

血流阻止および非血流阻止中の静的掌握運動時組織酸素動態

Muscle Tissue Oxygenation during Nonischemic and Ischemic Isometric Handgrip Exercises

河原弥生*、中村好男**、村岡 功**

Yayoi Kawahara*, Yoshio Nakamura**, Isao Muraoka**

*早稲田大学大学院人間科学研究科

*Graduate School of Human Sciences, Waseda University,

**早稲田大学スポーツ科学部

**Faculty of Sport Sciences, Waseda University

キーワード: 近赤外線分光装置, 掌握運動, 組織酸素動態, 運動持続時間

Key words: Near-infrared spectroscopy, Handgrip exercise, Muscle oxygenation, Endurance time

Abstract

Previous studies have reported that the endurance time was the same between ischemic and nonischemic isometric handgrip exercises at over 50%MVC. However it is not clear whether the results were explained by decreased oxygen supply elicited by increased intra-muscular pressure. There is also little information available about muscle tissue oxygenation kinetics during such exercises at lower intensities. To further investigate these details we observed tissue oxygenation kinetics during ischemic and nonischemic isometric handgrip exercises by using near infrared spectroscopy.

A total of 15 healthy subjects performed isometric handgrip exercises at 20, 30, 40, 50%MVC both under nonischemic (Free) and ischemic (Occl) conditions until exhaustion. In Occl, a tourniquet on the upper arm was inflated to 200mmHg before exercises started, and no cuff inflation was performed in Free. Changes in Oxy- and Deoxy- hemoglobin/myoglobin (Hb/Mb) in the superficial flexor muscle were measured with spatially resolved near-infrared spectroscopy.

At 40 and 50%MVC, the endurance time was the same in the two conditions, however it was longer in Free than in Occl at 20 and 30%MVC. On the other hand OxyHb/Mb in Free was higher than Occl at all intensities. At exhaustion, OxyHb/Mb did not reach the lowest level even in Occl except at 20%MVC, and DeoxyHb/Mb had plateaued in Free and continued to increase in Occl at all intensities.

Our results indicated that the same endurance time in the two conditions at 40 and 50%MVC was not explained by decreased oxygen supply, and suggested that oxygen was supplied to the exercising muscles and consumed there even at exhaustion. We conclude that oxygen supply and utilization is not a limiting factor of isometric handgrip exercises at any intensity.

I. 緒言

上腕部に巻いたカフに加圧して前腕部への血流阻止を人為的に引き起こす方法(体肢近位部加圧法)を用いた研究において、運動強度が50%および75%MVC(13)、あるいは60%および75%MVC(16)では、阻血および非阻血条件下での静的掌握運動における持続時間に差がないことが報告されている。これらの結果は、高強度の静的掌握運動では、筋内圧の上昇によって活動筋への血流が完全に阻止されるために、筋での代謝状態も近位部阻血の有無には影響されなかった可能性を示しているように思われる。

しかしながら、静脈閉塞法を用いて活動筋での測定を行なった研究によると、完全な血流阻止は70%MVC以上で起こるとされており、60%MVCでの運動では血液の流入も観察されている(1, 20)。これらのことから、近位部阻血を用いた研究で観察された同等の持続時間が、活動筋への血流遮断のためであるということについては疑問が残る。

一方、20%あるいは30%MVCといった低強度での静的掌握運動中には完全な血流阻止は起きておらず、活動筋内の血流は一定量確保されている(24)。しかしその場合でも、いずれ疲労困憊に至り、また、近位部加圧法での阻血時には運動持続時間に短縮(13, 16)がみられている。それゆえ、このような条件下での活動筋における酸素動態がどの様になっているかを知ることが興味深いことであるが、これまで阻血および非阻血条件下での低強度運動における活動筋での組織酸素動態を比較検討した研究はほとんど見当たらない。

近年、近赤外線分光装置を用いて活動筋における組織酸素動態を測定する手法が開発され(21)、多くの研究がなされている(2, 4, 6, 14, 19)。この方法は、近赤外線の吸光度が酸素化あるいは脱酸素化ヘモグロビン/ミオグロビンで異なることを利用して、観察部位の酸素化レベルを評価することを可能とす

るものである。そして、この酸素化レベルの上昇は、活動筋レベルにおいて酸素供給が高まっていることを推測させるものである。また、この方法を用いることにより、運動中の活動筋内の酸素動態を経時的かつ非侵襲的に疲労困憊まで観察することができる。

そこで、本研究では、運動の持続時間が阻血条件と非阻血条件とで同等となるような負荷での掌握運動において、活動筋への酸素供給が両条件で同様であるのか否かについて、近赤外線分光装置を用いて検討することとした。さらに、血流阻止中および非阻止中の低強度静的掌握運動時の組織酸素動態を比較検討することとした。

II. 方法

1 被験者

被験者は健康な成人男女15名(男性10名、女性5名)であり、年齢は 21.6 ± 2.0 歳、身長は 170.7 ± 6.8 cm、体重は 63.6 ± 9.5 kgであった。15名の被験者のうち、20%MVC試行に7名(男性4名、女性3名)、30%MVC試行に9名(男性5名、女性4名)、40%MVC試行に10名(男性8名、女性2名)、50%MVC試行に12名(男性8名、女性4名)が参加した。

試行間で被験者に違いはあったが、各被験者は必ず同一試行でのFree条件およびOccl条件の両方を行った。被験者は、実験前に実験の目的、内容および実験に際して起こりうる苦痛ならびに危険についての十分な説明を受けたのち、同意書に署名し実験に参加した。実験開始後も、苦痛を感じた場合には自由に実験を中止しても良い旨を重ねて説明した。

2 実験プロトコール

実験に先立ち、座位姿勢で最大握力の測定を行った。最大握力の測定はロードセル(SHOWA DBU-100K)を接続したハンドグリップ装置を用いて行い、掌握力はロードセルを介して生体アンプ

(AB-621G 日本光電)で増幅した後、電圧計に接続し、10kgが1Vとなるように感度を調節してデジタル表示させた。測定は3回行い、最大値を最大握力(MVC)とした。MVC測定後に十分な休息をとった上で座位にて実験を行った。負荷強度は20、30、40および50%MVCの4種類であり、試行の順番はランダムとした。

発揮された張力は増幅して電圧計およびオッシログラフに接続した。オッシログラフには、被験者ごとの設定強度を直線で固定表示して予め準備し、発揮張力はもう一本の直線によって表示されるように設定した。被験者には、電圧計またはオッシログラフのいずれかに表示された発揮張力を見ながら設定した張力を維持するように指示した。被験者は安静の後、一定強度での掌握運動を疲労困憊まで行った。実験中、検者が電圧計に示された数値を常に確認し、発揮張力を記録紙に記録した。記録された発揮張力から、設定した掌握力を5秒間連続して持続できなくなった点を確認し、その時点疲労困憊とした。上記の試行を、被験者の上腕に血圧測定用のカフを巻き運動開始直前より加圧した状態(Occl条件)ならびに加圧しない状態(Free 条件)で行った。加圧は、運動開始10秒前より開始し、運動開始時には200mmHgの加圧が終了するようにするとともに、実験中その圧を保持した。

3 測定

安静時および運動中の組織酸素動態の観察には近赤外線分光装置(NIRS、OM-200島津製作所)を用い、プローブは活動肢の浅指屈筋筋腹部の表皮上に布製のベルトで固定した。この装置は、発光部からの距離の異なる2箇所の受光センサーを用い、光拡散理論に基づいた空間分解法によって、ヘモグロビン/ミオグロビン濃度を定量的に算出しようとするものである。プローブの発光部と2箇所の受光センサーとの距離はそれぞれ2.5cmと4.0cmとなっており、レ

ーザー光の波長は830nm、805nm、780nmであった。

本研究では、個体間の差をなくすため、Hamaoka et al.(1996)(14)の動脈血流遮断法に従い動脈阻血によって酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン量(OxyHb/Mb)の最低値および脱酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン量(DeoxyHb/Mb)の最高値を求めてデータの標準化を行い、値をすべて相対値で示した。

Free 条件の場合は、疲労困憊後ただちに予め上腕に巻いておいたカフを200mmHgまで加圧しOxyHb/Mbの最低点およびDeoxyHb/Mbの最高点を求め、その直前の10秒間の平均値をOxyHb/Mb、DeoxyHb/Mbの最低値、最高値とした。その際に加圧は原則として4 分間継続することとしたが、苦痛を訴えた被験者に対してはOxyHb/Mb が定常とならなくとも加圧をその時点で終了した。Occl 条件においては、疲労困憊後も阻血状態を保持(2分から3 分)して、同様にOxyHb/Mb、DeoxyHb/Mbの最低値、最高値を求めた。総ヘモグロビン/ミオグロビン量(TotalHb/Mb)については、安静値を基準にして相対化した。

Free条件において、加圧を3分間以上継続できたのは総数38例中14例、2分間で終了したのが24例であり、2分間未満で加圧を終了した例はなかった。加圧を4分間継続するとOxyHb/Mbの曲線はおおむね平坦に近づくが、2分で終了した場合にはOxyHb/Mbは低下途中であった。

一方、Occl条件について、加圧を3分継続できたのは総数38例中18例、2分間で終了したのが20例であった。さらに、Occl条件では、掌握運動終了(疲労困憊)直後にOxyHb/Mb が急増するという現象が観察された。また、運動終了と同時にOxyHb/Mbが上昇した被験者では、加圧を2分以上継続させても運動終了直前の値にまで低下しない例(38例中15例)が多く見受けられた。Free 条件においても運動中にOxyHb/Mbが最低点を示した者がおり(38例中6例)、その場合には当該実験試行全般を通じた

OxyHb/Mbの最低点、DeoxyHb/Mb については OxyHb/Mbが最低点を示した時の値を用いて標準化した。

各被験者の各試行における運動持続時間を10等分して、それぞれの区間に含まれるOxyHb/Mb、DeoxyHb/Mb、TotalHb/Mbを平均しその後の処理を行った。また、運動前1分間の平均を安静値とした。OxyHb/Mbについては、安静値を100%、最低値を0%とし標準化を行った。DeoxyHb/Mbについては安静値を0%、最高値を100%として相対値を求めた。TotalHb/Mbについては安静値を100%として計算した。被験者間の平均値を求めるために、各運動強度において10分割した各々の区間ごとに被験者全員の値を平均し、統計処理を施した。また、各運動強度における疲労困憊時の10秒間の平均値を求め、上記と同様に標準化して条件間の比較を行った。

運動前の安静時および運動中に、双極誘導法にて心電図を導出し、心電計(Life Scope8日本光電)から出力されるR波に同期したTTL信号をA/Dボードを介してコンピュータに取り込み、一拍ごとのR-R 間隔を計測した。R-R間隔については、上記と対応する区

間の総心拍数を、そのR-R 間隔の総計で除すことによって平均の分時心拍数(HR)を求めた。

4 統計処理

すべての値は平均値±標準誤差で表した。条件間の差の検定には対応のあるt検定を使用した。安静値からの変化については一元配置の分散分析を行い、有意なものに対しては最小有意差法を用いて対の比較を行った。いずれも有意水準は5%未満とした。

III. 結果

1 標準化のためのOxyHb/Mb最低値

Occl条件における最低値を得るための加圧時のOxyHb/Mbならびに加圧時間を表1に示した。運動終了直前の値にまでOxyHb/Mbが低下しない事例(表中のPO>End)は、20%MVCおよび50%MVCにおいて顕著であった。また、OxyHb/Mbの最低値は30%MVCおよび40%MVCにおいて、Occl 条件の方で有意に低値を示した(30%MVC:Free, 5.0AU, Occl, 1.1AU; 40%MVC:Free, 6.4AU, Occl, 0.5AU)。

Table 1. OxyHb/Mb at exhaustion and after postexercise occlusion and duration of postexercise occlusion

		20%MVC	30%MVC	40%MVC	50%MVC
Number of Subjects (n)	(PO>End)	4	2	3	6
	(PO<End)	3	7	7	6
Duration of PO (min)	(PO>End)	2.7 ± 0.3	2.9 ± 0.2	2.7 ± 0.2	2.7 ± 0.1
	(PO<End)	2.3 ± 0.2	2.2 ± 0.1	2.6 ± 0.2	2.7 ± 0.1
OxyHb/Mb at end of exercise (AU)	(PO>End)	-0.2 ± 1.4	4.1 ± 0.5	1.8 ± 1.6	6.4 ± 1.9
	(PO<End)	0.7 ± 0.5	7.4 ± 2.4	5.9 ± 1.0	8.8 ± 1.2
OxyHb/Mb after PO (AU)	(PO>End)	1.7 ± 1.3	4.3 ± 0.4	5.1 ± 2.0	10.4 ± 2.5
	(PO<End)	-1.4 ± 1.1	0.4 ± 1.1	0.2 ± 1.0	-0.1 ± 1.2

Values are means±SE OxyHb/Mb, Estimated oxyhemoglobin/myoglobin concentration

PO, Postexercise Occlusion

PO<End, Subjects whose OxyHb/Mb at the end of exercise were larger than those of after postexercise occlusion;

PO>End, Subjects whose OxyHb/Mb at the end of exercise were lower than those of after postexercise occlusion;

2 運動の持続時間

20%MVCと30%MVCでの運動持続時間はFree条件でOccl条件よりも有意に長かったが、40%MVCと

50%MVC では条件間に差は認められなかった(図1)。

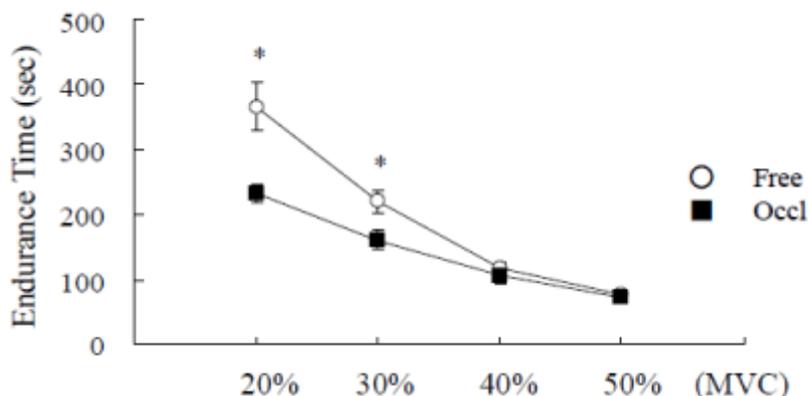


Fig.1. Endurance time of nonischemic (Free, ○) and ischemic (Occl, ■) isometric hardgrip exercises at constant load of 20, 30, 40 and 50%MVC.

Values are means ± SE.

* Significant ($P < 0.05$) difference between Free and Occl conditions.

3 近赤外線分光装置のパラメータ

運動開始から疲労困憊までのOxyHb/MbとDeoxyHb/Mbの変化を図2に示した。Free条件のOxyHb/Mbについては、20%MVCでは安静値からの変化は認められなかったが、30、40および50%MVCでは運動開始当初は急激に減少し、30秒程度経過した後に緩やかに上昇する傾向を示した。また、30%MVCでは運動後半から疲労困憊に至るまでOxyHb/Mbは一定の値を示したが、40および50%MVCでは疲労困憊に至るまで上昇を続けた。一方、Occl条件のOxyHb/Mbについては、いずれの強度においても疲労困憊に至るまで時間経過とともに減少した。運動開始当初の減少率はFree条件と同様、急激であった。

DeoxyHb/Mbについては、40%と50%MVCのFree条件ではOxyHb/Mbが上昇に転じる運動の後半においても、ほぼ一定の値を保っていた。一方、Occl条件では、初期の急激な上昇後は、いずれの強度でも直線的な上昇を示した。

TotalHb/Mbは、50%MVC試行のFree条件において運動中上昇を続け、運動終了時には安静値より有意に高い値を示した。その他の強度のいずれの

条件においても、安静値からの有意な変化は認められなかった(図3)。

図4に疲労困憊時のOxyHb/Mb、DeoxyHb/MbおよびTotalHb/Mbを示した。いずれの強度においても、OxyHb/MbはFree条件でOccl条件よりも有意に大きい値を示し、DeoxyHb/Mbは有意に小さい値を示した。また、TotalHb/Mbは、50%MVCにおいてFree条件でOccl条件よりも有意に高値を示したものの、他の強度では条件間の差はなかった。

4 心拍数

HRはすべての強度における両条件で安静時より有意に上昇したが、いずれも緩やかな変化であった。また、疲労困憊時のHRは、20、30、40および50%MVCのFreeとOccl条件で、それぞれ、 92.9 ± 5.4 bpmと 89.2 ± 5.0 bpm、 98.7 ± 5.3 bpmと 92.6 ± 3.3 bpm、 98.6 ± 5.0 bpmと 97.1 ± 3.4 bpm、および 104.5 ± 2.9 bpmと 102.8 ± 3.6 bpmであった。いずれの強度でも条件間に差は認められなかった。

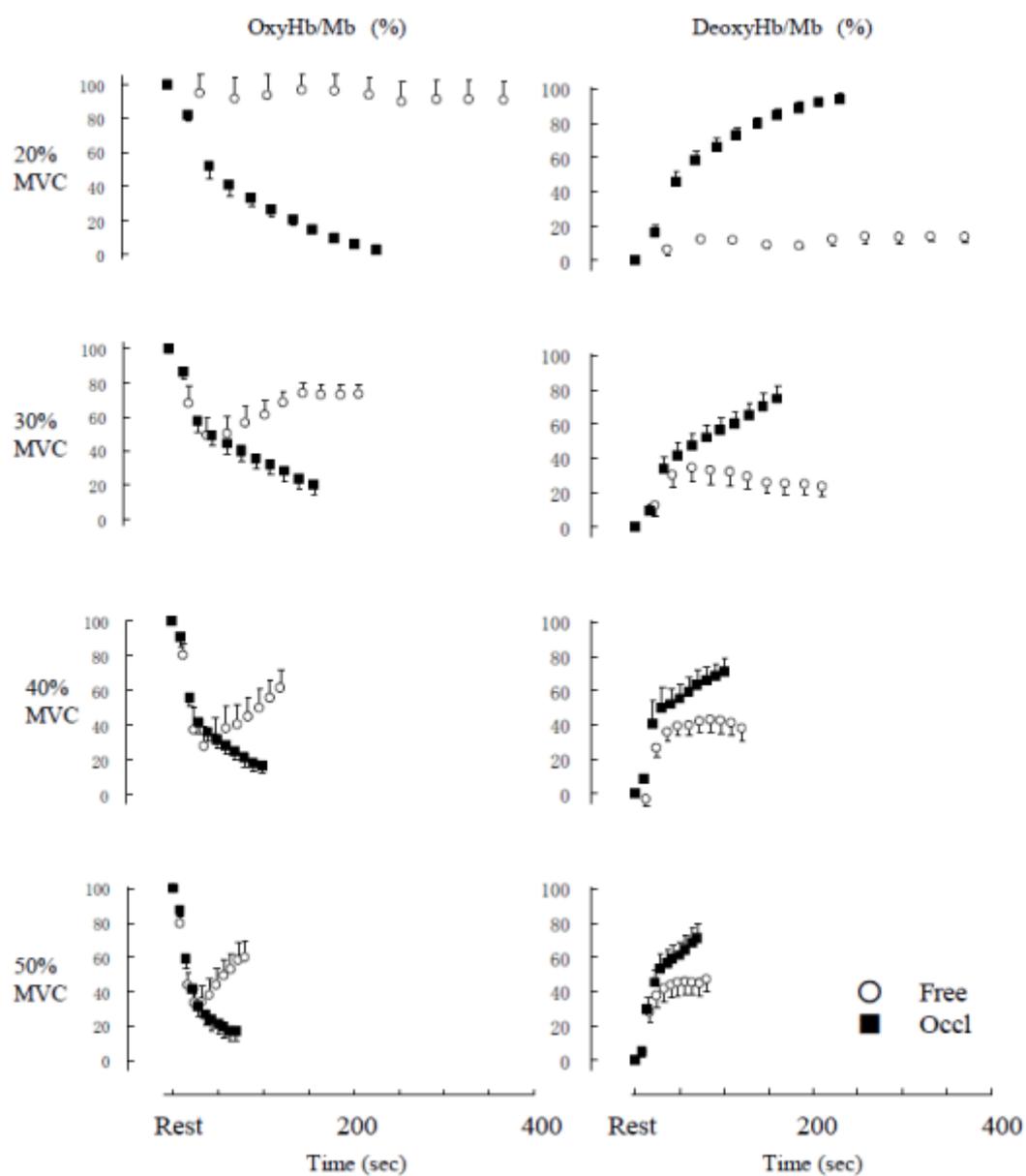


Fig. 2. Changes in OxyHb/Mb and Deoxy/Mb during nonischemic (Free, ○) and ischemic (Occl, ■) isometric handgrip exercises at a constant load of 20, 30, 40 and 50%MVC. Values are means \pm SE.

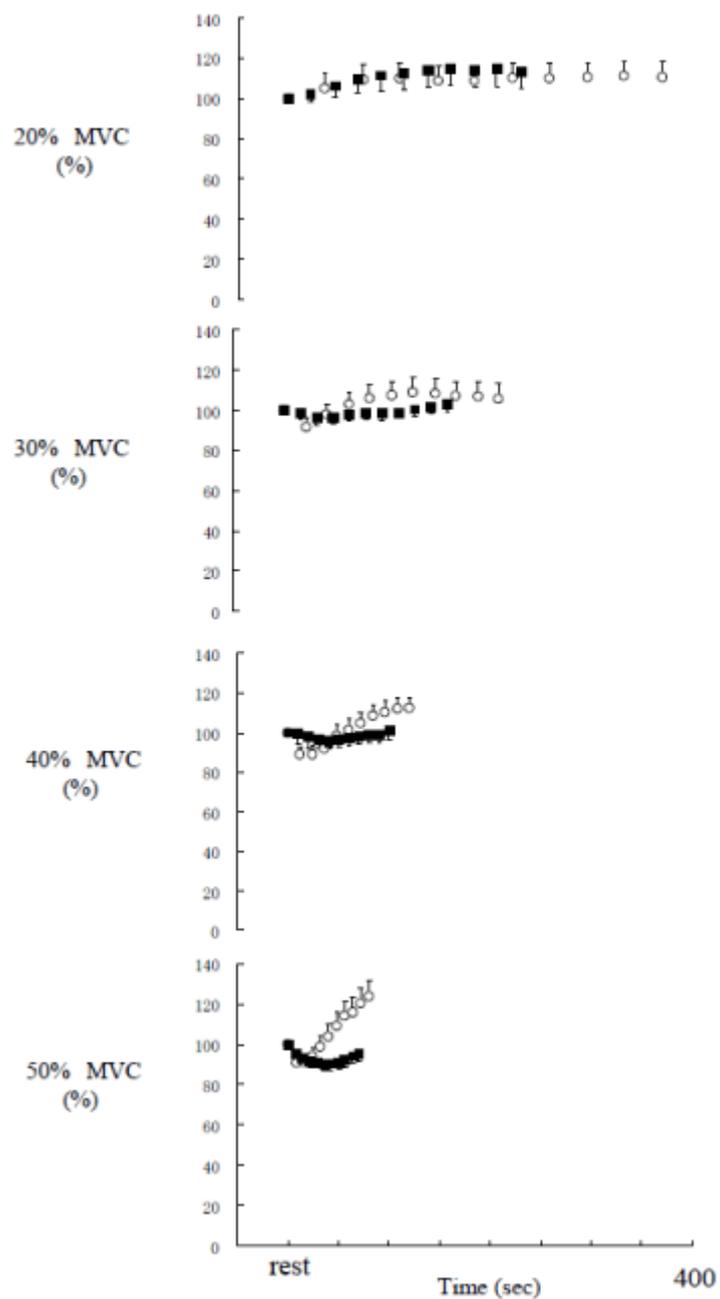


Fig. 3 Changes in Total Hb/Mb during nonischemic (Free, ○) and ischemic (Occl, ■) isometric handgrip exercises at a constant load of 20, 30, 40 and 50%MVC. Values are means \pm SE.

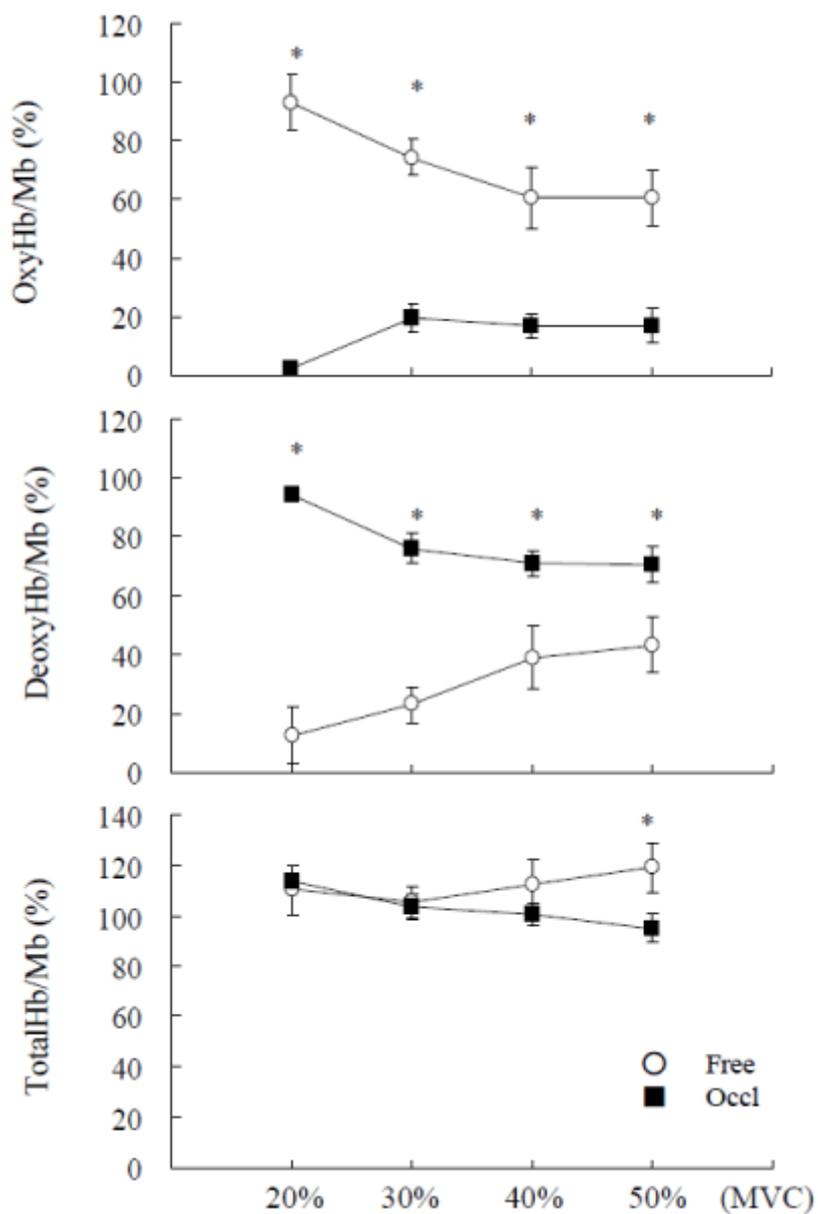


Fig. 4. OxyHb/Mb, Deoxy/Mb and Total Hb/Mb at exhaustion of nonischemic (Free, ○) and ischemic (Occl, ■) isometric handgrip exercises at a constant load of 20, 30, 40 and 50%MVC.

Values are means \pm SE.

* Significant ($P < 0.05$) difference between Free and Occl conditions.

IV. 考察

本研究における主な知見は、40および50%MVCでの持続時間は両条件で同等であった一方で、OxyHb/Mb がFree条件で高値を示したことであった。また、運動終了時のOxyHb/Mbは、20%MVCにおけるOccl条件を除く両条件で、いずれの強度においても最低値となっておらず、また、DeoxyHb/Mbは、Occl条件では運動終了まで直線的に上昇を続け、Free条件では運動終了まで一定であったことであった。

1 方法論上の問題点

1) データの標準化

本研究で用いた値は空間分解法によって換算されたHb/Mb濃度であるが、この換算値はHomma and Kagaya (1998) (19)によってすでに用いられているものの、散乱係数が不定である等の問題もあって、換算値を絶対濃度とすることは困難である。そのため、また、試行間のプローブのずれによる影響を避けるため、本研究におけるNIRSより得られたパラメータは標準化し、その後の処理を行なった。

ただし、運動終了後に上腕に巻いたカフに加圧してOxyHb/Mbが一定になるまで加圧を持続し、最低値を求めようとしたものの、被験者が苦痛を訴えた場合にはOxyHb/Mbが一定とならなくとも2分で加圧を終了した。加圧時間が短く虚血状態が不十分であれば完全な最低値が得られない。Occl条件での運動においては、運動終了後2分を経過しても運動終了直前の値にまで低下しない場合には、運動終了直前の値を最低値としているため、Occl条件の方がFree条件に比べて「完全な最低値」が得やすいと考えることもできる。

本研究では、30および40%MVC試行においてOxyHb/Mbの最低値はOccl条件の方で有意に低値を示した。このことは、データ解釈にあたってのバイアス要因となるが、もしFree条件のOxyHb/Mbが高値で

あったとしても、条件間の相対値の差が広がり、結果を過少評価している可能性はあるものの過大評価をしている訳ではない。それゆえ、このことが本研究で目的としている結果の解釈に影響していたとは思われず、また、いずれの試行においても条件間の初期値に有意な差は認められなかった。

2) 被験者

実験に際して、本研究では、15名の被験者にランダムに試行を行なわせた。試行によって被験者および男女比は異なるが、各試行での阻血および非阻血条件については同一被験者が行なっている。また、標準化した組織酸素動態は男女で同様の傾向を示しており、それゆえ、これらのことも本研究の結果の解釈には影響を及ぼさないと考えられる。

2 運動の持続時間

近位部加圧法での静的運動における持続時間の研究は、前腕(13、16)または上腕(3)を用いて、多くの研究者によってなされてきた。そして、45%MVC(16)あるいは50%MVC(13)での静的掌握運動ではOcclとFreeの条件間で持続時間に差はないとされ、35%MVC(16)あるいは30%MVC(13)ではOccl条件で持続時間の短縮が起きている。

本研究の結果は、これらの結果と同等であった。また、本研究では、50%MVCでのFree条件においても疲労困憊時のOxyHb/Mbは $59.7 \pm 9.8\%$ を示し、完全な血流阻止は起きておらず、活動筋への酸素供給は両条件で異なるものと思われた。それゆえ、40%と50%MVC試行のOcclおよびFree条件で持続時間が同じであったことを、Free条件においても筋内圧の上昇により活動筋への血流が遮断されていたためであるという理由で説明することはできない。

3 組織酸素動態

20%MVC試行におけるOxyHb/Mbにおいては、

Free条件では安静値からの変化は見られなかった一方で、Occl条件では運動初期に急激に減少した。さらに、30%MVC以上での試行における運動開始時のOxyHb/Mbは両条件で急激に減少するとともに、DeoxyHb/Mbは急激に増加していたが、興味深いのは、これらの変化率が両条件で同様であったことである(図2)。

OxyHb/Mbの変化は観察部位の酸素供給と酸素消費のバランスを示しており、両条件で同じ様に变化したことは、これらの運動強度ではFree条件においても運動初期には酸素供給が制限されていたことを示すものである。Lind and McNicol(1967)(24)の報告によると、血流阻止が生起するのは20%MVCあたりからであることが示唆されており、負荷の上昇に伴って筋内圧も上昇する(31)。それゆえ、本研究における30%MVC以上の試行においては、運動の初期段階では筋内圧の上昇により血流阻止が起きていた可能性が考えられる。

これまで、NIRSによって観察されたパラメータがヘモグロビンとミオグロビンのどちらをより反映しているかについて、議論がなされてきた。Mancini et al.(1994)(26)は、4秒に1回の頻度での足底屈運動を行なった場合のパラメータが静脈血酸素飽和度の値と関連していたことから、NIRSパラメータは主にヘモグロビンの酸素化状態を反映しているとしている。しかしながら、彼らはまた、NMRの結果から、疲労困憊まで行わせた場合においては、より高い負荷まで行うことのできた被験者の活動筋や、筋収縮の頻度を2秒に1回に上げて運動をさせた場合の観察部位では、ミオグロビンの脱酸素化も起きていることを報告している。

一方で、Tran et al.(1999)(35)は、1Hzのリズムでの足底屈運動において、NIRSで測定したOxyHb/Mbの変化はNMRで測定したミオグロビンの脱酸素化動態と良く一致することを示し、NIRSパラメータは主にミオグロビンの酸素化状態を反映しているとした。さら

に、NMRを用いた研究の中でRichardson et al.(1995)(29)は、複数の負荷で膝伸展運動を行なわせた場合のミオグロビンの脱酸素化率は、最大仕事率に対する25%の負荷での運動においても、運動開始から20秒以内に50%にまで進むことを報告している。この結果は、高強度の運動でなくとも運動初期にはミオグロビンによって酸素供給がなされている可能性を示すものである。

これらの研究結果から、NIRSで測定したOxyHb/Mbの結果は、運動強度が高くなるにつれミオグロビンの脱酸素化も反映していると考えられる。したがって、本研究で観察された30%MVC以上の試行での運動初期のOxyHb/Mbの動態は、筋内圧の上昇による血流阻止が起きていたことに加え、ミオグロビンからの酸素供給もなされていたため、Free条件とOccl条件とで同様であった可能性が考えられる。

ところで、本研究の30%~50%MVC試行では、OxyHb/Mbは約30秒を過ぎたところで、Occl条件ではその低下率が緩やかとなり、Free条件においては上昇に転じた。20%MVC試行においても、Occl条件でその低下率は緩やかとなっている。そして、これらの現象が全身循環の指標であるHRの動態とは一致していないことから、これには活動筋への血流配分の変化が大きく影響していたものと考えられる。すなわち、交換神経活動による非活動肢の血管収縮および血圧の上昇(30)が生じた一方で、活動筋では血管拡張(9, 15)がおこり、Free条件では、多くの血液が活動筋に分配されたためにOxyHb/Mbが上昇に転じ、Occl条件においてはOxyHb/Mbの低下とDeoxyHb/Mbの上昇が緩やかになったものと推測される。また、30%MVC試行では、運動後半にかけてOxyHb/Mbは一定となったが、その際のHRは上昇を続け、TotalHb/Mbは一定であった。これらのことより、OxyHb/Mbの上昇は運動の持続に伴う筋内圧の上昇(5)等によって抑制されていた可能性も考えられ

る。

一方で、30%~50%MVCでのFree条件におけるDeoxyHb/Mbは、運動終了にかけてほぼ一定の値を保っており、また、Occl条件においてもDeoxyHb/Mbは直線的に上昇していた。これらのことから、運動終了まで酸素は継続的に利用されていたものと思われる。

4 組織酸素動態と運動の持続時間

本研究の20%MVC試行では、Occl条件よりもFree条件で有意に持続時間が延長した。また、Free条件においてはOxyHb/Mbに変化が認められなかった一方で、Occl条件ではOxyHb/Mbが運動開始時より急激に低下した。Free条件における低強度での運動中のNIRSパラメータの変化は、ヘモグロビンの脱酸素化を反映している可能性が高く(26)、OxyHb/Mbに変化がなかったことは、運動開始時に上昇したヘモグロビンによる酸素供給が活動筋での酸素消費と見合っていたことを示している。そして、Free条件では筋内圧の上昇による血流阻止がなかった一方で、Occl条件では阻血によって運動開始時より酸素供給が阻害されていたため、運動の持続時間が短縮したのであろう。また、Occl条件における運動終了時の観察部位はほぼ脱酸素化状態であり、組織における酸素量が低値であったことが運動終了の一つの要因であったと考えられる。一方、Free条件においては、OxyHb/Mbの結果から運動終了まで酸素供給は十分になされており、それにもかかわらず運動が終了したことは、酸素供給以外の要因によって運動が終了したことを意味するものである。

30%MVC試行においては、運動の持続時間がOccl条件でFree条件より短縮したが、運動終了時のOccl条件でのOxyHb/Mbは $20.0 \pm 5.5\%$ であった。したがって、Occl条件においても組織の酸素不足が運動終了の主要因であった可能性は低いものの、Free条件と比較して運動後半における組織内の酸素

量が低値であったことは、運動の持続時間を短縮させたことに一部関わっていたものと思われる。

一方、40および50%MVC試行における両条件の運動持続時間は、条件間で同等であった。過去の研究において、40%MVC以上での運動では新たな運動単位の増加はほとんどない(11)ことが報告されており、本研究における40%と50%MVCでの掌握運動においては、速筋線維を含むほとんどの運動単位が動員されていた可能性が考えられ、運動強度が高い場合においては、活動筋への酸素供給は運動の持続に大きな影響を及ぼさないように思われる。それゆえ、Free条件での疲労困憊時におけるOxyHb/MbはOccl条件に比べて高値を示していたにもかかわらず、両条件間で運動の持続時間に差がなかったのであろう。

これまで、疲労の主要因は筋に存在することが示唆されており(17, 37, 38)、解糖系のエネルギー代謝による代謝産物の蓄積が、運動を終了させる要因の一つであることが言われている(8, 12, 22, 34)。また、酸化リン酸化の過程で活性酸素種が生成され(28)、このことが細胞外 K^+ 濃度の上昇をもたらすひとつの要因であることが示唆されている(23)。そして、細胞外 K^+ 濃度の上昇は筋細胞膜およびT管膜における活動電位の伝達を減衰させて張力低下を引き起こすとされており(33)、運動を終了させる要因と考えられている(36, 37)。また、細胞外 K^+ 濃度の上昇は負荷が高いほど大きいことが知られており(10, 32)、本研究の40および50%MVC試行においては、代謝産物の蓄積および細胞外 K^+ 濃度の上昇が運動を終了させていたのかもしれない。

過去の研究において、10%~30%MVCでの静的運動中、運動の持続に伴って運動単位の動員(11, 25, 27, 39)あるいは筋内圧(5)が増加することが示されている。さらに、血圧および脚における筋交感神経活動は疲労困憊まで持続的に上昇することが知られている(7)。これらの結果は、低強度での静的運動にお

いても運動の持続に伴いエネルギーは無酸素的にも生成され、高強度運動時と同様に代謝産物が蓄積する可能性を示すものである。また、細胞外K⁺濃度は低強度での静的掌握運動においても時間の経過に伴って上昇することが知られている(10)。これらのことから、本研究における20%および30%MVC試行のFree条件においても、細胞外K⁺濃度の上昇および代謝産物の蓄積が運動終了の要因となっていたことも考えられる。

また、本研究における30%MVC試行では、Occl条件において運動後半における組織内の酸素量がFree条件と比較して低値であり、運動の持続時間が短縮していた。これまで、活動筋への酸素供給が低下すると、より多くの代謝産物が蓄積することが報告されている。イヌの筋を用いた³¹P-NMRでの研究では、低強度での3分間の電気刺激後のPCr量は、虚血条件において灌流条件よりも低値を示したとされている(17)。また彼らは、ヒトにおける研究ではFIO₂が10%の条件で通常酸素条件より早い段階でのPi とH⁺の増加が認められたとし、疲労困憊時のPCr濃度は両条件で同じであったことを報告した(18)。これらの結果は、酸素供給が低下すると活動筋内にはより早い段階で代謝産物が蓄積することを示すものである。本研究の30%MVC試行においても、Occl条件ではより早い段階で代謝産物が蓄積したために持続時間が短縮したのであろう。

以上、酸素供給以外の要因が運動の持続時間を制限すると考えられ、その他の要因として、活動電位の頻度と大きさの減少(11、25)などが想定されている。本研究においてはその成因を特定することはできないが、この解明については今後の課題であるといえる。

V. まとめ

本研究の目的は、運動の持続時間が阻血条件(Free条件)と非阻血条件(Occl条件)とで同等となるような負荷での掌握運動において、活動筋への酸素

供給が両条件で同様であるのか否かについて、近赤外線分光装置を用いて検討することであった。また、低強度での両条件における組織酸素動態を比較検討することであった。被験者に、20、30、40および50%MVCの負荷での静的掌握運動をFree条件とOccl条件とで疲労困憊まで行なわせ、運動持続時間および活動筋組織酸素動態を測定した。

40%あるいは50%MVCでの静的掌握運動の持続時間はFree条件とOccl条件とで同等であった一方で、OxyHb/MbはFree条件で高値を示した。運動終了時のOxyHb/Mbは、20%MVCにおけるOccl条件を除く両条件で、いずれの強度においても最低値となっておらず、また、DeoxyHb/Mbは、Occl条件では運動終了まで直線的に上昇を続け、Free条件では運動終了まで一定であった。

これらの結果から、40%あるいは50%MVCでの持続時間が同等であったことが、Free条件において筋内圧の上昇による活動筋への血流遮断が起きていたためではないことが示された。また、いずれの強度においても運動終了まで活動筋には酸素が存在し利用されていたことが示唆され、運動を終了させた要因は、酸素供給および利用以外にあると思われた。

参考文献

- 1) Barnes W S (1980) the relationship between maximum isometric strength and intramuscular circulatory occlusion. *Ergonomics*. 23(4): 351-357
- 2) Belardinelli R, Barstow T J, Porszasz J and Wasserman K (1995) Changes in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infrared spectroscopy. *Eur. J. Physiol.* 70(6): 487-492
- 3) Bonde-Petersen F, Mork A L and Nielsen E (1975) Local muscle blood flow and sustained contractions of human arm and back muscles. *Eur J Appl Physiol* 34(3): 43-50
- 4) Chance B, Dait M T, Zhang C, Hamaoka T and

- Hagerman F (1992) Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *Am J Physiol* 262(3): C766-C775
- 5) Crenshaw A G, Karlsson S, Gerdle B and Friden J (1997) Differential responses in intramuscular pressure and EMG fatigue indicators during low- vs. high-level isometric contractions to fatigue. *Acta Physiol Scand* 160(4): 353-361
- 6) De Blasi R A, Cope M, Elwell C, Safoue F and Ferrari M (1993) Noninvasive measurement of human forearm oxygen consumption by near infrared spectroscopy. *Eur J Appl Physiol* 67(1): 20-25
- 7) Doerzbacher K J and Ray C A (2001) Muscle sympathetic nerve responses to physiological changes in prostaglandin production in humans. *J Appl Physiol* 90(2): 624-629
- 8) Donaldson S K (1986) Mammalian muscle fiber types: comparison of excitation-contraction coupling mechanisms. *Acta Physiol Scand* 128 (Suppl 556): 157-166
- 9) Ellsworth M L (2000) The red blood cell as an oxygen sensor: what is the evidence? *Acta Physiol Scand* 168(4): 551-559
- 10) Fallentin N, Jensen B R, Bystrom S and Sjogaard G (1992) Role of potassium in the reflex regulation of blood pressure during static exercise in man. *J Physiol* 451: 643-651
- 11) Fallentin N, Jorgensen K and Simonsen E B (1993) Motor unit recruitment during prolonged isometric contractions. *Eur J Appl Physiol* 67(4): 335-341
- 12) Fitts R H (1996) Muscle fatigue: the cellular aspects. *Am J Sports Med* 24(6): S9-S13
- 13) Fukunaga T, Philippi H and Hollmann W (1976) Uber die Beziehungen zwischen statischer Arbeit, Kraftleistung und Durchblutung. *Sportarzt und Sportmedizin*. 8: 181-188
- 14) Hamaoka T, Iwane H, Shimomitsu T, Katsumura T, Murase N, Nishio S, Osada T, Kurosawa Y and Chance B (1996) Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscles by near-infrared spectroscopy. *J Appl Physiol* 81(3): 1410-1417
- 15) Hansen J, Sander M and Thomas G D (2000) Metabolic modulation of sympathetic vasoconstriction in exercising skeletal muscle. *Acta Physiol Scand* 168(4): 489-503
- 16) Heyward V H (1975) Influence of static strength and intramuscular occlusion on submaximal static muscle endurance. *Res Q* 46(4): 393-402
- 17) Hogan M C, Nioka S, Brechue W F and Chance B (1992) A ³¹P-NMR study of tissue respiration in working dog muscle during reduced O₂ delivery conditions. *J Appl Physiol* 73(4): 1662-1670
- 18) Hogan M C, Richardson R S and Haseler L J (1999) Human muscle performance and PCr hydrolysis with varied inspired oxygen fractions: a ³¹P-MRS study. *J Appl Physiol* 86(4): 1367-1373
- 19) Homma S and Kagaya A (1998) Oxygen delivery and utilization in working muscles during 1-min static handgrip exercise at varied intensity. *J Exerc Sci* 8: 30-37
- 20) Humphreys P W and Lind A R (1963) The blood flow through active and inactive muscles of the forearm during sustained hand-grip contractions. *J Physiol* 166: 120-135
- 21) Jobsis F F (1977) Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science* 198(4323): 1264-1267
- 22) Katz A, Sahlin K and Henriksson J (1986) Muscle ATP turnover rate during isometric contraction in humans. *J Appl Physiol* 60(6): 1839-1842
- 23) Kourie J I (1998) Interaction of reactive oxygen species with ion transport mechanism. *Am J Physiol* 275(44): C1-C24
- 24) Lind A R and McNicol G W (1967) Local and central circulatory responses to sustained contractions and the effect of free or restricted arterial inflow on post-exercise hyperaemia. *J Physiol* 192(3): 575-593
- 25) Loscher W N, Cresswell A G and Thorstensson A (1994) Electromyographic responses of the

- human triceps surae and force tremor during sustained submaximal isometric plantar flexion. *Acta Physiol Scand* 152(1): 73-82
- 26) Mancini D M, Bolinger L, Li H, Kendrick K, Chance B and Wilson J R (1994) Validation of near-infrared spectroscopy in humans. *J Appl Physiol* 77(6): 2740-2747
- 27) Maton B and Gamet D (1989) The fatigability of two agonistic muscles in human isometric voluntary submaximal contraction: an EMG study. *Eur J Appl Physiol* 58(4): 369-374
- 28) Reid M B (2001) Redox modulation of skeletal muscle contraction: what we know and what we don't. *J Appl Physiol* 90(2): 724-731
- 29) Richardson R S, Noyszewski E A, Kendrick K F, Leigh J S and Wagner P D (1995) Myoglobin O₂ Desaturation during exercise. *J Clin Invest* 96(4): 1916-1926
- 30) Seals D R, Chase P B and Taylor J A (1988) Autonomic mediation of the pressor responses to isometric exercise in humans. *J Appl Physiol* 64(5): 2190-2196
- 31) Sjogaard G, Kiens B, Jorgensen K and Saltin B (1986) Intramuscular pressure, EMG and blood flow during low-level prolonged static contraction in man. *Acta Physiol Scand* 128(3): 475-484
- 32) Sjogaard G, Savard G and Juel C (1988) Muscle blood flow during isometric activity and its relation to muscle fatigue. *Eur J Appl Physiol* 57(3): 327-335
- 33) Sjogaard G (1990) Exercise-induced muscle fatigue: The significance of potassium. *Acta Physiol Scand* 140 (suppl 593): 5-63
- 34) Sary C M and Hogan M C (2000) Impairment of Ca²⁺ release in single *Xenopus* muscle fibers fatigued at varied extracellular Po₂. *J Appl Physiol* 88(5): 1743-1748
- 35) Tran T, Sailasuta N, Kreutzer U, Hurd R, Chung Y, Mole P, Kuno S and Jue T (1999) Comparative analysis of NMR and NIRS measurements of intracellular Po₂ in human skeletal muscle. *Am J Physiol* 276(Regulatory Integrative Comp. Physiol. 45): R1682-R1690
- 36) Unsworth K, Hicks A and McKelvie R (1998) The effect of beta-blockade on plasma potassium concentrations and muscle excitability following static exercise. *Pflugers Arch* 436(3): 449-456
- 37) West W, Hicks A, McKelvie R and O'Brien J (1996) The relationship between plasma potassium, muscle membrane excitability and force following quadriceps fatigue. *Pflugers Arch* 432(1): 43-49
- 38) Wright J R, McCloskey D I and Fitzpatrick R C (1999) Effects of muscle perfusion pressure on fatigue and systemic arterial pressure in human subjects. *J Appl Physiol* 86(3): 845-851
- 39) Zwarts M J and Arendt-Nielsen L (1988) The influence of force and circulation on average muscle fibre conduction velocity during local muscle fatigue. *Eur J Appl Physiol* 58(3): 278-283