

自転車エルゴメーターによる漸増負荷運動時の酸素摂取動態に対するモデルの妥当性

Assessment of models for the oxygen uptake kinetics during incremental dynamic leg exercise.

齋藤 初恵*, 木村 真優子*, NEMETH Hajnalka***
渡辺 剛**, 伊藤 拳**, 吉岡 耕一*

Hatsue SAITO*, Mayuko KIMURA*, NEMETH Hajnalka***
Tsuyoshi WATANABE**, Susumu ITO** and Kouichi YOSHIOKA*

Abstract

Purpose: The purpose of this study was to fit three theoretical models to $\dot{V}O_2$ response during exercise, and to assess the validity of the three models using AIC (Akaike's Information Criterion). **Methods:** Subjects were two females. Using a bicycle ergometer, they performed a trapezoid exercise protocol, in which a constant-load exercise (22W, 42W, 62W, 82W, 102W, 122W) was placed between increment and decrement phases. Subjects repeated the protocol of each constant-load intensity three times. Expired gas was continuously measured by an aeromonitor with breath-by breath method. $\dot{V}O_2$ at increment phase was fitted to the model of a single exponential (Model-1), the exponential model with an additional time delay (TD) (Model-2) and the model of a time delay alone (Model-3). The values of AIC for the fits of the three models were calculated. **Results and Discussion:** The fitted values of the time constant (τ) of Model-1, $\tau + TD$ (Mean Response Time) of Model-2 and TD of Model-3 were similar. AIC of Model-2 tended to be smaller than that of Model-1 or Model-3 suggesting that Model-2 is most suitable among the three models.

Key wards; $\dot{V}O_2$ kinetics, model fitting, AIC

I はじめに

運動時の酸素摂取動態 ($\dot{V}O_2$ kinetics) を調べ

る際、一般的にはステップ負荷運動がよく用いられる。ステップ負荷運動開始時には、筋の代謝亢進に先がけて肺の $\dot{V}O_2$ が急峻に増加する時間遅れ

* 国士館大学大学院スポーツ・システム研究科 (Graduate School of Sport System, Kokushikan University)

** 国士館大学ハイテクリサーチセンター (High-Tech Research Center, Kokushikan University)

*** Faculty of Physical Education and Sport Science, Semmelweis University

(Phase I) が観察される。これに続いて $\dot{V}O_2$ は指数関数的に増加して (Phase II)、Phase IIIへと移行する応答を示すことが知られている¹⁴⁾。この酸素摂取動態は、乳酸性閾値 (Lactate threshold; LT) を境に異なる動態を示す。LT以下の運動強度では、運動開始後の $\dot{V}O_2$ はPhase IIの指数関数的な増加の後、Phase IIIに移行して2~3分間で定常状態に達する。一方LT以上の運動強度では、 $\dot{V}O_2$ が定常状態に達するまでの時間が遅延するか、あるいは運動終了時まで増加し続ける^{1) 2) 10) 11)}。さらに、その時間は運動強度の増加にともなって長くなることが報告されている¹²⁾。

一方、最大酸素摂取量や無酸素性閾値などの測定には漸増負荷 (ランプ負荷) テストがよく用いられる。漸増負荷ではステップ負荷運動における酸素摂取動態のようにPhase IやPhase IIが明確に区別できないため、負荷の開始時点と酸素摂取応答の開始時点のずれを平均応答時間 (Mean response time; MRT) として求めることが多い。これはステップ負荷運動におけるPhase Iの継続時間とPhase IIの時定数 (Time constant; τ) の和に相当すると考えられている¹³⁾。

ステップ負荷運動時の酸素摂取動態については古くから研究が行われており、現在ではPhase Iを除いたデータ、もしくは3つの局面それぞれに対して数式モデルをフィットさせる方法が一般的となっている。しかし、漸増負荷運動時の酸素摂取動態に対する数式モデルについては十分な検討がなされているとは言い難い。さらに、運動時の呼吸応答に対するモデルの妥当性 (あてはまりの

良さ) を客観的に評価した研究は報告されていない。

そこで本研究では、自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷運動時の酸素摂取動態に対し、字定数を含むモデル、時定数と時間遅れを含むモデル、時間遅れを含むモデルをフィットさせ、その妥当性について検討することを目的とした。

II 方法

(1) 被験者

被験者は健康な成人女子2名 (身長 172.0 ± 9.9 cm、体重 63.2 ± 8.9 kg、年齢 25.5 ± 2.1 歳) とした。被験者には本研究の目的および危険性についての十分な説明を行い、実験の被験者となることの同意を得た。また、本研究は国土舘大学大学院スポーツ・システム研究科研究倫理評価委員会による承認を受けて行った。

(2) 運動負荷

運動は自転車エルゴメーター (REhcor社製 Type905901) を用いて行った。運動負荷のプロトコルを図1に示した。2Wでの基底負荷運動を7分間 (0~420秒) 行った後、3分間 (420~600秒) で任意の負荷に至るように負荷を漸増させた。その後、任意の負荷による一定負荷運動を20分間 (600~1800秒) 行った。一定負荷運動は22W、42W、62W、82W、102Wおよび122Wとし、計6段階の運動負荷において、それぞれ3回ずつの測定を行った。なお、ペダリングの回転速度は60rpmを保つように指示した。

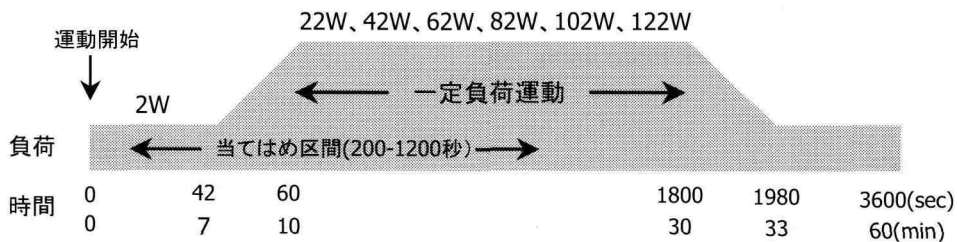


図1 運動負荷のプロトコール

(3) 呼気ガス測定

運動中の呼気ガスは呼気ガス分析器（ミナト医科学社製AE-300S）および呼気ガス分析ソフト（ミナト医科学社製AT for Windows）を用いて分析した。

(4) モデルのフィッティング

運動開始200～1200秒（運動開始～運動開始20分）をモデルの当てはめ区間とし（図1）、時間tにおける分時酸素摂取量を $\dot{V}O_2(t)$ として、以下に示す3つのモデルを非線形最小二乗法で回帰した。

$$\text{Model 1: } \tau \frac{d\dot{V}O_2(t)}{dt} + \dot{V}O_2(t) - kL(t) = 0 \quad (\text{パラメータ数}=3)$$

$$\text{Model 2: } \tau \frac{d\dot{V}O_2(t)}{dt} + \dot{V}O_2(t) - kL(t-TD) = 0 \quad (\text{パラメータ数}=4)$$

$$\text{Model 3: } \dot{V}O_2(t) - kL(t-TD) = 0 \quad (\text{パラメータ数}=3)$$

なお、t=秒数、L(t)=時間tにおける負荷、 τ =時定数、TD=時間遅れとした。フィッティングは統計解析ソフト（カイエンス社製Kyplot5.0）を用いて行った。

(5) フィットの妥当性の評価

各モデルにより求められたフィットの妥当性を以下に示すAIC (Akaike's Information Criterion; 赤池の情報量規準) により検討した⁹⁾。

$$AIC = -2 * (\text{最大対数尤度}) + 2 * (\text{モデルのパラメータ数})$$

誤差が正規分布に従うと仮定すると、

$$AIC = n * \log(2\pi\hat{\sigma}^2) + n + 2p$$

なお、n=データ数、 $\hat{\sigma}^2$ =誤差の分散の推定値、p=モデルのパラメータ数である。AICの算出にはKyplot5.0を用いた。

III 結果および考察

(1) 各モデルによるフィッティングと時定数、時間遅れ

表1に3つのモデルによって求められた時定数および時間遅れを示した。Model-1によって求め

られた時定数、およびModel-2によって求められた平均応答時間（時定数+時間遅れ= τ +TD）は各運動負荷において50秒前後となった。ステップ負荷運動において、定常状態が観察される運動負荷時の $\dot{V}O_2$ 時定数は30秒程度であるとされており⁸⁾、Phase Iの継続時間とPhase IIの時定数を合わせた40～50秒間でO2は定常状態となる。これは本研究のModel-1およびModel-2の時定数、平均応答時間と同程度である。

また、いずれの運動負荷においても、Model-2の平均応答時間は、Model-1の時定数およびModel-3の時間遅れとほぼ一致していた。しかし各モデルによるフィッティングカーブを比較すると（図2）、いずれのモデルも負荷漸増にともなう $\dot{V}O_2$ の変化を反映したフィッティングが得られたが、負荷の立ち上がり、および一定負荷運動開始付近のフィッティングがモデル間でやや異なっていた。特に、パラメータに時定数を含めた

表1 各モデルにより求められた時定数および時間遅れ

	Model-1	Model-2		Model-3	
	τ (sec)	τ (sec)	TD (sec)	τ +TD (sec)	TD (sec)
22W	63.4	15.8	50.8	66.6	68.4
42W	45.3	0.0	49.4	49.4	49.4
62W	50.2	36.1	14.0	50.1	48.3
82W	50.1	36.2	14.0	50.2	48.4
102W	57.0	45.8	10.7	56.5	53.2
122W	55.2	55.2	0.0	55.2	49.7

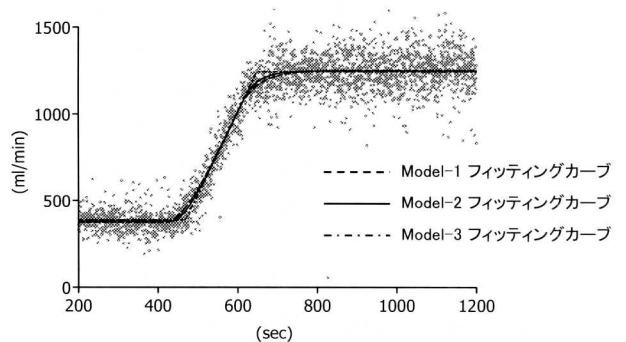


図2 82W負荷時における各モデルによるフィッティングカーブ

Model-1およびModel-2では、時定数を含まないModel-3よりも適したフィッティングカーブが得られていた。

(2) AICによるフィッティングの評価

モデルの妥当性を評価するためにAICを求めた。表2に各モデルにおけるAICの値を示した。AICの値が小さいほど「良いモデルである」とみなされる。3つのモデルのAIC値を比較すると、62W～102Wの運動負荷ではModel-2が最小の値を示した。22W、42Wの運動負荷ではModel-3が、122Wの運動負荷ではModel-1のAIC値が最小であったが、表3および図3に示すように、Model-2のAIC値との差はわずかであった。これらのことから、パラメータに時定数と時間遅れの両方を含めたModel-2が最も良いモデルとして選択される傾向にあったと言える。

運動時の酸素摂取動態に対するモデルについての研究は古く、多くのモデルが考案されている。しかし、これらの研究におけるモデルの「当てはまりの良さ」の評価は、グラフ上に描かれたフィッティングカーブや、フィットによって算出された時定数、時間遅れなどの値から主観的に判断したり^{4) 5) 6)}、あるいは実測データとモデルによるフィッティングカーブとのずれを標準偏差などにより求めたりしているに過ぎない^{7) 15)}。また、パラメータ数を増やせば高強度の運動負荷（PhaseⅢが観察されないような運動負荷）では良好なフィッティングカーブが得られるが³⁾、低～中等度の運動負荷では必ずしもパラメータ数を増やせば良いフィッティングが得られるとは限らない。

本研究では、出来るだけパラメータ数を増やすことなく当てはまりの良いモデルを考案するための一つの評価方法としてAICを用いた。AICを用いることにより、モデルの当てはまりの良さを客観的に評価することが可能となった。酸素摂取量以外の呼吸・循環パラメータに対するモデルの考案についてもAICの活用は有効であると考えられ、今後さらに検討を重ねて行きたい。

表2 各モデルにおけるAIC値

	Model-1	Model-2	Model-3
22W	24340.53	24324.07	24322.68
42W	24903.64	24866.19	24864.19
62W	28656.74	28648.79	28669.40
82W	30469.99	30453.59	30498.80
102W	30107.01	30095.23	30177.84
122W	33755.16	33757.16	33897.12

表3 各モデル間のAIC値の差

	Model-1 - Model-2	Model-3 - Model-2
22W	16.46	-1.39
42W	37.45	-2.00
62W	7.94	20.60
82W	16.40	45.21
102W	11.78	82.61
122W	-2.00	139.95

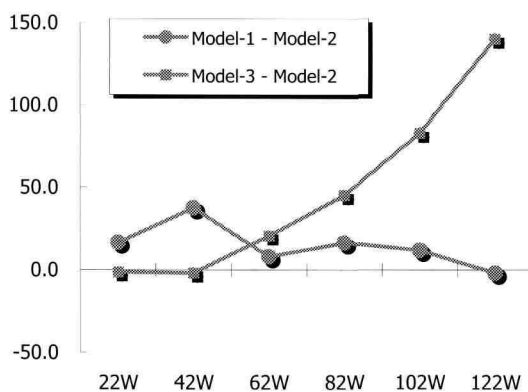


図3 各モデル間のAIC値の差

引用文献

- 1) Barstow T.J. et al. : Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. J. Appl. Physiol., 71 : 2099-2106, 1991
- 2) Casaburi R. et al. : Influence of work rate on ventilatory and gas kinetics. J. Appl. Physiol., 67 : 547-555, 1989
- 3) Christopher B. et al. : A comparison of modeling techniques used to characterize oxygen uptake kinetics during the on-transient of exercise. Exp. Physiol., 86(5) 667-676, 2001

- 4) Cleuziou C. et al. : Dynamics responses of oxygen uptake at the onset and end of moderate and heavy exercise in trained subjects. *Can. J. Appl. Physiol.*, 29(1) : 32-44, 2004
- 5) Donald H. et al., : Asymmetries of oxygen uptake transients at the on- and offset of heavy exercise in humans. *J. Physiol.*, 443:575-586, 1991
- 6) Niizeki K. et al., : Simulation of asymmetrical O₂ uptake kinetics during incremental and decremental ramp exercise. *Advanced Exp. Med. Bio.*, 393 : 165-172, 1995
- 7) Markoviz G.H. et al., : On issues of confidence in determining the time constant for oxygen uptake kinetics. *Br. J. Sports Med.*, 38 : 553-560, 2003
- 8) 宮村実晴ら, 呼吸-運動に対する応答とトレーニング効果-. NAP, 1998
- 9) 鈴木義一郎, 情報量規準による統計解析入門. 講談社, 1995
- 10) Whipp B. J. et al., : Parameters of ventilatory and gas exchange kinetics during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 52 : 1506-1513, 1982
- 11) Whipp B. J. et al., : The slow component of O₂ uptake kinetics during heavy exercise. *Med. Sci. Sport. Exerc.*, 26 : 1319-1326, 1994
- 12) Whipp B. J. et al., Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. *J. Appl. Physiol.* 33:351-356, 1972
- 13) Whipp B. J. et al., : A test to determine parameters of aerobic function during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 50 : 217-221, 1981
- 14) Whipp B. J. et al., : Physiological determinants of pulmonary gas exchange kinetics during exercise. *Med. Sci. Sport. Exerc.*, 22 : 62-71, 1990
- 15) Yano T. et al., Approximation equation for oxygen uptake kinetics in decrement-load exercise starting from low exercise intensity. *J. Physiol. Anthropol.*, 22(1) 7-10, 2003