

Original Article

健常人に対する回転永久磁石を用いた磁気刺激, 反復性末梢磁気刺激, 経皮的電気神経刺激による H_{max}/M_{max} の変化木曾昭史,¹ 前田寛文,¹ 大高洋平,¹ 森 仁,² 加賀谷齊^{1,3}¹藤田医科大学医学部リハビリテーション医学講座²株式会社 IFG³国立長寿医療研究センターリハビリテーション科

要旨

Kiso A, Maeda H, Otaka Y, Mori H, Kagaya H. A comparative study of changes in H_{max}/M_{max} under spinning permanent magnet stimulation, repetitive peripheral magnetic stimulation, and transcutaneous electrical nerve stimulation in healthy individuals. *Jpn J Compr Rehabil Sci* 2024; 15: 58–62.

【目的】われわれは、磁束を変化させることで電界を誘導する回転永久磁石 (SPM) を用いた小型の装置を開発し、反復性末梢磁気刺激 (rPMS) や経皮的電気神経刺激 (TENS) と同様に痙縮軽減効果があると仮説を立てた。本研究では、健常人を対象に1回のセッションの SPM 刺激効果を rPMS や TENS と比較した。

【方法】11名の健常成人男性を対象とした。陰極をヒラメ筋上に、陽極は陰極から5cm遠位のアキレス腱内側に設置した。刺激電極は脛骨神経を刺激するために膝窩に固定した。最大H波 (H_{max}) と最大M波 (M_{max}) を測定し、以下の条件で H_{max}/M_{max} を算出した。a) 15分間の SPM 刺激, b) 30分間の SPM 刺激, c) 10,000発の rPMS, d) 15分間の TENS, e) 15分間の安静 (コントロール群)。SPM, rPMS, TENS の機器は、腹臥位でヒラメ筋の筋腹に装着した。

【結果】コントロール群と比較して、 H_{max}/M_{max} は15分および30分の SPM 刺激, rPMS, TENS で有意に

低下した ($p < 0.005$)。15分間の SPM 刺激での H_{max}/M_{max} の変化は、30分間の SPM 刺激および rPMS での変化よりも有意に小さかった ($p < 0.005$)。

【結論】SPM 刺激は健常人の H_{max}/M_{max} を低下させ、痙縮に対する新たな治療法となりうる。

キーワード: 回転永久磁石, 反復性末梢磁気刺激, 経皮的電気神経刺激, H_{max}/M_{max}

はじめに

痙縮はしばしばリハビリテーションの妨げとなる。経皮的電気神経刺激 (transcutaneous electrical nerve stimulation; TENS) は痙縮軽減にしばしば用いられる物理的手段の一つである [1]。TENS は比較的安全であり副作用も少ない。各種の神経疾患に生じる痙縮に対する TENS の短期的な有効性も実証されている [2]。TENS の電極は主動筋の筋腹、拮抗筋の筋腹、または神経の走行に沿って設置される。TENS の刺激周波数は 100 Hz が最も効果的とされ、通常、その刺激強度は感覚閾値以上運動閾値未満に設定されるので皮膚のチリチリ感を生じる [2, 3]。

四肢への反復性末梢磁気刺激 (repetitive peripheral magnetic stimulation; rPMS) も痙縮軽減に有効である。皮膚の侵害受容器を刺激することなく神経と筋肉を活性化する rPMS は、1回のセッションでも痙縮を軽減する [4–6]。さらに、rPMS では皮膚に電極を貼付する必要がない。しかし、現在の rPMS 装置は大型のため、痙縮軽減のためだけに使用するのには実用的ではないと思われる。経頭蓋磁気刺激に回転永久磁石 (spinning permanent magnet; SPM) を使用するというアイデアは、Helekar と Voss [7] によって最初に提唱された。われわれは、磁束を変化させることで電界を誘導する四肢用の小型 SPM 装置を開発した。SPM の刺激強度は従来の rPMS 装置の刺激強度より低い。運動閾値未満の刺激強度を持つ TENS が痙縮を軽減させるように [2, 3]、われわれは SPM 刺激によっても痙縮は軽減するという仮説を立てた。

痙縮に対する TENS の有効性は Modified Ashworth Scale (MAS) で評価されることが多いが [4, 6, 8–10]、客観的な測定には電気生理学的手法が用いられる [11–13]。H波の最大振幅値 (H_{max}) と M波の最

著者連絡先: 加賀谷齊

国立研究開発法人 国立長寿医療研究センター

〒474-8511 愛知県大府市森岡町七丁目430番地

E-mail: hkagaya2@ncgg.go.jp

2024年8月23日受理

利益相反: spinning permanent magnet (SPM) 装置は株式会社 IFG が特許出願中であり、森仁と加賀谷齊は発明者として登録されている。SPM 装置は株式会社 IFG から無償貸与され、森仁は株式会社 IFG の株主である。他の著者には、開示すべき利益相反はない。本研究の一部は JSPS 科研費 19K19812、公益財団法人渡邊財団 30 周年記念特別助成金の助成を受けた。

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial NoDerivatives International License.

©2024 Kaifukuki Rehabilitation Ward Association

大振幅値 (M_{max}) の比である H_{max}/M_{max} は他のパラメータよりも頻用される評価法であり、痙縮筋では高い値を示す [13, 14]. H_{max}/M_{max} 低下は痙縮軽減を意味し、健常者であっても TENS により減少する [13, 14]. そこで本研究では、健常者に対する SPM 刺激 1 セッション後の H_{max}/M_{max} を評価し、rPMS, TENS における H_{max}/M_{max} と比較した.

方法

対象者は 11 人の成人男性であり、平均 (SD) 年齢 34 (9) 歳、平均 (SD) 身長 171.1 (6.2) cm、平均 (SD) 体重 64.8 (7.8) kg であった. 本研究は、認定臨床研究審査委員会の承認を受け、Japan Registry of Clinical Trials (登録番号: jRCTs042200013) に登録された. 対象者全員から書面によるインフォームドコンセントを得た.

われわれが開発した SPM 機器は円盤状の永久磁石をモーターで回転させることで磁気刺激を与える. 磁石は円盤状の中心軸を中心に回転する. 磁石の平らな面の円周上に 4 つの磁極が軸の周りに配置され、その極性は 90 度ごとに反転する. 磁石からの磁束の方向は円盤形状の平面に垂直である. 磁石は円筒形のプラスチックケースで覆われており、ケースの底面から周波数 130 Hz、最大磁束密度 0.23 T の交流磁界を発生させることができる. 予備実験の結果を参考に、本機器の刺激強度を感覚閾値未満および運動閾値未満に設定した. なお、機器は直径 7.8 cm、高さ 2.1 cm、重さわずか 108 g である (図 1). そのため四肢に簡単に装着可能であるが、まだ市販はされていない.

対象者には、膝をわずかに曲げた腹臥位で筋肉を可能な限りリラックスさせるように指示した. 記録電極として銀塩化銀表面電極 (NM-31, 日本光電工業株式会社, 東京) を用い、陰極をヒラメ筋の腓腹筋-ヒラメ筋接合部に設置した. 腓腹筋とヒラメ筋は超音波 (Noblus, 株式会社日立製作所, 東京) で確認した. 陽極はアキレス腱内側の陰極から 5 cm 遠位に配置した. アース電極は陰極と刺激電極の間に配置した. 刺激電極は脛骨神経を刺激するために膝窩に固定し、



図 1. spinning permanent magnet (SPM) 機器
直径 7.8 cm、高さ 2.1 cm であり、その質量はわずかに 108 g である.

ニューロパック X1 (日本光電工業株式会社, 東京) に接続した. 矩形刺激のパルス幅は 1 ms とした. 刺激電極の位置は変えずに刺激強度を徐々に上げて H_{max} 値を記録し、その後 M_{max} 値を記録した. ヒラメ筋の H 波と M 波のピーク間振幅を記録した [13]. H 波の最大振幅を M 波の最大振幅で割り H_{max}/M_{max} を各対象者について算出した. H_{max}/M_{max} は健常者においても個人差が大きいため、得られた値が安定していることを確認するために刺激前に 2 回評価し、2 回の値が近似していることを確認した上で、平均ではなく 2 回目と刺激後の H_{max}/M_{max} をその後の解析に使用した.

H_{max}/M_{max} は各対象者について、a) SPM 刺激 15 分、b) SPM 刺激 30 分、c) rPMS10,000 発、d) TENS15 分、e) 15 分間刺激なし (コントロール群) の条件で行った. SPM, rPMS, TENS の装置はヒラメ筋筋腹に装着した (図 2). 各条件の実験はそれぞれ別日に行った. rPMS には市販の PMS 刺激装置 (Pathleader; 株式会社 IFG, 仙台) を用い、刺激時間と休止時間は各 2 秒とした. 刺激周波数はこの装置の最大値である 50 Hz に設定した. rPMS の刺激条件は刺激時間ではなく刺激回数で表現されるため、rPMS の刺激条件を SPM や TENS と一致させることは困難であり、痙縮軽減に効果があると思われる条件で刺激を行った. TENS は市販の刺激装置 (リハブ; 日本シグマックス株式会社, 東京) を用い、パルス幅 70 μ s、刺激周波数 100 Hz で行った. rPMS と TENS については、刺激強度を徐々に増加させて感覚閾値と運動閾値を決定した. 感覚閾値は被験者がチリチリ感を感じると報告した最小刺激強度とし、運動閾値はヒラメ筋の筋収縮が観察される最小刺激強度とした. rPMS と TENS の刺激強度は感覚閾値以上で運動閾値のすぐ下のレベルに設定しているため、rPMS は SPM より強い刺激強度になる. rPMS の平均 (SD) 刺激強度は 0.33 (0.03) T であった.



図 2. 腓腹筋上の spinning permanent magnet (SPM) 機器
機器は小型のバッテリーと接続する. 刺激電極は脛骨神経刺激のために膝窩部に固定されている. 刺激前後で H_{max}/M_{max} を評価した.

統計解析

刺激前後または 15 分間の安静（コントロール群）後の H_{max}/M_{max} 値の変化量を以下の式で算出した。

$$H_{max}/M_{max} \text{ 値の変化量} = (\text{刺激終了直後の } H_{max}/M_{max} \text{ 値}) - (\text{刺激直前の } H_{max}/M_{max} \text{ 値})$$

ただし、コントロール群は刺激終了直後の代わりに 15 分間の安静後の H_{max}/M_{max} 値を用いた。

H_{max}/M_{max} 変化量の正規性は有意水準 5% で Shapiro-Wilk 検定を用いて評価した。各 H_{max}/M_{max} の変化量は、一元配置分散分析 (ANOVA) 後、有意水準 5%/ $C_2 = 0.5\%$ で Bonferroni 補正を行った Wilcoxon signed-rank test を用いて検定した。 H_{max}/M_{max} は健常者においても個人差が大きいことが知られているため、変化量を用いた [14, 15]。すべての統計解析は、JMP バージョン 12 (SAS Institute Japan Inc., Tokyo, Japan) を用いて行った。

結果

本研究における有害事象は観察されなかった。前述のように、2 回評価した H_{max}/M_{max} 値は近似していた。異なる条件下での H_{max}/M_{max} の変化量は、TENS ($p = 0.023$) を除いて正規分布であった。15 分 SPM 刺激、30 分 SPM 刺激、rPMS、TENS、コントロール群の変化量の中央値は、順に -3.0% 、 -6.6% 、 -6.7% 、 -4.7% 、 0.2% であった。ANOVA による群間差は有意であった ($F = 11.153$, $p < 0.001$)。コントロール群と比較して、 H_{max}/M_{max} の変化量は SPM15 分刺激 ($p = 0.0020$)、SPM30 分刺激 ($p = 0.0010$)、rPMS ($p = 0.0010$)、TENS ($p = 0.0010$) で有意に減少した。15 分間の SPM 刺激における H_{max}/M_{max} の変化量は、30 分間の SPM 刺激 ($p = 0.0020$) および rPMS ($p = 0.0049$) よりも有意に小さかった (図 3)。

考察

本研究の結果、SPM 刺激、rPMS、TENS はコントロールよりも H_{max}/M_{max} 値の変化量は有意に減少した。15 分間の SPM 刺激は、30 分間の SPM 刺激および rPMS よりも効果は低かったが、TENS と同程度の効果であった。健常人を対象とした研究では、15 分間の TENS により H_{max}/M_{max} と、 M_{max} の 10% の大きさのヒラメ筋 H 反射から測定したヒラメ筋 H 反射の潜時が有意に減少することがわかっている [14]。別の研究では、健常者でも 30 分の TENS で H_{max}/M_{max} 、 H_{max} 、 M_{max} 、M 傾斜比が有意に低下している [13]。同様に、 M_{max} の約 30% の振幅を持つ H 反射は、15~40 分の TENS で減少している [16]。本研究において、SPM 刺激下で H_{max}/M_{max} が有意に減少したことは、この方法が TENS と同様に痙縮を減少可能であることを示している。刺激前に 2 回評価した H_{max}/M_{max} 値が今回は近似していたため 2 回目の測定結果を採用したが、今後の検討で 2 回の測定値に差があった場合は別な処理方法の検討も必要である。

現在の技術的な限界により、SPM 機器の最大磁束密度は 0.23 T に留まったが、本研究で運動閾値直下の刺激強度の rPMS では平均 0.33 T であった。した

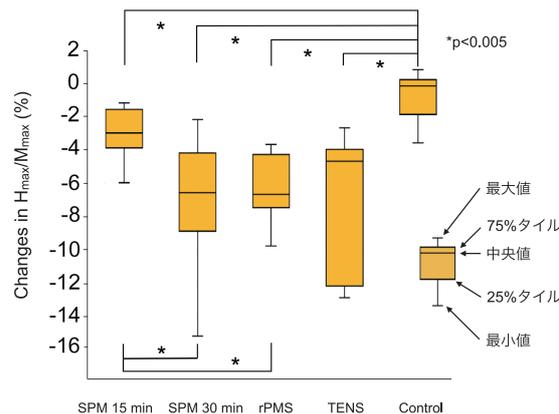


図 3. H_{max}/M_{max} の変化

コントロール群と比較して、 H_{max}/M_{max} は SPM15 分刺激、SPM30 分刺激、rPMS、TENS で有意に減少した。15 分間の SPM 刺激での H_{max}/M_{max} の変化量は、30 分間の SPM 刺激、rPMS 下での変化よりも有意に小さかった。

(SPM：回転永久磁石、rPMS：反復性末梢磁気刺激、TENS：経皮的電気神経刺激)

がって、rPMS と同等の効果を得るためには、SPM 装置での刺激時間を長くする必要があった。ただし、15 分間の SPM 刺激は 15 分間の TENS と同等の効果があった。これまで TENS として有効な刺激時間は 15 分 [17] から 60 分 [18, 19] と報告されている。週 5 日、2 週間の運動閾値未満の刺激強度による痙縮筋に対する 15 分間の TENS により MAS の有意な減少も得られている [17]。感覚閾値未満の強度の TENS でも MAS は減少している [10]。本研究で使用した SPM 刺激の強度は感覚閾値未満かつ運動閾値未満であったが、磁気刺激は皮膚の侵害受容器を刺激することなく神経と筋肉を活性化するので、磁気刺激の感覚閾値強度は電気刺激よりも高い可能性があり、今後のさらなる検討が必要である。

TENS が痙縮や運動制御に及ぼす効果のメカニズムは不明である [2]。主動筋刺激は、主動筋の抑制性入力経路として、反回抑制を増強させることができ、これは α -motoneuron への負のフィードバックを行う Renshaw 細胞によって引き起こされると考えられており、拮抗筋刺激は Ia の相反抑制を増強する可能性がある [20, 21]。

この研究にはいくつかの限界がある。本研究では SPM、rPMS、TENS の刺激強度を均一化できていない。そのため異なる刺激強度では異なる結果が得られる可能性がある。本研究の対象者は健常人のため、痙縮患者を対象とした SPM 刺激の研究が必要である。 H_{max}/M_{max} 以外の電気生理学的手法を用いた評価も必要である。電極設置部位、パルス幅、周波数、刺激強度などの TENS 刺激条件の標準化は確立されていない [2]。本研究で使用した SPM 機器の最大磁束密度は 0.23 T に固定されている。ただし、その設置部位（主動筋筋腹、拮抗側筋腹、神経の走行に沿う）と刺激時間は調整可能である。

結論

われわれは健常者において、SPM 刺激が rPMS や TENS と同様に H_{max}/M_{max} を減少させることを示した。SPM 機器は rPMS 装置よりはるかに小型であり、その刺激強度は感覚閾値未満、運動閾値未満であるために皮膚のチリチリ感もない。TENS は痙縮軽減や課題関連訓練に臨床で使用されている [9, 18]。患者に対する SPM の効果はまだ不明であるが、この新しい機器は痙縮に対する新しい治療法としての可能性がある。

文献

- Lin S, Sun Q, Wang H, Xie G. Influence of transcutaneous electrical nerve stimulation on spasticity, balance, and walking speed in stroke patients: A systematic review and meta-analysis. *J Rehabil Med* 2018; 50: 3–7.
- Mills PB, Dossa F. Transcutaneous electrical nerve stimulation for management of limb spasticity: A systematic review. *Am J Phys Med Rehabil* 2016; 95: 309–18.
- Mahmood A, Veluswamy SK, Hombali A, Mullick A, N M, Solomon JM. Effect of transcutaneous electrical nerve stimulation on spasticity in adults with stroke: A systematic review and meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil* 2019; 100: 751–68.
- Struppler A, Havel P, Müller-Barna P. Facilitation of skilled finger movements by repetitive peripheral magnetic stimulation (RPMS) - a new approach in central paresis. *NeuroRehabilitation* 2003; 18: 69–82.
- Krewer C, Hartl S, Müller F, Koenig E. Effects of repetitive peripheral magnetic stimulation on upper-limb spasticity and impairment in patients with spastic hemiparesis: a randomized, double-blind, sham-controlled study. *Arch Phys Med Rehabil* 2014; 95: 1039–47.
- Werner C, Schrader M, Wernicke S, Bryl B, Hesse S. Repetitive peripheral magnetic stimulation (rpMS) in combination with muscle stretch decreased the wrist and finger flexor muscle spasticity in chronic patients after CNS lesion. *Int J Phys Med Rehabil* 2016; 4: 4.
- Helekar SA, Voss HU. Transcranial brain stimulation with rapidly spinning high-field permanent magnets. *IEEE Access* 2016; 4: 2520–8.
- Sonde L, Kalimo H, Farnaes SE, Viitanen M. Low TENS treatment on post-stroke paretic arm: a three-year follow-up. *Clin Rehabil* 2000; 14: 14–9.
- Kim TH, In TS, Cho HY. Task-related training combined with transcutaneous electrical nerve stimulation promotes upper limb functions in patients with chronic stroke. *Tohoku J Exp Med* 2013; 231: 93–100.
- Park J, Seo D, Choi W, Lee S. The effects of exercise with TENS on spasticity, balance, and gait in patients with chronic stroke: a randomized controlled trial. *Med Sci Monit* 2014; 20: 1890–6.
- Hui-Chan CWY, Levin MF. Stretch reflex latencies in spastic hemiparetic subjects are prolonged after transcutaneous electrical nerve stimulation. *Can J Neurol Sci* 1993; 20: 97–106.
- Martins FL, Carvalho LC, Silva CC, Brasileiro JS, Souza TO, Lindquist AR. Immediate effects of TENS and cryotherapy in the reflex excitability and voluntary activity in hemiparetic subjects: a randomized crossover trial. *Rev Bras Fisioter* 2012; 16: 337–44.
- Karakoyun A, Boyraz İ, Gunduz R, Karamercan A, Ozgirgin N. Electrophysiological and clinical evaluation of the effects of transcutaneous electrical nerve stimulation on the spasticity in the hemiplegic stroke patients. *J Phys Ther Sci* 2015; 27: 3407–11.
- Hiraoka K. Neural mechanisms underlying the effect of transcutaneous electrical nerve stimulation in humans. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 2002; 42: 359–66.
- Levin MF, Hui-Chan C. Are H and stretch reflexes in hemiparesis reproducible and correlated with spasticity? *J Neurol* 1993; 240: 63–71.
- Koyama S, Tanabe S, Ishikawa T, Itoh S, Kubota S, Sakurai H, 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. *Somatosens Mot Res* 2014; 31: 221–6.
- Picelli A, Dambruoso F, Bronzato M, Barausse M, Gandolfi M, Smania N. Efficacy of therapeutic ultrasound and transcutaneous electrical nerve stimulation compared with botulinum toxin type A in the treatment of spastic equinus in adults with chronic stroke: a pilot randomized controlled trial. *Top Stroke Rehabil* 2014; 21; Suppl 1: S8–16.
- Ng SSM, Hui-Chan CWY. Transcutaneous electrical nerve stimulation combined with task-related training improves lower limb functions in subjects with chronic stroke. *Stroke* 2007; 38: 2953–9.
- Cho HY, In TS, Cho KH, Song CH. A single trial of transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) improves spasticity and balance in patients with chronic stroke. *Tohoku J Exp Med* 2013; 229: 187–93.
- van der Salm A, Veltink PH, IJzerman MJ, Groothuis-Oudshoorn KC, Nene AV, Hermens HJ. Comparison of electric stimulation methods for reduction of triceps surae spasticity in spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil* 2006; 87: 222–8.
- Nielsen JB, Crone C, Hultborn H. The spinal pathophysiology of spasticity--from a basic science point of view. *Acta Physiol (Oxf)* 2007; 189: 171–80.