

ランプ負荷運動を含む一定負荷自転車ペダリング運動時の 酸素摂取動態に対する数式モデルの検討

Models investigation to $\dot{V}O_2$ kinetics during incremental and decremental dynamic leg exercise

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

Hatue SAITO*, NEMETH Hajnalka****, Mayuko KIMURA*
Tsuyoshi WATANABE*** and Susumu ITO***

Abstract

The purpose of the present study was to examine our models to $\dot{V}O_2$ kinetics during trapezoid exercise started from 2W. Incremental and decremental phase data were fitted to simple linear system with a time constant. Subjects were 2 females. $\dot{V}O_2$ time constants of the incremental phase were about 50 seconds for 42-102W. Our findings were consistent with earlier investigations : thus the sum of Phase I duration and Phase II time constant results ≈ 50 seconds. $\dot{V}O_2$ time constants of decremental phase were about 20-40 seconds for 22-122W, furthermore, slope dependency was presented in according to previous reports. Our model showed that $\dot{V}O_2$ time constant of the decremental phase was obviously smaller than the incremental phase. Therefore, our models were suitable for $\dot{V}O_{2-on/off}$ kinetics investigation.

Key words: $\dot{V}O_2$ kinetics, time constant, incremental phase, decremental phase

I はじめに

ジョギングやウォーキングなどの一定負荷運動においては酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) に定常状態が観察される。このような一定負荷運動時の酸素摂取動態 ($\dot{V}O_2$ kinetics) に対する数式モデルについては古くから興味が持たれている。運動時の $\dot{V}O_2$ 動

態を調べる際、一般的にはステップ負荷運動がよく用いられている。ステップ運動負荷を行った場合、 $\dot{V}O_2$ 応答は10~25秒間の時間遅れの後 (Phase I)、Phase II で指数関数的に増加してPhase IIIへと移行する⁸⁾。またこの $\dot{V}O_2$ 動態は、乳酸性閾値 (Lactate threshold ; LT) に相当する強度以下の運動の場合、Phase II の指数関数的な増加の後

* 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

PhaseⅢで定常状態に達するが、LT以上の運動強度ではPhaseⅡの増加に続きPhaseⅢにおいても緩やかに増加する（緩成分）ことが知られている^{1) 2) 9) 11)}。

一方、最大酸素摂取量や無酸素性閾値などを調べる際にはランプ負荷（漸増負荷）テストがよく用いられる。ランプ負荷運動に対する $\dot{V}O_2$ 動態はステップ負荷の場合と比較されており、ステップ負荷に見られるPhaseⅠやPhaseⅡがランプ負荷では明確に区別できないため、負荷の開始時点と $\dot{V}O_2$ 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¹⁰⁾。これはステップ負荷運動におけるPhaseⅠの継続時間とPhaseⅡの時定数（Time constant; τ ）の和に相当すると考えられているが、運動強度や負荷勾配により、必ずしも一致するとは限らないという報告もある^{7) 4)}。

そこで本研究では、一定負荷運動の前後にランプ負荷（漸増負荷および漸減負荷）運動をともなう自転車ペダリング運動を行い、負荷漸増～一定負荷運動開始時、および一定負荷運動終了～負荷漸減時の $\dot{V}O_2$ 動態に対する数式モデルについて検討した。

Ⅱ 方法

(1) 被験者

被験者は健康な成人女子2名（HN；年齢24歳、

身長179cm、体重69.5kg、MK；年齢27歳、身長165cm、体重57.0kg）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、本研究は国士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（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。任意の負荷による一定負荷運動を20分間（600～1800秒）行った後、3分間（1800～1980秒）で2Wに至るように負荷を漸減させた。負荷漸減の後、再び2Wでの基底負荷運動を27分間（1980～3600秒）行った。20分間の一定負荷運動は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。

(3) 測定方法およびデータ分析

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。測定により得られた $\dot{V}O_2$ のデータは統計解析ソフト（カイエンス社製Kyplot4.0）を用い

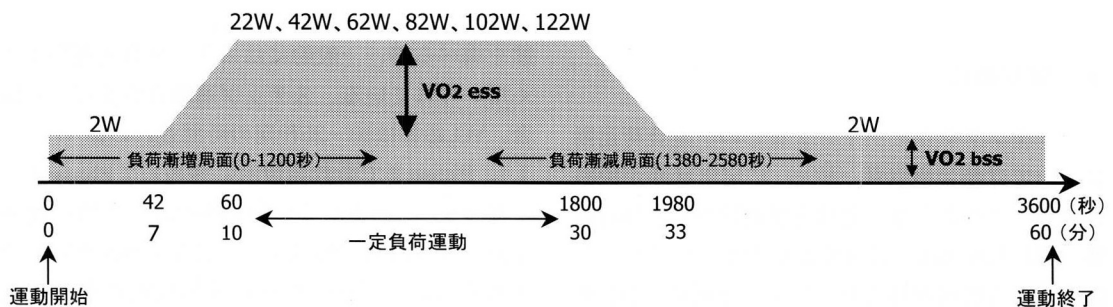


図1 運動負荷のプロトコル

て解析した。 $\dot{V}O_2(t)$ を時間 t における分時酸素摂取量とし、以下に示す指数関数モデルで回帰した。

- (1) 負荷漸増局面：0～1200秒（運動開始～運動開始20分）

$$\begin{aligned} \dot{V}O_2(t) &= \dot{V}O_{2bss} \quad (t < 420) \\ \dot{V}O_2(t) &= \dot{V}O_{2bss} + \dot{V}O_{2ess} / 180 \cdot ((t-420) \\ &\quad + \tau (e^{-(t-420)/\tau} - 1)) \quad (420 \leq t < 600) \\ \dot{V}O_2(t) &= \dot{V}O_{2bss} + \dot{V}O_{2ess} + \dot{V}O_{2bss} \cdot \\ &\quad \dot{V}O_{2ess} / 180 (e^{-180/\tau} - 1) \cdot e^{-(t-600)/\tau} \quad (600 \leq t) \end{aligned}$$

- (2) 負荷漸減局面：1380～2580秒（運動開始23～43分）

$$\begin{aligned} \dot{V}O_2(t) &= \dot{V}O_{2ess} \quad (t < 1800) \\ \dot{V}O_2(t) &= \dot{V}O_{2ess} + \dot{V}O_{2bss} / 180 \cdot ((t-1800) \\ &\quad + \tau (e^{-(t-1800)/\tau} - 1)) \quad (1800 \leq t < 1980) \\ \dot{V}O_2(t) &= \dot{V}O_{2ess} + \dot{V}O_{2bss} + \dot{V}O_{2ess} \cdot \\ &\quad \dot{V}O_{2bss} / 180 (e^{-180/\tau} - 1) \cdot e^{-(t-1980)/\tau} \quad (1980 \leq t) \end{aligned}$$

なお、 t =秒数、 $\dot{V}O_{2bss}$ =基底運動負荷時の $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}O_{2ess}$ =運動負荷時の $\dot{V}O_2$ 増加分（図-1）、 τ =時定数とした。

いない¹²⁾。しかし、いずれにしても定常状態が観察される運動負荷においては、 τ は30秒程度であるとされている⁵⁾。つまり、ステップ負荷運動における運動開始時の $\dot{V}O_2$ が定常状態に至るまでの時間はPhase Iの継続時間とPhase IIの τ を合わせた約40～55秒となる。本研究のモデルにより求められた τ は、42W、62W、82W、102W、122Wでいずれも50秒前後が示され、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 τ を合わせた値と同程度であった。また、比較的高強度の負荷である102W、122Wにおいても定常状態が観察され、 τ は中等度の負荷と同程度であった。これはステップ負荷運動と比較し、ランプ負荷運動では負荷が緩やかに増加することから、 $\dot{V}O_2$ は比較的高い運動強度においても中等度の運動負荷と同程度の τ をもって定常状態へ到達したものと考えられた。

Ⅲ 結果および考察

(1) 負荷漸増局面（0～1200秒）

図-2に42W負荷時の負荷漸増局面におけるフィッティングを示した。負荷漸増にともなう $\dot{V}O_2$ の変化をよく反映したフィッティング曲線が得られたことが分かる。また、各運動負荷時におけるフィッティングにより得られた曲線（以下フィッティングカーブ、図-3）により、いずれの負荷においても負荷の漸増に伴うように $\dot{V}O_2$ の応答が変化し、その後定常状態に到達する様子がよく示されていることが分かる。表-1にフィッティングにより求められた各運動負荷における τ を示した。ステップ負荷運動において、運動開始時の $\dot{V}O_2$ の τ が運動強度に依存せず一定であるかどうかについては数多くの議論がなされており、未だに結論は出

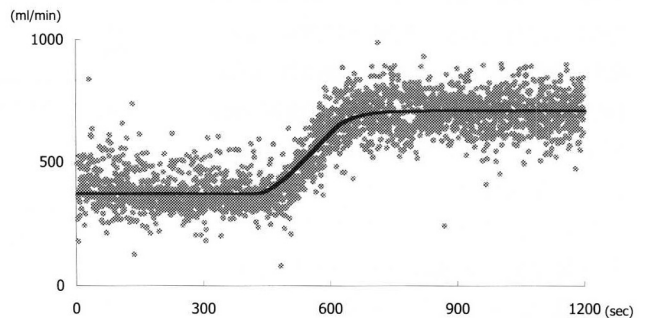


図2 負荷漸増局面における42W負荷時のフィッティング

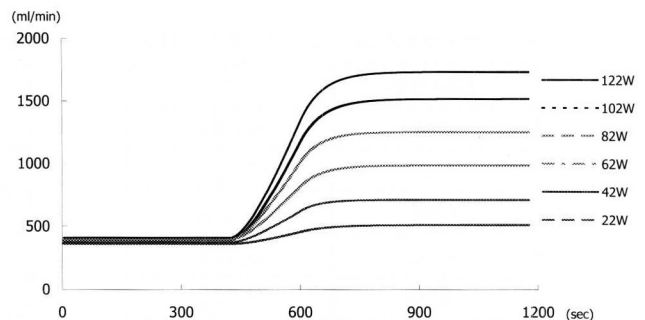


図3 負荷漸増局面における各運動負荷時のフィッティングカーブ

(2) 負荷漸減局面 (1380~2580秒)

図-4に122W負荷時の負荷漸減局面におけるフィッティングを示した。負荷漸増局面におけるフィッティングと同様に、負荷漸減においても $\dot{V}O_2$ の変化をよく反映したフィッティング曲線が得られた。また、各運動負荷時におけるフィッティングカーブ(図-5)により、いずれの負荷においても定常状態から負荷の漸減に伴うように $\dot{V}O_2$ の応答が変化の様子がよく示されていることが分かる。各運動負荷における負荷漸減局面の τ (表-2)は、20~40秒の範囲にあり、さらに負荷漸増局面の $\dot{V}O_2$ の τ (表-1)と比較し負荷漸減局面の τ は小さく、これは先行研究と同様の傾向にあった^{7) 11) 3)}。また、運動強度に依存して τ は大きくなる傾向にあった。負荷漸減時の $\dot{V}O_2$ の τ は、負荷勾配の影響を受けるという報告がある⁶⁾。本研究における負荷勾配は、22W=6.7W/min、42W=13.3W/min、62W=20.0W/min、82W=26.7W/min、102W=33.3W/min、122W=40.0W/minであった。したがって運動強度が高いほど負荷勾配は大きくなるプロトコルであったことから、本研究においても負荷勾配の増加に伴って τ が大きくなる傾向にあったといえる。

以上の結果から、負荷漸増および負

荷漸減を含む一定負荷運動時の $\dot{V}O_2$ の τ は、いずれの局面においても先行研究と同様の結果が得られたことから、本研究で用いた数式モデルによる $\dot{V}O_2$ 動態の解析はほぼ妥当であったと考えられる。しかし、22Wにおける負荷漸増局面の τ は他の運動負荷のそれとは異なる傾向にあった。運動開始時における $\dot{V}O_2$ 動態の運動強度依存については、

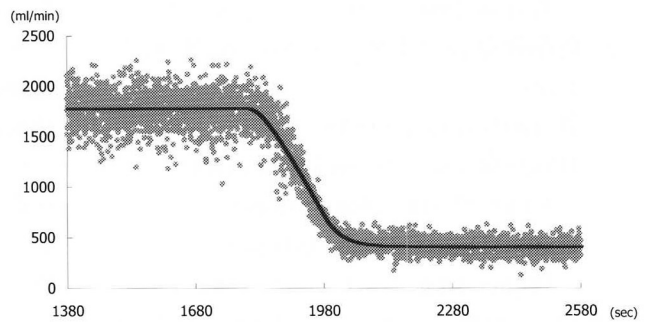


図4 負荷漸減局面における122W負荷時のフィッティング

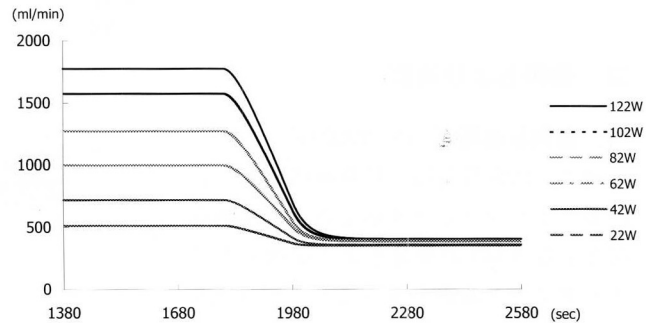


図5 負荷漸減局面における各運動負荷時のフィッティングカーブ

表1 負荷漸増局面における各運動負荷時の τ

運動負荷	τ
22W	72.241
42W	48.780
62W	53.518
82W	52.466
102W	58.520
122W	56.700

表2 負荷漸減局面における各運動負荷時の τ

運動負荷	τ
22W	22.056
42W	28.451
62W	34.725
82W	31.852
102W	36.205
122W	39.768

そのメカニズムも含め未だに明確な結論は出されていないが、負荷強度もしくは負荷勾配によって異なったモデルを用いた方が、より適したフィットとなる可能性も考えられる。さらに、今回は漸増負荷開始時点と $\dot{V}O_2$ 応答の開始時点のずれ（時間遅れ）については検討してないことから、これらの諸要因を考慮した数式モデルについても検討する必要があると考えられた。

V まとめ

本研究では一定負荷運動の前後にランプ負荷運動を伴う自転車ペダリング運動を行い、負荷漸増～一定負荷運動開始時、および一定負荷運動終了～負荷漸減時の $\dot{V}O_2$ 動態に対する数式モデルについて検討した。負荷漸増局面における $\dot{V}O_2$ の τ は、42W、62W、82W、102W、122Wの運動負荷でいずれも50秒前後を示した。これは先行研究により報告されているステップ負荷におけるPhase IとIIとの継続時間とほぼ同程度であった。また、負荷漸減局面における $\dot{V}O_2$ の τ は20～40秒の範囲にあり、いずれの負荷強度においても負荷漸増局面の τ よりも小さい値となった。さらに負荷勾配の増加にともなって τ も大きくなる傾向にあり、これらは先行研究と同様の結果となった。以上の結果から、今回用いた数式モデルによる $\dot{V}O_2$ 動態の解析はほぼ妥当であったと考えられるが、今後、負荷強度の違いや時間遅れを考慮した数式モデルについても検討する必要があると考えられた。

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) 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
- 4) Miyamoto Y. et al. : Dynamics of ventilation, circulation, and gas exchange to incremental and decremental ramp exercise. *J.Appl. Physiol.*, 72 : 2244-2254, 1992
- 5) 宮村実晴ら：呼吸-運動に対する応答とトレーニング効果-， p.110-115, 1998
- 6) Niizeki K. et al. : Simulation of asymmetrical $\dot{V}O_2$ uptake kinetics during incremental and decremental ramp exercise. *Advanced Exp. Med. Bio.*, 393 : 165-172, 1995
- 7) Swanson G. D. et al., : On the modeling and interpretation of oxygen uptake kinetics from ramp work rate tests. *J.Appl. Physiol.*, 50 : 2453-2458, 1988
- 8) Whipp B. J. et al. : Physiological determinants of pulmonary gas exchange kinetics during exercise. *Med. Sci. Sport. Exerc.*, 22 : 62-71, 1990
- 9) Whipp B. J. et al., : Parameters of ventilatory and gas exchange kinetics during exercise. *J.Appl. Physiol.*, 52 : 1506-1513, 1982
- 10) Whipp B. J. et al., : A test to determine parameters of aerobic function during exercise. *J.Appl. Physiol.*, 50 : 217-221, 1981
- 11) Whipp B. J. et al., : The slow component of $\dot{V}O_2$ uptake kinetics during heavy exercise. *Med. Sci. Sport. Exerc.*, 26 : 1319-1326, 1994
- 12) Xu F. et al., : Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sports Med.*, 27(5) : 313-327, 1999
- 13) Yoshida T. : Gas exchange responses to ramp exercise. *Ann. Physiol Anthropol.*, 9(2) : 167-173, 1990

(推薦評議員：渡辺 剛)