サイクリストと非サイクリストにおけるペダリング運動中の 大腿部の筋酸素化動態の比較

岩 川 孝 志¹⁾ 中 村 好 男²⁾ 村 岡 功²⁾

A COMPARISON OF CYCLISTS AND NON-CYCLISTS' THIGH MUSCLE OXYGENATION STATE DURING PEDALING

TAKASHI IWAKAWA, YOSHIO NAKAMURA and ISAO MURAOKA

Abstract

The purpose of this study was to compare the thigh muscle oxygenation state of competitive road cyclists and non-cyclists during varied pedaling frequency cycling. Six male college road cyclists (CY group) and five male students (NC group) performed four sets of cycling bouts, consisting of 2 minutes of warm up (60 rpm, 50 watts) followed by 5 minutes of pedaling (150 watts) using an electro-magnetic braked cycle ergometer at 40, 60, 90, and 120 rpm. Oxygenated hemoglobin and/or myoglobin (Oxy-Hb/Mb) and deoxygenated Hb/Mb (Deoxy-Hb/Mb) concentrations in the vastus lateralis were measured by near infrared spatially resolved spectroscopy. The Oxy-Hb/Mb level was significantly higher in the CY group than the NC group. But there was no significant interaction effect of the group and pedaling rate on the Oxy-Hb/Mb level. These results suggest that the changes in muscle oxygenation state according to pedaling cadence do not differ between cyclists and non-cyclists. And though the whole body work efficiency decreased according to increasing pedaling cadence, Oxy-Hb/Mb and Deoxy-Hb/Mb levels in the vastus lateralis remained unchanged up to 90 rpm. However, at 120 rpm, the Oxy-Hb/Mb level decreased remarkably and the Deoxy-Hb/Mb level increased. These results suggest that deoxygenation in the vastus lateralis at 120 rpm was higher than that for lower frequencies. And, conversely, oxygen uptake in the vastus lateralis might have increased steeply at 120 rpm. It may be that the maximum pedaling cadence that would not reduce work efficiency in the vastus lateralis is around 90 rpm.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2001, 50 : 491~500)

key word : cyclists, pedaling cadence, muscle oxygenation state

I. 緒 言

自転車ペダリング運動を一定仕事率で行う場合、様々なトルクやペダル回転数を選択することが可能である。そして、長距離種目を専門とする自転車競技選手ではこの時、酸素摂取量が最小となるペダル回転数(毎分50~60回転)^{1,2)}を選ぶのではなく、それよりも高いペダル回転数(毎分90~105回転)^{3~6)}を好んで選択することが知られている。その理由として、活動筋における筋張力

を減少させること^{5,7)}、グリコーゲンの枯渇を遅延させること⁸⁾、実際にペダルに発揮しなくてはならない踏力を低減させること^{9~12)}等が理由として挙げられて来た。しかし、現時点でも自転車競技選手がなぜエネルギー効率を低下させてしまうようなペダル回転数を選択するかについての明確な解答は得られているとは言えない。

Takaishi et al.^{13,14)} は、神経-筋疲労を始めとする末梢疲労を軽減させるために、自転車競技選手は高いペダル回転数を選択することを示唆して

¹⁾ 早稲田大学大学院人間科学研究科
〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15

²⁾ 早稲田大学人間科学部運動生理学研究室
〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15

Graduate School of Human Sciences, Waseda University, 2-579-15
Mikajima, Tokorozawa, Saitama, 359-1192, Japan

School of Human Sciences, Waseda University, 2-579-15 Mikajima,
Tokorozawa, Saitama, 359-1192, Japan

いる。彼らはその要因として高いペダル回転数においては発揮筋力が低いことから、低いペダル回転数と比較して、1) 筋内圧が低く血流状態が改善される、2) 遅筋線維の動員が多いという2つの可能性を推察している。

一般に、神経-筋疲労の推定は運動の継続に伴う積分筋電図の増加を観察することによって行われており、これは新たな運動単位の動員とインパルスの発射頻度の増加によるものといわれている^{15,16)}。これらの増加は一般的に、代謝産物の蓄積によるpHの低下によってもたらされると考えられている^{16,17)}が、Moritani et al.¹⁸⁾は、活動筋に対して動脈血流を遮断した場合に、運動単位のインパルス発射頻度とスパイク振幅値が増大したことから、活動筋に対する酸素供給の低下は運動単位の動員やrate codingを増大させることを示唆している。また、彼らはその原因として、動員閾値張力の低い有酸素的エネルギー供給に依存している運動単位に、発揮張力の低下が生じるためであると推察している。実際、Hogan et al.^{19~21)}およびStary and Hogan²²⁾は、利用可能な酸素水準の低下が筋細胞内のbioenergeticsや筋張力に影響する可能性を示唆している。このことから、活動筋における酸素需要と利用可能な酸素とのバランス、すなわち筋酸素化レベルは、神経-筋疲労の発現に関連している可能性が考えられる。

自転車運動では筋収縮がリズムカルになされることから、下肢筋によって筋ポンプ作用が発揮される^{23,24)}、下肢への血流は運動強度が増大するのと同じく増大して行く^{25,26)}。しかしながら、一定仕事率を保ったまま、筋張力と筋収縮頻度が変化する場合には、この筋ポンプ作用がどの様に変化するのかは明らかではない。また、Takaishi et al.^{13,14)}は低いペダル回転数と比較してペダル回転数が高くなれば、筋内圧も低下することから高回転時の筋血流量が増大する可能性を推察しているに過ぎない。

仮に、ペダル回転数が増した場合に筋血流量が増大しても、実際には自転車競技選手はペダリング頻度をある一定の範囲に保っており、ペダリング頻度を可能な限り高くしている訳ではない。ペ

ダリング頻度を増大させて、たとえ筋内圧を低下させたとしても、質量が一定である脚による内的仕事は増大する^{27,28)}。つまり、ペダリング頻度の増大によって、ペダルに対して行われる仕事率が一定であったとしても、活動筋での酸素消費量は増大することが予想される。従って、自転車競技選手がある一定範囲のペダル回転数を選択するということは、活動筋に対する血流状態つまり酸素供給と、活動筋での酸素需要のどちらか一方のみを優先させているためではないことを示しているといえる。

しかし、これまでペダル回転数を変化させた場合の活動筋での酸素需要、および酸素供給については共に検討されたことがほとんどない。唯一、実際にGotshall et al.²⁹⁾は同一仕事率でのペダリング運動において、ペダル回転数の増大に伴って酸素摂取量と心拍出量から算出されるwhole bodyの動静脈酸素較差はペダル回転数の増大によって低下することから、活動筋に対して血流量が増大したことを推察しているが、自転車運動中に全身にどのように血液配分が行われているかは明らかではなく、これらのデータは活動筋の情報を反映しているかは分からない。従って、本研究では、自転車競技選手群と対照群においてペダル回転数を変化させた場合の筋酸素化動態を比較検討することを目的とした。

Ⅱ. 方 法

A. 被験者

被験者は大学自転車部に所属する男子自転車選手6名(サイクリスト群)と、自転車競技を行っていない活動的な男子学生5名(非サイクリスト群)であった。彼らは、研究の目的と方法、実験に参加することによって生じ得る危険について十分な説明を受け、同意書に自らの自由意思で署名した上で実験に参加した。被験者の年齢および身体的な特徴を表-1に示した。

B. 実験プロトコール

実験は室温23℃、湿度50%に保たれた実験室内で行われた。被験者はまず、自転車エルゴメータ

Table 1. Physical characteristics of subjects.

Group	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)
Cyclist	21.0±0.8	172.4±1.9	69.0±3.4
Non cyclist	22.2±0.7	175.2±2.6	72.6±3.3

All values are expressed as mean±SEM.

(RS 232C Model 50 : コンビ) 上で, 心電図 (胸部双極誘導) 導出用塩化銀電極, 呼気ガス採取用マスク, 近赤外分光装置 (OM-200 : 島津製作所) のプローブを装着され, その後, 運動試行を行った. 運動試行は, 自転車エルゴメータ上での 2 分間の安静と 2 分間のウォーミングアップ, および 5 分間の本運動から成っていた. また運動終了後, 速やかに近赤外分光装置のプローブよりも近位部に大腿用血圧カフを装着して 300 Torr にまで加圧し, 測定部位への動脈血流量を約 4 分間停止させた.

ウォーミングアップはペダル回転数を毎分 60 回転とし, 50 Watt の仕事率で行わせた. また, 本運動での仕事率は 150 Watt とし, ペダル回転数を毎分 40, 60, 90, および 120 回転の 4 種類として, 計 4 試行を行った. 運動中, 被験者には自転車エルゴメータの制御部にデジタル表示されるペダル回転数を確認しながら, 目標のペダル回転数を保つように注意を促した. 試行順はランダムとした.

C. 測定項目

1. 酸素摂取量および心拍数の測定

ウォーミングアップ開始時から本運動終了まで, 酸素摂取量並びに心拍数の測定を行った. 酸素摂取量は呼気ガス分析装置 (RM-300 および MG-360 : ミナト医科学) を用いて測定し, 心拍数は胸部双極誘導によって得られた心電図記録 (CEC-8108 : 日本光電) から算出した.

2. 酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン, 脱酸素化ヘモグロビン/ミオグロビンの測定

本研究では, 4 波長 (690, 780, 805, 850 nm) の近赤外光 (Near infrared : NIR) を用いた近赤外分光装置の送光部と受光部とが一体となったプローブを, 被験者の左脚外側広筋筋腹部に相当する位置に装着して, 酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン (Oxygenated hemoglobin and/or myoglobin

: Oxy-Hb/Mb) 濃度, および脱酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン (Deoxygenated hemoglobin and/or myoglobin : Deoxy-Hb/Mb) 濃度の測定を, 自転車エルゴメータ上での安静開始時から行った.

本研究で用いた近赤外分光装置, OM-200 では空間分解法 (Spatially resolved spectroscopy : SRS) を用いて光散乱体である生体内の吸光係数 (μ_a) を算出して, Oxy-Hb/Mb 濃度, および Deoxy-Hb/Mb 濃度測定を行っている.

Farrel et al.³⁰⁾ の半無限媒体モデルにおける定常光に対する光拡散方程式の解を用いると, ある一点から光散乱体に照射された光の反射光量を求めることが出来る. 同時にある距離の異なった 2 点で実測される吸光度の差は, Farrel et al.³⁰⁾ の拡散方程式の解によって得られる反射光量を 2 点で算出して, それぞれ対数変換した後に比を求めることによって得ることが出来る. この比からは実行減数係数 (μ_{eff}) が導かれることから, 2 点の吸光度の差からも μ_{eff} を算出することが出来る. また実際には, μ_{eff} と 2 点間の吸光度の差は, ほぼ直線関係を示すことから, 一次式によってフィッティングが可能である. そこで, OM-200 では送光部からそれぞれ 25, 40 mm 距離の離れた点で吸光度を測定しており,

$$\mu_{eff} = 1.596 (Abs_{40mm} - Abs_{25mm}) - 0.7535$$

としている (ただし, Abs_{40mm} と Abs_{25mm} は, それぞれ送光部から 40 mm, 25 mm の地点で測定した吸光度). そこで OM-200 では μ_a と μ_{eff} の関係,

$$\mu_a = (\mu_{eff})^{2/3} \mu_s'$$

と (ただし, μ_s' : 補正拡散係数), μ_s' の光波長依存性から, ヘモグロビン濃度測定に用いた 780, 805, 830 nm の波長について 800 nm を基準としてそれぞれ 1.02, 0.995, 0.97 の係数を掛けることによって μ_s' を便宜的に計算から除外している. また, 筋組織は水分が 70% であると仮定して, 水分補正を行っている. 最後に, Wray et al.³¹⁾ のヘモグロビンの吸光係数を用い, 以下の式によって Oxy-Hb/Mb 濃度, および Deoxy-Hb/Mb 濃度をそれぞれ算出している.

Oxy-Hb/Mb=

$$-7.083 \mu a_{780} + 2.967 \mu a_{805} + 6.972 \mu a_{830}$$

Deoxy-Hb/Mb=

$$8.577 \mu a_{780} - 1.367 \mu a_{805} - 5.194 \mu a_{830}$$

(ただし, μa_{780} , μa_{805} , μa_{830} , はそれぞれ 780, 805, 830 nm の光波長を用いて測定された μa)

これらのヘモグロビンおよびミオグロビン濃度は真の μa を計算していないため, 単位を任意単位 (Arbitrary Unit : A. U.) としている.

D. データ処理

酸素摂取量, 心拍数, および NIR_{SRS} によって得られた各データは, 全ての試行の安静開始から 1 分までのデータを安静時のデータとした. また, 各本運動における最後の 1 分間の値を平均してその試行の値とした. さらに, NIR_{SRS} で測定された Oxy-Hb/Mb, および Deoxy-Hb/Mb については Hamaoka et al.³²⁾ の生体内阻血キャリブレーション法に従って, Oxy-Hb/Mb は動脈血流遮断時に見られた最低値, Deoxy-Hb/Mb は動脈血流遮断時に見られた最高値を基準として, データの標準化を行った.

E. 統計

各データは平均値±標準誤差で表した. 安静時, および各ペダル回転数における酸素摂取量, 心拍数および NIR_{SRS} によって得られたデータは, グループ(サイクリスト/非サイクリスト)×ペダル回転数(毎分40, 60, 90, 120回転)の二要因とその交互要因による二元配置の分散分析を行った後に, Fisher の最小有意差法による多重比較を Post hoc test として行った. 全ての検定において, 危険率が 5%未満をもって有意とした.

Ⅲ. 結 果

A. 酸素摂取量

図-1 に各試行での本運動における酸素摂取量を示した. 酸素摂取量はペダル回転数の増大に伴って増大した ($p < 0.01$) が, サイクリスト群と非サイクリスト群の間には, 有意な差は観察されなかった. また, グループとペダル回転数による交

Fig. 1. The oxygen uptake in both groups at rest and each pedaling rate.

互作用も有意なものではなかった.

B. 心拍数

図-2 に各試行での本運動における心拍数を示した. 非サイクリスト群の心拍数はサイクリスト群に比べ, 有意に高い値であった ($p < 0.01$). また, ペダル回転数の増大に伴って, 心拍数は上昇した ($p < 0.01$). しかし, 心拍数においても, グループとペダル回転数の交互作用は有意なものではなかった.

Fig. 2. The heart rate in both groups at rest and each pedaling rate.

C. Oxy-Hb/Mb, Deoxy-Hb/Mb

1. Oxy-Hb/Mb

図-3 に両群の各ペダル回転数における本運動での Oxy-Hb/Mb レベルの変化を示した. サイクリスト群では非サイクリスト群と比較して有意に高い値を示した ($p < 0.05$). 一方, 両群におい

Fig. 3. The means of Oxy-Hb/Mb level in both groups at rest and each pedaling rate.

でペダル回転数が増大すると、Oxy-Hb/Mb は有意に変化した ($p < 0.05$) が、毎分90回転まで有意な変化が見られなかった。しかし、ペダル回転数が毎分120回転まで増大した場合には、安静時、および他のどのペダル回転数と比較しても有意に低値を示した (vs. 安静時および毎分60回転: $p < 0.01$, vs. 毎分40回転および毎分90回転: $p < 0.05$)。ただし、Oxy-Hb/Mb において、グループとペダル回転数との間に有意な交互作用は観察されなかった。

2. Deoxy-Hb/Mb

図-4 に安静時および各ペダル回転数における Deoxy-Hb/Mb レベルの変化を示した。Deoxy-Hb/Mb においては両群に有意な差は見られなかった。また、ペダル回転数の変化に対して、Deoxy-Hb/Mb は有意に変化し ($p < 0.05$) たが、

Fig. 4. The means of Deoxy-Hb/Mb level in both groups at rest and each pedaling rate.

毎分90回転までは有意な変化が見られなかった。しかし、毎分120回転の場合には、安静時、および他のペダル回転数と比較しても有意に高値を示していた (vs. 安静時、毎分40回転および毎分90回転: $p < 0.01$, vs. 毎分60回転: $p < 0.05$)。しかし、Deoxy-Hb/Mb においても、グループとペダル回転数の間に有意な交互作用は観察されなかった。

Ⅳ. 考 察

A. サイクリストと非サイクリストの比較

本研究において、両群間における酸素摂取量には有意な差が観察されなかったものの、サイクリスト群と比較して、非サイクリスト群では心拍数が有意に高値を示していた。この結果は、両群間において有酸素性作業能力に差異があったことを示唆するものである。同一の絶対強度であれば、有酸素性作業能力が低い群では、高い群と比較して相対強度が高くなることは良く知られている。それゆえ、本研究では最大酸素摂取量の測定を行っていないが、非サイクリスト群は、サイクリスト群と比較して高い相対強度でのペダリング運動を行っていたものと考えられる。

確かに、Oxy-Hb/Mb はサイクリスト群と比較して非サイクリスト群では有意に低値を示していた。西尾たち³³⁾は 200 Watt のペダリング運動時の Oxy-Hb/Mb 濃度レベルを観察したところ、最大酸素摂取量が高い者ほど Oxy-Hb/Mb 濃度レベルの低下が小さかったことを示している。従って、有酸素性作業能力が両群で異なっていた可能性が考えられる。ただし、Oxy-Hb/Mb においてはグループとペダル回転数という二要因の間に交互作用は見られなかった。このことは、ペダル回転数の変化に対する Oxy-Hb/Mb の応答パターンは両群で同様であって、例えばどちらかの群で、ある特定のペダル回転数で特異的な応答が見られた訳ではないということを示すものである。しかし、両群に同一相対負荷を課した場合に、同一の結果が得られるか否かについては、更なる検討が必要であるように思われる。

両群において NIR_{SRS} によって測定された筋酸

素化動態でのペダル回転数に対する応答パターンが同一であるという本研究の結果は、自転車競技という運動形態への馴化によって、ペダリング動作時の筋血流状態、つまり酸素供給状態に特別な適応が発現する訳ではないということを意味するものである。これまで、自転車競技選手は自転車競技を行っていない者と比較して、高いペダル回転数を選択することが知られている^{3~6)}。しかしながら、ペダル回転数の変化に対する Oxy-Hb/Mb の応答パターンが同様であったことから、どちらか一方の群において特定のペダル回転数で Oxy-Hb/Mb が高くなるということはないものと考えられた。

Takaishi et al.^{13,14)} は、熟練したサイクリストを対象として、自転車ペダリング運動中の時間経過に伴う積分筋電図の傾きから神経-筋疲労を推定し、ペダル回転数が毎分80回転から90回転の場合にそれが最小となったことを報告している。この結果は、自転車競技選手が用いるような高いペダル回転数では、末梢の疲労が軽減されることを示唆するものである。彼らは、その理由として、1) ペダル回転数の増加に伴う筋張力の低下によって、筋内圧が低下し筋血流が確保されること、2) 筋線維タイプの動員パターンがペダル回転数の増加に応じて異なる、という二つの要因を挙げている。

本研究の結果はこの第一の要因に対して一つの解答を与えるものと思われる。つまり、第一の要因については、ペダル回転数の増加によって活動筋に対する酸素供給の増大が起こるという想定によるものであった。しかし、本研究における毎分90回転のペダリングでの Oxy-Hb/Mb は、毎分40回転や60回転と比較して有意な変化を示さなかった。このことから毎分90回転では酸素供給が特異的に増大することは考えられない。また、サイクリスト群と非サイクリスト群との差異という観点に立ったとしても、Oxy-Hb/Mb にペダル回転数とグループの交互作用は観察されなかった。従って、ペダル回転数に対する応答パターンは両群で同様であったといえ、毎分90回転でのペダリングにおいて活動筋に対する酸素供給状態が改善され

たことによって、神経-筋疲労が他のペダル回転数よりも軽減されるという現象が、自転車競技選手だけに発現するとは考え難いと思われた。

B. ペダル回転数の変化に対する筋酸素化動態の応答

一定仕事率でペダリング運動を行う際にペダル回転数を増加させると、クランクに対して発揮される有効踏力(クランクトルク)は減少するものの、ペダリング動作そのものによる仕事(内的仕事)は増大する。本研究でも毎分40回転から120回転の範囲で、ペダル回転数の増大に応じて両群ともに酸素摂取量の増大が観察された(図-1)。このことは Wells et al.²⁷⁾ や Francescato et al.²⁸⁾ が示すように内的仕事の増大を反映したものであると考えられる。

ペダリング運動の主動筋である外側広筋の Oxy-Hb/Mb は、ペダリング頻度を毎分120回転にまで増大させると、安静時および他のどのペダル回転数と比較しても有意に低下した(図-3)。Deoxy-Hb/Mb はペダリング頻度を毎分120回転に増大させると、安静時、および他のどのペダル回転数と比較しても有意に高い値を示した(図-4)。

ペダリング運動時における全身の酸素摂取量は、そのほとんどが活動肢である脚に由来するものである²⁶⁾。本研究において酸素摂取量は毎分40回転時と毎分60回転時との間にのみ有意な差が見られなかったものの、ペダル回転数の増大によって徐々に増大した。従って、150 Watt での一定仕事量の自転車運動においてペダリング頻度を増大させて行くと毎分90回転程度までは、徐々に活動筋において酸素消費が増大したことが予想される。一方で、同時に酸素供給が増大することによって Oxy-Hb/Mb はほぼ同じレベルに保たれたことが考えられた。一定仕事率での自転車運動においてペダリング頻度の増大はペダルに発揮すべき踏力を減少させることから、高いペダリング頻度は筋内圧を低下させ、筋血流を充進させる可能性も考えられる。このことが Oxy-Hb/Mb が維持されたことに貢献していたかも知れない。

また, Gotshall et al.²⁹⁾は同一仕事率でのベダリング運動において, ペダル回転数の増大に伴って酸素摂取量の増大に見合わない心拍出量の増大を観察している. このことから, 彼らはペダル回転数の増大に伴う筋ポンプ作用の増強が, 血液循環を改善したのではないかと示唆している. この時, 心拍出量と酸素摂取量から算出される whole body の動静脈酸素較差はペダル回転数の増大によって減少していることから, 活動筋の酸素消費に対して活動筋の血流量が多かった可能性が示唆されている. 本研究の結果, ペダル回転数の増加に伴って活動筋の酸素消費の増大が予想される一方で, 毎分90回転程度まで Oxy-Hb/Mb が維持されていた. このことは, Gotshall et al.²⁹⁾の知見からは酸素需要量の増大に応じた心拍出量の増大と, ペダル回転数の増大に伴う筋ポンプ作用の亢進によって脚への血流量が増え, その結果として酸素需要と酸素供給のバランスが維持されたためであると説明できる.

しかしながら, Gotshall et al.²⁹⁾は毎分110回転まで心拍出量と酸素摂取量から算出される whole body の動静脈酸素較差が低下していることを示しており, このことから毎分110回転程度までにペダル回転数を増大させても活動筋に対する血流量は増大する可能性を示唆している. 本研究の結果は毎分120回転にまでペダル回転数を増大させると, 活動筋においては利用できる酸素量が減少することを示唆するものであり, ペダル回転数が全く同じではないとは言え, この知見と一致しないように思われる. しかしながら, Gotshall et al.²⁹⁾の主張は全身を対象にした指標から得られたものであり, 実際に脚の動静脈酸素較差を観察した訳ではない. 本研究はそれに対して, 自転車運動の主動筋である外側広筋を対象にしている. 従って, このような違いは観察している対象が全身と活動筋である外側広筋部というように異なっていることによるのかも知れない.

一定仕事率でペダル回転数を増大させて行くと外側広筋の筋放電量は直線的に増大するという報告 (Goto et al.³⁴⁾, 青木たち³⁵⁾)が見られる一方で, 大殿筋 (Goto et al.³⁴⁾) や前脛骨筋 (青木たち³⁵⁾) の

筋放電量はペダル回転数が増大すると指数関数的に増大するとの報告もある. このことから, 同一肢体内の筋であってもペダル回転数の増大に対してその筋活動は異なる応答をしていることが考えられる. また, このような異なった筋活動をしている同一肢体内のそれぞれの活動筋に対して, どのように血流が配分されているかは明らかではない.

動的掌握運動においては高強度になるに従って, 尺側手根屈筋の筋放電量よりも, 腕橈骨筋の筋放電量が増大して来ることが報告されている³⁶⁾. この時, 組織酸素飽和度の低下は尺側手根屈筋よりも, 腕橈骨筋で大きかった. また, 比較的低い強度では筋活動が増大しても, どちらの筋でも組織酸素飽和度の変化は小さかった. このことから, 活動肢体内では代謝要求が増大すると, 血流の分配を行うよりも, 各部位での酸素取り込みを必要に応じて増大させていることが示唆されている³⁶⁾. 従って, 必ずしも同一肢体内において, 異なる各部分の代謝応答に見合うように血流が厳密に調節されている訳ではないことが予想され, 同時にこの肢体内の各部での酸素取り込みの違いは代謝需要が高くなった場合に, より顕著になることも考えられる.

毎分120回転においては安静時, および他のどのペダル回転数と比較しても Oxy-Hb/Mb は低値を示し, Deoxy-Hb/Mb は高値を示していた. 従って, 毎分120回転でのベダリング時には脱酸素化が亢進しており, 外側広筋での酸素消費は他のペダル回転数と比較して顕著に増大していたことが示唆される. 逆に毎分90回転までに注目すれば, ベダリング頻度の増加によって全身の運動効率は低下しつつあると考えられるものの, 外側広筋部では効率に大きな変化はなく, 毎分90回転前後は急にそれが大きく低下する直前の最も高いペダル回転数であるとも考えられるだろう.

V. 要 約

本研究では自転車ベダリング運動中の活動筋における筋酸素化動態を自転車競技選と一般学生とで比較した. 被験者として大学自転車部員 6 名 (サ

イクリスト群)と一般学生5名(非サイクリスト群)を用いた。被験者には自転車エルゴメータ上で2分間の安静を保たせた後, 50 Watt でのウォーミングアップを2分間, 引き続いて150 Watt での本運動を5分間行わせた。ただし, 本運動でのペダル回転数は40, 60, 90, および120 rpm の4種類とし, それぞれを1試行ずつ計4試行を行った。また, どの試行においてもウォーミングアップ時のペダル回転数は60 rpm とした。安静時から運動終了まで左脚外側広筋部の筋酸素化動態を近赤外空間分解法によって測定した。

Oxy-Hb/Mb はサイクリスト群で非サイクリスト群と比較して有意に高い値を示したが, 群とペダル回転数による有意な交互作用は観察されなかった。従って, ペダル回転数の変化に対する筋酸素化動態の応答には, 両群で違いがないことが示唆された。

またペダリング頻度の増大に伴って全身の酸素消費量は増大し, エネルギー効率が低下する一方で, Oxy-Hb/Mb はペダル回転数が毎分90回転までは有意な変化がなく, 毎分120回転に達すると安静時, および他のどのペダル回転数と比較しても有意に低値を示した。さらに, Deoxy-Hb/Mb も同様にペダル回転数が毎分90回転に達するまでは有意な変化はなく, 毎分120回転に達すると安静時, および他のペダル回転数と比較して有意に増大した。

このことから, 毎分120回転では外側広筋部において脱酸素化が亢進したものと考えられ, 毎分120回転では外側広筋において酸素消費が, 低い回転数と比較して急増したことが示唆された。このことは逆に, 毎分120回転前後にペダル回転数を増大させると, 外側広筋での効率が大きく低下する可能性を示しており, 外側広筋での効率を急に低下させない最も高いペダル回転数は毎分90回転前後で発現すると思われる。

謝 辞

本稿を終えるにあたり, 実験に協力していただいた中田真琴氏(G. S. NOKO ムラヤマ)に深謝するとともに, 本論文の作成に有益な助言をいただいた網澤義夫

氏(島津製作所)に感謝の意を表します。

(受理日 平成13年5月17日)

参 考 文 献

- 1) Gaesser, G. A., & Brooks, G. A. Muscular efficiency during steady-rate exercise : effects of speed and work rate. *J. Appl. Physiol.*, (1975), **38**, 1132-1139.
- 2) Coast, J. R., & Welch, H. G. Linear increase in optimal pedaling rate with increased power output in cycle ergometry. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1985), **53**, 339-342.
- 3) Hagberg, J. M., Mullin, J. P., Giese, M. D., & Spitznagle, E. Effect of pedaling rate on submaximal exercise responses of competitive cyclists. *J. Appl. Physiol.* (1981), **51**, 447-451.
- 4) Marsh, A. P., & Martin, P. E. Effect of cycling experience, aerobic power, and power output on preferred and most economical cycling cadences. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1997), **29**, 1225-1232.
- 5) Patterson, R. P., & Moreno, M. I. Bicycle pedalling forces as a function of pedalling rate and power output. *Med. Sci. Sports and Exerc.*, (1990), **22**, 512-516.
- 6) Sargeant, A. J. Human power output and muscle fatigue. *Int. J. Sports Med.*, (1994), **15**, 116-121.
- 7) Patterson, R. P., Pearson, J. L., & Fisher, S. V. The influence of flywheel weight and pedalling frequency on the biomechanics and physiological responses to bicycle exercise. *Ergonomics.*, (1983), **26**, 659-668.
- 8) Ahlquist, L. E., Bassett Jr, D. R., Sufit, R., Nagle, F. J., & Thomas, D. P. 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.*, (1992), **65**, 360-364.
- 9) Ericson, M. O., & Nisell, R. Efficiency of pedal forces during ergometer cycling. *Int J. Sports. Med.*, (1988), **9**, 118-122.
- 10) Kautz, S. A., Feltner, M. E., Coyle, E. F., & Baylor, A. M. The pedaling technique of elite endurance cyclists ; changes with increasing workload at constant cadence. *Int. J. Sports Biomech.*, (1991), **7**, 29-53.
- 11) Sanderson, D. J. The influence of cadence and power output on the biomechanics of force application during steady-rate cycling in competitive and recreational cyclists. *J. Sports. Sci.*, (1991), **9**, 191-203.
- 12) Radmaker, A. C. H. J., Zoladz, J., & Sargeant, A. J. Effect of prolonged exercise performed at different movement frequencies on maximal short-term power output in humans. *J. Physiol.*, (1994), **475**, 23P.
- 13) Takaishi, T., Yasuda, Y., Ono, T., & Moritani, T. Optimal pedaling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.*,

- (1996), **28**, 1492-1497.
- 14) Takaishi, T., Yamamoto, T., Ono, T., Ito, T., & Moritani, T. Neuromuscular, metabolic, and kinetic adaptations for skilled pedaling performance in cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1998), **30**, 442-449.
 - 15) Maton, B. Human motor unit activity during onset of muscle fatigue in submaximal isometric isotonic contractions. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1981), **46**, 271-281.
 - 16) Moritani, T., Muro, M., & Nagata, A. Intramuscular and surface electromyogram changes during muscle fatigue. *J. Appl. Physiol.*, (1986), **60**, 1179-1185.
 - 17) Nakamura, Y. & Schwartz, A. The influence of hydrogen ion concentration on calcium binding and release by skeletal muscle sarcoplasmic reticulum. *J. Gen. Physiol.*, (1972), **59**, 22-32.
 - 18) Moritani, T., Sherman, W. M., Shibata, M., Matsumoto, T., & Shinohara, M. Oxygen availability and motor unit activity in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1992), **64**, 552-556.
 - 19) Hogan, M. C., Kurdak, S. S., & Arthur, P. G. Effect of gradual reduction in O₂ delivery on intercellular homeostasis in contracting skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.*, (1996), **80**, 1313-1321.
 - 20) Hogan, M. C., Gladden, L. B., Grassi, B., Stary, C. M., & Samaja, M. Bioenergetics of contracting skeletal muscle after partial reduction of blood flow. *J. Appl. Physiol.*, (1998), **84**, 1882-1888.
 - 21) Hogan, M. C., Richardson, R. S., and Haseler, L. J. Human muscle performance and PCr hydrolysis with varied inspired oxygen fractions: a ³¹P-MRS study. *J. Appl. Physiol.*, (1999), **86**, 1367-1373.
 - 22) Stary, C. M., & Hogan, M. C. Impairment of Ca²⁺ release in single *Xenopus* muscle fibers fatigued at varied extracellular PO₂. *J. Appl. Physiol.*, (2000), **88**, 1743-1748.
 - 23) 西保 岳, 池上 晴夫, 筋ポンプが血液循環動態に及ぼす影響, 体力科学, (1985), **34**, 167-175.
 - 24) 西保 岳, 姜 熙成, 池上晴夫, 筋ポンプが血液循環動態に及ぼす影響(第2報), 体力科学, (1985), **34**, 284-293.
 - 25) Sullivan, M. J., Binkley, P. K., Unverferth, D. V., & Leier, C. V. Hemodynamic and metabolic responses of exercising lower limb of humans. *J. Lab. Clin. Med.*, (1987), **110**, 145-152.
 - 26) Knight, D. R., Poole, D. C., Schaffartzik, W., Guy, H. J., Prediletto, R. P., Hogan, M. C., & Wagner, P. D. Relationship between body and leg VO₂ during cycle ergometry. *J. Appl. Physiol.*, (1992), **73**, 1114-1121.
 - 27) Wells, R., Morrissey, M., & Hughson, R. Internal work and physiological responses during concentric and eccentric cycle ergometry. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1986), **55**, 295-301.
 - 28) Francescato, M. P., Girardis, M. & di Prampero, P. E. Oxygen cost of internal work during cycling. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1995), **72**, 51-57.
 - 29) Gotshall, R. W., Bauer, T. A., & Fahrner, S. L. Cycling cadence alters exercise hemodynamics. *Int. J. Sports. Med.*, (1996), **17**, 17-21.
 - 30) Farrell, T. J., & Patterson, M. S. A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties in vivo. *Am. Assoc. Phys. Med.*, (1992), **19**, 879-888.
 - 31) Wray, S., Cope, M., Delpy, D. T., Wyatt, J. S., & Reynolds, E. O. Characterization of the near infrared absorption spectra of cytochrome aa3 and haemoglobin for the non-invasive monitoring of cerebral oxygenation. *Biochim Biophys Acta.*, (1988), **30**, 184-92.
 - 32) Hamaoka, T., McCully, K., Chance, B., & Iwase, H. Non-invasive measures of muscle metabolism. In : Sen, C. K., Packer, L. & Hanninen, O. Eds., *Exercise and Oxygen toxicity*, Elsevier Science, Amsterdam, (1992), 481-510.
 - 33) 西尾進也, 勝村俊仁, 浜岡隆文, 長田卓也, 下光輝一, 自転車運動時の下肢筋の酸素濃度変化の非侵襲的測定, 臨床スポーツ医学, (1997), **14**, 659-663.
 - 34) Goto, S., Toyoshima, S., & Hoshikawa, T. Study of the integrated EMG of leg muscles during pedaling at various loads frequency and equivalent power. In Komi, P.V. eds. *Biomechanics V-A*, University Park Press, Baltimore, (1975), 246-252.
 - 35) 青木純一郎, 形本静夫, 村岡功, 島谷美智子, 中村好男, 井口文雄, 岡田純一, 木暮勇男, ベダリングスピードおよび負荷が下肢の筋活動に及ぼす影響, 平成3年度日本体育協会スポーツ医・科学班研究報告. No II. 競技種目別競技力向上に関する研究. No.18 自転車. 第15報., (1991), 219-225.
 - 36) Homma, S. & Kagaya, A. Detection of oxygen consumption in different forearm muscles during hand-grip exercise by spatially resolved NIR spectroscopy. In Harrison, D.K., & Delpy, D. T. eds., *Oxygen transport to tissue XIX.*, Plenum Press, New York., (1997), 327-332.