

## 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—

木目良太郎<sup>1</sup> 庭山 雅嗣<sup>2</sup> 曾根 慎悟<sup>2</sup> 白石 聖<sup>1</sup> 藤岡 正子<sup>1</sup>  
下村 浩祐<sup>1</sup> 長田 卓也<sup>1</sup> 村瀬 訓生<sup>1</sup> 勝村 俊仁<sup>1</sup>

**要 旨**：左外側広筋の長軸方向に8カ所測定可能なプローブを装着した多チャンネル型近赤外空間分解分光法を用いて、動脈血流遮断時および自転車運動時の組織酸素飽和度( $StO_2$ )の部位差について検討した。各測定部位の皮脂厚を測定し、光学係数に与える脂肪厚の影響を補正した。その結果、動脈血流遮断時における $StO_2$ 低下率は、近位部に比べて遠位部の方で有意に高かった。また動脈血流遮断時および運動終了時における $StO_2$ の最低値は、近位部に比べ遠位部で有意に低かった。(J Jpn Coll Angiol, 2008, 48: 383-388)

**Key words**: muscle oxygenation, distribution, near-infrared spectroscopy, bicycle exercise

### 序 言

酸素需要の増大に伴い酸素供給もまた増大し、全身レベルでは酸素摂取量と酸素供給量の間には正の相関関係がみられることが知られている<sup>1)</sup>。大腿動脈や上腕動脈のような弾性血管レベルでも、骨格筋エネルギー代謝の亢進に伴い筋血流量が増大すると先行研究で報告されているが<sup>2, 3)</sup>、末梢組織レベルでは、エネルギー需要量の増大に対する血流分布が不均一であるとされている<sup>4-6)</sup>。このような局所レベルにおける酸素供給の不均一化が亢進するに伴い、 $O_2$  extractionがより低下する可能性について報告されている<sup>7)</sup>。実際、肺胞換気量( $\dot{V}_A$ )と肺胞血流量( $Q$ )のバランス( $\dot{V}_A/Q$ )は、健常者に比べて肺疾患患者の方がより不均一に分布しており<sup>8)</sup>、肺でのガス交換における $\dot{V}_A/Q$ 分布の重要性が指摘されている<sup>9)</sup>。

肺と同じように筋組織においても、 $O_2$ バランスの不均一性が運動時の筋酸素消費量に及ぼす影響について幾つか報告されており、最近では、positron emission tomography(PET)を用いた運動時における筋酸素消費

量および筋血流量の不均一性に関する報告が散見される<sup>5, 6)</sup>。しかしPETによる測定はmoving artifactの影響を強く受けるので、歩行運動や自転車運動のようにダイナミックな運動時の測定は実質的に不可能である。また時間分解能にも乏しいので、運動開始時などの非定常状態の変化を検出することもできない。これに対し、連続光を使用した近赤外分光法(NIR<sub>cws</sub>)は非侵襲的かつリアルタイムに組織酸素濃度変化の評価が可能であり、また自転車運動時における組織酸素動態のモニタリングにもこれまで数多く用いられている<sup>10, 11)</sup>。われわれも最近、改良型の多チャンネルNIR<sub>cws</sub>システムを用いて、自転車運動時における外側広筋の酸素動態不均一性について調べたが<sup>10)</sup>、NIR<sub>cws</sub>で得られるシグナルは測定開始時からの相対的变化であるため、安静時における組織酸素動態の測定部位による差異がマスクされる危険性がある。またNIR<sub>cws</sub>より得られた酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)、脱酸素化ヘモグロビン(deoxy-Hb)は、濃度変化ではなく量的変化を反映しており、血液量変化の影響が非常に大きい。さらに最近、NIR<sub>cws</sub>より得られる情報は、皮膚血流変化による影響も無視できないほど大きいと報告されている<sup>12)</sup>。一方、近赤外空間分解分光法(NIR<sub>SRS</sub>)は、複

<sup>1</sup>東京医科大学健康増進スポーツ医学講座

<sup>2</sup>静岡大学工学部電気電子工学科

2007年7月2日受付 2009年1月8日受理

数の受光素子より検出された受光量の空間的傾きから酸素濃度を算出することから、皮膚情報の影響を受けにくく、また組織酸素飽和度( $StO_2$ )の算出が可能である。本研究では、多チャンネル型 $NIR_{SRS}$ を用いて、動脈血流遮断時および自転車運動時における外側広筋内の $StO_2$ 分布について検討した。

## 方 法

### (1)対象

被験者は健康な成人 6 名(男性 5 名, 女性 1 名, 年齢:  $25 \pm 5$  yrs, 身長:  $169.4 \pm 6.7$ cm, 体重:  $61.4 \pm 12.3$ kg, 最高酸素摂取量:  $53.2 \pm 8.1$ ml/kg/min, 最高運動強度:  $298.2 \pm 54.0$ W)であった。すべての被験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、書面にて実験に参加することへの同意を得た。

### (2)実験デザイン

本研究では以下に挙げる 2 つの実験を行った。

#### 1)動脈血流遮断

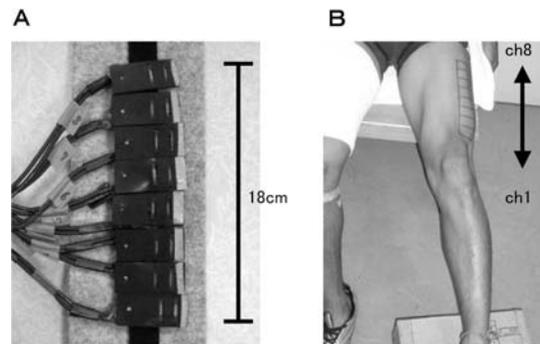
左外側広筋に $NIR_{SRS}$ のプロブを装着し、左大腿近位部に装着した加圧帯を300mmHgで加圧して大腿部への動脈血流を遮断した。動脈血流遮断時における $StO_2$ の最低値到達を確認した後、動脈血流遮断を解放した。動脈血流遮断開始 1 分後から 4 分後までの $StO_2$ を回帰直線にて近似し、 $StO_2$ 低下率の部位差について検討した。なお、被験者は安静仰臥位を保ち、動脈血流遮断時間は 6 ~ 8 分とした。

#### 2)漸増負荷自転車運動

主運動の前に座位安静を 1 分間保った後、0Wのウォーミングアップを 1 分間行った。その後、2 秒ごとに 1Wずつ増加する 30W ランプ負荷法(女性は 20W)による自転車運動負荷を疲労困憊まで実施した。8 カ所測定可能な $NIR_{SRS}$ のプロブを左外側広筋上に装着し、単一筋内における $StO_2$ の測定部位による差異を計測した。また運動時における酸素摂取量の変化は呼気ガス分析装置(AE-300S, ミナト医科学社)を用いて測定した。

### (3)多チャンネル型 $NIR_{SRS}$

$NIR_{SRS}$ は、複数の受光素子より検出された受光量の空間的傾きから組織酸素濃度の絶対値を算出できるので、安静時における組織酸素濃度の差異も検出可能である。



**Figure 1**

A: Multi-channel  $NIR_{SRS}$  probe. The multi-channel probe covered an area of approximately 18 cm  $\times$  3 cm area.

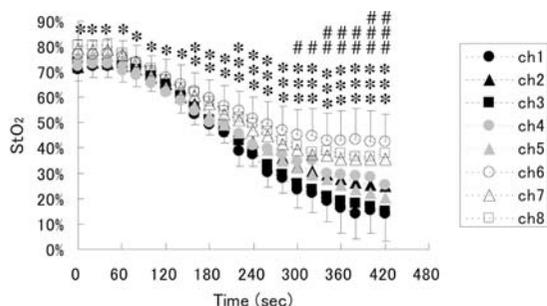
B: The attached position of the multi-channel  $NIR_{SRS}$  probe. The probe was attached to the skin overlying on the vastus lateralis muscle.

しかしながら、近赤外光を用いた他の手法と同様に、 $NIR_{SRS}$ においても表層組織による散乱係数が定量性に大きく影響する。庭山らは、 $NIR_{SRS}$ を用いた筋組織酸素濃度計測における誤差要因について、生体組織モデルでのモンテカルロシミュレーションを行った結果、 $StO_2$ は筋の散乱係数による影響が少ないことから、皮脂厚による散乱係数の補正により定量性を大幅に向上できると報告している<sup>13)</sup>。超音波ドップラー装置(LOGIQ3, GE横河メディカルシステム社)を用いて測定部位の皮脂厚を測定し、 $StO_2$ に与える皮脂厚の影響を補正した。測定用プロブは、左外側広筋遠位部を起点として大転子に向かい 8 カ所装着し、マルチプロブの測定範囲は約18cmであった(**Fig. 1**)。なお測定用プロブは、2 波長LED(ピーク波長770, 830nm)から20, 30mmの位置に受光部を配置し、2 点間の空間的傾きを皮脂厚で補正することにより $StO_2$ を算出した。

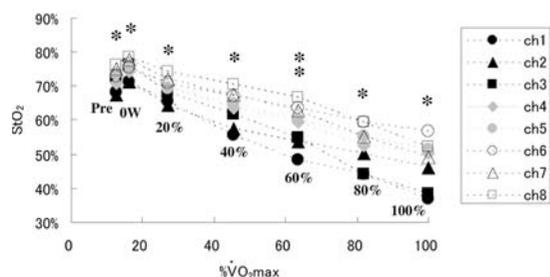
0.5秒間隔で得られたNIRSシグナルを 2 秒ごとに算出した。なお動脈血流遮断中の $StO_2$ 変化は20秒ごとに、自転車運動中の $StO_2$ 変化は各強度の前後10秒(合計20秒)を平均処理して評価した。また、遠位部 3 カ所(ch 1-3)、中間部 2 カ所(ch 4-5)と近位部 3 カ所(ch 6-8)をそれぞれ平均化し、動脈血流遮断中および運動時における $StO_2$ の部位間比較を行った。

### (4)統計処理

各測定結果については、6 名の平均値  $\pm$  標準誤差で



**Figure 2** Changes in StO<sub>2</sub> in each measurement site during 6 min arterial occlusion. Significantly different from distal (ch 1–3) and proximal sites (ch 6–8). \*p < 0.05, \*\*p < 0.01, \*\*\*p < 0.001. Significantly different from intermediate (ch 4–5) and proximal sites (ch 6–8). #p < 0.05, ##p < 0.01, ###p < 0.001.



**Figure 3** StO<sub>2</sub> in each measurement site on vastus lateralis muscle during bicycle exercise in relation to percentage of oxygen uptake. Significantly different from distal (ch1–3) and proximal sites (ch 6–8). \*p < 0.05, \*\*p < 0.01.

示した。仰臥位と座位安静時におけるStO<sub>2</sub>の比較には対応のあるt検定を用いた。動脈血流遮断時および運動時におけるStO<sub>2</sub>を部位別に比較するためには、時間および群を要因とする二元配置の分散分析(two-way repeated measures analysis of variance: ANOVA)を用い、交互作用の有意性について検討した。なお、統計的有意水準は5%未満に設定した。

## 結 果

### (1) 動脈血流遮断

動脈血流遮断前の安静時において、すでに近位部に比べて遠位部の方でStO<sub>2</sub>が有意に低かった(遠位: 73.9 ± 2.5%, 近位: 78.8 ± 1.6%, p < 0.05)が中間部とは差がみられなかった(**Fig. 2**)。動脈血流遮断に伴いすべての部位においてStO<sub>2</sub>は経時的に低下し、動脈血流遮断開始4分後以降は中間部でも近位部に比べて有意に低い値を示した(p < 0.001–p < 0.05)。動脈血流遮断開始1分後から4分後までのStO<sub>2</sub>を回帰直線にて近似し、StO<sub>2</sub>低下率の部位差を比較したところ、近位部に比べて遠位部の方でStO<sub>2</sub>低下率が有意に高かった(遠位部: 0.21 ± 0.06% / sec, 近位部: 0.15 ± 0.04% / sec, p < 0.05)。また、動脈血流遮断時におけるStO<sub>2</sub>の最低値は、近位部に比べて遠位部の方で有意に低かった(遠位部: 18.1 ± 6.0%, ch8: 38.5 ± 3.6%, p < 0.001)。

### (2) 漸増負荷自転車運動

自転車運動時におけるStO<sub>2</sub>の部位別変化を**Fig. 3**に示

した。仰臥位で行った動脈血流遮断前の安静時と同様に、自転車運動前における座位安静時(pre)のStO<sub>2</sub>もまた、近位部に比べて遠位部の方で有意に低値であった(遠位部: 69.5 ± 2.8%, 近位部: 74.7 ± 1.8%, p < 0.05)。0Wのウォーミングアップ時では、全測定部位において安静時に比べてStO<sub>2</sub>が増加する傾向が観察され、遠位部では有意に増加した(p < 0.05)。その後、運動負荷強度の増大に伴い全測定部位のStO<sub>2</sub>は顕著に低下した。また、すべての運動強度において、近位部に比べて遠位部の方で有意に低く、疲労困憊時ではすべての部位で最低値を示した(遠位部: 40.4 ± 5.8%, 近位部: 52.7 ± 3.7%, p < 0.05)。運動時における中間部(ch4–5)のStO<sub>2</sub>と遠位部、近位部それぞれのStO<sub>2</sub>を比較した結果、有意な差は確認されなかった。

## 考 察

### (1) 安静時および動脈血流遮断時におけるStO<sub>2</sub>の部位差

仰臥位に比べ座位安静時(pre)の方がすべての測定部位でStO<sub>2</sub>が有意に低く(p < 0.01–0.05)、また遠位と近位の部位差はPreの方が有意に高かった。安静時における筋組織のNIRSシグナルが静脈血液量の影響を強く反映することは、静脈血流遮断法の結果からも明らかである。したがって、仰臥位と比較して座位安静時の方でStO<sub>2</sub>が有意に低下した要因としては、下肢への静脈血貯留量が増大したためと推察される。動脈血流遮断前における安静状態では、近位部に比べて遠位部の方で有意にStO<sub>2</sub>が低い値を示し、われわれの先行研究と一致する結果となった<sup>10)</sup>。筋組織のStO<sub>2</sub>は、酸素消費と酸素供給のO<sub>2</sub>バランスに依存すると考えられる。Mizunoら<sup>6)</sup>は、PETを用

いて大腿四頭筋の筋酸素消費量および筋血流量の不均一性について調べた結果、遠位部に比べて近位部の方が筋酸素消費量、筋血流量ともに高値を示したと報告している。このPETを用いた研究では $O_2$ バランスについては調べられていないが、実験結果から $O_2$ バランスを算出すると、部位差は認められない傾向であった。外側広筋は表層部に比べて深層部の方がType I線維の割合が多く<sup>14)</sup>、Mizunoら<sup>6)</sup>のPETイメージングからも表層部に比べて深層部の方が筋酸素消費量、筋血流量ともに多いことが示されている。PETを用いた研究では、大腿四頭筋すべてが対象であったのに対し、本実験の測定部位は外側広筋のみであり、しかもNIRSは表層部の情報に限局されることから、測定領域および深度の違いが結果に反映されていると推測される。

また、動脈血流遮断時における $StO_2$ の最低値は、近位部に比べて遠位部の方で有意に低かった。Esakiら<sup>15)</sup>は、片脚膝伸展運動時における外側広筋酸素動態の部位差を検討した結果、遠位部の方が近位部と比較して有意に $StO_2$ が低下し、静脈血酸素飽和度と筋酸素化レベルとの間に有意な正の相関関係がみられたことから、近位部に比べて遠位部の方が酸素拡散能に優れていると述べている。今回の動脈血流遮断時における $StO_2$ 最低値の部位差もまた、毛細血管レベルにおける酸素拡散能の違いによるものと推察される。

さらに、動脈血流遮断時における $StO_2$ の低下率は、近位部に比べて遠位部の方で有意に高値を示した。Hamaokaら<sup>16)</sup>は、近赤外時間分解分光法を用いて動脈血流遮断時における $StO_2$ の低下率について調べた結果、 $0.13 \pm 0.015\% / \text{sec}$ であったと報告しており、今回の結果は先行研究と非常に近似した値であった。筋組織の $StO_2$ は、酸素消費と酸素供給の $O_2$ バランスに依存することから、動脈血流遮断時における $StO_2$ の低下率は筋酸素消費量を反映していると考えられる。前述した動脈血流遮断時における $StO_2$ 最低値の結果と併せて推察すると、近位部に比べて遠位部の方で、ミトコンドリアの数やサイズの増加および酵素活性の向上に伴う筋有酸素能の亢進により安静時筋酸素消費量が増加したと考えられる。実際、全身レベルではあるが、フィットネスレベルの高い方が安静時代謝の亢進が確認されたとの報告もみられる<sup>17)</sup>。

なお、NIRSシグナルは主に細動脈、毛細血管、細静脈レベルの微小血管情報を反映すると報告されている<sup>18)</sup>。被験者は仰臥位を保持していたので、静脈圧の部位差

はほとんどなく、静脈血内に残存する酸素濃度の部位差の影響も非常に小さいと考えられる。

## (2) 漸増負荷自転車運動時における $StO_2$ の部位差

0Wのウォーミングアップ時ではすべての測定部位において、安静時に比べて $StO_2$ が上昇する傾向が観察された。これは活動筋に対する筋血流量の増加ならびに静脈還流量の増加による充血量の低下が要因であると考えられ、遠位部の方がその影響が大きいと思われる。

運動強度の増大に伴い全測定部位の $StO_2$ は顕著に低下し、疲労困憊時における $StO_2$ は近位部に比べて遠位部の方で有意に低かった。Esakiら<sup>15)</sup>は、片脚膝伸展運動時における外側広筋酸素動態の部位差について検討した結果、負荷強度の増大に伴い外側広筋の近位部に比べて遠位部の方で有意に脱酸素化の亢進が確認されたと報告している。漸増負荷自転車運動時における筋放電量は、近位部に比べて遠位部の方で有意に高かったという報告<sup>19)</sup>から、疲労困憊時における $StO_2$ の部位差の要因としてまず第一に筋活動量の違いが考えられる。また、筋活動を伴わない安静時の動脈血流遮断中における $StO_2$ の最低値にも部位差が確認されたことから、酸素拡散能の違いによる影響も大きいものと考えられる。更には、運動時における筋血流量は近位部に比べて遠位部の方が有意に少ないことから<sup>6)</sup>、 $\dot{V}O_2/Q$ で表現される $O_2$ バランスにも部位差がみられると推察される。

## 結 論

本研究では動脈血流遮断時および自転車運動時における左外側広筋内の $StO_2$ 分布について検討した。その結果、動脈血流遮断時における $StO_2$ 低下率は、近位部に比べて遠位部の方で有意に高かった。また、安静時、運動終了時ともに近位部に比べて遠位部の方で $StO_2$ が有意に低かった。これらの要因としては、酸素拡散能や $O_2$ バランス、動員される筋線維タイプ別動員パターン、筋内圧による血流阻害の部位差による影響と推察される。

## 謝 辞

本研究の実施に際し多大なご協力を頂いた安生幹子、佐藤綾佳の両氏に感謝の意を表す。本研究は文部科学省科学研究費補助金(18700536)による研究成果の一部である。

## 文 献

- 1) Astrand P-O, Rodahl K: Circulation. Textbook of Work Physiology(朝比奈一男, 浅野勝己監訳). 大修館書店, 東京, 1976, 83-128.
- 2) Osada T: Muscle contraction-induced limb blood flow variability during dynamic knee extensor. *Med Sci Sports Exerc*, 2004, **36**: 1149-1158.
- 3) Osada T, Katsumura T, Murase N et al: Post-exercise hyperemia after ischemic and non-ischemic isometric handgrip exercise. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 2003, **22**: 299-309.
- 4) Richardson RS, Haseler LJ, Nygren AT et al: Local perfusion and metabolic demand during exercise: a noninvasive MRI method of assessment. *J Appl Physiol*, 2001, **91**: 1845-1853.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Walley KR: Heterogeneity of oxygen delivery impairs oxygen extraction by peripheral tissues: theory. *J Appl Physiol*, 1996, **81**: 885-894.
- 8) Braunwald E, Fauci AS, Kasper DL et al, eds.: *Harrison's Principles of Internal Medicine*. McGraw Hill, New York, 2001.
- 9) Wagner PD: Heterogeneity of skeletal muscle perfusion and metabolism. *J Appl Physiol*, 2003, **95**: 2202-2203.
- 10) 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.
- 11) Kime R, Osada T, Shiroishi K et al: Muscle oxygenation heterogeneity in a single muscle at rest and during bicycle exercise. *Jpn J Phys Fitness Sports Med*, 2006, **55** (Suppl): S19-S22.
- 12) Davis SL, Fadel PJ, Cui J et al: Skin blood flow influences near-infrared spectroscopy-derived measurements of tissue oxygenation during heat stress. *J Appl Physiol*, 2006, **100**: 221-224.
- 13) 庭山雅嗣, 曾根慎悟, 村田秀覚 他: 空間分解NIRSを用いた筋組織酸素濃度計測における誤差要因とその補正法. *脈管学*, 2007, **47**: 17-20.
- 14) Johnson MA, Polgar J, Weightman D et al: Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *J Neurol Sci*, 1973, **18**: 111-129.
- 15) Esaki K, Hamaoka T, Rådegran G et al: Association between regional quadriceps oxygenation and blood oxygen saturation during normoxic one-legged dynamic knee extension. *Eur J Appl Physiol*, 2005, **95**: 361-370.
- 16) Hamaoka T, Katsumura T, Murase N et al: Quantification of ischemic muscle deoxygenation by near infrared time-resolved spectroscopy. *J Biomed Opt*, 2000, **5**: 102-105.
- 17) Van Pelt RE, Jones PP, Davy KP et al: Regular exercise and the age-related decline in resting metabolic rate in women. *J Clin Endocrinol Metab*, 1997, **82**: 3208-3212.
- 18) Boushel R, Langberg H, Olesen J et al: Monitoring tissue oxygen availability with near infrared spectroscopy (NIRS) in health and disease. *Scand J Med Sci Sports*, 2001, **11**: 213-222.
- 19) Malek MH, Coburn JW, Weir JP et al: The effects of innervation zone on electromyographic amplitude and mean power frequency during incremental cycle ergometry. *J Neurosci Methods*, 2006, **155**: 126-133.

## Muscle Deoxygenation Distribution in a Single Muscle During Bicycle Exercise Using Multi-channel Near-Infrared Spatial Resolved Spectroscopy

Ryotaro Kime,<sup>1</sup> Masatsugu Niwayama,<sup>2</sup> Shingo Sone,<sup>2</sup> Kiyoshi Shiroishi,<sup>1</sup> Masako Fujioka,<sup>1</sup> Kosuke Shimomura,<sup>1</sup> Takuya Osada,<sup>1</sup> Norio Murase,<sup>1</sup> and Toshihito Katsumura<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Sports Medicine for Health Promotion, Tokyo Medical University, Tokyo, Japan

<sup>2</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, Shizuoka University, Shizuoka, Japan

**Key words:** muscle oxygenation, distribution, near-infrared spectroscopy, bicycle exercise

We examined muscle tissue oxygen saturation (StO<sub>2</sub>) during arterial occlusion and bicycle exercise using multi-channel near-infrared spatial resolved spectroscopy. The measurement probe was attached on the left vastus lateralis along the direction of the long axis. The fat layer thickness of each measurement site was evaluated for correction of the effect of fat layer thickness on reduced scattering coefficient. The decreasing rate of StO<sub>2</sub> during arterial occlusion was significantly greater at the distal site than the proximal site. In addition, the StO<sub>2</sub> was significantly lower at the distal site than the proximal site during arterial occlusion as well as at the end of exercise. (J Jpn Coll Angiol, 2008, **48**: 383–388)