神経筋電気刺激 (NMES) とストレッチングの 同時施行は筋伸張性を短時間で向上させる

Simultaneous Execution of Neuromuscular Electrical Stimulation (NMES) and Muscle Stretching Increases Muscle Extensibility in a Short Time

照井 駿明¹⁾ 吉田 英樹²⁾ 原 幹周³⁾ 片石 悠介⁴⁾ 花田 真澄⁵⁾
谷脇 雄次⁶⁾ 前田 貴哉^{2,7)} 佐藤 公博⁸⁾

SHUNMEI TERUI, RPT, MS¹⁾, HIDEKI YOSHIDA, RPT, PhD²⁾, KANSU HARA, RPT³⁾, YUSUKE KATAISHI, RPT⁴⁾,
MASUMI HANATA, RPT⁵⁾, YUJI TANIWAKI, RPT⁶⁾, TAKAYA MAEDA, RPT, MS^{2,7)}, KIMIHIRO SATO, RPT, MA⁸⁾

¹⁾ Department of Rehabilitation, Research Institute for Brain and Blood Vessels-Akita

²⁾ Department of Development and Aging, 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@hirosaki-u.ac.jp

³⁾ Department of Rehabilitation, Kuroishi General Hospital

⁴⁾ Department of Rehabilitation, Nakamura Memorial Hospital

⁵⁾ Department of Rehabilitation, Odate Municipal General Hospital

⁶⁾ Department of Rehabilitation, Hitsujigaoka Hospital

⁷⁾ Department of Rehabilitation, Hirosaki Memorial Hospital

⁸⁾ Department of Physical Therapy, Hokkaido Institute of Rehabilitation Technology

Rigakuryoho Kagaku 31(1): 87-91, 2016. Submitted Aug. 11, 2015. Accepted Sep. 19, 2015.

ABSTRACT: [Purpose] The purpose of this study was to investigate whether simultaneous execution (SE) of neuromuscular electrical stimulation (NMES) and muscle stretching increases muscle extensibility in a short time. [Subjects and Methods] Fifteen healthy volunteers participated in this study. They performed stretching of the bilateral triceps surae (TS) muscles during 15-minute NMES, aimed at reciprocal inhibition of the TS (SE session), and the stretching only (control session). The stretching was performed at just before the start of each session, and 5 and 15 minutes after the start of each session. Bilateral ankle dorsiflexion ranges during the stretching (D/F-ROM) were measured at the three time points. [Results] In the SE session, significant D/F-ROM increases were observed at 5 minutes as well as 15 minutes after the start of the session compared with just before the start of the session. In addition, there was no significant D/F-ROM difference between these two time points. In the control session, however, there were no significant D/F-ROM differences among the three time points. [Conclusion] NMES and muscle stretching increases muscle extensibility in a short time.

Key words: neuromuscular electrical stimulation, muscle stretching, muscle extensibility

要旨:〔目的〕本研究の目的は、NMES とストレッチングの同時施行が筋伸張性を短時間で向上させ得るかどうか検討することとした。〔対象〕健康者 15 名とした。〔方法〕全対象者には、両側の下腿三頭筋への相反抑制に基づく NMES と同筋のストレッチングを同時に行う条件（同時施行）とストレッチングのみを行う条件（コントロール）を行った。両条件でのストレッチングは開始直前と開始 5 分後および 15 分後に実施し、その際の足関節背屈角度を測定した。〔結果〕コントロールでは、3 時点間での足関節背屈角度に違いはなかった。一方、同時施行では、開始直前よりも開始 5 分後および 15 分後での足関節背屈角度が有意に増加したが、開始 5 分後と 15 分後では差がなかった。〔結語〕NMES とストレッチングの同時施行は筋伸張性を短時間で向上させる。

キーワード: NMES, ストレッチング, 筋伸張性

¹⁾ 秋田県立脳血管研究センター 機能訓練部

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 老年保健学分野: 青森県弘前市本町 66-1 (〒036-8564) TEL 0172-39-5975

³⁾ 黒石市国民健康保険 黒石病院 リハビリテーション科

⁴⁾ 中村記念病院 リハビリテーション科

⁵⁾ 大館市立総合病院 リハビリテーション科

⁶⁾ 羊ヶ丘病院 リハビリテーション科

⁷⁾ 弘前記念病院 リハビリテーション科

⁸⁾ 北海道千歳リハビリテーション学院 理学療法学科

I. はじめに

神経筋電気刺激 (Neuromuscular Electrical Stimulation : NMES) は、脳卒中や脊髄損傷などの中枢神経障害に伴う筋緊張亢進 (痙縮) の軽減や、末梢神経障害に伴う筋萎縮の予防や改善および筋力増強など、主に運動機能の回復を目的として実施されている¹⁾。この内、痙縮の軽減については、相反抑制 (もしくは Ia 抑制) の原理に基づき、痙縮筋の拮抗筋に対して筋収縮が生じる程度の電気刺激を加えることで相反抑制を賦活し、痙縮の軽減に伴う筋伸張性の向上を図ることが多い²⁻⁴⁾。最近では、痙縮を伴わない健常者においても、相反抑制に基づいた NMES (以下、相反抑制 NMES) をストレッチの前処置として実施することで、ストレッチを行いやすい条件が得られる可能性が指摘されている⁵⁾。

ところで、電気刺激により誘発された相反抑制の持ち越し効果の持続時間は、個人差はあるものの平均 10 ～ 15 分程度と比較的短い^{6,7)}。このため、ストレッチの前処置として相反抑制 NMES を実施する場合、その後のストレッチを実施するタイミングによっては相反抑制 NMES の効果が十分に反映されない可能性がある。一方、川村ら⁸⁾は、具体的な実験データは示していないものの、相反抑制 NMES とストレッチを同時に施行する手法 (以下、相反抑制 NMES とストレッチの同時施行) を紹介している。相反抑制 NMES とストレッチの同時施行では、前述の電気刺激により誘発された相反抑制の持ち越し効果の持続時間の問題を考慮する必要は無く、相反抑制の影響が最も強く作用した状態でストレッチを実施できると考えられる。また、電気刺激により誘発される相反抑制は、電気刺激開始後直後から賦活される⁹⁾ため、筋伸張性は相反抑制 NMES の実施直後から向上し始めると予想される。これまで、痙縮の抑制やストレッチの前処置としての相反抑制 NMES の一般的な実施時間は 15 分程度とされてきた²⁻⁵⁾。しかし、相反抑制 NMES とストレッチの同時施行を用いることで、相反抑制 NMES の開始からストレッチを実施するまでの時間を従来よりも大幅に短縮できる可能性があり、臨床への波及効果も大きいと考えられる。しかしながら、相反抑制 NMES とストレッチの同時施行に伴う以上のような可能性を実際に検証した研究は見当たらない。

以上から本研究の目的は、相反抑制 NMES とストレッチの同時施行が筋伸張性を短時間で向上させ得るかどうか検討することとした。

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の得られた下肢の整形外科疾患の既往の無い健常者 15 名 (女性 5 名、男性 10 名、年齢 21.1 ± 0.9 歳、身長 165.5 ± 7.6 cm、体重 63.3 ± 5.6 kg) とし、ストレッチの標的筋は左右の下腿三頭筋 (以下、TS) とした。対象者に対しては、NMES およびストレッチ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 TS を含むストレッチや筋力トレーニングなどの運動を控えるよう指示した。本研究は、弘前大学大学院保健学研究科倫理委員会の承認を受けた (承認番号 : 2014-029)。

2. 方法

本研究はクロスオーバー・デザインであり、対象者は「実験 1」: TS への相反抑制 NMES、すなわち TS の拮抗筋である前脛骨筋への NMES と TS の他動ストレッチを同時に施行する条件 (以下、同時施行条件) と、「実験 2」: TS の他動ストレッチのみ施行する条件 (以下、コントロール条件) の全てに参加した。なお、各実験は互いに 1 日以上の間隔を空け、対象者ごとにくじ引きにより無作為な順序で実施された。各実験の事前準備として、対象者の左右の TS の他動ストレッチを実施するために、左右の足関節を他動的に最大限背屈させるのに必要な外力を決定した。具体的な方法は齋藤らの方法¹⁰⁾に準じ、検査者は左右の膝関節を完全伸展位としつつ安静腹臥位を保持した対象者の左右の足関節をハンドヘルドダイナモメーター (μ Tas F-100, アニマ社製) を把持した右手で徒手的に一側ずつ最大限背屈させる (以下、TS 最大ストレッチ) ことで、最終可動域に達するのに必要な外力を測定した。足関節の他動的背屈が最終可動域に達したと判断する基準は、完全伸展位をとった対象者の膝関節に TS 最大ストレッチに伴う代償運動 (膝関節屈曲) が出現する直前の時点とした。さらに、後述する TS 最大ストレッチ時の足関節の背屈角度 (以下、最大背屈角度) の測定のために、左右の腓骨頭と腓骨外果、第 5 中足骨の骨頭および骨底の 4 箇所マーキングを行った。以下に実験方法の詳細を述べる。

「実験 1 (同時施行条件)」: 対象者は、ベッド端から左右の腓骨外果が約 5 cm はみ出た状態で左右の膝関節を完全伸展位とした安静腹臥位をとり、前述の実験の事前準備終了後に左右の前脛骨筋の運動点と同筋の筋腹上の遠位端に相反抑制 NMES を実施するための 5 cm × 5 cm のサイズの粘着パッド電極 (PALS Platinum M サイズ, AXELGAARD 社製) を貼付した。なお、電極貼付部位の皮膚は、液体石鹸と水道水にてあらかじめ洗浄し、

皮脂や汚れを十分に落とした。電極貼付後、実験前評価として、左右の最大背屈角度の測定を右・左の順序で3回連続（ストレッチング10秒、休憩10秒の反復）で実施した。最大背屈角度の測定は、前述の対象者ごとにあらかじめ決定された外力に達した時点での足関節の側面（矢状面）像をデジタルカメラ（IXY DIGITAL 910S, CANON 社製、画素数：800 万画素）にて撮影した。なお、各実験での撮影条件が同一となるように、以下の点に配慮した。デジタルカメラの撮影面は腓骨頭と脛骨内側顆を結ぶ線の中点と踵骨隆起中央を結ぶ線と平行とし、さらに腓骨外果の最大隆起部を通り基準線と直行する線上で腓骨外果から 50 cm 外側にデジタルカメラのレンズ中央が位置するように三脚を用いて調整した。実際の最大背屈角度は、実験終了後に撮影されたデジタル画像をパソコン上で画像処理・解析ソフトウェア（ImageJ 1.43u, NIH 社製）に読み込み、デジタル画像上でマーキングされた腓骨頭と腓骨外果を通る直線と第 5 中足骨の骨頭と骨底を通る直線のなす角度として測定した。測定はデジタル画像 1 枚につき 1 回とし、得られた 3 つの測定値の平均値を左右の最大背屈角度の代表値とした。実験前評価終了後、低周波治療器（イトー ES-420, 伊藤超短波社製）を用いて 15 分間の相反抑制 NMES を開始した。相反抑制 NMES の刺激条件は、周波数とパルス持続時間については先行研究²⁻⁵⁾に準じてそれぞれ 30 Hz, 300 μ s とし、パルス振幅（電流強度）については対象者が痛みを感じることなく左右の足関節が底背屈 0° となる程度とした。オン時間とオフ時間については、オン時間中での 10 秒間の TS 最大ストレッチングとその後の 10 秒間の休憩を考慮し、両時間ともに 10 秒とした。相反抑制 NMES 開始 5 分後および 15 分後には、5 分後および 15 分後評価として、実験前評価と同様の方法で左右の最大背屈角度の測定を連続するオン・オフ時間の中で 3 回実施した。15 分後評価が終了した時点で相反抑制 NMES を終了し、実験 1 も終了とした。

「実験 2（コントロール条件）」：対象者は、実験 1 と同様の安静腹臥位をとり、さらに実験 1 と同様に電極を貼付した。その後、対象者は、実験前評価として、実験 1 と同様の方法で左右の最大背屈角度の測定を受けた後、相反抑制 NMES を伴わない安静腹臥位を 15 分間保持した。実験前評価の 5 分後および 15 分後には実験前評価と同様の方法で左右の最大背屈角度の測定を受けた。15 分後評価が終了した時点で、実験 2 も終了した。

統計学的分析では、各実験において全 15 例 30 脚より得られた各評価時点での最大背屈角度について、実験前評価の最大背屈角度を基準値として、5 分後および 15 分後評価の最大背屈角度の基準値からの変化量を算出した。その上で、時間経過（同時施行条件とコントロール条件実施中の各評価時点間での比較）と実験条件（同時施行条件とコントロール条件との間での 5 分後お

よび 15 分後評価における比較）を要因とした反復測定による二元配置分散分析を行い、事後検定には多重比較検定（Tukey-Kramer 法）を実施した。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 出版社製）を用いて実施し、統計判定危険率は 5% 未満をもって有意と判断した。

III. 結 果

本研究に起因した有害事象の発生は皆無であり、全対象者が実験を完遂した。

各実験における 5 分後および 15 分後評価での最大背屈角度の基準値からの変化量を表 1 に示す。反復測定による二元配置分散分析の結果、時間経過の要因と実験条件の要因のいずれにも有意差が認められた。また、時間経過と実験条件の二要因の間に交互作用が認められた。多重比較検定の結果、時間経過では、コントロール条件では各評価時点間での最大背屈角度の明らかな違いは認められなかったが、同時施行条件では基準値と比較して 5 分後および 15 分後評価での最大背屈角度の有意な増加が認められた。その一方で、同時施行条件での 5 分後評価と 15 分後評価との間では、最大背屈角度の明らかな違いは認められなかった。次に、実験条件間の比較では、5 分後および 15 分後評価のいずれにおいてもコントロール条件と比較して同時施行条件での最大背屈角度の有意な増加が認められた。

IV. 考 察

方法で述べた通り、最大背屈角度の測定は TS の他動ストレッチングで実施され、さらに他動ストレッチング実施時の外力は対象者ごとに各条件で同一としていた。このことから、同時施行条件での 5 分後および 15 分後評価での最大背屈角度の有意な増加は、相反抑制 NMES に伴う TS の筋伸張性の向上を示唆していると考えられる。また、同時施行条件での 5 分後および 15 分後評価での最大背屈角度の増加の程度は平均値で 5° 前後であり、5 分後評価と 15 分後評価との間で最大背屈角度に明らかな違いが認められなかった。この結果は、相反抑制 NMES とストレッチングの同時施行では、相反抑制 NMES 開始 5 分後でも筋伸張性が十分に向上することを示している。一般に、痙縮の抑制やストレッチングの前処置としての相反抑制 NMES は 15 分程度実施される²⁻⁵⁾。これと比較すると、相反抑制 NMES とストレッチングの同時施行を活用することで、筋伸張性を従来よりも短時間で向上させることが可能であり、結果として相反抑制 NMES の施行時間を大幅に短縮できる可能性が示唆された。また、Peres ら¹⁾は、本研究と同様に健常者を対象として、TS への 15 分間の深部性温熱療

表 1 最大背屈角度の基準値からの変化量

	基準値	5 分後評価	15 分後評価
		#	
同時施行条件 (°)	0	5.9 ± 6.9	5.0 ± 0.7
コントロール条件 (°)	0	-0.5 ± 2.1	-0.8 ± 2.2

平均値 ± 標準偏差で表示, *: $p < 0.05$ (実験条件), #: $p < 0.05$ (時間経過).

法 (パルス超短波療法) の実施後に体重の $1/3$ に相当する外力を用いた 10 分間の持続的な TS のストレッチングを実施することで, ストレッチングの前後で 1.25° から 4.38° の足関節背屈角度の即時的な増加を認めた (ストレッチングのみの場合は -0.25° から 0.30°) と報告している. 本研究結果は, 相反抑制 NMES とストレッチングの同時施行を用いることで, Peres らの方法よりも大幅に短い介入時間で同等以上の即時的効果を得られることを示している. 従って, 相反抑制 NMES とストレッチングの同時施行は, 大変効率の良いストレッチングの手法となる可能性がある. なお, 電気刺激により誘発される相反抑制は, 電気刺激開始後直後から賦活されるものの, 電気刺激を開始してから実際のストレッチングに資する筋伸張性の向上を認めるまでの時間については未だ解明されていない. このため, 相反抑制 NMES とストレッチングの同時施行を用いることで, 本研究で認められた相反抑制 NMES 開始 5 分後よりもさらに短時間で筋伸張性向上が得られる可能性もある. この点については, 今後の追加検討が必要であろう.

NMES を用いて筋伸張性を向上させる手法としては, 本研究で用いた相反抑制 NMES の他に, 「自己抑制 (もしくは, Ib 抑制) の原理に基づく NMES (以下, 自己抑制 NMES)」も考えられる¹⁾. 自己抑制 NMES では, 相反抑制 NMES とは異なり, 痙縮の抑制や筋伸張性の向上を狙う筋自体に電気刺激を加える. 自己抑制 NMES についても, 相反抑制 NMES と同様に, 健常者においてストレッチングの前処置として筋伸張性を向上させ得ることが確認されている⁵⁾. しかし, NMES とストレッチングの同時施行を意図した場合, 自己抑制 NMES では電気刺激に伴う筋収縮が生じている最中 (オン時間中) にその筋のストレッチングを実施することになり, 方法論的に困難であると考えられる. 一方, 電気刺激が中断している最中 (オフ時間中) にストレッチングを実施すると, ストレッチングの前処置として実施する場合とは異なり自己抑制の持ち越し効果の持続時間への配慮は不要であるが, NMES とストレッチングの同時施行の概念からは逸脱してしまう. 従って, NMES とストレッチングの同時施行を行う場合は, 相反抑制 NMES を用いるのが妥当と考えられる.

本研究の限界は, 相反抑制 NMES とストレッチングの同時施行で認められた短時間での筋伸張性の向上が,

実際の介入として一定期間ストレッチングを実施した際の介入効果の向上にもつながるか否か不明な点である. 今後, 相反抑制 NMES とストレッチングの同時施行について, 相反抑制 NMES 開始 5 分後からストレッチングを実施する群とストレッチングの前処置として相反抑制 NMES を実施する群, さらにストレッチングのみを実施する群の 3 群間で一定期間ストレッチングを実施した際の介入効果を比較検討することが必要である. また, 最近の研究では, 相反抑制の効果は大脳皮質運動野の興奮性変化の影響を受けることがわかっており¹²⁾, その実例として電気刺激に随意運動 (すなわち, 大脳皮質運動野の興奮性変化) を組み合わせることで相反抑制の効果が増強することが指摘されている⁶⁾. この点を考慮すると, 本研究で用いた相反抑制 NMES とストレッチングの同時施行についても, 前脛骨筋への電気刺激時に随意的な足関節の背屈運動を加えることで, 下腿三頭筋の筋伸張性がさらに向上し, よりストレッチングを実施しやすい状況を作り出すことが可能かもしれない. この点も, 今後検討すべき課題と考えられる.

引用文献

- 1) 網本 和: 物理療法学 (第3版). 医学書院, 東京, 2008, pp134-145.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 鈴木佳代子, 関 和則, 半田康延・他: 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.
- 5) 佐藤結衣, 吉田英樹, 佐藤菜奈子・他: 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? 理学療法科学, 2014, 29(5): 709-713.
- 6) Yamaguchi T, Fujiwara T, Saito K, et al.: The effect of active pedaling combined with electrical stimulation on spinal reciprocal inhibition. J Electromyogr Kinesiol, 2013, 23(1): 190-194.
- 7) Koyama S, Tanabe S, Ishikawa T, et al.: Time-dependent effects of neuromuscular electrical stimulation on changes in

- spinal excitability are dependent on stimulation frequency: a preliminary study in healthy adults. *Somatosense Mot Res*, 2014, 31(4): 221-226.
- 8) 川村博文, 高木峰子, 鶴見隆正・他: 関節可動域制限の予防・治療を目的とした物理療法. *理学療法*, 2012, 29(1): 35-42.
 - 9) Jankowska E, Roberts WJ: Synaptic actions of single interneurons mediating reciprocal Ia inhibition of motoneurons. *J Physiol*, 1972, 222(3): 623-642.
 - 10) 齋藤茂樹, 吉田英樹, 前田貴哉・他: ストレッチングの前処置としての骨格筋へのキセノン光照射の有効性. *理学療法科学*, 2014, 29(5): 703-707.
 - 11) 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.
 - 12) Fujiwara T, Tsuji T, Honaga K, et al.: Transcranial direct current stimulation modulates the spinal plasticity induced with patterned electrical stimulation. *Clin Neurophysiol*, 2011, 122(9): 1834-1837.