

# 男子20km競歩のレース経過にともなう歩行速度と 力学的エネルギーの流れの変化

法元康二<sup>1)</sup> 阿江通良<sup>2)</sup> 横澤俊治<sup>3)</sup> 藤井範久<sup>2)</sup>

## Changes in walking speed and mechanical energy flow of male race walkers during 20km race

Koji Hoga<sup>1)</sup>, Michiyoshi Ae<sup>2)</sup>, Toshiharu Yokozawa<sup>3)</sup> and Norihisa Fujii<sup>2)</sup>

### Abstract

The purpose of this study was to investigate technical factors relating to the maintenance of walking speed in race walking in official 20km races. Thirty-five elite race walkers were analyzed as subjects by using VTR camera (60 Hz) at 4-8km and 14-18km point during 20km official race. The results were as follows.

Decreases in the recovery hip and knee joint torques resulted in decreases in the backward joint forces at the hip and knee, which decreased the joint force power at the recovery hip and knee and the mechanical energy flow from the recovery leg to the torso during the second half of the recovery phase. Therefore, decreases in the joint force at the recovery hip and knee decreased the mechanical energy flow, which might lead to decrease in the walking speed.

Key words: mechanical work, mechanical energy flow, joint force, joint torque  
力学的仕事, 力学的エネルギー伝達量, 関節力, 関節トルク

### I. はじめに

Frederick (1991) はあらゆる持久性スポーツにおいて動作の経済性が重要であり, それにはバイオメカニクスの要因も関与していると述べている. 代表的な持久性運動である長距離走に関しても, 三浦ほか (1971) は高い競技パフォーマンスを達成するには, 発揮した生理的エネルギーを無駄なく疾走速度に変換する技術が重要であることを示唆している. 同じく, Williams and Cavanagh (1987) は長距離走において身体各部分間で伝達される力学的エネルギーが生理的エネルギー利用の有効性を高めることを示唆している. さらに, 榎本ほか (1999) は長距離走における力学的エネルギー利用の有効性と競技パフォーマンスの関係を分析し, 長距離走の競技パフォーマンスが高い場合, 身体部分間の力学的エネルギーの伝達量が大きく, 力学的エネルギー利用の有効性が高かったと報告

している. これらは力学的エネルギーを有効に利用することがレース中における大きな疾走速度の維持を可能にし, 競技パフォーマンスの向上に役立つことを示唆している. そのため,トラック種目では3000m以上, 道路種目では10km以上の距離で競われる持久性種目である競歩種目においても, 高いパフォーマンスを達成するためには, 力学的エネルギーを有効に移動速度に変換するような技術を獲得し, 大きな歩行速度を獲得し, 維持することで高い競技パフォーマンスを達成できると考えられる.

競歩における力学的エネルギーに関する初期の研究は効率に関するものが多い. Cavagna and Franzetti (1981) や Marchetti et al. (1982) は競歩と通常歩行や走の効率とを比較しているが, 力学的エネルギーを有効に使った大きな歩行速度の獲得や, 高い競技パフォーマンスを達成するための技術に関する報告はしていない. 最近になり, Hoga et al. (2003, 2006) が公式競技

1) 茨城県立医療大学保健医療学部  
School of Medical Health, Ibaraki Prefectural University of Health Sciences  
2) 筑波大学大学院総合人間科学研究科  
Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba  
3) 国立スポーツ科学センタースポーツ科学研究部  
Department of Sports Sciences, Japan Institute of Sports Sciences

会および実験によって競歩中の回復脚と支持脚の力学的エネルギーの流れについて検討し、力学的エネルギーの流れと歩行速度の関係についての研究を行っている。その結果、競歩では関節力によって脚と体幹の間における力学的エネルギーの流れが大きくなり、その有効性が高められることによって大きな歩行速度を獲得されることが明らかとなった。しかし、レース経過にもなると歩行動作や力学的エネルギーの流れがどのように変化するかなどについて検討した研究は少ない。Briswalter et al. (1998) は一流男子50km競歩選手を被験者として実験を行い、各被験者の50km競歩の自己記録ペースで行った3時間にわたる歩行の前後では明確な動作の変化はみられなかったことを報告している。しかし、彼らの分析で用いられた動作に関する変数は、ストライド長、1歩中の身体各部の鉛直方向変位、特定の時点での身体部分の角度などであり、長時間歩行の前後での動作の変容を詳細にとらえているわけではない。実際のレースでは疲労などによって歩行動作が変化し、競技規則に適合した動作で歩行速度を維持することが困難となり競歩審判員の警告を受けることがある。したがって、レース中にわたって大きな歩行速度を維持するための技術的要因をバイオメカニク的に明らかにすることは、競歩におけるより高いパフォーマンス達成を目指す上で有益な知見を提供すると考えられる。

そこで、本研究では公式競技会における前半と後半の一流競歩選手の動作を分析し、その歩行速度の変化と力学的エネルギーの流れとの関係を検討し、歩行速度の維持に關与する技術的要因を明らかにすることを目的とした。

## II. 方法

### 1. 分析対象者

1997-1999年に日本国内で行われた6つの公式競技会 (Table 1) における20kmレースに参加し、競技規則に定める5名以上の熟練した競歩審判員が判定を行ったレースにおいて (International Association of Athletics Federations, 2010) 競技規則への違反の指摘が2名以内の審判に留まり失格とならずにフィニッシュした男子選手の中で、その記録が1時間35分以内の35名を分析対象者とした。Table 2には分析対象者の特性を示してある。また、分析レースより前に達成された各分析対象者の自己記録と、当該レースにおける自己記録達成率も算出した。分析対象者はレース後半で歩行速度が増加した歩行速度増加群 (Increase : I群) とレース後半で歩行速度が減少した歩行速度減少群 (Decrease : D群) に分けられた。I群は歩行速度が増加したすべての分析対象者としたが、歩行速度が減少した分析対象者24名は全分析対象者の3分の2以

Table 1 Videotaped races

Competition	Date	Course	N of subjects
第7回高畠競歩大会	1997.11.2	山形県高畠町	3
第81回日本陸上競技選手権大会	1998.1.26	神戸市六甲アイランド	8
第37回全日本競歩大会*	1998.4.12	石川県輪島市	6
第12回アジア陸上競技選手権大会	1998.7.20	福岡市大濠公園	4
第8回高畠競歩大会	1998.11.5	山形県高畠町	4
第38回全日本競歩大会*	1999.4.18	石川県輪島市	10

\* 日本陸上競技連盟科学委員会の活動の一環として撮影

Table 2 Characteristics of the subjects (N=35)

	Mean	SD	Max - Min
Age (yrs)	23.1	4.3	34 - 18
Height (m)	1.71	0.05	1.83 - 1.6
Body Mass (kg)	57.8	4.4	68 - 50
Race time (h.m.s)	1 <sub>h</sub> 27 <sub>m</sub> 55 <sub>s</sub> .1	4 <sub>m</sub> 33 <sub>s</sub> .5	1 <sub>h</sub> 19 <sub>m</sub> 50 <sub>s</sub> - 1 <sub>h</sub> 34 <sub>m</sub> 59 <sub>s</sub>
Best time (h.m.s)	1 <sub>h</sub> 27 <sub>m</sub> 47 <sub>s</sub> .1	6 <sub>m</sub> 46 <sub>s</sub> .9	1 <sub>h</sub> 18 <sub>m</sub> 27 <sub>s</sub> - 1 <sub>h</sub> 43 <sub>m</sub> 24 <sub>s</sub>
Performance Ratio (%)	99.8	6.1	119.0 - 88.0

上に該当したことから、全分析対象者の歩行速度変化の平均値とD群の最大値との差がI群の最小値と全分析対象者の平均値との差よりも大きくなるようにしてD群の範囲を設定した。その結果、I群とD群の分析対象者数は同数の11名となった。

## 2. VTR撮影

1周2kmの周回コースで実施された公式競技会における男子20kmレースのうち、レース前半4, 6, 8kmの各地点とレース後半14, 16, 18km地点の歩行動作をその側方からVTRカメラを用いて撮影を行った。撮影スピードは毎秒60 フィールド、露出時間は撮影条件により1/1000 秒もしくは1/1500 秒であった。カメラはコース上の距離計測線から15mの距離に三脚に固定し、5mの区間を撮影範囲とした。また、実座標に換算するため距離計測線上に2つの較正マークを5m間隔で置いた。

## 3. データ処理

### 1) 2次元座標データの算出

撮影したVTR画像を用いて分析対象者のレース前半4, 6, 8km地点とレース後半14, 16, 18km地点における1サイクルの歩行動作について身体分析点(23点)および較正マーク(2点)をデジタル化した。分析は、レース前半区間ではスタートから10km地点の中間に近い6km地点の、後半区間では10km地点からフィニッシュの中間に近い16km地点の歩行動作を主として行ったが、映像内で競技者同士が重なりデジタル化が困難な場合には、レース前半では4km(1名)あるいは8km地点(3名)、後半では14km(4名)あるいは18km(4名)地点の動作を分析対象とした。デジタル化にはDKH社製Frame-DIAS IIシステムを用い、得られた身体の2次元座標を実長換算した。Wells and Winter (1980)の方法により分析点の座標成分ごとに最適遮断周波数を決定し、Butterworth low-pass digital filterを用いて平滑化を行った。平滑化の最適遮断周波数は、レース前半の歩行動作で、X座標(水平)が1.8-8.4Hz、Y座標(鉛直)が3.0-7.8Hz、レース後半の歩行動作で、X座標が2.4-7.8Hz、Y座標が3.0-8.4Hzの範囲にあった。

### 2) キネマティクスの変数の算出

平滑化した座標データから阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて部分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ってそれ

らの速度、加速度を算出した。また、静止座標系の垂直軸に対する全身の身体各部分(左右の手、前腕、上腕、足、下腿、大腿および頭部、体幹)の長軸方向の近位から遠位に向かうベクトルとのなす角度を部分角度とし、分析点の座標データから算出した。算出した角度変位を時間で数値微分することで部分角速度を算出し、部分の力学的エネルギーの算出に用いた。

さらに、歩行の1サイクルを右足離地時から次の右足離地時までとし、1サイクルに要した時間を2等分して、その逆数をピッチ、1サイクル中における重心の水平方向の変位であるストライド長を2等分したものをステップ長とした(山崎・広瀬, 1989)。歩行速度はピッチとステップ長の積により算出した。

国際陸上競技連盟のルールは競歩をレース中に地面との接触を失わないものと定義し、ルール違反となるのは競歩審判員の肉眼(Human Eye)によって明らかに見えたかどうか(Visible)によるものとして規定している(International Association of Athletics Federations, 2010)。また、国際陸連では、文言上の定義だけでなく、実際にロス・オブ・コンタクトあるいはバントニーとして判定すべき歩行フォームと、ルールにのっとった歩行フォーム例を動画によって規定し、競歩審判員の資格認定基準として用いている(International Association of Athletics Federations, 2006)。さらに、これらの規定はバイオメカニクス変数によっても補完されており(DaMilano et al., 2008)、実際の競技会において審判の肉眼ではとらえられない短い時間に両足が地面と接触を失うことがあっても、それらすべてがルール逸脱とはならないという方針をとっている。また、楠本ほか(1983)と永井ほか(1985)は競歩において両足が地面との接触を失うロス・オブ・コンタクト局面(非支持局面)が発生する歩行速度を報告しているが、本研究における分析対象者の歩行速度の最小値は、楠本ほか(1983)が報告した非支持局面の発生する歩行速度(3.6 m/s)よりも高く、本研究における分析対象者の全てで非支持局面が発生していた。本研究における非支持局面の時間の全分析対象者の平均値は(Table 3)、国際陸連が国際競歩審判員を対象として実施した歩型判定の分析(Knicker and Loch, 1990)

Table 3 Flight time of all subjects (N=35)

	Mean	SD	Max - Min
First half (s)	0.032	0.010	0.058 - 0.017
Second half (s)	0.027	0.011	0.050 - 0.008

において国際審判員が視認できなかった非支持時間の平均値 (0.039秒) を下回っていた。また、上回る分析対象者もみられたが (前半: 8名, 後半: 7名), Knicker and Loch (1990) の分析では0.05秒以下の非支持局面の発生は視認できない場合があると報告しており、また、法元ほか (2001) は、国際陸連の方針に先駆けて行った分析において、公式競技会における実際の競歩審判員の判定は非支持時間の長短ではなく、接地および離地前後の支持足の動きである可能性を報告していることから、分析対象者の項目で述べた通り熟練した競歩審判員が判定を行った公式競技会で失格とならなかった者は全て分析対象とした。

そして、本研究の分析対象者は両足が地面と離れる局面がみられる場合、どちらかの足が地面と接触している局面を支持期、両足が地面と離れ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をそれぞれ2等分して支持時間、非支持時間とした。また、1サイクル中の支持期および非支持期における重心の水平方向の変位を2等分したものをそれぞれ支持距離、非支持距離とした。

### 3) 力学的エネルギーの算出

身体各部分の力学的エネルギーを式 (1) により算出した。

$$E_{i,j} = m_i g h_{i,j} + \frac{1}{2} m_i v_{i,j}^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_{i,j}^2 \quad (1)$$

ここで、 $E_{i,j}$  は時刻  $j$  における部分  $i$  の力学的エネルギー、 $m$  は部分質量、 $g$  は重力加速度、 $h$  は部分の重心高、 $v$  は部分重心の速度、 $I$  は部分の重心まわりの慣性モーメント、 $\omega$  は身体各部分の部分角度を数値微分して得た部分の角速度である。また、力学的エネルギーとその変化の要因となる部分に対する外力との関係をとらえやすくするために、力学的エネルギーを時間で数値微分して力学的エネルギー変化率 ( $dE/dt$ ) を算出した。部分の力学的エネルギー変化率は、その部分に作用する外力およびトルクによって生じるパワーの総和と等しくなると仮定できるため、力学的エネルギー変化と変化の要因との関係を検討するのに適している (Winter, 1990)。

部分内および部分間で力学的エネルギーの交換および伝達がおけると仮定し、力学的仕事 ( $W_{wb}$ ) を式 (2-3) より算出した。

身体部分間の力学的エネルギーの伝達量 ( $T_b$ ) は Pierrynowski et al. (1980) の方法を用いて式 (3-5) より算出した。 $W_w$  は部分内で力学的エネルギーの交換はあるが部分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である。

$$\Delta E_{i,j} = E_{i,j+1} - E_{i,j} \quad (2)$$

$$W_{wb} = \sum_j^{n-1} \left| \sum_i^s (\Delta E_{i,j}) \right| \quad (3)$$

$$W_w = \sum_i^s \sum_j^{n-1} |\Delta E_{i,j}| \quad (4)$$

$$T_b = W_w - W_{wb} \quad (5)$$

ここで、 $n$  は1サイクルに要したフィールド数、 $s$  は部分の数である。

### 4) キネティクスの変数の算出

関節力、関節トルクを算出するために、身体を剛体リンクにモデル化し、各部分について式 (7-9) に示した運動方程式をたてた。

$$JF_{pX} = ma_X + JF_{dX} \quad (7)$$

$$JF_{pY} = ma_Y + JF_{dY} + mg \quad (8)$$

$$JT_p = I\alpha + JT_d + r_{dX} JF_{dX} - r_{dY} JF_{dY} - r_{pX} JF_{pY} + r_{pY} JF_{pX} \quad (9)$$

ここで、 $X$  および  $Y$  は座標成分、 $m$  は部分質量、 $a$  は部分の重心加速度、 $g$  は重力加速度、 $JF_p$  は部分の近位端に作用する関節力、 $JF_d$  は遠位端に接する部分から受ける関節力、 $I$  は部分の重心まわりの慣性モーメント、 $\alpha$  は部分の角加速度、 $JT_p$  は部分の近位端に作用する関節トルク、 $JT_d$  は遠位端に接する部分から受ける関節トルク、 $r_p$  は部分の重心から近位端までのベクトル、 $r_d$  は部分の重心から遠位端までのベクトルである。

本研究では回復脚各関節に作用する関節力、関節トルクについて、回復脚足部に作用する  $JF_d$  はゼロとして、式 (7-9) を回復脚足部の遠位から順次解くことによって算出した。

関節  $j$  における関節力パワー ( $JFP_j$ )、セグメントトルクパワー ( $STP_j$ ) は、式 (10-11) によって算出した。

$$JFP_j = JF_j \cdot V_j \quad (10)$$

$$STP_j = JT_j \cdot SAV_s \quad (11)$$

ここで、 $JF_j$  は関節  $j$  の関節力、 $V_j$  は関節  $j$  の速度、 $JT_j$  は関節  $j$  の関節トルク、 $SAV_s$  は部分  $s$  の角速度である。

関節力、関節トルクによって部分  $s$  になされた仕事は、 $JFP_j$ 、 $STP_j$  を時間で積分することで算出した。また、仕事を各局面に要した時間で除すことで関節力パ



ワー、セグメントトルクパワーの平均値 (*MJFP*, *MSTP*) をそれぞれ算出した。

#### 5) 局面分け

歩行動作の1周期のうち右足離地 (R-off) から右足接地 (R-on) までの右脚回復期を両足が地面と接触を失う非支持期を含めた以下の4つの動作局面に分けた。

第1局面 (Phase 1) :

右足離地 (R-off) — 左足接地 (L-on)

第2局面 (Phase 2) :

左足接地 (L-on) — 身体重心が左足のつま先の真上を通過する左足支持期中点 (L-mid)

第3局面 (Phase 3) :

左足支持期中点 (L-mid) — 左足離地 (L-off) まで

第4局面 (Phase 4) :

左足離地 (L-off) — 右足接地 (R-on)

#### 6) 時系列データの規格化と平均

時系列データを各局面の動作時間により規格化した。右足離地 (R-off) から右足接地 (R-on) までの時間を100%として、右脚回復期の全分析対象者のデータを規格化した。力学的エネルギーと関節力、関節トルクおよび関節力パワーについては、分析対象者間の比較のために各分析対象者の身体質量でデータを除して規格化した。

また、歩行速度増加群と減少群の規格化した時系列データから1%ごとに各群の平均値と標準偏差を算出した。

#### 7) 統計処理

分析項目間の関係をみるため、ピアソンの相関係数  $r$  を算出した。また、歩行速度の変化に対する各分析項目の関係の強さをみるために重回帰分析を行い、標準回帰係数  $\beta$  を算出した。さらに、本研究では、I群およびD群のそれぞれの群におけるレース前半と後半での各変数の差について検討するために、各群それぞれのレース前半と後半の間の有意差検定に対応のある  $t$  検定を用いた。また、歩行速度、ステップ長、ピッチに関する変数についてレース前半および後半のそれぞれでのI群とD群を比較するために、対応のない  $t$  検定を用いた。すべての統計処理において有意水準は5%未満とした。

なお、分析対象競技会におけるVTR撮影の一部は、日本陸上競技連盟科学委員会バイオメカニクス班の活動として行われたものである。競技会撮影にあたっては事前に主催者の同意を得、また、テクニカル

ミーティングにおいて分析撮影の実施内容および遂行にあたって危険が伴わないことについて十分に説明を行い、参加者の同意を得た。さらに、これら競技会の最新のものを以降、2009年3月までに更新された日本記録および世界記録の更新率はそれぞれ0.44%と1.2%で非常に小さく、競技水準の大きな変化はみられなかったことから、データの追加は行わなかった。

### Ⅲ. 結果

#### 1. レースにおける歩行速度、ステップ長、ピッチの変化

20kmレースにおけるレース前半および後半におけるそれぞれの歩行速度とレース記録 ( $mean = 1_{h}27_{m}55_{s}.1$ ,  $SD = 4_{m}33_{s}.5$ ) の関係についてみたところ、レース前半 ( $mean = 3.80\text{m/s}$ ,  $SD = 0.19\text{m/s}$ ,  $r = 0.67$ ,  $p < 0.001$ ) と後半 ( $mean = 3.66\text{m/s}$ ,  $SD = 0.23\text{m/s}$ ,  $r = 0.78$ ,  $p < 0.001$ ) の両方でレース記録と有意な高い相関がみられた。また、レース前半と後半の歩行速度差 ( $mean = -0.15\text{m/s}$ ,  $SD = 0.22\text{m/s}$ ) とレース記録の関係についてみたところ、レース前後半の歩行速度差とレース記録の間には有意な相関はみられなかった ( $r = -0.24$ )。しかし、自己記録達成率との間には有意な正の相関がみられた ( $r = 0.38$ ,  $p < 0.05$ )。なお、本研究ではレース前半と後半ともにレースごとに異なる地点での歩行動作の分析を行ったが、レース前半、後半ともに、分析地点の距離 (前半:  $mean = 5.54\text{km}$ ,  $SD = 0.78\text{km}$ ; 後半:  $mean = 15.43\text{km}$ ,  $SD = 1.09\text{km}$ ) は歩行速度と有意な相関はみられなかった (前半:  $r = -0.14$ ; 後半:  $r = -0.13$ )。また、それぞれの分析地点間の距離 ( $mean = 9.89\text{km}$ ,  $SD = 1.28\text{km}$ ) はレース記録 ( $r = -0.15$ ) および歩行速度差と有意な相関はみられなかった ( $r = -0.22$ )。

Table 4は、全被験者の歩行速度差とステップ長、ステップ頻度の差の平均値と標準偏差を示したもので、歩行速度差に対する支持距離と非支持距離、支持時間、非支持時間の標準重回帰係数 ( $\beta$ ) も示した。レース前半と後半の速度差との間では、ステップ長の変化 ( $mean = -0.04\text{m}$ ,  $SD = 0.05\text{m}$ ,  $r = 0.89$ ,  $p < 0.001$ ) の方がステップ頻度 ( $mean = -0.02\text{steps/s}$ ,  $SD = 0.09\text{steps/s}$ ,  $r = 0.57$ ,  $p < 0.001$ ) と比べて、高い相関係数がみられたものの、ステップ長とステップ頻度の両方で有意な高い相関がみられた。

また、標準回帰係数の絶対値は非支持距離 ( $\beta = 0.99$ ) が最も大きく、次いで非支持時間 ( $\beta = -0.95$ )、支持時

**Table 4** Difference of walking speed, step length and step frequency of all subjects ( $N=35$ ) from the first half of the race to the second half. Step length was divided into support distance and flight distance. Step time, which was a reciprocal of the step frequency, was divided into support time and flight time.

	Mean	SD	$r$ to the difference of walking speed	$\beta$ to the difference of walking speed ( $r^2=0.998$ )
Walking speed (m/s)	-0.15	0.22		
Step length (m)	-0.04	0.05	0.89***	
Support distance (m)	-0.01	0.05	0.32	0.70***
Flight distance (m)	-0.02	0.06	0.59***	0.99
Step frequency (steps/s)	-0.02	0.09	0.57***	
Support time (s)	0.01	0.01	-0.69***	-0.87***
Flight time (s)	-0.01	0.01	0.49**	-0.95

\* $p<0.05$ , \*\* $p<0.01$ , \*\*\* $p<0.001$

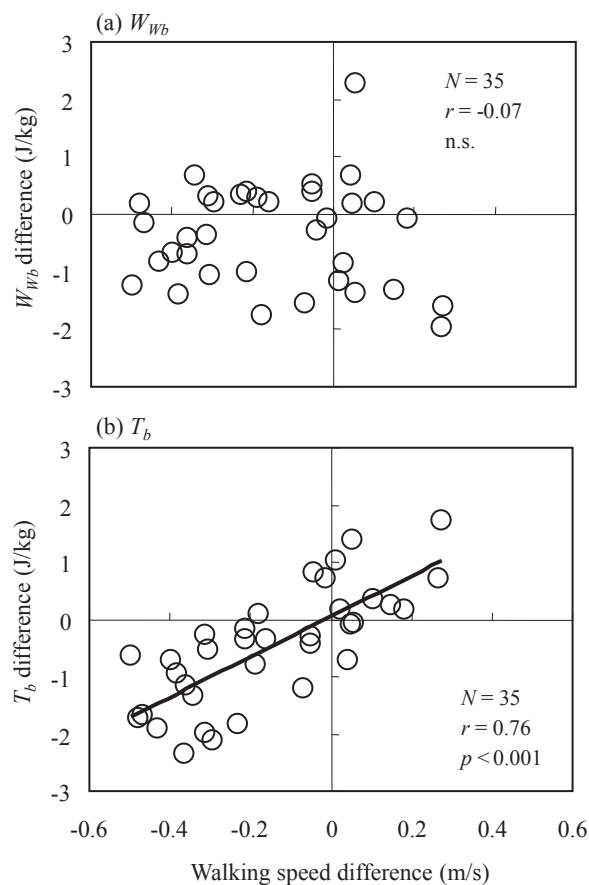
間 ( $\beta = -0.87$ ), 支持距離 ( $\beta = 0.70$ ) の順で, これらの決定係数 ( $r^2$ ) は0.998であった. しかし, それぞれの標準回帰係数の有意性を検定するために, それぞれについて  $t$  値を算出したところ, 支持距離 ( $t = 9.92$ ), 支持時間 ( $t = 7.82$ ) については5%の有意水準 ( $t = 2.04$ ) を上回っていたものの, 非支持距離 ( $t = 2.01$ ), 非支持時間 ( $t = 1.86$ ) は下回っていた.

## 2. レースにおける力学的エネルギー伝達量の変化

Figure 1 (a) は20kmレースにおけるレース前後半の歩行速度差と全身の力学的仕事 ( $W_{wb}$ ) 差の関係を, (b) は歩行速度差と力学的エネルギー伝達量 ( $T_b$ ) 差の関係を示したものである. レース前後半の歩行速度差は  $W_{wb}$  差 ( $mean = -0.37$  J/kg,  $SD = 0.90$  J/kg) と有意な相関を示さなかったが ( $r = -0.07$ ),  $T_b$  差 ( $mean = -0.46$  J/kg,  $SD = 1.02$  J/kg) と有意な正の相関を示し ( $r = 0.76$ ,  $p < 0.001$ ), レース後半における  $T_b$  の減少が大きいと, 歩行速度も大きく減少していた.

Figure 2 はI群およびD群におけるレース前半と後半における  $W_{wb}$  (a) と  $T_b$  (b) の平均値と標準偏差を示したものである.  $W_{wb}$  は歩行中に全身で発揮したパワーの総和を,  $T_b$  は発揮したパワーの身体部分間での伝達量の総和を, それぞれ表す.  $W_{wb}$  については, I群とD群ともレース前後半で有意な差はみられなかった. しかし,  $T_b$  については, レース前半ではI群 ( $mean = 6.35$  J/kg,  $SD = 0.73$  J/kg) とD群 ( $mean = 7.27$  J/kg,  $SD = 1.01$  J/kg) の間に有意な差がみられ ( $t = 2.30$ ,  $p < 0.05$ ), D群の方が大きかった. また, I群ではレース前半と後半での  $T_b$  の有意な差はみられ

なかったが, D群でレース後半 ( $mean = 5.94$  J/kg,  $SD = 0.77$  J/kg) に有意な  $T_b$  の減少がみられた ( $t = 6.81$ ,  $p < 0.001$ ).



**Figure 1** Relationships of the walking speed difference to the  $W_{wb}$  (a) and  $T_b$  (b) between the first and second halves of the races.

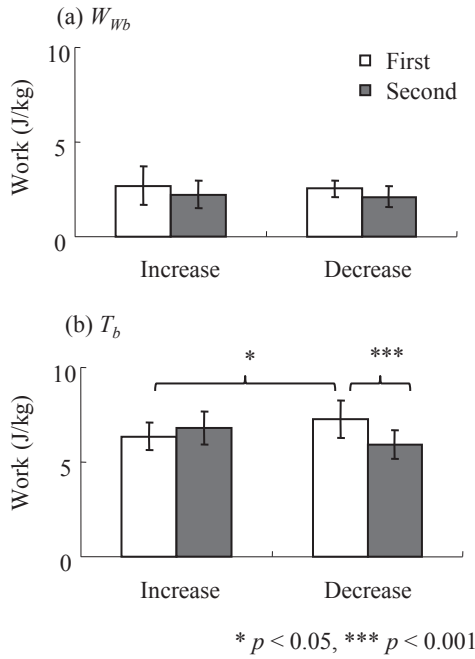


Figure 2 Changes of  $W_{wb}$  (a) and  $T_b$  (b) between the first and second halves of the races for Increase ( $N=11$ ) and Decrease ( $N=11$ ) groups.

### 3. レースにおける回復脚の力学的エネルギーの流れの変化

Figure 3は、I群とD群の各局面における平均の関節力パワー ( $MJFP$ ) とセグメントトルクパワー ( $MSTP$ ) をレース前後半で比較し、有意差のみられたものを示した。

I群については、局面3における股関節 ( $t=2.70, p<0.05$ ) と膝関節 ( $t=2.30, p<0.05$ ), 足関節 ( $t=2.34, p<0.05$ ) の  $MJFP$  がレース後半で有意に増加していた。

D群では、以下の局面および関節において後半に有意に減少していた。

局面1：股関節 ( $t=2.82, p<0.05$ ) と膝関節 ( $t=3.13, p<0.05$ ), 足関節 ( $t=2.97, p<0.05$ ) の  $MJFP$  がレース後半で有意に減少していた。

局面2：足関節 ( $t=3.58, p<0.01$ ) の  $MJFP$  がレース後半で有意に減少し、大腿膝関節 ( $t=3.10, p<0.05$ ) と下腿足関節 ( $t=2.48,$

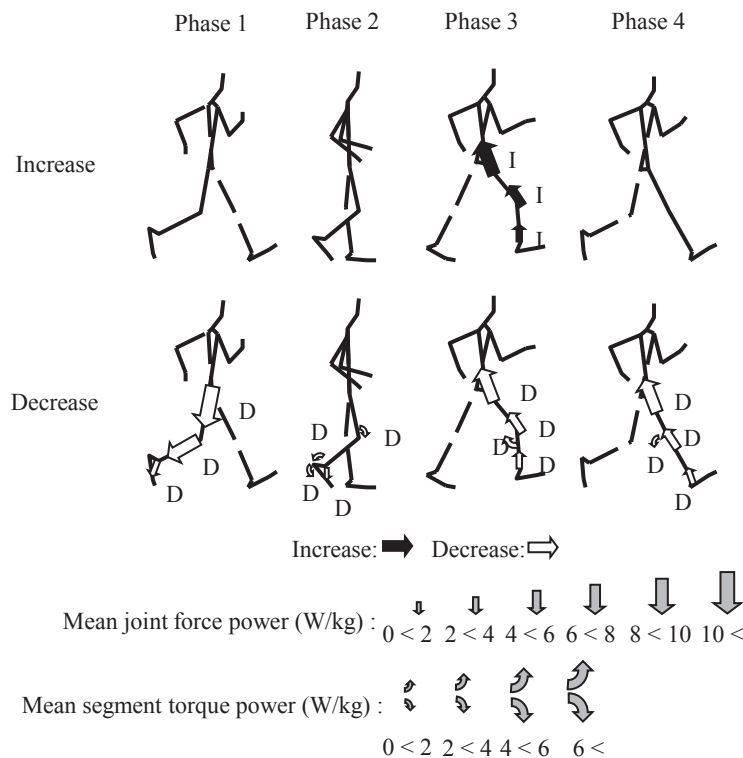


Figure 3 Mean joint force powers (straight arrows) and segment torque powers (curved arrows) of the recovery (right) leg in which the difference between the first and second halves of the races was significant for Increase (black arrows) and Decrease (white arrows) groups ( $N=11, p<0.05$ ). Arrows are indicated in the mean magnitude of the second half of the races for each group.

$p < 0.01$ ), 足部足関節 ( $t = 3.66, p < 0.01$ ) のMSTPがレース後半で有意に減少していた。

局面3: 股関節 ( $t = 10.37, p < 0.001$ ) と膝関節 ( $t = 7.05, p < 0.001$ ), 足関節 ( $t = 4.58, p < 0.01$ ) のMJFPがレース後半で有意に減少し, 下腿膝関節のMSTP ( $t = 7.98, p < 0.001$ ) がレース後半で有意に減少していた。

局面4: 股関節 ( $t = 4.72, p < 0.001$ ) と膝関節 ( $t = 6.45, p < 0.001$ ), 足関節 ( $t = 3.09, p < 0.01$ ) のMJFPがレース後半で有意に減少し, 大腿膝関節のMSTP ( $t = 2.23, p < 0.05$ ) がレース後半で有意に減少していた。

また, レース前半と後半のそれぞれでI群とD群を比較すると, レース前半で有意な差がみられたのは, 局面1の膝関節 ( $t = 2.58, p < 0.05$ ) と足関節 ( $t = 2.51, p < 0.05$ ) のMJFPのみであった。レース後半で

は, 局面1の膝関節 ( $t = 2.36, p < 0.05$ ) と足関節 ( $t = 2.32, p < 0.05$ ) のMJFP, および大腿股関節 ( $t = 2.51, p < 0.05$ ) と下腿膝関節 ( $t = 2.09, p < 0.05$ ) のMSTP, 局面2の足部足関節 ( $t = 2.47, p < 0.05$ ) のMSTP, 局面3の股関節 ( $t = 2.85, p < 0.01$ ) と膝関節 ( $t = 2.30, p < 0.05$ ), 足関節 ( $t = 2.77, p < 0.05$ ) のMJFPおよび下腿膝関節 ( $t = 4.22, p < 0.001$ ) のMSTP, 局面4の膝関節 ( $t = 2.12, p < 0.05$ ) のMJFPであった。

#### 4. レースにおける回復脚の関節力と関節トルクの変化

Figure 4は, I群の右足回復期での回復脚の大腿股関節の関節力水平成分の変化 (a) と関節トルク (b) をレース前半と後半の平均値と標準偏差で示したものである。関節力の正の値は前向き関節力を示し, 関節トルクの正の値は股関節屈曲トルクを示している。関節力はR-offで前向きであったが, 回復期30%で後向きに変化し, 回復期80%まで減少していた。また, 関節トルクはR-offから回復期40%まで屈曲トルクが

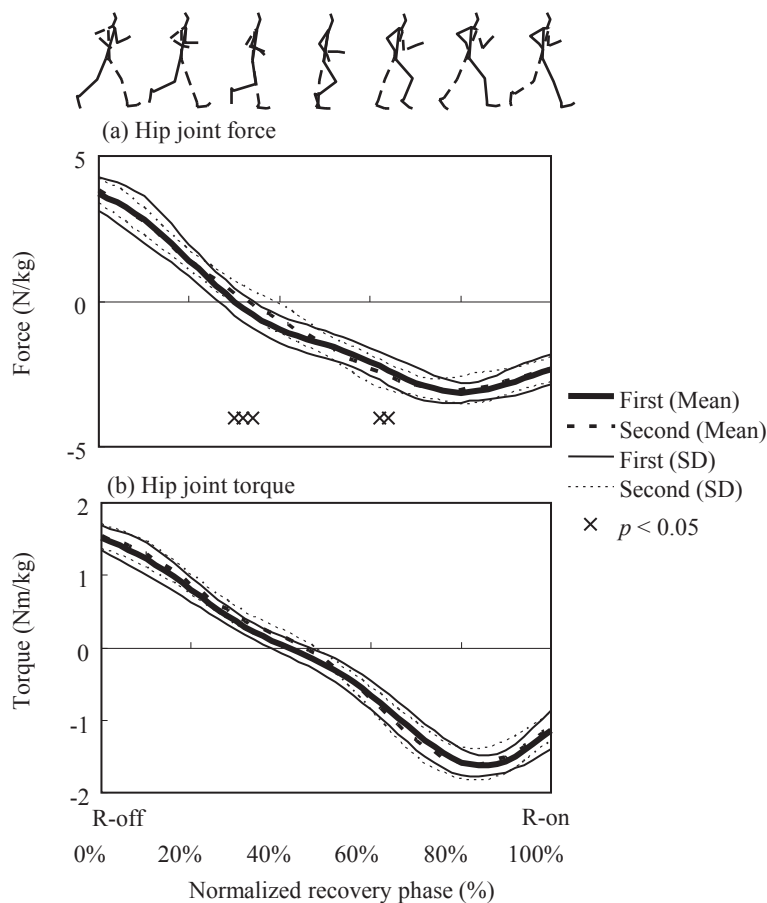


Figure 4 Mean horizontal component of joint force (a) and joint torque (b) at the recovery (right) hip for Increase group at the first and second halves of the races.



減少して伸展に変化し、回復期80%まで減少するような変化をしていた。レース前半と後半の関節力を比較すると、回復期30%における後向きの関節力がレース後半で有意に減少し ( $t=2.34, p<0.05$ )、回復期60%の関節力は有意に増加していた ( $t=2.45, p<0.05$ )。また、関節トルクでは回復期全体を通してレース前半と後半での有意な差はみられなかった。

Figure 5はD群の右足回復期での回復脚の大腿股関節(a)と下腿膝関節(b)の関節力水平成分の変化をレース前半と後半の平均値と標準偏差で示したものである。正は前向きの関節力を示している。股関節力水平成分の変化パターンはI群と同様であった。また、膝関節力水平成分の変化パターンは、R-offでは前向きの関節力が股関節の半分であり、回復期40%まで減少して後向きに変化し、回復期80%まで減少していた。レース前半と後半の比較では、股関節ではR-off直後の前向きの関節力 ( $t=2.55, p<0.05$ )と回復期後半の後向きの関節力 ( $t=2.90, p<0.05$ )がレース後半で有意に減少していた。膝関節でもR-off直後の

前向きの関節力 ( $t=4.03, p<0.01$ )と回復期後半の後向きの関節力 ( $t=3.01, p<0.05$ )がレース後半で有意に減少していた。

Figure 6はD群の右足回復期での回復脚股関節(a)と膝関節(b)の関節トルクの変化をレース前半と後半の平均値と標準偏差で示したものである。正は股関節の屈曲と膝関節の伸展を示している。股関節トルクの変化パターンはI群と同様であった。また、膝関節トルクの変化パターンは、R-offでは伸展トルクが股関節の4分の1程度であり、回復期40%まで減少して屈曲トルクに変化し、回復期80%まで減少していた。レース前半と後半のトルクを比較すると、股関節では、R-off直後の屈曲トルク ( $t=3.22, p<0.01$ )と回復期後半の伸展トルク ( $t=3.32, p<0.01$ )がレース後半で有意に減少していた。膝関節でも、R-off直後の伸展トルク ( $t=3.08, p<0.01$ )と回復期後半の屈曲トルク ( $t=3.72, p<0.01$ )がレース後半で有意に減少していた。

Figure 4-6に示したパラメータについて、レース前

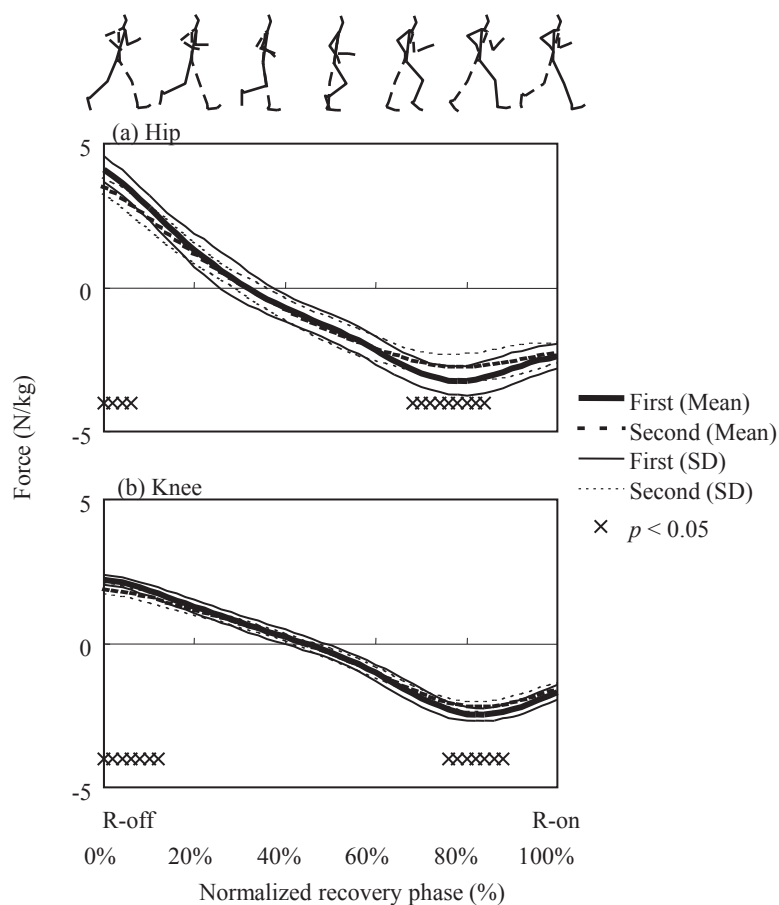


Figure 5 Mean horizontal component of joint force at the recovery (right) hip (a) and knee (b) joint for Decrease group at the first and second halves of the races.

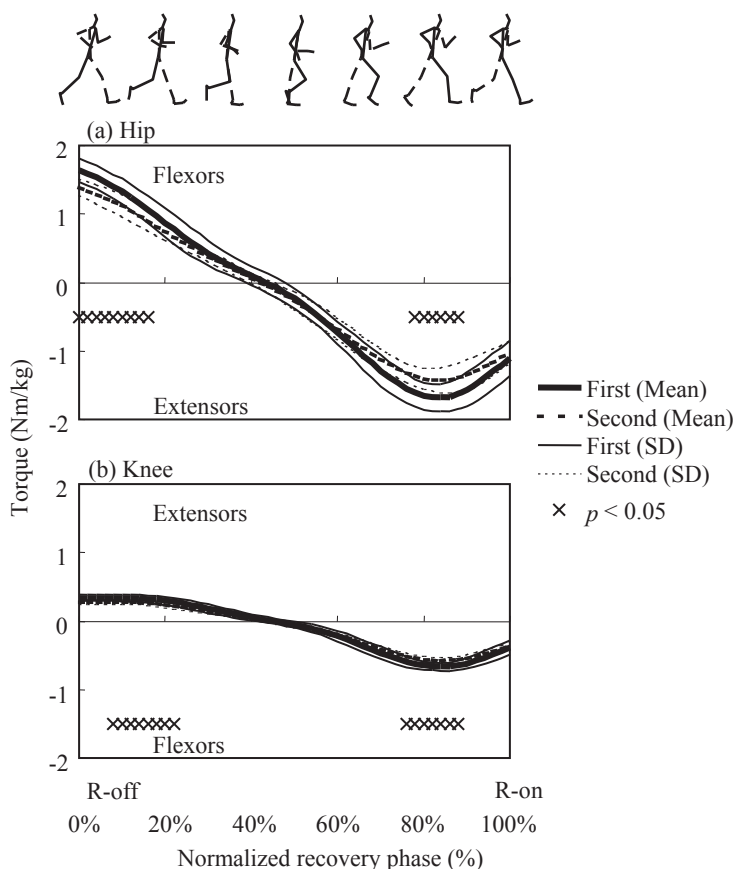


Figure 6 Mean joint torques at the recovery (right) hip (a) and knee (b) joint for Decrease group at the first and second halves of the races.

半と後半のそれぞれでI群とD群を比較したところ、レース前半については、二つの群間で有意な差がみられたのは回復脚の股関節力水平成分のR-offの時点のみで、D群が有意に大きく ( $t = 2.36, p < 0.05$ )、膝関節力では回復期全体を通して有意な差はみられなかった。関節トルクに関しても、股関節、膝関節ともに有意な差のみられた局面はなかった。レース後半については、回復脚の股関節力と膝関節力水平成分についてみると、股関節では回復期80%でI群が有意に大きく ( $t = 2.24, p < 0.05$ )、膝関節では回復期70%から90%にかけてI群が有意に大きかった ( $t = 3.16, p < 0.01$ )。回復脚の股関節トルク、膝関節トルクについてみると、股関節では、R-offから回復期10%までの局面でI群が有意に大きく ( $t = 2.25, p < 0.05$ )、回復脚70%から90%までの局面でもI群が有意に大きかった ( $t = 2.76, p < 0.05$ )。膝関節では、R-off直後および回復期20%から40%までの局面でI群が有意に大きく ( $t = 2.32, p < 0.05$ )、回復期70%から95%までの局面でもI群が有意に大きかった ( $t = 3.56, p < 0.01$ )。

#### IV. 考 察

##### 1. レースにおける歩行速度、ステップ長、ピッチの変化

本研究におけるデータは異なるレースの異なる地点のデータについて比較したものであったが、結果の項で示したように、レース前半と後半のそれぞれの分析地点におけるスタートからの距離は歩行速度との有意な相関はなかった。また、分析地点間の距離は歩行速度差およびレース記録と有意な相関はみられなかったことから、異なる分析地点でのデータの結果への影響は無視できるほど小さかったと考えることができる。

歩行速度とレース記録との関係についてみると、レース前後半の歩行速度差とレース記録の間には有意な相関はみられなかった。しかし、自己記録達成率 (Table 2) とは有意な正の相関がみられ、レース前半と後半の歩行速度の差が小さいほどレース前の自己記録に対する達成率が高かったといえる。そのため、レース後半での歩行速度の維持や増加は、競技レベル

に関係なく、競技者の能力を競技パフォーマンスにつなげるための必要な条件であると考えられる。

Abbiss and Laursen (2008) は、スプリント走、長距離走、自転車競技、競泳などにおける30秒以内で終わる種目から4時間以上にわたって競われる種目までの各種目のペース配分戦略に関する研究を総説している。その中で、2分以上、4時間以内の種目では平均的なペース配分戦略が採用される傾向にあること、また、パワー発揮を維持する2分以上の種目でも、平均的なペース配分戦略が最適であること (De Koning et al., 1999; Thompson et al., 2003) などを記述している。したがって、これらの研究報告からもレース後半での歩行速度の維持や増加はより高い競技パフォーマンスの発揮に有利な条件であると考えられる。

Table 4 で示したように、レース前半と後半の歩行速度差には、ステップ長とステップ頻度の両方が強い関係を示していたものの、これらの要素は互いに影響し合っていると考えられる。そのため、ステップ局面を支持局面と非支持局面とに分け、距離の要素と時間の要素の側面での歩行速度に対する影響について重回帰分析によって検討してみたところ、非支持局面の要素は支持局面の要素に対してばらつきが大きいことから有意な関係を認めることができなかった。しかし、支持局面の要素については、支持距離、支持時間ともに有意な強い関係がみられ、支持距離よりも支持時間の方が歩行速度に対して関係が強いという結果がみられた。したがって、レース後半における歩行速度の低下は、おもに支持時間の増加によって生じるといえ、レース後半での歩行速度の低下を防ぎ、レース中にわたって歩行速度を維持するためには、支持時間が増加しないようにする必要があると考えられる。

## 2. レースにおける回復脚の力学的エネルギーの流れの変化

Figure 1 で示したように、レース前後半での歩行速度変化には、全身の力学的仕事 ( $W_{mb}$ ) より力学的エネルギーの伝達量 ( $T_b$ ) の変化が有意に関係していた。また、Figure 2 で示したように、レース前半における  $T_b$  は I 群よりも D 群の方が大きかった。このことはレース前後半での歩行速度の変化には身体部分間の力学的エネルギー伝達量の変化が伴うが、D 群ではレース前半における身体部分間の力学的エネルギーの伝達量が大きく、力学的エネルギーを有効に利用していたことを示している。阿江・藤井 (1996) は運動課題達成に対する運動中に発揮された全身の力学的仕事

の有効性が高い場合の背景として力学的エネルギーの伝達量が大きいことを前提としている。榎本ほか (1999) は、長距離走において全身の力学的エネルギー伝達量の増大は力学的仕事を小さくして長距離走のパフォーマンス向上に役立つことを示唆している。競歩における本研究の結果は、レース後半において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することができなくなったことが歩行速度の減少に影響したことを示唆している。

Figure 3 に示したように、D 群におけるレース前半に対するレース後半での局面 1, 3, 4 における股関節と膝関節の関節力パワーの減少は足関節力パワーや膝関節、足関節のセグメントトルクパワーより大きく、D 群における回復脚離地直後と回復期後半における股関節と膝関節の関節力パワーの減少は、離地後に回復脚の股関節力によって体幹から回復脚に流れる力学的エネルギーと、回復期後半に回復脚から体幹に流れる力学的エネルギーの流れが減少したことを示している。

Hoga et al. (2003) は、競歩における公式競技会中の回復脚股関節における力学的エネルギーの流れについて分析し、回復脚の股関節力による回復脚と体幹の間の力学的エネルギーの流れの大きさは、全身の力学的エネルギー伝達量に影響していたことを明らかにしている。本研究においても D 群でレース後半の回復脚の関節力パワーの減少 (Figure 4) と、全身の力学的エネルギー伝達量の減少がみられ、回復脚股関節力パワーの減少、すなわち股関節力による力学的エネルギーの流れの減少は全身の力学的エネルギー伝達量の減少に影響していたと考えられる。また、有意ではないが、レース後半の力学的エネルギー伝達量が増加していた I 群では、局面 3 における回復脚の股関節、膝関節、足関節の平均の関節力パワーが有意に増加していたことから (Figure 3)、レース後半での力学的エネルギーの伝達や有効な利用には、回復期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ていたと考えられる。

また、レース前半で I 群と D 群で有意な差がみられたのは関節力パワーのみであり、セグメントトルクパワーでは有意な差が見られなかったが、レース後半では関節力パワーとセグメントトルクパワーの両方で有意な差がみられるようになっていた。レース前半では、D 群は筋の発生するパワーでは I 群と有意な差はなく、関節力による力学的パワーの伝達で I 群よりも有意に大きくなっていったものの、レース後半では、D 群は関節力による力学的パワーの伝達だけでなく、筋に

よるパワーの発生もI群よりも有意に小さくなったことでFigure 3に示したように全身の力学的エネルギーの伝達ではI群とD群とで有意な差がみられなかったと考えられる。また、I群では、非支持局面である局面4では関節パワー、セグメントトルクパワーの有意な増加はみられなかったことから、I群における力学的エネルギー伝達量の増加は、非支持期における身体部分間の力学的エネルギー量の伝達によるものではなかったと考えられる。

Figure 4で示したように、I群では回復期60%での股関節の関節力水平成分がレース後半に有意に増加していたが、関節トルクでは有意な変化はなかった。Hoga et al. (2003)は、競歩の公式競技会のレース前半において、回復期後半における大きな股関節伸展トルクが回復脚大腿股関節の前向きの関節力を大きくすることを報告している。法元ほか (2008)は、回復期後半における回復脚股関節に作用する関節力の大きさは股関節伸展トルクだけでなく体幹長軸まわりのトルクの大きさにも影響されることを3次元画像分析と地面反力のデータから報告している。そのため、本研究においてレース後半において歩行速度を増加させた分析対象者は回復脚股関節トルク以外の要因によっても股関節の後向きの関節力を増加させ、回復脚から体幹に流れる力学的エネルギーを大きくしていた可能性も考えられる。

Figure 5と6で示したように、D群では回復期60%から90%まで股関節と膝関節の関節力水平成分と関節トルクがレース後半に有意に減少していた。回復脚離地直後における股関節屈曲トルクと膝関節伸展トルクはそれぞれ回復脚大腿と回復脚下腿を前方に加速するので、これらの関節には前向きの力が作用する。また、回復期後半における回復脚股関節伸展トルクと膝関節屈曲トルクは、それぞれ回復脚大腿と回復脚下腿を後方に加速し、回復脚股関節と膝関節の近位端に後向きの力を作用させる。したがって、回復脚離地直後と回復期後半におけるこれらの関節トルクの減少によって関節力水平成分が減少し、関節力パワーが減少していたと考えられる。

Hoga et al. (2003, 2006)は、回復期後半において大きな股関節伸展トルクを発揮することで回復脚大腿股関節の後向きの関節力を大きくし、回復脚から体幹を経て支持脚に流れる力学的エネルギーを大きくすることが大きな歩行速度の獲得に役立つことを明らかにした。本研究でも部分間の力学的エネルギー伝達量の変化が20km競歩レース前半と後半での歩行速度の変

化に関係していることが示され、力学的エネルギー伝達量を増加および維持するには回復期後半における回復脚から支持脚への力学的エネルギーの流れを増加または維持する必要があることが示唆された。レース後半での歩行速度の有意な減少には回復脚股関節における伸展トルクや後向きの関節力が小さくなることが関係し、本研究の結果でみられたように、D群の力学的エネルギーの有効性がレース前半で高かったにも関わらずレース後半において低下していたのは、局所的な疲労によって力学的エネルギーの流れに大きな影響を及ぼす部位、すなわち股関節、膝関節トルクをD群がレース後半でI群よりも低下させたことでエネルギーの流れが低下したことによると考えられる。そのため、レース後半で歩行速度を維持するには、回復期後半における回復脚股関節伸展トルクと膝関節屈曲トルクを維持することが重要であると考えられる。

さらに、Williams and Cavanagh (1987)や榎本ほか (1999)が示唆する全身の力学的エネルギー伝達量の増大の長距離走のパフォーマンス向上への貢献は、実際のレース中の変化量とスピードの変化の関係についてとらえたものではなく、レース前半と後半でのバイオメカニクス的変数の関係性を詳細にとらえているわけではない。また、力学的エネルギー伝達量が大きい場合でも、発揮したパワーや力学的エネルギーの伝達に関係する部位での発揮パワーが個々の分析対象者にとって大きかった場合には疲労によるパフォーマンス低下が発生すると考えられることから、持久系運動のパフォーマンス変化と力学的エネルギーの発生、伝達の関係については今後詳細に検討する必要がある。

競歩技術の指導書では、回復脚および支持脚の動作については、支持脚の後方への大きなスイングによってストライドを大きくし、歩行速度を獲得するべきであるといった記述しかない(金原, 1976; McNab, 1980; シュモリンスキー, 1982)。Hoga et al. (2003)の報告や本研究の結果で得られたような、回復脚股関節の伸展による回復脚の振り戻しについてはこれまで述べられてこなかった。本研究の結果は、回復期後半の大きな股関節トルクの発揮が、歩行速度獲得だけでなく、歩行速度を維持し、実際のレースで競技者が能力を発揮するための新たな技術的示唆になることを示している。

## V. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると、以下のように



なる。

- ①レース記録と歩行速度の間には、レース前半 ( $mean = 3.80\text{m/s}$ ,  $SD = 0.19\text{m/s}$ ) と後半 ( $mean = 3.66\text{m/s}$ ,  $SD = 0.23\text{m/s}$ ) の両方で有意な相関がみられた (前半:  $r = 0.67$ ,  $p < 0.001$ ; 後半:  $r = 0.78$ ,  $p < 0.001$ )。また、歩行速度の変化 ( $mean = -0.15\text{m/s}$ ,  $SD = 0.22\text{m/s}$ ) と自己記録達成率 ( $mean = 99.8\text{m/s}$ ,  $SD = 6.1\%$ ) との間に有意な相関がみられた ( $r = 0.38$ ,  $p < 0.05$ )。
- ②レース前半と後半の歩行速度差は、ステップ長 ( $mean = -0.04\text{m}$ ,  $SD = 0.05\text{m}$ ,  $r = 0.89$ ,  $p < 0.001$ ) およびステップ頻度 ( $mean = -0.02\text{steps/s}$ ,  $SD = 0.09\text{steps/s}$ ,  $r = 0.57$ ,  $p < 0.001$ ) の変化とも有意な相関がみられたが、重回帰分析の結果、支持時間の差との間の関係が最も強かった ( $\beta = -0.87$ ,  $t = 7.82$ ,  $p < 0.001$ )。
- ③歩行速度が増加した場合、回復期後半において回復脚股関節の関節力パワーと後向きの関節力が有意に増加していた。
- ④歩行速度が減少した場合、力学的エネルギーの伝達量が有意に減少していた (レース前半:  $mean = 7.27\text{J/kg}$ ,  $SD = 1.01\text{J/kg}$ ; レース後半:  $mean = 5.94\text{J/kg}$ ,  $SD = 0.77\text{J/kg}$ ;  $t = 6.81$ ,  $p < 0.001$ )。
- ⑤歩行速度が減少した場合は、回復期後半において回復脚股関節と膝関節の関節力パワーと後向きの関節力が有意に減少していた。また、回復脚股関節伸展トルクと膝関節屈曲トルクの有意な減少がみられた。

以上のことから、男子20kmレースにおいてレース後半に歩行速度を増加させるか、速度の減少を抑えることは、競技者のもつ能力をパフォーマンスとして発揮するための重要な要因であることが明らかになった。また、男子20kmレースの後半での歩行速度の増加は、回復脚から体幹および支持脚への力学的エネルギーの流れが大きくなり、支持脚の水平速度が増加して支持時間が減少したためと考えられる。レース後半での歩行速度の減少は、回復脚からの力学的エネルギーの流れが小さくなり、支持脚の水平速度が減少して支持時間が増加したためと考えられる。そのため、20km競歩レースのレース後半での歩行速度の増加は、回復脚股関節にかかる後向きの関節力を維持することが重要であり、また、歩行速度の減少に回復期後半の回復脚股関節伸展トルクと膝関節屈曲トルクの減少が伴っていたことから、これらのトルク発揮を維持することが重要であると考えられる。

## 文 献

- Abbiss, C.R. and Laursen, P.B. (2008) Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Medicine*, 38 (3): 239-252.
- 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: 155-162.
- 阿江通良・藤井範久 (1996) 身体運動における力学的エネルギー利用の有効性とその評価指数. *筑波大学体育科学系紀要*, 19: 127-137.
- Briswalter, J., Fougerson, B., and Legros, P. (1998) Variability in energy cost and walking gait during race walking in competitive race walkers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30: 1451-1455.
- Cavagna, G.A., and Franzetti, P. (1981) Mechanics of competition walking. *Journal of Physiology*, 315: 243-251.
- DaMilano, M., Vizini, V., LaTorre, A., Saladie LaFuente, L., Hoga, K. and Ae, M. (2008). La Marcia-Percorso attraverso la specialita piu medagliata dell'Atletica Leggera Italiana. Commissione Giudici Marcia e Settore Tecnico Marcia: Roma.
- De Koning, J.J., Bobbert, M.F., and Foster, C. (1999) Determination of optimal pacing strategy in track cycling with an energy flow model. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2 (3): 266-277.
- 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: 12-19.
- Frederick, E.C. (1991) Economy of movement and endurance performance. In: Shephard, R. J., and Åstrand, P.O. (Eds.) *Endurance in Sports*, Vol.II of the Encyclopedia of sports medicine. An IOC medical commission publication, pp.179-185.
- 法元康二・阿江通良・榎本靖士 (2001) 競歩における歩行技術に関するバイオメカニクス的研究—競技規則への適合について—. *陸上競技研究*, 47: 19-24.
- Hoga, K., Ae, M., Enomoto, Y., and Fujii, N. (2003) Mechanical energy flow in the recovery leg of elite race walkers. *Sports Biomechanics*, 2: 1-13.
- Hoga, K., Ae, M., Enomoto, Y., Yokozawa, T., and Fujii, N. (2006) Joint torque and mechanical energy flow in the support legs of skilled race walkers. *Sports Biomechanics*, 5: 167-182.
- 法元康二・阿江通良・榎本靖士・横沢俊治・藤井範久 (2008) 身体部分間の力学的エネルギーの流れからみた競歩の歩行技術に関するバイオメカニクス的研究. *陸上競技研究*, 73: 2-11.
- International Association of Athletics Federations (2006) *Materials for IAAF Level II Race Walking Judges Course*. International Association of Athletics Federations, Monaco.
- International Association of Athletics Federations (2010) *Competition Rules 2010-2011*, Monaco.
- 金原 勇 (1976) 競歩. 宮丸凱史ほか編 *現代スポーツコーチ全集 陸上競技のコーチング (I)*. 大修館書店: 東京, pp.537-554.
- 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: 7-9.

- 楠本秀忠・後藤幸弘・辻野 昭 (1983) 競歩の筋電図学的研究. 体育学研究, 28 : 43-54.
- McNab, T. (1980) Race walking. In: McNab, T. (Eds.) The complete book of athletics. Ward lock limited : London, pp.99-103.
- Marchetti, M., Cappozzo, A., Figura, F., and Felici, F. (1982) Race walking versus ambulation and running. In: Matsui, H., and Kobayashi, K. (Eds.) Biomechanics VIII-B, Human kinetics: Champaign, Illinois, pp.669-675.
- 三浦望慶・松井秀治・星川 保・宮下充正・小林寛道・袖山 紘 (1971) 走運動における身体資源 (physical resources) と運動成果 (physical performance) の関係について. 体育の科学, 21 : 114-119.
- 永井 純・杉山喜一・上村影史・尾縣 貢・関岡康雄・藤田紀盛 (1985) 競歩の技術に関する基礎的研究. 運動学研究, 1 : 51-62.
- 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.
- シュモリンスキー：成田十次郎ほか訳 (1982) ドイツ民主共和国の陸上競技教程. ベースボールマガジン社：東京, pp.153-163.
- Thompson, K.G., MacLaren, D.P., Lees, A, and Atkinson, G. (2003) The effect of even, positive and negative pacing on metabolic, kinematic and temporal variables during breaststroke swimming. European Journal of Applied Physiology, 88 (4-5) : 438-443.
- 山崎信寿・広瀬秀行 (1989) 時間・距離因子の分析. 土屋和夫監. 臨床歩行分析懇話会編, 臨床歩行分析入門. 医歯薬出版：東京, pp.11-24.
- 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.
- Williams, K.R., and Cavanagh, P.R. (1987) Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. Journal of Applied Physiology, 63 : 1236-1245.
- Winter, D.A. (1990) Biomechanics and motor control of human movement. John Wiley and Sons, New York, pp.103-139.

平成22年 7 月 13 日受付  
平成22年 11 月 24 日受理