

高強度短時間運動の繰り返しがエネルギー代謝機構に及ぼす 影響

有光 琢磨

要旨

本研究は、高強度短時間運動の繰り返しがエネルギー代謝機構に及ぼす影響を調査することを目的とし、7人の健常男子大学生にインターバルを有した5回の10秒間自転車運動（運動負荷は400 W、自転車の回転数は80 rpm）を実施した。左脚外側広筋に近赤外線分光装置のプロープを設置し、安静から運動終了まで連続して組織酸素飽和度（TOI）を測定した。また、安静、運動終了5、10、20分目に血中乳酸濃度を測定した。その結果、セット間のTOI、TOIの回復動態に有意差は認められず、血中乳酸濃度は運動終了5、10分で有意に増大した。これらの結果より、運動継続に対して有酸素性能力の貢献度の増大とともに、その有酸素性能力に起因するPCrの再合成・利用が引き起こされている可能性が示唆された。

キーワード：高強度短時間自転車運動 | 血中乳酸濃度 | NIRS | TOI

1. はじめに

短時間インターバルトレーニングは、非常に高い強度の運動を繰り返し¹⁾、ヒトの骨格筋代謝適応を引き起こす手法として利用されている²⁻⁴⁾。この高強度運動に必要とされるエネルギー供給の大部分は、クレアチンリン酸（PCr）の加水分解と解糖系代謝に由来し、PCrと水素イオン（H⁺）の両方の濃度が大きく変化する⁵⁻⁹⁾。この繰り返し運動の継続は、有酸素性エネルギー供給の貢献も増大するが、主に無酸素性エネルギー供給によって行われているとされる¹⁰⁾。横断的研究において、持久的能力の高い者は非鍛錬者¹¹⁾やスプリンター¹²⁾と比べてPCrの回復能力が速いことも報告されている。PCrの再合成や無機リ

ン酸塩の除去過程は、酸化系過程によってのみ生じるため筋内での酸素の利用が重要となる¹³⁻¹⁵⁾。従って、繰り返し運動によるパフォーマンスの維持は、活動筋への酸素の供給が重要となる。

骨格筋内の代謝は、より詳細な呼吸測定、ミトコンドリアの酵素活性評価、³¹P-核磁気共鳴法（³¹P-MRS）を用いて評価される。しかし、これらの評価方法は、高額機器の利用といった制限がある。近年、骨格筋内代謝を評価する方法として、近赤外線分光法

（NIRS）が利用されている。NIRSは、近赤外光の吸光度特性に基づき、骨格筋内の酸素化水準と血行動態の変化に関する情報をもたらす¹⁶⁾。酸素化ヘモグロビン（Hb）・ミオグロビン（Mb）（Oxy-Hb/Mb）や脱酸素化

Hb/Mb (Deoxy-Hb/Mb) の 2 つの NIRS 信号が特に有用であることが示されており、それらは組織内における代謝活性の増加により変化する。Deoxy-Hb/Mb は、筋内の酸素抽出の変化¹⁷⁻¹⁸⁾、一方、組織内酸素飽和度

(TOI%) の測定値は筋内の酸素供給と酸素消費のバランスを反映している¹⁹⁻²⁰⁾。これまでの NIRS を用いた研究において、スプリント運動中の骨格筋内脱酸素化動態が示されている²¹⁻²³⁾。運動開始時、外側広筋において、急激な増大を示し、その後、インターバル間の休息でベースラインへ向かう動態を示すことが報告されている (再酸素化)。

そこで本研究の目的は、短時間高強度負荷運動を繰り返すと、運動を継続するためのエネルギー供給はどのような影響を受けているのかを検討することである。評価手法として、非侵襲的な近赤外線分光装置 (NIRS) を用いて、エネルギー供給能力を評価する。また、仮説として、1 回のインパルス負荷で生じる血中乳酸は 5 回繰り返すと加算されるかを検証することとした。

2. 対象および方法

2-1. 被験者

本研究の被験者は、7 人の健常な男子大学生とした。被験者の年齢、身長、体重は、それぞれ 24.7±3.0 歳、173.0±7.7 cm、69.3±12.4kg であった (表 1)。各被験者は、

表 1 被験者の身体特性

	Age yrs	Hight cm	Weight kg	Wmax w
Sub. 1	30	172	67.0	200
Sub. 2	24	173	65.0	240
Sub. 3	22	162	52.5	150
Sub. 4	23	167	63.2	200
Sub. 5	23	180	72.6	320
Sub. 6	23	172	72.0	280
Sub. 7	28	185	93.0	280
Mean	24.7	173.0	69.3	238.6
SD	3.0	7.7	12.4	59.0

実験の目的、それに伴う危険性などを説明された後に実験に参加するための同意書に記名した。本実験は、北海道大学大学院教育学研究科倫理委員会の承認を得たのちに実施した。本研究は、ヘルシンキ宣言の趣旨に則して実施した。

2-2. プロトコル

各被験者は、研究室に来室し、身体組成を計測した。その後、自転車エルゴメータ (Ergometer 232 CXL, Combi, 東京, 日本) を用いて、50、100、150、200 W と各負荷で 5 分間の自転車運動を実施し、それに続けて漸増率 20 W の漸増負荷運動 (20 W/min) を実施した。運動終了条件は、各被験者が設定したペダルの回転数である 60 rpm を維持出来なくなるまでとした。これとは別の日に、運動負荷を 400 W とした高強度負荷運動を実施した。1) 10 秒間の高強度運動を 1 セット、2) 10 秒間の高強度運動をインターバル 5 分 50 秒とし 5 回繰り返す運動、を実施した。

各被験者は、運動中の心拍数を記録するため胸に電極を設置した。近赤外線分光装置は、各被験者の左脚 (外側広筋) にプローブを設置した。運動時において、各被験者は、リラックスした状態を保ち、安静、セット間で自転車エルゴメータのクランクを水平位置になるように指示された。

2-3. 測定項目

近赤外線分光法 (NIRS) は、筋組織酸素モニタ (NIRO-200nx, 浜松フォトニクス, 静岡, 日本) を用いて測定した。NIRO-200nx はモディファイド・ランベルト・ベール法 (MLB 法) により酸素化ヘモグロビン変化量や脱酸素化ヘモグロビン変化量を測定することが可能であるが、本研究では空間分解分光法 (SRS 法) により定量化される組織酸素化指標 (組織酸素飽和度: TOI) を採用した。NIRS プローブは、照射プローブと検出

プローブ間の距離 3.0 cm となる検出器で構成されている。光源から放出される三波長光 (735、810 および 850 nm) は、それが吸収または散乱され組織内に浸透し、散乱光の一部が光検出器に戻ることで検出可能となる。TOI のサンプリング周波数は、1 Hz としたが、TOI は脱酸素ヘモグロビン (HHb) と酸素化ヘモグロビン (O₂Hb) から、以下の式を用いることで算出された。

$$TOI = O_2Hb / (HHb + O_2Hb) \cdot \dots \cdot (1)$$

血液サンプル (100 μl) は、温めた指先から採取した。各被験者の手指は、動脈血化するために、各試験前に椅子に座りながら 40~45 °C のお湯で予熱した。予熱後、被験者の手指は、休息中および自転車エルゴメータでの運動中に手袋で保温した。予熱して採取した血液サンプルは、動脈血酸素分圧を正確に反映していないかもしれないが、動脈血の pH に近い値を反映することができると示されている²⁴⁾。血液サンプルは、血液アナライザー (i-STAT 1, i-STAT, Abbott Point of Care Inc. IL, USA) を用いて分析し血中乳酸濃度を算出した。

2-4. 統計解析

本研究結果は、平均値±標準偏差として記した。TOI と血中乳酸濃度の結果は、時間×各セットの分散分析を実施した。条件間に有意差が認められなかった場合、下位検定として一元配置の分散分析を実施し、事後検定として Bonferroni の post-hoc テストを実施した。有意水準は p<0.05 に設定した。

3. 結果

図 1 は、5 回の繰り返し高強度負荷運動時の各セットにおける TOI の変動を示してい

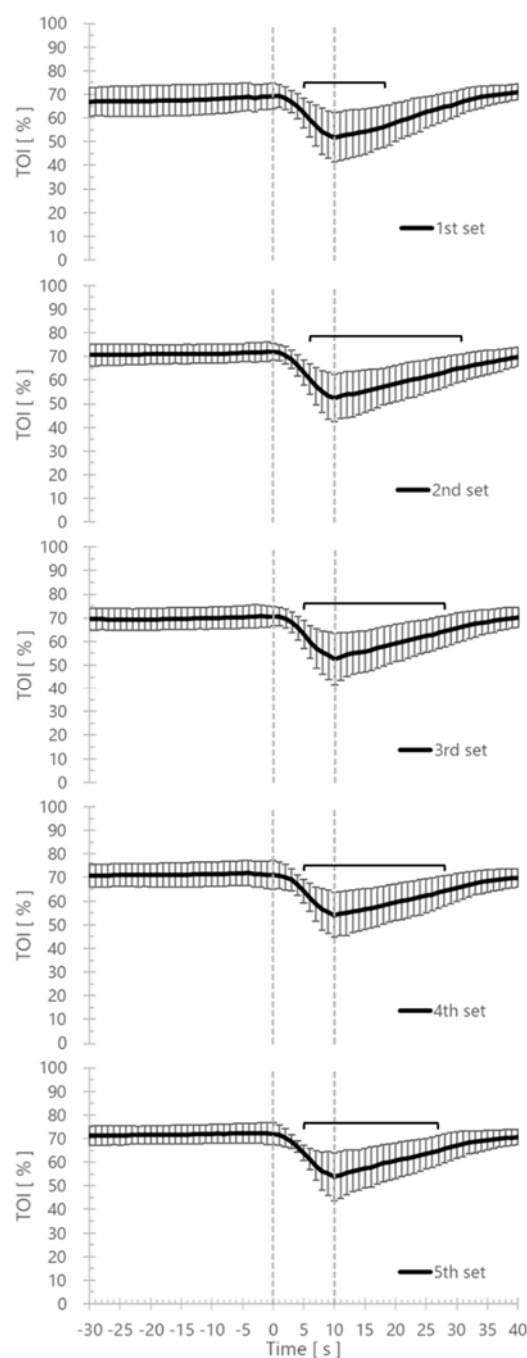


図 1 繰り返し運動時の各セットの TOI 動態
括弧で示している範囲は、運動開始点と比べて有意差が認められている範囲を示す。(p<0.05)

る。運動開始後、運動終了まで減少し続け、その後、安静レベルまで回復傾向を示した。1 セット目は、運動 6 秒目から運動後 14 秒目

迄、2セット目は、運動6秒目から運動後20秒目迄、3セット目は、運動5秒目から運動後18秒目迄、4セット目は、運動5秒目から運動後18秒目迄、5セット目は、運動5秒目から運動後18秒目迄、有意な低下を示していた。それ以降は、安静レベルと有意差は認められなかった。

図2は、5回の繰り返し高強度運動時における各セットの安静時、運動時最小値、変化量のTOIを示している。安静時と最低値のTOI間には、有意な差は認められなかった。

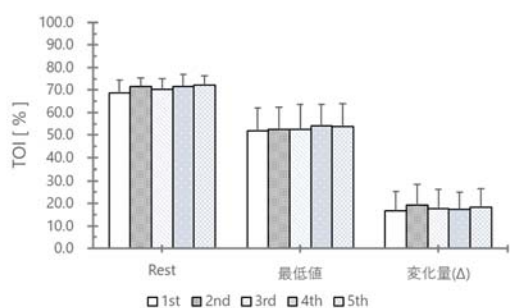


図 2 繰り返し高強度運動の各セットにおけるTOIの安静時、運動時最小値、変化量

図3は、繰り返し高強度運動各セットの運動終了後(回復期)において、TOI値が最小値から安静であるベースラインの半値(1/2)まで回復する時間($T_{1/2}$)および運動開始直前の前水準まで回復する時間(T_L)を示している。各セット回復期における $T_{1/2}$ と T_L は、3セット目のみ有意な増大が認められ、5セット目において増加傾向が認められた。しか

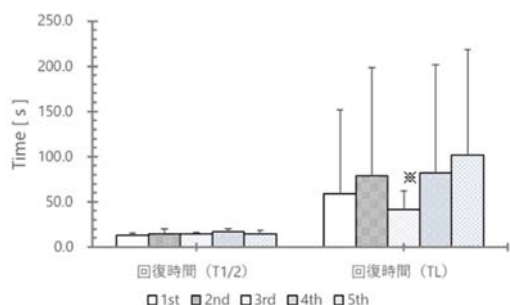


図 3 繰り返し高強度運動からの回復時におけるTOI値が運動開始直前と最低値の1/2まで回復するのに要する時間($T_{1/2}$)および運動開始直前まで回復するのに要する時間(T_L)

し、3セット目を除いて、他のセットの回復期では、運動開始直前レベルまで回復することなく次セットを実施する被験者が確認された。

図4は、1回のみの高強度負荷運動に伴う血中乳酸濃度の変化(黒線)、5回の繰り返し高強度負荷運動に伴う血中乳酸濃度の変化(赤線)を示している。1回のみ血中乳酸濃度は、安静時で 1.34 ± 0.4 mM、運動終了5分後で 2.59 ± 0.7 mMであった。5回の繰り返し運動時の血中乳酸濃度は、安静時で 1.31 ± 0.3 mM、運動終了5分後で 2.97 ± 1.0 mMであった。破線は、1回のみ実施した高強度負荷運動5分後の血中乳酸濃度を5倍して安静時を加算した数値を予測している。破線の予測値は、 14.3 ± 3.7 mMであった。

両実験において、血中乳酸濃度は、安静時と比較して、運動終了5分、10分で有意な増大を示した($p < 0.05$)。

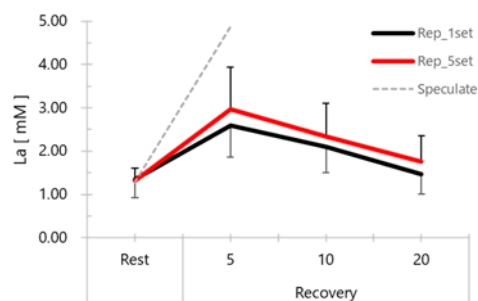


図 4 血中乳酸濃度の増大

4. 考察

本研究は、高強度短時間運動を繰り返して実施した場合と単回運動を比較し、単回運動によって生じるエネルギー代謝の変化が、繰り返し運動において、類似するように実施回数分の代謝応答の蓄積として変化するかを検証することであった。その結果、5回の繰り返し運動における1セット目と5セット目

間での TOI に有意な変化は認められなかった。運動終了時での TOI の変化量間もまた、セット間で有意差は認められなかった。運動時に減少した TOI が、運動開始直前水準までに回復するために要する時間は、セット間で長くなる傾向を示したが有意差までは認められなかった。血中乳酸濃度は、単回運動の結果から推測した繰り返し運動終了時の血中乳酸濃度と比べると、実測による血中乳酸濃度の方が低い結果であった。

TOI は、酸素の供給と利用のバランスの結果として反映される。活動筋での酸素の消費量が一定であると仮定すると、TOI の減少は、活動筋への酸素供給量の低下や酸素の抽出を意味する。5 回の繰り返し運動において、各セットの TOI 応答はセット間で有意な変化を示していない。また、TOI は運動開始後に急激に減少し最小値を示す。この運動時に生じる TOI の減少率（傾き）は、セット間で有意な変化を示していない。一般的に NIRS の応答は、持続的能力の評価指標として採用され、特に運動終了後の回復動態が評価される。Chance et al.²⁵⁾は、大腿四頭筋における負荷の増大とともに、最小値から運動開始直前である水準までの半値になるまでに要する時間が長くなることを報告している。しかし、局所筋を用いた他の研究では運動強度の増大が伴っても変化しないことも示されている²⁶⁾。本研究では、 $T_{1/2}$ は 14.8 ± 1.3 s ($13.3 \sim 16.7$) であり、セット間で有意な差を認めない。中年から高齢者における最大自転車運動後の $T_{1/2}$ は平均 $22.5 \sim 45.7$ 秒と報告¹⁾されており、本研究は先行研究より速い値を示している。同様に、運動開始直前の水準までに回復しているかを反映する T_L が、セット間で異なる傾向を示した（図 1、図 3）。内側広筋を用いて繰り返し収縮運動における NIRS の T_L を評価した結果²⁷⁾は、 T_L の再現性の高い結果を示しており、回復時間の評価指標として、また有酸素性能力を評価する有効

な指標である可能性が指摘されている。

筋内 pH が低下するような運動強度の場合、pH の低下によってミトコンドリア内の酸素消費が抑制されクレアチンリン酸の回復速度が低下する。特に、pH が 7.0 を下回ると再酸素化動態による有酸素性能力が評価出来なくなるとされる。回復期における $T_{1/2}$ が速くなることは、酸素の供給や酸素の利用の回復速度が速いことを意味している。事実、最高酸素摂取量とクレアチンリン酸の回復の関係が示されており²⁸⁾、筋での酸素消費の回復はクレアチンリン酸の回復を反映していると考えられ、 $T_{1/2}$ が速いものほど有酸素能力が高くなる可能性を示す。

Matsuura et al.²⁹⁾は、異なる休息時間を伴った繰り返し自転車運動を 10 セット実施し、5 回終了時点でも血中乳酸濃度が 10 mM を越えてくることを報告している。つまり、本研究においても、高強度負荷での繰り返し運動では、血中乳酸濃度は代謝されることなく蓄積されることが予測された。しかし、血中乳酸濃度は、単回で 2.59 ± 0.7 mM であり、繰り返し運動時で 2.97 ± 1.0 mM と先行研究や著者らが推測した数値より低い結果を示した。運動形態は異なるものの、繰り返し運動を実施した研究では、後半の運動において血中乳酸濃度が減少したと報告している³⁰⁻³¹⁾。本研究において、1 セット目と 5 セット目間の TOI に有意な差は認められていないことから、各セットにおける酸素供給量の低下（有酸素性エネルギーの動員の減少）が引き起こされているとは考えにくい。スプリント運動の継続による運動後半での無酸素性エネルギー供給による遂行¹⁰⁾というより、無酸素性エネルギーの動員減や有酸素性エネルギーの動員増が生じていたと考えられる。各セットによって産生された血中・筋中乳酸は、インターバルといった休息期間に代謝されたことが考えられる。骨格筋における Type II 線維内において産生された乳酸は、MCT-4 の働きで血管へ排

出され、MCT-1 の働きで Type I 線維内に取り込まれ代謝される。このような乳酸シャトルの働きが生じることでエネルギー源として利用された可能性も考えられる。さらに、PCr の利用・再合成による影響も考えられる。

TOI の T_{12} から有酸素能力の高さと PCr の回復能力の高さが指摘される。そのため、有酸素性能力の高い被験者は、PCr の再合成が速く、その結果として、短時間高強度負荷繰り返し運動初期で動員されるエネルギー源として PCr が十分に存在し、糖質を利用するような解糖系を多量に動員しなかったことで乳酸産生が抑制された可能性が考えられる。事実、同様のことが指摘されている³²⁾。

5. まとめ

本研究は、短時間高強度負荷繰り返し運動がエネルギー代謝にどのような影響を及ぼしているかを検討した。近赤外線分光法

(NIRS) を用いて、運動終了後から組織内酸素飽和度 (TOI) の回復過程の変化を用いることで被験者の有酸素能力を評価することが出来る可能性、また、血中乳酸濃度の変化から、運動に動員されるエネルギー供給機構を推測すること、その結果、運動継続に対して有酸素性能力の貢献度の増大とともに、その有酸素性能力に起因する PCr の再合成・利用が引き起こされている可能性を示唆した。

参考文献

1. Ichimura S, Murase N, Osada T, Kime R, Homma T, Ueda C, Nagasawa T, Motobe M, Hamaoka T, Katsumura T. Age and activity status affect muscle reoxygenation time after maximal cycling exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2006 38(7):1277-81, 2006
2. Gist NH, Fedewa MV, Dishman RK, Cureton KJ. Sprint interval training effects on aerobic capacity: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 44(2):269-79, 2014
3. Kubukeli ZN, Noakes TD, Dennis SD. Training techniques to improve endurance exercise performances. *Sports Med* 32:489-509, 2002
4. Ross A, Leveritt M. Long-term metabolic and skeletal muscle adaptations to short-sprint training: implications for sprint training and tapering. *Sports Med* 15:1063-82, 2001
5. Gaitanos GC, Williams C, Boobis LH, Brooks S. Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J Appl Physiol* 75:712-9, 1993
6. Parolin ML, Chesley A, Matsos MP, Spriet LL, Jones NL, Heigenhauser GJ. Regulation of skeletal muscle glycogen phosphorylase and PDH during maximal intermittent exercise. *Am J Physiol* 277(5):E890-900, 1999
7. Edge J, Bishop D, Goodman C, Dawson B. Effects of high- and moderate-intensity training on metabolism and repeated sprints. *Med Sci Sports Exerc* 37:1975-82, 2005
8. Spencer M, Bishop D, Dawson B, Goodman C. Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities: specific to field-based team sports. *Sports Med* 35:1025-44, 2005
9. Gray SR, De Vito G, Nimmo MA, Farina D,

- Ferguson RA. Skeletal muscle ATP turnover and muscle fiber conduction velocity are elevated at higher muscle temperatures during maximal power output development in humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 290:R376-82, 2006
10. McGawley K, Bishop D. Anaerobic and aerobic contribution to two, 5×6-s repeated-sprint bouts. *Coach Sport SciJ* 3:52, 2008
11. Takahashi H, Inaki M, Fujimoto K, Katsuta S, Anno I, Niitsu M, Itai Y. Control of the rate of phosphocreatine resynthesis after exercise in trained and untrained human quadriceps muscles. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 71: 396-404, 1995
12. Johansen L, Quistorff B. 31P-MRS characterization of sprint and endurance trained athletes. *Int J Sports Med* 24:183-9, 2003
13. Harris RC, Edwards RH, Hultman E, Nordesjö LO, Ny Lind B, Sahlin K. The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pflugers Arch* 28;367(2):137-42, 1976
14. Sahlin K, Harris RC, Hultman E. Resynthesis of creatine phosphate in human muscle after exercise in relation to intramuscular pH and availability of oxygen. *Scand J Clin Lab Invest* 39(6): 551-8, 1979
15. Hogan MC, Richardson RS, Haseler LJ. Human muscle performance and PCr hydrolysis with varied inspired oxygen fractions: a 31P-MRS study. *J Appl Physiol* 86 (4): 1367-73, 1999
16. Hamaoka T. Muscle oxygenation monitoring using near-infrared spectroscopy. *JPN J Phys Fit Sport* 2(2):203-7, 2013
17. Billaut F, Buchheit M. Repeated sprint performance and vastus lateralis oxygenation: Effect of limited O₂ availability. *Scand J Med Sci Sports* 23(3):e185–e93, 2013
18. Racinais S, Bishop D, Denis R, Lattier G, Mendez-Villaneuva A, Perrey S. Muscle deoxygenation and neural drive to the muscle during repeated sprint cycling. *Med Sci Sports Exerc* 39(2):268-74, 2007
19. Jones B, Hamilton DK, Cooper C. Muscle Oxygen Changes following Sprint Interval Cycling Training in Elite Field Hockey Players. *Plos One* 10(3): e0120338, 2015
20. Bailey SJ, Wilkerson DP, DiMenna FJ, Jones AM. Influence of repeated sprint training on pulmonary O₂ uptake and muscle deoxygenation kinetics in humans. *J Appl Physiol* 106(6):1875-87, 2009
21. Boone J, Bouckaert J, Barstow TJ, Bourgois J. Influence of priming exercise on muscle deoxy [Hb+ Mb] during ramp cycle exercise. *Eur J Appl Physiol* 112(3):1143-52, 2012
22. Buchheit M, Ufland P. Effect of endurance training on performance and muscle reoxygenation rate during repeated-sprint running. *Eur J Appl Physiol* 111(2):293-301, 2011

23. Boushel R, Langberg H, Olesen J, Gonzales-Alonzo J, Bülow J, Kjaer M. Monitoring tissue oxygen availability with near infrared spectroscopy (NIRS) in health and disease. *Scand J Med Sci Sports* 11(4):213-22, 2001
24. Zavorsky GS, Cao J, Mayo NE, Gabbay R, Murias JM. Arterial versus capillary blood gases: a meta-analysis. *Respir Physiol Neurobiol* 155:268-79, 2007
25. Chance B, Dait MT, Zhang C, Hamaoka T, Hagerman F: Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscle of elite competitive rowers. *Am J Physiol* 262: 766-75, 1992
26. 浜岡隆文. 運動における局所骨格筋酸素動態の非観血的評価-近赤外分光法の応用. *東医大誌* 51:437-45, 1993
27. 岡隆浩. 近赤外分光法による内側広筋等尺性運動の酸素動態測定: 評価の指標と信頼性に関する研究. *リハビリテーション医学* 36:526-32, 1999
28. Kent-Braun JA, Ng AV. Skeletal muscle oxidative capacity in young and older women and men. *J Appl Physiol* 89:1072-8, 2000
29. Matsuura R, Ogata H, Yunoki T, Arimitsu T, Yano T. Effect of blood lactate concentration and the level of oxygen uptake immediately before a cycling sprint on neuromuscular activation during repeated cycling sprints. *J Physiol Anthropol* 25(4):267-73, 2006
30. Bangsbo J, Graham TE, Kiens B, Saltin B. Elevated muscle glycogen and anaerobic energy production during exhaustive exercise in man. *J Physiol* 451:205-27, 1992
31. Bangsbo J, Graham TE, Kiens B, Saltin B. Elevated muscle glycogen and anaerobic energy production during exhaustive exercise in man. *J Physiol* 451:205-27, 1992
32. Bangsbo J, Krstrup P, González-Alonso J, Saltin B. ATP production and efficiency of human skeletal muscle during intense exercise: effect of previous exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 280(6):E956-64, 2001

執筆者紹介 (所属)

有光琢磨 八戸学院大学 健康医療学部 講師