自転車運動時の大腿部の酸素消費量と 酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン含量の部位差

市村 志朗¹ 勝村 俊仁² 森口 哲史³ 山田 雄太⁴
中川 直樹⁵ 庭山 雅嗣⁶ 山本 克之⁷ 浜岡 隆文⁸

要 旨：本研究の目的は、自転車運動時の大腿部筋酸素消費量($\dot{V}O_{2mus}$)と大腿部酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン含量(Hb/MbO₂ 含量)に部位差があるかどうかを明らかにすることであった。健常成人男性 5 名に仰臥位での漸増負荷自転車運動を疲労困憊まで行わせ、その際に、多チャンネル式近赤外連続分光法装置を用いて大腿部の $\dot{V}O_{2mus}$ と Hb/MbO₂ 含量の部位差を検討した。高負荷運動時に、近位部の $\dot{V}O_{2mus}$ は遠位部より有意($p<0.05$)に高値であった。高負荷運動時には、大腿部 $\dot{V}O_{2mus}$ には部位差があり、大腿部 Hb/MbO₂ 含量には部位差がみられないことが示された。このことより、高負荷運動時の大腿部の酸素供給にも部位差がある可能性が考えられた。
(J Jpn Coll Angiol 2012; 52: 115–122)

Key words: muscle oxygen consumption, muscle oxygenated hemoglobin/myoglobin content, multi-channel near infrared continuous wave spectroscopy

序 論

近年、安静時や運動時の筋酸素消費や筋への酸素供給の不均一性に関して、positron emission tomography (PET) を用いた研究¹⁻³⁾で、運動時の活動筋酸素消費や活動筋への酸素供給に不均一性があることが報告されている。しかし、PET は moving artifact の影響で、自転車運動などの動的運動での測定評価は困難であることが知られている。また、近年の多チャンネル式近赤外分光法の普及⁴⁻⁷⁾に伴い、動的な膝伸展運動⁸⁻¹⁰⁾や自転車運動^{9, 11-13)}時の同一筋内および筋間の筋酸素化レベルの研究がみられるようになり、活動筋の筋酸素化レベルに不均一性があることが報告されている。しかし、これら先行研究にて評価されている筋酸素化レベルは、測定部位の筋酸素消費と筋への酸素供給のバランスを示すものであり、活動筋酸

素消費自体や筋への酸素供給の不均一性を直接的に示しているわけでない。Fujioka ら¹⁴⁾は、多チャンネル式近赤外連続分光法(multi-NIRcws)と動脈血流遮断手法を用いて、掌握運動時の前腕屈筋群 $\dot{V}O_{2mus}$ の部位差を検討しているが、われわれの知る限り、自転車運動時の大腿部酸素消費量の部位差について検討した研究はみられない。また、ヒトの行動の多くは大腿部の大筋群を使用した歩行や走行であり、外側広筋の酸素化動態と全身の有酸素能力との間に関連がある¹⁵⁾ことから大腿部酸素消費量の部位差を明らかにすることは非常に重要である。そこで、本研究では、最大自転車運動時の大腿部の活動筋酸素消費量($\dot{V}O_{2mus}$)と活動筋の酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン含量(Hb/MbO₂ 含量)の部位差について検討することを目的とした。

方 法

1. 対象

被検者は日常的に身体運動を行っている健常成人男性 5 名であった(30±2 歳、身長 175.0±1.9 cm、体重 67.3±3.1 kg)。すべての被検者に対して事前に文章および口頭にて実験の趣旨や危険性について十分説明し、書面にて実験に参

¹ 東京理科大学理工学部

² 東京医科大学健康増進スポーツ医学講座

³ 鹿児島大学教育学部

⁴ 中京大学スポーツ科学部

⁵ 産業能率大学情報マネジメント学部

⁶ 静岡大学工学部

⁷ 北海道大学大学院情報科学研究科

⁸ 立命館大学スポーツ健康科学部

2011 年 3 月 11 日受付 2011 年 7 月 27 日受理

Figure 1 Experimental setup. Multi-NIRcws, multi-channel near infrared continuous wave spectroscopy; VL, vastus lateralis; RF, rectus femoris.

加することへの同意を得た。また、すべての実験手順はヘルシンキ宣言に基づいて行われた。

2. 実験手順

被検者には、多チャンネル式近赤外連続光分光法装置 (multi-NIRcws) による Hb/MbO₂ 測定部位の静水圧の影響を最小にするために、仰臥位での多段階漸増負荷自転車運動 (model-868, モナーク社) を疲労困憊まで行わせた (**Fig. 1**)。自転車運動のペダル回転数は 60 rpm とし、被検者はメトロノームのリズムに合わせて自転車運動を行った。この回転数を連続 10 秒間維持できなくなった時点を経済困憊での運動終了とした。また、両足はストラップを用いてペダルと固定した。各負荷での運動時間は 3 分間であり、負荷は 30 W (0.5 kp×60 rpm) から開始し、4 分 (運動 3 分 + 動脈血流遮断 30 秒 + 回復 30 秒) ごとに 30 W ずつ負荷を漸増させた (**Fig. 2**)。

実験時には、心拍数 (HR)、全身の酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$)、血中乳酸値 (La)、平均血圧 (MBP) と右大腿部 Hb/MbO₂ 動態を測定した。HR は、ハートレートモニター (ポラール社) を用いて、beat by beat で測定した。 $\dot{V}O_2$ と $\dot{V}CO_2$ は、呼気ガス分析装置 (AE280S, ミナト医科学社) を使用して、ブレスバイブレスにて測定した。La は、安静時と各運動負荷終了直後および疲労困憊直後に右手の指先より採血を行い、ラクテートプロ (アークレイ社) を用いて測定した。MBP は、フィナプレス血圧モニター (オメガ社) を用いて左中指から beat by beat にて測定した。右大腿部の Hb/MbO₂ 動態は、Niwayama ら⁴⁾ が作製した multi-NIRcws を用いて測定した。データ取得サンプリングレートは、8 Hz であった。

HR, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, MBP の評価としては、安静時の動

脈血流遮断を行う直前の 1 分間の平均値を用いた。運動時には、各測定項目ともに運動終了直前の 30 秒間の平均値を算出した。乳酸性作業閾値 (LT) は、安静時および各運動負荷終了直後に測定された La 値を 2 つの直線を用いて、最小二乗法での回帰を行い、それぞれの回帰直線の残差が一番小さくなる直線の交点から近似値として算出した。また、LT 時の HR, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, MBP 値は、安静時から運動終了時までの HR, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, MBP それぞれの値を最小二乗法にて直線回帰し、得られた直線回帰式を用いて算出した。

3. 大腿部酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン (Hb/MbO₂) 動態の測定

被検者には、multi-NIRcws プローブを右大腿部の外側広筋部 (VL) と大腿直筋部 (RF) に貼付し、右大腿部近位部には動脈血流遮断を行うための加圧帯を装着した。プローブ貼付は右外側広筋遠位部を基準として、VL には 24 チャンネル、RF には 12 チャンネルの測定を行えるように配置した。最近位部の測定位置は、膝蓋骨上端と大腿子間距離の 2/3 に相当する位置であった (**Fig. 1**)。

手順として、被検者に 3 分間の安静を維持させた後、安静時の大腿部酸素消費量 ($\dot{V}O_{2mus}$) および大腿部酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン含量 (Hb/MbO₂ 含量) を算出するために、加圧帯を 300 mmHg にて加圧し、Hb/MbO₂ の低下がみられなくなるまで 9 分間の動脈血流の遮断を行った。その後、Hb/MbO₂ が動脈血流遮断前に戻ったことを確認した後、被検者には、多段階漸増負荷自転車運動を行わせた。各運動負荷では 3 分間の自転車運動終了直後には、大腿部の運動時 $\dot{V}O_{2mus}$ を算出するために、30 秒間の動脈血流遮断を行い、続いて 30 秒間の休息の

Figure 2 Changes in Hb/MbO₂ at rest and during exercise for a representative subject. La, blood lactate concentration. Note that arterial occlusion (A.O.) at the end of exercise caused further decrease in Hb/MbO₂ and Hb/MbO₂ rapidly recovered after cuff release.

後、次の運動負荷での自転車運動が行われた。この手順は、被検者が疲労困憊になるまで繰り返された(**Fig. 2**)。なお、安静時、運動終了直後ともに動脈血流遮断は、右膝を伸展した状態にて行った。

4. 大腿部の酸素消費量($\dot{V}O_{2mus}$)と酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン含量(Hb/MbO₂含量)の算出方法

安静時 $\dot{V}O_{2mus}$ は、安静時動脈血流遮断開始から1分間の Hb/MbO₂ 低下率から算出した^{16, 17)}。各運動負荷時の $\dot{V}O_{2mus}$ は、各運動負荷終了直後の動脈血流遮断開始から10秒間の Hb/MbO₂ 低下率より算出した^{16, 17)}。

安静時および運動時 Hb/MbO₂ 含量は、安静時動脈血流遮断直前10秒間の Hb/MbO₂ 平均値、または各運動負荷時の運動終了直前10秒間の Hb/MbO₂ 平均値と安静時動脈血流遮断時に得られた Hb/MbO₂ の最低値の差分から求めた。式は次のようであった。

$$\text{安静時 Hb/MbO}_2 \text{ 含量} = \text{安静時 Hb/MbO}_2 \text{ 値} - \text{動脈血流遮断時の Hb/MbO}_2 \text{ 最低値} \quad (1)$$

$$\text{運動時 Hb/MbO}_2 \text{ 含量} = \text{運動時の Hb/MbO}_2 \text{ 値} - \text{動脈血流遮断時の Hb/MbO}_2 \text{ 最低値} \quad (2)$$

5. 多チャンネル近赤外連続光分光法装置(multi-NIRcws)

本研究にて使用した multi-NIRcws の測定原理と装置の詳細については、次の先行研究に記載されている⁴⁾。本研究での使用した装置のプロープは、1つの送光部と4つの受光部から構成され、**Fig. 1**のように十字型であった。送受光間距離は1.5 cmであった。われわれは、9プ

ロープ(3×3; 18 cm×18 cm)を用いて、受光部を VL で24ポイント(6×4)、RF で12ポイント(6×2)配置し、それぞれの Hb/MbO₂ を測定した(**Fig. 1**)。

NIRcws は、表層組織による散乱係数が定量性に大きく影響する。Niwayama ら^{4, 18)}は、皮脂厚による散乱係数の補正により NIRcws により測定された値の定量性を大幅に向上させられることを報告している。そこで、本研究では、multi-NIRcws による各プロープでの測定部位(9箇所)の皮脂厚を超音波診断装置(SONOS 1500, Hewlett Packard 社)の B モードにて測定し、Niwayama ら^{4, 18)}の方法を用いて皮脂厚による影響を補正し、Hb/MbO₂ 値の定量化を行った。

6. 統計処理

各測定値は、平均値±標準偏差にて示した。皮脂厚および安静・各運動負荷での $\dot{V}O_{2mus}$ と Hb/MbO₂ 含量の部位差については、縦、横方向ともに1列ずつ個別に一元配置分散分析および多重比較(Tukey 法)を用いて検定した。

結 果

1. 仰臥位自転車運動による全身反応

安静時および各運動負荷時、LT 時、最大負荷時(Max 時)の HR、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、La、MBP を **Table 1** に示した。LT 時のそれぞれの値は近似値であり、HR は 125±5 bpm、 $\dot{V}O_2$ は 1536±202 ml/min、 $\dot{V}CO_2$ は 1664±255 ml/min、La は 3.4 mmol/l、MBP は 134±4 mmHg であった。また、各被検者の仰臥位自転車運動による最大負荷値は、それぞれ、150 W、180 W、180 W、210 W、210 W(最大負荷平均

Table 1 Systemic aerobic parameters during supine incremental cycling exercise

	Rest	30 W	60 W	90 W	LT (116±16 W)	120 W	150 W	Max (180±30 W)
HR (bpm)	63 ± 3	83±8	97±10	110±6	124±5	132±9	135±11	141±13
$\dot{V}O_2$ (ml/min)	317 ± 27	604±21	910±40	1268±29	1536±202	1592±46	1738±131	2082±268
$\dot{V}CO_2$ (ml/min)	269 ± 20	491±19	848±49	1298±13	1664±255	1789±61	1937±137	2507±387
La (mmol/l)	1.6 ± 0.2	2.1±0.3	2.5±0.3	2.8±0.3	3.4±0.4	4.8±0.6	5.7±0.8	8.2±0.7
MBP (mmHg)	74 ± 3	87±5	96±5	106±5	114±4	116±4	121±2	125±4

Values are mean ± standard deviation. Values at LT are an extrapolated. Values at Max are mean of the maximum of each subject. HR, heart rate; $\dot{V}O_2$, oxygen uptake; $\dot{V}CO_2$, carbon dioxide output; La, blood lactate concentration; MBP, mean blood pressure; LT, lactate threshold

値 180±30 W)と被検者間で同様でなかったことから、Max 時のそれぞれの値は、各被検者の Max 時の値を用いた。その結果、HR, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, La, MBP の Max 時の値はそれぞれ、141±13 bpm, 2082±268 ml/min, 2507±387 ml/min, 8.2±0.7 mmol/l, 125±4 mmHg であった。

2. 皮脂厚および大腿部 $\dot{V}O_{2mus}$ ・Hb/MbO₂ 含量の部位差

大腿部皮脂厚に部位による統計的な有意差はみられず、すべての測定場所の平均値は 3.2±0.7 mm であった。大腿部 $\dot{V}O_{2mus}$ と Hb/MbO₂ 含量では、運動負荷の増加に伴い $\dot{V}O_{2mus}$ は増加し (Fig. 3), Hb/MbO₂ 含量は低下した (Fig. 4)。

大腿部 $\dot{V}O_{2mus}$ の部位差では、安静時から 90 W 時まで大腿部の外側から内側への横方向および近位から遠位までの縦方向両方で有意な部位による違いはみられなかった。一方、120 W 時と Max 時には、近位から遠位の縦方向で有意な違いがみられ、最近位部の $\dot{V}O_{2mus}$ は、最遠位部より有意 ($p<0.05$) に高値を示し、150 W 時には遠位部と比較して、近位部が高値になる傾向 ($p<0.1$) がみられた (Fig. 3)。

Hb/MbO₂ 含量では、安静およびすべての運動負荷強度において、大腿部の外側から内側の横方向および近位部から遠位部への縦方向での部位による違いはみられなかった (Fig. 4)。

考 察

1. 筋酸素消費の部位差について

Mizuno ら²⁾は、PET を用いて、膝伸展運動時の外側広筋遠位部と近位部の部位差について検討し、遠位部と比較して近位部のほうが筋酸素消費は高いことを報告している。近赤外分光法を用いた筋酸素消費の部位差の研究では、われわれの知る限り、掌握運動時の前腕屈筋群の部位差の検討を行った研究¹⁴⁾のみであり、動的運動時の大腿部筋酸素消費の部位差についての研究は、われわれが初めてである。

Kennedy ら⁹⁾は、漸増負荷自転車運動で負荷が 50% に達してから筋酸素飽和度が VL 近位部で急激に減少し、その低下の程度は遠位部より近位部のほうが大きくなることを示している。自転車運動時の大腿部への酸素供給は、遠位部より近位部のほうが多いと考えられている^{12, 13)}ことから、Kennedy ら⁹⁾の研究における高負荷強度での急激な近位部の筋酸素飽和度低下は、筋酸素消費の亢進によって引き起こされていたものと思われる。本研究では、LT 以降の運動負荷強度にて、大腿近位部の $\dot{V}O_{2mus}$ は、大腿遠位部と比較して有意 ($p<0.05$) に高値になり、高負荷強度時には、大腿近位部の $\dot{V}O_{2mus}$ は、より亢進することを示している。したがって、自転車運動による大腿部酸素消費量の部位差は、低負荷運動時にはみられないが、LT 以上の高負荷運動時に観察されることが明らかになった。

2. 酸素供給量の部位差について

NIRcws で測定される筋酸素化レベルは測定場所の筋への酸素供給量と筋酸素消費量のバランスを反映する⁷⁾。この原理を利用すれば、Hb/MbO₂ 含量と $\dot{V}O_{2mus}$ の結果より近赤外分光法を用いて、活動筋への酸素供給状態を考察することが可能である。本研究では、自転車運動時の大腿部 Hb/MbO₂ 含量に部位差は認められなかったが、LT 以上の高負荷運動時に大腿近位部の $\dot{V}O_{2mus}$ は、大腿遠位部より有意に高値を示した。これらのことから、安静および LT 以下の低負荷運動時には、活動筋への酸素供給に部位差があることは考えられないが、LT 以上の高負荷運動時には、大腿遠位部の活動筋への酸素供給は、大腿近位部よりも少なくなっていたと考えられる。本研究と同様な結果として、Quaresima ら¹⁹⁾は、multi-channel NIRS を用いて、30 秒間の大腿四頭筋最大努力静的収縮後の大腿四頭筋の血流量の部位差を調査した結果、近位部の血流は、遠位部より有意に高値であったとの報告している。また、Kime ら²⁰⁾は、60% $\dot{V}O_{2peak}$ 以上の自転車運動での大腿遠位部の筋酸素化レベル 1/2 回復時

Figure 3 Changes in $\dot{V}O_{2mus}$ in each measurement site on thigh during supine incremental cycling exercise. Significantly different from distal site (f) and proximal site (a) or (b). * $p < 0.05$, # $p < 0.1$. Significantly different from distal site (e) and proximal site (a). + $p < 0.05$.

間は、大腿近位部より有意に遅延することを示し、これは酸素供給が少なかったことが原因であろうと考察している。さらに、大腿部の筋線維組成では、遠位部より近位部のほうがより Type I 線維の比率が高いこと²¹⁾や、運動時の大腿部筋内圧は近位部より遠位部のほうが高くなるという報告や^{22, 23)}、筋内圧の上昇は、血流を阻害するということ⁵⁾からも本研究での高負荷運動時に大腿遠位部の酸素供給が、大腿近位部より少なくなっているという考察は妥当性があると考えられる。

3. 筋酸素化レベルの部位差について

本研究では、安静時および各運動負荷時の Hb/MbO₂

含量に部位による違いは認められなかった。同様な結果として、NIRcws を用いた先行研究²⁰⁾では、大腿部筋酸素化レベルの部位による差はみられないと報告している。一方、近赤外空間分解分光法(NIR_{SRS})を用いた先行研究^{12, 13)}では、安静時および運動時の大腿部筋酸素飽和度に部位による差がみられたとの報告がある。このように、本研究での Hb/MbO₂ 含量での評価と先行研究での筋酸素飽和度での評価とでは、結果が一致しなかった。

本研究で用いた Hb/MbO₂ 含量は、測定部位の酸素供給と消費のバランスを反映する筋酸素化レベル指標であり、その概念は、 $\dot{Q}-\dot{V}O_2$ という式で表すことができ、こ

Figure 4 Changes in Hb/MbO₂ content in each measurement site on the thigh during supine incremental cycling exercise.

No significant difference was observed between each measurement site.

の式からも Hb/MbO₂ 含量の値は、 $\dot{Q}$ の変動に大きく影響される。また、先行研究での筋酸素飽和度も酸素供給と消費のバランスを示す筋酸素化レベル指標であるが、その指標が濃度であることから、 $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ という式にて表すことができる。つまり、筋酸素飽和度は、ある酸素供給量に対してどのくらい酸素消費をしたかを割合で示す筋酸素化レベル指標であることから、どのような酸素供給状態であっても、その値が相対的にどのくらいの酸素化レベルなのかを示す生理学的に意味をもつ指標と考えられる。

この指標の違いをもとに、本研究と先行研究の筋酸素

化レベル部位差結果の相違を考えると、本研究結果と考察より、高負荷運動時に大腿部 $\dot{V}O_{2mus}$ に部位差があり、大腿部への酸素供給に部位差が存在すると考えられる状況の中で、大腿部 Hb/MbO₂ 含量に部位差がみられないという結果は、大腿部の筋酸素飽和度の部位差が存在している予想させる。同様な結果として、近赤外時間分解分光法を用いて、酸素化ヘモグロビン量と筋酸素飽和度を同時に評価した研究⁸⁾では、運動時の外側広筋近位部と遠位部それぞれの酸素化ヘモグロビン量の値は同様であったが、筋酸素飽和度では、外側広筋近位部より外側広筋遠位部のほうが有意に低値であったと報告し

ている。つまり、その状況を示す絶対値での評価では、筋酸素化レベルには部位差はみられなかったが、その状況を生理学的に評価すると筋酸素化レベルに部位差が存在する可能性が考えられた。

4. 本研究での限界点

本研究での自転車運動は、Hb/MbO₂ 測定部位への静水圧の影響を少なくするために仰臥位で行った。その結果、運動終了時の心拍数、全身酸素摂取量のデータからみて、最大運動時の中心循環機能は十分に充進していなかったと考えられた。すなわち、ほとんどの被検者の運動中止理由は、負荷に対する下肢の筋力不足によるものであったと考えられた。このことから、本研究では、本来被検者が有していると想定される中心循環機能や活動筋の酸素運搬能や酸素拡散能を含む有酸素代謝能が十分に発揮されていなかった可能性が考えられる。つまり、本研究での Max 時のデータは、生理学的な中心循環機能や筋有酸素代謝能の上限でのデータではない可能性があることを理解しておく必要がある。

結 論

仰臥位自転車運動時には、LT 以上の高負荷運動時では、大腿部 $\dot{V}O_{2mus}$ は、遠位部より近位部ほうが大きく充進することが明らかになった。大腿部 Hb/MbO₂ 含量は、安静時、運動時ともに、部位による違いはみられなかったが、LT 以上の高負荷運動時では、大腿遠位部への酸素供給は、近位部より少なくなっていた可能性が考えられた。

文 献

- 1) Kalliokoski KK, Oikonen V, Takala TO, et al: Enhanced oxygen extraction and reduced flow heterogeneity in exercising muscle in endurance-trained men. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2001; **280**: E1015–E1021
- 2) Mizuno M, Kimura Y, Iwakawa T, et al: Regional differences in blood flow and oxygen consumption in resting muscle and their relationship during recovery from exhaustive exercise. *J Appl Physiol* 2003; **95**: 2204–2210
- 3) Heinonen IH, Kemppainen J, Kaskinoro K, et al: Regulation of human skeletal muscle and its heterogeneity during exercise in moderate hypoxia. *Am J Physiol* 2010; **299**: R72–R79
- 4) Niwayama M, Yamamoto K, Kohata D, et al: A 200-channel imaging system of muscle oxygenation using cw near-infrared spectroscopy. *IEICR TRANS INF & SYST* 2001; E85-D: 115–123
- 5) Miura H, McCully KK, Nioka S, et al: Relationship between muscle architectural features and oxygenation status determined by near infrared device. *Eur J Appl Physiol* 2004; **91**: 273–278
- 6) Quaresima V, Ferrai M, Franceschini MA, et al: Spatial distribution of vastus lateralis blood flow and oxyhemoglobin saturation measured at the end of isometric quadriceps contraction by multichannel near-infrared spectroscopy. *J Biomed Opt* 2004; **9**: 413–420
- 7) Hamaoka T, McCully KK, Quaresima V, et al: Near-infrared spectroscopy/imaging for monitoring muscle oxygenation and oxidative metabolism in healthy and diseased humans. *J Biomed Opt* 2007; **12**: 062105
- 8) 江崎和希, 武政 徹, 長田卓也, 他: 膝伸展運動時の協同筋内における筋内酸素飽和度の相違. *脈管学* 2003; **43**: 327–330
- 9) Kennedy MD, Haykowsky MJ, Boliek CA, et al: Regional muscle oxygenation differences in vastus lateralis during different modes of incremental exercise. *Dyn Med* 2006; **5**: <http://www.dynamic-med.com/content/5/1/8>
- 10) Ueda C, Kagaya A: Muscle reoxygenation difference between superficial and deep regions of the muscles during static knee extension. *Adv Exp Med Biol* 2010; **662**: 329–334
- 11) Koga S, Poole DC, Ferreira LF, et al: Spatial heterogeneity of quadriceps muscle deoxygenation kinetics during cycle exercise. *J Appl Physiol* 2007; **103**: 2049–2056
- 12) 木目良太郎, 庭山雅嗣, 曾根慎悟, 他: 自転車運動時における単一筋内酸素濃度の部位差について—多チャンネル型近赤外空間分解分光法を用いて—. *脈管学* 2009; **48**: 383–388
- 13) Kime R, Niwayama M, Fujioka M, et al: Unchanged muscle deoxygenation heterogeneity during bicycle exercise after 6 weeks of endurance training. *Adv Exp Med Biol* 2010; **662**: 353–358
- 14) Fujioka M, Kime R, Koga S, et al: Comparison of muscle O₂ dynamics at different sites of the forearm flexor muscles during incremental handgrip exercise. *Adv Exp Med Biol* 2010; **662**: 359–364
- 15) Ichimura S, Murase N, Osada T, et al: Age and activity status affect muscle reoxygenation time after maximal cycling exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2006; **38**: 1277–1281
- 16) Hamaoka T, Iwane H, Shimomitsu T, et al: Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscles by near-infrared spectroscopy. *J Appl Physiol* 1996; **81**: 1410–1417
- 17) Sako T, Hamaoka T, Higuchi H, et al: Validity of NIR spectroscopy for quantitatively measuring muscle oxidative metabolic rate in exercise. *J Appl Physiol* 2001; **90**: 338–344
- 18) Niwayama M, Hamaoka T, Lin L, et al: Quantitative muscle oxygenation measurement using NIRS with correction for the influence of fat layer: Comparison of oxygen consumption rate with measurements by other techniques. *Proc SPIE* 2000;

- 3911: 256–264
- 19) Quaresima V, Ferrari M, Franceschini MA, et al: Spatial distribution of vastus lateralis blood flow and oxyhemoglobin saturation measured at the end of isometric quadriceps contraction by multichannel near-infrared spectroscopy. *J Biomed Opt* 2004; **9**: 413–420
 - 20) Kime R, Im J, Moser D, et al: Reduced heterogeneity of muscle deoxygenation during heavy bicycle exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2005; **37**: 412–417
 - 21) Lexell J, Hentiksson-Larsen K, Sjostrom M: Distribution of different fibre types in human skeletal muscles. 2. A study of cross-sections of whole m vastus lateralis. *Acta Physiol Scand* 1983; **117**: 115–122
 - 22) Ameredes BT, Provenzano MA: Regional intramuscular pressure development and fatigue in the canine gastrocnemius muscle in situ. *J Appl Physiol* 1997; **83**: 1867–1876
 - 23) Sadamoto T, Bonde-Petersen F, Suzuki Y: Skeletal muscle tension, flow, pressure and EMG during sustained isometric contractions in humans. *Eur J Appl Physiol* 1983; **51**: 395–408

Heterogeneity of Muscle Oxygen Consumption and Muscle Oxygenated Hemoglobin/Myoglobin Content in Thigh during Incremental Cycling Exercise

Shiro Ichimura,¹ Toshihito Katsumura,² Tetsushi Moriguchi,³ Yuta Yamada,⁴ Naoki Nakagawa,⁵
Masatsugu Niwayama,⁶ Katsuyuki Yamamoto,⁷ and Takafumi Hamaoka⁸

¹Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science, Tokyo, Japan

²Department of Sports Medicine for Health Promotion, Tokyo Medical University, Tokyo, Japan

³Faculty of Education, Kagoshima University, Kagoshima, Japan

⁴School of Health and Sport Sciences, Chukyo University, Nagoya, Japan

⁵School of Information-oriented Management, Sanno University, Kanagawa, Japan

⁶Faculty of Engineering, Shizuoka University, Shizuoka, Japan

⁷Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, Hokkaido, Japan

⁸College of Sport and Health Science, Ritsumeikan University, Shiga, Japan

Key words: muscle oxygen consumption, oxygenated hemoglobin/myoglobin content, multi-channel near infrared continuous wave spectroscopy

The purpose of this study was to evaluate the heterogeneity of muscle oxygen consumption ($\dot{V}O_{2\text{mus}}$) and muscle oxygenated hemoglobin/myoglobin content (Hb/MbO₂) in the right thigh during stepwise incremental cycling exercise in supine position. Subjects were five healthy male volunteers (30±2 yrs., height 175.0±1.9 cm, weight: 67.3±3.1 kg). Muscle oxygenation in the right thigh was measured using multi-channel near infrared continuous wave spectroscopy (multi-NIRcws). In order to reduce the influence of the hydrostatic pressure within multi-NIRcws measurement sites, the subjects performed the stepwise incremental cycling exercise while lying on a bed in a supine position. The exercise load was started at 30 watts and increased by 30 watts every 4 minutes until the subjects reached exhaustion. We evaluated $\dot{V}O_{2\text{mus}}$ and Hb/MbO₂ at rest and during each exercise load. $\dot{V}O_{2\text{mus}}$ increased and Hb/MbO₂ decreased with the increase exercise load in all measurement sites. $\dot{V}O_{2\text{mus}}$ at high intensity exercise load was significantly larger in the proximal positions than in the distal positions ($p<0.05$). Hb/MbO₂ showed no significant differences in all measurement sites at rest and during all exercise loads. These results indicated the heterogeneity of $\dot{V}O_{2\text{mus}}$ and oxygen supply toward a longitudinal direction between proximal and distal positions at high intensity exercise load.

(J Jpn Coll Angiol 2012; **52**: 115–122)