

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 26 日現在

機関番号：34523

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560362

研究課題名(和文) 活動筋の深層部における酸素動態

研究課題名(英文) Deep muscle deoxygenation during exercise

研究代表者

古賀 俊策 (KOGA, SHUNSAKU)

神戸芸術工科大学・芸術工学部・教授

研究者番号：50125712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：活動する筋肉の酸素要求に対して酸素の供給が遅れると、酸素不足量が増加して運動を安全に長時間続けることが困難になる。とくに、運動強度が急激に増加すると、活動筋内部の酸素の消費と供給(血流量)のミスマッチとその空間的な不均一性が顕著になる。近赤外分光装置(NIRS)によるヒトの活動筋酸素動態(酸素の消費と供給のバランス)の計測部位は従来、筋肉の表層部に限られ、遅筋線維が多く含まれる深層部(例、中間広筋)の酸素動態については不明である。本研究では、酸素不足を改善(減少)する有酸素運動処方・トレーニング法を提案するために、新型のNIRS装置を用いてヒトの表層筋に加えて深層筋の酸素動態を検討した。

研究成果の概要(英文)：Near-infrared assessment of skeletal muscle is restricted to superficial tissues due to power limitations of spectroscopic systems. We reasoned that understanding of muscle deoxygenation may be improved by simultaneously interrogating deeper tissues. To achieve this we modified a high-power time-resolved near-infrared spectroscopy system (TRS-NIRS), to increase depth penetration. Superficial and deep spectroscopy was performed in 6 participants during heavy-intensity cycle exercise. Compared with the superficial rectus femoris (RF), peak deoxygenation of the deep RF (including the superficial intermedius in some) was not significantly different, but deoxygenation kinetics were significantly slower. These data validate a high-power TRS-NIRS system with large OS for measuring the deoxygenation of deep tissues, and reveal temporal and spatial disparities in muscle deoxygenation responses to exercise.

研究分野：運動生理学

キーワード：深層筋における酸素動態 活動筋

1. 研究開始当初の背景

活動筋の微小循環レベルにおける酸素消費 ($\dot{V}O_2$) と酸素供給 (\dot{Q}) のバランス (酸素動態) は空間的・時間的に不均一である。 $\dot{V}O_2$ の増加に対して \dot{Q} が相対的に遅れると $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ の値が増加して酸素不足が生じる。これまで、申請者は近赤外分光装置 (NIRS) 装置を用いてヒトの運動開始時における大腿四頭筋の脱酸素化ヘモグロビン + ミオグロビン (Hb+Mb) ($\dot{V}O_2/\dot{Q}$ を反映) の部位差を計測した。しかし、従来の NIRS 装置の計測深度は筋肉の表層部 (深さ約 1.5-2cm) に限られるため、有酸素的な遅筋線維が多く含まれる深層部 (例、中間広筋) の酸素動態は不明である。また、PET イメージング (陽電子放射断層撮影法) によれば、深層筋の $\dot{V}O_2$ と血流量は表層筋のそれよりも多い。しかし、PET の測定は運動の前後に限られ、日常の身体活動 (活動強度が時間と共に変化する) における酸素動態の連続的な測定には適さない。

そこで、申請者は最先端の光計測技術を有する浜松ホトニクス中央研究所と共同で、深層筋 (深さ約 3-4cm) の酸素動態計測を可能にする時間分解 NIRS 装置を開発した。この装置は 1) 従来の NIRS 装置では計測できない光路長、散乱と吸収の係数を実測し、酸素化・脱酸素化 [Hb+Mb] の絶対値を連続的に出力し、2) レーザー光源の出力を増加して深層筋酸素動態の測定を可能にする。

2. 研究の目的

活動する筋肉の酸素要求に対して酸素の供給が遅れると、酸素不足量が増加して運動を安全に長時間続けることが困難になる。とくに、運動強度が急激に増加すると (例、運動の開始時) 活動筋内部の酸素の消費と供給 (血流量) のミスマッチとその空間的な不均一性が顕著になる。近赤外分光装置 (NIRS) によるヒトの活動筋酸素動態 (酸素の消費と供給のバランス) の計測部位は従来、筋肉の

表層部に限られ、遅筋線維が多く含まれる深層部 (例、中間広筋) の酸素動態については不明である。本研究では、酸素不足を改善 (減少) する有酸素運動処方・トレーニング法を提案するために、新型の NIRS 装置を用いてヒトの表層筋に加えて深層筋の酸素動態を検討した。

3. 研究の方法

平成 26 年度には、ヒトの活動筋の表層部と深層部における酸素動態の空間的および時間的な不均一性を計測した。とくに、大腿四頭筋表層部の外側広筋、大腿直筋、内側広筋に加えて、深層部の中間広筋の酸素動態を計測し、酸素不足の部位を特定した (酸素動態のマッピング)。また、酸素供給を増加させた条件で (繰り返し運動プロトコール) 上記の測定を行い、大腿四頭筋の脱酸素化 [Hb+Mb] ($\dot{V}O_2/\dot{Q}$ を反映し、皮膚血流量増加の影響を受けにくい) の不均一性 (とくに運動開始時) を検討した。平成 27 年度には、活動筋酸素動態の不均一性が有酸素性持久能力に与える影響を検討した。

所属機関倫理委員会の承認を得た後、成人 8 名を被験者として、一定強度 [ガス交換閾値 (GET) 以上の高強度] の自転車運動時における大腿四頭筋の表層部と深層部における酸素動態を非侵襲的に測定した。被験者は 2 分間の安静後、4 分間の無負荷運動 (ベースライン)、6 分間の主運動、そして 6 分間の無負荷運動 (回復) を行なった。

酸素の供給と消費のバランスの測定:

活動筋の酸素要求に対して酸素の供給が遅れると (酸素不足) 脱酸素化 [Hb+Mb] ($\dot{V}O_2/\dot{Q}$ を反映する) の値が増加する。一方、酸素供給がその要求に見合うと脱酸素化 [Hb+Mb] は一定となる。そこで、運動時と運動終了後・回復時の局所筋における酸素不足の指標として、大腿四頭筋の脱酸素化 [Hb+Mb] 応答を測定した。今回採用した時間

分解・近赤外分光装置(TRS-NIRS)は、毛細血管と筋肉組織を通過する近赤外分光の光路長、散乱、吸収の係数を実測し、脱酸素化[Hb+Mb]を計測する装置である。通常使用されている連続波 NIRS は、上記の光学係数を一定とみなし、脱酸素化[Hb+Mb]の相対変化を測定するが、TRS-NIRS を用いれば脱酸素化[Hb+Mb]の絶対値(振幅)を計測できる(Fukuoka et al., 2015; Koga et al., 2011, 2015; Okushima et al., 2015)。また、超音波ドップラー装置を用いて大腿四頭筋表層部(外側広筋、内側広筋、大腿直筋)の皮下脂肪厚を測り、脱酸素化[Hb+Mb]の値を補正した(Adami et al., 2015; Bowen et al., 2013; Chin et al., 2011; Spencer et al. 2014)。

表層筋における酸素動態の測定:

TRS-NIRS(浜松ホトニクス TRS-20D)を用いて、大腿直筋、外側広筋、内側広筋における表層部(深さ約1.5cm)の脱酸素化[Hb+Mb]を連続測定した。

深層筋における酸素動態の測定: TRS-NIRS(浜松ホトニクス TRS-20SD)を用いて、大腿直筋における深層部(深さ約2-3cm;一部の被験者では中間広筋の表層部を含む)の脱酸素化[Hb+Mb]を連続測定した。

肺レベルの酸素消費量の測定:

全身レベルの酸素摂取量応答動態(Koga et al., 2005)と無酸素性作業閾値(ガス交換閾値、GET)を測定した。

計測データの解析:

運動負荷と上記の生体反応の関係を非線形近似モデルで解析し、遅れ時間(time delay)と時定数(time constant)を求め、両者の和を平均応答時間(mean response time, MRT)とした。そして、活動筋酸素動態の空間不均一性を評価するために、生体応答の変動係数(部位間の標準偏差÷平均値)を計算した。

4. 研究成果

時間分解・近赤外分光装置を用いて、ヒトの活動筋の複数部位における脱酸素化[Hb+Mb](濃度)の絶対値を非侵襲的に計測する方法を開発し、自転車運動時に酸素不足が生じる筋肉の局所的な部位を推定した。とくに、運動開始時において活動筋深層部の脱酸素化[Hb+Mb]応答が表層筋よりも遅いので、深層筋の酸素不足は表層筋よりも少ないことが推測された(図1)。運動終了後の回復時においては、複数部位における脱酸素化[Hb+Mb]は運動時よりも減少したので、活動筋全体の酸素供給量の減少速度は酸素消費量よりも遅いこと(運動後過充血)が示唆された。回復時では、深層筋と表層筋の脱酸素化[Hb+Mb]は運動中のそれを超えることはなく、運動終了後数分以内に運動開始前のレベルに回復した。したがって、今回計測した筋肉の部位において、運動中に生じた酸素不足は回復中に徐々に減少し、運動終了後では深層筋と表層筋の両方において酸素供給の制限はないことが示唆される。この様に、表層筋に加えて深層筋の酸素動態を計測することによって、活動筋酸素不足の空間的・時間的な不均一性が明らかになった。

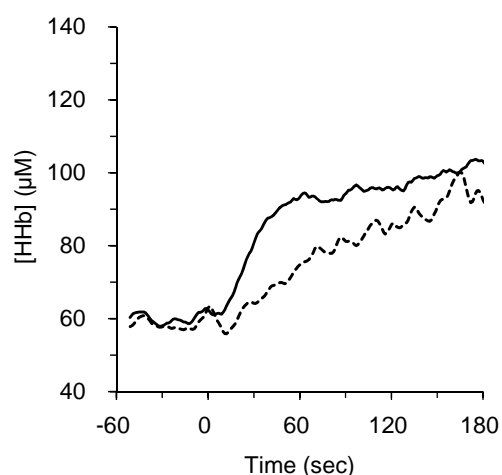


図1 運動開始時における大腿直筋の深層部(点線)と表層筋(実線)の脱酸素化[Hb+Mb](HHb)応答。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

Fukuoka Y, Poole DC, Barstow TJ, Kondo N, Nishiwaki M, Okushima D, Koga S. Reduction of $\dot{V}O_2$ slow component by priming exercise: novel mechanistic insights from time-resolved near-infrared spectroscopy. *Physiol Rep* 査読有, 3 巻, 2015 doi: 10.14814/phy2.12432.

Koga S, Barstow TJ, Okushima D, Rossiter HB, Kondo N, Ohmae E, Poole DC. Validation of a high-power, time-resolved, near-infrared spectroscopy system for measurement of superficial and deep muscle deoxygenation during exercise. *J Appl Physiol* 査読有, 118 巻, 2015, 1435-1442.

Okushima D, Poole DC, Rossiter HB, Barstow TJ, Kondo N, Ohmae E, Koga S. Muscle deoxygenation in the quadriceps during ramp incremental cycling: Deep vs. superficial heterogeneity. *J Appl Physiol* 査読有, 119 巻, 2015, 1313-1319.

〔学会発表〕(計1件)

古賀 俊策、活動筋における酸素不足の不均一性、呼吸研究会、2015年9月17日、和歌山市

〔その他〕

ホームページ等

http://www.kobe-du.ac.jp/faculty_member/s-koga/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古賀 俊策 (KOGA, Shunsaku)

神戸芸術工科大学芸術工学部・教授

研究者番号: 5 0 1 2 5 7 1 2