

2022年国内主要競歩レースにおける国内シニア・U20 上位競技者の 地面反力および下肢関節トルクの推定

三浦 康二¹⁾ 佐藤 高嶺²⁾ 川向 哲弥³⁾ 高橋 直己⁴⁾

1) 株式会社大塚製薬工場 2) 山形県上山市教育委員会 / 筑波大学大学院人間総合科学研究科
3) 株式会社エモーションテック 4) 東京学芸大学大学院

1. 目的

近年のスマートフォン・タブレット内臓カメラやアプリケーションソフトウェアの機能向上を背景として、角度変位、角速度、角加速度などのキネマティクスの範疇の物理量を変数とする分析と動作の評価が一般的な家庭用情報端末のみで可能になってきている。そのため、バイオメカニクス分析に熟練した研究者を介さずとも、スポーツバイオメカニクスの手法を用いたスポーツ動作の評価を競技者とコーチのみで行うことが可能となってきている。それに対し、ハイパフォーマンススポーツに対する現時点でバイオメカニクス研究者でなくてはできないと考えられるサポート手法の一つとして、力の項を加えたキネティクス変数によるクイックフィードバックが挙げられる(三浦ほか, 2021)。

力およびトルクといったキネティクス変数の算出に際して、歩・走動作における回復脚(遊脚)や上肢、また、跳躍動作の振り上げ脚のように先端部が空中にある場合には、空気抵抗を無視し、先端部には外力が作用していないという前提で遠位の部分から運動方程式を解いてゆくことでデータ算出できる。また、投擲種目では投擲物の加速度と質量などから投擲腕の手部にかかる外力を推定することで算出が可能である。しかし、走・歩動作の支持脚および跳躍動作の踏切脚、さらには棒高跳における上肢の場合には、地面反力およびポール反力を先端部にかかる大きな外力として考慮する必要があることから、フォースプレートやセンサーによる計測が不可欠とされている。

それに対し、競歩における地面反力はランニングやスプリント走と比較して小さいことや接地直後の急激なピークが小さいことが知られており(Payne, 1978)、競技規則が規定する歩容によって歩行中の

身体重心の上下動が小さく抑えられて重心加速度の個人差による地面反力への影響も限定的と予測されることから、歩行中の身体重心加速度からの地面反力の推定が可能と考えられる。また、歩行中の圧力中心の移動パターンの個人差が小さく、踵部から足部先端に向けてほぼ等速で移動することが知られていることから(Murrayほか, 1983)、法元(2000)は、競歩種目の専門的なトレーニングを行っている11名の大学生競技者を被験者として、フォースプラットフォームによって計測した地面反力・足部圧力中心と2次元画像分析法によって身体重心加速度と重力加速度から推定した地面反力・足部圧力中心のパターン相関係数による比較検証を行った。その結果、2次元画像分析法によっても地面反力・足部圧力中心を精度よく推定できることが明らかとなり($p < 0.01$)、その後の公式レースにおけるキネティクスの算出にその方法がもちいられている(三浦ほか, 2020; Hoga-Miura, 2022)。

以上を受けて、競歩種目における日本陸連科学委員会によるパフォーマンス分析の競技者へのフィードバックでは、2次元画像分析法による地面反力・足部圧力中心の推定と、推定データを用いて算出した下肢関節トルクを近年用いるようになってきているほか、合宿などでのバイオメカニクス分析サポートでも、これらの項目のクイックフィードバックを行うようになってきている(三浦ほか, 2021)。

そのため、本報告では2022年2月から4月にかけて日本国内で開催された競歩種目の主要競技会における男子・女子20kmW・35kmWおよびU20男子・女子10kmWに出場した世界一流の日本人競技者を含む国内競技者の地面反力および下肢関節トルクの実測結果について報告を行う。

表1 分析対象競技会・種目

競技会名	開催地	期日	周回コース 距離	分析種目	分析 対象 者数
第105回日本陸上 競技選手権大会	神戸市	2022年2月20日	1km	男子20kmW	4
第46回全日本競歩 能美大会	石川県能美市	2022年3月20日	1km	男子20kmW	4
第106回日本陸上 競技選手権大会	石川県輪島市	2022年4月16 -17日	1km	男子20kmW	1
兼 第61回全日本競歩 輪島大会				男子35kmW	8
				U20男子10kmW	3
				女子20kmW	2
U20女子10kmW				3	

2. 方法

2.1 データ収集

分析競技会・レースは表1に示した通りである。

撮影した競技者のうち失格とならずにフィニッシュした競技者について、男子・女子20kmWおよび35kmWではオレゴン世界陸上標準記録突破者または2022年4月時点でのWRK60位以内（ターゲットナンバー以内）のものを分析対象とした。U20男子・女子10kmWでは各種目の記録上位3名を分析対象とした。

また、これらの競技会は0.5kmを往復する1周1kmの周回コースで行われたが、各競技会においてコース内の1箇所には長さ4.0mの分析区間を設置し、ハイスピードカメラ1台（カメラスピード：240fps）による分析撮影を全ての周回について行った。遠近補正は三浦ほか(2021)の方法を用いた。

2.2 データ処理

レース後に1kmごとのスプリットタイムを入手し、各分析対象者がカメラ画像に映っていた周回のうち、最も速かった周回を表3に示した分析地点とした。各分析対象者の身体標点25点を分析点として1歩行周期（2歩）分の動作をビデオ動作分析システム（Frame-DIAS IV, Q'sfix社製）により60fpsでデジタル化し、遠近補正を行って2次元座

標の再構築を行なった。

得られた分析点の分析画像面内の座標はバタワース型デジタルフィルタによって平滑化し、法元・阿江(2006), Hoga-Miura et al. (2017)の方法により身体重心加速度および重心まわり角運動量を用いて推定した歩行中の地面反力に基づいて、支持期を含む膝関節および股関節まわりのトルクを算出した。

算出したデータは、推定地面反力については支持期のデータについて、右足接地から離地までを右足支持期として、右接地時点を0%、右足つま先の離地1フレーム前を100%として局面を規格化した。左足支持期についても同様に、左接地時点を0%、左足つま先の離地1フレーム前を100%として局面を規格化した。

また、膝関節と股関節トルクについては、支持期と回復期を通した1歩行周期で示すために、右接地時点を0%、右足つま先の離地1フレーム前を50%として支持期を規格化、右足つま先離地から右足接地までを右足回復期として、右足つま先の離地時点を51%、右足接地時点を100%として局面を規格化した。左足支持期と回復期についても同様の規格化を行なった。

表 2 各種目の分析対象パフォーマンス

種目	人数 (N)	平均	標準偏差
男子 20kmW	9	1:20'18"	0'56"
男子 35kmW	8	2:29'38"	2'22"
U20 男子 20kmW	3	41'26"	0'21"
女子 20kmW	2	1:29'35"	0'06"
女子 35kmW	3	2:52'03"	5'28"
U20 女子 10kmW	3	45'47"	0'47"

3. 結果と考察

3.1 競技パフォーマンス

方法で示した比較各群における対象者のパフォーマンスを表 2 に示した。

3.2 ステップ変数

表 3 と 4 に分析対象地点の歩行スピードおよびステップ変数および 1 歩中の身体重心上下動を示した。

3.3 推定地面反力

図 1 は男子 20kmW, 男子 35kmW, U20 男子 10kmW のそれぞれの種目における分析対象者の地面反力 (前後方向成分, 鉛直方向成分) について, 各対象者の身体質量に重力加速度を乗じた値で規格化した値の平均値に標準偏差を加算したものと, 減算したもので示した。また, 各対象者の女子 20kmW, 女子 35kmW, U20 女子 10kmW についても同様に図 2 に示した。

競歩中の地面反力の計測は, 古くは Payne (1978), Murray ほか (1983), Fenton (1984) によって報告されている。

本報告では図 1 と 2 で示したように, 前後方向成分で男女とも接地直後に体重の 0.2-0.3 倍の後ろ向きの反力が作用し, 離地前に 0.4 倍程度の反力が作用していたが, これらの結果は先行研究のものと大きく異なることはなかった。同様に, 鉛直方向成分では体重の 2 倍程度の上向きの反力が作用していたが, 同じく先行研究のものと大きく異なることはなかった。

また, Payne (1978), Murray ほか (1983), Fenton (1984) のほか, 法元 (2000) で示された競歩の動作中の地面反力の鉛直方向成分では, 接地直後の急峻な上向きのピークと, 支持期終盤のピークが出現

する二峰性の変化パターンを示している。しかし, 報告はなされていないものの法元 (2000, 2007) における実験で収集された個々のデータや, わが国の強化競技者を対象とした国立スポーツ科学センターで 2000 年代中盤から行われた測定合宿で収集されたデータ (三浦, 2022) では, 支持期中に一回のピークしか出現しない単峰性の変化パターンも多くみられたことから, 図 1 と 2 で示した鉛直方向成分の変化パターンも妥当性がないわけではないだろう。

3.3 関節トルク

図 3 は男子 20kmW, 男子 35kmW, U20 男子 10kmW のそれぞれの種目における分析対象者の股関節と膝関節のトルクについて, 各対象者の身体質量で規格化した値の平均値に標準偏差を加算したものと, 減算したもので示した。また, 各対象者の女子 20kmW, 女子 35kmW, U20 女子 10kmW についても同様に図 4 に示した。

支持期を含めた競歩中の下肢関節トルクの報告は, 地面反力同様に古くは Payne (1978), Murray ほか (1983), Robertson and Winter (1980) によって報告されている。また, 法元 (2000, 2007), 法元と阿江 (2004), Hoga ほか (2006) によっても報告されている。

本報告では図 3 と 4 で示したように, 股関節トルクは支持期で男女とも接地直後に体重 1kg あたり 2Nm 弱の伸展トルクが発揮された後, 支持期中盤で屈曲トルクに変化し支持期後半で体重 1kg あたり 2Nm (2Nm/kg) 弱の屈曲トルクが発揮されて離地, 回復期において中盤に伸展トルクに変化して接地していた。膝関節トルクでは支持期で男女とも接地直後に 1-2Nm/kg 弱の屈曲トルクが発揮された後, 支持期終盤で伸展トルクに変化し離地前に 0.5Nm/kg 前後の伸展トルクが発揮されて, 回復期において中盤に屈曲トルクに変化して接地していた。

表3 分析地点とステップ変数 (男子 20kmW, 男子 35kmW, U20 男子 10kmW)

	男子 20kmW		男子 35kmW		U20 男子 10kmW	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
分析地点 (km)	6.39	4.11	7.88	6.31	1.50	0.00
分析地点スピード (m/秒)	4.40	0.16	3.96	0.23	4.31	0.08
分析地点スピード (分'秒"/km)	3'52"	0'19"	4'03"	0'30"	3'52"	0'14"
ピッチ (ステップ/秒)	3.46	0.11	3.43	0.09	3.58	0.29
ステップ時間 (秒)	0.29	0.01	0.29	0.01	0.28	0.03
支持時間 (秒)	0.23	0.01	0.26	0.02	0.25	0.02
非支持時間 (秒)	0.06	0.01	0.04	0.02	0.03	0.00
ステップ長 (m)	1.27	0.09	1.15	0.06	1.21	0.10
支持距離 (m)	1.00	0.08	1.01	0.05	1.07	0.10
非支持距離 (m)	0.27	0.05	0.15	0.08	0.13	0.02
身体重心上下動 (m)	0.05	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01

表4 分析地点とステップ変数 (女子 20kmW, 女子 35kmW, U20 女子 10kmW)

	女子 20kmW		女子 35kmW		U20 女子 10kmW	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
分析地点 (km)	19.50	0.00	8.17	4.04	4.17	4.62
分析地点スピード (m/秒)	3.74	0.02	3.44	0.08	3.68	0.02
分析地点スピード (分'秒"/km)	4'27"	0'01"	4'51"	0'06"	4'32"	0'01"
ピッチ (ステップ/秒)	3.53	0.00	3.47	0.15	3.53	0.00
ステップ時間 (秒)	0.28	0.00	0.29	0.01	0.28	0.01
支持時間 (秒)	0.26	0.01	0.26	0.01	0.25	0.01
非支持時間 (秒)	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.00
ステップ長 (m)	1.06	0.05	0.99	0.05	1.04	0.04
支持距離 (m)	0.98	0.03	0.91	0.04	0.93	0.04
非支持距離 (m)	0.08	0.02	0.09	0.03	0.11	0.02
身体重心上下動 (m)	0.06	0.00	0.05	0.01	0.01	0.00

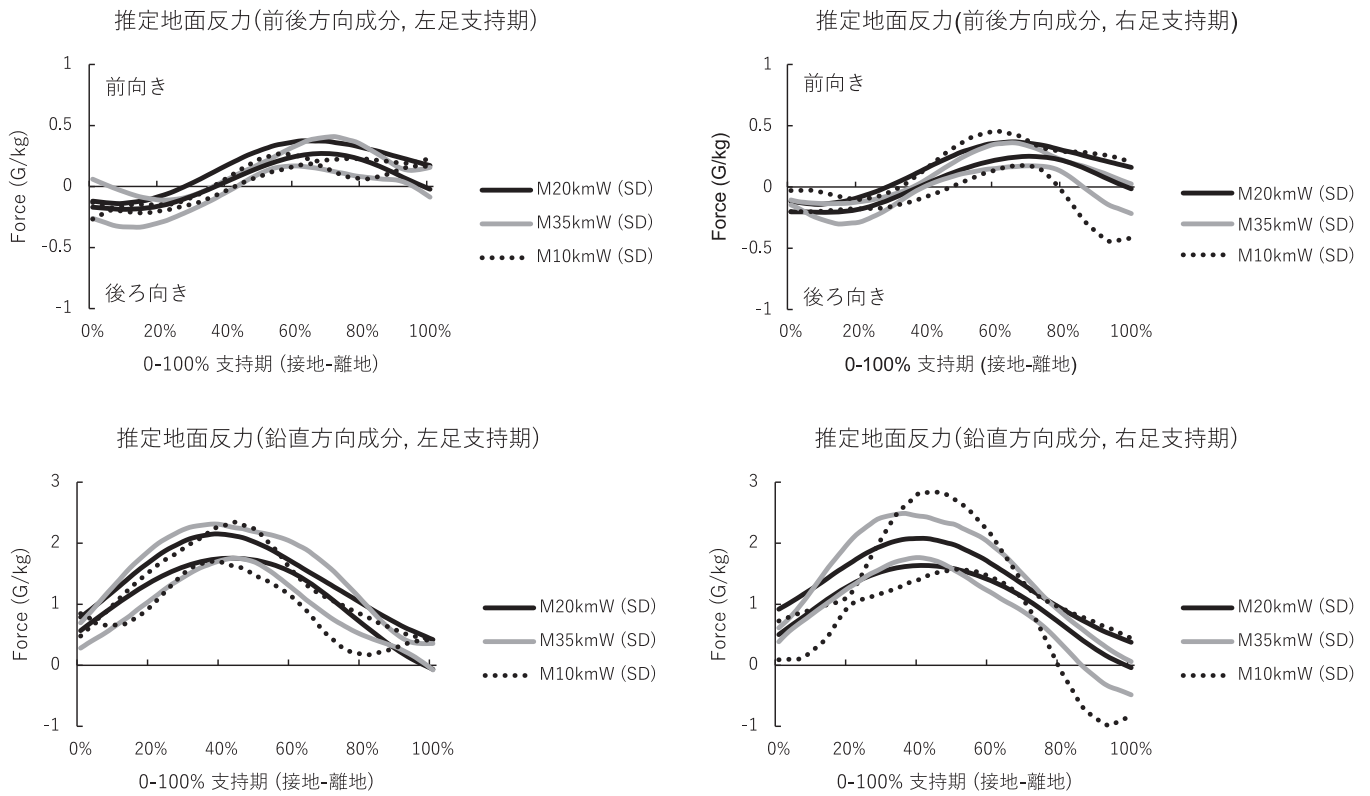


図1 支持期における推定地面反力の変化（体重 1kg あたり / 男子 20kmW, 男子 35kmW, U20 男子 10kmW）

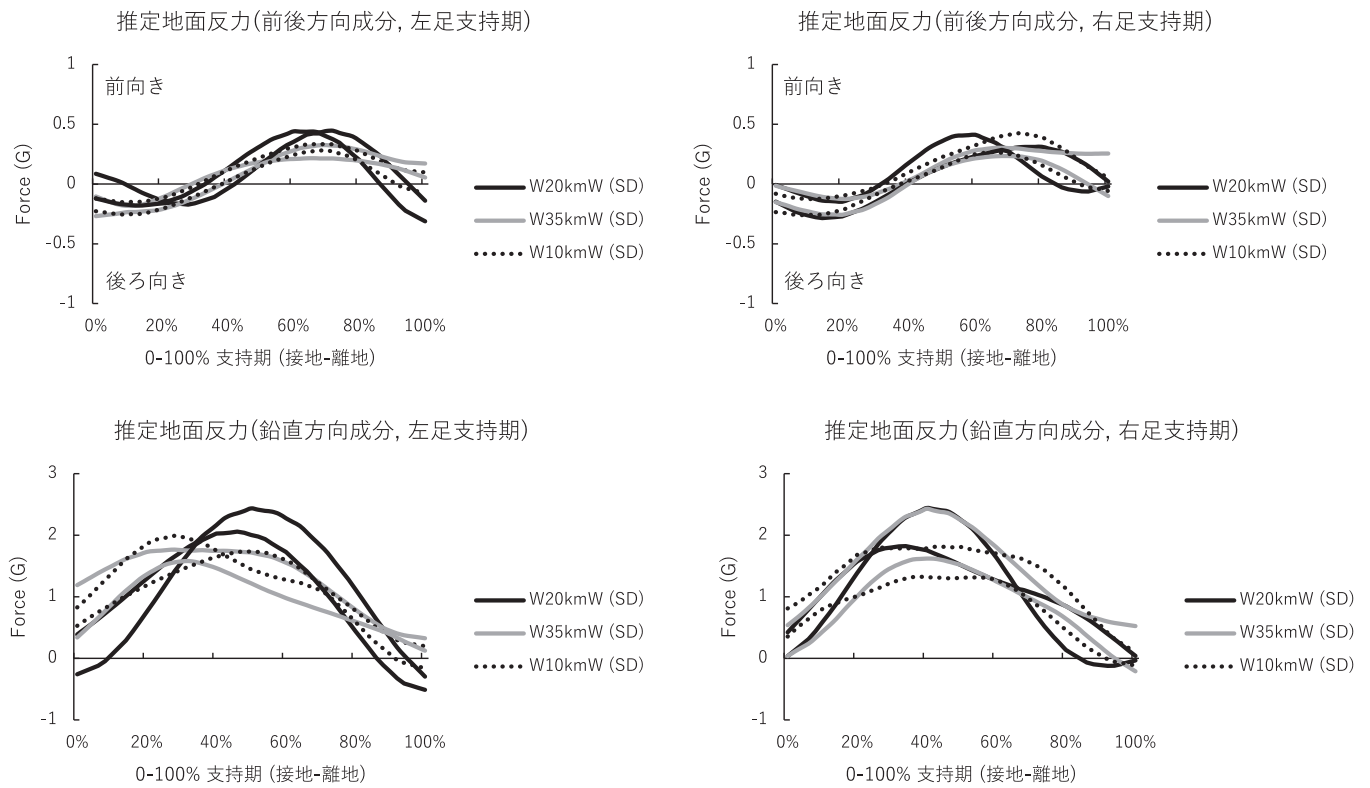


図2 支持期における推定地面反力の変化（体重 1kg あたり / 女子 20kmW, 女子 35kmW, U20 女子 10kmW）

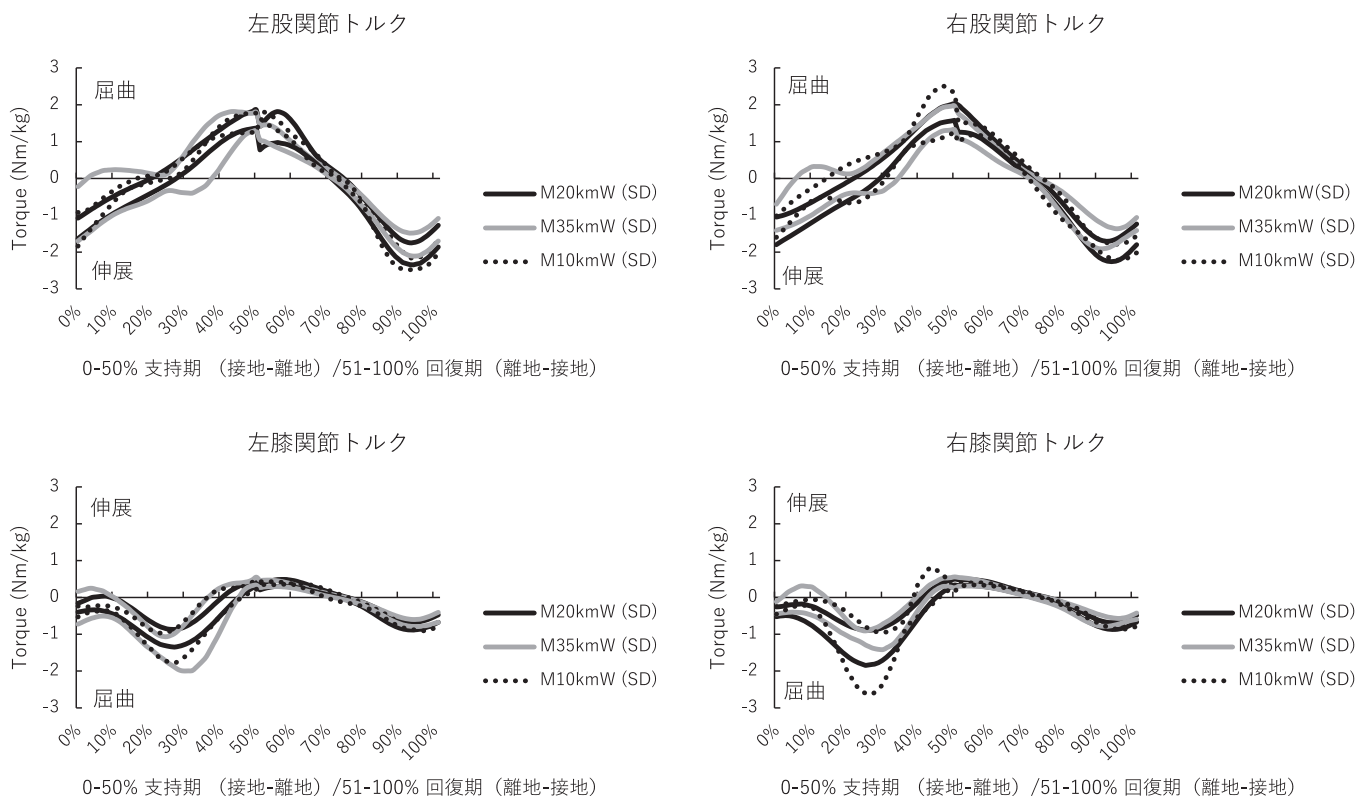


図3 歩行1サイクルにおける股関節・膝関節トルクの変化
(体重1kgあたり / 男子20kmW, 男子35kmW, U20男子10kmW)

これらのトルクの大きさは、支持期中盤の屈曲トルクで先行研究のデータが1Nm/kgだったのに対して本報告のものが2Nm/kgと大きかったほかは、図3と4のデータと先行研究のもので大きな違いはみられなかった。しかし、地面反力のデータと同様、報告はなされていないものの法元(2000, 2007)における実験で収集された個々のデータや、わが国の強化競技者を対象とした国立スポーツ科学センターで2000年代中盤から行われた測定合宿で収集されたデータ(三浦, 2022)では、支持期中盤で大きな膝関節屈曲トルクを示すデータも多くみられたことから、図3と4で示した膝関節トルクの変化パターンに妥当性がないわけではないだろう。

4. まとめ

本報告では2022年2月から4月にかけて日本国内で開催された競歩種目の主要競技会における男子・女子20kmW・35kmWおよびU20男子・女子10kmWに出場した世界一流の日本人競技者を含む国内競技者の地面反力および下肢関節トルクの分析結果について示した。

これらの分析結果で示した分析対象者の個別のデータは、判定上の課題のようにパフォーマンス向

上に向けた前提条件になる技術トレーニングの内容を検討するために、過年度のデータと比較しながらコーチやトレーナーを交えた個別面談などの機会が用いられた。

人体の運動は骨格筋の筋収縮と弛緩の繰り返しによって発生し制御されることから、力の項を含んだキネティクス変数を用いてフィードバックを行うことは競技者の技術トレーニングの内容の検討や、競技中の動作の制御を行う上でコーチング上の観点から有効な示唆を与えることにつながる。そのため、先行研究において画像データを用いた地面反力の推定とその妥当性の検証が行われていたことを根拠とし、コーチング上の観点でフィードバックが行われた。

しかし、根拠とした方法の検証は20年以上前の大学生競技者を被験者として行われたものであり、現在では競技レベルなどが異なっていることから、再度、詳細な検証が行われる必要があると考えられる。

5. 文献

Fenton, R.M. (1984) Race walking ground reaction forces. Sports Biomechanics

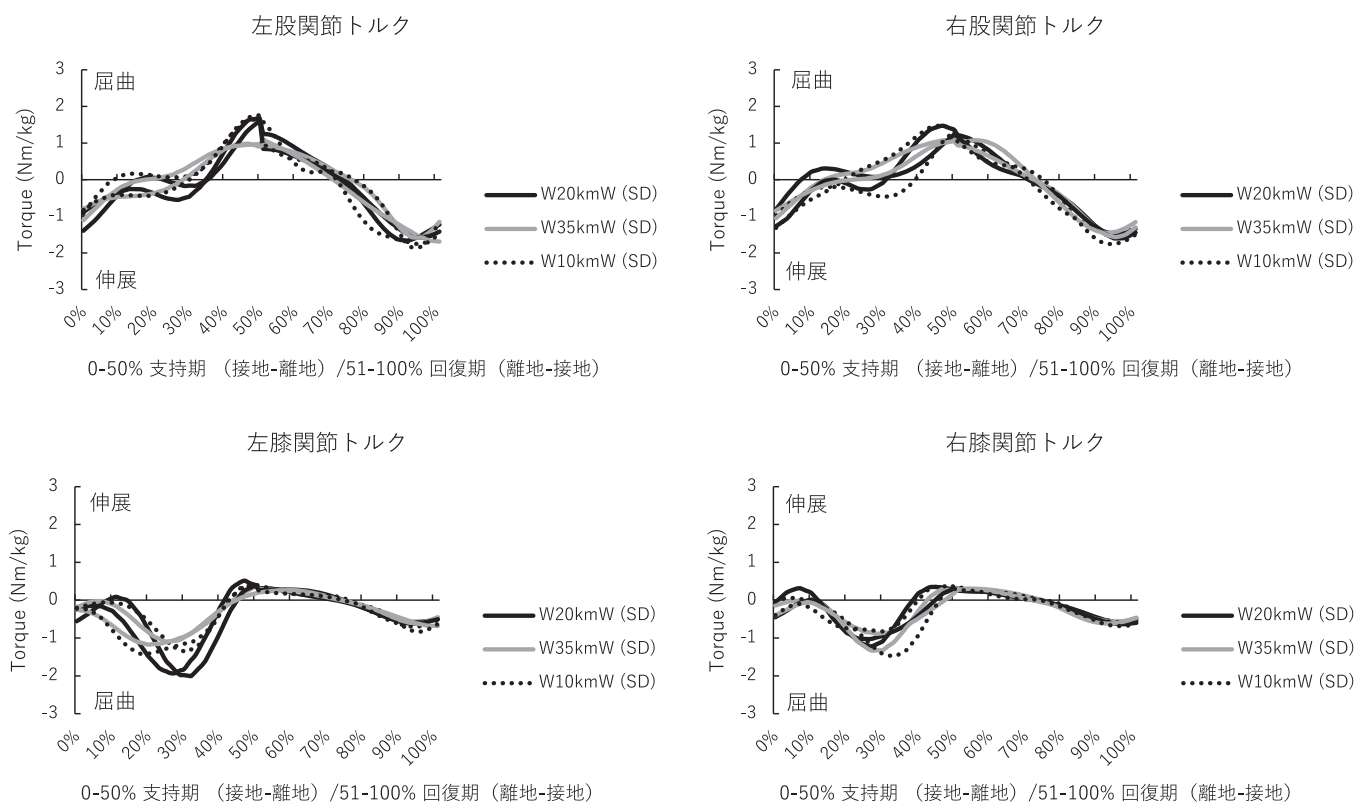


図4 歩行1サイクルにおける股関節・膝関節トルクの変化
(体重1kgあたり / 女子20kmW, 女子35kmW, U20女子10kmW)

Proceedings, 61-70.

法元 康二 (2000) 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年度筑波大学体育研究科 研究論文集, pp.233-236.

法元 康二, 阿江 通良 (2004) 第II部応用編第7章歩動作 競歩. 福永 哲夫・金子 公有監修 バイオメカニクス～身体運動を科学する, 杏林書院, pp150-156.

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.

Hoga, K., Ae, M., Enomoto, Y., Yokozawa, T., Fujii, N. (2006) Joint torque and mechanical energy flow in the support legs of skilled race walkers. Sports Biomechanics, 5(2), 167-182.

法元 康二 (2007) 競歩の歩行技術に関するバイオメカニクスの研究—身体部分間の力学的エネルギーの流れに着目して—. 平成18年度筑波大学博士論文, 筑波大学人間総合科学研究科.

Hoga-Miura, K., et al. (2017) Reconstruction of walking motion without flight phase by using computer simulation on the world elite

20km race walkers during official races. Slovak Journal Sport Science, 2(1), 59-75.

Hoga-Miura, K., Hirokawa, R., Sugita, M., Enomoto, Y., Kadono, H., Suzuki, Y. (2022) Reconstruction of walking motion without flight phase by using computer simulation on the world elite 20km female race walkers during official race. Gazzetta Medica Italiana- Archivio per le Scienze Mediche, 181 (5), 303-314.

三浦 康二, 佐藤 高嶺, 川向 哲弥, 大久保 玲美 (2020) 2018-2019年度国内主要競歩レースにおける国内一流競技者の下肢および体幹関節トルクの分析. 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 REPORT2020, 19, 221-231.

三浦 康二, 蔭山 雅洋, 黒阪 翔, 津野 天兵, 渡辺 圭佑 (2021) 特集 ハイパフォーマンススポーツを対象とした医・科学支援の実例—ハイパフォーマンス・サポート事業の活動を例に. フィールドにおける2次元動作分析法による前額面・矢状面内動作の簡易的分析とクイックフィードバック. Journal of High Performance Sport, 7, 58-70.

三浦 康二 (2022) 02 科学 東京 2020 オリンピック
に向けた競歩種目の対策と今後. 月刊陸上競技
編集 JAAF Digital Book TOKYO 2020 チームジャ
パンの軌跡と未来へ, 公益財団法人日本陸上競技
連盟, pp36-39.

Murray, M. P., Guten, G. N., Mollinger,
L. A., Gardner, G. M. (1983) Kinematic and
electromyographic patterns of olympic
racewalkers. the American Journal of Sports
Medicine, 11(2), 68-74.

Payne, A. H. (1978) A comparison of ground
reaction forces in race walking with those
in normal walking and running. Biomechanics
VI-A, 293-302.

Robertson, D. G. E., and Winter, D. A. (1980)
Mechanical energy generation, absorption and
transfer amongst segments during walking.
Journal of Biomechanics, 13 (10) , 845-854.