

自転車エルゴメーター運動によるランプ負荷運動時の酸素摂取動態に対する 数式モデルの妥当性について

Models investigation to the oxygen uptake kinetics during increment and decrement dynamic leg exercise.

齋藤初恵*, Nemeth Hajnalka*^{***}, 木村真優子*
渡辺剛*^{**}, 伊藤拳*^{**}

Hatsue SAITO *, NEMETH Hajnalka*^{***}, Mayuko KIMURA *
Tsuyoshi WATANABE*^{**} and Susumu ITO*^{**}

ABSTRACT

The purpose of the present study was to investigate our models to oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) kinetics during trapezoidal dynamic leg exercise started from 2W. Subjects were 2 females. During exercise, expired gas was continuously measured by aeromonitor with breath-by-breath method. $\dot{V}O_2$ data at the increment and decrement phases were fitted to simple exponential expression with time constant (Model NTD), and also with time constant and time delay (Model TD). Both of the increment and the decrement phases, Model TD showed better fitting than Model NTD. $\dot{V}O_2$ time constants calculated by Model NTD were similar to the sum of time constant and time delay that was calculated by Model TD. It was considered that the model with time delay was more suitable for $\dot{V}O_2$ transient kinetics examination.

Key words; $\dot{V}O_2$ kinetics, time constant, time delay, increment phase, decrement phase

I はじめに

一定負荷運動時の酸素摂取動態 ($\dot{V}O_2$ kinetics) に関する研究は古くから行われている。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る。現在主流となっている一呼吸毎 (breath by breath) の呼気ガスデータ分析によって、ステップ負荷運動開始時において、筋の代謝亢進に先がけて肺の O_2 が急峻に増加する時

間遅れの存在 (Phase I) が示され、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¹⁵⁾。またこの $\dot{V}O_2$ 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 moderate な運動強度の場合、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 heavy な運動強度では、 $\dot{V}O_2$ が定常状態

* 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

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 ($\dot{V}O_2$ slow component)、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¹⁰⁾。

一方、最大酸素摂取量や無酸素性作業閾値などの測定にはランプ負荷 (漸増負荷) テストがよく用いられる。ランプ負荷ではステップ負荷のように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 $\dot{V}O_2$ 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く、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¹¹⁾。しかし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⁶⁾。ステップ負荷運動に対する $\dot{V}O_2$ 応答については、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¹⁾が一般的となっているが、ランプ負荷運動時の $\dot{V}O_2$ 応答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。

そこで本研究では、一定負荷運動の前後にランプ負荷 (負荷漸増および負荷漸減) 運動を伴う自転車ペダリング運動を行い、負荷漸増局面および負荷漸減局面の $\dot{V}O_2$ 動態に対し、時間遅れを含まない数式モデルと時間遅れを含む数式モデルをフィットさせ、その妥当性について検討した。

II 方法

(1) 被験者

被験者は健康な成人女子2名 (NH; 年齢24歳、身長179cm、体重69.5kg、KM; 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。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

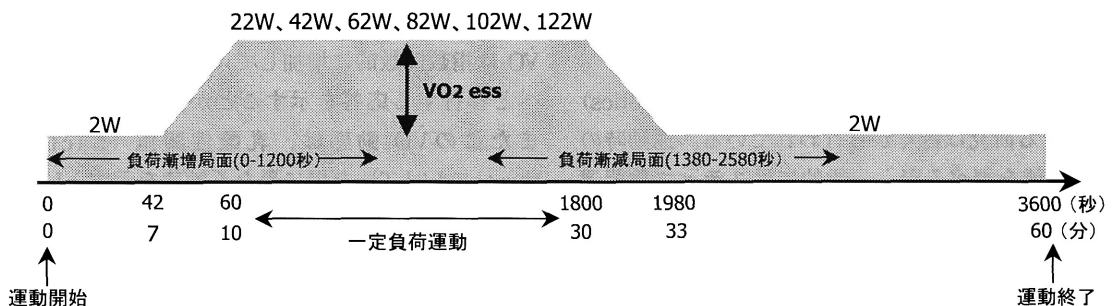


図1 運動負荷のプロトコル

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 $\dot{V}O_2$ のデータの解析には統計解析ソフト (カイエンス社製Kypplot4.0) を用いた。0~1200秒 (運動開始~運動開始20分) を負荷漸増局面、1380~2580秒 (運動開始23~43分) を負荷漸減局面とし (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、以下に示す指数関数モデルで回帰した。

Model NTD: $d\dot{V}O_2(t)/dt = 1/\tau (\dot{V}O_{2ess}(t) - \dot{V}O_2(t))$

Model TD: $d\dot{V}O_2(t)/dt = 1/\tau (\dot{V}O_{2ess}(t-TD) - \dot{V}O_2(t))$

なお、 t =秒数、 $\dot{V}O_{2ess}$ =時間 t における運動負荷時の O_2 増加分 (図1)、 τ =時定数、 TD =時間遅れとした。

Ⅲ 結果および考察

(1) 負荷漸増局面 (0~1200秒)

図2に42W負荷時の各モデルによるフィッティングを示した。両モデルとも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が得られたが、Model TDでは負荷に対する応答の変化をよりよくとらえていた。また、各運動負荷時におけるフィッティングカーブ (図3) では、特に比較的高強度の負荷において、Model NTDと比較しModel TDでは負荷の急峻な変化をよく表したフィッティングカーブが得られた。

表1に各モデルの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 および TD を示した。Model NTDにより求められた τ は、42W~122Wでいずれも50秒前後が示され、

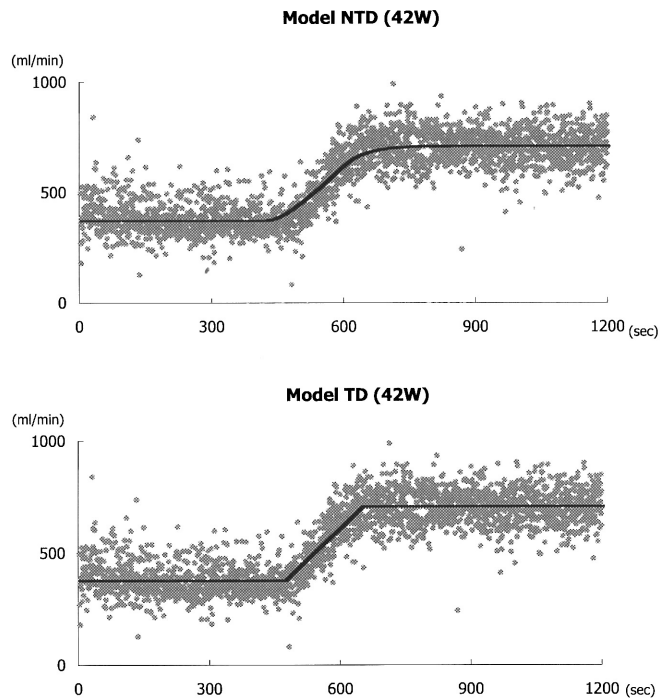


図2 負荷漸増局面における42W負荷時のフィッティング

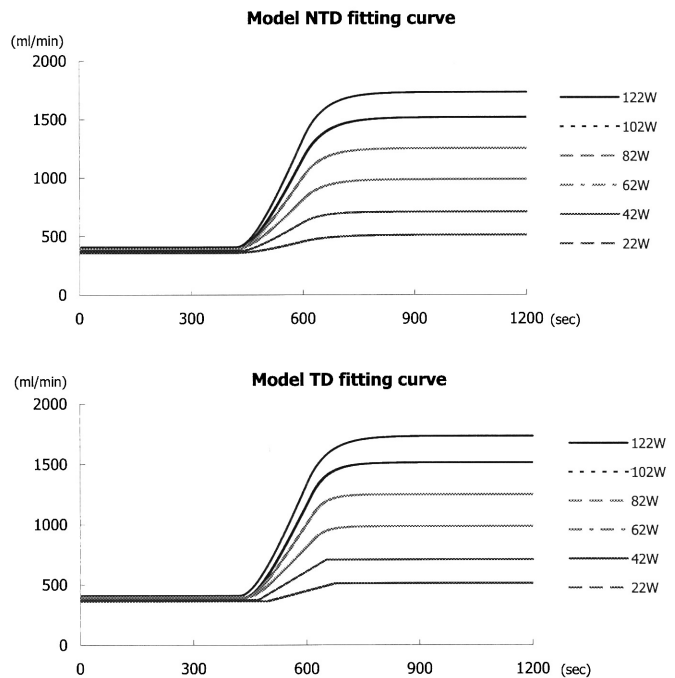


図3 負荷漸増局面における各運動負荷時のフィッティングカーブ

これはステップ負荷運動におけるPhase Iの継続時間 (15~25秒)¹²⁾とPhase IIの τ (約30秒)⁷⁾を合わせた時間と同程度であった。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。

Model TDにより求められたTDは、運動負荷の増加とともに小さくなる傾向にあったが、22W、42Wにおける τ およびTDでは、 τ をTDとして説明していると考えられた。62W~102WにおけるTDは10~25秒の範囲内にあり、これはmoderateなステップ負荷運動におけるPhase Iの継続時間と同程度であった。また、いずれの負荷においても、 τ とTDの合計はModel NTDにより求められた τ とほぼ同程度の値となった。

22Wにおける τ や τ +TDは、いずれのモデルにおいても他の負荷よりも大きい値を示した。MacDonaldら⁵⁾は運動時の脚血流量の応答は $\dot{V}O_2$ 応答よりも先行することを明らかにしている。さらに、 $\dot{V}O_2$ は活動筋における酸素消費を反映していることが明らかとなっている^{3) 4)}。

22Wでは運動開始時の負荷が弱く、そのような場合、筋血流量の増加が活動筋での酸素消費の増加より遅れるものと考えられる。活動筋での酸素消費が $\dot{V}O_2$ の応答に反映されるとすれば、 $\dot{V}O_2$ の応答は負荷パターンから遅れて上昇し、筋血流量がある程度増加するまでは、活動筋における酸素消費動態が $\dot{V}O_2$ に反映されないと考えられる。一方、122WにおいてはModel TDによって求められたTDは他の負荷よりも小さく、これは運動時の心拍数が高く筋血流量が多いために、活動筋の酸素消費動態が血流量の修飾を受けて短時間で $\dot{V}O_2$ へと反映されたと考えられた。つまり、運動強度によって酸素運搬系と酸素利用系の両要因の $\dot{V}O_2$ 動態への関与が変化する可能性が考えられた。したがって、負荷の強度によって異なったモデ

ルを用いることで、より良好なフットングや τ 、TDが得られる可能性が考えられた。

(2) 負荷漸減局面 (1380~2580秒)

図3に122W負荷時の各モデルによるフィッティングを示した。両モデルとも負荷漸減にともなう $\dot{V}O_2$ の変化をよく反映したフィッティングが得られたが、Model TDでは負荷に対する応答の変化をよりよく表していると思われた。また、各運動負荷時におけるフィッティングカーブ (図4) は、

表1 負荷漸増局面における各運動負荷時の τ およびTD

	Model NTD	Model TD		
	τ	τ	TD	τ +TD
22W	72.241	0.012	76.018	76.030
42W	48.780	0.033	52.295	52.328
62W	53.518	30.570	22.237	52.807
82W	52.466	32.770	19.227	51.997
102W	58.520	43.186	14.237	57.423
122W	56.700	55.451	1.161	56.612

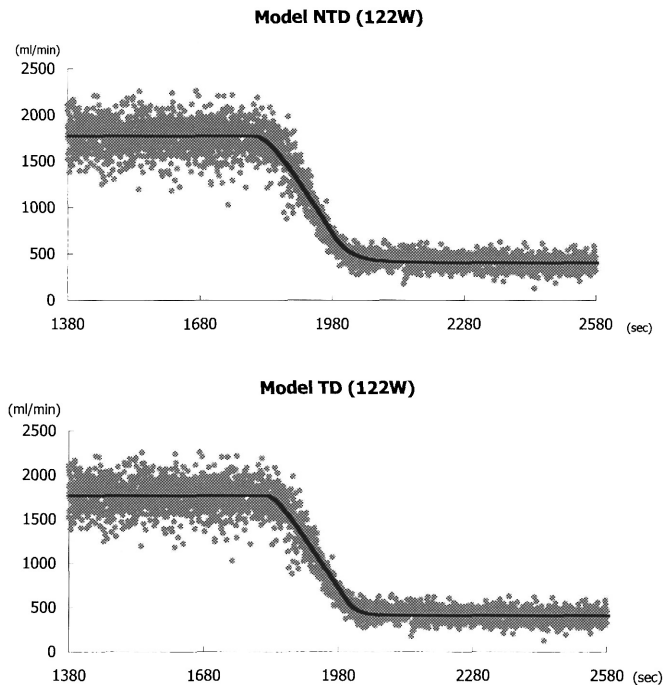


図4 負荷漸減局面における122W負荷時のフィッティング

負荷漸増時と同様、Model NTDと比較しModel TDでは負荷の急峻な変化をよく表したフィッティングカーブが得られた。

表2には各モデルの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 およびTDについて示した。Model NTDにより求められた τ は、いずれの運動負荷においても30秒前後が示され、また、負荷漸増局面における τ と比較し、負荷漸減局面における τ は小さい値となり、先行研究の同様の結果となった^{2) 8) 9) 14)}。Niizekiら⁸⁾は負荷漸増局面と漸減局面との非対称性について検討し、活動筋における血流がこの非対称性における有力な要因であるとしている。本研究におけるプロトコルでは、一定負荷運動を20分間行った後に負荷漸減局面となる。したがって、一定負荷運動を行う間に活動筋の血流量は増加し、それが $\dot{V}O_2$ 動態へと反映された結果、負荷漸減に対する $\dot{V}O_2$ 応答が負荷漸増に対する応答よりも比較的短時間となった可能性が考えられる。

Model TDにより求められたTDは、22W、62Wを除いて10秒前後であった。また、いずれの負荷においても、 τ とTDの合計はModel NTDにより求められた τ とほぼ同程度の値となった。しかし62Wでは比較的良好なフィッティングが得られたものの(図6)、TDの算出が不可能であった。Yanoら¹³⁾は無酸素性作業閾値以上の運動時において、負荷漸増運動を行った後の負荷漸減局面の $\dot{V}O_2$ 動態は、少なくとも3つの構成要素に分割して検討することが必要であるとしている。つまり、初期局面、指数関数的に減少する局面、そして直線的に減少する局面である。本研究におけるModel TDによるフィッティングを見ると(図4下、図6)、負荷漸減時(1800~1980秒)では比較的直線的な近似となっており、実

際の $\dot{V}O_2$ 応答をうまく表しきれていないことが分かる。先述のように、ステップ負荷運動開始時に対する $\dot{V}O_2$ 応答については、3つ(もしくは2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ことから、負荷漸減局面においても、いくつかの局面に分割してモデルをフィットさせる必要があると考えられた。

表2 負荷漸減局面における各運動負荷時の τ およびTD

	Model NTD	Model TD		
	τ	τ	TD	$\tau + TD$
22W	22.056	20.313	1.870	22.183
42W	28.451	14.174	14.335	28.509
62W	34.725	45.765	-10.480	35.285
82W	31.852	23.745	7.852	31.597
102W	36.205	27.335	8.429	35.764
122W	39.768	22.941	16.212	39.153

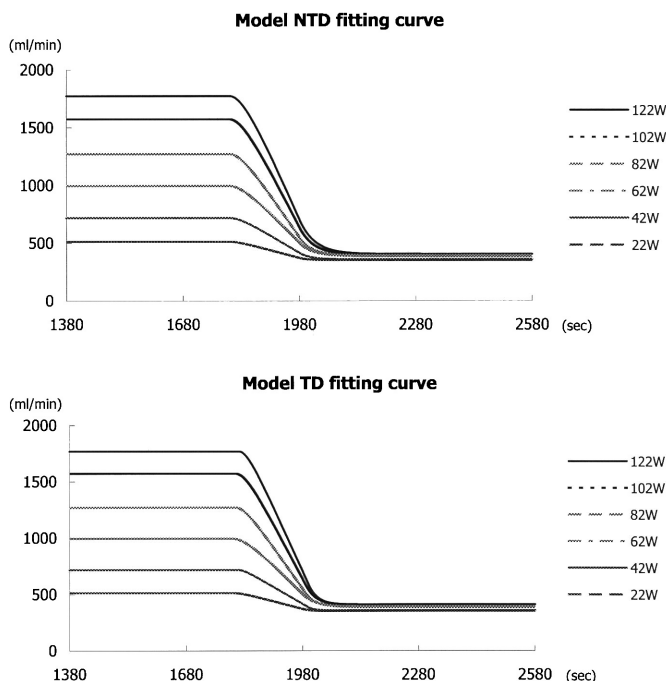


図5 負荷漸減局面における各運動負荷時のフィッティングカーブ

V まとめ

本研究では、一定負荷運動の前後にランプ負荷（負荷漸増および負荷漸減）運動を伴う自転車ペダリング運動を行い、負荷漸増局面および負荷漸減局面の $\dot{V}O_2$ 動態に対し、時間遅れ（TD）を含まない数式モデルと時間遅れを含む数式モデルを

フィットさせ、その妥当性について検討した。その結果、いずれの局面においてもTDを含まないモデルよりも、TDを含んだモデルの方がより良好なフィッティングが得られた。また、TDを含まないモデルによって算出された τ と、TDを含んだモデルにより算出された τ とTDの和は、ほぼ同程度であった。

以上のことから、本研究で用いた数式モデルは、特にTDを含むモデルにおいて、より良好なフィッティングや τ 、TDの算出が可能であったと考えられるが、どちらのモデルがより適切であるかについては、情報量規準による解析が必要であると思われる。また、負荷の強度により異なるモデルを用いたり、局面を分割してそれぞれに数式をフィットさせることで、さらに良好なフィッティングが得られる可能性が考えられた。

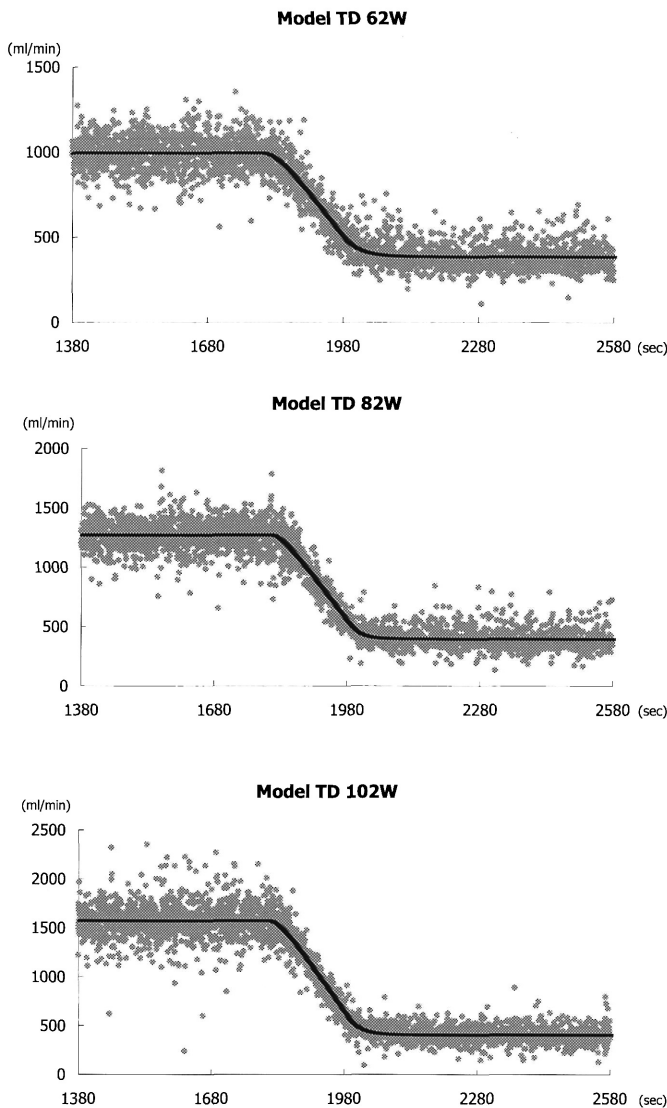


図6 負荷漸減局面におけるModel TDによる62W、82W、102W負荷時のフィッティング

引用・参考文献

- 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) 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)
- 3) Grassi B et al., Muscle O₂ uptake kinetics in humans : implications for metabolic control. *J. Appl. Physiol.* **80**:988-998(1996)
- 4) Grassi B et al., Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise on-transitions in humans. *J. Appl. Physiol.* **95**:149-158(2002)
- 5) MacDonald M J et al., Alveolar oxygen uptake and femoral artery blood flow dynamic in upright and supine leg exercise in humans. *J. Appl. Physiol.* **85**:1622-1628 (1998)
- 6) Miyamoto Y et al., Dynamics of ventilation, circulation, and gas exchange to incremental and decremental ramp exercise. *J. Appl. Physiol.* **72**:2244-2254 (1992)
- 7) 宮村実晴ら, 呼吸一運動に対する応答とトレーニング効果—NAP p.110-115 (1998)
- 8) Niizeki K. et al., Simulation of asymmetrical O₂ uptake kinetics during incremental and decremental ramp exercise. *Advanced Exp. Med. Bio.* **393**:165-172 (1995)
- 9) Swanson G D et al., On modeling and interpretation of oxygen uptake kinetics from ramp work rate tests. *J. Appl. Physiol.* **65**:2453-2458 (1988)
- 10) Whipp B J et al., Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. *J. Appl. Physiol.* **33**:351-356 (1972)
- 11) Whipp B J et al., A test to determine parameters of aerobic function during exercise. *J. Appl. Physiol.* **50**:217-221 (1981)
- 12) Xu F et al., Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sports Med.* **27**(5):313-327 (1999)
- 13) Zoladz J A et al., Detection of the change point in oxygen uptake during an incremental exercise test using recursive redials : relationship to the plasma lactate accumulation and blood acid base balance. *Eur. J. Appl. Physiol.* **78**:369-377 (1998)
- 13) Yano T et al., Kinetics of oxygen uptake during decremental ramp exercise. *J. Sports Med. Fit.* **40**:11-16 (2000)
- 14) Yoshida T. Gas exchange responses to ramp exercise. *Ann. Physiol Anthropol.* **9**(2):167-173 (1990)