

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

阿江通良¹⁾ 永原 隆¹⁾ 大島雄治¹⁾ 小山宏之¹⁾ 高本恵美²⁾ 柴山一仁¹⁾
1) 筑波大学 2) 大阪体育大学

1. はじめに

1968年のメキシコオリンピック走高跳でアメリカ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および曲線助走である。

走高跳の技術は助走、踏み切り準備、踏み切り、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み切りである。曲線助走を用いる背面跳はベリーロールに比べて、3次元的动作の要素が強く、踏み切り準備、踏み切り、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。

世界陸上第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をクリアーするなど、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トーマス選手が優勝

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み切り準備姿勢に特徴があった。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をクリアーして2位になったロシアのリバコフ選手は、踏み切り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み切り準備および踏み切り動作の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名の踏み切り準備および踏み切り動作を、左足踏み切り選手では2台の高速VTRカメラ(HSV-500、ナック、250コマ/秒、1/1000秒)により、右足踏み切り選手では2台のデ

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
1	D. トーマス	BAH	2.35	-	×○	×○	○	××○	○
2	Y. リバコフ	RUS	2.35	-	○	○	○	○	×○
3	K. イオアノフ	CYP	2.35	○	○	○	×○	×○	×○
4	S. ホルム	SWE	2.33	-	○	○	○	○	×××
5	T. ジャンク	CZE	2.30	○	○	○	○	×××	
5	V. モヤ	CUB	2.30	○	○	○	○	×××	
7	E. オンネン	GER	2.26	○	-	○	×-	××	
8	J. ババ	CZE	2.26	○	○	×○	×××		

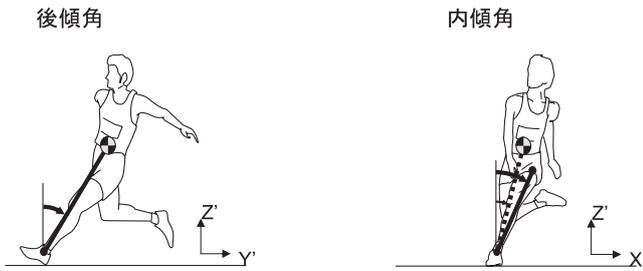


図1 身体の後傾角および内傾角の定義

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、踏み切り1歩前および踏み切り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)。

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み切り2歩前接地の5コマ前から踏み切り足離地後の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5~7.5Hz)。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であった。

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み切り局面における身体重心の速度などを算出した。

- H1: 踏み切り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
- H3: 身体重心の最大値 (H1+H2) とバー高との差

Thomas (BAH) 2.35m Lateral view

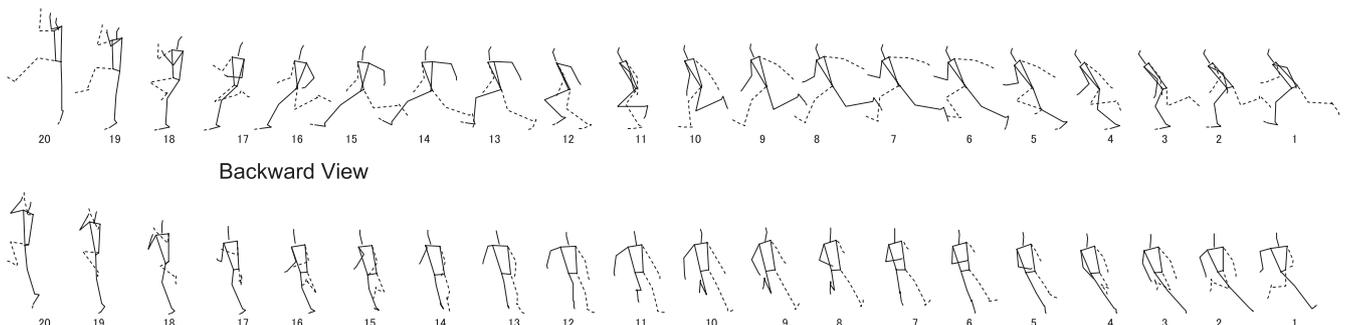


図2 トーマス選手のスティックピクチャー (2m35、上段：側方、下段：後方)

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。踏み切り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。

3. 結果と考察

3.1 3選手の踏み切り準備および踏み切りのフォーム

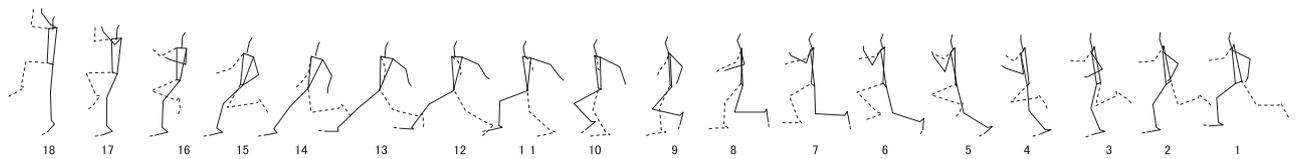
図2から4は、踏み切り2歩前接地から踏み切り足離地までの上位入賞者3名のスティックピクチャー (上段は側方から、下段は後方から) を示したものである。なお、左の上肢と下肢および体幹は実線で、右側は破線で示した。

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、踏み切り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、支持脚の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、踏み切りに入るまでには身体を起こしている。踏み切り足接地時には、体幹の起こしは他の選手に比べてやや小さいが、身体や踏み切り脚の後傾は大きい。また両腕をしっかりと振り込み、踏み切り足離地時には身体を垂直に保ち、振り上げ脚の大腿も高く上げている。

後方から見た場合の特徴は、踏み切り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み切り足接地にも保たれていることである (踏み切り時: 8.1度)。

Rybakov (RUS) 2.35m Lateral view



Backward view

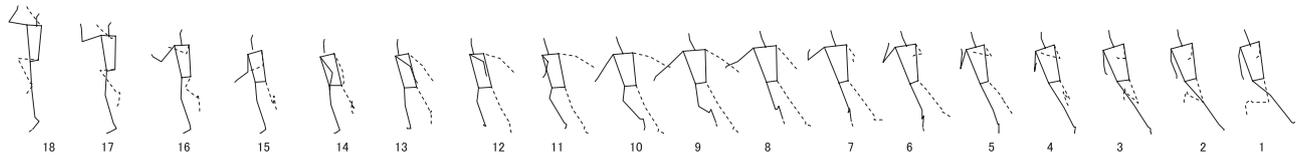
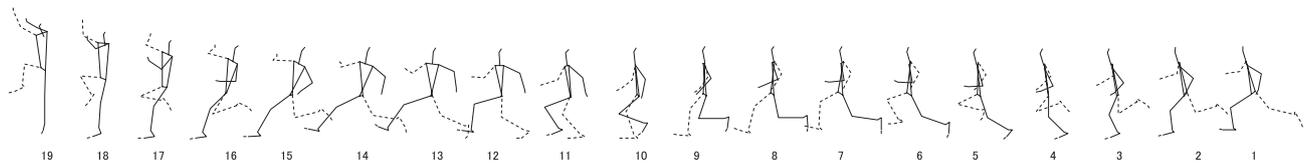


図3 リバコフ選手のスティックピクチャー（2m35、上段：側方、下段：後方）

Ioannou (CYP) 2.35m Lateral view



Backward view

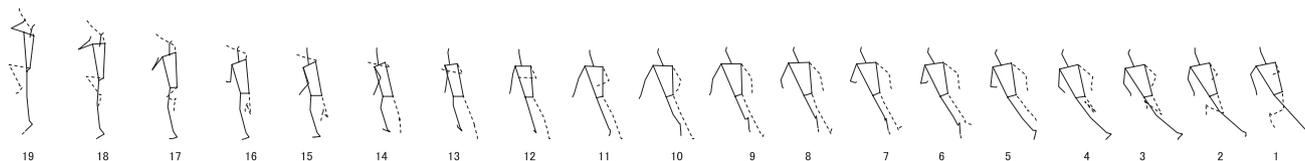


図4 イオアノフ選手のスティックピクチャー（2m35、上段：側方、下段：後方）

リバコフ選手（図3、2m35）

リバコフ選手は、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、踏み切り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み切りに移っている。しかし、1歩前の膝関節の屈曲はトーマス選手よりも小さい。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ことを示す。踏み切り局面では、身体および踏み切り脚を大きく後傾し、両腕と振り上げ脚を大きく振り込んでいる。

後方からみると、踏み切り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から10）で進行方向を大きく変えていることがわかる。踏み切り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）

イオアノフ選手は、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、リバコフ選手と同様に綺麗なフォームである。しかし、踏み切り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、さらに踏み切り足を地面にたたきつけるようにしていることもあり、踏み切り足の接地がやや遅れている。

後方からみると、踏み切り2歩前では大きく内傾しているが、踏み切り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3名の選手のパフォーマンスを規定する要因および踏み切り時間を、表3は最後の1歩および踏み切り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クリアランスにある。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。踏み切り時間は、1991年のもの（飯干ほか、1994）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み切り1歩前(7.73m/s)、踏み切り足接地時

表2 3選手のパフォーマンス決定要因および踏み切り時間

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)	踏み切り時間 (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

表3 3選手の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	踏み切り		1歩前	踏み切り		
	接地時	接地時	離地時	接地時	接地時	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

表4 3選手の踏み切り足接地時における身体の傾き角

選手名	踏み切り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

表5 3選手の踏み切り1歩前および踏み切り局面における膝関節角度

選手名	膝関節角度(度)				
	1歩前		踏み切り		
	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

(7.87m/s) とともに3名中で最も大きく、わずかに加速して踏み切りに入っている。彼の踏み切り足接地時の速度は、東京大会（踏み切り7.52±0.25m/s、1994）、ヘルシンキ大会（踏み切り7.78±0.34m/s、Isolehto, et al., 2007）の平均値よりもやや大きい。この加速して踏み切り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、それでも踏み切り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み切り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は踏み切り1歩前および踏み切り局面の膝関節角度を示したものである。また図5は3選手の踏み切り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。踏み切り足接地時の身体の

内傾角は3選手とも東京大会（3.2±3.1度）よりも大きく、特にトーマス選手の内傾角は8.2度と非常に大きく、彼の大きな特徴の一つであると考えられる。

図2～4および表3に示したように、3選手とも踏み切り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

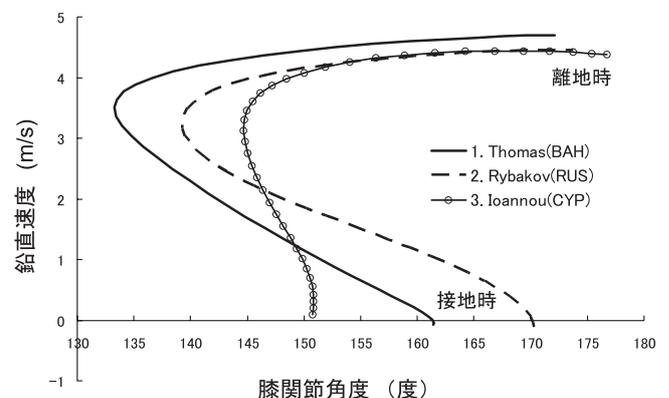


図5 3選手の踏み切り局面における膝関節角度および身体重心の鉛直速度の変化

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5に示したように、踏み切り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）。踏み切り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。踏み切り前半では膝関節は屈曲、身体重心は上昇を続けるが、これは大きく後傾した進退が踏み切り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%であったが、トーマス選手では77%、リバコフ選手では76%、イオアノフ選手では75%であり、大きな相違はなかった。これらの結果は、トーマス選手が踏み切り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. 踏み切り技術への示唆

すでに述べたように、トーマス選手の踏み切り動作の特徴の1つは、8.2度という大きな内傾にある。Okuyama et al. (2003) は、走高跳では踏み切り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。踏み切り時に作用する鉛直地面反力は踏み切り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、踏み切り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、踏み切り足接地の直後において身体、特に踏み切り脚が内傾していることは踏み切り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、踏み切り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、踏み切り加速しながら入っていた。踏み切り局面では踏み切り脚の内傾が大きく、股関節外転および膝伸展を大

きく使っていた。

イオアノフ選手では踏み切り足接地時の身体重心の鉛直速度は上向きであった。踏み切り局面において、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。踏み切り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。イオアノフ選手の踏み切りはこれに近いものであったと考えられる。イオアノフ選手は、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、踏み切り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せられて生み出されるものである。トーマス選手とイオア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)：世界一流走り高跳び選手の技術に関するバイオメカニクス的分析. 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).