

〈原 著〉

事前運動が最大強度運動時における 2つの筋脱酸素化パラメータに及ぼす影響

Differential effects of prior exercise on two muscle deoxygenation parameters during maximal exercise

大澤 拓也¹, 塩瀬 圭佑², 高橋 英幸³

TAKUYA OSAWA¹, KEISUKE SHIOSE², HIDEYUKI TAKAHASHI³

Abstract

The purpose of this study was to investigate that the effects of prior exercise on two muscle deoxygenation parameters during maximal exercise were different. Seven active male volunteers (24±3 years) performed a heavy intermittent exercise test, composed of a 1-min maximal exercise (M-1), a 6-min exercise at the intensity of 65-70% of maximal oxygen uptake, and a 1-min maximal exercise (M-2), separated by 4-min rests. The changes of deoxygenated hemoglobin and myoglobin (d-HHb) and tissue oxygen saturation (d-StO₂), assessed by near-infrared continuous-wave and spatially-resolved spectroscopies, respectively, were monitored from the vastus lateralis continuously. The d-HHb increased and the d-StO₂ decreased during both M-1 and M-2 exercises. Compared to the M-1 exercise, d-StO₂ was higher throughout the M-2 exercise (P<0.01), but not d-HHb (N.S.). These results suggest that, during 1-min maximal exercise, the d-StO₂ was partially attenuated by the prior exercise-induced vasodilation, but not the d-HHb.

Key words: Near-infrared spectroscopy, Working muscle, Cycling

緒言

組織内の酸素状態を評価する方法として、近赤外分光法 (near infrared spectroscopy :

NIRS) が用いられている。これは近赤外光を体表面上より組織に照射し、酸素化ヘモグロビン (Hb)/ミオグロビン (Mb) と脱酸素化 Hb/Mb の吸光度の違いを利用して、組織内部の酸素状態を計測することができる。そのメリットとし

¹Faculty of Sports and Health Sciences, Japan Women's College of Physical Education, 8-19-1 Kitakarasuyama, Setagaya-ku, Tokyo 157-8565, Japan.

²Faculty of Sports and Health Science, Fukuoka University, 8-19-1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180, Japan.

³Department of Sports Science, Japan Institute of Sports Science, 3-15-1 Nishigaoka, Kita-ku, Tokyo 115-0056, Japan.

て、非侵襲的かつ連続的測定が可能であること、簡便性が高いこと、装置が比較的安価であることなどが挙げられ、これまでに数多くのNIRSに関する研究が行われている (Hamaoka et al. 2011). 一方、直接HbやMbを測定していないことから、その理解や解釈には議論の余地がある。

NIRSにはいくつかの測定法が存在するが、特に連続光法 (near infrared continuous-wave spectroscopy: NIR-CWS), および空間分解法 (near infrared spatially-resolved spectroscopy: NIR-SRS) が普及しており、幅広く利用されている。この二者の違いとして、NIR-CWSでは送受光間距離がひとつであり、検出光の量的変化から値が算出されるのに対して、NIR-SRSでは送受光間距離が2つであり、それぞれで得られた光強度の違いに基づいて値が算出される。これまでの研究において、これらの測定法を用いて、筋脱酸素化を同時に検討した研究は散見される (Caldwell et al. 2016; Spencer et al. 2012) が、その2つを比較した研究はほとんど見られない。

運動強度が変化するとき、特に高強度運動開始時において、筋組織内における酸素の供給と消費のバランスは大きく変化する (DeLorey et al. 2005). また、事前運動により、筋組織内の循環応答が速くなる (Marles et al. 2007). 従って、NIR-CWSにより評価された筋脱酸素化指標である脱酸素化Hb/Mbは動脈血流の変化の影響を受けにくい (Davies et al. 2008) のであれば、事前運動による影響を受けず、一方、NIR-SRSにより評価された筋脱酸素化指標である酸素飽和度は測定部位における酸素バランスを反映すると考えられることから、事前運動により筋脱酸素化が緩和される可能性が考えられる。しかしながら、事前運動が高強度運動開始時における2つの異なる測定法により算出された筋脱酸素化指標に及ぼす影響は明らかでない。もしも2つの筋脱酸素化指標が異なる変化を示すのであれば、2つの筋脱酸素化指標の理

解につながると考えられる。

本研究では、高強度運動開始時における2つの筋脱酸素化指標 (NIR-CWSによって算出される脱酸素化Hb/MbおよびNIR-SRSによって算出される組織酸素飽和度) は、事前運動によりどのような違いを示すのか明らかにすることを目的とした。

方法

1) 被験者

活動的な若年男性7名 (24±3歳, 身長: 168±6cm, 体重: 57.5±4.1kg) が本研究に参加した。実験実施に際して、被験者は本研究の内容および危険性について、文書および口頭にて説明を受け、同意書に署名した。本研究はヘルシンキ宣言に則り、国立スポーツ科学センターの倫理委員会 (通知番号第018号) の承認を得たうえで実施された。

2) 実験デザイン・運動プロトコル

実験は非連続した2日間で行われた。1日目、最高酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2peak}$) とその時の運動負荷を算出するため、被験者は自転車エルゴメータ (エクスカリバースポーツ2500, ロード社, オランダ) を用いた多段階式運動負荷試験を疲労困憊に至るまで実施した。

2日目、自転車エルゴメータを用いた高強度間欠的運動負荷試験を実施した。運動プロトコルは安静1分後、100% $\dot{V}O_{2peak}$ 運動1分 (M-1), 安静4分、65-70% $\dot{V}O_{2peak}$ 運動6分、安静

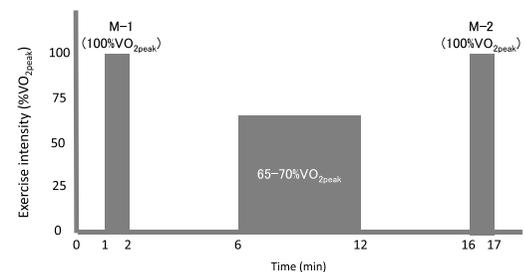


Fig. 1 Exercise protocol

4分, 100% $\dot{V}O_{2peak}$ 運動1分(M-2)であった(Fig. 1). 安静時の測定は自転車のシート上とした. また, 各運動の開始は右脚の踏み出しとし, また各運動の開始および停止は測定者の合図に合わせて行われた.

2日間を通して, 自転車エルゴメータのハンドル・シート位置は被験者ごとに決定され, 被験者のシューズとペダルはストラップにより固定された. また, 座位・アップライト姿勢でのペダリング運動とし, ペダル回転数は毎分60回転とした.

3) 測定項目

酸素摂取量($\dot{V}O_2$, STPD)は呼吸代謝測定システム(AE-310s, ミナト医科学, 大阪)を用いて, breath-by-breath法により測定された. 心拍数は胸部センサ(Polar RS800CX, ポラール, フィンランド)を用いてモニタされた. $\dot{V}O_2$, 心拍数は運動開始から運動終了まで, 連続的に測定された.

血中乳酸値は簡易型血中乳酸値測定器(ラクテート・プロ, アークレー, 京都)を用いて, 指尖より微量(5 μ L)採血を行い, 算出した. 採血はM-1およびM-2運動終了1分後および3分後とし, それぞれ高い値をM-1およびM-2運動後の値として採用した.

NIR-CWSおよびNIR-SRSが可能である近赤外分光装置(NIRO-200NX)を用いて, 自転車運動の主働筋である外側広筋の酸素化Hb/

Mb, 脱酸素化Hb/Mb, 総Hb, および組織酸素飽和度の変化量(d-StO₂: パーセントポイント(%pt))を測定した. プローブは右の外側広筋上, 遠位3分の1部位に貼付され, 遮光カバーされた. また, 本研究では, 各指標は基準値(ゼロ)からの相対変化で評価された. 基準値(ゼロ)は運動開始前の安静時, 被験者のペダル位置が最前方(アナログ時計の短針3時位置)に固定され, 各指標が安定したときの値とした. 近赤外分光装置のプローブは送受光間距離が3cmであり, 送信頻度は10Hzであった. 取得されたデータは15秒ごとに平均化された.

4) データ処理・統計解析

データは全て平均値 \pm 標準偏差で示した. また, $\dot{V}O_2$, 心拍数, およびNIRSにより取得された各データは15秒ごとに平均化された. 統計処理は統計ソフト(SPSS Statics 24, IBM社, シカゴ)を用いた. M-1とM-2とを比較するため, 二元配置分散分析(順序 \times 時間)を行った. 順序の主効果が認められた場合, M-1とM-2の二水準を比較するため, 対応のあるt検定を行った. 全ての統計処理において, 有意水準を5%未満とした.

結果

被験者の $\dot{V}O_{2peak}$ およびその時の負荷はそれぞれ50.1 \pm 11.2mL/kg/分, 258 \pm 42Wであっ

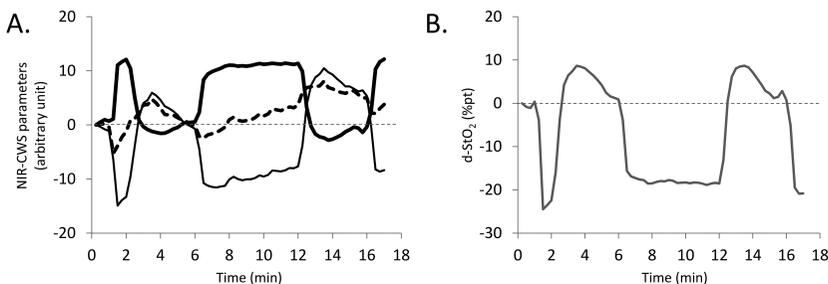


Fig. 2 Changes of NIRS parameters in a representative subject throughout the test. A: NIR-CWS parameters (thin line: Oxygenated Hb/Mb, thick line: Deoxygenated Hb/Mb, thick dotted line: Total Hb), B: NIR-SRS parameters (d-StO₂). The thin dotted line is a baseline before the exercise.

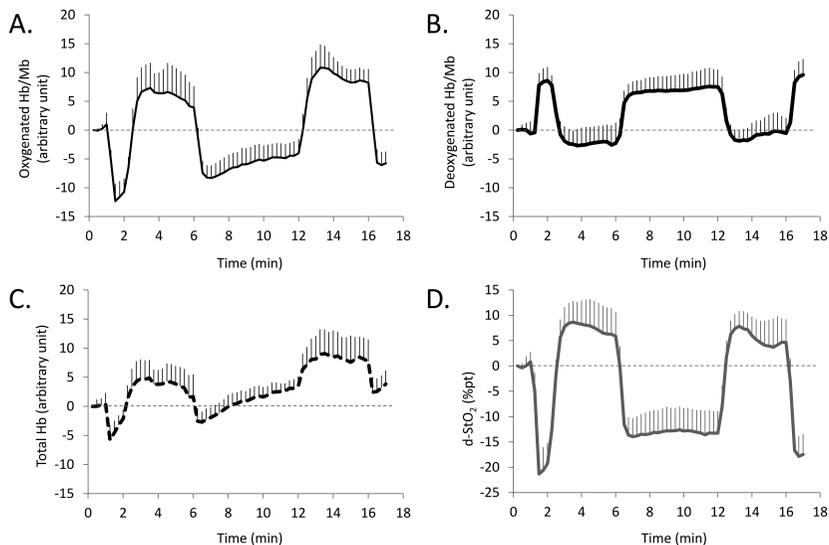


Fig. 3 Changes of NIRS parameters throughout the test. Mean \pm S.D. **A:** Oxygenated Hb/Mb, **B:** Deoxygenated Hb/Mb, **C:** Total Hb, **D:** d-StO₂. The thin dotted line is a baseline before the exercise.

た.

高強度間欠的運動負荷試験時における NIRS 指標の被験者 1 名の値, および全被験者の平均値を Fig. 2, Fig. 3 に示す。M-1 および M-2 開始前における脱酸素化 Hb/Mb はそれぞれ -0.61 ± 2.11 , -0.55 ± 2.65 であり, d-StO₂ はそれぞれ $0.81 \pm 1.93\%$ pt, $4.64 \pm 4.59\%$ pt であった。M-1 (0-15 秒: -0.4 ± 2.5 , 15-30 秒: 7.8 ± 2.1 , 30-45 秒: 8.4 ± 2.3 , 45-60 秒: 8.6 ± 2.4) と M-2 (0-15 秒: 1.3 ± 2.6 , 15-30 秒: 8.2 ± 2.2 , 30-45 秒: 9.3 ± 2.6 , 45-60 秒: 9.6 ± 2.7) との比較において, 脱酸素化 Hb/Mb は両条件間に有意差が認められなかった (N.S.)。また, 7 名中 6 名において, 最大運動 1 分間の平均値は M-1 よりも M-2 の方が高値を示した。一方, d-StO₂ では, M-1 (0-15 秒: $-4.9 \pm 3.6\%$ pt, 15-30 秒: $-21.3 \pm 4.7\%$ pt, 30-45 秒: $-20.6 \pm 4.5\%$ pt, 45-60 秒: $-19.2 \pm 4.1\%$ pt) と比較し, M-2 (0-15 秒: $-3.0 \pm 4.4\%$ pt, 15-30 秒: $-16.7 \pm 3.6\%$ pt, 30-45 秒: $-17.8 \pm 4.0\%$ pt, 45-60 秒: $-17.5 \pm 4.0\%$ pt) では有意な増加が認められた ($P < 0.01$)。また, 全被験者において, 最大運動 1 分間の平均値は M-1

よりも M-2 の方が高値を示した。酸素化 Hb/Mb (M-1 0-15 秒: -5.3 ± 1.9 , 15-30 秒: -12.3 ± 3.0 , 30-45 秒: -11.6 ± 2.7 , 45-60 秒: -10.7 ± 2.3 , M-2 0-15 秒: 1.1 ± 1.5 , 15-30 秒: -5.7 ± 2.3 , 30-45 秒: -6.1 ± 2.3 , 45-60 秒: -5.7 ± 2.0 , $P < 0.01$)。総 Hb (M-1 0-15 秒: -5.8 ± 2.5 , 15-30 秒: -4.5 ± 2.1 , 30-45 秒: -3.2 ± 1.6 , 45-60 秒: -2.1 ± 1.4 , M-2 0-15 秒: 2.4 ± 2.6 , 15-30 秒: 2.6 ± 2.2 , 30-45 秒: 3.2 ± 2.1 , 45-60 秒: 3.8 ± 2.3 , $P < 0.01$) は M-1 と M-2 との間に有意差が認められた (Fig. 4)。

$\dot{V}O_2$ (M-1 0-15 秒: 14.5 ± 5.9 mL/kg/分, 15-30 秒: 27.3 ± 6.8 mL/kg/分, 30-45 秒: 34.2 ± 6.1 mL/kg/分, 45-60 秒: 36.3 ± 4.9 mL/kg/分, M-2 0-15 秒: 16.8 ± 5.0 mL/kg/分, 15-30 秒: 34.1 ± 8.6 mL/kg/分, 30-45 秒: 39.8 ± 7.7 mL/kg/分, 45-60 秒: 40.3 ± 5.0 mL/kg/分, $P < 0.01$) および心拍数 (M-1 0-15 秒: 87 ± 17 拍/分, 15-30 秒: 121 ± 10 拍/分, 30-45 秒: 134 ± 11 拍/分, 45-60 秒: 145 ± 8 拍/分, M-2 0-15 秒: 107 ± 18 拍/分, 15-30 秒: 138 ± 13 拍/分, 30-45

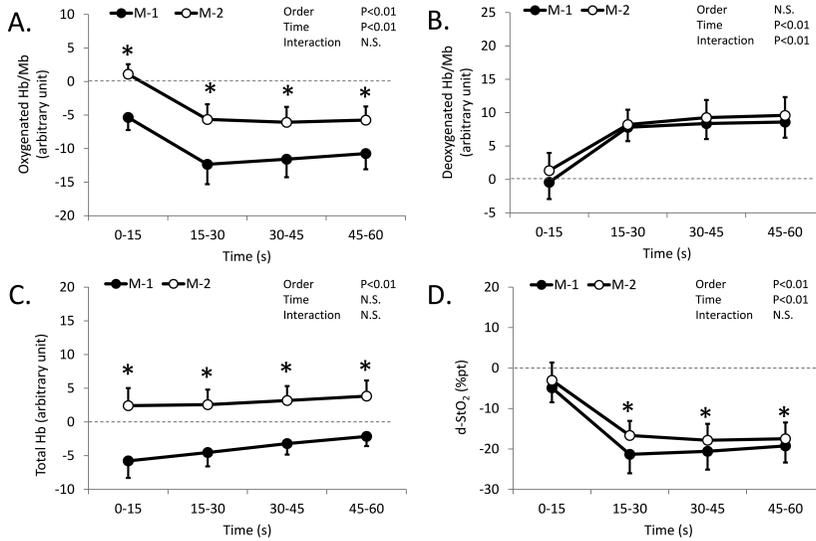


Fig. 4 Changes of NIRS parameters during the M-1 and M-2 exercises. Mean \pm S.D. A: Oxygenated Hb/Mb, B: Deoxygenated Hb/Mb, C: Total Hb, D: d-StO₂. * $P < 0.05$ (M-1 vs. M-2). The thin dotted line is a baseline before the exercise.

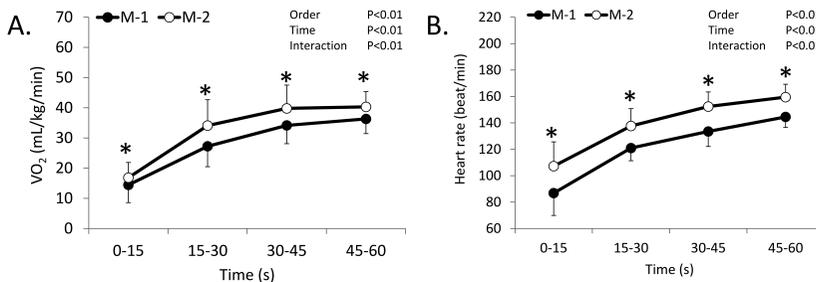


Fig. 5 Changes of pulmonary oxygen uptake (A) and heart rate (B) during the M-1 and M-2 exercises. Mean \pm S.D. * $P < 0.05$ (M-1 vs. M-2).

秒：152 \pm 11 拍/分，45-60 秒：160 \pm 10 拍/分， $P < 0.01$) は M-1 と M-2 との間に交互作用が認められた (Fig. 5)。一方，血中乳酸濃度は M-1 と M-2 との間で有意差は認められなかった (M-1：6.80 \pm 1.19mM，M-2：7.18 \pm 1.93mM，N.S.)。

考察

本研究では，事前運動が最大運動開始時における NIRS により評価された 2 つの筋脱酸素化指標に及ぼす影響について検討した。その結果，事前運動により，M-2 では脱酸素化 Hb/Mb は

変化しなかったものの，d-StO₂ は増加すること (つまり，脱酸素化の低下) が明らかとなった。これまでにも NIRS による筋脱酸素化の指標について様々な議論が行われてきた (Quaresima and Ferrari 2009 ; Jones et al. 2009) が，本研究で用いた 2 つの指標，脱酸素化 Hb/Mb および d-StO₂，を比較した研究は現在までほとんど見られない。本研究は，その違いの要因を十分に説明できないものの，二者の違いを同時測定により検討した意義ある研究であると考えられる。

NIRS は組織内における微小循環 (細動脈，毛細血管，細静脈) の Hb や Mb を反映しており，

また、HbとMbを分離した測定が困難なものの、運動時においては主にHbを反映していると考えられている(Hamaoka et al. 2011)。それゆえ、本研究における脱酸素化Hb/Mbやd-StO₂は主に微小循環におけるHbの変化によるものであると推測される。また、脱酸素化Hb/Mbは、測定範囲における酸素と結合していないHbやMbの基準値からの変化量を示している。本指標が“酸素抽出”の指標として用いられる(Davies et al. 2008; Jones et al. 2009)のは、動脈血酸素が変化していないことが前提である。本研究では動脈血酸素飽和度を測定していないが、動脈血酸素飽和度が一定であると仮定した場合、脱酸素化Hb/Mbは組織における酸素抽出を反映していると考えられる。本研究は常圧酸素環境下での運動であり、また被験者の有酸素性作業能力や本運動プロトコルの運動時間から、運動誘発性動脈血酸素不飽和が大きく生じたとは考えにくい。そのため、脱酸素化Hb/Mbの増加は組織における酸素抽出を反映していると推察される。また、総Hbは血液量の変化の指標であり、これは微小血管の収縮・拡張を反映すると考えられる。本研究では、M-1と比較し、M-2の総Hbは高値を示したことから、M-2では酸素供給量が増加している可能性が考えられ、先行研究(Davies et al. 2008)での仮定と異なり、本運動プロトコルにおいては脱酸素化Hb/Mbは組織における酸素の供給・消費バランスを反映していない可能性が高い。

一方、NIR-SRSによる組織酸素化指標は測定範囲内のHb/Mb全体に対する酸素化Hb/Mbの割合を示す指標であり、その変化(d-StO₂)は酸素の供給・消費の双方に起因する。また、運動開始時に見られる筋収縮による機械的圧迫や交感神経性血管収縮による影響は受けにくいという特徴がある(Tew et al. 2010)。本研究では、d-StO₂は事前運動により増加が認められたが、これは組織における脱酸素化が低下したことを示している。M-1とM-2は同一運動であり、M-

1と比較し、M-2では筋酸素消費量の低下が生じたとは考えにくい。組織における酸素抽出される前の血液量、主に細動脈の血管拡張および酸素供給の増加が影響したと考えられる。また、脱酸素化Hb/Mbと異なり、d-StO₂では、M-1開始前と比較して、M-2開始前では高値を示したこともM-2時におけるd-StO₂の増加に影響したと考えられる。

本研究の限界として、被験者数が少ないこと、運動時間が1分と短く、時定数を算出していないこと、単一筋・一部位のみの計測であること、などが挙げられる。今後、NIR-CWSとNIR-SRSによる脱酸素化指標の違いを検討する研究では、これらを考慮して実施する必要がある。

本研究では、事前運動が最大運動時における2つの脱酸素化指標に及ぼす影響がNIR-CWSとNIR-SRSにより異なるのか、明らかにすることを目的として実験を行った。その結果、NIR-CWSによる脱酸素化Hb/Mbは事前運動による変化は認められなかったが、NIR-SRSによるd-StO₂は有意に増加した(d-StO₂の変化量の低下)。従って、事前運動に伴う酸素供給量の増加により、2つの指標は異なる変化を示し、主に酸素抽出の変化に由来して変化する脱酸素化Hb/Mbはほとんど影響されないが、酸素の供給と消費の両者のバランスを示すd-StO₂はその変化量が小さくなることが示唆された。

利益相反自己申告：申告すべきものはなし

参考文献

- Caldwell, J. T., Wardlow, G. C., Branch, P. A., Ramos, M., Black, C. D., Ade, C. J.: Effect of exercise-induced muscle damage on vascular function and skeletal muscle microvascular deoxygenation. *Physiol. Rep.* **4**: e13032, 2016.
- Davies, R. C., Eston, R. G., Poole, D. C., Rowlands, A. V., DiMenna, F., Wilkerson, D. P., Twist, C., Jones, A. M.: Effect of eccentric exercise-induced muscle damage on the dynamics of muscle oxygen-

- ation and pulmonary oxygen uptake. *J. Appl. Physiol.* **105**: 1413-1421, 2008.
- DeLorey, D. S., Kowalchuk, J. M., Paterson, D. H.*: Adaptation of pulmonary O₂ uptake kinetics and muscle deoxygenation at the onset of heavy-intensity exercise in young and older adults. *J. Appl. Physiol.* **98**: 1697-1704, 2005.
- Hamaoka, T., McCully, K. K., Niwayama, M., Chance, B.*: The use of muscle near-infrared spectroscopy in sport, health and medical sciences: recent developments. *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.* **369**: 4591-4604, 2011.
- Marles, A., Perrey, S., Legrand, R., Blondel, N., Delangles, A., Betbeder, D., Mucci, P., Prieur, F.*: Effect of prior heavy exercise on muscle deoxygenation kinetics at the onset of subsequent heavy exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* **99**: 677-684, 2007.
- Quaresima, V., Ferrari, M.*: Muscle oxygenation by near-infrared-based tissue oximeters. *J. Appl. Physiol.* **107**: 371, 2009.
- Spencer, M. D., Murias, J. M., Paterson, D. H.*: Characterizing the profile of muscle deoxygenation during ramp incremental exercise in young men. *Eur. J. Appl. Physiol.* **112**: 3349-3360, 2012.
- Tew, G. A., Ruddock, A. D., Saxton, J. M.*: Skin blood flow differentially affects near-infrared spectroscopy-derived measures of muscle oxygen saturation and blood volume at rest and during dynamic leg exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* **110**: 1083-1089, 2010.
- Jones, A. M., Davies, R. C., Ferreira, L. F., Barstow, T. J., Koga, S., Poole, D. C.*: Reply to Quaresima and Ferrari. *J. Appl. Physiol.* **107**: 372-373, 2009.