

自転車こぎ運動時の大腿および下腿部の Oxy(Hb+Mb) の変化パターンについて

三浦 哉・的場秀樹

Changes in oxygenated hemoglobin and myoglobin in the vastus lateralis and lateral part of the gastrocnemius muscles during incremental cycle exercise

Hajime MIURA and Hideki MATOBA

Abstract

The purpose of this study was to measure the balance of oxygen delivery and oxygen consumption in the working muscle during the incremental cycling exercise. Using near infrared spectroscopy, we monitored the changes in oxygenated hemoglobin and myoglobin [oxy(Hb+Mb)] of the vastus lateralis muscle (VL) and lateral part of the gastrocnemius muscle (LG) during the exhaustive cycle exercise. Studies were done in healthy five male and one female volunteers while gas exchange parameters were measured. During exercise of relatively low intensity (up to 20% $\dot{V}O_{2max}$), oxy(Hb+Mb) increased from resting value in both VL and LG. In VL, oxy(Hb+Mb) was sustained or decreased slowly between 40 and 50% $\dot{V}O_{2max}$, and decreased linearly with the exercise intensity at 50 to 80% $\dot{V}O_{2max}$. Thereafter, it was sustained up to near 100% $\dot{V}O_{2max}$. In LG, on the other hand, oxy(Hb+Mb) remained constant near resting levels during exercise of moderate intensity (40 to 70% $\dot{V}O_{2max}$). During exercise of higher intensity (above 70% $\dot{V}O_{2max}$), there was a rapid drop. These results indicated the difference in the pattern of oxy(Hb+Mb) change between VL and LG muscles during the exhaustive incremental cycle exercise.

Key Words : near infrared spectroscopy, hemoglobin, myoglobin, working muscle

I. 緒言

呼気ガスから求められる $\dot{V}O_2$ は、全身のエネルギー代謝あるいは運動強度の指標として広く使われている^{1,11)}が、局所レベルでの酸素消費に関しては間接的な指標にすぎない。一方、近年の近赤外分光法の進歩により、ヘモグロビン (Hb) およびミオグロビン (Mb) の酸素化 [oxy(Hb+Mb)]、あるいは脱酸素化 [deoxy(Hb+Mb)] 状態を非侵襲的に測定することが可能になった。この方法は Hb および Mb の近赤外領域における特徴的な吸収特性を利用したものであり、Millikan¹⁵⁾、Jobsis¹²⁾、Chance ら³⁾の報告以来、急速に発展してきた^{2,4,8,10,11,14,17)}。

近赤外分光法を利用した方法では、被検者の負担が比較的少なく、局所レベルにおける酸素の供給と消費のバランスを連続的に観察することが可能である。したがって、様々な活動時の局所レベルにおける活動量・負担度を反映する情報が時系列的に得られることが期待される。

そこで本研究では、今後、様々な活動時の局所レベルにおける運動強度・負担度を oxy(Hb+Mb) で表示する上での基礎的データを得るために、自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷法による最大運動テスト時の大腿および下腿部における Oxy(Hb+Mb) の変化パターンの特性を明らかにしようとした。

II. 方法

A. 被検者

被検者は成人男性 5 名および女性 1 名であり、彼らの年齢、体重、身長、 $\dot{V}O_{2max}$ および ventilatory threshold 出現時の $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2@VT}$) については表 1 に示した通りである。測定に先立ち、彼らには口頭および文書にて実験の主旨および内容を十分に説明し、彼らの自発的意志での承諾を得た後に測定を開始した。

Table 1. Physical characteristics of the subjects

Variable		mean \pm S.D.
Age	(yrs)	23.6 \pm 3.1
Weight	(kg)	59.2 \pm 7.9
Height	(cm)	168.6 \pm 8.0
$\dot{V}O_{2max}$	(ml \cdot kg ⁻¹ \cdot min ⁻¹)	55.8 \pm 9.1
% $\dot{V}O_{2max@VT}$	(%)	60.3 \pm 3.1

Values are mean \pm S.D.

B. 最大運動テスト

自転車エルゴメーター (Monark 社製) を用いて、25W から始めて 1 分毎に 25W ずつ漸増させて疲労困憊に至らせた。なお、 $\dot{V}O_{2max}$ の判定基準としては、1) $\dot{V}O_2$ の leveling off⁷⁾、2) 心拍数が毎分 180 拍以上¹⁸⁾が認められた場合とした。また、Wasserman ら¹⁶⁾の判定方法に従い、1) $\dot{V}E$ および $\dot{V}CO_2$ の急激な上昇、2) $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ の変化を伴わない、 $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ の上昇がみられた運動強度 ($\dot{V}O_2$) を ventilatory threshold (VT) とした。

C. 近赤外分光装置

本研究では近赤外分光装置 (HEO-100: オムロン社製) を用い、送受光プローブを被検者の外側広筋 (VL) および腓腹筋外側筋 (LG) の筋腹に相当する部位に固定して、組織における oxy(Hb+Mb) の相対的な変化を 1 秒毎に測定した。なお、本装置の送受光プローブと光路の模式図は図 1 に示す通りである。光源から発せられた光は筋組織に達し、血管内の Hb と筋内の Mb に一部吸収されて、再び受光部に戻ってくる。生体において近赤外光 (760~900nm) を有意に吸収するのは Hb および Mb のみであり、酸素化・脱酸素化状態によって近赤外光の吸収度合い (optical density) が変化する。なお、本装置では光路長の決定が困難なことから酸素濃度の定量化ができないために、測定部位の近位側にカフを巻いて、約 250mmHg の圧力を加えて血液の循環を停止させる阻血キャリブレーション法を用いた。加圧は oxy(Hb+Mb) の最低値が得られるまで続けられ、その最低値を組織での酸素濃度 0%、安静レベルを 100%として、運動中の値を相対値で示すこととした。

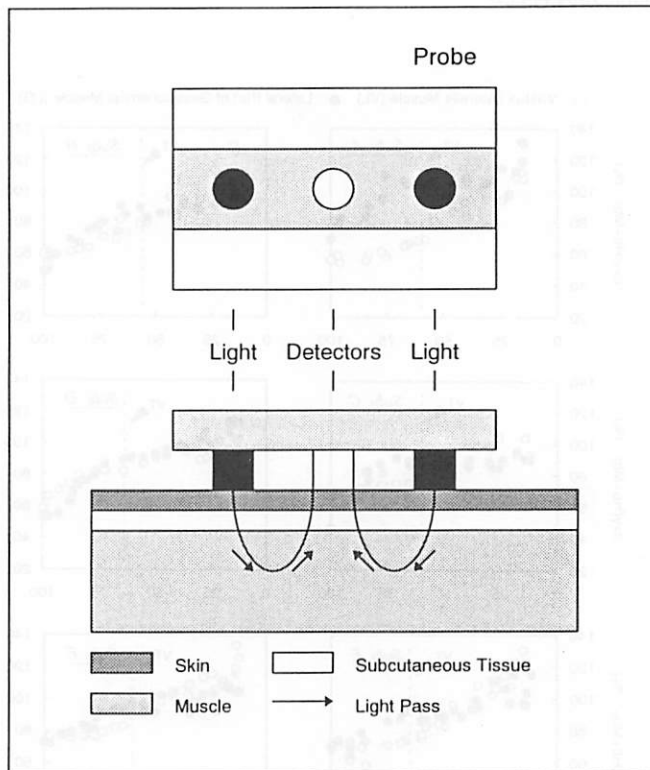


Figure 1. Schematic illustration of the near infrared spectroscopy probe and of the optical path from the light to the detector

D. 呼気ガス分析

測定の際には、呼気を運動中 30 秒毎に連続的に摂取し、熱線式流量計 (RM-300: ミナト医科学社製) によって換気量を計量した。O₂ および CO₂ 濃度については、それぞれジルコニア素子方式および赤外線方式によるガス分析器 (MG-360: ミナト医科学社製) を用いて、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)、炭酸ガス排出量 ($\dot{V}CO_2$)、毎分換気量 ($\dot{V}E$) を求めた。

E. 分析項目

各運動負荷段階における最後の 30 秒間の平均値を、その負荷に対する Oxy(Hb+Mb)、 $\dot{V}O_2$ として分析した。

III. 結果

各被検者の VL および LG における oxy(Hb+Mb) と $\dot{V}O_{2max}$ の変化は図 2 に、全被検者の結果は図 3 に示した通りである。各被検者毎にその変化パターンに違いがあるものの、大きく分けて次のような傾向がみられた。

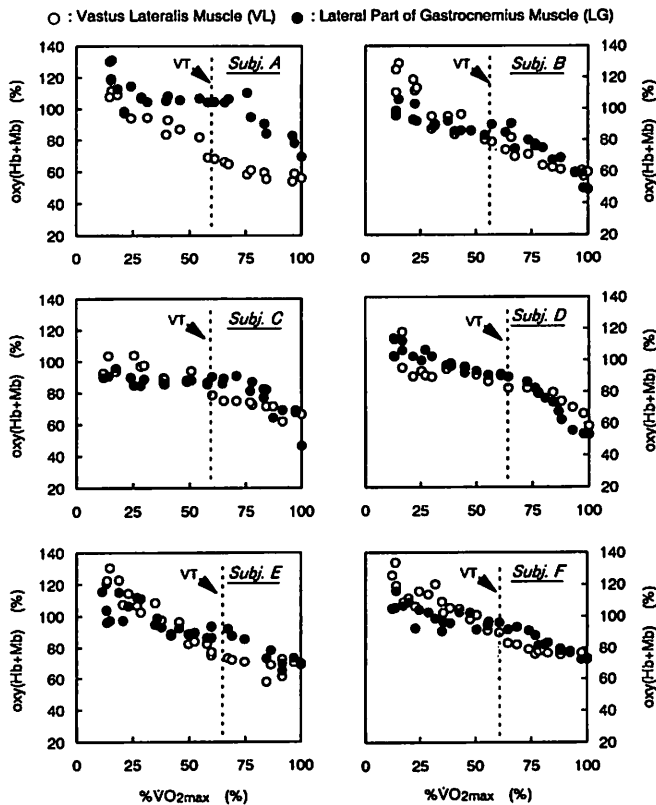


Figure 2. Changes of oxy(Hb+Mb) in the vastus lateralis (VL) and lateral part of the gastrocnemius muscle (LG) during the exhaustive exercise.

運動開始直後の低強度においては、VL および LG の oxy(Hb+Mb) は安静レベル (100%) を超えて増加した。その後、両部位ともに低下し、VL では約 40~50% $\dot{V}O_{2max}$ までは安静レベル付近で定常状態を保ち、それ以上の運動強度になると直線的に低下し、疲労困憊時 (100% $\dot{V}O_{2max}$) で再び定常状態を保つ傾向がみられた。一方、LG では中強度 (約 60~70% $\dot{V}O_{2max}$) までは oxy(Hb+Mb) が約 80~100% の範囲で定常状態を保ち、高強度 (70% $\dot{V}O_{2max}$ 以上) になると急激に低下する傾向がみられた。

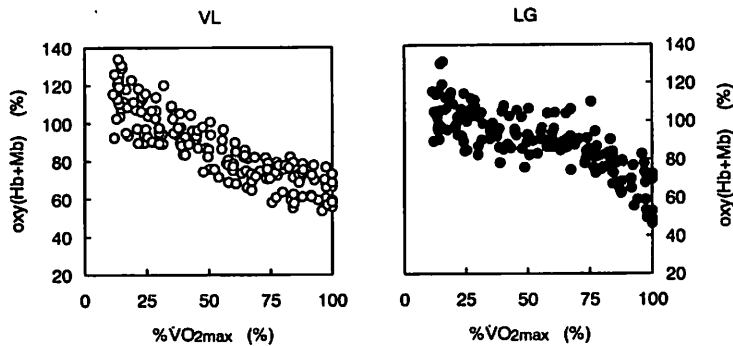


Figure 3. Relationship between % $\dot{V}O_{2max}$ and oxy(Hb+Mb) in the vastus lateralis (VL) and lateral part of the gastrocnemius muscle (LG) during the exhaustive exercise.

IV. 考察

近年、CT (Computerized Tomography)、MRI (Magnetic Resonance Imaging)、MRS (Magnetic Resonance Spectroscopy) あるいは近赤外分光法 (Near Infrared Spectroscopy) といった生体の形態および機能の非侵襲的測定法が注目されている⁷⁾。これらの方法は運動生理学、スポーツ医学の分野でも広く応用されており、なかでも近赤外分光法による測定器は、比較的小型で移動可能なために運動中の骨格筋の測定に適している^{8,9,11)}。

本研究では様々な活動時の局所レベルにおける運動強度・負担度の指標を oxy(Hb+Mb) で表示するための基礎的データを得るために、同一自転車こぎ運動時の大腿および下腿部における oxy(Hb+Mb) の変化の特性を明らかにしようとした。

oxy(Hb+Mb) の変化に影響を及ぼす因子としては、主に筋血流量、O₂ extraction、静脈還流量などが考えられる。また、運動により水素イオン濃度、体温あるいは CO₂ 分圧が上昇するため、Hb の O₂ 親和性が低下して末梢における O₂ extraction が増加すること、自転車こぎ運動のように脚を回転させると筋のポンプ作用によって下肢に貯留していた静脈血が還流すること、これらは oxy(Hb+Mb) を低下させる方向に作用する。一方、運動強度の増加にともなう筋血流量の増加は oxy(Hb+Mb) を増加させる方向に作用する。運動開始直後の低強度において、VL および LG の oxy(Hb+Mb) が安静レベルよりも増加しているのは、心拍出量の増加とともに活動筋への血流量が増加したことが原因の一つと考えられる。その後、VL では 40~50% $\dot{V}O_{2max}$

まで、LG では $60\sim 70\% \dot{V}O_{2\max}$ までは安静レベル付近で定常状態を保ち、それ以上の強度になると低下しはじめた。oxy(Hb+Mb) が定常状態にある場合は、活動筋での O_2 extraction の増加による oxy(Hb+Mb) を低下させる方向と動脈血の流入量の増加による oxy(Hb+Mb) を増加させる方向とが互いにつりあった状態にあり、さらに運動強度が増加すると活動筋での O_2 extraction が一層増加し、動脈血流入量の増加による影響を上回ることで oxy(Hb+Mb) の低下が始まると考えられる。

本研究と同様に漸増負荷運動時の大腿部における oxy(Hb+Mb) の変化をみた Belardinelli ら²⁾は、lactate threshold を超えると、過剰に CO_2 が産生し、Bohr 効果により Oxy(Hb+Mb) が一層低下すると報告している。本研究では非観血的方法で ventilatory threshold (VT) を求めたが、VL においては VT 出現前後から oxy(Hb+Mb) の低下がみられ、LG においては VT を超えてもしばらく定常状態が保たれた。このように、LG における oxy(Hb+Mb) の変化と VT との間には一定の関係が得られなかった。LG では VT 出現時点において oxy(Hb+Mb) が低下していないことから、LG 部位ではまだ多量の酸素が存在していると考えられ、この点は大腿と下腿部とでは自転車こぎ運動において有酸素的に行える運動強度の上限が異なることを意味するのかもしれない。

さて、本研究の一番の特徴は同一運動時の大腿および下腿部の oxy(Hb+Mb) の変化を観察し、その変化パターンに大きな違いがあった点である。この原因の一つに漸増負荷法による自転車こぎ運動時における大腿および下腿部の活動量の違いが考えられる。自転車こぎ運動時の主働筋は大腿四頭筋、大腿二頭筋、下腿三頭筋などであるが、中でも大腿部の筋群の運動への関与は大きい。筋収縮の強度、負担度の指標には、一般的に表面筋電図で得られる筋放電量を用いている。従来の研究から、自転車こぎ運動時の外側広筋における筋放電量は運動強度とともに増加し、筋放電量が急激に大きくなる運動強度 (fatigue threshold) と anaerobic threshold (AT) との間には有意な相関関係が認められている^{5,6)}。著者の知る限り、漸増負荷法を用いた自転車こぎ運動時の下腿筋群の筋放電量の変化と AT の関係については明らかにされていないようであるが、近赤外分光法による oxy(Hb+Mb) の変化と表面筋電図を同時に測定することで、VL および LG における oxy(Hb+Mb) の変化パターンの違いの原因が明らかにされるのではないかと考えられる。つまり、低～中強度では大腿部を中心とした筋群が運動に関与し、VT を超える強度では一層その関与が高まり、さらにそれ以上の強度になると大腿部の筋群だけでは強度に見合った仕事ที่ไม่十分になり、その他の協同筋群、特に下腿部の筋群が運動に参加するのではないかと推察される。このように、運動強度によって運動に参加する筋群の割合が異なるのではないかと考えられる。

V. まとめ

近赤外分光装置を用いて、漸増負荷法による自転車こぎ運動時の外側広筋 (VL) および腓腹筋外側筋 (LG) の oxy(Hb+Mb) の変化の特性を明らかにしようとした。その結果、運動開始直後の低強度においては VL および LG の oxy(Hb+Mb) は安静レベルを超えて増加し、その後、両部位ともに低下し、VL では約 $40\sim 50\% \dot{V}O_{2\max}$ までは安静レベル付近で定常状態を保ち、それ以上の運動強度になると直線的に低下し、疲労困憊時 ($100\% \dot{V}O_{2\max}$) 付近では再び定常状態

を保つ傾向がみられた。一方、LG では中強度 (約 $60\sim 70\% \dot{V}O_{2\max}$) までは oxy(Hb+Mb) が約 $80\sim 100\%$ の範囲で定常状態を保ち、高強度 ($70\% \dot{V}O_{2\max}$ 以上) になると急激に低下する傾向がみられた。このように、同一の自転車こぎ運動でありなが大腿および下腿部の oxy(Hb+Mb) の変化パターンには大きな違いがみられた。

参考文献

- 1) Beaver, W.L., K. Wasserman, and B.J. Whipp. On-line computer analysis and breath-by-breath graphical display of exercise function tests. *J.Appl.Physiol.* 34 : 128-132, 1973.
- 2) Belardinelli, R., T.J. Barstow, J. Porszasz, and K. Wasserman. Changes in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infrared spectroscopy. *Eur.J.Appl.Physiol.* 70 : 487-492, 1995.
- 3) Chance, B., S. Nioka, J. Kent, K. McCully, M. Fountain, R. Greenfeld, and G. Holton. Time resolved spectroscopy of hemoglobin and myoglobin in resting and ischemic muscle. *Anal.Biochem.* 174 : 698-707, 1988.
- 4) De Blasi, R.A., M. Cope, C. Elwell, F. Safoue, and M. Ferrari. Noninvasive measurement of human forearm oxygen consumption by near infrared spectroscopy. *Eur.J.Appl.Physiol.* 67 : 20-25, 1993.
- 5) deVries, H.A., T. Moritani, A. Nagata, K. Magnussen. The relation between critical power and neuromuscular fatigue as estimated from electromyographic data. *Ergonomics* 25 : 783-791, 1982.
- 6) deVries, H.A., M.W. Tichy, T.J. Housch, K.D. Smyth, A.M. Tichy, and D.J. Housh. A method for estimating physical working capacity at the fatigue threshold. *Ergonomics* 30 : 1195-1204, 1987.
- 7) Ekblom, B. Effect of physical training on oxygen transport system in man. *Acta Physiol. Scand.Suppl.* 328 : 1-45, 1956.
- 8) Hamaoka, T., C. Albani, B. Chance, and H. Iwane. A new method for the evaluation of muscle aerobic capacity in relation to physical activity measured by near-infrared spectroscopy. *Med.Sports Sci.* 37 : 421-429, 1992.
- 9) 浜岡隆文, 岩根久夫. 近赤外光を用いた局所骨格筋酸素動態のモニタリング. *体育の科学.* 43 : 365-368, 1993.
- 10) Hampson, N.B. and C.A. Piantadosi. Near infrared monitoring of human skeletal muscle oxygenation during forearm ischemia. *J.Appl.Physiol.* 64 : 2449- 2457, 1988.
- 11) 本間幸子, 福岡善之, 藤井宣晴, 江田英雄, 池上晴夫. 近赤外分光法を用い活動筋の循環動態の評価—自転車運動時の大腿活動筋について—. *体力科学.* 41 : 586-594, 1992.
- 12) Jobsis, F.F. Noninvasive infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science.* 198 : 1264-1266, 1977.
- 13) Koike, A., K. Wasserman, K.D. McKenzie, S. Zanconato, and D. Weiler- Ravell. Evidence that diffusion limitation determines O₂ uptake kinetics during exercise in man. *J.Clin.Invest.* 86 : 1698-1706, 1990.
- 14) Mancini, D.M., L. Bolinger, H. Li, K. Kendrick, B. Chance, and J.R. Wilson. Validation of near-infrared spectroscopy in humans. *J.Appl.Physiol.* 77 : 2740-2747, 1994.
- 15) Millikan, G.A. Experiments on muscle hemoglobin in vivo : The instantaneous measurement of muscle metabolism. *Proc. R. Soc.* 123 : 218-241, 1937.
- 16) Wasserman, K., B.J. Whipp, S.N. Koyal, and W.L. Beaver. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J.Appl.Physiol.* 35 : 236-243, 1973.
- 17) Wilson, J.R., D.M. Mancini, K. McCully, N. Ferraro, V. Lanoce, and B. Chance. Noninvasive detection of skeletal muscle underperfusion with near- infrared spectroscopy in patients with heart failure. *Circulation* 80 : 1668-1674, 1989.
- 18) Wyndham, C.H., N.B. Strydom, J.S. Martiz, J.F. Morrison, J. Peter, and Z.U. Potgieter. Maximum oxygen and maximum heart rate during strenuous work. *J.Appl.Physiol.* 14 : 927-936, 1959.

