

氏 名 ひらの まさみ  
**平野 雅巳**

学位の種類 博士(スポーツ健康科学)

報告番号 甲第 1583 号

学位授与の日付 平成 27 年 9 月 13 日

学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当 (課程博士)

学位論文題目

**特異的な発揮筋力を刺激とした有酸素性運動に関する研究**

論文審査委員 (主査)	福岡大学	教授	檜垣 靖樹
(副査)	福岡大学	教授	田中 宏暁
	福岡大学	教授	向野 義人
	元福岡大学	教授	清永 明

福岡大学大学院 スポーツ健康科学研究科

スポーツ健康科学専攻 博士課程後期

学位申請論文

(要旨)

特異的な発揮筋力を刺激とした有酸素性運動に関する研究

主査 檜垣 靖樹

副査 田中 宏暁

副査 向野 義人

副査 清永 明

学籍番号 GD080502

平野 雅巳

## 研究の要旨

### 緒言

呼吸代謝指標を用いた有酸素性作業能力の評価は、持久系アスリートの競技選手 (Hawley JA & Noakes TD, 1992) から有症患者 (Yoshimura E et al, 2011) まで幅広い対象者に用いられている。評価には、漸増運動負荷中の呼吸応答を分析するため、低強度の運動中の少ない換気量から高強度の多い換気量にまで高い分析精度が求められる。換気量測定には、タービン型やニューモタコ型の流量計が多くのシステムに用いられている。しかし、いくつかの分析機器は、過小評価や過大評価することが報告されている。Rosdahl H et al (2013) と Medbø JI et al (2012) は、タービン型の換気量を用いた Moxus Modular システム (AEI Technologies, Illinois, USA) がダグラスバッグ (Douglas bag; DB) 法よりも過大評価することを示した。また、ニューモタコ型流量計と同じシステムにも関わらず、過小評価することを報告した (Rosdahl H et al, 2013)。AMIS2001 代謝測定器 (Innovision, Odense, デンマーク) は、同じ流量計を用いて過小評価している (Jensen K et al, 2002)。それ故、呼吸代謝指標を用いた有酸素性作業能評価は、研究に用いる機器や測定方法の違いによる誤差の程度を把握することが重要である。

有酸素性運動は、同一仕事率であっても、筋力発揮と収縮速度が違えば生理応答は異なる。自転車を用いた有酸素性運動は、ペダル回転数によって外的な出力 (External power output) よりも内的な出力 (Internal Power output) が大きく (Tokui M & Hirakoba K, 2008)、最大努力時における最大仕事率のペダル回転数と酸素摂取量 ( $VO_2$ ) が最高または最大になるペダル回転数と必ずしも一致しない (Buchanan M & Weltan A, 1985; Ferreira LF et al, 2006)。最大下の自転車運動において、機械的負荷に対する生理的に高効率な至適なペダル回転数は、健康づくりを目的にした運動や運動負荷試験に一般的に用いられている。Banister EW & Jackson RC (1967) は、オリンピックゴールドメダリストを対象に 59~343watts 強度の 50、60、70、80、100、120rpm から 2 試技を行ったところ、 $VO_2$  と HR は、50rpm から 80rpm で同じ仕事率にも関わらず大きく変化しないことを示した。サイクリストと非サイクリストを対象に、200watts の同一強度で 50、65、80、95、110rpm の自転車運動を行わせたところ、最もエネルギーを節約できる回転数が非サイクリスト ( $62.9 \pm 4.7$ rpm) よりもサイクリスト ( $56.1 \pm 6.9$ rpm) の方が低い回転数となり (Marsh AP & Martin PE, 1993)、自転車の運動経験が至適ペダル回転数に影響することを認めた。また、85% $VO_{2max}$  強度に対して 50~100rpm で自転車運動を行った時、60rpm

の%VO<sub>2</sub>max は、50 と 70rpm と差を認めず、90rpm が有意に高値を示した (Takaishi T et al, 1996)。これらのことから、ペダル回転数による呼吸循環応答は、対象者の自転車競技経験や運動強度によって影響を受ける可能性があり、非サイクリストの中等強度の自転車運動で呼吸応答が近似するペダル回転数の範囲がある可能性が考えられる。

発揮筋力と収縮速度が異なる組合せの有酸素性運動中の骨格筋は、酸素動態の応答が異なる。自転車運動では、一定の筋収縮速度で仕事率を漸増させたとき、運動強度の増加に伴い筋内酸素レベルは直線的に低下し、最大付近で定常する (樋口ほか, 1999)。また、低強度から中強度の同一運動強度において筋収縮速度が遅く、収縮あたりの発揮筋力が高いほど骨格筋酸素レベルは低値を示すことが報告されており (汪ほか, 2005; Takaishi, T, et al 2002)、発揮筋力によって筋酸化レベルに違いが生じる。しかし、これまで有酸素性運動の運動指導では、機械的負荷に対して生理的に効率が良い 50 や 60rpm のペダル回転数を用いられていた。

有酸素性運動中の筋線維の動員は、発揮筋力や収縮速度によって異なると考えられる。ヒトの骨格筋は、ATPase 染色を用いた方法において、収縮速度が遅く、発揮張力が小さい、酸化能力に優れた TypeI 型と、収縮速度が速く、発揮筋力が大きく、解答系能力に優れた TypeIIb 型とその中間の TypeIIa 型に分類できる。運動中の筋線維の動員は、非侵襲的な筋電図を用いて筋放電量やその周波数から推定したり、侵襲的な筋生検を用いて運動直後の筋線維と筋線維毎のグリコーゲン消費から推定する方法などがあるが、手技や解析に高度な技術を要するために報告が少ない。中等強度の有酸素性運動の筋線維タイプの動員について、Deschenes MR et al (2000) は、50-55%VO<sub>2</sub>peak の 40 と 80rpm の自転車運動において、40rpm の主動筋の活動が 80rpm より大きいことを報告している。また、Ahlquist LE et al (1992) は、85 % VO<sub>2</sub>max の 50rpm と 100rpm の自転車運動において、50rpm の運動後の TypeII 型線維のグリコーゲン消費量が 100rpm より大きいことを報告している。すなわち、中等強度における異なるペダル回転数の有酸素性運動は、速筋線維の動員に影響する。また、運動中の骨格筋内の低酸素刺激または血流制限は、骨格筋のミトコンドリア機能や毛細血管床を向上させる。酸化的リン酸化や酸素運搬能力は、運動時の制限された血流 (Tanimoto M & Ishii N, 2006) または低酸素条件 (Green HJ et al, 2009) による毛細血管密度とミトコンドリア機能の増加 (Arany Z et al, 2008) によって改善する。これらのことから、有酸素性運動における筋力発揮と収縮速度の運動条件は、筋線維動員や末梢酸素動態によってトレーニング効果に影響を及ぼす可能性が考えられる。

発揮筋力と収縮速度の組合せによるトレーニング適応は、筋肥大や筋力増加を目的としたレジスタンストレーニングや無酸素性パワートレーニングに関する研究が多い。筋力トレーニングにおいて、高速と低速で肘屈曲筋群の等速トレーニングを行ったところ、高速トレーニングは、低負荷でのパワー増加を認め、低速トレーニングは、高負荷でのパワー増加を認めている (Kanehisa H & Miyashita M, 1983)。また、最大拳上重量の 50% 負荷の標準的な収縮速度における膝伸展運動トレーニングでは筋の横断面積が増加しないにも関わらず、同負荷の低速収縮速度と収縮の維持 (等尺性筋収縮) を組合せたトレーニングでは、筋断面積と筋力を増加させる (Tanimoto M & Ishii N, 2006)。無酸素性パワートレーニングにおいて、自転車エルゴメーターを用いた無酸素性最大パワーの 90% において、高負荷低速度条件と低負荷高速度条件の同一仕事率での自転車運動トレーニングは、5 秒間の全力ペダリング運動を 20 秒間の休息を挟んで 5 回、このセットを 10 分の休息後にさらに 1 セット行い、週 4 回を 4 週間実施した。その結果、トレーニング条件群間に差がないものの両群とも無酸素性最大パワーが増加し、間欠的な運動パフォーマンスは、低負荷高速度条件で有意に向上した (黒部ほか, 2012)。すなわち、発揮筋力と筋収縮速度は、組合せによって特異的なトレーニング効果を引き起こす可能性がある。

有酸素性運動における異なる回転数のトレーニングは、我々が調べた限りで唯一、要介護認定の要支援 1 及び 2 を受けた高齢者を対象に 3 種類の回転数を増減させ、5 分間の運動を 3 日間の行うことで下肢調整力と歩行や動的バランスの改善が報告されている (對馬ら, 2011)。しかし、健康づくり運動に多く用いられ、多方面に応用できると考えられる中等強度の有酸素性運動について、発揮筋力と筋収縮速度の組合せがトレーニング適応に影響を及ぼすかは明らかにされていない。

## 目的

本研究では、有酸素性運動におけるトレーニング刺激としての特異的な筋力発揮が呼吸循環系に及ぼす影響を検討することを目的とした。研究 1 として、新たに開発された複数のミキシングチャンバーを用いた多人数同時測定 (Multichannel Mixing Chamber: MCMC) 法 (図 1) における安静時及び運動中のエネルギー消費に関する評価の妥当性を検証した。研究 2 として、乳酸閾値 (Lactate threshold: LT) 強度相当の同一仕事率の自転車運動におけるペダル回転数が呼吸循環応答に及ぼす影響について検討した。研究 3 として、LT 強度相当の同一仕事率における異なるペダル回転数の自転車運動が全身性の運

動負荷、末梢循環応答および短期間のトレーニング適応について検討した。研究 4 として、LT 強度相当の同一仕事率の異なるペダル回転数における長期間の自転車運動トレーニングが有酸素性作業能適応と最大下運動中の呼吸循環応答に及ぼす影響について検討した。

## 方法

対象者は、健康な若年成人を対象とした（研究 1: 13 名、研究 2: 7 名、研究 3: 16 名、研究 4: 18 名）。尚、本研究は、福岡大学倫理委員会の承認を得て実施した。

研究 1 は、実験 I から IV で構成した。実験 I は、極めて少量のガスで分析を行う質量分析器の異なるガスサンプルに分析を切り替えた際に生じるサンプルメモリ効果 (Thorsen T et al, 2011) が代謝指標の演算に影響しないウォッシュアウト時間を検証した。実験機器の構成は、2 台のミキシングチャンバーを用いて、マルチサンプラー (ARCO-2000 SYSTEM-5L, アルコシステム, 柏市) によって自動的に分析されるミキシングチャンバーを選択し、質量分析器 (ARCO-2000 MET, アルコシステム, 柏市) にて分析した。実験の手順は、各ミキシングチャンバー内に 2 種類の異なる濃度組成の規定ガス (Gas1: O<sub>2</sub> 20.93%, CO<sub>2</sub> 0.04%; Gas2: O<sub>2</sub> 15.00%, CO<sub>2</sub> 4.55%) を充填し、それぞれ 5 秒間、1 周期を 10 秒間として、8 周期の分析を 10Hz で記録した。

実験 II は、非連続ガス濃度値を用いて代謝指標算出した際の連続ガス濃度を用いたときとの誤差を明らかにした。健康な成人男性 1 名 (年齢 25 歳、身長 173.7cm、体重 65.6kg) を対象に座位安静と漸増運動負荷試験をそれぞれ 10 分間行った。運動は、自転車エルゴメーター (Corival, Lode, オランダ) を用いた。運動負荷は、4 秒毎に 1W のランプ式漸増法とした。ガス濃度は、質量分析器を用い、10Hz で分析した値を 1.0、2.5、5.0、10 秒間の平均値を用いて酸素摂取量 (VO<sub>2</sub>)、二酸化炭素排出量 (VCO<sub>2</sub>)、呼吸交換比 (RER) を算出した (図 2)。

実験 III は、MCMC 法を用いた安静時代謝 (Resting metabolic rate: RMR) と食事誘導性体熱産生 (Diet induced thermogenesis: DIT) の妥当性を検討した。7 名の対象者 (年齢 22±1 歳、身長 171±7cm、体重 66.0±13.6kg) は、実験前日の激しい身体運動を控え、規定された夕食を遅くとも 19:00 までに摂取させ、その後のカフェイン入り飲料、喫煙を控えさせ、水の摂取のみを許可された。また、実験当日も安静状態を保つために早朝 (7:00~7:30) にタクシーを使って来研させた。

RMR は、30 分間以上の座位安静ののち、10 分間の測定を行った。RMR の測定セッション

ヨンは、7:45~8:45に行われた。その後、朝食（600kcal: タンパク質 15%、脂質 25%、糖質 60%）を 9:00 または 9:15 に摂取した。DIT は、朝食摂取後の 30、90、150 分後に測定された。呼気ガスは、MCMC 法で分析後、同一ガスを DB 法にて採気した。代謝指標は、10 分間の記録されたデータの内、前半の 5 分間を除き、後半の 5 分間の平均値を用いた（Compher C et al, 2006）。また、総エネルギー消費量（Total Energy expenditure: TEE）は、Weir JB の式（Weir JB, 1949）を用いて算出した。尚、実験は室温 22.8±1.3°C、湿度 37±11%、123m<sup>3</sup>の実験室にて実施された。

実験IVは、運動時の呼吸代謝測定の妥当性を検証した。6名の対象者（年齢 23±3 歳、身長 174±5cm、体重 68.4±9.9kg）は、前日の激しい身体活動を控え、実験前の少なくとも 3 時間以上の絶食状態で来研した。運動は、自転車エルゴメーター（Corival, Lode, オランダ）を用いて 4 秒毎に 1W 漸増するランプ式漸増運動負荷法とし、ペダル回転数 60rpm を維持した。運動終了は、規定のペダル回転数を 1 分間維持できなくなる疲労困憊に至るまでとした。尚、実験は、5 台のミキシングチャンバーが同時分析させて、5 名の対象者の分析が行えるように設定した。呼気ガスは、MCMC 法により分析され、同一ガスを DB 法にて 1 分間採気し、換気量を湿式双胴ドラムガスメーター（CR-20, Fukuda Irika Inc., 東京都）、呼気ガス濃度を質量分析器（ARCO-2000 MET, アルコシステム, 柏市）にて分析した。運動中の心拍数は、CM5 誘導の心電図から記録した（ML-3600, フクダ電子, 東京都）。尚、MCMC 法は、12 秒毎に算出された値を 1 分間の平均値を代表値とした。

実験 I のデータは、平均値±標準偏差（SD）で表示した。実験 I のメモリ効果は、高濃度から低濃度への切り替え n 秒後として算出し（式）、一元配置の分散分析を行い、事後検定に Bonferoni 検定を用いた。

$$\frac{|\text{規定ガス (Gas1 or 2) - 測定ガス濃度 T(n)}|}{|\text{規定ガス 1 (Gas 1) - 規定ガス (Gas 2)}|} \times 100 \dots \text{(式)}$$

実験 II の MCMC 法と DB 法の換気量（VE）は、標準状態（STPD; 0°C、1 気圧、乾燥状態）とした。座位安静時と運動時の 10.0 秒間の平均ガス濃度から算出した代謝指標との比較は、1.0、2.5、5.0 秒を 1 サンプルの t 検定を行った。実験 III 及び IV の数値は、平均誤差率±1.96\*標準偏差（平均誤差±1.96\*標準偏差）で表記した。MCMC 法と DB 法との差異は、対応のある t 検定を用いた。DIT 算出のための TEE が RMR より低い場合、負の熱量として算出した。MCMC 法と DB 法の関連は、ピアソンの単相関分析を用い、両方法の個体差は Bland-Altman Plots（Bland JM & Altman DG, 1986）を用いた。尚、統計解析は、

統計処理ソフト統計処理ソフト (PASW statistics 18, SPSS Inc., シカゴ) を用い、危険率 5%未満 ( $p < 0.05$ ) をもって有意とした。

研究 2 は、同一仕事率における複数のペダル回転数毎に呼吸循環応答を確認するために、まず、 $VO_2\max$  と LT を測定した。 $VO_2\max$  と LT 仕事率は、電磁ブレーキ式自転車エルゴメーター (Excalibur, Lode, オランダ) を用い、ペダル回転数 50rpm にて 4 分間 10watts のウォーミングアップの後、ランプ式に負荷を漸増させる自転車運動を疲労困憊まで行った。呼気ガスは、1 分間毎に DB で採気し、ガス濃度を質量分析器 (ARCO-1000, アルコシステム, 柏市) にて分析し、換気量を湿式双胴レスピロメーター (CR-20, Fukuda Irika Inc., 東京都) にて分析した。最大酸素摂取量は、負荷上昇に対して  $VO_2$  がプラトーになる、呼吸交換比が 1.1 以上、運動後の血中乳酸濃度が 8.0mmol/L 以上、主観的運動強度が 17 以上 (ACSM, 2006)、年齢推定最大心拍数の $\pm 10$  拍に達している、これらのクライテリアのうち 2 項目以上を満たしたものとした。血中乳酸濃度は、安静時及び運動中に 30 秒もしくは 60 秒毎に耳朶から 20 $\mu$ L を採血の後、ただちに溶血剤で攪拌し、固定化酵素法 (BIOSEN 5040, EFK, ドイツ) にて分析した。LT は、仕事率と血中乳酸濃度の関係から熟練者 5 名の目視を行い、最大と最小を除いた 3 名の平均値とした。

ペダル回転数における呼吸循環応答は、50rpm で測定した LT 仕事率を 40、50、60、80、100rpm の 5 種類のペダル回転数にて、各 4 分間の固定運動負荷試験を実施した。呼気ガスは、各負荷 3~4 分を DB にて採気し、前述と同じ方法で分析した。血中乳酸濃度、心拍数並びに主観的運動強度は、3 分 30 秒から測定を開始した。ペダル回転数は、対象者に自転車エルゴメーターのディスプレイで確認するように指示を出し、電子メトロノームによって誘導して正確性を確保した。

統計処理は、ペダル回転数毎の $\%VO_2\max$ 、心拍数並びに主観的運動強度 (RPE) に対して一元配置の分散分析を行い、有意差を認めた場合に多重比較検定として Bonferroni 検定を行った。尚、全ての統計解析は、統計処理ソフト (PASW statistics 18, SPSS Inc., シカゴ) を用い、いずれの有意水準も危険率 5%未満とした。

研究 3 は、一過性運動の筋酸素動態及び呼吸循環応答を確認することにより、トレーニング刺激の特徴を検討した。その後、短期間のトレーニング効果を検討するため対象者を体力水準 (LT watts と  $VO_2\max$ ) に偏りが生じないようにマッチングさせ、2 群 (LFTr: Low frequency training; HFTr: High Frequency training) に分けた (表 1)。 $VO_2\max$  と LT 仕事率を求めるための運動負荷試験は、電磁ブレーキ式自転車エルゴメーター

(Excalibur, Lode, オランダ) を用い、ペダル回転数 50rpm にて 4 分間 10watts のウォーミングアップの後、ランプ式に負荷を漸増させる自転車運動を疲労困憊まで行った。次に、ペダル回転数を変えた運動負荷試験は、35、50、75rpm それぞれ 6 分間の固定運動負荷とし、各条件間に 6 分間の休息を設けた。呼吸循環系と筋酸素動態の評価は、各条件の 5~6 分を採用した。各条件の最後の 30 秒間で心拍数、主観的運動強度 (RPE)、血圧を測定した。運動トレーニング群は、LT 強度と  $VO_2\max$  を基準に偏りがないように 35rpm の LFTr 群と 75rpm の HFTr 群にランダム割り付けた。運動トレーニングは、1 回 60 分、1 週間 5 回の頻度で 2 週間行った。尚、5 回目に 50rpm のペダル回転速度において最大下ランプ負荷試験を行った。また、自転車エルゴメーターの仕事率は、誤差を除くため 3 種類の回転数に対して校正器 (Calibrator 2000, Lode, オランダ) を用い、50rpm の仕事率を基準として補正した。

$VO_2\max$  は、1 分間毎に DB で採気し、ガス濃度を質量分析器 (ARCO-1000, アルコシステム, 柏市) にて分析し、換気量を湿式双胴レスピロメーター (CR-20, Fukuda Irika Inc., 東京都) にて分析した。最大酸素摂取量の判定基準は、負荷上昇に対して  $VO_2$  がプラトーになる、呼吸交換比が 1.1 以上、運動後の血中乳酸濃度が 8.0mmol/L 以上、主観的運動強度が 17 以上 (ACSM, 2011)、年齢推定最大心拍数の $\pm 10$  拍に達している、これらのクライテリアのうち 2 項目以上を満たしたものとした。

LT は、血中乳酸濃度を安静時及び運動中に 30 秒もしくは 60 秒毎に耳朶から 20 $\mu$ L を採血の後、ただちに溶血座位で攪拌し、固定化酵素法 (BIOSEN 5040, EFK, ドイツ) にて分析した。血中乳酸閾値は、仕事率と血中乳酸濃度の関係から第二変曲点以上を除くデータからすべての組み合わせの 2 本の回帰直線を作成し、残差平方和が最小になる組合せの交点から求めた。

骨格筋酸素動態とペダル踏力の評価について、筋酸素化動態は、近赤外線分光法装置 (HEO-100, オムロン, 京都市) を用いて、右大腿部外側広筋の近位 2/3 に相当する箇所を測定した。この装置は、760nm と 840nm の近赤外光を用いて、発光部と受光部間が 3cm であることから皮膚から約 1.5cm (Patterson MS et al, 1989) の骨格筋の酸素化 (OxyHb/Mb) と脱酸素化 (DeoxyHb/Mb) を評価した。筋酸素化レベルは、安静時の OxyHb/Mb を 100%とし、大腿部用マンシエットを用いて 300mmHg で約 10 分間の血流遮断を行って安定した 30 秒間の平均値を 0%として標準化した。測定データは、2Hz でパソコンに記録された。

ペダル踏力は、右ペダルにフォースプレート (LPR-A-2KNS1, 共和電業, 東京都) からアンプ (DPM-911A, 共和電業, 東京都)、AD 変換器 (Power Lab, AD Instruments) を介してパソコンに記録した。ペダルクランク角度は、60°毎にコイルを設置して直列接続し、クランクに装着した磁石が通過することで誘導起電力を AD 変換器に同時に記録した。また、近赤外線分光法装置のサンプリングは、Takaishi T et al (2002) の方法を用いてサンプリング頻度を音で同期させた電子メトロノームから AD 変換器に記録した (図 10)。

統計処理について、ペダル回転数毎の呼吸循環系応答と末梢負荷は、一元配置の分散分析を行い、有意な差を認めた時に多重比較検定として Bonferroni 検定を行った。また、トレーニング適応は、トレーニング群×期間の二元配置の分散分析を行い、有意な差を認めたとき多重比較検定として Bonferroni 検定を行った。尚、全ての統計解析は、統計処理ソフト (PASW statistics 18, SPSS Inc., シカゴ) を用い、いずれの有意水準も危険率 5%未満とした。

研究 4 は、低ペダル回転数トレーニング群、高ペダル回転数トレーニング群および非運動群の計 3 群において、8~10 週間の長期期間のトレーニング介入を実施した。トレーニング期間中の有酸素能力の推移、介入前後の同一運動強度および相対的同一運動強度における呼吸循環系応答の変化を検討した。対象者は、体力水準 (LT watts と VO<sub>2</sub>max) に偏りが生じないようにマッチングさせ、3 群 (LFTr: Low frequency training; HFTr: High Frequency training; Con: Control) に分けた。介入前後 VO<sub>2</sub>max、LT 強度は、電磁ブレーキ式自転車エルゴメーター (Excalibur, Lode, Netherlands) を用い、ペダル回転数 50rpm にて 4 分間 10watts のウォーミングアップの後、ランプ式に負荷を漸増させる自転車運動を疲労困憊まで行って測定した。運動群のトレーニングは、指定されたペダル回転数にて LT 強度相当の同一仕事率において、1 回 60 分、1 週間 5 回、6 週間以上かつ負荷修正時の LT 仕事率が頭打ちに達するまでの期間 (8~10 週間) 行った。また、最大下運動中の呼吸循環系応答は、35、50、75rpm のペダル回転数による固定運動負荷試験を介入前と介入後に実施し、介入後は介入前の絶対的同一強度と介入後の相対的同一強度を行った。尚、測定手順および各指標の算出方法は、研究 3 と同様である。

統計解析について、有酸素性作業能の介入前後適応と推移及びトレーニング介入前後の最大下運動中の呼吸循環系応答は、トレーニング群×期間の二元配置の分散分析を行い、有意な差を認めたとき多重比較検定として Bonferroni 検定を行った。尚、全ての統計解析は、統計処理ソフト (PASW statistics 18, SPSS Inc., シカゴ) を用い、いずれの有意水準

も危険率 5%未満とした。

## 結果

実験Ⅰについて、メモリ効果は、チャンネル切り替え 2 秒後まで有意な差を認めた。一方、切り替え 3 秒から 5 秒後までは、 $O_2$  に差がなく、 $CO_2$  も 4 及び 5 秒に統計的な差を認めなかった (図 3)。

実験Ⅱの座位安静及び漸増運動における非連続ガス濃度は、1.0、2.5、5.0 秒間の平均濃度から算出した  $VO_2$ 、 $VCO_2$ 、 $RER$  が 10 秒間の平均濃度から算出した時に比べて統計的に差がないことを明らかにした。

実験Ⅲの安静時代謝における MCMC 法と DB 法の Bland - Altman プロットにおける 95%信頼区間 (平均誤差率 $\pm 1.96 * SD$  (平均値 $\pm 1.96 * SD$ )) は、 $VESTPD$  が  $7.7 \pm 4.7\%$  ( $0.58 \pm 0.39$  l/min)、呼気二酸化炭素濃度 ( $FECO_2$ ) が  $3.2 \pm 2.0\%$  ( $0.09 \pm 0.06\%$ )、 $VO_2$  が  $9.3 \pm 3.9\%$  ( $23 \pm 10$  ml/min)、 $VCO_2$  が  $10.6 \pm 4.1\%$  ( $23 \pm 9$  ml/min)、 $RER$  が  $1.2 \pm 1.4\%$  ( $0.010 \pm 0.012$ ) であった。これらの指標は、DB 法より MCMC 法の方が有意に高値を示した ( $p < 0.001$ )。呼気酸素濃度 ( $FEO_2$ ) の 95%信頼区間は、 $0.4 \pm 0.3\%$  ( $0.07 \pm 0.06\%$ ) を示し、MCMC 法より DB 法の方が有意に低値を示した ( $p < 0.001$ )。全ての被験者と測定の間関係は、MCMC 法と DB 法との間に強い相関関係 ( $R^2 = 0.9519$ ,  $p < 0.001$ ) を示した (図 4-A)。 $TEE$  の 95%信頼区間は、 $9.5 \pm 3.9\%$  ( $0.11 \pm 0.05$  kcal/min) を示し、DB 法より MCMC 法が有意に高値を示した ( $p < 0.001$ ) (図 4-B)。 $DIT$  は、ベースラインの  $RMR$  よりも 30 分後が  $0.15$  kcal/min、90 分後が  $0.19$  kcal/min と有意に高値を認めた (図 4-C)。MCMC 法と DB 法のそれぞれから算出された  $DIT$  は、両方法間に統計的な差を認めなかった。

実験Ⅳについて、 $VESTPD$ 、 $FEO_2$ 、 $FECO_2$ 、 $VO_2$ 、 $VCO_2$  及び  $RER$  の全てにおいて MCMC 法と DB 法との間に相関関係を認めた ( $R^2 = 0.984 \sim 0.995$ ,  $P < 0.001$ ) (図 5,6)。95%信頼区間は、 $VESTPD$  が  $2.5 \pm 4.1\%$  ( $1.48 \pm 2.30$  L/min)、 $FEO_2$  が  $0.2 \pm 0.6\%$  ( $0.03 \pm 0.09\%$ )、 $FECO_2$  が  $1.3 \pm 2.3\%$  ( $0.05 \pm 0.09\%$ )、 $VCO_2$  が  $2.5 \pm 4.6\%$  ( $45 \pm 100$  ml/min)、 $RER$  が  $1.7 \pm 1.2\%$  ( $0.018 \pm 0.012$ ) を示し、これらは MCMC 法が DB より有意に高値を示した ( $p < 0.05$ )。 $VO_2$  は、 $0.9 \pm 4.8\%$  ( $9 \pm 93$  ml/min) を示し、統計的有意な差を認めなかった。

ランプ式漸増運動負荷試験における疲労困憊時の呼吸循環応答は、 $VO_2$  が  $3262 \pm 493$  ml/min ( $47.9 \pm 5.5$  ml/kg/min)、 $VCO_2$  が  $3822 \pm 711$  ml/min、 $VESTPD$  が  $90.38 \pm 18.76$  L/min、 $RER$  が  $1.17 \pm 0.07$ 、心拍数が  $189 \pm 9$  b/min であった。尚、呼吸代謝

指標は、すべて DB 法による分析である。

研究 2 は、 $\%VO_2\max$  は、50rpm の自転車運動（平均  $45\%VO_2\max$ ）に対して、80（ $49\%VO_2\max$ ）と 100rpm（ $56\%VO_2\max$ ）が有意に高値を示した（ $p < 0.05$ ）（図 7-A）。心拍数は、50rpm の自転車運動に対して、100rpm が有意に高値を示した（ $p < 0.01$ ）。主観的運動強度は、80rpm よりも 100rpm が高値を示した（ $p < 0.05$ ）（図 7-B）。血中乳酸濃度は、統計的な差を認めなかった。

研究 3 の一過性運動の生理応答について、35 と 50rpm の運動は、75rpm に比べて  $VO_2$ 、VE、心拍数、血中乳酸濃度が有意に低値を示した（ $p < 0.01$ ）。RER、収縮期血圧、拡張期血圧、RPE は、各ペダル回転数間で差を認めなかった。ペダル 1 回転あたりの踏力の力積は、ペダル回転数が小さくなるに従って有意に高値を示した。末梢の OxyHb/Mb は、ペダル回転数が小さくなるに従って有意に低値を示した。

2 週間のトレーニング効果として、トレーニング介入前の対象者の身体特性は、HFTr 群の身長のみが LFTr 群より有意に高値を示したが、他の項目に有意な差を認めなかった（表 3）。HFTr 群の一人の対象者は、急性的な体調不良のため、途中でトレーニングを辞退した。

トレーニング介入 2 週間後の LFTr 群において、50rpm のペダル回転数によるランプ負荷試験中の血中乳酸濃度は、トレーニング介入前の 145 と 175%LT 強度に比べて有意に低値を示した（図 8）。160、205、235%LT 強度において、同じ傾向が認められた。一方、HFTr 群は、全ての強度において、介入前後の乳酸濃度に差を認めなかった。体重あたりの LT 時仕事率は、トレーニング群と期間に有意な交互作用を認め（ $p = 0.048$ ）、LFTr 群が介入前より介入後が有意に増加した。しかし、HFTr 群は差を認めなかった（図 9）。体重と BMI は、両群ともに介入前後に差がなかった。

研究 4 について、トレーニング介入前後の  $VO_2\max$  は、二元配置の分散分析に有意な交互作用を認めず、両運動群ともに有意に増加した（図 10-A）。体重あたりの LT 強度は、二元配置の分散分析に有意な交互作用を認めず、両トレーニング群ともに有意に増加した（図 10-B）。両トレーニング群における体重あたり LT 強度の推移は、8 週目に比べて介入前、1 週目、2 週目が有意に低値を示した。3 週目以降に有意な差を認めなかった（図 15）。

トレーニング前後の最大下運動中における呼吸循環応答の変化について、介入前と絶対的同一強度は、 $VO_2$  の差を認めなかった（表 2）。 $\%VO_2\max$  および酸素脈（ $VO_2/HR$ ）は、両トレーニング群共に有意に減少し、心拍数は両トレーニング群共に増加した。また、換

気当量 ( $VE_{BTSP}/VO_2$ ) は、トレーニング条件×期間に有意な交互作用を認め、LFT<sub>r</sub> 群において介入前より介入後に有意に減少した。

トレーニング後の増加した LT 強度における相対的同一強度は、両トレーニング群における  $VO_2$ 、 $\%VO_{2max}$ 、心拍数がトレーニング前より有意に増加した (表 2)。 $VE_{BTSP}/VO_2$  は、交互作用に傾向を認め、LFT<sub>r</sub> 群において介入前より介入後が有意に減少した。 $VO_2/HR$  は、有意な交互作用を認め、LFT<sub>r</sub> において介入前より介入後が有意に増加した。

#### まとめ

研究 1 では、新しく開発した多人数同時に測定可能な MCMC 法は、ゴールドスタンダードである DB 法との誤差が生理学的な変動と比べても許容範囲内であり、最大下及び最大運動中のエネルギー消費に関する測定が先行研究で報告されている一人ずつ測定する呼気ガス分析器と同程度の妥当性であることを確認した。研究 2 では、50rpm で測定した乳酸閾値強度相当の同一仕事率において、40rpm 程度から 80rpm 未満の運動は、ペダル回転数の違いによる呼吸循環応答への影響が小さいことを示唆した。研究 3 では、ペダル回転数とそれに伴うペダル踏力と末梢の酸素動態が最大下強度の有酸素性作業能の適応に影響することを明らかにした。研究 4 では、トレーニング時のペダル回転数に伴う発揮筋力の違いに関わらず全身性の有酸素性作業能は、向上するものの、その全身性持久力を構成する詳細な機構に差異が生じる可能性が示唆された。

以上の結果から本研究は、有酸素性自転車運動のペダル回転数による筋力発揮と収縮速度の組合せに関する運動条件が最大下の有酸素性作業能の適応に影響することを明らかにした。

図表

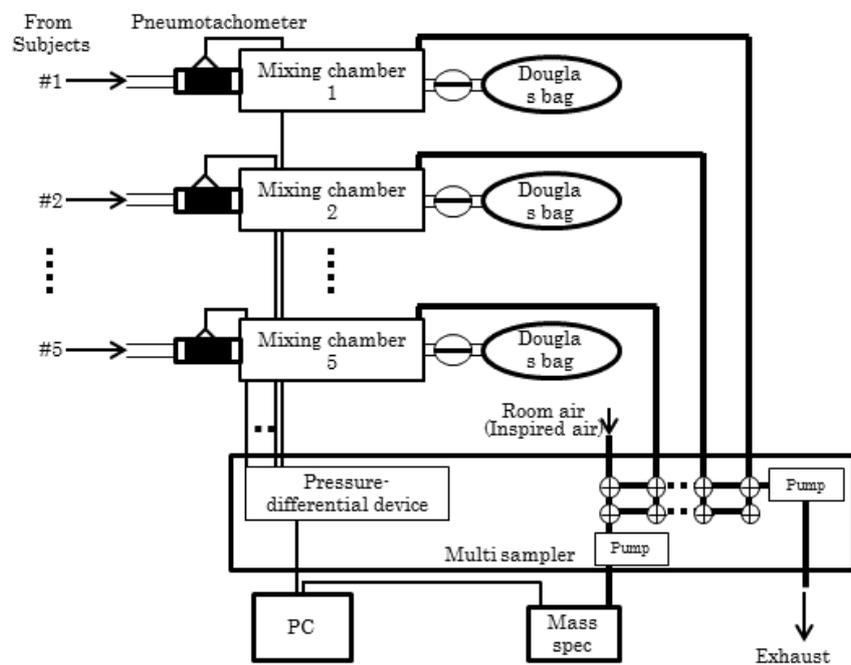


図1. マルチミキシングチャンバー法.

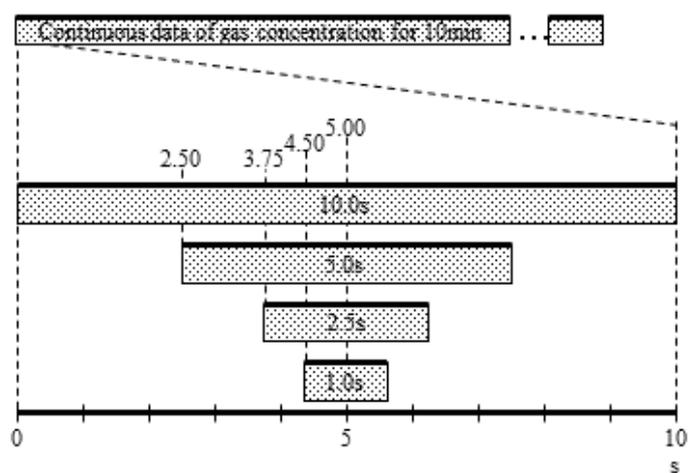


図2. 連続ガス濃度を用いた非連続ガスの平均化の時間帯.

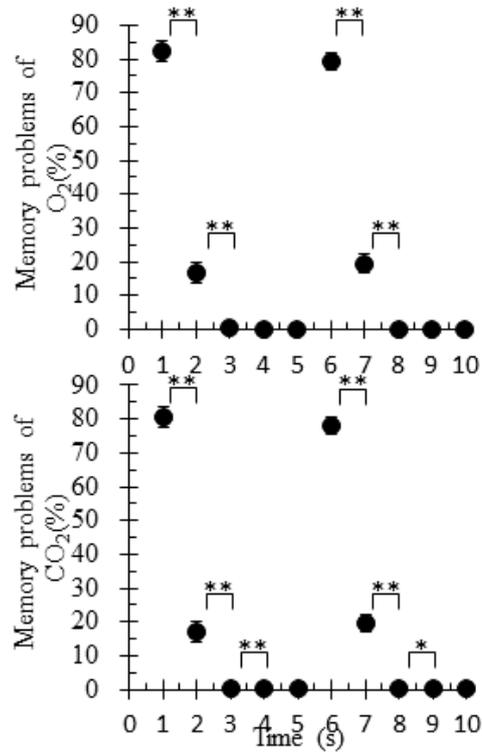


図 3. 異なる濃度組成のガス分析におけるメモリ効果のウォッシュアウト.

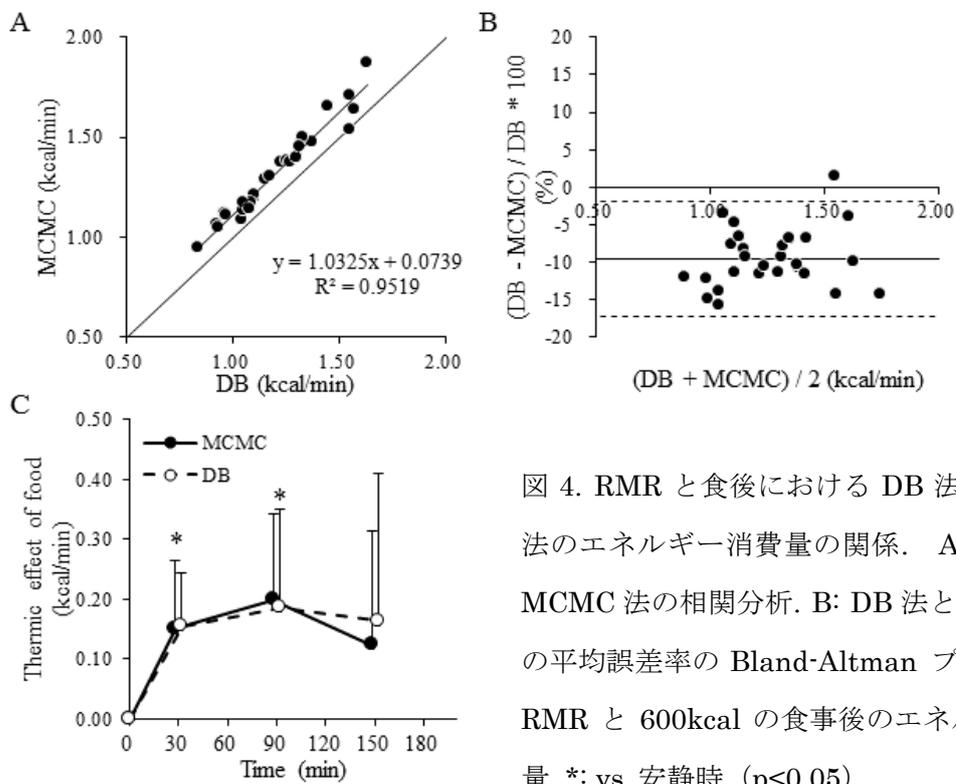


図 4. RMR と食後における DB 法と MCMC 法のエネルギー消費量の関係. A: DB 法と MCMC 法の相関分析. B: DB 法と MCMC 法の平均誤差率の Bland-Altman プロット. C: RMR と 600kcal の食事後のエネルギー消費量. \*: vs 安静時 (p<0.05) .

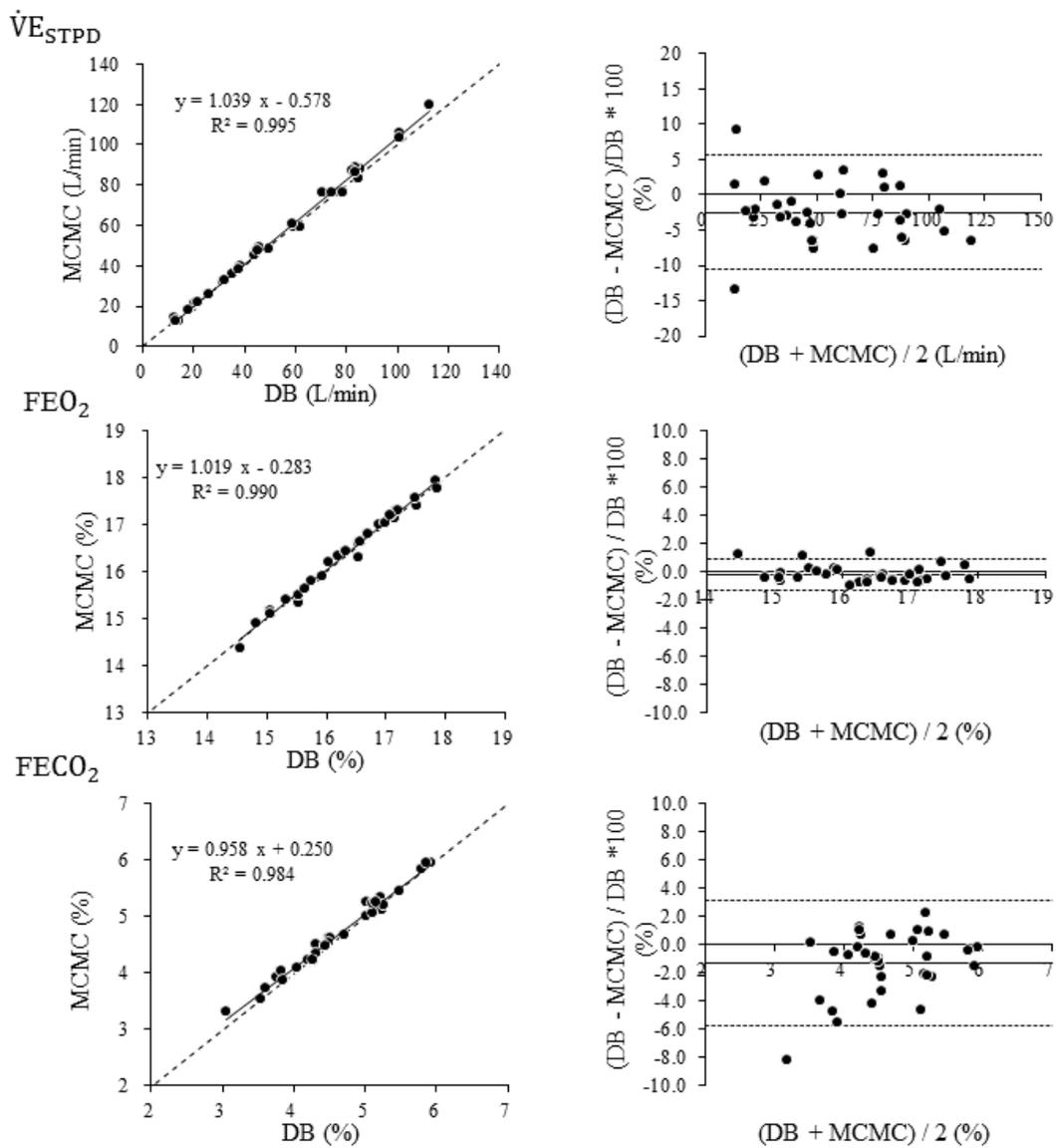


図 5. 最大漸増運動中のマルチミキシングチャンバー法とダグラスバッグ法との相関分析と個体差. 左の図は  $\dot{V}E_{STPD}$ 、 $FEO_2$  及び  $FECO_2$  におけるマルチミキシングチャンバー法とダグラスバッグ法の相関分析を示す. 破線は  $y=x$  を示す. 右の図は, Bland-Altman のプロットを用いた平均誤差率を示す. 実線は平均誤差率、破線は 95% 誤差範囲を示す.

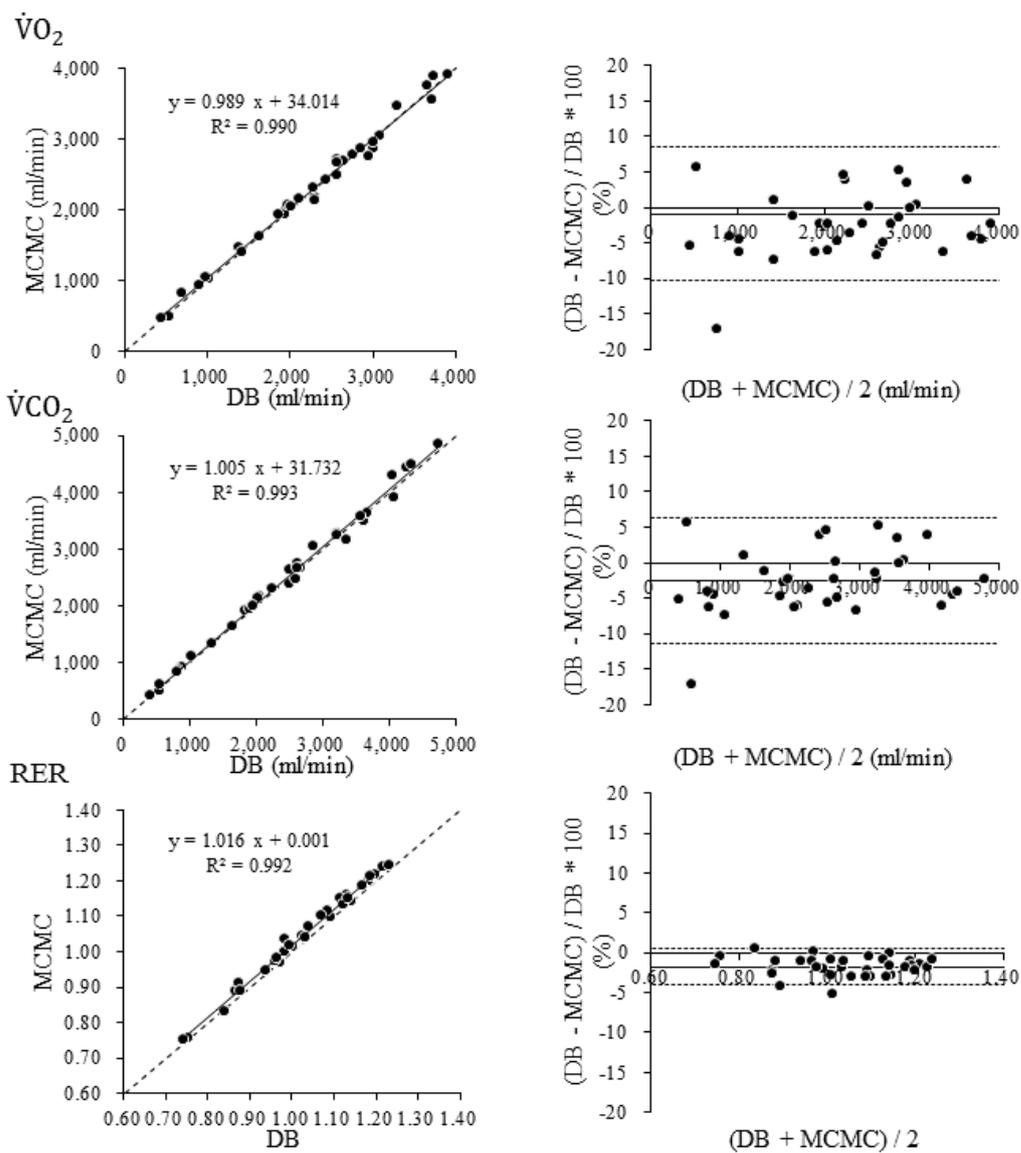


図 6. 最大漸増運動中のマルチミキシングチャンバー法とダグラスバッグ法との相関分析と個体差. 左の図は  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$  及び RER におけるマルチミキシングチャンバー法とダグラスバッグ法の相関分析を示す. 破線は  $y=x$  を示す. 右の図は, Bland-Altman のプロットを用いた平均誤差率を示す. 実線は平均誤差率, 破線は 95%誤差範囲を示す.

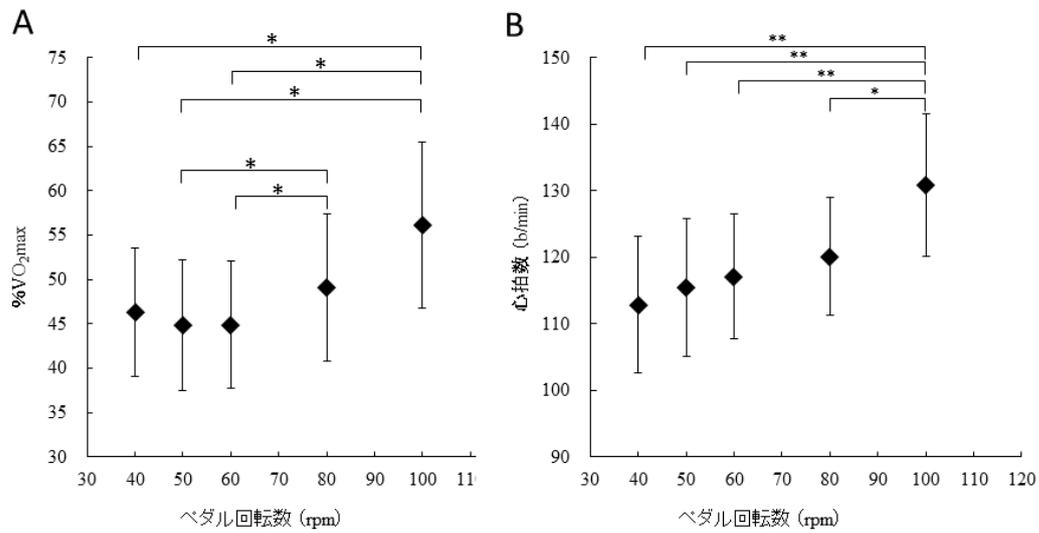


図 7. 同一 LT 仕事率におけるペダル回転数と呼吸循環応答.

\*:p<0.05. \*\*:p<0.01

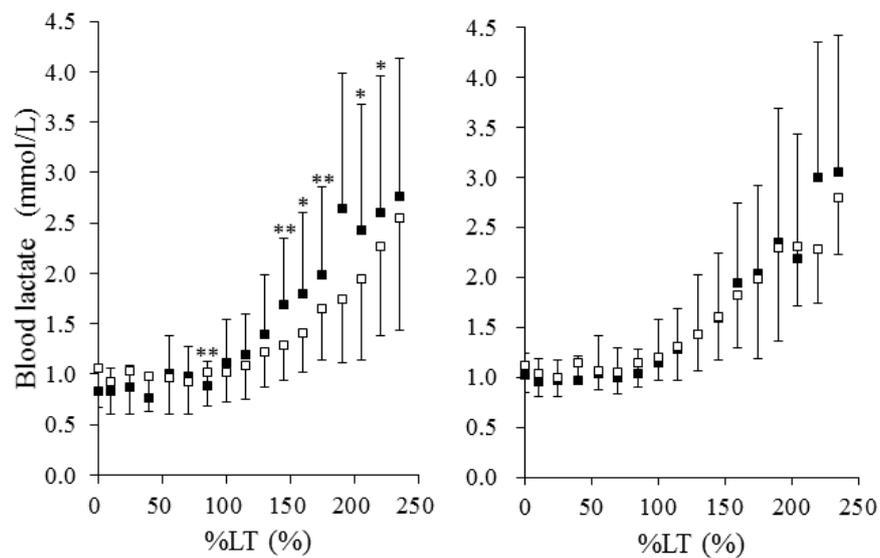


図 8. トレーニング介入前後における漸増運動中の血中乳酸濃度.

血中乳酸濃度は、ランプ式漸増運動負荷テストにおいてペダル回転数を 50rpm に規定して測定した. 左の図は LFTr 群、右の図は HFTr 群を示す. ■がトレーニング介入前、□がトレーニング介入後を示す.

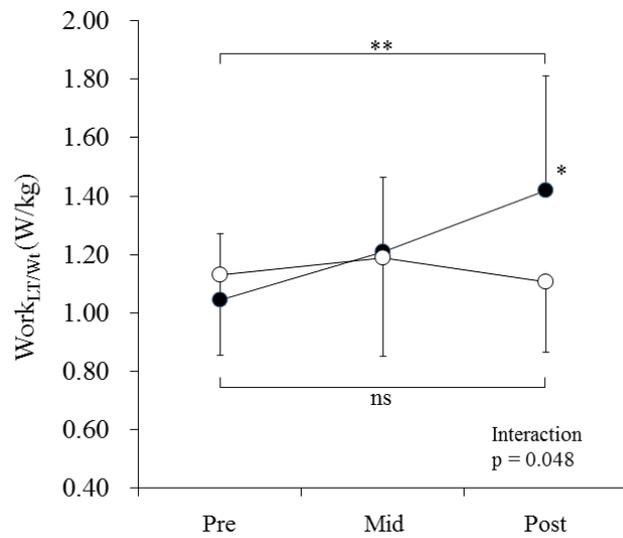


図 9.2 種類のペダル回転数による短期間トレーニングにおける LT 仕事率の適応. ●が LFTTr 群、○が HFTTr 群を示す.

\*:  $p < 0.1$  \*\*: $p < 0.05$

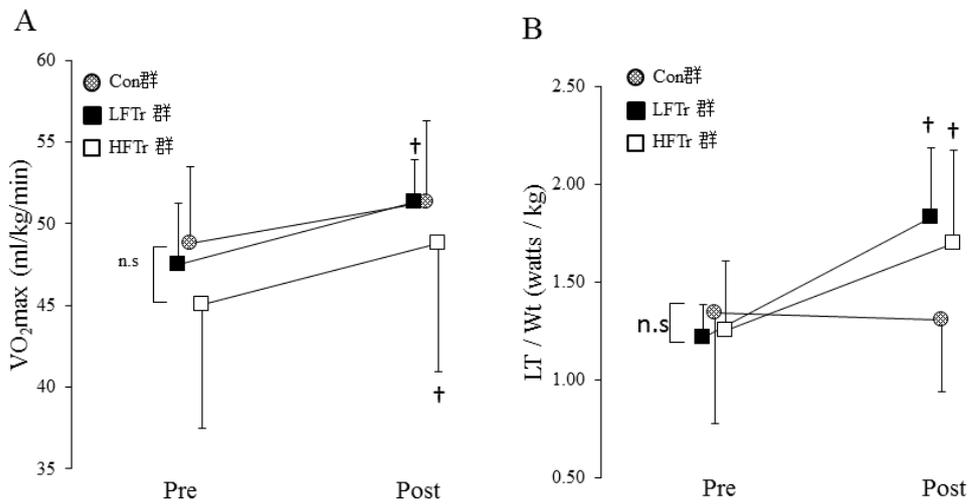


図 10. 各群におけるトレーニング介入前後の VO<sub>2</sub>max と LT 強度の適応.

†:  $p < 0.05$

表 1. トレーニング介入前の身体と有酸素性作業能の特性.

	LFTTr	HFTTr	<i>p</i>
<i>n</i>	8	7	
Age (years)	23.9 ± 2.0	23.0 ± 1.4	0.25
Work <sub>LT</sub> (W)	65 ± 13	63 ± 16	0.77
Work <sub>LT</sub> /Wt (W/kg)	1.0 ± 0.2	1.0 ± 0.3	0.56
Work <sub>max</sub> (W)	269 ± 44	247 ± 24	0.13
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/min)	3,026 ± 418	2,815 ± 334	0.20
$\dot{V}O_{2max}$ /Wt (ml/kg/min)	45.9 ± 5.9	45.1 ± 7.7	0.64
Height (cm)	174.5 ± 5.7	167.3 ± 4.5	0.02 <sup>a</sup>
Weight (kg)	66.1 ± 4.2	63.3 ± 7.7	0.82
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	21.7 ± 0.8	22.6 ± 2.5	0.42

表 2. トレーニング時のペダル回転数における最大下運動中の呼吸代謝応答の変化.

		Pre W <sub>LT</sub>	Post(Pre W <sub>LT</sub> )	Post(Post W <sub>LT</sub> )
LT(watts)	LFTTr	83 ± 12	83 ± 12	125 ± 30
	HFTTr	76 ± 14	76 ± 14	103 ± 22
VO <sub>2</sub> (ml/min)	LFTTr	1220 ± 248	1160 ± 162	1724 ± 387 #
	HFTTr	1149 ± 149	1137 ± 144	1438 ± 229 #
%VO <sub>2</sub> (%)	LFTTr	38.7 ± 7.6	33.1 ± 2.1 *	49.0 ± 7.7 #
	HFTTr	42.1 ± 7.1	38.3 ± 6.4 *	48.6 ± 7.5 #
HR(beat/min)	LFTTr	95.5 ± 4.9	101.0 ± 6.7*	117.2 ± 14.0 #
	HFTTr	105.3 ± 12.7	110.2 ± 9.6*	127.5 ± 20.0 #
VE/VO <sub>2</sub>	LFTTr	25.0 ± 7.3	24.1 ± 4.3 *†	21.7 ± 7.0 #†
	HFTTr	26.8 ± 4.6	26.0 ± 4.0	27.5 ± 2.8
VO <sub>2</sub> /HR	LFTTr	12.8 ± 2.8	11.5 ± 1.5 *	14.6 ± 2.2 #†
	HFTTr	11.0 ± 1.5	10.4 ± 1.7 *	11.3 ± 1.8

\*:  $p < 0.05$ , Pre W<sub>LT</sub> vs Post (Pre W<sub>LT</sub>)

#:  $p < 0.05$ , Pre W<sub>LT</sub> vs Post (Post W<sub>LT</sub>)

†:  $p < 0.1$ , 期間×トレーニング条件

## 審査結果の要旨

### 1. 研究の概要

本研究は、運動づくりを目的とした対象者のニーズに合わせた効果的な慢性適応を引き起こす詳細な運動条件を確立するために、有酸素性運動におけるトレーニング刺激としての特異的な発揮筋力が呼吸循環系に及ぼす影響を検討した研究である。

有酸素性作業能を評価するにあたり、ミキシングチャンバー法を応用した新しい呼吸代謝の測定法（マルチチャンネルミキシングチャンバー法: MCMC 法）をゴールドスタンダードのダグラスバッグ法（DB 法）と比較することによって妥当性を明らかにした。

同一仕事率における異なるペダル回転数の自転車運動は、酸素摂取量を指標とした全身性負荷において、低ペダル回転数の運動より高ペダル回転数の運動の方が若干高いにも関わらず、ペダル踏力や酸素動態を指標とした末梢負荷が低ペダル回転数の運動において高いことを示した。また、トレーニング介入によって、異なるペダル回転数に伴う発揮筋力と収縮速度の組合せに関する運動条件が最大下の有酸素性作業能の適応に影響を及ぼすことを明らかにした。

### 2. テーマの斬新性

本研究は、有酸素性運動における運動処方に関する条件に、発揮筋力や酸素動態による末梢負荷をトレーニング刺激として検討した点が独創的である。有酸素性作業能の評価に用いられる新開発された MCMC 法は、ウォッシュアウト時間と非連続ガス濃度の呼吸代謝指標の演算が検討され、今後、さらに同時測定できるチャンネル数を増せる可能性が示されており、測定に手間と時間のかかっていた呼吸代謝測定がより効率的に行えるという点で意義が高い。

### 3. 研究結果の有用性

従来の有酸素性運動における運動処方は、運動強度の指標に全身性の負荷を用いて行われてきた。しかし、全身性の負荷が同一であるにも関わらず、末梢の負荷が異なることでトレーニング適応に影響するという点が、健康づくりの目的に限らず、全般の運動処方に寄与できるものである。また、有酸素性作業能の評価に用いた呼気ガス分析は、新開発された MCMC 法と DB 法との妥当性を検証した上で、トレーニング効果測定に用いられている。

#### 4. 外部評価

本研究の成果は、下記の国際誌の審査を経て掲載されており、外部からの評価に耐えられる内容であると判断できる。

1. Simultaneous multiple-subject analysis of respiratory gas exchange in humans. J Phys Fitness Sports Med 3(2): 269-279, 2014.
2. Effects of 2 weeks of low-intensity cycle training with different pedaling rates on the work rate at lactate threshold. Eur J Appl Physiol 115(5): 1005-13, 2015.

#### 5. 主な質疑応答

本学位申請論文の審査に際し、以下の討議が行われた。

Q 乳酸閾値強度の相対的な最大酸素摂取量 (%VO<sub>2</sub>max) のトレーニング適応について。

A 乳酸閾値強度の%VO<sub>2</sub>max は、鍛練程度などによって個人差が大きい。本研究では、健康な若年成人男性であったため、初期の%VO<sub>2</sub>max が低い水準にあり、長期間のトレーニングで高まった。2 週間の介入では、介入後に%VO<sub>2</sub>max の測定を行っていないが、低ペダル回転群の乳酸閾値が増加していることから%VO<sub>2</sub>max も高まったと推察できる。

Q 本研究の成果や今後の発展による社会への貢献について。

A 本研究は、異なる発揮筋力と収縮速度の組合せの運動条件について、呼吸代謝指標を中心に検討を行った。今後、他の運動強度や体力水準の対象者における検討、生化学的分析手法での検討が必要である。これらの成果は、詳細な運動適応を引き起こすための運動処方を発展させ、有酸素性作業能と関連がある疾患等の予防や改善できる可能性がある。

Q トレーニングによる骨格筋量の増加が介入後に乳酸値を低下させた可能性について。

A 筋量の増加によって、筋線維 1 本当たりの負担の軽減や筋線維動員率の減少が乳酸濃度の低下につながった可能性は推察できる。しかし、本研究では、MRI 等を用いて骨格筋量を定量していない。

Q 高ペダル回転群は、2 週間のトレーニングで有酸素性作業能が変わらなかったにも関わらず、長期間のトレーニングで増加した理由について。

A 2 週間の高ペダル回転運動では、乳酸閾値強度に有意な増加が認められなかったが、長期トレーニングでは、1 週間毎に行われる負荷修正で、絶対的強度が増加した。そのため、長期トレーニングでは、高ペダル回転群の有酸素性作業能の増加も認められたと考えられる。

## **6. 審査委員会の結論**

本学位申請論文は、口頭試問のいずれの質問にも適切で明確な回答を得た。よって、審査委員合議の結果、試験は合格とした。