

## 中長距離ランナーにおける高強度走行中のステップ変数と走の経済性

丹治 史弥<sup>1,2)</sup> 榎本 靖士<sup>3)</sup> 鍋倉 賢治<sup>3)</sup>

Fumiya Tanji<sup>1,2)</sup>, Yasushi Enomoto<sup>3)</sup> and Yoshiharu Nabekura<sup>3)</sup>: Step parameters and running economy of well-trained distance runners during high-intensity running. *Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci.* 62: 523-534, December, 2017

**Abstract** : This study investigated the relationships between running economy and various step parameters (ground contact time, step length and step frequency), as well as the effects of these relationships on differences in foot strike pattern at intensities ranging from below to above the lactate threshold in well-trained distance runners. Thirty-one male distance runners (20 middle-distance and 11 long-distance; age  $19.5 \pm 1.2$  years, height  $171.7 \pm 4.5$  cm, mass  $57.6 \pm 3.5$  kg, BMI  $19.5 \pm 0.7$ ) participated. Their seasonal best performance was  $804.0 \pm 121.0$  points, expressed as the IAAF score. Both running economy and step parameters were calculated for speeds of 15.0, 16.2 and 17.4 km·h<sup>-1</sup>, which corresponded to intensities below, equivalent to and above the lactate threshold, i.e.  $93.2\% \pm 6.4\%$ ,  $100.6\% \pm 6.9\%$  and  $108.1\% \pm 7.4\%$ , respectively. As running speed increased, running economy, step length and step frequency increased, whereas the ground contact time decreased. A significant positive relationship was observed between ground contact time and running economy at an intensity above the lactate threshold ( $r=0.46$ ,  $p<0.01$ ). A significant positive relationship was observed between step length and running economy ( $r=0.54$  and  $0.52$ ,  $p<0.01$ ), and a negative relationship was observed between step frequency and running economy ( $r=-0.55$  and  $-0.53$ ,  $p<0.01$ ) at intensities equivalent to and above the lactate threshold, respectively. Middle-foot strikers exhibited a shorter ground contact time than rear-foot strikers at intensities equivalent to and above the lactate threshold, whereas running economy exhibited no significant difference in terms of foot strike pattern. From the present results, it can be concluded that a shorter ground contact time enhances running economy; however, running economy is not related to the foot strike pattern at an intensity of 90%—110% of the lactate threshold.

**Key words** : ground contact time, foot strike pattern, step length, step frequency

キーワード : 接地時間, 接地パターン, ステップ長, ステップ頻度

### I. 緒 言

専門的にトレーニングを行なっている中長距離ランナーの走パフォーマンスに関連する生理学的変数の1つとして、走の経済性 (running

economy: RE) が挙げられる (Conley and Krahenbuhl, 1980 ; Morgan et al., 1989). REはある走スピードをいかに少ないエネルギーによって走行できるかを示す能力であり、値が小さいほどREに優れていると評価できる。このREの個人差の54%はバイオメカニクスの変数によって説

1) 国立スポーツ科学センタースポーツ科学部  
115-0056 東京都北区西が丘 3-15-1

2) 筑波大学大学院人間総合科学研究科  
305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1

3) 筑波大学体育系  
305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1

連絡先 丹治史弥

1. *Department of Sport Science, Japan Institute of Sport Sciences*

*3-15-1 Nishigaoka, Kita-ku, Tokyo 115-0056*

2. *Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba*

*1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574*

3. *Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba*

*1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574*

*Corresponding author fumiya.tanji.238@gmail.com*

明できるとされており (Williams and Cavanagh, 1987), これまでに様々な研究によって RE とバイオメカニクスの変数の関係が検討され, それらの変数の改善が RE を向上させると示されてきた.

優れた RE に影響するバイオメカニクスの変数として, 短い接地時間 (ground contact time: CT; Anderson, 1996; Hayes and Caplan, 2012; Santos-Concejero et al., 2013, 2014), 短いステップ長 (step length: SL; de Ruyter et al., 2013; Tartaruga et al., 2012), 高いステップ頻度 (step frequency: SF; Cavanagh and Williams, 1982; Tartaruga et al., 2012) などが関連付けられている. これらのステップ変数はバイオメカニクスの変数の中でも比較的簡易に測定でき, 例えば Hayes and Caplan (2012) は, 走行中の脚が地面に接地している時間をハイスピードカメラのフレーム数から評価し, CT を算出しており, Nummela et al. (2007) は, 1 ステップの時間の逆数から SF を算出している. SL と SF の積が走スピードとなるため, 走スピードを光電管などによって評価すれば SL は算出することができる. これらのように, 走スピードを評価し, 走動作をハイスピードカメラで撮影することによってステップ変数は評価できるため, 選手およびコーチにとって指導現場で使いやすい.

また, 接地パターンの違いは CT や RE に影響するとされているが, 経済的に優れた接地パターンについては明らかになっていない (Ardigó et al., 1995; Hasegawa et al., 2007; Perl et al., 2012; Williams and Cavanagh, 1987). 接地パターンは大きく, かかとから地面に接地する rear-foot-strike (RFS) と前足部または中足部から地面に接地する middle-foot-strike (MFS) に分けられる (Perl et al., 2012). 日常的にトレーニングを行なっている一般ランナーを対象とした Williams and Cavanagh (1987) は, RE に優れているランナーが劣っているランナーよりも RFS が多いことを認めている. 一方で, 国際ハーフマラソン競技者を対象とした Hasegawa et al. (2007) は, 競技中の上位ランナーが下位ランナーに比べて高い MFS の割合であることを明ら

かにし, MFS が RE に優れた接地パターンであると示唆している. これらの見解の相違から, どちらの接地パターンが RE に優れているのかは, さらなる調査が必要であると言える.

これまで RE は乳酸性代謝閾値 (lactate threshold: LT) を超えない強度において酸素摂取量 (oxygen uptake:  $\dot{V}O_2$ ) によって評価されてきたため, バイオメカニクスの変数との関係も LT を超えない強度で評価されることが多かった. 一方, LT を超える強度において調査した研究も存在するが (Santos-Concejero et al., 2013, 2014), これらは RE を  $\dot{V}O_2$  のみで評価しているという問題点がある. 運動強度が LT を超えると, エネルギー基質利用割合が変化し, 無酸素性エネルギー代謝の動員が増大する (Morgan et al., 1989). これらの生理応答を踏まえると,  $\dot{V}O_2$  のみで正確に LT を超える強度の RE を評価できているのか疑問が呈されている (Kaneko, 1990). この問題を解決するために Tanji et al. (2017) は, LT を超える強度における RE を,  $\dot{V}O_2$  および呼吸交換比 (respiratory exchange ratio: RER) によって有酸素性エネルギー代謝量, 血中乳酸蓄積量 (blood lactate accumulation:  $\Delta bLa$ ) によって無酸素性エネルギー代謝量をそれぞれ算出し, それらを加算することで  $\dot{V}O_2$  のみの評価より正確に評価できることを示し, さらに LT を超えない強度における RE よりも走パフォーマンスとの関連が強くなることを明らかにした. したがって, この評価方法を用いて LT を超える強度における RE に影響するバイオメカニクスの変数を明らかにすることは, 走パフォーマンス向上の要因をより正確に検討できると考えられる. また, バイオメカニクスの変数は運動強度の増大に伴って変化する (Kyröläinen et al., 2001) ため, それぞれの運動強度において RE との関係を明らかにする必要がある. 丹治ほか (2016) は, この RE の評価方法を用いて, LT を超える強度における RE とランニングフォームの関係を明らかにし, 経済性に優れたランニングフォームの一部が LT を超えない強度とは異なるランニングフォームであることを示し, さ

らにバイオメカニクスの変数によってREの個人差の80.6%を説明できることを明らかにした。

以上の先行研究の結果を踏まえると、LTを超える強度においてREとCT, SLおよびSFの関係に対する知見はほとんど得られておらず、また接地パターンによるREの違いについて一定の見解は得られていない。そこで本研究の目的は、専門的にトレーニングを行なっている中長距離ランナーを対象に、LTを超えない強度からLTを超える強度におけるREとCT, SLおよびSFの関係を明らかにし、加えて接地パターンの違いによる影響を明らかにすることであった。

## II. 方 法

### 1. 被験者

本研究は、陸上競技中長距離走種目を専門にトレーニングしている大学生ランナー31名(年齢:  $19.5 \pm 1.2$ 歳, 身長:  $171.7 \pm 4.5$  cm, 体重:  $57.6 \pm 3.5$  kg および BMI:  $19.5 \pm 0.7$ )を被験者とした(Table 1)。被験者のシーズン最高記録を国際陸上競技連盟が発行するIAAF Score (Spiriev, 2014)にて得点化したとき、最も高い得点を示した種目を被験者の専門種目とした。被験者の専門種目の平均IAAF Scoreは  $804.0 \pm 121.0$  pointsであった(800 m:  $1'54''5 \pm 2''0$ [ $n=7$ ], 1,500 m:  $4'06''4 \pm 11''4$ [ $n=13$ ], 5,000 m:  $15'31''8 \pm 35''7$

[ $n=7$ ] および 10,000 m:  $31'27''0 \pm 1'15''8$ [ $n=4$ ])。実験を開始するにあたり、すべての被験者に本研究の目的、方法および実験の危険性について、口頭および紙面において説明し、実験に参加する同意を得た。なお、本研究の方法は筑波大学人間総合科学研究科体育系研究倫理委員会の承認を得て行なわれた(課題番号: 体26—65)。

### 2. 実験デザイン

生理学的変数およびステップ変数を明らかにするために、実験室内の傾斜1%に設定されたトレッドミル(ORK-7000, 大竹ルート工業, 岩手)上において、多段階漸増負荷走行テストを行なった。室温によって生理学的応答が異なることを考慮し、実験室内の温度をエアコンによって23—26°Cに調節し、実験室の窓を開け、自然換気を行なうことによって常に室内の酸素および二酸化炭素濃度を一定に保った。

多段階漸増負荷走行テストの第1ステージの走スピードを、被験者の専門種目の記録を考慮して11.4, 12.6または13.8 km·h<sup>-1</sup>とし、1ステージごとに1.2 km·h<sup>-1</sup>漸増させ、それぞれ3分間の走行をさせた。なおトレッドミルのスピードはデジタルタコメーター(EE-1B, 日本電産シンボ社, 京都)を用いて、本来のスピードの±0.05 km·h<sup>-1</sup>未満の誤差になるようにステージごとに調整された。各ステージの間に血液採取およびト

**Table 1** Mean ( $\pm$ SD) properties of subjects, running performance and physiological variables.

	All (n=31)	RFS (n=15)	MFS (n=16)	Effect size
Age (yr)	19.5 $\pm$ 1.2	19.4 $\pm$ 1.3	19.5 $\pm$ 1.2	0.08
Height (cm)	171.7 $\pm$ 4.5	171.6 $\pm$ 3.7	171.9 $\pm$ 5.3	0.07
Mass (kg)	57.6 $\pm$ 3.5	57.6 $\pm$ 3.7	57.6 $\pm$ 3.5	0.01
BMI	19.5 $\pm$ 0.7	19.5 $\pm$ 0.6	19.5 $\pm$ 0.9	0.06
Running performance (IAAFs)	804.0 $\pm$ 121.0	782.5 $\pm$ 108.8	824.1 $\pm$ 131.7	0.34
$\dot{V}O_2$ max (mL·kg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	70.4 $\pm$ 6.2	71.2 $\pm$ 6.6	69.6 $\pm$ 6.0	0.26
s $\dot{V}O_2$ max (km·h <sup>-1</sup> )	19.8 $\pm$ 1.2	19.6 $\pm$ 1.0	20.1 $\pm$ 1.2	0.42
sLT (km·h <sup>-1</sup> )	16.2 $\pm$ 1.1	16.4 $\pm$ 1.1	16.0 $\pm$ 1.1	0.39
%LT (%)	81.7 $\pm$ 6.0	83.8 $\pm$ 5.8	79.8 $\pm$ 5.6	0.70

Notes: All: rear-foot-striker + middle-foot-striker, RFS: rear-foot-striker, MFS: middle-foot-striker, IAAFs: International Association of Athletics Federations score (Spiriev, 2014).

レッドミルのスピード調整のために2分の休息をとらせ、6ステージ実施させた。6ステージ終了後、5分間安静にさせ、その後疲労困憊にいたるまで1分ごとに $0.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 走スピードを漸増させながら連続的に走行させた。疲労困憊は、1) RERが1.15以上、2) 心拍数が年齢から推定される最大心拍数(220-年齢)に達している、3) 血中乳酸濃度(blood lactate concentration: bLa)が $8.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上のうち、いずれか2つを満たしている場合とした(Fletcher et al., 2009)。

$\dot{V}\text{O}_2$ 、二酸化炭素排出量(carbon dioxide production:  $\dot{V}\text{CO}_2$ )および換気量は、自動呼気ガス分析器(AE310-S, ミナト医科学社, 大阪)のEXPモードを用いて走行中連続的に分析した(Tanji et al., 2017)。呼気ガス分析器は実験前後に校正ガス(大気相当:  $\text{O}_2$  20.80%,  $\text{CO}_2$  0.03%,  $\text{N}_2$  Balance および呼気相当:  $\text{O}_2$  15.00%,  $\text{CO}_2$  5.00%,  $\text{N}_2$  Balance)によって、熱線流量計は実験前に流量校正器(2L)によってそれぞれ校正した。テスト開始前、各ステージ走行直後および疲労困憊1分、3分および5分後に検者が被験者の指先から血液を採取し、血中乳酸濃度分析器(1500 SPORT lactate analyzer, YSI, Yellow Springs, OH, USA)によってbLaを分析した。心拍数はハートレートモニタ(S610i, Polar Electro Japan, 東京)によって連続測定した。トレッドミルの進行方向の左側1.5mの位置に、光軸がトレッドミルの進行方向に対して垂直になるようにハイスピードカメラ(EX-FC300S, CASIO社, 東京)を設置した。REを評価するために算出する、 $\dot{V}\text{O}_2$  および RER は多段階漸増負荷走行テストの各走スピード走行終了前1分間の平均を用い、これに対応させるためにCT, SL および SF は走行終了前15秒間の撮影によって算出し、このとき240 fpsのシャッタースピードによって撮影した。なお、トレッドミルスピードおよびハイスピードカメラのシャッタースピードによってステップ変数は算出できるため、トレッドミル上に距離を校正する機器の設置はしなかった。

### 3. 算出項目および算出方法

多段階漸増負荷走行テストにおいて連続する1分間の $\dot{V}\text{O}_2$ の最高値を最大酸素摂取量(maximal oxygen uptake:  $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ )として採用した。 $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ 時の走スピード(speed of  $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ :  $s\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ )は多段階漸増負荷走行テストにおける各走スピードの $\dot{V}\text{O}_2$ によって、 $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ 走スピード回帰直線を求め、 $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ を外挿することで算出された。なおこの時、各走スピードの $\dot{V}\text{O}_2$ 各ステージ走行終了前1分間の $\dot{V}\text{O}_2$ とした。LT時の走スピード(speed of LT: sLT)は、多段階漸増負荷テストにおける各走スピードに対するbLa(走スピード-bLa)に対して残差が最小となる2本の直線回帰の交差する点とし、lactate analysis software (Lactate-E ver.2)によって算出された(Newell et al., 2007)。この算出方法は、血中に乳酸が蓄積されることによって出現するベースラインからのブレイク地点を正確に評価できるモデルであるとされている(Lundberg et al., 1986)。LTは $s\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ に対するsLTの強度として算出された。

RE, CT, SL および SF は、すべての被験者が共通して走行した13.8, 15.0, 16.2 および 17.4  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ のうち、被験者のsLTが $16.2 \pm 1.1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ であったことから(Table 1), 15.0  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ をLTを超えない強度( $93.2 \pm 6.4\%$ LT強度), 16.2  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ をLT付近強度( $100.6 \pm 6.9\%$ LT強度), そして17.4  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ をLTを超える強度( $108.1 \pm 7.4\%$ LT強度)とした。REはそれぞれの走スピードの $\dot{V}\text{O}_2$ , RER および  $\Delta\text{bLa}$ によって、以下の式を用いて1km走行当たりのコスト( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ )として算出した(Tanji et al., 2017)。

$$\begin{aligned} \text{RE}[\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}] &= (20202 \text{ J} \cdot \text{O}_2\text{L}^{-1} - (0.82 - \text{RER}) \times 100 \\ &\quad \times 50 \text{ J} \cdot \text{O}_2\text{L}^{-1}) \times \dot{V}\text{O}_2[\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \\ &\quad \times \text{min}^{-1}] / 1000 \times \text{speed}[\text{km} \cdot \text{h}^{-1}] \\ &\quad \times 60 / 1000 \times (1/4.182) + \Delta\text{bLa}[\text{mmol} \\ &\quad \times \text{L}^{-1}] \times 3.0[\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mM}^{-1}] \\ &\quad \times (20202 \text{ J} \cdot \text{O}_2\text{L}^{-1} - (0.82 - \text{RER}) \\ &\quad \times 100 \times 50 \text{ J} \cdot \text{O}_2\text{L}^{-1}) / 1000 / 3 \text{ min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \text{speed}[\text{km}\cdot\text{h}^{-1}] \times 60/1000 \\ & \times (1/4.182) \end{aligned}$$

つまり、RERが0.82時のエネルギー等価量を20202 J $\cdot$ O<sub>2</sub>L<sup>-1</sup>とし、RERが±0.01変化した時エネルギー等価量も±50 J $\cdot$ O<sub>2</sub>L<sup>-1</sup>変化させ、RERが1.00を超えた時のエネルギー等価量は21102 J $\cdot$ O<sub>2</sub>L<sup>-1</sup>とした。エネルギー等価量に $\dot{V}O_2$ を乗ずることによって、有酸素性エネルギー代謝を算出した。さらにbLaが2.0 mmol $\cdot$ L<sup>-1</sup>を超えた時、安静時のbLaとbLaの差によって $\Delta bLa$ を算出し、係数(3.0 mL O<sub>2</sub> $\cdot$ kg<sup>-1</sup> $\cdot$ mM<sup>-1</sup>)を乗じ、走行時間(3 min)で除することによって、無酸素性エネルギー代謝を算出した。そして、有酸素性エネルギー代謝と無酸素性エネルギー代謝を加算することによってそれぞれの走スピードにおけるREを算出した。

CTは連続する8ステップ(4ストライド)の各ステップにおけるトレッドミルに被験者の足が接地しているフレーム数をQuickTime Player 7 (Apple Inc., Cupertino, CA, USA)を用いて目視から求め、それらの平均値から時間(sec)を算出した。SF(Hz)は1ステップ目の接地から連続する9ステップ目の接地までのフレーム数から時間(sec)を求め、1ステップ当たりの平均時間の逆数によって算出した。SL(m)はデジタルタコメーターによって測定されたトレッドミルのスピードからSFを除すことによって算出した。さらに、身長による影響を除外するために、SLおよびSFを身長(m)によって除し、それぞれSL/身長比(SLH:%)およびSF/身長(SFH:Hz $\cdot$ m<sup>-1</sup>)として表わした。

#### 4. 統計分析

ハイスピードカメラの映像から目視によって被験者の接地パターンを評価した。外頼よりも後方をかかとと定義し、かかとから接地していると確認されたランナーをRFS群(n=15)、かかとよりも前方から接地していると確認されたランナーをMFS群(n=16)とした。統計処理にはSPSS Statistic 22 (IBM社, Chicago, IL, USA)を使用し、統計的有意水準は $p < 0.05$ とした。結

果はすべて平均値±標準偏差にて示した。REおよびステップ変数(CT, SL, SF, SLHおよびSFH)の走スピードの増大に伴う変化を明らかにするために一要因分散分析を行ない、有意な主効果が認められたときBonferroniの信頼区間の調整を用い多重比較検定を行なった。また、接地パターンによる影響を確認するために、接地パターンと走スピードの二要因分散分析を行ない、有意な主効果が認められたときBonferroniの信頼区間の調整を用い多重比較検定を行なった。各走スピードにおけるREとステップ変数の関係を明らかにするために、Pearsonの積率相関係数を用いて分析した。また群間を比較するために効果量(effect size)をCohen(1988)の方法を用いて算出し、Lipsey(1990)およびSawilowsky(2009)のスケールによって解釈した。したがって、 $d = 0.01$ のときvery small, 0.2のときsmall, 0.5のときmediumそして0.8のときlargeと判断した。

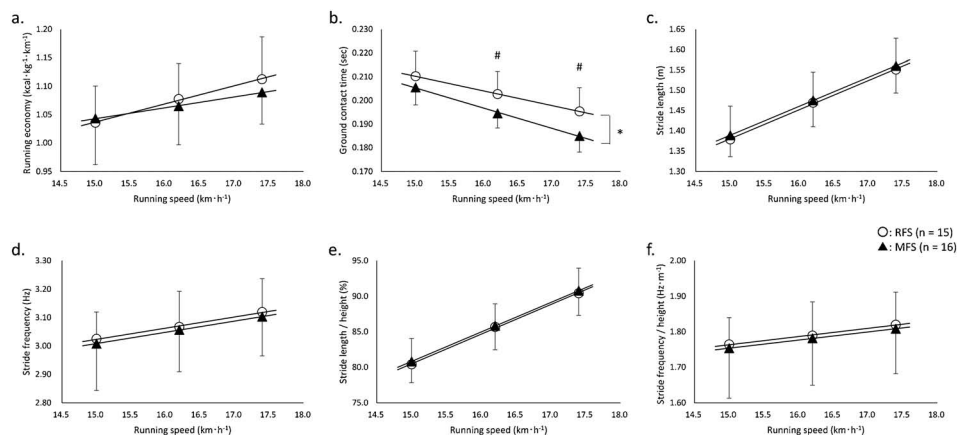
### III. 結 果

被験者の身体的特徴、生理学的変数および走パフォーマンスをTable 1に示した。接地パターンによって群分けしたとき、%LT(medium)を除くすべての身体的特徴、生理学的変数および走パフォーマンスの効果量はvery smallまたはsmallであった。LTを超えない強度(15.0 km $\cdot$ h<sup>-1</sup>)、LT付近強度(16.2 km $\cdot$ h<sup>-1</sup>)およびLTを超える強度(17.4 km $\cdot$ h<sup>-1</sup>)におけるREおよびステップ変数の結果をTable 2に示した。すべての被験者を対象としたとき、走スピードの増大に伴い、RE, SL, SF, SLHおよびSFHは有意な増大( $p < 0.001$ )が、一方CTは有意な減少( $p < 0.001$ )が認められた。それぞれの接地パターンにおけるREおよびステップ変数の走スピードの増大に伴う変化をFig. 1に示した。CTには有意な交互作用( $p < 0.05$ )が認められ(Fig. 1-b)、LT付近( $d = 1.02$ )およびLTを超える強度( $d = 1.22$ )におけるCTは群間に有意な差が認められた(MFS < RFS:  $p < 0.01$ )。REおよびその他のステ

**Table 2** Mean ( $\pm$ SD) running economy and step parameters at each running speed.

	Speed ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	All (n=31)	RFS (n=15)	MFS (n=16)	Effect size
RE ( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ )	15.0	$1.04 \pm 0.07$	$1.04 \pm 0.08$	$1.04 \pm 0.06$	0.10
	16.2	$1.07 \pm 0.06^\#$	$1.08 \pm 0.07^\#$	$1.06 \pm 0.06^\#$	0.19
	17.4	$1.10 \pm 0.07^\#, \#$	$1.11 \pm 0.06^\#, \#$	$1.09 \pm 0.07^\#, \#$	0.35
CT (sec)	15.0	$0.208 \pm 0.009$	$0.210 \pm 0.011$	$0.206 \pm 0.007$	0.52
	16.2	$0.198 \pm 0.009^\#$	$0.203 \pm 0.010^\#$	$0.195 \pm 0.006^{*, \#}$	1.02
	17.4	$0.190 \pm 0.010^\#, \#$	$0.195 \pm 0.010^\#, \#$	$0.185 \pm 0.007^{*, \#, \#}$	1.22
SL (m)	15.0	$1.38 \pm 0.06$	$1.38 \pm 0.04$	$1.39 \pm 0.07$	0.17
	16.2	$1.47 \pm 0.06^\#$	$1.47 \pm 0.06^\#$	$1.48 \pm 0.07^\#$	0.09
	17.4	$1.56 \pm 0.06^\#, \#$	$1.55 \pm 0.06^\#, \#$	$1.56 \pm 0.07^\#, \#$	0.14
SF (Hz)	15.0	$3.02 \pm 0.13$	$3.03 \pm 0.10$	$3.01 \pm 0.16$	0.13
	16.2	$3.06 \pm 0.14^\#$	$3.07 \pm 0.13^\#$	$3.06 \pm 0.15^\#$	0.08
	17.4	$3.11 \pm 0.13^\#, \#$	$3.12 \pm 0.12^\#, \#$	$3.10 \pm 0.14^\#, \#$	0.13
SLH (%)	15.0	$80.8 \pm 3.1$	$80.4 \pm 2.5$	$80.8 \pm 3.3$	0.14
	16.2	$85.9 \pm 3.2^\#$	$85.7 \pm 3.2^\#$	$85.8 \pm 3.1^\#$	0.05
	17.4	$90.6 \pm 3.1^\#, \#$	$90.4 \pm 3.1^\#, \#$	$90.8 \pm 3.1^\#, \#$	0.11
SFH ( $\text{Hz} \cdot \text{m}^{-1}$ )	15.0	$1.76 \pm 0.11$	$1.76 \pm 0.08$	$1.75 \pm 0.14$	0.10
	16.2	$1.79 \pm 0.11^\#$	$1.79 \pm 0.10^\#$	$1.78 \pm 0.13^\#$	0.07
	17.4	$1.81 \pm 0.11^\#, \#$	$1.82 \pm 0.09^\#, \#$	$1.81 \pm 0.13^\#, \#$	0.10

Notes: All: rear-foot-striker + middle-foot-striker, RFS: rear-foot-striker, MFS: middle-foot-striker, \*: significant difference RFS vs MFS, #: significant difference vs  $15.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , ##: significant difference vs  $16.2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .



**Fig. 1** Mean ( $\pm$ SD) running economy and step parameters in rear-foot-striker (RFS: open circles:  $\circ$ ) and middle-foot-striker (MFS: filled triangles:  $\blacktriangle$ ) at each running speed.

Notes: a, running economy; b, ground contact time; c, step length; d, step frequency; e, step length/height; f, step frequency/height. \*: significant interaction between foot strike pattern vs running speed. #: significant difference RFS vs MFS.

ップ変数には有意な交互作用が認められず、すべての強度において群間に有意な差が認められなかった。

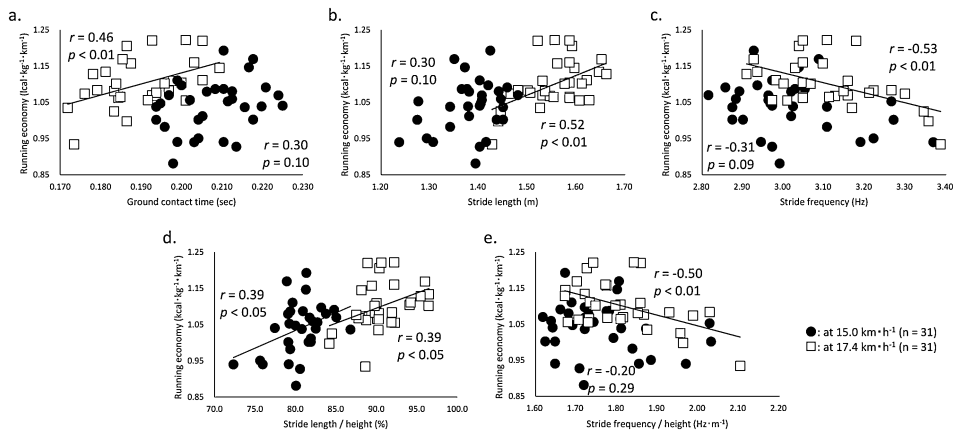
RE とステップ変数の相関係数を Table 3 に示

し、さらに LT を超えない強度および LT を超える強度における RE とステップ変数の関係を Fig. 2 に示した。すべての被験者を対象としたとき、LT を超えない強度では SLH においてのみ RE

**Table 3** Correlation coefficients ( $p$  values) between running economy and step parameters at each running speed.

Speed ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	All (n=31)			RFS (n=15)			MFS (n=16)		
	15.0	16.2	17.4	15.0	16.2	17.4	15.0	16.2	17.4
CT	0.30 (0.10)	0.18 (0.33)	0.46** ( $<0.01$ )	0.35 (0.20)	0.12 (0.66)	0.49 (0.06)	0.29 (0.28)	0.20 (0.46)	0.44 (0.09)
SL	0.30 (0.10)	0.54** ( $<0.01$ )	0.52** ( $<0.01$ )	0.26 (0.35)	0.53* ( $<0.05$ )	0.34 (0.22)	0.36 (0.18)	0.58* ( $<0.05$ )	0.66** ( $<0.01$ )
SF	-0.31 (0.09)	-0.55** ( $<0.01$ )	-0.53** ( $<0.01$ )	-0.27 (0.34)	-0.53* ( $<0.05$ )	-0.35 (0.20)	-0.37 (0.16)	-0.59* ( $<0.05$ )	-0.67** ( $<0.01$ )
SLH	0.39* ( $<0.05$ )	0.54** ( $<0.01$ )	0.39* ( $<0.05$ )	0.41 (0.13)	0.61* ( $<0.05$ )	0.35 (0.20)	0.39 (0.14)	0.48 (0.06)	0.45 (0.08)
SFH	-0.20 (0.29)	-0.46** ( $<0.01$ )	-0.50** ( $<0.01$ )	-0.08 (0.78)	-0.39 (0.15)	-0.27 (0.33)	-0.30 (0.26)	-0.54* ( $<0.05$ )	-0.64** ( $<0.01$ )

Notes: All: rear-foot-striker + middle-foot-striker, RFS: rear-foot-striker, MFS: middle-foot-striker, \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ .



**Fig. 2** Relationships in running economy with step parameters at intensities below (filled circles: ●) and above (open squares: □) the lactate threshold.

Notes: a, ground contact time; b, step length; c, step frequency; d, step length/height; e, step frequency/height.

との間に有意な相関関係が認められた ( $r=0.39$ ,  $p<0.05$ ). LT 付近強度では以下のステップ変数と RE との間に有意な相関関係が認められた; SL ( $r=0.54$ ,  $p<0.01$ ), SF ( $r=-0.55$ ,  $p<0.01$ ), SLH ( $r=0.54$ ,  $p<0.01$ ) および SFH ( $r=-0.46$ ,  $p<0.01$ ). LT を超える強度では以下のステップ変数と RE との間に有意な相関関係が認められた; CT ( $r=0.46$ ,  $p<0.01$ ), SL ( $r=0.52$ ,  $p<0.01$ ), SF ( $r=-0.53$ ,  $p<0.01$ ), SLH ( $r=0.39$ ,  $p<0.01$ ) および SFH ( $r=-0.50$ ,  $p<0.01$ ). また, それぞれの接地パターンにおける RE とス

テップ変数の関係は, RFS 群では LT 付近強度において SL, SF および SLH に有意な相関関係が認められた (それぞれ  $r=0.53$ ,  $-0.53$  および  $0.61$ ,  $p<0.05$ ). 一方, MFS 群では LT 付近強度において SL, SF および SFH に有意な相関関係が認められ (それぞれ  $r=0.58$ ,  $-0.59$  および  $-0.54$ ,  $p<0.05$ ), 同様に LT を超える強度においても SL, SF および SFH に有意な相関関係が認められた (それぞれ  $r=0.66$ ,  $-0.67$  および  $-0.64$ ,  $p<0.01$ ).

## Ⅳ. 考 察

### 1. 異なる運動強度における RE とステップ変数

本研究は、被験者の LT 強度を基準に、LT を超えない強度 ( $15.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )、LT 付近強度 ( $16.2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) および LT を超える強度 ( $17.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) について RE およびステップ変数を評価した。その結果、RE およびステップ変数は走スピードの増大に伴い有意な変化が認められた。したがって、運動強度によって RE とステップ変数の関係も変化する可能性があり、それぞれの運動強度において評価する必要がある。

本研究のすべての被験者を対象としたとき、LT を超える強度において CT は RE との間に有意な正の相関関係が認められた ( $r=0.46$ )。このことは、LT 強度を超える同一の走スピードにおいて、CT が長いランナーほど RE に劣ることを示している。この結果は、専門的にトレーニングを行なっているランナーを対象に LT を超える強度において RE と CT の間に関連を認めた Santos-Concejero et al. (2013, 2014) を支持している。彼らは RE を、LT を超える強度にも関わらず  $\dot{V}O_2$  のみによって評価しているが、 $\dot{V}O_2$  に加えてエネルギー基質の利用割合および無酸素性エネルギー代謝を考慮した本研究でも同様の結果が認められたことによって、専門的にトレーニングを行なっている中長距離ランナーにおいてこの見解は正しいことが示された。

走運動中の支持局面において下肢などの活動筋が身体質量を支えるために動員され、それらの活動が最も RE に影響を及ぼすと指摘されている (Kram and Taylor, 1990)。また、支持局面のうちとりわけエキセントリック局面の時間が長いことによって走スピードの低下を招き、その後コンセントリック局面において再び走スピードを加速するための筋活動がより生じ、その結果 RE は悪化すると指摘されている (Nummela et al., 2007)。さらに、走動作のような反動動作を伴う運動では、反動動作に貢献する筋と腱 (筋腱複合

体) が一度伸張されてから短縮する。このふるまいは stretch-shortening cycle と呼ばれており、弾性エネルギーの貯蔵および再利用に重要な役割を果たし、経済性を優れさせる可能性がある。この弾性エネルギーの再利用について Bosco et al. (1981) は、エキセントリック局面に大きな弾性エネルギーを貯蔵することおよびエキセントリックからコンセントリックへの移行時間 (coupling time) を短くすることの 2 つをポイントとして示している。前者について図子ほか (1998) は、足関節角速度が大きくなるにつれて足関節のエキセントリックに対するコンセントリックの関節トルクが増大することを報告している。丹治 (2014) は走スピードの増大に伴い、CT が減少し、エキセントリック局面の足関節背屈角速度は増大したことを示している。これらの結果から、同一の走スピードにおける短い CT での走行は支持局面の足関節背屈角速度は長い CT よりも大きくなると推測でき、短い CT はエキセントリック局面においてより大きな弾性エネルギーの貯蔵をすると示唆される。また後者について Bosco et al. (1981) は、coupling time が 0.001 秒長くなると筋の増強効果が 20 N 減少すると報告しており、coupling time そのものが CT に含まれるため、走行中の短い coupling time は短い CT に反映されていることになる。つまり短い CT は長い CT よりも弾性エネルギーを貯蔵・再利用できると推察される。以上のことから、LT を超える強度では短い CT が優れた RE に関連したと考えられる。

一方で、LT を超えない強度および LT 付近強度では CT と RE の間に有意な関連が認められなかった (それぞれ  $r=0.30$  および  $0.18$ ,  $p=0.10$  および  $0.33$ )。この結果は、専門的にトレーニングを行なっているランナーを対象に LT を超えない強度において CT と RE の関連を認めなかった Tartaruga et al. (2012) の結果を支持する結果となった。LT を超える強度では走スピードが大きいため、支持局面における走スピードの加減速も大きい一方、LT を超えない強度や LT 付近の強度では走スピードがそれほど大きくないため、加減速も小さくなく、RE の低下に大きな影響を及



ほさなかったと示唆される。また、LTを超えない強度やLT付近の強度では走スピードが小さく、支持局面の足関節背屈角速度も小さい(丹治, 2014)。小さい足関節角速度ではエキセントリックに対するコンセントリックの足関節トルクが小さく(図子ほか, 1998)、弾性エネルギーの再利用はREへ小さい貢献であったと推察される。以上のことからLTを超えない強度およびLT付近の強度でCTとREの間に関連が認められなかったと考えられる。

SLは、LT付近およびLTを超える強度においてREとの間に有意な正の相関関係が認められた一方、SFは、LT付近およびLTを超える強度においてREとの間に有意な負の相関関係が認められた。また、SLは身長によって補正すると(SLH)、すべての運動強度においてREとの間に有意な正の相関関係が認められた。すなわち、同一の走スピードにおいて身長に対するSLの割合が小さいほどREに優れることが明らかとなった。Tartaruga et al. (2012)は専門的にトレーニングを行なっているランナーのLTを超えない強度において $\dot{V}O_2$ とSLの間に有意な正の相関関係を認めており、本研究の結果はそれを一部支持するものとなった。SLおよびSFは自由に走行するとき最もREが優れていると報告されている(Cavanagh and Williams, 1982)一方で、SLを3%減少(またはSFを3%増大)させるとREが向上することも認められている(de Ruiter et al., 2013)。Anderson (1996)は大きいSLによる走行が、支持期のコンセントリック局面においてより大きな筋の出力を必要とすることや、身体重心の鉛直方向に対する振幅を大きくさせ、その結果、大きなプレーキ成分を生み出す接地の姿勢を導くことやその衝撃を緩衝する関節動作を必要とし、経済性に劣ることを指摘している。同様にKaneko et al. (1987)も、大きいSLによって支持期のエキセントリック局面に大きなプレーキ成分が生じ、その後コンセントリック局面において大きな筋の出力を發揮する必要があり、その際に機械的効率に劣るtype II線維の動員が増大するため経済性に劣ることを指摘している。以上のこ

とから、大きいSLでの走行は、より筋の出力を發揮するためにtype II線維の動員を増大させ、REに劣ると考えられる。

また、運動強度の増大に伴い、SLおよびSFは増大した(Table 2)。このことは、LTを超えない強度よりもLT付近およびLTを超える強度において、SLの増大のために筋出力が増大するほか、SFの増大のために下肢動作に伴う筋を収縮させる内的仕事量が増大すると推察される。したがって、LT付近およびLTを超える強度においてREとSL(またはSF)の関係が強くなった原因として、運動強度の増大によってtype II線維の動員が増大するにも関わらず、さらに大きいSLによってその動員が増し、また大きいSFによってその動員頻度が増え、より経済性に劣る走行となったためと考えられる。

## 2. 接地パターンの違いによるREとステップ変数

接地パターンによってRFSとMFSに群分けを行なったところ、CTに有意な交互作用が認められた(Fig. 1)。LTを超えない強度ではMFSの方がRFSよりもmedium( $d=0.52$ )にCTが小さかったが、有意な差ではなかった。しかし、LT付近ではその差がlarge( $d=1.02$ )になり、LTを超える強度ではさらに大きくなり( $d=1.22$ )、それぞれ有意な差が認められた。

本研究では、接地パターンによってCTに大きな差が認められたにも関わらず、REはすべての運動強度において群間に有意な差が認められなかった。Ardigó et al. (1995)やPerl et al. (2012)は、接地パターンによってREに有意な差は認められないと報告しており、本研究はその結果を支持するものとなった。また、RFSとMFSのそれぞれの接地パターンにおけるCTとREの関係はLTを超える強度において有意ではないものの、正相関の傾向が認められた(それぞれ $r=0.49$ および $0.44$ ,  $p=0.06$ および $0.09$ )。この結果は接地パターンによる影響よりも、それぞれの接地パターンで短いCTであるかがREにとって重要であることを示唆している。したがって、ど

ちらの接地パターンであっても支持期のエキセントリック局面における大きな足関節背屈角速度および短い coupling time による走行が求められると推察される。

SL や SF, またそれらを身長によって補正した SLH および SFH も同様に接地パターンと運動強度による交互作用が認められず, 群間の差も認められなかった。本研究よりも遅い走スピードにおいて, 同一の被験者に接地パターンを変更させたときの SL の変化を調査した Willson et al. (2015) は, 接地パターンによって SL は変化がないことを報告しており, 本研究と同様の結果を示している。したがって, 運動強度に関わらず接地パターンの違いによって SL (または SF) が変化することはないと推察される。これらの本研究の結果からおおよそ 90–110% LT 強度の範囲において, 接地パターンの違いは CT には影響がある一方で, RE, SL および SF には大きな影響を及ぼさないと考えられる。

本研究は 3 つの走スピードにおいて RE とステップ変数の関係を明らかにしているため, 解釈に限界がある。RE は接地パターンと走スピードによる交互作用の傾向が認められ ( $p=0.10$ ), さらに走スピードを追加し分析したとき, 有意な交互作用が認められる可能性がある。もしこの関係が認められるのであれば, 先行研究の見解がすべて一致する。つまり, Williams and Cavanagh (1987) は本研究で用いた LT を超えない強度よりも低い運動強度において RFS の方が, Hasegawa et al. (2007) はハーフマラソン競技中において MFS の方が, それぞれ RE に優れた接地パターンであると主張している。さらに Chapman et al. (2012) は走スピードによって関係性が変化することを示唆している。加えて本研究では, LT を超えない強度において RFS が ( $d=0.10$ ), LT を超える強度において MFS が ( $d=0.35$ ) 大きな差でないものの RE に優れていた。以上を踏まえると, 90%LT 未満の強度では RFS が, 110%LT を超える強度では MFS が RE に優れている可能性がある。これらの見解を明らかにするためには, さらに低い運動強度および高い運動強

度においても調査する必要がある。とりわけ, これまでに LT を超える強度において RE を評価し, 接地パターンによる影響を明らかにした研究はなく, 本研究の結果は経済性に優れた接地パターンを今後検討する上での問題提起となるだろう。

それぞれの接地パターンにおけるステップ変数と RE の関係を見ると, LT を超える強度において, MFS 群は RE と SL, SF および SFH に有意な相関関係が認められている一方, RFS 群は有意な相関関係が認められなかった (Table 3)。これらの結果は, RFS よりも MFS においてステップ変数のわずかな違いが RE に関連することを示唆しており, 運動強度の増大に伴い MFS の接地パターンではステップ変数の変化により注意が必要であると言える。ただし, RFS 群においても強い関連ではないものの同様の傾向を示しているため, 同様にステップ変数の変化に注意を払う必要があると推察される。

### 3. 現場への示唆

専門的にトレーニングを行なっている中長距離ランナーを対象とした本研究の結果, LT を超える強度において短い CT は優れた RE に関連することを明らかにした。短い CT に関連する走動作として支持期のエキセントリック局面における大きな足関節背屈角速度および短い coupling time が考えられ, 凶子ほか (1998) はそれらを走行中に発揮するためには足関節に関与する筋腱複合体のスティフネスが重要であると指摘している。すなわち, RE を向上させるためには, 足関節に関与するスティフネスを向上させ, その結果走行中の CT を短くさせるようなトレーニングが必要となる。Paavolainen et al. (1999) は, レジスタンストレーニングを行なうことによって, 足関節に関与するスティフネスが向上し, さらにその結果走行中の CT は減少し, RE および走パフォーマンスは向上したと報告している。彼らはレジスタンストレーニングとして, 繰り返しスプリント, 自重またはシャフトを用いたジャンプ系 (カウンタームーブメントジャンプ, ドロップジャン

ブ、ハードルジャンプなど) および最大挙上重量の40%以下の強度での速い動作によるレッグプレスや膝の伸張—短縮運動を実施させており、最大負荷を伴わなくともトレーニング効果が認められるものと推察できる。

本研究において分析対象とした90—110%LT強度では、接地パターンの違いによってREの優劣は決定しないことが明らかとなった。専門的にトレーニングを行なっている中長距離ランナーにとって、これらの運動強度はフルマラソンを走行する運動強度に相当する。すなわち、フルマラソンにおいてはどちらの接地パターンによって走行しても経済性は変わらないと考えられる。一方、運動強度が高まるにつれてMFSがREに優れる傾向が認められた。したがって、LT強度をはるかに超えるトラック種目においてはMFSの接地パターンが望ましいと示唆される。

## V. 結 論

本研究は、専門的にトレーニングを行なっている中長距離ランナーを対象に、LTを超えない強度 ( $93.2 \pm 6.4\%$ LT強度) からLTを超える強度 ( $108.1 \pm 7.4\%$ LT強度) におけるREとCT, SLおよびSFの関係を明らかにし、加えて接地パターンの違いによる影響を明らかにした。その結果、1) LTを超える強度においてCTとREの間に有意な正の相関関係が認められた、2) すべての運動強度において身長に対するSLの割合とREの間に有意な正の相関関係が認められた、3) すべての運動強度において接地パターンによるREの差は認められなかった。これらのことから、90—110%LT強度では接地パターンに関わらず、短いCTおよび短いSL(または高いSF)で走行することがREに優れることが明らかになった。今後は、REとステップ変数の縦断的变化の関係を明らかにし、さらに指導現場に活かせる知見を得ることが求められる。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費JP23500720, JP15

K01550の助成を受けて実施しました。

## 文 献

- Anderson, T. (1996) Biomechanics and running economy. *Sports Med.*, 22: 76–89.
- Ardigó, L. P., Lafortuna, C., Minetti, A. E., Mogroni, P., and Saibene, F. (1995) Metabolic and mechanical aspects of foot landing type, forefoot and rearfoot strike, in human running. *Acta. Physiol. Scand.*, 155: 17–22.
- Bosco, C., Komi, P. V., and Ito, A. (1981) Prestretch potentiation of human skeletal muscle during ballistic movement. *Acta. Physiol. Scand.*, 111: 135–140.
- Cavanagh, P. R. and Williams, K. (1982) The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 14: 30–35.
- Chapman, R. F., Laymon, A. S., Wilthte, D. P., Mckenzie, J. M., Tanner, D. A., and Stager, J. M. (2012) Ground contact time as an indicator of metabolic cost in elite distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 44: 917–925.
- Cohen, J. (1988) *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Routledge.
- Conley, D. L. and Krahenbuhl, G. S. (1980) Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 12: 357–360.
- de Ruiten, C. J., Verdijk, P. W., Werker, W., Zuidema, M. J., and de Haan, A. (2013) Stride frequency in relation to oxygen consumption in experienced and novice runners. *Eur. J. Sport Sci.*, 14: 251–258.
- Fletcher, J. R., Esau, S. P., and MacIntosh, B. R. (2009) Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J. Appl. Physiol.*, 107: 1918–1922.
- Hasegawa, H., Yamaguchi, T., and Kraemer, W. J. (2007) Foot strike patterns of runners at the 15-km point during an elite-level half marathon. *J. Strength Cond. Res.*, 21: 888–893.
- Hayes, P. and Caplan, N. (2012) Foot strike patterns and contact times during high-calibre middle-distance races. *J. Sports Sci.*, 30: 1275–1283.
- Kaneko, M. (1990) Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. *J. Biomech.*, 23 Suppl 1: 57–63.
- Kaneko, M., Matsumoto, M., Ito, A., and Fuchimoto, T. (1987) Optimum step frequency in constant speed

- running. In: Jonsson, B. (ed.) *Biomechanics X-B. Human Kinetics*, pp. 803–807.
- Kram, R. and Taylor, C. R. (1990) Energetics of running: a new perspective. *Nature*, 346: 265–266.
- Kyröläinen, H., Belli, A., and Komi, P. V. (2001) Biomechanical factors affecting running economy. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33: 1330–1337.
- Lipsey, M. W. (1990) *Designing sensitivity: Statistical power for experimental research*. Sage.
- Lundberg, M. A., Hughson, R. L., Weisiger, K. H., Jones, R. H., and Swanson, G. D. (1986) Computerized estimation of lactate threshold. *Comput. Biomed. Res.*, 19: 481–486.
- Morgan, D. W., Martin, P. E., and Krahenbuhl, G. S. (1989) Factors affecting running economy. *Sports Med.*, 7: 310–330.
- Newell, J., Higgins, D., Madden, N., Cruickshank, J., Einbeck, J., McMillan, K., and McDonald, R. (2007) Software for calculating blood lactate endurance markers. *J. Sports Sci.*, 25: 1403–1409.
- Nummela, A., Keränen, T., and Mikkelsen, O. (2007) Factors related to top running speed and economy. *Int. J. Sports Med.* 28: 655–661.
- Paavola, L., Hakkinen, K., Hamalainen, I., Nummela, A., and Rusko, H. (1999) Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J. Appl. Physiol.*, 86: 1527–1533.
- Perl, D., Daoud, A. I., and Lieberman, D. E. (2012) Effects of footwear and strike type on running economy. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 44: 1335–1343.
- Santos-Concejero, J., Granados, C., Irazusta, J., Bidaurrezaga-Letona, I., Zabala-Lili, J., Tam, N., and Gil, S. M. (2013) Differences in ground contact time explain the less efficient running economy in North African runners. *Biol. Sport*, 30: 181–187.
- Santos-Concejero, J., Tam, N., Granados, C., Irazusta, J., Bidaurrezaga-Letona, I., Zabala-Lili, J., and Gil, S. M. (2014) Stride angle as a novel indicator of running economy in well-trained runners. *J. Strength Cond. Res.*, 28: 1889–1895.
- Sawilowsky, S. (2009) New effect size rules of thumb. *J. Mod. Appl. Stat. Meth.*, 8: 467–474.
- Spiriev, B. (2014) *IAAF scoring tables of athletics: 2014 revised edition*. IAAF.
- 丹治史弥 (2014) 様々な運動強度における Running Economy の高いランニングフォームを探る. 上月研究助成事業報告書.  
[http://www.kozuki-foundation.or.jp/ronbun/spresearch/spres12\\_tanji.pdf](http://www.kozuki-foundation.or.jp/ronbun/spresearch/spres12_tanji.pdf), (参照日 2017年3月27日).
- 丹治史弥・関慶太郎・榎本靖士・鍋倉賢治 (2016) 高強度走行中のランニングフォームと経済性. *ランニング学研究*, 27: 21–35.
- Tanji, F., Shirai, Y., Tsuji, T., Shimazu, W., and Nabekura, Y. (2017) Relation between 1,500-m running performance and running economy during high-intensity running in well-trained distance runners. *J. Phys. Fitness Sports Med.*, 6: 41–48.
- Tartaruga, M. P., Brisswalter, J., Peyre-Tartaruga, L. A., Ávila, A. O., Alberton, C. L., Coertjens, M., Cadore, E. L., Tiggemann, C. L., Silva, E. M., and Kruegel, L. F. M. (2012) The relationship between running economy and biomechanical variables in distance runners. *Res. Q. Exerc. Sport*, 83: 367–375.
- Williams, K. R. and Cavanagh, P. R. (1987) Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *J. Appl. Physiol.*, 63: 1236–1245.
- Willson, J. D., Ratcliff, S. A., Meardon, S. A., and Willy, R. W. (2015) Influence of step length and landing pattern on patellofemoral joint kinetics during running. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 25: 736–743.
- 関子浩二・西園秀嗣・平田文夫 (1998) 筋収縮の違いからみた下肢三頭筋のトルク発揮特性. *体力科学*, 47: 593–600.

(2017年1月31日受付)  
 (2017年6月18日受理)

Advance Publication by J-STAGE  
 Published online 2017/7/25