



ICU 患者における筋電気刺激中の筋酸素 化状態の評価：ケースシリーズ研究

佐藤香織（東海大学医学部付属病院看護部救命救急センター） 沓澤智子（東海大学スポーツ医科学研究所）

岩本敏志（東海大学医学部看護学科） 市川 毅（東海大学医学部付属病院リハビリテーション技術科）

久保大輔（横浜市立大学大学院データサイエンス研究科）

青木弘道（東海大学医学部医学科総合診療学系救命救急医学領域）

Muscle Oxygenation Status During Electrical Muscle Stimulation of Intensive Care Unit Patients: A Case Series

Kaori SATO, Tomoko KUTSUZAWA, Satoshi IWAMOTO, Tsuyoshi ICHIKAWA, Daisuke KUBO and
Hiromichi AOKI



Abstract

Intensive care unit (ICU)-acquired weakness is observed in acutely ill ICU patients, who develop muscle weakness during recovery, without any underlying disease/condition. Early rehabilitation is recommended to prevent ICU-acquired weakness. However, voluntary rehabilitation is often limited by disease severity and treatment. Recently, belt electrode-skeletal muscle electrical stimulation (B-SES) has gained attention for the rehabilitation of ICU patients; however, only a few studies have explored its effects on patient vital signs and muscle oxygenation status. Therefore, in this study, we aimed to investigate the effects of B-SES on the vital signs, blood gas values, and gastrocnemius (GM) and vastus lateralis muscle (VL) oxygenation status in three ICU patients with severe polytrauma (40-, 43-, and 23-year-old males) via near-infrared spectroscopy. B-SES intensity was set at the minimum level necessary to induce muscle contraction. Notably, no changes in vital signs (blood pressure and heart rate) were observed before or after treatment, with no hypoxemia. Moreover, no muscle desaturation was detected. Compared to the muscle oxygenation dynamics observed during voluntary exercise, $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ and $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ were increased in the GM muscles of cases 1 and 3 after B-SES. VL muscles exhibited lower $\Delta\text{Hb/Mb}$ than GM muscles, possibly due to the low stimulus intensity. Overall, our findings highlight the potential and relative safety of B-SES for ICU patient rehabilitation, providing that minimal intensity is used to stimulate muscle contraction.

Keywords: Belt-electrode skeletal muscle electrical stimulation, Intensive care unit-acquired muscle weakness, Muscle oxygenation, Near infrared spectroscopy

(Tokai J. Sports Med. Sci. No. 37, 31-40, 2025)

I. 緒言

集中治療室 (intensive care unit : ICU) に入室した重症患者では、筋力低下を引き起こす原疾患がないにもかかわらず病状が回復した際に筋力低下を認めることがあり、この病態を ICU-acquired weakness (ICU-AW) という¹⁻³⁾。ICU-AW は重症患者に起こる神経筋障害⁴⁾とされ、発症に関与する危険因子として、不活動、敗血症や高血糖、カテコラミンや筋弛緩薬などの薬剤などが挙げられている⁵⁾。ICU-AW を発症すると、人工呼吸器の装着期間の延長、ICU 在室期間・在院日数の延長に繋がり⁶⁾、死亡率の増加⁶⁾や医療費の増大などの弊害を生じる⁷⁾。

ICU-AW の予防の1つとして、ICU 在室中から退院後の生活を見据えた早期リハビリテーションの実施が推奨されている⁸⁾。ICU 患者では、疾患の重症度や治療のため、病初期はマッサージや他動的関節可動域訓練などのリハビリテーションが主に実施され、筋収縮を伴う随意運動 (立位歩行、床上エルゴメーターなど) 実施は困難なことが多い⁹⁾。そこで、随意運動の代替として経皮的に骨格筋に電気刺激を与え、筋収縮を生じさせる筋電気刺激の適応が始まっている¹⁰⁾。ベルト電極式骨格筋電気刺激法 (Belt-electrode Skeletal muscle Electrical Stimulation : B-SES)¹¹⁾は、ベルト電極を腹部・大腿・下腿に装着し、同時に刺激することから下肢筋全体の伸筋と屈筋を同時に収縮させることができ、関節可動がない。また、ベルト電極は刺激面積が広いこと、漸増波パルスを使用していることから、電気刺激時の疼痛が少ないという利点がある¹²⁾。

ICU に入室する急性重症患者に筋収縮を伴う運動を実施することは、いくつかの問題がある。ICU 入室患者は、呼吸・循環器系の予備能力が低下している。そのような状況下では、筋収縮による酸素消費・二酸化炭素産生の増加に見合う、換気・心拍出量の増大が生じない可能性があり、高CO₂血症や低酸素血症などが生じる可能性がある。

そのため、筋肉へ酸素が十分に供給されず、筋肉の低酸素状態が招来される可能性もある。以上のことから、ICU 患者に最適な B-SES の刺激強度は、筋収縮が認められる最小の強度で刺激している報告が多く^{13, 14)}、B-SES の継続に伴う治療強度の増強に関するプロトコールも未確定である^{15, 16)}。

筋酸素化状態および筋血流量の変化は、近赤外分光法 (near infrared spectroscopy : NIRS) を用いて測定可能である。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、酸素化 Hb/Mb (oxy-Hb/Mb) と、脱酸素化 Hb/Mb (deoxy-Hb/Mb) の濃度変化を非侵襲的に算出できる¹⁷⁾。また、oxy-Hb/Mb と deoxy-Hb/Mb の和である総ヘモグロビン (total-Hb/Mb) は、観察領域の血流量を示す。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¹⁷⁾とされている。

B-SES 実施中の筋酸素化状態に関する研究では、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酸素化状態および換気の変化¹⁸⁾、健康人男性における筋電気刺激中の下肢筋の筋酸素化状態¹⁹⁾が報告されているが、ICU 患者に対する B-SES 実施中の筋酸素化状態を評価した報告はない。前述したように ICU 患者に B-SES を実施した場合、筋肉が低酸素状態に陥る可能性がある。筋肉が運動時に酸素不足に陥ると、oxy-Hb/Mb が減少し続け、deoxy-Hb/Mb が増加し続けることが、閉塞性動脈硬化症を合併した患者の歩行時の NIRS 所見として報告されている²⁰⁾。また、ICU-AW を併発しやすい敗血症では、筋肉の微小循環や酸素化状態の変化が報告されており^{21, 22)}、B-SES 実施中の筋酸素化状態が健康人と異なる可能性がある。そこで、本研究では、ICU 患者に B-SES を実施し、バイタルサイン、動脈血ガス分析の変動および収縮筋 (外側広筋および腓腹筋) の筋酸素化状態を明らかにすることを目的とした。

II. 倫理的事項

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19R024）を得て実施した。被験者または被験者の意識状態が清明でない場合には代諾者に、研究内容を書面と口頭で説明し、文書で同意を得た。20例の測定を予定していたが、適格条件に該当する患者が少なかったことに加え、コロナ禍による面会制限により代諾者からの同意取得が困難となり、5例の測定で研究を終了した。5例中2例の被験者は、意識障害のため、測定中の安静が保てず、安定した測定ができなかったため解析から除外し、残りの3症例の結果を本研究の測定の全てとし、ケースシリーズとして報告する。

III. 対象と方法

1. 研究対象者

対象は、東海大学医学部付属病院高度救命救急センターのICUに入室した、年齢20歳以上80歳未満の患者とした。

対象患者の適格条件、除外基準、中止基準を以下に示す。

1) 適格条件

- (1) 年齢20歳以上80歳未満のICU入室患者
- (2) 人工呼吸器、気管挿管の有無に関わらず、低換気・低酸素血症がない患者〔経皮酸素飽和度（ SpO_2 ）93%以上〕
- (3) バイタルサインの異常がない〔収縮期血圧（以下、SBP）：90mmHg以上、心拍数（以下、HR）：50回/分以上120回/分未満〕

2) 除外基準

- (1) 急性薬物中毒、自殺企図、来院時心肺停止の蘇生後、第1～5頸椎損傷、陳旧性脳血管障害
- (2) ベルト電極装着部位（腹部、大腿、下腿）

の熱傷、外傷、または損傷のある患者、下肢浮腫、下肢静脈血栓

- (3) バイタルサインの異常（SBP：90mmHg未満、HR：50回/分未満、120回/分以上、 SpO_2 ：93%未満）

3) B-SES 20分間の中止基準

- (1) 同意撤回のあった場合
- (2) バイタルサインの異常 (2) 除外基準の (3) に同じ

2. プロトコール

バイタルサインの安定および脳浮腫の改善が認められた日から、患者にB-SESを20分間、毎日実施した。なお、患者がICUを退室した時点でB-SES終了とした。B-SES実施第1日（B-SES Day 1）、7日（B-SES Day 7）、14日（B-SES Day 14）に、B-SES実施前後のバイタルサイン、動脈血液ガスの測定およびB-SES中の腓腹筋（Gastrocnemius muscle：GM）、外側広筋（Vastus lateralis muscle：LV）の筋酸素化状態を、NIRSを用いて測定した。B-SES Day 1実施中のバイタルサインが安定していたことが確認できた場合、Day 2以降のB-SESを、同じ刺激強度で実施した。患者の基礎データ（年齢、身長、体重、既往歴、診断名、神経学的所見）は、カルテから得た。

3. B-SES

B-SESの機器は、リハビリテーション総合電気刺激装置 AUTO TENS PRO Rehabili Unit（株式会社 ホーマーイオン研究所）を使用した。ベルト電極を腹部（腸骨稜3cm頭側）、両大腿（膝部頭側3cm）、両下腿（内顆頭側3cm）に装着した。B-SESのモードは、機器に設定された廃用ソフトモード（開始から1分30秒までに3Hzから20Hzに漸増、20Hzで3秒刺激、2秒休止とし、終了前1分30秒より20Hzから3Hzに漸減）を適応した。刺激強度は、ICU入室中の重症患者が対象であるので、筋収縮が確認できる最小限の刺激強度とした。健常人において、大腿・下腿筋の収縮が目視できる程度の強度とする日當¹⁹⁾の先

行研究を参考に、治療出力40%、治療出力メーターが大腿2（実行電流 3.5mA）、下腿1（実行電流 2mA）とした。なお、B-SESでは、伸筋と屈筋が同時に収縮するため発生張力の測定は不可であることから、上記の設定でGMの収縮と足関節が僅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. B-SES 前後のバイタルサインの測定

B-SES 開始 1 分前と B-SES 終了 1 分前にバイタルサインの測定と動脈血液ガス分析（BGA）を実施した。バイタルサインは、生体モニタ（IntelliVue MP 50、フィリップスエレクトロニクスジャパン（株））から、体温（BT）、HR、SBP、拡張期血圧（DBP）、呼吸数（RR）、SpO₂を記録した。BGA は、汎用血液ガス分析装置（ABL800FLEX、ラジオメーター（株））を用いて、pH、動脈血二酸化炭素分圧（PaCO₂）、動脈血酸素分圧（PaO₂）、乳酸値を測定した。

5. B-SES 中の筋酸素化状態

筋酸素化状態は、B-SES 開始前の安静 1 分間から B-SES 終了後 5 分間まで、NIRS を用いて連続的に測定した。使用機器は、携帯型近赤外線組織酸素モニタ装置 Pocket NIRS Duo、（ダイナセンズ（株））で、使用波長は、735nm、810nm、850nm、プローブの送受光間距離は、4 cm である。プローブ貼付部位は、VL では大転子部を 0 %、外側膝関節裂隙点を 100 % とした膝側 30 % 付近、GM は下腿の内脛骨点を 0 %、内果点を 100 % とした膝側 30 % 付近で、筋厚が最大となる部位とした。プローブは、筋線維の長軸方向に沿って貼付し、黒色のバンドでプローブを覆い、遮光した。

測定項目は、oxy-Hb/Mb、deoxy-Hb/Mb、total-Hb/Mb で、B-SES 開始 1 分前から B-SES 終了 5 分後までの oxy-Hb/Mb、deoxy-Hb/Mb、total-Hb/Mb 変化（Δ）をグラフで示し、それらの動態を定性的に分析した。

6. 筋肉量および皮下脂肪厚

プローブ貼付部位の大腿周囲径と下腿周囲径をメジャーで測定し、筋肉量の指標とした。プローブ貼付部位の GM と VL の皮下脂肪厚は、皮下脂肪計（ヤガミ）を使用し、測定した。

IV. 症例提示

3 症例のプロフィールを表 1 に示した。B-SES の実施は、症例 1 は、Day 1 から Day 13 まで、症例 2 は、Day 1 から Day 11 まで、症例 3 は、Day 1 から Day 13 まで行った。

1. 症例 1、40歳. 男性

現病歴：屋根で作業中に転落し救急搬送。重症頭部外傷（急性硬膜外血腫、両側前頭葉脳挫傷、外傷性くも膜下出血、気脳症、前頭骨骨折、頭蓋底骨折）、顔面外傷（眼窩吹き抜け骨折、上顎骨骨折、両側頬骨骨折、両側眼窩底骨折）、頸部外傷（左第 7 頸椎横突起骨折）、胸部外傷（左血気胸、両側肺挫傷、右第 12 胸椎横突起・椎弓骨折、左第 2-9 肋骨骨折、右第 10・11 肋骨骨折）、四肢外傷（右橈尺骨遠位端開放骨折）と診断され、

表 1 患者のプロフィールと呼吸管理
Table 1 Patient Profile and Respiratory Care

		症例 1	症例 2	症例 3
年齢	歳	40	43	23
性別		男性	男性	男性
身長	cm	170	170	170
体重	kg	75.0	95.0	82.0
BMI	kg/m ²	25.9	30.3	25.3
周囲径				
大腿	mm	51.0	59.4	52.5
下腿	mm	34.0	39.5	37.3
皮下脂肪厚				
大腿	mm	11	13	11
下腿	mm	13	14	8
気管挿管		有	有	有
人工呼吸器		なし	自発換気 (PS, CPAP)	自発換気 (PS, CPAP)
酸素濃度	%	35	30	24
PEEP	cmH ₂ O		5	8
PS 圧	cmH ₂ O		5	8

BMI : Body Mass Index, PEEP : 呼吸終末陽圧, PS : Pressure Support, CPAP : Continuous Positive Airway Pressure,

ICU に入室した。

既往歴：高血圧、糖尿病。内服加療なし。

経過：第1病日に気管挿管し、人工呼吸器管理下で、脳出血と脳浮腫に対する加療を行っていた。右橈尺骨遠位端開放骨折に対して創外固定術、左血気胸に対して胸腔ドレーン挿入を施行した。顔面骨骨折に対する手術適応はあったが気脳症があり手術は待機となった（第14病日に整復手術を施行：B-SES Day 6）。呼吸状態は徐々に安定し、第8病日に人工呼吸器から離脱したが、顔面骨骨折のため気管挿管は継続され、35%酸素を吸入していた。

第9病日（B-SES Day 1）に、左血気胸が改善したため胸腔ドレーンが抜去された。脳浮腫の改善が確認され、B-SES 開始となった。B-SES は、エコー検査で右下腿に血栓を認めたため、左下肢にのみ、実施した。B-SES Day 1 の患者の安静度（医師が治療上、必要と判断する運動・活動の制限の程度）は、頸椎カラー装着、ICU 高機能ベッド臥床、体位交換禁止、頸部から体幹を捻じらない体位保持が必要であった。患者の意識状態は、Glasgow Coma Scale（GCS）で E：1（Eye opening：痛み刺激でも開眼しない）、V：T（Best verbal response：気管挿管中）、M：4（Best motor response：痛み刺激から逃避する）、鎮静状態は、Richmond Agitation-Sedation Scale（RASS）-4（深い鎮静状態：呼びかけに無反応だが身体刺激で動くまたは開眼する）だが、一時的に+1（落ち着きがない：絶えずそわそわしている）であった。B-SES 実施中、下肢を動かさないよう指示をしていたが、意識障害のため、下肢の随意的な運動を認めた。

B-SES 前後のバイタルサイン（BT、HR、BP、RR）に変化を認めず、BGA は PaO_2 が 130mmHg から 98mmHg に低下したが、 SpO_2 の低下は認めなかった（表2）。

GM の筋酸素化状態（図1A）は、B-SES 開始後、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ が、3分で最高値となった後、4分まで減少し、その後漸増した。 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ は、B-SES 開始後、1分まで増加した後、3

表2 B-SES 前後のバイタルサインと動脈血ガス分析データ
Table 2 Vital signs and arterial blood gas analysis data before and after B-SES

B-SES		症例1		症例2		症例3	
		開始	終了	開始	終了	開始	終了
体温	°C	37.7	37.8	38.4	38.3	37.7	37.6
呼吸数	回/分	27	28	15	16	16	16
心拍数	回/分	117	113	90	89	95	90
収縮期血圧	mmHg	135	136	185	186	130	133
拡張期血圧	mmHg	68	68	83	86	68	70
SpO_2	%	100	100	95	94	98	99
pH		7.429	7.459	7.466	7.470	7.387	7.390
PaCO_2	mmHg	41.9	39.4	32.8	31.5	49.3	48.2
PaO_2	mmHg	130	95.5	65.1	76.8	87.7	95.3
乳酸	mg/dl	12	12	11	12	3	5

B-SES：ペルト電極式骨格筋電気刺激法、 SpO_2 ：経皮的動脈血酸素飽和度、 PaCO_2 ：動脈血二酸化炭素分圧、 PaO_2 ：動脈血酸素分圧

分まで減少し、その後、5分まで増加し、ほぼ一定となった。 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ は B-SES 開始後、漸増していった。VL の筋酸素化状態（図1B）は、10分、13分に体動のため、基線が大きく動き、10分以降の NIRS データは、解析から除外した。 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ は、B-SES 開始後4分まで減少し、その後10分まで漸増していた。 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ は、B-SES 開始後7分まで一定した後、漸増していた。 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ は、開始時1分まで減少したが、その後、漸増していた。

B-SES Day 7 および Day 13にも NIRS 測定を実施したが、意識障害が残存し、B-SES 中の体動が多く、解析には適さなかった。

2. 症例2、43歳、男性

現病歴：交通事故で救急搬送。救急隊到着時、心肺停止の状態であったが、搬送中に自己心拍再開した。高エネルギー外傷、重症頭部外傷（外傷性くも膜下出血、左側脳室内出血、脳梁損傷、蘇生後脳症）、頸部外傷（右第7頸椎横突起骨折）、胸部外傷（外傷性血気胸、前縦隔血腫、右鎖骨遠位端骨折、左第1肋骨骨折、両側第1肋軟骨骨折）、腹部外傷（腸間膜損傷、膀胱損傷）、骨盤外傷（右恥坐骨骨折、両側腸骨骨折）、四肢外傷（右大腿骨骨幹部骨折）と診断され、ICU に入室した。

既往歴：特記事項なし。

経過：第1病日に気管挿管し、人工呼吸器管理下で、脳浮腫に対する加療を行っていた。膀胱整復術、腸間膜整復術、骨盤骨折に対し創外固定術

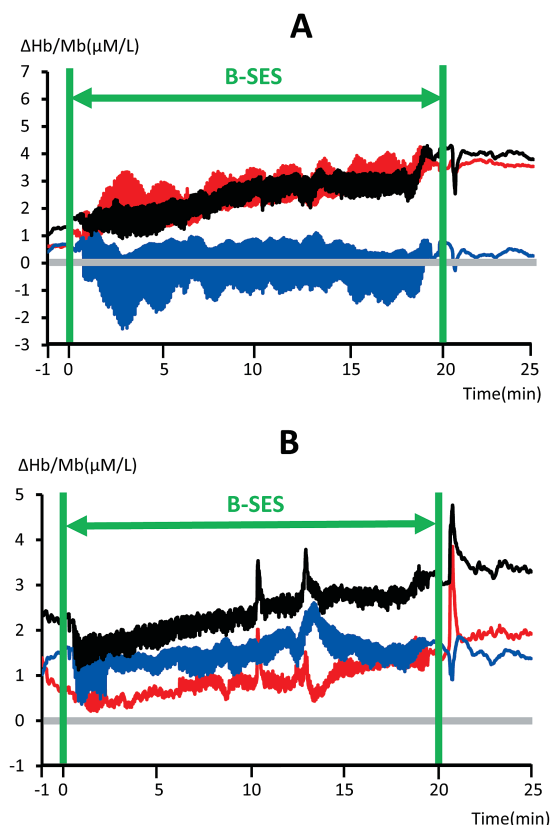


図1 症例1 B-SSES中の筋酸素化状態

A: 腓腹筋 (GM)

B: 外側広筋 (VL)

B-SSES: ベルト電極式骨格筋電気刺激法

— Δ oxy-Hb/Mb: 酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン

— Δ deoxy-Hb/Mb: 脱酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン

— Δ total-Hb/Mb: 総ヘモグロビン/ミオグロビン

Fig. 1 Case 1 Muscle oxygenation state during B-SSES

A: gastrocnemius muscle (GM)

B: vastus lateralis muscle (VL)

B-SSES: Belt electrode - skeletal muscle electrical stimulation

— Δ oxy-Hb/Mb: oxygenated hemoglobin/myoglobin

— Δ deoxy-Hb/Mb: deoxygenated hemoglobin/myoglobin

— Δ total-Hb/Mb: total hemoglobin/myoglobin

を施行した。右大腿骨骨幹部骨折は、直達牽引を行い、手術は待機となった。前縦隔血腫、外傷性血気胸、肋骨骨折は保存的治療を、第7病日に骨盤骨折と右大腿骨骨幹部骨折に対し、手術を施行した。呼吸状態は徐々に安定していたが、術後のため気管挿管と人工呼吸器管理は継続していた。右大腿骨骨幹部骨折の術後であったが、整形外科医師に、術後の右下肢へのB-SSESの実施の許可

を得た。

ICU入室9病日目に外傷による脳浮腫の改善と術後の病状が安定したことを確認し、B-SSESを開始した。呼吸管理は、Pressure Support, Continuous Positive Airway Pressure (PS, CPAP: 自発換気)でサポート圧は5 cmH₂O、吸入酸素濃度は30%であった。B-SSES Day1の患者の安静度は、頸椎カラー装着、ICU高機能ベッド臥床、体位交換禁止、頸部から体幹を捻じらない体位保持が必要であった。患者の意識状態は、GCSでE: 1、V: T、M: 4、鎮静鎮痛剤の持続投与下でRASSは-4だが、一時的に+1の状態であった。

B-SSES Day1のバイタルサインは、発熱、高血圧を認めていたが、B-SSES終了1分前のBT、BPは、開始前と変化なく、HR、RRにも変化を認めなかった(表2)。B-SSES前のPaO₂は65mmHgであったが、B-SSES後は、76.8mmHgとなり、B-SSESによる悪化は認めなかった(表2)。

GMの筋酸素化状態(図2A)は、患者の意識状態が清明ではなく、B-SSES中に下肢の随意的な動きを認め、基線の動揺が大きく、解析から除外した。VLの筋酸素化状態(図2B)では、B-SSES開始後から15分まで、 Δ oxy-Hb/Mb、 Δ deoxy-Hb/Mb、 Δ total-Hb/Mbは、漸増を認めた。

B-SSESは、Day1からDay11まで実施し、B-SSES Day7にNIRS測定を実施したが、意識障害が残存し、B-SSES中の体動が多く、解析には適さなかった。

3. 症例3、23歳、男性

現病歴: 小型の自動二輪車の単独事故で救急搬送。高エネルギー外傷、頭部外傷(急性硬膜外血腫、外傷性くも膜下出血、脳挫傷、気脳症、頭頂骨骨折、両側側頭骨骨折、後頭骨骨折)、顔面外傷(前頭骨開放骨折、篩骨骨折、蝶形骨骨折、左眼窩底骨折、右眼窩底側壁骨折、左頬骨骨折、上顎骨骨折、下顎骨正中骨折、右下顎骨頭骨骨折、筋層に達する前額部挫創)、頸部外傷(第3・5・6棘突起骨折、第7横突起骨折)の診断で、

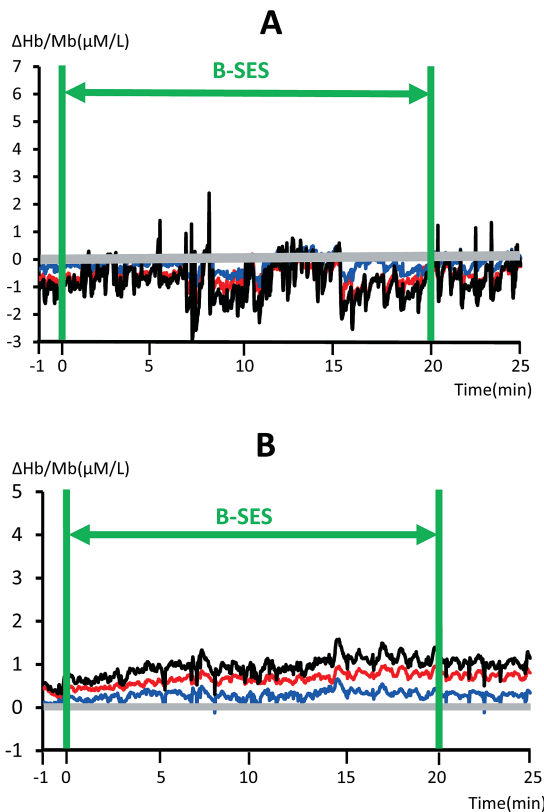


図2 症例2 B-SSES 中の筋酸素化状態
A：腓腹筋 (GM)
B：外側広筋 (VL)
B-SSES：ベルト電極式骨格筋電気刺激法
— $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ ：酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン
— $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ ：脱酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン
— $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ ：総ヘモグロビン/ミオグロビン

Fig. 2 Case 2 Muscle oxygenation state during B-SSES
A: gastrocnemius muscle (GM)
B: vastus lateralis muscle (VL)
B-SSES: Belt electrode - skeletal muscle electrical stimulation
— $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$: oxygenated hemoglobin/myoglobin
— $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$: deoxygenated hemoglobin/myoglobin
— $\Delta\text{total-Hb/Mb}$: total hemoglobin/myoglobin

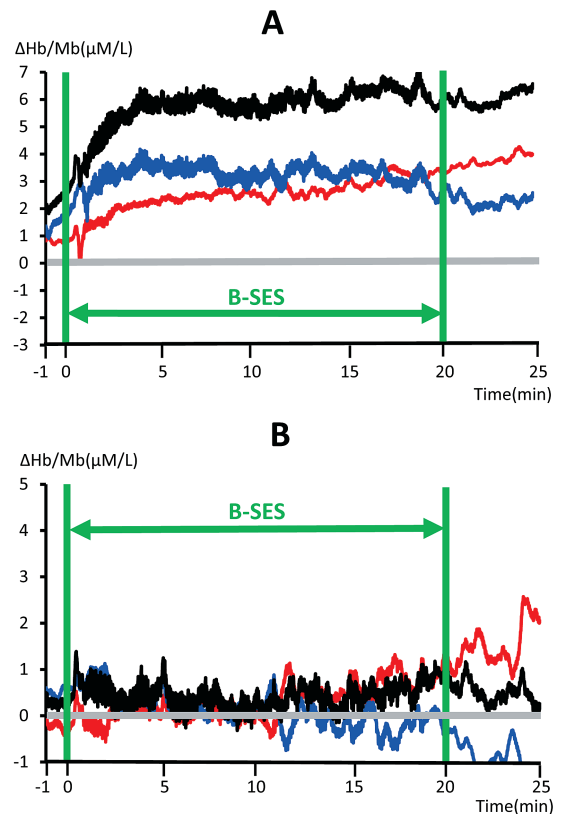


図3 症例3 B-SSES 中の筋酸素化状態
A：腓腹筋 (GM)
B：外側広筋 (VL)
B-SSES：ベルト電極式骨格筋電気刺激法
— $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ ：酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン
— $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ ：脱酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン
— $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ ：総ヘモグロビン/ミオグロビン

Fig. 3 Case 3 Muscle oxygenation state during B-SSES
A: gastrocnemius muscle (GM)
B: vastus lateralis muscle (VL)
B-SSES: Belt electrode - skeletal muscle electrical stimulation
— $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$: oxygenated hemoglobin/myoglobin
— $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$: deoxygenated hemoglobin/myoglobin
— $\Delta\text{total-Hb/Mb}$: total hemoglobin/myoglobin

ICU に入室した。

既往歴：特記事項なし。

経過：第1病日に気管挿管し、人工呼吸器管理下で、脳浮腫に対する加療を行っていた。顔面骨骨折に対しては、気脳症と脳浮腫があり手術は待機の方針となった（第17病日に頭部と顔面の骨折に対し手術を施行：B-SSES Day 5）。呼吸状態は徐々に安定したが、顔面骨骨折のため気管挿管と

人工呼吸器管理は継続していた。

外傷後脳浮腫の改善を確認したICU入室13病日にB-SSESを開始した。呼吸管理は、PS, CPAP：自発換気、サポート圧8 cmH₂O、吸入酸素濃度24%であった（表1）。B-SSES開始時の安静度は、頸椎カラー装着、ICU高機能ベッド臥床、体位交換禁止、頸部から体幹を捻じらない体位保持が必要な状態であった。患者の意識状態は、

GCS で E : 3 (呼びかけにより開眼)、V : T、M : 4 (命令に応じる)、鎮静鎮痛剤の持続投与下で RASS は -2 (軽い鎮静状態：呼びかけに10秒未満のアイ・コンタクトが可能) であった。

B-SES 1 分前・B-SES 終了 1 分前の BP、HR に変化なく、RR、PaCO₂、PaO₂ にも変化を認めなかった (表 2)。

GM の筋酸素化状態 (図 3 A) は、B-SES 開始後、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ は漸増し、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ は、4.5 分まで増加し、7 分まで一定であったが、その後漸減していた。 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ は、開始 5 分まで増加し、その後、一定となった。VL の筋酸素化状態 (図 3 B) では、B-SES 開始後 12 分まで、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ ともにほぼ一定であるが、それ以降、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ は漸増、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ は漸減した。

B-SES Day 7 および Day 13 にも NIRS 測定を実施したが、意識障害が残存し、B-SES 実施中の体動が多く、解析には適さなかった。

V. 考察

1. ICU 患者への B-SES 適応

3 名の患者は、20～40 歳代で、頭部を含む多発外傷であった。3 名とも体位交換を禁じられ、頸部から体幹をねじらない体位で安静を保持されていた。症例 1 は、下肢には外傷を認めなかったが、エコー検査で右下腿に血栓を認めたため、左下肢にのみに B-SES を実施した。症例 2 は骨盤骨折と右大腿骨骨折があり、その術後に B-SES を開始した。症例 2 では、術後 2 病日目ではあったが、右下肢を含めた B-SES の実施が可能であった。症例 3 では、頭部外傷の程度が重症であり、B-SES Day 1 が第 13 病日であった。3 症例ともに、適用刺激強度では、バイタルサインの変動が基準値内にとどまり、B-SES の実施が可能と判断された。意識障害を認める ICU 患者では、最小限の電気刺激強度であっても、下肢の随意運動があり、

B-SES 中の NIRS 測定は困難であった。

2. B-SES 実施中のバイタルサインの変化

BP に関しては、3 症例とも B-SES 実施中に HR の上昇や BP の変化を認めなかった。PaO₂、SpO₂ に関しては、症例 1 以外では B-SES 実施中の PaO₂ のほうが B-SES 実施前より高かった。症例 1 では PaO₂ の低下が認められたが、低下しても PaO₂ の正常値範囲内にとどまり、SpO₂ の低下は認められなかった。この結果から、B-SES 実施時には呼吸状態に注意する必要があると考えられるが、人工呼吸器を装着した重症患者に対する B-SES の実施に関しては、丸山ら¹³⁾ が安全性を検討しており、人工呼吸器の設定条件の変更は必要ないと述べている。

3. B-SES 実施中の筋酸素化状態

GM の筋酸素化状態は、症例 1 と 3 が解析可能であった。症例 1 (図 1 A) は、筋収縮で減少する $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ の増加と、筋収縮で増加する $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ の減少が認められ、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ が増加していることから、筋血流が増加していると推測される。症例 3 は、筋収縮により $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ が一旦増加するが、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ の増加により、漸減していったと考えられる。この 2 症例の筋酸素化動態は、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ の増加が大きく、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ が筋収縮にもかかわらず増加しており、筋肉へ酸素供給は十分に行われていることを示している。

VL の筋酸素化状態は、症例 1 は、10 分までの解析では、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ の増加を認めたが、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ はほぼ一定である。症例 2 は、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ は、漸増を認めた。症例 3 は、14 分以後に $\Delta\text{total-Hb/Mb}$ が増加すると、 $\Delta\text{oxy-Hb/Mb}$ の増加、 $\Delta\text{deoxy-Hb/Mb}$ の減少を認めている。VL の相対濃度変化は、GM より小さく、筋肉に対して、運動強度が軽かった可能性が高い。

B-SES 実施中の筋酸素状態は、日當ら¹⁹⁾ によれば、1) total-Hb/Mb 減少型、2) total-Hb/

Mb 増加型、3) total-Hb/Mb 変化なし型の 3 つのタイプに分類されたと報告されている。total-Hb/Mb 減少型は、通常の随意運動と同じパターンで、B-SES 開始とともに total-Hb/Mb が一旦減少し、その後、徐々に増加し、筋収縮により酸素が消費されるため、oxy-Hb/Mb は減少するが、total-Hb/Mb の増加に伴い増加する。 Δ deoxy-Hb/Mb は、 Δ oxy-Hb/Mb と逆の変化をする。Total-Hb/Mb 増加型は、oxy-Hb/Mb と total-Hb/Mb が B-SES 開始とともに増加し、deoxy-Hb/Mb は、ほとんど変化しない、あるいは減少する。筋収縮により酸素が消費されているにもかかわらず、血流の増加で deoxy-Hb/Mb がウォッシュアウトされていると考えられる。これは、随意運動では認められないパターンで、B-SES に特有である可能性がある。本研究の症例 1・3 の GM は、 Δ total-Hb/Mb 増加型に類似している。症例 3 の VL は、 Δ total-Hb/Mb 減少型に該当すると考えられる。

VI. 研究の限界

本研究では、B-SES 実施できた症例が 5 例と少なく、かつ NIRS 測定が安定してできなかったため、筋酸素化状態の解析は 3 例にとどまった。これは、研究期間中の ICU 入室患者に、ベルト電極装着部位に皮膚損傷や術創がある患者が多かったこと、下肢深部静脈血栓の合併等で、B-SES を適応できる症例が少なかったことに加え、COVID-19 感染による ICU 運用の変更などにより測定ができなかったことによる。B-SES 実施中の PaO_2 が一部で低下を認めており、B-SES 実施との関連は定かではないが、今後、症例数を重ね、検討が必要である。

NIRS 測定は、意識障害により、測定者側の指示が十分に被験者側に伝わらず、随意運動が生じ、安定した測定ができなかった。深い鎮静状態または意識清明である患者を対象にしていく必要がある。また、B-SES の継続による効果については、

経時的測定ができなかったため、本研究では解析できなかった。B-SES の効果は、ICU 患者に有効な測定方法が確立されておらず、評価方法の明確化と統一されたプロトコルの検討が必要である。

VII. 結語

ICU 患者 3 例に筋収縮が確認できる程度の B-SES を実施し、GM と VL の筋酸素化状態を検討した。B-SES 中のバイタルサインは安定しており、筋酸素化状態は低酸素状態を認めなかった。ICU 患者への、B-SES によるリハビリテーション実施は、適格基準に該当する場合は、実施することは可能と考える。今後、症例数を重ね、B-SES 実施の明確な適格基準・プロトコルの開発などを検討していく必要がある。

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) Kress JP, Hall JB. ICU-acquired weakness and recovery from critical illness. *N Engl J Med* 370: 1626-1635, 2014.
- 2) Needham DM, Davidson J, Cohen H, Hopkins RO, Weinert C, Wunsch H, Zawistowski C, Bemis-Dougherty A, Berney SC, Bienvenu OJ, Brady SL, Brodsky MB, Denehy L, Elliott D, Flatley C, Harabin AL, Jones C, Louis D, Meltzer W, Muldoon SR, Palmer JB, Perme C, Robinson M, Schmidt DM, Scruth E, Spill GR, Storey CP, Render M, Votto J, Harvey MA. Improving long-term outcomes after discharge from intensive care unit: Report from a stakeholders' conference. *Crit Care Med* 40: 502-509, 2012.
- 3) Schweickert WD, Hall J. ICU-acquired weakness. *CHEST* 131: 1541-1549, 2007.
- 4) Stevens RD, Marshall SA, Cornblath DR, Hoke A, Needham DM, de Jonghe B, Ali NA, Sharshar T. A framework for diagnosing and classifying intensive

- care unit-acquired weakness. *Crit Care Med* 37: s299-s308, 2009.
- 5) Abdelmalik PA, Rakocevic G. Propofol as a risk factor for ICU-acquired weakness in septic patients with acute respiratory failure. *Can J Neurol Sci*, 44: 295-303, 2017.
- 6) Wieske L, Dettling-Ihnenfeldt DS, Verhamme C, Nollet F, van Schaik IN, Schultz MJ, Horn J, van der Schaaf M. Impact of ICU-acquired weakness on post-ICU physical functioning: a follow-up study. *Crit Care* 19: 196. 2015.
- 7) Ali NA, O'Brien Jr. JM, Hoffmann SP, Phillips G, Garland A, Finley JCW, Aimoosa K, Hejal R, Wolf KM, Lemeshow S, Connors Jr. AF, Marsh CB. Acquired weakness, handgrip strength, and mortality in critically ill patients. *Am J Respir Crit Care Med* 178: 261-268, 2008.
- 8) 高橋哲也, 西田修, 宇都宮明美, 安藤守秀, 飯田有輝, 尾崎孝平, 小幡賢吾, 神津玲, 小松由佳, 山下康次, 有蘭信一, 岩田健太郎, 卯野木健, 尾山陽平, 金井香菜, 栗山直英, 齊藤正和, 櫻本秀明, 笹沼直樹, 嶋先晃, 高橋正浩, 田代尚範, 野々山忠芳, 花田匡利, 平澤純, 福家良太, 松木良介, 森沢知之, 山田亨, 横山仁志. 集中治療における早期リハビリテーション 根拠に基づくエキスパートコンセンサス. *日集中医誌* 24: 255-303, 2017.
- 9) 對東俊介. ICU における理学療法の変遷と今後の展望. *日集中医誌* 31: 544-9, 2024.
- 10) 新見昌央. ICU における早期リハビリテーション治療. *Jpn J Rehabil Med* 61: 750-756, 2024.
- 11) 日本骨格筋電気刺激研究会. B-SES 使用方法の手引き 改訂第2版. 2017.
- 12) Miyamoto T, Fukuda K, Kimura T, Matsubara Y, Tsuda K, Moritani T. Effect of percutaneous electrical muscle stimulation on postprandial hyperglycemia in type 2 diabetes. *Diabetes Res Clin Pract* 96: 306-312, 2012.
- 13) 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集会誌*35回, 65-69, 2014.
- 14) 野々山忠芳, 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.
- 15) Poulsen J, Møller K, Jensen CV, Weisdorf Si, Kehlet H, Perner A. Effect of transcutaneous electrical muscle stimulation on muscle volume in patients with septic shock. *Crit Care Med* 39: 456-461, 2011.
- 16) Abdellaoui A, Préfaut C, Gouzi F, Couillard A, Coisy-Quivy M, Hugon G, Molinari N, Lafontaine T, Jonquet O, Laoudj-Chenivess D, Hayot M. Skeletal muscle effects of electrostimulation after COPD exacerbation: a pilot study. *Eur Resp J* 38: 781-788, 2011.
- 17) 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—. 沼谷薫 (監修). 新興医学出版社. 東京. pp 227-231, 2016.
- 18) 中岡正昭, 岩本敏志, 栗田太作, 沓澤智子, 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素化状態および換気の変化. *東海大学健康科学部紀要* 22: 25-29, 2016.
- 19) 日當聡志, 沓澤智子, 中岡正昭, 岩本敏志. 健康人男性における筋電気刺激中の下肢筋の筋酸素化状態. *東海大学スポーツ医科学雑誌* 第36号: 27-38, 2024.
- 20) 岩本敏志, 池内眞弓, 栗田太作, 浅野浩一, 沓澤智子. 6 分間歩行試験時の近赤外分光法測定により閉塞性動脈硬化症が診断された COPD 患者の 1 例. *日呼ケアリハ学誌* 27: 188-192, 2018.
- 21) De Blasi RA, Palmisani S, Alampi D, Mercieri M, Romano R, Collini S, Pinto G. Microvascular dysfunction and skeletal muscle oxygenation assessed by phase-modulation near-infrared spectroscopy in patients with septic shock. *Intensive Care Med* 31: 1661-1668, 2005.
- 22) Creteur J, Carollo T, Soldati G, Buchele G, De Backer D, Vincent J-L The prognostic value of muscle StO₂ in septic patients. *Intensive Care Med*, 33: 1549-1556, 2007.