〈研究論文〉

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

中岡正昭[*1]・岩本敏志[*2]・栗田太作[*3]・沓澤智子[*2]

Changes in muscle oxygenation state and ventilation during electrical muscle stimulation in young men

Masaaki NAKAOKA [*1], Satoshi IWAMOTO [*2], Daisaku KURITA [*3] and Tomoko KUTSUZAWA [*2]

〈抄録〉

【目的】ICU 入室中の急性重症患者に筋電気刺激（EMS）を適用する基礎データとするために、健常成人男性に、両下肢全体に EMS を施行し、右下肢の筋肉酸素化状態と換気の変化を検討した。

【方法】対象は健常成人男性７名（25.4±2.8歳）。ベルト型電極をウェスト、膝上、足首につけ、15分間の EMS を行った。刺激強度は筋肉収縮が目視できる程度とした。EMS 中の外側広筋と腓腹筋の筋肉酸素化状態を近赤外分光法で測定した。換気は、呼吸圧の変化から、呼吸数、換気量相当を算出した。

【結果及び考察】腓腹筋と外側広筋の筋肉酸素化状態は、開始後１分30秒まで総ヘモグロビンと酸素化ヘモグロビンが低下し、その後増加し、３分でプラトーとなった。EMS 中の呼吸数は、安静時に比べ17％増加した。本研究での EMS は、軽い運動強度に相当し、換気への影響も小さいことが示され、ICU 入室患者に対して安全に使用できると考えられた。

Key words：筋電気刺激、近赤外分光法、筋肉酸素化状態、外側広筋、腓腹筋

Ⅰ．はじめに

集中治療室（ICU）及び救命救急センターに滞在中の患者は疾病やその治療上、安静を余儀なくされ、安全や安楽を考慮するうえで、鎮静や手足の抑制などを必要とすることも少なくない。安静は２～３週間続くと筋肉量が３～11％減少すると報告されている（Adomus, 2003）。筋萎縮や関節拘縮を予防するために、ICU に入室している急性重症患者に対するリハビリテーションとして他動的関節可動域訓練（以下 ROM）が看護師によりベッドサイドで日常的に行われている。しかしながら ROM は筋萎縮や筋力の低下に対しての効果は乏しい（田中ら、2002）。

近年、電気刺激を用いて筋肉収縮を起こし、筋力の維持を目的とした手法が開発され、リハビリテーションに用いられるようになってきている。電気刺激（Electrical Muscle Stimulation ; 以下 EMS）を用いたトレーニングは機器を使用しない通常のリハビリプログラムに比べ、筋力・筋肉量の維持、筋萎縮の減少、筋肉疲労の減少を示すとの報告がされている（Muthalib, 2010 : Meesen, 2010: Hasegawa, 2011）。Hamada ら（2003）は、EMS を用いることは自発的運動によるものと同様の代謝改善効果があると報告している。

この EMS を ICU に入室している急性重症患者に使用できれば、筋萎縮や筋力低下を予防し、早期離床が図れると考えられる。ICU に入室している急性重症患者は換気・循環状態が不安定であるため、EMS のような運動負荷により、どの程度筋肉の酸素消費の変化をもたらすか、筋肉に対する運動強度がどの程度かを測定し、また

＊１　東海大学医学付属病院看護部（Division of Nursing, Tokai University Hospital）
＊２　東海大学健康科学部看護学科（School of Health Sciences, Tokai University）
＊３　東海大学情報教育センター（IT Education Center, Tokai University）

呼吸数と一回換気量の変化を明らかにすることが必要である。

Ⅱ．研究目的

本研究ではICU入室中の急性重症患者にEMSを適用する基礎データとするために、健常成人男性（20～30歳代）の被験者に対して、両下肢のEMS中の筋肉酸素化状態の動態を近赤外分光法（Near Infrared Spectroscopy：NIRS）を用いて検討する。さらにEMS中の換気測定を行い、EMSが換気にどの程度の影響を及ぼすかを検討する。

Ⅲ．研究方法

１．研究対象

20～30歳代の健康な成人男性７名（年齢25.4±2.8歳）を対象とした。ICU入室患者は若年者から高齢者まで幅広い年齢層であるが、年齢の影響を除外するため、本研究では若年者のみを対象とした。

２．研究期間

データ収集は2014年７月から2014年12月まで行った。

３．倫理的配慮

本研究は、東海大学健康科学部倫理委員会（第14-03号）の承認を得た。また本研究への同意は、研究者より被験者へ口頭及び文書で研究の説明を行い、文書にて得た。

４．測定プロトコール

測定場所は、室温を25度、湿度40～60％に設定した。NIRSは外光の影響を受けやすいため、直射日光が当たらないよう遮光した。問診を行った後に身体測定、経皮的酸素飽和度（換気測定装置）を測定し、肺機能検査（電子式診断用スパイロメータSP-370COPD：フクダ電子）を施行した。測定後、被験者はベッド上で仰臥位になり、膝関節伸展位をとり、EMS用の電極の装着、近赤外分光計プローブの装着、換気測定装置鼻カニューラの装着を行った。５分間の安静後、15分間EMSを行った。EMS終了後５分間回復を観察した。尚リハビリテーションを診療で行う際は１回15分が基本であるため、EMSの時間は15分と設定した。

１）EMS

EMSの機器はAUTO TENS PROリハビリユニット（ホーマーイオン研究所）を使用した。固定バンド（バンド型電極）を被験者の腹部、両膝上、両足首に装着した。５分間の安静後、20Hzの指数関数的漸増波で３秒の刺激をし、２秒間休止するサイクルを15分間実施した。周波数はEMS開始１分30秒までに20Hzに到達するように漸増していく。１分30秒から13分30秒まで20Hzで刺激し、13分30秒から周波数が漸減していく。刺激強度はICUに入室している患者にEMSを適用することを考慮し、目視より筋収縮がはっきり確認できる最低強度とした(2.0～34.0mA)。EMS終了後５分間回復を観察した。

AUTO TENS PROリハビリユニットの特徴は、ベルト電極により下肢全体を一度に刺激できること、指数関数的漸増波パルスにより、皮膚表面での電気消費量が小さくなり、痛みや不快感が少ないことである。

２）測定項目と測定方法

①被験者の基礎データ

年齢、既往症の有無、運動習慣の有無、喫煙歴について問診を行った。

②身体所見

身長、体重、BMI、体温、脈拍、血圧、両下腿・大腿の周囲径、両下腿・大腿の皮下脂肪厚、経皮的酸素飽和度、肺機能検査（肺活量、％肺活量、一秒量、一秒率）の測定を行った。下肢周囲径はメジャーで測定し、皮下脂肪厚測定は皮下脂肪計（ヤガミ）を使用した。

③筋肉の酸素化状態

⑴近赤外分光法

筋肉の酸素化状態の測定は、近赤外分光法（NIRS）を用いた。使用機器はNIRO-200（浜松ホトニクス株式会社製）。使用波数は、775、810、850nmである。送光、受光プローブは、筋線維の長軸に沿って３cm間隔で貼付し、安静時から回復までを測定した。近赤外光は、生体透過性が高く、非侵襲的に組織内の微小血管や毛細血管の酸素化ヘモグロビン（oxy-Hb）、脱酸素化ヘモグロビン（deoxy-Hb）の濃度を、光の吸収の差から推定することができる。また、酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの和である総ヘモグロビン（total-Hb）は観察部分の血液量を示す。

⑵測定部位

被検筋は右腓腹筋と右外側広筋で、腓腹筋の測定部位は内側頭とし、下腿の膝側30％付近で、筋厚が最大となる部位にプローブを貼り、黒いバンドでプローブ

を覆った。外側広筋の測定部位は、大転子点を０％、外側膝関節裂隙点を100％とした膝側30％付近で測定を行った。

④換気測定と経費酸素飽和度の測定

換気測定は、換気測定装置（フクダ電子）を用いた。鼻カニューラを装着し呼吸回数（RR）、一回吸気換気量相当（Vti）を呼吸圧から計測した。また同時にパルスオキメータプローブを手指に装着し経皮酸素飽和度、脈拍数（PR）の測定を行った。

５．分析方法

患者の基礎データは、平均値±標準偏差で示した。NIRS のデータは、0.5秒毎の total-Hb、oxy-Hb、deoxy-Hb の変化量をグラフに表し、定性的に15分間の EMS 中の total-Hb、oxy-Hb、deoxy-Hb の動態を検討した。

換気データは100ms 毎の RR、Vti を計算し、15分間の EMS 中の RR、Vti の最大値を求めた。EMS 開始前を100％として、EMS 中の最大値を％で表した。

PR は安静時から回復時までを経時的に測定した。

Ⅳ．結果

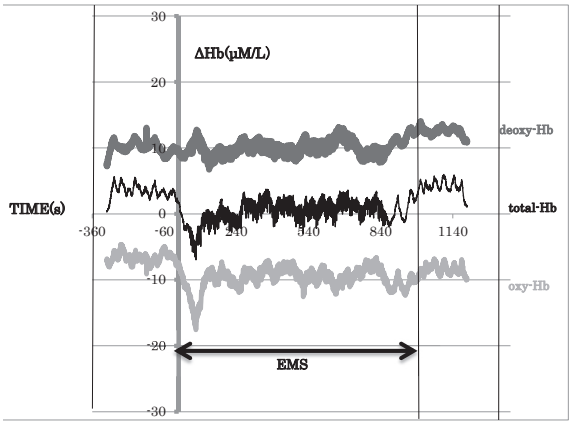
１．被験者の属性

７名の被験者の年齢は23歳から31歳（25.4±2.8歳）で、全被験者の BMI は正常値であった。血圧、脈拍、経皮的酸素飽和度は正常範囲内であった（表１）。また肺機能検査も全被験者正常範囲内であった（表１）。測定肢の皮下脂肪厚は全被験者５mm 未満であり、皮下脂肪厚による NIRS への影響は小さいと考えられた。

表１　被験者の呼吸・循環系データ

（n=7）

		平均±標準偏差
収縮期血圧	mmHg	118.1 ± 6.8
拡張期血圧	mmHg	70.3 ± 4.1
脈拍	回／min	72.4 ± 12.3
SpO_2	%	97.9 ± 0.4
肺活量	L	4.74 ± 0.48
%肺活量	%	93.9 ± 7.8
１秒量	L	4.05 ± 0.54
１秒率	%	91.5 ± 10.7



縦軸は各ヘモグロビン値、横軸は時間（秒）を示している。EMS 開始を０秒とし、開始前（安静時）－300秒から、終了（回復時）1200秒までを示している

EMS: 電気刺激　oxy-Hb: 酸素化ヘモグロビン deoxy-Hb: 脱酸素化ヘモグロビン　total-Hb: 総ヘモグロビン

図１　31歳男性の外側広筋の NIRS データ

表２　EMS 中の換気・脈拍データ

	安静時	EMS中最高値	増加率	安静時との差
呼吸回数（回／min）	16.0±3.5	18.4±2.8	117.3±19.2	2.4±1.9
１回吸気換気量相当（ml/min）	691±255	852±362	116±18	160±149
脈拍数（回／ min）	62.1±9.3	69.3±9.7	111.9±5.9	7.2±3.3

２．EMS 中の筋肉酸素化状態

全被験者の筋肉酸素化状態の変化が類似していたため、代表例として31歳男性の外側広筋の記録を図１に示した。total-Hb、oxy-Hb は、EMS 開始から90秒にかけて低下し、その後安静時の値まで回復し、EMS 終了までほぼ一定の値を示した。deox-Hb は、EMS 開始後も大きな変化は見られず、ほぼ一定の値を示した。

３．EMS 中の換気状態

被験者７名の換気データと脈拍データを表２に示した（表２）。EMS 中の呼吸回数は最高値で18.4回、回数にして2.4回（17.3％）の増加を認めた。一回吸気換気量相当では16％の増加で、脈拍数でも、11.9％の増加を示した。

Ⅴ．考察

本研究では、健常人に EMS を施行し、EMS 中の筋肉酸素化状態と換気状態を測定した。筋肉の酸素化状態は、ほとんどの被験者で EMS 開始から１分30秒にかけ

て total-Hb と oxy-Hb が低下し、その後増加し、３分以降は、ほぼ一定となった。Deoxy-Hb はほとんど変化せず、本研究での EMS によりもたらされた筋肉収縮は、運動強度としては、軽いと考えられた。EMS 中の RR と Vti は、最高値で16％の増加で、本研究で施行する EMS の強度が換気に与える影響は小さいと考えられた。

１．EMS 中の筋肉酸素化状態

EMS 開始直後に、total-Hb と oxy-Hb が低下していくのは、EMS によって、被検筋の収縮による筋ポンプ作用（筋肉が収縮・弛緩を繰り返すことで血管に圧力をかけ末梢血管の静脈血を心臓に戻す働き）による血液量の低下と筋肉内の酸素消費の増大による低下であると考えられる（堺、2002)。通常、定量運動負荷中の筋ポンプ作用による total-Hb の低下は運動開始15秒付近で最低となる（Kime, 2009）が、本研究では EMS 開始から１分30秒まで刺激頻度が漸増しているため、最低値が90秒付近になっていると考えられる。１分30秒後に刺激の頻度が一定となってから、total-Hb が増加していくが、これは、筋肉内の血流量が増えたことを示し、毛細血管の拡張やリクルートが関係していると考えられる。これに伴い oxy-Hb が増加していくが、これは、筋肉に十分な血液が供給されていることを示している（Kime, 2009)。Total-Hb と oxy-Hb が、安静時の値付近まで増加したことと、各 Hb の変化量が小さいことから、EMS は軽い強度の運動であったと考えられる。

２．EMS 中の換気状態（RR・Vti）

一般的に、嫌気的解糖閾未満の軽～中等度の運動強度では、酸素消費量に比例して、分時換気量は増大する（谷口、1993)。一定の運動を負荷した場合、分時換気量の変化は、運動開始直後に急激に増加し（phase I)、その後徐々に増加し（phase II)、２～３分で恒常状態（phase III）に達する（谷本、2007)。分時換気量は呼吸数（RR）と一回換気量（Vt）の積で求められる。本研究では、EMS 中の RR と Vti は、ほとんどの被験者で大きな変化はなかった。本研究で用いた EMS の強度の、換気に与える影響は小さいと考えられた。

３．EMS のリハビリテーションへの応用

超急性期の重症患者のリハビリテーションは ROM など受動運動が日常的行われるが、受動運動では関節拘縮予防効果はあるが、筋力低下予防の効果は乏しいと田中ら（2002）は報告している。筋力低下を予防するためには自動運動が必要であるが、ICU に入室している急性重症患者に自動運動を行わせることには限界がある。この EMS は自動運動が出来ない患者、体位の制限ある患者でも介入が可能で、筋収縮をもたらすことから筋萎縮を防ぐことができ、早期離床に結びつくことが期待される。

４．今後の課題

本研究では、対象が20～30歳代と若年者のみで、中高年での影響は検討していない。ICU に入室される急性期重症患者では若年者から高齢者と広い年齢層が入室するため、中高年の被験者の検討もしていく必要がある。

本研究では ICU に入室される急性期重症患者を想定し、最低強度での刺激における検討を施行したが、回復期の患者に応用出来るよう、強度を上げた時の変化とその影響も検討していく必要がある。また、本研究で用いた運動強度を長期に適用した場合、筋肉量維持に対する長期的な効果を検討していく必要がある。

Ⅵ．結論

本研究で用いた EMS による筋収縮は、健常人において EMS 中の筋肉酸素化状態の変化から、軽い運動強度であった。また EMS 中の RR、Vti、PR の変化量から、EMS による換気への影響は小さいことが示唆され、このことから ICU に入室される急性重症患者に対しても、安全に使用できる可能性が高いと考えられた。

文献

Adomus G, Caiozzo V,（2003）: Skeletal muscle unweighting, spaceflight and ground-based models. J Appl Physiol, 95, 2185-2201.

Guyton AC，Hall JE,（1999）：ガイトン　臨床生理学，早川弘一訳，医学書院，1078-1083.

Hamada T, Moritani T, Sasaki H, et al（2003）: Enhancement of whole body glucose uptake during and after human skeletal muscle low frequency electrical stimulation. J Appl Physiol, 94, 2107-2112.

浜岡隆文（2012）：筋代謝研究における近赤外線分光法の役割 , J Jpn Coll Angiol, 52, 99-102.

Hamada T,（2004）: Electrical stimulation of human lower extremities enhances energy consumption, carbohydrate oxidation, and whole body glucose uptake. J Appl Physiol, 96, 911-6.

Hasegawa S, Kobayashi M, Arai R, et al.（2011）: Effect of early implementation of electrical muscle stimulation to prevent muscle atrophy and weakness in patients after anterior cruciate ligament reconstruction. J Electromyogr Kinesiol, 21, 4, 622-630.

Hirata K, Hara T, Oshima Y, et al.（2006）: Effects of electrical

stimulation and voluntary exercise on muscle oxygenation assessed by NIRS. Osaka City Med, 52, 67-78.

Kime R, Im J, Moser D, et al.（2009）: Noninvasive determination of exercise-induced vasodilation during bicycle exercise using near infrared spectroscopy. Medical science monitor, 15, CR89-94.

McCully KK, Hamaoka T,（2000）: Near infrared spectroscopy: what can it tell us about oxygen saturation in skeletal muscle. Exerc Sport Sci Rev, 28, 123-127.

Meesen L, Dendale P, Cuypers K, et al.（2010）: Neuromuscular electrical stimulation as a possible means to prevent muscle tissue wasting in artificially ventilated and sedated patients in the intensive care unit. Neuromodulation. 315-321.

Moritani T.（1985）: Electromechanical changes during electrically induced and maximal voluntary contractions: Electromechanical responses of different muscle fiber types during stimulated contractions. Exp Neurol, 88, 471-83.

Muthalib M, Jubeau M, Millet GY, et al.（2010）: Biceps brachii muscle oxygenation in electrical muscle stimulation. Clin Physiol Funct Imaging. 30, 360-368.

堺章（2002）：目で見るからだのメカニズム，医学書院　50-51

坂井建雄，宮本賢一，小西真人（2005）：カラー図解　人体の正常構造と機能　X 運動器，日本医事新報社，28-29.

酒谷薫（2012）：NIRS- 基礎と臨床 -，岡田英史，星詳子編，新興医学出版社，3-5.

Schweichert WD, Hall J.（2007）: ICU-Acquired weakness, Chest, 1311, 1541-1549.

Segers J, Hermans G, Bruyninckx F, et al.（2014）: Feasibility of neuromuscular electrical stimulation in critically ill patients . J Crit Care, 29, 1082-1088.

田中宏太佳（2002）：よくわかって役に立つリハビリテーション医療の実際，永井書店，146-152.

谷口興一（1993）：心肺運動負荷テスト - 呼吸ガス分析による心肺疾患の新しい見方 -，南江堂，1-10.

谷本普一（2007）：呼吸器疾患の運動療法と運動負荷テスト，克誠堂出版，19-28.

田畑稔（2008）：有酸素運動の基本，PT ジャーナル，第42巻第6号，515-526.

Abstract

Purpose: It is necessary to determine the influence of electrical muscle stimulation（EMS）on muscle oxygenation state and ventilation during EMS for patients with critical illness. The purpose of this study was to determine the muscle oxygenation state of the lower limbs during EMS in healthy young men, and to investigate the effect of EMS on ventilation.

Methods: Seven young men（25.4 ± 2.8 years old）were studied. Their thigh and leg muscles were simultaneously and electrically stimulated via belt-shaped electrodes at a minimum current level for 15 min. The oxygenation state of the gastrocnemius and vastus lateralis muscles was measured using near infrared spectroscopy. Changes in ventilation（respiratory rate and inspiratory tidal volume）were estimated using changes in intranasal pressure.

Results and Dicussion: Total hemoglobin and oxygenated hemoglobin decreased until 90 s after the initiation of EMS, then increased to 3 min, where they reached a plateau. Respiratory rate exhibited small increases（+17%）during EMS.

These findings suggest that the EMS that was used this study induced mild exercise intensity and had a limited influence on ventilation. Therefore, EMS can be safely applied for the rehabilitation of patients with critical illness.

Key words: Muscle oxygenation, Electrical muscle stimulation, Near infrared spectroscopy, Ventilation