《原 著》

機能的電気刺激を用いた嚥下反射動作支援のための基礎的検討

久野 弘明^{*1} 山本 敏泰^{*1} 青柳陽一郎^{*2} 椿原 彰夫^{*2}Functional Electrical Stimulation for Pharyngeal Dysphagia :
A Feasibility StudyHiroaki KUNO,^{*1} Toshiyasu YAMAMOTO,^{*1} Yoichiro AOYAGI,^{*2} Akio TSUBAHARA^{*2}

Abstract : In this study, we investigated a surface electrode stimulation method to support laryngeal elevation in patients with pharyngeal dysphagia, from the viewpoint of functional electric stimulation (FES). Informed consent was obtained from 15 healthy men and 4 patients with pharyngeal dysphagia. Digastric and stylohyoid muscles were stimulated by silver-textile surface electrodes covering the muscle belly. Laryngeal elevation by the electrical stimulation (ES) during liquid (water, 3 ml) swallowing movement was measured by digital video camera. The laryngeal elevation trajectory demonstrated a hysteresis loop. The elevation distance of the larynx increased with a rise of stimulus strength. Laryngeal elevation by ES was 76.0% in the normal subjects and 86.6% in patients when measured during liquid swallowing. Applying FES for laryngeal elevation may assist in improving the swallowing reflex. (*Jpn J Rehabil Med* 2010 ; 47 : 867-873)

要 旨 : 本研究は、機能的電気刺激の視点から嚥下障害患者の喉頭挙上を支援する表面電極刺激方法として、喉頭挙上筋群の内、主に顎下腹筋と茎突舌骨筋の刺激について検討した。被験者は、20歳代の健常者15名と50～70歳代の嚥下障害患者4名（うち3名は日を変えて2回施行したため $n=7$ ）とした。液体嚥下は座位で水分約3 mlを嚥下させ、喉頭挙上動作をデジタルビデオカメラで計測した。銀織布製の表面電極を筋腹上に貼付し、電気刺激を行った。最初に健常者3名で刺激強度に対する喉頭挙上の動作特性を調べた。喉頭挙上動作の軌跡は刺激強度上昇に伴い挙上距離が増加し、挙上と下制の軌跡がやや異なるヒステリシスループを描いた。次に、健常者12名と嚥下障害患者4名（ $n=7$ ）の電気刺激による喉頭挙上では、液体嚥下時のそれぞれ平均76%および87%の挙上距離が得られた。表面電気刺激で嚥下反射時の喉頭挙上に近い動作が再建可能であることが示唆された。

Key words : 嚥下障害 (dysphagia), 機能的電気刺激 (functional electrical stimulation : FES), 表面電極 (surface electrode), 喉頭挙上 (laryngeal elevation)

はじめに

摂食・嚥下は、飲食物を視覚的・嗅覚的に認識した後に口の中に取り込まれ、口腔、咽頭、食道を経て胃まで到達する一連の過程であり、先行期、準備期、口腔期、咽頭期、食道期の5段階に分けられる¹⁻³⁾。嚥

下は5段階のなかで主に後半の3段階を占める運動で、嚥下障害は脳卒中などの中枢神経疾患によってこれらのどこかで障害が発生した状態である。咽頭期の障害については、舌骨・喉頭の挙上減少、喉頭下垂、喉頭の閉鎖不全、輪状咽頭筋弛緩障害などが指摘されている。嚥下障害に対する基本的なりハビリテーションア

2010年7月26日受付, 2010年10月18日受理

^{*1} 岡山理科大学知能機械工学科/〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1
Department of Intelligent Mechanical Engineering, Okayama University of Science

^{*2} 川崎医科大学リハビリテーション医学教室/〒701-0192 岡山県倉敷市松島577
Department of Rehabilitation Medicine, Kawasaki Medical School
E-mail : kuno@are.ous.ac.jp

ブローチは、口唇・舌・頬などの運動、ブローイング、空嚥下、リラクゼーション、頭部挙上訓練などの運動の他に、氷なめや酸刺激による口腔・咽頭内の感覚刺激などがある⁴⁾。

近年、嚥下障害に対する電気刺激の応用が注目されるようになってきた⁵⁻¹²⁾。当該領域の電気刺激には、経皮的電極および表面電極を用いた報告があるが、経皮的な刺激は少なからず侵襲的であり、感染の可能性がある。一方、表面電気刺激は、非侵襲的であり、感覚神経刺激効果もある⁵⁾。しかし運動を生成する場合には、筋の選択性の問題、また刺激強度を上げることによる疼痛などの問題がある。

初期の報告の1つとして、Parkら⁶⁾の軟口蓋の定電流刺激を行ったケーススタディがあり、飲み込み動作時間の短縮が報告されている。その後、Freedら⁷⁾の下顎下、咽頭・喉頭部の表面電極型電気刺激の有効性が米国において認定されて以来、VitalStim[®]として商品化された。刺激はオトガイ舌骨、顎舌骨、顎二腹、甲状舌骨筋など舌骨上下部の筋群とされており、比較的小さな電極(0.5 in²)で刺激する。

表面電極型電気刺激で嚥下動作を補助するためには、舌骨挙上などの運動が起こせることが重要であるが、当初 VitalStim では、各筋の生理学的な役割は十分に検討されたわけではなく、運動生成のためのプログラムは提案されていない。一方、Burnettら⁹⁾はワイヤー電極刺激で主に舌骨周囲筋群の生理学的運動特性を調べた。舌骨運動の最近のTsushimaら¹³⁾の研究によると、正常な嚥下動作時に舌骨は上前方に移動し、オトガイ舌骨筋、顎舌骨筋、および顎二腹筋(前腹、後腹)の挙上動作により、その運動は顎に向かって収束するとしている。特にオトガイ舌骨筋、顎舌骨筋は舌骨の前方移動に作用すると共に、その移動距離は舌骨上筋群が持続的に収縮しているかどうかによって異なる。Humbertら¹⁰⁾とLudlow¹¹⁾は、表面電極型の刺激効果を検討しており、舌骨の下制を引き起こす刺激には誤嚥を引き起こす可能性があり、注意が必要である。電気刺激の臨床応用の有効性については更なる検証が要すると指摘している。

今回われわれは、機能的電気刺激(Functional Electrical Stimulation, FES)の視点から矩形搬送波を用いた定電圧型刺激装置を用いて、喉頭挙上筋群を刺激することにより喉頭挙上動作を再建することが可能かどうかを検討した。

対象と方法

1. 被験者

実験は岡山理科大学工学部倫理審査委員会の承諾を得た後、十分な説明を行い文書により同意が得られた20歳代の健常者男性15名と50～70歳代の嚥下障害患者男性4名(うち3名は日を変えて2回施行したため $n=7$)を対象とした。健常者15名のうち3名は、最大刺激電圧を変化させた場合の喉頭挙上の動作特性を調べるために刺激電圧特性実験のみを行った。嚥下障害患者は、ワレンベルグ症候群で、発症後平均205日(80～334日)であった。4名とも胃瘻から栄養されており、藤島のグレードは2が1人、3が3人であった。日常生活活動(Activities of Daily Living: ADL)は、歩行を含めて全例で自立していた。

2. 喉頭挙上動作の計測

液体嚥下と表面電極を用いた電気刺激による喉頭挙上支援の2種類を行った。

液体嚥下は、座位にて水分約3mlを嚥下させ、甲状軟骨の喉頭隆起の軌跡をデジタルビデオカメラ(Sony社製, HDR-SR12)を用いて計測した。デジタルビデオカメラは、被験者の右側方に設置し、矢状面画像を撮影した。喉頭挙上距離は、ビデオ動画から画像編集ソフト(Sony社製, Picture Motion Browser)を用いて0.1s間隔で静止画をキャプチャし、画像解析ソフト(バイオアーツ社製, ImageJ)を用いて計測した。喉頭は嚥下時には曲線的に移動するが、計測を簡便にするために喉頭挙上距離はビデオ撮影時に基準となるスケールを写し込み、喉頭の挙上開始点と0.1sごとの位置を直線的に結んで算出した。なお、喉頭挙上距離の計測誤差を最小限にするため、嚥下時に身体(特に頸部)を動かさないよう指示し、椅子のヘッドレストに後頭部を付けるよう指示した。

3. 電気刺激による喉頭挙上支援

電気刺激による喉頭挙上支援は、試作の電気刺激装置(8chFESII)^{14,15)}を用いた。この刺激装置は、患者を含む人体への薬事法未承認である刺激器機のため、厚生労働省の臨床研究に関する指針に基づき、運動機能改善に向けた電気刺激システムおよびその関連機器の試作、改良、および臨床研究について傷害保険に加入し、共同研究者の医師の立ち会いのもと実験に用いた。本刺激装置の基本波形は図1に示すように、5kHzの矩形(サイン波も可)搬送波を用いた8チャ

図1 刺激波形の概略図

ネルの定電圧型刺激装置である。定電圧刺激の場合には、皮膚のインピーダンスが変化しても高電圧や過電流が印加されず安全であるが、2相性の波形であっても皮膚と電極の間に分極電圧が生じ皮膚が赤くなることがある。本刺激装置では刺激後最低10ms程度スイッチングによる強制放電を行っている¹⁴⁾。更に刺激装置の表面電極はナイロン製銀織布で作られており、電極サイズを刺激部位にあわせて自由に変更でき、被刺激筋の筋腹を覆うように整えることができる。

刺激は①顎二腹筋前腹と②顎二腹筋後腹+茎突舌骨筋直上の皮膚表面2チャンネルとした(図2左)。刺激電極は、双電極法により左右対称に筋腹を覆うように貼り、喉頭の挙上状態をみて①顎二腹筋前腹刺激を行うかどうか判断した(図2右)。刺激パターンは、液体嚥下時の喉頭挙上動作を基に、立ち上がり、持続、立ち下がり期間ともに0.5sの台形状とした。刺激強度は、電圧を徐々に上昇させながら刺激時の不快

感の訴えがなく、喉頭挙上が得られる刺激強度を事前に検討した。健常者12名では平均 36.5 ± 7.4 V、嚥下障害患者4名($n=7$)では 65.1 ± 8.0 Vで舌骨上周囲の顎二腹筋、茎突舌骨筋を電気刺激して喉頭を挙上させた。一方、刺激電圧特性実験は3名の健常者を対象に、筋収縮が開始する電圧と喉頭が充分挙上する電圧を事前に検討し、台形刺激パターンの持続時の刺激強度を15～55 Vまで10 Vごとに变化させて刺激強度に対する喉頭挙上動作を調べた。なお、電気刺激時には自発的な嚥下をしないよう被験者に指示し、電気刺激のみで受動的に喉頭を挙上させた。

舌骨周囲には他にも多くの筋が存在し、表面電極では他の筋収縮が起こらないよう選択的に刺激することは難しい¹⁶⁾。そのため、喉頭の挙上が充分得られて他の筋収縮が極力起こらないよう貼付位置は事前に時間をかけて入念に検討した。この際、局所的な刺激が可能な誘発電位検査装置(日本光電社製、MEB-9204)で事前に刺激筋の位置を検討した。顎二腹筋、茎突舌骨筋、顎舌骨筋、オトガイ舌骨筋などの筋腹を覆うようにした皮膚表面刺激により喉頭挙上が見られるが、顎中央に近い部位で顎舌骨筋およびオトガイ舌骨筋部位を刺激した場合に顎の下制が強く生じるため、顎二腹筋後腹および茎突舌骨筋を刺激筋として選択した。さらに、皮膚のインピーダンスが低下するよう頸部を清拭して皮膚の汚れや乾燥を除去し、男性の場合は髭を剃毛した。刺激電極は、剥離防止や密着性を高めて

図2 刺激電極の貼付位置

①顎二腹筋前腹と②顎二腹筋後腹+茎突舌骨筋：左図は①②、右図は②を刺激する場合(相磯貞和 訳：ネッター解剖学アトラス。南江堂、2004より改変)

導電効率を上げるため、サージカルテープやフィルムドレッシング材（3M社製、テガダームTM）等で固定した。電気刺激による喉頭挙上支援の評価は、喉頭隆起の挙上距離にて行った。

結 果

図3は、刺激強度に対する喉頭挙上動作の変化の典型的例（健常者、顎二腹筋前腹刺激なし）で、(a)矢状面の軌跡、(b)喉頭挙上距離の時間変化、(c)電気刺激持続期間中（0.5～1.0s）の平均喉頭挙上距離の変化を示したものである。また、(a)の軌跡は頸部（喉頭）の写真上に重ねて描いた。図(a)(b)の凡例は液体嚥下（黒太実線）、電気刺激15V（黒破線）、電気刺激25V（灰破線）、電気刺激35V（黒細実線）、電気刺激45V（濃灰実線）、電気刺激55V（薄灰実線）、刺激パターン（灰太実線、(b)のみ）である。喉頭挙上動作の矢状面の軌跡(a)は、液体嚥下・電気刺激ともに喉頭挙上と下制の軌跡がやや異なるヒステリシスループを描き、喉頭はループ左側で挙上し右側で下制した。また、電気刺激による喉頭挙上動作は、刺激強度の上昇に伴い挙上距離が増加し、軌跡は液体嚥下と概ね一致して少し前方上方へ移動した。喉頭挙上距離の時間変化(b)は、液体嚥下では0.9sでピークに達し、1.7sではほぼ元の位置に戻る山型の変化を示した。一方、電気刺激による喉頭挙上距離の変化は、刺激強度の上昇に伴って立ち上がりの傾斜が急峻になるとともにピーク値が増加し、刺激強度が45V以上ではほぼ飽和した。その形状は、台形状の刺激パターンと概ね一致した。また、喉頭挙上距離のピーク時間にはばらつきがみられるため、電気刺激持続期間中（0.5～1.0s）の平均(c)で喉頭挙上距離の変化を定量的にみると、刺激強度の上昇に伴って25V以上で急激に増加し、45V以上で飽和した。なお、刺激強度によるこれらの変化は、他の2名の被験者でも同様の傾向を示した。

図4は健常者12名の喉頭の挙上距離を示したものである。健常者では、顎二腹筋前腹刺激は行わなかった。左図(a)は液体嚥下、右図(b)は電気刺激による喉頭挙上動作で、横軸が時間(s)、縦軸が喉頭挙上距離(cm)、電気刺激の台形状の灰実線は刺激パターンである。液体嚥下では、0.4～1.2sの間で挙上距離が最大となり、平均で 2.6 ± 0.4 cm 挙上した。一方、電気刺激では、0.5～1.0sの間で挙上距離が最大とな

り、平均で 2.0 ± 0.6 cm 挙上した。喉頭挙上距離は、液体嚥下と比較すると電気刺激では、平均で76.0% 挙上させることができた。なお、挙上距離の割合(%)は個々の被験者で算出した後に平均化した。

図5は嚥下障害患者4名($n=7$)の喉頭の挙上距離を示したものである。嚥下障害患者では、被験者Aを除いた3名(B～D)の被験者に、顎二腹筋後腹+茎突舌骨筋に加えて顎二腹筋前腹を同時に刺激した。左図(a)は液体嚥下、右図(b)は電気刺激による喉頭挙上動作で、横軸が時間(s)、縦軸が喉頭挙上距離(cm)、電気刺激の台形状の灰実線は刺激パターンである。液体嚥下では、0.3～1.2sの間で挙上距離が最大となり、平均で 2.0 ± 1.2 cm 挙上した。一方、電気刺激では、0.7～1.5sの間で挙上距離が最大となり、平均で 1.5 ± 0.9 cm 挙上した。喉頭挙上距離は、液体嚥下と比較すると電気刺激では、平均で86.6% 挙上させることができた。

考 察

これまでの表面電極を用いた報告では、刺激強度を上げることによる疼痛の問題があり、喉頭挙上を得ることは困難とされていた。今回、矩形搬送波を用いた定電圧型刺激装置を用いることにより、喉頭挙上距離は液体嚥下と同等までは及ばないが軌跡は概ね一致することから、電気刺激によって嚥下反射における喉頭挙上動作を概ね再建できる可能性が示唆された。また、刺激電圧特性実験を行った3名の被験者で軌跡の方向は多少のばらつきがみられたが、Tsushimaら¹³⁾によれば喉頭の動作は食物の硬さによっても軌道が変わるという報告があり、今後電気刺激による喉頭挙上動作支援の視点からこれらについても追跡調査したい。さらに、表面電極は主に喉頭をやや上方後方へ引く顎二腹筋後腹と茎突舌骨筋腹上に貼付して刺激を行っているが、実験結果からも明らかなように喉頭がやや前方上方へ移動したことからそれ以外の喉頭挙上筋も同時に刺激された可能性がある。刺激された可能性のある筋としては、その直下の顎舌骨筋、双電極法による顎舌骨筋背部の喉頭挙上筋に及んでいる可能性がある。しかしながら、現状において刺激された筋の範囲は、シミュレーションで確認する他なく、今後の研究で検討したい。刺激強度に対する喉頭挙上距離の時間変化では、ある電圧以上では飽和することが明らかになり、また、その形状は刺激パターンと概ね一致

図3 刺激強度に対する喉頭挙上動作の変化
(a) 矢状面の軌跡, (b) 喉頭挙上距離の時間変化, (c) 電気刺激持続期間中 (0.5 ~ 1.0 s) の平均喉頭挙上距離の変化 (健常者, 顎二腹筋前腹刺激なし)

図4 健常者の喉頭挙上距離の変化

(a) 液体嚥下, (b) 電気刺激

図5 嚥下障害患者の喉頭挙上距離の変化

(a) 液体嚥下, (b) 電気刺激

することが分かった。このことから、電気刺激による刺激強度を事前に検討しておけば、被験者にできるだけ負担の少ない適切な刺激強度を選択することができると思われる。また、本実験では刺激パターンを立ち上がり・持続・立ち下がりともに0.5s一定で行ったが、電気刺激時の喉頭挙上距離の変化が刺激パターンと一致した。このことから、被験者の液体嚥下パターンに合わせて刺激パターンを変化させれば、個々の被験者の液体嚥下パターンに応じた刺激パターンを

提供することができ、適切な喉頭挙上動作支援を行えると考えられる。電気刺激持続期間中(0.5～1.0s)の平均喉頭挙上距離は、ある電圧から急激に増加して最終的に飽和したことから、被験者の状態に合わせて適切な刺激強度を選択することができる。

健常者の喉頭挙上距離は、液体嚥下と電気刺激を比較して76.0%挙上させることができた。しかし、刺激強度に対する電圧特性実験から推測すると十分な刺激強度が得られていれば喉頭挙上距離の波形は台形状

に近いパターンが得られるはずであるが、何名かの被験者では台形状の変化が得られなかった。この原因としては、被験者が電気刺激に不慣れなために違和感を訴えたことによる刺激強度不足、頸部周囲の清拭不足により接触インピーダンスが上昇し、実質的な刺激強度が低下したことなどが考えられる。このため、被験者が電気刺激にある程度慣れるための事前実験や頸部周囲の清拭を充分しておく必要がある。なお、電気刺激に対する感覚は、皮膚（筋）が振動するような感覚の訴えはあったが、疼痛の訴えはなかった。

嚥下障害患者の喉頭の挙上距離は、液体嚥下と電気刺激を比較して86.6%挙上させることができた。しかし、嚥下障害患者においても、健常者と同様に喉頭挙上距離の台形状の変化はみられなかった。この原因は、健常者と同様の理由が考えられる。本研究は刺激手法の検討が主題であり、嚥下障害患者における客観的な評価を行うには被験者数は少ないものである。しかしながら、実験時点で嚥下可能な喉頭挙上距離に対して電気刺激により液体嚥下に対して健常者(76.0%)よりも大きな割合(86.6%)で喉頭挙上を得られている。また、嚥下障害患者の中には電気刺激で液体嚥下よりも大きな喉頭挙上を得られている場合(被験者AおよびB1)もあり、訓練次第で喉頭挙上距離を増大できる可能性がある。今後は、嚥下障害患者に対する電気刺激における刺激強度、刺激周波数などの基本パラメータの検討とともに、喉頭挙上筋群の筋力増強などの訓練効果等を含めて検討していく必要があると考える。一方、刺激電極は筋腹を覆うように貼るのが原則であるが、特に高齢者では皮膚のしわ、たるみ等により特定するのに手間取ることもある。今後、訓練などで繰り返し利用することを考えると、嚥下動作時の喉頭挙上のタイミングをあわせて電気刺激開始操作をハンド・スイッチ等で行うことが健常者では比較的簡単に対応できることが示されたが¹²⁾、脳卒中などによる嚥下障害者では口腔部の感覚機能、手指機能、認知機能を評価した上で利用していく必要があると考える。また、刺激電極の配置については、健常者などの刺激部位とそのサイズを参考に標準化していくことが必要と思われる。

本研究の一部は、文部科学省平成18年度私立大学学術研究高度化推進事業(社会連携研究推進事業)「地域社会とのコラボレーションによるQOL向上の一体的アプロ

チ」, 科学研究費(基盤研究(C), 研究課題番号: 19500466 および 21500500)の助成により実施した。

文 献

- 1) 田中芳幸, 廣岡優子, 松岡未希子, 青柳陽一郎, 椿原彰夫: 摂食・嚥下診療のアプローチ. 日本醫事新報 2005; 4227: 27-35
- 2) 岡本五十雄: 嚥下障害. 総合リハビリテーション 1991; 19: 310-314
- 3) 山田好秋: 嚥下を制御する神経機構. Niigata Dent J 1999; 29: 1-9
- 4) 藤島一郎: 摂食・嚥下のリハビリテーション. 日本歯科医師会雑誌 1998; 51: 4-9
- 5) Gallas S, Marie JP, Leroi AM, Verin E: Sensory transcutaneous electrical stimulation improves post-stroke dysphagic patients. Dysphagia 2009, DOI 10-1007/s00455-009-9259-3
- 6) Park CL, O'Neill PA, Martin DF: A pilot exploratory study of oral electrical stimulation on swallow function following stroke: An innovative technique. Dysphagia 1997; 12: 161-166
- 7) Freed ML, Freed L, Chatburn RL, Christian M: Electrical stimulation for swallowing disorders caused by stroke. Respir Care 2001; 46: 466-474
- 8) Wijting Y: Neuromuscular electrical stimulation in the treatment of dysphagia—a summary of the evidence. VitalStim therapy 2010; 2-25, TI Anode UK PVT Ltd
- 9) Burnett TA, Mann EA, Cornell SA, Ludlow CL: Laryngeal elevation achieved by neuromuscular stimulation at rest. J Appl Physiol 2003; 94: 128-134
- 10) Humbert IA, Poletto CJ, Saxon KG, Kearney PR, Crujido L: The effect of surface electrical stimulation on hyolaryngeal movement in normal individuals at rest and during swallowing. J Appl Physiol 2006; 101: 1657-1663
- 11) Ludlow CL: Electrical neuromuscular stimulation in dysphagia: current status. Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery 2010; 18: 159-164
- 12) Burnett TA, Mann EA, Stoklosa JB, Ludlow CL: Self-triggered functional electrical stimulation during swallowing. J Neurophysiol 2005; 94: 4011-4018
- 13) Tsushima C, Saitoh E, Baba M, Yokoyama M, Fujii W, Okada S, Uematsu H: Hyoid movement and laryngeal penetration during sequential swallowing. J Med Dent Sci 2009; 56: 113-121
- 14) 山本敏泰, 野崎大地, 矢野英雄: 高齢障害者の立位・歩行に関するリハビリ訓練の為の支援機器に関する研究開発(H10-長寿-99). 平成11年度厚生科学研究費補助金, 長寿科学総合研究事業研究報告書 2001
- 15) 川北慎一郎, 山本敏泰, 濱出茂治, 立野勝彦: 片麻痺上下肢に対する表面電極型8chFESシステムの臨床応用. 総合リハビリテーション 2003; 31: 789-794
- 16) 加賀谷 齊, 馬場 尊, 才藤栄一, 横山通夫, 尾関保則, 三串伸哉, 岡田澄子, 村岡慶裕, 肥田岳彦: 舌骨上筋群モーターポイントの解剖学的検査. 日本摂食・嚥下リハビリテーション学会誌 2005; 9: 195-198