



健常成人男性における筋電気刺激中の 下肢筋の筋酸素化状態

日當聡志 (板橋中央総合病院)

沓澤智子 (東海大学スポーツ医科学研究所、東海大学医学部看護学科)

中岡正昭 (静岡県立大学看護学部) 岩本敏志 (東海大学医学部看護学科)

Muscle oxygenation of a lower limb during electrical stimulation in healthy males

Satoshi HINATA, Tomoko KUTSUZAWA, Masaaki NAKAOKA and Satoshi IWAMOTO



Abstract

Background: Belt electrode skeletal muscle stimulation (B-SES), simultaneously stimulates the muscles of the entire lower extremity and produces contraction of the lower limb muscles if applied to the waist, knees, and ankles. Recently, B-SES has been applied to prevent muscle weakness in the intensive care unit (ICU). However, there are few studies on the muscle oxygenation state during B-SES.

Purpose: This study aimed to investigate the muscle oxygenation state of the vastus lateralis and gastrocnemius during B-SES in healthy men.

Methods: Fourteen healthy men (28.2 ± 2.3 years) were enrolled. B-SES device was used to electrically stimulate all muscles of the lower limbs for 15 min. The oxygenation status of the vastus lateralis and gastrocnemius muscles during B-SES were measured by near-infrared spectroscopy. Kinetics of blood volume (total hemoglobin/myoglobin [Hb/Mb]), oxygenated Hb/Mb, and deoxygenated Hb/Mb were qualitatively analyzed.

Results: The dynamics of changes in total Hb/Mb (Δ total Hb/Mb) were classified into the usual, increased, and irregular groups. The usual group comprised those with similar dynamics of Δ total Hb/Mb during voluntary exercise. In the increased group, Δ oxygenated Hb/Mb was shown to increase from the start of B-SES.

Conclusion: Muscle oxygenation dynamics during B-SES and voluntary exercise may be different.

(Tokai J. Sports Med. Sci. No. 36, 27-38, 2024)

I. 緒言

筋電気刺激 (electrical muscle stimulation : EMS) とは、経皮的に骨格筋に電気刺激を与え、他動的に筋収縮を起こすもので、筋力維持を目的としてリハビリテーションに活用されている。従来の EMS の手法は、貼付型電極を用いて、1 つ

の筋肉を 2 極間で刺激するもので、貼付型電極と皮膚の電気接触面積が小さく、そこに強い電流を流すためと矩形波により電流が急激に上昇するために、電気刺激中に疼痛を伴いやすい欠点があった¹⁾。また、50Hz や 80Hz などの高周波刺激では、筋張力が維持できず筋疲労が起こりやすかった¹⁾。この欠点を補うためベルト電極を腹部、両膝上、両足首に巻き、そこに通電することで、下肢全体

の筋を同時に刺激し筋収縮を生じさせることができるベルト電極式骨格筋電気刺激法 (belt electrode skeletal muscle electrical stimulation : B-SES) が開発された²⁾。B-SES では、ベルト電極を用いることから電気面積が増大すること、刺激電流が指数関数的漸増波を使用していることから、疼痛を感じる事が少ないことが利点である²⁾。また、この方法は伸筋と屈筋が同時に刺激されることから、関節を可動することなく筋収縮を起こす。そのため、人工関節全置換術後³⁾、ギプス固定している下肢の筋力維持⁴⁾などのリハビリテーションに活用されている。

近年、集中治療室 (ICU) に入室している重症患者に B-SES が適用されはじめている。ICU 入室患者は、術後や人工呼吸管理のためベッド上安静を強いられることが多く、ICU 入室後10日間で筋肉量が17.7%低下したとの報告⁵⁾もあり、筋量・筋力低下を伴うことが知られている。この病態を ICU acquired weakness (ICU-AW) といい、過度の安静による廃用が原因の1つに挙げられており⁶⁾、筋収縮を伴う B-SES の ICU-AW の予防効果が期待されている。しかしながら、ICU 入室患者は心機能・呼吸機能が障害されていることが多く、運動負荷は、心不全や呼吸不全を悪化させる危険性が高い。加えて、ICU 入室患者は、意識障害や鎮静剤の使用により、最大耐性刺激強度を決定できないことが多い。従って、ICU 患者へ B-SES を適用する際の収縮強度は、安全性を考慮し、筋収縮が目視できる程度の弱い強度で開始されていることが多い^{7,8)}。ICU 患者への B-SES 適用の筋量・筋力への効果、バイタルサインへの影響などの報告はなされている⁸⁾が、B-SES 施行中の筋酸素化状態の測定とその動態の検討はなされていない。

運動中の筋酸素化状態は近赤外分光法 (near infrared spectroscopy : NIRS) を用いて測定可能である。波長が約700~900nm の近赤外光は、生体組織の透過性が高い。生体内で近赤外光を吸収する主な物質は、毛細血管内および細胞・静脈内のヘモグロビン (Hb) と筋細胞内のミオグロビ

ン (Mb) で、その酸素化状態により吸光度が変化するため、光強度変化を計測することにより、酸素化 Hb/Mb (oxy-Hb/Mb) と脱酸素化 Hb/Mb (deoxy-Hb/Mb) の濃度変化を算出できる⁹⁾。また、酸素化 Hb/Mb (oxy-Hb/Mb) と脱酸素化 Hb/Mb (deoxy-Hb/Mb) の和 (総 Hb/Mb, total Hb/Mb) は、観察領域の血液量を示す。現在の NIRS では、Hb と Mb の濃度変化を区別することはできないが、一般的には NIRS により測定したシグナルの80%は Hb である⁹⁾とされている。

B-SES では、随意運動と異なり、電気抵抗の低いタイプ II 型筋線維が刺激されると報告されている^{10,11)}。そのため、B-SES 中の筋酸素化状態が随意運動と異なる可能性がある。我々は健常人において、B-SES 施行時の筋酸素化状態について、下腿筋と大腿筋ともに収縮が目視できる程度の強度で施行した結果を報告した¹²⁾が、そのプロトコルは下腿筋に対する大腿筋の刺激強度が一定ではなかった。B-SES では、大腿と下腿の筋量の違いから、大腿筋の刺激強度は下腿筋の2~3倍を推奨している。そこで本研究では、健常成人男性に、下腿筋に対し大腿筋の電気刺激強度を2倍にした B-SES を施行し、NIRS を用いて腓腹筋および外側広筋の筋酸素化状態を測定し、その動態を明らかにすることを目的とした。なお、ICU 入室患者への適用を考え、下腿筋への刺激強度は、腓腹筋の収縮が目視できる程度とした。

II. 対象と方法

1. 研究対象者

対象は20歳から39歳までの健常成人男性14名 (28.2 ± 2.3歳) で日常生活が自立し、基礎疾患がない者とした。本研究は、人を対象とする医学系研究に関する倫理指針を遵守し、東海大学臨床研究審査委員会の承認 (承認番号 : 17R-361) を得て実施した。被験者には研究内容を書面と口頭で説明し、文書にて同意を得た。

2. 測定プロトコール

初めに被験者から、年齢、既往歴、喫煙歴、運動習慣を問診し、身長、体重、バイタルサイン（血圧、脈拍、体温）を測定した。運動習慣は、厚生労働省が定める30分以上、週2日以上運動しているものを運動習慣ありとした。血圧（BP）と脈拍（PR）はデジタル自動血圧計（オムロン）で、体温はデジタル体温計（ニプロ）で測定した。経皮酸素飽和度（SpO₂）をPULSOX-ME300（コニカミノルタ）で測定した。仰臥位で膝関節伸展位をとり、NIRSのプロープ貼付部位の大腿と下腿の周囲径をメジャーで、同部位の皮下脂肪厚を皮下脂肪計（ヤガミ）で測定した。

被験者は、ベッド上で仰臥位をとり、5分間安静にした後、B-SESを開始した。B-SESは下肢全体に15分間施行した。安静からB-SES終了5分後までの25分間の外側広筋と腓腹筋の筋酸化状態を、近赤外分光法を使用し、測定した。

BP、PR、SpO₂はB-SES開始前、開始5分後、B-SES終了時、B-SES終了後5分に測定した。

3. B-SES

B-SESは、AUTO TENS PRO リハビリユニット（ホームイオン研究所）を使用した。被験者は仰臥位をとり、ウェスト、両膝上、両足首にベルト電極を装着した。B-SESの刺激は、機器に搭載されている「廃用モード（開始から1分30秒：3 Hzから20Hzに漸増、1分30秒から終了前1分30秒：20Hzで3秒刺激、2秒休止、終了前1分30秒から終了まで：20Hzから3 Hzに漸減）」を用いた。なお、20Hzの周波数は、筋張力を維持し、筋収縮の低下が起こりにくく、筋肥大を効率よく促進できるとされている^{13, 14)}。刺激強度は機器の治療出力メーターが下腿筋（腓腹筋）1、大腿筋（外側広筋）2となるように設定した。20Hz時の実効電流は治療出力レベルメーター値が1の場合、2mA、レベルメーター値が2の場合は3.5mAとなる。なお、収縮強度は発生する筋張力で測定すべきであるが、B-SESでは伸筋・屈筋が同時に収縮するので測定不可能である。その

ため、上記設定により、腓腹筋の収縮と足関節がわずかに底屈することを目視で確認し、下腿筋が刺激されていると判断した。

4. 筋酸化状態

筋酸化状態はNIRSで測定した。機器はNIRO-200（浜松ホトニクス株式会社）で、使用波長は775nm、810nm、850nmである。送受光間距離は3.5cmと4cmで、プローブを右外側広筋、右腓腹筋の筋線維の長軸に沿って貼付した。プローブ貼付部位は、腓腹筋は下腿の膝関節裂隙部と踵部をむすんだ膝側30%の内側頭、外側広筋が大転子点と外側膝関節裂隙部を100%とした膝側30%の部位とした¹²⁾。プローブは両面テープで固定し、外光を遮断するため測定部位を黒い布で覆った。

NIRO-200では、modified Beer Lambert (MBL) 法を用いて、oxy-Hb/Mb、deoxy-Hb/Mb、total-Hb/Mb の変化量 (Δ) を測定できるほか、空間分解分光法 (SRS: Spatial resolved spectroscopy) を用いて組織酸化指標 (TOI) の変化 (Δ) を測定可能である。

5. 分析方法

1) 被験者の属性

身長、体重から、Body Mass Index (BMI) を算出した。被験者の身体に関するデータは平均値と標準偏差で示した。大腿・下腿間の周囲径または皮下脂肪厚の比較は、対応のあるt検定で行なった。

2) バイタルサイン

B-SES前後のバイタルサインの比較は、反復測定分散分析を行い、post hocとしてHolm法を用いた。統計処理ソフトは、HAD (Ver.17)¹⁵⁾を用いた。

3) B-SES中の筋酸化動態

NIRSのデータは Δ oxy-Hb/Mb、 Δ deoxy-Hb/Mb、 Δ total-Hb/Mb、 Δ TOIの10秒毎の平均値を

算出し、B-SES 開始 1 分前から B-SES 終了 2 分後までの変化をグラフで示した。 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ の動態を定性的に分析した。

Ⅲ. 結果

B-SES はすべての被験者で下腿筋・大腿筋ともに、筋収縮を目視で確認でき、疼痛を訴える被験者はいなかった。

1. 被験者のプロフィール (表 1)

被験者は 14 名 (28.2 ± 2.3 歳) で、BMI は 2 名

が肥満 1 度であり、1 名に喫煙歴があった (被験者 A)。下肢の周囲径と皮下脂肪厚は、両者とも大腿が下腿より大であった (両者とも $p < 0.01$)。また、皮下脂肪厚は NIRS に影響を与えるとされる 10mm を超える者はいなかった。

2. バイタルサイン (表 2)

B-SES 前後のバイタルサインは、収縮期 BP および SpO_2 には全経過で有意差は認められなかった。B-SES 終了時の拡張期 BP は、開始前と開始 5 分より有意に低かった (両者とも $p < 0.05$)。PR は開始前に対し、開始 5 分 ($p < 0.01$)、終了時 ($p < 0.01$)、終了 5 分 ($p < 0.01$) が、開始 5

表 1 被験者のプロフィール (n=14)
Table 1 Profile of participants (n=14)

	単位	平均	±	標準偏差	
年齢	歳	28.2	±	2.3	
身長	cm	172.5	±	3.9	
体重	kg	66.8	±	8.6	
BMI	kg/m ²	22.4	±	2.5	
周囲径					
大腿	mm	43.3	±	4.9	]*
下腿	mm	35.9	±	5.4	
皮下脂肪厚					
大腿	mm	6.3	±	1.9	]*
下腿	mm	3.7	±	1.7	

BMI: Body Mass Index

*: $p < 0.01$ (大腿 vs. 下腿)

表 2 ベルト電極式筋電気刺激中のバイタルサイン (n=14)

Table 2 Changes in vital signs during belt electrode skeletal muscle stimulation (n=14)

		開始前	開始 5 分	終了時	終了 5 分後
SBP	mmHg	123.2 ± 16.4	124.8 ± 11.1	120.5 ± 10.6	121.1 ± 14.5
DBP	mmHg	75.1 ± 10.9	69.3 ± 5.9	66.9 ± 5.6*, \$	69.1 ± 12.1
PR	bpm	75.2 ± 10.6	62.9 ± 8.4**	58.3 ± 8.4**, #	58.6 ± 6.6**, #
SpO ₂	%	96.9 ± 0.8	96.7 ± 0.8	96.1 ± 0.9	96.4 ± 1.3

SBP: 収縮期血圧、DBP: 拡張期血圧、PR: 脈拍数、SpO₂: 経皮的動脈血酸素飽和度

*: $p < 0.05$ (開始前に対し)、**: $p < 0.01$ (開始前に対し)、\$: $p < 0.05$ (開始 5 分に対し)、#: $p < 0.01$ (開始 5 分に対し)

表3 外側広筋と腓腹筋の筋酸素化状態のパターン

Table 3 Classification of muscle oxygenation kinetics in vastus lateralis and gastrocnemius

被験者	パターン		運動習慣
	外側広筋	腓腹筋	
A	通常型	増加型	なし
B	不規則型	通常型	なし
C	増加型	通常型	あり
D	増加型	増加型	あり
E	通常型	通常型	あり
F	増加型	増加型	なし
G	通常型	増加型	なし
H	増加型	通常型	あり
I	増加型	増加型	あり
J	通常型	通常型	あり
K	通常型	通常型	あり
L	増加型	増加型	あり
M	通常型	通常型	なし
N	通常型	通常型	なし

分に対し、終了時 ($p < 0.01$)、終了5分 ($p < 0.01$) が有意に低下していた。

3. 運動習慣 (表3)

運動習慣は、「あり」が8名 (被験者C～E、H～L)、「なし」が6名であった。

4. B-SES 中の筋酸素化動態

B-SES 中の筋酸素化動態を主に $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ の動態から、3つのタイプに分類した (図1)。その代表例を図2～4に示す。

1) 被験者K、30歳、運動習慣あり： $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型 (図2)

被験者Kでは、B-SES 開始後、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ および $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ は急激に低下し、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$

Hb/Mb は90秒、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ は120秒で最低値となった後、徐々に増加した。 $\Delta\text{deoxygen-Hb/Mb}$ は30秒まで増加したが、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ の増加に伴い減少し、270秒からほぼ一定となった。被験者Kでは、刺激様式がかわる780秒から終了まで $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ は増加し続けたが、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ は低下し、 $\Delta\text{deoxygen-Hb/Mb}$ は増加した。TOI はB-SES 開始30秒まで低下し、わずかに増減するものの、ほぼ一定となった。

このように、B-SES 開始後に $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ が大きく低下し、その後、徐々に増加するタイプを、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型とした。 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型では、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ は $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ と同様に、刺激開始後低下し、その後徐々に増加している。

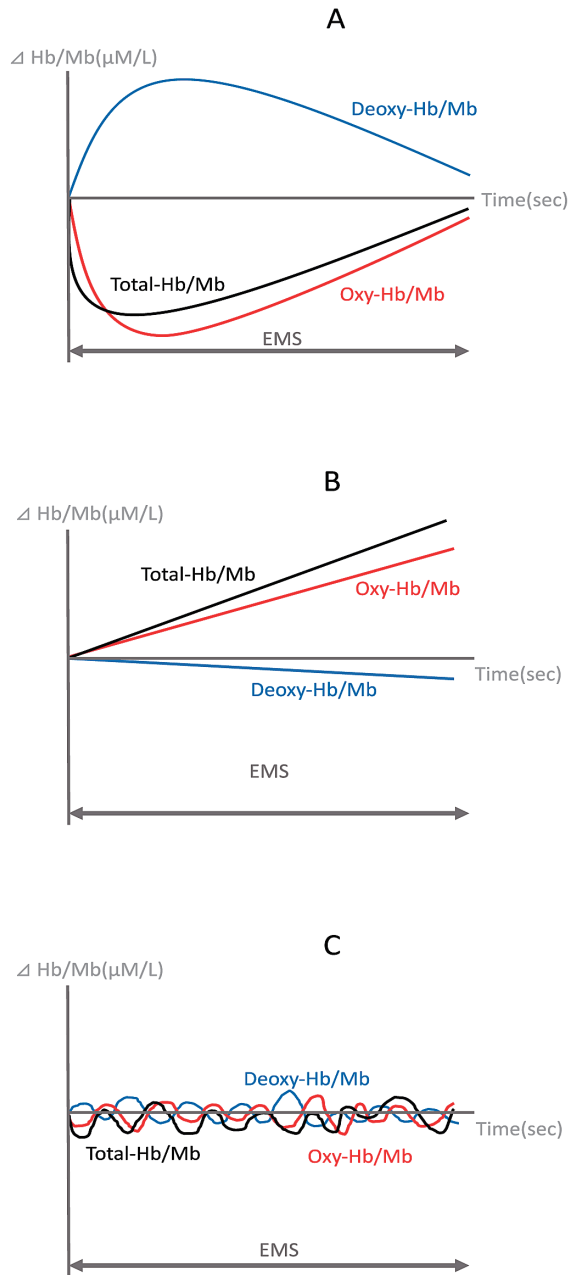


図1 B-SES中の筋酸素化状態のタイプ
Fig. 1 Classification of muscle oxygenation kinetics during B-SES
A: $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ usual group B: $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ increasing group C: $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ irregular group

2) 被験者F、26歳、運動習慣なし： $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 増加型（図3）

被験者Fでは、B-SES開始後、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ と $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ は150秒まで最大 $4\mu\text{M/L}$ の低下がみられるが、その後大きく増加し続けた。

$\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ は90秒まで最大 $2\mu\text{M/L}$ とわずかに増加するが、その後緩やかに低下した。TOIはB-SES開始90秒が最低値で、その後810秒まで増加し続けた。

このように、B-SES開始後の $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ が

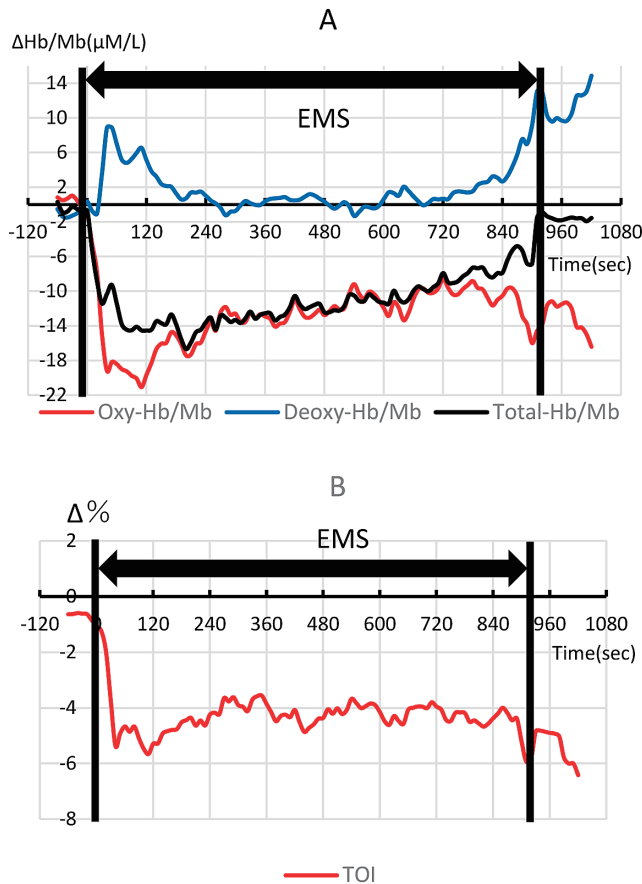


図2 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型 (被験者 K、外側広筋)
A: Δ 酸素化 Hb/Mb、 Δ 脱酸素化 Hb/Mb、 Δ 総 Hb/Mb
B: 組織酸素化指標
Fig. 2 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ usual group (Subject K, vastus lateralis muscle)
A: NIRS recording (red line: Δ oxygenated Hb/Mb, blue line: Δ deoxygenated Hb/Mb, black line: $\Delta\text{total-Hb/Mb}$)
B: Tissue oxygen index (TOI)

小さく、その後、著増するタイプを $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 増加型とした。 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ は $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ と同様に著増し、そのため、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ は筋収縮にもかかわらず増加が認められない。

3) 被験者 B、32歳、運動習慣なし: $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 不規則型 (図 4)

被験者 B では、B-SES 開始より $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ は不規則に増減を繰り返していた。TOI も同様に増減を繰り返していた。

このタイプは、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型・増加型

に当てはまらないため、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 不規則型とした。

5. 外側広筋と腓腹筋における酸素化動態のタイプ

14名の B-SES 中の筋酸素化動態のタイプを、外側広筋、腓腹筋別に示した (表 3)。 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型は、腓腹筋では 8/14 (57%)、外側広筋では 7/14 (50%) が該当した。 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 増加型は、腓腹筋で 6/14 (43%)、 Δ 外側広筋でも 6/14 (43%) が該当した。 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 不規則型は外側広筋の 1/14 (7%) の

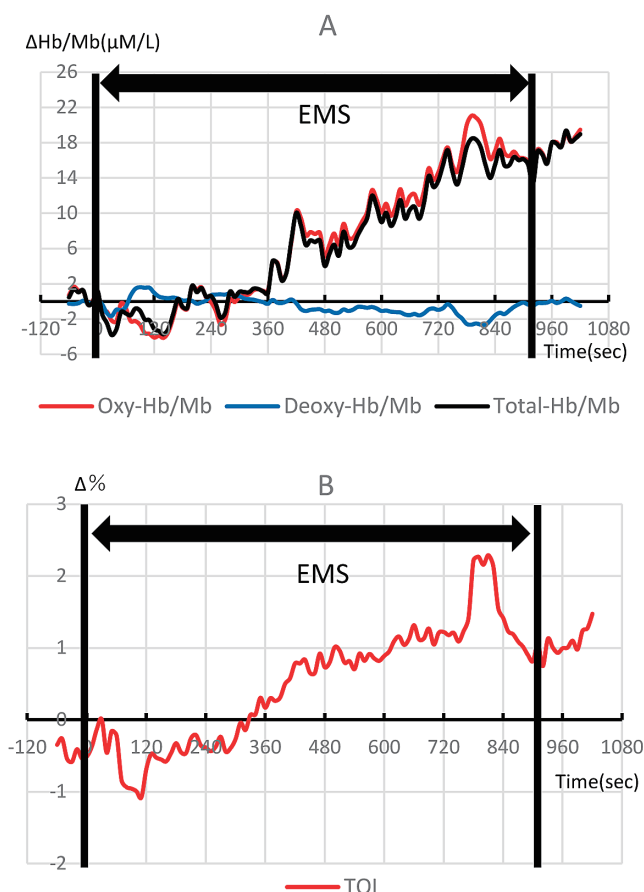


図3 Δ total-Hb/Mb 増加型 (被験者 F、外側広筋)
 A : Δ 酸素化 Hb/Mb、 Δ 脱酸素化 Hb/Mb、 Δ 総 Hb/Mb
 B : 組織酸素化指標
 Fig. 3 Δ total-Hb/Mb increased group (Subject F, vastus lateralis muscle)
 A: NIRS recording (red line: Δ oxygenated Hb/Mb, blue line: Δ deoxygenated Hb/Mb, black line: Δ total-Hb/Mb)
 B: Tissue oxygen index (TOI)

みであった。

大腿筋と下腿筋で同じタイプを示したのは、9/14 (64%)、大腿筋と下腿筋ともに Δ total-Hb/Mb 増加型は 4/14 (29%) で、 Δ total-Hb/Mb 通常型は 5/14 (36%) であった。

筋別の筋酸素化動態のタイプと運動習慣の有無には関連は認められなかった。

IV. 考察

本研究では下腿筋に対し大腿筋の刺激強度を 2

倍にし、B-SES 中の外側広筋と腓腹筋の筋酸素化状態を測定した。筋酸素化状態の変化は、通常の随意運動でみられる 1) Δ total-Hb/Mb 通常型の他に、2) Δ total-Hb/Mb 増加型、3) Δ total-Hb/Mb 不規則型が認められた。 Δ total-Hb/Mb 増加型は、EMS による筋線維のリクルートの違いが関係している可能性が考えられた。 Δ total-Hb/Mb 不規則型は被験者本人の筋酸素化状態の特性や刺激強度が弱かった可能性もあるが、原因は特定できなかった。

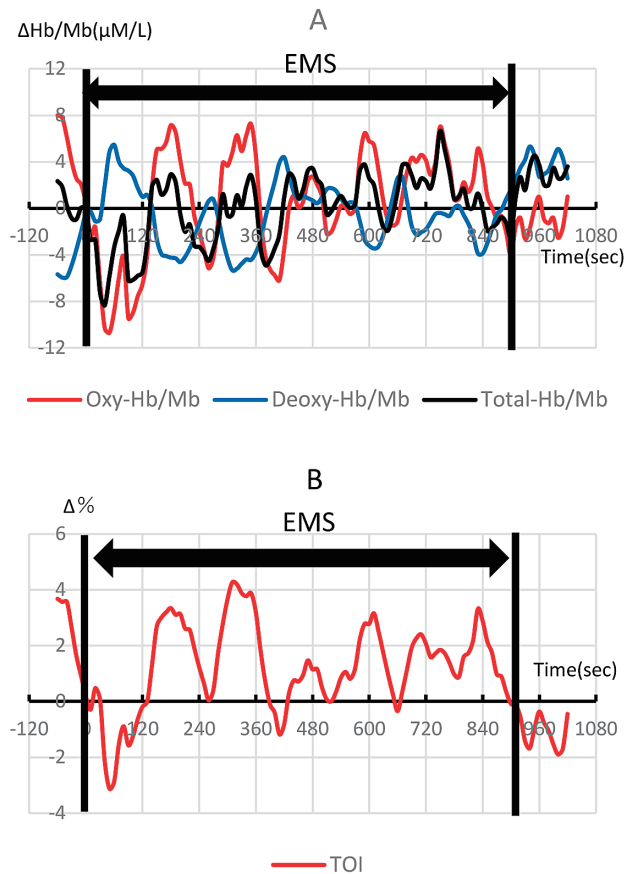


図4 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 不規則型 (被験者 B、外側広筋)

A: Δ 酸素化 Hb/Mb、 Δ 脱酸素化 Hb/Mb、 Δ 総 Hb/Mb

B: 組織酸素化指標

Fig. 4 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ irregular group (Subject B, vastus lateralis muscle)

A: NIRS recording (red line: Δ oxygenated Hb/Mb, blue line: Δ deoxygenated Hb/Mb, black line: $\Delta\text{total-Hb/Mb}$)

B: Tissue oxygen index (TOI)

1. B-SES 中の筋肉酸素化動態のタイプについて

B-SES 中の筋肉酸素化動態のタイプを、図 1 に示した。1 つめのタイプ (図 1-A) は、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型で、B-SES 開始より $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ は 30 秒前後に一旦減少し、その後増加した。B-SES 開始後の $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ の低下は、被験筋の筋ポンプ作用に伴い一時的に血液量が低下した可能性を示す。その後の $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ の増加は、末梢血管拡張に起因している可能性がある¹⁶⁾。 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ は $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ より遅れて最低値となるが、これは筋ポンプ作用と筋収縮による酸素消費の増加に

よるものと考えられる¹⁶⁾。 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ は、筋酸素消費の増加に伴って増加した後、血液量の増加により筋組織からの流出が増え、減少したと考えられる。これらの所見は自転車エルゴメータによる軽度から中等度の運動強度の外側広筋や¹⁶⁾、トレッドミル運動負荷時の腓腹筋¹⁷⁾、反復握握運動における前腕屈筋群¹⁸⁾といった随意運動の酸素化状態の動態と類似していた。運動中の $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ の増加は中岡ら¹²⁾の研究では、腓腹筋の刺激強度は本研究と同じであるが、腓腹筋では、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型を示していた。

本研究では、通常の随意運動でみられる $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型以外に、B-SES 開始より

$\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ と $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ は増加し続け、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ 一定、またはわずかに減少するタイプ（図 1-B、 total-Hb/Mb 増加型）が認められた。このタイプの $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 増加は、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型に比べ、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ の増加が顕著である。これは筋血液量が著しく増加していることを示し、毛細血管の拡張や血流の増加が生じていると推察される。このため、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ は、筋収縮により酸素が消費され増加しているのにもかかわらず、筋組織から除去されるため、一定または減少を示したと考えられる。

随意運動を行った場合、筋収縮の際に小さな細胞体をもつ運動単位から活動し始めるサイズの原則があり、筋線維のサイズが小さいタイプ I がまずリクルートされ、徐々に筋線維の大きなタイプ II 筋線維がリクルートされる¹⁹⁾。B-SES を含む EMS の場合、随意運動と異なり電気抵抗が低いタイプ II 線維が優先してリクルートされるため^{10, 11)}、解糖系経路代謝産物である乳酸が蓄積されることが報告されている²⁰⁾。乳酸は血管拡張作用を持つことから、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 増加型に乳酸が関与している可能性が考えられる。Ogata ら²¹⁾ の B-SES を使用した研究では、B-SES 開始前後で非常に強い刺激（実効電流中央値 8.4mA）と強い刺激（7.25mA）で乳酸値が有意に増加したことを報告している。彼らの研究では、中等度の刺激強度（5.2mA）での乳酸値に有意差を認めていないが、乳酸値が上昇している被験者もあり²⁰⁾、本研究では、刺激強度は Ogata らより弱い、乳酸値が上昇していた可能性はある。

この 2 つのタイプのほかに、B-SES 開始より $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ や $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ の全てが不規則に変化する動態（ $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 不規則型、図 1-C）を示した被験者も認められた。この理由として、刺激強度が低く収縮強度が軽い、または、皮下脂肪が厚く筋からの情報を十分に検出していない可能性があげられる。しかしながら、前者については、図 3 に示す被験者 B の外側広筋は、目視で他の被験者と目視で同等の筋収縮を認めており、被験者 B の筋収縮が微弱であった

可能性は低い。後者については、図 3 に示す被験者 B の外側広筋の皮下脂肪厚は 7.5mm であり、NIRS は送受光間距離の約 1/2 の深さの組織の情報を検出するとされていることから、筋からの信号はとらえていたと考えられる。

2. 筋別の筋酸素化動態の特徴

前述したように、B-SES を含む EMS は電気抵抗が少なく、タイプ II 筋線維から筋収縮を誘発させる^{10, 11)}。 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 増加型の機序として、タイプ II 線維が刺激されたことによる乳酸の蓄積が血管を拡張させた可能性があることから、タイプ I やタイプ II の筋線維の構成比率が、筋酸素化状態のパターンに反映される可能性がある。腓腹筋はタイプ I とタイプ II の筋線維比率が 50% ずつであるが、外側広筋はタイプ II a の筋線維が多い^{22, 23)}。このことから、外側広筋のほうが $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 増加型の割合が高いのではないかと推察されたが、本研究では $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 増加型は、腓腹筋で 6/14（43%）、外側広筋でも 6/14（43%）であった。筋線維の構成比率は個人差が大きいことから、被験者数を増やして検討していく必要がある。

3. B-SES 中のバイタルサインの変化

B-SES 開始より収縮期 BP の上昇はなく、拡張期 BP の低下、PR の減少を認めたが、EMS による筋収縮は随意運動ではないため血中のカテコラミン濃度が変化しない¹⁰⁾ こと、1-10Hz の低周波電気刺激では、 β エンドルフィンやエンケフェリンなどの内因性オピオイドペプチドが放出され、 μ 受容体と結合し鎮痛作用が生じる²⁴⁾。先に述べたように、今回使用した B-SES の廃用モードは、開始から 1 分 30 秒まで 3 Hz から 20Hz に漸増し、終了前 1 分 30 秒から終了まで 20Hz から 3 Hz に漸減するモードである。したがって、刺激電流による疼痛がなかったことが関係していると考えられ、以上のことから、ICU 入室患者など重篤な患者にも安全に使用できると考えられる。

V. 研究の限界

B-SES では、方法でも述べたように、機械側の出力は一定としたが、筋張力などを測定できないため、運動強度が被験者間で同一であったかどうかは不明である。従って、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ の変化のパターンが、収縮強度に依存するかどうかは、同一被験者で、刺激強度を強くして検討していく必要がある。また、同一筋内の異なる部位（近位側、遠位側など）での測定も検討する必要がある。

本研究で使用した NIRS 機器は、Hb/Mb の相対的な変化量をみており、Hb/Mb 濃度の絶対量は測定できない。 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型と増加型でどの程度血流に差があるかなどは、他の測定法で確認していく必要がある。

また乳酸蓄積による血管拡張作用の可能性が示唆されたが、今後、乳酸値の測定を行っていきたい。

VI. 結論

本研究では B-SES の刺激強度を腓腹筋に対して、外側広筋の刺激強度を 2 倍にした時の筋酸化状態の変化を測定した。 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ が、EMS 中、自転車エルゴメータやトレッドミル歩行の主動筋と同様の変化を示す $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ 通常型のほかに、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ が著しく増加するパターンも認められ、EMS では随意運動とは異なる筋酸化状態があることが示された。

利益相反

著者全員の本研究に関する利益相反はない。

文献

- 1) 浜田拓, 林達也, 森谷敏夫. 筋電気刺激 (EMS) を利用した生活習慣病改善の可能性. *BME* 16: 35-41, 2002.
- 2) Miyamoto T, Kamada H, Tamaki A, Moritani T.

Low intensity electrical muscle stimulation induces significant increase in muscle strength and cardiorespiratory fitness. *Eur J Sport Sci* 16: 1104-1110, 2016.

- 3) 和田治, 山本洋輔, 岡智大. 術後急性期の人工関節弛緩術後患者に対する 4 日間の大腿四頭筋への電気刺激療法への有用性. *理学療法学* 47: 132-137, 2020.
- 4) Hasegawa S, Kobayashi M, Arai R, Tamaki A, Nakamura T, Moritani T. Effect of early implementation of electrical muscle stimulation to prevent muscle atrophy and weakness in patient after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Electromyogr Kinesiol* 21: 622-630, 2011.
- 5) Segers J, Hermans G, Bruyninck F, Meyfroidt G, Longer D, Gosselink R. Feasibility of neuromuscular electrical stimulation in critically ill patient, *J Crit Care* 29: 1082-1088, 2014.
- 6) Kress JP, Hall JP: ICU-acquired weakness and recovery from critical illness, *N Engl J Med* 370, 1626-1635, 2014.
- 7) 丸山剛, 亀田裕美, 塩見耕平, 鈴木康裕, 石川公久, 上野友之, 江口清. 重症患者に対する Electrical Muscle Stimulation の安全性の検討. *国立大学リハビリテーション療法士学術大会誌* 35回, 65-69, 2014.
- 8) 野々山国芳, 重見博子, 成瀬廣亮, 重見研司, 松峯昭彦, 石塚全. 運動療法と栄養療法により筋力・骨格筋量が改善した集中治療室獲得性筋力低下の一例: *日呼ケアリハ学誌* 30: 350-354, 2022.
- 9) 浜岡隆文. 活動筋の酸素・エネルギー代謝の測定: NIRS—基礎と臨床—. 酒谷薫 (監修). 新興医学出版社, 東京. pp 227-231, 2016.
- 10) Hirata K, Hara T, Oshima Y, Yoshikawa T, Fujimoto S. Effect of electrical stimulation and voluntary exercise on muscle oxygenation assessed by NIRS. *Osaka City Med J* 52: 67-78, 2006.
- 11) Watanabe K, Taguchi Y, Moritani T. Metabolic and cardiovascular responses during voluntary pedaling exercise with electrical muscle stimulation. *Eur J Appl Physiol* 114: 1801-1807, 2014.
- 12) 中岡正昭, 杵澤智子, 栗田太作. 成人男性における電気刺激を用いたトレーニング中の筋肉酸化

- 状態および換気状態の変化 東海大学健康科学部紀要 22: 25-29, 2017.
- 13) 森谷敏夫. 運動器治療機器最前線 (第2回) 経皮的電気刺激 ベルト電極式骨格筋電気刺激法. *整形外科* 65: 972-976, 2014.
 - 14) Moritani T, Mori M, Kijima A. Electromechanical changes during electrically induced and maximal voluntary contractions: Electrophysiologic responses of different muscle fiber types during stimulated contractions. *Exp neurol* 88: 471-483, 1985.
 - 15) 清水裕士. フリーの統計分析ソフト HAD: 機能の紹介と統計学習・教育、研究実践における利用方法の提案. *メディア・情報・コミュニケーション研究* 1: 59-73, 2016.
 - 16) Kime R, Im J, Moser D, Nioka S, Katsumura T, Chance B. Noninvasive determination of exercise-induced vasodilation during bicycle exercise using near infrared spectroscopy. *Med Sci Monit* 15: 89-94, 2009.
 - 17) Komiyama T, Onozuka A, Miyata T, Shigematsu H. Oxygen saturation measurement of calf muscle during exercise in intermittent claudication. *Eur J Vas E* 23: 388-392, 2002.
 - 18) Kutsuzawa T, Shioya S, Kurita D, Haida M, Yamabayashi H. Effect of age on muscle energy metabolism and oxygenation in the forearm muscle. *Med Sci Sports Exerc* 33: 901-906, 2001.
 - 19) 望月久: 筋機能改善の理学療法とそのメカニズム—理学療法と科学的基礎を求めて. 第3版. 東京, 有限会社ナッブ, pp 89-90, 2014.
 - 20) Hamada T, Hayashi T, Kimura T, Nakao K, Moritani T. Electrical stimulation of human lower extremities enhances energy consumption, carbohydrate oxidation, and whole body glucose uptake. *J Appl Physiol* 96: 911-916, 2004.
 - 21) Ogata T, Sekiya H, Kono Y, Watanabe Y, Oda H. Development of the protocol to deliver graded stimulation intensity on lower limbs using belt-shaped electrode skeletal muscle stimulation. *Progress in Rehabilitation Medicine* 6: 1-8, 2021.
 - 22) Johnson MA, Polgar J, Weightman D, Appleton D. Data on the distribution of fiber types in thirty-six human muscles: An autopsy study. *J Neurol Sci* 18: 111-129, 1973.
 - 23) Hickey M, Weidner M, Gavigan K, Zheng D, Tyndall G, Houmard A: The insulin action-fiber type relationship in human is muscle group specific. *Am J Physiol* 269: E150-E154, 1995.
 - 24) 瀧口述弘. 疼痛管理における物理療法の選択と実践: *物理療法科学* 26: 42-46, 2019.