

血中乳酸濃度を指標とした持久力 トレーニング負荷強度の検討

鶴見大学 吉田敬義
(共同研究者) 同 竹内直文
同 須田吉廣

Endurance Training Intensities based on Arterial Blood Lactate Concentrations during Incremental Exercise Test

by
Takayoshi Yoshida,
Naofumi Takeuchi, Yoshihiro Suda
Tsurumi University

ABSTRACT

Eight healthy college students volunteered as subject to determine the submaximal exercise intensities based on the arterial blood lactate concentrations during the incremental exercise test.

The incremental exercise test consisted of 4-min unloaded pedalling (Monark ergometer), and thereafter 25 W increased every minute until volitional exhaustion. To obtain the change in blood lactate concentration, arterial blood was collected by inserting a catheter into either the radial or brachial artery with local anaesthesia. Then, the intensities of submaximal exercise tests were determined at the workload which the arterial lactate began to increase above the resting value (AT level), at the workload corresponding to the value of 2 mM arterial lactate (2 mM LA level), and at the workload corresponding to 4 mM LA (4 mM LA level). The submaximal exercise tests were performed at these intensities for 15 minutes. Oxygen uptake was measured by the Douglas bag method and arterial lactate was determined by the enzymatic method.

During the submaximal exercise tests of the AT level, $\dot{V}O_2$, % $\dot{V}O_2$

max, heart rate and LA were well coincided with the predetermined value at the incremental exercise test. However, at the 2 mM LA level and 4 mM LA level, the parameters obtained during the submaximal exercise test tended to overestimate the predetermined value, respectively.

These results indicate that the intensities based on arterial blood lactate were one of the most usefulness for training or rehabilitation activity, but that further investigation would necessitate for this method to be most commonly used.

要 旨

漸増運動テスト中に得られた動脈血乳酸濃度の値を基に、リハビリテーションやトレーニングとしての運動強度を求めることを検討するために、8名の健康な男子大学生が本研究に参加した。

漸増運動テストは、自転車エルゴメータで4分間の0Wでのウォーミングアップ後に、1分ごとに25Wずつ疲労困憊(ぱい)まで漸増した。

このテスト中、前腕動脈または橈骨動脈に留置したカテーテルより動脈血乳酸濃度を測定した。この動脈血乳酸濃度が安静値以上に増加する点(ATレベル)、2mMの値に相当する点(2mM LAレベル)および、4mMの値に相当する点(4mM LAレベル)を、最大下運動テストの強度として採択した。

これらの運動強度で15分間の最大下運動を行なったところ、ATレベルでの運動では予測値に極めてよく一致した。一方、2mM LAレベルや4mM LAレベルでは、運動強度が大きくなるにつれて予測値よりもoverestimateする傾向があった。

序

従来、持久力トレーニング強度の指標として% $\dot{V}O_2$ max や%HR max がよく用いられてきている。しかし、同じ% $\dot{V}O_2$ max の運動強度で運動

しても、被験者間で、筋の代謝性アシドーシス状態が異なることが知られている(Katch et al., 1979)。

筋代謝のアシドーシス状態から運動強度を処方することは、被験者を最大運動に追い込む危険性をなくする利点がある。また、被験者間の体力や全身持久力が異なっても、すべての被験者にほぼ同一のアシドーシス状態で運動が可能であると考えられる。さらに、筋代謝性アシドーシスのレベルを変えることにより、トレーニングの強度のみならず、患者のリハビリテーション用の運動負荷強度を求めることができると考えられる。

そこで、持久力トレーニングの強度を処方する時に、% $\dot{V}O_2$ max よりもむしろ、筋代謝のアシドーシス状態を基準に行うことが望ましいと考えられる。

Kindermann et al. (1978) は、この考え方から、4mMの乳酸濃度に相当する運動強度がスポーツ選手に対して最適のトレーニング強度であることを報告している。しかしこのような基準を用いてトレーニングを行った研究は少なく、また、どの程度の呼吸循環機能の変化を示すのかも十分に解明されていない。

そこで、本研究は、漸増運動テスト中の動脈血乳酸濃度の値を基に、最大下運動の強度を求めて、トレーニング負荷強度としての動脈血乳酸濃

度の検討を行うことを目的とした。

方 法

a) 被 験 者

8名の健康な男子大学生が被験者として本実験に参加した。実験に先立ち、心電図検査、血圧、スパイロメトリー、および一般的なメディカルチェックを行い、何ら異常のないことを確かめた。彼らの身体特性は表1に示されている。

b) 漸増運動テスト

血中乳酸濃度の値から最大下運動テストの運動強度を求める手段として、モナーク社製自転車エルゴメータによる漸増運動テストを行った。

漸増運動テストの負荷方法は、運動開始後4分間は無負荷（“0W”）でウォーミングアップし、その後1分間に25Wずつ、被験者が疲労困憊で運動が続けられなくなるまで漸増した。

漸増運動テスト中、酸素摂取量（ $\dot{V}O_2$ ）はダグラスバッグ法で測定した。

被験者はノーズクリップをし、マウスピースをくわえて、低抵抗のJ-バルブを通して呼吸した。呼吸は1分ごとにダグラスバッグで採気した。採気された呼吸は直ちにガスメータで計量され、その一部のガスサンプルをCaCl₂で乾燥状態にし、ポーラログラフO₂分析器と赤外線CO₂分析器とでそれぞれO₂、CO₂分画濃度を分析した。これらの分析器は実験前にあらかじめショランダー微量ガス分析器を用いて校正した。

実験中には、空気と標準ガス（O₂ 14.67%、CO₂ 4.96%）とでチェックした。心拍数（HR）

は、CM₅誘導法を用いて心電計でモニターし、R-Rインターバルを数えることにより求めた。

血液サンプルを得るために、0.5%キシロカインで局部麻酔をした後に、テフロンカテーテルを前腕動脈または橈骨動脈に挿入した。

動脈血サンプルは、安静時および運動開始3分後から採気にあわせて1分ごとに、被験者が運動を続けられなくなるまでヘパリンでリンスした注射器に無氣的に得られた。

血液pH、PO₂、PCO₂は、37°Cで電極法で分析した（IL 813）。重炭酸塩（HCO₃⁻）はHenderson-Hasselbalchの公式より算出した。血液乳酸濃度およびピルビン酸濃度は酵素法を用いて分析した。

c) 最大下運動テスト

血液中のアシドーシス状態を各被験者で一定のレベルにする試みとして、漸増運動テスト中に得られた乳酸濃度の変化から最大下運動テストの運動強度を求めた。

図1に示されているように、各被験者の動脈血乳酸濃度と運動強度の関係を求めた。この図から、動脈血乳酸濃度が安静値レベルよりも増加し始めた点（Anaerobic Threshold: AT レベル）、乳酸値が2mMに相当する点（2mM LAレベル）、および4mMに相当する点（4mM LAレベル）の運動強度を求めた。

このようにして求めた運動強度で、15分間の最大下運動テストを行った。最大下運動テストの負荷強度の順序はランダムとし、各テスト間には少なくとも1週間以上のインターバルをおいた。

表1 Physical characteristics of subjects

Age (yr)	Height (cm)	Weight (kg)	$\dot{V}O_{2max}$ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)
22.8±2.3	170.0±6.0	66.5±9.6	39.5±6.8

Mean±SD

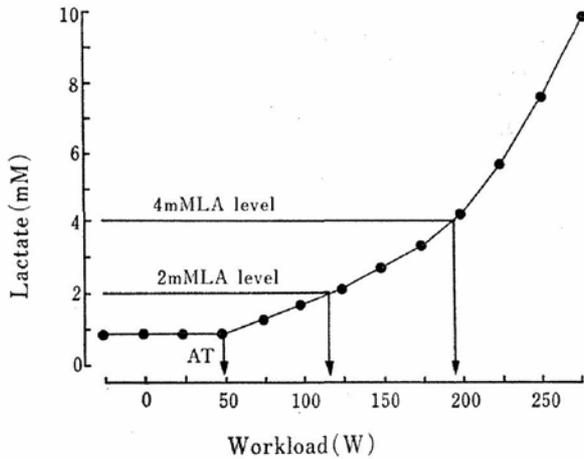


図1 Relationship between arterial blood lactate concentration and workload during incremental exercise test

最大下運動テスト中、酸素摂取量はダグラスバッグ法で、心拍数は心電図法で、安静時および運動開始5分、10分、15分目に1分間測定した。漸増運動テスト時と同様にして、前腕動脈又は橈骨動脈に挿入したカテーテルから動脈血をサンプルした。動脈血乳酸濃度とピルビン酸濃度は酵素法で、動脈血 pH, PO₂, PCO₂ は電極法で分析し

た。HCO₃⁻ は Henderson-Hasselbalch の公式より算出した。

結 果

最大下運動テストの運動強度は、AT レベルで 57.8±11.5W ($\bar{X} \pm SD$), 2mM LA レベルで 110±12.7W, 4mM LA レベルで 173±12.5W であった。4mM LA レベルでは、2人の被験者が運動の途中で疲労困憊状態となり、運動を中止した。

表2は、各運動強度で15分目の心拍数、酸素摂取量、% $\dot{V}O_2$ max, 動脈血乳酸濃度の値が示されている。また、漸増運動テスト中に AT, 2mM LA, 4mM LA に相当する負荷での各パラメータも同様に示されている。4mM LA レベルでの最大下運動テストの結果は、予測した各パラメータよりも統計的に有意に高いものであった。

最大下運動テスト中の心拍数の経時的な変化が図2に、酸素摂取量の変化が図3に示されている。

表2 Descriptive measures at AT, 2 mM LA level, 4 mM LA level at the incremental exercise test and during the submaximal exercise tests.

AT at Incremental test		Submax work at AT level	
$\dot{V}O_2$ l·min ⁻¹	0.97±0.16		0.98±0.18
% $\dot{V}O_2$ max	38.3±5.6		38.7±8.2
HR beats·min ⁻¹	98.9±9.0		97.4±12.0
LA mM	1.19±0.4		1.37±0.7
2mM at Incremental test		Submax work at 2 mM LA level	
$\dot{V}O_2$ l·min ⁻¹	1.25±0.07		1.46±0.22
% $\dot{V}O_2$ max	49.5±8.6		55.5±14.0
HR beats·min ⁻¹	119.0±18.0		137.6±6.0
LA mM	2		3.30±0.65
4mM at Incremental test		Submax work at 4 mM LA level	
$\dot{V}O_2$ l·min ⁻¹	1.95±0.19		2.37±0.37*
% $\dot{V}O_2$ max	76.1±7.2		92.9±16.1*
HR beats·min ⁻¹	151.3±13.8		178.8±14.8**
LA mM	4		8.62±2.2**

Mean±SD

* p<0.05 ** p<0.01

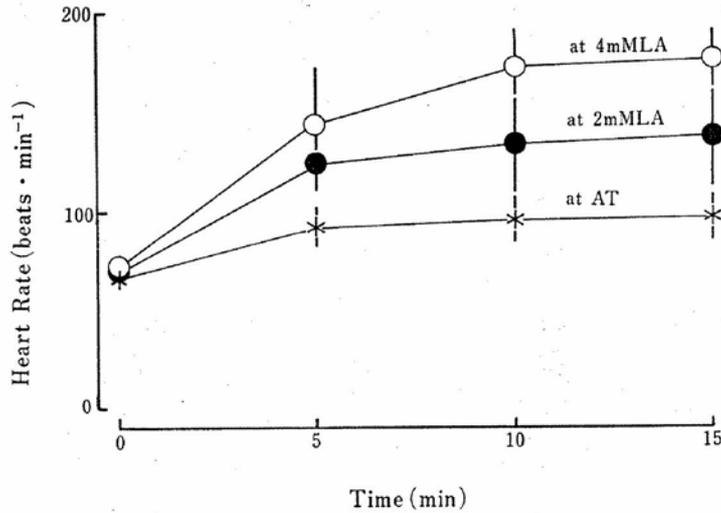


図2 Heart rate response to submaximal exercise tests at AT, 2mM LA, 4mM LA level, respectively

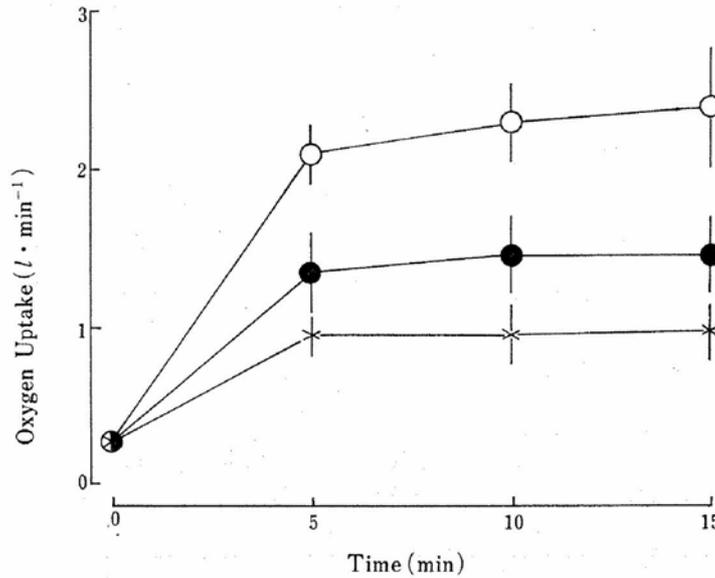


図3 Oxygen uptake during submaximal exercise tests. The legends are same as indicated in Fig 2

AT レベルでの運動では、心拍数や酸素摂取量は運動開始5分である一定のレベルに達し、運動中はこのレベルを維持した。一方、4mM LA レベルでは、心拍数と酸素摂取量とも運動中に増加し続けた。

最大下運動テスト中の動脈血乳酸濃度および重炭酸塩濃度の変化が図4に示されている。最大下運動テストの強度は、漸増運動テストの乳酸濃度の変化から設定したにもかかわらず、動脈血乳酸

濃度の値は、運動強度が大きくなる程漸増運動テストで予測した値よりも大きくなった。AT レベルでの運動は、動脈血乳酸濃度は急激に増加し、15分の運動で $8.6 \pm 2.2 \text{mM}$ となった。また乳酸/ピルビン酸比は、AT レベルでは運動による明らかな変化を示さなかったが、2mM LA レベルと 4mM LA レベルの運動では有意に増加し ($p < 0.05$)、解糖反応が進んだことを示している (図5)。

考 察

本研究は、代謝性アシドーシス状態をある一定のレベルに規定して、最大下運動テストの強度を検討する目的で行なった。代謝性アシドーシス状態の尺度として、動脈血乳酸濃度を用いた。

筋組織における乳酸濃度は、グリコーゲンの単なる無氣的解糖作用の結果のみならず、無氣的な解糖と TCA サイクルでのピルビン酸利用との動的なアンバランスが生じた時にも増加することが知られている (Jöbsis and Stainsby, 1968)。さらに、乳酸は中間代謝産物であるので、乳酸の産生、拡散、分布、除去といった変化の総合的な結果でしかない (Mader, et al. 1978)。

また、血液中の乳酸は筋組織から流出し、全身に運ばれて非活動筋や心筋で酸化される。それ故に、血液中の乳酸濃度は、筋組織の代謝性アシド

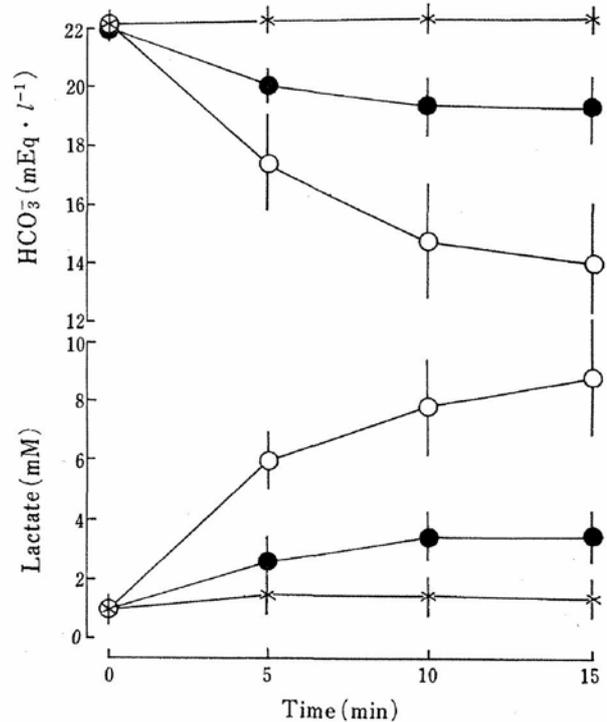


図4 Arterial blood lactate and bicarbonate concentrations during submaximal exercise tests. The legends are same as indicated in Fig 2

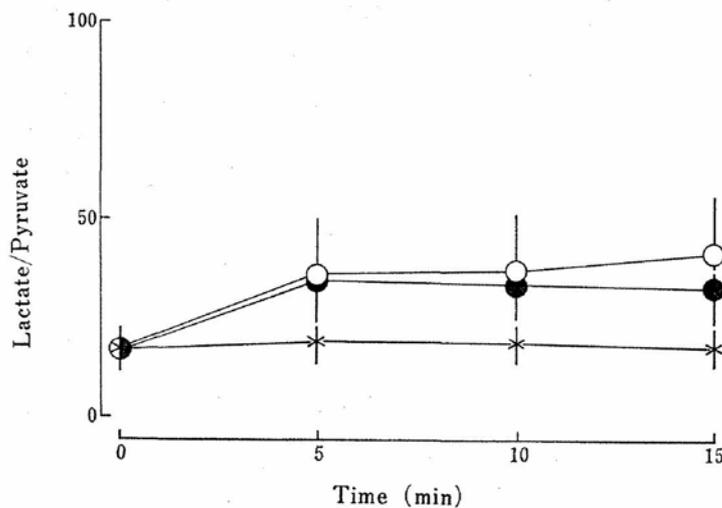


図5 Lactate/pyruvate ratio during the submaximal exercise tests. The legends are same as indicated in Fig 2

ーシス状態を正確に反映しているとは言いがたい。

しかし、現在の実験方法では、経時的に筋組織レベルでの代謝性アシドーシス状態の変化を調べることは困難である。たとえ、筋バイオプシー法を用いて経時的に筋乳酸濃度を分析しても、実用的でない。

そこで、一般に運動中の代謝性アシドーシスは、1) 血液中の酸の増加、2) 酸一塩基平衡の変化、3) 血液中の緩衝作用の結果として換気量や $\dot{V}CO_2$ の増加、といった変化として知られている (Bouhuys et al. 1966, Osnes and Hermansen, 1974)。

また、動脈血乳酸濃度や酸一塩基平衡の変化は

代謝性アシドーシスの尺度として、現在よく用いられている (Ciba Foundation Symposium 87: Metabolic Acidosis).

漸増運動テストの結果から、動脈血乳酸濃度のレベルを用いて、最大下運動テストの運動強度を求めたところ、AT レベルでは予測した酸素摂取量や動脈血乳酸値で15分間の運動ができた。しかし、運動強度が大きくなるにつれて、予測値を大きく上回る結果となった (表2)。特に、4mM LA レベルでの最大下運動テスト中には動脈血乳酸濃度は予測値 (4mM) の2倍以上 (8.62 ± 2.2 mM) にも増加した。この結果は、Stegmann and Kindermann (1981) や Yoshida et al. (1982) の報告とよく一致した。

一方、本研究と同様に、4mM LA レベルが持久性トレーニング強度として最適な負荷方法であることを報告した Kindermann et al. (1979) の報告とは明らかに異なった。彼らは、30分の運動中を通して血中乳酸値はほぼ 4mM となっている。恐らく、この矛盾は漸増運動テストでの負荷方法によるものであろう。

我々の漸増運動テストは1分ごとの漸増負荷であるのに対して、Kindermann et al. のそれは3分ごとの漸増負荷である。漸増負荷の持続時間が異なっても、酸素摂取量で示した AT の値には有意差はないが、運動強度は指数的に変化することが知られている (Whipp et al. 1974)。また、ランプ運動の速さを変えても酸素摂取量には変化がないが、速いランプ運動の方が AT となる運動強度は大きい (Davis et al. 1982)。

したがって、1分ごとの漸増負荷で求めた最大下運動の強度は動脈血 LA レベルが高いほど over estimate する結果となったと考えられる (表2)。

そこで、Stegmann と Kindermann (1981) は、このような over estimate を防ぎ、トレーニング負荷強度として、個々の被験者で漸増運動中およ

び最大運動後の乳酸濃度の Kinetics から求めた Individual Anaerobic Threshold (IAT) の概念を推奨している。

しかし、IAT の方法は最大運動を必要としているために、最大運動が出来ないような患者や老人を被験者とした研究では IAT を求めることが困難である。むしろ、本研究で試みたように、最大運動を行なわないで、各被験者間に同様な代謝性のストレスを負荷できるようにテストを工夫する必要がある。

トレーニング強度を求める方法としての動脈血乳酸濃度の利用は、本研究では、必ずしも満足できるものではなかった。乳酸や水素イオン濃度 (H^+) は、時間因子によっても影響されることが知られており (Hultman and Sahlin, 1980)、漸増負荷テストの方法を工夫する必要がある。

結論として、1分ごとの漸増運動テスト中に得られた動脈血乳酸濃度の値を基に、最大下運動強度を求めたところ、AT レベルでは、予測した代謝性アシドーシスレベルで最大下運動が可能であった。一方、2mM LA レベルや 4mM LA レベルでは、運動強度が大きくなるにつれて予測値を大きく over estimate する傾向があった。

本研究で用いた最大下運動強度を求める方法は、最大運動を必要としないので、体力の弱い人や患者・老人のみならず、一般の人やスポーツマンにも広く利用できる可能性を持っている。しかし、この方法を普遍化するにはさらに研究が必要とされよう。

文 献

- 1) Bouhuys, A., Pool, J., Binkhorst, R.A., Leeuwen, P.V.: Metabolic acidosis in healthy males. *J. Appl. Physiol.*, 21: 1040—1046 (1966)
- 2) Ciba Foundation Symposium 87; Metabolic Acidosis. Pitman, Great Briten (1982)
- 3) Davis, J.A., Whipp, B.J., Lamarra, N., Huntsman, D.J., Frank, R.J., Wasserman, K.: Effect of ramp slop on determination of aerobic

- parameters from the ramp exercise test. *Med. Sci. Sports Exer.*, **14** : 339—343 (1982)
- 4) Hultman, E., Sahlin, K.: Acid-base balance during exercise. In: Exercise and Sports Sciences Reviews, Vol. 8, Hutton, R.S. and Miller, D.I. (eds). Franklin Institute Press, Philadelphia, 41—128 (1980)
 - 5) Jöbsis, F.F., Stainsby, W.N.: Oxidation of NADH during contractions of circulated mammalian skeletal muscle. *Respir. Physiol.*, **4** : 292—300 (1968)
 - 6) Kindermann, W., Simon, G., Keul, J.: The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **42** : 25—34 (1979)
 - 7) Mader, A., Heck, H., Hollman, W.: Evaluation of lactic acid anaerobic energy contribution by determination of postexercise lactic acid and concentration of ear capillary blood in middle distance runners and swimmers. In: Exercise Physiology, Landry, F., Orban, W.A.R. (eds). Symposia Specialists, Miami, 187—200 (1978)
 - 8) Osnes, J.-B., Hermansen, L.: Acid-base balance after maximal exercise of short duration. *J. Appl. Physiol.*, **32** : 59—63 (1974)
 - 9) Stegmann, H., Kindermann, K.: Comparison of prolonged exercise tests at the individual anaerobic threshold and the fixed anaerobic threshold of $4 \text{ m} \cdot \text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ lactate. *Int. J. Sports Med.*, **2** : 105—110 (1982)
 - 10) Whipp, B.J., Koyal, S.N., Wasserman, K.: Anaerobic threshold and O_2 uptake kinetics for work increments of various durations. *Med. Sci. Sports*, **6** : 67—68 (1974)
 - 11) Yoshida, T., Suda, Y., Takeuchi, N.: Endurance training regimen based upon arterial blood lactate: Effects on anaerobic threshold. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **49** : 223—230 (1982)
 - 12) Yoshida, T., Takeuchi, N., Suda, Y.: Arterial versus venous lactate increase in the forearm during incremental bicycle exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **50** : 87—93 (1982)