

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700217

研究課題名(和文)嚥下メカニズムの解明による喉ごしの定量評価法の開発

研究課題名(英文)Development of swallowing feeling measurement system using swallowing mechanism

研究代表者

三輪 洋靖(MIWA, HIROYASU)

独立行政法人産業技術総合研究所・デジタルヒューマン工学研究センター・主任研究員

研究者番号：30367073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、嚥下における喉ごしを工学的アプローチによって解明するため、嚥下音計測システムと筋電計を用い、試料を単一嚥下で摂取したときの筋活動および嚥下音の計測を行った。そして、嚥下メカニズムを説明するモデルとして、解剖学的知見から咽頭期に作用する筋骨格モデルを構築した。さらに、嚥下音に時間周波数変換と統計処理を適用することで、試料の刺激強度に対して、喉ごしが上に凸の特性を持つことを明らかにし、嚥下時間・刺激強度・喉ごしの関係を説明するモデルを構築した。最後に、嚥下音より嚥下時間を算出するシステムを開発し、嚥下音による喉ごしの評価システムの検討を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, our research goal was to model the swallowing motion and feeling using swallowing sounds. At first, we measured swallowing sounds and EMG signals during drinking samples with individual swallowing, and proposed the musculo-skeletal model for swallowing from view point of the anatomical insight. Then, we applied continuous wavelet transform and statistical processing to swallowing sounds and EMG signals to obtain three indices to quantify the swallowing feeling. As analysis results of the indices, we considered that the swallowing feeling had the characteristics of the convex upward to the stimulation intensity, and proposed a model among swallowing time, stimulation intensity and swallowing feeling. Finally, we developed a swallowing time measurement system comprised of measurement system and automated detection of swallowing sound. By integration of the proposed models and systems, development of measurement system for swallowing feeling was suggested.

研究分野：人間情報学

キーワード：感性計測評価 嚥下 嚥下音 筋電位 モデル化 計測 喉ごし 嚥下感覚

1. 研究開始当初の背景

私たちの生活において「食」すなわち食品や水分の摂取は生命維持の観点から欠かすことのできない行動の一つである。同時に、食は単純なエネルギー摂取としてだけでなく、日常生活における楽しみの一つとしても機能している。これは、食における楽しみが飲食品の「おいしさ」と強く関係していることを経験的に知っているからと言える。

飲食品のおいしさとは、認知的もしくは感性的な評価尺度であるため客観的な定義は難しいが、おいしさの程度を評価する尺度として、相良は食品が持つ味、風味、外観、テクスチャー、温度、音の6つの特性を総合的な認知である嗜好を提唱している[1]。これら6つの特性を認知するとき、ヒトは五感を通して各特性を知覚し、遺伝的特性や経験に基づいて嗜好を認知する。摂食・摂水を時系列で捉えたと、食品が体外から体内へ移動するにつれて、図1に示すような順番で各感覚器が知覚している。特に、咽頭通過時のテクスチャーは「喉ごし」や「嚥下感覚」とも呼ばれ、炭酸飲料やアルコール飲料等の飲料品では喉ごしを重視する場合もある。飲料メーカーも喉ごしを強調したマーケティング活動を行っており、喉ごしは、飲食品のおいしさにおいて、重要な要素の1つと言える。

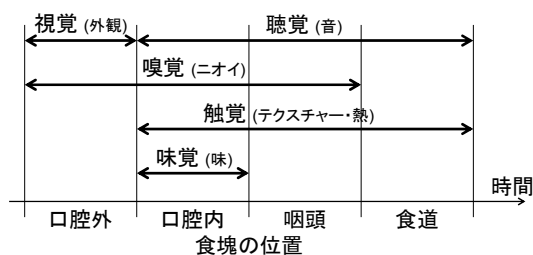


図1 嚥下における知覚と感覚器の分布

嚥下に関する研究は、医学、介護、バイオメカニクス分野で、嚥下メカニズムの解明、嚥下機能評価による誤嚥リスクの回避、嚥下トレーニングによる嚥下機能の維持、改善等積極的に行われている。例えば、ヒトの嚥下メカニズムは、咀嚼して食塊を作る準備期、舌で口腔から咽頭へ食塊を送る口腔期、咽頭から食道の入り口へ食塊を送る咽頭期、蠕動運動で食塊を胃へ送る食道期の4期に分かれていること、咽頭相以降は反射運動であり、気道の開閉等は周辺筋肉の協調動作プログラムによって自動的に行われ、ヒトが随意的に制御しにくいことが知られている[2]。また、古閑らはヒトの嚥下運動における加齢の影響を表面筋電図によって評価し、筋電図の持続時間と筋活動バースト数が加齢によって有意に変化することを明らかにし、栗原らは光センサを用いた嚥下能力評価システムによる嚥下年齢を提案している[3][4]。

一方、喉ごしに代表される嚥下感覚については、藤田らが喉頭運動、嚥下音、筋電図を

同時計測する嚥下機能評価システム SFN シリーズを開発しており、同システムを用いることでビールやおかゆ嚥下時に水分、食品の特性と嚥下の関係性を評価しているが[5][6]、喉ごしに関する多くの研究、調査は官能検査による主観評価が中心であり、喉ごしに関する工学的アプローチによる研究は不十分であった。

[1] 相良, “おいしさを探る感性工学”, 日本味と匂学会誌, Vol.8, No.2, pp.153-159, 2001.
 [2] K. Corbin-Lewis, J. M. Liss, K. L. Scirotno, 金子(訳), “摂食・嚥下メカニズム”, 医歯薬出版, pp.2-41, 2010.
 [3] 古閑, 村山, 中原, 中西, “表面筋電図によるヒト嚥下運動の加齢による影響の定量的評価”, 臨床神経生理学, Vol.34, No.6, pp.511-520, 2006
 [4] 栗原, 渡辺, 小林, 田中, “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”, 人間工学, Vol.45, No.2, pp.110-117, 2009.
 [5] 藤田, 村山, 林, 中村, 小島, 道見, “嚥下機能評価システム SFN-1 を用いたビール飲み込み時の嚥下動態の解析”, 電子情報通信学会技術研究報告. ME とバイオサイバネティクス, Vol.106, No.80, pp.25-28, 2006.
 [6] 金田, 小島, 渡, 中村, 林, “喉越し計測システムの開発”, FFI ジャーナル, Vol.212, No.8, pp.666-670, 2007.

2. 研究の目的

これまでに実施してきた、申請者らが開発した体内音センサ[7]を用いた炭酸飲料の嚥下音計測実験では、嚥下方法にも個性があり、同一の試料を摂取する場合でも嚥下音が異なったり、複数の嚥下方法を無意識に使い分けていることが示唆されていた。そこで、既存の嚥下に関する知見に、個人特性や環境特性、動的な筋肉の動き等を考慮したモデルを融合することで、新しい嚥下モデルを構築できると考えた。さらに、構築した嚥下モデルに基づいて、主観的評価である喉ごしを説明することで、これまで曖昧な定義のまま用いられていた喉ごしの意味やメカニズムを科学的に明らかにできると考えた。

以上より、本研究では、嚥下を筋電図や嚥下音によって観測・分析することで筋活動や嚥下音のメカニズムを説明できる新しい嚥下モデルを構築すること、および、構築した嚥下モデルを用い、嚥下と喉ごしの関係を解明し、喉ごしを簡易に計測できるシステムの開発することを研究目標とした。

具体的には、(1) 嚥下時の筋活動および嚥下音の計測、(2) 嚥下メカニズムを説明するモデルの構築、(3) 嚥下時の生理信号による喉ごし推定方法の構築を研究目的とした。さらに、得られた成果を統合し、喉ごし評価シ

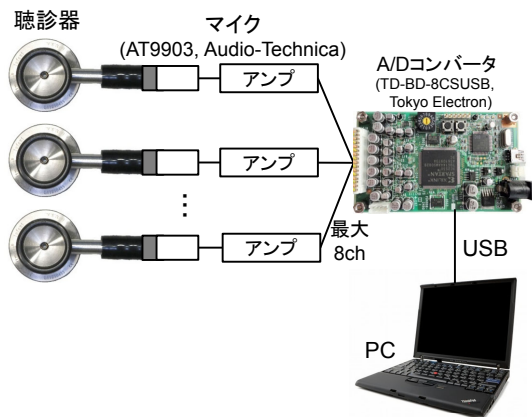
システムの構築を検討する。

- [7] H. Miwa, “Heart rate and respiratory rate measurement using body-sound”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.3, pp.434-442, 2011.

3. 研究の方法

(1) 嚥下音計測システム

本研究では、嚥下音、すなわち、摂食・摂水時に頸部で生じる音に着目し、嚥下音の計測と解析を行った。嚥下音の計測には、われわれが開発した体内音センサ[7]を嚥下音計測用に改良した。体内音センサは図2のようなウェアラブルセンサで、集音部に聴診器(Littmann Classic II Infant; 3M, USA)を用い、集音部に入力された嚥下音は、アンプ付きマイク(AT9903; Audio-Technica)、A/Dコンバータ(TD-BD-8CSUSB; Tokyo Electron Device)を通してPCで録音した。集音部は専用の固定部材とバンドを用いて頸部に固定した。



(a) 全体構成図



(b) 専用部材に固定された集音部
図2 嚥下音計測システム

(2) 単一嚥下時の嚥下音・筋電位計測実験

感覚器の分布と嚥下メカニズムより喉ごしは咽頭期での筋活動と関係が深いと考え、咽頭期と関連する嚥下音および筋電図による嚥下活動の計測を行った。また、嚥下には単一嚥下と連続嚥下があるが、連続嚥下は実験条件の制限が難しいため、本研究では単一嚥下に限定した。

実験では、実験協力者に安静座位姿勢で試料を摂取してもらい、喉頭隆起の左側に固定した嚥下音計測システムで嚥下音を計測し、筋電計(Biolog 2000 + DL-141; S&ME, Japan)

で、咬筋、舌骨上筋群、舌骨下筋群の皮膚表面筋電位を計測した。嚥下音のサンプリング周波数は44.1[kHz]、量子化ビット数は16[bit]、筋電位のサンプリング周波数は1000[Hz]とした。

実験試料には、無味無臭の強炭酸水、弱炭酸水、とろみ付き水、水の4種類の試料を用意した。強炭酸水と水は市販飲料を使用し、弱炭酸水は両者を1:1で配合、とろみ付き水は水に市販のとろみ剤を添加した。そして、プラスチック容器に20[g]の試料を取り分け、1口で摂取することを1試行とした。また、実験は無響室もしくは環境音が十分に小さい実験室で行った。

なお、本実験は産業技術総合研究所人間工学実験委員会審査・承認(人2011-346)のもと実施した。

4. 研究成果

(1) 嚥下時の筋活動および嚥下音の計測

本研究では、研究期間中に37名の実験協力者に対し、単一嚥下時の嚥下音・筋電位計測実験を実施した。図3に弱炭酸水摂取時の筋電図および嚥下音を示す。

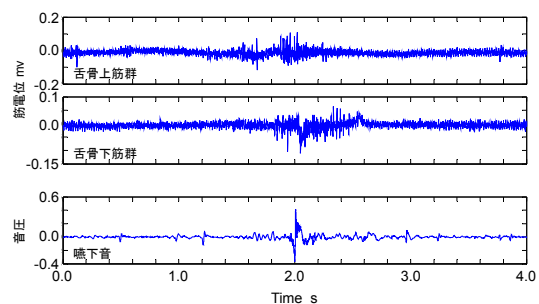


図3 弱炭酸水嚥下時の筋電図・嚥下音

(2) 嚥下メカニズムを説明するモデルの構築

ヒトが食品や水分を摂取するとき、それらは口、口腔、中咽頭、下咽頭、食道、胃の順番で送られていく。この一連の送り込み動作を嚥下と呼び、食品や水分を口に含み咀嚼して食塊を作る準備期、舌で口腔から咽頭へ食塊を送る口腔期、咽頭から食道の入口へ食塊を送る咽頭期、蠕動運動で食塊を胃へ送る食道期の4期に分かれる[2]。

そこで、嚥下の咽頭期に着目し、解剖学や既存の嚥下における筋活動に関する既存研究に基づき、オトガイ舌骨筋、甲状舌骨筋、胸骨舌骨筋、胸骨甲状筋、舌骨、甲状軟骨から構成され、嚥下における各筋肉の動きを記した嚥下モデルを構築した。図4にこの咽頭期で運動する筋骨格を単純化したモデル図を示す。

咽頭期は、準備期、口腔期を経て咽頭へ送り込まれた食塊により舌根部とその周辺感覚受容器が刺激されることで開始される。咽頭期では軟口蓋を閉鎖し鼻腔への逆流を防ぐと同時に、声帯を閉じることで気管への流入を防ぐ。さらに、オトガイ舌骨筋の収縮

によって舌骨が上に引き上げられ、甲状舌骨筋が収縮することで甲状軟骨が上前方へ移動する。すると、喉頭蓋軟骨が喉頭口に倒れて気管に蓋がされる。これにより、喉頭蓋軟骨と声帯による気道防御がなされる。このとき呼吸は一時的に停止する。甲状軟骨が前方に移動したことで、喉頭と脊柱の間にスペースが生まれ、食道が拡張する。食塊は、咽頭収縮筋の分節的な締め付けによって生じる前後の圧力差によって、食道へと送り出されていく。その後、食道を拡張したのとは逆の手順で気道は開放され、喉頭蓋軟骨、舌骨も元の位置に戻る。最後に、食道期に遷移し、食道に送り込まれた食塊が食道の蠕動運動によって胃へと移動していく。

提案したモデルでは、下顎骨と舌骨をオトガイ舌骨筋、顎舌骨筋、舌骨二腹筋で構成される舌骨上筋群で接続し、舌骨と甲状軟骨、胸骨柄を胸骨舌骨筋、甲状舌骨筋、胸骨甲状筋で構成される舌骨下筋群で接続している。咽頭期では、各筋肉が時間差を持って活動することで、舌骨や甲状軟骨を上下に動かす。

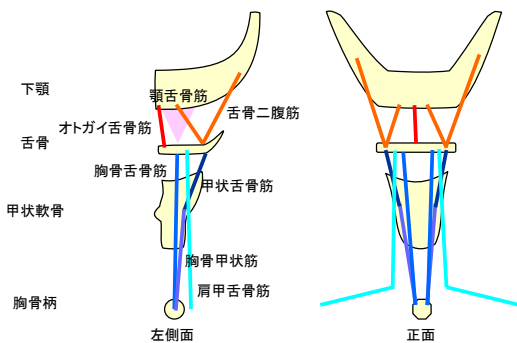


図4 咽頭期における筋骨格モデル

(3) 嚥下時の生理信号による喉ごし推定方法の構築

試料嚥下時の喉ごしをモデル化するため、計測によって得られた各試料嚥下時の嚥下音に連続ウェーブレット変換(CWT、Continuous Wavelet Transform)による時間・周波数解析を適用した(図5)。さらに、CWTのデータに対して、周波数ごとに上位25%をハイパワー部と定義し、ハイパワー部を抽出した。このとき、21.5[Hz]以下の低周波帯域と2.76[kHz]以上の高周波帯域はノイズと見なして削除した。そして、ハイパワー部が持続した時間である嚥下音発生時間とハイパワー部面積を、嚥下音に関する特徴量として求めた。全試行について、試料ごとに平均を求めた結果、図6のように、強炭酸水<水<弱炭酸水の順で値が大きくなった。このとき、嚥下音発生時間とハイパワー部面積は1次関数で近似され両者に高い相関関係($R^2=0.99$)が得られた。さらに、全試行のデータを用い、ハイパワー部面積について一元配置の分散分析を適用したところ、試料間に有意差($P=0.026$)が確認され、チューキー法により、有意水準5%で強炭酸水-弱炭酸水間における有意差が確認できた。

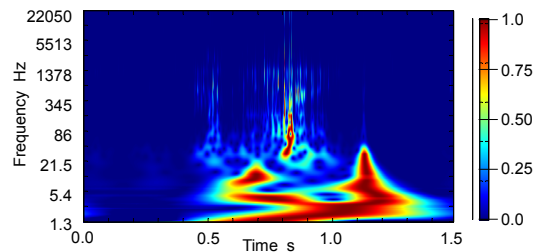


図5 嚥下音にウェーブレット変換を適応した結果

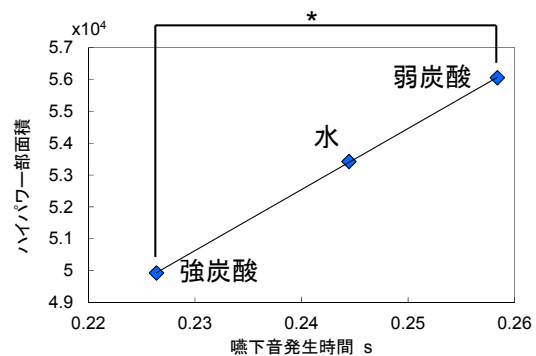


図6 嚥下音の特徴量の関係

一方、筋電図に関して、筋電位は絶対値処理ののち、バターワースフィルタ(カットオフ周波数25[Hz]、次数5)によるローパスフィルタ(LPF)を適用した。実験結果より、非嚥下時の筋電位は最大値が平均値の1.5倍を超えないことが分かったので、非嚥下時の平均筋電位の1.5倍を閾値とし、閾値以上の筋電位が出力された区間を嚥下による筋肉の活動時間と定義した。ただし、舌骨上筋群は、嚥下の準備期、口腔期においても予備活動することが知られている。本研究では咽頭期における筋活動に着目するため、解剖学的動作に基づき、嚥下関連筋群は咬筋→舌骨上筋群→舌骨下筋群の順番で活動することを拘束条件として設定し、各筋肉の活動時間を抽出した。筋電位に関しては個人差が大きいため、12名の実験協力者に対して、実験協力者ごとに試料、計測部位の2要因について2元配置の分散分析で活動時間に関する有意差の有無を検定した。分散分析の結果、実験協力者のうち58%で試料間に有意水準5%の有意差が得られた。また、42%で舌骨上筋群の活動時間が強炭酸水<水<弱炭酸水に、67%で舌骨下筋群の活動時間が強炭酸水<水<弱炭酸水の順番で長くなり、一部の実験協力者において、チューキー法により試料間での有意水準5%の有意差が確認できた。これらのことから、同量の試料であっても、試料の炭酸強度によって、ヒトは嚥下方法を変化させていることが示唆された。

また、嚥下音と筋電位に関する実験結果の比較より、統計的に有意な相関は得られていないものの、嚥下音ハイパワー部面積、発生時間と筋活動時間の間には類似した傾向があることが示唆された。

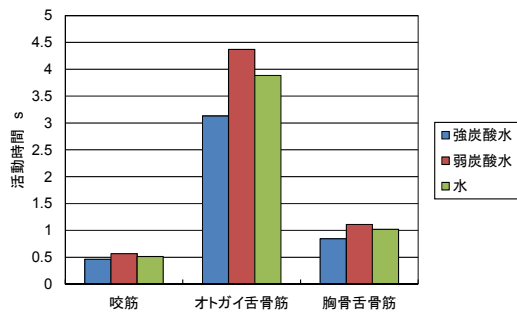


図 7 筋活動時間の比較

最後に、嚥下音と喉ごしの関係より、炭酸強度を含む試料の刺激強度と嚥下時間の関係についてモデル化を行った。

まず、試料を嚥下すると、ヒトは刺激強度を知覚し、喉ごしが良くなるように嚥下方法を選択すると考えた。咽頭期以降では反射運動が支配的なことから、嚥下方法とは、咽頭期における一連の筋骨格の協調動作プログラムと言える。本研究で計測した嚥下音特徴量は筋活動時間と同様の傾向を示すことから、嚥下音によって嚥下時間の長短、すなわち、嚥下方法の傾向が分かる。そして、嚥下方法の選択には無意識的な介入が働いていると考えられる。

次に、水を基準として、嚥下時間と刺激強度の関係について考えると、刺激が非常に強い強炭酸水の場合、その刺激を不快と感じており、体が受ける不快刺激を最小化するために、水よりも短時間で飲み込もうとして、嚥下時間が短い嚥下方法が選択されたと考えられる。一方、弱炭酸水は水より刺激は強いものの、本実験に参加した実験協力者は炭酸飲料を好む者であったため、弱炭酸水の刺激を適度な快刺激と感じていたと考えられる。そして、この快刺激を無意識的に求めようとして、無刺激の水よりも嚥下時間が長い嚥下方法を選択したと考えられる。つまり、嚥下時間が長い試料は、その試料を快刺激と感じており、喉ごしが快もしくは良好な試料であったと考えた。

以上をまとめると、試料を摂取したとき、試料が持つ刺激強度から喉ごしが快の場合は嚥下時間が長く、喉ごしが不快の場合は嚥下時間が短くなるよう、嚥下方法の選択に無意識的な介入が働くことが示唆された。そこで、図 8 のように、喉ごしに対して嚥下時間は単調増加の関係があり、刺激強度と喉ごしの間には、図 9 のように、摂取する試料の刺激強度に対して上に凸の特性を持つモデルを提案した。

さらに、炭酸刺激にとろみ付き水を加え、モデル構築には用いていない実験協力者に対する計測結果に対して、同様の分析を行った結果、一部の被験者において、不快と感じる強炭酸水、とろみ付き水の 2 種類で嚥下音特徴量に類似した傾向が確認され、提案モデルが支持される結果となった。

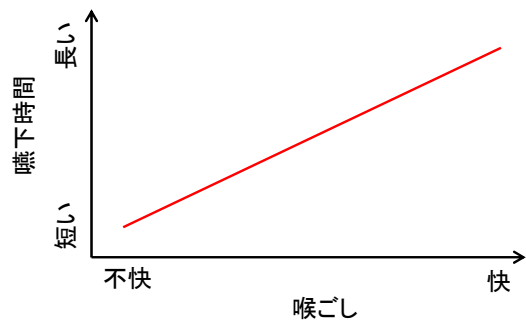


図 8 喉ごしと嚥下時間の関係

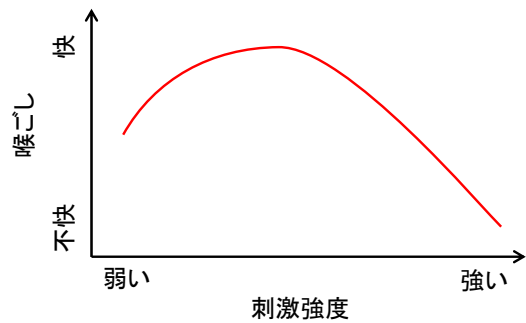


図 9 刺激強度と喉ごしの関係

以上より、数学的記述には至らなかったが、飲料品の嚥下において、嚥下時間による快・不快の推定に向けた基礎的知見を固めることができた。

(4) 喉ごし評価システムの検討

上記の研究成果より、喉ごし評価システムを構築するためには、試料嚥下時の嚥下時間を簡易に計測するシステムが必要となる。そこで、これまでの研究成果を統合し、嚥下音を含む音データから嚥下音を抽出し、嚥下時間を自動的に算出するシステムを開発した。本システムでは、試料を単独嚥下で摂取したときの嚥下音を計測したのち、①嚥下音の分割と標準偏差の算出、②嚥下セクションの推定、③嚥下音の Wavelet 変換、④疑似信号パワーの算出、⑤閾値処理による嚥下音開始時刻、終了時刻の推定、⑥嚥下音発生時間の算出の 6 段階の処理で嚥下時間を算出する。特に、時刻ごとに Wavelet 係数の合計を求めることで、疑似信号パワーを求めることで、嚥下開始時刻および終了時刻の検出精度を高めることができた。図 10 に本システムによって検出した嚥下時間の例を示す。

本システムの性能を評価するため、従来の目視による計測との比較実験を行った結果、両者の一致率は 87.5% と十分に高く、開発したシステムの有効性を確認できた。

以上より、本システムによる嚥下音発生時間の計測と嚥下時間・刺激強度・喉ごしに関するモデルを組み合わせることで、嚥下音による喉ごしの評価システムの実現が示唆された。

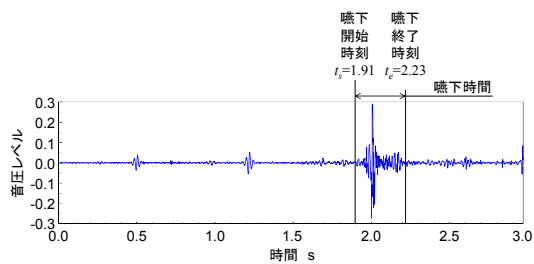


図 10 嚥下時間の自動算出結果

(5) まとめ

本研究では、嚥下における喉ごしを工学的アプローチによって解明するため、体内音計測システムを改良した嚥下音計測システムと筋電計を用い、複数の試料を単一嚥下で摂取したときの筋活動および嚥下音の計測を行った。そして、発生メカニズムを説明する嚥下モデルとして、解剖学的知見から咽頭期に作用する筋骨格モデルを構築した。さらに、嚥下音に対し、時間周波数変換と統計処理を適用することで、試料の刺激強度に対して、喉ごしは上に凸の特性を持つことを明らかにし、嚥下時間・刺激強度・喉ごしの関係を説明するモデルを構築した。最後に、嚥下音より嚥下時間を自動的に算出するシステムを開発し、提案モデルと組み合わせることで、嚥下音による喉ごしの評価システムの検討を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

(1) 三輪 洋靖, 持丸 正明, 野場 重都, 舛田 晋, “嚥下音による炭酸刺激強度と嚥下活動のモデル化”, バイオメカニズム, 査読有り, Vol. 22, 2014, pp.49-58.

[学会発表] (計 3 件)

(1) 三輪 洋靖, “嚥下における筋電と嚥下音の計測に関する研究”, 日本咀嚼学会第 25 回学術大会, 2014.9.20, 静岡県立大学 (静岡県).

(2) 三輪 洋靖, 持丸 正明, 野場 重都, 舛田 晋, “嚥下音による炭酸刺激強度と嚥下活動のモデル化”, 第 23 回バイオメカニズム・シンポジウム, 2013.7.27, ホテルルビノ京都堀川 (京都府)

(3) 三輪 洋靖, “体内音センサによる嚥下音の計測”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'12 講演, 2012.5.28, アクトシティ浜松 (静岡県)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 嚥下時間の計測装置、計測方法
発明者: 三輪 洋靖

権利者: 国立研究開発法人産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2015-115998

出願年月日: 2015.6.8

国内外の別: 国内

[その他]

招待講演 1 件

三輪 洋靖, “モノ・ヒト・コトを測る ー実験室から日常生活へー”, 2014.4.25, 早稲田大学 (東京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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・主任研究員
三輪 洋靖 (MIWA HIROYASU)
研究者番号: 30367073