

## 運動時の血中乳酸動態に関する基礎研究

中山 聖\* 福西 恵大\*\* 山下 晋\*\*\* 春日 規克\*\*\*\*

### 要 旨

本研究では、陸上選手計 2 名に対し自転車エルゴメーターでの負荷漸増法により乳酸性作業閾値(LT)の測定を行った後、算出した LT 値前後の 5 種類の運動強度負荷にて 15 分間の一定強度ペダリング運動を行った。各強度の血中乳酸濃度が定常に達した値により乳酸カーブを描き、従来の乳酸カーブとの比較を行い LT の意義を検討することを目的とした。

結果として、15 分間ペダリング時の血中乳酸濃度はすべての強度において、従来の方法による血中乳酸濃度より高値を示した。5 種類のペダリング強度と血中乳酸濃度との関係を示す乳酸カーブにみられる LT は、従来の方法による LT 測定時よりも低強度で観測された。

以上のことから、従来の LT 測定時の血中乳酸濃度はピークを迎える前の乳酸増加時の値であり、有酸素性と無酸素性作業の境界線を決める値としては問題があるため、トレーニングの LT 利用には今後さらなる検討が必要であることが示唆された。

キーワード：血中乳酸、LT（乳酸性作業閾値）、乳酸カーブ、ペダリング運動

### I. はじめに

近年、スポーツ現場では選手個々の最適なトレーニング方法を選び出すために血中乳酸を指標としたトレーニングが行われている。乳酸といえば、疲労物質のイメージが強い。しかし近年、Allen & Westerblad<sup>1)</sup>、八田ら<sup>2)</sup>の研究により、そのイメージは払拭された。現在では乳酸は疲労を防ぐ物質であるという報告もある。乳酸は解糖系の中間代謝物質であり、運動時の速筋細胞で作られ、心筋や遅筋細胞ではエネルギー基質として積極的に使われると報告している<sup>3) 4)</sup>。

スポーツ選手の適正テストとして、また、トレーニング法の企画のために、有酸素性能力を知る必要がある。このためにの有酸素性と無酸素性作業の境界線を決める方法の一つとして、乳酸カーブテストによる LT 測定がある。低強度から徐々に強度を上げていくと、急激に血中乳酸濃度が高まるポイントがある<sup>5)</sup>。そのポイントを LT (Lactate Threshold: 乳酸性作業域値) という。LT は身体に様々な反応が起きてくる強度であり、換気量が急激に増加する時期ともほぼ一致するといわれ、運動生理学的にも主観的にも「きつさ」の境界点といえる。持久的トレーニングの実施により LT が高まることは、この主観的

な「きつさ」の基準が上がり、同じ強度でも主観的に「きつくない」強度になることがある。

Fujitsuka ら<sup>6)</sup>は激運動後の血中乳酸濃度は平均で 7.65 分後にピークを向かえると報告している。過去の我々の研究<sup>7)</sup>でも 400m 走後の血中乳酸測定において最も高値を示したのは運動終了から 7 分後であった。一方、一般に広く用いられている LT 測定は、循環器応答である心拍数が一定に達する 2-3 分を目安に運動負荷を漸増させ、その負荷を上げる直前の採血により血中乳酸濃度が測定されている。

このことから、従来の LT 算出のための血中乳酸濃度は、ピークを迎える前の見かけの値である可能性が考えられる。そこで本研究では、短距離選手と長距離選手に種々の運動強度にて 15 分間のペダリング運動を行わせ、それぞれの強度の血中乳酸濃度が定常となった値を測定することで LT を求め、従来の LT と比較・検証するとともに新たな意義を検討することを目的とした。

### II. 被験者及び実験手段

被験者は陸上競技部に所属する短距離選手 1 名及び長距離選手 1 名に絞り、2 名に対して各 6 回のペダリング運動のテストを実施した。被験者の体組成

\*岡崎女子大学・非常勤講師 \*\*県立安城東高校 \*\*\*岡崎女子短期大学・幼児教育学科

\*\*\*\*岡崎女子大学・子ども教育学科

および陸上歴、自己ベスト記録は表 1 に示した。本実験の実施にあたり、実験の際の怪我等の危険性について十分に説明し、参加の同意を得た。実験は室温が常時 25 度となるように設定された環境下で行われた。全ての測定は違う日に行われ、疲労の影響がないように努めた。また、生体の日内変動を考慮し、毎回同じ時間に実験室に来室し、測定を行った。なお、実験当日は激しい運動を控え、実験室来室 2 時間前までに飲食を終えるように指示した。

表 1 被験者の体組成及び陸上歴及び大学ベスト

| 種目             | 短距離選手           | 長距離選手              |
|----------------|-----------------|--------------------|
| 陸上歴<br>身長 (cm) | 4 年<br>167.5 cm | 8 年<br>173 cm      |
| 体重 (kg)        | 62kg            | 59 kg              |
| 大学ベスト(秒)       | 10.77<br>(100m) | 3.55.90<br>(1500m) |

### Ⅲ. 実験方法

#### 1. 従来の方法による LT 測定

実験には自転車エルゴメーター (モナーク 8 2 8 E) を用いて、負荷漸増式にて行った。ペダリングフォームは腰を浮かせず漕ぐように指示した。1 分間あたりの回転数が 60 回転になるように指示し、メトロノームに合わせて漕がせた。準備運動として実験開始から 3 分まで 0kp によるペダリングを行った。その後、負荷を 2kp に変更し、2 分毎に 0.5kp ずつ上げていった (図 1)。なお 2 分経過後も、心拍数が上昇している場合は、心拍数が一定、または上昇がゆるやかになるまで負荷を変更しなかった。負荷強度の上昇に対して毎分 60 回転のペダリングが維持できなくなった時点でテスト終了とした。心拍数の測定には polar 社の腕時計型心拍メモリー「FT7」を用いた。

このテストの血中乳酸濃度の測定は、準備運動前の安静時、および各負荷ステージの終了時の採血液によって、アークレイ社の「ラクテート・プロ™2LT

−1730」と「ラクテート・プロ™2 センサー」を用いて行った。

得られた各運動強度での血中乳酸濃度をグラフ上にプロットし乳酸カーブを描き、運動強度が増えるに従い僅かに乳酸値が増加する時と、急激に、また強度に比例して増える時期の 2 つの成分に分け、それぞれに近似直線を回帰式により求めて引いた。次に、その二つの直線の交点を LT と定めた。

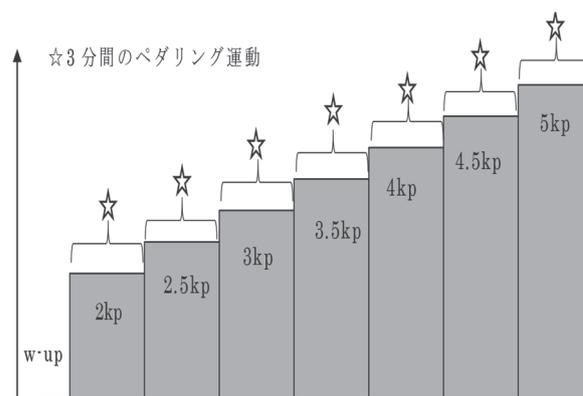


図 1 従来の乳酸カーブテストプロトコルの例

#### 2. 15 分間ペダリング

15 分間ペダリング時の血中乳酸濃度を測定することで運動時の血中乳酸動態を観察した。

実験のプロトコルを図 2 に示した。0kp で 1 分間ペダリングを行い、その後は強度を上げ 15 分間ペダリングを実施した。実験を行なったペダリングの強度は 2kp, 2.5kp, 3kp, 3.5kp, 4.5kp の 5 種類とした。実験時の乳酸測定のための採血は、各運動前に 1 回、運動中と運動後 10 分後までは 1 分毎とした。また、運動後 10 分間以後は 5 分毎に 2 回の採血を行なった。

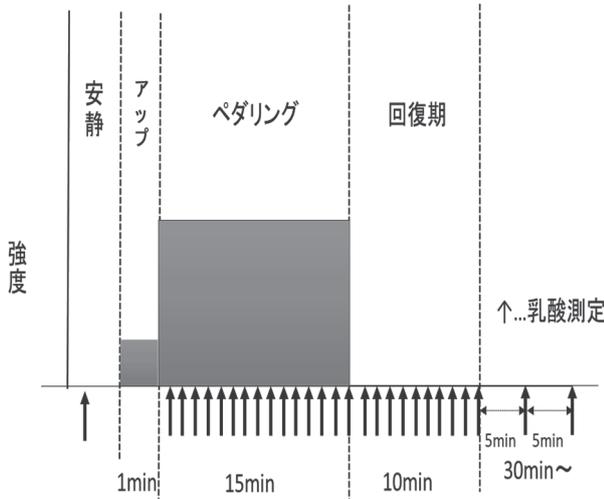


図 2 15 分間のペダリングのプロトコル

### 3. 統計処理

各統計処理には、Microsoft Excel 2013 を用いた。各測定項目間の相関係数は、ピアソンの相関係数を算出した。なお、有意水準は 5% とした。

## IV. 結果

### 1. 従来の LT 測定法による実験

図 3 と 4 には、従来の方法により求めた短距離選手と長距離選手の乳酸カーブを示した。安静時とわずかに乳酸値が上昇する際の LT 強度以下の成分 a(a') には、両被験者共に直線性がみられた。また、短距離選手の LT は 2.8kp、長距離選手の LT は 3.1kp であった。普段から持続的なトレーニングをしている長距離選手のほうが短距離選手より LT が高強度で観測された。なお、LT 以降の強度においてもペダリング強度と血中乳酸濃度の間には直線性がみられ、有意な正の相関がみられた（短距離選手 b 成分;  $r=0.9916$ , 長距離選手 b' 成分;  $r=0.9590$ ）。このことから LT を求めるための 2 直線は意義のある成分であることが示された。

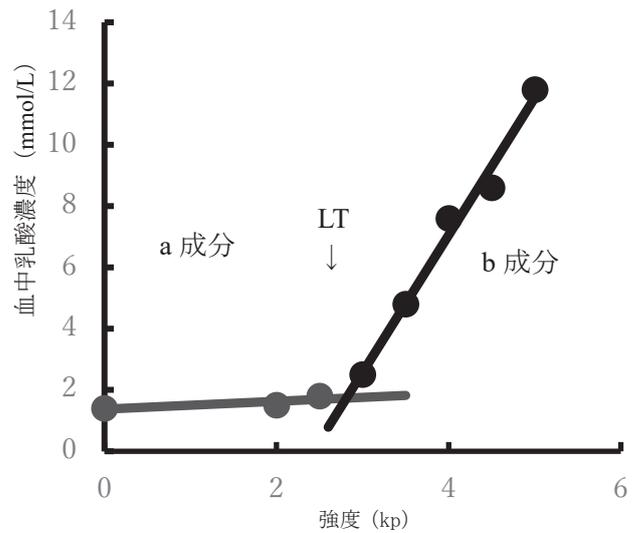


図 3 短距離選手 従来の乳酸カーブ

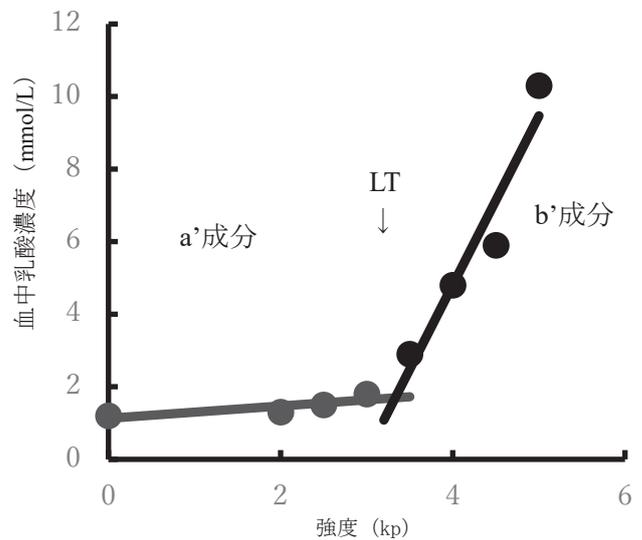


図 4 長距離選手 従来の乳酸カーブ

### 2. 15 分間ペダリング運動時の血中乳酸動態

短距離選手の 5 種類の運動強度における 15 分間ペダリング時の血中乳酸動態を図 5 に示した。運動負荷 2kp における定常状態は同負荷運動開始から 3 分後に達し、15 分後の運動終了までの平均値は  $1.9 \pm 0.17 \text{ mmol/L}$  であった。2.5kp でのペダリング運動における血中乳酸値は、平均  $3.0 \pm 0.44 \text{ mmol/L}$  でほぼ安定した。この値は従来の漸増負荷法による同負荷での乳酸値  $1.8 \text{ mmol/L}$  と比べると 1.6 倍以上の高値であった。次に、短距離選手の従来の 2 分毎の負荷漸増の測定では LT 以上の強度であった 3kp においては、運動開始から 6 分まで乳酸は上昇し、6 分以降 15 分後までの平均値は  $5.85 \pm 0.36 \text{ mmol/L}$  で

あった。同様に 3.5kp でも、13 分後に定常状態を迎え、平均値は  $8.52 \pm 0.56 \text{ mmol/L}$  であった。いずれも従来の LT 測定値の値に比べ高値を示した、オールアウト強度である負荷 4.5kp におけるペダリング運動の際は、それ以下の強度とは異なり、最初の 3 分間は 3.5kp による運動とし、その後に強度を 4.5kp に上げ、毎分 60 回転のペダリングを行った。運動開始 7 分後、4.5kp へ強度増加した 4 分後に運動の継続が不可となった。運動終了直前は血中乳酸濃度が  $11.2 \text{ mmol/L}$  まで上昇した。血中乳酸濃度は、オールアウト強度以下の負荷の時とは異なり運動終了にも増加し、終了 6 分後には  $15.1 \text{ mmol/L}$  まで上昇した。

また、ペダリングによる運動強度が高いほど血中乳酸の上昇傾きは大きくなり、定常状態に至るまで時間を長く要する傾向がみられた。

図には示されていないが長距離選手の 2.5kp において、短距離選手同様に血中乳酸濃度は約  $2.5 \text{ mmol/L}$  で安定していた。長距離選手に関しては、LT が 3.1kp であるので 3kp においても約  $2.9 \text{ mmol/L}$  で安定しており、短距離選手が  $5.85 \pm 0.36 \text{ mmol/L}$  に達したのに対して急激な増加はみられなかった。さらに、長距離選手 3.5kp においては運動開始 2 分後には血中乳酸濃度が  $4.1 \text{ mmol/L}$  まで上昇し、定常状態後の平均値は  $4.24 \pm 0.23 \text{ mmol/L}$  であり、短距離選手ほどの上昇はみられなかった。しかし、長距離選手も短距離選手同様に従来の LT 測定での値と比較すると、運動時間を 15 分とした場合には、従来の 2 分毎の負荷漸増時の同じ負荷に対して血中乳酸濃度は高値を示した。また、長距離選手もオールアウト強度は 4.5kp であり、実験では 3.5kp による 3 分間の準備運動後に強度を 4.5kp に上げ、ペダリングを行った。運動開始 10 分後、強度増加 7 分後にオールアウトに達した。運動終了直前は  $10.8 \text{ mmol/L}$  まで上昇し、運動後から 3 分後にかけて血中乳酸濃度は最高で  $12.2 \text{ mmol/L}$  まで上昇した。

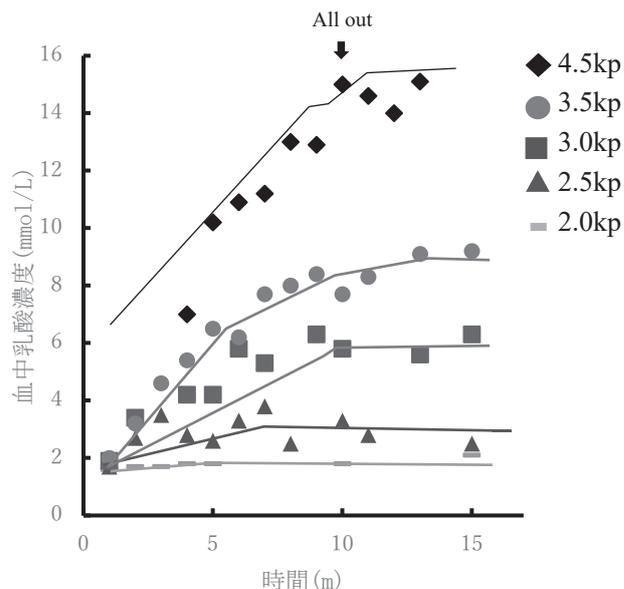


図 5 短距離選手の 5 種類の運動強度における 15 分間ペダリング時血中乳酸動態

### 3. 新たな乳酸カーブ

15 分間ペダリング時における各強度の定常状態の血中乳酸濃度と各運動強度の関係を調べた。図 6 と 7 には、図 3 と 4 で示した短距離選手と長距離選手の従来の漸増法による乳酸カーブと 2 つの直線成分に加えて 15 分間の運動継続時に得られた血中乳酸濃度の定常値による乳酸カーブと直線成分を示し、両実験による結果の比較を行った。なお、いずれの LT 以上の直線成分が示す血中乳酸濃度と強度の間には、有意な相関関係がみられた。乳酸カーブは従来とほぼ同様のカーブが得られた。15 分間のペダリング実験で求めた乳酸カーブを従来型と区別するため新乳酸カーブと名付けた。短距離選手(図 6)における新乳酸カーブの二本直線成分の交点の強度は 2.1kp となり、従来の LT 測定時の 2.8kp より 25%の低下が見られた。長距離選手における新乳酸カーブの二本の交点の強度は 2.5kp となり、短距離選手同様、LT 測定時の 3.1kp より約 20%低い値が得られた。

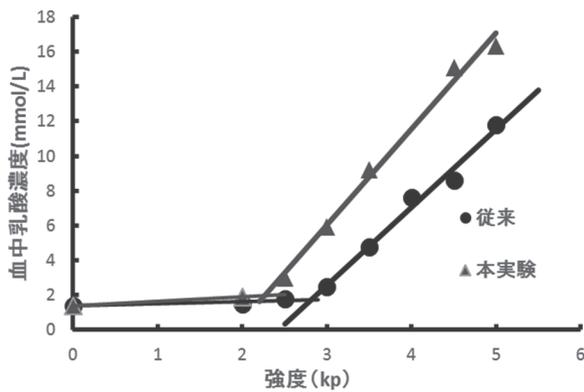


図 6 短距離選手 従来と新乳酸カーブ比較

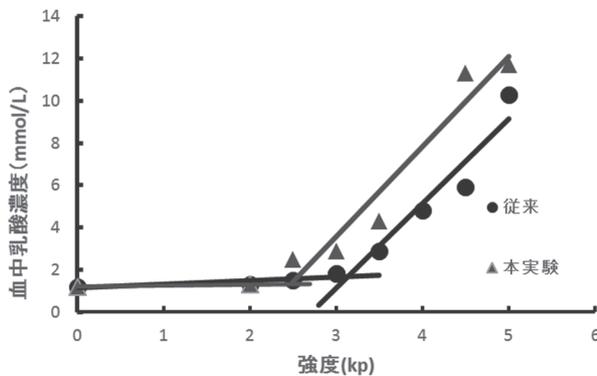


図 7 長距離選手 従来と新乳酸カーブ比較

#### 4. 心拍数との関係

心拍数の定常状態となる時の血中乳酸濃度を測定し、そこからLTを求めた従来型の結果と、乳酸値が定常状態になったことから求めたLTとの違いを検討するため、全ての運動強度における定常状態の心拍数と血中乳酸濃度の定常値との関係を調べた。短距離・長距離選手ともに心拍数と血中乳酸値の間には、相関係数  $r=0.83$  の有意な相関関係がみられた(図8)。これは運動強度が心拍数を決定するとともに、乳酸値を決定していること、乳酸上昇による血中の化学組成の変化が心臓中枢に影響することによるものと考えられる。図5に示された各強度下での乳酸の上昇率がほぼ直線的であることを考え合わせると、真のLTは本研究で行なった、血中乳酸濃度が定常値となった値を用いて乳酸カーブから求めることが正しいが、従来の測定でも真のLTを予測するに値する数値を導き出せる結果であったと考えられる。しかし、正しい有酸素性作業能力やその向上のための有効性や安全性を踏まえたトレーニング条件の算

定のためには、より正しいLTを導き出す必要性も今後さらに検討すべきと考えられた。

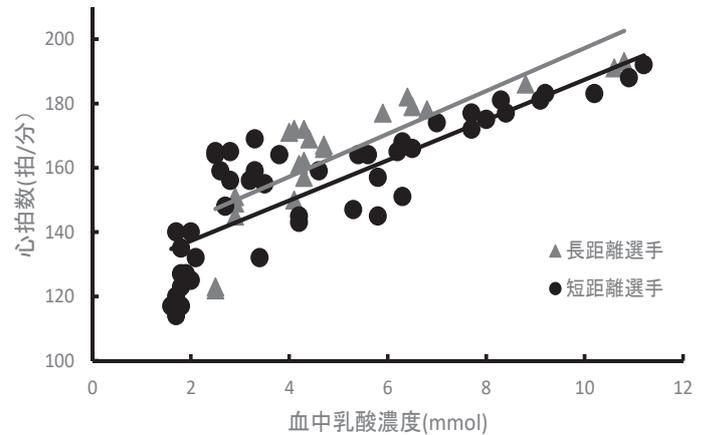


図 8 血中乳酸濃度と心拍数の関係

#### V. 考察

本実験においては被験者を短距離選手と長距離選手の各一名に絞り、同一被験者による運動中の血中乳酸動態の測定に徹底することで、従来の方法によるLT測定との比較を行った。

運動負荷テストの際に、血中乳酸濃度が急激に増加に転じるポイントであるLT(乳酸性作業閾値)は、二酸化炭素排出量のための換気量の急増ポイントである換気性作業閾値(VT)とほぼ一致することをWassetmannら<sup>8)</sup>が発見した。彼らWassetmannらは、有酸素性作業によるエネルギー供給機構の最大値として、無酸素性作業性閾値(AT)の考えも提唱し、さらには運動時に採血や、最大強度の運動を行わなくても運動能力の評価が可能であることも考えた<sup>9)10)</sup>。近年ではLTとVTの両者は必ずしも一致しないと考えられるようになってきたが、心拍性作業閾値(HRT)<sup>11)</sup>や主観的指標(RPE)<sup>12)</sup>を取り入れることで、より簡易で有効な運動処方の開発が行われている。

本実験にて行なった5種類の強度の15分間ペダリング運動において、その継続過程で得られる血中乳酸が定常状態に至る濃度は、従来の方法によるLTでの値より大きな値を示した。それにより算出されたLTは、従来の方法によるLT値より大きく低い値を示した。本実験のLT測定が低値を示した要因は、従来の負荷漸増実験では心拍数が定常に達したことを基準に負荷を高め、その直前の採血より乳

酸値を測定しているが、その段階ではまだ血中乳酸が定常状態に至っていないためであった。この心拍を基準にした場合と乳酸の定常値を基準としたときのLTの違いが、有酸素性あるいは無酸素性能力の異なる長・短距離選手の双方に同様に認められたことは、負荷漸増法による測定と本実験による方法で求めたLTに差に有意性があることを示す結果と考えられた。

運動負荷の変化に対する循環器応答は、血中酸素・二酸化炭素濃度の変化や血流量の増大に対する心房や大動脈弓の圧受容器からの信号、呼吸中枢を介する迷走神経反射などにより調節されているが<sup>13)</sup>、一方、血中の乳酸濃度は血流量が増え、呼吸数や換気量が増えた上でも生じる酸素負債が原因となり、次に活動筋内で解糖系が優位に進む過程で産出された乳酸が輸送体を介して血中に移動した結果であり、両者の定常状態に至る時間に差が生じることは当然と考えられる。

本研究では、短距離選手も長距離選手もオールアウトする後に血中乳酸濃度のピークを迎えた。血中乳酸濃度のピークが運動終了後に現れることについては、血中乳酸濃度の上昇は筋活動にともなうエネルギー消費の増大に対し、乳酸の輸送・利用が生成速度に追いつかないために起こる現象であり、激しい運動の際には運動停止により、その時点以降のエネルギー消費速度は激減するが、オールアウトによる運動停止後にも血中乳酸の増加が見られたのは、それまでのエネルギー供給不足を補うための酸素負債下での解糖系の亢進が影響していたためと考えられた。

スポーツ競技選手だけでなくスポーツ愛好家にとっても自分のLTを知ることは、運動に対しての素質・適性、また現時点での運動能力を判断する有効な材料となる。さらには、運動能力向上のためのトレーニング法を考える上でのLT測定は意義を持つものであり、その有効性が報告されている<sup>14)</sup>。

LTは運動に必要なエネルギーを酸化系エネルギー供給機構のみではまかなえず、不足が生じるため、解糖系エネルギー供給機構が動員され始める閾値であり、この不足を生じる現象が刺激となり、トレーニングにより酸化系エネルギー供給機構に向上が起こると考えられる。このことから作業閾値以上の運動負荷によるトレーニングが、持久性能力や疲労耐性の向上に役立つ<sup>15)</sup>とされるなら、本結果で得られた20-25%のLTの低下は、それに相当する必要

トレーニング負荷の軽減にもつながると考えられる。その結果として、スポーツ愛好家や、特に中高年者に対して安全かつ有効な運動処方を提供することにつながる実験結果と考えられた。

以上のことから、従来の方法によるLT測定時の血中乳酸濃度はピークを迎える前の見かけの値であり、「乳酸性作業閾値(LT)は、運動強度により産生される血中乳酸濃度を基準に測定される」と捉えるなら、本実験における測定方法が、真の血中乳酸濃度を示すものであり、その乳酸値から求めたLTが従来の測定値より低値を示すことに対しては、今後もさらに十分な検討の意義があると考えられた。

## VI. 結論

各強度の運動を15分間継続し、その間に得られた血中乳酸定常値を用いてLTを算出した結果、従来とは異なる値が得られた。従来の方法によるLTを求め際の血中乳酸濃度の測定は心拍数が定常状態となるタイミングで実施されていたのに対し、本実験では定常状態になった血中乳酸を測定したため、各運動強度毎に高い血中乳酸濃度値が測定され、そこから求めたLTは、従来の心拍数定常状態を基準とするLT算出結果よりも20-25%もの低値を示した。

LTの測定方法にはさまざまな方法があり、未だ正確な方法は確立されていない。LTを知ることは、運動能力を知る上で、またトレーニング法の策定の上で重要な意義を持つことであり本研究が今後、LT測定方法確立のための一助となれば幸いである。

## 付記

本研究は、令和元年度愛知教育大学研究倫理規定に基づいた承認を受け実施された。

本稿の執筆は中山聖が、山下・春日の指導のもと行い、投稿前の最終修正を実験・分析と同様に福西を加え全員で行った。

## VII. 引用文献

- 1) Allen, D. and Westerblad, H. (2004) Lactic acid: the latest performance-enhanced drug. *Science*, 305, pp.1112-1113
- 2) 八田秀雄 (2015) 「新版 乳酸を活かしたスポーツトレーニング」『講談社』、pp.1-11
- 3) Bonen, A. (2001) The expression of lactate

- transporters (MCT1 and MCT4) in heart and muscle. *Eur.J.Appl.Physiol*,86(1),pp.6-11
- 4) Juel,C, Halestrap,A.P., Ivy,J.L, Withers, R. T., Van Handel,P.J., Elger,D.H., Costill, D.L.(1999)Lactate transport in skeletal muscle - role and regulation of the monocarboxylate transporter.*J.Physiol*,15(517) (Pt 3)(Pt 3),pp.633-642
- 5) Ivy JL,RT Withers,PJ Van Handel,DH Elger,DL Costill(1980)Muscle respiratory capacity and fiber type as determinants of the lactate threshold. *J.Appl.Physiol*,48,pp.523-527
- 6) Fujitsuka,N., Yamamoto,T., Ohkuwa.T., Saito,M., and Miyamura,M.(1982)Peak blood lactate after short periods of maximal treadmill running. *Eur.J. Appl.Physiol*,48,pp.289-296
- 7) 中山聖(2018)「50秒間最大負荷トレーニングが血中乳酸及び走能力に及ぼす影響」『愛知教育大学卒業論文』、p.12
- 8) Wasserman, K. & McIlroy, M. B.(1964) Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *Am.J. Cardiol*,14,pp.844-852
- 9) Naimark A., Wasserman K., McIlroy Mb. (1964)Continuous measurement of ventilatory exchange ratio exercise. *J.Appl.Physiol*,19,pp.644-652
- 10) Wasserman, K. et al.(1973) Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J.Appl.Physiol*,35,pp.236-243
- 11) 山地啓司(1998)「心拍性作業閾値(Heart Rate Threshold)の意義と実際」『日本運動生理学雑誌』5(2)、pp.127-136
- 12) 小野寺 孝一、宮下充正(1976)「全身持久性運動における主観的強度と客観的強度の対応性—Rating of perceived exertion の観点から—」『体育学研究』21(4)、pp.191-203
- 13) 春日規克. (2018) 3訂版・運動生理学の基礎と発展. 『フリースペース』、pp.90-98
- 14) 吉田 敬義(1993)「運動の指標としてのAT, LT, OBLA の持つ意味」『体力科学』42(4)、pp.406-414
- 15) García-pallarés.J, García-Fernández, M., Izquierdo, M.(2010)Performance changes in world-class kayakers following two different training periodization models.*Eur.J.Appl.Physiol*,110(1), pp.99-107