

電気刺激

藤田 欣也* 南谷 晴之**

1. はじめに

生体への電気刺激の大半は、遠心性・求心性の神経を電気的なパルスを用いて刺激するものであるが、一部には、電流や電界がもたらす影響を利用するものもある。本稿では、まず、感覚系の補助や代行を目的とするものと、身体各部の器官の機能を制御することを目的とするものに大別した。また、機能制御を目的とするものが多く、対象が広範囲にわたるため、これを運動神経刺激を介して外部制御器で積極的に制御するものと、刺激による治療効果を目的とするもので小分類した。本文では、この分類に従って話を進めてゆく。

2. 感覚補助・代行のための電気刺激

電気刺激を用いた感覚代行といえ、まず蝸牛での電気刺激を用いた聴覚補助が上げられる。これは既に22/24チャンネルの電気刺激装置が市販され、臨床的に用いられている¹⁾。これに比較して、視覚は情報量の多さと情報が2次元的な広がりをもつことから、最初に大脳視覚野での刺激が試みられて以来²⁾、地道な研究が続いている。最近では、カフ電極等、末梢神経刺激電極の多チャンネル化が可能になりつつあるため、脳ではなく視神経で刺激を加える試みも始められている³⁾。伝送すべき情報量が多いため、分解能の向上が課題となっている。

また、前庭に直流を通電すると平衡感覚が影響を受けることが知られており⁴⁾、この現象をバーチャルリアリティ用の平衡感覚ディスプレイとして製品化することも試みられている⁵⁾。平衡感覚に関しては、電気刺激によって左右の前庭のアンバランスによる平衡機能障害が緩和されたとする報告なども見られる⁶⁾。さらに、皮膚受容器への電気刺激や機械刺激を用いた情報伝送は古くから試みられているが、神経再生型⁷⁾や神経束挿入型⁸⁾の電極の刺激空間分解能が向上すれば、受容器を介さない直接神経刺激による末梢感覚インタフェースも現実味を帯びてくる可能性がある。

3. 機能制御のための電気刺激

3.1 治療的電気刺激

最も一般化している電気刺激といえ、健康器具として家庭に浸透している低周波治療器であろう。同様の方法で運動神経を刺激して筋収縮させることによる治療効果を目的としたもの

が、治療的電気刺激(Therapeutic Electrical Stimulation: TES)である。片麻痺患者の肩関節亜脱臼に対して、肩周囲筋の筋力を刺激で強化して間接的に症状を緩和する方法などが試みられ、良好な成績を納めている⁹⁾。さらに骨格筋支配神経への刺激の応用の一つとして、心筋の補助が挙げられる。広背筋が心臓を巻くように外科的手術を行い、必要に応じて電気刺激で心拍動の補助を行うもので、そのための動物実験が行われている¹⁰⁾。

このような慢性的用途のためには、骨格筋を耐疲労性の遅筋主体の筋組成に変える事が必要になる。筋の組成変化に関しては低周波慢性電気刺激の効果が知られており、その機序についても解説されているが¹¹⁾、廃用性筋萎縮への応用やスポーツを目的とした筋力強化¹²⁾などの点からも、さらに研究が必要である。同様の手法で、耐疲労性を高めた薄筋を肛門括約筋に代用する試みも検討されている¹³⁾。

また、求心性神経を電気刺激して、脳や脊髄の神経回路を抑制/促進するもの、すなわち電気刺激を神経の活動状態に介入する手段として用いるものを(Neuro Modulation Stimulation: NMS)と呼び、TESと区別する向きもある。パーキンソン病に見られる振戦を視床への電気刺激によって抑制する方法¹⁴⁾などは、こちらに分類できる。脊髄硬膜での電気刺激による除痛なども、こちらであろう¹⁵⁾。電気刺激の効果の一つとして、麻痺患者の痙性抑制が挙げられ、TESの臨床的效果として知られている。最近ではNMS的アプローチとして、求心性神経枝の選択的刺激による痙性抑制も試みられている¹⁶⁾。

この他、通電することにより骨の再生を促すもの¹⁷⁾、電界に曝露することで治療効果を期待する方法など、その応用も多岐に渡っている。

3.2 機能的電気刺激

電気刺激を生体の機能制御の手段として用いるものは、機能的電気刺激(Functional Electrical Stimulation)に分類できる。機能制御といえ最も実用的に成功した例が心臓ペースメカと除細動であろう。最近では、負荷状態に応じてペースングを適応的に制御するなど、さらに実用的になっている。排尿障害に対しては、電気刺激により膀胱容量の増大を行うTES的なものと、積極的に排尿を制御するFES的なものが考えられ、仙髄神経や陰部神経への電気刺激が試みられている¹⁸⁾。また、横膈神経を刺激する呼吸ペースングの研究は従来から知られているが、より使用が容易な表面電極を用いた体幹筋の刺激でも、ある程度の呼吸補助が可能であることが、近年、示されている¹⁹⁾。同様の手法での咳(痰の排出)の制御も試みられている²⁰⁾。

上下肢のFESは、近年、完全埋込型(体外送信機と体内受信・刺激装置)と表面電極型に2極分化する方向にある。上肢でいえば、Clevelandで製品化された完全埋込型のFreeHand²¹⁾、器具型のHANDMASTER²²⁾やBionicGlove²³⁾などが好例である。下

1999年11月1日受付

* 東京農工大学・工学部

〒184-8588 小金井市中町2-24-16

E-mail: kfujita@cc.tuat.ac.jp

** 慶應義塾大学・理工学部

肢も Cleveland のグループや東北大・NEC グループが完全埋込の方向にあるのに対し²⁴⁾, 低侵襲の表面刺激を補装具と併用する Hybrid 式も増加する傾向にある。刺激方法には 2 つの選択肢があるが, システム全体としての構成は, 安全性や制御の容易さの点から装具との併用が増加する傾向にある。安全性を重視して装具を併用する場合, 膝関節を固定するため, 機能的にはフレーム(場合により杖)を用いた平地歩行に制限される。

FES を支える電気刺激の基礎研究では, 電気刺激時には太い神経繊維から刺激されて筋疲労を招くという逆リクルートメント問題に対して, ブロック刺激や 3 極のカフ電極と特殊な刺激波形の組み合わせによって順リクルートメントを得る方法が提案され, 動物実験まで行われている²⁵⁾。また神経束を多極電極を用いて刺激することで電界分布を制御して, 筋を個別に制御する研究²⁶⁾などもあるが, 神経束への侵襲性が強いことや長期間での安定性の問題などから動物実験に留まっている。動物実験での慢性実験では, カフ型や神経束挿入型が神経活動の計測で良好な成績を収めつつあるので, 近いうちに刺激用に用いられる可能性も高い。

最近の話題としては, 脊髄損傷による完全麻痺者にも自律的に歩行パターンを生成する回路(Central Pattern Generator: CPG)が残存していることが挙げられる²⁷⁾。電気刺激により CPG を制御することが可能になれば, 本来の歩行パターンを再現できる魅力的な方法であるが, 現在は他動的に運動させた時に微弱な筋活動が確認できる程度で, より強い活動を誘発する脊髄神経回路の刺激方法の発見が鍵である。

4. おわりに

電気刺激に関連した話題を大まかに紹介した。TES, NMS, FES と, 目的も作用も多種多様である。神経の電気刺激は古くから知られている技術であるにもかかわらず, 今でもなお, 最も効率的に生体活動に介入できる方法であることには変わりがない。どの作用をどの目的に用いるか, まだまだ研究の余地は多い。

参考文献

- 1) <http://www.cochlear.com/>
- 2) G. S. Brindley & W. S. Levin: The sensations produced by electrical stimulation of the visual cortex, *J. Physiol.*, 196 479-493 (1968)
- 3) C. Veraart, C. Raftopoulos et. al.: Visual sensations produced by optic nerve stimulation using an implanted self-sizing spiral cuff electrode, *Brain Research*, 813, 181-186 (1998)
- 4) T. C. Britton, B. L. Day et. al.: Postural electromyographic responses in the arm and leg following galvanic vestibular stimulation in man, *Exp. Brain Res.*, 94 (1993)
- 5) <http://www.vm3.com/>
- 6) B. R. Park, M. S. Kim et. al.: Electrical stimulation can restore postural disturbance caused by vestibular disorders, in *Proc. IFESS'99*, 207-210 (1999)
- 7) P. Dario, P. Garzella, et. al.: Neural interfaces for regenerated nerve stimulation and recording, *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, 6(4), 353-363 (1998)
- 8) K. Yoshida & R. B. Stein: Characterization of signals and noise rejection with bipolar longitudinal intrafascicular electrodes, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 46(2), 226-234 (1999)
- 9) 高橋, 亀山他: 経皮埋め込み電極を用いた肩関節亜脱臼に対する治療的電気刺激法の開発, *日本パラプレジア医学会雑誌*, 4(1), 278-279 (1992)
- 10) R. L. Whalen, C. L. Richards et. al.: A ventricular assist device powered by conditioned skeletal muscle, *Ann. Thorac. Surg.*, 68 (2), 780-784 (1999)
- 11) D. Pette & G. Vrbova: What does chronic electrical stimulation teach us about muscle plasticity?, *Muscle Nerve*, 22(6), 666-677 (1999)
- 12) A. Delitto & M. Brown: Electrical stimulation of quadriceps femoris in an elite weight lifter: a single subject experiment, *Int. J. Sports Med.*, 10(3), 187-191 (1989)
- 13) T. Shatari, Y. Sugiyama et. al.: Reconstruction of anal function by transposed gracilis muscle with electrical stimulation: rabbit model, *Int. J. Art. Organs.*, 17(4), 240-244 (1994)
- 14) <http://www.medtronic.com/>
- 15) 下地恒毅: 脊髄刺激法による除痛, 麻酔, 43, S67-76 (1994)
- 16) K. Fujita, S. Kataoka et. al.: Soleus spasticity reduction by repeated burst stimulation to superficial peroneal nerve, in *Proc. IFESS'99*, 173-176 (1999)
- 17) K. Kubota, N. Yoshimura et. al.: Overview of effects of electrical stimulation on osteogenesis and alveolar bone, *J. Periodontol.*, 66 (1), 2-6 (1995)
- 18) R. A. Appell: Electrical stimulation for the treatment of urinary incontinence, *Urology*, 51 (2A Suppl.), 24-26 (1998)
- 19) J. Sorli, F. Kandare et. al.: Ventilatory assistance using electrical stimulation of abdominal muscles, *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, 4, 1-6 (1996)
- 20) R. J. Jaeger, R. M. Turba et. al.: Cough in spinal cord injured patients: comparison of three methods to produce cough, *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 74(12), 1358-1361 (1993)
- 21) <http://www.neurocontrol.com/>
- 22) R. H. Nathan: A non-invasive FES system for restoration of hand function in C5 quadriplegia and CVA, in *proc. 2nd Int. FES Sympo. in Sendai*, 128-133 (1995)
- 23) A. Prochazka, M. Gauthier et. al.: The bionic glove: an electrical stimulator garment that provides controlled grasp and hand opening in quadriplegia, *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 78(6), 608-614 (1997)
- 24) T. Fujii, S. Tanaka et. al.: Development of a new implantable system for functional electrical stimulation in Sendai project, in *Proc. IFESS'99*, 283-286 (1999)
- 25) Z. P. Fang & J. T. Mortimer: Selective activation of small motor axons by quasi-trapezoidal current pulses, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 38(2), 168-174 (1991)
- 26) C. Veraart, W. M. Grill et. al.: Selective control of muscle activation with a multipolar nerve cuff electrode, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 40(7), 640-653 (1993)
- 27) M. R. Dimitrijevic, Y. Gerasimenko et. al.: Evidence for a spinal central pattern generator in humans, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 16 (860), 360-376 (1998)