

AMCoR

Asahikawa Medical University Repository <http://amcor.asahikawa-med.ac.jp/>

嚥下医学 (2012.10) 1巻2号:328～334.

嚥下医学ベーシックサイエンス
機能的電気刺激の原理と発声・嚥下障害への臨床応用

片田彰博

機能的電気刺激の原理と発声・嚥下障害への臨床応用

片田彰博 ● 旭川医科大学耳鼻咽喉科・頭頸部外科学教室

機能的電気刺激とは

機能的電気刺激（functional electrical stimulation：FES）は微小な電気刺激を用いて生体の失われた機能を回復させる治療法であり、さまざまな分野での臨床応用が進んでいる（表1）。FESは感覚機能の回復を目的とした感覚系FESと運動機能の回復を目的とした運動系FESに大別される。感覚系FESでは高度難聴者に対する人工内耳システムが広く普及している。また、心臓のペースメーカーもFESの一種であるといえる。運動系FESは整形外科領域を中心に、脳卒中や脊髄損傷などの中枢性運動麻痺患者での四肢の運動機能回復をめざした研究がすすめられている。われわれは、この運動系FESを反回神経麻痺によって障害された喉頭機能の回復に応用する研究を行っている。本稿ではこの運動系FESの原理、喉頭機能の回復をめざした研究の内容、さらに嚥下障害に対する臨床応用の可能性について解説する。

運動系FESのしくみ

1) 基本原理

運動麻痺は、中枢の上位運動ニューロンと末梢の下位運動ニューロンのどちらかが傷害されても起こり得る。脳卒中や脊髄損傷で上位運動ニューロンが傷害された場合、上位中枢から下位運動ニューロンへの入力消失してしまうので、その支配領域の筋には筋収縮が起こらなくなり廃用性の萎縮が生じる。しかし、下位運動ニューロンは直接的なダメージを受けているわけではなく、神経としての興奮性は保持されている。したがって、外

循環器科領域：心臓のペースメーカー
耳鼻咽喉科領域：人工内耳による聴覚機能の回復
脳神経外科領域：難治性疼痛、不随意運動症に対する脳深部刺激療法
整形外科領域：脊髄損傷後の上肢、下肢の運動機能の回復
泌尿器科領域：脊髄損傷後の膀胱機能障害における排尿調節
眼科領域：人工視覚システム、網膜電気刺激による視覚回復

表1 機能的電気刺激の研究領域

部からの電気刺激で神経細胞に活動電位を発生させることは容易であり、神経近傍や軸索周囲に電極を留置した場合には、非常に小さな電圧でも筋収縮を生じさせることが可能である。このとき、外部からの電気刺激が軸索に活動電位を発生させると、その興奮は神経筋接合部へと伝えられ、シナプス小胞からアセチルコリンの放出が起こる（図1）。これは通常の筋収縮と同じメカニズムであり筋収縮の誘発が非常に効率的であることから、上位運動ニューロンの障害は運動系FESのよい適応であるといえる。

一方、末梢神経損傷により下位運動ニューロンが傷害されると、軸索や神経筋接合部は変性し電気的な興奮性が失われ、その支配領域にある筋は脱神経の状態となる。この状態では、電気刺激を加えてもアセチルコリンを介した筋収縮の誘発ができなくなるため、下位運動ニューロン障害による運動麻痺にはFESが無効であるという意見が主流であった。しかし、われわれがイヌの内喉頭筋を用いて検討したところ、完全な脱神経の状態にあっても筋組織が正常に近い状態で保存されていれば、電気刺激の強度を高めることで筋収縮を誘発できることが確認された¹⁾。また、脱神経の状態にある筋肉に電気刺激による筋収縮を誘発す

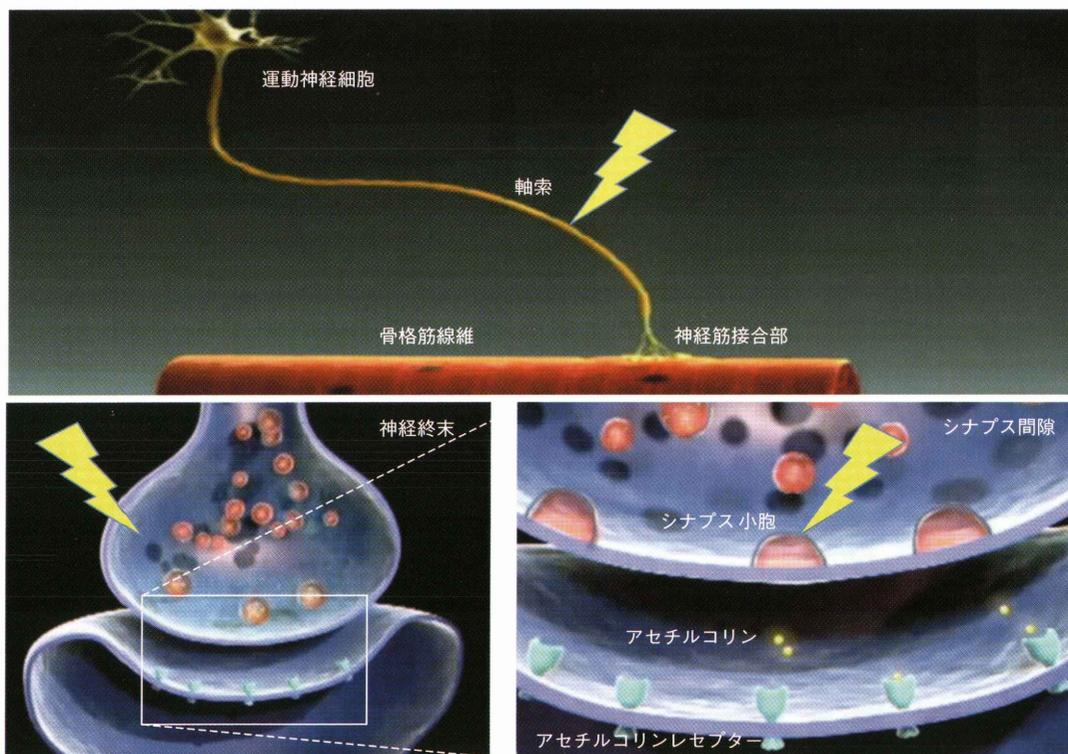


図1 機能的電気刺激による筋収縮のメカニズム

ることで、廃用性萎縮を防ぐことができることも確認されている²⁾(図2)。さらに、末梢神経は再生能力が高く、損傷した神経を吻合したり神経筋弁を移植することで脱神経後の筋に再支配を誘導することは、さほど難しいことではない。わずかも再支配が起これば、電気刺激による筋収縮の誘発は非常に容易になることから、われわれは末梢神経障害による下位運動ニューロン障害に対してもFESはある程度有効であると考えている。

2) システムの構成

運動系FESのシステムは、①運動指令を出すタイミングを決定するトリガーの検出装置、②目的とする運動を遂行するための刺激シーケンス(刺激の順番、長さ、強さ)を発生させる刺激装置、③筋肉に電気刺激を与えるための電極の3つの部分で構成される。電気刺激を行うための電極の設置方法は表面電極、針電極、埋め込み型電極の3

通りがある(図3)。表面電極は皮膚表面に設置した電極で刺激を行う方法であり、取り扱いは大変容易である。しかし、刺激したい筋肉と電極の間には距離があるので、小さい筋肉や体の深部に存在する筋肉を選択的に刺激する精度はない。発声運動や嚥下運動に関与する咽頭、喉頭、頸部の筋肉はいずれも小さく、比較的深層にあるため、発声運動や嚥下運動を補助するFESシステムの構築には表面電極は不向きであろう。針電極は皮膚を貫通して体外から運動神経や筋組織を直接刺激する方法であり、刺激精度の面では有利だが、頸部など可動性が大きい部分では運動時の痛みや経皮部分での感染の問題があり、長期にわたる慢性的な刺激には適さない。埋め込み型電極は電極を完全に体内に埋め込む方法である。心臓ペースメーカーのように刺激発生装置も体内に埋め込んで体表からリモコンで操作するシステムと、人工内耳のように体外からの高周波誘導によって電力

機能的電気刺激なし

機能的電気刺激あり

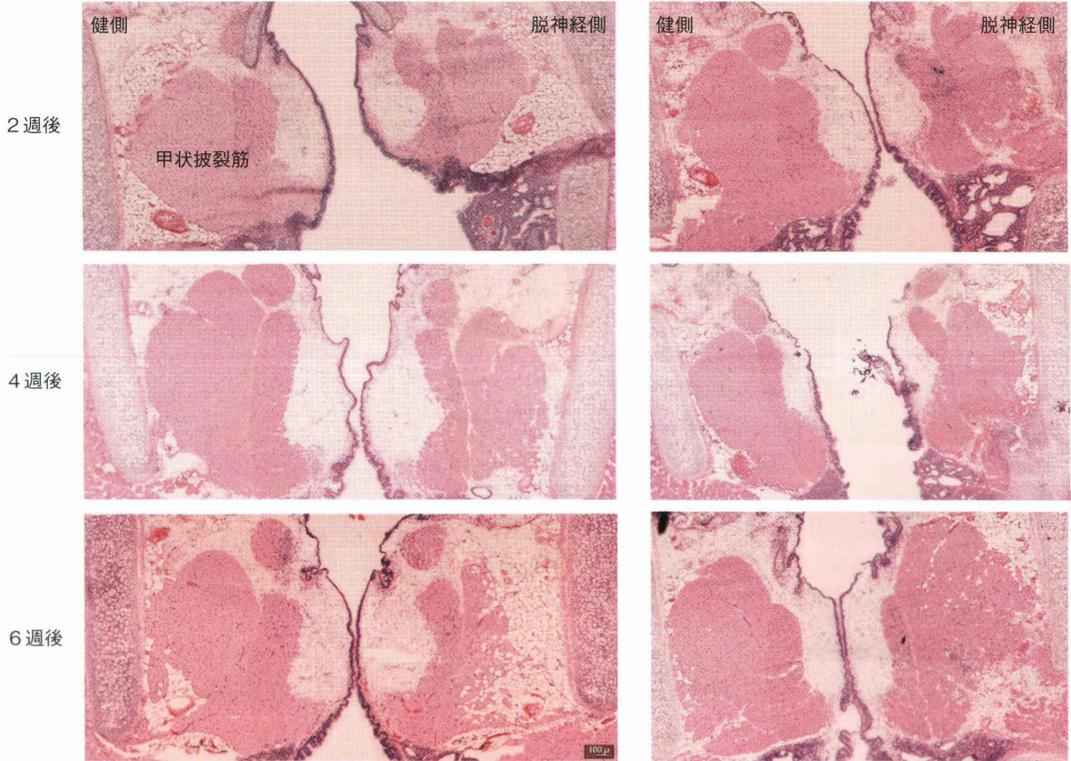


図2 機能的電気刺激による甲状披裂筋脱神経後の筋萎縮の抑制

の供給と動作コマンドの送受信を行うシステムがある。いずれの場合も、電極の埋め込みには外科手術が必要となり、システム自体が非常に高価なものになるのが欠点である。しかし、呼吸運動や嚥下運動を補助するためには患者が眠っている間でも、自律的に活動し続ける必要があり、そのためにはこの埋め込み型電極によるシステムの構築が必要であろう。

喉頭機能障害に対するFESの臨床応用

1) 声門開大運動の誘発による呼吸機能の改善

FESの喉頭機能障害への臨床応用については、声門開大運動の誘発による呼吸機能の回復に関する研究が最もすすんでいる。両側声帯麻痺では吸気時に声門が開大しないために呼吸困難が生じる。症状が強い場合には声門開大術や気管切開術が必

要となるが、これらの術式は気道の形態を変化させるものであり、気道抵抗が低下して呼吸が容易になる反面、音声が悪化したり気管カニューレが必要になるなどの問題を生じる。FESによって声門開大運動を誘発する試みはZealearらのグループによって研究がすすめられてきた³⁾。彼らは両側声帯麻痺のイヌモデルを用いて、埋込型電気刺激装置(implantable pulse generator: IPG)に接続した脳深部刺激用の電極を声門開大筋である後輪状披裂筋と輪状軟骨の間に留置し、一定のサイクルで声門開大運動を誘発することに成功した^{1,4)}。このシステムに用いられているIPGは左右の声門開大筋を別々に刺激できるように、2本の刺激電極が接続できるようになっている。このFESシステムは、動物本来の呼吸とは全く同期していないが、嚥下や呼吸は障害されることがな

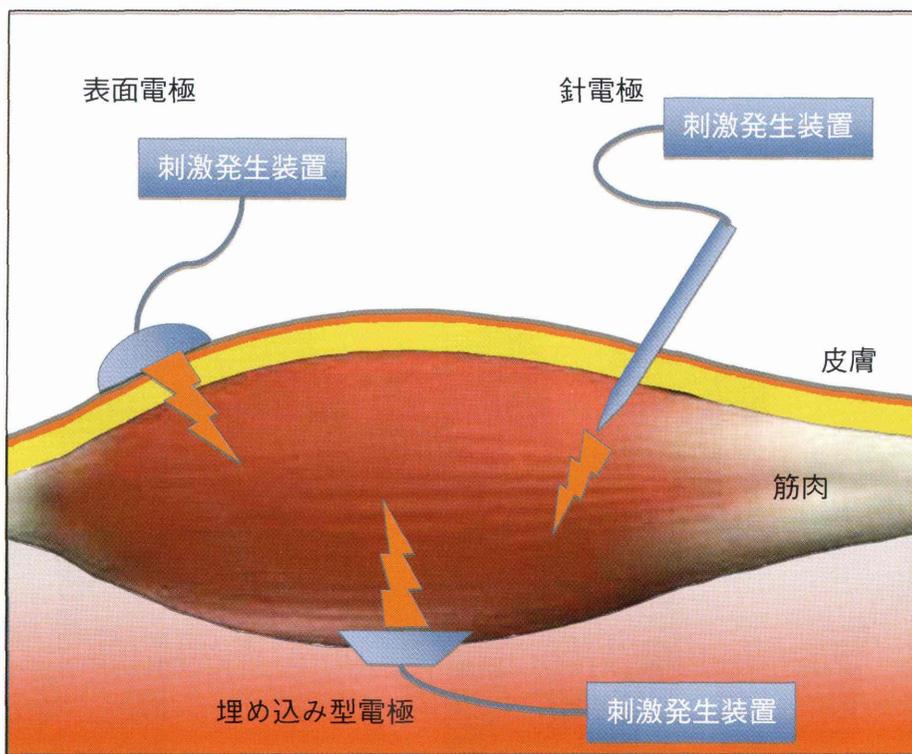


図3 機能的電気刺激に用いる電極の種類

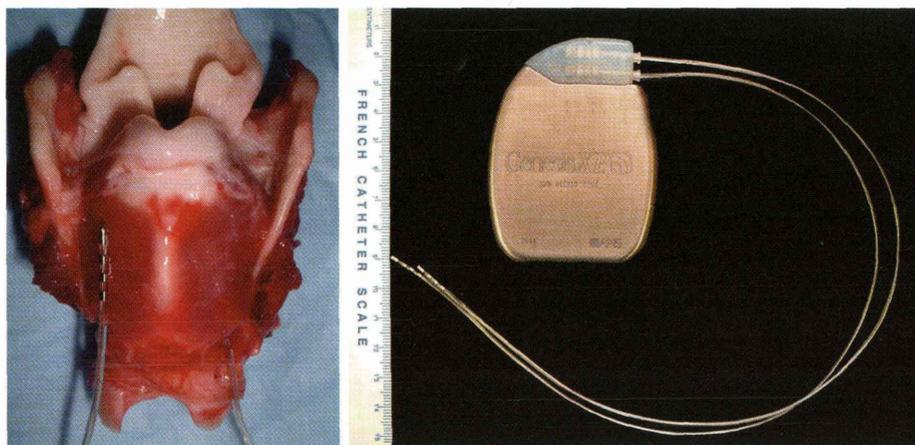
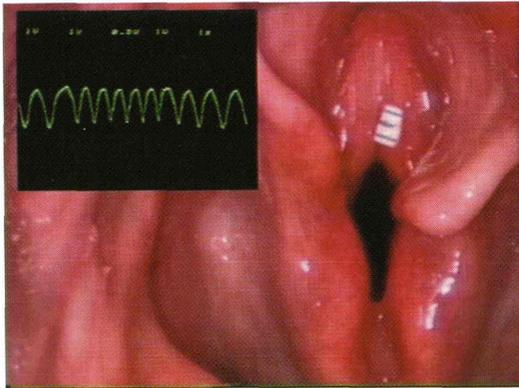


図4 埋め込み型電気刺激装置と刺激電極

く、誘発された声門開大運動によって動物の運動能が著明に改善することも確認されている⁵⁾。また、長期間の電気刺激による筋線維への影響も非常にわずかであり、動物実験レベルでは有効性と安全性が確認されていることから、臨床応用されるのも間近であると思われる。

2) 声門閉鎖運動の誘発による音声障害の改善
一側性声帯麻痺は麻痺側の声帯が内転しないために、発声時の声門間隙が大きくなり気息性の嗶声を生じる。FESによって麻痺声帯を内転させることで音声を改善させる試みも動物実験レベルでは古くから検討されている。1991年には Kojima

機能的電気刺激なし



機能的電気刺激あり

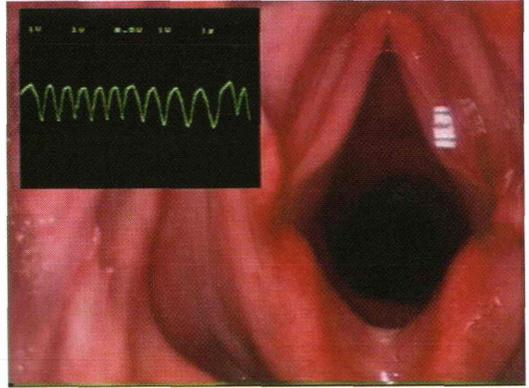
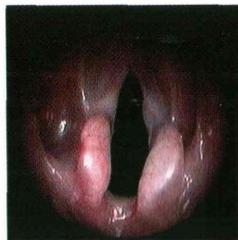


図5 両側声帯麻痺における声門開大運動の誘発

機能的電気刺激なし



機能的電気刺激あり

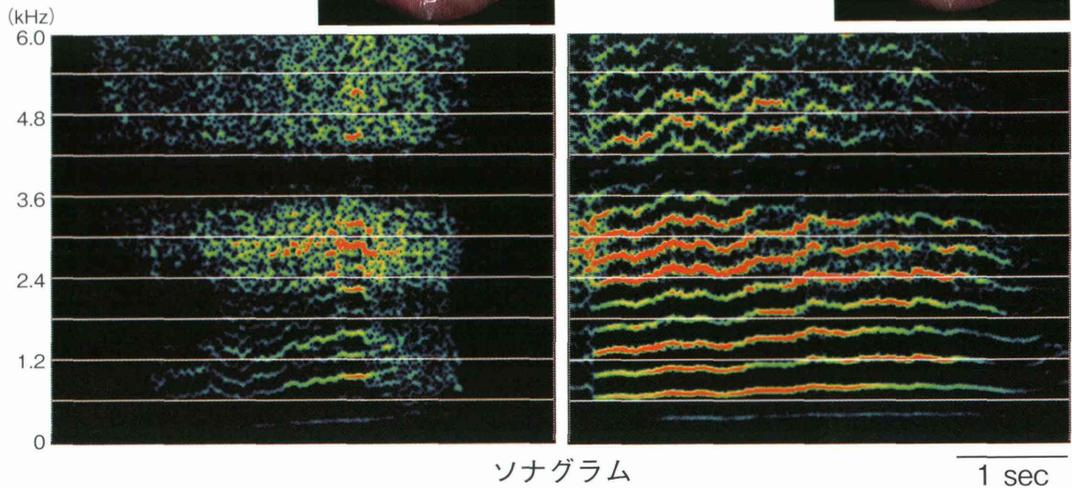
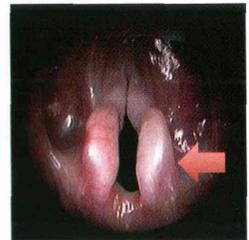


図6 麻痺側声帯の内転による音声の改善

ら⁶⁾、2004年にはKatadaら⁷⁾が、FESによる声門閉鎖運動の誘発が一側声帯麻痺モデル動物の音声障害を改善することを報告している(図6)。しかし、その後の臨床応用に関する研究はほとんどすすんでいない。現状では、声帯内注入術、甲状軟骨形成術、披裂軟骨内転術などの音声改善手

術がそれぞれに満足できる治療成績を収めており、FESによる音声改善への期待はそう大きなものではないのであろう。しかし、体内に埋め込む電極をより小型化して体表からワイヤレスでコントロールすることは、現在の医用電子工学のレベルでは決して不可能な課題ではない。甲状軟骨形成

術で甲状軟骨内にシリコンブロックを留置するのと同様の感覚で刺激電極を留置し、それを体表から容易にコントロールすることができれば、FESが誘発する声門閉鎖運動によって音声を改善する新しい治療法が実現する可能性は十分にあると考えられる。

嚥下障害に対するFESの臨床応用

嚥下障害は脳血管障害、神経筋疾患、頭頸部癌、加齢による変化などのさまざまな原因で起こり得る。日本摂食・嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会から提唱されている訓練法のまとめ(改訂2010)⁸⁾では電気刺激療法についても言及されている。このなかでのリハビリテーションにおける電気刺激療法は、治療的電気刺激(therapeutic electrical stimulation: TES)と機能的電気刺激(FES)に分類されている。TESは廃用筋の改善、脱神経筋萎縮の予防、痙縮の抑制や鎮痛を目的とし、FESは麻痺をした筋肉や末梢神経を電氣的に制御して機能的な動きを生み出す方法と記載されている。

嚥下障害のリハビリテーションを目的としたTESはすでに臨床応用がすすんでいる。これに用いられる装置はVitalStim[®]とよばれ米国FDAの認可を受けてすでに商品化されている(図7)。この装置では、表面電極からの電気刺激による喉頭挙上運動の誘発や感覚刺激を介した嚥下反射の誘発が可能であり、嚥下リハビリテーションに対する有効性が報告されている^{9,10)}。しかし、一方では低周波刺激による痛みの問題や、表面電極を用いるために深層に位置する甲状舌骨筋の刺激が難しく、思うように喉頭挙上誘発されずにかえって喉頭が下降してしまう可能性も指摘されている¹¹⁾。今後のさらなるシステムの改良が必要と思われる。

嚥下障害の原因は脳血管障害による上位運動ニューロン障害であることが多く、運動系FESのよい適応になると考えられる。嚥下運動の補助を



図7 嚥下リハビリテーションにおける電気刺激療法

目的としたFESの応用については、埋め込み電極を用いた甲状舌骨筋刺激による喉頭挙上の誘発が有効であると思われる。しかし、嚥下運動は睡眠中でも無意識に起こる不随意運動であり、嚥下運動に先行する何らかの信号をトリガーとして刺激シーケンスを発生させる必要がある。また、嚥下運動は呼吸運動とも密接に関係しており、嚥下時には誤嚥を防ぐための呼吸停止や気管内圧の上昇が起こっている。呼吸筋、咽頭筋、喉頭筋の活動を同期させながら、嚥下運動のパターンを時系列で正確に再現できる刺激シーケンスを確立し、それを制御するデバイスを開発することが、嚥下障害に対するFESの実用化に向けた大きな課題であると思われる。

これからの展望

FESによって麻痺している筋に筋収縮を誘発することは、それほど難しいことではない。現在の技術水準をもってすれば、咽頭や喉頭の運動を

制御している小さな筋肉を低侵襲で安全に刺激できるデバイスを開発することも決して無理難題ではないと思われる。しかし、そのデバイスが障害に苦しむ患者の QOL を改善するためには、ハードウェアの開発だけではなく、誤作動がない安全性の高い刺激アルゴリズムの確立や、安全な FES デバイスの設置手技や埋め込み手術の確立など多くの問題が解決されなければならない。そのためには、発声障害や嚥下障害の詳細な病態解明に加えて、医学と工学のより密接な連携と協力による問題解決が必要不可欠であると思われる。

●参考文献

- 1) Katada A, et al: Evaluation of a deep brain stimulation electrode for laryngeal pacing. *Ann Otol Rhinol Laryngol* **117**: 621-629, 2008.
- 2) 片田彰博, 他: 脱神経後の内喉頭筋萎縮に対する機能的電気刺激の効果. *日気食会報* **54**: 270-276, 2003.
- 3) Zeale DL et al: Electrical pacing of the paralyzed human larynx. *Ann Otol Rhinol Laryngol* **105**: 689-693, 1996.
- 4) Zeale DL, et al: Rehabilitation of bilaterally paralyzed canine larynx with implantable stimulator. *Laryngoscope* **119**: 1737-1744, 2009.
- 5) Nomura K, et al: Bilateral motion restored to the paralyzed canine larynx with implantable stimulator. *Laryngoscope* **120**: 2399-2409, 2010.
- 6) Kojima H, et al: Electrical pacing for dynamic treatment of unilateral vocal cord paralysis. Experiment in long-denervated muscle. *Ann Otol Rhinol Laryngol* **100**: 15-18, 1991.
- 7) Katada A, et al: Functional electrical stimulation of laryngeal adductor muscle restores mobility of vocal fold and improves voice sounds in cats with unilateral laryngeal paralysis. *Neurosci Res* **50**: 153-159, 2004.
- 8) 藤島一郎, 他: 訓練法のまとめ (改訂 2010). *日摂食嚥下リハ会誌* **14**: 644-663, 2010.
- 9) 小林健太郎, 他: 従来 of 嚥下訓練では改善が困難と考えられた重度嚥下障害に電気刺激治療が奏功した 1 例. *J Clin Rehabil* **18**: 1045-1049, 2009.
- 10) 大野敏彦, 他: 電気刺激治療による嚥下訓練について (第一報). *理療* **41**: 59-61, 2012.
- 11) Ludlow CL, et al: Effects of surface electrical stimulation both at rest and during swallowing in chronic pharyngeal Dysphagia. *Dysphagia* **22**: 1-10, 2007.