

嚥下筋活動計測におけるばらつき要因の検討 ～嚥下の繰り返しによる影響～

大森 信行^{*1,*2} 遠藤 博史^{*1} 近井 学^{*1} 井野秀一^{*1}

Experimental Investigation of Variability in Swallowing Measurement

Nobuyuki Ohmori^{*1,*2}, Hiroshi Endo^{*1}, Manabu Chikai^{*1} and Shuichi Ino^{*1}

Abstract - In the swallow measurement, previous studies have shown that EMG onset and offset has a certain degree of variability. In order to find the cause of the variability, we measured EMG of repeated swallowing (117 times) in four measurement positions and investigated the temporal measures. The swallowing EMG was measured by using a sensor sheet that consists of multiple electromyography electrodes. In the measured EMG signals, a signal to noise ratio of swallowing EMG and wave shape (rise time and fall time) effected on variability of onset and offset time. In order to investigate time variation of swallowing, the average of duration, onset and offset were calculated for three group of swallowing (first, middle and last group: 39 times of measurements were in each group). As the result, repeated swallowing increased the EMG offset time in one measurement position. The offset time of last 39 times swallowing is significantly larger than that of first 39 times. There were no significant differences in other three measurement positions. The results indicate that there was an effect in the local region of it of front neck.

Keywords: swallow, electromyography, sheet, noise and repeat

1. はじめに

食品メーカーにおいては、豊かな食生活の実現を目指し、食べやすさに着目し、咀嚼・嚥下機能の低下した人であっても経口摂食することを目指した食品の開発が進んでいる。センシング技術を活用して嚥下過程の筋活動を計測することにより、ヒトの食嗜好に関する仕組みを調査し、おいしさを感じられる食品の開発へと活用することを目指して、嚥下筋電図計測用のセンサシート^[1]を開発してきた。嚥下活動の計測には臨床では内視鏡やX線VF^[2,3,4]、身体的な負担の少ない方法としては嚥下音^[5]や筋電図^[6,7]による方法が利用されている。筋電図では前頸部に複数電極を貼り付けて筋電図電圧の前頸部表面の分布を計測できる^[8]。センサシートは複数の電極が埋め込まれたシートを前頸部に貼り付けて筋電図を計測する方法であるが、電極レイアウトを保持して簡便な計測を目指す点に特徴がある。

本研究では嚥下の繰り返しによる嚥下動作の変化を、嚥下時間の変化と、そのばらつきにより調査した。嚥下動作の変化に関する要因として加齢については、VF検査により高齢者において年齢の増加により食塊の咽頭通過時間、喉頭挙上遅延時間^[9]、上部食道括約筋開口持続時間等^[4]が増加する。嚥下筋電図では若年者よりも高齢群では筋電図持続時間が長くなる^[10]。より短期間での変化

として、VF検査の再現性を検討するために健常者で2週間から数ヶ月程度の間隔で2回の検査を行ったところ、嚥下の継続時間等の時間的な指標に有意な変化は生じなかった^[3]。これよりも短時間における繰り返し嚥下の影響は検討されていなかった。また、ばらつきについては、筋電図による嚥下計測の研究では活動時間は被験者間の平均値に対して少なくとも2割程度の標準偏差を持つことが報告^[1,6,7]されている。X線による評価では、咽頭通過時間(食塊の先頭が咽頭に入り、食塊末端が上部食道括約筋を通過するまで)は被験者間平均で0.6秒程度であるが2割程度の標準偏差が生じる^[3,4]。ばらつきの原因については嚥下動作、計測方法のいずれにあるかは明確ではなかった。

本研究では嚥下動作の変化に関する要因として繰り返し嚥下の影響を調査する実験を行った。実験により被験者内の影響を検討した。また、計測方法がバラツキに及ぼす影響として電極位置や解析方法について検討を行っ

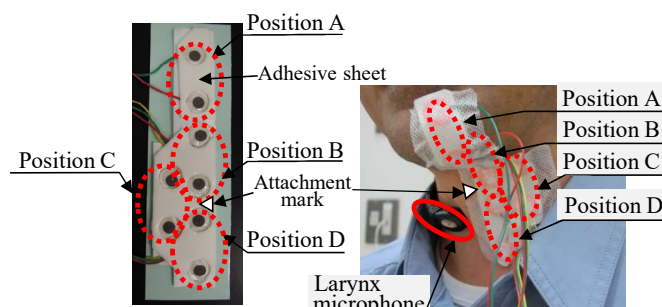


図1 試作した嚥下筋電図センサシート
Fig.1 Swallow EMG sensor sheet prototype (adhesive face) and the sheet attached to examinee

*1: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人間情報研究部門
*2: 長野県工業技術総合センター 材料技術部門
*1: Human Informatics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
*2: Material Technology Department, Nagano Prefecture General Industrial Technology Center

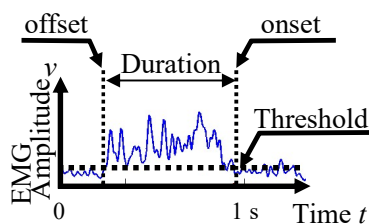


図2 嚥下筋電図センサシートによる測定波形と活動開始・終了時刻、継続時間の例
Fig. 2. Example of EMG waveform measured using sensor sheet and onset, offset and duration

た。嚥下の筋電図からは振幅に基づく活動強度や活動量等の指標も計測できるが、本研究ではセンサシートで計測できることが確認されている時間的な特徴により検討を行った。

2. 実験方法

2.1 計測用センサ

利用した嚥下筋活動計測用センサシートを図1の通り粘着シートに筋電図電極を組み込んだものである。電極8個により図1の位置AからDでの測定を行うセンサシートは図の取付指標(Attachment Mark)を甲状軟骨に合わせて貼り付けることで位置Aが舌骨上筋群付近、位置C,Dが舌骨下筋群付近に、位置Bはその中間位置に配置される。

2.2 実験手順

咀嚼・嚥下機能に異常のない健康者1名(男性30代)が実験協力者として実験に参加した。嚥下回数は合計117回とした。

1回あたりの評価試料の量は、Nakaneら^[10]のVF法による嚥下機能検査と同様に4mlとしディスポシリンジ(SS-05SZ, テルモ社製, Japan)で計測した。試料はシリンジで被験者自身が口腔へ注入して保持し、合図を待ってから嚥下を開始した。被験者には可能な限り口腔内の試料4ml全量を一度に嚥下するように教示した。

2.3 嚥下活動の解析方法

嚥下時の筋活動はセンサシートを接続したデータロガー(MP150, BIOPAC Systems, Inc., USA)により4kHzサンプリングで記録した。繰り返しによる嚥下活動の変動の調査のために表1の指標を位置AからDについて計算した。指標の計算では測定した筋電図波形から100-200Hzの帯域をフィルタにより取り出し全波整流と10Hz低域通過フィルタによる平滑化を行った波形を対象とした。遅れ時間及び活動時間2において位置Aのonset時刻を基準とした理由は、嚥下の開始時刻、つまり食塊を口腔から咽頭へ送り込もうとする筋活動の開始時刻を基準とするためである。4箇所測定位置の中で口腔に近い位置Aのonset時刻を嚥下開始の基準とした。

指標におけるonset、offset時刻を、嚥下時以外の筋活

表1 指標と計算方法

Table 1 Indexes and Calculation	
指標	計算方法
活動時間 1	各位置の onset, offset 時刻の差
活動時間 2	位置 A の onset と各位置の offset 時刻の差
Onset 遅れ時間	位置 A の onset と各位置の onset 時刻の差
Offset 遅れ時間	位置 A の offset と各位置の offset 時刻の差

動波形(ベースライン)の大きさに基づいて設定した閾値を上回る、または下回る時刻により計算したところ、目視判定による時刻と大きく異なって計算されることがあった。閾値による方法は4.2節の通りSN比及び波形の影響を受けるため、目視判定により時刻を特定することとした。目視判定は筆者の内の1名が行った。

3. 実験結果

合計117回の嚥下の所要時間は約50分であった。繰り返しによる嚥下の変動を調査するため、117回を39回ずつ最初、中間、最後の時間帯に分割し、筋電図信号の時間的な特徴を評価するために表1の指標の平均値を測定位置4箇所について計算した。SN比の悪化によりonsetまたはoffsetが判定できない波形は欠損とした。位置A、B、C、Dでそれぞれ26、7、4、25回の欠損があった。時間帯別の欠損は各位置の平均で最初、中間、最後でそれぞれ、2.25、8.75、4.5回であった。活動時間と遅れ時間の平均値をそれぞれ図3、図4に標準偏差とともに測定位置毎に示す。遅れ時間においては位置Aのonset、offsetを基準時刻とするため、位置Aの遅れ時間はすべての測定で0とした。嚥下の繰り返しによる時間的な特徴の変化を調べるために、表1に示す指標の変化量の時間帯(最初、中間、最後)における違いについて、測定位置(位置A,B,C,D)毎にKruskal-Wallis testで検定を行い、多重比較をSteel-Dwass testにより行った。この結果offset遅れ時間の測定位置Bにおいて有意差($\chi^2(2) = 10.24, p < .01$)があり、最初と最後の時間帯間で有意差($p < .05$)があった。また、表1に示す指標の変化量の測定位置(A,B,C,D)における違いについて、同様に検定した。この結果、4種類の指標において有意差があり($p < .01$)、多重比較の結果を図3、図4に示した。遅れ時間についての検定では時刻の基準とした位置Aを除いた3箇所を対象とした。

4. 考察

4.1 嚥下動作時間の変化に関する検討

本研究で行った117回の繰り返し嚥下は1日の嚥下回数585回^[11]の20%に相当する。繰り返し嚥下は、位置Bにおけるoffset遅れ時間が大きくなった。舌骨上筋群・下筋群の全域にわたって筋電図計測に影響を与えるわけでは

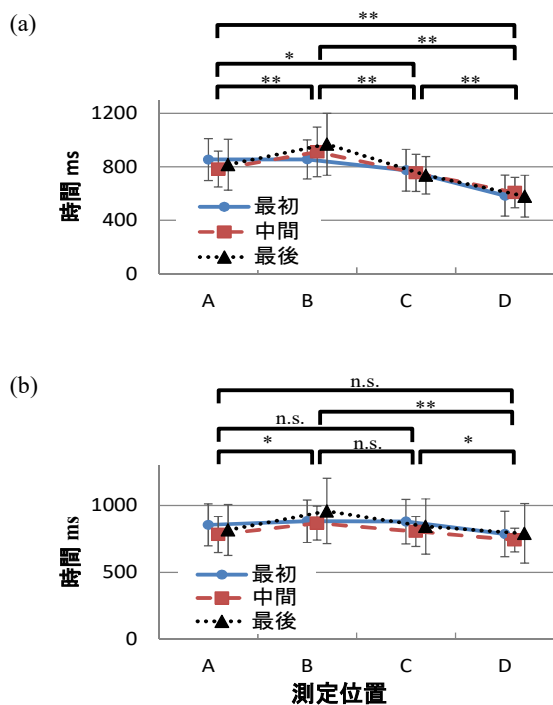


図3 活動時間の測定位置毎の平均値(平均±S.D.)
(a) 活動時間1 (b)活動時間2
Fig. 3. EMG Duration of each measurement position
(a) Duration 1 (b) Duration 2

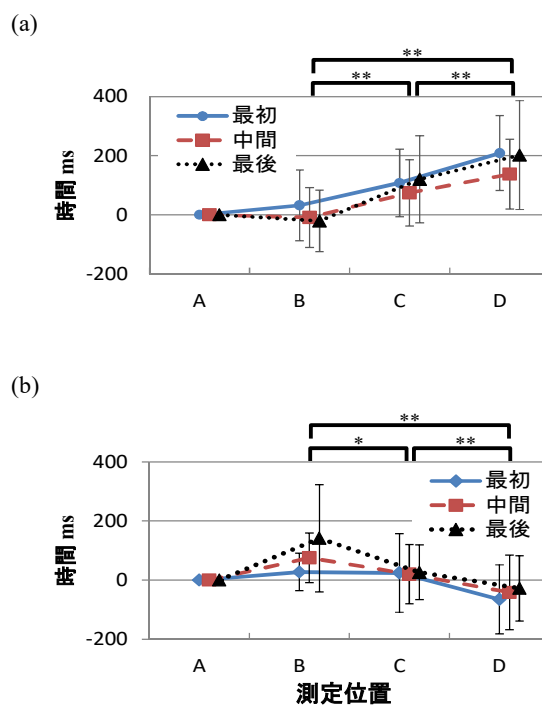


図4 遅れ時間の測定位置毎の平均値(平均±S.D.)
(a)Onset 遅れ時間 (b)Offset 遅れ時間
Fig. 4. EMG delay of each measurement position
(a) Onset Latency (b) Offset Latency

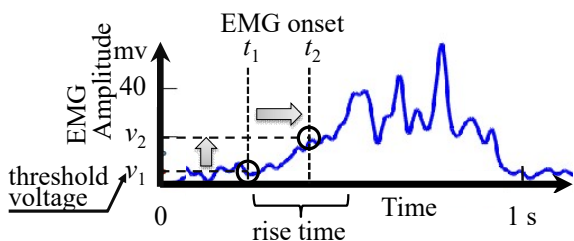


図5 閾値電圧の増加による活動開始時刻検出への影響
Fig. 5. Onset detection affected by increase of threshold voltage

なく、測定位置 B の甲状軟骨上部付近において筋電図が他の位置よりも遅くまで継続するという局所的な影響があった。Onset 遅れ時間では有意な変化がないことから、個々の嚥下の開始には影響を与えないと考えられる。

位置 B における offset 遅れ時間の差は100ms から200ms 程度の違いであった。今回の実験では心理的負荷の定量的調査は行っていないが、約470ml の水を50分程度かけて嚥下する行為は、日常的な摂食行為とは大きく異なるものであり、被験者の意見からも一定の心理的負荷の生じたことが予想される。

また4箇所位置で計測した筋電図波形のパターンを活動時間、遅れ時間のそれぞれ2種類の指標により調査したが、すべての指標で計測位置間における違いが生じている。これは、嚥下の進展において順次活動する異なる筋の筋電図が各測定位置において計測されていることを示

唆し永谷ら¹⁰⁾の計測結果とも整合する結果である。

ただし舌骨上筋群・下筋群は複数の筋が近接して多層的に走行するため、今回の各測定位置における表面筋電図は特定の筋のみに由来する信号が他の筋由来の信号と区分して得られものではなく、舌骨上筋群と下筋群による筋電図がそれぞれ各測定位置に応じた異なる寄与度合いで重畳された波形であると考えられる。前頸部における嚥下筋電図の電圧の分布に基づき¹⁰⁾、舌骨上筋群、下筋群の筋電図を区分しやすく、十分な S/N 比で計測するための測定位置、電極の配置を検討することは今後の課題である。

筋電図持続時間の平均値に対する標準偏差の割合は20%程度であり、筋電図センサシートでの研究¹¹⁾と同様であった。例として測定位置 B における117回の平均は活動時間1で822±166ms、活動時間2で904±190msであった。これらの被験者内のばらつきは1節における被験者間のばらつきと比較して同程度であった。

4.2 計測におけるばらつき要因と対策

嚥下筋電図の onset 及び offset 計測方法がばらつきに与える影響を検討する。実験で得られた筋電図の波形を調査したところ、S/N 比が低下することによる以下の影響があった。(a)閾値による方法ではベースライン(嚥下していない時の波形)の平均電圧に係数を乗じた値を閾値電圧とするが、S/N 比の悪化により嚥下時の筋電図信号に対してベースライン電圧が相対的に大きくなると信号電

圧は変わらなくても閾値電圧が増加するため、onset を遅く、offset を早く見積もってしまうこと、(b)嚥下時の信号の波形において立ち上がり、立ち下がり時間が短く、活動の変化が急峻である場合は閾値電圧の影響は小さいが、活動の変化が緩やかであり傾きが小さい場合には閾値電圧の小さな変化でも活動開始、終了時間が大きく影響を受けてしまうことの2点である。(a)について、ノイズによるベースライン電圧増加で閾値電圧が増加 (v_1 から v_2 へ) することで onset が遅く判断(t_1 から t_2 へ)される筋電図波形の例を図5に示す。立ち上がりは0.3秒から0.6秒付近、立ち下がりは1秒付近である。本実験でもこの影響が確認されたため3節においては筋電図の活動開始、終了時刻を計算するために閾値による方法ではなく、ベースライン電圧の影響を受けづらい目視による判定を採用した。(b)については立ち上がり、立ち下がり時間増加の原因として、複数の筋に由来する筋電図電圧の混入の影響が考えられる。

今回の実験ではS/N比の変動がonset、offset時刻検出のばらつきを増加させた可能性があった。これは計測方法によるばらつきであり、ヒトの嚥下のばらつきの正確な評価にはばらつきの小さな計測方法が必要となる。対策としては、4.1節のとおり舌上筋群、下筋群の筋電図が混在しづらく嚥下筋電図信号のS/N比が確保できる電極位置や解析方法を検討することが考えられる。

5. 結論

嚥下の繰り返しにおける筋電図の変化を調査したところ、一箇所の測定位置において筋活動が他の位置よりも遅くまで継続したことを示唆する結果が得られた。筋電図波形を調査したところ、筋電図の時間的な特徴をより高精度に計測するためには、計測位置、解析方法に課題があることがわかった。今後は嚥下筋電図による食品評価に向けて他の被験者による検討等を進める予定である。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費JP17H00755、国立研究開発法人産業技術総合研究所地域産業活性化人材育成事業の支援を受けています。センサシートをご提供いただいた(株)西澤電機計器製作所百瀬英哉研究開発室室長付技術エキスパートに感謝します。

参考文献

- [1] Ohmori, N., et al.: Noise Reduction in Swallowing Muscle Activity Measurement Based on Mixture Gaussian Distribution Model; JACIII, **vol.21**, no.1, pp.109-118, (2017).
- [2] 才藤, 向井 監修: 摂食・嚥下リハビリテーション; 東京, 医歯薬出版 (2007)
- [3] Lof GL, Robbins J.: Test-retest variability in normal swallowing; Dysphagia, **vol.4**, no.4, pp. 236-242, (1990)
- [4] Molfenter SM., Steele CM.: Temporal Variability in the Deglutition Literature; Dysphagia, **vol.27**, no.2, pp.162-177, (2012).
- [5] Chikai, M., et al.: Pilot Study on an Acoustic Measurements System of the Swallowing Function Using an Acoustic-Emissions Microphone; JACIII, **vol.9**, no.2, pp.293-300, (2017).
- [6] 永谷他: 非侵襲的計測方法による嚥下運動の解析 : 健常若年者と健常高齢者の比較; 信学技法 MBE2004-91, pp.73-76, (2005).
- [7] Kohyama K., et al.: Textural evaluation of rice cake by chewing and swallowing measurements on human subjects; Biosci Biotechnol Biochem., **vol.71**, no.2, pp. 358-365, (2007).
- [8] Yu, B., et al.; A pilot study of high-density electromyographic maps of muscle activity in normal deglutition; Proc. 35th IEEE Eng Med Biol Soc., (2013).
- [9] 飴矢, 西窪, 三瀬: 加齢による嚥下機能の変化; 耳鼻と臨床, **vol. 52**, No. Suppl. 4, pp. S249-S255(2006).
- [10] Nakane, A., et al.: Videofluoroscopic Kinesiologic Analysis of Swallowing: Defining a Standard Plane; Journal of medical and dental sciences. **vol.53**, pp.7-15, (2006).
- [11] Lear C.; The frequency of deglutition in man; Arch Oral Biol, **vol.10**, no.1, pp.83-99, (1965).