

[研究助成 (A)]

マルチモーダル嚥下機能計測技術を応用した
嚥下 FES に関する基礎研究Fundamental Study on Functional Electrical Stimulation for Swallowing using
Multimodal Assessment method of Swallowing

2191026



研究代表者

東京理科大学
工学部 機械工学科

講 師

橋 本 卓 弥

[研究の目的]

高齢化が進む日本において、加齢に伴う高齢者の身体機能の低下が問題となっており、その1つとして嚥下機能の低下が挙げられる。そして、嚥下機能の低下によって引き起こされる誤嚥性肺炎は、高齢者の主要な死亡要因の1つとなっている。嚥下機能を改善するために、様々なリハビリテーション法が実施されているが、近年では、電気刺激によるリハビリテーション法が注目されるようになってきている。一方、電気刺激による運動補助・再建に関する研究は、四肢の運動を対象として活発に行われているものの、嚥下運動支援に関する研究は少ない。特に、家庭等での使用を想定した随意型の嚥下運動支援は未だ実現されておらず、さらなる研究開発が求められる。電気刺激による日常生活での嚥下運動支援を実現するための課題として、筋の選択性の問題と刺激を与える際のトリガーの問題がある。頸部の筋は小さいため、侵襲性が低い表面電極では筋を選択的に刺激することが難しく、表面電極による効果的な刺激位置や刺激強度を検討する必要がある。また、日常の食事場面において何を嚥下運動のトリガーとするかは難しく、現状では、ハンド・スイッチなどで刺激タイミングを調整する場合が多い。その場合は、患者の随意的な嚥下運動と刺激のタイミングを合わせることは難しく、結果として

十分な電気刺激の効果を得られない可能性がある。以上のことから、電気刺激の嚥下運動への適用においては、刺激位置、刺激強度、刺激トリガーについての更なる検討が必要である。

そこで本研究では、まず、機能的電気刺激(Functional Electrical Stimulation, 以下 FES)を用いて嚥下運動の補助を行う際の効果的な刺激位置や刺激強度について基礎的な検討を行った。また、電気刺激のトリガーを決定するための方法として、我々が提案する PVDF (Poly Vinylidene DiFluoride) フィルムを用いたマルチモーダル嚥下機能評価システムを応用するために、PVDF フィルムによって嚥下における喉頭挙上の運動も計測することができるかどうか検証した。

[研究の内容、成果]

1. 電気刺激装置と基本の刺激パターン

図1(左)は試作した電気刺激装置を示しており、皮膚抵抗の変化や電極パッドの密着率低下によって過電流が流れないようにするために、

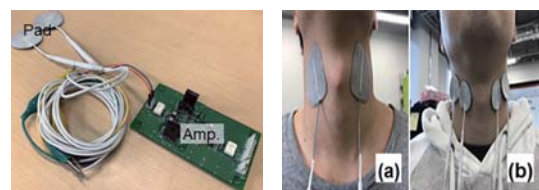


図1 開発した電気刺激装置(左)と刺激位置(右)

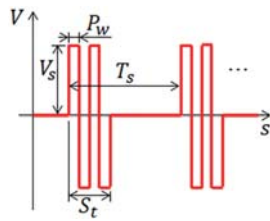


図2 刺激パターン

定電圧型とした。PC で生成した刺激信号を D/A ボード (16 bit) を介して送ると、その信号を増幅して筋肉に刺激を与えられるようになっている。また、刺激用の電極パッドとして、大きさが異なる 2 種類 (S, M) の粘着ゲルパッド (Setsu Planning 社製 Top-Touch) を用いた。

刺激信号には、図 2 に示すような 2 相性パルス波を用い、先行研究を参考に、パルス幅 $P_w=0.1$ ms, 総刺激時間 $S_t=2.4$ ms, 刺激周波数 $F_s\left(=\frac{1}{T_s}\right)=20$ Hz を基本の刺激パターンとした。さらに、刺激電圧 V_s に関しては、皮膚抵抗に個人差があるため、15 V~45 V まで 10 V 刻みで変化させるようにした。

2. 刺激位置の検討

嚥下関連筋は、舌骨上筋群と舌骨下筋群に大別でき、電気刺激で喉頭挙上を補助する場合、舌骨上筋群である顎舌骨筋、オトガイ舌骨筋、顎二腹筋、茎突舌骨筋への刺激が有効とされる。一方、顎舌骨筋やオトガイ舌骨筋への刺激は下顎を下げる効果もあるため、本実験では、舌骨上筋群のうち、顎二腹筋および茎突舌骨筋を刺激筋として選択した。これらの筋肉は頸部の左右対称にあり、パッド位置によっては左右の筋を十分に収縮させられない可能性がある。そこで、1 チャンネルで左右の筋を挟み込んで同時に刺激する方法 (図 1 (右(a))) と、2 チャンネルで左右を別々に刺激する方法 (図 1 (右(b))) を比較した。なお、2 チャンネルでの同時刺激では、刺激電流が干渉しないか予備実験にて確認した。

実験では、嚥下障害がなく、正常咬合を有す

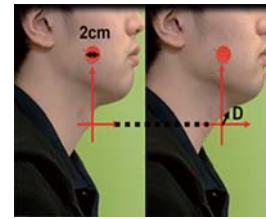


図3 喉頭挙上の計測

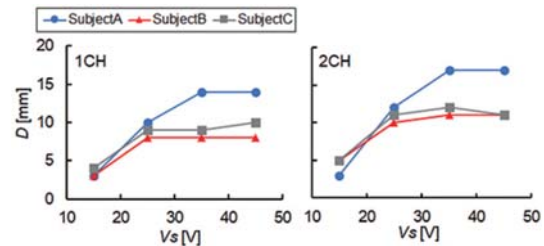


図4 刺激位置による喉頭挙上量の比較

る健常者 3 名 (23 ± 1 歳) に協力してもらった。まず、被験者を 90 度座位で椅子に座らせ、姿勢を正してもらった。次に、刺激部位を脱脂綿で拭き、電極パッドを装着した。この際、動脈を避けるようにパッドを貼り付けるようにした。刺激回数は 5 回とし、同時に被験者の側面から喉頭挙上の様子をビデオカメラで撮影 (30 fps) した。そして、画像解析により喉頭隆起の挙上量 D を測定した (図 3)。また、挙上の比較対象として、水 10 ml を嚥下した際の挙上量も計測した。

実験結果は図 4 に示す通りで、水 10 ml を嚥下した際の挙上量 (被験者 A : 31 mm, 被験者 B : 21 mm, 被験者 C : 26 mm) と比較すると、1 チャンネルの場合は平均 41%, 2 チャンネルの場合は平均 51% の挙上量を得られていた。結果として、1 チャンネルよりも 2 チャンネルの方が大きな挙上量を得ることができた。これは、2 チャンネルの場合の方が左右の筋により多くの電流が流せるためだと考えられる。また、どの被験者においても、刺激電圧がある一定値以上になると挙上量が飽和しているが、その値は被験者毎に異なることが分かった。

3. 刺激パターンの検討

生体筋に電気刺激を与える際、ある水準 (閾

表1 パルス幅 P_w , 刺激時間 S_t , 喉頭挙上量 D の関係

Sub.	P_w [ms]	0.05			0.10			0.20			0.30		
A	S_t [ms]	1.4	1.5	1.6	1.4	1.6	1.8	1.2	1.6	2.0	1.2	1.8	2.4
	D [mm]	13	14	14	14	18	17	12	17	17	10	16	17
B	S_t [s]	1.3	1.4	1.5	1.2	1.4	1.6	1.2	1.6	2.0	1.2	1.8	2.4
	D [mm]	9	10	10	10	11	11	11	10	11	10	10	10
C	S_t [s]	1.4	1.5	1.6	1.4	1.6	1.8	1.6	2.0	2.4	1.8	2.4	3.0
	D [mm]	11	11	11	11	12	11	12	12	11	11	12	11

値)までは刺激として認識されないことが知られている。この際の閾値を調査することにより、より身体に負担が少ない刺激を行うことができると考えられる。そこで、次に、顎二腹筋および茎突舌骨筋におけるパルス幅 P_w , 刺激時間 S_t について検討した。

実験では、まず、パルス幅 P_w を 0.05~0.30 ms の間で変化させ、それぞれにおいて刺激時間 S_t を 0 から 1 周期ずつ増加させた。そして、喉頭挙上が発生した時の S_t を記録し、更に、その時点から 3 周期増やしたところまで計測を続け、試行毎に喉頭挙上量を計測した。また、筋疲労によって閾値は増加する傾向があるため、試行間には十分な休息時間を設けた。なお、前述の実験結果より、2 チャンネルでの刺激を行った。

実験結果を表1に示す。結果として、パルス幅 P_w の値に関係なく、全被験者で刺激時間 S_t が 1.4 ms 以上となった時に喉頭挙上が見られた。被験者によっては、それ以上に S_t を増加させても挙上量は増加せず、挙上量の飽和が見られた。この結果から、今回選択した嚥下関連筋では、1.4 ms が閾値なのではないかと推察できる。

4. 下顎固定の効果の検討

2章で述べたように、顎舌骨筋 (mylohyoid)、オトガイ舌骨筋 (geniohyoid) への刺激では下顎の下制が生じることがある。図5に示すように、この二つの筋は下顎と舌骨を結び、下顎を固定した場合は舌骨を引き上げ、固定しない場合は下顎を下制させる。閉口した状態ではないと嚥下し難いことを考慮し、下顎を意図的に固定した状態で刺激を与えることにより、挙上量

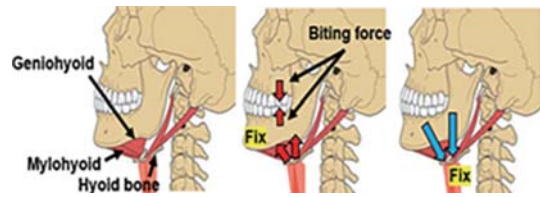


図5 顎舌骨筋 (mylohyoid) とオトガイ舌骨筋 (geniohyoid) の役割



図6 刺激位置

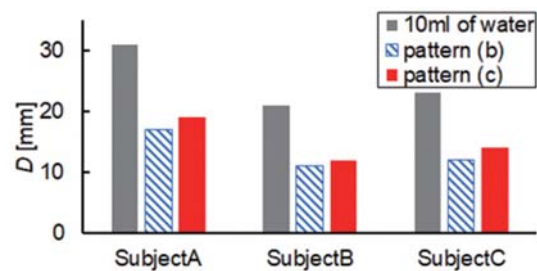


図7 下顎固定の効果

が増加するかどうか検証した。

2章での実験結果から、パルス幅 P_w を 0.10 ms, 刺激時間 S_t を 1.4 ms とした。パッド貼り付け位置は図6に示す通りで、これまでの顎二腹筋、茎突舌骨筋に加え、顎舌骨筋、オトガイ舌骨筋を刺激するようにした。実験中、被験者には無理のない力で閉口し続けてもらうように指示した。

実験結果は図7に示す通りで、全被験者で挙上量の増加が確認でき、被験者 A では水嚥下時の 61% 程度の挙上を得ることができた。この結果から、下顎の固定を行うことで、顎舌骨筋、オトガイ舌骨筋も刺激筋として選択することができ、より効果的に喉頭挙上を誘発できることが分かった。

5. マルチモーダル嚥下機能計測に向けた PVDF フィルムによる喉頭挙上計測

我々は、これまでの研究において、圧電素子の一種である PVDF (PolyVinylidene DiFluoride) フィルムを用いて嚥下運動における筋音信号と嚥下音信号の同時計測に取り組んできた。これに加え、喉頭挙上計測を実現することにより、嚥下運動における筋活動 (筋音)、食塊の流入 (嚥下音)、喉頭挙上に関する情報を基にした多角的な嚥下機能評価が実現できると考えられる。また、筋活動と喉頭挙上運動から嚥下のタイミングを同定することができれば、嚥下 FES のトリガとして使うことができ、随意的な嚥下機能補助への応用が期待できる。そこで、PVDF フィルムにより喉頭挙上を計測できるかどうか検証した。

実験では、被験者に 90 度座位で椅子に座ってもらい、被験筋として頸部右側の 4 箇所 (顎二腹筋前腹 (AD)、胸骨舌骨筋 (SN)、甲状舌骨筋 (TH)、胸鎖乳突筋 (SCM)) に PVDF フィルムを貼付した (図 8)。また、2 章での実験同様、喉頭挙上の比較用として、被験者の左側方からビデオカメラにより喉頭部分の動きも撮影 (30 fps) した。計測時間は 3 秒間とし、その時間内に水 10 ml を嚥下するように指示した。なお、被験者は嚥下障害がなく、正常嵌合を有する健常者 3 名 (23±1 歳) とし、測定を 5 回行った。

計測結果の一例として、最も良い結果が得られた SN での計測結果を図 9(a) に示す。この結果から、上下が反転する場合もあるものの、類似した波形が得られていることが分かる。そこで、比較し易いように、計測波形を全波整流した結果を図 9(b) に示す。また、動画から得られた喉頭隆起の上下方向の移動量を示すグラフを図 9(c) に併記する。図 9(b) を見てみると、PVDF フィルムの波形には明確な 2 つのピーク (peak1, peak2) が存在し、peak1 は喉頭挙上の移動量が最初に最大となると一致しているのが分かる。この関係は、SN での計

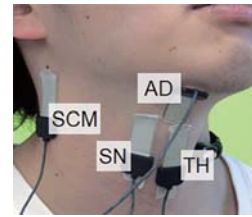


図 8 PVDF フィルムの貼付位置

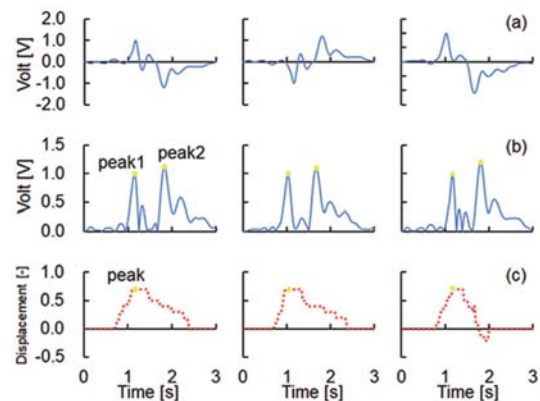


図 9 PVDF フィルムによる喉頭挙上運動の計測結果

測において特に顕著に見られた。この結果から、PVDF フィルムを用いて喉頭挙上に関連する波形を計測できる可能性が確認できた。

[今後の研究の方向、課題]

嚥下 FES 装置については、今後、さらなる検討を行い、刺激位置や刺激強度についてより詳細に調査し、より効果的に喉頭挙上を誘発する方法を確立する。さらに、マルチモーダル嚥下機能計測技術については、嚥下 FES のトリガーを決定するまでには至っていないため、今後、取得できる 3 種類の信号を基に嚥下 FES のためのトリガーを決定する方法論について検討する。そして、マルチモーダル嚥下機能計測システムと嚥下 FES を統合し、随意型の嚥下支援システムの構築を目指す。

[成果の発表、論文等]

- (1) Takuya Hashimoto, "Measurement of Laryngeal Elevation Using PVDF Film for Multimodal Assessment of Swallowing Function", The 41th Interna-

tional Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC' 19), 2019.

- (2) 橋本卓弥, 菊地貴博, 道脇幸博, “筋音計測による咀嚼・嚥下機能の定量的評価に関する研究”, 日本機械学会福祉工学シンポジウム 2019 (LIFE 2019), 2019.
- (3) 梶谷卓矢, 橋本卓弥, 菊池貴博, 道脇幸博, 小池卓二, “マルチモーダル嚥下機能評価に関する研究”, 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2019), 2019.