

## 原 著

低強度自転車運動時のペダル回転数が  
局所活動筋酸素動態に及ぼす影響馬屋原 康 高<sup>1</sup>

## 抄 録

本研究は、健常男子学生8名を対象として低強度自転車運動時のペダル回転数が局所活動筋酸素動態に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。運動負荷は、仕事率80 Wで6分間の一定負荷をペダル回転数40, 80, 120 rpmの3通りとし、運動中の呼吸循環応答、外側広筋の筋活動および近赤外分光法を用いて筋酸素動態を測定した。その結果、120 rpmでの回転数に比し、外側広筋の筋活動量や全身の酸素摂取量が有意に増加した。また、外側広筋のtotal Hbには3群間で有意な変化が認められず、120 rpmでoxy Hbの有意な減少、deoxy Hbの有意な増加が認められたことから、120 rpmでは活動筋における酸素消費の増加が示唆された。これらのことから、同一仕事率でもペダル回転数の増加に伴い、筋活動量が増加したことで活動筋での酸素消費も増加し、結果的に全身の酸素摂取量が増加するものと考えられる。

**Key words:** 自転車運動, ペダル回転数, 近赤外分光法, 筋酸素動態

## 1 はじめに

自転車運動は、スポーツ分野だけでなく心疾患患者、呼吸器疾患患者などの有疾患患者を対象とした運動療法的手段としても臨床的に多く用いられている。また自転車エルゴメーターを用いたペダリング運動の特徴は、ペダルにかかる荷重負荷(kp)とペダル回転数(rpm)を対象の身体能力に合わせて自由に設定することができることである。一般に運動療法で用いられているペダル回転数は50 rpmまたは60 rpmである。先行研究<sup>1)-4)</sup>によると、ペダル回転数50～60 rpmで酸素摂取量( $\dot{V}O_2$ )が最

小となり、ペダル回転数を上昇させれば $\dot{V}O_2$ は増加するということはすでに明らかになっている。その運動生理学的なメカニズムについて、運動効率の観点から呼吸循環応答や筋電図変化を検討した報告がみられる<sup>3) 4)</sup>。

先行研究では、高仕事率の自転車運動においてペダル回転数60 rpmで $\dot{V}O_2$ や主動作筋の一つである外側広筋の筋活動量は最も低値で、さらにペダル回転数の増加に伴い $\dot{V}O_2$ や筋活動量は増加すると報告されている<sup>3) 4)</sup>。一方、近年では、近赤外分光法(NIRS: near-infrared spectroscopy)を用い継続的な筋酸素動態を非侵襲的に測定することが可能となった。Kawaguchiら<sup>5)</sup>は、NIRSを用いて測定した外側広筋における酸素動態は全身の酸素摂取量と強い相関を認めたことから、活動筋の酸素動態は全身の酸素摂取量を反映すると報告している。した

受稿: 2016年5月2日 受理: 2017年4月10日

<sup>1</sup> 広島都市学園大学健康科学部リハビリテーション学科  
理学療法学専攻  
広島県広島市安佐南区大塚東3丁目2-1

がって、ペダル回転数が全身の酸素摂取量だけでなく活動筋の酸素動態に何らかの影響を及ぼすのではないかと考えられる。しかし、低仕事率の自転車運動時のペダル回転数が呼吸循環応答や筋活動量のみならず、活動筋における酸素動態に与える影響について検討した報告はない。そこで本研究は、自転車運動時のペダル回転数が局所活動筋酸素動態に与える影響について明らかにすることを目的として、仕事率 80 W の一定負荷をペダル回転数 40 rpm, 80 rpm および 120 rpm の 3 種類行った。また、呼気ガス分析および表面筋電図を用いて運動生理学的に考察した。

## 2 対 象

対象は、心肺機能に異常のない健常男子大学生 8 名（年齢： $23.6 \pm 1.2$  歳，身長： $173.8 \pm 6.3$  cm，体重： $67.0 \pm 7.4$  kg，最大酸素摂取量： $38.5 \pm 5.3$  ml /min/kg）とした。

## 3 方 法

### 3.1 運動負荷

運動負荷は、自転車エルゴメーター（Ergo Medic 818・Monark 社）を用い、6 分間の一定負荷（80 W）を実施した。この場合のペダル回転数を 40 rpm, 80 rpm および 120 rpm の 3 通りとした（Table 1）。事前に運動負荷試験を行い、全ての被検者において、80 W が低強度負荷とされる  $40\% \dot{V}O_{2\max}$  未満で<sup>6)</sup>、かつ無酸素性作業域値以下の運動負荷量であることを確認した。

Table 1 仕事率 80 W 時のペダル回転数とペダル負荷量の設定

ペダル回転数	40 rpm	80 rpm	120 rpm
ペダル負荷量	2.0 kp	1.0 kp	0.67 kp

### 3.2 呼気ガス測定および解析方法

呼気ガス分析装置（AE-280S・ミナト医科学社）および心電図モニター（DS-3140・フクダ電子社）を使用し、 $\dot{V}O_2$ 、分時換気量（ $\dot{V}E$ ）、心拍数（HR）の呼吸循環諸量を breath by breath 方式で連続記録した。また、 $\dot{V}O_2$  を HR で除し一回拍出量の目安とされている酸素脈（ $O_2$ -pulse）を算出した。呼吸

循環諸量は、運動終了前 30 秒間の平均値を算出し各ペダル回転数における代表値とした。

### 3.3 下肢筋における筋活動量の測定および解析方法

表面筋電図を用いて自転車運動時における下肢筋（外側広筋、前脛骨筋、ハムストリングスおよび腓腹筋）の筋活動量を測定した。得られたデータは A/D 変換器を介し、サンプリング周波数 1k Hz でパーソナルコンピュータに取り込み、解析を行った。また得られたデータより運動終了前 30 秒間での積分筋電図（iEMG）を算出し各ペダル回転数における筋活動量の代表値とした。

### 3.4 筋酸素動態の測定および解析方法

筋酸素動態の測定には、近赤外分光法（NIRS）装置（BOM-L1TR・オメガウエーブ社）を用い外側広筋における組織酸素化ヘモグロビン（oxy Hb）、組織脱酸素化ヘモグロビン（deoxy Hb）および全ヘモグロビン（total Hb：total Hb = oxy Hb + deoxy Hb）を測定した。NIRS は oxy Hb と deoxy Hb の吸光度特性を利用することにより、組織での酸素動態を測定するものである。波長の異なる 3 種類の近赤外光（780, 810, 830 nm）を測定光とし光ファイバーを通して組織に照射した。NIRS のプローブは外側広筋筋腹に装着し、プローブの発光部と受光部の間隔は 30 mm とした。得られたデータは A/D 変換器（Mac Lab 8S・A/D Instrument 社）を介し、サンプリング周波数 10 Hz でパーソナルコンピュータに取り込み、解析を行った（Fig. 1）。また各データは、

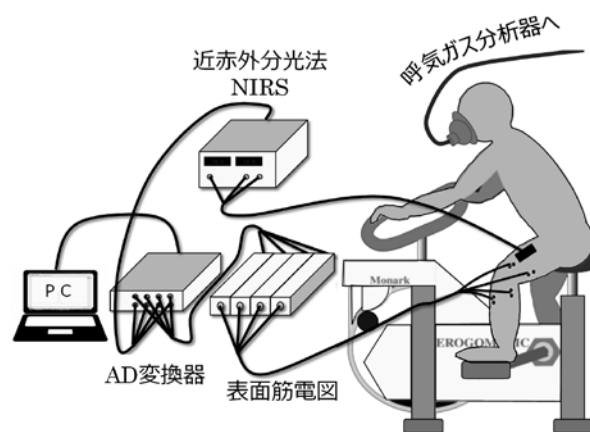


Fig. 1 測定方法

安静時を 100%とした相対値を算出して表し、運動終了前 30 秒間の平均値を算出し各ペダル回転数における代表値とした (Fig. 2)。

### 3.5 統計処理

得られたデータは全て平均値±標準偏差で表した。統計処理には統計ソフト (StatView 5.0・SAS Institute Inc) を使用した。各測定値の回転数の違いによる比較は、一元配置分散分析を用い、多重比較は Fisher の PLSD 法を用いた。また、統計学的有意水準は危険率 5 %未満とした。

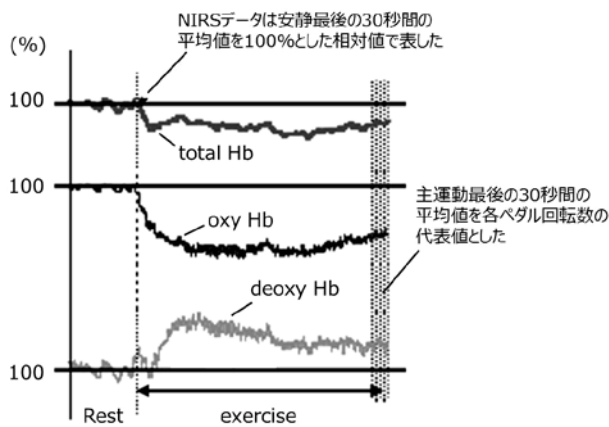


Fig. 2 各NIRSデータの解析方法

### 3.6 倫理的配慮

本研究は、ヘルシンキ宣言を遵守し実施した。被検者に対し書面および口頭にて研究内容に関して十分な説明を行い、書面による同意を得た。

## 4 結 果 (Table 2)

### 4.1 呼吸循環諸量

呼吸循環諸量の結果について、Table 2 に示す。 $\dot{V}O_2$  は、120 rpm において 40 rpm および 80 rpm に比べ有意に増加した ( $p < 0.01$ )。また、 $\dot{V}E$  および HR は、120 rpm において 40 rpm および 80 rpm に比べ有意に増加した ( $p < 0.01$ )。さらに、一回心拍出量を反映している  $O_2$ -pulse は、120 rpm において 40 rpm および 80 rpm に比べ有意に増加した ( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ )。しかし、全ての換気諸量において、40 rpm と 80 rpm の間に有意な変化を示さなかった。

### 4.2 筋活動量

筋活動量の結果について、Table 2 に示す。外側広筋、前脛骨筋、ハムストリングスにおける一定負荷最後の 30 秒間の iEMG は、40 rpm と 80 rpm の間に有意な差を示さなかったが、120 rpm において

Table 2 各ペダル回転数における測定結果とその 3 群間の比較 (一元配置分散分析)

測定項目	ペダル回転数		
	40 rpm	80 rpm	120 rpm
呼吸循環諸量			
$\dot{V}O_2$ (ml/min)	980 ± 55	1,138 ± 99	1,561 ± 305 <sup>*,††</sup>
$\dot{V}E$ (l/min)	22.2 ± 3.2	33.6 ± 3.5	52.8 ± 9.5 <sup>*,††</sup>
HR (bpm)	111 ± 10.0	117 ± 9.7	143 ± 10.9 <sup>*,††</sup>
$O_2$ -pulse (ml/min/bpm)	9.5 ± 1.1	9.9 ± 1.2	11.6 ± 1.9 <sup>*,†</sup>
筋活動量 ( $\mu V \cdot s$ )			
iEMG 外側広筋	1,040 ± 220	1,111 ± 282	1,459 ± 429 <sup>*,†</sup>
iEMG 前脛骨筋	376 ± 172	392 ± 151	1,027 ± 438 <sup>*,††</sup>
iEMG 内側ハムストリングス	498 ± 240	388 ± 226	835 ± 438 <sup>*,††</sup>
iEMG 腓腹筋	748 ± 250	951 ± 445	1,253 ± 754
外側広筋における局所筋酸素動態 (%)			
oxy Hb	1.9 ± 3.1	- 3.4 ± 3.9 <sup>*</sup>	- 11.4 ± 5.7 <sup>*,††</sup>
deoxy Hb	- 3.3 ± 5.1	3.3 ± 7.3	17.2 ± 10.8 <sup>*,††</sup>
total Hb	0.6 ± 2.5	1.1 ± 3.7	2.0 ± 3.3

<sup>\*,†</sup>:  $p < 0.05$     <sup>\*,††</sup>:  $p < 0.01$

<sup>\*</sup>: 80 rpm, 120 rpm vs 40 rpm

<sup>†</sup>: 120 rpm vs 80 rpm

平均値±標準偏差

40 rpm および 80 rpm に比べ有意に増加した ( $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$ )。しかし、腓腹筋における筋活動量は、ペダル回転数の変化による有意差を示さなかった。

#### 4.3 外側広筋における筋酸素動態

外側広筋における局所筋酸素動態を Table 2 に示す。total Hb は、ペダル回転数の変化による有意差は示さなかった。また oxy Hb は、80 rpm において 40 rpm に比べ有意に減少し ( $p < 0.05$ )、120 rpm においても 40 rpm および 80 rpm に比し有意に減少した ( $p < 0.01$ )。さらに deoxy Hb は、40 rpm と 80 rpm の間に有意差を示さなかったが、120 rpm において 40 rpm および 80 rpm に比べ有意に増加した ( $p < 0.01$ )。

### 5 考 察

本研究は、健常男子学生 8 名を対象として低強度自転車運動時のペダル回転数が局所活動筋酸素動態に及ぼす影響について明らかにするため、仕事率 80 W の一定負荷をペダル回転数 40, 80, 120 rpm の 3 通り実施し、運動中の呼吸循環応答、外側広筋の筋活動および NIRS を用いて筋酸素動態を測定した。

#### 5.1 ペダル回転数の増加が全身の酸素摂取量に及ぼす影響

80 W の低強度な自転車運動においても  $\dot{V}O_2$  は 120 rpm において他のペダル回転数に比べ有意に増加した。また、120 rpm では他のペダル回転数に比べ  $\dot{V}E$  が有意に増加したことから呼吸仕事量の増加が考えられる。さらに、ペダル回転数の増加に伴い外側広筋における筋活動量は増加した。これらの結果は、Takaishi ら<sup>4)</sup> の非サイクリストにおける高強度運動時の結果と一致した。本研究の被検者も非サイクリストであった。さらに 120 rpm では他のペダル回転数に比べ、外側広筋、前脛骨筋およびハムストリングスの筋活動量は有意に増加した。したがって、120 rpm では、呼吸仕事量や下肢筋の全体的な筋活動量が増加したことで、結果的に  $\dot{V}O_2$  は増加したのではないかと考えられる。

#### 5.2 ペダル回転数の増加が局所活動筋酸素動態に及ぼす影響

一般に NIRS で測定された酸素動態は、組織での酸素消費と酸素供給のバランスを反映するため、酸素消費が供給を上回れば oxy Hb は低下し、酸素供給が消費を上回れば oxy Hb は増加するとされている。岩川ら<sup>7)</sup>は、150 W のペダリング運動を 40 rpm, 60 rpm, 90 rpm および 120 rpm の 4 通り行い、120 rpm では他の回転数と比較して外側広筋の oxy Hb が有意に減少したことから外側広筋の筋酸素消費が増加したと考察している。しかし、岩川らが報告している oxy Hb の減少が筋活動量の増加に伴う筋酸素消費の増加を反映しているのか、単に組織中の血液量の指標とされている total Hb が減少したためであるのかは不明である。そこで本研究では、表面筋電図を用い、ペダル回転数の増加に伴う筋活動量の変化を NIRS とともに外側広筋にて測定した。岩川らが外側広筋の筋活動量や運動中の筋酸素動態の指標として用いている oxy Hb は<sup>7)</sup>、120 rpm において有意に減少している。さらに、DeLorey ら<sup>8)</sup> や 鮫島ら<sup>9)</sup> が筋酸素動態の指標として用いられている deoxy Hb は、120 rpm において有意に増加し、血液量を反映する total Hb には変化が認められず、外側広筋の筋活動量は有意に増加した。このことから、120 rpm における oxy Hb の減少や deoxy Hb の増加は単に血液量の変化によるものではなく、ペダル回転数の増加に伴う筋活動量の増加により、筋の酸素消費が増加した結果、oxy Hb は減少し deoxy Hb は増加した可能性がある。

#### 5.3 局所筋酸素動態と全身の酸素摂取量の関連

先行研究において、Knight ら<sup>10)</sup> は、自転車運動時における全身の酸素摂取量は活動筋である脚の酸素摂取量に依存すると報告し、Kawaguchi ら<sup>5)</sup> は、NIRS を用いて測定した外側広筋における酸素動態は全身の酸素摂取量と強い相関を認めたことから、活動筋の酸素動態は全身の酸素摂取量を反映すると報告している。

本研究では、120 rpm において他の回転数に比べ有意に  $\dot{V}O_2$  は増加した。さらに外側広筋では、120 rpm において deoxy Hb が増加、oxy Hb が減少し、

筋活動量は増加した。したがって 120 rpm では、活動筋において酸素消費が増加したため、 $\dot{V}O_2$  は増加したのではないかと考えられる。しかしながら、Fick の式から末梢の酸素動態と全身の酸素摂取量を考えた場合、循環の影響を考慮する必要がある。Quaresima ら<sup>11)</sup> は、足関節の底背屈運動時において筋の収縮頻度の高いほうが大腿動脈における血流量は有意に多いと報告している。Ferguson ら<sup>12)</sup> は、膝伸展運動を収縮頻度毎分 60 回および 100 回の 2 通り行い、動静脈酸素較差は 2 群間で有意差を認めず、大腿動脈血流は収縮頻度毎分 60 回に比べ毎分 100 回で有意に拡大と報告している。一方、Hoelting ら<sup>13)</sup> は、膝伸展運動を収縮頻度毎分 40 回、60 回、80 回の 3 通り行い、大腿動脈の逆行性血流は毎分 40 回で最も増加したと報告し一定の見解は得られていない。本研究では、120 rpm において  $O_2$ -pulse は有意に増加した。 $O_2$ -pulse は  $\dot{V}O_2$  を HR で除したもので、一回拍出量の目安とされていることから、120 rpm では一回拍出量の増加が推察される。しかし、今回は自転車運動であったため下肢だけでなくハンドルを握るための筋活動や体幹を固定するために上肢筋群や体幹筋群などの筋活動が予測されることから、下肢の活動筋へどれだけ血流が配分されたのか明らかにすることができなかった。今後の研究では、膝伸展運動など活動筋を限定した条件で、大腿動脈において超音波ドップラー法などを用いて酸素供給系の要因を検討する必要がある<sup>14)</sup>。

## 6 結 論

健常男子学生 8 名を対象に近赤外分光法を用いて自転車運動時のペダル回転数の違いが局所活動筋酸素動態に及ぼす影響について検討した。その結果、120 rpm では他の回転数に比べ、 $\dot{V}O_2$ 、下肢筋の筋活動量、外側広筋の deoxy Hb が有意に増加した。また 120 rpm において oxy Hb が有意に減少したが、total Hb に有意な変化が認められなかった。これらのことから、同一仕事量であってもペダル回転数が増加すれば、下肢筋の筋活動量が増加することで活動筋酸素動態に影響を及ぼし、結果的に全身の酸素摂取量が増加するものと考えられる。

## 7 利益相反 (COI)

本論文に関連し、開示すべき COI 関係となる企業などはない。

## 引用文献

- 1) Gaesser GA, Brooks GA. Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *J Appl Physiol* 1975 ; 38 ( 6 ) : 1132-1139.
- 2) Francescato MP, Girardis M, di Prampero PE. Oxygen cost of internal work during cycling. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1995 ; 72 ( 1 - 2 ) : 51-57.
- 3) Takaishi T, Yasuda Y, Ono T, Moritani T. Optimal pedaling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 1996 ; 28 ( 12 ) : 1492-1497.
- 4) 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 ( 3 ) : 442-449.
- 5) Kawaguchi K, Tabusadani M, Sekikawa K, Hayashi Y, Onari K. Do the kinetics of peripheral muscle oxygenation reflect systemic oxygen intake? *Eur J Appl Physiol* 2001 ; 84 ( 1 - 2 ) : 158-161.
- 6) Fletcher GF, Balady GJ, Amsterdam EA, Chaitman B, Eckel R, Fleg J, et al. Exercise standards for testing and training: a statement for healthcare professionals from the American Heart Association. *Circulation* 2001 ; 104 ( 14 ) : 1694-1740.
- 7) 岩川 孝志, 中村 好男, 村岡 功. 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. *体力科学* 2001 ; 50 ( 4 ) : 491-499.
- 8) DeLorey DS, Kowalchuk JM, Paterson DH. Relationship between pulmonary  $O_2$  uptake kinetics and muscle deoxygenation during moderate-intensity exercise. *J Appl Physiol* (1985) 2003 ; 95 ( 1 ) : 113-120.
- 9) 鮫島 光博, 浜岡 隆文, 西尾 進也, 佐古 隆之, 本間 俊行, 市村 志朗, 他. 固定負荷自転車運動時における近赤外分光法 (NIRS) を用いた外側広筋の筋酸素動態の検討. *Therapeutic Research* 2001 ; 22 ( 9 ) : 2025-2030.
- 10) Knight DR, Poole DC, Schaffartzik W, Guy HJ, Prediletto R, Hogan MC, et al. Relationship between body and leg  $\dot{V}O_2$  during maximal cycle ergometry. *J Appl Physiol* (1985) 1992 ; 73 ( 3 ) : 1114-1121.
- 11) Quaresima V, Homma S, Azuma K, Shimizu S, Chiarotti F, Ferrari M, et al. Calf and shin muscle oxygenation patterns and femoral artery blood flow

during dynamic plantar flexion exercise in humans. Eur J Appl Physiol 2001 ; 84 ( 5 ) : 387-394.

- 12) Ferguson RA, Ball D, Krstrup P, Aagaard P, Kjaer M, Sargeant AJ, et al. Muscle oxygen uptake and energy turnover during dynamic exercise at different contraction frequencies in humans. J Physiol 2001 ; 536 (Pt 1) : 261-271.
- 13) Hoelting BD, Scheuermann BW, Barstow TJ. Effect of contraction frequency on leg blood flow during knee extension exercise in humans. J Appl Physiol (1985) 2001 ; 91 ( 2 ) : 671-679.
- 14) Mimura T, Tanaka S, Kawarabayashi T, Ishihara K, Hara T, Fujiwara H, et al. Relationships among muscle oxygenation, muscle blood volume, and femoral artery blood flow during prolonged constant work-rate leg exercise. Jpn J Appl Physiol 2003 ; 33 ( 6 ) : 335-342.

# Effect of low intensity bicycle ergometer exercise with differential pedal rate on local muscle oxygenation.

Yasutaka Umayahara<sup>1</sup>

## Abstract

The purpose of this study was to investigate the effect of low intensity bicycle ergometer exercise at different pedal rates on local muscle oxygenation. Eight healthy male subjects participated in the study. Subjects performed a bicycle ergometer exercise for 6 min at 80 W. Pedal rate was selected as 40, 80, and 120 rpm. We measured cardiorespiratory responses, vastus lateralis muscle activity, and vastus lateralis muscle oxygenation using near-infrared spectroscopy. Oxygen intake and vastus lateralis muscle activity at a pedal rate of 120 rpm were higher than that for 40 rpm and 80 rpm. total Hb in the vastus lateralis was not different between the three pedal rates. At 120 rpm pedal rate, oxy Hb in the vastus lateralis increased significantly, while deoxy Hb in the vastus lateralis decreased significantly, indicating that local muscle oxygen uptake was increased. These data suggest that the increase in muscle activity and local muscle oxygen uptake at a high pedal rate may lead to increased oxygen intake at the same exercise intensity.

**Key words:** bicycle ergometer exercise, pedal rate, near-infrared spectroscopy, muscle oxygenation

---

<sup>1</sup> Department of Rehabilitation, Faculty of Health Sciences, Hiroshima Cosmopolitan University  
3-2-1 Otsukahigashi, Asaminami-ku, Hiroshima 731-3166, Japan