

特集2 摂食嚥下障害の最新のトピックス:機器を用いたアプローチ

総説

舌骨上筋群に対する末梢磁気刺激療法

加賀谷 斉

Hitoshi Kagaya

要旨 末梢磁気刺激は電気刺激に比して疼痛が少なく、衣服の上からも刺激可能である。われわれは、オトガイ下から舌骨上筋群を疼痛なく刺激可能な末梢磁気刺激療法を開発した。舌骨上筋群刺激により健常人の液体 10 mL 嚥下時と同程度の舌骨挙上が可能であった。また、2 週間の末梢磁気刺激により舌骨上筋筋力の有意な増加を得ることもできた。現在、1,800 発の舌骨上筋群刺激が正味 2 分で施行可能である。さらに、嚥下反射に同期させた筋電トリガー型末梢磁気刺激も可能と思われる。舌骨上筋群に対する末梢磁気刺激療法は本邦が世界をリードしており、今後世界に広まっていくことが期待される。

キーワード 末梢磁気刺激, 舌骨上筋群, 摂食嚥下障害

I. はじめに

生体に電気刺激を行って筋収縮を生じさせる手技は古くは 1 世紀のローマ時代から行われていたとされ¹⁾、現在でも四肢に対する電気刺激療法は広範に行われている。摂食嚥下に関して嚥下反射時に喉頭を挙上させる筋は舌骨挙上作用を持つ舌骨上筋群と、舌骨は下降させるが喉頭は挙上させる甲状舌骨筋である(表 1)。この中で皮膚上からアプローチしやすい筋はオトガイ下に位置する顎二腹筋前腹、顎舌骨筋、オトガイ舌骨筋である。21 世紀初頭から摂食嚥下障害患者の舌骨上筋群への電気刺激療法に関する多くの研究報告が行われるようになり、メタ解析によってもその有効性が示されている^{2,3)}。ランダム化比較試験に限定したシステマティックレビューにおいても 11 論文中 10 論文において脳卒中後の摂食嚥下障害に対する電気刺激により摂食嚥下機能の向上が得られている⁴⁾。

しかし、オトガイ下付近には顔面神経や、三叉神経由来の下顎神経の枝である下歯槽神経が走行するため、オトガ

イ下の電気刺激ではこれらの神経が刺激されて顔面や歯の疼痛が生じることが多い。疼痛を避けるために刺激強度を弱くすると逆に十分な舌骨挙上を得られなくなる。また、高齢者ではオトガイ下には皺や皮膚のたるみがあるため電極貼付も決して容易ではなく、男性では電極貼付のための毎日の髭剃りを要することが多く、準備に要する時間も長い。さらに、座位ではオトガイ下の電極は剥がれやすいので、電極固定にも工夫を要するなど多くの問題も存在する。

II. 末梢磁気刺激

末梢磁気刺激(peripheral magnetic stimulation:PMS)は刺激用コイルから強力なパルス状の磁場を瞬間的に派生させ、電磁誘導により生体内に渦電流を誘導し、神経や筋肉の細胞膜に脱分極を生じさせる⁵⁾。PMS は皮膚の侵害受容器を直接刺激しないために電気刺激に比して疼痛が少なく、刺激に用いるコイルを皮膚に接触させる必要がないことから衣服の上からも刺激可能である。従来、PMS では経頭蓋磁気刺激(transcranial magnetic stimulation:TMS)装置を用いて頭部刺激用のコイルを転用したり、四肢用の刺激コイルを TMS 装置に接続して用いることが多かったために、機器が大型で持ち運びが困難であるなどの欠点もみられた。本邦では 2015 年に末梢神経専用の磁気刺激装置 PathleaderTM(株式会社 IFG)が販売された。100V の電源 1 つで使用可能なためリハビリテーションセンターや病棟でも使用しやすく、四肢に対する PMS が容易になった。なお、PMS を治療に用いる場合には刺激を反

表 1 喉頭挙上筋

舌骨上筋群	顎二腹筋(前腹, 後腹) 顎舌骨筋 オトガイ舌骨筋 茎突舌骨筋
舌骨下筋群	甲状舌骨筋

国立長寿医療研究センター リハビリテーション科部

[連絡先] 加賀谷 斉: 国立長寿医療研究センター リハビリテーション科部 (〒474-8511 愛知県大府市森岡町七丁目 430 番地)

TEL: 0562-46-2311 FAX: 0562-48-2373 E-mail: hkagaya2@ncgg.go.jp

受稿日: 2023 年 10 月 5 日 受理日: 2023 年 10 月 6 日

復することから、repetitive（反復性）をつけて rPMS と呼ばれている。

rPMS を行うためには、コイルの選択、刺激強度、刺激周波数、刺激－休止時間（on-off 時間）の設定が必要である。コイルは主に円形コイルまたは 8 字コイルが用いられ、円形コイルは 8 字コイルよりも深部を刺激可能であるが選択的な刺激は困難であり、8 字コイルはより選択的な局所の刺激に適している⁶⁾。刺激強度に関しては強いほど得られる筋収縮力も大きくなるが、電気抵抗の高い皮膚の侵害受容器を直接刺激しない rPMS であっても刺激強度が大きいと疼痛を生じる。筋力増強を目的とした場合にはより強い筋収縮が望ましいので、刺激時の疼痛に耐えられる強度、あるいは疼痛を感じない最大強度に設定する。刺激周波数、すなわち 1 秒間の刺激回数は 10～50 Hz 程度が用いられることが多い⁶⁾。周波数が小さいと刺激で生じる単収縮が融合せず、ふるえが生じる。長時間の連続刺激では筋疲労を生じるために、電気刺激や rPMS では刺激 off 時間の設定が必要である。rPMS ではコイルの発熱を抑えるために、電気刺激に比して off 時間を長めにすることが多い。rPMS による総刺激回数は刺激周波数、on-off 時間、刺激時間から計算され、例えば周波数 30 Hz、on 時間 2 秒、off 時間 8 秒（1 分間 6 サイクル）で 10 分間の rPMS を行えば、総刺激回数は $30 \times 2 \times 6 \times 10 = 3,600$ 発になる。off 時間を短く設定すればより短時間で同じ回数の rPMS が可能であるが、rPMS 機器に予め設定されている安全機構により機器が一定以上の熱を感知した場合には刺激が停止してしまう。当然ながら刺激強度が強いとコイルの発熱は生じやすくなるので、rPMS に要する時間を短縮するためには、刺激強度、刺激周波数、on 時間、総刺激回数を決定して、最後にその刺激が行えるような最小の off 時間を設定するのがよい。

rPMS による筋収縮は電気刺激と同じく筋内運動神経の刺激によって生じるので、末梢神経の障害があると筋収縮は減弱またはほとんど得られない。したがって、rPMS の適応は原則として末梢神経障害がないことである。一方、rPMS の禁忌は心臓ペースメーカー挿入患者、刺激部位に近接する部位に取り外しのできない磁性体がある場合である。体内金属がある場合でも MRI 撮影が可能な場合は問題ない。てんかんの既往、妊娠中は相対禁忌になる。また、rPMS 中は筋収縮が生じるので血圧、脈拍は上昇する傾向にある。しかし、rPMS は頭部への刺激より安全性は高いと考えられ、実際に rPMS に由来する重篤な問題は報告されていないが⁶⁾、磁気刺激法の安全性に関するガイドライン⁷⁾にも従う。一般的なりハビリテーション治療の中止基準に該当しないことも必要である。

Ⅲ. 舌骨上筋群の末梢磁気刺激

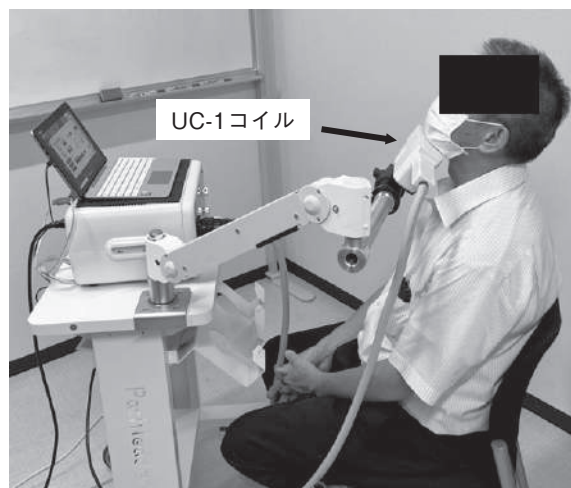
舌骨上筋群の電気刺激で問題となりうる疼痛、皺や皮膚のたるみ、髭、電極固定方法などに対処するためには、疼痛が少なく、刺激コイルを皮膚に接触させる必要がない rPMS の使用は魅力的である。しかし、rPMS は機器本体や刺激用コイルの大きさなどのためにオトガイ下という小範囲の刺激には従来用いられていなかった。2014 年 Momosaki ら⁸⁾は TMS 機器に接続したパラボリックコイル MMC-90TM（MagVenture Company, デンマーク）を用いてオトガイ下の舌骨上筋群を刺激し、刺激後に飲水速度と 1 回の嚥下量が有意に増大したことを報告した。また、彼らは 6 日間入院での rPMS と摂食嚥下リハビリテーションの併用療法により、脳卒中患者の摂食嚥下機能の改善を得たことも報告した⁹⁾。刺激強度は痛みを感じる強度の 90%であり、周波数 30 Hz、on time 2 秒、off time 28 秒、または周波数 20 Hz、on time 3 秒、off time 27 秒の条件を用いて 1 日 10 分間、すなわち 1,200 発の刺激を行っている。しかし、TMS 機器は非常に高価であり、off time が on time の 14 倍または 9 倍と非常に長かった。

われわれは、PMS 専用機器である PathleaderTMを用いたオトガイ下の舌骨上筋群の rPMS を試みた。しかし、PathleaderTMに付属する円形コイルタイプである T 型コアコイルは四肢の刺激を対象に設計されておりオトガイ下の刺激には大きすぎたので、新しいコイル（U 型コアコイル）の開発を行った。U 型コアコイルは 8 字コイルタイプであり、舌骨上筋群など局所の刺激に適した形状である。試作品の段階で健常人の舌骨上筋群を対象に周波数 30 Hz で 2 秒間の安静時 rPMS を行ったところ、舌骨は前方に 10.9 ± 2.8 mm、上方に 8.3 ± 4.1 mm（平均値 \pm SD）の挙上を得ることができた。これは健常人の液体 10 mL 嚥下時と同程度の舌骨挙上効果であり、磁気刺激中の痛みも Numerical Rating Scale（NRS）で中央値 1 と小さかった¹⁰⁾。

エビデンスの高い舌骨上筋群の筋力強化訓練として Shaker 訓練が広く知られている¹¹⁾。しかし、仰臥位で 1 分間の頭部挙上を 3 回、30 回の頭部挙上を 1 セットとして、1 日 3 セット、6 週間行うという運動負荷の大きさから本邦の高齢摂食嚥下障害患者では原法通りに行うことは極めて難しく、海外でも様々な変法が行われているのが実情である。われわれは、健常人を対象に舌骨上筋群の rPMS と頭部挙上訓練の 2 週間のランダム化比較試験を行った。rPMS 群では周波数 30 Hz、on time 2 秒、off time 8 秒、最大刺激強度の 70%（約 0.7T）で 1 日 5,400 発の刺激を行った。頭部挙上訓練の内容は Shaker 訓練と同様のメニューを用いた。その結果、2 週間後には rPMS 群では舌骨上筋筋力の有意な増加を得たが、頭部挙上訓練群では筋力増加



a. Pathleader™本体



b. UC-1コイルを用いたオトガイ下刺激

図1 舌骨上筋群 rPMS

Pathleader™ 本体には用途に応じたコイルを接続可能である。UC-1 コイルはアーム付きカートで任意の高さや角度に固定可能である。コイルは皮膚に接触させる必要はないのでマスク装着下でも刺激可能である。

傾向はみられたものの有意差はみられなかった¹²⁾。Shaker 訓練と同様に6週間行えば頭部挙上訓練群でも有意な筋力増強を得ることが可能と推測されるが、rPMSの方がより早期に筋力増強を得られることの意義は大きい。また、rPMSでは患者自身の努力は必要としないため、実現可能性もShaker 訓練よりも高いと考えられる。

最近、U型コアコイルがUC-1 コイル（株式会社 IFG）として正式に発売された。Pathleader™ と UC-1 コイルを用いた現在のわれわれの舌骨上筋群の rPMS プロトコルは、周波数 30 Hz, on time 2 秒, off time 2 秒, 疼痛なく舌骨の十分な挙上を得られる刺激強度（機器の最大刺激強度の 70~80% 程度）で、刺激回数は1セットが 30 回（所要時間 2 分）、1日 2~3 セット（1日 3,600~5,400 発）である。1セット（1,800 発）の刺激時間が正味 2 分と短時間で完遂可能である。ただし、連続で2セットを行おうとすると、コイルの発熱予防の安全機構が働いて刺激が停止するので、2 単位（40 分）の訓練を行う時には最初の 2 分間で1セット、最後の 2 分間で1セットとして2セット行っている（図1）。回復期リハビリテーション病棟入院患者などで1日3単位の訓練を行う場合には、1日3セットの rPMS も考慮する。Pathleader™ は準備に要する時間が非常に短いために、このような使用法も可能である。また、必ずしもコイルを皮膚に接触させる必要がないために、rPMS 時はペーパータオルをコイルとオトガイ下の間に挟むことで感染対策も容易である。安全機構はコイルが熱くなる前に発動するために、実際にオトガイ下のコイルに熱さを感じることはない。また、認知症、認知機能障害を持つ患者に対する間接訓練は困難なことも多いが、rPMS は本人の努力は要せず刺激中の痛みも少ないために、指示の

入らない患者に対する間接訓練として用いることもできる。

以上は安静時の rPMS であるが、嚥下反射に同期させて rPMS を行えば嚥下反射中の舌骨挙上を増大させる可能性がある。動作に刺激を同期させる方法として筋電図トリガー方式がある。嚥下反射時に舌骨上筋群は収縮するので、舌骨上筋群の収縮開始を筋電図で捉えて rPMS を行えば嚥下反射中の刺激が可能と思われるが、オトガイ下には rPMS のためのコイルが設置されるために舌骨上筋群に電極を貼付することは実際には困難である。嚥下反射時には舌骨上筋群に続いて舌骨下筋群も収縮するので、われわれは、舌骨下筋群である胸骨舌骨筋上に表面電極を設置した筋電トリガー型 rPMS を健常人 20 例で行った。rPMS は周波数 30 Hz, 疼痛なく安静時の舌骨挙上が十分に得られる刺激強度とした。嚥下時の胸骨舌骨筋の Root Mean Square (RMS) 波形から閾値を決め、胸骨舌骨筋波形が閾値以上になったときから 2 秒間 rPMS を与えたところ、磁気刺激は全例嚥下反射中に開始された。液体 10 mL 嚥下時に嚥下反射中の舌骨の前方最大移動距離は磁気刺激併用で有意に大きくなり、舌骨移動時間も磁気刺激併用で有意に延長した。さらに、高解像度マノメトリーで評価した上部食道入口部開大幅は磁気刺激併用により有意に大きくなった¹³⁾。以上から、嚥下反射に同期させた筋電トリガー型 rPMS も実現可能と思われる。

IV. おわりに

2022 年の摂食嚥下障害に対する rPMS のシステマティックレビューでは7つの論文が取り上げられているが、すべて本邦からの論文である¹⁴⁾。したがって、この分野では

本邦が世界の最先端にある。今後、rPMSを用いた舌骨上筋群刺激療法が本邦だけでなく世界に広まっていくことが期待される。

文 献

- 1) 川村次郎：電気療法の歴史。臨整外，30：147-153，1995.
- 2) Tan C, Liu Y, Li W, et al：Transcutaneous neuromuscular electrical stimulation can improve swallowing function in patients with dysphagia caused by non-stroke diseases：a meta-analysis. J Oral Rehab, 40：472-480, 2013.
- 3) Chen YW, Chang KH, Chen HC, et al：The effects of surface neuromuscular electrical stimulation on post-stroke dysphagia：a systemic review and meta-analysis. Clin Rehabil, 30：24-35, 2016.
- 4) Alamer A, Melese H, Nigussie F：Effectiveness of neuromuscular electrical stimulation on post-stroke dysphagia：A systematic review of randomized controlled trials. Clin Interv Aging, 15：1521-1531, 2020.
- 5) 出江紳一，八島建樹：末梢神経連続パルス磁気刺激の製品化。Bio Clinica, 30：1169-1173, 2015.
- 6) Beaulieu LD, Schneider C：Repetitive peripheral magnetic stimulation to reduce pain or improve sensorimotor impairments：A literature review on parameters of application and afferents recruitment. Neurophysiol Clin, 45：223-237, 2015.
- 7) 臨床神経生理学学会 脳刺激法に関する小委員会編：磁気刺激法の安全性に関するガイドライン（2019年版）。臨床神経生理学，47：126-130，2019.
- 8) Momosaki R, Abo M, Watanabe S, et al：Functional magnetic stimulation using a parabolic coil for dysphagia after stroke. Neuromodulation, 17：637-641, 2014.
- 9) Momosaki R, Abo M, Watanabe S, et al：Repetitive peripheral magnetic stimulation with intensive swallowing rehabilitation for poststroke dysphagia：An open-label case series. Neuromodulation, 18：630-634, 2015.
- 10) Kagaya H, Ogawa M, Mori S, et al：Hyoid bone movement at rest by peripheral magnetic stimulation of suprahyoid muscles in normal individuals. Neuromodulation, 22：593-596, 2019.
- 11) Shaker R, Easterling C, Kern M, et al：Rehabilitation of swallowing by exercise in tube-fed patients with pharyngeal dysphagia secondary to abnormal UES opening. Gastroenterology, 122：1314-1321, 2002.
- 12) Ogawa M, Kagaya H, Nagashima Y, et al：Repetitive peripheral magnetic stimulation for strengthening of the suprahyoid muscles：A Randomized controlled trial. Neuromodulation, 23：778-783, 2020.
- 13) Nagashima Y, Kagaya H, Toda F, et al：Effect of electromyography-triggered peripheral magnetic stimulation on voluntary swallow in healthy humans. J Oral Rehabil, 48：1354-1362, 2021.
- 14) Hwang NK, Park JS, Choi JB, et al：Effect of peripheral magnetic stimulation for dysphagia rehabilitation：A systematic review. Nutrients, 14：3514, 2022.