

長距離選手のランニングエコノミーに影響を及ぼす体力および技術的要因の検討

榎本靖士*

Training Factors Affected Running Economy for Distance Runner

ENOMOTO Yasushi *

1. はじめに

長距離走では長い時間にわたってエネルギーを出力しつづける必要がある。長距離走におけるエネルギー産生量（消費量）は酸素摂取量でほぼ評価できることから、長距離選手の重要な能力の1つとして、最大酸素摂取量（ VO_2max ）が測定されてきた⁶⁾。 VO_2max と長距離走パフォーマンスとの間には幅広い競技レベルを対象とした場合、有意な相関関係が示されているが²³⁾、とくに高い競技レベルの選手のみを対象とした場合、必ずしも VO_2max が高いほど競技記録が高いわけではなく、他の要因の重要性が指摘されている。

乳酸性作業閾値（LT）の重要性が1980年代に着目され、多くの研究が行われてきた^{6,9)}。そこでは、中距離走よりも長距離走でパフォーマンスと相関が高く、乳酸を生み出さずにエネルギーを生み出せる酸素摂取量（酸素摂取水準）やその走速度が高いことが長距離走パフォーマンスには重要な要因であると明らかにされてきた^{7,22)}。

もう1つの重要な要因としてランニングエコノミーがある。記録が同程度の選手集団の場合にはランニングエコノミーがその差を説明すると示唆されてきた¹⁵⁾。ランニングエコノミーの考え方自体は広く普及していたものの、ランニングエコノミーがどのような要因と関係しているのか、すなわちどのようにすればエコノミーを高められるのかが明らかにされてこなかったため、実践的な研究や新たなトレーニング法の開発には至っていない。

近年、ケニアやエチオピアの長距離選手が国際大会において上位を独占し、世界記録を大きく更新してきたため、彼らの高いパフォーマンスを説明する要因が研究されてきた¹⁷⁾。その中で、彼らの高いランニングエコノミーが明らかにされ、その要因が検討されてきた^{14,19)}。しかし、長距離走で活躍して

いるものが一部の出身地域から多く輩出されていることから、遺伝子、食事、社会・文化的背景、体型などとの関係が議論され、トレーニングと結びつく着眼点では研究は行われていない。

ランニングエコノミーに影響する要因を体力および技術的要因から研究することはトレーニングの開発や選手の評価に役立つ知見を提供することになり、トレーニング現場と研究が密接につながる機会ともなろう。そこで本プロジェクトはランニングエコノミーに関する文献を精査し、ランニングエコノミーに影響する要因を検討するとともに、今後の長距離走パフォーマンスおよびトレーニングに役立つ研究の方向性を提示しようとするものである。

2. ランニングエコノミー

ランニングエコノミーは、走の経済性と訳され、ある走速度に対してより少ないエネルギーで走れるかをみるものである。ランニングエコノミーは、最大下のある走速度における酸素摂取量と定義され^{3,8)}、評価されてきた。酸素摂取量は、最大下で

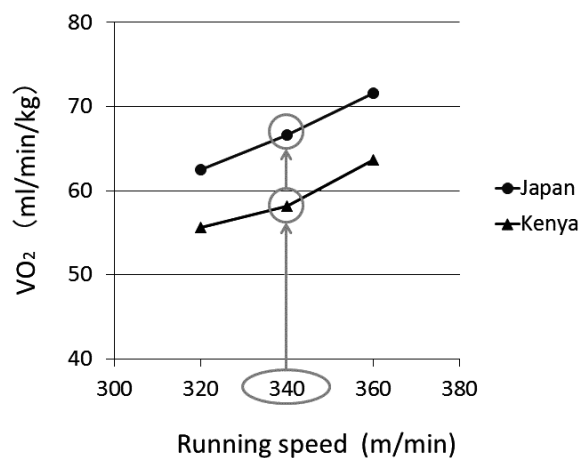


図1 走速度と酸素摂取量との関係

* 筑波大学体育系
Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

あれば走速度の増大とともに直線的に増大するため、最大下におけるある走速度での酸素摂取量を比較することが望ましいと考えられている。

図1は、ケニア人と日本人の一流長距離選手それぞれ6名の走速度と酸素摂取量との関係を平均値で示したものである。両者とも走速度の増大にともない酸素摂取量も増大していることがわかる。しかし、ケニア人選手の走速度と酸素摂取量の関係は日本人選手のそれより下にある。これは、ケニア人選手は、日本人選手より同じ走速度において酸素摂取量が少ないこと、すなわちランニングエコノミーが高いことを示している。

しかし、同じ走速度でなければランニングエコノミーを比較できないとなると、競技レベルが異なる選手間で比較することや競技記録が増大してもランニングエコノミーを評価することが困難であると考えられる。そこで、ランニングエコノミーはエネルギーコストとして評価されるようになってきた¹⁰⁾。すなわち、エネルギーコストとはある距離を走るために必要となる酸素摂取量である。1kmあたりのエネルギーコスト (O_2 コスト) は、ml/kg/km であらわされる。図2は、上述した酸素摂取量を O_2 コストに計算し直し、走速度との関係で示したものである。この範囲の走速度であればほぼ同程度の O_2 コストを示しており、 O_2 コストを用いて選手間およびパフォーマンス向上におけるランニングエコノミーの評価となり得ることを示唆していると言えよう。

さらに、 O_2 コストでは脂質と糖質などエネルギー基質の差を反映していないため、実際のエネルギー消費量とは異なることが指摘されている。そこで、酸素摂取量を測定するときに呼気ガス内の二酸化炭素量を測定し、吸気の酸素と呼気の二酸化炭素の比、すなわち呼吸交換率を用いてカロリーコストを

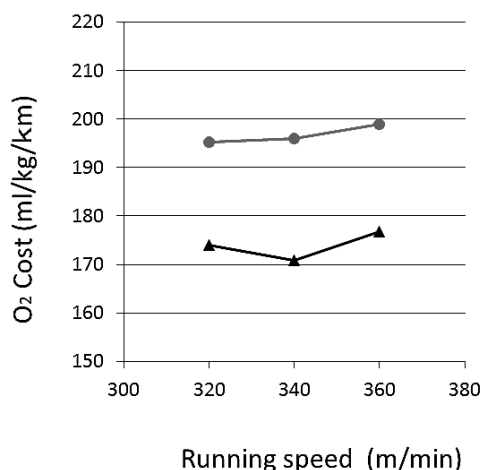


図2 走速度と O_2 コストとの関係

算出する方法も提案されている¹⁰⁾。

これまで概念的に示されてきたランニングエコノミーであるが、近年の研究は長距離選手の技術やトレーニング効果を評価できる可能性を示していると考えられる。

3. 長距離走パフォーマンスとランニングエコノミー

長距離選手のパフォーマンスにランニングエコノミーが強く影響していることが示されているものの、 VO_{2max} や LT の重要性が損なわれるものではないであろう。長距離走トレーニングにランニングエコノミーを高めるトレーニングが明確に導入され、その効果の検証が行われるため、また VO_{2max} や LT などの他の要因との関連が理解されるためにもこれらをモデルとして示すことが役立つであろう¹²⁾。

例えば、マラソンにおけるパフォーマンスを考えてみる。ある一流長距離選手の VO_{2max} が 80ml/kg/min、LT が 80% VO_{2max} とする。ここで、LT は 3~4 分間の多段階トレッドミル走テストを行なったときの血中乳酸濃度の上昇カーブから 2mmol/L や 4mmol/L に相当する走速度で評価される場合が多いが、ここではマラソンを走り切れる % VO_{2max} と考えるべきであろう。このモデルであれば、1500m 走では 120% VO_{2max} が 4 分程度維持できる運動強度で、選手によってはこれが 125%であったり 110%であったりすると考えればよいことになる。

ここで、ランニングエコノミーは O_2 コストであらわし、日本の一流選手であればおよそ 0.20ml/kg/m 程度である。これら VO_{2max} 、LT (% VO_{2max})、 O_2 コストを掛け合わせることでマラソンにおいて維持できる走速度が算出できる¹²⁾。すなわち、

$$80 \text{ (ml/kg/min)} \times 0.80 \text{ (%}VO_{2max}\text{)} \div 0.20 \text{ (ml/kg/m)} = 320 \text{ m/min}$$

このペースでマラソンを走り切ることができれば、2時間11分52秒となる。マラソンの場合は一定ペースがパフォーマンスの見通しとなるため、このようなモデルがより役立つであろう。これにより、 VO_{2max} を高める必要があるのか、LT を高める必要があるのか、ランニングエコノミーを高める必要があるのかを課題としてとらえることができ、またそのためのトレーニング方法も工夫し、検証することができるであろう。他の長距離種目においてもレースを一定ペースで走ることとすれば同様にこれらの測定の評価と活用が期待でき、そしてレースにおけるペース変化や戦術については専門的なレース準備としてトレーニングとその評価を行なえばよ

いと考えられよう。

ここで、ランニングエコノミーの標準値を示しておく必要がある。図2からわかるようにケニア人選手の値は0.18ml/kg/m程度であった。先ほどの式に当てはめると、維持できる走速度が356m/min、マラソントイムが1時間58分32秒となり、大幅な世界記録の更新となる。ケニア人選手は VO_2max やLTがそれほど高くないことも報告されており¹⁸⁾、これらの値の妥当性は今後の検証が必要であるものの、ケニア人選手を筆頭に世界の一流長距離選手がマラソンで2時間の壁を突破する日も近いことを予想させるものであろう¹³⁾。いずれにしてもランニングエコノミーの評価とそれに基づくトレーニングをパフォーマンスの向上と結びつくよう実践し、研究することの必要性が示唆される。

4. ランニングエコノミーに影響する要因

ランニングエコノミーに影響する要因については多くのレビューがある^{1,11,20,24)}。これらはランニングエコノミーにみられる個人差を説明しようとするものが多く、したがってトレーニングとの関係についての検証は不十分である。

Keith Williams²⁵⁾は、ランニングエコノミーに影響する要因を包括的に検証した最初の研究者であろう。彼は、ランニングエコノミーとバイオメカニクスの要因について、地面反力やパワーなど様々なバイオメカニクス変量を算出し、それらのランニングエコノミーへの影響を統計的に調べている。その結果、ランニングエコノミーの個人差を説明する単一の変量はみられなかったが、重回帰分析の結果から複数のバイオメカニクスの変量で64%を説明できると報告している。

Redger Kramは、多くの走動作に関するバイオメカニクスの要因を実験的に検証している。彼の独特の研究方法は、地面反力を計測できるトレッドミルを開発し、動作を制限あるいはアシストすることでランニングエコノミーの変化を検討している。一連の研究結果から、ランニングエコノミーに影響する要因として、地面反力鉛直成分⁵⁾および水平成分⁴⁾、脚の前方スウィング¹⁶⁾、左右のバランス²⁾などをあげている。

近年は筋力トレーニングやプライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーの向上につながることを示した研究もみられる²¹⁾。持続的トレーニングではない方法でランニングエコノミーの向上が示されたということでは非常に価値があると考えられるが、いずれもある単体のトレーニングをランニング初心者を対象に行なった実験である。しか

し、実際にはあるトレーニングを切り出して行なうことは不可能であり、その効果を1対1の関係でとらえられるわけではないであろう。そのため、ランニングエコノミーを含んだパフォーマンスモデルやトレーニングモデルを構築し、トレーニングを実践した結果、どのような変化を示すのかを検証していくことが必要であろう。

文 献

- 1) Anderson T (1996) Biomechanics and running economy. *Sports Med* 22 (2): 76-89.
- 2) Arellano C J, Kram R (2011) The effects of step width and arm swing on energetic cost and lateral balance during running. *Journal of Biomechanics* 44: 1291-1295.
- 3) Cavanagh P R, Kram R (1985) The efficiency of human movement—a statement of the problem. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 17, 304-308.
- 4) Chang Y H, Kram R (1999) Metabolic cost of generating horizontal forces during human running. *J. Appl. Physiol.* 86: 1657-1662.
- 5) Chang Y H, Huang C H W, Hamerski C M, Kram R (2000) The independent effects of gravity and inertia on running mechanics. *J Exp Biol* 203: 229-238.
- 6) Costill D L, Thonason H, Robert E (1973) Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med Sci Sports* 5 (4), 248-252.
- 7) 大後栄治、植田三夫、石井哲次、上條清美、弘 卓三 (1999) LTを基にしたトレーニング計画の研究—神奈川大学箱根駅伝参加選手の特徴—。ランニング学研究 10, 35-42.
- 8) Daniels J T (1985) A physiologist's view of running economy. *Med. Sci. Sports Exerc* 17 (3), 332-338.
- 9) Farrell P A, Willmore J H, Coyle E F, Billing J E, Costill D L (1979) Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med. Sci. Sports* 11 (4), 338-344.
- 10) Fletcher J R, Esau S P, MacIntosh B R (2009) Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *Journal of Applied Physiology* 107: 1918-1922.
- 11) Foster C, Lucia A (2007) Running economy - The forgotten factor in elite performance. *Sports Medicine* 37 (4-5): 316-319.
- 12) Joyner M J (1991) Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *Journal of Applied Physiology* 70 (2): 683-687.

- 13) Joyner M J, Ruiz J R, Lucia A (2011) The two-hour marathon: who and when? *Journal of Applied Physiology* 110 (1): 275-277.
- 14) Lucia A, Esteve-Lanao J, Oliván J, Gómez-Gallego F, San Juan A F, Santiago C, Pérez M, Chamorro-Vina C, Foster C (2006) Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Applied Physiology, Nutrition & Metabolism* 31 (5), 530-540.
- 15) 三浦望慶、松井秀治、袖山 紘 (1976) 長距離走のスキルに関する実験的研究. 身体運動の科学Ⅱ : 134-144、杏林書院 : 東京.
- 16) Modica J R, Kram R (2004) Metabolic energy and muscular activity required for leg swing in running. *J. Appl. Physiol.* 98: 2126-2131.
- 17) Pitsiladis Y, Bale J, Sharp C, Noakes T (2007) *East African Running – toward a cross-disciplinary perspective*. Routledge, New York.
- 18) Saltin B, Larsen H, Terrados N, Bangsbo J, Bak T, Kim C K, Svedenhag J, Rolf C J (1995) Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 5 (4): 209-221.
- 19) Saltin B. (2003) The Kenyan project – Final report. *New Studies in Athletics* 18 (2): 15-24.
- 20) Saunders P U, Pyne D B, Telford R D, Hawley J A (2004) Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Medicine* 34 (7): 465-485.
- 21) Spurr R W, Murphy A J, Watsford M L (2003) The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 89: 1-7.
- 22) Tanaka K, Matsuura Y, Matsuzaka A, Hirakoba K, Kumagai S, Sun S O, Asano K (1984) A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 16, 278-282.
- 23) 豊岡示朗 (1977) 長距離ランナーの「トレーニング可能性」と有酸素的パワー. 体育の科学 27 : 436-441.
- 24) 山地啓司 (1997) ランニングの経済性に影響をおよぼす要因. 運動生理学雑誌 2 : 81-98.
- 25) Williams K R, Cavanagh P R (1987) Relationship between distance mechanics, running economy, and performance. *Journal of Applied Physiology* 63: 1236-1245.