

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：34523

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16476

研究課題名(和文)筋酸素動態の空間的な不均一性が有酸素性作業能力に及ぼす影響

研究課題名(英文)Effect of spacial heterogeneity in muscle deoxygenation on aerobic exercise capacity

研究代表者

奥島 大 (Okushima, Dai)

神戸芸術工科大学・その他部局等・研究員

研究者番号：70735307

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は筋酸素動態(酸素消費と供給のバランス)の空間的な不均一性が有酸素性作業能力に及ぼす影響について検討することであった。我々は筋酸素動態の指標である脱酸素化応答と有酸素性作業能力の関係、および高強度インターバルトレーニングや低酸素環境による影響について、それぞれ検討した。各研究における結果は、有酸素性作業能力が酸素動態の主要な指標である脱酸素化応答の大きさの影響を受けるものの、脱酸素化応答の空間的な不均一性の影響を受けていないことを示すものであった。この結果は、筋酸素動態の空間的な不均一性が有酸素性作業能力を決定する主要な要因ではない可能性を示唆する。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the relationship of spatial heterogeneity (i.e., among/within active muscles) in muscle deoxygenation with aerobic exercise capacity. We tested 1) the relationship of muscle deoxygenation and aerobic exercise capacity ($\dot{V}O_{2peak}$), 2) the effect of high intensity exercise training on muscle deoxygenation, and 3) the effect of fractional inspired O_2 concentration. In these investigations, we found the several observations demonstrating that the aerobic exercise capacity is influenced by the magnitude of muscle deoxygenation but not the spatial heterogeneity of muscle deoxygenation. This suggests the possibility that the aerobic exercise capacity is not associated with the spatial heterogeneity of muscle deoxygenation.

研究分野：運動生理学

キーワード：筋酸素動態 近赤外時間分解分光装置 有酸素性作業能力

1. 研究開始当初の背景

長時間の運動継続を妨げる要因の一つに、筋肉の酸素消費に供給が追従しないこと(ミスマッチ)がある。特に、筋の酸素消費と供給のバランス(酸素動態)の空間的(例:異なる活動筋間、筋の浅層部・深層部)な不均一性はこのミスマッチを引き起こすと考えられている。筋酸素動態のミスマッチは有酸素性作業能力に関連し(Boone et al. 2009)、筋酸素動態の不均一性は筋活動水準、筋線維組成や、毛細血管活動の神経制御などの有酸素性作業能力に関連する機能の影響を受ける(Behnke et al. 2011; McDonough et al. 2005; Chin et al. 2011)。したがって、筋酸素動態の不均一性が有する特性を解明することは有酸素性作業能力の制限要因や改善方法について新たな知見を得る上で重要であると考えられる。しかし、以下の点に関しては未だ不明な点が多い。

どの空間(例:複数の活動筋間、単一の活動筋内)における筋酸素動態の不均一性が有酸素性作業能力と強い関連性を有するのか?

筋酸素動態の不均一性と有酸素性作業能力との関連性は有酸素性作業能力の全てのレベルで一様なのか、あるいは特定レベル(例:持久性運動競技者)でのみ表れるのか?

筋酸素動態の不均一性と有酸素性作業能力との関連性は酸素供給量の減少(低酸素環境、大腿部加圧)による影響を受けるのか?

持久性運動トレーニングによる筋酸素動態の不均一性の変化が有酸素性作業能力に及ぼす影響はどの程度なのか?

上記の点を明らかにするために運動中の筋酸素動態を非侵襲的(痛みを伴わず)に測定する方法の一つとして、近赤外線分光(NIRS)法がある。ただし、従来の装置では測定深度が皮膚から1.5~2.0cmに限定される。また、酸素動態の導出に必要な光学係数(光路長・吸収係数・散乱係数)を一定とし、測定値は相対値しか扱えないため、不均一性

の評価を行うには限界があった。申請者の研究グループでは、測定値を絶対値として扱うことが可能で、測定深度がより深い(皮膚から3.0~4.0cm)時間分解NIRS装置を開発した。したがって、これまで不可能であった筋酸素動態の不均一性を複数の活動筋間、および単一の活動筋内(皮膚からの深さ方向)といった点から検討可能である。

2. 研究の目的

本研究では、筋酸素動態の空間的な不均一性が有酸素性作業能力に及ぼす影響に関して、1)筋酸素動態の不均一性と有酸素性作業能力との関連性、2)持久性運動トレーニングによる筋酸素動態の不均一性の変化が有酸素性作業能力に及ぼす影響、3)酸素供給の減少が筋酸素動態の不均一性と有酸素性作業能力の関連性に及ぼす影響について、それぞれ検討することを目的とする。

3. 研究の方法

1) 筋酸素動態の不均一性と有酸素性作業能力との関連性

成人男性8名を対象に漸増負荷自転車運動試験を実施し、大腿四頭筋(外側広筋・内側広筋・大腿直筋)の表層部、および深層部(大腿直筋)における酸素動態を測定した(実験1)。また、成人男性24名を対象として漸増負荷自転車運動試験を実施し、大腿四頭筋(外側広筋・大腿直筋)の酸素動態、および最高酸素摂取量を測定した(実験2)。

2) 持久性運動トレーニングによる筋酸素動態の不均一性の変化が有酸素性作業能力に及ぼす影響

成人男性18名(トレーニング群10名、対照群8名)を対象として5週間の高強度インターバルトレーニング前後に漸増負荷自転車運動試験を実施し、最高酸素摂取量および大腿四頭筋(外側広筋・大腿直筋)の酸素動態を測定した(実験)。また、成人男性18名(トレーニング群10名、対照群8名)を対象に5週間の高強度インターバルトレーニング前後に漸増負荷自転車運動試験を実施し、最高酸素摂取量および外側広筋(表層

部・深層部)の酸素動態を測定した(実験 1)。

3) 酸素供給の減少が筋酸素動態の不均一性と有酸素性作業能力の関連性に及ぼす影響

低酸素環境による運動能力の低下が酸素動態の空間的不均一性について検討するため、8名の成人男性を対象に通常酸素環境(20.9%)および低酸素環境下(12.0%)で自転車による漸増負荷試験を実施し、外側広筋の酸素動態を測定した。

4. 研究成果

1) 筋酸素動態の不均一性と有酸素性作業能力との関連性

図1は実験1における漸増負荷運動試験中の低~中強度(<50%WR_{peak})および中~高強度(>70%WR_{peak})の相対運動強度(最高運動強度の相対値:WR_{peak})に対する脱酸素化応答の傾き(deoxygenation slope)を示したものである。大腿四頭筋表層部(外側広筋:VL,内側広筋:VM,大腿直筋:RF-s)および深層部(大腿直筋:RF-d)では、脱酸素化応答が運動強度に応じて異なる変化傾向を示した。この結果は、漸増負荷運動試験中に筋酸素動態の空間不均一性が変化する可能性を示唆している。

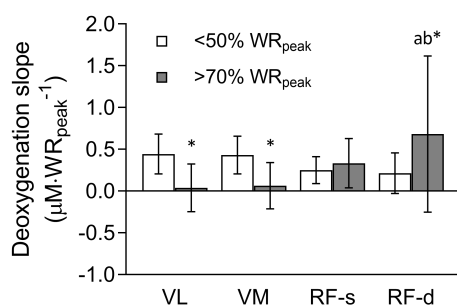


図1. 漸増負荷運動試験中の相対運動強度(%WR_{peak})に対する脱酸素化応答の傾き. a, vs. VL, $P < 0.05$. b, vs. VM, $P < 0.05$. * vs. <50%WR_{peak}, $P < 0.05$.

実験2では、漸増負荷運動時の脱酸素化応答の変化量は部位に関係なく有酸素性作業能力と有意な相関関係を示した(外側広筋: $r = 0.444$, 大腿直筋: $r = 0.490$, $P < 0.05$)。しかし、脱酸素化応答の傾きは運動能力に関係なく同様の変化を示した。この結果は、運動

能力の増大・減少にともない筋酸素動態の空間不均一性が変化しない可能性を示唆する。

2) 持久性運動トレーニングによる筋酸素動態の不均一性の変化が有酸素性作業能力に及ぼす影響

図2は、実験1のトレーニング前後における外側広筋の漸増負荷運動開始から終了までの脱酸素化応答の変化量(Δ deoxy[Hb+Mb])を示したものである。トレーニング(Tr)群では、前後で Δ deoxy[Hb+Mb]が有意に増加したが、このような変化は対照群では認められなかった。また、大腿直筋でも同様の結果が認められた。

一方、漸増負荷運動中における脱酸素化応答の相対変化(Normalized deoxy-[Hb+Mb])についてトレーニング前後で検討したところ、被験者群、および部位に関係なく有意な変化は認められなかった(図3)。また、実験1のトレーニング前後における脱酸素化応答についても表層部・深層部に関係なく実験1と類似した結果が認められた。

これらの結果は、1)の結果を支持するものであり、有酸素性作業能力を増大させるトレーニングが筋酸素動態の空間的不均一性に強く影響しない可能性を示唆する。

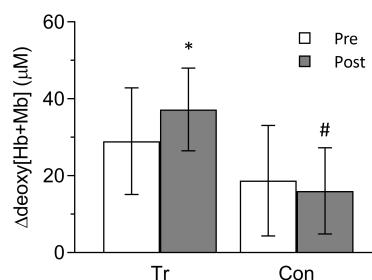


図2. トレーニング前後の外側広筋における脱酸素化応答の変化量(Δ deoxy[Hb+Mb]). * vs. Pre, $P < 0.05$. # vs. Tr, $P < 0.05$.

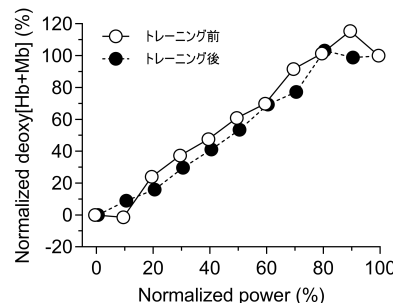


図3. トレーニング前後の外側広筋における正規化脱酸素化応答(Normalized deoxy[Hb+Mb])。

3) 酸素供給の減少が筋酸素動態の不均一性と有酸素性作業能力の関連性に及ぼす影響

漸増負荷運動試験中の $\Delta\text{deoxy}[\text{Hb}+\text{Mb}]$ は酸素濃度の変化による違いが認められなかった (20.9% vs. 12.0%, 36.7 ± 8.7 vs. 40.2 ± 2.8 , $P > 0.05$)。また、Normalized $\text{deoxy}[\text{Hb}+\text{Mb}]$ についても酸素濃度環境間に有意な変化は認められなかった。これらの結果は、酸素供給量の減少にともなう有酸素性作業能力の低下が筋酸素動態の空間不均一性に強く影響しない可能性を示唆する。

4) まとめ

以上、1) ~ 3) までの研究で得られた結果は、有酸素性作業能力が横断的にも縦断的にも漸増負荷運動中の筋酸素動態の空間的不均一性による影響を受けない可能性を示唆する。また、本研究の結果は、筋酸素動態を用いた有酸素性作業能力の評価が脱酸素化応答の大きさによって十分評価できる可能性を示すと考えられる。

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6件)

[査読有]

1. Okushima D, Poole DC, Rossiter HB, Barstow TJ, Kondo N, Ohmae E, and Koga S. Muscle deoxygenation in the quadriceps during ramp incremental cycling: Deep vs. superficial heterogeneity. *J Appl Physiol* 119: 1313-1319, 2015.
DOI: 10.1152/jappphysiol.00574.2015
2. Koga S, Barstow TJ, Okushima D, Rossiter HB, Kondo N, Ohmae E, and 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* 118: 1435-1442, 2015.
DOI: 10.1152/jappphysiol.01003.2014
3. Fukuoka Y, Poole DC, Barstow TJ, Kondo

N, Nishiwaki M, Okushima D, and Koga S. Reduction of VO_2 slow component by priming exercise: novel mechanistic insights from time-resolved near-infrared spectroscopy. *Physiol Rep* 3: e12432, 2015.
DOI: 10.14814/phy2.12432

4. Okushima D, Poole DC, Barstow TJ, Rossiter HB, Kondo N, Bowen TS, Amano T, and Koga S. Greater $\text{VO}_{2\text{peak}}$ is correlated with greater skeletal muscle deoxygenation amplitude and hemoglobin concentration within individual muscles during ramp-incremental cycle exercise. *Physiol Rep* 4: e13065, 2016.
DOI: 10.14814/phy2.13065
5. Koga S, Okushima D, Barstow TJ, Rossiter HB, Kondo N, and Poole DC. Near-infrared spectroscopy of superficial and deep rectus femoris reveals markedly different exercise response to superficial vastus lateralis. *Physiol Rep* 5: e13402, 2017.
DOI: 10.14814/phy2.13402
6. Breese BC, Poole DC, Okushima D, Bailey SJ, Jones AM, Kondo N, Amano T, and Koga S. The effect of dietary nitrate supplementation on the spatial heterogeneity of quadriceps deoxygenation during heavy-intensity cycling. *Physiol Rep* 5: e13340, 2017.
DOI: 10.14814/phy2.13340

[学会発表](計8件)

1. Okushima D, Poole DC, Barstow TJ, Rossiter HB, Ohmae E, Kondo N, and Koga S. Greater absolute deoxygenation in deep versus superficial quadriceps muscles at $\text{VO}_{2\text{max}}$ during cycle ergometry. 2015 ACSM Annual Meeting. San Diego, United States, 2015.
2. 奥島大, 天野達郎, 鈴木裕昭, 大前悦子, 近藤徳彦, 古賀俊策. 脱酸素化応答の空間不均一性と有酸素性作業能力の関係. 第70回日本体力医学会大会. 和歌山, 2015.
3. Okushima D, Poole DC, Barstow TJ,

Rossiter HB, Bowen TS, Amano T, Kondo N, and Koga S. Greater $\dot{V}O_{2peak}$ is associated with deoxygenation amplitudes, but not deoxygenation kinetics, across the active muscles. 2016 ACSM Annual Meeting. Boston, United States, 2016.

4. Koga S, Okushima D, Kondo N, Barstow TJ, and Poole DC. Human evolution of endurance exercise performance. 日本生理人類学会・米国人間生物学会行動シンポジウム・ヒロ, 米国, 2016.
5. 奥島大, 西脇雅人, 天野達郎, 近藤徳彦, 鈴木裕昭, 大前悦子, 古賀俊策. 高強度インターバルトレーニングによる持久性運動能力の増大が活動筋の酸素動態に及ぼす影響. 第 71 回日本体力医学会大会. 岩手, 2016.
6. 西脇雅人, 末永晶, 奥島大, 小田啓之, 香良直輝, 松本直幸, 古賀俊策. 大学競泳戦首位に対する定期的なドライランドトレーニングの実施が競泳パフォーマンスに及ぼす影響. 第 29 回日本トレーニング科学会大会. 神奈川, 2016.
7. Okushima D, Rossiter HB, Barstow TJ, Poole DC, Nishiwaki M, Kondo N, and Koga S. High Intensity Interval Training (HIT) Increases Muscle Deoxygenation During Ramp Incremental Exercise. 2017 ASCM Annual Meeting. Denver, United States, 2017.
8. 奥島大, 近藤徳彦, 天野達郎, 古賀俊策. 運動様式の違いが活動筋の酸素動態に及ぼす影響. 第 72 回日本体力医学会大会. 愛媛, 2017.

〔その他〕

ホームページ等:

https://scholar.google.co.jp/citations?user=_0YEKElAAAAJ&hl=ja&oi=sra

6. 研究組織

(1)研究代表者

奥島 大 (OKUSHIMA, Dai)

神戸芸術工科大学・その他部局等・研究員

研究者番号: 70735307

(2)連携研究者

古賀 俊策 (KOGA, Shunsaku)

神戸芸術工科大学・芸術工学部・名誉教授

研究者番号: 50125712

(3)研究協力者

なし