嚥下筋活動計測におけるばらつき要因の検討
～高精度な計測に向けて～

大森 信行[*1,*2]　澤野 友貴[*3]　渡辺 誠一[*3]　百瀬 英哉[*4]
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], Tomoki Sawano[*3], Seiichi Watanabe[*3], Hideya Momose[*4],
Hiroshi Endo[*1], Manabu Chikai[*1] and Shuichi Ino[*1]

Abstract - In the swallow measurement, previous studies have shown that EMG onset and offset have a certain degree of variability. In order to find the cause of the variability, we measured EMG in two types of swallow method: Tipper and Dipper type. In tipper type swallow the bolus positioned on the tongue at the beginning of the swallow and tongue tip is pressed against the upper incisors during swallowing. In contrast, in dipper type swallow the bolus positioned beneath the anterior tongue and the tongue tip scoop the bolus to a supra-lingual location. In experiment for investigating time and amplitude variation of swallowing, the average of duration and amplitude were calculated for two types of swallowing. Three subjects participated the experiment. As the result, in three subjects there were positions at which duration in dipper type is significantly larger than that of tipper type. And in two subjects there were positions at which amplitude in tipper type is significantly larger than that of dipper type. repeated swallowing increased the EMG offset time in one measurement position. The results indicate that adequate subject control improves inter individual variability of swallowing measurement.

Keywords: swallow, electromyography, variability, bolus and position

1.　はじめに

食品メーカにおいては, 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，シート型の嚥下筋電センサ [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。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。

非侵襲的な嚥下計測として嚥下筋電を用いた研究がされており，そのばらつきの検討が行われている。筋電から得た開始時刻には一定のばらつきが生じること[8]、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の継続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、食塊後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]。一方で被験者内のばらつきについてはX線による研究[3]が行われているが，その要因や嚥下計測への影響は明確となっていない。一般的にばらつきのある測定における精度向上には測定回数を増やして平均値を得ることが有効であるが，嚥下といったヒトの動きの計測では，測定回数の増加は被験者の負担が大きくなってしまう。また，嚥下の過剰な繰り返しは限定的ではあるが計測に影響を与える。ばらつきの小さな計測により測定回数を

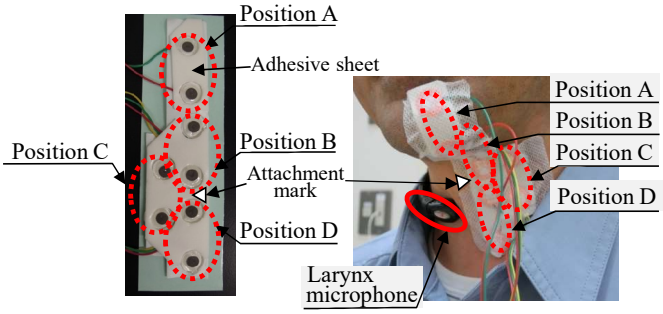

図１　試作した嚥下筋電図センサシート
Fig.1 Swallow EMG sensor sheet prototype (adhesive face) and the sheet attached to examinee

*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
*3: 長野工業高等専門学校
*4: 株式会社スキノス
*1: Human Informatics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
*2: Material Technology Department, Nagano Prefecture General Industrial Technology Center
*3: National Institute of Technology, Nagano College
*4: SKINOS Co., Ltd.

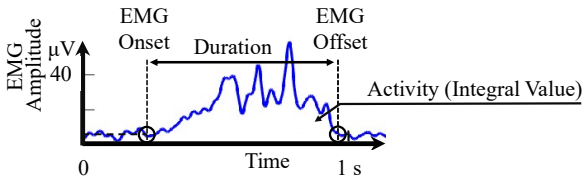

図 2　嚥下筋電図センサシートによる測定波形と活動開始・終了時刻、継続時間、活動量の例
Fig. 2. Example of EMG waveform measured using sensor sheet and onset, offset, duration and activity

増やすことなく高精度な嚥下筋電計測の実現を目指して，筆者らはばらつきの要因検討のために，同一被験者，同一嚥下試料での100回程度の繰り返し嚥下を行った[9]。この結果，個々の嚥下毎に一定のばらつき(被験者内のばらつき)が生じることがわかった。

嚥下計測のばらつきとして，計測・解析方法のみではなく，ヒトの要因としての影響があり得ることがわかったため，本研究では被験者の嚥下方法を統制することによる計測ばらつきへの影響を検討した。ばらつきに影響する可能性のある嚥下方法として本研究では，嚥下開始時の食塊の保持位置に着目した。健常者において嚥下は舌尖の初期位置により、口蓋と舌の間に食塊を保持する Tipper 型(舌背保持)、口底部で保持する Dipper 型(口腔底保持)に分類され、舌により食塊をすくい上げて嚥下を行う Dipper 型の方が先行して舌骨上筋群の活動が発生し筋活動継続時間が延長する。両型は主に X 線により識別でき、加齢による Dipper 型の頻度増加等が報告されている。本研究ではこの2つの型による嚥下の違いが舌骨上筋群及び下筋群の活動に与える影響を筋電の時間，振幅に関する指標の被験者内のばらつきとともに検討した。

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常者 3 名（男性 20 代から 40 代）が被験者として実験に参加した。被験者には舌背保持，口腔底保持の 2 つの嚥下方法を説明した。次に舌背保持ではできるだけ早く，口腔底保持ではできるだけゆっくり嚥下するよう指示した。嚥下の速さを教示した理由は，舌背保持よりも口腔底保持の方が筋活動継続時間が長いことから，ここではその違いをより大きく出現させた計測によりばらつきへの影響を評価するためである。嚥下回数は各嚥下方法で 10 回ずつ合計 20 回とした。

表 1　指標と計算方法
Table 1　Indexes and Calculation

指標	計算方法
継続時間	各位置の onset, offset 時刻の差
活動量	各位置の ofnset と offset 時刻の間の筋電波形の面積

嚥下試料は水とし，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 4 ml 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 4 ml 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 4 kHz サンプリングで記録した。嚥下活動のばらつき検討のために表 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 100-500 Hz の帯域をフィルタにより取り出し全波整流と 10 Hz 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。

指標における onset、offset 時刻は目視判定した。判定は筆者の内の 1 名が行った。

2.4　統計解析方法

表 1 に示した継続時間と活動量について被験者毎に以下の統計解析を行った。①嚥下方法に関する解析: 測定位置(位置 A,B,C,D)毎に嚥下方法(舌背保持，口腔底保持)間における Wilcoxon rank sum test 検定を行った。②ばらつきの大きさに関する解析: 測定位置毎に嚥下方法(舌背，口腔底保持)間の標準偏差の違いについて F 検定を行った。③測定位置に関する解析: 測定位置(A,B,C,D)間における違いについて，Kruskal-Wallis test で検定を行い，多重比較を Steel-Dwass test により行った。

3.　実験結果

筋電波形の特徴を評価するために表 1 の指標について平均値と標準偏差を測定位置 4 箇所について計算した。結果を被験者ごとの継続時間を図 3 に示し，紙面の都合から被験者 1 名についての活動量を図 4 に示す。嚥下方法に関する統計解析の結果，継続時間では，測定位置 A 及び D において 3 名の被験者で有意差があり，位置 B, C では 2 名の被験者において有意差があった。1 名の被験者ではすべての位置において有意差があった。活動量では, 位置 A から C において 2 名の被験者で有意差があり、1 名の被験者ではすべての位置で有意差がなかった。継

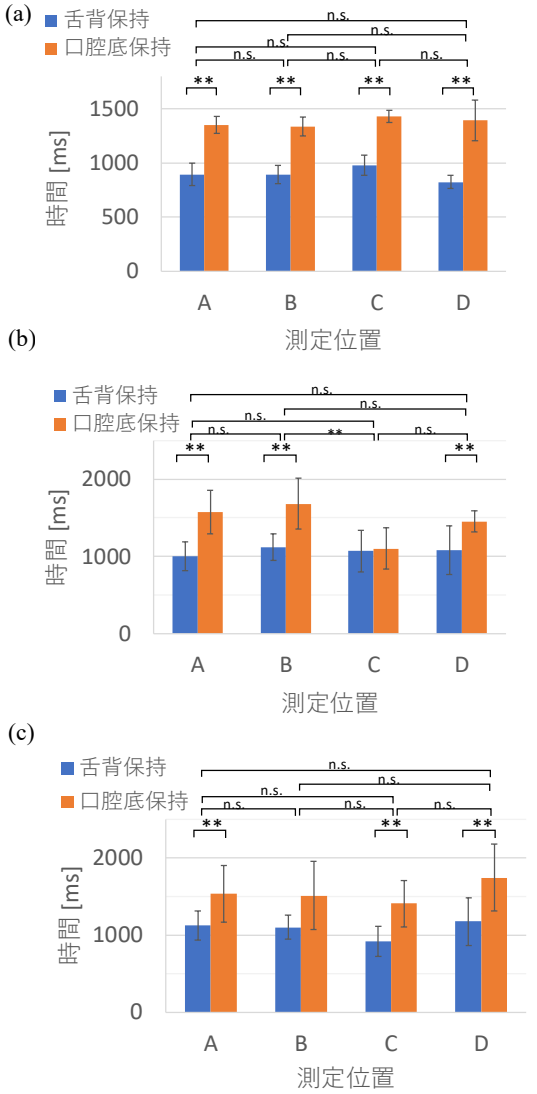

図 3　測定位置毎の継続時間（平均±S.D.）
(a)被験者 1　(b)被験者 2　(c) 被験者 3
Fig. 3. EMG Duration at Each Measurement Position
(a) Subject No 1　(b) Subject No 2　(c) Subject No 3

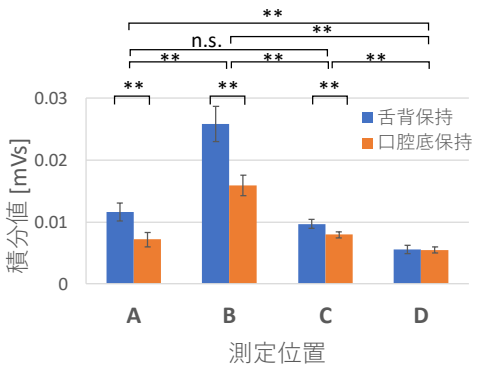

図 4　被験者 1 の測定位置毎の活動量(平均±S.D.)
Fig. 4. EMG Activity at four measurement position of subject No.1 (mean±S.D.)

続時間は 3 名において有意差のある測定位置で被験者ごとに比較すると，口腔底保持の方が長く，活動量は 2 名において有意差のある測定場所で同様に比較すると，舌背保持の方が大きかった。ばらつき(標準偏差)についての統計解析の結果，継続時間では被験者 2 の位置 D で，口腔底保持の方が小さく(p<0.05)，被験者 3 の位置 B で 舌背保持の方が小さかった(p<0.01)。活動量では被験者 2 の位置 A から D の全箇所で口腔底保持の方が小さく(位置 B は p<0.05，他は p<0. 01)，被験者 3 の位置 A,B で舌背保持の方が小さかった(p<0.01)。

測定位置間に関する統計解析の結果では、継続時間では被験者 3 名中 1 名に有意差があり(p<0.05)，多重比較の結果，位置 B,C 間に有意な差があり結果を図 3 に示した。活動量では 3 名ともに有意差があり(p<0.01)，多重比較の結果，被験者 1 では位置 A,C 間を，被験者 2 では A,B 間を，被験者 3 では A,D 間を除いたすべての位置間で有意差があり被験者 1 について多重比較の結果を図 4 に示した。すべての被験者で位置 B，C，D はこの順が活動量の大きい順番であり，BC，CD，BD 間に有意差があった。

4.　考察

4.1　嚥下動作時間の変化に関する検討

嚥下方法(舌背、口腔底保持)に関する統制を行った実験から前頚部における筋電の継続時間と活動量が嚥下方法により異なる結果となった。口腔底保持では水が舌よりも下部に位置しているため，嚥下のために水を舌上にすくい上げる動作が生じていることが舌背保持よりも継続時間が長くなる原因と考えられる。活動量は舌背保持のほうが大きい測定場所があった。教示において舌背保持では早く飲み込むことを教示していたことが主要な原因と考えられる。

嚥下筋電波形の継続時間については1節の通り概ね2割程度の変動係数(被験者間)を持つことが指摘されている。今回の結果では，小さい場所では4%，最大値でも2割以下であった。被験者内のばらつきとしては，従来の嚥下[9]と比べると継続時間のばらつきが小さくなり，再現性が向上できたと考えられる。従来の嚥下計測でばらつきが大きくなってしまう要因として，2つの異なる嚥下方法が混在していた可能性がある。Dodds ら[10]も繰り返し嚥下で2つの嚥下方法の混在を指摘していることから，異なる2つの嚥下方法を区分せずに1つの方法であるとみなして計算すると，区分しない方法における平均値は2つの方法の平均値の間の値を，ばらつきはそれぞれの方法のばらつきよりも大きく見積もる可能性がある。より日常に近い嚥下状況を想定して混在によるばらつきへの影響について検討するために2つの方法を混在させたときの標準偏差の計算を行った。嚥下方法におけるばらつきの大きさを評価するため，2つの嚥下方法(a)舌背保持と(b)口腔底保持のそれぞれの10回の測定結果と，(c)舌背保持と口腔底保持を混合した20回の測定結果において標準偏差を測定位置ごとに計算した被験者1についての結果を図5

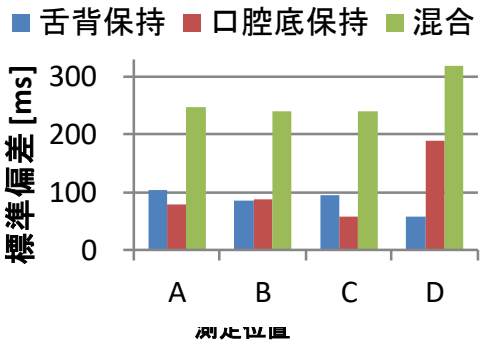

図 5　嚥下方法(舌背、口腔底保持、2 方法を混合)における測定位置毎の継続時間の標準偏差(被験者 1)
Fig. 5. Standard deviation of EMG duration in three types of swallowing (Tipper type, Dipper type, Mixed of the two types) at each measurement position (Subject No.1)

に示す。この結果，混合した結果との比較では，位置 A,B 及び C では舌背保持と口腔底保持両方が2割から4割程度であり，位置 D では舌背保持で2割，口腔底保持で4割程度であった。測定位置で平均すると舌背保持では34%，口腔底保持では38%であった。他の2名の被験者では被験者2は舌背保持では74%，口腔底保持では76%，被験者3は舌背保持では54%，口腔底保持では98%であった。したがって嚥下方法について舌背または口腔底保持の一方に統制して測定する場合と比べると，2つの方法が混合された計測ではばらつきが大きくなる場合があることがわかった。被験者の適切な統制を行い，ばらつきの要因を取り除くことで，嚥下計測の再現性は向上する余地があると考えられる。なお，計算では2つの嚥下方法の混合割合を1：1としたが被験者の日常の嚥下における正確な割合は計測していないこと，実験では2つの嚥下方法で継続時間に差が生じやすくするために教示を行っていること等から，(c)の混合した結果が日常における嚥下のばらつきと同程度であるとは必ずしも言えない。

以上の検討から嚥下方法の統制は嚥下筋電計測において被験者内のばらつき抑制に効果があると考えられる。ただし，3章の通り舌背，口腔底保持の2つの方法間での継続時間と活動量の標準偏差は，2名の被験者で有意差があり，2つの方法のうち標準偏差が小さい方法は被験者によって分かれる結果となった。未統制の要因が存在する可能性があり，詳細な検討は今後の課題である。

5.　結論

同一食品の嚥下において，口腔内の食塊保持位置等の嚥下方法の違いが嚥下筋電の計測に影響を与える可能性が確認できた。適切な統制を行うことで，ばらつきを抑えた嚥下計測の高精度化が可能であることがわかった。嚥下機能評価においては統制した筋電検査によって，従来よりも僅かな嚥下動作の変化を検出できる可能性がある。今後は嚥下筋電図による食品評価に向けて被験者の間のばらつきの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。

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] 林他: 舌骨上筋群表面筋電図と甲状舌骨筋およびオトガイ舌骨筋筋電図との比較; 耳鼻と臨床, **vol. 43**, no. 5, pp. 666-672, (1997).

[9] 大森他: 嚥下筋活動計測におけるばらつき要因の検討; ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, **5Tp3-1**, (2017).

[10] Dodds WJ, et al.: Tipper and dipper types of oral swallows; AJR Am J Roentgenol., **vol. 153,** No. 6, pp.1197-1199, (1989).