

高強度のウォームアップ運動が 活動筋の酸素動態に及ぼす影響

神戸芸術工科大学大学院 古賀 俊策
(共同研究者) 神戸大学 近藤 徳彦
同志社大学 福岡 義之
神戸大学 天野 達郎
神戸芸術工科大学 奥島 大

Effects of High-Intensity Warm-Up Exercise on Balance for Oxygen Delivery and Utilization in Exercising Muscles

by

Shunsaku Koga

Graduate School of Kobe Design University

Narihiko Kondo, Tasturo Amano

School of Human Development, University of Kobe

Yoshiyuki Fukuoka

Faculty of Health and Sports Science,

Doshisha University

Dai Okushima

Kobe Design University, School of Design

ABSTRACT

Heavy priming exercise reduces the oxygen deficit during the subsequent heavy exercise. Current theories for the etiology of the oxygen deficit following the onset of exercise include increased bulk and local blood flow and O_2 delivery (\dot{Q}) via residual

vasodilation and academia/temperature-induced rightward shift of the hemoglobin (Hb) O₂ dissociation curve. We used a method to quantify absolute [deoxy(Hb + Mb), HHb] of superficial- and deeper regions of the rectus femoris (RF) muscle in 6 participants during cycle exercise, using time-resolved NIRS with adipose tissue correction. HHb of the deeper RF for both the priming- and subsequent heavy exercise showed steady state responses toward the end of exercise, suggesting matching of oxygen consumption (\dot{V}_{O_2}) and \dot{Q} kinetics. Compared with the superficial RF, peak deoxygenation of the deep RF was not significantly different, however deoxygenation kinetics were slower (mean response time, priming exercise, 35 ± 11 s vs. 66 ± 26 s; subsequent exercise, 32 ± 8 s vs. 44 ± 22 s, $p < 0.05$). These data revealed temporal and spatial disparities in muscle deoxygenation responses to exercise and suggested matching of \dot{V}_{O_2} and \dot{Q} kinetics, thus the oxygen deficit reduced in the deeper region RF muscle, compared with the superficial RF. Further, these results suggest that deep region muscle has a greater \dot{Q} / \dot{V}_{O_2} , which led to improve matching of \dot{Q} -to- \dot{V}_{O_2} thereby raising muscle and microvascular oxygen pressure and enhancing blood-myocyte O₂ flux.

要 旨

高強度のウォームアップ (W-up) 運動を用いると、W-up 運動後の主運動における活動筋の酸素消費量 (\dot{V}_{O_2}) の増加が速くなり、酸素不足が減少する。本研究では、表層筋に加えて深層筋も含めた活動筋の酸素動態を計測し、高強度のW-up 運動が活動筋の酸素動態に及ぼす影響を明らかにした。時間分解・近赤外分光装置を用いて、活動筋における脱酸素化ヘモグロビン+ミオグロビン (HHb) を計測した。大腿直筋深層部のHHbは第1運動と第2運動の開始後の約5分目において定常状態を示し、 \dot{V}_{O_2} と \dot{Q} の増加速度のマッチングが生じたことが示唆された。さらに、第1運動と第2運動において大腿直筋深層部におけるHHbの時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった。HHbは \dot{V}_{O_2}/\dot{Q} を反映するので、表層筋に比べて遅筋線維が多く含まれ、運動中の筋温がより高い深層筋では、酸素供給が十

分になって活動筋全体の \dot{V}_{O_2} と \dot{Q} のバランスが改善され、酸素不足が減少したと推測される。

緒 言

高強度のウォームアップ (W-up) 運動を用いると、W-up 運動後の主運動における活動筋の酸素消費量 (\dot{V}_{O_2}) の増加速度が速くなり (酸素不足の減少)、運動の継続時間が長くなる (古賀, 2001⁵⁾; 古賀たち, 2004⁶⁾)。このメカニズムとして、1) 活動する筋肉と血液中に乳酸が生じて酸素解離曲線の右方シフトと血管拡張が起き、筋微小循環レベルの酸素供給量 (\dot{Q}) が増加する、2) 遅筋線維の動員増加が起こり、活動筋の毛細血管と筋細胞の酸素分圧差がより大きくなって、酸素が筋細胞に多く取り込まれる、3) さらに、筋温の上昇によって筋細胞の有酸素性代謝が促進することが挙げられる (Koga et al. 2013¹⁰⁾)。

運動継続時間を規定する要因の一つである活動筋の酸素不足は、筋微小循環と細胞レベルの酸

素動態 ($\dot{V}O_2$ と \dot{Q} のバランス) の不均一性, とくに $\dot{V}O_2$ と \dot{Q} の増加速度の mismatch によって生じる (古賀, 2012⁷⁾). 著者たちは, 高強度の W-up 運動によって, 表層筋における酸素動態の空間的・時間的な不均一性が変化することを認めただが (Fukuoka et al. 2015⁴⁾; Koga et al. 2014¹¹⁾; Spencer et al. 2014¹⁵⁾), 深層筋 (インナーマッスル) の酸素動態については不明である. 深層筋には遅筋線維が多く含まれ, また表層筋に比べて運動中の筋温がより高いので, 高強度 W-up 運動の効果が促進されて酸素が深層筋に多く取り込まれると予想される.

従来の近赤外分光装置の計測深度は筋肉の表層部 (深さ約 1.5-2cm) に限られるので, 申請者たちはレーザー光源の出力を増加して, 深層筋 (深さ約 3-4cm) の酸素動態の絶対値計測を可能にする時間分解・近赤外分光装置 (TRS-NIRS) を開発した (毛細血管と筋肉組織を通過する近赤外光の散乱と吸収の係数を実測する) (Koga et al. 2015b¹³⁾; Okushima et al. 2015¹⁴⁾). 本研究の目的は, 表層筋に加えて深層筋も含めた活動筋の酸素動態を計測し, 高強度の W-up 運動が活動筋の酸素動態に及ぼす影響を明らかにすることである. 本研究によって, 有酸素性運動能力の向上と運動持続時間の延長を目指す運動処方の開発が期待され, 意義が大きい.

1. 研究方法

所属機関倫理委員会による審査を経て, 成人男性 7 名 (21±3 歳) に被験者を依頼した. 高強度の繰返し運動時 (W-up, 自転車運動) における活動筋の脱酸素化ヘモグロビン濃度 (HHb: $\dot{V}O_2$ と \dot{Q} のバランスを示す) を測定した. HHb は血液量変動の影響を受けにくく, $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ を反映するので, 鏡像関係にある微小循環の酸素分圧 [PO_2 ($\dot{Q}/\dot{V}O_2$)] の動的応答を推測できる (Koga et al. 2012⁹⁾, 2015a¹²⁾).

通常使用されている連続波 (CW) NIRS は, 光学係数を一定とみなし, HHb の相対変化を測定するが, 時間分解・近赤外分光装置 (TRS-NIRS) を用いれば HHb の絶対値 (振幅) を計測できる (Koga et al. 2011⁸⁾). 浜松ホトニクス製の TRS-NIRS を用いて, 大腿直筋の表層部, および深層部 (一部の被験者では中間広筋表層部を含む) の HHb を連続測定した. 大腿直筋の皮膚表面に貼り付けた近赤外分光センサーの送光部と受光部の距離を 3cm (表層部), および 6cm (深層部) とし, 測定深度はそれぞれ約 1.5cm, および 3cm と推定した.

さらに, 超音波ドップラー装置 (Yokogawa-GE Medical, Logiq400) を用いて大腿直筋表面の皮下脂肪厚を測り, HHb の値を補正した (Adami et al. 2015¹⁾; Bowen et al. 2013²⁾; Koga et al. 2011⁸⁾).

$\dot{V}O_2$ の増加が \dot{Q} の増加よりも速いと HHb が増加し, 酸素不足となる. そこで, 運動時における活動筋複数部位の HHb の増加速度を測り, 酸素不足の部位を推定した.

また, 活動筋全体の酸素消費動態 ($\dot{V}O_2$) を反映する肺胞レベルの $\dot{V}O_2$ 動態 (第 2 相と第 3 相) をブレスバイブレスの呼吸ガス交換測定装置 (ミナト医科学, AE-300S) で連続的に測定した.

座位姿勢において, 2 分間の安静と 4 分間の無負荷強度 (0 watt) の自転車運動を行い, その直後に 6 分間の高強度 W-up (第 1) 運動, 回復時に 6 分間の無負荷運動, そして 6 分間の高強度第 2 運動を負荷した. 高強度運動の負荷強度は, 漸増負荷 (ランプ) 自転車運動 (20watt 毎分の増加率) による事前の測定で求めた (乳酸閾値と最高酸素摂取量の約 50% に値する運動強度).

計測データの解析: 運動負荷と生理反応の応答速度の関係を非線形近似モデルによって解析した.

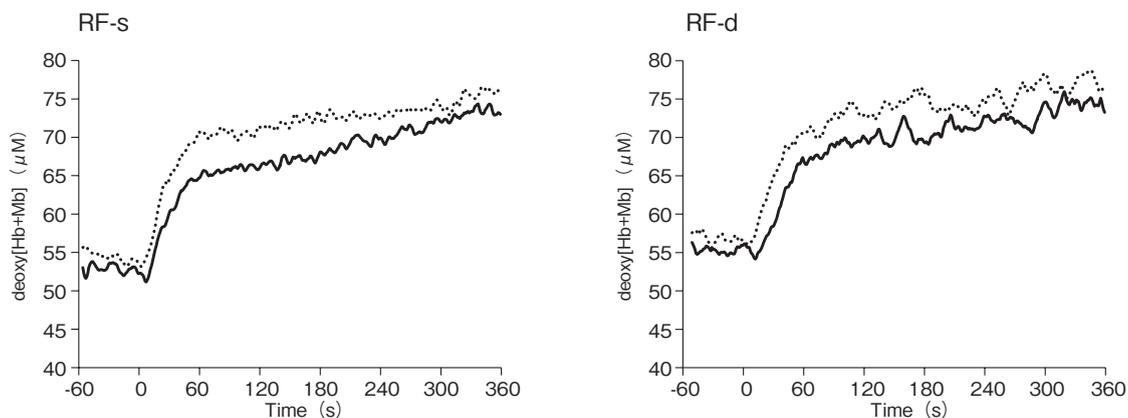


図1 高強度運動時における筋脱酸素化動態 (実線:1st bout,点線:2nd bout)

2. 研究結果

2. 1 第1運動と第2運動における比較

高強度 W-up (第1) 運動と高強度第2運動において、大腿直筋の表層部 (RF-s) と深層部 (RF-d) の脱酸素化ヘモグロビン濃度 [HHb, deoxy (Hb+Mb)] の絶対値は指数関数状に増加した (図1)。つまり、HHb は $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ を反映するので、第1運動と第2運動の両方において、無負荷運動から高強度運動への移行に伴って \dot{Q} は $\dot{V}O_2$ よりも遅く増加したことが示された。高強度運動の終了時点において、大腿直筋表層部の HHb は第1運動と第2運動ともに増加を続けた。一方、大腿直筋深層部の HHb は両方の運動の最終1分間において定常状態を示した。

第2運動における大腿直筋表層部 HHb のベースライン (無負荷運動の値)、振幅 (運動終了時一ベースライン)、および運動開始時の時間遅れと時定数は第1運動に比べて、有意な差はなかった (表1)。しかし、平均応答時間は第2運動の方が短い傾向にあった。また、大腿直筋深層部の HHb でも表層筋と同様の結果が見られた。

2. 2 大腿直筋表層部と深層部における比較

第1運動では、大腿直筋深層部と表層部における HHb のベースライン、振幅、および運動開始

表1 高強度運動時における筋脱酸素化動態の比較

	RF-s	RF-d
1st bout		
Baseline (μM)	53.8 \pm 4.6	55 \pm 8.0
Amplitude (μM)	19.5 \pm 16.8	20.2 \pm 15.8
Time delay (s)	7.0 \pm 4.6	9.0 \pm 7.0
Time constant (s)	28.4 \pm 8.7	56.4 \pm 23.7 *
Mean response time (s)	35.4 \pm 11	65.5 \pm 26.4 *
2nd bout		
Baseline (μM)	55.5 \pm 6.4	56.0 \pm 6.8
Amplitude (μM)	21 \pm 15.0	22.1 \pm 18.7
Time delay (s)	5.1 \pm 2.0	5.6 \pm 4.7
Time constant (s)	27.2 \pm 8.0	38.5 \pm 18.9 *
Mean response time (s)	32.3 \pm 8.1 †	44.0 \pm 21.7 * †

* , main effect for RF-s vs. RF-d, P<0.05

† , main effect for 1st vs. 2nd, P=0.06

時の時間遅れに有意な差はなかった (表1)。しかし、深層部における HHb の時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった (表1)。さらに、第2運動においても、大腿直筋深層部と表層部における HHb のベースライン、振幅、および運動開始時の時間遅れに有意な差はなかったが、深層部における HHb の時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった。

3. 考察

自転車運動において、活動筋毛細血管レベルの \dot{Q} は不均一に分布しているので、活動肢全体に酸素を供給する血流 (例、大腿動脈血流) と微小循環における血流の調節は異なる (Chin et al.2011

3) , Koga et al. 2014¹¹⁾). また, 運動中に動員される筋線維の種類によって酸素の供給と利用の割合 ($\dot{V}O_2/\dot{Q}$) が異なり, 活動筋の酸化代謝が不均一になることが推測される. 今回の研究では, 高強度 W-up (第1) 運動と高強度第2運動において, 大腿直筋表層部の HHb は指数関数状に増加したので, 無負荷運動から高強度運動への移行に伴って \dot{Q} は $\dot{V}O_2$ よりも遅く増加したことが示された. この結果は Fukuoka et al. (2015⁴⁾) の結果と一致する. 一方, 高強度運動の終了時点において, 大腿直筋表層部の HHb は第1運動と第2運動ともに増加を続けた. しかし, 大腿直筋深層部の HHb は両方の運動開始後の約5分目において定常状態を示し, $\dot{V}O_2$ と \dot{Q} の増加速度のマッチングが生じたことが示唆された.

第2運動における大腿直筋表層部 HHb のベースライン (無負荷運動の値), 振幅 (運動終了時ベースライン), および運動開始時の時間遅れと時定数は第1運動に比べて, 有意な差はなかった (表1). しかし, 平均応答時間は第2運動の方が短い傾向にあった. 大腿直筋深層部の HHb でも表層筋と同様の結果が見られた. 高強度のウォームアップ (W-up) 運動を用いると, W-up 運動後の主運動における活動筋の $\dot{V}O_2$ の増加速度が速くなり, 酸素不足が減少する. したがって, 第2運動における大腿直筋 HHb の平均応答時間が第1運動に比べて, 短い傾向にあった原因として, 下記のメカニズムが考えられる. 1) 活動筋と血液中に生じた乳酸によって酸素解離曲線の右方シフトと血管拡張が起き, 筋微小循環レベルの酸素供給量が増加する, 2) 遅筋線維の動員増加が起これ, 活動筋の毛細血管と筋細胞の酸素分圧差がより大きくなって, 酸素が筋細胞に多く取り込まれる, 3) さらに, 筋温の上昇によって筋細胞の有酸素性代謝が促進することが挙げられる (Koga et al. 2013¹⁰⁾).

第1運動では, 大腿直筋深層部と表層部におけ

る HHb のベースライン, 振幅, および運動開始時の時間遅れに有意な差はなかった (表1). しかし, 深層部における HHb の時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった (表1). さらに, 第2運動においても, 大腿直筋深層部と表層部における HHb のベースライン, 振幅, および運動開始時の時間遅れに有意な差はなかったが, 深層部における HHb の時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった. 深層筋には遅筋線維が多く含まれ, また表層筋に比べて運動中の筋温がより高いので, 高強度 W-up 運動の効果が促進されて酸素が深層筋に多く取り込まれると示唆される (Koga et al. 2015b¹³⁾). 遅筋線維がより多く動員されると, 活動筋全体の $\dot{V}O_2$ と \dot{Q} のバランス ($\dot{V}O_2/\dot{Q}$) が改善されること (酸素不足の減少) が予想される.

W-up 運動によって活動筋の \dot{Q} を増加させた場合, 遅筋線維の動員増加が起これ, 活動筋全体の酸素不足量は減少するが, HHb の不均一性は変化しない (Fukuoka et al. 2015⁴⁾). 一方, 低酸素環境においては活動筋全体の酸素不足量は増加するが, HHb の空間的分布は通常酸素環境よりも均一になる (Bowen et al. 2013²⁾). このように, 酸素動態の不均一性の程度と酸素不足量の関係については不明な点が多い. さらに, 上記の知見は表層筋に限られるので, 深層筋も含めた活動筋全体の酸素不足の分布状態が明らかになれば, 活動筋全体の酸素不足の減少と運動持続時間の延長が期待される.

動物実験レベルでは, 筋線維の種類によって活動筋の酸素交換の動的な応答は異なる (Koga et al. 2014¹¹⁾). 筋収縮の開始直後, 持久性に優れる遅筋線維では \dot{Q} の増加速度が $\dot{V}O_2$ のそれよりも速く, 酸素分圧 (PO_2) は低下しにくい. また, 応答の遅れ時間が長く, 低下速度 (時定数) が遅い. 一方, 疲労しやすい速筋線維では $\dot{V}O_2$ に対して \dot{Q} が不足し, PO_2 がより速く低下して筋細胞への

酸素の取り込みが遅れる。したがって、ヒトにおいても、遅筋線維が多く含まれる浅層筋では、酸素供給が不十分になって酸素不足が顕著になり、 PO_2 が減少すると予想される。今回の研究では、第1運動と第2運動共に、大腿直筋深層部におけるHHbの時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった。HHbは $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ を反映するので、遅筋線維が多く含まれる深層筋では、酸素供給が十分になって活動筋全体の $\dot{V}O_2$ と \dot{Q} のバランスが改善され、酸素不足が減少したと推測される。

3. 1 研究成果の社会的貢献度：

1) 高強度のW-up運動と主運動時の活動筋酸素動態の関係を明らかにすれば、遅筋線維が多く含まれる深層筋の動員増加を促す有酸素性運動処方開発につながる。とくに、活動筋全体の酸素不足の減少と運動持続時間の延長が期待され、意義が大きい。2) 高強度のW-up運動が活動筋の複数部位における酸素不足に及ぼす影響を把握することは、効果的な筋持久性運動トレーニング法の開発、つまり、筋持久能力が向上する部位の特定が可能となり、非常に意義がある。

4. 結 論

高強度のウォームアップ(W-up)運動を用いると、W-up運動後の主運動における活動筋の酸素消費量($\dot{V}O_2$)の増加が速くなり(酸素不足の減少)、運動の継続時間が長くなる。本研究では、表層筋に加えて深層筋も含めた活動筋の酸素動態を計測し、高強度のW-up運動が活動筋の酸素動態に及ぼす影響を明らかにした。時間分解・近赤外分光装置を用いて、活動筋における脱酸素化ヘモグロビン+ミオグロビン(HHb)を計測し、W-up運動が活動筋の \dot{Q} と $\dot{V}O_2$ のバランスに及ぼす効果を考察した。大腿直筋深層部のHHbは第1運動と第2運動の開始後の約5分目において定

常状態が示され、 $\dot{V}O_2$ と \dot{Q} の増加速度のマッチングが生じたことが示唆された。さらに、第1運動、および第2運動において大腿直筋深層部におけるHHbの時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった。HHbは $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ を反映するので、表層筋に比べて遅筋線維が多く含まれ、運動中の筋温がより高い深層筋では、酸素供給が十分になって活動筋全体の $\dot{V}O_2$ と \dot{Q} のバランスが改善され、酸素不足が減少したと推測される。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) Adami A., Koga S., Kondo N., Cannon D.T., Kowalchuk J.M., Amano T., Rossiter H.B., Changes in whole tissue heme concentration dissociates muscle deoxygenation from muscle oxygen extraction during passive head-up tilt. *J. Appl. Physiol.*, 118: 1091-1099(2015)
- 2) Bowen T.S., Rossiter H.B., Benson A.P., Amano T., Kondo N., Kowalchuk J.M., Koga S., Slowed oxygen uptake kinetics in hypoxia correlate with the transient peak and reduced spatial distribution of absolute skeletal muscle deoxygenation. *Exp. Physiol.*, 98: 1585-1596, (2013)
- 3) Chin L.M., Kowalchuk J.M., Barstow T.J., Kondo N., Amano T., Shiojiri T., Koga S., The relationship between muscle deoxygenation and activation in different muscles of the quadriceps during cycle ramp exercise. *J. Appl. Physiol.*, 111: 1259-1265 (2011)
- 4) Fukuoka Y., Poole D.C., Barstow T.J., 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.*, 3. doi: 10.14814/phy2.12432(2015)
- 5) 古賀俊策 : 酸素摂取動態. 新運動生理学下巻(宮村實晴編集), 真興交易医書出版部, 57-65(2001)

- 6) 古賀俊策, 遠藤雅子, 塩尻智之: 運動開始時の酸素摂取. 運動と呼吸(宮村實晴編集), 真興交易医書出版部, 24-32(2004)
- 7) 古賀俊策: 活動筋の酸素動態不均一性. 身体運動と呼吸・循環機能(宮村實晴編集), 真興交易医書出版部, 147-154(2012)
- 8) Koga S., Poole D.C., Fukuoka Y., Ferreira L.F., Kondo N., Ohmae E., Barstow T.J., Methodological validation of the dynamic heterogeneity of muscle deoxygenation within the quadriceps during cycle exercise. *Am. J. Physiol.: Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **301**: R534–R541 (2011)
- 9) Koga S., Kano Y., Barstow T.J., Ferreira L.F., Ohmae E., Sudo M., Poole D.C., Kinetics of muscle deoxygenation and microvascular PO₂ during contractions in rat: Comparison of optical spectroscopy and phosphorescence-quenching techniques. *J. Appl. Physiol.*, **112**: 26-32(2012)
- 10) Koga S., Wüst R.C.I., Walsh B., Kindig C.A., Rossiter H.B., Hogan M.C., Increasing temperature speeds intracellular PO₂ kinetics during contractions in single Xenopus skeletal muscle fibers. *Am. J. Physiol.: Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **304**: R59-R66(2013)
- 11) Koga S., Rossiter H.B., Heinonen I., Musch T.I., Poole D.C., Dynamic heterogeneity of exercising muscle blood flow and O₂ utilization. *Med. Sci. Sports Exer.*, **46**: 860-876(2014)
- 12) Koga S., Poole D.C., Kondo N., Oue A., Ohmae E., Barstow T.J., Effects of increased skin blood flow on muscle oxygenation/deoxygenation: comparison of time-resolved and continuous-wave near-infrared spectroscopy signals. *Eur J. Appl. Physiol.*, **115**: 335-343(2015a)
- 13) Koga S., Barstow T.J., Okushima D., Rossiter H.B., Kondo N., Ohmae E., Poole D.C., 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(2015b)
- 14) Okushima D., Poole D.C., Rossiter H.B., Barstow T.J., Kondo N., Ohmae E., Koga S., Muscle deoxygenation in the quadriceps during ramp incremental cycling: deep versus superficial heterogeneity. *J. Appl. Physiol.*, **119**: 1313-1319 (2015)
- 15) Spencer M.D., Amano T., Kondo N., Kowalchuk J.M., Koga S., Muscle O₂ extraction reserve during intense cycling is site-specific. *J. Appl. Physiol.*, **117**: 1199-1206(2014)