

嚥下有無の判別および食塊の粘性分類のための嚥下に伴う振動計測

鏑木崇史[†] 大塚亮平[†] 栗原陽介[†]

1. はじめに

日本は平成 25 年 10 月 1 日の段階で高齢化率 25.1%に達し、超高齢社会に分類されている。第 1 次ベビーブーム時に生まれた、いわゆる団塊の世代の人々が、2012 年から 2014 年にかけて 65 歳に到達するため、高齢化のスピードが最も早まった。2035 年には人口の 3 人に 1 人が高齢者になると推計されている[1]。

また、高齢者になるにつれて、認知症の患者が増加傾向にあることが問題となっている [2]。さらに、高齢者になるにつれて様々な身体機能の低下を伴い、ヒトの身体活動を支える運動機能も低下するという問題がある。そして、高齢者の生活の質 (Quality of life ; QOL) や日常生活活動 (Activity of daily living ; ADL)に関わると考えられている。したがって、高齢期において運動機能を保ち健康を維持する上で、ライフログによるモニタリングは大変重要である [3]。

このように、高齢者になるにつれて発生する問題から 2 つの食事に関するトラブルがある。1 つ目のトラブルとして、認知症による記憶力の低下である。記憶力の低下は食事を忘れてしまうことによる栄養失調や、逆に食事したことを忘れてしまい食事回数が多くなり過食に繋がる可能性がある。2 つ目のトラブルとして、運動機能の低下の中に、嚥下関連器官の解剖学および生理学的変化により嚥下機能が低下することである。具体的には食塊を飲み込む機能の嚥下機能において、咽頭にある喉頭の位置が低下しているため、嚥下する時の喉頭挙上が不十分となり、上部食道括約筋を閉じている筋肉の機能不全も生じて、喉頭の閉鎖が不十分で誤嚥しやすくなる。さらに、咽頭収縮筋の収縮力が低下し、咽頭に唾液および食物が残留しやすくなり、誤嚥をきたしやすくなる [3][4]。

窒息事故の主な原因食品としては、餅、ご飯やパンの粘性が高い食品が挙げられる [6]。そこで、食物を嚥下したかどうかを分類することによって、食事の回数を確認することができ、同居人や介護者が高齢者の食事管理が可能になる。また、食塊の嚥下を行った食品の粘性の分類を可能にすることができれば、粘性が大きい食塊を飲み込んだ際に通知ができる。そのことによって、同居人や介護者が高齢者から目を離していても通知することで注意を払うことができ、誤嚥の早期発見により窒息事故防止ともつながると考える。

従来の嚥下機能評価の主な手法としては、嚥下内視鏡検査 (Videoendoscopic Evaluation of Swallowing, VE) と嚥下造影検査 (Videofluoroscopic Examination of Swallowing, VF) 等が挙げられるが、これらの手法は手軽に行えるものでは

なく、普段の食生活における嚥下運動のモニタリングには適していない [7]。そのため、普段の食生活においても手軽に嚥下運動のモニタリングができるシステムが検討されている。また、筆者らは、光センサを用いて嚥下の機能を評価する方法を提案してきた [8][9][10]。嚥下音に着目する先行研究もあるが、粘性による嚥下音の分類を目的とはしていない [11][12]。また、高齢者の食事の管理という研究に関しては、カメラでモニタリングするという研究が多く、嚥下音に着目した研究は少ない。カメラでモニタリングを行うと、常に監視されているというストレスが生じてしまう可能性がある。

そこで筆者らは、これらの問題をなくすためのライフログシステムの提案として、双指向性マイクロフォンをチューブに埋め込み、ボンドで密閉した高感度圧力センサを頸部に設置し、用いた。そして、嚥下の有無と食品の違いによる特性の評価を行う方法を提案してきた [14]。[14]の実験で被験者 5 人に食品を飲み込む実験で、周波数別に解析した際に食品別に結果の偏りがあった。その結果に対して、食品の特徴から「粘性」が原因と考察した。

本研究では、物を飲み込む動作である嚥下運動を、高感度圧力センサを用いて計測する。また、動的時間伸縮法 (Dynamic Time Warping, DTW) を用いて、嚥下の有無と食品の粘性の分類の 2 種類の嚥下状態の分類を行うことを目的とする。DTW を活用することによって、時間軸上のずれが存在する時系列データ同士の類似度も算出することができる。また、異なるいくつかの周波数帯域によって、嚥下状態の分類の精度を高めることと、食品の粘性に着目し、高精度に嚥下した食品の粘性について推定を行う。用いる周波数帯域は以下のとおりである。

- ・ (a) 扱う周波数領域
- ・ 嚥下計測する際に一般的に用いられる (b) 喉頭挙上運動で起こる低周波の 1–20 Hz
- ・ 咽頭期で発生する嚥下音の、(c) 喉頭蓋閉鎖で起こる 20–100 Hz
- ・ 食塊流入音帯域 (低) (d) 50–150 Hz
- ・ 食塊流入音帯域 (高) (e) 400–750 Hz

の 5 種類で粘性の判別に適する周波数帯域を評価する。[15]の報告で本研究に用いる高感度圧力センサが低周波を含めすべての周波数領域を計測可能とされている。

2. 提案手法

2.1 嚥下のメカニズムと計測対象

嚥下運動は準備期、口腔期、咽頭期、食道期の 4 つの期に分けられ、嚥下音は主に 3 つの音成分によって成り立つとされており、文献によって一致した見解ではないが、主に 4 期のうちの咽頭期において、喉頭蓋の閉鎖時、食塊の流入時、喉頭蓋の開放時にそれぞれ発生するとされている [7]。嚥下運動のモニタリングにおいては、咽頭期に着目

[†] 青山学院大学 Aoyama Gakuin University

することが重要であると考えられる。

ここで咽頭期のメカニズムと発生する振動について述べる。咽頭期は嚥下反射によって誘発される不随意運動で、咽頭腔に入った食塊の後端が食道入口部を通過するまでを指す。咽頭腔は鼻腔、口腔、喉頭腔から遮断され、食道入口部のみが開大する[13]。

- ① 上咽頭遮断：食塊が舌により口腔後方へ移動すると軟口蓋は挙上し、上咽頭パッサーバン隆起に接して上咽頭は遮断される。これにより食塊の鼻腔逆流が防止できる。
- ② 口腔との遮断：食塊が舌により口腔後方へ移動するとき、舌背の大部分は硬口蓋に密着しており口腔は遮断される。
- ③ 嚥下反射の誘発：上咽頭、口腔遮断と同時に口峽部が解放されると食塊は中咽頭へ送り込まれ、不随意運動である嚥下反射が誘発される。
- ④ 喉頭挙上と喉頭腔閉鎖：舌骨と喉頭が一塊として前上方に挙上する。このときの喉頭挙上に伴い発生する振動が 1–20 Hz とされ $m(t)$ とおく。 t は連続時間とする。舌根の後方運動と相まって、喉頭が舌根部に押し付けられ喉頭蓋が喉頭前庭を閉鎖し食塊が気道に入るのを防ぐ。この時の喉頭蓋の閉鎖に伴う振動は 20–100 Hz とされ $s_a(t)$ とおく。
- ⑤ 食道入口部の開大：喉頭が挙上している間、咽頭が収縮し蠕動様運動波が生じ、食塊が食道入口部に到達する。同時に同部が開大して食塊が食道へ送り込まれる。この時に 2 種類の帯域の振動が発生する。50–150 Hz と 400–750 Hz とされ、それぞれ $s_b(t)$ 、 $s_c(t)$ とおく。食道入口部の開大は同部を形成する輪状咽頭筋の弛緩と喉頭の前上方への挙上により、食道入口部の前後径が広くなることによる。

本研究では、 $m(t)$ 、 $s_a(t)$ 、 $s_b(t)$ 、 $s_c(t)$ について着目する。

2.2 低周波デバイスの開発とモデル

本研究では、咽頭期における嚥下音 $s_a(t)$ 、 $s_b(t)$ 、 $s_c(t)$ と喉頭の挙上運動 $m(t)$ を同時に計測し、それぞれの帯域のデータを使うと判別することができるか検証する。喉頭挙上運動 $m(t)$ は低い周波数領域の運動なので、双指向性マイクロフォンの低周波領域を高感度化する必要がある。高い周波数領域だけでなく低い周波数領域も計測できる高感度圧力センサを作成する。

双指向性マイクロフォンは、前面と後面に圧力を取り込むためのポートが空いており、前面もしくは背面から圧力変動が伝わってくると圧力の変化にともないエレクトレットフィルムが振動する。この振動によるエレクトレットフィルムの微小変位を静電容量の変化としてとらえ、静電容量電極間の電圧変化に変換する。この電圧がマイクロフォンに内蔵されている FET により増幅され出力される。

双指向性マイクロフォンをそのまま使うと、1Hz 近傍の低周波領域では、フィルムへ伝わる圧力が弱く、マイクロフォン自体が同じ圧力空間に置かれるためフィルムの表裏

で圧力同士が相殺され振動せずに電圧変化が起きなくなってしまう。そこで、ゴムチューブにマイクロフォンを埋め込み密閉し、エレクトレットフィルムの片面を密閉にすることで、低周波領域での微小な圧力変化を計測することができる。

このチューブを頸部に設置し、その状態で嚥下を行うと $m(t)$ 、 $s_a(t)$ 、 $s_b(t)$ 、 $s_c(t)$ と、ノイズ $n(t)$ を伴う振動がチューブに伝搬しチューブ内の空気を振動させることでそれぞれの振動を計測することができる。そのときの高感度圧力センサの出力を $x(t)$ とする。

2.3 提案システムの概要

本研究では計測した圧力センサの時系列 $x(t)$ をもとに、嚥下の有無および嚥下した食塊の粘性を判別することを目的としている。ここでは、嚥下の有無および嚥下した食塊の粘性の嚥下状態を y と定義し、 $N+1$ 種類 (f_0, f_1, \dots, f_N) の名義尺度であるとする。事前に計測した $x_i(t)$ の嚥下状態 y_i は既知である。新たに計測した $x_{new}(t)$ について、嚥下状態既知のデータと比較を行い、嚥下状態 y_{new} を推定する問題に帰着する。図 1 に提案するシステムの概要を示す。

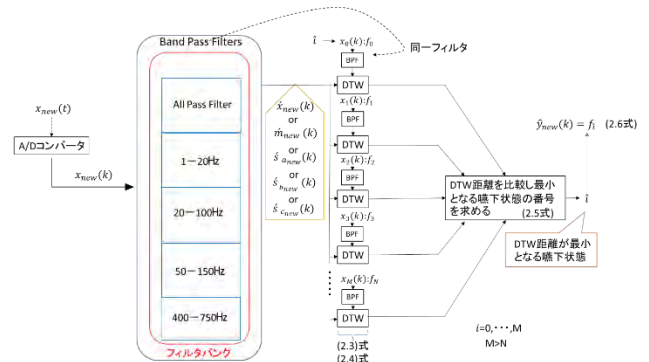


図 1 提案システムの概要

2.3.1 状態既知データ

i 番目の嚥下観測データ $x_i(t)$ の嚥下状態を y_i は下式のように定義する。嚥下状態は $N+1$ 種類 (f_0, f_1, \dots, f_N) のいずれかを取る。 k は、連続時間 t を離散化したものである。

$$x_i := \{x_i(k)\}_{k=1}^{K_i} \quad (1)$$

$$y_i \in \{f_0, f_1, \dots, f_N\} \quad (2)$$

2.3.2 バンドパスフィルタを用いた嚥下運動に伴う振動の分離

高感度圧力センサで嚥下データ $x_{new}(t)$ を計測し、A/D コンバータでデジタル信号に変換する。変換されたデータをバンドパスフィルタ (Band-pass filter: BPF) で上記の本研究の目的で記したそれぞれの必要な周波数のみに分ける。図 2 に BPF の説明図を示す。 $x_{new}(k)$ は A/D コンバータでデジタル変換されたものである。すべての周波数領域の嚥下データが $x_{new}(k)$ であり、 $m_{new}(k)$ 、 $s_{a_{new}}(k)$ 、 $s_{b_{new}}(k)$ 、 $s_{c_{new}}(k)$ はそれぞれ $x_{new}(k)$ を BPF によって周波数別に分けたデータである。

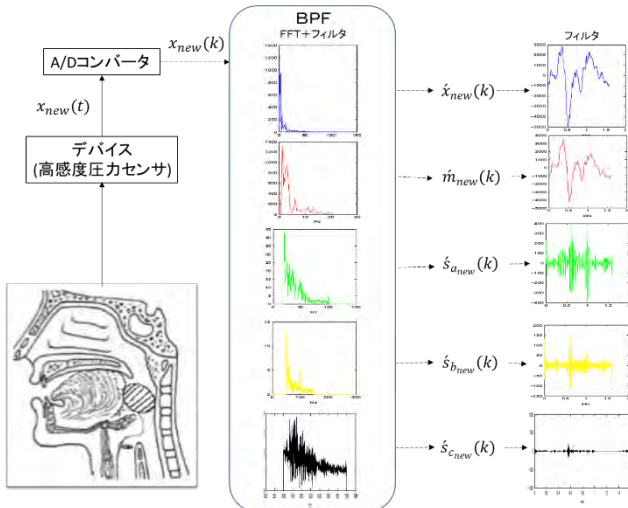


図 2 BPF による分析の説明図(構成図)

2.3.3 DTWを用いた嚥下状態に対する距離の算出

本研究では、1.6 秒の間の被験者の任意のタイミングで単独嚥下を行うという実験方法を用いていることで、データ毎に嚥下開始及び嚥下終了のタイミングが異なってしまう。ため、動的時間伸縮法 (Dynamic Time Warping, DTW) を用いて、間軸上のずれを許容できる DTW 距離を類似度の定義として使用することとする。

DTW 距離は動的計画法を用いて計算される。2 つの嚥下計測データの長さに対応した $K_i \times K_j$ のテーブルを用意する。行方向は x_i に、列方向は x_j に対応しており、最下行最左要素を $a_{1,1}$ 、最上行最右要素を a_{K_i, K_j} とする。テーブルが空の状態から計算を開始し、全ての要素に値を埋めた時点で計算が終了する。全ての要素が埋められた時、最上最右要素である a_{K_i, K_j} の値が DTW 距離となる。

異なる 2 つの嚥下観測データ x_i, x_j 間の DTW 距離 $D(x_i, x_j)$ は下式で与えられる。

$$a_{m,n} = |x_i(m) - x_j(n)| + \min \begin{cases} a_{m-1, n-1} \\ a_{m-1, n} \\ a_{m, n-1} \end{cases} \quad (3)$$

$$D(x_i, x_j) := a_{K_i, K_j} \quad (4)$$

このように (3) 式では局所的には最近傍のみを考慮しているが、(4) 式では大域的な最適化が得られるようになる。

2.3.4 嚥下状態の推定

嚥下状態 y_{new} が未知の嚥下観測データ $x_{new}(k)$ を与えたとき、嚥下状態 y_{new} は次のように推定される。

観測した嚥下観測データ $x(k)$ をあらかじめ登録していた全ての嚥下観測データ $f_N(k)$ と総当たりで DTW 距離を算出し、最も DTW 距離が短かったデータを i とし、その嚥下観測データ状態 \hat{y}_{new} として推定する。

$$\hat{i} := \underset{i}{\operatorname{argmin}} D(x_i(k), x_{new}(k)) \quad (5)$$

$$\hat{y}_{new} = f_{\hat{i}} \quad (6)$$

3. 嚥下状態の推定実験

3.1 概要

本実験では、2 つの実験をする。1 つ目は、安静状態と食品を嚥下する 2 種類の判定である (3.6.3)。2 つ目は、粘性のみの嚥下による分類である (3.6.4)。この 2 つの実験を行う。この 2 つの実験によって、今回 BPF によって分けている周波数帯域に与える影響について考察する。

3.2 実験システム

高感度圧力センサと装着図を図 3 に示す。センシングデバイスから得られる信号を CONTEC の C-LOGGER を用いて計測し記録する。

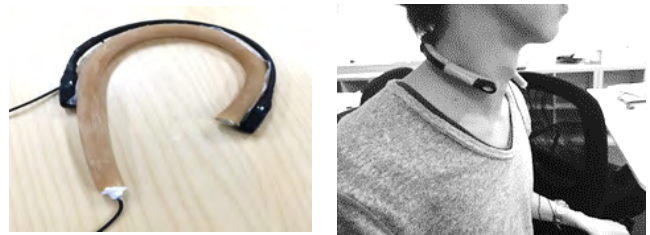


図 3 デバイスと装着図

3.3 実験条件

3.3.1 使用する食品

本実験では、餅を詰まらせる人が多いことから、一番粘性のあるものとして餅を選択した。一方粘性の低いものとしてはお茶を選択した。さらに定量的に粘度との関係性を調べるため、お茶に増粘剤を加え、合計 3 食品で実験を行った。嚥下状態として、 f_0 は何もしない状態、 f_1 はお茶を飲み込む状態、 f_2 はお茶に増粘剤を飲み込んだものを飲み込んだ状態、 f_3 は餅を飲み込んだ状態である。お茶は市販で売っているものを使用する (伊藤園: おーいお茶)。さらに粘性のみに差を出すためにお茶 150g に対して増粘剤を 3.2g 加えたものを使用する。それぞれ 1 回の嚥下量は 10ml とする (日清オイリオ: トロミアップエース)。餅は市販の売っているものを使用し (丸善: 生きり餅)、誤嚥の事故例が多い時期が正月時期のことを考慮に、雑煮 (オーブンで 3 分加熱し 1 分湯煎) を使用する。1 回の嚥下量は 10g とする。

3.3.2 機材の設定

サンプリング周波数: 25kHz、サンプリング周期: 40 μ s、データ点数 40000 点 (1.6 秒間)、分解能 0.6 Hz で計測する。その後、2.5kHz でダウンサンプリングを行い、データ量を 1/10 に減らした。本実験の計測対象とする最大周波数は 750 Hz であり、十分ナイキスト周波数に収まる。

3.3.3 被験者

提案システムの妥当性を調べるにあたり、嚥下機能に問題がない若年者で検証を行う。さらに今回は喉頭挙上運動をより明確に計測するため、喉頭の大きな男性に限定する。被験者は嚥下異常のない男性 7 名 (年齢 22 ± 0.5 歳、身長 175.1 ± 6.7 cm、体重 61.6 ± 4.5 Kg) とし、インフォームドコンセントを得て行う。

3.4 実験手順

本来、嚥下運動は日常において連続的なものである。口腔期、咽頭期、食道期、を厳密に分類することは難しい。しかし、単独嚥下においてはこの 4 期が規則正しく発生するとされているので本実験は単独嚥下運動に着目して行う。

3.1 節で述べた嚥下状態 $f_0 \sim f_3$ の 4 状態のそれぞれについて (i) 飲み込み準備 (ii) 計測開始(1.6 秒間) (iii) 単独嚥下 という流れで計測を行う。1 人 10 セットの嚥下行動を計測し、合計 280 回 (10×7 人分×4 種類) のデータを得る。その後、全ての組み合わせにおいて各周波数の DTW 距離を算出し、評価を行う。

3.5 評価方法

解析は交差検定を用いて行う。観測データ $x_{new}(k)$ を、あらかじめ登録しておいた各粘性の嚥下と安静状態のデータ $x_i(k)$ と総当たりで DTW 距離を算出し、推定結果 \hat{y}_{new} とを求める。評価では、 y_{new}^{true} が正解として与えられるとして正答率を算出する。

3.5.1 嚥下の有無の正答率

嚥下状態 f_0 を安静状態、 f_1 をお茶、増粘と餅を含めた粘性と定義する嚥下データとし、2 種類の嚥下状態における正答率を算出する。

$$\text{正答率} = \frac{\#(\hat{y}_{new} = y_{new}^{true})}{\#(\quad)} \quad (7)$$

ただし $\#(\hat{y}_{new} = y_{new}^{true})$ は () を満たすデータ数を求める関数である。ただし、 $\#(\quad)$ は全データ数を示す。

3.5.2 粘性分類の正答率

嚥下状態 f_0 を安静状態、 f_1 をお茶を飲み込んだデータ、 f_2 を増粘剤 (3.2g) を加えたお茶を飲み込んだデータ (増粘)、 f_3 を餅を飲み込んだときのデータと定義し、4 種類の嚥下状態における正答率を算出する。

それぞれの分類において真陽性 (True Positive, TP)、真陰性 (True Negative, TN)、偽陰性 (False Negative, FN)、偽陽性 (False Positive, FP) を次のように定義とする。

$$\begin{aligned} TP(f_i) &= \#(\hat{y}_{new} = f_i, y_{new}^{true} = f_i) \\ TN(f_i) &= \#(\hat{y}_{new} \neq f_i, y_{new}^{true} \neq f_i) \\ FP(f_i) &= \#(\hat{y}_{new} = f_i, y_{new}^{true} \neq f_i) \\ FN(f_i) &= \#(\hat{y}_{new} \neq f_i, y_{new}^{true} = f_i) \\ f_i: \quad &\{i = 0 \sim 3\} \end{aligned}$$

ただし $\#(\hat{y}_{new} = f_i, y_{new}^{true} = f_i)$ は () 内のすべての条件を満たすデータ数を求める関数である。

$$\text{正答率}(f_i) = \frac{TP(f_i) + TN(f_i)}{TP(f_i) + FP(f_i) + FN(f_i) + TN(f_i)} \quad (8)$$

さらに、感度 (Sensitivity, Se) と陽性的中率 (Positive Predictive Value, PPV) を以下のように算出する。

$$\text{Se}(f_i) = \frac{TP(f_i)}{TP(f_i) + FN(f_i)} \quad (9)$$

$$\text{PPV}(f_i) = \frac{TP(f_i)}{TP(f_i) + FP(f_i)} \quad (10)$$

3.6 実験結果

3.6.1 BPF (バンドパスフィルタ)

図 4 に今回解析する際に用いた BPF の例を示す。実際に餅を飲み込んだデータである。生データの時系列データをそれぞれの周波数にフィルタをかけ FFT をかけたグラフである。

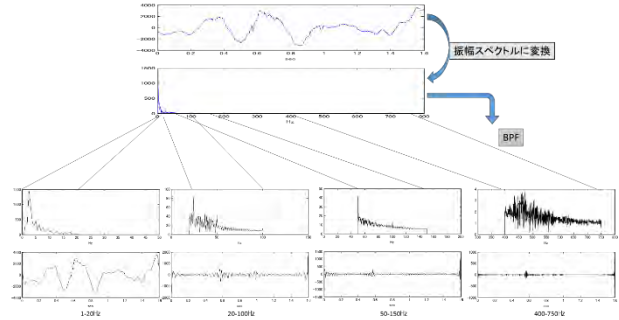


図 4 BPF の例

3.6.2 時系列データ

図 5 に今回実験を行った (a) 扱う周波数領域、図 6 に (b) 1-20 Hz の観測データの例を示す。安静状態における 0.4 秒、1.2 秒付近は脈の動きである。その他の大きな周波数のブレは嚥下音と喉頭挙上運動である。

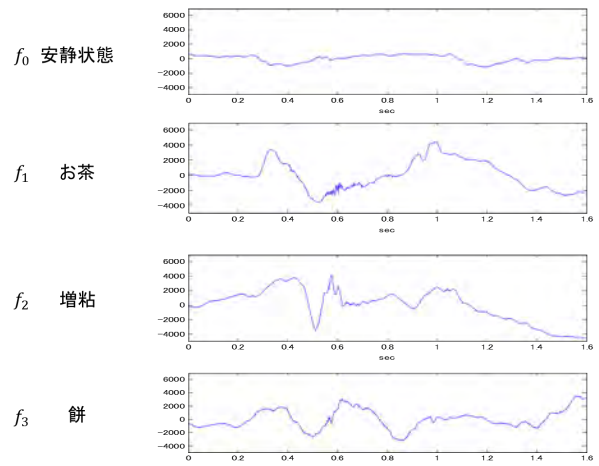


図 5 (a) 扱う周波数領域における観測データの例

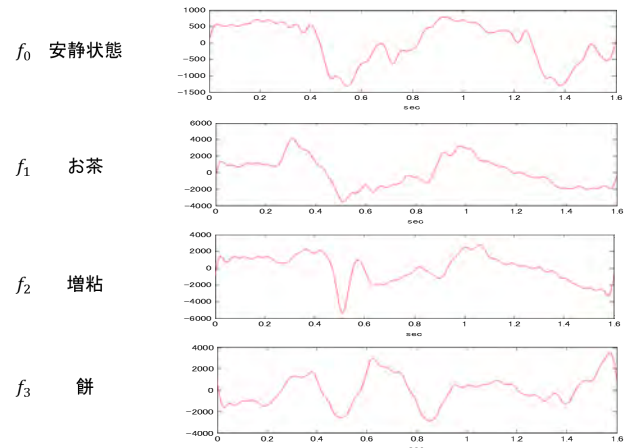


図 6 (b) 1-20 Hz における観測データの例

3.6.3 嚙下の有無の推定結果

表 1 に周波数別の嚙下の有無の正答率の結果を示す。安静状態を嚙下無し。お茶、増粘と餅を嚙下有りとおく。嚙下無しのための正答率と嚙下有りのための正答率を各周波数で比較し、嚙下の有無を判別できるか検証結果である。

表 1 周波数別の嚙下の有無の正答率

	嚙下無し	嚙下有り
扱う周波数領域	0.99	0.99
1-20 Hz	1	0.99
20-100 Hz	0.99	0.97
50-150 Hz	0.87	0.93
400-750 Hz	1	0.87

表 1 を見ると、各周波数で嚙下無しと嚙下有りの正答率が高いことが分かる。中でも 1-20Hz での正答率が 2 つとも高いことから、嚙下の有無を判別することは各周波数で約 9 割以上の判別ができる中で、1-20 Hz の範囲で最も精度の高い判別が可能だと考察する。

3.6.4 粘性分類の推定結果

表 2 と図 6 に交差検定を行った周波数別の正答率の結果を示す。最も正答率の高い(b)1-20 Hz と対極の(c)20-100 Hz の判定の内訳をそれぞれ表 3、表 4 に示す。表 5、6 に感度、陽性的中率の結果を示す。

表 7 に、表 2 で行った安静状態を除いた周波数別の正答率の結果を示す。

表 2 周波数別の正答率一覧

	安静	お茶	増粘	餅	平均
(a) 扱う周波数領域	0.98	0.63	0.47	0.57	0.66
(b) 1-20 Hz	1.00	0.75	0.52	0.78	0.77
(c) 20-100 Hz	0.98	0.48	0.33	0.28	0.50
(d) 50-150 Hz	0.87	0.58	0.40	0.52	0.59
(e) 400-750 Hz	1.00	0.63	0.43	0.47	0.63



図 6 周波数別および実験条件別のグラフ

表 3 (b)1-20 Hz の推定結果内訳

真値 \ 推定値	安静	お茶	増粘	餅
安静	70	3	0	0
お茶	0	52	27	9
増粘	0	9	37	4
餅	0	6	6	57

表 4 (c) 20-100 Hz の推定結果内訳

真値 \ 推定値	安静	お茶	増粘	餅
安静	69	1	5	0
お茶	1	35	30	28
増粘	0	19	22	23
餅	0	15	13	19

表 5 1-20 Hz の感度、陽性的中率の結果

	感度	陽性的中率
安静	1.00	0.91
お茶	0.75	0.58
増粘	0.52	0.72
餅	0.71	0.78

表 6 20-100 Hz の感度、陽性的中率の結果

	感度	陽性的中率
安静	0.95	0.83
お茶	0.48	0.37
増粘	0.33	0.35
餅	0.32	0.46

表 7 安静状態を抜いた周波数別の正答率一覧

	お茶	増粘	餅	平均
(a) 扱う周波数領域	0.63	0.47	0.57	0.56
(b) 1-20 Hz	0.75	0.52	0.78	0.69
(c) 20-100 Hz	0.48	0.33	0.28	0.37
(d) 50-150 Hz	0.58	0.40	0.52	0.50
(e) 400-750 Hz	0.63	0.43	0.47	0.51

表 2 より、1-20 Hz の範囲での正答率の結果が他の周波数と比較すると、すべての値が大きくなった。1-20 Hz の正答率の結果の値が大きくなったのは、表 3、4 を見るとわかるように、1-20 Hz では、各粘性で観測データと推定結果が一致している数がすべてにおいて多いことが分かることに対して、20-100 Hz では安静状態は判定できているものの、そのほかの粘性では観測データと推定結果が一致している数が少ない。また、表 5、6 に着目すると (b) 1-20 Hz の感度陽性的中率が (c) 20-100 Hz と比較すると値がすべて大きい。このように各粘性で判別ができているので表 2 のように 1-20 Hz での正答率の結果が高くなっていると考察する。また、粘性が最も大きいと考えられる餅の正答率の結果が安静状態を除いて最も高い値になった。このことから低周波の領域の値に着目することによって粘性の高いものを嚙下したかどうかの判断が可能だと考察する。

嚙下の有無 (安静状態との比較) に関しては、低周波の範囲で正答率 1 (100%) や、他の周波数でも正答率の値が大きいのは、嚙下の有無の分類という食品の分類と対極的な推定なので、比較的分類しやすく大きい値になったと考える。一方、表 7 に着目すると、平均の結果が表 2 と比較すると値が小さくなっている。それは安静状態の正答率が

大きいためである。そのため、食品の粘性のみでの正答率の精度を上げる必要があると考察する。

4. 考察

第3章では、2つの実験を行った。1つ目は、安静状態と3種類の粘性を飲み込んだものを粘性とまとめて嚥下の有無の正答率の検証を行った。結果は、各周波数で約9割の正答率の中で、1-20 Hzの範囲で他の周波数よりも以上正答率が高い値になり、1-20 Hzの範囲に着目することで最も精度の高い判別ができるとわかった。

2つ目として、4種類の嚥下状態でDTWを用いて交差検定を行い、1-20 Hzの範囲での正答率の結果が他の周波数と比較すると、すべての値が大きくなった。これは、粘性の強さによって、喉頭蓋の開鎖する強さが変わってくるのが考えられ、故に喉頭挙上運動が変わったことが挙げられる。このように20Hz以上の嚥下音を利用する場合と比べ、本研究で提案する1-20 Hzの計測が重要であることが示唆された。

一方、食品の粘性のみの結果での正答率の平均は安静状態を含めた結果の平均よりも大幅に低くなってしまったという結果になった。それは安静状態の正答率が大きいためであり、食品の粘性のみでの正答率の精度を上げる必要があると考察する。

提案手法ではDTWを使用することによって、嚥下のタイミングのずれを許容することができるというメリットがあった。このため、他の音が混入していてもある程度判別ができることを示している。今回の実験で低い帯域のみを使用するのが良いことが判明したので、フィルタを用いることで高周波ノイズとして除去することが可能である。

5. むすび

第2章にて提案したセンシングデバイスを用いて、喉頭挙上運動および嚥下音を計測することができた。また、周波数特性の実験によって、双指向性マイクロフォンをゴムチューブに埋め込みボンンドで密閉することで、低周波も含め、実験を行った全ての周波数を双指向性マイクロフォンと比較すると高い値になることが分かった。SN比を使用し波形のひずみに着目することで、高感度圧力センサが低周波の範囲でも他の周波数と変わらない感度で計測が可能ということがわかり、嚥下状態の推定実験で低周波も計測するという目的に適したデバイスということが分かった。

嚥下状態の推定実験で嚥下観測データをバンドパスフィルタによって周波数別に分けたデータ間のDTW距離を算出することによって嚥下運動の有無の判定と嚥下した食品の粘性の分類を行った。この実験で低周波の1-20 Hzでの範囲が今回実験を行った各周波数の結果よりも値が大きくなった。このことから、喉頭挙上運動に着目して計測することによって、より精度が高い粘性の分類ができることが分かった。しかし、安静状態の正答率が高いために正答率の平均の値が大きくなっている傾向があったため、安静状態の結果を抜いた平均の結果が低くなってしまった。つまり、嚥下の有無の判別はほぼ100%で判別が可能だが、食品の粘性のみの判別を行うと正答率が低くなったので、食品の粘性のみの判別でも精度を上げるという課題ができた。

本論文では被験者を男性の若年層に限定したが、今後は女性、高齢者についても検討を行いたい。

謝辞

本研究はJSPS科研費16K16392の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 内閣府：平成25年版高齢社会白書，第2節，1，高齢者の姿と取り巻く環境の現状と動向。
- [2] 厚生労働省：URL：
http://www.mhlw.go.jp/kokoro/specialty/detail_recog.html
- [3] 健康長寿ネット：URL：
<http://www.tyojyu.or.jp/hp/page000000500/hpg000000458.htm>
- [4] 兵頭政光：高齢者の嚥下機能
- [5] 厚生労働省：食品による窒息の現状把握と原因分析 平成19年
- [6] 新妻可奈子，本橋由香，佐藤敏夫，川島徳道，阿岸鉄三，小見勝利：“喉表面の動きを撮影したビデオ画像及び嚥下音の同期記録・解析装置による非侵襲嚥下機能評価”，第47回日本人工臓器学会大会，2009。
- [7] 関弘和，堀洋一：“高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた異常動作検出”，電気学会論文誌D，Vol.122，No.2，182-188，2002。
- [8] Y. Kurihara, R. Omura and K. Watanabe：“Evaluation system of swallowing function by using optical sensor in-home nursing”，SICE-ICASE Int. Joint Conf., pp. 137, 2006。
- [9] 栗原陽介，渡辺嘉二郎，小林一行，田中博：“光センサを用いた嚥下時における先行時間，頤舌骨筋筋力，甲状舌骨筋筋力の推定による嚥下能力評価法”，日本人間工学会，110-117，2009。
- [10] Y. Kurihara, K. Watanabe, Y. Yang, and H. Tanaka：“Construction of Age Model for the Evaluation of Swallowing Function Using Photo Sensors”，IEEE Trans. On Neural Sys. & Rehab. Eng., Vol.18, NO.5, 2010。
- [11] 田中雄大，星勇輝，渡邊祐子：“マイクロフォンを用いた嚥下音検出システムの検討”，電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会，p. 83, 2011。
- [12] 渡部雄祐，渡邊祐子，浜田晴夫：“複数のマイクロフォンによる嚥下音評価システムの検討”，日本音響学会研究発表会，論文No. 3-9-4, 2009。
- [13] 丘村熙：“嚥下のしくみと臨床”，金原出版，pp. 17-21, 1993。
- [14] 南條宏基，鏑木崇史，栗原陽介：“喉頭挙上運動および嚥下音計測のためのセンシングデバイスの開発および動的時間伸縮法による嚥下の分類”，情報処理学会第77回全国大会，2014。
- [15] Toni Giorgio：“Computing and Visualizing Dynamic Time Warping Alignments in R: The dew Package.” Journal of Statistical Software, Vol. 31, No. 7, pp. 1-24, 2009。