漸増負荷テストにおける呼気ガス動態のシステムダイナミクスモデリング

高橋 信二¹⁾ 林 容市¹⁾ 西嶋 尚彦²⁾

System dynamics modeling of expired gas dynamics during incremental test

Shinji Takahashi¹, Youichi Hayashi¹ and Takahiko Nishijima²

Abstract

A study was conducted to examine the validity of the system dynamics (SD) model of expired gas dynamics during incremental tests, individually. In modeling, it was assumed that (1) the increment of exercise intensity follows the test time, (2) the behavior of oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and lactate (La) depend on exercise intensity, (3) CO_2 output ($\dot{V}CO_2$) is the sum of metabolic $\dot{V}CO_2$ that stems from increased $\dot{V}O_2$ and $\dot{V}CO_2$ generated by buffering La, and (4) ventilation ($\dot{V}_E$) is the sum of ventilation and hyperventilation that depends on La. The validity of the model was examined by (a) determination coefficient (r^2) as a fit index of simulated $\dot{V}_E$, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ and La to measured them, (b) equivalence consisting of the correlation coefficient (r) and paired t test between simulated and measured data at the anaerobic threshold (AT) and respiratory compensation point (RCP). Seven male subjects performed two protocol types of incremental tests to exhaustion on a cycle ergometer (TEST I, TEST II). The measurements in TEST I were used for modeling, and TEST II measurements for establishing the validity criteria of the model. In all subjects, the fit index of the simulated $\dot{V}_E$, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ and La was high (r^2 = more than 0.954, $P<.05$). Correlation coefficients of simulated $\dot{V}O_2$, % $\dot{V}O_{2max}$ and Watt at AT and RCP were respectively high ($P<.05$), and mean differences between simulated and measured $\dot{V}O_2$, % $\dot{V}O_{2max}$ and Watt at AT and RCP were not statistically significant. These results indicated that the SD model of expired gas dynamics during incremental testing was valid. In conclusion, it is suggested that individual aerobic fitness can be analytically evaluated using SD modeling with incremental test measures.

Key words : simulation, aerobic fitness, system dynamics, parts of speech

(Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 48: 169-180, March, 2003)

1) 筑波大学体育科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1
2) 筑波大学体育科学系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1
連絡先 高橋信二

1. *University of Tsukuba, Doctoral Program of Health and Sport Sciences*
1-1-1 Tennodai Tsukuba city, Ibaraki 305-8574
2. *University of Tsukuba, Institute of Health and Sport Sciences*
748 1-1-1 Tennodai Tsukuba city, Ibaraki 305-8574
Corresponding author shinji@stat.taiiku.tsukuba.ac.jp

キーワード：シミュレーション、全身持久性、システムダイナミクス

1 緒 言

効果的な全身持久性トレーニングを実施するためには、処方された運動の強度と代謝機能の改善との間の関係を個々人について確認することが求められる。トレーニング効果は運動強度に最も依存し (McArdle et al., 1991), 物理的強度, 生理的強度および心理的強度などの指標を用いて記述される。全身持久性は, 一般的に最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\text{max}$), 無酸素性代謝閾値 (anaerobic threshold : AT), $\dot{V}O_2\text{max}$ の相対的強度 (% $\dot{V}O_2\text{max}$), 血中乳酸濃度 (La) および心拍数などの生理的指標を用いて評価される。これらの生理的指標は運動強度に対応して, 非線形な変動を示すことが知られており, 時系列に変動する生理的指標の動態の分析には動的モデリング技法が適用されてきている。

Morton and Gregory (1987) は, 定常負荷テストにおける被験者毎の $\dot{V}O_2$ 動態に指数関数モデルを適用し, $\dot{V}O_2$ の時定数は年齢, トレーニング状況に影響されることを明らかにした。指数関数モデルを適用した他の負荷テストでは, Hughson et al. (1988), Miyamoto and Niizeki (1992) は漸増負荷テストおよび漸減負荷テストにおける仕事量の増減と $\dot{V}O_2$, 換気量 ($\dot{V}_E$), 二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$), 心拍数の動態との関係を検討した。また, Hughson et al. (1990) はフーリエ解析を用い, ランダム負荷テスト中の $\dot{V}O_2$ 動態をシステムとして取り扱うことを試みた。Sherrill et al. (1990) は漸増負荷テストにおける $\dot{V}O_2$ 動態と $\dot{V}CO_2$ 動態に多項式スプライン関数モデルを適用し, AT と代償性呼吸の開始点 (respiratory compensation point : RCP) の判定に有用性の高いモデルを報告した。Cabrera and Chizeck (1996) は動的な因果関係を仮定した多変量時系列モデルを漸増負荷に対する $\dot{V}O_2$ 動態, La 動態に適用し, 両変数の関係性を考察した。これらの方程式の多くは非線形最小二乗法あるいは最尤法

を用いて負荷運動過程における呼気ガス諸量間の因果関係をモデリングし, $\dot{V}O_2$ に対する $\dot{V}CO_2$ や La の関係を求めたものであり, 呼気ガス諸量の動態を十分に説明するモデルであると考えられる。また, Billat et al. (2000) は指数関数モデルを $\dot{V}O_2$ 動態に適用し, 運動遂行に対する無氣的代謝の貢献度の評価方法を報告しており, 個別的な全身持久性の評価方法としての有用性の高さが示されている。

一方, Di Prampero (1981) Wasserman et al. (1986) Whipp and Wasserman (1972) Whipp et al. (1989) などが構築した概念モデルでは, 運動強度に対する生理的応答を示す $\dot{V}_E$, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, La などの各変数間には動的な因果関係が仮定されているものの, 上述の数値モデルは直接的かつ包括的に因果関係を取り扱ったものではなく, 変数間の動的因果関係が取り扱われないために, 全身持久性指標間の関係性を十分に把握することができるとは言い難い。

多変数から構成される動的な因果関係を検討する手法として, 近年システムダイナミクスモデリングが適用されてきている (Bowker, 1993 ; 福田ら, 1993 ; 島田ら, 1994)。システムダイナミクスは動的シミュレーション技法であり, 対象とする現象の変動をシステムとして捉え, 時間経過に伴い集積する量を表すストック, ストックの単位時間あたりの変化量を表すフロー, フローの意志決定に情報を提供するコンバータ, フィードバックループおよび遅れ時間によりシステムを構成し, 変数間の相互依存関係を構造化する手法である。

負荷運動過程における生理的指標間にみられる動的因果関係にシステムダイナミクスを適用することにより, 個体内の代謝機能をシステムと捉え, 呼気ガス諸量間に見られる動的因果構造に基づいて呼気ガス動態を動的シミュレーションモデルとして取り扱うことができる。これによって, 個々人についてモデリングし, 負荷運動過程における $\dot{V}O_2$ や $\dot{V}CO_2$ をシミュレーションすることができ, RMR (relative metabolic rates) や Mets (metabolic equivalents) などの代謝量の指標を個人毎

に予測可能となり、任意に行われるトレーニング量の、個別性を重視した計量化が期待できる。また、システムダイナミクスの適用により、全身持久性の発達を呼吸ガス諸量間の相互依存関係の変化として構造モデルに表現することができ、新たな全身持久性の評価方法として用いることも期待される。

そこで本研究は、多様な負荷運動過程において、呼吸ガス動態を予測するモデルの作成のための第一段階として、一般的なテスト方法である漸増負荷運動に言及し、漸増負荷テストで測定される生理的指標間の動的因果関係にシステムダイナミクスモデリングを適用して呼吸ガス動態モデルを構築する。構築されたモデルの妥当性は適合性および等価性から検証すること、およびシステムダイナミクスモデリングを用いた全身持久性の新しい評価方法を検討することを目的とした。

II 方 法

1. 被験者

大学生ラグビー部員男子7名を被験者とした。被験者の年齢、身長、体重、競技歴の平均値±標準偏差は、それぞれ21.3±0.95歳、173±4.16cm、75.9±10.5kg、6.3±0.76年であった。被験者に研究内容を十分に理解させたうえで、実験参加への承諾を得た。

表1は、測定項目の平均値および標準偏差を示

している。 $\dot{V}O_2\max$ は4007±465ml/minであり、体重あたりでの $\dot{V}O_2\max$ ($\dot{V}O_2\max/W$)は53.1±5.1ml/kg/minであった。 $\dot{V}O_2AT$ は2190±358.0ml/min、 $\dot{V}O_2RCP$ は3445±506.7ml/minであり、AT時およびRCP時の $\dot{V}O_2\max$ に対する相対値(% $\dot{V}O_2\max$ at AT, % $\dot{V}O_2\max$ at RCP)は55.1±10.0%, 85.9±6.3%であった。また $\dot{V}O_2\max$ が得られた仕事量(Watts at $\dot{V}O_2\max$)、AT時の仕事量(Watts at AT)、RCP時の仕事量(Watts at RCP)はそれぞれ、294±24 watts, 156±19 watts, 244±31 wattsであった。

2. モデリングの手続き

Bowker (1993)の手続きを応用し、システムダイナミクス・シミュレーションソフトウェアSTELLA (Ver. 5.1J)を用いて、各被験者について漸増負荷運動中における生理的応答をモデリングした。手続きは、①モデルの概念化、②モデルの作成、③漸増負荷テスト、④シミュレーション、⑤モデルの評価：再現性、適合性、等価性の検証、である。

3. モデルの概念化

生体反応の多くはフィードバックが作用する。運動中にみられる代謝応答にもフィードバックが作用すると考えられる。すなわち、運動に要求されるエネルギー需要量に対する運動初期の供給量の不足がエネルギー供給を促進させる。その後、

Table 1 Anthropometric characteristics and aerobic capacities of subjects

Subjects	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	%Fat (%)	Max			AT			RCP		
					$\dot{V}O_2\max/W$ (ml/kg/min)	$\dot{V}O_2\max$ (ml/min)	Watt (watt)	$\dot{V}O_2$ (ml/min)	% $\dot{V}O_2\max$ (%)	watts (watt)	$\dot{V}O_2$ (ml/min)	% $\dot{V}O_2\max$ (%)	watts (watt)
HN	20	174	75.9	11.3	60.8	4613	300	2163	46.9	150	4205	91.2	270
TK	22	176	83.1	13.4	45.7	3796	285	2011	53.0	150	3141	82.7	225
KK	22	176	74.5	13.3	55.0	4094	315	1684	41.1	135	3069	75.0	240
RM	21	171	62.0	9.8	52.5	3252	255	1885	58.0	135	2995	92.1	210
KJ	22	176	94.4	20.0	47.6	4490	315	2417	53.8	165	4021	89.6	285
YY	22	176	73.6	10.4	55.2	4063	315	2473	60.9	180	3636	89.5	270
AF	20	165	67.9	11.5	55.1	3742	270	2697	72.1	180	3047	81.4	210
mean	21.3	173	75.9	12.8	53.1	4007	294	2190	55.1	156	3445	85.9	244
SD	0.95	4.16	10.5	3.44	5.11	465	24	358	9.99	19	507	6.34	31

供給量と需要量の差が減少するにしたがい、エネルギー供給系の促進は緩やかになり、その後、定常状態に達する。すなわち、運動初期においては、エネルギー供給の規定因子であるエネルギー供給量と需要量の差が、時間経過に伴い変動するエネルギー供給により決定されるというフィードバック関係にある。しかしながら、本研究では、漸増負荷という特殊な運動過程の呼気ガス動態を取り扱ったものであり、呼気ガス動態の規定因子となる仕事量は、呼気ガス動態に影響されず単調漸増する。したがって、本研究では、漸増負荷テスト過程における呼気ガス動態を仕事量の規定因子としない、すなわち仕事量と呼気ガス動態間にフィードバック関係を構築しないモデルを仮定し、モデリングを行った。

Di Prampero (1981), Wasserman et al. (1986) Whipp et al. (1989) の概念にしたがい、図1に示されるような因果関係の概念モデルを仮定した。仮定された条件は、以下の5点であった。①時間経過に伴い仕事量は漸増する。②仕事量の増加に伴い、 $\dot{V}O_2$ はレベリングオフが見られるまで増加し、 $\dot{V}O_2$ の増加に対応して有気的代謝由来の代謝性 $\dot{V}CO_2$ は増加する。③仕事量の増加に対して La は非直線的に増加し、過剰蓄積する La は緩衝作用に由来する緩衝性 $\dot{V}CO_2$ の増加を引き起こす。したがって、④ $\dot{V}CO_2$ は代謝性 $\dot{V}CO_2$ と緩衝性 $\dot{V}CO_2$ の和である。⑤ $\dot{V}_E$ は $\dot{V}CO_2$ に比例して増加し、RCP以上では La の過剰蓄積に起因する代謝性アシドーシスを抑制（代償性呼吸）作用に由

来する $\dot{V}_E$ の増加（過換気）が引き起こされる。

4. モデルの作成

概念モデルで仮定された条件にしたがい選択した変数は、 $\dot{V}O_2$, La , $\dot{V}CO_2$, 代謝性 $\dot{V}CO_2$ (Metabolic $\dot{V}CO_2$), 緩衝性 $\dot{V}CO_2$ (Buffering $\dot{V}CO_2$), $\dot{V}_E$, 換気 (Normal ventilation), 過換気 (Hyperventilation) の8変数に、仕事量 (Work rate) を加えた計9変数であった。仕事量, $\dot{V}O_2$, La , $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}_E$ の5変数を漸増負荷テストにより測定し、モデルに投入した。代謝性 $\dot{V}CO_2$, 緩衝性 $\dot{V}CO_2$, 換気, 過換気の4変数はモデル内で推定される内生変数であった。つまり、代謝性 $\dot{V}CO_2$ は、漸増負荷テスト過程において、緩衝能が顕著に機能し始めるAT以前の $\dot{V}O_2$ と $\dot{V}CO_2$ の線形関係をAT以後へ外挿することにより推定した。緩衝性 $\dot{V}CO_2$ は実測値 $\dot{V}CO_2$ と推定された代謝性 $\dot{V}CO_2$ との差により推定した。換気は代償性呼吸が起こる以前(RCP以前)の $\dot{V}_E$ と $\dot{V}CO_2$ の線形関係をRCP以後へ外挿することにより推定した。過換気は実測値 $\dot{V}_E$ と推定された換気との差により推定した。これらの外挿を用いた呼気ガス諸量の推定方法は、矢野ら(1984)およびYano(1987)の CO_2 excessの算出方法を応用したものである。

以上の9変数および変数間の因果関係をストック、フローおよびコネクタに対応させて、被験者毎に、図2に示されるようなフローダイアグラム(福田ら, 1993)を作成した。長方形で記述される変数がストックであり、総仕事量 (Total Work rate), 総 $\dot{V}O_2$ (Total $\dot{V}O_2$), 総 La (Total La), 総 $\dot{V}CO_2$ (Total $\dot{V}CO_2$), 総代謝性 $\dot{V}CO_2$ (Total Metabolic $\dot{V}CO_2$), 総緩衝性 $\dot{V}CO_2$ (Total Buffering $\dot{V}CO_2$), $\dot{V}_E$ (Total $\dot{V}_E$), 換気 (Total Normal ventilation), 過換気 (Total Hyperventilation) は各時点における9変数の集積量を示す。正円形で記述される変数がフローであり、仕事量 (Work rate), $\dot{V}O_2$, La および $\dot{V}CO_2$ などは単位時間 (1min) あたりでのストックの変化量を示す。雲形はクラウドと呼ばれ、モデルの範囲外の環境を示す。各変数を結ぶ単方向矢印はコネクタであり、変数間の因果関係を示す。

Fig 1 Concept of model: causal loop of expired gas dynamics model during incremental test I.

Fig 2 Flow diagram of expired gas dynamics model during incremental test using STELLA 5.1 J.

仕事量 (Work rate) は時間経過に伴い1分毎に漸増するためランプ関数 (Ramp function) を適用し, ウォーミングアップによる1分間の負荷増加の遅れをディレイ関数 (Delay function) で定義した.

Work rate = Delay function (Ramp function (rate of increment, 1min), 1min)

運動負荷に対する生理的応答を表す8変数はグラフ関数を用いて定義した. グラフ関数は, 実測値を用いたシミュレーションや一般的な関数を用いて定義することが困難であるような複雑な入力が必要とする際に使われる機能である (森田, 1997). $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ あるいはLaなどの変数に対しては指数関数など既知の関数を適用し, 解析することが一般的であるが, 運動負荷応答を表す変数間の関係性は個人差が大きく, 関数の適合残差が大きくなることの理由により, 実測値間の関係性を直接記述するグラフ関数 (Graph function) を用いて構造モデルを作成した.

$\dot{V}O_2$ およびLaは仕事量の増加に伴い増加するため, グラフ関数を用いて以下のように定義した.

$\dot{V}O_2$ = Graph function (Work rate)

La = Graph function (Work rate)

代謝性 (Metabolic) $\dot{V}CO_2$ は $\dot{V}O_2$ の増加に対応して増加し, 緩衝性 (Buffering) $\dot{V}CO_2$ はLaにより決定され, $\dot{V}CO_2$ は代謝性 $\dot{V}CO_2$ と緩衝性 $\dot{V}CO_2$ との和であることから, グラフ関数を用いて以下のように定義した.

$\dot{V}CO_2$ = Metabolic $\dot{V}CO_2$ + Buffering $\dot{V}CO_2$

Metabolic $\dot{V}CO_2$ = Graph function ($\dot{V}O_2$)

Buffering $\dot{V}CO_2$ = Graph function (La)

$\dot{V}_E$ は, それぞれ $\dot{V}CO_2$, Laにより決定される換気 (Normal ventilation) と過換気 (Hyper ventilation) の和であることから, グラフ関数を用いて以下のように定義した.

$\dot{V}_E$ = Normal ventilation + Hyper ventilation

Normal ventilation = Graph function ($\dot{V}CO_2$)

Hyperventilation = Graph function (La)

5. 漸増負荷テスト

自転車エルゴメータ (モナーク社製 model 818E) を用いたプロトコルの異なる多段階漸増負荷テスト (テストIおよびテストII) を実施した. 両テストとも, 1分間の座位安静状態ののち, 1分間のウォーミングアップ (0kp) を行い, 負荷テスト中のペダル回線数を60rpm一定とした.

テストIでは、ウォーミングアップ後1分間あたり0.25kpずつ、テストIIでは0.5kpずつ負荷を漸増させ、両テストとも被験者が疲労困憊に至るまで行った。テストIのデータを用いて呼気ガス動態モデルを作成し、テストIIのデータをモデルの妥当基準とした。

テスト中の $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ は、自動代謝分析装置（Mijnhardt社 OXYCON-a）を用いて、breath by breath法により安静時から運動終了後まで測定した。呼気ガス諸量の測定値は30秒毎の平均値に換算した。 La の動態を確認するため、安静時、ウォーミングアップ終了時およびテスト中1分毎に耳朶より採血し、採血後直ちに簡易乳酸測定器（アークレイ社ラクトート・プロ）を用いて La の測定を行った。

呼気ガス諸量、血中乳酸濃度の値から $\dot{V}O_{2max}$ 、AT時の $\dot{V}O_2$ （ $\dot{V}O_{2AT}$ ）およびRCP時の $\dot{V}O_2$ （ $\dot{V}O_{2RCP}$ ）を判定した。 $\dot{V}O_{2max}$ は、 $\dot{V}O_2$ の増加が前負荷段階の150ml/min未満となるレベリングオフ（leveling-off）を判定の第一基準とした（Taylor et al., 1955）。レベリングオフがみられない場合は、呼吸交換比1.15以上が出現した時点での $\dot{V}O_2$ とした（Tanaka et al., 1986）。ATは、①二酸化炭素当量（ $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ ）の変化の伴わない酸素当量（ $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ ）の急激な増加点、②V-slope法（Beaver et al., 1986）および③血中乳酸濃度が安静時水準またはウォーミングアップの水準から急上昇する変曲点を求める両対数変換法（Beaver et al., 1985）等から総合的に判定した。RCPは1分間あたりの $\dot{V}CO_2$ に対する $\dot{V}_E$ の比率が増加する点と定義し（Whipp et al., 1989）、 $\dot{V}_E$ と $\dot{V}CO_2$ の2変量をグラフ上にプロットし、2直線回帰法により判定した。

6. シミュレーション

シミュレーションの計算間隔は0.1分とし、4点の微係数を用いる4次ルンゲ・クッタ法を用いて計算された。得られたシミュレーション結果はモデルの評価に用いた。

7. モデルの評価

モデルの再現性を検証するために、テストIの実測値に対するシミュレーション値の相関係数を算出した。モデルの妥当性は、テストIIの実測値に対するシミュレーション値の適合性および等価性により検証した。

また、システムダイナミクスを用いた全身持久性の分析的評価を検討するため、 $\dot{V}O_{2max}/W$ が最低値を示した被験者TK（ $\dot{V}O_{2max}/W = 45.7\text{ml/kg/min}$ ）と、最高値を示した被験者HN（ $\dot{V}O_{2max}/W = 60.8\text{ml/kg/min}$ ）において、シミュレーションにより算出された有気のおよび無気代謝を表す変数値を比較した。

モデルの適合度指標には決定係数（ r^2 ）を用いた。モデルの等価性指標には、AT水準、RCP水準の $\dot{V}O_2$ 、 $\% \dot{V}O_{2max}$ 、仕事量、 $\dot{V}CO_2$ 、 $\dot{V}_E$ におけるテストIIの実測値に対するシミュレーション値の相関係数、ならびに対応のあるt検定による平均値の差の検定を用いた。統計的有意水準はすべての検定で $P < .05$ とした。統計処理にはSPSS9.0Jを用いた。

III 結 果

1. モデルの再現性

表3は、被験者のテストIから得られた $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 La の実測値に対するシミュレーション値の相関係数を示している。 $\dot{V}_E$ では、すべての被験者において $r = 0.999$ 以上で統計的に有

Table 2 Correlation coefficients between simulation and measurement of Test I

Subjects	$\dot{V}_E$	$\dot{V}O_2$	$\dot{V}CO_2$	La
HN	1.000	1.000	1.000	1.000
TK	0.999	1.000	1.000	0.996
KK	0.999	1.000	1.000	0.995
RM	1.000	1.000	1.000	1.000
KJ	0.999	1.000	0.996	1.000
YY	1.000	1.000	0.998	0.952
AF	1.000	1.000	0.998	0.986

All parameters detected significant correlation coefficient ($P < .05$).

Fig 3 Fitting of simulation to measurement during incremental test II (Data of subject YY).

Table 3 Determinant coefficients of simulated expired gas parameters on the model

Subjects	$\dot{V}_E$	$\dot{V}O_2$	$\dot{V}CO_2$	La
HN	0.994	0.998	0.975	0.972
TK	0.954	0.992	0.970	0.985
KK	0.985	0.994	0.969	0.985
RM	0.997	0.996	0.995	0.977
KJ	0.936	0.994	0.960	0.959
YY	0.996	0.997	0.999	0.943
AF	0.973	0.996	0.994	0.996

All parameters detected significant determinant coefficient ($P < .05$).

意であった。また、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 La では、 $r = 0.999$ 、 0.996 、 0.952 以上で統計的に有意であった。

2. モデルの妥当性

図3は被験者YYのテストIIから得られた $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 La の実測値に対するシミュレーション値の適合性を示している。また、表4はすべての被験者の $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 La についてテストIIの実測値に対するシミュレーション値の決

定係数を示している。すべての被験者の $\dot{V}_E$ において $r^2 = 0.936$ 以上の有意な決定係数が得られた。同様に $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 La では、それぞれ $r^2 = 0.992$ 、 0.960 、 0.943 以上の有意な決定係数が得られた。

表4は、妥当基準である実測値から判定されたAT、RCPと、シミュレーション値から判定されたAT、RCP水準の $\dot{V}O_2$ または $\dot{V}O_{2max}$ に対する相対値、 $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}CO_2$ および仕事量の等価性を示している。

$\dot{V}O_{2AT}$ 、 $\% \dot{V}O_{2max}$ at AT、 $\dot{V}_EAT$ 、 $\dot{V}CO_{2AT}$ 、Watts at ATの妥当基準に対するシミュレーション値の相関係数は、それぞれ $r = 0.911$ 、 0.948 、 0.975 、 0.894 、 0.923 であった。対応のあるt検定において $\dot{V}CO_{2AT}$ に有意な差が認められ、その他の項目では有意な差は認められなかった。また、 $\dot{V}O_{2RCP}$ 、 $\% \dot{V}O_{2max}$ at RCP、 $\dot{V}CO_{2RCP}$ 、Watts at RCPの実測値に対するシミュレーション値の相関係数は、それぞれ $r = 0.944$ 、 0.914 、 0.628 、 0.881 であったが、 $\dot{V}_ERCP$ では有意な相関が認められなかった ($r = 0.549$)。RCP水準の各項目における対応のあるt検定において、AT水準同様

に、 $\dot{V}O_2RCP$ に有意な差が認められ、その他の項目においては有意な差は認められなかった。

3. 呼気ガス動態の分析的評価

図4は、 $\dot{V}O_2max/W$ において評価された2名の被験者についてシミュレーションによる特徴的な呼気ガス諸量4変数の動態を比較したものであ

る。両者の $\dot{V}O_2$ および代謝性 $\dot{V}CO_2$ は疲労困憊時点での運動強度、 $\dot{V}O_2$ および代謝性 $\dot{V}CO_2$ の値に差があるものの、運動負荷に対する変動は近似した傾向であった。

一方、乳酸由来の代謝性アシドーシスに抗する緩衝能を示す緩衝性 $\dot{V}CO_2$ と過換気は異なる動態を示した。 $\dot{V}O_2max/W$ が低値を示した被験者TK

Table 4 Equivalence of simulated expired gas parameters at AT and RCP on the model

Variables (unit)	r	Simulation		Measurement		PD
	*: $P < .05$	mean	SD	mean	SD	*: $P < .05$
$\dot{V}O_2AT$ (ml/min)	0.911 *	2054.9	305.7	2072.6	302.2	n.s
% $\dot{V}O_2max$ at AT (%)	0.948 *	52.1	9.8	54.3	9.4	n.s
Watts at AT (watts)	0.923 *	162.9	23.6	158.6	28.5	n.s
$\dot{V}CO_2AT$ (ml/min)	0.894 *	1737.8	477.0	1991.0	311.0	*
$\dot{V}_EAT$ (l/min)	0.975 *	50.7	11.0	52.4	8.2	n.s
$\dot{V}O_2RCP$ (ml/min)	0.944 *	3242.4	327.1	3276.0	342.5	n.s
% $\dot{V}O_2max$ at RCP (%)	0.914 *	81.7	9.3	85.3	6.7	n.s
Watts at RCP (watts)	0.881 *	257.1	23.6	261.4	22.7	n.s
$\dot{V}CO_2RCP$ (ml/min)	0.628 *	3165.3	474.7	3685.1	461.3	*
$\dot{V}_ERCP$ (l/min)	0.549	96.6	15.9	103.5	16.2	n.s

r: correlation coefficient between simulation and measurement.

PD: paired differences on paired t-test between simulation and measurement.

Fig 4 Comparison of Subject HN and Subject TK in specific simulated parameters ($\dot{V}O_2$, Metabolic $\dot{V}CO_2$, Buffering $\dot{V}CO_2$ and Hyperventilation).

の緩衝性 $\dot{V}CO_2$ および過換気は、被験者HNよりも低い運動強度に対して増大もしくは開始するものであった。被験者TKの過換気が増大は、被験者HNに比べて急激な傾きを示した。

IV 考 察

1. システムダイナミクスモデルの妥当性

本研究では、モデル作成に用いたテストIの実測値に対するシミュレーション値の相関係数を用いて、各被験者についてモデルの再現性を検証した。各被験者ともに各変数において0.952以上の有意に高い相関係数が得られた。特に $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ では $r = 0.998$ 以上と高く、作成されたモデルには再現性があることが確認された。

モデルの妥当性は適合性と等価性から検証した。 $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 La の決定係数(r^2)は、それぞれ0.936, 0.992, 0.960, 0.943以上と有意に高い適合性を示した。 $\dot{V}O_2$ の決定係数0.992は、ステップ負荷テスト時の $\dot{V}O_2$ 動態に対して指数関数モデルを適用し、非線形最小二乗法を用いてモデリングを行ったMorton (1987)の0.954と同等あるいはそれ以上に高いものであった。この結果は、システムダイナミクスモデリングはモデルに対する実測値の残差を最小化するモデリング手法と同水準であり、かつ、被験者毎に運動負荷過程における呼吸ガス動態を記述することが可能であることを示している。 $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 La については比較対象となる先行研究がないものの、高い適合性が得られた本研究の結果より、各変数間の動的な因果関係を記述したシステムダイナミクスモデルの妥当性は高いと判断される。

しかしながら、本研究では1回の実測値を投入してモデリングを行ったため、測定値自体の変動に影響される。呼吸ガス諸量の測定項目は、測定技術や測定機器によって生じる測定誤差、あるいは生体本来の生物学的変動などにより実測値が変動することが知られている (Morgan and Mitchell, 1992)。したがって、今後は測定誤差および生物学的誤差を最小にするため、実用的に可能であれば測定を複数回実施し、その平均値を

用いたモデリングの検討が必要であると考えられる。

AT, RCP両水準における相関係数は、 $\dot{V}_E$ RCPを除く ($r = 0.549$, $P > .05$)、すべての項目で中等度から高い相関を示し、特に、 $\dot{V}O_2$ AT, $\dot{V}O_2$ RCP, % $\dot{V}O_{2max}$ at AT, % $\dot{V}O_{2max}$ at RCP, Watts at ATおよびWatts at RCPでは $r = 0.911$ 以上の非常に高い相関が認められ、また、妥当基準とシミュレーション値の平均値間に有意な差は認められなかった。これらの結果から、モデルは等価性があると判定された。

一方、 $\dot{V}CO_2$ AT, $\dot{V}CO_2$ RCPは有意な相関は示したものの ($\dot{V}CO_2$ AT: $r = 0.894$, $\dot{V}CO_2$ RCP: $r = 0.628$)、妥当基準とシミュレーション値間に有意な差がみられた ($\dot{V}CO_2$ AT: paired differences mean = 254ml/min, $\dot{V}CO_2$ RCP: paired differences mean = 520ml/min)。 $\dot{V}_E$ RCPでは妥当基準とシミュレーション値間に有意な差は認められなかったものの、両群間に有意な相関も認められなかった。これらの結果から、AT, RCP水準の $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}CO_2$ において、モデルは十分な等価性を有するとは言い難い。

Newstead et al. (1990)は、 $\dot{V}_E$ および $\dot{V}CO_2$ の変動は動脈血カリウムイオン(K^+)の変動と一致していることから、 K^+ も換気高進の要因の1つである可能性を示唆している。Miyamura et al. (1998)は、 $\dot{V}_E$ を高進させる要因として H^+ 、 K^+ の他に、カテコラミンや体温などがあり、抑制する因子としてドーパミンを示している。このように、 $\dot{V}_E$ や $\dot{V}CO_2$ を規定する要因は多く、関係性が複雑であることを考慮すると、本研究のモデルには含まれない他の要因の影響も考えられる。しかしながら、本研究で用いた代謝性指標AT, RCPの判定方法は $\dot{V}O_2$ 動態に対する $\dot{V}CO_2$ 動態(Beaver et al., 1989)、および $\dot{V}CO_2$ 動態に対する $\dot{V}_E$ 動態を評価したものである (Whipp et al., 1989)。そのため、シミュレーション値により判定された $\dot{V}O_2$ AT, $\dot{V}O_2$ RCP, % $\dot{V}O_{2max}$ at ATおよび% $\dot{V}O_{2max}$ at RCPが妥当基準に対する有意な等価性を示し、 $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}CO_2$ の高い適合性を示したことから、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}_E$ および $\dot{V}CO_2$ 動態に対する

本システムダイナミクスモデルは妥当であると判定された。

2. システムダイナミクスモデリングを用いた分析的な全身持久性評価方法

全身持久性の評価基準である $\dot{V}O_2\text{max}/W$ において最低値および最高値を示した2名の被験者を用いて、システムダイナミクスモデリングを用いた全身持久性の分析的評価を検討した。2名の $\dot{V}O_2$ および代謝性 $\dot{V}CO_2$ の動態は互いに直線的であり、その傾きはおよそ同等であることが視覚的に認められるこのことから、両者の運動に対する有気的代謝の反応は同様であると考えられる。したがって、疲労困憊時点での仕事量および $\dot{V}O_2\text{max}/W$ にみられる両者の成績の差は有気的代謝に起因するものではないと考えられる。有気的代謝の動態は両者において同水準であったのに対して、緩衝性 $\dot{V}CO_2$ および過換気の動態は被験者HNがTKより高い運動強度から増加（右傾化）する傾向であった。この結果は、被験者間における緩衝能もしくは無気的代謝の優劣を示すものであると解釈することができる。

$\dot{V}O_2\text{max}$ の制限因子は外的要因と内的要因に分類される。外的要因は $\dot{V}O_2\text{max}$ の測定に用いる運動様式や低酸素環境などであり、内的要因には循環機能、筋での酸素消費能が挙げられる。これまでの研究成果から、筋での酸素消費能をその決定因子とみなすことが多い（山地，1992）。AT以上強度での運動中に過剰に蓄積するLaは筋の運動を阻害する要因（代謝性アシドーシス）であり、緩衝能はそれに抗する能力である。これらのことを考慮すると、仕事量に対する有気的代謝の変動は2名の被験者とも近似していたものの、運動の継続時間、疲労困憊時の仕事量、 $\dot{V}O_2\text{max}$ に差が見られるのは、被験者TKの方が緩衝能が劣り、筋収縮の低下やそれに伴う酸素消費の減少に起因すると推察される。このように、システムダイナミクスモデリングでは各機能の動的因果関係を構造的に取り扱うために、各個人の全身持久性についてより分析的な評価が可能である。

本研究では被験者間で比較検討を行ったが、シ

ステムダイナミクスモデリングを用いた全身持久性の評価方法は個体内での比較にも適用可能である。すなわち、トレーニング前に漸増負荷テストを実施し、モデルを作成し、トレーニング後、同一の漸増負荷テストを実施し、モデルによるシミュレーション値とトレーニング後の実測値の隔たりを発達として捉えることができる。システムダイナミクスモデルは現象の動的因果関係を構造的に取り扱うため、トレーニングの効果として、どの機能に発達が見られたかを分析的に確認することが可能である。トレーニングによる発達は個別性が大きいことから、漸増負荷テストとシステムダイナミクスモデリングを用いた全身持久性の評価方法は有用性の高いものであると考えられる。

本研究では、システムダイナミクスモデリングの手続きに従い、 $\dot{V}O_2$ 、La、 $\dot{V}CO_2$ 、代謝性 $\dot{V}CO_2$ 、緩衝性 $\dot{V}CO_2$ 、 $\dot{V}_E$ 、換気、過換気、運動強度の9項目を構成要素として、各個人について漸増負荷テスト過程における呼気ガス諸量間に見られる動的因果関係モデルを構築した。適合度指標である決定係数は $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ およびLaの各項目において有意に高い値を示した。また、AT、RCP水準の $\dot{V}_E$ 、 $\dot{V}CO_2$ においては十分な等価性は認められなかったものの、AT、RCP水準の $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}O_2\text{max}$ に対する $\dot{V}O_2$ の相対値および運動強度において有意な高い等価性が検証された。これらの結果より、本研究において構築されたモデルの妥当性が検証された。システムダイナミクスモデリングを適用することによって、運動負荷過程における生理的指標間の動的因果モデルを個々人について構築することができることから、全身持久性の分析的評価およびトレーニング効果の分析的評価の可能性が示唆された。本研究では漸増負荷テスト過程のみを検討したが、対象者のトレーニング手段に適合した呼気ガス動態モデリングを実施するためには、定常負荷運動や間欠負荷運動などの様々な運動負荷様式におけるシステムダイナミクスモデリングの適用可能性、さらに仕事量の変動と呼気ガス動態間にフィードバック関係を仮定したより柔軟性のあるモデルについての検討が今後の課題として残されていると思われる。また、

本研究における標本数は7名であり、標本による結論の一般化に制限を与える要因の一つ（標本による研究の限界）であると考えられる。平均値の差の検定および相関係数の有意性検定における統計的過誤を回避し、検定の頑健性を確保するためには多数の標本を用いた検討も必要である。

文 献

- Beaver, W.L., Wasserman, K., and Whipp, B.J. (1985) Improve detection of lactate threshold during exercise using a log-log transformation. *J. Appl. Physiol.* 59: 1936–1940.
- Beaver, W.L., Wasserman, K., and Whipp, B.J. (1986) A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J. Appl. Physiol.* 60: 20–27.
- Billat, V.L., Bocquet, V., Slawinski, J., Laffite, L., Demarle, A., Chassaing, P., and Koralsztejn, J.P. (2000) Effect of a prior intermittent run at $\dot{V}O_{2\max}$ on oxygen kinetics during an all-out severe run in humans. *J. Sports. Med. Phys. Fitness.* 40: 185–194.
- Bowker, D.W. (1993) Dynamic models of homogeneous systems. In: Fry, J.C. (Eds) *Biological data analysis: a practical approach*. Oxford, Univ. Press: New York, pp. 313–343.
- Cabrera, M.E. and Chizeck, H.J. (1996) On the existence of a lactate threshold during incremental exercise: a systems analysis. *J. Appl. Physiol.* 80: 1819–1828.
- Di Prampero, P.E. (1981) Energetics of muscular exercise. *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.* 89: 143–222.
- 福田 敦・小山 茂・轟 朝幸・武田晋一 (1993) システムダイナミクスの基礎. 国際システムダイナミクス日本支部編 STELLA II 入門テキスト. パーシティーウェア: 東京, pp. 1–21.
- Hughson, R.L., Sherrill, D.L., and Swanson, G.D. (1987) Kinetics of $\dot{V}O_2$ with impulse and step exercise in man. *J. Appl. Physiol.* 64: 451–459.
- Hughson, R.L., Winter, D.A., Patla, A.E., Swanson, G.D., and Cuervo, L.A. (1990) Investigation of $\dot{V}O_2$ kinetics in humans with pseudo random binary sequence work rate change. *J. Appl. Physiol.* 68: 796–801.
- McArdle, W.D., Katch, F.I., and Katch, V.L. (1991) *Exercise Physiology: Energy, Nutrition, and Human Performance* (3rd ed), Lea & Febiger: Philadelphia.
- Miyamoto, Y. and Niizeki, K. (1992) Dynamics of ventilation, circulation, and gas exchange to incremental and decremental ramp exercise. *J. Appl. Physiol.* 72: 2244–2254.
- Miyamura, M., Ishida, K., Itoh, H., and Ohkuwa, T. (1998) Relationship between maximal pulmonary ventilation and arterialized venous blood potassium and dopamine concentrations obtained at exhaustion in man. *Jpn. J. Physiol.* 48: 17–23.
- Morgan, D.W. and Mitchell, C. (1992) Physiological aspects of running economy. *Med. Sci. Exerc.* 23: 378–383.
- 森田道也 (1999) 経営システムのモデリング学習. 牧野書店: 東京, pp. 65–71.
- Morton, R.H. and Gregory, C.G. (1987) A systems model approach to the ventilatory anaerobic threshold. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 56: 367–373.
- Newstead, C.G., Donaldson, G.C., and Sneyd, J.R. (1990) Potassium as a respiratory signal in humans. *J. Appl. Physiol.* 69: 1799–1803.
- Sherrill, D.L., Anderson, S.J., and Swanson, G.D. (1990) Using smoothing splines for detecting ventilatory thresholds. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 22: 684–689.
- 島田俊郎・山内 昭 (1994) システムダイナミクス入門. 島田俊郎編 日科技連出版社: 東京, pp. 3–51.
- 清水和幸 (1999) 生命システム解析のための数学. コロナ社: 東京, pp. 95–109.
- Tanaka, K., Watanabe, H., Konishi, Y., Mitsuzono, R., Sumida, S., Tanaka, S., Fukuba, T., and Nakadomo, F. (1986) Logitudinal associations between anaerobic threshold and distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 55: 248–252.
- Taylor, H.L., Busirk, E., and Henschel, A. (1955) Maximal oxygen uptake measure of cardio-respiratory performance. *J. Appl. Physiol.* 8: 73–80.
- 山地啓司 (1992) 最大酸素摂取量の科学. 杏林書院: 東京, pp. 208–225.
- 矢野徳郎・浅野勝巳・野村武男・松阪 晃・平木場浩二 (1984) 漸増運動時の $\dot{V}CO_2$ の動態. 体力科学

- 33: 201–210.
- Yano, T (1987) The differences in CO₂ kinetics during incremental exercise among sprinters, middle, and long distance runners. *Jpn. J. Physiol.* 37: 369–378.
- Wasserman, K., Beaver, W.L., and Whipp, B.J. (1986) Mechanisms and patterns blood lactate increase during exercise. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 18: 344–352.
- Whipp, B.J. and Wasserman, K. (1972) Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. *J. Appl. Physiol.* 33: 351–356.
- Whipp, B.J., Davis, J.A., and Wasserman, K. (1989): Ventilatory control of the ‘isocapnic buffering’ region in rapidly-incremental exercise. *Respir. Physiol.* 76: 357–367.

(平成14年1月16日受付)
(平成14年9月7日受理)