

Brief Report**高頻度磁気刺激によって誘発される最大筋収縮力の測定—最適刺激部位に関する予備的研究**椿原彰夫,¹ 紙上真徳,² 伊藤智崇,¹ 岸本智也,¹ 黒住千春³¹川崎医療福祉大学リハビリテーション学部理学療法学科²川崎医療福祉大学医療技術学研究科リハビリテーション学専攻（学生）³川崎医療福祉大学リハビリテーション学部作業療法学科**要旨**

Tsubahara A, Kamiue M, Ito T, Kishimoto T, Kurozumi C. Measurement of maximal muscle contraction force induced by high-frequency magnetic stimulation: a preliminary study on the identification of the optimal stimulation site. *Jpn J Compr Rehabil Sci* 2021; 12: 27-31.

【目的】高頻度磁気刺激装置を用いて強い筋収縮を起こさせるための最適刺激部位および方法を特定すること。

【方法】健康成人8名の右側外側広筋に、耐えられる痛みの範囲で最大強度の高頻度磁気刺激を行った。刺激部位は膝蓋骨底外側端と大腿遠位3分の1の点（D点）の間（区間A）とD点と大腿近位3分の1の点（P点）の間（区間B）で、両者の最大筋収縮力を比較した。

【結果】刺激性最大筋収縮力は、区間Aよりも区間Bにおいて有意に大きかった。また、最適刺激部位は、区間AではD点の近傍、区間BではD点とP点の中央部の狭い領域に集まっていた。痛みは、両点ともに非常に少なかった。

【結論】外側広筋への磁気刺激の最適刺激部位は、大腿中央部に集まり、近位浅小枝に加えて近位深小枝、あるいは高密度に集合する深部の運動神経終末も刺激された可能性がある。また、プローブを移動させて、もっとも強い筋収縮力が得られる点を探査することが有用と知られた。

キーワード：高頻度磁気刺激、筋収縮力、筋力増強、大腿四頭筋、運動点

著者連絡先：椿原彰夫

川崎医療福祉大学リハビリテーション学部理学療法学科

〒701-0193 岡山県倉敷市松島 288

E-mail : atsuba@mw.kawasaki-m.ac.jp

2021年6月15日受理

利益相反：川崎医療福祉大学とオージー技研（株）との間に共同研究契約を締結し、機器の製作をお願いし、3年間で合計2,398,000円の研究費を受け取っていることを開示する。

はじめに

高齢者の運動能力を維持し、介護予防を達成するために、住民による体操教室やデイサービスで、好気性運動や抵抗運動が取り入れられている[1-4]。しかし、認知症や意欲低下などのある方々には継続的に筋力を増加あるいは維持できる簡便な方法が求められる。

骨格筋に収縮を起こす方法には、筋力増強訓練のほかに電気刺激療法があるが[5-8]、痛みや不快感を生じるという問題が指摘されている[9]。近年、電気刺激に代わり得る手段として、骨格筋に対する高頻度反復末梢性磁気刺激法が報告されている[10, 11]。しかし、1テスラの出力強度の磁気刺激装置では、下肢の筋力増強の目的で広く普及するには至っていない。そこで、われわれは産学共同研究によって、高頻度磁気刺激装置の開発を続けている。

電気刺激では筋の表層のみの刺激であるため、運動点の直上に刺激電極を貼る、あるいは近位と遠位の電極すべての運動点を挟んで刺激する方法が用いられている[5-8]。磁気刺激ではプローブを筋腹上に置く方法となるが、現時点では最適刺激部位および方法は特定されていない。そこで、本研究では大腿四頭筋の中ではもっとも大きく、先行研究の多くで被験筋とされてきた外側広筋について[12, 13]、大腿遠位部と大腿中央部のいずれにプローブを設置した場合に強い筋収縮が得られるかを確認するために、最大磁気刺激時の筋収縮力を比較した。また、各部位における最適刺激部位の分布についても検討した。本研究によって、高齢者の筋力増強を目的とした磁気刺激法の普及に寄与したい。

方法**1. 対象**

中枢神経疾患や神経筋疾患、骨関節疾患を有しない8名の健康成人（男性4名、女性4名、平均年齢20.6±0.5歳）が、自由意思に基づいて本研究に参加了。被験者には研究内容を十分に説明したのち、書面にて参加の同意を得た。なお、本研究を開始するにあたり、施設内の研究倫理委員会の承認を得た（第19-072号）。

2. 高頻度磁気刺激の方法

被験者は椅子座位で、膝関節屈曲 75 度、股関節屈曲 75 度の姿勢とした。磁気刺激前に、膝蓋骨底外側端と上前腸骨棘を結んだ直線上で、遠位 3 分の 1 の点 (D 点) と近位 3 分の 1 の点 (P 点) にマークを付けた (図 1)。磁気刺激は、最大出力強度 1.3 テスラの高頻度磁気刺激装置の試作機 (オージー技研 (株) 製) を用いて、右側外側広筋を刺激した (図 2)。刺激頻度は 30 Hz で、弱刺激から徐々に上げ、耐えられる痛みの範囲の最大強度とした。刺激部位は、運動

点が存在すると報告されている位置を考慮して [14]、膝蓋骨底外側端と D 点の間 (区間 A) ならびに D 点と P 点の間 (区間 B) の 2箇所とした。区間 A および区間 B のそれぞれについて、プローブを移動させ、もっとも強い筋収縮力が得られる点を探索した。探索の際、側方へ 2 cm 前後のプローブの移動を可能とした。最大収縮の点を 3 秒間、等尺性に刺激し、その後 2 秒間の休息を置いて次の刺激を行った。刺激は、計 5 回ずつとした。区間 A および区間 B の刺激部位の順序は、ランダムとした。

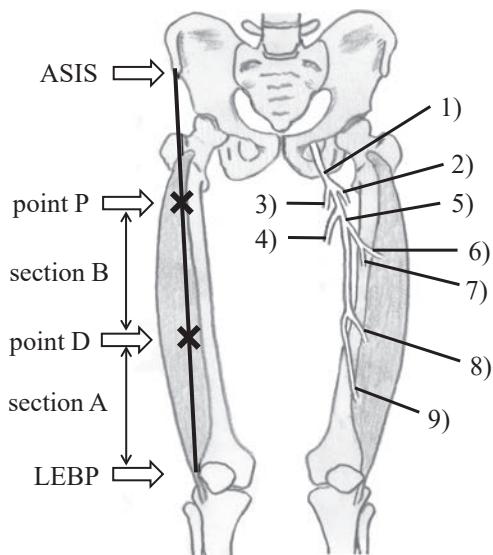


図 1. 磁気刺激の部位と各分画に対応する神経の分布
ASIS: 上前腸骨棘 (anterior superior iliac spine), LEBP: 膝蓋骨底外側縁 (lateral edge of the base of patella), point D: 遠位 3 分の 1 の点 (D 点), point P: 近位 3 分の 1 の点 (D 点), section A: 膝蓋骨底外側端と D 点の間 (区間 A), section B: D 点と P 点の間 (区間 B), 1) 大腿神経, 2) 大腿直筋枝, 3) 内側広筋枝, 4) 中間広筋枝, 5) 外側広筋枝, 6) 近位浅小枝, 7) 近位深小枝, 8) 中央-遠位小枝, 9) 遠位小枝。



図 2. 磁気刺激装置のプローブと磁気刺激の場面
試作機のプローブの面積は 19.5 cm x 21.5 cm で、プローブ内にあるコイルの表面積は 18.2 cm²、最大出力強度は 1.3 テスラである。

3. 筋収縮力の測定

磁気刺激を開始する前に、椅子座位にて右膝関節伸展筋に 3 秒間の最大等尺性随意収縮を 5 秒間の休息を挟んで 2 回行わせ、収縮力を測定した。大きいほうのデータを随意性最大筋収縮力とした。つづいて、最大強度の刺激時の等尺性伸展筋収縮力 (刺激性最大筋収縮力) を、区間 A および区間 B の刺激部位について測定した。それぞれの部位について 5 回ずつ測定し、もっとも大きい値ともっとも小さい値を除いた 3 回の刺激性最大筋収縮力を解析のデータとした。さらに、刺激性最大筋収縮力を随意性最大筋収縮力で除して、相対的収縮力を算出した。

筋収縮力 (筋トルク値) の測定には、多用途筋機能評価運動装置 BIODEX System3 (BIODEX Medical 社製) を使用した。

4. 痛みの評価

磁気刺激の終了後に、区間 A および区間 B について、刺激時の痛みの程度を評価した。評価には 10-cm visual analogue scale (VAS) を用い [15]、表示は % で表した (0%: 痛みなし, 100%: 激痛)。

5. データの解析

全被験者の刺激性最大筋収縮力ならびに VAS 値について、Wilcoxon の符号付順位和検定によって区間 A と区間 B との比較を行った。統計学的解析には SPSS ver.22.0 (IBM 社) を用い、有意水準は 5% とした。また、刺激性最大筋収縮力が得られた最適刺激部位が、膝蓋骨底外側端と上前腸骨棘を結んだ直線上のどの位置に存在するかを、割合で表示した (0%: 膝蓋骨底外側端, 100%: 上前腸骨棘)。最適刺激部位が直線上にない場合は、最適刺激部位から直線に垂線を下ろし、その交点の割合とした。結果の数値は、「平均±SD」として表記する。

結果

被験者全員が、本装置の最大強度の磁気刺激 (1.3 テスラ) を強い痛みなく受けることが可能であった。その際の VAS 値は、区間 A で 20.4±16.8%，区間 B で 20.4±15.9% で非常に低く、両者に有意差は認められなかった。

被験者全員の随意性最大収縮力は、188.5±61.1 Nm であった。刺激性最大筋収縮力は、区間 A では 11.2±4.2 Nm、区間 B では 30.9±17.0 Nm で、区間 A よりも区間 B において、統計的有意に大きかった (図 3)。相対的収縮力の平均値は、区間 A で 6.1±

1.8%，区間Bで $15.9\pm5.0\%$ であった。区間Aおよび区間Bにおける最適刺激部位を図4に示す。区間AではD点の近傍に集まり、区間BではD点とP点の中央部の狭い領域に集まっていた。

考察

運動点は運動神経終末が高密度に集合し、痙攣の場合に電気的に易興奮性を呈する部位と報告されてきた[16]。しかし、近年の健常者への電気刺激の研究では、運動点は運動神経が筋腹に入る部位で、電気刺激によって探索される表層の点と定義が変わっている[14, 17]。外側広筋の運動点は、大腿神経外側広筋枝の近位浅小枝、中央-遠位小枝、遠位小枝の3つの領域に位置するが、被験者間の位置の統一性は低く、広い範囲に分布すると報告されている[14]。本研究

の区間Aは中央-遠位小枝および遠位小枝の領域、区間Bは近位浅小枝の領域に該当する(図1)。本研究の結果から、磁気刺激によって得られる最大筋収縮力は、区間Aよりも区間Bにプローブを設置した場合のほうが圧倒的に大きいと知られた。また、最適刺激部位は狭い領域に限定されており、表層にある運動点(近位浅小枝の領域)のみを刺激することでは説明され得ない。磁気刺激では、電気刺激よりも深部まで刺激可能であるため、近位浅小枝に加えて深層にある近位深小枝、あるいは高密度に集合する深部の運動神経終末も刺激された可能性がある。事実、区間Bの中央部には、これらの近位深小枝が走行すると知られている[14, 18]。

今回、磁気刺激を使用した場合、ほとんど痛みを伴うことなく筋収縮が得られると知られた。しかも、外側広筋のみの刺激で大腿四頭筋全体の約15%の収縮力が得られた。外側広筋の筋力が大腿四頭筋全体の3分の1と仮定すると、この値は外側広筋単独の最大収縮力の45%に相当することになる。高齢者に用いられる抵抗運動の強度が最大筋力の40~85%と報告されているため[4]、この収縮力は廃用性筋力低下を予防するには十分と考えられる。本研究では1.3テスラの装置を使用したが、従来の1テスラの装置でも有用な収縮力が得られる可能性がある。プローブを移動させて、最も強い筋収縮力が得られる点を探索することが重要と考えられる。電気刺激による筋収縮では皮膚に強い痛みを生じるという問題があるため、磁気刺激を使用する方法に期待が寄せられる。今後は、さらに最大出力強度の強い磁気刺激装置の開発が望まれる。また、筋力増強効果が磁気刺激によって得られることを検証する必要がある。

結語

外側広筋の筋収縮を得るための磁気刺激の最適刺激部位は、大腿中央部に位置していた。また、プローブを移動させて、もっとも強い筋収縮力が得られる点を探索することが有用であると知られた。高頻度末梢性反復磁気刺激法は痛みの少ない方法であるため、筋力増強への有効性に関する今後の研究に期待が寄せられる。

謝辞

本学との間に共同研究契約を締結し、機器の試作ならびに研究費を提供してくださいましたオージー技研株式会社には、厚く御礼を申し上げます。

文献

1. Aranceta J, Pérez-Rodrigo C, Gondra J, Orduna J. Community-based programme to promote physical activity among elderly people: the GeroBilbo study. *J Nutr Health Aging* 2001; 5: 238-42.
2. Papa1 EV, Dong X, Hassan M. Resistance training for activity limitations in older adults with skeletal muscle function deficits. *Clin Interv Aging* 2017; 12: 955-61.
3. Lee H, Kim I-G, Sung C, Jeon T-B, Cho K, Ha Y-C, et al. Exercise training increases skeletal muscle strength independent of hypertrophy in older adults aged 75 years

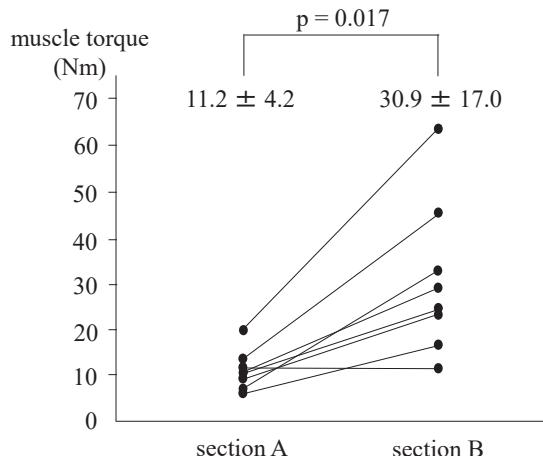


図3. 刺激性最大筋収縮力(筋トルク)の比較
数値は、「平均値±標準偏差」を表わす。

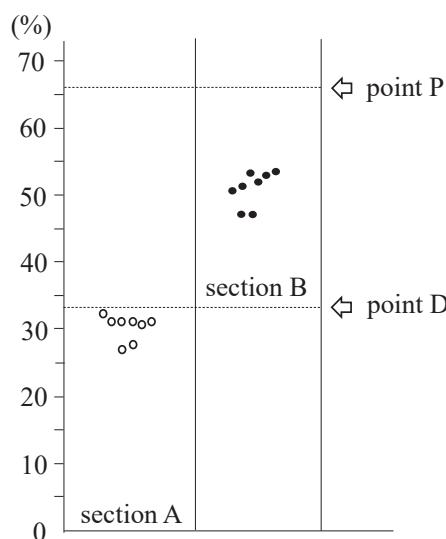


図4. 区間Aおよび区間Bにおける最適刺激部位
縦軸は、膝蓋骨底外側端と上前腸骨棘を結んだ直線上の位置を割合で表示している(0%:膝蓋骨底外側端、100%:上前腸骨棘)。point D(D点)は遠位3分の1の点、point P(P点)は近位3分の1の点を意味する。

- and older. *Geriatr Gerontol Int* 2019; 19: 265–70.
4. Peterson MD, Rhea MR, Sen A, Gordon PM. Resistance exercise for muscular strength in older adults: a meta-analysis. *Ageing Res Rev* 2010; 9: 226–37.
 5. Gerovasili V, Stefanidis K, Vitzilaios K, Karatzanos E, Politis P, Koroneos A, et al. Electrical muscle stimulation preserves the muscle mass of critically ill patients: a randomized study. *Clit Care* 2009; 13: R161.
 6. Gruther W, Kainberger F, Fialka-Moser V, Paternostro-Sluga T, Quittan M, Spiss C, et al. Effects of neuromuscular electrical stimulation on muscle layer thickness of knee extensor muscles in intensive care unit patients: a pilot study. *J Rehabil Med* 2010; 42: 593–7.
 7. Hortobágyi T, Maffiuletti NA. Neural adaptations to electrical stimulation strength training. *Eur J Appl Physiol* 2011; 111: 2439–49.
 8. Miyamoto T, Kamada H, Tamaki A, Moritani T. Low-intensity electrical muscle stimulation induces significant increases in muscle strength and cardiorespiratory fitness. *Eur J Sport Sci* 2016; 16: 1104–10.
 9. Neyroud D, Temesi J, Millet GY, Verges S, Maffiuletti NA, Kayser B, et al. Comparison of electrical nerve stimulation, electrical muscle stimulation and magnetic nerve stimulation to assess the neuromuscular function of the plantar flexor muscles. *Eur J Appl Physiol* 2015; 115: 1429–39.
 10. Struppner 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.
 11. Suzuki K, Hiraoka T, Tsubahara A, Ito T, Izumi S, Yashima K, et al. Considerations for safety of high-frequency repetitive peripheral magnetic stimulation of skeletal muscles in rats: assessment by histological analysis of muscles and biochemical blood tests. *Jpn J Compr Rehabil Sci* 2015; 6: 56–63.
 12. Bustamante V, Casanova J, de Santamaría EL, Mas S, Sellarés J, Gea J, et al. Muscle training with repetitive magnetic stimulation of the quadriceps in severe COPD patients. *Free Radic Res* 2008; 42: 939–48.
 13. Baek J, Park N, Lee B, Jee S, Yang S, Kang S. Effects of repetitive peripheral magnetic stimulation over vastus lateralis in patients after hip replacement surgery. *Ann Rehabil Med* 2018; 42: 67–75.
 14. Botter A, Oprandi G, Lanfranco F, Allasia S, Maffiuletti NA, Minetto MA. Atlas of the muscle motor points for the lower limb: implications for electrical stimulation procedures and electrode positioning. *Eur J Appl Physiol* 2011; 111: 2461–71.
 15. Bijur PE, Silver W, Gallagher EJ. Reliability of the visual analog scale for measurement of acute pain. *Acad Emerg Med* 2001; 8: 1153–7.
 16. Garland DE, Lilling M, Keenan MA. Percutaneous phenol blocks to motor points of spastic forearm muscles in head-injured adults. *Arch Phys Med Rehabil* 1984; 65: 243–5.
 17. Safwat MD, Abdel-Meguid EM. Distribution of terminal nerve entry points to the flexor and extensor groups of forearm muscles: an anatomical study. *Folia Morphol (Warsz)* 2007; 66: 83–93.
 18. Page BJ, Mrowczynski OD, Payne RA, Tilden SE, Lopez H, Rizk E, et al. The relative location of the major femoral nerve motor branches in the thigh. *Cureus* 2019; 11: e3882.