ストレッチングの前処置として 神経筋電気刺激 (NMES) は有効か？

Is Neuromuscular Electrical Stimulation (NMES) Effective as a Pretreatment of Muscle Stretching?

佐藤 結衣¹⁾ 吉田 英樹²⁾ 佐藤 菜奈子³⁾ 齋藤 茂樹⁴⁾ 前田 貴哉^{5,6)}
成田 大一⁷⁾ 岡本 成諭子⁸⁾ 一戸 のどか⁸⁾ 小山内 太郎⁹⁾ 成田 和生⁸⁾
原 幹周¹⁰⁾

YUI SATO, RPT¹⁾, HIDEKI YOSHIDA, RPT, PhD²⁾, NANAKO SATO, RPT³⁾, SHIGEKI SAITO, RPT⁴⁾, TAKAYA MAEDA, RPT^{5,6)},
HIROKAZU NARITA, RPT, PhD⁷⁾, NATSUOKA OKAMOTO⁸⁾, NODOKA ICHINOHE⁸⁾, TARO OSANAI, RPT⁹⁾, KAZUKI NARITA⁸⁾,
KANSHU HARA, RPT¹⁰⁾

¹⁾ Department of Rehabilitation, Aomori Kyoritsu Hospital

²⁾ Department of Health Promotion, Division of Health Sciences, Hirosaki University Graduate School of Health Sciences: 66-1
Honcho, Hirosaki-shi, Aomori 036-8564, Japan. TEL+81 172-39-5975 E-mail: ptyoshi@cc.hirosaki-u.ac.jp

³⁾ Department of Rehabilitation, Hirosaki Stroke and Rehabilitation Center, ⁴⁾ Department of Rehabilitation, Hakodate
Central General Hospital, ⁵⁾ Department of Rehabilitation, Hirosaki Memorial Hospital, ⁶⁾ Department of Physical Therapy,
Division of Comprehensive Rehabilitation Sciences, Hirosaki University Graduate School of Health Sciences, ⁷⁾ Department of
Development and Aging, Division of Health Sciences, Hirosaki University Graduate School of Health Sciences, ⁸⁾ Department
of Physical Therapy, Hirosaki University School of Health Sciences, ⁹⁾ Department of Rehabilitation, Aomori Jikeikai Hospital,
¹⁰⁾ Department of Rehabilitation, Kuroishi General Hospital

Rigakuryoho Kagaku 29(5): 709-713, 2014. Submitted Mar. 12, 2014. Accepted May 6, 2014.

ABSTRACT: [Purpose] The purpose of this study was to investigate the effectiveness of neuromuscular electrical stimulation (NMES) as a pretreatment of muscle stretching. [Subjects and Methods] Sixteen healthy volunteers participated in this study. They received three types of 15-minute intervention as follows: 1) NMES based on the Ia inhibition (Ia-NMES), 2) NMES based on Ib inhibition (Ib-NMES), and 3) rest without NMES (control). Both the Ia- and Ib-NMES were performed with the aim of improving hamstrings extensibility. Hamstrings muscle hardness and the distance of long sitting body antelexion before and after the NMES and control treatments were examined. [Results] Only the Ib-NMES caused a significant decrease in hamstring muscle hardness. On the other hand, the Ia-NMES as well as the Ib-NMES prevented decrease in the distance of long sitting body antelexion which was observed after the control treatment. [Conclusion] These results raise the possibility that NMES might be effective as a pretreatment of muscle stretching.

Key words: neuromuscular electrical stimulation, stretching, pretreatment

要旨:〔目的〕ストレッチングの前処置としての神経筋電気刺激 (NMES) の有効性を検討することとした。〔対象〕健康者 16 名とした。〔方法〕ハムストリングスの伸張性向上を意図した Ia 抑制および Ib 抑制に基づく NMES, NMES を実施しない介入 (それぞれ, Ia-NMES, Ib-NMES, コントロール) を実施し, 前後でのハムストリングスの筋硬度と長座位体前屈距離の変化の有無を条件間で比較した。〔結果〕ハムストリングの筋硬度の有意な減少を引き起し得たのは Ib-NMES のみであった。一方, 長座位体前屈距離については, Ia-NMES と Ib-NMES の両者が, コントロールで出現した有意な減少を予防し得た。〔結語〕本研究結果は, NMES がストレッチングの前処置として有効であることを示唆する。

キーワード: 神経筋電気刺激, ストレッチング, 前処置

¹⁾ 青森保健生活協同組合 あおもり協立病院 リハビリテーション科

²⁾ 弘前大学大学院 保健学研究科 保健学専攻 健康支援科学領域 健康増進科学分野: 青森県弘前市本町 66-1
(〒036-8564) TEL 0172-39-5975

³⁾ 一般財団法人黎明郷 弘前脳卒中・リハビリテーションセンター リハビリテーション科, ⁴⁾ 社会福祉法人函館厚生院 函館中央病院 リハビリテーション科, ⁵⁾ 医療法人整友会 弘前記念病院 リハビリテーション科, ⁶⁾ 弘前大学大学院 保健学研究科 保健学専攻 総合リハビリテーション科学領域 理学療法学分野, ⁷⁾ 弘前大学大学院 保健学研究科 保健学専攻 健康支援科学領域 老年保健学分野, ⁸⁾ 弘前大学 医学部 保健学科 理学療法学専攻, ⁹⁾ 社団法人慈恵会 青森慈恵会病院 リハビリテーション科, ¹⁰⁾ 黒石市国民健康保険 黒石病院 リハビリテーション科

I. はじめに

ストレッチングは、理学療法の臨床現場だけでなく、スポーツ現場でのウォーミングアップやクールダウンなど様々な場面で活用されている。ストレッチングは、前処置として温熱療法を実施することで効果をより高められると考えられており¹⁾、超短波療法や超音波療法などの深部加温効果の高い温熱療法が筋伸張性の向上に有効とされる²⁻⁶⁾。しかし、これらの温熱療法にもいくつかの問題点がある。具体的には、超短波療法については、電磁エネルギーを利用しているため、金属挿入部位付近への適用は禁忌⁷⁾であり、臨床的に筋伸張性に問題を生じやすい整形外科術後患者などへの適用が困難な場合がある。また、超短波の照射に使用する導子の大きさが不十分な場合は、広範囲の筋加温に適さない場合もあり得る⁷⁾。超音波療法については、超短波療法とは異なり金属挿入部位付近への照射が可能であるが、一般に超音波の照射に用いる導子の面積が小さいため、大きな筋に対しての加温性に優れているとはいえない⁸⁾。

神経筋電気刺激（以下、NMES）は、上位運動ニューロン障害に伴う筋緊張亢進（痙縮）の抑制や末梢神経障害に伴う筋萎縮の予防および改善、筋力増強など、主に運動機能の改善を目的として実施される電気刺激療法である^{9,10)}。NMESによる筋緊張抑制には、Ia抑制（相反抑制）およびIb抑制（自己抑制）に基づく手法が知られている。Ia抑制とは、ある筋が伸張されたことをその筋の筋紡錘が検出し、その情報が筋紡錘を発するIa線維を介して脊髄へ伝達される。その後、伝達された情報は、抑制性介在ニューロンを介して伸張された筋の拮抗筋を支配する α 運動ニューロンに伝達されることで、拮抗筋の筋緊張が抑制される現象である^{9,10)}。一方、Ib抑制とは、ある筋の収縮や伸張に伴い生じた張力をその筋の筋腱移行部に存在するゴルジ腱器官（腱紡錘）が検出し、その情報がゴルジ腱器官を発するIb線維を介して脊髄へ伝達される。その後、伝達された情報は、抑制性介在ニューロンを介してその筋を支配する α 運動ニューロンに伝達されることで、その筋の筋緊張が抑制される現象である^{9,10)}。したがって、NMESにより筋緊張の抑制を図る場合、Ia抑制に基づくNMESではストレッチングの対象となる筋の拮抗筋を、Ib抑制に基づくNMESではストレッチングの対象となる筋そのものを電気刺激することになる。

NMESに関しては、脳卒中や脊髄損傷といった上位運動ニューロン障害に伴う患者の筋緊張抑制に有効との報告はある¹¹⁻¹⁴⁾が、上位運動ニューロン障害を伴わない健常者や運動器疾患患者を対象としたストレッチングの前処置としての有効性を検討した報告は見当たらない。NMESは、局所的な刺激によりIaもしくはIb抑制を介した筋緊張抑制効果をストレッチングの対象となる

筋全体へ比較的容易に与え得ると考えられる。したがって、NMESにストレッチングの前処置としての有効性があれば、超短波療法や超音波療法と比較しても遜色ない介入手段となり得る。

そこで本研究では、ストレッチングの前処置としてのNMESの有効性について検討することを目的とした。

II. 対象と方法

1. 対象

対象者は、本研究への参加に書面による同意が得られた健常者16名（男12名、女4名、年齢 22.2 ± 2.3 歳）とし、NMESにより伸張性の改善を期待する筋は左右のハムストリングス（以下、Ham）とした。対象者に対しては、NMESに伴う筋伸張性の変化をより厳密に調査するため、本研究への参加期間中は、自宅などでのHamを含む下肢および体幹筋のストレッチングと筋肉痛を生じるような激しい運動は控えるよう指導した。

2. 方法

対象者は後述する3つの条件、すなわちIa抑制に基づくNMES（以下、Ia-NMES）、Ib抑制に基づくNMES（以下、Ib-NMES）、NMESを伴わない安静背臥位での介入（以下、コントロール）の全てに参加した。介入には1日以上の間隔を空け、無作為な順序に行われた。また、全ての実験は室温が約25℃に保たれた同一の実験室にて行われた。実験前の準備として、対象者の両側の坐骨結節から腓骨頭を結ぶ線分の50%の位置に当たる両大腿後面の皮膚表面にマーキングを行い、この部位を後述するHamの筋硬度の測定部位¹⁵⁾とした。

対象者は、事前評価として後述するHamの筋伸張性と関連する評価指標、すなわちHamの筋硬度および長座位体前屈距離の測定を受けた。事前評価の終了後、対象者は背臥位をとり、15分間のいずれかの介入を受けた。各介入終了後、事後評価として、Hamの筋硬度および長座位体前屈距離の測定を受けた。なお、対象者に対しては、各介入の実施中や体位変換の際は下肢筋の筋収縮をなるべく起こさないように指導した。

IaおよびIb-NMESは、安静背臥位の対象者に対して低周波治療器（イトーES-420、伊藤超短波）を用いて実施された。NMESを実施するための電極は全て5cm×5cmの大きさの粘着パッド（PALS Platinum Mサイズ、AXELGAARD）を使用し、Ia-NMESでは左右の外側および内側広筋の運動点に、Ib-NMESでは左右の大腿二頭筋と半腱様筋の運動点に貼付した。電極貼付部位の皮膚前処置は、液体石鹸と水道水を用いて皮脂や汚れを十分に落とした。刺激パラメータの設定は先行研究に従い^{10,12)}、周波数30 Hz、パルス持続時間300 μ sec、オン時間およびオフ時間をともに5秒とした。パルス振幅に

については、電気刺激に伴う疼痛を伴うことなく Ia-NMES では大腿四頭筋、Ib-NMES では Ham の十分な筋収縮が認められる最大値を対象者ごとに決定した。その結果、本研究での Ia および Ib-NMES でのパルス振幅の平均値は、それぞれ 13.8 ± 3.9 mA, 19.8 ± 3.1 mA であった。

Ham の筋硬度（単位：Nm）の測定は、筋硬度計（NEUTONE TDM-NA1, TRY-ALL）を用いて実施された。股関節を屈曲伸展および外内転中間位かつ軽度外旋位、膝関節を完全伸展位とした腹臥位にて前述の大腿後面の皮膚表面のマーキング部位に対して左右それぞれで 5 回ずつ計測されて得られる値のうち、最大値と最小値を除く 3 つの測定値の平均をもって Ham の筋硬度の代表値とした。各介入の実施前後で、全対象者 16 名 32 肢分のデータの平均値および標準偏差を算出した。なお、本研究で使用した筋硬度計および Ham の筋硬度の測定方法に関する信頼性は、先行研究で確認されている¹⁵⁾。また、Ham の筋硬度の測定は、筋硬度計の使用に習熟した同一検者（Y.S.）により実施された。

長座位体前屈距離（単位：cm）の測定は、文部科学省作成の新・体力テストの長座位前屈の測定方法¹⁶⁾を準拠し、長座位前屈測定器（T-2069, TOEI LIGHT）を用いて実施された。測定の開始肢位は、長座位で壁に腰背部および後頭部を密着させ、両上肢を伸展させつつ測定器を軽く把持させた状態とした。その上で、開始肢位から反動をつけずに両上肢により測定器を前方へ押しつつ前屈したときの測定器の移動距離を測定した。対象者に対しては、測定時の注意事項として、測定器をまっすぐに押すこと、膝関節を屈曲させないこと、反動をつけずにゆっくりと押すことを指導した。なお、計測値を示す目盛りを読み取る検者 1 名が対象者の膝関節を屈曲しないように固定し、他の検者 1 名が対象者の膝関節屈曲が出現した時点を目視し、停止指示を対象者へ出した。また、長座位前屈距離の測定時には、第三者からの声が

けは、対象者への心理的影響を排除するため、一切行われなかった。長座位前屈距離の測定は 3 回行い、その平均値をもって長座位前屈距離とした。その上で、各介入の実施前後において、全対象者 16 名分の平均値および標準偏差を算出した。

統計学的分析では、各介入の事前、事後評価間での各評価項目の測定値を対応のある t 検定にて比較した。全ての統計学的分析は、エクセルアドインソフトウェア「Statcel3」（OMS 出版）を用いて実施した。検定は両側検定とし、有意水準は 5% とした。

III. 結果

Ham の筋硬度の結果を表 1 に示す。Ia-NMES およびコントロールでは事前、事後評価間での Ham の筋硬度の明らかな違いは認められなかったが、Ib-NMES では事前評価と比較して事後評価での Ham の筋硬度の有意な減少が認められた。

長座位体前屈距離の結果を表 2 に示す。Ia および Ib-NMES では事前・事後評価間での長座位体前屈距離の明らかな違いは認められなかったが、コントロールでは事前評価と比較して事後評価での長座位体前屈距離の有意な減少が認められた。

IV. 考察

筋硬度と筋伸張性の間の有意な相関から、筋硬度は筋伸張性の指標として先行研究においても使用されてきた^{15,17)}。本研究では、Ia-NMES およびコントロールでは事前、事後評価間での Ham の筋硬度の明らかな違いは認められなかったが、Ib-NMES では事前評価と比較して事後評価での Ham の筋硬度の有意な減少が認められた。これは、本研究で実施した二種類の NMES のうち、Ib-NMES において Ham の筋伸張性が改善されたことを

表 1 Ham の筋硬度（Nm）

	Ia-NMES	Ib-NMES	コントロール
事前評価	24.4 ± 2.7	25.0 ± 3.4	24.3 ± 3.0
事後評価	24.1 ± 2.8	23.7 ± 3.9	24.2 ± 3.0

平均値 ± 標準偏差で表示, *: $p < 0.05$.

表 2 長座位体前屈距離（cm）

	Ia-NMES	Ib-NMES	コントロール
事前評価	28.6 ± 7.5	29.0 ± 8.5	27.8 ± 5.8
事後評価	29.6 ± 8.1	30.0 ± 8.8	26.4 ± 6.5

平均値 ± 標準偏差で表示, *: $p < 0.05$.

示している。Ib抑制は、いわゆる「負のフィードバック」の一例であり、筋の張力が増大した場合に、その筋を支配する α 運動ニューロンが過剰に興奮しないように自己抑制をかける機構であると考えられている¹⁰⁾。本研究では、Ib-NMESによりHamに電気刺激に伴う筋収縮が生じたことでHamの腱が伸張された結果、Ib抑制に基づいたHamの筋緊張抑制が生じ、その結果としてHamの筋硬度の低下が認められたと考えられる。一方、Ia-NMESの理論基盤となっているIa抑制も、Ib抑制と同様に筋緊張に影響を及ぼすとされている^{9,10)}が、冒頭で述べたようにIb抑制とは機構的に全く異なるものである。本研究でも、Ia抑制に伴う筋伸張性の改善を意図した介入としてIa-NMESを実施したが、Hamの筋硬度の有意な低下が認められたのはIb-NMESのみであった。このような結果が得られた理由については、本研究結果のみからは明らかにすることは出来ない。しかし、上位運動ニューロン障害を伴わない健常者を対象とした場合、ストレッチングの対象となる筋の収縮を伴わないIa-NMESが筋緊張に及ぼす影響は、ストレッチングの対象となる筋の収縮を伴うIb-NMESと比較して弱いかもしれない。また、脳卒中などの上位運動ニューロン障害患者の下肢筋では、伸筋から屈筋に作用するIa抑制は増強することが指摘されている¹⁷⁾。このような背景もあり、NMESを用いた上位運動ニューロン障害患者の筋緊張（痙縮）抑制に関する先行研究の多くは、伸筋から屈筋への作用を意図したIa-NMESを用いている¹¹⁻¹⁴⁾。本研究では、健常者を対象とした上で、NMESにより伸張性の改善を期待する筋を膝関節屈筋であるHamとしたため、上位運動ニューロン障害患者で認められる膝関節伸筋である大腿四頭筋からHamへ作用するIa抑制の増強は生じていなかったはずである。このことも、本研究において、Ia-NMESの事前、事後評価間でのHamの筋硬度の有意な減少が認められなかった要因となっていた可能性がある。

一方、長座位体前屈距離については、コントロールでは事前評価と比較して事後評価での有意な減少が認められたのに対して、IaおよびIb-NMESでは事前、事後評価間での明らかな違いが認められなかった。このことは、コントロールの実施に伴い引き起されたHamの筋伸張性低下がIaおよびIb-NMESの実施に伴い予防された結果、コントロールの実施後と比較してIaおよびIb-NMESの実施後では長座位体前屈を行いやすい状態となっていたことを示唆していると考えられる。この理由は次のように考えられる。コントロールでは、対象者が下肢の運動や下肢筋の収縮を伴わない安静背臥位を15分間保持したことで不動であることによるHamの筋緊張増加が生じた結果、Hamの筋伸張性が低下したものと思われる。これに対して、IaおよびIb-NMESでは、Hamの筋緊張増加がIaおよびIb抑制に基づき抑えられ

たために、コントロールと比較してHamの筋伸張性が保たれていたのではないかと推察される。ただ、Ib-NMESについては、本研究でみられたHamの筋硬度の有意な減少から、長座位体前屈距離についても事前評価と比較した事後評価での明らかな延長が生ずるのが自然ではないかとも考えられる。この点については、長座位体前屈距離がHamの筋伸張性以外にも骨盤や脊柱などの可動性を含む複合的な柔軟性評価指標になる¹⁸⁾ことから考えて、Ib-NMESによるHamの筋伸張性の改善が他の要因により長座位体前屈距離の明らかな延長につながらなかった可能性もある。

本研究結果をまとめると、Ia-NMESとIb-NMESを比較した場合、Ib-NMESの方がストレッチングの前処置としてより有効であることを示唆しているようにも思われる。しかし、長座位体前屈距離の変化にみられた結果を見る限り、ストレッチングの前処置としてのIa-NMESの有効性が完全に否定されたわけではなく、本研究で採用されたHamの筋伸張性と関連する評価指標、特にHamの筋硬度にはIa-NMESの筋伸張性向上効果が十分に反映されなかった可能性も考慮されるべきである。今後、使用する筋伸張性評価指標に対する再考も図りながらストレッチングの前処置としてのIaおよびIb-NMESの有効性に関する検証を進めていくことが必要である。加えて、NMESと超短波療法や超音波療法などの温熱療法とのストレッチングの前処置としての効果の比較や、ストレッチングとNMESを併用した場合の実際の介入効果について検討することも視野に入れるべきであろう。

引用文献

- 1) 網本 和：物理療法学（第3版）。医学書院、東京、2008、pp50-61.
- 2) Peres SE, Draper DO, Knight KL, et al.: Pulsed shortwave diathermy and prolonged long-duration stretching increase dorsiflexion range of motion more than identical stretching without diathermy. *J Athl Train*, 2002, 37(1): 43-50.
- 3) 森下勝行, 烏野 大, 宇都宮雅博・他：超音波照射が軟部組織硬度に与える影響。日本物理療学会会誌, 2010, 17: 25-29.
- 4) 高梨 晃, 伊藤修一, 小林 準・他：脳卒中片麻痺患者に対する足底部超音波照射の効果。日本物理療学会会誌, 2006, 13: 45-50.
- 5) 田坂厚志, 沖 貞明, 田中 聡・他：関節拘縮発生予防を目的とした超音波療法の効果：ラット足関節ギプス固定モデルを用いたトレッドミル走行での検討。理学療法科学, 2009, 24(4): 577-580.
- 6) 桑原拓也, 饗場和美, 豊岡浩介・他：反復性他動ストレッチングのハムストリングス伸張に及ぼす効果：温熱療法の併用効果について。Kitakanto Med J, 2008, 58: 159-166.
- 7) 松澤 正, 江口勝彦：物理療法学（改訂第2版）。金原出版, 2012, 東京, pp70-90.

- 8) 網本 和：物理療法学（第3版）．医学書院，東京，2008，pp70-86.
- 9) 網本 和：物理療法学（第3版）．医学書院，東京，2008，pp134-145.
- 10) 庄本康治：最新物理療法の臨床適応，文光堂，東京，2012，pp118-136.
- 11) van der Salm A, Veltink PH, Ijzerman MJ, et al.: Comparison of electric stimulation methods for reduction of triceps surae spasticity in spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil*, 2006, 87(2): 222-228.
- 12) Veltink PH, Ladouceur M, Sinkjaer T: Inhibition of the triceps surae stretch reflex by stimulation of the deep peroneal nerve in persons with spastic stroke. *Arch Phys Med Rehabil*, 2006, 81(8): 1016-1024.
- 13) 鈴木佳代子，関 和則，半田康延：治療的電気刺激による痙性麻痺者の歩容改善．*生体医工学*，2009，47(2): 172-175.
- 14) Bhaqchandani N, Schindler-Ivens S: Reciprocal inhibition post-stroke is related to reflex excitability and movement ability. *Clin Neurophysiol*, 2012, 123(11): 2239-2246.
- 15) 岡崎倫江，那須千鶴，吉村和代・他：健常若年女性における月経周期中の大腿筋群筋硬度の変動．*理学療法科学*，2008，23(4): 509-513.
- 16) 文部科学省スポーツ・青年局：体力・運動能力調査報告書．文部科学省・スポーツ・青年局，東京，2001，pp231-241.
- 17) 宮崎義憲，柳本昭人，野寺和彦・他：中高年女性における柔軟性改善用補助台使用による立位体前屈トレーニングの効果について．*東京学芸大学紀要．芸術・スポーツ科学系*，2007，59: 85-91.
- 18) Draper DO, Castro JL, Feland B, et al.: Shortwave diathermy and prolonged stretching increase hamstring flexibility more than prolonged stretching alone. *J Ortho Sports Phys Ther*, 2004, 34(1): 13-20.