

博士論文

中長距離ランナーの高強度走行中の
ランニングエコノミーと走パフォーマンス

平成 28 年度

筑波大学大学院人間総合科学研究科体育科学専攻

丹治 史弥

目次

関連論文	・ ・ ・	vii
略語の説明	・ ・ ・	viii
表のタイトル	・ ・ ・	x
図のタイトル	・ ・ ・	xii
I. 緒言	・ ・ ・	1
II. 文献研究		
A. 中長距離走パフォーマンスに関連する生理学的変数		
1. 最大酸素摂取量 (maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_{2\max}$)	・ ・ ・	5
2. 走の経済性 (running economy: RE)	・ ・ ・	7
3. 乳酸性代謝閾値 (lactate threshold: LT)	・ ・ ・	9
4. $\dot{V}O_{2\max}$ と RE の変数間の関係	・ ・ ・	10
B. 伝統的な RE の評価方法	・ ・ ・	12
1. $\dot{V}O_2$ [$\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$]	・ ・ ・	13
2. $\dot{V}O_2$ [$\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$]	・ ・ ・	13
3. $\dot{V}O_2$ [$\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-0.66} \cdot \text{min}^{-1}$ or $\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-0.75} \cdot \text{min}^{-1}$]	・ ・ ・	14
4. $\Delta\dot{V}O_2$ [$\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$]	・ ・ ・	14
C. LT を超える強度走行時の RE を評価するための条件		
1. $\dot{V}O_2$ の定常状態	・ ・ ・	16

2. エネルギー基質の利用割合の評価	・ ・ ・	18
3. 無酸素性エネルギー代謝量の評価	・ ・ ・	20
D. RE とバイオメカニクスの変数の関係を検討した研究	・ ・ ・	21
1. LT を超えない強度	・ ・ ・	22
2. LT を超える強度	・ ・ ・	23
III. 研究課題の設定		
A. 問題点	・ ・ ・	25
B. 解決すべき課題		
1. 大学生中長距離ランナーの LT を超える強度における酸素摂取動態	・ ・ ・	26
2. LT を超える強度における RE と走パフォーマンスの関係	・ ・ ・	26
3. 走パフォーマンスと生理学的変数の縦断的關係	・ ・ ・	27
4. LT を超える強度における RE とバイオメカニクスの変数の関係	・ ・ ・	27
C. 研究課題の設定	・ ・ ・	28
IV. 中長距離ランナーの LT を超える強度における酸素摂取動態（研究課題 1）		
A. 目的	・ ・ ・	31
B. 方法		
1. 被験者	・ ・ ・	32
2. 実験デザイン	・ ・ ・	33
3. 算出項目および算出方法	・ ・ ・	35

4. 統計分析	・ ・ ・	36
C. 結果	・ ・ ・	37
D. 考察		
1. $\dot{V}O_{2\max}$ の優劣と緩成分	・ ・ ・	43
2. $\dot{V}O_{2\max}$ と $\dot{V}O_2$ の立ち上がり速度	・ ・ ・	44
3. 実験プロトコルと緩成分	・ ・ ・	45
E. 小活	・ ・ ・	46
V. LT を超える強度における RE と走パフォーマンスの関係 (研究課題 2)		
A. 目的	・ ・ ・	47
B. 方法		
1. 被験者	・ ・ ・	48
2. 実験デザイン	・ ・ ・	48
3. 算出項目および算出方法	・ ・ ・	49
4. 統計分析	・ ・ ・	51
C. 結果	・ ・ ・	51
D. 考察		
1. 走パフォーマンスと $\dot{V}O_{2\max}$ および LT	・ ・ ・	56
2. 走パフォーマンスと RE	・ ・ ・	57
3. 走パフォーマンスと $\dot{V}O_{2\max}$ および RE	・ ・ ・	59
3. 本研究課題の限界	・ ・ ・	60

E. 小活	・ ・ ・	61
VI. 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ける走パフォーマンスと 生理学的変数の縦断的關係（研究課題 3-1）		
A. 目的	・ ・ ・	62
B. 方法		
1. 被験者	・ ・ ・	63
2. 実験デザイン	・ ・ ・	63
3. 算出項目および算出方法	・ ・ ・	64
4. 統計分析	・ ・ ・	65
C. 結果	・ ・ ・	65
D. 考察		
1. 生理学的変数と走パフォーマンスの変化	・ ・ ・	74
2. $\dot{V}O_2\text{max}$ と RE の変化率の關係	・ ・ ・	76
E. 小活	・ ・ ・	78
VII. 優れた競技レベルを有する中長距離ランナーにおける走パフォーマンスと生理学的 変数の縦断的關係（研究課題 3-2）		
A. 目的	・ ・ ・	79
B. 方法		
1. 被験者	・ ・ ・	80

2. 実験デザイン	・ ・ ・	81
3. 算出項目および算出方法	・ ・ ・	82
4. 統計分析	・ ・ ・	82
C. 結果	・ ・ ・	82
D. 考察		
1. 生理学的変数と走パフォーマンスの変化	・ ・ ・	86
2. $\dot{V}O_{2\max}$ と RE の変化率の関係	・ ・ ・	88
E. 小活	・ ・ ・	89
VIII. LT を超える強度における RE とバイオメカニクスの変数の関係 (研究課題 4)		
A. 目的	・ ・ ・	90
B. 方法		
1. 被験者	・ ・ ・	91
2. 実験デザイン	・ ・ ・	91
3. 算出項目および算出方法	・ ・ ・	93
4. 統計分析	・ ・ ・	97
C. 結果	・ ・ ・	97
D. 考察		
1. LT を超える強度における RE とバイオメカニクスの変数の関係	・ ・ ・	103
2. 経済性に優れたランニングフォーム	・ ・ ・	104
E. 小活	・ ・ ・	106

IX. 総合考察

1. LT を超える強度における RE を評価する重要性 . . . 107
2. バイオメカニクスの変数の改善の有用性 . . . 108
3. 効果的に走パフォーマンスを向上させるトレーニング戦略 . . . 109

X. 結論 . . . 115

謝辞 . . . 117

参考文献

関連論文

本論文は、以下に示した学術論文に未発表の実験結果を加えてまとめられたものである。

- I. 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.
- II. 丹治史弥, 鍋倉賢治. 大学生ランナーにおける 3 年間の有酸素性能力と走パフォーマンスの変化の関係. ランニング学研究. 印刷中.
- III. 丹治史弥, 津田修也, 小林優史, 鍋倉賢治. (2016) 学生トップ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効果的な向上戦略. 陸上競技研究, 107: 22-29.
- IV. Tanji F, Shirai Y, Tsuji T, Shimazu W, Nabekura Y. (2017) Relation between 1,500-m running performance and running economy during high-intensity running in well-trained distance runners. The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine. 6: 41-48.

略語の説明

$\dot{V}O_{2\max}$ (maximal oxygen uptake)

最大酸素摂取量: 体内に 1 分間あたりに摂取できる酸素の最大値

RE (running economy)

走の経済性: 任意の走速度におけるエネルギー消費量

RE_{bLT} (running economy at intensity below the lactate threshold)

LT を超えない強度における走の経済性

RE_{aLT} (running economy at intensity above the lactate threshold)

LT を超える強度における走の経済性

LT (lactate threshold)

乳酸性代謝閾値: 血中に乳酸が蓄積され始める強度

$\dot{V}O_2$ (oxygen uptake)

酸素摂取量: 体内に 1 分間あたりに摂取した酸素量

bLa (blood lactate concentration)

血中乳酸濃度

Δ bLa (blood lactate accumulation)

血中乳酸蓄積量

RER (respiratory exchange ratio)

呼吸交換比: 酸素摂取量に対する二酸化炭素産生量の割合

$\dot{v}O_{2\max}$ (velocity of maximal oxygen uptake)

最大酸素摂取量が出現する走速度

vLT (velocity of lactate threshold)

乳酸性作業閾値

表のタイトル

Table IV-1. Mean (\pm SD) physical and physiological characteristics of endurance runners and recreational runners.	• • •	33
Table IV-2. Mean (\pm SD) time constant at each intensity running of endurance runners and recreational runners, and effect sizes (p value) of each time constant between endurance runners and recreational runners.	• • •	38
Table IV-3. Mean (\pm SD) slow component at each intensity running of endurance runners and recreational runners, and effect sizes (p value) of each slow component between endurance runners and recreational runners.	• • •	39
Table IV-4. Effect sizes (p value) of oxygen uptake between 3-min and 4-min values at each intensity running of endurance runners and recreational runners.	• • •	40
Table IV-5. Mean (\pm SD) blood lactate concentration at each intensity running of endurance runners and recreational runners and effect sizes (p value) of each blood lactate concentration between endurance runners and recreational runners.	• • •	42
Table V-1. Correlation coefficients for the relationships between 1,500-m velocity ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) and maximal oxygen uptake, the velocity at maximal oxygen uptake, the velocity at the lactate threshold, and lactate threshold intensity.	• • •	52
Table V-2. Oxygen uptake, respiratory exchange ratio, blood lactate concentration, %maximal oxygen uptake intensity, %lactate threshold intensity, changes during the final 1 min in running oxygen uptake, and running economy at		

below and above the lactate threshold intensity.	• • •	54
Table V-3. Correlation coefficients for the relationships between 1,500-m velocity		
and running economy at below and above the lactate threshold intensity.	• • •	54
Table V-4. Multiple regression analysis for 1,500-m velocity, with maximal oxygen		
uptake and running economy at below and above the lactate threshold intensity as the		
independent variables.	• • •	56
Table VI-1. The changes in physical variables over three years, and the changes ratio		
(%) of these variables.	• • •	67
Table VI-2. The changes in physiological variables and IAAF score over three years, and		
the changes ratio (%) of these variables.	• • •	69
Table VI-3. Correlation coefficients between the changes ratio of maximal oxygen uptake,		
lactate threshold, running economy at intensity below the lactate threshold or above		
the lactate threshold and IAAF score.	• • •	70
Table VII-1. The result of the subjects' major competitions over four years.	• • •	81
Table VII-2. The changes in the subjects' physical characteristics and physiological		
variables over four years.	• • •	83
Table VII-3. Correlation coefficients between intra-individual maximal oxygen uptake,		
lactate threshold and running economy at intensity below and above the lactate		
threshold.	• • •	84
Table VIII-1. Mean (\pm SD) value of the physiological variables and 5,000 m season best		
time and biomechanics variables, and <i>p</i> values (and effect size) between good group		

and poor group on each variables. . . . 98

図のタイトル

Figure IV-1. Oxygen uptake kinetics (mean \pm SD) during each 4-min submaximal running of endurance runners (open circles) and recreational runners (filled circles). . . . 38

Figure IV-2. The relationship between time constant and slow components of oxygen uptake at 70% (a), 80% (b) and 90% of maximal oxygen uptake intensity (c) in all subjects. . . . 41

Figure IV-3. The relationship between maximal oxygen uptake and time constant at 70% (a), 80% (b) and 90% of maximal oxygen uptake intensity (c) in all subjects. . . . 42

Figure V-1. The relationships between 1,500-m velocity and velocity of maximal oxygen uptake (open squares) and velocity of lactate threshold (filled squares). . . . 52

Figure V-2. The relationships between 1,500-m velocity and maximal oxygen uptake (open triangles) and lactate threshold intensity (filled triangles). . . . 53

Figure V-3. The relationships between 1,500-m velocity and running economy measured at two exercise intensities: below the lactate threshold (LT) ($90.0 \pm 3.7\%LT$; open circles) and above it ($109.6 \pm 34.2\%LT$; filled circles). . . . 55

Figure VI-1. The transition of the changes in maximal oxygen uptake (open circles, thick

line), lactate threshold (LT: cross markers, thin line), running economy at intensity below the LT (open squares, thick short broken line) or above the LT (filled circles, thick short broken line) and IAAF score (thin long broken line) over three years in all subjects. . . . 68

Figure VI-2. The relationships between the changes ratio of IAAF score and the changes ratio of (a) maximal oxygen uptake, (b) lactate threshold, (c) running economy at intensity below the lactate threshold and (d) running economy at intensity above the lactate threshold. . . . 71

Figure VI-3. The relationship between the changes ratio of maximal oxygen uptake and the changes ratio of running economy at intensity below the LT (a) and above the LT (b). . . . 71

Figure VI-4. The relationships between the physiological variables in first year and the changes ratio of each variables. . . . 73

Figure VI-5. The relationships between maximal oxygen uptake in first year and the changes ratio of running economy at intensity below the LT (a) and above the LT (b). . . . 73

Figure VII-1. The changes ratio of subjects' physiological variables over four years. . . . 84

Figure VII-2. The intra-individual relationship between maximal oxygen uptake and running economy at intensity below the lactate threshold. . . . 85

Figure VII-3. The intra-individual relationship between maximal oxygen uptake and

running economy at intensity above the lactate threshold.	• • •	86
Figure VIII-1. Definition of the coordinate system of the hip, knee and ankle joints (reproduced from Kariyama et al. 2013).	• • •	94
Figure VIII-2. Definition of the segment coordinate systems of the thigh, shank and foot and the joint coordinate systems of the center of the hip, knee and ankle (reproduced from Kariyama et al. 2013).	• • •	95
Figure VIII-3. The relationship between running economy at intensity above the lactate threshold (at $18.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) and the ankle dorisi/plantar flexion joint angle at toe on.	• • •	99
Figure VIII-4. The changes in the joint angle, joint angular velocity and joint torque at the ankle joint during support phase.	• • •	100
Figure VIII-5. The changes in the joint angle, joint angular velocity and joint torque at the knee joint during support phase.	• • •	101
Figure VIII-6. The changes in the joint angle, joint angular velocity and joint torque at the hip joint during support phase.	• • •	102
Figure VIII-7. The changes in the (a) vertical, (b) horizontal and (c) vertical ground reaction force during support phase.	• • •	103
Figure IX-1. The changes in maximal oxygen uptake and running economy during three years of subject K (a) and L (b).	• • •	112
Figure XI-2. The effective strategy to improve the running performance.	• • •	114

I. 緒言

古くから中長距離走パフォーマンスは、有酸素性エネルギー代謝の最大能力であり、体内でいかに多くの酸素を利用できるかを示す最大酸素摂取量 (maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_{2max}$) によって評価されてきた (Costill et al. 1973; Fay et al. 1989). しかしその後、専門的にトレーニングを行なっているランナーにおいては、優れた $\dot{V}O_{2max}$ を有していることは前提に過ぎず、有酸素性エネルギー代謝の最大下における能力であり、ある走速度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走の経済性 (running economy: RE) が優れているかどうかは走パフォーマンスにとって重要な生理学的変数であると指摘されるようになった (Conley & Krahenbuhl 1980; Morgan et al. 1989). 以上のことから、専門的にトレーニングを行なっているランナーにおける中長距離走パフォーマンスは $\dot{V}O_{2max}$ および RE によって推定できることが明らかにされている (Ingham et al. 2008).

RE は一般に乳酸性代謝閾値 (lactate threshold: LT) を超えない強度において走行する際の酸素摂取量 (oxygen uptake: $\dot{V}O_2$) によって評価される (Morgan et al. 1989). しかし、マラソンを除く中長距離種目、とりわけトラック競技種目は LT をはるかに超える強度においてレースが展開されており、例えば 1,500 m 走中は、 $\dot{V}O_2$ が $95\% \dot{V}O_{2max}$ まで到達すると言われている (Hanon et al. 2008). LT を超えない強度と LT を超える強度では走行中の代謝が異なるため (Brooks 2007), 後者の強度における RE の評価は、より実際の競技中の代謝を反映でき、走パフォーマンスとの関連が強くなると予想される.

しかしながら、LT を超える強度において RE は評価されておらず、その理由として以下の2つが挙げられる. 1つ目の理由は、LT を超える強度の運動中の代謝は LT を超えない強度のそれと異なり、エネルギー基質の利用割合は糖質酸化が高まり、加えて無酸素性エネ

ルギー代謝の貢献が増大し、 $\dot{V}O_2$ のみでは RE を正確に評価できないためである (Morgan et al. 1989). 2 つ目の理由は、LT を超える強度での運動中の $\dot{V}O_2$ は定常状態が認められず (Bransford & Howley 1977)、疲労困憊まで増大し続けるためである (Morgan et al. 1989). この現象は緩成分と呼ばれ (Poole 1994)、その出現によって走速度に対する RE を正確に評価することが難しくなる.

しかし近年、有酸素性能力に優れたランナーの $\dot{V}O_2$ は、LT を超える強度においても、運動開始後にすばやく定常状態に達し、またその後の緩成分も小さいことが指摘されてきた (Berger & Jones 2007). したがって、有酸素性能力に優れた中長距離ランナーでは、LT を超える強度においても $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められ、RE を評価できると推測される.

また 1 つ目の問題点に関連して di Prampero and Ferretti (1999) は、無酸素性エネルギー代謝量 (酸素借) と運動による血中乳酸蓄積量 (blood lactate accumulation: ΔbLa) の間の関係を明らかにし、 ΔbLa によって無酸素性エネルギー代謝量を算出できるとした. そしてその評価方法は多くの研究によって無酸素性エネルギー代謝量を算出するために採用されている (Bertuzzi et al. 2015; di Prampero et al. 1993; Kyröläinen et al. 2001; Kyröläinen et al. 2003; Zagatto et al. 2011). 加えてエネルギー基質の利用割合は、呼吸交換比 (respiratory exchange ratio: RER) によって評価できるとされており (Lusk 1924)、近年再び Fletcher et al. (2009) によって有酸素性エネルギー代謝量を評価する際に $\dot{V}O_2$ に加えて RER を評価する重要性が指摘された. 以上のことから LT を超える強度における RE (RE at intensity above the LT: RE_{aLT}) は、その際の $\dot{V}O_2$, RER および ΔbLa を考慮することによってより正確に評価できると予想される.

走パフォーマンスは $\dot{V}O_{2max}$ および RE によって推定できることから、走パフォーマンス

スを向上するためには、それらの生理学的変数の向上が必要となる (Saunders et al. 2004). 競技レベルに優れたランナーはすでに優れた $\dot{V}O_{2\max}$ を有しているため、 $\dot{V}O_{2\max}$ の向上よりも RE の向上の方が容易であり (Saunders et al. 2010), また RE の向上が走パフォーマンスの向上に関連すると指摘されている (Jones 1998; 2006). 一方で、競技レベルの優劣に関わらず、あるランナーの集団における横断的な $\dot{V}O_{2\max}$ と RE には逆相関の関係が認められている (Fletcher et al. 2009; Hunter et al. 2005; Mooses et al. 2015). つまりこの関係は $\dot{V}O_{2\max}$ が優れているランナーほど RE が劣っていることを示す. この主要因として Hunter et al. (2005) は筋線維タイプの影響を示唆しており, type II 線維が type I 線維に比べて機械的効率に劣り、酸化能力に優れるという特徴を持つため, type II 線維を多く有しているランナーは $\dot{V}O_{2\max}$ に優れる一方, RE が低くなる傾向にあることを指摘している. さらに、筋線維タイプの割合は持久系トレーニングによって増減すると報告されている (Rusko 1992; Schantz & Henriksson 1983). したがって、筋線維タイプがこれらの生理学的変数の関係に影響している可能性を考慮すると、 $\dot{V}O_{2\max}$ と RE の縦断的な変化の関係においても逆相関となる可能性がある. この関係は、 $\dot{V}O_{2\max}$ と RE を持久系トレーニングによって同時期に向上することは困難であり、どちらかの変数が向上したとき、もう一方の変数は低下すると言える. 競技レベルに優れたランナーはすでに優れた $\dot{V}O_{2\max}$ を有していることから、 $\dot{V}O_{2\max}$ が低下しても RE の向上によって走パフォーマンスが向上する可能性がある. 実際、世界トップレベルの女子長距離ランナーは 5 年間のトレーニングに伴い 8% の $\dot{V}O_{2\max}$ の低下の一方 10% の RE の向上が認められ、その結果 3,000 m 走パフォーマンスが 8% 向上したと報告されている (Jones 1998). しかし生理学的変数および走パフォーマンスを縦断的に追跡した研究は、Jones (1998) の研究を含め、競技レベルに優れた

ランナーを対象とした事例報告が多く (Ingham et al. 2012; Jones 2006), 専門的にトレーニングを行なっているランナー共通の傾向であるのかはわからない. したがって, 走パフォーマンスが効果的に向上するトレーニング戦略を生理学的な視点から明らかにすることは選手およびコーチにとって意義がある.

一方でランニングフォームの改善は, RE の向上が認められるトレーニング手段の一つであり (Barnes & Kilding 2014; Moore 2016), 持久的トレーニングによって RE が向上する際の変化と異なり, 筋線維タイプ割合の変化が小さく, 運動に対する内的エネルギー需要量を軽減すると推測される. つまりランニングフォームの改善は $\dot{V}O_{2max}$ の低下を抑制しつつ RE が向上し, 結果として効果的に走パフォーマンスを向上させるトレーニング手段の一つとして期待できる. 特に LT を超える強度の走行では運動に対する内的エネルギー需要が増大するため (Ardigò et al. 1995), ランニングフォームの改善が RE_{aLT} の向上に有用なトレーニングとなる可能性がある. しかしこれまで, LT を超えない強度においては RE の個人差の 50%以上がランニングフォームによって説明できることが明らかにされているが (Williams & Cavanagh 1987), LT を超える強度においては RE が評価されてこなかったため, RE_{aLT} とランニングフォームの関係は明らかになっていない. したがって, ランニングフォームの改善が RE_{aLT} の向上に有用であり, 走パフォーマンスを向上させるトレーニング手段になり得るのか明らかにする必要がある.

以上のことから本研究の目的は, 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の走パフォーマンスと生理学的変数の関係を, 特に LT を超える強度における RE に着目して, 横断的および縦断的に明らかにし, 効果的に走パフォーマンスを向上させるトレーニング戦略についての示唆を得ることとした.

II. 文献研究

A. 中長距離走パフォーマンスに関連する生理学的変数

1. 最大酸素摂取量 (maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_{2\max}$)

$\dot{V}O_{2\max}$ は有酸素性エネルギー代謝の最大能力であり, いかに多くの酸素を利用できるかの能力を示し, 古くから走パフォーマンスとの密接な関係が明らかにされてきた (Costill et al. 1973; Fay et al. 1989; Nummela et al. 2006). 例えば, Costill et al. (1973) は競技歴 1-20 年のランナーを対象に $\dot{V}O_{2\max}$ と 10 マイル走タイムとの間に負の相関関係 ($r = -0.91$) が認められることを示し, Fay et al. (1989) は女性非アスリートランナーにおける $\dot{V}O_{2\max}$ と 5 km, 10 km および 16.09 km 走中の平均走速度との間に有意な正の相関関係 (それぞれ $r = 0.91, 0.92$ および 0.88) が認められることを示した. 一方で, 競技レベルに優れたランナーにおいて $\dot{V}O_{2\max}$ が走パフォーマンスと関連すると示した報告は非常に少なく (Ingham et al. 2008), 多くは関連を認めていない (Conley & Krahenbuhl 1980; Ferri et al. 2012; Lacour et al. 1990). 例えば, Conley and Krahenbuhl (1980) は, 競技レベルに優れたランナーの $\dot{V}O_{2\max}$ と 10 km 走タイムとの間に関連を認めておらず ($r = -0.12$), 同様に Ferri et al. (2012) も男性 1,500 m エリートランナーの $\dot{V}O_{2\max}$ と 1,500 m 走中の平均走速度との間に関連を認めていない ($r = 0.05$).

$\dot{V}O_{2\max}$ は運動中に動員される筋量, 筋の毛細血管密度, 1回拍出量, ヘモグロビン量, 筋への血液量, type II 線維割合などによって決定し (Jones 2006; Joyner & Coyle 2008), これらの要因を変化させることによって $\dot{V}O_{2\max}$ は向上する. トレーニングによる $\dot{V}O_{2\max}$ の変化について報告した研究は多く存在し, 専門的なトレーニングを行っていない者を対象に, 持久系トレーニングを実施させたとき, $\dot{V}O_{2\max}$ は 5-20 週間で向上し, またその

結果走パフォーマンスも向上することが示されている (Burgomaster et al. 2008; Carter et al. 1999; Priest & Hagan 1987; Tanaka et al. 1984; Ramsbottom et al. 1989). 例えば, Ramsbottom et al. (1989) は, 12 名の男性健常大学生を対象に, 週 3 回以上の持久系トレーニングを 5 週間実施させた結果, $\dot{V}O_2\text{max}$ が 10%程度向上し, 5 km 走タイムも有意に向上したことを示した. Priest and Hagan (1987) は, 12 名の男性大学生クロスカントリー選手を対象に, 週 4 回の持久系トレーニングを 7 週間実施させ, $\dot{V}O_2\text{max}$ が 10%程度向上し, 3.22 km 走および 10 km 走タイムが有意に向上したことを示した.

対照的に, 専門的なトレーニングを行なっているランナーを対象とした研究の多くは, 数年のトレーニングによって $\dot{V}O_2\text{max}$ が変化しなかった (Arrese et al. 2005; Jones 2006) または低下したものの (Jones 1998), 走パフォーマンスは向上したと報告している. 例えば Arresse et al. (2005) は, 競技レベルに優れた男女 33 名の 3 年間の $\dot{V}O_2\text{max}$ および走パフォーマンスを追跡し, $\dot{V}O_2\text{max}$ の変化なしに走パフォーマンスが向上したことを示した. その結果を受けて Arresse et al. (2005) は, 他の生理学的要因の改善が関与していることを示唆している. Jones (1998) は, 世界トップレベルの女子長距離ランナーの 5 年間の有酸素性能の変化を追跡し, $\dot{V}O_2\text{max}$ の 8%程度の低下および RE の 10%程度の向上を認め, その結果 3,000 m 走パフォーマンスが 8%向上したことを報告した. 唯一, Tota et al. (2015) の研究では, 平均 16.5 歳の専門的なトレーニングを行なっている男女ランナーを対象に縦断的な生理学的変数を追跡した結果, 追跡 1 年後に $\dot{V}O_2\text{max}$ が有意に向上した一方で RE が有意に低下し, 2 年後に $\dot{V}O_2\text{max}$ は維持されたまま RE が有意に向上したことを示している. この結果は, 専門的にトレーニングを行なっても, $\dot{V}O_2\text{max}$ が優れていなければ, トレーニングによって $\dot{V}O_2\text{max}$ が向上する可能性がある. しかし, 彼らの研究では走

パフォーマンスを評価しておらず、生理学的変数の結果、走パフォーマンスはどのように変化したのかわからない。

以上のような観点から、専門的にトレーニングを行なっているランナーは優れた $\dot{V}O_{2max}$ を有しているため、 $\dot{V}O_{2max}$ と走パフォーマンスとの関連が認められず、またトレーニングによる $\dot{V}O_{2max}$ のさらなる改善は容易でない (Saunders et al. 2010). 一方で、年齢の若いランナーであれば、トレーニングによってさらに $\dot{V}O_{2max}$ が向上し、十分な $\dot{V}O_{2max}$ の能力を有した後に続いて RE が向上する可能性がある。

2. 走の経済性 (running economy: RE)

RE は有酸素性エネルギー代謝の最大下能力で、いかに少ないエネルギーによって走行できるかを示し、ある速度において走行した際の $\dot{V}O_2$ の大小によって評価される (Anderson 1996). したがって、ある速度の走行における $\dot{V}O_2$ が少ないとき、RE は優れていると評価でき、RE の値 ($mLO_2 \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ など) の大小と RE の概念的な優劣が逆であることに注意が必要である。

専門的にトレーニングを行なっているランナーにとって RE が重要な能力であることは多くの研究によって指摘されており (Conley & Krahenbuhl 1980; 榎本ほか 2008; Ingham et al. 2008), 例えば Conley and Krahenbuhl (1980) は、競技レベルに優れた男性ランナーの RE ($mLO_2 \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) と 10 km 走タイムとの間に有意な正の相関関係 ($r = 0.83$) があることを示している. Ingham et al. (2008) は、800 m および 1,500 m 走を専門とする競技レベルに優れた女性アスリートにおいて RE ($mLO_2 \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$) と 800 m および 1,500 m 走行中の平均走速度との間に有意な負の相関関係があることを示している (そ

れぞれ $r = -0.67$ および -0.72). 榎本ほか (2008) は, 日本人ランナーとケニア人ランナーの生理学的変数を調査すると, $\dot{V}O_2\text{max}$ は同等である一方, RE はケニア人ランナーで非常に優れており, RE が走パフォーマンスを決定する重要な能力であることを指摘している. したがって, 競技レベルに優れたランナーにとって RE の向上は走パフォーマンスの向上に寄与すると予想される.

女子マラソン世界記録保持者の 12 年間の生理学的変数を追跡した Jones (2006) は, $\dot{V}O_2\text{max}$ の変化を認めなかったものの RE の顕著な向上を認め, その結果走パフォーマンスが向上したと報告している. Conley et al. (1981) は, 競技レベルに優れたランナーを対象に 18 週間のトレーニングを実施させ, $241 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 走行時の RE が 16%, $296 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 走行時の RE が 9% 向上したことを示した. また Svedenhag and Sjodin (1985) は, 競技レベルに優れた男性ランナーを対象に 1 月から 5 月の 5 か月間の専門的トレーニングによる生理学的変数の変化を明らかにし, その結果, 被験者の RE は向上し, 競技的状态に到達していたことを認めている. 一方で, 競技レベルの低いランナーでは数週間のトレーニングによって $\dot{V}O_2\text{max}$ および走パフォーマンスは向上したものの, RE は向上しなかったことが示されている (Costill et al. 1973; Lake & Cavanagh 1996). これらの結果から, $\dot{V}O_2\text{max}$ は比較的短期間で向上する一方 RE の向上には長期間を有すること, および競技レベルに優れたランナーを対象とした研究の多くはトレーニングによって RE の向上が認められていることから, RE の向上はすでに被験者が優れた $\dot{V}O_2\text{max}$ を有しているかどうかの影響することの 2 つの解釈ができる.

RE には生理学的要因, バイオメカニク的要因, 解剖学的要因, 環境的要因および心理学的要因が複雑に関与しているとされている (Anderson 1996; 山地 1997). またレジスタ

ンストレーニング、スプリントインターバルトレーニング、低酸素トレーニング、筋の柔軟性の向上などは RE を向上するトレーニング手段として挙げられているが (Barnes & Kilding 2014; Saunders et al. 2004), RE の個人差の 50%以上がバイオメカニクスの変数によって説明できることから (Williams & Cavanagh 1987), ランニングフォームの向上もそのトレーニング手段の一つであることが知られている (Moore 2016).

3. 乳酸性代謝閾値 (lactate threshold: LT)

運動強度が増大すると、グルコース分解が促進され、乳酸が産生される。産生された乳酸は type I 線維や心筋のミトコンドリアにおいて酸化されるが、乳酸の産生量が酸化量を上回ると血中に乳酸が蓄積され始める (Brooks 2007). この時の走速度は乳酸性作業閾値とされており (Faude et al. 2009), 走パフォーマンスと強く関連することが知られている (Roecker et al. 1998; Simoës et al. 2005; Stratton et al. 2009). LT は $\dot{V}O_{2max}$ (または $\dot{V}O_{2max}$ が出現する走速度) に対する乳酸性作業閾値における $\dot{V}O_2$ (または走速度) の比率によって算出される. Joyner (1991) は, 一般的な LT 強度の範囲を 75–85% ($\dot{V}O_{2max}$) としており, LT が 75%未満の場合や 85%を超える場合をそれぞれ一般に比べ劣っているまたは優れていると評価できる.

フル馬拉ソンやハーフ馬拉ソンの走パフォーマンスの推定に対して, $\dot{V}O_{2max}$, RE および LT によって大部分が説明できることが明らかにされている (di Prampero et al. 1986; Joyner 1991). しかし専門的にトレーニングを行なっているランナーにおいてこの LT とトラック種目 (800 m–10,000 m) における走パフォーマンスとの有意な関係を認めた研究は存在せず, また Ingham et al. (2008) も競技レベルの高いランナーにおける 800 m および

1,500 m 走パフォーマンスは $\dot{V}O_2\text{max}$ および RE の 2 要因によっておおよそ推定できるとし、LT はトラック種目の走パフォーマンスの推定にそれほど必要でないとしている。

以上のことから、専門的にトレーニングを行なっているランナーはおおよそ同程度の LT を有しており、トラック種目における走パフォーマンスを LT によって推定することは困難であると推測される。

4. $\dot{V}O_2\text{max}$ と RE の変数間の関係

ここまでの文献研究から、 $\dot{V}O_2\text{max}$ および RE はいずれも走パフォーマンスとの間に関連が認められる変数であることがわかった。すなわち $\dot{V}O_2\text{max}$ または RE が優れるほど走パフォーマンスは高くなり、競技レベルに優れたランナーは低いランナーに比べて両変数が優れている。しかし両変数の横断的關係について興味深い関係が示されている。専門的なトレーニングを行なっていない集団 (Hunter et al. 2005), 競技レベルの低いランナー (Fletcher et al. 2009) および競技レベルに優れたランナー (Mooses et al. 2015) において $\dot{V}O_2\text{max}$ ($\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) と RE ($\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) には有意な正の相関関係が認められ、つまり $\dot{V}O_2\text{max}$ が優れているランナーほど RE は低いことになる。この関係には筋線維タイプが影響していると示唆されており (Hunter et al. 2005), type I 線維に比べて機械的効率に劣り、酸化能力に優れている type II 線維を多く有しているランナーは $\dot{V}O_2\text{max}$ が優れる一方、RE が低くなる傾向にある。したがって、競技レベルの優れたランナーであっても優れた $\dot{V}O_2\text{max}$ を有し同時に優れた RE を持つことは厳密には困難であると言える。

$\dot{V}O_2\text{max}$ と RE の横断的關係に影響を及ぼしている主な要因とされる筋線維タイプの割合は、持久系トレーニングによって type II 線維の減少や、type I 線維の増大が認められて

おり (Rusko 1992; Schantz & Henriksson 1983), すなわち $\dot{V}O_{2\max}$ と RE の縦断的關係も同様に逆相関である可能性がある。もしこの關係が認められるとき、持久系トレーニングによって $\dot{V}O_{2\max}$ が向上したとき、一方で RE は低下することとなる。

競技レベルの低いランナーは、7 か月の持久系トレーニングによって $\dot{V}O_{2\max}$ が有意に向上し、無酸素性作業閾値時の $\dot{V}O_2$ も有意に増大したことが報告されている (Tanaka et al. 1984)。同様に、Ramsbottom et al. (1989) は、5 週間の持久系トレーニングを実施させた競技レベルの低いランナーの $\dot{V}O_{2\max}$ が有意に向上し、血中乳酸濃度 $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 時の $\dot{V}O_2$ も有意に増大したことを報告している。これらの結果は競技レベルの低いランナーにおいて $\dot{V}O_{2\max}$ と RE の縦断的変化に逆相関の關係が認められる可能性を支持する。

同様に競技レベルに優れたランナーは、5 年間のトレーニングによって $\dot{V}O_{2\max}$ の 8% 程度の低下と RE の 10% 程度の向上が認められており (Jones 1998)、競技レベルに優れたランナーにおいても $\dot{V}O_{2\max}$ と RE の縦断的關係には逆關係が認められる可能性がある。しかし、競技レベルに優れたランナーを対象に数か年の $\dot{V}O_{2\max}$ と RE を追跡した研究は少なく、またその多くは一人のランナー（個人内）を対象とした研究である (Ingham et al. 2012; Jones 1998; 2006)。したがって、これらの結果が専門的にトレーニングを行なっているランナーに共通して認められる変化であるかはわからない。また、 $\dot{V}O_{2\max}$ と RE の縦断的变化に逆相関が認められるのであれば、同時期に両変数の能力を向上することは困難であり、どちらかの変数が向上したとき一方の変数は低下するため、その結果どのように走パフォーマンスが変化するのは明らかになっていない。

B. 伝統的な RE の評価方法

RE は一般に LT を超えない強度において走行する際の $\dot{V}O_2$ によって評価される (Morgan et al. 1989). これは $\dot{V}O_2$ -走速度の直線回帰が 90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度を超えると成立せず (Daniels & Daniels 1992), 指数関数的に $\dot{V}O_2$ が増大することや (Nagle et al. 1970), 呼吸交換比 (RER) が 1.00 を超えると $\dot{V}O_2$ の定常状態を認められなくなることから (Bransford & Howley 1997), LT を超える強度における走行では RE は評価できないと指摘されているためである. また LT を超える強度における走行ではエネルギー基質の利用割合が変化し, 加えて無酸素性エネルギー代謝が動員されるために, $\dot{V}O_2$ のみでは RE を正確に評価できないとの指摘もある (Kaneko 1990; Morgan et al. 1989). 以上のような要因のために RE は LT を超えない強度において評価されているが, この条件に基づきながらも, これまでに研究者は様々な方法を用いて RE を評価してきた.

走速度に対する $\dot{V}O_2$ が定常状態に達するまでにある程度の時間を要すると考えられており, RE の評価のために古くは 6-10 分間の走行時間が用いられてきた (Conley & Krahenbuhl 1980; Morgan et al. 1995; Tartaruga et al. 2012). 一方, Whipp and Wasserman (1972) は LT を超えない強度, つまり低強度から中強度においては走行開始 3 分以内に $\dot{V}O_2$ が定常状態となることを示している. また近年, 有酸素性能力に優れているアスリートの $\dot{V}O_2$ は運動開始後すぐに定常状態が認められると指摘され (Berger & Jones 2007), 3 分間 (Kyröläinen et al. 2001; 2003; Russell et al. 2002) や 4 分間 (Pyne & Saunders 2012) の走行によって RE を評価することが採用または推奨されている.

1. $\dot{V}O_2$ [$\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$]

この評価方法は、1 分間当たりの $\dot{V}O_2$ によって評価する方法であり、RE を評価する最もポピュラーな方法として採用されている (Conley & Krahenbuhl 1980; Grant et al. 1997; Morgan et al. 1989; Nummela et al. 2006; Williams & Cavanagh 1987). ある速度の走行における $\dot{V}O_2$ をそのまま RE として用いることができるため、簡易に評価できる。また、Conley and Krahenbuhl (1980) は競技レベルの高いランナーにおいて $268 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 走行時の平均的な RE は $50.3 \text{ mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であるとしており、その後も Conley は競技レベルの高いランナーを対象とした縦断的な研究において $268 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 走行時の $\dot{V}O_2$ を用いて RE を評価している (Conley et al. 1984). 同一の走速度において RE ($\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) を評価する方法は、運動強度 (%LT や $\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ など) を決定するための事前の実験試技なしに実施できることから、被験者の負担を軽減できる。また、同一のランナーの RE を縦断的に評価する場合には同一の走速度を用いることで経済性の変化を比較しやすい利点がある。

2. $\dot{V}O_2$ [$\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$]

この評価方法は、同一の距離を走行するために要した $\dot{V}O_2$ によって評価する方法であり、その利点として、走速度が異なっても RE を比較できることにある。そのため運動強度 (%LT や $\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ など) で統一する場合に用いられ (Billat et al. 2003; Bragada et al. 2010; Bransford & Howley 1977; Tota et al. 2015), 競技レベルが異なるランナーにおいても比較できるとされている。また、複数の LT を超えない強度を走行させ、その際の最も優れた RE を採用する研究もある (Ingham et al. 2008). その他にも Margaria et al. (1963)

は $\dot{V}O_2$ をエネルギーコストに換算したとき ($20.9 \text{ kJ} \cdot \text{O}_2\text{L}^{-1}$, $1 \text{ J} = 0.239 \text{ kcal}$), そのエネルギーコストはおおよそ $1 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ となるとしている. したがって RE が $1 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 未満の場合, RE が優れていると評価できる. $\dot{V}O_2$ を熱量 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$) に換算し (Kyröläinen et al. 2001; Kyröläinen et al. 2003), さらにこの値を 1 m 当たりで算出している研究も存在する (di Prampero et al. 1993).

3. $\dot{V}O_2$ [$\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-0.66} \cdot \text{min}^{-1}$ or $\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-0.75} \cdot \text{min}^{-1}$]

通常, 体重の増大に比例して多くのエネルギーを必要とするため, $\dot{V}O_2$ は体重 1 乗当たりの値によって算出されている (i.e. $\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$). しかし, Léger and Mercier (1984) は $\dot{V}O_2$ を体重の 1 乗当たりで表すと体重の軽い者の方が重い者よりも $\dot{V}O_2$ が高くなることを指摘した. また Fredericks (1987) は, ある速度の走行に要する代謝は体重の 0.66 乗に比例するため, 体重の 1 乗当たりで表すと体重の重い者の RE を過大評価することを示した. これらの報告を受けて, 研究対象者の体重が群間などで大きく異なっている場合には体重の 0.66 乗または 0.75 乗に補正して RE を評価する方法を用いることが多い (Helgerud et al. 2010; Nummela et al. 2007; Morgan et al. 1995; Weston et al. 2000). 例えば Helgerud et al. (2010) は, 肥満者と一般的な体重の被験者の RE を比較するときこの評価方法を用いている. また, Weston et al. (2000) は, 白人ランナーと黒人ランナーの RE を比較する際に, 体重の 0.66 乗に補正して評価している. したがって, 年齢 (i.e. 子供と大人) (Daniels et al. 1978; Krahenbul & Williams 1992), 性別 (Helgerud et al. 2010; Nummela et al. 2007) や民族 (Bosch et al. 1990; Weston et al. 2000) の違いによって被験者間で体重が大きく異なる場合は, 体重当たりではなく, 体重の 0.66 乗または 0.75 乗当

たりによって RE を算出する方がより妥当に評価できると示唆されている (Bergh et al. 1991).

4. $\dot{V}O_2$ [$\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$]

動物は安静時にも酸素を消費しており、厳密に言えば、ある走速度における $\dot{V}O_2$ は安静時（つまり生命を維持するため）に必要な $\dot{V}O_2$ も含まれた値である。したがってこの評価方法は、運動に対する実質的なエネルギー消費量を算出するために、ある走速度の走行における $\dot{V}O_2$ と安静時の $\dot{V}O_2$ の差から算出する方法であり、特に低強度の走行において RE を過小評価しないように用いられている (Lacour et al. 1990; Tam et al. 2012). 安静時の $\dot{V}O_2$ は立位安静時の $\dot{V}O_2$ を測定するか (Tam et al. 2012), 固定値として $5.0 \text{ mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (Lacour et al. 1990) を用いることが多いようである。

以上のように伝統的な RE の評価には様々な方法が存在するが、基本的には LT を超えない強度において RE は評価されている。しかし、マラソンを除く中長距離走種目の実際の競技場面では LT を超える強度においてレースが展開されており、LT を超える強度における RE (RE_{aLT}) を評価することはより重要な知見を得られると推測される。

Hanon et al. (2008) は 1,500 m 走中の $\dot{V}O_2$ を測定し、 $95\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ 程度まで到達することを明らかにした。また 1,500 m 走に対する有酸素性エネルギー代謝と無酸素性エネルギー代謝のエネルギー貢献はそれぞれ 80% および 20% であると報告されている (Hill 1999). これらの報告はトラック種目の走行中のエネルギー代謝には無酸素性エネルギー代謝も貢献していることを示している。LT を超える強度において RE を評価するためには、その強

度においても競技レベルの高いランナーの $\dot{V}O_2$ が定常状態となるのかを明らかにする必要がある。また、LT を超える強度を走行する際のエネルギー代謝は LT を超えない強度と異なり、より糖質酸化の代謝が増大した無酸素性エネルギー代謝が動員される。したがって、 $\dot{V}O_2$ 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することで RE_{aLT} をより正確に評価することができると予想される。

C. LT を超える強度走行時の RE を評価するための条件

1. $\dot{V}O_2$ の定常状態

LT を超えない強度の場合、 $\dot{V}O_2$ は 3-5 分程度で定常状態が認められる (Barstow et al. 1993; Whipp & Wasserman 1972)。一方 LT を超える強度の場合、一定の運動強度で走行していても $\dot{V}O_2$ は定常状態が認められることなく、疲労困憊に至るまで増大し続け (Morgan et al. 1989)、この現象は緩成分として広く知られている (Poole 1994)。緩成分は、活動筋の熱蓄積 (Whipp & Wasserman 1986)、乳酸およびその副産物である水素イオン (H^+) の蓄積 (Poole et al. 1988)、筋内のクレアチンリン酸の利用割合の増大 (Rossiter et al. 2002)、興奮収縮連関による筋細胞内のカルシウムイオン (Ca^{2+}) 濃度の増大 (Krustrup et al. 2008) などの影響によって出現すると言われている。その中でも最も大きい原因は type II 線維の動員の増大によるものと考えられている (Jones et al. 2011)。Type II 線維は type I 線維に比べて機械的効率が悪く、より優れた酸化能力を持ち (Hunter et al. 2005)、走行の疲労に伴ってその動員を増大させる (Jones et al. 2011)。そのため type II 線維を多く動員する LT を超える強度における走行では、エネルギー需要量は増大し続け、緩成分が認められる。

しかし有酸素性能力の優れたランナーは、その能力の劣ったランナーと比べて、運動時の主働筋量 (Vøllestad et al. 1984) やミトコンドリア濃度 (Grassi et al. 1996), type II 線維よりも速い $\dot{V}O_2$ の立ち上がり能力を持つ type I 線維 (Crow & Kushmerick 1982) をそれぞれ多く持ち (Ricoy et al. 1998), $\dot{V}O_2$ 応答に違いがみられる (Koppo et al. 2004). また, 有酸素性トレーニングを実施すると, 筋中の type II 線維割合は減少し (Schantz et al. 1982; Schantz et al. 1983), 経済性が高まることが示されている (Morgan et al. 1995). 以上を踏まえると, 本来 type II 線維の動員が増大する LT 以上の強度の走行においても有酸素性能力に優れているランナーは type I 線維をより動員し, その結果緩成分が認められない可能性がある. さらに有酸素性能力の変数と緩成分の大きさとの間には有意な負の相関関係が報告されており (Berger et al. 2006; Koppo et al. 2004), この見解について支持している.

実際, 有酸素性能力の高いアスリートは, 一般人や有酸素性能力の低いランナーと比較して, 走行開始後すばやく $\dot{V}O_2$ を立ち上げ (Draper & Wood 2005), LT 以上の強度における走行においても走行開始直後のより早い段階で $\dot{V}O_2$ は定常状態となることが確認されている (Berger & Jones 2007). また同時に Berger and Jones (2007) は, 最高酸素摂取量 (peak oxygen uptake: $\dot{V}O_{2peak}$) と緩成分の大きさとの間に有意な負の相関関係を認めており, 有酸素性能力の高いアスリートほど緩成分が認められないことを示している. これらの結果は, 競技レベルの高いランナーは LT を超える強度においても緩成分が小さく, $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められると推測される.

加えて Burnley et al. (2006) は, 健康な男性 9 名を対象に, 6 分間の高強度 (LT 強度に LT 強度と $\dot{V}O_{2max}$ 強度の差の 70%を加算した強度) の走行の後に複数の休息時間 (10 分,

20 分, 30 分, 45 分および 60 分) を設け, 繰り返し同じ強度において 6 分間の運動を実施させ, そのときの $\dot{V}O_2$ 動態を調査した. その結果, 休息時間が短くなるにつれて運動開始後の $\dot{V}O_2$ の立ち上がりが速くまたその時の緩成分は小さくなることを示した. この結果は, 実験を実施する際のプロトコルにおいて, 直前の運動との間 (休息) の時間を短くすれば, 運動中の $\dot{V}O_2$ の立ち上がりが速くなり, 運動開始後すぐに $\dot{V}O_2$ は定常状態に達することを示唆している. 一般に競技レベルの高いランナーの生理学的変数を測定するときの実験プロトコルは, 走行と走行の間に 1-2 分程度の休息を挟む間欠的漸増負荷プロトコルが推奨されているが (Pyne & Saunders 2012), 運動中の $\dot{V}O_2$ の定常状態または緩成分の観点からみてもこの実験プロトコルは測定に適していると推測される.

以上のことから, 専門的にトレーニングを行なっているランナーは, LT を超える強度においても $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められ, また, 走行の直前に運動を行なっていることで定常状態に達するまでの時間が短くなると予想される. しかし, それらの調査を行なった研究は限られており, 本研究でも同様に LT を超える強度においても $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められるのかどうか検討が必要である.

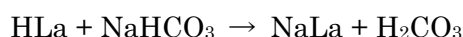
2. エネルギー基質の利用割合の評価

走行中に必要なエネルギー (adenosine triphosphate: ATP) はエネルギー基質 (脂肪やグリコーゲン) を酸化することによって産生し, 脂肪を利用する脂質酸化と炭水化物を利用する糖質酸化がある (Brooks 1997). 一般に運動強度が低くなるにつれて脂質酸化の割合が高まり, 反対に運動強度が高くなるにつれて糖質酸化の割合が高まる (Brooks 1997). それぞれの酸化割合が 100%であった場合, 酸素 1 L 当たりのエネルギー生成量 (エネルギ

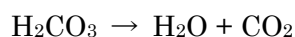
一等価) は脂質酸化で 4.69 kcal (19.6 kJ), 糖質酸化で 5.05 kcal (21.1 kJ) とされており (Lusk 1924), したがって同じ $\dot{V}O_2$ でもエネルギー基質の利用割合が異なると生成されるエネルギー量は異なると言える。そのため古くから RE を評価する際にエネルギー基質を評価する重要性は指摘されてきたが (Lusk 1924; Weir 1949), 現実的には考慮されていない例が多く Fletcher et al. (2009) によって再び強く指摘されるようになった。エネルギー基質は RER によって評価することが可能であり, 脂質酸化割合が 100% のとき RER は 0.707 となり, 糖質酸化割合が 100% のとき RER は 1.00 となる (Lusk 1924)。また, この結果に基づくと, RER が ± 0.01 変化すると, エネルギー等価はおおよそ $\pm 50 \text{ J} \cdot \text{O}_2\text{L}^{-1}$ ($0.012 \text{ kcal} \cdot \text{O}_2\text{L}^{-1}$) 変化することになり, $\dot{V}O_2$ のみで評価することや固定値のエネルギー等価を用いることは, RE の過小評価または過大評価をもたらすことになる。例えば di Prampero et al. (1993) は, 高強度走行中の RE を評価するときに, すべてのエネルギー等価を $20.9 \text{ kJ} \cdot \text{O}_2\text{L}^{-1}$ として算出した。この $20.9 \text{ kJ} \cdot \text{O}_2\text{L}^{-1}$ は RER が 0.96 の時のエネルギー等価に相当するため, RER が 0.96 よりも小さいとき RE を過小評価, 大きいとき RE を過大評価する。

以上のように糖質酸化割合が 100% の時の RER は 1.00 となり, これ以上の代謝反応を示すことはないが, 実際は RER が 1.00 を超えることも確認される。これは $\dot{V}O_2$ に対して二酸化炭素産出量 (carbon dioxide excretion: $\dot{V}CO_2$) が過剰に増加することによって生じるが, エネルギー代謝には関係のない反応であると指摘されている (Holloszy 2014)。Holloszy はその原因を 2 つの理由によって説明しており, 1 つ目は過換気によって CO_2 の過剰な排出が生じるためとしている。高強度の運動において, 換気量はエネルギー需要量 ($\dot{V}O_2$) 以上に増大する。つまり $\dot{V}O_2$ はそれほど増大しないものの, 血中の CO_2 濃度を安静値に戻す反応が起こるために多くの CO_2 が肺から呼気へと排出され, その結果 RER が

1.00 を超える。2 つ目は、酸塩基平衡を維持するために血中の炭酸水素ナトリウム (NaHCO_3) が無酸素性エネルギー代謝によって産生された乳酸を緩衝または中和する反応の過程で生成される CO_2 が排出されるためとしている。この乳酸を緩衝する反応式は以下のように説明でき、



さらに、この過程で生成された H_2CO_3 が肺の毛細血管において以下の反応式のように H_2O と CO_2 に分解される。



そしてその後、肺から呼気へと排出されることによって、 RER が 1.00 を超える。したがって RER が 1.00 を超えても、走行に対する代謝反応ではないため、エネルギー等価を $21.1 \text{ kJ} \cdot \text{O}_2\text{L}^{-1}$ として算出するべきである。

3. 無酸素性エネルギー代謝量の評価

無酸素性エネルギー代謝が動員されると血中に乳酸が蓄積されはじめる。そのため、血中乳酸濃度は無酸素性エネルギー代謝の変数の一つとして用いられる (Vandewalle et al. 1987)。また、無酸素性エネルギー代謝量を評価する変数として、総エネルギー需要量と総酸素摂取量の差分から算出する酸素借 (accumulated oxygen deficit: AOD) がある

(Medbø et al. 1988). di Prampero and Ferretti (1999) はこの AOD と血中乳酸蓄積量 (ΔbLa) の関係から血中乳酸蓄積 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 当たり $3.0 \text{ mL O}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ の AOD があることを明らかにした. 30 秒全力ペダリングにおける無酸素性エネルギー代謝量を検討した Bertuzzi et al. (2015) や Zagatto et al. (2011) はこの評価方法を用いて算出している. 同様に, RE_{aLT} を評価した di Prampero et al. (1993) や Kyröläinen et al. (2001; 2003) の研究も, この係数と血中乳酸蓄積量を用いて無酸素性エネルギー代謝量を算出していることから, この評価方法は確立されている. しかし, Kyröläinen et al. (2001; 2003) は RE_{aLT} を評価しているにも関わらず, 走パフォーマンスとの関係を明らかにしておらず, RE_{aLT} を評価する重要性までは指摘できていない.

D. RE とバイオメカニクスの変数の関係を検討した研究

前述の通り, RE の個人差の 50% 以上はバイオメカニクスの変数によって説明できることが明らかにされている (Williams & Cavanagh 1987). したがって, バイオメカニクスの変数を改善することは RE の向上に有用である. とりわけランニングフォームの改善は RE が向上するトレーニング手段であると指摘されている (Moore 2016). 走行に必要なエネルギーは, 身体を進行方向へ移動するため必要な外的なエネルギーと身体を進行方向へ移動するために直接必要でない内的なエネルギー (身体重心の上下動, 四肢の動作など) に分けることができ, 走速度の増大に伴って後者の増大率は大きくなる (Ardigo' et al. 1995). ランニングフォームの改善は運動に対する内的エネルギー需要量を軽減することができ, RE_{aLT} の向上に特に重要なトレーニング手段であると予想される. 加えて持久系トレーニングと比べ筋線維タイプ割合の変化が小さく, $\dot{V}O_{2\max}$ が変化することなく RE_{aLT} が向上する可

能性がある。しかし、これまで RE_{aLT} とバイオメカニクスの変数の関係を検討した研究は少なく、さらに必ずしも正確に RE_{aLT} を評価できているとは言えない。

走行中には脚が地面に接している局面（支持期）と脚が地面から離れている局面（回復期）の 2 つの局面が存在する。Grabowski and Kram (2008) は、支持期において体重を支えるためのエネルギーが走行に対するコストの大半を占めると指摘している。つまり、支持期における経済性に優れたランニングフォームの獲得はより RE を向上させると予想される。したがって本研究では、支持期のランニングフォームに着目することとする。

1. LT を超えない強度

LT を超えない強度における RE (RE at intensity below the LT: RE_{bLT}) とバイオメカニクスの変数を明らかにした研究は多く存在し、その変数はストライド・ピッチ (Cavanagh & Williams 1982; 佐竹と池上 1985) や関節角度・関節角速度 (Anderson 1996; Kyröläinen et al. 2001; Williams & Cavanagh 1987) と言ったキネマティクスから接地時間 (Anderson 1996; Chapman et al. 2012; Kram 2000; di Michele & Merni 2014; Williams & Cavanagh 1987), 接地パターン (Perl et al. 2012), 地面反力 (Heise & Martin 2001; Williams & Cavanagh 1987), 筋活動 (Kyröläinen et al. 2001; Nummela et al. 2006; Paavolainen et al. 1999) と言ったキネティクスまで多岐にわたる。Williams & Cavanagh (1987) は、レクリエーションレベルのランナーを対象に LT を超えない強度におけるランニングフォームおよび地面反力を調査し、接地時の下腿の後傾が大きい、離地時の足関節底屈角度が小さい、支持局面の膝関節屈曲角度が大きい、および鉛直方法の地面反力の波形が小さいことが RE に優れているとしている。Moore (2016) は、このようなバイオメカ

ニクスの変数はトレーニングによって改善することが可能であり、その結果 RE が向上すると指摘している。例えば, Moore et al. (2012) は初心者ランナーを対象に、離地時の膝関節の伸展の抑制および足関節の底屈の抑制を改善させ、RE が向上したことを示している。また de Ruiter et al. (2013) は、初心者ランナーを対象に自由ピッチから 3%増大（ストライドを 3%減少）させたとき、RE が向上したことを明らかにしている。

2. LT を超える強度

関節角度、関節角速度、地面反力、筋活動などの変数は運動強度の増大に伴って変化すると指摘されており (Chapman et al. 2012; Kyröläinen et al. 2001), LT を超えない強度と LT を超える強度ではそれらの変数が異なる。したがって、LT を超える強度における経済性に優れたバイオメカニクスの変数は LT を超えない強度におけるそれとは異なると予想される。それを明らかにするためにはエネルギー基質や無酸素性エネルギー代謝などを繊細に評価した RE とバイオメカニクスの変数との関係を明らかにする必要がある。しかし一般に LT を超える強度におけるバイオメカニクスの変数を明らかにしている研究は、RE を評価せず、走パフォーマンスに優れているランナーのバイオメカニクスの変数を基準に検討されており (Enomoto et al. 2008; Hasegawa et al. 2007; Hayes & Caplan 2012), RE とバイオメカニクスの変数を明らかにした研究は Kyröläinen et al. (2001) を除いて見当たらない。Kyröläinen et al. (2001) は、 $18.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 走行時の RE と筋電活動の関係を明らかにしているが、ランニングフォームなどのその他のバイオメカニクスの変数との間には有意な相関関係を認めなかった。一方、Hayes and Caplan (2012) はレース中の接地時間と走パフォーマンスの有意な負の相関関係を明らかにしているが、接地時間が短いことが経済性

に優れているかどうかはわからない。

榎本ほか (2008) は、日本人ランナーとケニア人ランナーの $22.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 時のランニングフォームを比較し、 RE_{aLT} に優れているケニア人ランナーは日本人ランナーに比べて接地直後に股関節伸展トルクを大きく発揮していることを明らかにしている。同様に、Santos-Concejero et al. (2013) は競技レベルの高いランナーにおいて、 RE_{aLT} と回復脚の振り戻し時間およびストライド角度との間に有意な負の相関関係、接地時間との間に有意な正の相関関係を認めた。しかし、これらの研究はそれぞれ LT を超える強度にも関わらず $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ のみで RE_{aLT} を算出しており、正しく RE_{aLT} を評価できているとは言えない。

以上のように RE_{aLT} とランニングフォームの関係はこれまで十分に明らかにできていないとは言えず、それは RE_{aLT} の評価方法に対する知見が不足していたことが原因である。ランニングフォームの改善が RE_{aLT} の向上にとっても有用なトレーニング手段であることを主張するためには、 RE_{aLT} を正確に評価し、バイオメカニクスの変数との関係を明らかにする必要がある。

III. 研究課題の設定

A. 問題点

文献研究によって、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ける走パフォーマンスは $\dot{V}O_{2max}$ よりも RE と関連することがわかった。しかし、トラック種目の競技場面で展開されている強度 (LT を超える強度) は、一般に RE が評価される強度 (LT を超えない強度) よりもはるかに速い。つまり、これまで評価されてきた RE は実際の競技走行中の代謝を反映できていない。そのため、LT を超える強度における RE (RE_{aLT}) の方が、競技場面での代謝をより反映した経済性を評価することにつながり、より走パフォーマンスの検討に重要な知見をもたらすと予想される。

走パフォーマンスの向上には生理学的変数の向上が必要となるが、 $\dot{V}O_{2max}$ と RE の縦断的变化には逆相関の関係が認められる可能性があり、持久的トレーニングによって一方の変数が向上するともう一方の変数は低下すると推測される。しかし、専門的にトレーニングを行なっている複数の中長距離ランナーを対象に数年の走パフォーマンスと生理学的変数の縦断的な変化の関係を検討した研究はこれまでにない。また、ランニングフォームの改善は運動に対する内的エネルギー需要量を減少させ、持久的トレーニングと比べ、 $\dot{V}O_{2max}$ の低下なしに RE を向上させると推測される。しかし、LT を超える強度において RE とバイオメカニクスの変数の関係を明らかにした研究には評価方法の限界があり、ランニングフォームの改善が RE_{aLT} の向上に有用なトレーニング手段であるかはわからない。これらの結果推測される走パフォーマンスが効果的に向上するトレーニング戦略を明らかにすることはコーチ、選手および研究者にとって意義がある。

以上のことから、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、

RE_{aLT} と走パフォーマンスの関係を明らかにし、その変化を縦断的に検討することは効果的なトレーニング戦略を提案する上で重要となる。これらを解決するためには以下の点について明らかにする必要がある。

B. 解決すべき課題

1. 中長距離ランナーの LT を超える強度における酸素摂取動態

LT を超える強度において RE が評価できない理由の一つに、 $\dot{V}O_2$ が定常状態とならないことが挙げられる。しかし有酸素性能力の高いアスリートは、一般人や有酸素性能力の低いランナーと比較して、走行開始後すばやく $\dot{V}O_2$ を立ち上げ、LT を超える強度においても $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められている。しかしそれらを示した報告は少なく、本研究においても同様に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 LT を超える強度における $\dot{V}O_2$ が定常状態となることを明らかにすることが、 RE_{aLT} を評価する前提と言える。

2. LT を超える強度における RE と走パフォーマンスの関係

RE_{aLT} を評価するためには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量を評価することが欠かせない。したがって RE_{aLT} を、有酸素性エネルギー代謝量だけでなく無酸素性エネルギー代謝量を加味して算出し評価することは、実際の競技中のエネルギー代謝を反映しており、より走パフォーマンスと関連が認められると予想され、その関係を検討する価値は高い。そこで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、 RE_{aLT} を $\dot{V}O_2$ 、呼吸交換比および血中乳酸蓄積量によって算出し、走パフォーマンスとの関係を明らかにする必要がある。その関係が LT を超えない強度における RE (RE_{bLT})

よりも強ければ, RE_{aLT} が走パフォーマンスにとって重要な生理学的変数であると言える。

3. 走パフォーマンスと生理学的変数の縦断的關係

競技レベルに関わらず, 同程度の競技パフォーマンスを有する集団において $\dot{V}O_{2max}$ と RE ($\dot{V}O_2$) の横断的關係には正の相関關係が認められる。同様に $\dot{V}O_{2max}$ と RE の縦断的な変化の關係においても正の相関關係が認められる可能性があり, もしこの關係が認められるのであれば, $\dot{V}O_{2max}$ が向上したとき RE は低下する關係となる。しかし, これまでにこの關係について明らかにされておらず, またそのとき走パフォーマンスはどのように変化するのは検討されていない。そこで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走パフォーマンスと RE_{aLT} を含む走パフォーマンスに関連する生理学的変数を追跡することによって, 走パフォーマンスが向上する過程を調査でき, 生理学的変数との縦断的な変化の關係を明らかにすることができる。

4. LT を超える強度における RE とバイオメカニクスの変数の關係

RE の個人差の 50% 以上はバイオメカニクスの変数によって説明でき, ランニングフォームの改善は RE の向上が認められるトレーニング手段の一つであると知られている。ランニングフォームの改善は持久系トレーニングと比べ筋線維割合の変化が小さく $\dot{V}O_{2max}$ の変化なしに, 内的なエネルギー需要量を減少させることによって RE を向上させ, 効果的に走パフォーマンスが向上する可能性がある。特に LT を超える強度の走行は内的エネルギー需要量が増大するため, RE_{aLT} の向上に有用なトレーニング手段であると推測される。しかしこれまでに RE_{aLT} とバイオメカニクスの変数の關係を明らかにした研究はなく, ランニ

ングフォームの改善が RE_{aLT} の向上に有用なトレーニング手段であるかはわからない。

C. 研究課題の設定

以上のことから本研究は、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において、LT を超える強度における RE と走パフォーマンスの関係を横断的および縦断的に明らかにし、また効果的に走パフォーマンスが向上するトレーニング戦略についての示唆を得るために、それぞれ以下の研究課題を設定した。

研究課題 1.

研究課題 1 では、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と同能力に劣るレクリエーションレベルのランナーを対象に、LT を超えない強度、LT 強度および LT を超える強度走行中の $\dot{V}O_2$ 動態を明らかにすること目的とした。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は有酸素性エネルギー代謝能力に優れているため、LT を超える強度においても $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められると仮説を立てて本研究課題を実施した。

研究課題 2.

研究課題 2 では、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、1,500 m 走パフォーマンスと生理学的変数の関係を明らかにすることを目的とした。生理学的変数は $\dot{V}O_{2max}$, LT, LT を超えない強度における RE および LT を超える強度における RE とし、LT を超える強度における RE が最も走パフォーマンスと強い関連を持つと仮説を立てて本研究課題を実施した。

研究課題 3.

研究課題 3 では、走パフォーマンスと LT を超える強度における RE を含む生理学的変数の数か年にわたる変化を追跡することによって、走パフォーマンスと生理学的変数の縦断的な変化の関係を明らかにすることを目的に、以下の中長距離ランナーを対象に研究を実施した。

研究課題 3-1.

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は日々のトレーニングによって走パフォーマンスを向上させており、その際に生理学的変数も変化すると予想される。そこで研究課題 3-1 では、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 3 年間の走パフォーマンスと LT を超える強度における RE を含む生理学的変数を追跡した。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おいて、 $\dot{V}O_{2max}$ と LT を超える強度における RE の縦断的な変化の関係には逆相関が認められ、LT を超える強度における RE の向上に対して $\dot{V}O_{2max}$ の低下が小さいとき走パフォーマンスはより向上すると仮説を立てて本研究課題を実施した。

研究課題 3-2.

優れた競技レベルを有する中長距離ランナーはトレーニングによって向上させるべき生理学的変数が中程度以上の競技レベルを有する中長距離ランナーのそれと同様であるかはわからない。そこで研究課題 3-2 では、競技レベルに優れた中長距離ランナー 1 名を対象に 4 年間の走パフォーマンスと生理学的変数を追跡した。競技レベルに優れた中長距離ランナ

一においても同様に、 $\dot{V}O_{2\max}$ と LT を超える強度における RE の縦断的な変化の関係には逆相関が認められ、 $\dot{V}O_{2\max}$ と LT を超える強度における RE の両変数の定期的な向上によって走パフォーマンスが向上すると仮説を立てて本研究課題を実施した。

研究課題 4.

研究課題 4 では、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 を超える強度における RE とバイオメカニクスの変数の関係を明らかにすることを目的とし、 $\dot{V}O_{2\max}$ を低下させずに RE が向上する一つの可能性を提案する。LT を超える強度の走行は内的エネルギー需要量が増大するため、バイオメカニクスの変数は LT を超える強度における RE の個人差の 50%を超える説明率を示すと仮説を立てて本研究課題を実施した。

IV. 中長距離ランナーの LT を超える強度における酸素摂取動態 (研究課題 1)

A. 目的

LT を超える強度における $\dot{V}O_2$ は、定常状態にならず、増大し続けることが知られている (Morgan et al. 1989). しかし、有酸素性能力の高いアスリートは、非アスリートランナーや有酸素性能力の低いランナーと比較して、走行開始後すばやく $\dot{V}O_2$ を立ち上げ (Draper & Wood 2005), LT を超える強度においても $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められることが報告されている (Berger & Jones 2007). 有酸素性能力の優れたランナーは、その能力の劣ったランナーと比べて、運動時の主働筋量 (Vøllestad et al. 1984) やミトコンドリア濃度 (Grassi et al. 1996), type II 線維よりも速い $\dot{V}O_2$ の立ち上がり能力を持つ type I 線維 (Crow & Kushmerick 1982) をそれぞれ多く持つことや (Ricoy et al. 1998), 本来 type II 線維の動員が増大する LT 以上の強度の走行においても type I 線維をより動員するために、 $\dot{V}O_2$ が定常になると考えられている (Koppo et al. 2004). これらの報告は、中長距離ランナーにおいても同様に、LT を超える強度において $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められる可能性を示唆しているが、それらの知見は非常に少ない.

そこで本研究課題では、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と同能力に劣っているレクリエーションレベルのランナーを対象に、70%, 80% および 90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度において 4 分間の走行を実施させたときの $\dot{V}O_2$ 動態を明らかにすることを目的とした. 本研究課題は、有酸素性エネルギー代謝能力に優れている中長距離ランナーは LT を超える強度 (90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度) においても $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められると仮説を立てて実施した.

B. 方法

1. 被験者

本研究課題の被験者は、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 (endurance runners: 以下 END 群) 10 名 (年齢: 20.1 ± 0.7 歳, 身長: 170.6 ± 4.3 cm, 体重: 59.1 ± 3.2 kg) と週に 1 回程度の運動を行なっているレクリエーションレベルのランナー (recreational runners: 以下 RR 群) 9 名 (年齢: 24.8 ± 3.0 歳, 身長: 173.6 ± 3.5 cm, 体重: 68.2 ± 3.5 kg) であった (Table IV-1). END 群の専門競技種目のシーズン最高記録は、国際陸上競技連盟が発行する IAAF Score (Spiriev 2014) にて得点化すると、 943.1 ± 45.3 であった。実験を開始するにあたり、すべての被験者に本研究課題の目的、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、本研究課題は国立大学法人筑波大学大学院人間総合科学研究科倫理委員会の承認を得て行なわれた (標題番号: 体 27-27)。また、被験者には実験に先立って、トレッドミル上での走行練習を十分に行わせ、実験中に普段通りの走行ができるように熟練させた。

Table IV-1. Mean (\pm SD) physical and physiological characteristics of endurance runners and recreational runners.

	END	RR	Effect size (<i>p</i> value)
Age (yr)	20.1 \pm 0.7	24.8 \pm 3.0	2.12 (0.00*)
Height (cm)	170.6 \pm 4.3	173.6 \pm 3.5	0.74 (0.12)
Body weight (kg)	59.1 \pm 3.2	68.2 \pm 6.1	1.84 (0.01*)
$\dot{V}O_{2\max}$ (mL \cdot kg ⁻¹ \cdot min ⁻¹)	66.8 \pm 5.9	53.9 \pm 3.7	2.62 (0.00*)
v $\dot{V}O_{2\max}$ (km \cdot h ⁻¹)	19.2 \pm 0.7	15.0 \pm 1.2	4.13 (0.00*)
vLT (km \cdot h ⁻¹)	15.4 \pm 1.1	11.5 \pm 1.5	2.99 (0.00*)
LT (%)	80.0 \pm 4.4	76.6 \pm 8.0	0.52 (0.27)

*: $p < 0.05$

2. 実験デザイン

本研究課題は、被験者を実験室内の傾斜 1%に設定されたトレッドミル (ORK-7000, 大竹ルート工業, 岩手) 上を走行させることで環境条件を整えた。室温および湿度を 23-26°C および 40-60%にそれぞれ設定し、常に換気を行なうことによって新鮮な空気を保った。すべての実験は 15-19 時の間に実施した。

被験者は 2 つのテストを実施し、テスト間は 2-3 日あけた。1 つ目のテストは、被験者の $\dot{V}O_{2\max}$, LT およびそれらの走速度 (velocity of $\dot{V}O_{2\max}$: v $\dot{V}O_{2\max}$ および velocity of LT: vLT) を明らかにするために、多段階漸増負荷テストを実施した。多段階漸増負荷テストは最初の走速度を 12.6 km \cdot h⁻¹ (END 群) または 7.8 km \cdot h⁻¹ (RR 群) とし、3 分間の走行を 1 ステージごとに 1.2 km \cdot h⁻¹ 漸増させ、各ステージの間に血中乳酸の採取およびトレッドミルの速度調整のために 2 分の休息をとり、5-7 ステージ実施させた。ステージ走終了は、1)

呼吸交換比 (RER) が 1.00 以上, 2) 主観的運動強度 (rate of perceived exertion: RPE) が 17 以上, 3) 血中乳酸濃度 (blood lactate concentration: bLa) が $4.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上のうち, いずれか 2 つを満たしている場合とした. ステージ走終了後, 5 分間立位安静にさせ, その後疲労困憊にいたるまで 1 分ごとに $0.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 走速度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) 年齢から推定される最大心拍数 ($220 - \text{年齢}$) に達している, 3) 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).

2 つ目のテストは, 被験者の LT を超えない強度および LT 以上の強度における 3 分目および 4 分目の呼気ガス応答を明らかにするために, ウォーミングアップとして $6.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ での 4 分間の走行後, テスト 1 の結果に基づいて算出された 65%, 70%, 75%, 80%, 85% および $90\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ 強度においてそれぞれ 4 分間の走行を実施した. 各ステージ間は血中乳酸の採取およびトレッドミルの速度調整のために 2 分の休息をとらせた. なおそれぞれのテストでは, 走行開始時間の 3 秒前に安全バーにつかまり身体を保持しながら速度の調整されたトレッドミルに飛び乗り, 開始時間に安全バーから手を離す方法によって走行を開始させた.

$\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ 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された (Iwayama et al. 2015; 白井ほか 2014). 呼気ガス分析器は実験前後に校正ガス (大気相当: O_2 20.90%, CO_2 0.03%, N_2 Balance および呼気相当: O_2 15.00%, CO_2 5.00%, 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が行なわれた. bLa は, 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) によって分析された。心拍数はハートレートモニタ (RCX5, Polar Electro, Finland) によって連続的に測定し、RPE は運動終了直後に被験者から問診した。

3. 算出項目および算出方法

多段階漸増負荷テストにおいて連続する 1 分間の $\dot{V}O_2$ の最高値を $\dot{V}O_{2max}$ として採用した。なお、ステージ走における $\dot{V}O_2$ がこの値を超えることはなかった。多段階漸増負荷テストにおける各走速度における $\dot{V}O_2$ によって、 $\dot{V}O_2$ -速度回帰直線を求め、 $\dot{V}O_{2max}$ を外挿することで $v\dot{V}O_{2max}$ を算出した。多段階漸増負荷テストにおいて走行したステージの各走速度に対する bLa を分析対象に、走速度-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を vLT とし (Lundberg et al. 1986), Lactate analysis software (Lactate-E ver.2) によって算出した (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 (Newell et al. 2007)。その後、LT は $v\dot{V}O_{2max}$ に対する vLT の強度として算出された。

実際に走行した 65%, 70%, 75%, 80%, 85% および 90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度のうち、80% $\dot{V}O_{2max}$ 強度が被験者のおおよそ LT 強度であったため (Table IV-1), そこから $\pm 10\% \dot{V}O_{2max}$ (つまり 70% および 90% $\dot{V}O_{2max}$) 強度をそれぞれ、LT を超えない強度および LT を超える強度とし、70%, 80% および 90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度における $\dot{V}O_2$ 動態を分析対象とした。 $\dot{V}O_2$ の 3 分目 (2'01-3'00) と 4 分目 (3'01-4'00) の平均値の差分を緩成分として算出した (Bickham et al. 2004)。したがって、値が正のとき 4 分目の $\dot{V}O_2$ が 3 分目よりも高く、緩成

分が認められたことになる.

各運動強度における $\dot{V}O_2$ の立ち上がり速度は, $\dot{V}O_2$ を1秒間隔で補間した後,直前に運動を実施させた際の $\dot{V}O_2$ 動態を検討した Burnley et al. (2006) の方法を用いて算出した. この方法は運動開始後 20 秒までの $\dot{V}O_2$ データは分析対象からは取り除き, 20 秒以降 2 分までの $\dot{V}O_2$ データに対して, 以下に示す指数関数を用いて近似した.

$$\dot{V}O_2(t) = \dot{V}O_2(b) + A[1 - e^{-(t-TD)/\tau}]$$

$\dot{V}O_2(t)$ は, 任意時間 t における $\dot{V}O_2$, $\dot{V}O_2(b)$ は運動開始前 30 秒の $\dot{V}O_2$ 平均値, A は振幅値, TD は遅れ時間, τ は時定数を表している. ただし, Burnley et al. (2006) の方法では, $\dot{V}O_2(b)$ は運動開始前 60 秒の $\dot{V}O_2$ 平均値としているが, 本研究で 60 秒の $\dot{V}O_2$ 平均は直前の運動の影響を受けていたため, 30 秒の $\dot{V}O_2$ 平均値を採用した.

4. 統計分析

結果はすべて平均値 \pm 標準偏差にて示した. 各運動強度における END 群と RR 群の緩成分および両群における 3 分目と 4 分目の $\dot{V}O_2$ を比較するため, それぞれ効果量 (effect size) を Cohen (1988) の方法を用いて算出し, Lipsey (1990) のスケールによって解釈した. したがって, 効果量 d が 0.2 未満の場合はその差がほとんどなし, 0.2 以上 0.5 未満の場合はその差が小程度, 0.5 以上 0.8 未満の場合はその差が中程度, そして 0.8 以上の場合は差の差が大きいと判断した. 加えて, 1 分間の $\dot{V}O_2$ の変化が 100 mL O_2 を超えると $\dot{V}O_2$ の緩成分が認められたと判断した (Fletcher et al. 2009). 各運動強度における END 群と RR 群

の緩成分, 両群における 3 分目と 4 分目の $\dot{V}O_2$ の比較に, SPSS Statistic 22 (IBM 社, Chicago, IL) を用いて, 対応のある t 検定を行なった. 各運動強度における時定数と緩成分との間の関係を Pearson の積率相関係数を用いて分析した. 統計的有意水準は $p < 0.05$ とした.

C. 結果

被験者の $\dot{V}O_{2max}$, $v\dot{V}O_{2max}$, LT および vLT は END 群でそれぞれ $66.8 \pm 5.9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, $19.2 \pm 0.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $80.0 \pm 4.4\%$ および $15.4 \pm 1.1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ であり, RR 群でそれぞれ $53.9 \pm 3.7 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, $15.0 \pm 1.2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $76.6 \pm 8.0\%$ および $11.5 \pm 1.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ であった (Table IV-1). したがって, 両群に共通して $80\% \dot{V}O_{2max}$ 強度がおおよそ LT 強度であり, $70\% \dot{V}O_{2max}$ 強度は LT を超えない強度, そして $90\% \dot{V}O_{2max}$ 強度は LT を超える強度であったと言える.

各運動強度における $\dot{V}O_2$ の 4 分間の動態を Figure IV-1 に表し, 時定数の結果を Table IV-2 に示した. 70% , 80% および $90\% \dot{V}O_{2max}$ 強度における時定数を両群で比較したときの効果量 d (および p -value) はそれぞれ 0.91 (0.07), 0.74 (0.12) および 1.96 (< 0.01) であり, END 群の $\dot{V}O_2$ の立ち上がりは RR 群に比べて速く, とりわけ運動強度が高くなるにともないこの差は大きくなることが認められた.

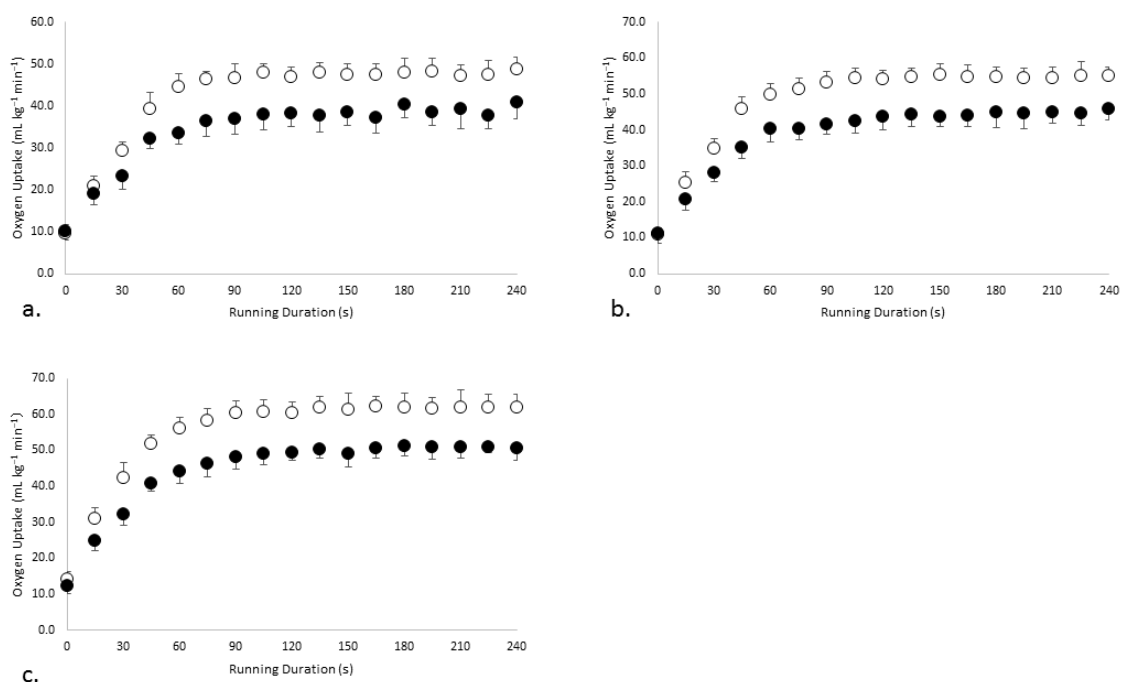


Figure IV-1. Oxygen uptake kinetics (mean \pm SD) during each 4-min submaximal running of endurance runners (open circles) and recreational runners (filled circles).
Notes; a: 70% $\dot{V}O_{2\text{max}}$, b: 80% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ and c: 90% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ intensities running.

Table IV-2. Mean (\pm SD) time constant at each intensity running of endurance runners and recreational runners, and effect sizes (p value) of each time constant between endurance runners and recreational runners.

% $\dot{V}O_{2\text{max}}$	Time constant (s)		
	END	RR	Effect size (p value)
70	29.9 \pm 4.6	34.9 \pm 5.7	0.91 (0.07)
80	27.8 \pm 5.6	31.3 \pm 3.7	0.74 (0.12)
90	23.8 \pm 4.5	31.0 \pm 2.4	1.96 (0.00*)

*: $p < 0.05$

70%, 80%および 90% $\dot{V}O_{2\max}$ 強度の緩成分は END 群でそれぞれ 10.0 ± 55.7 , -4.7 ± 38.4 , および $8.4 \pm 50.9 \text{ mL}O_2 \cdot \text{min}^{-1}$ であり, RR 群で 39.6 ± 48.6 , 54.0 ± 76.9 および $39.5 \pm 50.8 \text{ mL}O_2 \cdot \text{min}^{-1}$ であった (Table IV-3). $100 \text{ mL}O_2 \cdot \text{min}^{-1}$ を超える緩成分を示した END 群はすべての強度において 0 名であった一方, RR 群は 70%, 80%および 90% $\dot{V}O_{2\max}$ 強度でそれぞれ 1 名, 2 名および 1 名に認められた. END 群と RR 群の緩成分を比較すると効果量 d (および p -value) は, 70%, 80%および 90% $\dot{V}O_{2\max}$ 強度でそれぞれ 0.57 (0.23), 0.97 (0.06) および 0.61 (0.20) と有意ではないが, 中程度以上の差が認められた. RR 群の緩成分は, 有意な差ではないが, END 群の緩成分に比べて大きく, その差は 70%および 90% $\dot{V}O_{2\max}$ 強度において中程度, 80% $\dot{V}O_{2\max}$ 強度において大きな差であった.

Table IV-3. Mean (\pm SD) slow component at each intensity running of endurance runners and recreational runners, and effect sizes (p value) of each slow component between endurance runners and recreational runners.

% $\dot{V}O_{2\max}$	Slow component ($\text{mL}O_2 \cdot \text{min}^{-1}$)		
	END	RR	Effect size (p value)
70	10.0 ± 55.7	39.6 ± 48.6	0.57 (0.23)
80	-4.7 ± 38.4	54.0 ± 76.9	0.97 (0.06)
90	8.4 ± 50.9	39.5 ± 50.8	0.61 (0.20)

END 群の 3 分目と 4 分目の $\dot{V}O_2$ を比較すると、それぞれの運動強度における効果量 d (および p value) はそれぞれ 0.08 (0.58), 0.03 (0.70) および 0.04 (0.64) であった。したがって、すべての運動強度において緩成分は認められなかった (Table IV-4)。同様に RR 群の 3 分目と 4 分目の $\dot{V}O_2$ を比較すると、効果量 d (および p value) はそれぞれ 0.18 (0.03), 0.25 (0.08) および 0.26 (0.04) であった。したがって、RR 群は 70% $\dot{V}O_{2max}$ 強度において、効果量はほとんど認められなかったものの、3 分目から 4 分目にかけて $\dot{V}O_2$ の有意な増大が認められた。80% $\dot{V}O_{2max}$ 強度においては有意な $\dot{V}O_2$ の増大ではないものの、緩成分の効果量が小程度認められ、90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度においては緩成分の効果量が小程度認められ、有意な $\dot{V}O_2$ の増大が認められた。

Table IV-4. Effect sizes (p value) of oxygen uptake between 3-min and 4-min values at each intensity running of endurance runners and recreational runners.

$\% \dot{V}O_{2max}$	END	RR
70	0.08 (0.58)	0.18 (0.03*)
80	0.03 (0.70)	0.25 (0.08)
90	0.04 (0.64)	0.26 (0.04*)

*: $p < 0.05$

時定数と緩成分の間の相関係数 (および p value) は 70%, 80% および 90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度でそれぞれ 0.02 (0.94), 0.07 (0.77) および 0.27 (0.27) であり、すべての運動強度において有意な相関関係は認められなかった (Figure IV-2)。70%, 80% および 90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度の

時定数と $\dot{V}O_{2\max}$ の間の相関係数 (および p value) はそれぞれ -0.29 (0.22), -0.23 (0.33) および -0.70 (<0.01) であり, $90\%\dot{V}O_{2\max}$ 強度においてのみ有意な負の相関関係が認められた (Figure IV-3). 70% , 80% および $90\%\dot{V}O_{2\max}$ 強度の緩成分と $\dot{V}O_{2\max}$ の間の相関係数 (および p value) はそれぞれ -0.26 (0.28), -0.38 (0.11) および -0.21 (0.40) であり, すべての運動強度において有意な相関関係は認められなかった. それぞれの運動強度における bLa を Table IV-5 に示した. すべての強度において END 群が RR 群よりも有意ではないものの低い bLa の値を示した.

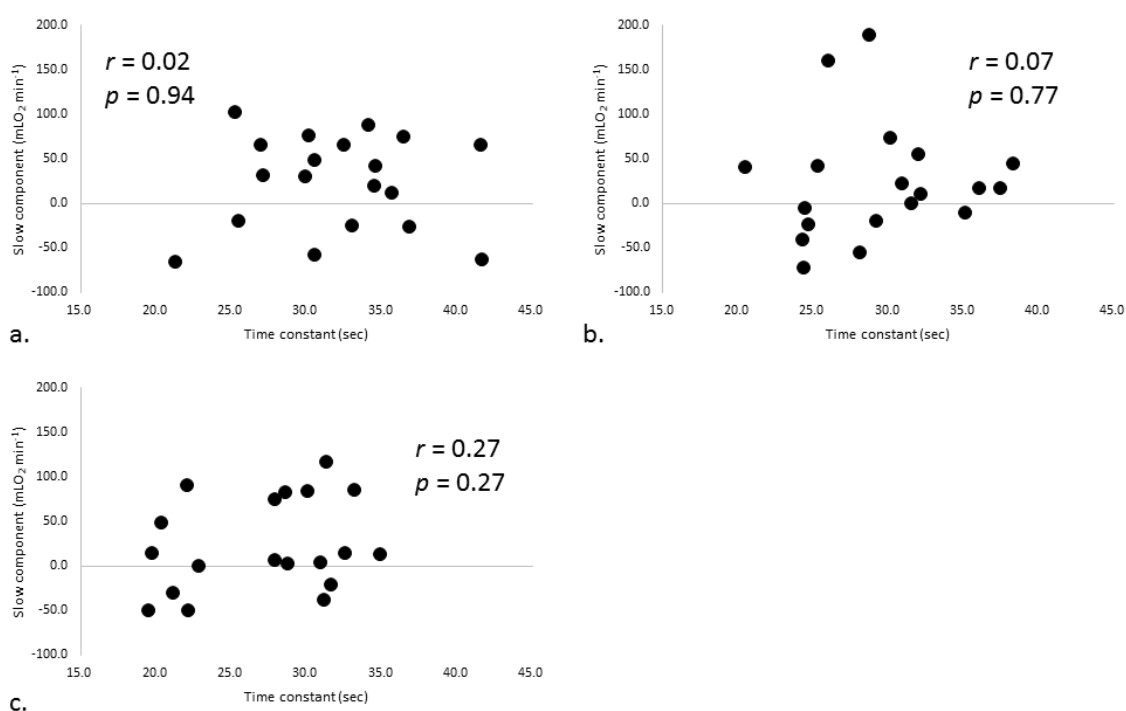


Figure IV-2. The relationship between time constant and slow components of oxygen uptake at 70% (a), 80% (b) and 90% of maximal oxygen uptake intensity (c) in all subjects.

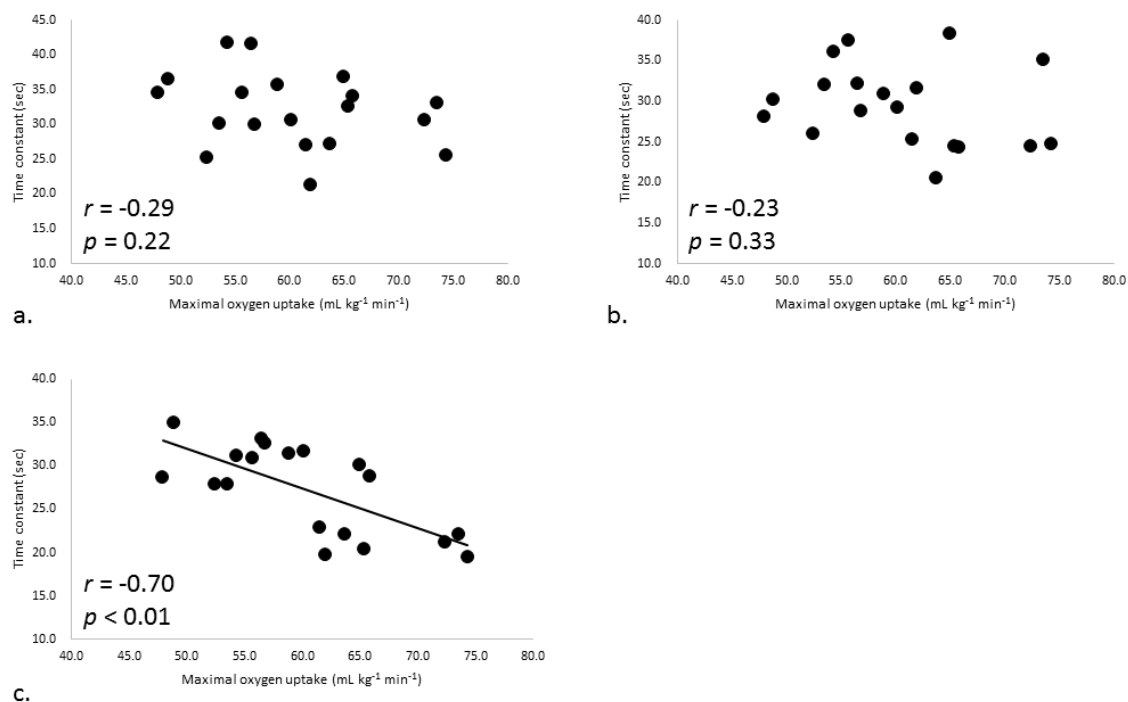


Figure IV-3. The relationship between maximal oxygen uptake and time constant at 70% (a), 80% (b) and 90% of maximal oxygen uptake intensity (c) in all subjects.

Table IV-5. Mean (\pm SD) blood lactate concentration at each intensity running of endurance runners and recreational runners, and effect sizes (p value) of each blood lactate concentration between endurance runners and recreational runners.

%VO ₂ max	Blood lactate concentration (mmol·L ⁻¹)		
	END	RR	Effect size (p value)
70	1.6 \pm 0.6	2.1 \pm 0.5	0.98 (0.05)
80	2.6 \pm 0.7	3.3 \pm 0.7	0.91 (0.06)
90	4.9 \pm 1.1	5.3 \pm 1.0	0.37 (0.44)

D. 考察

1. $\dot{V}O_{2\max}$ の優劣と緩成分

古くから LT 以上の強度において $\dot{V}O_2$ は定常状態が認められず、疲労困憊に至るまで増大するとされ、この現象は緩成分と呼ばれている (Poole 1994). この主な原因は type II 線維の影響であるとされており、type I 線維に比べて酸化能力に優れ、機械的効率の悪い type II 線維 (Hunter et al. 2005) が LT を超える強度においてより動員されるため、緩成分が認められると考えられてきた (Jones et al. 2011). また Bickham et al. (2004) は、有酸素性能の優れたアスリート ($\dot{V}O_{2\max}$: $59.3 \pm 3.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) においても、3 分目と 4 分目の $\dot{V}O_2$ を比較したとき、LT 以上の強度において 4 分目の $\dot{V}O_2$ が有意に高い値となり、緩成分が出現することを示している. 本研究課題の結果、RR 群 ($\dot{V}O_{2\max}$: $53.9 \pm 3.7 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) の 3 分目と 4 分目の $\dot{V}O_2$ を比較すると、LT を超える強度である $90\% \dot{V}O_{2\max}$ のみでなく、LT を超えない強度である $70\% \dot{V}O_{2\max}$ においても緩成分が認められた. また $80\% \dot{V}O_{2\max}$ においても中程度の効果量が認められ、有意ではないが緩成分が認められたと言える (Table IV-4). 一方 END 群 ($\dot{V}O_{2\max}$: $66.8 \pm 5.9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) の 3 分目と 4 分目の $\dot{V}O_2$ を比較すると、LT を超えない強度だけでなく、LT 以上の強度である 80% および $90\% \dot{V}O_{2\max}$ 強度においても効果量は 0.10 未満であり、緩成分は認められなかった (Table IV-4). さらに、 $\dot{V}O_2$ が定常状態であり緩成分が認められないと判定する基準として Fletcher et al. (2009) は、1 分間の $\dot{V}O_2$ の変動が $100 \text{ mL} O_2 \text{ min}^{-1}$ 未満のときとしている. その評価方法に基づくと、本研究課題の END 群はそれぞれの運動強度においてすべての被験者の $\dot{V}O_2$ の変動が $100 \text{ mL} O_2 \cdot \text{min}^{-1}$ 未満であった. したがって END 群の $\dot{V}O_2$ は LT を超える強度においても 3 分間ですでに定常状態に達しており、その結果、緩成分が

認められなかったと推察される。一方, RR 群は 70%, 80%および 90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度においてそれぞれ 1 名, 2 名および 1 名が $100 \text{ mL}O_2 \cdot \text{min}^{-1}$ を超えており, 必ずしも定常状態に達していなかった。この先行研究 (Bickham et al. 2004) と本研究課題の結果の相違は, 被験者の有酸素性能力の違いが影響していると考えられる。本研究課題の被験者 (END 群) の $\dot{V}O_{2max}$ は Bickham et al. (2004) の被験者よりも 10%以上優れていた。

2. $\dot{V}O_{2max}$ と $\dot{V}O_2$ の立ち上がり速度

有酸素性能力に優れたランナーは, その能力に劣ったランナーと比べて, 運動時の主働筋量 (Vøllestad et al. 1984) やミトコンドリア濃度 (Grassi et al. 1996), type II 線維よりも速い $\dot{V}O_2$ の立ち上がり能力を持つ type I 線維 (Crow & Kushmerick 1982) をそれぞれ多く持ち (Ricoy et al. 1998), $\dot{V}O_2$ 応答に違いがみられる (Koppo et al. 2004)。また, 有酸素性トレーニングを実施すると, 筋中の type II 線維割合は減少し (Schantz et al. 1982; 1983), 経済性が高まる (Morgan et al. 1995) ことが示されている。実際, 持久系トレーニング実施者と非実施者 (Koppo et al. 2004; Krstrup et al. 2008) や持久系アスリートと瞬発系アスリート (Berger & Jones 2007; Draper & Wood 2005) の $\dot{V}O_2$ 応答を比較した研究では前者の緩成分が小さいことを示している。また, 有酸素性能力に優れたランナーはその能力に劣っているランナーと比べて, 運動開始後の $\dot{V}O_2$ の立ち上がりは速く (Draper & Wood 2005), 緩成分と有酸素性能力の変数との間には有意な負の相関関係が報告されている (Berger & Jones 2007; Berger et al. 2006; Koppo et al. 2004)。例えば Berger and Jones (2007) は, 有酸素性能力の優れた持久系アスリート ($\dot{V}O_{2peak}$: $60.2 \pm 4.6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) の 84% $\dot{V}O_{2peak}$ 強度と, その能力の劣った瞬発系アスリート ($\dot{V}O_{2peak}$: $47.1 \pm$

4.0 mL \cdot kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$) の 87% $\dot{V}O_{2peak}$ 強度での運動における $\dot{V}O_2$ 応答を比較した。その結果、 $\dot{V}O_2$ の立ち上がりは持久系アスリートで速く、 $\dot{V}O_{2peak}$ と時定数および緩成分との間に有意な負の相関関係が認められたことを示している。本研究課題の結果でも、 $\dot{V}O_{2max}$ と 90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度における時定数の間に有意な負の関係が認められた。つまり、LT を超える強度においては $\dot{V}O_{2max}$ が優れたランナーほど $\dot{V}O_2$ の立ち上がり速度が速いと言える。一方で $\dot{V}O_{2max}$ と緩成分および時定数と緩成分の間に有意な相関関係が認められず、単に $\dot{V}O_{2max}$ または $\dot{V}O_2$ の立ち上がり速度のみが直接緩成分に関連するとは言えない結果となった。しかし群間で比較すると、END 群は RR 群よりも $\dot{V}O_{2max}$ が優れ、 $\dot{V}O_2$ の立ち上がり速度が速く、緩成分は中程度以上に小さかった。

3. 実験プロトコルと緩成分

従来、LT を超えない強度においても、ある速度の走行に対して $\dot{V}O_2$ が定常状態に達するまでにある程度の時間を要すると考えられており、その評価には 6-10 分間の走行が用いられていた (Conley & Krahenbuhl 1980; Morgan et al. 1995; Tartaruga et al. 2012)。しかし近年、有酸素性能力の高いアスリートは運動開始後短時間で $\dot{V}O_2$ が定常状態に達することが指摘されはじめ、4 分間 (Lacour et al. 1990; Pyne & Saunders 2012; Tam et al. 2012) または 3 分間 (Jones 1998; Kyröläinen et al. 2001; 2003; Russell et al. 2002) の走行による評価の実施や推奨がされている。本研究課題の結果、有酸素性エネルギー代謝に優れた中長距離ランナーは、LT を超えない強度だけでなく LT を超える強度においても 3 分間の走行で $\dot{V}O_2$ が定常状態に達し、またその後の緩成分は認められなかった。 $\dot{V}O_2$ をより短時間の走行によって評価できれば、被験者や実験実施者の負担を軽減するためにも意義がある。

したがって、よくトレーニングされた持久系ランナーを対象にある速度に対する $\dot{V}O_2$ を評価する際、LT を超える強度の走行においても 3 分間の走行によって RE の評価が可能であることが推察された。

運動開始後短時間で $\dot{V}O_2$ の定常状態に達するためには $\dot{V}O_2$ の立ち上がりが速いことが重要となる。有酸素性能力に優れたアスリートを対象に 4 分間の走行を行わせ、LT を超える強度において緩成分を認めた Bickham et al. (2004) の研究は、ステージ間を少なくとも 20 分以上の完全休息によって実施している。一方で、本研究課題では 2 分間の休息によって間欠的に漸増負荷走行を実施した。Burnley et al. (2006) は、直前の運動に続く運動開始の時間が短ければ、その運動における $\dot{V}O_2$ の立ち上がりは速くなり、また緩成分も小さくなることを示している。したがって、休息時間を短く間欠的に運動を実施させるプロトコルは、運動開始後の $\dot{V}O_2$ の立ち上がり速度を高め、より素早く $\dot{V}O_2$ を定常状態に到達させると考えられる。

E. 小活

本研究課題は、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と同能力に劣っているレクリエーションレベルのランナーを対象に、70%、80%および 90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度において 4 分間の走行を実施させたときの $\dot{V}O_2$ 動態を明らかにした。その結果、レクリエーションレベルのランナーは LT を超える強度だけでなく LT を超えない強度においても $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められず、緩成分が認められた。一方、有酸素性能力の優れた中長距離ランナーは LT を超えない強度だけでなく、LT を超える強度においても $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められ、緩成分は認められなかった。

V. LT を超える強度における RE と走パフォーマンスの関係 (研究課題 2)

A. 目的

競技レベルに優れたランナーの走パフォーマンスに最も関連する生理学的変数は RE であり (Conley & Krahenbuhl 1980), 一般に LT を超えない強度の走行に対する $\dot{V}O_2$ によって評価される (Morgan et al. 1989). しかし, 実際の競技場面では LT をはるかに超える強度においてレースが展開されており, LT を超える強度の走行における RE の方がより走パフォーマンスの検討に重要な知見をもたらすと予想される. これまで LT を超える強度において RE を評価できない理由として, $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められないこと (Bransford & Howley 1997) および評価方法が複雑となること (Kaneko 1990; Morgan et al. 1989) が指摘されていた. しかし研究課題 1 において, 有酸素性エネルギー代謝能力に優れた中長距離ランナーは LT を超える強度においても $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められることが明らかとなった. また, 無酸素性エネルギー代謝量を血中乳酸蓄積量 (ΔbLa) によって算出する方法が提案されている (di Prampero & Ferretti 1999). 加えて呼吸交換比 (RER) によってエネルギー基質を評価すれば (Fletcher et al. 2009), LT を超える強度における RE (RE_{aLT}) をより正確に評価できると予想される.

そこで本研究課題では, 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 (90%LT) における RE および LT を超える強度 (110%LT) における RE を含む生理学的変数と 1,500 m 走パフォーマンスの関係を明らかにすることを目的とした. 本研究は, RE_{aLT} が, LT を超えない強度における RE (RE_{bLT}) や $\dot{V}O_{2max}$, LT よりも 1,500 m 走パフォーマンスに関連すると仮説を立てて実施した.

B. 方法

1. 被験者

本研究課題の被験者は、中長距離走種目を専門にトレーニングを行なっているランナー 34 名（年齢 20.0 ± 1.4 歳，身長 172.2 ± 4.5 cm，体重 58.6 ± 4.0 kg，1,500 m シーズン最高記録 $4'03''2 \pm 8''5$ および 1,500 m 走速度 22.2 ± 0.8 km \cdot h $^{-1}$ ）であった。被験者の 1,500 m シーズン最高記録は、実験を実施した年に記録した最も高い記録を用い、国際陸上競技連盟が発行する IAAF Score (Spiriev 2014) の得点に換算すると 817.3 ± 100.3 であった。実験を開始するにあたり、すべての被験者に本研究課題の目的、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、本研究課題は国立大学法人筑波大学大学院人間総合科学研究科倫理委員会の承認を得て行なわれた（標題番号: 23-131）。

2. 実験デザイン

本研究課題は、被験者を実験室内の傾斜 1%に設定されたトレッドミル（ORK-7000，大竹ルート工業，岩手）上を走行させることで環境条件を整えた。室温および湿度を 23-26°C および 40-60%にそれぞれ設定し、常に換気を行なうことによって新鮮な空気を保った。すべての実験は 15-19 時の間に実施した。

被験者は 5 分の休息によって間欠的漸増負荷走行と連続的漸増負荷走行に分けた多段階漸増負荷走行テストを行ない、 $\dot{V}O_{2max}$, LT および RE を測定した。間欠的漸増負荷走行は、各走速度に対する $\dot{V}O_2$, RER, 血中乳酸濃度 (bLa) を明らかにするために実施し、1 ステージ 3 分間の走行を 2 分の休息をはさみ、1 ステージごとに 1.2 km \cdot h $^{-1}$ 走速度を漸増させ、

計 5 または 6 ステージの走行を行なわせた。第 1 ステージの走速度は被験者の走能力に合わせて $12.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ または $13.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ にした。間欠的漸増負荷走行の終了基準は、1) RER が 1.00 以上、2) 主観的運動強度 (rate of perceived exertion: RPE) が 17 以上、3) bLa が $4.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上のうち、いずれか 2 つを満たしている場合とした。間欠的漸増負荷走行終了後、5 分間立位安静にさせ、続いて連続的漸増負荷走行を行なわせた。連続的漸増負荷走行は、 $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ を明らかにするために実施し、疲労困憊にいたるまで 1 分ごとに $0.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 走速度を漸増させながら連続的に走行させた。疲労困憊の基準は、1) RER が 1.15 以上、2) 年齢から推定される最大心拍数 ($220 - \text{年齢}$) に達している、3) 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)。

呼吸ガスパラメータ、bLa、心拍数および RPE の分析は研究課題 1 の方法に準じて行なった。

3. 算出項目および算出方法

連続的漸増負荷走行において連続する 1 分間の $\dot{V}\text{O}_2$ の最高値を $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ として採用した。間欠的漸増負荷走行の各走速度における $\dot{V}\text{O}_2$ によって、 $\dot{V}\text{O}_2$ -速度回帰直線を求め、 $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ を外挿することで $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ が出現する走速度 (velocity of maximal oxygen uptake: $v\dot{V}\text{O}_2\text{max}$) を算出した。間欠的漸増負荷走行において走行したステージの各走速度に対する bLa を分析対象に、走速度-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を LT 時の走速度 (velocity of lactate threshold: $v\text{LT}$) とし (Lundberg et al. 1986), Lactate analysis software (Lactate-E ver.2) によって算出した (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 (Newell et al. 2007). その後, LT は $\dot{V}O_{2\max}$ に対する v_{LT} の強度として算出された.

それぞれの被験者が実際に走行した走速度のうち最も被験者の 90%LT 強度および 110%LT 強度に近い走速度を選択し, Kyröläinen et al. (2001; 2003) の方法 (以下の式を参照) によってそれぞれ RE_{bLT} および RE_{aLT} として RE を算出した.

$$\begin{aligned} RE [J \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}] = & (20202 J \cdot O_2 L^{-1} - (0.82 - RER) \times 100 \times 50 J \cdot O_2 L^{-1}) \\ & \times \dot{V}O_2 [mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}] / 1000 \times velocity [km \cdot h^{-1}] \times 60 / 1000 \\ & + \Delta bLa [mmol \cdot L^{-1}] \times 3.0 [mLO_2 \cdot kg^{-1} \cdot mM^{-1}] \\ & \times (20202 J \cdot O_2 L^{-1} - (0.82 - RER) \times 100 \times 50 J \cdot O_2 L^{-1}) / 1000 \\ & / 3 \text{ min} \times velocity [km \cdot h^{-1}] \times 60 / 1000 \end{aligned}$$

したがって, 有酸素性エネルギー代謝量は $\dot{V}O_2$ と RER によって算出されるエネルギー等価を積算, 無酸素性エネルギー代謝量は運動によって蓄積された bLa (運動直後の bLa と安静時の bLa の差分) に $3.0 \text{ mL}O_2 \cdot kg^{-1} \cdot mM^{-1}$ を積算し, 走行時間 (3 min) によって除すことによってそれぞれ算出された. また, 単位距離当たりのエネルギーコストに変換し, 両エネルギー代謝量を加算することによってそれぞれの RE ($J \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$) を算出した. エネルギー等価は RER が 0.82 のとき $20202 J \cdot O_2 L^{-1}$ と仮定し, RER が ± 0.01 変化するとエネルギー等価も $50 J \cdot O_2 L^{-1}$ 変化させることによって算出し, RER が 1.00 を超えたとき, エネルギー等価はすべて $21102 J \cdot O_2 L^{-1}$ とした. また bLa が $2.0 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 未満の時, 無酸素性エネルギー代謝量はないものとし, 算出しなかった.

4. 統計分析

結果はすべて平均値 \pm 標準偏差にて示した。すべての統計分析には SPSS Statistic 22 (IBM 社, Chicago, IL) を用いて分析を行なった。1,500 m シーズン最高記録の平均走速度 ($v_{1,500m}$; $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) と $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$, LT, RE_{bLT}, RE_{aLT}, $v\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ および $v\text{LT}$ の関係を明らかにするために, Pearson の積率相関係数によって分析した。また $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ と RE_{bLT} または RE_{aLT} の3つの生理学的変数を独立変数, $v_{1,500}$ を従属変数とする強制投入法による重回帰分析を行ない, 2つの生理学的変数による 1,500 m 走パフォーマンスの決定係数を明らかにした。RE_{bLT} と RE_{aLT} の比較のために対応のある t 検定によって分析した。統計的有意水準は $p < 0.05$ とした。

C. 結果

被験者の $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$, $v\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$, $v\text{LT}$ および LT はそれぞれ, $71.1 \pm 3.8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, $19.8 \pm 0.9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $16.6 \pm 1.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ および $84.1 \pm 4.5\%$ であった (Table V-1)。 $v_{1,500}$ は $v\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ および $v\text{LT}$ との間に有意な正の相関関係が認められた (それぞれ $r = 0.65$ および 0.61 , $p < 0.001$, Figure V-1) 一方, $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ および LT との間に有意な相関関係が認められなかった (それぞれ $r = 0.19$ および 0.10 , $p = 0.28$ および 0.58 , Figure V-2)。

Table V-1. Correlation coefficients for the relationships between 1,500-m velocity (km·h⁻¹) and maximal oxygen uptake, the velocity at maximal oxygen uptake, the velocity at the lactate threshold, and lactate threshold intensity.

	$\dot{V}O_{2\max}$ (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	$v\dot{V}O_{2\max}$ (km·h ⁻¹)	vLT (km·h ⁻¹)	LT (%)
Mean ± SD	71.1 ± 3.8	19.8 ± 0.9	16.6 ± 1.0	84.1 ± 4.5
<i>r</i>	0.19	0.65	0.61	0.10
<i>p</i> -value	0.28	<0.001*	<0.001*	0.58

*: $p < 0.05$

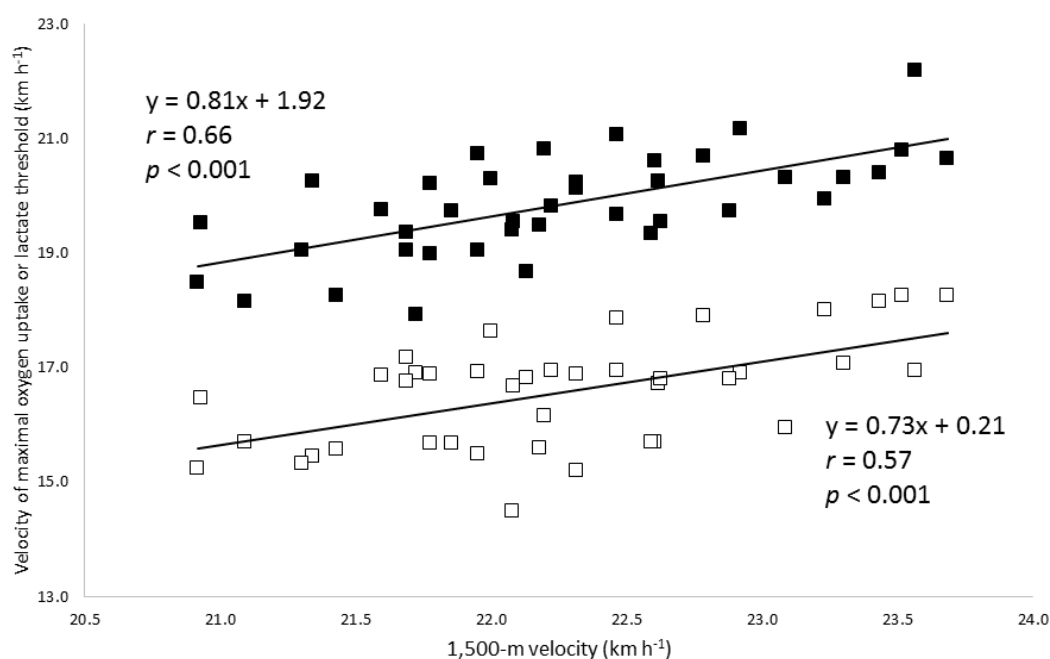


Figure V-1. The relationships between 1,500-m velocity and velocity of maximal oxygen uptake (open squares) and velocity of lactate threshold (filled squares).

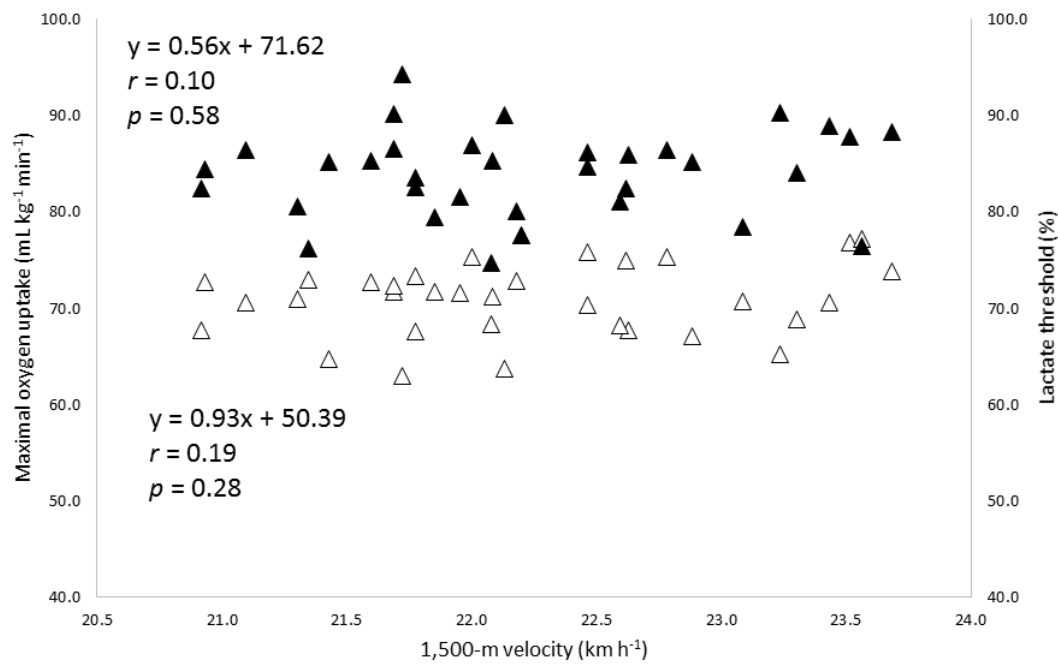


Figure V-2. The relationships between 1,500-m velocity and maximal oxygen uptake (open triangles) and lactate threshold intensity (filled triangles).

安静時の bLa は $1.1 \pm 0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ であった. RE_{bLT} および RE_{aLT} の算出に用いられた運動強度はそれぞれ, $90.0 \pm 3.7\% \text{LT}$ および $109.6 \pm 4.2\% \text{LT}$ であり, そのときの $\dot{\text{V}}\text{O}_2$, RER, bLa, $\% \dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ を Table V-2 に示した. RE_{bLT} および RE_{aLT} はそれぞれ 4.46 ± 0.17 および $4.72 \pm 0.18 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ であり, RE_{aLT} の方が有意に高い値となった. v1500 との間に有意な負の相関関係が認められ (それぞれ $r = -0.57$ および -0.72 , Table V-3), RE_{aLT} は RE_{bLT} よりも v1,500 と強い相関関係が認められた (Figure V-3).

Table V-2. Oxygen uptake, respiratory exchange ratio, blood lactate concentration, %maximal oxygen uptake intensity, %lactate threshold intensity, changes during the final 1 min in running oxygen uptake, and running economy at below and above lactate threshold intensity.

	$\dot{V}O_2$ (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	RER	bLa (mmol·L ⁻¹)	% $\dot{V}O_{2max}$ (%)	%LT (%)	RE (J·kg ⁻¹ ·m ⁻¹)
at below the LT	53.5 ± 3.0	0.94 ± 0.04	1.5 ± 0.4	75.7 ± 4.2	90.0 ± 3.7	4.46 ± 0.17
at above the LT	65.3 ± 3.4	1.03 ± 0.05	3.9 ± 1.1	91.9 ± 4.0	109.6 ± 4.2	4.72 ± 0.18

Table V-3. Correlation coefficients for the relationships between 1,500-m velocity and running economy at below and above the lactate threshold intensity.

	r	R^2	p
RE at below the LT	-0.57	0.33	<0.001*
RE at above the LT	-0.72	0.52	<0.001*

*: $p < 0.05$

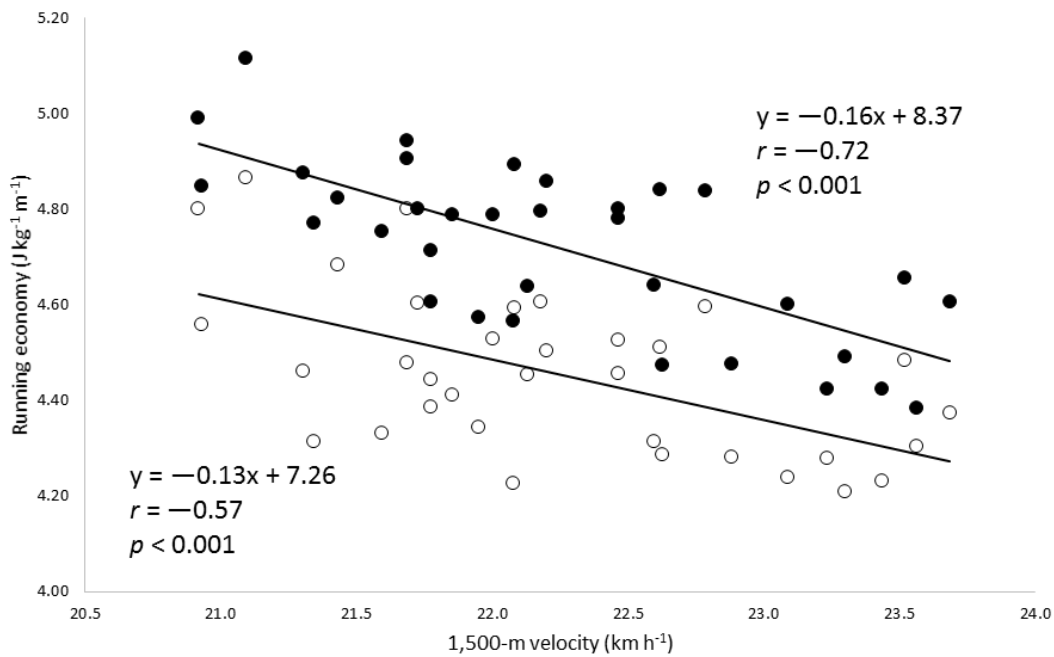


Figure V-3. The relationships between 1,500-m velocity and running economy measured at two exercise intensities: below the lactate threshold (LT) ($90.0 \pm 3.7\%$ LT; open circles) and above it ($109.6 \pm 34.2\%$ LT; filled circles).

$\dot{V}O_{2\max}$ および RE による重回帰分析の結果, RE_{bLT} を用いた場合の $v_{1,500}$ の決定係数 (R^2) は 0.337 ($p < 0.01$) であった一方, RE_{aLT} を用いた場合 $v_{1,500}$ の決定係数は 0.605 ($p < 0.001$) であった (Table V-4).

Table V-4. Multiple regression analysis for 1,500-m velocity, with maximal oxygen uptake and running economy at below and above the lactate threshold intensity as the independent variables.

	R^2	p	VIF	
			$\dot{V}O_{2\max}$	RE
at below the LT	0.337	<0.01	1.003	1.003
at above the LT	0.605	<0.001	1.034	1.034

D. 考察

1. 走パフォーマンスと $\dot{V}O_{2\max}$ および LT

本研究課題の被験者の競技レベル (1,500 m 走パフォーマンス) は先行研究 (Ferri et al. 2012; Ingham et al. 2008; Lacour et al. 1990) よりも低かったが, $70.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上の $\dot{V}O_{2\max}$ を有しており, これは先行研究とおおよそ同等の値であった. したがって, 競技レベルは中程度以上であるが, 有酸素性エネルギー代謝はエリート水準の能力を有している被験者であったと言える.

多くの先行研究において, $\dot{V}O_{2\max}$ は走パフォーマンスを最も説明できる生理学的変数であると報告されてきた (Costill et al. 1973; di Prampero et al. 1986; Fay et al. 1989). しかし競技レベルに優れた男性ランナーにおいて, さらに 1,500 m 走パフォーマンスと $\dot{V}O_{2\max}$ の関連を報告した研究は, 著者の知る限り Ingham et al. (2008) のみで, 多くはその関連を認めていない (Ferri et al. 2012; Lacour et al. 1990). 13 名の男性 1,500 m ランナー ($3'44''1 \pm 6''5$) を対象に生理学的変数との関係を調査した Ingham et al. (2008) は,

1,500 m 走パフォーマンス ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) と $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ との間に有意な正の相関関係を認めた ($r=0.57$). 一方, Ferri et al. (2012) は 8 名の男性 1,500 m ランナー ($3'53''3 \pm 6''9$) において, また Lacour et al. (1990) は 24 名の男性 1,500 m ランナー (平均 $3'46''6$) において, それぞれ 1,500 m 走パフォーマンス ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ または $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) と $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ との間に有意な相関関係を認めなかった (それぞれ $r = 0.05$ および 0.29). 本研究課題も同様に 34 名の専門的にトレーニングをしている中長距離ランナー ($4'03''2 \pm 8''5$) において, 1,500 m 走速度 ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) と $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ との間に有意な相関関係を認めなかった ($r = 0.19$, Table V-1, Figure V-2). この結果は, 競技レベルの高いランナーにおいて $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ は走パフォーマンスを推定する生理学的変数でないことを指摘した Conley and Krahenbuhl (1980) を支持するものであった. 同様に, LT もフルマラソンやハーフマラソンのような長距離走にとっては走パフォーマンスを決定する重要な生理学的変数であるとされているが (di Prampero et al. 1986; Joyner 1991), 競技レベルに優れた男性ランナーにおける中距離走パフォーマンスとの関連を認めた報告はない. 本研究課題も同様に 1,500 m 走速度と LT との間に有意な相関関係を認めなかった ($r = 0.10$, Table V-1, Figure V-2). 以上の結果から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は, 競技レベルに優れたランナーと同様に, 優れた $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ と LT の能力を有しており, さらに優れた他の生理学的変数の能力を持つことが 1,500 m 走パフォーマンスの成否を決定すると示唆される.

2. 走パフォーマンスと RE

RE は, 一般に LT を超えない強度における走行中の $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ によって評価される変数であり, 競技レベルに優れたランナーにとって走パフォーマンスに最も関連する生理学的変数であ

ると指摘されている (Conley & Krahenbuhl 1980; Daniels & Daniels 1992). しかしながら、競技レベルに優れたランナーの 1,500 m 走パフォーマンスとの関連を認めた研究はこれまでになかった. 例えば競技レベルに優れたランナーを対象とした Ingham et al. (2008) の研究は、 $\dot{V}O_{2max}$ と RE によって 1,500 m 走パフォーマンスの大部分を説明できるとしている ($R^2 = 0.938$) が、RE と 1,500 m 走パフォーマンスとの 2 変数の間に有意な相関関係を認めていない ($r = -0.01$). 対照的に、本研究課題では、我々の仮説通り、 $\dot{V}O_2$ だけでなく RER および ΔbLa を考慮し評価した RE と 1,500 m 走パフォーマンスとの間に有意な負の相関関係を認めた. さらに RE_{aLT} が RE_{bLT} よりもより 1,500 m 走パフォーマンスとの間に強い関連を持つことを認めた ($r = -0.57$ vs -0.72 , Table V-3, Figure V-3). したがって本研究は、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において 1,500 m 走パフォーマンスと RE の関連を認め、かつ特に RE_{aLT} の重要性を明らかにした最初の研究である.

1,500 m 走中の $\dot{V}O_2$ は 100% $\dot{V}O_{2max}$ 付近まで増大することから (Hanon et al. 2008), 競技場面では LT 以上の強度において走行している. また 1,500 m 走全体に対するエネルギー貢献割合は、有酸素性エネルギー代謝と無酸素性エネルギー代謝でそれぞれおよそ 80% および 20% となり (Hill 1999), 無酸素性エネルギー代謝が多く動員されていることがわかる. さらに 1,500 m 走レースは終盤にスパート局面が存在し、そのときの走速度はレース全体を通して最も高まることが知られている (Spencer & Gastin 2001). したがって、レースの序盤は高い走速度において走行しながらも、いかにエネルギーを温存できるかがレースの成否を分ける. このような 1,500 m 走の特徴から、1,500 m 走パフォーマンスは RE_{aLT} との間に強い関連を持つと推察される.

一方, RE_{aLT}は RE_{bLT} よりも有意に高い値を示し (Table V-2), LT を超える強度において経済性が低下することが示された. この主な原因は, 高強度の走行において type II 線維の動員が増大したためであると考えられる. Type II 線維は type I 線維に比べて機械的効率が悪く, 酸化能力がより優れている (Hunter et al. 2005) ため, 動員量が増大すると無酸素性エネルギー代謝の貢献も増大し, よりエネルギーが必要となる. したがって同じ LT を超える運動強度においても (本研究では $109.6 \pm 4.2\%$ LT 強度), 少ない type II 線維の動員によっても走行できる能力を有していたランナーは RE が優れ, かつ走パフォーマンスが優れていたと推察される. 同様に内的な仕事量 (Ardigo' et al. 1995) や活動筋の熱蓄積 (Whipp & Wasserman 1986) が増大することも LT を超える強度における経済性を低下させる原因であると言われている. とりわけ, バイオメカニクスの変数は RE の個人間の差異の 50%以上を説明すると言われており (Williams & Cavanagh 1987), 運動強度が高まるにつれてバイオメカニクスの変数が変化し, 経済性が低くなったと考えられる.

3. 走パフォーマンスと $\dot{V}O_{2\max}$ および RE

v1,500 は $\dot{V}O_{2\max}$ および RE_{bLT} によって 33.7%説明できる ($p < 0.01$) ことが明らかになったが (Table V-4), これはマラソンパフォーマンスの説明率 (> 70%) よりも低い (di Prampero et al. 1986). 1,500 m 走とマラソンの有酸素性エネルギー代謝貢献はそれぞれ 80%および 100%であり (Hill 1999), この走行全体の有酸素性エネルギー代謝の貢献割合の違いが $\dot{V}O_{2\max}$ および RE による説明率の差異になると示唆される. しかし, RE_{bLT} を RE_{aLT}に変えたとき, v1,500 の説明率は 60.5% ($p < 0.001$) にまで増大することが明らかとなった. 本研究課題で用いた RE は無酸素性エネルギー代謝量も考慮したものである. した

がって 1,500 m 走のように無酸素性エネルギー代謝も貢献する競技には、無酸素性エネルギー代謝の評価も加えた本研究課題の RE_{aLT}の方が有用な変数となりうると言える。

本研究課題では、v1,500 と関連が認められた $\dot{v}O_{2max}$ や vLT を重回帰分析の独立変数として含めなかった。これらの変数は走パフォーマンスと最も関連が認められる変数として多くの研究によって指摘されている (Bragada et al. 2010; Noakes et al. 1990)。しかしこれらの変数は走速度によって評価される変数であり、同様に走速度として評価される走パフォーマンスとの間に関連が認められるのはそれほど特別なことではない。また、本研究課題は $\dot{v}O_{2max}$ や vLT よりも RE_{aLT} と v1,500 の間の関係が強いことを示した。この結果は、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の 1,500 m 走パフォーマンスを最も説明する生理学的変数は RE_{aLT}であると言える。

4. 本研究課題の限界

本研究課題には限界が存在する。本研究課題の RE は、被験者に共通した 5 または 6 つの走速度を走行させ、それぞれの被験者の 90%LT 強度および 110%LT 強度に最も近い走速度から算出した。そのため完全には運動強度を規定できておらず、それぞれの強度において 3.7%および 4.2%の標準偏差が存在する。運動強度を完全に規定するためには実験を少なくとも 1 人につき 2 回実施する必要があるが、34 名の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課題では、被験者の拘束を考慮し、完全に規定できなかった。しかし、それぞれの RE はすべての被験者が LT を超えていないまたは LT を超えた強度において RE が評価されており、本研究の結果が覆ることはないと考えられる。

本研究課題は、走行全体で 20%の無酸素性エネルギー代謝貢献割合が認められる 1,500

m 走 (Hill 1999) において RE_{aLT} を評価する重要性を指摘した最初の研究である。今後は無酸素性エネルギー代謝貢献割合が走行全体に対するエネルギー代謝において 40%程度認められる 800 m (Hill 1999) や 5%ほどの 5,000 m (Weyand et al. 1993) 走パフォーマンスと RE_{aLT} の関係を調査できれば, RE_{aLT} を評価する重要性をさらに指摘できるものと考えられる。

E. 小活

本研究課題は、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 (90%LT) における RE および LT を超える強度 (110%LT) における RE を含む生理学的変数と 1,500 m 走パフォーマンスの関係を明らかにした。その結果、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 1,500 m 走パフォーマンスは $\dot{V}O_{2max}$ および LT との間に有意な相関関係が認められなかったが、RE_{bLT} および RE_{aLT} との間に有意な負の相関関係が認められ、とりわけ RE_{aLT} との関連が強かった。また、1,500 m 走パフォーマンスは $\dot{V}O_{2max}$ および RE_{aLT} によって 60.5%説明できることが明らかとなった。これらの結果から LT を超える強度における経済性は、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の 1,500 m 走パフォーマンスを推定するにあたり最も重要な生理学的変数であると言える。

VI. 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ける走パフォーマンス

と生理学的変数の縦断的關係（研究課題 3-1）

A. 目的

研究課題 2 の結果から、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を最も説明できる生理学的変数は LT を超える強度における RE (RE_{aLT}) であることが明らかとなった。そのため、中長距離ランナーの走パフォーマンスと生理学的変数の縦断的な変化を追跡するにあたり RE_{aLT} にも着目する必要がある。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は、トレーニングによって優れた競技パフォーマンスへと向上させることが望まれ、またその際の生理学的変数の変化は大きいと推測される。

走パフォーマンスに関連する $\dot{V}O_{2max}$ と RE の横断的な関係は正の相関関係（概念的に考えると逆相関の関係）が認められており（Fletcher et al. 2009; Hunter et al. 2005; Mooses et al. 2015）、縦断的な変化においても同様の関係（逆相関の関係）が認められる可能性がある（Tanaka et al. 1984; Ramsbottom et al. 1989）。つまりトレーニングなどによって RE が向上したとき、一方で $\dot{V}O_{2max}$ は低下するかもしれない。しかしこの関係はこれまでに調査されておらず、トレーニングによって $\dot{V}O_{2max}$ と RE のうちどちらかの変数が向上したとき、もう一方の変数はどのように変化し、またその結果、走パフォーマンスはどのように変化するのかは明らかとなっていない。

そこで本研究課題では、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 21 名を対象に、3 年間にわたる走パフォーマンスと RE_{aLT} を含む生理学的変数を追跡することによって、走パフォーマンスと $\dot{V}O_{2max}$ および RE_{aLT} の縦断的な変化の関係を明らかにすること

を目的とした。本研究課題では、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の $\dot{V}O_{2max}$ と RE_{aLT} の縦断的な変化の關係には逆相関が認められ、一方の生理学的変数の向上に対してもう一方の生理学的変数の低下が小さいとき走パフォーマンスは向上すると仮説を立てて実施した。

B. 方法

1. 被験者

本研究課題の被験者は、中長距離ランナー21名であり、すべてのランナーは大学陸上競技部に所属していた。被験者が大学1年次の6月から実験は開始され、その時点での年齢、身長および体重はそれぞれ 18.3 ± 0.5 歳, 171.2 ± 5.3 cm および 56.7 ± 3.6 kg であった。被験者の専門競技は、3年にわたり競技に出場し、かつ最も優れたパフォーマンスを持つ種目とし、その1年目のシーズン最高記録は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 828.4 ± 113.4 であった (800 m: 8名, 1,500 m: 1名, 5,000 m: 5名, 10,000 m: 5名および 3,000 m SC: 2名)。実験を開始するにあたり、すべての被験者に本研究課題の目的、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、本研究課題の方法は国立大学法人筑波大学大学院人間総合科学研究科倫理委員会の承認を得て行なわれた (課題番号: 23-131)。

2. 実験デザイン

本研究課題は、被験者を実験室内の傾斜 1%に設定されたトレッドミル (ORK-7000, 大竹ルート工業, 岩手) 上を走行させることで環境条件を整えた。室温および湿度を $23-26^{\circ}C$

および 40-60%にそれぞれ設定し、常に換気を行なうことによって新鮮な空気を保った。すべての実験は 15-19 時の間に実施した。被験者は、3 年にわたる生理学的変数および走パフォーマンスの縦断的な変化を明らかにするために、1 年のシーズンのうち中長距離トラック種目の試合期である 6 月と 11 月の計 2 回、3 年間で計 6 回の測定を実施した。

被験者は研究課題 2 と同様の実験プロトコルによって $\dot{V}O_{2max}$, LT および RE を測定した。なお第 1 ステージの走速度は被験者の走能力に合わせて 11.4, 12.6 または 13.8 km \cdot h $^{-1}$ にした。同様に呼気ガスパラメータ、血中乳酸濃度 (bLa)、心拍数および主観的運動強度 (RPE) の分析は研究課題 1 の方法に準じて行なった。

3. 算出項目および算出方法

$\dot{V}O_{2max}$, $v\dot{V}O_{2max}$, vLT および LT は研究課題 2 の方法に準じて算出された。被験者の 3 年次の vLT が 16.5 ± 0.9 km \cdot h $^{-1}$ であったことから、15.0 km \cdot h $^{-1}$ および 17.4 km \cdot h $^{-1}$ 走行時の RE をそれぞれ、LT を超えない強度における RE (RE_{bLT}) および RE_{aLT} として、研究課題 2 の方法に準じて、1 km 走行当たりのエネルギーコスト (kcal \cdot kg $^{-1}\cdot$ km $^{-1}$) として算出した。

$\dot{V}O_{2max}$, LT, RE_{bLT} および RE_{aLT} は、各年 2 回の測定値の平均値をその年の値として採用し (Arrese et al. 2005)、走パフォーマンスは各年のシーズン最高記録を IAAF Score にて得点化し、IAAFs として表わした。3 年間のトレーニングによって変化した $\dot{V}O_{2max}$, LT, RE_{bLT} , RE_{aLT} および IAAFs の変化率 (%) を 1 年目の値に対する 3 年目の値によってそれぞれ算出し、 $\Delta\dot{V}O_{2max}$, ΔLT , ΔRE_{bLT} , ΔRE_{aLT} および $\Delta IAAFs$ として表わした。

4. 統計分析

結果はすべて平均値 \pm 標準偏差にて示した。 $\dot{V}O_{2\max}$, LT, RE_{bLT}, RE_{aLT} および IAAFs の年次ごとの変化を検定するために、それぞれの変数において対応のある一元配置分散分析を行ない、主効果が認められた項目について Bonferroni の方法によって多重比較検定を行った。 $\dot{V}O_{2\max}$, LT, RE_{bLT}, RE_{aLT}, IAAFs およびそれぞれの変化率と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。統計処理には SPSS Statistic 22 (IBM 社, Chicago, IL) を使用し、統計的有意水準は $p < 0.05$ とした。また 21 名の被験者のうち、800 m を専門とするランナーを中距離群 (MD 群)、それ以外の種目を専門とするランナーを長距離群 (LD 群) とし群間の差を比較するために、効果量 (effect size) を Cohen (1988) の方法を用いて算出し、Lipsey (1990) のスケールによって解釈した。したがって、効果量 d が 0.2 未満の場合はその差がほとんどなし、0.2 以上 0.5 未満の場合はその差が小さい、0.5 以上 0.8 未満の場合はその差が中程度そして 0.8 以上の場合はその差が大きいと判断した。また、すべての被験者の中で、IAAFs の向上が大きかった上位 10 名のランナーを上位群、それ以外の 11 名のランナーを下位群とした。

C. 結果

被験者の形態学的変数の年次ごとの推移を Table VI-1, $\dot{V}O_{2\max}$, LT, RE_{bLT}, RE_{aLT} および IAAFs の年次ごとの推移を Figure VI-1 および Table VI-2 に示した。IAAFs は年次ごとにおおむね向上し、1 名を除くすべての被験者が 3 年間のトレーニングによって IAAFs を向上させた ($p < 0.001$)。 $\dot{V}O_{2\max}$ および RE_{aLT} の年次ごとの有意な変化は認められず、3 年間の変化も同様に有意な向上が認められなかった (それぞれ $p = 1.000$ および 0.27)。LT

は1年目から2年目にかけて有意な向上が認められ、2年目から3年目にかけて有意な変化は認められなかったものの、3年間の変化として有意な向上が認められた ($p < 0.01$). RE_{bLT} は1年目から2年目、2年目から3年目にかけてそれぞれ有意な変化が認められなかったものの (それぞれ $p = 0.19$ および 1.000), 3年間の変化として有意な向上が認められた ($p < 0.05$). 被験者間の $\dot{V}O_{2max}$, LT , RE_{bLT} , RE_{aLT} および $IAAFs$ の変化率の変動係数はそれぞれ、725.1%, 112.1%, 144.3%, 264.5% および 66.5% であり、とりわけ $\dot{V}O_{2max}$ および RE_{aLT} において大きな変動係数が認められた.

Table VI-1. The changes in physical variables over three years, and the changes ratio (%) of these variables.

	subject	Major event	1st year			2nd year			3rd year			The changes ratio		
			Height	Body weight	BMI	Height	Body weight	BMI	Height	Body weight	BMI	Height	Body weight	BMI
			cm	kg		cm	kg		cm	kg		%	%	%
MD group	A	800	174.0	51.5	17.0	174.0	53.6	17.7	174.0	54.0	17.8	0.0	5.0	5.0
	B	800	172.0	59.8	20.2	173.0	60.6	20.2	173.0	62.3	20.8	0.6	4.2	3.0
	C	800	165.0	56.3	20.7	165.0	57.6	21.1	165.0	57.8	21.2	0.0	2.7	2.7
	D	800	175.0	61.7	20.1	174.5	60.2	19.8	175.0	62.9	20.5	0.0	1.9	1.9
	E	800	176.5	60.2	19.3	176.0	60.6	19.6	176.0	60.5	19.5	-0.3	0.5	1.1
	F	800	170.3	59.5	20.5	170.6	58.4	20.1	170.6	61.2	21.0	0.2	2.8	2.4
	G	800	174.0	58.2	19.2	174.0	58.1	19.2	174.0	58.3	19.2	0.0	0.2	0.2
	H	800	171.0	54.5	18.6	172.5	55.8	18.7	172.3	55.6	18.7	0.7	2.1	0.6
LD group	I	1,500	180.0	63.5	19.6	180.0	64.4	19.9	180.0	65.0	20.1	0.0	2.4	2.4
	J	10,000	171.0	56.5	19.3	171.0	56.4	19.3	171.5	57.9	19.7	0.3	2.6	2.0
	K	5,000	178.1	60.4	19.0	178.7	59.2	18.5	178.6	59.0	18.5	0.3	-2.2	-2.8
	L	5,000	168.0	53.6	19.0	168.0	54.4	19.3	168.0	53.6	19.0	0.0	-0.1	-0.1
	M	5,000	161.0	50.0	19.3	161.0	50.5	19.5	161.0	47.4	18.3	0.0	-5.2	-5.2
	N	10,000	175.5	60.6	19.7	175.0	61.2	20.0	175.5	60.6	19.7	0.0	0.1	0.1
	O	3,000SC	177.0	61.6	19.7	177.0	63.5	20.3	176.5	62.3	20.0	-0.3	1.1	1.7
	P	5,000	165.0	52.1	19.1	165.0	51.5	18.9	166.0	51.8	18.8	0.6	-0.5	-1.7
	Q	10,000	171.0	55.6	19.0	171.0	55.5	19.0	171.0	55.5	19.0	0.0	-0.1	-0.1
	R	10,000	174.0	60.3	19.9	174.0	58.3	19.3	174.3	59.3	19.5	0.1	-1.7	-2.0
	S	5,000	161.0	55.0	21.2	161.0	54.3	20.9	161.3	54.7	21.0	0.2	-0.5	-0.9
	T	10,000	168.5	55.5	19.5	169.0	55.7	19.5	169.0	56.1	19.6	0.3	1.1	0.5
	U	3,000SC	168.0	54.1	19.2	168.5	54.3	19.1	168.0	55.3	19.6	0.0	2.1	2.1
All	Mean		171.2	57.1	19.5	171.4	57.3	19.5	171.5	57.7	19.6	0.1	0.9	0.6
	SD		5.3	3.8	0.9	5.3	3.7	0.8	5.2	4.2	0.9	0.3	2.3	2.3
MD group	Mean		172.2	57.7	19.5	172.5	58.1	19.5	172.5	59.0	19.9	0.2	2.4	2.1
	SD		3.6	3.4	1.2	3.4	2.5	1.0	3.4	3.2	1.2	0.3	1.6	1.5
LD group	Mean		170.6	56.8	19.5	170.7	56.8	19.5	170.8	56.8	19.4	0.1	-0.1	-0.3
	SD		6.2	4.1	0.6	6.2	4.3	0.6	6.1	4.6	0.7	0.2	2.1	2.2

Notes: MD; middle distance runners ($n = 8$) and LD; long distance runners ($n = 13$).

Shade shows the higher IAAF score improved subjects ($> 6.7\%$, $n = 10$).

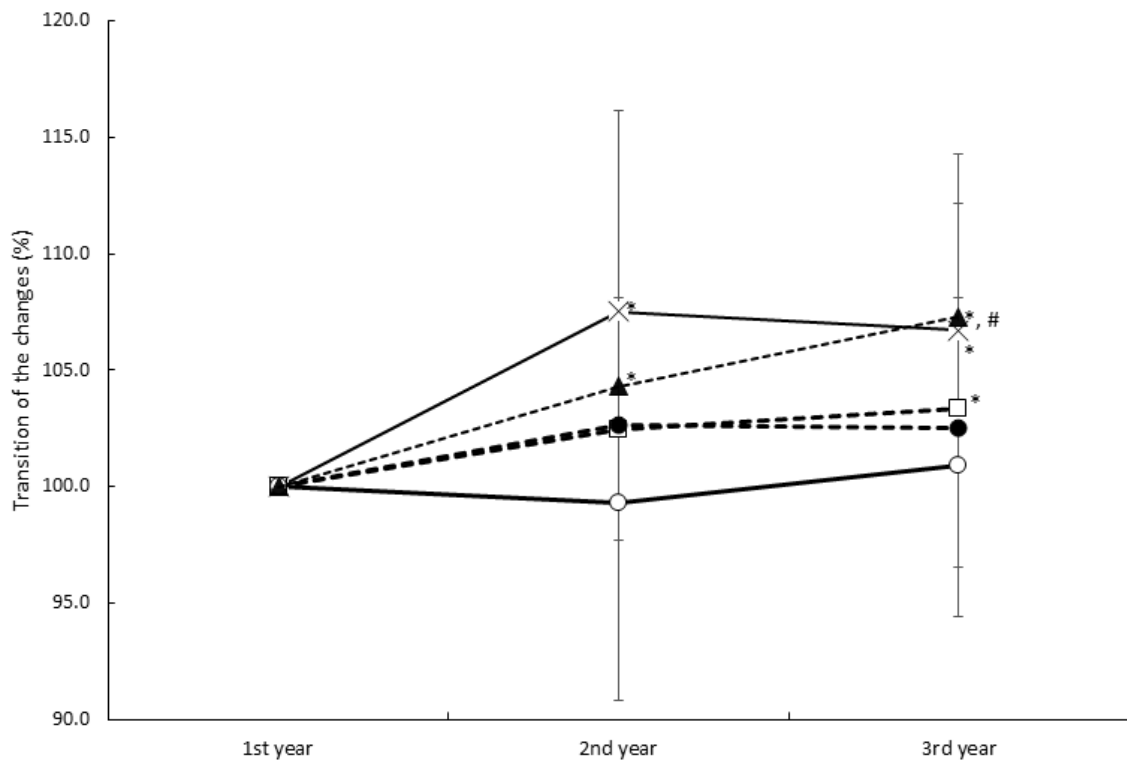


Figure VI-1. The transition of the changes in maximal oxygen uptake (open circles, thick line), lactate threshold (LT: cross markers, thin line), running economy at intensity below the LT (open squares, thick short broken line) or above the LT (filled circles, thick short broken line) and IAAF score (thin long broken line) over three years in all subjects.

Notes: * shows a significant difference between 1st years' value, # show a significant difference between 2nd years' value.

Table VI-2. The changes in physiological variables and IAAF score over three years, and the changes ratio (%) of these variables.

	subject	Major event	1 st year						2 nd year						3 rd year						The changes ratio				
			$\dot{V}O_2$ max	LT	RE _{alt} T	RE _{alt} T	IAAF	$\dot{V}O_2$ max	LT	RE _{alt} T	RE _{alt} T	IAAF	$\dot{V}O_2$ max	LT	RE _{alt} T	RE _{alt} T	IAAF	$\dot{V}O_2$ max	LT	RE _{alt} T	RE _{alt} T	IAAF			
			mL/kg/min	%	kcal/kg/km	a.u.		mL/kg/min	%	kcal/kg/km	a.u.		mL/kg/min	%	kcal/kg/km	a.u.		%	%	%	%	%			
MD group	A	800	70.2	65.7	1.10	1.16	798	62.9	87.4	1.04	1.12	842	76.6	83.8	1.09	1.26	916	9.1	27.6	1.2	-8.9	14.8			
	B	800	62.5	80.6	1.01	1.09	841	65.1	91.0	1.11	1.12	906	64.7	84.8	1.08	1.13	962	3.5	5.2	-7.4	-3.6	14.4			
	C	800	67.0	74.2	1.11	1.16	811	69.6	83.2	1.13	1.20	888	74.3	80.1	1.11	1.18	913	10.9	8.0	0.0	-2.2	12.6			
	D	800	63.9	77.0	1.10	1.13	894	73.0	76.3	1.09	1.15	938	67.0	77.9	1.06	1.09	995	4.8	1.1	4.2	3.7	11.3			
	E	800	70.4	83.0	1.09	1.13	937	65.7	79.9	0.98	1.06	941	74.5	85.9	1.07	1.18	954	5.8	3.6	1.8	-3.8	1.8			
	F	800	74.9	80.6	1.26	1.27	875	71.2	85.3	1.10	1.16	890	74.1	83.1	1.16	1.21	867	-1.1	3.2	4.7	4.7	-0.9			
	G	800	63.4	78.5	1.02	1.06	954	68.8	80.5	1.06	1.09	980	64.8	77.8	1.04	1.07	964	2.3	-0.9	-1.2	-1.2	1.0			
	H	800	66.8	71.5	1.06	1.10	985	72.0	80.1	1.05	1.12	996	66.6	82.3	0.99	1.07	1021	-0.3	15.1	2.4	2.4	3.7			
LD group	I	1,500	75.9	75.5	1.08	1.16	865	70.0	82.9	1.02	1.04	954	70.5	74.1	0.95	1.04	939	-7.1	-1.8	12.0	10.4	8.6			
	J	10,000	68.9	88.5	1.05	1.10	811	71.2	86.9	0.98	1.02	876	71.4	85.1	0.96	1.02	878	3.6	-3.8	7.5	7.5	8.3			
	K	5,000	70.6	84.5	1.04	1.13	697	66.9	84.3	0.96	1.03	712	73.4	83.6	1.01	1.10	811	4.0	-1.0	3.2	3.2	16.4			
	L	5,000	59.7	76.9	1.03	1.08	698	70.1	83.5	1.05	1.11	691	66.8	87.5	1.05	1.12	745	11.9	13.9	-4.0	-4.0	6.7			
	M	5,000	70.3	83.9	1.04	1.14	665	61.2	89.4	1.05	1.07	717	66.7	89.3	1.03	1.06	739	-5.0	6.5	7.3	7.3	11.1			
	N	10,000	77.1	83.4	1.05	1.13	900	75.3	82.7	1.00	1.06	963	76.0	86.3	1.00	1.05	994	-1.4	3.4	7.1	7.1	10.4			
	O	3,000SC	80.2	80.1	1.09	1.13	987	70.4	87.1	1.02	1.09	1045	76.5	84.1	1.04	1.08	1037	-4.6	4.9	4.1	4.1	5.1			
	P	5,000	77.1	78.0	1.12	1.22	634	73.7	86.4	1.16	1.21	648	68.1	83.3	1.07	1.15	673	-11.7	6.8	5.7	5.7	6.2			
	Q	10,000	71.9	68.9	0.97	1.05	820	76.0	84.6	0.97	1.02	856	64.1	80.5	0.88	0.90	857	-10.8	16.8	13.8	13.8	4.5			
	R	10,000	72.9	84.8	0.97	1.03	868	73.0	84.2	0.99	1.05	875	77.1	88.0	0.95	1.07	901	5.8	3.7	-4.5	-4.5	3.8			
	S	5,000	67.6	76.4	1.11	1.14	588	66.8	82.5	1.08	1.11	581	68.0	87.5	1.12	1.14	601	0.6	14.5	-0.1	-0.1	2.2			
	T	10,000	78.0	80.1	1.04	1.10	864	69.1	83.3	1.01	1.05	909	75.2	82.6	1.00	1.06	904	-3.7	3.1	3.3	3.3	4.6			
	U	3,000SC	71.9	77.7	1.04	1.07	904	71.8	84.5	1.02	1.10	950	73.6	86.6	1.03	1.08	963	2.3	11.4	-0.4	-0.4	6.5			
All	Mean		70.5	78.6	1.07	1.12	828.4	69.7	84.1	1.04	1.09	864.7	71.0	83.5	1.03	1.10	887.3	0.9	6.7	2.9	2.1	7.3			
	SD		5.5	5.5	0.06	0.06	113.4	3.8	3.4	0.06	0.05	124.0	4.5	3.8	0.07	0.08	115.5	6.5	7.5	5.2	5.6	4.8			
MD group	Mean		67.4	76.4	1.09	1.14	886.9	68.5	83.0	1.07	1.13	922.6	70.3	82.0	1.08	1.15	949.0	4.4	7.9	0.7	-1.1	7.3			
	SD		4.2	5.7	0.08	0.06	68.2	3.6	4.8	0.05	0.04	51.1	5.0	3.1	0.05	0.07	49.0	4.2	9.3	3.8	4.5	6.5			
LD group	Mean		72.5	79.9	1.05	1.11	792.4	70.4	84.8	1.02	1.07	829.0	71.3	84.5	1.01	1.07	849.4	-1.2	6.0	4.2	4.1	7.3			
	SD		5.4	5.1	0.05	0.05	122.6	3.9	2.1	0.05	0.05	143.1	4.3	4.0	0.06	0.06	129.4	6.8	6.5	5.6	5.4	3.8			

Notes: MD; middle distance runners ($n = 8$) and LD; long distance runners ($n = 13$).

Shade shows the higher IAAF score improved subjects ($> 6.7\%$, $n = 10$).

3 年間のトレーニングによる各変数の変化率の関係を Table VI-3 に示した。ΔIAAFs は $\dot{\Delta}\text{VO}_{2\text{max}}$, ΔLT, ΔRE_{bLT} および ΔRE_{aLT} との間に有意な相関関係が認められなかった（それぞれ $r = 0.28, 0.05, -0.23$ および -0.10 , Figure VI-2）。一方, $\dot{\Delta}\text{VO}_{2\text{max}}$ と ΔRE_{bLT} および ΔRE_{aLT} の間にはそれぞれ有意な逆相関が認められ ($r = -0.54$ および -0.79 , Figure VI-3), このうち IAAFs をより向上させていた上位群ランナーの $\dot{\Delta}\text{VO}_{2\text{max}}$ と ΔRE_{bLT} または ΔRE_{aLT} は, この回帰直線よりも上 (y 軸方向に+) に位置するものが多かった。

Table VI-3. Correlation coefficients between the changes ratio of maximal oxygen uptake, lactate threshold, running economy at intensity below the lactate threshold or above the lactate threshold and IAAF score.

	ΔLT	ΔRE _{bLT}	ΔRE _{aLT}	ΔIAAFs
$\dot{\Delta}\text{VO}_{2\text{max}}$	0.13	-0.54*	-0.79*	0.28
ΔLT		-0.20	-0.35	0.05
ΔRE _{bLT}			0.73*	-0.23
ΔRE _{aLT}				-0.10

*: $p < 0.05$

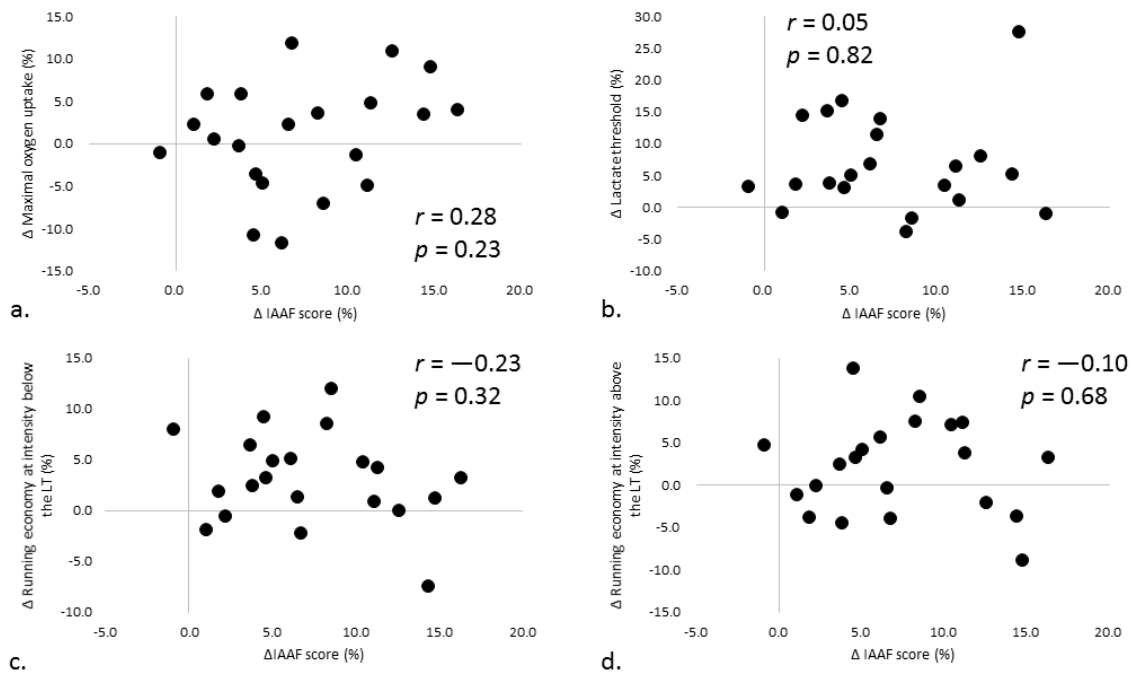


Figure VI-2. The relationships between the changes ratio of IAAF score and the changes ratio of (a) maximal oxygen uptake, (b) lactate threshold, (c) running economy at intensity below the lactate threshold and (d) running economy at intensity above the lactate threshold.

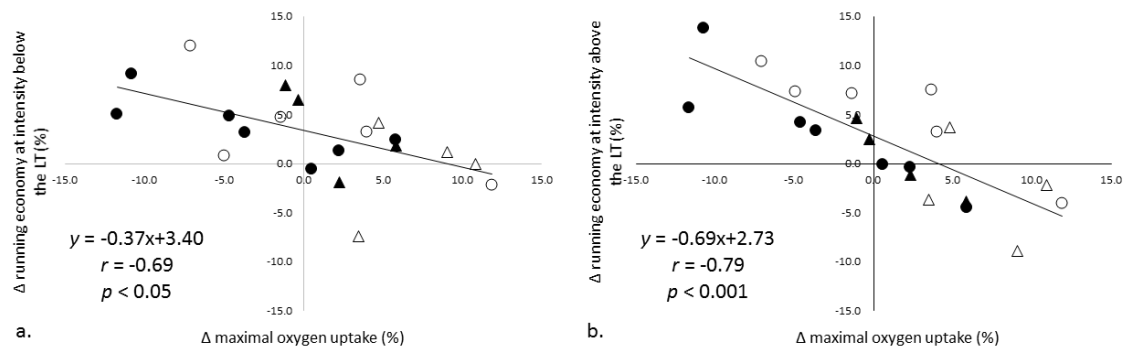


Figure VI-3. The relationship between the changes ratio of maximal oxygen uptake and the changes ratio of running economy at intensity below the LT (a) and above the LT (b).

Notes: The triangles shows middle distance runners ($n = 8$), the circles shows long distance runners ($n = 13$), the open makers shows higher IAAF score improved runners ($n = 10$), and the filled markers shows lower IAAF score improved runners ($n = 11$).

MD 群と LD 群の $\Delta\dot{V}O_{2\max}$, ΔLT , ΔRE_{bLT} , ΔRE_{aLT} および $\Delta IAAF_s$ を比較すると, $\Delta\dot{V}O_{2\max}$ および ΔRE_{aLT} に大きな効果量が認められ (それぞれ $d = 0.99$ および 1.05), ΔRE_{bLT} に中程度の効果量が認められた ($d = 0.74$) (Table VI-2). 一方 ΔLT は小程度の効果量であり ($d = 0.23$), $\Delta IAAF_s$ はほとんどなかった ($d = 0.01$). 上位群と下位群の $\dot{V}O_{2\max}$, ΔLT , ΔRE_{bLT} , ΔRE_{aLT} および $\Delta IAAF_s$ を比較すると, 上位群は下位群に比べて $\dot{V}O_{2\max}$ を中程度に向上し ($d = 0.78$), $IAAF_s$ をより大きく向上させた ($d = 2.93$) 一方, LT および RE_{bLT} の向上は小程度 (それぞれ $d = 0.20$ および 0.24) であり, RE_{aLT} の変化はほぼ同等であった ($d = 0.02$).

1 年目の $\dot{V}O_{2\max}$, LT , RE_{bLT} , RE_{aLT} および $IAAF_s$ と $\Delta\dot{V}O_{2\max}$, ΔLT , ΔRE_{bLT} , ΔRE_{aLT} および $\Delta IAAF_s$ の間の関係では, $\dot{V}O_{2\max}$ と $\Delta\dot{V}O_{2\max}$ および LT と ΔLT の間に有意な負の相関関係 (それぞれ $r = -0.63$ および -0.78) が認められた一方, RE_{bLT} と ΔRE_{bLT} , RE_{aLT} と ΔRE_{aLT} および $IAAF$ と $\Delta IAAF$ の間に関連は認められなかった (それぞれ $r = 0.24, 0.15$ および -0.27 , Figure VI-4). また, 1 年目の $\dot{V}O_{2\max}$ と ΔRE_{bLT} および ΔRE_{aLT} の間にはそれぞれ有意な正の相関関係が認められた ($r = 0.58$ および 0.45 , Figure VI-5).

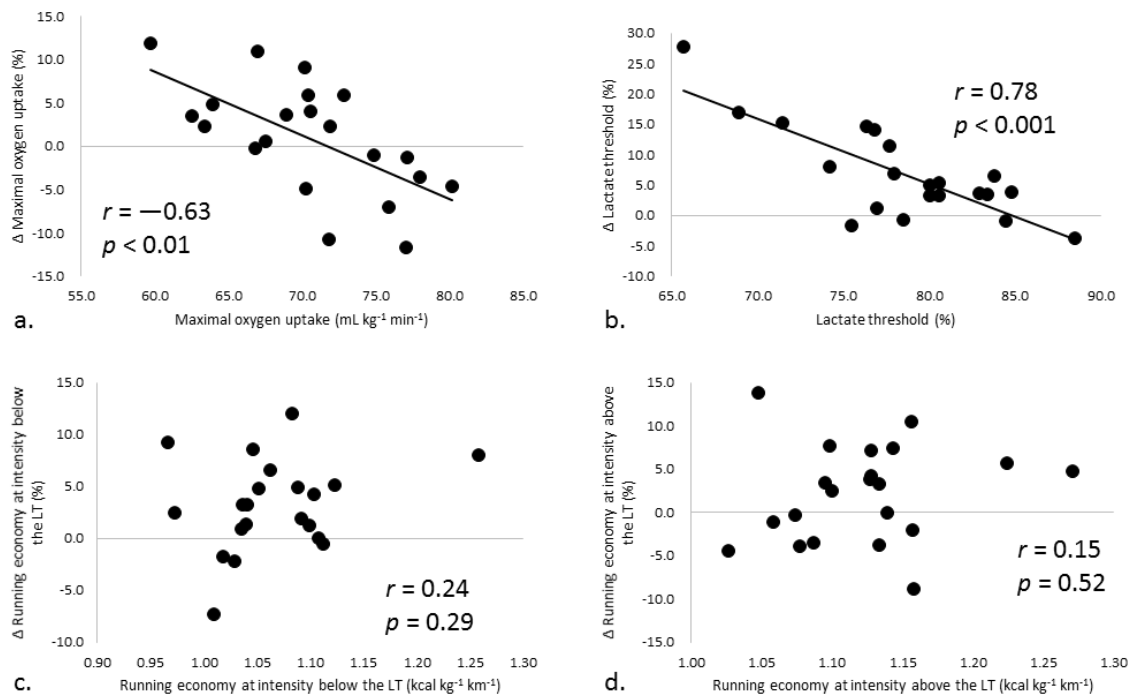


Figure VI-4. The relationships between the physiological variables in first year and the changes ratio of each variables.

Notes: a. shows maximal oxygen uptake vs Δ maximal oxygen uptake, b. shows lactate threshold vs Δ lactate threshold, c. shows running economy at intensity below the LT vs Δ running economy at intensity below the LT and d. shows running economy at intensity above the LT vs Δ running economy at intensity above the LT.

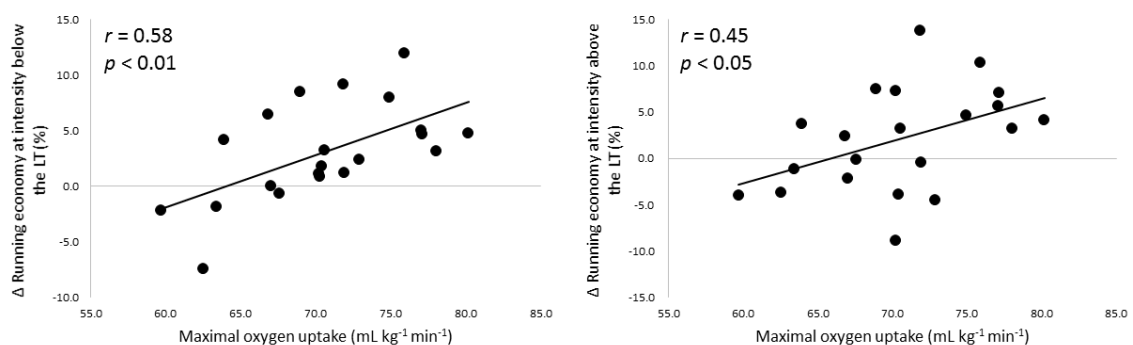


Figure VI-5. The relationships between maximal oxygen uptake in first year and the changes ratio of running economy at intensity below the LT (a) and above the LT (b).

D. 考察

1. 生理学的変数と走パフォーマンスの変化

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 ($\dot{V}O_{2max}$: $70.5 \pm 5.5 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, IAAFs: 828.4 ± 113.4) の3年間の生理学的変数および走パフォーマンスを追跡した本研究課題の結果、被験者が3年間で LT, RE_{bLT} および IAAFs を有意に向上した。しかし、 ΔLT および ΔRE_{bLT} を含むすべての単独の生理学的変数の変化率と $\Delta IAAFs$ との間には有意な相関関係が認められなかった (Figure VI-2, Table VI-3)。したがって、1つの生理学的変数の向上が走パフォーマンスを向上させるとは言えず、2変数以上の生理学的変数が走パフォーマンスの変化に関連すると示唆された。

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おいて LT はトラック種目の走パフォーマンスとの関連が認められておらず、また LT や換気性代謝閾値の向上と走パフォーマンスの向上との関連を認めた研究は著者の知る限りない。競技者はトラック競技において LT をはるかに超える強度で走行するため、LT の優劣が走パフォーマンスの決定にとりわけ重要な変数とはならないと考えられる。一般に競技レベルの低いランナーは、 $\dot{V}O_{2max}$ の顕著な向上によって走パフォーマンスの向上が認められ (Tanaka et al. 1984; Ramsbottom et al. 1989)、一方競技レベルの高いランナーは、 $\dot{V}O_{2max}$ の変化なしに (Arrese et al. 2005; Jones 1996) または $\dot{V}O_{2max}$ が低下したにも関わらず (Jones 1998)、RE が向上したことによって走パフォーマンスの向上が認められている。本研究課題と同様に、数か年の $\dot{V}O_{2max}$ と走パフォーマンスの追跡実験を競技レベルの高いランナー ($\dot{V}O_{2max}$: $76.6 \pm 7.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, IAAFs: 1062 ± 86) を対象に実施した Arrese et al. (2005) は、 $\Delta IAAFs$ と $\Delta \dot{V}O_{2max}$ との間に有意な相関関係を認めず、他の生理学的変数が向

上したことの影響を指摘している。

本研究課題において、生理学的変数の変化率 ($\dot{V}O_{2\max}$, ΔRE_{bLT} および ΔRE_{aLT}) と $\Delta IAAFs$ に関連が認められなかった原因は、 $\dot{V}O_{2\max}$ と ΔRE_{bLT} および ΔRE_{aLT} との間にそれぞれ有意な逆相関が認められたからと考えられる。つまり 1 名を除くすべてのランナーが IAAFs を向上させた一方、1) $\dot{V}O_{2\max}$ が向上しかつ RE_{bLT} または RE_{aLT} が低下したランナーと、2) RE_{bLT} または RE_{aLT} が向上しかつ $\dot{V}O_{2\max}$ が低下したランナーが混在したため、被験者全体を平均するとそれぞれの生理学的変数の向上が認められなかった。また、被験者の 1 年目 (18.3 ± 0.5 歳) の $\dot{V}O_{2\max}$ と $\Delta \dot{V}O_{2\max}$ の間に有意な負の相関関係が認められ、1 年目の $\dot{V}O_{2\max}$ と ΔRE_{bLT} および ΔRE_{aLT} の間に有意な正の相関関係が認められた。したがって、1 年目の $\dot{V}O_{2\max}$ が低いランナーほど $\dot{V}O_{2\max}$ が向上した一方、 RE_{bLT} (または RE_{aLT}) は低下し、結果として走パフォーマンスは向上したことが明らかとなった。競技レベルの高いランナーは $\dot{V}O_{2\max}$ が優れており、トレーニングによってさらに $\dot{V}O_{2\max}$ が向上することは困難であり、RE の向上が走パフォーマンスの向上により関連すると指摘されている (Saunders et al. 2010)。しかし、本研究課題で対象とし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の中には、さらに $\dot{V}O_{2\max}$ を向上できるランナーも存在したと推察される。Tota et al. (2015) は、若いアスリート (16.5 ± 0.9 歳) の 2 年間のトレーニングを通した生理学的変数の変化を追跡し、トレーニングの初期にまず $\dot{V}O_{2\max}$ の向上が起こり、その後 RE が向上と報告しており、この見解を支持している。以上のことから、走パフォーマンスが向上する過程において、どの程度 $\dot{V}O_{2\max}$ を有しているかどうかの後に向上させるべき生理学的変数の決定に重要であると考えられる。

MD 群と LD 群の有酸素性能力の変化率を比較すると、前者はより $\dot{V}O_{2\max}$ を向上し、後

者はより RE を向上し走パフォーマンスを向上させていた。しかし、MD 群の 1 年目の $\dot{V}O_{2max}$ は LD 群よりも低かった。つまり専門種目の差異ではなく、中長距離ランナー共通の現象として、1 年目の $\dot{V}O_{2max}$ の優劣によって、向上するべき有酸素性能力が異なると推察される。実際、 $\dot{V}O_{2max}$ の優れていた LD 群ランナーの中でも 1 年目の $\dot{V}O_{2max}$ がそれぞれ 68.9, 59.7 および 67.6 mL \cdot kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$ であった subject J, L および S は $\dot{V}O_{2max}$ をそれぞれ 3.6%, 11.9% および 0.6% 向上した。同様に、MD 群の 1 年目に $\dot{V}O_{2max}$ が 70 mL \cdot kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$ 未満のランナーはすべて 2 年目までに $\dot{V}O_{2max}$ が向上していた。加えて上位群と下位群を比較したとき、前者はより $\dot{V}O_{2max}$ の向上が認められた ($d = 0.78$) 一方、RE は両群で同等の変化であった ($d = 0.02$)。この結果は、 $\dot{V}O_{2max}$ の向上が直接 IAAFs の向上に関連するわけではないが (Figure VI-2a)、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は競技種目に関わらずにとってまず $\dot{V}O_{2max}$ の向上が走パフォーマンスの向上に影響を及ぼすと考えられる。

2. $\dot{V}O_{2max}$ と RE の縦断的变化の關係

$\Delta\dot{V}O_{2max}$ と ΔRE_{bLT} および ΔRE_{aLT} の間には、我々の仮説通り、逆相関の關係が認められ、とりわけ後者との間に強い関連が認められた (Figure VI-3, Table VI-3)。横断的な $\dot{V}O_{2max}$ と RE との關係に逆相関が認められる主な理由は、筋線維タイプが影響していると考えられている (Hunter et al. 2005)。機械的効率が悪く、より酸化能力に優れた type II 線維を多く有しているランナーは type I 線維を多く有しているランナーに比べて、 $\dot{V}O_{2max}$ が優れる一方 RE が劣る傾向にある (Hunter et al. 2005)。この見解は $\dot{V}O_{2max}$ と RE の縦断的な關係において逆相関が認められることについても同様に説明できると考えられ、例

えばトレーニングによって type II 線維を発達させたランナーは、酸化能力の向上および効率の低下が生じ、結果的に $\dot{V}O_{2max}$ の向上および RE の低下が認められたと推察される。

IAAFs をより向上させた上位群のランナーの多くは、すべてのランナーを対象とした $\Delta\dot{V}O_{2max}$ および ΔRE_{bLT} または ΔRE_{aLT} の回帰直線よりも y 軸方向に+に位置した (Figure VI-3). つまり RE_{bLT} では subject B, L および M の 3 名, RE_{aLT} では subject A および B の 2 名を除く上位群のランナーは下位群のランナーに比べて、 $\dot{V}O_{2max}$ または RE のいずれかの変数の向上に対して一方の変数の低下が小さかった、またはいずれの変数も向上していた。しかし、 $\Delta\dot{V}O_{2max}$ および ΔRE_{bLT} の関係において、回帰直線より y 軸方向に+に位置したランナーは 12 名であったが、そのうち上位群は 7 名であり、加えて両変数が向上したランナーは 7 名もいたにも関わらず、そのうち上位群は 4 名しかいなかった。一方で、 $\Delta\dot{V}O_{2max}$ および ΔRE_{aLT} の関係では、回帰直線より y 軸方向に+に位置したランナーは 10 名であり、そのうち上位群は 8 名であり、また両変数が向上したランナーの 3 名はすべて上位群であった。 $\Delta\dot{V}O_{2max}$ と ΔRE_{aLT} の間の逆相関の關係が ΔRE_{bLT} よりも強いことから、どちらかの変数が向上したときのもう一方の変数の低下は RE_{aLT} においてより生じ、長期的な観点から $\dot{V}O_{2max}$ と RE_{aLT} を向上することは走パフォーマンスを向上させるためには必要であることが明らかとなった。以上のことから、走パフォーマンスの向上について検討するとき、 $\dot{V}O_{2max}$ と RE_{aLT} の変化に着目することが重要であると考えられる。

Subject A および B は上位群の多くの中長距離ランナーに当てはまった生理学的変数の変化を示さなかった。同様に生理学的変数の変化が全体の回帰直線の y 軸方向に+の位置にあった subject F も本研究課題において唯一走パフォーマンスを低下させていた。これらの 3 名は MD 群ランナーであり、他のトラック種目と比べ、レース戦略 (門野ほか 2008)

や走パフォーマンスに必要なエネルギー代謝能力（最大酸素価など）が異なること (Hill 1999; Ramsbottom et al. 1994; Spencer et al. 1996) が影響していると推察される。

一方、同時期に $\dot{V}O_{2max}$ および RE を向上するランナーも見受けられた。持久的トレーニングによる筋線維タイプ割合の変化とは異なるトレーニングによる影響が考えられる。この点については研究課題 4 にて検討を行なう。

E. 小活

本研究課題は、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 21 名を対象に、3 年間にわたる走パフォーマンスと RE_{aLT} を含む生理学の変数を追跡することによって、走パフォーマンスと $\dot{V}O_{2max}$ および RE_{aLT} の縦断的变化の関係を明らかにした。その結果、3 年のトレーニングによって変化した生理学の変数と走パフォーマンスの関係に有意な関連が認められなかったものの、 $\dot{V}O_{2max}$ と RE_{bLT} および RE_{aLT} の縦断的な変化の間には逆相関が認められ、とりわけ後者において強い関連が認められた。走パフォーマンスをより向上させたランナーの $\Delta\dot{V}O_{2max}$ および ΔRE_{aLT} はランナー全体の $\dot{V}O_{2max}$ と RE_{aLT} の変化率の回帰直線よりも y 軸方向に+に位置した。つまり、 $\dot{V}O_{2max}$ と RE_{aLT} の両変数を同時に向上することは困難であり、どちらかの変数が向上しても、もう一方の変数が大きく低下すれば、走パフォーマンスの大きな向上は見込めず、どちらかの変数の向上に対してもう一方の変数の低下をいかに最小限にできるかが走パフォーマンスの向上につながると推察された。以上のことから $\dot{V}O_{2max}$ および RE_{aLT} を縦断的に追跡することが走パフォーマンスを検討するにあたって重要であり、特に $\dot{V}O_{2max}$ の優劣によって、その後のトレーニングによって向上すべき生理学の変数が異なると考えられる。

VII. 優れた競技レベルを有する中長距離ランナーにおける走パフォーマンスと生理学的変数の縦断的關係（研究課題 3-2）

A. 目的

研究課題 3-1 では、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の走パフォーマンスとそれに関連する生理学的変数を 3 年間追跡し、 $\dot{V}O_{2max}$ と LT を超える強度における RE (RE_{aLT}) の縦断的な変化の間には逆相関が認められ、両変数の変化を追跡することが重要であることを明らかにした。また $\dot{V}O_{2max}$ の優劣によってその後向上すべき生理学的変数が異なることを推察した。しかし、これらの結果が競技レベルに優れたランナーにおいても同様に認められるのかはわからない。競技レベルに優れたランナーは $\dot{V}O_{2max}$ が優れており、さらなる向上は困難であり、RE を向上する方が走パフォーマンスを向上させるためには容易である (Saunders et al. 2010)。しかし、縦断的な関係に逆相関が認められるのであれば、RE を向上し続けると $\dot{V}O_{2max}$ は顕著に低下する可能性があり、競技レベルに優れたランナーの $\dot{V}O_{2max}$ が優れているという前提に当てはまらなくなり、またその結果走パフォーマンスも低下する可能性もある。研究課題 3-1 において再認された、中長距離ランナーにとって $\dot{V}O_{2max}$ が優れていることが前提であることを加味すると、RE を向上しつつも優れた $\dot{V}O_{2max}$ を維持させる必要がある。

そこで本研究課題は、競技レベルに優れた中長距離ランナー 1 名を対象に、 RE_{aLT} を含む走パフォーマンスに関連する生理学的変数を 4 年にわたって測定し、その変数の変化の関係を明らかにすることを目的とした。本研究課題は、競技レベルに優れた中長距離ランナーにも同様に $\dot{V}O_{2max}$ と RE_{aLT} の縦断的な変化の関係には逆相関が認められ、 $\dot{V}O_{2max}$ と

RE_{aLT} が交互に向上することによって走パフォーマンスが向上すると仮定を立てて実施した。

B. 方法

1. 被験者

本研究課題の被験者は、大学陸上競技部に所属し、3,000 m SC を専門に競技を行なっている競技レベルに優れたランナー1名であり、大学2年次に日本学生陸上競技対校選手権大会において優勝し、大学3年次に同大会2連覇、大学4年次に同大会2位となった（Table VII-1）。実験開始（大学1年次の6月）時の被験者の年齢、身長、体重および3,000 m SC の自己最高記録はそれぞれ、18歳、177 cm、60.9 kg および9'01"86であった。なお、この3,000 m SC の自己最高記録を国際陸上競技連盟が発行する IAAF Score (Spiriev 2014) にて得点化すると、986 であった。実験を開始するにあたり、被験者には本研究課題の目的、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、本研究課題の方法は国立大学法人筑波大学大学院人間総合科学研究科倫理委員会の承認を得て行なわれた（課題番号: 23-131）。

Table VII-1. The result of the subjects' major competitions over four years.

		1 st grade	2 nd grade	3 rd grade	4 th grade
3,000 m SC	KCAIC (May)	9'02"22	8'47"95 ④	9'37"48	8'50"65 ①
	JSAIndC (June)	9'01"86 ④	8'53"71 ②	8'53"96 ②	
	JAC (June)			9'08"92 ⑪	8'46"74 ⑤
	JCAIntC (September)		8'57"50 ①	8'49"71 ①	8'45"05 ②
	Seasonal best time	9'01"86	8'47"95	8'49"71	8'45"05
1,500 m	Seasonal best time	3'53"19	3'50"25	3'49"62	3'48"55

Notes: KCAIC; Kanto college athletics interscholastic championships, JSAIndC; Japanese student athletics individual championships, JAC; Japanese athletics championships, JCAIntC; Japanese college athletics interscholastic championships. The number in the circles shows a rank.

2. 実験デザイン

本研究課題は、被験者を実験室内の傾斜 1%に設定されたトレッドミル（ORK-7000, 大竹ルート工業, 岩手）上を走行させることで環境条件を整えた。室温および湿度を 23-26°C および 40-60%にそれぞれ設定し、常に換気を行なうことによって新鮮な空気を保った。すべての実験は 15-19 時の間に実施した。大学 1 年次の 6 月から大学 3 年次の 3 月までは継続的に実験を行ない、大学 4 年次は 4 月のみの測定となった。なお、大学 2 年次の春および大学 4 年次の夏以降は故障のため予定していた実験を実施できなかった。

被験者は研究課題 2 と同様の実験プロトコルによって $\dot{V}O_{2max}$, LT および RE を測定した。なお第 1 ステージの走速度は 13.8 km・h⁻¹にした。同様に呼気ガスパラメータ、血中乳

酸濃度 (bLa)、心拍数および主観的運動強度 (RPE) の分析は研究課題 1 の方法に準じて行なった。

3. 算出項目および算出方法

$\dot{V}O_{2max}$, $v\dot{V}O_{2max}$, vLT および LT は研究課題 2 の方法に準じて算出された。被験者の vLT は $16.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ を下回ることではなく、また $19.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ はおおよそ被験者の 3,000 mSC のレースペースの走速度であったことから、 $15.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ および $19.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 走行時の RE をそれぞれ、 LT を超えない強度における RE (RE_{bLT}) および RE_{aLT} として、研究課題 2 の方法に準じて、1 km 走行当たりのエネルギーコスト ($\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$) として算出した。被験者の各生理学的変数の変化を明らかにするため、大学 1 年次の 6 月に測定した値を 100% とし、各測定時の値の変動を求めた。

4. 統計分析

$\dot{V}O_{2max}$ と RE_{bLT} および RE_{aLT} の 2 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。統計処理には SPSS Statistic 22 (IBM 社, Chicago, IL) を使用し、統計的有意水準は $p < 0.05$ とした。

C. 結果

被験者の 1 年次の 6 月から 4 年次の 4 月にかけての身体的特徴および生理学的変数の変化の結果を Table VII-2 および Figure VII-1 に示した。身長は変化せず、体重は微増した。 $\dot{V}O_{2max}$ は $68.1\text{--}83.4 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ の範囲で変化し、1 年次の 6 月の値を基準とすると、

-6.2%から-17.6%の変動となった。その変化は 1 年次から 2 年次にかけて減少が認められ、3 年次以降に増加し、その後安定する傾向を示した。 $\dot{v}\text{VO}_2\text{max}$ は $19.7\text{--}21.2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ の範囲で変化し、その変動は-6.2%から+2.6%であった。 $v\text{LT}$ は 1 年次から 3 年次にかけて向上が認められ、 $16.4\text{--}18.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ の範囲で変化し、その変動は-3.9%から+7.8%であった。 RE_{bLT} および RE_{aLT} はそれぞれ $1.00\text{--}1.12 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ および $1.08\text{--}1.28 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ の範囲で変化し、+2.0%から+10.3%および+8.1%から+15.4%の変動がそれぞれ認められた（RE は値が小さくなると向上のため+と表記）。 RE_{bLT} は 1 年次から 2 年次にかけて向上し、3 年次以降にわずかに低下し、 RE_{aLT} は同様に 1 年次から 2 年次にかけて向上し、3 年次以降もその経済性の維持が認められた。 $\dot{\text{VO}}_2\text{max}$ は RE_{bLT} および RE_{aLT} との間にそれぞれ非常に強い正の相関関係（Table VII-3, Figure VII-2 および Figure VII-3, つまり RE は値が小さくなるほど優れていると評価されるため逆相関の關係）が認められた。

Table VII-2. The changes in the subjects' physical characteristics and physiological variables over four years.

	1 st grade			2 nd grade		3 rd grade		4 th grade	
Date	2012/6/30	2012/12/5	2013/3/12	2013/7/1	2013/11/27	2014/7/10	2014/12/9	2015/3/4	2015/4/8
Age (yr)	18	19	19	19	20	20	21	21	21
Height (cm)	177	177	177	177	177	177	177	177	177
Body weight (kg)	60.9	62.3	62.8	62.1	64.8	61.7	62.9	63.9	62.9
$\dot{\text{VO}}_2\text{max}$ (mL/kg/min)	83.4	77.0	71.6	72.1	68.7	76.1	76.9	76.4	78.2
$\dot{v}\text{VO}_2\text{max}$ (km/h)	20.8	21.2	20.1	20.1	19.7	21.3	20.8	20.7	21.2
LT (km/h)	17.0	16.7	16.4	17.8	16.9	17.1	18.3	18.2	17.0
LT (%)	81.9	78.8	81.8	88.3	85.9	80.3	87.8	88.1	80.2
RE_{bLT} (kcal/kg/km)	1.12	1.06	1.00	1.02	1.02	1.00	1.07	1.06	1.09
RE_{aLT} (kcal/kg/min)	1.28	1.18	1.14	1.13	1.08	1.12	1.19	1.14	1.15

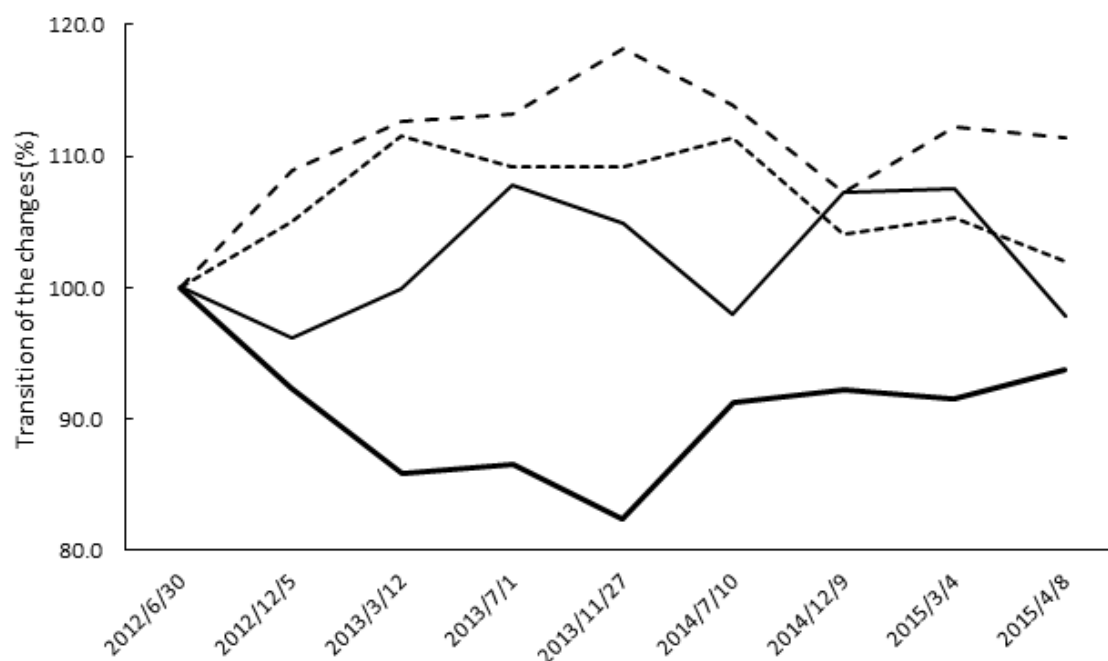


Figure VII-1. The changes ratio of subjects' physiological variables over four years.

Notes: The changes in each physiological variables as based on the value at 30th June 2012. Thick line; maximal oxygen uptake, thin line; lactate threshold, short broken line; running economy at intensity below the lactate threshold, long broken line; running economy at intensity above the lactate threshold.

Table VII-3. Correlation coefficients between intra-individual maximal oxygen uptake, lactate threshold and running economy at intensity below and above the lactate threshold.

	LT	RE _{bLT}	RE _{aLT}
$\dot{V}O_{2\max}$	-0.35	0.82**	0.87**
LT		-0.10	-0.20
RE _{bLT}			0.77*

*: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$.

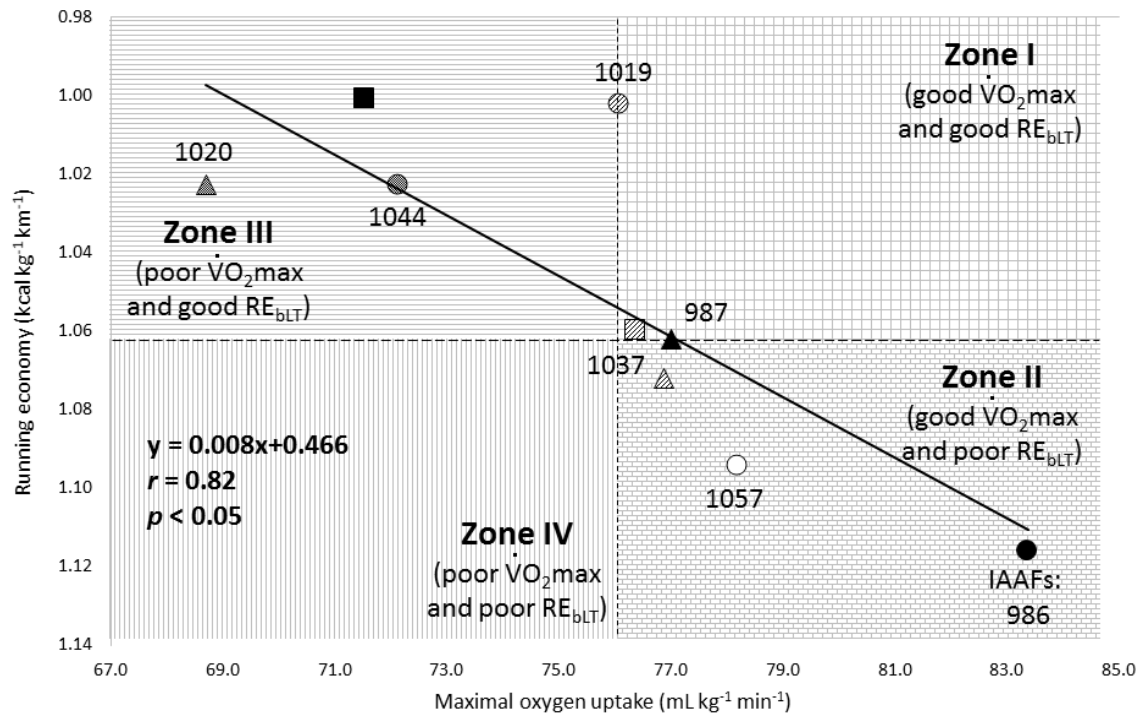


Figure VII-2. The intra-individual relationship between maximal oxygen uptake and running economy at intensity below the lactate threshold.

Notes: filled marks; 1st year values, dots marks; 2nd year values, slanted marks; 3rd year values, open mark; 4th year value, circle marks; June or April values, triangle marks; November or December values, square marks; March values, short broken line; subject's mean maximal oxygen uptake value, and long broken line; subject's mean running economy value.

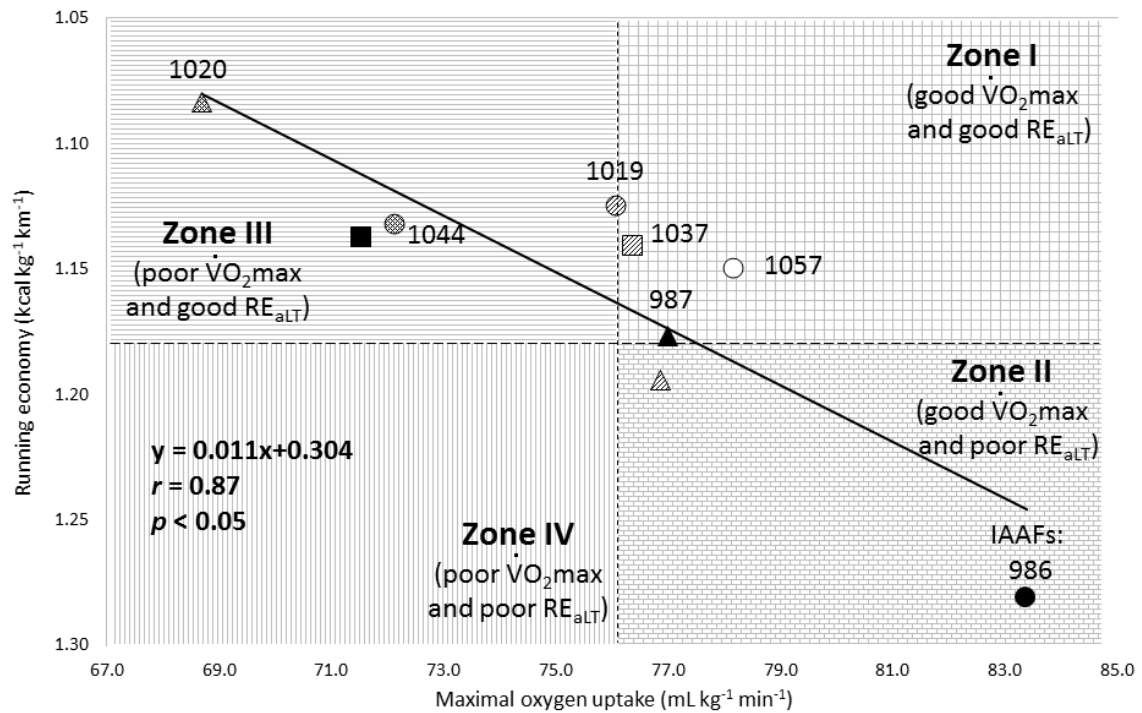


Figure VII-3. The intra-individual relationship between maximal oxygen uptake and running economy at intensity above the lactate threshold.

Notes: filled marks; 1st year values, dots marks; 2nd year values, slanted marks; 3rd year values, open mark; 4th year value, circle marks; June or April values, triangle marks; November or December values, square marks; March values, short broken line; subject's mean maximal oxygen uptake value, and long broken line; subject's mean running economy value.

D. 考察

1. 生理学的変数と走パフォーマンスの変化

世界クラス的女子長距離ランナーは5年間のトレーニングによって、 $\dot{V}O_{2\max}$ を8%低下させたもののREを10%向上させ、その結果3,000 m走パフォーマンスを8%向上させたことが報告されている (Jones 1998). 女子マラソン世界記録保持者は12年間のトレーニングを通して、 $\dot{V}O_{2\max}$ を向上させられなかった一方REを顕著に向上させ、その結果走パフォ

パフォーマンスを向上させたことが明らかにされている (Jones 2006). また、競技レベルの高いランナー集団では、数年間のトレーニングによって、 $\dot{V}O_{2max}$ の向上なしに走パフォーマンスを向上させたことも認められている (Arrese et al. 2005). このような観点から、競技レベルに優れたランナーは、すでに優れた $\dot{V}O_{2max}$ を有しているため、 $\dot{V}O_{2max}$ よりも RE を向上する方が容易であり (Saunders et al. 2010), $\dot{V}O_{2max}$ よりも RE の向上によって走パフォーマンスが向上すると指摘されている. 本研究課題の被験者も同様に、大学 1 年次の 6 月に示した非常に高い $\dot{V}O_{2max}$ ($83.4 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) が大学 2 年次の 11 月までに 17.6% 低下した一方、RE が向上したことによって走パフォーマンスは向上した. しかし最も興味深い結果は、被験者の $\dot{V}O_{2max}$ が $70 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 未満となった後、大学 4 年次までに $\dot{V}O_{2max}$ が向上する変化を示したことである. その一方で RE はわずかに低下したが、走パフォーマンスはその後も向上していることからこの生理学的変数の変化は効果的であったと推察される. この結果から、競技レベルに優れたランナーにとっても $\dot{V}O_{2max}$ の優劣がその後に向上すべき生理学的変数の決定に重要であると考えられる.

本来 RE は LT 強度を超えない走速度において評価されることが一般的であり (Morgan et al. 1989), その値は走パフォーマンスと強い関連が認められている (Daniels & Daniels 1992; Conley & Krahenbuhl 1980). 本研究課題において、被験者の RE_{bLT} は 4 年間で 2.0% の向上が認められた. このわずかな生理学的変数の変化はトップアスリートにとって走パフォーマンス向上に重要であり (Pugliese et al. 2014), 本研究課題の被験者の走パフォーマンスを向上させたと考えられる. また特に驚くべきことは、 RE_{bLT} よりも、レースペース付近の走速度である $19.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 走行時の RE_{aLT} が顕著に向上したことである. 4 年間を通して走パフォーマンスが向上していることから、 RE_{aLT} が競技レベルに優れたトラック競

技選手の走パフォーマンスに重要な知見をもたらすことを改めて示された。

2. $\dot{V}O_{2\max}$ と RE の縦断的变化の關係

競技レベルに関わらず、 $\dot{V}O_{2\max}$ と RE は逆相関の關係にあることが認められており (Fletcher et al. 2009; Hunter et al. 2005; Mooses et al. 2015), この關係は主に筋線維タイプが影響しているとされている (Hunter et al. 2005). 競技レベルに優れたランナーを対象にした本研究課題では、 $\dot{V}O_{2\max}$ と RE_{bLT} および RE_{aLT} の縦断的变化に逆相関の關係を認め、とりわけ後者との間に強い関連が示された (Figure VII-2 および Figure VII-3). この縦断的な变化の關係が認められる原因を、横断的な關係と同様に筋線維タイプによって説明すると、トレーニングによって type I 線維を発達させたとき、筋の機械的効率は向上し一方酸化能力は低下するため、RE 向上する一方 $\dot{V}O_{2\max}$ の低下が認められたと示唆される。またこの關係は、無酸素性エネルギー代謝の貢献があり、type II 線維を多く動員している LT を超える強度において強くなった。

Figure VII-2 および Figure VII-3 には、各測定時期における被験者の $\dot{V}O_{2\max}$ と RE_{bLT} または RE_{aLT} の關係だけでなく、被験者の $\dot{V}O_{2\max}$ と RE_{bLT} または RE_{aLT} の平均値を破線によって記した。この 2 本の破線によって $\dot{V}O_{2\max}$ と RE の關係は 4 つに分割できる。つまり右上の領域は $\dot{V}O_{2\max}$ および RE がともに優れている (Zone I), 右下の領域は $\dot{V}O_{2\max}$ が優れ RE が劣っている (Zone II), 左上の領域は RE に優れ $\dot{V}O_{2\max}$ が劣っている (Zone III), そして左下の領域は $\dot{V}O_{2\max}$ および RE がともに劣っている (Zone IV) と評価できる。被験者の $\dot{V}O_{2\max}$ と RE の關係は 1 年次に多くが Zone II であったが、2 年次には Zone III に移り、3 年次以降に多くが Zone I に近い Zone II または Zone III に位置し、

特にこの傾向は RE_{aLT} において強かった。つまり 1 年次から 2 年次にかけて被験者の $\dot{V}O_{2max}$ は低下した一方 RE_{aLT} が顕著に向上し、その後 2 年次から 3 年次にかけて RE_{aLT} がわずかに低下した一方 $\dot{V}O_{2max}$ は向上し、その結果走パフォーマンスを向上させたと言える。しかしながら単に RE_{aLT} が向上した 2 年次よりも、そこからわずかに RE_{aLT} が低下しても $\dot{V}O_{2max}$ の向上が認められた最終年次の走パフォーマンスはさらに向上したことから、 RE だけでなく $\dot{V}O_{2max}$ も優れていることが望ましいことが改めて示された。

E. 小活

本研究課題は、競技レベルに優れた中長距離ランナー1 名を対象に、 RE_{aLT} を含む走パフォーマンスに関連する生理学的変数を 4 年にわたって測定し、その変数の変化の関係を明らかにした。その結果、 $\dot{V}O_{2max}$ および RE は 4 年間を通して低下または向上し続けることはなく、向上と低下を繰り返しながら、最終的に $\dot{V}O_{2max}$ が 6.2%低下した一方、 RE_{bLT} および RE_{aLT} がそれぞれ 2.0%および 10.2%向上し、特にレースペース付近の強度における RE が顕著に向上した結果、3,000 m SC の走パフォーマンスを 4.0%向上したことが明らかとなった。さらに、 RE_{aLT} を向上し続けたときよりも、その後低下した $\dot{V}O_{2max}$ を向上した 3 年目以降でさらに走パフォーマンスが向上したことから、 $\dot{V}O_{2max}$ も優れていることが重要であることが示された。 $\dot{V}O_{2max}$ と RE の縦断的な関係に有意な逆相関が認められ、特に RE_{aLT} において強い関連が認められることが明らかとなった。したがって、同時期に $\dot{V}O_{2max}$ と RE_{aLT} が向上することは困難であることを意味し、どちらかの生理学的変数が向上したとき一方の変数は低下する関係にあると言える。

VIII. LT を超える強度における RE とバイオメカニクスの変数の関係 (研究課題 4)

A. 目的

研究課題 3-1 および 3-2 において、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の $\dot{V}O_{2max}$ と LT を超える強度における RE (RE_{aLT}) の縦断的变化には逆相関の関係が認められ、同時期に両変数を向上することは困難であることが明らかとなった。しかし中には同時期に $\dot{V}O_{2max}$ と RE_{aLT} の両変数が向上しているランナーも存在した。この一つの要因として、持久的トレーニングによる生理学的変数の変化に加えて、ランニングフォームの改善によるバイオメカニクスの変数の変化が影響している可能性がある。LT を超えない強度における RE (RE_{bLT}) の個人差の 50%以上はバイオメカニクスの変数によって説明でき (Williams & Cavanagh 1987), ランニングフォームの改善は RE_{bLT} を向上させるとされてきた (Moore 2016)。しかし, RE_{aLT} とバイオメカニクスの変数の関係はこれまでに明らかにされておらず, RE_{aLT} の向上にバイオメカニクスの変数が効果的であるかはわからない。バイオメカニクスの変数は走速度の増大に伴い大きく変化すると報告されており (Kyröläinen et al. 2001), LT を超える強度と LT を超えない強度では RE との関係が異なると推測される。加えて、運動強度の増大に伴い走行中の内的需要量は増大する (Ardigò et al. 1995) ことから, LT を超える強度において RE とバイオメカニクスの変数の関係は高まると予想される。

以上のことから本研究課題では、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, RE_{aLT} と支持局面のバイオメカニクスの変数の関係を明らかにすることを目的とした。

B. 方法

1. 被験者

本研究課題の被験者は、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14名であり、被験者の年齢、身長および体重はそれぞれ 19.8 ± 1.0 歳, 172.1 ± 5.5 cm および 58.1 ± 4.1 kg であった。被験者の 5,000 m シーズン最高記録および国際陸上競技連盟が発行する IAAF Score (Spiriev 2014) の得点はそれぞれ $15'16''7 \pm 31''8$ および 763.2 ± 90.6 であった。実験を開始するにあたり、すべての被験者に本研究課題の目的、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、本研究課題は国立大学法人筑波大学大学院人間総合科学研究科倫理委員会の承認を得て行なわれた (標題番号: 体 26-65)。

2. 実験デザイン

生理学的変数を測定する多段階漸増負荷走行テストとバイオメカニクスの変数を測定する短走路走行テストを 2 週間以内に実施した。なお、足が地面に接地している支持局面は、接地する際に大きな反力を受けることや、離地する際に推進力を発揮するため、RE に大きく影響を与える局面であると報告されており (Heise et al. 2011; Kram 2000)、本研究課題では支持局面のバイオメカニクスの変数を扱った。

i. 多段階漸増負荷走行テスト

多段階漸増負荷走行テストは、被験者を実験室内の傾斜 1%に設定されたトレッドミル (ORK-7000, 大竹ルート工業, 岩手) 上を走行させることで環境条件を整えた。室温およ

び湿度を 23-26°C および 40-60%にそれぞれ設定し、常に換気を行なうことによって新鮮な空気を保った。すべての実験は 15-19 時の間に実施した。

被験者は研究課題 2 と同様の実験プロトコルによって $\dot{V}O_{2max}$, LT および RE_{aLT} を測定した。なお第 1 ステージの走速度は被験者の走能力に合わせて 12.6 または 13.8 km \cdot h $^{-1}$ にした。同様に呼気ガスパラメータ、血中乳酸濃度 (bLa)、心拍数および主観的運動強度 (RPE) の分析は研究課題 1 の方法に準じて行なった。

ii. 短走路走行テスト

多段階漸増負荷走行テストの結果、すべての被験者の LT を超えた走速度であった 18.6 km \cdot h $^{-1}$ において実験室内の 50 m の走路を走行させた。被験者は 10 m 程度の加速の後、一定の走速度において走行するように指示された。5 m の間隔で置かれた光電管 (Timing Systems, Brower, Draper, UT) を用いて即時的な走速度の確認が行なわれ、走速度が 18.6 km \cdot h $^{-1}$ の \pm 3%未満の範囲である、右足で 2 枚のフォースプレートのうちいずれかを確実に踏めている、かつ被験者が主観的に自然なランニングフォームであったと評価した場合を成功試技とした。その際に光学式三次元動作解析システム (250 Hz, VICON MX+, VICON Motion Systems, Oxford) を用いて、12 台の赤外線カメラによって走動作を測定した。被験者には身体測定点 47 点に赤外線反射マーカーを貼付し、三次元座標データを収集した。静止座標系は、走路進行方向に直行する右方向を X 軸、走行進行方向を Y 軸、鉛直上向きを Z 軸とする右手座標系と定義した。得られた座標データは Wells and Winter (1980) の方法を用いて、分析点毎に最適遮断周波数を決定し、Butterworth digital filter による平滑化を行なった (2.5-25 Hz)。地面反力を測定するために 2 枚のフォースプラットフォーム (9281A,

9287B, Kistler, Winterthur) を用い, サンプルング周波数を 1,000 Hz として測定した. なお, 50 N 以下の力は除外した (Kyröläinen et al. 2001). すべての被験者は各々の足のサイズに合った共通のシューズ (WAVE SPACER AR3, Mizuno, 大阪) を履き試技を行なった.

3. 算出項目および算出方法

i. 生理学的変数

$\dot{V}O_{2max}$, $v\dot{V}O_{2max}$, vLT および LT は研究課題 2 の方法に準じて算出された. RE_{aLT} も同様に, すべての被験者が LT を超えた走速度であった, $18.6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 走行時の $\dot{V}O_2$, RER および ΔbLa を用いて研究課題 2 の方法に準じて, 1 km 走行当たりのエネルギーコスト ($\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$) として算出した.

ii. ストライド長, ピッチおよび接地時間

右足がフォースプラットフォームに接地してから左足が接地するまでの身体重心の移動距離によってストライド長 (stride length: SL ; m) を算出した. 右足の接地から左足の接地までの時間の逆数によってピッチ (stride frequency: SF ; Hz) を算出した. 接地時間 (contact time: CT ; sec) は地面反力が 50 N を超えた時間によって算出された (Kyröläinen et al. 2001).

iii. 関節角度および関節角速度

平滑化された座標データから, 身体を 15 の剛体セグメントにモデル化した. 各セグメントの重心位置, 質量, 慣性モーメントなどの慣性パラメータは阿江 (1992) の推定式を用い

て身体部分慣性係数を算出した。

右脚の各関節において、荏山ほか (2013) の方法を用い、股関節の屈曲伸展座標系、内外転座標系および内外旋座標系、膝関節の屈曲伸展座標系、内外反座標系および内外旋座標系、足関節の底屈背屈座標系、内外反座標系および内外旋座標系を定義し (Figure VIII-1), それを基に関節座標系を定義した (Figure VIII-2d-e). 同様に、荏山ほか (2013) の方法を用い、身体に添付したマーカーを用いて、右足、右下腿および右大腿セグメントの長軸に対して互いが直行する 3 軸のセグメント座標系を定義した (Figure VIII-2a-c).

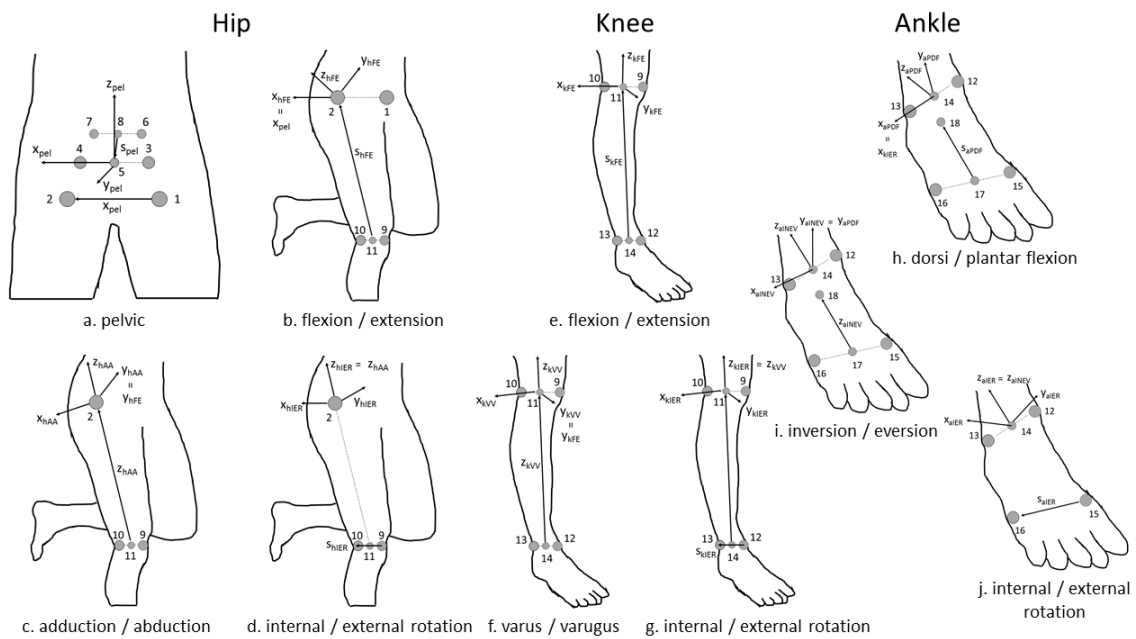


Figure VIII-1. Definition of the coordinate system of the hip, knee and ankle joints (reproduced from Kariyama et al. 2013).

Notes: 1 center of left hip joint (2 right), 3 left ilium-anterior superior iliac spine (4 right, 5 center), 6 left ilium-posterior superior iliac spine (7 right, 8 center), 9 tibia-medial ridge of tibial plateau (10 lateral, 11 center), 12 tibia-apex of the medial malleolus (13 fibula-apex of the lateral malleolus, 14 center), 15 foot/PIP medial side (16 lateral, 17 center), 18 foot/calcaneus-center of posterior surface.

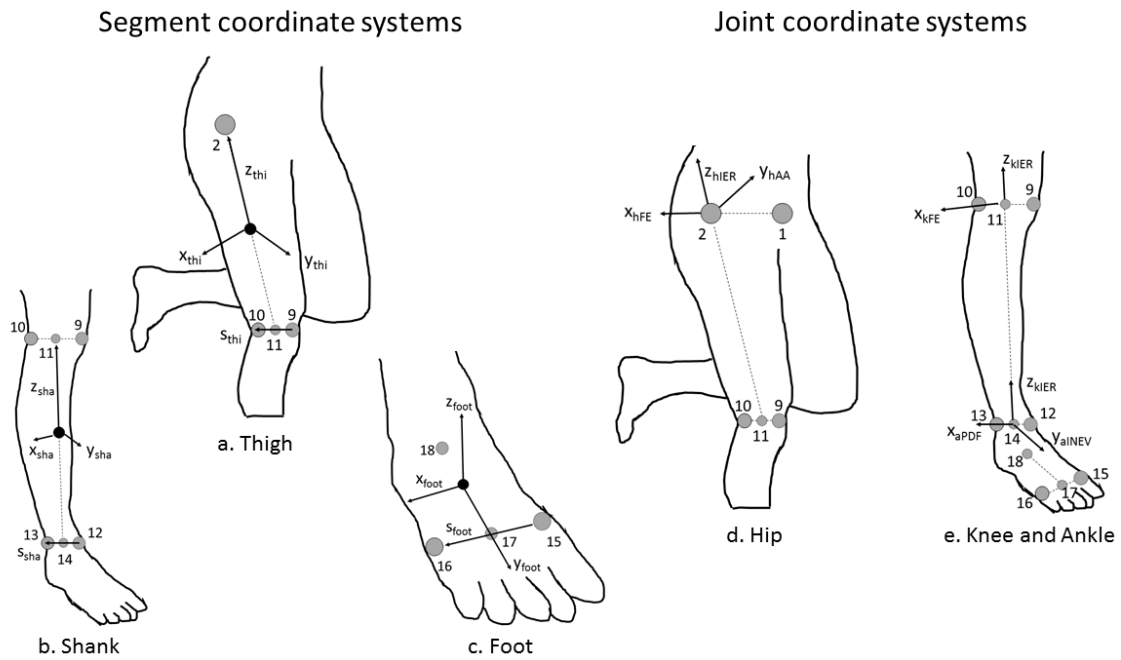


Figure VIII-2. Definition of the segment coordinate systems of the thigh, shank and foot and the joint coordinate systems of the center of the hip, knee and ankle (reproduced from Kariyama et al. 2013).

Notes: 1 center of left hip joint (2 right), 9 tibia-medial ridge of tibial plateau (10 lateral, 11 center), 12 tibia-apex of the medial malleolus (13 fibula-apex of the lateral malleolus, 14 center), 15 foot/PIP medial side (16 lateral, 17 center), 18 foot/calcaneus-center of posterior surface.

関節角度の算出方法は荻山ほか (2013) の算出方法を用いた。つまり、股関節屈曲伸展角 (FE_{H JA}) は骨盤座標系の y_{pel} 軸と股関節屈曲伸展座標系の y_{hFE} 軸との角度差、股関節内外転角 (AA_{H JA}) は股関節屈曲伸展座標系の z_{hFE} 軸と股関節内外転座標系の z_{hAA} 軸との角度差、股関節内外旋角 (IER_{H JA}) は股関節内外転座標系の x_{hAA} 軸と股関節内外旋座標系の x_{hIER} 軸との角度差によって、それぞれ算出した。同様に、膝関節屈曲伸展角 (FE_{K JA}) は股関節内外旋座標系の y_{hIER} 軸と膝関節屈曲伸展座標系の y_{kFE} 軸との角度差、膝関節内外旋角 (IER_{K JA}) は膝関節内外反座標系 x_{kVV} 軸と膝関節内外旋座標系の x_{kIER} 軸との角度差、足関

節底背屈角 (PDF_{AJA}) は膝関節内外旋座標系の y_{kIER} 軸と足関節底屈背屈座標系の y_{aPDF} 軸との角度差, 足関節内外反角 (INEV_{AJA}) は足関節底屈背屈座標系の z_{aPDF} 軸と足関節内外転座標系の z_{aINEV} 軸との角度差によって, それぞれ算出した.

得られたそれぞれの関節角度を時間微分することで, 関節角速度を算出した. 符号の正負は足関節で底屈および外反を正, 背屈および内反を負, 膝関節で伸展および外旋を正, 屈曲および内旋を負, 股関節で伸展, 外転および外旋を正, 屈曲, 内転および内旋を負とした. 算出されたデータは, 右足が接地し離地するまでの時間で規格化した. また, それぞれの変数において, 接地時 (on), 離地時 (off), 最大 (max) および最小 (min) の値を求めた.

iv. 地面反力

得られた X, Y, Z 軸 (それぞれ左右, 前後, 鉛直方向) の地面反力は被験者の体重によって除し, 同じく右足が接地し離地するまでの時間を 100%として規格化した. X 軸は, 進行方向に対して右手側への力が正, Y 軸は進行方向への力を正とした. それぞれの軸において最大値および最小値 (Z 軸を除く) を求め, また Z 軸において力積を求めた.

v. 関節トルク

セグメント角速度は, 小池ほか (2006) の方法を用いて算出した. 右脚の 3 つの関節トルクは, 身体 of 3 次元座標と地面反力データを基に静止座標系上で逆動力学計算を行ない, 関節座標系に投影したものを用いた. 得られた関節トルクは, 被験者の体重によって除し, 同じく右足が接地し離地するまでの時間を 100%として規格化した. また, それぞれの変数において, 最大値および最小値を求めた.

4. 統計分析

RE_{aLT}の説明変数を明らかにするために、関節角度および関節角速度の on, off, max および min を従属変数に代入し、ステップワイズ法による重回帰分析を行ない、またその際に算出される分散拡大係数 (variance inflation factor: VIF) の値を確認した。14 名の被験者のうち、18.6 km・h⁻¹ 走行時の RE_{aLT} の優れていた上位 7 名を Good 群、劣っていた下位 7 名を Poor 群とした。 $\dot{V}O_{2max}$, $v\dot{V}O_{2max}$, LT, RE_{aLT}, 5,000 m シーズン最高記録, SL, SF および CT の群間の差を明らかにするために対応のない t 検定を用いて分析を行なった。関節角度、関節角速度、関節トルクおよび地面反力については規格化された時間と群の 2 要因分散分析を行ない、群における主効果が認められたとき、Bonferroni の信頼区間の調整および最大値および最小値に対して対応のない t 検定を用いて分析した。2 変数間の関係には Pearson の積率相関係数を用いて分析した。数値はすべて平均値 \pm 標準偏差で示した。すべての統計処理には SPSS Statistic 22 (IBM 社, Chicago, IL) を使用した。統計的有意水準は $p < 0.05$ とした。また対応のない t 検定に加えて、効果量 (effect size) も、測定した変数の群間の差を明らかにするために、Cohen (1998) の方法を用いて算出し、Lipsey (1990) の規格によって解釈した。したがって、効果量 d が 0.2 未満の場合はその差がほとんどなし、0.2 以上 0.5 未満の場合はその差が小程度、0.5 以上 0.8 未満の場合はその差が中程度、そして 0.8 以上の場合は差の差が大きいと判断した。

C. 結果

$\dot{V}O_{2max}$, $v\dot{V}O_{2max}$, LT, RE_{aLT} および 5,000 m シーズン最高記録の結果を Table VIII-1 に示した。RE_{aLT}, vLT および LT は Good 群が有意に高い値であったが、5,000 m シーズン

最高記録を含むその他の変数においては両群で有意な差が認められず、効果量も中程度または小程度であった。Good 群と Poor 群のバイオメカニクスの変数を比較したとき、ストライド長 (SL) およびピッチ (SF) に両群の有意な差は認められず、効果量も小さかった (Table VIII-1)。接地時間 (CT) も同様に両群において有意な差は認められなかった一方、中程度の効果量が認められた。

Table VIII-1. Mean (\pm SD) value of the physiological variables, 5,000 m season best time and biomechanics variables, and p values (and effect size) between good group and poor group on each variables.

	All	Good group	Poor group	p value	Effect size
$\dot{V}O_{2\max}$ (mL \cdot kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)	70.6 \pm 5.1	69.3 \pm 6.1	71.9 \pm 3.9	0.37	0.51
$v\dot{V}O_{2\max}$ (km \cdot h $^{-1}$)	20.0 \pm 0.7	20.1 \pm 0.7	19.8 \pm 0.8	0.51	0.37
vLT (km \cdot h $^{-1}$)	17.1 \pm 0.9	17.7 \pm 0.6	16.4 \pm 0.6	<0.01	2.09
LT (%)	85.4 \pm 4.0	88.1 \pm 3.4	82.7 \pm 2.4	<0.01	1.82
5,000 m season best time	15'16"7 \pm 31"8	15'07"9 \pm 21"4	15'26"9 \pm 40"6	0.30	0.59
RE (kcal \cdot kg $^{-1}\cdot$ km $^{-1}$)	1.11 \pm 0.05	1.07 \pm 0.04	1.15 \pm 0.03	<0.05	2.28
SL (m)	1.66 \pm 0.09	1.64 \pm 0.11	1.67 \pm 0.08	0.67	0.36
SF (Hz)	3.09 \pm 0.16	3.11 \pm 0.20	3.07 \pm 0.13	0.41	0.24
CT (sec)	0.169 \pm 0.010	0.172 \pm 0.008	0.165 \pm 0.011	0.20	0.73

Notes: SL; step length, SF; step frequency, CT; cotact time.

すべての関節角度、関節角速度の接地時 (on)、離地時 (off)、最大値 (max) および最小値 (min) の変数においてステップワイズ重回帰分析を行なった結果、接地時足関節底屈背

屈角度 ($\text{PDF}_{\text{AJAon}}$, $\text{VIF} = 1.195$), 離地時足関節内外反角速度 ($\text{INEV}_{\text{AJAoff}}$, $\text{VIF} = 2.921$) および最大膝関節内外反角速度 ($\text{IER}_{\text{KJAVmax}}$, $\text{VIF} = 3.066$) の 3 つの変数と RE_{aLT} の間に有意な決定係数 ($R^2 = 0.806$, $p < 0.01$) が認められ, とりわけ RE_{aLT} と $\text{PDF}_{\text{AJAon}}$ の 2 変数の間には有意な正の相関関係 ($r = 0.67$, $p < 0.01$) が認められた (Figure VIII-3).

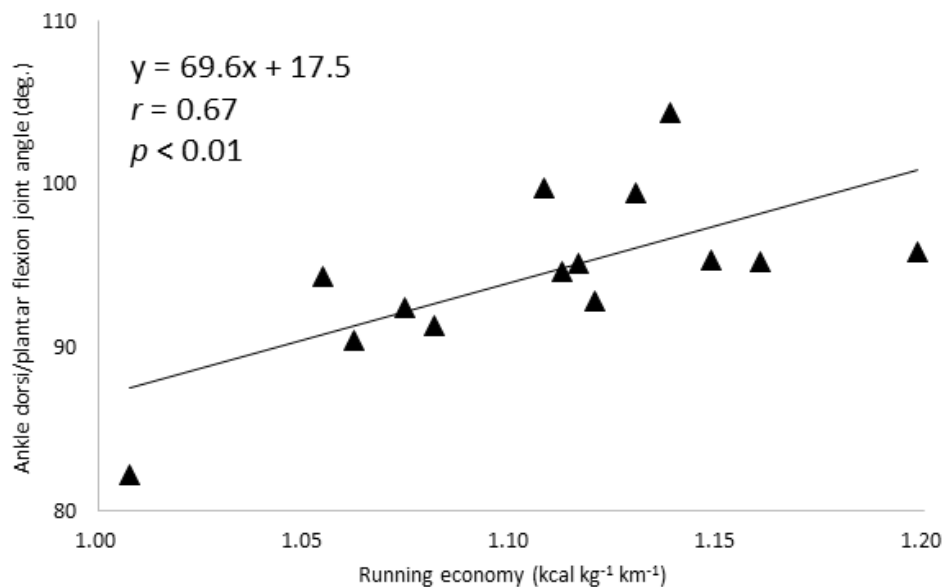


Figure VIII-3. The relationship between running economy at intensity above the lactate threshold (at $18.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) and the ankle dorsi/plantar flexion joint angle at toe on.

接地中の関節角度, 関節角速度および関節トルクの結果を足関節, 膝関節および股関節に分けてそれぞれ Figure VIII-4, Figure VIII-5 および Figure VIII-6 に示した. 関節角度において群間に主効果が認められたのは足関節底屈背屈角度 (PDF_{AJA}), 膝関節屈曲伸展角度 (FE_{KJA}) および股関節内外旋角度 (IER_{HJA}) であり (すべて $p < 0.05$), PDF_{AJA} および FE_{KJA} は関節角度の最小値 (それぞれ $p < 0.05$ および 0.01), IER_{HJA} は最大値および最小値において有意差が認められた ($p < 0.05$). 関節角速度に関する両群に主効果が認められた

変数はなかった. 関節トルクは股関節屈曲伸展トルク ($FE_H TRQ$) において主効果が認められたが ($p < 0.05$), トルクの最大値および最小値に有意な差は認められなかった.

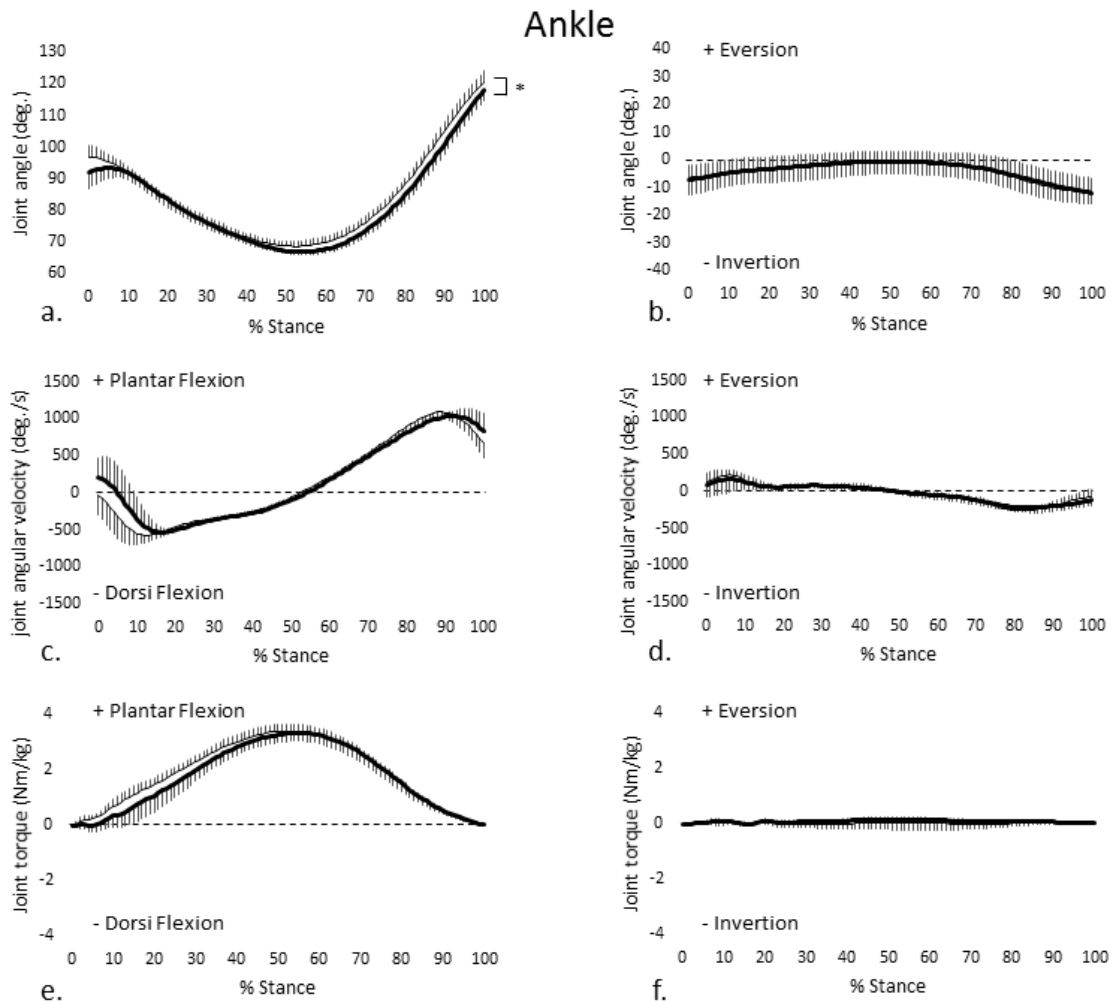


Figure VIII-4. The changes in the joint angle, joint angular velocity and joint torque at the ankle joint during support phase.

Notes: thick line; mean changes of good group, thin line; mean changes of poor group, a. dorsi/plantar flexion angle, b. inversion/eversion angle, c. dorsi/plantar flexion angular velocity, d. inversion/eversion angular velocity, e. dorsi/plantar flexion torque, f. inversion/eversion torque. *; there are significant difference ($p < 0.05$) between good group and poor group.

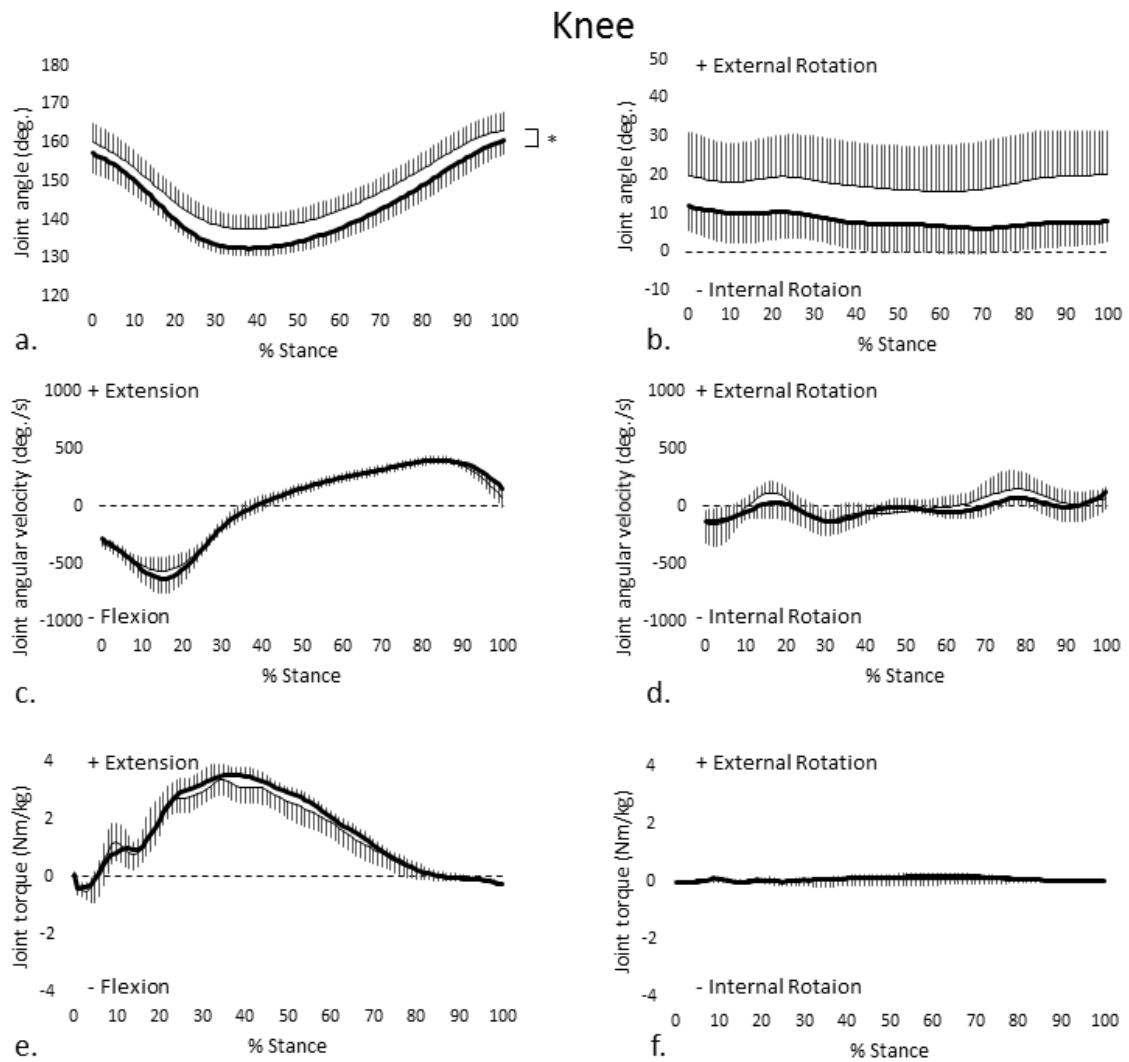


Figure VIII-5. The changes in the joint angle, joint angular velocity and joint torque at the knee joint during support phase.

Notes: thick line; mean changes of good group, thin line; mean changes of poor group, a. flexion/extension angle, b. internal/external rotation angle, c. flexion/extension angular velocity, d. internal/external rotation angular velocity, e. flexion/extension flexion torque, f. internal/external rotation torque. *; there are significant difference ($p < 0.05$) between good group and poor group.

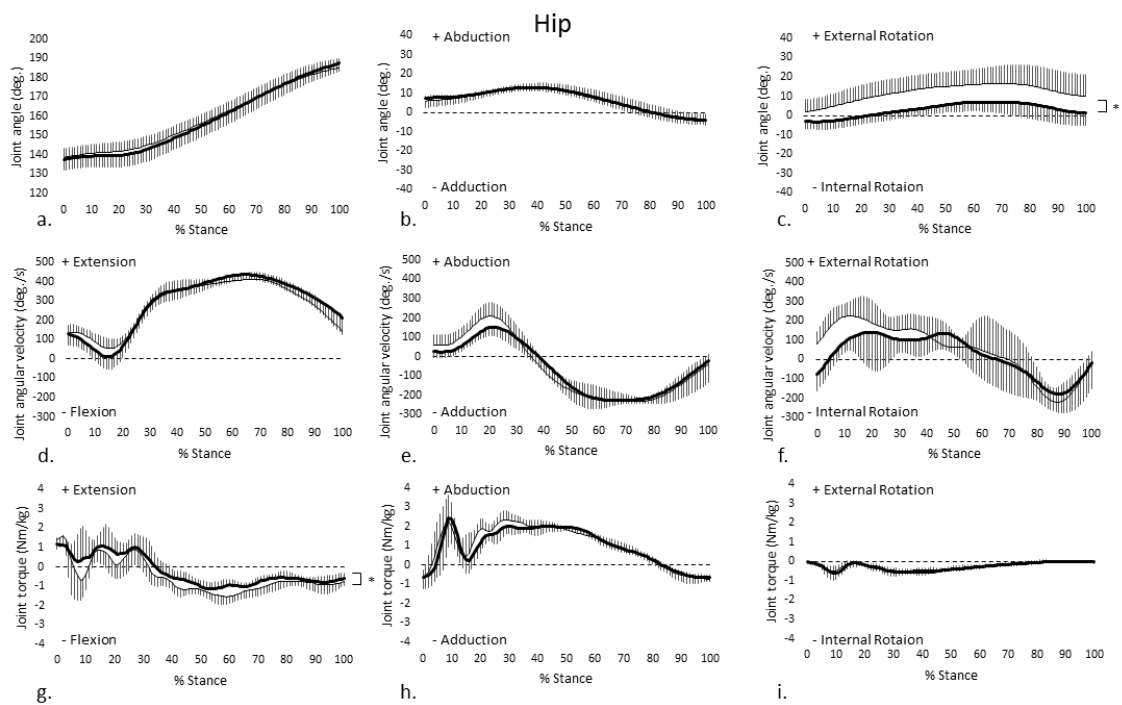


Figure VIII-6. The changes in the joint angle, joint angular velocity and joint torque at the hip joint during support phase.

Notes: thick line; mean changes of good group, thin line; mean changes of poor group, a. flexion/extension angle, b. adduction/abduction angle, c. internal/external rotation angle, d. flexion/extension angular velocity, e. adduction/abduction angular velocity, f. internal/external rotation angular velocity, g. flexion/extension torque, h. adduction/abduction torque, i. internal/external rotation torque. *; there are significant difference ($p < 0.05$) between good group and poor group.

地面反力の結果を Figure VIII-7 に示した. 鉛直成分の力積が Good 群で小さい傾向にあった ($p = 0.05$) が, それぞれの変数に主効果は認められなかった. 鉛直方向のピーク値も同様に有意差は認められなかった.

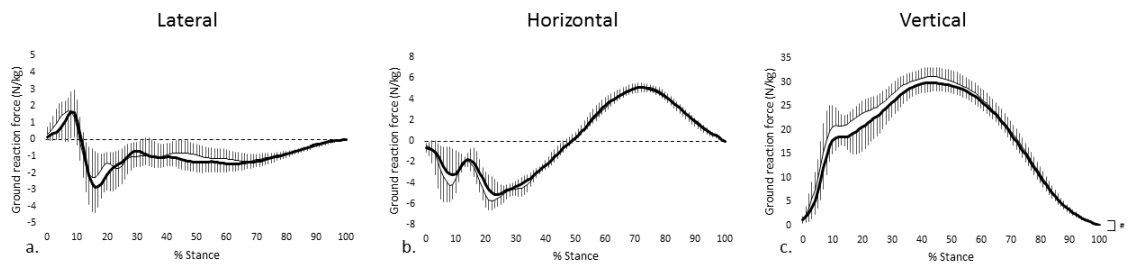


Figure VIII-7. The changes in the (a) vertical, (b) horizontal and (c) vertical ground reaction force during support phase.

Notes: thick line; mean changes of good group, thin line; mean changes of poor group. #; there are tendency difference ($p = 0.05$) between good group and poor group.

D. 考察

1. RE_{aLT} とバイオメカニクス的変数の関係

各関節角度および関節角速度の接地時 (on), 離地時 (off), 最大 (max) および最小 (min) の値を独立変数, RE_{aLT} を従属変数とし, ステップワイズ重回帰分析を行なった結果, 接地時足関節底屈背屈角度 (PDF_{AJAon} , $VIF = 1.195$), 離地時足関節内外反角速度 ($INEV_{AJAoff}$, $VIF = 2.921$) および膝関節最大内外反角速度 ($IER_{KJAVmax}$, $VIF = 3.066$) の3つの変数によって RE_{aLT} の 80.6% を説明できることが明らかとなった. したがって, 本研究課題において対象とし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の場合, RE_{aLT} の個人差の 80% 以上をバイオメカニクス的変数によって評価できることが示された. これは Williams and Cavanagh (1987) が示した RE_{bLT} とバイオメカニクス的変数の決定係数よりも高い. 運動強度の増大に伴い走行中の内的需要量は増大するため (Ardigò et al. 1995), 運動中のランニングフォームなどの技術的要因は RE の決定に重要となり, その結果 RE_{aLT} はバイオメカニクス的変数との関連が高まったと考えられる.

ステップワイズ重回帰分析によって選択された 3 つの変数のうち、特に、PDF_{A JAon} は RE_{aLT} との間に有意な正の相関関係が認められ (Figure VIII-3)、接地時に過度に底屈していないかが RE_{aLT} の成否を決定すると示された。INEV_{A JAVoff} は RE_{aLT} との間に有意ではない正相関が認められた ($r = 0.44$, $p = 0.12$)。離地時の平均足関節内外反角速度は内反優位に出ており、内反角速度が小さいまたは外反角速度が出ていたランナーほど RE_{aLT} が劣っていた。支持期後半から出現する足関節内反角速度は、支持期の 80%-90%局面において最大値となり、離地 (100%) にかけて小さくなる傾向にあるが (Figure VIII-4d)、その内反角速度が離地まで残っている方が経済性に優れていると推察される。IER_{K JAVmax} は RE_{aLT} との間に有意ではない正相関が認められ ($r = 0.27$, $p = 0.36$)、支持期に膝の外反角速度が大きいランナーほど経済性に劣ると推察される。前進するランニングの特に全身の体重を脚で支える支持期において、膝の外反への角速度を持つことは経済性を悪化させると考えられる。両群に主効果は認められなかった IER_{K JAV} は、両群ともに外反および内反に角速度が出現していたが、Poor 群の方が大きい最大値を出現させていた (Figure VIII-5d)。

2. 経済性に優れたランニングフォーム

群間に主効果が認められた 1 つ目の変数は、接地中の足関節底屈背屈角度 (PDF_{A JA}) であり、Good 群で有意に低値を示した。したがって支持期全体を通して Good 群は Poor 群に比べてより背屈位で接地していた (Figure VIII-4a)。一般に足関節が背屈しているとき、足関節の内外反は生じにくい一方、底屈しているときは遊びが生まれ、足関節の内外反が生じやすくなる (Barnett & Napier 1952)。それを防ぐために腓腹筋やヒラメ筋の活動が活発となり、RE を低下させると示唆される。特に高強度走行においては接地による衝撃が増

大し、より腓腹筋やヒラメ筋の活動が増大するため (Kyröläinen et al. 2001), RE が低下したと推察される。地面反力の Z 軸の力積は Good 群において小さい傾向があり, (Figure VIII-7c), 接地の前半に Good 群の波形が低値を示しており, これには接地の良し悪しも影響していると推察される (Scholz et al. 2008)。実際, PDF_{AJA} の底屈が接地時の衝撃を強くすることが指摘されており (Kellis & Liassou 2009), この見解を支持する。

群間に主効果が認められた 2 つ目の変数は膝関節屈曲伸展角度 (FE_{KJA}) であり, Good 群において接地中に有意な低値を示した (Figure VIII-5a)。特に最小屈曲伸展角度は Good 群で有意に小さい値であり, より屈曲していたと言える。膝関節の屈曲は接地に伴う衝撃を緩衝し, 地面反力を低下させることが指摘されている (Kellis & Liassou 2009) ことから, 地面反力の力積が低値であることは優れた経済性に影響していると示唆される。加えて, 離地時に股関節の関節角度が同じで膝関節がより屈曲している動作は, 伸展している動作よりも合理的なキック動作であると報告されている (伊藤 2000)。本研究においても Good 群は Poor 群と比較して, 股関節屈曲伸展角度 (FE_{HJA}) は同じ角度であった (Figure VIII-6a) 一方 FE_{KJA} はより屈曲していた。

群間に主効果が認められた 3 つ目の変数は, 接地中の股関節内外旋角度 (IER_{HJA}) であり, Good 群で有意に低値を示した (Figure VIII-6c)。また, IER_{HJA} の最大値および最小値において Good 群で有意に低値を示していた。つまり, 経済性に優れたランナーは接地時に股関節が内旋しており, その後も支持期全体を通して大きく外旋することなく離地していた。解剖学的な面から解釈すれば, 接地時の内旋が高強度走行時の経済性を高めた可能性を 2 点挙げられる。1 点目は, 回復脚の振り戻しについてである。接地時における支持脚の股関節内旋は回復脚の振り戻しがあり, 一方外旋では回復脚が十分に振り戻されない (ニ

ューマン 2005). 従って, Good 群は接地時により回復脚の振り戻しがあり, 経済性が優れていたと示唆される. 2 点目は, 股関節伸展筋である大殿筋の働きについてである. 接地時の股関節内旋は大殿筋がより伸張した状態で収縮できるため (ニューマン 2005), 大きな力を発揮することが可能となり, 経済性を向上させたと示唆される.

群間に主効果が認められた 4 つ目の変数は股関節屈曲伸展トルク ($FE_H TRQ$) であり, 唯一の関節角度以外の変数となり, Good 群が Poor 群と比較して有意に高い伸展トルクおよび低い屈曲トルクを示した (Figure VIII-6g). 股関節の伸展トルクは, 低強度走行時にはほとんど認められず, 高強度走行になるに伴って増大することが報告されている (阿江ほか 1986). 榎本ほか (2008) は, 高強度走行におけるケニア人ランナーと日本人ランナーのバイオメカニクスの指標を比較したとき, ケニア人ランナーの接地直後の大きな股関節伸展トルクが認められ, 優れた経済性を生んでいる可能性を指摘した. 本研究課題においてもその結果を支持し, $FE_H TRQ$ の接地直後の大きな伸展トルク発揮は推進に対する出力を有効に行なえており, これが優れた経済性に影響していると示唆される.

E. 小活

本研究課題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, RE_{aLT} と支持局面のバイオメカニクスの変数の関係を明らかにした. その結果, RE_{aLT} の個人差の 80%以上をバイオメカニクスの変数によって説明できることが認められた. また, 高強度走行中の経済性に優れている 4 つの特筆すべきランニングフォームが明らかとなった.

IX. 総合考察

1. LT を超える強度における RE を評価する重要性

競技レベルに優れたランナーの走パフォーマンスと最も関連する変数は RE であることが先行研究において指摘されており (Conley & Krahenbuhl 1980), 一般に $\dot{V}O_2$ が定常状態となる LT を超えない強度において RE は評価されてきた (Morgan et al. 1989). しかし, 実際の競技場面 (特にトラック種目) では LT を超える強度においてレースが展開されていることから, 本研究では LT を超える強度において RE を評価することの重要性を横断的および縦断的な観点から明らかにした. これまで LT を超える強度における RE (RE_{aLT}) が評価されてこなかった理由は, LT を超える強度において $\dot{V}O_2$ の定常状態が認められないこと (Bransford & Howley 1997; Daniels & Daniels 1992; Nagle et al. 1970) および無酸素性エネルギー代謝量を評価できないこと (Kaneko 1990) の 2 つがあげられる. 後者はすでに di Prampero and Ferretti (1999) が血中乳酸蓄積量 (ΔbLa) から推定する方法を提唱しており, 多くの研究 (Bertuzzi et al. 2015; di Prampero et al. 1993; Kyröläinen et al. 2001; 2003; Zagatto et al. 2011) が, その方法を用いて無酸素性エネルギー代謝量を算出している. また前者については, 本研究におい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の $\dot{V}O_2$ は LT を超える強度においても定常状態が認められることを認めた (研究課題 1; Figure IV-1). 以上のことから, 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対して RE_{aLT} を評価することは可能であると言える. 以上を踏まえて本研究では, RE_{aLT} の有用性を明らかにするために横断的な評価 (研究課題 2) に加えて, 縦断的に評価 (研究課題 3-1 および 3-2) した.

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の 1,500 m 走パフォーマンスと

LTを超えない強度におけるRE (RE_{bLT}) および RE_{aLT} との関係を調査した研究課題2では、走パフォーマンスと両強度におけるREとの間に有意な負の相関関係を認めたが、特に RE_{aLT} で強い関連が認められた (それぞれ $r = -0.57$ および -0.72 , Figure V-3). また、競技レベルに優れたランナーのトラック種目の走パフォーマンスは $\dot{V}O_{2max}$ とREによって大部分が説明できると報告されているが (Ingham et al. 2008), 本研究においても1,500 m 走パフォーマンスは $\dot{V}O_{2max}$ と RE_{aLT} によって60%以上説明できることを明らかにした (研究課題2; Table V-4).

走パフォーマンスと生理学的変数の数か年にわたる変化を縦断的に追跡した研究課題3-1では、 $\Delta\dot{V}O_{2max}$ と ΔRE_{bLT} および ΔRE_{aLT} との間に有意な逆相関の関係を認め、とりわけ後者との間の関連が強いことを認めた (Figure VI-3). 競技レベルに優れた3,000 m SCランナーの縦断的な生理学的変数と走パフォーマンスを追跡した研究課題3-2では、4年間で $\dot{V}O_{2max}$ が6.7%低下、 RE_{bLT} が2.0%向上、そして RE_{aLT} が10.2%向上し、その結果3,000 m SCの走パフォーマンスが4.0%向上したことを認めた (Table VII-1; Table VII-2). 競技レベルに優れたランナーにとって走パフォーマンスの1%の変動は非常に重要な変化であると指摘されており (Pugliese et al. 2014), この対象者の場合、特に RE_{aLT} の顕著な向上が走パフォーマンスを4.0%も向上させたと推察される.

以上の結果からも、従来評価されていた RE_{bLT} よりも RE_{aLT} を評価することが、走パフォーマンスの変化を検討するうえで重要な知見をもたらすと考えられる.

2. バイオメカニクスの変数の改善の有用性

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 $\dot{V}O_{2max}$ と RE_{aLT} の縦断的変

化に逆相関の関係を認めた（研究課題 3-1 および 3-2）。つまり一方の変数が向上したとき、もう一方の変数は低下する。研究課題 3-1 の $\Delta\dot{V}O_{2\max}$ と ΔRE_{aLT} の関係における回帰直線の傾きは-0.69 であり、これは $\dot{V}O_{2\max}$ が 1%向上したとき RE_{aLT} はおよそ 0.7%低下する（または RE_{aLT} が 1%向上したとき $\dot{V}O_{2\max}$ はおよそ 1.4%低下する）ことを示唆する。

しかし研究課題 3-1 の個人的な変化に着目すると（Table VI-2）、中には同時期に両変数が向上しているランナーも存在した。 $\dot{V}O_{2\max}$ と RE_{aLT} の縦断的変化の逆相関の關係の主な要因として筋線維タイプ割合の変化が挙げられるが、両変数が同時期に向上するためにはその要因とは別の要因が影響していると推察される。 RE の個人差は 50%以上をバイオメカニクスの変数によって説明でき（Williams & Cavanagh 1987）、ランニングフォームの改善は RE を向上する有効なトレーニング手段となりうる（Moore 2016）。そこで本研究ではバイオメカニクスの変数と RE_{aLT} の関係を明らかにし、その結果 RE_{aLT} の個人差の 80%以上をバイオメカニクスの変数によって説明できることを認めた（研究課題 4）。ランニングフォームの改善は、運動における内的な仕事量を減少させ、 $\dot{V}O_{2\max}$ の低下を抑制しつつ、 RE_{aLT} を向上できると示唆される。同時期に両変数を向上するために持続的トレーニングに加えて、ランニングフォームといったバイオメカニクスの要因の改善をするトレーニングを行なうことは RE_{aLT} の向上にとって有用であると考えられる。

3. 効果的に走パフォーマンスを向上させるトレーニング戦略

走パフォーマンスは $\dot{V}O_{2\max}$ と RE によって大部分が説明でき（Ingham et al. 2008; 研究課題 2）、これらの生理学的変数の向上が走パフォーマンスを向上させる。競技レベルに優れたランナーは、優れた $\dot{V}O_{2\max}$ を有していることが前提であり、トレーニングによっ

て $\dot{V}O_{2\max}$ を向上するよりも RE を向上する方が容易であり (Saunders et al. 2004), また RE の向上が走パフォーマンスの向上に関連する (Jones 1998; 2006). 研究課題 3-1 で生理学的変数を縦断的に追跡した結果, $\dot{V}O_{2\max}$ と RE_{aLT} のどちらか (または両変数) を向上し, 走パフォーマンスを向上させており, 生理学的変数の向上と走パフォーマンスの変化の間に直接の関連は認められなかった. この結果から $\dot{V}O_{2\max}$ と RE_{aLT} のどちらかを向上させるかはランナーによって異なることが推察できる.

研究課題 3-1 において $\Delta\dot{V}O_{2\max}$ および ΔRE_{aLT} と関連が認められたのは 1 年目の $\dot{V}O_{2\max}$ の値であった. 被験者の 1 年目の $\dot{V}O_{2\max}$ と $\Delta\dot{V}O_{2\max}$ の間の回帰直線は, “ $y = -0.74x + 53.1$ ” であり, $y = 0$ のときの x の値, つまり 3 年間のトレーニングによる $\dot{V}O_{2\max}$ の変化が正か負かの境となった 1 年目の $\dot{V}O_{2\max}$ は $71.7 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ であった. 同様に 1 年目の $\dot{V}O_{2\max}$ と ΔRE_{aLT} の間の回帰直線は, “ $y = 0.46x - 30.0$ ” であり, $y = 0$ のときの x の値は $65.8 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ であった. したがって, $\dot{V}O_{2\max}$ が相対的に劣っているとき, $\dot{V}O_{2\max}$ が向上, $\dot{V}O_{2\max}$ が優れているとき, RE_{aLT} が向上したことが示された. 実際, 1 年目から 2 年目にかけての $\dot{V}O_{2\max}$ は subject B, C, D, G, H, J, L, Q, R および S において向上が認められたが, そのうち Q と R を除くすべての被験者の 1 年目の $\dot{V}O_{2\max}$ は $70 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 未満であった. 対照的に, 1 年目から 2 年目にかけて RE_{aLT} が向上した被験者は subject A, E, F, I, K, M, N, O, P および T であったが, すべての被験者の 1 年目の $\dot{V}O_{2\max}$ は $70 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 以上であった. したがって $\dot{V}O_{2\max}$ がおよそ $70 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 未満の場合その後のトレーニングによって $\dot{V}O_{2\max}$ を向上, 一方 $\dot{V}O_{2\max}$ がおよそ $70 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 以上の場合 RE_{aLT} を向上し, その結果 1 名を除くすべてのランナーの走パフォーマンスが向上したと言える. Arrese et al. (2005) は, 追跡開始時に 76.6 ± 7.3

$\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ の $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ を有していたランナーの 3 年間の IAAFs と $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ の縦断的変化に有意な相関関係を認めておらず、この見解を支持する。加えて、研究課題 3-1 において 1 年目の走パフォーマンスが同等であった subject K と L (IAAFs はそれぞれ 697 および 698) は、3 年間にわたるトレーニングによっていずれも大きな走パフォーマンスの向上を認めたが、生理学的変数の変化の様態は異なった (Figure IX-1)。1 年目の $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ が優れていた ($70.6 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) 前者は、1 年目から 2 年目にかけて RE_{aLT} が向上し、2 年目から 3 年目にかけて $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ が向上し、最終的に $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ および RE_{aLT} がそれぞれ 4.0% および 3.2% 向上し、走パフォーマンスは 16.4% 向上した (5,000 m: 15'39→14'59)。一方、初期の $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ が劣っていた ($59.7 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) 後者は、1 年目から 2 年目にかけて $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ が向上し、2 年目から 3 年目にかけて両変数が低下したものの、最終的に $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ が 11.9% 向上し、 RE_{aLT} が 4.0% 低下した結果、走パフォーマンスは 6.7% の向上 (5,000 m: 15'38→15'22) が認められた。この $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ の値を基準にした生理学的変数の変化は走パフォーマンスを向上させる効果的なトレーニング戦略の目安となると考えられる。

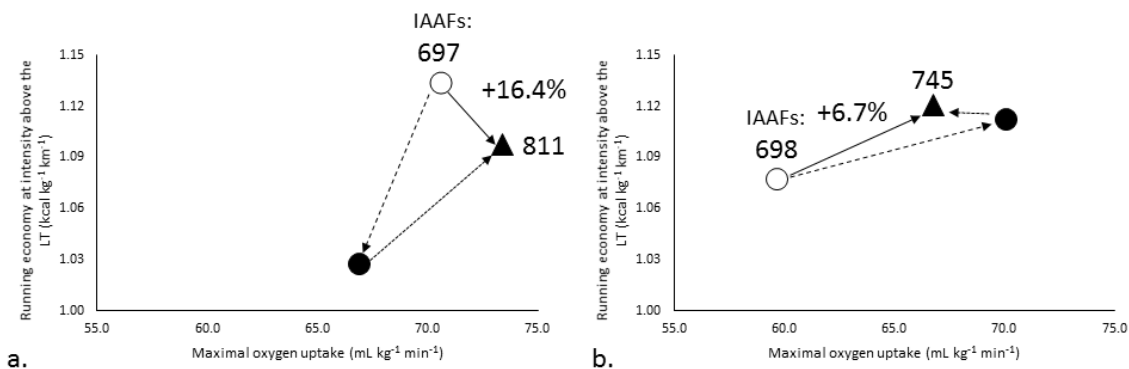


Figure IX-1. The changes in maximal oxygen uptake and running economy during three years of subject K (a) and L (b).

Notes: ○ 1st year value, ● 2nd year value, ▲ 3rd year value. A long broken line arrow show the changes from 1st year to 2nd year, a short broken line arrow show the changes from 2nd year to 3rd year, and a solid line arrow show the changes from 1st year to 3rd year.

専門的にトレーニングを行なっているランナーの走パフォーマンスと $\dot{V}O_{2\max}$ および RE_{aLT} の縦断的な変化に直接の関連が認められなかったため (研究課題 3; Figure VI-2), $\dot{V}O_{2\max}$ と RE_{aLT} のどちらかではなく、2 つの変化のバランスによって走パフォーマンス向上の成否が決定すると考えられる。被験者の年次ごとの $\dot{V}O_{2\max}$ および RE_{aLT} の変化を見ると、多くのランナーにおいてどちらかの生理学的変数が向上した翌年にもう一方の生理学的変数が向上していた (Table VI-2)。例えば最も IAAFs の向上が認められた subject K の生理学的変数は、1 年目から 2 年目にかけて $\dot{V}O_{2\max}$ が $3.7 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 低下、 RE_{aLT} が $0.11 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 向上し、2 年目から 3 年目にかけて $\dot{V}O_{2\max}$ が $6.5 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 向上、 RE_{aLT} が $0.07 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 低下し、結果的に 1 年目から 3 年目にかけて $\dot{V}O_{2\max}$ および RE_{aLT} がそれぞれ向上し ($2.8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ [4.0%] および $0.07 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ [3.2%])、その結果走パフォーマンスは 16.4% 向上した (Figure IX-1a)。したがって、 $\dot{V}O_{2\max}$ または RE_{aLT} を向上するときの一方の変数の低下を最小限にし、これを繰り返し

ながら最終的に両生理学的変数を向上することは効果的に走パフォーマンスを向上させると考えられる。

優れた競技レベルを持つランナー1 名の数か年にわたる生理学的変数と走パフォーマンスを追跡した研究課題 3-2 では、先行研究 (Jones 1998; 2006; Saunders et al. 2004) の指摘通り、被験者の $\dot{V}O_{2\max}$ が非常に高く、トレーニングによって RE_{aLT} は向上し、走パフォーマンスも向上した (Table VII-2; Figure VII-3)。しかし、4 年間を通じて RE_{aLT} が向上し続けることはなく、大学 3 年目以降は $\dot{V}O_{2\max}$ が向上し、その結果、さらなる走パフォーマンスの向上が認められた。すなわち、走パフォーマンスの向上には RE_{aLT} の向上が必要であるが、前提として優れた $\dot{V}O_{2\max}$ を有していることが重要であると推察される。また、 RE_{aLT} が向上すると $\dot{V}O_{2\max}$ が低下するため、その後低下した $\dot{V}O_{2\max}$ を再び向上するようにトレーニングをする必要がある。したがって、競技レベルに関わらず、走パフォーマンスを向上させるためには優れた $\dot{V}O_{2\max}$ を保ち持ち続けながら RE_{aLT} を向上することが走パフォーマンスの向上に効果的であると考えられる。

以上の研究課題 3-1 および 3-2 の結果から、Figure XI-2 に示す生理学的変数が交互に向上するような変化が効果的に走パフォーマンスを向上させると考えられる。つまり、原則として生理学的変数が Zone III または IV のとき $\dot{V}O_{2\max}$ を向上、Zone I または II のとき RE_{aLT} を向上するようにトレーニングを行なう。また、持続的なトレーニングに加えてランニングフォームの改善は $\dot{V}O_{2\max}$ の向上に対して RE_{aLT} の低下を抑制または $\dot{V}O_{2\max}$ の低下に対してより RE_{aLT} を向上できると期待できる。定期的に $\dot{V}O_{2\max}$ および RE_{aLT} を評価し、その結果に応じてトレーニングの期分け設定を行なうことが望まれる。

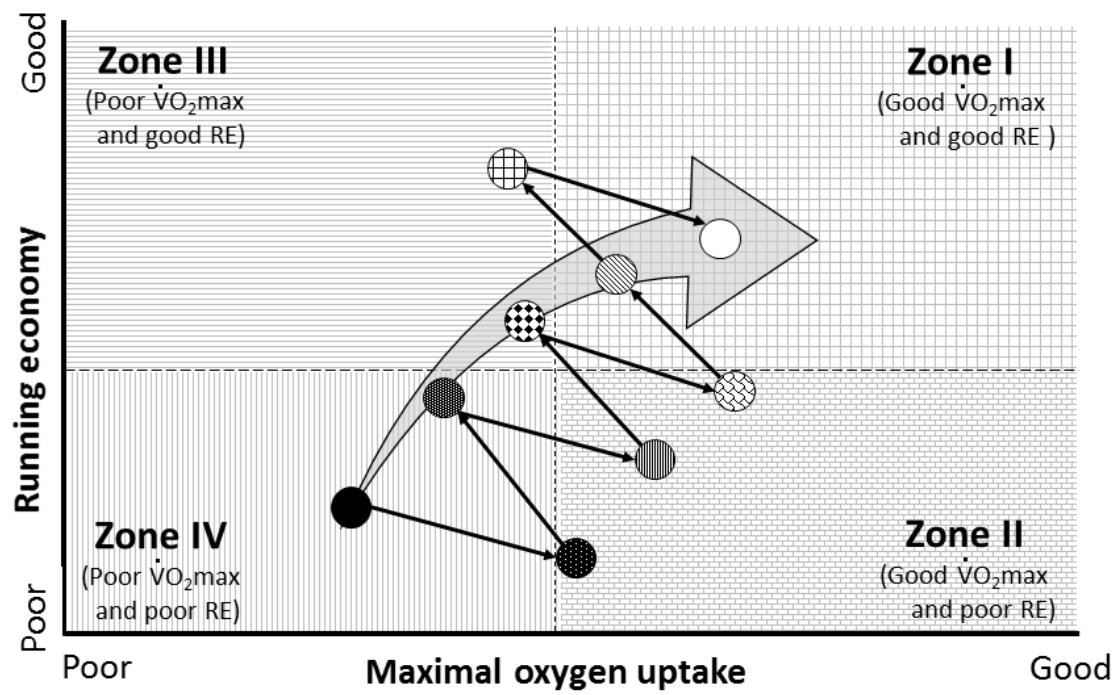


Figure XI-2. The effective strategy to improve the running performance.

X. 結論

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の走パフォーマンスと生理学的変数の関係を、特に LT を超える強度における RE に着目して、横断的および縦断的に明らかにし、効果的に走パフォーマンスを向上させるトレーニング戦略について示唆を得ることであった。この目的を達成するために4つの研究課題を設定し、以下のことが明らかとなった。

1. LT を超えない強度, LT 付近強度および LT を超える強度における4分間の走行中の酸素摂取動態を明らかにした結果, LT を超える強度においても酸素摂取量は定常状態が認められた。
2. 生理学的変数と走パフォーマンスの関係を明らかにした結果, 走パフォーマンスと $\dot{V}O_{2max}$ および LT の間に関連は認められなかった一方, RE との間に負の相関関係が認められた。とりわけ LT を超える強度における RE は 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強く関連し, また $\dot{V}O_{2max}$ と LT を超える強度における RE によって走パフォーマンスの60%以上を説明できることが明らかとなった。
3. 3年間にわたる生理学的変数と走パフォーマンスの縦断的な変化を追跡した結果, 追跡開始1年目の $\dot{V}O_{2max}$ と3年間にわたる $\dot{V}O_{2max}$ および LT を超える強度における RE の変化率の間にはそれぞれ有意な負および正の相関関係が認められ, $\dot{V}O_{2max}$ の優劣がその後向上すべき変数を決定すると考えられる。また, $\dot{V}O_{2max}$ と LT を超える強度にお

ける RE の縦断的な変化には逆相関, つまりどちらかの変数が向上するともう一方の変数は低下する関係が認められ, $\dot{V}O_{2\max}$ および LT を超える強度における RE の変化のバランスが走パフォーマンス向上の成否を決定すると考えられる.

4. LT を超える強度における RE とバイオメカニクスの変数の関係を明らかにした結果, LT を超える強度における RE の個人差の 80% 以上はバイオメカニクスの変数によって説明でき, ランニングフォームの改善は LT を超える強度における RE の向上に有用なトレーニング手段となりうると考えられる.

以上の研究課題の結果から, 優れた $\dot{V}O_{2\max}$ を有していることが優れた走パフォーマンスにとって前提条件であると考えられる. つまり, $\dot{V}O_{2\max}$ が低い場合はまず $\dot{V}O_{2\max}$ を向上し, LT を超える強度における RE を向上するのは $\dot{V}O_{2\max}$ が十分に高まったときが望ましいと推察される. LT を超える強度における RE の向上に伴い $\dot{V}O_{2\max}$ は低下するが, 再び $\dot{V}O_{2\max}$ を高め, これらの変化を繰り返し, 両生理学的変数を優れたものへと向上することが効果的に走パフォーマンスを向上させるものと推察される. 加えて, 一方の変数の向上に対してもう一方の変数の低下を抑制することはより走パフォーマンスを向上させ, その一つのトレーニング手段としてランニングフォームの改善が有効であると示された. したがって, 上記のような生理学的変数の変化を持続系トレーニングによって行ないつつ, ランニングフォームを改善することがより効果的に走パフォーマンスを向上させると考えられる.

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。ここに深く感謝の意を表し、今後も体育・スポーツ科学の研究者として学び続け、人の役に立つことを誓います。

鍋倉賢治教授には、研究活動に関することを一から懇切丁寧に御指導いただきました。研究に対する能力を持ち合わせていなかった私が博士論文をまとめることができたのは、辛抱強く私の成長を見守り、ときに私の能力に合わせて的確に御助言していただいたからに他なりません。

木塚朝博教授、榎本靖士准教授、谷川聡准教授には、研究に関する貴重な御教示をいただきました。先生方からの御指摘によって本論文の完成度が格段に高まりました。環太平洋大学 吉岡利貢講師、仙台大学 門野洋介講師には、研究内容について真剣に議論していただき、また研究者としての態度についてご教示いただきました。

鍋倉研究室の服部聡士氏、白井祐介氏、高山史徳氏には、研究についての議論だけでなく、多くの励ましをいただきました。また、小林優史氏、鈴木健太氏、黒川心氏、河合謙一氏、嶋津航氏、辻俊樹氏にはデータ収集において多くのご協力をいただきました。

松村拓希氏、大桃結花氏、植木陽治氏には現場でのコーチングに関する知識を共有しあい、研究について多くのアドバイスをいただきました。

最後になりますが、長きにわたって研究に没頭できる環境を整え、いつも応援してくれた両親に深く感謝します。

参考文献

- 阿江通良 (1992) 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. In: バイオメカニズム 11－ヒトの形態と運動機能. Ed: 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志. 東京大学出版会, 東京: 23-33.
- 阿江通良, 宮下憲, 横井孝志, 大木昭一郎, 渋谷侃二 (1986) 機械的パワーからみた疾走における下肢筋群の機能および貢献度. 筑波大学体育科学系紀要 9: 229-239.
- Anderson T. (1996) Biomechanics and running economy. *Sports Med* 22: 76-89.
- Ardigò LP, LaFortuna C, Minetti AE, Mognoni P & Saibene F. (1995) Metabolic and mechanical aspects of foot landing type, forefoot and rearfoot strike, in human running. *Acta Physiol Scand* 155: 17-22.
- Arrese AL, Ostáriz ES, Mallén JAC & Izquierdo DM. (2005) The changes in running performance and maximal oxygen uptake after long-term training in elite athletes. *J Sports Med Phys Fitness*, 45: 435-440.
- Barnes KR & Kilding AE. (2015) Strategies to improve running economy. *Sport Med* 45: 37-56.
- Barnett CH & Napier JR. (1952) The axis of rotation at the ankle joint in man; its influence upon the form of the talus and the mobility of the fibula. *J Anat* 86: 1-9.
- Barstow TJ, Casaburi R & Wasserman K. (1993) O₂ uptake kinetics and the O₂ deficit as related to exercise intensity and blood lactate. *J Appl Physiol* 75: 755-762.
- Berger NJA & Jones AM. (2007) Pulmonary O₂ uptake on-kinetics in sprint- and endurance-trained athletes. *Appl Physiol Nutr Metab* 32: 383-393.
- Berger NJ, Rittweger J, Kwiet A, Michaelis I, Williams AG, Tolfrey K & Jones AM. (2006)

- Pulmonary O₂ uptake on-kinetics in endurance- and sprint-trained master athletes. *Int J Sports Med* 27: 1005-1012.
- Bergh U, Sjödén B, Forsberg A & Svedenhag J. (1991) The relationship between body mass and oxygen uptake during running in humans. *Med Sci Sports Exerc* 23: 205-211.
- Bertuzzi R, Kiss MAPDM, Damasceno M, Oliveira RSF & Lima-Silva AE. (2015) Association between anaerobic components of the maximal accumulated oxygen deficit and 30-second Wingate test. *Braz J Med Biol Res* 48: 261-266.
- Bickham DC, Gibbons C & Le Rossignol PF. (2004) $\dot{V}O_2$ is attenuated above the lactate threshold in endurance-trained runners. *Med Sci Sports Exerc* 36: 297-301.
- Billat VL, Lepretre PM, Heubert RP, Koralsztejn JP & Gazeau FP. (2003) Influence of acute moderate hypoxia on time to exhaustion at $\dot{V}O_{2max}$ in unacclimatized runners. *Int J Sports Med* 24:9-14.
- Bosch AN, Goslin BR, Noakes TD & Dennis SC. (1990) Physiological differences between black and white runners during treadmill marathon. *Eur J Appl Physiol* 61: 68-72.
- Bragada JA, Santos PJ, Maia JA, Colaço PJ, Lopes VP & Barbosa TM. (2010) Longitudinal study in 3,000 m male runners: relationship between performance and selected physiological parameters. *J Sports Sci Med* 9:439-444.
- Bransford D & Howley E. (1977) Oxygen cost of running in trained and untrained men and women. *Med Sci Sports* 9: 41-44.
- Brooks GA. (1997) Importance of the 'crossover' concept in exercise metabolism. *Clin Exp*

Pharmacol Physiol 24: 889-895.

Brooks GA. (2007) Lactate: link between glycolytic and oxidative metabolism. Sports Med 37: 341-343.

Burgomaster KA, Howarth KR, Phillips SM, Rakobowchuk M, Macdonald MJ, McGee SL & Gibala MJ. (2008) Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in human. J Physiol 586: 151-160.

Burnley M, Jonathan H, Doust H & Jones AM. (2006) Time required for the restoration of normal heavy exercise $\dot{V}O_2$ kinetics following prior heavy exercise. J Appl Physiol 101: 1320-1327.

Carter H, Jones AM & Doust JH. (1999) Effect of 6 weeks of endurance training on the lactate minimum speed. J Sports Sci 17: 957-967.

Cavanagh PR & Williams K. (1982) The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running. Med Sci Sports Exerc 14: 30-35.

Chapman RF, Laymon AS, Wilthte DP, McKenzie JM, Tanner DA & Stager JM (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 Edi. Oxford, UK, Routledge.

Conley DL & Krahenbuhl GS. (1980) Running economy and distance running performance of highly trained athletes. Med Sci Sports Exerc 12: 357-360.

- Conley DL, Krahenbuhl GS & Burkett LN. (1981) Training for aerobic capacity and running economy. *Phys Sport Med* 9: 107-115.
- Conley DL, Krahenbuhl GS, Burkett LN and Millar A. (1984) Following steve scott: physical changes accompanying training. *Phys Sports Med* 12: 103-106.
- Costill DL, Thomason H & Roberts E. (1973) Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med Sci Sports* 5: 248-252.
- Crow MT & Kushmerick MJ. (1982) Chemical energetics of slow-and fast-twitch muscles of the mouse. *J Gen Physiol* 79: 147-166.
- Daniels J & Daniels N. (1992) Running economy of elite male and elite female runners. *Med Sci Sports Exerc* 24: 483-489.
- Daniels J, Oldridge N, Nagle F & White B. (1978) Differences and changes in $\dot{V}O_2$ among young runners 10 to 18 years of age. *Med Sci Sports* 10: 200-203.
- de Ruiter CJ, Verdijk PW, Werker W, Zuidema MJ & de Haan A. (2013) Stride frequency in relation to oxygen consumption in experienced and novice runners. *Eur J Sport Sci* 14: 251-258.
- di Michele R & Merni F. (2014) The concurrent effects of strike pattern and ground-contact time on running economy. *J Sci Med Sport* 17: 414-418.
- di Prampero PE, Atchou G, Bruckner JC & Moia C. (1986) The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol* 55: 259-266.
- di Prampero PE, Capelli C, Pagliaro P, Antonutto G, Girardis M, Zamparo P & Soule RG. (1993) Energetics of best performances in middle-distance running. *J Appl Physiol* 74:

2318-2324.

di Prampero PE & Ferretti G. (1999) The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. *Respir Physiol* 118: 103-115.

Draper SB & Wood DM. (2005) The oxygen uptake response of sprint- vs. endurance-trained runners to severe intensity running. *J Sci Med Sport* 8: 233-243.

榎本靖士, 岡崎和伸, 岡田英孝, 渋谷俊浩, 杉田正明, 高橋英幸, 高松潤二, 前川剛輝, 森丘保典, 横澤俊治 (2008) ケニア人長距離選手の生理学的・バイオメカニクスの特徴の究明 ~日本人長距離選手の強化方策を探る~. 上月財団スポーツ研究助成事業報告書.

Enomoto Y, Kadono H, Suzuki Y, Chiba T & Koyama K. (2008) Biomechanical analysis of the medalists in the 10,000 metres at the 2007 World Championships in Athletics. *New Studies Athl* 23: 61-66.

Faude O, Kindermann W & Meyer T. (2009) Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Med* 39: 469-490.

Fay L, Londeree BR, Laforntaine TP & Volek. MR. (1989) Physiological parameters related to distance running performance in female athletes. *Med Sci Sports Exerc* 21: 319-322.

Ferri A, Adamo S, torre AL, Marzorati M, Bishop DJ & Miserocchi G. (2012) Determinants of performance in 1,500-m runners. *Eur J Appl Physiol* 112: 3033-3043.

Fletcher JR, Esau SP & MacIntosh BR. (2009) Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J Appl Physiol* 107: 1918-1922.

Fredericks EC. (1987) Biomechanical aspects of endurance. In: *Exercise-Benefits, Limits*

- and Adaptations. Ed: Macleod D, Maughan R, Nimmo M, Reilly T & Williams C. E & FN Spon, London: 205-219.
- Grabowski AM & Kram R (2008) Effects of velocity and weight support on ground reaction forces and metabolic power during running. *J Appl Biomecha* 24: 288-297.
- Grant S, Craig I, Wilson J & Aitchison T. (1997) The relationship between 3 km running performance and selected physiological variables. *J Sports Sci* 15:403-410.
- Grassi B, Poole DC, Richardson RS, Knight DR, Erickson BK & Wagner PD. (1996) Muscle O₂ uptake kinetics in humans: implications for metabolic control. *J Appl Physiol* 80: 988-998.
- Hanon C, Leveque JM, Thomas C & Vivier L. (2008) Pacing strategy and $\dot{V}O_2$ kinetics during a 1500-m race. *Int J Sports Med* 29: 206-211.
- Hasegawa H, Yamaguchi T & Kraemer WJ. (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 & Caplan N. (2012) Foot strike patterns and contact times during high-calibre middle-distance races. *J Sports Sci* 30: 1275-1283.
- Helgerud J, Støren Ø & Hoff J. (2010) Are there differences in running economy at different velocities for well-trained distance runners? *Eur J Appl Physiol* 108: 1099-1105.
- Heise GD & Martin PE. (2001) Are variations in running economy in humans associated with ground reaction force characteristics? *Eur J Appl Physiol* 84: 438-442.
- Heise GD, Smith JD & Martin PE. (2011) Lower extremity mechanical work during

stance phase of running partially explains interindividual variability of metabolic power. *Eur J Appl Physiol* 111: 1777-1785.

Hill DW. (1999) Energy system contributions in middle-distance running events. *J Sports Sci* 17: 477-483.

Holloszy JO. (2014) Energy for physical activity: Measurement of human energy expenditure. In: *Exercise physiology—Nutrition, energy, and human performance*. 8th edition. Ed: McArdle WD, Katch FI & Katch VL. Wolters Kluwer Health, Philadelphia, PA, USA: 189.

Hunter GR, Bamman MM, Larson-Meyer DE, Joannisse DR, McCarthy JP, Blaudeau TE & Newcomer BR. (2005) Inverse relationship between exercise economy and oxidative capacity in muscle. *Eur J Appl Physiol* 94: 558-568.

Ingham SA, Fudge BW & Pringle JS. (2012) Training distribution, physiological profile, and performance for a male international 1500-m runner. *Int J Sports Physiol Perform* 7: 193-195.

Ingham SA, Whyte GP, Pedlar C, Bailey DM, Dunman N & Nevill AM. (2008) Determinants of 800-m and 1500-m running performance using allometric models. *Med Sci Sports Exerc* 40: 345-350.

伊藤章 (2000) 疾走動作, 筋活動, 地面反力. In: *スポーツバイオメカニクス*. Ed: 深代千之, 桜井伸二, 平野裕一, 阿江通良. 朝倉書店, 東京: 13-18.

Iwayama K, Kawabuchi R, Park I, Kurihara R, Kobayashi M, Hibi M, Oishi S, Yasunaga K, Ogata H, Nabekura Y & Tokuyama K. (2015) Transient energy deficit induced by

- exercise increases 24-h fat oxidation in young trained men. *J Appl Physiol* 118: 80-85.
- Jones AM. (1998) A five year physiological case study of an Olympic runner. *Br J Sports Med* 32: 39-43.
- Jones AM. (2006) The physiology of the world record holder for the women's marathon. *Int J Sports Sci Coaching*, 1: 101-116.
- Jones AM, Grassi B, Peter M, Christensen M, Krustrup P, Bangsbo J & Poole DC. (2011) Slow component of $\dot{V}O_2$ kinetics: mechanistic bases and practical applications. *Med Sci Sports Exerc* 43: 2046-2062.
- Joyner MJ. (1991) Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J Appl Physiol* 70: 683-687.
- Joyner MJ & Coyle EF. (2008) Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol* 586: 35-44.
- 門野洋介, 阿江通良, 榎本靖士, 杉田正明, 森丘保典 (2008) 記録水準の異なる 800 m 走者のレースパターン. *体育学研究* 53: 247-263.
- Kaneko M. (1990) Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. *J Biomech* 23 Suppl 1: 57-63.
- 荏山靖, 藤井宏明, 森健一, 関子浩二 (2013) 片脚および両脚リバウンドジャンプにおける 3 次元的な力発揮特性の相違. *体育学研究* 58: 91-109.
- Kellis E & Liassou C. (2009) The effect of selective muscle fatigue on sagittal lower limb kinematics and muscle activity during level running. *J Orthop Sports Phys Ther* 39: 210-220.

小池関也, 森洋人, 阿江通良 (2006) 多体系の運動方程式に基づく跳躍動作の動力学的分

析: 身体重心鉛直速度に対する下肢関節トルクの貢献度. ジョイント・シンポジウム講演

論文集: 17-22.

Koppo K, Bouckaert J & Jones AM. (2004) Effects of training status and exercise

intensity on phase II $\dot{V}O_2$ kinetics. *Med Sci Sports Exerc* 36: 225-232.

Krahenbuhl GS & Williams TJ. (1992) Running economy: changes with age during

childhood and adolescence. *Med Sci Sports Exerc* 24: 462-466.

Kram R. (2000) Muscular force or work: what determines the metabolic energy cost of

running? *Exerc Sport Sci Rev* 28: 138-143.

Krustrup P, Secher NH, Relu MU, Hellsten Y, Söderlund K & Bangsbo J. (2008)

Neuromuscular blockade of slow twitch muscle fibres elevates muscle oxygen uptake

and energy turnover during submaximal exercise in human. *J Physiol* 586: 6037-6048.

Kyröläinen H, Belli A & Komi PV. (2001) Biomechanical factors affecting running

economy. *Med Sci Sports Exerc* 33: 1330-1337.

Kyröläinen H, Kivelä R, Koskinen S, Mcbrode J, Andersen JL, Takala T, Sipilä S & Komi

PV. (2003) Interrelationships between muscle structure, muscle strength, and running

economy. *Med Sci Sports Exerc* 35: 45-49.

Lacour JR, Padilla-Magunacelaya S, Barthélémy JC & Dormois D. (1990) The energetics

of middle-distance running. *Eur J Physiol* 60: 38-43.

Lake MJ & Cavanagh PR. (1996) Six weeks of training does not change running

mechanics or improve running economy. *Med Sci Sports Exerc* 28: 860-869.

Léger L & Mercier D. (1984) Gross energy cost of horizontal treadmill and track running. Sports Med 1: 270-277.

Lipsey MW. (1990) Designing sensitivity: Statistical power for experimental research. Newbury Park, CA, Sage.

Lundberg MA, Hughson RL, Weisiger KH, Jones RH & Swanson GD. (1986) Computerized estimation of lactate threshold. Comput Biomed Res 19: 481-486.

Lusk G. (1924) Analysis of the oxidation of mixtures of carbohydrate and fat. J Biol Chem 59: 41-42.

Margaria R, Cerretelli P, Aghemo P & Sassi G. (1963) Energy cost of running. J Appl Physiol 18: 367-370.

Medbø JJ, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O & Sejersted OM. (1988) Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. J Appl Physiol 64: 50-60.

Midgley AW, McNaughton LR & Jones AW. (2007) Training to enhance the physiological determinants of long distance running performance: Can valid recommendations be given to runner and coaches based on current scientific knowledge? Sports Med. 37: 857-880.

Moore IS. (2016) Is there an economical running technique? A review of modifiable biomechanical factors affecting running economy. Sports Med 46: 793-807.

Moore IS, Jones AM & Dixon SJ. (2012) Mechanisms for improved running economy in beginner runners. Med Sci Sports Exerc 44: 1756-1763.

Mooses M, Mooses K, Haile DW, Durussel J, Kaasik P & Pitsiladis YP. (2015)

- Dissociation between running economy and running performance in elite Kenyan distance runners. *J Sports Sci* 33: 136-144.
- Morgan DW, Bransford DR, Costill DL, Daniels JT, Howley ET & Krahenbuhl GS. (1995) Variation in the aerobic demand of running among trained and untrained subjects. *Med Sci Sports Exerc* 27: 404-409.
- Morgan DW, Martin PE & Krahenbuhl GS. (1989) Factors affecting running economy. *Sports Med* 7: 310-330.
- Nagle F, Robinhold D, Howley E, Daniels J, Baptista G & Stoedefalke K. (1970) Lactic acid accumulation during running at submaximal aerobic demands. *Med Sci Sports* 2: 182-186.
- ニューマン A ドナルド (2005) 股関節. In: 筋骨格系のキネシオロジー. Ed: 嶋田智明, 有馬慶美. 医歯薬出版, 東京: 407-453.
- Newell J, Higgins D, Madden N, Cruickshank J, Einbeck J, McMillan K & McDonald R. (2007) Software for calculating blood lactate endurance markers. *J Sports Sci* 25: 1403-1409.
- Noakes TD, Myburgh KH & Schall R. (1990) Peak treadmill running velocity during the $\dot{V}O_2$ max test predicts running performance. *J Sports Sci* 8: 35-45.
- Nummela A, Kerären T & Mikkelsen LO. (2007) Factors related to top running speed and economy. *Int J Sports Med* 28: 655-661.
- Nummela AT, Paavolainen LM, Sharwood KA, Lambert MI, Noakes TD & Rusko HK. (2006) Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running

- economy in well-trained athletes. *Eur J Appl Physiol* 97: 1-8.
- Paavolainen LM, Nummela AT & Rusko HK. (1999) Neuromuscular characteristics and muscle power as determinants of 5-km running performance. *Med Sci Sports Exerc* 31: 124-130.
- Perl D, Daoud AI & Lieberman DE. (2012) Effects of footwear and strike type on running economy. *Med Sci Sports Exerc* 44: 1335-1343.
- Poole DC. (1994) Role of exercising muscle in slow component of $\dot{V}O_2$. *Med Sci Sports Exerc* 26: 1335-1340.
- Poole DC, Ward SA, Gardner GW & Whipp BJ. (1988) Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics* 31: 1265-1279.
- Priest JW & Hagan RD. (1987) The effects of maximum steady state pace training on running performance. *Br J Sports Med* 21: 18-21.
- Pugliese L, Serpiello FR, Millet GP & Torre AL. (2014) Training diaries during altitude training camp in two Olympic champions: an observational case study. *J Sports Sci Med* 13: 666-672.
- Pyne DB & Saunders PU. (2012) Testing and assessing adaptation to endurance training. In: *Endurance Training – Science and Practice* (Mujika I. eds.), Iñigo Mujika S.L.U., Vitoria-Gasteiz, Spain: 181-190.
- Ramsbottom R, Nevill AM, Nevill ME, Newport S & Williams C. (1994) Accumulated oxygen deficit and short-distance running performance. *J Sports Sci* 12: 447-453.
- Ramsbottom R, Williams C, Fleming N & Nute MLG. (1989) Training induced

- physiological and metabolic changes associated with improvements in running performance. *Br J Sports Med* 23: 171-176.
- Ricoy JR, Encinas AR, Cabello A, Medero S & Arenas J. (1998) Histochemical study of the vastus lateralis muscle fibre type of athletes. *J Physiol Biochem* 54: 41-47.
- Roecker K, Schotte O, Niess AM, Horstmnn T & Dickhuth HH. (1998) Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test. *Med Sci Sports Exerc* 30: 1552-1557.
- Rossiter HB, Ward SA, Kowalchuk JM, Howe FA, Griffiths JR & Whipp BJ. (2002) Dynamic asymmetry of phosphocreatine concentration and O₂ uptake between the on- and off-transients of moderate- and high-intensity exercise in human. *J Physiol* 541: 991-1002.
- Rusko HK. (1992) Development of aerobic power in relation to age and training in cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc* 24: 1040-1047.
- Russell AP, Le Rossignol PE, Snow RJ & Lo SK. (2002) Cycling at 120 when compared to 80 rev/min increases the accumulated oxygen deficit but does not affect the precision of its calculation. *J Exerc Physiol* 5: 32-38.
- 佐竹昌之, 池上晴夫 (1985) 長距離走におけるピッチとストライドの変化が走効率に及ぼす影響. *体育学研究* 30: 231-239.
- Santos-Concejero J, Granados C, Irazusta J, Bidaurreazaga-Letona I, Zabala-Lili J, Tam N & Gil SM. (2013) Differences in ground contact time explain the less efficient running economy in North African runners. *Biol Sport* 30: 181-187.

- Saunders PU, Cox AJ, Hopkins WG & Pyne DB. (2010) Physiological measures tracking seasonal changes in peak running speed. *Int J Sports Physiol Perform* 5: 230-238.
- Saunders PU, Pyne DB, Telford RD & Hawley JA. (2004) Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med* 34: 465-485.
- Schantz P, Billeter R, Henriksson J & Jansson E. (1982) Training-induced increase in myofibrillar ATPase intermediate fibers in human skeletal muscle. *Muscle Nerve* 5: 628-636.
- Schantz P & Henriksson J. (1983) Increases in myofibrillar ATPase intermediate human skeletal muscle fibers in response to endurance training. *Muscle Nerve* 6: 553-556.
- Scholz MN, Bobbert MF, van Soest AJ, Clark JR & van Heerden J. (2008) Running biomechanics: shorter heels, better economy. *J Exp Biol* 211: 3266-3271.
- 白井祐介, 品田貴恵子, 吉岡利貢, 鍋倉賢治. (2014) ローイング時のストロークレートの相違がエネルギー消費量に及ぼす影響. *体育学研究* 59: 263-274.
- Simões HG, Denadai BS, Baldissera V, Campbell CSG & Hill DH. (2005) Relationships and significance of lactate minimum, critical velocity heart rate deflection and 3000 m track-tests for running. *J Sports Med Phys Fitness* 45: 441-451.
- Spencer MR & Gustin PB. (2001) Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 33: 157-162.
- Spencer MR, Gustin PB & Payne WR. (1996) Energy system contribution during 400 to 1500 meters running. *New Studies Athl* 11: 59-65.
- Spiriev B. (2014) IAAF scoring tables of athletics: 2014 revised edition. IAAF.

Stratton E, O'Brien BJ, Harvey J, Blitvich J, McNicol AJ, Janissen D, Paton C & Knez

W. (2009) Treadmill velocity best predicts 5000-m run performance. *Int J Sports Med* 30: 40-45.

Svedenhag J & Sjodin B. (1985) Physiological characteristics of elite male runners in and off season. *Can J Appl Sport Sci* 10: 127-133.

Tam E, Rossi H, Moia C, Berardelli C, Rosa G, Capelli C & Ferretti G. (2012) Energetics of running in top-level marathon runners from Kenya. *Eur J Appl Physiol* 112: 3797-3806.

Tanaka K, Matsunaga Y, Matsuzaka A, Hirakoba K, Kumagai S, Sun SO & Asano K.

(1984) A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Med Sci Sports Exerc* 16: 278-282.

Tartaruga MP, Brisswalter J, Peyre-Tartaruga LA, Ávila AO, Alberton CL, Coertjens M,

Cadore EL, Tiggemann CL, Silva EM & Kruel LFM. (2012) The relationship between running economy and biomechanical variables in distance runners. *Res Q Exerc Sport* 83: 367-375.

Tota Ł, Maciejczyk M, Pokora I, Cempla J, Pilch W & Palka T. (2015) Changes in

endurance performance in young athletes during two training seasons. *J Hum Kinet* 49: 149-158.

Vandewalle H, Pérès G & Monod H. (1987) Standard anaerobic exercise tests. *Sports*

Med 4: 268-289.

Vøllestad NK, Vaage O & Hermansen L. (1984) Muscle glycogen depletion patterns in

- type I and subgroups of type II fibers during prolonged severe exercise in man. *Acta Physiol Scand* 122: 433-441.
- Weir JBDV. (1949) New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 109: 1-9.
- Wells RP & Winter DA. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal pathological and sporting gait. *Human Locomotion* 1: 92-93.
- Weston A, Mbambo Z & Myburgh KH. (2000) Running economy of African and Caucasian distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1130-1134.
- Weyand P, Cureton K, Conely D & Sloniger M. (1993) Percentage anaerobic energy utilized during track running events. *Med Sci Sports Exerc* 25: 105.
- Whipp BJ & Wasserman K. (1972) Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. *J Appl Physiol* 33: 351-356.
- Whipp BJ & Wasserman K. (1986) Effect of anaerobiosis on the kinetics of O₂ uptake during exercise. *Fed Proc* 45: 2942-2947.
- Williams KR & Cavanagh PR. (1987) Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *J Appl Physiol* 63: 1236-1245.
- 山地啓司 (1997) ランニングの経済性に影響をおよぼす要因. *動生理学雑誌* 2: 81-98.
- Zagatto A, Redkva P, Loures J, Kalva Filho C, Franco V, Kaminagakura E & Papoti M. (2011) Anaerobic contribution during maximal anaerobic running test: correlation with maximal accumulated oxygen deficit. *Scand J Med Sci Sports* 21: e222-e230.