

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：33916

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350638

研究課題名(和文) 随意運動介助型電気刺激を用いた咀嚼嚥下動作の再建

研究課題名(英文) Restoration of chew-swallow by using integrated volitional control electrical stimulation

研究代表者

加賀谷 斉 (KAGAYA, Hitoshi)

藤田保健衛生大学・医学部・教授

研究者番号：40282181

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：舌骨上筋上に表面電極を装着し、随意運動介助型電気刺激を用いた咀嚼運動の三次元動作解析を行った。咀嚼では、オトガイと喉頭の上下の周期運動の停止後に嚥下反射が生じていた。咀嚼嚥下と液体嚥下における嚥下反射のタイミングは異なり、脳卒中患者においても咀嚼嚥下の場合は嚥下反射遅延が誤嚥の原因にはならなかった。頭部挙上訓練に電気刺激を加えることで、短期間に筋力増強効果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：The 3 dimensional motion analysis was performed during chew-swallow with integrated volitional control electrical stimulation. The surface electrodes were put on the suprahyoid muscles. The swallowing reflex was occurred after stopping the cyclic motion of the mentum and larynx. The timing of swallowing reflex between chew-swallow and liquid swallow differ. The prolonged swallowing reflex does not increase the risk of aspiration in individuals with stroke in chew-swallow. We found that the head raising exercise combined with integrated volitional control electrical stimulation strengthened the suprahyoid muscles earlier.

研究分野：リハビリテーション

キーワード：電気刺激 咀嚼 摂食嚥下

1. 研究開始当初の背景

摂食嚥下は多数の筋肉と神経により制御された複雑な運動である。摂食嚥下機能に問題が生じれば誤嚥を生じ、誤嚥は肺炎の原因となる。肺炎は本邦では死亡原因の第3位であり、高齢者肺炎の多くは誤嚥性肺炎と考えられている。したがって、摂食嚥下障害で生じる問題の解決が、肺炎での死亡を減少されるためには、極めて重要である。

機能的電気刺激は低周波を人体に与え、筋収縮を生じさせることで失われた動作を再建する技術であり、これまで脳卒中や脊髄損傷などによる四肢の再建に用いられてきた。摂食嚥下障害に対する機能的電気刺激の研究は2000年代に入ってから始まり、いずれも喉頭挙上が減弱している患者の舌骨上筋群などに電気刺激を行い、舌骨・喉頭を挙上させることを目的としている。しかし、摂食嚥下において、飲み込むことと咀嚼することは全く別の機序であることが近年明らかにされた。健常人の場合、口腔内の食塊を飲み込むときには、口腔から咽頭に食塊が達した直後に嚥下反射が生じ、食道入口部が弛緩して食道に流入する。しかし、口腔内の食塊を咀嚼したときには、咀嚼された食物は順次咽頭へと送り込まれ、中咽頭で蓄積される(stage II transport)。そして、ある程度食塊が蓄積された後に嚥下反射が生じる。そのため、機能的電気刺激を用いて嚥下動作を再建するときにも、飲み込む動作の再建と咀嚼を伴う動作の再建は別に考える必要がある。われわれは、随意運動が生じた場合に筋電図を拾い、筋電量に比例した電気刺激を発生させる随意運動介助型電気刺激法に注目した。喉頭挙上時に生じる舌骨上筋の筋収縮をトリガーとして電気刺激を舌骨上筋に与えることで、嚥下反射が生じるタイミングに一致して電気刺激を与えることが可能になる。

また、麻痺した筋は筋萎縮を生じ筋力が低下するため、機能的電気刺激を行うにあたっては、予め治療的電気刺激と呼ばれる筋力増強訓練が必要である。舌骨上筋の筋力強化訓練としては頭部挙上訓練(Shaker exercise)がエビデンスの高い訓練法であるが、訓練に6週間を要し、また負荷が強いため脱落が多いといわれる。そこで、頭部挙上訓練にIVESを併用することでより短期間に筋力増強効果が得られるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

電気刺激を用いた咀嚼嚥下の動作解析を行い、また、咀嚼嚥下と液体嚥下の嚥下反射のタイミングの相違を検討した。さらに、電気刺激を併用した筋力増強訓練を行うことで、より実用的な咀嚼動作の再建を目指す。

3. 研究の方法

(1) 電気刺激を用いた咀嚼嚥下の動作解析

健常成人10名(平均年齢32歳)の舌骨上筋上に表面電極(Vitrode F-150M)を装着し(図1)、随意運動介助型電気刺激装置(integrated volitional control electrical stimulator; IVES)(オージー技研)を接続した。IVESの刺激波形はパルス幅 $50\mu\text{s} \times 6$ 回、刺激周波数20Hzの振幅変調方式である。刺激強度は被験者毎に不快なく耐えられる最大の刺激強度とした。クッキー5gを咀嚼嚥下させ、三次元動作解析装置 KinemaTracer®(キッセイコムテック社)を用いてサンプリング周波数60Hzで計測した。カラーマーカはオトガイと喉頭隆起に装着し、CCDカメラは2台使用した。

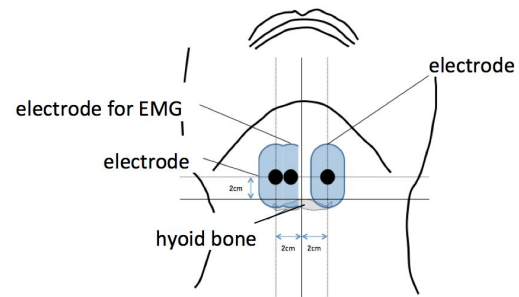


図1 舌骨上筋上の表面電極設置部位

(2) 咀嚼嚥下と液体嚥下における嚥下反射のタイミング

2-1) 健常人53名を60歳未満の28人(平均年齢39歳)と60歳以上の25人(平均年齢72歳)に分け、座位で液体10ml命令嚥下、コンビーフ8g咀嚼嚥下、クッキー8g咀嚼嚥下、液体5ml+コンビーフ4g(混合物)咀嚼嚥下を行わせた。食塊にはバリウムを混ぜ、毎秒30フレームで側面像の嚥下造影検査を行った。嚥下反射のタイミングとして、食塊先端が下顎骨下縁を超えた時点から舌骨の挙上開始時点までの時間(stage transition duration; STD)を求めた。また、それぞれの食塊のSTDの相関を求めた。

2-2)2008年1月から2013年5月までに座位またはリクライニング60°で頸部回旋なしに混合物の咀嚼嚥下を嚥下造影検査中に行った脳卒中患者153名(平均年齢68歳)のSTDと penetration-aspiration scale (PAS)を後方視的に調査した。

(3)電気刺激を併用した頭部挙上訓練の効果

頭部挙上訓練(Shaker exercise)は, Shakerらが提唱した舌骨・喉頭挙上筋力増強と上部食道入口部開大を目的としたエビデンスの高い訓練である。2種類の訓練から構成され,第1の運動は仰臥位で肩を床につけたまま,頭部だけをつま先が見えるまで1分間挙上する。1分間のインターバルを入れて頭部挙上を3回行う。第2の運動は仰臥位で頭部挙上を30回繰り返す。これを1日3セット6週間実施する。健常成人20例(平均年齢24歳)を無作為にShaker exercise実施群(S群)とIVESを用いたShaker exercise実施群(S+I群)の2群各10名に分け週5日間2週間の介入を行った。S群はShaker exerciseを1日3セット行い,S+I群はShaker exercise実施時に舌骨上筋群の収縮に同期したIVESを実施した。電極設置部位は研究(1)と同部位とした。両群とも,介入前後で開口時の等尺性筋力,臥位での頭部屈曲および座位での頭部屈曲時の筋力を測定した。

4. 研究成果

(1)咀嚼中のオトガイと喉頭隆起は両者とも1-1.5cmの範囲で上下方向の周期運動を繰り返し,同期していた。周期運動の停止後に嚥下反射が生じていた。嚥下反射では,咀嚼の周期運動を大きく超えてオトガイと喉頭隆起が挙上した(図2)。

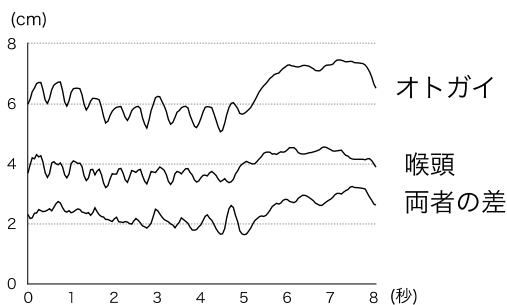


図2 オトガイと喉頭隆起の動き

したがって,咀嚼開始時のオトガイまたは喉頭の動きよりも大きく上方に移動した

ときに電気刺激を与えれば,咀嚼と嚥下反射との鑑別が可能になると思われた。

(2-1)健常人のSTDはいずれも正規分布していなかった(Shapiro-Wilk test)。60歳未満の中央値は液体10ml,コンビーフ8g,クッキー8g,混合物の順に0.0,0.4,2.0,1.8秒,60歳以上では順に0.1,4.4,4.2,1.9秒であった。液体10mlのSTDは年齢にかかわらずコンビーフ8g,クッキー8g,混合物よりも有意に短かった(Wilcoxon signed-rank test)。混合物以外では,60歳以上では60歳未満よりもそれぞれの食塊においてSTDが延長した(Mann-Whitney U test)。また,STDの相関関係をみると,コンビーフとクッキー以外は有意な関係はみられなかった(Spearman rank correlation coefficients)。それぞれのSTDを対数変換して正規分布させ,STDの正常範囲を平均値±2SD(標準偏差)として求めた(表1)。

表1 STDの正常範囲

	60歳未満	60歳以上
液体10ml	-0.4~1.2 秒	-0.4~2.0 秒
コンビーフ8g	-0.5~7.8 秒	-0.4~51.2 秒
クッキー8g	-0.3~12.0 秒	-0.3~58.1 秒
混合物	0.0~10.0 秒	0.0~11.9 秒

以上から,STDは咀嚼嚥下では健常人において延長することが明らかとなった。このSTDの延長は,咀嚼に伴って生じるstage II transportが原因と思われる。高齢者ではコンビーフやクッキーのSTDの中央値は5秒以内であるのにもかかわらず,正常上限は50秒以上となり,高齢者では個人差が大きいことも明らかになった。また,コンビーフとクッキー以外はSTDに有意な関係はみられなかったことから,嚥下反射のタイミングを考える際には,健常人においては少なくとも液体,固形物,混合物の3種類は独立していることを考慮する必要があることがわかった。

(2-2)脳卒中患者のSTDも正規分布していなかった。STDの中央値は3.2秒であり,PASは1が85例,2が8例,3が17例,4が1例,5が4例,6が2例,7が11例,8が25例であった。誤嚥がみられた

38 例 (PAS 6 ~ 8) と誤嚥がみられなかった 115 例 (PAS 1 ~ 5) の PAS 中央値は順に 3.6 秒, 3.1 秒であり, 両者に有意差はみられなかった (Mann-Whitney U test) .

したがって, 混合物を咀嚼嚥下したときの脳卒中患者の STD は健常人よりも延長しているが, 誤嚥の有無による延長はない. これまで, 嚥下反射遅延は誤嚥の原因になると考えられてきたが, 咀嚼嚥下では嚥下反射遅延は誤嚥の原因とはならないことが明らかとなった .

(3) S群の1名およびS+I群の1名の合計2名が途中で脱落したため, 最後まで訓練を継続した S群9名, S + I群9名の合計18名を対象とし解析を行った. 介入前のS群とS+I群の筋力に有意差はみられなかった. 介入前後の筋力を比較するとS群では有意な差は認められないが, S + I 群で臥位頭部屈曲, 座位頭部屈曲時の筋力が有意に増大した (paired-t test) . また, 介入前後の平均筋力の差を比較すると S群と比較しS + I 群で臥位頭部屈曲の筋力差が有意に大きかった (unpaired-t test) (図 3 , 4) .

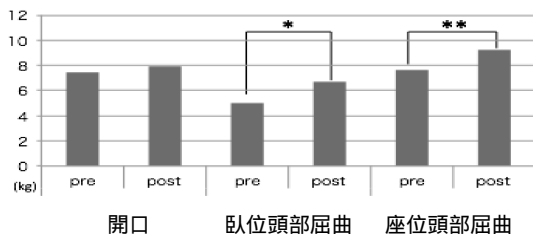


図 3 S + I 群の筋力
(* P=0.006, ** P=0.009)

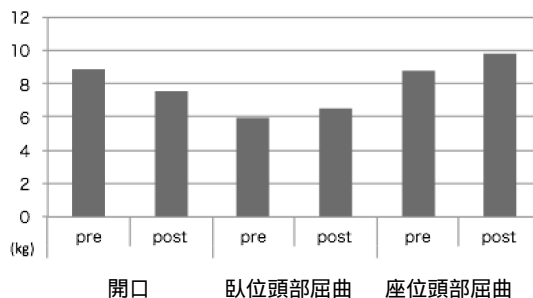


図 4 S 群の筋力

介入初日から介入 2 日目にかけて, Shaker Exercise に対する疲労および困難さを両群全被験者が訴えたが, 翌日まで継続する筋痛を訴えたのはS群では9名全員であったのに対し, S+I群では9名中1名のみであった. 筋痛を訴えた部位は胸鎖乳突筋周辺の前頸部であった. 介入最終日では, 両群共このような訴えは消失した (表 2) .

表 2 胸鎖乳突筋部の痛みを訴えた患者数

	初日	2 日目	2 週間後
S 群	9	9	0
S + I 群	9	1	0

今回, 2 週間の介入においてもS + I 群では頭部屈曲時の筋力が有意に増大した. 頭部挙上訓練はその脱落率の高さが課題とされており, 短期間で筋力増強は望ましいと考えられる. また, 筋痛の少なさもS + I 群の有意な点である. したがって, 頭部挙上訓練に IVES を併用することで, より短期間で効果的な筋力増強が得られたと考えられる .

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

Kagaya H, Saitoh E, Shibata S, Onogi K, Aoyagi Y, Inamoto Y, Ozeki M, Ota K:

Delayed pharyngeal response in chew-swallow does not increase risk of aspiration in individuals with stroke. J Am Geriatr Soc 2015; 63: 1698-1699. (査読有)

Kagaya H, Yokoyama M, Saitoh E, Kanamori D, Susa C, German RZ, Palmer JB: Isolated pharyngeal swallow exists during normal human feeding. Tohoku J Exp Med 2015; 236: 39-43. (査読有)

Susa C, Kagaya H, Saitoh E, Baba M, Kanamori D, Mikushi S, Ozaki K, Uematsu H, Minakuchi S: Classification of sequential swallowing types using videoendoscopy with high reproducibility and reliability. Am J Phys Med Rehabil 2015; 94: 38-43. (査読有)

Nishimura K, Kagaya H, Shibata S, Onogi K, Inamoto Y, Ota K, Miki T, Tamura S, Saitoh E. Accuracy of Dysphagia Severity Scale rating without using videoendoscopic evaluation of swallowing. Jpn J Compr Rehabil Sci 2015; 6: 124-128. (査読有)

Toda F, Kagaya H, Baba M, Shibata S,

Ozeki Y, Kanamori D, Tanaka T, Miki T, Ishigame K, Nishimura K, Onogi K, Saitoh E: Effect of swallowing rounds on the outcome of dysphagic patients. Jpn J Compr Rehabil Sci 2015; 6: 50-55. (査読有)
〔学会発表〕(計10件)

Kagaya H, Mizokoshi E, Aoyagi Y, Shibata S, Onogi K, Inamoto Y, Saitoh E: Relationship between timing of swallow onset and bolus positions in drinking and eating. 5th Korea- Japan NeuroRehabilitation Conference, Seoul, Korea, 2016.3

加賀谷 斉, 田矢理子: 咀嚼嚥下と嚥下反射惹起時間. 第60回日本音声言語医学会, 名古屋市, 2015.10

加賀谷 斉, 田矢理子, 岩田義弘, 櫻井一生: 脳幹障害由来の重度摂食嚥下障害に対する喉頭挙上術の帰結. 第60回日本音声言語医学会, 名古屋市, 2015.10名古屋市, 2015.10

Kagaya H, Momota T, Aoyagi Y, Inamoto Y, Shibata S, Onogi K, Saitoh E: Shaker exercise combined with integrated volitional control electrical stimulation. The 1st Asia-Oceanian Congress for NeuroRehabilitation; Seoul, Korea. 2015.9

Kagaya H, Shibata S, Ozeki Y, Aoyagi Y, Onogi K, Inamoto Y, Saitoh E: Conservative and surgical treatment for severe dysphagia due to brainstem disease. 第21回日本摂食嚥下リハビリテーション学会; 京都市, 2015.9

Kagaya H, Shibata S, Ozeki Y, Baba M, Saitoh E, Iwata Y, Sakurai K: Laryngeal Suspension and Upper Esophageal Sphincter Myotomy for Severe Dysphagia. 4th Japan-Korea Neurorehabilitation Conference, Akita, Japan, 2015.2

Kagaya H, Onogi K, Shibata S, Aoyagi Y, Kanamori D, Inamoto Y, Saitoh E: Stage

transition duration in chew swallowing. 3rd Korea-Japan NeuroRehabilitation Conference, Busan, Korea, 2014.3

加賀谷 斉, 小野木啓子, 柴田斉子, 太田喜久夫, 青柳陽一郎, 尾関保則, 前島伸一郎, 金森大輔, 目黒道生, 松尾浩一郎, 才藤栄一: 咀嚼嚥下におけるstage transition duration. 第19回日本摂食・嚥下リハビリテーション学会, 岡山市, 2013.9

Kagaya H, Momota T, Shibata S, Onogi K, Ota K, Saitoh E: Functional Electrical Stimulation for Patients with Reduced Laryngeal Elevation. 35th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Osaka, Japan, 2013.7

Kagaya H, Momota T, Tanabe S, Sutoh T, Aoyagi Y, Inamoto Y, Shibata S, Ota K, Onogi K, Saitoh E: Power-assisted functional electrical stimulation for pharyngeal dysphagia. 7th World Congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine. Beijing, China, 2013.6

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加賀谷 斉 (KAGAYA Hitoshi)
藤田保健衛生大学・医学部・教授
研究者番号: 4 0 2 8 2 1 8 1

(2) 研究分担者

青柳陽一郎 (AOYAGI Yoichiro)
藤田保健衛生大学・医学部・准教授
研究者番号: 3 0 2 8 6 6 6 1

百田貴洋 (MOMOTA Takahiro)
藤田保健衛生大学・医療科学部・助教
研究者番号: 3 0 5 9 7 6 3 8

才藤栄一 (SAITOH Eiichi)
藤田保健衛生大学・医学部・教授
研究者番号: 5 0 1 6 2 1 8 6

田辺茂雄 (TANABE Shigeo)

藤田保健衛生大学・医療科学部・准教授
研究者番号：50398632

稲本陽子 (INAMOTO Yoko)
藤田保健衛生大学・医療科学部・准教授
研究者番号：70612547