

嚥下音の3次スプライン曲線を用いた 嚥下機能改善効果に対する定量評価法

Quantitative evaluation method for improvement effect of swallowing function
using cubic spline curve of swallowing sound

佐々木 一真¹、本橋 由香²、山内 忍²、
佐藤 敏夫^{1,2}、阿岸 鉄三³

¹ 桐蔭横浜大学大学院工学研究科、² 桐蔭横浜大学医用工学部、³ 大分大学医学部

(2015年3月20日 受理)

キーワード：嚥下音、3次スプライン曲線、嚥下機能、炭酸水、とろみ調整剤

1. はじめに

日本人の肺炎死亡者の約90%が65歳以上の高齢者であり、そのうち、誤嚥性肺炎によるものが多くを占めると推定されている。それに伴って、徐々に摂食・嚥下機能が低下していく高齢者に対する嚥下機能障害のスクリーニング検査は大変重要で、早期の発見と対応が求められている⁽¹⁾。

従来より嚥下機能の評価方法には、嚥下造影検査(VF)や嚥下内視鏡検査(VE)が行われてきた。しかし、これらの方法には被曝などの侵襲的な操作が必要であること、ベッドサイドで実施できないなどといった欠点がある。その一方で、聴診器を患者の頸部に直接当てて嚥下音を聴取する頸部聴診法⁽²⁾が行われている。頸部聴診法は食塊を嚥下する際に咽頭部で生じる嚥下音や嚥下前後の呼吸音を頸部に当てた聴診器で聴診することで嚥下障害の程度を判定する方法である。しかし、正常な嚥下音と異常な嚥下音の鑑別方法、あ

るいは異常とされる嚥下音の意味を明らかにした報告はあまり見当たらない。そのため、明瞭な正常音と特徴的な異常音を聞き分けられれば頸部聴診法は嚥下障害の評価において大変有用であるものの、現状は観察者の勘と経験に頼らざるを得ないことから、誤嚥の有無を見落とししたり、病態把握が困難であるといった問題点が挙げられている。

一方、摂食・嚥下障害を有する患者に対しては、きざみ食やとろみ調整剤などを添加した食事が提供されており、これらによって咽頭への急速な流入を防ぐことで誤嚥のリスクを低減できるといわれている。さらに近年では、口腔や咽頭に対する炭酸の発泡性による物理刺激と冷却による温度刺激が嚥下反射を惹起し、冷却炭酸水が嚥下機能の改善に有用であるとの報告⁽³⁾もあるが、炭酸の発泡強度と嚥下機能改善効果について定量的に評価した例はほとんど見当たらない。

我々は、摂食・嚥下障害の診断やリハビリテーションに携わるスタッフが日常的にベッ

Kazuma SASAKI¹, Yuka MOTOHASHI², Shinobu YAMAUCHI², Toshio SATO^{1,2} and Tetsuzo AGISHI³

¹ Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama. ² Faculty of Biomedical Engineering, Toin University of Yokohama. ³ Faculty of Medicine, Oita University

ドサイドで簡単に実施でき、定量性と客観性も有し、検査データとして保存も可能な摂食・嚥下障害の新しいスクリーニング検査方法として、ウェーブレット変換を用いた嚥下音の分析方法について既に提案^{(4), (5)}した。本報告では提案した方法に基づき、炭酸飲料の発泡性刺激や飲食物の粘度が嚥下機能に与える影響を客観的かつ定量的に評価することを試みた。なお、本研究は桐蔭横浜大学臨床研究倫理審査委員会承認（承認番号 I-521、平成 25 年 4 月 1 日～平成 28 年 3 月 31 日）の下で実施した。

2. 実験方法

2-1. スプライン曲線を用いた嚥下機能の定量的評価法

我々の過去の研究成果として、嚥下音は第Ⅰ音から第Ⅲ音までの 3 つの音で構成され、第Ⅰ音のピークから第Ⅲ音のピークまでの嚥下音全体の時間を T1、第Ⅰ音のピークから第Ⅱ音のピークまでの時間を T2 として、以下の式で求めた数値に基づき、嚥下機能を定量的に評価することを試みた^{(3), (4)}。

$$\frac{T2}{T1} = \frac{\text{第Ⅱ音} - \text{第Ⅰ音}}{\text{第Ⅲ音} - \text{第Ⅰ音}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

しかし、ウェーブレット変換により得られる時間-周波数平面上に表した嚥下音のカラーマップ画像を見て、主観的に各音の時間軸上におけるピーク位置を決めたために、検査者によってはピーク位置が異なる場合もあった。そこで、嚥下音を 3 次スプライン曲線で近似し、そこから各音のピーク位置を客観的に決定する方法について検討した。

今回の研究で使用した生体音分析装置 (Bio Sound Analyzer : BSA) の電圧フルスケールは 3.5V (± 1.75V) であるため、信号の元データに 1.75V を加えてゼロ点を移動し、0 ～ 3.5V の範囲内に信号を移動させた。この信号に対し、16 区間移動平均による平滑化処理を行った後、上向きピーク（元データで

はプラス側ピーク）を 16 番目ずつサンプリングしていき、そのサンプリング点の間を 3 次スプライン関数で補間することで、Fig.1 に示す嚥下音信号を近似する 3 次スプライン曲線を求めた。そして、各音のスプライン曲線のピーク値から -3dB 減衰した 2 点を結ぶ線分の midpoint をそれぞれ嚥下音の時間軸上のピーク位置と定め、算出したピーク位置から (1) 式を使って嚥下機能を定量化した。

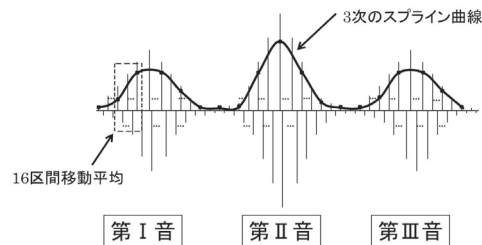


Fig.1 スプライン曲線による嚥下音信号の近似

2-2. 炭酸強度の異なる炭酸水を用いた嚥下音測定実験

今回の報告では、頸部聴診法における嚥下音の聴診部位として推奨されている輪状軟骨直下気管外側上を嚥下音測定部位とし、Fig.2 に示すように測定部位に加速度センサ (TA-701T、日本光電工業株式会社、直径 20mm × 高さ 16mm、重さ 41g) を専用の両面テープを使って喉表面に固定した。

炭酸水の作製には、ソーダストリーム（株式会社シナジートレーディング）を用いた。炭酸強度はソーダストリームに記載されている強・中・弱の 3 種類とした。被験者に試料



Fig.2 喉表面への加速度センサの装着

である水と炭酸水を各5mLずつ嚥下してもらい、その際に発生する嚥下音をBSAで測定し、ウェーブレット変換による時間-周波数解析を行った。その後、嚥下音信号の近似曲線から各音のピーク位置を求め、(1)式で求めた値を基に炭酸強度と嚥下機能改善効果の関係について定量的評価を試みた。

2-3. 粘度の異なる試料を用いた嚥下音測定実験

粘度の違いによる嚥下音の変化を測定するために、とろみ調整剤（トロメイク SP 2671244、株式会社明治）の添加量の違いによる試料の粘度測定を行った。水100mLにとろみ調整剤を1g～10gまで1gごと添加量を増加させてとろみをつけた後、温度を25℃に保持した。そして、それぞれの試料についてLine Spread Test (LST) 法とB型粘度計（英弘精機株式会社）を用いて粘度測定を行った。LST法とは、患者ごとの食事を簡便に適切なとろみに調整することを目的として考案された方法である。直径2～8cmの同心円を1mm間隔で印刷したアクリル板（簡単とろみ測定板、自然派のサラヤ）の中心上2cmの高さから、Fig.3に示すようにシリンジ内の試料20mlを2～8秒かけて抽出する。そして、30秒後に中心から6方向に広がった試料の距離を測定し、その距離の平均値からとろみの指標となる粘度を推定する方法である。

次に、粘度測定した試料を用いて、とろみ調整剤添加量の違いによる嚥下音の変化を調

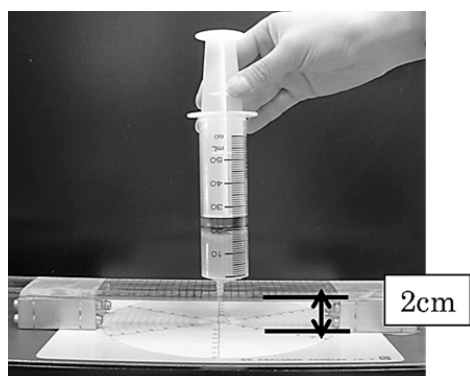


Fig.3 LST 法

査した。20代の健常者（男性）に、試料5mLを各2回ずつ嚥下してもらい、その際の嚥下音をBSAを用いて測定した。得られた嚥下音に対してウェーブレット変換による時間-周波数解析を行い、粘度の違いによる第Ⅰ音、第Ⅱ音、第Ⅲ音の時間的位置の変化について調査した。

3. 結果及び考察

3-1. 炭酸強度を変化させた時の嚥下音測定結果

Fig.4に水を嚥下した場合、Fig.5 (a)に炭酸（強）を嚥下した場合、(b)に炭酸（中）を嚥下した場合、(c)に炭酸（弱）を嚥下した場合の嚥下音測定結果をそれぞれ示す。上段に嚥下音信号とそのウェーブレット変換結果を、下段に嚥下音信号を3次スプライン曲線で近似し、そこから各音の発生時間を算出した結果を示す。水を嚥下した場合は、第Ⅰ音が0.33秒、第Ⅱ音が0.76秒、第Ⅲ音が1.13秒であった。炭酸（強）を嚥下した場合は、第Ⅰ音が19秒、第Ⅱ音が19.35秒、第Ⅲ音が20.06秒、炭酸（中）を嚥下した場合は、第Ⅰ音が7.11秒、第Ⅱ音が7.45秒、第Ⅲ音が8.09秒、炭酸（弱）を嚥下した場合は、

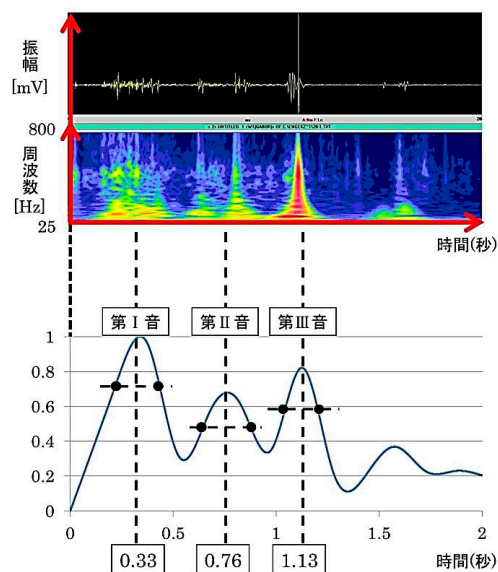


Fig.4 水を嚥下した場合の嚥下音測定結果

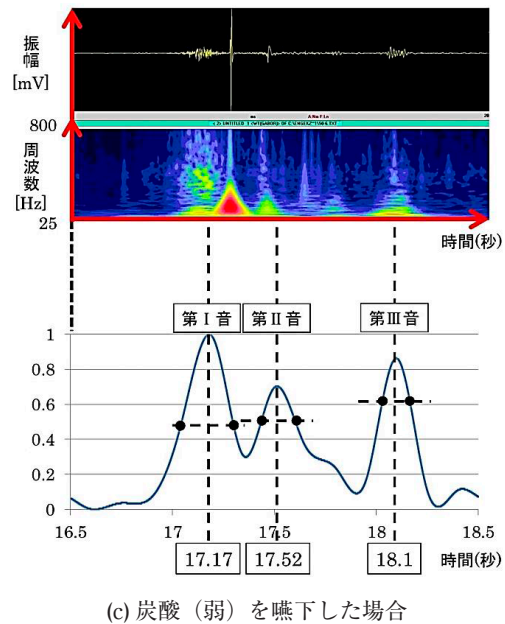
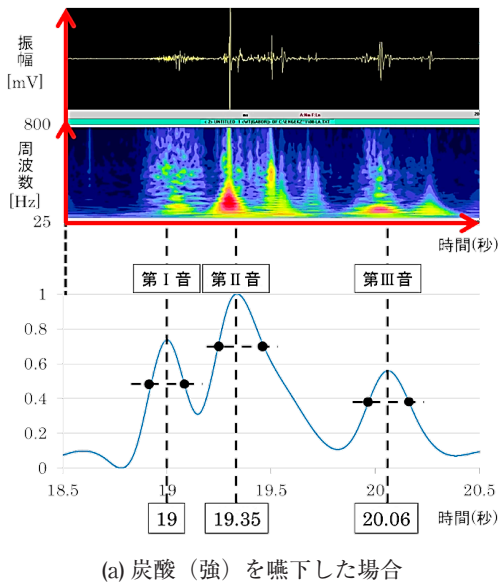


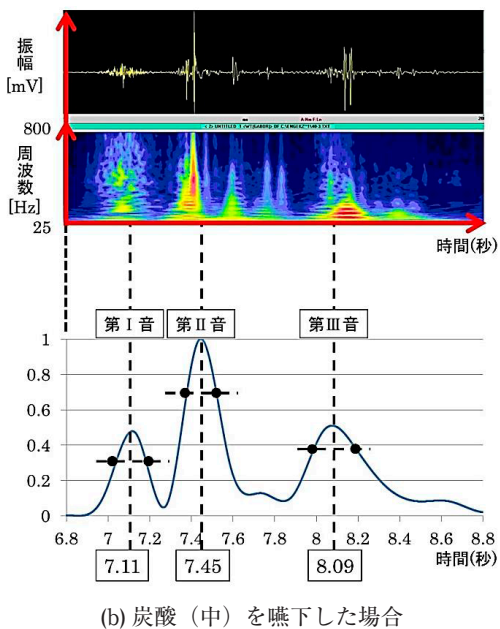
Fig.5 炭酸強度を変化させた時の嚥下音測定結果

た場合には、水を嚥下した時に比べて第II音が第I音に近づく傾向があることが確認できた。また、炭酸の発泡強度が強い程、第I音に近づく傾向が強いこともわかった。これらの結果から、 $T2/T1$ を求めることで、炭酸の発泡性刺激による嚥下機能改善効果を定量的に評価できる可能性があることが示唆された。

3-2. 粘度を変化させた時の嚥下音測定結果

Fig.6 にとろみ調整剤添加量とB型粘度計で測定した粘度との関係、Fig.7 に粘度とLST法で調べた試料の広がり距離との関係を示す。とろみ調整剤を1～10gの範囲で添加した試料をB型粘度計を使って粘度測定したところ、とろみ調整剤の添加量が増加するにつれて、粘度も比例して増加することが確認できた。また、とろみ調整剤の添加量の増加に伴って、LST法による試料の広がり面積も比例して小さくなることから、LST法による粘度測定の有効性が確認できた。

次に、被験者に粘度調整した試料を嚥下し



第I音が17.17秒、第II音が17.52秒、第III音が18.1秒であった。これらの結果から(1)式を使って $T2/T1$ を計算すると、水を嚥下した場合は約54%となり、第II音は嚥下音全体のほぼ中央に位置していた。一方、炭酸（強）を嚥下した場合は約33%、炭酸（中）を嚥下した場合は約35%、炭酸（弱）を嚥下した場合は約38%となり、炭酸を嚥下し

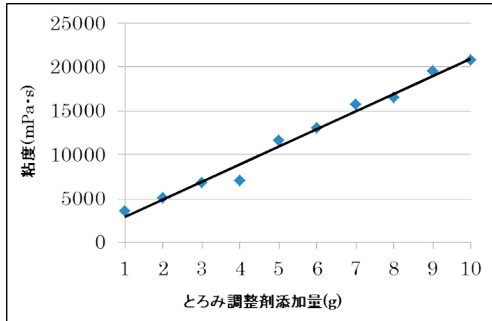


Fig.6 とろみ調整剤添加量と粘度との関係

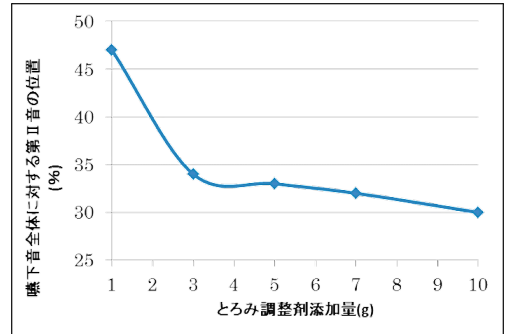


Fig.9 とろみ調整剤添加量と $T2/T1$ との関係

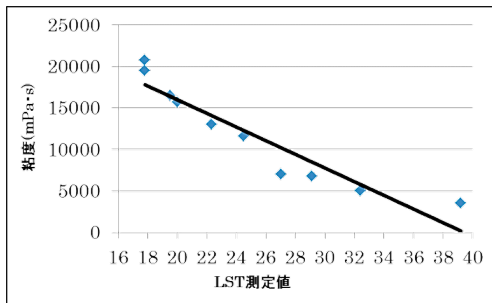


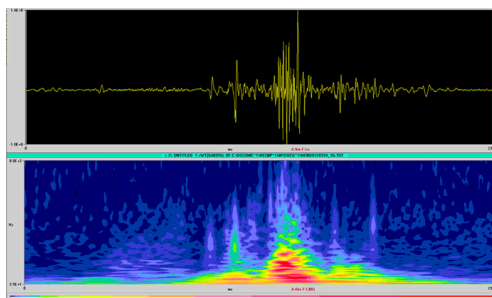
Fig.7 粘度と LST 法による試料の広がり距離との関係

Fig.9を見ると、とろみ調整剤を3g添加した際には $T2/T1$ は大きく低下するのに比べ、とろみ調整剤を3g以上添加してもそれ以降、 $T2/T1$ はほとんど変化しないこともわかった。すなわち、とろみ調整剤を3g以上添加して粘度を大きくしても、嚥下機能改善効果はそれほど望めないこともわかった。

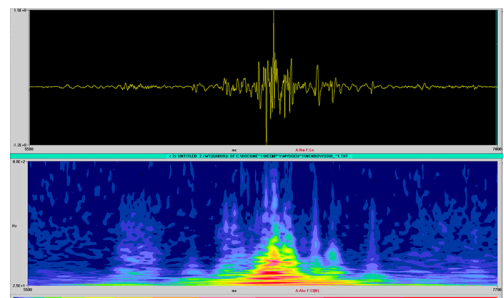
4. 結論

でもらい、その時の嚥下音をBSAを用いて測定し、ウェーブレット変換による時間-周波数解析を行った。Fig.8 (a)にとろみ調整剤の添加量1g、(b)にとろみ調整剤の添加量10gの時の嚥下音の解析結果を示す。また、Fig.9にとろみ調整剤添加量と $T2/T1$ との関係を示す。Fig.8 (a)の結果から、とろみ調整剤を1g添加した際の $T2/T1$ は47%、10g添加した際は30%となった。すなわち、粘度の増加に伴って第Ⅱ音の位置が第Ⅰ音に近づく傾向があることがわかった。しかし、

生体音分析装置 (BSA) を用い、測定した嚥下音に対してウェーブレット変換による時間-周波数解析を行うことで、嚥下機能をスクリーニング検査する新しい方法について検討した。嚥下音を3次スプライン曲線で近似し、そこから各嚥下音の時間軸上のピーク位置を求めることで、客観的に嚥下機能を定量化できるようになった。その成果を踏まえ、炭酸飲料の発泡性刺激による嚥下機能改善効果の定量化を試みたところ、炭酸が口腔内を物理的に刺激することで、嚥下機能が改善さ



(a) とろみ調整剤の添加量 1g



(b) とろみ調整剤の添加量 10g

Fig.8 とろみ調整剤の添加量を変化させた時の嚥下音測定結果

れることを定量的に確認することができた。
また、とろみ調整剤を添加し、粘度調整した
飲食物は嚥下障害を有する患者でも安全に嚥
下できる可能性があることを定量的に評価す
ることができた。

【参考文献】

- 1) 藤島一郎（監修），柴本 勇（監修），平
田 直（発行者），“動画でわかる 摂食・
嚥下リハビリテーション pp.12-21”，中山
書店：2004.
- 2) 植松 宏（監修），“セミナー わかる！摂
食・嚥下リハビリテーション 1 巻 評価法
と対処法 pp.72-87”，医歯薬出版株式会社：
2005.
- 3) 唐帆健浩，安達 仁，大前由紀雄，北川洋
子，田部哲也，北原 哲，“中咽頭への注水
刺激による嚥下反射の惹起—冷却炭酸水注
入の嚥下訓練への応用の可能性—”，耳鼻
52（補 1），S44-S47，2006.
- 4) K. Sasaki et., “Quantitative Evaluation of
Improvement of Swallowing Function by
Swallowing Viscosity Adjusted Foods
and Carbonated Beverages”, ASAIO 60th
Annual Conference, p.2, 2014.
- 5) 佐々木一真，野田彩華，山内 忍，本橋由
香，佐藤敏夫，阿岸鉄三，“嚥下音信号の
3 次スプライン補間による嚥下機能の定量
的評価の試み”，第 52 回日本人工臓器学会
大会予稿集，S-213, 2014.