

福岡大学大学院 スポーツ健康科学研究科

博士学位論文

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

平成 27 年 9 月

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

目次

第 1 章	研究の要旨	2
第 2 章	序論	3
第 3 章	複数人数の同時呼気ガス分析による呼吸代謝測定の妥当性 (研究 1)	9
第 4 章	LT 強度相当の自転車運動におけるペダル回転数と呼吸循環応答の関係について (研究 2)	20
第 5 章	同一仕事率における異なる発揮筋力が有酸素性運動の筋酸素化動態、呼吸循環応答及びトレーニング適応について (研究 3)	24
第 6 章	同一仕事率における異なる発揮筋力が長期間の運動トレーニングの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 (研究 4)	32
第 7 章	研究の意義と限界	37
第 8 章	総括	38
第 9 章	公表論文目録	39
第 10 章	謝辞	40
第 11 章	引用文献	41

第1章 研究の要旨

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、複数のミキシングチャンバーを用いた多人数同時測定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、乳酸閾値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、乳酸閾値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。

研究1では、新しく開発した多人数を同時に測定可能なマルチミキシングチャンバー法において、ゴールドスタンダードであるダグラスバッグ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。

第2章 序論

健康運動プログラムの必要性和動向

我が国が抱えるいくつかの健康問題は、身体活動量が少ないことや有酸素性作業能力が低いことが原因にあげられる。日本の医療費は、平成 23 年度に 38 兆 5850 億円、年齢階級別にみると 20 歳以降で年齢を重ねるごとに増加を示している（厚生労働省, 2013）。主な傷病は、65 歳未満で新生物と循環器系がそれぞれ約 12%、呼吸器系と精神及び行動障害がそれぞれ約 10%、65 歳以上で循環器系が約 27%、悪性新生物が約 13%であった。これらの内、悪性新生物の罹患率（Sawada SS et al, 2014）、高血圧（Kiyonaga A et al, 1985; Motoyama et al, 1998）、動脈硬化（Sunami M et al, 1998）などと有酸素性作業能力やその改善と関連が認められている。すなわち、運動による有酸素性作業能力の維持増進は、いくつかの健康問題の解決策になる可能性がある。

健康運動に関するガイドラインは、1975 年アメリカスポーツ医学会より運動処方指針が出版されて以降、スポーツ科学や臨床的な知見を更新しながら第 8 版が発行されてきた。運動処方の主な内容として、成人の健康を改善させるために必要な最小の運動強度は、少なくとも中等度の運動であることが推奨されている。また、大筋群をリズムカルに使う有酸素運動を心血管系フィットネス向上の目的で推奨されている。この指針は、健康・運動指導の専門家や臨床の専門家に直接情報提供することを目的に作成された。一方、我が国の運動に関するガイドラインは、1989 年に厚生省（現厚生労働省）から発表された「運動所要量」にて、初めて運動強度と継続時間、頻度が推奨され、健康のための維持目標となる最大酸素摂取量が示された（進藤, 1990）。その後、2006 年と 2013 年に改訂が行われ、新知見に基づき、ライフステージに応じた健康づくりの推進、生活習慣病の重症化予防にも重点が置かれ、運動のみならず、生活活動を含めた身体活動に着目された基準となり「健康づくりのための身体活動基準」とされた（厚生労働省, 2013）。この基準は、保健指導で運動指導を安全に推進できるように具体的な判断・対応の手順を示し、糖尿病・循環器疾患、ガン、ロコモティブシンドローム、認知症のリスク軽減を目的とした身体活動量の増加を推奨している。加えて、有酸素性作業能力の目標値は、男女の年齢層毎に全身持久力の基準が設けられている。欧米と日本のガイドラインには、対象者や効果の目的に違いがあるものの、対象者に合わせた運動プログラム作成に必要な知見が盛り込まれてきている。

有酸素性運動の運動処方と効果

有酸素性運動のプログラムは、運動様式、運動強度、運動頻度、運動継続時間から運動プログラムが作成される。健康・体力の改善と維持の目的で、多くの成人に対し、中等度の有酸素性運動を少なくとも週 5 日、または高強度の有酸素性運動を少なくとも週 3 日、あるいは中等と高強度の運動を組み合わせた週 3~5 日の運動が推奨されている。運動強度は、中等度が酸素摂取量予備量 (VO_2R) の 40~60%、高強度が $VO_2R60\%$ に相当し、可能であれば直接測定することが推奨される (ACSM 第 8 版)。心拍予備量 (HRR) と VO_2R は、他の運動強度定量法 (Swain DP & Leutholtz BC, 1997) に比較して身体活動時のエネルギー消費量をより正確に反映する。すなわち、運動処方には、全身性の身体負荷の程度が把握できる生理・生化学的指標を基にすることが重要である。

全身負荷を示す生理・生化学的指標は、最大努力時の呼吸循環応答が基準にされたり、最大下の呼吸循環応答や血中物質変化の閾値や変曲点を基準として決定される。最大努力を伴う決定法は、最大酸素摂取量 (VO_2max) や最大心拍数の相対値として処方される。 VO_2max は古くから有酸素性作業能の評価指標として用いられている。しかし、漸増運動負荷法によって疲労困憊まで至らすため、高齢者や有疾患にはリスクがある。そのため、定量化された機械的負荷量に対する呼吸循環応答から VO_2max を推定し (Åstrand PO & Ryhming I, 1954)、有酸素能の評価や運動処方 (Sunami Y et al. 1999) に並行して用いられている。一方、最大下の運動で評価する方法として、無酸素性作業閾値 (Wasserman K et al, 1973)、乳酸閾値 (Ivy JL et al, 1980)、二重積屈曲点 (Tanaka H et al, 1997)、心音屈曲点 (Matsuda T et al, 2010; Tanaka H et al, 2013) などを用いた精密な測定法によって決定される。この結果に従って具体的な運動強度は、ランニングやウォーキングの速度、自転車エルゴメーターであれば仕事率としてわかりやすく数値化される。

中等強度の有酸素性運動は、健康指標と有酸素性作業能力を向上させる。高血圧症の患者に対して自転車エルゴメーターを用いた 10~20 週間、3 日/週、60 分/日、LT 強度の運動療法において降圧効果が示されたこと (Kiyonaga A et al, 1985)、若年成人男性を対象に同様の運動様式で 6 週間、5 日/週、60 分/日の LT 強度の有酸素性運動トレーニングを行ったときに耐糖能異常を予防する効果が示されたこと (Nishida Y. et al, 2001)、健康な高齢者を対象に 5 か月間、2~3 日/週、60 分/日の推定最大酸素摂取量の 50%相当の運動強度の有酸素性運動トレーニングを行ったところ血中脂質の改善が示されたこと (Sunami

Y et al. 1999) など、有酸素性運動トレーニングによりメタボリックシンドロームや関連疾患の改善が認められている。また、若年者の非肥満者を対象に 6 週間、5 日/週、60 分/日の LT 強度の自転車トレーニングを行ったところ、VO₂max の増加と遅筋線維の毛細血管の増加が認められた (Shono N et al, 2002)。これらのことから健康関連指標の改善を目的とした運動プログラムは、運動様式、運動強度、運動継続時間、運動頻度が豊富な科学的知見によって確立されている。

有酸素性作業能の評価

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) から有患者 (Yoshimura E et al, 2011) まで幅広い対象者に用いられている。対象者の体力水準はもちろん、同一被験者内でも漸増運動負荷中の呼吸応答は、変化が大きく、少ない換気量から多い換気量まで高い分析精度が必要である。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。換気量測定のために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。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 DB 法よりも過大評価することを示した。加えて、ニューモタコ型流量計と同じシステムにも関わらず、過小評価にシフトすることを報告した (Rosdahl H et al, 2013)。また、AMIS2001 代謝測定器 (Innovision, Odense, デンマーク) は、同型の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。

筋力発揮と収縮速度が異なる組合せにおける一過性運動の呼吸代謝応答

時間当たりの仕事量を示す仕事率は、力と速度の積で表され、運動強度の定量に用いられる。骨格筋では、筋力発揮と筋収縮速度の積が筋の仕事率といえる。発揮筋力と収縮速度の関係は、動物の摘出筋において負荷の増加に従って最大収縮速度が減少し (Hill AV, 1938)、ヒトを対象とした自転車の多関節運動においても同様の結果を示した (生田と猪飼, 1972)。また、自転車運動の最大仕事率は、各負荷とそれに対する最大仕事率との関係が二次回帰式で示され (Dotan R & Bar-Or O, 1983; 中村ほか, 1984)、その頂点にあたる一つの組合せが理論的な無酸素性最大仕事率である。

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。自転車エルゴメーター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最高酸素摂取量 ($VO_2\text{peak}$) または $VO_2\text{max}$ が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)。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 ($62.9 \pm 4.7\text{rpm}$) よりもサイクリスト ($56.1 \pm 6.9\text{rpm}$) 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示唆している。また、85% $VO_2\text{max}$ 強度に対して 50~100rpm で自転車運動を行った時、60rpm の % $VO_2\text{max}$ 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、被験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。

筋力発揮と収縮速度が異なる組合せにおける末梢循環応答

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素化レベルに違いが生じる。しかし、これまで機械的負荷に対する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る。

筋線維の動員は、発揮筋力や収縮速度によって筋線維数や性質が異なる。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、解糖系能力に優れた 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_{2peak} の 40 と 80rpm の自転車運動において、筋電図の分析から 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_{2max} 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。

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適応に影響を及ぼす可能性が考えられる。

筋力発揮と収縮速度の異なる組合せの運動におけるトレーニング適応

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、低速トレーニング群は、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、筋断面積と筋力が増加させる (Tanimoto M & Ishii N, 2006)。無酸素性パワートレーニングでは、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を 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筋収縮速度の運動トレーニングは、我々が調べた限りでは少ない。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。

健康づくりのための運動処方は、運動様式、運動強度、継続時間、実施頻度の要素を基礎として多面的に運動プログラムが組み立てられ、トレーニングが実施されている。従って、対象者のより細かなニーズに合わせた効率的な慢性適応を引き起こす詳細な運動条件について研究することは、スポーツ健康科学分野やスポーツ科学分野にとって重要であると考えられる。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発揮筋力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。尚、本研究では、一般的にペダルの漕ぎやすさから用いられる 50rpm や 60rpm よりも遅いあるいは速いペダル回転数が一過性及び慢性適応を引き起こすために顕著であると仮定し、50rpm と 60rpm 以外の回転数に伴う筋力を特異的な発揮筋力であると定義した。

第3章 複数人数の同時呼気ガス分析による呼吸代謝測定の妥当性 (研究 1)

本章は、呼吸循環応答のゴールドスタンダードであるダグラスバッグ (Douglas bag: DB) 法と比較的簡便かつ効率的に分析するために我々が開発したマルチミキシングチャンバー (Multiple channel mixing chamber: MCMC) 法の妥当性の検証を行った。

MCMC 法は、同時に 5 名の呼吸代謝測定を 1 台のディスプレイ、キーボード、マウスで入力や管理が行え、かつ 1 台の高価な質量分析器の高速分析応答を有効活用して比較的安価な流量計と組み合わせて測定する (図 1)。本章では、被験者の呼気ガスをミキシングチャンバーで分析された同一ガスを採気して分析比較した。

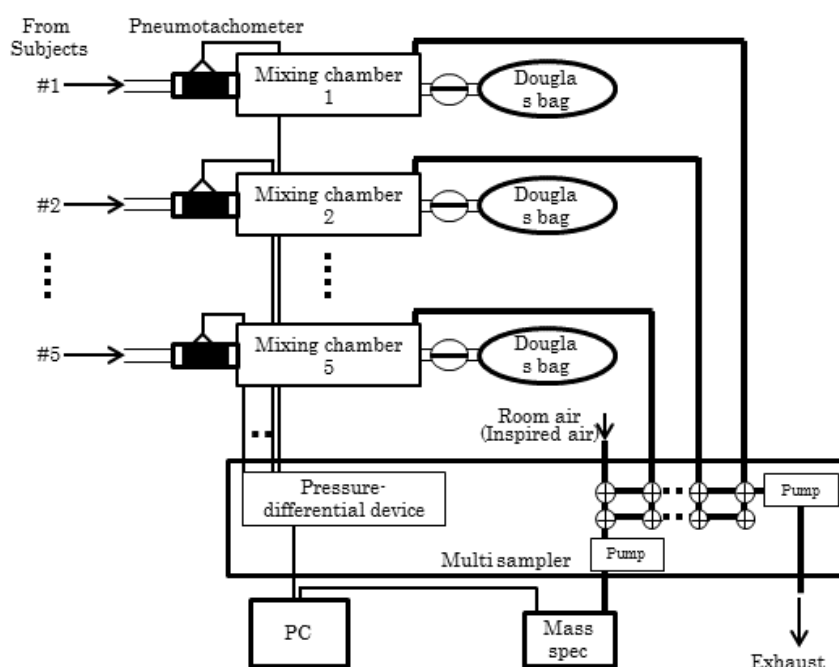


図 1. マルチミキシングチャンバー法.

1. 目的

複数のミキシングチャンバーを用いた多人数同時測定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の検討を目的とした。

2. 方法

被験者は、安静時代謝 (RMR: Resting metabolic rate) と食事誘発性体熱産生 (DIT:

Diet induced thermogenesis) の測定を行う実験Ⅲのために 7 名の健常な若年男性 (年齢 22±1 歳、身長 171±7cm、体重 66.0±13.6kg) と最大運動負荷テストの測定を行う実験Ⅳのために 6 名の健康な成人男性 (年齢 23±3 歳、身長 174±5cm、体重 68.4±9.9kg) とした。実験に先立ち、インフォームドコンセントを得た。尚、本研究は、福岡大学倫理委員会の承認を得て実施した。

実験プロトコール

実験Ⅰは、極めて少ないガス量で分析を行う質量分析器において、異なる濃度組成の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: O₂ 20.93%, CO₂ 0.04%; Gas2: O₂ 15.00%, CO₂ 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ときの連続ガス濃度を用いたときとの誤差を明らかにした。健常な成人男性 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

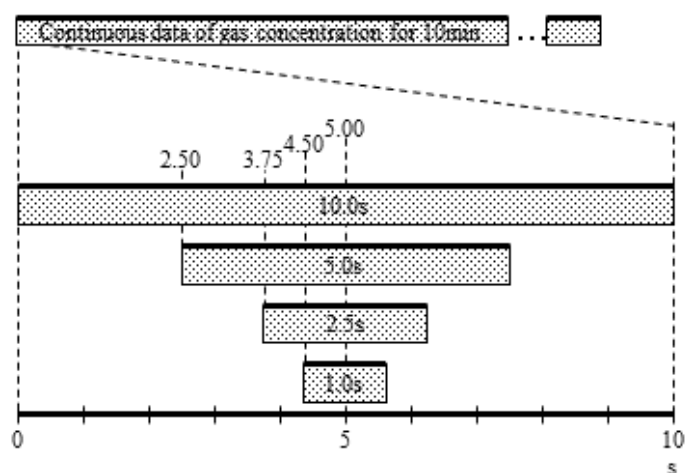


図 2. 連続ガス濃度を用いた非連続ガスの平均化の時間帯.

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 VO_2 、 VCO_2 、RER を算出した (図 2)。

実験Ⅲは、MCMC 法を用いた RMR と DIT の妥当性を検討した。全ての被験者は、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 までに摂取し、その後のカフェイン入り飲料と喫煙を控えるように指示され、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 $22.8\pm 1.3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $37\pm 11\%$ 、 123m^3 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。被験者は、前日の激しい身体活動を控えるように指示され、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 名の被験者の分析が行えるように分析器が設定され、5 台のミキシングチャンバーを同時に分析した。呼気ガスは、MCMC 法により分析され、分析後の同一ガスを 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)、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。

データ分析

実験Ⅰのデータは、平均値 \pm 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 プロット (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。

3. 結果

実験Ⅰについて、図 3 には、異なる濃度組成のガスが充填された 2 台のミキシングチャンバーを 5 秒毎に切り替えて分析したときのガス濃度分析の経時変化を示した。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 秒後から 5 秒後までは、O₂ に差がなく、CO₂ も 4 秒後及び 5 秒後に統計的な差を認めなかった (図 4)。

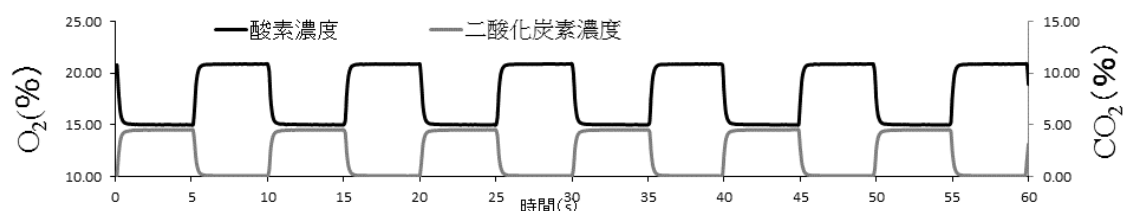


図 3. 2 台のミキシングチャンバー切替時におけるガス濃度の経時変化。

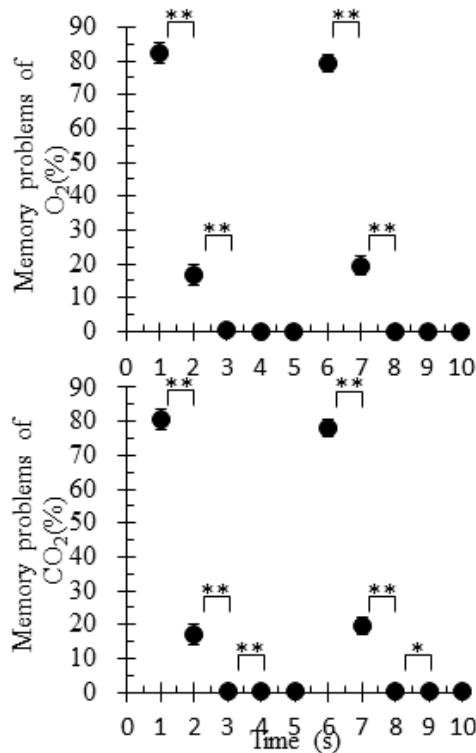


図 4. 異なる濃度組成のガス分析におけるメモリ効果のウォッシュアウト.

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

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、 VE_{STPD} が $7.7 \pm 4.7\%$ (0.58 ± 0.39 l/min)、 $FECO_2$ が $3.2 \pm 2.0\%$ ($0.09 \pm 0.06\%$)、 VO_2 が $9.3 \pm 3.9\%$ (23 ± 10 ml/min)、 VCO_2 が $10.6 \pm 4.1\%$ (23 ± 9 ml/min)、 RER が $1.2 \pm 1.4\%$ (0.010 ± 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 ($p < 0.001$)。FEO₂ 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には強い相関関係 ($R^2 = 0.9519$, $p < 0.001$) を示した (図 5-A)。TEE の 95% 信頼区間は、 $9.5 \pm 3.9\%$ (0.11 ± 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 5-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 5-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。

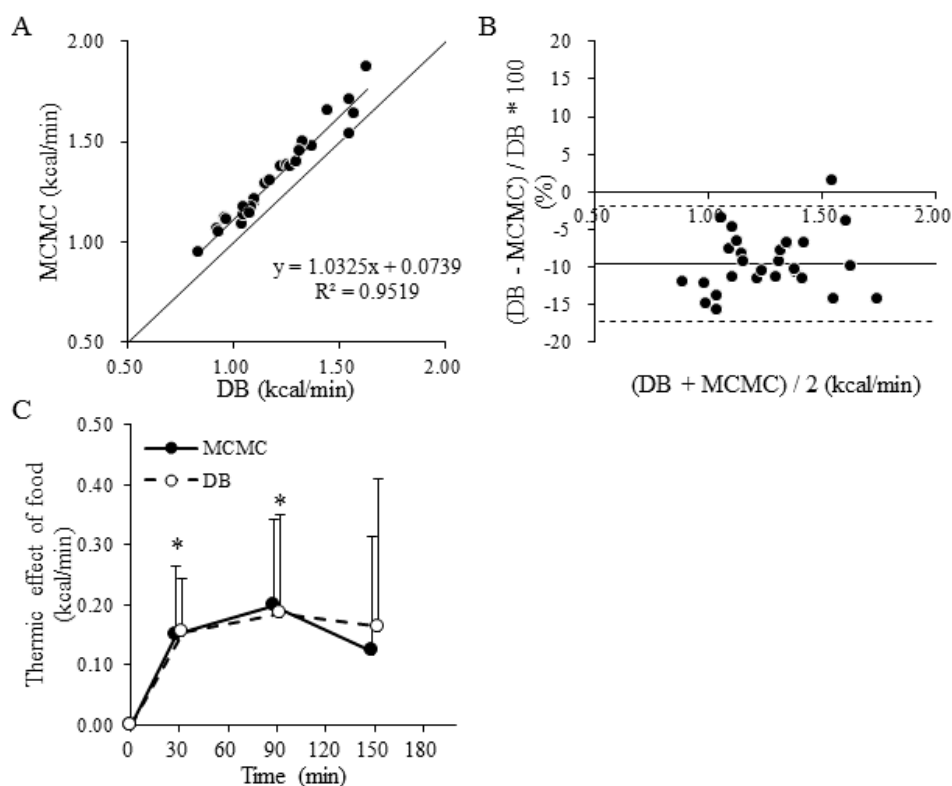


図 5. RMR と食後における DB 法と MCMC 法のエネルギー消費量の関係. A: DB 法と MCMC 法の相関分析. B: DB 法と MCMC 法の平均誤差率の Bland-Altman プロット. C: RMR と 600kcal の食事後のエネルギー消費量. *: vs 安静時 ($p < 0.05$).

実験IVについて、 VE_{STPD} 、 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 6,7)。95%信頼区間は、 VE_{STPD} が $2.5 \pm 4.1\%$ (1.48 ± 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 ± 100 ml/min)、RER が $1.7 \pm 1.2\%$ (0.018 ± 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 ± 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 ± 493 ml/min (47.9 ± 5.5 ml/kg/min)、 VCO_2 が 3822 ± 711 ml/min、 VE_{STPD} が 90.38 ± 18.76 L/min、RER が 1.17 ± 0.07 、心拍数が 189 ± 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。

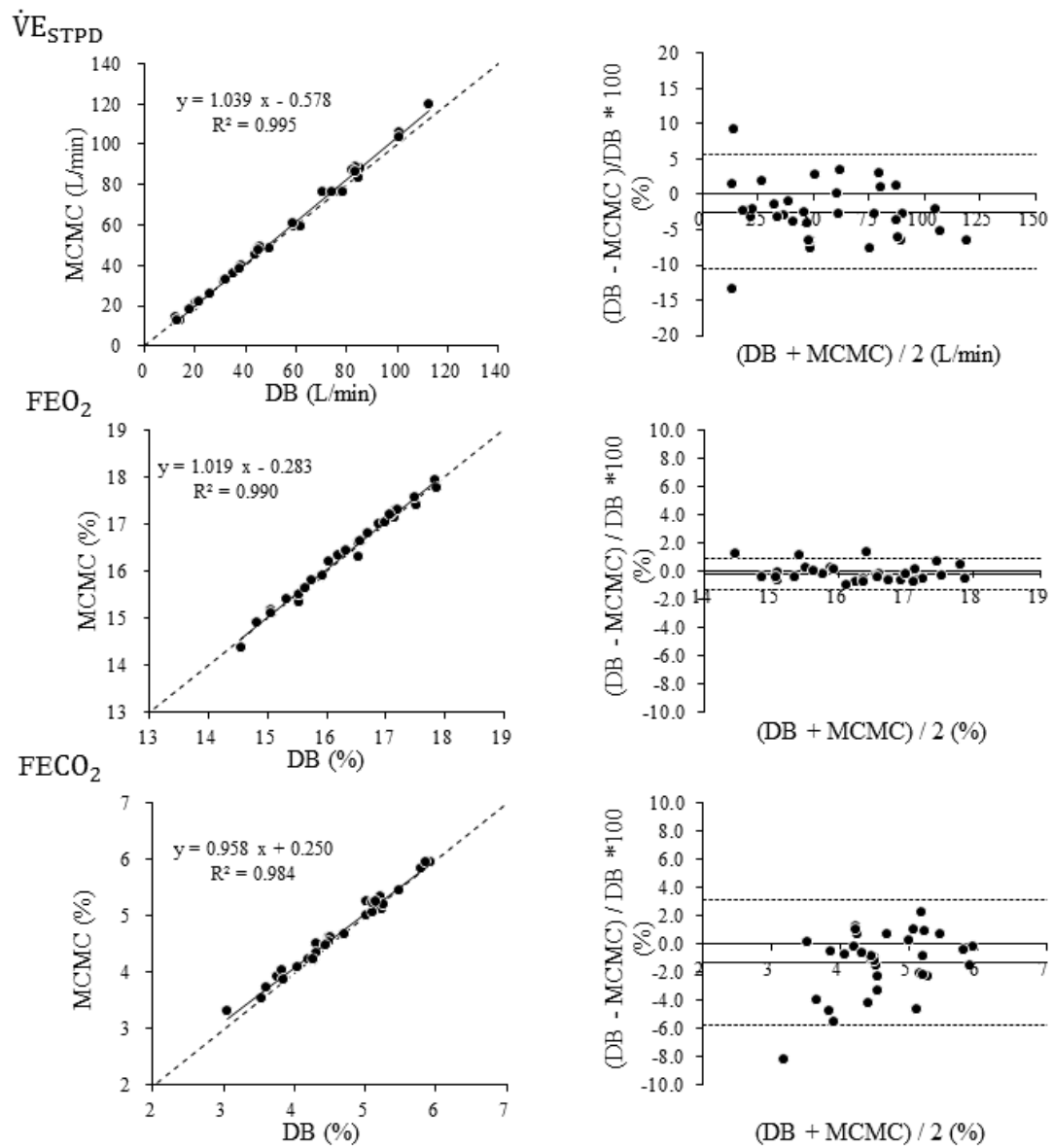


図 6. 最大漸増運動負荷運動中のマルチミキシングチャンバー法とダグラスバッグ法との相関分析と個体差。左の図は $\dot{V}E_{STPD}$ 、 FEO_2 及び $FECO_2$ におけるマルチミキシングチャンバー法とダグラスバッグ法の相関分析を示す。破線は $y=x$ を示す。右の図は、Bland-Altman のプロットを用いた平均誤差率を示す。実線は平均誤差率、破線は 95% 誤差範囲を示す。

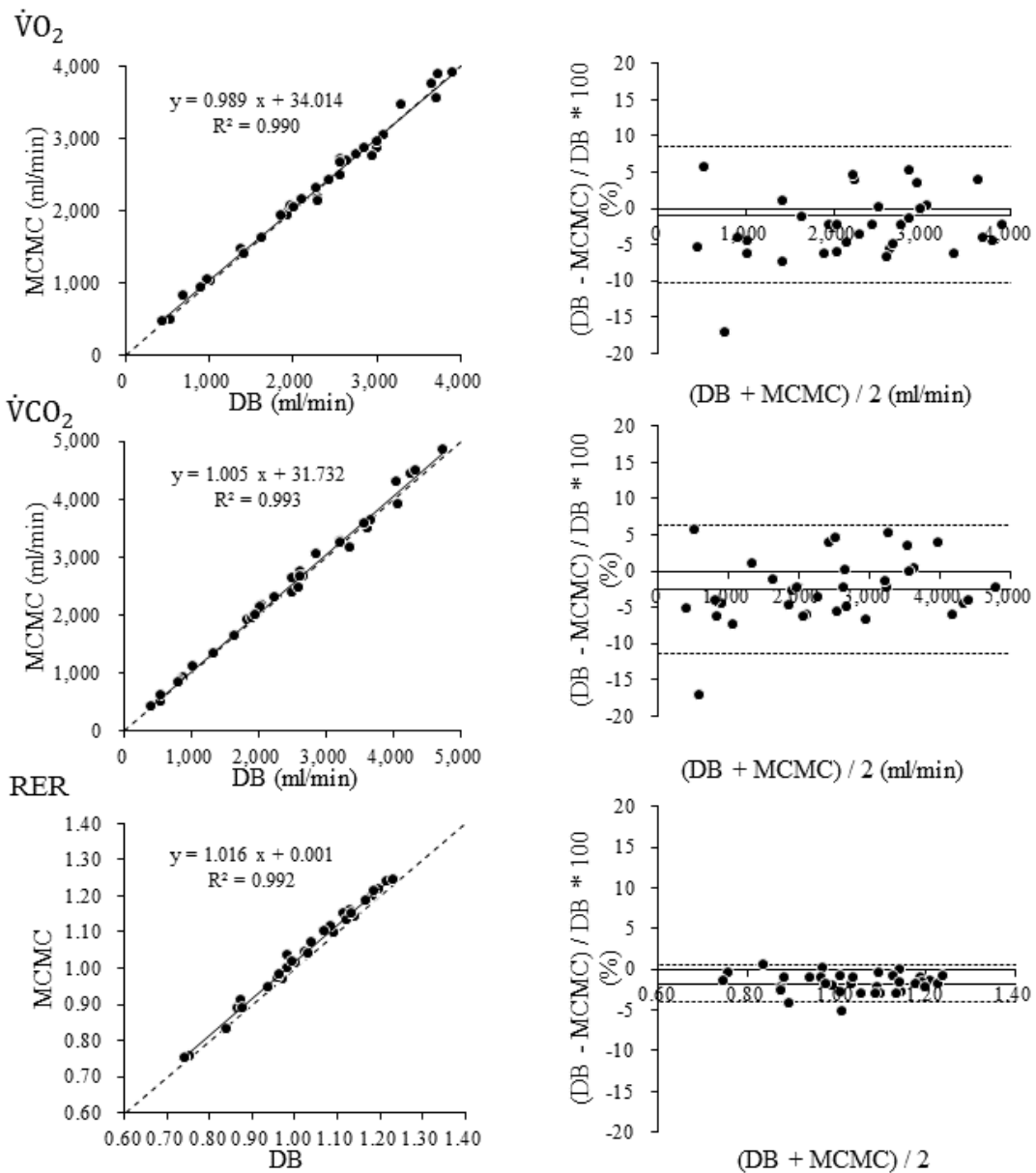


図 7. 最大漸増運動負荷運動中のマルチミキシングチャンバー法とダグラスバッグ法との相関分析と個体差. 左の図は $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ 及び RER におけるマルチミキシングチャンバー法とダグラスバッグ法の相関分析を示す. 破線は $y=x$ を示す. 右の図は, Bland-Altman のプロットを用いた平均誤差率を示す. 実線は平均誤差率, 破線は 95%誤差範囲を示す.

4. 考察

本章では、MCMC 法における複数人同時の呼吸代謝分析の妥当性が示された。いくつか

の代謝指標に測定方法間に差を認めたが、生理学的に許容範囲内であった。安静時の $\dot{V}O_2$ の誤差が約 9%、運動中は、極めて小さい誤差 (<1%) であった。

質量分析器のメモリ効果は、2 秒以上のウォッシュアウト時間を設けることで、分析直前の残留ガスの影響を取り除くことができることを明らかにした。この問題は、本研究で開発した MCMC 法のように各ミキシングチャンバー内にある複数の異なるガス濃度を 1 台の質量分析器で分析するとき生じる。それ故、我々は 2 秒以上のウォッシュアウト時間を設けることでメモリ効果を極めて小さい状態に保てることを示し、1 台の質量分析器に最適なウォッシュアウト時間から各ミキシングチャンバー内のガス濃度分析に必要な切り替え時間を決定した。しかし、メモリ効果は、2 秒間のウォッシュアウト後でもわずかに (O_2 : 0.3%以下, CO_2 : 0.4%以下) 生じる。この小さな誤差は、人の代謝測定の変動に比べると小さな影響である (表 1)。

表 1. ミキシングチャンバー切替後からの算出誤差.

Time (s)	$\dot{V}O_2$	$\dot{V}CO_2$	RER
0-1	-36.6	-38.3	-3.3
1-2	-1.4	-2.2	-1.0
2-3	-1.0	-1.6	-0.7
3-4	-0.7	-1.3	-0.6
4-5	-0.5	-1.1	-0.7

(%)

$\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, and RER were calculated when the ventilation expired volume was ideal.

代謝指標の算出は、非連続の 1 秒から 10 秒間のどの平均濃度を用いても可能であることを示した。これは、ミキシングチャンバー内で呼気ガスがよく拡散されるよう設計されたことと高速応答の質量分析器を用いたことで達成できたもとと考えられる。複数の被験者の同時測定は、漸増運動中の呼気ガス変化を短い周期で複数回測定することが重要である。それ故、1 秒間の平均濃度を得るためには、2 秒間のウォッシュアウトを含め、1 台のミキシングチャンバーを 3 秒間かけて複数回分析するべきである。一方、定常状態では、換気両や呼気ガス濃度が安定し、変化が小さいため、理論上は 1 台の質量分析器で 1 分間

あたり 20 台のミキシングチャンバーの呼気ガス濃度を分析することが可能であると考えられる。

安静時および食後の代謝測定は、MCMC 法の VO_2 と VCO_2 の絶対値が DB 法よりも有意に高値を示したが、相対的変化は信頼できる。2 回の測定における RMR の変動係数は、DB 法が $2.7 \pm 1.4\%$ [1.0~5.0%] と MCMC 法が $3.2 \pm 2.7\%$ [0.8~8.9%] であり、健康な成人を対象とした同一日の RMR の変動が 3~8% とした先行研究 (Donahoo WT et al, 2004) と近似する。短い測定の DIT の比較において、MCMC 法が $21 \pm 17\text{kcal}$ と DB 法が $23 \pm 17\text{kcal}$ との間に統計的な差を認めなかった。しかしながら、両方法の TEE に差異があるため、DIT に差が生じなかった。

MCMC 法は、運動時の呼気ガス測定が高い精度であることが示された。本研究は、MCMC 法が運動中、複数の被験者を同時に代謝測定するために有効であることを明らかにした。最大有酸素性作業能力としての生理学的な指標は、 $VO_{2\text{max}}$ の決定のための基準に到達した。DB 法と MCMC 法における VO_2 の違いは、約 $500\text{ml}/\text{min}$ から $3900\text{ml}/\text{min}$ の範囲で小さな誤差 (0.9%) であった。

非定常状態における代謝測定の先行研究は、本研究の MCMC 法と比べても同程度の精度がある。Power ら (Power SK et al, 1987) は、固定負荷時の非定常時の VO_2 がおよそ $6\sim 63\text{ml}/\text{min}$ の誤差であることを報告した。また、Foss Ø と Hallén J (Foss Ø and Hallén J, 2005) は、Oxycon Pro (Erich Jaeger GmbH, ドイツ) のミキシングチャンバー法と DB 法との VO_2 の差が $30\text{ml}/\text{min}$ 以下であることを報告した。本研究の VO_2 の平均誤差と 95%信頼区間は、 $-9\text{ml}/\text{min}$ と -190 から $170\text{ml}/\text{min}$ 、両測定方法間に統計的な差を認めなかった。

MCMC 法を用いたシステムは、実験室のスペースと実験の時間を節約させる。従来のミキシングチャンバーを用いたシステムは、たった一人の被験者の測定専用である。ミキシングチャンバーを用いた従来の方法は、自動化によって便利で正確な測定ができるように発展してきた (Bassett DE et al, 2001; Wilmore JH & Costill DL, 1974)。我々の新しいシステムは、1 台のディスプレイで全ての被験者の測定値を時系列でみることができる。そのため、多くの対象者を測定する大規模な介入研究や縦断調査、運動様式 (道下ほか, 2013) や運動条件 (平野ほか, 2013) の組合せが多い実験などにおいて、実験期間の短縮が可能となる。また、このシステムは、サプリメント摂取、食事摂取量や摂取のタイミングなどの生体リズムが影響する研究において同時刻に測定することで誤差を減らすと考え

られる。それ故、同一日の同時刻に複数人の呼気ガス測定が行えることは、実験の遂行を効率化させ、研究の発展に寄与できると考えられる。

第4章 LT 強度相当の自転車運動におけるペダル回転数と呼吸循環応答の関係について (研究 2)

本章では、トレーニング刺激として有効な特異的筋力発揮を設定するために、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した。本章の結果及び、先行研究の結果を基にして、研究 3 と研究 4 の一過性適応及び慢性適応の検討の際にペダル回転数を採用する。

1. 目的

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。

2. 方法

対象者は、自転車競技を行っていない健康な若年成人 7 名（男性 6 名、女性 1 名）とした（表 2）。

表 2. 対象者の身体特性

n		7 (M=6, F=1)
年齢	才	23.1 ± 1.3
身長	cm	170.2 ± 8.7
体重	kg	62.5 ± 8.3
VO ₂ max	ml/min	2929 ± 651
VO ₂ max/Wt	ml/kg/min	47.0 ± 10.4
watts _{LT}	watts	99 ± 24

(平均値±SD)

最大酸素摂取量と 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。呼気ガスは、1 分間毎にダグラスバッグで採気し、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 respirometer（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 VO₂ 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 ± 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 μ 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。呼吸ガスは、各負荷 3~4 分をダグラスバッグにて採気し、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。

3. 結果

$\%VO_2\max$ 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 8-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 8-B)。血中乳酸濃度は、統計的な差を認めなかった。

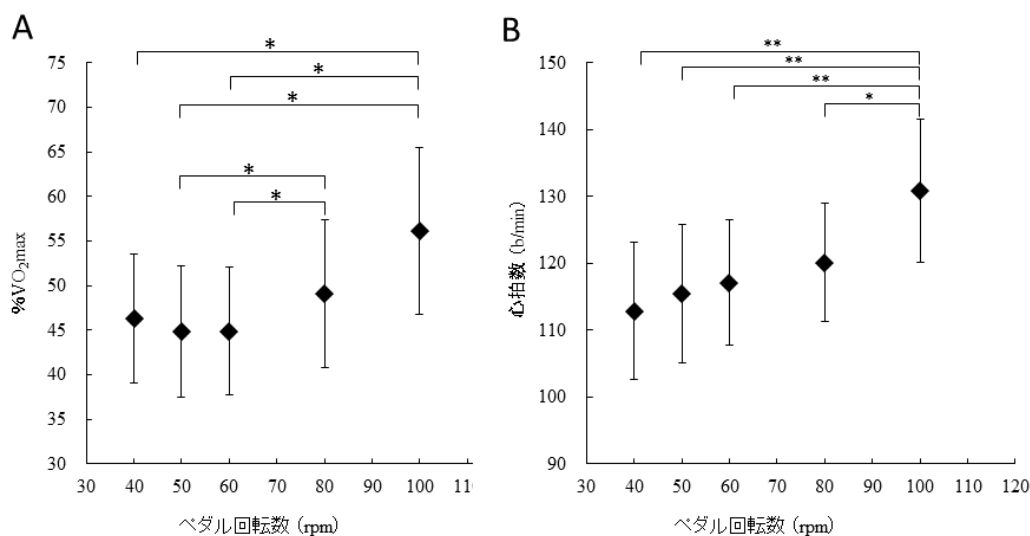


図 8. 同一 LT 仕事率におけるペダル回転数と呼吸循環応答.

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

4. 考察

中等強度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は、ペダル回転数による呼吸循環応答への影響が小さい範囲にある。Löllgen H et al (1980) は、無負荷に設定された極めて低い強度、70%及び 100%VO₂max において、ペダル回転数が 40、60、80、100rpm の運動を行わせた。その結果、無負荷では、全てのペダル回転数間の VO₂ に有意な差を認め、70%VO₂max 強度では 100rpm の VO₂ が 80rpm より有意に高値を示した。100%VO₂max 強度は、全てのペダル回転数間の VO₂ において差を認めなかった。また、Takaishi T et al (1996) は、85%VO₂max 強度に対して 50~100rpm で自転車運動を行った時、50 から 70rpm の %VO₂max 間に差を認めず、70rpm の %VO₂max に比べて 80 と 90rpm が有意に高値を示した。本研究は、50rpm 時に平均 45%VO₂max 相当の強度において、40 から 60rpm の回転数間に差を認めず、80 回転以上の高回転が高値を認めており、先行研究と同じ傾向であった。また、本研究の 100rpm ペダル回転数の運動は、心拍数と %VO₂max 共に高い傾向にあることからペダル回転数の影響を強く受けていることが示唆された (図 9)。これは、筋収縮と心収縮のカップリング (Novak V et al, 2007) が影響しているものと推察できる。一方、汪ら (2005) は、80%VT (Ventilatory Threshold) 強度 (約 36%VO₂max 相当) において、32rpm の VO₂ より 79rpm が有意に高値であることを報告している。これらの結果から、50rpm のペダル回転速度で測定した LT 相当の同一

仕事率における呼吸代謝応答は、低回転が 40rpm 程度、高回転が 80rpm 未満においてペダル回転数の影響が小さいことを示唆した。

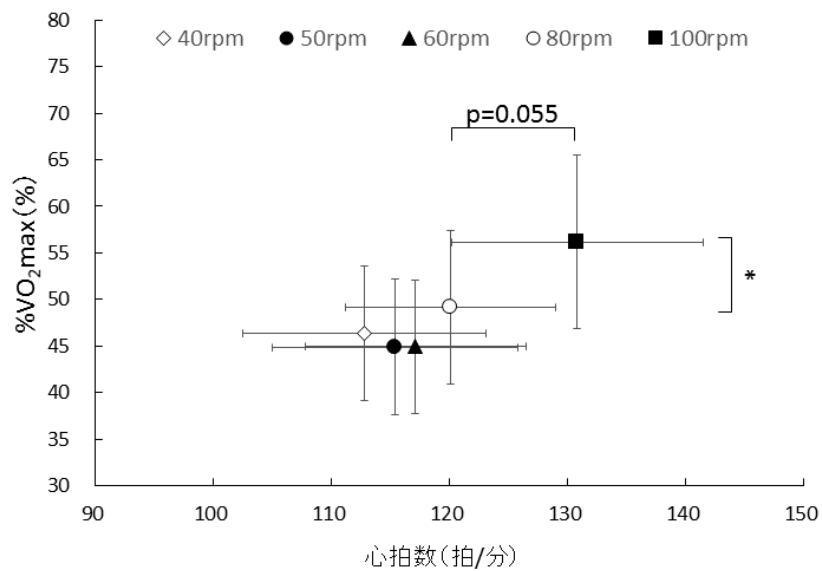


図 9. 各ペダル回転数における心拍数と%VO₂max の関係.

有意水準は、対 80rpm のみを表記した.

*: p<0.05

第5章 同一仕事率における異なる発揮筋力が有酸素性運動の筋酸素化動態、呼吸循環応答及びトレーニング適応について (研究3)

本章は、研究2 (第4章) の結果をもとにして、トレーニング時のペダル回転数の影響が大きくなるようにペダル回転数に可能な限り高低差を付けるために、35rpm と 75rpm に設定して検討した。35、75rpm のペダル回転数に加え、効果測定のための 50rpm の3種類のペダル回転数における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、35rpm と 75rpm のペダル回転数における短期間のトレーニングを行い、有酸素能の適応を検討した。

1. 目的

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明らかにすることを目的とした。

2. 方法

対象者特性

対象者は、健康な若年成人男性 16 名 (年齢 23.4 ± 1.7 才、身長 171.4 ± 6.1 cm、 64.3 ± 6.0 kg) であった。対象者へは、研究によって生じる利益と不利益などについて十分に説明を行った後、文書にて同意を得た。尚、本研究は、福岡大学倫理審査委員会の承認を得た。

実験プロトコール

対象者は、体力水準 (乳酸閾値相当の仕事率と最大酸素摂取量) 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 3)。最大酸素摂取量 ($VO_2\max$) と乳酸閾値相当の仕事率 (LTwatts) 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、乳酸閾値強度と最大酸素摂取量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) を使い、50rpm の仕事率を基準として補正した。

表 3. トレーニング介入前の身体と有酸素性作業能の特性。

	LFTr	HFTr	<i>p</i>
<i>n</i>	8	7	
Age (years)	23.9 ± 2.0	23.0 ± 1.4	0.25
Work _{LT} (W)	65 ± 13	63 ± 16	0.77
Work _{LT} /Wt (W/kg)	1.0 ± 0.2	1.0 ± 0.3	0.56
Work _{max} (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 ^a
Weight (kg)	66.1 ± 4.2	63.3 ± 7.7	0.82
BMI (kg/m ²)	21.7 ± 0.8	22.6 ± 2.5	0.42

(Mean±SD)

最大酸素摂取量

最大酸素摂取量 (VO₂max) は、1 分間毎にダグラスバッグで採気し、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。VO₂max の判定基準は、負荷上昇に対して VO₂ 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±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。

血中乳酸閾値

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 20μL 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。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

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貨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）。

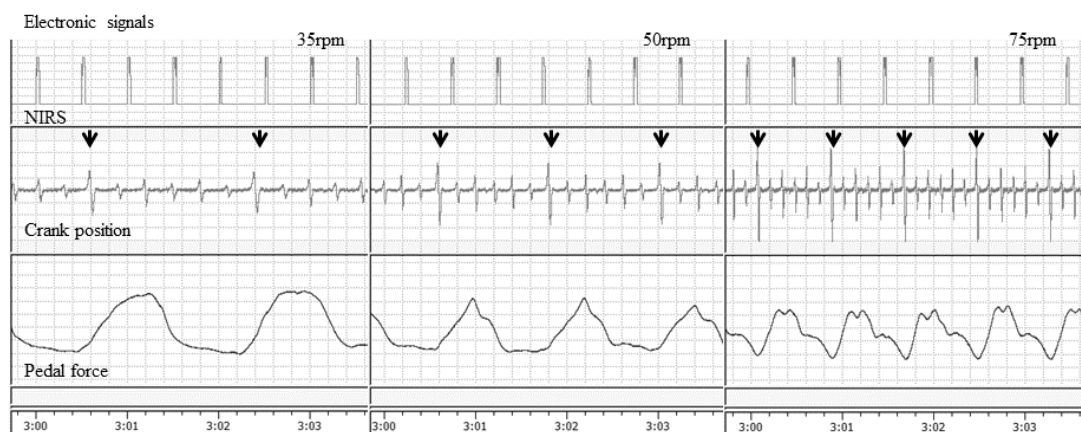


図 10. 近赤外線分光法装置（NIRS）サンプリング、クランク角度及びペダル踏力の記録方法. 上段は、NIRS と同期された電子シグナル. 中段は、クランク角度を 60°毎のシグナル. 矢印は、360° (=0°) を示す. 下段は、フォースプレートの値を示す.

統計処理

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。

3. 結果

一過性運動の生理応答

同一 LT 仕事率における 3 種類のペダル回転数の生理応答は表 4 に示した。35 と 50rpm の運動は、75rpm に比べて $\dot{V}O_2$ 、VE、心拍数、血中乳酸濃度が有意に低値を示した ($p < 0.01$)。呼吸交換比、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。

表 4. LT 仕事率における 3 つの異なるペダル回転数の運動時の生理応

	<i>n</i>	35 rpm	50 rpm	75 rpm
$\dot{V}O_2$ (ml/min)	16	960 ± 143	973 ± 171	1,044 ± 155 ^{b,c}
% $\dot{V}O_{2max}$ (%)	16	33.3 ± 7.2	33.7 ± 7.3	36.1 ± 7.1 ^{b,c}
$\dot{V}E_{BTPS}$ (L/min)	16	26.0 ± 6.0	26.4 ± 5.5	29.5 ± 5.8 ^{b,c}
RER	16	0.92 ± 0.06	0.93 ± 0.03	0.95 ± 0.06
SBP (mmHg)	16	136 ± 11	141 ± 14	147 ± 17
DBP (mmHg)	16	62 ± 8	64 ± 7	64 ± 10
HR (b/min)	16	92 ± 18	101 ± 15	108 ± 16 ^{b,c}
La (mmol/L)	15	1.3 ± 0.4	1.4 ± 0.4	1.7 ± 0.6 ^{b,c}
RPE	16	10 ± 2	10 ± 2	11 ± 2
PFIS (kgf min/r)	11	14.2 ± 8.4	8.5 ± 5.3	5.4 ± 3.5 ^{a,b,c}
OxyHb/Mb (%)	16	84 ± 10	102 ± 13	116 ± 18 ^{a,b,c}

(Mean ± SD)

^a 35 vs. 50rpm, ^b 35 vs. 75rpm, ^c 50 vs. 75 rpm ($p < 0.01$)

トレーニング効果

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 11)。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 12)。体重と BMI は、両群ともに介入前後に差がなかった。

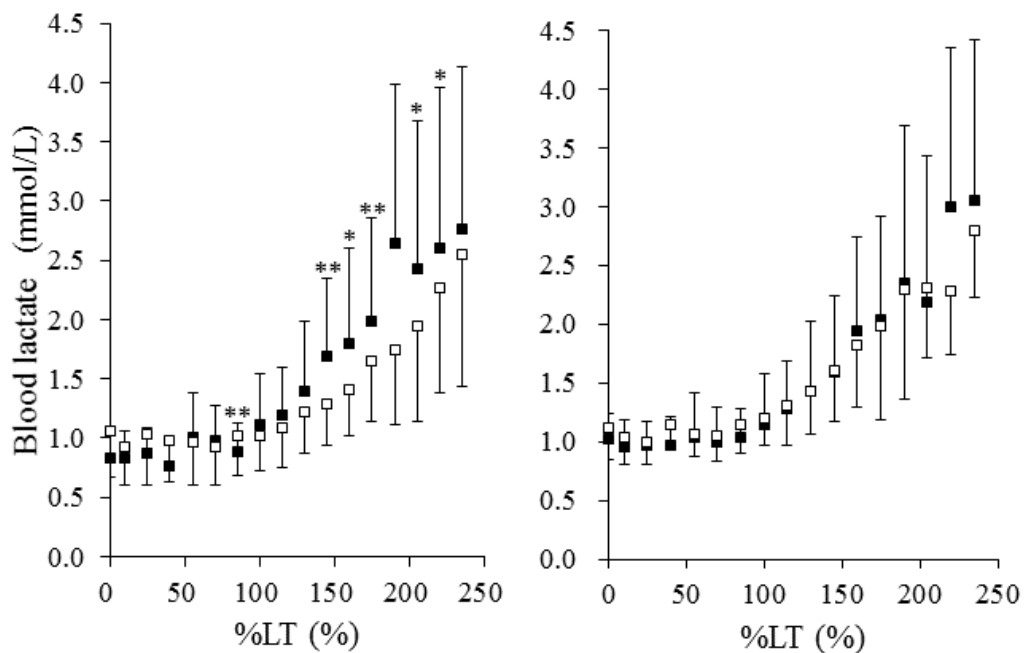


図 11. トレーニング介入前後における漸増運動中の血中乳酸濃度。

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 に規定して実施し、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。

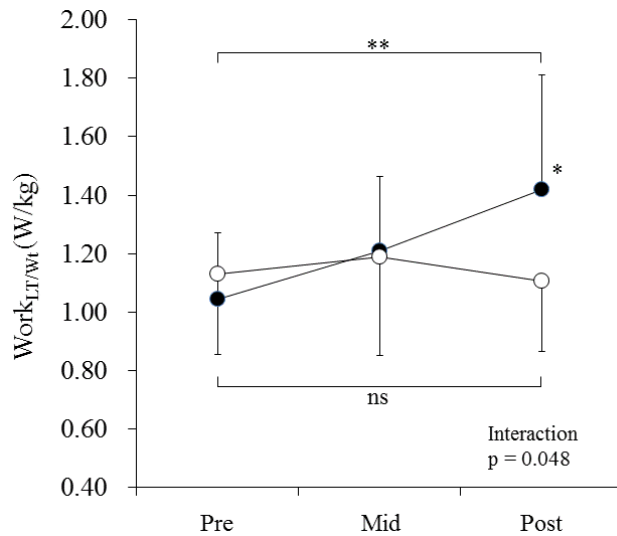


図 12. 2 種類のペダル回転数による短期間トレーニングにおける LT 仕事率の適応. ●は LFTTr 群、○は HFTTr 群を示す.
*: p<0.1 ** :p<0.05

4. 考察

同一仕事率の運動では、75rpm のペダル回転数の運動中の VO₂ や心拍数より 35rpm の方が低値を示した。対照的に 35rpm のペダル踏力は、75rpm に比べて高く、OxyHb/Mb が低いことを示した。それ故、LT 時の同一仕事率における 35 と 50rpm のペダル回転数の運動は、75rpm 時よりも末梢への運動刺激が大きい。それによって、LT 時の仕事率は、LFTTr 群の 2 週間後に増加し他にも関わらず、LFTTr 群に変化を認めなかった。

全身性の運動強度は、LT 相当の同一仕事率における %VO₂max、VO₂、換気量、心拍数が 35 と 50rpm に比べて 75rpm が有意に高値を示した (表 4)。酸素脈、呼吸交換比、収縮期血圧、拡張期血圧、並びに主観的運動強度は、統計的な差を認めなかった。これらの結果から全身性の運動強度は、LT 仕事率を設定した 50rpm より 75rpm の運動がわずかに高い強度であり、35rpm と 50rpm は運動強度の差が小さいことを示した。

一方、末梢性の運動負荷は、筋酸素動態が低く、ペダル 1 回転あたりの力積が低いペダル回転数ほど有意に高値を示し、発揮される筋力が異なっていた (表 4)。外側広筋の筋活動は、高ペダル回転数より低ペダル回転数の方が大きい (Takaishi T et al, 1996)。先行研究同様に低ペダル回転より 75rpm のような高回転の酸素動態が大きいことは、運動中の

血流供給が高い筋収縮または長い筋収縮によって影響することを示唆する (Takaishi T et al, 2002)。一定ペダル回転数の漸増運動負荷試験において、主動筋の OxyHb/Mb は、運動強度とともに減少し、最大強度付近で頭打ちに達する (Belardinelli R et al, 1995)。本研究において、75rpm 運動の OxyHb/Mb の最低値は、低ペダル回転の運動の最高値と同程度に減少している (図 13)。また、LT 強度は、有酸素能力向上に必要な最低強度である (Tanaka H et al, 2012) が、本研究の結果は、ペダル回転数によって LT 強度の自転車運

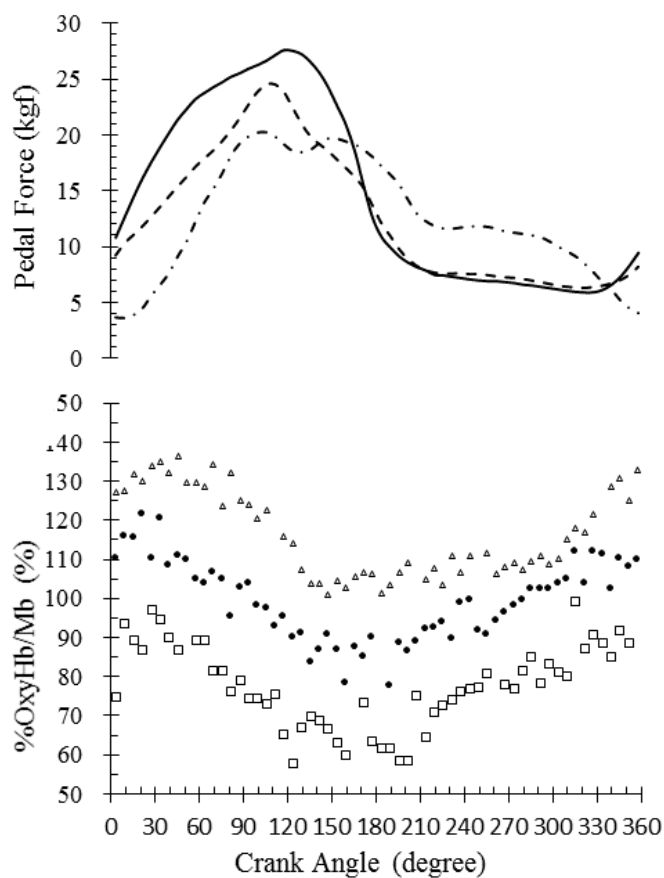


図 13. ペダルクランク角度と筋酸素レベル及びペダル踏力の典型例.

上側パネルは、ペダル踏力を示す. 実線が 35rpm, 破線が 50rpm, 一点鎖線が 75rpm.

下側パネルは、筋酸素動態を示す. □が 35rpm, ●が 50rpm, △が 75rpm.

動における有酸素性の効果に影響することを示唆した。

低酸素刺激は、筋の有酸素能力と関連する (Hoppeler H & Vogt M, 2001)。本研究において、LT 強度の 35rpm のペダル回転数によって、高いペダル踏力と低い筋酸素レベルは、高いペダル回転数よりも有酸素能力を高めるための末梢への刺激が大きい。歩行中に外部

圧迫による血流制限は、成長ホルモンを増加させる (Abe T et al, 2006)。Green HJ et al (2009) は、筋の酸化的リン酸化が酸素供給またはミトコンドリア活性、またはその両方によって影響されることを報告した。彼らの研究は、60%VO₂peak 強度の低酸素環境下の一過性運動が通常環境下の同じ強度の運動よりも外側広筋内の乳酸生成によって刺激された。その結果、2 週間の低酸素トレーニング後において通常環境時と低酸素環境時の乳酸濃度に差がなくなった。本研究において、LFTr 群にけるトレーニングの 2 週間後は、トレーニング前より LT が高まった。これらの結果は、筋の酸化能力の適応が末梢刺激に影響されたことを示唆した。

短期間のトレーニングは、有酸素能を高めることができる。Goodman et al (2005) は、非鍛錬者を対象に 65%VO₂max 強度で 2 時間/日、たった 6 日間のトレーニングの結果、左心室機能の向上を報告した。また、いくつかの先行研究において、短期間のトレーニングが最大下の有酸素能力に影響することが報告されている (Green HJ et al, 2013a: 2013b)。本研究の知見である LFTr 群の適応は、これらの先行研究によって支持された。LFTr と HFTr 群が行った機械的な運動量が同じであるにも関わらず、HFTr 群にとって有酸素性作業能を向上させるために必要な刺激が不十分であった。

最後に本研究には、いくつかの限界がある。一過性運動におけるペダル回転数の測定順がランダムでなかった。それ故、運動時の順番が生理応答に影響したことが否定できない。しかし、各ペダル回転数の運動間に長い休憩 (約 6 分間) を取ったことで影響を最小限に抑えた。もう一つの限界として、運動における骨格筋の適応を生化学的な手法によって直接分析を行っていない。今後、筋生検を用いて骨格筋のミトコンドリアと毛細血管床の適応を検証する必要がある。

以上のことから、本章では、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は、最大下有酸素性作業能のトレーニング適応に影響することを明らかにした。

第6章 同一仕事率における異なる発揮筋力が長期間の運動トレーニングの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（研究4）

本章は、第4章と同条件の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応答の変化を検討した。

1. 目的

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を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

対象者

対象者は、自転車競技未経験の健康な若年成人男性18名とし、体力水準（LT強度と VO_2max ）に偏りが生じないように3群に振り分けた。対象者へは、研究によって生じる利益と不利益などについて十分に説明を行った後、文書にて同意を得た。尚、本研究は、福岡大学倫理審査委員会の承認を得た。

実験プロトコール

対象者は、体力水準（LT watts と VO_2max ）に偏りが生じないようにマッチングさせ、3群（LFTTr: Low frequency training; HFTTr: High Frequency training; Con: Control）に分けた（表5）。介入前後 VO_2max 、LT強度は、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の両方を行った。尚、測定手順および各指

標の算出方法は、第 4 章と同様である。

表 5. 介入前における各群の対象者特性

	Con	LFTTr	HFTTr
年齢(才)	23.4 ± 3.2	24.2 ± 2.2	23.6 ± 1.5
身長(cm)	171.0 ± 7.4	176.6 ± 6.6	170.4 ± 3.4
体重(kg)	64.2 ± 7.0	67.9 ± 6.2	61.9 ± 7.1
BMI(kg/m ²)	21.9 ± 1.2	21.7 ± 0.8	21.3 ± 2.5
LT(watts)	84 ± 29	83 ± 12	76 ± 14
LT/Wt(watts/kg)	1.35 ± 0.57	1.22 ± 0.17	1.25 ± 0.36
VO ₂ max(ml/kg/min)	48.8 ± 4.6	47.5 ± 3.9	45.1 ± 7.6

(Mean ± SD)

統計解析

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、有意な差を認める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。

3. 結果

VO₂max 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 14-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、両運動群ともに有意に増加した (図 14-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、VO₂ の差を認めなかった (表 6)。%VO₂max および酸素脈 (VO₂/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_{BTPS}/VO₂) は、トレーニング条件×期間に有意な交互作用を認め、LFTTr 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 6)。 VE_{BTPS}/VO_2 は、交互作用に傾向を認め、LFTTr 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、LFTTr において介入前より介入後が有意に増加した。

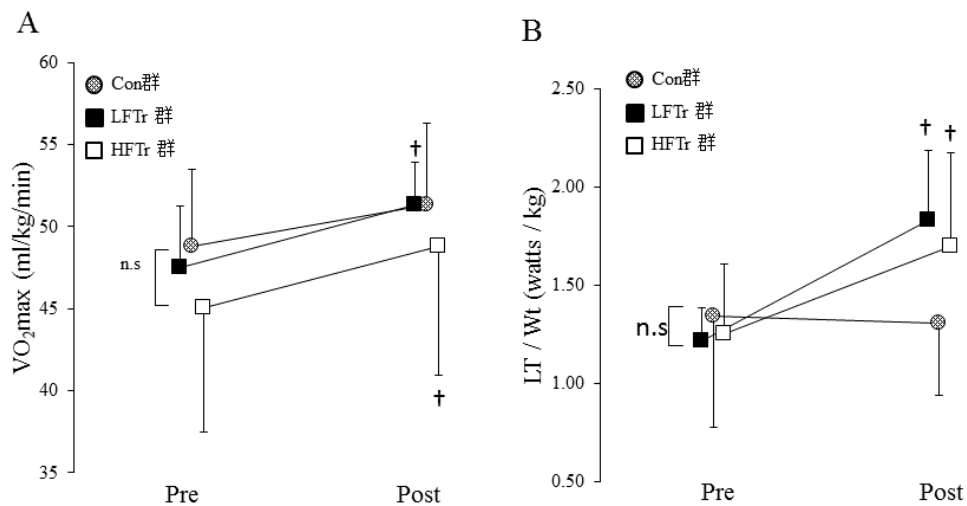


図 14. 各群におけるトレーニング介入前後の VO_2max と LT 強度の適応.

†: $p < 0.05$

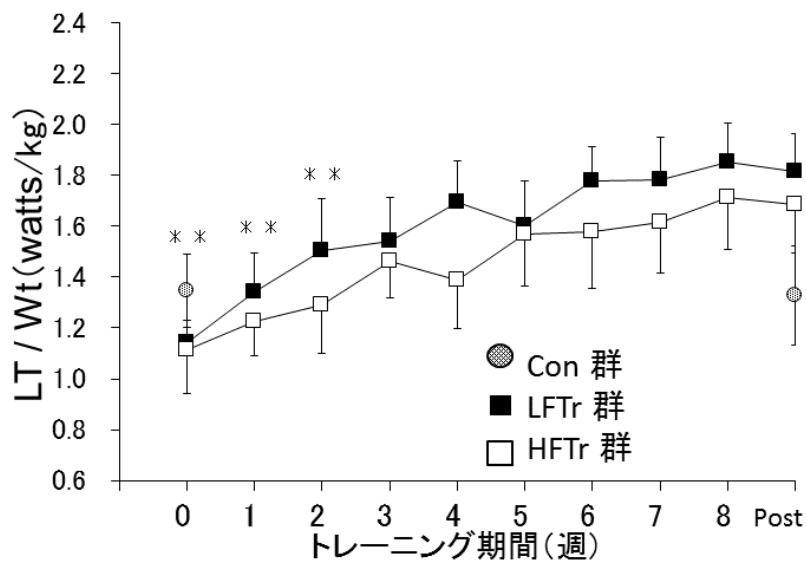


図 15. トレーニング群における LT 強度の推移.

表 6. 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 _{LT}	Post(Pre W _{LT})	Post(Post W _{LT})
LT(watts)	LFT _r	83 ± 12	83 ± 12	125 ± 30
	HFT _r	76 ± 14	76 ± 14	103 ± 22
VO ₂ (ml/min)	LFT _r	1220 ± 248	1160 ± 162	1724 ± 387 #
	HFT _r	1149 ± 149	1137 ± 144	1438 ± 229 #
%VO ₂ (%)	LFT _r	38.7 ± 7.6	33.1 ± 2.1 *	49.0 ± 7.7 #
	HFT _r	42.1 ± 7.1	38.3 ± 6.4 *	48.6 ± 7.5 #
HR(beat/min)	LFT _r	95.5 ± 4.9	101.0 ± 6.7*	117.2 ± 14.0 #
	HFT _r	105.3 ± 12.7	110.2 ± 9.6*	127.5 ± 20.0 #
VE/VO ₂	LFT _r	25.0 ± 7.3	24.1 ± 4.3 *‡	21.7 ± 7.0 #†
	HFT _r	26.8 ± 4.6	26.0 ± 4.0	27.5 ± 2.8
VO ₂ /HR	LFT _r	12.8 ± 2.8	11.5 ± 1.5 *	14.6 ± 2.2 #‡
	HFT _r	11.0 ± 1.5	10.4 ± 1.7 *	11.3 ± 1.8

*: p < 0.05, Pre W_{LT} vs Post (Pre W_{LT}) (絶対的同一強度)

#: p < 0.05, Pre W_{LT} vs Post (Post W_{LT}) (相対的同一強度)

†: p < 0.1, 期間 × トレーニング条件

‡: p < 0.05, 期間 × トレーニング条件

4. 考察

最大および最大下の有酸素性作業能は、トレーニング中のペダル回転数に関わらず、長期間のトレーニング介入によって向上した。介入前後の最大下運動中の呼吸循環応答は、トレーニング時のペダル回転数が外呼吸系および酸素運搬系の機能に影響していることが示唆された。

有酸素性作業能は、ペダル回転数に関わらず、LT 強度相当の同一仕事率の長期間トレーニングによって向上した。高ペダル回転数における 2 週間のトレーニングは、LT 強度相当の仕事率を変化させなかった (研究 3)。トレーニング時の仕事量は、有酸素能向上の最低限必要な強度とされる LT (Tanaka H et al, 2013) 相当の同一仕事率であり、両群ともに同程度であった。しかし、本研究は、LFT_r 群と比べると 1 ペダル回転あたりのペダル踏力が小さく、末梢へのトレーニング刺激が小さかったものの、2 倍以上の筋収縮を繰り返すことで回数同条件のトレーニングを 2 週間以上継続したことで有酸素性作業能が向上したと示唆される。

介入前後の最大下運動中の呼吸循環応答は、トレーニング時のペダル回転数が外呼吸系および酸素運搬系の機能に影響していることが示唆された。絶対的同一強度において、両群ともに心拍数が介入前に比べて増加した。若年成人男性（音成ほか, 2003）や高血圧患者（Kiyonaga A et al, 1985）を対象とした LT 強度の 50rpm ペダル回転数のトレーニングは、心拍数が減少する。本研究は、先行研究と異なる結果であった。LFTr 群は、絶対的同一強度の酸素当量が改善し、酸素を取り組むために必要な吸気量が減少した。加えて、LFTr 群は、相対的同一強度の運動時においても換気当量が改善している。これは、LFTr 群において、吸気からの酸素取り込みに関係する外呼吸系が向上したことを示唆した（図 16）。また、相対的同一強度の運動時において酸素脈が増加した。一回心拍出量または血液中の酸素動態に影響したと推察できる。

以上のことから、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が向上するものの、その全身性持久力を構成する詳細な機構には差異が生じる可能性が示唆された。

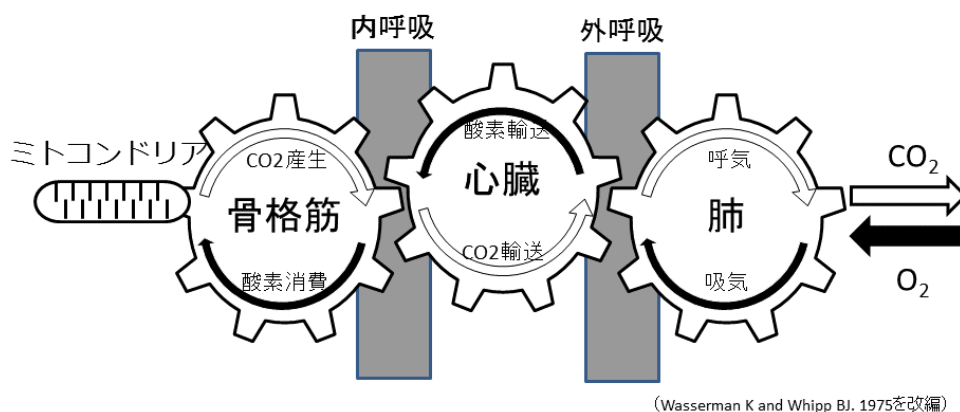


図 16. 酸素の摂り込みにおける外呼吸と内呼吸.

第7章 研究の意義と限界

本研究で得られた知見は、今までの運動処方要素である運動様式、運動強度、継続時間、実施頻度に加えて、筋収縮速度や筋力の要素を加味するために科学的に重要な情報である。今後、関連研究の前進が身体活動量低下や運動不足が原因の一つに挙げられる疾患関連の諸問題を解決するスポーツ健康科学分野やスポーツ科学分野の発展の一助となることを期待したい。

本研究には、いくつかの限界がある。まず、中等強度のトレーニング適応について検討したに過ぎず、生活活動レベルの超低強度においても発揮筋力と筋収縮の組合せによる差異が生じるか不明である。また、本研究は、有酸素性作業能の適応に関する呼吸代謝指標を中心に検討したに過ぎない。生化学的な手法を用いて骨格筋や血液を分析することによって骨格筋への酸素運搬に関する内呼吸系や骨格筋内のエネルギー代謝系の分析による解析が今後必要である。

第8章 総括

研究 1 では、MCMC 法を用いた多人数同時測定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。その結果、MCMC 法は、ゴールドスタンダードな方法である 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、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。その結果、50rpm で測定した LT 強度相当の同一仕事率において、40rpm 程度から 80rpm 未満のペダル回転数の運動は、ペダル回転数の違いによる呼吸循環応答へ影響が小さいことを示唆した。

研究 3 では、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。その結果、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、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。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が向上するものの、その全身性持久力を構成する詳細な機構には差異が生じる可能性が示唆された。

本研究は、有酸素性自転車運動のペダル回転数による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することを明らかにした。全身性の負荷が同程度であっても、特徴的なペダル回転数とそれに伴う特異的な発揮筋力による運動条件は、対象者のニーズに合わせた効率的な慢性適応を引き起こす可能性を示唆した。

第9章 公表論文目録

原著論文

Simultaneous multiple-subject analysis of respiratory gas exchange in humans.

Hirano M, Yamada Y, Hibi M, Katashima M, Higaki Y, Kiyonaga A, Tanaka H (2014)

J Phys Fitness Sports Med 3 (2) : 267-79.

原著論文

Effects of 2 weeks of low-intensity cycle training with different pedaling rates on the work rate at lactate threshold.

Hirano M, Shindo M, Mishima S, Morimura K, Higuchi Y, Yamada Y, Higaki Y,

Kiyonaga A (2015) Eur J Appl Physiol 115 (5) :1005-1013.

第10章 謝辞

本研究は、JSPS 科研費（19300224）、JSPS 科研費（26750317）及び公益財団法人日本科学協会 笹川科学研究助成金（24-637）の助成を受けたものです。

本論文の執筆、実験遂行にあたり多大なるご指導、ご鞭撻を賜りました福岡大学スポーツ科学部 進藤宗洋 名誉教授、清永明 名誉教授に心より感謝申し上げます。論文投稿にあたりご指導頂きました同学部 田中宏暁 教授、本論文の審査過程において多大なるご指導を賜りました檜垣靖樹 教授に深謝申し上げます。共同研究者として、実験計画や有益な議論をして頂いた株式会社 健康科学研究所 研究開発リーダー 松原建史 氏、同研究所 樋口慶亮 氏、福岡大学スポーツ科学部 森村和浩 助教に感謝致します。また、実験 及び数多く予備実験に被験者として、時には検者として快く協力して頂いた運動生理学研究室の大学院生、運動生理系のゼミに所属する学部生、福岡大学 基盤研究機関 身体活動研究所のスタッフの皆様に感謝いたします。最後に、研究生生活を様々な面で支えてくれた家族と両親に感謝致します。

第11章 引用文献

- Abe T, Kearns CF, Sato Y (2006) Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood from the leg muscle, Kaatsu-walk training. *J Appl Physiol* 100 (5) : 1460-1466.
- Ahlquist LE, Bassett DR Jr, Sufit R, Nagle FJ, Thomas DP (1992) The effect of pedaling frequency on glycogen depletion rates in type I and type II quadriceps muscle fibers during submaximal cycling exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 65 (4) : 360-364.
- American College of Sport Medicine. (2011) 運動処方指針. 運動負荷試験とプログラム. 南江堂.
- Arany Z, Foo SY, Ma Y, Ruas JL, Bommi-Reddy A, Girnun G, Cooper M, Laznik D, Chinsomboon J, Rangwala SM, Baek KH, Rosenzweig A, Spiegelman BM (2008) HIF-independent regulation of VEGF and angiogenesis by the transcriptional coactivator PGC-1 alpha. *Nature* 451 (7181) : 1008-1012.
- Åstrand PO, Ryhming I (1954) A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work. *J Appl Physiol* 7 (2) : 218-21.
- Banister EW, Jackson RC (1967) The effect of speed and load changes on oxygen intake for equivalent power output during bicycle aerometry. *Int. Z. angew. Physiol. einsch. Arbeitsphysiol* 24: 284-290.
- Bassett DE Jr, Howley ET, Thompson DL, King GA, Strath SJ, McLaughlin JE and Parr BB (2001) Validity of inspiratory and expiratory methods of measuring gas exchange with a computerized system. *J Appl Physiol* 91: 218-224.
- Belardinelli R, Barstow TJ, Porszasz J, Wasserman K (1995) Skeletal muscle oxygenation during constant work rate exercise. *Med Sci Sports Exerc* 27 (4) : 512-9.
- Borg G (1970) Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med* 2 (2) : 92-8.
- Bland JM and Altman DG (1986) Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 8: 307-310.
- Compher C, Frankenfield D, Keim N and Roth-Yousey L; Evidence Analysis Working

- Group (2006) Best practice methods to apply to measurement of resting metabolic rate in adult: a systematic review. *J Am Diet Assoc* 106: 881–903.
- Deschenes MR, Kraemer WJ, McCoy RW, Volek JS, Turner BM, Weinlein JC (2000) Muscle recruitment patterns regulate physiological responses during exercise of the same intensity. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 279 (6) : R2229-2236
- Donahoo WT, Levine JA and Melanson EL (2004) Variability in energy expenditure and its components. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 7: 599–605.
- Dotan R, Bar-Or O (1983) Load Optimization for the Wingate Anaerobic Test. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 51 (3) :409-417.
- Ferreira LF, Lutjemeier BJ, Townsend DK, Barstow TJ (2006) Effects of pedal frequency on estimated muscle microvascular O₂ extraction. *Eur J Appl Physiol* 96 (5) 558-563.
- Foss Ø and Hallén J (2005) Validity and stability of a computerized metabolic system with mixing chamber. *Int J Sports Med* 26: 569–575.
- Goodman JM, Liu, PP and Green HJ (2005) Left ventricular adaptations following short-term endurance training. *J Appl Physiol* 98: 454-460.
- Green HJ, Burnett M, Carter S, Jacobs I, Ranney D, Smith I, Tupling S (2013a) Role of exercise duration on metabolic adaptations in working muscle to short-term moderate-to-heavy aerobic-based cycle training. *Eur J Appl Physiol* 113 (8) : 1965-1978.
- Green HJ, Burnett M, Jacobs I, Ranney D, Smith I, Tupling S (2013b) Adaptations in muscle metabolic regulation require only a small dose of aerobic-based exercise. *Eur J Appl Physiol* 113: 313-324.
- Green HJ, Burnett ME, Smith IC, Tupling SM, Ranney DA (2009) Failure of hypoxia to exaggerate the metabolic stress in working muscle following short-term training. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 297 (3) : R593-604.
- Hawley JA, & Noakes TD (1992) Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 65 (1) : 79-83.
- Herbert L, Terry R, Gisela S (1980) Muscle metabolites, force, and perceived exertion bicycling at varying pedal rates. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 12 (5) :

345-351.

樋口 博之・勝村 俊仁・浜岡 隆文・佐古 隆之・下光 輝一 (1999) 漸増負荷運動における局所骨格筋の酸素化レベルの測定について. 日本運動生理学雑誌 6 (1) : 27-35.

Hirano M, Shindo M, Mishima S, Morimura K, Higuchi Y, Yamada Y, Higaki Y, Kiyonaga A (2015) 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) :1005-1013.

平野 雅巳・田中 守・清永 明・田中 宏暁・檜垣 靖樹 (2013) 4 基のトレッドミルを設置した大型流水プールの水流分布と縦列水中歩行時の呼吸代謝応答. 九州体育・スポーツ学研究 28 (1) :11-17.

Hirano M, Yamada Y, Hibi M, Katashima M, Higaki Y, Kiyonaga A, Tanaka H (2014) Simultaneous multiple-subject analysis of respiratory gas exchange in humans. *J Phys Fitness Sports Med* 3 (2) : 267-79.

Hoppeler H and Vogt M (2001) Muscle tissue adaptations to hypoxia. *J Exp Biol* 204 (18) : 3133-9.

生田 香明・猪飼 道夫 (1972) 自転車エルゴメーターによる Maximum Anaerobic Power の発達の研究. 体育学研究 17 (3) : 151-157.

Ivy JL, Withers RT, Van Handel PJ, Elger DH and Costill DL (1980) Muscle respiratory and fiber type as determinants of the lactate threshold. *J Appl Physiol* 48 (3) : 523-527.

Jensen K, Jørgensen S and Johansen L (2002) A metabolic cart for measurement of oxygen uptake during human exercise using inspiratory flow rate. *Eur J Appl Physiol* 87: 202-206.

Kanehisa, H, Miyashita M (1983) Effect of isometric and isokinetic muscle training on static strength and dynamic power. *Eur J Appl Physiol* 50: 365-371.

Kiyonaga A, Arakawa K, Tanaka H, Shindo M (1985) Blood pressure and hormonal responses to aerobic exercise. *Hypertension*. 7(1):125-132.

厚生労働省 (2013) 平成 25 年 我が国の保健統計. <http://www.mhlw.go.jp/toukei/list/130-25.html>. (2015.4.10)

厚生労働省 (2013) 運動基準・運動指針の改定に関する検討会 報告書.

<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xple-att/2r9852000002xpqt.pdf>

(2015.4.23)

黒部 一道・黄 忠・西脇 雅人・荻田 太 (2012) ペダリング負荷と速度の異なる組み合わせによるトレーニングプロトコールが最大無酸素性パワーと間欠的運動パフォーマンスに及ぼす影響. 九州体育・スポーツ学研究 26 (2) 27-33.

Löllgen H, Graham T, Sjogaard G (1980) Muscle metabolites, force, and perceived exertion bicycling at varying pedal rates. *Med Sci Sports Exerc* 12 (5) :345-351.

Marsh, A, P., and Martin, P, E., (1993) The association between cycling experience and preferred and most economical cadences. *Med Sci Sports Exerc* 25 (11) :1269-1274.

松原 建史・樋口 慶亮・峰 祐子・柳川 真美・山口 靖子・樋口 ゆう子・神宮 純江・進藤 宗洋・小池 城司 (2011) 健常女性における最大下運動時の二重積屈曲点と動脈スティフネスの関係. 体力科学 60 (2) :249-267.

松原 建史・前田 龍・樋口 慶亮・柳川 真美・樋口 ゆう子・山口 靖子・出口 美華・久保 邦子・進藤 宗洋・小池 城司 (2012) 全身持久力向上に伴う二重積屈曲点相当の心拍数の変化と年齢推定 50%VO₂max 相当の心拍数の妥当性. 体力科学 61 (3) 319-26.

Matsuda T, Kumahara H, Obara S, Kionaga A, Shindo M, Tanaka H (2010) The first heart sound immediately after exercise as an index of exercise stress. *International journal of sports and health science* 6: 213-218.

Medbø JI, Mamen A and Beltrami FG (2012) Examination of the Moxus Modular metabolic system by the Douglas-bag technique. *Appl Physiol Nutr Metab* 37: 860-871.

道下 竜馬・平野 雅巳・内野 香苗・筒井 佑・堤 康平・清永 明・田中 宏暁・檜垣 靖樹 (2013) 水中トレッドミルと陸上トレッドミルによる呼吸循環応答の差異. 臨床スポーツ医学 30 (3) :285-290.

Motoyama M, Sunami Y, Kinoshita F, Kiyonaga A, Tanaka H, Shindo M, Irie T, Urata H, Sasaki J, Arakawa K (1998) Blood pressure lowering effect of low intensity aerobic training in elderly hypertensive patients. *Med Sci Sports Exerc* 30 (6) :818-23.

Nishida Y, Higaki Y, Tokuyama K, Fjimi K, Kiyonaga A, Shindo M, Sato Y, Tanaka H (2001) Effect of mild exercise training on glucose effectiveness in healthy men.

- Diabetes Care 24(6):1008–1013
- Novak V, Hu K, Vyas M, Lipsitz LA (2007) Cardiolocomotor Coupling in Young and Elderly People. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 62(1): 86-92.
- 音成 道彦・松原 建史・内藤 聖子・劉 忠峰・大瀬 雄也・庄野 菜穂子・田中 守・清永 明・田中 宏暁・進藤 宗洋・立花 宏文・山田 耕路 (2003) 九大農学芸誌 58 (1・2) :19-26.
- Powers SK, Lawler J, Thompson D and Beadle R (1987) Measurement of oxygen uptake in the non-steady-state. *Aviat Space Environ Med* 58: 323–327.
- Rosdahl H, Lindberg T, Edin F and Nissson J (2013) The Moxus Modular metabolic system evaluated with two sensors for ventilation against the Douglas bag method. *Eur J Appl Physiol* 113: 1353-1367.
- Sawada SS, Lee IM, Naito H, Kakigi R, Goto S, Kanazawa M, Okamoto T, Tsukamoto K, Muto T, Tanaka H, Blair SN (2014) Cardiorespiratory fitness, body mass index, and cancer mortality: a cohort study of Japanese men. *BMC Public Health* 14: doi: 10.1186/1471-2458-14-1012.
- Sakamoto M, Higaki Y, Nishida Y, Kiyonaga A, Shindo M, Tokuyama K, Tanaka H (1999) Influence of mild exercise at the lactate threshold on glucose effectiveness. *J Appl Physiol* 87 (6) :2305–2310.
- 進藤 宗洋 (1990) 厚生省の「健康づくりのための運動所要量」について。-『身から錆を出さない、出させない』暮らし方の原理の提案-。保健の科学 32 (3) 139-156.
- Shono N, Urata H, Saltin B, Mizuno M, Harada T, Shindo M, Tanaka H (2002) Effects of low intensity aerobic training on skeletal muscle capillary and blood lipoprotein profiles. *J Atheroscler Thromb* 9 (1) :78–85.
- Sunami Y, Motoyama M, Kinoshita F, Sueta K, Matsunaga A, Sasaki J, Tanaka H, Shindo M (1999) Effects of low intensity aerobic training on the high-density lipoprotein cholesterol in healthy elderly subjects. *Metabolism* 48(8):984–988.
- Swain DP., & Leutholtz BC (1997) Heart rate reserve is equivalent to %VO₂ reserve, not to %VO₂max. *Med Sci Sports Exerc* 29 (3) : 410-414.
- Takaishi T, Sugiura T, Katayama K, Sato Y, Shima N, Yamamoto T, Moritani T (2002) Changes in blood volume and oxygenation level in a working muscle during a crank cycle. *Med. Sci. Sports. Exerc* 33 (3) : 520-528.

- Takaishi, T, Yasuda Y, Ono Takashi, Moritani T (1996) Optimal pedaling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 28 (12) :1492-1497.
- Tanaka H, Kiyonaga A, Terao Y, Ide K, Yamauchi M, Tanaka M, and Shindo M (1997) Double product response is accelerated above the blood lactate threshold. *Med Sci Sports Exerc* 29 (4) : 503-508.
- Tanaka H, Matsuda T, Tobina T, Yamada Y, Yamagishi T, Sakai H, Obara S (2013) Product of heart rate and first heart sound amplitude as an index of myocardial metabolic stress during graded exercise. *Circ J* 77:2736-41.
- Tanaka H, Morimura K, Shiose K (2012) An optimal exercise protocol for improving endurance performance and health. *J Phys Fitness Sports Med* 1 (4) : 595-604.
- Tanimoto M, Ishii N (2006) Effect of low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation on muscular function in young men. *J Appl Physiol* 100: 1150-1157.
- Thorsen T, Shriver T, Racine N, Richman BA, Schoeller DA (2011) Doubly labeled water analysis using cavity ring-down spectroscopy. *Rapid Commun Mass Spectrom.* 25 (1) : 3-8.
- Tokui M, Hirakoba K (2008) Estimation of oxygen cost of internal power during cycling exercise with changing pedal rate. *J Physiol Anthropol* 27 (3) :133-138.
- 對馬 明・高石 鉄雄・越智 亮・飯田 文彦・天木 充・矢野 茂樹 (2011) ペダル回転数の変化を伴う自転車運動が虚弱高齢者の下肢機能に及ぼす短期的効果. *理学療法学* 38(3) 188-193.
- Patterson MS, Chance B, Wilson BC (1989) Time resolved reflectance and transmittance for the noninvasive measurement of tissue optical properties. *Appl Optics* 28: 2331-2336.
- Podsiadlo D, Richardson S (1991) The timed “up” & “go”: A test of basic functional mobility for frail elderly persons. *J Am Geriatr Soc* 39: 142-148.
- 汪 立新・古川 貴仁・原 丈貴・中雄 勇人・鈴木 崇士・藤本 繁夫 (2005) 回転数・トルク数の調節が活動筋内の酸素動態およびエネルギー代謝に及ぼす影響. *体力科学* 54: 229-236.
- Wasserman K, Whipp BJ, Koysl SN, and Beaver WL (1973) Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 35 (2) :236-243.

- Wasserman K, Whipp BJ (1975) Exercise physiology in health and disease. *Am Rev Respir Dis* 112 (2) :219-249.
- Weir JB (1949) New methods for calculating metabolic rate: special reference to protein metabolism. *J Physiol* 109: 1-9.
- William PT (2001) Physical fitness and activity as separate heart disease risk factors: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 33 (5) : 754-61.
- Yoshimura E, Kumahara H, Tobina T, Ayabe M, Matono S, Anzai K, Higaki Y, Kiyonaga A, Tanaka H (2011) A 12-week aerobic exercise program without energy restriction improves intrahepatic fat, liver function and atherosclerosis-related factors. *Obes Res Clin Pract* 5 (3) :e249-257.