

男子 50km 競歩日本記録更新時のペース変化とキネマティクスおよび
キネティクスの変数の変化佐藤 高嶺¹⁾ 奥野哲弥¹⁾ 三浦康二²⁾

1) 筑波大学大学院人間総合科学研究科 2) 日本スポーツ振興センター

Changes in pace and kinematics and kinetics parameters during 50km race walking competition achieved Japanese national record

Takane Sato¹⁾ Tetsuya Okuno¹⁾ Koji Miura²⁾

1) Graduate School of Comprehensive Human Sciences University of Tsukuba

2) Japan Sports Council

Abstracts

The aim of this study was to investigate factors of changes in speed during men's 50kmW race as a case study. This research focused on a subject who achieved a new Japanese national record at this race (Japan National Championship of Men 50kmW). Video data of every laps were collected on a single point of the 2km-circuit of the race using two high speed cameras. Walking speed increased in 35km, and reduced in 45km along with changes in stride length. These changes coincided with increase and reduce of hip joint torque and backward joint force in the late recovery phase of each step. Those were associated with the amount of mechanical energy flow from the recovery leg to the support leg in the late recovery phase and with the changes in the effectiveness of the whole body mechanical energy. Therefore, it is important to maintain or increase the magnitude of the hip joint torque and backward joint force in the late recovery phase on the second half of race.

I. 緒言

平川 (2012) は男子 50km 競歩において近い将来、日本の選手が銅メダル以上の順位を獲得することが期待されると述べており、実際にそのわずか 3 年後の 2015 年北京での世界陸上競技選手権大会 (世界陸上) の男子 50km 競歩において日本人競技者が初のメダルとなる銅メダルを獲得した。更にその後もオリンピック、世界陸上と立て続けにメダルを獲得し、2019 年ドーハでの世界陸上では、ついに日本の選手が金メダルを獲得した。また、この種目の日本記録は 2009 年に更新されてから 10 年近く破られることがなかったが、2018 年 10 月からの一年間に 3 回、計 4 名によって記録が更新されており、ここ数年での日本の 50km 競歩の成長、活躍は著しい。

その 50km 競歩は世界記録でも競技時間が 3 時間 30 分以上にも及び、オリンピックや世界陸上における現行の陸上競技種目の中で距離、時間ともに最

も長い競技種目である。そのため、レース序盤から中盤にかけてのペースが速すぎる場合には、レース終盤で大きなペース低下を引き起こす可能性が高く、自らのパフォーマンスを最大限に発揮するためにはペース配分が重要である (平川, 2012; Hanley, 2013)。しかしながら、近年のオリンピック、世界陸上における 50km 競歩レースのペース配分に関する研究では、上位者であってもレース終盤の 40-50km ではペースの低下が見られることを報告している (法元, 2010; 平川, 2012; Hanley, 2013)。一方で、平川 (2012) は国際大会において金メダルを獲得するためにはレース終盤におけるペースの維持あるいは漸増が起こり得ることを指摘している。実際、2016 年リオ・デ・ジャネイロオリンピックでは、40km 地点で 2 位に着けていた日本人競技者がその後の 45km にかけてペースを低下させた一方で、3 位のスロバキア人競技者はペースを維持させることで 2 位に上がり、さらには

45-50km にかけてペースを増加させることで金メダルを獲得している。そのため、上位の中でも特に1位になるためにはレース終盤におけるペースの維持、あるいはさらに漸増させるようなペース変化が1つの鍵となる可能性がある。

これまでのペース変化に関する研究では、Hanley et al. (2013) が男子 50km 競歩におけるペース変化の要因について、ヨーロッパカップに出場した12名を対象に検討し、骨盤の回旋角度変位や離地時の足関節底屈角の減少が見られ、ストライドの低下とともにペースも低下していたことを報告している。しかし、その動作の変容がどのような要因によって生じたものであるのかは検討されておらず、ペース変化の要因について詳細には捉えきれていない。一方で、法元ほか (2011) は男子 20km 競歩レース中の動作分析を行い、キネマティクスの変数とキネティクスの変数を組み合わせて検討し、回復期後半における回復脚股関節の関節力パワーと後向きの関節力の変化がペース変化に関係していたことを明らかにしている。キネティクスの変数は動作を引き起こす力に関する変数であり、運動の状態に関する変数であるキネマティクスの変数と組み合わせて分析することでペース変化の要因をより詳細に捉えることができる。

そこで、本研究では男子 50km 競歩レース中のペース変化とキネマティクスおよびキネティクスの変数を組み合わせて分析することで、ペース変化の要因をより詳細に検討し、レース終盤におけるペースの維持、漸増に関する知見を得ることを目的とした。また、国際的にも水準の高いレースを対象に分析を行うことで、世界大会のような高水準のレースで勝つために有益な知見が得られると考えられる。そのため、本研究では日本記録という高水準の記録が2名の競技者によって更新された、国際的にもハイレベルなレースにおける歩行動作を分析し、そのうちレースを制した1名を事例的に検討することとした。

II. 方法

1. 分析対象者

本研究は男子 50km 競歩において日本記録を達成した、競歩種目を専門とする日本人男性競技者1名(50km 競歩自己最高記録: 3時間 39分 07秒, 年齢: 31歳)を対象とした。ただし、男子 50km 競歩における現在の日本記録はその後、他の競技者によって更に更新されている。以下、対象者を A 選手とする。

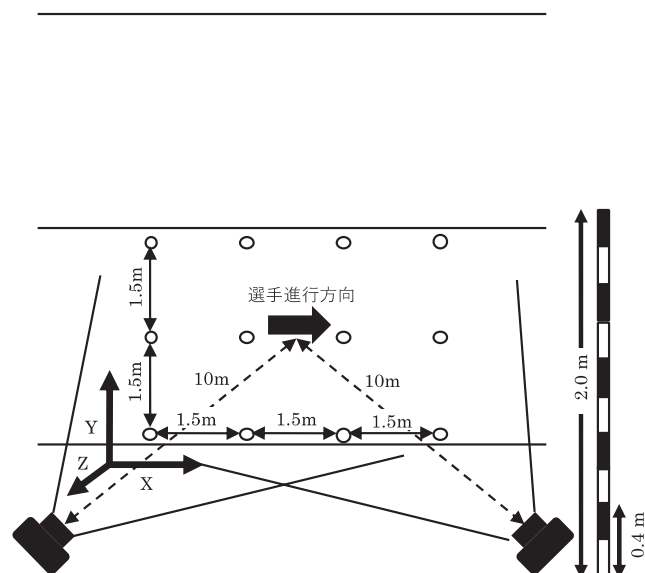


図1 キャリブレーション設定

2. データ収集

第103回日本陸上競技選手権大会において1周2kmの周回コースで行われた男子 50km 競歩レース中の 5.5km, 17.5km, 35.5km, 45.5km 地点での歩行動作をコース側方から2台のデジタルカメラ (DMC-FZ300, Panasonic 社製) を用いて撮影した。撮影スピードは 120fps, 露出時間は 1/120 秒 - 1/16000 秒での自動設定とした。2台のカメラはそれぞれコースに対して約 45度, 135度になるようにコース中央から約 10m の距離に三脚で固定し、選手の後方と前方から撮影を行った (図1)。また、コース上の合計 12 地点にマーク間隔 40cm のキャリブレーションポールを垂直に立て、選手の進行方向 (X 軸) に 4.5m, 進行方向に対して直行する方向 (Y 軸) に 3m, 鉛直方向 (Z 軸) に 2m とする右手系静止座標系を設定した。なお、本研究のデータ収集は日本陸上競技連盟科学委員会の活動によって行われた。

3. データ処理

2台のカメラから得られた各地点での映像は右足、もしくは左足の離地直前のコマ数を合わせることで同期した。その後、離地直前の 10 コマ前から同側足の離地直前 (以下、離地とする) の 10 コマ後までを動作解析ソフト (Frame-DIAS V, DKH 社製) を用いて、身体分析点 25 点およびコントロールポイントを 60Hz にてデジタル化した。撮影条件により時折身体の左側の分析点をとらえることが困難な場合が生じたため、その場合は分析者の目視によって分析点を推定した。デジタル化は熟練した分析者1名によって行われ、各分析点はポイント・オーバー・フレーム法を用いてデジタル化された。

(Bahamonde&Stevens, 2006). また, 分析点を特定しやすくするため, 動作解析ソフトの拡大機能を用いて, 各分析点周辺を 400% に拡大した. 得られた身体分析点の 3 次元座標値を 3 次元 DLT 法によって求めた. 算出した 3 次元座標値は, 残差分析法により最適遮断周波数を決定し, X 座標を 2.4-5.4Hz, Y 座標を 3.0-5.4Hz, Z 座標を 4.2-5.4Hz にて, バターワースデジタルフィルタを用いて平滑化した. なお, コントロールポイントから算出された 3 次元再構成後の位置座標の標準誤差は, いずれも 0.005m 未満であった.

4. 算出項目

(1)キネマティクスの変数

平滑化した座標データから阿江 (1996) の身体部分係数を用いて 15 の身体セグメント (左右の手部, 前腕, 上腕, 足部, 下腿, 大腿および頭部, 上胴, 下胴) および全身の重心位置, 部分の慣性モーメントを算出した. 分析点および算出した重心位置の変位を時間で数値微分することにより関節速度およびセグメントと全身の重心速度, 重心加速度を算出した.

右足, もしくは左足の離地から同側足の離地までを歩行の 1 サイクルとし, 1 サイクル中の重心の水平変位を 2 等分したものをストライド, 1 サイクルに要した時間を 2 等分し, その逆数をピッチとした. 歩行速度はストライドとピッチの積から算出した.

本来, 競歩は両足が同時に地面から離れることなく歩く競技であるが (日本陸上競技連盟, 2019), 本研究では人の目では捉えきれない程度の両足が地面から離れる局面が見られた. そのため, どちらかの足が地面と接している局面を支持期, 両足が地面と離れている局面を非支持期とし, 1 サイクル中の支持期および非支持期の時間および水平変位をそれぞれ 2 等分して支持時間, 非支持時間, 支持距離, 非支持距離とした.

(2)キネティクスの変数

本研究では地面反力を測定することが不可能であったため, 回復脚の各関節に作用する関節力, 関節トルクについてのみ, 回復脚足部の遠位端に作用する外力をゼロとして逆動力学的手法を用いて算出した.

(3)力学的エネルギー

各身体セグメントの力学的エネルギーを木下・藤井 (2015) の方法を参考に以下の式で算出した.

$$E_{s,t} = m_s g h_{scg,t} + \frac{1}{2} m_s \left| V_{scg,t} \right|^2 + \frac{1}{2} \left(I'_{scgx,t} \omega'^2_{scgx,t} + I'_{scgy,t} \omega'^2_{scgy,t} + I'_{scgz,t} \omega'^2_{scgz,t} \right)$$

ここで $E_{s,t}$ は時刻 t における身体セグメント s の力学的エネルギー, m_s, g, h_{scg}, V_{scg} はそれぞれ, 身体セグメント s の質量, 重力加速度, 静止座標系における身体セグメント重心座標データの Z 軸成分, 並進速度ベクトルである. また, I'_{scgx}, I'_{scgy} , および I'_{scgz} は身体セグメント s の重心回りの主慣性モーメント I_{scg} の各軸まわりの成分, $\omega'_{scgx}, \omega'_{scgy}$, および ω'_{scgz} は身体セグメント s の移動座標系における各軸回りの角速度である. また, 力学的エネルギーを時間で数値微分することにより力学的エネルギー変化率を算出した.

(4)力学的エネルギーの伝達量

身体部分感の力学的エネルギーの伝達量 (T_b) は Pierrynowski et al. (1980) の方法を参考に以下の式 1) - 4) で算出した.

$$\Delta E_{s,t} = E_{s,t+1} - E_{s,t} \quad 1)$$

$$W_{wb} = \sum_t^{fn-1} \left| \sum_s^{sn} (\Delta E_{s,t}) \right| \quad 2)$$

$$W_w = \sum_s^{sn} \sum_t^{fn-1} \left| \Delta E_{s,t} \right| \quad 3)$$

$$T_b = W_w - W_{wb} \quad 4)$$

ここで W_{wb} はセグメント内およびセグメント間での力学的エネルギーの変換および伝達が起こると仮定した場合の力学的仕事, W_w はセグメント内で力学的エネルギーの交換はあるがセグメント間での力学的エネルギーの伝達がないと仮定した場合の力学的仕事, fn は 1 歩行周期に要したフィールド数, sn はセグメントの数である.

(5)力学的エネルギー利用の有効性指数

歩行技術を評価する指標として力学的エネルギー利用の有効性指数 (EI) を阿江・藤井 (1996) の方法を用いて以下の式で算出した.

$$EI = \frac{\frac{1}{2} M V_x^2}{W_{wb}}$$

ここで M, V_x はそれぞれ身体質量, 歩行の 1 サイクルにおける身体重心速度前後成分の平均である.

(6)関節力パワー, セグメントトルクパワー

関節における関節力パワー (JFP_j) とセグメントトルクパワー (STP_j) を以下の式で算出した.

$$JFP_j = F_j \cdot V_j$$

$$STP_j = T_j \cdot \omega_s$$

ここで F_j, V_j, T_j はそれぞれ関節 j の関節力, 並進速度, 静止座標系における関節トルク, ω_s はセグメント s の角速度である. また, 関節力, 関節トルクによってセグメント s になされた仕事を JFP_j, STP_j を時間で積分することで算出し, その仕事を各局面に要した時間で除すことで関節力パワー

およびセグメントトルクパワーの平均値 (MJFP, MSTP) を算出した。

5. 局面分け

歩行動作の1サイクルのうち右足離地直前 (R-off) から右足接地 (R-on) までの右脚回復期を両足が地面から離れた非支持期を含めて以下の4つの局面に分けた。

- 第1局面：右足離地 (R-off) -左足接地 (L-on)
- 第2局面：左足接地 (L-on) -身体重心が左脚の足関節の真上を通過する左足支持期中点 (L-mid)
- 第3局面：左足支持期中点 (L-mid) -左足離地 (L-off) まで
- 第4局面：左足離地 (L-off) -右足接地 (R-on)

6. 時系列データの規格化

各分析地点での時系列データを回復期における各局面の動作時間によって規格化した。第1, 第4局面をそれぞれ15%, 第2局面を30%, 第3局面を40%とし, 全体を100%として規格化した。また, 力学的エネルギー, 関節力, 関節トルク, 関節力パワーおよび関節トルクパワーはA選手の身体質量で除すことで規格化した。

7. レース中のペース変化

レース中のペース変化をとらえるため, 試合の公式リザルトより5km毎のラップタイムを取得し, 5km毎の平均歩行速度を算出した。

III. 結果

1. レースにおける歩行速度, ストライド, ピッチの変化

図2は5km毎の区間平均速度の変化と各分析地点での歩行速度を示したものである。レース序盤の0-5kmでは, 3.70m/sとレース中最も遅い歩行ス

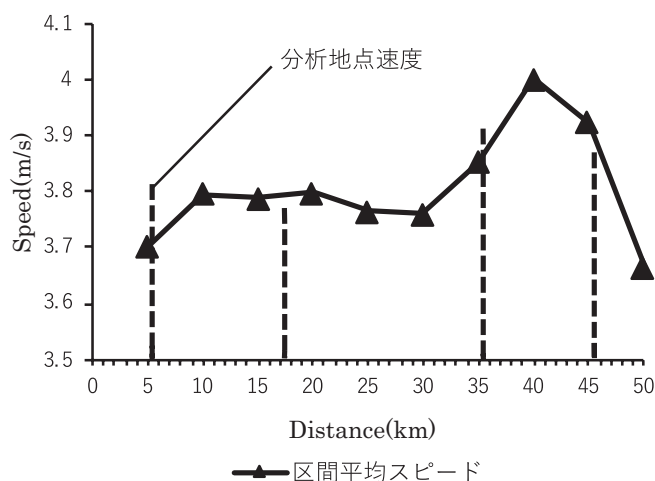


図2 5km 毎の区間平均速度の変化と各分析地点での歩行速度

ピードであった。その後, 5-20kmにかけて3.78-79m/sまで増加したが, 20-30kmではわずかに低下していた。30-35kmでは大きく歩行速度が増加し, 3.85m/sとこの時点までで最も高い歩行速度になり, 35-40kmで4.00m/sとさらに増加し, レース中最も高い歩行速度を示した。しかし, 40-45kmでは3.92m/sまで低下しており, 45-50kmで3.67m/sとさらに大きく低下し, レース中最も遅い区間となっていた。5.5, 17.5, 35.5, 45.5kmの各分析地点の歩行速度は, それぞれ3.80, 3.77, 3.91, 3.87m/sであった。なお, 1kmあたりが4分00秒ペースだと4.16m/s, 4分30秒ペースだと3.70m/sに相当する。

表1は各分析地点におけるキネマティクスの変数をまとめたものである。5.5km地点では, ピッチが3.43Hzでほかの地点よりも低く, ストライドは1.11mで歩行速度が最も高かった35.5km地点と変わらなかった。一方で, 17.5-45.5km地点ではピッチが3.53Hzと差はなく, ストライドが1.07-1.11mの間で変化していた。非支持時間はレース前半の2地点では0.05sであったが, レース後半の2地点では0.04sと減少していた。また, 非支持距離はレー

表1 各分析地点におけるステップパラメータ

| | ストライド | ピッチ | 歩行速度 | 支持時間 | 非支持時間 | 支持距離 | 非支持距離 |
|--------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| | (m) | (Hz) | (m/s) | (s) | (s) | (m) | (m) |
| 5.5km | 1.11 | 3.43 | 3.81 | 0.24 | 0.05 | 0.92 | 0.19 |
| 17.5km | 1.07 | 3.53 | 3.77 | 0.23 | 0.05 | 0.88 | 0.19 |
| 35.5km | 1.11 | 3.53 | 3.91 | 0.24 | 0.04 | 0.94 | 0.17 |
| 45.5km | 1.10 | 3.53 | 3.87 | 0.24 | 0.04 | 0.93 | 0.16 |

ス前半の 5.5km, 17.5km ではともに 0.19m であったが, レース後半の 35.5km, 45.5km ではそれぞれ 0.17m, 0.16m と前半と比べて減少していた. 一方で, 支持距離は 5.5km, 17.5km ではそれぞれ 0.92m, 0.88m であったが, 35.5km, 45.5km ではそれぞれ 0.94m, 0.93m とレース後半で増加していた.

2. 力学的エネルギー

表 2 は各分析地点における力学的仕事, 力学的エネルギー伝達量, 力学的エネルギー利用の有効性指数 (EI) を示したものである. W_{nb} は 1 サイクル中に全身で発揮したパワーの総和である全身の仕事量を表し, T_b は発揮したパワーである力学的エネルギーの身体セグメント間での伝達量の総和を表している. W_{nb} はレース前半では 2.8J/kg であったが, レース後半の 35.5km では低下し, 2.0J/kg とレース中最も小さい値を示していた. しかし, 45.5km では大きく増加しており, 3.0J/kg と分析地点の中で最も大きい値を示した. また, 後半の 2 地点では前半よりも T_b が大きな値を示したものの, 45.5km では W_{nb} も大きかったため EI が低下し, 最も低い値を示した. 一方で, 35.5km では最も EI が高くなっていた.

3. 力学的エネルギーの流れ

図 3 は各分析地点における右回復脚セグメントの力学的エネルギー変化率 (dE/dt), 関節力パワー (JFP), セグメントトルクパワー (STP) の変化を示している. dE/dt の正の値はセグメントの力学的エネルギーが増加したことを示し, 負の値は減少したことを示す. また, JFP の正の値は関節力によってセグメントに力学的エネルギーが流入したことを示し, 負の値は流出したことを示す. そして, STP の正の値は関節トルクによってセグメントに力学的エネルギーが流入したことを示し, 負の値は流出したことを示す.

各分析地点における足部と下腿の dE/dt , JFP, STP の変化パターンはそれぞれ似ているパターンを示した. その一方で大腿部における変化は分析地点ごとでのばらつきが見られた. 特に股関節における JFP は回復期 70% 前後から 100% にかけてばらつきがあり, 最も EI が高かった 35.5km での大腿近位端に作用する股関節力による大腿部の力学的エネルギー流出が大きく, 回復期 80% あたりから 100% にかけてのセグメントの力学的エネルギー減少量も大きかった. 一方で, 最も EI が低かった 45.5km では同様の股関節力による大腿部の力学的エネルギー流出が小さくなり, 回復期 80% あたりから 100% にか

けてのセグメントの力学的エネルギー減少量も小さかった.

図 4 はそれぞれ各分析地点における右回復脚セグメント近位端の MJFP, MSTP を各局面に分けて示したものである. MJFP は MSTP と比べ, 大きな値を示しており, 足関節や膝関節よりも股関節において大きな値が示された. 最も EI が高かった 35.5km での第 4 局面における股関節 MJFP は負の値となっており, 17.5km と比べて負のパワーが大きく増加していた. 一方で, EI が最も低かった 45.5km では同じ局面での股関節における負のパワーは大きく低下していた.

4. 関節力と関節トルクの変化

図 5, 6 はそれぞれ各分析地点における右回復脚大腿近位端に作用する関節力前後成分, 関節トルクの変化を示している. 関節力の正の値は進行方向に対し前向きを示し, 負の値は進行方向に対し後向きを示している. 関節トルクの正の値は伸展トルクを示し, 負の値は屈曲トルクを示している.

股関節力前後成分は R-off から回復期 30-40% までは前向き力であったが, 回復期 30% 前後からは後向き力に変化し, 回復期 80-90% にかけて後向きに増加していた. 5.5km 地点は他の地点よりも早期に前向きから後向きへと変化し, 回復期後半での後向き力の増加は緩やかで, ピーク値は $-3.0N/kg$ と各分析地点の中で最も小さかった. 一方で, その他の地点では, 回復期後半において 5.5km 地点よりも後向き力が大きく増加しており, 特に EI が最も高かった 35.5km 地点において $-3.8N/kg$ と最もピーク値が大きかった. また, 反対に EI が最も低かった 45.5km 地点での後向き力のピーク力は $-3.4N/kg$ と 35.5km 地点よりも小さかった.

股関節トルクは R-off から回復期 40% 前後までは屈曲トルクを示していたが, 回復期 40-50% からは伸展トルクに変化し, 回復期 80% 前後まで増加していた. 5.5km 地点は他の地点よりも早期に屈曲トルクから伸展トルクに変化しており, 伸展トルクのピーク値は $1.6Nm/kg$ と最も小さかった. 一方で, その他の地点では, 回復期 50% で屈曲トルクから伸展トルクに変化しており, EI が最も高かった 35.5km 地点において $1.8Nm/kg$ と最もピーク値が大きかった. また, 反対に EI が最も低かった 45.5km 地点でのピークトルクは $1.6Nm/kg$ と 35.5km 地点よりも小さかった.

表2 各分析地点における力学的仕事, 力学的エネルギー伝達量, EI

| | W_{wb} (J/kg) | W_w (J/kg) | Tb (J/kg) | EI |
|--------|-----------------|--------------|-------------|------|
| 5.5km | 2.8 | 16.7 | 13.9 | 2.6 |
| 17.5km | 2.8 | 17.1 | 14.4 | 2.6 |
| 35.5km | 2.0 | 18.3 | 16.4 | 3.9 |
| 45.5km | 3.0 | 18.2 | 15.2 | 2.5 |

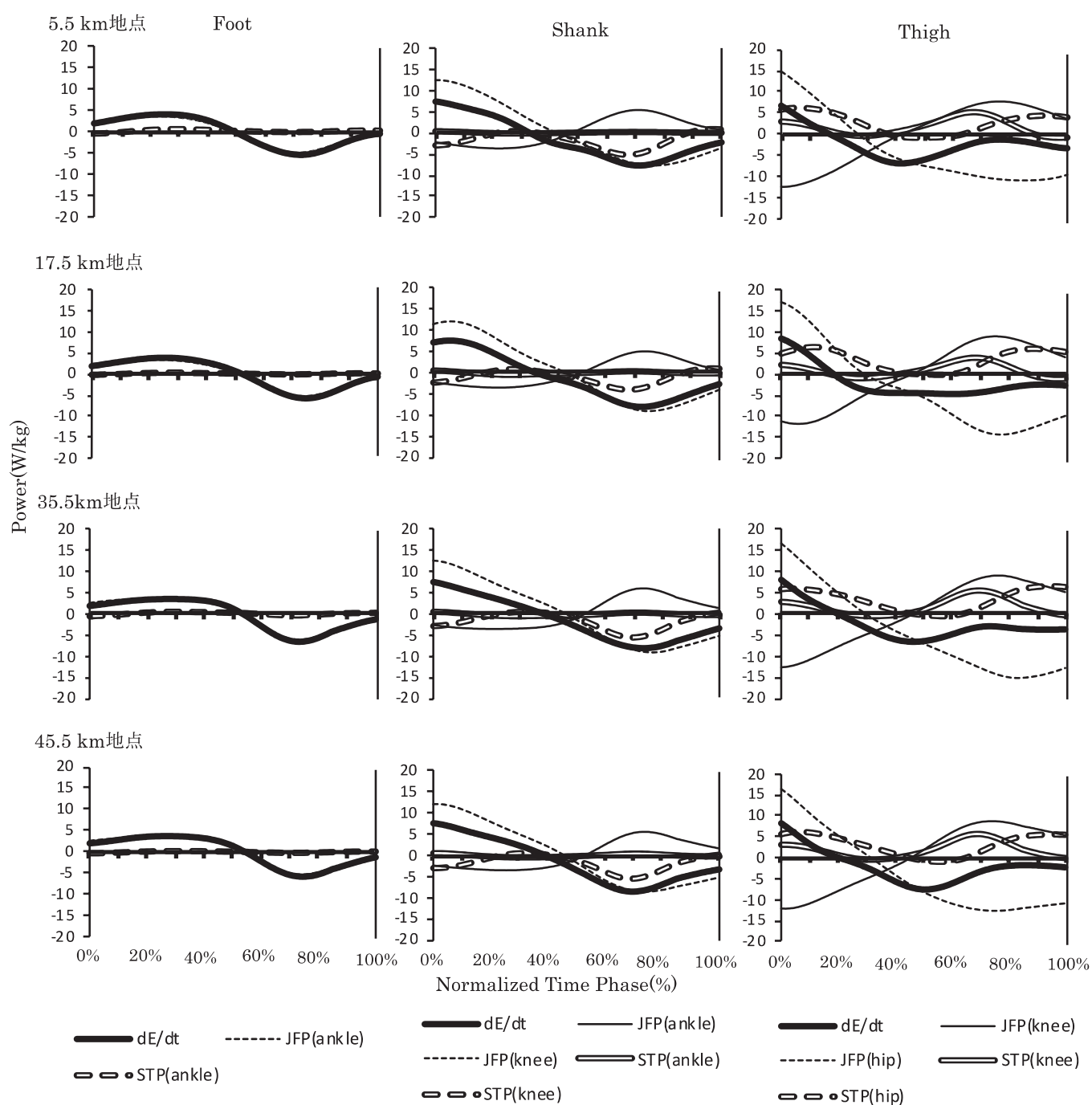


図3 各分析地点における右回復脚セグメントの力学的エネルギー変化率 (dE/dt), 関節力パワー (JFP), セグメントトルクパワー (STP) の変化パターン

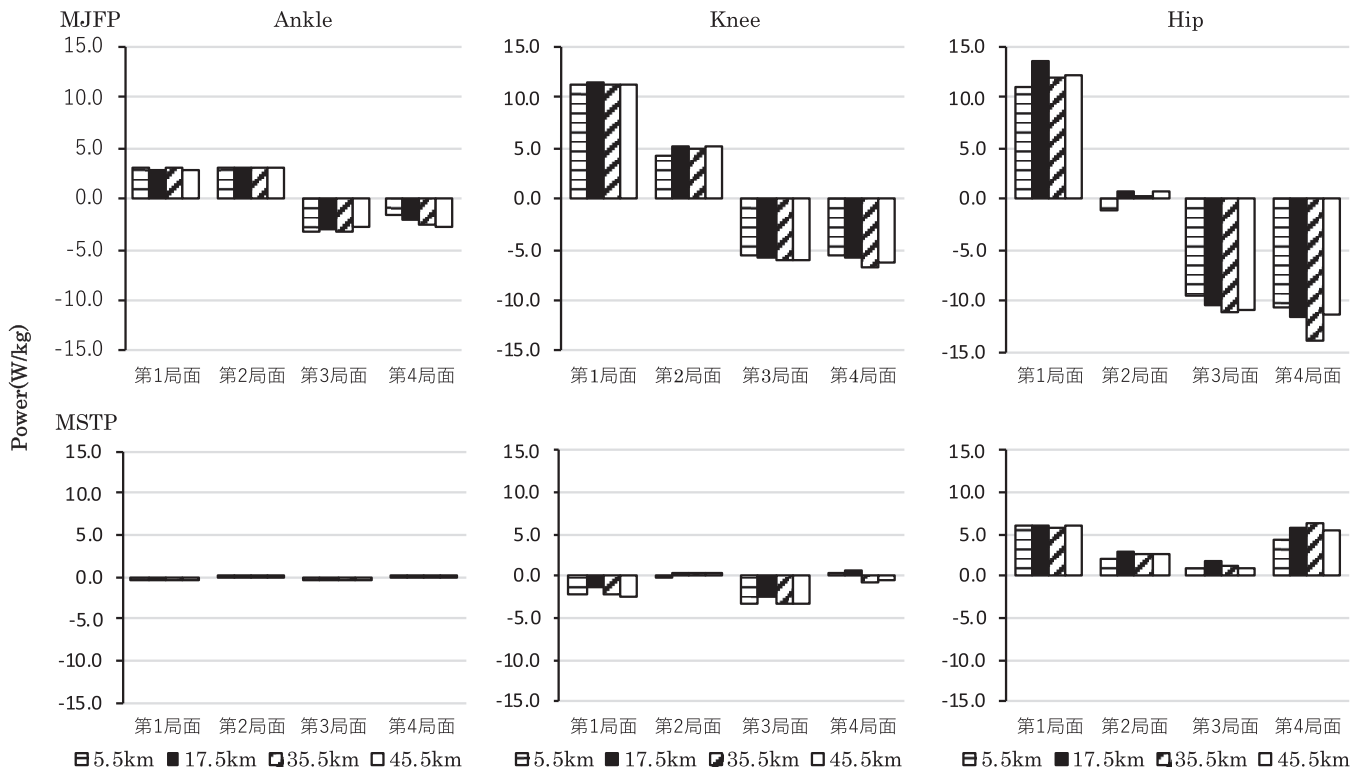


図4 各分析地点における右回復脚セグメント近位端のMJFPとMSTP

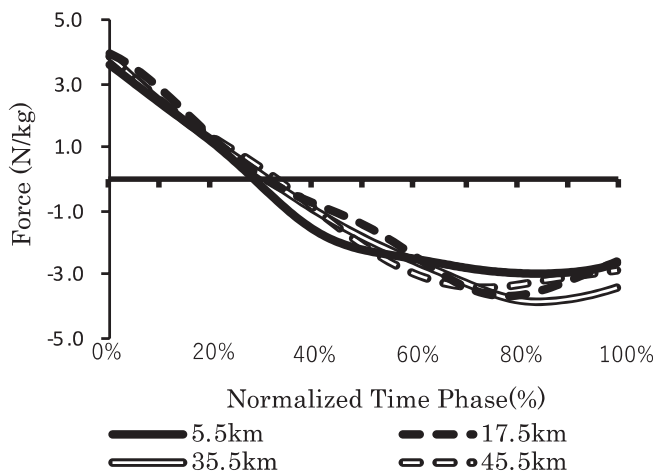


図5 各分析地点における右回復脚大腿近位端に作用する股関節力前後成分 (+前方; -後方)

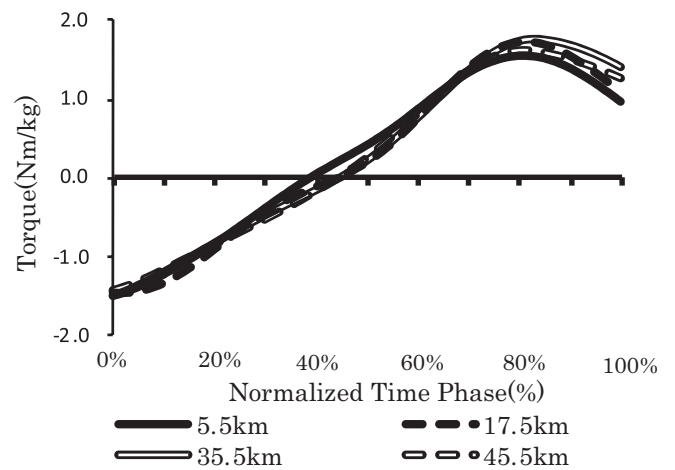


図6 各分析地点における右回復脚大腿近位端に作用する股関節トルク伸展屈曲成分 (+伸展; -屈曲)

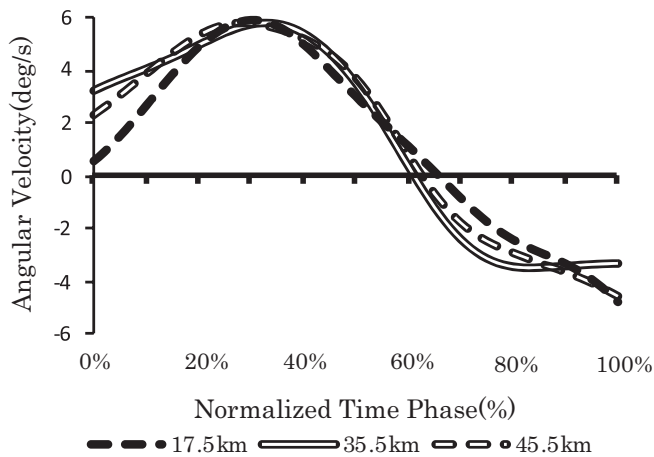


図7 各分析地点における右回復脚の股関節角速度 (+屈曲; -伸展)

IV. 考察

1. レースにおけるペースおよびキネマティクスの変数の変化

図2に示したように5.5km, 17.5km地点での歩行速度はその区間の5kmの平均歩行スピードと近い値となっていた。その一方で、35.5km, 45.5kmでは区間平均スピードと比較的大きな差があった。このことは、少なくとも35-40km, 45-50kmの区間内において歩行速度に大きな変化があったことを意味しており、分析地点はこれらの区間の極めて序盤であることから速度変化は分析地点よりも後で生じたと考えられる。また、これら2つの区間はそれぞれレース中の区間平均スピードが最も高かった区間と最も低かった区間であったことから、競技結果に大きな影響を与えた区間であったと考えられる。そのため、これらの区間内の各分析地点におけるパラメータをその前後の区間と比較することによってペース変化に影響を与えた要因を明らかにできると同時に、世界大会のような高水準のレースで勝つために有用な知見を得られると考えられる。以下、それらの分析地点を中心に考察を進めていく。

50km競歩レースにおいてはレース終盤に歩行スピードの低下が見られることが報告されてきた(法元, 2010; 平川, 2012; Hanley, 2013)。Hanley et al. (2013)は、50km競歩レースの18.5km, 28.5km, 38.5km, 48.5kmの計4地点における選手たちの動作を分析し、ピッチに有意な変化はなかったが、ストライドがレース後半に低下することで有意に歩行速度も低下したことを報告している。本研究の17.5km, 35.5km, 45.5km地点でもピッチは同

じ3.53Hzと変化はなく、ストライドが変化することによって歩行速度の増加と低下が生じており、先行研究と同様の結果となった。その一方で、Hanley et al. (2013)は非支持時間が長い選手ほど歩行速度が速い関係にあったとしているが、A選手は歩行速度が上昇したレース後半において非支持時間が短くなっており、非支持距離を短くする一方で支持距離を増加させることで歩行速度を高めていた。Hanley (2013)は、50km競歩ではレース序盤に歩行スピードが抑えられ、その後中盤にかけて増加していくことを報告しており、法元(2010)は国際大会において1-4位に入った選手は5-8位の選手よりもレース序盤から中盤にかけてより大きく歩行スピードを増加させていたとしている。そのため、世界大会において上位に入るためにはレース序盤から中盤にかけての大きな歩行スピードの増加が必要となると考えられる。これらのことから、A選手のように滞空時間を短くしながらも大きく歩行速度を高めることができることは、歩型の判定がなされる競歩種目において国際レースで上位に入るための強みになると考えられる。

一方、法元(2010)は国際大会において1-4位に入った選手は他の選手たちよりも歩行スピードの低下が小さく、歩行スピードが低下してもレース序盤のペースを維持できていたとしているが、A選手は40km過ぎから歩行スピードが低下し始めていた。特に45-50kmにおいては大きく歩行スピードが低下し、レース序盤よりも遅いスピードとなっていた。そのため、世界大会において上位に入るためにはこのレース終盤での歩行スピードの低下は不安要素となると考えられる。

2. 力学的エネルギーの流れ

表2に示したように、大きく歩行速度が増加していた35.5kmにおいて全身の力学的仕事(W_{nb})は最も小さく、力学的エネルギーの伝達量(T_b)および力学的エネルギー利用の有効性指数(EI)は最も大きくなっていった。このことは力学的エネルギーの伝達量を大きくすることで力学的エネルギーを有効に利用し、小さな仕事量で大きな歩行速度を獲得していたことを意味し、非常に効率良く高いパフォーマンスを発揮していたと言える。法元ほか(2011)は、20km競歩レースにおいてはレース後半で力学的エネルギーの伝達量が減少し、力学的エネルギーを有効に利用できなくなることが歩行速度の減少に影響するとしている。本研究においても歩行速度が低下した45.5kmでの力学的エネルギーの伝

達量は 35.5km よりも低下しており、力学的エネルギー利用の有効性指数が分析地点の中で最も小さかったことから、力学的エネルギーがレース終盤において有効に利用できなくなったことで歩行速度が低下したことがうかがえる。また、45.5km における全身の力学的仕事は最も大きな値となっていたことから、力学的エネルギーを伝達できなくなったことによる歩行速度の低下を全身の筋によって発揮する仕事量を大きくすることで抑えようとしていたと考えられる。ペース変化に関する考察から 45.5km 以降で大きく歩行速度が低下したと考えられることから、歩行速度の大きな低下が生じる以前に仕事量が増加したことが終盤での大きな歩行速度低下に影響していたと考えられる。

図 3 に示したように回復脚における力学的パワーは関節力によるパワーの方が関節トルクによるものと比べて非常に大きかった。法元ほか (2011) は、20km 競歩レース後半における力学的エネルギーの伝達量の増加や力学的エネルギーの有効な利用には、回復脚後半における回復脚股関節および膝関節の関節力パワーの増加が影響し、反対に、 T_b の低下には回復脚股関節力パワーの減少が影響するとしている。本研究においても歩行速度が増加した 35.5km では、回復期後半にあたる回復期 80% あたりから 100% にかけて負の股関節力パワーが 17.5km と比べて大きく増加していた。このことは力学的エネルギーの伝達量の増加に貢献したと考えられ、力学的エネルギーを有効に利用していたと考えられる。一方で 45.5km では歩行速度とともに回復期 80% あたりから 100% にかけての負の股関節力パワーが大きく低下しており、これによって力学的エネルギーの伝達量が減少し、有効に力学的エネルギーを利用できなくなったと考えられる。

図 4 に示した局面ごとでの平均パワーでは、第 4 局面での負の股関節力パワーが 35.5km では大きく増加し、反対に 45.5km では大きく減少していた。この回復期終盤にあたる第 4 局面は非支持局面であり、法元 (1999) は支持脚離地直後の非支持局面において股関節を素早く屈曲させ、ほぼ同時に反対脚の股関節を素早く伸展させるようなシザーズ動作によって着地後に支持足回りの身体的回転速度を大きくし、ステップ長が増加すること明らかにしている。図 7 は 17.5km, 35.5km, 45.5km での回復脚の股関節角速度を示したものである。35.5km では離地直後の第 1 局面において他の分析地点より素早い股関節屈曲が行われていたが、接地直前の第 4 局面では股関節伸展速度は他の分析地点よりも小さく

なっていた。このことは股関節を通して体幹部へと大きく力学的エネルギーが流出したため第 4 局面での股関節伸展速度が他の地点より低下したものの、その分支脚への力学的エネルギーの流れが大きくなったことで、第 1 局面での股関節屈曲角速度は大きくなっていったと考えられる。そのため、A 選手は回復期終盤において股関節の負の股関節力パワーを増加させることで支持脚へ大きく力学的エネルギーを伝達し、支持脚を離地後に素早く振り込むことでストライドを大きくし、大きな歩行速度を獲得していたと考えられる。一方で、歩行速度の低下した 45.5km では力学的エネルギーの伝達量が小さくなったことで支持脚離地後の股関節屈曲角速度が低下し、ストライドの低下につながったと考えられる。

図 5, 6 を見ると、負の関節力パワーの増加が見られた 35.5km では関節力前後成分の後向きの力の増加と股関節伸展トルクのわずかな増加が見られた。関節力は関節トルクにより生じるため、この股関節力前後成分の増加は股関節伸展トルクの増加が関わっていると考えられる。Hoga et al. (2003) は回復期後半での負の股関節力パワーに股関節力前後成分が影響していることを明らかにし、回復期後半で回復脚における股関節の後向きの力を大きくすることによって、作用反作用の法則によって支持脚の股関節を前方へ加速させているとしている。また、これにより回復脚から支持脚への力学的エネルギーの流れが大きくなり、ストライドが大きくなる可能性を示唆している。このことから、A 選手も回復期後半における関節力前後成分の後向きの力を大きくすることによって負の関節力パワーを増加させ、それによって支持脚側への力学的エネルギーの伝達を大きくしていたと考えられる。一方で、45.5km では回復期後半での関節力前後成分の後向きの力の減少と股関節伸展トルクのわずかな減少が生じていた。これにより、負の関節力パワーの減少が生じ、支持脚への力学的エネルギーの伝達が小さくなったと考えられる。

V. まとめ

本研究の目的は、競歩種目を専門とする日本人男性競技者 1 名を対象に事例的に男子 50km 競歩レース中のペース変化とキネマティクスおよびキネティクスの変数を組み合わせて分析することで、ペース変化の要因を詳細に検討し、レース終盤でのペースの維持、漸増に関する知見を得ることで、今後の世界大会で活躍を続けるために有用な知見を得ること

であった。

レース後半の 35-40km にかけて仕事量を小さくしながらもペースが大きく上昇しており、ここでの歩行速度の増加はストライドの増加によるものであった。この要因としては回復期終盤において回復脚の股関節伸展トルクおよび股関節力前後成分の後向きの力を増加させることで回復脚股関節を通しての力学的エネルギーの伝達量を大きくし、反対脚の振り込みを大きくすることが関係していると考えられた。その一方で、レース終盤の 40km 過ぎからはペースが低下し、45-50km はレース中最も遅いラップとなっており、ここではストライドの低下によって歩行速度も低下していた。この要因としては、回復期終盤における回復脚の股関節伸展トルクおよび股関節力前後成分の後向きの力が低下したことで回復脚股関節を通しての力学的エネルギーの伝達量が低下したことが関係していると考えられた。また、歩行速度の低下を抑えようとしたことで仕事量が増加したため力学的エネルギーの利用効率が悪くなり、その後大きな歩行速度の低下を招いたと考えられる。

これらの結果から、男子 50km 競歩レース終盤においてペースを維持、漸増させるためには回復期終盤における回復脚の股関節伸展トルクおよび股関節力前後成分の後向きの力をレース終盤においても維持、増加することが必要になると考えられる。股関節力は股関節伸展トルクによる影響を受けると考えられ、この伸展トルクの維持能力には、股関節および膝関節の屈曲・伸展に関わる筋の持久力が関与しているとされる(尾縣ほか, 2003)。また、競歩種目における高い歩行速度の獲得、維持には股関節と膝関節の伸展・屈曲筋群の力発揮が関係していることから(Hoga et al., 2003; 法元ほか, 2011)、競歩における高度な持久性のトレーニングの実施によって、下肢におけるそれらの筋群の出力を維持する能力を高め、レース終盤に股関節トルクの低下をいかに抑えるかあるいは増加させるかが世界大会で勝つ上で1つの鍵になると考えられる。

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係数. *Japanese Journal of Sports Science*, 15. 155-162.

Bahamonde, R. E., and Stevens, R. R. (2006) Comparison of two methods of manual digitization on accuracy and time of

completion. in *Proceedings of the 24th International Symposium of Biomechanics in Sports*.

- Hanley, B. (2013) An analysis of pacing profiles of world-class racewalkers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 8 : 435-441.
- Hanley, B., Bissas, A., and Drake, A. (2013) Kinematic characteristics of elite men's 50 km race walking. *European Journal of Sports Science*, 13 : 272-279.
- 平川武仁 (2012) 国際大会の 50km 競歩におけるペースの変化. *陸上競技研究*, 91 (4) : 33-40
- 法元康二 (1999) 競歩の歩行速度に影響を及ぼすバイオメカニクスの要因. 平成 11 年度筑波大学大学院修士論文.
- Hoga, K., Ae, M., Enomoto, Y., Yokozawa, T., and Fujii, N. (2003) Mechanical energy flow in recovery leg of elite race walkers. *Sports Biomechanics*, 2 : 1-13.
- 法元康二 (2010) 2000-2009 年の世界大会男子 50km 競歩におけるレースペース分析. *月刊陸上競技*, 44 (12) : 176-177
- 法元康二・阿江通良・横澤俊治・藤井範久 (2011) 男子 20km 競歩のレース経過に伴う歩行速度と力学的エネルギーの流れの変化. *コーチング学研究*, 24 : 139-152.
- 木下まどか・藤井範久 (2015) テコンドーの前回し蹴りにおける力学的エネルギーフロー. *バイオメカニズム学会誌*, 39 : 37-46.
- 日本陸上競技連盟 (2019) 陸上競技ルールブック 2019-2020 年度版. ベースボール・マガジン社, pp. 347-353.
- 尾縣貢・鍋芳明・高本恵美・木越清信 (2003) 400m 走中の下肢関節トルク持続能力と下肢の筋持久性との関係. *体力科学*, 52 : 455-464.
- Pierrynowski, M. R., Winter, D. A., and Norman, R. W. (1980) Transfer of mechanical energy within the total body and mechanical efficiency during treadmill walking. *Ergonomics*, 23 : 147-156.