

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

摂食嚥下リハビリテーションにおける電気刺激法

総説▶

永見慎輔

Shinsuke Nagami

要旨 摂食嚥下障害に対して干渉波を活用した経皮的干渉波刺激療法 (IFC-stimulation) が適用を拡大している。前頸部に貼付した電極から干渉波を通電し、深部に刺激を与えることができる装置が開発され、不快感を小さくして咽頭や喉頭への感觉刺激が可能となった。本装置では、嚥下反射と咳嗽反射の潜時が改善する可能性が示唆されている。しかし、実臨床のエビデンスは不足しており、今後さらなる有用性の検討が必要である。

また、摂食嚥下障害に対する神経筋電気刺激療法 (NMES) は、国際的に有効性が認知され、広範な疾患を対象として用いられている。NMES は、感覺神経刺激 (sNMES) と神経・筋刺激 (mNMES) を行う手法が存在している。国内における NMES の主な使用方法としては、筋力の増大を目的とした mNMES が主に介入で用いられている。その過程で電極の配置、刺激周波数、持続時間、刺激強度といった要素が筋収縮に影響を及ぼすことが確認されている。さらに、脳血管障害に対する NMES の効果には広範なエビデンスが存在している。いずれにしても機器の特性を正確に理解しつつ用いることが、機能改善につなげるうえで重要と考える。

キーワード 摂食嚥下障害、神経筋電気刺激療法、経皮的干渉波刺激療法

I. はじめに

日本は超高齢社会を迎へ、2025年には高齢化率が約30%、2040年には約40%に達する見込みである。高齢化とともに、嚥下障害患者は増加すると予想されており、言語聴覚士は摂食嚥下障害を有する患者と臨床の最前線で向き合うこととなる。実際に、摂食嚥下障害は誤嚥性肺炎の原因となり、生命に対する重大なリスクとなる。しかしながら、増加する高齢者に相反して、医療・介護の現場では慢性的な人手不足が問題となっており、十分な介入が施せない状況にある。このような課題に対処するため、摂食嚥下リハビリテーションの効率化や的確化が課題となっている。

近年、摂食嚥下障害に対して干渉波を活用した経皮的干渉波刺激療法 (IFC-stimulation) が適用範囲を拡大している。具体的には比較的安価な干渉波刺激装置が開発された影響が大きい。また、従来から頸部への神経筋電気刺激療法 (Neuromuscular Electrical Stimulation : NMES) が国際的に広く実施してきた。この治療法は英国においては診療ガイドラインである NICE (National Institute for Health and Care Excellence : 国立医療技術評価機構) に

記載されており、主に脳卒中患者に対して利益があると記載されている。日本では脳卒中治療ガイドライン 2021 (改訂 2023) で一部触れられているが、摂食嚥下障害リハビリテーションにおける NMES の普及率は乏しいのが現状である。このような国際的な動向を踏まえ、摂食嚥下リハビリテーションに従事する言語聴覚士としては、適用と方法についての理解を深める必要がある。本稿では電気刺激療法に対する、これまでの知見とメカニズムについて概説する。

II. 干渉波電気刺激療法について

干渉波電気刺激療法 (Interferential Current Stimulation : IFC-stimulation) について簡単に説明すると、2つの異なる周波数を持った電気信号を送り、その信号を交差させることで「波のうねり」を作っている。この「うねり」は人体の深部を刺激するのに役立たせることができる。また、この方法には主要な2つの周波数がある。ひとつは「キャリア周波数」と呼ばれ、もうひとつはこの「うねり」の周波数 (周波数差) である。この周波数差を「ビート周波数」と呼ぶ。中周波の干渉波によって、皮膚がくすぐったく感じ、ザワザワとした感覚を感じる。これは多くの人



図1 IFC device Gentle Stim[®]

にとって、パルス波がもたらすピリピリとした感覚よりも快適である。この技術に基づいて作られた商品であるジェントルスティム[®]（株式会社フードケア）（図1）が販売されており、多くの医療機関で用いられている。

さらに、群発（バースト）周期をもった中周波を、波として干渉させるのではなく電気回路で合成することも可能であり、これをバースト変調交流波（burst-modulated alternating current : BMAC）と呼ぶ¹⁾。この手法と通常の低周波刺激（パルス波）との主な違いは、皮膚に対する感じ方が異なることと、どれだけ深く作用するかである。したがって、この手法を利用している機器は、電気刺激がパルス波より快適であるとされている。BMACは理論的に体の深部まで届くとされているが、電気がどれだけ体内に深く届くかは、その持続時間（位相持続時間）によっても変化する。つまり、BMACとパルス波の大きな違いは、どうやって体内の受容器に作用するかである。受容器は、強い刺激を受けると反応し、弱い刺激では反応しないことがある。したがって、BMACの場合、複数の小さな刺激が加わることで、受容器がより強く反応しやすくなるという現象が起こる。このため、BMACは特定の受容器に作用する治療においては有用であると考えられている。

III. IFC-stimulation のこれまでの知見

嚥下反射とは、喉の粘膜が何らかの刺激を受けると、特定の神経（上喉頭神経、舌咽神経）を通じて延髄の孤束核に信号が送られ、一定の条件が整うとスイッチが入るように誘発される仕組みである。また、刺激を送る周波数によって、どの神経が反応するかが変わることがわかっている。例えば、嚥下反射に関連する神経線維は、一般に A δ 線維と呼ばれている²⁾。特に、2,000 Hz, 250 Hz, 5 Hz の刺激周波数がそれぞれ A β （触覚や圧力に関与）、A δ （嚥下、

痛み、温度に関与）、C 線維（痛みや温かさ）を刺激すると言われているが³⁾、動物実験の結果から嚥下を誘発するには、30~55 Hz の刺激周波数が有効であると考えられている^{2,4)}。IFC-stimulation 機器ではキャリア周波数 2,000 Hz, ビート周波数 50 Hz が採用されている。Umezaki らはラットを用いた動物実験によって、IFC-stimulation が SLN（上喉頭神経）を刺激して嚥下潜時を変化させることを検証しており、嚥下惹起性が改善することを示している⁵⁾。さらに、越久らは、嚥下潜時が変化するか、IFC-stimulation を用いて、健常者で実験を行っている。IFC-stimulation 群では、咽頭に水を 3 mL/min 注入し続けているときの 5 分間の嚥下回数が対照群（2,000 Hz の中周波刺激）に比べて増加することを示している⁶⁾。また、われわれは、IFC-stimulation を誤嚥性肺炎の既往がある患者に一定期間（1 日 30 分、週 5 日、3 週間）嚥下リハビリテーションと併用して行っても、対照群に比べてバイタルサインの安定性に影響を与えることはなく、安全に使用できることを報告した⁷⁾。さらに、誤嚥性肺炎患者に対するランダム化比較試験では、IFC-stimulation を行うと咳を誘発する閾値が低くなり、食事の摂取量も増加するとの効果があると報告されている⁸⁾。この装置の特徴としては、頸部に対する不快感が弱く、皮膚に対する負担も少ないため、患者に適応しやすいことが利点とされている。現状では、脳血管障害、パーキンソン病、COPD、認知症、誤嚥性肺炎などに対する知見が存在している⁹⁻¹³⁾。さらに小児に適応した症例報告も存在する¹⁴⁾。理論的には摂食嚥下リハビリテーションの一環として活用できる装置だと考えられるが、ヒトにおける効果を証明するには、今後も臨床研究における検証が必要である。しかし、感覚閾値で適応することに特化した装置として有望であることは明らかであるため、今後の成果が期待される。

IV. NMES について

摂食嚥下リハビリテーションで用いられる NMES は、求心性の神経にアプローチする方法と舌骨筋群の筋力増強を促進し、嚥下機能の改善を目指す方法などが用いられている。具体的には NMES は、運動閾値（Motor Neuromuscular Electrical Stimulation : mNMES）で用いる場合と、感覚閾値（Sensory Neuromuscular Electrical Stimulation : sNMES）で用いる場合がある。NMES にはすでに多くの研究報告があり、メタ解析でも嚥下機能の改善効果が認められている¹⁵⁻¹⁷⁾。NMES は IFC-stimulation 以前に登場し、すでに多数の臨床研究が実践されている。例えば、10 年前に米国の SLP（Speech Language Pathologist）に対するアンケート調査が行われており、NMES は SLP が最も高頻度に使用する摂食嚥下訓練として報告されてい

る¹⁸⁾。しかし、わが国の言語聴覚士と摂食嚥下障害看護認定看護師を対象に行われた、摂食嚥下リハビリテーションの実態調査のアンケートでは、NMES を用いた介入が最も低頻度だったのが現状である¹⁹⁾。

V. NMES を感覚閾値で用いる方法

NMESにおいて感覚神経をターゲットとする刺激方法(sNMES)がある。NMES装置を用いて感覚閾値で刺激を行う場合、刺激強度は筋肉が収縮しないレベルに設定する。Ludlowらは、mNMESが嚥下時の舌骨挙上を阻害するように作用し、誤嚥や咽頭残留は運動閾値を超える最大許容強度の刺激では改善が得られなかつたと報告した²⁰⁾。また、感覚閾値レベルの刺激(sNMES)では誤嚥や咽頭残留が有意に軽減したと報告している。さらに、Hamadaらは、急性期の脳梗塞患者に通常の嚥下リハビリテーションに加えてsNMESを行った結果、呼吸器感染症の合併頻度が有意に減少したと報告している²¹⁾。現状としては、sNMESはIFC-stimulationとは、受容器や感覚神経に対する効果が異なる可能性がある。しかしながら、sNMESについてもヒトに対する臨床研究が多数行われており、その効果は明白であるため、積極的な利用が望まれる。

VI. NMES を運動閾値で用いる方法

わが国で広く浸透しているNMESの用い方は、運動閾値で使用する方法(mNMES)である。mNMESは舌骨筋群の筋力増強を促進し、嚥下機能を改善することを目的としている。例えば、Rofesらは脳梗塞後の嚥下障害に対して、mNMESと運動閾値の75%強度でNMESを1日1時間、10日間行った結果、嚥下機能が改善したと報告している²²⁾。

摂食嚥下障害に対するNMESで、舌骨筋群をターゲットとする場合、刺激周波数、持続時間、電極の貼付方について検討する必要があるが、その方法は多様である。また、システムティックレビューとメタ解析にて、NMESにおける電極の配置、刺激周波数、持続時間、刺激強度等を検討した報告も存在する²³⁾。実際には、mNMESとして用いる場合、前頸部の皮膚に配置された電極からパルス波を流し、運動神経を刺激して筋肉を収縮させる。電気や磁気を用いない通常の嚥下運動においては主に遅筋(Type I)線維から筋収縮が起こるが、NMESの利用においては速筋(Type II)線維からの収縮が誘発される。実際に、嚥下運動に関与する舌骨喉頭領域の多くの筋には速筋成分が多く、NMESの利用は生理的な収縮の誘発に有用であるとされている。さらに、NMESで誘発される筋収縮の強度は、刺激周波数、持続時間、そして刺激強度と関連している。最

適な筋収縮を誘発するための刺激周波数は50~100Hzの低周波であると報告されている²⁴⁾。加えて、低周波の中でも周波数によって筋線維の収縮は異なると考えられている。実際に周波数が40~50Hz以下に下がると遅筋線維が収縮し、筋疲労が少なくなる。対照的に、60Hz以上の高周波数では速筋線維が収縮し、筋疲労が生じやすくなると考えられている²⁵⁾。そのため、周波数や適切な刺激時間などに対する理解が必要である。

NMESの刺激時間は通常20~30分が推奨されている。先行研究においても20~60分の範囲で適応したと報告されており、特に30~60分が最も効果的に用いられる刺激時間である。NMESの使用に際しては1日1回の短時間の適用でも効果が認められている。舌骨上下筋群に対するNMESの適用は、運動閾値による筋収縮の誘発を目的として行われる。刺激の強度が高いほど筋収縮が強くなるが、患者の不快感や筋疲労につながる可能性も考慮すべきである。

そして、電極の配置は、NMESの効果に重要な影響がある。舌骨喉頭領域に対するNMESでは、舌骨喉頭複合体が電極配置の主要なターゲットである。電極の配置方法には議論があるが、主な貼付位置は舌骨上筋群に水平に貼る方法である。舌骨下筋群に貼る方法や、舌骨上下筋群の両方に貼る方法も存在している。高齢者においては喉頭下垂の影響を受けて舌骨下筋群に貼付できないことが多いのが現状である。しかしながら、電極の配置方法による効果は多様であるとされており、製品ごとに電極のサイズや配置範囲が異なるため、製品特性を理解したうえで電極配置を考慮する必要がある。

VII. NMES の使用意義と国内外の動向

国内外でさまざまなNMES装置が発売されているため、その一部のみを紹介する。まず、Vital Stim Plus®(株式会



図2 NMES device : VitalStim® plus



図3 NMES device イトー poststim®

表1 NMESとIFC-stimulationの特徴

	NMES		IFC-stimulation
製品名	バイタルスティムプラス	イトーpostim (Ampcare ESPTM)	ジェントルスティム
刺激ターゲット	感覚神経、運動神経・筋	運動神経・筋	感覚神経
出力	0~25 mA	0~80 mA	0~3.4 mA
治療時間	30分、60分 (1~240分)	30分 (1~60分)	15分、30分 5~30分
パルス幅	300 μs (60~300 μs)	300 μs (60~300 μs)	—
刺激周波数	80 Hz (1~80 Hz)	30 Hz (20, 30, 50, 80, 100 Hz)	50 Hz (2050と2000 Hzの差分、ビート周波数)
刺激波形	二相性対称性パルス波	二相性対称性パルス波	干渉波
On 時間	59秒 (1~99秒)	5秒 (0.1~60秒)	—
Off 時間	1秒 (1~99秒)	15, 20, 25秒 (0~30秒)	—
直接訓練	○	×	○
特徴	感覚神経刺激、 神経・筋刺激	神経・筋刺激	感覚神経刺激 不快感が小さい

NMES : neuromuscular electrical stimulation, FC-stimulation : interventional current stimulation

社インターリハ)(図2)という製品がある。これはアメリカのFDA(Food and Drug Administration)から認可を受けている製品であり、国際的に広く使用されている。Vital Stim Plusの刺激波形は二相性対称性パルス波が用いられており、刺激強度は、0~25 mAで調整可能で、感覚閾値と運動閾値の両方で使用されている。また、sEMG(表面筋電位)を装備しているため筋の機能を客観的に評価できる。さらに、イトーpostim®(株式会社伊藤超音波)(図3)と名付けられたNMESデバイスも市場に登場しており、Ampcare ESP™による介入が推奨されている。これにより、Functional Oral Intake Scale(FOIS)、Penetration Aspiration Scale(PAS)、SWAL-QOLの改善が確認されている^{26,27)}。しかし、多数のメーカーからNMES機器が発売されているため、それぞれの利点、欠点を確認したうえで使用されることが望ましい。すべての商品を比較することは困難であるため、費用と効用を踏まえて購入に至ることが重要と考える。成人大けでなく小児期の摂食嚥下障害を有する患者に対し、NMESを導入する報告も増加しているが、フォローアップ期間が短く、現状では有効性は確立されていない²⁸⁾。

VII.まとめ

IFC-stimulationとNMESの特徴について概説した。摂食嚥下リハビリテーションにおいて、電気刺激療法は有用な方法であるため、積極的な導入が望まれる。IFC-stimulationとNMES機器の特徴(表1)を理解した上で、適応を検討しつつ導入する必要がある。

文献

- Ward AR : Electrical stimulation using kilohertz frequency alternating current. Phys Ther, 89 : 181-190, 2009.
- Jean A : Brain stem control of swallowing : Neuronal network and cellular mechanisms. Physiological Reviews, 81 : 929-969, 2001.
- Koga K, Furue H, Rashid MH, et al : Selective activation of primary afferent fibers evaluated by sine-wave electrical stimulation. Mol Pain, 1 : 13, 2005.
- Saito Y, Ezure K, Tanaka I : Difference between hypoglossal and phrenic activities during lung inflation and swallowing in the rat. J Physiol, 544 : 183-193, 2002.
- Umezaki T, Sugiyama Y, Fuse S, et al : Supportive effect of interventional current stimulation on susceptibility of swallowing in guinea pigs. Exp Brain Res, 236(10) : 2661-2676, 2018.

- 6) Furuta T, Takemura M, Tsujita J, et al : Interferential electric stimulation applied to the neck increases swallowing frequency. *Dysphagia*, 27(1) : 94-100, 2012.
- 7) Nagami S, Maeda K, Fukunaga S, et al : Safety of transcutaneous electrical sensory stimulation of the neck in terms of vital parameters in dysphagia rehabilitation. *Sci Rep*, 9 (1) : 13481, 2019.
- 8) Maeda K, Koga T, Akagi J : Interferential current sensory stimulation, through the neck skin, improves airway defense and oral nutrition intake in patients with dysphagia : a double-blind randomized controlled trial. *Clin Interv Aging*, 12 : 1879-1886, 2017.
- 9) Sugishita S, Imai T, Matsui T, et al : Effects of short term interferential current stimulation on swallowing reflex in dysphagic patients. *Int J Speech Lang Pathol Audiol*, 3 : 1-8, 2015.
- 10) 杉下周平, 今井教仁, 福永真哉, 他 : 直接訓練に干渉波電気刺激療法を併用し嚥下反射遅延が改善した1例. 日本摂食・嚥下リハビリテーション学会雑誌, 22 : 52-58, 2018.
- 11) 渡辺慶大, 田村俊暁, 飯塚眞由美, 他 : 干渉波刺激療法の導入を契機に経口摂取を確立した脳梗塞慢性期の重度嚥下障害の1例. 嚥下医学, 9(2) : 204-212, 2020.
- 12) Yoshimatsu Y, Tobino K, Nishizawa S, et al : Interferential Current Stimulation for Swallowing Disorders in Chronic Obstructive Pulmonary Disease : A Preliminary Study. *Prog Rehabil Med*, 7 : 20220007, 2022.
- 13) Hara Y, Nakane A, Tohara H, et al : Cervical Interferential Current Transcutaneous Electrical Sensory Stimulation for Patients with Dysphagia and Dementia in Nursing Homes. *Clin Interv Aging*, 15 : 2431-2437, 2021.
- 14) Funato M, Maruta K, Yano M, et al : Efficacy of interferential current transcutaneous electrical sensory stimulation through the neck skin for treating dysphagia in children with disabilities : A case series. *SAGE Open Med Case Rep*, 11 : 2050313X221149527, 2023.
- 15) Carnaby-Mann GD, Crary MA : Examining the evidence on neuromuscular electrical stimulation for swallowing: ameta-analysis. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*, 133 : 564-571, 2007.
- 16) Chen YW, Chang KH, Chen HC, et al : The effects of surface neuromuscular electrical stimulation on post-stroke dysphagia : a systematic review and meta-analysis. *Clin Rehabil*, 30 : 24-35, 2016.
- 17) Clark H, Lazarus C, Arvedson J, et al : Evidence-based systematic review: effects of neuromuscular electrical stimulation on swallowing and neural activation. *Am J Speech Lang Pathol*, 18 : 361-375, 2009.
- 18) Carnaby GD, Harenberg L : What is "usual care" in dysphagia rehabilitation: a survey of USA dysphagia practice patterns. *Dysphagia*, 28(4) : 567-574, 2013.
- 19) Kato K, Ikeda R, Suzuki J, et al : Questionnaire survey on nurses and speech therapists regarding dysphagia rehabilitation in Japan. *Auris Nasus Larynx*, 48(2) : 241-247, 2021.
- 20) Ludlow CL, et al : Effects of surface electrical stimulation both at rest and during swallowing in chronic pharyngeal dysphagia. *Dysphagia*, 22(1) : 1-10, 2007.
- 21) Hamada S, Yamaguchi H, Hara H : Does sensory transcutaneous electrical stimulation prevent pneumonia in the acute stage of stroke? A preliminary study. *Int J Rehabil Res*, 40 : 94-96, 2017.
- 22) Rofes L, Arreola V, Lopez I, et al : Effect of surface sensory and motor electrical stimulation on chronic post stroke oropharyngeal dysfunction. *Neurogastroenterol Motil*, 25 : 888-e701, 2013.
- 23) Propp R, Gill PJ, Marcus S, et al : Neuromuscular electrical stimulation for children with dysphagia : a systematic review. *BMJ Open*, 12(3) : e055124, 2022.
- 24) Vanderthommen M, Duchateau J : Electrical stimulation as a modality to improve performance of the neuromuscular system. *Exerc Sport Sci Rev*, 35 : 180-185, 2007.
- 25) Vromans M, et al : Functional electrical stimulation-induced muscular fatigue : Effect of fiber composition and stimulation frequency on rate of fatigue development. *J Electromyogr Kinesiol*, 38 : 67-72, 2018.
- 26) Martindale N, et al : Neuromuscular Electrical Stimulation Plus Rehabilitative Exercise as a Treatment for Dysphagia in Stroke and Non-Stroke Patients in an NHS Setting : Feasibility and Outcomes. *Geriatrics (Basel)*, 4(4) : 53, 2019.
- 27) Sproson L, et al : Combined electrical stimulation and exercise for swallow rehabilitation post-stroke : a pilot randomized control trial. *Int J Lang Commun Disord*, 53(2) : 405-417, 2018.
- 28) Speyer R, Sutt AL, Bergström L, et al : Neurostimulation in People with Oropharyngeal Dysphagia : A Systematic Review and Meta-Analyses of Randomised Controlled Trials-Part I : Pharyngeal and Neuromuscular Electrical Stimulation. *J Clin Med*, 11(3) : 776, 2022.