

氏名(本籍)	高橋信二(岩手県)
学位の種類	博士(体育科学)
学位記番号	博甲第3484号
学位授与年月日	平成16年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	体育科学研究科
学位論文題目	システムダイナミックスを適用した運動中の呼気ガス動態の予測

主査	筑波大学教授	医学博士	高松 薫
副査	筑波大学助教授	教育学博士	田中 喜代次
副査	筑波大学助教授	教育学博士	西嶋 尚彦
副査	筑波大学助教授	教育学博士	服部 環

## 論文の内容の要旨

### 1. 研究目的

健康やスポーツパフォーマンスと密接に関連する運動中の酸素摂取量 ( $VO_2$ ) は運動負荷を独立変数とする線形回帰分析により求められることが多い。 $VO_2$  は運動負荷に対して動的に変動する。また、 $VO_2$  動態と無酸素系代謝を反映する二酸化炭素排出量 ( $VCO_2$ ) や血中乳酸濃度 ( $La$ ) 動態との間には、因果関係が存在する。そのため、 $VO_2$ 、 $VCO_2$  および  $La$  の間に因果関係を仮定した動的なシミュレーション法を適用することによって、①運動中の呼気ガス動態を構造的に捉え予測すること、②個人ごとに呼気ガス動態モデリングを適用すること、などが可能となる。

本研究では、一般的な全身持久性体力テストである漸増負荷テストデータの  $VO_2$ 、 $VCO_2$ 、 $La$  を用いて、各種運動中の呼気ガス動態を予測する方法を開発するために、動的シミュレーション技法であるシステムダイナミックスを適用した「呼気ガス動態予測モデル」の妥当性を検証することを目的とした。

### 2. 研究課題

上述の目的を達成するために、以下に示す4つの研究課題を設定した。

- 研究課題1 漸増負荷テストにおける呼気ガス動態の構造モデルの妥当性
- 研究課題2-1 定常運動における呼気ガス動態予測の運動強度変化に対する頑健性
- 研究課題2-2 間欠運動における運動時と休息時の呼気ガス動態予測
- 研究課題3 短時間の超最大運動における呼気ガス動態予測
- 研究課題4 12分間走中の呼気ガス動態予測

### 3. 研究結果

#### (1) 漸増負荷テストにおける呼気ガス動態の構造モデルの妥当性 (研究課題1)

漸増負荷テストから得られるデータに、システムダイナミックスによる動的シミュレーション技法を適用した呼気ガス動態モデルの妥当性を検討した。7名の男性被験者は、プロトコルの異なる2つの漸増負荷テ

ストを疲労困憊に至るまで行った。テスト I から得られた  $VO_2$ ,  $VCO_2$ ,  $La$  を用いて呼気ガス動態予測モデルを作成した。また、テスト II の実測値を妥当基準とし、呼気ガス動態予測モデルの妥当性を検討した。

その結果、①呼気ガス動態予測モデルによりシミュレーションされた  $VO_2$ ,  $VCO_2$  および  $La$  は、実測値に対して高い適合性を示すこと、②  $VO_2$ ,  $VCO_2$ ,  $La$  の各動態を反映する無酸素性作業閾値 (AT) のシミュレーション値は実測値に対して等価性を示すこと、などが認められた。

#### (2) 定常運動における呼気ガス動態予測の運動強度変化に対する頑健性 (研究課題 2-1)

定常負荷運動における呼気ガス動態予測モデルの妥当性、および運動負荷変化に対する予測精度の頑健性を検討した。5名の男性被験者は、負荷漸増テストを実施した後に、80%、100%および120% ATの各強度の定常負荷テストを行った。呼気ガス動態予測モデルの予測的妥当性は、シミュレーションされる  $VO_2$ ,  $VCO_2$ ,  $La$  の実測値に対するシミュレーション値の適合性から検討し、頑健性は運動強度ごとの適合性とシミュレーション誤差の比較から検討した。

その結果、①  $VO_2$ ,  $VCO_2$  および  $La$  のシミュレーション値は、実測値に対して高い適合性を示すこと、②モデルは低強度から高強度までの運動負荷変化に対して頑健であること、などが認められた。

#### (3) 間欠運動における運動時と休息時の呼気ガス動態予測 (研究課題 2-2)

高強度間欠負荷運動中における呼気ガス動態予測モデルの妥当性、ならびにモデルの頑健性を検討した。5名の男性被験者は漸増負荷テストを実施し、その後、60%、80%および100%  $VO_{2max}$  の間欠負荷テストを行なった。モデルの予測的妥当性は、シミュレーションされる  $VO_2$ ,  $VCO_2$ ,  $La$  の実測値に対するシミュレーション値の適合性から検討し、頑健性は運動強度毎の適合性とシミュレーション誤差の比較から検討した。

その結果、①  $VO_2$ ,  $VCO_2$  および  $La$  のシミュレーション値は、実測値に対して高い適合性を示すこと、②その一方で、 $VO_2$ ,  $VCO_2$  では高強度の運動負荷において有意なシミュレーション誤差があること、③モデルに運動後過剰酸素摂取量 (EPOC) を反映させることにより、呼気ガス動態予測モデルを修正する必要があること、などが認められた。

#### (4) 短時間の超最大運動における呼気ガス動態予測 (研究課題 3)

超高強度間欠運動における呼気ガス動態予測モデルの妥当性を検討した。5名の男性被験者は、漸増負荷テストを実施し、その後、140%  $VO_{2max}$  強度の超高強度間欠負荷テスト (SMI テスト) を行った。漸増負荷テストのデータはモデリングに用いられ、SMI テストのデータはシミュレーションの妥当基準に設定された。また、モデルの予測的妥当性は、シミュレーションされる  $VO_2$ ,  $VCO_2$ ,  $La$  および重炭酸緩衝系の指標である二酸化炭素過剰排出量 ( $CO_{2excess}=VCO_2-VO_2$ ) の実測値に対するシミュレーション値の適合性から検討した。

その結果、①シミュレーションされた  $VO_2$ ,  $VCO_2$  動態は、実測値に対して高い適合性を示すこと、②しかしその一方で、 $La$  には有意なシミュレーション誤差があり、重炭酸緩衝系の指標である二酸化炭素過剰排出 ( $CO_{2excess}$ ) においても有意なシミュレーション誤差があること、などが認められた。したがって、超高強度運動時ではいくつかの系統的誤差が認められたため、呼気ガス動態予測モデルの予測的妥当性を確認することはできないこと、およびモデルの大きな改善点として、超高強度運動の影響により変化する  $La$  の産生と除去の時定数や過換気の  $VCO_2$  動態に与える因子を組み込む必要があることが示唆された。

#### (5) 12分間走中の呼気ガス動態予測 (研究課題 4)

実験室外の環境での運動における呼気ガス動態予測モデルの予測的妥当性を検討した。5名の男性被験者

は、実験室内で漸増負荷テストを実施し、その後、陸上トラックで12分間の自由走行速度テストを行った。モデルの予測的妥当性は、シミュレーションされる $VO_2$ 、 $VCO_2$ 、 $CO_2\text{excess}$ の実測値に対するシミュレーション値の適合性から検討し、頑健性はシミュレーション誤差率（SER）と加速度の相関係数から検討した。

その結果、①シミュレーションされた $VO_2$ 、 $VCO_2$ 、 $CO_2\text{excess}$ は実測値に対して高い適合性を示すことが認められた。

#### 4. 結論

本研究の結論を総括すると、システムダイナミクスを適用した呼気ガス動態予測モデルは、①一般的な全身持久性体力の評価方法である漸増負荷テストのデータから個人ごとに構築できること、②低強度から高強度の多様な運動中の $VO_2$ 、 $VCO_2$ 、 $La$ 、 $CO_2\text{excess}$ を予測可能であること、などが明らかとなった。

### 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は、漸増負荷テストから得られる生理的諸変量を基にして、各種強度での定常負荷運動や高強度間欠負荷運動など、さまざまな運動中の有酸素性代謝、無酸素性代謝および身体活動量を予測する動的シミュレーションモデルを、システムダイナミクスを用いて個人ごとに構築する手法の有用性を明らかにした。

審査専門委員会では、システムダイナミクスを運動の生理的現象の解明にはじめて適用したこと、先行研究にみられる心拍数を用いた線形連立方程式による呼気ガス予測に比較して予測誤差が小さいこと、などが高く評価された。なお、今後の課題として、運動の強度や時間が時々刻々変化する各種運動への適用の可能性について、さらに検討を要することが指摘された。

よって、著者は博士（体育科学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。