

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

法元康二¹⁾ 阿江通良²⁾

1) 青森県スポーツ科学センター 2) 筑波大学体育科学系

Comparison of the effectiveness of the mechanical energy utilization for medalists and Japanese athletes on the men's 20km race walking of the Olympic Games in Athens

Koji Hoga¹⁾ Michiyoshi Ae²⁾

1) Aomori Prefectural Institute for Sports Sciences

2) Institute of Health and Sports Sciences, University of Tsukuba

Abstract

The purpose of this study was to identify the difference in the effectiveness of the mechanical energy utilization between the medalists and Japanese athletes on the men's 20km race walking of the Olympic Games in Athens. Three medalists and two Japanese athletes who walked on the 2km circuit course during the men's 20km race walking event were videotaped by two VTR cameras. Effectiveness indices of the mechanical energy utilization in race walking for medalists were higher than those for Japanese athletes because medalists have obtained large walking speed with small mechanical work (W_{wb}). The mechanical energy of the support leg for medalists increased with large mechanical energy flow from the recovery leg to the support leg by joint forces at the recovery and support hip in the end of the recovery phase. Increased mechanical energy of the support leg resulted in the large step length and walking speed.

I. 緒言

オリンピックや世界選手権では、競歩種目は男子 20km, 50km, 女子 20km (1997 年までは 10km) の三種目が実施されている。日本人選手の入賞はオリンピックでは達成されていないが、世界選手権では男子 50km で今村選手が東京大会 (1991 年) とアテネ大会 (1997 年) でそれぞれ 7 位と 6 位に入賞し、山崎選手がヘルシンキ大会 (2005 年) で 8 位に入賞している。しかし、男子 20km では柳沢選手がエドモントン大会 (2001 年) で 7 位に入賞しているだけで、女子 20km での入賞は達成されていない。そのため、男女 20km での日本一流選手と世界一流選手との差は、男子 50km と比べて大きいといえる。

競歩種目は、国際競技会において 17 歳以下のユ-

ス種目を含めて 5000m 以上の距離で実施される持久的種目であることから、生理的エネルギーを有効に利用し、レース中にわたって歩行速度を維持することは、高い競技パフォーマンスの達成に重要であると考えられる。Hoga ら (2003) は、日本国内で実施された公式競技会の男子 20km 競歩レースにおいて世界一流選手と日本一流選手を含む 28 名の競技者の回復脚における力学的エネルギーの流れについて分析し、レース中の大きな歩行速度の獲得には、筋によって発生した力学的エネルギーを有効に利用することが重要であることを明らかにしている。しかし、Hoga ら (2003) の研究では世界一流選手と日本一流選手との違いについては明らかにされておらず、また、日本国内の競技会における世界一流選手のパフォーマンスは必ずしも最高に近いコンディ

ションで達成されたものでないことから、日本一流選手と世界一流選手の違いを明らかにするには国際競技会における分析の方が適しているといえよう。

また、競歩種目では、競技規則による競歩の定義に適合しているかどうかを一周 2km 以下の周回コース上に等間隔で配置された五名から八名の競歩審判員が判定し、三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（財団法人日本陸上競技連盟，2005）．オリンピックや世界選手権などの国際競技会では、最高ランク（レベルⅢ）の国際審判員のみが判定を行うことから、競技規則に適合する範囲内で大きな歩行速度を獲得する技術を明らかにするためには、レベルⅢの国際審判員が判定する競技会での分析の方が適していると考えられる。

そこで、本研究では、世界一流選手と日本一流選手の違いについて明らかにするために、力学的エネルギー利用の有効性の観点から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違いについて明らかにすることを目的とした。

II. 方法

1. VTR 撮影

アテネオリンピック男子 20km 競歩（2004 年 8 月 20 日）は、オリンピックスタジアムをスタートおよびフィニッシュ地点として、スタジアムから 1km 離れた住宅街に設定された一周 2km の周回コースで行われた。スタートから 2km の地点のコース脇歩道に二台の VTR カメラ（DCR-TRV50，ソニー社製，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三次元 DLT 法のためのキャリブレーションを行った。

2. データ処理

Table 1 Characteristics for subjects

Name	Brugnetti (ITA)	Fernandez (ESP)	Deaks (AUS)	Tanii (JPN)	Yamazaki (JPN)
Place	1	2	3	15	DNF (Retired at 8km)
Age (yrs)	27	27	27	21	20
Height (m)	1.75	1.73	1.83	1.66	1.78
Body Mass (kg)	62	57	66	58	63
Race time	1:19'40"	1:19'45"	1:20'02"	1:23'38"	
Best time	1:19'40"	1:17'22"	1:18'14"	1:20'39"	1:20'38"
Performance Ratio (%)	100.0	97.0	97.8	96.4	

一周ごとに撮影したメダリストおよび日本人選手の VTR 画像から、分析可能であった周回のうち一周 2km のスプリットタイムの変化が小さく、歩行フォームに対する疲労の影響が少なかったと思われる 6km 地点から 14km 地点にかけての歩行 1 サイクルの画像を選択し（表 1），ビデオ動作解析システム（Frame-DIAS II，ディケイエイチ社製）により身体計測点 25 点の座標をデジタル化した。二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 法によって三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 X 座標が，2.4-7.2Hz，Y 座標が，1.8-7.4Hz，Z 座標が，1.8-7.4Hz，の範囲であった。

3. 算出項目

本研究では、以下の項目について算出した。

1) 歩行速度，ピッチ，ストライド

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水平前後成分を歩行速度とし、ピッチは 1 サイクルに要した時間を二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前後方向変位を二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，2005），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二等分したものを支持時間、非支持局面の時間を二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二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二等分したものを非支持距離として算出した。

2) 全身の力学的仕事，力学的仕事伝達量

身体各部分の部分質量，重心高，重心速度，重心まわりの慣性モーメント，角速度などから各部分の力学的エネルギーを算出し，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こると仮定した Pierrynowski ら（1980）の方法を用いて，部分の力学的エネルギーのフィールド間の差分から，

全身の力学的仕事 (W_{wb}) を式 (1) により算出した.

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

ここで, $\Delta E_{i,j}$ は部分 i の力学的エネルギーの時刻 j と時刻 $j+1$ の間の差分, 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.

身体内の力学的エネルギーの伝達量 (T_b) を Pierrynowski ら (1980) の方法を用いて式 (2), (3) により算出した. ここで, 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.

$$W_w = \sum_i^s \sum_j^{n-1} |\Delta E_{i,j}| \quad (2)$$

$$T_b = W_w - W_{wb} \quad (3)$$

力学的エネルギーが歩行速度に有効に利用されたかを評価するため, 阿江と藤井 (1996) が提唱した力学的エネルギーの有効性指数 (EI) を式 (4) により算出した.

$$EI = \frac{\text{EffectiveEnergy}}{\text{MechanicalWork}} = \frac{\frac{1}{2} M V_Y^2}{W_{wb}} \quad (4)$$

ここで, M は身体質量, V_Y は身体重心速度の水平前後成分の 1 サイクルの平均であり, 分子に有効エネルギーとして身体重心速度の水平前後方向成分による運動エネルギーを, 分母に 1 サイクルの力学的仕事を代入した.

3) 地面反力の推定

実際のレースでは, フォースプラットフォームを用いた地面反力の測定ができなかった. そこで, 本研究では, 榎本 (1998) が疾走動作の分析において水平前後方向と鉛直方向の地面反力を推定した方法を用いて, 地面反力を重心加速度および全身の角運動量から推定した.

水平前後方向と鉛直方向の地面反力を重心加速度のみから推定した場合, 水平前後方向成分の地面反力は, ランニング (羽田ら, 2003) 同様に, 競歩においても (法元, 2000), 実測した地面反力と大きく異なる. そこで, 重心加速度からは, 鉛直成分 (Z 成分, GRF_Z) のみを式 (5) によって求めた.

$$GRF_Z = Ma_Z + Mg \quad (5)$$

ここで, M は身体質量, a は重心の加速度, g は

重力加速度である.

身体重心まわりの外力によるモーメントは, 身体重心まわりの全身の角運動量の変化に等しいことから, 榎本 (1998) の方法では, 以下の式 (6), (7), (8) より地面反力の水平前後成分 (Y 成分, $mGRF_Y$) を算出している.

$$H_{CG} = \sum_{i=1}^s (I_i \omega_i + m_i r_{iY} r_{v_{iZ}} - m_i r_{iZ} r_{v_{iY}}) \quad (6)$$

$$\dot{H}_{CG} = d_Y GRF_Z - d_Z mGRF_Y \quad (7)$$

$$mGRF_Y = \frac{d_Y GRF_Z - \dot{H}_{CG}}{d_Z} \quad (8)$$

ここで, H_{CG} は重心まわりの角運動量, s は部分の数, I_i は部分 i の重心まわりの慣性モーメント, ω_i は部分 i の部分重心まわりの角速度, m_i は部分 i の部分質量, r_i は身体重心に対する部分 i の重心の位置ベクトル, r_{v_i} は身体重心に対する部分 i の重心の速度, $mGRF_Y$ は重心まわりのモーメントから算出された水平前後方向の地面反力, d は重心に対する圧力中心の位置ベクトルである.

榎本 (1998) および羽田ら (2003) は, 圧力中心を拇指球に固定して d を算出し, $mGRF_Y$ を推定しているが, 本研究では, 法元 (2000) の方法と同様に, 圧力中心位置は接地直後における踵の Y 座標から離地直前におけるつま先の Y 座標まで等速で移動するものと仮定して d を算出した. 法元 (2000) は, この推定法により算出した圧力中心位置および地面反力の水平前後成分を, 実際にフォースプラットフォームを用いて推定した値と比較している. そして, この推定法による値はピーク値の低下が生じるが, それ以外では実測値に近い地面反力が推定できたと述べていることから, 本研究では, 式 (5)–(8) によって妥当な地面反力の水平前後成分と鉛直成分の推定が可能であると判断した.

また, 地面反力の水平左右成分を水平前後成分と同じ方法で算出したところ, これまで競歩中の地面反力を実測した研究 (Payne, 1978 ; Fenton, 1984; Cairns ら, 1986) で示されたものと比較して, 支持期中盤のピーク値が小さいほかは, 同じような変化パターンを示したことから, 水平前後成分の地面反力と同じ方法による推定は妥当であると判断した.

身体部分を剛体とみなして運動方程式をたて, 手や足など身体の遠位部分から順次解くことによって関節力および関節トルクを算出した. 関節 j における関節力パワー (JFP_j), 関節トルクパワー (JTP_j)

を式 (9), (10) により算出した (Winter, 1990).

$$JFP_j = JF_j \cdot V_j \quad (9)$$

$$JTP_j = JT_j \cdot (SAV_i - SAV_{i+1}) \quad (10)$$

ここで, JF_j は関節 j に作用する関節力, V_j は関節点の速度, JT_j は関節 j の関節トルク, SAV_i は部分 i の部分角速度, SAV_{i+1} は部分 i の近位に隣接する部分 $i+1$ の部分角速度である.

III. 結果

1. 歩行速度, ピッチ, ストライド

表2は, 全ての被験者の歩行速度, ピッチ, ストライドを示したものである. 歩行速度については, ブルニェッティ選手が 4.36 m/s で最も大きく, 次いでディークス選手 (4.34 m/s), フェルナンデス選手 (4.32 m/s) の順であったが, 山崎選手 (4.17 m/s), 谷井選手 (4.11 m/s) とともにメダリストよりも小さかった. ピッチについては, 谷井選手 (3.53 Hz) 以外の全ての選手で 3.33 Hz であったが, ストライドについては, ブルニェッティ選手が 1.31 m, フェルナンデス選手が 1.30 m, ディークス選手が 1.30 m であり, メダリストはほぼ同じ大きさであった. 日本人選手は, 谷井選手が 1.16 m, 山崎選手が 1.25 m で, メダリストよりも小さかった. また, ストライドの身長比についても, メダリストはブルニェッティ選手 (74.7 %) とフェルナンデス選手 (75.0 %) が同じ程度の大きさであり, ディークス選手は 71.5% であったが, 日本人選手 (谷井選手: 70.1 %; 山崎選手: 70.3 %) よりも大きかった.

Table 2 Walking speed, step frequency and step length for all subjects

Name	Brugnetti (ITA)	Fernandez (ESP)	Deaks (AUS)	Tanii (JPN)	Yamazaki (JPN)
Analyzed point (km)	6	10	14	10	6
Walking Speed (m/s)	4.36	4.32	4.34	4.11	4.17
Step Frequency (Hz)	3.33	3.33	3.33	3.53	3.33
Step Time (sec)	0.30	0.30	0.30	0.28	0.30
Support Time (sec)	0.27	0.29	0.25	0.26	0.28
Flight Time (sec)	0.03	0.01	0.05	0.02	0.02
Step Length (m)	1.31	1.30	1.30	1.16	1.25
Support Distance (m)	1.16	1.26	1.08	1.06	1.18
Flight Distance (m)	0.15	0.04	0.22	0.10	0.07
Step Length Ratio to body height (%)	74.7	75.0	71.5	70.1	70.3

Table 3 W_{wb} , T_b and EI for all subjects

Name	Brugnetti (ITA)	Fernandez (ESP)	Deaks (AUS)	Tanii (JPN)	Yamazaki (JPN)
W_{wb} (J/kg)	3.95	2.74	3.51	3.97	5.21
T_b (J/kg)	18.96	18.57	17.31	14.62	16.85
EI	2.40	3.41	2.68	2.12	1.67

また, 本研究で分析した全ての被験者で両足が地面との接触を失う非支持局面が発生していたが, 非支持時間については, フェルナンデス選手が 0.01 秒と最も短かったが, 谷井選手と山崎選手はともに 0.02 秒で, ブルニェッティ選手 (0.03 秒), ディークス選手 (0.05 秒) よりも短かった. また, 支持距離については, フェルナンデス選手は 1.26 m と非常に長かったが, ブルニェッティ選手 (1.16 m) は山崎選手 (1.18 m) と同じ程度であり, ディークス選手 (1.08 m) は谷井選手 (1.06 m) と同じ程度であった. 非支持距離については, フェルナンデス選手は 0.04 m と非常に短かったが, 谷井選手 (0.10 m) と山崎選手 (0.07 m) は, ブルニェッティ選手 (0.15 m), ディークス選手 (0.22 m) よりも短かった.

2. 全身の力学的仕事と力学的エネルギー伝達量, 力学的エネルギーの有効性指数

表3は, 1 サイクル中に全身で発揮した体重 1kg あたりの力学的仕事 (W_{wb}) と全身の部分間で伝達された力学的エネルギー伝達量 (T_b), 力学的エネルギーの有効性指数 (EI) を全ての被験者について示したものである. W_{wb} については, フェルナンデス選手が 2.74 J/kg で最も小さく, 次いでディークス選手が 3.51 J/kg で, ブルニェッティ選手 (3.95 J/kg) と谷井選手 (3.97 J/kg) は, ほぼ同じ大きさであったが, 山崎選手は 5.21 J/kg で最も大きかった. T_b については, ブルニェッティ選手 (18.96 J/kg) とフェルナンデス選手 (18.57 J/kg) が同じくらい大きさで, 次いでディークス選手 (17.31 J/kg), 山崎選手 (16.85 J/kg) の順であり, 谷井選手は 14.62 J/kg で最も小さかった. EI については, フェルナンデス選手が 3.41 と非常に高く, 次いでディークス選手 (2.68), ブルニェッティ選手 (2.40) の順であったが, 日本人選手は谷井選手 (2.12), 山崎選手 (1.67) の両方ともメダリストより低かった.

3. 下肢の関節力パワーと関節トルクパワー, 関節トルク, 関節角速度

図1は全ての被験者の回復脚股関節における関節

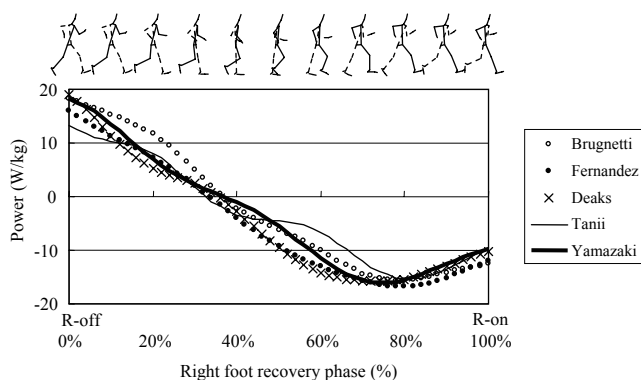


Figure 1 Joint force power of the right hip for all subjects during the normalized recovery phase

力パワーの変化を，右足離地から右足接地までの右足回復期を 100 % として規格化して示したものである．正のパワーは，回復脚股関節力によって体幹から回復脚に力学的エネルギーが流れたことを示し，負のパワーは，回復脚から体幹に力学的エネルギーが流れたことを示している．離地時に正であった股関節力パワーは，回復期 40 % 付近で負のパワーに変化し，回復期 80 % まで負のパワーを増加させていた．回復期前半における正の関節力パワーは，ブルネッティ選手のものほかの選手のものよりも大きかった．負の関節力パワーが増加する回復期 40% から 80% までの局面では，フェルナンデス選手とディークス選手のものが大きく，谷井選手の負の関節力パワーは他の選手のものよりも小さかった．また，回復期 80% から接地までの局面では，ブルネッティ選手とフェルナンデス選手の負の関節力パワーはほぼ同じ大きさであり，ディークス選手，山崎選手，谷井選手の負の関節力パワーよりも大きかった．

図 2 は，全ての被験者の支持脚股関節の関節力パワーの変化を，右足接地から右足離地までの右足支

Figure 2 Joint force power of the right hip for all subjects during the normalized support phase

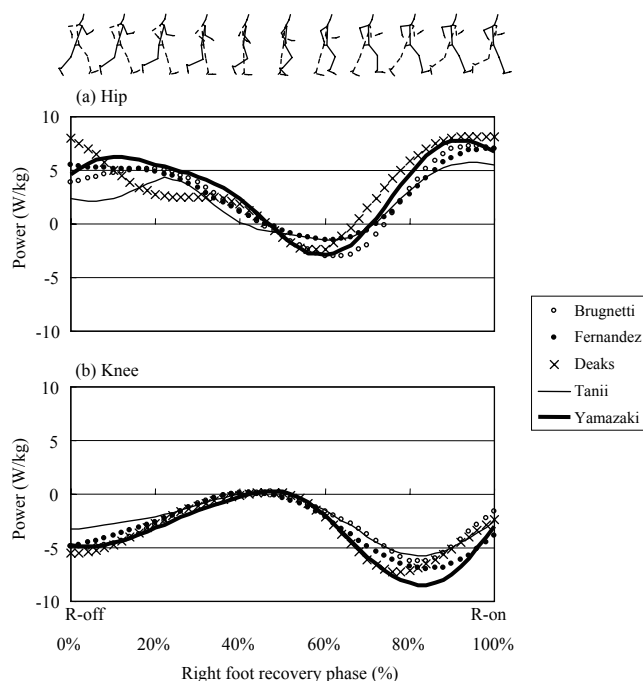


Figure 3 Joint torque power of the recovery hip (a) and knee (b) for all subjects during the normalized recovery phase

持期を 100% として規格化して示したものである．正のパワーは，支持脚股関節力によって体幹から支持脚に力学的エネルギーが流れたことを示し，負のパワーは，支持脚から体幹に力学的エネルギーが流れたことを示している．接地時において全ての被験者の関節力パワーは負であったが，ブルネッティ選手とディークス選手は，支持期 20% から 40% までの局面で正のパワーを示した後に，支持期 40% から 60% あたりまで負のパワーを示して，支持期 60% から離地まで正のパワーを急激に増加させていた．フェルナンデス選手では，支持期 20% から 60% まで非常に小さい負のパワーを示したのち，離地まで急激に負のパワーを増加させていた．谷井選手と山崎選手は，支持期 20% から 50% まで負のパワーを示した後に，離地まで正のパワーを増加させていた．支持期 60% から 80% まで，山崎選手の正の関節力パワーが他の選手のものよりも大きかったが，支持期 80% から離地時における正のパワーは，谷井選手および山崎選手よりもメダリストのほうが大きくなっていた．

図 3 は，全ての被験者の右足回復期における回復脚股関節 (a) と膝関節 (b) の関節トルクパワーの変化である．離地時に正であった股関節トルクパワーは，回復期 40% あたりまで減少して負のパワーに変化し，回復期 70% から接地まで正のパワーを増

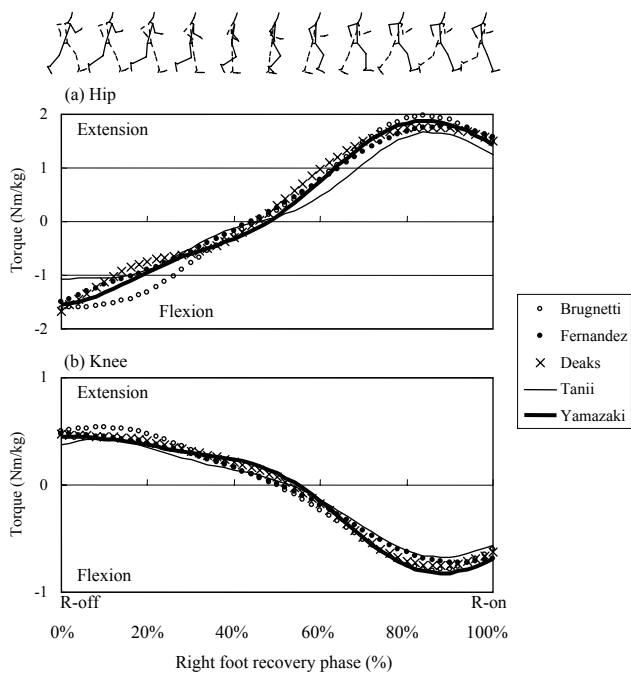


Figure 4 Joint torque of the recovery hip (a) and knee (b) about the medial-lateral axis of the absolute coordinate system for all subjects during the normalized recovery phase

加させていた。回復期前半では、山崎選手の股関節トルクパワーは他の選手のものより大きかった。膝関節の関節トルクパワーについては、離地時に負のパワーを示した後、回復期 40% あたりまで負のパワーが減少し、再び回復期 80% あたりまで負のパワーを増加させていたが、回復期後半における山崎選手の負の膝関節トルクパワーは他の選手のものより大きかった。

図 4 は、全ての被験者の右足回復期における回復脚股関節 (a) と膝関節 (b) における静止座標系左右軸まわりの関節トルクの変化である。正のトルクは伸展を示し、負のトルクは屈曲を示している。股関節トルクは離地時に屈曲トルクを示したが、回復期 40% まで減少して伸展トルクに変化し、回復期 80% まで伸展トルクが増加していた。右足離地から回復期 40% までの局面では、ブルニエッティ選手の股関節屈曲トルクが他の選手よりも大きく、回復期 80% 付近の伸展トルクのピーク値もブルニエッティ選手のものが大きかった。また、回復期後半では、谷井選手の伸展トルクは他の選手よりも小さかった。山崎選手の伸展トルクのピーク値はブルニエッティ選手を除く他の選手よりも大きかったが、接地時にはメダリスト三選手よりも小さくなっていった。膝関節トルクは離地時に伸展トルクであったが、回

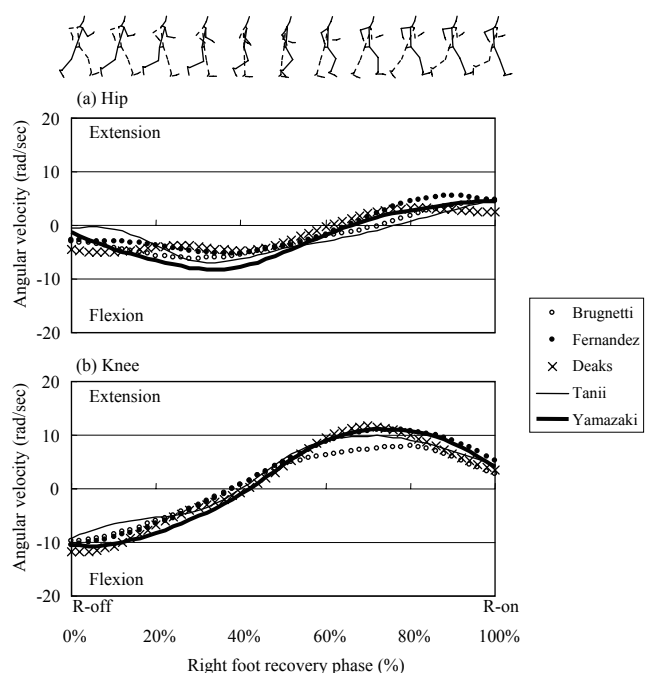


Figure 5 Joint angular velocity of the recovery hip (a) and knee (b) about the medial-lateral axis of the absolute coordinate system for all subjects during the normalized recovery phase

復期 50% に屈曲トルクに変化した後、屈曲トルクを大きく増加させて接地していた。右足離地から回復期 30% までの局面では、ブルニエッティ選手の伸展トルクが他の選手よりも大きく、回復期 80% から右足接地までの局面では、山崎選手の屈曲トルクが他の選手よりも大きく、また、谷井選手は他の選手よりも小さくなっていった。

図 5 は、全ての被験者の右足回復期における回復脚股関節 (a) と膝関節 (b) における静止座標系左右軸まわりの関節角速度の変化である。正の角速度は伸展を示し、負の角速度は屈曲を示している。離地時に屈曲の角速度を示した股関節角速度は、回復期 40% まで屈曲の角速度が増加し、回復期 60% で伸展に変化して接地していた。膝関節角速度は、離地時に屈曲であったが、右足回復期 40% に伸展に変化した後、回復期 70% ぐらいまで増加して接地していた。回復期 20% から 40% までの局面では、山崎選手の股関節と膝関節における屈曲の角速度は他の選手よりも大きかった。また、回復期 70% から 90% までの局面で、山崎選手の膝関節における伸展の角速度はフェルナンデス選手とならんで他の選手よりも大きかったが、接地時には、他の選手と同じ大きさであった。

IV. 考察

本研究で分析を行った被験者の歩行速度は、メダリスト (4.32 - 36 m/s) の方が、日本人選手 (4.11 - 17 m/s) より大きかったが、メダリストのピッチ (3.33 Hz) は、日本人選手 (3.33 - 53 Hz) と同じか小さかったため、歩行速度の違いはストライドの違いによるものであったといえる (表 2)。また、ストライドの身長比についても、メダリスト (71.5 - 75.0 %) は日本人選手 (70.1 - 3 %) よりも大きく、Hoga ら (2003) が日本国内の公式競技会の男子 20km 競歩について分析したのと同じ傾向がみられた。また、本研究における被験者の非支持時間は 0.01 秒から 0.05 秒の範囲であったが、Knicker と Loch (1990) は、両足が地面から両足が離れたと競歩審判員が判定した競技者の平均の非支持時間 (0.046 秒) は、そうでない場合 (0.039 秒) と統計的な有意差はみとめられず、非支持時間とは異なる観点で判断していた可能性があることを報告しており、失格とならずにフィニッシュした本研究の被験者は競技規則に適合した歩型であったといえる。

本研究における被験者の体重 1kg あたりの全身の力学的仕事 (W_{wb}) は、メダリスト (2.74 - 3.95 J/kg) のほうが日本人選手 (3.97 - 5.21 J/kg) よりも少なく、日本人選手よりも歩行速度の高かったメダリストの力学的エネルギーの有効性指数 (EI; 2.40 - 3.41) は、日本人選手 (1.67 - 2.12) より高くなっていた。また、力学的エネルギー伝達量 (T_p) は、メダリスト (17.31 - 18.96 J/kg) のほうが日本人選手 (14.62 - 16.85 J/kg) よりも多かったが、榎本ら (1999) は、公式競技会の男子 5000m 走における分析から、全身の力学的エネルギー伝達量は疾走速度との間に有意な相関があると報告し、力学的エネルギーが身体部分間で多く伝達されることで力学的仕事を小さくし、疾走速度および力学的エネルギーの有効性を高められるとしている。本研究における被験者でも同様な傾向がみられたことから、メダリストでは、日本人選手と比較して多くの力学的パワーを身体部分間で伝達させることによって、少ない力学的仕事で大きな歩行速度を獲得していたと考えられる。

榎本ら (1999) は、長距離走において力学的エネルギーの有効性を高め、大きな疾走速度を獲得するための動作の特徴として、両脚間での力学的エネルギーの伝達が大きいかを挙げている。Hoga ら (2003) は、公式競技会における一流競技者では、回復期後半に回復脚股関節力によって回復脚から体

幹に流れる力学的エネルギーが歩行速度と有意な相関がみられたと報告し、また、実験において競歩中の地面反力を計測した Hoga ら (印刷中) の研究では、支持期終盤において支持脚股関節力によって体幹から支持脚に流れる力学的エネルギーの流れが歩行速度と有意な相関があったことを報告している。本研究における被験者では、接地前において回復脚股関節力によって回復脚から体幹に流れる力学的エネルギーの流れと、支持脚離地前において支持脚股関節力によって体幹から支持脚に流れる力学的エネルギーの流れの両方で、メダリストの方が日本人選手よりも大きく (図 1, 図 2)、競歩における下肢の力学的エネルギーの流れについて検討したこれまでの研究 (Hoga ら, 2003; Hoga ら, 印刷中) と同じような傾向がみられた。さらに、Hoga ら (2003) は、回復期後半における回復脚股関節伸展トルクの大きさが回復脚股関節力による力学的エネルギーの流れに影響すると述べているが、本研究の被験者でも、回復脚接地前におけるメダリストの股関節伸展トルクが日本人選手よりも大きかったように (図 4)、これまでの研究と同じような傾向がみられた。

左右の股関節力によって回復脚から支持脚に流れた力学的エネルギーによって支持脚の力学的エネルギーは増加するが、支持期終盤において、支持脚股関節には前向きの関節力が作用することから (Hoga ら, 印刷中)、支持脚全体は前方に加速することになり、ステップ長を大きくすることに役立つと考えられる。したがって、メダリストのステップ長が日本人選手よりも大きかったのは (表 2)、支持期終盤において回復脚から支持脚に流れた力学的エネルギーが多かったことによると考えられ、それによってメダリストは大きな歩行速度を獲得していたと考えられる。さらに、非支持時間が非常に短く、支持距離が最も長かったフェルナンデス選手が (表 2)、全身の力学的仕事が他の被験者よりも少なく、力学的エネルギーの有効性が最も高かったことから (表 3)、回復脚から支持脚に流れる力学的エネルギーを大きくすることで、両足が地面との接触を失うロス・オブ・コンタクトによる注意や警告を受けにくくなると考えられる。

山崎選手の全身の力学的仕事 (W_{wb}) は、メダリストだけでなく谷井選手と比較しても非常に大きかった (表 3)。部分の力学的エネルギーの変化から全身の力学的仕事を算出する方法 (Pierrynowski ら, 1980) は、関節トルクパワーから算出した力学的仕事よりも小さくなる傾向があるとされている (阿江と藤井, 1996b)。山崎選手の W_{wb} は他の選

手と比較して非常に大きかったことから、関節トルクパワーによって算出した全身の力学的仕事でも他の選手よりも大きかったと考えられる。White と Winter (1985) は、競歩中の地面反力を計測し、関節トルクパワーを算出しているが、その中で、回復脚の股関節と膝関節のトルクパワーと、支持脚の足関節トルクパワーが大きなパワーを示したと報告している。図3で示したように、山崎選手の股関節トルクパワーは、回復脚前半で他の選手のものよりも大きく、膝関節トルクパワーは、回復期後半で他の選手よりも大きかったことから、山崎選手の W_{wb} が他の選手のものより大きかったことには、これらのパワーが関係していたと考えられる。

回復期前半における山崎選手の股関節の屈曲トルクは大きくなかったが、屈曲角速度が他の選手よりも大きかったことから(図4, 5)、この局面における股関節トルクパワーの大きさには、股関節屈曲の角速度が関係していたと考えられる。また、この局面では、膝関節の屈曲角速度も大きかったことから、膝関節を屈曲することで、回復脚全体の股関節まわりの回転半径を小さくし、股関節のすばやい屈曲を行っていたと考えられる。しかし、回復期前半における回復脚膝関節の屈曲は回復脚足部を上方に蹴り上げることになるため、ロス・オブ・コンタクトの注意・警告を受けやすくなると考えられる(法元, 2005)。

また、競歩では接地時に膝関節を伸展させる必要があり、回復期前半に大きく屈曲した膝関節は、回復期後半に再び伸展することになる。回復期80%前後における山崎選手の膝関節伸展角速度はフェルナデス選手と同じで他の選手よりも大きかったが、接地時には他の選手と同じ伸展角速度であったことから(図5)、膝関節トルクパワーが負のピークを示した回復期80%前後における屈曲の角加速度は他の選手よりも大きかったと考えられ、そのことによって膝関節屈曲トルクが大きくなり(図4)、負のトルクパワーが大きくなっていたと考えられる。法元ら(2005)は、接地前における下腿の振り出しが小さい場合にはベント・ニーの注意・警告を受けやすいことを報告しているが、膝関節の伸展角速度は下腿の振り出しに影響するため、接地直前に膝関節の屈曲トルクが大きくなって、膝関節伸展角速度が小さくなることは、負の関節トルクパワーの増加だけでなく、ベント・ニーの注意・警告を受けやすくなると考えられる。

回復期における股関節と膝関節トルクパワーと左右軸まわりの関節トルク、関節角速度に関するこれ

らの考察から、回復期前半における大きな正の股関節トルクパワーの発揮と、回復期後半における大きな負の膝関節トルクパワーの発揮は、一歩中における全身の力学的仕事の増加だけでなく、歩型違反による注意・警告を受けやすくなる可能性があることから、改善すべき点であったと考えられる。

V. 要約

本研究の目的は、世界一流選手と日本一流選手の違いについて明らかにするために、力学的エネルギー利用の有効性の観点から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競技者の違いについて分析することであった。

その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 日本人選手のステップ長が1.16 - 25mであったのに対し、メダリストのステップ長は1.30-1.31mであり、歩行速度の違い(日本人選手:4.11 - 17m/s; メダリスト:4.32 - 36m/s)に大きく影響していた。
 - 2) メダリストは全身で発揮した力学的仕事が日本人選手よりも少なかったが、全身の部分間での力学的エネルギー伝達量が日本人選手よりも多く、力学的エネルギーを有効に利用し大きな歩行速度を獲得していた。
 - 3) メダリストは、回復脚接地前において、左右の股関節力によって回復脚から支持脚に多くの力学的エネルギーを流すことによって支持脚を前方に加速してステップ長を大きくし、大きな歩行速度を獲得していた。
 - 4) 日本人選手のうち、山崎選手は、回復期前半における股関節の正のトルクパワーおよび回復期後半における膝関節の負のトルクパワーが大きく、全身の力学的仕事を大きくしていた。
 - 5) 回復期後半での大きな股関節トルクパワーの発揮は、回復脚股関節と膝関節の大きな屈曲によってロス・オブ・コンタクトの注意・警告を受けやすく、また、回復期後半での大きな膝関節トルクパワーの発揮は、接地時の膝関節の伸展速度の低下によってベント・ニーの注意・警告を受けやすくなるため、改善すべき点となっていた。
- 以上のことから、日本一流選手を世界一流選手に近づけるためには、回復脚接地前における左右の股関節力を大きくすることによって、回復脚から支持脚へ流れる力学的エネルギーを多くし、全身で発揮した力学的仕事を有効に利用して大きな歩行速度を獲得することが重要であることが示唆された。また、回復期前半において回復脚膝関節の屈曲を抑えるこ

とと、回復脚接地直前に膝関節のすばやい振り出しを行うことは、注意・警告を受けにくい動きとなるだけでなく、全身の力学的仕事を小さくし力学的エネルギーの有効性を高める動きであることも示唆された。

謝辞：本研究のデータは、アテネオリンピック競歩男女種目の日本代表選手および専任コーチの協力を得て収集したものである。また、本研究において被験者となった各代表選手と専任コーチには本研究の趣旨をご理解頂き快くデータ開示にご協力いただいた。これらの方々に深く感謝の意を表します。

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.
- 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.
- Cairns, M. A., Burdett, R. G., Pisciotta, J. C., and Simon, S. R. (1986) A biomechanical analysis of racewalking gait. *Medicine and Science in Sports Medicine*, 18(4), 446-453.
- 榎本靖士 (1998) 力学的エネルギーからみた長距離走者の疾走動作. *筑波大学体育科学研究科平成9年度修士論文*, pp26-33.
- 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.
- Fenton, R. M. (1984) Race walking ground reaction forces. In: *Sports Biomechanics*, J. Terauds, K. Barthels, E. Kreighbaum, R. Mann, and J. Crakes (Eds.) Del Mar, CA: Academic Publishers, 61-70.
- 羽田雄一, 阿江通良, 榎本靖士, 法元康二, 藤井範久 (2003) 100m 走における疾走スピードと下肢関節のキネティクスの変化. *バイオメカニクス研究*, 7 (3), 193-205.
- 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. *筑波大学体育研究科平成11年度修士論文*, pp23-27.
- 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), 1-13.
- 法元康二, 杉田正明, 藤崎 明, 阿江通良 (2005) アテネオリンピックと第43回全日本競歩輪島大会の男子20km競歩におけるペント・ニー判定の比較. *日本陸上競技連盟陸上競技研究紀要*, 第1巻, 124-127.
- 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.
- Hoga, K., Ae, M., Enomoto, Y., Yokozawa, T., and Fujii, N. (in press) Joint torque and mechanical energy flow in the support leg of skilled race walkers. *Sports Biomechanics*.
- 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.
- 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.
- 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 (2), 147-156.
- 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.
- White, S. C., and Winter, D. A. (1985) Mechanical power analysis of the lower limb musculature in race walking. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1, 15-24.
- Winter, D. A. (1990) *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley and Sons Inc., New York, pp.103-139.
- 財団法人日本陸上競技連盟 (2005) *陸上競技ルールブック 2005年度版*. あい出版, 東京.