

6

摂食嚥下障害に対する電気刺激療法

Electrical Stimulation for Treatment of Dysphagia

井上 誠*

Makoto Inoue

Key words : 舌骨筋／表面刺激／筋力強化／中枢神経への作用

要旨

リハビリテーションの分野において、電気刺激療法は鎮痛や筋力強化などの目的で古くから使用されてきた。筋力強化をめざした電気刺激療法は、脳血管疾患患者の摂食嚥下障害に対する理学療法として浸透してきたが、その効果に関するエビデンスはいまだ十分に得られていない。一方、筋力強化とは別に、感覚神経への刺激を通して、中枢神経系に働きかけることによって嚥下運動にかかわる中枢神経系の改善をめざした治療法もある。本稿では、電気刺激療法の種類や原理を紹介したうえで、中枢強化を目的とする電気刺激療法にも触れ、摂食嚥下障害への応用について、今後の展望と課題を解説する。

筋力強化を目的とする
電気刺激療法

生体に電流を流すことにより生じる神経・筋の興奮などを通して、関連する運動機能を強化しようとするものであり、神経筋電気刺激療法 (neuromuscular electrical stimulation) とも呼ばれる。これには、治療的電気刺激 (therapeutic electrical stimulation : TES)、機能的電気刺激 (functional electrical stimulation : FES) などがある。TES は患者自身の随意運動能力の回復をめざす治療法という。痙性に伴う過度の筋緊張の軽減、筋・関節可動域の拡大、随意性運動の向上、廃用性筋萎縮の改善などが目的である。FES では、中枢性の出力が減少した末梢運動神経に対して電気刺激を行う。刺激により得られる筋収縮を実際の動作に合わせることで、機能強化を図る。

* 新潟大学大学院医歯学総合研究科
摂食嚥下リハビリテーション学分野
(〒951-8514 新潟県新潟市中央区学校町通
2-5274)
E-mail : inoue@dent.niigata-u.ac.jp

刺激には、表面電極を用いる方法と、ワイヤー電極などの埋め込み電極を用いる方法があり、電気刺激に対して最も反応しやすい部位である運動点 (motor point) をターゲットとする。通常、運動神経は身体深部を走行していることが多いため、皮膚表面からの刺激は容易でない。運動点は、この神経筋枝が深部から表層の筋に入り込んでいく部位であり、この部位上の皮膚に電極を置いて刺激することで筋収縮が得られる。なお、神経への刺激を間接刺激というのに対して、筋への刺激には直接刺激があり、筋線維を脱分極させることも可能であるが、その電流量は神経軸索の脱分極に要する電流量よりもかなり大きい。

中枢強化を目的とする
電気刺激療法

電気刺激療法には、筋力強化とは別に中枢強化を目的として感覚神経刺激を行うものもある。これは、刺激に伴う即時効果ではなく、刺激後に誘導される中枢神経系の可塑性変化を期待するものである。

代表的な方法に、咽頭粘膜への電気刺激がある。下咽頭粘膜の一部は上喉頭神経によって支配されている。上喉頭神経への電気刺激によって嚥下反射が容易に誘発可能なことから、本法は少なからず脳幹延髄の嚥下のパターン発生器に影響するものと考えられる^{1, 2)}。しかし、脳幹への直接効果が得られる刺激が数十 Hz であるのに対し、中枢強化のための刺激は数 Hz と低頻度である。この違いは、ターゲットが脳幹神経路にあるか大脳皮質であるかだけでなく、刺激の直接効果を求めるのか、刺激後の中枢神経系の可塑性変化を期待するのかにも依存する。低頻度刺激では上位脳、ことに反対側大脳半球の興奮が起こることが証明されている。刺激後効果に関するメカニズムに関してはいまだ不明であるが、大脳皮質の他の部位で示されている long term potentiation が関与しているのかもしれない³⁾。

摂食嚥下障害への応用

摂食嚥下障害に対して行われる筋力強化を目的とした電気刺激療法は、舌骨喉頭複合体をターゲットとした表面刺激が最も知られている（図 1）。過去には埋め込み電極を用いる方法⁴⁾が紹介されたが、生体への侵襲が大きく、電極挿入にあたっては熟練を要すること、頭頸部の動きにより電極も動いてしまい、同一部位の刺激を継続するのが難しいことなどの理由から、行われることがなくなった。他方、表面電極を用いた経皮的電気刺激療法は、生体への侵襲が少なく簡便ではあるが、選択的な筋への刺激は不可能であり、実際には表在する筋にしか効果は期待できない。

筋力強化を目的とした経皮的電気刺激による TES や FES により、摂食嚥下障害が改善したという臨床報告がある。刺激の即時効果を検討したものとして、Ludlow ら⁵⁾は嚥下咽頭期障害をもつ患者に対して感覚閾値程度の電気刺激を与えながら

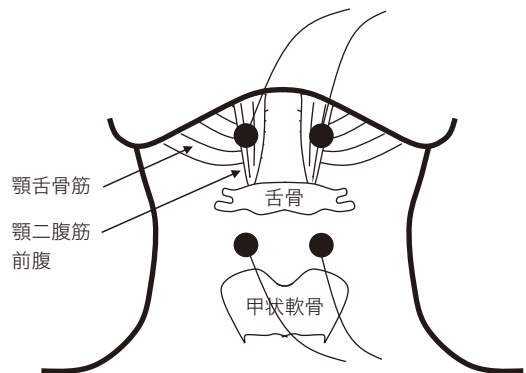


図 1 表面電極による電気刺激療法時の電極貼付部位の例

黒丸は電極。左右の舌骨上筋群、舌骨下筋群（図省略）をターゲットとして双極電極を貼付する。

嚥下をさせると、喉頭侵入や誤嚥頻度が減少したと報告している。一方、刺激の中・長期効果に関しては、統一した結論が得られていない⁶⁻¹⁵⁾（表 1）。その理由として、患者群、刺激部位や様式、介入期間、刺激時の被験者へのタスクなどが異なることが考えられる。また、過去の報告では適用症例のほとんどが脳血管疾患であることから、末梢神経障害、頭頸部腫瘍術後、認知症、その他の中枢・末梢疾患に対してどのように適用されるべきかについてはいまだ不明のままである。

中枢強化を目的とした咽頭粘膜電気刺激療法では、脳梗塞急性期後に残存する摂食嚥下障害に対して効果があるという報告がある。そこでは、刺激に伴う健側半球の興奮性増加が示唆されており、経頭蓋磁気刺激（transcranial magnetic stimulation : TMS）による咽頭筋の誘発電位の振幅増加^{16, 17)}、嚥下時食塊移送の改善^{16, 17)}などが挙げられている。近年、電気刺激に加えて咽頭電気刺激と TMS¹⁸⁻²⁰⁾、咽頭電気刺激と溶液刺激²¹⁾を組み合わせることで、刺激効果を増強させるという取り組みが紹介されている。

表1 電気刺激療法の長期効果をみた研究

著者	年	患者	刺激	介入・ 評価期間	コントロール・ 比較群	改善	変化なし
Ortega et al	2016	38 名の高齢者、平均年齢 80.5 歳、嚥下障害あり	80 Hz、パルス時間 0.3 ミリ秒、感覚閾値レベル	10 日間	TRPV1 agonist である capsaicin 投与	いずれの群も VE 上の所見が改善	
Heijnen et al	2012	85 名のパーキンソン病患者、平均年齢 68 歳、認知機能問題なし	80 Hz、パルス時間 0.7 ミリ秒を 1 日 30 分	週 5 回を 3~5 週間	古典的嚥下訓練	Dysphagia Severity Scale	グループ間での差はなし
Gallas et al	2010	11 名の脳卒中患者、平均年齢 68 歳、罹病期間 8 週間以上	80 Hz、運動閾値以下の刺激を 1 日 1 時間	1 週間		嚥下反応までの潜時、PA スケール、咽頭残留	TMS による咽頭筋誘発電位
Bogaardt et al	2009	25 名の MSA 患者、平均年齢 53 歳、平均罹病期間 16.5 年	30 Hz、パルス時間 0.2 ミリ秒、1 日 20 分、週 1 セッション	3 週間		液体嚥下時の PA スケール、咽頭残留など	
Lim et al	2009	36 名の脳卒中患者、介入群は平均年齢 67.8 歳、対照群は 60.8 歳、いずれも認知機能に問題なし	温度刺激に加えて 80 Hz、7 mA を 1 日 1 時間	週 5 回を 4 週間	温度刺激のみ	PA スケール、咽頭通過時間、経管栄養脱離	主観的嚥下困難感
Bülow et al	2008	25 名の脳卒中患者、50~80 歳、脳幹梗塞を含まず、発症後 3 カ月以上、経管栄養の者を含まず、認知機能に問題なし	VitalStim によって提唱されたプログラムによる、平均 13 mA を 1 日 60 分	週 5 回を 3 週間	古典的嚥下訓練	なし	
Permsirivanich et al	2009	23 名の脳卒中患者、介入群は平均年齢 64.5 歳、対照群は 64.7 歳、罹病期間 2 週間以上、嚥下咽頭期に問題あり	80 Hz、パルス時間 0.7 ミリ秒を 1 日 1 時間	週 5 回を 4 週間	古典的嚥下訓練	FOIS	
Ryu et al	2009	26 名の咽頭部腫瘍患者、いずれも摂食嚥下障害の症状を呈する、介入群は平均年齢 63.4 歳、対照群は 60.8 歳	80 Hz、パルス時間 0.7 ミリ秒を 1 日 30 分	週 5 回を 2 週間	古典的嚥下訓練	Functional Dysphagia Scale	
Oh et al	2007	8 名の脳卒中患者、平均年齢 57 歳、嚥下時咽頭残留や誤嚥を認めるなどの機能障害を有する	70 Hz、パルス時間 0.3 ミリ秒を 1 日 1 時間	週 5 回を 2 週間		DOSS、VF 上の評価	TMS による輪状咽頭筋マッピング
Shaw et al	2007	18 名の摂食嚥下障害患者、平均年齢 59.3 歳	異なる部位に電極貼付、1 日 1 時間	1~21 カ月		Dysphagia Severity Score、経口摂取、誤嚥や咽頭残留など	

今後の展望と課題

筋力強化を目的とした電気刺激療法のターゲットとなる舌骨筋は、主に速筋成分からなり²²⁾、速筋の萎縮を主症状として筋力低下が引き起こされるといわれることから、表面電気刺激が主に速筋成分への効果をもたらすことが期待される。一方、表面電極を用いた通常の電気刺激では、遅筋が十分に活動するという証明はなされていない。また、電気刺激によって得られる筋収縮や感覚刺激は生

理的なものではなく、さらに真の刺激部位を知ることとは難しい。生理的な筋収縮においては、サイズの原理に従って小さな運動単位から活動する。しかし、電気刺激によって興奮した運動神経のもとでは、サイズに関係なく無秩序に、もしくは生理的な原理に反して筋収縮を得る可能性がある。今後は、対象とする疾患を見極めて使用するだけでなく、刺激のターゲットがどこにあるのか、どのような効果を期待するものであるのかを十分に理解したうえで本法の臨床効果が検証されていくであろう²³⁾。

文献

- 1) Tsukano H, Taniguchi H, Hori K, Tsujimura T, Nakamura Y, Inoue M : Individual-dependent effects of pharyngeal electrical stimulation on swallowing in healthy humans. *Physiol Behav* 2012 ; **106** : 218-223
- 2) Tsuji K, Tsujimura T, Magara J, Sakai S, Nakamura Y, Inoue M : Changes in the frequency of swallowing during electrical stimulation of superior laryngeal nerve in rats. *Brain Res Bull* 2014 ; **111** : 53-61
- 3) Stefan K, Kunesch E, Cohen LG, Benecke R, Classen J : Induction of plasticity in the human motor cortex by paired associative stimulation. *Brain* 2000 ; **123** (Pt 3) : 572-584
- 4) Burnett TA, Mann EA, Stoklosa J B, Ludlow CL : Self-triggered functional electrical stimulation during swallowing. *J Neurophysiol* 2005 ; **94** : 4011-4018
- 5) Ludlow CL, Humbert I, Saxon K, Poletto C, Sonies B, Crujido L : Effects of surface electrical stimulation both at rest and during swallowing in chronic pharyngeal Dysphagia. *Dysphagia* 2007 ; **22** : 1-10
- 6) Oh BM, Kim DY, Paik NJ : Recovery of swallowing function is accompanied by the expansion of the cortical map. *Int J Neurosci* 2007 ; **117** : 1215-1227
- 7) Shaw GY, Sechtem PR, Searl J, Keller K, Rawi TA, Dowdy E : Transcutaneous neuromuscular electrical stimulation (VitalStim) curative therapy for severe dysphagia : myth or reality? *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2007 ; **116** : 36-44
- 8) Bülow M, Speyer R, Baijens L, Woisard V, Ekberg O : Neuromuscular electrical stimulation (NMES) in stroke patients with oral and pharyngeal dysfunction. *Dysphagia* 2008 ; **23** : 302-309
- 9) Bogaardt H, van Dam D, Wever NM, Bruggeman CE, Koops J, Fokkens WJ : Use of neuromuscular electrostimulation in the treatment of dysphagia in patients with multiple sclerosis. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2009 ; **118** : 241-246
- 10) Lim KB, Lee HJ, Lim SS, Choi YI : Neuromuscular electrical and thermal-tactile stimulation for dysphagia caused by stroke : a randomized controlled trial. *J Rehabil Med* 2009 ; **41** : 174-178
- 11) Permsirivanich W, Tipchatyotin S, Wongchai M, Leelamanit V, Setthawatcharawanich S, Sathirapanya P, Phabphal K, Juntawises U, Boonmeeprakob A : Comparing the effects of rehabilitation swallowing therapy vs. neuromuscular electrical stimulation therapy among stroke patients with persistent pharyngeal dysphagia : a randomized controlled study. *J Med Assoc Thai* 2009 ; **92** : 259-265
- 12) Ryu JS, Kang JY, Park JY, Nam SY, Choi SH, Roh JL, Kim SY, Choi KH : The effect of electrical stimulation therapy on dysphagia following treatment for head and neck cancer. *Oral Oncol* 2009 ; **45** : 665-668
- 13) Gallas S, Marie JP, Leroi AM, Verin E : Sensory transcutaneous electrical stimulation improves post-stroke dysphagic patients. *Dysphagia* 2010 ; **25** : 291-297
- 14) Heijnen BJ, Speyer R, Baijens LW, Bogaardt HC : Neuromuscular electrical stimulation versus traditional therapy in patients with Parkinson's disease and oropharyngeal dysphagia : effects on quality of life. *Dysphagia* 2012 ; **27** : 336-345
- 15) Ortega O, Rofes L, Martin A, Arreola V, López I, Clavé P : A Comparative Study Between Two Sensory Stimulation Strategies After Two Weeks Treatment on Older Patients with Oropharyngeal Dysphagia. *Dysphagia* 2016 ; **31** : 706-716
- 16) Fraser C, Power M, Hamdy S, Rothwell J, Hobday D, Hollander I, Tyrrell P, Hobson A, Williams S, Thompson D : Driving plasticity in human adult motor cortex is associated with improved motor function after brain injury. *Neuron* 2002 ; **34** : 831-840
- 17) Jayasekeran V, Singh S, Tyrrell P, Michou E, Jefferson S, Mistry S, Gamble E, Rothwell J, Thompson D, Hamdy S : Adjunctive functional pharyngeal electrical stimulation reverses swallowing disability after brain lesions. *Gastroenterology* 2010 ; **138** : 1737-1746
- 18) Michou E, Mistry S, Jefferson S, Singh S, Rothwell J, Hamdy S : Targeting unlesioned pharyngeal motor cortex improves swallowing in healthy individuals and after dysphagic stroke. *Gastroenterology* 2012 ; **142** : 29-38
- 19) Michou E, Mistry S, Jefferson S, Tyrrell P, Hamdy S : Characterizing the mechanisms of central and peripheral forms of neurostimulation in chronic dysphagic stroke patients. *Brain Stimul* 2014 ; **7** : 66-73
- 20) Michou E, Williams S, Vidyasagar R, Downey D, Mistry S, Edden RA, Hamdy S : fMRI and MRS measures of neuroplasticity in the pharyngeal motor cortex. *Neuroimage* 2015 ; **117** : 1-10
- 21) Magara J, Michou E, Raginis-Zborowska A, Inoue M, Hamdy S : Exploring the effects of synchronous pharyngeal electrical stimulation with swallowing carbonated water on cortical excitability in the human pharyngeal motor system. *Neurogastroenterol Motil* 2016 ; **28** : 1391-1400
- 22) Korfage JA, Schueler YT, Brugman P, Van Eijden TM : Differences in myosin heavy-chain composition between human jaw-closing muscles and supra- and infrahyoid muscles. *Arch Oral Biol* 2001 ; **46** : 821-827
- 23) Barikroo A, Carnaby G, Crary M : Electrical stimulation therapy for dysphagia : a follow-up survey of USA dysphagia practitioners. *Int J Rehabil Res*, 2017 [Epub ahead of print]