

【研究ノート】

長距離走の生理的機能と 力学的運動量との関係

三 宅 章 介
佐 渡 清 隆
佐々木 敏 彦
角 田 和 彦

緒 言

長距離走の能力を高めるために、走者各人の持久的生理機能を向上させることは重要な課題である。しかし、生理的機能ばかりでなく、疾走スキル（フォーム）を改善し、より効率の良い走能力を習得することも重要なことである。

本研究は本学の陸上競技部の長距離走者を対象に、彼らの競技力向上を目的とし、各競技者について生理的機能と走スキルの両面からその特徴を捉え、競技成績との関連を追求しようとするものである。

生理的機能としては同負荷に対する心拍数と酸素摂取量の測定と5,000mタイムトライアル中の心拍数の測定を実施し、走スキルとしては走法のエネルギー効率を求めため、5,000mタイムトライアル中の疾走フォームをビデオカメラで撮影し各人フォームの画像解析を行った。

方 法

被験者として協力を得られたのは本学の陸上部員で長距離走を専門とするもの4名であり、彼らの身体特性と5,000mタイムトライアル中の記録と5,000mの公認記録を表1に示す。

表 1 被験者の形態と競技記録

被験者名	年令	身 長 cm	体 重 kg	実験時の記録		5,000 m ベスト記録
	歳			分 秒	分 秒	
K.S.	20	171.9	63.2	16 : 12.1	15 : 04.9	
K.O.	19	173.6	59.9	16 : 38.0	15 : 28.7	
T.T.	20	169.0	60.0	19 : 27.9	17 : 27.0	
T.K.	20	163.0	53.0	16 : 53.3	16 : 26.9	

実験 1 自転車エルゴメーターによる酸素摂取量と心拍数の関係

モナーク社製自転車エルゴメーターにより 3 点法による運動負荷テストを実施し、ダグラスバック法により各運動負荷時 4 分毎の最後の 1 分間の呼気を採気し、日本電気三栄測器社製の呼気分析器を用い各負荷での酸素摂取量を計測した。なお、換気量の測定は乾式ガスメーターを使用した。

自転車エルゴメーターの負荷は 2, 3, 4 kp であり、回転数は 1 分間に 60 回転であった。また、測定中の心拍数は常時、竹井機器製の心拍メモリーにより計測した。

実験 2 5,000 m タイムトライアル中の

疾走フォームの撮影と心拍数の測定

本学の 400 m トラックを使用し、被験者には、通常の練習と同じように指示し、1 名ずつ 5,000 m 走を行わせた。

ビデオカメラは、スタートから 150 m 地点の走行を対象として各周回の記録をするため、走路と光軸を垂直にして走路から 40 m 離れた地点に設置し、走路を 10 m の幅で撮影した。画面校正のために、高さ 2 m のポールを走路に沿って 2 m の間隔で 5 本設置した。この時の撮影速度は 60 frame/sec であった。

タイムトライアル中の心拍数測定は走行に最も障害の少ないと思われるキャノン社製の小型心拍計ハートレートモニター PE-3000 を使用

長距離走の生理的機能と力学的運動量との関係

し、全行程中測定した。

画像解析については、得られた走行時のビデオ画像を、縦400ドット、横640ドットのモニターテレビ上に表示し、この映像の身体座標点をマウスで指示しコンピューターに入力した。これらの身体座標点を射影変換処理により座標変換し、これらを分析の対象とした。データの平滑化には13点移動平均法を用い、この時の遮断周波数は4.95Hzであった。

機械的エネルギーの算出には以下の式を用いた。

$$E = mgh + 1/2mv^2$$

E：身体重心における機械的エネルギー

m：体重 (kg)

g：重力加速度 =9.8 (m/s₂)

h：身体重心垂直変位 (m)

v：身体重心の速度 (m/s)

式の第1項は身体重心における位置エネルギー（ポテンシャルエネルギー）を示し、第二項は身体重心における運動エネルギーを示している。

機械的エネルギーの解析については、スタート、中間走（ベース走）、ラストスパートの3つの局面に分け解析を行った。対応する周回は1, 7, 13周目とした。

結果と考察

実験1 自転車エルゴメーターによる酸素摂取量と心拍数の関係

1) 個々人の心拍数変動と酸素摂取量の関係

各作業強度での酸素摂取量と心拍数との関係を図1に示した。縦軸に酸素摂取量、横軸に心拍数をとり各個人における酸素摂取量-心拍数間には高い相関があった。

これを負荷量との関連で見ると、負荷量の増加にともない酸素摂取量が急激に増加する者 (K.O., T.T.) とこれが穏やかに増加する者 (K.S., T.K.) があつた。しかし、両群に競技記録の良い者が存在し、一定の傾向は認められなかつた。しかし、穏やかな者の中では初期酸素

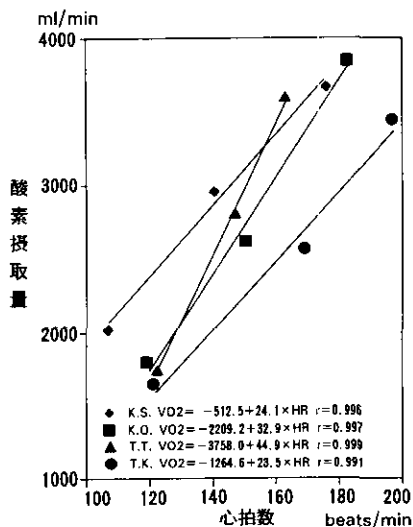


図1 心拍数と酸素摂取量の関係

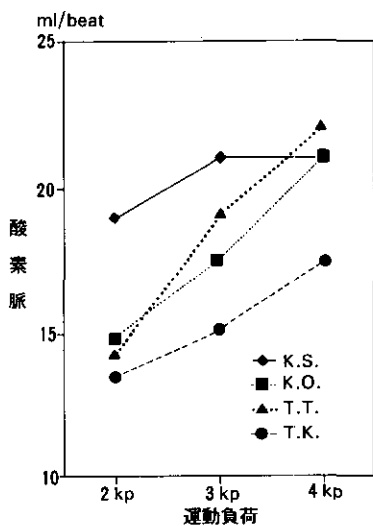


図2 運動負荷と酸素脈の関係

摂取量に大きな差があり、
ここでの差異が最大負荷時
の相違となっていた。

2) 酸素脈と心拍数の 関係

心拍出量に対する指標である酸素脈の変動を見ると(図2), 酸素摂取量の変化が穏やかであった者(回帰係数が小さい者)は酸素脈の変化も穏やかであり, 酸素脈の変動が小さい傾向を示していた。この中で特に高いパフォーマンスを示していたK.S.は, 他の被験者と比較して初期の負荷状態(2 KP)から最終負荷状態(4 KP)まで, その値は20ml/beats付近にあり, その値は余り変化してなかった。従って, 心拍出量に関しては効率の良い酸素供給が行われていたことを示唆していると思われる。また, この実験での最大負荷状態(4 KP)で, 最も多い酸素摂取量を示したK.O.は10,000 mの記録において4名中最も優れているが, 酸素脈に関してはK.S.と

異なっており、今後の課題となろう。

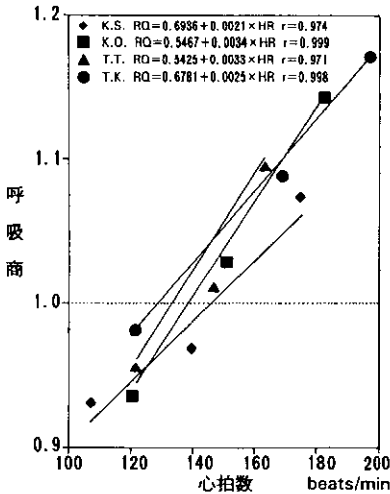


図3 心拍数とRQの関係

ける脂質代謝と糖質代謝の割合が変化し、消費エネルギー当量に相違を生じることが知られている。これらの代謝にもなるエネルギー当量を間接的に知るためにRQと心拍数の関係を明らかにしておく必要がある。

この関係を表したものが図3であり、RQに対応する心拍数の状態を示したものである。

RQ < 1に対応する心拍数は、概ね有酸素性の活動状態を示すものと考えられる。したがって、個々の活動水準の高さ特にRQ < 1での心拍数は有酸素性での活動性の高さを示すものと考えられる。その意味からも回帰係数の値が低くRQ = 1での心拍数が高い者ほど有酸素性の作業能力に優れているものと考えられる。この点を考慮し、4名を比較するとK.S., K.O., T.T., T.K., の順となり、実際の競技記録との相違は三位と四位が入れ変わっているだけであった。特にK.S.は3KPの負荷においてもRQ < 1であり、有酸素性作業能力が高い傾向は明らかであった。

3) RQと心拍数の関係

有氣的活動と無氣的活動の指標として用いられるRQは、 $(\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2)$ の比であり、RQ < 1である場合は、その活動は有酸素性の反応過程であり、RQ > 1で値が大きくなるにしたがい無氣的な反応過程の占める割合が高くなることがある。また、RQが(0.7 < RQ < 1.0)の範囲にある場合、生体内にお

実験2 5,000mタイムトライアル中の疾走フォームの撮影と心拍数の測定

1) 走行中の心拍数

5,000m走時の心拍数を図4に示した。4名共周回が増す毎に漸増的に上昇し、例外的にも下降することはなかった。第6周目から定常状態を示し、ラストスパートで若干上昇する傾向であった。この時の記録は表1に示す通りK.S., K.O., T.K., T.T.の順であり、各周回毎の平均速度(周回のラップタイムより算出)を図5に示す。T.T.のみ中間疾走時に減速傾向が認められるが、他の3名は一定のスピードを保持していることが判る。

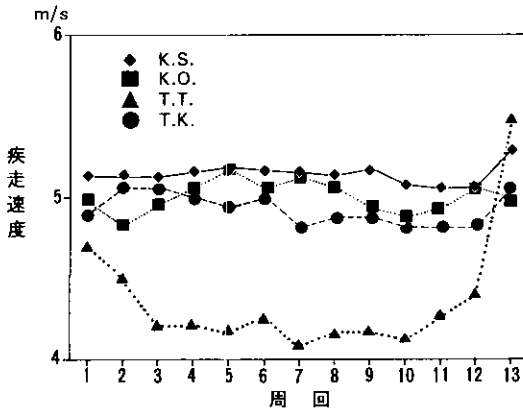


図4 5,000m疾走中の心拍数

長距離走の生理的機能と力学的運動量との関係

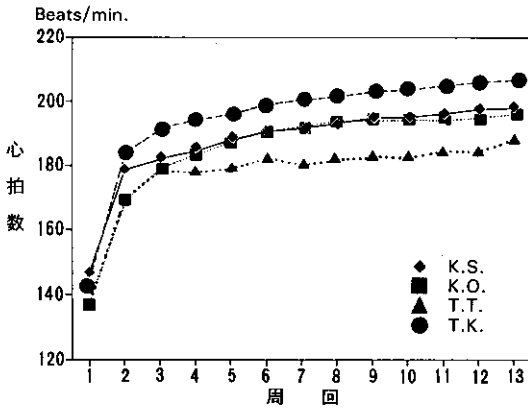


図5 各周回毎の平均速度の変化

2) 運動中のエネルギー消費量の推定

走行時の代謝量推定に関しては、心拍数と酸素摂取量との高い相関が明らかであったので、個々の被験者の関係式、さらに心拍数とRQの関係式から心拍数に対応するエネルギー当量を求め、心拍数をパラメーターとして用いた酸素摂取量に推定エネルギー当量を掛け合わせ、各周

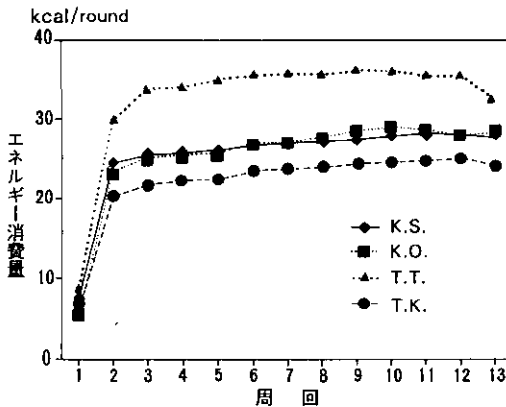


図6 各周回毎のエネルギー消費量の変化

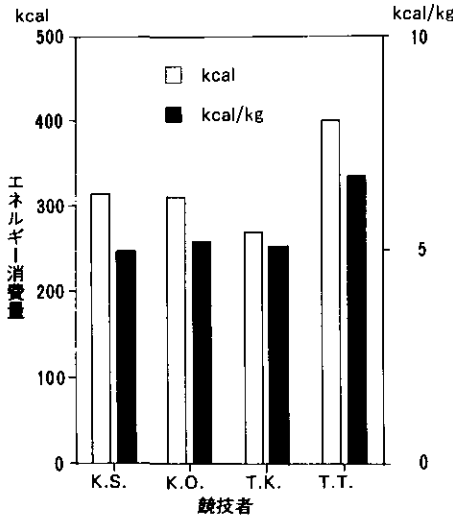


図7 5,000m走時のエネルギー消費量と体重当りのエネルギー消費量

回毎のエネルギー消費量を算出した(図6)。

心拍数はほぼ定常状態が観察されたことから、エネルギー消費量についても同様な変化が認められた。しかし、必ずしも高い心拍数変動を示した者が高いエネルギー消費量ではなく、各個人により異なる結果であった。

競技力向上を考えると、個々人についての基礎的な代謝測定が重要な意味を持つことが示唆された。

測定値そのものはトレーニングにより変動し得るもの

であることから、さらに定期的な代謝測定の必要性が存在し、パフォーマンスの向上に伴う代謝量の変化を記録し、個々人のトレーニングへと還元することの必要性が今後の課題となるであろう。また、測定機器の軽量化や測定方法の簡便化、測定結果の信頼性の向上により、その実現の可能性が高くなるであろう。

3) 5,000m走時のエネルギー消費量と体重当たりエネルギー消費量

心拍数を変数とし、前述の方法により算出した総エネルギー消費量と体重当たりエネルギー消費量(安静代謝を除いた)を記録の優れていた者の順に示したのが図7である。エネルギー消費量は毎分当りのエネルギー消費量に作業時間を乗じたものであるから、活動時間が長ければエネルギー量も多くなることは当然であろう。

長距離走の生理的機能と力学的運動量との関係

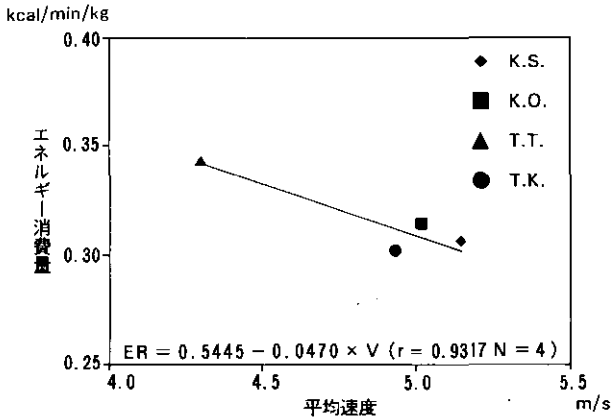


図8 平均速度とエネルギー消費量の関係

4) エネルギー消費量と平均速度

各個人のエネルギー変換効率を観察・比較するためには、体重当たりのエネルギー消費率を検討する必要がある。また、パフォーマンスとエネルギー効率との関係は競技力を向上するために重要なファクターであると考えられる。そこで、パフォーマンスを平均速度で示し、体重当たりのエネルギー消費率との関係を示したものが図8である。この図は、高いパフォーマンスを示すにつれ体重当たりのエネルギー消費量が減少する傾向を示している。

速度とエネルギー消費との関係は、走におけるエネルギー変換効率の良さを表すものと考えられる。したがって、この結果は走スキルの良否を表しているものと思われる。さらに実証的にこの問題を明らかにするためには、機械的エネルギー効率について検討し、これとの比較で考える必要があろう。

5) 映像解析

長距離走において、ペース走の走行が競技成績を左右する要因となると考え、特に中間走を注目した。

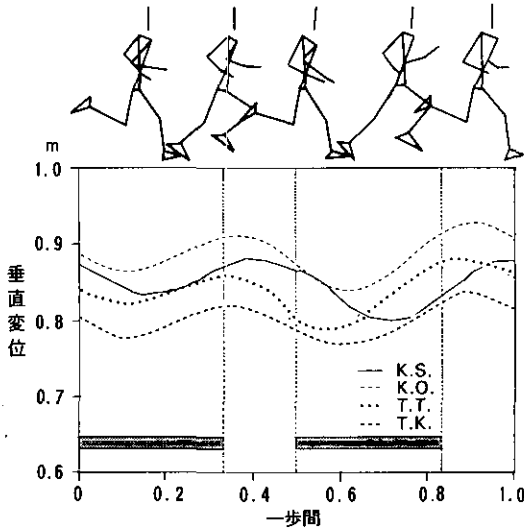


図9 一步間における重心の垂直変位

1. 中間走における各選手の身体重心の垂直変位

機械的エネルギーのうちの身体重心における位置エネルギー（ポテンシャルエネルギー）を求めるために必要な身体重心の垂直変位を図9に示した。図の横軸は左脚着地を0とし次の左脚着地までの1サイクルで示した（以下同じ）。縦軸は身体重心の垂直変位をmで示した。図中の網掛けの部分には各選手の平均的な着地期を表している。

重心の垂直変位は、各脚の着地後に極小となり、離地後に極大となる2つの山と谷が認められる。変位の仕方は、全員同様であった。但し、他の3名と比べて、K.S.に位相の遅れが認められた。

左右の脚期の違いをみると、右脚期に身体重心変位はより低い位置まで下がりより高い位置まで上がっており、上下動の幅が大きくなっていった。このように左右の脚期で重心変位に差がみられた。これは、右脚が利き脚であったため、右脚期でより大きなキック力を発揮させて重心位置を上昇させているためと考えられる。また、位置エネルギーは、右脚期に重心の上下動の幅が大きくなりエネルギーのロスが大きくなっていると考えられる。

長距離走の生理的機能と力学的運動量との関係

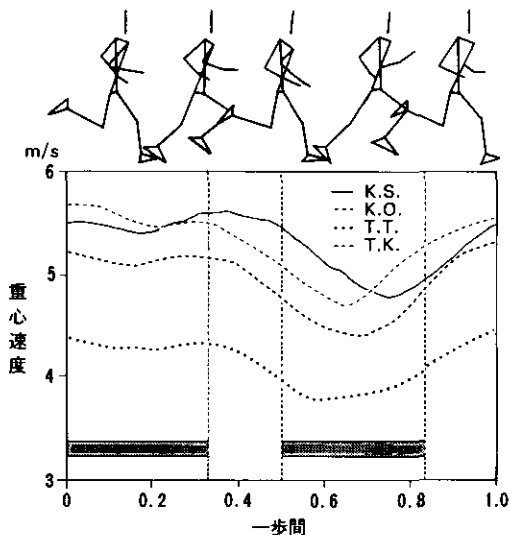


図10 中間走の一步間における重心速度の変化

2. 中間走における各選手の身体重心の速度変位

機械的エネルギーのうちの身体重心における運動エネルギーを求めるために必要な身体重心の速度変位を図10に示した。

重心の速度は、右脚地期に最小となり、左脚地期付近で最大となっていた。各脚の着地期に極小となり、離地期に極大となる傾向は、垂直変位と同様であったが、はっきりした2つの山と谷が見られなかった。このように、左右の脚期の差は、重心の垂直変位よりも顕著であった。変位のしかたは、各選手とも同様の傾向を示した。

各脚期について重心の加速減速でみると、左脚期においては加速も減速も小さく、右脚期においてはどちらも大きい傾向を示した。この差は、利き脚とそうでない脚の差とが考えられる。また、運動エネルギーでも、右脚期でエネルギーのロスが大きくなっていると考えられる。

3. 中間走における各選手の身体重心におけるエネルギー変動

図11は縦軸にエネルギーをジュール (J) で表したものである。

エネルギーの変動は、右脚地期に最小となり、左脚離地付近で最大と

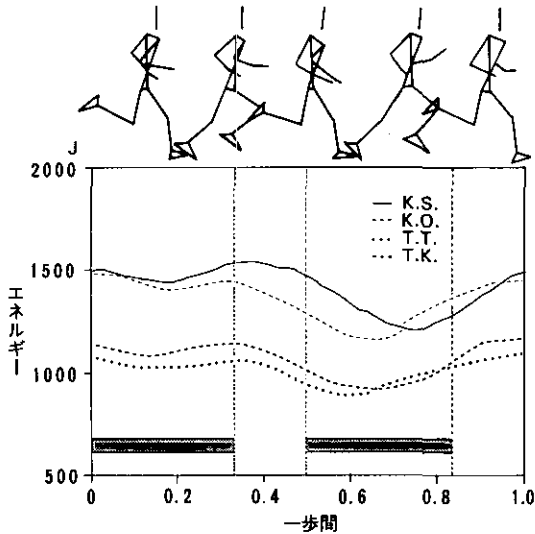


図11 中間走の身体重心におけるエネルギー変動

なっていた。この傾向は速度変位と同様な変化の仕方を示していた。左右の脚期の差は、重心の速度変位と同様に右脚期に変動が大きくなっていた。変位の様子は、各選手とも同様の傾向を示したが、エネルギーの大きさについては、5,000 m 競技の記録により2群に分かれた (K.S., K.O. と T.T., T.K.)。これは、走速度が高く運動エネルギーが大きいことによるものと推測される。

この間に生産される身体重心の機械的エネルギー (仕事量) は、このエネルギーの変化量として表される量である。ここで、個々人の1サイクル当たりの生産エネルギーを示すと、K.S. 745.6 (J), K.O. 676.8 (J), T.T. 432.2, T.K. 555.3 (J) であった。この時の位置エネルギーの変化量と運動エネルギーの変化を比較すると、K.S. では、位置エネルギーが152 (J)、運動エネルギーが610 (J) であった。これは、運動エネルギーによる生産は位置エネルギーによる生産の約4倍となる結果であった。

生産されるエネルギーの左右の脚期の差については、右脚期でエネルギー変化率が大きく、機械的エネルギーの生産が大きくなっていると考

長距離走の生理的機能と力学的運動量との関係

えられる。

また、この時の生産エネルギーは消費エネルギーと同じ値と推測される。

4. 各局面における走速度の推移

5,000 m走をスタート、中間走（ベース走）、ラストスパートの3つの局面に分けて各選手の走速度の変化を図12に示した。

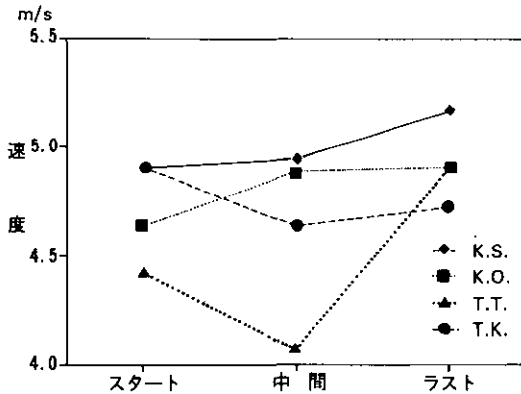


図12 各周回毎の平均速度の変化

それぞれの選手においてペース配分に違いが認められ、T.T.はスタート時の速度が高く、他の3名は、スタート時と中間走の速度はほぼ同じであった。K.O.以降は、ラストスパートで速度が速くなっていた。また、中間走における速度の順位は、5,000 m走の記録の順位と同順になっていた。このことは、中間走の速度が競技成績を決定する大きな要因となっていることが推測される。

5. 各局面における重心の垂直変化の幅の推移

1サイクルに2度重心が上下するが、その垂直変位の幅の平均を各局面毎に示したのが図13である。

競技成績のよい2名 (K.S., K.O.) は他の2名と比較して身体重心変位が大きい傾向を示した。特にK.S.のラストスパートは走速度の増

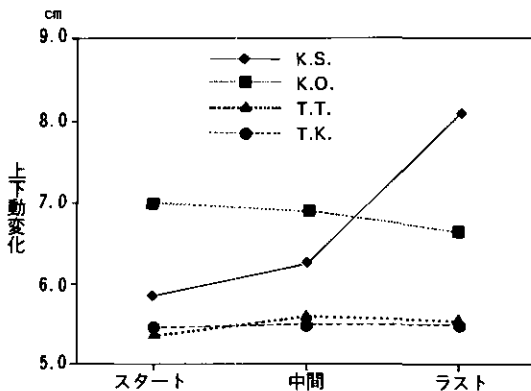
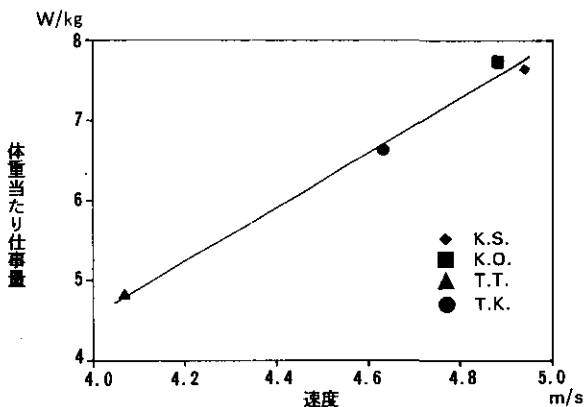


図13 一步間における重心の上下動変化

大とともに身体重心が大きく上下していた。

エネルギー論的には身体重心の変位が小さいほどロスが少なく有利であると考えられるので、K.S. のラストスパート走法を再検討する必要がある。



$$W = -9.17 + 3.429 \times V \quad (R = 0.9965 \quad N = 4)$$

図14 中間走の走速度と体重当たりの仕事量

長距離走の生理的機能と力学的運動量との関係

6. 中間走の走速度と体重当たりの仕事量

中間走における走速度と体重当たりの仕事量の関係を示したのが図14である。中間走においては、走行の機械的仕事率が走速度に比例する傾向がみられた。この時の回帰式は $W = 3.43V - 9.17$ ($W =$ 体重当たりの仕事量 (W/kg), $V =$ 走速度 (m/s)) であり、相関係数は $r = 0.997$ で

あった。しかし、図では省略したがスタートやラストスパート時には、比例関係は認められなかった。

ラストスパート時に、走速度を増加させた者は、走速度に対する体重当たりの仕事率が大きくなっており、エネルギー効率は低くなっていた。これは、ラストスパート時の走行では、エネルギー効率よりも絶対的な走速度を重視し、中間走ではエネルギー効率の高さを重視した走法になっているものと考えられる。

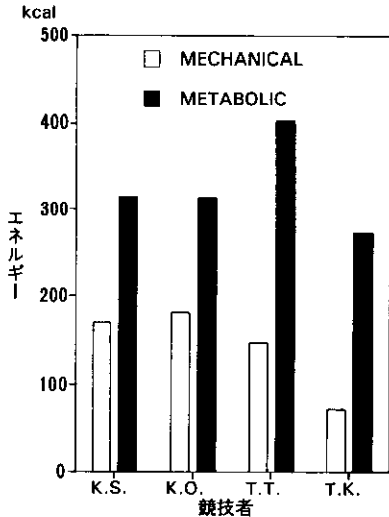


図15 メタボリックエネルギーとメカニカルエネルギーの関係

7. 実験1で得られた5,000mタイムトライアル中に消費されたエネルギーと実験2のビデオより映像解析によって得られた機械的エネルギーを比較するために示したのが図15である。その比は57.9から26.6%と大きな差であった。エネルギー効率が最も良かったのはK.O.であり、最も悪かったのはT.K.で、T.T.とT.K.は走スキルの改善や、走り込み不足の解消により、より高い効率を実現するよう努力する必要がある。

ま と め

本学陸上競技部の長距離選手4名を被験者とし、自転車エルゴメーター(モナーク社製)を用い、酸素摂取量と心拍数の関係を明らかにし、400mトラックで5,000mのタイムトライアル中の心拍数とビデオカメラにより撮影された画像を多方面より分析し、以下の結果を得た。

1. 心拍数変動と酸素摂取量の関係は個人差が大きく、一般に報告されている通り身体能力の高い者ほど代謝量が高い。
2. 心拍出量に関係する酸素脈は負荷の増加と共に増大する例と、負荷量にあまり依存しない例が示された。
3. RQと心拍数はほぼ直線的な関係が認められた。
4. 走行中の心拍数測定から、長距離走でも無気的な応答が全期間を通じて存在することが示唆された。
5. 走行時の心拍数測定はエネルギー量を推定することの有効な方法の一つである。
6. エネルギー消費量と平均速度からは走スキルの優劣に対してエネルギー効率の面からこれを裏付ける可能性が示唆された。
7. パフォーマンスが高いほど体重当たりの消費エネルギーは少なかった。
8. 走の機械的エネルギーでの、運動エネルギーによる生産と位置エネルギーによる生産との割合は、約1対4となっていた。
9. 中間走における機械的仕事量は走速度に比例する傾向がみられたが、スタート時やラストスパート時ではその傾向はみられなかった。
10. 中間走における走速度は5,000mの競技成績に大きく関係する結果となった。

北星学園大学経済学部 北星論集第28号 正誤表

頁・行	誤	正
127頁 11行目	$(u_i u_j)$	$(u_i u_j)$
129頁 8行目	$= \widetilde{AA} + D^2$	$= \underline{AA} + D^2$
137頁 図3	$I = \underline{1} + 1$	$I = I + 1$
137頁 図3	k, l ループの端点にある yes, no を削除	
140頁	表2 R^1 行列の固有値	表2 R^1 行列の固有値
142頁 下から3行目	又, f_i の	又, f_i の
143頁 下から8行目	付与してある。	付与する。
150頁 下から5行目	statistical method.	statistical method.
156頁	図4 5,000m 疾走中の心拍数	図5 各周回毎の平均速度の変化
157頁	図5 各周回毎の平均速度の変化	図4 5,000m 疾走中の心拍数