7

運動障害以外の疾患に対する
エビデンスに基づいた電気刺激療法Electric Stimulation Therapy Based on Evidence for Diseases
Other than Movement Disorders

木村浩彰* 三上幸夫* 牛尾 会* 澤 衣利子* 上田健人*

Hiroaki Kimura

Yukio Mikami

Kai Ushio

Eriko Sawa

Kento Ueda

Key words : 治療的電気刺激／機能的電気刺激／創傷治癒／排尿障害／嚥下障害

要旨

リハビリテーション医学は物理療法（physical therapy）とともに発展してきた。電気刺激療法は物理療法の1つである。電気刺激療法は骨格筋に対して最初に臨床応用され、治療と機能回復に用いられている。治療を目的とした治療的電気刺激（therapeutic electrical stimulation : TES）と、機能回復を目的とした機能的電気刺激（functional electrical stimulation : FES）は厳密に区別される。電気刺激療法は、筋力増強や鎮痛、麻痺筋の機能制御などに使用されるが、運動障害以外にも創傷治癒促進や排尿機能改善、嚥下機能改善に用いられる。また、筋肉を刺激することで疑似的に運動した効果が得られ、糖や脂質代謝を活性化し、肥満や糖尿病、サルコペニア、寝たきり患者にも適応が拡大されている。

はじめに

リハビリテーション医学の英訳は physical therapy and rehabilitation medicine であり、物理療法（physical therapy）と共にリハビリテーション医学が発展してきたことを示している。物理療法は「熱、低温、光、水、電気、マッサージなどを用いる身体的治療の科学および技術」であり、電気刺激療法は物理療法の1つである。

電気刺激療法の基本

生きている細胞は、細胞内外で電位差を発生させ細胞機能を発現しており、細胞の死と共に電位差を失う。また、視覚や聴覚、触覚などの感覚器官からの情報は、電気信号に変換され神経を通じ

て中枢へ伝えられ、中枢からの指令も電気信号によって身体各所に伝えられる。このように、電気は生命活動の基盤を形成し、細胞の集合体である人体の情報伝達も電気によって行われている。したがって、外部から電気刺激を行うことで細胞機能や身体機能に干渉可能であり、これが電気刺激療法である。

1855年 Duchenne が骨格筋に対する電気刺激療法を報告して以来、鎮痛を目的とした経皮的電気刺激（transcutaneous electrical nerve stimulation : TENS）と、筋力増強や浮腫改善、痙性の抑制、創傷治癒や血流の促進などの治療を目的とした治療的電気刺激（therapeutic electrical stimulation : TES）、中枢神経・麻痺筋の制御による機能回復を目的とした機能的電気刺激（functional electrical stimulation : FES）がある。FESは医用工学的技術の粋であり、TESと区別すべきである。

電気刺激は、運動点に刺激電極を置く単極刺激

* 広島大学病院リハビリテーション科
〒734-8551 広島県広島市南区霞 1-2-3
E-mail : luna@hiroshima-u.ac.jp

表1 電流刺激療法の種類

- ・経皮的電気刺激 (transcutaneous electrical nerve stimulation : TENS)
- ・神経筋電気刺激 (electrical muscle stimulation : EMS)
- ・マイクロカレント・微弱電流
- ・高電圧パルス電流 (high voltage pulsed current : HVPC)
- ・直流
- ・干渉電流
- ・ロシアン電流 (ロシアンカレント)
- ・立体動態波

(通電) 法と、運動点を挟んで2つの電極を置く双極刺激 (通電) 法がある。電気刺激は①電流強度、②パルス持続時間、③波形の傾き式、④周波数によって調節される。電気刺激は機械を使用するので、用語は重要である。

- 運動点 (motor point) : 電気刺激により筋収縮を誘発されやすい部位。筋肉ごとに存在する。
- 電流密度 : 単位面積あたりの電流の強さ。電流の強さに比例し、電極の大きさに反比例する。
- 電流強度 : 電流強度 = (電圧/電流) × パルス幅で示され、神経や筋肉を興奮させるため一定以上の電流強度が必要である。電流強度が強すぎると不快感や痛みを生じる。
- 通電時間 : 刺激パルスの持続時間とパルス幅から成る。
- 波形の傾き : 刺激に必要な急峻な電流変化。
- 刺激周波数 : 筋肉の収縮を得るため一定以上の刺激の繰り返しが必要となる。周波数が高すぎると不応期となり筋収縮が得られなくなる。

電気刺激療法は周波数やパルス幅を変えることで治療方法や目的を変更可能である。電気刺激療法の種類を表1に示す。

電気刺激療法の適応

- 鎮痛 : TENS は疼痛治療として一般的に使用され、無作為化比較試験で変形性膝関節症や慢性腰痛に有効である¹⁾。TENS の鎮痛作用は Mel-

zack ら²⁾ の gate control 理論によって説明されてきたが、下行性疼痛抑制系の賦活化や脊髄後角への抑制的な影響が指摘されている。TENS は術後疼痛やがん性疼痛にも応用されているが、強固な証拠はまだない³⁾。臨床では SSP (silver spike point) 電極を経絡「ツボ」に置いて電気刺激を行う治療もある。

- TES による運動機能改善 : 末梢神経損傷による麻痺筋の筋収縮を誘発し筋萎縮を予防する。中枢神経損傷では、正常な末梢神経・筋を利用して筋力を増強し、痙性を抑制する。廃用性筋力低下も同様に筋収縮によって筋力を増強する。TES による刺激方法は、低周波や中周波、干渉電流が用いられる。
- FES による機能回復 : 麻痺筋を制御して機能を再建する。中枢神経の可塑性やネットワーク再構築を促進する。
- 末梢循環 : 筋収縮によるポンプ作用で浮腫を軽減させる。
- 創傷治癒 : 循環の改善や修復細胞の活性化による。
- 排尿機能 : 骨盤底筋に作用し失禁を改善する。

電気刺激療法の保険適応について : 電気刺激療法はホット・パックや超音波療法と同じく、J119 消炎鎮痛処置に該当し、1 日につき 35 点請求できる。リハビリテーション料を算定すると消炎鎮痛等処置を算定できない。また、大学病院などの特定機

表 2 電気刺激療法の禁忌や注意すべき部位

心臓ペースメーカーなど体内埋め込み型電子機器装着者	電子装置の誤作動誘発
心臓病の病歴がある患者の胸部	不安定な不整脈悪化
知覚障害 酒気帯び	電気刺激を知覚できず、過大な刺激を与える可能性
動静脈の血栓症、血栓性静脈炎	筋収縮による血栓遊離
悪性腫瘍 脳血管障害やてんかん発作の病歴をもつ頭蓋顔面領域	血流増大に伴い状態悪化
妊婦の腹部、腰仙部、骨盤領域	発育中の胎児や妊娠子宮への影響
筋収縮が禁忌となる病態（腹部・鼠径ヘルニアなど）	筋収縮により状態悪化
目 皮膚が過敏、損傷、病変がある領域 急性損傷や炎症のある部位	過剰の電流が流れる可能性
頸動脈領域	急速な血圧低下の可能性
出血や血腫が起こりやすい組織または月経時の腹部	血流を増加させる可能性

能病院や 200 床以上の病院は再診の際に外来診療料を算定しており、消炎鎮痛処置はこれに含まれるため、やはり算定できない。

電気刺激療法の禁忌

電気刺激療法の禁忌および禁忌部位を表 2 に示す。電気刺激療法中は電極と患部との接触を完全にして、電流が流れている間電極を体から離さない。金属と皮膚との接触を避け、通電中に電源を切らない。

電気刺激療法のエビデンス

1. 脳血管障害（脳卒中治療ガイドライン 2015⁴⁾ から抜粋）

●上肢機能障害に対するリハビリテーション：中等度の麻痺筋（手関節背屈筋、手指伸筋）には電気刺激の使用が勧められる（グレード B）。反復経頭蓋磁気刺激や経頭蓋直流電気刺激は考慮してもよいが、患者の選択、安全面に注意を要する（グレード C1）。

- 片麻痺側の肩に対するリハビリテーション：麻痺側の肩関節可動域と亜脱臼の改善を目的として、機能的電気刺激が勧められるが、長期間の効果の持続はなし（グレード B）。
- 痙縮に対するリハビリテーション：痙縮に対して高頻度の TENS を施行することが勧められる（グレード B）。
- 歩行障害に対するリハビリテーション：慢性期で下垂足がある患者には FES が勧められるが、効果持続時間は短い（グレード B）。

2. 脊髄損傷

脊髄損傷に対する FES は多くの報告があり、脊髄損傷理学療法ガイドラインでグレード B となっている⁵⁾。

3. 慢性創傷・褥瘡

低出力直流電流、高電圧パルス電流、交流、TENS はいずれも創傷治癒を促進する⁶⁾。同様に褥瘡においても有用である。米国内科学会による

褥瘡治療ガイドラインで、創傷治癒を早めるため補助的な電気刺激療法が勧められている（弱い推奨・中等度のエビデンス）^{7,8)}。日本褥瘡学会の褥瘡予防・管理ガイドライン（第4版）にも局所治療として電気刺激治療が勧められている（推奨度B）⁹⁾。

4. 排尿障害

2013年日本排尿機能学会による「女性下部尿路症状診療ガイドライン」で、腹圧性尿失禁に対する電気刺激療法は推奨グレードBとされた。

5. 嚥下障害

嚥下障害に対する電気刺激療法のメタアナリシスは多く、中等度の嚥下障害に有用性が示されている¹⁰⁾。

FES の話題と ニューロリハビリテーション

FESは中枢性麻痺の残存する末梢神経を刺激して機能回復させる医用工学的治療であり、1961年前脛骨筋の電気刺激によって脳卒中片麻痺患者の足関節背屈を促したLibersonの報告から始まった。脳卒中や脊髄損傷患者に対するFESの効果は多く報告されている¹¹⁾。

近年、FESは埋め込み電極から表面電極を用いたシステムが主流となり、感覚入力と運動出力を統合させる手法として、筋電をトリガーとして電気刺激を行う筋電誘発電気療法（electromyography-triggered neuromuscular stimulation：ETMS）が推奨されている。ETMSは、1979年Hansenが麻痺患者12名の手関節伸筋にETMSを行った報告が最初で¹²⁾、日本では村岡¹³⁾がIVES療法（Integrated Volitional controlled Electrical Stimulation）を開発し、IVES療法に手関節固定装具を加えたHANDS療法（hybrid assis-

tive neuromuscular dynamic stimulation）も報告されている¹⁴⁾。ETMSとして2010年表面電極が装具に組み込まれたNESSシステムの上肢用H200と下肢用L300の薬事承認が得られ、臨床に応用されている¹⁵⁾。

FESはニューロリハビリテーションとしても使用される。FESの複雑性から限界が指摘されているが、神経・筋を刺激することで損傷された脳の可塑性や神経ネットワークの再構築が促進される。FESは神経筋電気刺激（neuro-muscular electrical stimulation：NMES）としてニューロリハビリテーションの構成要素となっている。

電気刺激療法の最新知見

神経に支配されている臓器はすべて電気刺激に反応するので、医用工学の発展と共にさまざまな電気刺激療法が実用化され、臨床応用されている。

- 迷走神経刺激によるてんかん抑制：薬剤抵抗性の難治性てんかん発作を有するてんかん患者（開頭手術が奏効する症例を除く）の発作頻度を軽減する補助療法として2010年7月保険適応となった。
- 修正型電気刺激療法（modified electronic convulsion therapy：mECT）：1938年から現在まで躁うつ病や統合失調症など多くの精神疾患に使用されている。
- 脊髄刺激療法：1992年から複合性局所性疼痛症候群（脳卒中後の肩手症候群を含む）や末梢神経損傷に伴う神経因性疼痛およびその他の難治性疼痛に対して行われる。遷延性意識障害や四肢痙性麻痺に対して脊髄後索電気刺激（dorsal column stimulation：DCS）も行われる。
- 脳深部刺激療法（deep brain stimulation：DBS）：2000年からパーキンソン病や振戦、ジストニアの治療として保険適応となった。
- 仙骨神経刺激療法（sacral neuromodulation：

SNM)：2014年4月から便失禁に対する新たな治療法として保険適応となった。

- 横隔膜ペーシング：上位頸髄損傷や中枢性呼吸障害に対して行われるが、保険適応はない。

骨格筋刺激による新しい方法と代謝への影響

TESによる効果的な筋力増強法として、運動時に動作を妨げる拮抗筋を電気刺激して得られる筋収縮を運動抵抗とするハイブリッドトレーニングシステムが挙げられる¹⁶⁾。短時間、短期間で効果を示すことが明らかにされており、今後無重力空間での運動療法としても期待されている。また、電気刺激による筋肉収縮を介した代謝への影響も重要である。筋肉は α 運動ニューロンによって支配されており、特定の α 運動ニューロン支配下の筋線維は組織化学的に同じ性質をもっている。筋肉は大別して遅筋 (Type I) と速筋 (Type II) に分けられ、Hennemanの「サイズの原理」に応じて小さく動員閾値の低いType Iから順次動員される。しかし、電気刺激は大きな神経に伝わるので「逆サイズの原理」が働きType IIから動員される¹⁷⁾。また、神経移植や神経刺激頻度によって筋肉はその性質を変化させる^{18, 19)}。森谷らは、大腿四頭筋の電気刺激によって低い運動強度で解糖系エネルギー利用の高い速筋線維の動員を可能にし、筋エネルギー消費と糖代謝を活性化できることを示した²⁰⁾。これにより、肥満や糖尿病に対する代謝促進や、外科術後、寝たきり患者、要介護者、サルコペニア、失禁に対する筋肥大にも電気刺激療法が応用できる可能性が示唆された。

症例

68歳、男性。糖尿病による糖尿病性腎症（透析中）と糖尿病性網膜症（左失明）、末梢神経障害。肥満と糖尿病性壊疽による左下腿切断のため通常

図1 68歳、男性。糖尿病による両側網膜症（左失明）、人工透析、左下腿切断。低周波刺激によって運動可能となった

の運動療法を行えなかったが、電気刺激療法（低周波によるTES：ベルト式骨格筋電気刺激METABOモード・AUTO Tens PRO Rehabili Unit, ホーマーイオン研究所、東京）により筋肉を他動的に動かし、身体機能の維持改善と意欲の向上に使用できた（図1）。

結語

電気刺激療法は古くから広く臨床で用いられているが、臨床的エビデンスに乏しい。医用工学の進歩により新しい電気刺激療法が創られている。リハビリテーション医学は物理療法としての電気刺激療法をこれからも積極的に使用し、エビデンスのある治療として確立させなければならない。

文献

- 1) Khadilkar A, Odebiyi DO, Brosseau L, Wells GA : Transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) versus placebo for chronic low-back pain. Cochrane Database Syst Rev 2008 ; CD003008
- 2) Melzack R, Wall PD : Pain mechanisms : a new theory. Science 1965 ; 150 : 971-979
- 3) Hurlow A, Bennett MI, Robb KA, Johnson MI, Simpson KH, Oxberry SG : Transcutaneous electric nerve stimulation (TENS) for cancer pain in adults. Cochrane Database Syst Rev 2012 ; CD006276
- 4) 日本脳卒中学会脳卒中ガイドライン委員会、小川

- 彰, 出江紳一, 片山泰朗, 嘉山孝正, 鈴木則宏 編: 脳卒中ガイドライン 2015, 協和企画. 東京. 2015; pp272-340
- 5) 松瀬博夫, 志波直人, 田川善彦: 物理療法のエビデンスと実践 電気刺激療法 (筋力増強). JOURNAL OF CLINICAL REHABILITATION 2011; **20**: 1048-1053
 - 6) Ud-Din S, Bayat A: Electrical Stimulation and Cutaneous Wound Healing: A Review of Clinical Evidence. Healthcare (Basel) 2014; **2**: 445-467
 - 7) Qaseem A, Mir TP, Starkey M, Denberg TD: Clinical Guidelines Committee of the American College of Physicians: Risk assessment and prevention of pressure ulcers: a clinical practice guideline from the American College of Physicians. Ann Intern Med 2015; **162**: 359-369
 - 8) Qaseem A, Humphrey LL, Forciea MA, Starkey M, Denberg TD: Clinical Guidelines Committee of the American College of Physicians: Treatment of pressure ulcers: a clinical practice guideline from the American College of Physicians. Ann Intern Med 2015; **162**: 370-379
 - 9) 門野岳史, 古田勝経, 永井弥生, 他: 褥瘡予防・管理ガイドライン, 第4版. 日本褥瘡学会誌 2015; **17**: 487-557
 - 10) Chen YW, Chang KH, Chen HC, Liang WM, Wang YH, Lin YN: The effects of surface neuromuscular electrical stimulation on post-stroke dysphagia: a systemic review and meta-analysis. Clin Rehabil 2016; **30**: 24-35
 - 11) Howlett OA, Lannin NA, Ada L, McKinstry C: Functional electrical stimulation improves activity after stroke: a systematic review with meta-analysis. Arch Phys Med Rehabil 2015; **96**: 934-943
 - 12) Van Overeem Hansen G: EMG-controlled functional electrical stimulation of the paretic hand. Scand J Rehabil Med 1979; **11**: 189-193
 - 13) 村岡慶裕: 随意筋電制御電気刺激装置 IVES. 臨床脳波 2009; **51**: 170-175
 - 14) 藤原俊之: HANDS 療法 BMI を用いた上肢訓練の効果. Modern Physician 2014; **34**: 807-811
 - 15) 松永俊樹, 島田洋一, 三澤晶子, 佐々木香奈, 富手貴教, 工藤大輔, 奥寺良弥, 佐藤峰善, 千田聡明, 畠山和利, 渡邊基起: NESS システム. JOURNAL OF CLINICAL REHABILITATION 2012; **21**: 560-564
 - 16) 松瀬博夫, 志波直人, 田川善彦: ハイブリッドトレーニングシステム. JOURNAL OF CLINICAL REHABILITATION 2012; **21**: 544-553
 - 17) Gregory CM, Bickel CS: Recruitment patterns in human skeletal muscle during electrical stimulation. Phys Ther 2005; **85**: 358-364
 - 18) Buller AJ, Mommaerts WFHM, Seraydarian K: Enzymic properties of myosin in fast and slow twitch muscles of the cat following cross-reinnervation. J Physiol 1969; **205**: 581-597
 - 19) Corso S, Nápolis L, Malaguti C, Gimenes AC, Albuquerque A, Nogueira CR, De Fuccio MB, Pereira RD, Bulle A, McFarlane N, Nery LE, Neder JA: Skeletal muscle structure and function in response to electrical stimulation in moderately impaired COPD patients. Respir Med 2007; **101**: 1236-1243
 - 20) Hamada T, Hayashi T, Kimura T, Nakao K, Moritani T: Electrical stimulation of human lower extremities enhances energy consumption, carbohydrate oxidation, and whole body glucose uptake. J Appl Physiol (1985) 2004; **96**: 911-916