

## 嚥下音信号のウェーブレット変換による嚥下機能の非侵襲かつ定量的評価の試み

Non-invasive and quantitative evaluation of swallowing function  
by wavelet transform of swallowing sound signals

○ 可児雅弥（桐蔭横浜大院） 古滝莉加（桐蔭横浜大） 山内 忍（桐蔭横浜大）  
本橋由香（桐蔭横浜大） 佐藤敏夫（桐蔭横浜大院） 阿岸鉄三（桐蔭横浜大）

Masaya KANI, Graduate School of Toin University of Yokohama, Kurogane-cho 1614, Aoba-ku, Yokohama  
Rika FURUTAKI, Toin University of Yokohama  
Shinobu YAMAUCHI, Toin University of Yokohama  
Yuka MOTOHASHI, Toin University of Yokohama  
Toshio SATO, Graduate School of Toin University of Yokohama  
Tetsuzo AGISHI, Toin University of Yokohama

**Abstract:** Swallowing sounds were measured using a bio sound analyzer (BSA) developed by the authors. The BSA is capable of measuring three channels simultaneously, so the acceleration sensors were affixed at two positions enabling satisfactory measurement of swallowing sounds. Smoothing was carried out on the swallowing sound signals that were obtained, then every 16th amplitude peak was sampled. Intervals between sampling points were interpolated using a three-dimensional spline function, and an approximation envelope of the swallowing sound signals was created. The time of the peak between the first and third sounds was taken as (T3-T1) and that between the first and second sounds was taken as (T2-T1). The parameter P expressing the relative position of the second sound to the continuous time of the overall swallowing sound was determined from the (T3-T1) and (T2-T1), enabling quantitative evaluation of swallowing function.

**Key Words:** Swallowing sounds, Acceleration sensor, Three-dimensional spline function, Swallowing function

## 1. はじめに

現在、超高齢社会に分類される我が国では、肺炎による死亡は増加傾向にあり、2011年には脳血管疾患を抜いて日本における死因順位の第3位となった。中でも誤嚥性肺炎は高齢者の肺炎の7割以上を占めるとも言われており、口腔ケア、摂食・嚥下リハビリテーションによる予防や嚥下障害に対する詳細なスクリーニング検査の実施は、高齢者のQOL (quality of life) 向上の点で重要である。現在、代表的な嚥下機能のスクリーニング検査法として、反復唾液のみテスト、水飲みテスト、改訂水飲みテスト、食物テスト、頸部聴診法など多くの方法が行われている<sup>(1)</sup>。また、嚥下に関する筋群、特に舌骨運動に関与する舌骨上筋群の筋活動を記録する筋電図検査による嚥下機能評価についても多くの報告例<sup>(2)</sup>がある。

我々は、血液透析患者のバスキュラーアクセス機能を非侵襲かつ定量的に評価することを目的に、被験者の皮膚表面に加速度センサを装着してバスキュラーアクセス内を血液が流れる際に発生するシャント音を測定し、得られたシャント音信号に対してウェーブレット変換を行うことで、バスキュラーアクセス機能を評価する研究を行っている<sup>(3),(4)</sup>。この一連の研究で得られた成果の応用例として、嚥下音に対しても同様な解析を行うことによって、嚥下機能を定量的に評価する方法についての検討も試みている<sup>(5),(6)</sup>。同様な試みとして、喉表面に装着したマイクロフォンで嚥下音を測定し、水を嚥下した際と、お粥を嚥下した際には発生する嚥下音の大きさに違いが見られたとの報告<sup>(7)</sup>がある。我々は、喉表面に装着した加速度センサによって測定した嚥下音に対してウェーブレット変換を行ったところ、嚥下音が3つの音によって構成されており、その3つの音の時間軸上の相対的位置関係から嚥下機能を評価する方法について提案した。今回の報告では、提案した方法の前提となる3つの音を安定して測定する方法について検討するとともに、本方法による炭酸水の嚥下による嚥下改善効果を定量的に表すことについて検討した。

## 2. 実験方法

## 2.1 生体雑音分析装置 (Bio Sound Analyzer : BSA)

我々は、各種の生体雑音をベッドサイドで非侵襲的に測定し、得られた生体雑音信号をウェーブレット変換することで、定量的かつリアルタイムで目的とする生体機能をスクリーニング検査できる生体雑音分析装置 (Bio Sound Analyzer : BSA、医薬品医療機器法等未承認) を産学医共同で開発した<sup>(8)</sup>。このBSAは、サンプリング周波数 44.1kHz、分解能 16ビットで最大3チャンネルの生体雑音の同時測定が可能である。

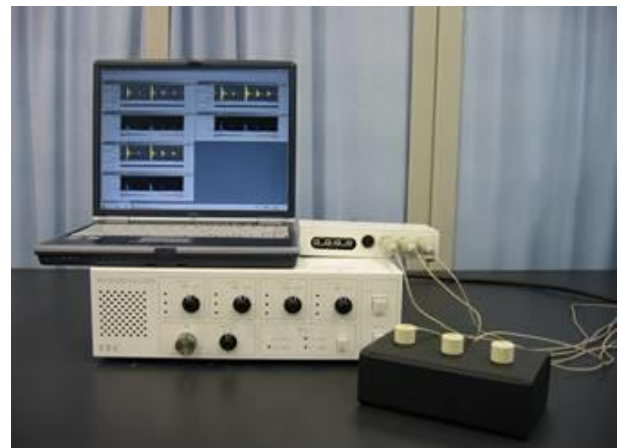


Fig.1 Bio Sound Analyzer (BSA)

このBSAで測定した生体雑音の一例として、血液透析患者のバスキュラーアクセスから得られたシャント音の解析結果<sup>(3)</sup>をFig.2に示す。Figure 2の上段は、横軸に時間、縦軸に信号電圧を取って表した生体雑音信号を示す (オシロスコープ表示)。下段には、それをウェーブレット変換して得られた結果を横軸に時間、縦軸に周波数を取って表している。そして、周波数スペクトルの大きさを青から赤のカラーマップで表現している。ウェーブレット変換の際に用

いるマザー・ウェーブレットはガボール関数を用いている。また、同時に wave ファイル形式でもデータを出力でき、生体雑音を実際に音として聞くことも可能である。

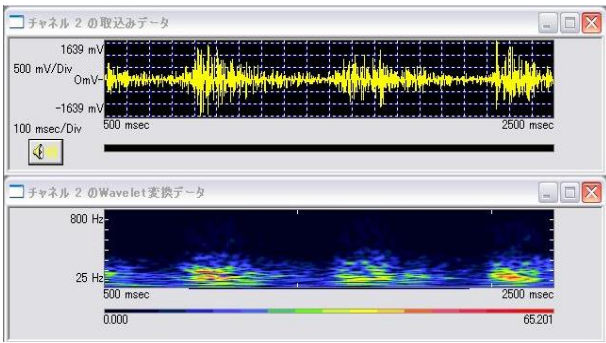


Fig.2 Analysis example of shunt murmur of vascular access

### 2.2 嚥下音測定に適したセンサ装着位置

嚥下音を測定するセンサとしては、心音センサ (TA-701T、日本光電) を使用した。このセンサは、外径 20mm、厚さ 16mm、重さ 41g のフローティングタイプの加速度型センサであり、公称では周波数特性 20～600Hz、共振周波数 350Hz 以上、感度は  $0dB=0.1V/(m/s^2)$  として、0～12dB (150Hz) である。当初、このセンサを嚥下聴診法において嚥下音の聴取に適しているとされている輪状軟骨直下の気管外側上の皮膚面<sup>(5)</sup>に専用の粘着カラー (H260、日本光電) を使って装着した。このとき、喉頭蓋が気管へ蓋をする形で倒れ、飲み込んだ飲食物が咽頭から食道内を通過する際に生じる音、すなわち我々が第 II 音と呼ぶ音は明瞭に測定することができた。しかし、喉頭が上前方へ拳上した際に生じる音、すなわち第 I 音と、飲食物が食道内を通過した後、気管の蓋をしていた喉頭蓋が上方に上がり、それに伴って拳上していた喉頭が元の位置に戻った際に生じる音、すなわち第 III 音が得られないか、あるいは得られても極端に小さいケースが見受けられた。第 I 音と第 III 音は、嚥下に伴う喉表面の動きを加速度センサで捉えたものであるが、嚥下が起きてもセンサを装着した部位の喉表面が動かなければ、加速度センサでは検出できない。すなわち、被験者によっては、このセンサ装着位置では我々の欲している嚥下に伴う 3 つの音を明瞭に測定できない可能性がある。そこで、Fig.3 に示すように嚥下時の喉表面を側方からビデオカメラで測定し、その後、得られたビデオ画像と画像寸法計測ソフト (Pixs2000\_PRO、イノテック) を使って、嚥下時に最も動きの大きい、すなわち変位量の大きい位置を同定することを試みた。その際、基準点 (ゼロ点) は、嚥下時に喉表面の動きが見られない喉側面に設定した。変位量の測定位置として今回は、①舌骨直上、②甲状軟骨直上、③輪状軟骨直上、④輪状軟骨直下の 4 ヶ所について調べた。

### 2.3 嚥下機能の定量的評価

我々が提案している嚥下に伴う 3 つの音の時間軸における相対的な位置関係から、嚥下機能を定量的に評価する方法の可能性について検証する目的で、同一被験者に水を嚥下してもらった際の嚥下音と、炭酸水メーカーを使って炭酸濃度を 2 段階に変化させた炭酸水を嚥下してもらった時における 3 つの音の相対的な位置関係の変化について調べた。喉表面への心音センサの装着は、2.2 節で同定した嚥下時に最も喉表面における変位量の大きい位置、すなわち第 I 音と第 III 音を良好に測定できるであろうと推測され

る位置と、従来のセンサ装着位置で、第 II 音が良好に測定できる輪状軟骨直下の気管外側上の 2 ヶ所にセンサを装着した。



Fig.3 Displacement measurement of throat surface

まず、被験者に座位で 5ml の常温水を嚥下してもらい、その際の嚥下音を BSA で 10 秒間測定した。次に、炭酸水メーカー (ソーダストリーム Source, sodastream) を使って、炭酸強度が弱、中と異なる 2 種類の炭酸水を作製し、同様に 5ml を嚥下してもらって、その際の嚥下音を測定した。そして、それぞれの位置で得られた嚥下音信号を合成することで、3 つの音が良好に得られている嚥下音信号を作成した。得られた嚥下音信号から我々が開発した生体雑音解析ソフトであるビットマップアナライザー (BMA)<sup>(4)</sup> を使い、嚥下音信号の包絡線を 3 次スプライン近似で求め、時間軸上における 3 つの音に対するそれぞれの振幅ピーク位置 T1、T2、T3 を定めた。ピーク位置を決定する際には、包絡線のピーク振幅から -3dB 低下した 2 点間の中心をピーク位置と定義した。

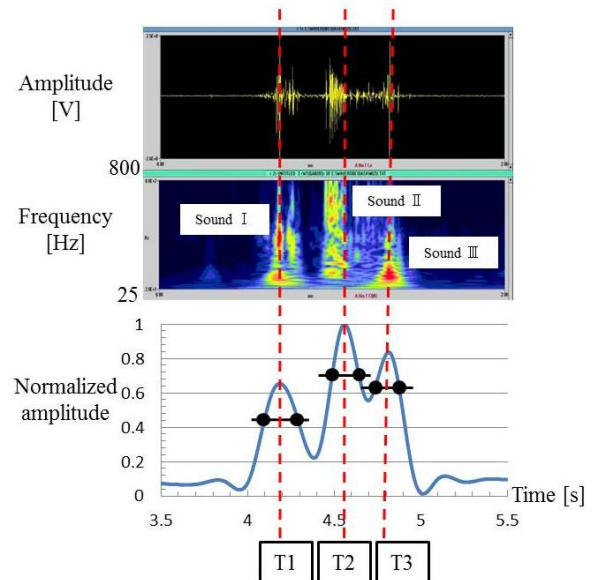


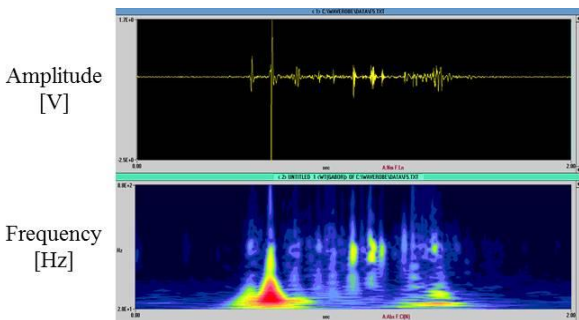
Fig.4 Envelope of swallowing sounds signals

一例として、水を嚥下した際に得られる嚥下音信号と、それを 3 次スプライン近似することで得られた包絡線を Fig.4 に示す。第 I 音-第 III 音間の時間 T3-T1 は、いわゆる喉頭拳上時間に相当する。その時間に対して、第 I 音-第 II 音間の時間 T2-T1 の比率 P を求めることで、嚥下機能の定量的評価を試みた。なお、本研究は桐蔭横浜大学研究倫理審査委員会の承認の下で実施した。

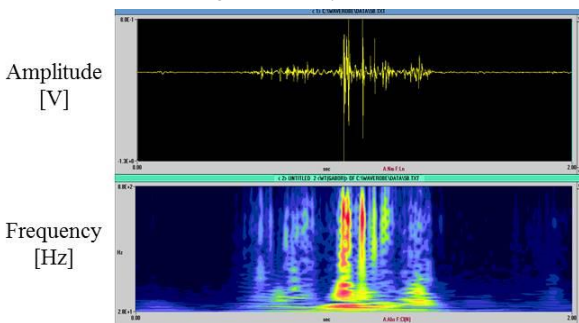
3. 実験結果

3.1 嚥下音測定に適したセンサ装着位置の同定結果

嚥下時における喉表面の動きを撮影したビデオ画像から、嚥下時における変位量が最も大きいのは、①舌骨直上であることがわかった。そこで、その位置にセンサを装着し、水を嚥下した際に得られた嚥下音信号とそのウェーブレット変換結果を Fig.5 (a) に示す。また、同時に従来のセンサ装着位置である輪状軟骨直下の気管外側上にセンサを装着し、得られた嚥下音信号とそのウェーブレット変換結果を (b) に示す。Figure5 (a) を見ると、喉頭が上前方へ拳上した際に生じる第 I 音と、飲食物が食道内を通過した後、拳上していた喉頭が元の位置に戻った際に生じる第 III 音の存在が確認できる。一方、飲食物が通過する咽頭や食道がセンサ装着位置から離れているため、飲食物が咽頭から食道内を通過する際に生じる第 II 音はほとんど測定されていない。それに対して Fig.5 (b) を見ると、このセンサ装着位置は、飲食物が通過する咽頭や食道が近いため、第 II 音が明瞭に測定できている。しかし、この位置では嚥下の際の喉表面の動きがほとんどないため、第 I 音と第 III 音が非常に小さい。この結果から、我々が提案している嚥下音を構成する 3 つの音の位置から求められるパラメータ P を使って嚥下機能を評価するには、この 2 ヶ所に装着したセンサから得られる 2 つの嚥下音信号を合成することで、安定して 3 つの音を得られることがわかった。



(a) Right above hyoid bone

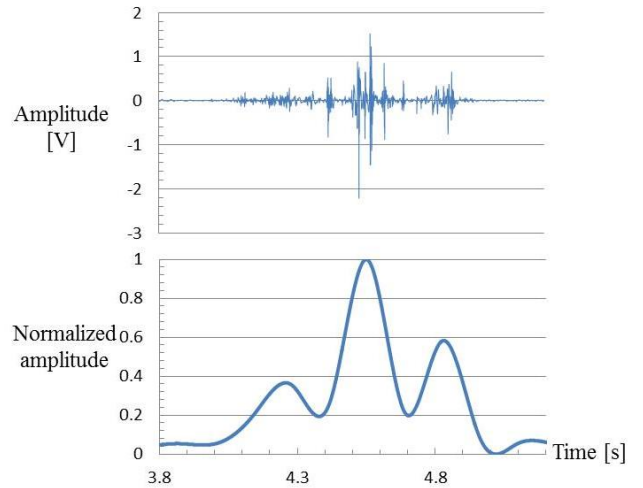


(b) Outer side of trachea under annular cartilage

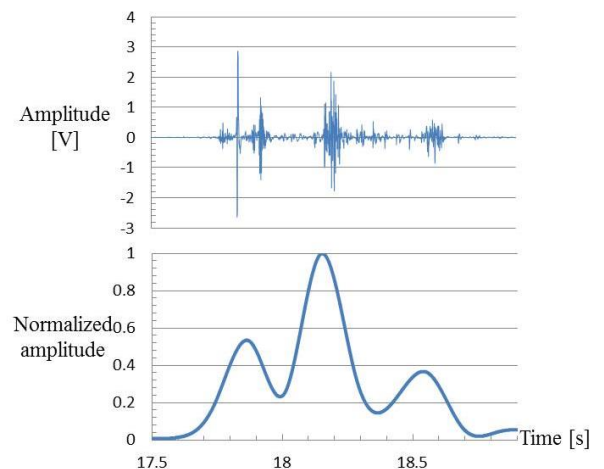
Fig.5 Swallowing sounds signals and their wavelet transforms

3.2 水および炭酸強度を変えた 2 種類の炭酸水を嚥下した際のパラメータ P の変化

前節で決定した 2 ヶ所にセンサを装着し、水、および炭酸水メーカーで作成した炭酸強度が弱、中と異なる 2 種類の炭酸水を被験者に嚥下してもらった際の嚥下音信号と、その嚥下音信号の包絡線を求めた結果の一例を Fig.6 に示す。水を嚥下した際に得られた嚥下音信号の解析結果を示す Fig.4 と比較すると、炭酸強度：弱から炭酸強度：中へと炭酸強度が強くなるにつれて、第 II 音が第 I 音に近づいていく様子が確認できる。それに応じてパラメータ P の値も 0.61、0.56、0.45 と徐々に小さくなっていった。



(a) Concentration of carbonic acid : weak



(b) Concentration of carbonic acid : medium

Fig.6 Swallowing sounds signals and their envelopes

4. 考察

従来、喉表面に装着したマイクロフォンや加速度センサを使って嚥下時の嚥下音を測定する試みについては、既に多くの報告例<sup>(7)</sup>がある。しかし、一連の嚥下運動に伴って得られる嚥下音は、その時間が約 0.5 秒程度と短いために、その嚥下音を構成する音の内容についての考察は、あまりなされていないように思われる。今回、サンプリング周波数 44kHz という BSA を使い、さらにウェーブレット変換を行ったところ、嚥下音を 3 つの音に明確に分離することができた。Figure 4 を見ると、第 I 音と第 III 音は周波数が約 200Hz 以下の低周波数成分で構成されている一方、第 II 音はその周波数成分が 25Hz から 800Hz までと広範囲にわたることから、第 I 音・第 III 音と第 II 音はその発生原因が異なること、第 I 音と第 III 音は類似の原因によって生じていることが推測される。我々は、以前の研究で嚥下造影 (VF) と同期して嚥下音を測定し、その解析結果から第 I 音と第 III 音は喉頭の拳上とそれが元に戻った際に生じる音であり、第 II 音は飲食物が咽頭から食道内を通過する際に生じる音であることを VF 画像と嚥下音を同期再生することで確認している<sup>(9)</sup>。この結果を踏まえ、嚥下音を構成する 3 つの音の時間軸上における相対的位置関係から得られるパラメータによって、嚥下機能を定量的に評価する方法を提案した。

今回の報告では、その方法の有効性を検証する一例とし

て、炭酸水による嚥下改善効果について定量的な評価を試みた。炭酸飲料は他の飲料と比較して嚥下しやすく、嚥下時間が短縮するという報告がなされている<sup>(10)</sup>。そこで、我々が定義した $P=(T2-T1)/(T3-T1)$ というパラメータによる効果の検証を試みた。その結果、炭酸強度が強くなるのに伴い、 $P$ が小さくなる傾向が見いだされた。第Ⅲ音は、飲食物が咽頭から食道内を通過した後、気管の蓋をしていた喉頭蓋が上方に上がり、それに伴って拳上していた喉頭が元の位置に戻った際に生じる音なので、 $P$ が小さいという事は、食道内を飲食物が完全に通過した後、喉頭蓋が時間的な余裕を持って元に戻ることを意味しており、これは気管に飲食物が流れ込む誤嚥を起こす危険性が小さくなることに対応していると考えられる。一方、 $P$ が大きくなる、あるいは第Ⅱ音と第Ⅲ音の発生時刻が近接している場合は、飲食物がまだ咽頭から食道内を通過している間に、気管に蓋をしていた喉頭蓋が元に戻ってしまうことを意味しており、このようなケースでは誤嚥の可能性が高いと考えられる。また、我々は過去に年齢の異なる複数の被験者に水を嚥下してもらい、年齢による $P$ の変化についても調べている<sup>(5)</sup>が、その結果は年齢が高くなる程、 $P$ が大きくなる傾向が見られ、これが加齢による嚥下機能の低下を表しているのではないかと考えている。しかしながら、今回の報告の段階では被験者数も少なく、統計的に有意であるかどうかを判定するまでには至っておらず、今後被験者を増やしながらか、更なる検討を行っていく予定である。

## 5. まとめ

今回の報告では、我々が産学医で共同開発した生体雑音分析装置(BSA)を使い、嚥下音を非侵襲的に測定し、得られた嚥下音信号をウェーブレット変換することで、定量的かつリアルタイムでの嚥下機能の評価を試みた。我々の提案する評価方法では、嚥下音を構成する3つの音を安定して測定することが必要であるが、嚥下時の喉表面の動きを撮影したビデオ画像から、センサ装着位置を同定し、2個のセンサから得られた嚥下音信号を合成することで、3つの音を安定して測定できるようになった。その結果を踏まえ、炭酸水による嚥下改善効果について評価したところ、炭酸強度が強くなるのに従って、喉頭拳上時間 $T3-T1$ に対する第Ⅱ音の位置、すなわち飲食物が咽頭から食道内を通過している音が第Ⅰ音に近づく傾向が見られ、これは水に比べて炭酸水の方が誤嚥を起こしにくい可能性があるというところを、定量的に表現できたのではないかと考えている。

## 参考文献

- (1) 藤島一郎編著, 6. 症状とスクリーニング, よくわかる嚥下障害, pp. 78-85, 永井書店, 2001.
- (2) 神山かおる, 高 智紅, 力学特性が異なる食品咀嚼中の筋電図と筋音図の比較, 食総研報, No. 77, pp. 79-87, 2013.
- (3) T. Sato, K. Tsuji, N. Kawashima, T. Agishi and H. Toma, Evaluation of blood access dysfunction based on a wavelet transform analysis of shunt murmurs, J Artif Organs, Vol. 9, No. 2, pp. 97-104, 2006.
- (4) 本橋由香, 佐々木一真, 山内 忍, 佐藤敏夫, 竹内真一, 阿岸鉄三, シャント音の基準化持続時間に基づくバスキュラーアクセス機能評価の試み, 医工学治療, Vol. 26, No. 3, pp. 145-154, 2014.

- (5) 佐藤敏夫, 阿岸鉄三 他, ウェーブレット変換を用いた嚥下音の時間-周波数解析による嚥下機能評価の試み, 医工学治療, Vol. 17, No. 4, pp. 181-187, 2005.
- (6) M. Kani, S. Yamauchi, Y. Motohashi, T. Sato and T. Agishi, Time-frequency analysis of swallowing sounds in non-invasive evaluation of swallowing function, Abstracts of ASAIO 62<sup>nd</sup> Annual Conference, p. 3, 2016.
- (7) 金子裕史, 林 豊彦 他, 喉頭運動・舌骨上筋群筋電図・嚥下音の同時計測による嚥下機能の評価—お粥の性状の違いによる嚥下動態の変化—, 信学技報, MBE 2001-122, pp. 135-142, 2001.
- (8) 血流音を波形で表示 産学共同で小型装置, 日刊工業新聞, 2005年10月4日.
- (9) 村上彩子, 佐藤敏夫, 阿岸鉄三 他, 生体雑音の時間-周波数解析による非侵襲生体機能診断, 信学技報, US2009-25pp. 15-20, 2009.
- (10) 森下元賀, 山上翔太 他, 入院高齢患者における炭酸飲料を用いた嚥下運動改善の持続効果の検討, 吉備国際大学保健福祉研究所研究紀要, No. 16, pp. 7-12, 2015.