

長距離走選手の嫌気性代謝閾値推定式の作成

	大阪市立大学	田中喜代次
(共同研究者)	同	中川敬
	同	羽間鋭雄
	筑波大学	松浦義行
	同	浅野勝己
	大阪体育大学	井関敏之

Development of Prediction Equations for Indirect Assessment of Anaerobic Threshold in Distance Runners

by

Kiyoji Tanaka, Takashi Nakagawa and Toshio Hazama

Osaka City University

Yoshiyuki Matsuura, Katsumi Asano

University of Tsukuba

Toshiyuki Iseki

Osaka College of Physical Education

ABSTRACT

The predictability of anaerobic threshold (AT) from maximal aerobic power, distance running performance, chronological age, and total running distance achieved on the treadmill (TRD) was investigated in a sample of 53 male distance runners, 17—23 yr of age. The dependent variable, oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) at which the AT was detected (i.e., $\dot{V}O_2 @AT$), was determined during an incremental treadmill test in which a series of eight or nine running bouts (with an initial velocity of 160, 180, or 200 $m \cdot min^{-1}$) was administered until exhaustion. $\dot{V}O_2 @AT$ was defined as the $\dot{V}O_2$ at which blood lactate concentration exhibited a systematic increase above a resting base-line value and was detected from the individual plots of blood lactate concentration versus treadmill velocity. A regression

analysis of the data indicated $\dot{V}O_2 @AT$ could be predicted from the following four measurements with a multiple $R=0.831$ and a standard error of estimate of $2.66 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$: $\dot{V}O_2 \text{ max}$ ($67.9 \pm 5.7 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), 1,500-m running performance ($254.5 \pm 14.2 \text{ s}$), TRD ($6.82 \pm 1.13 \text{ km}$), and age ($19.4 \pm 2.2 \text{ yr}$). When independent variables were limited to $\dot{V}O_2 \text{ max}$ (X_1) and 1,500-m running performance (X_2) for simpler assessment, a multiple $R=0.806$ and a standard error of estimate of $2.76 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ were computed. A useful prediction equation with this predictive accuracy was considered to be $\dot{V}O_2 @AT = 0.386X_1 - 0.128X_2 + 57.11$. To determine if the prediction equation developed for the 53 distance runners could be generalized to other sample, cross-validation of the equation was tested, using 21 different distance runners, 17–22 yr of age. A high correlation ($R=0.927$) was obtained between $\dot{V}O_2 @AT$ predicted from the above equation and directly measured $\dot{V}O_2 @AT$. It is concluded that the generalized equation may be applicable to young distance runners for indirect assessment of $\dot{V}O_2 @AT$.

要 旨

骨格筋における運動中の好気性代謝の上限を示す血中乳酸の上昇開始点と定義される嫌気性代謝閾値 (anaerobic threshold: AT) は、種々の呼吸器系疾患や心臓疾患を伴う患者の安全な運動量閾値として、さらには、一般人や持久性競技選手の適切な生理学的持久性指標としてその重要性が指摘されている。しかし、本来のATの測定は観血的方法であり、種々の危険性や非実用性が伴う。

そこで本研究では、ATと関連の深いかつ測定が比較的容易で、信頼性も高い最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2 \text{ max}$) や 1,500-m 走パフォーマンスなどを説明変数とするATの推定式の作成を試みた。3種のATの推定式を作成したが、推定の精度や実用性を考慮して、 $\dot{V}O_2 @AT = 0.386X_1 - 0.128X_2 + 57.11$ ($X_1 = \text{体重当りの } \dot{V}O_2 \text{ max}$, $X_2 = \text{1,500-m 走パフォーマンス}$) なる式の利用が有

効であることを示唆した。

緒 言

今日まで、我々は広領域におよぶ数多くの生理学的・形態学的諸属性 (例えば、酸素負債量・酸素摂取量・心拍出量・心拍数・心容積・心収縮能・走効率・換気能力・体脂肪率・下肢長など) の中長距離走パフォーマンスへの役割について詳細な検討を行ってきた。

その結果、とくに嫌気性代謝閾値 (anaerobic threshold: AT) と称されている血中乳酸の安静水準からの急激な増加開始点に相当する酸素摂取量 (以下 $\dot{V}O_2 @AT$ と略す) が長距離走パフォーマンスに最大の関与を示す知見を得た¹⁰⁾。さらには、長期トレーニングに伴う $\dot{V}O_2 @AT$ の変化量と 5,000-m や 10,000-m 走パフォーマンスの変化量との間にも有意な相関が認められたことを報告した⁸⁾。

したがって、 $\dot{V}O_2 @AT$ それ自体の変動が長

距離走パフォーマンスの変動により直接的に運動することが推察され、持久性競技選手における $\dot{V}O_2$ @AT の評価の重要性が指摘される。

しかしながら、 $\dot{V}O_2$ @AT の測定には多額の研究費用・高精度の呼気ガス分析器・高度な実験手技が要求されるばかりでなく、運動中に被検者の動脈或は静脈から血液を連続的に採取しなければならないといった危険性・非実用性が伴う。

このような理由から、換気およびガス交換諸量から AT を非観血的に決定する方法が諸家^{1,3,4,14,15,18})によって提案され、その有用性の高いことが報告されている。ところが、今日まで AT との関連性が深く、かつ実際に広く利用されている他の全身持久性指標などから、AT を推定する試みはなされていない。

したがって、本研究では、現在では多くの研究機関で比較的容易に測定できる最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$ max) や走パフォーマンスなどを説明変数とする高い予測精度と実用性を兼ね備えた $\dot{V}O_2$ @AT の推定式を考案することを目的とした。

方 法

1. 対 象

A群: $\dot{V}O_2$ @AT の推定式の作成に用いた対象は、高校・大学に在籍する53名の男子長距離走者(年齢: 19.4 ± 2.2 yr, 身長: 169 ± 4 cm, 体重: 56.7 ± 4.3 kg)であった。これらの被検者は、いずれも 1,500m 以上の複数の距離競技を専門とする熟練した走者で、平均約 7 年間のトレーニング歴を有していた。

B群: A群の走者を用いて作成した $\dot{V}O_2$ @AT の推定式の cross-validation を検討するために、性・年齢・体格がほぼ同様である21名の新たな長距離走者(年齢: 19.6 ± 1.7 yr, 身長: 170 ± 5 cm, 体重: 56.5 ± 4.1 kg)を選択した。しかし、これらの被検者は平均約 3.5 年間のトレーニング歴を有する者で、A群の走者と比べると、走能力の面

で劣っていた。

2. 負 荷 試 験

AT および $\dot{V}O_2$ max の測定は、被検者の主運動様式が走であることを考慮し、トレッドミル上で行った。軽いウォームアップの終了後、被検者の走能力に応じてトレッドミルベルトの初期速度 ($160, 180, 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ のいずれか) を選択し、3分30秒毎に $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ずつ速度を漸増した。各速度での走行時間は3分とし、次の速度へ移行するまでの30秒間に前腕静脈より血中乳酸濃度の測定に供するための血液標本を採取した。

3. AT および $\dot{V}O_2$ max の決定

AT は運動中の血中乳酸濃度が安静水準より急激に増加し始めた点とし、その時点に相当する酸素摂取量を $\dot{V}O_2$ @AT とした。また、 $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ の上昇を伴わない $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ の上昇開始点および $\dot{V}E$ の非直線的増加開始点を AT 決定の非観血的指標として補足的に利用した^{1,3,12,13,14})。 $\dot{V}O_2$ max の判定には $\dot{V}O_2$ の level-off ($\Delta \leq 150 \text{ ml O}_2 \cdot \text{min}^{-1}$)、年齢別予測最高心拍数および回復期のピーク血中乳酸濃度 ($\geq 8 \text{ mM}$) を用いた。

換気・ガス交換諸量の分析には、A群を対象とした場合、Beckman 社製 LB-2 (CO₂ 用) と OM-11 (O₂ 用) を、そしてB群を対象とした場合、Mijnhardt 社製 Oxycon System (Type OX-4) を利用した。血中乳酸濃度は Roche 社製 Lactate Analyzer (LA-640) あるいは酵素法により分析した。なお、血中乳酸濃度は安静時で $1.26 \pm 0.31 \text{ mM}$ 、AT 出現時で $1.66 \pm 0.42 \text{ mM}$ であった。

4. 長距離走パフォーマンスの測定

各被検者の長距離走パフォーマンスは多数存在したもので、原則として負荷試験実施日前後1カ月以内の競技会或は記録会で計測した中の最高記録をデータ解析に供した。ただし、これらの期間中いずれの競技会・記録会にも参加できなかった者についてのパフォーマンスは、負荷試験実施日か

ら最も近い日に計測した記録とした。

結 果

表1には、本対象の中のA群について得られた $\dot{V}O_2 @AT$ ・ $\dot{V}O_2 max$ ・ $\% \dot{V}O_2 max @AT$ やトレッドミル上での総走行距離 (TRD)・走パフォー

マンスなどの平均値と標準偏差を示した。表2は $\dot{V}O_2 max$ ・1,500-m 走パフォーマンス・TRD・年齢を説明変数として、基準変数である $\dot{V}O_2 @AT$ との重回帰分析を行った結果を示したものである。作成した $\dot{V}O_2 @AT$ の推定式は表3のごとくである。

表1 Physiological and running performance variables in 53 distance runners.

		MEAN±S.D.
$\dot{V}O_2 @AT$	$ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$	50.6 ± 4.6
$\dot{V}O_2 max$	$ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$	67.9 ± 5.7
$\dot{V}O_2 @AT$	$l \cdot min^{-1}$	2.870 ± 0.340
$\dot{V}O_2 max$	$l \cdot min^{-1}$	3.851 ± 0.456
$\dot{V}E_{max}$	$l \cdot min^{-1}$	138.1 ± 19.3
HR_{max}	$b \cdot min^{-1}$	194.9 ± 7.7
TRD*	km	6.816 ± 1.130
1,500-m	s	254.5 ± 14.2
5,000-m	s	953.4 ± 62.5

* total running distance achieved on the treadmill

表2 Stepwise multiple regression analysis for the $\dot{V}O_2 @AT$ and selected variables.

	$\dot{V}O_2 max$	1,500-m	TRD	Age	C	Rm	RSC
r	0.753	-0.728	0.590	0.484			
step 1	0.753 (0.608)				9.37	0.753	
step 2	0.478 (0.386)	-0.398 (-0.128)			57.11	0.806	8.2
step 3	0.588 (0.475)	-0.561 (-0.181)	-0.298 (-1.210)		72.73	0.822	2.6
step 4	0.615 (0.497)	-0.648 (-0.209)	-0.265 (-1.073)	-0.184 (-0.383)	84.44	0.831	1.5

r, zero-order correlation; C, Y-intercept; Rm, multiple correlation; RSC, Rm square change
Values are standard partial regression coefficients with partial regression coefficients in a raw-score form given in parentheses.

表3 Summary of prediction equations.

prediction equation	SEE
(1) $Y=0.386X_1-0.128X_2+57.11$	2.76
(2) $Y=0.475X_1-0.181X_2-1.210X_3-72.73$	2.69
(3) $Y=0.497X_1-0.209X_2-1.073X_3-0.383X_4+84.44$	2.66

where $Y = \dot{V}O_2 @AT$ ($ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$), $X_1 = \dot{V}O_2 max$ ($ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$), $X_2 = 1,500\text{-m run}(s)$, $X_3 = TRD$ (km), and $X_4 = age$.

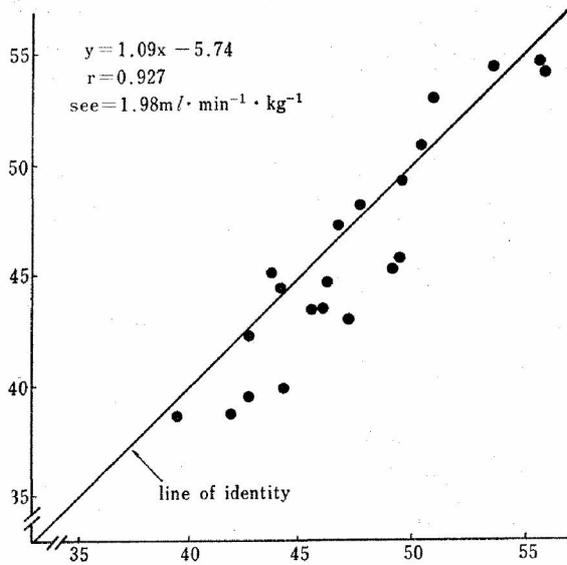


図1 Cross-validation of $\dot{V}O_2$ @AT predicted from equation (1) against directly measured $\dot{V}O_2$ @AT. The sample consisted of 21 age- and sex-matched distance runners of a different group.

図1はA群を対象として作成した推定式の中の(1)式をB群に適用した結果得られた $\dot{V}O_2$ @ATと、B群について実測した $\dot{V}O_2$ @ATの散布図である。予測 $\dot{V}O_2$ @ATによる実測 $\dot{V}O_2$ @ATの推定の標準誤差は $1.98 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ となり、両 $\dot{V}O_2$ @AT間には $r=0.927$ なる高い相関が認められた。

考 察

Wasserman¹²⁾によれば、ATは運動中の好気性エネルギー生成が乳酸の著増を招くような嫌気性の代謝機構によって補足される直前の $\dot{V}O_2$ と解釈される。この解釈の背景には、(a)負荷強度が高くなれば、代謝活動の高進した筋による O_2 需要はミトコンドリアへの O_2 供給を上回る。(b) O_2 需要—供給の不均衡は、ピルビン酸の乳酸への移行を伴って細胞内での嫌気性酸化の増大を招く、(c)乳酸は HCO_3^- により細胞内で緩衡される、(d)緩衡作用によって発生する CO_2 は $\dot{V}CO_2$ の増加をもたらす、(e)酸塩基平衡の変動はガス交換に大きな変化をもたらす、といった仮説が内在

している。

これらの仮説にしたがえば、筋組織内で起こる O_2 需要—供給の不均衡に伴う嫌気性解糖の増大がより遅い時期に到来するほどATの出現が遅いことになり、究極的にはある一定の作業に対する持久能をより長く維持させることができることを指す。その実証例として、Wasserman¹²⁾は動脈血中乳酸が安静水準に比べて 1.0 mM 未満の増加(ほぼAT水準に相当)を示す場合には持久時間は50分間継続されたが、その増加量が 2.5 mM を超える程度の場合には10名の被検者全員が50分間の自転車駆動を遂行することができなかったことを報告している。

また、Costill and Fox²⁾はマラソンの平均走速度でトレッドミル上を走らせた場合の $\% \dot{V}O_2 \text{ max}$ が約75%であったことを、その後、Maronら⁶⁾も実際のマラソン走行中の $\% \dot{V}O_2 \text{ max}$ が約75%であったことを報告している。この75% $\dot{V}O_2 \text{ max}$ は優れた長距離走者のAT水準にほぼ匹敵する値であり、マラソンはATに近い水準で行われることが推測される⁷⁾。このように、AT水準は長時間にわたる好気性エネルギー依存のほぼ最高水準に相当することから、ATが長距離走者における持久性走パフォーマンスを占う最適指標の一つに数えられている訳である^{5,7,8,11)}。

近年、われわれの研究の中で、長距離走者群ではATや $\dot{V}O_2 \text{ max}$ における個人差(分散)が一般人の場合よりも小さいとは言え、これら両変数間の関連が $r=0.8$ 前後と高いことを、一方では $\dot{V}O_2 \text{ max}$ も走パフォーマンスに対して有意な関連を示すとは言え、その関与の程度は $r=0.6$ 前後である(走パフォーマンスの分散の僅か36%が $\dot{V}O_2 \text{ max}$ によって説明されるに過ぎない)ことを報じてきた^{5,8)}。

このことは走パフォーマンスと $\dot{V}O_2 \text{ max}$ がATに対して各々独立的に関与している部分が多いことを、換言すれば、ATが $\dot{V}O_2 \text{ max}$ と走

パフォーマンスの組合せによってより高い精度で推定され得るという仮説の成り立つことを示唆するものである。

線維化肺炎患者・慢性閉塞性肺疾患患者・冠動脈疾患患者・本態性高血圧患者などにおいては、AT と $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の双方あるいはいずれかが極度に低く、一方から他方を推定することは困難かもしれない。しかし、鍛練者や一般健常人においては、前述のごとく AT と $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の関係はかなり密接である。Withers ら¹⁷⁾や山辺ら²⁰⁾も両者間に $r=0.83$ および $r=0.87$ が認められたことを報告している。

Weltman and Katch¹⁶⁾ は $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の推定に AT が利用できることを指摘したが、長距離走者を対象とする場合、逆に $\dot{V}O_2 \text{ max}$ を AT の推定式の一要素に利用することは有効であると言えよう。

本研究では、 $\dot{V}O_2 \text{ max}$ に加えて 1,500-m 走パフォーマンスを AT 推定式の中でもう一つの説明変数とした訳であるが、1,500-m 走パフォーマンスは純粋に持久能を反映するとは言い切れない点で多少議論が残るかもしれない。しかし、一般的にみれば、長距離走者・一般健常人を問わず、10,000-m 走パフォーマンスに優れる者ほど 1,500-m 走パフォーマンスにも優れていることが多く、両者の関連性 ($r=0.902$, $N=37$; 未発表資料) はかなり密接であると言える。

したがって、信頼性がより高く、実施がより容易であり、持久性指標として広く取り上げられている 1,500-m 走パフォーマンスを AT 推定式の一要素に利用することは実用的であると考えられる。

本対象の $\dot{V}O_2 \text{ @AT}$ ・ $\dot{V}O_2 \text{ max}$ ・走パフォーマンスの結果は、Withers ら¹⁷⁾ Kumagai ら⁵⁾ 丸山および美坂¹⁹⁾、Tanaka ら¹¹⁾ が対象とした長距離走者の値とほぼ類似したことから、本対象の走能力および有酸素性作業能力は概して長距離走者

の平均的な値であると考えられる。このことは、本研究で作成した推定式がかなり広範囲の長距離走者に適用され得ることを指すものであり、大きな意義が認められる。

表 3 に示した(2)式と(3)式の推定の精度は(1)式のそれを上回るものであるが、表 2 のごとく、その差異は僅少である。また、(2)式と(3)式の中の第 3 説明変数 (TRD) の利用はとくに実用的であるとは言えないこと、並びに(3)式の中の第 4 説明変数 (年齢) の利用も対象の年齢幅を限定することから、AT の推定には(1)式の利用が勧められる。異なった対象 (B 群) に(1)式を適用して予測した $\dot{V}O_2 \text{ @AT}$ と実測した $\dot{V}O_2 \text{ @AT}$ の間に有意な高い相関が認められたことは、作成した式の cross-validation を十分満たすものと考えられる。

文 献

- 1) Caiozzo, V.J., J.A. Davis, J.F. Ellis, J.L. Azus, R. Vandagriff, C.A. Prietto, and W.C. McMaster.; A comparison of gas exchange indices used to detect the anaerobic threshold, *J. Appl. Physiol.*, **53** : 1184—1189 (1982)
- 2) Costill, D.L., and E.L. Fox.; Energetics of marathon running, *Med. Sci. Sports*, **1** : 81—86 (1969)
- 3) Davis, J.A., M.H. Frank, B.J. Whipp, and K. Wasserman.; Anaerobic threshold alterations caused by endurance training in middle-aged men, *J. Appl. Physiol.*, **46** : 1039—1046 (1979)
- 4) Davis, J.A., P. Vodak, J.H. Wilmore, J. Vodak, and P. Kurts; Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise, *J. Appl. Physiol.*, **41** : 544—550 (1976)
- 5) Kumagai, S., K. Tanaka, Y. Matsuura, A. Matsuzaka, K. Hirakoba, and K. Asano; Relationships of the anaerobic threshold with the 5km, 10km, and 10mile races. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **49** : 19—23 (1982)
- 6) Maron, M.B., S.M. Horvath, J.E. Wilkerson, and J.A. Gliner.; Oxygen uptake measurements during competitive marathon running, *J. Appl.*

- Physiol.*, **40** : 836—838 (1976)
- 7) Tanaka, K., and Y. Matsuura.; Marathon performance, anaerobic threshold, and onset of blood lactate accumulation, *J. Appl. Physiol.*, **57** : 640—643 (1984)
 - 8) Tanaka, K., Y. Matsuura, A. Matsuzaka, K. Hirakoba, S. Kumagai, S. Sun-O, and K. Asano.; A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance running performance, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **16** : 278—282 (1984)
 - 9) Tanaka, K., Y. Matsuura, S. Kumagai, A. Matsuzaka, K. Hirakoba, and K. Asano.; Relationships of anaerobic threshold and onset of blood lactate accumulation with endurance performance, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **52** : 51—56 (1983)
 - 10) Tanaka, K.; The Relative Role of Selected Physiological and Morphological Attributes to Success in Endurance Performances, Doctoral Dissertation, Ibaraki, Japan: Univ. of Tsukuba, p. 474—483, p. 540—576 (1982)
 - 11) Tanaka, K., Y. Matsuura, and T. Moritani.; A correlational analysis of maximal oxygen uptake and anaerobic threshold as compared with middle and long distance performances, *J. Physical Fitness Japan*, **30** : 94—102 (1981)
 - 12) Wasserman, K.; The anaerobic threshold measurement to evaluate exercise performance. *Am. Rev. Respir. Dis.*, **129** : Suppl S35—S40 (1984)
 - 13) Wasserman, K., B.J. Whipp, and J.A. Davis.; Respiratory physiology of exercise: metabolism, gas exchange and ventilatory control, In: Widicombe, J.G., ed., *International Review of Physiology, Respiratory Physiology III*, Vol. 23, Baltimore: University Park Press, p. 149—211 (1981)
 - 14) Wasserman, K., and B.J. Whipp.; Exercise physiology in health and disease, *Am. Rev. Respir. Dis.*, **112** : 219—249 (1975)
 - 15) Wasserman, K., B.J. Whipp, S.N. Koyal, and W.L. Beaver.; Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise, *J. Appl. Physiol.*, **35** : 236—243 (1973)
 - 16) Weltman, A., and V. Katch.; Relationship between the onset of metabolic acidosis (anaerobic threshold) and maximal oxygen uptake, *J. Sports Med.*, **19** : 135—142 (1979)
 - 17) Withers, R.T., W.M. Sherman, J.M. Miller, and D.L. Costill.; Specificity of the anaerobic threshold in endurance trained cyclists and runners, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **47** : 93—104 (1981)
 - 18) Yoshida, T., A. Nagata, M. Muro, N. Takeuchi, and Y. Suda.; The validity of anaerobic threshold determination by a Douglas bag method compared with arterial blood lactate concentration, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **46** : 423—430 (1981)
 - 19) 丸山敦夫, 美坂幸治; $\dot{V}O_2$ AT および $\dot{V}O_{2sub-max}$ による長距離選手 Performance の推定について, 鹿児島大学教育学部研究紀要, **35** : 53—64 (1984)
 - 20) 山辺裕, 小林克也, 藤井英樹, 加堂哲治, 福崎恒; 労作性狭心症の運動負荷時 cardiorespiratory response に関する研究, 日本胸部疾患学会雑誌, **21** : 631—638 (1983)