



札幌医科大学学術機関リポジトリ *ikor*

SAPPORO MEDICAL UNIVERSITY INFORMATION AND KNOWLEDGE REPOSITORY

Title	自転車こぎ運動中における外側広筋の酸素化レベルと有酸素能力との関係
Author(s)	神林, 勲; 森田, 憲輝; 金木, 裕次郎; 石村, 宣人; 中村, 寛成; 内田, 英二; 藤井, 博匡; 武田, 秀勝
Citation	札幌医科大学保健医療学部紀要, 第7号: 63-69
Issue Date	2004 年
DOI	10.15114/bshs.7.63
Doc URL	http://ir.cc.sapmed.ac.jp/dspace/handle/123456789/4896
Type	Journal Article
Additional Information	
File Information	n13449192763.pdf

- コンテンツの著作権は、執筆者、出版社等が有します。
- 利用については、著作権法に規定されている私的使用や引用等の範囲内で行ってください。
- 著作権法に規定されている私的使用や引用等の範囲を越える利用を行う場合には、著作権者の許諾を得てください。

自転車こぎ運動中における外側広筋の酸素化レベルと有酸素能力との関係

神林 勲¹, 森田 憲輝², 金木裕次郎³, 石村 宣人⁴, 中村 寛成⁴
内田 英二⁵, 藤井 博匡⁶, 武田 秀勝⁶

自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷運動中、近赤外分光法 (NIRS) により測定された外側広筋の酸素化ヘモグロビンとミオグロビン [oxy(Hb+Mb)] は、運動強度とともに低下する。そして、その低下率には二酸化炭素排泄量から推定された乳酸性アシドーシスに相当する仕事量や酸素摂取量付近で増加するという加速ポイントが認められている。本研究の目的は、この加速ポイントのoxy(Hb+Mb) レベルと全身性有酸素能力 (最高酸素摂取量と換気性閾値) との関係を検討することである。被検者には12名の健康な男子を用いた。漸増負荷運動は1分間に30ワットの漸増率のランプ負荷法により疲労困憊まで実施した。運動中の酸素濃度、二酸化炭素濃度および換気量は自動呼気分析装置によりbreath by breath法で測定された。NIRSによって得られるoxy(Hb+Mb) は個人の相対的変化を示している。そこで、個人間の比較を可能にするため、oxy(Hb+Mb) を漸増負荷運動前の安静時の平均値を100%、運動後に実施された15分間の動静脈血虚血中の最低値を0%とする百分率で表した。運動強度の増加に伴い、oxy(Hb+Mb) は直線的な減少を示した。その後、筋組織での脱酸素飽和度が加速されたことを意味する急激なoxy(Hb+Mb) の低下が、12名の被検者中10名に認められた。この加速ポイントにおけるoxy(Hb+Mb) (%oxy@AP) の被検者10名の平均値は75.3±8.7%であった。%oxy@APは最高酸素摂取量と有意な負の相関関係 ($r=-0.804$, $p<0.01$) があり、また、換気性閾値での酸素摂取量とも有意な負の相関関係 ($r=-0.935$, $p<0.01$) があつた。これらの知見は、APにおける筋酸素化レベルは全身性の有酸素能力を反映する指標であることを示唆する。

<キーワード> 筋酸素動態、外側広筋、最高酸素摂取量、換気性閾値、ランプ負荷運動

Relationships between aerobic capacities and muscle oxygenation level at vastus lateralis during incremental cycle exercise

Isao KAMBAYASHI¹, Noriteru MORITA², Yujiro KANAKI³, Nobuhito ISHIMURA⁴, Tomonari NAKAMURA⁴
Eiji UCHIDA⁵, Hiromasa FUJII⁶, Hidekatsu TAKEDA⁶

Muscle oxygenated hemoglobin and oxygenated myoglobin [oxy(Hb+Mb)] measured by near infrared spectroscopy (NIRS) in the vastus lateralis sharply decreased near the work and metabolic rate where significant lactic acidosis was detected by excess carbon dioxide production, as work rate was increased during incremental cycle exercise test. The aims of this study were to determine relationships between the level of oxy(Hb+Mb) where this signal sharply decreased and general aerobic capacities [peak oxygen uptake (VO_{2peak}) and ventilatory threshold (VT)]. Twelve healthy male subjects participated in the study. Work rate was increased in a ramp pattern ($30 \text{ watt} \cdot \text{min}^{-1}$) until volitional fatigue. Breath by breath method was used to measure gas exchange with a metabolic chart. Oxy(Hb+Mb) signals were expressed as percentage oxygenation relative to the overall change from the rest (100%) to the minimum level (0%) obtained during 15-min ischemia after exercise. As work rate was increased, oxy(Hb+Mb) began to decrease linearly. Afterwards, a sharp decrease, which the rate of muscle tissue oxygen desaturation accelerated, was observed in 10 of the 12 subjects. Mean oxy(Hb+Mb) level at the accelerated point (%oxy@AP) was $75.3 \pm 8.7\%$. The %oxy@AP was significantly correlated with VO_{2peak} ($r = -0.804$, $p < 0.01$) and $VO_{2@VT}$ ($r = -0.935$, $p < 0.01$), respectively. These findings suggest that the level of muscle oxygenation at AP reflects general aerobic capacities.

Key words: Muscle oxygenation, vastus lateralis, peak oxygen uptake, ventilatory threshold, ramp exercise

I. 緒 言

近年、近赤外領域の連続光を用いた近赤外分光法 (Near infrared spectroscopy, 以下NIRS) の開発により、局所レベルでの組織酸素動態を非侵襲的に、長時間・連続的に測定することが可能となった^{1,3)}。漸増負荷法を用いた自転車こぎ運動中における活動筋の酸素動態についても、多くの報告がなされている。しかしながら、その中で運動中の筋酸素動態を解析して最高酸素摂取量 (Peak oxygen uptake, 以下 $\dot{V}O_{2peak}$) や無酸素性作業閾値などの全身性の有酸素能力との関係を検討したものは数少ない^{1,3,12)}。

Belardinelliら¹⁾ は自転車こぎ運動の主動筋である外側広筋の酸素化ヘモグロビンとミオグロビン [oxygenated hemoglobin and oxygenated myoglobin, 以下oxy(Hb+Mb)] は運動強度の増加とともに緩やかに低下し、換気性閾値 (Ventilatory threshold, 以下VT) 付近から急激に低下する現象を観察した。そして、このoxy (Hb+Mb) の低下が加速される点 (Accelerated point, 以下AP) とVTにおける酸素摂取量および運動強度との間に非常に高い正の相関関係を報告している。同様な報告が乳酸性閾値との関連で、Grassiら³⁾ によってもなされている。しかしながら、これまでAP出現時におけるoxy (Hb+Mb) レベルの個人差については検討されていない。

NIRSによって得られるoxy (Hb+Mb) の動態は個人内の相対的な変化であるため、被検者間の比較はできない。個人間の比較を行う有効な手段として、動脈血流遮断による阻血キャリブレーションがある^{4,6,8,9,14-16)}。これは安静時やウォーミング・アップ時のoxy (Hb+Mb) を100%、阻血キャリブレーションによる最低値を0%としてoxy (Hb+Mb) を表す方法である。この方法を用いることで、APにおけるoxy (Hb+Mb) レベルの高さを個人間で比較することが可能となる。

AP出現の生理学的機序は、乳酸生成の亢進による血中二酸化炭素濃度の増加やpHの低下がBohr効果 (ヘモグロビン酸素解離曲線の右傾) をもたらし、酸素の解離が増加することで生じるとされている¹⁾。よって、乳酸生成の亢進が遅い者ほどAP時の筋酸素化レベルが低くなると考えられる。先行研究において、局所的な酸化能力の優劣と全身性有酸素能力に密接な関係にあることが報告されており¹⁷⁻²⁰⁾、AP時の筋酸素化レベルと全身性有酸素能力の間にも関連があると仮定できる。

そこで本研究は、AP時のoxy (Hb+Mb) を運動後の阻血キャリブレーションによるスケールで表し、全身性の有酸素能力 ($\dot{V}O_{2peak}$ とVT) との関係を検討することを目的とする。

II. 方 法

A. 被検者

大学運動部に所属し、日常定期的に運動を行っている健全な男子学生12名 (年齢 21.4 ± 2.0 歳、身長 172.3 ± 6.3 cm、体重 63.1 ± 4.1 kg) を対象に測定を行った。被検者が所属する運動部は多岐に亘っていたが、自転車競技選手や自転車を日常のトレーニングに用いている者はいなかった。測定に先立ち、被検者全員に本研究の目的、方法および予想される危険について十分な説明を実施し、自主的な参加の同意を得た。

B. 実験の概要

図1に本研究の測定プロトコルを示した。被検者に呼気ガス分析用のマスク、心電図の電極およびNIRSのプロブを右脚外側広筋上に装着し、自転車エルゴメーター上で左脚を下死点 (Bottom dead center) まで伸展させた状態で右脚を弛緩させ3分間の安静をとらせた。安静後直ちに無負荷で3分間のウォーミング・アップを行わせ、その後、1分間に30Wattの増加率でランプ負荷運動を疲労困憊まで実施させた。ペダリング頻度はメトロノームに合わせて60rpmを維持するように指示し、安静時から運動終了まで上体の姿勢変化が出来る限り生じないように留意させた。疲労困憊は指示されたペダリング頻度を維持できていないことを数名の検者が主観的に判断した。運動終了後、マスクおよび電極をはずして被検者を椅子へ移動させ、NIRSのプロブ装着位置より近位側に幅75mmの止血帯 (瑞穂医科学工業社製) を装着した。先行研究を参考に、疲労困憊から約10分間の座位安静後、止血帯に500mmHgの圧を加えて右脚の動脈血流を約15分間遮断した^{12,13)}。止血帯の開放後、引き続き5分間の回復期を設けた。

C. Oxy(Hb+Mb) の測定

右脚外側広筋のoxy (Hb+Mb) および全ヘモグロビン

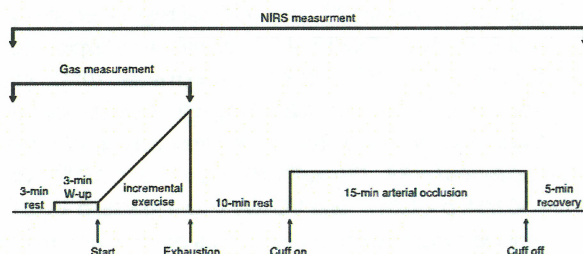


Fig. 1 Experimental protocol in this study.

札幌医科大学大学院保健医療学研究科¹・浅井学園大学生涯学習システム学部²・札幌市八条中学校³・北海道教育大学大学院教育学研究科⁴・國學院短期大学⁵・札幌医科大学保健医療学部

神林勲, 森田憲輝, 金木裕次郎, 石村宜人, 中村寛成, 内田英二, 藤井博匡, 武田秀勝

著者連絡先: 武田秀勝 〒060-8556 札幌市中央区南1条西17丁目 札幌医科大学理学療法科

量の測定をパーソナル・コンピューターに接続されたNIRS (オムロン社製HEO-200) を用いて行った。プローブは受光部と送光部の距離が3cmのものを使用し、近赤外光は760nmと840nmの波長を用いた。プローブは膝上約10~15cmの外側広筋上に装着した。装着の際は運動中の振動によってずれず、また、測定部位が圧迫されて局所的な阻血が生じないように、専用のベルトを用いて適切な圧で固定し、さらに、その上から伸縮性のあるテープで固定した。運動中の発汗による受光部の曇りを防ぐため、プローブと皮膚の間には透明なプラスチック製ラップを挿入した。NIRSの計測はプロトコルを通して0.5秒の時間間隔で行い、10秒毎に平均化した値を分析に供した。

NIRSによって得られるoxy(Hb+Mb)の値は各個人の相対的な変化を表していることから、動脈血流遮断による阻血キャリブレーション^{46,83,146}によってoxy(Hb+Mb)を評価した。評価の方法は3分間の安静時におけるoxy(Hb+Mb)の平均値を100%、15分間の動脈血流遮断中に得られた最低値を0%とし、得られたoxy(Hb+Mb)を相対値(%)で表した。図2に全プロトコル中のoxy(Hb+Mb)の変化を示した。

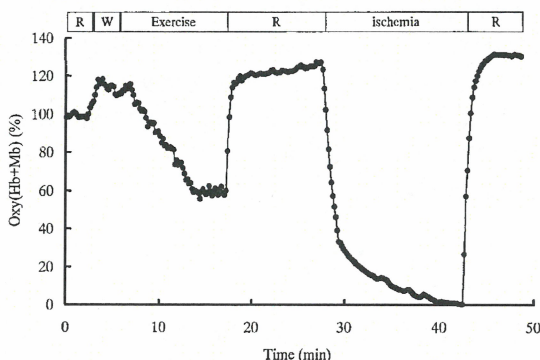


Fig. 2 Change of oxy(Hb+Mb) signals during the experimental protocol. R; rest, W; warm-up(unloaded cycling), Exercise; incremental (ramp) exercise until volitional fatigue, ischemia; arterial occlusion with cuff inflation.

Oxy(Hb+Mb)は運動負荷の増加とともに低下し、疲労困憊に至る前に脱酸素化限界に達したり、疲労困憊まで低下し続けたりする。このoxy(Hb+Mb)の低下の過程において、低下の割合が急激に増加した点をAPとして相当するoxy(Hb+Mb) (%oxygenation at AP、以下%oxy@AP)を求めた。算出は2名の検者により視覚的に判定されたAP³⁾の前後において、oxy(Hb+Mb)が直線的に変化する部分を1次回帰によって直線で表し、2つの回帰直線の交点におけるoxy(Hb+Mb)をAP時の酸素化レベルとした(図3)。また、AP出現時の運動時間も算出した。AP出現の再現性を確認するため、被検者12名中8名において同様の自転車こぎ運動を2週間の間隔を設けて2度実施させた。なお、1回目をTest 1、2回目をTest 2とした。

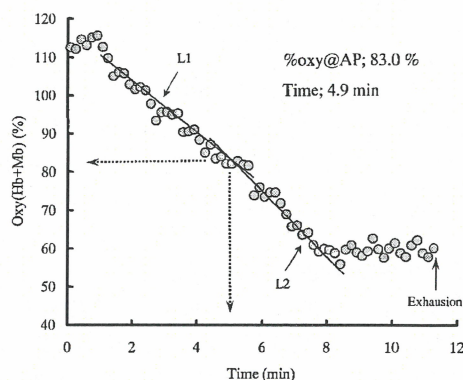


Fig. 3 A typical example in detection of the accelerated point (AP) during incremental exercise. L1 ($y = -6.53x + 115.33, r = -0.980$) and L2 ($y = -7.95x + 122.38, r = -0.964$) show regression line above and below the AP, respectively.

D. 呼吸ガス分析

自動呼吸ガス分析装置(ミナト医科学社製AE-280S)を用いて安静時から運動終了まで酸素摂取量(以下 $\dot{V}O_2$)、二酸化炭素排泄量(以下 $\dot{V}CO_2$)および換気量(以下 $\dot{V}E$)をbreath by breath法により測定し、これらのデータから酸素当量(以下 $\dot{V}E/\dot{V}O_2$)、二酸化炭素当量(以下 $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$)およびガス交換比(以下RER)を算出した。得られたデータは8呼吸毎に移動平均処理を行い、さらに10秒毎に単純平均したものを分析に用いた。 $\dot{V}O_{2peak}$ は心拍数(以下HR)が180bpm以上、RERが1.1以上を満たした10秒間の平均値の最大値とした。呼吸ガスの分析と同時にHRを胸部双極誘導により連続的に記録した。

VTの判定は、運動強度の増加に比較して① $\dot{V}E$ が非直線的に増加する時点、② $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ が変化せずに $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ が増加する時点、および③ $\dot{V}O_2$ の増加に対して $\dot{V}CO_2$ の増加が上回る時点の3つの基準^{21,22)}で2名の検者が個別に実施し、その平均値をVTとした。なお、VTは相当する酸素摂取量($\dot{V}O_2$ at VT、以下 $\dot{V}O_{2@VT}$)で評価し、出現時の運動時間も算出した。

E. 統計処理

得られた各変数は平均値±標準偏差で表した。変数間の平均値の検定には対応のあるt検定を用いた。また、相関関係の検討にはピアソン積率相関分析を行った。危険率はいずれの場合も5%以下をもって有意とし、記載については5%および1%とした。

Ⅲ. 結 果

A. $\dot{V}O_{2peak}$ およびVT

表1に $\dot{V}O_{2peak}$ とVTの値を被検者全員(n=12)の平均値で示した。 $\dot{V}O_{2peak}$ と $\dot{V}O_{2@VT}$ には $r = 0.888$ ($p < 0.01$)の正の相関関係が認められた。 $\dot{V}O_{2@VT}$ は報告さ

れている一般健常人 ($232 \pm 39 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) と持久性競技者 ($493 \pm 57 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) の値²⁾ の間に位置していた。また、VTの出現時間は $60 \pm 0.9 \text{ min}$ であった。漸増負荷運動における最大到達負荷と運動継続時間はそれぞれ $3175 \pm 321 \text{ Watt}$ と $637 \pm 61 \text{ 秒}$ 、 $\text{VO}_{2\text{peak}}$ 出現時のHRとRERは $1876 \pm 25 \text{ bpm}$ と 1.46 ± 0.05 であった。

B. プロトコル中のoxy(Hb+Mb) の変化

図2にプロトコル中のoxy(Hb+Mb) の変化例を示した。安静時において一定を保っていたoxy(Hb+Mb) は、無負荷でのウォーミング・アップにより増加し、負荷の

Table 1. Peak oxygen uptake, ventilatory threshold and the level of muscle oxygenation at the accelerated point in subjects.

	$\text{VO}_{2\text{peak}}$ ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) n=12	$\text{VO}_{2\text{@VT}}$ ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) n=12	%oxy@AP (%) n=10
mean	52.2	31.7	75.6
SD	5.6	5.1	8.2

$\text{VO}_{2\text{peak}}$; peak oxygen uptake, $\text{VO}_{2\text{@VT}}$; oxygen uptake at ventilatory threshold; %oxy@AP; muscle oxygenation level at the accelerated point.

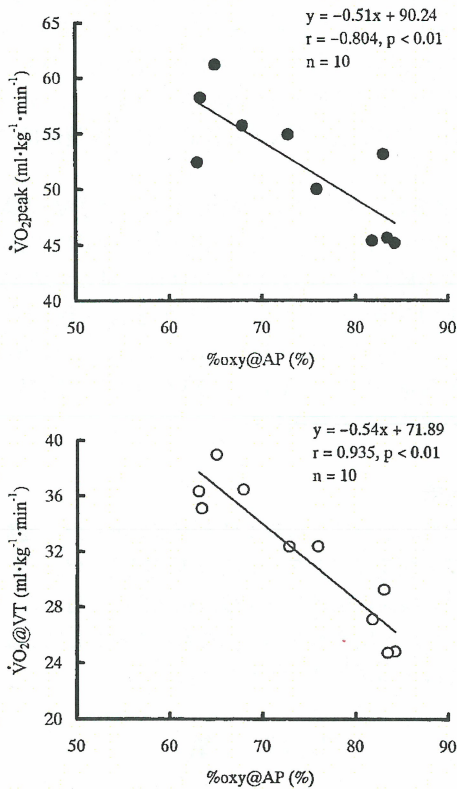


Fig. 4 Relationships between the level of muscle oxygenation at the accelerated point (%oxy@AP) and general aerobic capacities. The upper and bottom panels show the relation with peak oxygen uptake and oxygen uptake at ventilatory threshold, respectively.

増加に伴って直線的に低下し始めた。そして、運動開始から約5分後にAPが出現した。AP出現後、oxy(Hb+Mb) はさらに直線的に低下し、脱酸素化限界に達する者、またそのまま疲労困憊まで低下し続ける者がみられた。本研究では12名中2名の被検者においてoxy(Hb+Mb) は直線的に低下し続け、APを判定することが出来なかった。プロトコルを通して全ヘモグロビン量には大きな変化が認められなかった。

C. APの再現性

AP出現の再現性を検討するため、被検者12名中8名に対して同様な測定を2度実施した。最大到達負荷は2回の測定で等しかった ($310 \pm 14.6 \text{ vs. } 313.5 \pm 10.9 \text{ Watt}$)。APは8名全員において判定することができた。Test 1およびTest 2のAP出現時の運動負荷はそれぞれ $1438 \pm 122 \text{ Watt}$ と $1411 \pm 118 \text{ Watt}$ であり、両者の間には $r = 0.984$ ($y = 0.91x + 15.14$, $p < 0.01$) の正の相関関係が認められた。

D. 全身性有酸素能力と%oxy@APとの関係

%oxy@APは63.4~84.2%の範囲であり、被検者間で約20%の開きが認められた。平均値については表1に示した。APの出現時間は $4.9 \pm 1.3 \text{ min}^{-1}$ であった。図4に%oxy@APと $\text{VO}_{2\text{max}}$ およびVTとの相関関係を示した。 $\text{VO}_{2\text{peak}}$ との間には $r = -0.804$ ($p < 0.01$) の負の相関関係が、同様に $\text{VO}_{2\text{@VT}}$ との間にも $r = -0.935$ ($p < 0.01$) の負の相関関係が得られた。

IV. 考 察

本研究で得られた主要な結果は、阻血キャリブレーションに評価されたAP時の筋酸素化レベル、すなわち%oxy@APは $\text{VO}_{2\text{peak}}$ および $\text{VO}_{2\text{@VT}}$ と有意な負の相関関係にあったことである(図4)。このことから、局所的な指標である%oxy@APは全身性の有酸素能力と密接な関係があることが示唆される。

AP出現の生理学的機序については、乳酸の生成に伴う代謝性アシドーシスがヘモグロビン酸素解離曲線にBohr効果をもたらすことによって生じるとされている。乳酸は筋細胞内での緩衝作用により二酸化炭素の過剰生成と血中重炭酸イオンの減少を導き、これによって血液は酸性化され、ヘモグロビン酸素解離曲線は右傾する。Stringerら²⁾は漸増負荷運動中、動静脈から血液を採取し、血中の酸素分圧、ヘモグロビン酸素飽和度、重炭酸イオン濃度、pHおよび乳酸濃度を測定した。その結果、静脈血中の酸素分圧は安静時からV-slope法で求められた無酸素性作業閾値に達するまでに、27.4Torrから21.2Torrへと有意に低下したことを認めた。そして、無酸素性作業閾値以降において重炭酸イオンの急激な減少、pHとヘモグロビン酸素飽和度の顕著

な低下を観察している。これらの結果は、NIRSによって測定されたAP出現の生理学的背景を支持するものである。

Oxy (Hb+Mb) は酸素の供給と消費のバランスを示す指標である⁴⁴⁾。そのため、APはBohr効果以外に筋血流量の減少によるNIRSプローブ下の酸化ヘモグロビン量の低下によっても生じる可能性が考えられる。本研究においては漸増負荷運動時における外側広筋への筋血流量について言及することはできない。漸増負荷運動時の筋血流量について検討した先行研究では、①運動強度の増加に伴って直線的に増加するという報告^{25,26)}や、②VT強度以上ではレベリングオフするという報告²⁷⁾がある。①の場合ではAP出現に筋血流量の影響はない。②の場合は筋血流量が一定になれば酸化ヘモグロビンの増加をもたらす要因がなくなることから、組織での酸素利用率が一定でもoxy (Hb+Mb) が急激に低下する可能性がある。しかしながら、APはVTよりも約1分前に出現していることから、②の影響もなかったと考えられる。

漸増負荷運動中における乳酸生成の亢進は動員される筋線維タイプと関係すると考えられる。運動強度の増加に伴って運動に動員される筋線維の数が増加し、その動員はST線維からFT線維の順で生じる²⁸⁾。また、Sale²⁹⁾はVTの強度を超えると、非常に多くのFT線維が動員されるとしている。FT線維はST線維に比較して毛細血管の発達度が低く無酸素的代謝に優れ、骨格筋型乳酸脱水素酵素がST線維の3倍の高値を示すことが報告されている³⁰⁾。また、FT線維はST線維よりもミトコンドリア含有量が少ない^{31,32)}。解糖系で生成されたピルビン酸がミトコンドリアでの利用速度を上回れば筋細胞質内に乳酸が蓄積し始めることから、ミトコンドリア含有量が少なければ乳酸生成の亢進が高まる。よって、筋線維組成がFT線維優位型である者は運動中、乳酸生成の亢進が早いと考えられる。

漸増負荷運動における主働筋の筋電図積分値を調べた研究^{11,33-35)}では、VTなどの無酸素性作業閾値の付近から筋電図積分値は急増することが報告されている。FT線維は活動電位や発火頻度が高く、発火の同期化が生じやすいことが報告されており³⁶⁾、FT線維の運動への動員が筋電図積分値の急増を招来すると考えられる。運動強度の増加に伴い、同一の強度でoxy (Hb+Mb) の顕著な低下と筋電図積分値の顕著な増加という鏡像現象が認められている¹¹⁾。これらのことから、FT線維の運動への参画による乳酸生成の亢進がAPを生じさせると推察され、%oxy@APが低い者ほどST線維優位型の筋線維組成を有していると考えられる。VO_{2peak}やVTがST線維占有率と有意な正の相関関係にあることを報告している先行研究³⁷⁾はこの仮説を支持すると思われる。

現在までのところ、筋線維組成とAPとの関係を検討した研究は見当たらない。しかしながら、局所運動中にNIRSによって測定されたoxy (Hb+Mb) の低下に関する指標は、筋線維組成と有意な相関関係にあることが報告され

ている。Hamaokaら⁵⁾は足関節背屈運動における腓腹筋の初期脱酸素化速度は、ST線維とFTa線維の合計占有率と有意な正の相関関係にあることを認めている。また、安静時の筋においても動脈血流遮断により生じた初期脱酸素化速度は、ST線維占有率が高い筋ほど速いことが報告されている¹⁰⁾。これらの先行研究から、運動や虚血によってもたらされたoxy (Hb+Mb) の低下に関する指標は、筋線維組成と密接な関係にあることが示唆され、今後、APについてもさらなる研究が望まれる。

Belardinelliら¹⁾やGrassiら³⁾は自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷運動中における外側広筋のoxy (Hb+Mb) の変化を測定し、その減少が加速するAPを認めた。一方で、oxy (Hb+Mb) は直線的に低下し続けることを認めている研究^{21,2)}や、4種類の変化パターンを報告している研究¹⁴⁾もある。本研究では12名の被検者中10名にAPを判定することができたが、2名の被検者においてoxy (Hb+Mb) は運動中直線的に低下し、APを判定することはできなかった。研究間で用いられている漸増負荷法は同一ではないものの、本研究も含めこれら研究間の違いをもたらす要因については明らかではない。本研究でAPが認められなかった2名の被検者の専門種目は陸上競技の長距離走とクロスカントリースキーであり、筋線維タイプが他の被検者に比較してよりST線維型であると推察される。このことが、APの判定を困難なものにしたのかもしれない。

V. 総 括

自転車漕ぎ運動による漸増負荷運動(ランプ負荷法)を12名の健康な男子に疲労困憊まで実施させ、外側広筋の筋酸素動態[oxy (Hb+Mb)]を近赤外分光法(NIRS)によって測定した。また、運動中、breath by breath法により呼気ガスデータを連続的に記録し、最高酸素摂取量(VO_{2peak})と換気性閾値(VT)を測定した。漸増負荷運動中、12名中10名において先行研究で報告されているoxy (Hb+Mb)の低下が加速する点(AP)が認められ、APを安静時のoxy (Hb+Mb)を100%、運動終了10分後に行われた15分間の阻血キャリブレーション中に得られた最低値を0%とする相対値で評価した(%oxy@AP)。そして、APと全身性有酸素能力(VO_{2peak}とVT)との関係を検討した。結果は以下の通りである。

- 1) %oxy@APは75.3 ± 8.7%であり、被検者間に約20%の個人差が認められた。
- 2) VO_{2peak}は522 ± 56 ml·kg⁻¹·min⁻¹、VO₂@VTは31.7 ± 5.1 ml·kg⁻¹·min⁻¹であった。
- 3) %oxy@APとVO_{2peak}にはr = -0.804 (p < 0.01)、VO₂@VTにはr = -0.935 (p < 0.01)といずれも有意な負の相関関係が得られた。

以上の結果より、阻血キャリブレーションによって評価されたAP出現時における筋酸素化レベルの値は全身性の

有酸素能力と密接な関係にあることが示唆された。

文 献

- 1) Belardinelli, R., Barstow, T. J., Porszasz, J. et al. : Change in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infrared spectroscopy. *Eur.J.Appl.Physiol.*, 70 : 487-492, 1995.
- 2) Bhambhani, Y. N., Buckley, S. M. and Susaki, T. : Detection of ventilatory threshold using near infrared spectroscopy in men and women. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 29 (3) : 402-409, 1997.
- 3) Grassi, B., Quaresima, V., Marconi, C. et al. : Blood lactate accumulation and muscle deoxygenation during incremental exercise. *J.Appl.Physiol.*, 87 : 348-355, 1999.
- 4) Hamaoka, T., Iwase, H., Shimomitsu, T. et al. : Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscle by near-infrared spectroscopy. *J.Appl.Physiol.*, 81 : 1410-1417, 1996.
- 5) Hamaoka, T., Mizuno, M., Osada, T. et al. : Changes in oxygenation and phosphocreatine during exercise and recovery in relation to fiber types and capillary supply in human skeletal muscle. *SPIE*, 3194 : 478-484, 1997.
- 6) 樋口博之・勝村俊仁・浜岡隆文ら：漸増負荷運動における局所骨格筋の筋酸化レベルの測定について。日本運動生理学雑誌, 6 : 27-35, 1999.
- 7) 樋口博之・勝村俊仁・浜岡隆文ら：ランブ負荷運動における外側広筋と大腿直筋の血液・酸素動態。体力科学, 49 : 183-192, 2000.
- 8) 神林勲・柴原貴也・佐川正人ら：等尺性脚伸展運動における中・長距離ランナーと非鍛錬者の筋酸化動態の比較。北海道教育大学紀要（自然科学編）, 52 : 147-154, 2001.
- 9) 神林勲・石村宣人・小林和美ら：筋酸化動態からみた等尺性掌握運動における筋持久力の男女差。北海道教育大学紀要（自然科学編）, 54 : 86-96, 2003.
- 10) 神林勲・Ratkevicius, A.・武田秀勝ら：Fiber type composition affects resting ATP turnover estimated by NIRS in human ischemic muscle. 札幌医科大学保健医療学部紀要, 5 : 35-42, 2003.
- 11) 三浦哉・荒木秀夫・的場秀樹：自転車こぎ運動時の外側広筋および腓腹筋外側部における筋酸化と筋放電量との関係。体力科学, 48 : 413-420, 1999.
- 12) 弘原海剛・木村稔・大島秀武ら：ランブ負荷運動に伴う近赤外分光法（NIRS）の筋内酸素動態の検討－評価方法の試作と運動能力との関連について－。体力科学, 48 : 125-136, 1999.
- 13) 弘原海剛・田中繁宏・三村達也ら：ランブ負荷運動に伴う近赤外分光法（NIRS）により測定した筋内酸素動態の測定方法に関する検討。体力科学, 49 : 129-138, 2000.
- 14) 本間幸子・藤井宣晴・江田英雄ら：健康増進のための至適運動強度の評価－活動筋における酸素の供給と消費のバランスからの検討－。体力研究, 85 : 96-106, 1994.
- 15) 塩崎知美・狩野豊・渡辺重行ら：近赤外分光法による高齢者の筋酸化動態の検討。体力科学, 47 : 393-400, 1998.
- 16) Costes, F., Denis, C., Roche, F. et al. : Age-associated alteration of muscle oxygenation measured by near infrared spectroscopy during exercise. *Arch.Physiol.Biochem.*, 107 : 159-167, 1999.
- 17) Hopper, H., Luthi, P., Claassen, H. et al. : The ultrastructure of the normal human skeletal muscle. *Pflügers Arch.*, 344 : 217-232, 1973.
- 18) Aunola, S., Mariniemi, J., Alanen, E. et al. : Muscle metabolic profile and oxygen transport capacity as determinants of aerobic and anaerobic threshold. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 57 : 726-734, 1988.
- 19) 稲木光晴・高橋英幸・久野謙也ら：生体内で評価された筋の有酸素能力と全身性の有酸素能力との関係。体力科学, 39 : 417-425, 1995.
- 20) Larson-Mayer, D.E., Newcomer, B.R., Hunter, G.R. et al. : Relation between in vivo and in vitro measurements of skeletal muscle oxidative metabolism. *Muscle Nerve*, 24 : 1665-1676, 2001.
- 21) Davis, J.A., Frank, M.H., Whipp, B.J. et al. : Anaerobic threshold alterations caused by endurance training in middle-aged men. *J.Appl.Physiol.*, 46 : 1039-1046, 1979.
- 22) Wasserman, K., Whipp, B.J., Koyal, S.N. et al. : Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J.Appl.Physiol.*, 35 : 236-243, 1973.
- 23) 中村好男：一般健康人と持久競技者における換気閾値、乳酸閾値、OBLAの標準値について。トレーニング科学, 4 : 23-30, 1992.
- 24) Stringer, W., Wasserman, K., Casaburi, R. et al. : Lactic acidosis as a facilitator of oxyhemoglobin dissociation during exercise. *J.Appl.Physiol.*, 76 : 1462-1467, 1994.
- 25) Sullivan, M.J., Binkley, P.K., Unverferth, D.V. et al. : Homodynamic and metabolic responses of the exercising lower limb of humans. *J.Lab.Clin.Med.*, 110 : 145-152, 1987.
- 26) Sullivan, M.J., Knight, J.D., Botham, M.B. et al. : Relation between central and peripheral homodynamic during exercise in patients with chronic heart failure. *Circulation*, 80 : 769-781, 1989.
- 27) Kagaya, A. : Leveling-off calf blood flow during walking and running, and its relationship to anaerobic threshold. *Ann.Physiol.Anthrop.*, 9 : 219-224, 1990.
- 28) Vøllestad, N.K. and Blom, P.C.S. : Effect of varying exercise intensity on glycogen depletion in human muscle fibers. *Acta Physiol.Scand.*, 125 : 395-405, 1985.
- 29) Sale, D.G. : Neural adaptations to strength training. In : *Strength and Power in Sport*, Komi, P.V. (ed.) , 249-265, Blackwell Scientific, Boston MA, 1991.
- 30) Thosstenson, A., Sjodin, B., Tesch, P. et al. : ATPase, myokinase, CPK and LDH in human fast and slow twitch muscle fibers. *Acta Physiol.Scand.*, 99 : 225-229, 1997.

- 31) Howald, H., Hoppeler, H., Claassen, H. et al. : Influences of endurance training on the ultrastructural composition of the different muscle fiber types in human. *Pflugers Arch*, 403 : 396-376, 1985.
- 32) Cabric, M., Apple, H.-J. and Resic, A. (1988) : Fine structural changes in electrostimulated human skeletal muscle. *Eur.J.Appl.Physiol.*, 57 : 1-5.
- 33) deVries, H.A., Tichy, M.W., Housh, T.J. et al. : A method for estimating physical working capacity at the fatigue threshold (PWCF) . *Ergonomics*, 30 : 1195-1204, 1987.
- 34) Mateika, J.H. and Duffin, J. : Coincidental changes in ventilation and electromyographic activity during consecutive incremental exercise tests. *Eur.J.Appl.Physiol.*, 68 : 54-61, 1994.
- 35) Mateika, J.H. and Duffin, J. : The ventilation, lactate and electromyographic thresholds during incremental exercise test in normoxia, hypoxia and hyperoxia. *Eur.J.Appl.Physiol.*, 69 : 110-118, 1994.
- 36) Viitasalo, J.T., Luhtanen, P., Rauhala, P. et al. : Electromyographic activity related to aerobic and anaerobic threshold in ergometer bicycling. *Acta Physiol.Scand.*, 124 : 287-293, 1985.
- 37) Ivy, J.L., Withers, R.T., Van Handel, P.J. et al. : Muscle respiratory capacity and fiber type as determinants of the lactate threshold. *J.Appl.Physiol.*, 48 : 523-527, 1980.

