

長距離走パフォーマンスを評価するための トラック走での乳酸カーブテストの開発

Development of a lactate curve test in track running
to assess long-distance running performance.

鈴木 康 弘

I 緒言

長距離走のパフォーマンスは、有酸素性エネルギー代謝の指標である最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$) の大小により決まることが古くから提唱されてきた^{6,11)}。しかし、その後研究が進んでいくと普段から持久性トレーニングを行っているランナーを対象とした場合、 $\dot{V}O_2\max$ を高いレベルで維持することは前提であり、最大下運動時の酸素摂取量が評価指標となる走の経済性 (ランニングエコノミー)^{5,11)} や乳酸性作業閾値 (LT: Lactate Threshold)^{2,11)} の優劣により長距離走パフォーマンスは決定されることが示唆されてきた。そのため、陸上競技長距離走選手を対象に長距離走パフォーマンスおよび有酸素性能力を評価するために、 $\dot{V}O_2\max$ 、ランニングエコノミーおよびLTなどがよく測定されている^{1,4,12)}。

これらの項目を測定する手段として、トレッドミルを用いた多段階漸増負荷テストである、乳酸カーブテストがよく用いられる。このテストは、速度もしくは傾斜と速度の両方を増加させながら被検者を疲労困憊まで走らせ、その運動中および休息中の呼気ガスや血液を採取するテスト方法である^{7,12)}。トレッドミルは、一定速度で走り続けることができ、また実験室の環境であるため、温度や湿度などの条件を一定に保つことができることから、信頼性の高い測定が可能である。しかしながら、トレッドミル走と屋外でのトラック走は、エネルギー代謝やバイオメカニクス変数が必ずしも同じではないことが知られている^{3,10)} ため、陸上競技長距離走種目のようなトラックを用いて行われる競技では、その競技パフォーマンスを評価するための手段としては、運動様式が異なるトレッドミル走よりトラック走を用いる方が適切であると考えられる。さらに、トレッドミルや $\dot{V}O_2\max$ を測定するために必要な呼気ガス分析装置はとても高価であり、体育・スポーツ系大学以外でこれらの機器を購入することは容易ではない。したがって、比較的安価で実施できるテストであり、持久性トレーニングの効果を評価しやすい、血中乳酸濃度を指標としたトラック走での乳酸カーブテストを開発することは、高価な機器を有さない大学の研究者やトレーニング現場の指導者にとって

表1 被検者の特性

	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	10000 m 走 シーズンベストタイム
A	31	166	55.0	27分41秒
B	28	168	54.4	28分07秒
C	29	164	51.2	27分56秒
D	25	173	57.3	28分57秒
E	24	178	62.5	27分58秒
平均	27.4	169.8	56.1	28分07秒
標準偏差	2.9	5.7	4.2	29秒

有意義であると考えられる。

そこで本研究では、トラック走での乳酸カーブテストを考案し、長距離走パフォーマンスおよび有酸素性能力の評価が可能であるか否かについて検討することを目的とした。

II 方法

1. 被検者

被検者は、実業団の陸上競技部に所属する日本人長距離走競技者5名（年齢：27.4±2.9歳，身長：169.8±5.7 cm，体重：56.1±4.2 kg，10,000 m 走シーズンベストタイム：28分07秒±29秒）であった（表1）。対象者は、過去に日本陸上競技選手権10,000 m 走での優勝経験がある選手3名を含む、日本におけるトップレベルの競技者であった。

被検者には、実験に先立ち、実験の趣旨、内容および危険性について十分な説明をすることにより参加の同意を得た。

2. テストプロトコル

トラック走での乳酸カーブテストは、全天候型陸上競技場にて行った。被験者にはあらかじめテスト開始前2時間は食事を摂取しないように指示し、各自でウォーミングアップを40分間行わせた後にテストを開始した。

トラック走での乳酸カーブテストは、400 mトラックを3周する1,200 m 走を1ステージとし、ステージ間に1分間の休息を挟みながら各ステージの走速度を漸増させる最大7ステージの間欠的漸増速度ランニングとした。各ステージの設定タイムは、4分12秒，4分00秒，3分48秒，3分36秒，3分24秒，3分12秒，3分00秒とし、先頭に被検者ではない走者にペースメーカーとして走ってもらい、その後方に1列になって各被検者が走ることで全員が一定ペースで走ることができるようにした。なお、この設定タイムは、陸上競技長距

離走選手が普段のトレーニングでよく使っている1 kmあたりの走タイムに変換すると、それぞれ3分30秒、3分20秒、3分10秒、3分、2分50秒、2分40秒、2分30秒であり、分速に換算すると、それぞれ287、302、316、333、357、370、395 m/minであった。

3. 測定項目

乳酸カーブテスト中は、心拍計（Verity Sense：Polar社製）を用いて心拍数（HR）を連続的に測定した。また、各ステージの運動終了後における1分間の休息中に指先から微量採血し、簡易型血中乳酸濃度分析機（Lactate Pro 2, Arkray社製）を用いて血中乳酸濃度を測定し、各ステージにおける最高値を記録した。さらに、Borgスケールにより自覚的運動強度（RPE）を記録した。

各ステージの走速度と血中乳酸濃度の結果をもとに、最小二乗法を用いて近似曲線を算出し、血中乳酸濃度が2 mmol/L、4 mmol/Lおよび6 mmol/Lに相当する走速度を算出した。

4. 統計処理

各測定項目の値は平均値±標準偏差で示した。10,000 m走のシーズンベストタイムと各血中乳酸濃度との間の関係は、ピアソンの積率相関分析を用いた。なお、統計処理の有意性は危険率5%未満で判定した。

III 結果

トラック走での乳酸カーブテストは、第6ステージまで全員の被験者が設定タイムどおり走ることができたが、第7ステージでは1名が1周走行後に、もう1名が2周走行後に運動を中止したため、完走者は3名であった。さらに第7ステージでは、設定タイムどおりで走り切れたのは1名のみであった。

図1に、トラック走での乳酸カーブテストにおける各ステージの血中乳酸濃度を示した。平均値で見ると、第1、第2ステージの値は変わらず、第3ステージで2 mmol/Lを超え、第4ステージで4 mmol/L近くになり、4 mmol/Lを超えた第5ステージ以降は指数関数的に増加するという、典型的な乳酸カーブを確認できた。

表2に、トラック走での乳酸カーブテストから算出した血中乳酸濃度が2、4、6 mmol/Lに相当する走速度を示した。2、4、6 mmol/Lに相当する走速度は、それぞれ 316 ± 7.0 m/min、 339 ± 19.5 m/min、 355 ± 18.5 m/minであった。

図2に、トラック走での乳酸カーブテストにおける各ステージの心拍数を示した。心拍数の平均値はステージ毎に直線的に上昇した。

図3に、トラック走での乳酸カーブテストにおける各ステージのRPEを示した。RPEの

長距離走パフォーマンスを評価するためのトラック走での乳酸カーブテストの開発

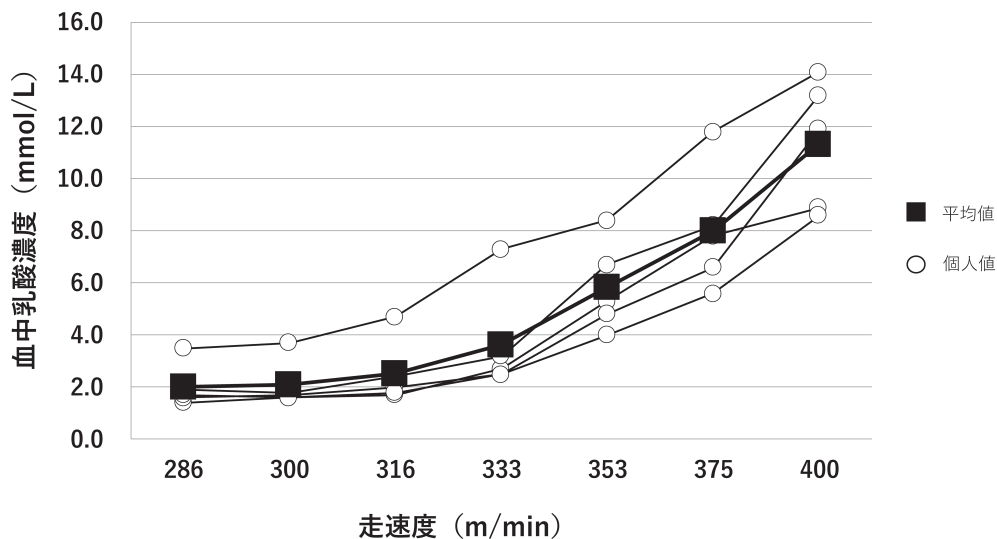


図1 トラック走での乳酸カーブテストにおける血中乳酸濃度の変化

表2 トラック走における各被験者の血中乳酸濃度 2, 4, 6 mmol/L に相当する走速度

	2 mol/L の走速度 (m/min)	4 mol/L の走速度 (m/min)	6 mol/L の走速度 (m/min)
A	322	345	360
B	316	349	365
C	307	339	352
D	-	306	325
E	321	357	373
平均	316	339	355
標準偏差	7.0	19.5	18.5

平均値はステージ毎に増加したが、個人値をみるとステージ後半ではばらつきがみられた。

10,000メートル走のシーズンベストタイムと血中乳酸濃度が4 mmol/L および6 mmol/L に相当する走速度との間にそれぞれ有意な負の相関関係 ($r = -0.861, P < 0.05$; $r = -0.811, P < 0.05$) が認められた。一方2 mmol/L に相当する走速度と10,000 m 走のシーズンベストタイムとの間には有意な相関関係は認められなかった ($r = -0.218, ns$)。

IV 考察

本研究では、一般的にトレッドミル走で行われる乳酸カーブテストをトラック走で行い、その有用性について検討した。その結果、1,200 m 走を1分間の休息を挟みながら7段階で

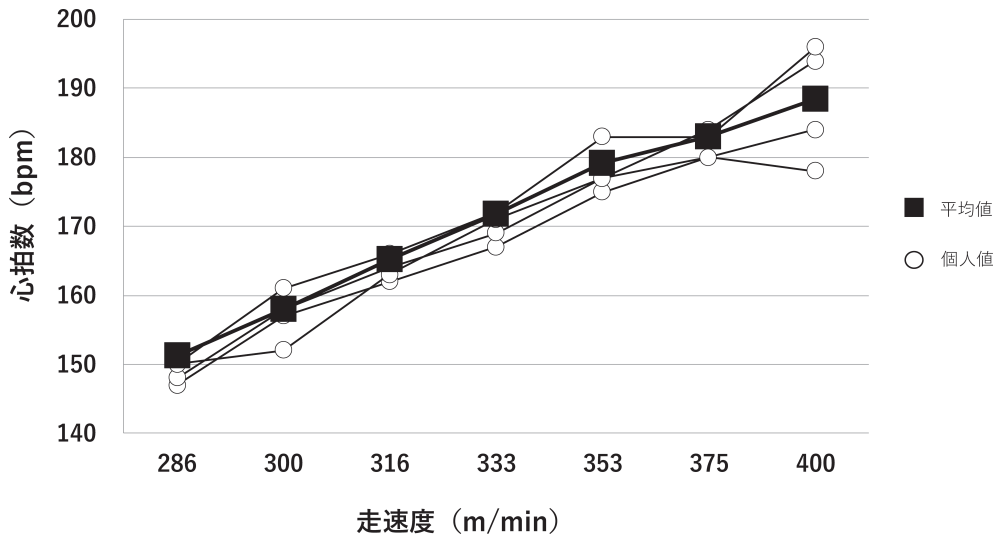


図2 トラック走での乳酸カーブテストにおける心拍数の変化

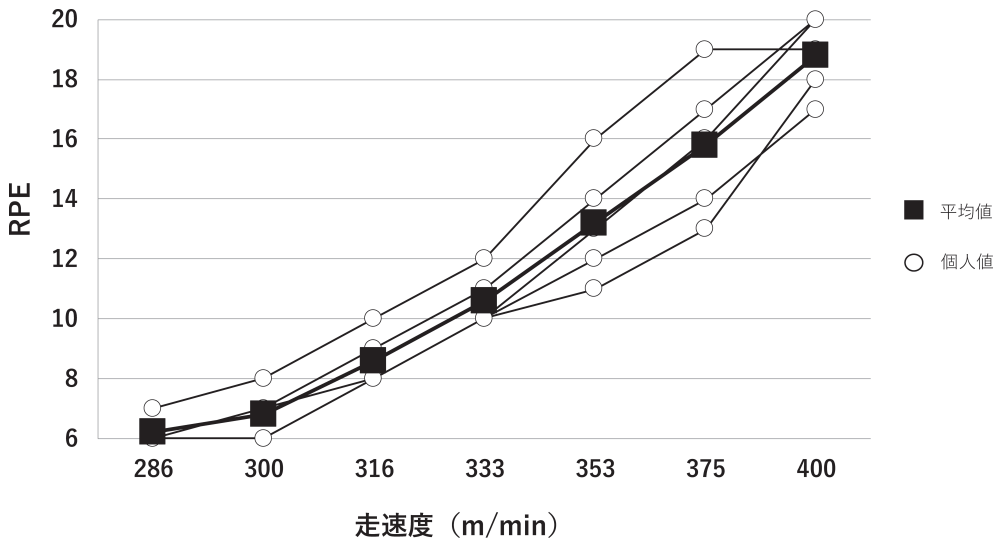


図3 トラック走での乳酸カーブテストにおける RPE の変化

速度を漸増させるプロトコルを用いたトラック走での乳酸カーブテストは、トレッドミル走での乳酸カーブテストと同様に2, 4, 6 mmol/Lに相当する走速度をそれぞれ算出することが可能であった。さらに、4 mmol/Lおよび6 mmol/Lに相当する走速度と10,000 m走のシーズンベストタイムとの間には有意な負の相関関係が認められた。これらのことから、本研究で考案したトラック走での乳酸カーブテストは、長距離走パフォーマンスおよび有酸素性能力を評価するための手段として有用であることが示唆された。

1. トレッドミル走とトラック走との比較

陸上競技長距離走選手を対象とした乳酸カーブテストは、トレッドミルを用いる場合が多いが、その理由としては、実験室におけるトレッドミルを用いた乳酸カーブテストでは、乳酸の測定ばかりではなく、運動中に呼気ガス分析装置を用いて $\dot{V}O_2\text{max}$ やランニングエコノミーなどの有酸素性能力の指標を評価することができるからである^{7,12)}。また、トレッドミルを用いれば走速度を一定に保つことが容易であり、さらには天候に左右されることなく気温および湿度を一定にできるというメリットがある。しかしながら、実際のトラック走では、風の影響を受けて空気抵抗が生じるが、トレッドミル走では空気抵抗が少ないことから、運動中に必要なエネルギーはトラック走と比較してトレッドミル走の方が少なくなり、エネルギーコストが低くなることが示唆されている³⁾。そのため、長距離走パフォーマンスおよび有酸素性能力をはじめとする生理学的評価をするためには、トレッドミル走よりもトラック走を実施した方がより実践的なデータが得られると考えられる。

そこで本研究では、エリート陸上競技長距離走選手を対象として、普段のトレーニングにも活用できるトラックでの乳酸カーブテストを考案し、トラック走と同じ走速度でのトレッドミル走を行わせることにより、トラックでの乳酸カーブテストの有用性を明らかにする計画であったが、諸事情によりトレッドミル走を実施することができなかった。そのため本研究で得られたトラック走のデータと、同じ被検者を対象として1年前に実施した実験で得られたトレッドミル走で評価した2, 4, 6 mmol/Lに相当する走速度のデータを比較した(表3)。

その結果、平均値で比較すると2, 4, 6 mmol/Lに相当する各走速度はトラック走がトレッドミル走よりも低かった。このことは、トレッドミル走はトラック走と比較してエネルギーコストが少なく、有酸素性能力を過大評価する可能性があることを示唆するものである。したがって、長距離走パフォーマンスおよび有酸素性能力を評価し、また普段のトレーニング強度を設定することを目的として実施する乳酸カーブテストは、トレッドミル走ではなくトラック走で実施することが望ましい¹⁰⁾と考えられるが、このことについては今後さらに検証する必要がある。

2. トラック走での乳酸カーブテストのメリット

一般的にトレッドミルを用いた乳酸カーブテストの目的は、任意の血中乳酸濃度に対する運動強度を算出することであり、また各ステージの運動強度は200, 250, 300 m/minなどの切りの良い数字の走速度で設定するが多いが、本研究で考案した乳酸カーブテストのプロトコルは、長距離走選手が普段のトレーニングで用いる1 kmを走行するために必要なタイムそのものを運動強度として設定した。すなわち、第1ステージでは1 kmを3分30秒で走るペースに設定して、1ステージごとに1 kmを走るペースを10秒ずつ速くし、最終

表3 トラック走およびトレッドミル走における血中乳酸濃度2, 4, 6 mmol/Lに相当する走速度の比較

	2 mol/L の走速度 (m/min)		4 mol/L の走速度 (m/min)		6 mol/L の走速度 (m/min)	
	トラック	トレッドミル	トラック	トレッドミル	トラック	トレッドミル
A	323	337	345	367	360	387
B	327	327	349	352	365	369
C	319	312	339	351	352	369
D	-	-	306	337	325	359
E	323	337	357	376	373	403
平均	316	328	339	357	355	377
標準偏差	7.0	11.8	19.5	15.2	5.6	17.5

の第7ステージでは1 kmを2分30秒で走るペースまで速くしていくプロトコルであった。このプロトコルを採用することにより、普段走っているペース（タイム）ではどの程度の心拍数や血中乳酸濃度になっているのか、という生理学的な運動強度を選手・コーチが直感的に把握できるようになることが利点であると考えられる。

例えば、第4ステージは1 kmを3分で走るペースであり、マラソンのゴールタイムに換算すると約2時間7分0秒相当になる。マラソンは血中乳酸濃度が2 mmol/Lを超えるようなLT以上のペースで走り続けると筋グリコーゲンが枯渇してしまい、運動が継続できなくなる（レース後半で大幅に失速する）ことが知られているため⁸⁾、もしマラソンを2時間7分で走ることを目標とするのであれば、1 kmを3分で走るペースで走った直後の血中乳酸濃度を2 mmol/L以下に抑えることが目標となる。本研究で考案したテストプロトコルを用いれば、1 kmを3分で走るペースにおける血中乳酸濃度と心拍数がすぐに分かるため、テスト終了後のトレーニングから得られたデータを基にして運動強度を設定することが容易である。また、乳酸カーブテストの主な目的は任意の血中乳酸濃度に対する負荷を算出することである⁷⁾が、本研究で考案したトラック走での乳酸カーブテストにおいても2, 4, 6 mmol/Lに相当する走速度を算出することが可能であった（表2）。さらに、本研究における被検者の10,000 m走のシーズンベストタイムと4 mmol/Lおよび6 mmol/Lに相当する走速度との間には有意な負の相関関係が認められたことから、10,000 m走のタイムを向上させるためには、4 mmol/Lおよび6 mmol/Lに相当する走速度を向上させる必要があることを示唆された。したがって、本研究で考案したトラック走での乳酸カーブテストを定期的の実施することで、10,000 m走のパフォーマンスが向上しているのかどうかを確認することが可能であると考えられる。

3. 本研究の限界

本研究では、実験に参加しないペースメーカーが先頭を走り、被検者にはその後方に1列となつて走らせたことから、空気抵抗を避けるという点においては被検者全員がほぼ同じ条件であったと考えられる。しかし、一般的なトレーニング現場では、ペースメーカーを走らせることは困難であると考えられ、設定タイムを一定ペースで走ったり、一度に複数人を測定したりすることが困難である可能性がある。また、本研究の被検者は陸上競技日本選手権の10,000 m 走において優勝経験がある選手を3名含む、極めて競技レベルの高い集団であったため、第6ステージ(1 km を2分40秒ペース)まで全員が完走でき、第7ステージ(1 km を2分30秒ペース)においても3名が完走できた。しかし、もし本研究の被検者よりも競技レベルの低い集団を被検者とした場合には、完走できるステージが少なくなり、きれいな乳酸カーブを描けない可能性がある。そのため、本研究で考案したプロトコルは、少なくとも10000 m 走を28分台で走ることが可能な選手に対しては適用できるが、それより競技レベルの低い選手に対しては適用できない可能性があるという限界がある。

V まとめ

本研究で考案したトラック走での乳酸カーブテストは、トレッドミル走での乳酸カーブテストと同様に長距離走パフォーマンスおよび有酸素性能力を評価するための手段として有用であることが示唆された。

謝辞

本研究は、2022年度の東京経済大学個人研究助成費(研究番号22-10)を受けた研究成果である。本研究の遂行にあたり、各測定を担当していただいた、山中亮氏(新潟食料農業大学)、安藤良介氏(国立スポーツ科学センター)、丹治史弥氏(東海大学)に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) di Prampero P. E., Atchou G., Bruckner J. C., Moia C. The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 55 (3): 259-266, 1986.
- 2) Farrell P. A., Wilmore J. H., Coyle E. F., Billing J. E., Costill D. L. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports*, 11 (4): 338-344, 1979.
- 3) Jones Andrew M., Doust Jonathan H. A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. *J Sports Sci*, 14 (4): 321-327, 1996.
- 4) Joyner M. J. Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J Appl Physiol*, 70 (2): 683-687, 1991.

- 5) Larsen H. B. Kenyan dominance in distance running. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, 136 (1): 161-170, 2003.
- 6) Laursen P. B., Jenkins D. G. The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med*, 32 (1): 53-73, 2002.
- 7) 日本スポーツ振興センターハイパフォーマンススポーツセンター国立スポーツ科学センター. 日本人トップアスリートのフィットネスチェックデータ. 松林武生編, フィットネスチェックハンドブック—体力測定に基づいたアスリートへの科学的支援. 大修館書店, pp.124-130, 2020.
- 8) Rapoport B. I. Metabolic factors limiting performance in marathon runners. *PLoS Comput Biol*, 6 (10): e1000960, 2010.
- 9) Saltin B., Larsen H., Terrados N., Bangsbo J., Bak T., Kim C. K., Svedenhag J., Rolf C. J. Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports*, 5 (4): 209-221, 1995.
- 10) Singh G., Kushwah G., Singh T., Ramirez-Campillo R., Thapa R. K. Effects of six weeks outdoor versus treadmill running on physical fitness and body composition in recreationally active young males: a pilot study. *PeerJ*, 10: e13791, 2022.
- 11) Tanaka K., Matsuura Y. Marathon performance, anaerobic threshold, and onset of blood lactate accumulation. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 57 (3): 640-643, 1984.
- 12) Yamanaka R., Ohnuma H., Ando R., Tanji F., Ohya T., Hagiwara M., Suzuki Y. Sprinting Ability as an Important Indicator of Performance in Elite Long-Distance Runners. *Int J Sports Physiol Perform*: 1-5, 2019.