

第 11 回世界陸上競技選手権大阪大会

日本陸上競技連盟バイオメカニクス研究班報告書

# 世界一流陸上競技者の パフォーマンスと技術



## 報告書の刊行にあたって

(財) 日本陸上競技連盟  
専務理事 澤木 啓祐

2007年9月に第11回世界陸上競技選手権大会が無事終了いたしました。国内での開催は、1991年の東京大会以来16年ぶりであり、世界のトップ選手達が競うこの世界陸上は、陸上関係者・ファンならずとも多くの人々に大きな感動を与え、そのパフォーマンスに魅了されました。

日本陸上競技連盟では、1991年の世界陸上東京大会を機にバイオメカニクス班を編制し、「陸上競技の技術」に主眼を置いてきました。以降、科学委員会では日本のトップ選手も目を向け、国内主要競技会においてもバイオメカニクスによる分析を推進してきました。

現在のあらゆるスポーツ競技において、スポーツの技術は日進月歩とされています。特に陸上競技は、最も顕著な種目であると言えます。陸上競技のパフォーマンスは「動き」・「型」と「体力」の調和から「記録」が成り立つ種目であることから、科学的アプローチが重要となっています。

今回、遅まきながら報告書が完成されてきました。本書が皆様の手元に届くころには、また新たな陸上競技の潮流があるかもしれませんが、コーチング現場の有益な資料として活用していただくことをお願い申し上げます。

本書の特徴は、バイオメカニクス面から様々な報告がされています。本書で紹介された内容は、世界トップクラス選手の技術分析だけではなく、レースパターン分析と走動作まで踏み込んだ報告がされています。本書が単なる報告書ではなく、コーチングの技術と戦略に生かす大きなヒントが隠されていると言えます。是非とも、多くのコーチおよび競技者の方々が本書をお読みいただき、「競技力向上」に還元いただけることを期待しております。

最後に発行にあたり、ご尽力いただいた関係各位の皆様、大阪大会会場での撮影ならびに分析・執筆いただいた科学委員会のメンバーやアシスタント諸君の努力に感謝申し上げます。

第 11 回世界陸上競技選手権大会  
日本陸上競技連盟バイオメカニクス研究班報告書  
世界一流陸上競技者のパフォーマンスと技術

目 次

報告書の刊行にあたって

1. はじめに：バイオメカニクス班の準備と実施 .....	1
2. 100m のレース分析 .....	5
3. 男子 100m 決勝進出者 5 名の予選から決勝におけるレースパターン分析 .....	18
4. 男女短距離選手のスタートダッシュ動作 .....	24
5. 一流短距離選手の疾走動作の特徴-第 11 回世界陸上競技選手権大阪大会出場選手について- .....	39
6. 2007 世界陸上競技選手権大阪大会における決勝 400m 走レースのバイオメカニクス分析 .....	51
7. 2007 年世界陸上競技選手権大阪大会における男子 110m ハードル走および女子 100m ハー ドル走レースの時間分析 .....	76
8. 2007 年世界陸上競技選手権大阪大会における男子 110m ハードル走および女子 100m ハー ドル走レースの動作分析 .....	86
9. 男女 400m ハードル走における記録およびレースパターン分析 .....	96
10. 世界一流男子中距離走者のレースパターンと走動作 .....	105
11. 世界一流女子中距離走者のレースパターンと走動作 .....	122
12. 長距離レースにおける世界一流選手の走動作の特徴 .....	135
13. 走幅跳のバイオメカニクスの分析 .....	154
14. 第 11 回世界陸上男子走高跳上位入賞者の跳躍動作のバイオメカニクスの分析 .....	165

15. 第11回世界陸上女子走高跳上位入賞者の跳躍動作のバイオメカニクス的分析 .....	171
16. 世界一流男子やり投の投てき技術 .....	176
17. 円盤投げのキネマティクスの分析 .....	189
18. 第11回世界陸上大阪大会の男・女ハンマー投上位入賞者のバイオメカニクスの特徴 .....	201
19. 男女20km競歩におけるロス・オブ・コンタクト判定 .....	212

国際陸上競技連盟発行 New Studies in Athletics への報告論文

20. Analysis of speed patterns in 100-m sprints .....	218
21. Mid-phase sprinting movements of Tyson Gay and Asafa Powell in the 100-m race during the 2007 IAAF World Championships in Athletics .....	223
22. Biomechanical analysis of the world's top distance runners of the 10,000 m final in the Osaka 2007 11th IAAF World Championships in Athletics .....	228
23. Biomechanical analysis of the men's and women's long jump at the 11th IAAF World Championships in Athletics, OSAKA 2007: A brief report .....	235
24. Run-up Velocity in the Men's and Women's Triple Jump at the 2007 World Championships in Athletics .....	250
25. Challenge in the men's high jump: A brief report on biomechanical analysis of the techniques for top three men high jumpers in the IAAF World Championships in Athletics, Osaka 2007 .....	257
26. A biomechanical analysis of the men's shot put finalists in the Osaka Athletics World Championship 2007 -An overview of finalists and comparisons of top three putters .....	265
27. Biomechanical analysis of elite javelin throwing technique at the 2007 IAAF World Championships in Athletics .....	276

# 第 11 回世界陸上大会における日本陸連 バイオメカニクス研究班の準備と実施

## Japan Biomechanics Research Project in IAAF World Championships in Athletics, Osaka 2007

日本陸連科学委員会委員長 阿江通良

Michiyoshi Ae<sup>1)</sup>

1) University of Tsukuba

### 1. はじめに

第 11 回世界陸上競技選手権大会, 大阪 2007(以下, 第 11 回世界陸上) のための日本陸上競技連盟バイオメカニクス研究班の準備は, 科学委員会を中心に前年 (2006 年) 5 月から始まった. このような科学的活動は競技力向上や普及のために有用であるという日本陸連の姿勢, 国際陸連および大会組織委員会のご理解などに大きく助けられ, 準備段階では解決すべき課題があったが, 大会における活動は成功裏に終了することができた. われわれは, 1991 年の第 3 回世界陸上においても同様の研究班を組織し, 多大な成果を収めることができたが, 手探り状態であった 16 年前と比較すると, バイオメカニクス班の活動に対する理解, 様々な撮影や測定に関するテクノロジーの進歩, 長年の活動による知見の蓄積, そして研究班員の錬度などの点で大きな進歩が見られた. 本稿では, 研究班の準備や大会における活動の概要を紹介することにする.

### 2. 準備

2.1 国際陸連および大会組織委員会からの許可

2006 年 5 月の当初計画では, メンバーを第 3 回大会の 74 名 (第 3 回大会ではバイオメカニクス班が監察カメラ班の補助を兼ねたため) から大幅に削減し, 科学委員会委員を含め 55 名とした. しかし, 実際には班員 30 名, 競技場外のサポート要員 10 名で行なわれた. 参加する班員数の交渉を含め, 準備段階では大きな課題, というよりも困難があり, 個人的には何度か「今回はスタンドから観戦しよう」と考えることもあった.

その最も大きなものは, 活動申請を日本陸連に提出し, 理事会の承認を得て準備完了となった後, 国際陸連の関係部署に日本陸連から申請書と計画書を提出してもらったが, 国際陸連の関係部署ではわれわれのプロジェクトは議題になっていないという情報を, 伊藤先生 (大阪体育大学) を通じて得たことであった. 国際陸連が許可しなければ, 大会組織委員会も動けず, プロジェクトの

実現は不可能である. 何度か日本陸連を通じて, 打診したが 2006 年 11 月でも返事はなかった. この間, 詳細は控えるが, 何かと噂があり, まさに「今回はスタンドから観戦しよう」の心境であった. しかし, サポートや励まし, 日本陸連で承認されているという責任もあり, いくつかのルートを通じて, 関係者に文書や email を送った. 2006 年 12 月になり, 大会組織委員会の関さん (日本陸連) を通じて, バイオメカニクスプロジェクトについて情報を送れという Fax が国際陸連からあったという知らせがあった.

その後, 関さんを介して国際陸連の担当者となり取りし, 2007 年 5 月には伊藤先生と共に, 国際陸連担当者と直接会って本プロジェクトの概要, 外国から申請のあるプロジェクトとの関係などを説明し, 国際陸連からの承認をいただいた. この打ち合わせの直後には, 大会期間全日程のカメラ設置, 人員, 準備から撮影までの班員の行動計画を提出するよう要求され, これらを email に添付して国際陸連担当者に送り, 日本選手権に来日した際に最終打ち合わせを行った. やつとわれわれのプロジェクトの実施が国際陸連および大会組織委員会から認められ許可されたのである.

### 2.2 実施に向けた準備

6 月からは予定どおり, メンバーの人数に入った (写真 1). このときには, 伊藤先生, 松尾先生 (国立スポーツ科学センター), 杉田先生 (三重大学), 榎本先生 (京都教育大学), 持田先生 (横浜医科学センター) が中心となってトラックとフィールドの各班, さらに種目ごとの人員配置が行われた. また, 第 3 回大会と大きく異なったのは, 班員数が減少したこと, データを早く出すことを意図したこと, 後述するプレスへのクイックデータリリースをしてほしいとの要求があったことなどにより, 競技場外のサポート要員を組織したことである. しかし, 本プロジェクトの予算では 10 名のサポート要員をお願いすることはできなかったため, 伊藤先生を代表に申請した文部科学省科学研究費補助金を活用させていただいた.



写真1. バイオメカニクスプロジェクトメンバー  
(閉会式後に撮影)



写真2. バイオメカニクス班の控室

この段階で1つの問題が持ち上がった。その1つは、大会組織委員会には事前に何度もお願いしていたが、班員の休憩、機材の準備と保管、データ分析のための控え室が確保できないということであった。しかし、関さんのご尽力と、競技における全ての器具や機器を運用しているニシ・スポーツのご好意により、100m スタート地点後ろでスタンド下の器具庫の半分(写真2)、実際には半分以上を使用してもよいとの許可が得られ、何とかなった。しかし、ここは冷房がまったくないのである。これでは、班員の健康管理ができず、暑い大阪の夏を乗り切ることができないと不安が大きくなるばかりであった(若い班員には風通しがいいとか、第3回大会ではスタンドの最上段で休んだなどと言っていたが、経験者の伊藤先生はあまり信用していなかったようである)。

また、5月ごろに船原氏(共同通信社)から可能性を打診されていたプレスへのクイックデータリリースへの対応も解決すべき課題であった。幸い、データ分析を早くし、フィードバックしたいとの計画があったので、それを少しプレスのために修正すれば何とかなることがわかった。さらに、船原氏にお願いして、プレスにデータを提供するという条件で、プレスセンターの一部にデータ分析のスペースを設けていただけのことになった。通常は立ち入りが厳しいプレスセンターへ入れるようになったことは、われわれに非常に大きなメリットをもたらすことになった。その1

つは、冷房のある作業スペースが確保でき、ここで休憩することもできたこと、プレス対応の食堂が使用でき、ここで昼食がとれたこと(実はわれわれの昼食や弁当はなにも用意されていなかったのであるが、日本陸連の森さんのご尽力によりプレスセンター食堂で使える食券を発行してもらった)であろう。

そして、大会の2日前(8月23日)に機材を搬入し、前日にはカメラ位置を確保し、計測用のマークをつけ、審判の方々に挨拶とお願いをして準備完了となった。大阪陸協の方々は、伊藤先生を通じて、また数年にわたって実施させていただいた大阪国際GP、日本選手権などでの活動を通じてよい関係が築かれていたことは、本プロジェクトの成功の最大の要因の1つであると言える。

### 3. 実施

図1は8月28日のカメラ設置位置を示したものである。さらに競歩対応のカメラ位置などについては、国際陸連の競歩担当者と打ち合わせをして決定した(法元氏が担当)。第3回大会では、国立競技場の電源が少ないため、仮設電源を使用したし、16mmフィルムカメラを多用したが、今回はスタンドに電源が多くあり(使用箇所と使用要領を申請して許可を得る必要あり)、VTRの性能も向上したため、この点での苦労はなかった。また、短距離の走速度や跳躍の助走速度の分析には、レーザー光線を利用した速度測定装置(LAVEG)を使用したこと、400m走などの時間分析にはオーバーレイ方式を導入したなどは新しいことであった。

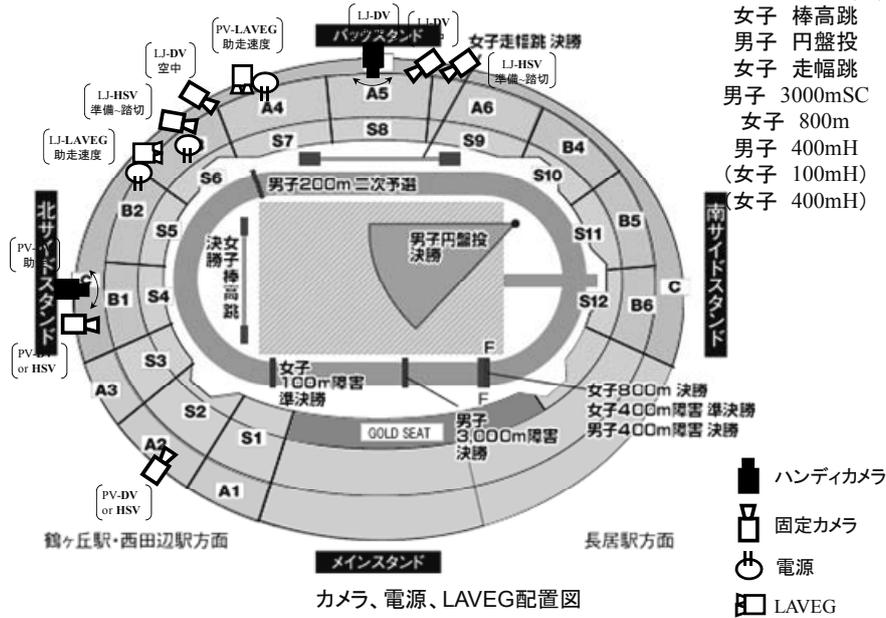
期間中の活動は、いくつかの問題があったものの、マーカー確認、カメラ設置、キャリブレーション(写真3)、撮影、再キャリブレーション、そして、班員やサポート要員によるクイックデータ分析、プレスへの資料提供というルーチンで順調に進んだと言えるであろう。ただし、プレスへのデータ提供には少し時間がかかり、データを提供したところには夜の12時を過ぎていることが多かった。



写真3. 100mの3次元動作分析のためのキャリブレーション風景

2007年8月28日(火)

女子 棒高跳  
 男子 円盤投  
 女子 走幅跳  
 男子 3000mSC  
 女子 800m  
 男子 400mH  
 (女子 100mH)  
 女子 400mH)



カメラ、電源、LAVEG配置図  
 図1. カメラやLAVEGなどの設置位置(例)

T.Gay (final 9.85)

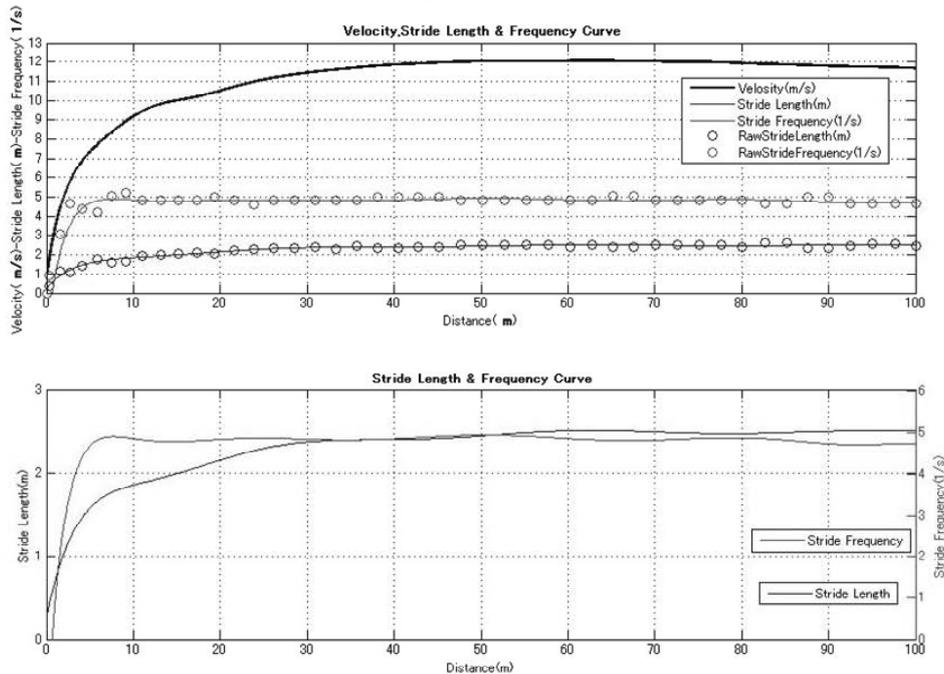


図2. 得られたデータの一つ(男子100m優勝者のゲイ選手(アメリカ)のスピード曲線(LAVEGによる)およびストライドとピッチの変化)

図2および3は収集したデータの例で、図2は男子100m優勝者のゲイ選手(アメリカ)のスピード曲線(LAVEGによる)およびストライドとピッチの変化であり、図3はプレスへ提供した女子棒高跳び優勝者のイシンバエワ選手(ロシア)の跳躍フォームのスティックピクチャーである。このプレスへのデータ提供は予想以上に好評で、苦勞しただけのことはあったようである。データ提供を行った翌日には、間接的ではあるが、

ベルギー、オーストラリア、アメリカ、ドイツなどから問い合わせがあり、VTRのコピーを有料でもいいのでほしいという申し出もあったようである。また、男子走り高跳び優勝者のトーマス選手のコーチがわれわれのデータ(重心の最高値を2m50と推定)を見て彼の可能性を確信した、イギリスの陸上競技専門誌には100mのタイム分析や速度データをもとにした詳細なレースに関する報道があったなどの話が伝わってきている。

## Pole vaulting technique of Yelena ISINBAEVA (RUS) at the 2<sup>nd</sup> attempt of 4.80

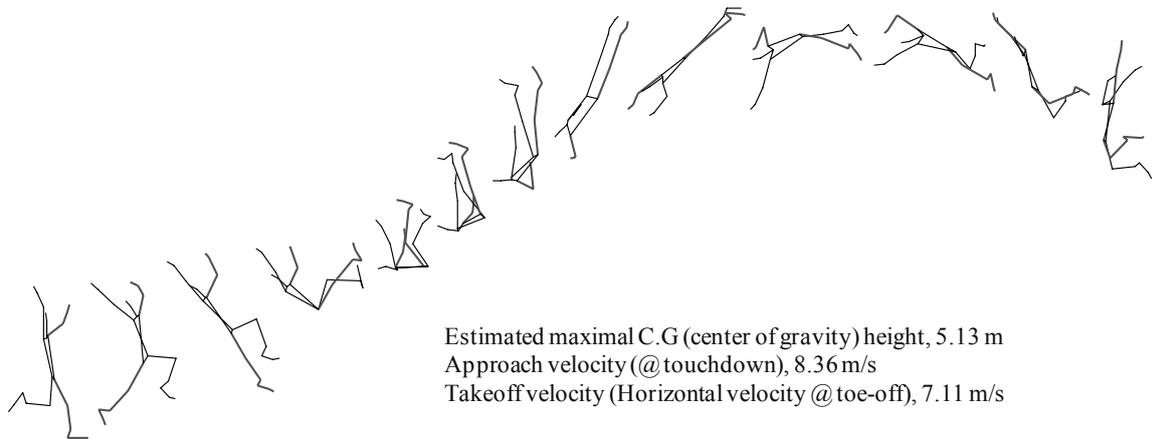


図3. プレスへ提供したデータ (例: 女子棒高跳び優勝者イシンバエワ選手のスティックピクチャー)

### 4. 終わりに: 公式試合におけるプロジェクトの意義

今回のプロジェクトと同様な公式試合を対象とした活動は、国立スポーツ科学センターや各競技団体などが行っているが、これらのプロジェクトで得られたデータは、競技力向上だけでなく、スポーツ科学研究にも非常に有用である。大げさに言えば、高度に鍛えられた選手の全力のパフォーマンスを科学的に研究することは、人間の可能性を考えるうえで重要である。

公式試合での科学プロジェクトの実施には、大会を統括する競技団体や組織委員会の承認や多大な経費の獲得、そしてそれに対応できるスポーツ科学者の養成など、解決すべき課題も多い。ま

た、科学研究という観点からは、競技会における測定データの精度が実験室で得られたものよりも劣るという指摘もあろう。しかし、これらの課題は努力と工夫によって解決できるであろう、あるいは多少の短所があるにしても、それを凌ぐ価値が公式試合で収集されたデータにはあると考えられる。

最後になったが、本プロジェクトの実施にあたり、日本陸連、大阪大会組織委員会、大阪陸協審判諸氏、ニシスポーツ株式会社にはご理解と多大なご支援をいただきました。ここに記して心より感謝いたします。

# 100m のレース分析

## The analysis of 100m races

松尾彰文<sup>1)</sup> 広川龍太郎<sup>2)</sup> 柳谷登志雄<sup>3)</sup> 杉田正明<sup>4)</sup>  
土江寛裕<sup>5)</sup> 阿江通良<sup>6)</sup>

1) 国立スポーツ科学センター 2) 北海道東海大学 3) 順天堂大学  
4) 三重大学 5) 城西大学 6) 筑波大学

Akifumi MATSUO<sup>1)</sup>, Ryotaro HIROKAWA<sup>2)</sup>, Toshio YANAGIYA<sup>3)</sup>  
Masaaki SUGITA<sup>4)</sup>, Hiroyasu TSUCHIE<sup>5)</sup>, Michiyoshi AE<sup>6)</sup>

1) Japan Institute of Sports Sciences, 2) Hokkaidotokai University, 3) Juntendo University  
4) Mie University, 5) Josai University, 6) University of Tsukuba

### 1. はじめに

最速スプリンターを決める 100m は、男子では T. Gay (USA) が当時世界記録 (9.74 秒) 保持者の A. Powell (GAM) を押さえて 9.85 秒 (風速 -0.5m/s) で優勝した。女子では Campbell (JAM) が 2 位 Williams を同タイムながら 11.00 秒 (風速 -0.2m/s) で接戦を制した。100m レースでは 加速、最大スピード、スピードの持続性にわけて考えることができる。世界選手権大会で、ゴールタイムの差だけをみるのではなくそれぞれの局面を科学的に分析しておくことは、今後のスプリントでのトレーニング戦略を検討するための基礎資料となり (阿江ら, 1995), これらをもとに個々の特性を把握することや、目標値の設定することができるであろう。

100m レースにおけるスピード分析は、ビデオ映像を用いる方法 (ビデオ法) やレーザー方式の計測器を用いる方法 (レーザ法) などがある (松尾ら, 2008)。本大会ではレーザー法により、予選から決勝までのすべてのレースでスタートからゴールまでのスピードを分析した。本稿では、男女の 100m レースのスピード変化を分析した結果を、それぞれのラウンドごとに集計した結果を報告する。

### 2. 測定方法

#### 2.1 レーザ法について

今大会では 5 台のレーザー方式の速度計測装置 (LDM300C-Sport; JENOPTIK 社製) を用いた。この装置は、スプリンターの背中にレーザビームを照射し、その反射光が帰ってくるまでの時間から 10msec 毎に距離を計測し、計測結果をコンピュータに送り、時系列データとして保存が可能となっている (松尾ら, 2008)。この装置の測定誤差は 70m で 2cm 以下であり、レーザの強さは安全規格で最も安全とされているクラス 1 である。

計測装置をグラウンドレベルに設置できなかったためスタートラインの後方のスタンド最上段のスタートラインからおおよそ 65m, グラウンドからの高さ 22m 付近に設置した。男女ともに予選から決勝までのすべてのレースで 5 名を計測対象とした。対象選手の抽出には 1 次予選ではディリブプログラムに記載されている 2007 のベスト記録とパーソナルベストを参考にした。なお、準々決勝、準決勝および決勝では、この大会での記録および順位を参考に計測対象の 5 名を抽出した。

予選から決勝まですべてのレースで測定したが、10m ごとのラップタイムが算出できたのは、男子では 9.85 秒から 10.46 秒までの 63 例、女子では 10.99 秒から 11.98 秒までの 71 例であった。計測できなかったのは、対象とした選手が出場しなかった場合、途中で棄権した場合、レースを放棄した場合のように選手側の原因と、計測時に選手をゴールまで追従できなかった場合のような測定者側に問題があった場合であった。測定装置をスタンドの最上段に設置したため、装置本体をティルティングしながら選手の背部を追従した。そのためにスタートから 40m 付近での計測ミスとゴール手前での計測ミスが多かったと考えられる。

#### 2.2 データの解析

レーザ法による時間-距離関係から、スピード変化を求めると多くの高周波ノイズが含まれており、このノイズを少なくする工夫が行われている (金高, 1999)。遮断周波数によって最大スピードが影響される。レーザ法による距離測定では、適切なフィルターをかけることで精度が高まる (Harrison et al., 2005) ことから、ゴールタイムをゴール地点通過タイムとして、10.00m ごとの通過タイムを算出した (松尾ら, 2007, 2008)。

この方法ではスタートからゴールまで 1 台の装置で選手の背部までの距離を計測しているの、常にトルソーの先端と背部との差がほぼ一定であるとして背部からのデータをもとにしてラップタイムを求めた。以上のようなデータ解析には、Matlab (The MathWorks 社) でプログラミングしたプログラムを用いた。スタート時の反応時間は、競技結果として公式に発表されたものである。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 ゴールタイム, ラップタイム

最大スピード, その区間, スピード通減率, ラップタイム, 区間平均スピード, 最大スピードに対する比率などを男女決勝レースおよび日本人選手のものそれぞれに, 表 1 (決勝), 表 2 (日本選手) に示した。

決勝においてデータが収集できたのは, 男子では 1, 2, 3, 5, 6 位, 女子では, 1, 2, 4, 5, 6 位であった。男子で 4 位に入った選手は準決勝の

表 1. 100m決勝の 10m ごとの通過タイム, ラップタイム, 区間スピード

#### 男子100m決勝

RANK	name	goal time(s)	max speed (m/s)	distance (m)	reaction (s)		10m	20m	30m	40m	50m	60m	70m	80m	90m	100m
1	T. GAY USA	9.85	11.83	65	0.143	lap time	1.91	2.94	3.86	4.73	5.59	6.44	7.28	8.13	8.98	9.85
						split time	1.91	1.03	0.92	0.87	0.86	0.85	0.84	0.85	0.85	0.87
						averages	5.25	9.71	10.82	11.42	11.71	11.80	11.84	11.79	11.68	11.56
2	D. ATKINS BAH	9.91	11.74	55	0.137	lap time	1.89	2.93	3.86	4.75	5.62	6.47	7.32	8.18	9.04	9.91
						split time	1.89	1.04	0.93	0.89	0.87	0.85	0.85	0.86	0.86	0.87
						averages	5.28	9.65	10.70	11.24	11.58	11.73	11.72	11.69	11.59	11.51
3	A. POWELL JAM	9.96	11.79	55	0.145	lap time	1.89	2.91	3.84	4.72	5.57	6.42	7.29	8.16	9.04	9.96
						split time	1.89	1.02	0.93	0.88	0.85	0.85	0.87	0.87	0.88	0.92
						averages	5.30	9.72	10.83	11.39	11.67	11.77	11.54	11.50	11.36	10.85
5	martina-0.5 AHO	10.08	11.67	65	0.180	lap time	1.98	3.03	3.97	4.88	5.75	6.61	7.47	8.33	9.20	10.08
						split time	1.98	1.05	0.94	0.91	0.87	0.86	0.86	0.86	0.87	0.88
						averages	5.05	9.54	10.60	11.09	11.46	11.58	11.63	11.61	11.57	11.33
6	M. DEVONISH GBR	10.14	11.48	65	0.149	lap time	1.96	3.00	3.95	4.85	5.73	6.61	7.48	8.36	9.23	10.14
						split time	1.96	1.04	0.95	0.90	0.88	0.88	0.87	0.88	0.87	0.91
						averages	5.11	9.60	10.53	11.10	11.34	11.40	11.47	11.39	11.45	11.01

#### 女子100m決勝

RANK	name	goal time(s)	max speed (m/s)	distance (m)	reaction (s)		10m	20m	30m	40m	50m	60m	70m	80m	90m	100m
1	V. CAMPBELL JAM	11.01	10.56	55	0.167	lap time	2.01	3.14	4.15	5.11	6.07	7.02	7.97	8.96	9.97	11.01
						split time	2.01	1.13	1.01	0.96	0.96	0.95	0.95	0.99	1.01	1.04
						averages	4.97	8.84	9.96	10.36	10.46	10.56	10.45	10.12	9.94	9.58
2	L. WILLAMS USA	11.01	10.40	45	0.145	lap time	2.01	3.13	4.13	5.10	6.06	7.03	8.00	8.98	9.99	11.01
						split time	2.01	1.12	1.00	0.97	0.96	0.97	0.97	0.98	1.01	1.02
						averages	4.97	8.97	9.95	10.32	10.40	10.37	10.35	10.14	9.95	9.76
4	T. EDWARDS USA	11.05	10.45	45	0.141	lap time	2.00	3.12	4.15	5.12	6.08	7.04	8.01	9.00	10.02	11.05
						split time	2.00	1.12	1.03	0.97	0.96	0.96	0.97	0.99	1.02	1.03
						averages	5.01	8.87	9.78	10.25	10.45	10.42	10.34	10.06	9.84	9.68
5	K. GEVAERT BEL	11.05	10.32	55	0.143	lap time	1.98	3.10	4.11	5.10	6.08	7.04	8.02	9.01	10.01	11.05
						split time	1.98	1.12	1.01	0.99	0.98	0.96	0.98	0.99	1.00	1.04
						averages	5.06	8.92	9.86	10.08	10.30	10.32	10.28	10.12	9.97	9.61
6	C. ARRON FRA	11.08	10.41	45	0.164	lap time	2.03	3.15	4.16	5.13	6.09	7.06	8.03	9.02	10.04	11.08
						split time	2.03	1.12	1.01	0.97	0.96	0.97	0.97	0.99	1.02	1.04
						averages	4.93	8.95	9.84	10.30	10.41	10.41	10.29	10.04	9.86	9.59

表 2. 日本選手の通過タイム, ラップタイム, 区間スピード

RANK	name	goal time(s)	max speed (m/s)	distance (m)	reaction (s)		10m	20m	30m	40m	50m	60m	70m	80m	90m	100m
R1	朝原宣治 +1.0	10.14	11.55	55	0.143	lap time	1.90	2.94	3.88	4.78	5.65	6.52	7.39	8.28	9.19	10.14
						split time	1.90	1.04	0.94	0.90	0.87	0.87	0.87	0.89	0.91	0.95
						averages	5.25	9.62	10.65	11.13	11.48	11.56	11.46	11.23	11.03	10.51
QF	朝原宣治 +0.8	10.16	11.41	65	0.137	lap time	1.92	2.95	3.90	4.80	5.68	6.56	7.44	8.33	9.23	10.16
						split time	1.92	1.03	0.95	0.90	0.88	0.88	0.88	0.89	0.90	0.93
						averages	5.21	9.69	10.60	11.05	11.34	11.39	11.40	11.23	11.07	10.79
R1	塚原直貴 -0.1	10.20	11.20	65	0.145	lap time	1.87	2.92	3.87	4.78	5.68	6.57	7.47	8.36	9.27	10.20
						split time	1.87	1.05	0.95	0.91	0.90	0.89	0.90	0.89	0.91	0.93
						averages	5.34	9.51	10.51	11.01	11.15	11.20	11.19	11.13	11.04	10.74
QF	塚原直貴 -0.3	10.31	11.15	55	0.180	lap time	1.92	2.96	3.91	4.83	5.73	6.62	7.53	8.44	9.36	10.31
						split time	1.92	1.04	0.95	0.92	0.90	0.89	0.91	0.91	0.92	0.95
						averages	5.21	9.60	10.50	10.93	11.13	11.15	11.09	10.96	10.81	10.58
SF	朝原宣治 +0.3	10.36	11.19	55	0.149	lap time	1.94	2.99	3.94	4.85	5.75	6.64	7.54	8.45	9.38	10.36
						split time	1.94	1.05	0.95	0.91	0.90	0.89	0.90	0.91	0.93	0.98
						averages	5.15	9.52	10.58	10.96	11.16	11.21	11.15	10.92	10.74	10.24
R1	高橋 萌木子 -0.7	11.98	9.48	45	0.167	lap time	2.11	3.34	4.45	5.53	6.58	7.64	8.70	9.76	10.85	11.98
						split time	2.11	1.23	1.11	1.08	1.05	1.06	1.06	1.06	1.09	1.13
						averages	4.74	8.15	8.99	9.30	9.48	9.47	9.40	9.40	9.23	8.83
JPN						split time	2.11	1.23	1.11	1.08	1.05	1.06	1.06	1.06	1.09	1.13
JPN						averages	4.74	8.15	8.99	9.30	9.48	9.47	9.40	9.40	9.23	8.83

タイムが7番目であったため、測定対象ではなかった。また、準決勝では朝原選手が出場していたので測定の対象とした。一方、女子で決勝3位の選手は準決勝のタイムが5番目であったが、そのレースの4着であったため、着順を優先して1組2着だったWilliamsを決勝での測定対象とした。

男子の最大スピードで最も高い値は、決勝レースで観察された。Gayの11.83m/s、次いで、3位Powellの10.79m/sであった。女子では、決勝ではCampbellの10.56m/s、ついで4位Edwardsの10.45m/sであった。準決勝のEdwardsが10.57m/sであり、今大会の最高値であった。現在女子の世界記録はジョイナーの10.49秒であるが、彼女がソウルオリンピックで10.54秒のとき、最大スピードはほぼ11m/s(小林, 1990)に達しており、しかも、スタートから60mか90mくらいまでそのスピードが維持されていたようだ。この値と比べると、女子の最大スピードは世界記録から0.5m/sほど低い値であり、このために、ゴールタイムでもおおよそ0.5秒の差になったものと考えられる。

### 3.2 100m レース時のスピード変化

図1にはスタートからの距離でみた男子100m決勝における上位3名のスピード変化と1位の選手の通過タイムとの差の変化を示した。スタートから20m-30mの区間で10.7から11.0m/s近くに到達していた。これはそれぞれの選手の最大スピードの90から93%に相当する速さであった。その後のスピード増加は60mまたは80m付近ま

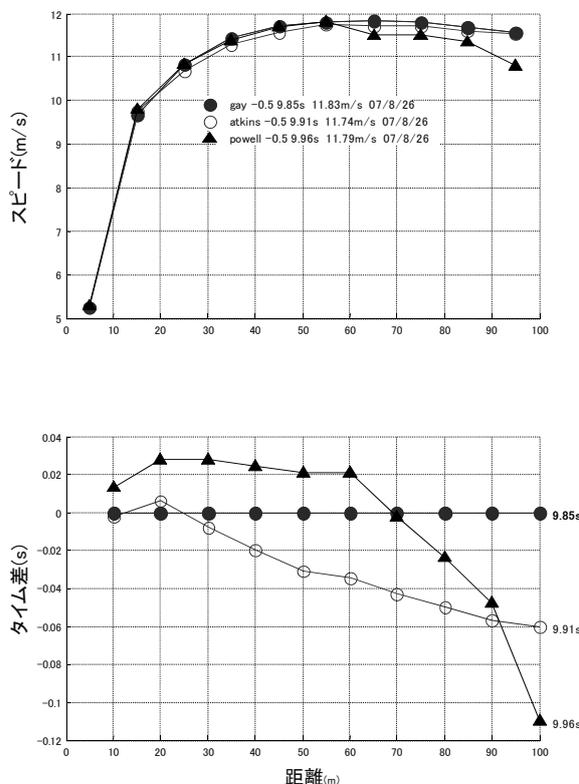


図 1. 男子の決勝におけるスピード曲線とトップとのラップタイムの差

で続くが、増加量は1m/s程度であった。スタートから60m付近まではGayとPowellはほぼ同じようなスピード変化であったが、その後、Powellのスピードは急激に低下した。一方、Gayはほぼそのままのスピードを持続していたが、ゴール前には僅かなスピード低下がみられた。スピード遞減率をみるとGayは2.2%、Powellは8.1%であった。

図2には女子100m決勝におけるタイム計測者のスピード変化とトップとのタイム差の変化を示した。女子では10から20mの区間でほぼ9m/sに達し、次の区間で10m/sを超えた。1位と2位が同タイムながら着差があり、Campbellが1位となった。Campbellは50m-60m付近で最高スピード10.56m/sに達していた。その後、スピードの低下は他者よりも顕著であった。一方、2位のWilliamsのスピードはスタート時でCampbellよりも僅かに速いスピードであったが、最大スピードが10.40m/sでCampbellよりも劣る値だった。しかし、その後のスピード低下はCampbellよりも少なく、70m以降はCampbellよりも速いスピードであった。スピード遞減率をみるとCampbellが9.8%、Williamsは6.1%であった。このレースでは最大スピードのhighがスピードの低下が大きかったスプリンターが勝った。一方では、最大スピードは多少低くともスタート時の加速が高く、スピード遞減率を少なくすることでもトップを争えるレースパターンがあることが示された。

図3には、日本選手のスピード曲線を示した。朝原選手の1次予選の10.14秒のときの最大スピ

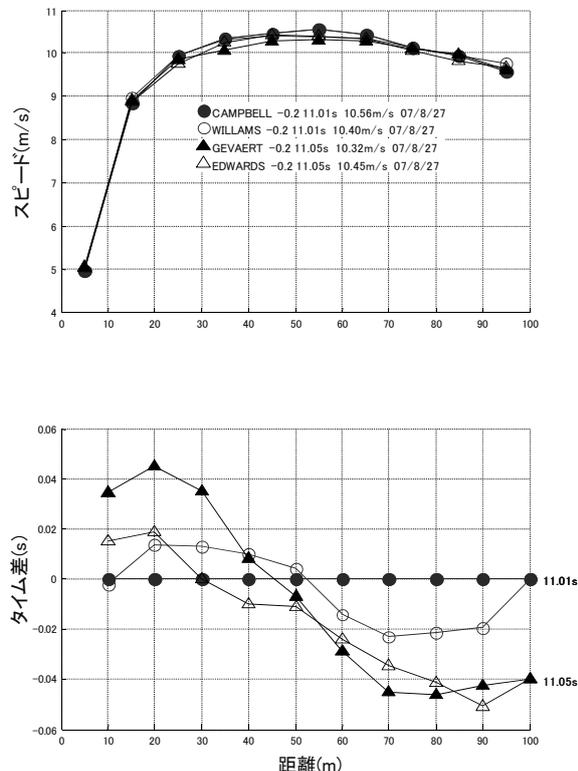


図2. 女子スピード曲線とトップとのラップタイムの差

ード11.56m/sが本大会での日本人最高値であり、2次予選で10.16秒のときは、11.40m/sであった。また、塚原選手では1次予選、10.20秒の時、11.20m/sであった。高橋選手の最大スピードは9.48m/sであった。やはり、最大スピードが高いほうがゴールタイムもよい傾向にある。

### 3.3 最大スピードとゴールタイムの関係

図4には、男女別に最大スピード、30mラップタイム、スピード遞減率とゴールタイムの関係を示した。

全体でみると男女ともに最大スピードとゴールタイムは反比例関係にあり、統計的に有意な相関関係(男子; n=61, r=-0.947, p<0.0001, 女子; n=71, r=-0.962, p<0.0001)が認められた。すなわち、最大スピードが高いほどゴールタイムもよいことを示しており、加速過程やゴール前のスピード遞減よりも、最大スピードがゴールタイムに影響する大きな要因であることを示している。

最大スピードとゴールタイムの関係からみると10秒を切るための最大スピードの目標値はおおよそ11.6m/sになるであろう。朝原選手の1次予選では11.56m/sであったが、これよりもあと0.1m/sほどスピードをアップすることで10秒を切る可能性が高まると考えられる。

加速過程の評価として、30mの通過タイムとゴールタイムとの関係をみると、男女ともにゴールタイムと統計的に有意な正の相関関係が認められた。男女ともに、相関係数がそれぞれr=0.499, r=0.822で最大スピードとゴールタイムの係数よ

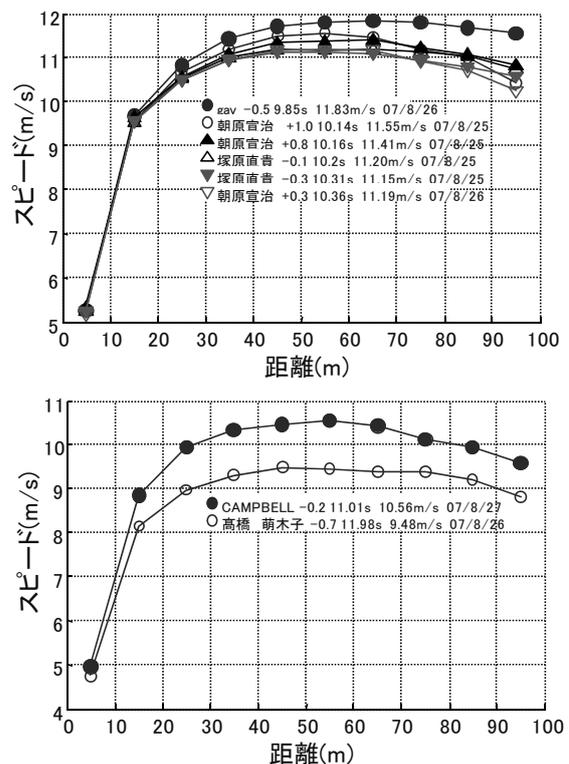


図3. 日本選手のスピード曲線

りも低かった。このことは、やはり、最大スピードがゴールタイムへおおよそ影響が大きいことを示す結果であった。

ゴール前のスピード低下を示す指標であるスピード逓減率とゴールタイムの関係をみると、男女ともにおおよそ 2%から 13%までの範囲で分散していた。男子では統計的に有意な相関関係 ( $r=0.181$ , ns) が認められなかったが、女子では有意な相関関係 ( $r=0.240$ ,  $p<0.05$ ) が認められた。男子ではゴールタイムが 10.0 秒付近でも 10%以上の逓減率を示す例や、10.6 秒のゴールタイムでも 2 から 3%の値を示す例がみられた。決勝レースでのスピード逓減率をみると Gay が 2.2%、2位の Atkins が 1.8%であった。やはり、最大スピードが高い方がパフォーマンスに与える影響が大きいことを示す結果であった。実際には観測されていないが、最大スピードをゴールまで持続させたと仮定、すなわち、スピード逓減率を 0%であると仮定して推定したゴールタイムと実際のゴールタイムの差を比較してみよう。優勝した Gay の場合には、9.82 秒となりゴールタイムとの差は 0.03 秒、2位の Atkins では 9.88 秒、差が 0.03 秒、途中でレースをあきらめたような Powell では 9.81 秒、差は 0.15 秒であった。スピードの逓減率が 0%になるような例は、いままでになく、現有データ中の最小値は Atkins の 1.8%である。このように、スピード逓減率を評価すると、この局面での改善可能なタイムが試算できるであろう。女子についてみると、優勝した campbell は 3.6%で、2位の williams は 1.8%であった。このように逓減率が悪くとも、最大スピードが他よりも高いと、逃げ切るレースで勝利できるのである。

ゴールタイムとの関係をラウンドごとに男女別に見たものを図 5 と図 6 に示した。男子では、最大スピードでは、すべてのラウンドで統計的に有意な相関関係が認められたが、30m のラップタイムでは、1 次予選と 2 次予選では有意であったが、準決勝と決勝では有意ではなかった。さらにスピード逓減率では、どのラウンドも有意な相関関係は認められなかった。一方の女子では、最大スピードでは 1 次予選から準決勝までは統計的に有意な相関が認められたが、決勝では、それが認められなかった。女子では、計測した選手のゴールタイムが 11.01 から 11.08 という僅差であったからであろう。また、30m のラップタイムでは、1 次予選と準決勝では有意な相関であったが、2 次予選と決勝では有意ではなかった。スピード逓減率は男子同様に、どのラウンドも有意な相関ではなかった。

ラウンドが進むにつれて、タイムの差が狭まくなることや測定対象の選手数が少なくなるので、ゴールタイムとの相関が低くなるであろう。しかしながら、男女ともに、スピード逓減率とゴール

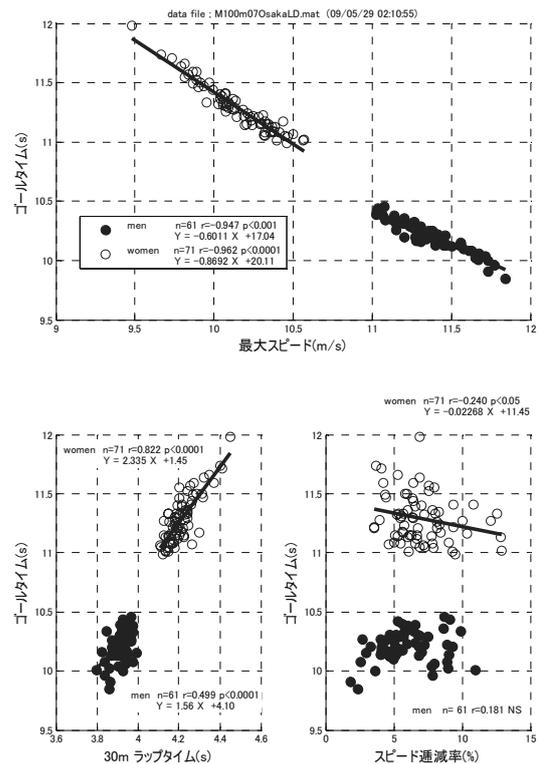


図 4. 男女別に見たレース中の最大スピード、30m ラップタイムおよびスピード逓減率とゴールタイムの関係

タイムとの関係がなかったことや、最大スピードとゴールタイムは女子の決勝を除けば、どのラウンドでも有意な相関が認められた。これらのことから、どのラウンドでも、最大スピードが高いことがゴールタイムを決定する重要な要因であるといえる。女子の決勝のように僅差の場合には、最大スピード以外の加速過程やスピード逓減率が決定要因になることもある。

### 3.4 最大スピード到達区間

最大到達区間を男女別にみたものが図 7 であり、ラウンド別にみたものを表 3 に示した。最頻値は男女ともに 50~60m 区間であった。次の多いのは男子では 60~70m 区間、女子では 40~50m 区間であった。このことは、男子では 50~70m の区間で、女子では 40~60m 区間で最大スピードに到達する選手が多く、女子のほうが男子よりも速く最大スピードに到達する傾向にあることを示している。ラウンド別に見ると、男子では 70~80m 区間が最頻値であったが、女子では 50~60m 区間が最頻値であった。

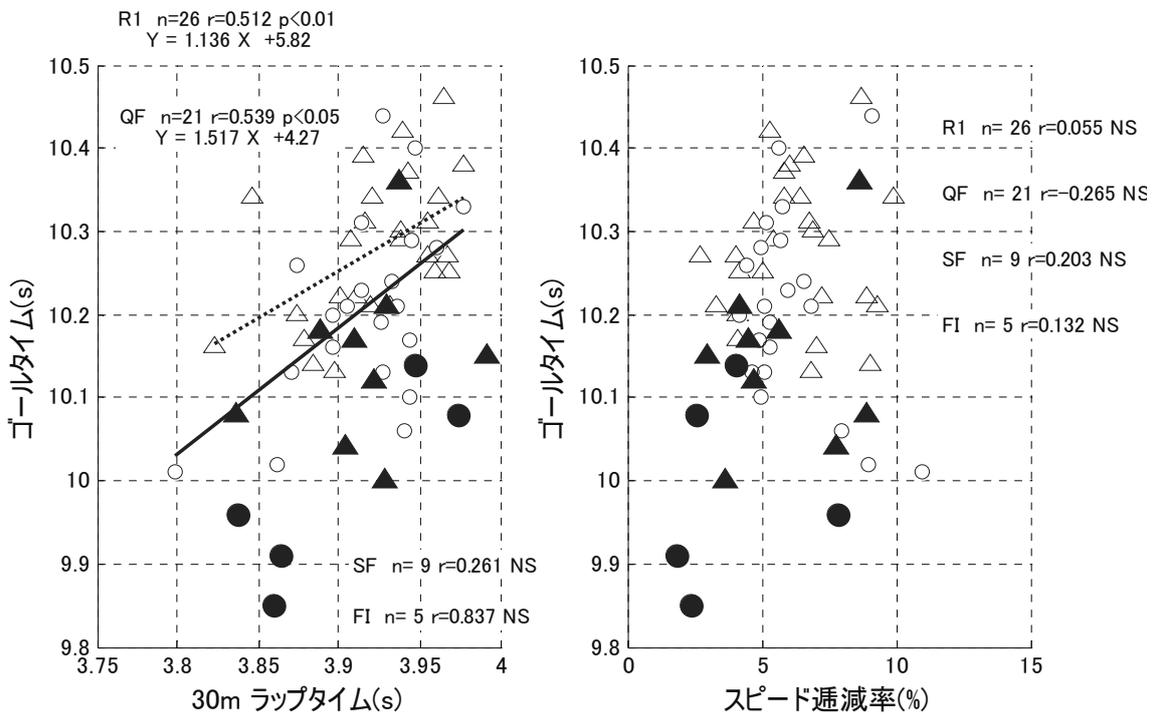
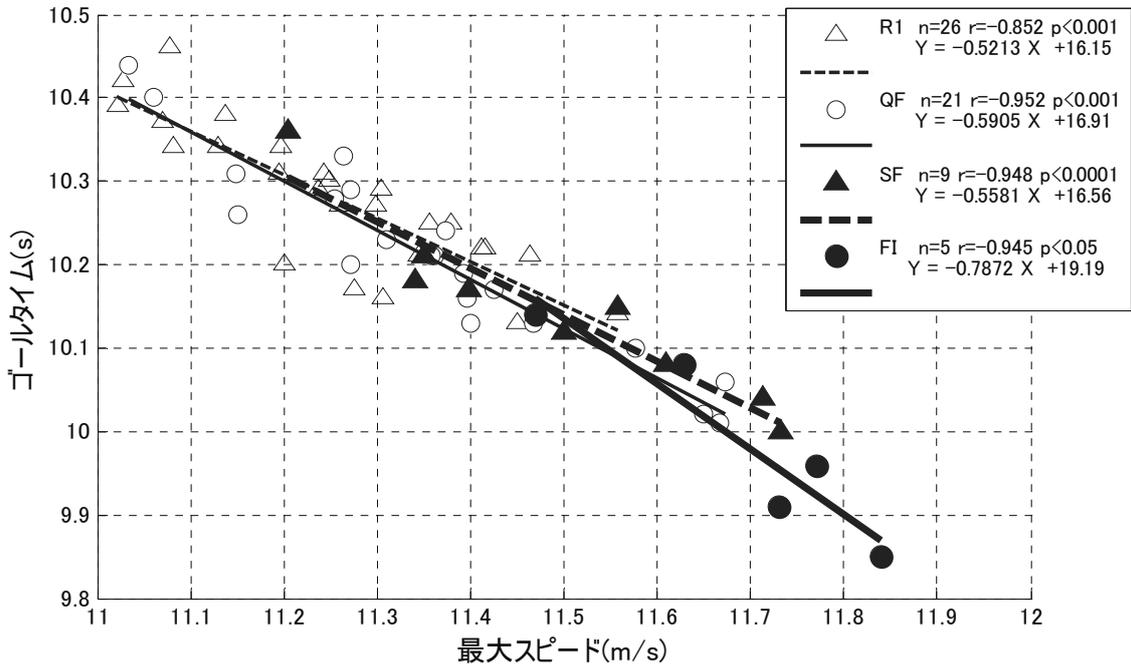


図 5. 男子についてラウンド別に見たレース中の最大スピード、30m ラップタイムおよびスピード逓減率とゴールタイムの関係

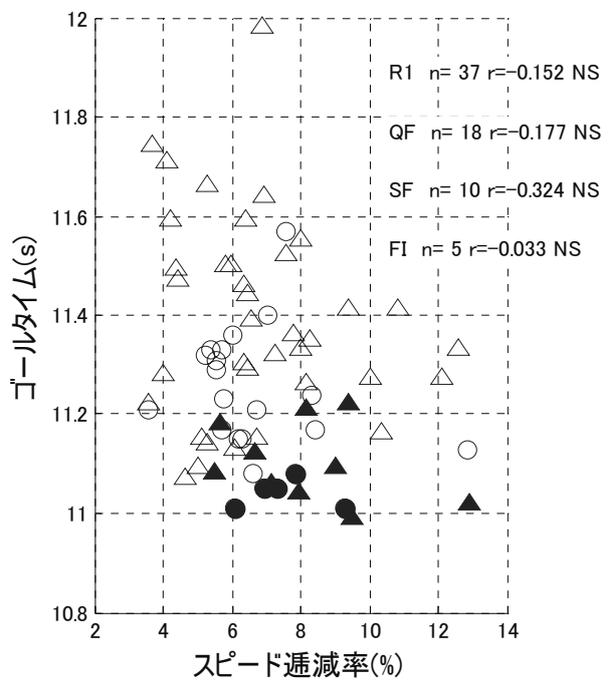
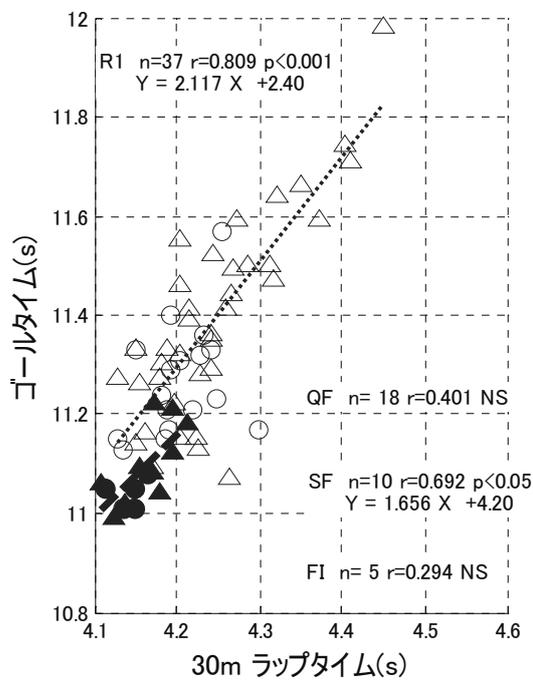
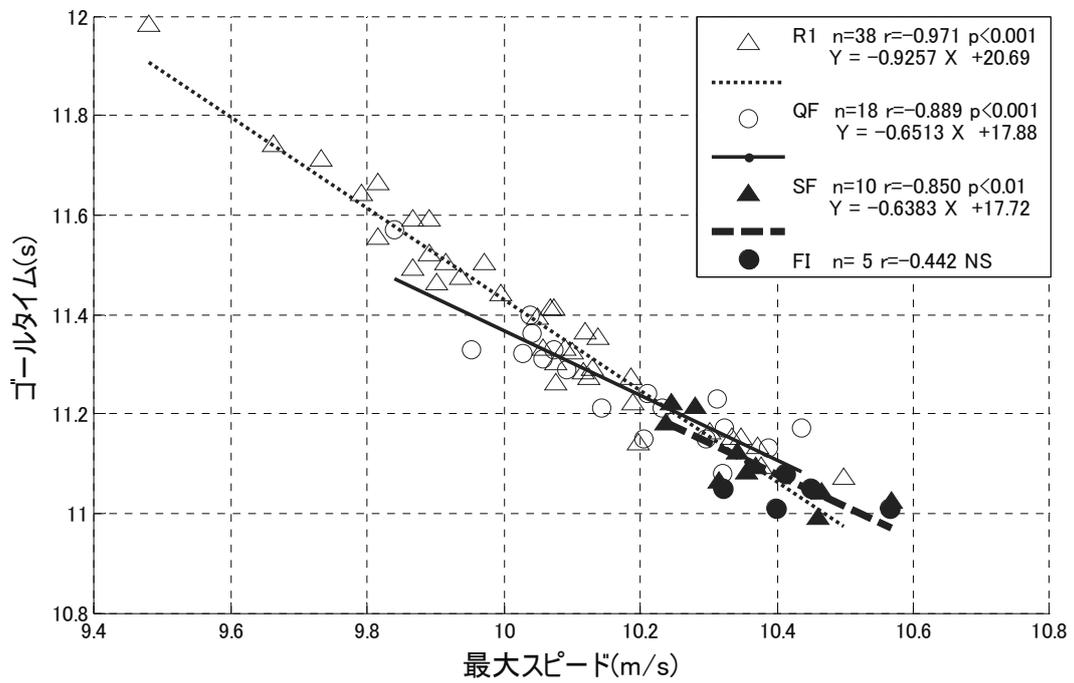


図 6. 女子についてラウンド別に見たレース中の最大スピード、30m ラップタイムおよびスピード通減率とゴールタイムの関係

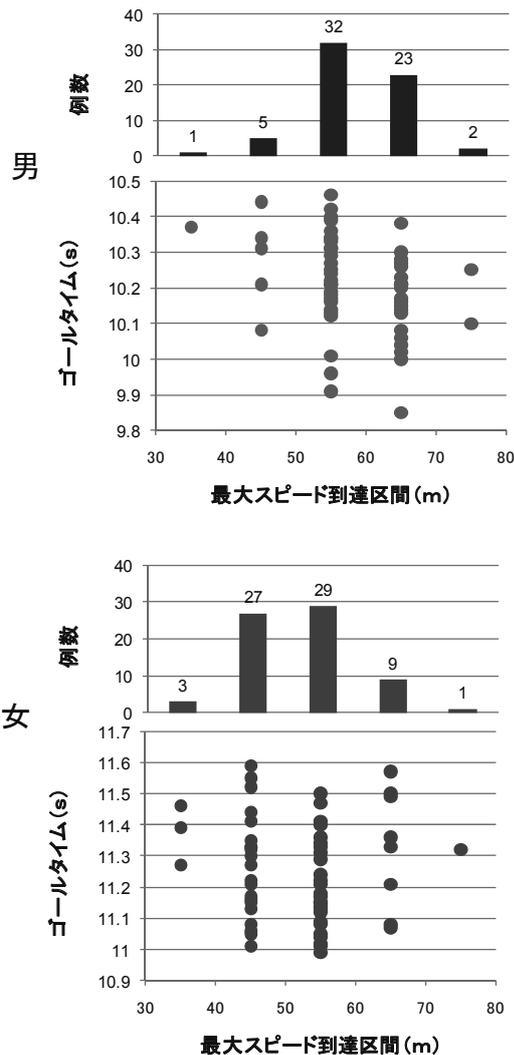


図 7. 男女別に見た最大スピード到達区間 (m)

表 3. 男女別に見た最大スピード区間の度数分布

	men					women				
	total	R1	QF	SF	FI	total	R2	QF	SF	FI
40m~50m	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
50m~60m	5	4	1	0	0	33	21	6	3	3
60m~70m	34	15	12	5	2	29	12	9	6	2
70m~80m	22	7	7	5	3	7	4	2	1	0
80m~90m	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
total	61	26	20	10	5	71	38	18	10	5

### 3.5 反応時間

図 8 には、公式結果で発表された反応時間とゴールタイムの関係を見た者を示した。男子では 123 例、女子では 122 例であった。ゴールタイムと反応時間とは男女ともに統計的な有意な相関が認められなかった。男女間の平均値の差は 0.06 秒であるが、T 検定でみると 5%水準で有意な差であった。しかしながら、この差は、男女間のパフォーマンスの差を説明できるものではない。

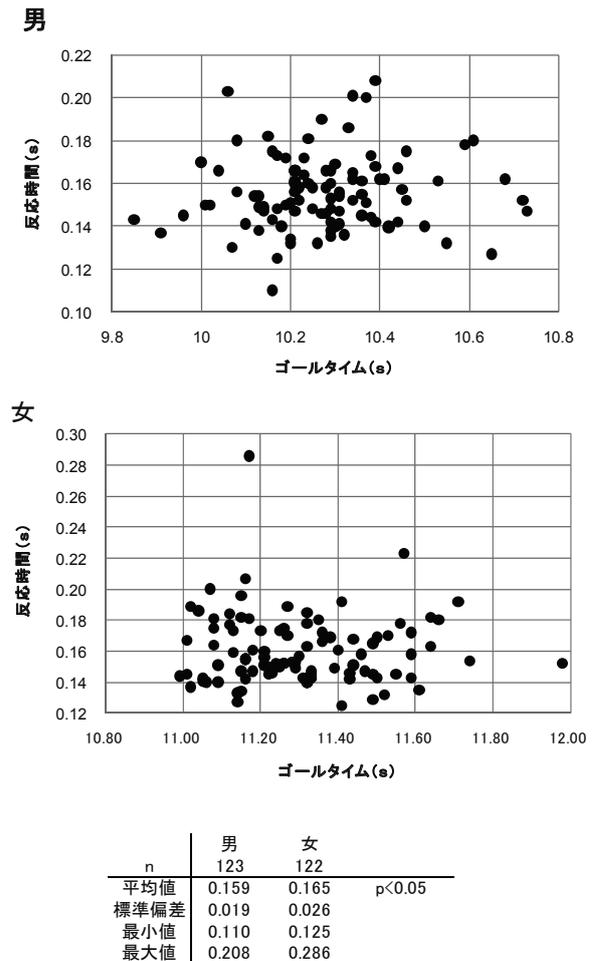


図 8. ゴールタイムと反応時間の関係

世界陸上大阪大会；100m 出場の全選手を対象とした。反応時間はオフィシャルプログラムに掲載された値を用いた。男女間には 5%水準で有意な差が認められた。

### 3.6 レース中のピッチとストライド

図 9 には Gay と Atkins, 図 10 には Powell と Martina, 図 11 には 1 次予選と 2 次予選の朝原, と図 12 には塚原のスタートからゴールまでのピッチとストライドの変化を示した。ピッチは、ビデオ映像から分析し、数学的に処理して滑らかな曲線にしたのちにスピードからストライドを算出した。Gay のピッチはスタートから 5m くらいでほぼ最大値に達し、その後はほぼ一定の値を示し、80m 付近からわずかな減少傾向がみられた。ほかの選手は、スタートから 5m くらいでピーチがでたのちに、わずかな変動を繰り返し、ゴールまででは遅くなり、ストライドが増加する傾向がみられた。ゴール前にピッチが増加する傾向の選手は見当たらなかった。

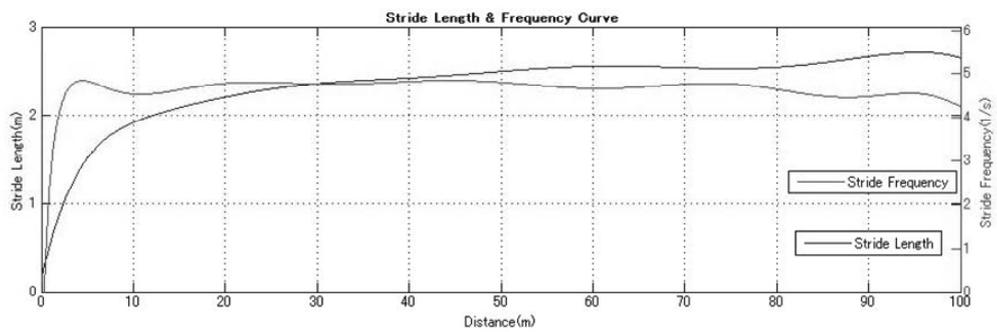
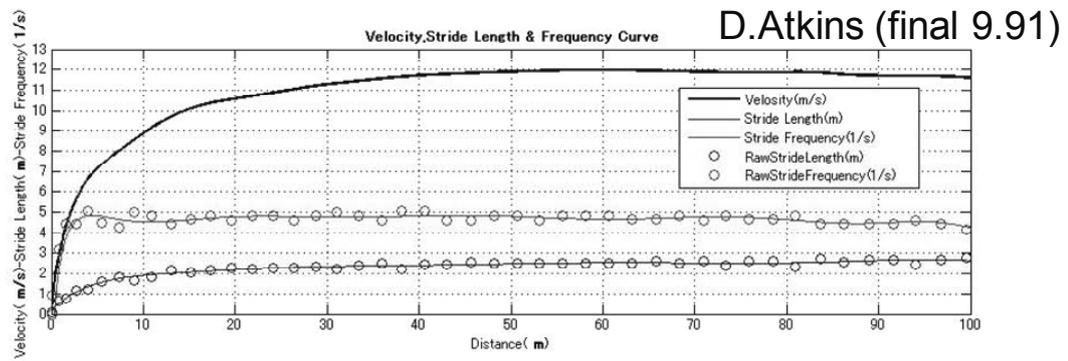
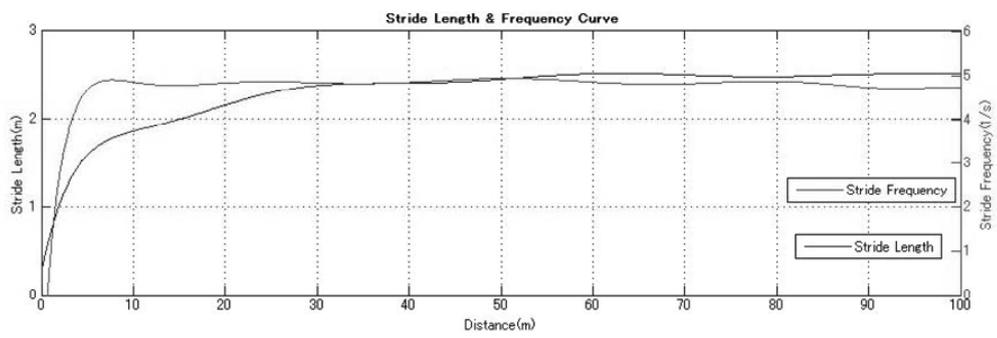
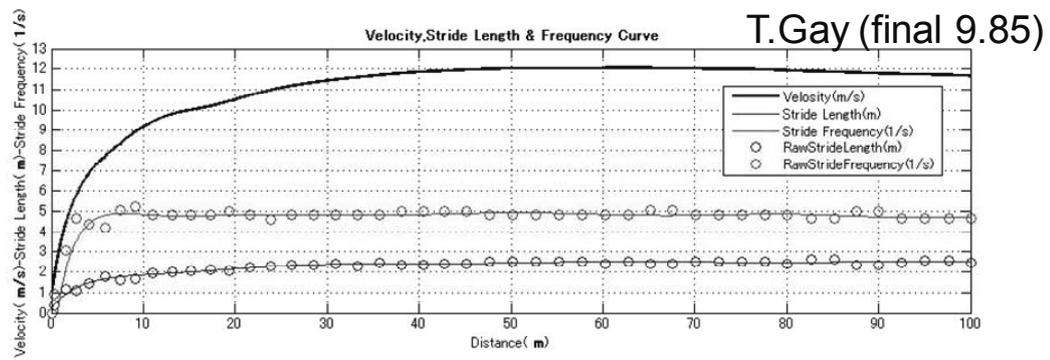


図 9. Gay 選手と Atkins 選手のピッチ，ストライドとスピードの変化

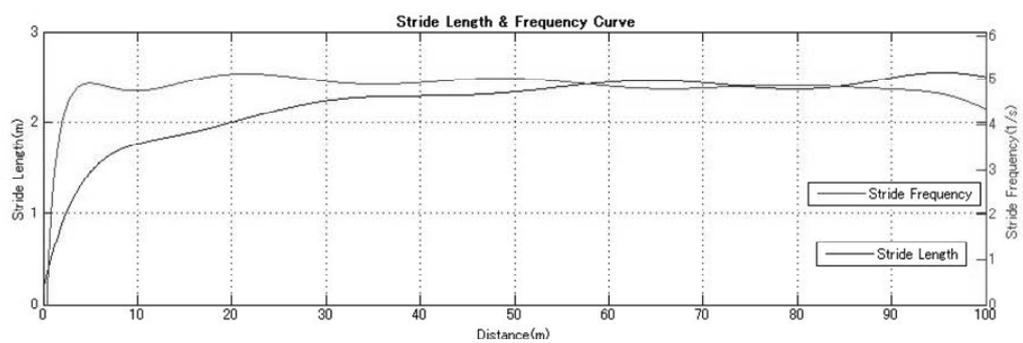
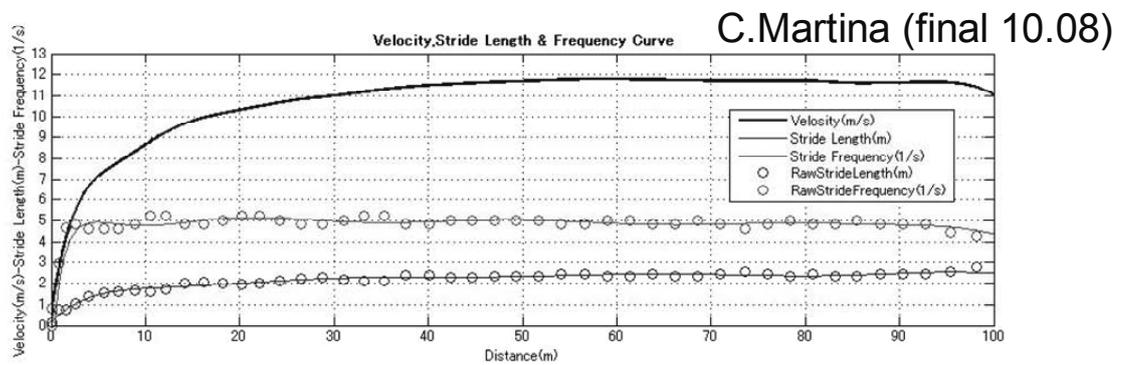
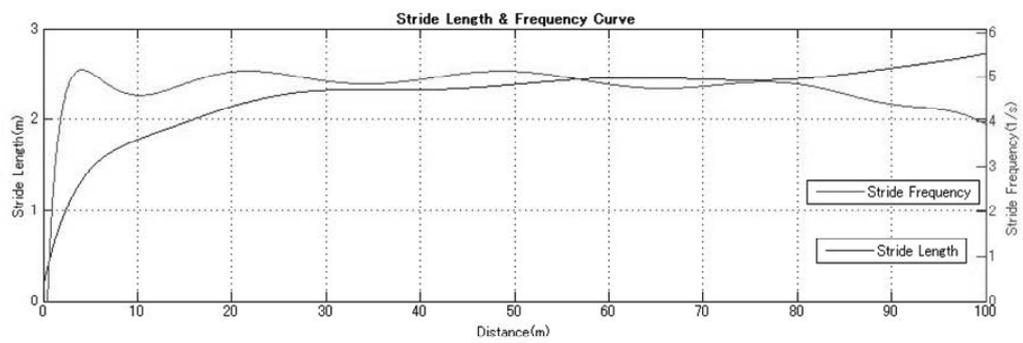
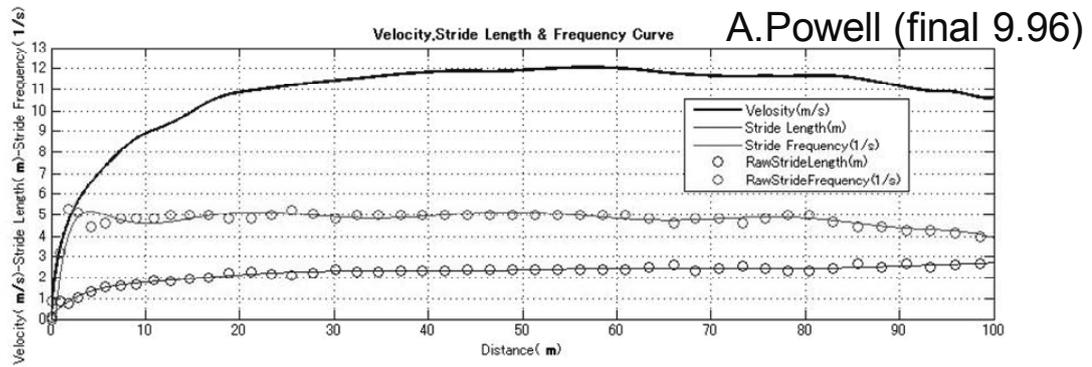
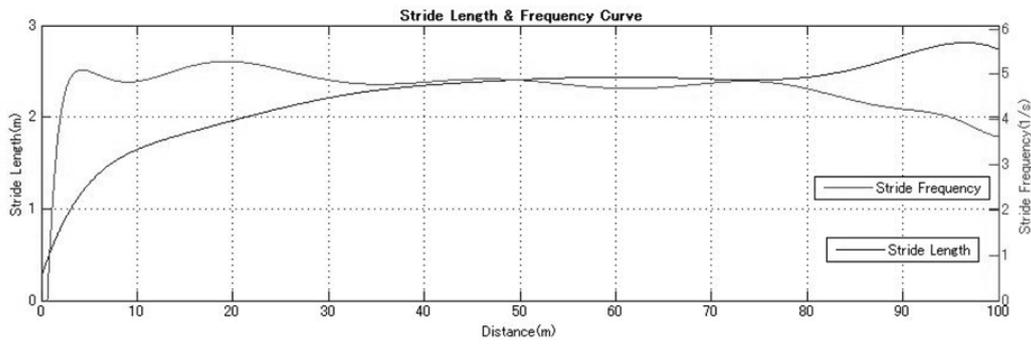
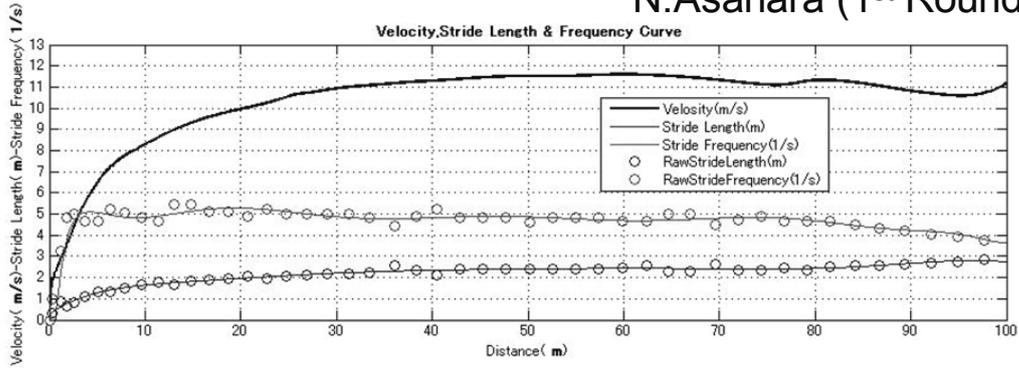


図 10. Powell 選手と Martina 選手のピッチ、ストライドとスピードの変化

N.Asahara (1<sup>st</sup> Round 10.14)



N.Asahara (2<sup>st</sup> Round 10.16)

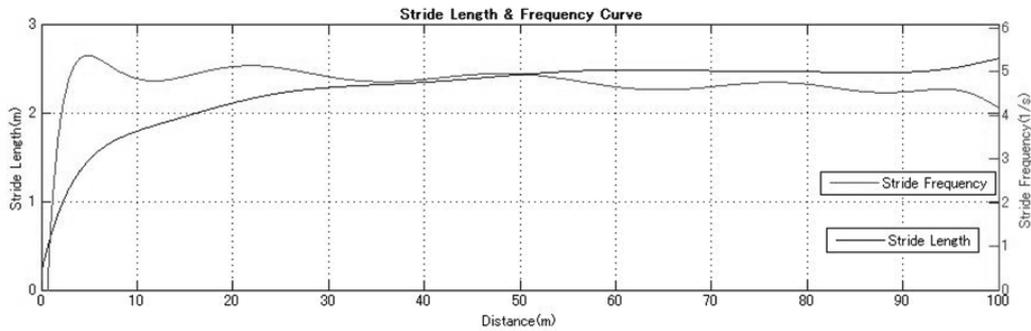
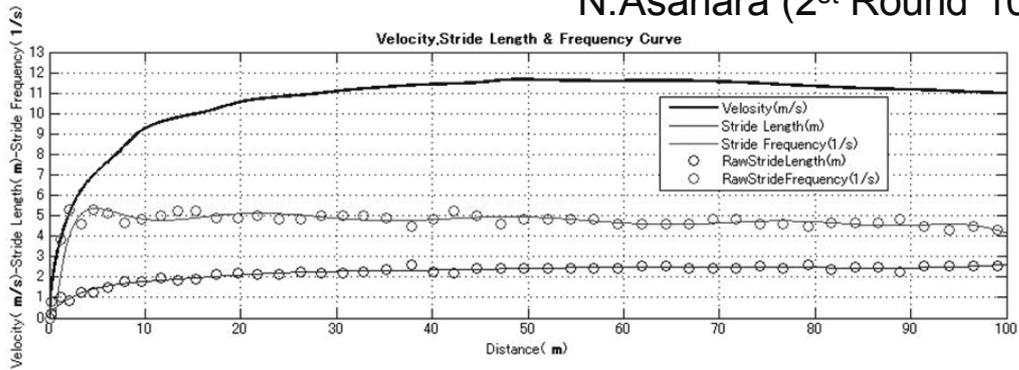


図 11. 朝原選手のピッチ、ストライドとスピード変化

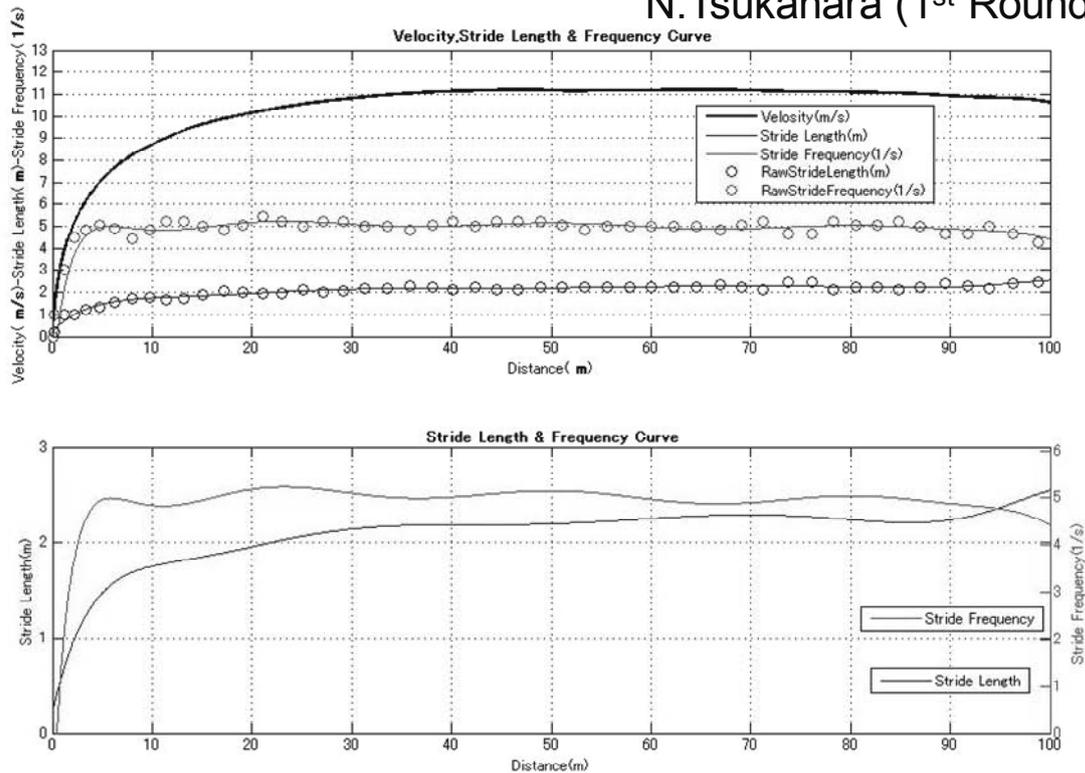


図 12. 塚原選手のピッチ, ストライドとスピード変化

4. まとめ

日本で開催された世界陸上競技選手権大会で男女の 100m レースにおいて, 1 次予選から決勝までのレースで, 男子では 61 名, 女子では 71 名のスピード変化のデータを得ることができた.

- (1) 最大スピードは男子では, Gay の 11.83m/s, 女子では Campbell の 10.56m/s が最も高い値であった.
- (2) スピード逓減率は男子では, 2 位の Atkins の 1.8%, 女子では Williams の 6.0% がもっとも低い値であった.
- (3) ゴールタイムとの関係を見ると, 最大スピードとの間には, 男女ともに非常に高い相関 (男子 ; n=61,  $r=-0.947$ ,  $p<0.0001$ , 女子 ; n=71,  $r=-0.962$ ,  $p<0.0001$ ), また, 30m ラップタイムとの間にも, 男女ともに有意な相関関係 (男子  $r=0.499$ ,  $p<0.0001$ , 女子  $r=0.822$ ,  $p<0.0001$ ) が認められた. 相関係数は男女ともに最大スピードの方が高い値であった. これらのことから, 最大スピードが 100m のパフォーマンスを決定する大きな要因であると示された.
- (4) ラウンドごとにゴールタイムとの関係を見ると, 最大スピードとの関係では, 男子ではすべてのラウンドで, また, 女子では決勝を除いたラウンドで有意な相関関係が認められた. 30m のラップタイムでは男女ともに決勝では有意な関係は認められなかった.
- (5) スピード逓減率とゴールタイムとの間には男子では有意な相関が認められなかったが, 女子では統計的に有意な相関 ( $r=-0.240$ ,  $p<0.05$ ) が認められた. ラウンドごとに見ると, 男女ともすべてのラウンドで相関は認められなかった.
- (6) スタートからのピッチとストライドの変化では, スタートから 5m ほどでどの選手もピークに達するが, そのあとの変化には個人差がみられた. どの選手もゴール前にはピッチが減少し, ストライドが増加する傾向が見られた.

文献

阿江通良・鈴木美佐緒・宮西智久・岡田英孝・平野敬靖 (1994) 世界一流スプリンターの 100m レースパターンの分析 -男子を中心に- 世界一流陸上競技者の技術. ベースボール・マガジン社, 14-28, 東京.

- Harrison,A. J.,R. L. Jensen, O. Donaghue, (2006) A Comparison of laser and video techniques for determining displacement and velocity during running. *Measurement in Physical education and exercise science*, 9(4), 219-231.
- 広川龍太郎・杉田正明・松尾彰文・阿江通良・金子太郎・高野進 (2005) ”末續慎吾”の100m 走中の疾走速度分析. *陸上競技研究紀要*, 1, 108-110.
- 広川龍太郎・杉田正明・松尾彰文・金子太郎 (2005) 国内GPにて収集した外国人選手の疾走速度分析. *陸上競技研究紀要*, 2, 90-91.
- 金高宏文 (1999) レーザ速度測定器を用いた疾走速度測定におけるデータ処理の検討. *鹿屋体育大学学術研究紀要*, 22, 99-108.
- 小林寛道 (1990) 走る科学
- 松尾彰文・広川龍太郎・柳谷登志雄・杉田正明・阿江通良 (2007) レーザー方式スピード測定装置による100mのラップタイム分析. *トレーニング科学会*, 発表資料
- 松尾彰文・広川龍太郎・柳谷登志雄・土江寛裕・杉田正明 (2008) 男女100mレースのスピード変化. *バイオメカニクス研究*, 12(2), 74-83.

# 男子 100m 決勝進出者5名の予選から 決勝におけるレースパターン分析

## Comparison of the race pattern from 1st round to final about men's 100m race at 2007 IAAF World Championship in Athletics in Osaka

広川龍太郎<sup>1)</sup> 松尾彰文<sup>2)</sup> 柳谷登志雄<sup>3)</sup> 土江寛裕<sup>4)</sup> 杉田正明<sup>5)</sup>

1) 東海大学国際文化学部 2) 国立スポーツ科学センター 3) 順天堂大学スポーツ健康学部  
4) 城西大学経営学部 5) 三重大学教育学部

Ryotaro HIROKAWA<sup>1)</sup>, Akifumi MATSUO<sup>2)</sup>, Toshio YANAGIYA<sup>3)</sup>  
Hiroyasu TSUCHIE<sup>4)</sup>, Masaaki SUGITA<sup>5)</sup>

1) Tokai University, 2) Japan Institute of Sports Sciences, 3) Juntendo University  
4) Josai University, 5) Mie University

In this study, we compared all the race patterns of velocity about five finalists of men's 100m race at 2007 IAAF World Championship in Athletics in Osaka.

The results were as follows:

- 1) All the race patterns had only one peak.
- 2) When we analyzed the data about Tyson Gay and Derrick Atkins, there were few variations in Standard Deviation. It shows that the race patterns were invariable at all times.
- 3) About Asafa Powell, we recognized some variations in SD and the race patterns were variable.

### 1. はじめに

世界選手権やオリンピックなどの世界大会規模における 100m 走では、決勝までに二日間で 4 レースに臨み、勝者を決める。予選から決勝に至るまで、綿密な戦術が組まれており、これはグランプリ大会の様な決勝一本のレースとは異なった趣である。決勝進出、もしくは決勝で最大のパフォーマンスを発揮する方法等の、スプリントにおけるトレーニング戦略を得るために、決勝に残った選手の予選から決勝におけるレースパターンを分析することは大変有用であり、多くの示唆を得られると思われる。

短距離走に関する Biomechanics 的研究の中に、レース中の疾走速度を継続的に捉えたものがある。そしてその有用性はコーチらに認められている(阿江ら, 1994)。

今回、2007 世界陸上大阪大会では、5 台の速度測定器を用いて予選から決勝までのデータを得た。その内の決勝に進出した T.Gay (米国・1 位), D.Atkins (バハマ・2 位), A.Powell (ジャマイカ・3 位), C.martina (オランダ領アンティル・5 位), M.Devonish (英国・6 位) の分析を報告する。並んで、日本代表の朝原宣治、塚原直貴のデータを検討した。

### 2. 方法

レーザードップラー式速度測定器 Laveg-Sport 300C (Jenoptik/ヘンリージャパン社) を用いて、

レース中の疾走速度を測定した。測定器を 5 台、スタートラインの後方にセットした。グラウンドレベルでの設置が大会運営上できなかったため、スタートラインの後方 64~67m、高さが 22~23m のスタンド最上段に設置した(図 1)。サンプリング周波数は 100Hz であり、平滑化処理は 1Hz のローパスバターワースフィルタを用いた。また松尾らの方法に従い、10m 毎の通過タイムと区間速度を算出した(松尾ら, 2007)。

また Gay, Martina は一次予選にて計測ミスが生じたため、二次予選からのデータを使用した。また決勝 4 位の Ousoji A. Fasuba は準決勝を下位で通過し、決勝の測定リストから除外していたためデータ収集ができなかった。



図 1. 測定風景

### 3. 結果と考察

表1は対象としたレースの全結果で、計測された区間速度、ラップタイム、最高速度に対する比率、遞減率を示している。また図2～図8は選手毎の速度曲線である。また各レースにおいては風

速などの条件が異なるため、区間速度に変化が現れると考えた。そこで、最高速度を100%として、区間毎の変化率を考察した。これを図9～図15に挙げた。

表1. 計測された区間速度、ラップタイム、最高速度に対する比率

name	heat (wind)	race rank	reaction time	goal time(s)	max speed(m/s)	%distance in speed		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Tyson Gay USA	Final (-0.5)	1	0.143	9.85	11.83	2.2	elapsed time(s)	1.90	2.94	3.86	4.73	5.59	6.44	7.28	8.13	8.99	9.85	
							speed(m/s)	5.25	9.70	10.83	11.42	11.72	11.79	11.83	11.80	11.57	11.57	
	Semi Final (+0.1)	1	0.170	10.00	11.73	3.3	elapsed time(s)	1.95	3.00	3.93	4.82	5.69	6.54	7.39	8.25	9.12	10.00	
							speed(m/s)	5.12	9.59	10.70	11.27	11.53	11.69	11.73	11.65	11.54	11.34	
	R2 (-0.5)	1	0.203	10.06	11.68	7.4	elapsed time(s)	1.97	3.02	3.95	4.83	5.69	6.55	7.41	8.27	9.14	10.06	
							speed(m/s)	5.06	9.60	10.75	11.31	11.58	11.65	11.68	11.65	11.50	10.82	
Derrick Atkins BAH	Final (-0.5)	2	0.137	9.91	11.74	1.8	elapsed time(s)	1.89	2.93	3.87	4.75	5.62	6.47	7.32	8.18	9.04	9.91	
							speed(m/s)	5.28	9.65	10.69	11.26	11.57	11.74	11.71	11.70	11.58	11.53	
	Semi Final (+0.3)	1	0.166	10.04	11.71	3.8	elapsed time(s)	1.92	2.92	3.90	4.79	5.66	6.52	7.37	8.24	9.11	10.04	
							speed(m/s)	5.21	9.54	10.67	11.27	11.47	11.67	11.71	11.59	11.43	11.27	
	R2 (+0.8)	2	0.150	10.02	11.66	7.6	elapsed time(s)	1.89	2.93	3.88	4.76	5.63	6.49	7.35	8.21	9.09	10.02	
							speed(m/s)	5.29	9.59	10.61	11.26	11.56	11.60	11.66	11.55	11.39	10.77	
R1 (+1.0)	3	0.158	10.25	11.34	3.6	elapsed time(s)	1.92	3.00	3.96	4.88	5.77	6.65	7.54	8.43	9.33	10.25		
						speed(m/s)	5.20	9.27	10.37	10.98	11.21	11.34	11.26	11.18	11.06	10.93		
Asafa Powell JAM	Final (-0.5)	3	0.145	9.96	11.79	8.1	elapsed time(s)	1.88	2.91	3.83	4.71	5.57	6.42	7.29	8.16	9.04	9.96	
							speed(m/s)	5.31	9.73	10.83	11.38	11.67	11.79	11.51	11.51	11.34	10.84	
	Semi Final (+0.3)	2	0.156	10.08	11.61	8.8	elapsed time(s)	1.89	2.93	3.84	4.71	5.57	6.44	7.32	8.22	9.14	10.08	
							speed(m/s)	5.28	9.73	10.92	11.40	11.61	11.61	11.37	11.11	10.87	10.59	
	R2 (+0.8)	1	0.150	10.01	11.69	11.1	elapsed time(s)	1.85	2.88	3.80	4.67	5.53	6.39	7.24	8.13	9.05	10.01	
							speed(m/s)	5.41	9.66	10.89	11.50	11.62	11.69	11.66	11.24	10.96	10.39	
R1 (+1.0)	2	0.165	10.34	11.08	7.9	elapsed time(s)	1.88	2.91	3.86	4.77	5.68	6.58	7.49	8.42	9.36	10.34		
						speed(m/s)	5.31	9.73	10.54	10.93	11.08	11.04	10.96	10.85	10.59	10.21		
Churandy Martina AHO	Final (-0.5)	5	0.180	10.08	11.67	2.6	elapsed time(s)	1.98	3.03	3.98	4.88	5.75	6.62	7.47	8.34	9.20	10.08	
							speed(m/s)	4.83	9.70	10.69	11.26	11.57	11.74	11.71	11.71	11.56	11.37	
	Semi Final (+0.1)	3	0.182	10.15	11.61	2.9	elapsed time(s)	1.97	3.04	3.99	4.9	5.78	6.65	7.51	8.38	9.26	10.15	
							speed(m/s)	5.08	9.32	10.50	11.04	11.39	11.49	11.57	11.49	11.39	11.24	
	R2 (-0.6)	1	0.141	10.1	11.61	5.3	elapsed time(s)	1.96	2.99	3.94	4.84	5.72	6.58	7.45	8.31	9.19	10.10	
							speed(m/s)	5.11	9.63	10.55	11.13	11.36	11.57	11.57	11.56	11.42	10.96	
Marlon Devonish GBR	Final (-0.5)	6	0.149	10.14	11.48	3.9	elapsed time(s)	1.96	3.00	3.95	4.85	5.73	6.61	7.48	8.36	9.23	10.14	
							speed(m/s)	5.05	9.91	10.46	11.22	11.27	11.42	11.48	11.37	11.42	11.03	
	Semi Final (+0.1)	2	0.154	10.12	11.48	4.7	elapsed time(s)	1.93	2.99	3.93	4.83	5.71	6.58	7.45	8.33	9.22	10.12	
							speed(m/s)	5.18	9.45	10.65	11.08	11.35	11.51	11.45	11.42	11.37	10.97	
	R2 (-0.5)	2	0.154	10.13	11.48	4.6	elapsed time(s)	1.95	2.99	3.93	4.83	5.71	6.59	7.46	8.33	9.22	10.13	
							speed(m/s)	5.13	9.63	10.63	11.10	11.34	11.43	11.47	11.42	11.33	10.94	
R1 (-1.5)	1	0.136	10.13	11.48	5.7	elapsed time(s)	1.92	2.97	3.91	4.8	5.68	6.56	7.43	8.31	9.2	10.13		
						speed(m/s)	5.22	9.51	10.65	11.17	11.37	11.43	11.46	11.33	11.22	10.81		
朝原宣治 日本	Semi Final (+0.3)	8	0.161	10.36	11.48	8.3	elapsed time(s)	1.94	2.99	3.94	4.85	5.75	6.64	7.54	8.45	9.38	10.36	
							speed(m/s)	5.15	9.56	10.51	10.96	11.17	11.19	11.15	10.91	10.72	10.26	
	R2 (+0.8)	4	0.143	10.16	11.48	5.2	elapsed time(s)	1.91	2.95	3.90	4.80	5.69	6.57	7.44	8.33	9.24	10.16	
							speed(m/s)	5.22	9.65	10.55	11.06	11.33	11.37	11.41	11.24	11.07	10.82	
	R1 (+1.0)	1	0.147	10.14	11.48	9.6	elapsed time(s)	1.90	2.94	3.88	4.77	5.64	6.51	7.38	8.27	9.18	10.14	
							speed(m/s)	5.27	9.56	10.69	11.18	11.50	11.55	11.46	11.23	11.00	10.44	
塚原直貴 日本	R2 (-0.3)	5	0.154	10.31	11.48	5.1	elapsed time(s)	1.92	2.96	3.92	4.83	5.73	6.62	7.53	8.44	9.37	10.31	
							speed(m/s)	5.22	9.56	10.50	10.95	11.12	11.15	11.09	10.95	10.81	10.58	
	R1 (-0.1)	2	0.132	10.20	11.48	4.1	elapsed time(s)	1.87	2.92	3.87	4.78	5.68	6.57	7.47	8.36	9.27	10.20	
							speed(m/s)	5.34	9.51	10.52	11.01	11.14	11.21	11.20	11.12	11.05	10.75	
								%max speed	47.6	84.8	93.8	98.2	99.4	100.0	99.9	99.2	98.6	95.9

### 1) 最高速度について

決勝5名では、Devonish 以外が決勝で最高速度をマークした。また Gay の 11.83m/s が一番速い結果であった。またその位置は 60-70m 区間であった。9 秒台で走る競技者は概ね 60m 以降に 11.63m/s 以上のピークが来る(杉田ら, 2003)と報告されているのと同様であった。また Gay 以外は 50-60m で最高速度を迎えており、比較的早くトップスピードに上がっていた。Atkins は 11.74m/s, Powell は 11.79m/s, Martina は 11.74m/s, Devonish は 11.51m/s, また朝原は 11.55m/s, 塚原は 11.21m/s であった。これらのことより、外国人選手の方が最高速度はやや速いが、朝原のように走記録が同じ位であれば、日本人も外国人も最高速度と出現位置は殆ど変わらない事が伺えた。

### 2) 速度の逓減率について

ゴール前のスピード低下を示す指標である逓減率を検討した。ポイントが低いほど、減速をしていないことを示している。決勝5名では Powell 以外、決勝が最も低い逓減率であった。各選手における最も低い逓減率は Gay が 2.2%, Atkins が 1.8%, Powell が 7.9%, Martina が 2.6%, Devonish が 3.9% であった。Devonish は全レースを通じてあまり変化がなかったが、他の選手は二次予選と準決勝の間に 2.3-4.1 ポイントの低下が見られており、準決勝からいわゆる“流さないで”走っていることが伺えた。また朝原が 5.2%, 塚原が 4.1% であったため、若干逓減率が高いと伺えた。

### 3) レースのパターンについて

阿江は疾走速度の変化を 4 パターンとして捉え、次の様に分けている(阿江ら, 1994)。

A: 速度が 2 つのピークを示した後、ゴールまで徐々に減少する二峰性のパターン

B: ピークが 1 つのみの単峰性パターン

C: 速度が 2 つのピークを示した後、減少するが、ゴール前で再び速度がわずかに増加するパターン

D: 速度が 3 つのピークを示した後、ゴールまで徐々に減少する三峰性のパターン

今回は全ての結果が B の単峰性パターンであった。1991 世界陸上東京大会では、A と B のパターンを合わせて 86% を占めていたが、当時の世界記録(9 秒 86)を出した時のカール・ルイスは A であった。また東京の決勝に進んだ競技者は一次予選から決勝までの 4 ラウンドにおいて、同一のパターンで走っている競技者は居なかったと述べられている(阿江ら, 1994)。今回、総てが同じパターンという特徴が出たが、国内グランプリにて収集した先行研究(広川ら, 2005)に於いても、総てが単峰性パターンであったことから、最近のレースパターンは単峰性に移行している可能性が示唆された。

### a) Gay 選手のレースパターン(図 2, 図 9)

総てのレースにて、最高速度の出現位置が 60-70m 区間であった。図 2, 図 9 のどちらを見ても 90m 地点まで常に同じような速度、同じ加速-維持-減速パターンでレースをしていたことが伺え、SD 値が低い水準で表されている。自身の揺るぎない走パターンを確立して大会に臨んできたのではないかと伺えた。二次予選・準決勝は着順の関係する(各組 4 着以内)ため、着順がほぼ確定する 90m 付近に達するまでは流していないことが伺えた。惜しむらくは一次予選のデータが無いことである。一次予選でどの程度の余裕を持っていたのか、確認をしたいものであった。

### b) Atkins 選手のレースパターン(図 3, 図 10)

最高速度の出現位置は一次予選と決勝は 50-60m 区間で、二次予選と準決勝では 60-70m 区間であった。一次予選では他のレースと比べて一段低い曲線を描いている(図 3)。このことにより、SD 値が高くなるが、着順の関係する二次予選以降に絞った SD 値(図 3 中の SD2)を見てみると、 $\pm 0.1\text{m/s}$  以内と、低くなる。

また図 10 を見てみると、常に同じような加速-維持-減速パターンでレースをしていたことが伺え、SD 値の変化が少なかった。特に 20-30m 区間の SD 値が低く、常に最高速度の 91% 程の加速をしていることが伺えた。また、Atkins のレースは、決勝以外は追い風であったため( $+0.3-1.0\text{m/s}$  以内)、一定の走パターンを作りやすかったことも考えられた。Atkins と Powell は二次予選以降、決勝まで三度相まみえており、準決勝・決勝は Atkins の方が先着している。

### c) Powell 選手のレースパターン(図 4, 図 11)

最高速度の出現位置は二次予選と決勝は 50-60m 区間で、一次予選は 40-50m 区間で、準決勝では 40-60m 区間と 20m に亘っていた。Atkins と同様に一次予選では他のレースと比べて一段低い曲線を描いている(図 4)。このことにより、SD 値が高くなるが、着順の関係する二次予選以降に絞った SD 値(図 4 中の SD2)を見てみると、40-50m 区間までは低くなる( $\pm 0.06\text{m/s}$  以内)。50-60m 以降レース毎に速度差が見られたため、SD 値が徐々に上昇している。Powell は二次予選以外、1 着でゴールをしていない。二次予選も Atkins と並んでゴールするレース(Powell・10 秒 01, Atkins・10 秒 02)で、ライバルと駆け引きをしたレースを行っている様に伺えた。大会に臨むにあたって、Gay 選手と異なり、自分の走パターンを確立できなかった事も考えられた。

また図 11 を見てみると、最高速度付近の SD 値以外、他の選手と比べてやや高いことが伺える。レース毎に加速-維持-減速パターンが異なっ

ていることが伺えた。また、Atkins と同様に、決勝以外は追い風であったため (+0.3~1.0m/s)，走パターンに風の影響は少ないと考えられた。

d) Martina 選手のレースパターン (図 5, 図 12)  
 最高速度の出現位置は決勝では 50-60m 区間で、準決勝では 60-70m 区間で、二次予選では 50-70m 区間と 20m に亘っていた。図 4, 図 11 のどちらを見ても 10-20m 区間にバラツキが見られ SD 値が若干高い。決勝でこの区間速度が高いためであるが、図 12 の最高速度%に対しても高いため、決勝の 10-20m 区間で一気に上げているのが伺えた。

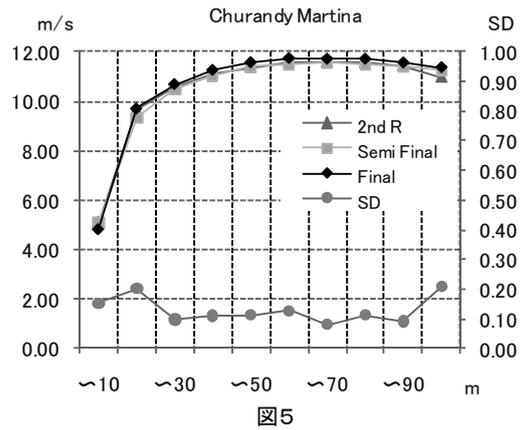


図5

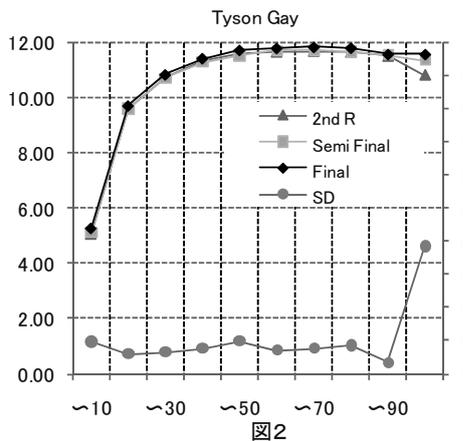


図2

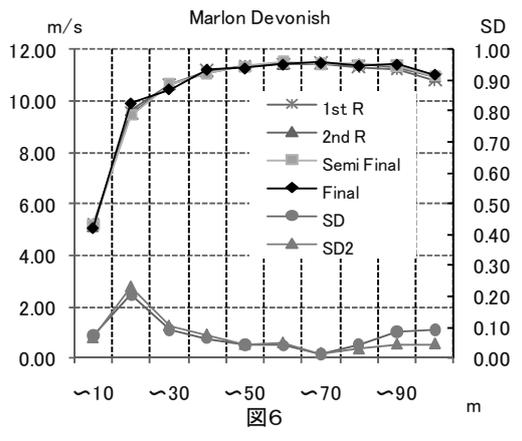


図6

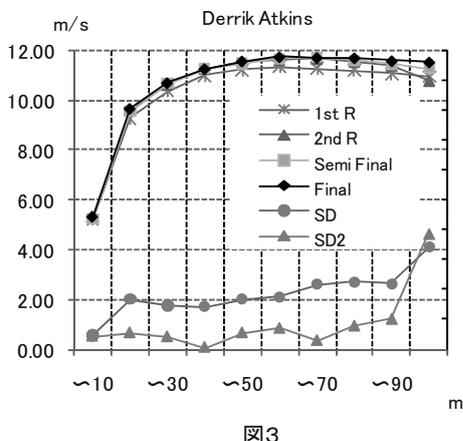


図3

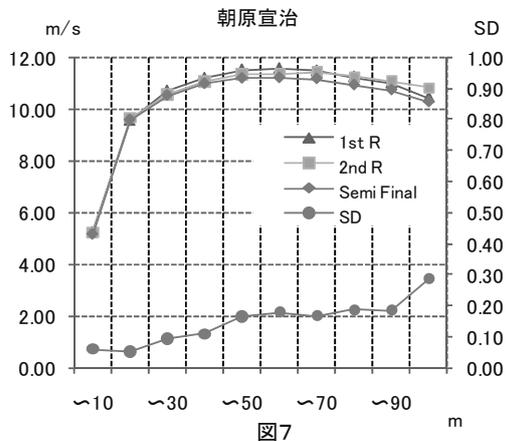


図7

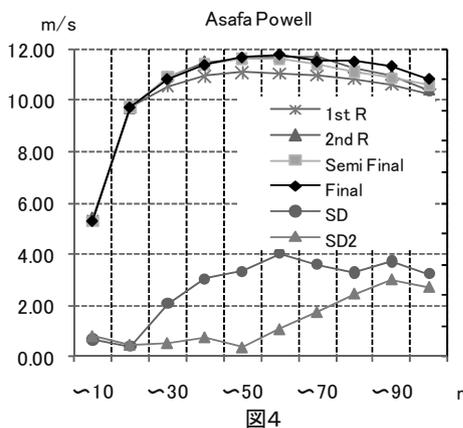


図4

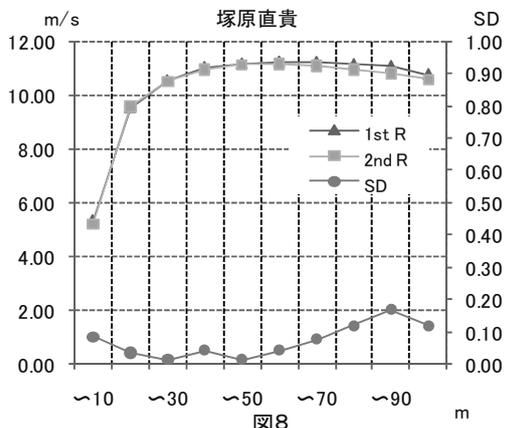


図8

図 2~8. 選手毎における距離とスピードの関係

決勝時の反応時間は最も悪く (0.180 秒) , 録画映像を確認しても, 集団後方から遅れて追い上げてきているのが伺えた。

レース毎に風が変わっており (二次予選-0.6, 準決勝+0.1, 決勝-0.5m/s) , 一定のパターンは作りにくいと思われたが, 図 12 を見ると, 30m 以降は SD 値が低く, 再現性の高いパターンが伺えた。Martina は自己記録が 10 秒 06 であり, 今回のレースでも全て 10 秒台であるが決勝に進出している。

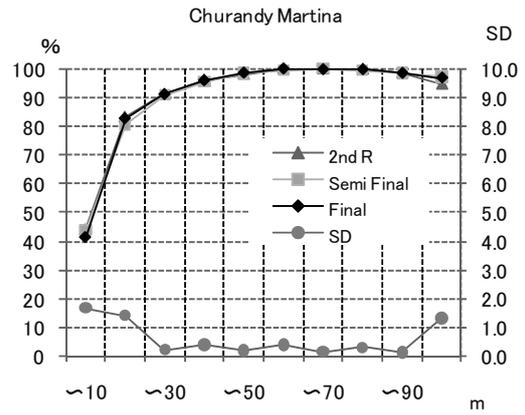


図 12

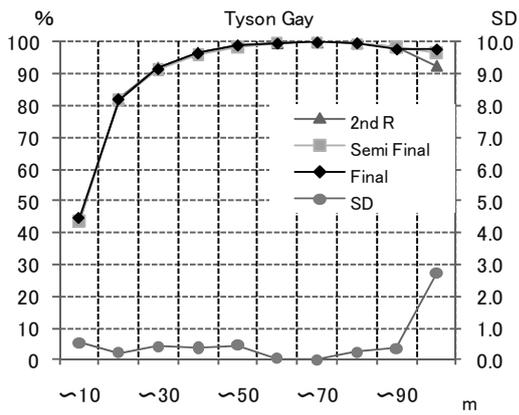


図 9

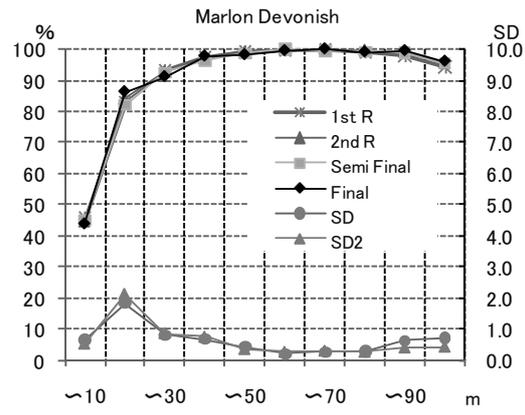


図 13

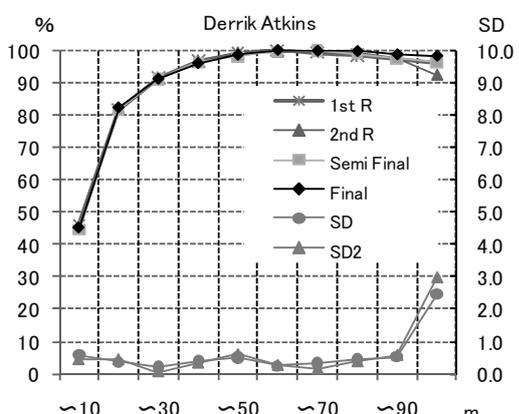


図 10

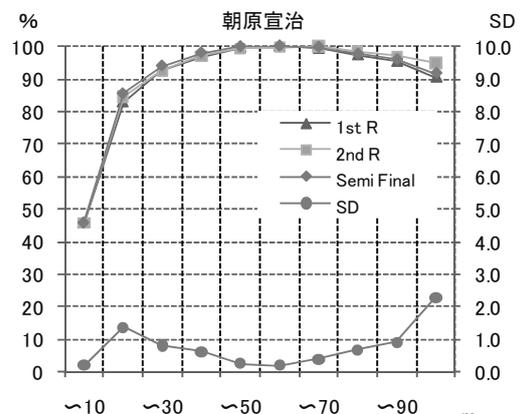


図 14

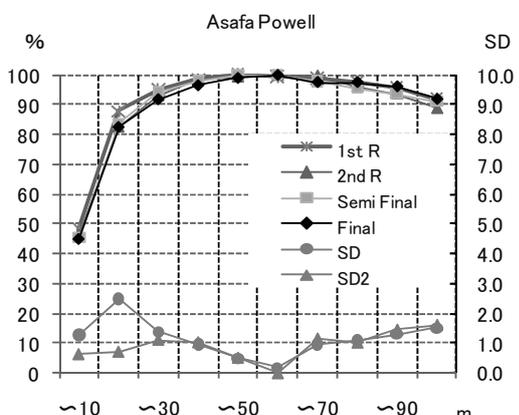


図 11

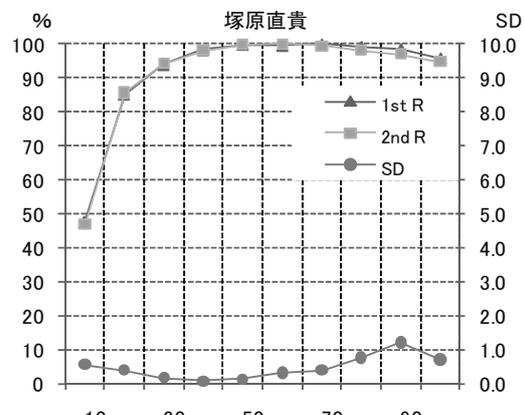


図 15

図 9~15. 選手毎における距離と%スピードの関係

e) Devonish 選手のレースパターン (図 6, 図 13)

最高速度の出現位置は準決勝のみ 50-60m 区間で、それ以外は 60-70m 区間であった。最高速度も 11.46-11.51m/s と、日本人選手と変わらない。ゴールタイムも 10 秒 12-14 と、一度も 10 秒 0 台以上を出していないが、決勝に進出している。自己最高記録は 10 秒 06 で前述の Martina と同様であり、日本代表クラスと殆ど変わらない。予選から四本纏めて 10 秒 1 台前半を出せば、決勝進出が可能な事を示された例といえる。

図 6, 図 13 のどちらを見ても 10-20m 区間にバラツキが見られ、SD 値が他の区間と比べて若干高かった。

準決勝の+0.1m/s 以外は向かい風で、-1.5 から -0.5m/s の中を走っていたが、最高速度にはあまり影響がないことが伺えた。

f) 朝原選手のレースパターン (図 7, 図 14)

最高速度の出現位置は二次予選が 60-70m 区間で、一次予選と準決勝が 50-60m 区間であった。最も速かった一次予選 (10 秒 14) の最高速度は 11.55m/s であったが逓減率が 9.6%と高かった。二次予選は 10 秒 16 と一次予選と 0.02 秒の差であったが、最高速度は 11.41m/s と、比較的遅かったが、逓減率が 5.2%であった。図 6 を見ると他の選手と異なり、一次予選で 30m 以降 60m までしっかりした加速が見られた。できることなら、このスピード曲線を準決勝以降で見てみたかったものである。

一次予選から準決勝まで、10-20m 区間の走速度が三本とも殆ど変わらないが、他の区間はバラツキがあったため、SD 値が比較的高かった。

g) 塚原選手のレースパターン (図 8, 図 15)

最高速度の出現位置は一次予選・二次予選共に 50-60m 区間であった。自己新記録を一次予選でマークしたのは素晴らしい成果と言える。しかし、最高速度が 11.21m/s、逓減率も 4.1%であったため、どちらにも改善点があると思われ、未だ多くの伸び代を秘めていると思われた。サンプリングが二本であったため、SD 値からの結果を出しにくいですが、図 15 を見ると 60-70m 区間までの SD 値が低く、加速→維持のパターンは一定なものが身に付いている可能性が伺われた。

以上の点から纏めると、Gay, Atkinsの“常に同じ”パターン(90-100m区間を除く)が大変目に付いた。世界記録保持者として挑んだPowellであったが、自身のパターンを作れずにいたと伺えた。

また 9 秒台の自己記録を持つ Atkins と Powell は、一次予選で明らかな余裕を持っている(最高速度比 Atkins-0.4 ポイント, Powell-0.71 ポイント)。自己記録 10 秒台の Devonish は殆ど変化ない(-0.1 ポイント)。上位入賞している Gay, Atkins, Powell の結果は大

変参考になるが、Devonish の4本纏め上げた疾走フォーム等を調べることにより、我々に対してより多くの示唆が得られるのではないかと考えた。

## 文献

- 阿江通良・鈴木美佐緒・宮西智久・岡田英孝・平野敬靖 (1994) 世界一流スプリンターの 100m レースパターンの分析 世界一流陸上競技者の技術. ベースボールマガジン社, 14-28.
- 杉田正明・広川龍太郎・阿江通良 (2003) 日本選手権の男女 100m 走中のスピード分析. 陸上競技の医科学サポート研究 Report2003, 19-23.
- 広川龍太郎・杉田正明・松尾彰文・阿江通良・高野進・末続慎吾 (2007) 男子 100m 走における、国内 GP にて収集した外国人選手と末続慎吾選手の疾走速度分析. 陸上競技研究紀要, 3, 39-41.
- 広川龍太郎・杉田正明・松尾彰文 (2005) 国内 GP にて収集した外国人選手の疾走速度分析. 陸上競技研究紀要, 2, 90-91.
- 松尾彰文・広川龍太郎・柳谷登志雄・杉田正明・阿江通良 (2007) レーザー方式スピード測定装置による 100m のラップタイム分析. トレーニング科学研究会, 発表資料

# 男女短距離選手のスタートダッシュ動作

## Starting dash movement of male and female sprinters

貴嶋 孝太<sup>1)</sup> 福田 厚治<sup>1)</sup> 伊藤 章<sup>1)</sup> 堀 尚<sup>1)</sup>

川端 浩一<sup>1)</sup> 末松 大喜<sup>2)</sup> 大宮 真一<sup>2)</sup> 山田 彩<sup>1)</sup>

村木 有也<sup>1)</sup> 淵本 隆文<sup>1)</sup> 田邊 智<sup>3)</sup>

1) 大阪体育大学 2) 筑波大学 3) 大阪産業大学

Kota KIJIMA<sup>1)</sup>, Koji FUKUDA<sup>1)</sup>, Akira ITO<sup>1)</sup>, Hisashi HORI<sup>1)</sup>, Koichi KAWABATA<sup>1)</sup>,  
Daiki SUEMATSU<sup>2)</sup>, Shinichi OMIYA<sup>2)</sup>, Aya YAMADA<sup>1)</sup>, Yuya MURAKI<sup>1)</sup>,  
Takafumi FUCHIMOTO<sup>1)</sup>, Satoru TANABE<sup>3)</sup>

1) Osaka University of Health and Sport Sciences, 2) University of Tsukuba,  
3) Osaka Sangyo University

### 1. はじめに

男子 100m 決勝では T.ゲイ (アメリカ) が世界記録保持者 (当時) の A.パウエル (ジャマイカ) を破り, 9 秒 85 の記録で優勝した. また, 日本代表の朝原宣治が準決勝に進出し, 塚原直貴は自己記録を更新するなど実力を発揮した. 女子 100m 決勝は, 1 位から 6 位までが 0.07 秒の大接戦であったが, V.キャンベル (アメリカ) が前回の世界陸上ヘルシンキ大会女子 100m 優勝者の L.ウィリアムス (アメリカ) を同タイムながら 1000 分の 2 秒差で抑え優勝した. 日本代表の高橋萌木子は 11 秒 98 の記録で第 1 次予選敗退であったが, 今後の活躍が期待できよう.

100m 走に代表される短距離走は, レース中の疾走速度の変化を基に加速期, 中間疾走 (等速) 期, 減速期に大きく分けることができる (小林, 1990). 加速期は, 身体が静止した状態から爆発的なスタートによって, 大きな加速力を発揮しながら高い疾走速度を獲得する重要な局面である. スタートダッシュ動作に関して, 伊藤ら (1994) は第 3 回世界陸上選手権大会 (1991, 東京) で, 斉藤ら (1997) は第 12 回アジア競技大会 (1994, 広島) でそれぞれ男子 100m レース中の疾走速度

の変化にともなう脚の関節運動について分析した.

本研究では, 第 11 回世界陸上競技選手権大会 (2007, 大阪) の 100m に出場した男子と女子のスタートダッシュ動作の特徴を, 下肢の関節運動と大腿および下腿の分節運動の面から明らかにしようとした.

### 2. 方法

#### 2.1 分析対象選手および対象レース

第 11 回世界陸上競技選手権大会 (2007, 大阪) の 100m に出場した男子選手 4 名と女子選手 3 名の計 7 名を分析対象とした (表 1). 各選手の分析対象レースは以下のとおりである.

##### 1) 男子 100m

決勝の T.ゲイ (優勝; 9 秒 85) と A.パウエル (第 3 位; 9 秒 96), 第 1 次予選の朝原宣治と塚原直貴 (それぞれ 10 秒 14, 10 秒 20).

##### 2) 女子 100m

準決勝の V.キャンベル (10 秒 99, 決勝は 11 秒 01 で優勝), 決勝の L.ウィリアムス (第 2 位; 11 秒 01), と第 1 次予選の高橋萌木子 (11 秒 98).

表1 分析対象選手と身体的特性

被験者名	性別	年齢 (歳)	国籍	身長 (m)	体質量 (kg)	自己記録 (秒)	レース記録 (秒)	分析レース	今大会成績
T.ゲイ	男	25	アメリカ	1.83	73	9.84	9.85	決勝	優勝
A.パウエル	男	24	ジャマイカ	1.90	88	9.77	9.96	決勝	第3位
朝原宣治	男	35	日本	1.79	75	10.02	10.14	第1次予選	準決勝
塚原直貴	男	22	日本	1.80	75	10.23	10.20	第1次予選	第2次予選
V.キャンベル	女	25	ジャマイカ	1.63	61	10.85	11.01	準決勝	優勝
Lウィリアムス	女	23	アメリカ	1.57	57	10.88	10.99	決勝	第2位
高橋萌木子	女	18	日本	1.69	57	11.54	11.98	第1次予選	第1次予選

2.2 ビデオ撮影

100m レースにおけるスタートダッシュ動作と、中間疾走動作（スタート後の 60m 付近）を、観客席最上段に設置したそれぞれ 2 台ずつのハイスピードカメラ（Vision Research 社製：Phantom V4.3）によって撮影（200Hz）した。

また、競技開始前と終了後に 3 次元座標を算出するためにコントロールポイント（撮影したレースにより異なるが 15 または 20 地点、それぞれ 5 か所の高さ）を撮影した。

2.3 動作分析

撮影した映像を基に、身体各部 23 点の座標値をビデオ動作分析ソフト（DKH 社製：Frame-DIAS II）によりデジタル化（100Hz）し、DLT法を用いて 3 次元座標値を求め 4 次のバターワースデジタルフィルターで平滑した（遮断周波数は 6-7Hz）。なお、本研究では X 軸の正を進行方向に対して右方向に、Y 軸の正を進行方向、Z 軸を鉛直上向きとする静止座標系を定義した。3 次元座標値算出における実測値と推定値との平均誤差は、X 軸が 0.006m、Y 軸が 0.006m、Z 軸が 0.006m であった。

本研究におけるスタート動作の分析範囲は、スタートの合図後、どちらかの手が離地する直前からスタート後 6 歩目までとし、この間を次のように分けて分析した。すなわち、①1 歩目；両足がスターティングブロックを離れてから 1 歩目の離地まで、②2 歩目；1 歩目の離地から 2 歩目の離地まで、とし、3 歩目以降も同様に定義した。また、中間疾走のデータは、1 サイクル（連続する 2 歩）の平均値から求めた。

2.4 分析項目

- 1) 疾走速度、ストライド、ピッチ、歩隔
  - ① 疾走速度：スタートでは 1 歩ごと、中間疾走では 1 サイクルの身体重心の平均速度。
  - ② ストライド：連続する歩数における接地の瞬間の爪先の水平前後距離。なお、スタート 1 歩目のストライドはスタートラインからの水平前後距離。

- ③ ピッチ：疾走速度をストライドで除した値。
  - ④ 歩隔：連続する歩数における接地の瞬間の爪先の水平左右距離。
- 2) スイング脚動作（図 1）
- ① もも上げ動作：大腿と鉛直線のなす角度の最大値 ( $\theta 1$ ) とその最大角速度 ( $\omega 1$ )。
  - ② 引きつけ動作：膝関節の最小角度 ( $\theta 2$ ) と最大屈曲角速度 ( $\omega 2$ )。
  - ③ 振り出し動作：大転子とくるぶしを結んだ線（以下、「脚全体」とする）と鉛直線のなす角度の最大値 ( $\theta 3$ )、および膝関節の最大伸展角速度 ( $\omega 3$ )。
  - ④ 振り戻し動作：接地する直前の脚全体の最大角速度 ( $\omega 4$ )。
- 3) キック脚動作（図 2）
- ① 下肢関節角度：接地の瞬間の股関節 ( $\theta 4$ )、膝関節 ( $\theta 5$ )、足関節 ( $\theta 6$ ) の関節角度、および離地の瞬間の股関節 ( $\theta 7$ )、膝関節 ( $\theta 8$ )、足関節 ( $\theta 9$ ) の関節角度。また、足関節 ( $\theta 10$ ) については接地期における関節角度の最小値。

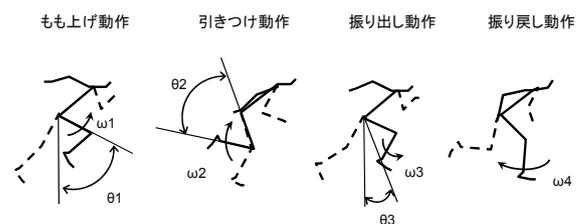


図 1 スイング脚動作の分析項目

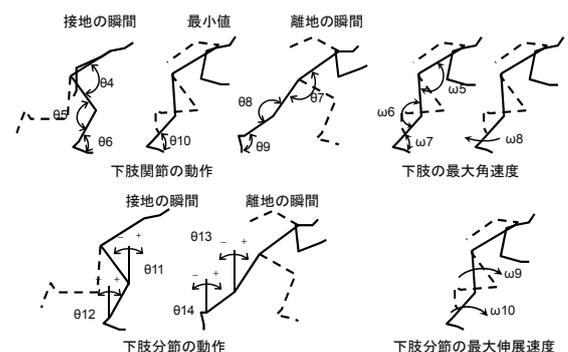
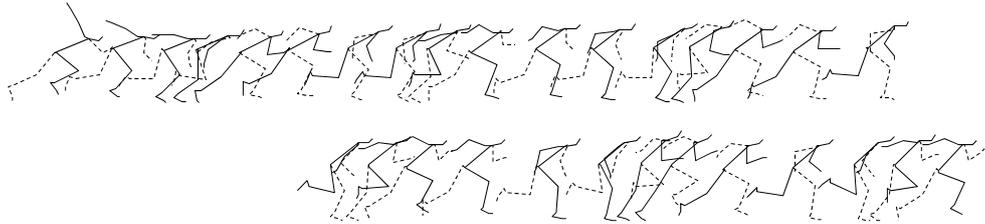
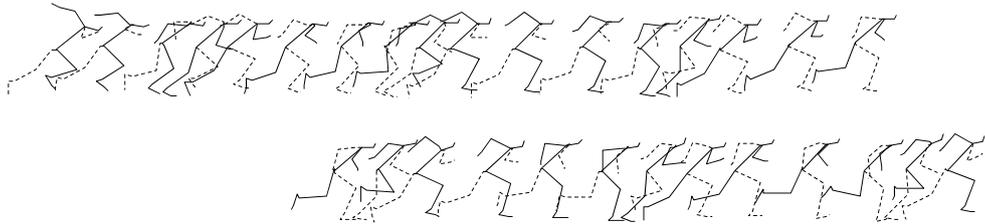


図 2 キック脚動作の分析項目

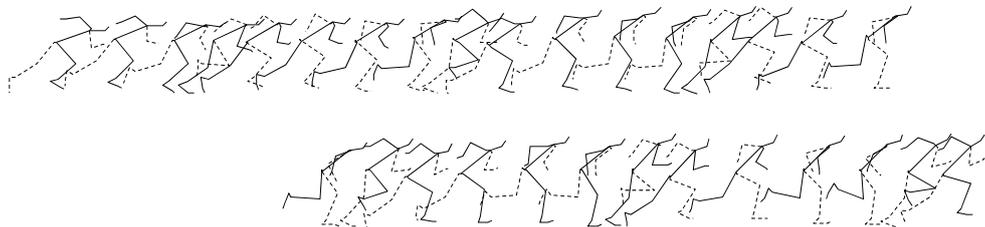
T.ゲイ(決勝:9秒85)



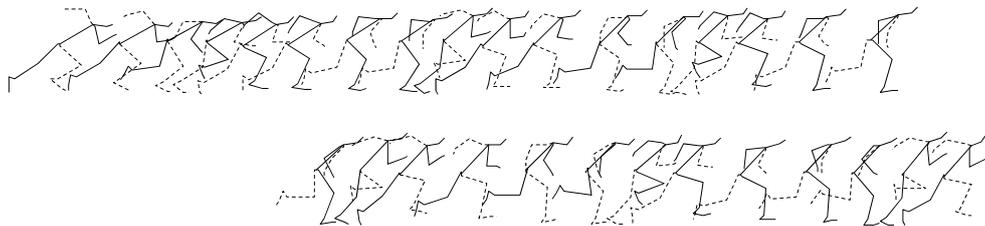
A.パウエル(決勝:9秒96)



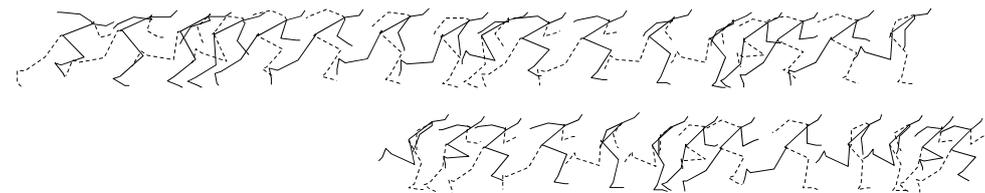
朝原宣治(第1次予選:10秒14)



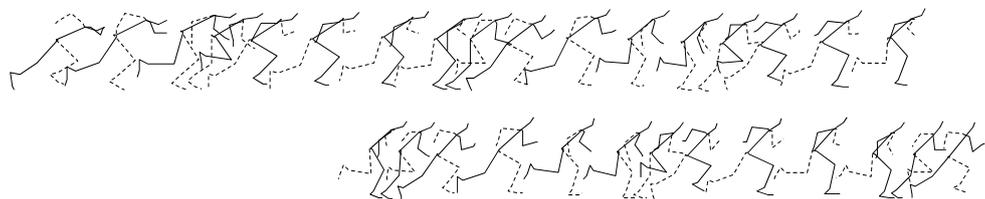
塚原直貴(第1次予選:10秒20)



V.キャンベル(準決勝:10秒99)



L.ウィリアムス(決勝:11秒01)



高橋萌木子(第1次予選:11秒98)

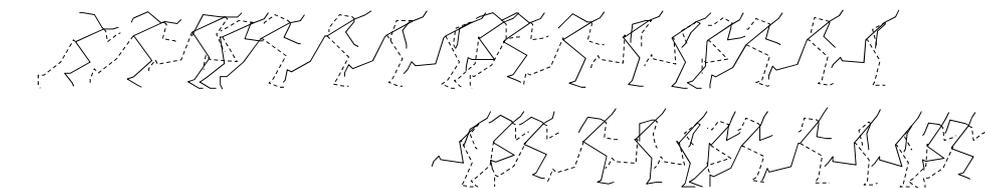


図3 スタートダッシュのスティック・ピクチャー

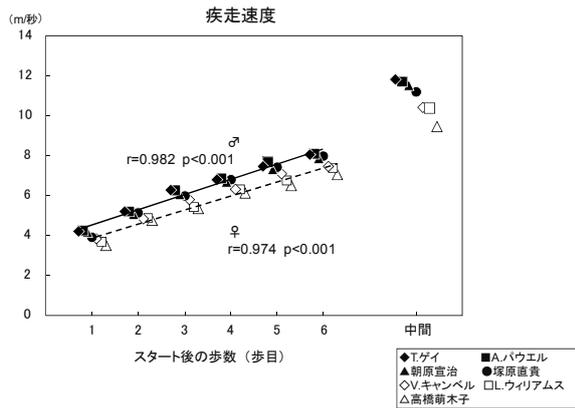


図4 スタート後の歩数と疾走速度の変化

- ② 下肢関節と脚全体の最大角速度: 接地期の股関節 ( $\omega_5$ ), 膝関節 ( $\omega_6$ ), 足関節 ( $\omega_7$ ) の最大伸展速度 (本研究では足関節の底屈を伸展と呼ぶこととした) および脚全体の最大後方スイング速度 ( $\omega_8$ ).
- ③ 下肢分節角度: 大腿角度は膝関節を中心とした大腿と鉛直線とのなす角度 ( $\theta_{11}$ ,  $\theta_{13}$ ). 下腿角度は足関節を中心とした下腿と鉛直線とのなす角度 ( $\theta_{12}$ ,  $\theta_{14}$ ). いずれも接地の瞬間および離地の瞬間の角度を求め, 鉛直線より前方をプラス, 後方をマイナスとした.
- ④ 下肢分節最大角速度: 接地期における大腿 ( $\omega_9$ ) と下腿 ( $\omega_{10}$ ) の最大角速度.

以上の項目について, ストライド, ピッチおよび歩隔はスタート後の歩数に伴う変化を調べ, 疾走動作は, スタート後の疾走速度との関係を調べた.

### 3. 結果

#### 3.1 スティック・ピクチャー

図3に本研究の対象である7名の選手のスタート6歩目までのスティック・ピクチャーを示し, 以下の分析を進めた.

#### 3.2 疾走速度, ストライド, ピッチ, 歩隔

スタート後の疾走速度は, 歩数がすすむにつれて有意に増加した ( $p<0.001$ ; 図4, 表2). 男子選手も女子選手も歩数とともに直線的に増加した. 個人ではゲイ, パウエルはともにスタート1歩目から中間疾走まで他の選手よりも高い速度であった.

ストライドにはどの選手も同じような変化傾向がみられ, スタート1歩目から2歩目で著しく増加し, その後は徐々に増加した(図5左, 表3). ストライドは男子選手のほうが女子選手よりも大きな値を示した.

ピッチの値には男女の違いはみられず, どの選手も1歩目から2歩目あたりまで増加し, その

表2 疾走速度

被験者名	単位:m/秒						中間疾走
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	
T.ゲイ	4.20	5.21	6.29	6.80	7.46	8.05	11.82
A.パウエル	4.26	5.22	6.29	6.89	7.68	8.08	11.72
朝原宣治	4.17	5.06	6.04	6.70	7.31	7.86	11.52
塚原直貴	3.92	5.14	5.98	6.79	7.41	7.99	11.19
V.キャンベル	3.84	4.86	5.81	6.32	7.08	7.48	10.43
L.ウィリアムス	3.68	4.89	5.44	6.30	6.77	7.40	10.37
高橋萌木子	3.50	4.76	5.35	6.13	6.51	7.07	9.46

後は中間疾走までほぼ一定の値を保った(図5右, 表4).

スタート後, 1から2歩目の歩隔は  $0.35\pm 0.08\text{m}$  であったが, 歩数とともに減少し, 5から6歩目では  $0.28\pm 0.05\text{m}$  ( $p<0.05$ ; 図6, 表5), 中間疾走では  $0.13\pm 0.04\text{m}$  となった.

#### 3.3 スタート後の疾走速度とスイング脚動作の関係

##### 1) もも上げ動作

スタート後, 疾走速度の増加にともないもも上げ角度は有意に増加した ( $p<0.01$ ; 図7上, 表6). また, もも上げ速度もスタート後有意に増加した ( $p<0.05$ ; 図8左上, 表7). 全選手の中で塚原はもも上げの角度, 速度ともに他の選手よりも比較的高い値を示した.

##### 2) 引きつけ動作

スタートダッシュ時の膝の引きつけ角度は, 疾走速度の増加にともない有意に減少した ( $p<0.01$ ; 図7中, 表8). その値は, 男子選手が女子選手よりも大きかった. 引きつけ速度は疾走速度の増加に伴う変化は見られなかった(図8右上, 表9).

##### 3) 振り出し動作

スタート1歩目の振り出し角度は-4.86度から4.12度の範囲にあり, その後は中間疾走まで有意に増加した ( $p<0.001$ ; 図7下, 表10). 振り出し速度は疾走速度の増加にともない有意に増加した (男女ともに  $p<0.001$ ; 図8左下, 表11) が, 同一疾走速度での振り出し速度は女子選手のほうが男子選手よりも高かった.

##### 4) 振り戻し動作

接地直前の脚全体の振り戻し速度は, 全選手に共通した傾向がみられ, スタートから中間疾走まで, 疾走速度の増加にともなって有意に増加した ( $p<0.001$ ; 図8右下, 表12).

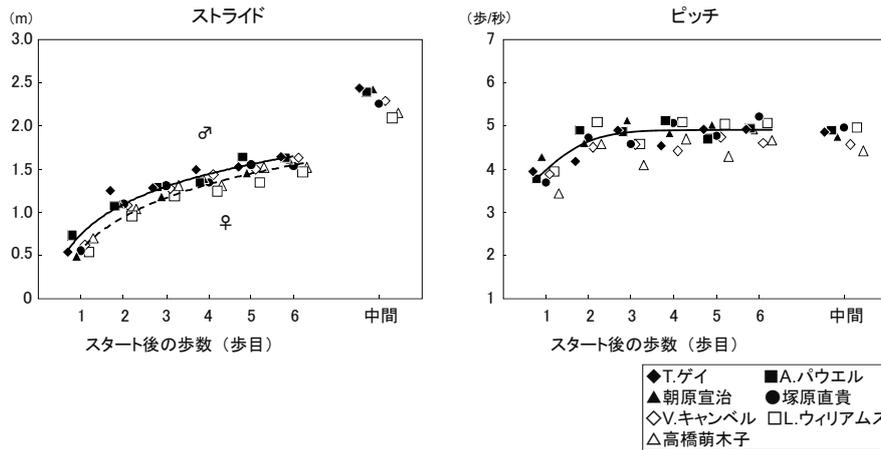


図5 スタート後の歩数とストライド (左), ピッチ (右) の変化

表3 ストライド

被験者名	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	0.54	1.25	1.28	1.50	1.52	1.64	2.43
A.パウエル	0.73	1.07	1.29	1.35	1.64	1.63	2.39
朝原宣治	0.49	1.10	1.18	1.39	1.46	1.61	2.42
塚原直貴	0.56	1.09	1.31	1.34	1.55	1.53	2.26
V.キャンベル	0.62	1.08	1.27	1.43	1.49	1.63	2.29
L.ウィリアムス	0.54	0.96	1.19	1.24	1.34	1.46	2.09
高橋萌木子	0.70	1.04	1.31	1.31	1.52	1.52	2.14

表4 ピッチ

被験者名	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	3.94	4.16	4.90	4.53	4.90	4.92	4.85
A.パウエル	3.77	4.89	4.86	5.11	4.69	4.94	4.85
朝原宣治	4.28	4.59	5.14	4.82	5.01	4.89	4.76
塚原直貴	3.69	4.72	4.57	5.06	4.77	5.21	4.96
V.キャンベル	3.88	4.50	4.57	4.42	4.74	4.59	4.55
L.ウィリアムス	3.94	5.09	4.58	5.08	5.04	5.06	4.96
高橋萌木子	3.43	4.58	4.09	4.68	4.29	4.65	4.42

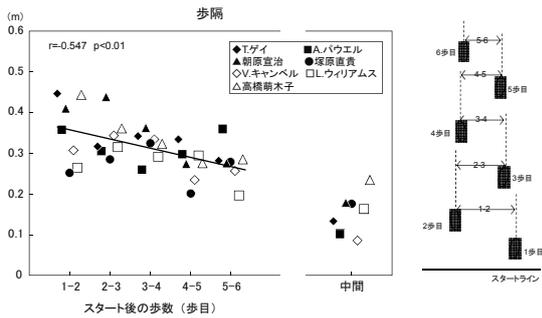


図6 スタート後の歩数と歩隔の変化

表5 歩幅

被験者名	1-2歩	2-3歩	3-4歩	4-5歩	5-6歩	中間疾走
T.ゲイ	0.45	0.32	0.34	0.33	0.28	0.13
A.パウエル	0.36	0.30	0.26	0.30	0.36	0.10
朝原宣治	0.41	0.44	0.36	0.27	0.27	0.18
塚原直貴	0.25	0.28	0.33	0.20	0.28	0.18
V.キャンベル	0.31	0.34	0.33	0.23	0.26	0.08
L.ウィリアムス	0.27	0.32	0.29	0.29	0.20	0.16
高橋萌木子	0.44	0.36	0.32	0.28	0.28	0.23

表6 もも上げ角度

被験者名	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	60.55	66.68	60.45	64.79	60.77	63.07	70.40
A.パウエル	66.02	72.11	67.09	67.10	65.36	70.92	70.35
朝原宣治	60.70	62.25	68.64	61.43	71.91	72.84	77.01
塚原直貴	68.87	73.55	76.84	76.16	74.74	78.75	78.59
V.キャンベル	61.99	66.09	66.44	72.20	70.04	71.78	65.44
L.ウィリアムス	64.19	61.35	68.78	60.17	65.05	61.74	61.10
高橋萌木子	56.08	56.96	62.54	66.60	65.65	68.76	67.84

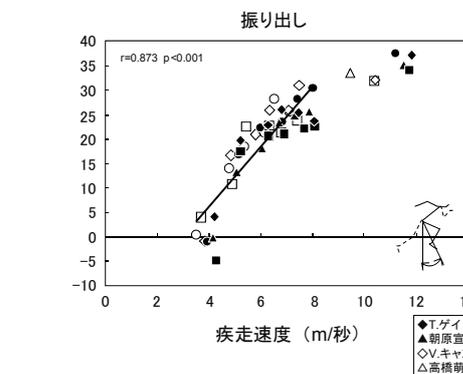
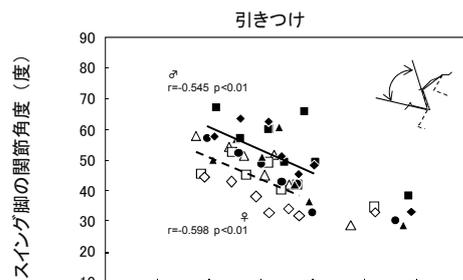
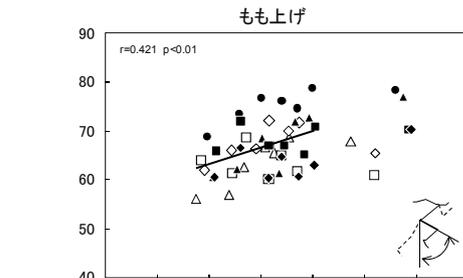


図7 スタート後の疾走速度とスイング脚動作との関係

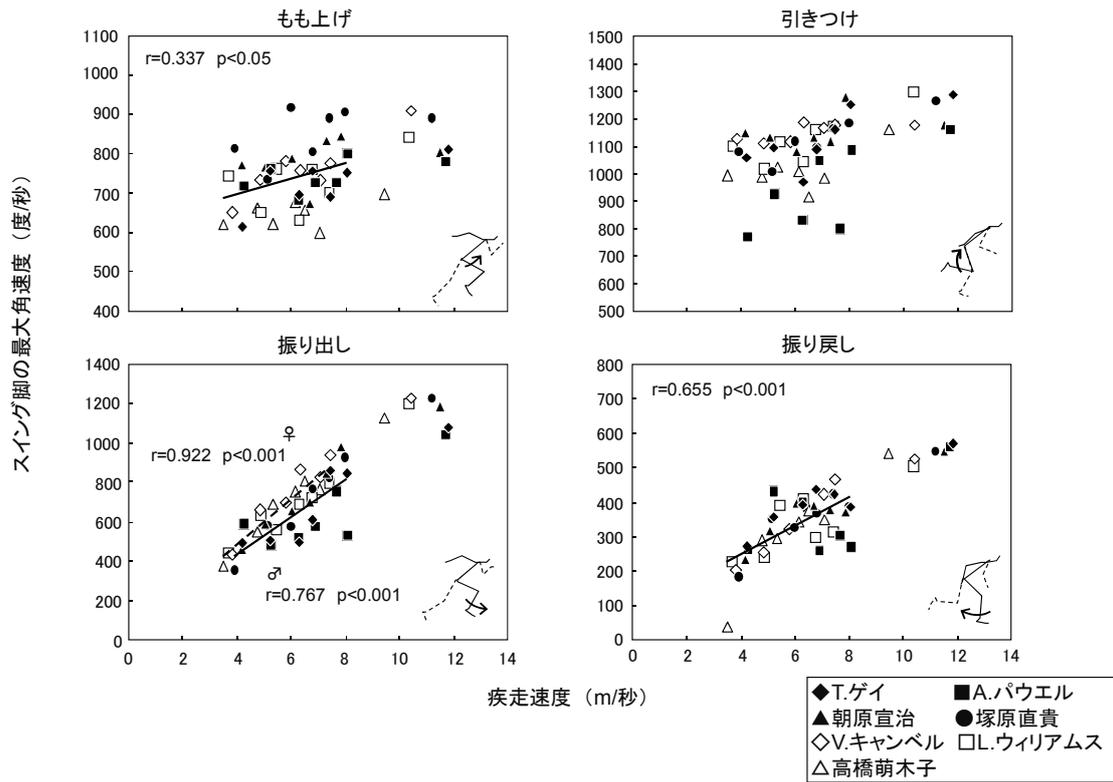


図 8 スタート後の疾走速度とスイング脚の最大角速度との関係

表 7 もも上げ速度

被験者名	単位:度/秒						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	613.51	755.82	695.04	756.65	689.53	753.24	811.09
A.パウエル	717.25	761.68	682.05	727.73	726.65	801.41	780.25
朝原宣治	772.98	766.30	789.66	673.12	833.25	844.66	804.28
塚原直貴	813.27	736.95	919.07	806.82	891.84	906.31	891.08
V.キャンベル	651.65	734.46	781.50	758.89	732.96	777.29	910.52
L.ウィリアムス	743.32	650.80	761.88	631.30	759.63	702.98	843.02
高橋萌木子	619.36	662.28	622.30	677.94	656.02	599.11	696.54

表 8 引きつけ角度

被験者名	単位:度						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	57.70	63.64	62.64	51.09	45.53	48.27	32.94
A.パウエル	67.22	57.12	60.02	49.45	65.85	49.40	38.40
朝原宣治	50.12	56.86	50.93	60.89	42.02	36.33	28.67
塚原直貴	57.03	52.23	48.75	42.94	42.21	32.96	30.17
V.キャンベル	44.32	42.83	38.03	32.75	34.03	31.71	32.90
L.ウィリアムス	45.52	52.68	45.25	49.29	40.41	41.94	34.63
高橋萌木子	57.93	54.28	51.38	45.10	51.72	42.07	28.88

表 9 引きつけ速度

被験者名	単位:度/秒						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	1055.83	1093.06	970.76	1087.55	1159.66	1248.37	1286.72
A.パウエル	772.06	924.56	830.73	1046.93	800.91	1084.49	1159.83
朝原宣治	1148.00	1133.21	1081.03	1133.45	1118.64	1278.87	1178.32
塚原直貴	1081.72	1007.86	1117.56	1096.04	1163.20	1183.83	1264.82
V.キャンベル	1126.12	1108.24	1115.41	1185.94	1164.86	1176.27	1175.37
L.ウィリアムス	1099.81	1018.18	1115.62	1043.61	1158.57	1172.37	1295.78
高橋萌木子	992.22	987.99	1022.31	1006.25	914.74	983.19	1158.89

表 10 振り出し角度

被験者名	単位:度						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	4.12	19.63	22.87	26.03	25.36	23.63	37.15
A.パウエル	-4.86	17.46	20.55	21.02	22.10	22.49	34.10
朝原宣治	-0.14	13.21	18.12	23.41	24.68	25.63	35.07
塚原直貴	-0.97	16.88	22.30	23.47	28.20	30.43	37.43
V.キャンベル	-0.93	16.64	20.81	25.91	25.90	30.88	32.04
L.ウィリアムス	3.98	10.76	22.42	22.78	21.37	23.71	31.88
高橋萌木子	0.44	13.98	18.45	21.24	28.28	25.66	33.45

表 11 振り出し速度

被験者名	単位:度/秒						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	491.22	506.09	496.22	609.28	859.68	844.62	1079.47
A.パウエル	590.68	484.84	520.63	575.68	754.60	533.20	1040.95
朝原宣治	463.24	588.15	654.01	696.74	845.27	977.53	1186.07
塚原直貴	355.80	584.52	576.85	768.63	824.24	927.78	1228.06
V.キャンベル	431.58	662.96	697.36	865.85	829.01	936.75	1224.55
L.ウィリアムス	443.88	630.11	559.63	689.83	724.41	794.40	1201.07
高橋萌木子	372.70	549.71	690.16	752.92	804.52	764.98	1128.38

表 12 振り戻し速度

被験者名	単位:度/秒						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	272.70	357.74	391.70	437.21	422.55	385.40	569.58
A.パウエル	261.13	430.30	398.50	260.43	303.03	269.62	561.46
朝原宣治	232.86	315.57	396.14	391.15	378.06	370.84	545.89
塚原直貴	184.14	352.65	328.06	367.95	424.83	388.87	546.63
V.キャンベル	203.52	253.46	320.65	390.25	422.45	466.90	525.88
L.ウィリアムス	227.18	238.95	391.26	409.91	298.00	312.30	504.37
高橋萌木子	37.10	290.18	294.32	342.54	376.59	347.85	539.53

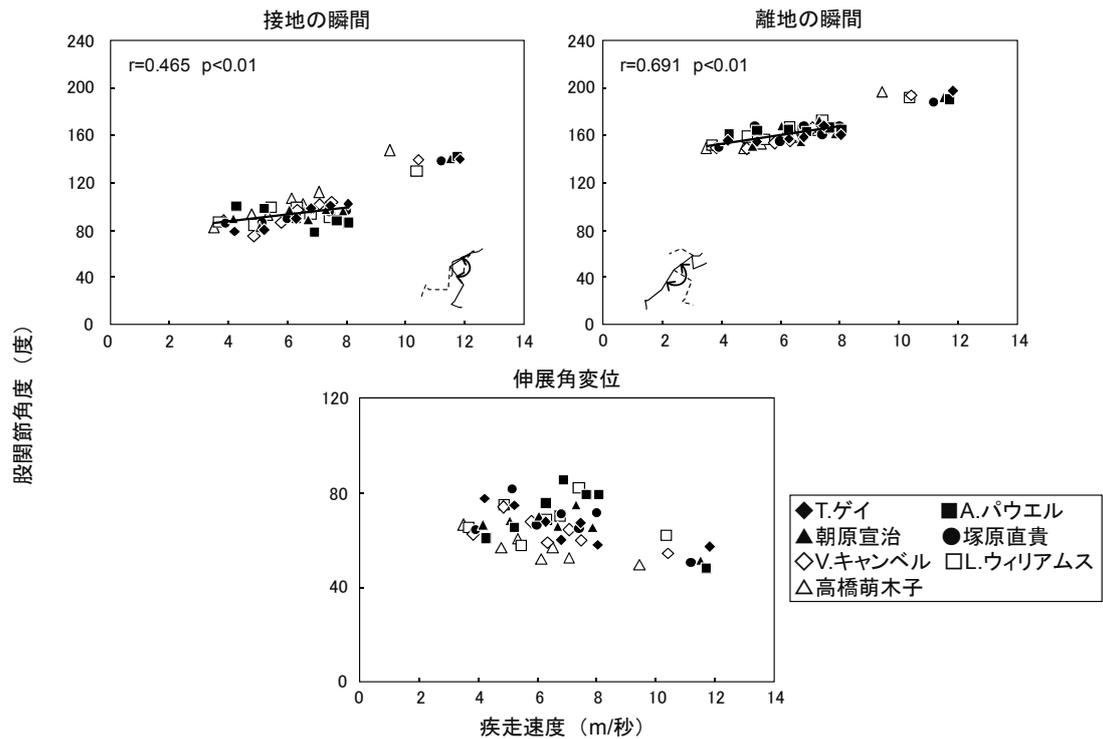


図9 スタート後の疾走速度と股関節動作との関係

表13 股関節角度

単位:度

被験者名	1歩目		2歩目		3歩目		4歩目		5歩目		6歩目		中間疾走	
	接地	離地	接地	離地	接地	離地	接地	離地	接地	離地	接地	離地	接地	離地
T.ゲイ	78.45	155.94	79.64	154.35	89.29	156.89	98.15	158.22	100.88	167.99	102.24	160.04	140.26	197.63
A.パウエル	100.11	160.94	98.40	163.76	88.98	164.63	77.88	163.23	87.44	166.68	86.36	165.46	142.67	190.87
朝原宣治	89.34	155.88	82.45	150.73	97.10	167.50	88.97	154.72	97.66	172.75	96.24	161.52	140.71	192.40
塚原直貴	85.35	149.77	86.02	167.70	88.98	155.35	96.75	167.73	95.75	160.69	96.43	168.00	137.75	188.07
V.キャンベル	87.29	149.60	74.58	148.58	86.14	153.97	96.58	155.42	101.39	165.63	103.06	162.85	139.11	193.55
L.ウィリアムス	86.82	151.99	84.02	159.15	98.93	156.55	98.49	167.11	93.76	163.81	90.36	172.46	129.69	191.90
高橋萌木子	82.52	149.15	93.02	149.54	92.54	153.06	107.09	158.97	102.15	159.17	111.93	164.63	147.77	197.07

表14 股関節角変位

単位:度

被験者名	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	77.49	74.71	67.60	60.08	67.11	57.80	57.37
A.パウエル	60.83	65.36	75.65	85.35	79.25	79.11	48.20
朝原宣治	66.54	68.28	70.40	65.75	75.10	65.28	51.69
塚原直貴	64.42	81.68	66.38	70.99	64.94	71.57	50.32
V.キャンベル	62.31	74.01	67.82	58.85	64.24	59.79	54.44
L.ウィリアムス	65.18	75.13	57.61	68.62	70.05	82.10	62.21
高橋萌木子	66.63	56.52	60.53	51.88	57.02	52.70	49.30

### 3.4 スタート後の疾走速度とキック脚動作の関係

#### 1) 下肢関節角度および角変位

##### ①股関節

股関節では伸展動作だけがみられ、接地の瞬間および離地の瞬間の角度は疾走速度の増加にと

もなつて有意に増加した(接地時、離地時ともに  $p<0.01$ ; 図9上、表13)。また、伸展角変位は選手間でばらつきが大きく一定の傾向は見られなかったが、スタートダッシュでは中間疾走時よりもやや大きな角変位であった(図9下、表14)。

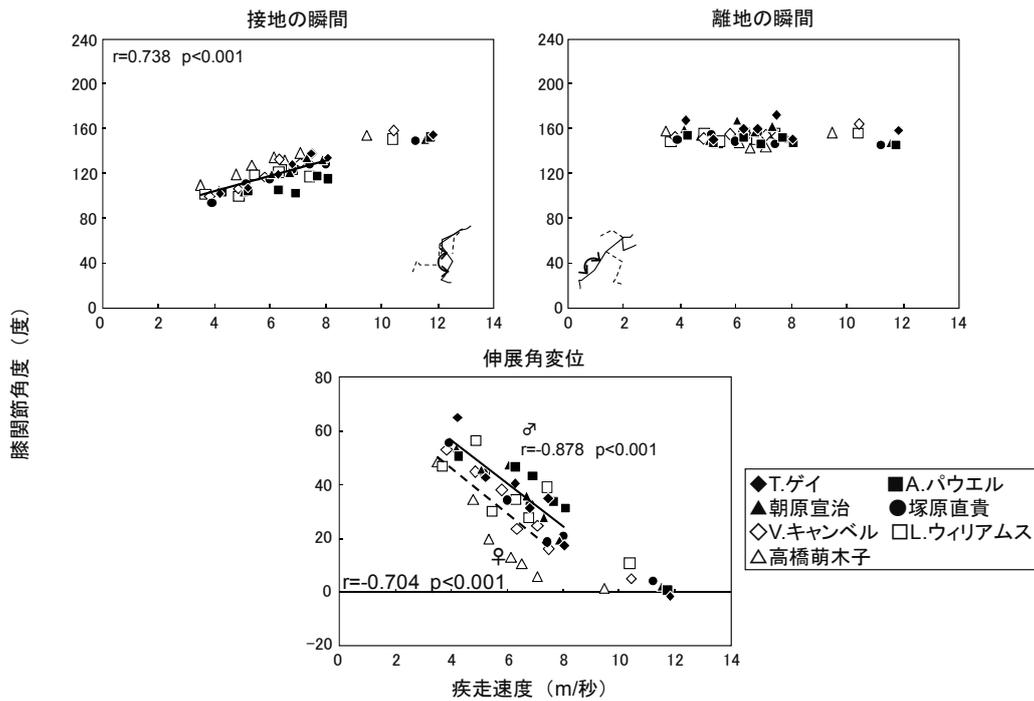


図 10 スタート後の疾走速度と膝関節動作との関係

表 15 膝関節角度

被験者名	1歩目		2歩目		3歩目		4歩目		5歩目		6歩目		中間疾走		
	接地	離地	最小値	離地											
T.ゲイ	102.15	167.08	107.03	149.96	119.17	159.68	127.86	159.30	137.42	172.26	133.41	150.93	154.44	159.80	158.14
A.パウエル	103.00	153.64	104.52	147.71	105.01	151.88	102.71	146.10	117.84	151.73	115.17	146.67	152.35	144.16	144.94
朝原宣治	105.75	159.31	103.94	149.72	119.38	166.98	121.16	157.00	133.76	161.86	132.18	151.53	150.32	144.73	147.13
塚原直貴	94.03	149.78	110.85	155.23	114.65	149.00	123.54	156.50	127.70	146.38	128.67	149.49	149.68	140.98	145.23
V.キャンベル	99.45	152.43	106.54	151.34	116.79	154.94	132.31	155.87	129.10	154.03	137.17	153.28	158.47	158.95	164.09
L.ウィリアムス	101.49	148.46	99.60	156.04	118.63	148.67	120.96	155.52	123.18	150.83	116.86	156.08	150.72	144.94	155.77
高橋萌木子	109.31	157.99	119.35	153.87	126.99	146.81	134.11	147.22	131.84	142.40	138.02	143.92	153.98	154.99	156.39

表 16 膝関節伸展角変位

被験者名	単位:度						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	64.93	42.93	40.51	31.44	34.83	17.52	-1.65
A.パウエル	50.64	43.19	46.87	43.39	33.90	31.50	0.78
朝原宣治	53.55	45.78	47.61	35.85	28.10	19.35	2.40
塚原直貴	55.75	44.38	34.35	32.96	18.68	20.82	4.25
V.キャンベル	52.98	44.80	38.15	23.56	24.93	16.12	5.15
L.ウィリアムス	46.96	56.44	30.05	34.56	27.65	39.22	10.83
高橋萌木子	48.68	34.51	19.82	13.11	10.56	5.90	1.40

マイナスは屈曲を示す

## ②膝関節

スタートダッシュでは全ての選手において屈曲角変位がみられなかった。接地の瞬間の角度はスタート後の疾走速度の増加にともない有意に増加した ( $p<0.001$ ; 図 10 左上, 表 15)。離地の瞬間の角度はスタートから中間疾走までほとん

ど変化しなかった (図 10 右上, 表 15)。伸展角変位は、スタート 1 歩目が最も大きく ( $53.36\pm 5.92$  度)、その後、中間疾走まで有意に減少した ( $p<0.001$ ; 図 10 下, 表 16)。個人では、パウエルの伸展角変位がスタート 4 歩目以降他の選手よりやや大きく、高橋が小さい傾向がみられた。

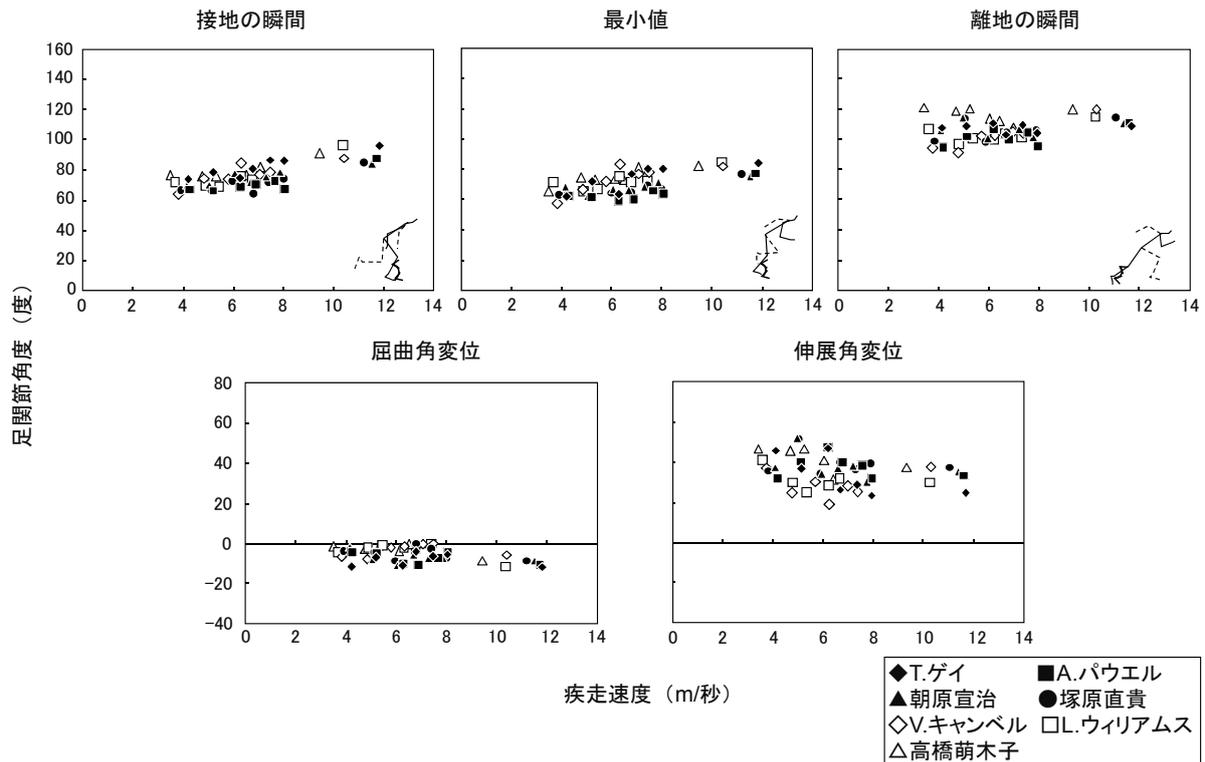


図 11 スタート後の疾走速度と足関節動作との関係

表 17 足関節角度

被験者名	1歩目		2歩目		3歩目		4歩目		5歩目		6歩目		中間疾走								
	接地	最小値	離地	接地	最小値																
T.ゲイ	73.69	62.08	106.99	78.72	71.87	107.78	74.84	63.92	109.91	80.96	76.77	101.98	86.55	80.53	108.41	86.14	80.69	103.18	95.78	83.96	108.07
A.パウエル	67.00	62.36	93.65	66.47	61.46	100.89	69.41	59.26	106.17	70.48	59.84	98.84	73.02	65.86	103.42	67.67	63.57	94.53	87.91	77.30	109.72
朝原宣治	70.23	68.43	104.99	70.12	62.32	113.65	77.65	66.66	99.97	71.92	66.10	102.49	75.70	68.47	105.79	78.34	71.39	100.65	84.24	75.51	109.94
塚原直貴	66.67	63.13	97.89	66.18	61.53	112.56	72.88	64.08	97.50	64.50	64.41	103.64	72.18	69.63	105.46	74.12	66.88	105.39	85.35	76.81	113.52
V.キャンベル	63.66	57.24	93.49	74.09	66.32	90.18	74.04	72.06	101.32	84.72	83.49	101.83	77.00	76.66	104.10	78.49	78.28	103.01	87.72	82.07	119.06
L.ウィリアムス	72.17	71.55	106.07	69.81	65.63	95.91	68.88	66.96	99.62	76.13	75.53	99.23	73.97	71.60	103.12	74.94	72.29	100.68	96.34	84.94	113.88
高橋萌木子	76.84	65.39	120.30	75.99	74.57	117.86	75.84	72.91	119.35	74.43	73.57	112.88	76.39	72.79	111.57	81.89	81.42	107.34	91.12	82.35	119.08

表 18 足関節角変位

被験者名	屈曲角変位							伸展角変位						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	11.61	6.85	10.92	4.19	6.01	5.45	11.83	44.91	35.91	45.99	25.21	27.87	22.49	24.11
A.パウエル	4.64	5.01	10.15	10.64	7.16	4.10	10.62	31.29	39.44	46.91	39.00	37.56	30.95	32.42
朝原宣治	1.80	7.80	11.00	5.81	7.23	6.95	8.73	36.56	51.33	33.31	36.39	37.32	29.26	34.42
塚原直貴	3.54	4.64	8.80	0.09	2.55	7.24	8.54	34.76	51.03	33.43	39.22	35.83	38.51	36.71
V.キャンベル	6.41	7.77	1.98	1.23	0.33	0.21	5.65	36.25	23.86	29.26	18.34	27.43	24.73	36.98
L.ウィリアムス	0.62	4.18	1.92	0.60	2.37	2.66	11.40	34.52	30.28	32.66	23.70	31.52	28.39	28.94
高橋萌木子	11.45	1.42	2.93	0.85	3.60	0.46	8.78	54.91	43.29	46.44	39.30	38.79	25.92	36.73

### ③足関節

接地の瞬間とその後の最小値、離地の瞬間のいずれも疾走速度の増加にともなう変化は見られず、ほぼ一定の値を示した(図 11 上段, 表 17)。その結果、接地期前半の屈曲角変位と後半の伸展角変位は、全ての選手においてスタートから中間疾走までほとんど変化しなかった(図 11 下段, 表 18)。

### 2) 下肢関節の最大伸展速度

#### ①股関節

すべての選手において伸展速度は疾走速度の増加にともない有意に増加し ( $p < 0.001$ ; 図 12 左上, 表 19), 同一疾走速度での伸展速度に男女差はみられなかった。

#### ②膝関節

伸展速度はスタート後の疾走速度の増加にと

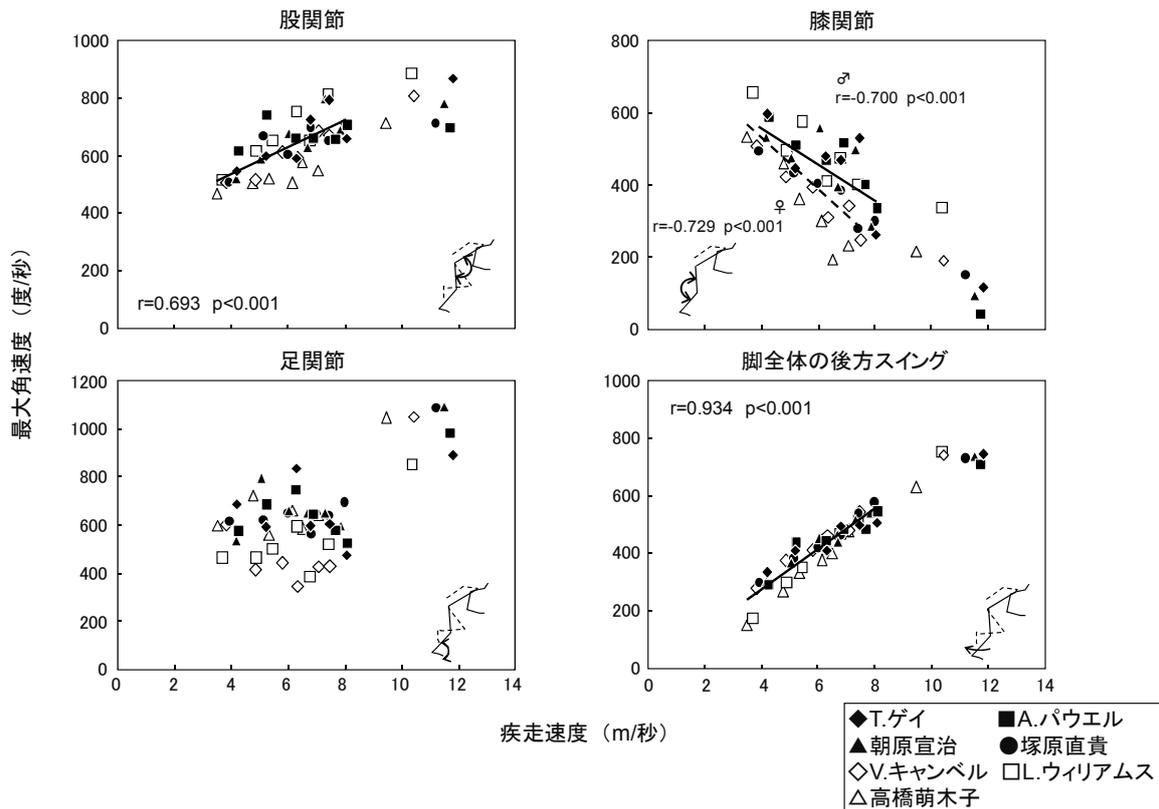


図 12 スタート後の疾走速度とキック脚の最大角速度との関係

表 19 股関節最大伸展速度

被験者名	単位:度/秒						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	546.01	599.99	590.33	726.23	795.49	658.46	867.90
A.パウエル	616.50	740.73	658.99	660.52	655.81	706.70	697.06
朝原宣治	519.44	590.54	678.51	627.86	795.75	689.15	781.90
塚原直貴	509.03	668.56	603.54	698.35	652.78	711.88	712.62
V.キャンベル	506.44	517.14	611.60	593.65	685.58	669.95	808.52
L.ウィリアムス	517.53	617.87	651.35	751.21	655.03	811.96	887.32
高橋萌木子	470.20	503.64	519.71	506.68	577.03	548.61	713.12

表 20 膝関節最大伸展速度

被験者名	単位:度/秒						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	597.21	445.96	478.89	469.25	528.93	261.48	116.30
A.パウエル	586.81	510.22	469.11	517.48	400.18	334.92	41.63
朝原宣治	532.63	475.26	557.62	393.73	497.94	285.24	93.78
塚原直貴	493.42	432.98	404.73	383.40	278.63	299.22	149.67
V.キャンベル	506.36	422.22	392.54	310.26	341.78	246.34	190.84
L.ウィリアムス	656.41	496.35	577.00	409.11	475.68	401.64	336.76
高橋萌木子	532.54	457.14	361.08	299.22	191.38	230.01	214.74

表 21 足関節最大伸展速度

被験者名	単位:度/秒						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	687.46	592.89	836.58	597.87	605.42	475.91	893.63
A.パウエル	576.52	686.36	746.70	645.98	577.98	526.56	981.31
朝原宣治	533.71	799.43	662.23	650.61	651.66	598.73	1092.10
塚原直貴	615.86	623.95	651.86	565.02	638.25	697.32	1087.76
V.キャンベル	602.61	416.03	443.81	345.54	427.50	431.16	1052.73
L.ウィリアムス	464.69	464.75	503.38	596.43	387.20	520.70	850.47
高橋萌木子	598.32	722.56	560.65	661.03	586.27	640.22	1049.02

表 22 脚全体後方スイング速度

被験者名	単位:度/秒						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	336.40	407.79	410.15	493.51	499.39	506.82	745.30
A.パウエル	290.67	438.54	443.89	484.43	481.55	547.47	709.02
朝原宣治	303.05	366.44	454.77	439.52	518.33	542.06	736.89
塚原直貴	298.16	383.69	422.13	463.74	541.15	578.18	731.17
V.キャンベル	279.99	373.91	412.14	461.73	480.40	543.25	740.47
L.ウィリアムス	173.08	299.48	351.81	445.48	466.97	517.16	752.84
高橋萌木子	151.40	268.55	333.11	376.06	398.85	474.21	630.62

もない有意に減少した ( $p<0.001$ ; 図 12 右上, 表 20). 同一疾走速度に対する伸展速度は男子選手が女子選手よりも高かった.

### ③足関節

伸展速度はスタート後の疾走速度の変化にともなう一定の傾向は見られなかったが, 男子選手のほうが女子選手よりもやや高い値を示した. ス

タート時の足関節伸展速度は中間疾走よりも低いものであった (図 12 左下, 表 21).

### ④脚全体の後方スイング速度

スイング速度はスタートから中間疾走にかけて, 疾走速度の増加にともない有意に増加し ( $p<0.001$ ; 図 12 右下, 表 22), 同一走速度でのスイング速度にも男女差はみられなかった.

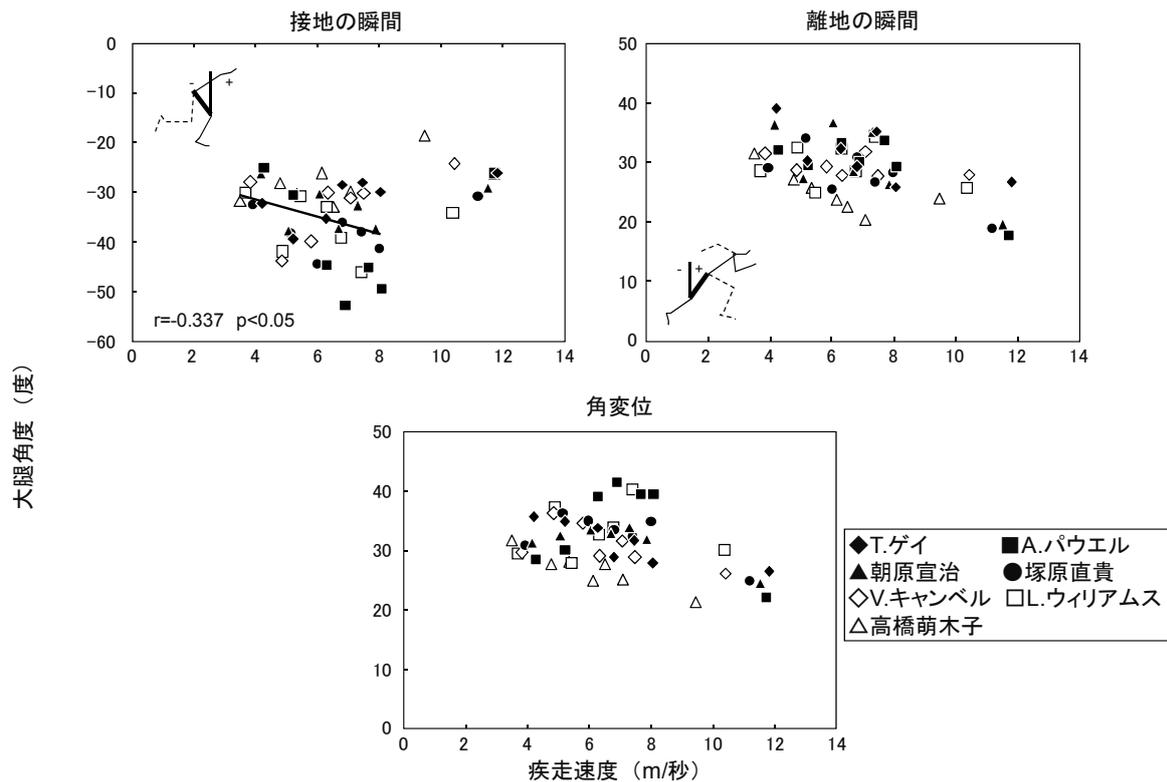


図 13 スタート後の疾走速度と大腿の動作との関係

表 23 大腿角度

被験者名	単位:度													
	1歩目		2歩目		3歩目		4歩目		5歩目		6歩目		中間疾走	
	接地	離地												
T.ゲイ	-32.23	39.10	-39.37	30.40	-35.34	32.31	-28.52	29.34	-28.00	35.25	-29.90	25.84	-26.17	26.81
A.パウエル	-24.98	32.03	-30.54	29.60	-44.71	33.31	-52.82	30.07	-45.20	33.63	-49.54	29.30	-26.13	17.83
朝原宣治	-26.21	36.41	-37.75	27.27	-30.24	36.65	-37.16	28.47	-32.56	35.28	-37.29	26.43	-29.12	19.70
塚原直貴	-32.39	29.22	-38.29	34.22	-44.48	25.43	-36.06	30.93	-37.92	26.83	-41.32	28.31	-30.66	19.00
V.キャンベル	-27.84	31.53	-43.84	28.72	-39.88	29.28	-30.15	27.89	-31.15	31.79	-30.18	27.66	-24.26	27.91
L.ウィリアムス	-30.11	28.64	-41.95	32.50	-30.78	24.96	-32.92	32.35	-39.32	28.54	-46.14	34.42	-34.27	25.79
高橋萌木子	-31.85	31.49	-28.19	27.18	-30.35	25.74	-26.14	23.71	-32.87	22.61	-29.80	20.30	-18.54	23.82

表 24 大腿角変位

被験者名	単位:度						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	71.34	69.77	67.65	57.86	63.25	55.74	52.98
A.パウエル	57.01	60.14	78.02	82.89	78.82	78.84	43.96
朝原宣治	62.62	65.03	66.89	65.64	67.84	63.72	48.82
塚原直貴	61.61	72.51	69.91	66.99	64.75	69.63	49.66
V.キャンベル	59.37	72.56	69.16	58.03	62.93	57.84	52.17
L.ウィリアムス	58.74	74.46	55.74	65.27	67.86	80.55	60.05
高橋萌木子	63.34	55.38	56.09	49.85	55.48	50.10	42.36

3) 下肢分節角度および角変位

①大腿

接地の瞬間の角度は、すべての選手においてマイナスの値（大腿が後傾した状態）であり、スタート後の疾走速度の増加にともない減少する傾向がみられた ( $p<0.01$ ; 図 13 左上, 表 23). 離地

の瞬間の角度は、疾走速度の増加に対してほとんどの選手はほぼ一定の値を示したが、高橋は減少する傾向を示した (図 13 右上). 伸展角変位は、スタート時のほうが中間疾走時よりもやや大きくなる傾向が観察された (図 13 下, 表 24).

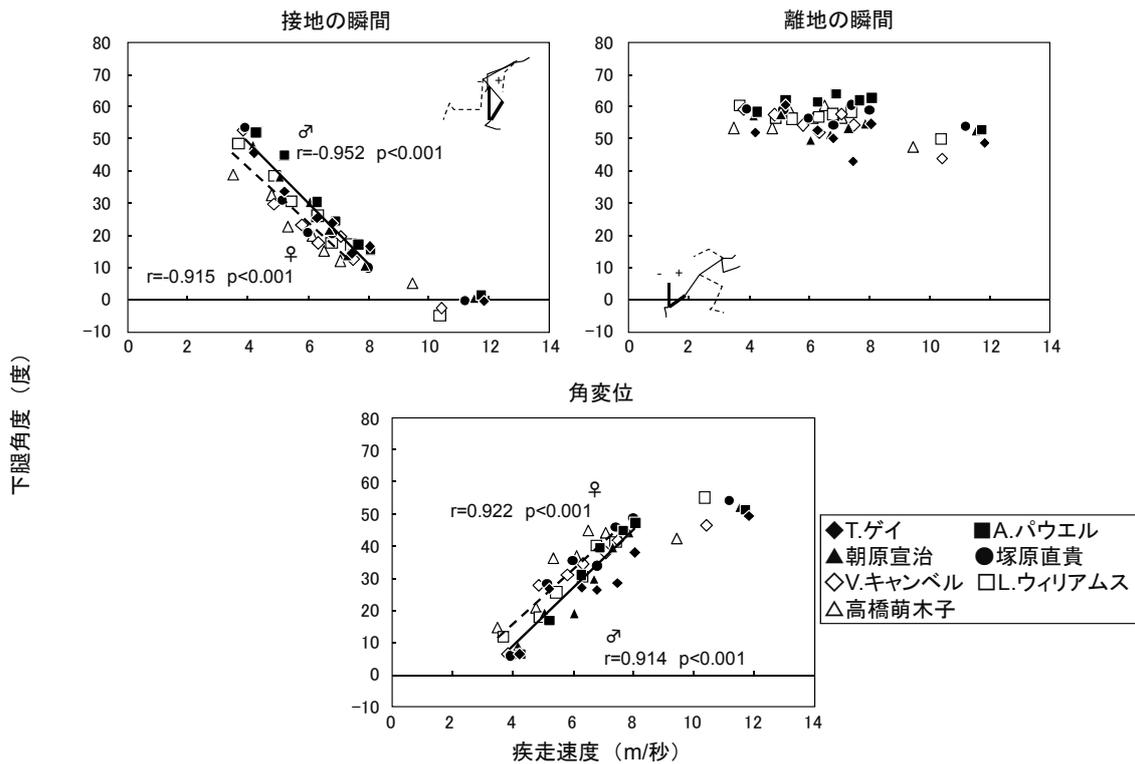


図 14 スタート後の疾走速度と下腿の動作との関係

表 25 下腿角度

被験者名	1歩目		2歩目		3歩目		4歩目		5歩目		6歩目		中間疾走	
	接地	離地												
T.ゲイ	45.62	52.03	33.59	60.44	25.49	52.63	23.62	50.03	14.58	42.99	16.70	54.65	-0.61	48.67
A.パウエル	52.02	58.40	44.95	61.89	30.28	61.43	24.47	63.97	16.97	61.89	15.29	62.63	1.52	52.89
朝原宣治	48.04	57.11	38.30	57.55	30.38	49.67	21.68	51.47	13.68	53.42	10.53	54.90	0.56	52.57
塚原直貴	53.58	59.44	30.86	58.99	20.87	56.43	20.40	54.43	14.38	60.46	10.00	58.82	-0.35	53.77
V.キャンベル	52.71	59.10	29.62	57.38	23.33	54.34	17.55	52.02	19.75	57.76	12.65	54.38	-2.73	43.82
L.ウィリアムス	48.40	60.18	38.44	56.46	30.60	56.29	26.12	56.83	17.51	57.71	17.00	58.34	-4.99	50.01
高橋萌木子	38.84	53.49	32.45	53.31	22.66	58.93	19.75	56.49	15.28	60.21	12.18	56.38	4.91	47.43

表 26 下腿角変位

被験者名	単位:度							
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走	
T.ゲイ	6.41	26.84	27.14	26.41	28.42	37.94	49.28	
A.パウエル	6.37	16.94	31.15	39.50	44.92	47.33	51.37	
朝原宣治	9.07	19.25	19.29	29.79	39.74	44.37	52.01	
塚原直貴	5.86	28.13	35.56	34.02	46.08	48.82	54.12	
V.キャンベル	6.38	27.76	31.01	34.47	38.00	41.73	46.54	
L.ウィリアムス	11.78	18.02	25.70	30.71	40.20	41.34	55.00	
高橋萌木子	14.66	20.86	36.27	36.74	44.92	44.20	42.52	

②下腿

接地の瞬間の角度は疾走速度の増加にともない有意に減少 ( $p<0.001$ ; 図 14 左上, 表 25) した。離地時の角度は疾走速度の増加にともなう変化はみられず, スタートから中間疾走までほぼ一定の値を示した。つまり, 接地期において下腿は前

方へ傾き, その角変位はスタート 1 歩目が最も小さく ( $8.65\pm 3.40$  度), スタートから中間疾走まで疾走速度の増加にともない有意に増加した ( $p<0.001$ ; 図 14 下, 表 26)。

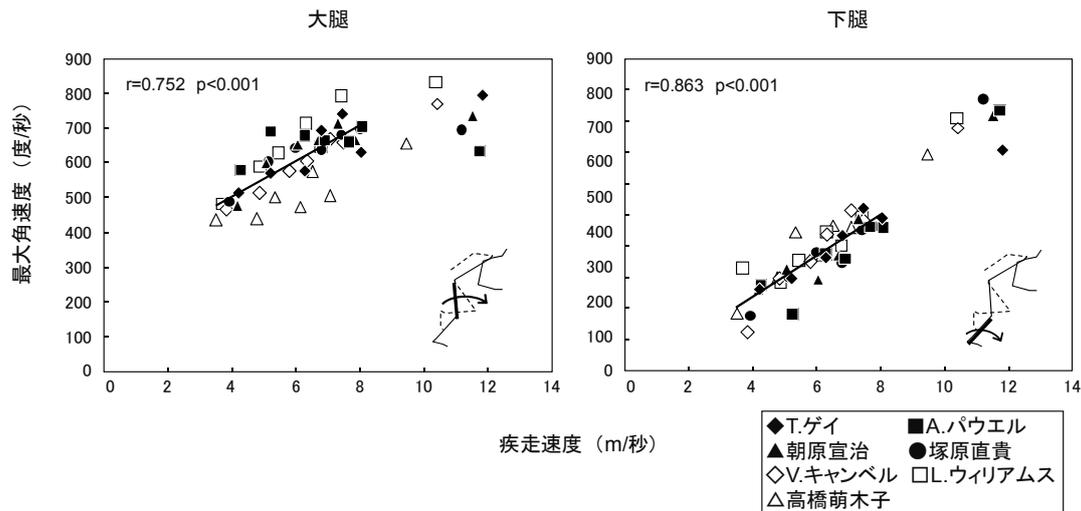


図 15 スタート後の疾走速度と大腿（左）、および下腿（右）の最大速度との関係

表 27 大腿速度

被験者名	単位:度/秒						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	513.76	570.43	576.46	693.37	741.66	631.62	794.92
A.パウエル	580.40	690.88	678.26	665.39	660.94	705.73	634.18
朝原宣治	477.84	597.84	652.27	665.63	714.65	665.34	736.20
塚原直貴	488.01	604.17	644.10	637.88	681.00	697.10	695.68
V.キャンベル	467.41	513.40	576.69	606.21	668.00	659.24	770.12
L.ウィリアムス	481.69	589.50	629.78	714.17	645.49	793.03	833.32
高橋萌木子	438.07	439.99	500.35	472.63	573.89	506.79	654.99

表 28 下腿速度

被験者名	単位:度/秒						
	1歩目	2歩目	3歩目	4歩目	5歩目	6歩目	中間疾走
T.ゲイ	513.76	570.43	576.46	693.37	741.66	631.62	794.92
A.パウエル	580.40	690.88	678.26	665.39	660.94	705.73	634.18
朝原宣治	477.84	597.84	652.27	665.63	714.65	665.34	736.20
塚原直貴	488.01	604.17	644.10	637.88	681.00	697.10	695.68
V.キャンベル	467.41	513.40	576.69	606.21	668.00	659.24	770.12
L.ウィリアムス	481.69	589.50	629.78	714.17	645.49	793.03	833.32
高橋萌木子	438.07	439.99	500.35	472.63	573.89	506.79	654.99

#### 4) 下肢分節の最大角速度

##### ①大腿

速度は、ほとんどの選手がスタート後の疾走速度の増加にともない有意に増加し ( $p<0.001$ ; 図 15 左, 表 27), スタート後 6 歩目では中間疾走時とほぼ同じ値になった。しかし、パウエルは、スタート 1 歩目は他の選手より著しく高く、2 歩目以降は中間疾走まで大きな変化はみられなかった。一方、高橋は他の選手よりも低い値であった。

##### ②下腿

すべての選手に同じような傾向がみられ、スタート後の疾走速度の増加にともない有意に増加した ( $p<0.001$ , 図 15 右, 表 28)。また、スタート時の下腿速度は中間疾走時よりも著しく低かった。

## 4. 考察

### 4.1 疾走速度, ストライド, ピッチ, 歩隔について

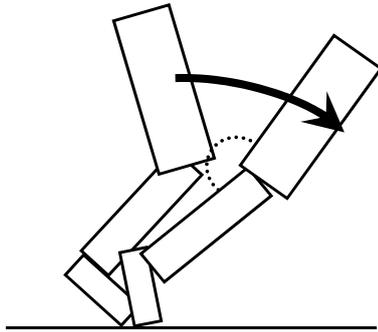
スタート 1 歩ごとの疾走速度は、歩数がすすむにつれて増加していく傾向を示し、男子選手は女子選手よりもスタート 1 歩目から常に疾走速度が高かった。男子選手と女子選手ではピッチに差はなく、ストライドは男子選手のほうが大きな値を示した。つまり、男子選手と女子選手の疾走速度の差は、主にストライドの違いによるものであると言える。

歩隔はスタート 1 歩目が最も大きく ( $0.35\pm 0.08\text{m}$ ), 疾走速度の増加にともない有意に減少した。この傾向は、前回の世界陸上ヘルシンキ大会での測定結果 (伊藤と貴嶋, 2006) と一致しており、スタートでは大きな歩隔をとることが重要であるということを示している。

### 4.2 スイング脚動作について

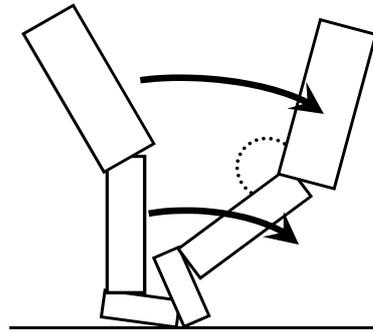
もも上げ動作に関係するもも上げ角度ともも上げ速度は、疾走速度の増加にともない有意に増加した。また、膝の引きつけ動作に関係する引きつけ角度は、疾走速度の増加にともない有意に減少した。もも上げ動作と引きつけ動作に関して、小林と山下 (1990) は、疾走速度が高まると膝の引きつけ角度は小さくなるが、このことは股関節に対する脚の慣性モーメントを減少させ、脚を素早く前方へ移動させる (もも上げ動作を素早く行う) ことに有効であると議論している。しかし、伊藤ら (1998) は、中間疾走時のスイング脚動作について、疾走速度が高い選手ほど膝の引きつけ角度が大きいことを報告している。さらに、福田ら (2008) は、本大会のゲイとパウエルは中間疾走において膝の引きつけ角度が他の選手より大きかったことを報告している。本研究のスタートダッシュでも引きつけ角度は男子選手が女子選手よりも大きかったが、これらの結果は世界一流の男子選手はスタートダッシュから中間疾走ま

スタートダッシュ



下腿はあまり動かず、大腿の前方回転により膝関節を伸展する

中間疾走



大腿も下腿のもどちらも前方回転し、膝関節の伸展が少ない

図 16 スタート（左）と中間疾走（右）のキック動作の特徴（模式図）

で比較的大きな引きつけ角度で疾走していることを示すものであり、小林と山下（1990）の報告とは異なる結果であった。

#### 4.3 キック脚動作について

本研究では、スタート後の疾走速度の増加にともない股関節伸展速度が増加するという結果を得た。伊藤ら（1994）や斉藤ら（1998）は国際競技会出場選手を対象に同様の報告をしている。また、伊藤ら（1997）は、スタートから中間疾走まで、接地期の股関節伸展トルクとパワーの方が膝関節伸展トルクとパワーよりも常に高いことを報告している。さらに、馬場ら（2000）は、接地期の大殿筋と大腿二頭筋の筋・腱複合体の短縮速度が、スタートから中間疾走まで高まることを報告している。つまり、本研究の結果とこれらの報告は、スタートダッシュにおける疾走速度の増加には股関節伸展動作が重要であることを明らかにした。

膝関節の伸展速度は疾走速度の増加にともない有意に減少しており、スタートダッシュでは疾走速度の増加とともに膝関節を伸展させる動作から膝関節の伸展動作を抑えていく動作へと変化した。本研究では、キック中の下肢の関節運動をより詳細に検討するために、下肢を大腿および下腿の分節に分けて分析を行った。その結果、すべての選手について、図 16 の模式図に示すようなスタートダッシュと中間疾走で異なる動作の特徴を示した。すなわち、スタートダッシュでは疾走速度の増加にともない股関節の伸展速度が高まり、大腿は前方へ回転したが、下腿の前方回転はほとんどみられなかった。つまり、本研究の結果はスタートダッシュでは中間疾走と異なり、下腿を固定しての膝伸展動作が脚全体の後方スイング速度の増加に貢献していることを示すものである。

#### 4. まとめ

第 11 回世界陸上競技選手権大会（2007、大阪）の 100m に出場した世界と日本の男女短距離選手のスタートダッシュ動作について動作学的研究を行った結果、次のことが明らかとなった。

1. すべての選手にみられた傾向は、
  - 1) スタート後の速度増加とともにストライドが増加する。
  - 2) スタート後ピッチは 2 歩目あたりまで増加し、その後は一定の値を示す。
  - 3) スタート後の速度増加とともに歩隔は減少する。
  - 4) スタートダッシュでは股関節と膝関節を伸展するキック動作である。
  - 5) 足関節の屈曲および伸展角変位はスタートから中間疾走まで変化しない。
  - 6) スタートダッシュでは下腿をほぼ固定したまま、大腿の前方回転により膝関節を伸展するキック動作である。
2. ゲイとパウエルはスタート直後から日本代表選手や女子選手よりも高い疾走速度を発揮していた。
3. 男子選手は、膝の引きつけが少ないスイング脚動作をしていた。

#### 参考文献

- 馬場崇豪・和田幸洋・伊藤章（2000）短距離走の筋活動様式。体育学研究，45：186-200
- 福田厚治・伊藤章・貴嶋孝太（2008）男子一流スプリンターの疾走動作の特徴-世界陸上東京大会との比較から-。バイオメカニクス研究，2：91-98
- 伊藤章・貴嶋孝太（2006）スタートダッシュから中間疾走までの着地位置の変化-特に歩隔に着目して-。陸上競技研究紀要，2：1-4。

伊藤章・斉藤昌久・淵本隆文（1997）スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー，および筋放電パターンの変化. 体育学研究, 42 : 71-83.

伊藤 章・斉藤昌久・佐川和則・加藤謙一・森田正利・小木曾一之（1994）世界一流スプリンターの技術分析. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス研究班編 世界一流陸上競技者の技術. ベースボール・マガジン社：東京, pp31-49.

小林寛道編・宮下充正監修（1990）走る科学. 大修館書店：東京.

斉藤昌久・伊藤 章・佐川和則・伊藤道郎・加藤謙一・市川博啓（1997）アジア・トップスプリンターのスタートダッシュの動作分析. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス研究班編 アジア一流陸上競技者の技術. 創文企画：東京, pp. 11-31.

# 一流短距離選手の疾走動作の特徴

- 第 11 回世界陸上競技選手権大阪大会出場選手について -

## Characteristics of sprint running movement of elite sprinters: at the 11<sup>th</sup> IAAF World Championships in Athletics, Osaka

福田 厚治<sup>1)</sup> 貴嶋 孝太<sup>1)</sup> 伊藤 章<sup>1)</sup> 堀 尚<sup>1)</sup>  
川端 浩一<sup>1)</sup> 末松 大喜<sup>2)</sup> 大宮 真一<sup>2)</sup> 山田 彩<sup>1)</sup>  
村木 有也<sup>1)</sup> 淵本 隆文<sup>1)</sup> 田邊 智<sup>3)</sup>

1) 大阪体育大学 2) 筑波大学大学院 3) 大阪産業大学

Koji Fukuda<sup>1)</sup>, Kota Kijima<sup>1)</sup>, Akira Ito<sup>1)</sup>, Hisashi Hori<sup>1)</sup>,  
Koichi Kawabata<sup>1)</sup>, Aya Yamada<sup>1)</sup>, Daiki Suematsu<sup>2)</sup>, Shinichi Omiya<sup>2)</sup>,  
Yuya Muraki<sup>1)</sup>, Takafumi Fuchimoto<sup>1)</sup>, Satoru Tanabe<sup>3)</sup>

1) Osaka University of Health and Sport sciences,

2) Graduate School, University of Tsukuba,

3) Osaka Sangyo University

### 1. はじめに

第 11 回世界陸上競技選手権大会が 2007 年に大阪で開催され、男子 100m においてはタイソン・ゲイ選手 (USA) が、世界記録保持者 (当時) であったアサファ・パウエル選手 (JAM) を破り優勝し、女子はベロニカ・キャンベル選手 (JAM) が優勝した。大会後に驚異的な世界記録 (100m ; 9.69 秒, 200m ; 19.30 秒) を樹立したウサイン・ボルト選手 (JAM) は、この大会では 100m には出場していなかったが 200m で 2 位であった。

本研究ではこの大会の男女の 100m および 200m の上位入賞者と日本代表選手について、個々の選手の疾走動作の特徴を探るとともに、疾

走速度と疾走動作の関係を調べ、より高いパフォーマンスを得るための要因を明らかにしようとした。

### 2. 方法

#### 2.1 分析対象選手および対象レース

第 11 回世界陸上競技選手権大会 (2007, 大阪) における男女の 100m および 200m について測定した。分析対象選手は以下の 14 名である (表 1)。

##### a) 100m の対象選手

男子決勝のタイソン・ゲイ (優勝 ; 9.85 秒, 200m 優勝 ; 19.76 秒) とアサファ・パウエ

表 1 分析対象選手の身体的特徴と記録

	国名	身長 (m)	身体質量 (kg)	ベスト記録 (sec)	レース記録 (sec)	分析レース	備考 (本大会成績および最終ラウンド)
T. ゲイ	USA	1.83	73.0	9.84	9.85	決勝	男子100m 1位, 200m 1位
A. パウエル	JAM	1.90	88.0	9.74	9.96	決勝	男子100m 3位
朝原宣治	JPN	1.79	75.0	10.02	10.14	1次予選	男子100m 準決勝
塚原直貴	JPN	1.80	75.0	10.23	10.20	1次予選	男子100m 2次予選
V. キャンベル	JAM	1.63	61.0	10.85	10.99	準決勝	女子100m 1位, 200m 2位
L. ウィリアムス	USA	1.57	57.0	10.88	11.01	決勝	女子100m 2位
高橋萌木子	JPN	1.69	57.0	11.54	11.98	1次予選	女子100m 1次予選
U. ボルト	JAM	1.96	86.0	19.75	19.91	決勝	男子200m 2位
W. スピアモン	USA	1.88	78.0	19.65	20.05	決勝	男子200m 3位
末續慎吾	JPN	1.78	68.0	20.03	20.47	1次予選	男子200m 2次予選
高平慎士	JPN	1.80	60.0	20.35	20.77	2次予選	男子200m 2次予選
神山知也	JPN	1.74	61.0	20.69	20.78	1次予選	男子200m 2次予選
A. フェリックス	USA	1.68	57.0	22.11	21.81	決勝	女子200m 1位
信岡沙希重	JPN	1.64	55.0	23.33	23.74	1次予選	女子200m 1次予選

※身長, 身体質量, ベスト記録は大会までの公表データに基づく

ル (3位; 9.96秒), および1次予選の朝原宣治, 塚原直貴. 女子準決勝のベロニカ・キャンベル (優勝; 11.01秒, 200m2位; 22.34秒) と決勝のローリン・ウィリアムス (2位; 11.01秒), および1次予選の高橋萌木子.

#### b) 200mの対象選手

男子決勝のウサイン・ボルト (2位; 19.91秒) とウォレス・スピアモン (3位; 20.05秒), および1次予選もしくは2次予選の末續慎吾, 高平慎士, 神山知也. 女子決勝のアリソン・フェリックス (優勝; 21.81秒), および1次予選の信岡沙希重.

## 2.2 ビデオ映像の撮影および分析

観客席最上段に設置した2台のハイスピードビデオカメラ (Vision Research社製: PhantomV4.3) で100m, 200mともにゴール手前約40m地点を疾走中の選手を撮影した (200fps). また, 競技開始前後に, 3次元座標を算出するためのコントロールポイント (レースまたは撮影日により異なるが15または20地点, それぞれ5ヶ所の高さ) の撮影も行った. 撮影した映像をもとに, 身体各部23点をビデオ動作分析ソフト (DKH社製: Frame-DIAS II) によりデジタル化し, DLT法によって3次元動作解析を行った (100Hz). なお, 本研究ではX軸の正を進行方向に対して右方向, Y軸の正を進行方向, Z軸を鉛直上方向とする静止座標系を定義した. コントロールポイントの実空間座標値と算出座標値の平均誤差は, X: 0.005-0.007m, Y: 0.005-0.007m, Z: 0.006-0.008mの範囲であった. その後, 矢状面の2次元平面上 (Y-Z平面) での座標に変換し, 4次のバターワースデジタルフィルターを用い, 遮断周波数7Hzで平滑化した.

## 2.3 動作分析の項目

### 1) 疾走速度, ストライド, ピッチ

疾走速度は身体重心の水平速度, ストライドは接地脚の爪先から次の接地脚の爪先までの水平前後距離とし, それぞれ1サイクル (連続する2歩) の平均値を求めた. ピッチは疾走速度をストライドで除して算出した.

### 2) スイング脚の動作 (それぞれ左右脚の平均値)

① もも上げ動作 (図1中左); 鉛直線と大腿のなす最大角度 ( $\theta_{Mom}$ ) とその角速度の最大値 ( $\omega_{Mom-max}$ ).

② 引き付け動作 (図1左); 膝関節の最小角度 ( $\theta_{Hik}$ ) と屈曲速度の最大値 ( $\omega_{Hik-max}$ ).

③ 振り出し動作 (図1中右); 大転子とくるぶしを結んだ線 (以後「脚全体」という) と鉛直線のなす角度の最大値 ( $\theta_{Das}$ ), および膝関節の伸展速度の最大値 ( $\omega_{Das-max}$ ).

④ 振り戻し動作 (図1右); 大転子とくるぶしを結んだ線の接地の直前の最大角速度 ( $\omega_{Mod-max}$ ).

### 3) キック脚の動作 (それぞれ左右脚の平均値)

⑤ 接地局面の下肢関節角度 (図2左, 中左, 右); 接地の瞬間の股関節 ( $\theta_{Hc}$ ), 膝関節 ( $\theta_{Kc}$ ), 足関節 ( $\theta_{Ac}$ ) の角度, 接地後最も屈曲した時点 (以後「中間時点」という) 膝関節 ( $\theta_{Km}$ ), 足関節 ( $\theta_{Am}$ ), および離地の瞬間の股関節 ( $\theta_{Hr}$ ), 膝関節 ( $\theta_{Kr}$ ), 足関節 ( $\theta_{Ar}$ ) の角度.

⑥ 下肢関節および脚全体の角速度 (図2中, 中右); キック脚の股関節 ( $\omega_{Hc-max}$ ), 膝関節 ( $\omega_{Kc-max}$ ) の最大伸展速度, および足関節 ( $\omega_{Ac-max}$ ) の最大足底屈速度 (以後「伸展速度」という), および脚全体 ( $\omega_{H/A-max}$ ) の最大後方スイング速度.

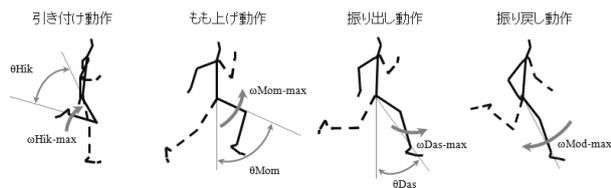


図1 スイング脚の動作の定義



図2 キック脚の動作の定義

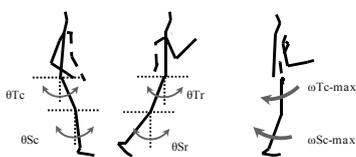


図3 キック脚の分節の動作の定義

- ⑦ 下肢分節の角度および角速度 (図 3) ; 接地の瞬間の大腿 ( $\theta Tc$ ) と下腿 ( $\theta Sc$ ), または, 離地の瞬間の大腿 ( $\theta Tr$ ) と下腿 ( $\theta Sr$ ) が鉛直線となす角度を求めた. なお, 大腿は大転子を, 下腿は膝関節を中心とし, それぞれ中心から見て下端が前方にある場合 (後傾位) をプラス (+), 後方にある場合 (前傾位) をマイナス (-) として表わした. 角速度は, 大腿 ( $\omega Tc\text{-max}$ ) と下腿 ( $\omega Sc\text{-max}$ ) の接地期の最大角速度 (後方スイング速度) を求めた.

### 3. 結果と考察

図 4 にゲイ, パウエル, 朝原, キャンベル, ボルト, 信岡の各選手のスティックピクチャーを示した.

#### 3.1 疾走速度

各選手の分析地点での疾走速度は以下の通りであった (表 2). 男子 100m では, ゲイ選手が最も高く 11.82m/s, 日本選手では朝原選手が 11.52m/s であった. 女子 100m では, キャンベル選手の 10.43m/s が最も高く, 高橋選手は 9.46m/s であった. 男子 200m ではスピアモン選手が 10.39m/s で最も高く, 日本選手では末續選手が 9.99m/s であった. 女子 200m では, フェリックス選手が 9.42m/s, 信岡選手が 8.51m/s であった.

100m の疾走速度は 60m 地点付近であることから, ほぼ最高疾走速度である (阿江ら, 1994). しかし, 200m では 100m に比べ最高疾走速度自体が低く (貴嶋ら, 2005), 第 7 回世界陸上競技

選手権大会 (セビリア) の決勝レースを調べた Ferro ら (2001) や土江ら (2002) の報告にあるように, 160m 付近の疾走速度は 200m レースの最高疾走速度から低下した状態にある. このように, 100m と 200m の分析地点が異なる局面であるため, それぞれの動作を直接比較することに問題はあるが, 本研究では単純にそれぞれの選手が分析地点においてどのような走りをしたかを調べることを基本とし, その上で疾走速度との関係についても調べた.

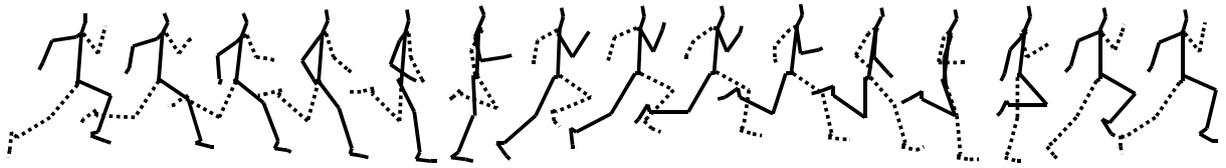
#### 3.2 ストライドとピッチ

ストライドと疾走速度には有意な相関関係が認められなかった (図 5 左). それに対して, ピッチは疾走速度が高いほど, または 200m より 100m の選手のほうが高い傾向であった ( $r=0.734$ ,  $p<0.01$ ; 図 5 右). また, これらについては斉藤と伊藤 (1995) の方法を用い, ストライドおよびピッチを引き出す機能の優劣を調べるため, ストライド指数およびピッチ指数を以下の式により求めた.

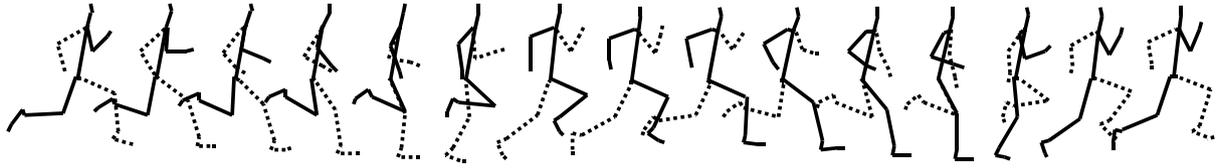
$$\begin{aligned} \text{ストライド指数} &= \text{ストライド} \cdot \text{身長}^{-1} \\ \text{ピッチ指数} &= \text{ピッチ} \cdot (\text{身長} \cdot g^{-1})^{1/2} \end{aligned}$$

ストライド指数は疾走速度との間に有意な相関関係が認められなかった (図 6 左). ピッチ指数は疾走速度が高いほど高い値を示していた ( $r=0.887$ ,  $p<0.001$ ; 図 6 右). 1991 年の世界陸上競技選手権東京大会の選手らに関する分析報告では (伊藤ら, 1994), 100m の選手らと 200m に出場した日本選手が比較的ストライドが大きかったと報告しているが, 今回の大会では男女ともに, ストライドは 100m の選手たちより 200m の選手たちのほうが比較的大きく, ピッチは 100m の選手たちのほうが高かった. 福田ら (2008) は, 東京大会と大阪大会の男子 100m 上位入賞者 (東京; ルイス, バレル. 大阪; ゲイ, パウエル) について, ゲイ選手とパウエル選手はストライドが全体の傾向からみてやや小さい値であったことからピッチ優先の走り, ルイス選手とバレル選手のストライドはゲイ選手やパウエル選手より比較的大きかったことからストライド優先の走りであったと分類している. 対象選手の中で最も長身であったボルト選手は, ストライドが 2.63m と最も大きかったが, ストライド指数で見ると 1.34 の平均的な値であった. 朝原選手は, ゲイ選手やパウエル選手と同じようなストライドで走っていたが, ピッチおよびピッチ指数が低かったため, 疾走速度も低かった. また, 塚原選手は, ストライドが 2.26m で男子 100m の選手の中では比較的小さく, ストライド指数は 1.25 と対象選手のうち最も低かったが, ピッチは 4.96 歩/秒の最も高い値を, また, ピッチ指数もパウエル選手に次ぐ

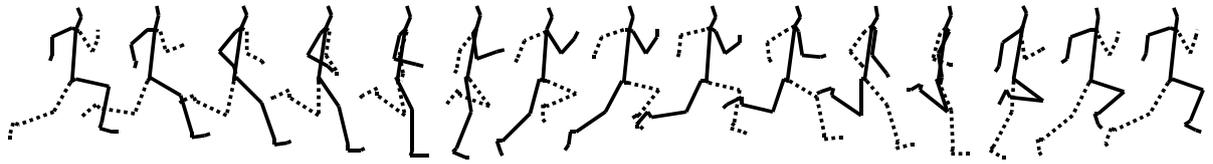
T. ゲイ選手 100m 9.85 sec.



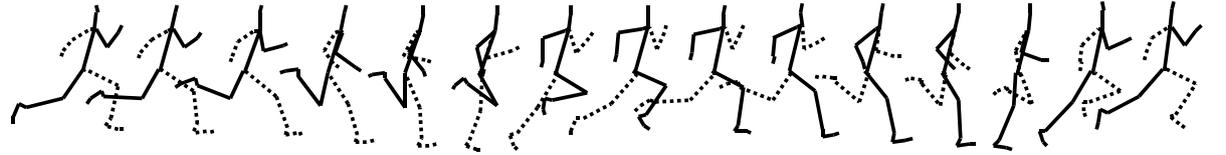
A. パウエル選手 100m 9.96 sec.



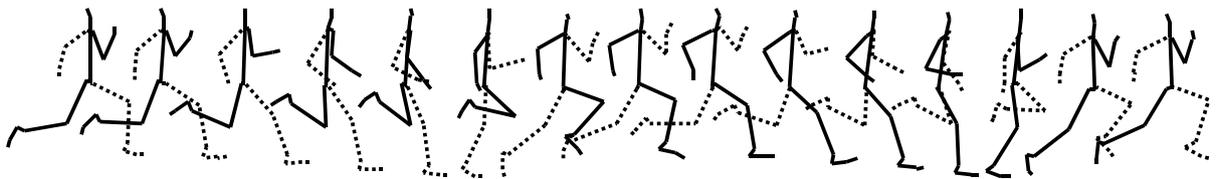
朝原宣治選手 100m 10.14 sec.



V. キャンベル選手 100m 10.99 sec.



U. ボルト選手 200m 19.91 sec.



信岡沙希重選手 200m 23.74 sec.

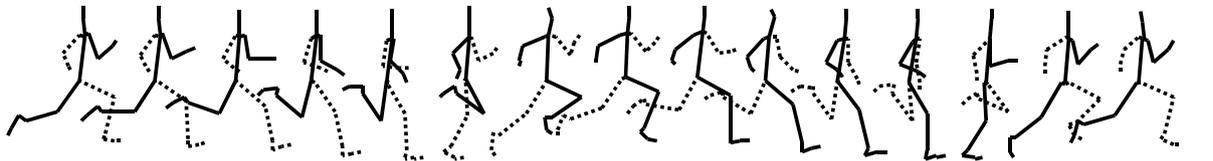


図4 T. ゲイ, A. パウエル, 朝原宣治, V. キャンベル, U. ボルト, 信岡沙希重選手のスティック  
ピクチャー

表2 疾走速度, ストライド, ピッチおよびストライド指数, ピッチ指数

	疾走速度 (m/s)	ストライド <sup>o</sup> (m/step)	ピッチ (step/s)	ストライド指数	ピッチ指数
T. ゲイ	11.82	2.43	4.85	1.33	2.10
A. パウエル	11.72	2.39	4.90	1.26	2.16
朝原宣治	11.52	2.42	4.76	1.35	2.03
塚原直貴	11.19	2.26	4.96	1.25	2.12
V. キャンベル	10.43	2.29	4.55	1.41	1.86
L. ウィリアムス	10.37	2.09	4.96	1.33	1.98
高橋萌木子	9.46	2.14	4.42	1.27	1.83
U. ボルト	10.25	2.63	3.90	1.34	1.74
W. スピアモン	10.39	2.47	4.20	1.32	1.84
末續慎吾	9.99	2.29	4.36	1.29	1.86
高平慎士	9.76	2.45	3.99	1.36	1.71
神山知也	9.63	2.21	4.35	1.27	1.83
A. フェリックス	9.42	2.36	4.00	1.40	1.66
信岡沙希重	8.51	2.08	4.09	1.27	1.67

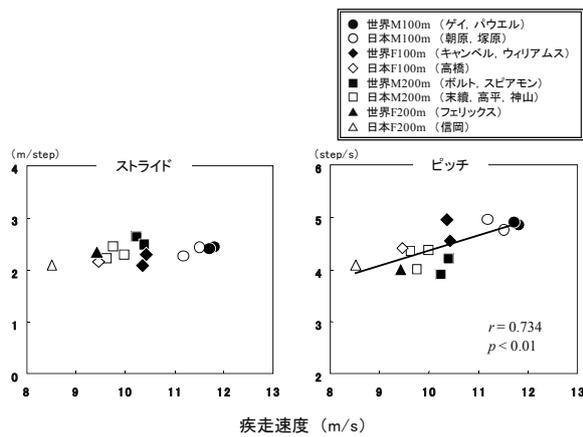


図5 ストライドおよびピッチと疾走速度の関係

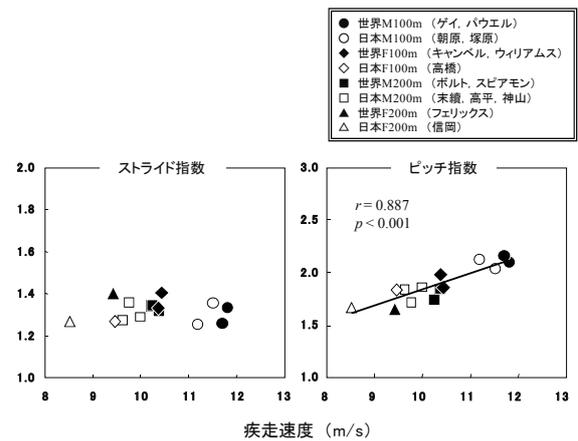


図6 ストライドおよびピッチと疾走速度の関係

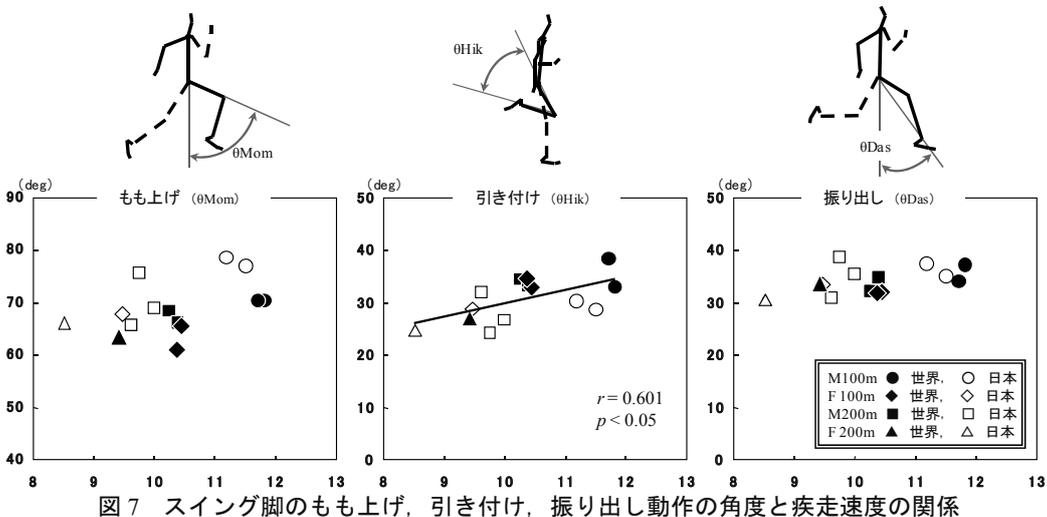


図7 スイング脚のもも上げ, 引き付け, 振り出し動作の角度と疾走速度の関係

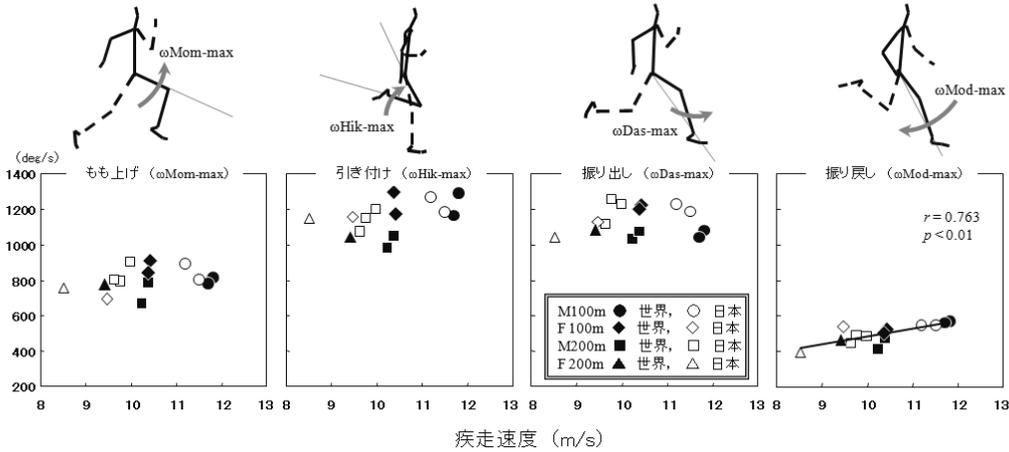


図 8 スイング脚のもも上げ，引き付け，振り出し，振り戻し動作の最大速度と疾走速度の関係

表 3 スイング脚の動作角度

	もも上げ角度 (deg)	引き付け角度 (deg)	振り出し角度 (deg)
T. ゲイ	70.40	32.94	37.15
A. バウエル	70.35	38.40	34.10
朝原宣治	77.01	28.67	35.07
塚原直貴	78.59	30.17	37.43
V. キャンベル	65.44	32.90	32.04
L. ウィリアムス	61.10	34.63	31.88
高橋萌木子	67.84	28.88	33.45
U. ボルト	68.33	34.35	32.16
W. スピアモン	66.01	33.35	34.79
末續慎吾	69.02	26.68	35.41
高平慎士	75.55	24.09	38.80
神山知也	65.66	31.94	30.97
A. フェリックス	63.52	27.11	33.60
信岡沙希重	66.10	24.78	30.54

表 4 スイング脚の動作速度

	もも上げ速度 (deg/s)	引き付け速度 (deg/s)	振り出し速度 (deg/s)	振り戻し速度 (deg/s)
T. ゲイ	811.09	1286.72	1079.47	569.58
A. バウエル	780.25	1159.83	1040.95	561.46
朝原宣治	804.28	1178.32	1186.07	545.89
塚原直貴	891.08	1264.82	1228.06	546.63
V. キャンベル	910.52	1175.37	1224.55	525.88
L. ウィリアムス	843.02	1295.78	1201.07	504.37
高橋萌木子	696.54	1158.89	1128.38	539.53
U. ボルト	667.49	980.34	1029.46	408.80
W. スピアモン	785.98	1051.62	1073.71	469.22
末續慎吾	901.53	1199.78	1225.53	482.68
高平慎士	791.42	1145.67	1255.28	489.77
神山知也	804.27	1071.28	1117.39	443.67
A. フェリックス	780.86	1043.82	1087.64	465.33
信岡沙希重	757.29	1147.73	1039.59	393.85

高い値を示していたことから、ピッチに依存した走りであると言える。女子 100m 優勝者のキャンベル選手は、ストライド指数が 1.41 と対象選手の中で最も高く、次いで女子 200m 優勝者のフェリックス選手が 1.40 の高い値を示していた。

### 3.3 スイング脚の動作

#### ① もも上げ動作

もも上げ角度 (図 7 左, 表 3) およびもも上げ速度 (図 8 左, 表 4) はともに疾走速度と有意な相関関係が認められなかった。しかし、もも上げ角度については男子 100m の朝原選手と塚原選手に顕著に見られるように、日本選手のほうが大きい様子が見られた。もも上げ速度は 100m では男子が塚原選手，女子がキャンベル選手とウィリアムス選手，200m では末續選手の値が比較的高かった。

#### ② 引き付け動作

引き付け角度は疾走速度が高いほど大きく、外国選手のほうが日本選手より比較的大きかった ( $r=0.601$ ,  $p<0.05$ ; 図 7 中, 表 3)。また、引き付け速度 (図 8 中左, 表 4) は、疾走速度と有意な相関関係は認められなかった。この結果は、外国選手は膝をあまり深く折りたんで

いなかったのに対し、日本選手や 200m 後半の方が膝関節をしっかり折りたんで脚を前方

に運んでいる傾向を示しており、かつて行われていた「脚の慣性モーメントを減少させ効率よく脚を前方へ運ぶために引き付け角度を小さくする」(小林, 1990) という指導とは全く異なるものであった。

#### ③ 振り出し動作

振り出し角度 (図 7 右, 表 3) および振り出し速度 (図 8 中右, 表 4) はともに疾走速度との間に一定の傾向は見られなかった。

#### ④ 振り戻し動作

疾走速度が高い 100m の選手のほうが振り戻し速度は高かった ( $r=0.763$ ,  $p<0.01$ ; 図 8 右, 表 4)。

### 3.4 キック脚の動作

#### ①キック期の下肢関節角度

股関節はどの選手も接地から離地まで常に伸展動作だけであった。膝関節と足関節についてはほとんどの選手が接地後一旦屈曲した後伸展した。

接地の瞬間の股関節，膝関節および足関節角度は、それぞれどの選手もほぼ一定の角度を示した

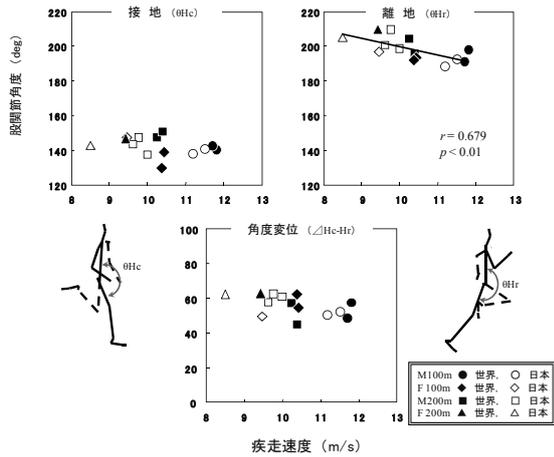
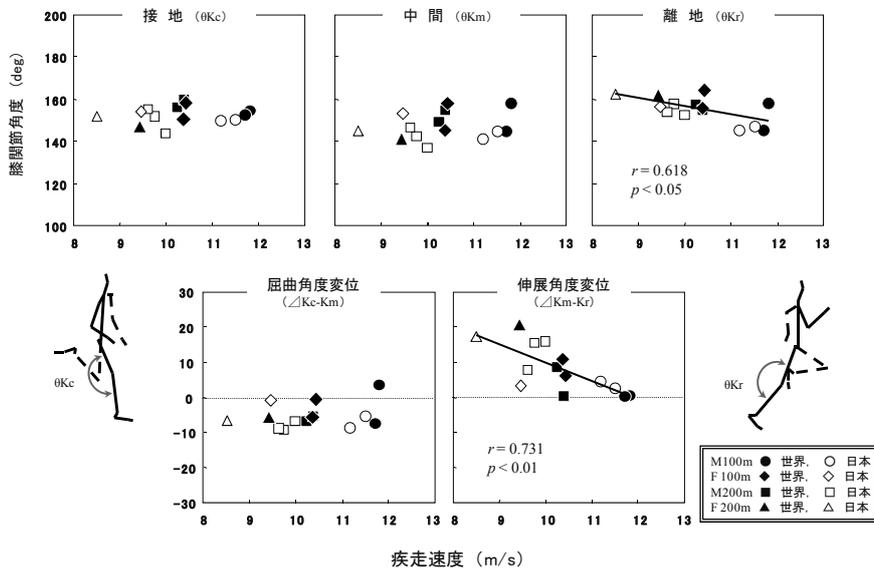


図9 股関節の接地の瞬間，離地の瞬間の角度および角度変位と疾走速度の関係

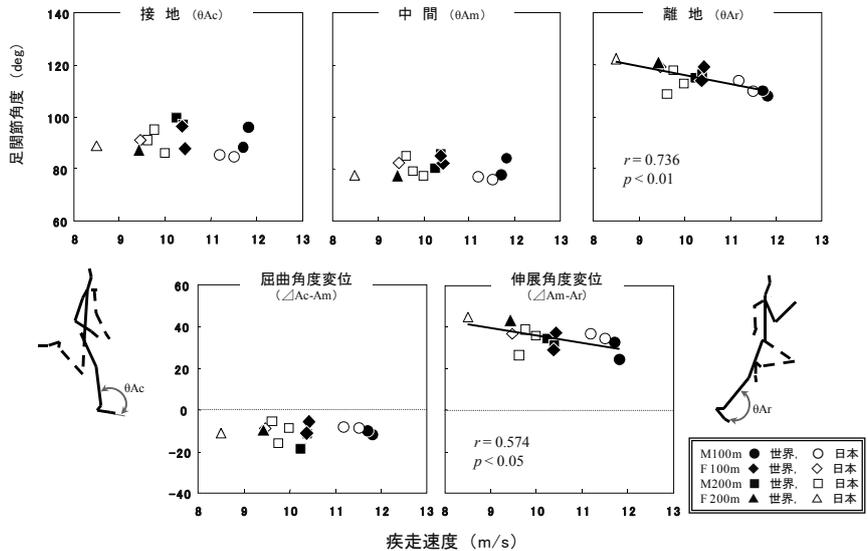
表5 接地および離地の瞬間の股関節角度とその角度変位

股関節	接地角度 (deg)	離地角度 (deg)	角度変位 (deg)
T. ゲイ	140.26	197.63	57.37
A. パウエル	142.67	190.87	48.20
朝原宣治	140.71	192.40	51.69
塚原直貴	137.75	188.07	50.32
V. キャンベル	139.11	193.55	54.44
L. ウィリアムス	129.69	191.90	62.21
高橋萌木子	147.77	197.07	49.30
U. ボルト	147.52	204.34	56.81
W. スピアモン	150.80	195.56	44.76
末續慎吾	137.68	198.58	60.89
高平慎士	147.27	209.64	62.38
神山知也	143.16	200.70	57.54
A. フェリックス	146.67	209.75	63.08
信岡沙希重	143.11	205.30	62.19



角度変位については，+が伸展，-が屈曲の変位を示す。

図10 膝関節の接地の瞬間，中間時点（最小値），離地の瞬間の角度および角度変位と疾走速度の関係



角度変位については，+が伸展，-が屈曲の変位を示す。

図11 足関節の接地の瞬間，中間時点（最小値），離地の瞬間の角度および角度変位と疾走速度の関係

表 6 接地の瞬間, 中間 (最小), 離地の瞬間の膝関節角度とその角度変位

膝関節	接地角度 (deg)	中間角度 (deg) ※1	離地角度 (deg)	屈曲角度変位 (deg) ※2	伸展角度変位 (deg)
T. ゲイ	154.44	157.82	158.14	3.38	0.32
A. パウエル	152.35	144.86	144.94	-7.49	0.09
朝原宣治	150.32	144.73	147.13	-5.59	2.40
塚原直貴	149.68	140.98	145.23	-8.70	4.25
V. キャンベル	158.47	157.87	164.09	-0.60	6.22
L. ウィリアムス	150.72	144.94	155.77	-5.77	10.83
高橋萌木子	153.98	153.14	156.39	-0.84	3.25
U. ボルト	155.95	149.03	157.57	-6.92	8.54
W. スピアモン	159.90	154.33	154.59	-5.56	0.25
末續慎吾	143.76	136.87	152.66	-6.89	15.78
高平慎士	151.93	142.49	157.68	-9.44	15.19
神山知也	155.11	146.22	153.82	-8.89	7.60
A. フェリックス	147.13	141.36	161.94	-5.77	20.58
信岡沙希重	151.70	145.14	162.23	-6.56	17.08

※1 中間角度に該当する最小値が観察されない場合, 接地時間の50%時点の値を代用し左右平均値を算出した。

※2 角度変位は, マイナス値が屈曲変位, プラス値が伸展変位を表わす。

表 7 接地の瞬間, 中間 (最小), 離地の瞬間の足関節角度とその角度変位

足関節	接地角度 (deg)	中間角度 (deg)	離地角度 (deg)	屈曲角度変位 (deg) ※	伸展角度変位 (deg) ※
T. ゲイ	95.78	83.96	108.07	-11.83	24.11
A. パウエル	87.91	77.30	109.72	-10.62	32.42
朝原宣治	84.24	75.51	109.94	-8.73	34.42
塚原直貴	85.35	76.81	113.52	-8.54	36.71
V. キャンベル	87.72	82.07	119.06	-5.65	36.98
L. ウィリアムス	96.34	84.94	113.88	-11.40	28.94
高橋萌木子	91.12	82.35	119.08	-8.78	36.73
U. ボルト	99.43	80.32	114.64	-19.11	34.33
W. スピアモン	96.89	85.46	116.24	-11.44	30.79
末續慎吾	85.83	77.03	112.61	-8.80	35.58
高平慎士	95.01	78.87	117.54	-16.14	38.67
神山知也	88.94	82.52	108.64	-6.41	26.11
A. フェリックス	87.29	77.57	120.98	-9.72	43.42
信岡沙希重	88.82	77.52	122.33	-11.30	44.81

※ 角度変位の屈曲(マイナス値)は背屈, 伸展(プラス値)は底屈を表わす。

(図 9, 10, 11 各上左, 表 5, 6, 7). 中間時点 11 上中, 表 7) は, どの選手にも違いは見られなかった. 離地の瞬間の股関節 ( $r = -0.679$ ,  $p < 0.01$ ; 図 9 上右, 表 5), 膝関節 ( $r = -0.618$ ,  $p < 0.05$ ; 図 10 上右, 表 6), 足関節 ( $r = -0.736$ ,  $p < 0.01$ ; 図 11 上右, 表 7) はともに疾走速度が高いほど小さい値であった。

接地から中間時点までの膝関節と足関節の屈曲角度変位は, どの選手にも違いは見られなかった (図 10, 11). 中間時点から離地にかけての膝関節 ( $r = -0.731$ ,  $p < 0.01$ ; 図 10 下右, 表 6) と足関節 ( $r = -0.574$ ,  $p < 0.05$ ; 図 11 下右, 表 7) の伸展角度変位は, 疾走速度が高いほど小さくなる傾向を示した。

膝関節の動作には個々の選手に特徴的なものが観察された. 例えば, ゲイ選手は両脚とも接地から終盤にかけて伸展し続け離地の直前に屈曲した. このような動作が片方の脚だけに観察され

の膝関節 (図 10 上中, 表 6) と足関節角度 (図 11 上右, 表 7) は, キャンベル選手と高橋選手であった. パウエル選手はキック期前半に屈曲し終盤までほぼその角度を維持し, 離地の直前に屈曲した. また, 100m の日本選手 (男子; 朝原選手, 塚原選手; 女子; 高橋選手) と 200m のスピアモン選手はキック期後半にわずかに伸展していたものの非常に小さい値であり, パウエル選手とよく似ていた. (※キック期の終盤まで膝関節角度に伸展動作しか見られなかった場合は, 中間角度 (最小値) に該当する値として, キック期全体を 100% とした場合の 50% 時点の値を用いた)

## ② 下肢関節最大角速度

伊藤ら (1998) は, 100m の男女の選手を対象に, 中間疾走速度と股関節の最大伸展速度との間には有意な相関関係が認められなかったが, 膝関節と足関節の伸展速度には有意な負の相関関係が認められたと報告している. 男女の 100m と

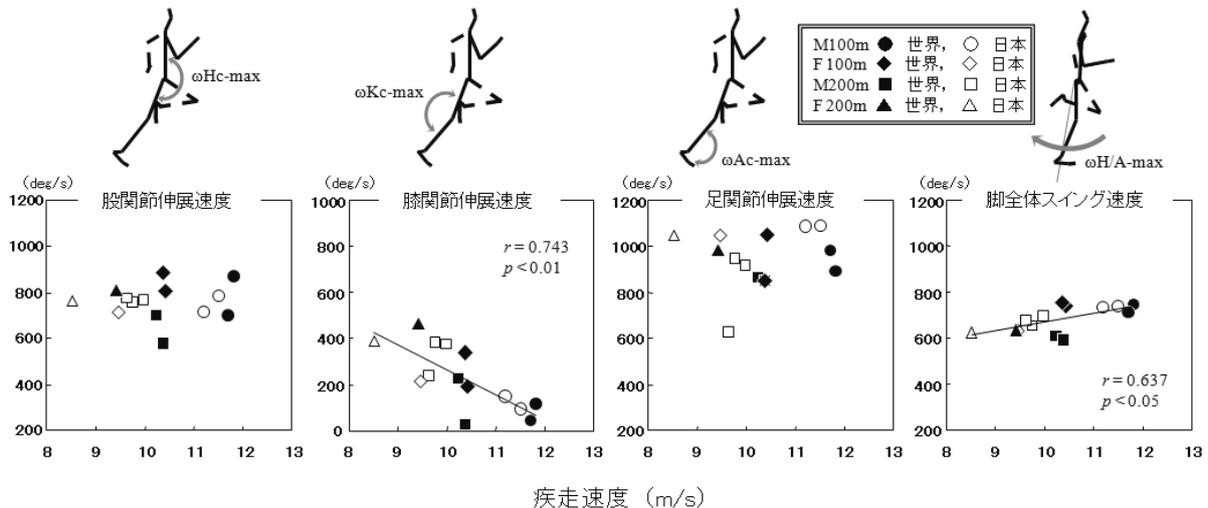


図 12 キック脚の股関節，膝関節，足関節の最大伸展速度および脚全体スイング速度と疾走速度の関係

表 8 キック期の下肢関節最大伸展速度および脚全体の後方スイング速度

	股関節伸展速度 (deg/s)	膝関節伸展速度 (deg/s)	足関節伸展速度 (deg/s)	脚スイング速度 (deg/s)
T. ゲイ	867.90	116.30	893.63	745.30
A. パウエル	697.06	41.63	981.31	709.02
朝原宣治	781.90	93.78	1092.10	736.89
塚原直貴	712.62	149.67	1087.76	731.17
V. キャンベル	808.52	190.84	1052.73	740.47
L. ウィリアムス	887.32	336.76	850.47	752.84
高橋萌木子	713.12	214.74	1049.02	630.62
U. ボルト	698.05	226.81	864.29	603.16
W. スピアモン	576.82	23.55	848.94	590.04
末續慎吾	767.21	374.67	914.09	692.66
高平慎士	754.51	380.94	947.55	652.36
神山知也	777.62	238.64	626.98	676.30
A. フェリックス	809.50	468.76	986.49	634.08
信岡沙希重	762.76	389.35	1046.65	625.40

200m の選手を対象とした本研究においては、股関節の伸展速度は疾走速度と有意な相関関係は認められず（図 12 左，表 8），膝関節伸展速度は疾走速度が高いほど低く（ $r = -0.743$ ,  $p < 0.01$ ；図 12 中左），彼らと同様の結果を得た。しかし，本研究では足関節の伸展速度は疾走速度と有意な相関関係が認められず（図 12 右），やや違った傾向であった。脚全体の最大後方スイング速度は、伊藤ら（1998）の報告と同様に、疾走速度が高いほど高い値を示していた（ $r = 0.637$ ,  $p < 0.05$ ；図 12 右）。

個々の選手について観察すると、股関節にはどの選手にも特徴的なものは見られなかった。膝関節伸展速度は、男子 200m のスピアモン選手が同じ程度の疾走速度である他の男子 200m 選手や女子 100m 選手に比べ著しく低く、男子 100m 選手とほぼ同様の値を示した。足関節伸展速度は男子 200m の神山選手が他の選手に比べ著しく低かつ

た。伊藤ら（1998）は、優秀選手ほど膝関節を伸展しないため、股関節の伸展速度を脚全体のスイング速度に効果的に転換していることを明らかにしているが、本研究では、男子 100m の全選手と 200m のスピアモン選手のキック動作がそれに相当していると思われる。

### ③ 下肢分節の角度および角速度

接地の瞬間の大腿と下腿の角度は、疾走速度に関係なくほぼ一定の値を示した（図 13 上左，図 14 上左，表 9）。離地の瞬間の大腿角度は疾走速度が高いほど小さく（ $r = 0.655$ ,  $p < 0.05$ ；図 13 上右），下腿角度は疾走速度に関係なくほぼ一定の値を示した。本研究では離地の瞬間の股関節角度は疾走速度の高い選手ほど小さかったが、大腿角度が小さかったことがその一因であると思われる。特徴的であったのが接地の瞬間の下腿角度で、どの選手も地面とほぼ垂直の 0 度付近の一定の値を示した（図 14 上左）。

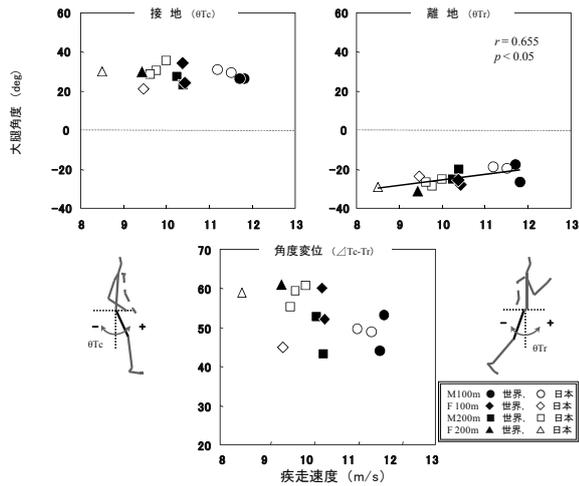


図 13 大腿の接地の瞬間と離地の瞬間の角度および角度変位と疾走速度の関係

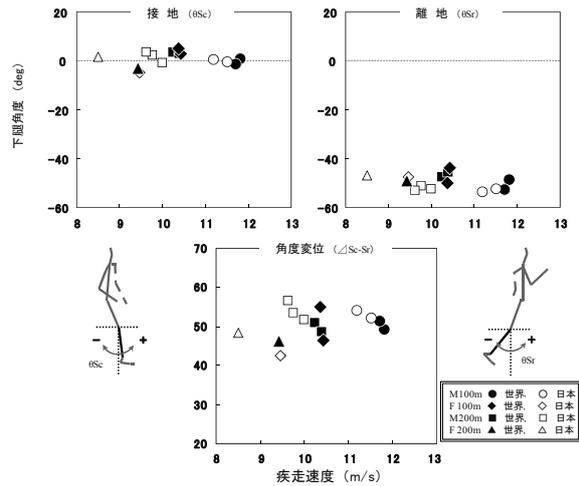


図 14 下腿の接地の瞬間と離地の瞬間の角度および角度変位と疾走速度の関係

表 9 接地および離地の瞬間の大腿と下腿の角度とその角度変位

	大腿接地角度 (deg)	大腿離地角度 (deg)	大腿角度変位 (deg)	下腿接地角度 (deg)	下腿離地角度 (deg)	下腿角度変位 (deg)
T. ゲイ	26.17	-26.81	52.98	0.61	-48.67	49.28
A. パウエル	26.13	-17.83	43.96	-1.52	-52.89	51.37
朝原宣治	29.12	-19.70	48.82	-0.56	-52.57	52.01
塚原直貴	30.66	-19.00	49.66	0.35	-53.77	54.12
V. キャンベル	24.26	-27.91	52.17	2.73	-43.82	46.54
L. ウィリアムス	34.27	-25.79	60.05	4.99	-50.01	55.00
高橋萌木子	21.11	-23.82	44.93	-4.91	-47.43	42.52
U. ボルト	27.46	-25.17	52.62	3.41	-47.60	51.01
W. スピアモン	23.03	-20.20	43.23	2.93	-45.61	48.54
末續慎吾	35.43	-25.15	60.58	-0.81	-52.49	51.68
高平慎士	30.42	-28.83	59.25	2.35	-51.15	53.50
神山知也	28.34	-26.87	55.21	3.45	-53.05	56.50
A. フェリックス	29.91	-31.16	61.07	-2.96	-49.22	46.26
信岡沙希重	29.91	-29.00	58.92	1.62	-46.78	48.39

※ 大腿は大転子，下腿は膝関節を中心として、鉛直線とのなす角度。それぞれ中心から見て大腿および下腿が前方にあるときをプラスとする。

表 10 キック期の大腿と下腿の最大角速度

	大腿角速度 (deg/s)	下腿角速度 (deg/s)
T. ゲイ	794.92	708.21
A. パウエル	634.18	833.87
朝原宣治	736.20	818.67
塚原直貴	695.68	870.42
V. キャンベル	770.12	777.39
L. ウィリアムス	833.32	811.13
高橋萌木子	654.99	694.31
U. ボルト	623.33	660.47
W. スピアモン	561.13	675.03
末續慎吾	749.41	770.47
高平慎士	699.37	752.04
神山知也	683.73	763.17
A. フェリックス	773.06	714.65
信岡沙希重	704.59	700.55

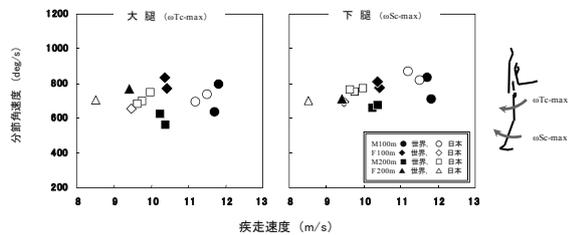
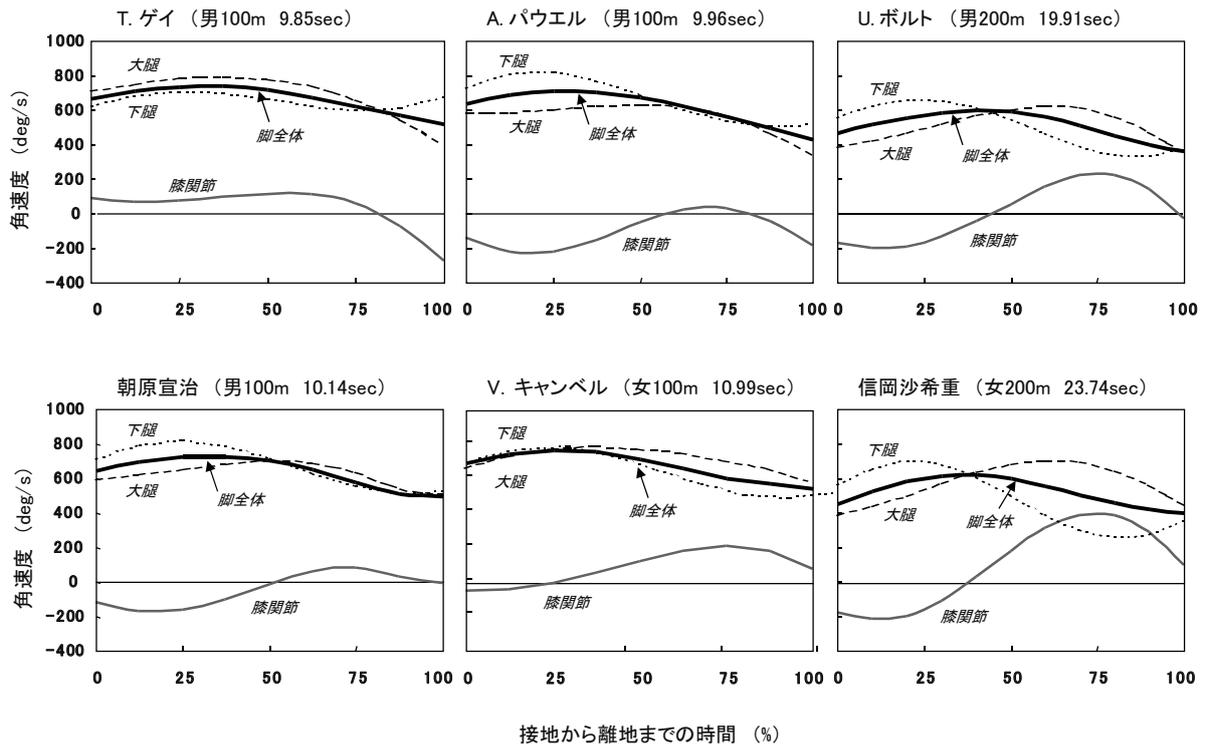


図 15 キック脚の大腿，下腿の最大角速度と疾走速度の関係



※大腿, 下腿, 脚全体は後方スイング速度, 膝関節は+が伸展速度, -が屈曲速度を示す。  
 図 16 キック脚の膝関節と大腿, 下腿および脚全体の角速度変化パターン

キック期の角度変位は, 大腿 (図 13 下), 下腿 (図 14 下) とともに疾走速度に関係なく大きくばらついており, 疾走速度に対する一定の傾向は認められなかった。

各分節の接地中の角速度について見ると, 大腿と下腿ともに (図 15, 表 10), 選手間で差が大きく, 疾走速度に対して一定の傾向が見られなかった。

④キック期の膝関節および分節の角速度変化パターン

図 16 に, 男子は 100m のガイ, パウエルおよび朝原選手, 200m のボルト選手, 女子は 100m のキャンベル選手と 200m の信岡選手の脚全体および膝関節とその分節である大腿と下腿のキック期における角速度変化パターン (左右脚の平均) を示した。これを見ると, 選手間で大きな違いが見られた。当然であるが, 膝関節速度は大腿と下腿の相対速度である。その観点から, 各選手の膝関節の動きを観察した。

ほとんどの選手の膝関節 (図中灰色実線) がキック期前半に屈曲したが, その最大角速度がほぼ同じであった選手がパウエル, ボルト, 朝原, 信岡の各選手であった。しかし, パウエルと朝原選手は大腿と下腿の角速度が全体的に高く, ボルトと信岡選手は低かった。一方, キャンベル選手は膝関節がほとんど屈曲しなかったために大腿と下腿の角速度はほぼ一致していたが, ガイ選手は接地後から低い速度ながら膝関節が伸展しており, 他の選手と異なり, 大腿の角速度が下腿より

高かった。この局面ではブレーキ方向の地面反力が働き, 身体重心は皆同じように減速するが (福田と伊藤, 2004), ガイ選手を除くすべての選手において下腿の角速度が加速していた。つまり, ブレーキ力に対して下腿を前方へ回転させることによる膝関節の屈曲動作で対応していたことがわかる。一方, ガイ選手の下腿の速度はほぼ一定の値を示しており, 他の選手とは異なる方法でブレーキ力を受け止めていたことがわかる。

ほとんどの選手の膝関節がキック後半に伸展したが, その最大値は信岡選手が最も大きく, ボルト, キャンベル, 朝原, パウエル選手の順に小さくなった。この膝関節の角速度が大きかった選手は共通して下腿の角速度の低下が著しかった。ガイとパウエル選手には離地の直前から膝関節の屈曲速度が見られたが, 両選手ともに下腿の速度を保ちながら大腿の速度が低下していた。

4. まとめ

本研究は, 第 11 回世界陸上競技選手権大会の男女の 100m および 200m の上位入賞者と日本代表選手の疾走動作を分析し, それぞれの特徴を探るとともに, 疾走速度との関係を調べた結果, 以下のことが明らかとなった。

- ①ピッチは疾走速度が高いほど高く, 200m の選手より 100m の選手のほうが高かった。
- ②もも上げ角度は, 相対的に日本選手のほうが大きい傾向が見られた。

- ③引き付け角度は外国選手は日本選手に比べて大きかった。
- ④膝関節伸展角度変位は疾走速度が高いほど少なく、膝関節伸展速度も疾走速度が高いほど低かった。
- ⑤脚全体スイング速度は、疾走速度が高いほど高い値を示していた。特に100mのパウエル選手、朝原選手、塚原選手、200mのスピアモン選手は、脚全体スイング速度が大腿角速度より高かった。
- ⑥どの選手も接地の瞬間の下腿角度は0度付近の一定の値であった。
- ⑦離地時の大腿角度は疾走速度が高いほど小さかった。

土江寛裕・中川博文・矢澤 誠・佐々木秀幸(2002)  
200m競走における10m毎の疾走速度とピッチ、  
ストライド変化。陸上競技紀要, 15:30-38.

### 参考文献

- 阿江通良・鈴木美佐緒・宮西智久・岡田英孝・平野敬晴(1994)世界一流スプリンターの100mレースパターンの分析-男子を中心に-。日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス研究班編 世界一流陸上競技者の技術。ベースボール・マガジン社：東京, pp14-28.
- Ferro, A., Rivera, A., Pagola, I., Ferreruella, M., Martin, A., Rocandio, V. (2001) Biomechanical analysis of the 7<sup>th</sup> World Championships in Athletics Seville 1999. *New Studies in Athletics*. 16-1: 25-60.
- 福田厚治・伊藤 章(2004)最高疾走速度と接地期の身体重心の水平速度の減速・加速：接地による減速を減らすことで最高疾走速度は高められるか。体育学研究, 49:29-34.
- 福田厚治・伊藤 章・貴嶋孝太(2008)男子一流スプリンターの疾走動作の特徴 - 世界陸上東京大会との比較から -。バイオメカニクス研究, 12:91-98.
- 伊藤 章・市川博啓・斉藤昌久・佐川和則・伊藤道郎・小林寛道(1998)100m中間疾走局面における疾走動作と速度との関係。体育学研究, 43:260-273.
- 伊藤 章・斉藤昌久・佐川和則・加藤謙一・森田正利・小木曾一之(1994)世界一流スプリンターの技術分析。日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス研究班編 世界一流陸上競技者の技術。ベースボール・マガジン社：東京, pp31-49.
- 貴嶋孝太・福田厚治・伊藤 章(2005)末續慎吾選手の200m走の特徴。陸上競技学会誌, 3:10-14.
- 小林寛道編著・宮下充正監修(1990)走る科学。大修館書店：東京。
- 斉藤昌久・伊藤 章(1995)2歳から世界一流短距離選手までの中間疾走能力の変化。体育学研究 40:104-111.

# 2007 世界陸上競技選手権大阪大会における 決勝 400m 走レースのバイオメカニクス分析

## Biomechanical analysis of the 400 metres final race at the 2007 World Championships in Athletics

持田 尚<sup>1)</sup> 杉田 正明<sup>2)</sup>

1) 横浜市スポーツ医科学センター 2) 三重大学

Takashi Mochida<sup>1)</sup>, Masaaki Sugita<sup>2)</sup>

1) Yokohama Sports Medical Center, 2) Mie University

### 1. はじめに

世界トップ選手のバイオメカニクスデータは、世界の人々を魅了したスーパーパフォーマンスに科学のメスを入れた情報として、多くの人々が注目する(図 1)。同時に、アスリートやコーチなどは競技力向上のための資料としてそれらを活用する(伊藤ら, 2008)。もはや知識基盤社会(Knowledge-based society)到来の時代において、科学的データはスポーツ活動の基盤として飛躍的に重要性を増し、成功を収めるためには、そのContentsと、活用するKnow-howが鍵となってくるまでとなった。

国際陸上競技連盟(IAAF)は、これまでに世界大会のバイオメカニクスリサーチ結果を報告してきた。400m走競技に関しては、Michael Johnson(USA)が世界記録(43秒18)を樹立したレースの分析データが含まれているなど貴重な情報を提供してきている(Amelia Ferro et al.,2001)。報告内容はレース中のスピード分析が主であるが、分析区間は大会によって異なり、1998年のソウルオリ

ピック(88ソウル)(IAAF,1990)、1991年第3回世界陸上競技選手権東京大会(91東京)は100m毎の分析であった(杉浦ら,1994)。そして、1997年第6回世界陸上競技選手権アテネ大会(97アテネ)(Bruggemann et al.,1999)と1999年第7回世界陸上競技選手権セビリア大会(99セビリア)(Amelia Ferro et al.,2001)は50m区間であり、過去最も短い分析区間となる。ちなみに1994年に行われた第12回広島アジア大会(94アジア)における日本陸連バイオメカニクス研究班の活動では、400m走レース中の動作分析が伊藤ら(1997)によって実施されている。国際大会におけるこのような取組は初めてであり、400m走強化策に示唆を与える資料が提供されてきた。

本稿では、16年ぶりに本邦で開催された世界陸上選手権大会(2007世界陸上競技選手権大阪大会;07大阪)の400m走レースについて、スピード分析および動作分析を実施したので報告する。



図 1. バイオメカニクスレポートに興味を持つジャーナリストたち  
(2007 世界陸上競技選手権大会プレスセンター)

## 2. 研究方法

### 2.1 レース中のスピード、ピッチ、ストライド分析

400m 走レース中のスピード分析は、400m ハードルの位置を基準とした区間平均スピード ( $\bar{V}_{zone}$  : m/sec)を用いて行った (Zone 設定 : 400m ハードル, 分析方式 : Overlay (持田ら, 2007)). つまり, 400m を 11 区間 (Zone1:Start-45m, Zone2:45-80m, Zone3:180-115m, Zone4:115-150m, Zone5:150-185m, Zone6:185-220m, Zone7:220-255m, Zone8:255-290m, Zone9:290-325m, Zone10:325-360m, Zone11:360-400m) に分けて分析した (図 2). 区間平均ピッチ ( $SF_{zone}$ ) は Zone 内 6~9 サイクル (12~18steps) に要した時間から平均 1 ステップ時間を求め, その逆数とした. また, 区間平均ストライド ( $SL_{Zone}$ ) は,  $\bar{V}_{zone}$  を  $SF_{zone}$  で除すことにより求めた. さらに,  $SF_{zone}$  については式 (1) により相対ピッチ (Relative- $SF_{zone}$ ) を,  $SL_{Zone}$  については式 (2) により身長比ストライドを算出した (Alexander,1977) .

$$Relative - SF_{zone} = SF_{zone} \times \sqrt{\frac{\text{身長}}{g}} \quad (1)$$

ここで,  $g$  は重力加速度 ( $9.81\text{m/s}^2$ ) である.

$$Height \text{ ratio } SL_{Zone} = SL_{Zone} / \text{height} \quad (2)$$

そして, 99 セベリアや 91 東京の報告データと比較するために, 50m, 100m, 150m, 200m, 250m, 300m, 350m 地点の通過タイムを, Overlay 方式で求めた各通過タイムと距離の直線回帰に内挿することで求めた (推定通過タイム). 尚, Overlay 方式による分析方法の詳細については持田ら (2007) の報告を参照していただきたい.

### 2.2 前半, 後半速度の定義と低下率の求め方

伊藤ら (1997) は, スタート後 150m 付近 (以後「前半」という) とスタート後 350m 付近 (以後「後半」という) における動作分析の結果から, 前半と後半における速度, ピッチ, ストライドを算出している. 本研究における『前半』とは, Zone4(115-150m)と Zone5 (150-185m) の平均値とし, 『後半』とは, Zone10(325-360m) の値と定義した. 99 セベリアのデータについては, 100-150m 区間と 150-200m 区間の平均値を『前半』とし, 300-350m 区間と 350-400m 区間の平均値を『後半』とした.

そして, 前半から後半への低下率は式 (3) より算出した.

$$\text{低下率} = 100 \times (\text{前半の値} - \text{後半の値}) / \text{前半の値} \quad (3)$$

### 2.3 動作分析

前半と後半の疾走動作を, バックストレート側, ホームストレート側それぞれの観客席上段に 2 台ずつ設置したカメラで撮影した (前半 : SONY VX-2000 ・ 60Hz, 後半 : Vision Research 社製 ・ PhantomV4.3 ・ 200Hz). 各カメラの映像から, 選手の身体分析点 23 点をビデオ動作解析ソフト (DKH 社製 : Frame-DIAS II) によりデジタル化し (前半 60Hz, 後半 100Hz), 2 次元座標を得た後, 3 次元 DLT 法 (池上ら, 1991) を用いて 3 次元座標へと変換した. 3 次元座標は Butterworth low-pass digital filter を用いて遮断周波数 3.0~7.8Hz の範囲で平滑化した. そして, 第 12 回広島アジア大会の動作分析データと比較するために, 得られた座標から, 次に示す伊藤ら (1997) の分析項目に倣って各データを算出した.

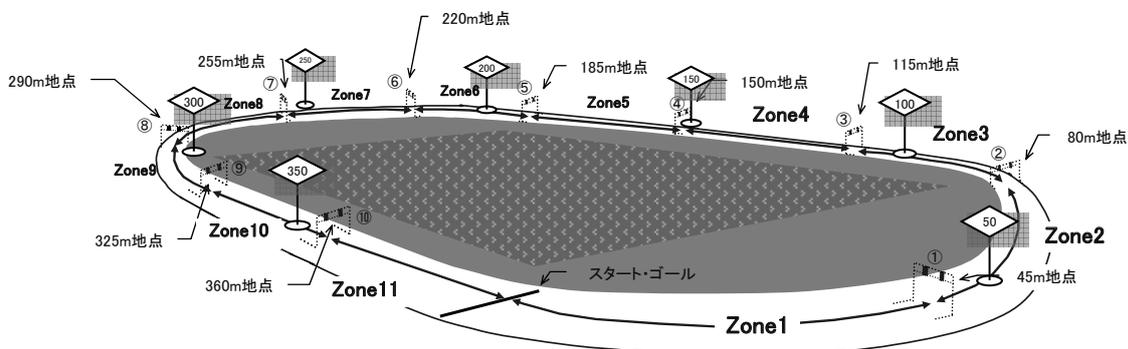


図 2. 400m ハードルを基準とした通過位置と区間の定義

1) スイング脚に関しては、次の項目について走動作 1 サイクルの平均値を用いた (図 3 参照)。

- ①引き付け動作；膝関節の最小角度 ( $\theta_{Hik}$ ; deg) と膝屈曲速度の最大値 ( $\omega_{Hik-max}$ ; deg/s)。
- ②もも上げ動作；鉛直線と大腿のなす角度の最大値 ( $\theta_{Mom}$ ; deg) とその角速度の最大値 ( $\omega_{Mom-max}$ ; deg/s)。
- ③振り出し動作；大転子とくるぶしを結んだ線と鉛直線のなす角度の最大値 ( $\theta_{Das}$ ; deg), および膝関節の最大伸展速度 ( $\omega_{Das-max}$ ; deg/s)。
- ④振り戻し動作；大転子とくるぶしを結んだ角速度の接地直前の最大値 ( $\omega_{Mod-max}$ ; deg/s)。

2) キック脚に関しては、次の項目について走動作の 1 サイクルの平均値から求めた (図 4 参照)。

- ①接地瞬間の股関節 ( $\theta_{H1}$ ; deg), 膝関節 ( $\theta_{K1}$ ; deg), 足関節 ( $\theta_{A1}$ ; deg) の角度
- ②離地瞬間の股関節 ( $\theta_{H2}$ ; deg), 膝関節 ( $\theta_{K2}$ ; deg), 足関節 ( $\theta_{A2}$ ; deg) の角度
- ③接地中の股関節 ( $\omega_{H-max}$ ; deg/s), 膝関節 ( $\omega_{K-max}$ ; deg/s), 足関節 ( $\omega_{A-max}$ ; deg/s) の最大伸展速度, および大転子とくるぶしを結んだ線 ( $\omega_{H/A-max}$ ; deg/s) の最大後方スウィング速度。

3) 体幹については、次の項目について走動作の 1 サイクルの平均値から求めた (図 3 参照)。

- ①接地瞬間の支持脚の大転子と胸骨上縁を結ぶ線と鉛直線のなす角度 ( $\theta_{TAI}$ ; deg, +: 前傾・-: 後傾)。
- ②離地瞬間の支持脚の大転子と胸骨上縁を結ぶ線と鉛直線のなす角度 ( $\theta_{TAI}$ ; deg, +: 前傾・-: 後傾)。

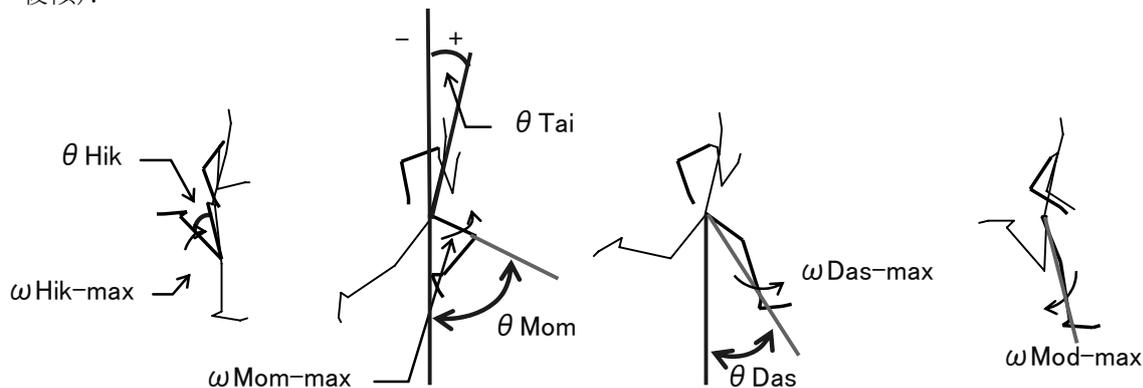


図 3. スイング脚と体幹の角度・角速度定義

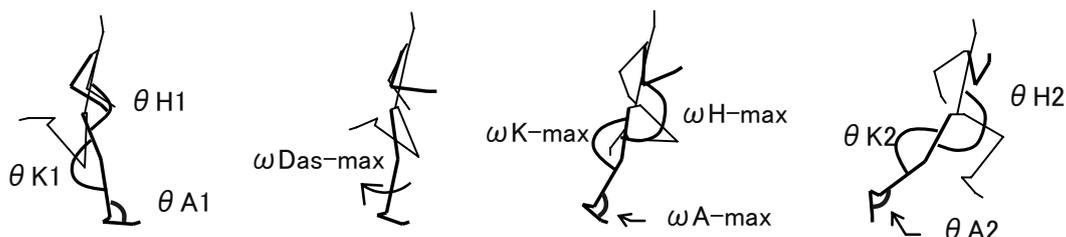


図 4. キック脚の角度・角速度定義

## 2.4 統計処理

相関分析には、Pearson の積率相関分析を用いた (SPSS for windows). 有意水準 5% とした。

## 3. 結果と考察

### 3.1 400m ハードル位置を基準とした Overlay 方式によるレース分析結果

表 1 と表 2 に男女決勝レース走者のゴール記録, 身長・体重 (北京オリンピックホームページ), 通過タイム (Passing Time), 区間タイム (Lap time),  $\bar{V}_{zone}$ ,  $SF_{zone}$ ,  $SL_{zone}$ , Relative-  $SF_{zone}$ , Height Ratio  $SL_{zone}$  を示した. なお, 女子については準決勝進出した丹野選手のデータも示した. 男女決勝レース上位 3 名と丹野選手の  $\bar{V}_{zone}$ ,  $SF_{zone}$ ,  $SL_{zone}$ , Relative-  $SF_{zone}$ , Height Ratio  $SL_{zone}$  の変化については, 決勝走者 8 名の平均値データと比較したものを図 5~図 8 に示した。

#### 3.1.1 男子決勝レース

43 秒 45 の自己新記録で優勝した WARINER 選手をはじめ, アメリカ選手がメダルを独占した (表 1). 43 秒 96 で 2 位の MERRIT 選手も当時自己新記録と, 上位選手が力を出し切ったハイレベルなレースであった。

両者の勝負に注目すると, MERRIT 選手 (5 レーン) が WARINER 選手 (6 レーン) の背中を見ながら 80m 地点まで秒速 8.13m (Zone1; S-45m), 10.54m (Zone2; 45-80m) と平均スピード (Zone1; 8.05m/s → Zone2; 10.47m/s) を若干上回る速さで両者とも走り始めていった。

表1. 男子400m走レース中の通過タイム、スピード、ピッチ、ヒッチ、ストライド

Lane	順位	名前	記録	国名	性別	身長(m)	体重(kg)	Zone												
								Section	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
								S-45m	45-80m	80-115m	115-150m	150-185m	185-220m	220-255m	255-290m	290-325m	325-360m	360-400m		
								Start	45m	80m	115m	150m	185m	220m	255m	290m	325m	360m	400m	
								Passing Time(sec)	0.00	5.54	8.88	12.26	15.77	19.40	23.06	26.81	30.50	34.37	38.39	43.45
								Lap Time(sec)	5.54	3.32	3.40	3.50	3.64	3.65	3.75	3.69	3.87	4.02	4.20	7.90
								Speed(m/sec)	8.13	10.54	10.28	9.99	9.92	9.58	9.32	9.49	9.04	8.70	8.35	3.63
								SF <sub>pass</sub> (Hz)	—	4.13	3.92	3.82	3.77	3.89	3.89	3.97	4.00	3.85	3.63	
								SL <sub>pass</sub> (m)	—	2.55	2.62	2.62	2.55	2.46	2.40	2.39	2.26	2.26	2.18	
								Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.80	1.70	1.66	1.64	1.68	1.69	1.72	1.74	1.67	1.58	
								Height ratio SL <sub>zone</sub>	—	1.38	1.42	1.41	1.38	1.33	1.29	1.29	1.22	1.22	1.18	
								Passing Time(sec)	0.00	5.54	8.86	12.18	15.63	19.30	23.02	26.86	30.58	34.57	38.61	43.96
								Lap Time(sec)	5.54	3.32	3.39	3.45	3.67	3.72	3.84	3.72	3.99	4.04	5.36	
								Speed(m/sec)	8.13	10.54	10.34	10.13	9.94	9.41	9.12	8.78	8.67	8.13	7.47	
								SF <sub>pass</sub> (Hz)	—	4.16	4.02	3.89	3.81	3.72	3.83	3.81	3.78	3.71	3.49	
								SL <sub>pass</sub> (m)	—	2.33	2.33	2.36	2.36	2.26	2.26	2.26	2.24	2.24	2.14	
								Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.33	1.37	1.36	1.31	1.29	1.29	1.29	1.22	1.22	1.12	
								Height ratio SL <sub>zone</sub>	—	1.33	1.37	1.36	1.31	1.29	1.23	1.23	1.22	1.22	1.12	
								Passing Time(sec)	0.00	5.57	8.99	12.38	15.78	19.34	23.09	26.93	30.71	34.85	39.12	44.32
								Lap Time(sec)	5.57	3.42	3.39	3.40	3.55	3.75	3.84	3.79	4.14	4.44	4.27	5.20
								Speed(m/sec)	8.08	10.23	10.33	10.29	9.85	9.33	9.12	8.92	8.46	8.19	7.70	
								SF <sub>pass</sub> (Hz)	—	4.09	4.06	4.00	3.83	3.83	3.77	3.68	3.59	3.40		
								SL <sub>pass</sub> (m)	—	2.50	2.54	2.57	2.57	2.41	2.38	2.45	2.30	2.29	2.26	
								Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.79	1.78	1.75	1.68	1.69	1.68	1.65	1.61	1.57	1.49	
								Height ratio SL <sub>zone</sub>	—	1.33	1.35	1.37	1.37	1.28	1.27	1.30	1.22	1.22	1.20	
								Passing Time(sec)	0.00	5.46	8.76	12.10	15.53	19.14	22.89	26.68	30.61	34.80	39.11	44.45
								Lap Time(sec)	5.46	3.30	3.34	3.44	3.60	3.75	3.79	3.94	4.19	4.30	5.35	
								Speed(m/sec)	8.25	10.60	10.49	10.18	9.71	9.32	9.24	8.89	8.36	8.13	7.48	
								SF <sub>pass</sub> (Hz)	—	4.18	4.09	4.39	4.24	4.22	4.18	4.15	4.05	3.95	3.72	
								SL <sub>pass</sub> (m)	—	2.29	2.33	2.32	2.29	2.21	2.14	2.06	2.06	2.01		
								Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.88	1.88	1.91	1.87	1.80	1.73	1.73	1.68	1.59		
								Height ratio SL <sub>zone</sub>	—	1.28	1.31	1.30	1.29	1.24	1.24	1.20	1.16	1.16	1.09	
								Passing Time(sec)	0.00	5.71	9.03	12.41	15.90	19.49	23.24	27.03	30.98	34.94	39.39	44.59
								Lap Time(sec)	5.71	3.32	3.39	3.49	3.75	3.75	3.79	3.95	4.14	4.35	5.20	
								Speed(m/sec)	7.89	10.54	10.33	10.04	9.76	9.33	9.24	8.85	8.46	8.19	7.69	
								SF <sub>pass</sub> (Hz)	—	4.04	3.93	3.76	3.69	3.69	3.67	3.60	3.53	3.54		
								SL <sub>pass</sub> (m)	—	2.61	2.63	2.62	2.59	2.53	2.52	2.46	2.40	2.31		
								Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.77	1.73	1.68	1.65	1.62	1.61	1.58	1.55	1.52		
								Height ratio SL <sub>zone</sub>	—	1.38	1.39	1.39	1.37	1.34	1.33	1.30	1.27	1.22		
								Passing Time(sec)	0.00	5.54	8.93	12.31	15.83	19.45	23.19	27.09	31.18	35.37	39.61	44.71
								Lap Time(sec)	5.54	3.39	3.39	3.52	3.62	3.74	3.90	4.09	4.19	4.24	5.10	
								Speed(m/sec)	8.13	10.33	10.33	9.94	9.67	9.37	8.97	8.56	8.36	8.26	7.84	
								SF <sub>pass</sub> (Hz)	—	4.18	4.13	4.02	3.89	3.89	3.83	3.78	3.83	3.78	3.59	
								SL <sub>pass</sub> (m)	—	2.47	2.50	2.48	2.49	2.41	2.34	2.27	2.18	2.18		
								Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.86	1.83	1.78	1.72	1.72	1.70	1.68	1.70	1.68		
								Height ratio SL <sub>zone</sub>	—	1.28	1.28	1.28	1.29	1.25	1.21	1.17	1.13	1.13		
								Passing Time(sec)	0.00	5.66	8.96	12.28	15.72	19.39	23.07	26.91	30.86	35.09	39.44	44.72
								Lap Time(sec)	5.66	3.30	3.32	3.44	3.67	3.69	3.84	4.05	4.22	4.35	5.25	
								Speed(m/sec)	7.96	10.50	10.54	10.18	9.63	9.49	9.12	8.85	8.56	8.04	7.55	
								SF <sub>pass</sub> (Hz)	—	4.31	4.21	4.11	4.09	4.00	3.92	3.88	3.68	3.67		
								SL <sub>pass</sub> (m)	—	2.46	2.51	2.48	2.33	2.38	2.28	2.13	2.08	2.06		
								Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.85	1.80	1.76	1.75	1.71	1.68	1.66	1.66	1.57		
								Height ratio SL <sub>zone</sub>	—	1.37	1.39	1.38	1.30	1.32	1.29	1.27	1.19	1.15		
								Passing Time(sec)	0.00	5.76	9.13	12.51	15.93	19.50	23.24	27.14	31.21	35.49	39.86	45.40
								Lap Time(sec)	5.76	3.37	3.39	3.42	3.57	3.74	3.90	4.07	4.27	4.37	5.54	
								Speed(m/sec)	7.82	10.33	10.33	9.83	9.80	9.37	8.97	8.60	8.19	8.01	7.22	
								SF <sub>pass</sub> (Hz)	—	4.04	3.97	3.83	3.73	3.69	3.63	3.56	3.51	3.40		
								SL <sub>pass</sub> (m)	—	2.57	2.60	2.68	2.63	2.54	2.47	2.41	2.33	2.24		
								Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.79	1.76	1.70	1.65	1.64	1.61	1.58	1.56	1.51		
								Height ratio SL <sub>zone</sub>	—	1.33	1.35	1.39	1.36	1.32	1.28	1.21	1.22	1.16		
								Speed(m/sec)	8.05	10.47	10.40	10.12	9.69	9.40	9.14	8.99	8.49	8.27	7.61	
								SF <sub>pass</sub> (Hz)	—	4.20	4.09	3.98	3.89	3.88	3.85	3.81	3.78	3.71		
								SL <sub>pass</sub> (m)	—	2.60	2.54	2.55	2.50	2.42	2.37	2.36	2.25	2.23		
								Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.83	1.79	1.74	1.70	1.69	1.68	1.65	1.62	1.54		
								Height ratio SL <sub>zone</sub>	—	1.34	1.36	1.36	1.33	1.30	1.27	1.26	1.20	1.19		
								Speed(m/sec)	0.14	0.14	0.11	0.12	0.09	0.11	0.13	0.35	0.28	0.27		
								SF <sub>pass</sub> (Hz)	—	0.20	0.19	0.19	0.18	0.17	0.17	0.19	0.20	0.19		
								SL <sub>pass</sub> (m)	—	0.10	0.10	0.11	0.12	0.10	0.09	0.12	0.11	0.11		
								Relative SF <sub>zone</sub>	—	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.06		
								Height ratio SL <sub>zone</sub>	—	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04		

決勝8名平均値

決勝8名SD(標準偏差)

表2. 女子400m走レース中の通過タイム、スピード、ピッチ、ストライド

■女子決勝と持野選手		Final/2007/8/29															
Semi Final/2007/8/27		名前															
Lane	順位	記録	国名	性別	身長(m)	体重(kg)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Zone	Section	Start	45-80m	80-115m	115-150m	150-185m	185-220m	220-255m	255-290m	290-325m	325-360m	360-400m					
Passing position	Start	45m	100m	135m	170m	205m	240m	275m	310m	345m	380m	415m					
Passing Time(sec)	0.00	6.32	10.08	13.81	17.55	21.30	25.04	28.78	32.53	36.27	39.91	43.61					
Lap time(sec)	6.32	3.76	3.74	3.74	3.75	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76					
Speed(m/sec)	—	8.92	9.14	9.14	9.14	9.14	9.14	9.14	9.14	9.14	9.14	9.14					
Stride(m)	—	7.12	7.12	7.12	7.12	7.12	7.12	7.12	7.12	7.12	7.12	7.12					
Stride(m/Hz)	—	4.00	3.97	3.84	3.75	3.69	3.62	3.60	3.60	3.59	3.54	3.45					
Stride(m)	—	2.33	2.30	2.26	2.24	2.25	2.22	2.21	2.13	2.13	2.13	2.08					
Relative SF <sub>max</sub>	—	1.68	1.66	1.62	1.58	1.56	1.56	1.52	1.52	1.51	1.50	1.48					
Height ratio SF <sub>max</sub>	—	1.33	1.31	1.28	1.28	1.28	1.28	1.22	1.22	1.22	1.22	1.19					
Passing Time(sec)	0.00	6.27	10.21	14.16	18.20	22.42	26.81	31.40	36.19	41.08	46.03	51.05					
Lap time(sec)	6.27	3.94	3.95	4.04	4.12	4.19	4.26	4.32	4.38	4.44	4.50	4.57					
Speed(m/sec)	7.17	8.89	8.85	8.67	8.49	8.32	8.16	8.02	7.88	7.74	7.63	7.53					
Stride(m)	—	6.89	6.83	6.74	6.64	6.54	6.44	6.34	6.24	6.14	6.04	5.94					
Stride(m/Hz)	—	3.96	3.90	3.85	3.85	3.85	3.82	3.78	3.78	3.78	3.73	3.67					
Stride(m)	—	2.25	2.27	2.25	2.15	2.16	2.22	2.06	2.05	2.05	2.04	1.94					
Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.65	1.63	1.61	1.61	1.65	1.64	1.61	1.58	1.56	1.56	1.53					
Height ratio SF <sub>zone</sub>	—	1.31	1.33	1.33	1.32	1.28	1.28	1.22	1.22	1.22	1.20	1.13					
Passing Time(sec)	0.00	6.09	9.88	13.71	17.65	21.69	25.84	30.06	34.45	39.06	43.79	48.66					
Lap time(sec)	6.09	3.76	3.84	3.94	4.04	4.15	4.26	4.36	4.46	4.56	4.66	4.76					
Speed(m/sec)	7.39	9.12	8.94	8.74	8.54	8.34	8.14	7.94	7.74	7.54	7.34	7.14					
Stride(m)	—	4.22	4.13	4.13	4.13	4.07	4.03	3.98	3.87	3.82	3.82	3.82					
Stride(m/Hz)	—	2.19	2.21	2.13	2.13	2.09	2.04	2.00	1.97	1.93	1.85	1.85					
Stride(m)	—	1.74	1.71	1.71	1.68	1.66	1.66	1.64	1.60	1.58	1.52	1.52					
Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.31	1.32	1.28	1.27	1.25	1.22	1.20	1.18	1.18	1.16	1.11					
Height ratio SF <sub>zone</sub>	—	1.31	1.32	1.28	1.27	1.25	1.22	1.20	1.18	1.18	1.16	1.11					
Passing Time(sec)	0.00	6.36	10.18	14.20	18.28	22.42	26.69	31.14	35.70	40.34	44.98	49.66					
Lap time(sec)	6.36	3.82	4.02	4.09	4.24	4.32	4.41	4.49	4.57	4.64	4.74	4.84					
Speed(m/sec)	7.08	9.16	8.70	8.56	8.26	8.39	8.46	8.01	7.71	7.55	7.35	7.15					
Stride(m)	—	4.18	4.03	4.03	4.00	3.96	3.92	3.89	3.81	3.75	3.51	3.51					
Stride(m/Hz)	—	2.19	2.16	2.12	2.12	2.16	2.12	2.16	2.06	2.02	2.01	1.97					
Stride(m)	—	1.75	1.69	1.69	1.69	1.66	1.66	1.63	1.60	1.57	1.48	1.48					
Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.66	1.62	1.63	1.63	1.59	1.59	1.59	1.59	1.50	1.46	1.38					
Height ratio SF <sub>zone</sub>	—	1.31	1.29	1.29	1.29	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.20	1.14					
Passing Time(sec)	0.00	6.46	10.29	14.31	18.35	22.49	26.86	31.25	35.65	40.26	44.84	49.54					
Lap time(sec)	6.46	3.84	3.94	4.05	4.12	4.25	4.37	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41					
Speed(m/sec)	6.97	8.91	8.83	8.63	8.32	8.60	8.63	8.01	7.71	7.51	7.31	7.11					
Stride(m)	—	3.91	3.83	3.81	3.76	3.89	3.80	3.81	3.78	3.61	3.47	3.47					
Stride(m/Hz)	—	2.33	2.32	2.26	2.21	2.21	2.21	2.21	2.10	2.06	2.03	1.96					
Stride(m)	—	1.67	1.63	1.62	1.60	1.66	1.66	1.62	1.61	1.54	1.48	1.48					
Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.31	1.30	1.27	1.24	1.24	1.24	1.18	1.15	1.15	1.14	1.10					
Height ratio SF <sub>zone</sub>	—	1.31	1.30	1.27	1.24	1.24	1.24	1.18	1.15	1.15	1.14	1.10					
Passing Time(sec)	0.00	6.24	10.01	13.93	17.75	21.74	25.91	30.20	34.62	39.21	43.84	48.44					
Lap time(sec)	6.24	3.77	3.82	3.92	3.99	4.17	4.29	4.42	4.56	4.69	4.84	4.94					
Speed(m/sec)	7.21	9.28	9.16	8.93	8.78	8.39	8.39	7.83	7.63	7.33	7.23	7.23					
Stride(m)	—	4.00	4.00	4.00	3.93	3.85	3.76	3.68	3.63	3.54	3.45	3.45					
Stride(m/Hz)	—	2.32	2.29	2.27	2.28	2.23	2.23	2.18	2.15	2.09	1.98	1.98					
Stride(m)	—	1.69	1.69	1.68	1.68	1.63	1.59	1.53	1.50	1.46	1.38	1.38					
Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.63	1.63	1.63	1.63	1.59	1.59	1.59	1.59	1.50	1.46	1.38					
Height ratio SF <sub>zone</sub>	—	1.31	1.31	1.30	1.30	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.20	1.14					
Passing Time(sec)	0.00	6.34	10.28	14.31	18.35	22.42	26.88	31.25	35.65	40.26	44.84	49.54					
Lap time(sec)	6.34	3.94	3.95	4.12	4.12	4.25	4.37	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41					
Speed(m/sec)	7.10	8.89	8.85	8.49	8.19	8.23	8.01	7.85	7.60	7.33	7.02	7.02					
Stride(m)	—	4.13	4.05	3.89	3.87	3.94	3.87	3.80	3.76	3.70	3.60	3.60					
Stride(m/Hz)	—	2.15	2.18	2.19	2.12	2.09	2.07	2.09	2.02	2.02	2.06	1.95					
Stride(m)	—	1.75	1.71	1.64	1.63	1.66	1.63	1.60	1.59	1.56	1.52	1.52					
Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.23	1.25	1.25	1.21	1.19	1.18	1.18	1.20	1.15	1.18	1.12					
Height ratio SF <sub>zone</sub>	—	1.23	1.25	1.25	1.21	1.19	1.18	1.18	1.20	1.15	1.18	1.12					
Passing Time(sec)	0.00	6.12	9.89	13.93	18.03	22.37	26.68	31.05	35.60	40.29	45.05	49.97					
Lap time(sec)	6.12	3.77	4.04	4.10	4.34	4.30	4.37	4.56	4.69	4.76	4.86	4.92					
Speed(m/sec)	7.35	9.28	8.67	8.53	8.07	8.13	8.01	7.68	7.47	7.36	7.16	7.16					
Stride(m)	—	3.96	3.81	3.73	3.68	3.65	3.62	3.53	3.51	3.48	3.33	3.33					
Stride(m/Hz)	—	2.34	2.27	2.29	2.19	2.23	2.21	2.18	2.13	2.11	2.03	2.03					
Stride(m)	—	1.69	1.69	1.62	1.59	1.57	1.54	1.50	1.50	1.48	1.42	1.42					
Relative SF <sub>zone</sub>	—	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63					
Height ratio SF <sub>zone</sub>	—	1.32	1.28	1.28	1.28	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.19	1.14					
Passing Time(sec)	7.17	8.97	8.67	8.69	8.68	8.68	8.68	8.68	8.68	8.68	8.68	8.68					
Lap time(sec)	—	8.97	8.67	8.69	8.68	8.68	8.68	8.68	8.68	8.68	8.68	8.68					
Speed(m/sec)	—	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28	9.28					
Stride(m)	—	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00					
Stride(m/Hz)	—	1.30	1.29	1.29	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25					
Stride(m)	—	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10					
Relative SF <sub>zone</sub>	—	0.14	0.17	0.19	0.16	0.25	0.16	0.26	0.11	0.10	0.15	0.26					
Height ratio SF <sub>zone</sub>	—	0.14	0.17	0.19	0.16	0.25	0.16	0.26	0.11	0.10	0.15	0.26					
Passing Time(sec)	—	0.08	0.06	0.06	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07					
Lap time(sec)	—	0.08	0.06	0.06	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07					
Speed(m/sec)	—	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06					
Stride(m)	—	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04					
Stride(m/Hz)	—	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03					
Stride(m)	—	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04					
Relative SF <sub>zone</sub>	—	0.00	6.27	10.24	14.33	18.54	22.89	27.26	31.70	36.27	41.04	45.98					
Height ratio SF <sub>zone</sub>	—	0.00	6.27	10.24	14.33	18.54	22.89	27.26	31.70	36.27	41.04	45.98					
Passing Time(sec)	0.00	6.27	10.24	14.33	18.54	22.89	27.26	31.70	36.27	41.04	45.98	51.81					
Lap time(sec)	6.27	3.97	4.														

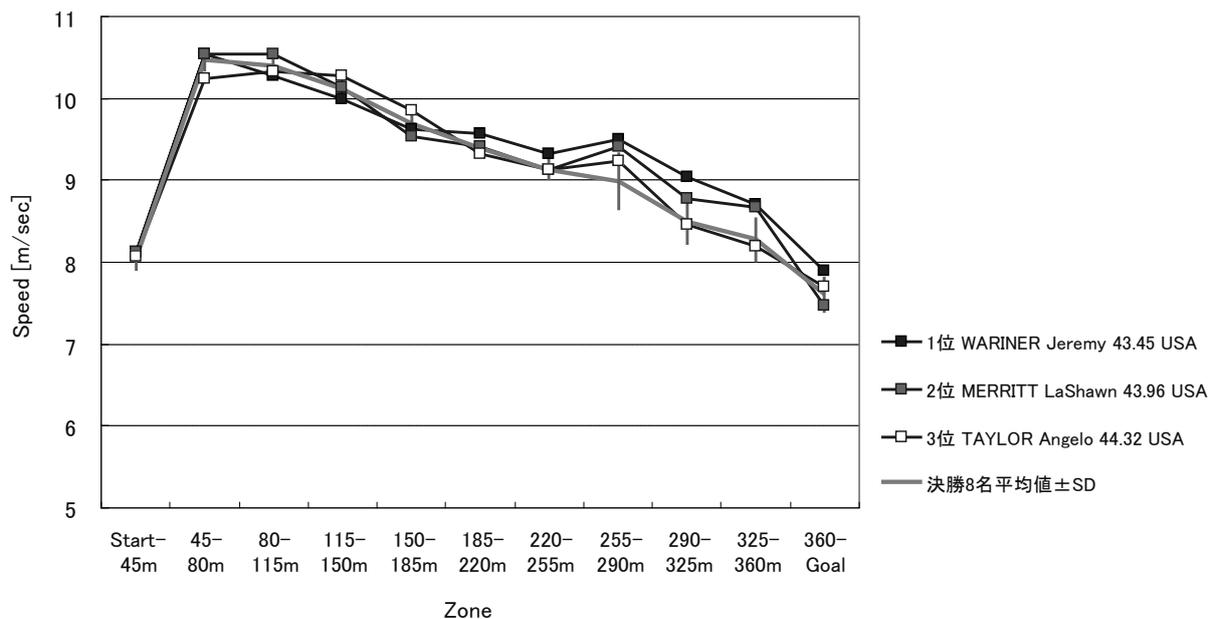


図 5. 07 大阪・男子 400m 走決勝レース中のスピード変化 (Zone 設定 : 400m ハードル)

上位 3 名データと決勝 8 名平均値±SD  
SD : 標準偏差

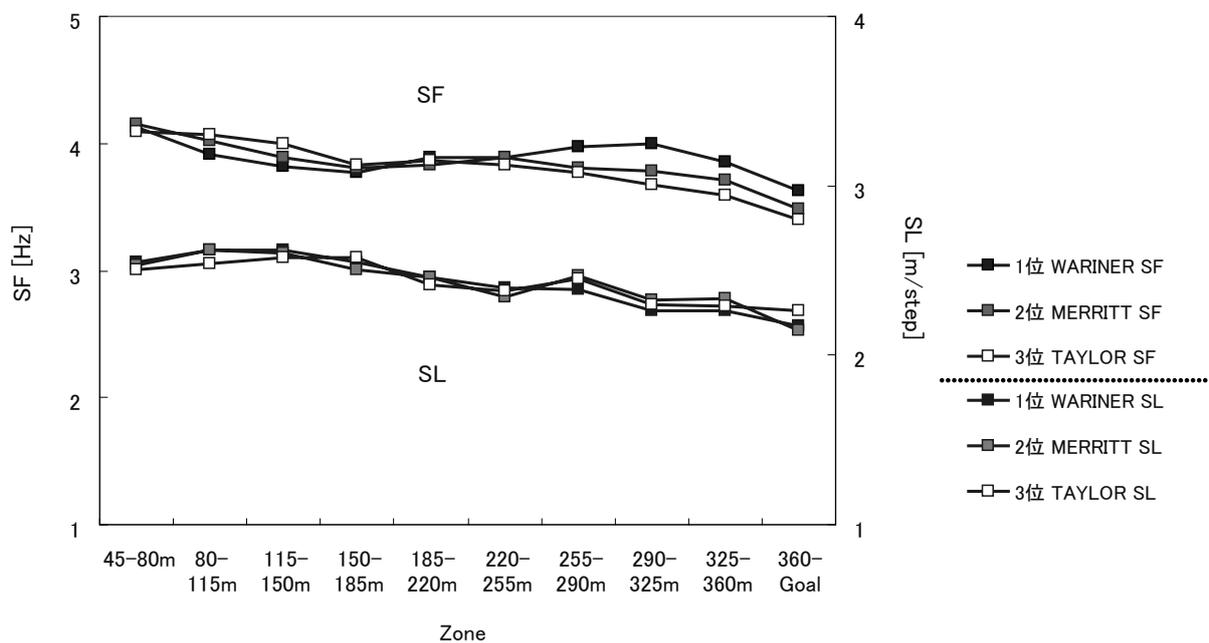


図 6. 07 大阪・男子 400m 走決勝レース中のピッチ (SF), ストライド (SL)変化

上位 3 名のデータを示す. 上段がピッチの変化, 下段がストライドの変化  
尚, Zone 1 (S-45m)のピッチとストライド分析は行っていない.

<Abbreviation>

SF:ピッチ, SL:ストライド

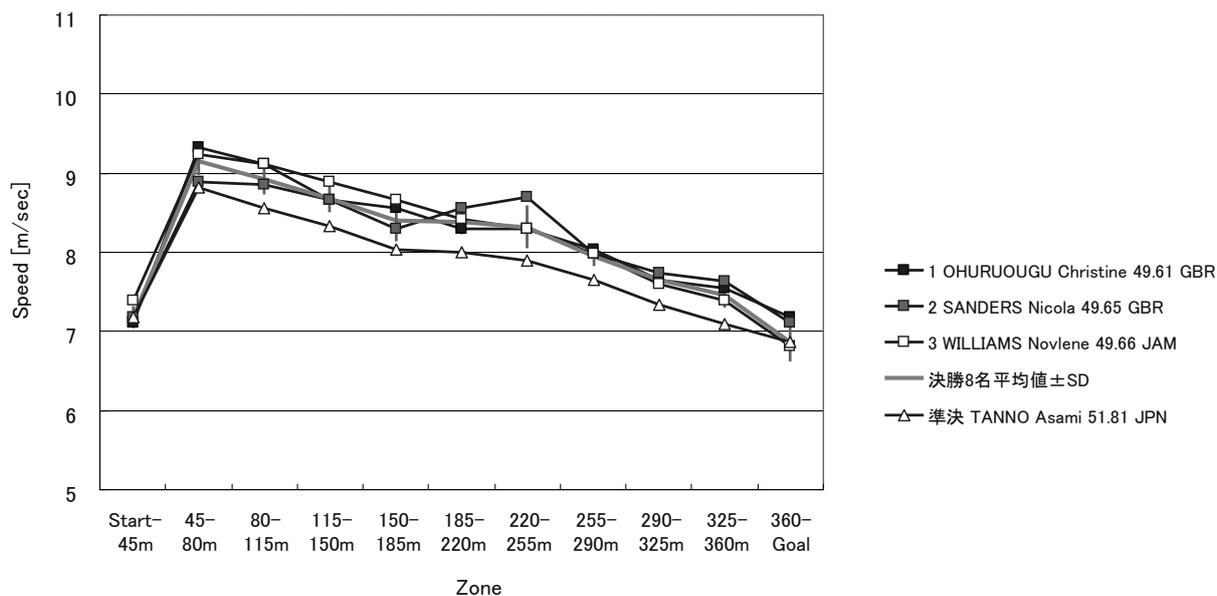


図 7. 07 大阪・女子 400m 走決勝レース中のスピード変化 (Zone 設定 : 400m ハードル)

上位 3 名データと決勝 8 名平均値±SD  
SD : 標準偏差

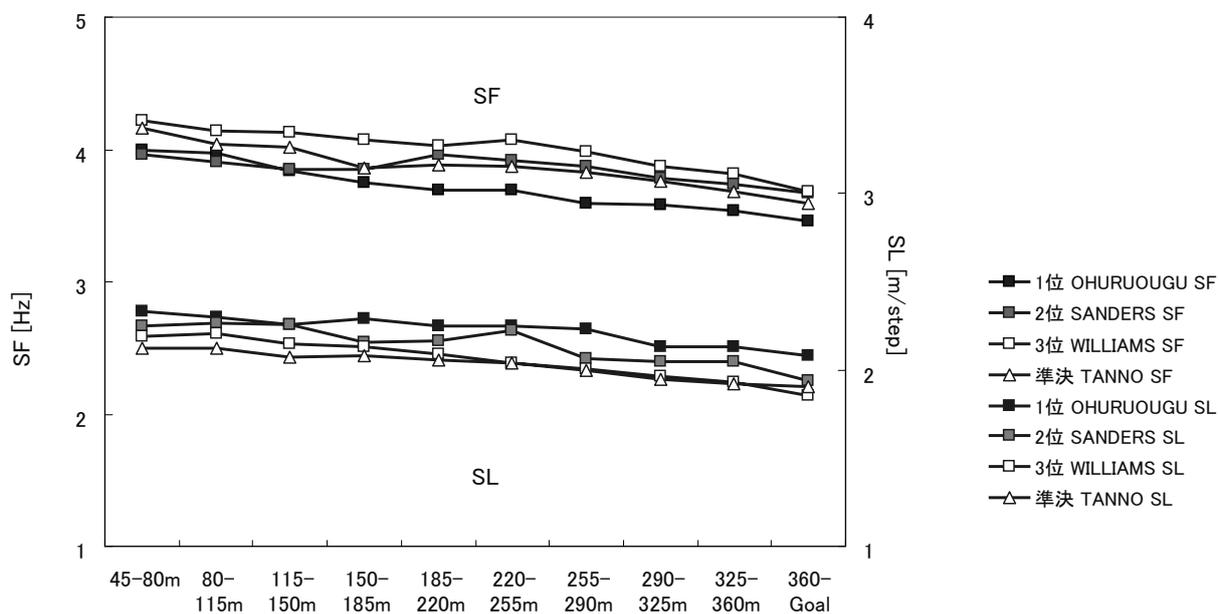


図 8. 07 大阪・女子 400m 走決勝レース中のピッチ (SF), ストライド (SL) 変化

上位 3 名と丹野選手のデータを示す。上段がピッチの変化, 下段がストライドの変化  
尚, Zone 1 (S-45m)のピッチとストライド分析は行っていない。

<Abbreviation>

SF:ピッチ, SL: ストライド

バックストレートへ入りはじめたところから 150m 地点ぐらいまでは MERRIT 選手 (Zone3→4; 10.54m/s→10.13m/s) が WARINER 選手 (Zone3→4; 10.28m/s→9.99m/s) より僅かに速く走っていく展開を見せた (表 1, 図 5)。その時 MERRIT 選手は WARINER 選手と同じストライド長 (2.62m) であり, MERRIT 選手はピッチを若干高くして (0.07~0.1Hz) スピードを上げていた (表 1, 図 6)。その後 Zone5(150-185m)以降, 両者ともスピードが低下するなか, WARINER 選手のスピード (9.62m/s) が MERRIT 選手(9.54m/s)を上回り始める。両選手は Zone8 (255-290m) で決勝 8 名の平均スピードを 0.42~0.50 (m/s) 上回るスパートをかけ, 下位選手をさらに引き離しゴールしていった。両者ともスパート後 (Zone9-11; 290-400m), スピードは低下していったが, WARINER 選手は MERRIT 選手に比べてスピード低下が抑えられている。その時, WARINER 選手のストライド ( $SL_{zone}$ ; 2.26→2.26→2.18m,  $SF_{zone}$ ; 4.00→3.85→3.63Hz) は MERRIT 選手 ( $SL_{zone}$ ; 2.32→2.34→2.14m,  $SF_{zone}$ ; 3.78→3.71→3.49Hz) より約 4~8cm 短く, 反対にピッチを 0.14~0.22 (Hz) 高くして走っていた。

### 3.1.2 女子決勝レースと丹野選手

女子決勝レースは僅か 0.05 秒間に上位 3 名が含まれる混戦であった。しかしながら, そのレース展開は三者三様であった (図 7)。まず 3 位の WILLIAMS 選手 (49 秒 66 : PB49 秒 63) が高いピッチ (表 2, 図 8, Zone2→Zone5; 4.22~4.04Hz) で前半 185m 地点を 21 秒 69 の 1 位で通過した。その時, 優勝した OHURUOUGU 選手は 22 秒 04 の 3 位通過, 準優勝の SANDERS 選手は 22 秒 42 の 5 位通過と大きく遅れていた。その後 185m 以降 255m (Zone6→7) まで SANDERS 選手は, 決勝 8 名の平均スピードを 0.56~0.82 (m/s) と大きく上回る劇的なスパートをかけた。185m 地点で 0 秒 73 あった WILLIAMS 選手との差は, 255m 地点では 0 秒 47 と, 70m 間で 0 秒 26 の差を縮めた。その時 SANDERS 選手は, まずピッチを 0.11 (Hz) 上げ (Zone5→6;  $SF_{zone}$  3.85→3.96Hz,  $SL_{zone}$  2.15→2.16m), スピードが 0.27(m/s)速くなった次の区間ではストライドを 6cm 伸ばし (Zone6→7; $SF_{zone}$  3.96→3.92Hz,  $SL_{zone}$  2.16→2.22m) さらにスピードを 0.14 (m/s) 速めていった。ホームストレートおよび最終区間 (Zone11) で, 前半大きく遅れを取っていた SANDERS 選手が WILLIAMS 選手に追いつき, 0 秒 01 の胸差で 2 位となった。スタートから高いピッチでリードを保ってきた WILLIAMS 選手は残り 40m 区間での減速が大きく, 3 位となった。優勝した OHURUOUGU 選手は Zone2 (45-80m) で 9.32(m/s)と決勝 8 名のうち最も高いスピードを出し, その後スムーズにレースを展開しながら, 最終区間 (Zone11) では 7.19 (m/s) と, これまた決

勝 8 名のうち最も高いスピードで走り抜け, 1 位を死守した。

準決勝にラウンドを進められた丹野選手のレースタイムは 51 秒 81 であった。参考までに, 決勝レースのスピード, ピッチ, ストライド変化と比較してみると, 最高速度が出現する Zone2 (45-80m) での速度が, 8.81 (m/s) と決勝 8 名の平均値 (9.15m/s) より 1.34 (m/s) 低く, その後中盤から終盤にかけて決勝走者より一定速度下回るスピードでレースが展開されていた。ピッチ, ストライドを世界レベルと比較すると, 丹野選手のピッチは世界のトップ選手と遜色ないが (図 8), ストライドの短さが目立つ。前半 (Zone1→5) のストライドを 5cm 伸ばす走りができるかと世界に通用する走りに近づくかもしれない。最高速度を向上させるアプローチとして, ストライドの伸長に注目していくことが重要だと感じる。そしてその効果的な訓練方法の開発が望まれよう。

### 3.1.3 WARINER 選手と M.JOHNSON 選手のレース比較

50m 区間ごとに分析してある 99 セベリアのデータなどと比較できるように, 推定 50m 通過タイムおよび区間タイム, 区間平均速度を, 表 3 (男子) と表 4 (女子) に示した。そして, 図 9 に WARINER 選手と M.JOHNSON 選手のレース比較を示した。両者のレースパターンは類似していたが, レース展開は次のようであった。

WARINER 選手は, M.JOHNSON 選手より, 150m 地点まで各区間, 秒速 0.18, 0.36, 0.08m 速く走っていて, 約 0.3 秒リードした。いっぽう M.JOHNSON 選手は, 150-200m 区間以降, すべての区間において WARINER 選手より秒速 0.16~0.35m 速く走っていた。150m 地点で 0.3 秒あった遅れを 200m 間要して取り戻し, 350m 地点で M.JOHNSON 選手は WARINER 選手を捕らえ, 最終的に 0 秒 27 差をつけてゴールとなる。もし, 両者が同一レースで争っていたとしたら, お互い競い合うことで 42 秒台のタイムが出たのではないかと想像を膨らますと気持ちが高ぶってくる。

### 3.2 ゴールタイムと走速度

伊藤ら (1997) は, アジア大会決勝走者と関西学生選手の走速度とゴールタイムとの関係から, 400m のゴールタイムの良い選手ほど前半の速度が速い傾向にあり, 後半の速度低下が大きい傾向にあったことを報告している。そして, 『400m 走選手が大きく記録を伸ばすためには, 前半を速い速度で楽に通過できる高い走能力を潜在的に持っていなければならない』と指摘している。そこで, 伊藤ら (1997), 99 セベリア (Amelia Ferro et al., 2001) のデータを本研

表 3. 推定 50m 通過タイムと区間スピード (男子)

■男子決勝 Final:2007/8/31						Zone																	
Lane	順位	名前	記録	国名	性別	Section		1		2		3		4		5		6		7		8	
						Start	50m	50-100m	100m	100-150m	150m	150-200m	200m	200-250m	250m	250-300m	300m	300-350m	350m	350-400m			
6	1位	WARINER	Jeremy	43.45	USA	M	0.00	6.01	10.80	15.77	20.97	26.27	31.60	37.24	43.45								
							Passing Time(sec)	6.01	4.79	4.96	5.20	5.31	5.33	5.64	6.21								
							Lap time(sec)	8.32	10.54	10.25	9.50	9.23	9.25	8.72	7.68								
							Speed(m/sec)	0.00	6.06	10.93	15.78	20.94	26.38	31.90	37.90	44.32							
							Passing Time(sec)	0.00	6.01	10.76	15.63	20.90	26.31	31.72	37.45	43.96							
							Lap time(sec)	6.01	4.74	4.88	5.26	5.42	5.41	5.73	6.51								
							Speed(m/sec)	8.32	10.54	10.25	9.50	9.23	9.25	8.72	7.68								
							Passing Time(sec)	0.00	6.06	10.93	15.78	20.94	26.38	31.90	37.90	44.32							
							Lap time(sec)	6.06	4.87	4.85	5.16	5.43	5.52	6.01	6.42								
							Speed(m/sec)	8.25	10.27	10.30	9.69	9.20	9.06	8.33	7.79								
							Passing Time(sec)	0.00	5.93	10.66	15.53	20.74	26.14	31.81	37.88	44.45							
							Lap time(sec)	5.93	4.74	4.87	5.21	5.39	5.67	6.07	6.57								
							Speed(m/sec)	8.44	10.55	10.27	9.59	9.27	8.81	8.24	7.60								
							Passing Time(sec)	0.00	6.18	10.96	15.90	21.09	26.49	32.16	38.17	44.59							
							Lap time(sec)	6.18	4.78	4.94	5.20	5.39	5.68	6.01	6.42								
							Speed(m/sec)	8.09	10.46	10.12	9.62	9.27	8.81	8.32	7.79								
							Passing Time(sec)	0.00	6.02	10.86	15.83	21.05	26.54	32.38	38.40	44.71							
							Lap time(sec)	6.02	4.84	4.97	5.22	5.48	5.84	6.02	6.31								
							Speed(m/sec)	8.30	10.33	10.06	9.58	9.12	8.56	8.31	7.92								
							Passing Time(sec)	0.00	6.13	10.86	15.72	20.97	26.36	32.07	38.20	44.72							
							Lap time(sec)	6.13	4.73	4.86	5.25	5.40	5.71	6.13	6.53								
							Speed(m/sec)	8.16	10.57	10.29	9.52	9.27	8.76	8.16	7.66								
							Passing Time(sec)	0.00	6.24	11.06	15.93	21.10	26.59	32.43	38.61	45.40							
							Lap time(sec)	6.24	4.82	4.87	5.17	5.48	5.85	6.17	6.79								
							Speed(m/sec)	8.02	10.36	10.26	9.67	9.12	8.55	8.10	7.36								
■99セビア(Amelia Ferro et al.2001)							Passing Time(sec)	0.00	6.14	11.10	16.10	21.22	26.42	31.66	37.18	43.13							
							Lap time(sec)	6.14	4.96	5.00	5.12	5.20	5.24	5.52	5.95								
							Speed(m/sec)	8.14	10.08	10.00	9.77	9.62	9.54	9.06	8.40								

表 4. 推定 50m 通過タイムと区間スピード (女子)

■女子決勝と丹野選手 Final:2007/8/29 Semi Final:2007/8/27						Zone																	
Lane	順位	名前	記録	国名	性別	Section		1		2		3		4		5		6		7		8	
						Start	50m	50-100m	100m	100-150m	150m	150-200m	200m	200-250m	250m	250-300m	300m	300-350m	350m	350-400m			
6	1位	OHURUOUGU	Christine	49.61	GBR	W	0.00	6.86	12.27	17.98	23.85	29.87	36.14	42.72	49.61								
							Passing Time(sec)	6.86	5.41	5.71	5.87	6.02	6.27	6.58	6.89								
							Lap time(sec)	7.29	9.24	8.76	8.52	8.31	7.97	7.60	7.26								
							Speed(m/sec)	0.00	6.83	12.47	18.20	24.17	29.96	36.21	42.72	49.65							
							Passing Time(sec)	6.83	5.64	5.73	5.97	5.79	6.25	6.51	6.93								
							Lap time(sec)	7.32	8.87	8.73	8.38	8.64	8.00	7.68	7.22								
							Speed(m/sec)	0.00	6.90	12.47	18.28	24.31	30.24	36.50	43.05	50.16							
							Passing Time(sec)	6.90	5.57	5.81	6.03	5.93	6.26	6.55	7.11								
							Lap time(sec)	7.25	8.98	8.61	8.29	8.43	7.99	7.63	7.03								
							Speed(m/sec)	0.00	7.00	12.54	18.28	24.23	30.03	36.27	42.91	50.17							
							Passing Time(sec)	7.00	5.54	5.74	5.95	5.80	6.24	6.64	7.26								
							Lap time(sec)	7.14	9.03	8.71	8.40	8.62	8.01	7.53	6.89								
							Speed(m/sec)	0.00	6.78	12.19	17.75	23.53	29.58	35.93	42.66	50.33							
							Passing Time(sec)	6.78	5.41	5.56	5.78	6.05	6.35	6.73	7.17								
							Lap time(sec)	7.37	9.24	8.99	8.65	8.26	7.87	7.43	6.52								
							Speed(m/sec)	0.00	6.90	12.54	18.35	24.45	30.62	36.97	43.53	50.54							
							Passing Time(sec)	6.90	5.64	5.81	6.10	6.17	6.35	6.56	7.01								
							Lap time(sec)	7.25	8.87	8.61	8.20	8.10	7.87	7.62	7.13								
							Speed(m/sec)	0.00	6.60	12.20	18.03	24.22	30.42	36.94	43.69	50.96							
							Passing Time(sec)	6.60	5.60	5.83	6.19	6.20	6.52	6.75	7.27								
							Lap time(sec)	7.58	8.93	8.58	8.08	8.06	7.67	7.41	6.88								
							Speed(m/sec)	0.00	6.84	12.58	18.54	24.76	31.06	37.63	44.57	51.81							
							Passing Time(sec)	6.84	5.74	5.96	6.22	6.30	6.57	6.94	7.24								
							Lap time(sec)	7.31	8.71	8.39	8.04	7.94	7.61	7.20	6.91								
							Speed(m/sec)	0.00	6.84	12.58	18.54	24.76	31.06	37.63	44.57	51.81							

究のデータに加えて、走速度とゴールタイムの関係をみてみた(図 10)。本研究データには 07 大阪に加え、日本陸連科学委員会が蓄積している国内トップ選手のデータも含めている。

表 5 と表 6 に前・後半速度、ピッチ、ストライドとそれらの低下率を示した。図 10 の男子前半に注目すると、全体的にはゴールタイムの良い選手ほど前半の走速度が速い傾向にあった ( $r=-0.89, p<0.01$ )。ただし、07 大阪および 99 セビアの選手に焦点を当てると、43 秒 18 から 45 秒 40 といった世界トップレベル内ではそのような関係性は見られなかった(N.S)。そして、世界トップレベルの速度低下率の平均値±標準偏差(範囲)は、18.00 ± 3.34% (11.25~22.54%, 表 5)であることを踏まえると、世界トップレベルになるためには、後半の速度低下が 18%前後程度に抑えられる余力をもつ条件で、前半(150m 付近)速度を 10.0(m/s)前後で走れなければならないと言える。

いっぽう女子の世界トップレベルの場合は、男子のような傾向ではなく、ゴールタイムの良い選

手ほど前半の走速度が速いといった全体的な傾向に沿っていた ( $r=-0.91, p<0.01$ )。

### 3.3 走速度とピッチ・ストライド

速度を構成するピッチとストライドについて、レース中の走速度との関係性を全体的にみると、ストライドが大きいものほど走速度が速い傾向にあった ( $r=0.89, p<0.01$ )。ピッチと走速度との関係性はある程度あるものの ( $r=0.61, p<0.01$ )、ストライドに比べて低かった(図 11)。速度低下率との関係では、ピッチ低下率 ( $r=0.61, p<0.01$ ) よりストライド低下率 ( $r=0.89, p<0.01$ ) による影響のほうが大きい傾向が示唆された。

### 3.4 疾走動作について

07 大阪男子メダリスト 3 名(以下、07 大阪男子 TOP3 とする)および山口選手(大阪ガス)と女子メダリスト 3 名(以下、07 大阪女子 TOP3)の疾走動作のスティックピクチャーを

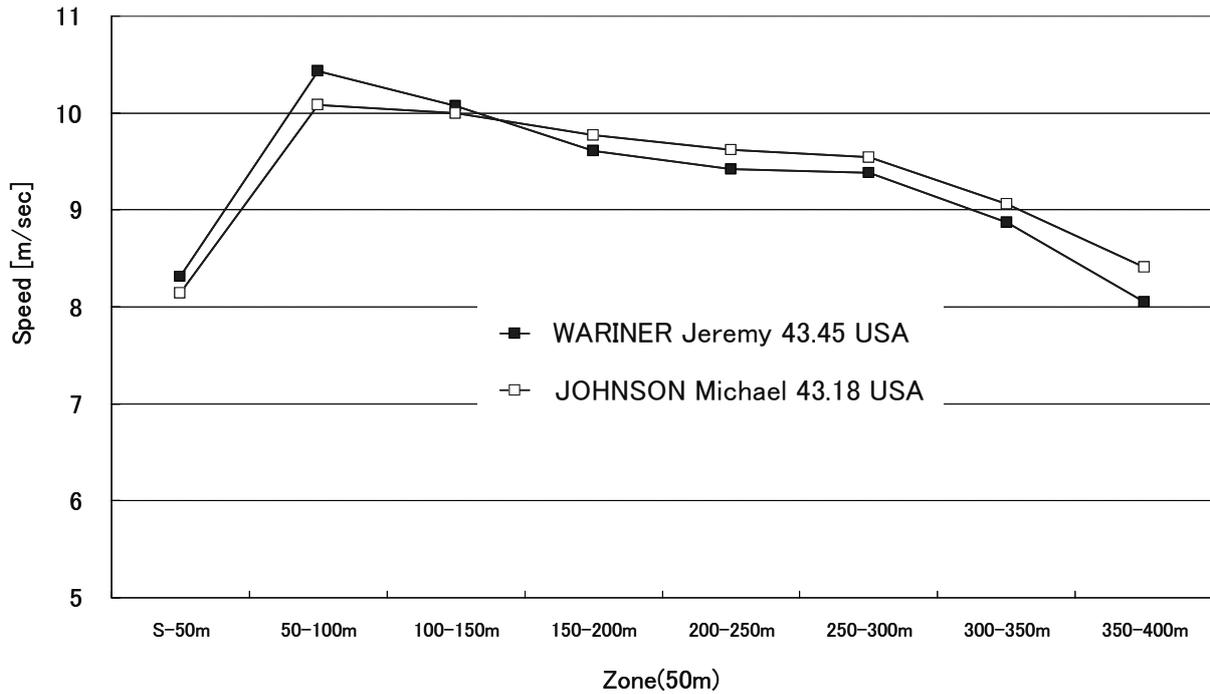


図9. J.WARINER 選手 (07 大阪) と M.JOHNSON (99 セビリア) 選手の比較

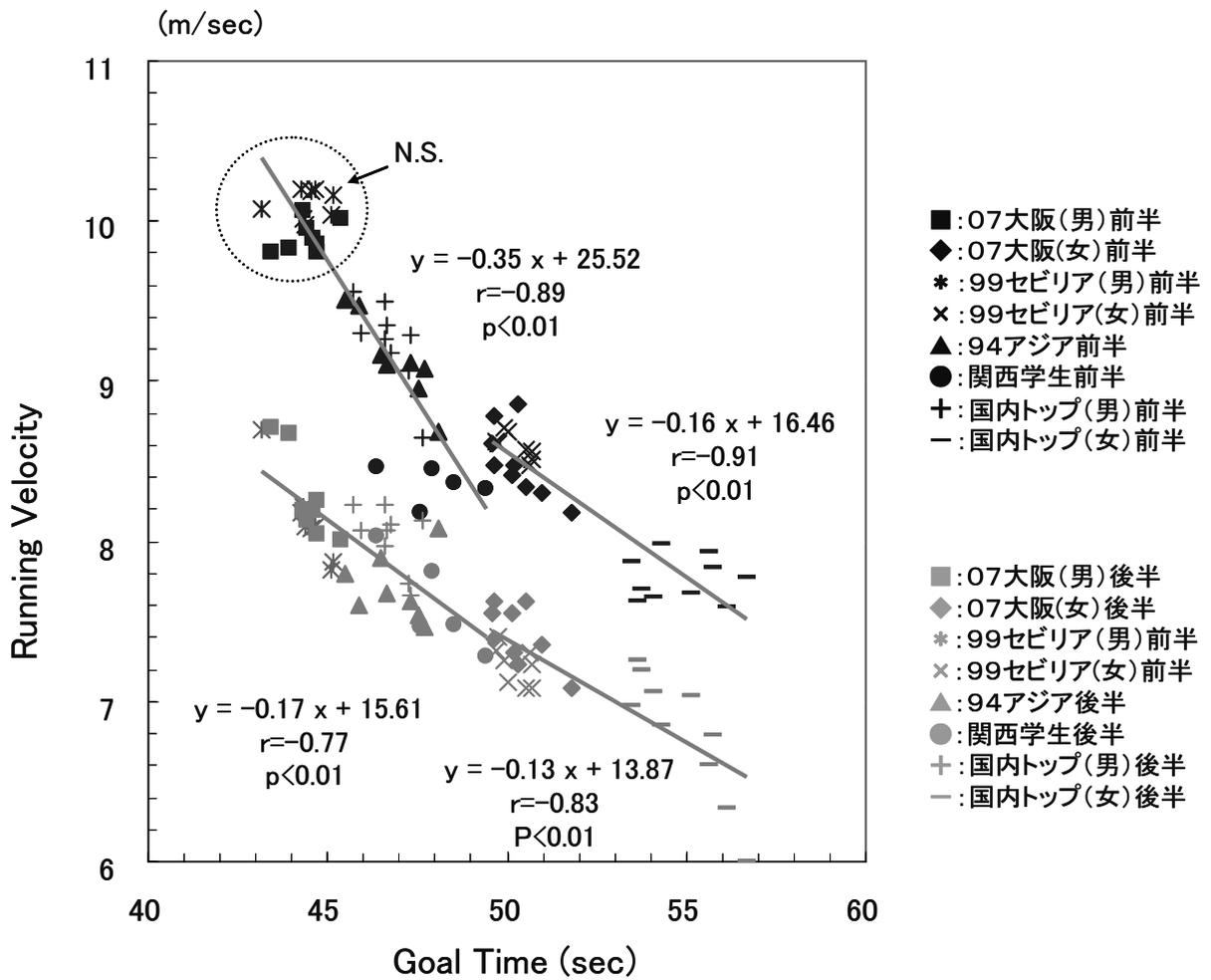


図10. ゴールタイムとレース前半と後半の走速度の関係

表 5. 男子 400m 走レースのゴールタイムとレース前半, 後半の走速度, ピッチ, ストライドおよび低下率

名前	前半 (150m 付近)				後半 (350m 付近)				低下率 (%)		
	記録 (秒)	速度 (m/s)	ピッチ (Hz)	ストライド (m)	速度 (m/s)	ピッチ (Hz)	ストライド (m)	速度	ピッチ	ストライド	
07大阪	WARINER Jeremy	43.45	9.81	3.79	2.58	8.70	3.85	2.26	11.25	-1.45	12.50
	MERRITT LaShawn	43.96	9.83	3.85	2.56	8.67	3.71	2.34	11.87	3.63	8.53
	TAYLOR Angelo	44.32	10.07	3.91	2.57	8.19	3.59	2.29	18.59	8.31	11.21
	BROWN Chris	44.45	9.95	4.31	2.31	8.13	3.95	2.06	18.26	8.46	10.69
	DJHONE Leslie	44.59	9.90	3.80	2.61	8.19	3.54	2.31	17.20	6.72	11.23
	CHRISTOPHER Tyler	44.71	9.81	3.95	2.48	8.26	3.78	2.18	15.78	4.37	11.94
	WISSMAN Johan	44.72	9.86	4.10	2.41	8.04	3.87	2.08	18.46	5.62	13.60
MONCUR Avard	45.40	10.02	3.78	2.65	8.01	3.40	2.36	20.08	10.01	11.18	
99セブリア (Amelia Ferro et al., 2001)	Johnson Michel	43.18	10.08	—	—	8.69	—	—	13.76	—	—
	Parrela Sanderei Claro	44.29	10.20	—	—	8.18	—	—	19.82	—	—
	Cardenas Atejandro	44.31	10.02	—	—	8.21	—	—	18.05	—	—
	Young Jerome	44.36	9.98	—	—	8.09	—	—	18.93	—	—
	Pettigrew Antonio	44.54	10.18	—	—	8.09	—	—	20.58	—	—
	Richardson Mark	44.65	10.20	—	—	8.09	—	—	20.67	—	—
	Haughton Gregory	45.07	10.04	—	—	7.82	—	—	22.08	—	—
Baulch Jamie	45.18	10.16	—	—	7.87	—	—	22.54	—	—	
94アジア大会 (伊藤ら, 1997)	Ismail Ibrahim	45.48	9.51	3.87	2.46	7.80	3.57	2.18	17.98	7.75	11.09
	Ju-II Son	45.87	9.47	4.00	2.37	7.60	3.64	2.09	19.75	9.00	11.81
	Sakooolchan Aktawat	46.50	9.16	3.87	2.37	7.90	3.85	2.05	13.76	0.52	13.31
	Inagaki Seiji	46.65	9.10	4.14	2.20	7.67	3.64	2.11	15.71	12.08	4.14
	Oomori Seiichi	47.29	9.11	4.00	2.28	7.63	3.70	2.06	16.25	7.50	9.46
	モハマド	47.53	8.95	4.00	2.24	7.54	3.70	2.04	15.75	7.50	8.92
	ゴラムレザ	47.70	9.08	3.75	2.42	7.47	3.45	2.17	17.73	8.00	10.58
サラボン	48.09	8.68	4.00	2.17	8.08	3.77	2.14	6.91	5.75	1.23	
国内トップ	T.K	47.62	8.65	3.69	2.35	8.13	3.51	2.32	6.01	4.88	1.20
	I.H	47.24	9.06	3.71	2.44	7.74	3.57	2.17	14.58	3.69	11.31
	O.Y	46.63	9.35	3.81	2.46	8.07	3.54	2.28	13.67	6.97	7.21
	K.Y	45.69	9.56	3.95	2.42	8.23	3.70	2.23	13.94	6.51	7.94
	M.Y	46.75	9.18	3.53	2.60	8.10	3.41	2.38	11.78	3.54	8.54
	A.M	46.58	9.27	3.96	2.34	8.23	3.86	2.13	11.20	2.66	8.77
	U.K	47.29	9.29	4.07	2.28	7.66	3.91	1.96	17.55	3.93	14.17
S.Y	46.59	9.49	4.11	2.32	7.98	3.67	2.17	15.99	10.64	6.15	
Y.Y	45.91	9.30	—	—	8.07	—	—	13.29	—	—	
関西学生 (伊藤ら, 1997)	T.M	47.61	8.18	3.81	2.15	7.46	3.87	1.93	8.80	-1.57	10.22
	J.O	46.38	8.46	3.90	2.17	8.03	3.70	2.17	5.08	5.13	-0.05
	K.A	47.91	8.45	4.08	2.07	7.81	3.77	2.07	7.57	7.60	-0.03
	T.C	48.52	8.37	3.80	2.20	7.48	3.61	2.07	10.63	5.00	5.93
	H.K	49.43	8.33	3.75	2.22	7.28	3.64	2.00	12.61	2.93	9.96
平均	07大阪	44.45	9.90	3.94	2.52	8.27	3.71	2.23	16.44	5.71	11.36
	99セブリア	44.45	10.11	—	—	8.13	—	—	19.55	—	—
	94アジア大会	46.89	9.13	3.95	2.31	7.71	3.67	2.11	15.48	7.26	8.82
	国内トップ	46.70	9.24	3.85	2.40	8.02	3.65	2.20	13.11	5.35	8.16
	関西学生	47.97	8.36	3.87	2.16	7.61	3.72	2.05	8.94	3.82	5.21
標準偏差	07大阪	0.58	0.10	0.19	0.12	0.27	0.19	0.11	3.25	3.61	1.47
	99セブリア	0.61	0.09	—	—	0.27	—	—	2.78	—	—
	94アジア大会	0.92	0.27	0.12	0.11	0.20	0.12	0.05	3.90	3.27	4.09
	国内トップ	0.63	0.27	0.20	0.10	0.20	0.17	0.13	3.30	2.60	3.78
	関西学生	1.13	0.11	0.13	0.06	0.30	0.10	0.09	2.88	3.44	5.08

図 12 と図 13 に示した。

### 3.4.1 スイング脚について

スイング脚の角度に関する分析項目において、ももあげ角度 ( $r=0.54, p<0.01$ ), 振り出し角度 ( $r=0.68, p<0.01$ ) と走速度との間に統計的に有意な相関関係がみられた。前半の速度が高いときはもも上げ角度と振り出し角度も大きく、後半の速度が低いときにはもも上げ角度と振り出し角度が低いという傾向であった。引き付け角度 (N.S.) と走速度との間には一定の傾向は認められなかった (表 7, 図 14)。スイング脚動作の最大速度については、いずれも走速度と一定の傾向は認められなかった (表 8, 図 15)。

### 3.4.2 キック脚の動作

接地の瞬間については、走速度と股関節角度は負の相関関係 ( $r=-0.44, p<0.01$ ), 膝と足関節角度とは正の相関関係がみられた (膝:  $r=0.33, p<0.05$ , 足:  $r=0.42, P<0.01$ )。つまり、前半は股関節角度が屈曲位で、膝や足関節は比較的伸展位で接地して、後半は股関節が伸展位で、膝や足関節は比較的屈曲位で接地していた (表 9, 図 16)。

いっぽう離地の瞬間については、走速度と股および膝関節角度とは負の相関関係 (股:  $r=-0.44, P<0.01$ , 膝:  $r=-0.56, P<0.01$ ) が認められたが、足関節との間には認められなかった。これは離地時において、股関節の開きは後半の

表 6. 女子 400m 走レースのゴールタイムとレース前半, 後半の走速度, ピッチ, ストライドおよび低下率

名前	記録(秒)	前半(150m付近)			後半(350m付近)			低減率(%)			
		速度(m/s)	ピッチ(Hz)	ストライド(m)	速度(m/s)	ピッチ(Hz)	ストライド(m)	速度	ピッチ	ストライド	
07大阪	OHURUOUGU Christine	49.61	8.62	3.79	2.27	7.55	3.54	2.13	12.41	6.68	6.15
	SANDERS Nicola	49.65	8.48	3.85	2.20	7.63	3.73	2.04	10.05	3.00	7.27
	WILLIAMS Novlene	49.66	8.78	4.10	2.14	7.39	3.82	1.93	15.85	6.90	9.62
	GUEVARA Ana	50.16	8.41	4.01	2.10	7.55	3.75	2.01	10.28	6.68	3.85
	TROTTER DeeDee	50.17	8.48	3.79	2.24	7.31	3.61	2.03	13.78	4.83	9.40
	ANTYUKH Natalya	50.33	8.85	3.89	2.28	7.23	3.45	2.09	18.29	11.22	7.97
	USOVICH Ilona	50.54	8.34	3.88	2.15	7.63	3.70	2.06	8.57	4.48	4.28
	WINEBERG Mary	50.96	8.30	3.70	2.24	7.36	3.48	2.11	11.30	6.02	5.60
	99セベリア (Amelia Ferro et al., 2001)	FREEMAN Cathy	49.67	8.63	—	—	7.32	—	—	15.20	—
RÜCKER Anja		49.74	8.61	—	—	7.41	—	—	13.98	—	—
GRAHAM Lorraine		49.92	8.71	—	—	7.26	—	—	16.70	—	—
OGUNKOYA Faliat		50.03	8.68	—	—	7.12	—	—	17.96	—	—
MERRY Katharine		50.52	8.57	—	—	7.08	—	—	17.37	—	—
NAZAROVA Natalya		50.61	8.48	—	—	7.31	—	—	13.82	—	—
BREUER Grit		50.67	8.56	—	—	7.09	—	—	17.20	—	—
KOTLYAROVA Olga		50.72	8.52	—	—	7.23	—	—	15.09	—	—
国内トップ	Tanno Asami	51.81	8.18	3.94	2.08	7.09	3.68	1.93	13.36	6.53	7.31
	A.S	53.63	7.63	3.75	2.04	7.26	3.70	1.96	4.86	1.16	3.74
	K.M	53.75	7.70	3.80	2.03	7.20	3.70	1.94	6.53	2.51	4.12
	K.J	54.06	7.64	3.88	1.97	7.06	3.69	1.92	7.58	5.03	2.69
	K.S	55.15	7.67	3.57	2.15	7.04	3.54	1.99	8.23	0.90	7.41
	M.K	56.11	7.59	3.68	2.06	6.34	3.57	1.77	16.46	2.91	13.97
	I.Y	55.71	7.83	3.69	2.12	6.79	3.63	1.87	13.28	1.64	11.83
	T.M	55.61	7.93	3.69	2.15	6.60	3.32	1.99	16.84	10.07	7.52
	T.C	53.47	7.87	3.56	2.21	6.97	3.49	2.00	11.47	2.07	9.59
	M.S	56.67	7.77	3.98	1.95	5.99	3.61	1.66	22.88	9.24	15.03
H.M	54.31	7.98	3.84	2.08	6.85	3.66	1.87	14.08	4.75	9.79	
平均	07大阪	50.14	8.53	3.88	2.20	7.46	3.64	2.05	12.57	6.23	6.77
	99セベリア	50.24	8.59	—	—	7.23	—	—	15.92	—	—
	国内トップ	54.57	7.76	3.74	2.08	6.81	3.59	1.90	12.22	4.03	8.57
標準偏差	07大阪	0.48	0.20	0.13	0.07	0.15	0.13	0.06	3.26	2.43	2.18
	99セベリア	0.44	0.08	—	—	0.12	—	—	1.60	—	—
	国内トップ	1.42	0.18	0.14	0.08	0.39	0.12	0.10	5.32	3.19	4.07

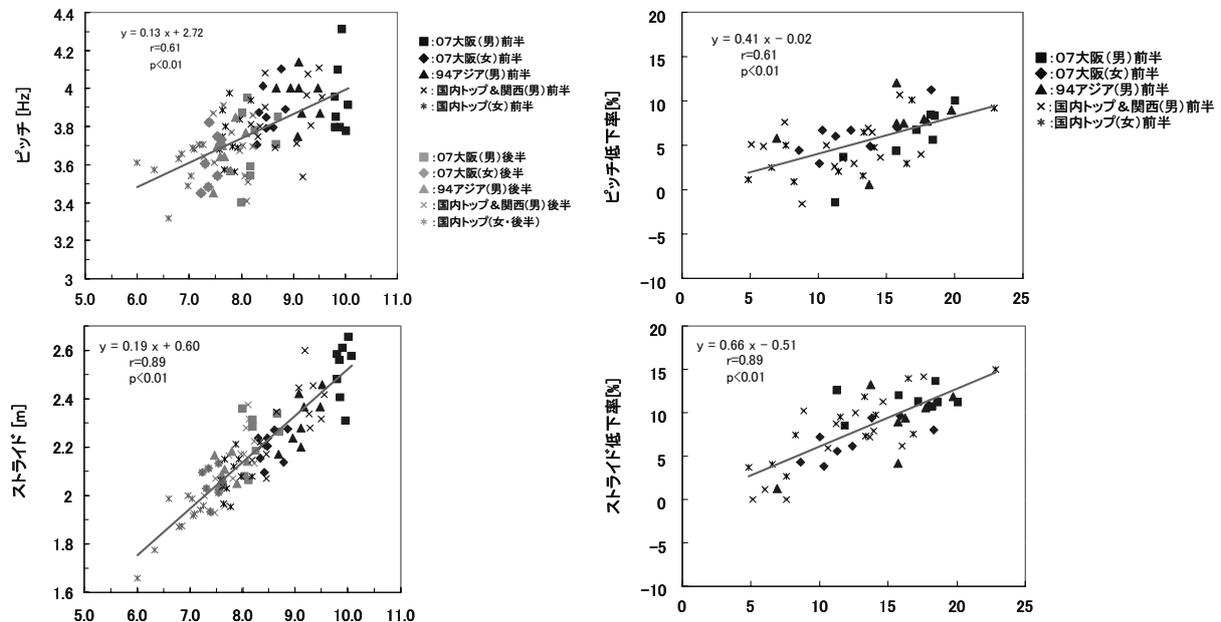


図 11. レース前半と後半の走速度とピッチ, ストライドの関係 (左図) および走速度の低下率とピッチ, ストライドの低下率 (右図)

$$\text{低下率} = 100 \times (\text{前半の値} - \text{後半の値}) / \text{前半の値}$$

図12. 疾走動作のスティックピクチャー(07大阪男子Top3と山口選手(大阪ガス))

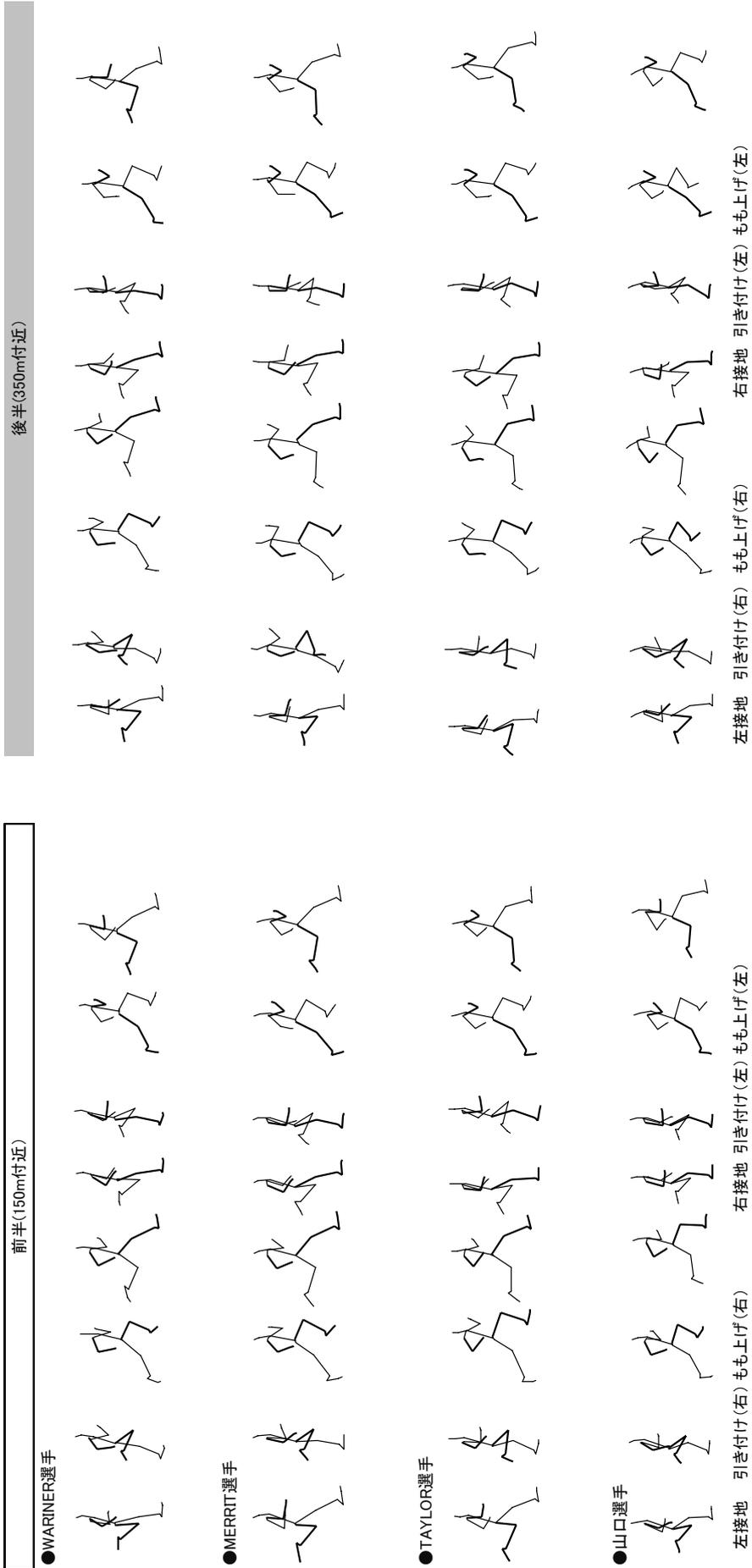


図13. 疾走動作のスティックピクチャー(07大阪女子Top3)

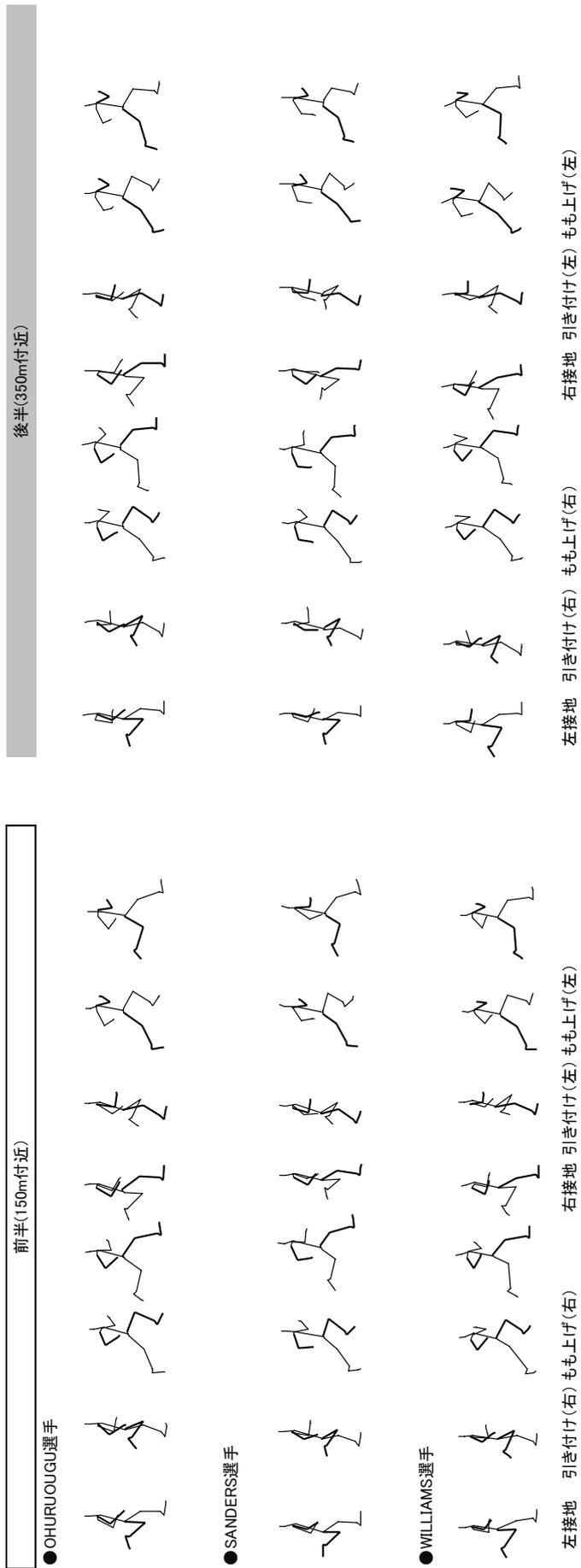


表 7. レース前半と後半のスウィング脚の動作（角度）

男子			前半(150m付近)			後半(350m付近)		
			名前	もも上げ (deg)	引き付け (deg)	振り出し (deg)	もも上げ (deg)	引き付け (deg)
07大阪 男子Top3	WARINER	Jeremy	64.16	31.53	32.18	61.64	35.87	29.40
	MERRITT	LaShawn	62.96	32.00	34.90	59.82	40.12	30.96
	TAYLOR	Angelo	65.86	39.53	37.65	63.20	44.25	34.36
07大阪 女子Top3	OHURUOUGU	Christine	64.64	33.27	34.29	62.63	36.35	32.24
	SANDERS	Nicola	71.21	27.12	34.18	61.60	28.84	29.93
	WILLIAMS	Novlene	63.49	35.10	31.68	59.85	40.89	25.09
94アジア大会 (伊藤ら, 1997)	Ismail	Ibrahim	71.37	39.51	38.60	59.31	43.79	26.87
	Ju-Il	Son	66.26	25.35	35.22	61.87	26.68	32.28
	Sakoolchan	Aktawat	65.17	34.49	34.07	63.10	32.01	29.68
	Inagaki	Seiji	68.26	26.76	30.85	59.42	32.31	26.09
	Oomori	Seiichi	65.03	35.15	36.85	56.72	32.94	31.20
	モハメド		60.42	30.40	33.05	56.23	32.20	26.51
	ゴラムレザ		70.01	25.85	36.33	61.88	24.27	30.71
	サラボン		61.95	26.62	35.02	55.73	24.01	31.14
国内 トップ	Yamaguchi	Yuki	73.31	29.27	36.31	65.19	24.92	30.39
関西学生 (伊藤ら, 1997)	T.M		57.40	30.49	30.11	60.62	31.81	28.39
	J.O		65.24	25.21	30.40	66.01	26.43	30.71
	K.A		60.60	26.19	30.68	57.14	36.91	26.42
	T.C		69.71	39.41	38.85	64.42	40.98	32.97
	H.K		64.35	27.37	35.69	61.07	31.10	26.69
平均	07大阪男子Top3		64.33	34.35	34.91	61.55	40.08	31.57
	07大阪女子Top3		66.45	31.83	33.38	61.36	35.36	29.09
	94アジア		66.06	30.52	35.00	59.28	31.03	29.31
	国内トップ&関西学生		65.10	29.66	33.67	62.41	32.02	29.26
標準偏差	07大阪男子Top3		4.17	4.18	1.48	1.41	6.09	3.65
	07大阪女子Top3		4.17	4.18	1.48	1.41	6.09	3.65
	94アジア		3.77	5.29	2.39	2.84	6.37	2.45
	国内トップ&関西学生		5.81	5.16	3.75	3.39	6.11	2.55

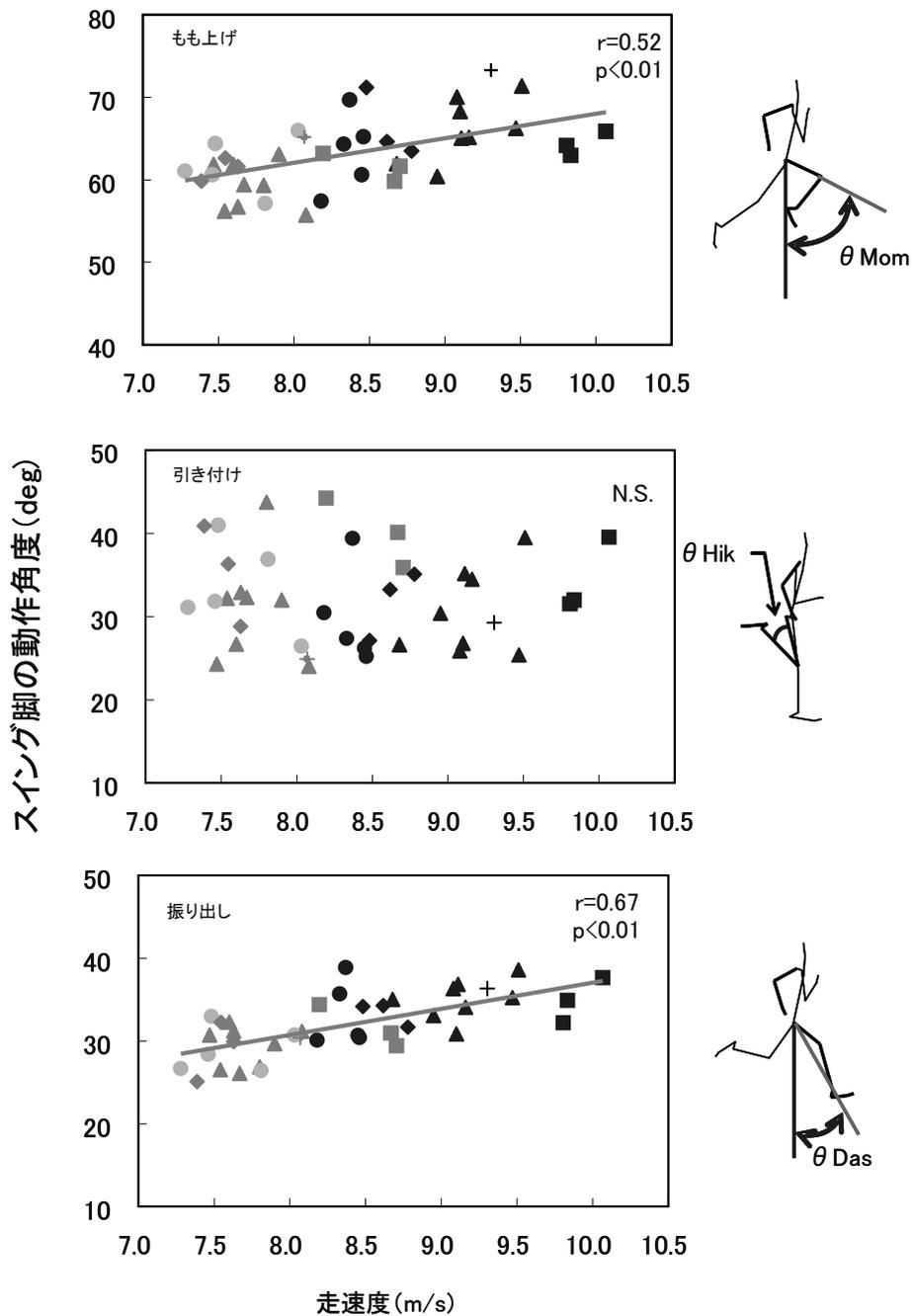


図 14. レース前半と後半の走速度とスイング脚のもも上げ, 引き付け, 振り出し角度との関係

- : 07大阪(男)前半
- ◆ : 07大阪(女)前半
- ▲ : 94アジア前半
- : 関西学生前半
- +
- : 07大阪(男)後半
- ◆ : 07大阪(女)後半
- ▲ : 94アジア後半
- : 関西学生後半
- +

表 8. レース前半と後半のスウィング脚の動作速度（角速度）

	名前	前半(150m付近)				後半(350m付近)			
		もも上げ (deg/秒)	引き付け (deg/秒)	振り出し (deg/秒)	振り戻し (deg/秒)	もも上げ (deg/秒)	引き付け (deg/秒)	振り出し (deg/秒)	振り戻し (deg/秒)
07大阪 男子Top3	WARINER Jeremy	659.11	976.93	1111.12	350.39	616.27	888.57	1059.98	330.17
	MERRITT LaShawn	732.02	1028.77	1081.93	410.79	623.49	884.99	840.56	333.27
	TAYLOR Angelo	745.98	1002.21	1003.44	456.13	592.56	876.98	812.98	396.10
07大阪 女子Top3	OHURUOUGU Christine	706.86	1012.87	1034.73	430.78	699.87	931.47	913.41	337.46
	SANDERS Nicola	739.98	1071.13	1164.91	440.42	747.73	841.75	1103.80	380.74
	WILLIAMS Novlene	640.11	918.16	1031.62	349.12	631.14	870.35	967.71	304.71
94アジア大会 (伊藤ら, 1997)	Ismail Ibrahim	810.45	928.48	683.54	436.02	689.27	893.76	1021.18	360.12
	Ju-Il Son	806.72	1074.58	936.21	335.18	813.31	1076.01	901.26	371.56
	Sakoolchan Aktawat	705.90	939.02	1084.24	431.35	681.68	949.86	934.48	339.27
	Inagaki Seiji	816.46	1010.98	838.24	341.20	683.83	1156.52	892.67	395.34
	Oomori Seiichi	800.99	1093.20	899.26	473.26	696.43	1019.58	918.45	342.92
	モハメド	841.82	1106.60	967.55	379.41	733.48	1022.31	916.23	297.48
	ゴラムレザ	818.47	1050.52	994.94	368.41	734.82	1028.17	953.40	351.51
	サラボン	867.74	969.44	1085.76	442.04	739.12	1058.83	938.79	525.12
国内 トップ	Yamaguchi Yuki	700.97	1003.43	987.30	484.60	727.35	889.43	1001.93	442.11
関西学生 (伊藤ら, 1997)	T.M	771.99	1049.93	1033.23	422.92	719.23	989.80	1098.47	364.33
	J.O	739.19	1022.65	1077.54	407.54	700.58	893.68	1007.39	391.20
	K.A	697.74	1167.58	1049.59	467.64	710.06	1031.83	1092.48	431.57
	T.C	806.05	955.08	1149.01	485.06	788.76	970.28	1118.89	396.77
	H.K	753.43	1001.97	1039.96	416.03	678.50	988.76	1000.20	346.78
平均	07大阪男子Top3	712.37	1002.64	1065.50	405.77	610.77	883.52	904.51	353.18
	07大阪女子Top3	695.65	1000.72	1077.08	406.77	692.91	881.19	994.97	340.97
	94アジア	808.57	1021.60	936.22	400.86	721.49	1025.63	934.56	372.92
	国内トップ&関西学生	744.89	1033.44	1056.11	447.30	720.75	960.63	1053.23	395.46
標準偏差	07大阪男子Top3	46.65	25.92	55.69	53.05	16.18	5.93	135.35	37.20
	07大阪女子Top3	50.87	77.21	76.07	50.16	58.60	45.83	98.08	38.14
	95アジア	46.86	70.02	132.83	51.39	44.29	79.24	40.24	67.63
	国内トップ&関西学生	41.79	72.68	54.13	35.73	37.36	57.20	55.58	36.98

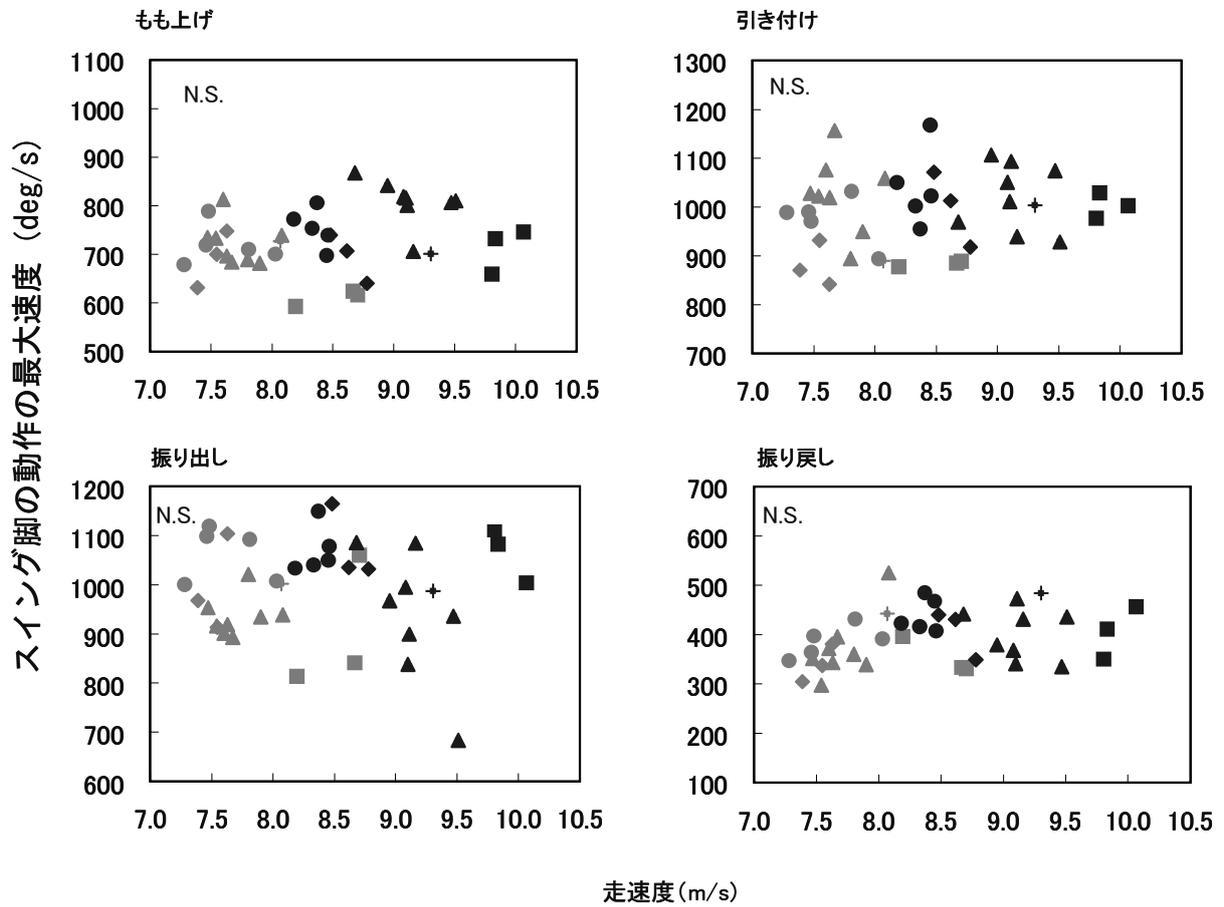


図 15. レース前半と後半の走速度とスイング脚のもも上げ，引き付け，振り出し，振り戻し動作速度との関係

- |             |             |
|-------------|-------------|
| ■:07大阪(男)前半 | ■:07大阪(男)後半 |
| ◆:07大阪(女)前半 | ◆:07大阪(女)後半 |
| ▲:94アジア前半   | ▲:94アジア後半   |
| ●:関西学生前半    | ●:関西学生後半    |
| +:国内トップ前半   | +:国内トップ後半   |

表 9. レース前半と後半のキック脚の接地瞬間と離地瞬間の下肢関節角度

名前	前半(deg)						後半(deg)							
	股関節		膝関節		足関節		股関節		膝関節		足関節			
	接地	離地	接地	離地	接地	離地	接地	離地	接地	離地	接地	離地		
07大阪男子Top3	WARINER	Jeremy	149.91	200.66	168.55	160.94	113.53	149.48	143.69	201.84	163.08	160.02	118.48	146.47
	MERRITT	LaShawn	137.22	197.98	169.16	155.87	129.21	144.34	146.83	196.26	159.99	163.27	120.43	126.70
	TAYLOR	Angelo	129.72	191.58	156.12	145.95	119.97	135.28	137.78	203.37	151.36	157.72	122.08	140.85
07大阪女子Top3	OHURUOUGU	Christine	131.75	208.05	143.37	156.82	117.65	130.43	136.63	195.89	141.60	157.03	110.77	133.05
	SANDERS	Nicola	132.20	206.54	145.52	161.52	122.25	140.86	139.17	204.04	148.93	167.94	113.97	141.53
	WILLIAMS	Novlene	143.24	198.55	161.09	150.20	127.65	148.59	140.19	197.35	155.16	161.54	115.47	133.79
94アジア大会 (伊藤ら, 1997)	Ismail	Ibrahim	143.90	185.07	163.41	147.45	101.54	106.26	149.63	207.18	160.23	166.67	101.36	118.30
	Ju-Il	Son	135.56	199.22	149.95	155.08	100.56	117.67	138.27	201.95	140.53	157.85	87.38	115.80
	Sakoolchan	Aktawat	140.26	204.28	142.71	150.80	88.07	124.28	147.19	214.98	151.98	168.85	88.07	130.24
	Inagaki	Seiji	138.77	198.73	160.54	159.90	103.08	112.32	153.28	209.67	158.47	167.34	93.53	123.56
	Oomori	Seiichi	125.98	199.19	148.16	163.92	99.08	127.52	142.08	212.69	145.47	170.88	92.69	120.59
	モハメド		123.99	188.77	156.33	166.03	94.10	96.92	138.38	198.75	145.65	162.75	86.39	100.57
	ゴラムレザ		142.27	197.55	158.72	154.59	97.27	111.66	155.96	210.47	157.96	170.66	86.62	115.12
サラボン		141.58	199.61	169.25	168.19	112.05	118.30	152.25	212.19	161.05	173.95	97.21	131.63	
国内 トップ	Yamaguchi	Yuki	128.73	193.78	144.75	147.84	109.66	136.39	142.47	204.07	155.24	165.44	115.74	142.96
関西学生 (伊藤ら, 1997)	T.M		147.87	204.06	156.16	164.69	88.33	110.65	150.03	203.90	160.28	165.40	96.56	117.49
	J.O		145.39	205.27	155.49	158.54	93.98	119.03	147.31	202.08	150.15	159.37	97.19	127.45
	K.A		147.73	196.62	148.61	158.19	85.55	113.36	153.32	212.89	151.59	171.45	83.14	120.13
	T.C		146.24	202.98	156.94	164.30	93.96	127.77	154.50	200.23	160.00	161.78	96.13	123.41
	H.K		144.33	195.99	162.27	159.05	91.35	119.66	147.71	194.07	156.36	156.73	86.98	108.10
平均	07大阪男子Top3		138.95	196.74	164.61	154.25	120.90	143.04	142.77	200.49	158.14	160.34	120.33	138.01
	07大阪女子Top3		135.73	204.38	149.99	156.18	122.52	139.96	138.66	199.09	148.56	162.17	113.40	136.12
	94アジア		136.54	196.55	156.13	158.25	99.47	114.37	147.13	208.49	152.67	167.37	91.66	119.48
	国内トップ&関西学生		143.38	199.78	154.04	158.77	93.81	121.14	149.22	202.87	155.60	163.36	95.96	123.26
標準偏差	07大阪男子Top3		10.21	4.66	7.36	7.62	7.88	7.19	4.59	3.75	6.08	2.79	1.80	10.18
	07大阪女子Top3		6.51	5.10	9.67	5.69	5.00	9.11	1.83	4.35	6.79	5.49	2.40	4.70
	95アジア		7.57	6.34	8.73	7.46	6.97	9.85	6.85	5.58	7.91	5.09	5.53	9.80
	国内トップ&関西学生		7.30	4.88	6.30	6.09	8.43	9.53	4.40	6.13	4.19	5.22	11.30	11.65

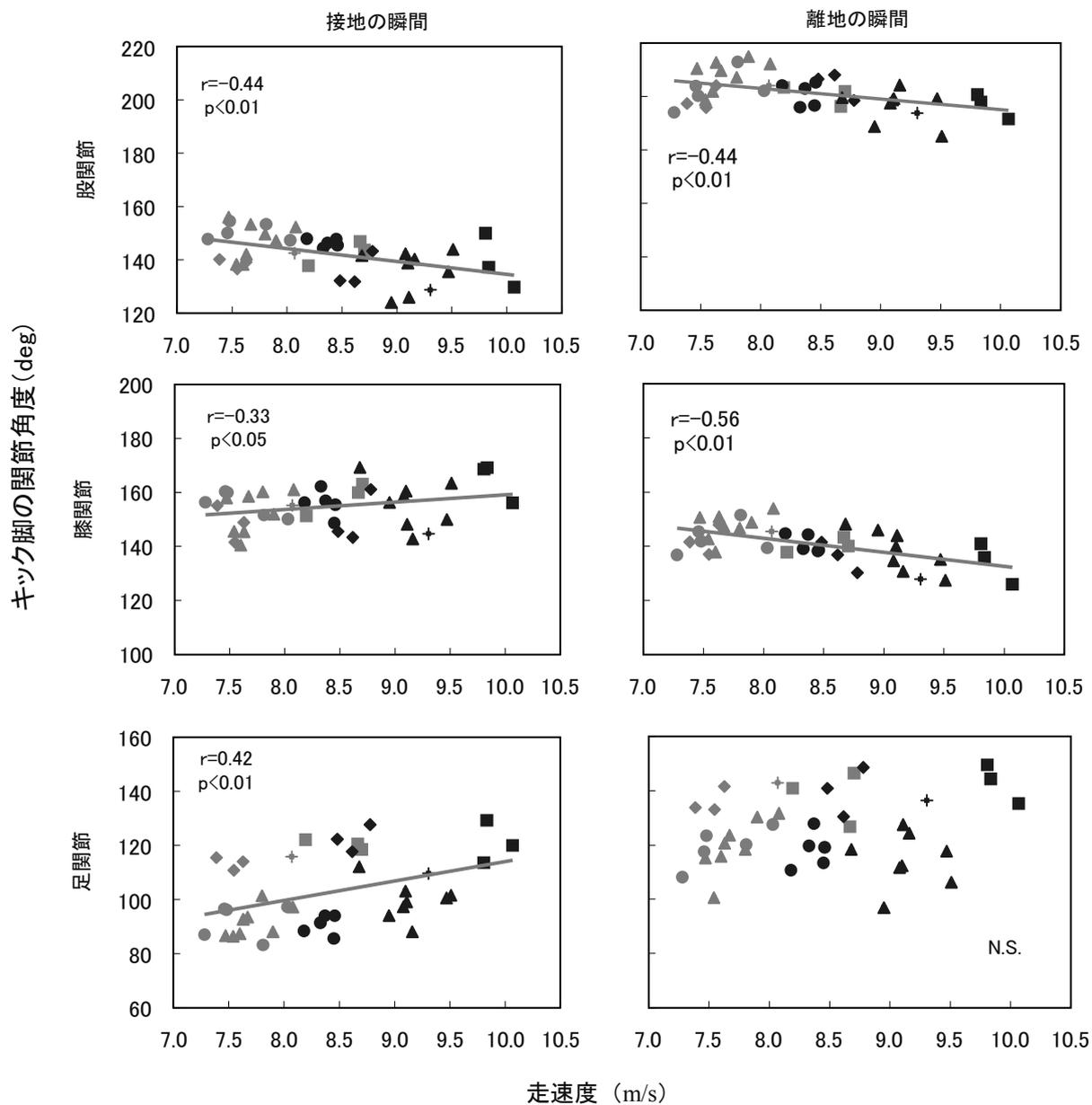


図 16. レース前半と後半のキック脚の接地瞬間と離地瞬間の下肢関節角度と走速度の関係

- : 07大阪(男)前半
- ◆ : 07大阪(女)前半
- ▲ : 94アジア前半
- : 関西学生前半
- +
- : 07大阪(男)後半
- ◆ : 07大阪(女)後半
- ▲ : 94アジア後半
- : 関西学生後半
- +

表 10. レース前半と後半のキック脚の最大伸展速度

	名前	前半 (deg/s)				後半 (deg/s)			
		股関節	膝関節	足関節	脚全体	股関節	膝関節	足関節	脚全体
07大阪男子Top3	WARINER Jeremy	745.73	297.67	856.14	539.07	624.91	202.71	704.69	547.40
	MERRITT LaShawn	664.97	353.77	662.50	600.23	586.86	316.15	562.11	545.06
	TAYLOR Angelo	785.86	335.55	765.60	649.30	718.34	222.41	675.98	559.26
07大阪女子Top3	OHURUOUGU Christine	418.99	377.96	621.42	596.69	507.53	396.68	680.07	461.88
	SANDERS Nicola	956.41	450.37	593.21	631.26	627.92	589.91	934.26	432.80
	WILLIAMS Novlene	658.43	379.32	648.22	691.21	635.13	468.21	863.65	445.14
94アジア大会 (伊藤ら, 1997)	Ismail Ibrahim	638.56	281.90	982.05	569.23	797.01	515.32	931.71	482.70
	Ju-Il Son	1022.16	574.39	1086.33	608.77	803.86	555.48	983.20	569.52
	Sakoolchan Aktawat	706.46	272.15	1005.54	573.53	862.50	623.72	1311.79	521.23
	Inagaki Seiji	787.53	439.75	906.42	574.39	785.24	505.35	1031.61	469.83
	Oomori Siichi	722.50	587.57	1200.63	680.39	807.30	654.32	1158.23	509.93
	モハメド	788.13	341.94	1056.99	598.41	792.87	594.59	1118.88	499.62
	ゴラムレザ	745.42	429.72	981.19	557.49	661.19	503.06	1072.58	458.37
	サラボン	807.01	285.05	848.26	604.76	870.90	583.27	1337.57	528.55
国内トップ	Yamaguchi Yuki	822.23	367.51	853.68	675.88	557.37	439.64	1205.76	449.20
関西学生 (伊藤ら, 1997)	T.M	733.87	466.58	866.02	551.34	727.41	403.22	694.48	547.99
	J.O	683.63	448.96	907.53	555.87	558.30	334.41	820.95	513.17
	K.A	698.22	334.04	757.63	561.38	721.96	522.53	744.39	467.97
	T.C	850.53	527.38	1100.51	609.10	616.21	564.07	985.09	504.20
	H.K	659.19	287.51	993.75	548.19	480.88	173.48	721.26	489.68
平均	07大阪男子Top3	732.18	329.00	761.42	596.20	643.37	247.09	647.59	550.57
	07大阪女子Top3	677.94	402.55	620.95	639.72	590.19	484.93	825.99	446.61
	94アジア	777.22	401.56	1008.43	595.87	797.61	566.89	1118.20	504.97
	国内トップ&関西学生	741.28	405.33	913.19	583.63	610.35	406.23	861.99	495.37
標準偏差	07大阪男子Top3	61.57	28.62	96.89	55.22	67.65	60.61	75.41	7.61
	07大阪女子Top3	269.24	41.42	27.51	47.82	71.68	97.69	131.21	14.60
	95アジア	112.98	128.13	108.81	38.80	63.81	56.77	146.28	35.74
	国内トップ&関西学生	78.05	90.49	119.65	50.45	98.46	140.64	198.35	34.87

時より抑えられていて、前半においては離地時に膝関節が屈曲位であったが、後半では膝が伸展位のフォームとなっていた (表 9, 図 16)。

キック脚の最大伸展角速度と走速度の関係では、膝関節角速度と走速度との関係に負の相関関係がみられた ( $r=-0.37, p<0.05$ )。そして、脚全体後方スイング速度と走速度との関係においては、正の相関関係がみられた ( $r=0.71, p<0.01$ ) (表 10, 図 17)。

伊藤ら (1994) の述べる理論によれば、股関節の伸展速度を脚全体のスイング速度に効率よく転換できない原因は、キック中の膝関節伸展速度が高まったためだとしている。世界トップレベルのデータを追加した本研究においても、股関節速度が前・後半変化しないにもかかわらず、後半の脚全体後方スイング速度低下が認められ、膝関節伸展角速度の増大と関連し起こっている様子が伺えた。

### 3.4.3 体幹の角度

接地と離地瞬間の体幹角度を表 11 と図 18 に示した。走速度との関係では、接地時の体幹角度との間に正の相関関係がみられた ( $r=0.54, p<0.01$ )。前半は、体幹を前傾させ接地する傾向にあり、後半は上体が起き上がってくる傾向であった。

### 3.5 まとめ

94 アジア (伊藤ら, 1997), 99 セビリア (Amelia Ferro et al., 2001) の報告に、本研究で得られた結果を加え検討した結果、次のことが明らかとなった。

1) Overlay 方式 (持田ら, 2008) による 400m ハードル位置を基準としたレース分析は、11 区間の速度変化を示すことになり、各選手のレース展開の詳細を分析データから想起させることを可能とした。そして、ピッチとストライドの変化も細かく把握できることから、走者の戦術的動向などの現象も捉えることができた。こ

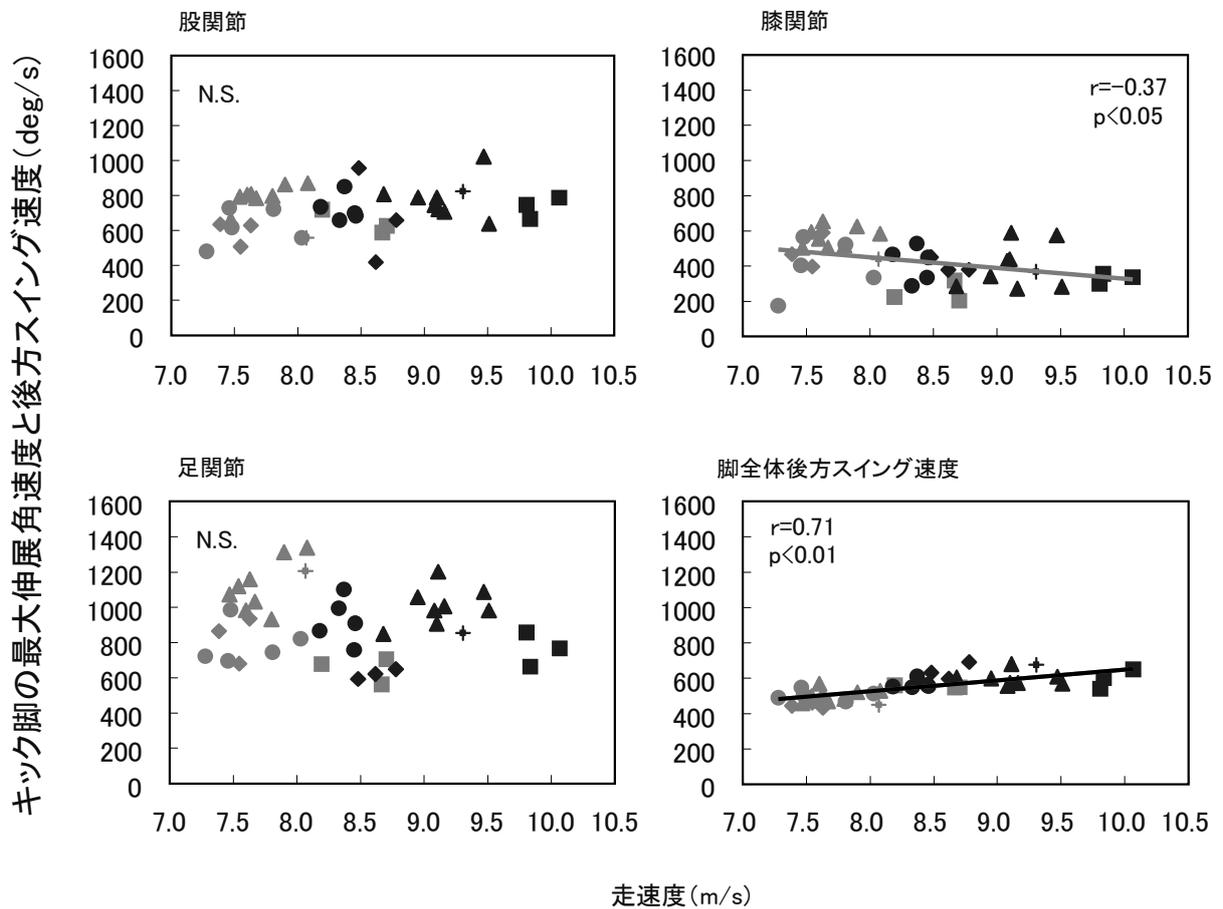


図 17. レース前半と後半の走速度とキック脚の最大伸展速度との関係  
および脚全体の後方スイング速度との関係

- : 07大阪(男)前半
- ◆: 07大阪(女)前半
- ▲: 94アジア前半
- : 関西学生前半
- +: 国内トップ前半
- : 07大阪(男)後半
- ◆: 07大阪(女)後半
- ▲: 94アジア後半
- : 関西学生後半
- +: 国内トップ後半

表 11. レース前半と後半の接地瞬間と離地瞬間の体幹前傾角度

	名前	前半(deg/s)		後半(deg/s)		
		接地	離地	接地	離地	
07大阪 男子Top3	WARINER	Jeremy	10.29	9.47	12.32	14.60
	MERRITT	LaShawn	16.53	15.67	8.80	13.11
	TAYLOR	Angelo	14.65	14.47	7.60	8.59
07大阪 女子Top3	OHURUOUGU	Christine	13.65	16.23	11.27	16.27
	SANDERS	Nicola	14.15	13.36	13.93	15.34
	WILLIAMS	Novlene	10.18	14.91	8.92	13.54
94アジア大会 (伊藤ら, 1997)	Ismail	Ibrahim	5.42	1.43	3.40	3.05
	Ju-Il	Son	5.53	3.05	3.95	1.56
	Sakoolchan	Aktawat	6.02	-0.59	0.38	-2.98
	Inagaki	Seiji	13.43	8.84	4.42	3.84
	Oomori	Seiichi	16.81	14.86	1.09	-0.78
	モハメド		15.59	12.70	3.45	1.41
	ゴラムレザ		8.60	2.03	2.07	1.79
	サラポン		11.47	7.08	6.08	2.66
国内 トップ	Yamaguchi	Yuki	17.67	16.87	9.81	11.06
関西学生 (伊藤ら, 1997)	T.M		10.55	6.59	6.01	3.91
	J.O		5.28	2.41	3.60	3.93
	K.A		12.08	7.25	4.86	0.41
	T.C		6.88	3.27	3.18	4.41
	H.K		9.59	7.36	7.11	5.05
平均	07大阪男子Top3		13.82	13.20	9.57	12.10
	07大阪女子Top3		12.66	14.84	11.37	15.05
	94アジア		10.36	6.18	3.11	1.32
	国内トップ&関西学生		10.34	7.29	5.76	4.80
標準偏差	07大阪男子Top3		3.20	3.29	2.45	3.13
	07大阪女子Top3		2.16	1.43	2.51	1.39
	95アジア		4.62	5.62	1.85	2.21
	国内トップ&関西学生		4.36	5.14	2.47	3.47

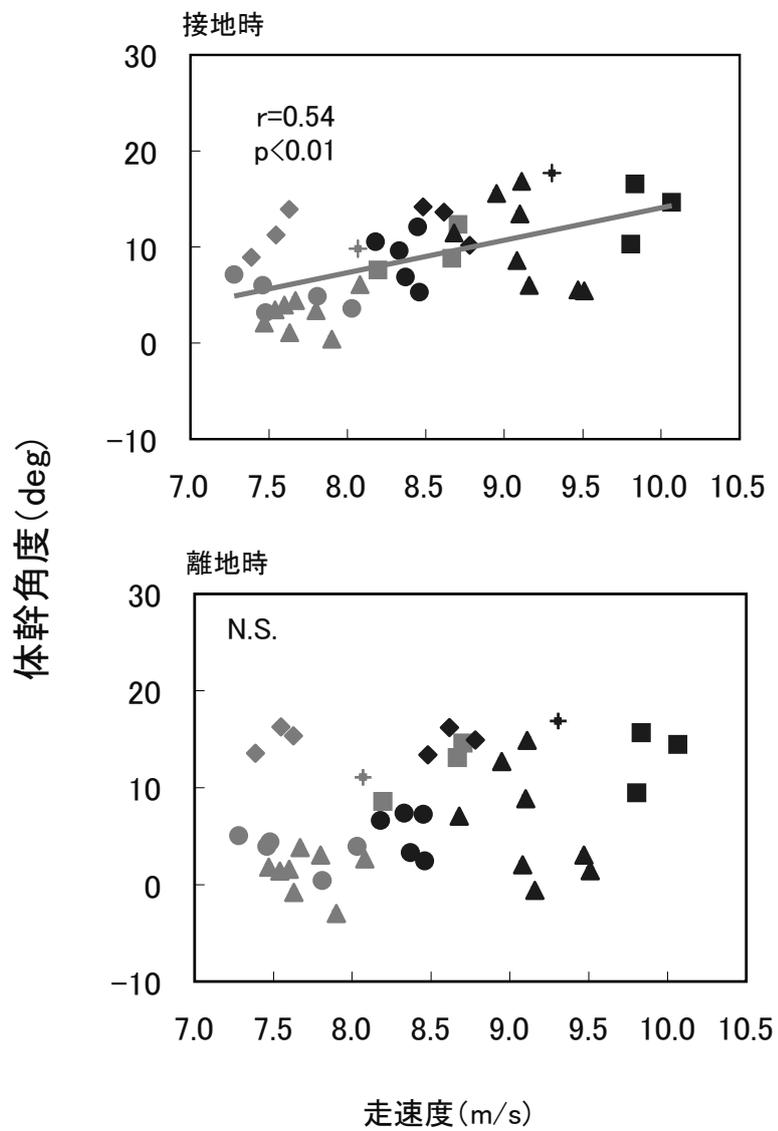


図 17. レース前半と後半の走速度と接地瞬間時と離地瞬間時の体幹角度

- |             |             |
|-------------|-------------|
| ■:07大阪(男)前半 | ■:07大阪(男)後半 |
| ◆:07大阪(女)前半 | ◆:07大阪(女)後半 |
| ▲:94アジア前半   | ▲:94アジア後半   |
| ●:関西学生前半    | ●:関西学生後半    |
| +国内トップ前半    | +国内トップ後半    |

れは、Overlay 方式による分析方法が、より多くの客観的情報を、撮影条件が厳しい環境下においても取得でき、指導者、選手へと提供できる可能性を広げたこととなる。

## 2) 走速度、ピッチ、ストライドとゴールタイム

- ① 全体的にはゴールタイムの良い選手ほど前半の走速度が速い傾向にあった。
- ② しかし、男子の世界トップレベル内では、前半速度とゴールタイムとの間に関連性は認められなかった。
- ③ 走速度が高いものほどストライドが長い傾向にあった。

## 3) 疾走動作

- ① 前半は、体幹を前傾させ接地する傾向にあり、後半は上体が起き上がってくる傾向であった。
- ② 前半の速度が高いときは、もも上げ角度と振り出し角度も大きく、後半の速度が低いときにはもも上げ角度と振り出し角度が低いという傾向であった。
- ③ 引き付け角度と走速度との間には一定の傾向は認められなかった。
- ④ 前半の接地は股関節角度が屈曲位で、膝や足関節は比較的伸展位で、後半の接地は股関節が伸展位で、膝や足関節は比較的屈曲位であった。
- ⑤ 離地時において、股関節の開きは後半の時より抑えられていて、前半においては離地時の膝関節は屈曲位であったが、後半では膝関節が伸展位のフォームとなっていた。
- ⑥ 前半の脚全体の後方スイング速度は速い傾向にあり、後半の脚全体後方スイング速度の低下は、膝関節伸展角速度の増大と関連し起こっている可能性が高い。

## おわりに

本研究の結果を踏まえ、わが国における 400m 走強化策に関する検討議題を提案し、本稿を閉じることとする。

- ① 最大スプリント力 (100m 走パフォーマンスなど) 強化方針について
  - ・ 選手個人内における最大スプリント力強化を中・長期スパンでどのように考えるか。
  - ・ いつまで、どのくらいのスプリント力を身に付けるのかなど。
- ② 前半のペースについて
  - ・ 最大スプリント力に対して、どのくらいの

速度比率で前半走れるように強化していくのか。

- ・ 後半の速度低下率との関係などについて
- ③ 技術的アプローチについて
    - ・ 最大スピードを上げる、前半速度を上げる技術的戦術として、どのような考えでいくのか。
    - ・ ピッチとストライドの重み付けをどうするか。
  - ④ ストライド伸長を目指したトレーニング方法 (体力・技術) の検討および検証について

## 文献

- Amelia, Ferro., Alicia, Rivera., Itziar, Pagola., Miguel, Ferreruella., Alvaro, Martin. and Valentin, Rocandio. (2001) Biomechanical analysis of the 7th World Championships in Athletics Seville 1999. IAAF New Studies in Athletics, 16 (1): 25-60.
- BRÜGGEMANN, G-P., KOSZEWSKI, D. & MÜLLER, H. (1999) Report of the IAAF Biomechanics Research Project Athens 1997. Monaco: International Athletic Foundation, Meyer & Meyer Sports 2, 1:54-62.
- 池上康男ら (1991) DLT 法 J.J.Sports Sci ; 163-170
- International Athletic Foundation International Amateur Athletic Federation (1990) Scientific Research Project at the Games of the XXXIV Olympiad-Seoul 1988 Final Report.
- 伊藤章 (2008) 短距離走 (男子 100m) 東京大会から大阪大会へ. バイオメカニクス研究, 12 (2) :99-100.
- 伊藤章, 市川博啓, 斉藤昌久, 伊藤道郎, 佐川和則, 加藤謙一 (1997) アジア大会男子 400m の動作分析. 佐々木秀幸, 小林寛道, 阿江通良 (監修) アジア一流陸上競技者の技術, 65-80. 創文企画, 東京.
- 持田尚, 松尾彰文, 柳谷登志雄, 矢野隆照, 杉田正明, 阿江通良 (2007) Overlay 表示技術を用いた陸上競技 400m 走レースの時間分析. 陸上競技研究紀要, 3 : 9 - 15.
- 北京オリンピックホームページ  
URL:<http://results.beijing2008.cn/WRM/ENG/BI/O/Athlete/A.shtml>
- 杉浦雄策, 沼澤秀雄 (1994) 200m, 400m レースの時間分析. 佐々木秀幸, 小林寛道, 阿江通良 (監修) 世界一流陸上競技者の技術, 50-56, ベースボールマガジン社, 東京.

# 2007 年世界陸上競技選手権大阪大会における 男子 110m ハードル走および 女子 100m ハードル走レースの時間分析

## Analysis of Racing Patterns in Men's 110m and Women's 100m Sprint Hurdle

柴山 一仁<sup>1)</sup> 川上 小百合<sup>2)</sup> 谷川 聡<sup>2)</sup>

1) 筑波大学大学院 2) 筑波大学

Kazuhito Shibayama<sup>1)</sup>, Sayuri Kawakami<sup>2)</sup> and Satoru Tanigawa<sup>2)</sup>

1) Graduate School of University of Tsukuba, 2) University of Tsukuba

### 【110mH】

#### (1) 各種データと記録の相関

タイム分析によって得られた各種データと記録間の相関係数を求め、いくつかの項目を相関行列として表 1 に示した。

男子 110mH において記録と相関が高かった項目は、最高速度 ( $r=-.802$ )、平均インターバルランタイム ( $r=.782$ )、最小インターバルランタイム ( $r=.601$ ) であった ( $p<.01$ )。一方、最小ハードリングタイム ( $r=.074$ )、平均インターバルランタイム ( $r=.047$ ) には記録との間に有意な相関は認められなかった。これらのことから、今大会の参加者レベル (12.95~13.92 秒) における記録短縮の課題として、最高速度の獲得はもちろん、ハードリングタイムの短縮よりもインターバルランタイムの短縮、つまりインターバル間をすばやく短時間で走ることがあげられる。また、一つのインターバル区間を短時間で走ることよりも、全てのインターバル区間を短時間で走ることがより重要となる。

Dapena (1991) は、男子 110mH のハードルイ

ンターバルに対するインターバルラン局面の割合は約 61%と示した。距離にすると約 5.5m である。ハードルを越えるために重心を引き上げる影響で水平速度の減少、鉛直速度の増大が生じる上に、通常の疾走よりストライドが制限された中で短いインターバルを走ることから、ただスプリント能力が高いだけでは記録の短縮はできず、短いインターバル間を高い速度、速いリズムで走る技術が必要になると考えられる。すなわち各群に共通する記録短縮の第一要因としては、スプリント能力の向上があげられるが、実際には、ハードリングにむけてインターバルラン区間における速いリズムの獲得されたスプリント技術が、記録短縮につながると考えられる。

#### (2) パフォーマンス別グループの比較 (上・中・下位群)

今大会の男子 110mH 参加者を、表 2 に示すように記録順に上位群・中位群・下位群の 3 グループに分けた。そして各インターバルにおける平均疾走速度を計算し、図 1 にグループ別疾走速度曲線を示した。

表 1. 男子選手の時間分析項目の相関行列

	記録	最高速度	最小 ハードリング タイム	平均 ハードリング タイム	最小 インターバル ランタイム	平均 インターバル ランタイム
記録						
最高速度	-.802 **					
最小ハードリングタイム	.074	-.118				
平均ハードリングタイム	.047	-.086	.892 **			
最小インターバルランタイム	.601 **	-.656 **	-.454 *	-.573 **		
平均インターバルランタイム	.782 **	-.639 **	-.459 *	-.534 **	.871 **	

n=37

\*\* :  $p<0.01$

\* :  $p<0.05$

表 2. 110mH の各群の度数分布

	上位群	中位群	下位群
範囲(sec.)	12.95～ 13.38	13.42～ 13.68	13.72～ 13.92
平均(sec.)	13.21	13.57	13.81
人数	12	14	11

上位・中位群においては、第 1~2 インターバルにかけて速度が大きく増加し、その後も増加を続け、第 4 インターバルにおいて最高速度に達していた。第 1 インターバルの速度を 100%とした相対速度をみると（表 3）、第 4 インターバルにおいて上位・中位群とも前半から約 3.5%増加していた。第 4 インターバル以降、速度は低下していく傾向がみられ、ともに第 8 インターバルにおいて第 1 インターバルを下回っていた。上位・中位群においては、全体的に同様の速度変化を示していた。一方、下位群においては第 1 インターバルの速度は中位群と同程度であり、中盤以降速度が低下する傾向は上位・中位群と同様であるが、第 2~3 インターバルにかけて速度増加は 1%程度であり、後は第 5 インターバルまで一定であった。また、第 6 インターバルにおいて第 1 インターバルを下回っており、上位・中位群よりもやや早い段階で前半の速度が低下していた。これらのことから、上位・中位群と下位群とではレース前半から中盤における速度増加率が異なること、後半の速度低下出現区間が異なることが差を生じていることがわかる。

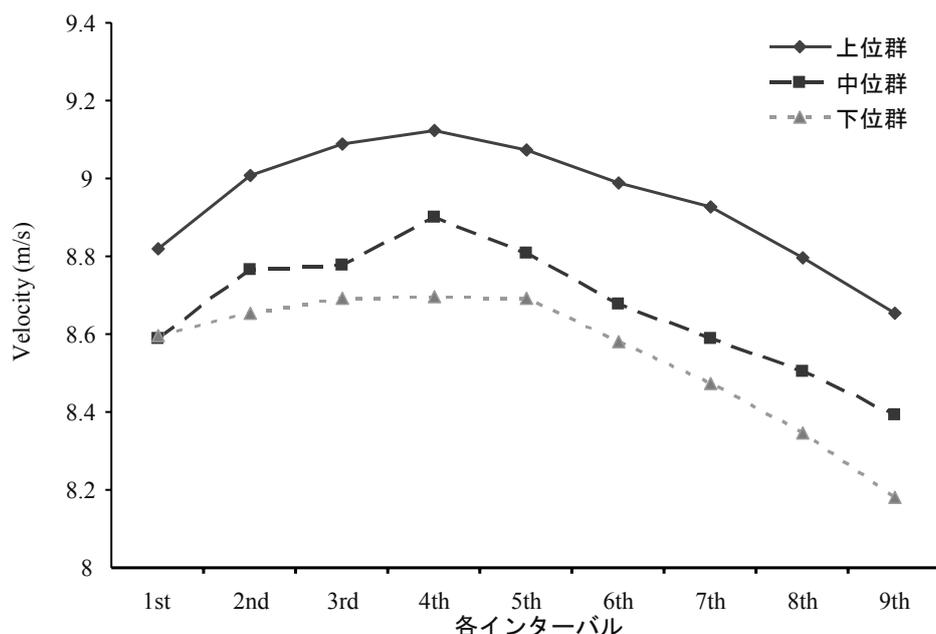


図 1. 110mH の各群における平均速度曲線

図 2 は分析項目別の平均値、標準偏差および各グループ（上位群・位群・下位群）間の有意差検定を行った結果を示している。

男子 110mH の各グループ間において平均ハードリングタイムと最小ハードリングタイムに有意な差は認められなかった。1%水準で有意差が認められたのは、上位群と下位群における最高速度、平均インターバルランタイムであった。上位群と中位群においては、最高速度、最小インターバルランタイム、平均インターバルランタイムに、中位群と下位群においては、最高速度、平均インターバルランタイムに 5%水準で有意差が認められた。これらのことから、今大会の参加者レベル（12.95~13.92 秒）においては、ハードリングタイムはそれほど差がないと考えられる。中位群が上位群に移行するためには、13 秒 5 台からの記録更新には最高速度区間に近い区間がより多く出現してくると示されているように（谷川, 2006）、最高速度の維持能力の向上が必要である。下位群が中位群に移行するためには、スプリント能力の向上はもちろんのこと、レース中盤までの速度の向上が課題である。森田ら（1994）が分析した東京世界陸上男子 110mH においては、上位群と中位群間において最高速度、平均インターバルランタイムに、中位群と下位群において平均ハードリングタイムに 1%水準で有意差が認められ、スプリント能力の向上、ハードリングタイムの安定が各群それぞれの課題として示された。今大会の結果では、各群間において傾向は弱いものの、最高速度、最小インターバルランタイムおよび平均インターバルランタイムとインターバルランに関わる項目に差が生じている。

表 3. 男子 110mH の各群の相対速度

	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	
上位群	100.0	102.2	103.1	103.5	102.9	101.9	101.2	99.7	98.1	
中位群	100.0	102.1	102.2	103.6	102.5	101.0	100.0	99.0	97.7	(%)
下位群	100.0	100.7	101.2	101.2	101.2	99.9	98.6	97.1	95.2	

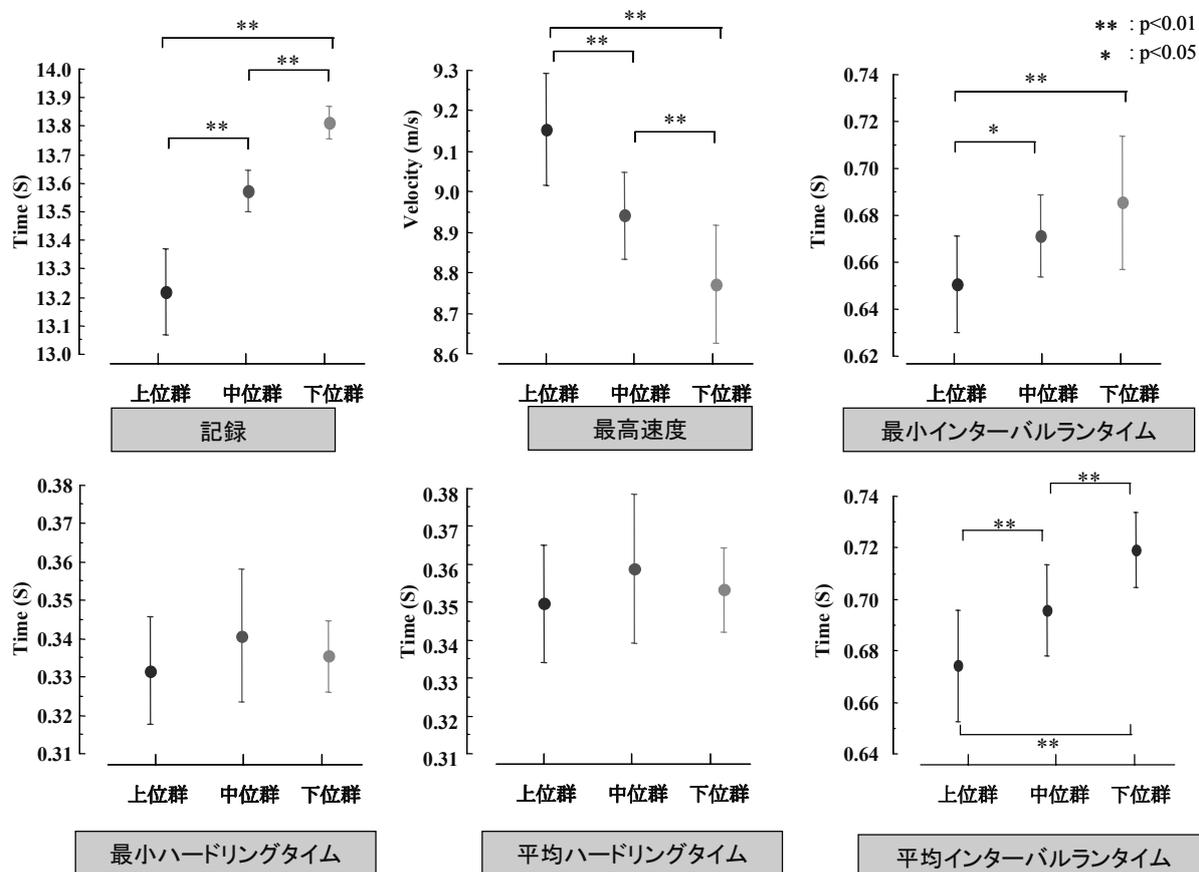


図 2. 男子 110mH 記録別グループ間の有意差検定結果

表 4. 男子 110mH のタイム分析データ

		1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	Goal	
タッチダウンタイム	劉翔	2.58	3.62	4.60	5.60	6.57	7.57	8.57	9.55	10.55	11.58	12.95	(sec.)
	内藤真人	2.62	3.68	4.70	5.73	6.73	7.77	8.83	9.90	10.98	12.08	13.54	
	田野中輔	2.64	3.69	4.76	5.81	6.84	7.89	8.94	10.03	11.11	12.19	13.61	
		Apr.	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	Run-in	
インターバルタイム	劉翔	2.58	1.03	0.98	1.00	0.97	1.00	1.00	0.98	1.00	1.03	1.37	(sec.)
	内藤真人	2.62	1.07	1.02	1.03	1.00	1.03	1.07	1.07	1.08	1.10	1.46	
	田野中輔	2.64	1.05	1.07	1.05	1.03	1.05	1.05	1.08	1.08	1.08	1.42	
ハードリングタイム	劉翔	0.40	0.38	0.37	0.37	0.35	0.37	0.37	0.35	0.35	0.37	(sec.)	
	内藤真人	0.37	0.37	0.35	0.38	0.35	0.37	0.37	0.38	0.40	0.40		
	田野中輔	0.40	0.37	0.38	0.38	0.37	0.37	0.37	0.38	0.38	0.37		
インターバルランタイム	劉翔		0.65	0.61	0.63	0.62	0.63	0.63	0.63	0.65	0.66	(sec.)	
	内藤真人		0.70	0.67	0.65	0.65	0.66	0.70	0.69	0.68	0.70		
	田野中輔		0.68	0.69	0.67	0.66	0.68	0.68	0.70	0.70	0.71		
平均速度	劉翔	5.92	8.85	9.29	9.14	9.46	9.14	9.14	9.29	9.14	8.85	9.09	(m/s)
	内藤真人	5.85	8.57	8.99	8.85	9.14	8.85	8.57	8.57	8.44	8.31	8.52	
	田野中輔	5.80	8.70	8.57	8.70	8.85	8.70	8.70	8.44	8.44	8.44	8.77	
相対速度	劉翔		100.0	105.0	103.3	106.8	103.3	103.3	105.0	103.3	100.0	102.7	(%)
	内藤真人		100.0	104.9	103.2	106.7	103.2	100.0	100.0	98.4	97.0	99.4	
	田野中輔		100.0	98.5	100.0	101.7	100.0	100.0	97.0	97.0	97.0	100.8	

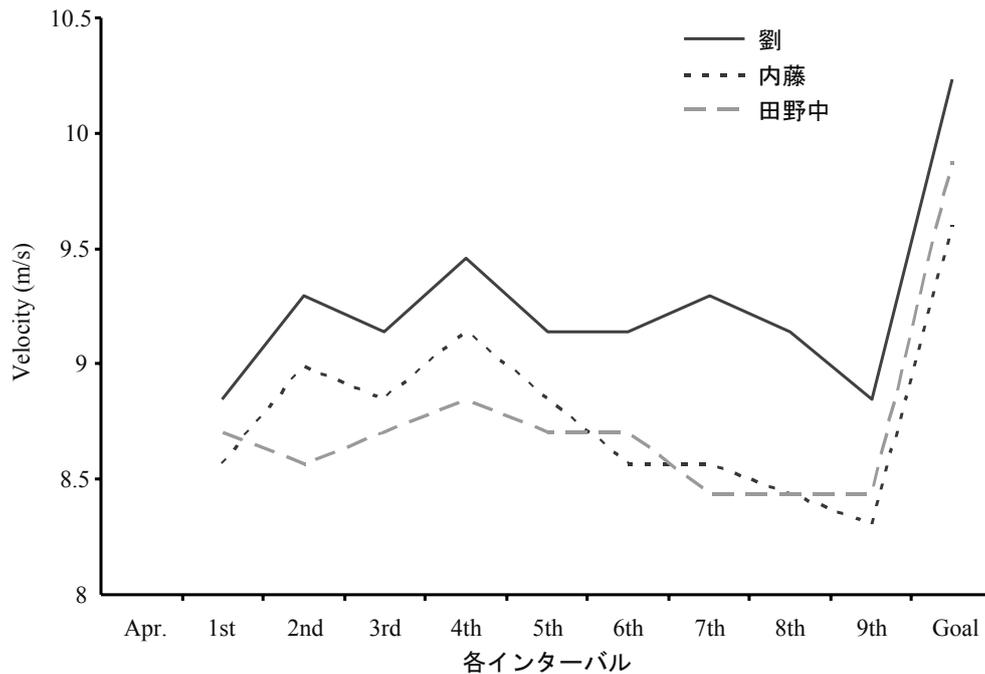


図3. 110mHにおける速度曲線

### (3) 優勝者と日本選手の比較

表4は今大会優勝者である劉と日本代表として準決勝に進出した内藤、田野中3名の各タイム分析データをまとめたものである。また、図3は劉、内藤、田野中の各インターバルにおける速度変化を示したものである。今大会における3群の中で、劉は上位群、内藤、田野中は中位群に属していた。表4より3名のアプローチタイムを比較すると、劉は2.58秒、内藤は2.62秒、田野中は2.64秒と劉がややリードして1台目を通過した。しかし、第2インターバルから劉は0.98秒と1.00秒を切るインターバルタイムを出しており、2台目以降その差は開く傾向にあった。最高速度出現区間は3名とも第4インターバルであるが、最高速度は劉が9.46m/s、内藤が9.14m/s、田野中が8.85m/sと大きな差が現れた。図3から3名の速度曲線を見ると、劉と内藤は速度に差があるものの速度変化パターンは類似していた。それに対し田野中は第1インターバルの速度を100%とした相対速度をみると(表4)、最高速度出現区間の相対速度は101.7%にとどまっており、劉(106.8%)や内藤(106.7%)に比べかなり低い。今後の第一課題として田野中が記録を向上させる場合、一区間でも速いリズムユニットを形成することが必要になると考えられる。一方、内藤はインターバルタイムが1.00秒と最高速度が秒速9mを超える区間が出現しているが、中盤以降の速度低下が著しく、9つのインターバルタイムの差が大きい。中位群の中でもインターバルタイムは短いことから、高い速度を長い区間維持できるようにハードリング技術の改善が必要となる

と推察される。また、日本選手2名に対し劉は、第9インターバルをのぞき第2~8インターバルまでは103~106%の高い相対速度を示しており、前半高まった速度を後半まで維持していることがわかる。また、0.97秒というインターバルタイムをはじめ、1.00秒を切る区間が3区間と日本選手2名にはみられないリズムユニットを形成している。これらのことから、劉は前半から中盤までの大きな速度増加とともに、非常に高い速度を後半まで維持する能力が高いと考えられる。

次にインターバルタイムをハードリングタイムとインターバルランタイムに区間分けして比較すると、平均ハードリングタイムは劉と内藤が0.37秒、田野中が0.38秒で劉との差はわずかであるが、上位群の平均ハードリングタイムは0.35秒であり、劉は世界トップ選手の中では比較的ハードリングに時間を要している。一方インターバルランタイムは劉が0.61~0.66秒(平均0.63秒)、内藤は0.65~0.70秒(平均0.68秒)、田野中は0.66~0.71秒(平均0.69秒)と劉と日本選手間には大きな差があることがわかる。森田ら(1994)にならい、この平均値よりインターバル間の平均ピッチを推測すると(平均踏切時間を0.12秒と仮定した場合)、劉は5.84歩/秒、内藤は5.38歩/秒、田野中は5.30歩/秒であり、日本選手2名に比べ劉は非常に高いピッチを獲得しており、インターバルラン区間において速いリズムを形成していた。

### (4) 上位3名のレースパターン

表5は、今大会における上位3名の選手のレースパターンを示したもので、優勝者は劉(12.95

表 5. 上位 3 名の各ラウンドにおけるレースパターン

	劉(優勝者)			トラメル(第2位)			ペイン(第3位)		
	Heat	S-F	Final	Heat	S-F	Final	Heat	S-F	Final
Time	13.36	13.25	12.95	13.40	13.23	12.99	13.27	13.19	13.02*
Apr.	2.63	2.63	2.58	2.63	2.55	2.53	2.62	2.61	2.53
1st	1.05	1.02	1.03	1.03	1.03	1.02	1.07	1.05	1.03
2nd	1.03	1.02	0.98	1.07	1.02	0.98	1.02	1.02	1.02
3rd	1.03	1.00	1.00	1.02	1.02	1.00	1.00	1.00	1.02
4th	1.03	1.02	0.97	1.02	1.00	1.00	1.02	1.00	1.00
5th	1.02	1.00	1.00	1.02	1.02	1.00	1.02	1.00	1.00
6th	1.03	1.02	1.00	1.05	1.00	1.00	1.02	1.03	1.02
7th	1.02	1.03	0.98	1.07	1.03	1.02	1.03	1.02	1.00
8th	1.05	1.03	1.00	1.05	1.05	1.03	1.03	1.03	1.03
9th	1.07	1.05	1.03	1.05	1.07	1.03	1.03	1.07	1.02
Run-in	1.40	1.43	1.37	1.40	1.44	1.38	1.42	1.37	1.35
平均区間タイム	1.04	1.02	1.00	1.04	1.03	1.01	1.03	1.02	1.01
平均ハードリングタイム	0.37	0.35	0.37	0.37	0.35	0.35	0.35	0.34	0.36
平均インターバルタイム	0.67	0.67	0.64	0.68	0.67	0.66	0.68	0.69	0.66
最高区間タイム	1.02	1.00	0.97	1.02	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00
速度維持区間	6	6	3	4	5	5	5	5	7

\*:PB

秒), 第 2 位はトラメル (12.99 秒), 第 3 位はペイン (13.02 秒) である. 各選手の予選・準決勝・決勝の記録をみると, 3 名ともラウンドごとに記録を短縮し, 決勝で最も良いパフォーマンスをしていた.

個人内でレースパターンを比較すると, 優勝者劉の場合, 平均ハードリングタイムは準決勝で一度向上しているが, 予選と決勝は同タイムであった. それに対し決勝では平均インターバルタイムが大幅に短縮していた. 森田ら (1994) にならった速度維持区間数 (最小インターバルタイム +0.02 秒以内のインターバル) は, 決勝では 3 区間ではあるが, 最高区間タイムは 0.97 秒まで短縮していた. よって劉の記録短縮の要因は, インターバルランタイムの短縮, 最高区間タイムの短縮によるものと考えられる. 2 位のトラメルの場合, ハードリングタイムは予選から準決勝において短縮し, 決勝は変わっていないが, 平均インターバルランタイムはラウンドごとに短縮していた. 速度維持区間数は全ラウンドにおいて 4-5 区間と安定している. トラメルも決勝では 0.98 秒の区間があり, 非常に速いリズムが出現している. よってトラメルの記録短縮の要因は, ハードリングタイムの短縮, インターバルランタイムの短縮, 最高区間タイムの短縮, 速度維持によるものと考えられる. 3 位のペインの場合, 平均ハードリングタイムは予選から準決勝で短縮し, 決勝では予選よりも時間を要している. それに対し平均インターバルランタイムは, 決勝で短縮している. 最高区間タイムは全ラウンドにおいて 1.00 秒と同じであるが, 速度維持区間数は決勝で 7 区間と増加している. よってペインの記録短縮の要因は, インターバルランタイムの短縮と速度維持によるものと考えられる. また, アプローチから第 1 インターバルタイムまでに準決勝と比較し約 0.1 秒向上しており, 3 選手と同様に前半区

間の速度を高めていた. ペインは 3 名の中で決勝において唯一自己記録を更新した選手であり, 予選から決勝までのタイム差が最も小さく, 彼の大会前のベスト記録が 13.12 秒であることから, 予選から非常に高いパフォーマンスの中で洗練されていったことがうかがえる. したがって, 最高速度は予選から変わっていないが, 決勝において高い速度を長い区間維持したことが自己記録更新につながったと思われる.

以上のように, 上位 3 名のラウンドごとのレースパターンにおいて記録短縮の主要因はそれぞれ異なるが, 3 選手ともアプローチから第 1 インターバルタイムまでに一様に速度を高めており, アプローチが上位争いには重要と考えられる. また, 今大会 3 位のペインは自己ベストを更新し, トラメルも決勝では自己ベスト (12.95 秒) に近い走りをしていて, それに対し 12.88 秒がベストの劉は, やや時間を要している. 劉の 12.88 秒 (自己ベスト記録: 世界歴代 2 位) のタイム分析によると (谷川, 2006), 第 3-6 インターバルの区間タイムは 0.97~0.98 秒であり, 中盤区間において速いリズムユニットが安定して出現している. 表 3 からわかるように, 今回は 0.9 秒台の区間は 3 区間であり, 安定したリズムユニットが形成できず, やや時間を要していることが今回のタイムに影響していると考えられ, 劉には記録更新の余地がまだ残されているとも推察される. 今後, 現在の世界記録である 12.87 秒の世界記録の更新は, 0.97~0.98 秒の区間タイムを出現させ, 平均区間タイムが 1.00 秒を切ってくるのが条件となる.

#### 【100mH】

##### (1) 各種データと記録の相関

タイム分析によって得られた各種データと記録間の相関係数を求め, いくつかの項目を相関行列として表 6 に示した.

表 6. 女子選手の時間分析項目の相関行列

	記録	最高速度	最小ハードリングタイム	平均ハードリングタイム	最小インターバルランタイム	平均インターバルランタイム
記録						
最高速度	-.900 **					
最小ハードリングタイム	.690 **	-.727 **				
平均ハードリングタイム	.658 **	-.685 **	.888 **			
最小インターバルランタイム	.180	-.084	-.320	-.487 **		
平均インターバルランタイム	.405 *	-.297	-.236	-.380	.870 **	

n=29

\*\* : p<0.01

\* : p<0.05

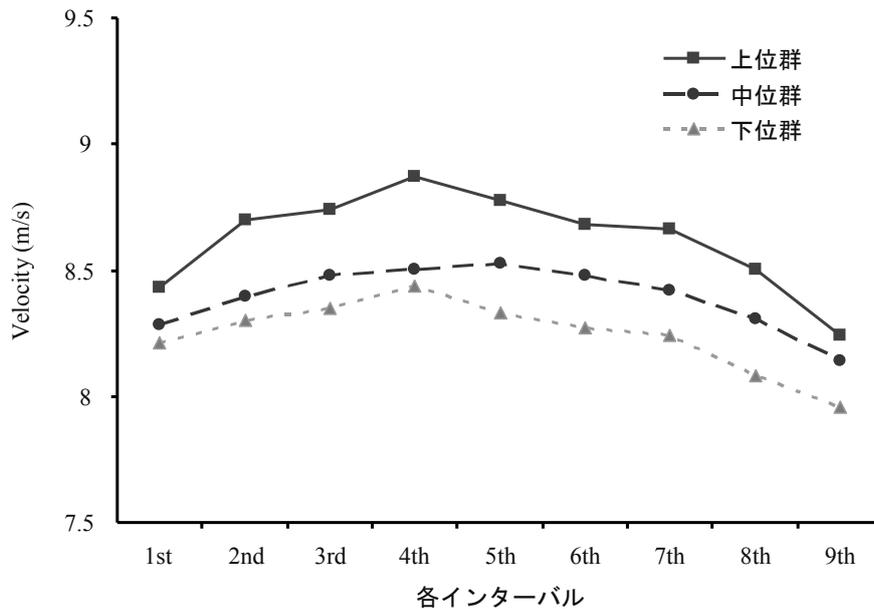


図 4. 100mH の各群における平均速度曲線

女子 100mH において記録と相関が高かった項目は、最高速度 ( $r=-.900$ )、最小ハードリングタイム ( $r=.690$ )、平均ハードリングタイム ( $r=.658$ ) であった ( $p<.01$ )。一方、平均インターバルランタイム ( $r=.405$ ) にも 5%水準で記録との間に有意な相関が認められたが、平均・最小ハードリングタイムより相関係数は低かった。また、最小インターバルランタイム ( $r=.180$ ) に記録との相関は認められなかった。これらのことから、今大会の参加者レベル (12.46~13.29 秒) における記録短縮の課題として、最高速度の獲得はもちろん、インターバルランタイムの短縮よりもハードリングタイムの短縮、つまりハードルをすばやく短時間で越えることがあげられる。女子の場合、相対的にハードルが低いいため、インターバル距離を伸ばし、ハードリング距離を短くしている可能性も考えられる(宮下, 2006)。東京大会は記録とインターバルランタイムと相関が高かったが、本大会では参加者全体の競技レベルが向上、レベル差が縮まったことも影響しているかもし

れない。

(2) パフォーマンス別グループの比較 (上・中・下位群)

今大会の女子 100mH 参加者を、表 7 に示すように記録順に上位群・中位群・下位群の 3 グループに分けた。そして各インターバルにおける平均疾走速度を計算し、図 4 にグループ別疾走速度曲線を示した。

上位群においては、第 2 インターバルにおいて速度が大きく増加した後、第 4 インターバルで最高速度に達している。第 1 インターバルの速度を 100%とした相対速度をみると (表 8)、第 4 インターバルにおいては前半からの増加率は約 5%と、中位・下位群と比べて大きかった。第 4 インターバル以降速度は徐々に低下し、第 7 インターバルからは急激に低下し、第 9 インターバルにおいて第 1 インターバルを下回っている。中位群も、上位群と同様の傾向を示したが、増加率が約 3%であった。下位群においては、中位群と同様に緩や

表 7. 100mH の各群の度数分布

	上位群	中位群	下位群
範囲(sec.)	12.46～ 12.65	12.78～ 12.99	13.01～ 13.29
平均(sec.)	12.55	12.89	13.10
人数	8	12	9

表 8. 女子 100mH の各群の相対速度

	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	
上位群	100.0	103.2	103.6	105.2	104.1	103.0	102.7	100.8	97.8	
中位群	100.0	101.4	102.3	102.6	102.9	102.3	101.6	100.2	98.3	(%)
下位群	100.0	101.1	101.6	102.8	101.4	100.7	100.4	98.4	96.9	

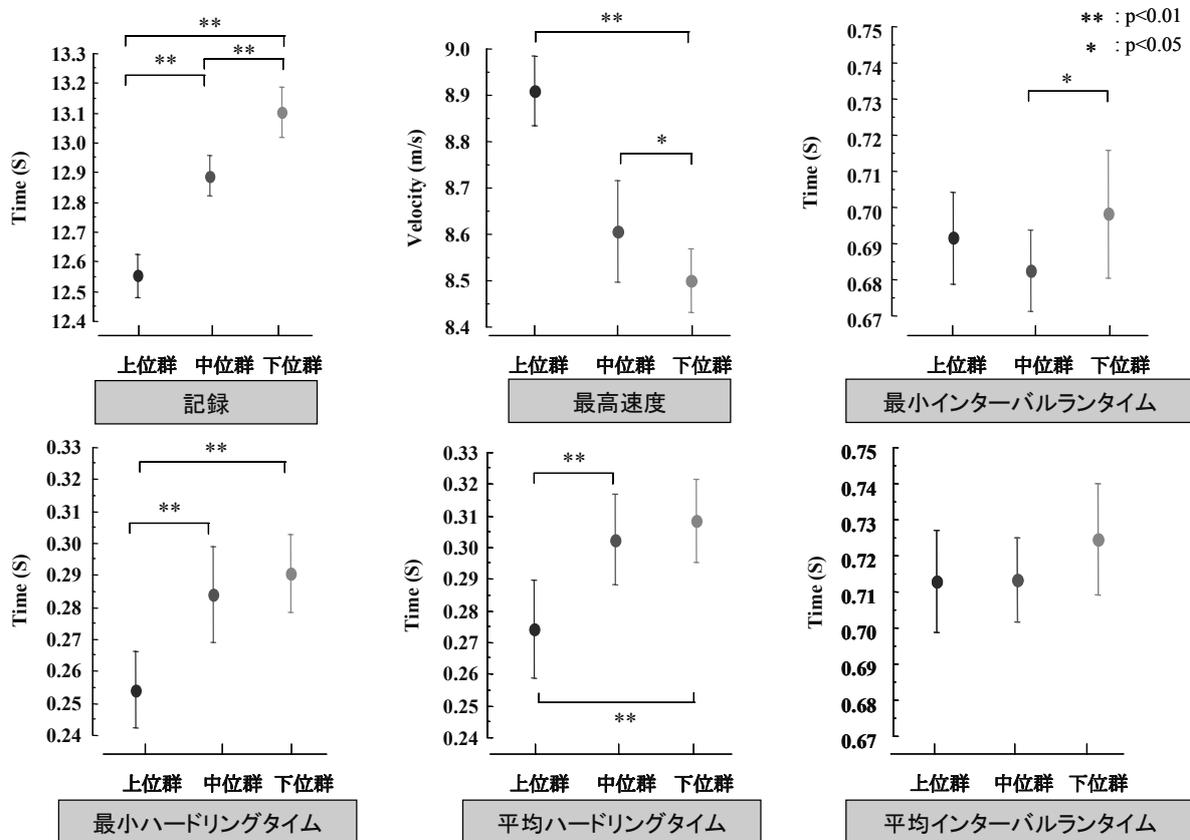


図 5. 女子 100mH の記録別グループ間の有意差検定結果

かに速度が増加し (増加率約 3%), 第 4 インターバル以降は速度が低下し, 第 8 インターバルにおいて第 1 インターバルを下回っている. これらのことから, 中盤以降速度が低下する傾向は各群共通しているものの, 上位群は中位・下位群と比較してレース前半から中盤にかけて速度が大きく増加し, その後同様に速度が低下していくのがわかる. 図 5 は分析項目別の平均値, 標準偏差および各グループ (上位群・中位群・下位群) 間の有意差検定を行った結果を示している. 1%水準で有意差が認められたのは, 上位群と中位群におい

ては最小ハードリングタイム, 平均ハードリングタイム, 上位群と下位群においては最高速度, 最小ハードリングタイム, 平均ハードリングタイムであった. 中位群と下位群においては最高速度と最小インターバルランタイムに 5%水準で有意差が認められた. 平均インターバルランタイムに有意な差は認められなかった.

これらのことから, 今大会の参加者レベル (12.46~13.29 秒) の上位群と中位群間においては, ハードリングタイムが記録に大きく影響していた. よって中位群が上位群へ移行するためには,

表 9. 100mH のタイム分析データ

		1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	Goal	
タッチダウンタイム	M.ペリー	2.54	3.54	4.51	5.48	6.44	7.41	8.39	9.38	10.36	11.39	12.46	(sec.)
	石野真美	2.71	3.74	4.76	5.79	6.82	7.84	8.89	9.94	11.01	12.09	13.29	
		Apr.	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	Run-in	
インターバルタイム	M.ペリー	2.54	1.00	0.97	0.97	0.97	0.97	0.98	0.99	0.98	1.03	1.07	(sec.)
	石野真美	2.71	1.03	1.02	1.03	1.03	1.02	1.05	1.05	1.07	1.08	1.20	
ハードリングタイム	M.ペリー	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.30		(sec.)
	石野真美	0.33	0.30	0.28	0.30	0.32	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30		
インターバルランタイム	M.ペリー		0.72	0.70	0.70	0.70	0.68	0.70	0.70	0.70	0.73		(sec.)
	石野真美		0.73	0.73	0.73	0.72	0.72	0.75	0.75	0.77	0.78		
速度	M.ペリー	5.12	8.50	8.79	8.79	8.79	8.79	8.64	8.64	8.64	8.23	8.53	(m/s)
	石野真美	4.80	8.23	8.36	8.23	8.23	8.36	8.10	8.10	7.97	7.85	7.58	
相対速度	M.ペリー		100.0	103.4	103.4	103.4	103.4	101.6	101.6	101.6	96.8	100.4	(%)
	石野真美		100.0	101.6	100.0	100.0	101.6	98.4	98.4	96.8	95.4	92.1	

高い疾走速度を生かしつつ、ハードリングタイムを短縮することが大きな課題である。中位群と下位群間においては、最高速度が高いことに加え、最小インターバルランタイムが記録に影響している。よって下位群が中位群へ移行するためには、スプリント能力の向上が第一の課題である。しかし、森田ら（1994）が分析した東京世界陸上女子100mHの各群間においては、最高速度、最小インターバルランタイム、平均インターバルランタイムに1%水準で有意差が認められ、記録短縮にはスプリント能力の向上が必要不可欠であると指摘している。2大会における平均ハードリングタイムに着目すると、東京大会において12.52秒で優勝したナロジレンコは0.33秒であり（森田ら、1994）、他の選手も0.3秒台であったが、今大会12.55秒で5位に入賞したパウエルは0.25秒であり、他の選手から見ても今大会の方が短いハードリングタイムであり、約15年のレベル向上の中で世界トップレベルにおける女子100mHのハードリング技術が変化してきたとも考えられる。

ハードリング距離の着地側距離を短縮させながらハードリングタイムを短くし、インターバルラン区間の距離を伸ばし水平速度が高まるという報告や（宮下、2006）、空中時間が短くなることでハードリング距離が小さくなり、インターバルの3歩がオーバーストライドになることから、ハードル高が低い女子では過度に低く跳ぶべきではなく、ハードリング距離も小さくするべきではないという報告もある（Dapena,1991）。しかし、ペリーと石野はほぼ同じハードリング距離（3.17m/3.13m）で、ハードル上の最高身体重心高（1.16m）も同じであった（技術分析で後述）。したがって、13、14秒台の選手の場合は、Dapenaのオーバーストライドになるという示唆があてはまる可能性はあるが、ストライドが大きい第2歩目でも2m前後であり、高いスプリント能力を有する12秒台の選手は、高いピッチで走ってお

り、インターバルラン区間においてオーバーストライドになるというのは考えにくい。タイム分析から考察するには限界があるが、今大会の上位・中位群間のハードリングタイムに有意差が認められたことで、両群間にはスプリント能力はもちろん、ハードリング動作の技術的な差が生じていると考えられる。

### (3) 優勝者と日本選手の比較

表9は今大会優勝者であるペリーと日本代表として出場した石野両者の各タイム分析データをまとめたものである。また、図6はペリー、石野両者の各インターバルにおける速度変化を示したものである。今大会における3群の中で、ペリーは上位群、石野は下位群に属していた。

表9より両者のアプローチタイムを比較すると、ペリーは2.54秒、石野は2.71秒とスタートから大きな差があり、石野は1台目からペリーに大きく遅れていることがわかる。また、図6から両者の各インターバルにおける速度変化パターンは類似しているが、速度そのものに差がみられる。最高速度に関しては、ペリーが8.79m/s、石野が8.36m/sと大きな差があった。最高速度出現区間はペリーが第2～5インターバル、石野は第3・6インターバルと両者とも前半、中盤区間を中心に出現している。また、第1インターバルの速度を100%とした相対速度から、ペリーは第9インターバルまでの長い区間速度を維持しているのに対し、石野は第5インターバルまでしか維持できなかった。

次にインターバルタイムをインターバルランタイムとハードリングタイムに区間分けして比較すると、インターバルランタイムはペリーが0.68～0.73秒（平均0.70秒）、それに対し石野が0.72～0.78秒（平均0.74秒）と両者間に大きな差が現れている。森田ら（1994）にならい、この平均値よりインターバル間の平均ピッチを推測すると（平均踏切時間を0.12秒と仮定した場合）、

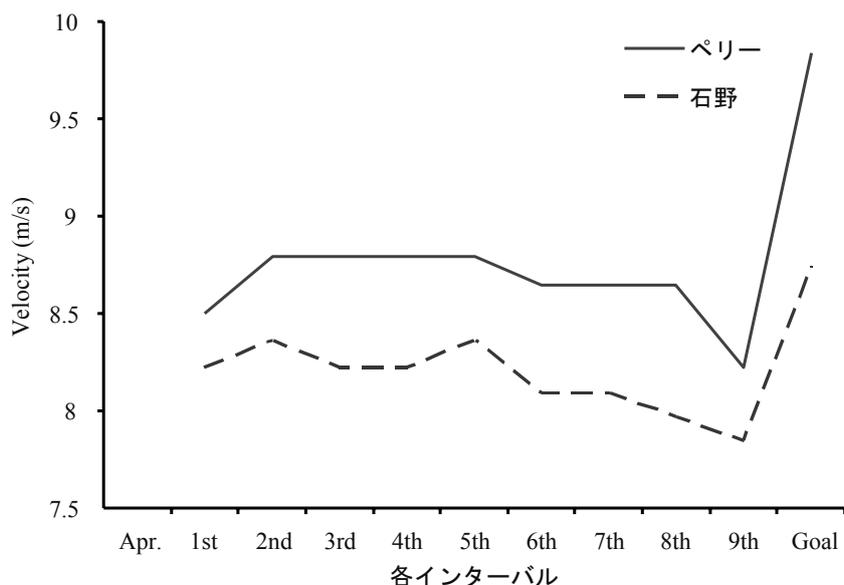


図 6. 100mH における速度曲線

表 10. 上位 3 名の各ラウンドにおけるレースパターン

	ペリー(優勝者)			フェリシアン(第2位)			エニス・ロンドン(第3位)		
	Heat	S-F	Final	Heat	S-F	Final	Heat	S-F	Final
Time	12.72	12.55	12.46	12.73	12.61	12.49	12.74	12.67	12.55
Apr.	2.57	2.57	2.54	2.65	2.64	2.61	2.64	2.62	2.55
1st	1.02	1.00	1.00	1.02	1.02	0.98	1.02	1.02	1.02
2nd	1.00	1.00	0.97	1.00	0.97	0.98	1.00	0.98	0.98
3rd	1.00	0.97	0.97	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98	0.97
4th	0.98	0.98	0.97	0.97	0.95	0.95	0.98	0.98	0.95
5th	0.98	0.98	0.97	0.97	0.98	0.95	0.98	0.97	0.97
6th	1.00	0.98	0.98	1.02	0.98	0.97	1.00	0.98	0.97
7th	1.00	0.98	0.98	1.02	1.00	0.97	0.98	1.00	0.98
8th	1.00	0.98	0.98	1.00	0.98	1.00	1.02	1.00	0.98
9th	1.07	1.03	1.03	1.05	1.02	1.02	1.03	1.02	1.02
Run-in	1.10	1.07	1.07	1.08	1.08	1.10	1.10	1.12	1.12
平均区間タイム	1.01	0.99	0.98	1.00	0.99	0.98	1.00	0.99	0.98
平均ハードリングタイム	0.29	0.28	0.28	0.30	0.29	0.28	0.31	0.31	0.28
平均インターバルランタイム	0.72	0.71	0.70	0.70	0.70	0.70	0.69	0.69	0.70
最高区間タイム	0.98	0.97	0.97	0.97	0.95	0.95	0.98	0.97	0.95 (sec.)
速度維持区間数	7	6	7	3	2	5	6	5	4 (区間)

ペリーは5.13歩/秒、石野は4.81歩/秒であり、ペリーは非常に高いピッチを獲得している。また、平均ハードリングタイムはペリーが0.28秒、石野が0.30秒と短い大きな差がみられるため、スプリント能力に加えハードリング能力にも差が現れていることがわかる。これらのことから、石野が今後記録の短縮をする上では、以前から指摘されているスプリント能力の向上が必要不可欠であると同時に、そのスプリント能力向上によるスピードに対応できるようなハードリング技術も必要であると考えられる。

#### (4) 上位 3 名のレースパターン

表 10 は、今大会における上位 3 名の選手のレースパターンを示したもので、優勝者はペリー(12.46 秒)、第 2 位はフェリシアン(12.49 秒)、第 3 位はエニス・ロンドン(12.55 秒)である。

各選手の予選・準決勝・決勝の記録をみると、3 名ともラウンドごとに記録を短縮し、決勝で最も良いパフォーマンスをしていた。

個人内でレースパターンを比較すると、優勝者ペリーの場合、平均ハードリングタイムは 3 ラウンドともほぼ同じであるが、平均インターバルランタイムは短縮している。また男子と同様に、森田ら(1994)にならった速度維持区間数は、全ラウンドにおいて 6~7 区間と非常に長いことから、ペリーの記録短縮の要因は、インターバルランタイムの短縮、そして安定した速度維持区間を保持したことによるものと考えられる。全ラウンドにおいて第 2・3 インターバルから第 8 インターバルまで高い速度を維持しており、非常に安定した走りをしていった。2 位のフェリシアンの場合、ペリーとは異なり平均インターバルランタイムは全ラウンドで同じであるが、平均ハードリングタ

イムは短縮している。速度維持区間数はラウンドによって差がみられた。よってフェリシアン記録短縮の要因は、ハードリングタイムの短縮によるものと考えられる。準決勝、決勝においては0.95秒とペリーよりも優れた最高区間タイムを出しているが、最高速度出現後の維持区間は短く、レース後半には減速している。3位のエニス・ロンドンの場合、平均ハードリングタイムは予選、準決勝は同じであるが、決勝で大幅に短縮している。それに対して平均インターバルランタイムは予選、準決勝よりも決勝の方が時間を要している。速度維持区間数はラウンドが進むにつれ減少していた。よってエニス・ロンドンの記録短縮の要因は、ハードリングタイムの短縮によるものと、予選から決勝におけるアプローチタイムが約0.1秒短縮したことによるものと考えられる。決勝では0.95秒という最高区間タイムが出現しているが、その維持区間は短く、レース後半において減速がみられた。

以上のように、上位3名のラウンドごとのレースパターンにおいて、記録短縮の要因はインターバルランタイムを短縮するタイプとハードリングタイムを短縮するタイプに分かれていた。また、男子と同様に3選手ともアプローチから第1インターバルタイムまでに、一様に速度を高め、第1インターバルランタイムの短縮がなされており、スタートから1台目さらに第1インターバルが成功することが、上位争いをするのには重要であると考えられる。今大会優勝者のペリーは、ラウンドごとに記録を短縮していく中でも各レースパターンは非常に類似しており、他の2名より最高速度は低いものの、一定の高い速度を長い区間維持していた。一定のリズムで予選から決勝までを走り、決勝の接戦の中でも自分のリズムを崩すことなく走りきれたことに勝因があると推察される。

## 文献

- Hucklekemkes, J. (1991) Model technique for the women's 100-meter hurdles. *Track Technique*, 118 : 3759-3766.
- McDonald, C. and J. Dapena. (1991) Linear kinematics of the men's 110-m and women's 100-m hurdles races. *Med.Sci.Sports Exerc*, 24 : 1382-1389.
- McDonald, C. and J. Dapena. (1991) Angular momentum in the 110-m and women's 100-m hurdles races. *Med.Sci.Sports Exerc*, 23 : 1392-1402.
- McDonald, C. (2002) Hurdling Is Not Sprinting. *Track Coach*, 161 : 5137-5143.
- 宮下憲 (2006) : 100m ハードルのトレーニングに向けて, *スプリント研究*, 16 : 44-50.
- 森田正利・伊藤章・沼澤秀雄・小木曾一之・安井年文 (1994) : スプリントハードル (110mH,

100mH) および男女 400mH のレース分析, 第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス研究報告書. ベースボールマガジン社, 東京 : 66-91.

Susanka, P., et al. (1988) Time analysis of the sprint hurdle events at the II World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics* 2-3 : 51-74.

谷川聡 (2006) : 世界トップレベルからみた110mハードル競走の競技特性, *スプリント研究*, 16 : 24-40.

# 2007 年世界陸上競技選手権大阪大会における 男子 110m ハードル走および 女子 100m ハードル走レースの動作分析

## Biomechanical Analysis of Men's 110m and Women's 100m Sprint Hurdle

谷川 聡<sup>1)</sup> 柴山 一仁<sup>2)</sup>

1) 筑波大学 2) 筑波大学大学院

Satoru Tanigawa<sup>1)</sup>, Kazuhito Shibayama<sup>2)</sup>

1) University of Tsukuba, 2) Graduate School of University of Tsukuba

### 1. はじめに

男子 110mH の世界記録(当時)は本大会出場、優勝の劉翔がもつ 12 秒 88, それに対して日本記録は 13 秒 39 とおよそ 0 秒 5 の差がある. 本大会でも 12 秒台の記録が 2 名と高いレベルでの接戦の試合であった. しかし, 日本人選手も, 初めて 3 名が A 標準記録を突破し出場, 準決勝に 2 名が進出するというレベルアップが図られてきている. また, 女子 100mH も世界記録には及ばないものの, 優勝記録は 12 秒台中盤のハイレベルで 0 秒 2 以内に 8 位までがゴールになだれ込む激戦となった. 日本人選手 1 名が B 標準記録を突破して出場した. 動作分析のための撮影の範囲は, 第 7 ハードルを中心に前方および後方から 2 台の HSV によって撮影した. スプリントハードルに

おいては, スプリント能力が重要であることは今回の時間分析においても明らかであり, またこれまでも多くの研究および指導書で指摘されている. 一方で, スプリントハードルはハードリングでの速度減速をいかに抑え, インターバル間ではいかに加速するかが重要になってくる. したがって, ハードリング技術の減速局面である踏切, インターバルの加速の始まりである着地動作に注目して動作分析を行った. そして, 各選手ともレース中盤以降, 速度低下することからハードリング技術の違いが大きく現れると考えられる 7 台目に撮影範囲を設定し撮影をした. また, 動作分析は男女ともに優勝者と 2 位さらに日本人選手の 3 名を対象とした(図 1 および図 2).

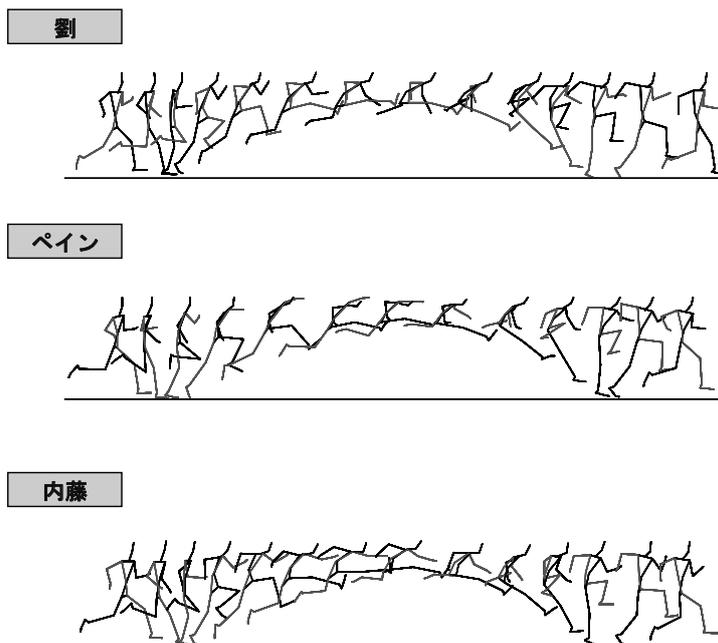


図 1. 男子 3 選手のハードリング

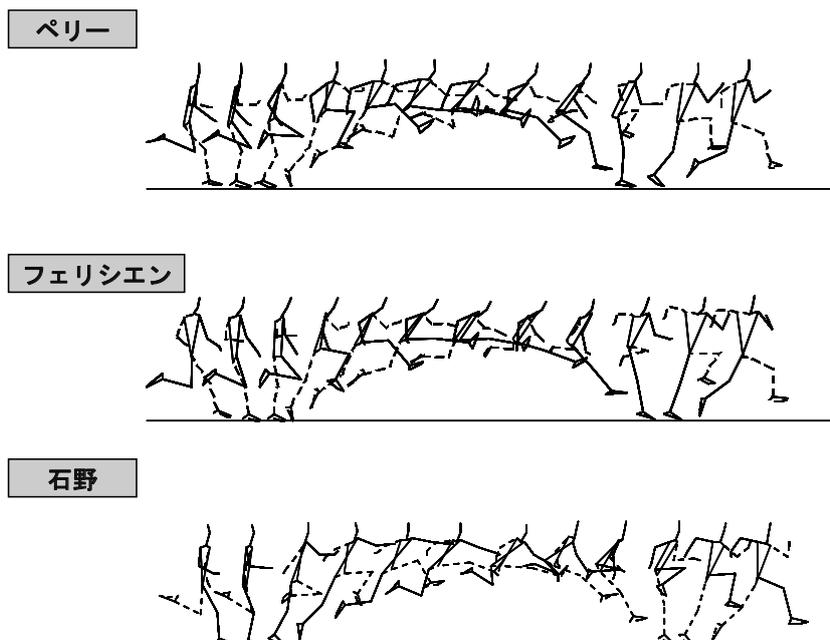


図 2. 女子 3 選手のハードリング

表 1. 男子 110mH の 3 選手の特徴

	身長(cm)	体重(kg)	自己最高記録(s)	分析レース記録(s)	達成率(%)
劉 翔	188	82	12.88	13.12	98.2
デイビッド・ペイン	179	76	13.12	13.02	100.8
内藤真人	185	75	13.43	13.54	99.2

表 2. 女子 100mH の 3 選手の特徴

	身長(cm)	体重(kg)	自己最高記録(s)	分析レース記録(s)	達成率(%)
ミッシェル・ペリー	172	58	12.43	12.46	99.8
ベルディタ・フェリシエン	163	63	12.46	12.49	99.8
石野真美	169	52	13.08	13.54	96.6

## 2. 分析レース記録と身体的特徴

表 1 には優勝した劉翔と 3 位のペインさらに内藤の身体的特徴と記録を示した。ペイン (13 秒 02) は大阪世界陸上決勝のレース、内藤は予選のレース (13 秒 54) より算出したが、劉は大阪大会決勝では 9 レーンで走っており撮影範囲外であり、同年の大阪グランプリのレース (13 秒 12) を対象にデータを算出した。ともに自己ベスト記録達成率は、劉が 98.2%、ペインが 100.8%、内藤が 99.2%であった。

表 2 には優勝したペリーと 2 位のフェリシエンさらに石野の身体的特徴と記録を示した。ペリー (12 秒 46) とフェリシエン (12 秒 49) は決勝レース、そして石野は予選レース (13 秒 54) の 7 台目のハードリング技術を検討した。ともに自己ベスト記録達成率は、ペリーおよびフェリシエンが 99.8%、石野が 96.6%であった。

## 3. 空間分析

### 【男子 110mH】

接地瞬時の身体重心速度は劉、ペイン、内藤の順に高かったが、接地後離地時にはペイン、劉、内藤の順であり、ペインが高い技術であったと推察される (図 3)。図 4 は、男子のハードリングにおける身体重心の軌跡、踏切距離、着地距離、接地時および離地時の身体重心角度 (支持脚の足先と身体重心を結ぶ線分と垂線のなす角度) および踏込み角度、離地角度、身体重心最高点とハードルからの距離などを示したものである。さらに踏切時間、着地時間およびハードリング時間を示した。

ペインは身長が 179cm であり、身体重心を大きく引き上げなくてはならないにもかかわらず、ブレーキ局面 (身体重心角度) が小さく、加速局面が大きいことからハードルへの踏切角度が

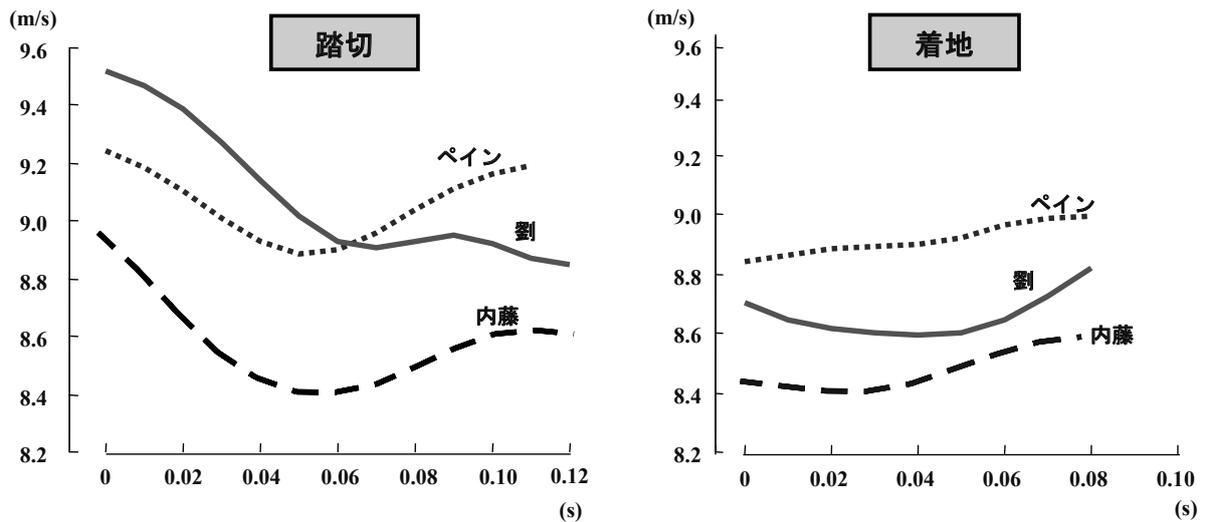


図3. 踏切および着地における身体重心の水平速度

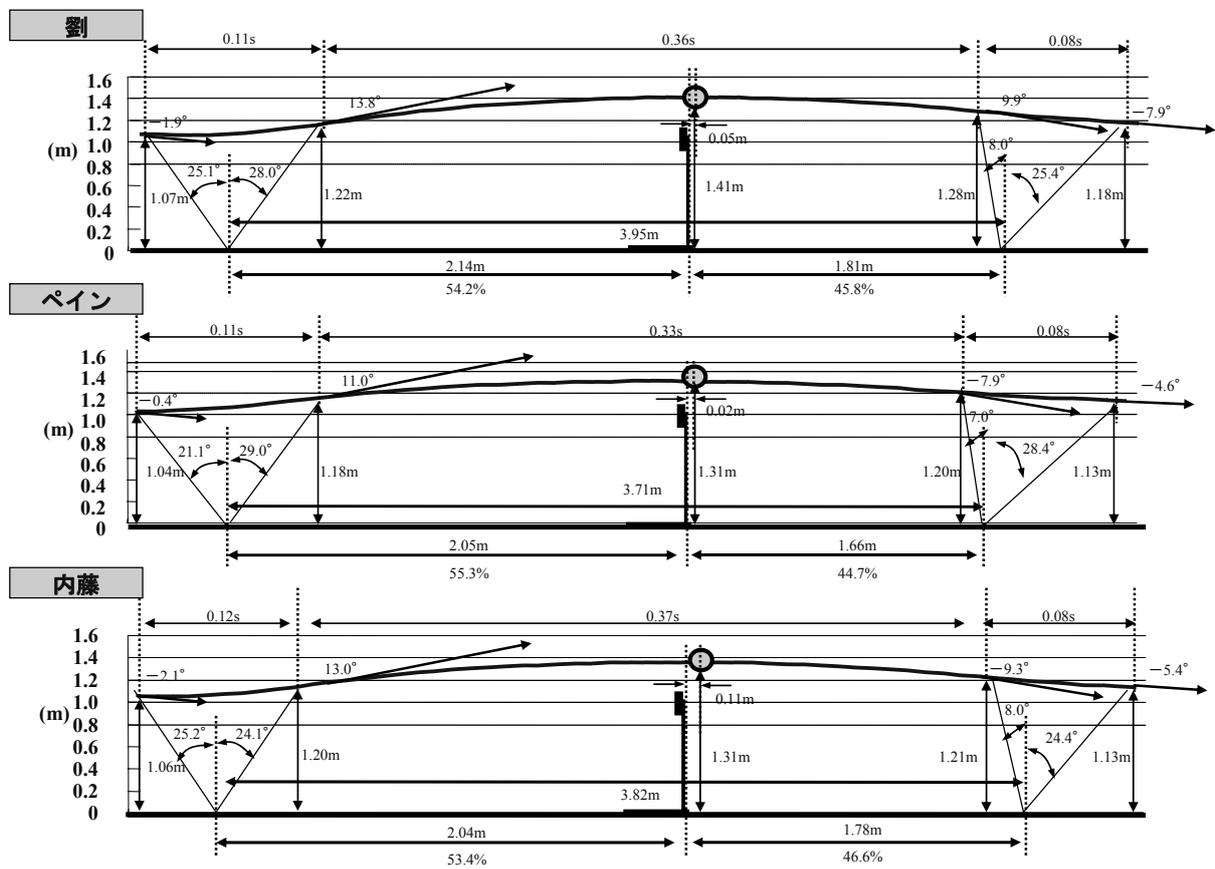


図4. 男子3選手のハードリングにおける身体重心の軌跡

11.0度と最も低くハードルに向かっており、7.9度と最も小さい角度で着地していた。さらに身体重心角度についてみると、踏切および着地とともにブレーキ局面が最も小さく加速局面が最も大きく、全身を使ったスムーズなハードリングであったと考えられる。一方で、内藤は踏切および着地における加速局面が小さく、十分に速度を高めることができなかつたと推察される。

ハードリング距離についてみると、劉はベスト記録達成率が98.2%とある程度余裕があるからか、ハードリングタイムが0.34秒と競技力を反映していなかったが、ハードリング距離も3.95mと3選手の中では一番大きいものとなっている。その分、インターバルラン距離が小さくなるため、長身ながら非常に高いピッチでインターバルランタイムを短くする技術に優れていると推察さ

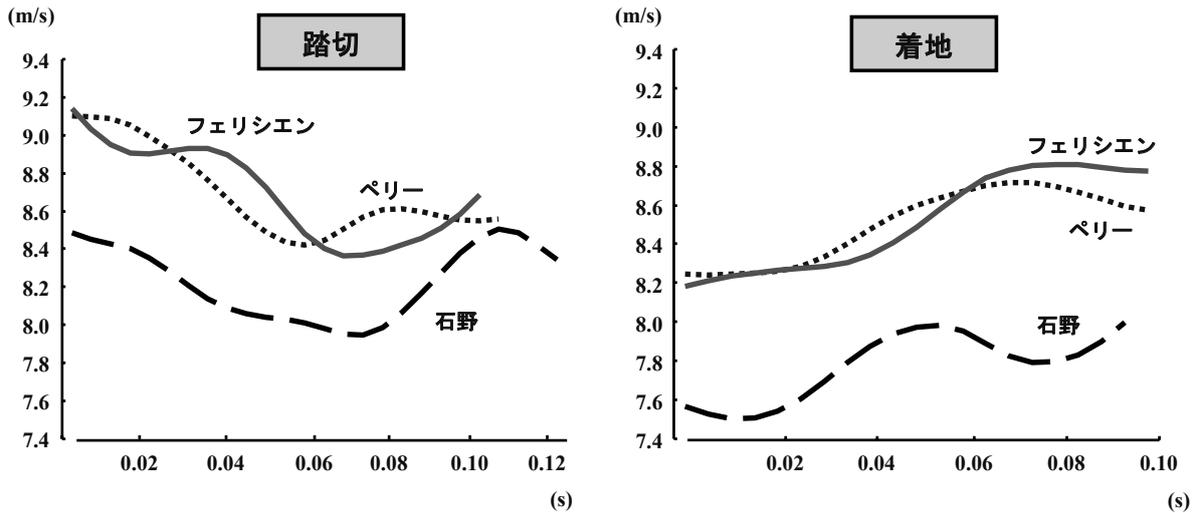


図 5. 踏切および着地における身体重心の水平速度

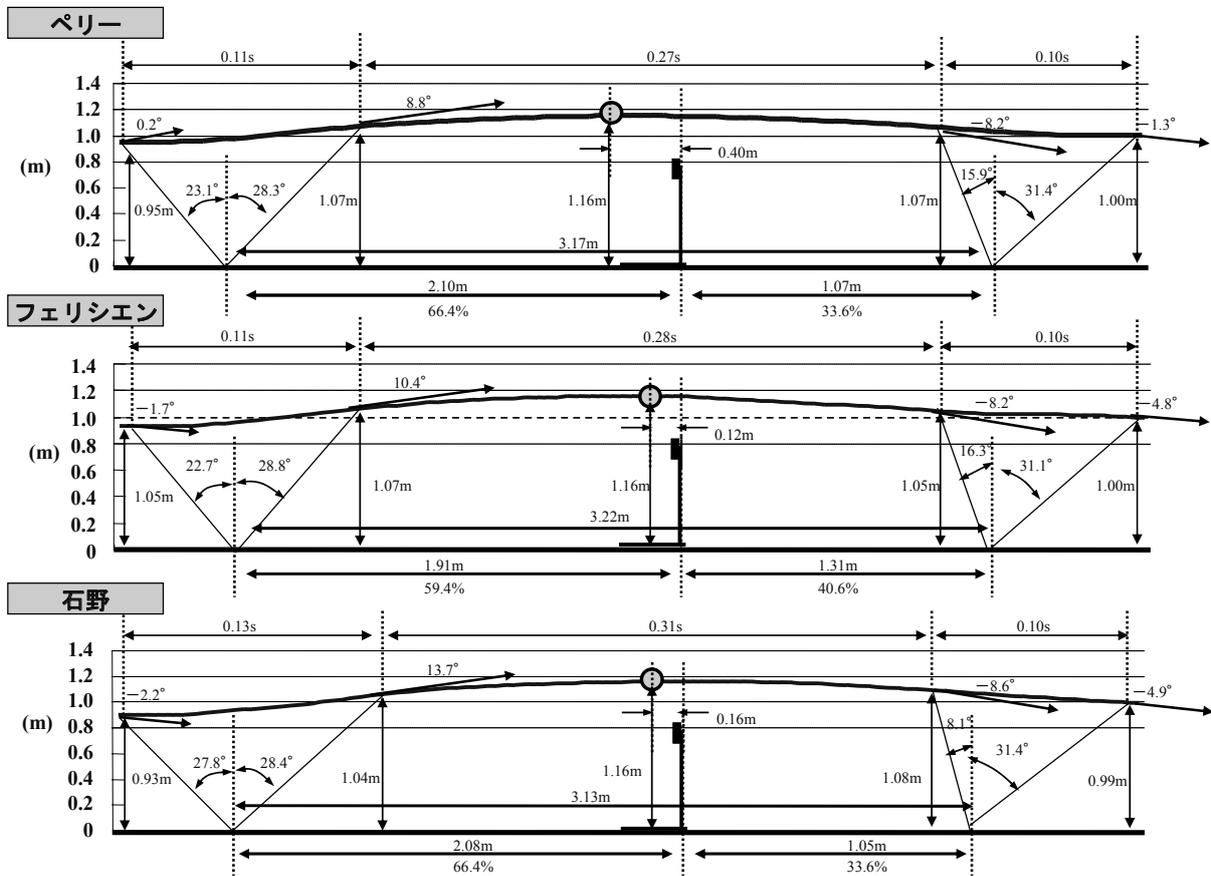


図 6. 女子 3 選手のハードリングにおける身体重心の軌跡

れる。また、ハードリング距離の踏切および着地距離の比率は、選手それぞれ異なっていたが、おおよそ 55 : 45 であった。理想的には東京大会でのフォスターの 60 : 40 の比率といわれている (森田ら, 1994)。したがって、身体重心最高点を東京大会でフォスターが 22cm、ピアースが 28cm もハードルの手前で迎えていたのに対し (森田ら, 1994)、本大会ではともにハードルを越えた劉は 5cm、ペインは 2cm で、内藤は 11cm の時点で迎えていた。これらのことから、速度を低下させ

ずにクリアできる技術であれば、ハードリングの踏切と着地の比率はそれほど問題ではないと推察される。

#### 【女子 100mH】

接地瞬時の身体重心速度はペリーとフェリシエンはほぼ同じであったが、石野は接地時に速度を落としており技術の差があったと推察される (図 5)。図 6 は、女子のハードリングにおける身体重心の軌跡、踏切距離、着地距離、接地時お

よび離地時の身体重心角度および踏み込み角度離地角度, 身体重心最高点とハードルからの距離などを示したものである. さらに踏切時間, 着地時間およびハードリング時間も示した.

ハードリング距離は 3m13~22cm と男子より小さく, 特に着地距離がペリーおよび石野は 1m 程度になっていた. 身体重心最高点はともに 1.16m であったものの, ペリーは 40cm, フェリシエンが 12cm, 石野が 16cm ハードル手前のところで迎えていた. ペリーは高い速度を維持するために遠くから踏み切り, ハードルを越えてからすぐに接地する動作が行えていたと考えられる. 一方, フェリシエンは速度は高いもののその速度にハードリングが対応できず, 近くから踏み切りを遅く得なくなってしまうと, 次のインターバル区間の減速 (0 秒 97 から 1 秒 00 へ: 時間分析参照) を招いたのではないかと推察される. ハードリング距離に関しては, 着地側距離を短縮させながらハードリングタイムを短くし, インターバル区間の距離を伸ばし水平速度が高まるという報告や (宮下, 2006), 空中時間が短くなることでハードリング距離が小さくなり, インターバルの 3 歩がオーバーストライドになることから, ハードル高が低い女子では過度に低く跳ぶべきではなく, ハードリング距離も小さくするべきではないという報告もある (McDonald and Dapena, 1991). しかし, ペリーと石野はほぼ同じハードリング距離 (3.17m/3.13m) で, ハードル上の最高身体重心高 (1.16m) も同じであった. 速度の低い 13, 14 秒台の選手の場合は, オーバーストライドになるという示唆 (McDonald and Dapena, 1991) があてはまる可能性はあるが, 高いスプリント能力を有する 12 秒台の選手 (ペリーは 5.13 歩/秒) は, 非常に高いピッチを獲得しており, インターバルラン区間においてオーバーストライドになるというのは考えにくく, 競技レベルが高くなるほど, むしろ通常の走法さらにはピッチ走法に近い形でインターバルを走っていると考えられる.

また, ペリーは, 長身であるものの踏切に最も低い姿勢で入り, 踏切中に身体重心をほぼ下げることなくハードルへ向い 8.8 度で踏み切っていた.

さらに着地後も  $-1.3^\circ$  とほぼ鉛直速度をなくしながら並進方向に身体を進めていた. 踏切で石野はブレーキ局面 (身体重心角度  $27.8^\circ$ ) が大きいため踏み切りに時間を要し, 踏切角度が  $13.7$  度であることから, 鉛直方向への速度成分が大きかったと考えられる. しかし, 着地ではブレーキ局面が最も小さく, 着地距離も小さいことからハードリングで減速したものの着地中に上手く加速が行えていると推察される. またハードル間距離は男子 9.14m と女子 8.50m と大きな差があるが, インターバル距離は男女とも 5m30~40cm 前後とほぼ変わらない距離を走っていることが示された. インターバルランニングのピッチは, 劉が 5.84 歩/秒, 内藤が 5.38 歩/秒, ペリーは 5.13 歩/秒, 石野は 4.81 歩/秒である. スプリント走と比較して, 男子はかなりピッチ型の走りを強いられているのに対し, 女子はスプリント走に近いものになると考えられる. すなわち, これまで言われているように, ハードルが男子と比較して相対的に低いだけでなくインターバル距離が占める割合が大きいことから, 女子のパフォーマンスにはスプリント走能力が男子より大きく左右すると考えられる.

#### 4. 踏切動作

##### 【男子 110mH】

各選手とも踏切中にやや減速後, 離地時にかけてやや加速する動作をおこなっていた (図 3). 支持脚の膝関節および足関節角度はともに屈曲, 伸展動作していたが, 劉およびペインは各変位が小さかった (表 3). 劉は特に膝関節の変位がなく, 脚を棒のようにして接地から全身を倒しこむようにして踏切をおこなっていたが, これは身体重心が高く, ハードルに対して大きく身体を引き上げなくてもハードルを越えられる長身選手が行える技術と考えられる (谷川, 2006). 図 7 に両脚の挟み込みのシザース動作の指標として, 踏切脚のスウィング速度 (大転子とくるぶしを結ぶ線分の角速度) とリード脚膝関節並進速度 (膝関節の並進方向のみの速度) を示した. さらに図 8 には, 踏切の接地瞬時, くるぶし通過時, 離地瞬

表 3. 男子 3 選手の踏切時の膝および足関節の屈曲および伸展角度

		劉	ペイン	内藤
膝関節 (deg)	屈曲	2.5	8.2	13.0
	伸展	5.1	13.5	7.4
	合計	7.7	21.7	20.4
足関節 (deg)	屈曲	20.0	21.3	31.4
	伸展	44.0	44.6	45.9
	合計	63.9	68.9	77.3

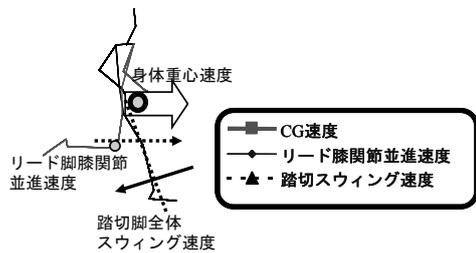
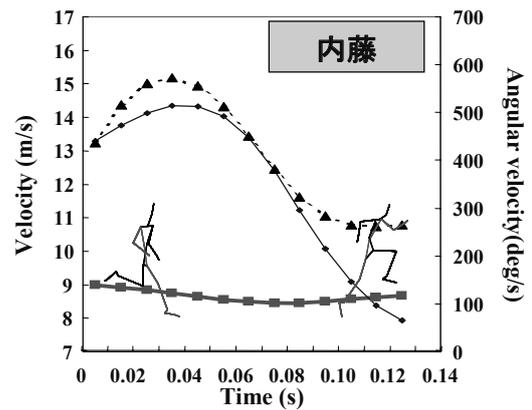
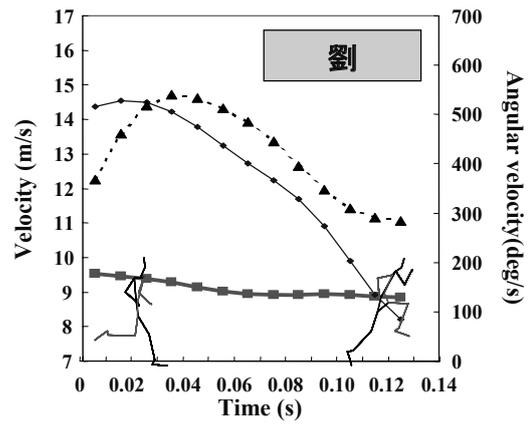
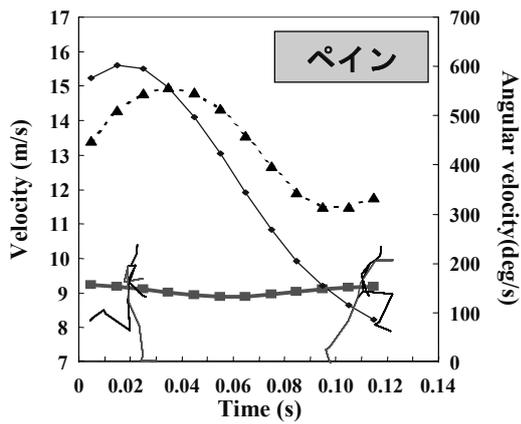


図 7. 男子 3 選手の踏切における身体重心速度とリード脚膝関節並進速度(左軸) および踏切脚スウィング速度 (右軸)

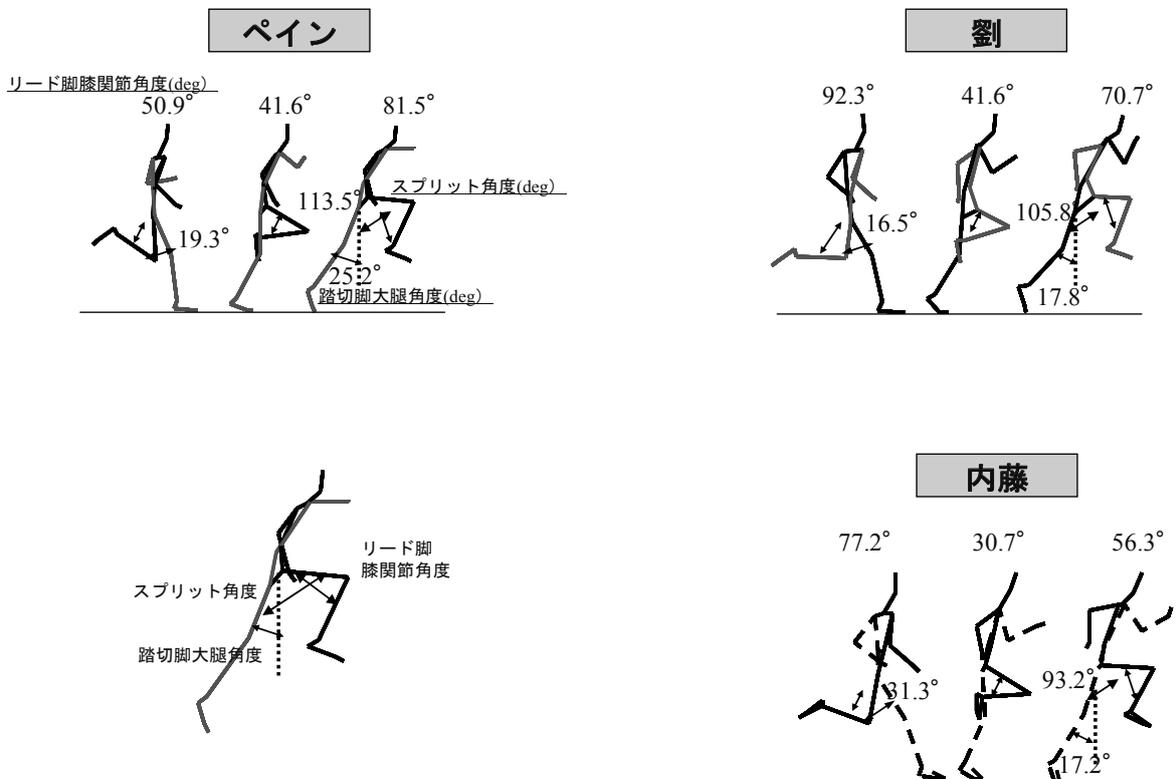


図 8. 男子 3 選手の踏切の接地瞬間, くるぶし通過時, 離地瞬間のリード脚膝関節角度 離地瞬間の両大腿角度(スプリット角度) および踏切脚大腿角度

時のリード脚膝関節角度、離地瞬時の両大腿角度（スプリット角度）および踏切脚大腿角度を算出した。各選手とも接地時の最大スウィング速度に差はないが、劉およびペインは、接地瞬時にスプリット角度が小さく、リード脚の膝関節の前方への速度が高く、両脚を挟み込むシザース動作を接地の早期におこなっていると考えられる。また、リード脚の膝関節を踏切にかけて屈曲して引き込むことが重要と指摘されている（宮下，1991）が、劉およびペインは Mann（1996）の報告と同様に、踏切時のリード脚の膝関節屈曲角度が大きく、踏切時にも大きい傾向にあり、13 秒前半の選手では、早い段階で膝関節を広げながら、ハードルに向かっていていると考えられる。また、離地時の両大腿の開脚はペインが  $113^\circ$ 、劉が  $106^\circ$ 、内藤が  $93^\circ$  であったが、踏切脚の大腿角度は垂直から後方へペインが  $25^\circ$ 、劉、内藤が  $17^\circ$  とペインは後方まで股関節を伸展しており、身長が小さいが大きなスプリット動作を前後方向に行なっていると考えられる。

すなわち、世界一流選手は McDonald and Dapena（1991）の報告と同様、膝を高く引き上げるだけでなく踏切離地までしっかりと後方に大腿を使い、踏切がなされていたと考えられる。

#### 【女子 100mH】

男子の報告と同様に、各選手とも踏切中に減速しながら離地時にかけてやや加速する動作をおこない（図 5）、支持脚の膝関節および足関節角度はともに屈曲、伸展動作していた。ペリーは特に各関節角度変位が大きかったものの低く姿勢で踏切に入り（身体重心高 0.99m）、股関節をすばやく伸展させながら走速度を維持して踏切動作を行っていたと考えられる（表 4）。

図 9 に女子の両脚の挟み込みのシザース動作の指標として、踏切脚のスウィング速度とリード脚膝関節並進速度を示した。図 10 には、踏切の接地瞬時、くるぶし通過時、離地瞬時のリード脚膝関節角度、離地瞬時の両大腿角度（スプリット角度）および踏切脚大腿角度を算出した。接地瞬時にペリーおよびフェリシエンはスプリット角

度が小さく踏切接地瞬時から脚のスウィング速度とリード脚の膝関節の前方への速度が高く、接地瞬時に両脚を挟み込むシザース動作を接地中の早期におこなっていると考えられる。一方、石野は脚のスウィング速度および膝関節並進速度が支持期中期に高くなっており、身体重心速度が膝関節並進速度を追い越すことがなく、脚だけの引き出し動作に終わってしまっていると推察される。また、男子と同様に一流選手は、踏切接地時に膝関節を小さくたたみ、早い段階で広げ、支持脚でしっかり後方までキックしながら、踏切瞬時にはハードリング姿勢をほぼ完了させハードルに向かっていていると考えられる。

#### 5. 着地動作

##### 【男子 110mH】

各選手とも、着地中に速度を上昇させていた（図 3）。着地においては、スピードを落とさないこと、高い位置で着地すること、次の疾走姿勢をつくることが大切である。この着地一步中の加速は、各選手とも身体重心の最高点から 20cm 程度下降しながら、リード脚の後方へのスウィングと抜き脚のシザース動作によっておこなわれていると考えられる。

両脚の挟み込みのシザース動作の指標として、図 11 は、着地瞬時から離地までの身体重心速度とリード脚全体のスウィング速度、さらに抜き脚の前方への速度を示すための抜き脚の膝関節並進速度を示したものである。接地時はスウィング速度がほぼ同じであるが、内藤は接地後半にかけてスウィング速度が低かった。また、ペインおよび劉は膝関節の並進速度の低下が早期であるのに対し内藤は速度が維持されていることから、着地中全体を通じて抜き脚を前方へ高く引き出しながら、着地動作をおこなっていると考えられる。一方、世界一流選手はハードルから落下してくる身体を着地時にその身体重心速度に合わせて並進方向への抜き脚動作をおこない、その直後に抜き脚の振り下ろしながら離地まで支持脚をスウィングすることで加速がおこなえ、抜き脚は疾走動作に早期に移行していると推察される。

表 4. 女子 3 選手の踏切時の膝および足関節の屈曲および伸展角度

		ペリー	フェリシエン	石野
膝関節 (deg)	屈曲	11.1	5.8	11.2
	伸展	21.5	4.8	15.7
	合計	32.6	10.5	27.0
足関節 (deg)	屈曲	30.9	18.9	18.8
	伸展	54.1	43.0	42.8
	合計	85.0	61.8	61.7

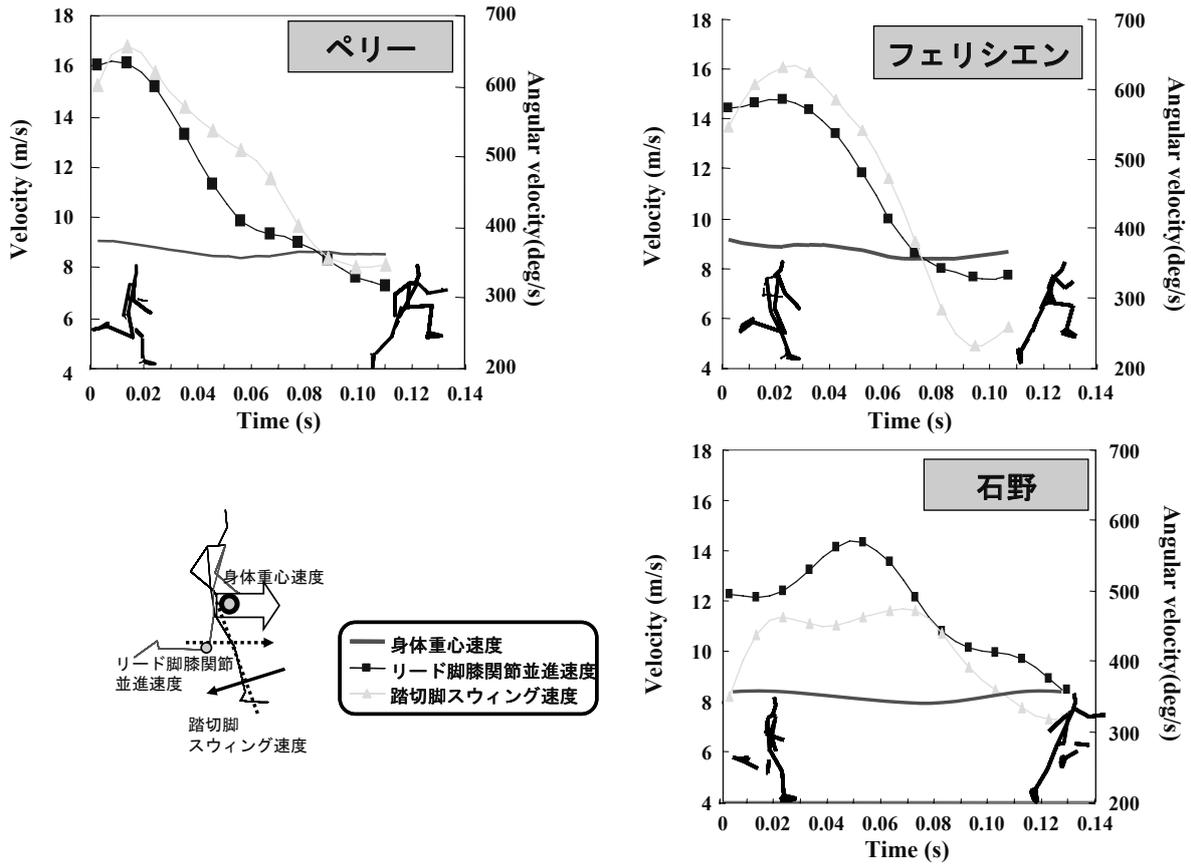


図9. 女子3選手の踏切における身体重心速度とリード脚膝関節並進速度(左軸) および踏切脚スウィング速度(右軸)

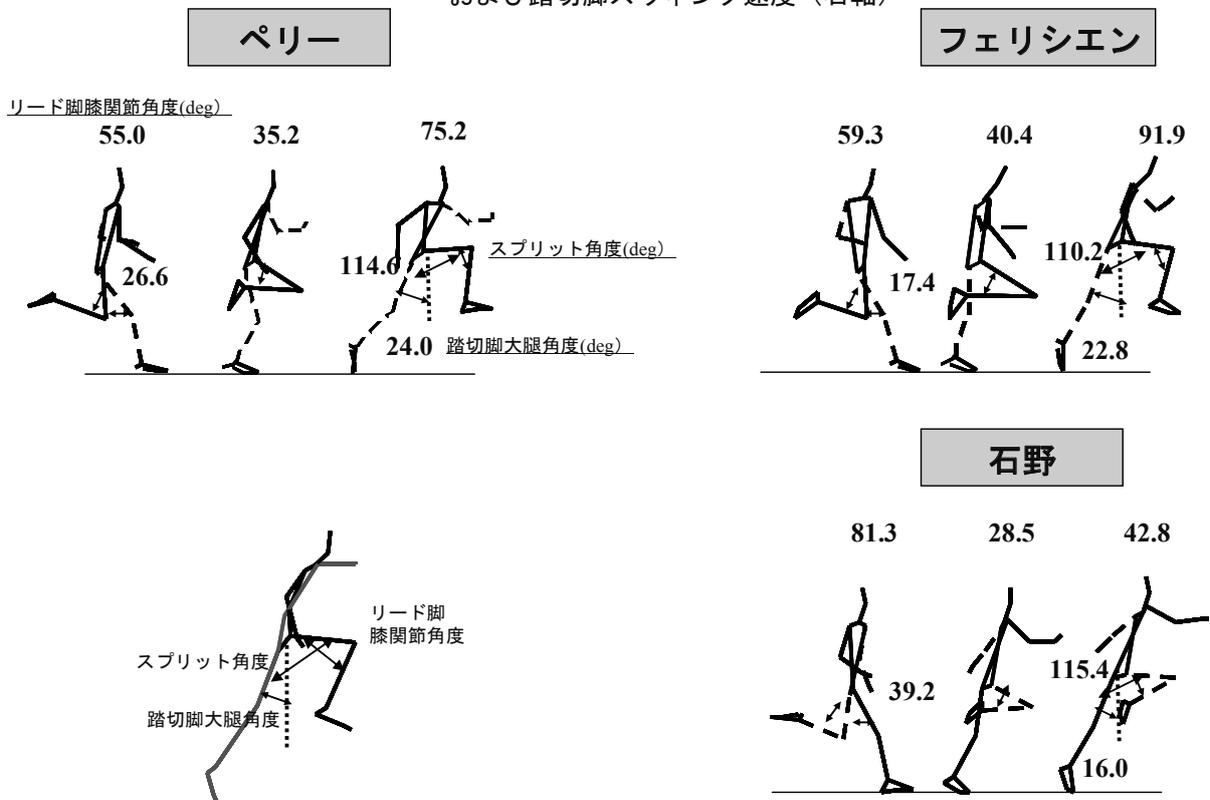


図10. 女子3選手の踏切の接地瞬時、くるぶし通過時、離地瞬時のリード脚膝関節角度、離地瞬時の両大腿角度(スプリット角度) および踏切脚大腿角度

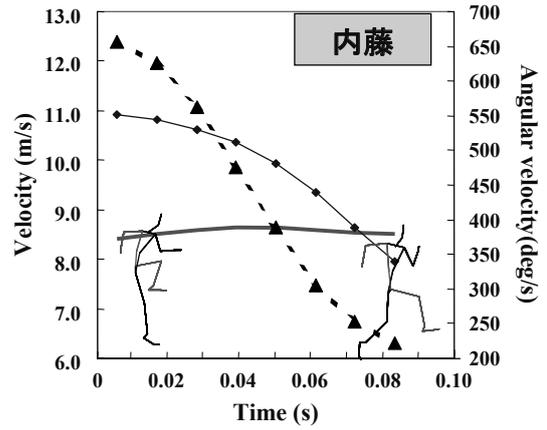
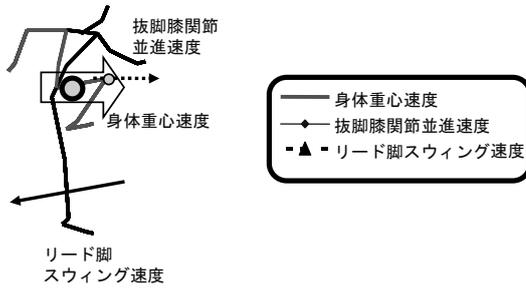
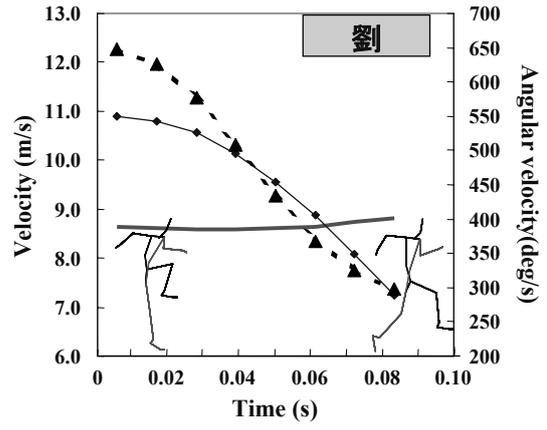
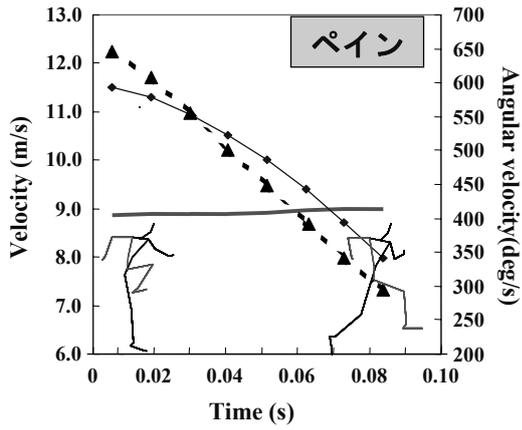


図 11. 着地における身体重心速度、抜き脚膝関節並進速度(左軸) および支持脚スウィング速度 (右軸)

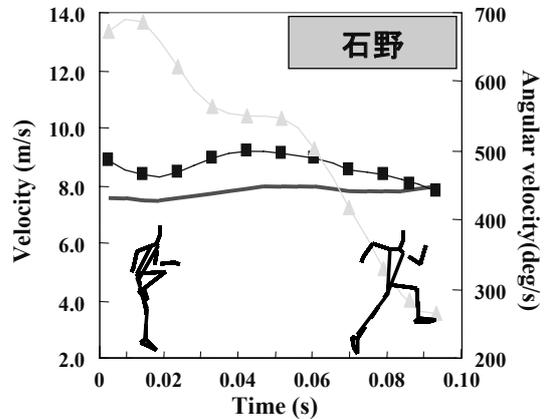
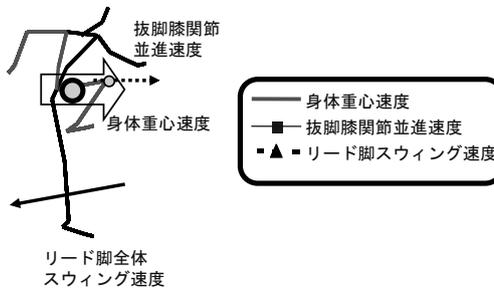
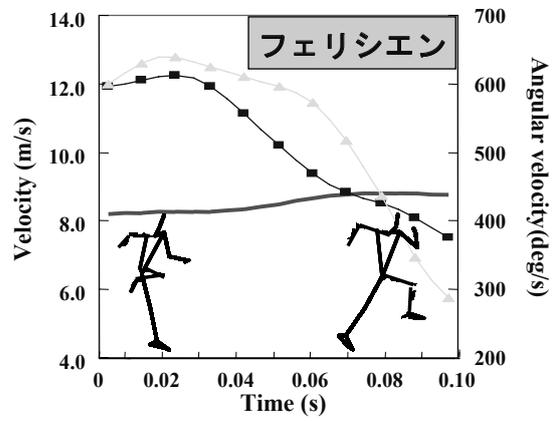
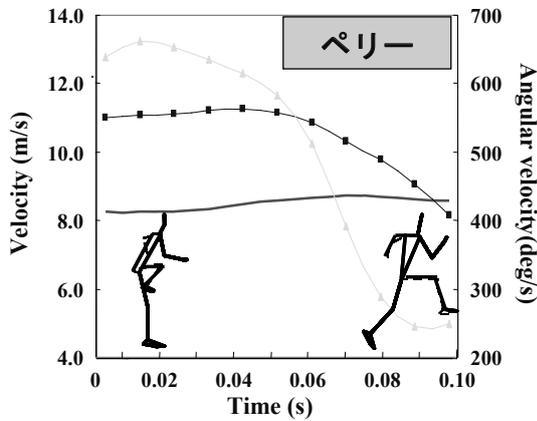


図 12. 着地における身体重心速度、抜き脚膝関節並進速度(左軸) および支持脚スウィング速度 (右軸)

### 【女子 100mH】

各選手とも男子同様、着地中に 0.4m/s ほど速度を上昇させていた(図 5)。男子よりも着地距離が小さく、ハードルを越えて早い時点で接地動作に移らなければならないと考えられる。

図 12 は、両脚の挟み込みのシザース動作の指標として、着地瞬時から離地までの身体重心速度とリード脚全体のスウィング速度、さらに抜き脚の前方への速度を示すための抜き脚の膝関節の並進速度を示したものである。石野は接地瞬時のリード脚のスウィング速度が高いものの接地中期から後期にかけて速度を維持できなかった。一方で、支持中期での膝関節並進速度がペリーおよびフェリシエンより高く、リード脚とのシザース動作のタイミングがずれていたものと思われる。着地に向けてすばやくリード脚を振り下ろす動作だけでなく、ハードルからの落下にあわせて並進方向へすばやく抜き脚動作を行いながら加速し、早期に疾走動作に移行していると推察される。

### 6. まとめ

以上のように、スプリントハードルにおいては以前から指摘されているようにスプリント能力の向上が第一の課題であるが、世界的な競技レベルの向上によって種目特有のハードリング動作が要求され、男女とも世界一流選手と日本人選手に共通した相違点が示されたと考えられる。すなわち、世界一流選手はスプリント動作の延長で踏切においても着地においても支持期前半にシザース動作が行われている一方で、日本人選手はシザースのタイミングが支持期中期・後半になってしまい、高い疾走速度を獲得できない間延びしたスプリント動作(伊藤ら, 1998)のような動作が確認された。このことは、スプリントハードルが競技力に関係なくスタートからゴールまでほぼ同じ歩数とストライドである競技特性から、世界一流競技者のハードリング技術が共通してスプリント走の技術の延長上にあることがはっきりと示されたとと思われる。また、そのような動きが高い速度で行われなければならない、世界一流の技術は、ハードル間を高い速度の中でのクリアするための先取り技術であったと考えられる。すなわち、歩数がほぼ同じであることから一流競技者の技術が目標とされる動作になると考えられる。今後、この大阪大会で得られた世界一流選手のエッセンスをトレーニングに活かし、日本選手がファイナリストになれる日が近い将来に来ることを期待したい。

### 文献

伊藤 章・市川博啓・斎藤昌久・佐川和則・伊藤道郎・小林寛道(1998) 100m 中間疾走局面における疾走動作と速度との関係。体育学研究,

43 : 260-273.

Mcdonald, C. and J. Dapena. (1991) Linear kinematics of the men's 110-m and women's 100-m hurdles races. Med.Sci.Sports Exerc.24 : 1382-1389.

Mcdonald, C. and J. Dapena. (1991) Angular momentum in the 110-m and women's 100-m hurdles races. Med.Sci.Sports Exerc.23 : 1392-1402

宮下憲(1991) 『ハードル』。ベースボールマガジン社。東京。

宮下憲(2006) 100m ハードルのトレーニングに向けて、スプリント研究 16 : 44-50.

森田正利・伊藤章・沼澤秀雄・小木曾一之・安井年文(1994) スプリントハードル(110mH, 100mH) および男女 400mH のレース分析, 第 3 回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス研究報告書。ベースボールマガジン社, 東京 : 66-91.

# 男女 400 m ハードル走における 記録およびレースパターン分析

## Analysis of the record and race-pattern for 400-m hurdlers

森丘 保典<sup>1)</sup> 柳谷 登志雄<sup>2)</sup> 榎本 靖士<sup>3)</sup> 杉田 正明<sup>4)</sup> 阿江 通良<sup>5)</sup>

1) 日本体育協会 2) 順天堂大学 3) 京都教育大学 4) 三重大学 5) 筑波大学

Yasunori Morioka<sup>1)</sup>, Toshio Yanagiya<sup>2)</sup>, Yasushi Enomoto<sup>3)</sup>, Masaaki Sugita<sup>4)</sup> and Michiyoshi Ae<sup>5)</sup>

1) Japan Sports Association, 2) Juntendo University, 3) Kyoto University of Education,  
4) Mie University, 5) University of Tsukuba

### 1. はじめに

400m ハードル走 (以下 400mH) に関しては、1980 年代後半から現在に至るまで、主にハードル区間の疾走速度変化を中心とするレースパターン分析について多数報告されており、個々の選手の特徴や記録に影響する要因などが検討されている (Ditroilo et al., 2001; 森丘ら, 2005; 森丘ら, 2008; 森田ら, 1992; Susanka et al., 1987)。また、選手のレースパターンは、大会の環境条件やラウンド通過条件などに直接的または間接的に影響を受けるものと考えられる。

本稿では、大阪大会の試合条件、フィニッシュ記録 (以下記録) およびレースパターンについて俯瞰的に検討することにより、その特徴について明らかにすることを目的とした。

### 2. 方法

#### 2.1 分析対象

記録分析の対象は、世界陸上競技選手権大阪大会 (以下、大阪大会) の全出場選手 (男子 35 名および女子 37 名) であった。また、レースパターン分析の対象は、VTR 画像の関係で分析ができなかった女子 1 名を除く男子 35 名および女子 36 名とした。なお、各選手の特徴ができるだけ反映されるように、最も記録の良かったラウンドを分析対象とした。

#### 2.2 測定方法

複数台の VTR カメラを用いてスタートピストルの閃光を撮影した後、インターバルの歩数と 10 台のハードリング直後の着地 (タッチダウン) が確認できるように選手を追従撮影した。撮影した VTR 画像から、ピストルの閃光および各選手のタッチダウンタイムを読みとり、各測定区間の疾走に要した時間を求めた。

400mH レースにおける測定区間定義は、Start から第 1 ハードル (H1) までの区間を S-H1 とし、

以下ハードル間を H1-2, H2-3, H3-4, H4-5, H5-6, H6-7, H7-8, H8-9, H9-10, 最終ハードル (H10) から Finish を H10-F とした。また、スタートから最高区間速度が出現する H2 までを区間 1 (S1) とし、H2 から H5 を区間 2 (S2), H5 から H8 を区間 3 (S3), H8 から Finish を区間 4 (S4) と定義し、それぞれの区間時間 ( $T_{S1}$ ,  $T_{S2}$ ,  $T_{S3}$ ,  $T_{S4}$ ) を算出した。

各区間の平均疾走速度は、それぞれの区間距離を区間時間で除すことにより求めた。

疾走速度低下率 ( $D_{S2/S1}$ ,  $D_{S3/S2}$ ,  $D_{S4/S3}$ ) は、次式にて算出した。

疾走速度低下率 (D)

$$=[1-(後の区間速度/前の区間速度)] \times 100$$

また、ペース配分の指標として、S1 から S4 の各区間時間がフィニッシュ時間 (記録) に占める割合 (区間時間比:  $\%_{S1}$ ,  $\%_{S2}$ ,  $\%_{S3}$ ,  $\%_{S4}$ ) を求めた。これは、相対的なペース配分の指標として用いられているものである (森丘ら, 2005; 2008)。

ハードル区間歩数 (Steps) は、ハードルクリアランス直後の先行 (リード) 脚の着地から次のハードリングにおける踏切足の接地までの歩数とし、H1 から H5 までの積算を  $S_{H1-5}$ , H5 から H8 までを  $S_{H5-8}$ , H8 から H10 までを  $S_{H8-10}$ , H1 から H10 までの総歩数を  $S_{H1-10}$  とした。

相関分析にはピアソンの積率相関分析を用い、有意性の判定には危険率 5% 未満を採用した。

### 3. 試合条件について

パフォーマンスについて検討する前に、大阪大会の試合条件 (日程、環境およびラウンド通過条件) について整理しておきたい。

・レース日程: 男子は 8 月 25 日に予選, 同 26 日に準決勝, 1 日おいて同 28 日に決勝。女子は

8月27日に予選, 同28日に準決勝, 1日おいて同30日に決勝.

- ・環境条件: 男子のレース時間帯は20時半~22時半, 気温は30~31℃, 湿度は62~65%. 女子のレース時間帯は予選が午前11時前後, 準決勝および決勝が21時半~22時半, 気温は29~33℃, 湿度は61~71%.
- ・ラウンド通過条件: 男女ともに予選通過(予通)が5組4着+4(計24名), 準決勝通過(準通)が3組2着+2(計8名).

#### 4. 記録分析について

表1は, 記録レベル別の分布を示したものである. また, 表2は, 大会平均およびラウンド通過(落選)記録を示したものである. 予選の通過平均記録(予通記録)は, 男子が49.38秒, 女子が55.70秒であった. 標準偏差は, 男子が±0.34秒, 女子が±0.71秒と幅があるが, 確実に準決勝に進

出することを考えれば, 平均値よりも良い記録が必須となる.

準決勝の通過平均記録(準通記録)は, 男子が48.41秒, 女子が53.95秒であった. 準通記録は, 予選に比べて標準偏差も小さいことから(男子±0.16秒, 女子±0.19秒), 決勝進出のためにはやはり平均値よりも良い記録を出すことが求められるだろう.

また, 決勝進出者のうち, 準決勝よりも記録の良かった選手は, 男子は3名(1~3位), 女子は2名(1~2位)と, いずれも表彰台に登った選手に限られている. 決勝は, 準決勝から1日あけてのレースであったが, 先に示したような厳しい気象条件や, 近年上位選手のレベルが均衡しており準決勝の通過レベルが高まっていること(森丘, 2008)などが影響していると推察される.

表1. 記録レベル別度数分布

		範囲(秒)	~47.99	48.00~48.49	48.50~48.99	49.00~49.49	49.50~49.99	50.00以上
男子	人数(人)		1	6	3	8	9	8
	割合(%)		3	17	9	23	26	23
		範囲(秒)	~53.99	54.00~54.49	54.50~54.99	55.00~55.99	56.00~56.99	57.00以上
女子	人数(人)		4	5	3	7	7	11
	割合(%)		11	14	9	20	20	31

表2. 大会平均記録およびラウンド通過(落選)記録

		大会平均記録	予落記録	予通記録	準落記録	準通記録	決勝記録
男子	人数(人)	35	11	24	16	8	7
	平均±SD(秒)	49.56±1.23	50.93±1.14	49.38±0.34	49.49±0.63	48.41±0.16	48.99±1.83
	最高値(秒)	47.61	49.67	48.70	48.44	48.18	47.61
	最低値(秒)	52.66	52.66	49.94	51.24	48.66	52.97
女子	人数(人)	37	13	24	16	8	8
	平均±SD(秒)	56.05±2.07	58.03±2.13	55.70±0.71	55.91±1.35	53.95±0.19	54.13±0.56
	最高値(秒)	53.31	56.44	54.77	54.38	53.57	53.31
	最低値(秒)	64.76	64.76	56.77	60.07	54.15	54.63

## 5. レースパターンの特徴について

### 5.1 区間時間と記録との関係

図1および図2は、区間時間 ( $T_{S1}$ ,  $T_{S2}$ ,  $T_{S3}$ ,  $T_{S4}$ ) と記録との関係を示したものである。男女ともに全ての区間時間と記録との間に有意な正の相関が認められ、相関係数は男子が  $T_{S2}$ ,  $T_{S3}$ ,  $T_{S1}$ ,  $T_{S4}$ , 女子は  $T_{S3}$ ,  $T_{S2}$ ,  $T_{S4}$ ,  $T_{S1}$  の順に高かった。  $T_{S2}$  および  $T_{S3}$  は、他の区間に比べて記録との相関係数が高いことが示されており (森丘ら, 2005), 大阪大会においても同様の結果が認められた。しかしながら、このことは、S2 と S3 が S1 や S4 に比べて重要度が高いという意味ではないことに留意すべきである。

森田ら (1994) は、最高区間速度が出現する H1-2 の区間時間 (速度) と記録との間に有意な相関関係が認められたことから、H2 までの疾走速度を高めることが記録向上のために必要な要因であるとしている。また、森丘ら (2005) は、S1 が記録的には最も差がつきにくい区間であるとしたうえで、この区間で一定以上の疾走速度を獲得することの重要性を示唆している。  $T_{S1}$  は、男女とも上位から下位までの差がほぼ 1 秒程度であり (それ以外の区間は約 1.5-4.0 秒), 記録的に「差がつきにくい」区間ではあるが、静止状態から走速度を獲得するために費やしたエネルギーや努力感といった「数値に表れない差」が、後の区間の疾走速度に影響することは想像に難くない。

### 5.2 速度低下率と記録との関係

図3および図4は、速度低下率 ( $D_{S2/S1}$ ,  $D_{S3/S2}$ ,  $D_{S4/S3}$ ) と記録との関係を示したものである。また、図5および図6は、区間時間比 ( $\%_{S1}$ ,  $\%_{S2}$ ,  $\%_{S3}$ ,  $\%_{S4}$ ) と記録との関係について示したものである。男子は、 $D_{S2/S1}$  および  $\%_{S2}$  と記録との間に正の相関が認められた。すなわち、男子は速い選手ほど S2 での速度低下が抑えられており、相対的なペース配分も「速い」傾向にあるとすることができる。女子は、 $D_{S2/S1}$  および  $\%_{S3}$  と記録との間に正の相関がみられ、 $\%_{S1}$  との間には負の相関が認められた。すなわち、女子も男子同様、速い選手ほど S2 での速度低下が抑えられており、S3 の相対的なペースが「速い」傾向にあると考えられる。また、女子にみられた  $\%_{S1}$  と記録との間の負の相関は、パフォーマンスの高い選手ほど、スタートから最高区間速度が出現するまでの時間が相対的に長く、相対的なペースとしては「遅い」傾向にあるととらえることもできる。これは、男子の一流選手にもみられる傾向 (森丘ら, 2005) であるが、先の区間時間のデータを勘案すれば、相対的なペース配分が遅いにもかかわらず速いペースを獲得している、すなわち走効率が良いという評価が可能であるかも知れない。実際、S2, S3 において高い速度を維持するためには、S1 で効率よく速度を高めておく必要があることは自明であり、相関関係に現れない部分の質的な分析も含めて、全体の傾向を捉えていく必要があるだろう。

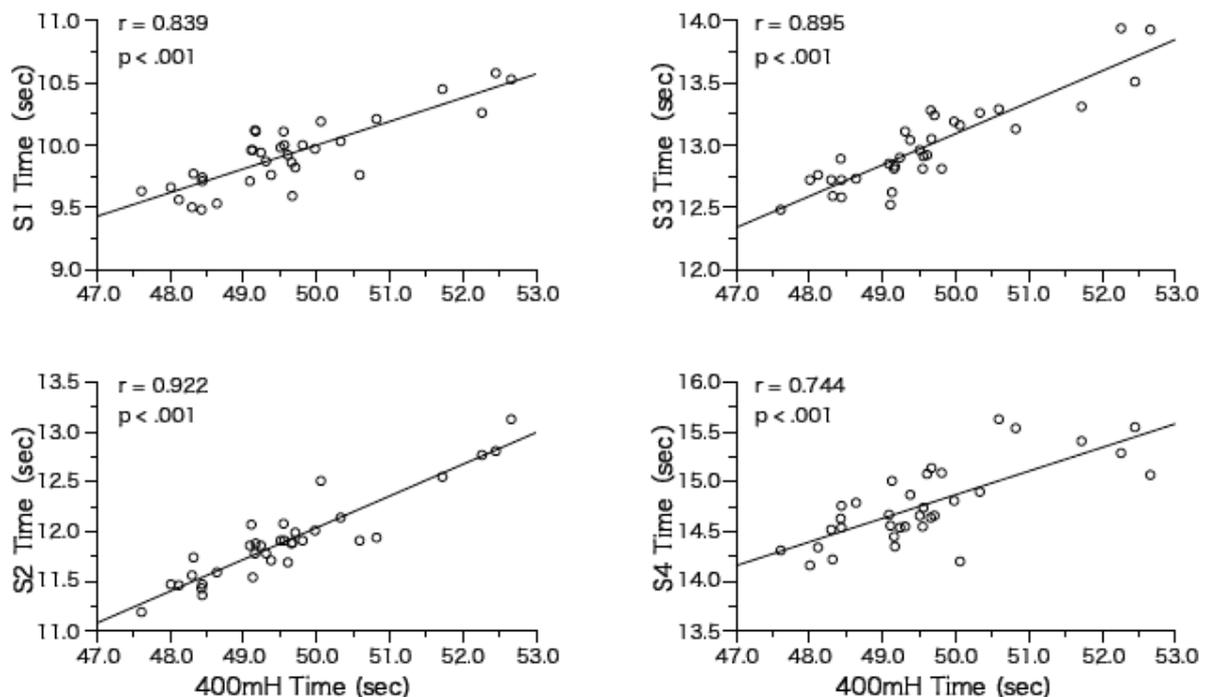


図1. 区間時間と記録との関係(男子)

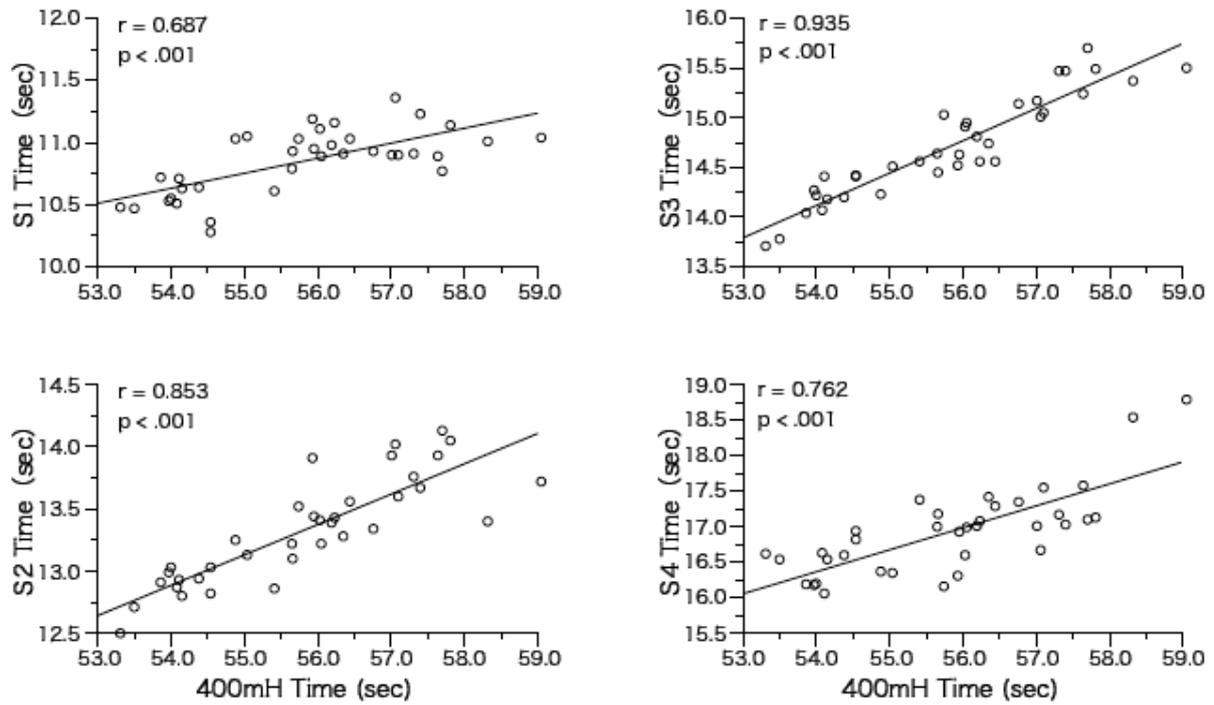


図 2. 区間時間と記録との関係(女子)

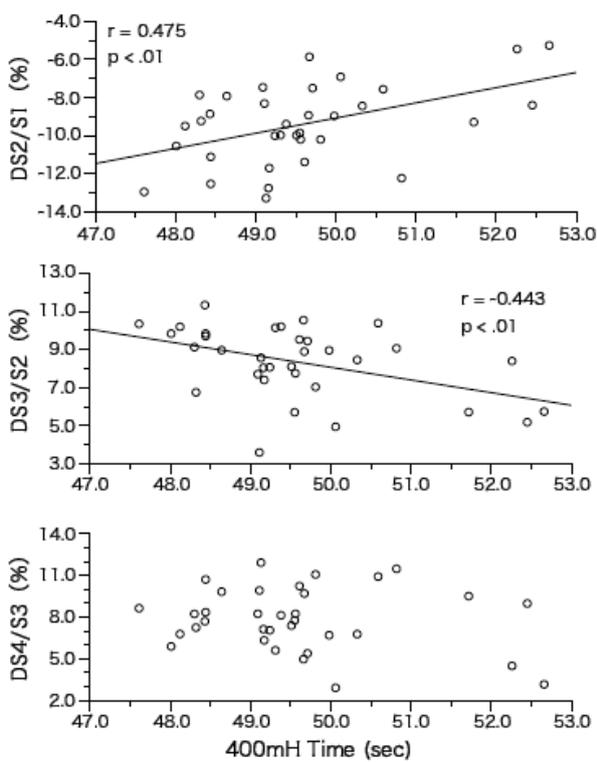


図 3. 速度低下率と記録との関係(男子)

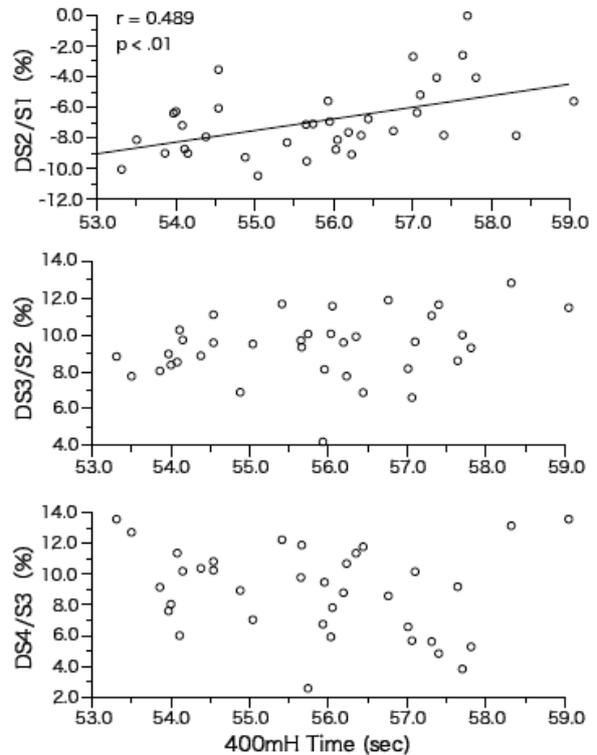


図 4. 速度低下率と記録との関係(女子)

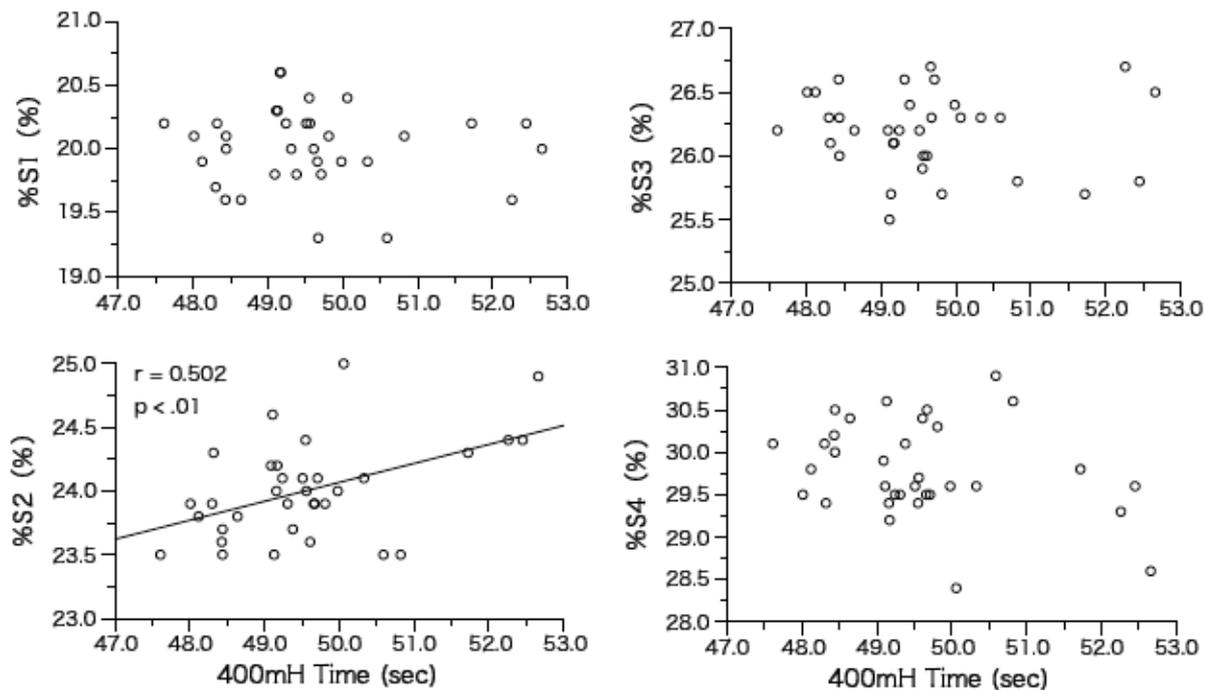


図 5. 区間時間比と記録との関係(男子)

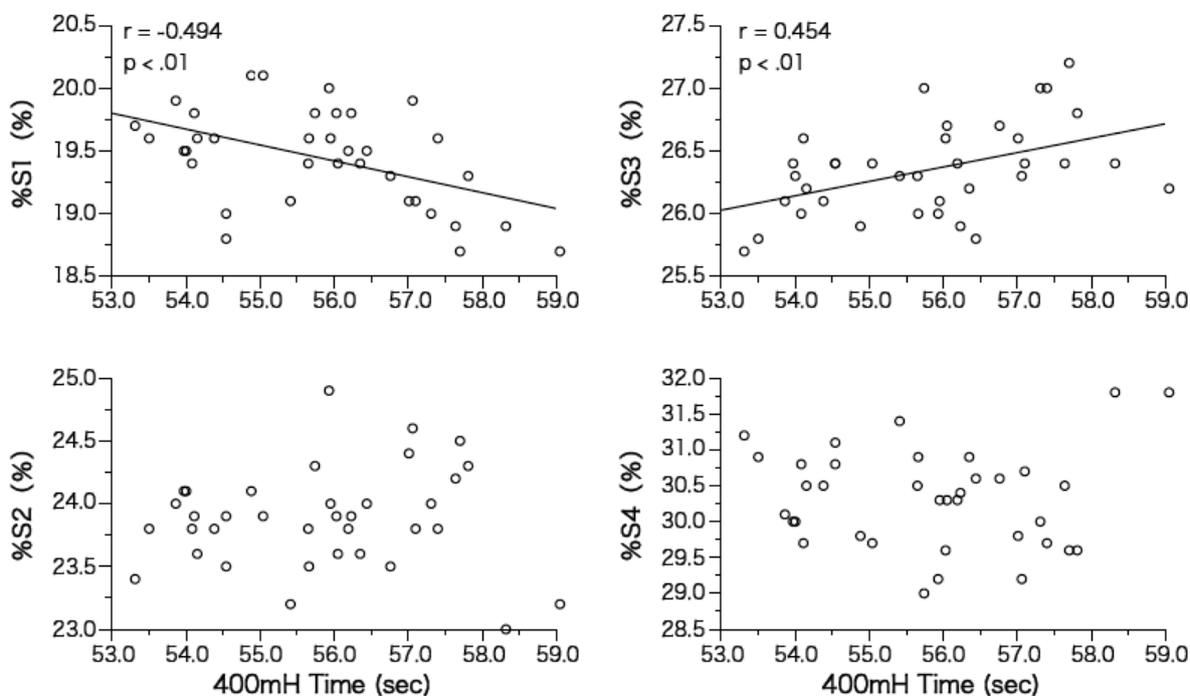


図 6. 区間時間比と記録との関係(女子)

なお、男子の $D_{S3/S2}$ と記録との間に負の相関が認められるなど、一部先行研究との相違がみられる結果も得られている。森丘ら（2005）の研究は、国内外の主要大会の決勝レースにおいて50秒以内の記録を達成した選手の自己ベスト記録（PB）、すなわち選手固有のベストパフォーマンス（PB）に対する達成率は99.5%以上）を分析対象としているのに対して、本報告では大阪大会の全出場選手（47～52秒台）を対象としているため、PBに対する達成率も、男子が98.4%、女子が98.0%程度に留まっている。したがって、データに含まれるバイアスの質が異なっている可能性があり、この点については詳細な検討が必要であるといえるだろう。

### 5.3 区間歩数と記録との関係

図7および図8は、ハードル区間歩数（ $S_{H1-10}$ 、 $S_{H1-5}$ 、 $S_{H5-8}$ 、 $S_{H8-10}$ ）と記録との関係を示したものである。男子は $S_{H1-10}$ 、 $S_{H1-5}$ 、 $S_{H5-8}$ と記録との間に正の相関が、女子はすべての指標と記録との間に正の相関が認められたことから、男女ともに速い選手ほどインターバル歩数が少ない傾向にあるといえる。一般に、400mHの記録を高めるためには、できるだけ少ない歩数で走ることが有効であるといわれており（宮下，1991；森田ら，1994）、大阪大会の結果も先行研究の結果を支持するものであったといえる。しかしながら、世界トップレベルの男子選手は、身長が180cm以下から190cm以上の選手まで多岐にわたるが、最少区間歩数は概ね13歩であることから、パフォーマンス

レベルが高まるほど歩数の差がつきにくくなることが予想される。実際、大阪大会での記録が50秒以内の男子選手（26名）を対象を絞ると、 $S_{H1-10}$ と記録との相関関係は認められなかった。一方、女子については、57秒以内の選手（27名）に絞った分析においても、 $S_{H1-10}$ と記録との間に相関関係が認められた。女子の最小区間歩数は概ね15歩であるが、女子の記録の延長線上に男子の記録があると考えれば、この男女間の相違はさほど違和感のない結果であると考えられる。また、 $S_{H1-5}$ と $T_{S-H5}$ 、 $S_{H5-8}$ と $T_{H5-8}$ との関係については、男女ともに歩数が少ない方が記録がよい傾向にあるが、男子の $S_{H8-10}$ は記録レベルによらず大半の選手が30歩（15歩×2）で走破しているなど、レース局面による相違もみられる。以上のことは、歩数増減の記録に及ぼす影響（貢献度）が、選手のパフォーマンスレベルやレースの局面によって異なることを示唆しているといえる。換言すれば、インターバルの歩数については、選手固有の走動作、ハードリングの踏切脚、著しい加減速の有無といった客観的要因と、レース局面毎の疲労状態といった主観的要因とを十分に勘案しつつ最適化することが求められるといえるだろう。

## 6. 日本人選手の記録およびレースパターンについて

### 6.1 世界および日本10傑の比較

表3は、2007年の世界と日本の10傑平均記録および日本代表選手の大会終了時点でのPBを比較したものである。

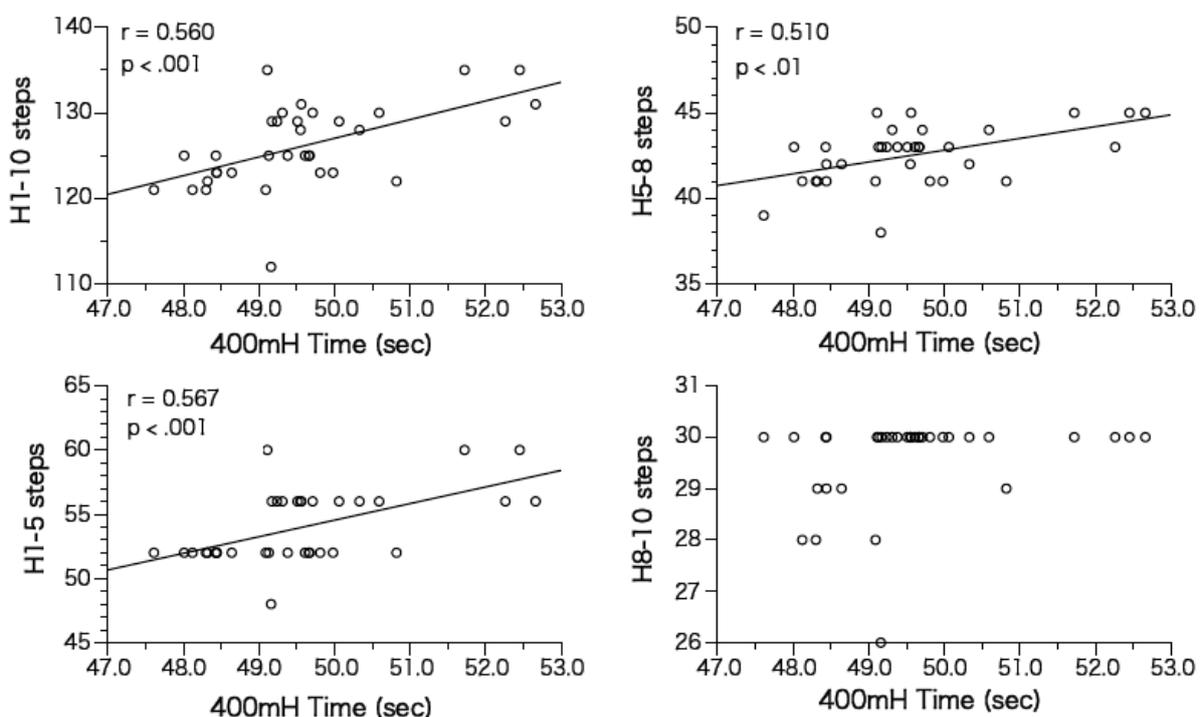


図7. 区間歩数と記録との関係(男子)

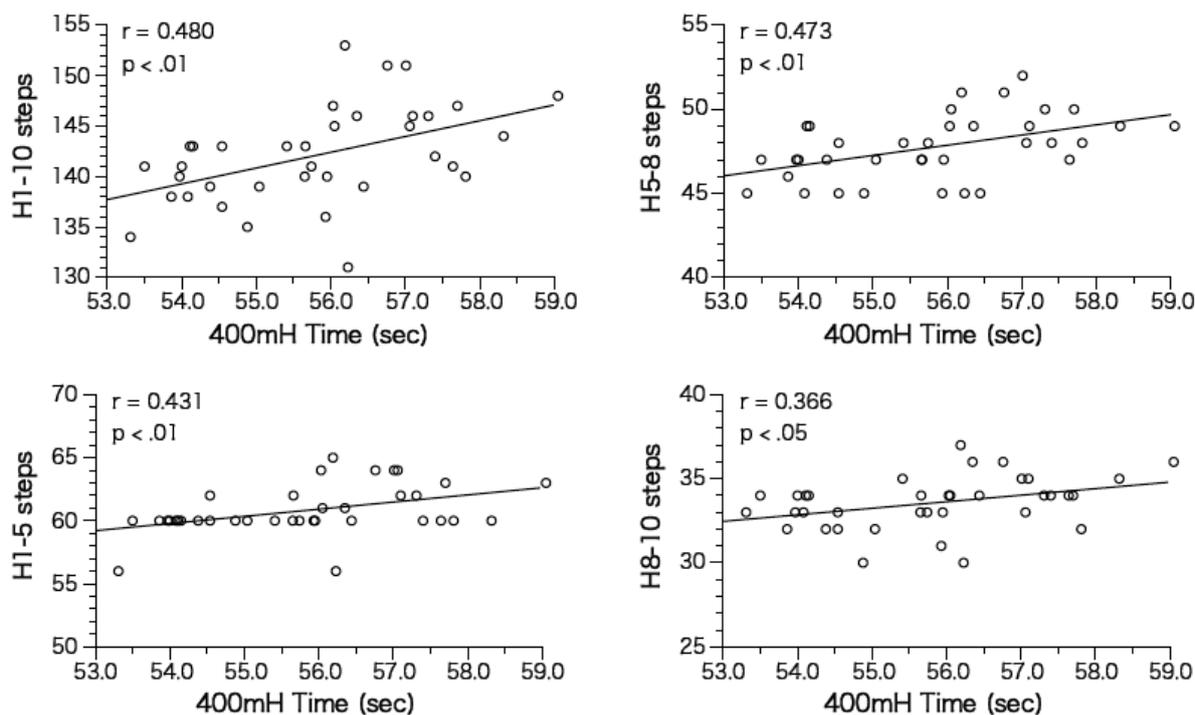


図 8. 区間歩数と記録との関係(女子)

表 3. 2007 年度の記録比較

		世界10傑	日本10傑	代表最高記録
男子	平均±SD(秒)	48.05±0.22	49.62±0.58	48.16±0.43
	最高値(秒)	47.61	48.44	47.89
	最低値(秒)	48.26	50.21	48.66
女子	平均±SD(秒)	53.75±0.37	58.12±0.98	
	最高値(秒)	53.28	55.71	55.71
	最低値(秒)	54.14	58.90	

※ 代表最高記録は、日本代表選手(男子3名、女子1名)の大会終了時点の自己最高記録

第 1 回の世界陸上が開催された 1987 年から 2007 年までの男子の世界 10 傑平均は、概ね 47 秒台後半から 48 秒 1-3 台で推移していることが報告されている(森丘, 2007)。一方、男子の日本 10 傑平均は、東京世界陸上が開催された 1991 年から 16 年の間に約 0.7 秒短縮され、約 3 秒もあった世界 10 傑との差も約 1.5 秒まで縮まっていることが報告されている(森丘ら, 2008)。実際、為末、成迫両選手の PB は世界 10 傑平均を上回っており、吉形選手も世界 10 位の記録まで 0.4 秒差に迫っている。

女子については、世界と日本の 10 傑平均に 4

秒以上の開きがあり、唯一の代表選手であった久保倉選手も世界 10 位記録まで約 1.6 秒もの差がある。

#### 6.2 日本代表選手のレースパターンについて

図 9 は、男子の記録上位 8 名平均と日本選手の速度曲線を比較したものである。成迫選手は、準決勝 1 組でシーズンベスト記録である 48.44 秒をマークしたが、各組上位 2 着+2 のプラス通過条件となる 4 位以内に入れず(5 位)決勝に進むことができなかった。14 歩切り替え時(H6-7)の減速が大きいなどの課題を残したものの、前半か

ら積極的なレースを展開し、世界レベルの走りをみせたといえるだろう。

為末選手は、持ち味であるレース前半から走りに精彩がなく、近年 21 秒 0~1 台で安定していた H5 通過に 21.48 秒もかかっている。速度曲線の傾向については他のレースとさほど変わらなかったことから、根本的なコンディションの不良が伺える。

吉形選手は、PB (48.66 秒) をマークしたレースとほぼ同じ H5 通過 (21.67 秒) であったが、S3 以降の速度低下が大きく、PB よりも約 2 秒遅いフィニッシュとなった。

図 10 は、女子の記録上位 8 名平均と久保倉選手の速度曲線を比較したものである。久保倉選手は、PB (55.71 秒：大会当時) をマークしたレースよりも約 0.6 秒遅いタイムで H5 を通過し (24.83 秒)、本来 17 歩で走るはずの H6-7 が 18 歩になるなど、レース全体を通して十分にその力を発揮することができなかった。

大阪大会の男子 400mH は、予落・準落最高記録が共に日本選手という、自国開催の大会にとっては皮肉な結果に終わってしまった。しかし、日本の男子 400mH が、オリンピックや世界選手権の決勝進出を想定した戦略を練るべきレベルに

あることは自明である。また、女子については、大阪大会では十分に力を発揮できなかった久保倉選手が、2008 年の北京五輪において準決勝進出を果たし、その後の国体でも 55.46 秒の日本記録台をマークするなど、世界レベルの入り口となる 54 秒台も視野に入りつつある。今後は、各選手の特徴を活かした合理的なレースパターンを模索することはもちろん、世界レベルのレースパターンの動向やラウンド通過条件なども考慮した上で、予選から決勝に至るまでの戦略についても総合的に検討することが課題となるだろう。

### 文献

- Ditroilo, M. and Marini, M. (2001) : Analysis of the race distribution for male 400m hurdles competing at the 2000 Sydney Olympic Games. *New Study in Athletics*. 16 : 15-30
- 森丘保典 (2007) : 大阪世界陸上までの道のりと北京に向けて. 日本スプリント学会第 18 回大会抄録集 : 13
- 森丘保典・榎本靖士・杉田正明・松尾彰文・阿江通良・小林寛道 (2005) : 陸上競技 400m ハードル走における一流男子選手のレースパターン分析. *バイオメカニクス研究* 9: 196-204

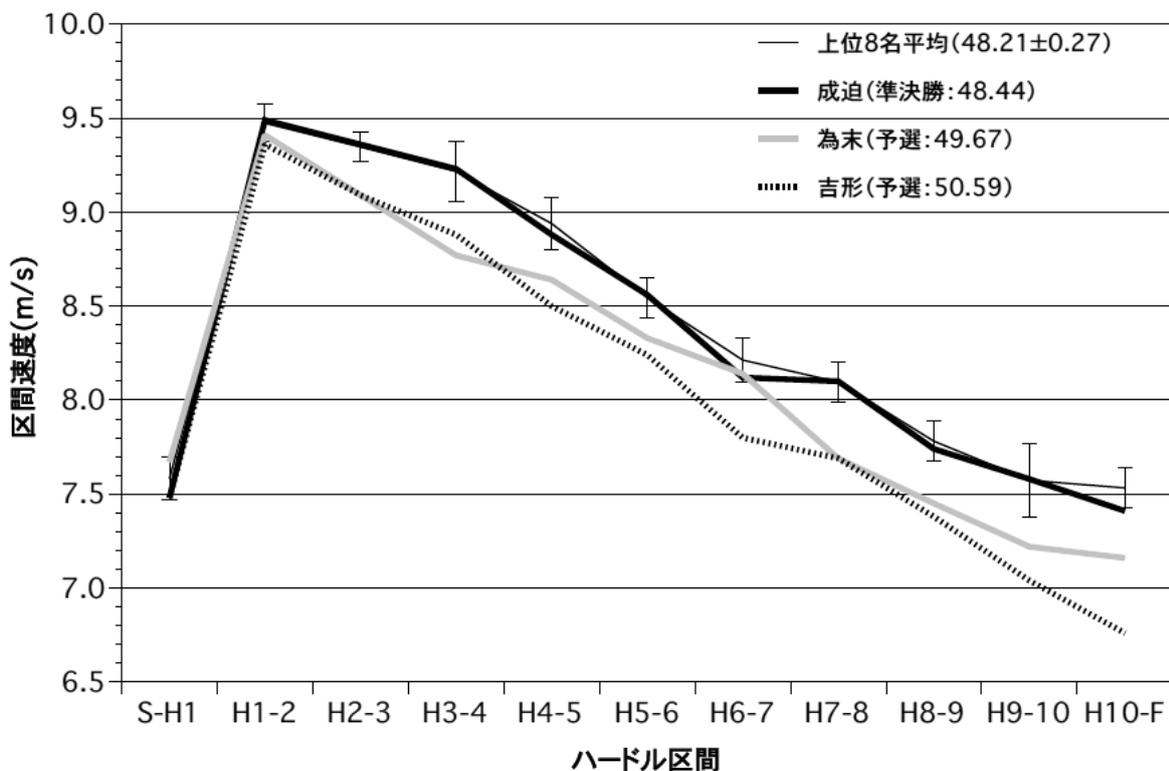


図 9. 男子上位 8 名平均と日本選手の速度曲線

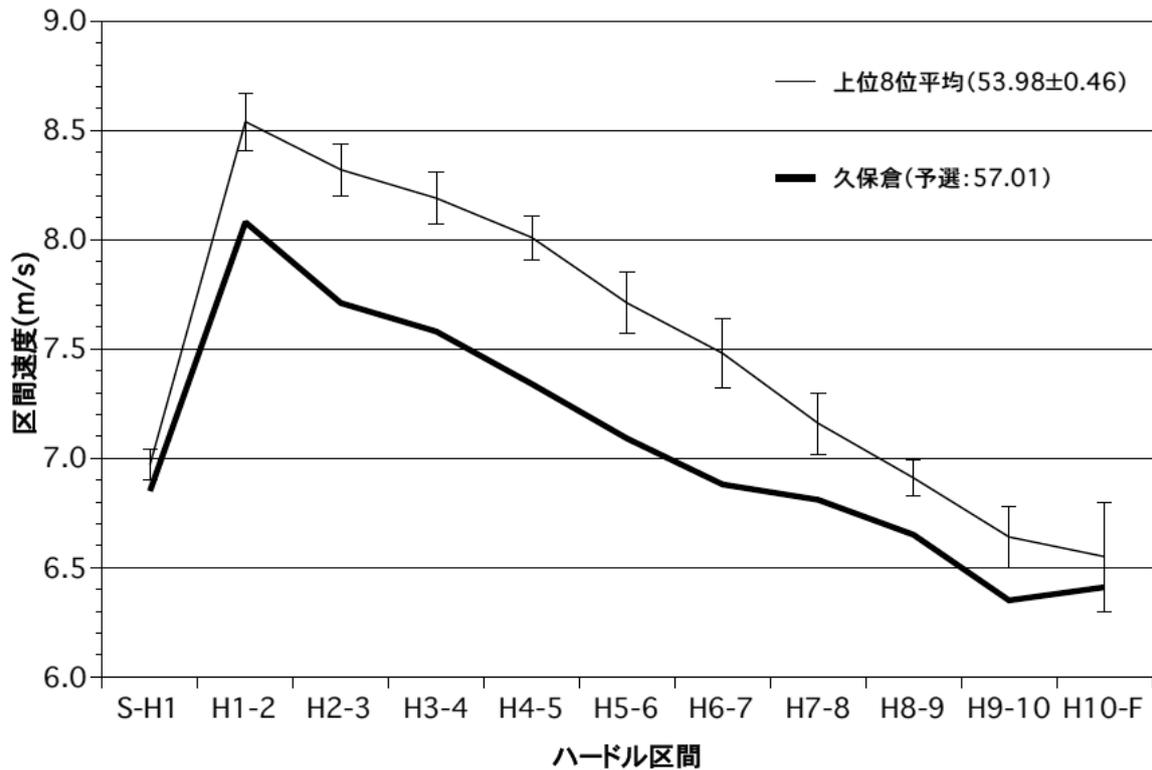


図 10. 女子上位 8 名平均と久保倉選手の速度曲線

森丘保典・森田正利・柳谷登志雄・榎本靖士・杉田正明・阿江通良（2008）世界陸上競技選手権大会における男子 400m ハードル走パフォーマンスの変遷について —1991 年東京大会と 2007 年大阪大会の記録およびレースパターン比較—. バイオメカニクス研究 12 : 109-114  
 森田正利・五十嵐幸一（1992）：世界一流ハードラーのレースに関する事例的研究-第 3 回世界

陸上競技選手権大会のタイム分析より. 陸上競技研究 11 : 2-13

Susanka, P., Kodejs, M. and Miskos, G. (1987) : Time analysis of the 400m hurdles. Scientific report on the II world championships in athletics ROME 1987 -BOOK1 Time analysis of the sprint and hurdle eVents, International Athletic Foundation (Eds.) , 1-31

# 世界一流男子中距離走者のレースパターンと走動作

## The race pattern and running motion of the world elite male middle-distance runners

門野 洋介<sup>1)</sup>, 榎本 靖士<sup>2)</sup>, 鈴木 雄太<sup>1)</sup>  
芦澤 宏一<sup>1)</sup>, 法元 康二<sup>3)</sup>, 小山 桂史<sup>4)</sup>

1) 筑波大学大学院 2) 京都教育大学 3) 茨城県立医療大学 4) 順天堂大学大学院

Hirosuke KADONO<sup>1)</sup>, Yasushi ENOMOTO<sup>2)</sup>, Yuta SUZUKI<sup>1)</sup>,  
Hirokazu ASHIZAWA<sup>1)</sup>, Koji HOGA<sup>3)</sup>, Keiji KOYAMA<sup>4)</sup>

1) Graduate School of University of Tsukuba , 2) Kyoto University of Education  
3) Ibaraki Prefectural University of Health Science, 4) Graduate School of Juntendo University

### 1. はじめに

これまで、日本陸上競技連盟科学委員会は日本国内の主要競技会における中距離走種目において、主に日本一流選手の通過タイム、走スピード、ストライド、ピッチ、さらには走動作などのバイオメカニクスデータを収集してきた。しかし、1991年の第3回世界陸上競技選手権東京大会、そして1994年の第12回広島アジア大会以来、外国の世界一流選手のデータはほとんど得られて

いない。したがって、世界一流男子中距離走者のレースパターンや走動作に関する資料は少なく、彼らの特徴についてはあまり知られていない。本稿では、第11回IAAF世界陸上競技選手権大阪大会（以下、大阪大会）における男子800mおよび1500m競走における世界一流選手のレースパターンおよび走動作を分析し、その特徴について明らかにすることを目的とした。

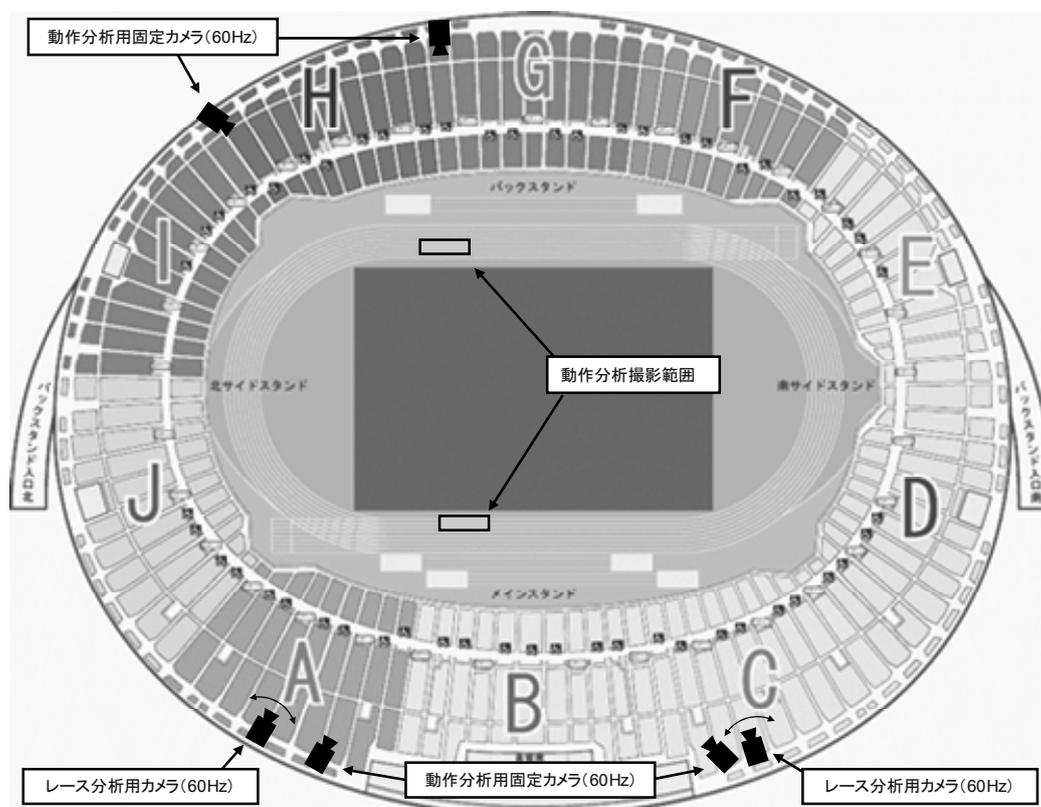


図1 カメラの設置位置および撮影範囲

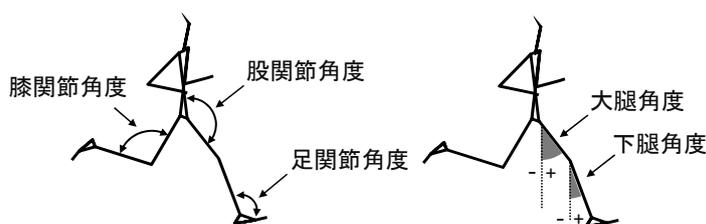


図2 関節角度および部分角度の定義

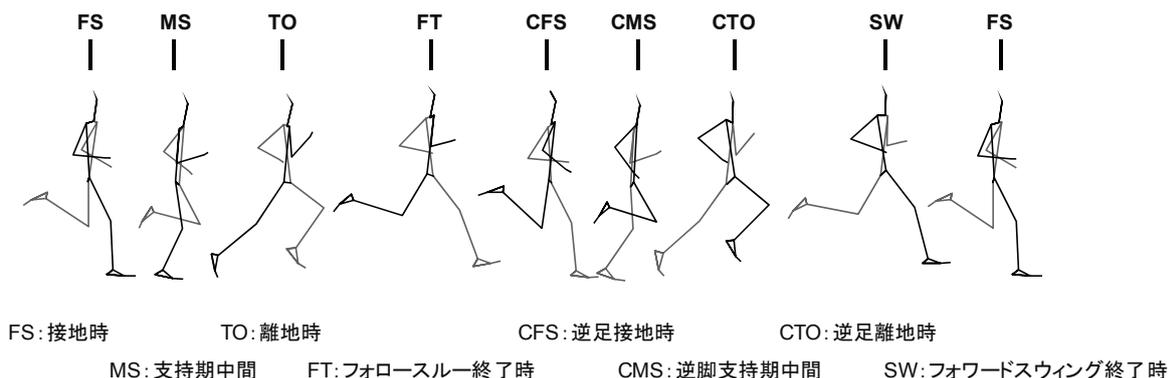


図3 時点の定義

## 2. 方法

### 2.1 レース分析のデータ収集と処理

図1は、カメラの設置位置および撮影範囲について示したものである。スタンドから2台のビデオカメラ(60Hz)を用いてレースを撮影した。スタートピストルの閃光を撮影した後、選手を追従撮影した。露出時間はスタートピストルの閃光撮影時が1/60s、それ以降は1/350~1/1000sとした。撮影したVTR画像から、選手の胸部が100m毎の地点を通過した時間(通過タイム)を1/100s単位で読み取った。なお、800m走の最初の地点については、120m地点(ブレイクライン)で読み取った。次に、通過タイムから各100m区間(ただし、800m走の最初の区間は120m、第2区間は80m)に要した時間(区間タイム)を求め、区間距離を区間タイムで除すことにより区間平均走スピード(以下、走スピード)を算出した。また、各区間において10歩に要した時間を読み取り、1歩の平均時間の逆数を平均ピッチ(以下、ピッチ)とし、各区間の走スピードをピッチで除すことにより平均ストライド(以下、ストライド)を算出した。

### 2.2 動作分析のデータ収集と処理

スタンドの最上段に設置した4台のビデオカメラ(60Hz)を用いて選手を撮影した(図1)。撮影範囲はY方向(走者の進行方向)7m×X方向(トラックの縁石から第3、第4レーン間のラ

インに向かって)3.65m×Z方向(鉛直方向)2.5mとし、ホームストレートとバックストレートのやや第2曲走路寄りの位置に設けた。

撮影したVTR画像から、走者の1サイクル動作(2歩)をビデオ動作解析システムを用いてデジタル化し、身体分析点23点の2次元座標を得た後、3次元DLT法を用いて3次元座標へと変換し、Butterworth low-pass digital filterを用いて平滑化した(最適遮断周波数は3.6~7.8Hz)。さらに、平滑化した3次元座標をY-Z平面に投影し、2次元座標を得た。

阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて身体部分および全身の重心位置および慣性モーメントを算出した。1サイクル中の身体重心の水平移動距離をそれに要した時間(1サイクル時間)で除すことにより走速度を算出した。1サイクル時間の半分をステップ時間とし、ステップ時間の逆数をピッチとした。走速度をピッチで除すことによりストライドを算出した。身体分析点の2次元座標から関節角度および部分角度を算出し、図2のように定義した。身体分析点および重心位置、関節および部分角度を時間微分することにより速度および角速度を算出した。右脚の下肢セグメントを剛体リンクセグメントにモデル化し、逆動力学的手法により関節トルク算出し、関節トルクと関節角速度を乗じることにより関節トルクパワーを算出した。また、1サイクルにおいて、図3のような時点を定義した。

統計処理は、ラウンド通過者と敗退者の記録の

表1 男子 800m および 1500m におけるラウンドの記録

男子800m						
	予選		準決勝		決勝	
	敗退	通過	敗退	通過		
n	22	24	16	8	8	
平均記録 ± SD	1:47.85 ± 02.93	1:45.85 ± 00.26	1:46.91 ± 01.74	1:44.96 ± 00.25	1:47.37 ± 00.18	
%SB ± SD (%)	99.5 ± 1.2	99.0 ± 0.7	98.2 ± 1.5	99.5 ± 0.7	97.1 ± 0.4	
最高記録	1:46.24	1:45.25	1:45.31	1:44.54	1:47.09	
最低記録	1:56.55	1:46.34	1:51.31	1:45.23	1:47.58	

男子1500m					
	予選		準決勝		決勝
	敗退	通過	敗退	通過	
n	17	24	9	14	14
平均記録 ± SD	3:50.97 ± 11.76	3:40.78 ± 00.98	3:45.50 ± 06.72	3:44.40 ± 09.24	3:36.05 ± 01.25
%SB ± SD (%)	97.3 ± 1.6	97.1 ± 1.3	96.0 ± 3.4	95.3 ± 3.8	98.8 ± 1.3
最高記録	3:42.08	3:38.65	3:41.17	3:40.53	3:34.77
最低記録	4:19.80	3:41.96	4:02.95	4:16.23	3:38.78

『通過』と『敗退』に有意差あり \*: $p<0.05$  \*\*: $p<0.01$  \*\*\*: $p<0.001$

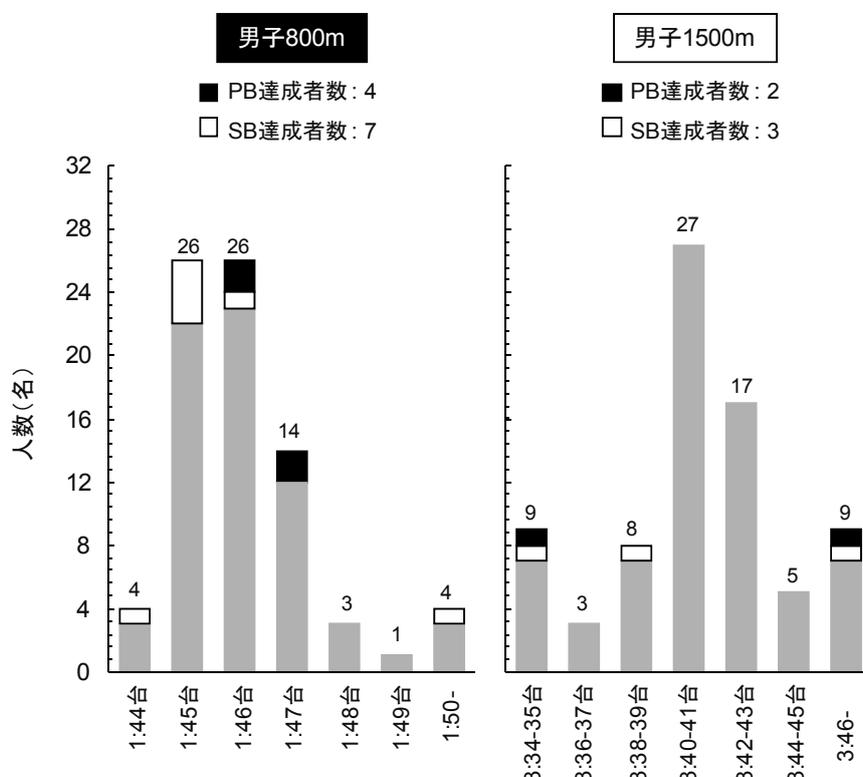


図4 男子 800m および 1500m における記録の分布

差、記録の上位群と下位群の走スピード、ストライドおよびピッチの差を明らかにするため、対応のない t 検定を行なった。有意水準は 5%以下とした。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 記録の特徴

表1は、男子 800m および男子 1500m におけるラウンド通過者および敗退者の平均記録、シーズンベスト記録 (以下, SB) に対する達成率 (以下, %SB), 最高および最低記録について示したものである。また、図4は、各種目における記録の分布について示したものである。ここではこれ

らの結果をもとに、記録の観点から各種目の特徴について検討する。

#### (1) 男子 800m

男子 800m において、予選、準決勝ともに通過者と敗退者の平均記録に有意差がみられた ( $p<0.01$ )。また、予選の%SBは有意ではないものの敗退者の方が大きく、準決勝においては反対に通過者の方が有意に大きかった ( $p<0.05$ )。このことから、予選においては、通過者は敗退者に比べて力の発揮をいくらか抑えて予選を通過しており、反対に準決勝においては、通過者すなわち決勝進出者は、自らの力を十分に発揮していた

と考えられる。決勝は A.K.YEGO (KEN) が 1 分 47 秒 09 で制したが、1 着の記録としては全てのラウンドの中で最も遅く、記録よりも勝負を強く意識したレースであったと推察される。

### (2) 男子 1500m

男子 1500m の通過者と敗退者の平均記録および%SB を比較すると、予選の平均記録 ( $p < 0.001$ ) 以外に通過者と敗退者に有意差はみられなかった。また、SB, PB 達成者数はあわせて 5 名と中距離走種目の中で最も少なかった。これらのことは、男子 1500m の記録的なレベルは高くはなく、またその差は小さく、僅差の中で着順争いが行われたことを示すと考えられる。決勝は B.LAGAT (USA) が 3 分 34 秒 77 で制し、この記録が大会最高記録であった。なお、準決勝通過の最低記録 (4 分 16 秒 23) については、選手間の妨害行為による救済措置が取られたため、この記録が最低通過記録となっている。

### 3.2 レースパターンの類型化とその特徴

ここでは、レースをいくつかの小区間に分け、その区間における平均走スピードの変化をみることにより、レース中の走スピードの変化すなわ

ちレースパターンを定性的に類型化し、その特徴について検討する。

#### (1) 男子 800m

図 5 は、男子 800m 競走の各ラウンド、各組における先頭走者の 200m 毎の通過タイムから各 200m 区間の平均走スピードを算出し、その変化を示したものである。図 6 は、類型化したパターンの分布について示したものである。図 7 は、パターン別にみた SB, PB 達成者の分布について示したものである。なお、図 5 中のシンボル (●▲○△) は類型化されたそれぞれのパターンを表し、図 6, 7 と対応している。

男子 800m においては、全てのレースにおいて 0~200m 区間 (以下、S1) から 200~400m 区間 (以下、S2) にかけて走スピードが減少していた (図 5)。このことは、800m においては、S1 の走スピードの大きさにかかわらず S2 では走スピードが減少していたことを示している。したがって、男子 800m のレースパターンの類型化は、S1 以降、すなわち S2, 400~600m 区間 (以下、S3) および 600~800m 区間 (以下、S4) の走スピードの変化をみることにより行なった。その結果、以下の 4 つのパターンに分類することができ

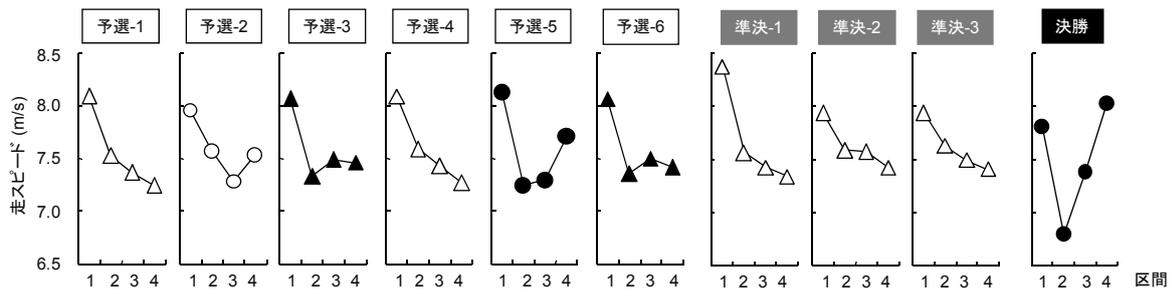


図 5 男子 800m における各 200m 区間の平均走スピードの変化

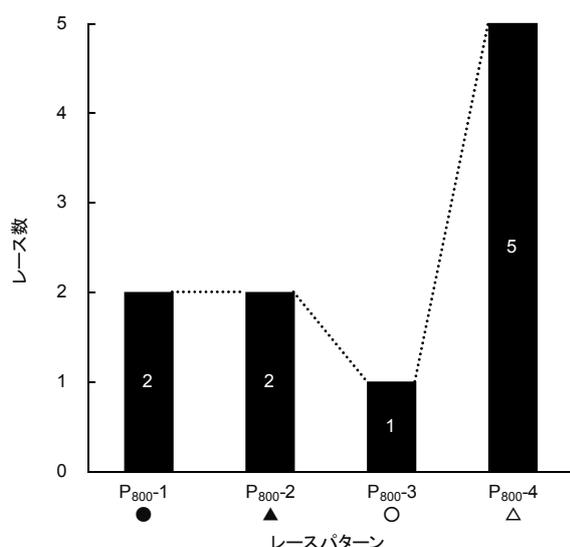


図 6 男子 800m におけるレースパターンの分布

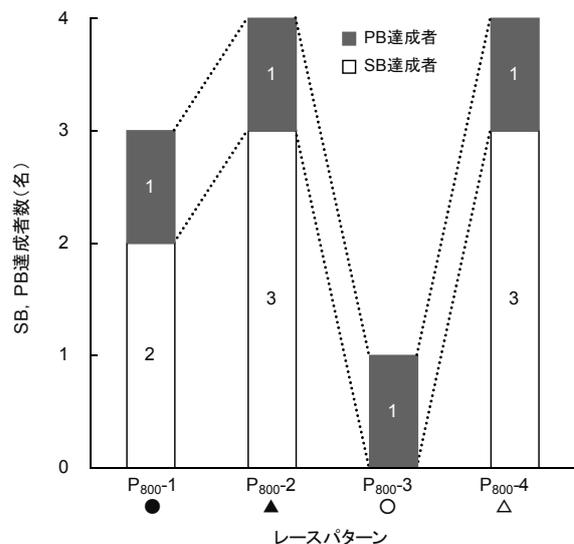


図 7 男子 800m におけるレースパターン別にみた PB, SB 達成者の分布

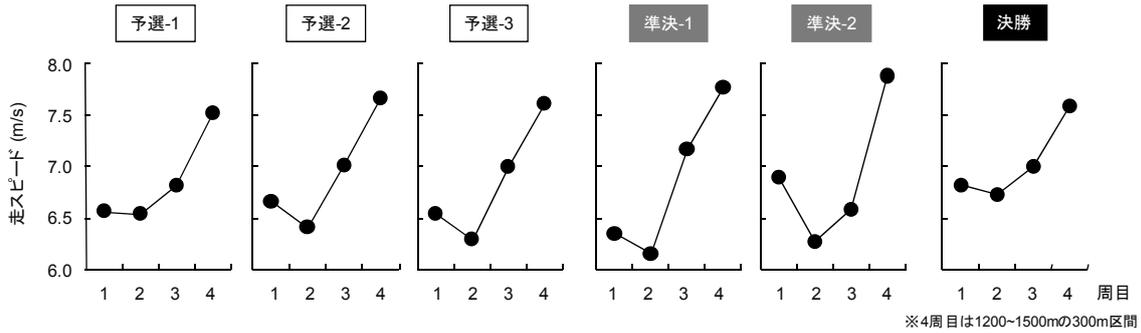


図8 男子1500mにおける各週の平均走スピードの変化

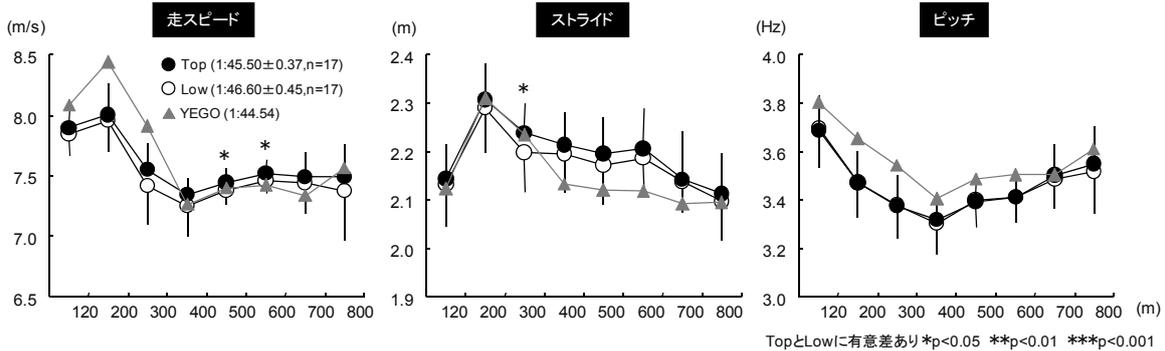


図9 男子800mにおける記録水準および大会最高記録者の走スピード、ストライドおよびピッチの変化

た。

まず1つめのパターン（以下、 $P_{800-1}$ ）は、S2からS3、そしてS3からS4にかけて加速するパターンである（図5中●）。これには決勝などが該当し、合計で2レース存在した（図6）。

2つめのパターン（以下、 $P_{800-2}$ ）は、S2からS3にかけて加速し、S3からS4にかけて減速するパターンである（図5中▲）。このパターンは2レース存在した（図6）。

3つめのパターン（以下、 $P_{800-3}$ ）は、S2からS3にかけて減速し、S3からS4にかけて加速するパターンである（図5中○）。このパターンは予選第2組のみの1レースしか存在せず、4パターンのうち最も少なかった（図6）。

4つめのパターン（以下、 $P_{800-4}$ ）は、S2からS3、そしてS3からS4にかけて減速するパターンである（図5中△）。全レースの半数にあたる5レースがこのパターンに該当し、4つのパターンのうち最も多かった（図6）。また、 $P_{800-4}$ のパターンにおいて3名がSBを、1名がPBを出しており（図7）、優勝者のA.K.YEGO（KEN）も準決勝第1組において1分44秒54のSBおよび大会最高記録を出している。

## (2) 男子1500m

図8は、男子1500mの各ラウンド、各組における先頭走者の400m毎の通過タイムから各400m区間（1200～1500m区間については300m）の平均走スピードを算出し、その変化を示したものである。全てのレースにおいて、1周目（以下、

L1）から2周目（以下、L2）にかけて減速し、3周目（以下、L3）、4周目（以下、L4）と加速するパターンを示し、男子1500mのレースパターンはこの1つのみであった。門野と榎本（2007）は、2003年世界選手権パリ大会、2004年オリンピックアテネ大会および2005年世界選手権ヘルシンキ大会のレース分析を行ない、男子1500mの予選や準決勝においては後半700m（3周目以降）において走スピードが漸増する傾向がみられたと報告している。大阪大会においても、彼らの報告と同様の傾向がみられたことから、3周目以降において走スピードが漸増するというパターンは、男子1500mのレースパターンの特徴といえるだろう。

## 3.3 記録からみた走スピード、ストライド、ピッチの特徴

ここでは、記録によって上位群（以下、Top）と下位群（以下、Low）に分け、記録からみた走スピード、ストライド、ピッチの特徴について検討する。なお、大会最高記録を出した選手も加え、その特徴についても検討する。

### (1) 男子800m

男子800mは、1分45秒～45秒台の選手17名をTop（1分45秒50±0秒37）、1分46秒～47秒台の選手17名をLow（1分46秒60±0秒45）とした。図9は、Top（図中●）、Low（図中○）および大会最高記録（1分44秒54）を出したYEGO（図中▲）の走スピード、ストライド、ピ

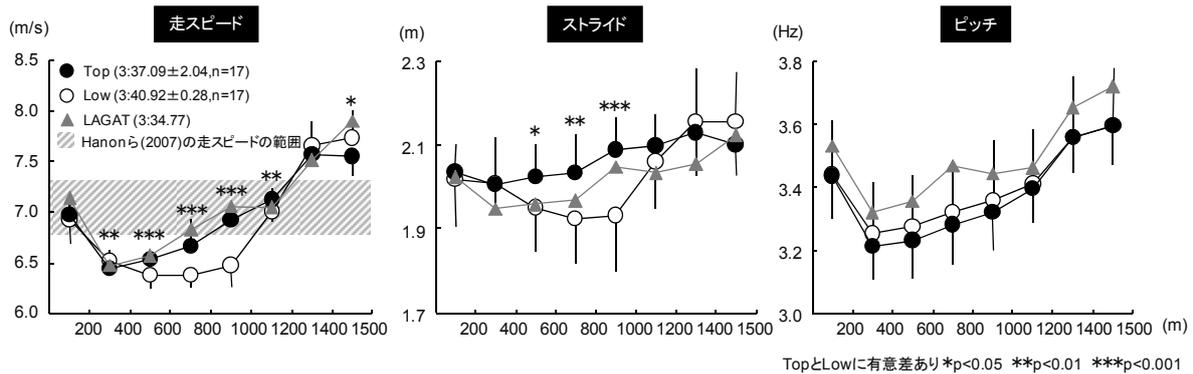


図 10 男子 1500m における記録水準別および大会最高記録者の  
走スピード、ストライドおよびピッチの変化

ッチの変化を示したものである。

走スピードの変化を概観すると、スタートで加速して 120~200m 区間において最高走スピードに達し、その後 400m にかけて減少し、400~600m においてやや増大し、600~800m においてはほぼ維持する傾向を示した。走スピードは全ての区間において Top が大きく、400~600m において有意差がみられた ( $p<0.05$ )。つまり、Top は特に 400~600m のレース中盤において高い走スピードを維持していたと考えられる。ストライドの変化を概観すると、120~200m 区間で最大となり、その後 500m にかけて減少し、500~600m 区間でわずかに増大し、600~800m で再び減少する傾向を示した。ストライドは 200~600m において Top の方が大きく、200~300m 区間において有意差がみられた ( $p<0.05$ )。ピッチの変化を概観すると、0~120m 区間で最大となり、その後 400m にかけて減少し、後半の 400m において漸増する傾向を示した。ピッチの大きさや変化の仕方は、0~600m においては Top と Low に差や相違はみられなかった。統計的にも全ての区間において有意差はみられなかった。しかし、600~800m に着目すると、Top の方が Low に比べて大きく、Top はラスト 200m においてピッチをより増大させていたことがわかる。

大会最高記録を出した YEGO の特徴は、0~300m、特に 120~200m 区間の走スピードが顕著に大きい点であろう。このことは、よい記録を出すためには、上述の 400~600m のレース中盤における高い走スピードの維持のみならず、レース序盤において高い走スピードを立ち上げることの重要性を示唆していると考えられる(門野ら, 2008)。さらに、YEGO は 700~800m 区間においてストライドを維持し、ピッチを著しく増大させることによってラストスパートを行っていたことがわかる。また、YEGO のストライドは 300~800m において Top や Low より小さく、反対にピッチは大きいことがわかる。したがって、ストライド、ピッチの大きさからみると、YEGO はピッチ型の走法であるといえよう。なお、選手のストライド、ピッチの大きさには、身長や体重など

の形態が影響を及ぼすことが考えられるため、これらの影響についても考慮する必要があるが、全選手の身体特性に関するデータを収集することができなかったため、考察することができなかった。

これらのことをまとめると、男子 800m における記録からみた走スピード、ストライド、ピッチの特徴は以下になるであろう。Top はストライドが大きく、400~600m のレース中盤において高い走スピードを維持し、ラスト 200m においてピッチをより増大させていた。また、大会最高記録を出した YEGO は、レース序盤において高い走スピードを立ち上げており、ラスト 100m においてピッチを著しく増大させることによってラストスパートを行っていた。

## (2) 男子 1500m

男子 1500m は、3 分 34 秒~39 秒台の選手 17 名を Top、3 分 40 秒~41 秒台の選手 17 名を Low とした。図 10 は、Top (図中●)、Low (図中○) および大会最高記録 (3 分 34 秒 77) を出した LAGAT (図中▲) の走スピード、ストライド、ピッチの変化を示したものである。

走スピードの変化を概観すると、0~200m 区間から 200~400m 区間にかけて減少した後、Top は 200~1400m までは漸増し、1400~1500m 区間において維持する傾向を示した。一方 Low は、200m 以降 600m にかけて減速した後、1000m あたりまで走スピードが小さいまま維持され、その後フィニッシュにかけて走スピードが著しく増大するような傾向を示した。走スピードは 400~1200m では Top が有意に大きく、反対に 1400~1500m 区間では Low が有意に大きかった ( $p<0.05$ )。このことから、Top は 400~1200m にあたる 2 周目と 3 周目においてより高い走スピードを維持していたことがわかり、反対に Low はこの局面において走スピードが小さかったために、レース終盤においてより高い走スピードを発揮することができたと推測される。ストライドの変化を概観すると、Top は 0~200 区間から 200~400m 区間にかけてわずかに減少した後、

1400m まで漸増し、1400~1500m 区間において再び減少する傾向を示した。一方 Low は、スタートから 800m にかけて減少した後、1400m にかけて増大し、1400~1500m 区間において再び減少する傾向を示した。ストライドは 400~1000m において Top が有意に大きかった。ピッチの変化を概観すると、Top, Low とも、0~200m 区間から 200~400m 区間にかけて減少した後、フィニッシュにかけて漸増する傾向を示し、全ての区間において有意差はみられなかった。このことと、前述の走スピードとを併せて考えると、Top はレース中盤においてより大きなストライドを維持することで、高い走スピードを維持していたと考えられる。

大会最高記録を出した LAGAT の特徴は、600~1000m および 1400~1500m 区間の走スピードが大きい点と、ピッチが大きい点(ピッチ型走法)であろう。600~1000m において、LAGAT は集団の中に位置していたことから、LAGAT 自身がこの局面において積極的に走スピードを高めていたというよりも、先頭のペースアップに LAGAT が対応した結果として走スピードが高まったと解釈するのが妥当であろう。しかし、1400~1500m 区間については、LAGAT 自身のラストスパートによるものであり、この区間において LAGAT はストライド、ピッチともに増大させていた。特に、Top も Low も 1400~1500m 区間においてピッチの増大はみられるものの、ストライドは増大しておらず、この区間において LAGAT はストライドを増大させていた点が、彼のラストスパートが速かったことの要因であろう。

Hanon ら (2007) は、記録水準が 3 分 28 秒~3 分 45 秒の一流男子 1500m 選手が優れた記録を出した時のレースパターンについて調査している。彼女らの報告によると、最も速い 100m 区間で約 13 秒 6 (約 7.35m/s)、最も遅い 100m 区間で約 14 秒 7 (約 6.80m/s) であったことが示されており、この走スピードの範囲を図 9 に重ねると、大阪大会の走スピードの範囲とは若干異なるようである。大阪大会の場合では、200~800m の走スピードが小さく、1200~1500m の走スピードが大きいことがわかる。一方、Hanon らの走スピードの範囲をみると、大阪大会に比べて走スピードの増減が小さく、平均的に高い走スピードを維持するようなパターンであるといえよう。また、大阪大会の男子 1500m の達成率は高くはなく(表 1), SB, PB 達成者数も少なかったことから(図 4)、大阪大会のパターンは、男子 1500m 選手が優れた記録を出した時のレースパターンとはいえない。したがって、男子 1500m において優れた記録を出すためのレースパターンについては、Hanon らの報告も踏まえて、今後さらに検討が必要であろう。

### 3.4 決勝レースの特徴

図 11 は男子 800m 決勝、図 12 は男子 1500m 決勝における上位 3 選手の走スピード、ストライド、ピッチの変化について示したものである。ここでは、決勝レースの特徴について検討する。しかし、榎本と門野 (2008) は、大阪大会と 1991 年東京大会の男子 800m 決勝および男子 1500m 決勝のレースを比較し、すでに大阪大会における世界一流選手の特徴について検討している。したがって、

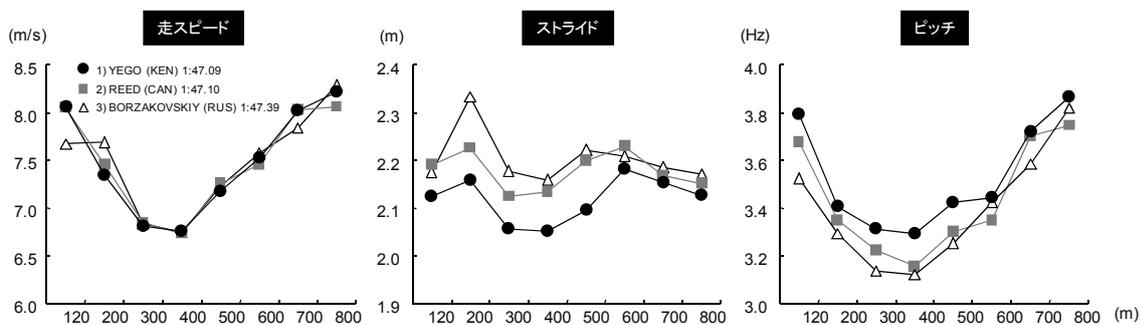


図 11 男子 800m 決勝における上位 3 選手の走スピード、ストライドおよびピッチの変化

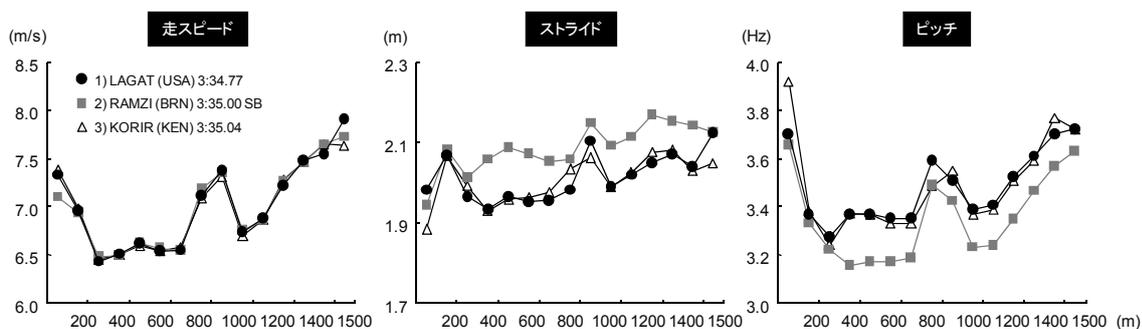


図 12 男子 1500m 決勝における上位 3 選手の走スピード、ストライドおよびピッチの変化

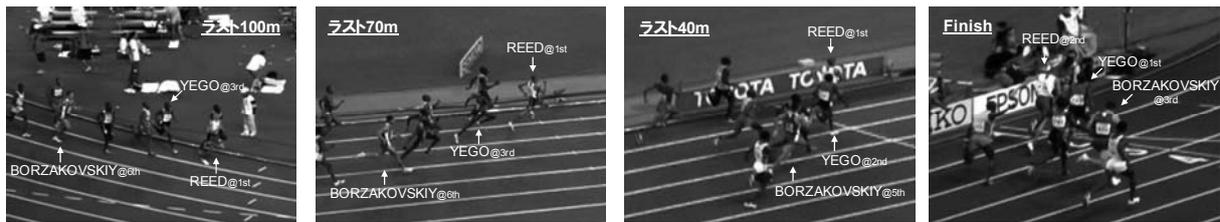


図 13 男子 800m 決勝におけるラスト 100m の様子



図 14 男子 1500m 決勝におけるラスト 100m の様子

本稿と内容が重複するため、詳細については榎本と門野(2008)を参照されたいが、レースパターンとその特徴を簡単に述べると以下のようになる。

男子 800m 決勝はスタートからスローペースの展開となり、400m の通過が 55 秒 08 と非常に遅かった。後半 400m は走スピードが漸増してラストスパート勝負となり、YEGO が 1 分 47 秒 09 で制した。この時の後半 400m のラップタイムは 52 秒 01 であり、前半 400m より約 3 秒も速かった。男子 1500m は、400m 通過が 58 秒 63、800m 通過が 1 分 58 秒 08 (400~800m のラップタイムは 59 秒 45) とスローペースの展開となった。800m 通過後、一度に走スピードが急激に増大したが、900~1000m 区間で再び大きく減速した。1000m 通過後、フィニッシュにかけて走スピードは漸増してラストスパート勝負となり、LAGAT が 3 分 34 秒 77 の SB で制した。このように、男子は 800m、1500m とともにレース前半はスローペースとなったため記録的に高くはなく、勝敗はラストスパートにおいて分かれる展開となった。このことから、榎本と門野(2008)は大阪大会における世界一流選手の特徴について、単に記録ではなくペース配分とラストスパートにみられる高い戦術と技術にあると述べている。そこで、ここでは男子 800m 決勝および 1500m 決勝のラストスパートに着目し、ラストスパートにおける戦術について検討する。

#### (1) 男子 800m 決勝

図 13 は、男子 800m 決勝におけるラスト 100m の様子を示したものである。ラスト 100m の時点で、まず G.REED (CAN) がラストスパートを開始した。この時、優勝者の YEGO は 3 番手、3 位の Y.BORZAKOVSKIY (RUS) は 6 番手であった。ラスト 70m の時点で順位が変わりなかったが、BORZAKOVSKIY はラスト 100m~70m に

おいて前の走者らが外側のレーンに大きく広がったことにより、彼らを抜くためにさらにその外側(第 4 レーン)を走ることを余儀なくされ、距離を大きくロスをしている様子がわかる。ラスト 40m の時点で先頭の REED が徐々に減速し始め、YEGO は 2 番手に、BORZAKOVSKIY は 5 番手に順位を上げた。そしてフィニッシュで YEGO が REED に追いつき、2 人が並ぶようにゴールに流れ込んだ。BORZAKOVSKIY はラスト 70m 以降にさらに追い上げ、ラスト 100m のタイムが 12 秒 06 と 3 名の中で最も速かったが、先頭には追いつくことができず、結果的に 3 位でフィニッシュした。このように、REED のように位置取りがよくても、ラストスパートを開始するタイミングが早すぎるとフィニッシュ直前に失速してしまうこともあり、一方 BORZAKOVSKIY のようにラストスパートに優れていても、位置取りがよくなければ先頭に追いつかないということもある。

#### (2) 男子 1500m 決勝

図 14 は、男子 1500m 決勝におけるラスト 100m の様子を示したものである。ラスト 100m の時点で、3 位の S.K.KORIR (KEN) は 2 番手、優勝した LAGAT は集団外側の 4 番手、2 位の R.RAMZI (BRN) は集団内側の 5 番手に位置していた。RAMZI は 2005 年ヘルシンキ大会の男子 800m と 1500m で 2 種目優勝を果たしている。ラスト 70m の時点で LAGAT が順位を上げて 3 番手に上がったが、この時 RAMZI は集団の内側で前方の進路を塞がれ、集団から抜け出せないでいる様子がわかる。ラスト 40m の時点で RAMZI がようやく集団から抜け出した時、LAGAT は既にトップに立っており、そのまま LAGAT が 1 位でフィニッシュした。LAGAT は、ラスト 100m を決勝レースを走った選手の中で最も速い 12 秒 65 で走っていた。しかし、その速さもさることながら、RAMZI が集団から抜け出せずにラスト 100m からスパー

表 2 YEGO と BORZAKOVSKIY の走速度, ストライド, ピッチ

		YEGO			BORZAKOVSKIY		
		Semi-Final		Final	Semi-Final		Final
		@550m	@750m	@750m	@550m	@750m	@750m
走速度	(m/s)	7.40	7.63	8.41	7.76	7.81	8.52
ストライド	(m)	2.16	2.03	2.17	2.33	2.08	2.20
支持期距離	(m)	0.97	0.94	0.97	1.02	0.92	0.95
前半距離	(m)	0.28	0.29	0.25	0.28	0.24	0.27
後半距離	(m)	0.69	0.65	0.72	0.74	0.67	0.68
非支持期距離	(m)	1.18	1.10	1.21	1.31	1.17	1.25
ピッチ	(Hz)	3.43	3.75	3.87	3.33	3.75	3.87
ステップ時間	(s)	0.292	0.267	0.258	0.300	0.267	0.258
支持期時間	(s)	0.133	0.125	0.117	0.133	0.125	0.117
前半時間	(s)	0.058	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
後半時間	(s)	0.075	0.075	0.067	0.083	0.075	0.067
非支持期時間	(s)	0.158	0.142	0.142	0.167	0.142	0.142

トを行なうことができなかつたことを考えると、LAGAT はラスト 100m の時点での位置取りに優れていたことが、このスパートを可能にしたともいえよう。

以上のことから、男子 800m および 1500m 決勝レースにおいては、ラストスパートの速さだけでなく、このような位置取りやタイミングといった戦術の僅かな違いが順位を大きく左右していたといえよう。

### 3.5 走動作の特徴

中距離走動作に関するバイオメカニクス的研究は他の競走種目に比べて少なく、中距離走動作に関する知見はほとんど得られていない。これまで述べたように、中距離走には様々レースパターンが存在し、これがパフォーマンス（記録、順位）に大きな影響を及ぼす。したがって、中距離走動作の特徴について検討する際には、走速度の大きさのみならず、レースの背景となるレースパターンも考慮に入れる必要がある。というのも、短距離走や障害走においては、スタートで加速して最高疾走速度に達した後、フィニッシュにかけて減速してゆくのが基本的なパターンであり、最高疾走速度に到達した後は、走スピードが大きな増減を繰り返すことはない（阿江ら, 1994; 森丘ら, 2005）。しかし、中距離走においては、短距離走のようなパターンの他にも様々なレースパターンが存在する。特に、レース中にみられる走スピードの増減は、中長距離走種目の特徴であるといえよう。ここでは、これまで述べたレース分析の

結果を踏まえ、各種目における走動作の特徴について検討する。

#### 3.5.1 男子 800m

男子 800m では、ラストスパートの速さだけでなく、位置取りやタイミングといった戦術がパフォーマンス（順位）を大きく左右していたことが示された。ここでは、ラストスパートに着目し、世界一流 800m 選手のラストスパート動作の特徴について検討する。男子 800m 決勝レースにおける全選手のラスト 100m のタイムは 12 秒 02~12 秒 70 の範囲であり、非常に速いラストスパートであった。これには、スローペースでレースが展開されたことが影響したと考えられる。その中で、1 位 YEGO と 3 位 BORZAKOVSKIY のラスト 100m のタイムは、それぞれ 12 秒 16、12 秒 06 であった。BORZAKOVSKIY は 2005 年ヘルシンキ大会の男子 800m 決勝でもラストスパートで後方から追い上げて 2 位に入り、また 2004 年オリンピックアテネ大会でも同様のレースパターンで優勝している。そのようなことから、彼のラストスパートの速さには定評がある。また、両者は準決勝の各組において 1 着でフィニッシュしていることから、ラストスパートの速さに優れた選手であることがわかる。以下では、両者の準決勝における 550m 地点（以下、SF<sub>@550m</sub>）と 750m 地点（以下、SF<sub>@750m</sub>）の走動作、および決勝における 750m 地点（以下、F<sub>@750m</sub>）の走動作を比較することにより、世界一流男子 800m 選手のラストスパート動作の特徴について検討する。

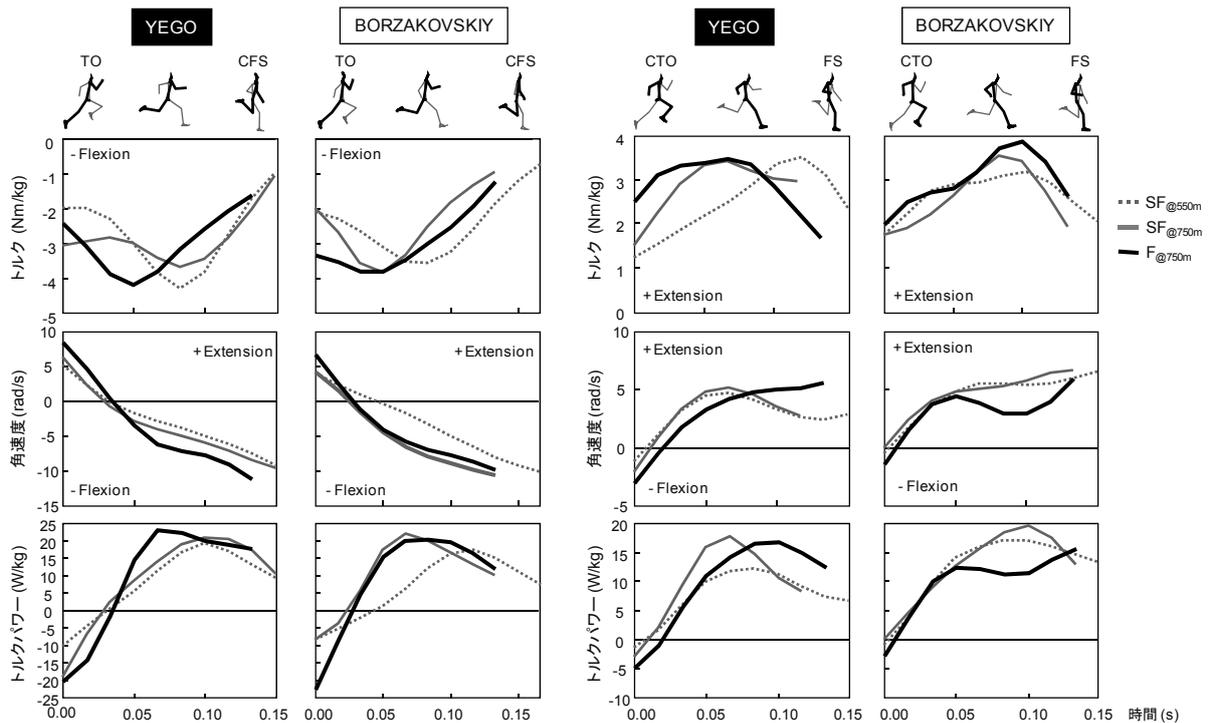


図 15 YEGO と BORZAKOVSKIY の非支持期における回復脚の股関節トルク，角速度，トルクパワー

(1) SF<sub>@550m</sub>からSF<sub>@750m</sub>にかけての変化

表 2 は，YEGO と BORZAKOVSKIY の SF<sub>@550m</sub>，SF<sub>@750m</sub> および F<sub>@750m</sub> における走速度，ストライド，ピッチについて示したものである。両者とも，SF<sub>@550m</sub> から SF<sub>@750m</sub> にかけて走速度が増大していた。この時，ピッチは増大したが，ストライドは減少していた。ピッチは主に非支持時間が短縮したことにより増大し，ストライドは主に非支持期距離が短縮したことにより減少していた。このことから，SF<sub>@550m</sub> から SF<sub>@750m</sub> にかけての変化は，主に非支持期においてみられると考えられる。非支持期は TO から CFS または CTO から FS の局面に相当する (図 3)。

図 15 は非支持期 (TO から CFS および CTO から FS) における回復脚の股関節のトルク，角速度およびトルクパワーについて示したものである。TO から CFS における股関節角速度をみると，両者とも SF<sub>@750m</sub> では，TO 直後に急激に伸展から屈曲に切り替わり，CFS にかけて大きな屈曲角速度を示した。この局面における股関節トルクおよびトルクパワーをみると，YEGO においては TO 時から TO 直後に大きな屈曲トルクを示し，BORZAKOVSKIY においては屈曲ピークトルクの出現が早くなっており，両者とも正のピークトルクパワーが増大していた。また，CFS 時の大腿角度は，両者とも SF<sub>@750m</sub> において増大していた (YEGO, SF<sub>@550m</sub>: -11.86deg, SF<sub>@750m</sub>: -4.50deg; BORZAKOVSKIY, SF<sub>@550m</sub>: -9.69deg, SF<sub>@750m</sub>: 0.86deg)。このことは，SF<sub>@750m</sub> では回復脚の大腿がより前方に引き出された姿勢で接地していたことを意味している。

次に，CTO から FS における股関節角速度をみると，両者とも SF<sub>@550m</sub> と SF<sub>@750m</sub> で大きな差はみられなかった。この局面における股関節トルクをみると，YEGO においては伸展ピークトルクの出現が早くなっており，BORZAKOVSKIY においては伸展ピークトルクが大きくなっていった。また，両者とも正のピークトルクパワーが増大していた。

以上のことから，SF<sub>@750m</sub> では離地した脚を素早く前方に引き出すような動作に変化しており，このことが非支持時間の短縮によるピッチの増大につながり，走速度が増大したと考えられる。

(2) SF<sub>@750m</sub> と F<sub>@750m</sub> との比較

SF<sub>@750m</sub> と F<sub>@750m</sub> では，F<sub>@750m</sub> の方が大きな走速度を示し，両者とも 8m/s 台と非常に大きかった (表 2)。F<sub>@750m</sub> では SF<sub>@750m</sub> に比べて，ストライド，ピッチともに増大していた。ストライドの増大は主に非支持期距離の増大によるものであり，ピッチの増大は支持期後半時間の短縮による支持期時間の短縮によるものであった。このことから，走速度が大きかった F<sub>@750m</sub> では，より短い支持期時間でキックを行ない，大きな非支持期距離を得ていたと考えられる。表 3 は支持脚の股関節，膝関節および足関節の角度変化量を示したものである。支持期において，支持脚の股関節は伸展し続け，膝関節および足関節は接地から支持期中間にかけて屈曲し，離地にかけて伸展する。F<sub>@750m</sub> において，股関節の伸展量は支持期前半において増加し，後半において減少していた。膝関節は，YEGO において屈曲量 (∠: -7.33deg)，伸

表 3 YEGO と BORZAKOVSKIY の支持脚の股関節，膝関節および足関節角度の変化量

			YEGO			BORZAKOVSKIY		
			Semi-Final		Final	Semi-Final		Final
			@550m	@750m	@750m	@550m	@750m	@750m
股関節	支持期前半伸展量	(deg)	13.84	16.93	22.74	18.18	11.52	21.46
	支持期後半伸展量	(deg)	44.37	47.35	34.79	29.42	49.43	40.13
膝関節	屈曲量	(deg)	12.35	13.52	6.19	15.35	8.06	7.84
	伸展量	(deg)	18.42	24.12	16.61	13.24	19.06	18.79
足関節	屈曲量	(deg)	7.19	14.50	8.13	8.97	9.10	14.96
	伸展量	(deg)	34.47	38.36	31.76	36.09	36.92	40.49

展量 ( $\Delta$ : -7.51deg) とともに減少し，BORZAKOVSKIYにおいて大きな変化はなかった。足関節は，YEGOにおいて屈曲量 ( $\Delta$ : -6.37deg)，伸展量 ( $\Delta$ : -6.60deg) とともに減少していたが，BORZAKOVSKIYにおいてともに増加していた(屈曲量 $\Delta$ : +5.87deg, 伸展量 $\Delta$ : +3.57deg)。このように， $F_{@750m}$ では短い支持期時間 (0.12s) の中で，支持脚膝関節の屈伸を小さくし，股関節を支持期前半に大きく伸展させるようなキック動作を行っていた。このことにより，大きな非支持期距離を得ることができたと推測される。

以上のことから，世界一流男子 800m 選手のラストスパート動作の特徴についてまとめると以下ようになる。ラストスパートでは，離地後に脚を素早く前方へ引き出して非支持期を短縮することでピッチを高めていた。また，さらに走速度が大きい場合には，支持脚膝関節の屈伸を小さくし，支持期前半において股関節を大きく伸展させるようなキック動作を行っていた。

### 3.5.2 男子 1500m

前述のレース分析から，男子 1500mのレースパターンの特徴として，3 周目以降フィニッシュにかけて走スピードが漸増する傾向にあることが挙げられた。本大会で最もよい記録 (3 分 34 秒 77) を出して優勝したLAGATも，決勝においてそのようなレースパターンの特徴を示した (図 12)。そこで，男子 1500m決勝におけるLAGATの 2 周目 (450m地点，以下 2<sup>nd</sup>)，3 周目 (850m地点，以下 3<sup>rd</sup>) および 4 周目 (1250m地点，以下 4<sup>th</sup>) の走動作を分析し，走スピードの変化に伴う動作の変化について検討する。

#### (1) 2<sup>nd</sup>から 3<sup>rd</sup>にかけての変化

表 4 は，LAGATの走速度，ストライド，ピッチについて示したものである。2<sup>nd</sup>から 3<sup>rd</sup> にかけて走速度は増大し ( $\Delta$ : +0.86m/s)，ストライド ( $\Delta$ : +0.14m)，ピッチ ( $\Delta$ : +0.20Hz) とともに

増大した。ストライドの増大は非支持期距離の

増大によるものであり ( $\Delta$ : +0.14m)，ピッチの増大は支持期時間の短縮によるものであった ( $\Delta$ : -0.02s)。表 5 は，LAGATの身体重心の運動に関するキネマティクスのパラメータについて示したものである。重心の上下動は絶対量 ( $\Delta$ : -0.99cm)，ストライドに対する割合 ( $\Delta$ : -0.75%) とともに減少し，離地角度も減少していた ( $\Delta$ : -0.68deg)。これらのことから，2<sup>nd</sup>では，短い支持期時間で身体がより前方へ進むようなキック動作が行なわれ，身体重心の上下動が小さく，より大きな非支持期距離を得る動作に変化していたと考えられる。

そこで，支持脚の動作に着目する。表 6 は支持脚の股関節，膝関節および足関節の角度変化量を示したものである。支持期において，支持脚の股関節は伸展し続け，膝関節および足関節は接地から支持期中間にかけて屈曲し，離地にかけて伸展する。2<sup>nd</sup>から 3<sup>rd</sup> にかけて，股関節の伸展量は支持期前半，後半ともに増加していた (前半 $\Delta$ : +2.04deg，後半 $\Delta$ : +2.15deg)。膝関節および足関節の屈曲量はともに減少し(膝関節 $\Delta$ : -1.95deg，足関節 $\Delta$ : -1.80deg)，伸展量は膝関節においてほとんど変わらず ( $\Delta$ : -0.17deg)，足関節において減少していた ( $\Delta$ : -14.63deg)。これらのことか

表 4 LAGAT の走速度，ストライド，ピッチ

		2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>
走速度	(m/s)	6.54	7.42	7.53
ストライド	(m)	1.96	2.10	2.13
支持期距離	(m)	0.80	0.79	0.99
前半距離	(m)	0.22	0.20	0.30
後半距離	(m)	0.58	0.59	0.69
非支持期距離	(m)	1.17	1.31	1.15
ピッチ	(Hz)	3.33	3.53	3.53
ステップ時間	(s)	0.300	0.283	0.283
支持期時間	(s)	0.125	0.108	0.133
前半時間	(s)	0.058	0.050	0.058
後半時間	(s)	0.067	0.058	0.075
非支持期時間	(s)	0.175	0.175	0.150

表 5 LAGAT の身体重心の運動に関するキネマティクスのパラメータ

		2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>
重心の上下動	(cm)	8.38	7.39	7.21
重心の上下動 / ストライド	(%)	4.27	3.52	3.38
DEC	(m/s)	0.13	0.12	0.24
DEC / 接地時の重心水平速度	(%)	2.07	1.70	3.18
離地角度	(deg)	6.86	6.18	5.33

表 6 LAGAT の支持脚の股関節、膝関節および足関節角度の変化量

			2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>
股関節	支持期前半伸展量	(deg)	11.22	13.26	17.37
	支持期後半伸展量	(deg)	40.13	42.28	48.30
膝関節	屈曲量	(deg)	6.58	4.63	10.30
	伸展量	(deg)	20.84	20.67	18.71
足関節	屈曲量	(deg)	8.12	6.32	16.15
	伸展量	(deg)	48.33	33.70	35.64

ら、LAGATは 3<sup>rd</sup> において、短い支持期時間の中で支持脚股関節を大きくかつ素早く伸展させ、膝および足関節の屈曲、伸展の小さいキック動作を行ない、大きな非支持期距離を得ていたと考えられる。また、前述のレース分析から、1500m走のレース中盤において高い走速度を維持していた者ほど、より大きなストライドを維持していたことが示された (図 10)。さらに、一般に走速度が 6~8m/s の範囲 (これは 1500m走における走速度の範囲に相当) において、走速度の増大に伴うストライドの増大には、非支持期距離の増大が大きく貢献することが知られている (阿江, 1992)。したがって、このようなLAGATの動作は、1500m走のレース中盤において大きなストライドにより大きな走速度を得るといふ走り方の 1 つのモデルとなり得ると考えられる。

#### (2) 3<sup>rd</sup>から 4<sup>th</sup>にかけての変化

3<sup>rd</sup>から 4<sup>th</sup>にかけて走速度はほとんど変わらず ( $\Delta$ : +0.11m/s)、ストライド ( $\Delta$ : +0.03m)、ピッチ ( $\Delta$ : 0.00Hz) にも大きな変化はみられなかった (表 4)。しかし、その内訳をみると、ストライドでは支持期距離が前後半ともに増大し (それぞれ  $\Delta$ : +0.10m)、非支持期距離が減少していた ( $\Delta$ : -0.16m)。一方、ピッチでは支持期時間が前後半ともに増大し (前半  $\Delta$ : +0.01s、後半  $\Delta$ : +0.02s)、非支持期時間が減少していた ( $\Delta$ : -0.03s)。このことは、4<sup>th</sup>では 3<sup>rd</sup>と走速度、ストライドおよびピッチは同じであるが、支持期の距離および時間が長く、一方で非支持期の距離および時間が短い動作に変化していたことを示している。

表 7 は、支持期における接地時および離地時の大腿、下腿および足の部分角度について示したものである。3<sup>rd</sup>から 4<sup>th</sup>にかけて、接地時の大腿角度 ( $\Delta$ : +4.79deg)、下腿角度 ( $\Delta$ : +9.92deg) は増大していた。離地時の大腿角度 ( $\Delta$ : -4.91deg) および下腿角度 ( $\Delta$ : -8.28deg) は減少していた。支持脚の関節角度の変化量をみると (表 6)、股関節の伸展量は支持期前半、後半とも増加し (前半  $\Delta$ : +4.11deg、後半  $\Delta$ : +6.02deg)、膝関節および足関節の屈曲量はともに増加し (膝関節  $\Delta$ : +5.67deg、足関節  $\Delta$ : +9.83deg) ていた。伸展量は膝関節において減少 ( $\Delta$ : -1.96deg)、足関節において増加していた ( $\Delta$ : +1.94deg)。このことは、4<sup>th</sup> では大腿および下腿がより後傾した姿勢で接地することで支持期前半距離が増大し、支持期前半では膝関節および足関節が大きく屈曲し、さらに股関節が大きく伸展する動作に変化したことを示している。そして、支持期後半では股関節と足関節が大きく伸展し、大腿および下腿がより前傾した姿勢で離地するようなキック動作に変化していたことを示すと考えられる。この支持脚の動作により、支持期の距離と時間が増大したと考えられる。

図 16 は回復脚の股関節および膝関節のトルク、角速度、トルクパワーについて示したものである。ここで、非支持期はTOからCFSまたはCTOからFSの局面に相当し、この局面において股関節および膝関節のトルク、トルクパワーのピークが生じている。3<sup>rd</sup>から 4<sup>th</sup>にかけてのピークの変化をみると、TOからCFSにおける股関節屈曲トルク ( $\Delta$ : -0.32Nm/kg) および正のトルクパワー ( $\Delta$ : +5.20W/kg)、膝関節の負のトルクパ

ワー ( $\Delta$ : -1.48W/kg) がそれぞれ増大していた。また、CTOからFSにおける股関節の伸展トルク ( $\Delta$ : +0.17Nm/kg) および正のトルクパワー ( $\Delta$ : +1.70W/kg), 膝関節の負のトルクパワー ( $\Delta$ : -3.32W/kg) もそれぞれ増大していた。さらに、FS直前の股関節伸展トルク ( $\Delta$ : +1.06Nm/kg) および膝関節屈曲トルク ( $\Delta$ : -1.86Nm/kg) も増大していた。これらのことは、4<sup>th</sup> では離地した脚を前方へ引き出す動作と、前方へ引き出された脚を接地に先立って降り戻す動作がより強調されていたことを示すと考えられる。すなわち、4<sup>th</sup> の非支持期においては、両脚

を前後に力強く挟み込むような、いわゆるシザーズがより強調された動作を行っていたと考えられ、このことが非支持期の距離と時間が短縮した要因であると推察される。

このように、3<sup>rd</sup>と4<sup>th</sup>では走速度、ストライド、ピッチは同じでも、異なる動作をしていたことがわかった。では、なぜこのように動作が異なっていたのかについて考察する。中距離走においては、様々なレースパターンが存在し、レース中時々刻々と変化する走速度に対してストライドとピッチも多様な変化を示す。したがって、中距離レース中において、同じ走速度であっても、レース

表 7 LAGAT の支持脚の大腿、下腿および足の部分角度

			2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>
大腿	接地時	(deg)	19.50	21.74	26.54
	離地時	(deg)	-29.23	-29.82	-34.73
下腿	接地時	(deg)	-9.76	-7.54	2.38
	離地時	(deg)	-44.24	-43.06	-51.34
足	接地時	(deg)	67.48	65.15	62.35
	離地時	(deg)	-7.21	2.25	-10.86

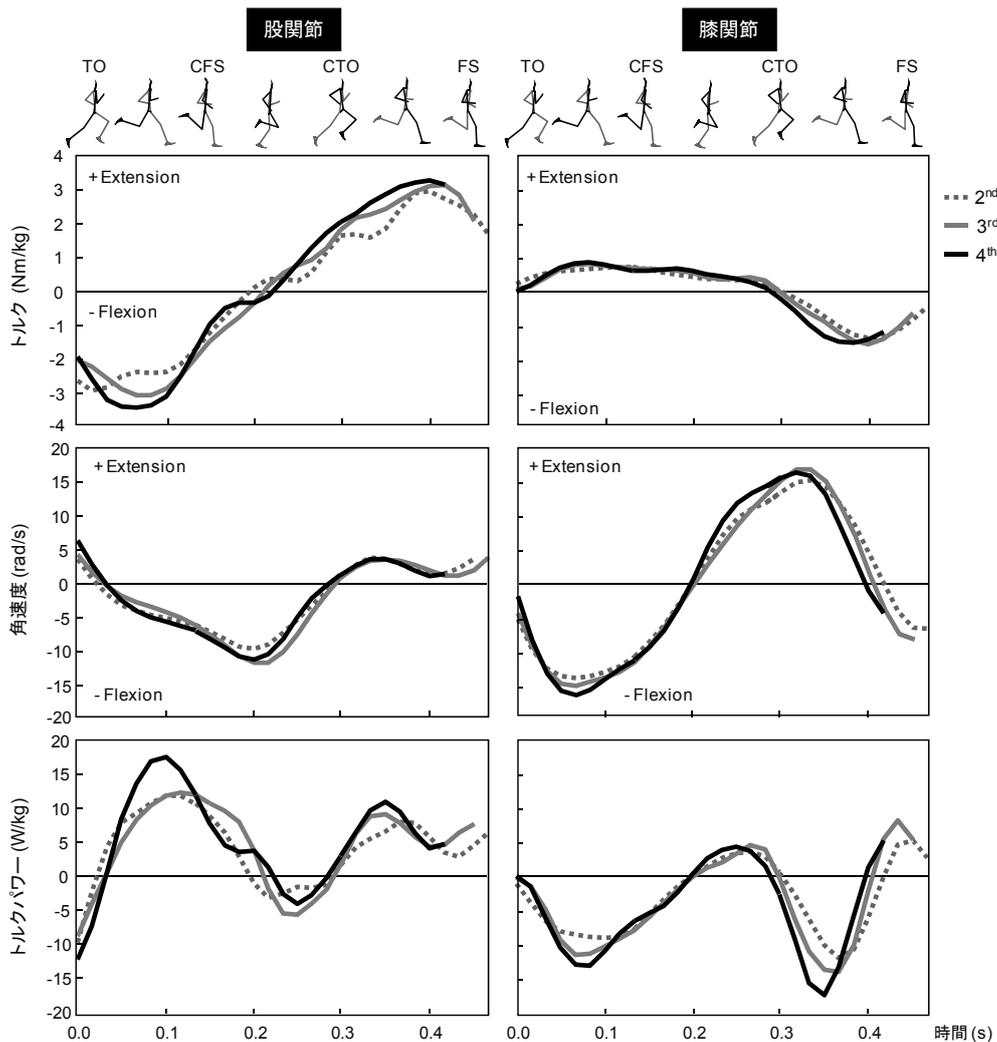


図 16 LAGAT の回復脚の股関節および膝関節のトルク，角速度，トルクパワー

パターンとレースの局面によって、ストライドとピッチが異なることがある。これまで短距離走や長距離走においては、レース後半の走速度の低下に伴い、支持期時間が増大し、ピッチが低下することが報告されている(岩井ら, 1997; 榎本と阿江, 2004)。しかし, 4<sup>th</sup>においてLAGATは, 支持期時間は増大していたが, 非支持期時間は短縮し, 結果としてピッチは維持されており, 低下はしていない。また, 中距離走のラストスパートやレース後半の走速度維持にはピッチを増大させることが重要であることが指摘されており(門野ら, 2008; 松尾ら, 1994, 1997; 杉田ら, 1994), 実際にLAGATは 1200m以降フィニッシュにかけてピッチが増大し続け, 走スピードも増大していた(図 12)。このことを考慮すると, 4<sup>th</sup>におけるLAGATの動作の変化は, 疲労の影響による変化というよりも, むしろ中距離走のラストスパート, すなわちピッチの増大に適応した変化であると解釈する方が妥当であろう。

以上のことから, LAGATの走動作の特徴をまとめると以下のようになる。レースの中盤(2<sup>nd</sup>から3<sup>rd</sup>)では, 短い支持期間の中で支持脚関節の屈伸動作を小さくしてキックを行ない, 大きな非支持期距離を獲得し, 高い走スピードを発揮していた。レース終盤(3<sup>rd</sup>から4<sup>th</sup>)では, 支持期に支持脚関節を大きく伸展させ, 非支持期において脚のシザース動作を強調し, 非支持期の距離と時間を短くすることでピッチを高め, ラストスパートに適応した動作を行っていた。

#### 4. おわりに

大阪大会における男子中距離走種目は, 800m, 1500mとも記録的には高くはなかったが, ラストスパート局面を中心にみられた位置取りやスパートのタイミングなどの戦術が非常に高度なものであったことが明らかとなった。男子 1500m優勝者の B.LAGAT (USA) は, 米国の陸上競技専門誌 Track & Field News (November, 2007) のインタビューの中で, 以下のようにコメントしている。"My coach, James Li, is a master strategist. We worked it (strategy) up this morning in my hotel room. So he told me, 'Just follow. ... You know what to do when it comes to 50m to go: Execute it, just go all out.'" つまり, 彼のコーチが中距離走の戦術についてよく理解していることや, 決勝が行なわれる日の朝に, 決勝レースの戦術について話し合っていたことなどが述べられている。このインタビューからわかるように, 選手は無策でレースに臨んでいるわけではない。中距離走において成功を収めるためには, 体力的に優れているだけでなく, ペース配分や戦術, そしてそれを可能にするための走動作などの技術的要因においても長けていることが不可欠であるといえよう。

#### 参考文献

- 阿江通良(1992)陸上競技のバイオメカニクス。(財)日本陸上競技連盟編 陸上競技指導教本 - 基礎理論編-(初版). 大修館書店:東京, pp.33-53.
- 阿江通良(1996)日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. Japanese Journal of Sports Science 15 (3): 155-162.
- 阿江通良, 鈴木美佐緒, 宮西智久, 岡田英孝, 平野敬靖(1994)世界一流スプリンターの100mレースパターンの分析—男子を中心に—. 鈴木秀幸, 小林寛道, 阿江通良 監修 世界一流陸上競技者の技術—第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス研究班報告書一. ベースボールマガジン社:東京, pp.14-28.
- 榎本靖士, 阿江通良(2004)バイオメカニクスからみた長距離走における疲労. バイオメカニクス研究, 8 (2): 112-119.
- 榎本靖士, 門野洋介(2008)世界陸上競技選手権大阪大会における中長距離レースのバイオメカニクスの分析とその活用. バイオメカニクス研究, 12 (2): 118-124
- Hanon, C. Leveque, J. M., Vivier, L., and Thomas, C. (2007) Oxygen uptake in the 1500 meters. New Studies in Athletics, 22 (1): 15-22.
- 岩井雅史, 市川博啓, 伊藤 章(1997)100m走における疾走速度遞減の要因. 第13回バイオメカニクス学会大会編集委員会 身体運動のバイオメカニクス, pp.173-177.
- 門野洋介, 阿江通良, 榎本靖士, 杉田正明, 森丘保典(2008)記録水準の異なる800m走者のレースパターン. 体育学研究, 53 (2): 247-263.
- 門野洋介, 榎本靖士(2007)中距離走種目の見どころ. 陸上競技学会誌, 6: 27-35.
- 松尾彰文, 杉田正明, 阿江通良, 小林寛道(1994)中長距離決勝におけるスピード, ピッチおよびストライドについて. 鈴木秀幸, 小林寛道, 阿江通良 監修 世界一流陸上競技者の技術—第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス研究班報告書一. ベースボールマガジン社:東京, pp.92-111.
- 松尾彰文, 杉田正明, 阿江通良, 小林寛道(1997)アジア大会における中距離走者のスピード, ピッチおよびストライドの変化. 鈴木秀幸, 小林寛道, 阿江通良 監修 アジア一流陸上競技者の技術—第12回広島アジア大会陸上競技選手権大会バイオメカニクス研究班報告書一. (財)日本陸上競技連盟, pp.83-97.
- 森丘保典, 榎本靖士, 杉田正明, 松尾彰文, 阿江通良, 小林寛道(2005)陸上競技400mハードル走における一流男子選手のレースパターン分析. バイオメカニクス研究, 9 (4): 196-204.
- 杉田正明, 松尾彰文, 阿江通良, 伊藤 章, 小林寛道(1994)男子800mにおけるスピード・ピ

付録1 男子 800m の各組における先頭走者の 400m 通過タイムおよびフィニッシュタイム

		1組	2組	3組	4組	5組	6組	平均	SD
予選	400m	51.27	51.55	52.04	51.08	52.23	51.97	51.69	0.46
	800m	1:46.00	1:46.00	1:45.56	1:45.52	1:45.58	1:45.25	1:45.65	0.29
準決勝	400m	50.33	51.57	51.42				51.11	0.68
	800m	1:44.54	1:44.92	1:45.12				1:44.86	0.29
決勝	400m	55.08							
	800m	1:47.09							

付録2 男子 1500m の各組における先頭走者の 400m 毎の通過タイムおよびフィニッシュタイム

		1組	2組	3組	平均	SD
予選	400m	1:00.94	1:00.06	1:01.17	1:00.72	00.59
	800m	2:02.12	2:02.44	2:04.75	2:03.10	01.44
	1200m	3:00.75	2:59.49	3:01.88	3:00.71	01.20
	1500m	3:40.65	3:38.65	3:41.33	3:40.21	01.39
準決勝	400m	1:02.94	57.95		1:00.45	03.53
	800m	2:07.87	2:01.73		2:04.80	04.34
	1200m	3:03.74	3:02.42		3:03.08	00.93
	1500m	3:42.39	3:40.53		3:41.46	01.32
決勝	400m	58.63				
	800m	1:58.08				
	1200m	2:55.21				
	1500m	3:34.77				

付録3 男子 800m の Top および Low における通過タイム, 走スピード, ストライド, ピッチの平均および標準偏差

		120m	200m	300m	400m	500m	600m	700m	800m
通過タイム	Top	15.19 ± 0.31	25.19 ± 0.56	38.45 ± 0.83	52.07 ± 0.81	1:05.50 ± 0.82	1:18.81 ± 0.73	1:32.16 ± 0.57	1:45.50 ± 0.37
	Low	15.28 ± 0.36	25.36 ± 0.46	38.91 ± 0.87	52.72 ± 1.26	1:06.28 ± 1.37	1:19.67 ± 1.30	1:33.07 ± 0.92	1:46.66 ± 0.45
走スピード (m/s)	Top	7.90 ± 0.17	8.00 ± 0.26	7.55 ± 0.22	7.34 ± 0.13	7.44 ± 0.12	7.52 ± 0.12	7.49 ± 0.20	7.49 ± 0.26
	Low	7.85 ± 0.19	7.96 ± 0.26	7.42 ± 0.32	7.25 ± 0.25	7.38 ± 0.12	7.46 ± 0.11	7.44 ± 0.26	7.38 ± 0.41
ストライド (m)	Top	2.14 ± 0.07	2.31 ± 0.07	2.24 ± 0.06	2.21 ± 0.07	2.19 ± 0.08	2.21 ± 0.08	2.14 ± 0.10	2.11 ± 0.08
	Low	2.13 ± 0.09	2.29 ± 0.09	2.20 ± 0.08	2.19 ± 0.08	2.17 ± 0.08	2.19 ± 0.07	2.14 ± 0.06	2.10 ± 0.08
ピッチ (Hz)	Top	3.69 ± 0.15	3.47 ± 0.13	3.38 ± 0.13	3.32 ± 0.09	3.39 ± 0.12	3.41 ± 0.11	3.50 ± 0.12	3.55 ± 0.15
	Low	3.69 ± 0.16	3.47 ± 0.15	3.38 ± 0.14	3.30 ± 0.13	3.40 ± 0.11	3.41 ± 0.11	3.49 ± 0.12	3.52 ± 0.17

付録4 男子 1500m の Top および Low における通過タイム, 走スピード, ストライド, ピッチの平均および標準偏差

		200m	400m	600m	800m	1000m	1200m	1400m	1500m
通過タイム	Top	28.67 ± 0.60	59.74 ± 0.73	1:30.36 ± 0.99	2:00.41 ± 2.09	2:29.32 ± 2.48	2:57.42 ± 2.08	3:23.84 ± 1.91	4:37.09 ± 2.04
	Low	28.91 ± 1.03	59.59 ± 1.49	1:30.96 ± 0.91	2:02.33 ± 0.44	2:33.27 ± 0.70	3:01.82 ± 1.05	3:27.97 ± 0.56	4:40.92 ± 0.28
走スピード (m/s)	Top	6.98 ± 0.15	6.44 ± 0.06	6.53 ± 0.08	6.67 ± 0.27	6.93 ± 0.11	7.12 ± 0.11	7.57 ± 0.10	7.55 ± 0.19
	Low	6.93 ± 0.25	6.52 ± 0.11	6.38 ± 0.13	6.38 ± 0.12	6.47 ± 0.21	7.01 ± 0.11	7.65 ± 0.23	7.73 ± 0.27
ストライド (m)	Top	2.04 ± 0.07	2.01 ± 0.07	2.02 ± 0.08	2.03 ± 0.09	2.09 ± 0.08	2.10 ± 0.07	2.13 ± 0.08	2.10 ± 0.08
	Low	2.02 ± 0.11	2.01 ± 0.11	1.95 ± 0.11	1.93 ± 0.11	1.93 ± 0.13	2.06 ± 0.11	2.16 ± 0.13	2.16 ± 0.12
ピッチ (Hz)	Top	3.44 ± 0.14	3.21 ± 0.11	3.23 ± 0.12	3.28 ± 0.13	3.32 ± 0.12	3.40 ± 0.11	3.56 ± 0.11	3.60 ± 0.13
	Low	3.44 ± 0.17	3.25 ± 0.16	3.28 ± 0.16	3.32 ± 0.17	3.36 ± 0.19	3.41 ± 0.17	3.56 ± 0.19	3.60 ± 0.19

付録5 男子 800m 決勝における上位3選手の通過タイム, 走スピード, ストライド, ピッチ

			120m	200m	300m	400m	500m	600m	700m	800m
通過タイム	1	A.K.YEGO (KEN)	14.88	25.76	40.44	55.24	1:19.17	1:22.47	1:34.93	1:47.09
	2	G.REED (CAN)	14.90	25.63	40.22	55.08	1:19.85	1:22.85	1:34.69	1:47.10
	3	Y.BORZAKOVSKIY (RUS)	15.65	26.06	40.69	55.52	1:19.35	1:22.57	1:35.33	1:47.39

			0~120m	120~200m	200~300m	300~400m	400~500m	500~600m	600~700m	700~800m
走スピード (m/s)	1	A.K.YEGO (KEN)	8.06	7.35	6.81	6.76	7.18	7.52	8.02	8.22
	2	G.REED (CAN)	8.05	7.46	6.85	6.73	7.26	7.46	8.03	8.06
	3	Y.BORZAKOVSKIY (RUS)	7.67	7.68	6.83	6.74	7.23	7.57	7.84	8.29
ストライド (m)	1	A.K.YEGO (KEN)	2.13	2.16	2.06	2.05	2.10	2.18	2.16	2.13
	2	G.REED (CAN)	2.19	2.23	2.13	2.13	2.20	2.23	2.17	2.15
	3	Y.BORZAKOVSKIY (RUS)	2.17	2.33	2.18	2.16	2.22	2.21	2.19	2.17
ピッチ (Hz)	1	A.K.YEGO (KEN)	3.79	3.41	3.31	3.29	3.43	3.44	3.72	3.87
	2	G.REED (CAN)	3.68	3.35	3.22	3.15	3.30	3.35	3.70	3.75
	3	Y.BORZAKOVSKIY (RUS)	3.53	3.29	3.14	3.12	3.25	3.43	3.58	3.82

付録6 男子 1500m 決勝における上位3選手の通過タイム, 走スピード, ストライド, ピッチ

			100m	200m	300m	400m	500m	600m	700m	800m
通過タイム	1	B.LAGAT (USA)	13.65	28.01	43.56	58.93	1:14.04	1:29.34	1:34.62	1:58.69
	2	R.RAMZI (BRN)	14.08	28.50	43.91	59.31	1:14.41	1:29.62	1:34.90	1:58.82
	3	S.K.KORIR (KEN)	13.55	27.86	43.36	58.74	1:13.91	1:29.21	1:34.40	1:58.52

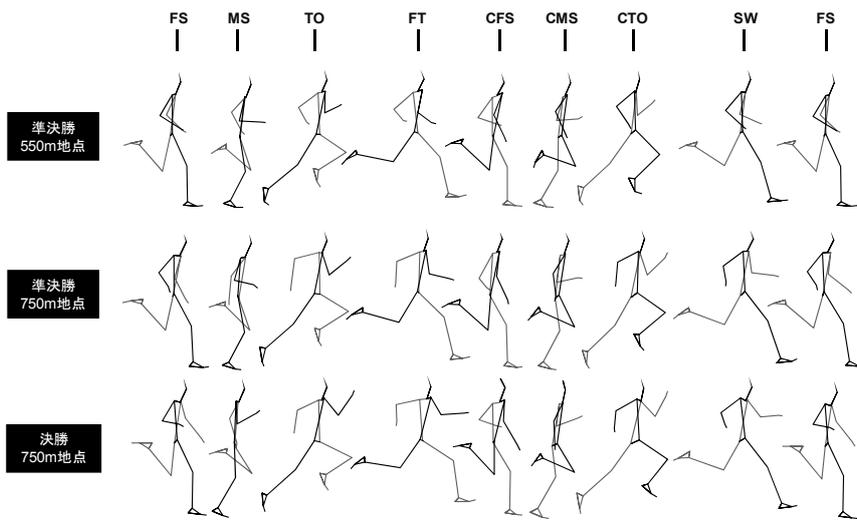
			900m	1000m	1100m	1200m	1300m	1400m	1500m
通過タイム	1	B.LAGAT (USA)	2:12.25	2:27.10	2:41.64	2:55.49	3:08.87	3:22.12	3:44.77
	2	R.RAMZI (BRN)	2:12.42	2:27.21	2:41.81	2:55.58	3:08.97	3:22.05	3:35.00
	3	S.K.KORIR (KEN)	2:12.20	2:27.13	2:41.71	2:55.46	3:08.86	3:21.49	3:35.04

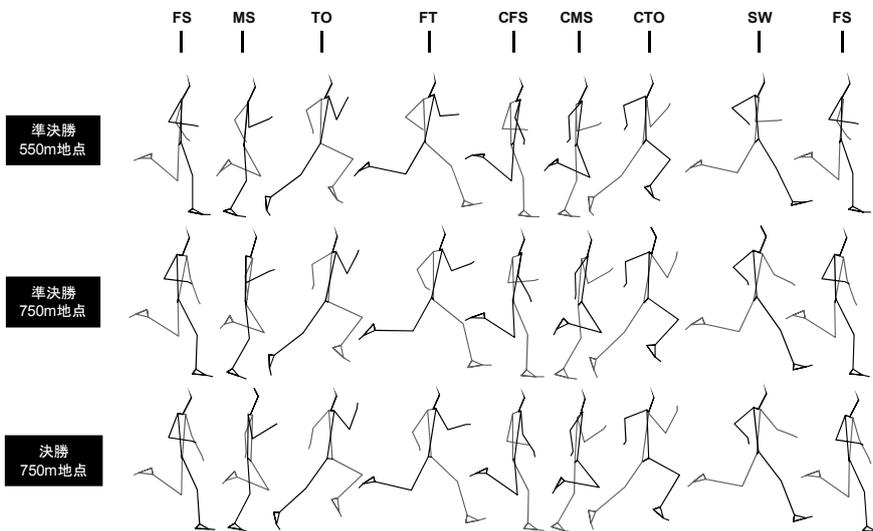
			0~100m	100~200m	200~300m	300~400m	400~500m	500~600m	600~700m	700~800m
走スピード (m/s)	1	B.LAGAT (USA)	7.33	6.96	6.43	6.51	6.62	6.54	6.54	7.11
	2	R.RAMZI (BRN)	7.10	6.94	6.49	6.49	6.62	6.57	6.54	7.19
	3	S.K.KORIR (KEN)	7.38	6.99	6.45	6.50	6.59	6.54	6.58	7.09
ストライド (m)	1	B.LAGAT (USA)	1.98	2.07	1.96	1.93	1.96	1.95	1.95	1.98
	2	R.RAMZI (BRN)	1.94	2.08	2.01	2.06	2.09	2.07	2.05	2.06
	3	S.K.KORIR (KEN)	1.88	2.07	1.99	1.93	1.96	1.96	1.98	2.03
ピッチ (Hz)	1	B.LAGAT (USA)	3.70	3.37	3.28	3.37	3.37	3.35	3.35	3.59
	2	R.RAMZI (BRN)	3.65	3.33	3.22	3.15	3.17	3.17	3.19	3.49
	3	S.K.KORIR (KEN)	3.92	3.38	3.24	3.37	3.37	3.33	3.33	3.48

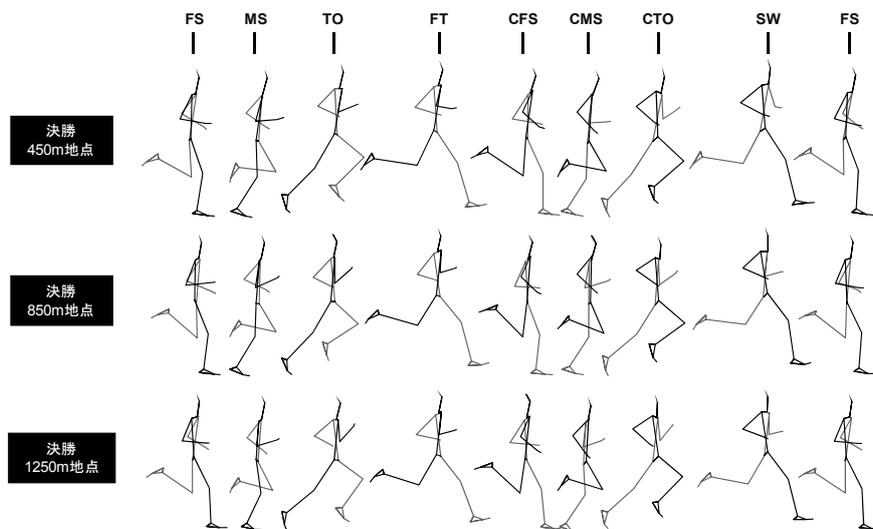
			800~900m	900~1000m	1000~1100m	1100~1200m	1200~1300m	1300~1400m	1400~1500m
走スピード (m/s)	1	B.LAGAT (USA)	7.37	6.73	6.87	7.22	7.47	7.55	7.90
	2	R.RAMZI (BRN)	7.35	6.76	6.85	7.27	7.46	7.65	7.72
	3	S.K.KORIR (KEN)	7.31	6.70	6.86	7.27	7.46	7.65	7.63
ストライド (m)	1	B.LAGAT (USA)	2.10	1.99	2.02	2.05	2.07	2.04	2.12
	2	R.RAMZI (BRN)	2.15	2.09	2.11	2.17	2.15	2.14	2.13
	3	S.K.KORIR (KEN)	2.06	1.99	2.03	2.08	2.08	2.03	2.05
ピッチ (Hz)	1	B.LAGAT (USA)	3.51	3.39	3.41	3.53	3.61	3.70	3.72
	2	R.RAMZI (BRN)	3.43	3.23	3.24	3.35	3.46	3.57	3.63
	3	S.K.KORIR (KEN)	3.55	3.37	3.39	3.51	3.59	3.77	3.72



付録7 男子800m優勝 A.K. YEGO (KEN) のスティックピクチャ



付録8 男子800m第3位 Y. BORZAKOVSKIY (RUS) のスティックピクチャ



付録9 男子1500m優勝 B. LAGAT (USA) の決勝におけるスティックピクチャ

# 世界一流女子中距離走者のレースパターンと走動作

## The race pattern and running motion of the world elite female middle-distance runners

門野 洋介<sup>1)</sup>, 榎本 靖士<sup>2)</sup>, 鈴木 雄太<sup>1)</sup>  
 芦澤 宏一<sup>1)</sup>, 法元 康二<sup>3)</sup>, 小山 桂史<sup>4)</sup>

1) 筑波大学大学院 2) 京都教育大学 3) 茨城県立医療大学 4) 順天堂大学大学院

Hirosuke KADONO<sup>1)</sup>, Yasushi ENOMOTO<sup>2)</sup>, Yuta SUZUKI<sup>1)</sup>,  
 Hirokazu ASHIZAWA<sup>1)</sup>, Koji HOGA<sup>3)</sup>, Keiji KOYAMA<sup>4)</sup>

1) Graduate School of University of Tsukuba, 2) Kyoto University of Education  
 3) Ibaraki Prefectural University of Health Science, 4) Graduate School of Juntendo University

### 1. はじめに

これまで、日本陸上競技連盟科学委員会は日本国内の主要競技会における中距離走種目において、主に日本人選手の通過タイム、走スピード、ストライド、ピッチ、さらには走動作などのバイオメカニクスデータを収集してきた。しかし、1991年の第3回世界陸上競技選手権東京大会、そして1994年の第12回広島アジア大会以来、外国の世界一流選手のデータはほとんど得られていない。したがって、世界一流中距離走者のレースパターンや走動作に関する資料は少なく、その特徴についてはあまり知られていない。また、女子選手に関するデータは、男子に比べて少ないのが現状である。本稿では、第11回IAAF世界陸上競技選手権大阪大会（以下、大阪大会）における女子800mおよび1500m競走における世界一流選手のレースパターンおよび走動作を分析し、その特徴について明らかにすることを目的とした。

### 2. 方法

方法は、レース分析および動作分析ともに前章の男子中距離走種目と同様の方法を用いた。したがって、方法については前章を参照されたい。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 記録の特徴

表1は、女子800mおよび女子1500mにおけるラウンド通過者および敗退者の平均記録、シーズンベスト記録（以下、SB）に対する達成率（以下、%SB）、最高および最低記録について示したものである。また、図1は、各種目における記録の分布について示したものである。ここではこれらの結果をもとに、記録の観点から各種目の特徴について検討する。

表1 女子800mおよび1500mのラウンドにおける記録

女子800m							
	予選		準決勝		決勝		
	敗退	通過	敗退	通過		敗退	通過
n	21	24	16	8	8		
平均記録 ± SD	2:09.13 ± 10.53	2:00.41 ± 00.67	2:00.73 ± 02.03	1:57.92 ± 01.13	1:58.17 ± 01.55		
%SB ± SD (%)	98.7 ± 1.5	99.4 ± 0.9	99.3 ± 1.7	101.0 ± 1.1	99.8 ± 1.0		
最高記録	2:01.00	1:58.95	1:58.62	1:56.17	1:56.04		
最低記録	2:36.14	2:01.81	2:06.97	1:59.32	2:00.90		
女子1500m							
	予選		準決勝		決勝		
	敗退	通過	敗退	通過		敗退	通過
n	13	24	12	12	12		
平均記録 ± SD	4:30.89 ± 33.38	4:10.42 ± 00.69	4:13.90 ± 05.12	4:09.17 ± 05.42	4:04.50 ± 05.00		
%SB ± SD (%)	94.8 ± 5.6	97.8 ± 1.1	97.2 ± 2.1	97.7 ± 2.4	99.5 ± 1.3		
最高記録	4:11.51	4:09.05	4:08.02	4:03.84	3:58.75		
最低記録	5:45.99	4:11.24	4:21.50	4:15.43	4:14.00		

『通過』と『敗退』に有意差あり \*: $p < 0.05$  \*\*: $p < 0.01$  \*\*\*: $p < 0.001$

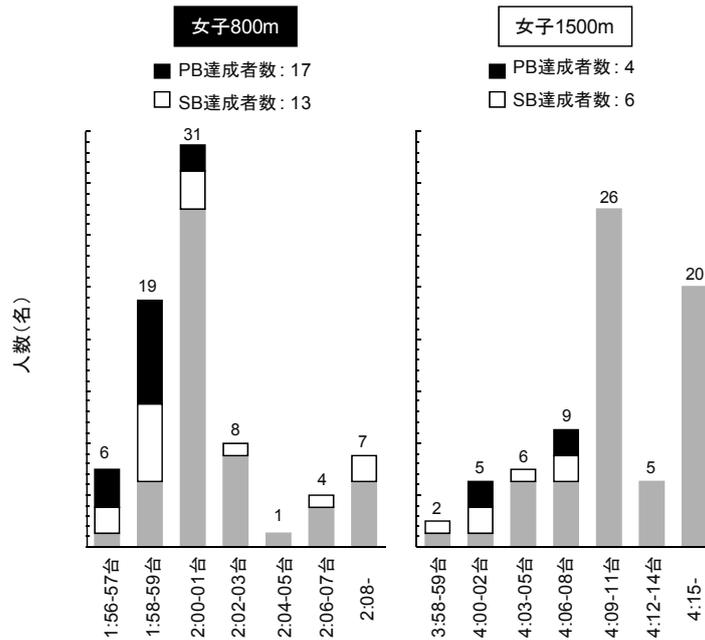


図1 女子800mおよび1500mにおける記録の分布

### (1) 女子800m

女子800mにおいて、予選、準決勝ともに通過者の平均記録が有意に優れており(予選:p<0.001, 準決勝:p<0.01), %SBも有意に高かった(p<0.05). 決勝進出者8名のうち、3名が自己最高記録(以下, PB), 3名がSBを準決勝において出していた(%SB:101.0±1.1%). しかし、準決勝敗退者の%SBも99.3±1.7%と決して低くはなく、中には1分58秒台のPBを出したにもかかわらず敗退した選手が2名いた。また、記録の分布をみると(図1), 1分56秒~2分01秒の高いレベルでの分布が多く, SB, PB達成者もその範囲に集中しており, SB, PB達成者数が延べ30名と男子も併せた中距離走種目の中で圧倒的に多かった。決勝はJ.JEPKOSGEI(KEN)が1分56秒04のPBおよび大会最高記録で制した。これらのことから, 女子800mは記録的に非常にレベルが高く, 特に決勝進出者においてはベストかそれに限りなく近いパフォーマンスを発揮していたといえよう。

### (2) 女子1500m

女子1500mにおいて、予選、準決勝ともに通過者の平均記録が有意に優れており(予選:p<0.001, 決勝:p<0.05), 予選においては%SBも有意に高かった(p<0.05). 決勝進出者の12名にはランキング1位から6位(4位は除く)までの選手が含まれており, 決勝の平均記録(4分04秒50±05秒00)および%SB(99.5±1.3%)は全てのラウンドの中で最も高かった。決勝はランキング2位のM.Y.JAMAL(BRN)が3分58秒75

のSBで制し, この記録が大会最高記録であった。これらのことから, 女子1500mは, ランキング上位者が予選、準決勝とほぼ順当に勝ち進み, 決勝はその実力が最も発揮されたレースであったといえよう。

### 3.2 レースパターンの類型化とその特徴

ここでは、レースをいくつかの小区間に分け, その区間における平均走スピードの変化をみることで、レース中の走スピードの変化すなわちレースパターンを定性的に類型化し, その特徴について検討する。

#### (1) 女子800m

図2は、女子800mの各ラウンド、各組における先頭走者の200m毎の通過タイムから各200m区間の平均走スピードを算出し, その変化を示したものである。図3は、類型化したパターンの分布について示したものである。図4は、パターン別にみたSB, PB達成者の分布について示したものである。なお、図2中のシンボル(●▲○△)は類型化されたそれぞれのパターンを表し, 図3, 4と対応している。

女子800mにおいては、全てのレースにおいて0~200m区間(以下, S1)から200~400m区間(以下, S2)にかけて走スピードが減少していた(図2)。これは、前章の男子800mと同様の結果であり, 女子800mにおいても, S1の走スピードの大きさにかかわらずS2では走スピードが減少していたことを示している。したがって、女子800mのレースパターンの類型化は, S1以降, す

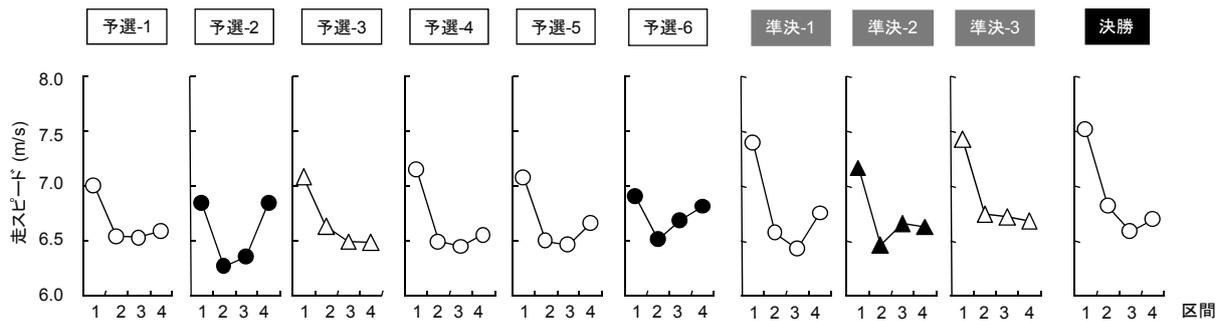


図2 女子800mにおける各200m区間の平均走スピードの変化

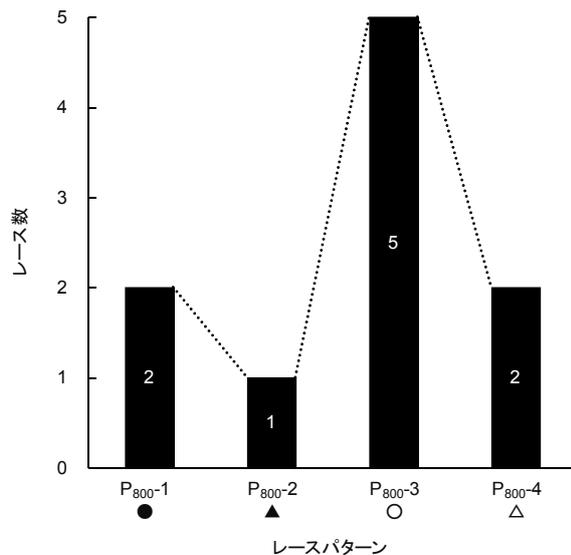


図3 女子800mにおけるレースパターンの分布

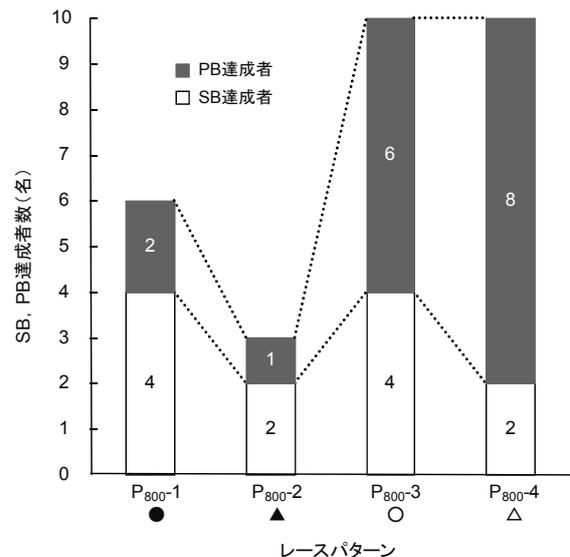


図4 女子800mにおけるレースパターン別にみたPB, SB達成者の分布

なわち S2, 400~600m 区間 (以下, S3) および 600~800m 区間 (以下, S4) の走スピードの変化をみることにより行なった. その結果, 以下の4つのパターンに分類することができた.

まず1つめのパターン (以下, P<sub>800-1</sub>) は, S2 から S3, そして S3 から S4 にかけて加速するパターンである (図2中●). このパターンは2レース存在した (図3).

2つめのパターン (以下, P<sub>800-2</sub>) は, S2 から S3 にかけて加速し, S3 から S4 にかけて減速するパターンである (図2中▲). これには準決勝第2組のみ該当し, 4つのパターンのうち最も少なかった (図3).

3つめのパターン (以下, P<sub>800-3</sub>) は, S2 から S3 にかけて減速し, S3 から S4 にかけて加速するパターンである (図2中○). 全レースの半数 (5レース) がこのパターンであり, 4パターンのうち最も多かった (図3). また, 延べ4名がシーズン最高記録 (以下, SB) を, 6名が自己最高記録 (以下, PB) を P<sub>800-3</sub> のパターンにおいて出しており (図4), 優勝者の JEPKOSGEI も決勝

において1分56秒04のPBおよび大会最高記録を出している.

4つめのパターン (以下, P<sub>800-4</sub>) は, S2 から S3, そして S3 から S4 にかけて減速するパターンである (図2中△). 2レースがこのパターンであった (図3). また, 2名がSBを, 8名がPBを P<sub>800-4</sub> のパターンにおいて出しており, JEPKOSGEI も準決勝第3組において1分56秒17のPBを出している.

これらをまとめると, 女子800mのレースパターンの特徴は以下のようなになるであろう. P<sub>800-3</sub> (○) が最も多く, SBまたはPB達成者数が10名と P<sub>800-4</sub> と並んで最も多かった. 優勝者の JEPKOSGEI は決勝において P<sub>800-3</sub> のパターンにおいてPBを出した. また, P<sub>800-4</sub> においてもSBまたはPB達成者が10名と最も多かった.

## (2) 女子1500m

図5は, 女子1500mの各ラウンド, 各組における先頭走者の400m毎の通過タイムから各400m区間 (1200~1500m区間については300m)

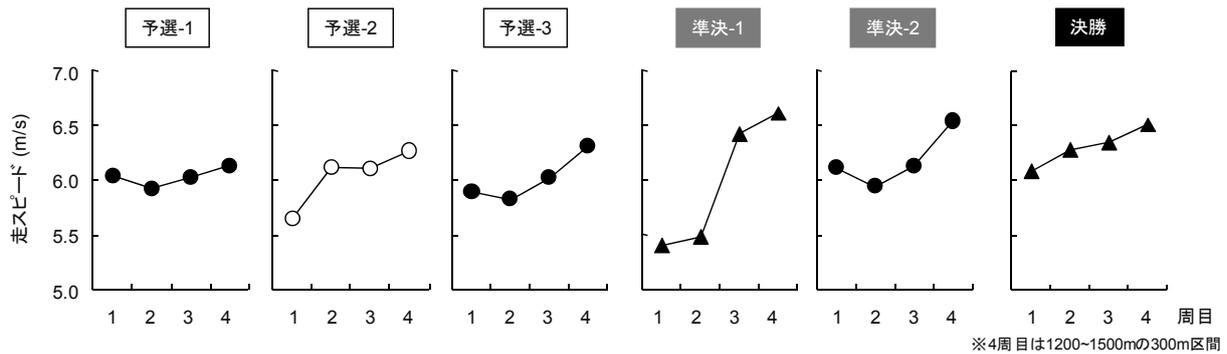


図5 女子 1500m における各週の平均走スピードの変化

の平均走スピードを算出し、その変化を示したも

予選第2組のみがこのパターンであった。

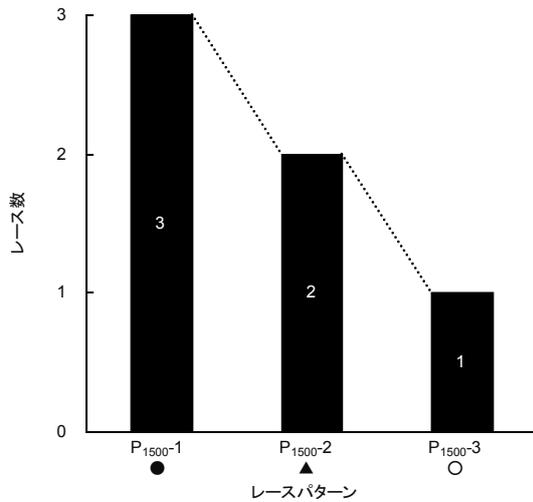


図6 女子 1500m におけるレースパターンの分布

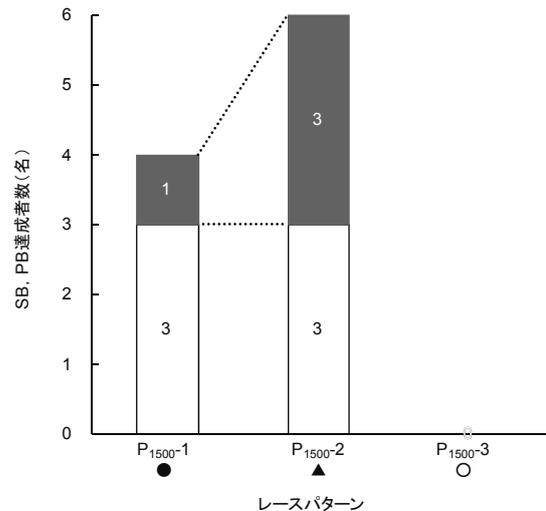


図7 女子 1500m におけるレースパターン別に見た PB, SB 達成者の分布

のである。図6は、類型化したパターンの分布について示したものである。図7は、パターン別に見た SB, PB 達成者の分布について示したものである。女子 1500m は以下の3つのパターンに分類することができた。

1 つめのパターン (以下、P<sub>1500</sub>-1) は、1 周目 (以下、L1) から 2 周目 (以下、L2) にかけて減速し、3 周目 (以下、L3)、4 周目 (以下、L4) と加速するパターンである (図5中●)。全レースの半数 (3 レース) がこのパターンであった (図6)。

2 つめのパターン (以下、P<sub>1500</sub>-2) は、L1 から L4 にかけて加速し続けるパターンである (図5中▲)。2 レースがこのパターンであった (図6)。3 名が SB を、3 名が PB を P<sub>1500</sub>-2 のパターンにおいて出しており、女子 1500m 優勝者の JAMAL は決勝において P<sub>1500</sub>-2 のパターンにおいて SB および大会最高記録を出した。

3 つめのパターン (以下、P<sub>1500</sub>-3) は、L1 から L2 にかけて加速、L2 から L3 は維持、L3 から L4 にかけて加速するパターンである。(図5中○)。

これらのことをまとめると、女子 1500m のレースパターンの特徴は以下になるであろう。P<sub>1500</sub>-1 (●) が最も多く、SB および PB 達成者は P<sub>1500</sub>-2 が最も多かった。また、全てのパターンに共通する特徴は、3 周目以降減速することではなく、フィニッシュにかけて走スピードが漸増する傾向にあることである。門野と榎本 (2007) は、2003 年世界選手権パリ大会、2004 年オリンピックアテネ大会および 2005 年世界選手権ヘルシンキ大会のレース分析を行ない、女子 1500m の予選や準決勝においては後半 700m (3 周目以降) において走スピードが漸増する傾向がみられたと報告している。大阪大会においても、彼らの報告と同様の傾向がみられたことから、3 周目以降において走スピードが漸増するというパターンは、女子 1500m のレースパターンの特徴といえるだろう。また、これは前章の男子 1500m のレースパターンと特徴と同じである。

### 3.3 記録からみた走スピード、ストライド、ピッチの特徴

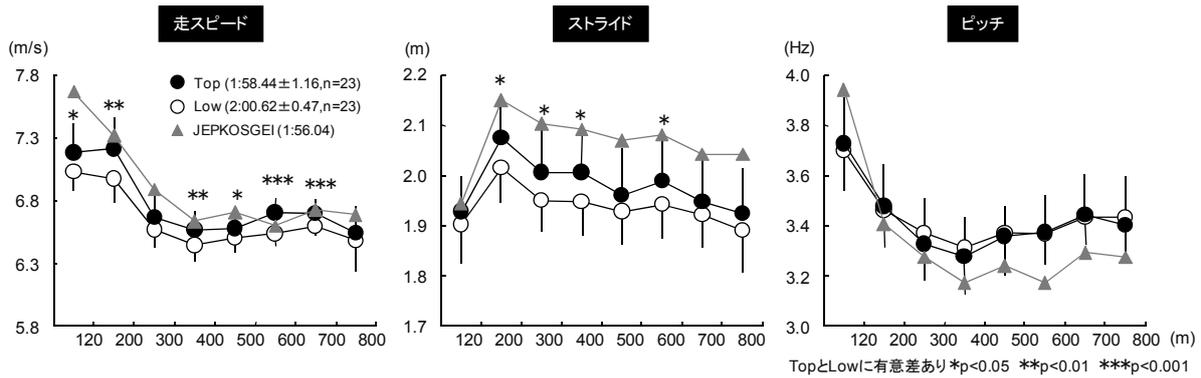


図8 女子800mにおける記録水準別および大会最高記録者の走スピード、ストライドおよびピッチの変化

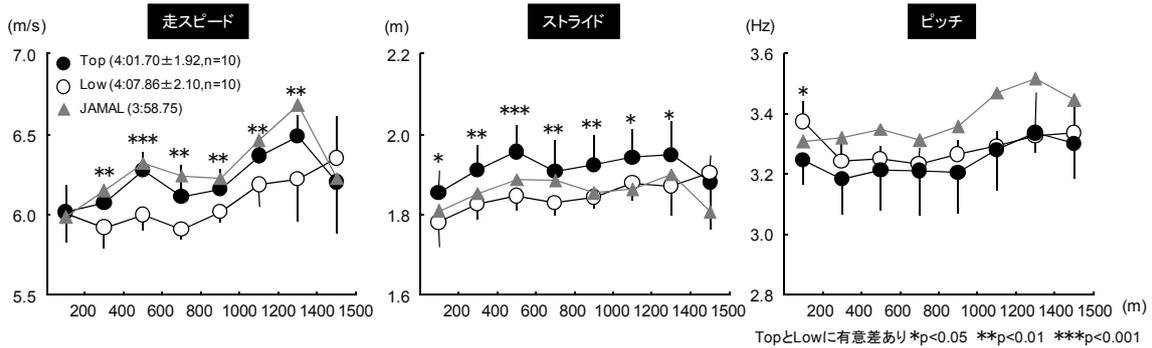


図9 女子1500mにおける記録水準別および大会最高記録者の走スピード、ストライドおよびピッチの変化

ここでは、記録によって上位群（以下、Top）と下位群（以下、Low）に分け、記録からみた走スピード、ストライド、ピッチの特徴について検討する。なお、大会最高記録を出した選手も加え、その特徴についても検討する。

#### (1) 女子800m

女子800mは、1分56秒～59秒台の選手23名をTop（1分58秒44±1秒16）、2分00秒～04秒台の選手23名をLow（2分00秒62±0秒47）とした。図8は、Top（図中●）、Low（図中○）および大会最高記録（1分56秒04）を出したJEPKOSGEI（図中▲）の走スピード、ストライド、ピッチの変化を示したものである。

走スピードの変化を概観すると、スタートで加速して0～120m区間または120～200m区間において最高走スピードに達し、200～300m区間で急激に減少し、その後Lowではフィニッシュまでほぼ維持、Topでは500～600m区間においてわずかに増大する傾向を示した。走スピードは全ての区間においてTopが大きく、0～200mのレース序盤、300～700mのレース中盤において有意差がみられたが、ラスト100mにおいて有意差はみられなかった。ストライドの変化を概観すると、120～200m区間で最大となり、その後500mにかけて減少し、500～600m区間でわずかに増大し、600～800mで再び減少する傾向を示し、これは前章

で述べた男子と同様の傾向であった。ストライドは全ての区間においてTopの方が大きく、120～400m、500～600m区間において有意差がみられた（ $p<0.05$ ）。ピッチの変化を概観すると、0～120m区間で最大となり、その後400mにかけて減少し、後半の400mにおいては、男子程ではないがやや漸増する傾向を示した。ピッチは、0～120m区間においてはTopの方が、200～400mおよび700～800m区間においてはLowの方がわずかに大きかったが、有意差はみられなかった。

大会最高記録を出したJEPKOSGEIの特徴は、まず0～120mのスタートにおいてピッチを高めて大きく加速している点であろう。そして、400mにかけてなだらかに減速し、後半の400mにおいては、400～500m区間ではストライドを縮めてピッチを増大させ、500～600m区間ではストライドを増大させてピッチを減少させ、600～700m区間では再びストライドを縮めてピッチを増大させている。このように、わずかではあるが100m毎にストライドとピッチがトレードオフするように変化していた。また、ピッチが増大している区間では走スピードが増大し、反対にストライドが増大している区間では走スピードが減少している点は興味深い。このように、JEPKOSGEIは、スタートで大きく加速し、レース後半においてはストライドとピッチを巧みにコントロールしながら走っていたと考えられる。さらに、ストライ

ドが非常に大きい点（ストライド型走法）も JEPKOSGEI の特徴の 1 つであろう。

これらのことをまとめると、女子 800m における記録からみた走スピード、ストライド、ピッチの特徴は以下になるであろう。Top はストライドが大きく、0~200m のレース序盤および 300~700m のレース中盤において高い走スピードを発揮または維持していた。大会最高記録を出した JEPKOSGEI は、スタートでピッチを高めて大きく加速し、レース後半においてはストライドとピッチを巧みにコントロールしながら走スピードを維持していた。

また、先に述べたように、女子 800m は SB、PB 達成者が非常に多く、なおかつそれはレベルの高い範囲に集中していた（図 1）。門野ら（2008）は、男子 800m 走者が自己記録あるいはそれに限りなく近い記録を出した時のレースパターンは、記録水準に関係なくほぼ同じであったことを明らかにし、そこからよい記録を出すためのペース配分の指標を提案している。しかし、女子については検討しておらず、女子のレースパターンに関する知見は男子に比べて少ない。したがって、ここで検討した大阪大会の女子 800m における Top や Low、そして JEPKOSGEI のレースパターンは、女子 800m 選手が優れた記録を出すためのレースパターンの 1 つのモデルとなり得ると考えられる。

## (2) 女子 1500m

女子 1500m は、記録が 3 分 58 秒~4 分 03 秒台の選手 10 名を Top、4 分 04 秒~09 秒台の選手 10 名を Low とした。図 9 は、Top（図中●）、Low（図中○）および大会最高記録（3 分 58 秒 75）を出した JAMAL（図中▲）の走スピード、ストライド、ピッチの変化を示したものである。

走スピードの変化を概観すると、Top ではスタートから 600m にかけて漸増し、600~800m 区間において一度減少した後、1400m にかけて再び漸増し、1400~1500m 区間において減少する傾向を示した。Low ではスタートから 800m までは大きな増減がなく、その後フィニッシュにかけて漸増する傾向を示した。走スピードは 200~1400m のレースの大部分において Top が有意に大きかった。しかし、1400~1500m 区間においては反対に Low が大きかった。ストライドの変化を概観すると、スタートから 600m にかけて漸増し、600~800m 区間において減少し、Top は 1400m にかけて漸増した後、1400~1500m 区間において減少する傾向を示した。Low は、800m 以降フィニッシュにかけて漸増する傾向を示した。ストライドは、1400~1500m 区間を除く全ての区間において Top が有意に大きかった。ピッチの変化を概観すると、200m まで加速した後 400m にかけて減少し、800~1000m あたりまではその大きさがほぼ維持さ

れ、その後 Top は 1400m にかけて増大し、1400~1500m 区間において減少する傾向を示した。

Low は 800m 以降フィニッシュにかけて漸増する傾向を示した。ピッチは 0~1000m において Low が大きく、0~200m 区間において有意差がみられた  $p < 0.05$ ）。このことと、前述の走スピードとを併せて考えると、Top はレースのほとんどの区間においてより大きなストライドを維持することで、高い走スピードを維持していたと考えられ、前章で述べた男子におけるレース中盤の特徴と同様の傾向がみられた。

大会最高記録を出した JAMAL の特徴は、Top と Low の走スピードに有意差がみられた 200~1400m における走スピードが大きい点と、ピッチが大きい点（ピッチ型走法）であろう。また、1400~1500m 区間において、ストライド、ピッチともに減少し、走スピードが大きく減少している点も特徴であろう。すなわち、JAMAL はこのラスト 100m 区間の減速が大きかったにも関わらず優れた記録を出し、決勝において 1 位でフィニッシュした。このことは、女子 800m や前章で述べた男子の考察と同様、中距離走種目において優れた記録を出すためにはラストスパートよりもむしろレースの序盤や中盤において高い走スピードを維持することが重要であることを改めて示唆するものであろう。さらに、そのようなレースにおいては、前章で述べた男子 1500m の LAGAT のように優れたラストスパートを行なえなくても、1 位でフィニッシュすることができ、記録と順位の両方において優れた成績を残すことができる可能性のあることを示唆しているといえよう。

## 3.4 決勝レースの特徴

ここでは女子 800m 決勝および 1500m 決勝のレース展開について、通過タイム、走スピード、ストライドおよびピッチの観点から概説する。

### (1) 女子 800m 決勝

女子 800m 決勝はスタート直後から JEOKOSGEI が飛び出してハイペースの展開となり、400m 通過が 56 秒 16 と非常に速かった。500~600m 区間において、2 位以降の選手たちが追い上げたが、700~800m 区間で JEOKOSGEI が再び引き離し、1 分 56 秒 04 の PB および大会最高記録で優勝した。図 10 は女子 800m 決勝における上位 3 選手の走スピード、ストライド、ピッチの変化について示したものである。JEOKOSGEI の特徴は、0~120m 区間の走スピードが非常に大きいことと、後半の 400m において走スピードを維持している点であろう。JEPKOSGEI は、予選、準決勝、決勝の全てのラウンドにおいてスタートで先頭に立ち、他の選手に一度も先頭を譲ることなく走りきるというレースを行っていた。JEOKOSGEI は、予選において 1 分 58 秒 95 の SB、

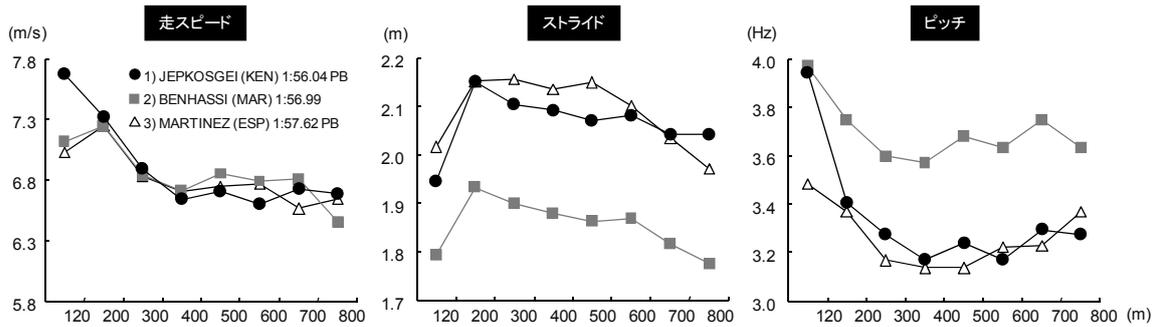


図 10 女子 800m 決勝における上位 3 選手の走スピード、ストライドおよびピッチの変化

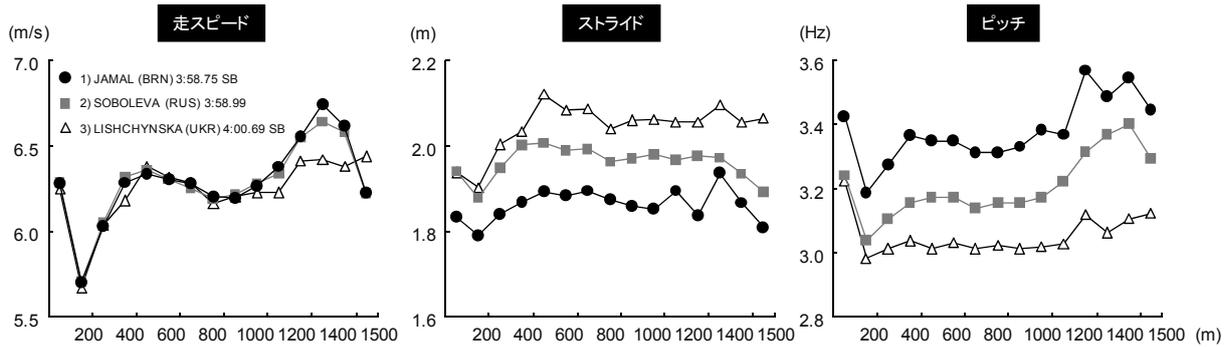


図 11 女子 1500m 決勝における上位 3 選手の走スピード、ストライドおよびピッチの変化

準決勝において 1 分 56 秒 17 の PB を出し、決勝においてはそれをさらに更新した。

2 位の H.BENHASSI (MAR) は、400~700m の走スピードは JEPKOSGEI より大きいものの、0~120m 区間における走スピードは小さく、700~800m においても走スピードが大きく低下している。3 位の M.MARTINEZ (ESP) も、BENHASSI と同様に、400~600m の走スピードは JEPKOSGEI より大きいものの、0~120m 区間や 600~800m の走スピードは小さい。したがって、JEPKOSGEI との走スピードの差は主にレースの序盤と終盤においてみられるといえよう。このことは、JEPKOSGEI が積極的なスタートでレース序盤に主導権を握り、BENHASSI らの後続はその差をレース中盤において縮めたが終盤において失速し、一方 JEPKOSGEI は走スピードを低下させることなく走り切ったことを示している。しかし、BENHASSI は SB、MARTINEZ は PB に相当する記録であったことから、記録の観点から見ると優れた結果であり、これは JEPKOSGEI が作り出したハイペースのレース展開をレース中盤において追い上げたことが、好記録に結びついたと考えられる。これらのことから、レース序盤において大きな走スピードを立ち上げ、レース中盤においてそれを維持することが好記録につながることを示唆しているといえよう。

前章で述べた男子 800m 決勝の場合は、スローペースのレース展開でラストスパート勝負となり、記録的には高くなかった。しかし、女子 800m

決勝の場合はレース序盤からハイペースの展開となり、記録的にも非常にレベルの高いレースであった。

## (2) 女子 1500m 決勝

女子 1500m 決勝は、JAMAL が 3 分 58 秒 75 の SB で優勝した。レース展開は、スタート直後一度大きく走スピードが低下したが、すぐさま 2 位の Y.SOBOLEVA (RUS) が先頭に立ち、走スピードを増大させてハイペースでレースを引っ張った。SOBOLEVA を先頭に、400m を 1 分 05 秒 82 で、800m を 2 分 09 秒 57 (400~800m のラップタイムは 63 秒 75) で、1000m を 2 分 57 秒 38 でそれぞれ通過した。1000m を過ぎたあたりから SOBOLEVA が徐々にペースを上げ、1200~1300m 区間において JAMAL がスパートし、SOBOLEVA をかわして先頭に立った。1300m 以降は JAMAL、SOBOLEVA とともにペースが低下し、そのまま JAMAL が先頭でフィニッシュした。この 1300m 以降にペースが低下していたことから、SOBOLEVA が作ったペースが速かったことがわかる。図 11 は女子 1500m 決勝における上位 3 選手の走スピード、ストライド、ピッチの変化について示したものである。JAMAL と SOBOLEVA の走スピードの差をみると、1200~1300m 区間においてのみ大きいことがわかる。また、この区間における JAMAL のストライドをみると、全ての区間の中で最も大きなストライドで走っており、ピッチも大きい。一方の SOBOLEVA

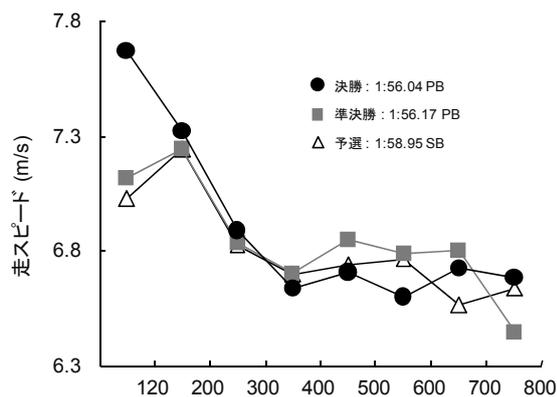


図 12 JEPKOSGEI の予選, 準決勝および決勝における走スピードの変化

表 2 JEPKOSGEI の走速度, ストライド, ピッチ

		1stR@150m	F@150m
走速度	(m/s)	6.71	7.02
ストライド	(m)	2.07	2.11
支持期距離	(m)	0.94	0.92
前半距離	(m)	0.29	0.31
後半距離	(m)	0.64	0.61
非支持期距離	(m)	1.13	1.19
ピッチ	(Hz)	3.24	3.33
ステップ時間	(s)	0.308	0.300
支持期時間	(s)	0.142	0.133
前半時間	(s)	0.067	0.067
後半時間	(s)	0.075	0.067
非支持期時間	(s)	0.167	0.167

表 3 JEPKOSGEI の支持脚の股関節, 膝関節および足関節の角度変化量

			1stR@150m	F@150m
股関節	支持期前半伸展量	(deg)	20.85	19.02
	支持期後半伸展量	(deg)	32.60	45.75
膝関節	屈曲量	(deg)	14.47	9.10
	伸展量	(deg)	12.84	18.24
足関節	屈曲量	(deg)	18.26	14.35
	伸展量	(deg)	28.51	35.19

は, ストライド, ピッチとも JAMAL ほどの急激な変化はみられない. このことから, JAMAL は 1200~1300m 区間においてまさにスパートを行っていたことが推察され, この局面の走りが勝敗を左右したと考えられる.

### 3.5 走動作の特徴

ここでは, 前章の男子と同様, これまで述べた女子のレース分析の結果を踏まえ, 各種目における走動作の特徴について検討する.

#### (1) 女子 800m

女子 800m で優勝した JEPKOSGEI は, 予選 (1:58.95, SB), 準決勝 (1:56.17, PB), 決勝 (1:56.04, PB) と SB および PB を更新しながらタイムを向上させていった. 図 12 は, JEPKOSGEI の予選, 準決勝および決勝の走スピードの変化を示したものである. 走スピードの変化をみると, 予選から準決勝にかけては主に 400~600m の走スピードが高く維持され, 準決勝から決勝にかけては 0~120m 区間の走スピードが増大していたことがわかる. また, 先に述べたように, よい記録を出すためにはレース序盤に大きな走スピードを立ち上げ, レース中盤においてそれを維持することが重要であることが示唆された. ここでは, 前者のレース序盤の走りに着目し, JEPKOSGEI の予選と決勝の 150m 地点の走動作を比較することにより, JEPKOSGEI が決勝のレース序盤において

どのような動作を行っていたかについて検討する.

表 2 は, JEPKOSGEI の予選と決勝の 150m 地点における走速度, ストライドおよびピッチについて示したものである. 150m 地点の走速度, ストライドおよびピッチは決勝の方が大きかった. ストライドの内訳をみると, 支持期距離が減少し ( $\Delta$ : -0.02m), 反対に非支持期距離が増大していた ( $\Delta$ : +0.07m). ステップ時間の内訳をみると, 支持期時間が僅かに減少し ( $\Delta$ : -0.008s), 非支持期時間は変わらなかった ( $\Delta$ : 0.000s). これらのことから, 決勝においては支持期に対して非支持期が, 距離および時間の両方において増大しており, 短い支持期時間でキックを行ない, 大きな非支持期距離を得るような動作に変化していたと推測される.

表 3 は, 予選と決勝の 150m 地点における支持脚の股関節, 膝関節および足関節の角度変化量を示したものである. 支持期前半において, 股関節伸展量はほとんど変わらず ( $\Delta$ : -1.83deg), 膝関節および足関節の屈曲量は減少していた (膝関節  $\Delta$ : -5.36deg, 足関節  $\Delta$ : -3.91deg). 支持期後半において, 全ての関節の伸展量は増大していた (股関節  $\Delta$ : 13.15deg, 膝関節  $\Delta$ : 5.41deg, 足関節  $\Delta$ : 6.69deg). これらのことから, JEPKOSGEI は決勝において, 短い支持期時間の中で, 支持期前半における膝関節および足関節の屈曲を小さくし, 支持期後半に下肢関節を大きく伸展させる

表 4 JAMAL の走速度, ストライド, ピッチ

		3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>
走速度	(m/s)	6.25	6.49
ストライド	(m)	1.93	1.89
支持期距離	(m)	0.96	0.95
前半距離	(m)	0.33	0.28
後半距離	(m)	0.63	0.67
非支持期距離	(m)	0.96	0.94
ピッチ	(Hz)	3.24	3.43
ステップ時間	(s)	0.308	0.292
支持期時間	(s)	0.158	0.150
前半時間	(s)	0.075	0.058
後半時間	(s)	0.083	0.092
非支持期時間	(s)	0.150	0.142

表 5 JAMAL の支持期における  
大腿, 下腿の部分角度

		3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>
大腿	接地時 (deg)	36.97	30.82
	離地時 (deg)	-33.65	-34.53
下腿	接地時 (deg)	6.60	-2.78
	離地時 (deg)	-51.41	-58.35

ようなキック動作を行っていたと考えられ、このことが大きな非支持期距離の獲得につながったと推測される。

(2) 女子 1500m

先に述べたように、女子 1500m のレースパターンの特徴は、3 周目で降減速することはなく、フィニッシュにかけて走スピードが漸増する傾向にあることが挙げられた。そこで、大阪大会で最もよい記録 (3 分 38 秒 75, SB) を出して優勝した JAMAL の決勝における 3 周目 (850m 地点, 以下 3<sup>rd</sup>) および 4 周目 (1250m 地点, 以下 4<sup>th</sup>) の走動作を分析し、走スピードの変化に伴う動作の変化について検討する。

表 4 は、3<sup>rd</sup> および 4<sup>th</sup> における走速度、ストライド、ピッチについて示したものである。3<sup>rd</sup> から 4<sup>th</sup> にかけて、走速度は増大していた ( $\Delta$ : +0.24m/s)。この時、ストライドは減少し ( $\Delta$ : -0.03m)、反対にピッチが増大していた ( $\Delta$ : +0.19Hz)。ストライドの内訳をみると、支持期および非支持期ともに減少していた。また、支持期においては、前半距離が減少し ( $\Delta$ : -0.05m)、反対に後半距離が増大していた ( $\Delta$ : +0.04m)。ステップ時間の内訳をみると、支持期および非支持期ともに減少していた。さらに、前半時間が減

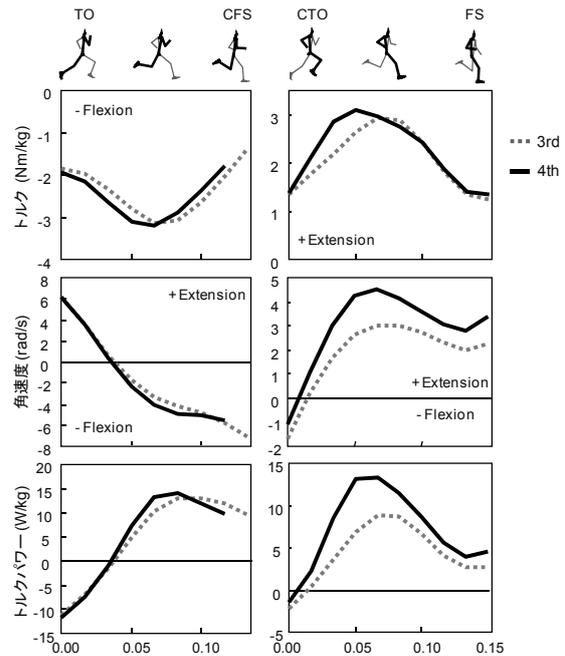


図 13 JAMAL の非支持期における回復脚の  
股関節トルク, 角速度, トルクパワー

少し ( $\Delta$ : -0.02s), 反対に後半時間が増大しており ( $\Delta$ : +0.01s), ストライドと同様の傾向を示した。これらのことから、3<sup>rd</sup> および 4<sup>th</sup> にかけて、ストライドが減少してピッチが増大することで走速度が増大していたと考えられる。また、支持期においては、支持期前半の距離および時間が減少し、反対に後半の距離および時間が増大していた。

表 5 は、支持期における支持脚の大腿、下腿および足の部分角度および角度変化量について示したものである。4<sup>th</sup> において、接地時の大腿角度 ( $\Delta$ : -6.15deg) および下腿角度 ( $\Delta$ : -9.37deg) が減少していた。このことは、3<sup>rd</sup> に比べて 4<sup>th</sup> では大腿および下腿がより前傾した姿勢で接地していたことを示すと考えられ、この姿勢により支持期前半距離および時間が減少したと推測される。また、離地時の大腿角度はほとんど変わらず ( $\Delta$ : -0.88deg)、下腿角度 ( $\Delta$ : -6.94deg) が減少していた。このことは、3<sup>rd</sup> に比べて 4<sup>th</sup> では、下腿がより前傾した姿勢で離地していたことを示すと考えられ、これにより支持期後半距離および時間が増大したと推測される。榎本 (2008) は、男子長距離走者の支持脚下腿の動きについて、接地直後に素早く前傾することと、離地直前に下腿の前傾が弱まる局面においても前傾を強めることが走速度を高めるために役立つと述べている。また、榎本は 5000m の記録が 13 分台の世界一流走者から 16 分以上の学生長距離走者を対象に分析を行なっているが、この時の世界一流走者の走速度は  $6.32 \pm 0.21$  m/s であり、これは JAMAL の走速度 (3<sup>rd</sup>: 6.25m/s, 4<sup>th</sup>: 6.49m/s) にほぼ等し

い。したがって、JAMAL は高い走速度を得るための合理的な下腿の動きを行っていたと考えられる。

図 13 は、非支持期 (TO から CFS および CTO から FS) における回復脚の股関節トルク、角速度およびトルクパワーについて示したものである。TO から CFS のトルクをみると、4<sup>th</sup> では TO 直後の屈曲ピークトルクの出現が早くなっていた。また、その直後に角速度は伸展から屈曲に切り替り、屈曲に切り替った直後の屈曲角速度が大きく、この局面における股関節トルクパワーが大きかった。CTO から FS のトルクをみると、4<sup>th</sup> では CTO 直後の伸展ピークトルクが増大し、出現が早くなっていた。また、角速度が屈曲から伸展に切り替る時点も早く、伸展ピーク角速度も増大しており、FS 直前の伸展角速度も増大していた。さらに、4<sup>th</sup> ではトルクパワーも常に大きな値を維持し、ピークパワーも増大していた。これらのことは、4<sup>th</sup> では非支持期において、離地した脚を素早く前方へ引き出す動作と、前方へ引き出された脚を接地に先立って降り戻す動作がより強調されていたことを示すと考えられる。すなわち、4<sup>th</sup> の非支持期においては、両脚を前後に力強く挟み込むような、いわゆるシザースがより強調された動作を行っていたと考えられる。このことにより、非支持期の距離と時間が短縮し、ピッチが増大したと推察される。

#### 4. おわりに

大阪大会の女子中距離走種目においては、男子とは対照的に非常に多くの選手が SB や PB を出しており、世界一流選手たちが記録の面においてベストパフォーマンスを発揮したといえよう。そして、それはレース序盤で高い走スピードを立ち上げ、それをレース中盤において維持することにより達成されていたことが明らかとなった。これまで、男子においては記録とレースパターンとの関係について検討されているが(門野ら, 2008), 女子に関する報告はなかった。しかし、大阪大会の分析結果から、女子においてもよい記録を出すためのレースパターンの特徴は、男子と同様のパターンとなることが示唆され、新たな知見を得ることができたといえよう。

#### 参考文献

- 榎本靖士 (2008) 長距離走者の走技術に関するバイオメカニクス的研究. 陸上競技研究, 72:2-13.
- 門野洋介, 阿江通良, 榎本靖士, 杉田正明, 森丘保典 (2008) 記録水準の異なる 800m 走者のレースパターン. 体育学研究, 53 (2) : 247-263.
- 門野洋介, 榎本靖士 (2007) 中距離走種目の見どころ. 陸上競技学会誌, 6 : 27-35.

付録1 女子 800m の各組における先頭走者の 400m 通過タイムおよびフィニッシュタイム

		1組	2組	3組	4組	5組	6組	平均	SD
予選	400m	59.12	1:01.08	58.36	58.79	59.03	59.71	59.35	0.96
	800m	2:00.11	2:01.75	2:00.00	2:00.31	1:59.95	1:58.95	2:00.18	0.90
準決勝	400m	57.42	58.81	56.54				57.59	1.14
	800m	1:58.11	1:58.97	1:56.17				1:57.75	1.43
決勝	400m	56.16							
	800m	1:56.04							

付録2 女子 1500m の各組における先頭走者の 400m 毎の通過タイムおよびフィニッシュタイム

		1組	2組	3組	平均	SD
予選	400m	1:06.23	1:10.80	1:07.82	1:08.28	02.32
	800m	2:13.74	2:16.19	2:16.46	2:15.46	01.50
	1200m	3:20.13	3:21.69	3:22.90	3:21.57	01.39
	1500m	4:09.05	4:09.57	4:10.45	4:09.69	00.71
準決勝	400m	1:14.07	1:04.65		1:09.36	06.66
	800m	2:27.17	2:12.71		2:19.94	10.22
	1200m	3:29.45	3:17.97		3:23.71	08.12
	1500m	4:14.86	4:03.84		4:09.35	07.79
決勝	400m	1:05.82				
	800m	2:09.57				
	1200m	3:12.66				
	1500m	3:58.75				

付録3 女子 800m の Top および Low における通過タイム, 走スピード, ストライド, ピッチの平均および標準偏差

		120m	200m	300m	400m	500m	600m	700m	800m
通過タイム	Top	16.73 ± 0.54	27.84 ± 0.86	42.85 ± 1.25	58.08 ± 1.39	1:13.29 ± 1.38	1:28.20 ± 1.34	1:43.14 ± 1.29	1:58.44 ± 1.16
	Low	17.07 ± 0.37	28.55 ± 0.59	43.78 ± 0.80	59.30 ± 0.88	1:14.70 ± 0.90	1:30.00 ± 0.95	1:45.17 ± 0.86	2:00.62 ± 0.47
走スピード (m/s)	Top	7.18 ± 0.23	7.21 ± 0.26	6.67 ± 0.21	6.57 ± 0.15	6.58 ± 0.15	6.71 ± 0.11	6.70 ± 0.11	6.54 ± 0.22
	Low	7.03 ± 0.15	6.97 ± 0.20	6.57 ± 0.14	6.45 ± 0.13	6.50 ± 0.12	6.54 ± 0.10	6.59 ± 0.08	6.48 ± 0.24
ストライド (m)	Top	1.93 ± 0.07	2.08 ± 0.08	2.01 ± 0.09	2.01 ± 0.09	1.96 ± 0.09	1.99 ± 0.08	1.95 ± 0.08	1.93 ± 0.09
	Low	1.90 ± 0.08	2.02 ± 0.07	1.95 ± 0.06	1.95 ± 0.07	1.93 ± 0.07	1.94 ± 0.07	1.92 ± 0.06	1.89 ± 0.09
ピッチ (Hz)	Top	3.73 ± 0.18	3.48 ± 0.17	3.33 ± 0.15	3.28 ± 0.15	3.36 ± 0.16	3.38 ± 0.15	3.44 ± 0.16	3.40 ± 0.15
	Low	3.70 ± 0.16	3.46 ± 0.15	3.37 ± 0.14	3.31 ± 0.12	3.37 ± 0.11	3.37 ± 0.12	3.44 ± 0.11	3.43 ± 0.17

付録4 女子 1500m の Top および Low における通過タイム, 走スピード, ストライド, ピッチの平均および標準偏差

		200m	400m	600m	800m	1000m	1200m	1400m	1500m
通過タイム	Top	33.28 ± 0.71	1:06.21 ± 0.48	1:38.08 ± 0.47	2:10.81 ± 1.39	2:43.29 ± 2.03	3:14.72 ± 2.34	3:45.55 ± 2.18	4:01.70 ± 1.92
	Low	33.35 ± 1.05	1:07.15 ± 1.74	1:40.50 ± 1.74	2:14.33 ± 1.43	2:47.56 ± 1.16	3:19.89 ± 1.37	3:52.09 ± 2.47	4:07.86 ± 2.10
走スピード (m/s)	Top	6.02 ± 0.13	6.08 ± 0.10	6.28 ± 0.12	6.12 ± 0.20	6.16 ± 0.13	6.37 ± 0.08	6.49 ± 0.13	6.20 ± 0.32
	Low	6.01 ± 0.18	5.92 ± 0.13	6.00 ± 0.10	5.91 ± 0.06	6.02 ± 0.06	6.19 ± 0.14	6.22 ± 0.27	6.35 ± 0.26
ストライド (m)	Top	1.86 ± 0.05	1.91 ± 0.06	1.96 ± 0.07	1.91 ± 0.08	1.92 ± 0.07	1.94 ± 0.07	1.95 ± 0.08	1.88 ± 0.12
	Low	1.78 ± 0.06	1.83 ± 0.04	1.85 ± 0.04	1.83 ± 0.03	1.84 ± 0.03	1.88 ± 0.05	1.87 ± 0.07	1.91 ± 0.04
ピッチ (Hz)	Top	3.25 ± 0.08	3.18 ± 0.11	3.21 ± 0.14	3.21 ± 0.15	3.21 ± 0.14	3.28 ± 0.14	3.33 ± 0.14	3.30 ± 0.11
	Low	3.37 ± 0.07	3.24 ± 0.06	3.25 ± 0.04	3.23 ± 0.05	3.26 ± 0.05	3.29 ± 0.05	3.33 ± 0.06	3.33 ± 0.13

付録5 女子 800m 決勝における上位3選手の通過タイム, 走スピード, ストライド, ピッチ

			120m	200m	300m	400m	500m	600m	700m	800m
通過タイム	1	J.JEPKOSGEI (KEN)	15.65	26.58	41.09	56.16	1:11.07	1:26.22	1:41.08	1:56.04
	2	H.BENHASSI (MAR)	16.87	27.91	42.54	57.46	1:12.06	1:26.79	1:41.18	1:56.99
	3	M.MARTINEZ (ESP)	17.08	28.13	42.78	57.71	1:12.54	1:27.32	1:42.55	1:57.62

			0~120m	120~200m	200~300m	300~400m	400~500m	500~600m	600~700m	700~800m
走スピード (m/s)	1	J.JEPKOSGEI (KEN)	7.67	7.32	6.89	6.64	6.71	6.60	6.73	6.69
	2	H.BENHASSI (MAR)	7.11	7.24	6.83	6.70	6.85	6.79	6.80	6.45
	3	M.MARTINEZ (ESP)	7.02	7.24	6.83	6.70	6.74	6.77	6.57	6.64
ストライド (m)	1	J.JEPKOSGEI (KEN)	1.94	2.15	2.10	2.09	2.07	2.08	2.04	2.04
	2	H.BENHASSI (MAR)	1.79	1.93	1.90	1.88	1.86	1.87	1.82	1.78
	3	M.MARTINEZ (ESP)	2.02	2.15	2.15	2.13	2.15	2.10	2.03	1.97
ピッチ (Hz)	1	J.JEPKOSGEI (KEN)	3.94	3.41	3.28	3.17	3.24	3.17	3.29	3.28
	2	H.BENHASSI (MAR)	3.97	3.75	3.60	3.57	3.68	3.63	3.75	3.63
	3	M.MARTINEZ (ESP)	3.48	3.37	3.17	3.14	3.14	3.22	3.23	3.37

付録6 女子 1500m 決勝における上位3選手の通過タイム, 走スピード, ストライド, ピッチ

			100m	200m	300m	400m	500m	600m	700m	800m
通過タイム	1	M.Y.JAMAL (BRN)	15.93	33.47	50.07	1:05.98	1:21.77	1:37.63	1:53.56	2:09.68
	2	Y.SOBOLEVA (RUS)	15.92	33.45	49.98	1:05.82	1:21.55	1:37.41	1:53.41	2:09.57
	3	I.LISHCHYNSKA (UKR)	16.02	33.65	50.22	1:06.40	1:22.07	1:37.90	1:53.81	2:10.05

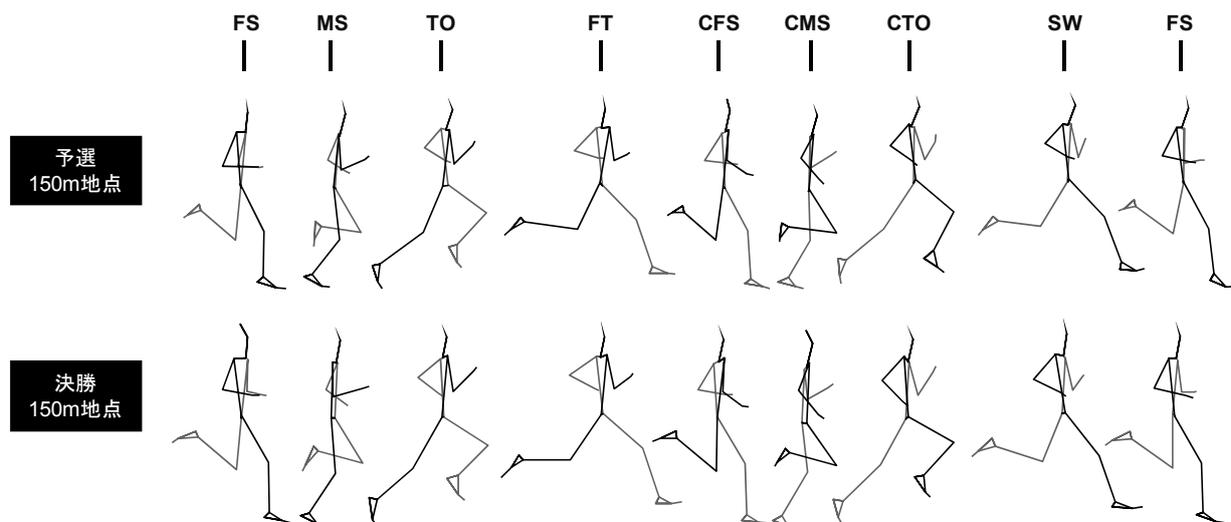
			900m	1000m	1100m	1200m	1300m	1400m	1500m
通過タイム	1	M.Y.JAMAL (USA)	2:25.83	2:41.80	2:57.48	3:12.74	3:27.57	3:42.69	3:58.75
	2	Y.SOBOLEVA (BRN)	2:25.66	2:41.59	2:57.38	3:12.66	3:27.72	3:42.92	3:58.99
	3	I.LISHCHYNSKA (KEN)	2:26.16	2:42.23	2:58.29	3:13.89	3:29.48	3:45.16	4:00.69

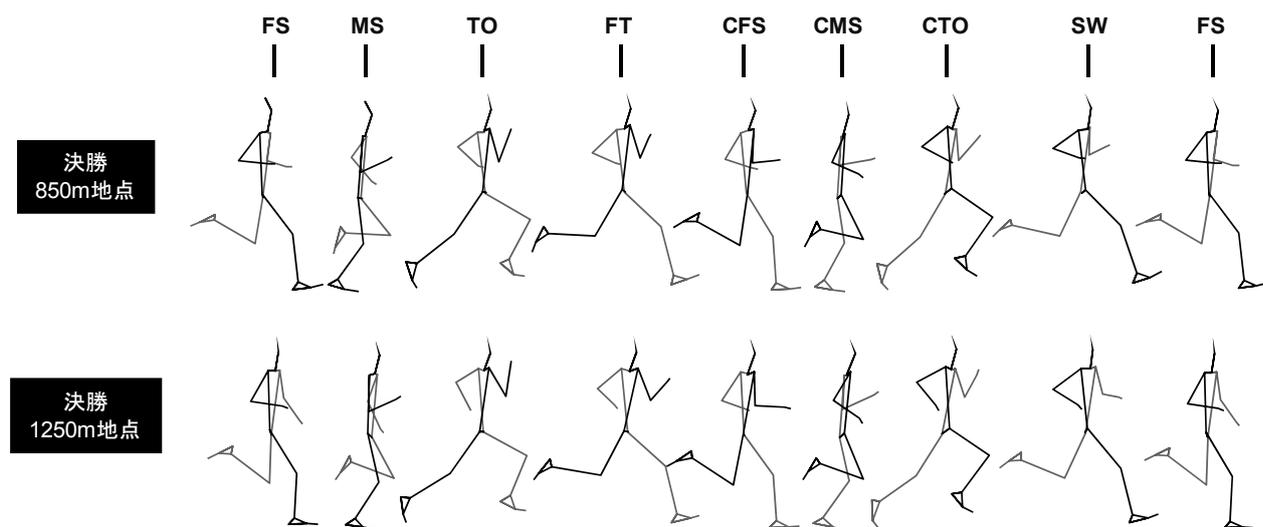
			0~100m	100~200m	200~300m	300~400m	400~500m	500~600m	600~700m	700~800m
走スピード (m/s)	1	M.Y.JAMAL (USA)	6.28	5.70	6.02	6.28	6.34	6.30	6.28	6.20
	2	Y.SOBOLEVA (BRN)	6.28	5.70	6.05	6.31	6.36	6.30	6.25	6.19
	3	I.LISHCHYNSKA (KEN)	6.24	5.67	6.04	6.18	6.38	6.32	6.28	6.16
ストライド (m)	1	M.Y.JAMAL (USA)	1.83	1.79	1.84	1.87	1.89	1.88	1.90	1.87
	2	Y.SOBOLEVA (BRN)	1.94	1.88	1.95	2.00	2.00	1.99	1.99	1.96
	3	I.LISHCHYNSKA (KEN)	1.94	1.90	2.00	2.03	2.12	2.08	2.09	2.04
ピッチ (Hz)	1	M.Y.JAMAL (USA)	3.43	3.19	3.28	3.36	3.35	3.35	3.31	3.31
	2	Y.SOBOLEVA (BRN)	3.24	3.04	3.11	3.15	3.17	3.17	3.14	3.15
	3	I.LISHCHYNSKA (KEN)	3.22	2.98	3.01	3.04	3.01	3.03	3.01	3.02

			800~900m	900~1000m	1000~1100m	1100~1200m	1200~1300m	1300~1400m	1400~1500m
走スピード (m/s)	1	M.Y.JAMAL (USA)	6.19	6.26	6.38	6.55	6.74	6.62	6.23
	2	Y.SOBOLEVA (BRN)	6.21	6.28	6.34	6.54	6.64	6.58	6.22
	3	I.LISHCHYNSKA (KEN)	6.20	6.22	6.22	6.41	6.42	6.38	6.44
ストライド (m)	1	M.Y.JAMAL (USA)	1.86	1.85	1.89	1.84	1.93	1.87	1.81
	2	Y.SOBOLEVA (BRN)	1.97	1.98	1.97	1.98	1.97	1.93	1.89
	3	I.LISHCHYNSKA (KEN)	2.06	2.06	2.06	2.06	2.10	2.05	2.06
ピッチ (Hz)	1	M.Y.JAMAL (USA)	3.33	3.38	3.37	3.57	3.48	3.54	3.44
	2	Y.SOBOLEVA (BRN)	3.15	3.17	3.22	3.31	3.37	3.40	3.29
	3	I.LISHCHYNSKA (KEN)	3.01	3.02	3.03	3.12	3.06	3.10	3.12



付録7 女子 800m 優勝 J. JEPKOSGEI の予選および決勝の 150m 地点におけるスティックピクチャ



付録8 女子 1500m 優勝 M. Y. JAMAL (BRN) の決勝におけるスティックピクチャ

# 長距離レースにおける世界一流選手の走動作の特徴

## Characteristics of the running motion for the world elite long-distance runners in the long-distance races

榎本 靖士<sup>1)</sup>, 門野 洋介<sup>2)</sup>, 法元 康二<sup>3)</sup>,  
鈴木 雄太<sup>2)</sup>, 小山 桂史<sup>4)</sup>, 千葉 哲<sup>5)</sup>

1) 京都教育大学 2) 筑波大学大学院 3) 茨城県立医療大学  
4) 順天堂大学大学院 5) 大阪府小学校教員

Yasushi ENOMOTO<sup>1)</sup>, Hiroshige KADONO<sup>2)</sup>, Koji HOGA<sup>3)</sup>  
Yuta SUZUKI<sup>2)</sup>, Keiji KOYAMA<sup>4)</sup>, Tetsu CHIBA<sup>5)</sup>

1) Kyoto University of Education, 2) Graduate School of University of Tsukuba  
3) Ibaraki Prefectural University of Health Science, 4) Graduate School of Juntendo University  
5) Primary Teacher of Osaka Prefecture

### 1. はじめに

これまで長距離走におけるバイオメカニクスの研究は少なく、世界一流選手の走動作の特徴に関する報告は少ない。1991年東京世界陸上大会においてもバイオメカニクス研究は走スピードとストライド、ピッチのみの分析であった。一方、短距離走では東京大会のバイオメカニクスの分析からキック動作を中心にキネマティクスの特徴が明らかにされ、日本人選手の疾走技術の改善に役立つ示唆を提供している。長距離走では走速度が短距離ほど高くないため、選手の個々の特徴が大きく、共通性のある走技術を明らかにすることは困難であると考えられるが (Williams and Cavanagh, 1987), 一流選手の走動作の特徴をバイオメカニクスの記述し、蓄積していくことは、長距離走の走動作の改善法やジュニア期に習得すべき走動作のモデルを構築していくために役立つであろう。本稿では、大阪世界陸上大会の男女 5000m および 10000m レースにおける上位 3 選手および日本人選手の走動作をバイオメカニクスの手法を用いて分析し、世界一流選手の走動作の特徴を明らかにするとともに日本人選手の走動作の課題を検討するものである。

### 2. 方法

長距離レースにおける走動作を分析するためバックストレートのスタンド上段に 1 台のデジタルビデオカメラで固定撮影した。撮影スピードは 60 fields/s, シャッタースピードは明るさにより 500~1000 であった。レースの撮影に先立ちコースに距離が既知のマークを固定したキャリブレーションポールを 5 か所に垂直に立てて撮影した。カメラの画角は 1 サイクルが撮影できるよ

うに 7m とした。また、200m ごとの通過タイムを読み取るように 1 台のデジタルビデオカメラで先頭集団を追従撮影した。

分析対象者は決勝レースにおける上位 3 選手と決勝もしくは予選レースにおける日本人選手とした。5000m では日本人選手が予選を通過した場合は決勝レースを、通過しなかった場合は予選レースを分析した。撮影した映像をパソコンにキャプチャし、動作分析システム Frame-DIAS<sup>□</sup>を用いて分析対象者の身体分析点 23 点を右足接地から次の右足接地、あるいは左足接地から次の左足接地までの 1 サイクルにわたってデジタイズした。

デジタイズで得られた座標は、キャリブレーションポイントから算出された DLT パラメータを用いて 2 次元座標に変換した。2 次元座標は 4 次のバターワースフィルタを用いて、座標点の水平および垂直成分 (X 座標と Y 座標) ごとに決定した遮断周波数で平滑化した。阿江 (1996) の身体部分係数を用いて部分および全身の重心位置を算出した。

得られた座標データをもとに、以下の項目を算出した。

- 1) ストライド・ピッチ
  - ① ストライド: 1 サイクルに身体重心が進んだ距離の 1/2
  - ② ピッチ: 左右 1 歩の平均時間をコマ数から算出し、その逆数
  - ③ 支持時間: 左右の足の接地から離地までの平均時間
  - ④ 非支持時間: 左右の足の離地から接地までの平均時間
  - ⑤ 滞空時間比: 非支持時間を支持時間で除した

もの

2) キネマティクス

大腿および下腿角度・角速度

大腿および下腿の角度の定義を図1に示した。角速度はそれらを数値微分したもので、正は反時計回り、負は時計回りを示す。

⑥ 足および膝関節角度・角速度

足および膝関節角度の定義を図1に示した。角速度はそれらを数値微分したもので、正は伸展、負は屈曲を示す。

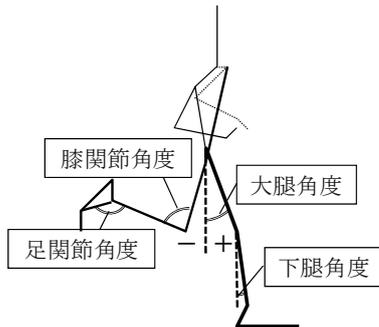


図1 大腿および下腿角度、足および膝関節角度の定義

3) エナジェティクス

⑦ 平均パワー

⑧ 1 サイクルの力学的仕事を身体部分の力学的エネルギーの変化を部分間および1 サイクルにわたって合計して算出し (Wwb ; Pierrynowski ら, 1980), それを1 サイクルの時間で除したもの。

⑨ 力学的エネルギー利用の有効性指数 (EI) 身体重心の1 サイクル平均の並進運動エネルギーを力学的仕事で除したもの (榎本ら, 1999)。

⑩ 力学的エネルギーの伝達量

1 コマの身体部分の力学的エネルギーの増大量と減少量の同量を伝達が生じた量とみなし、1 サイクルで合計したもの。有効鉛直スティフネス (Kv)

接地時の鉛直下向きの身体重心の運動量を

支持期前半時間で除して平均力を求め、支持期前半の身体重心の鉛直変位で除したもの。

3. 男子 5000m

1) 走速度, ストライド, およびピッチ

表1は、決勝レース上位3選手および予選レースにおける日本人選手の1000mごとの通過タイムを示したものである。優勝したラगत (アメリカ) のタイムは、13分45秒81と平凡であった。2位のキプチョゲ (ケニア), 3位のキプシロ (ケニア) は、ラगतとの差はそれぞれ0.13秒, 0.90秒と僅かであった。ラगतの最初の1000mは3分01秒01と非常に遅く、その後は2分40秒台で推移し、ラスト1000mは2分22秒99と非常に速かった。

図2は、決勝レース上位3選手および予選レースにおける日本人選手の200mごとのスピードの変化を示したものである。上位3選手はスタート後、スピードが大きく低下したが、1800mから2600mまで一度大きくスピードを増大していた。その後、スピードが低下し、4000mまで徐々に増大しながら推移し、4000m以降で大きく増大していた。上位3選手のラスト200mでのスピードはそれぞれ7.72, 7.57, 7.41m/sと、ラスト200mで勝敗がついていた。日本人選手は予選ということもあるが、三津谷と松宮ともにスピードの変化が小さく、平均的なスピードで走っていた。

表2は、上位3選手と日本人選手の4周目と12周目の分析区間における走速度、ストライド、ピッチ、支持時間、非支持時間、および滞空時間比を示したものである。ラगतの走速度は4周目で5.57m/s, 12周目で7.93m/sと大きくスピードを増大していた。このとき、ストライドは1.86mから2.18m, ピッチは3.00steps/sから3.64steps/sと、ストライドとピッチの両方が大きく増大していた。この傾向は、キプチョゲとキプシロにも同様に見られた。一方、ラगतの支持時間は、4周目で0.175秒から12周目で0.125秒と大きく低下し、非支持時間は0.158秒から0.150秒とあまり変化していなかった。キプシロは、支持時間が

表1 男子 5000m 決勝レースにおける上位3選手および予選レースにおける日本人選手の通過タイムとラップタイム

	1. Lagat (USA)		2. Kipchoge (KEN)		3. Kipsiro (KEN)		H1-15. Mitsuya (JPN)		H2-15. Matsumiya (JPN)	
1000m	3 : 01.01		3 : 00.80		3 : 01.72		2 : 47.40		2 : 51.12	
2000m	5 : 47.71	2 : 46.70	5 : 47.53	2 : 46.73	5 : 48.33	2 : 46.62	5 : 38.41	2 : 51.00	5 : 36.67	2 : 45.55
3000m	8 : 37.22	2 : 49.50	8 : 37.00	2 : 49.47	8 : 37.08	2 : 48.75	8 : 32.50	2 : 54.10	8 : 22.97	2 : 46.30
4000m	11 : 22.82	2 : 45.60	11 : 22.72	2 : 45.72	11 : 22.43	2 : 45.35	11 : 17.43	2 : 44.93	11 : 06.67	2 : 43.70
5000m	13 : 45.81	2 : 22.99	13 : 45.94	2 : 23.23	13 : 46.71	2 : 24.28	14 : 06.55	2 : 49.11	13 : 54.83	2 : 48.17

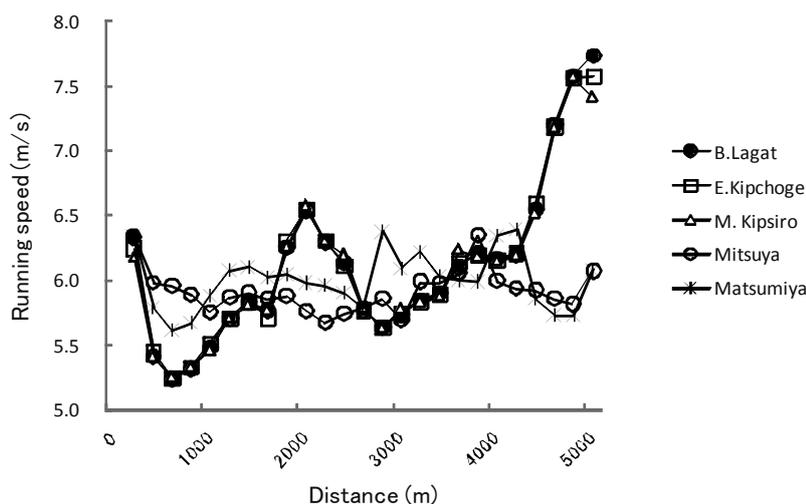


図2 男子5000m決勝における上位3選手および予選における日本人選手の走スピードの変化

表2 男子5000mにおける走速度、ストライド、ピッチ、支持時間、非支持時間および滞空時間比

	rap	Running Velocity (m/s)	Step length (m)	Step length / Height	Step frequency (steps/s)	Support time (s)	Non-support time (s)	Flight ratio
Lagat	4	5.57	1.86	1.06	3.00	0.175	0.158	0.90
	12	7.93	2.18	1.25	3.64	0.125	0.150	1.20
Kipchoge	4	5.55	1.81	1.06	3.08	0.175	0.150	0.86
	12	7.79	2.14	1.26	3.64	0.133	0.142	1.06
Kipsiro	4	5.93	1.98	1.14	3.00	0.183	0.150	0.82
	12	7.83	2.22	1.28	3.53	0.158	0.125	0.79
Mitsuya	4	5.79	1.83	1.12	3.16	0.167	0.150	0.90
	12	5.81	1.79	1.09	3.24	0.175	0.133	0.76
Matsumiya	4	6.00	1.80	1.10	3.33	0.167	0.133	0.80
	12	5.68	1.75	1.07	3.24	0.175	0.133	0.76

0.183秒から0.158秒、非支持時間が0.150秒から0.125秒と両方が減少していた。そして滞空時間比は、ラガトが0.90から1.20と大きく増大していたのに対し、キプシロは0.82から0.79と減少していた。

一方、日本人選手は4周目では上位3選手と走速度に大きな差はなかったが、12周目では三津谷が走速度をわずかに増大、松宮が減少していた。両者ともストライドの減少と支持時間の増大が見られた。身長に対するストライドは、上位3選手が12周目で1.2以上になっているのに対し、三津谷と松宮は4周目で1.12と1.10、12周目で1.09と1.07と小さかった。さらに、滞空時間比は、ラガトが12周目で1.20で最も高かったのに対し、三津谷と松宮は、4周目で0.90と0.80、12周目でともに0.76と小さかった。日本人選手はストライドとピッチともに高めることができず、レース終盤で走速度を大きく増大できなかったと言える。

以上のことから、ラガトは短い接地時間で大きなストライドを獲得できたためラストスパートで大きな走速度の増大が達成できたと考えられ

る。また、長距離走において、とくにラストスパートにおける急激なスピードアップにはストライドとピッチの両方を増大させることが必要であることが示唆される。

## 2) エナジェティクス

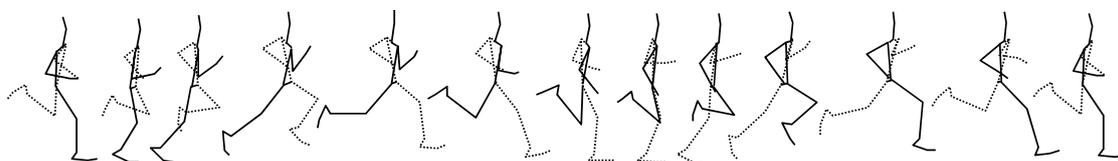
表3は、4周目と12周目における上位3選手と日本人選手の力学的エネルギー利用の有効性指数 (EI)、平均パワー (MP)、有効鉛直ステイフネス (Kv)、力学的エネルギーの伝達量 (Tb) を示したものである。

4周目でのEIは、三津谷が2.60で最も大きく、松宮が2.04で最も小さかった。上位3選手では12周目でEIが増大していたのに対し、日本人選手は減少していた。4周目での平均パワーは松宮が14.7W/kgで最も大きく、ラガトが9.6W/kgで最も小さかった。12周目では4名が増大しており、ラガトは18.5W/kgと大きく増大していた。4周目におけるKvは外国人選手で小さく、日本人選手で大きかったが、12周目では日本人選手が減少しているのに対し、外国人選手は大きく増大していた。Tbは4周目では上位3選手と日本人

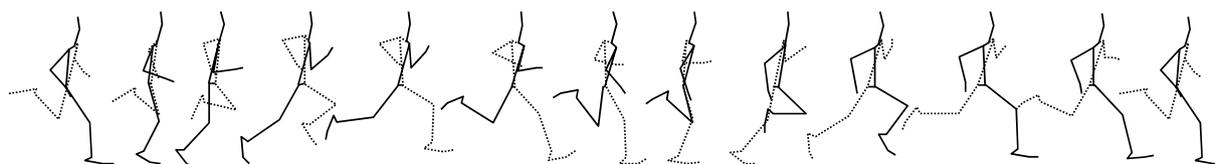
表3 男子5000mにおける力学的エネルギー利用の有効性指数(EI)、平均パワー(MP)および有効鉛直スティフネス(Kv)、力学的エネルギーの伝達量(Tb)

	rap	EI	MP (W/kg)	Kv (N/m)	Tb (J/kg)
Lagat	4	2.41	9.6	213.6	21.3
	12	3.09	18.5	1681.2	43.4
Kipchoge	4	2.31	10.3	319.7	21.3
	12	6.02	9.2	1468.6	47.8
Kipsiro	4	2.44	10.8	285.9	24.6
	12	4.22	12.8	940.3	50.8
Mitsuya	4	2.60	10.2	509.6	23.2
	12	1.92	14.2	449.8	23.1
Matsumiya	4	2.04	14.7	801.5	21.8
	12	1.74	15.0	551.1	20.8

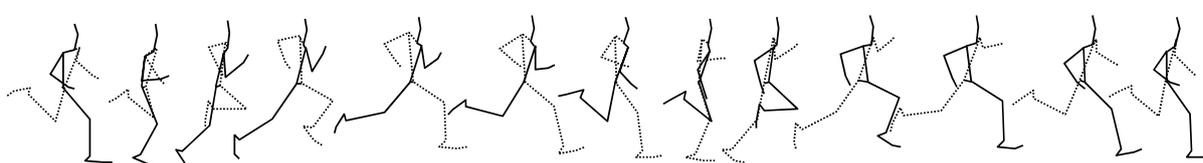
Lagat



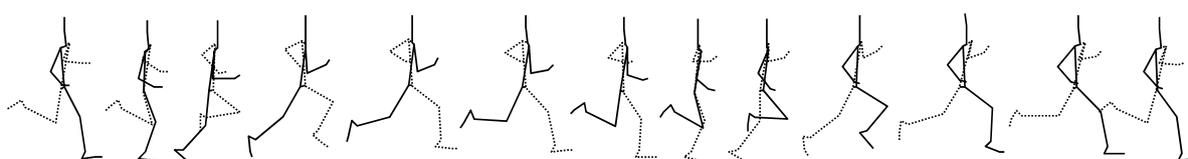
Kipchoge



Kipsiro



Mitsuya



Matsumiya

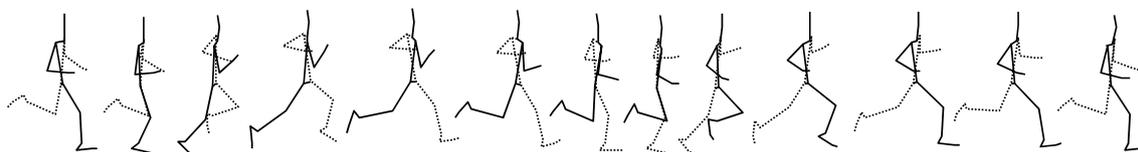


図3 男子5000mにおける上位3選手と日本人選手の12周目における1サイクルの走動作のスティックピクチャ

選手の間には大きな差はないが、12周目では上位3選手が大きく増大していたが日本人選手はほとんど変化がなかった。4周目と12周目ともにキプシロが最も大きく、24.6J/kgと50.8J/kgであった。

以上のことから、レース終盤において上位3選手はEI、MP、Kv、Tbを増大していたが、日本人選手はMP以外は増大していなかったことがわかった。またその増大の違いから、レース終盤でのスピードの増大に、ラガトはパワーとKv増大タイプ、キプチョゲはEIとKv増大タイプ、

表 4 男子 5000m における下腿および大腿の接地時 (FC) および離地時 (TO) の角度と支持期 (SP) および 1 サイクル (CYC) の角度変化 (ROM)

rap	Shank			Thigh				
	@FC	@TO	ROMsp	@FC	@TO	ROMsp	ROMcyc	
Lagat	4	6.0	-46.5	52.5	23.8	-32.8	56.7	76.4
	12	1.1	-54.2	55.3	33.0	-37.4	70.4	99.5
Kipchoge	4	2.4	-53.8	56.3	27.8	-26.6	54.4	73.0
	12	3.0	-53.6	56.6	32.3	-29.5	61.8	97.5
Kipsiro	4	3.6	-50.8	54.4	32.8	-28.9	61.8	82.1
	12	2.1	-55.2	57.3	39.8	-34.4	74.2	103.0
Mitsuya	4	5.2	-54.8	60.1	26.3	-27.2	53.5	84.2
	12	6.7	-52.2	59.0	30.4	-29.7	60.1	90.0
Matsumiya	4	0.9	-55.8	56.7	30.5	-31.9	62.4	81.2
	12	2.6	-52.6	55.3	30.6	-32.3	62.9	82.9

表 5 男子 5000m における大腿角速度の最大値 (前方スウィング) と最小値 (後方スウィング) およびその和

rap	Thigh (deg/s)			
	Min	Max	Max+Min	
Lagat	4	-483.7	485.3	1.6
	12	-661.1	657.3	-3.8
Kipchoge	4	-396.1	400.2	4.1
	12	-610.4	660.4	50.1
Kipsiro	4	-481.8	445.6	-36.2
	12	-663.8	602.3	-61.5
Mitsuya	4	-390.9	508.6	117.7
	12	-495.9	542.2	46.4
Matsumiya	4	-514.2	476.8	-37.4
	12	-499.9	545.4	45.4

キプシロは Tb 増大タイプであると考えられ、一流選手の間でも走速度の増大に対するエネジェティクス的項目に違いがあることが示されたと考えられる。一方、日本人選手はいずれの項目もあまり大きくなく、またレース終盤で減少していた。

### 3) 下肢動作

図 3 は、上位 3 選手と日本人選手の 12 周目における 1 サイクルの走動作のスティックピクチャを示したものである。

表 4 は、上位 3 選手と日本人選手の接地時および離地時の下腿および大腿角度、大腿および下腿の支持期の動作範囲 (ROMsp)、大腿の 1 サイクルの動作範囲 (ROMcyc) を示したものである。

接地時の下腿角度は、全員が正の値を示し、下腿がやや前方に振り出て接地していたことがわかる。離地時の角度は、ラガトが 4 周目では -46.5 度と最も大きかったが、12 周目では -54.2 度と大きく減少していた。キプシロも 12 周目で減少していたが、三津谷と松宮は逆に増大していた。支持期の下腿の動作範囲は、ラガトとキプシロでは 12 周目で大きくなっていったが、三津谷と松宮はわずかに減少していた。

大腿角度は、上位 3 選手では接地時で増大し、離地時では減少しており、支持期の動作範囲は大

きくなっていたが、松宮は変化していなかった。1 サイクルにおける大腿の動作範囲は、上位 3 選手が 12 周目で大きく増大していたのに対し、三津谷と松宮はわずかに増大していたのみであった。

表 5 は、上位 3 選手および日本人選手の 4 周目および 12 周目の 1 サイクルにおける大腿角速度の最大値および最小値とそれらの和を示したものである。最大値は前方、最小値は後方へのスウィングを示すものである。上位 3 選手は 4 周目よりも 12 周目で最大値と最小値ともに大きくなっていった。4 周目において松宮の最小値が他の選手よりも大きかった。松宮は走速度の割に大腿の後方へのスウィング速度が大きいことを示していると考えられる。ラガトは 4 周目と 12 周目ともに最大値と最小値の和が小さかったが、三津谷はその和が大きかった。これらは長距離走において大腿の後方および前方スウィングは走速度を高めるためにただ大きいだけではなく、それらがつりあっていることが重要であることを示していると考えられる。

表 6 は、足関節および膝関節の屈曲・伸展角度と角速度を示したものである。いずれの選手も足関節は屈曲角度より伸展角度が大きかった。12 周目においてラガトは足関節および膝関節の屈曲角度が 4 周目と比較して小さくなっていった。キプシロは足関節では屈曲角度が減少し、-6.3 度

表 6 男子 5000m における足関節および膝関節の屈曲および伸展 (Flex・Ext.) 角度と角速度

	rap	Ankle				Knee			
		Ang. Disp. (deg)		Ang. Vel. (deg/s)		Ang. Disp. (deg)		Ang. Vel. (deg/s)	
		Flex	Ext.	Flex.	Ext.	Flex	Ext	Flex.	Ext.
Lagat	4	-22.4	42.6	-400.5	602.8	-20.0	24.2	-418.0	367.6
	12	-9.0	37.2	-281.1	581.7	-9.6	24.7	-327.1	435.1
Kipchoge	4	-15.8	39.9	-313.5	535.1	-15.7	13.9	-310.5	238.0
	12	-6.3	26.8	-167.5	420.8	-16.2	21.4	-393.6	374.1
Kipsiro	4	-27.6	52.7	-488.8	721.0	-19.4	26.8	-414.5	338.5
	12	-9.8	42.5	-217.7	660.1	-14.3	31.3	-343.6	469.8
Mitsuya	4	-26.8	42.6	-463.7	677.3	-19.5	12.9	-357.8	220.9
	12	-16.6	40.1	-278.2	579.7	-23.4	24.5	-398.7	368.0
Matsumiya	4	-3.7	39.4	-114.8	563.7	-17.1	22.8	-326.4	382.5
	12	-16.7	51.0	-289.2	731.9	-19.2	26.8	-352.9	430.3

と最も小さかったが、膝関節では増大していた。三津谷、松宮では 12 周目では足関節の屈曲角度が -16 度と大きく、膝関節屈曲角度は 4 周目から増大していた。いずれの選手も足関節の屈曲角速度は伸展角速度と比較して小さかった。キプチョゲや三津谷は膝関節屈曲角速度が伸展角速度よりも大きかった。ラガトは 4 周目と比較して 12 周目で膝関節伸展角度が大きくなっていないにもかかわらず、伸展角速度は大きくなっていった。以上のことは、一流長距離選手はレース終盤における走速度の増大にもなって足関節および膝関節の屈曲が小さくなっており、膝関節の伸展は小さく、かつすばやく行っていたことを示唆するものである。

#### 4) ラガト選手の特徴と日本人選手の課題

近年の世界陸上やオリンピックでの 5000m は記録よりも勝負重視のレースが多く、ラストスパートによって勝敗が決することが多い。優勝したラガトは、1500m を専門とする選手で、今回の世界陸上大阪大会では 1500m でも優勝している。ラガトはラストスパートにおいてスピードを増大することに長けていると考えられ、それがレースの 12 周目において 4 周目よりもストライドとピッチを増大していたこと、EI を減少せずに MP を増大していたこと、Kv が大きく増大していたことなどのバイオメカニクスの特徴と関係していると考えられる。さらに、このようなスピード維持能力の高い選手ではレース序盤のローペースで体力を浪費してしまうことがよくあるが、ラガトはレース序盤では遅い走速度でも EI はあまり小さくなく、Kv が小さいことで過度な上下動を生まない走動作でエネルギーの浪費を抑えていたことが推測される。走動作ではレース序盤ではやや足および膝関節の屈曲と伸展が大きいものの、レース序盤と終盤のどちらにおいても大腿の前後へのスウィング動作が走速度に対して

適切であったことがうかがわれる。すなわち、ラガトはスピードにあわせて接地時間、足および膝関節の屈曲伸展動作、大腿の前後へのスウィング動作を調節して、エネルギーの無駄なく高いスピードを維持していたと考えられる。

一方、日本人選手はレース序盤では EI も高く、上位選手と比較しても大きく劣るところはみられない。しかし、レース終盤では走速度を増大することができなかった。これは体力的な問題も関係しているかもしれないが、MP は増大していたにもかかわらず走速度が増大していなかったことから、バイオメカニクスのみみると、ストライド、滞空時間比、EI および Kv の減少が走速度の減少と関係していると考えられる。今後も国際大会における 5000m レースは今大会と同様にラストスパートの重要性が増すと考えられる。日本人選手にもレース終盤の走速度の増大に対応する走動作を身につけることが必要であると考えられ、そのために短い時間で地面をキックし、大きなストライドを効果的に維持できる下肢の動作および筋力を獲得することが課題としてあげられよう。

#### 4. 男子 10000m

##### 1) 走速度、ストライド、およびピッチ

表 7 は、男子 10000m 決勝レースにおける上位 3 選手の 1000m ごとの通過タイムとラップタイムを示したものである。レースは 4 位のタデッセ (エリトリア) が積極的に引っ張り、前半は 1000m ごとを 2 分 45 秒あたりのペースで、後半は徐々にペースが上がり、8000m からマサシ (ケニア) がペースを上げたが、ラスト 1 周でベケレ (エチオピア) が逆転し、27 分 05 秒 90 で優勝した。最後の 1000m は 2 分 30 秒 11 であった。2 位には同じくエチオピアのシヒネが 27 分 09 秒 03 で入り、マサシは 27 分 12 秒 17 で 3 位であった。ベケレ、シヒネ、マサシのベスト記録は、それぞれ 26 分 17 秒 53 (世界記録)、26 分 39 秒 69、

表 7 男子 10000m 決勝上位 3 選手の 1000m ごとの通過タイムとラップタイム

Distance	1. Bekele (ETH)		2. Sihine (ETH)		3. Mathathi (KEN)	
	Split time	Lap time	Split time	Lap time	Split time	Lap time
1000m	2 : 44.36		2 : 44.53		2 : 45.38	
2000m	5 : 27.61	2 : 43.25	5 : 27.79	2 : 43.26	5 : 28.19	2 : 42.81
3000m	8 : 13.59	2 : 45.98	8 : 13.79	2 : 46.00	8 : 14.04	2 : 45.85
4000m	10 : 58.21	2 : 44.61	10 : 58.36	2 : 44.56	10 : 58.36	2 : 44.31
5000m	13 : 43.41	2 : 45.20	13 : 43.62	2 : 45.27	13 : 43.76	2 : 45.40
6000m	16 : 29.22	2 : 45.82	16 : 29.39	2 : 45.77	16 : 29.52	2 : 45.77
7000m	19 : 13.07	2 : 43.85	19 : 13.32	2 : 43.93	19 : 13.37	2 : 43.85
8000m	21 : 55.20	2 : 42.13	21 : 55.42	2 : 42.10	21 : 55.53	2 : 42.16
9000m	24 : 35.79	2 : 40.59	24 : 35.96	2 : 40.54	24 : 35.54	2 : 40.01
10000m	27 : 05.90	2 : 30.11	27 : 09.03	2 : 33.07	27 : 12.17	2 : 36.63

27 分 08 秒 42 であるが、スタート時の気温と湿度が 30 度、65%であったことを考えると、非常にレベルの高い記録であったと言える。

図 4 は、上位 3 選手と日本人選手（竹沢、前田）の走速度、ストライド、およびピッチの変化を示したものである。上位 3 選手が、レース序盤から最後まで高い走速度を維持していたのに対し、竹沢と前田は 10 周の前にすでに速度が低下していた。ストライドは 4 周目から上位 3 選手が大きくて日本人選手が小さく、さらに日本人選手はレース終盤にかけて徐々に減少していた。ピッチについては上位 3 選手はレース終盤まで維持し、24 周目ではラストスパートにおいて大きく増大していた。前田は 19 周目まで徐々に減少し、24 周目では増大していた。

ベケレは、身長が 1.60m と 5 選手中で最も小さいにも関わらずストライドは最も大きく、身長あたりでみると 1.19 から 1.25 で変化しており、前田が 1.11 から 1.03 と変化していたことから比べると、ストライドを非常に大きく獲得できかつ維持できていたことがわかる。

図 5 は、上位 3 選手と日本人選手の支持時間、非支持時間、滞空時間比の変化を示したものである。支持時間は、上位 3 選手はレース中盤でやや増大したものの終盤まで大きく増大しなかったが、竹沢と前田は徐々に増大し、前田は 24 周目で減少したが、竹沢は大きく増大し、竹沢の 24 周目の支持時間は 0.183 秒であった。非支持時間は、あまり大きな変化は見られないが、竹沢はレース終盤にかけてやや減少していた。滞空時間比は、上位 3 選手間には 2 周目では 1.1 前後で差はないが、ベケレとシヒネは中盤で増大し、マサシは減少していたが、24 周目では再び同程度になっていた。竹沢は 2 周目から 1.0 と最も低く、その後徐々に減少し、23 周目では 0.73 であった。

上位 3 選手は、レース終盤まで高い走速度を維持し、ストライドとピッチのわずかな変化がみられるのみであった。一方、日本人選手はストライドの減少により走速度を低下しており、またピッチには大きな変化は見られなかったが、支持時間

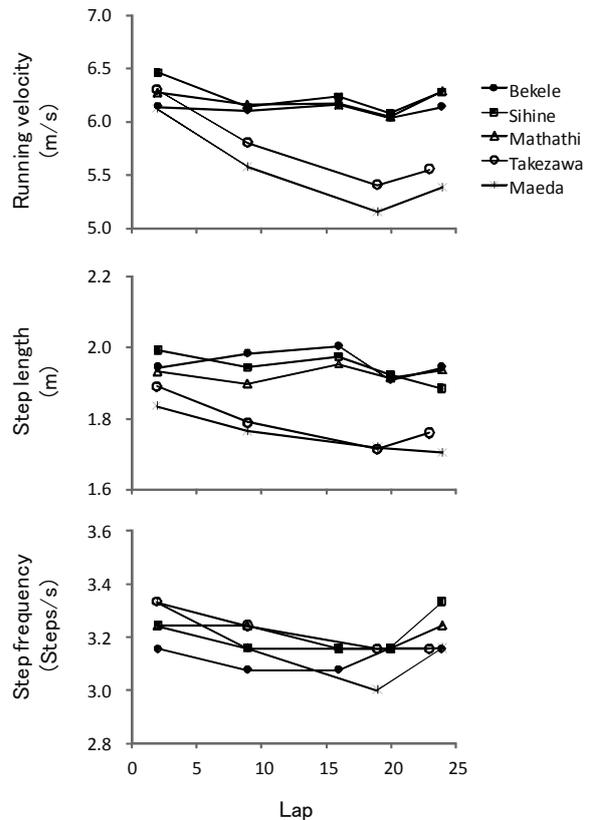


図 4 男子 10000m における上位 3 選手と日本人選手の走速度、ストライドおよびピッチの変化

の増大と非支持時間の減少が生じていた。ベケレは、身長あたりでは大きなストライドを獲得し、かつラストまで維持することができ、これにより最後まで走速度を維持していたと考えられる。

## 2) エナジェティクス

図 6 は、上位 3 選手と日本人選手の力学的エネルギー利用の有効性指数 (EI)、平均パワー (MP)、有効鉛直スティフネス (Kv)、力学的エネルギーの伝達量 (Tb) を示したものである。ベケレは 2 周目と 9 周目で EI が 1.77 と 1.46 と最も小さかったが、中盤以降で増大していた。シヒネは、16

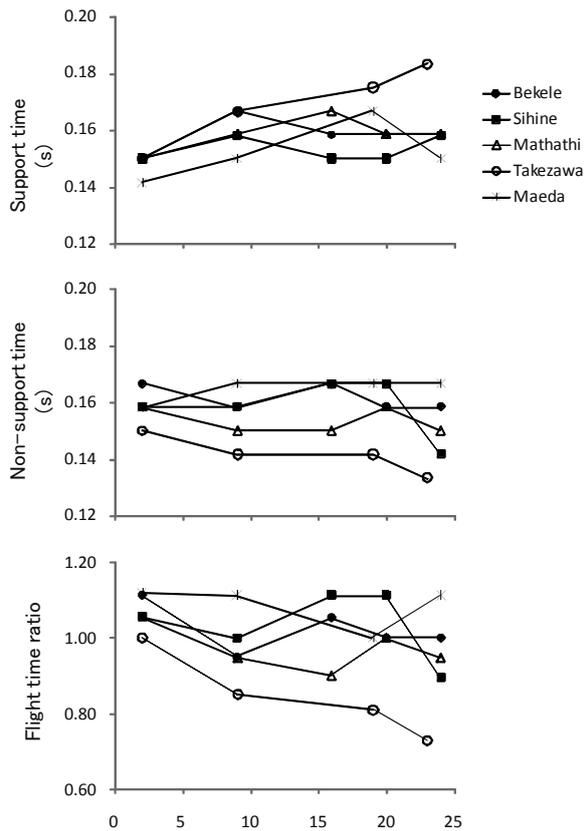


図5 男子 10000m における上位 3 選手と日本人選手の支持時間、非支持時間および滞空時間比の変化

周目と 20 周目で 3.59 と 3.74 と最も高くなっていたが、24 周目では大きく減少していた。マサシは、2 周目で 3.90 と最も高かったが、レース中盤以降では減少していた。竹沢と前田は 2 周目でそれぞれ 2.54 と 2.82 であったが、その後も低い値で推移していた。

平均パワーは、ベケレは 2 周目で 16.9W/kg、9 周目で 19.7W/kg と大きかったが、その後減少していた。シヒネとマサシはレース序盤から中盤にかけて低い値で推移していたが、24 周目では大きく増大しており、とくにシヒネは 15.2W/kg とレースの中で最も大きくなっていた。竹沢と前田は 11.0~15.0W/kg の間で推移し、大きな変化は見られなかった。

ベケレとシヒネの  $K_v$  は、2 周目で 529.6 と 669.2N/m/kg であった。そして、24 周目でベケレが減少していたもののレースを通して比較的高い値を維持していた。マサシは 2 周目で顕著に大きな値 (1552.9N/m/kg) を示したが、中盤で大きく減少し、24 周目では 285.5N/m/kg であった。竹沢と前田は 2 周目では 624.9 と 700.6N/m/kg とベケレやシヒネと大きな差はなかったが、その後は

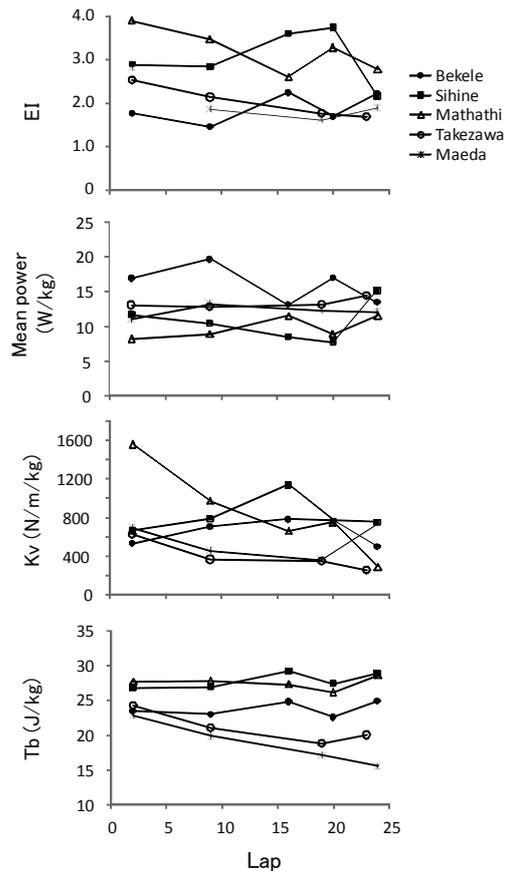


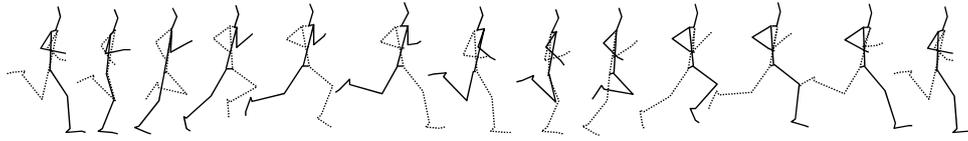
図6 男子 10000m における上位 3 選手と日本人選手の力学的エネルギー利用の有効性指数 (EI)、平均パワー (MP)、有効鉛直ステイフネス ( $K_v$ )、力学的エネルギーの伝達量 ( $T_b$ ) の変化

低い値で推移していた。前田は 24 周目で再び増大していた。

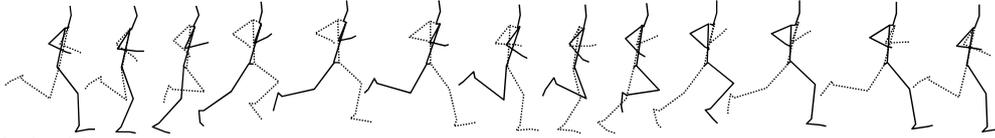
$T_b$  は、シヒネとマサシがレース序盤から中盤にかけて高い値で推移し、24 周目では両者ともレース中で最も高い値 (28.9, 28.6J/kg) であった。ベケレは 2 人よりやや低い値であったが、同様の変化パターンであった。竹沢と前田は 2 周目では 24.3 と 22.8J/kg と比較的高い値を示したが、その後は徐々に低下していた。

以上のことから、ベケレはレース序盤はパワーが大きいが EI は並であるが、レース終盤にかけて力学的エネルギーの有効性や伝達量が増大し、走速度を維持していたと考えられる。マサシは対照的にパワーが小さく、力学的エネルギー利用の有効性は大きいが、終盤ではパワーが増大していた。シヒネは EI とパワーの両方がバランスよく保たれていた。竹沢と前田はパワーを比較的大きく発揮し続けていたが、力学的エネルギー利用の有効性や力学的エネルギーの伝達などは上位選手と大きな差があった。

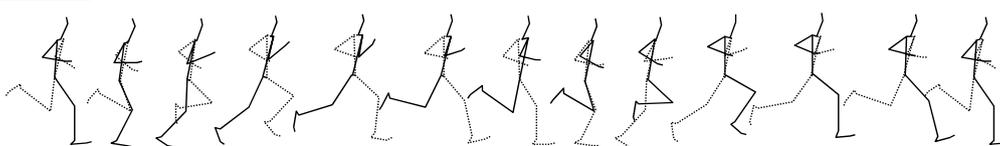
Bekele



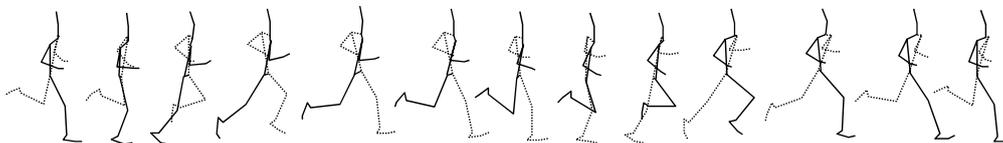
Sihine



Mathathi



Takezawa



Maeda

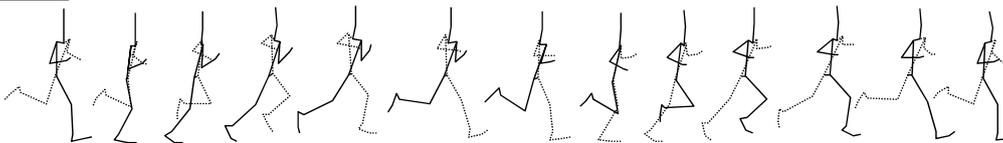


図7 男子10000mにおける上位3選手の20周目および日本人選手の19周目における1サイクルの走動作のスティックピクチャ

3) 下肢動作

図7は、上位3選手の20周目および日本人選手の19周目における1サイクルの走動作のスティックピクチャを示したものである。

図8は、上位3選手および日本人選手の大腿の最大、接地時、離地時および最少の角度を示したものである。ベケレは接地時の大腿角度は大きく、離地時の大腿角度は小さく、その動作範囲は9周目で62.1度、24周目で65.3度とレースを通して大きかった。シヒネとマサシも同様に支持期における大腿の動作範囲はレースを通して大きかった。一方、竹沢は接地時の大腿角度が小さく、前田は離地時の大腿角度が負で大きくなり、両者とも大腿動作範囲が50度前後と小さかった。さらに竹沢は離地後から最小までの動作範囲は極めて小さかった。

図9は、大腿角速度の最大値と最小値の変化を示したものである。大腿角速度の最大値は前方への、最小値は後方へのスウィング速度を示している。ベケレの大腿の後方スウィング速度は2周目では545.0deg/sとあまり大きくなかったが、20周目では594.9deg/sと大きかった。ベケレの大腿の後方スウィング速度は、レースを通して大きい値を維持しており、16周目で-579.2deg/sと最も

大きい値を示した。シヒネの大腿の前方および後方スウィング速度もベケレとほぼ同様の大きさで変化であったが、マサシは前方スウィング速度はレース序盤で大きくて徐々に減少していたが、後方スウィング速度は比較的大きな値を維持していた。竹沢と前田は2周目で前方スウィング速度が525.8と576.4deg/sと比較的大きかったが、その後徐々に減少し、23、24周目では463.8と441.3deg/sとなっていた。竹沢と前田の後方スウィング速度もレース序盤では大きな値を示したが、中盤以降で大きく減少していた。上位3選手の大腿の後方スウィング速度は走速度の維持と似た変化を示しているが、前方スウィング速度は必ずしも走速度とは関係のない変化を示している。竹沢は、後方へのスウィング速度は走速度の減少とともに減少しているが、23周目は走速度はやや増大していたにもかかわらず、大腿の後方スウィング速度は減少していた。以上のことは、長距離走において大腿の前方スウィングは走速度のみならずレース終盤での動きの維持にも関係する重要な動作の1つであると考えられ、また大腿の後方へのスウィング速度も走速度に効果的につながっているかどうかを検討する必要があると考えられる。

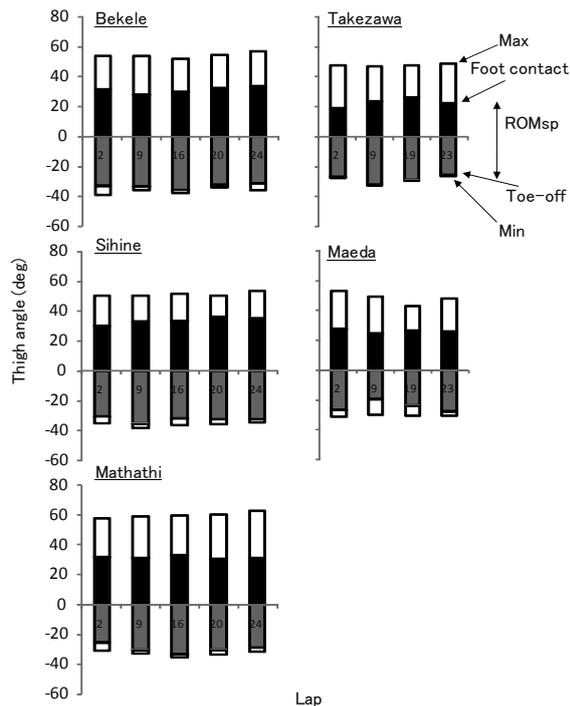


図8 男子10000mにおける上位3選手と日本人選手の大腿の最大、接地時、離地時および最小の角度

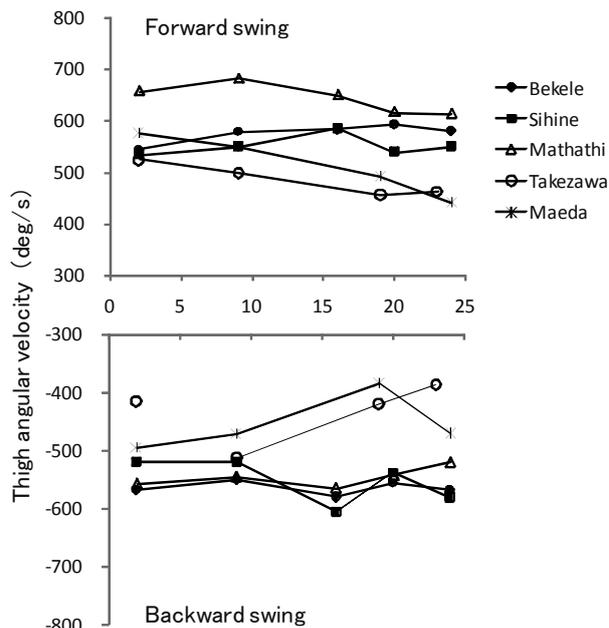


図9 男子10000mにおける上位3選手と日本人選手の大腿角速度の大値（前方スウィング）と最小値（後方スウィング）の変化

図10は、支持期における膝関節の屈曲角度を示したものである。レース序盤から中盤にかけてベケレとシヒネが比較的小さく維持していたのに対し、竹沢と前田は大きな変化は見られなかったが、比較的大きな値を維持していた。マサシは、序盤で大きかったが、終盤では最も小さかった。

以上のことから、上位3選手では大腿の前後へのスウィング動作が大きく、かつすばやく行なわれ、それがレース終盤まで維持されていることが示された。レース序盤ではベケレとシヒネのエチオピア選手は支持期における膝関節の屈曲が小さいことが示された。日本人選手はレース序盤か

ら大腿の動作範囲が小さく、終盤では後方へのスウィング速度が大きく減少しており、上位選手と比較すると大腿のスウィング動作が弱いと言えよう。

4) ベケレ選手の走動作の特徴と日本人選手の課題

優勝したベケレは、5000mと10000mの世界記録保持者であり、すでにオリンピックや世界陸上で何度も優勝している選手である。今大会では、ラスト1周まではかなり厳しい状況に追い込まれていたが、ラストスパートは非常に力強かった。

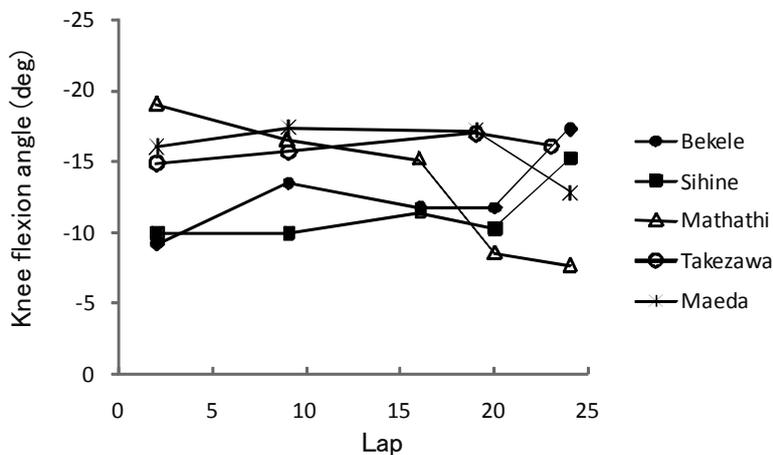


図10 男子10000m決勝における上位3選手と日本人選手の支持期における膝関節屈曲角度の変化

それを示すようにレース序盤ではパワーは発揮しているものの EI が低く、同じペースで走っていたシヒネやマサシと比較するとエネルギーを浪費していたことが推察される。しかし、24 周目のラストスパート局面になると、シヒネやマサシが EI を減少している中、EI を増大し、同程度になっていた。ベケレ選手は力学的パワーを大きく発揮し続けており、持久的能力が高いことが推測され、それを引き出しつつ、ラストスパートではさらに高いスピードを獲得できる走技術を習得していると考えられる。ベケレの走動作はレース終盤まであまり変化しておらず、大腿の前方スウィングも終盤まで維持し、非常に大きなストライドを獲得して走速度を維持、増大していたことがわかった。

日本人選手は、早々と先頭集団から遅れ、走速度を大きく減少していた。これは、選手のコンディションなどバイオメカニクス以外の他の要因も関係しているであろうが、いずれにしても世界レベルのスピードに対応できていないことは明白である。今後も国際大会の 10000m レースは暑さなどの環境に関わらずハイペースとなり、かつその中でスピードの変化への対応が要求されるであろう。日本人選手は、ストライドや滞空時間比、Kv や大腿の後方スウィングなど、長距離走における走速度と関連の強いバイオメカニクスの項目がレース序盤からあまり小さくなく、かつレース終盤で大きく減少していた。これらを高く保つことができる走動作を身につけることはハイペースの 10000m レースに対応するために役立つと考えられ、長距離走においても走技術を課題としたトレーニングを工夫して実施することが強く薦められる。

## 5. 女子 5000m

### 1) 走速度、ストライド、およびピッチ

表 8 は、女子 5000m 決勝レースにおける上位 3 選手と富士および予選レースにおける杉原の 1000m ごとの通過タイムとラップタイムを示したものである。優勝したデファー（エチオピア）は、最初の 1000m は 3 分を切っていたが、以降 4000m までは 3 分 1 桁台のラップで進み、ラスト 1000m は 2 分 44 秒 78 と大きくペースが上がって

いた。上位 3 選手の勝敗はラストスパートによって 1.5 秒以内の差で決まっていた。富士は、デファーと 4000m までは 2 秒以内の差を保っていたが、ラスト 1000m で 20 秒以上の差が開いた。杉原は予選レースであるが、中盤のペースは決勝レースと大きな差はなかったが、ラスト 1000m は富士と同様に上位 3 選手ほどペースは上がっていなかった。

図 11 は、上位 3 選手と日本人選手の 200m ごとのスピードの変化を示したものである。上位 3 選手のスピードは、スタート直後にやや高かったが、3000m まではほぼ 5.5m/s あたりの一定スピードで推移していた。3000m 地点からスピードを増大していたが、4000m あたりで一度スピードを減少してから 4000m 以降で大きく増大していた。上位 3 選手はラスト 200m のスピードに差がみられた。富士は、上位 3 選手とほぼ同様のスピードの変化であったが、3000m 地点のスピードの増大にやや遅れて増大しており、4000m 以降ではスピードを増大できていなかった。

表 9 は、上位 3 選手と日本人選手の 1, 8 (富士は 7 周目)、および 12 周目 (デファーと日本人選手) の分析区間における走速度、ストライド、ピッチ、支持時間と非支持時間、滞空時間比を示したものである。デファーとチェロノ（ケニア）は、1 周目と 8 周目では走速度が 5.5m/s、ストライドが 1.75m、ピッチがおよそ 3.1steps/s であったが、チェルイヨットと富士はデファーらと比べるとストライドがやや短く、ピッチがやや大きかった。滞空時間比もデファーとチェロノが 1.0~1.3 の範囲であったのに対し、チェルイヨットと富士は 0.8~1.0 の範囲であった。杉原はさらにピッチが大きく、滞空時間比も 0.7 と最も小さかった。デファーは、12 周目のラストスパートにおいて走速度が 6.78m/s、ストライドが 2.03m、身長比で 1.31 と大きく増大していたが、日本人選手は増大していなかった。すなわち、ストライドの大きいデファーとチェロノは滞空時間比が大きく、さらに走速度を増大するときには滞空時間比も増大していたが、ピッチの大きいチェルイヨットと富士は滞空時間比が小さく、かつ滞空時間比はレース中盤で減少していたことがわかった。

表 8 女子 5000m 決勝上位 3 選手と日本人選手の 1000m ごとの通過タイムとラップタイム

	M. Defar (ETH)	V. Cheruiyot (KEN)	P. Cherono (KEN)	K. Fukushi (JPN)	K. Sugihara (JPN)
1000m	2 : 59.40	3 : 00.21	2 : 59.60	2 : 59.10	3 : 08.51
2000m	6 : 04.91    3 : 05.52	6 : 05.07    3 : 04.85	6 : 05.12    3 : 05.52	6 : 04.68    3 : 05.59	6 : 13.21    3 : 04.70
3000m	9 : 12.07    3 : 07.15	9 : 11.87    3 : 06.80	9 : 12.25    3 : 07.14	9 : 12.10    3 : 07.42	9 : 21.31    3 : 08.10
4000m	12 : 13.13    3 : 01.06	12 : 13.05    3 : 01.18	12 : 13.27    3 : 01.01	12 : 15.12    3 : 03.02	12 : 26.78    3 : 05.47
5000m	14 : 57.91    2 : 44.78	14 : 58.50    2 : 45.45	14 : 59.21    2 : 45.94	15 : 19.40    3 : 04.28	15 : 31.44    3 : 04.66

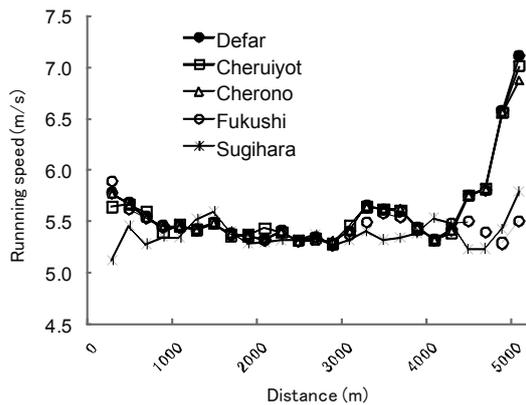


図11 女子5000m決勝における上位3選手と日本人選手の走スピードの変化

## 2) エナジェティクス

表10は、上位3選手と日本人選手の学的エネルギー利用の有効性指数(EI), 平均パワー(MP), 有効鉛直スティフネス(Kv), 力学的エネルギーの伝達量(Tb)を示したものである。決勝レースにおける上位3選手と福士選手では、1周目のEIはデファーが2.82と最も大きく、福士が2.52とその次に大きかった。8周目(福士は7周目)では、4選手間で大きな差はないもののデファー、チェルイヨット、チェロノ、福士の順で大きかった。デファーは12周目でMP, Kv, Tbのいずれも最も大きくなっていった。一方、福士はKvが、杉原はMPとTbが1, 8(7)周目と比べて最も大きくなっていった。

以上のことから、女子5000m選手の間ではエナジェティクスの特徴に大きな差はみられなかったが、8周目でのEIの大きさがレースの順位と同じになっており、中盤におけるEIが勝敗を左右する要因であったかもしれない。優勝したデファーは12周目でEI以外の項目が大きく増大しており、ラストスパートにおいてエナジェティク

的に優れた走動作であったことを示唆していると考えられる。

## 3) 下肢動作

図12は、上位3選手および日本人選手の8(7)周目における1サイクルの走動作のスティックピクチャを示したものである。

表11は、下腿および大腿の接地時と離地時の角度およびその動作範囲を示したものである。接地時の下腿角度は、福士以外は正の値であり、接地時に下腿が鉛直よりもやや振り出されていたことを示している。福士は1周目では正の値であったが、7, 12周目では負の値で、レース後半で徐々に減少していた。杉原は、1周目では福士とほぼ同じであったが、反対に徐々に増大していた。離地時の下腿角度は、福士と杉原はデファーと大きな差はなかったが、チェロノはやや大きかった。

接地時および離地時の大腿角度は、上位3選手と比べて日本人選手がやや大きい傾向があった。支持期の大腿動作範囲は上位3選手と日本人選手では大きな差はなかったが、日本人選手は接地時の角度が大きいため上位選手より腰に対してやや前方に大腿の動作範囲があることを示していると考えられる。1サイクルの大腿動作範囲は、デファーの12周目が最も大きく、99.3度であった。

表12は、支持期における膝関節の屈曲および伸展角度変化、屈曲および伸展角速度を示したものである。接地時の角度は上位3選手が150度以上であったが、日本人選手は150度以下で、福士の7周目は137.1度であった。屈曲角度変化の最少は福士の7周目の-10.7度、最大は杉原の12周目の-24.3度であり、屈曲および伸展角度変化には上位3選手と日本人選手で大きな差は見られなかった。最大屈曲角度も上位3選手に比べて日本人選手は小さい傾向が見られたすなわち、日

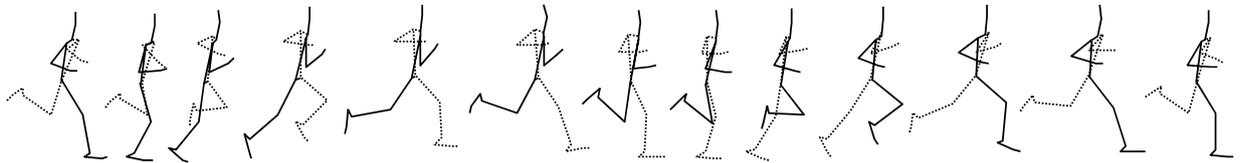
表9 女子5000mにおける走速度、ストライド、ピッチ、支持時間、非支持時間および滞空時間比

		rap	Running Velocity (m/s)	Step length (m)	Step length / Height	Step frequency (steps/s)	Support time (s)	Non-support time (s)	Flight ratio
1	M. Defar (ETH)	1	5.50	1.74	1.12	3.16	0.158	0.158	1.00
		8	5.54	1.85	1.19	3.00	0.150	0.183	1.22
		12	6.78	2.03	1.31	3.33	0.133	0.167	1.25
2	V. Cheruiyot (KEN)	1	5.68	1.66	1.07	3.43	0.150	0.142	0.94
		8	5.48	1.69	1.09	3.24	0.167	0.142	0.85
3	P. Cheronno (KEN)	1	5.48	1.74	1.09	3.16	0.150	0.167	1.11
		8	5.50	1.79	1.12	3.08	0.142	0.183	1.29
14	K. Fukushi (JPN)	1	5.50	1.65	1.03	3.33	0.158	0.142	0.89
		7	5.11	1.53	0.95	3.33	0.167	0.133	0.80
		12	5.22	1.52	0.94	3.43	0.167	0.125	0.75
9(H2)	K. Sugihara (JPN)	1	4.82	1.37	0.85	3.53	0.167	0.117	0.70
		8	5.35	1.52	0.95	3.53	0.167	0.117	0.70
		12	5.44	1.54	0.96	3.53	0.167	0.117	0.70

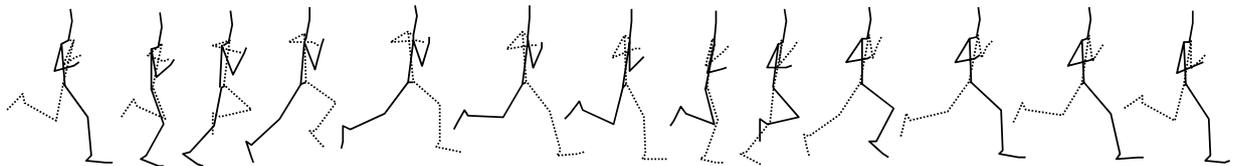
表 10 女子 5000m における力学的エネルギー利用の有効性指数 (EI), 平均パワー (MP)、  
有効鉛直スティフネス (Kv)、および身体部分間の力学的エネルギーの伝達量 (Tb)

Subjects	rap	EI	Mean Power (W/kg)	Kv (N/m/kg)	Tb (J/kg)
1 M. Defar (ETH)	1	2.82	8.5	511.5	34.9
	8	2.26	10.2	484.9	32.3
	12	2.63	14.5	1032.0	57.4
2 V. Cheruiyot (KEN)	1	1.96	14.1	474.5	40.9
	8	2.11	11.5	358.7	33.9
3 P. Cheronno (KEN)	1	2.24	10.6	331.8	36.6
	8	2.04	11.4	540.2	34.3
14 K. Fukushi (JPN)	1	2.52	10.0	386.5	39.0
	7	1.90	11.4	319.8	31.5
	12	2.26	10.3	433.3	34.1
9(H2) K. Sugihara (JPN)	1	2.56	8.0	449.3	24.9
	8	2.37	10.7	397.8	32.7
	12	2.03	12.9	398.1	35.3

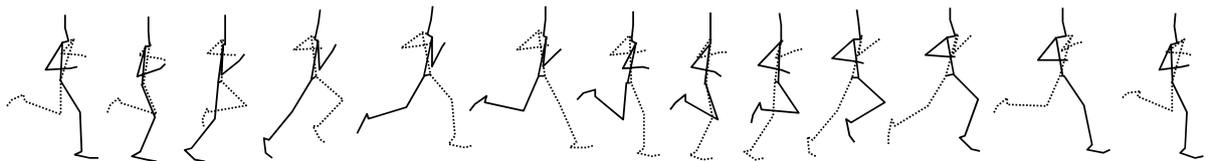
Defar



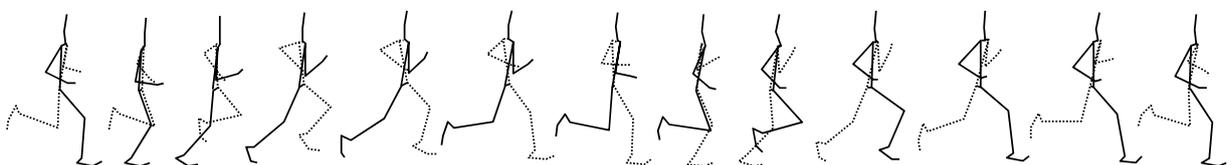
Cheruiyot



Cheronno



Fukushi



Sugihara

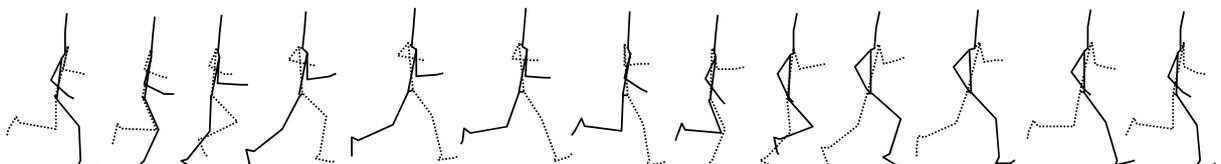


図 12 女子 5000m における上位 3 選手と日本人選手の 8 周目 (福士は 7 周目) における  
1 サイクルの走動作のスティックピクチャ

表 11 女子 5000mにおける下腿および大腿の接地時 (FC) および離地時 (TO) の角度と支持期 (SP) および 1 サイクル (CYC) の角度変化 (ROM)

Subjects	rap	Shank			Thigh			
		@FC	@TO	ROMsp	@FC	@TO	ROMsp	ROMcyc
1 M. Defar (ETH)	1	5.6	-49.0	54.5	30.8	-28.3	59.1	85.6
	8	8.6	-48.5	57.1	32.5	-27.9	60.5	87.7
	12	2.4	-49.7	52.1	32.2	-32.3	64.5	99.3
2 V. Cheruiyot (KEN)	1	3.9	-47.9	51.8	31.1	-25.8	56.9	81.7
	8	4.2	-47.4	51.6	34.8	-31.1	65.9	88.1
3 P. Cherono (KEN)	1	10.2	-42.8	53.0	25.8	-28.3	54.2	89.4
	8	4.1	-40.8	44.9	29.6	-31.9	61.5	84.5
14 K. Fukushi (JPN)	1	1.8	-49.6	51.4	34.3	-24.8	59.0	78.9
	7	-3.1	-48.0	44.9	39.9	-23.8	63.6	80.9
	12	-4.7	-50.6	45.9	33.8	-28.3	62.0	79.7
9(H2) K. Sugihara (JPN)	1	1.6	-51.5	53.2	32.5	-21.0	53.6	67.3
	8	3.5	-53.4	56.9	36.3	-25.2	61.5	76.4
	12	6.2	-52.1	58.3	38.1	-25.5	63.7	85.0

表 12 女子 5000m における接地時の膝関節角度、支持期の膝関節屈曲および伸展角度変化と角速度

rap	Knee Ang.	Ang. Disp. (deg)		Ang. Vel. (deg/s)		
		@FC	Flex	Ext	Flex.	Ext.
1 M. Defar (ETH)	1	154.7	-18.3	22.9	-355.0	365.7
	8	156.1	-18.5	21.9	-328.1	337.2
	12	150.2	-11.7	24.1	-311.6	386.4
2 V. Cheruiyot (KEN)	1	152.8	-16.6	21.7	-326.3	346.5
	8	149.4	-14.1	28.4	-318.0	390.8
3 P. Cherono (KEN)	1	164.3	-18.7	19.9	-333.5	345.5
	8	154.5	-18.0	34.5	-412.7	536.6
14 K. Fukushi (JPN)	1	147.6	-13.1	20.7	-276.0	334.5
	7	137.1	-10.7	29.5	-252.4	406.4
	12	141.5	-13.1	29.2	-317.4	425.3
9(H2) K. Sugihara (JPN)	1	149.1	-17.0	17.4	-460.3	247.9
	8	147.3	-16.1	20.6	-423.2	331.1
	12	148.1	-24.3	29.7	-495.4	424.5

本人選手は上位選手と比べて膝関節がより屈曲した姿勢で接地し、その後の屈曲の大きさには差がないことを示していると考えられる。

屈曲角速度の最少値は富士の 7 周目の  $-252.4\text{deg/s}$ 、最大は杉原の 12 周目の  $-495.4\text{deg/s}$  であった。伸展角速度は、全員でレース終盤に大きくなる傾向が見られた。デファアは屈曲角速度および伸展角速度ともに大きな変化は見られなかった。

表 13 は、大腿角速度の 1 サイクルの最大値 (前方スウィング) と最小値 (後方スウィング) およびそれらの和を示したものである。デファアは 1, 8 周目では最小値はあまり大きくないが、最大値は大きく、その和は正であった。12 周目では最小値と最大値ともに増大していた。富士と杉原は最大値は小さくなく、最小値との和は負の値であった。すなわち、デファアは大腿を後方ばかりで

なく、前方へもすばやくスウィングしているのに対し、日本人選手は前方へのスウィングが弱いことを示していると考えられる。

以上のことから、デファアは膝関節の屈曲および伸展動作はあまり大きくないが、大腿の後方へのスウィングが大きくかつ強く、さらに前方への大腿スウィング動作も同時に強く行なわれていたことが示された。日本人選手は下腿の動作は上位選手と差はないが、大腿が腰に対してより前方でスウィングされており、とくに前方へのスウィングが弱いことが示されたと考えられる。

#### 4) デファアの特徴と日本人選手の課題

デファアは身長が 1.55m と小さいにも関わらず、レース序盤から大きなストライドでゆったりとしたピッチで走っており、身長あたりのストライド、滞空時間比は大きかった。そして、ラストスパートにおいてはそれらがさらに大きく増大

表 13 女子 5000mにおける大腿角速度の最大値(前方スウィング)および最小値(後方スウィング)とその和

Subjects	rap	Thigh (deg/s)		
		Min	Max	Max+Min
1 M. Defar (ETH)	1	-499.5	589.6	90.1
	8	-496.4	549.0	52.7
	12	-620.4	649.5	29.1
2 V. Cheruiyot (KEN)	1	-510.8	486.5	-24.3
	8	-551.4	560.9	9.5
3 P. Cherono (KEN)	1	-503.9	522.5	18.6
	8	-630.7	503.2	-127.6
14 K. Fukushi (JPN)	1	-468.5	493.3	24.8
	7	-542.6	484.1	-58.5
	12	-550.5	456.8	-93.7
9(H2) K. Sugihara (JPN)	1	-460.4	431.2	-29.1
	8	-584.4	482.1	-102.3
	12	-604.6	536.5	-68.2

していた。EI と Kv はレース序盤から終盤まで高く保たれており、ラストスパートでは MP, Kv, および Tb が大きく増大していた。大腿のスウィング速度も大きく、かつ前方へのスウィング速度がやや大きかった。すなわち、いわゆる「ばねのある」走りで大腿の前後へのスウィングもタイミングよく行なわれていたことをしており、これらは男子 5000m や 10000m の上位選手の特徴と似ていると言えよう。

日本人選手は、ストライドよりもピッチが大きく、下腿や大腿の動作範囲は上位選手と大きな変化はないが、後方へのスウィングが小さく、スウィング速度も遅かった。エネジェティクスの項目をみるとレース中盤までは上位選手と大きな差はなく、無駄のない効率的な走動作が行っていたと考えられる。しかし、ラストスパートにおいてはいずれも大きな変化がなく、走速度を増大することができていなかった。デファークはラスト 1 周を 58.6 秒で走っており、今後も国際大会では男子同様にラストスパートで勝敗が決することが予想される。このようなレースでアフリカ系の選手に対してどのようなレース戦術で戦うかはさらに検討する必要があるが、走動作に関しては、女子選手でもトラックレースにおいては男子同様により高い走速度で走ることができる走動作を身につけ、ラストスパートで大きく走速度を増大できる筋力・パワーを養うことが重要な課題であろう。

## 6. 女子 10000m

### 1) 走速度, ストライド, およびピッチ

表 14 は、女子 10000m 決勝レースにおける上位 3 選手と日本人選手の 1000m ごとの通過タイムとラップタイムを示したものである。最初の 1000m は 3 分 29 秒とゆっくりのペースで、前半の 5000m も 16 分 30 秒と遅く、日本人選手も先頭集団に含まれていた。7000m 以降でペースアップし、7000~8000m で 3 分 06 秒、8000~9000m でおよそ 3 分 02 秒のペースになり、この時点で日本人選手は先頭から大きく遅れていた。ラスト 1000m は、優勝したディババ (エチオピア) が 2 分 44 秒、2 位のアベイレゲッセ (トルコ) が 2 分 51 秒、3 位のガウチャー (アメリカ) が 2 分 52 秒であったのに対し、福士は 3 分 15 秒、絹川は 3 分 12 秒、脇田は 3 分 15 秒であった。ディババのラスト 1000m は 1500m の日本記録に相当するペースであった。

図 13 は、上位 3 選手と日本人選手の分析区間における走速度、ストライドおよびピッチの変化を示したものである。上位 3 選手の走速度がレース終盤で大きく増大しているのに対し、日本人選手は減少していた。

ストライドは、レース序盤からディババが最も大きく、レース終盤で増大し、24 周目で最大 (1.77 m) であった。アベイレゲッセとガウチャーもレース終盤で増大していたが、日本人選手は 20 周目で一度減少し、24 周目で再び増大していた。

ディババのピッチは、13 周目で最小値 (2.93 steps/s) となり、その後増大していた。アベイレゲッセとガウチャーでは、レースを通してほぼ一定であり、3.24 と 3.33 steps/s であった。日本人選手のピッチは、福士は 19 周目 (3.43 steps/s)、絹川は 12 周目 (3.43 steps/s)、脇田は 14 周目 (3.64 steps/s) で最も大きく、その後減少していた。

図 14 は、上位 3 選手と日本人選手の分析区間における支持時間、非支持時間および滞空時間比の変化を示したものである。ディババの支持時間は、レースを通してあまり変化しなかったが、ガウチャーはレース序盤で大きく、徐々に減少しており、アベイレゲッセも 21 周目で減少し、最小値 (0.142 秒) となっていた。日本人選手はレース終盤でやや増大していた。

非支持時間は、ディババとアベイレゲッセはレースを通して大きく、21 周目でともに最大値 (0.167 秒) を示した。ガウチャーと脇田は増大、福士と絹川は減少していた。

滞空時間比は、ディババとアベイレゲッセはレース序盤から大きく、アベイレゲッセは 21 周目で最大値 (1.18) を示した。ガウチャーは 4 周目で最小値 (0.54) を示したが、その後は徐々に増大しており、反対に福士は 5 周目では上位選手と差はなかったが、その後は徐々に減少していた。

ディババは、5000m 優勝のデファークらと同様に大きなストライドを維持する走りであったこと

表 14 女子 10000m 決勝上位 3 選手と日本人選手の 1000m ごとの通過タイムとラップタイム

	1. T. Dibaba (ETH)		2. E. Abeylegesse (TUR)		3. K. Gaucher (USA)		10. K. Fukushi (JPN)		14. M. Kinukawa (JPN)		15. A. Wakita (JPN)													
1000m	3	: 28.99	3	: 29.63	3	: 29.64	3	: 29.16	3	: 29.36	3	: 29.31												
2000m	6	: 44.44	3	: 15.45	6	: 44.23	3	: 14.60	6	: 44.74	3	: 15.10	6	: 43.63	3	: 14.47	6	: 44.99	3	: 15.63	6	: 45.10	3	: 15.79
3000m	9	: 54.66	3	: 10.22	9	: 55.22	3	: 10.99	9	: 55.83	3	: 11.09	9	: 55.31	3	: 11.68	9	: 56.04	3	: 11.04	9	: 56.02	3	: 10.92
4000m	13	: 10.93	3	: 16.26	13	: 11.35	3	: 16.13	13	: 11.50	3	: 15.66	13	: 11.17	3	: 15.86	13	: 11.84	3	: 15.81	13	: 11.97	3	: 15.95
5000m	16	: 31.49	3	: 20.57	16	: 30.28	3	: 18.93	16	: 30.61	3	: 19.12	16	: 26.72	3	: 15.56	16	: 31.01	3	: 19.17	16	: 30.77	3	: 18.80
6000m	19	: 49.23	3	: 17.74	19	: 43.59	3	: 13.31	19	: 43.45	3	: 12.84	19	: 39.31	3	: 12.59	19	: 44.60	3	: 13.59	19	: 44.41	3	: 13.64
7000m	23	: 01.61	3	: 12.38	22	: 58.87	3	: 15.28	22	: 58.73	3	: 15.28	22	: 54.28	3	: 14.96	22	: 59.70	3	: 15.10	22	: 59.39	3	: 14.98
8000m	26	: 09.21	3	: 07.60	26	: 05.74	3	: 06.87	26	: 06.44	3	: 07.70	26	: 05.15	3	: 10.87	26	: 14.72	3	: 15.03	26	: 14.14	3	: 14.74
9000m	29	: 11.06	3	: 01.85	29	: 08.30	3	: 02.56	29	: 09.88	3	: 03.44	29	: 18.03	3	: 12.88	29	: 33.11	3	: 18.38	29	: 33.75	3	: 19.62
10000m	31	: 55.41	2	: 44.35	31	: 59.40	2	: 51.10	32	: 02.05	2	: 52.17	32	: 32.85	3	: 14.82	32	: 45.19	3	: 12.08	32	: 48.68	3	: 14.93

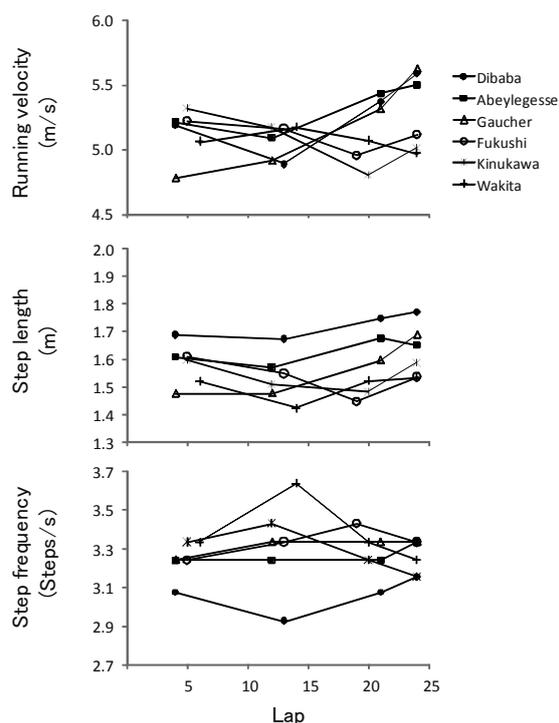


図 13 女子 10000m 決勝上位 3 選手と日本人選手の走速度、ストライドおよびピッチの変化

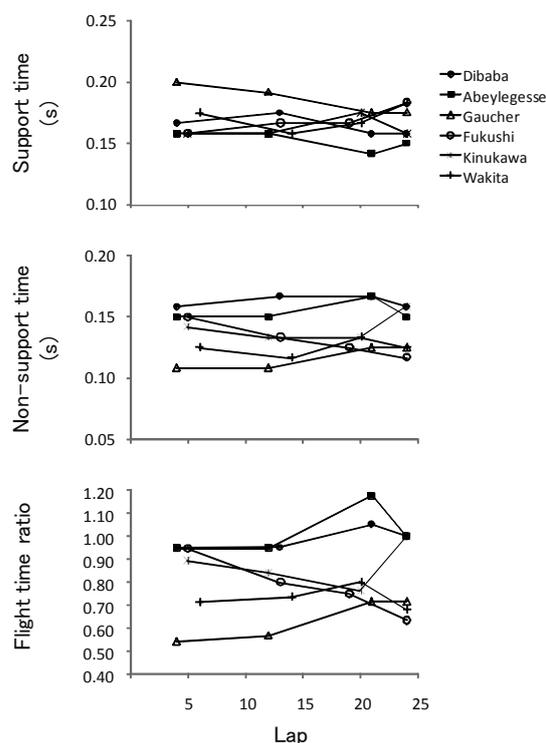


図 14 女子 10000m 決勝上位 3 選手と日本人選手の支持時間、非支持時間および滞空時間比の変化

がわかるが、アベイレゲッセはややピッチが大きい、ガウチャーはさらにストライドが小さく、ピッチが大きかった。身長はディババが 1.55m、アベイレゲッセが 1.59m、ガウチャーが 1.70m とガウチャーが一番大きかった。このようにストライドとピッチの組み合わせは、身長よりも選手のタイプが大きく表れていると考えられ、女子 10000m では上位選手の間でもタイプが大きく異なる選手がいたことがわかった。

## 2) エナジェティクス

図 15 は、上位 3 選手と日本人選手の力学的エネルギー利用の有効性指数 (EI)、平均パワー

(MP)、有効鉛直スティフネス ( $K_v$ )、力学的エネルギーの伝達量 ( $T_b$ ) の変化を示したものである。

EI の最小値は、ガウチャーの 12 周目で 1.59、最大値はアベイレゲッセの 24 周目で 3.41 であった。ディババの EI は、13 周目で 2.56 と一度大きくなっていったが、その後減少し、21 周目で 1.74、24 周目で 1.69 であった。絹川と脇田の EI はレース序盤で大きかったが、終盤で減少していた。

ディババの MP は、13 周目で 6.8 W/kg と小さかったが、21、24 周目で 12.7、14.6 W/kg と大きく増大していた。他の選手では大きな変化はみられなかった。

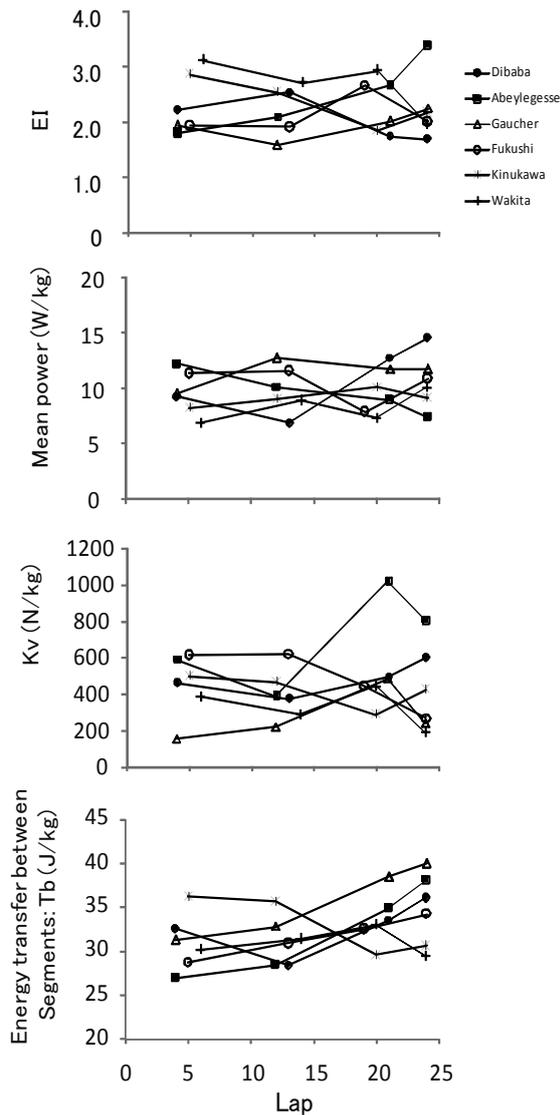


図 15 上位 3 選手と日本人選手の力学的エネルギー利用の有効性指数 (EI)、平均パワー (MP)、有効鉛直スチフネス (Kv)、力学的エネルギーの伝達量 (Tb) の変化

Kv は、アベイレゲッセが 12 周目では小さかったが、21 周目で大きく増大して 1019.2 N/m/kg と最大値を示した。ガウチャーは 4 周目で 153.7 N/m/kg と最も小さく、レースを通して低い値で推移していた。

Tb では、ディババの 4 周目を除くとディババ、アベイレゲッセ、ガウチャー、福士がレース終盤にかけて増大していた傾向がみられ、ガウチャーは 24 周目で 40.0 J/kg と最も大きかった。一方、絹川は 4、12 周目で大きかったが、その後減少しており、脇田は 21 周目までは増大していたが、24 周目で減少していた。

以上のことから、ディババはレース序盤から中盤にかけて EI、MP、Kv、Tb など平均的であっ

た。そして、さらに 24 周目でのラストスパートにおいて、EI は低下していたが、MP、Kv、Tb が増大しており、エナジェティクス的にみてバランスのよい走動作を維持していたことを示唆していると考えられる。アベイレゲッセは EI と Kv が大きく、ガウチャーは MP と Tb が大きく、異なるエナジェティクスの特徴をもっていたことが示されたと考えられる。日本人選手では、福士の Tb がレース終盤でも増大していたものの、絹川や脇田はレース序盤では EI や Tb が大きかったが、レース終盤まで維持することができず、走速度の低下と関係していたと考えられる。

### 3) 下肢動作

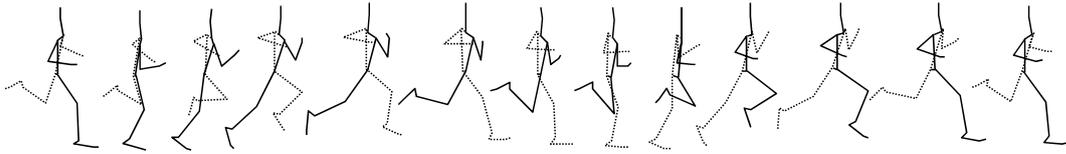
図 16 は、上位 3 選手の 21 周目および日本人選手の 20 周目 (福士は 19 周目) における 1 サイクルの走動作のスティックピクチャーを示したものである。

図 17 は、上位 3 選手と日本人選手の大腿の最大時、接地時、離地時および最小時の角度を示したものである。ディババの 4 周目における大腿の最大時、接地時、離地時、最小時角度はそれぞれ 55.6、31.2、-24.1、-30.3 度、24 周目においてはそれぞれ 57.0、32.0、-29.5、-32.5 度であった。大腿の動作範囲は大きくかつレースを通して大きな変化がなかったことが示されていると考えられる。アベイレゲッセはレース終盤で最大時および最小時の角度が増大していた。ガウチャーは離地時から最小までの角度変化が非常に小さかった。日本人選手の大腿の動作は男子選手ほど上位選手との差は見られないものの、上位選手と比較すると福士は離地時の角度が小さいこと、絹川は最大時と接地時の角度変化が大きいことが示された。

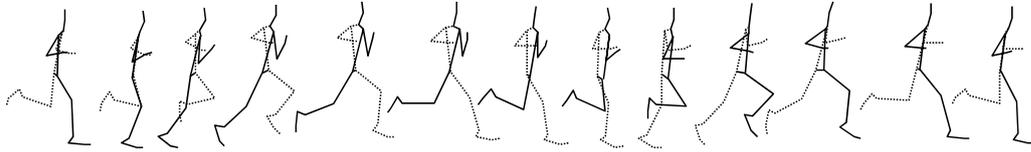
図 18 は、上位選手と日本人選手の大腿角速度の最大値と最小値の変化を示したものである。最大値は大腿の前方スウィングを、最小値は後方スウィングを示している。ディババの最大値はレース序盤ではとくに大きくなかったが、終盤で増大し、24 周目では 583.4deg/s まで増大していた。一方、最小値は 24 周目で負に大きくなっているものの他の選手と比較してとくに大きくはなかった。アベイレゲッセの最大値は 21 周目で 588.2deg/s と増大していたが 24 周目では減少していた。福士は最大値と最小値ともに小さい値で推移していた。脇田の最小値は 20 周目で -569.2deg/s と最も負に大きかった。

以上のことから、大腿の最大および最小角度は競技レベルや走速度よりも選手の特徴が表れていたと考えられ、女子では男子ほど上位選手と日本人選手の間で動作範囲には大きな差は見られなかった。一方、大腿の後方スウィング速度は競技レベルや走速度による差はみられなかったが、

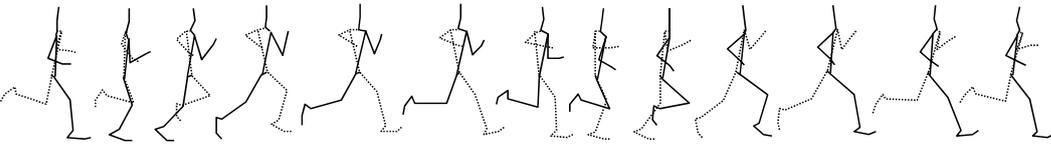
### Dibaba



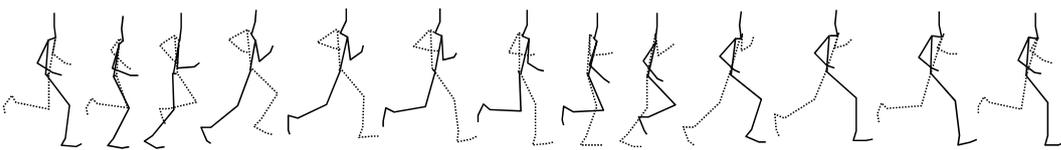
### Abeylegesse



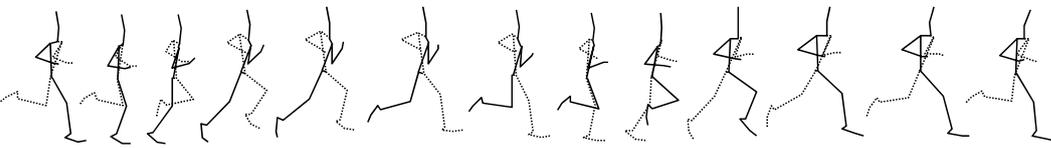
### Gaucher



### Fukushi



### Kinukawa



### Wakita

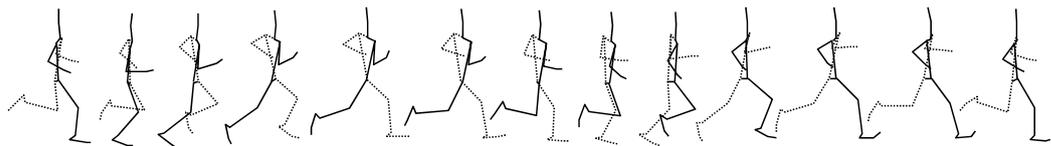


図 16 女子 10000m の上位 3 選手の 21 周目および日本人選手の 20 周目（福士は 19 周目）における 1 サイクルの走動作のスティックピクチャ

前方スウィング速度は上位選手では走速度の増大とともに増大していることがわかった。福士選手は大腿のスウィング速度が弱いですが、レース序盤では上位選手と同等の走速度で走っていることは、効果的なキック動作をしていたと考えられる。

#### 4) ディババの特徴と日本人選手の課題

ディババ選手は、ラストスパートで 5000m や 1500m の選手と同等の高いスピード維持能力を示した。ここでは非常に大きいストライドを獲得し、ピッチも増大していた。レースを通して滞空時間比が大きく、EI が大きく保たれていて、そ

のうえでラストスパートにおいて MP および Kv が増大していた。大腿も前後にバランスのとれた、大きく、かつ速いスウィングであった。これらの特徴は、5000m で優勝したデファーとほぼ同様であった。女子 10000m の上位選手でもガウチャーとはまったく異なる走動作の特徴を示していることから、エチオピアでは意図的にこのような走動作を身につけている可能性が示唆される。

一方、日本人選手はレース中盤から終盤で上位選手から遅れていたが、福士はストライドの減少とピッチの増大がみられたが、絹川と脇田はストライドの増大とピッチの減少がみられた。福士と

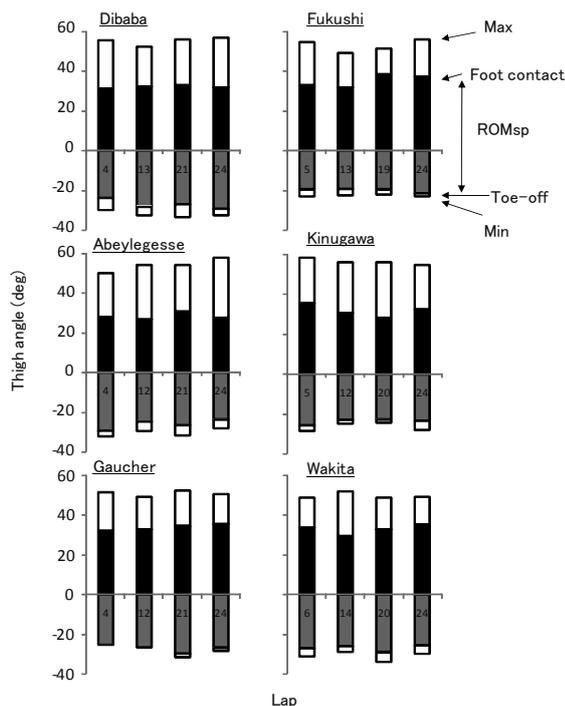


図 17 女子 10000m における上位 3 選手と日本人選手の大腿の最大、接地時、離地時、および最小の角度

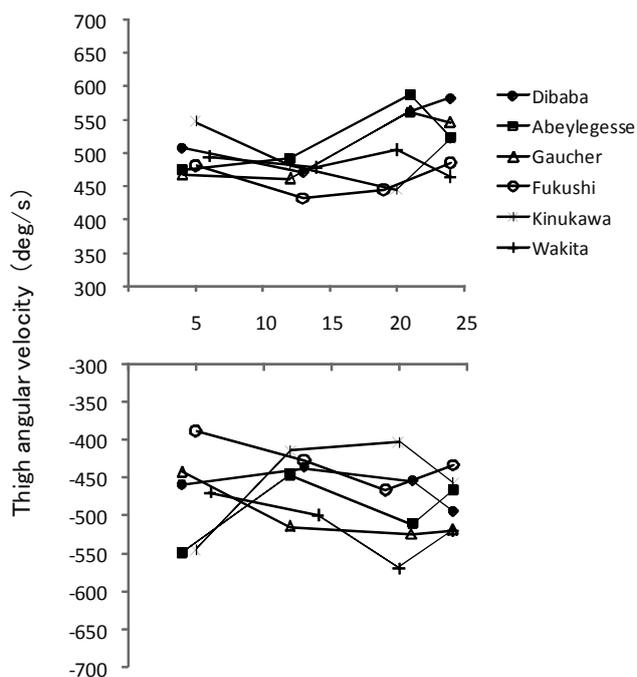


図 18 女子 10000m 決勝上位 3 選手と日本人選手の大腿角速度の最大値（前方スウィング）と最小値（後方スウィング）の変化

絹川はレース序盤では上位選手と大きな差はなかったが、中盤以降でエナジェティクスや大腿のスウィングに差がみられた。脇田も含めて日本人選手のバイオメカニクスの項目は、上位選手と大きく差がみられないことから、大会へ向けてのコンディショニングやレースの戦術などを工夫することで上位に入るとは十分に可能であると考えられる。一方でラストスパートでは 5000m と同様に大きなストライドを獲得するための走動作、筋力およびパワーを身につけなければいけないと考えられるが、ガウチャーのようにアフリカ系選手とは異なる走動作で 3 位になっていることは日本人選手にとって手本になるとともに、日本人選手の特徴を生かした走動作やレースプランを工夫することが重要であることを示唆していると考えられる。

#### 引用文献

- 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. *Jpn J Sports Sci* 15, 155-162.
- 榎本靖士, 阿江通良, 岡田英孝, 藤井範久 (1999) 力学的エネルギー利用の有効性からみた長距離走の疾走技術. *バイオメカニクス研究* 3 (1), 12-19.
- Pierrynowski M R, Winter D A, Norman R W (1980) Transfer of mechanical energy within the total body and mechanical efficiency during treadmill walking. *Ergonomics* 23 (2), 147-156.
- Williams K R, Cavanagh P R (1987) Relationship between distance mechanics, running economy, and performance. *Journal of Applied Physiology* 63, 1236-1245.

# 走幅跳のバイオメカニクスの分析

## Biomechanical Analysis of Long Jump

小山 宏之<sup>1)</sup> 村木 有也<sup>2)</sup> 吉原 礼<sup>3)</sup> 永原 隆<sup>4)</sup>  
柴山 一仁<sup>4)</sup> 大島 雄治<sup>4)</sup> 高本 恵美<sup>2)</sup> 阿江 通良<sup>5)</sup>

1) 筑波大学体育センター 2) 大阪体育大学 3) (株) オーエルシー・キッチンテクノ  
4) 筑波大学大学院 5) 筑波大学

Hiroyuki Koyama<sup>1)</sup>, Yuya Muraki<sup>2)</sup>, Aya Yoshihara<sup>3)</sup>, Ryu Nagahara<sup>4)</sup>,  
Kazuhiro Shibayama<sup>4)</sup>, Yuji Oshima<sup>4)</sup>, Megumi Takamoto<sup>2)</sup>, Michiyoshi Ae<sup>5)</sup>

1) Physical Education Center of University of Tsukuba, 2) Osaka University of Health and Sport Sciences,  
3) OLC Kitchen Techno Co., Ltd., 4) Graduate School of University of Tsukuba,  
5) University of Tsukuba

### 1. はじめに

第 11 回世界陸上競技選手権大阪大会の走幅跳の男子決勝は 2007 年 8 月 30 日 (気温 29 度, 湿度 70%) に予選を通過した 12 名で行われた. 結果はサラディノが 8m57 のアフリカ新記録を樹立し優勝し, 以下, ハウ (8m47) と続き, 前回世界選手権優勝のフィリップス (8m30) は 3 位であった. 日本からは荒川選手が出場したが決勝進出には至らなかった.

大阪大会の予選通過記録, 決勝 8 位の記録を見ると, それぞれ 7m99, 7m98 であり, 8m00 を安定して超えることが本大会での入賞の条件であった. ここで, 第 1 回世界陸上から大阪世界陸上大会までの予選通過記録, 優勝, 3 位, 8 位記録の推移 (図 1) を見ていくと, 優勝記録, 3 位入賞記録は大会ごとのばらつきが大きいものの, 予選通過ライン, 8 位入賞ラインは 8m 弱の記録から大きく変動していないことがわかる. すなわち, 世界大会における入賞条件は 8m を安定して跳躍することであり, 日本選手も十分に入賞可能な範囲で世界の競技レベルは推移しているといえるだろう.

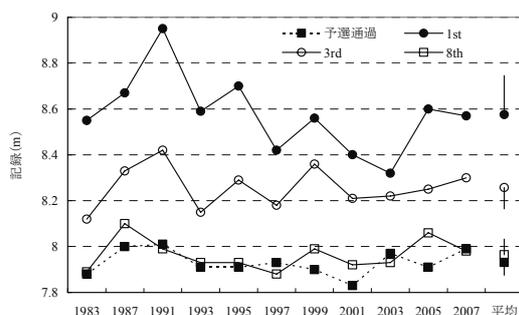


図 1 世界陸上大会における男子走幅跳の優勝記録, 3 位, 8 位および予選記録の変化

ここでは, 大阪大会の入賞選手の跳躍動作をキネマティクスの的に分析し, これまで行われた世界大会のデータと比較しながら, 世界一流走幅跳選手の跳躍動作の特徴およびその動向について報告する.

### 2. 方法

#### 2.1 分析対象選手

表 1 に男子入賞選手 8 名および日本人選手 (荒川選手) を分析の対象とした. 分析試技は決勝ラウンド (日本選手については予選ラウンド) において最も記録の良い試技とした.

表 1 競技成績, 分析試技および身体特性

順位	氏名	国名	身長 (m)	体重 (kg)	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
1	サラディノ	PAN	1.76	70	x	8.30	8.46	x	x	8.57
					1.1m/s	0.5m/s	0.0m/s	0.0m/s	-0.3m/s	0.0m/s
2	ハウ	ITA	1.84	73	x	8.13	x	8.12	8.20	8.47
					1.1m/s	-0.1m/s	0.2m/s	0.7m/s	0.2m/s	-0.2m/s
3	フィリップス	USA	1.81	80	8.30	x	x	8.02	x	8.22
					0.4m/s	0.0m/s	-0.1m/s	0.3m/s	0.1m/s	0.0m/s
4	ルカシェビチ	UKR	1.75	70	x	8.17	x	8.05	8.13	8.25
					0.0m/s	0.4m/s	0.5m/s	0.7m/s	0.4m/s	0.2m/s
5	モコエナ	RSA	1.90	60	7.98	7.86	8.19	8.18	8.15	8.19
					0.2m/s	-0.1m/s	0.4m/s	0.7m/s	0.0m/s	-0.1m/s
6	ベックフォード	JAM	1.83	73	8.09	8.03	8.03	8.17	8.17	x
					0.3m/s	0.6m/s	0.6m/s	0.0m/s	0.1m/s	0.0m/s
7	バジ	SEN	1.92	79	7.90	8.01	x	7.90	x	7.64
					0.6m/s	0.1m/s	-0.1m/s	0.4m/s	0.0m/s	0.1m/s
8	マルズーク	KSA	1.84	63	x	7.98	7.70	x	-	x
					0.8m/s	0.0m/s	-0.3m/s	0.4m/s	-	0.1m/s
予選	荒川	JPN	1.79	73	7.62	x	x	-	-	-
					0.8m/s	-0.4m/s	1.1m/s	-	-	-

太字の試技が分析試技

#### 2.2 撮影方法とデータ処理

踏切 3 歩前から踏切までの動作を分析するために, 観客席最上段に 2 台のハイスピードビデオカメラ (250 Hz, 1/1000 s) を設置し, 選手の動作を斜め前方および後方から撮影した. 各カメラの映像から選手の身体分析点 23 点の 3 次元座標を算出するために, 7 つのコントロールポイントを取り付けた高さ 3m のキャリブレーションポールを分析範囲内の 14 箇所に順次設置し, 競技会前に撮影した.

各カメラの映像をデジタイズし、身体分析点 23 点の 2 次元座標を得た後、3 次元 DLT 法を用いて 3 次元座標へと変換した。なお、3 次元座標の変換にあたり、進行方向（助走方向）右向きを x 軸、進行方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とした。2 台のカメラの同期には、足の接地のコマを用いた。得られた 3 次元座標は Butterworth low-pass digital filter を用いて遮断周波数 4.8 Hz から 8.4 Hz の範囲で平滑化した。

各測定項目間の関係を検討するために相関係数を算出した。なお、跳躍距離は公式記録と踏切における損失（踏切足の爪先から踏切板端までの距離）の和とした。

### 2.3 測定項目と測定法

得られた 3 次元座標から阿江（1996）の身体部分係数を用いて全身の身体重心および以下に示す項目を求めた。

- 跳躍距離の 3 要素（図 2）
- 身体重心高および位置
- 身体重心速度
- 踏切局面および踏切準備における身体部分角度および関節角度（図 3）
- 踏切準備局面におけるストライド（図 4）
- 踏切準備局面の各時点における身体部分および関節角度

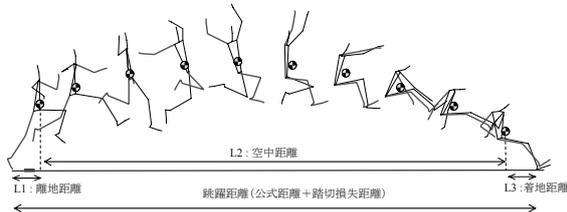


図 2 走幅跳の距離構成要素



図 3 セグメント、関節および肩と腰回転角度定義

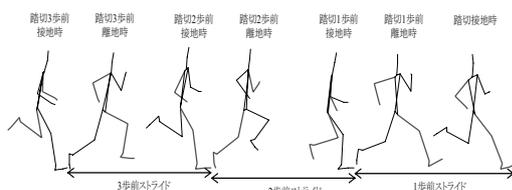


図 4 踏切準備局面におけるストライド

## 3. 結果および考察

### 3.1 跳躍距離を決定する要因

図 2 に示したように、跳躍距離は離地距離、空中距離、着地距離の総和で決定する。表 2 は男子走幅跳入賞選手の跳躍距離に関する結果を示している。跳躍距離の約 90% は空中距離が占め、入賞者で空中距離が最も大きかったのは優勝したサラディノの 7.80m であった。距離の 3 要素と跳躍距離の関係を見ると、空中距離のみ跳躍距離との間に有意な相関関係が見られた ( $r=0.968$ ,  $p<0.05$ )。一方、離地距離と着地距離はばらつきが小さく、跳躍距離と有意な関係は見られなかった。以上の結果は、当然のことであるが跳躍距離の増大は大きい空中距離を獲得することが最重要であるといえる。なお、着地および離地距離と身長の関係を見たが、どちらも身長との間に有意な関係は見られず、各距離の大きさはその時点の姿勢によって決定していた。

表 2 跳躍距離に関するパラメータ

	跳躍距離 (L1+L2+L3)	離地距離 (L1)	空中距離 (L2)	着地距離 (L3)	踏切損失距離
サラディノ	8.58	0.39	7.80	0.39	-0.01
ハウ	8.50	0.44	7.70	0.36	-0.03
フライップス	8.31	0.44	7.61	0.26	-0.01
ルカシェビチ	8.26	0.36	7.47	0.43	0.00
モコエナ	8.27	0.39	7.42	0.46	-0.08
ベックフォード	8.20	0.51	7.37	0.32	-0.03
バジ	8.09	0.51	7.12	0.46	-0.08
マルズーク	8.04	0.50	7.13	0.41	-0.05
平均±SD	8.28±0.19	0.44±0.06	7.45±0.25	0.39±0.07	-0.04±0.03
荒川	7.69	0.38	6.89	0.42	-0.07

### 3.2 踏切

#### 3.2.1 重心速度

表 3 は大阪、東京、アテネ世界陸上大会入賞選手の踏切局面の重心速度に関するパラメータを示している。大阪大会で踏切接地時の水平速度が最も大きかったのはハウの 10.87m/s であり、優勝したサラディノの踏切接地時水平速度は入賞者中 3 番目の 10.52m/s であった。

これまでに報告された 3 大会の結果から、11.0m/s を超える水平速度で接地していたのは、東京大会のパウエルとルイスのみであり（パウエル、11.00m/s、ルイス、11.06m/s）、2 人の速度が極めて大きかったことが改めて明らかとなった。

走幅跳の跳躍距離は踏切接地時および離地時の重心水平速度と強い正の相関関係があることがたびたび報告され、東京世界陸上の分析においても非常に強い正の相関関係が報告されている（接地時水平速度と跳躍距離、 $r=0.938$ ,  $p<0.01$ ；離地時水平速度と跳躍距離  $r=0.758$ ,  $p<0.05$ ）。しかし、大阪大会では水平速度と跳躍距離の間に有意な関係は見られなかった（接地時水平速度、 $r=0.574$ , n.s.；離地時水平速度、 $r=0.150$ , n.s.）。

表2 踏切局面の重心速度に関するパラメータおよび踏切時間

	踏切接地時		踏切脚膝最大屈曲時		踏切離地時		踏切における		踏切後半の 跳躍角度 (deg)	踏切時間		合計時間
	水平速度 (m/s)	鉛直速度 (m/s)	鉛直速度 (m/s)	鉛直速度獲得比 (%)	水平速度 (m/s)	鉛直速度 (m/s)	水平速度の減少 (m/s)	鉛直速度増加量 (m/s)		前半時間 (s)	後半時間 (s)	
サラディノ	10.58	9.23	2.61	69.6	8.90	3.75	-1.68	1.14	22.9	0.056	0.068	0.124
ハウ	10.87	9.56	2.42	69.9	9.26	3.46	-1.61	1.04	20.5	0.064	0.068	0.132
フィリップス	10.38	8.97	2.70	73.6	8.96	3.67	-1.42	0.97	22.3	0.064	0.072	0.136
ルカシェビチ	9.97	8.87	2.29	60.6	8.27	3.78	-1.70	1.49	24.6	0.048	0.064	0.112
モコエナ	10.12	8.70	2.31	62.3	8.33	3.71	-1.79	1.40	24.0	0.056	0.08	0.136
ベックフォード	10.63	9.49	2.01	61.8	9.05	3.25	-1.58	1.24	19.8	0.048	0.08	0.128
バジ	10.16	9.38	1.34	42.3	8.83	3.17	-1.33	1.83	19.8	0.048	0.096	0.144
マルズーク	10.22	9.16	1.84	61.1	9.03	3.01	-1.19	1.17	18.4	0.052	0.08	0.132
平均±SD	10.37±0.30	9.17±0.31	2.19±0.45	62.7±9.6	8.83±0.35	3.48±0.30	-1.54±0.21	1.29±0.28	21.5±2.2	0.055±0.007	0.076±0.10	0.131±0.010
荒川	10.08	9.34	1.67	53.9	8.98	3.10	-1.10	1.43	19.1	0.044	0.068	0.112
東京世界陸上*												
パウエル (8.95m)	11.00	-	-	-	9.09	3.70	-1.91	-	22.1	-	-	0.120
ルイス (8.91m)	11.06	-	-	-	9.72	3.22	-1.34	-	18.3	-	-	0.120
3-8位 (8.15±0.17m)	10.39±0.14	-	-	-	8.80±0.12	3.44±0.19	-1.59±0.10	-	21.4±1.5	-	-	0.114±0.005
アテネ世界陸上**												
ベドロソ (8.42m)	10.82	-	-	-	8.72	3.86	-2.10	-	23.9	-	-	-
1~8位平均	10.64±0.17	-	-	-	8.81±0.21	3.36±0.24	-1.84±0.30	-	20.9±1.6	-	-	-
跳躍距離との 相関係数 (n=8)	0.607	0.110	0.776**	-	0.155	0.684*	-0.636*	-0.508	0.460	0.620	-0.676*	-0.288
空中距離との 相関係数 (n=8)	0.560	0.005	0.894**	-	0.124	0.755	-0.621	-0.621	0.525	0.660*	-0.787**	-0.380

一方、跳躍距離と有意な相関関係が見られたのは踏切脚膝最大屈曲時（MKF 時）の鉛直速度であり（ $r=0.775$ ,  $p<0.05$ ）、離地時の鉛直速度と跳躍距離との間には正の有意傾向が見られた（ $r=0.683$ ,  $p<0.1$ ）。また、空中距離と有意な相関関係が見られたのも MKF 時の鉛直速度（ $r=0.894$ ,  $p<0.05$ ）および離地時の鉛直速度（ $r=0.799$ ,  $p<0.05$ ）であり、水平速度との間に有意な関係は見られなかった。この結果は、東京大会のように極めて大きい水平速度の選手がいなく 8.00~8.60m の範囲で勝敗の決まった大阪大会では、水平速度の大きさよりも踏切で獲得する鉛直速度の大きさが順位（跳躍距離）に影響していたことを示している。また、幅広い競技レベルで見ただけでは水平速度の影響が大きい、同程度のレベルの場合には獲得する鉛直速度が重要となることを示した結果でもある。さらに跳躍角度を見ると、3大会の上位入賞選手12人のうち20度以下の跳躍角度で入賞した選手は水平速度の大きいルイス（18.3°）のみで、その他の選手も大阪大会2位ハウ（20.5°）、アテネ大会2位ウォルダ（21.3°）以外はいずれも22°以上の跳躍角度であった。一方、下位入賞選手を見ると20°以下で跳躍をしていた選手は半数の6人を占めた。この結果は、現在の一流選手は水平速度を生かした低い跳躍、鉛直速度の獲得が大きい高い跳躍のどちらも共存するが、上位選手は高い跳躍を行うタイプの選手であることを示している。

そして、踏切離地時の重心速度から大阪大会入賞選手を分類すると、1<sup>st</sup>サラディノ、2<sup>nd</sup>ハウ、3<sup>rd</sup>フィリップスは、水平および鉛直速度が共に大きい選手。4<sup>th</sup>ルカシェビチ、5<sup>th</sup>モコエナは、水平速度が小さいが、鉛直速度は大きい選手。6<sup>th</sup>ベックフォード、7<sup>th</sup>バジ、8<sup>th</sup>マルズークは、水

平速度は大きい、鉛直速度は小さい選手と分類され、水平速度が大きい選手よりも鉛直速度が大きい選手が上位であったといえる。

これまでの踏切動作の研究では、踏切前半（踏切接地時から MKF まで）に鉛直速度を高めることの重要性が指摘されている（Lees *et al.*, 1993, 1994）。上述したように、MKF 時鉛直速度は跳躍記録および空中距離との間に有意な正の相関関係があり、MKF 時鉛直速度と離地時鉛直速度の間にも有意な正の相関関係が見られた（ $r=0.790$ ,  $p<0.05$ ）。この結果は、これまでの研究の結果を裏づけるものであり、踏切前半の身体の起こし回転で鉛直速度をより高めることは大きい鉛直速度で空中に飛びだし、空中距離および跳躍距離の獲得につながることを示している。なお、下位入賞選手は踏切後半時間が長く、踏切後半の鉛直速度の増加は大きい傾向が見られたが（踏切後半時間と踏切後半鉛直速度増加量,  $r=0.630$ ,  $p<0.1$ ）、離地時の鉛直速度を高めることにはつながっていなかった。

### 3.2.2 踏切動作について

図5は入賞選手の踏切動作のスティックピクチャーを、表4は踏切局面における踏切脚膝関節角度、体幹角度、肩および腰の回転角度、踏切脚の引き戻し角度、振上脚大腿角度を示したものである。また、表5は各項目間の相関関係を示したものである。

#### 3.2.2.1 踏切脚の動作

踏切脚膝関節はルカシェビチ以外は約160°のほぼ伸展位で接地し（ルカシェビチ, 141.8°）、その後約17°屈曲し（最大屈曲位, 平均142°）、離地にむけて伸展していた。一般的に、踏切脚を

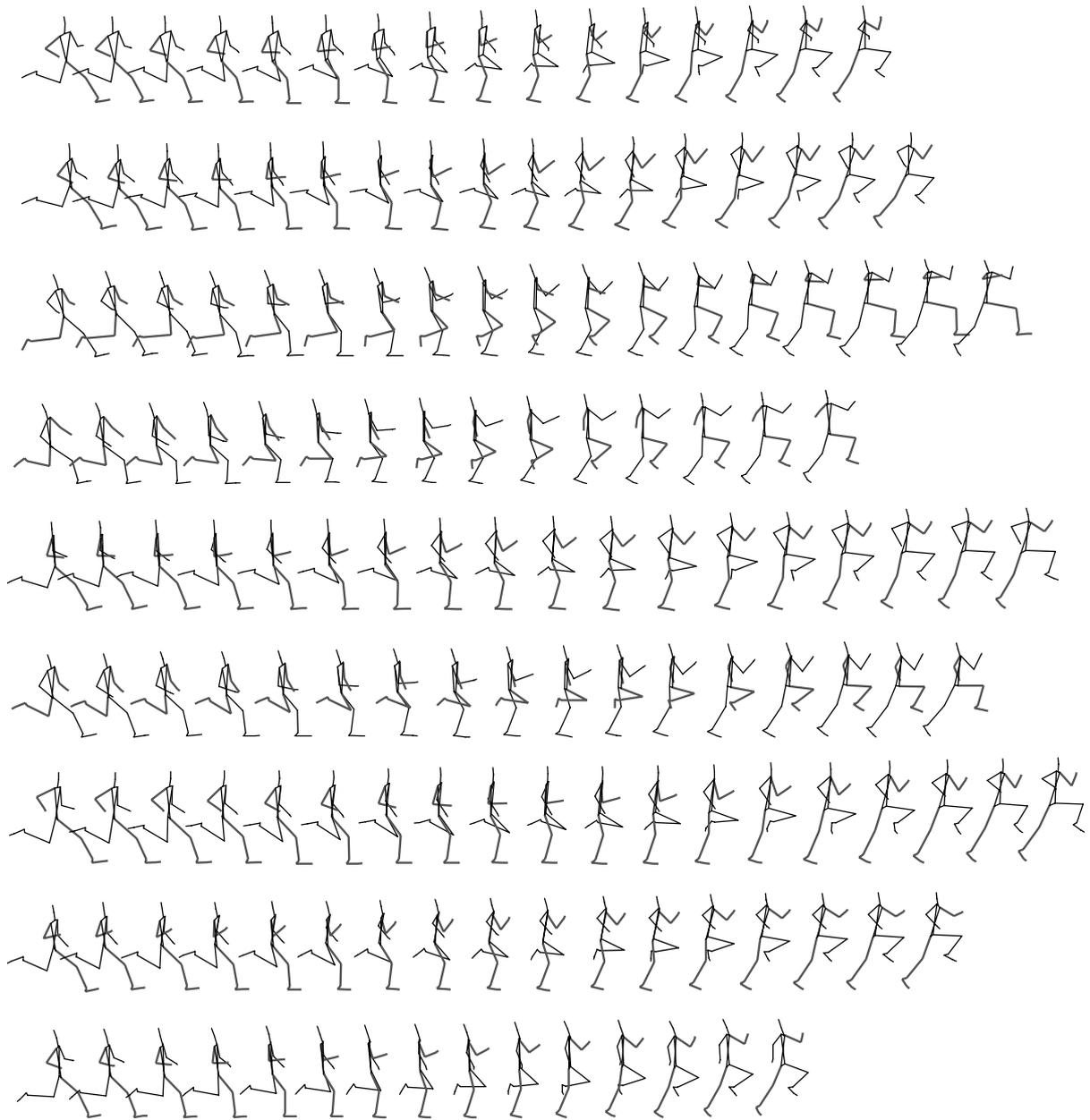


図5 入賞選手の踏切動作のスティックピクチャー

表4 踏切脚膝関節角度, 体幹角度, 肩および腰回転角度, 引き戻し角度に関する結果

	肩の回転			腰の回転			体幹の傾き			踏切脚膝角度				引き戻し角度 (矢状面)			引き戻し角度 (前額面)		引き戻し角速度 (矢状面)		
	接地	離地	動作範囲	接地	離地	動作範囲	接地	離地	動作範囲	接地	MKF	離地	屈曲量	伸展量	接地	離地	動作範囲	接地	離地	接地	離地
	(deg)			(deg)			(deg)			(deg)				(deg)			(deg)		(deg/s)		
サラディノ	-32.6	0.5	33.1	-1.1	-39.1	38.0	-2.3	5.6	7.9	160.2	143.2	168.4	17.0	25.2	37.3	-25.3	62.6	-2.6	-5.1	-364.3	-306.7
ハウ	-14.9	18.6	33.5	12.6	-21.9	34.5	-2.1	8.0	10.1	160.2	140.7	165.2	19.5	24.5	36.1	-31.0	67.1	-4.7	-5.7	-329.3	-410.0
フィリップス	-17.8	13.5	31.3	5.8	-17.8	23.6	-10.1	7.3	17.4	165.4	138.4	159.8	27.0	21.4	37.2	-28.3	65.5	-1.3	-7.1	-444.5	-362.2
ルカシェビチ	-12.9	15.3	28.2	1.7	-11.7	13.4	-3.9	-0.2	3.7	141.8	127.6	159.8	14.2	32.2	34.8	-24.1	58.9	-3.3	-3.2	-441.7	-361.0
モコエナ	-5.3	7.1	12.4	1.2	-31.1	32.3	-3.9	10.0	13.9	159.8	145.5	171.2	14.3	25.7	36.4	-21.9	58.3	-9.4	-8.8	-254.3	-297.1
ベックフォード	-18.5	2.4	20.9	5.7	-17.4	23.1	-3.1	7.8	10.9	155.3	139.0	165.2	16.3	26.2	35.4	-30.5	65.9	-1.3	-8.8	-408.2	-393.9
バジ	-16.1	8.9	25.0	11.4	-32.6	44.0	1.5	9.0	7.5	158.5	143.2	169.6	15.3	26.4	37.9	-27.2	65.1	-4.3	-4.0	-379.4	-316.1
マルズーク	-16.7	8.9	25.6	11.6	-15.1	26.7	-0.8	10.5	11.3	154.8	143.9	160.5	10.9	16.6	35.1	-28.2	63.3	-5.6	-5.4	-379.5	-365.7
平均	-16.9	9.4	26.3	6.1	-23.3	29.5	-3.1	7.3	10.3	157.0	140.2	165.0	16.8	24.8	36.3	-27.1	63.3	-4.1	-6.0	-375.2	-351.6
SD	7.6	6.2	7.1	5.3	9.8	9.7	3.3	3.4	4.2	8.0	5.7	4.6	4.8	4.5	1.1	3.1	3.3	2.7	2.1	62.3	41.1
荒川	-9.7	11.1	20.8	7.8	-18.5	26.3	-4.2	0.3	4.5	156.2	148.9	169.4	7.3	20.5	34.1	-26.2	60.3	-4.0	-5.7	-437.5	-477.8

表5 測定項目間の相関係数

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD
A 記録	-	0.574	0.150	0.683	0.589	0.775	0.460	-0.288	-0.448	0.022	0.500	-0.417	-0.415	0.191	-0.271	-0.291	-0.018	0.306	-0.011	0.210	0.458	0.229	0.255	0.031	0.058	0.216	0.009	-0.256	-0.650	-0.202
B 助走速度		-	0.815	-0.109	0.071	0.314	-0.378	0.106	-0.402	-0.010	0.422	0.275	-0.103	0.253	-0.027	0.239	0.215	0.484	0.247	0.097	0.412	-0.214	0.096	-0.736	0.739	0.108	-0.563	-0.500	-0.173	0.252
C 初速度x			-	-0.539	-0.520	-0.034	-0.774	0.355	-0.464	0.006	0.503	0.630	0.028	0.314	0.110	0.454	0.280	0.526	0.367	-0.124	0.332	-0.593	0.169	-0.907	0.928	-0.132	-0.572	-0.465	-0.023	0.316
D 初速度y				-	0.768	0.790	0.951	-0.468	-0.036	0.110	0.135	-0.788	-0.190	-0.237	-0.589	-0.602	-0.015	-0.038	-0.387	0.043	0.400	0.535	0.108	0.578	-0.517	0.054	0.306	0.256	-0.659	-0.570
E 速度減少					-	0.523	0.776	-0.415	-0.221	0.139	0.359	-0.551	0.024	-0.324	-0.758	-0.345	0.328	0.227	-0.221	-0.234	0.590	0.041	-0.043	0.136	-0.146	0.009	-0.092	0.009	-0.721	-0.432
F 跳躍高						-	0.609	-0.490	0.153	0.090	-0.085	-0.821	-0.142	-0.303	-0.483	-0.623	-0.117	-0.230	-0.433	0.073	0.175	0.624	0.005	0.764	-0.732	0.092	0.429	0.364	-0.488	-0.546
H 踏切時間							-	0.206	-0.043	-0.258	0.538	-0.383	0.678	0.149	0.848	0.568	0.747	0.750	0.446	0.202	-0.495	0.645	-0.224	0.437	0.368	0.218	-0.629	0.311	0.629	
I 肩回転①接地								-	0.488	-0.645	0.206	0.359	-0.249	-0.073	0.177	0.202	-0.208	-0.093	0.024	-0.193	0.142	-0.327	0.252	-0.355	0.353	-0.056	-0.024	0.203	0.136	
J ②離地									-	0.352	0.460	0.523	-0.276	-0.231	-0.229	0.000	-0.161	-0.449	-0.486	0.294	0.070	-0.206	-0.196	0.117	-0.146	-0.490	0.103	-0.599	-0.427	
K ②-①										-	0.182	0.074	0.025	-0.124	-0.390	-0.217	0.082	-0.294	-0.451	0.465	-0.090	0.171	-0.443	0.484	-0.506	-0.369	0.116	-0.742	-0.520	
L 膝回転①接地											-	0.281	0.261	0.383	0.503	0.100	0.173	0.235	-0.173	-0.026	-0.475	0.005	-0.707	0.679	-0.038	-0.522	-0.349	0.156	0.339	
M ②離地												-	-0.853	-0.334	-0.284	0.038	-0.504	-0.643	-0.864	0.024	-0.071	-0.768	-0.348	0.069	-0.567	-0.741	-0.524	-0.099	-0.429	
N ②-①													-	0.544	0.559	0.016	0.601	0.774	0.775	-0.038	-0.187	0.773	-0.034	0.300	0.545	0.461	-0.716	0.184	0.616	
O 体幹①接地														-	0.231	-0.615	-0.252	0.332	0.452	-0.757	0.046	0.015	-0.055	0.058	0.317	0.148	-0.282	0.559	0.530	
P ②離地															-	0.625	0.682	0.899	0.403	-0.067	-0.726	0.298	-0.266	0.358	0.546	0.095	-0.805	0.530	0.883	
Q ②-①																-	0.755	0.462	-0.039	0.554	-0.625	0.229	-0.171	0.243	0.189	-0.042	-0.426	-0.019	0.290	
R 膝屈曲①接地																	-	0.730	0.367	0.593	-0.549	0.714	-0.261	0.497	0.332	0.161	-0.703	-0.097	0.441	
S ②MKF																		-	0.638	-0.117	-0.614	0.495	-0.045	0.214	0.678	0.389	-0.878	0.448	0.886	
T ②離地																			-	-0.218	0.216	0.545	0.316	-0.115	0.750	0.608	-0.565	0.403	0.639	
U 屈曲																				-	-0.075	0.455	-0.326	0.470	-0.315	-0.224	0.012	-0.669	-0.403	
V 伸張																					-	-0.069	0.381	-0.390	-0.090	0.131	0.534	-0.154	-0.469	
W 引き戻し①接地																						-	0.059	0.289	0.151	0.546	-0.347	-0.158	0.152	
X ②離地																							-	-0.939	0.345	0.809	0.180	0.003	-0.125	
Y ①-②																								-	-0.279	-0.588	-0.292	-0.058	0.173	
Z 引き戻し速度①接地																									-	0.394	-0.792	0.287	0.731	
AA ②離地																										-	-0.107	0.173	0.178	
AB 振上①接地																												-	-0.179	-0.814
AC ②離地																													-	0.717
AD ②-①																														-

と鉛直速度の間に有意な相関 ( $r=0.84$ ,  $p<0.05$ ) 突っ張り、膝を曲げないほうが鉛直速度を高められると言われ、東京大会では最大屈曲時の膝角度が認められていたが、本大会ではそのような関係は見られなかった。この結果は、本大会ではルカシェビチのように接地時から膝の屈曲が大きい獲得した鉛直速度は大きい選手(ルカシェビチは大きく膝を屈曲した姿勢で接地しているが、接地後の屈曲量は小さい)がいたためであると考えられる。なお、踏切脚の突っ張りや屈曲と離地時鉛直速度の関係は見られなかったが、離地時鉛直速度に影響するのは、踏切前半で獲得する鉛直速度であり、踏切後半の鉛直速度ではないことは重要な点である。

踏切接地時の脚角度は、 $34.8^{\circ}$  ~  $37.9^{\circ}$  の範囲で選手間の差が小さかった。また、重心速度との相関も見られなかった。この結果は、引き戻し角度は選手の跳躍タイプ(低い跳躍、高い跳躍など)に関わらず、ほぼ同じであったことを示している。

東京大会と大阪大会を比較すると、大阪の入賞選手は大きな脚角度で接地し踏切中の動作範囲が大きい傾向が見られた。また、表3にあるように大阪大会入賞選手の踏切時間は東京大会に比べ若干であるが長い傾向が見られる。この結果から、大阪大会の入賞選手は踏切足を身体の前より前方に接地することで動作範囲を大きくし、長い踏切時間で速度変換を行う動作をしていたと考えられる。踏切足回りの前方回転と重心速度の関係を見ると、踏切中の脚の引き戻し角度変位および離地時の引き戻し角度が離地時水平速度と非常に強い相関(角度変位と水平速度  $r=0.928$ ,  $p<0.05$ ; 離地時角度と水平速度,  $r=-0.907$ ,  $p<0.05$ )を示した。この結果は、踏切局面において踏切足回りの身体の前より前方回転を大きくし、離地時に上体が前方に出ているほど大きい水平速度で離地できていたことを示している。

ここで、典型例として踏切中の減速が大きく跳躍角の大きいモコエナと、減速が少なく跳躍角の小さいマルズークの踏切脚と身体重心の動きを

図6に示した。離地時水平速度が大きく低い跳躍のマルズークは踏切足回りの脚の回転、特に下腿を前方へ回転させながら重心の前方への移動を大きくして踏み切ることによって水平速度を維持し、モコエナは下腿をあまり倒さず、少ない脚の前方回転で重心を上方へ移動させ鉛直速度の大きい高い跳躍をしていたことがわかる。以上の結果から、入賞選手でもいくつかのタイプにわかれ、水平速度を生かす場合は踏切足回りの前方回転を大きくする、高い跳躍を目指す場合には回転を抑えることが重要と言えるであろう。

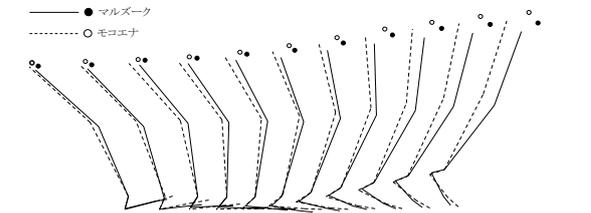


図6 モコエナ、マルズークの踏切脚のスティックピクチャーと重心位置(踏切全体を100%として10%毎に表示)

3.2.2.1 肩および腰の回転

いずれの選手も踏切脚側の肩を後方に引いた姿勢で接地し、その後踏切中に捻り戻しながら離地していた。東京大会では、離地時の肩回転角度および踏切中の肩回転角度変位は跳躍角度と有意な負の相関関係があると報告されているが、本大会ではそのような関係は見られなかった。

腰の回転は踏切脚側の腰がわずかに前方に出た姿勢で接地し、接地後は振上脚の振上げとともに振上脚側の腰が踏切脚側の腰を追い越し、離地時は振上脚側の腰がより前方に出ている。特に、サラディノは踏切接地時にすでに振上脚側の腰が踏切脚側よりも前方に出ている(踏切1歩前離地時は踏切脚側の腰が前方に出ている)、接地後の腰の前方への引き出しも最も大きかった。腰の回転角度と他の変数の相関関係を見ると、接地時

の腰回転角度が離地時鉛直速度との間に有意な負の相関関係 ( $r=-0.788$ ,  $p<0.05$ ) を、離地時水平速度との間に正の有意傾向 ( $r=0.630$ ,  $p<0.1$ ) を示した。また、接地時に腰の回転角度が小さい (振上脚側の腰をより前方に引き出している) ほど、MKF 時の鉛直速度が高い傾向も見られた。つまり、振上脚側の腰を前方に引き出して接地するほど、踏切中の鉛直速度獲得が大きく、後方に腰を残した姿勢で接地するほど、水平速度が維持され、高い水平速度で離地していたといえる。一方、踏切離地時の姿勢や踏切中の角度変位と速度の関係が弱いことは、踏切接地後の動作よりも、踏切接地時の姿勢が重要であることを示していると考えられる。

なお、ここで述べた腰と肩の回転の動作パターンはこれまで詳細な検討は行われておらず、本報告のデータ数も少ないため、今後データを追加して新たな示唆を引き出す必要がある。

### 3.3 助走

図7は入賞選手および荒川選手の踏切3歩前から踏切接地までのスティックピクチャーを示している。

#### 3.3.1 ストライド

表6は踏切3歩前から踏切までのストライド長を示している。表にはベスト試技に加えてその他の試技の平均値 (踏切板に明らかに足がっていない試技を除く) も同時に示した。踏切2歩前と1歩前を比較すると、バックフォード以外は踏切1歩前のストライドを2歩前より短くしていた。また、ベスト試技では長かったバックフォードも

その他の試技では踏切1歩前を短くしていた。この結果は、一般的にいわれる踏切2歩前は長い、踏切1歩前は短い「長・短」のストライド運びをいずれの選手も行っていたことを示している。しかし、ストライドの短縮量は選手によって様々であった。短縮量が非常に大きいタイプ (フィリップス、マルズーク、荒川)、短縮量が少ないタイプ (モコエナ、バックフォード、バジ)、その中間タイプ (サラディノ、ハウ) の3タイプが見られたが、ストライド運びのタイプと跳躍のタイプ (水平速度を維持、高い跳躍) の関係性は今回の選手内では見出せなかった。

踏切前3歩のストライド長の合計を見ると、絶対値では選手間で大きい差が見られたが、身長比ストライドではほとんどの選手 (明らかにストライドの大きいマルズークを除く) で3.7前後となった。この結果から見ると、荒川選手は入賞選手に比べ踏切前のストライドが短く刻んでくるタイプと言えるだろう。なお、ストライドは疾走速度などで変わるため、異なる競技レベルの選手に同一の身長比ストライドが当てはまるとは限らないが、今後幅広い記録水準の選手のデータを集めることで、記録と疾走速度に応じた標準的なストライド (間合い) を提示できるかもしれない。

#### 3.2.2 重心速度と重心高

表7は踏切2歩前から踏切接地までの重心速度の変化を示している。各選手の最高速度の出現歩は踏切3歩もしくは2歩前 (サラディノ、ハウ) であった。なお、この結果は Hay (1994) の報告 (一流走幅跳選手 56 名の最高速度出現歩、踏切3歩前が 26%、踏切2歩前が 54%) とほぼ同様の

表6 踏切3歩前から踏切までのストライドの変化

	踏切3歩前		踏切2歩前		踏切1歩前		合計		身長比								
									踏切3歩前		踏切2歩前		踏切1歩前		合計		
	Ave.	SD	Ave.	SD	Ave.	SD	Ave.	SD	Ave.	SD	Ave.	SD	Ave.	SD	Ave.	SD	
サラディノ	8.57 +0.0	2.14	-	2.29	-	2.12	-	6.56	-	1.22	-	1.30	-	1.21	-	3.73	-
	その他平均	2.14	0.06	2.35	0.08	2.07	0.11	6.56	0.24	1.21	0.04	1.34	0.05	1.18	0.06	3.73	0.14
ハウ	8.47 -0.2	2.26	-	2.39	-	2.23	-	6.88	-	1.23	-	1.30	-	1.21	-	3.74	-
	その他平均	2.38	0.09	2.47	0.07	2.17	0.06	7.02	0.10	1.29	0.05	1.34	0.04	1.18	0.03	3.81	0.05
フィリップス	8.30 +0.4	2.11	-	2.41	-	1.88	-	6.40	-	1.17	-	1.33	-	1.04	-	3.54	-
	その他平均	2.43	0.08	2.67	0.16	2.03	0.06	7.12	0.19	1.34	0.04	1.47	0.09	1.12	0.03	3.93	0.11
ルカシェビチ	8.25 +0.2	2.30	-	2.20	-	2.06	-	6.56	-	1.31	-	1.26	-	1.18	-	3.75	-
	その他平均	2.27	0.03	2.29	0.07	2.07	0.06	6.63	0.13	1.30	0.02	1.31	0.04	1.18	0.04	3.79	0.07
モコエナ	8.19 -0.1	2.27	-	2.41	-	2.22	-	6.90	-	1.21	-	1.28	-	1.18	-	3.67	-
	その他平均	2.22	0.09	2.40	0.06	2.36	0.10	6.99	0.26	1.18	0.05	1.28	0.03	1.26	0.05	3.72	0.14
バックフォード	8.17 +0.0	2.30	-	2.28	-	2.33	-	6.91	-	1.25	-	1.25	-	1.27	-	3.77	-
	その他平均	2.48	0.08	2.42	0.06	2.32	0.05	7.22	0.17	1.35	0.04	1.32	0.03	1.27	0.03	3.95	0.09
バジ	8.01 +0.1	2.36	-	2.45	-	2.40	-	7.21	-	1.23	-	1.28	-	1.25	-	3.75	-
	その他平均	2.31	0.08	2.47	0.08	2.37	0.12	7.15	0.28	1.20	0.04	1.29	0.04	1.23	0.06	3.72	0.14
マルズーク	7.98 +0.0	2.79	-	2.81	-	2.43	-	8.03	-	1.51	-	1.53	-	1.32	-	4.36	-
	その他平均	2.68	0.06	2.81	0.18	2.47	0.06	7.96	0.30	1.45	0.03	1.53	0.10	1.34	0.04	4.33	0.16
荒川	7.62 +0.8	2.21	-	2.37	-	1.93	-	6.51	-	1.24	-	1.32	-	1.08	-	3.64	-
	その他平均	2.22	0.05	2.41	0.07	1.96	0.08	6.59	0.01	1.24	0.03	1.35	0.04	1.10	0.04	3.68	0.06

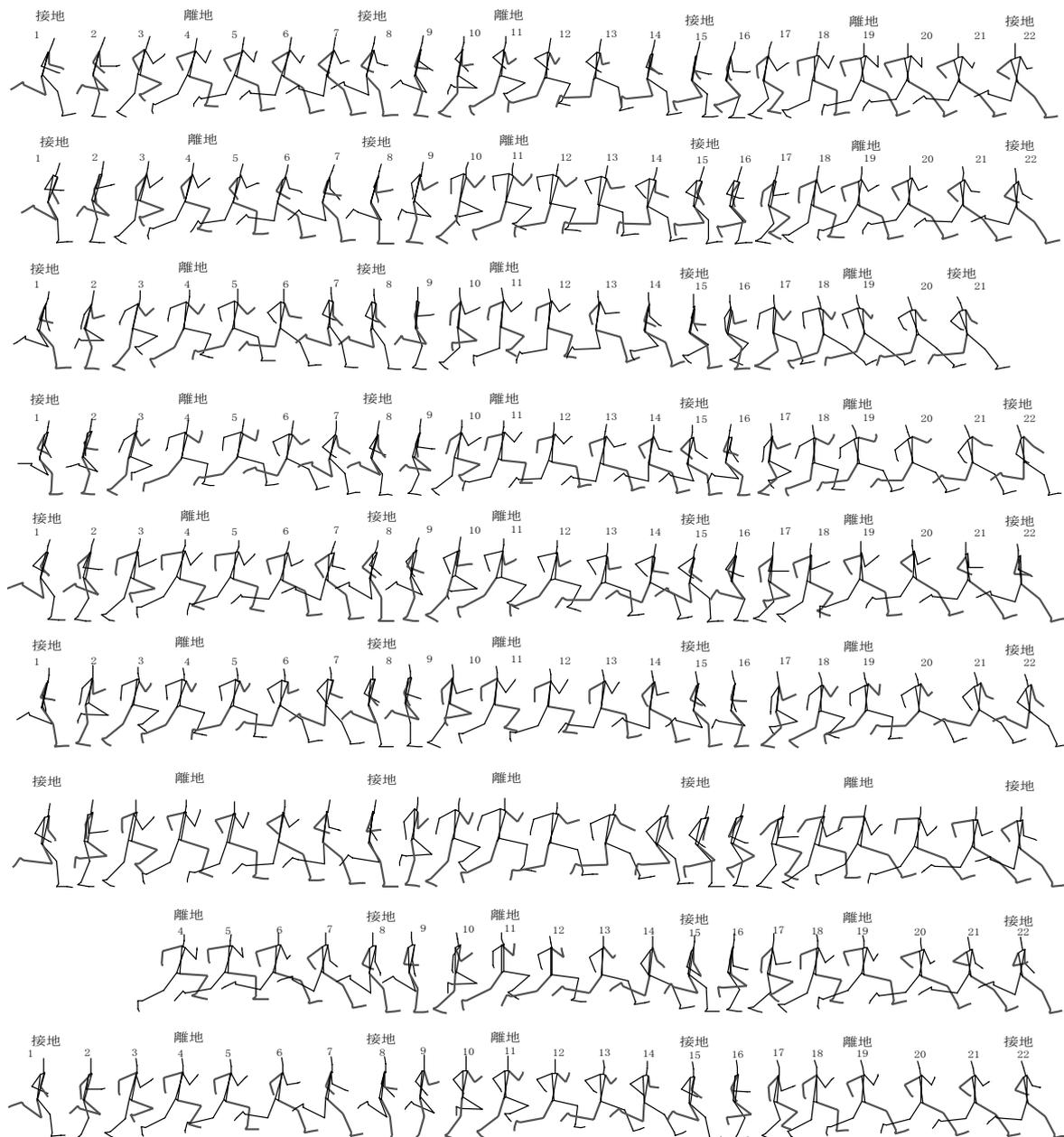


図7 踏切準備局面のスティックピクチャー

表7 踏切準備局面の重心鉛直および水平速度

	3歩前 水平速度 (m/s)	2歩前 水平速度 (m/s)	1歩前 水平速度 (m/s)	踏切接地時 水平速度 (m/s)	踏切準備 局面の減速 (m/s)	3歩前鉛直速度 接地時 (m/s)	3歩前鉛直速度 離地時 (m/s)	2歩前鉛直速度 接地時 (m/s)	2歩前鉛直速度 離地時 (m/s)	1歩前鉛直速度 接地時 (m/s)	1歩前鉛直速度 離地時 (m/s)
サラディノ	10.67	10.75	10.65	10.58	-0.17	-0.56	0.35	-0.62	0.14	-0.80	-0.13
ハウ	10.82	10.99	10.89	10.87	-0.12	-0.41	0.37	-0.42	-0.04	-0.97	0.16
フィリップス	11.06	11.01	10.94	10.38	-0.68	-0.51	0.37	-0.31	0.06	-1.09	-0.26
ルカシエビチ	10.31	10.17	10.22	9.97	-0.34	-0.67	0.53	-0.47	-0.20	-0.69	-0.12
モコエナ	10.44	10.39	10.44	10.12	-0.32	-0.57	0.62	-0.51	0.08	-0.97	-0.01
バックフォード	10.87	10.71	10.79	10.63	-0.24	-0.40	0.90	-0.36	-0.28	-1.19	0.26
バジ	10.52	10.41	10.41	10.16	-0.36	-0.65	0.66	-0.34	0.14	-1.04	0.02
マルズーク	-	10.63	10.50	10.22	-0.41	-	0.82	-0.75	0.59	-0.86	0.35
平均±SD	10.67±0.26	10.63±0.30	10.61±0.25	10.37±0.30	-0.33±0.176	-0.54±0.11	0.58±0.21	-0.47±0.15	0.06±0.26	-0.95±0.16	0.03±0.21
荒川	10.73	10.44	10.47	10.08	-0.65	-0.62	0.88	-0.17	0.00	-0.96	0.13

結果であり、一流選手は踏切3(2)歩前まで速度を高めていることが再度示された。最大速度後の減速は選手間の差が大きく、少なかったのはハウとサラディノでそれぞれ-0.12m/s, -0.17m/sであった。一方、最も大きかったのはフィリップスの-0.68m/sであり、平均では-0.33±0.18m/s(踏切準備最高速度の約3.1%)減速していた。なお、減速の大部分は踏切1歩前支持期に起こり(減速量の約7割)、この結果が踏切1歩前の減速を小さくすることが水平速度の維持に重要であることを示している。

既に述べたように、水平速度は踏切3歩前ではほぼ最高速度に達したことから、3歩前の水平速度を100%とした相対水平速度の変化を見ると(図8)、踏切接地時の相対速度は踏切3歩前の97.4±2.1%であった。また、減速が大きいフィリップス(踏切接地時、93.9%)を除くと踏切接地時の相対水平速度は96.6~100.5%の範囲であることから、3%以内の相対水平速度の減少が水平速度から見た踏切準備局面を評価基準となるかもしれない。なお、荒川選手は踏切3歩前と1歩前の減速が大きく、踏切接地時の相対水平速度は93.9%であった。

鉛直速度は踏切3歩前と2歩前離地時で特徴的な差が見られた。踏切3歩前では全選手が上向きの鉛直速度で離地したが、2歩前離地時の鉛直速度はほぼゼロかルカシェビチやバックフォードのようにマイナスであった。つまり、踏切3歩前は通常の疾走動作と同様にやや斜め上方に向かって離地したが、2歩前では1歩前に向かってほぼ水平に飛び出していたことを示している。マルズークは他の選手よりかなり大きい鉛直速度で離地しているのは、ストライドが他の選手よりも極めて長かったためと考えられる。

表8は踏切3歩前から踏切前の身体重心高の変化を、図9は入賞選手の重心高の変化の平均パターンを示している。踏切3歩前から踏切までの身

体重心低下量は身長 $の 6.6 \pm 0.9\% \text{height}$  (10 ± 1.9cm, 8.0cm-13cm)であった。なお、重心低下量、各時点の重心高と記録および重心速度の関係を見たがいずれも関係は見られなかった。詳細に見ると、踏切3歩前から2歩前離地の間に $0.2 \pm 0.4\% \text{height}$  (全体の3.4%)、2歩前離地から1歩前接地までの空中で $4.3 \pm 0.9\% \text{height}$  (全体の65%)、1歩前支持中に $1.0 \pm 0.7\% \text{height}$  (全体の15.5%)、1歩前離地から踏切接地までに $1.1 \pm 0.5\% \text{height}$  (全体の16.1%)低下させていた。つまり、入賞選手の傾向として身体重心低下の7割近くは踏切2歩前空中で行い、さらに1歩前空中を合わせると全体の8割以上となり、3歩ある支持期ではほとんど身体重心を下げていなかった。

また、支持期の重心高の変化の特徴として、踏切2歩前では3歩前よりも重心の上昇を少なくしていた。つまり、2歩前支持期では続く空中期で身体重心を下げるために、重心の上下動を少なくしほぼゼロの鉛直速度で離地していたと考えられる。

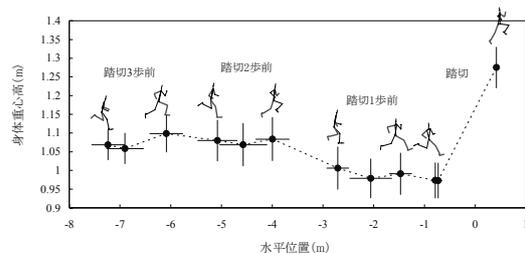


図9 踏切準備局面における身体重心高の変化

### 3.2.3 踏切準備動作

ここでは、踏切前3歩の動作を相互に比較し、トップ選手の踏切準備動作の特徴について考察する。

#### 3.2.3.1 踏切1歩前の動作

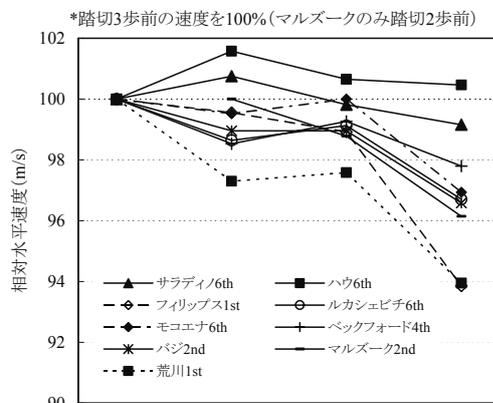
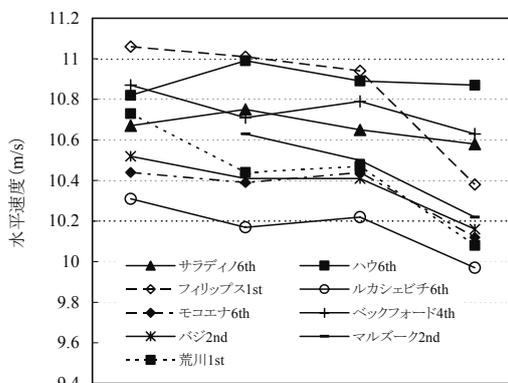


図8 踏切準備局面における重心水平速度の変化(左)および踏切3歩前の水平速度を100%とした場合の相対水平速度の変化(右)

表 8 踏切準備局面における重心高

	踏切3歩前			踏切2歩前			踏切1歩前			踏切 接地
	接地時	最下点	離地時	接地時	最下点	離地時	接地時	最下点	離地時	
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	
サラディノ	1.07 (60.8)	1.05 (59.6)	1.08 (61.4)	1.05 (59.7)	1.03 (58.2)	1.05 (59.7)	0.98 (55.7)	0.96 (54.6)	0.97 (55.1)	0.95 (54.0)
ハウ	1.08 (58.7)	1.08 (58.7)	1.11 (60.3)	1.08 (58.7)	1.08 (58.7)	1.08 (58.7)	1.00 (54.3)	0.98 (53.3)	1.00 (54.4)	0.98 (53.3)
フィリップス	1.06 (58.6)	1.05 (58.0)	1.08 (59.7)	1.07 (59.1)	1.06 (58.6)	1.07 (59.1)	0.98 (54.1)	0.94 (51.9)	0.94 (51.9)	0.93 (51.4)
ルカシェビチ	1.00 (57.1)	0.99 (56.6)	1.02 (58.3)	1.00 (57.1)	0.99 (56.6)	0.99 (56.6)	0.93 (53.1)	0.91 (52.0)	0.91 (52.0)	0.90 (51.4)
モコエナ	1.09 (57.4)	1.08 (56.8)	1.13 (59.5)	1.11 (58.4)	1.10 (57.9)	1.12 (59.0)	1.05 (55.3)	1.02 (53.7)	1.03 (54.2)	1.01 (53.2)
バックフォード	1.05 (57.4)	1.04 (56.8)	1.09 (59.6)	1.11 (60.7)	1.10 (60.1)	1.10 (60.1)	0.99 (54.1)	0.96 (52.5)	0.98 (53.6)	0.96 (52.5)
バジ	1.13 (58.9)	1.12 (58.3)	1.18 (61.5)	1.18 (61.5)	1.17 (60.9)	1.19 (62.0)	1.12 (58.3)	1.08 (56.3)	1.09 (56.8)	1.05 (54.7)
マルズーク			1.06 (57.6)	1.04 (56.5)	1.02 (55.4)	1.07 (58.2)	1.00 (54.4)	0.98 (53.3)	1.01 (54.9)	1.00 (54.4)
平均±SD	1.07±0.04 (58.4±1.3)	1.06±0.04 (57.8±1.1)	1.09±0.05 (59.7±1.4)	1.08±0.06 (59.0±1.7)	1.07 (58.3±1.8)	1.08±0.06 (59.2±1.6)	1.01±0.06 (54.9±1.6)	0.98±0.05 (53.5±1.5)	0.99±0.06 (54.1±1.6)	0.97±0.05 (53.1±1.3)
荒川	1.04 (58.1)	1.03 (57.6)	1.08 (60.5)	1.10 (61.7)	1.10 (61.6)	1.11 (62.1)	1.02 (56.9)	0.99 (55.5)	1.01 (56.5)	1.00 (55.9)

\*括弧内は身長比

表 9 は踏切準備局面の各時点における支持脚大腿角度および角速度を、表 10 支持脚下腿角度および角速度を、表 11 は遊脚大腿および下腿角度を示している。踏切 1 歩前接地時の姿勢を 2 歩前、3 歩前と比較すると、共通して支持脚大腿角度は大きく、支持脚下腿角度はほぼゼロ（フィリップスを除く）、支持脚膝関節はより屈曲していた。そして、1 歩前接地時の支持脚大腿および下腿角速度は 2 歩前、3 歩前比べ大腿を振り戻す速度は小さく、下腿を振り戻す速度は大きかった。この結果から、踏切 1 歩前の低い重心高は支持脚の膝の屈曲が大きい姿勢で接地していたためであり、その姿勢は 2 歩前空中において大腿は地面を待つように振り戻しを少なくし、一方で足部を身体の近くに着くように下腿を引き戻しながら接地することによって行われていたことを示している。

なお、フィリップスと荒川は下腿の振り戻しが少なく、支持足を身体のより前方に着くことによって身体重心を下げていた。このような脚を前方に振り出しての接地動作は、身体重心を下げることはできるが、減速が大きいとされている。両選

手の水平速度の減少は分析対象者の中でも特に大きく、上記の報告を裏付ける結果となった。

踏切 1 歩前接地時の遊脚を見ると、いずれの選手も踏切 2 歩前および 3 歩前よりも大腿角度、下腿角度ともに大きかった。すなわち、踏切 1 歩前では遊脚大腿を前方により引き出し、下腿は臀部の下に畳み込まず振り下ろすように接地していた。

ここでは遊脚と支持脚の動作を別々に考察したが、これまでの一流選手の分析から、踏切 1 歩前の遊脚と支持脚の動作は互いに関係し、1 歩前接地時に遊脚の振り出しが遅れている選手は、支持脚の引き戻しも遅く、支持足を身体のより前方に接地する傾向があり、1 歩前での減速が大きい傾向にあることが指摘されている。減速の大きかった荒川選手が遊脚下腿の振り出しが少なく、支持脚の引き戻しが少ない姿勢で接地していたことはこの傾向に一致し、効果的な踏切 1 歩前の動作はサラディノのように遊脚と支持脚を相互に引き付けた姿勢で接地することであると言えるだろう。

表 9 踏切準備局面における各歩の支持脚の大腿角度および角速度

	大腿角度															大腿角速度				
	踏切3歩前			踏切2歩前			踏切1歩前			踏切3歩前			踏切2歩前			踏切1歩前				
	1.接地時	4.離地時	5.最大後方時	8.接地時	11.離地時	12.最大後傾時	15.接地時	19.離地時	21.最大後傾時	1.接地時	4.離地時	8.接地時	11.離地時	15.接地時	19.離地時					
サラディノ	33.2	-21.1	-21.4	36.1	-16.6	-18.5	41.8	-22.2	-24.3	-435.9	-91.2	-492.4	-198.7	-435.5	-260.4					
ハウ	24.4	-21.4	-21.5	25	-14.1	-14.5	41.4	-25.7	-29.1	-489.7	-47.6	-648.1	-79.4	-477.9	-337.5					
フィリップス	35.8	-27.0	-27.0	31.4	-3.7	-3.9	49.3	-18.6	-18.6	-575.3	-45	-530.9	-63.6	-440.5	3.7					
ルカシェビチ	35.1	-34.9	-36.3	30.7	-18.3	-18.8	48.9	-26.0	-26.1	-606.6	-210.5	-558.6	-103.3	-515.2	-90.3					
モコエナ	31.6	-28.6	-29.4	27.9	-30.2	-31.6	45.9	-25.6	-28.9	-550.6	-136.9	-643.5	-182.7	-408.6	-319.7					
バックフォード	30.4	-26.0	-26.1	19.4	-20.8	-21.2	43.3	-32.5	-37.4	-558.3	-60.8	-535.9	-89.7	-455.9	-417					
バジ	34.4	-17.0	-17.1	27.7	-14.4	-14.4	36.8	-27	-29.6	-470.1	-30.1	-519.9	34.7	-494.5	-268.6					
マルズーク	-	-30.7	-34.9	36.6	-29.6	-36.3	46.3	-32.2	-35.6	-	-281.1	-488.9	-393.6	-433.1	-332.8					
平均	32.1	-25.8	-26.7	29.4	-18.5	-19.9	44.2	-26.2	-28.7	-526.6	-112.9	-552.3	-134.5	-457.7	-252.8					
SD	3.9	5.8	6.7	5.7	8.7	10.2	4.2	4.6	6.0	62.1	90.5	62.0	127.2	35.6	140.2					
荒川	34.1	-24.9	-26.3	23.8	-19.7	-22.7	41.8	-21.9	-26.1	-481.9	-209.8	-541.6	-238.1	-354.9	-409.0					

\*時点前の数字は図7のスティックピクチャーと対応

表 10 踏切準備局面における各歩の支持脚の下腿角度および角速度

	下腿角度											
	踏切3歩前				踏切2歩前				踏切1歩前			
	1.接地時	4.離地時	8.接地時	11.離地時	15.接地時	19.離地時	1.接地時	4.離地時	8.接地時	11.離地時	15.接地時	19.離地時
サラディノ	11.1	-60.9	8.5	-59.5	-4.6	-73.3	-435.3	-712.1	-486.1	-584.8	-662.4	-474.6
ハウ	3.4	-64.8	-1	-66	0.1	-67	-512.6	-695.5	-555.1	-671.9	-510.5	-500.7
フィリップス	9	-63.3	9.4	-65.5	4.6	-74.6	-564.4	-625.4	-562.7	-663.3	-661.3	-332.3
ルカシェビチ	-0.8	-66.7	-4.7	-74.5	-6.3	-80.1	-669.8	-634.5	-584.7	-619.8	-827.0	-456.8
モコエナ	-6.3	-60.4	-0.2	-56.9	1.7	-66.5	-543.5	-635.8	-497	-610.3	-525.6	-446.9
ベックフォード	6.7	-61.4	9.5	-60	1.3	-68.6	-615.2	-731.1	-550	-816.3	-640.3	-396.5
バジ	3.5	-57.4	8.9	-59.7	-0.9	-60.6	-442.3	-581.3	-489.5	-548.4	-535.3	-458.6
マルズーク		-58.9	8	-59.3	1.4	-66.2	-	-445.8	-582.2	-332.6	-642.9	-320.1
平均	3.8	-61.7	4.8	-62.7	-0.3	-69.6	-540.4	-632.7	-538.4	-605.5	-625.7	-423.3
SD	5.9	3.1	5.7	5.7	2.6	6.1	86.0	90.7	41.2	36.6	103.6	66.8
荒川	6.3	-60.0	5.2	-56.5	9.9	-65.3	-642.2	-602.2	-683.7	-706.6	-659.8	-320.1

\*時点前の数字は図7のスティックピクチャーと対応

表 11 踏切準備局面における各歩の遊脚大腿および下腿角度

	大腿角度												下腿角度		
	踏切3歩前				踏切2歩前				踏切1歩前				踏切1歩前		
	1.接地時	4.離地時	8.接地時	11.離地時	15.接地時	19.離地時	1.接地時	4.離地時	6.最大振り出し時	1.接地時	4.離地時	13.最大振り出し時	1.接地時	4.離地時	21.最大振り出し時
サラディノ	12.4	68.1	4.2	70.5	27.9	59.6	-120.2	-12.8	16.3	-117.5	-44.1	11.0	-75.4	23.6	32.8
ハウ	21.1	71.1	25.2	72.8	27.9	60.9	-124.3	-23	11.1	-111.6	-38.7	9.1	-83.8	15.8	31.3
フィリップス	26.6	71.5	7.2	65.1	50.1	51	-113.2	-3.6	18.3	-109.6	-38.4	17.2	-57.6	45.5	45.5
ルカシェビチ	23.1	74.1	24.2	80.8	29.3	68.8	-125.2	-2.9	20.3	-119.3	-11.6	15.8	-99.9	21.3	25.5
モコエナ	8.5	70.2	4.8	68.9	2.8	59.6	-127.5	-26.9	10.7	-126.4	-37.7	12.6	-122.7	6.3	29.2
ベックフォード	23.5	71.4	19.8	76.9	21.1	70.9	-115.4	-19.7	20.8	-116.8	-32.6	13.1	-109.2	-4.4	28.6
バジ	22.5	70.2	19.9	75.5	43.7	68.5	-99.2	-14.3	18.9	-100.9	-7.3	19.0	-74.1	26.6	38.0
マルズーク	84.4	84.4	2.1	78.8	21.1	73.7	-	-29.6	23.1	-130	-43.6	20.9	-108.2	6.8	29.4
平均	19.7	72.6	13.4	73.7	28	64.1	-117.9	-16.6	17.4	-116.5	-31.8	14.8	-91.4	17.7	32.5
SD	6.6	5.0	9.7	5.3	14.5	7.6	9.7	10	4.5	9.3	14.3	4.1	22.1	15.3	6.4
荒川	10.7	73.5	16.8	72.2	23.1	63.6	-130.5	-26.1	21.1	-129.7	-39.1	24.5	-39.1	22.9	30.6

\*時点前の数字は図7のスティックピクチャーと対応

### 3.2.3.1 踏切2歩前の動作

モコエナを除いて、踏切2歩前支持期では3歩前よりも支持脚大腿の動作範囲を少なくし、離地時の大腿の前傾を小さく、後方への蹴りを少なくしていた。特に、フィリップス、ルカシェビチは動作範囲を小さくしていた。加えて、離地後の大腿最大前傾角度(大腿が最も身体の後方に位置した時点の角度)も小さく、脚を後方へ流さずに前方に引き出していた。つまり、踏切2歩前支持脚(踏切1歩前遊脚)をより引き出した姿勢で1歩前接地をするための準備を、踏切2歩前支持期中の支持脚の後方への蹴りを抑える(股関節の伸展を抑える)ことから始めていたと言える。

加えて、フィリップス、ルカシェビチ以外の6名は離地時の支持脚足部角度が小さく(地面から踵が大きく上がっていない姿勢)、股関節の伸展に加えて足関節の底屈動作も少なくしていた。以上のことから、入賞選手は共通して踏切2歩前で支持脚関節の伸展動作を少なくし、後方への蹴りを抑えて踏切2歩前支持期中の重心の上下動を少なくし、ほぼゼロの鉛直速度で離地していたことが明らかとなった。

## 4. まとめ

本報告では男子走幅跳入賞選手の踏切および踏切準備動作のキネマティクスの特徴を東京大会の結果等と比較しながら検討した。その結果、入賞選手に共通な踏切準備動作、東京大会と共通

の結果で重要と考えられる踏切動作、選手のタイプにより異なる踏切動作の特徴などが示された。

なお、本報告は各選手の一跳躍のみを分析した結果にすぎない。今後、選手やコーチングに役立つより多くの情報を提供するためには、各選手の複数の跳躍動作、予選を含めた幅広いレベルでの跳躍動作の分析などが必要であろう。貴重なデータを得る機会を得た以上、さらに多くの分析を行いより遠くに跳躍するために重要となる要因を提示していきたい。そして本報告で示された世界トップ選手の特徴が今後のトレーニングを考える上での参考資料となれば幸いである。

## 文献

- Arampatzis, A., Brüggemann, G.-P., Walsch, M. (1999) Long jump. In Biomechanical analysis of the jumping events. In Biomechanical Research Project Athens 1997: Final Report (edit by G.-P. Brüggemann, D. Koszewski and H. Müller), pp.82-102.
- 深代千之・若山章信・小嶋俊久・伊藤信之・新井健之・飯干明・淵本隆文・湯海鵬 (1994) 走幅跳のバイオメカニクス 世界一流競技者の技術. ベースボールマガジン社, 135-151.
- Lees, A., Derby, D., and Fowler, N. (1993). A Biomechanical Analysis of the Last Stride, Touch-down, and Takeoff Characteristics of the Women's Long Jump. Journal of Sports Sciences, 11, 303-314.

Lees, A., Graham-Smith, P., and Fowler, N. (1994). A Biomechanical Analysis of the Last Stride, Touchdown, and Takeoff Characteristics of the Men's Long Jump. *Journal of Applied Biomechanics*, 10, 61-78.

謝辞: 世界陸上大阪大会における活動を遂行するにあたり, 多大なるご協力をいただいた日本陸上競技連盟に深く感謝の意を表します.

# 第 11 回世界陸上男子走高跳上位入賞者の 跳躍動作のバイオメカニクスの分析

## Biomechanical Analysis of Men's High Jump Winners in IAAF World Championships in Athletics Osaka 2007

阿江 通良<sup>1)</sup> 永原 隆<sup>2)</sup> 大島 雄治<sup>2)</sup>  
小山 宏之<sup>3)</sup> 高本 恵美<sup>4)</sup> 柴山 一仁<sup>2)</sup>

1) 筑波大学 2) 筑波大学大学院 3) 筑波大学体育センター 4) 大阪体育大学

Michiyoshi Ae<sup>1)</sup>, Ryu Nagahara<sup>2)</sup>, Yuji Oshima<sup>2)</sup>,  
Hiroyuki Koyama<sup>3)</sup>, Megumi Takamoto<sup>4)</sup>, Kazuhito Shibayama<sup>2)</sup>

1) University of Tsukuba, 2) Graduate School of University of Tsukuba, 3) Physical Education Center of University of Tsukuba, 4) Osaka University of Health and Sport Sciences

### 1. はじめに

1968 年のメキシコオリンピックでアメリカンのフォスベリー選手が 2m24 で優勝して以来、背面跳は一気に世界中に広まり、現在の世界記録は男女とも背面跳によって樹立されたものである(男子 2m45, 女子 2m09)。その特徴は背面でのバークリアランスバーおよび曲線助走である。

走高跳の技術は助走、踏切準備、踏切、クリアランスなどの局面に分けて論じられるが、最も重要な局面は踏切である。曲線助走を用いる背面跳はベリーロールに比べて、3 次元的動作の要素が強く、踏切準備、踏切、クリアランスのいずれも非常に複雑であり、一流選手の動作に関する研究はまだ少ない。

あった。また空中で脚をばたつかせる独特のフォームもマスコミやファンの話題となった。一方、同じく 2m35 をクリアして 2 位になったロシアのリバコフ選手は、踏切足接地時の大きな身体の後傾、両腕振込みなど典型的な美しいフォームを示した。本報告では、第 11 回大会の男子走高跳の上位入賞者の踏切準備および踏切動作を中心にバイオメカニクスの分析の結果を報告する。

### 2. 方法

#### 2.1 対象者およびデータ収集

男子走高跳決勝進出者 15 名の踏切準備および踏切動作を、左踏切選手では 2 台の高速度 VTR カメラ(HSV-500, ナック, 250 コマ/秒, 1/1000 秒)により、右足踏切選手では 2 台のデジタル VTR カメラ (VX-1000, ソニー, 60 フィールド/秒, 1/1000 秒) により撮影した。これらのカメラは長居陸上競技場スタンドの最上段に設置した。カメラ設置位置などの制約により、通常のカメラ同期装置が使えなかったため、踏切 1 歩前および踏切の足接地の瞬間を同期信号として用いて 2 台のカメラからの画像を、同期した(イベント法)。

#### 2.2 データ処理

競技会における各選手の最高記録跳躍の試技について少なくとも踏切 2 歩前接地の 5 コマ前から踏切足離地後の 10 コマ後までの身体計測点 23 点をデジタル化し、これらの 3 次元座標値を DLT 法により算出したのち、これらをバターワースデジタルフィルターにより平滑化した(最適遮断周波数は 5~7.5 Hz)。なお、計測誤差の平均は、x 軸(バーに平行)方向で 0.01m, y 軸(バーに垂直)方向で 0.02m, z 軸(鉛直)方向で 0.01m

表 1 第 11 回大阪大会における男子走高跳の結果

順位	選手名	国	記録(m)	2.16	2.21	2.26	2.30	2.33	2.35	2.37
1	D. トーマス	BAH	2.35	-	×O	×O	O	××O	O	×××
2	Y. リバコフ	RUS	2.35	-	O	O	O	O	×O	×××
3	K. イオアノフ	CYP	2.35	O	O	O	×O	×O	×O	×××
4	S. ホルム	SWE	2.33	-	O	O	O	O	×××	
5	T. ジャンク	CZE	2.30	O	O	O	O	×××		
5	V. モヤ	CUB	2.30	O	O	O	O	×××		
7	E. オンネン	GER	2.26	O	-	O	×-	××		
8	J. ハバ	CZE	2.26	O	O	×O	×××			

第 11 回大会の男子走高跳は、表 1 に示すように上位入賞者が 2m35 をクリアするなど、最近の大会では非常にレベルの高いものであった。さらに、バハマのトーマス選手はバスケットボール選手から走高跳選手に転向してわずか 2 年という経験の浅い選手が優勝したことは特筆すべきことであろう。彼のフォームは、まるでバスケットボールのランニングショットのようで、比較的短い助走と前傾の大きな踏切準備姿勢に特徴が

であった。

阿江の身体部分慣性係数を用いて身体各部および全身の重心位置を推定し、下記の身体重心高を求めるとともに、数値微分することにより助走や踏切局面における身体重心の速度などを算出した。

H1：踏切足が離れる瞬間の身体重心高

H2：空中で身体重心が上昇した高さ（本報告では、離地時の身体重心の鉛直速度から $V^2/2g$ の式により算出した。 $g=-9.8\text{m/s}^2$ ）

H3：身体重心の最大値（H1+H2）とバー高との差

また様々な下肢の関節角度、身体部分角度を算出したが、本報告では膝関節角度（大腿と下腿のなす角度）のみを報告する。踏切足接地時の姿勢の指標として、身体の内傾角および後傾角（図1）、体幹の傾斜角（両肩および両股関節の midpoint を結ぶ線分と鉛直線とのなす角度）などを求めた。

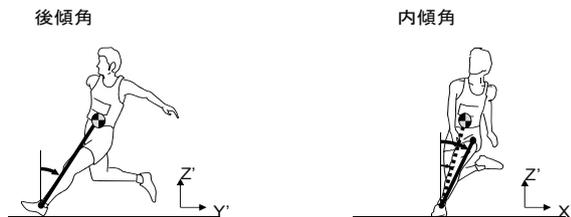


図1 身体の後傾角および内傾角の定義

### 3. 結果と考察

#### 3.1 踏切準備および踏切のフォーム

図2から9は、踏切2歩前接地から踏切足離地までの入賞者8名のスティックピクチャー（上段は側方から、下段は後方から）を示したものである。なお、左の上肢と下肢および体幹は実線で、右側は破線で示した。

ここでは、上位入賞者3名のフォームを詳細に見てみることにする。

トーマス選手（図2，2m35）

リバコフとイオアノフとは大きく異なり、踏切2歩前においても身体、特に体幹を大きく前傾している。このフォームは、バスケットボールのランニングショットあるいは短助走跳躍と非常によく似ている。また、図2の3,11,12のように、膝を深く屈曲していることも彼の大きな特徴の1つである。彼のフォームについてはこれまでのものと非常に異なっており、新しいタイプであるとの指摘が多くあるようであるが、踏切に入るまでには身体を起こしている。踏切足接地時には、体幹の起こしは他の選手に比べてやや小さいが、身体や踏切脚の後傾は大きい。また、両腕をしっかりと振り込み、踏切足離地時には身体を垂直に保ち、振上脚の大腿も高く上げている。

後方から見た場合の特徴は、踏切2歩前から大きく身体を内傾しており、この大きな内傾が踏切

足接地にも保たれていることである（踏切時：8.1度）。

リバコフ選手（図3，2m35）

リバコフは、すでに述べたように、多くの陸上競技の指導者に見られるような、両腕振込み、大きな後傾姿勢などの典型的で美しい走高跳のフォームを示している。側方からみると、踏切2歩前では前傾しているが、その後体幹を起こして重心を下げ、両腕振込みの準備をして踏切に移っている。しかし、1歩前の膝関節の屈曲はトーマスよりも小さい。このことは、逆に言うと、トーマスが大きく膝を屈曲して重心を下げているを示す。踏切局面では、身体および踏切脚を大きく後傾し、両腕と振上脚を大きく振り込んでいる。

後方からみると、踏切2歩前の身体の内傾はトーマスと同様に大きい。支持局面（8～10）で進行方向を大きく変えていることがわかる。踏切足接地時の内傾は保たれていることもわかる。

イオアノフ選手（図4，2m35）

イオアノフは、いわゆる完全な両腕振込みというよりも、半両腕振込み（セミダブルアーム）型と呼ばれる腕の振込みを用いているが、リバコフと同様に綺麗なフォームである。しかし、踏切2歩目（6～8）をみると、身体、あるいは身体重心の動きがやや上向きである（浮いている）。最後の1歩でもこの傾向がみられ、さらに踏切足を地面にたたきつけるようにしていることもあり、踏切足の接地がやや遅れている。

後方からみると、踏切2歩前では大きく内傾しているが、踏切足接地時には内傾が小さくなっている。

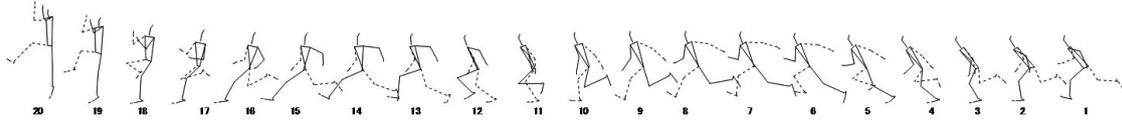
#### 3.2 身体重心の高さおよび速度

表2は選手のパフォーマンスを規定する要因および踏切時間を、表3は最後の1歩および踏切局面の身体重心の速度を示したものである。

トーマス選手の特徴は、著しく大きなH2(1.10m)およびあまり有効でないH3にある。また、リバコフ選手は身長が大きいこともあり、H1が大きい。踏切時間は、1991年と大きな違いはない。

予想とは大きく異なり、トーマス選手の助走速度は踏切1歩前(7.73m/s)、踏切足接地時(7.87m/s)ともに3名中で最も大きく、わずかに加速して踏切に入っている。彼の踏切足接地時の速度は、東京大会（踏切 7.52±0.25m/s, 1991）、ヘルシンキ大会（踏切 7.78±0.34m/s, 2005）の平均値よりもやや大きい。この加速して踏切に入る傾向はリバコフ選手にも見られるが、イオアノフ選手には見られない。しかし、それでも踏切足接地時の速度は東京大会の平均値よりも大きい。トーマス選手とリバコフ選手の踏切足接地時の鉛直下向き速度は東京大会 (-0.12±0.53m/s)、ヘルシンキ大会 (-0.33±0.16m/s) よりも小さく、イオアノフ

Thomas (BAH) 2.35m (Lateral view)



Thomas (BAH) 2.35m (Back view)

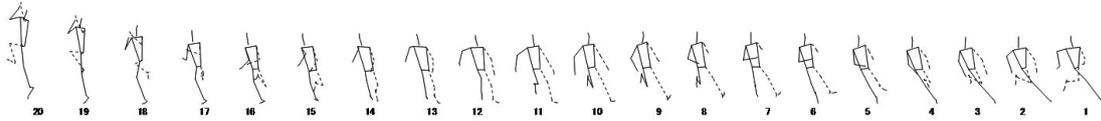
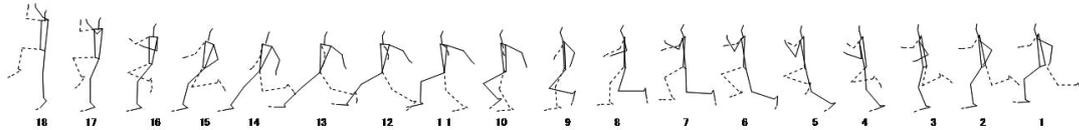


図2 トーマス選手のスティックピクチャー (2m35, 上段: 側方, 下段: 後方)

Rybakov (RUS) 2.35m (Lateral view)



Rybakov (RUS) 2.35m (Back view)

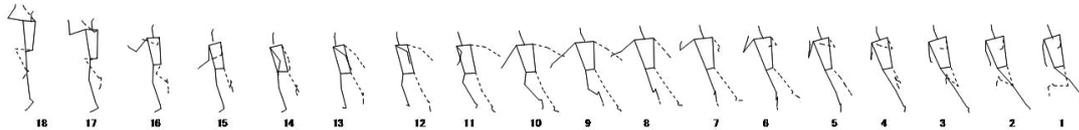
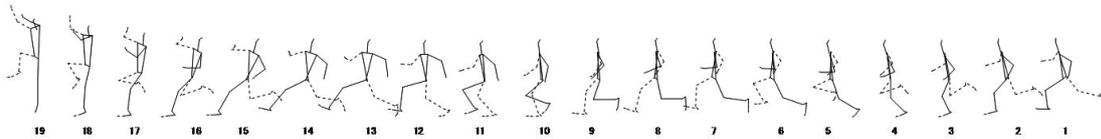


図3 リバコフ選手のスティックピクチャー (2m35, 上段: 側方, 下段: 後方)

Ioannou (CYP) 2.35m (Lateral view)



Ioannou (CYP) 2.35m (Back view)

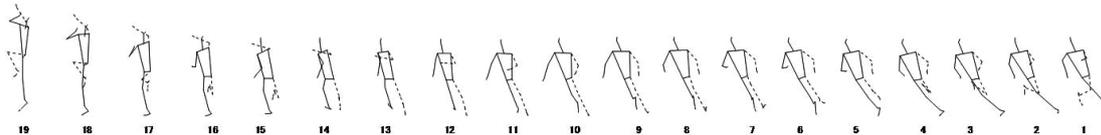
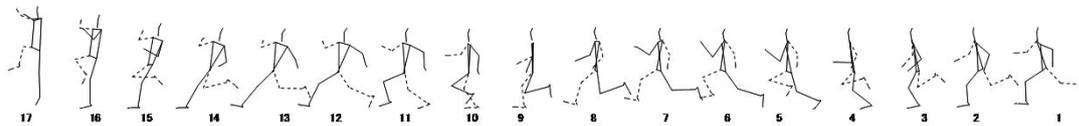


図4 イオアノフ選手のスティックピクチャー (2m35, 上段: 側方, 下段: 後方)

Holm (SWE) 2.33m (Lateral view)



Holm (SWE) 2.33m (Back view)

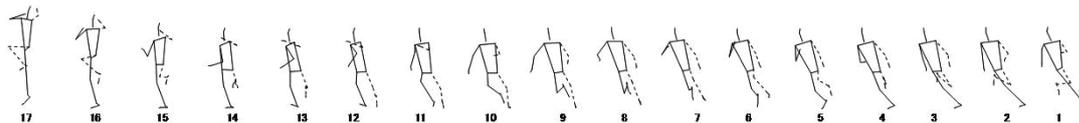
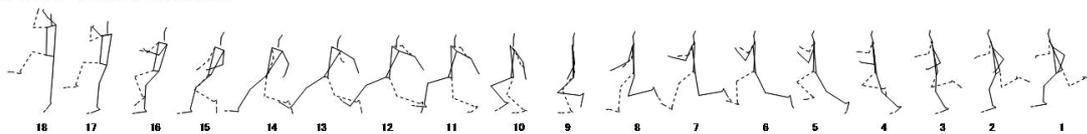


図5 ホルム選手のスティックピクチャー (2m33, 上段: 側方, 下段: 後方)

Janku (CZE) 2.30m (Lateral view)



Janku (CZE) 2.30m (Back view)

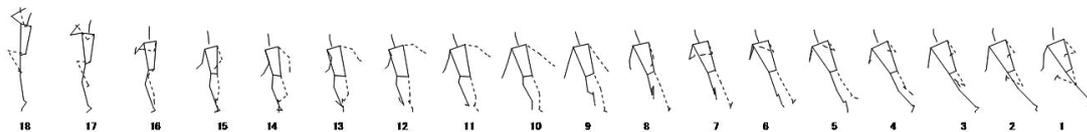


図6 ジャंक選手のスティックピクチャー (2m30, 上段: 側方, 下段: 後方)

Moya (CUB) 2.30m (Lateral view)



Moya (CUB) 2.30m (Back view)

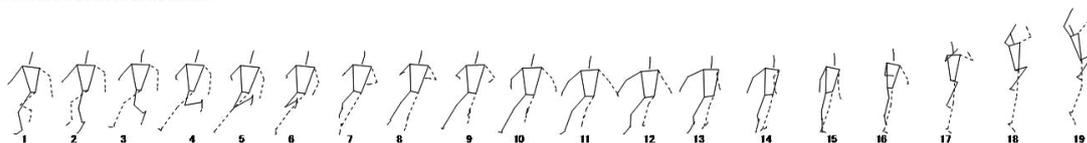
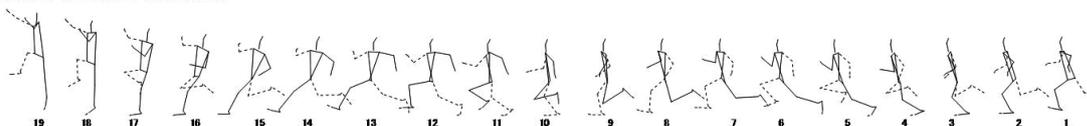


図7 モヤ選手のスティックピクチャー (2m30, 上段: 側方, 下段: 後方)

Onnen (GER) 2.26m (Lateral view)



Onnen (GER) 2.26m (Back view)

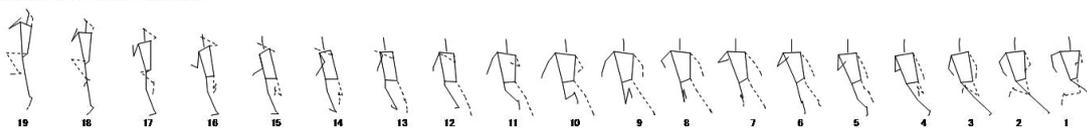
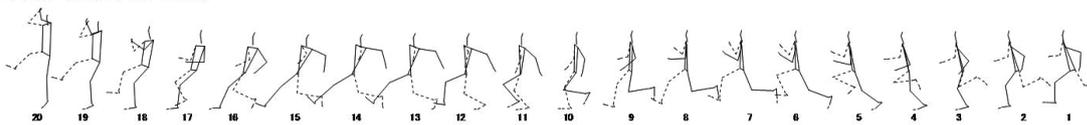


図8 オンネン選手のスティックピクチャー (2m26, 上段: 側方, 下段: 後方)

Baba (GZE) 2.26m (Lateral view)



Baba (GZE) 2.26m (Back view)

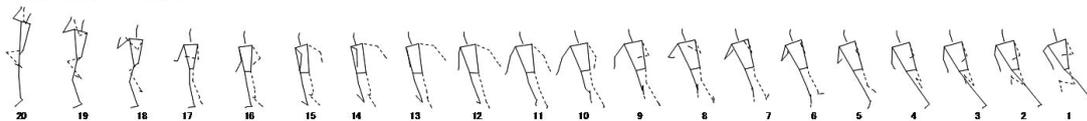


図9 ババ選手のスティックピクチャー (2m26, 上段: 側方, 下段: 後方)

表2 パフォーマンス決定要因および踏切時間

選手名	身長 (m)	体重 (kg)	分析記録 (m)	最大重心高 (m)	H1 (m)	H2 (m)	H3 (m)	踏切時間 (秒)
トーマス	1.90	75	2.35	2.49	1.40	1.10	-0.14	0.180
リバコフ	1.98	82	2.35	2.46	1.45	1.01	-0.11	0.192
イオアノフ	1.93	60	2.35	2.38	1.40	0.98	-0.03	0.148
ホルム	1.81	69	2.33	2.40	1.34	1.06	-0.07	0.128
ジャンク	1.92	78	2.30	2.36	1.41	0.96	-0.06	0.168
モヤ	1.96	80	2.30	2.45	1.48	0.97	-0.15	0.200
オンネン	1.94	83	2.26	2.37	1.44	0.93	-0.11	0.152
ババ	1.96	80	2.26	2.32	1.49	0.82	-0.06	0.200
平均	1.93	75.9	2.31	2.40	1.43	0.98	-0.09	0.171
標準偏差	0.05	7.8	0.04	0.06	0.05	0.08	0.04	0.027

表3 身体重心速度および跳躍角

選手名	身体重心速度(m/s)						跳躍角 (度)
	水平			鉛直			
	1歩前 接地時	踏切 接地時	踏切 離地時	1歩前 接地時	踏切 接地時	踏切 離地時	
トーマス	7.73	7.87	3.82	-0.47	-0.11	4.64	50.9
リバコフ	7.41	7.57	3.66	-1.01	-0.10	4.45	50.6
イオアノフ	7.75	7.61	3.80	-0.62	0.09	4.38	49.0
ホルム	7.97	7.71	4.37	-0.67	0.47	4.56	46.2
ジャンク	7.72	7.50	3.60	-0.98	-0.19	4.33	50.2
モヤ	7.63	7.04	3.82	-0.86	0.26	4.35	48.7
オンネン	7.86	7.96	4.75	-0.56	0.10	4.26	41.9
ババ	7.36	7.19	3.51	-0.86	-0.21	4.02	48.9
平均	7.68	7.56	3.92	-0.75	0.04	4.37	48.3
標準偏差	0.21	0.31	0.42	0.20	0.24	0.19	3.0

選手では上向きである。3選手の跳躍角は、ヘルシンキ大会 (51.1±2.3 度) と同様で、東京大会 (47.8±3.5 度) よりも大きい。

### 3.3 身体の傾き角および膝関節角度

表4は身体および体幹の傾き角を、表5は踏切1歩前および踏切局面の膝関節角度を示したものである。また図10は8選手の踏切局面における膝関節角度と身体重心の鉛直速度の変化の関係を示したものである。3選手の体幹の傾き角には差がないが、身体の後傾はイオアノフ選手の40度が最も小さく、トーマス選手の43.5度が最も大きく、東京大会 (37.7±3.4 度) よりも大きかった。踏切足接地時の身体の内傾角は多くの選手で東京大会 (3.2±3.1 度) に比べて大きかった。特にトーマス、モヤ、オンネンの3選手の内傾角は非常に大きく、彼らの大きな特徴の1つであると考えられる。

表4 踏切足接地時における身体の傾き角

選手名	踏切足接地時の身体の傾き角 (度)		
	後傾角	内傾角	体幹角
トーマス	43.5	8.2	13.3
リバコフ	43.0	2.9	14.3
イオアノフ	40.0	3.5	13.4
ホルム	35.5	3.9	8.6
ジャンク	41.2	6.0	11.6
モヤ	39.9	9.5	7.9
オンネン	36.2	8.6	13.3
ババ	41.5	4.0	6.8
平均	40.1	5.8	11.2
標準偏差	2.9	2.6	3.0

表5 踏切1歩前および踏切局面における膝関節角度

選手名	膝関節角度(度)				
	1歩前		踏切		
	接地時	離地時	接地時	最大屈曲時	離地時
トーマス	150	141	161	133	172
リバコフ	154	151	170	139	174
イオアノフ	144	136	151	145	177
ホルム	146	144	166	151	172
ジャンク	146	133	154	130	170
モヤ	146	113	160	138	164
オンネン	142	146	164	149	177
ババ	138	117	167	128	170
平均	145.8	135.1	161.7	139.1	172.0
標準偏差	5.1	13.7	6.7	8.5	4.3

図2~4および表3に示したように、3選手とも踏切1歩前では膝関節を屈曲しているが、そのパターンには相違が見られる。トーマス選手とイオアノフ選手は1歩前接地後、膝関節をさらに屈曲するか、ほぼその屈曲を維持したままで、あまり伸展せずに離地している。リバコフ選手は膝をあまり曲げずに支持脚を前傾させることによって身体重心を下げている。しかし、図2~4を観察すると、最後の1歩では膝屈曲の大きさに関係なく、いずれの選手も下腿を大きく前傾していることがわかる。スプリントでは、支持期前半における下腿のすばやい前傾がブレーキを少なくするために重要であると言われている。ここに示された下腿の前傾は3選手ともに1歩目における助走速度の減速が小さかったことの一要因であろう。

図10に示したように、踏切接地時の膝関節はリバコフ選手で最も大きく(伸展している)、イオアノフ選手が最も小さい(屈曲している)。踏切局面ではトーマス選手の膝が最も深く屈曲しており(133度)、この膝関節角度はヘルシンキ大会の最小値127.9度、東京大会の132.9度とほぼ同様で、トーマス選手の膝屈曲は大きいと言える。踏切前半では膝関節は屈曲するが、身体重心は上昇を続けるが、これは大きく後傾した身体が踏切足を中心に起こし回転するためである。身体重心の離地時の鉛直速度に対する膝関節伸展開始時の鉛直速度の比は東京大会では78.7±6.1%

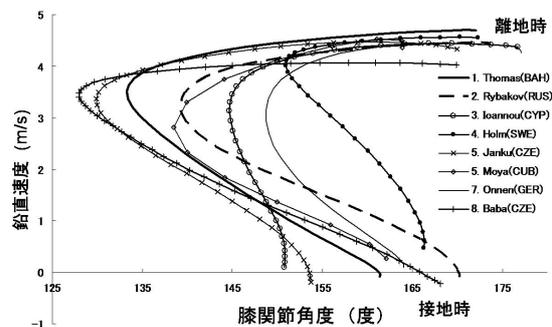


図10 踏切局面における膝関節角度および身体重心の鉛直速度の変化

であったが、トーマス選手では77%、リバコフ選手では76%、イオワノフ選手では75%であり、大きな相違はなかった。これらの結果は、トーマス選手が踏切局面において大きな鉛直速度を得るために、強い膝関節や体幹の伸展とともに、身体の起こし回転を有効に利用したことを示すものである。

#### 4. 踏切技術への示唆

すでに述べたように、トーマス選手の踏切動作の特徴の1つは、8.2度という大きな内傾にある。奥山ら(2003)は、走高跳では踏切脚を内傾させることにより股関節外転筋が効果的に使えるので、その結果として鉛直速度を大きくできることを示唆している。踏切時に作用する鉛直地面反力は踏切脚の股関節を内転させる外力モーメントを生じるので、選手は大きな股関節外転トルクを発揮して地面反力による内転モーメントに抗する必要がある。一方、踏切脚股関節において大きな外転トルクを発揮することは鉛直地面反力を大きくすることになり、身体を鉛直に上昇させるのに役立つ。言い換えると、踏切足接地の直後において身体、特に踏切脚が内傾していることは踏切脚股関節外転筋群が大きな力を発揮する条件を作りだし、鉛直地面反力、そして身体重心の鉛直速度を大きくするのに貢献すると考えられる。

トーマス選手は、踏切準備局面において体幹の前傾が大きく、支持脚の屈曲が大きく、踏切加速しながら入っていた。踏切局面では踏切脚の内傾が大きく、股関節外転および膝伸展を大きく使っていた。

イオワノフ選手では踏切足接地時の身体重心の鉛直速度は上向きであった。踏切局面において、選手は身体重心の水平および鉛直速度の方向を変換するために力積を発揮しなければならない。踏切足接地時の鉛直速度が上向きか、あるいは下向きの速度が小さいことは、下向きの速度を吸収するための鉛直力積が必要ないか、あるいは小さくてよいことを意味する。イオワノフ選手の踏切はこれに近いものであったと考えられる。イオワノフ選手は、多くの選手と同様に、最後の1歩で身体重心の水平速度が低下していたが、彼の特徴は最後の数歩を力みのなく走り、踏切に上向きの速度を持って入り(駆け上がり)、すばやく踏み切ったことである。

新しい技術は、一流選手が示す既存の技術と選手やコーチの創造的なアイデアが組み合わされて生み出されるものである。トーマス選手とイオワノフ選手の技術の組み合わせが走高跳の新しい技術の方向を示唆しているように思われる。

#### 文献

- 阿江通良(1996)日本人幼少年および青年競技者の身体部分慣性係数. *Japanese Journal of Sports Science*. 15-3:155-162.
- Hay, J.G.(1993) *The biomechanics of sports techniques*, fourth edition, Prentice Hall, New Jersey, pp.440-452.
- 飯干 明ほか(1994)世界一流走高跳選手の技術に関するバイオメカニクス分析. 世界一流陸上競技選手の技術. 佐々木・小林・阿江(編著). ベースボールマガジン社. pp.169-184.
- Isolehto J., et al. (2007): Biomechanical analysis of the high jump at the 2005 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*. 22-2:17-27.
- Okuyama, K., Ae, M., Yokozawa, T. (2003): Three dimensional joint torque of the takeoff leg in the fosbury flop style. *Abstract and Proceedings. International Society of Biomechanics XIXth Congress. (CD-ROM)*.

# 第 11 回世界陸上女子走高跳上位入賞者の 跳躍動作のバイオメカニクスの分析

## Biomechanical Analysis of Women's High Jump Winners in IAAF World Championships in Athletics Osaka 2007

阿江 通良<sup>1)</sup> 永原 隆<sup>2)</sup> 大島 雄治<sup>2)</sup>  
小山 宏之<sup>3)</sup> 高本 恵美<sup>4)</sup> 柴山 一仁<sup>2)</sup>

1) 筑波大学 2)筑波大学大学院 3)筑波大学体育センター 4)大阪体育大学

Michiyoshi Ae<sup>1)</sup>, Ryu Nagahara<sup>2)</sup>, Yuji Oshima<sup>2)</sup>,  
Hiroyuki Koyama<sup>3)</sup>, Megumi Takamoto<sup>4)</sup>, Kazuhito Shibayama<sup>2)</sup>

1) University of Tsukuba, 2) Graduate School of University of Tsukuba, 3) Physical Education Center of University of Tsukuba, 4) Osaka University of Health and Sport Sciences

### 1. はじめに

1968 年のメキシコオリンピックでアメリカンのフォスベリー選手が 2m24 で優勝して以来、背面跳は一気に世界中に広まり、現在の世界記録は男女とも背面跳によって樹立されたものである(男子 2m45, 女子 2m09)。

カメラ(HSV-500, ナック, 250 コマ/秒, 1/1000 秒)により, 右足踏切選手では 2 台のデジタル VTR カメラ (VX-1000, ソニー, 60 フィールド/秒, 1/1000 秒) により撮影した. これらのカメラは長居陸上競技場スタンドの最上段に設置した. カメラ設置位置などの制約により, 通常のカメラ同期装置が使えなかったため, 踏切 1 歩前および踏切の足接地の瞬間を同期信号として用いて 2 台のカメラからの画像を同期した(イベント法)。

表 1 第 11 回大阪大会における女子走高跳の結果

順位	選手名	国	記録(m)	1.85	1.90	1.94	1.97	2.00	2.03	2.05	2.10
1	B. ブラシッチ	CRO	2.05	○	○	○	○	×○	○	××○	×××
2	A. チェノワ	RUS	2.03	○	○	○	○	×○	×○	×××	
2	A. ディマルチノ	ITA	2.03	×○	○	○	○	○	×○	×××	
4	Y. スレサレンコ	RUS	2.00	○	○	○	○	×○	×××		
5	Y. サブチェンコ	RUS	2.00	○	○	×○	○	××○	×××		
6	R. ベイティア	ESP	1.97	○	○	○	×○	×××			
7	M. アイトワ	KAZ	1.94	○	○	○	×××				
7	V. パラマル	UKR	1.94	○	○	○	×××				
7	E. グリーン	SWE	1.94	○	○	○	×××				
7	K. ベルクイスト	SWE	1.94	○	○	○	×××				
7	M. スコトニコ	FRA	1.94	○	○	○	×××				

第 11 回大会の女子走高跳は, 表 1 に示すように 5 位までが 2m00 に成功し, そして 1m94 をクリアした 5 名の選手が 7 位という男子以上の非常に高いレベルの激戦であった. また, 優勝したブラシッチ選手(2m05)の身長は 1m92 と男子なみの長身であったが, 3 位のディマルチノ選手の場合は 1m69 と短身にもかかわらず 2m03 をクリアするなど様々なタイプの選手が競い合った. 本報告では, 第 11 回大会の女子走高跳の上位入賞者の踏切準備および踏切動作を中心にバイオメカニクスの分析の結果を報告する.

### 2. 方法

#### 2.1 対象者およびデータ収集

女子走高跳決勝進出者 16 名の踏切準備および踏切動作を, 左踏切選手では 2 台の高速度 VTR

#### 2.2 データ処理

競技会における各選手の最高記録跳躍の試技について少なくとも踏切 2 歩前接地の 5 コマ前から踏切足離地後の 10 コマ後までの身体計測点 23 点をデジタル化し, これらの 3 次元座標値を DLT 法により算出したのち, バッターワースデジタルフィルターにより平滑化した(最適遮断周波数は 5~7.5Hz), なお, 座標軸はバーに平行方向を x 軸, バーに垂直方向を y 軸, 鉛直方向を z 軸とした.

阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて身体各部および全身の重心位置を推定し, 下記の身体重心高を求めるとともに, 数値微分することにより助走や踏切局面における身体重心の速度などを算出した.

H1: 踏切足が離れる瞬間の身体重心高

H2: 空中で身体重心が上昇した高さ(本報告では, 離地時の身体重心の鉛直速度から  $v^2/2g$  の式により算出した.  $g = -9.81\text{m/s}^2$ )

H3: 身体重心の最大値(H1+H2)とバー高との差

また様々な下肢の関節角度, 身体部分角度を算出したが, 本報告では膝関節角度(大腿と下腿の

なす角度)のみを報告する。踏切足接地時の姿勢の指標として、身体の内傾角および後傾角(図1)、体幹の傾斜角(両肩および両股関節の midpoint を結ぶ線分と鉛直線とのなす角度)などを求めた。

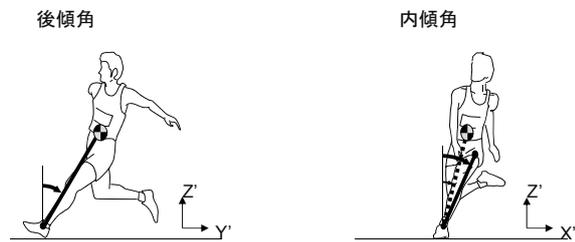


図1 身体の後傾角および内傾角の定義

### 3. 結果と考察

#### 3.1 踏切準備および踏切のフォーム

図2から7は、踏切2歩前接地から踏切足離地までの入賞者6名のスティックピクチャー(上段は側方から、下段は後方から)を示したものである。なお、左の上肢と下肢および体幹は実線で、右側は破線で示した。

上位入賞者のフォームを見比べると、ブラシッチ選手とチチェノワ選手は両腕(ダブルアーム)型の振り込みを、ディマルチノ選手は右腕でリードするシングルアーム型の振り込みをしていることがわかる。特に、チチェノワ選手は男子顔負けの見事なダブルアーム型の振り込みである。ここでは、これらのうち、先述した身長が著しく異なる2名、すなわち長身のブラシッチ選手と短身のディマルチノ選手のフォームを詳細にみることにし、他の選手のフォームについてはスティックピクチャーを示すにとどめる。

ブラシッチ選手(図2, 2m05)

身体を大きく内傾しながら2歩前(図2の1~5)で下腿を前に倒して膝を曲げ身体重心を低くし、離地時では身体をしっかりと前方に押し出している。2歩前で十分な準備ができていたため、1歩前の接地時(9)にはすでに支持脚の膝はよく曲がり、支持期における膝関節角度の変化は小さい(表5, 後出)。また、1歩前で素早く両腕振り込みの準備を完了していることも注目すべきことである。助走速度が大きく踏切に加速して入っている(表3, 後出)。このことが、他の選手よりも後傾角はやや小さいものの踏切で長身を起こす(起こし回転により鉛直速度を生み出す)原動力となっていると考えられる。離地時の重心高は1m37と非常に高く、すでに他の選手を5cm以上、ディマルチノ選手を18cmも上回っている。さらに、最大重心高が2m19であり、H3(クリアランスの利得)がマイナス14cmもあることを考えると、世界記録(2m09)を破る可能性は非常に高いと考えられる。

ディマルチノ選手(図4, 2m03)

踏切2歩前では身体を大きく内傾しているが(1, 5)、助走速度が大きいこともあり(表3)、支持脚の膝関節角度の屈曲は小さく、リラックスしたコーナー走のようなフォームである。そして、1歩前に向けて下腿を振り出して膝関節を比較的伸展した状態で接地している(9)。1歩前の支持期では、膝関節を他の選手よりも大きく屈曲しているが(表5, 156.2度から135.0度まで、約21度の屈曲)、スティックピクチャー(9~12)からわかるように、離地時に向かって下腿を倒しながら膝を屈曲しており(支持時間が長い)、1歩前の助走速度の低下は小さい。

ディマルチノ選手の大きな特徴は、接地時には身体はやや外傾しているが、大きく後傾した身体を大きな助走スピードを利用して素早く起こしていることである。また最後の1歩の空中時間が短く、素早く踏切に入っている。踏切は、右腕でリードするシングルアーム型であるが(14~18)、他の選手に比べて振上脚の振り込みのタイミングが早いことも(14)優れた点と言えるであろう。

ディマルチノ選手のフォームの特徴、すなわち、大きな身体の内傾を保ったスピード豊かな、コーナー走のような助走、1歩前で抜くように膝を曲げる踏切準備、大きな後傾、素早い振上脚などは日本選手が見習うべき点であろう。

#### 3.2 身体重心の高さおよび速度

表2は選手のパフォーマンスを規定する要因および踏切時間を、表3は踏切1歩前および踏切局面の身体重心の速度を示したものである。

表2 パフォーマンス決定要因および踏切時間

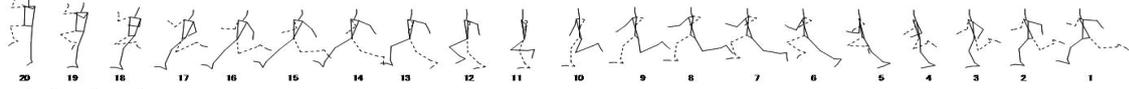
選手名	身長(m)	体重(kg)	分析試技(m)	最大重心高(m)	H1(m)	H2(m)	H3(m)	踏切時間(s)
ブラシッチ	1.92	75.0	2.05	2.19	1.37	0.82	-0.14	0.168
チチェノワ	1.80	56.0	2.03	2.18	1.32	0.86	-0.13	0.204
ディマルチノ	1.69	58.0	2.03	2.04	1.19	0.85	-0.01	0.156
スレサレンコ	1.78	57.0	2.00	2.08	1.32	0.76	-0.08	0.184
サブチェンコ	1.81	57.0	2.00	2.08	1.29	0.79	-0.08	0.160
ペイティア	1.92	71.0	1.97	2.07	1.32	0.74	-0.10	0.156
平均	1.82	62.3	2.01	2.11	1.30	0.80	-0.09	0.171
標準偏差	0.09	8.4	0.03	0.06	0.06	0.05	0.05	0.019

表3 身体重心速度および跳躍角

選手名	身体重心速度(m/s)						跳躍角(度)
	水平			鉛直			
	1歩前	踏切		1歩前	踏切		
	接地	離地	接地	離地	離地		
ブラシッチ	7.09	7.19	3.98	-0.67	-0.29	4.01	45.2
チチェノワ	6.98	6.89	3.25	-0.82	-0.26	4.11	51.7
ディマルチノ	7.27	7.22	3.34	-0.80	-0.10	4.08	50.7
スレサレンコ	6.44	6.26	2.94	-0.78	-0.08	3.86	52.8
サブチェンコ	7.04	6.98	3.47	-0.74	-0.04	3.93	48.6
ペイティア	6.27	6.52	3.51	-0.62	-0.02	3.82	47.4
平均	6.85	6.84	3.42	-0.74	-0.13	3.97	49.4
標準偏差	0.40	0.38	0.35	0.08	0.12	0.11	2.8

ブラシッチ選手とチチェノワ選手の最大重心高は非常に大きいですが、これはH1が大きいことに加えて、H2も大きいためである。従来の長身女子選手ではH2は小さいことが多いが、この両選手

Vlasik(CRO) 2.05m (Lateral view)



Vlasik(CRO) 2.05m (Back view)

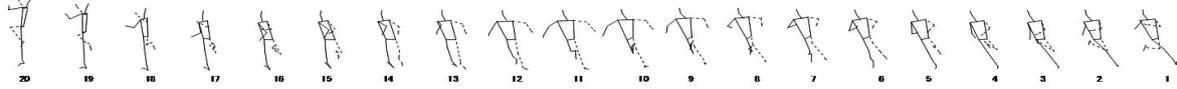
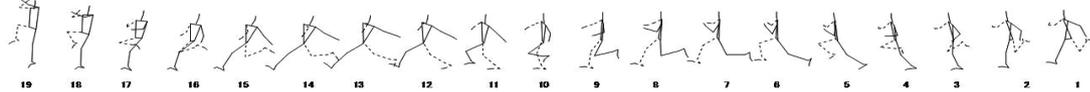


図2 ブラシッチ選手のスティックピクチャー (2m05, 上段: 側方, 下段: 後方)

Chicherov(RUS) 2.05m (Lateral view)



Chicherov(RUS) 2.05m (Back view)

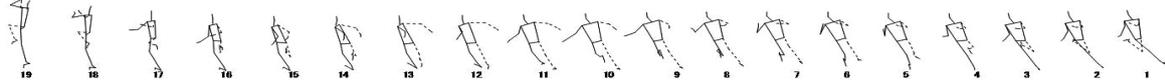
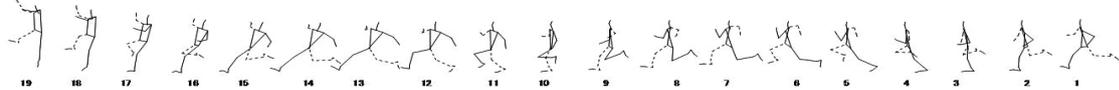


図3 チチェノワ選手のスティックピクチャー (2m03, 上段: 側方, 下段: 後方)

Dimartino(ITA) 2.03m (Lateral view)



Dimartino(ITA) 2.03m (Back view)

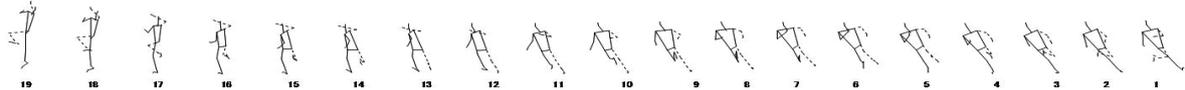
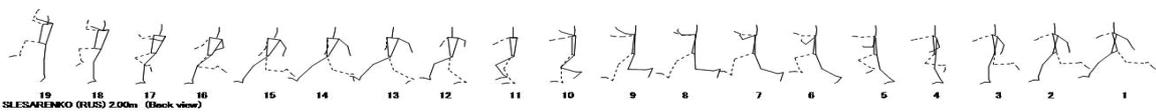


図4 ディマルチノ選手のスティックピクチャー (2m03, 上段: 側方, 下段: 後方)

Slesarenko(RUS) 2.00m (Lateral view)



Slesarenko(RUS) 2.00m (Back view)

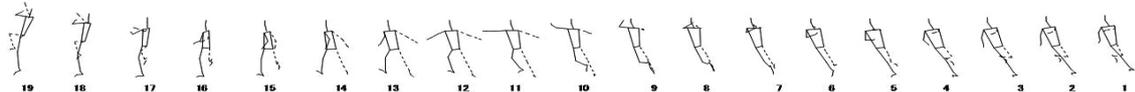
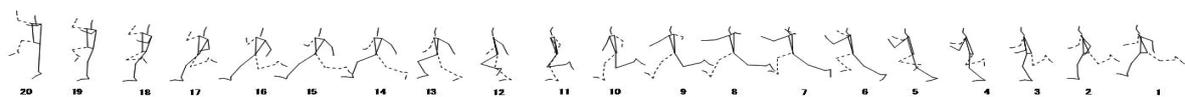


図5 スレサレンコ選手のスティックピクチャー (2m00, 上段: 側方, 下段: 後方)

Savchenko(RUS) 2.00m (Lateral view)



Savchenko(RUS) 2.00m (Back view)

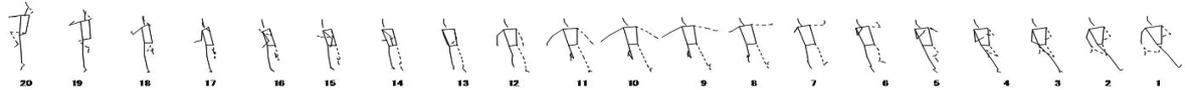
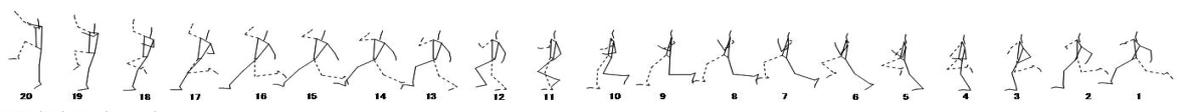


図6 サブチェンコ選手のスティックピクチャー (2m00, 上段: 側方, 下段: 後方)

Betia(ESP) 1.97m (Lateral view)



Betia(ESP) 1.97m (Back view)

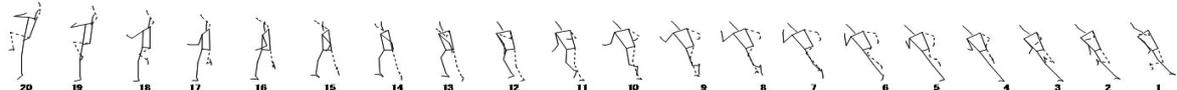


図7 ベイティア選手のスティックピクチャー (1m97, 上段: 側方, 下段: 後方)

は例外的であり、今後の女子走高跳の記録がさらに向上すると予想される。先述したように、ディマルチノ選手の成功の要因は H2 が大きいこと、H3 に優れていることである。

上位3選手の1歩前および踏切足接地時の重心速度はいずれも大きい。踏切足接地時の鉛直速度はブラシッチおよびチチェノワ選手ではやや大きい。ディマルチノ選手以下の4選手はいずれも小さい。

跳躍角は、ブラシッチ選手が最も小さく、スレサレンコ選手が最も大きい。これは助走速度の大小ともほぼ一致する。

### 3.3 身体の傾き角および膝関節角度

表4は身体および体幹の傾き角を、表5は踏切1歩前および踏切局面の膝関節角度を示したものである。

表4 踏切足接地時における身体の傾き角

選手名	踏切足接地時における身体の傾き(度)		
	後傾角	内傾角*	体幹角
ブラシッチ	38.4	-1.9	15.8
チチェノワ	42.1	-12.6	19.8
ディマルチノ	44.8	-2.5	13.1
スレサレンコ	39.6	-13.4	6.1
サブチェンコ	37.6	-2.2	13.5
ベイティア	37.0	-15.2	17.0
平均	39.9	-7.9	14.2
標準偏差	3.0	6.4	4.7

\*)負は外傾を示す

表5 踏切1歩前および踏切局面における膝関節角度

選手名	膝関節角度(度)				
	1歩前		踏切		
	接地時	離地時	接地時	最大屈曲時	離地時
ブラシッチ	148.5	145.8	173.3	153.9	176.5
チチェノワ	154.1	152.3	163.6	141.8	165.5
ディマルチノ	156.2	135.0	160.4	138.3	168.7
スレサレンコ	152.1	129.6	167.7	140.2	168.5
サブチェンコ	150.1	140.6	171.6	151.6	175.9
ベイティア	144.9	142.7	173.0	161.0	171.1
平均	151.0	141.0	168.3	147.8	171.0
標準偏差	4.0	8.0	5.3	9.1	4.4

男子選手に比べると、女子選手では踏切接地時に外傾するケースが多いが、今回の分析対象とした6選手も全員が外傾していた。しかし、ブラシッチ、ディマルチノ、サブチェンコ選手は小さく、チチェノワ、スレサレンコ、ベイティア選手は外傾が10度以上になる選手とに大別された。特に、ディマルチノ選手では外傾が小さく、後傾は大きいという特徴を示したが、これは短身選手がこの種目で成功するための条件になると考えられる。

体幹角については、明確な関係があるとは言えないが、表3に示した踏切足接地時の鉛直下向き速度が大きい選手(ブラシッチ、チチェノワ)では体幹の傾きが大きく、鉛直下向き速度が小さかった選手(スレサレンコ、サブチェンコなど)では傾きが小さいという傾向があるようである。こ

のことは、後傾、特に体幹の後傾を大きくした場合には踏切に飛び込んで入る動きを伴う可能性があることを示唆すると考えられる。

膝関節角度については、踏切1歩前の支持期において屈曲が大きい選手(ディマルチノ、スレサレンコ、サブチェンコ)と小さい選手(ブラシッチ、チチェノワ、ベイティア)に大別される。明確な関係ではないが、表3の助走速度と1歩前の膝関節角度をあわせて考えると、1歩前の支持期で膝関節屈曲の大きい選手は助走速度の減少がやや大きく、屈曲が小さい選手では踏切足接地時の速度が1歩前よりも大きい傾向にあるようである。したがって、1歩前の支持期において踏切準備として膝関節の屈曲を大きくした場合には、助走速度の減速が大きくなることを理解しておく必要がある。踏切局面における膝関節屈曲はいずれの選手も約20度で大きな相違はない。しかし、最大屈曲時の膝関節角度には大きな相違がみられ、チチェノワ、ディマルチノ、スレサレンコの3選手は膝関節角度が非常に小さい。アイソメトリックな筋収縮で発揮される膝伸展力は膝関節角度が135度以下になると、急激に小さくなるとされているが、これらの選手の示した膝関節角度は135度の限界に近いものと言えるであろう。また、これらの選手では離地時の膝関節角度も他の選手よりも小さいが、このことはH1を小さくする原因ともなる。これらのことを考えると、踏切足接地時の膝関節角度が小さい場合には、最大屈曲時および離地時の膝関節角度も小さくなる可能性が高いので、接地時の膝関節角度はなるべく大きい方が望ましいと考えられる。

## 4. まとめ：日本人女子選手への示唆

3位となったディマルチノ選手は短身であるが、2m30をクリアーしており、彼女の跳躍は日本女子選手のモデルの1つになると考えられる。すなわち、大きな助走速度、踏切1歩前における下腿を前傾して膝を屈曲する踏切準備、大きな身体の後傾、素早いタイミングでの振上脚の振り込みなどである。しかし、踏切接地時の膝関節角度が小さく、そのため離地時の膝伸展が小さくなりH1も小さいという欠点もみられた。このようなことから、ディマルチノ選手の動きを参考にしながら、接地時に膝関節角度が大きくできる(踏切脚を伸展して踏切に入れる)動きが日本女子選手の身に付けるべきものと示唆される。なお、ディマルチノ選手の1歩前離地時に踏切脚の大腿が高く上がっているが(図4の12)、このことが接地時の膝関節を小さくした原因と考えられるので、踏切足を素早く低く出すことが役立つと考えられる。

## 文献

- 阿江通良 (1996) 日本人幼少年および青年競技者の身体部分慣性係数. *Japanese Journal of Sports Science*. 15-3:155-162.
- Hay, J.G. (1993) *The biomechanics of sports techniques*, fourth edition, Prentice Hall, New Jersey, pp.440-452.
- 飯干 明ほか (1994) 世界一流走高跳選手の技術に関するバイオメカニクス敵分析. 世界一流陸上競技選手の技術. 佐々木・小林・阿江 (編著). ベースボールマガジン社. pp.169-184.
- Isolehto J., et al. (2007): Biomechanical analysis of the high jump at the 2005 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*. 22-2:17-27.
- Okuyama, K., Ae, M., Yokozawa, T. (2003): Three dimensional joint torque of the takeoff leg in the fosbury flop style. *Abstract and Proceedings. International Society of Biomechanics XIXth Congress*. (CD-ROM).

# 世界一流男子やり投の投てき技術

## Biomechanical Analysis of Elite Male

### Javelin Throwing Technique

田内 健二<sup>1)</sup> 村上 雅俊<sup>2)</sup> 遠藤 俊典<sup>3)</sup>

竹迫 寿<sup>4)</sup> 五味 宏生<sup>4)</sup> 藤井 範久<sup>5)</sup>

1) 早稲田大学 2) 愛媛女子短期大学 3) 茨城県立医療大学

4) 早稲田大学大学院 5) 筑波大学

Kenji Tauchi<sup>1)</sup>, Masatoshi Murakami<sup>2)</sup>, Toshinori Endo<sup>3)</sup>, Hisashi Takesako<sup>4)</sup>

Koki Gomi<sup>4)</sup> and Norihisa Fujii<sup>5)</sup>

1)Waseda University, 2)Ehime Women's College, 3)Ibaraki Prefectural University of Health and Sciences, 4)Graduate School of Waseda University, 5)University of Tsukuba

#### 1. はじめに

世界陸上選手権大阪大会における男子やり投げ決勝は、大会最終日となる9月2日に行われた。決勝の結果を表1に示した。優勝者は90.33mを投げたフィンランドのピトカマキ選手、2位は88.61mを投げたノルウェーのトルキルドセン選手、3位は86.21mを投げたアメリカのグリア選手であった。これらの上位3選手は、いずれも自己ベストが90mを超えており、大会前までの2007年度世界ランキング（記録）でも順に2位（91.23m）、4位（89.49m）、1位（91.29m）と上位を占めていることから、本大会はほぼ実力通りの結果であったといえる。

これまで世界一流男子やり投げ競技者の動作（投てき技術）に関するバイオメカニクス情報は比較的多く報告されてきた（Best et al., 1993; 若山ら, 1994; 野友ら, 1998; Mero et al., 1994; Morriss et al., 1997; Morriss et al., 2001; Campos et al., 2004; Murakami et al., 2006）。このうち、若山ら（1994）は1991年東京世界陸上、Mero et al.（1994）は1992

年バルセロナオリンピック、Morriss et al.（1997）は1995年イェテボリ世界陸上、Campos et al.（2004）は1999年セビリヤ世界陸上、Murakami et al.（2006）は2005年ヘルシンキ世界陸上といった世界大会の分析結果について報告している。これまでの報告では、競技レベルの劣る選手との比較から世界一流選手の動作の特徴を明らかにしたり、世界一流選手の投てき技術を事例的に紹介したりしている。特に、後者のような報告においては分析対象が世界一流選手であることから、グループとして平均化して評価することが適切ではないという考えがあるものと推察される。しかし、個別のデータは各選手の技術的特徴を詳細に分析できる反面、個人の身体的特徴（体格、筋力など）あるいは技術の特異性が強く反映されやすいために、その技術に関する知見が必ずしも他者に応用できない可能性もある。これに対して、世界一流選手は優れた投てき技術を有しているからこそ、個性があったとしても重要な局面の動作にはある程度の共通性があることが考えられる。し

表 1 男子やり投決勝の結果

順位	名前	1投目 (m)	2投目 (m)	3投目 (m)	4投目 (m)	5投目 (m)	6投目 (m)	最高記録 (m)
1	ピトカマキ	81.62	89.16	83.64	87.72	x	90.33	90.33
2	トルキルドセン	82.78	88.61	x	82.8	x	87.33	88.61
3	グリア	x	80.67	84.31	x	86.21	83.81	86.21
4	ヴァシレフスキス	x	85.19	x	77.42	x	x	85.19
5	イワノフ	85.18	84.71	81.42	84.91	81.55	x	85.18
6	エストウエンツェン	84.52	79.77	x	79.18	x	x	84.52
7	ヤニック	79.82	x	83.38	x	-	x	83.38
8	ヤルベンパ	80.30	79.40	82.10	x	77.30	75.40	82.10
9	マルチネス	82.03	81.19	x	-	-	-	82.03
10	アルビドソン	79.8	x	81.98	-	-	-	81.98
11	ラグス	x	77.22	80.01	-	-	-	80.01
12	ウィルツカラ	78.01	x	76.48	-	-	-	78.01

たがって、世界一流選手の動作を平均化することは、広く一般化できるような合理的な投てき技術を明らかにできる可能性があり、より良い投てき技術の方向性を提示するために必要なことであると考えられる。また、世界一流選手といっても投てき記録には少なからずの差があり、その差を生み出す技術的要因を明らかにすることは、より良い投てき技術を追及する上で有意義な示唆が得られると考えられる。

一方、日本における男子やり投げは、古くから世界に通用する数少ない投てき種目として知られてきた。84年のロサンゼルスオリンピックでは吉田雅美選手が5位入賞、87年ローマ世界選手権では溝口和洋選手が6位入賞している。近年では、日本選手権を9連覇(2000年~2008年:2008年12月現在)中で、本大会にも出場した村上幸史選手が日本の男子やり投を牽引している。その村上選手の自己ベストは81.71mであり、世界にあと一步というレベルにまで来ているが、本大会では77.63m(21位)と世界の壁を破れなかった。今後、日本のやり投の競技レベルを高めるためには、世界レベルの技術との相違点を明確にすることが不可欠であると考えられる。

そこで本稿では、①世界一流男子やり投の投てき技術を、大阪世界陸上決勝進出者の上位と下位とを比較することによって明らかにし、より良い投てき技術の方向性を提示すること、②世界一流選手と日本代表である村上選手との技術の相違点を明らかにし、日本選手における投てき技術の課題を提示することを目的とした。なお、本稿は国際陸連の機関誌(New Studies in Athletics)への報告書(Tauchi et al., in press)、バイオメカニクス研究(田内と村上, 2008)および月刊陸上競技(田内, 2008)に発表した論文の内容に新たなデータ

を加えてまとめたものである。また、本稿では十分に考察ができなかった女子やり投決勝におけるリリースパラメータおよび動作の基礎的パラメータの結果を資料として末尾に示した。

## 2. 方法

### 2.1 分析対象

本稿では、男子やり投げ決勝に出場した選手12名および日本代表選手であった村上幸史選手(予選B組)を分析対象とし、各選手の決勝あるいは予選において最も良いやりの飛距離を記録した試技を分析試技とした。また、男子やり投げ決勝に出場した選手12名については、記録の優劣からみた投てき技術の特徴を明らかにするために、1位から6位の選手を上位群、7位から12位の選手を下位群とした。なお、すべての選手は右手投げであった。

### 2.2 撮影方法

男子やり投げ決勝におけるすべての投てき試技を、助走路の側方および後方の観客席最上段に設置したデジタルビデオカメラ(HVR-AJ1, Sony)を用いて、毎秒60フィールド、露出時間1/1000で撮影した。また、助走路の中央、ファウルラインより後方6m地点を原点とし、縦6m×横4m×高さ2.5mの画角を設定し、合計9カ所にキャリブレーションポール(マーク間隔0.5m)を立てた。本稿では、投てき方向をy軸、y軸に対して左右方向をx軸、鉛直方向をz軸とした右手系の静止座標系を設定した。

### 2.3 分析方法

2台のカメラによって撮影された映像をPCに取り込み、動作解析ソフト(Frame-DIAS II, デ

表 2 投てき記録およびやりのリリースパラメータ

順位	名前	最高記録 (m)	リリース速度 (m/s)				リリース高 (m)	リリース角度 (deg)	姿勢角 (deg)	迎え角 (deg)
			左右	前方	上方	合成				
1	ピトカマキ	90.33	-4.5	22.8	18.8	29.9	1.99	39.9	45.6	5.7
2	トルキルドセン	88.61	1.0	24.3	17.2	29.8	1.86	35.9	39.4	3.5
3	グリア	86.21	2.4	24.0	16.6	29.3	1.71	35.6	37.1	1.5
4	ヴァシレフスキス	85.19	1.6	24.7	15.3	29.1	1.81	33.4	37.1	3.7
5	イワノフ	85.18	2.2	24.6	14.9	28.8	1.89	34.3	35.9	1.5
6	エストウエンツェン	84.52	2.2	23.5	15.9	28.5	1.91	34.6	38.2	3.6
7	ヤニック	83.38	2.6	24.4	14.8	28.7	1.87	32.5	34.2	1.7
8	ヤルベンパ	82.10	2.1	24.6	14.4	28.6	1.78	32.2	38.3	6.0
9	マルチネス	82.03	-1.3	24.3	14.9	28.5	2.03	32.9	37.5	4.6
10	アルビドソン	81.98	-0.3	24.4	14.3	28.3	1.99	31.9	33.0	1.2
11	ラグス	80.01	1.2	22.6	16.8	28.2	1.96	38.7	40.5	1.8
12	ウィルツカラ	78.01	0.9	23.9	14.9	28.2	1.84	32.8	42.5	9.7
	平均値	83.96	0.8	24.0	15.7	28.8	1.89	34.6	38.3	3.7
	標準偏差	3.48	2.0	0.7	1.4	0.6	0.10	2.6	3.5	2.5
21	村上	77.63	1.0	23.5	14.8	27.8	1.91	33.2	35.7	2.5

※:リリース角度, 姿勢角および迎え角は, いずれも矢状面(側方からみた面)内の角度

イケイエイチ)を用いて, やり(グリップ, 先端)および身体各分析点(23点)を毎秒60コマでデジタル化した。デジタル化された座標値を3次元DLT(Direct Linear Transformation)法により実長換算し, やりおよび身体分析点の3次元座標を求めた。2方向からの画像の同期は, やりのリリース時点のコマ数を合わせることで行った。算出された3次元座標は8-10Hzのバッタワースデジタルフィルタにより平滑化した。

## 2.4 分析項目

本稿では, 各データを算出するにあたり, 最終的なクロスステップ後の右足接地(R-on), 左足接地(L-on)およびやりのリリース(REL)の各イベントを設定し, 右足接地から左足接地までを準備局面, 左足接地からリリースまでを投局面とした。分析項目は, 以下の項目とした。

- 1) リリース速度: リリース時のグリップ速度
- 2) リリース高: リリース時のグリップ高
- 3) リリース角度: 矢状面内におけるリリース速度ベクトルとy軸とがなす角
- 4) 姿勢角: 矢状面内におけるグリップと先端とを結んだ線分とy軸とがなす角
- 5) 迎え角: 姿勢角から投射角を減じた角度  
なお, 理論的にやりの投てき記録を決定する要因となるリリース速度, リリース高およびリリース角(姿勢角および迎え角を含む)を総じてリリースパラメータとよぶ。
- 6) 助走速度: 身体重心速度
- 7) 減速率: L-on時の助走速度に対するREL時の助走速度の減速率(投局面の減速率)
- 8) 局面時間: 準備局面および投局面の経過時間
- 9) 投行程: 右足接地時からリリースまでのグリップの移動距離
- 10) 歩幅: 右足接地時の右つま先から左足接地時

の左つま先までの距離

- 11) 身体部分速度: 身体各分析点の合成速度
- 12) 腰角度: 水平面内における左右大転子を結んだ線分とx軸とがなす角(x軸と平行が0度, 左回旋位がプラス, 右回旋位がマイナス)
- 13) 肩角度: 水平面内における左右肩峰を結んだ線分とx軸とがなす角(x軸と平行が0度, 左回旋位がプラス, 右回旋位がマイナス)
- 14) 体幹角度: 矢状面内における左右肩峰の midpoint と左右大転子の midpoint とを結んだ線分とy軸とがなす角

本稿では, 上述の分析項目に加えて Ae et al. (2007)の方法を用いて, 上位群と下位群との平均動作パターンを算出した。この方法では, 動作時間の規格化に加えて, 身体各部位の座標値および身体重心位置を身長によって規格化することによって, 異なる選手の動作を平均的な動作としてパターン化することが可能となる。なお, 動作時間の規格化は, 準備局面および投局面の遂行時間の平均値の比がおおよそ6:4であったことから, 準備局面を0%-60%, 投局面を60%-100%として規格化した。

## 2.5 統計処理

分析項目は平均値±標準偏差で示した。各分析項目における上位群と下位群との差の検定には対応のないt検定を用いた。なお, 分析対象が各群ともに6名ずつであることから, 危険率(p値)5%未満を有意差あり, 10%未満を有意傾向ありとして判定した。

## 3. 結果および考察

- 3.1 先行研究との比較からみた本大会の特徴  
これまで世界一流選手のリリースパラメータ

表3 助走速度, 局面時間, 投行程および歩幅

順位	名前	助走速度 (m/s)			減速率 (%)	局面時間 (s)		投行程 (m)		歩幅 (m)	
		R-on	L-on	REL		準備局面	投局面	準備局面	投局面	トータル	前後
1	ビトカマキ	6.93	6.48	3.55	45.3	0.183	0.117	1.33	2.06	3.39	1.72
2	トルキルドセン	6.91	6.19	3.72	39.9	0.150	0.117	1.13	2.07	3.20	1.64
3	グリア	6.72	6.37	3.67	42.3	0.167	0.117	1.26	1.98	3.24	1.88
4	ヴァシレフスキス	6.48	6.06	2.71	55.3	0.217	0.117	1.45	2.06	3.52	2.14
5	イワノフ	6.90	6.04	3.37	44.2	0.233	0.100	1.71	1.75	3.46	2.35
6	エストウェンツェン	6.33	4.94	2.73	44.7	0.233	0.133	1.51	2.03	3.54	1.98
7	ヤニック	5.97	5.41	3.72	31.2	0.233	0.150	1.40	1.94	3.34	1.96
8	ヤルベンパ	6.63	6.57	3.77	42.6	0.167	0.117	1.10	2.00	3.10	2.00
9	マルチネス	6.19	5.75	3.59	37.5	0.233	0.133	1.44	2.20	3.64	1.76
10	アルビドソン	6.25	5.61	3.40	39.4	0.200	0.133	1.28	2.10	3.37	1.72
11	ラグス	6.65	6.21	3.55	42.9	0.167	0.117	1.18	2.06	3.24	1.72
12	ウィルツカラ	6.31	6.09	3.52	42.2	0.150	0.133	1.02	1.99	3.01	1.72
	平均値	6.52	5.98	3.44	42.3	0.194	0.124	1.32	2.02	3.34	1.88
	標準偏差	0.32	0.47	0.36	5.6	0.034	0.013	0.20	0.11	0.19	0.22
21	村上	6.71	5.78	3.41	41.0	0.217	0.133	1.62	1.85	3.47	1.85

表4 過去の世界大会および本大会 (大阪 WCh) における各パラメータ

大会名		東京WCh	バルセロナOG	イエテボリWCh	セビリアWCh	ヘルシンキWCh <sup>※2</sup>	大阪WCh
開催年		1991	1992	1995	1999	2005	2007
n		6	11	12	7	8	12
投てき記録 <sup>※1</sup>	(m)	85.47 ± 3.96	80.47 ± 4.21	81.90 ± 3.54	86.46 ± 2.32	81.41 ± 3.81	83.96 ± 3.48
リリース速度(合成)	(m/s)	28.9 ± 0.7	28.3 ± 1.8	28.8 ± 0.8	29.0 ± 0.6	29.2 - 32.0	28.8 ± 0.6
リリース高	(m)	1.78 ± 0.06	1.81 ± 0.04	1.97 ± 0.13	1.98 ± 0.13	1.7 - 2.0	1.89 ± 0.10
リリース角度	(deg)	35.4 ± 3.0	32 ± 3	38.0 ± 2.2	33.5 ± 4.1	29 - 38	34.6 ± 2.6
迎え角	(deg)	-2.2 ± 5.9	-1 ± 6	-3.4 ± 3.5	2.8 ± 5.3	-6 - 10	3.7 ± 2.5
<b>助走速度</b>							
R-on	(m/s)					6.2 - 7.3	6.52 ± 0.32
L-on	(m/s)		5.6 ± 1.0	5.97 ± 0.53			5.98 ± 0.47
REL	(m/s)		3.1 ± 1.0	3.22 ± 0.50			3.44 ± 0.36
減速率	(%)		44.64 <sup>※3</sup>	45.96 ± 8.03			42.29 ± 5.62
<b>局面時間</b>							
準備局面	(s)		0.221 ± 0.022	0.193 ± 0.036	0.191 ± 0.051		0.194 ± 0.034
投局面	(s)		0.135 ± 0.012	0.128 ± 0.011	0.126 ± 0.010		0.124 ± 0.013
<b>投行程</b>							
準備局面	(m)						1.32 ± 0.20
投局面	(m)		1.80 ± 0.1				2.02 ± 0.11
トータル	(m)	3.07 ± 0.22				2.9 - 3.6	3.34 ± 0.19
歩幅	(m)	1.73 ± 0.13	1.80 ± 0.10				1.88 ± 0.22

※1: 投てき記録は, 分析された試技の記録であり必ずしも各大会の最高記録と一致していない場合がある。

※2: ヘルシンキWChの結果は, 筆者が散布図からおおよその最大および最小値を読み取った。

※3: バルセロナOGの減速率は, 筆者がL-onおよびREL時における助走速度から算出した。

および動作に関する知見は, 主に世界陸上あるいはオリンピックにおける分析をもとにして得られてきた。そこで, ここでは先行研究との比較から本大会の特徴を明らかにすることとした。なお, 世界大会の分析結果を報告した先行研究はそれぞれ以下のように表記する。1991年東京世界陸上(若山ら, 1994)は東京WCh, 1992年バルセロナオリンピック(Mero et al., 1994)はバルセロナOG, 1995年イエテボリ世界陸上(Morriss et al., 1997)はイエテボリWCh, 1999年セビリア世界陸上(Campos et al., 2004)はセビリアWCh, 2005年ヘルシンキ世界陸上(Murakami et al., 2006)はヘルシンキWCh。

表2に投てき記録およびリリースパラメータ,

表3に助走速度, 局面時間, 投行程および歩幅を本大会の決勝進出者について示し, 表4に先行研究をもとにした過去の世界大会および本大会における各パラメータの平均値±標準偏差を示した。本大会における投てき記録は1位が90mを超え, 11位までが80m台であったことから, 例年の世界大会と比較しても同様なやや高いレベルであったといえる(表2, 表4)。ただし, 1991年東京WCh以降の男子やり投においては, 80m以上という高いレベルの層の選手は増加しているが, 上位の記録が90m前後でほぼ頭打ちとなっており, 全体の競技レベルは停滞しているというのが現状である(田内と村上, 2008)。

本大会におけるリリース速度(合成)は, 優勝し

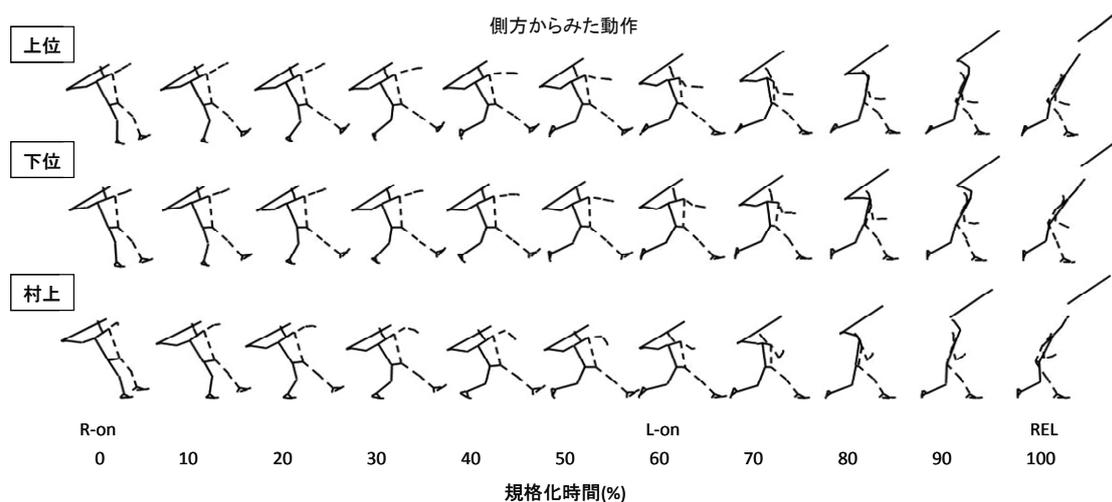


図2 側方からみた上位群, 下位群および村上選手における平均投てき動作パターン

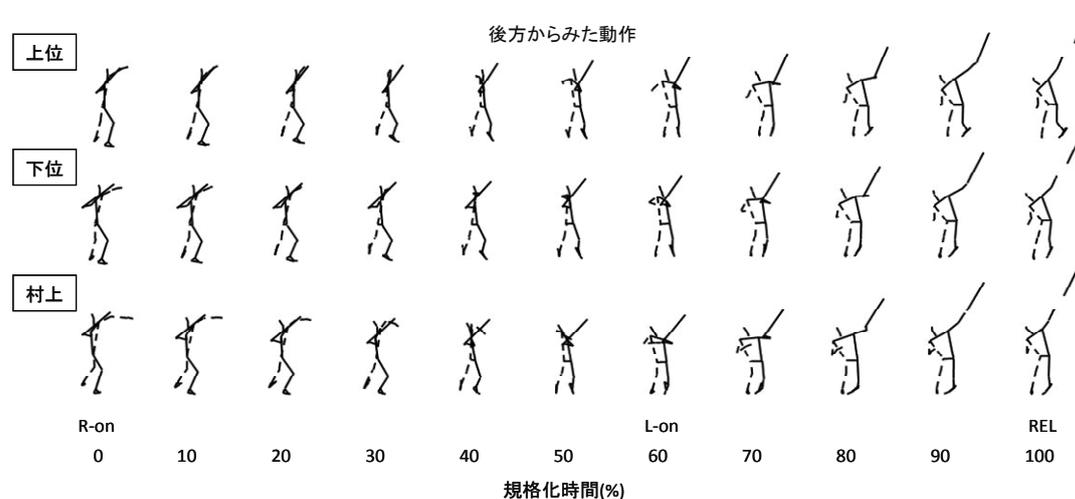


図3 後方からみた上位群, 下位群および村上選手における平均投てき動作パターン

たピトカマキ選手が最大値 29.9m/s を示し、11位と12位であったラグズ選手とウィルッカラ選手が最小値 28.2m/s を示した(表2)。決勝進出者の平均値は他の世界大会と同程度であった(表4)。リリース速度は、リリースパラメータの中で投てき記録を決定する最も重要な要因であることが多く報告されている。本大会においてもリリース速度(合成)と投てき記録との間には高い正の相関関係( $r=0.938, p<0.01$ )が認められている(田内, 2008)。そこで、先行研究と本大会の結果を利用して、世界一流選手40名(90.82m-78.01m)におけるリリース速度と投てき記録との相関関係を調べたところ、やはり高い正の相関関係( $r=0.764, p<0.01$ )が認められ、投てき記録を目的変数とする回帰式は【 $y$ (投てき記録)= $4.28x$ (リリース速度)- $39.37$ 】であった(図1)。この回帰式を用いて投距離を推定すると、80mを投げるためのリリース速度は 27.9m/s、85mでは 29.1m/s、90mでは 30.2m/s となることから、日本選手においてはまず“リリース速度 28.0m/s”を達

成することが目標になるものと考えられる。その他のリリースパラメータは、リリース速度ほど投てき記録に大きな影響を及ぼさないことが知られており、本大会におけるリリース高、リリース角度(迎え角も含む)のいずれもほぼ他の世界大会の値の範囲内であった。前田ら(1997)は、70m以上の自己記録を有する男子選手を対象にして、最適なリリース角度は個人ごとにばらつきがあるもののおよそ33度前後であること、迎え角については0度付近であることを報告している。これらの値は、本大会を含めた各世界大会の値とよく一致している。したがって、世界一流選手は、当然なことではあろうが適正な範囲内でやりをコントロールしながら、より高いリリース速度を獲得していることがうかがえる。

本大会における助走速度(減速率を含む)、局面時間はいずれも他の世界大会の値と同様であったが、投行程および歩幅は東京WChおよびバルセロナOGと比較して若干高値を示した(表4)。投行程はやりをもつ上肢の動作だけでなく、身体

表 5 各パラメータにおける上位群と下位群との比較

パラメータ	上位(1-6位)	下位(7-12位)	差
最高記録 (m)	86.67 ± 2.30	81.25 ± 1.92	上 > 下 p < 0.01
リリース速度			
左右 (m/s)	0.8 ± 2.7	0.9 ± 1.5	
前方 (m/s)	24.0 ± 0.7	24.0 ± 0.7	
上方 (m/s)	16.5 ± 1.4	15.0 ± 0.9	上 > 下 p < 0.10
合成 (m/s)	29.2 ± 0.6	28.4 ± 0.2	上 > 下 p < 0.01
リリース高 (m)	1.86 ± 0.10	1.91 ± 0.10	
リリース角度 (deg)	35.6 ± 2.3	33.5 ± 2.6	
姿勢角 (deg)	38.9 ± 3.5	37.7 ± 3.6	
迎え角 (deg)	3.3 ± 1.6	4.2 ± 3.4	
助走速度			
R-on (m/s)	6.7 ± 0.3	6.3 ± 0.3	上 > 下 p < 0.05
L-on (m/s)	6.0 ± 0.6	5.9 ± 0.4	
REL (m/s)	3.3 ± 0.5	3.6 ± 0.1	
減速率 (%)	45.3 ± 5.3	39.3 ± 4.5	上 > 下 p < 0.10
局面時間			
準備局面 (s)	0.197 ± 0.036	0.192 ± 0.036	
投局面 (s)	0.117 ± 0.011	0.131 ± 0.013	上 < 下 p < 0.10
投行程			
準備局面 (m)	1.40 ± 0.20	1.24 ± 0.17	
投局面 (m)	1.93 ± 0.12	2.05 ± 0.09	
トータル (m)	3.33 ± 0.14	3.28 ± 0.22	
歩幅			
前後 (m)	1.95 ± 0.27	1.81 ± 0.13	

全体の移動距離にも関係していることを考慮すると、本大会では他の大会と比較して歩幅が長かったことが投行程を長くさせた原因の 1 つであることが考えられる。しかし、両パラメータは体格（上肢長、下肢長）の影響を受けることから、この差が本大会の投てき技術の特徴と捉えられる否かの判断はできない。

以上のことから、本大会におけるリリースパラメータおよび動作に関する基礎的なパラメータは、おおまかにみるとほぼ先行研究で報告された値の範囲内であり、本大会で特徴的なパラメータを見出すことはできなかった。先述したように、1991 年東京 WCh 以降、世界の男子やり投全体の競技レベルは停滞していることを考慮すると、本稿における結果は妥当なところであろう。一方では、このような世界のトップの現状であるからこそ、日本のやり投が世界に近づくチャンスであるともとらえることができる。ここに示した値が、世界レベルに到達するためのある程度の目標値（参考値）として役立つことを願う次第である。

### 3.2 世界一流選手における投てき記録の優劣からみた投てき技術の相違

ここまでは、世界一流選手を 1 つのグループとして評価してきたが、世界一流といっても、本大

会の優勝記録と 12 位の記録とでは 10m 以上の差がある。このことは、本大会における 12 名の選手の中では投てき技術になんらかの優劣が存在していたことを示唆している。そこで、以下には 12 名の選手を便宜的に 6 名ずつ上位群と下位群とに分けて、投てき技術の比較を試みた。

図 2, 3 に上位群と下位群における平均動作パターンを、表 5 に両群における各パラメータを示した。その結果、投てき記録では上位群と下位群との間におよそ 5m、また合成のリリース速度にもおよそ 1m/s の統計的に有意な差が認められた（表 5）。これらのことは、図 1 に示したリリース速度と投てき記録との関係からも容易に理解できよう。しかし、ここで注目すべきはリリース速度の各成分である。つまり、前方へのリリース速度は両群ともに 24.0m/s と差がないのにも関わらず、上方へのリリース速度においては上位群が高値を示す傾向を示したことである。このことは、本大会における上位群と下位群との投てき記録の差は、やりに対して上方へ高い速度を与えられたか否かによるものであったことを示唆している。やり投に限らず他の投てき種目では、投てき物の前方への飛距離を競うことから、前方への速度が注目されており、その事実には疑いはないところである。しかし、やり投の世界一流選手の中では、投てき物に対してほぼ同じ前方への速度を与

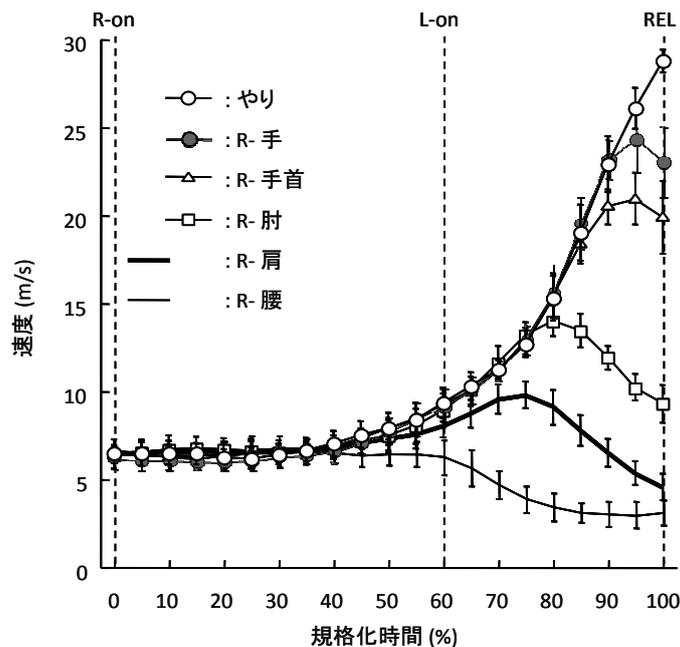


図4 全選手（決勝進出者12名）におけるやりおよび身体各部位速度の時系列変化パターン

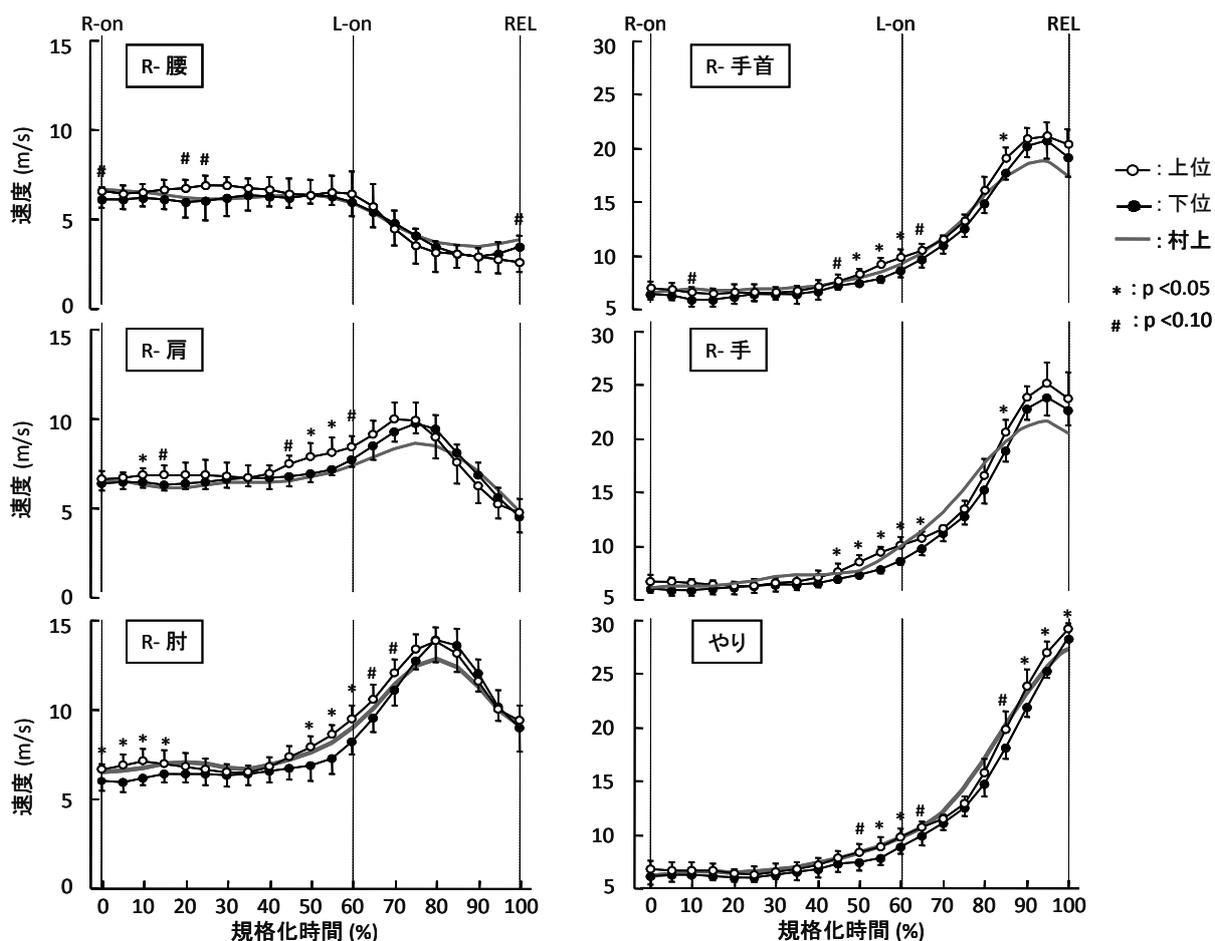


図5 やりおよび身体各部位速度の時系列変化パターンにおける上位群と下位群との比較

えながらも、さらに上方への速度を与えられた選手がより良い成績を収めていた。この結果は、世界トップレベルに近づくためには、前方への速度

を獲得できる技術に加えて、やりを高く投げ上げられる技術をも考慮していかなければならないことを示唆するものと考えられる。他のパラメー

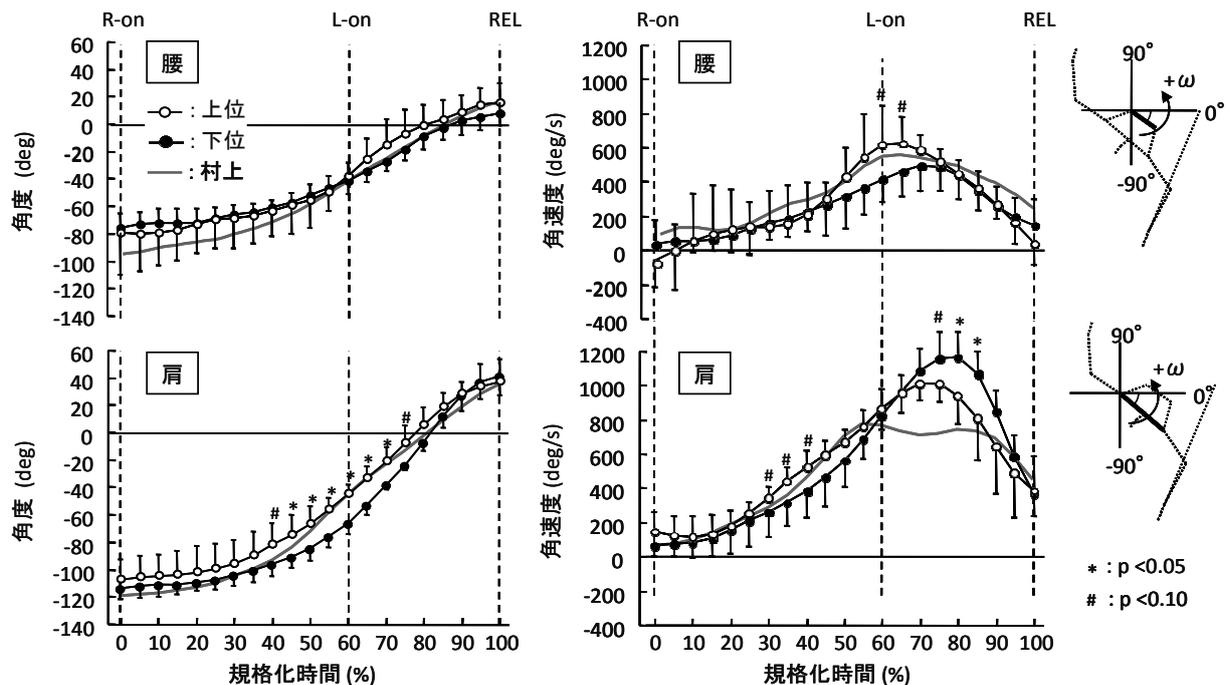


図 6 腰と肩の角度および角速度の時系列変化パターンにおける上位群と下位群との比較

タについてみていくと、R-on 時の助走速度において上位群が有意に高値を示していた (表 5)。Murakami et al. (2006) は、投てき記録と R-on 時の助走速度との間に有意な正の相関関係が認められたことを報告しており、本稿の結果はこの内容を支持するものであった。しかし、つづく L-on 時には若干減速し、両群間に差は認められていないことを考慮すると、R-on 時の助走速度は投てき記録に対して十分条件とはならないことが示唆される。一方、投局面における助走速度の減速率においては上位群が高値を示す傾向が認められた (表 5)。Bartoniets (2000) は、投局面における助走速度の減速は、上半身からやりへのエネルギー伝達に関係していることを指摘している。また、村上と伊藤 (2003) は 77.22m-45.25m の男子選手 49 名を対象にして、上位選手ほど助走速度が高く、L-on から REL まで急激に減速していたことを報告している。これらの報告を考慮すると、本稿にみられた減速率の結果は、世界一流選手の中でも上位群ほど上半身からやりへのエネルギー伝達が効果的に行われていたことを示唆するものと考えられる。ただし、決勝進出者 12 名の減速率を示しているイエテボリ WCh の分析結果をもとにして、本稿と同様の比較をしたところ、上位群と下位群との間に有意差は認められなかった。したがって、必ずしも減速率が大きければ良いわけではなく、助走速度の絶対値や投動作の良し悪しの影響を同時に考慮して、減速率の大きさを評価する必要があると考えられる。

以上のことから、本大会における世界一流選手の上位群と下位群では投てき技術に差があるこ

と、特に、やりに上方への速度を与えるための技術、および上半身からやりへのエネルギー伝達に関する技術に差があることが示唆された。そこで、ここからは上半身の動作についてさらに分析を進めることとする。図 4 に全選手における身体部分速度の時系列変化パターンを示した。準備局面では 40% まではすべての部分速度が助走速度とほぼ同程度であったが、L-on 付近では若干腰速度が低下し始め、より末端部分の速度が増加し始めている。そして、L-on と同時に腰速度が急激に減少するのと同様に、肩、肘、手首、手の順でピーク値を示し、最終的にやりのリリースを迎えるパターンを示した。このような中心部分から末端部分にかけて順次速度が加算されていく現象は運動連鎖 (kinetic chain) と呼ばれ (Jöris et al., 1985)、末端部分の速度増加のためには不可欠な動作であることが知られている。本稿では、これら部分速度の変化パターンについて上位群と下位群との比較を試みた結果、いずれの部位速度においてもおよそ 60% 付近、つまり L-on 前後において上位群が下位群と比較して高値を示す傾向が認められた (図 5)。また、肩と腰の角度および角速度をみると、上位群は下位群と比較して腰の角速度が 60% 前後に、肩の角度が 40%–65% に、肩の角速度が 30%–40% においてそれぞれ高値を示した (図 6)。これらのことは、上位選手は下位選手と比較してリリース時に対してより早い時点から体幹が投てき方向により速く長軸回転していたことを示すものであり、この動作が図 5 に示した各部位速度の差につながったものと考えられる。平均動作パターンのスティックピクチ

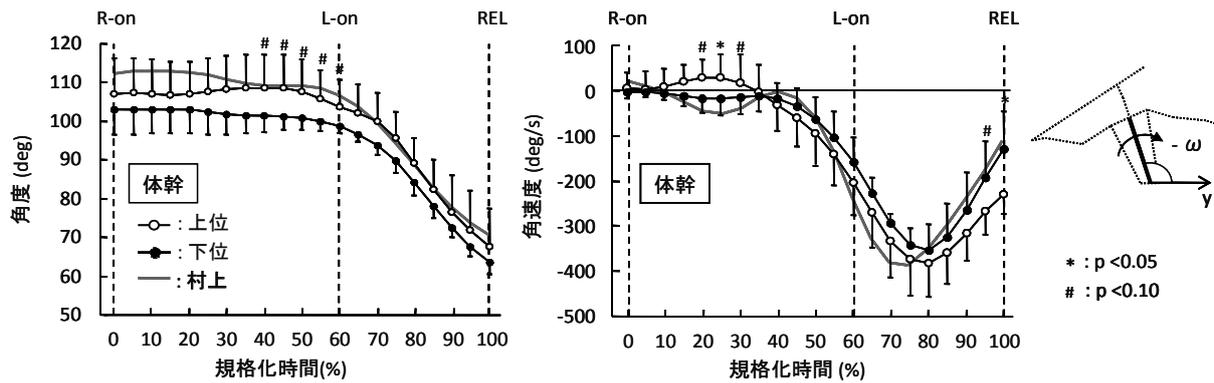


図7 体幹の角度および角速度の時系列変化パターンにおける上位群と下位群との比較

ヤ (図 2, 3) をみると、やはり上位群は 60%付近でやりを前方へ引き出し始めていることがわかる。野球のピッチングにおける投げでは、いわゆる「肩のラインが早いタイミングで開く(投てき方向へ長軸回転すること)」は良くない投球動作の典型として説明されることが多く、そのことはやり投においも同様であると考えられる。しかし、世界一流選手の上位選手の動作は、その説明とは一致せず、肩のラインが早いタイミングで開いていたことが明らかとなった。一般的には、肩のラインが早いタイミングで開くこと、つまり L-on 前に体幹が投てき方向へ長軸回転することによって、体幹に対して投げ手が前方へ引き出されやすくなることから、結果として投局面開始時にグリップがより前方へ位置され、リリースまでの投行程が短くなることが考えられる。したがって、指導現場では投局面開始のぎりぎりまで体幹の回転を抑えて投げ手を後方へ位置させ、それを L-on と同時にいっきに解放させることによって、投行程を長くすることを意図して「肩が開かない」ように指導が行われていると考えられる。しかしながら、仮に準備局面に体幹を回転させていても投げ手が前方へ引き出されてこないとすれば、体幹と投げ手との位置および速度の位相ずれは大きくなり、肩関節周りの筋群はより大きく強く引き伸ばされることになる。筋は大きく強く引き伸ばされ、即座に短縮する(伸張-短縮サイクル)ことで、爆発的な筋力を発揮することができることが知られている (Komi and Buskirk, 1972)。したがって、本大会における世界一流選手の上位選手はこの肩関節周りの筋群の伸張-短縮サイクルを強調するような投げを行っていた可能性が考えられる。このことについては、今後さらに検討する必要があるが、一般的には良くない動作として認識されている動作であっても、世界一流の中でもより上位の選手は、“一般的”とは異なるアプローチによって合理的な動作を行っている可能性は十分に考えられる。

さらに、本稿では体幹の前後傾角度および角速度についても検討した。その結果、上位群は下位

群と比較して、準備局面において体幹がより後傾位(40%–60%)を示す傾向が認められ、続く投局面においては角度としてはより直立位(=90度)に近いが、角速度は前傾方向に高値を示す傾向が認められた(図7)。村上と伊藤(2003)は、エリート選手ほど投局面における体幹の前傾角速度が高いことを報告しており、本稿の結果はこの報告を支持するものであった。このことから、上位選手は準備局面においてより体幹を直立位に近い角度に保ちながら、投局面において前傾角速度を高めていたが、下位選手は局面全体を通して体幹が前傾しており、角速度はそれほど大きくなかったことが示唆された。本大会においては、上位群が下位群と比較して上方へのリリース速度が高く、そのための投てき技術を有していることを指摘した。したがって、下位群のように体幹の角度が準備局面から投局面全体を通して前傾していることは、やりに上方への速度を与えることに対しては不利に作用することが考えられ、一方、上位群のように体幹を直立位に保つことは、上方への速度を与えやすい姿勢であったと考えられる。この点に関して、本大会の優勝者であるピトカマキ選手は、前方のリリース速度は12人中11番目と低かったが、上方へのリリース速度は顕著に高かった(表2)。彼の体幹角度は他の選手と比較してもより直立に近い角度を保っていたこと(田内, 2008)は、この考えが大きく外れていないことを示唆するものである。さらに、上位群の投局面において前傾角速度が高いことは、リリースに至るまで上肢を体幹によって前方へ引き出す効果が期待でき、やはり肩関節周りの筋群を引き延ばす効果があると考えられる。

このように考えると、上位群は準備局面後半では体幹の長軸回転、続く投局面では体幹の前傾回転の速度をそれぞれ高めることで、体幹部と投げ手との位置および速度の位相ずれを大きくし、肩関節周りの筋群の伸張-短縮サイクルを効果的に引き出すことによって、爆発的な力を発揮し、体幹から上肢へより大きなエネルギーを伝達していたと推察される。さらに、体幹部をより直立

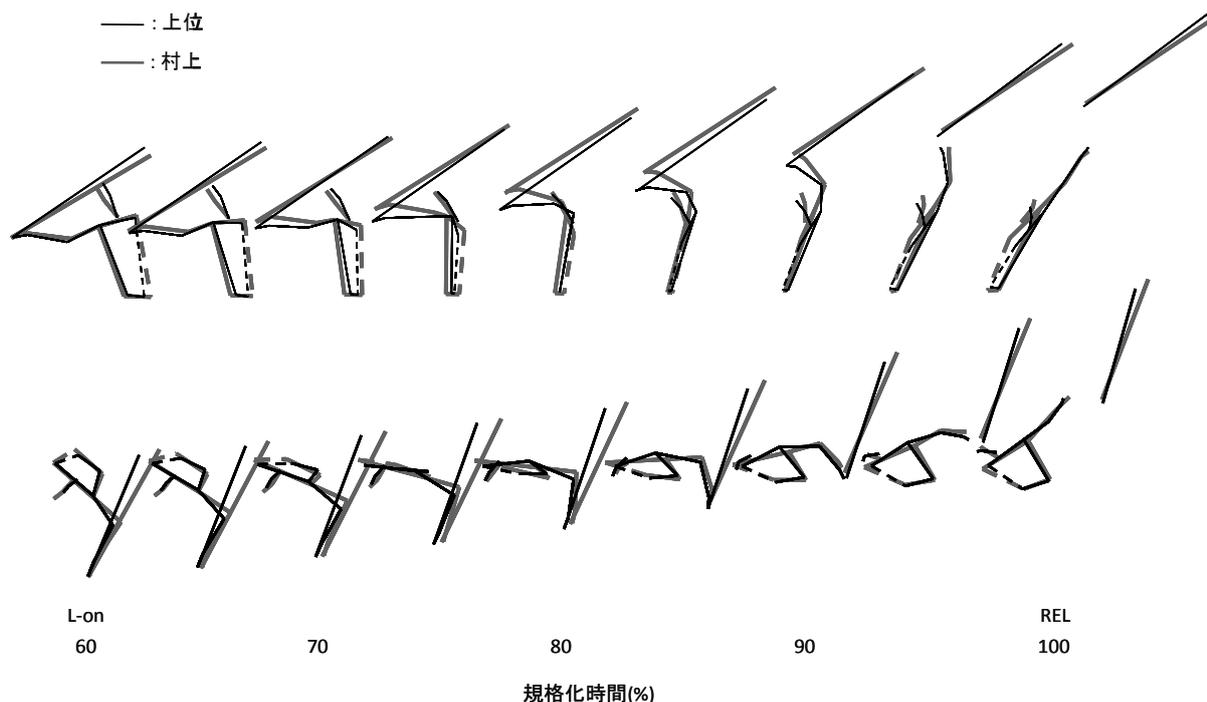


図8 上位群の平均投てき動作パターンと村上選手の投てき動作との比較

位に保つことによって、やりに対して上方へも大きな速度を与えていたものと考えられる。

### 3.3 世界一流選手と日本代表村上選手との相違

最後に、本稿では世界一流選手と日本代表であった村上選手との投てき技術を比較することによって、日本選手における投てき技術の課題を検討してみたい。まず、リリースパラメータおよび動作の基礎的パラメータを比較した結果、村上選手は世界一流選手の平均値と比較して、合成、前方および上方の各リリース速度の成分がいずれも低値を示した(表2)。村上選手の前方向へのリリース速度(23.5m/s)をみると、優勝したピトカマキ選手やその他80m超えた選手よりも高値を示す場合があったが、それらの選手と比較して上方への速度は低値を示した。このことは、村上選手が世界一流選手と対等になるためには、やはり今以上の前方向へのリリース速度を高めることと同時に、より高い上方への速度を獲得することが必要であることを示唆するものである。

他のパラメータについては、助走速度がR-on時では高値を示したがL-on時では低値を示した(表3)。このことは、村上選手は世界一流選手と比較して準備局面における減速が大きいことを示すものである。図2,3のスティックピクチャをみると、村上選手は上位群と比較してR-on時の右足が体幹のより前方に接地しており、このことが準備局面における助走速度の減速を大きくした原因であると考えられる。また、投行程については、村上選手は世界一流選手と比較して、準備局面におけるやりの移動距離が長く、続く投

局面においては短かったことが示された(表2)。このことについて身体各部の速度みると、準備局面における肩の速度はほとんど高まっていないにもかかわらず、肩より末端部分(肘、手およびやり)の速度が上位群と同程度か高値を示しており、続く投局面における各部位のピーク値は低値を示していた(図5)。このことは、準備局面において肩の速度が十分に高まる前に、より末端部分の速度が高まり、上肢が早いタイミングで前方へ引き出されていたことを示唆するものである。図8に示した投局面における上位群と村上選手とのスティックピクチャを比較してみると、村上選手は上位選手と比較して上肢が早いタイミングで前方へ引き出されているのが観察できる。さらに、腰と肩の角度および角速度をみると、準備局面における肩の角度および角速度は上位群のパターンに近かった(図6)。これらのことは、村上選手は上位群と同様に肩のラインが準備局面の早いタイミングで回転していたが、その肩のラインの回転にともなって上肢が前方へ引き出されていたために、投局面における体幹と上肢との位相ずれが小さく、投行程も短くなっていたことを示唆するものである。一方、上位群は早いタイミングで体幹が前方回転しても、村上選手よりも上肢が引き出されるタイミングが遅く、体幹と上肢との位相ずれが大きくなっていた。このことは結果として、前述した上位群と下位群との間にみられた差と類似している。したがって、「上位群は肩関節周りの筋群の伸張-短縮サイクルを強調した投げを行っていた」という可能性は、より良い投てき技術における重要なポイントにな

ることが考えられる。なお、村上選手の投局面における肩の角速度が低値で推移し、60-90%区間においてはほぼ一定の速度であったのは(図6)、体幹と上肢とが同期して投てき方向に回転したことによって、回転半径がより大きくなってしまったことが原因として考えられる。

以上のことから、世界一流選手との比較から村上選手の投てき技術の特徴をまとめると、助走速度は速いが準備局面での減速が大きいこと、その準備局面では体幹の長軸回転にともなう上肢が前方へ引き出され、体幹と上肢との位置および速度の位相ずれが少なくなり、続く投局面での末端部分の速度増加が小さかったことがあげられる。日本では、古くから“鞭動作”や“腕のしなり”など、体幹と上肢との位相ずれ、すなわち肩関節周りの筋群の伸張-短縮サイクルの重要性を唱えており、村上選手もそれを意識してきたことであろう。しかし、世界一流選手と比較すると村上選手でさえ、十分とはいえない投てき技術であった。ここに指摘したことは村上選手の特徴であり、すべての日本選手に共通する課題であるとは限らないが、今後、日本においては“体幹と上肢との位置および速度の位相ずれをいかにして大きくするか”という技術的課題を、よりクローズアップして取り組んでいかなければならないことを本稿の結果は示していると考えられる。

#### 4. まとめ

本稿の目的は、①世界一流男子やり投の投てき技術を、大阪世界陸上決勝進出者の上位選手(1-6位)と下位選手(7-12位)とを比較することによって明らかにし、より良い投てき技術の方向性を提示すること、②世界一流選手と日本代表である村上選手との技術の相違点を明らかにし、日本選手における投てき技術の課題を提示することであった。

主な結果は、以下のとおりである。

- ①について、上位群は下位群と比較して、
  - ・やりのリリース速度が高く、特に上方へのリリース速度が高かった(表2)。
  - ・右足接地時の助走速度が高く、投局面における助走速度の減速率が高かった(表3)。
  - ・準備局面のより早いタイミングで体幹が投てき方向に長軸回転し、投局面開始時前後の上肢の各部位(肩、肘、手)速度が高かった(図5, 6)。
  - ・準備局面および投局面を通して体幹がより直立位を保ち、投局面では体幹の前屈角速度が高かった(図7)。
- ②について、村上選手は上位群と比較して、
  - ・上肢の各部位速度は準備局面ではほぼ同様であったが、投局面では顕著に低く、やりのリリース速度も低かった(表2, 図5)。

- ・投行程が準備局面では長く、投局面では短い傾向を示した(表3)。

- ・準備局面のほぼ同じタイミングで体幹が投てき方向に長軸回転していたが、より早いタイミングでやりが前方へ引き出されていた(図6, 8)。

以上の結果から、より良い投てき技術の方向性として、助走速度を高めること、準備局面においては体幹を直立位に保ちながら長軸回転を開始すること、投局面では体幹の前屈角速度を高めることがあげられる。このことは、体幹からやりへのエネルギー伝達を効果的にし、やりの前方へのリリース速度に加えて、上方へのリリース速度を獲得するために必要な技術的ポイントであると考えられる。ただし、早いタイミングでの体幹の長軸回転は体幹と上肢との位相ずれを小さくし、運動連鎖による末端部分の加速を阻害する危険性を含んでいる。したがって、日本選手においてはいかにして体幹と上肢との位相ずれを大きくし、肩関節周りの筋群の伸張-短縮サイクルを効果的に利用できるかが重要な課題であると考えられる。

本稿の結果は、世界一流選手の中の上位と下位、また世界一流と日本チャンピオンとを比較しており、極めて高いレベルの投てき技術における差を指摘したものである。しかし、それぞれにおいて認められた技術の差は、かなりの部分において上位群がより合理的であり、理論的に説明できるものであった。したがって、本稿で示した結果は競技レベルの高い特定の選手にのみに適応できるものではなく、広範囲な競技レベルの選手が目指すべき投てき技術の方向性を示していると考えられる。もちろん、各個人が目標とする投てき技術を身につけるためのプロセスは一通りではなく、多くの試行錯誤が必要である。本稿に示した結果が、そのプロセスに対して何らかのヒントになれば幸いである。

#### 文献

- Ae, M., Muraki, Y., Koyama, H. and Fujii, N. (2007) A biomechanical method to establish a standard motion and identify critical motion by motion variability: With examples of high jump and sprint running. Bull. Inst. Health and Sport Sci., Univ. of Tsukuba 30: 5-12.
- Bartonietz, K. (2000) Javelin Throwing: an Approach to Performance Development. Biomechanics in Sport (ed ) Zatsiorsky, Blackwell Scince: pp.401-434.
- Best, R., Bartlett, R. and Morriss, C. (1993) A three-dimensional analysis of javelin throwing technique. J. Sports Sci. 11: 315-328.
- Campos, J., Brizuela, G. and Ramón, V. (2004) Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1999 IAAF World

- Championships in Athletics. *New Studies in Athletics* 19: 47-54, 2004.
- Jöris, H. J., van Muyen A. J., van Ingen Schenau G. J. and Kemper H. C. (1985) Force, velocity and energy flow during the overarm throw in female handball players. *J. Biomech.* 18: 409-414.
- Komi, P. V. and Buskirk, E. R. (1972) Effect of eccentric and concentric muscle conditioning on tension and electrical activity of human muscle. *Ergonomics.* 15 : 427-434.
- 前田正登, 野村治夫, 柳田泰義, 宮垣盛男 (1997) 人間の動きを考慮に入れたヤリの最適条件. *デサントスポーツ科学* 17: 270-277.
- Mero, A., Komi, P. V., Korjus, T., Navarro, E. and Gregor, R., J. (1994) Body segment contributions to javelin throwing during final thrust phases. *J. Appl. Biomech.* 10: 166-177.
- Morriss, C., Bartlett, R. and Fowler, N. (1997) Biomechanical analysis of the men's javelin throw at the 1995 World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics* 12: 31-41, 1997.
- Morriss, C. Bartlett, R. and Navarro, R. (2001) The function of blocking in elite javelin throws: A re-evaluation. *J. Hum. Mov. Stud.* 41: 175-190.
- Murakami, M., Tanabe, S., Ishikawa, M., Isolehto, J., Komi, P. V. and Ito, A. (2006) Biomechanical analysis of the javelin at the 2005 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics* 21: 67-80.
- 村上雅俊, 伊藤章 (2003) やり投げのパフォーマンスと動作の関係. *バイオメカニクス研究* 7: 92-100.
- 野友宏則, 富樫時子, 阿江通良 (1998) 記録水準の異なる選手のやり投げ動作に関するキネマティクスの研究. *陸上競技研究* 32 : 32-39.
- Tauchi, K., Murakami, M., Endo T., Takesako, H. and Gomi, K.: Biomechanical analysis of elite javelinthrowing technique at the 2007 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics* (in press)
- 田内健二, 村上幸史 (2008) 世界一流男子やり投げにおける投てき技術—91年世界陸上競技選手権東京大会と07年大阪大会との比較—. *バイオメカニクス研究* 12 (2) : 143-152.
- 田内健二 (2008) 2007年大阪世界陸上男子やり投において順位を決定したバイオメカニクスの要因とは. *月刊陸上競技* 42 (12) :157-159.
- 若山章信, 田附俊一, 小島俊久, 池上康男, 桜井伸二, 岡本敦, 植屋清見, 中村和彦 (1994) やり投げのバイオメカニクスの分析. 佐々木秀幸, 小林寛道, 阿江通良監修, 世界一流競技者の技術. ベースボール・マガジン社: 東京, pp. 220-238.

資料1 女子やり投決勝の結果

順位	名前	1投目 (m)	2投目 (m)	3投目 (m)	4投目 (m)	5投目 (m)	6投目 (m)	最高記録 (m)
1	シュボタコバ	66.40	60.30	67.07	64.28	63.56	64.61	67.07
2	オベルクフェル	64.01	65.26	60.90	61.87	61.12	66.46	66.46
3	ネリウス	59.89	59.75	59.96	64.42	62.38	x	64.42
4	ブレチヨバ	60.25	61.93	63.73	62.44	x	x	63.73
5	リカ	59.07	59.24	61.72	58.68	59.9	63.13	63.13
6	ビセツト	57.77	56.38	61.74	x	x	53.18	61.74
7	アバクモフ	61.43	59.91	x	x	x	60.74	61.43
8	シュタール	60.10	58.28	58.38	61.03	x	59.75	61.03
9	マディチュク	58.37	58.31	57.32	-	-	-	58.37
10	イヴァンコフ	57.56	56.88	57.87	-	-	-	57.87
11	ティレア・モルドバン	54.76	55.71	x	-	-	-	55.71
12	タルヴァイネン	53.50	x	50.04	-	-	-	53.50

資料2 女子やり投決勝における投てき記録およびやりのリリースパラメータ

順位	名前	最高記録 (m)	リリース速度 (m/s)				リリース高 (m)	リリース角度 (deg)	姿勢角 (deg)	迎え角 (deg)
			左右	前方	上方	合成				
1	シュボタコバ	67.07	-0.4	17.3	16.3	23.8	1.79	40.9	39.3	-1.6
2	オベルクフェル	66.46	1.8	18.9	14.4	23.8	1.68	37.2	36.9	-0.3
3	ネリウス	64.42	-1.3	20.7	12.4	24.1	1.74	34.9	43.9	9.0
4	ブレチヨバ	63.73	-2.5	19.1	14.6	24.2	1.83	37.3	41.5	4.2
5	リカ	63.13	-0.2	19.6	13.5	23.8	1.73	34.6	41.4	6.8
6	ビセツト	61.74	-3.2	20.0	12.9	24.0	1.70	32.7	32.5	-0.2
7	アバクモフ	61.43	-1.1	18.6	14.0	23.4	1.76	37.0	45.3	8.3
8	シュタール	61.03	-1.3	19.6	13.0	23.5	1.72	33.6	46.4	12.8
9	マディチュク	58.37	2.5	18.5	13.6	23.1	1.88	38.4	41.5	3.1
10	イヴァンコフ	57.87	1.6	18.7	14.4	23.6	1.69	37.6	33.9	-3.7
11	ティレア・モルドバン	55.71	-2.7	18.7	12.8	22.8	1.73	36.0	39.1	3.1
12	タルヴァイネン	53.5	-0.2	17.6	14.2	22.6	1.67	40.3	41.4	1.1
平均値		61.21	-0.6	18.9	13.8	23.6	1.74	36.7	40.3	3.6
標準偏差		4.17	1.8	0.9	1.1	0.5	0.06	2.5	4.2	4.9

資料3 女子やり投決勝における助走速度、局面時間、投行程および歩幅

順位	名前	助走速度 (m/s)			減速率 (%)	局面時間 (s)		投行程 (m)			歩幅 (m) 前後
		R-on	L-on	REL		準備局面	投局面	準備局面	投局面	トータル	
1	シュボタコバ	5.77	4.85	2.89	40.4	0.217	0.150	1.28	1.79	3.06	1.70
2	オベルクフェル	6.64	5.76	3.45	40.1	0.200	0.150	1.39	2.03	3.42	1.91
3	ネリウス	5.78	4.99	2.75	44.9	0.217	0.150	1.26	2.02	3.28	1.59
4	ブレチヨバ	5.20	4.45	2.44	45.2	0.200	0.150	1.07	1.81	2.87	1.47
5	リカ	5.16	4.64	2.37	48.8	0.167	0.133	0.87	1.64	2.52	1.42
6	ビセツト	5.45	5.12	3.07	40.0	0.217	0.133	1.28	1.70	2.98	1.63
7	アバクモフ	6.22	5.24	3.06	41.6	0.217	0.150	1.35	1.90	3.26	1.66
8	シュタール	5.94	4.80	2.57	46.5	0.250	0.133	1.49	1.65	3.14	1.88
9	マディチュク	5.82	4.39	2.64	39.7	0.250	0.150	1.41	1.81	3.21	1.81
10	イヴァンコフ	6.06	5.07	3.55	30.1	0.200	0.150	1.17	1.95	3.12	1.43
11	ティレア・モルドバン	4.90	3.83	2.05	46.5	0.283	0.150	1.38	1.71	3.09	1.48
12	タルヴァイネン	5.79	5.21	2.88	44.7	0.233	0.150	1.20	1.67	2.87	1.74
平均値		5.73	4.86	2.81	42.4	0.221	0.146	1.26	1.81	3.07	1.64
標準偏差		0.49	0.50	0.44	5.0	0.030	0.008	0.17	0.14	0.24	0.17

# 円盤投げのキネマティクスの分析

## Kinematics of Discus-Throw in IAAF World Championships in Athletics Osaka 2007

山本 大輔<sup>1)</sup> 伊藤 章<sup>2)</sup> 田内 健二<sup>3)</sup> 村上 雅俊<sup>4)</sup>  
淵本 隆文<sup>2)</sup> 田邊 智<sup>5)</sup> 遠藤 俊典<sup>6)</sup> 竹迫 寿<sup>7)</sup> 五味 宏生<sup>7)</sup>

1) 大阪体育大学大学院スポーツ科学研究科 2) 大阪体育大学 3) 早稲田大学  
4) 愛媛女子短期大学 5) 大阪産業大学 6) 茨城県立医療大学 7) 早稲田大学大学院

Daisuke Yamamoto<sup>1)</sup>, Akira Ito<sup>2)</sup>, Kenji Tauchi<sup>3)</sup>, Masatoshi Murakami<sup>4)</sup>  
Takafumi Fuchimoto<sup>2)</sup>, Satoru Tanabe<sup>5)</sup>, Toshinori Endou<sup>6)</sup>, Hisashi Takesako<sup>3)</sup>, Kouki Gomi<sup>7)</sup>

1) Graduate School of Osaka University of Health and Sport Sciences, 2) Osaka University of Health and Sport Sciences, 3) Ehime Women's College, 4) Waseda University, 5) Osaka Sangyo University, 6) Ibaraki Prefectural University of Health Sciences, 7) Waseda University Graduate School of Sport Sciences

### 1. はじめに

1991年に東京で世界陸上競技選手権大会が開催されて以来、日本では16年ぶり2度目となる世界陸上競技選手権大会が2007年大阪の地で開催された。円盤投げ種目には男子22カ国29人、女子19カ国28人がエントリーし、日本からは日本陸上競技選手権大会(2007, 大阪)で優勝した畑山茂雄選手と室伏由香選手が出場した。未だに世界と日本の円盤投げ競技レベルに差は見られるものの、2007年に男子では畑山選手が1979年に川崎清貴選手が樹立した日本記録の60.22mに大きく迫る60.11mの投てきを見せ、室伏由香選手も58.62mの日本記録を樹立し日本の円盤投げの競技レベルは高まりの兆しを見せてきている。そこで、本研究では今回の世界陸上競技選手権大会の円盤投げにおける男・女上位8名の投てき動作の特徴をバイオメカニクスの観点から明らかにし、畑山選手および室伏選手との比較を試みながら、現場での指導やトレーニングの検討材料、

あるいは今後の研究のデータベースとなるような資料を得ることを目的とした。

### 2. 研究方法

#### 2.1 測定対象

世界陸上競技選手権大会(大阪, 2007)における、男女円盤投げの上位8名と、日本代表として出場した畑山茂雄選手と室伏由香選手の計18名(表1・2)の円盤の動き、および男女上位3名と日本代表選手2名の8名の動作について解析を実施した。測定対象者は全員右手投げであった。

#### 2.2 撮影方法

図1は、本研究における撮影設定を示している。陸上競技場の観客席上段に設置した2台のDVカメラ(60fps)で、各選手の全ての投てき動作をサークルの側方と後方より撮影した。また、投てき方向4m×横4m×高さ2.5mの画角を設定し、あらかじめ較正点間の距離が分かっているキャリ

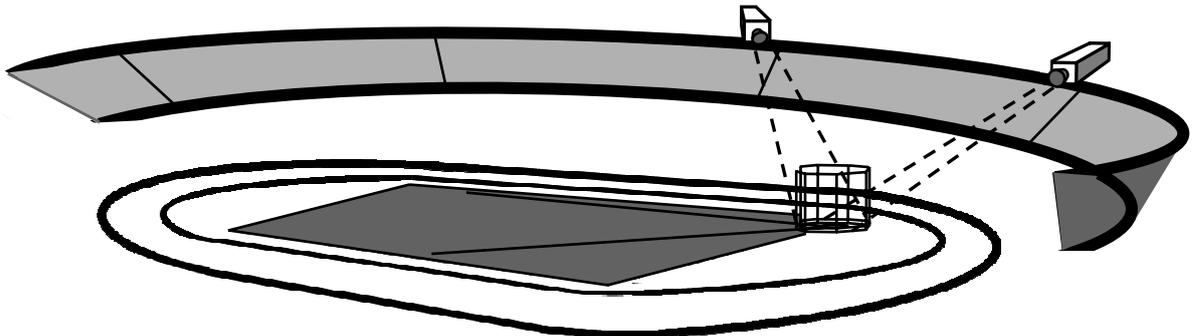


図1 撮影設定

ブレーション用のポール(各ポールに5ヶ所のマーク)を9ヶ所に垂直に立て、合計45個のマークを撮影した。なお本研究における撮影は、日本陸上競技連盟科学委員会の活動の一環である。

### 2.3 分析方法

撮影した映像から、各選手の最も記録の良かった試技の円盤および身体24点を動作解析システム(Frame-DIAS II, DKH)を用いて毎秒60コマでデジタル化し、DLT法(Direct Linear Transformation method)を用いて3次元座標値を算出した。その後、残差分析法によって身体各部と円盤の最適遮断周波数(5.05-7.54Hz)を決定し、4次のButterworth digital filterによりデータの平滑を行った。男女決勝と男女予選における較正点の実測値と計算値との平均誤差範囲は、投てき方向に対して左右方向(静止座標系におけるX軸)が3-15mm、投てき方向(Y軸)が4-19mm、鉛直方向(Z軸)が5-12mmであった。分析を行なうにあたり、円盤投げ動作を以下のように分けた。すなわち、バックスイング終了時のターン動作開始(T-st)、右足離地(R-off)、左足離地(L-off)、右足接地(R-on)、左足接地(L-on)、円盤のリリース(Rel)の時点を設定し、T-stからR-offまでを両脚支持局面(DS)、R-offからL-offまでを左脚支持局面(SS1)、L-offからR-onまでを非支持局面(NS1)、R-onからL-onまでを右脚支持局面(SS2)、L-onからRelまでを投げ出し局面(DV)と時系列に沿った6つの時点と5つの局面とした(図2)。

### 2.4 算出項目

男女円盤投げ種目における男女上位8名と日本代表として出場した畑山茂雄選手と室伏由香選手を合わせた計18名の1)投てき記録と身体的特徴、2)初期条件、3)動作時間を算出した。男女上位3名と日本代表選手2名の計8名については、4)円盤および身体重心(円盤+身体の合成重心)の軌跡と速度変化、5)腕のスイング速度、6)体幹の捻転角、7)両肩を結んだ線(以降「肩」と略す)と両腰を結んだ線(以降「腰」と略す)の回旋速度について算出した。なお腕のス

イング速度と体幹の捻転角および肩と腰の回旋速度は、体幹の長軸をZ軸とする運動座標系におけるX-Y平面で求めた。腕のスイング速度は、右肩と左肩を結ぶ線と、右肩と第三中手指節関節を結ぶ線とのなす角から求めた右肩の水平内外転角度の変化を時間で微分して求めた。また、水平内転方向のスイング速度を+とした。体幹の捻転角は、肩と腰のなす角度として求め、肩と腰が正対した状態を0°とし、腰に対して右肩が後方にある状態の捻りを+とした。また、肩と腰の回旋速度は、肩と腰の角度変化を時間で微分して求め、反時計回りの回旋速度を+とした。なお、本研究において、世界トップレベルの選手が各局面でどのような動作を行なっているのかを知るために、各局面の動作時間を男女上位8名それぞれの平均動作時間で標準化し、円盤速度と身体重心速度と腕のスイング速度、体幹の捻転角および肩と腰の回旋速度についてそれぞれ平均変化曲線を示した。それらの図における破線はそれぞれ男女上位3名の平均値、グレーの範囲は標準偏差を示している。畑山選手と室伏選手については、それぞれ太い実線で示した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 男女上位8名と日本選手の結果と身体的特徴

表1は、男子円盤投げ決勝での上位8名と畑山茂雄選手の身長と体重、試技結果と自己最高記録を示している。上位8名の身長と体重の平均は、それぞれ $1.98 \pm 0.02\text{m}$ と $116.5 \pm 11.2\text{kg}$ であった。体格面において、畑山選手は上位8名に比べると身長と体重ともに小柄であるといえる。本大会の決勝では、86年に東ドイツのJシュルト選手が樹立した74.08mの世界記録に次ぐ、歴代2位となる73.88mの自己最高記録を持つ前回大会覇者のアレクナ選手(00年)と歴代3位となる73.38mの自己最高記録を持つカンテル選手(06年)の2強が揃うハイレベルな戦いとなった。上位8名の記録が $65.68 \pm 1.59\text{m}$ という混戦を制したのは68.94mを投げたカンテルであった。もう一人の優勝候補であったアレクナ選手は4位で、自己最高記録から-8.64mと、8名中結果と自己最高記

表 1 男子円盤投げ上位 8 名と畑山選手の身体的特徴と試合結果および自己最高記録

Rank	Bib	Name	Country	BH (m)	BW (kg)	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	Result	Personal
1	525	Gerd Kanter ゲルド・カンテル	EST	1.96	126	64.89	65.37	68.94	×	65.22	68.84	68.94	73.38
2	635	Robert Harting ローベルト・ハルティンク	GER	2.01	112	64.62	65.59	65.59	×	66.68	62.00	66.68	66.93
3	852	Rutger Smith ルトガー・スミス	NED	1.97	125	64.32	65.98	66.42	65.08	×	65.69	66.42	66.60
4	805	Virgilijus Alekna ウィルギリウス・アレクナ	LTU	2.00	130	63.68	×	65.24	64.86	×	63.75	65.24	73.88
5	669	Gábor Máté ガーボル・マーテー	HUN	1.99	104	64.26	62.82	64.71	63.09	×	×	64.71	66.54
6	495	Omar Ahmed El Ghazaly オマル・アハメド・ガザリ	EGY	1.99	120	×	62.34	64.58	63.45	64.11	63.08	64.58	66.58
7	679	Ehsan Hadadi エフサン・ハダディ	IRI	1.96	98	63.29	64.10	×	64.21	64.53	×	64.53	67.95
8	529	Aleksander Tammert アレクサンデル・タツメルト	EST	1.96	117	62.16	63.91	63.44	64.29	62.79	64.33	64.33	70.82
(予)	732	畑山 茂雄 ハタケヤマ シゲオ	JPN	1.84	106	52.51	55.71	54.23	/	/	/	55.71	60.11

表 2 女子円盤投げ上位 8 名と室伏選手の身体的特徴と試合結果および自己最高記録

Rank	Bib	Name	Country	BH (m)	BW (kg)	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	Result	Personal
1	485	Franka Dietzsch フランカ・ディーチュ	GER	1.83	81	66.61	66.48	63.92	63.81	65.29	×	66.61	69.51
2	830	Darya Pishchalnikova ダリヤ・ピシチャルニコワ	RUS	1.89	95	59.91	63.10	65.14	60.83	65.78	65.55	65.78	65.55
3	351	Yarelis Barrios ヤレリス・バリオス	CUB	1.74	76	63.90	61.75		62.44	×	57.60	63.90	63.44
4	770	Nicoleta Grasu ニコレタ・グラス	ROM	1.76	88	59.51	59.79	63.14	61.44	63.02	63.40	63.40	68.80
5	333	Taifeng Sun 孫太風	CHN	1.87	90	61.21	60.39	63.22	61.57	×	×	63.22	64.98
6	911	Olena Antonova オレーナ・アントノフ	UKR	1.82	90	59.61	60.86	59.96	62.41	62.17	61.81	62.41	67.30
7	758	Joanna Wisniewska ヨアンア・ビスニエフスカ	POL	1.78	88	61.35	59.96	60.95	59.64	×	60.64	61.35	63.97
8	915	Natalya Fokina-Semenova ナタリヤ・フォキナセミヨノフ	UKR	1.78	85	61.17	60.36	60.11	59.94	×	58.37	61.17	63.11
(予)	619	室伏 由香 ムロフシ ユカ	JPN	1.70	64	50.76	51.79	52.76	/	/	/	52.76	58.62

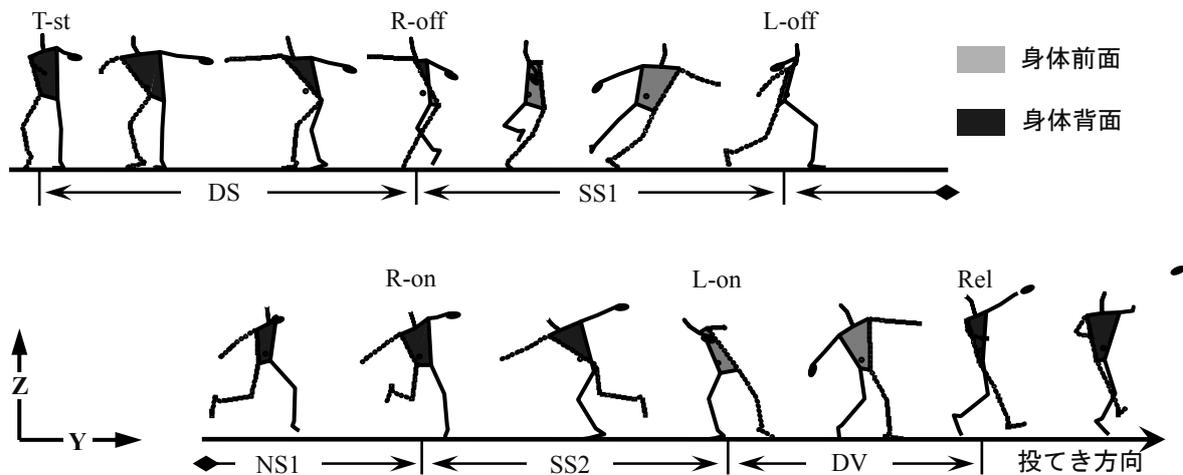


図 2 時点と局面の定義

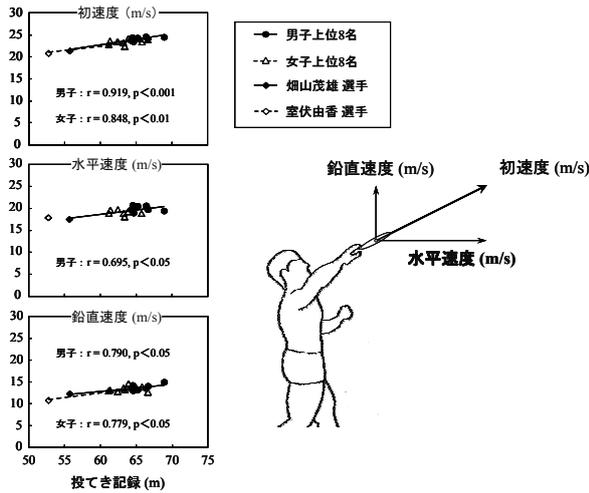


図 3 Rel 時の水平速度と鉛直速度および初速度と投てき記録との関係

録との差が最も大きかった。表 2 は、女子円盤投げ決勝での上位 8 名と室伏由香選手の身長と体重、試技結果と自己最高記録を示している。上位 8 名の身長と体重の平均は、それぞれ  $1.81 \pm 0.06$  m と  $86.6 \pm 5.9$  kg であった。室伏選手も畑山選手と同様に、上位 8 名に比べると体格面において小柄であるといえる。また、上位 8 名の結果の平均は  $63.48 \pm 1.94$  m であり、本大会では 39 歳のベテラン・ディーチュ選手が 1 投目に 66.61m を投げ、そのまま逃げ切り優勝した。1991 年の世界選手権東京大会から出場し、99 年セビア大会と 05 年ヘルシンキ大会に続く 3 回目の優勝を果たした。

### 3.2 初期条件

投てき種目における技術の最終ゴールは、Rel 時の最大限の速度と最適な高さやと射角であり、どれも投てき記録に影響する要因である。この最適な初期条件については、様々な競技レベルを対象に研究が行なわれ、さらにはこれらの最大・最適な初期条件を達成するために必要とされる技術の解明へ向けて様々な視点から研究がなされてきている (Gregor, et al., 1985; McCoy, et al., 1985; Dapena, 1993; 宮西ら, 1998; Yu, et al., 2002; 松尾と湯浅, 2005; Leigh and Yu, 2007; 田内ら, 2007; 山本ら, 2008)。

上位 8 名と日本選手を加えると、男子において円盤の初速度とその水平速度成分と鉛直速度成分は、投てき記録との間にそれぞれ有意な正の相関関係 ( $r=0.919, p<0.001$ ;  $r=0.695, p<0.05$ ;  $r=0.790, p<0.05$ ) が認められた (図 3)。また、女子においても円盤の初速度とその鉛直速度成分は、投てき記録との間にそれぞれ有意な正の相関関係 ( $r=0.848, p<0.01$ ;  $r=0.779, p<0.05$ ) が認められた (図 3)。そして、上位 8 名の初速度の平均は、男子が  $24.11$  m/s で女子が  $23.36$  m/s であり、ロス

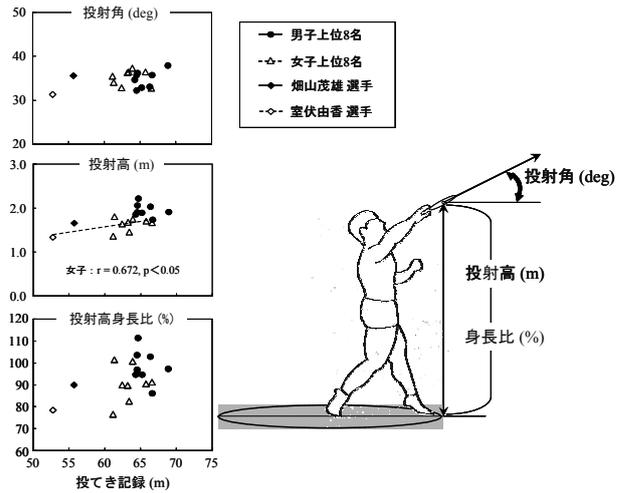


図 4 射角と射高および射高の身長比と投てき記録との関係

アンゼルス・オリンピックにおける男女上位 3 名の平均初速度 (男子 ;  $24.8$  m/s, 女子 ;  $25.0$  m/s : Gregor, et al., 1985) や他のトップレベルの選手を対象とした先行研究 (McCoy, et al., 1985; Leigh and Yu, 2007) と類似した値を示した。畑山選手と室伏選手の初速度はそれぞれ  $21.35$  m/s と  $20.79$  m/s であり、世界上位 8 名の平均初速度と比べて約  $2.7$  m/s 低かった。

上位 8 名と日本選手を加えると、男子選手は射角と射高および射高の身長比は投てき記録との間に有意な相関関係は認められなかった (図 4)。女子選手では、射高においてのみ投てき記録との間に有意な正の相関関係 ( $r=0.672, p<0.05$ ) が認められたが、射角と射高の身長比は投てき記録との間に有意な相関関係は認められなかった (図 4)。しかし、男女上位 8 名の射角の平均は、それぞれ男子が  $34.7^\circ$  と女子が  $35.2^\circ$ 、射高とその身長比の平均は、それぞれ男子が  $1.89$  m で  $95\%$  と女子が  $1.63$  m で  $90\%$  であった。初速度と同様に、これらの値はロスアンゼルス・オリンピックにおける男女上位 3 名の平均射角 (男子 ;  $35.6^\circ$ , 女子 ;  $34.7^\circ$ )、射高とその身長比の平均 (男子 :  $1.73$  m,  $90\%$ , 女子 :  $1.48$  m,  $84\%$ ) や他のトップレベルの選手を対象とした先行研究 (Gregor, et al., 1985; McCoy, et al., 1985; Leigh and Yu, 2007) と類似した値を示した。男子日本一流選手 (山本ら, 2008) の射高とその身長比 ( $1.66$  m,  $90.7\%$ ) と比較すると、世界トップレベルの選手は  $0.23$  m,  $5\%$  程度高い結果であった。畑山選手と室伏選手の射角はそれぞれ  $35.5^\circ$  と  $31.3^\circ$  であり、射高とその身長比は、それぞれ  $1.65$  m で  $90\%$  と  $1.33$  m で  $78\%$  であった。

### 3.3 動作時間

図 5 に男女上位 8 名と畑山選手と室伏選手における各局面の動作時間を示した。

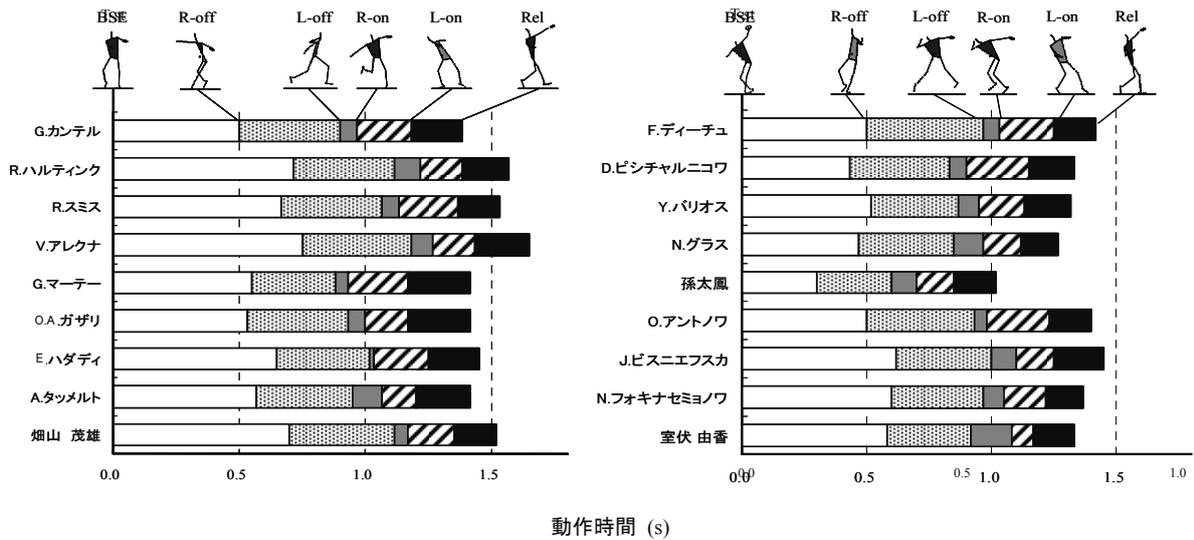


図5 男女上位8名および畑山選手と室伏選手の動作時間

表3 男女上位3名および畑山選手と室伏選手における円盤と身体重心の移動距離

Rank	Name	円盤軌跡 (m)						身体重心軌跡 (m)						
		DS	SS1	NS	SS2	DV	Total	DS	SS1	NS	SS2	DV	Total	
M-1	G.カントル	1.34	2.27	0.63	1.78	3.05	9.07	0.14	0.54	0.15	0.45	0.38	1.66	
M-2	R.ハルティンク	2.77	2.31	0.87	1.25	2.87	10.07	0.34	0.57	0.27	0.36	0.33	1.87	
M-3	R.スミス	2.12	2.62	0.54	1.50	2.77	9.56	0.28	0.62	0.16	0.52	0.36	1.94	
F-1	F.ディーチュ	1.40	2.80	0.44	1.29	2.46	8.38	0.30	0.66	0.16	0.51	0.25	1.89	
F-2	D.ピシチャルニコフ	2.13	2.99	0.48	1.76	2.99	10.35	0.24	0.60	0.15	0.55	0.28	1.82	
F-3	Y.バリオス	2.91	2.80	0.43	0.72	2.74	9.61	0.27	0.57	0.20	0.42	0.34	1.81	
Male (1-3)		平均	2.08	2.40	0.68	1.51	2.90	9.56	0.25	0.58	0.19	0.44	0.36	1.82
		標準偏差	0.72	0.19	0.17	0.27	0.14	0.50	0.10	0.04	0.07	0.08	0.03	0.15
Female (1-3)		平均	2.15	2.86	0.45	1.26	2.73	9.45	0.27	0.61	0.17	0.50	0.29	1.84
		標準偏差	0.76	0.11	0.03	0.52	0.26	1.00	0.03	0.04	0.02	0.07	0.05	0.04
(予)	畑山 茂雄		1.16	2.26	0.47	1.60	2.43	7.92	0.31	0.62	0.11	0.40	0.32	1.76
(予)	室伏 由香		2.06	2.61	1.25	0.83	2.61	9.35	0.24	0.47	0.29	0.20	0.23	1.43

### 1) 男子選手

上位8名の各局面とTotalの平均動作時間と標準偏差は、DS:  $0.62 \pm 0.09s$ , SS1:  $0.39 \pm 0.03s$ , NS:  $0.07 \pm 0.03s$ , SS2:  $0.19 \pm 0.04s$ , DV:  $0.21 \pm 0.03s$ , Total:  $1.48 \pm 0.09s$ であった。畑山選手の動作時間は、上位8名と大きな違いは見られなかった。円盤投げの動作時間は、様々な競技レベルを対象に報告されており (Gregor, et al., 1985; 植屋ら, 1994; 宮西ら, 1997; 田内, 2007; 田内ら, 2007), 上位8名の動作時間はそれらの先行研究と類似した値を示した。

しかし、すべての局面の動作時間と投てき記録との間には有意な相関関係は認められなかった。田内ら (2007) は広範な競技レベルを有した円盤投げ選手を対象に、競技レベルごとにGood群とMiddle群とPoor群の3群に分け、各局面の動作時間と投てき記録との関係を検討している。そして、Good群 (投てき記録;  $53.84 \pm 4.77m$ ) においてDV局面の動作時間 ( $0.20 \pm 0.03s$ ) と投てき記

録との間に有意な負の相関関係が認められたと報告している。本研究では、上述のように投てき記録とDV局面の動作時間との間に有意な相関関係が認められなかったが、男子上位8名とGood群のDV局面の動作時間はほぼ同じであった。

### 2) 女子選手

女子上位8名における各局面とそのTotalの平均動作時間と標準偏差は、DS:  $0.51 \pm 0.11s$ , SS1:  $0.39 \pm 0.05s$ , NS:  $0.07 \pm 0.02s$ , SS2:  $0.20 \pm 0.04s$ , DV:  $0.17 \pm 0.02s$ , Total:  $1.35 \pm 0.14s$ であった。室伏選手は女子上位8名に比べて、NS局面が長く、SS2局面が短かった。上位8名の値は、Gregor, et al. (1985) のロサンゼルス・オリンピック女子上位3名の各局面における平均動作時間と類似していた。しかし、男子と同様にすべての局面の時間と投てき記録との間には有意な相関関係は認められなかった。田内 (2007) は、アジアと日本におけるトップレベルの女子選手を対象に各局面の動作時間について調査しているが、その結果

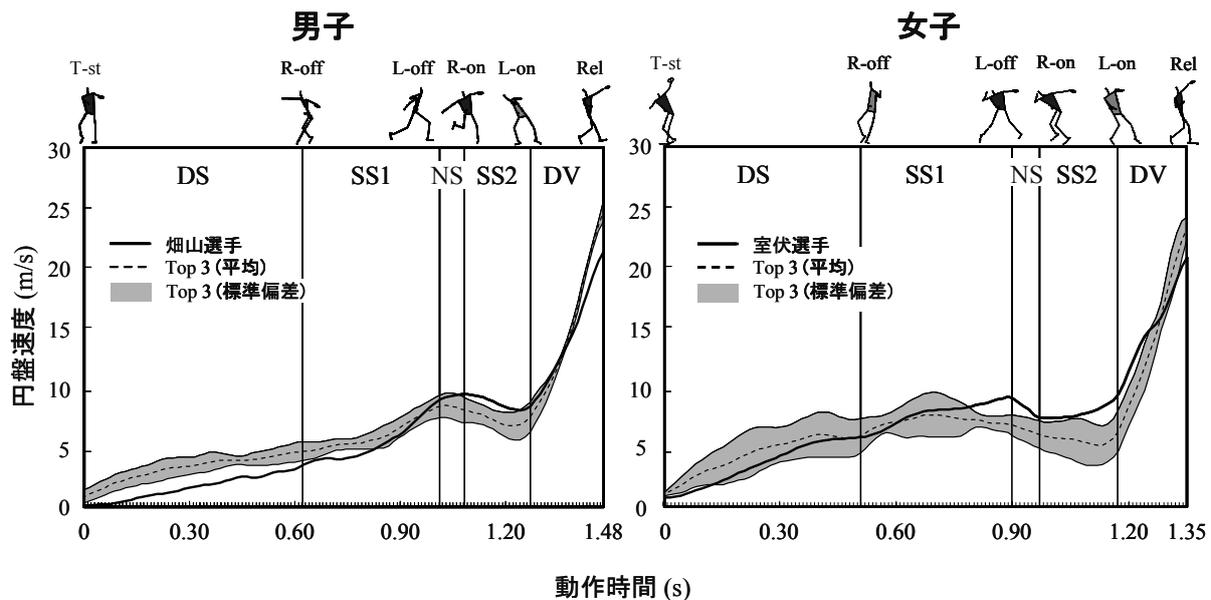


図6 男女上位3名および畑山選手と室伏選手の投てき動作中の円盤速度変化

と比較すると本研究の上位8名はNS局面が短く、SS2局面が長い傾向にあった。

### 3.4 円盤と身体重心の軌跡と速度変化

#### 1) 円盤の移動距離と速度変化

男女上位3名については、次に示すように円盤の移動距離を積算した(表3)。円盤のTotalの移動距離は男子が $9.56 \pm 0.50\text{m}$ 、女子が $9.45 \pm 1.00\text{m}$ で、ほとんど違いはなかった。室伏選手もほぼ同様の値( $9.35\text{m}$ )であったが、畑山選手は $7.92\text{m}$ と著しく短い値であった。円盤の移動距離を局面ごとに調べたところ、男子で最も長かったのはDV局面で、次いでSS1局面であった。一方、女子ではSS1局面が最も長く、次いでDV局面が長かった。Rel前のDV局面の移動距離は、男子が $2.90 \pm 0.14\text{m}$ で畑山選手より $0.47\text{m}$ 長く、女子は $2.73 \pm 0.26\text{m}$ で室伏選手より $0.12\text{m}$ 長かった。

男女間で比較すると、身長は男子選手が女子選手に比べ有意に大きい( $t=2.744$ ,  $p<0.05$ )にも関わらず、各局面とTotalそれぞれの円盤の移動距離に有意差は認められなかった。Leigh and Yu (2007)は、男子選手と女子選手ではパフォーマンスを分ける技術パラメーターが異なり、エリート女子円盤投げ選手における技術的特長の一つはR-offでの体幹のより大きな前傾とRel時のより大きな体幹の後傾であり、この動作は円盤の軌道を傾けるのに役立っていると報告している。また、円盤の移動距離を長くすることで円盤に力を加える時間が増加し、より大きな円盤水平初速度が可能になると報告している。このことから男女間で円盤の移動距離に差がみられなかったのは、投てき動作中の体幹の前後傾やそれに伴う円盤の上下動などが関係していると考えられる。しか

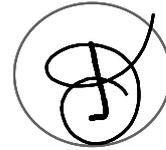
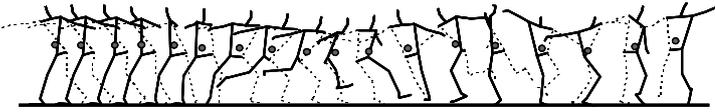
し、本研究において各局面及びtotalの円盤の移動距離と投てき記録との関係は認められなかった。

図6に男女上位3名及び畑山選手と室伏選手における投てき動作中の円盤速度変化を示した。円盤の速度は、男子はL-off付近まで緩やかに増加した後、SS2局面中にやや減少しL-on付近からRelに向けて急激に増加する変化パターンを示した。畑山選手はSS2局面でやや高い値を示したが全体的な傾向に違いは見られなかった。女子は男子より早いSS1局面の中盤から速度が減少し始め、男子と同様にL-on付近から急激に増加した。しかし、室伏選手はNS局面で低下しながら、R-offからRelまで増加する特異的な変化傾向を示した。山本ら(2008)は、世界一流と日本一流の男子円盤投げ選手20名を対象に投てき記録と円盤速度との関係について検討し、投てき記録の良い選手は、RelだけでなくL-onですでに円盤速度がより高かったと報告している。本研究において、世界上位3名のL-onの円盤速度の平均は男子が $8.16 \pm 1.22\text{m/s}$ 、女子が $7.38 \pm 1.67\text{m/s}$ であった。畑山選手と室伏選手のL-onの円盤速度は、それぞれは $8.88\text{m/s}$ と $10.25\text{m/s}$ であり、男子選手に大きな違いは認められなかったが、女子選手においては室伏選手の方が高い値であった。

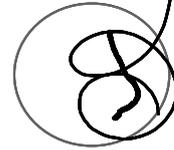
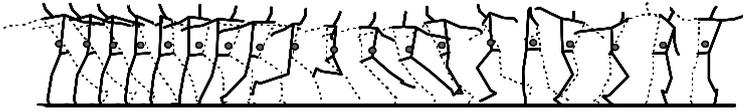
#### 2) 身体重心の移動距離と速度変化

図7に男女上位8名のT-stからRelまでのサークル後方から見た12Hzごとのスティックピクチャーと水平面上の円盤と身体重心の軌跡を示した。スティックピクチャーにおける破線は左半身、実線は右半身、丸は身体重心位置を示している。また円盤と身体重心の軌跡において、細い実線は

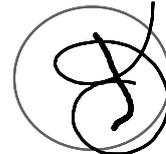
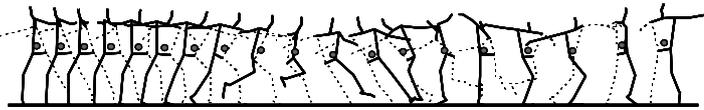
G.カンテル 68.94m



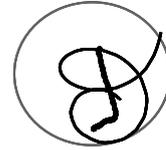
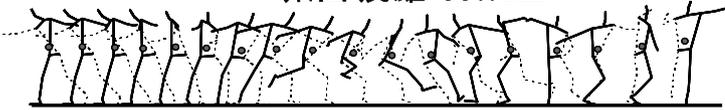
R.ハルティンク 66.68m



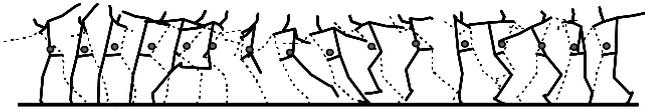
R.スミス 66.42m



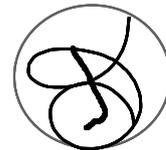
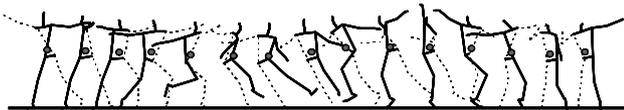
畑山 茂雄 55.71m



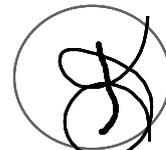
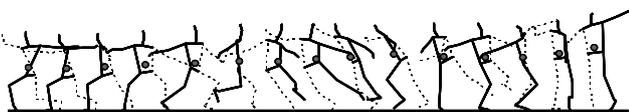
F.ディーチュ 66.61m



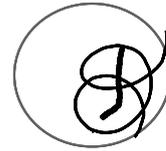
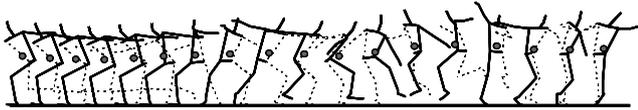
D.ピシチャルニコワ 65.78m



Y.バリオス 63.90m



室伏 由香 52.76m



Backward View

— 円盤の軌跡  
— 重心の軌跡

図7 男女上位3名および畑山選手と室伏選手におけるスティックピクチャーおよび円盤と身体重心の軌跡

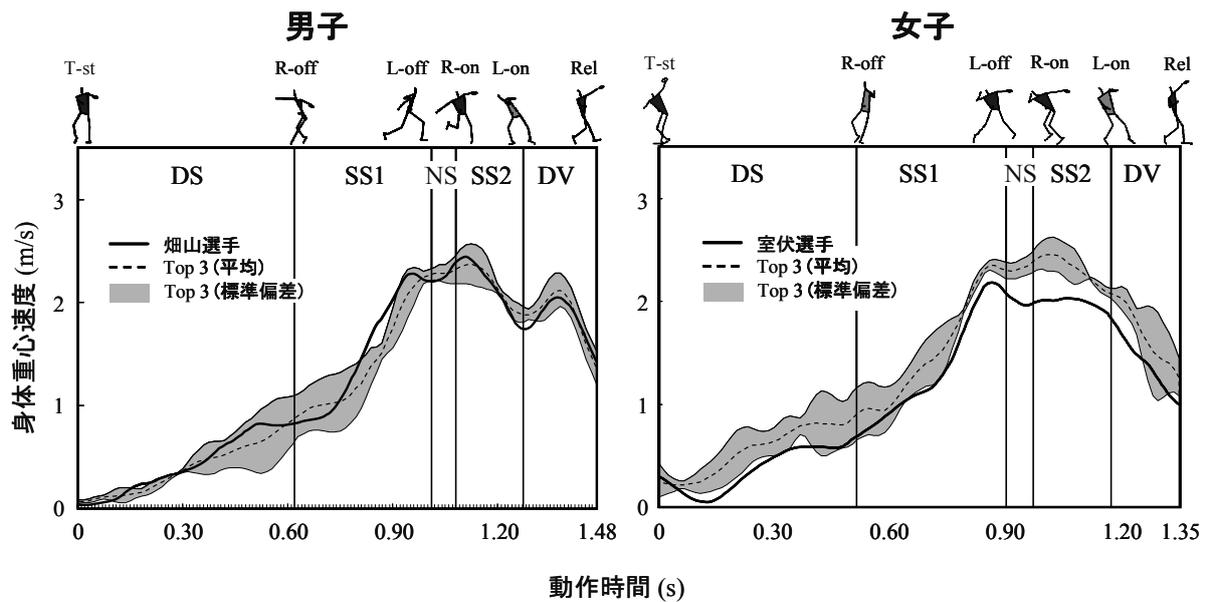


図8 男女上位3名および畑山選手と室伏選手の投てき動作中の身体重心速度変化

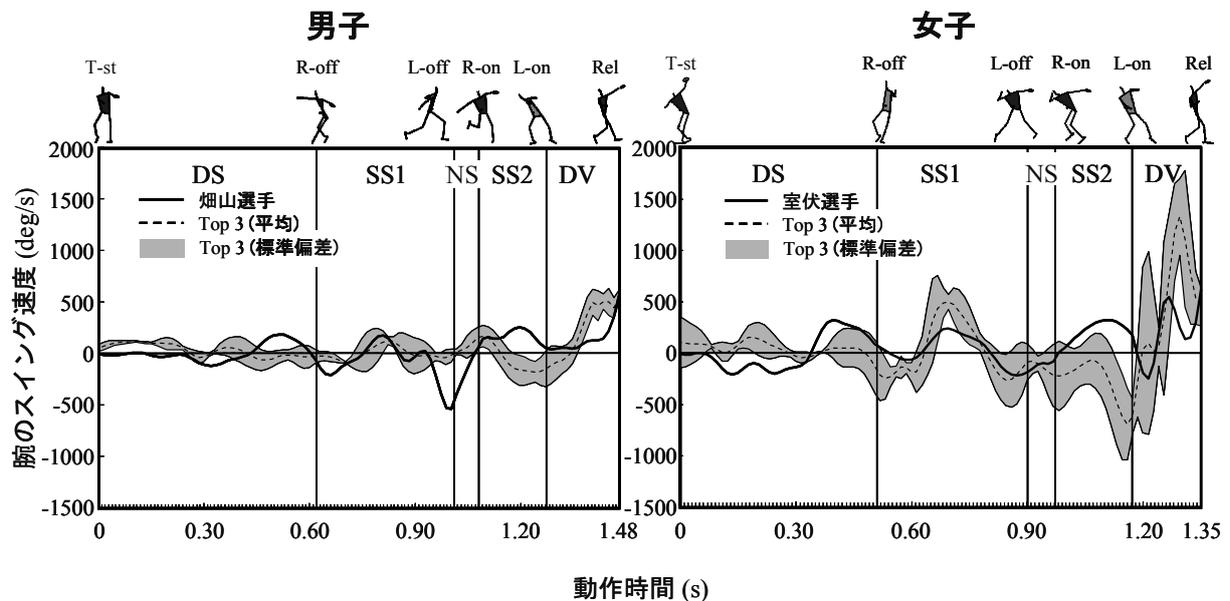


図9 男女上位3名および畑山選手と室伏選手の投てき動作中の腕のスイング速度変化

円盤の軌跡を、太い実線は身体重心の軌跡を示している。

男女上位3名において、身体重心の移動距離が最も長かった局面はSS1局面であり、続いてSS2局面が長く、主に片脚支持局面中に身体重心の移動が大きい傾向にあった(表3)。身体重心の軌跡をみると、ほとんどの選手が投てき方向に対して右(左脚方向)へ一旦移動した後にSS1局面中盤から左へやや戻りながら投てき方向へ移動していた。Totalの移動距離は男子が $1.82 \pm 0.15\text{m}$ 、女子が $1.84 \pm 0.04\text{m}$ で、畑山選手はほぼ同じ( $1.76\text{m}$ )であったが、室伏選手は $1.43\text{m}$ と著しく短かった。

図8に、男女上位3名及び畑山選手と室伏選手

における投てき動作中の身体重心の速度変化を示した。身体重心速度は男女ともに投てき開始のT-stからL-offまで一気に増加し、その後男子はL-onまで減少した後DV局面の中盤まで増加し、Relまで急激に減少した。女子はそれとは異なり常に減少する傾向を示した。松尾と湯浅(2005)は、身体重心速度の大部分はL-offまでに発生しており、L-onまでに投てき方向の身体重心速度を高めておくことが初速度を高める上で重要な要因の一つであると報告している。本研究のT-stからR-onまでの身体重心速度の増加は松尾と湯浅(2005)の報告と一致していた。また、男女上位3名のL-onでの身体重心速度は、それぞれ男子が $1.88 \pm 0.05\text{m/s}$ 、女子が $2.06 \pm 0.07\text{m/s}$ であった

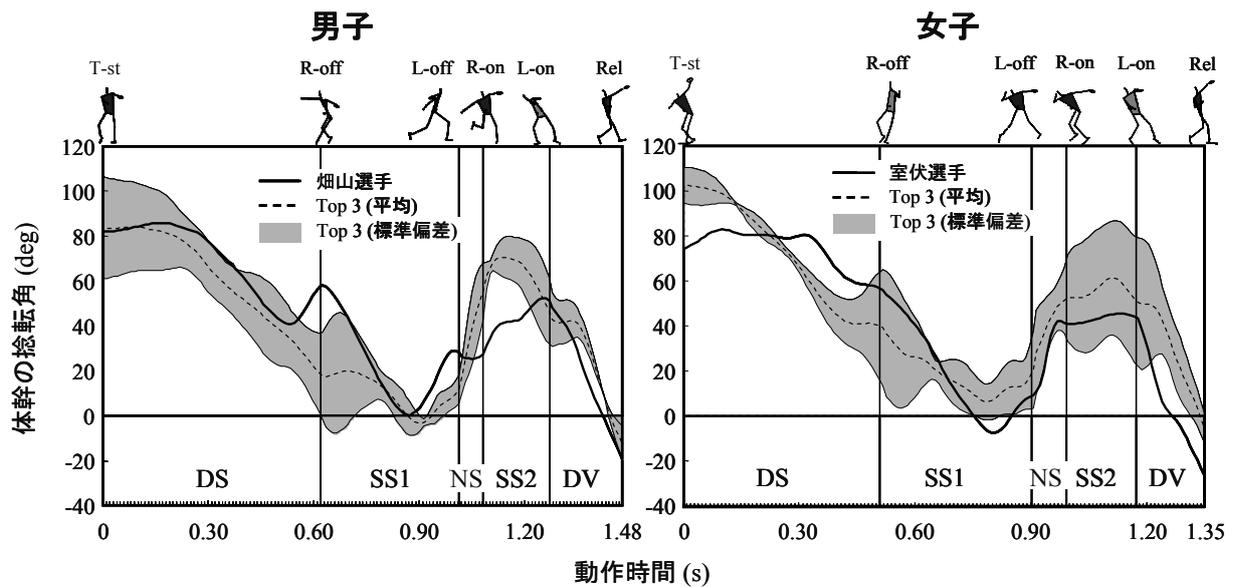


図 10 男女上位 3 名および畑山選手と室伏選手の投てき動作中の体幹の捻転角度変化

のに対し、畑山選手が 1.77m/s、室伏選手が 1.79m/s であり、ともに男女上位 3 名に比べてやや低い値であった。

### 3.5 腕のスイング速度

腕のスイング速度は、男女ともに L-on まで 0deg/s 付近で増減を繰り返しながら変動し、円盤速度が急激に増加する DV 局面では Rel 直前まで水平内転方向のスイング速度が増加する変化を示した (図 9)。

男子選手において、上位 3 名は L-on 付近で肩関節の水平外転角度が最大 (37.8°) となり、DV 局面で水平内転方向のスイング速度が増加し、Rel 直前で最大 (556.8m/s) となった。一方、畑山選手は上位 3 名より早い NS 局面中に肩関節の水平外転角度が最大 (47.8°) となり、その後水平内転方向のスイング速度を保ち Rel で最大 (574.5m/s) となった。つまり、肩関節の水平外転角度が最大となり、水平内転方向のスイング動作開始時点で明らかな違いが見られた。しかし、DV 局面中の腕のスイング速度の最大値に大きな違いは認められなかった。

女子選手において、上位 3 名は L-off 前から肩関節が徐々に水平外転し、L-on で肩関節の水平外転角度が最大 (90.6°) となり、その後水平内転方向のスイング速度が増加し、Rel 直前で最大 (1324.8deg/s) となった。一方、室伏選手は NS 局面で肩関節の水平外転角度が最大 (37.1°) となり、水平内転方向のスイング速度は Rel 時に最大 (615.8deg/s) となったが、その値は上位 3 名と比較すると著しく低い値であった。つまり、女子選手においても男子選手同様に、上位 3 名と日本選手とは肩関節の水平外転角度が最大となる時点が異なっていた。男女間で比較すると、女

子選手は男子選手に比べ DV 局面の開始時点である L-on で肩関節の水平外転角度が大きく、DV 局面中の水平内転方向のスイング速度が著しく高かった。男子選手と比較して体格の小さな女子選手は、L-on 付近で肩関節をより大きく水平外転させることによって DV 局面で腕のスイング速度を高め、男子選手同様の初速度を獲得していたことが示唆され、DV 局面中の円盤を加速させる動作に違いが見られた。しかし、女子選手におけるこれらの動作は、円盤質量が 1kg と男子選手に比べて軽いことなどによって可能になったものと考えられる。

### 3.6 体幹の捻転角

体幹はエネルギーの発生源やエネルギーバンクとしてだけでなく、エネルギーの通過点としての役割を持っている。多くの指導書や先行研究では、体幹の捻りとその捻り戻し動作の効果的な利用が投てきの基礎的要素であるとしている (小堀, 1986; 金子, 1988; 阿江, 1992; 安井, 1999; Leigh and Yu, 2007)。上位 3 名における体幹の捻転角は、男女ともに SS1 局面中盤まで減少した後 SS2 局面中盤まで増加し、最大捻転 (男子: 70.5°, 女子: 61.3°) に達した後、L-on 前から Rel に向かって減少する (捻り戻し動作) という類似した変化パターンを示した (図 10)。一方、畑山選手と室伏選手の変化パターンは、上位 3 名とは若干異なっていた。畑山選手は SS1 局面中盤から緩やかに増加して上位 3 名の選手より遅い時点の L-on 付近で最大捻転 (52.2°) となり、その後捻り戻し動作が開始されていた。室伏選手は SS1 局面中盤から R-on 付近まで急激に増加し、SS2 局面ではほぼ一定の捻転角を維持した後に L-on 付近で最大捻転 (49.9°) となり、その後捻

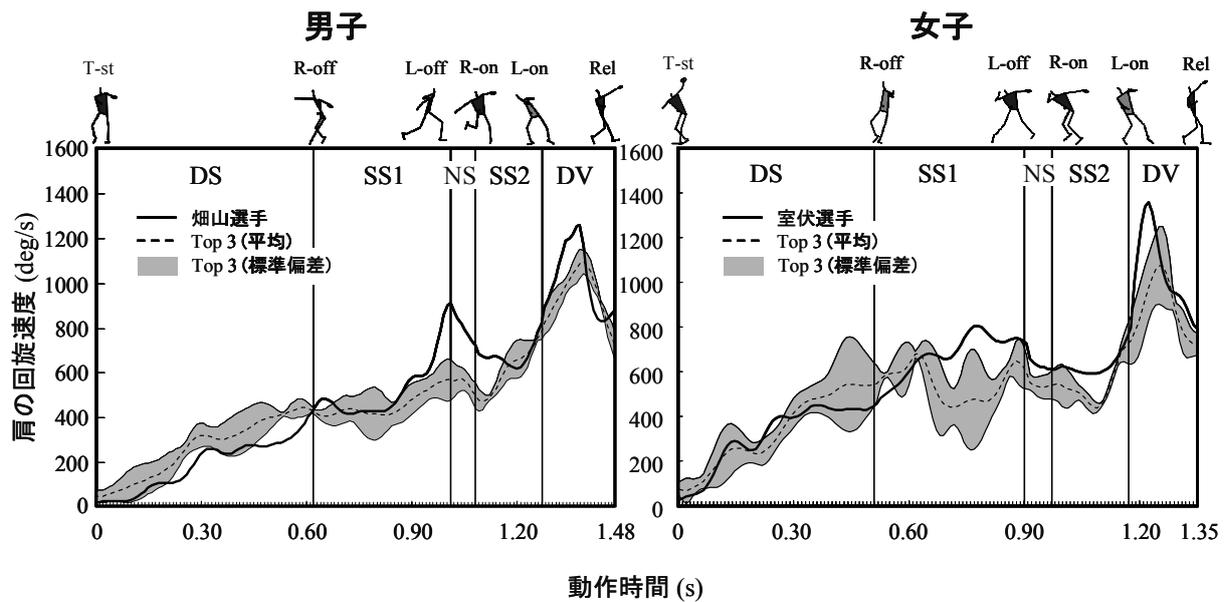


図 11 男女上位 3 名および畑山選手と室伏選手の投てき動作中の肩の回旋速度変化

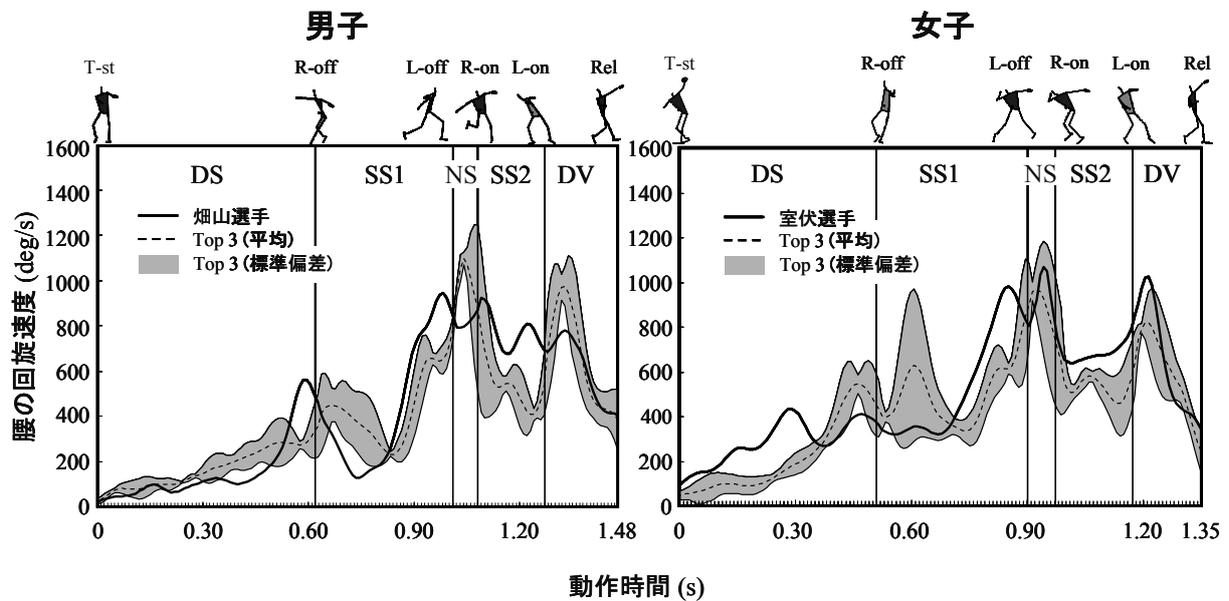


図 12 男女上位 3 名および畑山選手と室伏選手の投てき動作中の腰の回旋速度変化

り戻し動作が開始された。注目すべき点は、上位 3 名は L-on 以前 (SS2 局面中盤) から捻り戻し動作を開始しているのに対し、日本の両選手は L-on から捻り戻し動作を開始しているという点である。

多くの指導書では、SS2 局面で左腕や素早い左足の動作によって下半身を先行させて体幹の捻りを作り出し、L-on で円盤を出来るだけ後ろに残しておくことが重要であるとされている (小野, 1973; 金子, 1988; 尾懸, 1990; 佐々木ら, 1991; 安井, 1999)。畑山選手と室伏選手の最大捻転時のタイミングなどを見ると、おおむね指導書の内容に沿った動作であった。しかし、男女上位 3 名における捻転角の増加は主に NS 局面であり、

男子は SS2 局面前半、女子は SS2 局面中盤に最大に捻転され、その時点から直ちに Rel に向けて捻り戻し動作が開始されていた。この上位選手たちの捻転動作をもとにすると、上位選手たちが上述の指導書にあるような L-on で意識的に円盤を出来るだけ後ろに残そうとしていたとは考えにくく、しかも捻転角急激に増加する局面と捻り戻し動作開始の時点は、従来の指導書の内容より明らかに早い時点であるといえる。

このような上位選手たちの動作は、L-on 前から Rel に向かって円盤速度を増加させ、結果としてパフォーマンスを高める要因の一つであると考えられる。

### 3.7 肩と腰の回旋速度

男女上位3名の平均の肩の回旋速度は、NS局面からSS2局面前半まででやや停滞するものの投てき動作全体的にRel直前まで増加し続ける傾向が見られた(図11)。一方、腰の回旋速度はNS局面付近で急激に増加し最大となった後に減少し、再度L-on直前から急激に増加した(図12)。これらの結果は、男女上位3名の体幹の捻転角の増加が、肩の回旋速度をほぼ維持しながら腰の回旋速度を急激に高めることによって作り出されていたことを示している。一方、畑山選手は捻転角が増加した時点で肩の速度が減少し、腰の速度は増減を繰り返しながらほぼ一定の値を保っていた。つまり、畑山選手と上位選手とは体幹の捻転方法に明らかに違いが見られた。この点に関して、室伏選手は女子の上位選手と大きな違いは見られなかった。また、捻り戻し動作中のDV局面において肩と腰の回旋速度、および腕のスイング速度の時系列変化を比較したところ、L-onでは肩と腰の回旋速度が同調して増加し、腰の回旋速度がL-on直後に極大値に達し、低下し始めると続いて肩の回旋速度が高まり、その極大値が低下し始めると水平内転方向の腕のスイング速度が極大値を迎える変化を示した。円盤投げ動作における肩と腰の回旋動作および腕のスイング動作に運動エネルギーの転移が見られた。

### 4. まとめ

第11回世界陸上競技選手権大会の男女円盤投げ種目における上位8名と日本の畑山茂雄選手と室伏由香選手を対象に、世界トップレベルの選手における投てき動作を三次元動作解析した。

その結果、男子は初速度において投てき記録との間に、女子では初速度と投射高において投てき記録との間に有意な正の相関関係が認められ、これらの初期条件はトップレベルの選手を対象とした先行研究と類似した値を示した。

動作局面別やTotalの円盤および身体重心の移動距離は、男女間で大きな違いは認められなかった。

男子選手と女子選手では、DV局面における円盤加速動作に違いが見られ、女子選手は男子選手に比べてL-on付近で肩関節を大きく水平外転させ、腕のスイング速度をより高めていた。

体幹の捻転角は、男女ともにNS局面で肩の回旋速度をほぼ維持しながら腰の回旋速度を急激に高めることで増加させ、SS2局面中盤までに捻転角が最大に達し、直ちに捻り戻し動作が開始された。これと異なり、日本の両選手はL-onから捻り戻し動作を開始していた。男女上位3名の結果は、従来の指導書の内容とは異なる動作である思われた。

### 5. おわりに

本研究では、主にキネマティクスの観点から世界トップレベルの円盤投げ選手のパフォーマンスの特徴についてまとめた。世界一流選手の円盤投げ動作には、これまでの指導書の内容とは異なる結果も得られた。本研究の結果が、現場での指導や選手の体力・技術トレーニングの材料となれば幸いである。

### 文献

- 阿江通良(1992)陸上競技のバイオメカニクス。陸上競技指導教本—基礎理論編—。日本陸上連盟編、大修館書店、33-53。
- Dapena, J. (1993) New insights on discus throwing. *Track Technique* 125: 3977-3983.
- Gregor, R. J., Whiting, W. C., and McCoy, R. W. (1985) Kinematic Analysis of Olympic Discus Throwers. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1:131-138.
- 金子今朝秋(1988)投てき競技総論、円盤投げ。陸上競技指導教本。日本陸上競技連盟編、大修館書店、187-234。
- 小堀孝倫(1986)円盤投げの「振り」運動。日本大学芸術学部紀要、16:96-100。
- Leigh, S., and Yu, B. (2007) The associations of selected technical parameters with discus throwing performance: A cross-sectional study. *Sports Biomechanics*, 6(3): 269-284.
- 松尾宣隆、湯浅景元(2005)円盤投げ動作における身体重心速度が円盤速度と円盤+投擲者角運動量に及ぼす効果。中京大学体育学論叢、46(2):33-43。
- McCoy, R. W., Whiting, M. W. C., Rich, R. G., and Gregor, R. J. (1985) Kinematic analysis of discus thrower. *Track and Field*, 91: 2902-2905.
- 宮西智久、富樫時子、川村卓、桜井伸二、若山章信、岡本敦、只左一也(1997)アジア大会における円盤投げのバイオメカニクスの分析。アジア一流陸上競技者の技術—第12回広島アジア大会陸上競技バイオメカニクス研究班報告—。日本陸上競技連盟科学委員会バイオメカニクス研究班編、佐々木秀幸、小林寛道、阿江通良(監修)、創文企画、169-181。
- 宮西智久、桜井伸二、若山章信、富樫時子、川村卓(1998)アジア一流選手における円盤投げの角運動量の3次元解析。バイオメカニクス研究2(1):10-18。
- 尾懸貢(1990)円盤投げ。Q&Aシリーズ 実践陸上競技—フィールド編—。日本陸上競技連盟編、大修館書店、173-183。
- 小野勝次(1973)円盤投げ。陸上競技の技術。講談社、189-199。
- 佐々木秀幸、岡野進、恩田実(1991)円盤投げ。シリーズ絵で見るスポーツ⑰陸上競技。ベース

- ボール・マガジン社, 141-154.
- 田内健二 (2007) 円盤投げにおける動作時間と投てき記録との関係. 陸上競技のサイエンス. 月刊陸上競技マガジン, 41 (10) : 228-231.
- 田内健二, 磯繁雄, 持田尚, 杉田正明, 阿江通良 (2007) 円盤投げの動作時間と投てき記録との関係. 陸上競技研究紀要, 3 : 25-31.
- 植屋清見, 池上康男, 中村和彦, 桜井伸二, 岡本敦, 池川哲史 (1994) 円盤投げのバイオメカニクスの分析. 世界一流競技者の技術-第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス研究班報告書-. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス研究班編, 佐々木秀幸, 小林寛, 阿江通良 (監修), ベースボール・マガジン社, 257-271.
- 山本大輔, 伊藤章, 田内健二, 村上雅俊, 淵本隆文, 田邊智 (2008) 世界1位と日本1位の男子円盤投げ選手の円盤加速動作の比較. 陸上競技研究紀要, 4 : 124-127.
- 安井年文 (1999) 円盤投げにおける有効なターン動作とは?. 陸上競技を科学する. 関岡康雄編著, 筑波大学陸上競技指導者研究会編, 道和書院, 122-125.
- Yu, B., Broker, J., and Silvester, L. J. (2002) A Kinematic Analysis of Discus-Throwing Techniques. Sport Biomechanics, Vol.1(1): 25-46.

# 第 11 回世界陸上大阪大会の男・女ハンマー投 上位入賞者のバイオメカニクス的特徴

## Biomechanical characteristics of each top eight athletes in men and women hammer throw at the 11<sup>th</sup> World Championships in Athletics OSAKA 2007.

梅垣浩二<sup>1)</sup> 室伏広治<sup>2)</sup> 藤井宏明<sup>3)</sup> 桜井伸二<sup>2)</sup> 田内健二<sup>4)</sup>

1) 舞鶴工業高等専門学校 2) 中京大学 3) 筑波大学 4) 早稲田大学

Koji Umegaki<sup>1)</sup>, Koji Murofushi<sup>2)</sup>, Hiroaki Fujii<sup>3)</sup>, Shinji Sakurai<sup>2)</sup> and Kenji Tauchi<sup>4)</sup>

1) Maizuru National Collage of Technology, 2) Chukyo University,  
3) University of Tsukuba, 4) Waseda University

### 1. はじめに

男子ハンマー投は、8月25日に29名の選手により予選が行われ、77m00以上の予選通過標準記録をクリアした8名と、その他に記録順で12着までに入った4名が、決勝に進出した。8月27日の決勝では、予選で標準記録をクリアした選手が3投後の上位8名にほぼ残り、さらに3投が行われた。3投後の時点で、82m12を投げたコズムスをトップとして、80mを超える投てきをした選

手がさらに4名いた。最終的には、6投目でチホンが83m63を投げてトップに立ち、優勝した。表1(a)に男子上位8名の本大会の記録等を示す。

女子ハンマー投は、8月28日に40名の選手により予選が行われ、71m00以上の予選通過標準記録をクリアした5名と、その他に記録順で12着までに入った7名が、決勝に進出した。8月30日の決勝では、2投目に74m76を投げたハイド

表1 男女上位8選手の成績 (a: 男子 b: 女子)

#### (a) 男子

順位	名前	国籍	年齢	記録	1投目	2投目	3投目	4投目	5投目	6投目	自己最高	2007年 自己ベスト	2007年 世界10傑
1	イワン・チホン	ベラルーシ	31	83m63	x	x	79m35	x	80m77	83m63	86m73	82m58	2
2	ブリモジュ・コズムス	スロベニア	28	82m29	80m68	79m62	82m12	x	x	82m29	82m30	82m30	3
3	リボル・ハルフレイタグ	スロバキア	30	81m60	x	80m93	79m10	76m88	81m60	80m48	81m81	80m87	5
4	ワジム・デビヤトフスキー	ベラルーシ	30	81m57	76m28	80m95	x	81m22	81m57	81m20	84m90	82m94	1
5	クリスチャー・バルシュ	ハンガリー	25	80m93	78m29	79m49	79m55	79m63	77m29	80m93	82m45	81m40	4
6	室伏広治	日本	33	80m46	76m94	79m46	80m38	79m56	80m13	80m46	84m86	79m24	
7	シモン・ジョルコフスキ	ポーランド	31	80m09	79m81	80m09	78m58	79m87	x	77m53	83m38	80m70	6
8	マルクス・エッサー	ドイツ	27	79m66	78m67	79m66	78m37	x	79m19	79m46	81m10	80m68	7

#### (b) 女子

順位	名前	国籍	年齢	記録	1投目	2投目	3投目	4投目	5投目	6投目	自己最高	2007年 自己ベスト	2007年 世界10傑
1	ベティー・ハイドラー	ドイツ	24	74m76	x	74m76	x	73m73	71m31	73m10	76m55	75m77	6
2	イブシ・モレノ	キューバ	27	74m74	72m84	x	x	74m33	70m87	74m74	76m36	76m36	4
3	張文秀	中国	21	74m39	x	73m11	x	74m21	74m39	x	74m86	74m86	9
4	カミラ・スコリモフスカ	ポーランド	25	73m75	73m75	70m54	65m69	70m78	70m06	70m77	76m83	76m83	3
5	エレナ・コネフツェワ	ロシア	26	72m45	72m45	70m11	x	x	70m35	68m90	76m21	76m21	5
6	アイリーン・オキープ	アイルランド	26	70m93	70m93	64m27	69m06	66m90	69m21	69m38	73m21	73m21	
7	クラリッサ・クラレッチェイ	イタリア	27	70m74	x	70m25	70m73	67m56	70m74	x	71m98	71m27	
8	マニエラ・モントブラン	フランス	28	70m36	69m77	70m36	67m42	69m16	66m41	69m92	74m66	73m71	

2007年自己ベストや世界10傑は、本大会までの記録によるものである。

年齢は、生年月日による満年齢ではなく、生年による2007年の満年齢である。

ラーが優勝したが、上位 8 名による 4-6 投目でモレノや張が 74m 台の投てきを行い、トップの記録に迫る勢いであった。表 1 (b) に女子上位 8 名の本大会の記録等を示す。

## 2. 方法

撮影は観客席最上段に設置した 2 台のデジタルビデオカメラ (60 コマ/秒) により行われ、ハンマー囲いの後方および側方からの映像が記録された。分析は、男女上位 8 名のそれぞれの選手が本大会における記録を出した試技について行った。DLT 法により、ハンマーヘッドや身体各点の 3 次元座標が求められた。身体重心は、阿江ら (1996) の身体部分の質量比と質量中心比を用いて求められた。

3 次元データは、サークルの中心を原点として、鉛直上向きを Z 軸、投てき範囲を示す扇型の中央線の向きを Y 軸、Y 軸方向を見て右向きを X 軸とする固定座標系から見た運動として記述された。設定した座標系については、図 1 に示す。

ハンマーヘッドの速度などの結果の表示に関しては、時間に対して行うよりも、水平面内でのワイヤの方位角に対して行う方が、選手やコーチも感覚的に理解し易く、選手間の対比もし易いと思われる。ワイヤの方位角については、図 2 に示す。

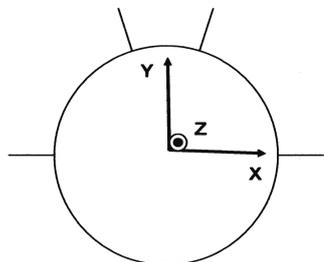
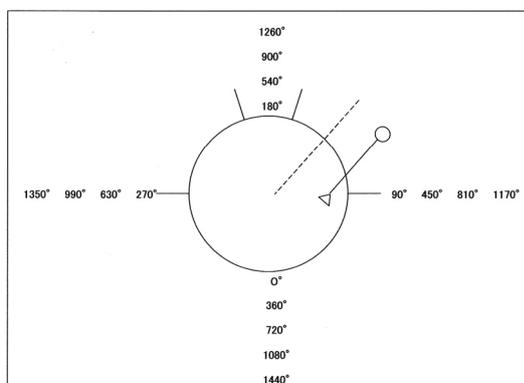


図 1 固定座標系 XYZ



ワイヤの向きを水平面に投影した線分を固定座標系の原点に移動させ、その回転角を方位角とした。  
スイングからターンに入り、ワイヤの向きを投影した線分が、一ッ方向を示したときを 0° とした。

図 2 ハンマーの方位角の定義

## 3. 結果と考察

### 3.1 ハンマーヘッド速度の大きさ

図 3 のように、ターン毎にハンマーヘッド速度の大きさは増減するとともに、ターンを繰り返すにつれてその大きさは漸増する。しかしその様相は、スイングからターンへの入りの速度の大きさや、ターン毎の速度の増減の大きさなど、各選手により特徴が見られた。たとえば、コズムスはターンの入りからヘッド速度が大きくターン毎の増減は小さいが、チホンやハルフレイタグはコズムスよりもターンの入りのヘッド速度が小さくターン毎の増減が大きい。またチホンは、リリース前の振り切りにおける加速が大きい傾向が認められた。この様に加速の様相にはそれぞれの選手によって特徴があり、記録の結果からこのレベルの選手の技術の優劣を判断することはできないと考えられる。

### 3.2 両足支持期と片足支持期

図 4 は支持期と時間、支持期と方位角の関係を示している。ハンマーヘッドの加速がほぼ両足支持期に行われていることは、よく知られた事実である。各ターンにおいて、片足支持期よりも両足支持期の時間を長くすること、あるいはハンマーヘッドの移動距離を長くすることが、ハンマーの加速に有利であるとも言われてきた。しかし、単に (右投げ選手の場合) 右足を早く着くだけではなく、右足着地と連動したハンマーを加速するための動作や力の発揮も伴わなければならないだろう。

投射期 (最後の両足支持期) において、男子ではチホンやデビャトフスキーが、女子ではモレノが、他の選手に比べて時間的にも空間的にも早い段階で右足を着いていた。特にチホンは、図 3 に見られるように投射期における顕著なハンマーヘッドの加速が特徴であった。

図 5 は支持期と方位角の関係を Gutierrez et al. (2002) の表示方法を参考に、1 ターン目を最も内側に、また最終ターンを最も外側になる円グラフで示している。右足を着いた時点の方位角は、男女共どの選手もターンを重ねるにつれて、回転の進む方向に増加していった。また、ハンマーヘッドのローポイント時点の方位角も、ターンを重ねるにつれて回転の方向に進んでいった。男子では、方位角で最も早く投射期に入るデビャトフスキーと最も遅く入るハルフレイタグや室伏の角度差は、64°であった。また女子では、最も早く投射期に入るモレノと最も遅く入る張の角度差は、59°であった。しかしその様相も、各選手の特徴や、その試技でターンを繰り返す中でのバランスを保つ影響などによると考えられる。

### 3.3 身体重心の軌跡

図 6 は上方および側方から見た身体重心の軌

跡を示している。上方から見た身体重心の軌跡は、半円を並べたような形状、あるいはサイクロイド曲線状を描くと言われている（池上ら，1994；Dapena, 1984）。軌跡の長さは男子選手に比べて女子選手の方が短く、軌跡の形状は女子選手の方が直線に近いということが一目でわかる。これは、形態の差によるものもあるが、男女のハンマーの質量の違いによる遠心力の差なども関与しているのかもしれない。

### 3.4 ハンマーヘッドと身体重心の鉛直変位

図7はハンマーヘッドと身体重心の鉛直変位を示している。ハンマーヘッドと身体重心の鉛直変位は、ターン毎のそれぞれの最下点時と最上点時の方位角がずれており、ハンマーヘッドがハイポイントを迎えた後に身体重心が最も低くなり、ハンマーヘッドがローポイントを迎えた後に身体重心が最も高くなっていった。ハンマーヘッドと腰の鉛直変位が逆位相となることが、世界記録投てき時のセディフの動作で見られたという報告がある（Otto, 1992）。またDapena (1986)は、ハンマーヘッドと身体重心の鉛直変位に平均（セディフやリトビノフを含む8名の選手）約120°の位相差が見られたと報告している。今回は男女とも身体重心についてほぼ逆位相であるという選手は見られず、それぞれの選手の特徴が見受けられた。たとえば3-4ターン目において、室伏やハルフレイタグはハンマーヘッドのハイポイント時と身体重心のローポイント時がほぼ同期しているが、ジョルコフスキはハンマーヘッドのハイポイント時と身体重心のローポイント時の方位角の差が大きかった。

### 3.5 投射期とその前2ターンのハンマーと投てき者の動作のタイミング

図8は、Murofushi et al. (2007)の表示方法と同様にハンマーの回転に伴う動作の成り行きを、3ターン目・4ターン目・投射期について示している。サークル内の曲線矢印がハンマーや投てき者の運動の順序を示しており、サークル外の直線により実際の投てき者とハンマーの運動をイメージしやすいと考えられる。サークル外の直線はハンマーの回転によるワイヤの方向を示しており、直線先端マークの黒丸はハンマーのロー・ハイポイントの時点を示し、直線先端マークの矢印は身体重心のロー・ハイポイントの時点を示している。モンブランの身体重心鉛直変位は、図7のようにロー・ハイポイントの方位角が明確でないため、図8にはその時点の直線を示していない。

3ターン目と4ターン目のハンマーヘッドのハイポイント・身体重心のローポイント・両足支持期の開始の関係について見ると、室伏とハルフレイタグはハンマーヘッドのハイポイントの直後

に身体重心がローポイントを迎えていた。他の選手は両足支持期の開始の直前または直後に身体重心がローポイントを迎えていた。また、室伏の他にも男子の上位4選手やハイドラーは、身体重心がローポイントを迎える時点が方位角の早い段階であった。Murofushi et al. (2007)は、ハンマーの動きに対して身体の動きが同調しないように、投てき者の周期的な動きのタイミングをコントロールすることがハンマーヘッドの効果的な加速につながると考えている。

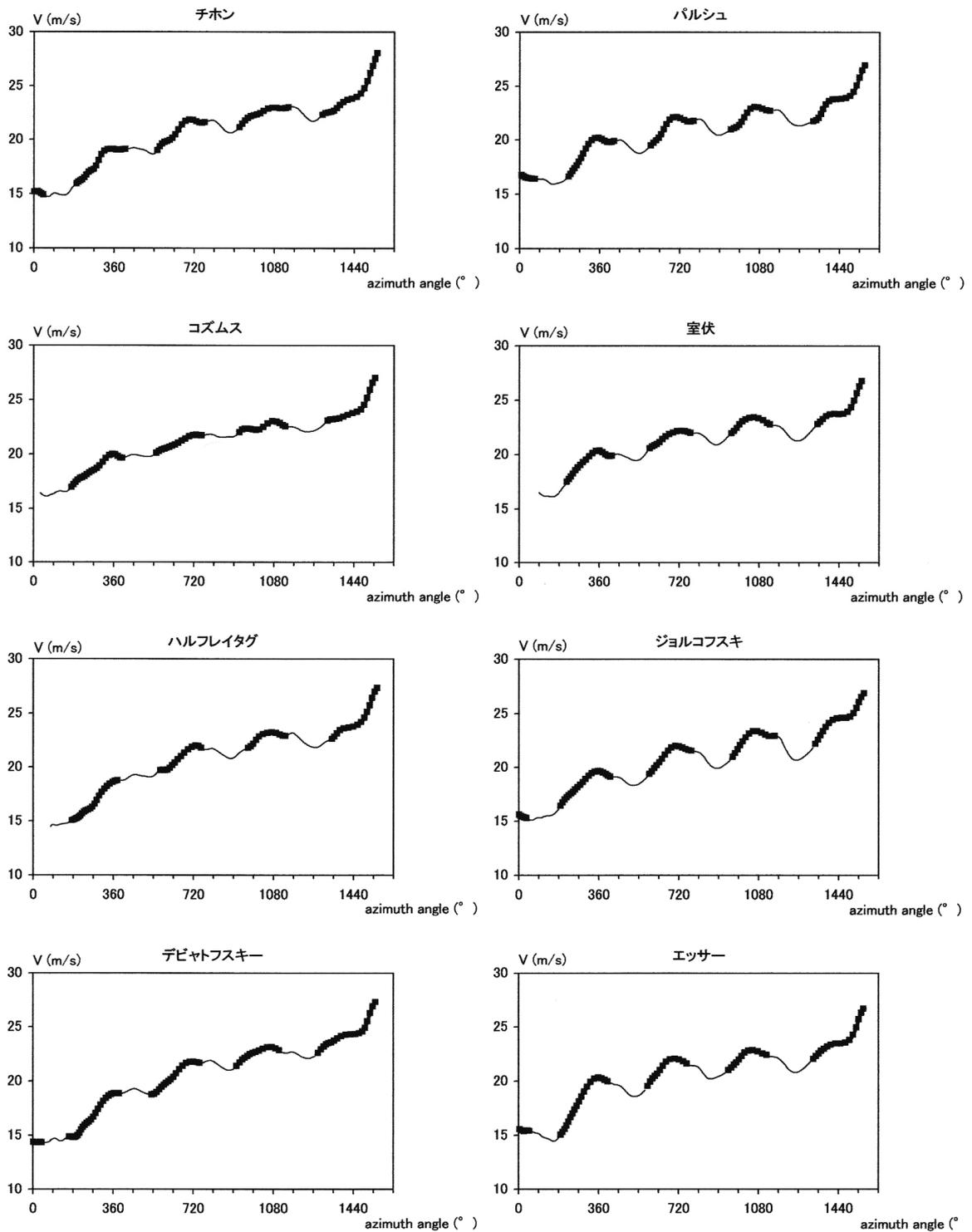
### 3.5 投てき者の動きの観点とハンマーヘッドの加速

リリース時のハンマーヘッド速度の大きさがほぼ記録を決定するが、リリースに至るまでのハンマーヘッドの加速の過程は、各選手の特徴が見られた。ハンマーヘッドの加速はほぼ両脚支持期に見られるが、両脚支持と方位角の関係は、ターン全体の流れの中でのバランスの保持や各ターンでの加速の程度など、各選手の特徴によると考えられる。単に両足支持期を長くすることが必ずしもハンマーの加速を促すわけではない。

ハンマーの加速を考えると、ワイヤや取っ手の力のみ注目するのではなく、ハンマーと身体の相対運動のタイミングにも注目すべきだろう。ハンマーの動きに同調しないような身体の動き、たとえば片足支持期での同調しない動きが、次の両足支持期での効果的なハンマーの加速を可能にすると考えられる。体格や体力の差を技術でカバーするヒントが、そこにあるのかもしれない。

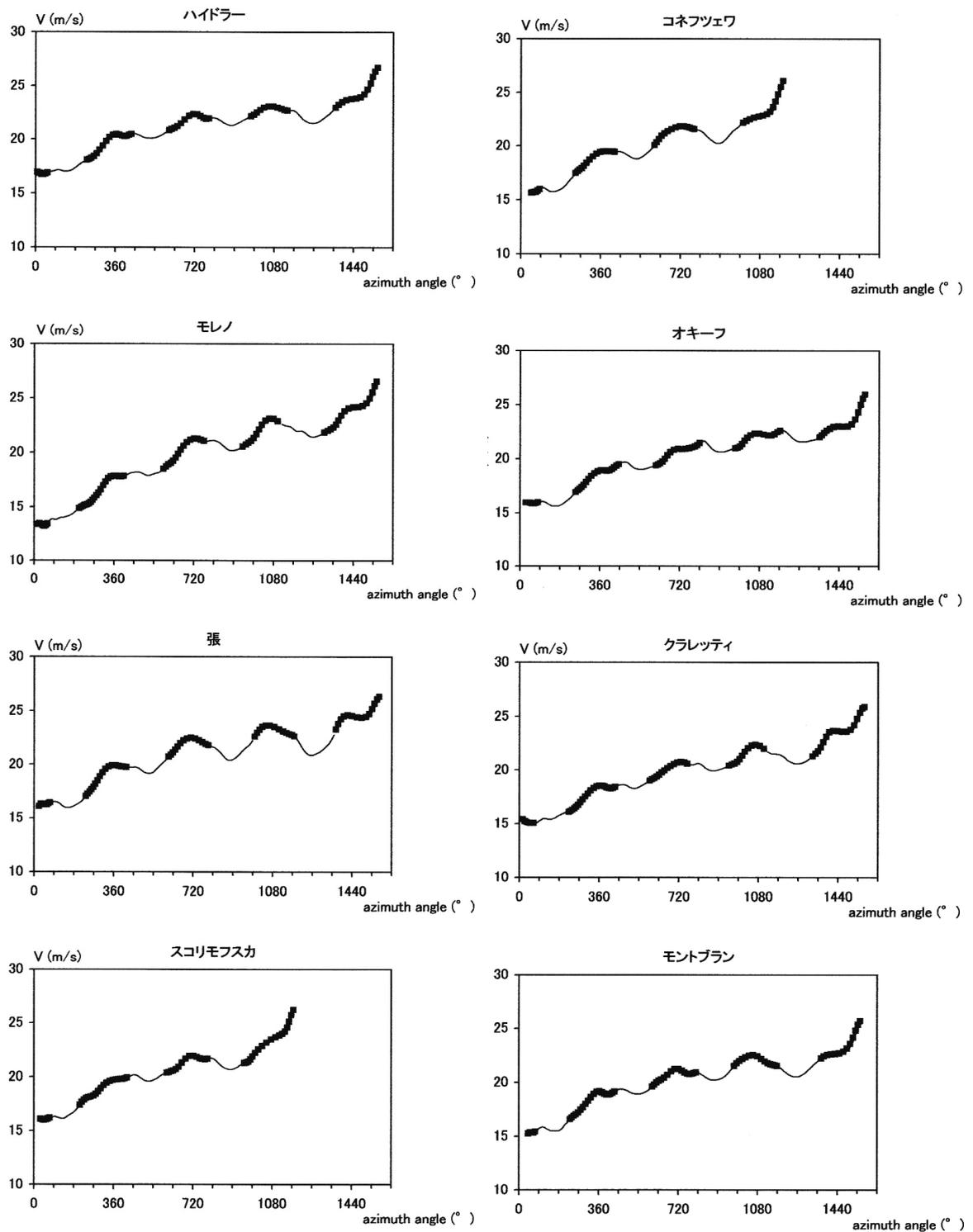
## 文献

- 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数, *Japanese Journal of Sports Sciences*, 15(3): 155-162.
- Dapena, J. (1986) A kinematic study of center of mass motions in the hammer throw. *Journal of Biomechanics*, 19: 147-158.
- Gutierrez, M., Soto, V.M., Rojas, F.J. (2002) A biomechanical analysis of the individual techniques of the hammer throw finalists in the Seville Athletics World Championship 1999. *New Studies in Athletics*, 17(2): 15-26.
- 池上康男, 桜井伸二, 岡本敦, 植屋清見, 中村和彦 (1994) ハンマー投のバイオメカニクス的分析, 世界一流陸上競技者の技術, ベースボールマガジン社: 東京, 240-256.
- Murofushi, K., Sakurai, S., Umegaki, K. and Takamatsu, J. (2007) Hammer acceleration due to thrower and hammer movement patterns. *Sports Biomechanics*, 6(3): 301-314.
- Otto, R. (1992) Sedykh photo sequence. *New Studies in Athletics*, 7(3): 51-65.



細線は片足支持期の速度の大きさを、太線は両足支持期の速度の大きさを示している。

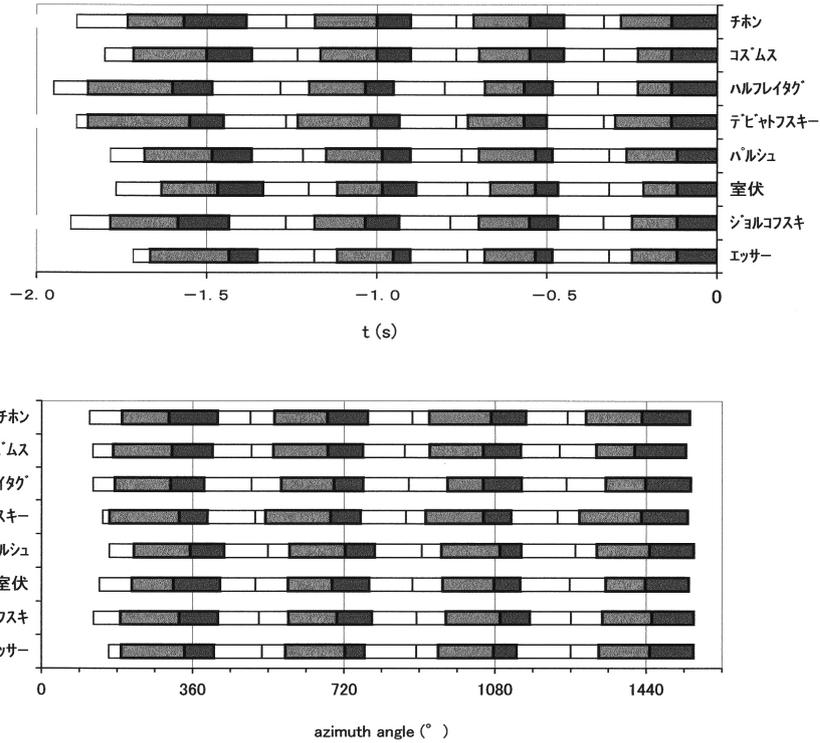
図3 男子上位8選手のハンマーヘッド速度の大きさ



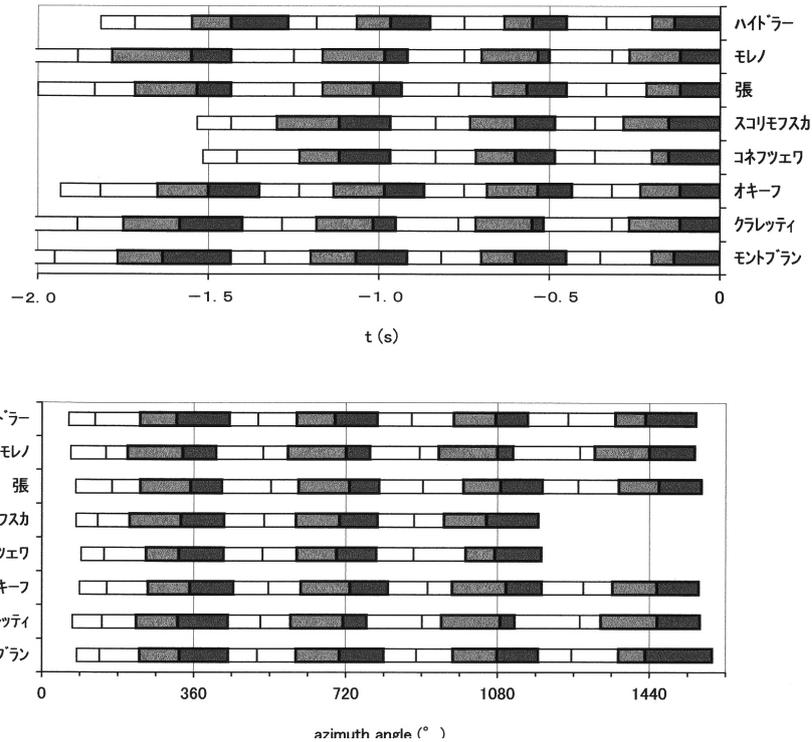
スコリモフスカとコネツエワは、3回転投げである。

図3 (続き) 女子上位8選手のハンマーヘッド速度の大きさ

(a) 男子



(b) 女子



スコリモフスカとコネツヅエリは、3回転投げである。

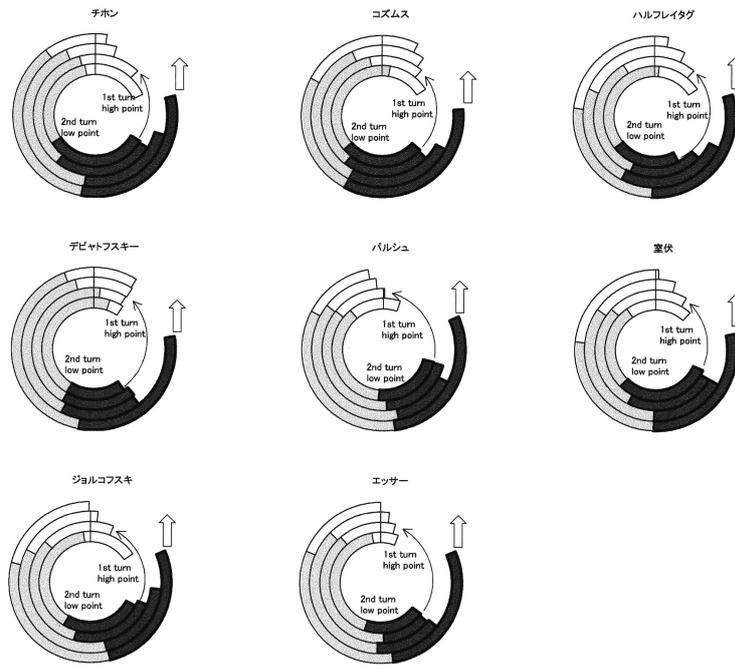
上段グラフについては、ハンマーがリリースされた直後のフレームを0秒として、フレーム数で時間の経過を逆に数えた。

色抜きのバーが両足支持期、白抜きが片足支持期である。

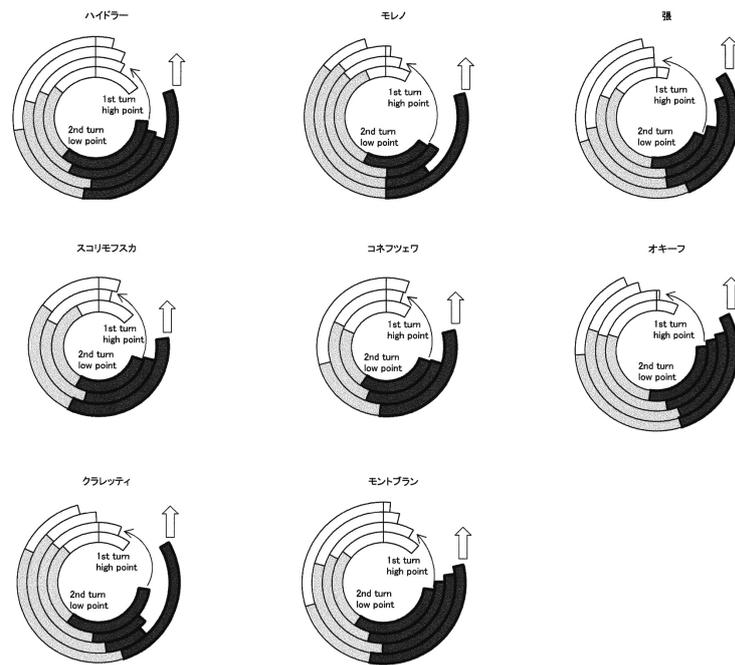
また両支持期における縦線は、ハンマーヘッドのローポイントやハイポイントの時点を示している。

図4 男女上位8選手の支持期と時間の関係(上段グラフ)および支持期と方位角の関係(下段グラフ)  
(a: 男子 b: 女子)

(a) 男子



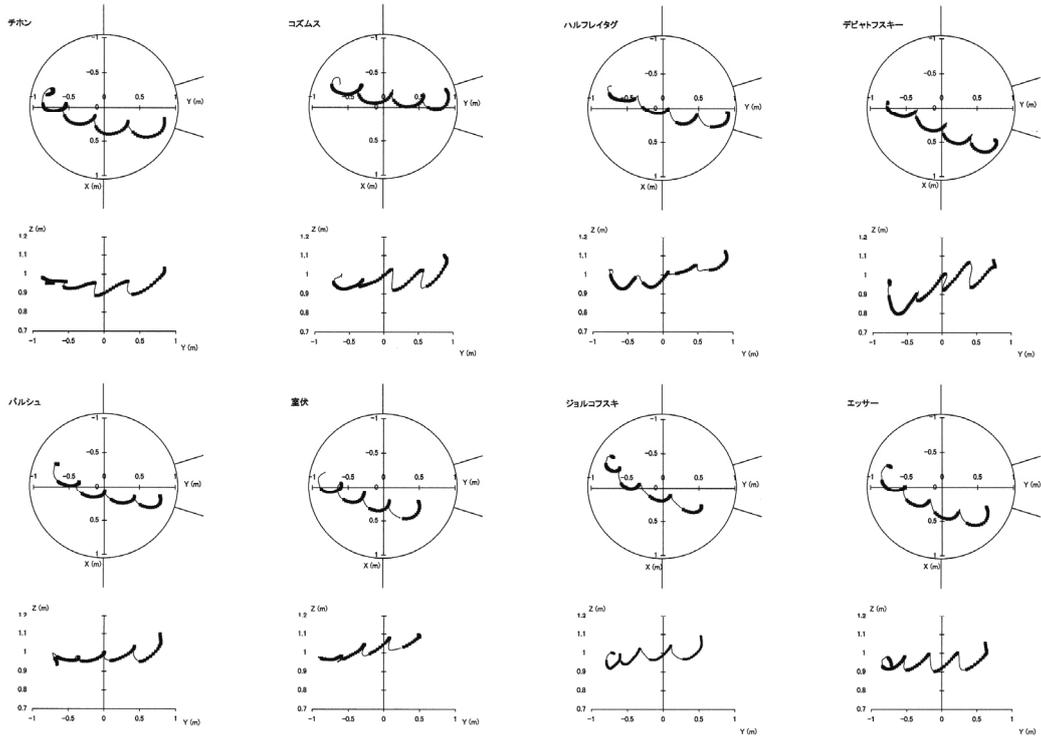
(b) 女子



一番内側の1ターン目ハイポイントから反時計回りに円グラフの白抜き部分をたどり、色抜き部分が両足支持期を示している。色抜き部分の太線囲みは、ローポイント以降を示している。曲線矢印に沿って、ひとつ外側の円グラフの白い部分に続く。2ターン目のハイポイントの時点である。片足支持期については、ハイポイント以降のみを円グラフで示している。ターンを重ねるごとに順次外側の円グラフにつながる。大きな矢印でハンマーのリリースとなり、円グラフは終わる。

図5 男女上位8選手の各ターンにおける支持期と方位角の関係  
(a: 男子 b: 女子)

(a) 男子



太線の軌跡は両足支持期を、細線の軌跡は片足支持期を示している。

(b) 女子

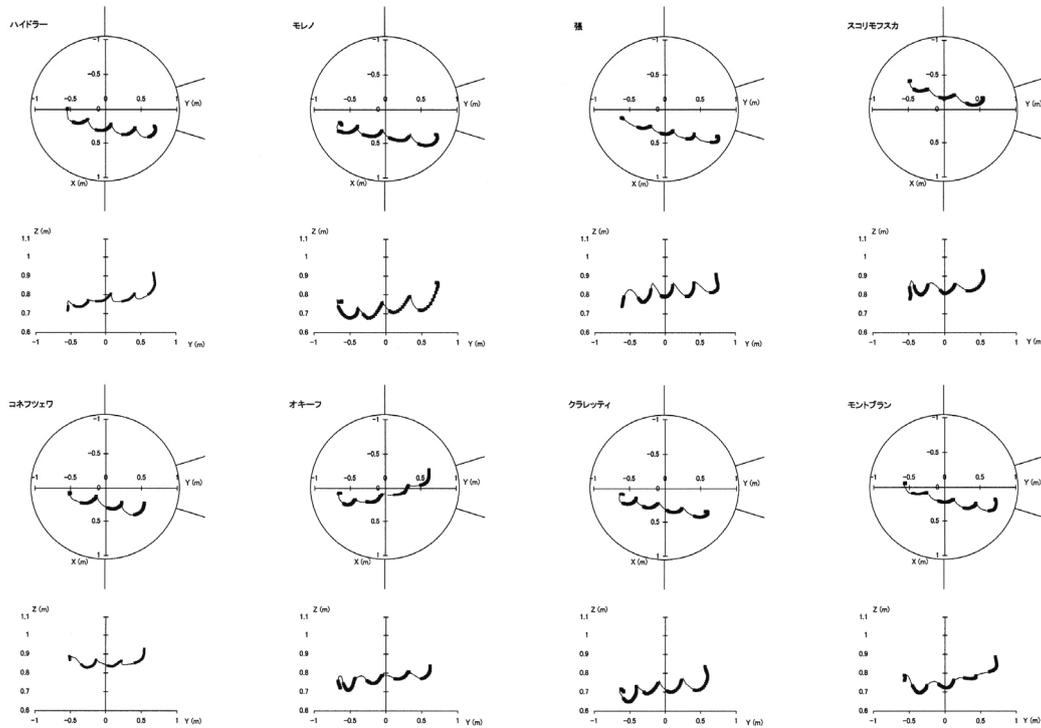
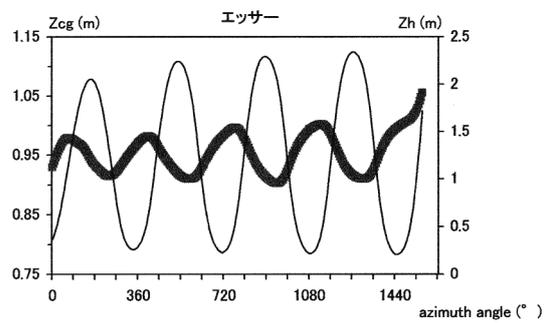
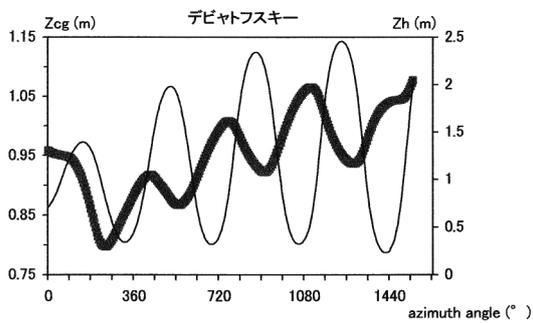
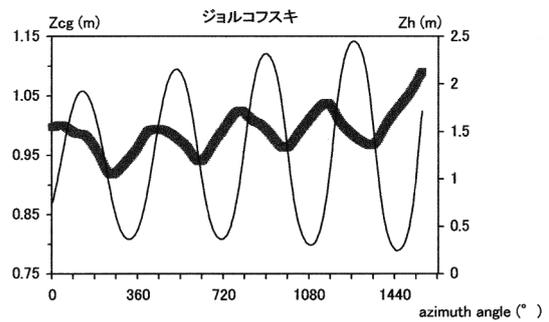
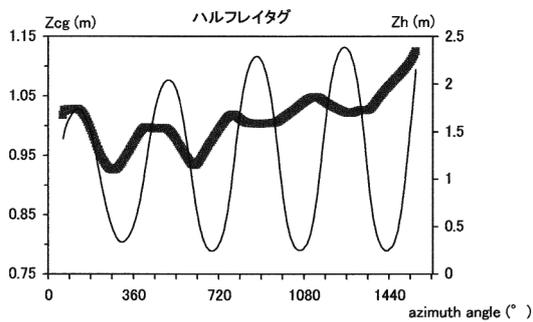
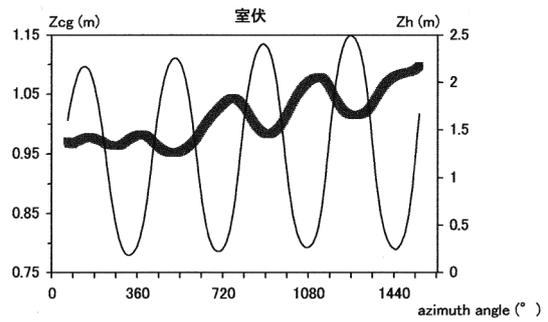
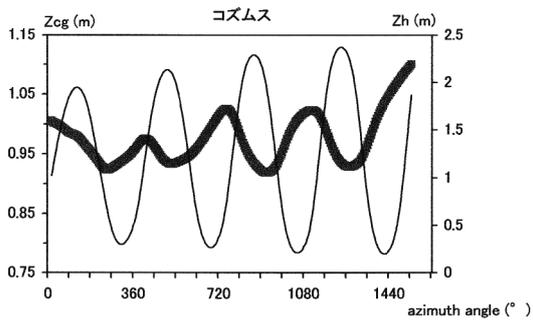
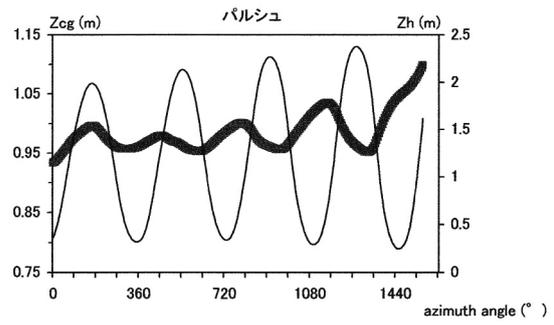
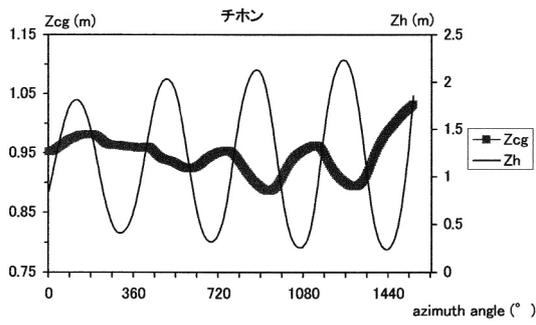
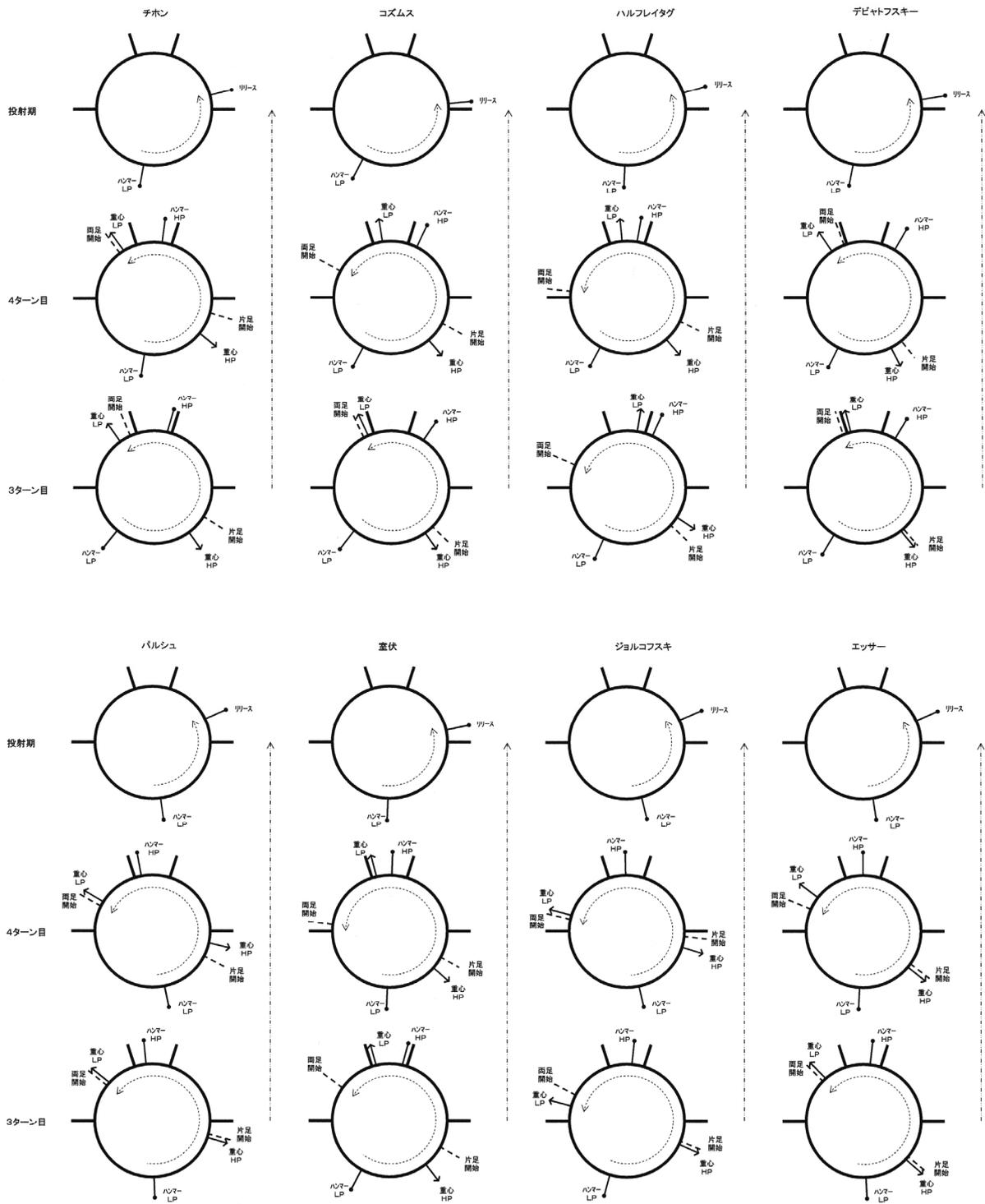


図 6 男女上位 8 選手の上方および側方から見た身体重心の軌跡  
(a: 男子 b: 女子)



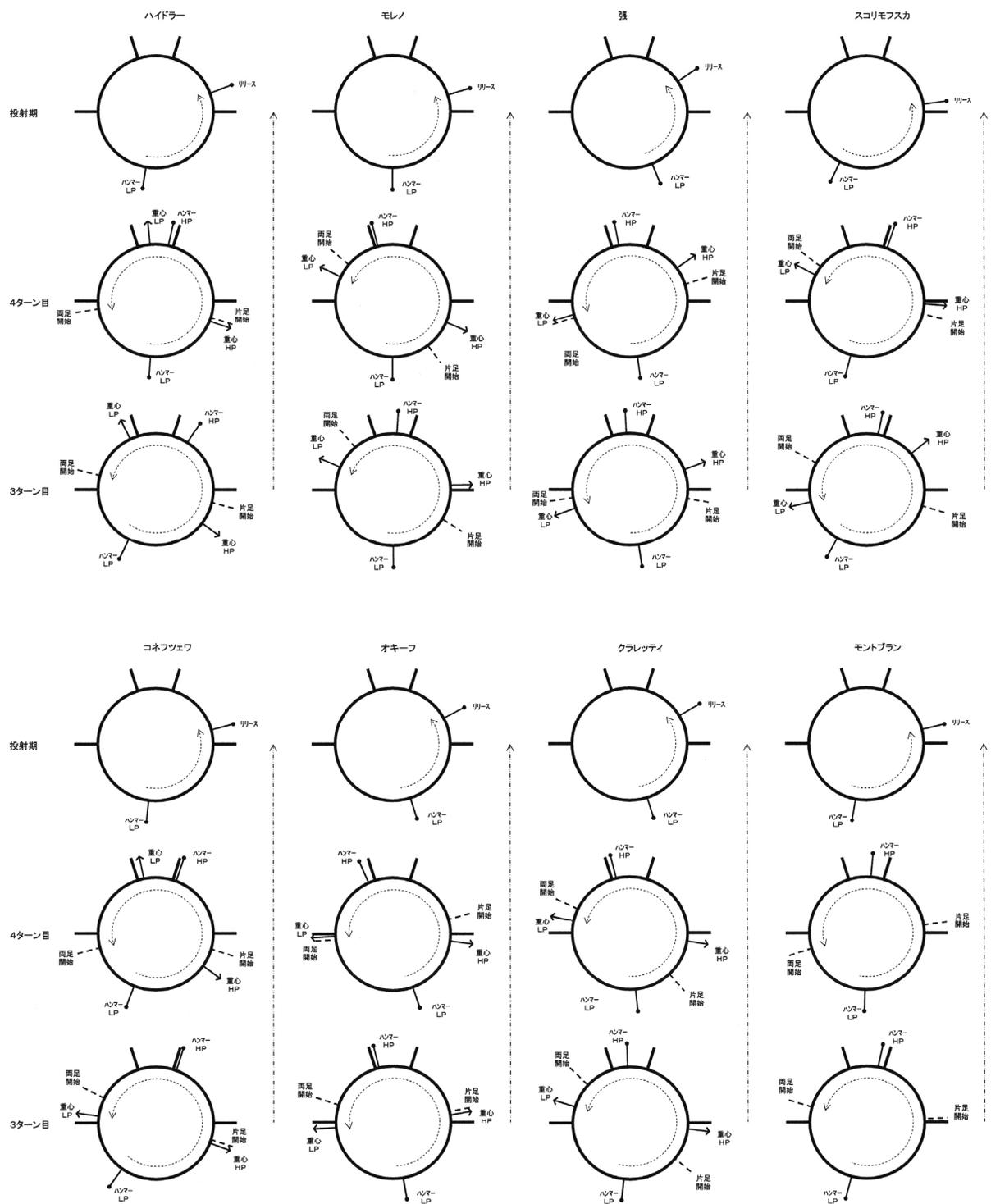
太線のZcgが身体重心を、細線のZhがハンマーヘッドを示している。

図7 男子上位8選手の身体重心とハンマーヘッドの鉛直変位



ハンマーLPやハンマーHPは、ハンマーヘッドのローポイントやハイポイント時の方位角を示している。また、重心LPや重心HPは、身体重心のローポイントやハイポイント時のハンマーの方位角を示している。片足開始や両足開始は、片足支持期や両足支持期の開始時のハンマーの方位角を示している。

図8 男子1位—8位の選手のハンマーヘッドと身体重心のローポイント・ハイポイントおよび両足・片足支持期開始の順序



スコリモフスカは3回転投げのため、図の4ターン目が実際には3ターン目に、図の3ターン目が実際には2ターン目に相当する。

コネフツェワは3回転投げのため、図の4ターン目が実際には3ターン目に、図の3ターン目が実際には2ターン目に相当する。

図8 (続き) 女子1位—8位の選手のハンマーヘッドと身体重心のローポイント・ハイポイントおよび両足・片足支持期開始の順序

# 男女 20km 競歩におけるロス・オブ・コンタクト判定

## Judgment of Loss of Contact in Men's and Women's 20 km Race Walking Events

法元 康二<sup>1)</sup>, 榎本 靖士<sup>2)</sup>, 門野 洋介<sup>3)</sup>, 鈴木 雄太<sup>3)</sup>

1) 茨城県立医療大学 2) 京都教育大学 3) 筑波大学大学院

Koji HOGA<sup>1)</sup>, Yasushi ENOMOTO<sup>2)</sup>, Hirosuke KADONO<sup>3)</sup>, Yuta SUZUKI<sup>3)</sup>

1) Ibaraki Prefectural University of Health Science, 2) Kyoto University of Education,  
3) Graduate School of University of Tsukuba

### 1. はじめに

陸上競技の競技規則は、競歩をいずれかの足が常に地面と離れないで歩き、前脚は接地の瞬間から垂直の位置になるまでまっすぐに伸びていなければならないものとして定義している(財団法人日本陸上競技連盟, 2007)。公式競技会における歩型の判定は、1周 2.5km 以下の周回コース上に等間隔で配置された5名から8名の競歩審判員が肉眼によって競技者が競歩の定義に適合しているかどうかを判定し、3名以上の審判員が競歩の定義に反すると判定した競技者は失格となると競技規則に定められている。

国際陸上競技連盟では、2002年より国際競技会で判定を行う国際競歩審判員のランクをレベルⅠからレベルⅢまでの3段階に分け、それぞれのランクの試験や国際競技会での判定実績によって分類するようになっている。オリンピックや世界選手権など世界レベルの国際競技会では最高ランクのレベルⅢ国際審判員(IRWJ: International Race Walking Judge)のみが判定を行い、レベルⅡ国際審判員(ARWJ: Area Race Walking Judge)は大陸別選手権などエリアレベルの国際競技会を担当し、レベルⅠ国際競歩審判員はそれ以外の国際競技会で判定を行うようになっている。さらに、2005年の世界選手権ヘルシンキ大会からは参加標準記録の対象競技会を世界レベルの国際競技会およびレベルⅡ以上の国際審判員が判定を行う大陸別連盟公認競技会のみを絞り、世界選手権に出場する競技者の技術レベルを一定以上のもの保つようとする措置をとっている。しかし、2005年の世界選手権ヘルシンキ大会では、男女3種目でのべ134名の出場者に対して計28名、また、2007年の世界選手権大阪大会ではのべ138名の出場者に対して計20名の失格者が発生しており、参加資格を得た競技会や国内選考会で失格とならなかった競技者でも、歩行技術が不安定であれば競技会によっては失格となることを示している。また、レベルⅢの審

判のみで判定を行う競技会は世界選手権、ワールドカップなどに限られていることから、そのような大会において実際の判定を分析して定量化することは、失格にならないような技術習得に役立つだけでなく、審判基準の変動を少なくするのにも役立つと思われる。

本報では、2007年世界選手権大阪大会の男女20km競歩において、赤カードを受けずに上位入賞した選手と失格となった選手の動きの比較を行ない、国際競歩審判員の判定基準を明確化するための基礎的知見を得ることを目的とした。

### 2. 方法

#### 2.1 データ収集

世界陸上競技選手権大阪男女20km競歩(男子:2007年8月26日、女子:2007年8月31日)は、大阪市長居陸上競技場を発着点として陸上競技場に隣接する大阪市長居公園内に設定された公園内道路を往復する1周2kmの周回コースで行われた。陸上競技場から約1kmの地点のコース脇歩道に2台のVTRカメラ(毎秒60フィールド)を設置して撮影し、レース終了後に幅3m、縦4.5m、高さ2mの分析範囲をコース上に設けて3次元DLT法のためのキャリブレーションを行った。構築した三次元座標の最大較正誤差は男子20kmではX座標:12.4mm、Y座標:17.0mm、Z座標:9.6mmであった。女子20kmではX座標:12.6mm、Y座標:26.1mm、Z座標:13.1mmであった。

表1に分析対象者を示した。男女20kmの両種目の入賞者のうち、赤カードを1回も受けなかった選手がそれぞれ2名だったので、ルールに適合した選手の代表として被験者とした。また、男子20kmでは7名、女子20kmでは4名がそれぞれ失格となったが、そのうち失格となる直前の5kmごとの通過順位が8位以内だった男子20kmの2名と女子20kmの1名を失格者の代表として被験者とした。なお、フェルナンデス選手は競技場

Table 1 Characteristics of the subjects

Name	Men20km			Women 20km			
	Perez (ECU)	Fernandez (ESP)	Brungetti (ITA)	Tallent (AUS)	Platzer (NOR)	Feitor (POR)	Saville (AUS)
Rank	1	2	DSQ	DSQ	4	5	DSQ
Year of birth	1974	1977	1976	1984	1972	1975	1974
Height (m)	1.74	1.73	1.75	1.78	1.76	1.60	1.64
Body mass (kg)	59	57	62	60	57	51	53
Race time	1:22'20"	1:22'40"			1:31'24"	1:32'01"	
Personal best time	1:17'21"	1:17'22"	1:19'36"	1:21'25"	1:27'41"	1:27'55"	

内で主任審判員より赤カードを受けて一旦失格となったが、上訴審判員の裁定によって失格が無効となったため赤カードは受けなかったものとして扱った。

## 2.2 データ処理

1 周ごとに撮影した選手の VTR 画像から、レース序盤の 4.5km からレース終盤の 18.5km にかけての地点で分析可能であった対象者の歩行 1 サイクルの画像を選択し、身体計測点 25 点の座標をデジタル化した。2 台のカメラ画像は右足接地のフィールドによって同期し、DLT 法によって 3 次元実座標に換算した。分析点の座標の平滑化は、座標成分ごとに最適遮断周波数を決定し (Wells と Winter, 1980), Butterworth low-pass digital filter を用いて行った。遮断周波数は男子 20km では X 座標が 1.8-7.2Hz, Y 座標が 1.8-7.2Hz, Z 座標が 3.0-7.8Hz の範囲で、女子 20km では X 座標が 1.8-5.4Hz, Y 座標が 1.8-5.4Hz, Z 座標が 3.6-5.4Hz であった。

阿江 (1996) の身体部分慣性係数を用いて算出した全身の重心の座標をもとに、右足接地から再び右足が接地するまでを歩行の 1 サイクルとして、1 サイクル中の平均の重心速度を歩行速度とし、ピッチは 1 サイクルに要した時間を 2 等分したものの逆数とした。ストライドは 1 サイクル中の重心の水平変位を 2 等分したものとした。

また、競技規則ではレース中に競技者が地面との接触を失わないものとして競歩を定義しているが (財団法人日本陸上競技連盟, 2007), 実際のレースでは審判の肉眼ではとらえられない短い時間だけ両足が地面と接触を失う非支持局面が発生することがある。そこで、非支持局面が発生した場合には、歩行の 1 サイクル中にどちらかの足が地面と接触している支持局面の時間を 2 等分したものを支持時間、非支持局面の時間を 2 等分したものを非支持時間として算出した。さらに、支持局面における重心の水平前後方向変位を 2 等分したものを支持距離、非支持局面における

重心の水平前後方向変位を 2 等分したものを非支持距離として算出した。

また、アテネ五輪男子 20km 競歩 (法元, 2005) および世界選手権ヘルシンキ大会 (法元ら, 2007) のロス・オブ・コンタクト判定について報告されているように、歩行中の回復脚各部の高さはロス・オブ・コンタクト判定に影響することから、本報における各分析対象者の身体標点 3 次元座標データについて右足離地 (R-off) から右足接地 (R-on) までの右足回復期の時間を 100%として規格化し、被験者間で比較した。

## 2.3 判定結果

競歩の公式競技会では、競歩審判員はレース中に競技者に対して行った注意、警告などの判定の詳細を個々の競歩審判記入用紙に記録し、個々の競歩審判員が記入用紙に記入した競技者番号、判定の内容、判定の時刻などを、競技中および競技終了後に記録員が競歩審判集計用紙に記入することになっている。競歩審判集計用紙は、競技終了後に競技規則に基づいて行われる抗議や、判定結果に対する説明の要求があった場合の説明資料として用いられる (財団法人日本陸上競技連盟, 2007)。そのため、競歩審判集計用紙は内部情報としてとどめることなく競技会終了後に公開されることが多い。オリンピック、世界選手権、ワールドカップなどの国際競技会では、審判員の氏名を明記した競歩審判集計表が各国選手団にテクニカル・インフォメーションのひとつとして配布されている。本報では、大会終了後に国際陸連競歩委員会 (Race Walking Committee) より配信された競歩審判集計表を用いて判定結果の分析を行った。

## 3. 結果と考察

### 3.1 判定結果について

表 2 は、競歩審判集計表に示された判定結果のうち、本報の被験者のものをまとめたものである。男子 20km 競歩では、注意はペレス選手が 0 回、

Table 2 Judgment for the subjects

Name	Men 20km			Women 20km			
	Perez (ECU)	Fernandez (ESP)	Brugnetti (ITA)	Tallent (AUS)	Platzer (NOR)	Feitor (POR)	Saville (AUS)
Number of cautions	0	1	3	6	3	0	3
Time of the first caution from the start		67'	20'	20'	34'		17'
Number of red cards	0	0	3	3	0	0	4
Time of the first red card from the start			32'	30'			47'
Time of the third red card from the start			58'	64'			49'

フェルナンデス選手が 1 回と非常に少なかったのに対し、ブルニェッティ選手が 3 回、タレント選手が 6 回と、失格となった選手の方が注意の回数が多かった。赤カードについては、ペレス選手、フェルナンデス選手ともに 1 回も受けていなかった。それに対して、ブルニェッティ選手はレース序盤のスタート後 32 分に 1 回目の赤カードを受けた後、58 分に 3 回目の赤カードを受けて失格となり、タレント選手はスタート 30 分後に 1 回目の赤カードを受けて、64 分に 3 回目の赤カードを受けて失格となっていた。また、失格となった 2 選手はそれぞれレース序盤の 20 分に 1 回目の注意を受けて、中盤までに失格となっていた。

女子 20km 競歩では、プレッツァー選手は注意を 3 回受けていたものの、フェイトール選手は 1 回も受けていなかった。失格となったサヴィル選手は注意を 3 回受けていた。赤カードについては、プレッツァー選手、フェイトール選手ともに 1 回も受けていなかったが、サヴィル選手はレース中盤のスタート後 47 分に 1 回目の赤カードを受けた後、49 分に 3 回目の赤カードを受けて失格となった。また、1 回目の注意は男子 20km と同様にレース序盤のスタート後 17 分に出されていた。

また、表には示していないが、入賞者の判定を整理すると、男子 20km 競歩の入賞者に対しては 1 回目の注意はスタート後 12 分から 67 分の間に出され、1 回目の赤カードは 24 分から 74 分までの間に出されている。一方、女子 20km 競歩では、1 回目の注意はスタート後 11 分から 34 分の間に出され、1 回目の赤カードは 23 分から 86 分までの間に出されている。そのため、入賞圏内にいながら失格となった選手に対する注意および赤カードが失格とならなかった選手に対するものよりも早い段階で出されていたというわけではなかったといえる。

### 3.2 歩行速度、ピッチ、ストライドについて

表 3 は、本報の分析対象者の各分析地点における歩行速度、ピッチ、ストライドを示したもので、1 歩の時間を支持時間と非支持時間に分け、ストライドについては支持距離、非支持距離に分けて示した。

男子 20km 競歩では、失格となったブルニェッティ選手を除いてレース中盤まで先頭集団は大人気で構成されたため、ペレス、フェルナンデス、タレント選手はレース終盤での分析となった。

歩行速度については、ペレス選手 (4.34m/秒, 15.61km/時) とフェルナンデス選手 (4.37m/秒, 15.72km/時) よりも失格となったタレント選手 (4.40m/秒, 15.83km/時) の方が高かったが、ブルニェッティ選手 (4.12m/s, 14.84km/時秒) はレース終盤よりもスローペースとなったレース序盤での分析となったため、他の 3 選手よりも低かった。

ピッチ、ストライドについては失格とならなかった 2 選手と失格となった 2 選手の間で明確な違いはみられなかった。両足が地面と離れる非支持時間については、ペレス選手とフェルナンデス選手は 0.033 秒であったが、失格となった 2 選手のうちブルニェッティ選手は 0.033 秒と失格とならなかった選手と同じであったのに対し、タレント選手は 0.06 秒と長かった。また、非支持距離については、非支持時間を反映して、ペレス選手 (0.15m)、フェルナンデス選手 (0.15m) とブルニェッティ選手 (0.14m) はほとんど同じであったが、タレント選手 (0.27m) は長かった。

女子 20km 競歩では、優勝したカニスキナ選手に続く集団が早い少数者になったため分析対象の 3 名の全てでレース中盤での分析となった。しかし、分析対象とした 3 選手とも異なる地点で分析したため、歩行速度は 3 選手とも大きく異なり、プレッツァー選手 (3.67m/秒, 13.20km/時) が最も低く、次いでフェイトール選手 (3.72m/秒, 13.39km/時) で、サヴィル選手 (3.74m/秒, 13.45km/時) が最も高かった。ピッチ、ストライドについ

Table 3 Walking speed, step frequency and step length of the subjects

Name	Men 20km				Women 20km		
	Perez (ECU)	Fernandez (ESP)	Brugnetti (ITA)	Tallent (AUS)	Platzer (NOR)	Feitor (POR)	Saville (AUS)
Analysed position	18.5km	18.5km	4.5km	14.5km	10.5km	8.5km	12.5km
Walking speed (m/sec)	4.34	4.37	4.12	4.40	3.67	3.72	3.74
Step frequency (Hz)	3.56	3.33	3.33	3.53	3.33	3.43	3.43
Support time (sec)	0.25	0.267	0.267	0.225	0.283	0.275	0.258
Flight time (sec)	0.033	0.033	0.033	0.06	0.017	0.017	0.033
Step length (m)	1.23	1.31	1.24	1.24	1.10	1.08	1.09
Support distance (m)	1.08	1.16	1.10	0.98	1.04	1.02	0.96
Flight distance (m)	0.15	0.15	0.14	0.27	0.06	0.06	0.13

ては男子 20km と同様に失格とならなかった 2 選手と失格となった選手の間に明確な違いはみられなかったが、非支持時間については、プレツァー選手 (0.017 秒) とフェイトール選手 (0.017 秒) に対して、失格となったサヴィル選手は 0.033 秒と失格とならなかった選手よりも長かった。また、非支持距離については、男子 20km と同様に非支持時間を反映して、プレツァー選手 (0.06m)、フェイトール選手 (0.06m) はほとんど同じであったのに対し、サヴィル選手 (0.13m) は長くなっていた。

本報で分析した男子 20km の被験者では、失格とならなかった選手の非支持時間は失格となった選手のものよりも短かったが、Knicker と Loch (1990) は、肉眼によるロス・オブ・コンタクト判定の限界は 0.04 秒であるという報告を行い、また、アテネ五輪男子 20km 競歩におけるメダリストの非支持時間は、0.01 秒から 0.05 秒までの範囲であった (法元と阿江, 2006)。しかし、本報で分析した失格者はこれら先行研究で示された失格とならなかった選手よりも非支持時間が長い選手もみられ、また、世界選手権ヘルシンキ大会における分析でも同様な結果が報告されている (法元ら, 2007)。本報で分析した失格者では、男子 20km におけるタレント選手は非支持時間が 0.06 秒と長かったものの、ブルニェッティ選手は 0.033 秒と失格とならなかった選手と同じであり、また、女子 20km で失格したサヴィル選手は 0.033 秒で女子の 2 選手 (プレツァー、フェイトール) よりも長かったものの、男子で失格とならなかった選手と同じであった。そのため、これまでのロス・オブ・コンタクト判定に関する分析報告と同じように (法元ら, 2004, 2007; 法元, 2005)、実際のロス・オブ・コンタクト判定は、非支持時間の長さを基準とするのではなく、ロス・オブ・コンタクト局面を肉眼で視認しやす

い歩行フォームに対して行われていたと考えられる。

### 3.3 回復脚各部の地面からの高さの変化について

図 1 は男子 20km における各分析対象者の右膝関節高の変化を、右足離地から右足接地までの時間を 100% として規格化した右足回復期について示したものである。

男子 20km 競歩のすべての分析対象者で右足離地から右足回復期 20% まで右 (回復) 脚の膝関節高が減少した後、回復期 70-80% まで増加して右足接地まで再び右 (回復) 脚関節高が減少していた。失格とならなかったペレス選手とフェルナンデス選手では、右足回復期全体で右 (回復) 脚膝関節高が失格となったブルニェッティ選手、タレント選手よりも低かった。

法元ら (2007) は、2005 年に開催された世界陸上競技選手権ヘルシンキ大会の男女 20km 競歩のロス・オブ・コンタクト判定の分析を本報と同じように上位入賞者で赤カードを受けなかった選手と、上位集団にいながら失格となった選手の比較によって行っている。男子 20km では、本報と同様に回復脚膝関節の高さで失格とならなかった選手と失格となった選手の違いが表れたが、回復期前半の膝関節高に限られていた。しかし、本報で示した 2007 年大阪大会で失格となった選手は回復期全体で膝関節高が失格とならなかった選手よりも高かった。国際陸連では、国際競歩審判員の育成に際してロス・オブ・コンタクト局面の発生が疑われるため注意して監察すべき局面として回復期全体の膝の高さについて強調している (財団法人日本陸上競技連盟, 2005)。したがって、図 1 で示したようにブルニェッティ選手とタレント選手の回復脚膝関節が回復期全体でペレス選手とフェルナンデス選手よりも高かつ

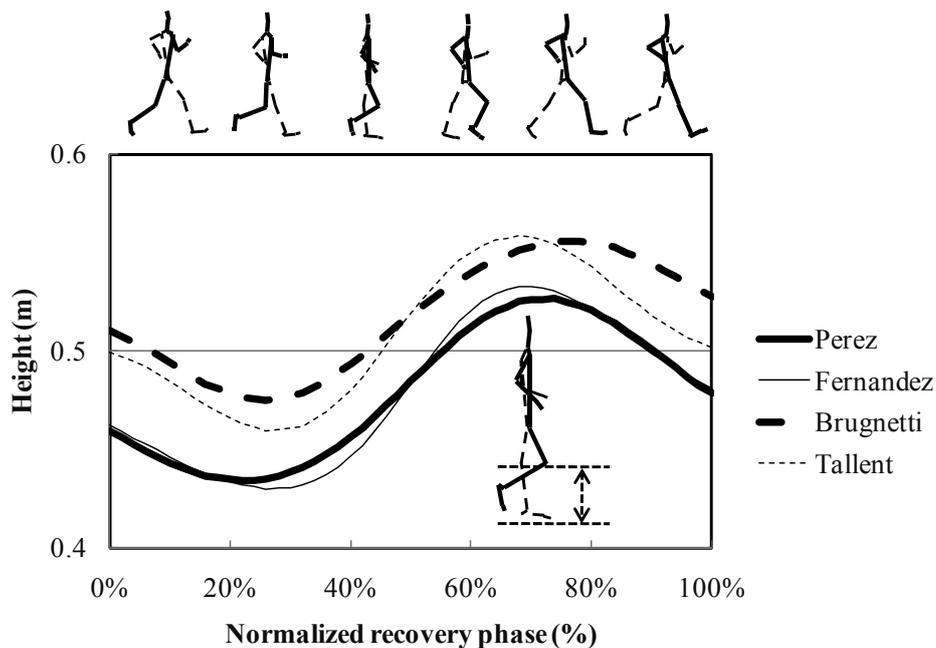


Figure 1 Height of the recovery knee during the normalized recovery phase

たことは、このような審判育成における強調点を反映したものと考えられる。

図2は女子20kmにおける各分析対象者の右かかと高の変化を、右足離地から右足接地までの時間を100%として規格化した右足回復期について示したもので、3名の被験者のうち、プレツァー選手が1.76mと、フェイトール選手(1.60m)、サヴィル選手(1.64m)よりも高かったため、各被験者の身長で除した値の変化についても図の下段に示した。

女子20km競歩で分析した2名の被験者の両方で右足離地から右足回復期20%まで右(回復)脚のかかと高が増加した後、回復期70%まで減少してから、右足接地までわずかに右(回復)脚かかと高が減少して接地していた。失格とならなかったプレツァー選手と失格となったサヴィル選手を比較すると、サヴィル選手の身長で除した値は、回復脚離地から回復期50%まではプレツァー選手よりも大きかった。また、フェイトール選手とサヴィル選手の身長で除した値を比較すると、回復脚離地から回復期20%までは同じぐらいの大きさであったが、回復期20%から回復脚接地までは、サヴィル選手の方が大きかった。

法元ら(2007)による2005年ヘルシンキ大会女子20km競歩の判定分析では、失格とならなかった選手と失格となった選手の違いは回復期後半の回復脚かかとの高さに現れ、失格となった選手はかかと高が高かったと報告している。本報における失格となった選手は、回復期前半および後半で失格とならなかった選手よりもかかと高が高かったが、法元ら(2004)の日本国内の公式競歩競技会におけるロス・オブ・コンタクト判定分

析では、回復期後半に回復脚足部高が高く、接地直前に落下するような動きをした場合にはロス・オブ・コンタクトの警告を受けていることを報告している。また、接地前に回復脚足部を上から下に踏み出すような動きはロス・オブ・コンタクト局面の発生が疑われるものとして、競歩審判員の間では一般に注意して監察すべき局面とされている。しかし、回復期前半の回復脚足部高が高い場合にもロス・オブ・コンタクトが発生しているという判定が行われやすいという報告も行われている(法元, 2005)。したがって、本報で分析したサヴィル選手は、回復期前半と後半の両方で回復脚かかと高が高かったことで、接地前に回復脚足部が落下する動きが競歩審判員より視認しやすくなっていたと考えられる。

#### 4. まとめ

本報では、2005年世界選手権ヘルシンキ大会(法元ら, 2007)に引き続き、2007年世界選手権大阪大会の男女20km競歩において、赤カードを受けずに上位入賞した選手と失格となった選手の動きの比較を行った。

ヘルシンキ大会では(法元ら, 2007)、男子20kmでは回復期前半の回復脚膝関節高に、女子20kmでは回復期後半の回復脚かかと高に失格となった選手と失格とならなかった選手の違いが表れた。本報で分析したヘルシンキ大会よりも違いの現れた局面がヘルシンキ大会よりも長かったが、男子では回復脚の膝関節高に、女子ではかかと高に違いが表れた。大阪大会で判定を行った審判員のうち、ヘルシンキ大会で判定を行っていた審判員は1名のみであったことから考えると、このよ

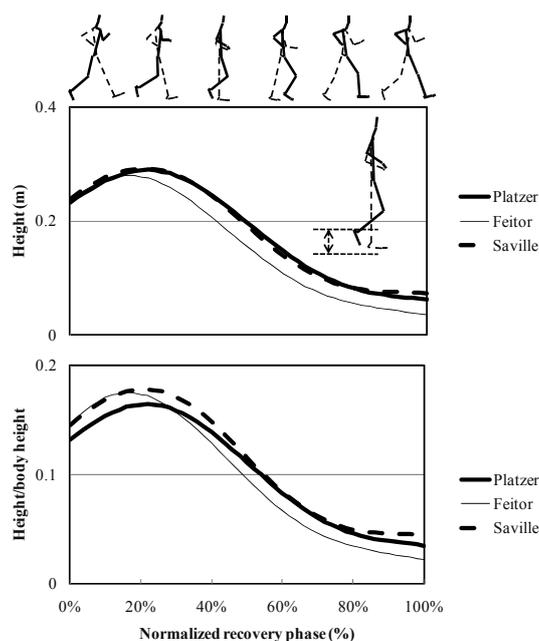


Figure 2 Height of the recovery heel (upper) and heel height divided by the body height during the normalized recovery phase

うに失格者と失格とならなかった選手の差が出た部位がヘルシンキ大会と大阪大会で同じであったことは、2大会の競歩審判員の判定基準には大きな違いはなかったと考えることができる。

2002年より施行されている国際審判員制度は国際競技会で判定を行う競歩審判員の数を絞り、判定基準のばらつきを小さくしようとするものであったが、本報でみられたように異なる審判員によっても判定傾向に共通性がみられたことは、競歩審判員の数を絞ったことだけでなく、育成・試験制度の改善も寄与したものと考えることができる。

#### 参考文献

- 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数, *Japanese Journal of Sports Sciences*, 15 (3), 155-162.
- 法元康二・杉田正明・藤崎 明・阿江通良 (2004) 競歩の歩型判定に関するバイオメカニクスの分析 -第 42 回全日本競歩輪島大会男子 20km 競歩の判定結果から-, 日本陸連科学委員会研究報告『陸上競技の医科学サポート研究 REPORT』, 3 (1), 53-59.
- 法元康二 (2005) ロス・オブ・コンタクトの判定分析からみた競歩, *月刊陸上競技*, 39(6), 160-162.
- 法元康二, 阿江通良 (2006) 力学的エネルギー利用の有効性からみたアテネオリンピック男子 20km 競歩におけるメダリストと日本人選手の比較. *陸上競技研究紀要*, 2, 38-46.
- 法元康二, 廣川龍太郎, 杉田正明, 阿江通良 (2007) 世界陸上競技選手権ヘルシンキ大会男女 20km 競歩におけるロス・オブ・コンタクト判定. *日本陸上競技学会誌特別号*, 6 (supplement), 11-16.
- Knicker, A. and Loch, M. (1990) Race walking technique and judging the final report of the international athletic foundation research project, *New Studies in Athletics*, 5 (3), 7-9.
- Wells, R. P. and Winter, D.A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits, *Human Locomotion I*, 92-93.
- 財団法人日本陸上競技連盟 (2005) 陸上競技ハンドブック 2005~2006年版, あい出版: 東京.
- 財団法人日本陸上競技連盟 (2007) 陸上競技ルールブック 2007年版, あい出版: 東京.

## Analysis of speed patterns in 100-m sprints

A. Matsuo <sup>1)</sup>, H. Tsuchie <sup>2)</sup>, T. Yanagiya <sup>3)</sup>, R. Hirokawa <sup>4)</sup>, M. Sugita <sup>5)</sup>, M. Ae <sup>6)</sup>

1) Japan Institute of Sports Sciences, 2) Jyosai University, 3) Juntendo University,  
4) Hokkaido Tokai University, 5) Mie University, 6) Tsukuba University

### Abstract

The running speed of men's and women's 100-m sprinters, including Tyson Gay (USA), Asafa Powell (JAM) and Veronica Campbell (JAM), at the 11th IAAF Athletic Championships in OSAKA were measured by using laser beam apparatus (LAVEG Sport, JENOPTIK, Germany). The purpose of this brief report was to investigate changes in running speed during the 100-m races and to provide information a sprint training. The highest speed of Gay (USA), who won the men's 100-m, and Powell (JAM) was 11.83 m/s and 11.79 m/s, respectively, and the rate of decrease in speed was 2.2% for Gay and 8.1% for Powell. However, their top speed was slower than that of Carl Lewis at the 3rd IAAF World Championships in Tokyo (12.05m/s, 9.86s of previous WR). In women, the highest speed attained by Campbell (JAM) was 10.56m/s and the rate of decrease in speed was 9.6%. The correlational coefficient between the top speed and goal time was -0.933 for men ( $p < 0.0001$ ) and -0.962 for women ( $p < 0.0001$ ). The rate of decrease in speed ranging from 2% to 13% has a small effect on the goal time. However, it may influence the ranking of the races of both the men's and women's.

### 1. Introduction

Tyson Gay (USA) won the 100-m world title for men in 9.85 s, followed by Derrick Atkins (BAH) who won the second rank in 9.91s, with world record holder Asafa Powell (JAM) attaining the third position. Powell led the run from the start to a distance of 60 m; however, after 60~70 m, his speed decreased suddenly. Taking the same time of 11.01 s, Veronica Campbell (JAM) defeated the defending champion Lauryn Williams (USA). In 100-m races, the important factors comprise the acceleration from the start to the top speed, the top speed, and the decrease in speed just before the goal. Analysing 100-m races of the world championship will provide extremely important data for planning the training strategy

in a sprint. The speed analyses of 100-m races were conducted by using video cameras or measuring instruments with the laser beam method. This method could measure the running speed from start to finish with a sampling rate of 100 Hz, although we had employed this method for evaluating the speed of the sprinters during 100-m races.

### 2. Method

In this study, the apparatus using the laser beam (LAVEG Sport, JENOPTIK, Germany) was employed for measuring the running speed. The error of measurement of this device is 7 cm, and the safety of the laser beam is categorised as class 1 by the safety standard. In this



Figure 1. Setting the 5 laves in seat in stand.

study, we positioned the five apparatuses at 64~68 m before the start line and 22~24 m above ground level (Figure 1). We measured the running speeds during sprinting for all races of men and women, from the first to the final round. In each race, five sprinters were selected based on their best performance in the daily programme. The measurement tools were positioned at the top of the stand behind the 100-m lanes such that different noises

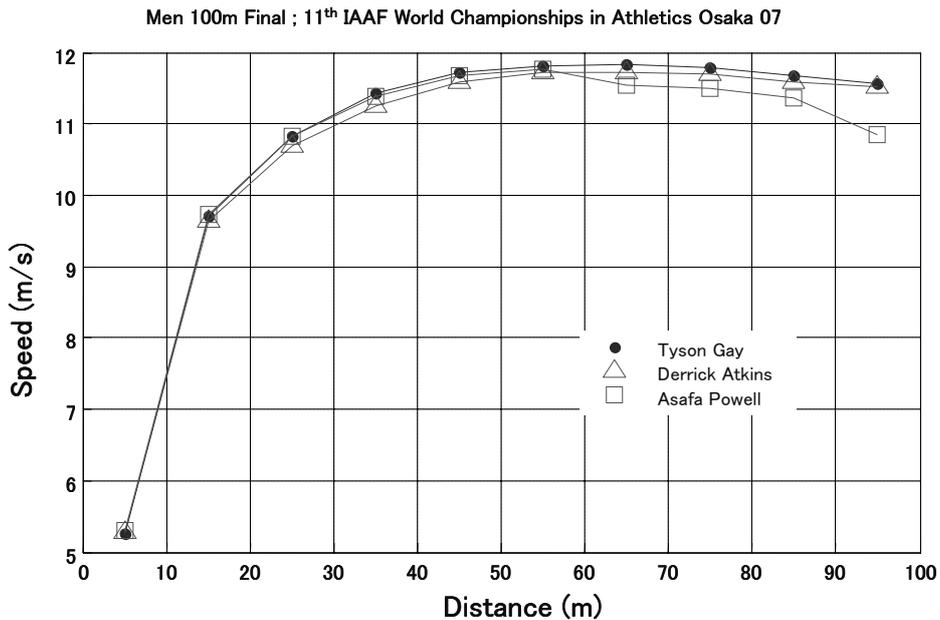
remained in the data, affected by the tilting movement of the device, particularly from the start to a distance of 40 m. These noises were removed by the spine interpolation; other noises were removed by the 1-Hz low pass Butterworth digital filter. Using filtered data, the elapsed time of 10 m from the start to the goal was calculated using the distances-time curves data. From the elapsed time, we calculated the running speed at each interval, the top speed and the rate of the decrease in speed from the top to the last speed, i.e. from 90 m to 100 m. The official results were used in the goal and reaction times.

### 3. Results

The measuring objects included 75 examples from the first to the final round; we obtained the data of 63 samples for men, with the goal time ranging from 9.85 s to 10.46 s, and the data of 71 samples for women, with the goal time ranging from 10.99 s to 11.98 s. In our opinion, the data

Table 1. Reaction time, Goal time, top speed, percent of decrease in speed, elapsed time, speed, %max in 100m finals of men and women.

Men 100m Final (Wind:-0.5m/s)																
rankname	reaction time s	goal time s	top speed m/s	top distance m	%Decrease in Speed %	Distance(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1 Tyson Gay USA	0.143	9.85	11.83	65	2.2	elapsed time (s)	1.90	2.94	3.86	4.73	5.59	6.44	7.28	8.13	8.99	9.85
						speed(m/s)	5.25	9.70	10.83	11.42	11.72	11.79	11.83	11.80	11.67	11.57
						% max speed	44.4	82.0	91.6	96.6	99.0	99.7	100.0	99.7	98.7	97.8
2 Derrick Atkins BAH	0.137	9.91	11.74	55	1.8	elapsed time (s)	1.89	2.93	3.87	4.75	5.62	6.47	7.32	8.18	9.04	9.91
						speed(m/s)	5.28	9.65	10.69	11.26	11.57	11.74	11.71	11.70	11.58	11.53
						% max speed	45.0	82.2	91.1	95.9	98.6	100.0	99.7	99.7	98.7	98.2
3 Asafa Powell JAM	0.145	9.96	11.79	55	8.1	elapsed time (s)	1.88	2.91	3.83	4.71	5.57	6.42	7.29	8.16	9.04	9.96
						speed(m/s)	5.31	9.73	10.83	11.38	11.67	11.79	11.51	11.51	11.34	10.84
						% max speed	45.1	82.5	91.8	96.6	99.0	100.0	97.7	97.6	96.2	91.9
5 Churandy Martina AHO	0.180	10.08	11.67	65	2.6	elapsed time (s)	1.98	3.03	3.98	4.88	5.75	6.62	7.47	8.34	9.20	10.08
						speed(m/s)	5.05	9.49	10.62	11.09	11.42	11.58	11.67	11.60	11.56	11.37
						% max speed	43.3	81.3	91.0	95.0	97.8	99.2	100.0	99.4	99.0	97.4
6 Marlon Devonish GBR	0.149	10.14	11.48	65	3.9	elapsed time (s)	1.96	3.00	3.95	4.85	5.73	6.61	7.48	8.36	9.23	10.14
						speed(m/s)	5.11	9.90	10.52	11.09	11.31	11.42	11.48	11.37	11.42	11.03
						% max speed	44.6	83.7	91.7	96.7	98.6	99.5	100.0	99.1	99.5	96.1
Women 100m final (Wind:-0.2m/s), & best time(Wind:-0.1m/s)																
rankname	reaction time s	goal time s	top speed m/s	top distance m	%Decrease in speed %	Distance (m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1 Veronica Campbell JAM	0.167	11.01	10.56	55	9.3	elapsed time (s)	2.01	3.14	4.15	5.11	6.07	7.02	7.97	8.96	9.97	11.01
						speed(m/s)	4.97	8.84	9.96	10.36	10.46	10.56	10.45	10.12	9.94	9.58
						% max speed	47.1	83.7	94.3	98.0	99.0	100.0	98.9	95.8	94.1	90.7
2 Lauryn Williams USA	0.145	11.01	10.40	45	6.1	elapsed time (s)	2.01	3.13	4.13	5.10	6.06	7.03	8.00	8.98	9.99	11.01
						speed(m/s)	4.97	8.97	9.95	10.32	10.40	10.37	10.35	10.14	9.95	9.76
						% max	47.8	86.2	95.7	99.3	100.0	99.7	99.5	97.5	95.7	93.9
4 Torri Edwards USA	0.141	11.05	10.45	45	7.3	elapsed time (s)	2.00	3.12	4.15	5.12	6.08	7.04	8.01	9.00	10.02	11.05
						speed(m/s)	5.01	8.87	9.78	10.25	10.45	10.42	10.34	10.06	9.84	9.68
						% max	47.9	84.9	93.6	98.1	100.0	99.7	99.5	96.2	94.2	92.7
5 Kim Gevaert BEL	0.143	11.05	10.32	55	6.9	elapsed time (s)	1.98	3.10	4.11	5.10	6.08	7.04	8.02	9.01	10.01	11.05
						speed(m/s)	5.06	8.92	9.86	10.08	10.30	10.32	10.28	10.12	9.97	9.61
						% max	49.0	86.4	95.6	97.6	99.8	100.0	99.6	98.0	96.6	93.1
6 Christine Arron FRA	0.164	11.08	10.41	45	7.9	elapsed time (s)	2.03	3.15	4.16	5.13	6.09	7.06	8.03	9.02	10.04	11.08
						speed(m/s)	4.93	8.95	9.84	10.30	10.41	10.41	10.29	10.04	9.86	9.59
						% max	47.3	85.9	94.5	98.9	100.0	100.0	98.8	96.4	94.7	92.1
SF Veronica Campbell JAM	0.144	10.99	10.46	55	9.5	elapsed time (s)	2.00	3.12	4.12	5.10	6.07	7.02	7.98	8.96	9.93	10.99
						speed(m/s)	4.99	8.94	9.98	10.21	10.37	10.46	10.39	10.30	10.22	9.47
						% max	47.7	85.4	95.5	97.6	99.1	100.0	99.4	98.5	97.7	90.5



**Figure 2. Speed changes in top 3 sprinter at men's 100m final**

loss occurred when the runner did not begin and qualify and when the laser light beam was unable to follow the runners because the device was positioned high on the stand.

Goal time, top speed, the appeared distance of the top speed, the reaction time at the start, the elapsed time of 10 m, the speed of a 10-m interval, the rate of decrease in speed from the top to the speed of the last interval of every man and woman were recorded in table 1. These data represented the data of the 1st, 2nd, 3rd, 5th, and 6th ranked male runners and the 1st, 2nd, 4th, 5th, and 6th ranked female runners and the time of 10.99 s at their semi-final. The maximum top speed attained by Gay (USA) over a distance of 60–70 m is 11.83 m/s; he was followed by Powell who ranked 3rd with a speed of 11.79 m/s. Lewis (USA) whose goal time was 9.86 s recorded a top speed of 12.05 m/s in the men's 100-m final at the third IAAF World Championships in Tokyo in 1991. Thus, Gay's top speed was 0.22 m/s slower than that of Lewis. With regard to the women's championship, Campbell (JAM) who attained the 1st position in the final

was the fastest with a speed of 10.56 m/s, followed by Williams (US) who ranked 2nd with a speed of 10.45 m/s. The changes in the speed of the top three male sprinters have been recorded in figure 2. From the start to a distance of 60 m, the tendency of changes in speed in Gay and Powell almost exhibited an identical pattern; however, after covering a distance of 60 m, the speed of Powell decreased suddenly. On the other hand, after this point, Gay maintained his speed at the same level, and decreased it slightly just before the goal. The percentage of the decrease in speed was 2.2% in Gay and 8.1% in Powell. Figure 3 presents the changes in the speed of the top two female sprinters. Taking the same time, Campbell defeated the defending champion Williams and attained a top speed of 10.56 m/s in the distance from 50 m to 60 m; however, after this point, her speed decreased. The top speed of Williams who ranked second was lower than that of Campbell by 10.40 m/s. However, William's acceleration at the start and the ability of maintaining her speed was higher than that of Campbell. Thus, during the distance from 70 m to the goal, the speed of Williams was higher than that of Campbell.

Women 100m Final ; 11<sup>th</sup> IAAF World Championships in Athletics Osaka 07

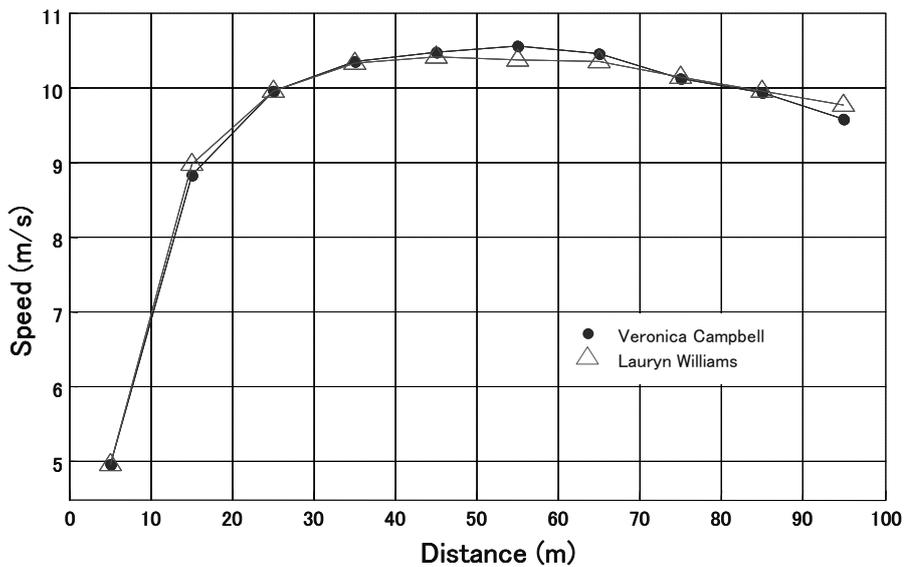


Figure 3. Speed changes in top 3 sprinter at women’s 100m final

Figure 4 presents the relationship among the top speed, the elapsed time of 30 m, the percentage of decrease in speed and the goal time. M represents men, W represents women, JPN is the data collected in Japan which includes the data of the international events held in Japan and 07 Osaka represents the present world championship in athletics. Among men, the range of the goal time in 101 samples of JPN was from 9.95 s (Gatlin; USA, 2006) to 10.91 s; among women, the range of the goal time in 106 samples was from 11.05 s (Felix; USA, 2005) to 12.89 s. The top speed and the goal time were inversely related, and significant statistical correlations existed for any group (M-07 Osaka = -0.933, M-JPN = -0.959, W-07 Osaka = -0.962, W-JPN = -0.974,  $p < 0.0001$ ). It has been demonstrated that in 100-m races, the higher the top speed, the better is the performance. In any group, the elapsed time at 30 m was also statistically related to the goal time. The correlation coefficients were from 0.555 to 0.809, which were lower than the relationship of the top speed with the goal time.

The rate of decrease in speed had been distributed in the range of 2% to 13% in all groups. When we observe the decrease rate of the speed and goal time in each group, we find that there was a positive relation in M-JPN and a negative relation in W-07 Osaka with statistically significant  $p < 0.05$ , and that in the other group, they had no relationship between them. From these results, it was suggested that there was a small effect of maintaining speed to the goal on a 100-m sprint performance. This is the one of the factors that did not result in any relationship between the goal time and the percentage of the decrease in speed.

#### 4. Conclusion

We obtained the extremely important data for 100-m sprinting in men (63 samples) and women (71 samples) in the 11th IAAF World Championships in Osaka. The highest speed of Gay (USA), who won the men’s 100-m finals, was evaluated to be 11.83 m/s and the rate of decrease in speed was evaluated to be 2.2%. In women, the highest speed attained by Campbell (JAM) was 10.56m/s and the rate of decrease in speed was 9.6%.

Statistically significant relationships exist between the top speed and goal time in men ( $r = 0.933$ ,  $p < 0.0001$ ) and women ( $r = 0.962$ ,  $p < 0.0001$ ).

The value of the rate of decrease in speed distributed from 2% to 13% has a small effect on the goal time; however, it affects the ranking in each race, for example, in both the men's and women's finals.

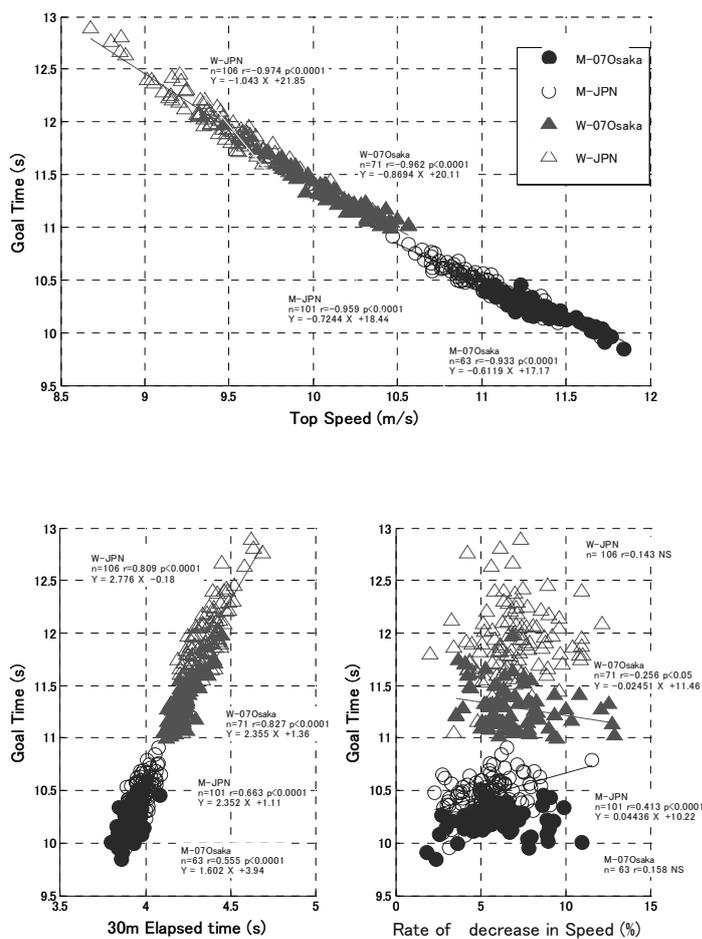


Figure 4. The relationship among top speed, 30m elapsed time, and percent of decrease in speed, and goal time.

# Mid-phase sprinting movements of Tyson Gay and Asafa Powell in the 100-m race during the 2007 IAAF World Championships in Athletics

Akira Ito<sup>1)</sup>, Koji Fukuda<sup>1)</sup> and Kota Kijima<sup>1)</sup>

1) Osaka University of Health and Sport Sciences, Osaka, Japan

## Abstract

In the present study, the running movements of Tyson Gay (9.85 seconds) and Asafa Powell (9.96 seconds) who finished first and third, respectively, in the 2007 IAAF World Championships in Athletics were analyzed. Their data were compared to past data (Ito et al., 1998) in order to determine the characteristics of both sprinters. Maximal sprint running velocity was 11.85 m/s for Gay and 11.88 m/s for Powell. For Gay and Powell, step frequency was 4.90 and 4.96 steps/s, respectively, and step length was 2.42 and 2.40 m, respectively. According to Ito et al. (1998), sprint running velocity is not related to maximum thigh angle “high knee”, but the faster the sprint running velocity, the greater the minimum knee angle. The maximum thigh angle for Gay and Powell was comparable at 65° and 70°, and the minimum knee angle for Gay and Powell was 41° and 38°, respectively, and these numbers were similar to the data obtained by Ito et al. (1998). The horizontal distance from the toe at the point of landing to the center of gravity for the two sprinters was 0.31 m, and this number is comparable to that for sprinters who run 100 meters in 11 seconds (Fukuda and Ito, 2004). Therefore, it is not necessarily good to land immediately underneath the center of gravity when landing. In support leg movements, an interesting finding was seen with maximum knee extension velocity for Gay and Powell. During landing, the knee joint of both sprinters always remained bent, and when acceleration force was expressed during the later half of the support phase, the extension velocity had a negative value: -50 degrees/s for Gay and -68 degrees/s for Powell.

Training guidance that attempts to increase sprint running velocity by reducing the deceleration associated with landing must be reexamined because the landing distance for Gay and Powell is comparable to that of sprinters who run 100 m in 11 seconds. What is important here is that Gay and Powell continue to bend the knee of the support leg during the support phase, and training guidance that instructs sprinters to actively extend the knee and ankle joints of the support leg must be reevaluated.

## 1. Introduction

While the 100-m sprint is a simple sport, it requires athletes to compete by running at top speed, and the winner of the 100-m sprint receives the greatest accolades in track and field. In order to run the 100-m sprint with good results, fast reaction time after the start signal and acceleration

after the start are important, but the most important element is maximum sprint running velocity. World-class sprinters reach their maximum sprint running velocity in about 70-80 m (Ae and Ito, 1992), and the maximum sprint running velocity of sprinters who run 100 m in less than 10 seconds is  $\geq 11.8$  m/s (Ito et al., 1998). Fast sprint running

requires a strong body and efficient running movements.

In the present study, the running movements of Tyson Gay (9.85 seconds) and Asafa Powell (9.96 seconds) who finished first and third, respectively, in the 2007 IAAF World Championships in Athletics were analyzed while they were running at top speed in the final race. Their data were compared to past data (Ito et al., 1998) in order to determine the characteristics of both sprinters.

## 2. Methods

During the final race for the men's 100-m sprint event during the 2007 IAAF World Championships in Athletics, two high-speed video cameras (Phantom v4, Vision Research Inc, USA) were placed at the highest row of the spectator stands on the start line and on the finish line in order to capture Tyson Gay and Asafa Powell at the 60-m mark. The two cameras were synchronized and captured images at 100 Hz. Using motion analysis software (DKH, Tokyo, Japan), the two-dimensional coordinates of 24 body points were scanned at 100 fps, and the direct linear transformation method (DLT) was used to calculate three-dimensional coordinates where the x-axis was the direction of sprinting, the y-axis the vertical direction perpendicular to the ground, and the z-axis was the horizontal line parallel to the starting line. The error between calculated three-dimensional coordinates and the actual values of the calibration points in the x, y and z-axis directions was 0.005 m, 0.005 m and 0.005 m, respectively. The three-dimensional coordinates were subjected to smoothing at 7 Hz using the Butterworth method.

For comparison, data accumulated from men's 100-m sprint events in international competitions and official Japanese track and field meets were used. Of our previous data, the best sprint record was the 9.86 seconds that Carl Lewis ran at the 1991 IAAF World Championships in Athletics in Tokyo.

## 3. Results and Discussion

### Step frequency and step length

Sprint running velocity was determined based on the distance covered by the center of gravity over two steps, and sprint running velocity at the measurement point was 11.85 m/s for Gay and 11.88 m/s for Powell. Figure 1 shows the relationships among sprint running velocity, step frequency and step length. According to past data (Ito et al., 1998), the faster the sprint running velocity, the greater the step frequency and the larger the step length. For Gay and Powell, step frequency was 4.90 and 4.96 steps/s, respectively, and step length was 2.42 and 2.40 m, respectively, and these numbers mostly agreed with past data. Gay is 1.83 m tall and Powell is 1.90 m tall, and the step length to height ratio for Gay and Powell is 1.32 and 1.26, respectively. Hence, while Gay is a step-length type sprinter, Powell is a step-frequency type sprinter. When Carl Lewis set the world record of 9.86 seconds in 1991, step frequency was 4.67 steps/s, step length 2.53 m and step length-to-height ratio 1.35 (Ito et al., 1994).

### Recovery leg movements

Leg movements during the recovery phase when the support leg leaves the ground and then the leg is moved forward were analyzed in

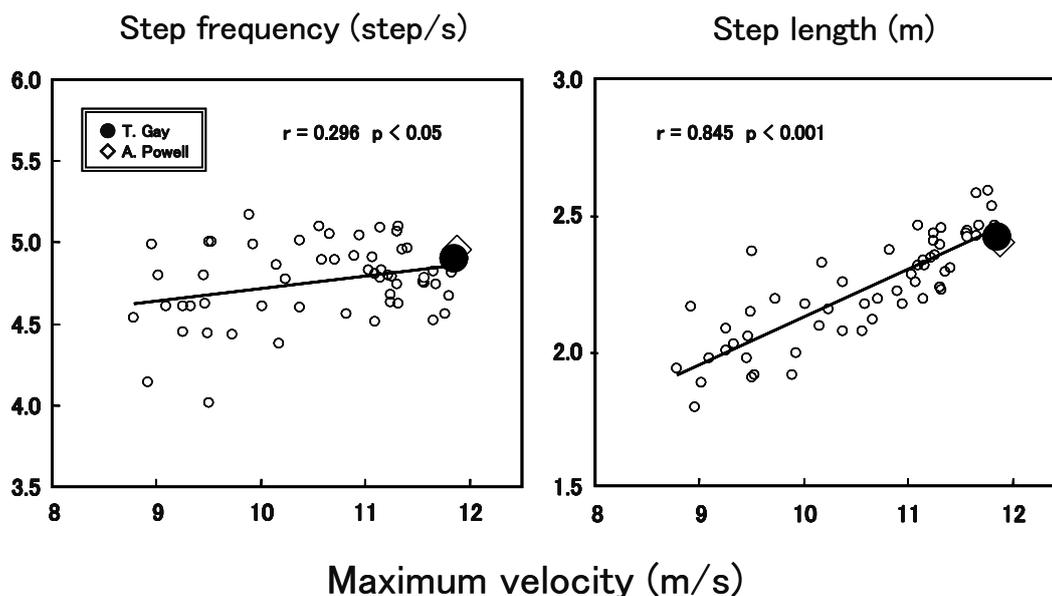


Figure 1. Relationships among sprint running velocity, step frequency and step length.

terms of maximum thigh angle (maximum angle formed by the thigh and the vertical line), minimum knee angle, and maximum leg angle (maximum angle formed by the vertical line and the line connecting the hip joint and the lateral malleolus) (Figure 2). According to Ito et al. (1998), sprint running velocity is not related to maximum thigh angle and maximum leg angle, but the faster the sprint running velocity, the greater the minimum knee angle. The maximum thigh angle for Gay and Powell was comparable at 65° and 70°, and these numbers were similar to the data obtained by Ito et al. (1998). The minimum knee angle for Gay and Powell was 41° and 38°, respectively, and these numbers were comparable to past data. The maximum leg angle for both sprinters was 34°, and this number was similar to the data obtained by Ito et al. (1998). Although the technique of the two sprinters appeared different to the naked eye, there were no

marked differences in the parameters measured in the present study. In other words, both sprinters moved their legs forward without excessively raising the thigh, thus resulting in relatively low knee height. The horizontal distance from the toe at the point of landing to the center of gravity (this relates to the maximum leg angle) for the two sprinters was 0.31 m, and this number is comparable to that for sprinters who run 100 meters in 11 seconds (Fukuda and Ito, 2004). Therefore, it is not necessarily good to land immediately underneath the center of gravity when landing.

#### Support leg movements

In the present study, the driving movements of the support leg were analyzed in terms of the maximum extension velocity of the hip, knee and ankle joints of the support leg during landing (Figure 3). Ito et al. (1998)

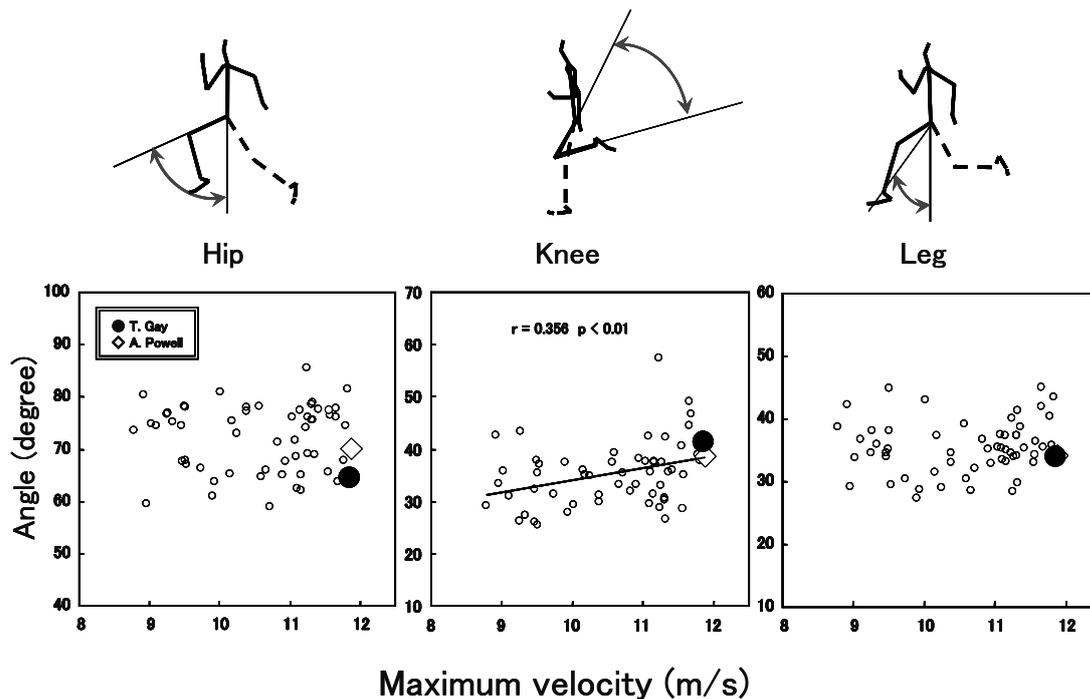


Figure 2 Relationships among sprint running velocity and recovery leg movements

reported that while fast sprinters exhibited fast hip extension and slow knee extension, the maximum ankle extension velocity did not correlate to sprint running velocity. However, an interesting finding was seen with maximum knee extension velocity for Gay and Powell. During landing, the knee joint of both sprinters always remained bent, and when acceleration force was expressed during the later half of the support phase, the extension velocity had a negative value: -50 degrees/s for Gay and -68 degrees/s for Powell. According to our unpublished data, Maurice Greene, the previous world record holder, exhibited the similar movement. The knee extension velocity for Lewis was almost zero (Ito et al., 1998), and the results of the present study suggest that sprint running technology has entered a new era. With regard to knee extension velocity, if the knee joint is fixed like Lewis, then 100% of hip extension can be transferred to drive

the leg in the posterior direction, but if the knee joint is bent like Gay and Powell, hip extension velocity is added to the leg, causing the drive velocity of the leg in the posterior direction to exceed 100%. Furthermore, with a driving movement where the knee joint is extended, hip extension velocity is absorbed by knee extension velocity, thus reducing the drive velocity of the leg in the posterior direction.

The maximum hip extension velocity for Gay and Powell was 774 and 693 degrees/s, and the maximum ankle extension velocity 664 and 743 degrees/s, respectively, and these values were mostly comparable to the data obtained by Ito et al. (1998).

#### 4. Guidance recommendations

The results of the present study show that Gay and Powell are world-class sprinters with different characteristics in terms of step

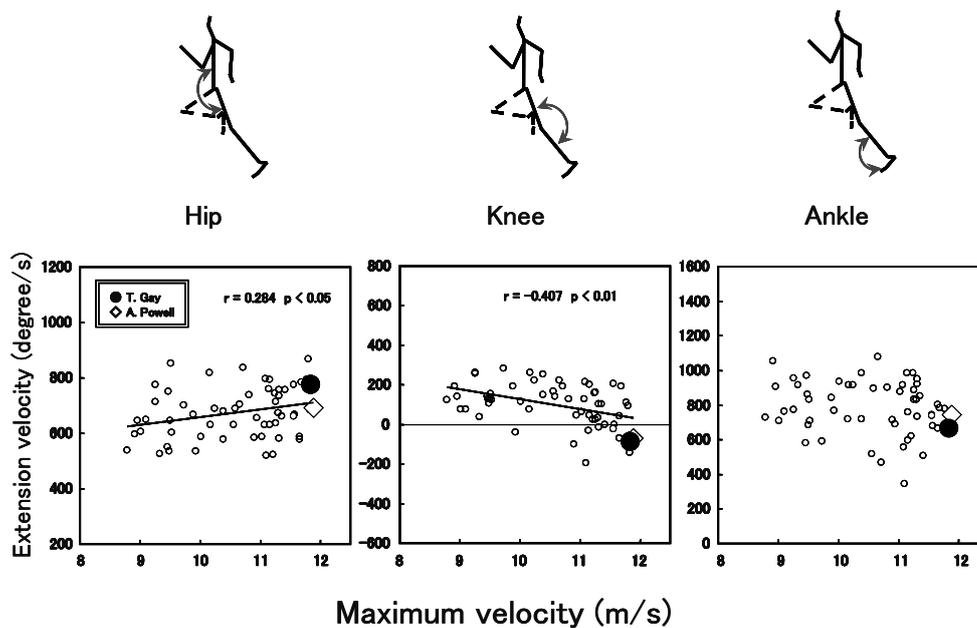


Figure 3 Relationships among sprint running velocity and support leg movements

length and step frequency, and suggest that caution must be exercised when strongly correcting step frequency and length.

Past studies have shown that the maximum ankle extension velocity is constant and is not related to sprint running velocity, and this suggests that so-called "snapping" movements are due to the spring-like properties of the muscle-tendon complex involving the triceps muscle of the calf and the Achilles tendon. In other words, athletes do not consciously extend the ankle, and guidance should take into account this point.

Training guidance that attempts to increase sprint running velocity by reducing the deceleration associated with landing must be reexamined because the landing distance for Gay and Powell is comparable to that of sprinters who run 100 m in 11 seconds. What is important here

is that Gay and Powell continue to bend the knee of the support leg during the support phase, and training guidance that instructs sprinters to actively extend the knee and ankle joints of the support leg must be reevaluated.

## References

- Ae, M and Ito, A. (1992). The men's 100 meters. *New Studies in Athletics*, 7(1), 47-52.
- Fukuda, K. and Ito, A. (2004). Relationship between sprint running velocity and changes in the horizontal velocity of the body's center of gravity during the foot contact phase. *Japan J. Phys. Educ.* 49, 29-39. In Japanese.
- Ito, A, Ichikawa, H., Saito, M., Sagawa, K., Ito, M. and Kobayashi, K. (1998). Relationship between sprint running movement and velocity at full speed phase during a 100 m race. *Japan J. Phys. Educ.* 43, 260-273. In Japanese.

## **Biomechanical analysis of the world's top distance runners of the 10,000 m final in the Osaka 2007 11th IAAF World Championships in Athletics**

Yasushi Enomoto<sup>1)</sup>, Hirotsuke Kadono<sup>2)</sup>, Yuta Suzuki<sup>2)</sup>, Tetsu Chiba<sup>1)</sup>, Keiji Koyama<sup>3)</sup>

1) Kyoto University of Education), 2) University of Tsukuba 3), Juntendo University

### **Abstract**

The purpose of this study was to reveal the biomechanical characteristics of running motion for the world's top distance runners in the men's 10000 m final at Osaka World Championships in Athletics. Bekele showed greater mean power and smaller effectiveness of mechanical energy utilization to running velocity, however increased in effectiveness at the latter of the race. Maximum, minimum and range of the thigh and shank angle showed the difference between the runners but did not change greatly throughout the race. Maximal thigh angular velocity of the recovery leg increased for Bekele, which might be critical motion for distance runners. The world's top distance runners showed a slight change of running motion and few fatigue symptoms. Even a distance runner must perform like a sprinter; it might be necessary to maintain high running speed during a race and spurt at the end. This is not only to utilize mechanical energy efficiently but also to generate more mechanical energy.

### **Introduction**

It is an important task for success in distance running to maintain running speed over an entire race distance, however it was not unusual in those races for the winner and second place to be separated by a second. Therefore race management became a very important factor. The gold medalist not only maintained a high running speed, but in the recent distance races of the World Championships and Olympic Games the champion used two highly effective strategies: (1) changing running speed intentionally throughout the race to cause rivals to waste energy; (2) spurring sharply on the last lap like a sprinter.

From an energetic view point, both the increase in energy generation and effective utilization of energy to running velocity would be critical factors

to performance of distance runners. Physiological studies have revealed the relationship of the physiological factors such as  $\dot{V}O_2\text{max}$ , lactate threshold and running economy to distance running performance. However, runners were evaluated by  $\dot{V}O_2\text{max}$  and running economy in running on a treadmill in a laboratory. Biomechanical study indicated the direct relationship of running motion to the performance in the race. Enomoto et al. (1997) suggested that the elite distance runners showed higher effectiveness of mechanical energy utilization to running velocity in a running cycle.

One of the most interesting factors about distance runners is how they sustain and manage to maintain running speed against fatigue. Elliot and Ackland (1981) showed a few kinematic

variables changing during the race as a result of fatigue. Williams et al. (1991) suggested that change in running motion due to fatigue is different by individuals. However, there are few studies about changes in running motion for the world's top distance runners during the race. A study analyzing the change in running motion during the race might give useful information about the running techniques of the world's top distance runners and a new insight into training for distance runners from biomechanical viewpoint.

The purpose of this study was to reveal the biomechanical characteristics of running motion for the world's top distance runners in the men's 10000 m final at Osaka World Championships in Athletics.

## Methods

We videotaped the runners at a fixed area on the backstretch in the men's 10000 m final in Osaka World Championships in Athletics using two digital video cameras (60 Hz) from side and front views of a runner. Another video camera was videotaped following the top group from the start to the goal to calculate the split time of each 100 m. The first place finisher of the race was Kenenisa Bekele (ETH) who is the world record holder of 10000 m, the second place finisher was Sileshi Sihine (ETH), the third place finisher was Martin Irungu Mathathi (KEN), whose height, body mass, best time of 10,000 m were 1.60 m, 54 kg, 26:17.53 for Bekele, 1.71 m, 55 kg, 26:39.69 for Sihine, 1.67 m, 52 kg, 27:08.42 for Mathathi, respectively. Running speed and step frequency were derived from the lap time of each 100 m and average time of a cycle (two steps) in each 100 m and step length was divided running speed by step frequency. Running motion of the top three

runners were analyzed during a running cycle at the 600 m (stage 1), 3800 m (stage 2), 6200 m (stage 3), 8200 m (stage 4) and 9400 m (stage 5) marks using the three-dimensional motion analysis technique. After calculation of three dimensional coordinates and smoothing the coordinate data using digital Butterworth filter, the center of gravity of the body, angles and angular velocities of the segments and joints of lower limbs, mechanical energy of whole body were calculated. Effectiveness index of mechanical energy utilization to running velocity was calculated by horizontal translational mechanical energy of the body divided by mechanical work in a cycle (Enomoto et al., 1997), which was calculated by sum of energy change of each segment in each time interval (Metzler et al., 2002).

## Results & Discussion

Table 1 shows the split and lap time for top three at each 1000 m during the race. Each 1000 m lap times from the start to 9000 m were almost same. There was a small difference between three runners in the last 1000 m, although no difference was found between them until the 9000 m mark. The goal time of the winner was the sixteenth fastest time (his season best time at that time) in 2007 despite the high temperature and humidity (30 degree, 65 %) in Osaka that night.

Figure 1 shows the running speed, step frequency and step length in each 400 m for the top three. Running speed of the top three was almost same until last three laps, while they suddenly sped up around 8800 m mark and time of the final lap were 55.51 s of Bekele, 58.66 s of Sihine and 62.16 s of Mathathi. Bekele was behind Mathathi and Sihine and

Table 1 Split and lap time at each 1000m in the race.

Distance	1. Kenenisa Bekele (ETH)		2. Sileshi Sihine (ETH)		3. Martin Irungu Mathathi (KEN)	
	Split time	Lap time	Split time	Lap time	Split time	Lap time
1000	2 : 44.36		2 : 44.53		2 : 45.38	
2000	5 : 27.61	2 : 43.25	5 : 27.79	2 : 43.26	5 : 28.19	2 : 42.81
3000	8 : 13.59	2 : 45.98	8 : 13.79	2 : 46.00	8 : 14.04	2 : 45.85
4000	10 : 58.21	2 : 44.61	10 : 58.36	2 : 44.56	10 : 58.36	2 : 44.31
5000	13 : 43.41	2 : 45.20	13 : 43.62	2 : 45.27	13 : 43.76	2 : 45.40
6000	16 : 29.22	2 : 45.82	16 : 29.39	2 : 45.77	16 : 29.52	2 : 45.77
7000	19 : 13.07	2 : 43.85	19 : 13.32	2 : 43.93	19 : 13.37	2 : 43.85
8000	21 : 55.20	2 : 42.13	21 : 55.42	2 : 42.10	21 : 55.53	2 : 42.16
9000	24 : 35.79	2 : 40.59	24 : 35.96	2 : 40.54	24 : 35.54	2 : 40.01
10000	27 : 05.90	2 : 30.11	27 : 09.03	2 : 33.07	27 : 12.17	2 : 36.63

seemed to exhaust energy before the final lap, but he sped up dramatically and left others behind. There was also no change in step frequency and step length until 9000 m. Elliot and Ackland (1981) showed that the decrease in running velocity caused by decrease in step length, while Williams et al. (1991) showed the increase in step length with fatigue eliminating an effect of running speed. Furthermore, the data of this race showed no significant change in the support time (average of right and left foot) during the race. It seems that the top three runners accomplished their best as if they were not fatigued throughout the race despite the hot muggy conditions.

Bekele showed small step frequency and large step length during the race, conversely Methathi showed large step frequency and small step length. Their average step lengths to body height during the race were 1.23, 1.13 and 1.13 for Bekele, Sihine and Mathathi, respectively. Bekele increased running speed by increasing in step frequency largely at the final lap. Correlation coefficients of running speed to step frequency and

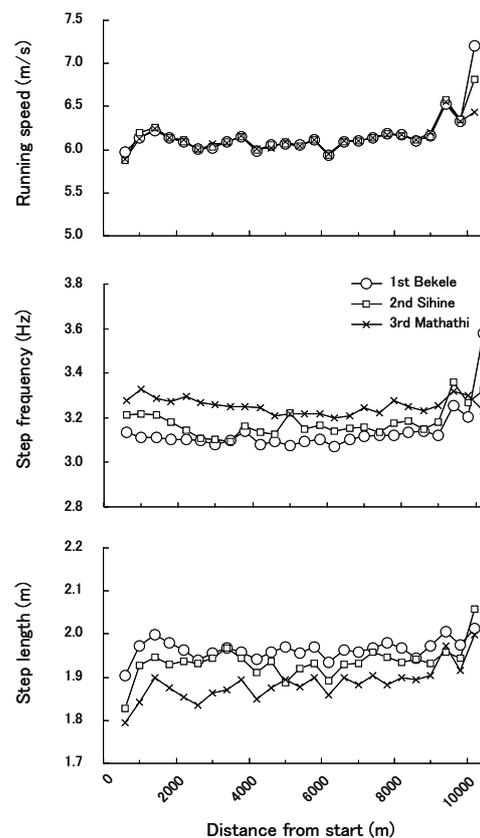


Figure 1 Running speed, step frequency and step length for top three in each 400 m during the race

step length were 0.904 and 0.662 for Bekele, 0.753 and 0.492 for Sihine, and 0.377 and 0.717 for Mathathi. These results suggested that Bekele could maintain large step length during the race and change in running speed by change in step frequency, especially at last spurt.

Figure 2 shows changes in the effectiveness index of mechanical energy utilization to running velocity (EI) and mechanical power which was calculated to divide mechanical work by cycle time of top three from stage 1 to 5. EI of Bekele was smaller than the others at stage 1, then increase at stage 3 and 5. EI of Sihine and Mathathi were greater than Bekele at stage 1, but Sihine decreased in EI from stage 4 to 5. Mathathi maintained EI through the race. Mean power of them doesn't show consistent change through the race. Bekele's mean power was greater than the others at stage 1 and 2. These results suggest that running

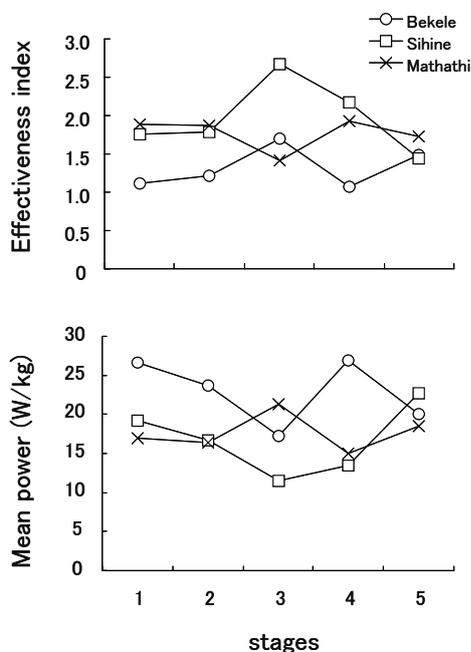


Figure 2 Changes in effectiveness index of mechanical energy and mean power of top three at each stage in the race.

motion of Bekele expended more energy but he can increased in effectiveness to maintain the running velocity and speed up at the end of the race. Mathathi may have good running technique to utilize mechanical energy effectively although he can not output more energy to speed up more at end of the race.

Figure 3 shows the changes in the maximal and minimum thigh and shank angles at each stage for the top three. Thigh and shank angle was defined as angle to the vertical (counter-clockwise is positive). Positive means swinging to the front of the body and negative means backward. The lengths of each bar indicate the range of motion of thigh and shank. The range of shank movement for Bekele was greater than the others, although the range of thigh movement for Mathathi was greater than the others from stage 1 to 5. All three runners showed minor changes in maximal and minimum angles of thigh and shank. Maximal thigh angle and the range of movement of the thigh for Mathathi gradually increased, while those of Bekele and Sihine didn't change. Maximal and minimum shank angles were maintained for Bekele but decreased for Sihine and Mathathi.

Figure 4 shows stick pictures of the top three runners at 8200 m mark (stage 4) in the race. Thin lines indicate the left side. Bekele shows that his shank was pulled up to the thigh greatly in early recovery phase with the consequence of the decrease in minimum knee angle, and then swung forward greatly before the foot strike.

Figure 5 shows changes in maximum thigh angular velocity (MTAV) of the top three runners at each stage in the race. At stage 1 and 2 Mathathi showed greater MTAV than the others. Bekele showed the increase in MTAV gradually

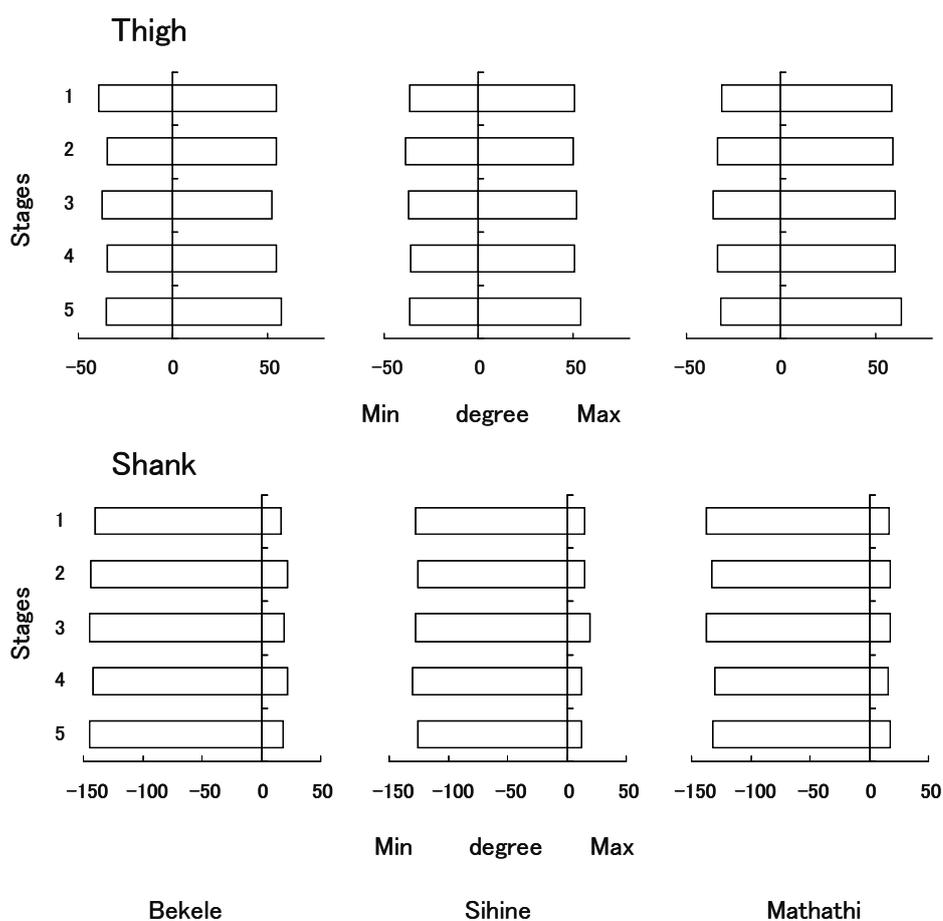


Figure 3 Maximum and minimum angles of the thigh and shank for the top three runners at each stage in the race.

from stage 1 to 4. These results imply that Bekele maintain the forward swing velocity of the thigh as a result of the control on the shank motion, which might be characteristic for Bekele. Enomoto and Ae (2005) suggested that Kenyan runners swung the thigh forward faster due to flexing the knee of the recovery leg greatly. These suggested that forward swing of thigh is an important motion for distance runners.

In conclusion, the world's top distance runners show a slight change of running motion and few fatigue symptoms. The characteristic of Bekele's running motion was greater shank motion, which would need to expend more mechanical energy.

Like a sprinters, it might be necessary for distance runners to maintain high running speed during a race and to spurt at the end of a race to not only utilize mechanical energy efficiently but also to generate more mechanical energy.

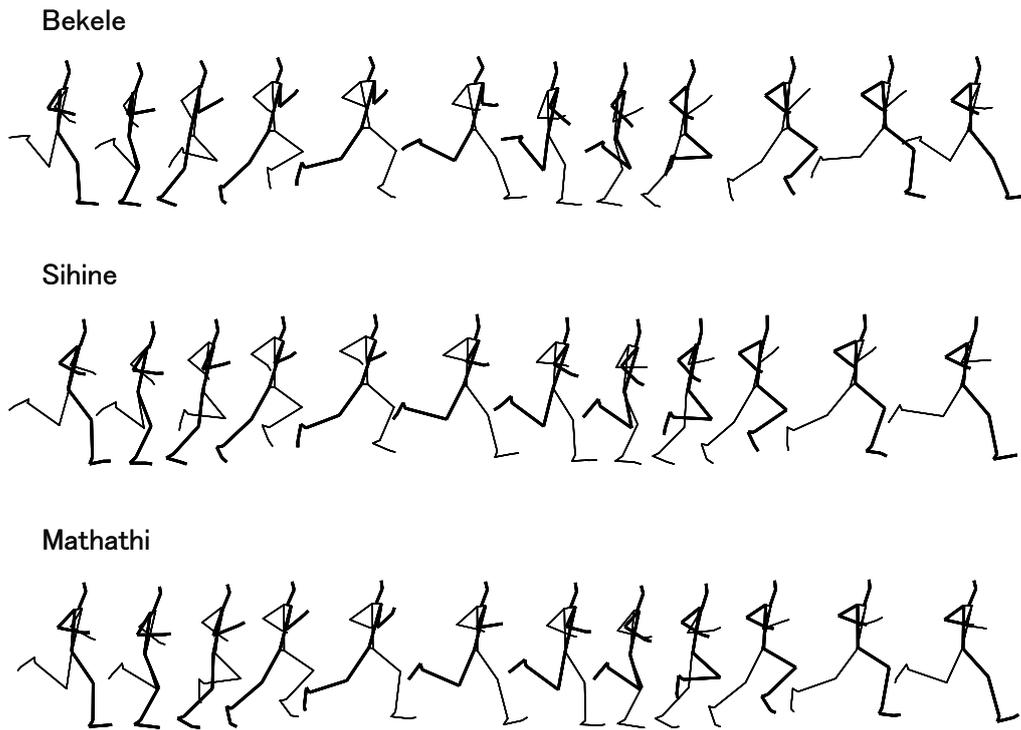


Figure 4 Stick pictures of the top three runners at 8200m mark (stage 4) in the race.

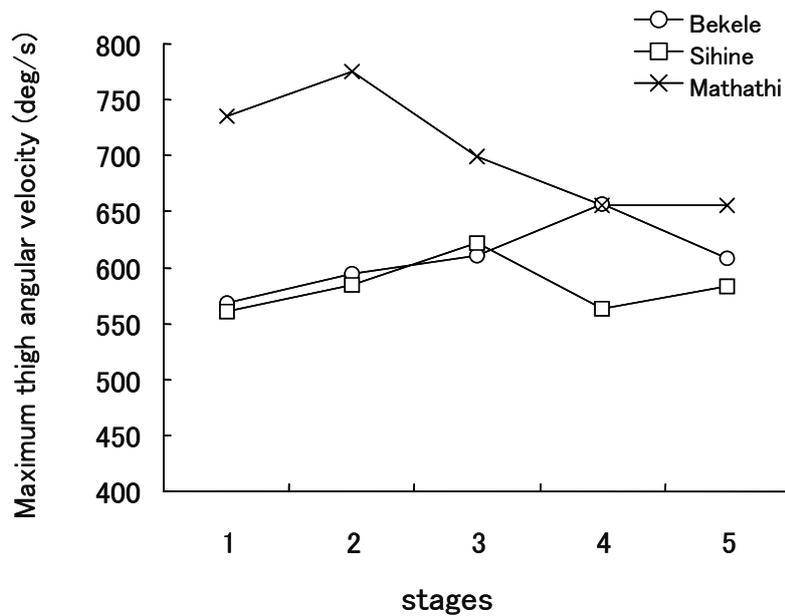


Figure 5 Change in maximum thigh angular velocity of top three runners at each stage in the race.

## References

Elliot B, Ackland T, Biomechanical effect of fatigue on 10000 meter running technique, *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 1981; 52 (2): 160-166.

Enomoto Y, Ae M, Fujii N, Okada H, Running technique in long distance running and the effectiveness of mechanical energy utilization, *Japanese Journal of Biomechanics in Sports and Exercise*, 1997; 3 (1): 12-19.

Enomoto Y, Ae M, A biomechanical comparison of Kenyan and Japanese elite long distance runner's techniques, *Book of abstract XXth Congress of the International Society of Biomechanics*. No.852, 2005.

Williams KR, Snow R, Agruss R, Changes in distance running kinematics with fatigue, *International Journal of Sport Biomechanics*, 1991; 7: 138-162.

Metzler V, Arampatzis A, Brüggeman GP, Influence of 2D and 3D body segment models on energy calculations during kinematic analysis of running, *European Journal of Applied Physiology*, 2002; 86: 337-341.

# **Biomechanical analysis of the men's and women's long jump at the 11th IAAF World Championships in Athletics, OSAKA 2007: A brief report**

Hiroyuki Koyama <sup>1)</sup>, Michiyoshi Ae <sup>1)</sup>, Yuya Muraki <sup>2)</sup>, Aya Yoshihara <sup>1)</sup>, and Kazuhito Shibayama <sup>1)</sup>

1) University of Tsukuba, 2) Osaka University of Health and Sports Science

## **Abstract**

The men's and women's long jumpers at the 11th IAAF World Athletic Championships in Osaka were three-dimensionally analyzed in the preparatory, takeoff, airborne, and landing phases. The purpose of this brief report was to investigate kinematics of the top three long jumpers in Osaka 2007. The results on the preparatory phase indicated that the investigated jumpers increased the run-up speed until the 2<sup>nd</sup> last stride, and lowered their C.G. in the airborne phase of the 2<sup>nd</sup> last stride by lengthening the airborne time.

An interesting observation was the lateral foot placement in the 2<sup>nd</sup> last stride and last stride, and an inward-inclined takeoff leg in the takeoff phase in the frontal plane, which induced effective use of the hip abductors of the takeoff leg to enhance the vertical velocity during the takeoff, as similar to the high jump (Okuyama *et al.*, 2003)..

## **1. Introduction**

The finals of the men's and women's long jump at the 11<sup>th</sup> IAAF World Championships in Athletics Osaka were held in 30<sup>th</sup> August and 28<sup>th</sup> August, respectively. The men's winner, Irvine Saladino (PAN) marked his personal best and new African record of 8.57 m. In the women's final, only Tatyana Lebedeva (RUS) jumped over 7.0 m, followed by Lyudmila Kolchanova (RUS) and Tatyana Kotova (RUS). The current world record of the men's long jump was 8.95 m, marked by Mike Powel (USA) at the 3<sup>rd</sup> World Championships in Athletics Tokyo, 1991. In this game, Carl Lewis

(USA) also jumped over 8.90 m, the previous world record by Bob Beamon. These jumps were studied by the biomechanical research project team organized by International Association of Athletic Federations and Japan Association of Athletic Federations. The report of this project provided findings for improving the performance, for example, the run-up speed of Powel and Lewis at the touchdown of the takeoff was over 11.0 m/s, and that of the other finalists was approximately 10.4 m/s; the less knee flexion of the takeoff leg was a very important factor to gain the vertical velocity during the takeoff (Fukashiro *et al.*, 1994).

At the 11<sup>th</sup> World Athletic Championships in Osaka, the biomechanics research project was also organized by International Association of Athletic Federations and Japan Association of Athletic Federations, and videotaped the qualifications and finals of the men's and women's long jump to obtain biomechanical information of the elite athletes and to provide coaches and athletes with findings to improve their performance.

The purpose of this brief paper was to report kinematics data of the top three men and women long jumpers in Osaka, 2007.

## 2. Methods

### 2.1 Analyzed jumps

Tables 1 and 2 show the characteristics of the top three men and women long jumpers, which were analyzed in this report.

### 2.2 Data collection and reduction

The men's and women's long jumpers qualified for the finals of the long jump were videotaped with two high-speed video cameras (250 Hz) and two digital video cameras (60 Hz) placed on the top row of the stadium. The two high-speed video cameras covered the 2<sup>nd</sup> last stride, last stride and takeoff, and the normal digital video cameras videotaped the airborne and landing motions. A calibration pole with seven control points was set at the fourteen locations over the videotaping area to reconstruct the real coordinates of the jumpers' segment endpoints.

Three-dimensional coordinates of twenty-three segment endpoints were reconstructed by using a three-dimensional direct linear transformation (3D-DLT) method, and were smoothed with a Butterworth low-pass digital filter at optimal cut-off frequencies determined by residual analysis, 4.8 to 8.4 Hz.

Table 1. Characteristics of the top three jumpers in the Men's final

Rank	Name	Nation	Height (m)	Weight (kg)	Personal best (m)	Result	Analyzed jump
1	Irving SALADINO	PAN	1.76	70	8.56	6th 8.57 (+0.0)	6th 8.57 (+0.0)
2	Andrew HOWE	ITA	1.84	73	8.41	6th 8.47 (-0.2)	6th 8.47 (-0.2)
3	Dwight PHILLIPS	USA	1.81	81	8.6	1st 8.30 (+0.4)	1st 8.30 (+0.4)

Table 2. Characteristics of the top three jumpers in the Women's final

Rank	Name	Nation	Height (m)	Weight (kg)	Personal best (m)	Result	Analyzed jump
1	Tatyana LEBEDEVA	RUS	1.73	63	7.33	3rd 7.03 (+0.3)	3rd 7.03 (+0.3)
2	Lyudmila KOLCHANOVA	RUS	-	-	7.21	6th 6.92 (-0.3)	6th 6.92 (-0.3)
3	Tatyana KOTOVA	RUS	1.78	57	7.42	6th 6.90 (+0.5)	6th 6.90 (+0.5)

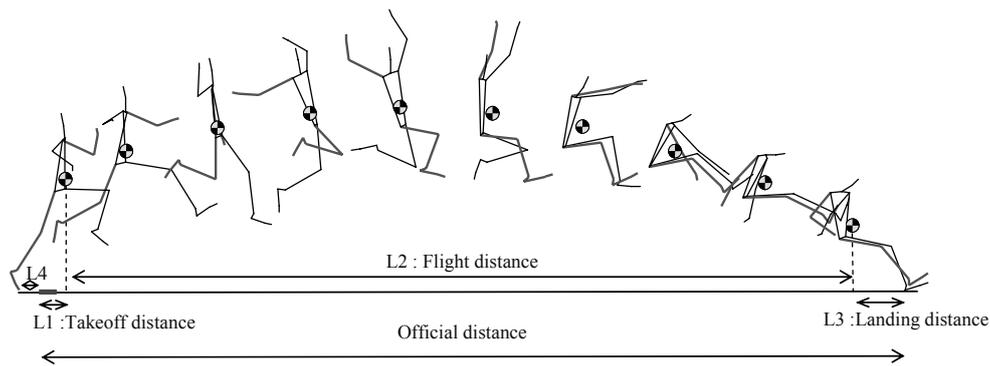


Figure 1. Definitions of components of jumping distance of the long jump

The official distance was divided into three lesser distances, which were takeoff distance, flight distance and landing distance, as shown in Figure 1.

The takeoff distance (L1) is the horizontal distance between the front edge of the takeoff board and the center of gravity (C.G.) of the body at the instant of the toe-off. The flight distance (L2) is the horizontal distance that the C.G. travels while the athlete is in the air. The landing distance (L3) is the horizontal distance between the C.G. at the instant the heels hit the sand and the ultimate mark in the sand made by the jumper. Toe-to-board distance (L4), which is the horizontal distance between the toe of the takeoff foot and the front edge of the board at the instance of the toe-off of the takeoff, was calculated as an indicator of the accuracy of the takeoff.

The C.G., joint angles of the takeoff leg, hip and shoulder rotation angles, and trunk angle were calculated. The leg angle between the line connecting the hip to ankle joint of the takeoff leg and horizontal line was calculated in the sagittal and frontal planes.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 Men's Final

##### 3.1.1 Performance descriptors

Table 3 shows the competition result of the men's long jump. Table 4 shows components of jumping distance of the long jump. The toe-to-board distance of the top three jumpers were ranging from 1.0 to 3.0 cm, which indicated that the run-up accuracy of the best jump was quite good in these jumpers. The takeoff distance (L1) was approximately 0.40 m and the percentage of that to the total distance was about 5.0 %, and the contribution of the flight distance (L2) to the official distance was over 90 % (91.0~91.8 %). These results were similar to the previous report of the elite male long jumpers by Hay (1986). The flight distance of Saladino was 7.80 m (91.0 %) and longer than those of Howe (7.70 m) and Phillips (7.62 m), and the landing distances of the top three finalists were 0.39 m for Saladino, 0.36 m for Howe, and 0.26 m for Phillips, respectively. These distances were smaller than those of the finalist at the World Championship in TOKYO 1991

Table 3. Results of the final of the men's long jump

RANK	NAME	NAT	RESULT	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
1	Irving SALADINO	PAN	<b>8.57</b>	x 1.1m/s	8.30 0.5m/s	8.46 0.0m/s	x 0.0m/s	x -0.3m/s	<b>8.57</b> <b>0.0m/s</b>
2	Andrew HOWE	ITA	<b>8.47</b>	x 1.1m/s	8.13 -0.1m/s	x 0.2m/s	8.12 0.7m/s	8.20 0.2m/s	<b>8.47</b> <b>-0.2m/s</b>
3	Dwight PHILLIPS	USA	<b>8.30</b>	<b>8.30</b> <b>0.4m/s</b>	x 0.0m/s	x -0.1m/s	8.02 0.3m/s	x 0.1m/s	8.22 0.0m/s
4	Olexiy LUKASHEVYCH	UKR	<b>8.25</b>	x 0.0m/s	8.17 0.4m/s	x 0.5m/s	8.05 0.7m/s	8.13 0.4m/s	<b>8.25</b> <b>0.2m/s</b>
5	Godfrey Khotso MOKOENA	RSA	<b>8.19</b>	7.98 0.2m/s	7.86 -0.1m/s	<b>8.19</b> <b>0.4m/s</b>	8.18 0.7m/s	8.15 0.0m/s	<b>8.19</b> <b>-0.1m/s</b>
6	James BECKFORD	JAM	<b>8.17</b>	8.09 0.3m/s	8.03 0.6m/s	8.03 0.6m/s	<b>8.17</b> <b>0.0m/s</b>	8.17 0.1m/s	x 0.0m/s
7	Ndiss Kaba BADJI	SEN	<b>8.01</b>	7.90 0.6m/s	<b>8.01</b> <b>0.1m/s</b>	x -0.1m/s	7.90 0.4m/s	x 0.0m/s	7.64 0.1m/s
8	Ahmed Faiz BIN MARZOUQ	KSA	<b>7.98</b>	x 0.8m/s	<b>7.98</b> <b>0.0m/s</b>	7.70 -0.3m/s	x 0.4m/s	-	x 0.1m/s

Table 4. Distances within the long jump - Men's final

Parameter	Saladino	Howe	Phillips	1991 Tokyo World Championship*
Official dist. (m) (L1+L2+L3)	8.57	8.47	8.30	8.15±0.17
Takeoff dist. (L1) (m) (%)	0.39 (4.5)	0.41 (4.8)	0.42 (5.1)	-
Flight dist. (L2) (m) (%)	7.80 (91.0)	7.70 (91.0)	7.62 (91.8)	-
Landing dist. (L3) (m) (%)	0.39 (4.5)	0.36 (4.2)	0.26 (3.1)	0.47±0.09
Toe-to Board dist. (L4) (m)	0.01	0.03	0.01	-
Heel displacement @ landing (L5) (m)	8.69	8.48	8.52	-
Loss dist. by landing (m)	0.12	0.01	0.22	-
Actual jump dist. (L4+L5) (m)	8.70	8.51	8.53	-

\* Fukushima *et al.* (1994)

(0.47±0.09 m). The shorter landing distance in this final seems to result from their landing motion. The data of this study indicated that the apparent landing distance, the horizontal distance between the C.G. and the heel at the instant of heel landing in the sand, was 0.51 m for Saladino and 0.48 m for Phillips, and these values were similar to that of the

previous report of Tokyo. The mark of the heel of Phillips made in the sand was 8.53 m and further than that of Howe (8.51 m), indicating Phillips had a large loss of the distance by poor avoiding motion after landing.

### 3.1.2 Velocity of the C.G.

Table 5 shows the horizontal and vertical velocities of the 2<sup>nd</sup> last stride, last stride and takeoff phases and takeoff angle. The run-up speed of the 2<sup>nd</sup> last stride was 10.65 m/s for Saladino, 10.99 m/s for Howe, and 11.01 m/s for Phillips, and then the speed decreased toward the takeoff. The data indicated that although Phillips reached the largest run-up speed at the touchdown of the 2<sup>nd</sup> last stride in the top three, the decrease in the speed from the 2<sup>nd</sup> last stride to the takeoff was the largest (-0.63 m/s), resulting in the smallest horizontal velocity at the touchdown of the takeoff (Saladino, 10.52 m/s; Howe, 10.87 m/s; Phillips, 10.38 m/s). Contrary, the decrease in the run-up speed for Saladino and Howe were smaller, -0.13 m/s for Saladino and

0.12 m/s for Howe, implying that their preparation for the takeoff were superior to Phillips's one.

The horizontal velocity at the touchdown for the top three was similar to the average of the reports on World Championship in Tokyo and Athens (Fukashiro *et al.*, 1994; Arampatzis *et al.*, 1999), with exception of M. Powel (11.00 m/s) and C. Lewis (11.06 m/s). The data represented that the horizontal velocity at the toe-off for Saladino was the smallest of the three, but his vertical toe-off velocity was the largest and contributed to gain the longest flight distance of the three. It is interesting that although the decreases in the horizontal velocity for Saladino and Howe were approximately same (Saladino, -1.63 m/s; Howe, -1.61 m/s), the gained vertical velocity was very different (Saladino, 3.75

Table 5. Horizontal and vertical velocities of the center of gravity (C.G.) of athletes and takeoff angle - Men's final

Parameter	I. SALADINO	A. HOWE	D. PHILLIPS	1991 TOKYO WC*			1997 Athens WC**
				M. POWEL	C. LEWIS	Other Athletes	
Official distance	8.57	8.47	8.30	8.95	8.91	8.15±0.17	8.11±0.18
Horizontal vel. (m/s)							
HV <sub>TDL2</sub>	10.65	10.99	11.01	-	-	-	-
HV <sub>TDL1</sub>	10.53	10.89	10.94	-	-	-	-
HV <sub>TD</sub>	10.52	10.87	10.38	11.00	11.06	10.39±0.14	10.65±0.19
HV <sub>MKF</sub>	9.23	9.56	8.97	-	-	-	-
HV <sub>TO</sub>	8.90	9.26	8.96	9.09	9.72	8.80±0.12	8.77±0.22
ΔHV <sub>TD-TO</sub>	-1.63	-1.61	-1.41	-1.91	-1.34	-1.59±0.10	-1.88±0.32
Vertical vel. (m/s)							
VV <sub>TD</sub>	-0.28	-0.46	-0.06	-	-	-	-
VV <sub>MKF</sub>	2.61	2.42	2.70	-	-	-	-
VV <sub>TO</sub>	3.75	3.46	3.67	3.70	3.22	3.44±0.19	3.42±0.26
VV <sub>MKF</sub> /VV <sub>TO</sub> (%)	69.6	69.9	73.5	-	-	-	-
Takeoff angle (deg)							
Y-Z plane	22.9	20.5	22.3	22.1	18.3	21.4±1.5	21.3±1.5
X-Y plane	1.9	-2.5	0.5	-1.4	3.3	1.6±1.4	-

\* Fukashiro *et al.* (1994) \*\* Arampatzis *et al.* (1999)

m/s; Howe, 3.46 m/s), indicating that the velocity conversion technique from the horizontal to the vertical for Saladino was superior to Howe.

### 3.1.3 Pathway of the C.G.

Figure 2 shows pathways of the C.G. from the 2<sup>nd</sup> last stride to the takeoff for the three jumpers. The long jumpers lower the C.G. in the final stage of the run-up to make the body prepared to obtain the vertical velocity during the takeoff phase (Hay, 1986). The top three jumpers gradually lowered the C.G. from the 2<sup>nd</sup> last stride to the instant of the takeoff foot touchdown. The largest decrease in the C.G. height was achieved in the airborne phase of the 2<sup>nd</sup> last stride, which were 6.3 cm for Saladino, 8.6 cm for Howe, and 9.1 cm for Phillips.

The phase time analysis indicated that the support time of the 2<sup>nd</sup> last stride was shorter and airborne time was longer, compared with the 3<sup>rd</sup> last stride. These data confirmed that the top three finalists changed the running motion and prepared for the takeoff during the support phase of the 2<sup>nd</sup> last stride.

There were remarkable differences in the technique of lowering the C.G. during the last stride among the three athletes. Phillips continued lowering of the C.G. until the toe-off of the last stride. However, Saladino and Howe took off, raising the C.G. slightly during the second half of the support phase. It should be worthy to note that although Phillips's large decrease in the C.G. height led the low position at the touchdown of the takeoff, his decrease in the horizontal velocity from the 2<sup>nd</sup> last

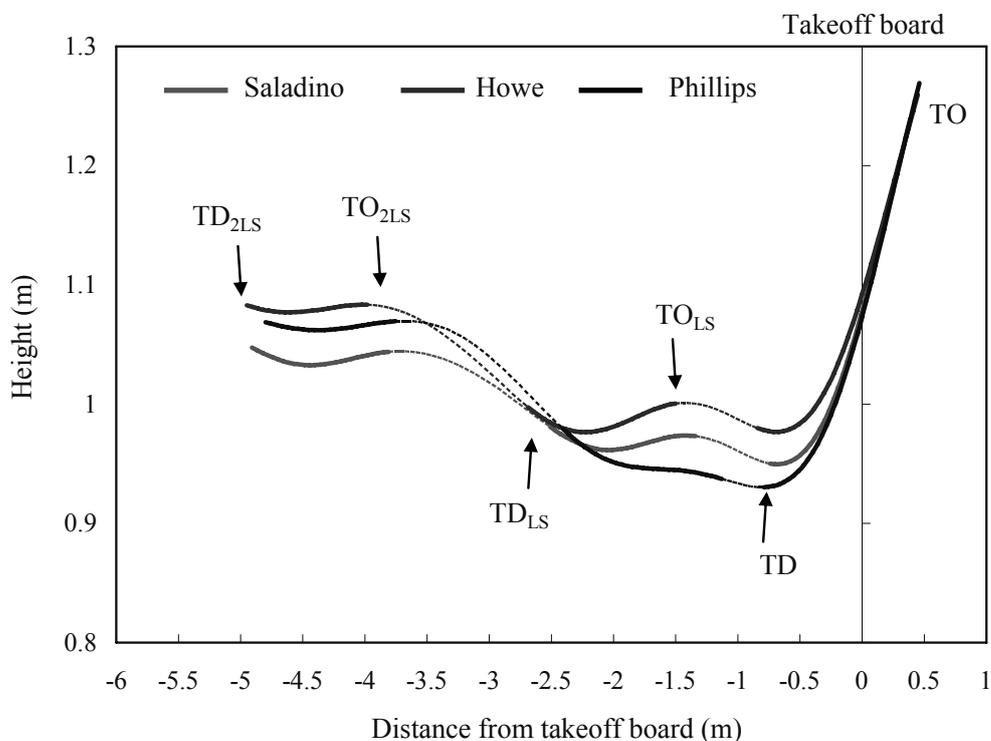
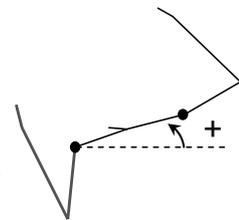


Figure 2. Pathway of the center of gravity of the body from the touchdown (TD) of the 2<sup>nd</sup> last stride to the toe-off (TO) of the takeoff.

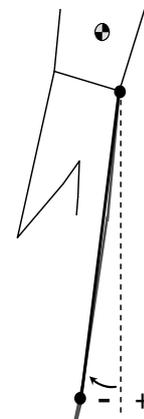
Table 6. Joint angles of the takeoff leg, trunk angle, hip and shoulder rotation angles, and leg angles at the touchdown (TD) and toe-off (TO) of the takeoff

Parameter	Saladino	Howe	Phillips	1991 Tokyo World Championship*
Knee <sub>TD</sub> (deg)	160.2	160.2	165.4	166.7±3.5
Knee <sub>MKF</sub> (deg)	143.2	140.7	138.4	145.6±5.3
Knee <sub>TO</sub> (deg)	168.4	165.2	159.8	172.0±2.3
Flex. / Ext. (deg)	-17.1 / 25.2	-19.4 / 24.5	-27.0 / 21.5	-21.1±4.3 / 26.4±4.8
Maximum Knee Flex. Vel. (deg/s)	-423.2	-452.8	-570.7	
Trunk - Sagittal plane <sub>TD</sub> (deg)	-2.3	-2.1	-10.1	-4.4±3.9
Trunk - Sagittal plane <sub>TO</sub> (deg)	5.6	8.0	7.3	5.8±3.7
Shoulder rotation TD (deg)	32.6	14.9	17.8	20.6±5.3
Shoulder rotation TO (deg)	-0.5	-18.6	-13.5	-10.3±8.0
Hip rotation TD (deg)	1.1	-12.6	-5.8	-9.0±4.9
Hip rotation TO (deg)	39.1	21.9	17.8	17.0±10.1
Twist angle (deg)	71.2	68.0	54.9	56.9±10.6
Leg angle Sagittal plane <sub>TD</sub> (deg)	37.3	36.1	37.2	-
Leg angle Sagittal plane <sub>TO</sub> (deg)	-25.3	-31.0	-28.3	-
Leg angle Frontal plane <sub>TD</sub> (deg)	-2.6	-4.7	-1.3	-
Leg angle Frontal plane <sub>TO</sub> (deg)	-5.1	-5.7	-7.1	-

Rotation angle (shoulder)



Leg angle (sagittal plan)



\* Fukashiro *et al.* (1994)

stride to the takeoff was the largest of the three (Phillips, -0.63 m/s; Saladino, -0.13 m/s; Howe, -0.12 m/s).

### 3.1.4 Joint and leg angles during the takeoff phase

Table 6 shows angles of the takeoff leg joints, trunk, hip and shoulder rotation at the touchdown and toe-off of the takeoff phase. Figure 3 shows the overhead views of the pathways of the C.G from the 2<sup>nd</sup> last stride to the takeoff and the footprint of each support phase.

The results on the knee joint indicated that the

knee flexion and the maximum knee flexion velocity for Saladino were the smallest. Fukashiro *et al.* (1994) reported that the less knee flexion of the takeoff leg was a crucial factor to enhance the vertical velocity during the takeoff. The result of this final and previous report of Tokyo confirm that the less flexed takeoff leg helps to gain the vertical velocity in the takeoff phase.

The hip rotation angles at the touchdown and toe-off of the takeoff phase were 1.1° and 39.1° for Saladino, -12.6° and 21.9° for Howe, and -5.8° and 17.8° for Phillips. The range of the hip rotation was 38.0° for Saladino, 33.5° for Howe, and 23.6° for

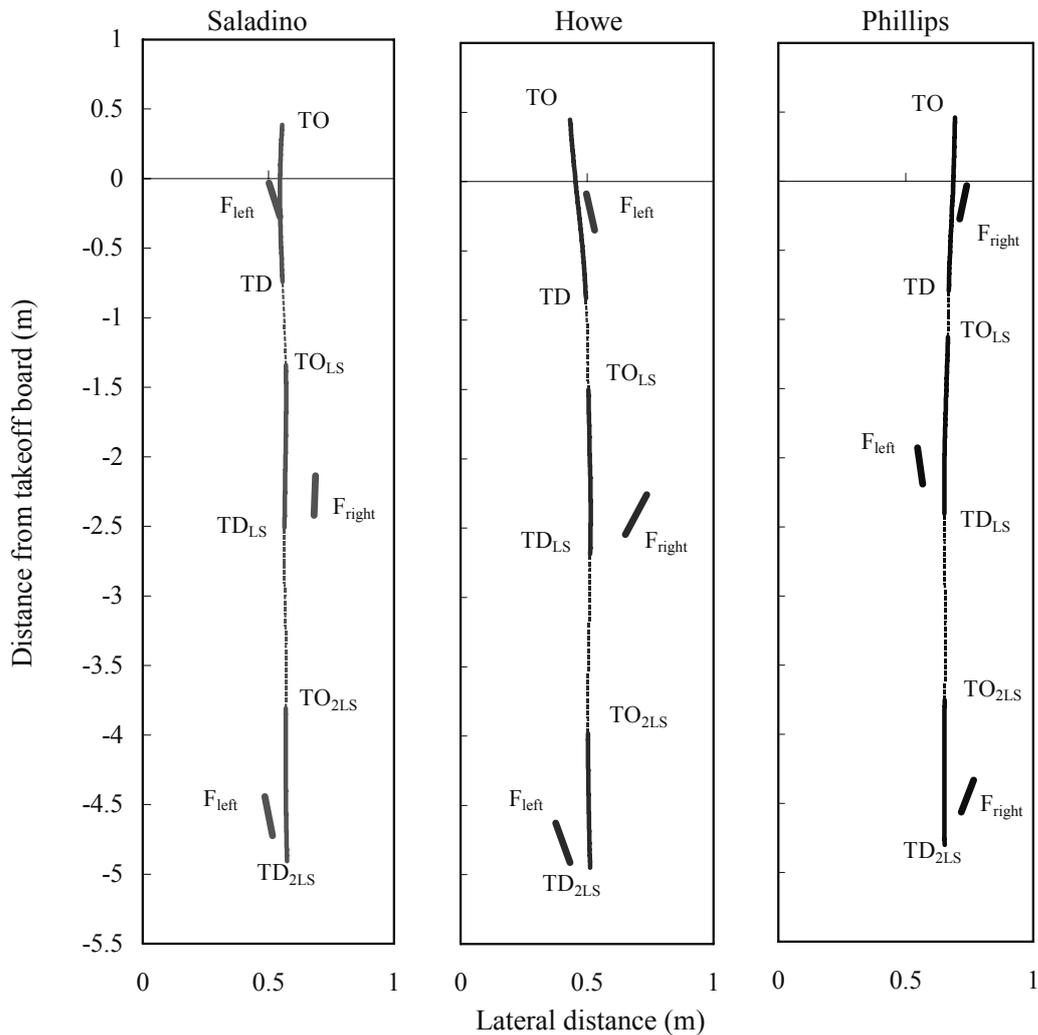


Figure 3. Overhead views of paths of the center of gravity of the body from the 2<sup>nd</sup> last stride to the takeoff and footprint of each support phase.

Phillips. These results indicated that the top three jumper rotated the hip of the lead leg forward in the swing of the lead leg during the takeoff, and the hip forward rotation of Saladino was the largest of the three. The previous report of Tokyo indicated that the range of the twist of the hip and shoulder during the takeoff positively correlated with the jump distance ( $r=0.86$ ), and that of Powel and Lewis was 74° and 70°, respectively. As shown in table 6, the twist range of Saladino and Howe was 71.1° and

68.0° and similar to that of Powel and Lewis. The results of this study and previous report indicated that the twist of the hip and shoulder was an important motion during the takeoff phase to obtain the jumping distance. The leg angle (hip-ankle) in the frontal plane at the touchdown of the takeoff was -2.6° for Saladino, -4.7° for Howe, and -1.3° for Phillips, respectively., which indicated that the top three jumpers slightly inclined the takeoff leg inward at the touchdown of the takeoff. As shown in

Figure 3, although the top three placed their support foot in the lateral position at the 2<sup>nd</sup> last and last strides, they placed their takeoff foot nearly under the C.G in the takeoff phase. Especially Howe's takeoff foot was placed in much medial position to the C.G during the takeoff phase. These results indicated that these jumpers placed their takeoff foot in the medial side, which resulted in a slight inward lean of the takeoff leg during the takeoff phase. Okuyama *et al.* (2003) suggested that the use of the hip abductors of the inward inclined takeoff leg in the high jump was an important factor to enhance the vertical velocity during the takeoff. The behavior of takeoff leg of the top three jumpers with the previous study (Okuyama *et al.*, 2003) imply that the elite long jumpers may have used their hip abductors of the takeoff leg to gain the vertical

velocity during the takeoff phase.

### 3.2 Women's final

#### 3.2.1 Performance descriptors

Table 7 shows the competition result of the women's long jump. Table 8 shows components of jumping distance of the long jump. Lebedeva marked the longest actual jump distance of the top three (7.08 m). The second longest actual jump was marked by the 3<sup>rd</sup> jumper, Kotova, and her jump was 10 cm longer than Kolchanova (Kotova, 7.05 m; Kolchanova, 6.95m). The distance results indicated that Kolchanova's second position may have attributed to the accuracy of the takeoff foot placement and landing. The landing distance of the top three was longer than that of the men's finalists.

Table 7. Results of the final of the woen's long jump

RANK	NAME	NAT	RESULT	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
1	Tatyana LEBEDEVA	RUS	<b>7.03</b>	6.73 -0.7m/s	<b>7.03</b> <b>0.7m/s</b>	<b>7.03</b> <b>0.3m/s</b>	x 0.7m/s	6.98 0.1m/s	-
2	Lyudmila KOLCHANOVA	RUS	<b>6.92</b>	x -0.2m/s	6.84 0.4m/s	x -0.1m/s	6.71 0.7m/s	6.63 1.0m/s	<b>6.92</b> <b>-0.3m/s</b>
3	Tatyana KOTOVA	RUS	<b>6.90</b>	6.80 -0.6m/s	x 0.0m/s	6.75 1.0m/s	6.70 0.7m/s	x 2.7m/s	<b>6.90</b> <b>0.5m/s</b>
4	Natide GOMES	POR	<b>6.87</b>	<b>6.87</b> <b>0.7m/s</b>	6.75 0.3m/s	6.61 -0.5m/s	6.86 0.9m/s	6.85 0.4m/s	6.80 -0.3m/s
5	Bianca KAPPLER	GER	<b>6.81</b>	<b>6.81</b> <b>-0.7m/s</b>	6.66 0.5m/s	6.78 0.3m/s	6.55 -0.4m/s	x 0.6m/s	6.49 1.0m/s
6	Maurren Higa MAGGI	BRA	<b>6.80</b>	6.41 -2.1m/s	6.64 0.7m/s	6.73 0.1m/s	<b>6.80</b> <b>1.2m/s</b>	6.62 0.4m/s	6.76 -0.2m/s
7	Keila COSTA	BRA	<b>6.69</b>	<b>6.69</b> <b>0.0m/s</b>	6.44 -1.1m/s	6.66 0.2m/s	6.66 -0.5m/s	x 1.9m/s	6.61 1.1m/s
8	Brittney REESE	USA	<b>6.60</b>	x 0.1m/s	<b>6.60</b> <b>-1.5m/s</b>	6.58 -0.3m/s	x 0.7m/s	x 0.8m/s	6.29 -0.3m/s

Table 8. Distances within the long jump - Women's final

Parameter	Lebedeva	Kolchanova	Kotova
Official dist. (m) (L1+L2+L3)	7.03	6.92	6.90
Takeoff dist. (L1) (m) (%)	0.31 (4.4)	0.34 (5.0)	0.34 (5.0)
Flight dist. (L2) (m) (%)	6.20 (88.2)	6.12 (88.5)	6.07 (88.0)
Landing dist. (L3) (m) (%)	0.52 (7.4)	0.46 (6.6)	0.49 (7.1)
Toe-to Board dist. (L4) (m)	0.05	0.00	0.06
Heel displacement @ landing (L5) (m)	7.03	6.95	6.99
Loss dist. by landing (m)	0.00	0.03	0.09
Actual jump dist. (L4+L5) (m)	7.08	6.95	7.05

### 3.2.2 Velocity of the C.G.

Table 9 shows the horizontal and vertical velocities of the C.G of the 2<sup>nd</sup> last stride, last stride and takeoff phases and takeoff angle. The run-up speed of the 2<sup>nd</sup> last stride was 9.52 m/s for Lebedeva, 9.23 m/s for Kolchanova, and 9.12 m/s for Kotova, and then slightly decreased until the touchdown of the takeoff, resulting in the 9.37 m/s for Lebedeva, 9.13 m/s for Kolchanova, and 9.08 m/s Kotova at the touchdown of the takeoff. The horizontal velocity at the toe-off for Lebedeva and Kolchanova was same (7.73 m/s). However, there was significant differences in the vertical toe-off velocity between these top two athletes (Lebedeva, 3.50 m/s; Kolchanova, 3.23m/s), indicating that Lebedeva's longer jump resulted from larger gain of the vertical velocity during the takeoff. Kotova's jump was very different from other two. The horizontal velocity at the toe-off was the largest of

the three (8.14 m/s) because of the much less decrease in the horizontal velocity during the takeoff (Kotova, -0.94 m/s; Lebedeva, -1.64 m/s; Kolchanova, -1.40 m/s), and her toe-off vertical velocity was the smallest (3.18 m/s). Compared with the previous World Championships of the Tokyo and Athens (Fukashiro *et al.*, 1994; Arampatzis *et al.*, 1999), the run-up speed of the top three in Osaka was small, but there were no differences in the official distance among these competitions, with exception of J.J. Kersee and H. Drechsler. The results on the C.G. velocity indicated that the larger gain of the vertical velocity and the high takeoff angle for Lebedeva and Kolchanova and less decrease in the horizontal velocity for Kotova contributed to obtain their longer jump distance.

The gain of the vertical velocity until the maximum knee flexion of the takeoff leg (MKF)

Table 9. Horizontal and vertical velocities of the center of gravity (C.G.) of athletes and takeoff angle - Women's final

Parameter	Lebedeva	Kolchanova	Kotova	1991 TOKYO WC*			1997 Athens World Championship**
				J. J.Kersee	H.Drechsler	Other Athletes	
Official distance	7.03	6.92	6.90	7.32	7.29	6.95±0.43	6.86±0.12
Horizontal velocity (m/s)							
HV <sub>TDL2</sub>	9.52	9.23	9.12	-	-	-	-
HV <sub>TDL1</sub>	9.63	9.11	9.39	-	-	-	-
HV <sub>TD</sub>	9.37	9.13	9.08	9.85	9.86	9.53±0.11	9.62±8.08
HV <sub>MKF</sub>	7.95	8.17	8.16	-	-	-	-
HV <sub>TO</sub>	7.73	7.73	8.14	8.09	8.49	7.92±0.31	8.08±0.26
ΔHV <sub>TD-TO</sub>	-1.64	-1.40	-0.94	-1.76	-1.37	-1.61±0.29	-1.54±0.25
Vertical Velocity (m/s)							
VV <sub>TD</sub>	-0.38	-0.42	-0.40	-	-	-	-
VV <sub>MKF</sub>	2.13	1.84	1.24	-	-	-	-
VV <sub>TO</sub>	3.50	3.23	3.18	3.46	2.80	3.05±0.24	3.10±0.23
VV <sub>MKF</sub> / VV <sub>TO</sub> (%)	60.8	57.1	39.1	-	-	-	-
Takeoff angle (deg)							
Y-Z plane	24.4	22.7	21.3	23.2	18.3	21.1±2.0	20.9±1.7
X-Y plane	-0.8	-1.1	3.0	-	-	-	-

\* Fukushima *et al.* (1994) \*\* Arampatzis *et al.* (1999)

was 60.8 % for Lebedeva, 57.1 % for Kolchanova, and 39.1 % for Kotova, respectively. Previous studies of Lees *et al.* (1993, 1994) reported that the vertical velocity which long jumpers obtained until the MKF was a crucial factor for successful jump and over 64 % of the final vertical velocity for women and about 70 % for men. These indicated that the vertical velocity obtained until the MKF for the top three was smaller than that of the previous elite athletes. As mentioned above, Kotova obtained only 40 % of the final vertical velocity until the MKF even in the her best jump, however, she finally obtained the vertical velocity of 3.18 m/s, which were within the average of the elite female long jumper. These results indicated that Kotova might use different technique for the velocity

conversion from the horizontal to the vertical during the takeoff.

### 3.2.3 Pathway of the C.G.

Figure 4 shows pathway of the C.G. from the 2<sup>nd</sup> last stride to the takeoff for women's final. The lowering the C.G. of the women's top three was similar to the pattern of the men. However, the absolute value of the decrease in the C.G. height in the 2<sup>nd</sup> last airborne phase was smaller (Lebedeva, 5.0 cm; Kolchanova, 6.8 cm; Kotova, 3.9 cm).

### 3.2.4 Joint and leg angles during the takeoff

Table 10 shows angles of the takeoff leg joints, trunk, hip and shoulder rotation at the touchdown and toe-off of the takeoff phase. Figure 5 shows

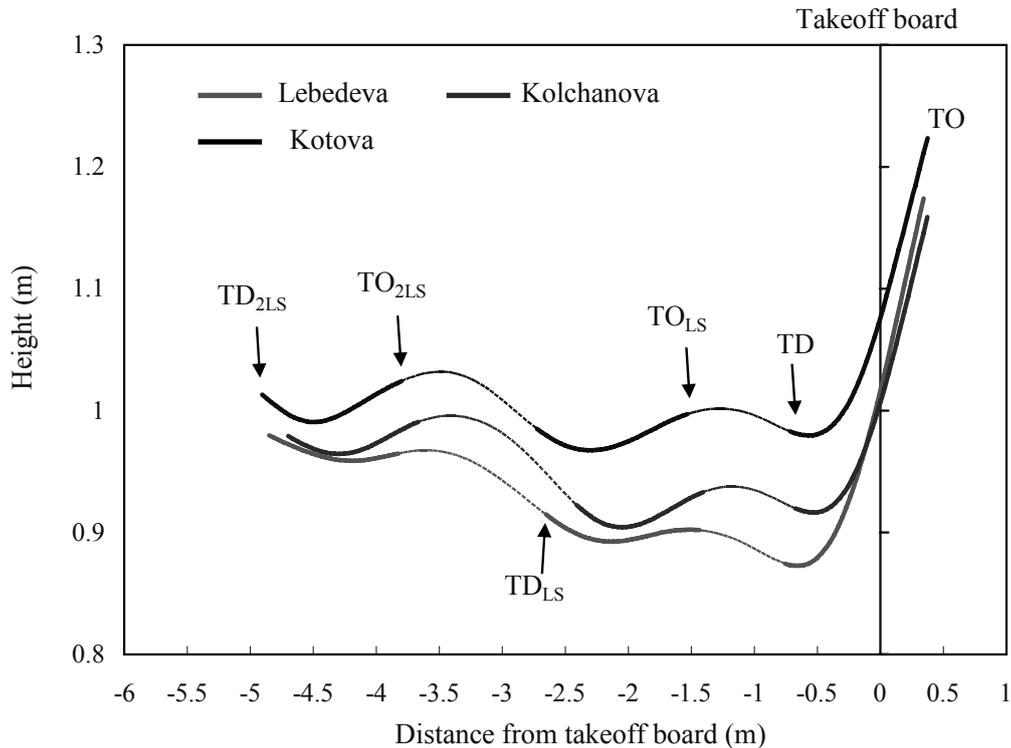


Figure 4. Path of the center of gravity of the body from the touchdown (TD) of the 2nd last stride to the toe-off (TO) of the takeoff

the overhead views of the paths of the C.G. from the 2<sup>nd</sup> last stride to the takeoff and the footprint of each support phase.

The knee flexion of the takeoff leg during the takeoff phase was 14.5° for Lebedeva, 15.4° for Kolchanova, and 6.5° for Kotova, and the minimum knee angle of the takeoff leg was approximately 143° to 146°. Compared with the top three men's jumpers, the knee flexion and maximum knee flexional velocity of the women's were much smaller than those of the men's jumpers. The report of the Tokyo WC indicated that the knee flexion of the takeoff leg was smaller in women's jumper than in the men's jumper (Women, 19.5±3.7°; Men, 21.1±4.3°). The less flexion of

the takeoff leg of women may be caused by the small muscular strength of the takeoff leg than men.

The leg angle (hip-ankle) in the frontal plane at the touchdown of the takeoff was -6.1° for Lebedeva, -7.7° for Kolchanova, and -4.3° for Kotova, and those at the toe-off of the takeoff were also the negative values (-8.1° for Lebedeva; -5.2° for Kolchanova; -6.2° for Kotova). These results indicated that the top three of the women inclined the takeoff leg inward over the takeoff phase as the men adapted. Additionally, the inward inclination of the takeoff leg was larger in the women than those of the men's jumpers. As shown in figure 5, the women's top three placed their takeoff foot much medially, and these led the inward-inclined takeoff

leg during the takeoff. These motions of the takeoff leg imply the use of the hip abductors of the takeoff leg for enhancing the vertical velocity in the takeoff phase, as previously described.

#### 4. Summary

The results on the preparatory phase indicated that the investigated jumpers increased the run-up speed toward the 2<sup>nd</sup> last stride, and lowered their C.G. in

the airborne phase of the 2<sup>nd</sup> last stride by lengthening the airborne time. They placed their takeoff foot in the medial side, which resulted in a slightly inward lean of the takeoff leg at the TD of the takeoff, which induced effective use of the hip abductors of the takeoff leg to enhance the vertical velocity during the takeoff, as similar to the high jump (Okuyama *et al.*, 2003).

Table 10. Joint angles of the takeoff leg, trunk angle, hip and shoulder rotation angles, and leg angles at the touchdown (TD) and toe-off (TO) of the takeoff

Parameter	Lebedeva	Kolchanova	Kotova	1991 Tokyo World Championship*
Knee <sub>TD</sub> (deg)	159.5	159.4	152.4	163.6±3.7
Knee <sub>MKF</sub> (deg)	145.0	143.9	145.8	144.1±2.7
Knee <sub>TO</sub> (deg)	163.9	163.5	164.5	170.4±4.1
Flex. / Ext. (deg)	-14.5 / 18.9	-15.4 / 19.6	-6.5 / 18.6	-19.5±3.7 / 26.3±3.3
Maximum Knee Flex. Vel. (deg/s)	-360.9	-392.4	-181.7	
Trunk - Sagittal plane <sub>TD</sub> (deg)	-2.2	-3.9	-4.1	-2.4±2.7
Trunk - Sagittal plane <sub>TO</sub> (deg)	8.3	6.2	-1.3	-0.7±2.8
Shoulder rotation TD (deg)	13.7	23.7	33.1	23.0±3.8
Shoulder rotation TO (deg)	-7.9	-7.5	0.8	-18.9±9.1
Hip rotation TD (deg)	-12.9	-4.9	4.1	-5.3±4.8
Hip rotation TO (deg)	19.8	14.3	15.3	6.4±4.1
Leg angle Sagittal plane <sub>TD</sub> (deg)	41.1	37.9	32.2	-
Leg angle Sagittal plane <sub>TO</sub> (deg)	-26.6	-25.2	-27.5	-
Leg angle Frontal plane <sub>TD</sub> (deg)	-6.1	-7.7	-4.3	-
Leg angle Frontal plane <sub>TO</sub> (deg)	-8.1	-5.2	-6.2	-

\* Fukashiro *et al.* (1994)

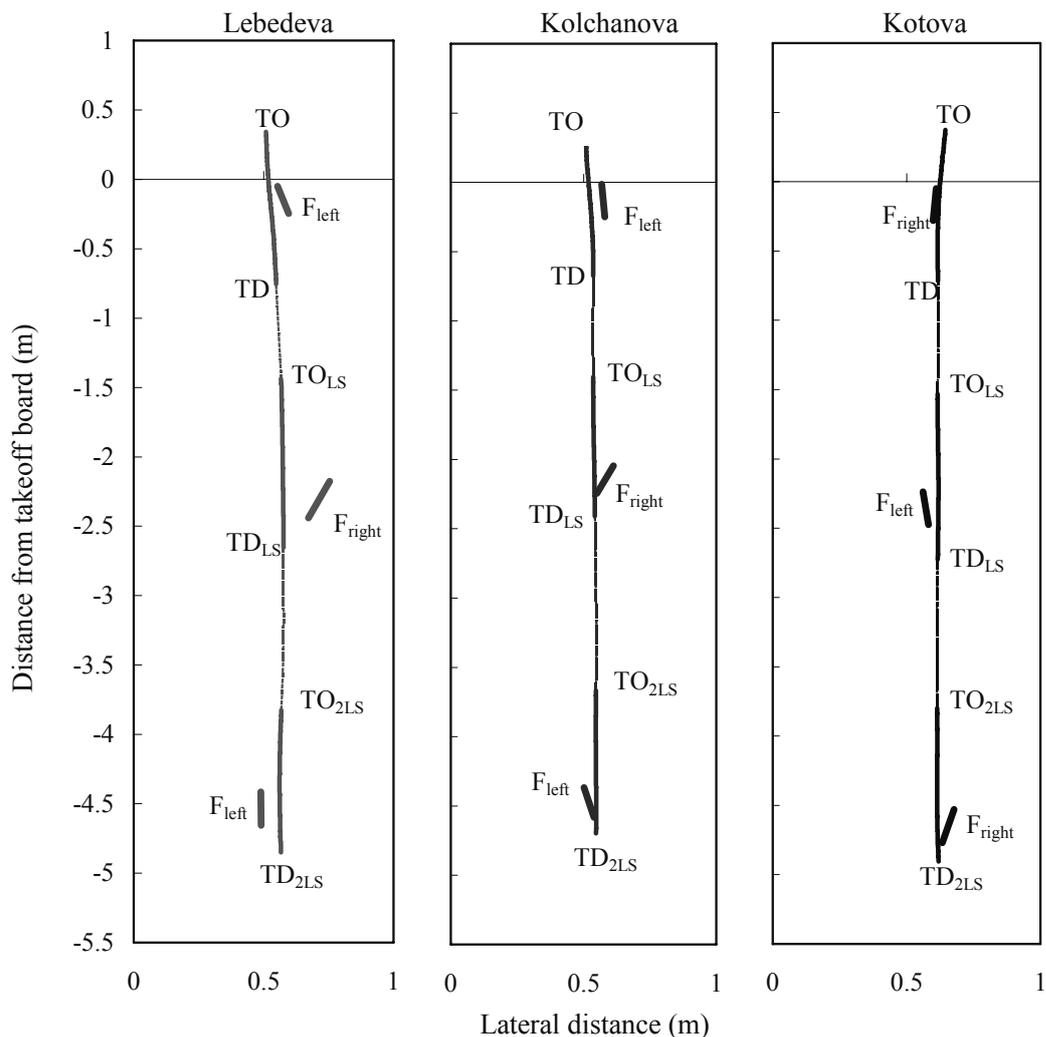


Figure 5. Overhead views of paths of the center of gravity of the body from the 2<sup>nd</sup> last stride to the takeoff and footprint of each support phase

## Reference

- Arampatzis, A., Brüggemann, G.-P., Walsch, M. (1999) Long jump. In Biomechanical analysis of the jumping events. In Biomechanical Research Project Athens 1997: Final Report (edit by G.-P. Brüggemann, D. Koszewski and H. Müller), pp.82-102.
- Fukashiro, S., Wakayama, A., Kojima, T., Ito, N., Arai, T., Iiboshi, A., Fuchimoto, T., and Tan, H. P. (1994). Biomechanical analysis of the long jump (in Japanese). In Japan Association of Athletics Federations (ed.), The Techniques of the World Top Athletes (Research Report of the 3<sup>rd</sup> World Championships, Tokyo) (pp. 135-151). Tokyo: Baseball Magazine Co.
- Hay, J. G. (1986). The Biomechanics of the Long Jump. In K. B. Pandolf (ed.). Exercise and Sports Sciences Reviews (Volume 14) (pp. 401-446). New York: Macmillan Publishing Co.

Lees, A., Derby, D., and Fowler, N. (1993). A Biomechanical Analysis of the Last Stride, Touch-down, and Takeoff Characteristics of the Women's Long Jump. *Journal of Sports Sciences*, 11, 303-314.

Lees, A., Graham-Smith, P., and Fowler, N. (1994). A Biomechanical Analysis of the Last Stride, Touchdown, and Takeoff Characteristics of the Men's Long Jump. *Journal of Applied Biomechanics*, 10, 61-78.

Okuyama, K., Ae, M., Yokozawa, T. (2003) Three dimensional joint torque of the takeoff leg in the fosbury flop style. *Abstract and Proceedings. International Society of Biomechanics XIXth Congress. (CD-ROM).*

## **Run-up Velocity in the Men's and Women's Triple Jump at the 2007 IAAF World Championships in Athletics in Osaka**

Muraki, Y. <sup>1)</sup>, Koyama, H. <sup>2)</sup>, Ae, M. <sup>2)</sup>, Shibayama, K. <sup>2)</sup>, and Yoshihara, A. <sup>2)</sup>

1) Osaka University of Health and Sports Science, 2) University of Tsukuba

### **Abstract**

The purpose of this report is to present the jumping distance and run-up velocity data from the men's and women's triple jump finals at the 2007 IAAF World Championships in Athletics in Osaka.

The instantaneous run-up velocities of all attempts of all athletes were measured by a laser distance measurement device (LAVEG by Jenoptik). The best record jumps of each athlete were included in an analysis.

Comparing with the past World Championships, the average performance in the men's triple jump did not improve remarkably. In the women's triple jump, the average jumping distance at the 2007 World Championships was greatest among the past World Championships. Therefore, the women achieved 86.0% of the men's jumping distances. While the women's run-up velocities reached 89.6% of the men's at the 2007 World Championships.

The run-up velocity was significantly related to the jumping distance in the men's and women's triple jump finals at the 2007 World Championships. These relationships indicated that one of the most important determinant of the triple jump performance would be the run-up velocity in both men's and women's finals at this competitions.

### **Introduction**

The 11<sup>th</sup> IAAF World Championships in Athletics 2007 was held at Osaka, Japan, from August 26<sup>th</sup> to September 2<sup>nd</sup>. In the men's triple jump, Nelson Évora of Portugal broke his own record by 23 cm and won the gold medal with a record of 17.74 m. While Yargelis Savigne of Cuba showed a big jump of 15.28 m at the first attempt and captured the victory in the women's triple jump.

In the horizontal jumps, the run-up velocity is of major importance for a successful

performance. The changes in world records of the men's triple jump also imply the importance of the approach speed. In 1960s, Jozef Schimidt of Poland, who was former Olympic champion and world record holder, was the first to break the 17 m barrier with a jump of 17.03 m. Schimidt's technique involved a low and fast hop and step in order to minimize the reduction of run-up velocity and energy loss during the hop and step. Moreover, Jonathan Edwards of United Kingdom improved the world record considerably and became world champion in 1995 with 18.29 m. One of the greatest

characteristic of Edwards' jump was high run-up velocity.

In this report, the purpose is to present the jumping distance and run-up velocity data from the men's and women's triple jump finals at the 2007 IAAF World Championships in Athletics in Osaka.

### Methods

Data were collected at the men's and the women's triple jump finals at the 2007 IAAF World Championships in Athletics in Osaka. The best valid jumps from each of the twelve finalists of the men's and women's competitions were selected for further analysis. The official distances of the selected jumps of each athlete were shown in Table 1 for male athletes and table 2 for female athletes.

The instantaneous run-up velocities of the

athletes were measured by a laser distance device (LAVEG by Jenoptik), which operated at 50 Hz and was installed before the runway at the top of the stadium. The operator of the LAVEG targeted the athlete's chest and followed during the entire approach run. The position time history data were smoothed by the fourth-order low-pass Butterworth digital filter with a cut-off frequency of 0.5 Hz. From the position time history data, the object's run-up velocity was calculated by the first time derivative.

Consequently, we provided the maximum run-up velocity and its location from the 0 m point of the approach distance (foul line) and the run-up velocity at 0 m point of the approach distance of all the male and female finalists, and the run-up velocity curves of the male and female top three athletes for the analysis.

Rank	Name	Nat.	Result	Wind	MAX m	MAX m/s	0 m m/s	Diff. m/s
1	N. Évora	POR	17.74	+1.4	4.25	10.49	10.22	-0.27
2	J. Gregório	BRA	17.59	+0.3	7.02	10.45	10.05	-0.40
3	W. Davis	USA	17.33	+1.0	3.25	10.23	10.07	-0.16
4	O. Tosca	CUB	17.32	+1.1	3.64	10.43	10.27	-0.16
5	A. Wilson	USA	17.31	+0.6	6.51	10.51	10.13	-0.38
6	P. Idowu	GBR	17.09	-0.9	5.53	10.26	9.92	-0.35
7	D. Giralt	CUB	16.91	+0.7	4.28	10.12	9.83	-0.30
8	A. Martínez	SUI	16.85	+1.3	6.32	10.49	10.08	-0.41
9	D. Kim	KOR	16.71	+1.1	5.67	9.94	9.70	-0.24
10	A. Petrenko	RUS	16.66	+0.8	3.34	9.89	9.73	-0.15
11	M. Zhong	CHN	16.66	+1.5	5.54	10.31	9.97	-0.34
12	D. Tsiámis	GRE	16.59	-1.1	4.09	9.77	9.53	-0.24
Average			17.06		4.95	10.24	9.96	-0.28
±SD			0.39		1.30	0.26	0.22	0.09

Table 1 Jumping distance (official), run-up velocity at the maximum point and 0 m point of the approach distance (foul line), location of the maximum run-up velocity and velocity change from the maximum point to the 0 m point of the approach distance for the best valid jumps from each of the twelve male finalists

Rank	Name	Nat.	Result	Wind	MAX m	MAX m/s	0 m m/s	Diff. m/s
1	Y. Savigne	CUB	15.28	+0.9	3.53	9.49	9.26	-0.24
2	T. Lebedeva	RUS	15.07	+0.8	3.50	9.59	9.39	-0.20
3	H. Devetzí	GRE	15.04	-0.2	3.27	9.22	9.00	-0.22
4	A. Pyatykh	RUS	14.88	+0.3	2.64	9.10	8.96	-0.14
5	M. Šestak	SLO	14.72	+0.2	3.30	8.96	8.81	-0.15
6	M. Martínez	ITA	14.71	+1.3	4.19	8.98	8.72	-0.26
7	O. Saladuha	UKR	14.60	+0.7	3.23	8.96	8.73	-0.23
8	L. Xie	CHN	14.50	+0.9	5.64	9.22	8.61	-0.60
9	K. Costa	BRA	14.40	+1.1	4.08	9.55	9.20	-0.35
10	O. Bufalova	RUS	14.39	+0.7	3.59	9.03	8.84	-0.19
11	O. Rypakova	KAZ	14.32	+1.4	3.54	8.97	8.79	-0.18
12	D. Veldáková	SVK	14.09	-0.1	4.46	8.97	8.78	-0.19
Average			14.67		3.75	9.17	8.93	-0.24
±SD			0.35		0.77	0.24	0.24	0.12

Table 2 Jumping distance (official), run-up velocity at the maximum point and 0 m point of the approach distance (foul line), location of the maximum run-up velocity and velocity change from the maximum point to the 0 m point of the approach distance (foul line) for the best valid jumps from each of the twelve female finalists

## Results and Comments

### Jumping distance

Table 1 and 2 presents jumping distance (official), run-up velocity at the maximum point and 0 m point of the approach distance (foul line), location of the maximum run-up velocity and velocity change from the maximum point to the 0 m point of the approach distance for each of the twelve male and female finalists, respectively. Figure 1 and 2 shows changes in ratios of the average jumping distances in the men's and women's triple jump finals at all the World Championships to those at the 1<sup>st</sup> World Championships (100%) for the male and the 4<sup>th</sup> World Championships (100%) for the female,

respectively.

At the World Championships 2007, six male athletes jumped further than 17.00 m and three female athletes broke 15.00 m. The average jumping distance of the male changed little throughout the past World Championships (Figure 1). Comparing with the past World Championships, the average jumping distance was greatest in the women's triple jump at the World Championships 2007 (Figure 2). On average, the women reached 86.0% of the men's jumping distances at the 11<sup>th</sup> World Championships.

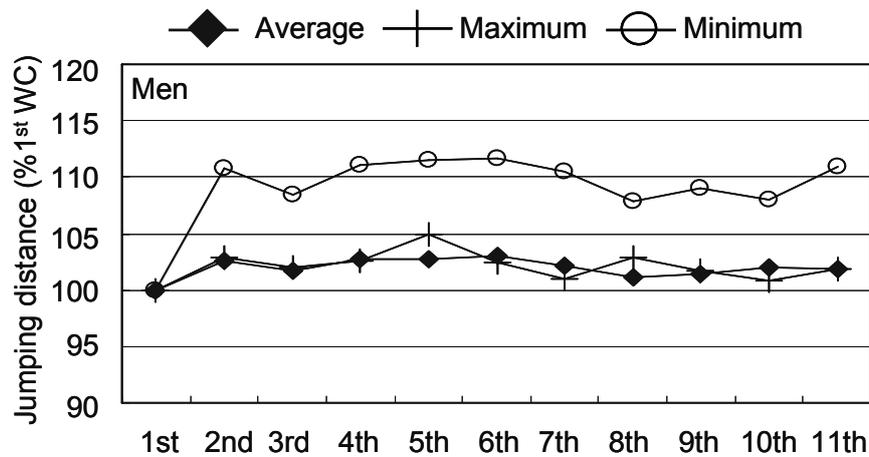


Figure 1 Changes in ratios of the average, maximum and minimum official distances in the men's triple jump finals at all the World Championships to those at the 1<sup>st</sup> World Championships (100%)

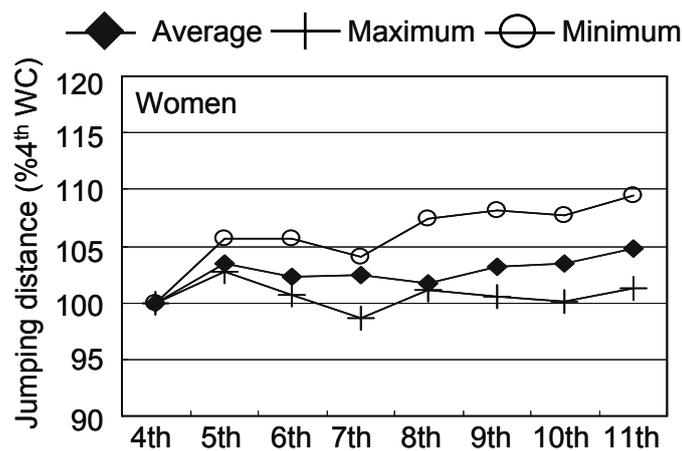


Figure 2 Changes in ratios of the average, maximum and minimum official distances in the women's triple jump finals at all the World Championships to those at the 4<sup>th</sup> World Championships (100%), in which the event was first included

### Run-up velocity

The maximum run-up velocity and run-up velocity at 0 m point of the approach distance were  $10.24 \pm 0.26$  m/s and  $9.96 \pm 0.22$  m/s for the male and  $9.17 \pm 0.24$  m/s and  $8.93 \pm 0.24$  m/s for the female at the World Championships 2007 (Table 1 and 2). There were six male and four female athletes who kept the run-up velocity faster than 10.00 m/s for male and 9 m/s for female, respectively, from the maximum point

to the 0 m point of the approach distance. The correlation coefficients between the maximum run-up velocity and the run-up velocity at 0 m point of the approach distance were highly significant for the men ( $r = 0.93$ ,  $p < 0.001$ ) and women ( $r = 0.87$ ,  $p < 0.001$ ). The women's run-up velocities at the maximum and 0 m point of the approach distance were both calculated to be 89.6% of the men's.

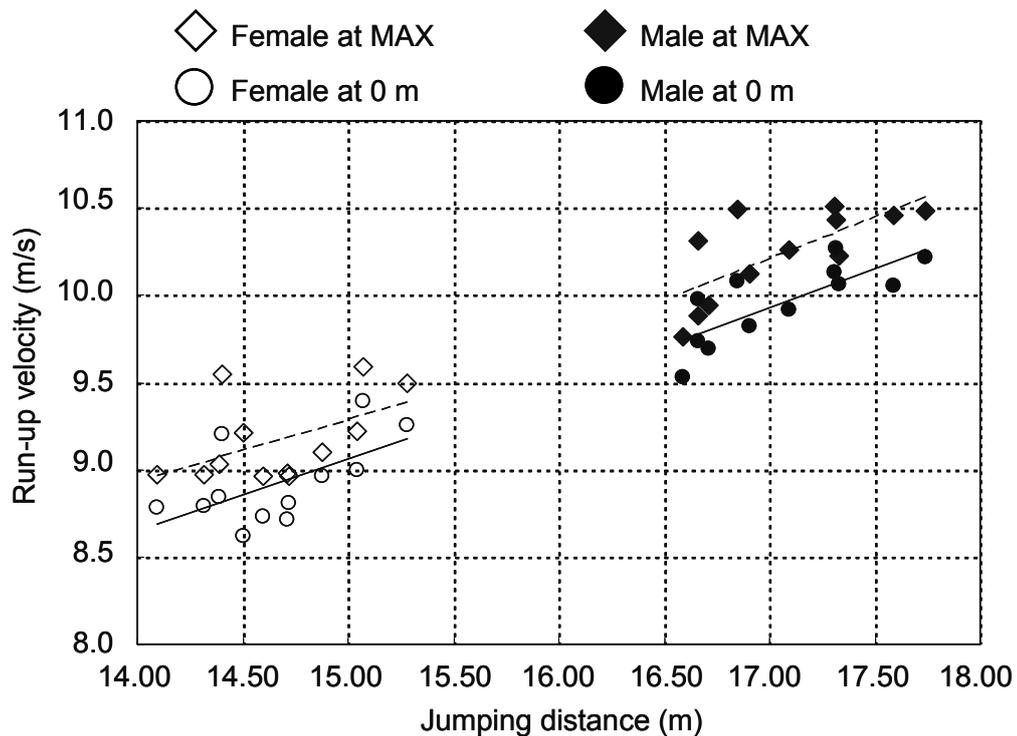


Figure 3 Relationships of jumping distance (official) to the run-up velocity at maximum and 0 m point of the approach distance (foul line) for the men's and women's triple jump finals

#### Relationships between jumping distance and run-up velocity

Figure 3 illustrates the relationships of the jumping distance to the run-up velocity at the maximum and 0 m point of the approach distance for the men's and women's triple jump finals. In the men's finalists, there were significant relationships of the jumping distance to the maximum run-up velocity ( $r = 0.72$ ,  $p < 0.01$ ) and the run-up velocity at 0 m point of the approach distance ( $r = 0.78$ ,  $p < 0.01$ ). While in the women's finalists, significant correlation was found only between the jumping distance and the run-up velocity at 0 m point of the approach distance ( $r = 0.59$ ,  $p < 0.05$ ). However, considering the Costa's jumping distance (Table 2), her run-up velocity

was extremely large in the women's finalists. These data of Costa indicated that she would failure to use her energetic potential in the triple jump. If Costa's data was excluded, the relationships of the jumping distance to the maximum run-up velocity and the run-up velocity at 0 m point of the approach distance turned to be significant (maximum point,  $r = 0.74$ ,  $p < 0.01$ ; 0 m point,  $r = 0.75$ ,  $p < 0.01$ ). These relationships underline the great importance of run-up speed for men not only for women.

#### Characteristics of the run-up velocities of the top three athletes

Figure 4 and 5 depicts the developments of the run-up velocities of the top three athletes of the

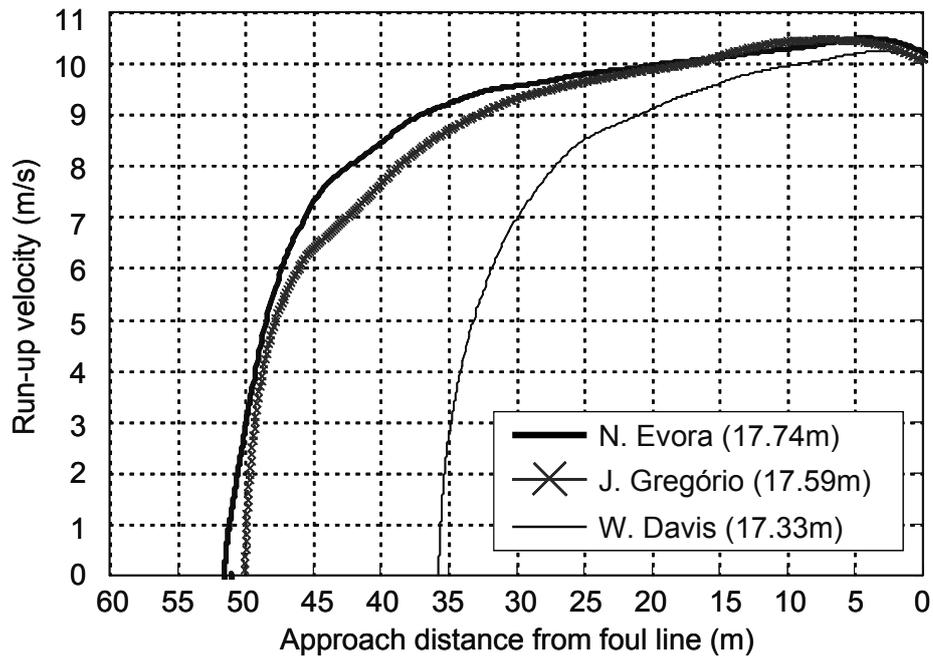


Figure 4 Development of the run-up velocity of the top three athletes of the men's triple jump final: N. Évora (17.74m), J. Gregório (17.59m) and W. Davis (17.33m)

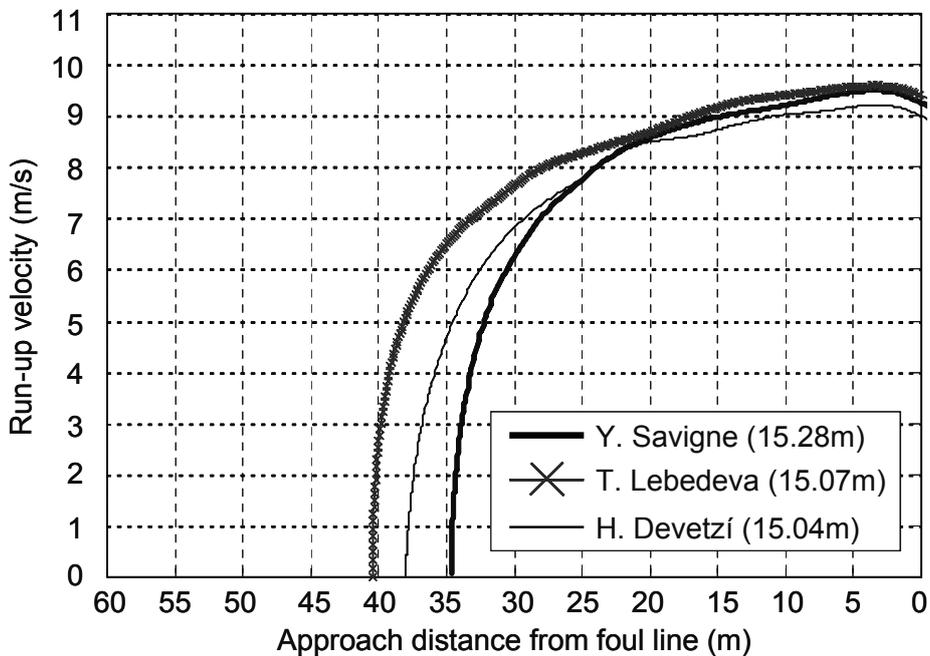


Figure 5 Development of the run-up velocity of the top three athletes of the men's triple jump final: Y. Savigne (15.28m), T. Lebedeva (15.07m) and H. Devetzi (15.04m)

men's and women's triple jump finals, respectively. Évora showed large run-up velocity almost entire points of the approach, and the run-up velocity at the end of the approach distance (0 m) was greatest among the top three athletes. Although Gregório exceeded Évora in the run-up velocity from 15 to 5 m points before the take-off, his location of the maximum run-up velocity was earlier than that of Évora and the loss of the run-up velocity became greater before the takeoff (Table 1). While Davis used shortest approach distance among three athletes, around 35 m point of the approach distance. However, his run-up velocity immediately increased and reached its peak of 10.23 m /s at 3.25 m point of the approach distances, which was nearest among the three athletes.

Savigne started the approach from about 35 m point of the approach distance. She accelerated immediately and the maximum run-up velocity reached the second largest among the women's finalists (Table 2). Lebedeva showed the greatest run-up velocity throughout the approach from about 40 m point of the approach distance. Although she could produce the greatest kinetic energy (increase run-up velocity) before the take-off, she was unable to improve the jumping distance within six attempts. The maximum run-up velocity of Devetzi was smallest among the three athletes.

## Summary

Run-up velocities of the best attempts of the twelve male and female finalists in Osaka 2007 were measured using a laser distance measurement device. We analyzed the maximum run-up velocity and its location from the 0 m point of the approach distance (foul line) and the run-up velocity at 0 m point of the approach distance.

The average performance in the men's triple jump did not improve remarkably throughout the past World Championships. While in the women's triple jump, the average jumping distance at the World Championships 2007 was greatest among the past World Championships.

The women reached 86.0% of the men's jumping distances and 89.6% of the men's run-up velocities at the 11<sup>th</sup> World Championships.

The run-up velocity was significantly related to the jumping distance in the men's and women's triple jump finals at the 2007 World Championships. These relationships indicated that one of the most important determinant of the triple jump performance was the run-up velocity in both men's and women's finals at this competitions.

**Challenge in the men's high jump: A brief report on biomechanical analysis  
of the techniques for top three men high jumpers  
in the IAAF World Championships in Athletics, Osaka 2007**

Michiyoshi Ae<sup>1)</sup>, Ryu Nagahara<sup>1)</sup>, Yuji Ohshima<sup>1)</sup>,  
Hiroyuki Koyama<sup>1)</sup>, Megumi Takamoto<sup>2)</sup>, and Kazuhito Shibayama<sup>1)</sup>

1) University of Tsukuba, 2) Osaka University of Health and Sport Science

**Abstract**

This brief report described interim results of kinematic analysis of the jumping techniques for top three men high jumpers at Osaka WC. Finalists in the men's high jump at Osaka WC were videotaped to obtain three-dimensional coordinates of twenty-three body landmarks in video images of the best jump for each jumper with a three-dimensional DLT method. Thomas's run-up CG velocity was high in the last stride (7.73 m/s) and at the takeoff foot touchdown (7.87 m/s) and his inward lean of the body, 8.2 deg was the greatest of the three jumpers. Thomas's technique was characterized by a strong forward lean of the trunk and deeply flexed support knee in the preparation phase, accelerative transition to the takeoff phase, fully used takeoff knee and hip, and the large inward lean of the body. The silver medalist, Rybakov from Russia who also cleared 2m35 exhibited us an orthodox and beautiful high jump technique with a double arm swing from large backward lean of the body at the takeoff foot touchdown. Although the bronze medalist, Ioannou decreased his horizontal CG velocity during the last stride, his technique was characterized by relaxed last few strides, running up transition to the takeoff phase and the quick takeoff.

**1. Introduction**

The high jump, as we know it today, became popular in the 19<sup>th</sup> century. The high jump was adopted as an event of the athletics of the modern Olympic Games in 1900. The most primitive style of the high jump is a scissors style in which a straight run-up is used. Starting with the scissors style, the technical evolution of the high jump has been taken place, for instance, the western roll, the straddle and the Fosbury-flop which is the most fashionable at present, and the record of the high jump has been improved.

The Fosbury-flop became famous all over the world, by Dick Fosbury's victory in the Mexico Olympic Games in 1968, who invented a back lay-out clearance technique

from a curved run-up. Most of high jumpers use the Fosbury-flop at present, and the current world records for men and women were established with this style (men: 2m45, women: 2m09).

Although the high jump technique can be divided into four phases: run-up, preparation, takeoff, and clearance, the takeoff is the most important phase. Basic principles of the takeoff are common in various styles mentioned above, which have been formulated by the study on the takeoff motion of the straddle style whose run-up is straight. However, there is still less information on the takeoff motion of the Fosbury-flop than that of the straddle style, because the takeoff of the Fosbury-flop is a

three-dimensional nature and more complicated than that of the straddle style because of its curved run-up.

The detailed three-dimensional analyses of the high jump at the IAAF World Championships in Athletics were conducted at the Championships held in Tokyo 1991, Athens 1997, and Helsinki 2005. The men's high jump at the 11<sup>th</sup> IAAF World Championships in Athletics, Osaka 2007, henceforth Osaka WC, was a very high level competition in which three jumpers cleared the height of 2m35, as shown in Table 1, the final result of this event. In addition to the high performance, an interesting topic of athletic fans and medias was that a less experienced young high jumper Thomas from Bahama won this competition with a little strange-looking style in which he ran-up and jumped up like a running shot of basketball and dabbled his legs before clearing the bar in the airborne phase. On the contrary, Rybakov from Russia who also cleared 2m35 exhibited us an orthodox and beautiful high jump technique with a double arm swing from large backward lean of the body at the takeoff foot touchdown.

This brief report described interim results of kinematic analysis of the jumping techniques for top three men high jumpers at Osaka WC.

## 2. Methods

### 2.1 Subjects and data collection

Fifteen finalists in the men's high jump at Osaka WC were videotaped with two high-speed video cameras(HSV-500, NAC Co.) operating at 250 Hz for left-footed jumpers and two normal digital video cameras(VX-1000, Sony) operating at 60 Hz for right-footed jumpers. These cameras were fixed on the top row corridor of the Nagai stadium so that they covered the videotaping area from the 3<sup>rd</sup> last stride to the bar. These cameras were synchronized by using an event method in which we used instants of the touchdown of the takeoff and the last stride as synchronization events.

Two videotaping areas were set for the left-footed and right-footed jumpers, respectively. The videotaping area was 6 m long in the direction parallel to the bar as a x axis, 6 m long in the perpendicular direction to the bar as a y axis, and 3 m high as a z axis. The areas were calibrated by standing a calibration pole vertically every two meters in each area before the start of the final.

### 2.2 Data reduction

Twenty-three body landmarks in video images of the

Table 1 Results of men's high jump, Osaka 2007

Rank	Name	NAT	Result(m)	2.16	2.21	2.26	2.30	2.33	2.35	2.37
1	Donald THOMAS	BAH	2.35	-	×○	×○	○	××○	○	×××
2	Yaroslav RYBAKOV	RUS	2.35	-	○	○	○	○	×○	×××
3	Kyriakos IOANNOU	CYP	2.35	○	○	○	×○	×○	×○	×××
4	Stefan HOLM	SWE	2.33	-	○	○	○	○	×××	
5	Tomas JANKU	CZE	2.30	○	○	○	○	×××		
5	Victor MOYA	CUB	2.30	○	○	○	○	×××		
7	EikeONNEN	GER	2.26	○	-	○	×-	××		
8	Jaroslav BABA	CZE	2.26	○	○	×○	×××			

best jump for each jumper were digitized from at least five frames before the touchdown(TD) of the support foot of the second last stride to ten frames after the toe-off of the takeoff foot. Three-dimensional coordinates of the segment endpoints were reconstructed with a DLT method from the digitized coordinates, smoothed with a Butterworth digital filter of optimum cutoff frequencies (5.0 to 7.5Hz) chosen by a residual method. The mean errors of the three-dimensional coordinates of the calibration points were 0.01m in the x axis, 0.02m in the y axis, and 0.01m in the z axis, respectively.

The whole body center of gravity(CG) estimated after Ae's body segment parameters (1996) for athletes and its derivative was calculated to obtain CG heights relating to the performance and CG velocity during the final stage of the run-up and the takeoff phase. Three CG heights as performance descriptors(Hay, 1993) were as follows:

H1: the height of the jumper's CG at the instant of takeoff

H2: the height that the jumper raises the CG during the flight

H3: the difference between the maximum height reached by the CG and the height of the crossbar

In this report, H2 was calculated from the vertical CG velocity of jumpers at the instant of takeoff, and H3 was the difference between the sum of H1 and H2 and the official record.

Although several joint and segment angles were calculated, only angle explained in this report was the knee joint angle which was defined as an angle between the thigh and shank. As parameters to evaluate the condition of the takeoff we calculated the inward and backward lean angles of the body and the trunk lean angle. Figure 1 showed the definition of inward lean and backward lean angles of the body. In the X'-Z' plane, the angle between the vertical line and a line connecting CG and the ankle joint of the takeoff leg (CG-ankle line) was defined as an inward lean angle of the whole body. In the

Y'-Z' plane, the angle between the vertical line and the CG-ankle line was obtained as a backward lean angle of the whole body. The trunk lean angle was the angle between the vertical line and a line connecting the midpoint of both shoulders and the midpoint of both hips.

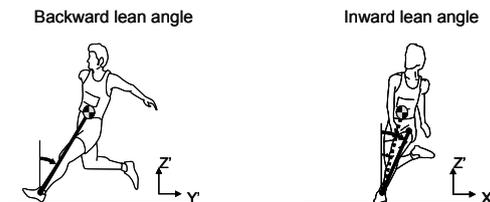


Figure 1 Definitions of the inward and backward lean angles

### 3. Results and discussion

#### 3.1 Motions of the top three jumpers in the final phase of the run-up and takeoff phase

Figures 2 to 4 show sequence stick pictures of the best jump for the top three jumpers before TD of the 2<sup>nd</sup> last stride to the instant of takeoff. The left limb and the trunk were depicted in solid lines and the right limb shown in broken lines. The stick pictures on the upper row is the lateral view of a jumper, which was transformed as if an observer was watching the jumper from the position perpendicular to the direction of the horizontal CG velocity of the jumper, and those on the lower row is the backward view of the jumper.

Thomas (Bahama) in Figure 2

Being very different from two other jumpers, Ryvakov and Ioannou, Thomas strongly inclines his body, especially the trunk forward in the 2<sup>nd</sup> stride, probably also in the 3<sup>rd</sup> stride, which looks like a basketball running shot or a high jump from a short run-up used in a practice. And the deeply flexed knee joint seen in the pictures(3,11 and 12) is also one of his features. Defying the guess of the audience and media in the Nagai stadium that his jumping motion was new and completely different from other jumpers in all the phases from the beginning of run-up to the landing, he raises his trunk and body during

Thomas (BAH) 2.35m Lateral view

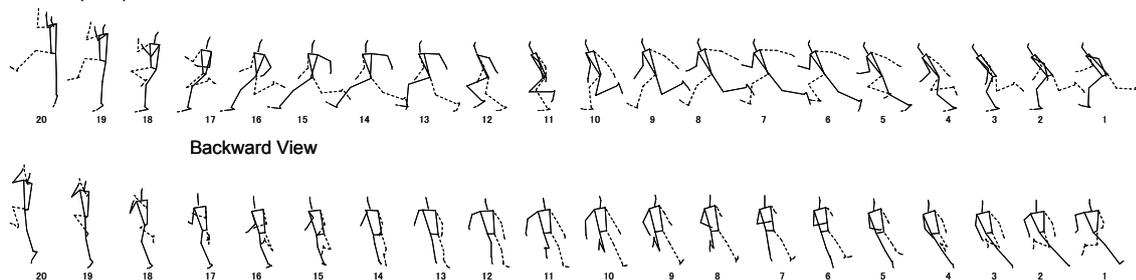


Figure 2 Sequence stick pictures of Thomas 2m35

Rybakov (RUS) 2.35m Lateral view

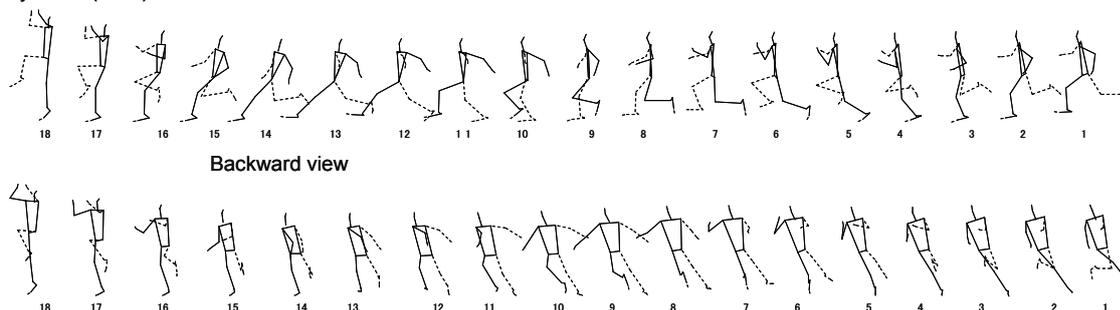


Figure 3 Sequence stick pictures of Rybakov (2m35)

Ioannou (CYP) 2.35m Lateral view

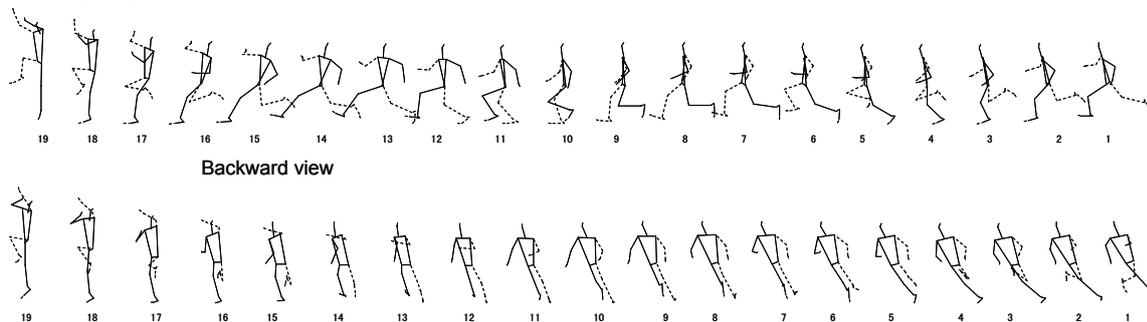


Figure 4 Sequence stick pictures of Ioannou (2m35)

the last stride to prepare for his strong takeoff. At the instant of takeoff foot TD, his backward lean of the body and the takeoff leg is large although the trunk backward lean looks a little smaller than other jumpers. His double-arm swing, almost vertical body at the takeoff, and highly raised thigh of the swing leg reveal his excellent techniques. Although dabbling legs before the crossbar clearance is his most characteristic, we all know that the height CG is raised is determined by the takeoff motion. From the backward view, we can observe his large inward

lean of the leg during the 2nd and last strides(1 to 10), which is still maintained at the takeoff foot TD(14 and 15).

Rybakov (Russia) in Figure 3

Rybakov who cleared 2m35 exhibits us an orthodox and beautiful high jump technique with a double arm swing from a large backward lean of the body at the takeoff foot TD, which we can frequently see in textbooks of athletics. From the lateral view, he inclines his body

forward appropriately in the 2<sup>nd</sup> last stride. He raises his trunk, lowers his CG and prepares his arms for the double-arm swing in the 2<sup>nd</sup> and last strides although his knee is less flexed than Thomas. In the takeoff phase, he inclines his takeoff leg and trunk backward and swings his arms and swing leg in a wide range of motion. From the backward view, his inward lean of the body during the 2<sup>nd</sup> last stride is as large as Thomas, but he changes the direction of his progression acutely during the support phase(8 to 10). At the takeoff foot TD(14), his inward lean was kept.

Ioannou (Cyprus) in Figure 4

Ioannou who also cleared 2m35 with a so-called a semi-double arm swing demonstrates a good form similar to Rybakov although a little larger upward movement of his body is observed in the 2<sup>nd</sup> stride(6 to 8). In the last stride, he floats his body, as seen in the 2<sup>nd</sup> stride, which may have caused a little delayed TD of the takeoff foot, slapping the foot down to the ground. From the backward view, his inward lean of the body in the 2<sup>nd</sup> last stride is very large but it becomes smaller at the instant of takeoff foot TD.

### 3.2 Performance descriptors and CG velocity

Table 2 shows the heights of the CG as performance

**Table 2 Performance descriptors of the top three high jumpers**

Name (Nationality)	Height (m)	Weight (kg)	Analyzed record (m)	Max. CG height (m)	H1 (m)	H2 (m)	H3 (m)	Takeoff time (s)
Thomas (BAH)	1.90	75	2.35	2.49	1.40	1.10	-0.14	0.180
Rybakov (RUS)	1.98	82	2.35	2.46	1.45	1.01	-0.11	0.192
Ioannou (CYP)	1.93	60	2.35	2.38	1.40	0.98	-0.03	0.148

**Table 3 The CG velocity and projection angle for the top three high jumpers**

Name (Nationality)	CG velocity (m/s)						Projection angle (deg)
	Horizontal			Vertical			
	Last stride	Takeoff		Last stride	Takeoff		
	on	on	off	on	on	off	
Thomas (BAH)	7.73	7.87	3.82	-0.47	-0.11	4.64	50.9
Rybakov (RUS)	7.41	7.57	3.66	-1.01	-0.10	4.45	50.6
Ioannou (CYP)	7.75	7.61	3.80	-0.62	0.09	4.38	49.0

descriptors and takeoff time. Table 3 shows CG velocity in the last stride and takeoff phases. Thomas's performance was characterized by his prominent H2(1.10m) but less efficient clearance height, H3(-0.14m). Rybakov showed the highest H1 by making use of his tall body height. The time of the takeoff phase ranged within the normal, compared with that of the in Tokyo WC.

Surprisingly Thomas's run-up velocity was high in the last stride(7.73 m/s) and at the takeoff foot TD(7.87 m/s), which was a little slower than that of the high jumpers in Tokyo WC(  $8.15 \pm 0.33$  m/s and  $7.52 \pm 0.25$  m/s, Iiboshi et al, 1994) and a little faster than that of Helsinki WC( $7.78 \pm 0.34$  m/s at the takeoff foot TD). In addition, it is likely that he accelerated his CG velocity in the last stride while most of high jumpers tended to decrease the CG velocity in the last stride to prepare for the takeoff. The similar tendency as Thomas was observed in the case of Rybakov whose CG velocity was also increased from 7.41 m/s at the last stride to 7.57 m/s at the TD. However, Ioannou decreased his CG velocity but his CG velocity(7.61 m/s) at the TD was still faster than the jumpers at Tokyo WC( $7.52 \pm 0.25$  m/s.)

The downward vertical velocity at the TD for Thomas and Rybakov was smaller than that of the high jumpers of

Tokyo WC( $-0.12 \pm 0.53$  m/s) and Helsinki WC( $-0.33 \pm 0.16$ m/s), and that of Ioannou was positive, although some jumpers very often transited to the takeoff with positive vertical CG velocity.

The projection angle of the CG was similar to that of Helsinki WC( $51.1 \pm 2.3$  deg) and larger than Tokyo WC( $47.8 \pm 3.5$  deg).

### 3.3 Body lean angle and knee joint angle

Table 4 shows backward and inward leans of the body and overall lean angle of the trunk and Table 5 indicates knee joint angle in the 1st stride and the takeoff phase. Figure 5 demonstrates a knee joint angle vs. CG vertical velocity diagram for the three high jumpers during the takeoff phase.

The backward lean of the body ranged from 40.0 deg of Ioannou and 43.5 deg of Thomas which were larger than that of Tokyo WC( $37.7 \pm 3.4$  deg), although there was no difference in the trunk lean angle among three jumpers. The inward lean of the body at the instant of takeoff TD for Thomas, 8.2 deg was the largest of the three jumpers and much larger than that of Tokyo WC( $3.2 \pm 3.1$  deg). The large inward lean of the body at the instant of takeoff TD is one of the features of Thomas.

As seen in Figures 2 to 4 and Table 3, the three high

jumpers flexed the knee joint during the last stride although the patterns were different. After the TD of the last stride, Thomas and Ioannou flexed the support knee joint more and maintained the knee flexion or less extended it toward the toe-off, although Rybakov did not flex his support knee so much during the support phase, adopting the technique of inclining the support leg forward to lower the CG. However, observation of Figures 2 to 4 revealed that they all inclined the shank forward deeply with regardless of the degree of the knee flexion during the support phase of the last stride. In sprint running, it is said that the fast forward lean of the support shank in the first half of the support phase is a critical factor to decrease the negative braking force. The technique of inclining the shank forward may be a reason why the three jumpers could make the decrease in the horizontal CG velocity smaller during the final phase of run-up.

As shown in Figure 5, Rybakov most extended his knee and Ioannou most flexed his knee at the instant of takeoff foot TD. Thomas flexed his knee deeply to 133 deg during takeoff phase, which was ranked as one of the maximum knee flexion, as reported that the minimum knee joint angle was 127.9 deg in Helsinki WC and 132.9 deg in Tokyo WC. Although the knee was flexing during the first half of the takeoff phase, the vertical CG

**Table 4 Body lean angle at the TD for the top three high jumpers**

Name (nationality)	Body lean at takeoff foot TD(deg)		
	Backward	Inward	Trunk
Thomas (BAH)	43.5	8.2	13.3
Rybakov (RUS)	43.0	2.9	14.3
Ioannou (CYP)	40.0	3.5	13.4

**Table 5 Knee joint angle in the last stride and takeoff phase for the top three high jumpers**

Name (nationality)	Knee joint angle (deg)				
	Last stride		Takeoff		
	on	off	on	Max flexion	off
Thomas (BAH)	150	141	161	133	172
Rybakov (RUS)	154	151	170	139	174
Ioannou (CYP)	144	136	151	145	177

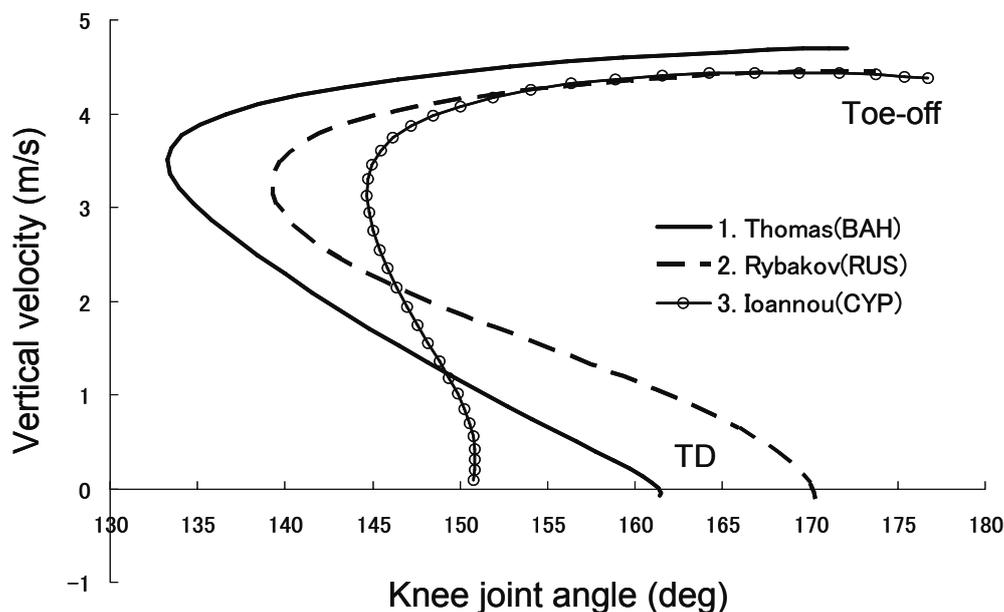


Figure 5 Knee joint angle vs. vertical CG velocity diagram for the top three high jumpers

velocity was increasing from the instant of takeoff TD. This is often called as a high jump paradox that the vertical CG velocity increases due to the rotation of the body around the takeoff foot in spite that the takeoff knee flexes. The ratio of the vertical CG velocity at the instant of the maximum knee flexion was reported as  $78.7 \pm 6.1\%$  in Tokyo WC, and those of the three jumpers were 77% for Thomas, 76% for Rybakov, and 75% for Ioannou, which means there was no remarkable difference. The results indicated that Thomas effectively used the rotation of the body as well as the strong knee extension to obtain the vertical CG velocity during the takeoff phase.

### 3.4 Remarks on the takeoff techniques

Thomas's feature was the great inward lean, 8.2 deg. Okuyama *et al.* (2003) suggested that the use of the hip abductors of the inward inclined takeoff leg in the high jump was an important factor to enhance the vertical velocity during the takeoff. Since great ground

reaction forces, especially the vertical component tends to adduct the takeoff hip joint, a high jumper has to resist the adduction moment of the ground reaction forces by exerting great hip abduction torque. On the contrary, a strong abduction torque of the takeoff leg generated by the hip abductors can exert great force on the ground, which helps to raise a high jumper vertically. In other words, the inward lean of the body in the initial stage of the takeoff phase may have helped to develop great force of the abductors and the ground reaction forces and contribute to raising the body upward.

For Ioannou, his vertical CG velocity at the TD was positive. During the takeoff phase, a high jumper has to generate impulse to absorb the forward and downward velocity of the CG and to acquire the upward CG velocity to raise his body in the air. The positive or small negative vertical CG velocity at the TD implies that the impulse to absorb downward CG velocity was not necessary or smaller than the case of large negative vertical CG velocity. Thomas's technique was characterized by a strong forward

lean of the trunk and deeply flexed support knee during the preparation phase, accelerative transition to the takeoff phase, fully used takeoff knee and hip, and the large inward lean of the body. Although Ioannou decreased his horizontal CG velocity during the last stride, his technique was characterized by the relaxed last few strides, running up transition to the takeoff phase and the quick takeoff.

With a creative idea of athlete and coach, a new technique often emerges from a combination of existing techniques which excellent athletes employ in the real world. In this context, a combination of the techniques of Thomas and Ioannou may be a challenging trial in the world of the high jump.

## References

- Ae, M. (1996): The inertia Properties of the Human body of Japanese Boys and Athletes. *Japanese Journal of Sports Science*. 15-3:155-162.
- Hay J.G. (1993): *The biomechanics of sports techniques*, fourth edition, Prentice Hall, New Jersey, pp.440-452.
- Iiboshi, A., et al (1994) *Biomechanical Analysis of the Techniques for the World's Best High Jumpers. Techniques of the world top athlete*. Sasaki S., Kobayashi K. and Ae M.(eds). *Baseball Magazine Co.*, Tokyo, pp.169-184.
- Isolehto J., et al. (2007): Biomechanical analysis of the high jump at the 2005 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*. 22-2:17-27.
- Okuyama, K., Ae, M., Yokozawa, T. (2003): Three dimensional joint torque of the takeoff leg in the fosbury flop style. *Abstract and Proceedings. International Society of Biomechanics XIXth Congress*. (CD-ROM).

**A biomechanical analysis of the men's shot put finalists  
in the Osaka Athletics World Championship 2007 –  
An overview of finalists and comparisons of top three putters**

Keigo Ohyama Byun <sup>1)</sup>, Hiroaki Fujii <sup>1)</sup>, Masatoshi Murakami <sup>2)</sup>,  
Toshinori Endo <sup>3)</sup>, Hisashi Takesako <sup>4)</sup>, Koki Gomi <sup>4)</sup> and Kenji Tauchi <sup>4)</sup>

- 1) Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba,  
2) Ehime Women's College, 3) Aoyama Gakuin University, 4) Waseda University

**Absuruct**

The purpose of this study was to present the overview of finalists' performances and to make comparisons of the technique of top three putters including the two rotators and a glider. Data were collected in the IAAF world championships for athletics in Osaka 2007. One motion of best record about every top ten athletes in the Men's shot put final was analyzed. The main findings are as follows;

While the release velocity is the main determinant of performance, some fluctuations can be related to other factors such as angle and position of release.

There is the technical variation even within the rotational style. Hoffa utilizes both of linear and angular momentum of body in higher extent. In contrast, Nelson seems to have emphasis especially on angular momentum. Mikhnevich of glider keeps higher level of linear momentum of whole body from the push off of glide to just before the final thrust.

These results suggest that shot velocity alone is not enough to explain the process of acceleration. Because whole body momentum is gained or maintained even in the concomitance of marked decrease of shot velocity during flight and transition phase of rotation. To ensure the source of energy for delivery, acceleration of athlete-shot system is suggested to be the key factor.

**Introduction**

Unlike the Fosbury flop of high jump, both style of glide and rotation coexists as mainstreams in the shot put. This world championship is not the exception. The process reaching the common delivery from a totally different preparation is the matter of great interest among coaches and athletes.

Preceding researchers and coaches have pointed out that the advantage of rotational shot put technique is characterized by long path of shot acceleration (Heger, 1974; Zatsiorsky, 1990; Pyka, 1991). On the other hand, unfavorable depression of shot velocity during flight and

transition phase has been reported frequently as a disadvantage (Grigalka, 1985; Luthanen et al., 1997). However, in spite of the shot deceleration, it has been expected that putters body can move forward and it can be favorable for delivery (Zatsiorsky, 1990; Hay, 1992). But experimental evidence has not been presented yet sufficiently. In terms of potential momentum within the athlete-shot system, apparent loss of shot velocity itself cannot necessarily be considered as a critical problem. Actually about discus throw, Schluter and Nixdorf (1984) reported that the amount of discus acceleration during the transition phase, the last half of preparation, is

negatively correlated to the discus velocity at release. In other words, the temporary inappropriate state of the implement is not the problem if the system is ready to ensure the final delivery with translating the momentum to the implement.

In this study we will focus especially on the acceleration profile with special reference not only to the shot itself but to the athletes body. The sequence from system acceleration to the final acceleration of shot in the delivery will be analyzed.

The purpose of this study was to present the overview of finalists' performances and to make comparisons of the technique of top three putters including the two rotators and a glider. The technical difference not only between rotation and glide but within rotation are discussed.

## Methods

Data were collected in the IAAF world championships for athletics in Osaka 2007. One motion of best record about every top ten athletes in the Men's shot put final was analyzed. All of these putters were right handed. Two digital video cameras (HVR-A1J, SONY) were used to record the putters' motion at 60fps and exposure time was set at 1/1000sec. One camera was fixed backward and the other at the right side of the throwing circle.

The shot of all ten putters and end points of each body segment of top three putters were manually digitized about every frame with motion analysis system (Frame-Dias; DKH Inc.) from video images. A 14-segment model comprising hands, forearms, upper arms, foot, shanks, thighs, head, and trunk was constructed. Three-dimensional coordinates of 24 points were obtained using a Direct Linear Transformation (DLT) technique (Abdel-Aziz and Karara, 1971), and smoothed by a fourth-order Butterworth low-pass digital filter cutting off at 2.4 to 7.8Hz, determined by residual analyses (Winter, 1990). Standard errors in the constructed coordinates of the control

points were 0.006 m (x-axis), 0.004m (y-axis), and 0.007 m (z-axis).

The locations of the center of mass and the moments of inertia for the each body segment of athletes were estimated from the body segment inertia parameters developed by Ae et al. (1992).

For analysis and description of data, putting motion was divided into several phases (Figure 1). The phases of preparation, flight, transition and delivery were assigned with respect to the information of foot contact.

To analyze the motion, a global reference frame was set. The Y-axis was aligned to the putting direction (pointing at front). The Z-axis was the vertical direction (pointing at the top), and the X-axis was perpendicular to the Y- and Z-axes (pointing at the right). In particular, trunk twist and tilt angle were calculated on the local reference frame fixed on the pelvis. These parameters indicate relative precedence of pelvis rotation to the shoulder axis rotation about longitudinal axis of trunk and tilting angle of trunk within saggial plane respectively.

## Results

Among ten putters, six adopt the rotational technique and the other four use the glide. Table.1 shows the condition of shot at the release. Official record correlates significantly with the velocity at release ( $r=0.87$ ,  $p<0.01$ ). Shot trajectory on X-Y plane and Y-Z plane of ten putters are showed in Figure 1. About X-Y plane four gliders show almost linear trajectory. The shot of rotators show circle-shaped path in the first half of turn. However "loop" portion of trajectory during flight and transition phase is seen only in Smith. The time courses of shot velocity of ten putters are represented on Figure 2. Regardless of preparation style, the most of acceleration takes place in the phase of delivery. Before flight phase, while rotation shows two or more peaks, glide shows single peak corresponding to the push off of right leg and the swing of left leg. During flight and transition phase, both of rotation and glide indicates

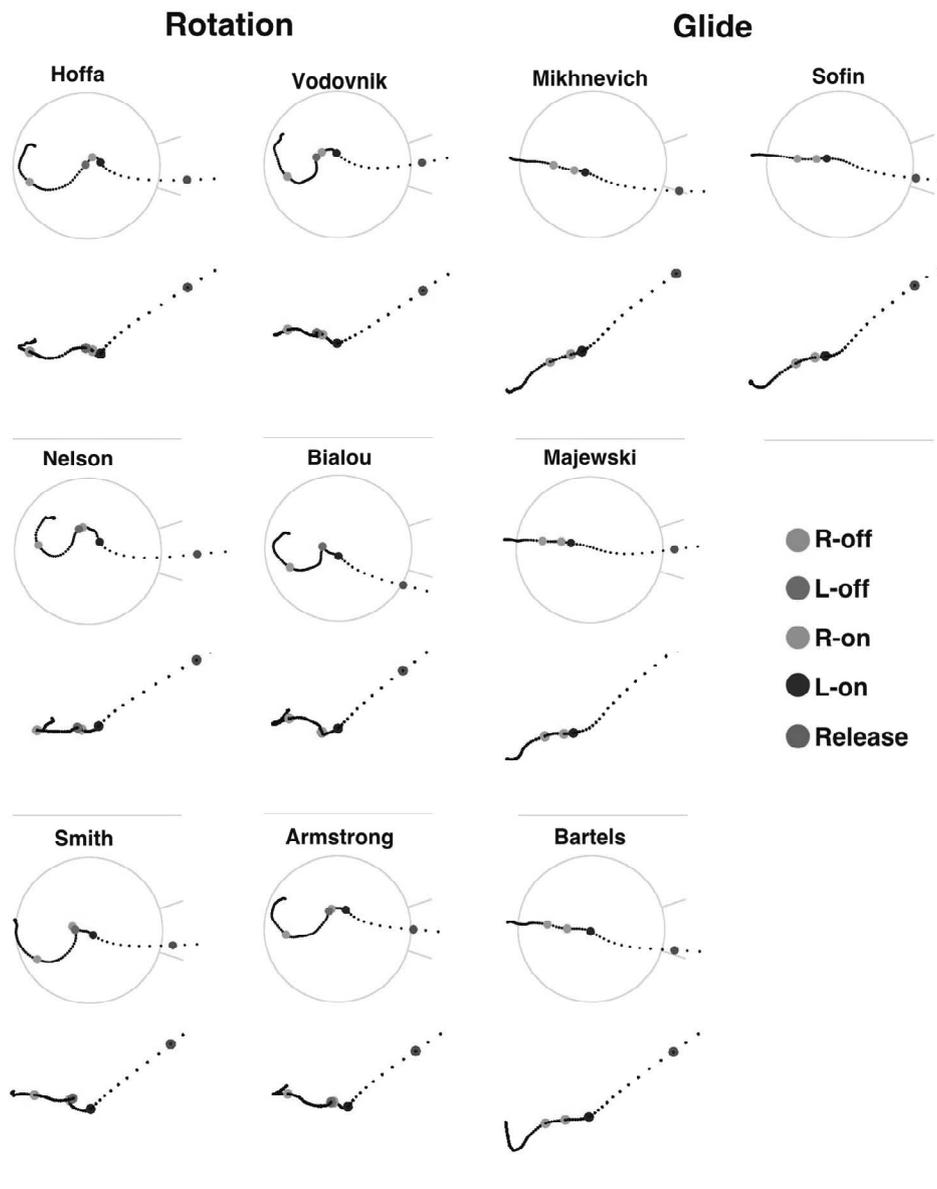


Figure 1. Shot trajectory on X-Y plane (top view) and Y-Z plane (side view) of ten putters

velocity fall. The fall during the flight and transition phase is more remarkable in rotation than glide. Figure 3 shows the duration of each phase from flight phase to release. Flight phase is longer in gliders than rotators. Especially in rotators, Bialou shows no flight phase. While transition phase is extremely longer in rotators, delivery is longer in gliders. The only rotator who secure the long delivery same as gliders is Hoffa. Further analyses were conducted about

the top three putters. Hoffa of 1st and Nelson of 2nd adopt the rotational technique. 3rd Mihnevich uses glide technique. Their shot velocity showed a typical time change pattern as already described. In this study, we will try to get insight about the cause of shot acceleration with special references to putters' motion and momentum generation. Fig.4a, 4b, 4c show the time course of shot velocity, linear momentum and angular momentum about center of mass (CM).

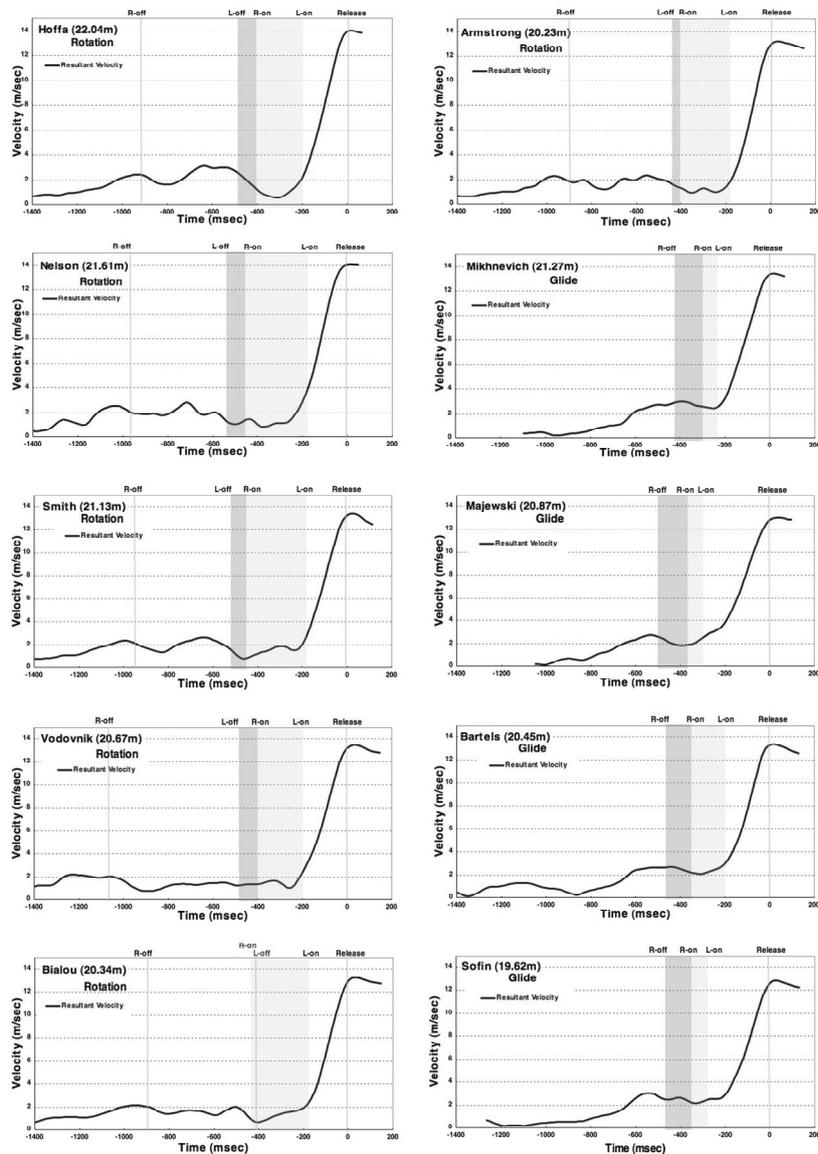


Figure 2. The time courses of shot velocity of ten putters (Only the resultant velocity is shown.)

### Linear Momentum of the putter

Resultant linear momentum increases gradually and peaks at the last of preparation phase about Hoffa and Mikhnevich. Nelson alone shows the peak during the transition phase. After the peak, it decreases toward the delivery (Fig.??). The peak value of resultant linear momentum of rotational Hoffa (368.9 kg m/sec) surpassed that of Nelson (297.5 kg m/sec) and even Mikhnevich

(346.9 kg m/sec) of glide. Nelson shows a notch-like depression just before the L-on, corresponding to the reverse action of upper body during transition phase. On the other hand, Mikhnevich of glide maintains the linear momentum throughout the preparation for the final thrust. Hoffa showed a middle pattern of the other two putters. Two rotator shows second peak of linear momentum around L-on.

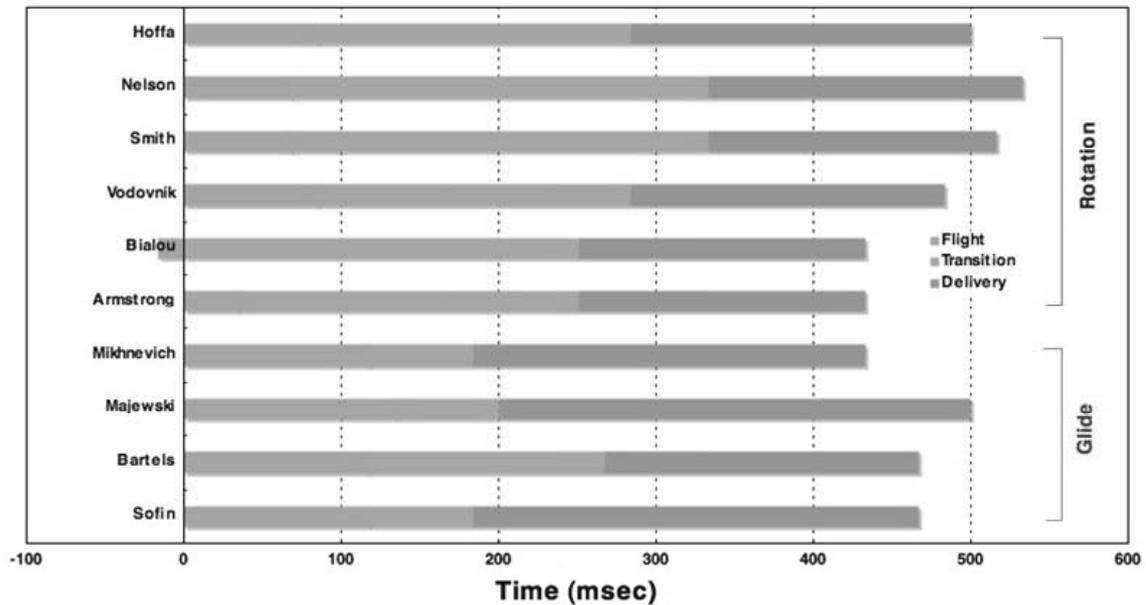


Figure 3. Duration of each motion phase from flight phase to release

At the start of weight shift and acceleration of body during preparation phase, individual difference is seen in the contribution of each component of the linear momentum. The two rotators can be characterized by the rightward component during the most of preparation phase. While Hoffa makes forward (putting direction) drive, Nelson shows small backward component. Nelson shows a small upper component in the start and downward in the latter half. As for Hoffa, downward component is remarkable in the middle of preparation phase. Mikhnevich of glide is characterized by the starting with downward to forward with upward component before the R-off. Commonly about both of the rotators and the glider, vertical component shows moderate peak just before the flight phase and remarkable highest peak just before the delivery.

#### Angular Momentum of putter

Before R-off, two rotators increase whole body angular momentum about CM mainly by upper body. After R-off,

two rotators maintain higher level of angular momentum throughout the motion. On the other hand, as for the Mikhnevich of glide keeps low level of angular momentum in contrast with the linear momentum. Only Mikhnevich shows rapid uniform increase of angular momentum in transition. During preparation, Hoffa keeps the level of angular momentum of lower extremity with balanced generation from both of right and left leg. For contrast, while angular momentum of the right leg of Nelson was almost same level as Hoffa, that of the left leg is remarkably higher and the sudden increase of left leg angular momentum is corresponding to the marked peak of lower extremity and increase of whole body angular momentum.

#### Trunk inclination and torsion angle

Fig.5 shows the forward - backward inclination within sagittal plane and the angle of torsion of the trunk. As for Mikhnevich, both of inclination and torsion angle are

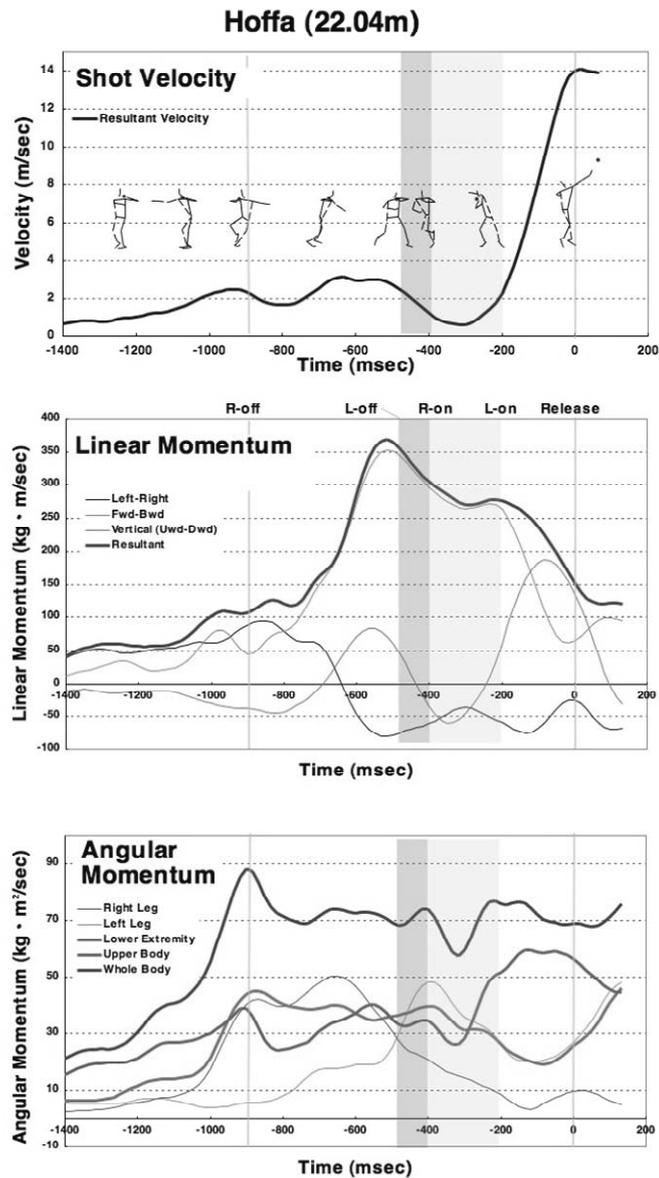


Figure 4a. Time course of shot velocity, linear momentum and angular momentum of athlete (Hoffa)

radually increase from about 100msec before the R-off. Then the trunk inclination changes in wide range from horizontal to upright and reached to its peak at just before the release. The torsion angle peaked during flight phase. Hoffa and Nelson started turn in more upright trunk position. Their trunk tilt forward mostly around the flight phase and increases to the peak just before the release. Nelson leans more forward during preparation than Hoffa

and Mikhnevich. It is common among three putters that trunk inclines backward before release beyond and it rapidly reverses toward the release. The trunk torsion of Hoffa reaches minimum before R-off. On the other hand, Nelson reaches minimum at late in flight phase. Hoffa and Mikhnevich's winding motion (increase of torsion) progresses at 121.3degree/sec and 141.7degree/sec respectively and that of Nelson increase more rapidly at 285.2degree/sec. The recoil of torsion begins at flight phase

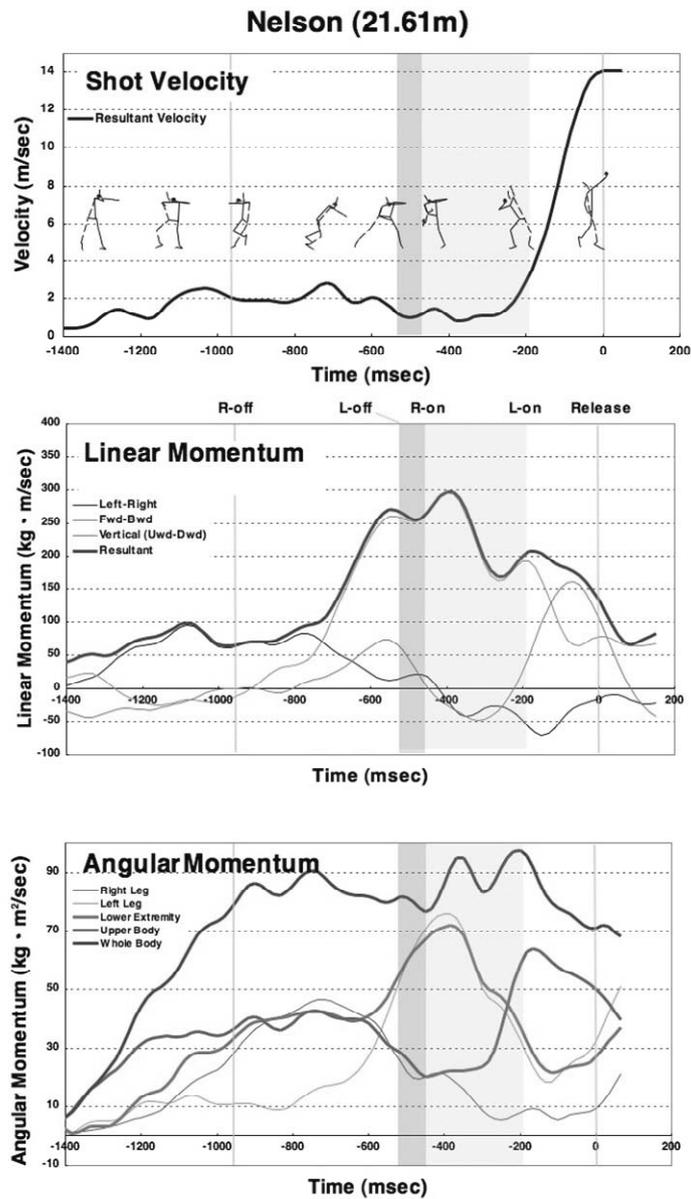


Figure 4b. Time course of shot velocity, linear momentum and angular momentum of athlete (Nelson)

in Mikhnevich and in the first half of transition phase in Hoffa and Nelson. The timing of increase of torsion coincides with the It is more intensive in rotation than glide. Especially, Nelson indicates more rapid recoil (221.2degree/sec) than Hoffa (190.8degree/sec) and Mikhnevich (140.8degree/sec).

### Discussion

It is reported that body height of Hoffa who won the championship is 182cm, the second Nelson and the third Mikhnevich is 183cm and 201cm respectively (IAAF, 2007). Probably, Hoffa is the shortest world champion of men's shot put so far. It is clearly disadvantageous to be short to secure the acceleration

### Mikhnevich (21.27m)

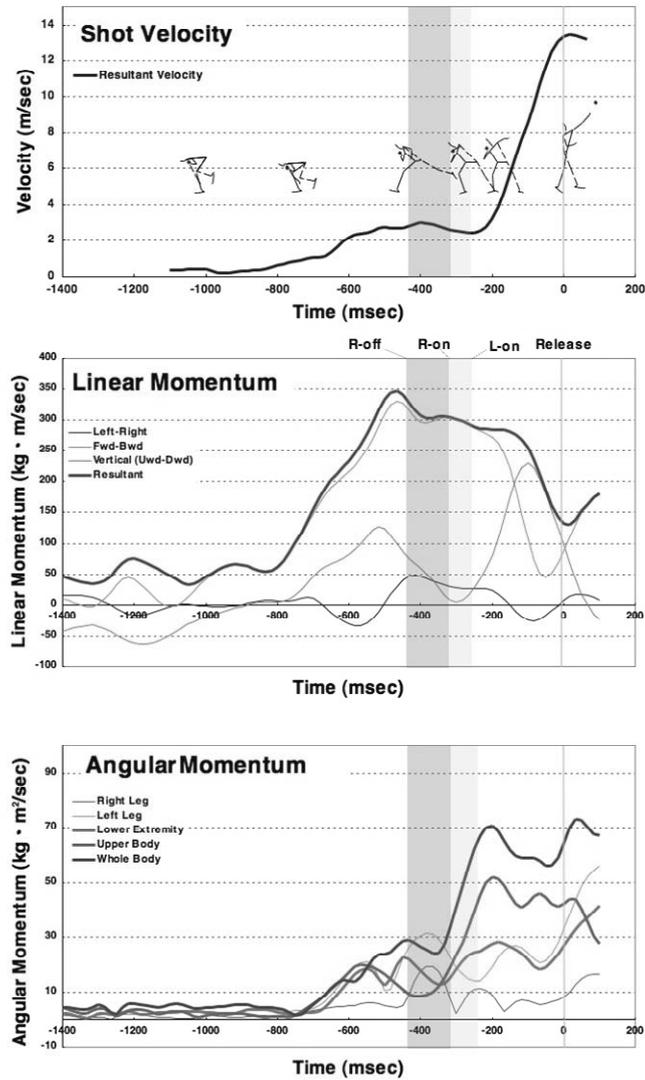


Figure 4c. Time course of shot velocity, linear momentum and angular momentum of athlete (Mikhnevich)

ange of the shot. The thought that rotation is suitable for small putters have been shown. Hoffa and Nelson embodied it in form by winning the gold and silver. As a matter of course, there should be the background of the technical excellence in their success.

Official record correlates significantly with the velocity at release. Some fluctuations can be related to other

factors such as angle and position of release.

Because most of shot acceleration is executed in delivery, the precedence phases should be aimed at ensuring the final acceleration. To satisfy this condition, not only the preparation of body position and the state of musculature incorporated in the final acceleration, but also the energy storage within athlete-shot system as the

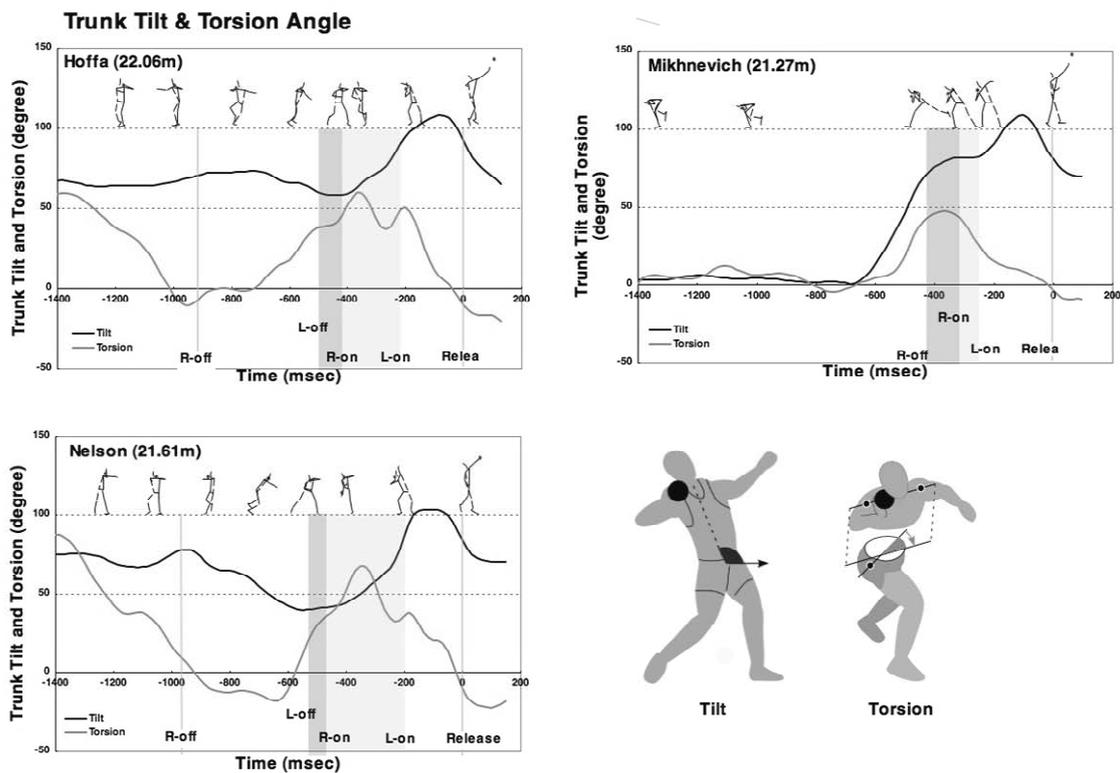


Figure 5. Forward - backward trunk inclination and the angle of torsion of the trunk. These parameters indicate tilting angle of trunk within saggital plane relative to the horizontal axis and relative precedence of hip axis rotation to the shoulder axis rotation about longitudinal axis of trunk.

source of final acceleration must be critical. The acceleration never occurs by shot alone. It needs the source of energy. In the past study, the researchers' attention has been paid mainly to the acceleration of shot itself even about the flight and transition phase. Luhthanan et al. (1997) pointed out the need of achieving an increase in the speed of the shot during the flight phase. From the viewpoint of reduction of loss of shot velocity, Coe and Stuhlec (2005) recommended keeping flight phase shorter. But the argument of how to secure the energy for acceleration has been hardly done. Although, a few researchers mentioned the importance of the momentum of the athlete-shot system (Zatsiorski, 1990; Hay, 1993; Bartnietz, 1994), we cannot find the study that showed it experimentally.

In the present study, the fall of shot velocity during the flight and transition phase is more remarkable in the rotation than the glide. This

supports the result of the precedent reports. This slowdown of shot velocity is corresponding to right foot grounding. Especially in rotation, this breaking motion and backward returning motion of the upper trunk coincides. This seems to result in the dissipation of the shot velocity. However, simultaneous generation of angular momentum and preparative configuration of body segments can be seen. Analyzing the system acceleration about top three in detail, Mikhnevich, in the nature of glide, depends on the linear momentum to storage energy in the whole system. On the other hand, amongst two rotators, Hoffa shows the same level of peak resultant linear momentum as Mikhnevich. It is suggested that linear momentum has great importance as well as angular momentum even in rotational style. Both of the two rotators show higher angular momentum than Mikhnevich.

Hoffa generates higher linear momentum from the effective weight shift to the putting direction and push off.

Then he skillfully suppressed the loss of the linear momentum that he got in the preparation phase and reaches the delivery. Two rotator shows second peak of linear momentum around L-on. It seems to be related to the left leg swing of transition phase. Actually, Nelson, indicating marked second peak, is characterized by intensive wide swing of left leg.

Also, from the time course of each component of momentum, the higher angular momentum of rotators after the second half of preparation phase seems to be related to the motion of lower extremity. In particular, Nelson keeps higher angular momentum throughout the preparation.

Nelson who shows marked dissipation of linear momentum during transition phase adversely increases the angular momentum. It seems to be closely related to the intensive swing of left leg during the transition. The deepest forward leaning angle of trunk from before R-on to transition seems to secure the range of motion of left leg for wide whipping motion. It is suggested that the leg movement causes the conversion of momentum from leg to the trunk and steep increase of angular momentum of lower extremity and provides trunk torsion as a result.

Actually, the velocity of trunk torsion increase of Nelson is more than two times of that of Hoffa and Mikhnevich. The torsion can stretch the abdominal and back muscles just before the final thrust and ensure the intensive upper trunk rotation during the last phase of delivery. Nelson seems to be dependent more upon trunk torsion than Hoffa and Mikhnevich. It is speculated that Nelson most actively utilizes the stretch-shortening cycle of trunk musculature. The remarkable wide swing of left leg of Nelson seems to be the source of kinetic energy of this intensive torsion.

The participation of angular momentum and sideward acceleration, the advantage of rotational technique, can be considered as disadvantage to coordinate the body balance. Hoffa eliminates this kind of tradeoff with continuous linear acceleration of CM from the back of the circle to the

release point standing comparison with glide technique without much dissipation of angular momentum of body. Actually, his linear momentum reach to higher level, which exceed not only Nelson but Mikhnevich of glider.

The backward trunk inclination during the delivery is caused by precedence of driving pelvis, but it rapidly reverses toward the release. It is suggested that this forward-backward rotation of trunk reinforces the final trust, cooperating with the linear translation and the recoil of trunk torsion.

### **Conclusions**

The results of the present study shows:

- 1) While the release velocity is the main determinant of performance, some fluctuations can be related to other factors such as angle and position of release.
- 2) Appearing in system acceleration, technical variation even within the rotational style. Hoffa utilizes both of linear and angular momentum of body in higher extent. In contrast, Nelson seems to have emphasis especially on angular momentum.
- 3) Mikhnevich of glider keeps higher level of linear momentum of whole body from the push off of glide to just before the final thrust.
- 4) Shot velocity alone is not enough to explain the process of acceleration. Because whole body momentum is gained or maintained even in the concomitance of marked decrease of shot velocity during flight and transition phase of rotation. To ensure the source of energy for delivery, acceleration of athlete-shot system is suggested to be the key factor. It can be proposed that the preparation for the delivery seems to be the process to accelerate whole body and secure the favorable body configuration rather than to accelerate the shot itself.

Acknowledgements

The authors thank to the biomechanics team of JAAF scientific committee for the effort of data collection, and to Mr. Hiroaki FUJII for technical assistance.

## References

- Abdel-Aziz, Y. and Karara, H. (1971) Direct linear transformation from comparator co-ordinates into object space co-ordinates. In: Proceedings of ASP/UI symposium on close-range photogrammetry, American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA, pp. 1–18.
- Ae, M., Tang, H.P., and Yokoi, T. (1992) Estimation of inertia properties of the body segment in Japanese athletes. In: Society of Biomechanisms (ed.), Biomechanisms 11, pp. 23-33. Tokyo, Japan: University of Tokyo Press.
- Bartonietz, K.E. (1994) Rotational shot technique. Track and Field Quarterly Review : Vol. 94, 3, p.18-29
- Coh, M., Stuhec, S. (2005) 3-D kinematic analysis of the rotational shot put technique. New Studies in Athletics: Vol. 20, Issue 3. p. 57-66
- Grigalka, O. (1985) In, Jarver, J. (ed.), The throws: contemporary theory, technique and training, 3rd ed., Los Altos, Calif., Tafnews Press, pp. 59-64.
- Hay, J.G. (1993). Biomechanics of Sports Techniques, 4th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- IAAF (2007) IAAF website, <http://www.iaaf.org>
- Luhtanen, P., Blomqvist, M. and Vantinen, T. (1997) A comparison of two elite shot putters using the rotational shot put technique. New Studies in Athletics: Vol. 12 Issue 4. p. 25-33
- Pyka, I. Otrando, B. (1991) National Strength & Conditioning Association Journal: Vol. 13 Issue 1. p. 6-9;83-88
- Schluter, W. and Nixdorf, E. (1984) Kinematische Beschreibung und Analyse der Diskuswurftechnik. Leistungssport: 6, 17-22
- Winter, D.A. (1990) Biomechanics and motor control of human movement: John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 41-43
- Zatsiorsky, V.M. (1990). The biomechanics of shot putting technique. In Proceedings of the First International Conference on Techniques in Athletics, Vol. 1 (edited by G.P. Brüggemann and J.K. Rühl): pp.118-125. Köln: Deutsche Sporthochschule.
-

## **Biomechanical analysis of elite javelin throwing technique at the 2007 IAAF World Championships in Athletics**

Kenji Tauchi <sup>1)</sup>, Masatoshi Murakami <sup>2)</sup>, Toshinori Endo <sup>3)</sup>, Hisashi Takesako <sup>1)</sup>, Koki Gomi <sup>1)</sup>

1) Waseda University, 2) Ehime Women's College, 3) Aoyama Gakuin University

### **Abstract**

The purpose of this study was to investigate the biomechanical parameters that influence the javelin throwing distance only among elite javelin throwers and to indicate the averaged motion pattern of elite javelin throwers. The best competition throws of twelve male finalists at the 2007 IAAF World Championships in Athletics were analyzed. The biomechanical parameters that affect throwing distance for elite javelin throwers were release velocity, and vertical release velocity in particular, and approach run velocity at final right foot contact on the ground. These results suggested that elite javelin throwers who began thrusting the javelin at a higher approach run velocity and obtained some horizontal release velocity (required at least 22-23m/s) but who also obtained higher vertical release velocity obtained better throwing distances. In addition, it was observed from averaged motion of World championships finalists that the better javelin throwers showed more flexion at the right knee angle, we called "knee down" motion, during final preparatory phase.

### **Introduction**

In the past, several biomechanical studies have analyzed the throwing movement of elite javelin throwers in the Olympic Games (OG) or World Championships (WCh). To the extent known, these studies were as follows: the 1985 OG in Los Angeles (Komi and Mero, 1985), the 1991 WCh in Tokyo (Ueya, 1992), the 1992 OG in Barcelona (Mero et al., 1994), the 1995 WCh in Gothenburg (Morriss et al., 1997), the 1999 WCh in Seville (Campos et al., 2004) and the 2005 WCh in Helsinki (Murakami et al., 2006). Most of the studies noted above have reported release parameters (release velocity, release height, release angle, attitude angle, attack angle). Although they also described the characteristics of the throwing technique in individual throwers, few studies elucidated the common characteristics of the throwing techniques among elite javelin throwers. Murakami et al. (2006)

investigated kinematic determination of javelin throwing performance for many throwers from the novice to elite level (included WCh finalists) by clarifying the relationship between kinematics of the throwing movement and the distance thrown. However, no studies have tried to investigate kinematic determination of javelin throwing performance only among elite javelin throwers.

The purpose of this study was to investigate the biomechanical parameters that influence the javelin throwing distance only among elite javelin throwers and to indicate the averaged motion pattern of elite javelin throwers.

### **Methods**

Subjects were twelve male javelin throwers who advanced to the male javelin final at the 2007 IAAF World Championships in Athletics in Osaka, Japan. All subjects were right-handed throwers. The best

throw for each subject during the competition was analyzed.

The throwing movements were videotaped by two video cameras from the left side and rear of the throwing area. The camera speed was 60fps, and shutter speed was 1000Hz. We calibrated the photographic field of the throwing area (throwing direction: 6m, lateral direction: 4m, vertical direction: 2.5m) for the following three-dimensional analysis. We recorded a pole with six landmarks set on a runway with nine control points.

Twenty-three landmarks on each athlete's body and two reference landmarks on the javelin (tip and grip) were digitized using a digitize system (Frame-DIAS, DKH). The three-dimensional coordinates were calculated using the direct linear transformation (DLT) method. These three-dimensional coordinates were smoothed with a digital filter with cutoff frequency set at 10Hz.

In this study, analysis of the javelin throwing movement focused on the final preparatory and delivery phases. The preparatory phase was defined as the period from when the right foot lands on the ground (R-on) to when the left foot lands on the ground (L-on), and the delivery phase was

defined as the period from L-on to release of the javelin (REL).

The calculated parameters were as follows (figure 1):

- Release parameters of the javelin (release velocity, release height, release angle, attitude angle and attack angle)
- Velocity of the body center of gravity ( $V_{CG}$ ) at R-on, L-on and REL
- Reduction in REL—percent reduction of  $V_{CG}$  from L-on to REL
- Duration of the preparatory and delivery phases
- Pull distance—the moving distances of the grip during the preparatory and delivery phases
- Step length—the length between right toe at R-on and left toe at L-on
- Right and left knee joint angle

In addition, we showed the averaged motion pattern of the javelin throwing movement for visual feedback in order to consider good throwing technique. The averaged motion was calculated by normalizing the three-dimensional coordinates of the segment endpoints by the thrower's body height and

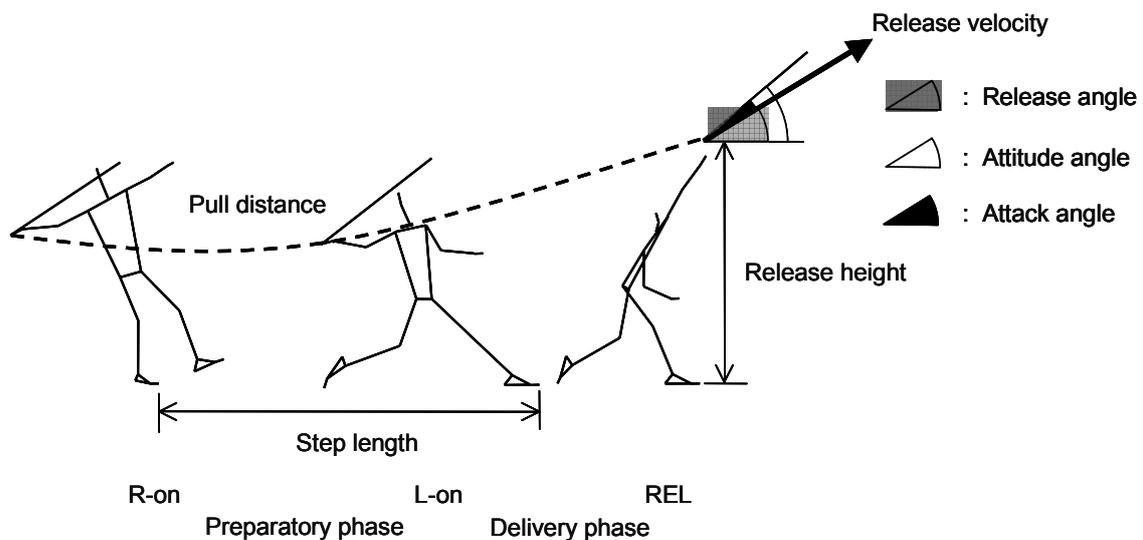


Figure 1 The representation of the measurement parameters

Table 1 Distance and release parameters of the javelin

Rank	Name	Distance (m)	Release Velocity (m/s)				Release height (m)	Release angle (deg)	Attitude angle (deg)	Attack angle (deg)
			Lateral	Horizontal	Vertical	Resultant				
1	Pitkämäki	90.33	-4.5	22.8	18.8	29.9	1.99	39.9	45.6	5.7
2	Thorkildsen	88.61	1.0	24.3	17.2	29.8	1.86	35.9	39.4	3.5
3	Greer	86.21	2.4	24.0	16.6	29.3	1.71	35.6	37.1	1.5
4	Vasilevskis	85.19	1.6	24.7	15.3	29.1	1.81	33.4	37.1	3.7
5	Ivanov	85.18	2.2	24.6	14.9	28.8	1.89	34.3	35.9	1.5
6	Oosthuizen	84.52	2.2	23.5	15.9	28.5	1.91	34.6	38.2	3.6
7	Janik	83.38	2.6	24.4	14.8	28.7	1.87	32.5	34.2	1.7
8	Järvenpää	82.10	2.1	24.6	14.4	28.6	1.78	32.2	38.3	6.0
9	Martínez	82.03	-1.3	24.3	14.9	28.5	2.03	32.9	37.5	4.6
10	Arvidsson	81.98	-0.3	24.4	14.3	28.3	1.99	31.9	33.0	1.2
11	Rags	80.01	1.2	22.6	16.8	28.2	1.96	38.7	40.5	1.8
12	Wirkkala	78.01	0.9	23.9	14.9	28.2	1.84	32.8	42.5	9.7
Average		83.96	0.8	24.0	15.7	28.8	1.89	34.6	38.3	3.7
SD		3.48	2.0	0.7	1.4	0.6	0.10	2.6	3.5	2.5

the time elapsed during each movement phase. For details on calculations of averaged motion, refer to Ae et al. (2007). In this study, the averaged motion was compared between six high rank throwers and six low rank throwers. But Greer (Rank 3) was excluded from the six high rank throwers' averaged motion because his leg motion differed markedly from all the other throwers. His legs motion will be described in detail later.

The correlation coefficients (r) between throwing distance and each measured parameter were calculated using the method of least squares. The significance level was set at 5% and 1%.

## Results

### Distance and release parameters

The distance and release parameters are presented in Table 1. The distance was 83.96±3.48m (Range : 90.33m-78.01m). The highest horizontal release velocity was Vasilevskis (Rank4: 24.7m/s), and the gold medalist Pitkämäki ranked 11th (22.8m/s). However, Pitkämäki had the highest vertical release velocity (18.8m/s); furthermore, he had the highest values in both release angle and attitude angle. Although significant positive correlations were observed between the distance and resultant release

Table2 Correlation coefficients between distance and release parameters of the javelin

Parameter	r	significance
Release velocity		
Lateral	-0.325	ns
Horizontal	-0.057	ns
Vertical	0.672	p<0.05
Resultant	0.938	p<0.01
Release height	-0.059	ns
Release angle	0.495	ns
Attitude angle	0.187	ns
Attack angle	-0.247	ns

ns: not significance

velocity (r=0.938, p<0.01) and vertical release velocity (r=0.672, p<0.05), the other release parameters showed non-significant correlations with the distance (Table 2).

### The velocity of the body center of gravity, duration, pull distance, and step length

The velocity of the body center of gravity ( $V_{CG}$ ), duration of preparatory and delivery phases, pull distance, and step length are presented in Table 3.  $V_{CG}$  decreased slightly from R-on (6.52±0.33m/s) to L-on (5.98±0.47m/s), and then the velocity rapidly decreased to release (3.44±0.36m/s). Horizontal step lengths for most throwers were the same as their

**Table 3** Velocity of the body center of gravity ( $V_{CG}$ ), duration, pull distance and step length.

Rank	Name	$V_{CG}$ (m/s)			Reduction in REL (%)	Duration (s)		Pull distance (m)			Step length (m)	
		R-on	L-on	REL		Preparatory	Delivery	Preparatory	Delivery	Total	Lateral	Horizontal
1	Pitkämäki	6.93	6.48	3.55	45.3	0.183	0.117	1.33	2.06	3.39	-0.75	1.72
2	Thorkildsen	6.91	6.19	3.72	39.9	0.150	0.117	1.13	2.07	3.20	-0.48	1.64
3	Greer	6.72	6.37	3.67	42.3	0.167	0.117	1.26	1.98	3.24	-0.35	1.88
4	Vasilevskis	6.48	6.06	2.71	55.3	0.217	0.117	1.45	2.06	3.52	-0.66	2.14
5	Ivanov	6.90	6.04	3.37	44.2	0.233	0.100	1.71	1.75	3.46	-0.11	2.35
6	Oosthuizen	6.33	4.94	2.73	44.7	0.233	0.133	1.51	2.03	3.54	-0.35	1.98
7	Janik	5.97	5.41	3.72	31.2	0.233	0.150	1.40	1.94	3.34	-0.58	1.96
8	Järvenpää	6.63	6.57	3.77	42.6	0.167	0.117	1.10	2.00	3.10	-0.32	2.00
9	Martínez	6.19	5.75	3.59	37.5	0.233	0.133	1.44	2.20	3.64	-0.81	1.76
10	Arvidsson	6.25	5.61	3.40	39.4	0.200	0.133	1.28	2.10	3.37	-0.46	1.72
11	Rags	6.65	6.21	3.55	42.9	0.167	0.117	1.18	2.06	3.24	-0.16	1.72
12	Wirkkala	6.31	6.09	3.52	42.2	0.150	0.133	1.02	1.99	3.01	-0.48	1.72
Average		6.52	5.98	3.44	42.3	0.194	0.124	1.32	2.02	3.34	-0.46	1.88
SD		0.32	0.47	0.36	5.6	0.034	0.013	0.20	0.11	0.19	0.22	0.22

1. Reduction in REL was percent reduction of  $V_{CG}$  from L-on to REL

body height or less. Although a significant positive correlation was observed between the distance and  $V_{CG}$  at R-on ( $r=0.596$ ,  $p<0.05$ ), the other parameters showed non-significant correlations with the distance (Table 4).

#### Visual feedback by averaged motion

In backward viewing, throwers ranked 7–12 tended to show more rightward rotation of the trunk (the grip was placed further backward) during the preparatory phase, so they tended to delay the timing of pulling the javelin during the delivery phase compared to throwers ranked 1–6 (Figure 2, 3). In side viewing, throwers ranked 1–6 tended to show more flexion at the right knee angle (Figure 4, left upper) and bending of the trunk backward slightly during the preparatory phase compared to throwers ranked 7–12 (Figure 2). Both throwers ranked 1–6 and throwers ranked 7–12 tended to show nearly full extension at the left knee angle after slightly flexing during the delivery phase (Figure 4, right bottom). However, bronze medalist Greer showed a very different style from the other eleven throwers; he kept greater flexion at his right and left knee angle

**Table 4** Correlation coefficients between the distance and each parameter

Parameter	r	significance
$V_{CG}$		
R-on	0.596	$p<0.05$
L-on	0.194	ns
REL	-0.058	ns
Reduction in REL	0.221	ns
Duration		
Preparation	0.056	ns
Delivery	-0.385	ns
Pull distance		
Preparation	0.310	ns
Delivery	-0.062	ns
Total	0.290	ns
Step length		
Lateral	-0.247	ns
Horizontal	0.087	ns

ns: not significance

during the delivery phase (Figure 5). Therefore, he was excluded from averaged motion of throwers ranked 1–6.

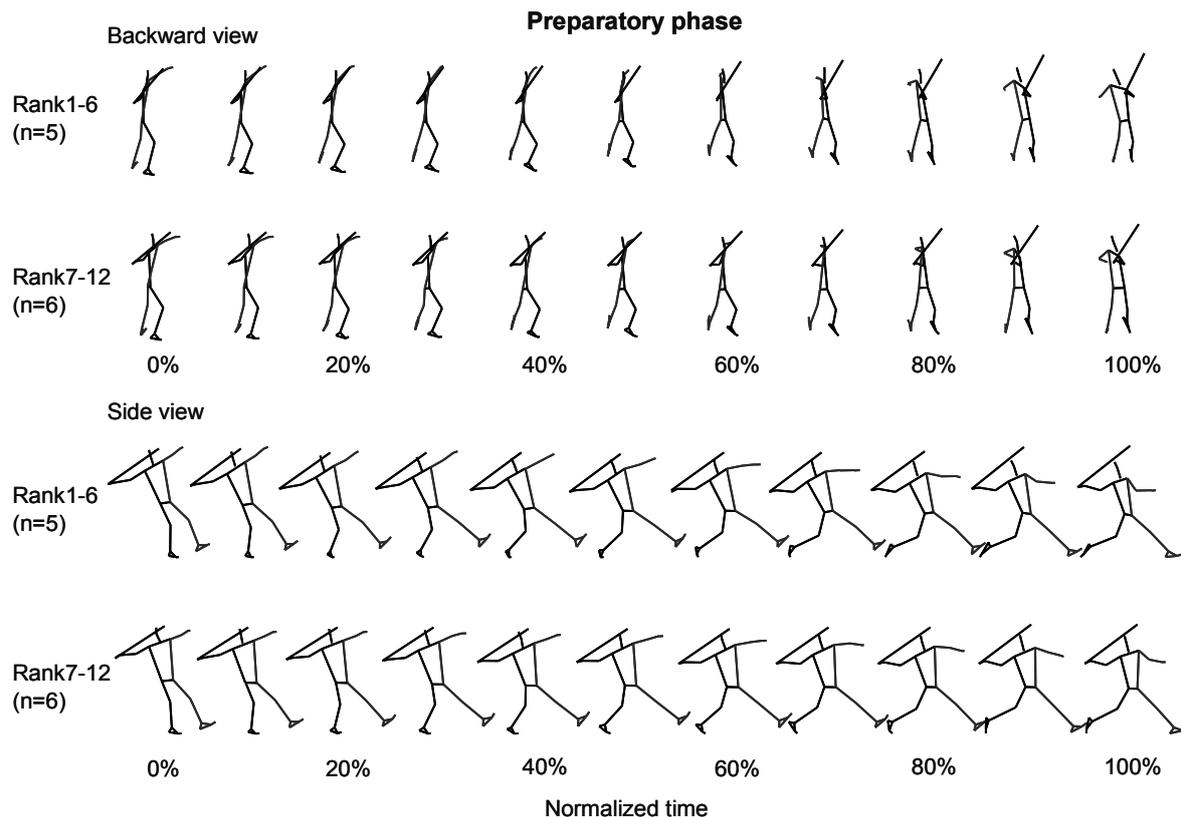


Figure 2 Averaged motion during preparatory phase in elite javelin throwers

## Discussion

The release parameters presented in this study (Table 1) were similar to those in previous studies (Mero et al., 1994; Morriss et al., 1997; Campos et al., 2004). In relationship to distance, there was a significant positive correlation coefficient between the distance and resultant release velocity; other release parameters showed non-significant correlation with the distance (Table 2). These results were supported by previous studies (Bartonietz, 2000; Murakami et al., 2006). In each component of release velocity, there was no significant correlation between the distance and horizontal release velocity which was most highest mean values in three components, but there was a significant correlation between the distance and vertical release velocity. This result suggested that vertical release velocity was a determination of rank (distance) as a prerequisite for obtaining a horizontal release

velocity of about 23–24m/s among elite javelin throwers.

Murakami et al. (2006) has reported that there was a significant positive correlation between the distance and approach run velocity at R-on for a wide range of performance levels. We also obtained the same result (Table 3), which proved the importance of starting to thrust the javelin at a higher approach run velocity in elite javelin throwers. However, the other parameters regarding approach run velocity were not significantly correlated with the distance. Although the reduction in REL is considered to relate to the kinetic energy transfer from the whole body to the javelin (Böttcher and Kühl, 1998; Bartonietz, 2000; Morriss et al., 2001), the amount of reduction was not a factor that decided the javelin throwing performance in elite javelin throwers. It may have influenced this result with different strategies to accelerate the javelin in

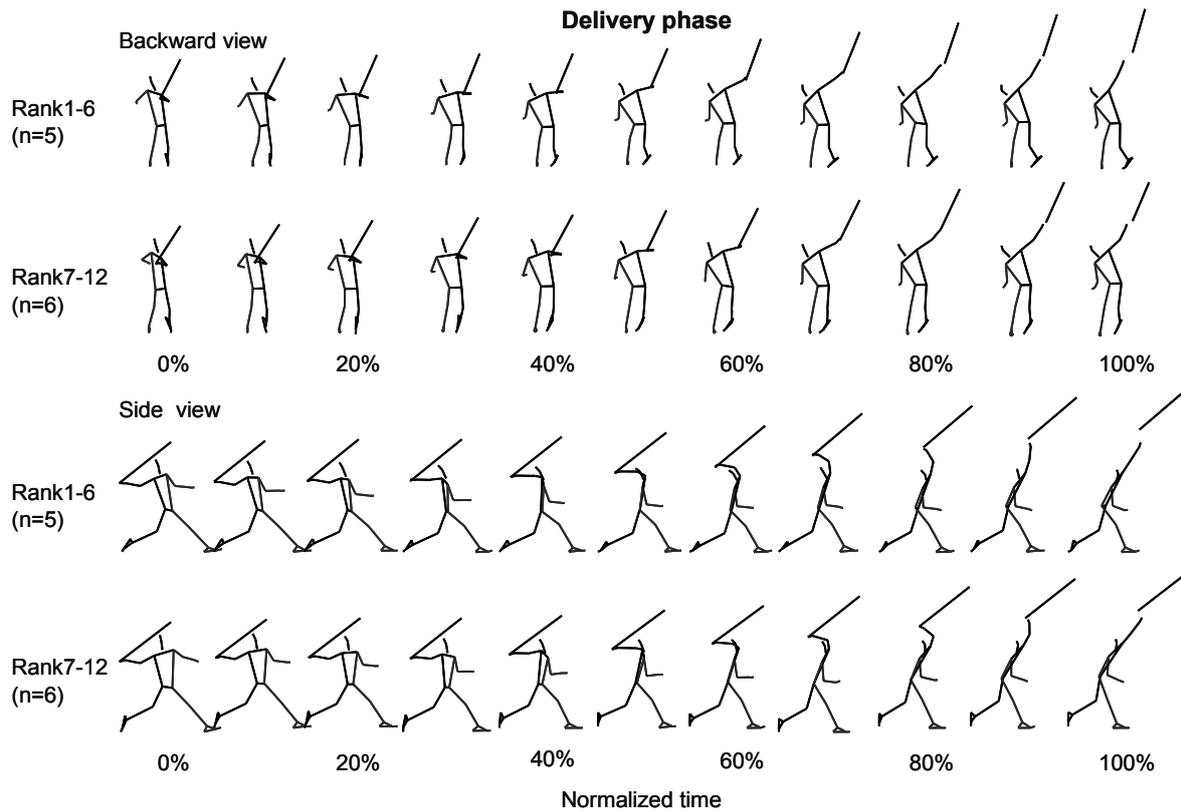


Figure 3 Averaged motion during delivery phase in elite javelin throwers

individuals.

Furthermore, Murakami et al. (2006) have reported that the distance and the pull distance had a linear relationship, and the pull distance values here (in WCh finalists) were similar, but this relationship was not confirmed by this study. This result suggested that pull distance was not a determinative factor in deciding the javelin throwing performance in elite javelin throwers. The duration and step length also were not determinative factors for their ranking.

This study was not able to adequately clarify the determinative factors for ranking in elite javelin throwers, instead indicating only basic biomechanics parameters. Therefore, we must analyze the kinematics and kinetics like angular velocity, momentum, and kinetic energy at each joint and body segment. In order to obtain some hints for future analysis of the throwing techniques in elite

javelin throwers, we tried to visually determine how elite javelin throwers move and indicate the averaged motion in five high rank throwers (ranked 1–6) and six low rank throwers (ranked 7–12) among World Championship finalists. This approach will be able to provide highly useful information for javelin throwers and their coaches without showing many biomechanical parameters.

Most interesting was the angle displacement of the both right and left knee joint. In Side viewing, the right knee joint tended to be flexed more in throwers ranked 1–6 than in throwers ranked 7–12 during the preparatory phase (Figure 4, left upper). We describe this motion as ‘right knee down’ in this study. It was conceivable that this ‘right knee down’ motion makes the pelvis rotate without bending the trunk forward, which leads to a body position thrusting the javelin during the former half of delivery phase (Figure 2, 3). In contrast, an

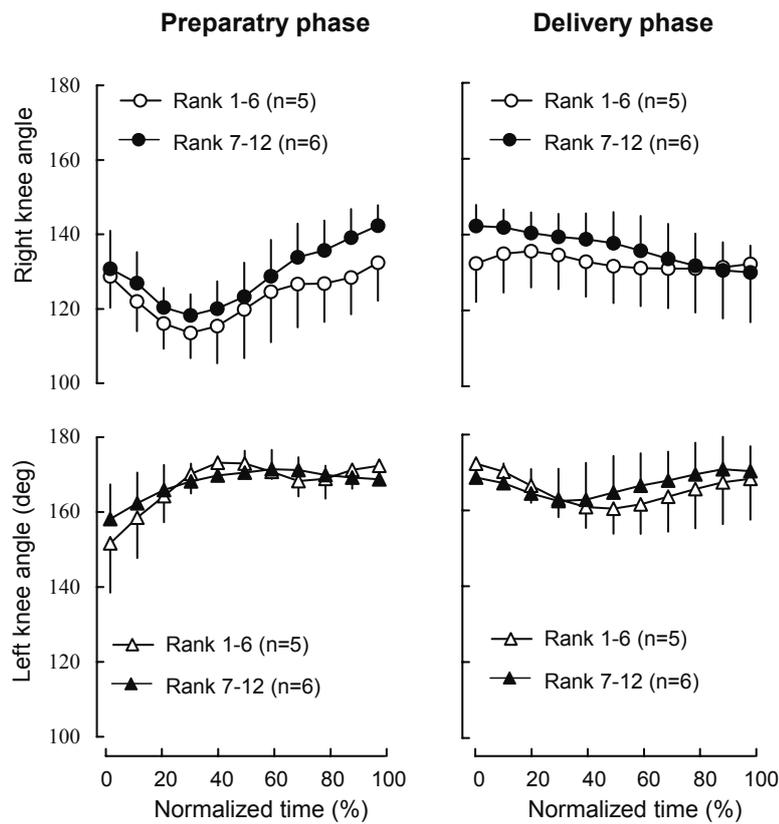


Figure 4 Angle displacement of the knee joint

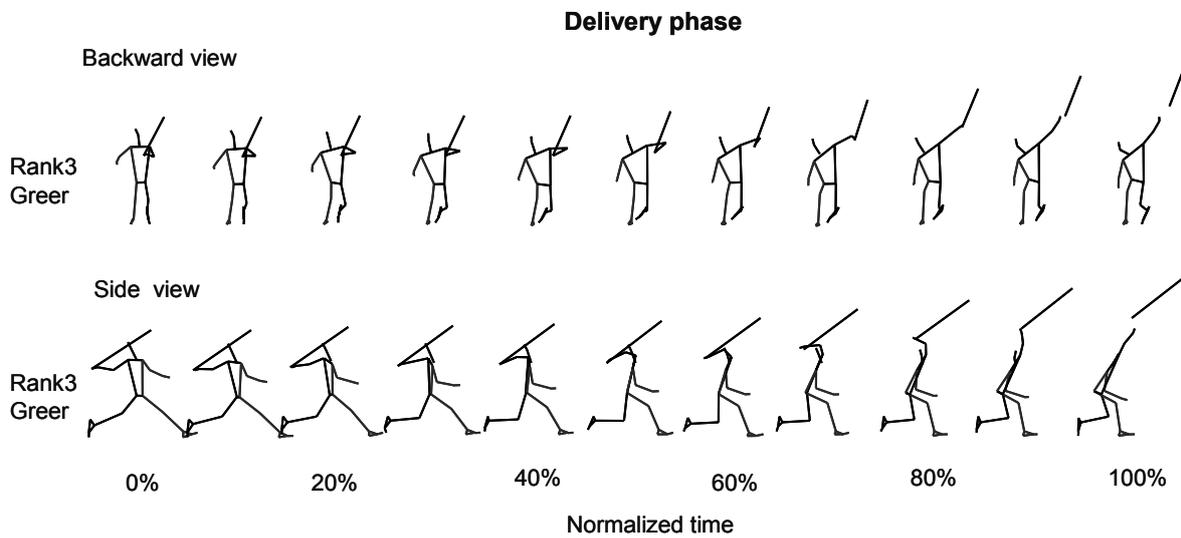


Figure 5 Stick pictures of the throwing motion during delivery phase in Greer (Rank 3)

incomplete ‘right knee down’ motion was observed in throwers ranked 7–12, who tend to keep bending the trunk forward slightly through the preparatory to delivery phase (Figure 2, 3). We surmise that such differences in motion are caused by more elite throwers producing a higher vertical release velocity

for the javelin.

Many previous studies have reported the importance of keeping extension at the left knee joint during delivery phase (Morriss and Bartlett, 1996; Bartonietz, 2000; Murakami et al., 2006). Most elite javelin throwers in this study also showed

nearly full extension at the left knee angle after slight flexion during the delivery phase. This left knee motion was found to be an important motion common to elite javelin throwers. However, bronze medalist Greer showed greater flexion at his left knee angle during the delivery phase (Figure 6). This study was unable to clarify whether this was a technique unique to him or whether he had practiced correctly but failed during the competition. Further investigation of this point is probably needed.

### Conclusion

This study sought to study biomechanical parameters that affect throwing distance for elite javelin throwers and indicate the averaged motion patterns of throwing motion for elite javelin throwers.

Based on the current results, biomechanical parameters that affect throwing distance for elite javelin throwers are release velocity, and vertical release velocity in particular, and approach run velocity at R-on. This leads to the conclusion that elite javelin throwers who began thrusting the javelin at a higher approach run velocity and obtained some horizontal release velocity (required at least 22-23m/s) but who also obtained higher vertical release velocity obtained better throwing distances.

In addition, throwing movement may differ among upper- and lower-level groups even among elite javelin throwers, a fact that became apparent as a result of visual feedback data. In the future, standardized models will be created and amassed to cover a wide range of javelin throwers, thus identifying more valid findings and perspectives on coaching.

### Reference

- Ae, M., Muraki, Y., Koyama, H. and Fujii, N.: A biomechanical method to establish a averaged motion and identify critical motion by motion variability: With examples of high jump and sprint running. *Bull. Inst. Health and Sport Sci., Univ. of Tsukuba* 30: 5-12, 2007.
- Bartonietz, K.: *Javelin Throwing: an Approach to Performance Development. Biomechanics in Sport* (ed ) Zatsiorsky, Blackwell Scince: 401-434, 2000.
- Böttcher, J. and Kühl, L.: The technique of the best female javelin throwers in 1997. *New Studies in Athletics* 13: 47-61, 1998.
- Campos, J., Brizuela, G. and Ramón, V.: Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1999 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics* 19: 47-54, 2004.
- Komi, P. V. and Mero, A.: Biomechanical analysis of Olympic javelin throwers. *Int. J. Sport Biomech.* 1: 139-150, 1985
- Mero, A., Komi, P. V., Korjus, T., Navarro, E. and Gregor, R., J. Body segment contributions to javelin throwing during final thrust phases. *J. Appl. Biomech.* 10: 166-177, 1994.
- Morriss, C. and Bartlett, R.: Biomechanical factors critical for performance in the men's javelin throw. *Sports Med.* 21 (6): 438-446, 1996.
- Morriss, C., Bartlett, R. and Fowler, N.: Biomechanical analysis of the men's javelin throw at the 1995 Word Championships in Athletics. *New Studies in Athletics* 12: 31-41, 1997.
- Morriss, C., Bartlett, R. and Navarro, E.: The function of blocking in elite javelin throwers: a re-evaluation. *J. Hum. Movement Stud.* 41: 175-190, 2001.

- Murakami, M., Tanabe, S., Ishikawa, M., Isolehto, J., Komi, P. V. and Ito, A.: Biomechanical analysis of the javelin at the 2005 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics* 21: 67-80, 2006.
- Ueya, K. : The men's throwing events. *New studies in Athletics* 7: 57-65, 1992.

## 世界一流陸上競技者のパフォーマンスと技術

---

2010年3月25日発行

発行人 澤木 啓祐

発行所 財団法人日本陸上競技連盟

〒150-8050 東京都渋谷区神南 1-1-1 岸記念体育会館内

TEL : 03-3481-2300

---