

自走式走エルゴメータを用いた，長距離走の有効性指数によるパフォーマンス評価方法の検討

土江 寛裕*・櫛部 静二*
平塚 潤*・鈴木 尚人**
福永 哲夫***

1. 緒 言

走運動の中で，長距離走はこれまで特に生理学的な角度からの研究が数多くなされてきた。長距離走のパフォーマンスは，最大酸素摂取量（豊岡 1976）や無酸素性作業閾値（Tanaka ら 1984，大後ら 1999）などの生理学的指標との関連が多く報告されている。また，それらの生理的能力により生み出されたエネルギーを効率的に運動に変換する能力，つまりは走りの技術が必要であると考えられる。しかしそういった長距離走における走りの技術に関する研究は，短距離走に比べて少ない。そのなかで，榎本ら（1999）は，力学的エネルギー利用の有効性を表す指数として，重心のパフォーマンス方向（進行水平方向）への運動エネルギー（ $\frac{1}{2}MV_x^2$ ， M は身体質量， V_x は進行方向への速度）に対する，エネルギーの部分内の変換と部分間の伝達があると仮定（Pierrynowski *et al.* 1980）したときの，身体全体の力学的仕事の比を用いた，力学的エネルギー利用の有効性指数（Efficiency Index, EI ）を求めた。それによると，5,000 m のパフォーマンスと EI には有意な相関関係が見られ，走運動中にセグメント間のエネルギーの伝達と交換がより大きくなることで，効率のよい動作になるというものであり，長距離走における走技術の重要性を示唆している。しかしそこでの EI は，実験条件が実際の長距離走の競技会でのパフォーマンス中であるため，レースの展開や状況などによって，速度などの条件が一定ではなかったと考えられる。 EI とパフォーマンスとの関係をより正確に捉えるためには，速度などの条件を一定にしたうえで EI とパフォーマンスとの関連を明らかにする必要があると考えられる。

そこで本研究では，走速度を一定に規定し走運動の仕事量を算出できる走エルゴメータ（土江ら 2008）を用い，走運動の有効性指数を算出することと，そこで得られた有効性指数と長距離

* 城西大学経営学部

** 城西大学理学部

*** 鹿屋体育大学

走のパフォーマンスとの関係を明らかにし、長距離走のパフォーマンスの評価指標としての有用性を検討することを目的とした。

2. 方法

2-1 被験者

被験者は陸上競技の長距離を専門とする選手 14 名（年齢：20.2±1.1 歳，身長：171.6±3.9 cm，体重：56.5±2.8 kg，5,000 m ベスト：14 分 39 秒 71±34 秒 41）であった。被験者は事前に実験に関する目的，実験内容，危険性などの説明を受けたうえで，書面で実験参加の意志を確認し，文書に署名した。

被験者の競技パフォーマンスの指標として実験を行った時点における 5,000 m のシーズンベストタイムを用いた。

2-2 実験方法

走エルゴメータでのデータ採取方法

実験に用いた装置（走エルゴメータ，以下，走エルゴ）および実験システムを図 1 に示した。

走エルゴメータの構造と得られるデータ

走エルゴは，被験者がベルト上を走行し，後方へ蹴ることによって動く，自走式トレッドミルであった。ベルトには 0.0336 m 動くとき 1 回の矩形波を発生するパルスジェネレータが内蔵され，この信号を A/D コンバータ（Eagle, Motion Analysis 社）を介して PC に取り込むことにより，

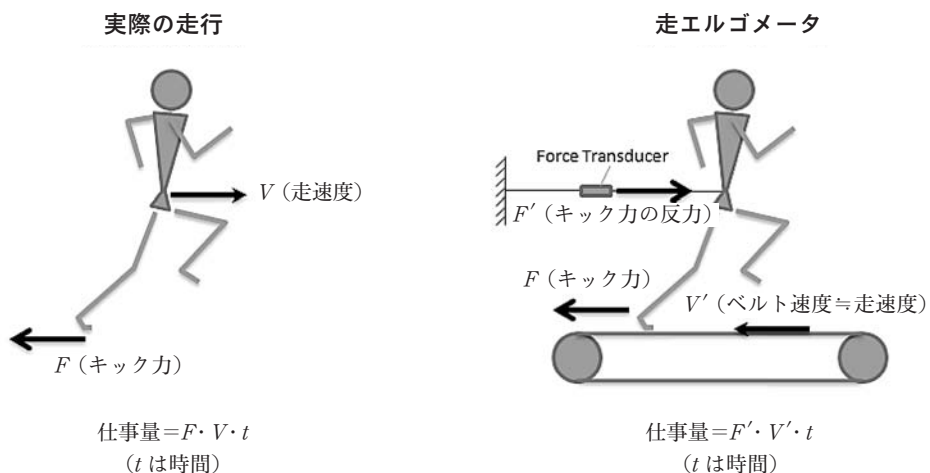


図 1 実際の走行および走エルゴメータでの仕事量の算出方法の比較

ベルトの移動距離およびベルト速度 (V) を算出し記録した。 V は発せられたパルスごとに算出できるが、その値を 2 kHz のサンプリング周波数となるようにスプライン補間し、その他のデータと同期させた。

被験者は腰ベルトを装着し、それを鋼鉄製のワイヤーとストレインゲージ (LUR-A-1KNSA 1, 協和電業) を介して前後の壁にしっかりと固定された鉄製のフレームに接続した。走エルゴは被験者が走行ベルトを蹴って走行ベルトを動かすと、その反作用を腰ベルトで受けて、牽引力 (F) を測定する構造になっていた (図 1)。腰ベルトは、できるだけ水平になるように注意深く装着し、ストレインゲージで検出された F の信号はストレインアンプ (DPM-305A, 共和電業製) で増幅後、A/D コンバータ (Eagle, Motion Analysis 社) を介して、サンプリング周波数 2 kHz で PC に保存した。

ピッチ, ストライドの算出

ベルト速度 V をもう一度時間微分することにより、ベルトの加速度 (A) を算出した。これによって被験者の 1 歩 1 歩のキックによるベルトの加速を検知し、1 歩ごとの時間 (T_{step}) および速度 (V_{step}) を求めた。そしてピッチ (*Step Frequency: SF*) およびストライド (*Stride Length: SL*) を以下のように求めた。

$$StepFrequency(SF)_{[steps/sec]} = \frac{1}{T_{step}} \dots \dots \dots (EQ1)$$

$$StrideLength(SL)_{[m]} = \frac{V_{step}}{SF} \dots \dots \dots (EQ2)$$

動作分析システム

図 2 に示すように、走エルゴを中心に 8 台の赤外線カメラ (Eagle, Motion Analysis 社) 設置し、走エルゴ上で走る走者の全身をカバーできるように調節した。被験者には身体のランドマーク 24 箇所反射反射マーカーを貼付 (図 3) し、3 次元空間座標を求めた。

走エルゴ実験プロトコル

走エルゴでの走行は 4.0 m/s, 4.5 m/s, 5.0 m/s の 3 段階に設定した。

被験者はまず入念にウォーミングアップを行い、次に走エルゴに慣れるため、しばらく走エルゴ上で練習走行を行った。その後身体のランドマーク上に反射マーカーを貼付し、実験を行った。走行中に被験者の前にモニターを設置し、被験者がベルト速度をモニタリングし、速度を正確にコントロールできるようにした。被験者はモニターで確認しながら速度を 4.0 m/s にあわせ、しばらく速度を持続した。その後、合図とともに 4.5 m/s に速度を増加させ、同様にしばらく速度を持続させた。さらに同様に 5.0 m/s を測定した。

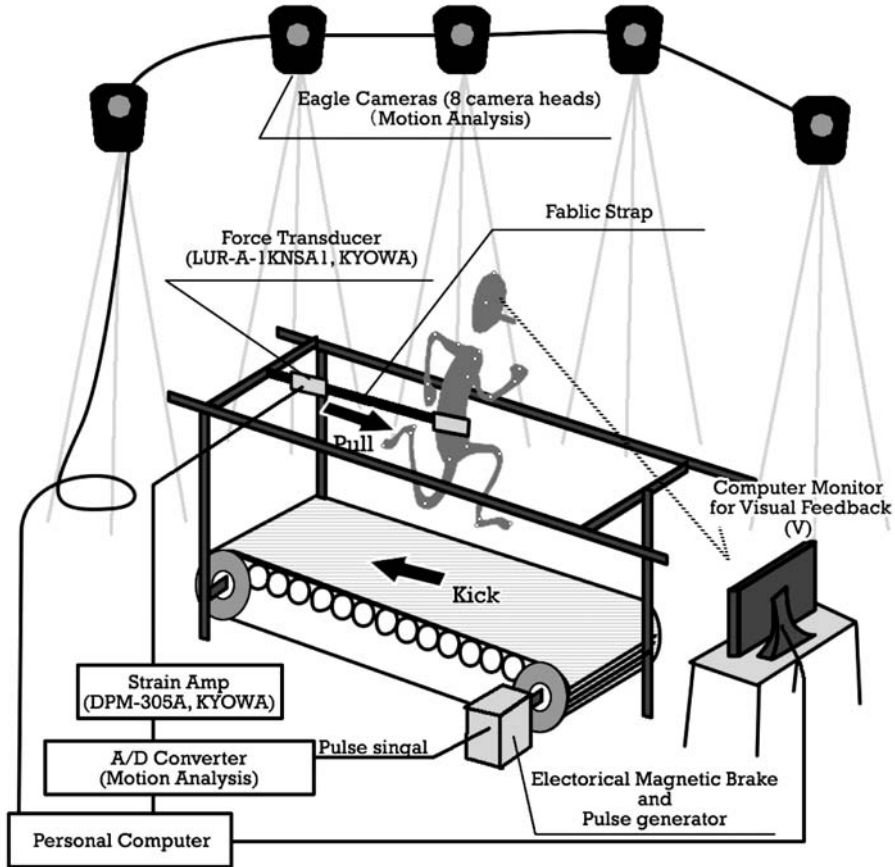


図2 実験システム見取り図

赤外線カメラ（Eagle Camera）は8台のCamera Headを使用し、被験者を三次元的に動作分析できるように走エルゴを囲んで設置した。FおよびVはA/Dコンバータを介し、Personal Computerにカメラ情報と合わせて保存した。

分析方法

3段階の速度において、設定速度で安定したときの6歩を分析区間とした。赤外線カメラで得られた身体のランドマーク（図2）の3次元空間座標は、矢状面（ベルトの移動方向）における、2次元で分析した。

身体運動の内的仕事量の分析

ランドマークを元に、全身を14のセグメントに分割し、各フレーム（時刻）における力学的エネルギー（ E_{ij} ）を求めた。

$$E_{ij} = mgh_{ij} + \frac{1}{2}m_iv_{ij}^2 + \frac{1}{2}I_i\omega_{ij}^2 \dots\dots\dots(EQ3)$$

i : 身体の i 番目のセグメント (セグメント i), j : フレーム (時刻), m_i : セグメント i の質量, g : 重力加速度, h : セグメント i の高さ, v : セグメント i の併進速度, I : セグメント i の慣性モーメント, ω : セグメント i の角速度を示す。

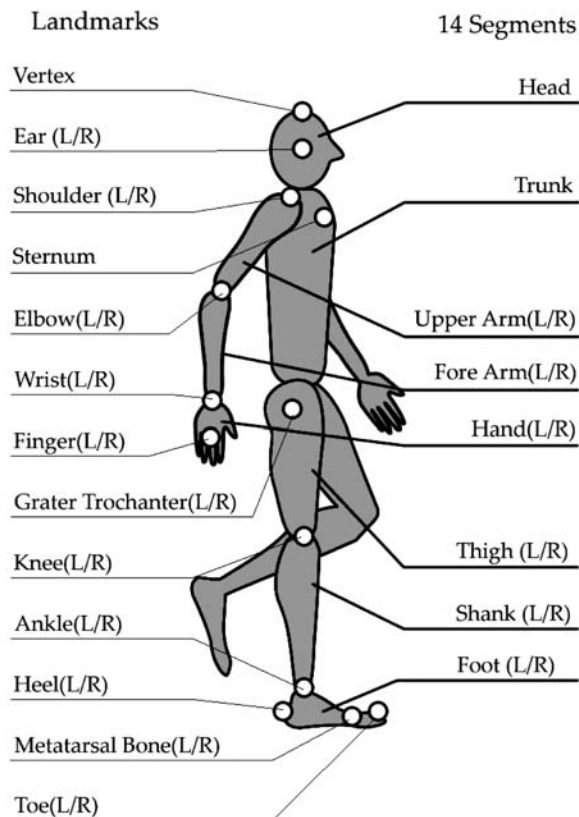


図3 動作分析用マーカーセッティングおよびセグメントの分割

次に1フレームごとの力学的エネルギーの変化分，すなわち仕事量を求めた。

$$\Delta E_{ij} = E_{ij+1} - E_{ij} \dots\dots\dots (EQ4)$$

セグメント内およびセグメント間で力学的エネルギーの交換および伝達が起こると仮定した Pierrynowski *et al.* (1980) の方法を用いて，1サイクルに身体がなした力学的仕事量を求め，全身の内的仕事量 (W_{int}) を求めた。

$$W_{int} = \sum_{j=1}^{n-1} \left| \sum_{i=1}^{14} (\Delta E_{ij}) \right| \dots\dots\dots (EQ5)$$

n : 1サイクルの時間 (フレーム数) を示す。

走エルゴから得られたベルト速度 (V) および牽引力 (F) から，被験者が走エルゴになした仕事を求め，外的仕事量 (W_{erg}) とした。

$$W_{erg} = FVt \dots\dots\dots (EQ6)$$

F : 1サイクルの力の平均値， V : 1サイクルの速度の平均値， t : 1サイクル時間を示す。

被験者が身体の内部になした仕事 (W_{int}) と走エルゴに対してなした仕事 (W_{erg}) を合計したものを、合計仕事量 (W_{tot}) とした。

$$W_{tot} = W_{int} + W_{erg} \dots\dots\dots (EQ7)$$

さらに、合計仕事量に対する外的仕事量の割合を走エルゴにおける力学的有効性指数 (eEI) とした。

$$eEI = \frac{W_{erg}}{W_{tot}} \dots\dots\dots (EQ8)$$

上記のパラメータはいずれも分析区間 (6 歩) の平均値から 1 サイクルあたりの値を求めた。

統計処理

すべての得られたパラメータは、ピアソンの相関係数を用いて相関関係を検証し、その危険率から統計的信頼度を $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$ の 3 段階で表した。また各試行 (ベルト速度) 間での差の検定には、対応のある t 検定を用いた。

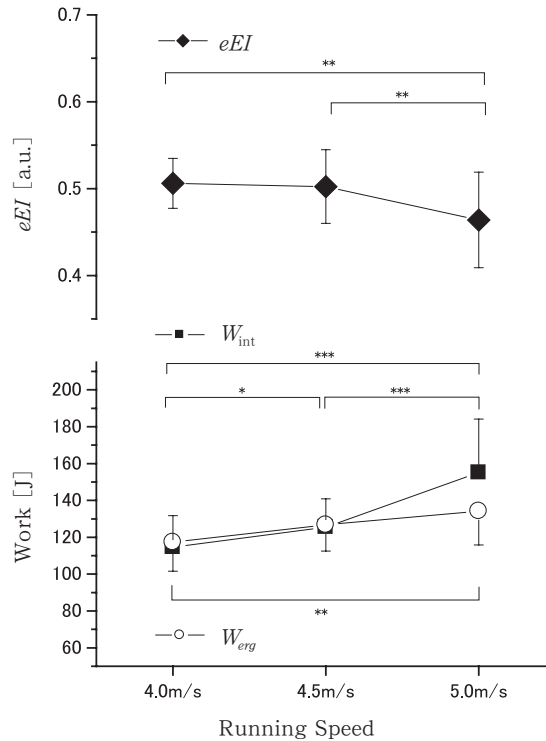
3. 結果

表 1 は研究実施年の 5,000 mSB, 走エルゴの各速度において得られたパラメータ (全被験者の平均値 \pm 標準偏差) を示している。5,000 m のシーズンベストタイムは平均 14 分 43 秒 43 ± 36 秒 00 であった。実験における各速度でのベルト速度は、誤差は 0.02 m/s 以下であり、正確に規

表 1 実験によって得られたデータ

Performance Parameter				
5000 m Seasonal Best	14: 43.43 \pm 36.00			
Experimental Parameters				
Running Parameters	4.0 m/s (S)	4.5 m/s (M)	5.0 m/s (F)	Statistic Significance
Belt Speed (V) [m/s]	4.00 \pm 0.02	4.50 \pm 0.02	4.98 \pm 0.04	$S < M^{***}/M < F^{***}/S < F^{***}$
SF [steps/s]	3.36 \pm 0.17	3.43 \pm 0.15	3.64 \pm 0.23	$S < M^{**}/M < F^{***}/S < F^{***}$
SL [m/cycle]	2.39 \pm 0.12	2.63 \pm 0.12	2.75 \pm 0.17	$S < M^{***}/M < F^{***}/S < F^{***}$
Energetic Parameters	4.0 m/s (S)	4.5 m/s (M)	5.0 m/s (F)	Statistic Significance
eEI [a.u.]	0.506 \pm 0.03	0.502 \pm 0.04	0.464 \pm 0.05	$M > F^{**}/S > F^{**}$
W_{int} [J]	114.53 \pm 17.26	125.50 \pm 15.31	155.13 \pm 29.03	$S < M^*/M < F^{***}/S < F^{***}$
W_{erg} [J]	117.33 \pm 15.73	126.71 \pm 14.26	134.27 \pm 18.39	$S < F^{**}$

*: $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$ *** : $p < 0.001$



*: $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$ *** : $p < 0.001$

図4 走速度に対する力学的効率指数 (eEI) および 内的仕事 (W_{int}), 外的仕事 (W_{erg}) の変化

定できた。各試行（ベルト速度）におけるピッチとストライドは、4.0 m/s でピッチ 3.36 ± 0.17 stp/s、ストライド（1 サイクル、2 歩あたり） 2.39 ± 0.12 m/cycle、4.5 m/s でピッチ 3.43 ± 0.15 stp/s、ストライド 2.63 ± 0.12 m/cycle、5.0 m/s でピッチ 3.64 ± 0.23 stp/s、ストライド 2.75 ± 0.17 m/cycle で、ベルト速度の増加とともに、ピッチとストライド両者の増加がみられた。

図4は3段階の走速度に対する eEI 、 W_{erg} および W_{int} を示している。

eEI は 4.0 m/s において 0.506 ± 0.03 、4.5 m/s で 0.502 ± 0.04 、5.0 m/s で 0.464 ± 0.05 であった。 eEI は 4.0 m/s から 4.5 m/s に速度を増加させた場合は有意な変化は見られなかったが、5.0 m/s に速度を増加させると、4.0 m/s、4.5 m/s 両方に対して有意に低下した。また、 W_{erg} は 4.0 m/s において 117.33 ± 15.73 J、4.5 m/s で 126.71 ± 14.26 J、5.0 m/s で 134.27 ± 18.39 J であった。 W_{erg} は 4.0 m/s に対して 5.0 m/s では有意に増加したが、それ以外の速度間では統計的に有意な変化は見られなかった。 W_{int} は 4.0 m/s において 114.53 ± 17.26 J、4.5 m/s で 125.50 ± 15.31 J、5.0 m/s で 155.13 ± 29.03 J であった。 W_{int} はどの速度間に対しても統計的に有意な差が認められ、速度が増加に伴い W_{int} も増加した。特に 5.0 m/s で顕著に増加した。

図5は、走エルゴにおける3段階の速度での eEI と 5,000 mSB の関係を示している。4.0 m/s

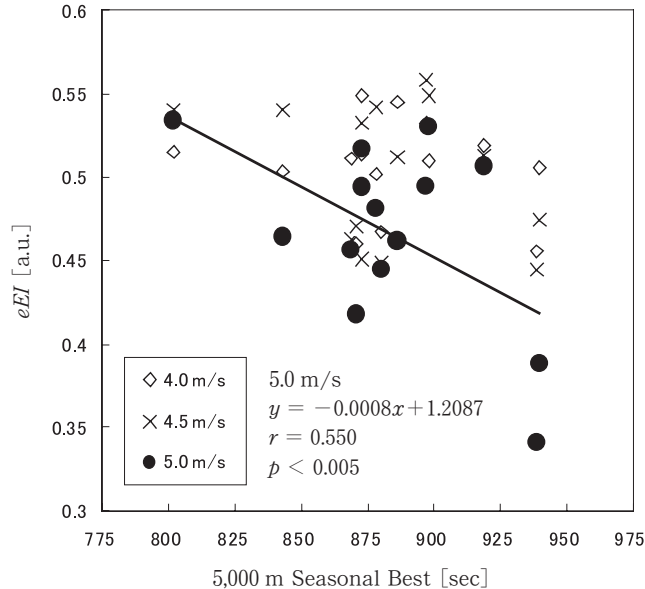


図5 5,000 m シーズンベストと、走エルゴにおける3段階の速度での eEI の関係

および 4.5 m/s での eEI と 5,000 mSB との間には有意な相関関係は見られなかった。しかし 5.0 m/s で 5,000 mSB のパフォーマンスと eEI との間に有意な相関関係が見られ、パフォーマンスの高い選手ほど、 eEI が高い傾向が見られた。

4. 考 察

本研究での走エルゴで求めた有効性指数 (eEI) は、EQ3~8 のようにして求めている。本研究での有効性指数 (eEI) と、榎本ら (1999) によって用いられた有効性指数 (EI) とでは値そのものは異なっていた。榎本らの研究における EI は、1 サイクル当たりのパフォーマンス方向 (つまり水平進行方向) の運動エネルギー ($\frac{1}{2}mv^2$, m : 身体質量, v : 水平進行方向の走速度) に対するパフォーマンス中の身体全体の内的仕事量の比から求めている。それに対して本研究では、水平進行方向の運動エネルギーに置き換えて、走エルゴを用いて測定した仕事量を用いている。また、榎本らのもとめた内的仕事量は、実際のレースを行っている最中のデータであるため、各セグメントのパフォーマンス方向への併進運動も伴った仕事量の合計であるが、本研究では自走式トレッドミルを用いているため、身体 (重心) の併進移動を伴わず、セグメントの内的仕事量 (W_{int}) のみでは、過小評価されてしまうと考えられる。そのため W_{int} に加えて、走エルゴで測定された仕事量 (W_{erg}) を合計し、榎本らの求める実際のパフォーマンス中の内的仕事量に近似させた。したがって、本研究で求めた走エルゴを用いた有効性指数 (eEI) と、榎本らの EI と

に数値そのものの差が見られるのは、算出方法の違いによるものと思われる。

eEI は、走速度が 5.0 m/s で他の 2 種類の速度に比べて有意に小さかった (図 4)。また、 W_{int} は外的仕事 W_{erg} に比べて、5.0 m/s で著しく増加した。このことから、走速度 5.0 m/s での eEI の顕著な低下は、 W_{int} の増加によるものであると考えられる。榎本ら (1999) は EI の低い選手の一例を挙げ、内的仕事量の増大は、上半身へのエネルギーの流入により頭と胴体のエネルギー変化が大きくなることが原因であるとしている。本研究においては詳しい動作分析を行っていないが、同じように内部での無駄な動作によって、 eEI の低下を招いた可能性が考えられる。

また、 eEI と 5,000 mSB は、4.0 m/s および 4.5 m/s においては有意な相関は見られなかったが、5.0 m/s では有意な相関関係が認められた (図 5)。5,000 mSB の平均値が 14 分 43 秒 43 であったことから、5,000 m での平均速度は 5.66 m/s であったことになる。本研究における実験条件で最もレースペースに近かったのは 5.0 m/s であり、そのためその条件下での eEI と 5,000 mSB との間に有意な相関関係が見られたと考えられる。したがって走エルゴを用いて求めた eEI は走パフォーマンスを推し量る指標となりうると考えられる。さらに、4.0 m/s の低い走速度においては、走運動の有効性は競技力の優劣によって違いが見られず、速度を増加させたときに、パフォーマンスの高い選手と低い選手の技術的な差が生じると考えられる。

図 6 は 5,000 mSB に対する、4.0 m/s の低い走速度から 5.0 m/s に速度を上げた際の eEI の変化量の関係を示している。この 2 項目間には有意な相関関係が見られた。ほとんどの選手が速度の増加と共に eEI を低下させたが、競技力の高い選手は、比較的变化は小さかった。これは競技力の高い選手は、レースペースに近い速い速度での走行になった時でも、余分な動きが起らず、

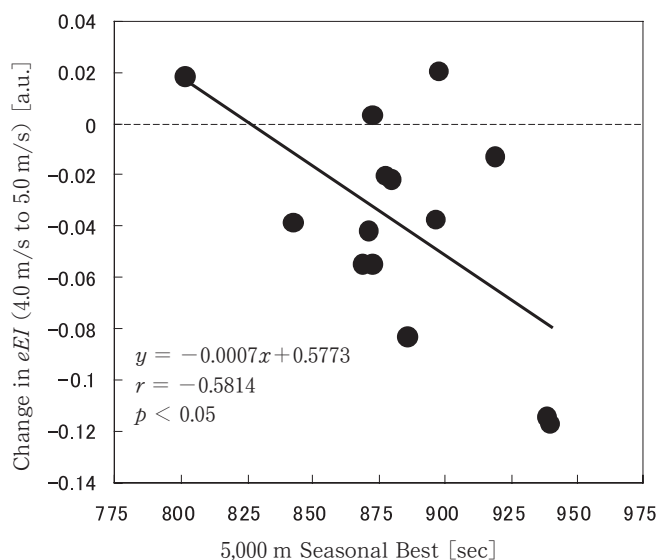


図 6 5,000 mSB と、走エルゴにおいて 4.0 m/s から 5.0 m/s に走速度を変化させたときの eEI 変化との関係

低い走速度と同じ有効性指数を維持していたと考えられる。Williams (1983) は、走運動中に左右の脚の間にエネルギーの伝達が起きている可能性を示し、Champman *et al.* (1983) は骨盤を介してエネルギーの伝達が起これり、その効率を高めているとしている。また榎本ら (1999) は、*EI* 低下の要因として、一方の脚のエネルギーが他方の脚に流れず、その代わり体幹に流入して体幹のブレを引き起こすことを挙げている。本研究ではそれぞれの選手の走動作まで詳しく検討していないため、推測の域を出ないが、競技力の高い選手は、走速度が高まっても、左右脚間での骨盤を介するエネルギー交換やエネルギーが体幹へ流入することによるブレを引き起こさない走技術を維持し、競技力の低い選手は、走速度が高まった時に、それに対応して効率の良い動きを維持することができないということが考えられる。

まとめ

本研究では、走エルゴを用いて長距離走の力学的有効性指数を一定の条件下において測定し、その検証を行った。その結果、以下のことが示唆された。

1. 走エルゴを用いて求めた力学的有効性指数 (*eEI*) は、レースタイムと相関があり、長距離走のパフォーマンスの評価指標となりうる
2. 走エルゴによる有効性指数 (*eEI*) は、パフォーマンスの低い選手ほど速度を上げた時に低下し、それは無駄な走動作による内的仕事量 (W_{int}) の増加によるものであると推察される

参考文献

- 1) 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.
- 2) Anderson, T. (1996): Biomechanics and running economy. *Sports Med.* 22 (2): 76-89.
- 3) Best C. H., Partridge, R. G. (1928): The equation of motion of a runner, exerting a maximal effort. *Proc. Roy. Soc. B.* 103: 218-225.
- 4) Cavagna, G. A., Saibene, F. P., & Margaria, R. (1964): Mechanical work in running. *J. Appl. Physiol.* 19: 246-256.
- 5) Cavagna, G. A., Kaneko, M. (1977): Mechanical work and efficiency in level walking and running. *J. Physiol.* 268 (2): 467-481.
- 6) Cavanagh, P. R., Pollock, M. L., Landa, J. (1977): A biomechanical comparison of elite and good distance running. *Annals New York Academy of Sciences* 301, 328-345.
- 7) Cavanagh, P. R., Kram, R., (1985): The efficiency of human movement - a statement of the problem. *Med. Sci. Sports Exerc.* 17 (3): 304-308.
- 8) Chapman, A. E., Caldwell, G. E. (1983): Factors determining changes in lower limb energy during swing in treadmill running. *J. Biomechanics* 16 (1): 69-77.
- 9) Correa, S. C. (1985): A kinematic study of long distance running performed at different

- velocities in athletes of distinct of skill. In G. de Groot *et al.* (eds.), *Biomechanics XI-B*, 630-634. Free University Press, Amsterdam.
- 10) 大後栄治, 植田三夫, 石井哲次, 上條清美, 弘卓三 (1999): LT を基にしたトレーニングの研究 — 神奈川大学箱根駅伝参加選手の特徴 —. *ランニング学研究* 10 : 35-42.
 - 11) Daniels, J. T. (1985): A physiologist's view of running economy. *Med. Sci. Sports Exerc.* 17 (3): 332-338.
 - 12) 榎本靖士, 阿江通良, 岡田英孝 (1997): 長距離走の疾走動作と力学的エネルギー利用の有効性. *陸上競技研究* 28 : 8-15.
 - 13) 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.
 - 14) 榎本靖士 (2006): 運動の効率 エネルギー論から見た長距離走動作の評価. *バイオメカニクス研究* 10 (4) : 281-288.
 - 15) Farley, C. T., Glasheen, J., McMahon, T. A. (1993): Running springs: speed and animal size. *J. Exp. Biol.* 185: 71-86.
 - 16) Hill, A. V. (1938) The heat of shortening and the dynamic constant of muscle. *Proc. Roy. Soc. London B* 126.
 - 17) Jaskolska, A., Goossens, P., Veenstra, B., Jaskolski, A., & Skinner, J. S. (1999) Comparison of treadmill and cycle ergometer measurements of force-velocity relationships and power output. *Int. J. Sports Med.* 20 (3): 192-197.
 - 18) 小林寛道, 宮下充正 (1990): 走る科学. 大修館書店, 東京.
 - 19) Kyolainen, H., Komi, P. V., Belli, A. (1995): Mechanical efficiency in athletes during running. *Scand J. Med. Sci. Sports* 5: 200-208.
 - 20) Lakomy, H. K. (1986) Measurement of work and power output using friction-loaded cycle ergometers. *Ergonomics.* 29 (4): 509-517.
 - 21) Peter G. Weyand, Deborah B. Sternlight, Matthew J. Bellizzi, Seth Wright (2000): Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *J. Appl. Physiol.* 89: 1991-1999.
 - 22) Pierrynowski, M. R., Winter, D. A., Norman, R. W. (1980): Transfers of mechanical energy within the total body and mechanical efficiency during treadmill walking. *Ergonomics* 23 (2): 147-156.
 - 23) Tanaka, K., Matsuura, Y., Matsuzaka, A., Kumagai, S., Sun, S. O., Asano, K. (1984): A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Med. and Sci. in Sports and Exercise* 16: 278-282.
 - 24) 田中真介, 満園良一, 関岡泰雄 (1985): 5000 m における走運動の構造とその生理学的機能との関係. *教育医学* 30 (4) : 15-22.
 - 25) 豊岡示朗, 金子公有 (1976): 長距離ランナーの縦断的記録推移と有酸素的パワー. *大阪体育大学紀要* 8 : 27-33.
 - 26) 土江寛裕, 永田晟 (1997): 100 m 競走に見られる疾走速度遅減の動作要因. *日本体育学会 第 48 回日本体育学会大会号* : 337.
 - 27) 土江寛裕, 松尾彰文, 福永哲夫 (2005): 陸上競技短距離選手に見られる加速走中の下肢スティフネスの変化. *東京体育学研究*.
 - 28) Tsuchie, H., Kobayashi, K., Kanehisa, H., Kawakami, Y., Iso, S., Fukunaga, T. (2008): Assessment of Sprinting Abilities Using a Resistant Self-driven Treadmill. *Int. J. Sport Health Sci.* 6: 85-90.
 - 29) Williams, K. R., Cavanagh, P. R. (1983): A model for the calculation of mechanical power during distance running. *J. Biomech.* 16 (2): 115-128.
 - 30) Williams, K. R., Cavanagh, P. R. (1987): Relationship between distance running mechanics,

running economy, and performance. *J. Appl. Physiol.* 63 (3): 1236-1245.

- 31) Winter, D. A. (1990): Biomechanics and motor control of human movement: 103-139, John Wiley & Sons Inc, New York.