

201417007B

厚生労働科学研究費補助金

長寿科学総合研究事業

頸部装着型機器による嚥下機能評価と食事介助支援装置の実用化
に関する研究

平成24年度～平成26年度 総合研究報告書

研究代表者 松村 明

平成27（2015）年 5月

厚生労働科学研究費補助金

長寿科学総合研究事業

頸部装着型機器による嚥下機能評価と食事介助支援装置の実用化
に関する研究

平成24年度～平成26年度 総合研究報告書

研究代表者 松村 明

平成27（2015）年 5月

目 次

I. 総合研究報告

頸部装着型機器による嚥下機能評価と食事介助支援装置の実用化に関する研究 ----- 1

松村 明

C. 1 頸部装着型デバイスを用いた嚥下スクリーニング方法の開発 -- 4

C. 2 嚥下造影検査および高解像度マノメトリーとの同時記録による嚥下音の検討 -- 7

C. 3 高齢者の嚥下機能の計測と鍼治療の効果の定量化に関する検討 -- 26

C. 4 高齢者施設における食事介助に関する実態調査 -- 29

C. 5 筑波大学附属病院における誤嚥性肺炎と嚥下障害の現状について -- 36

(資料) 高齢者施設の食事介助に関する調査

調査票① 施設の概要 ----- 47

調査票② 施設における食事介助の実態調査 ----- 48

II. 研究成果の刊行に関する一覧表 ----- 56

III. 研究成果の刊行物・別刷 ----- 57

頸部装着型機器による嚥下機能評価と食事介助支援装置の実用化に関する研究

研究代表者 松村 明 脳神経外科・筑波大学附属病院長

研究要旨 本研究では、提案する装置を用いた嚥下活動記録の利便性を向上させるため、実証実験用に高機能携帯端末による記録システムを実装し、主に入院患者にご協力頂き、開発した機器により食事中及び就寝中の嚥下活動の記録を行う。まず、平均嚥下時間、毎分の嚥下回数、嚥下異常音の取得を行うとともに、就寝中を想定して平均嚥下時間、毎時間あたりの嚥下回数を計測し記録するシステムを構築する。さらに、嚥下造影検査やマンメータ（圧力計測）と比較を通じて嚥下音信号解析の高度化を目指す。

鈴木 健嗣	筑波大学システム情報系 准教授
日高 紀久江	筑波大学医学医療系 教授
鮎澤 聡	筑波技術大学保健科学部 准教授
江口 清	筑波大学医学医療系 准教授
中井 啓	筑波大学医学医療系 講師

A. 研究目的

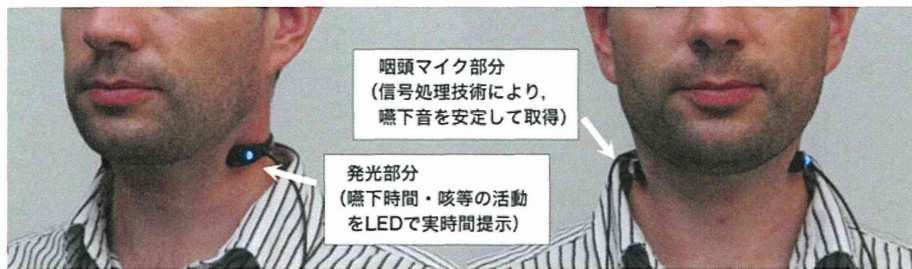
本申請研究では、加齢に伴い嚥下機能の低下が見られる在宅高齢者、嚥下機能障害のおそれのある入院患者を対象とし、障害の程度に応じた適切な治療・リハビリテーションを行うため、手軽で高齢者でも容易に利用可能であり、かつ実時間で嚥下機能を計測・記録及び提示可能な新規開発した嚥下計測機器による臨床研究を実施し、その有効性を検証する。我々は、脳卒中等の神経疾患や神経外傷に伴う機能障害の回復を目指し、臨床を目指して臨床医学・看護学・ロボット工学の研究者とともに本研究を推進している。在宅高齢者・入院患者の嚥下機能評価、嚥下障害者の介護の実態調査を実施するとともに、その新たな対処方法を確立する。

本年度は、提案する装置を用いた嚥下活動記録の利便性を向上させるため、実証実験用に高機能携帯端末による記録システムを実装し、在宅高齢者・入院患者にご協力頂き、開発した機器により嚥下活動の記録を行っている。まず、嚥下時間、嚥下回数、嚥下異常音の取得を行う

ための臨床研究を実施している。さらに、本装置を用いた嚥下音取得実験を通じて、嚥下直後の湿性音・泡立ち音、さらにむせに伴う喀出音と誤嚥の関係を明らかにするため、嚥下造影検査やマンメータ（圧力計測）と比較を通じて嚥下音信号解析の高度化を目指す。また、病院内および外部協力機関と連携して研究を実施するため、嚥下計測デバイスの改善およびスマートフォンを利用した計測システムの構築に着手する。ここでは、在宅状況から情報収集を行う通信ネットワーク網を用いたデータ収集システムの構築を目指す。小型スマートフォンでの計測、及びPCでの計測システムを実現し、当初計画通り実証実験用に高機能携帯端末にて記録システムを実装する。

B. 研究方法

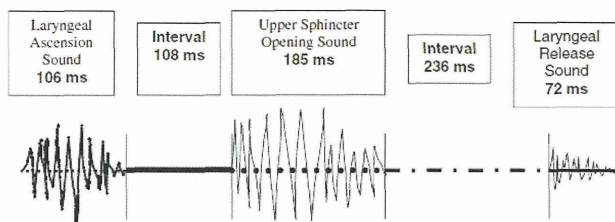
提案手法は、頸部の皮膚表面から装着型マイクであるエレクトレットコンデンサマイクを利用して採取する嚥下音に基づき、嚥下能力の推定を行うものである。図B-1に、提案する頸部装着型インタフェースの装着図と外観を示す。頸部に使用するマイクは、エレクトレットコンデンサ型咽喉マイクを用いる。この咽喉マイクは喉周辺の振動のみを取得するものであり、外界からの音響や周囲の環境に影響されず被験者の口腔内の音のみを採取することが出来る。図B-2に、代表的な嚥下音の構成要素を示す。



図B-1. 頸部装着型嚥下機能計測インタフェース



図B-3. 嚥下音, 口腔内圧計測, VF同時計測実験風景



図B-2. 嚥下音の構成要素
(Moriniere et al. より抜粋)

本システムは、咽喉マイクより嚥下の計測を行う計測部と、計測データを蓄積し嚥下判断を行う処理部、処理後のデータを基に情報提示を行う提示部からなる。計測部のマイクは頸部に装着し、11.025kHzのサンプリング周波数で音響データを取得する。咽喉マイクの入力感度は-663[dB]であり、マイクからの入力を200倍に増幅して取得する。計測部からコンピュータ上の処理部へ音響データを送り、処理部では音声データの蓄積及び解析を逐次行う。解析装置には携帯端末(スマートフォン)と計算機の2種類を用意した。解析部に用いるスマートフォンはSAMSUNG製のGALAXY NEXUS, 計算機はDELL製のVostro 3360を用いる。

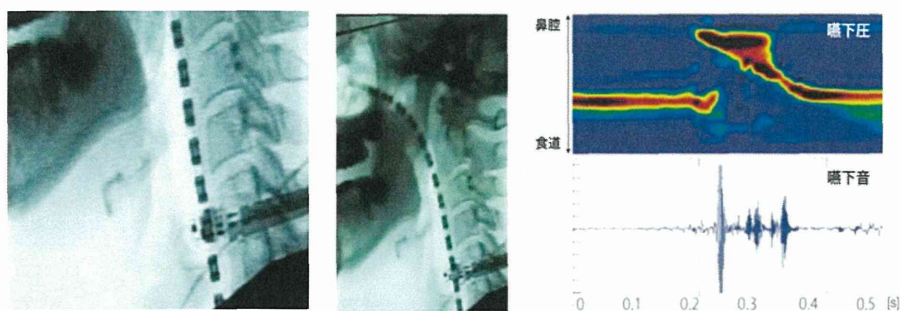
インタフェースに備えた提示部は、LEDを用いて情報提示を行う。解析部によりデータをシリアル通信でマイクロコントローラ(dsPIC30F3012)

に送り、LED制御により光提示を実現する。

さらに、計測後に記録した嚥下の音声ファイルと嚥下回数や平均嚥下時間などの解析結果をネットワーク経由でサーバにデータの蓄積し、データベースを構築する。データベースのデータは後にオフラインでの解析や症状進行の経過などを見るために利用されることを想定する。

本研究では、提案手法の妥当性を検証するため、一般に用いられる嚥下機能評価と比較し、開発する装置の有効性を検証する。嚥下造影検査、嚥下圧測定とともに嚥下音を同時測定し、嚥下音との関係を明らかにする。ここでは、頸部の輪状軟骨直下期間外側上付近より音を採取するため、嚥下音以外にも通常の発声や咳、その他ノイズが含まれる。そこで取得した音に対して、振幅特徴や周波数領域の特徴を見出すことで、嚥下音とそのほかの音を特徴づけ、適切に嚥下音の区間の抽出を実時間で行うことを目指している。またさらに、推定した嚥下区間で個々の被験者毎の嚥下活動の特徴について信号解析を行うものである。

なお食事介助中において、嚥下動作は外界から判断することは容易でないため、食事介助を行う家族や介護士の負担となっている。そのため、図B-1に示すように嚥下動作を光によってフィードバックすることで、他者に対して現在正常に嚥下が行われたかを容易に示すことが可能である。な



図B-4. 嚥下造影検査中の嚥下圧・嚥下音同時計測（左：嚥下音計測部を拡大）

お、フィードバックする情報は、デバイスが測定可能状態の時に緑、正常な嚥下が行われた時に青、嚥下以外の咳などの異常音を検知した時や嚥下時間が通常より長くなった時に赤のLEDを点灯させる。嚥下障害者の介護やリハビリテーションにおいて嚥下が行われたかどうか重要な情報であり、このように簡易的にLEDの点灯のみで情報提示を行うことで直感的な理解を助けるものとする。また、水飲みテストRSSTの自動計測や客観評価など、嚥下測定器の役割も果たす。

さらに、長期的および日々の持続的な計測を想定し、開発した装置により記録した嚥下音データをネットワーク上の管理するためのデータベースを構築している。データベースはWindows上にサーバを構築し、スマートフォンのAndroid上に構成したプログラムを利用することで、FTP通信により嚥下データ、嚥下回数、各回の嚥下時間、平均嚥下時間をあわせて格納させるシステムを構築した。なお、音声ファイルとテキストデータは記録日時で関連づけられ、リハビリ時の経過などの指標に利用することが可能である。嚥下造影検査、嚥下圧測定とともに嚥下音を同時測定する様子を図B-4に示す。

（倫理面への配慮）

嚥下機能評価ということで新規デバイスを用いて観察を行う、観察研究の範疇に属するため、UMIN等の臨床研究には登録しない。また、臨床研究用の補償保険に加入する予定はない。誤嚥などが起こった場合には通常の保険診療の範囲内で最善の治療を提供する。

筑波大学附属病院倫理委員会へ、研究内容の申請のうえ、審査をうけ、承認を得たうえで研究を行っている。研究承認期間は、2015年3月31

日まで、この間に病棟、他院回復期リハビリテーション病棟、在宅介護者等のデータ収集を行うこと、情報管理責任者をおき、対象個人が特定されない非連結データとして管理することが承認されている。なお、被験者実験に際しては被験者の承諾を得て実験を実施するとともに、得られたデータについては統計的に処理し、被験者個人が特定されないことがないようにするなど被験者個人の情報の取り扱いには十分に注意して行っている。

C. 研究結果

C. 1 頸部装着型デバイスを用いた嚥下スクリーニング方法の開発

嚥下評価としては嚥下造影検査がゴールドスタンダードである。これはX線透視下においてバリウム水他、様々な模擬食材を嚥下することで実際の嚥下動態を視認可能な、誤嚥の有無や原因などの診断に非常に有用な検査である。しかし、被曝の問題、場所や検査者など様々な制限がある。また、本邦では嚥下スクリーニング検査として反復唾液嚥下テスト（以下RSST）が用いられている。しかし、スクリーニング検査であってもある程度の専門的知識や経験が必要である。

本研究における機器開発の一つの目的として、より簡便でベッドサイドや在宅でも評価可能なデバイスの開発を進めている。今回は新規開発したデバイスを利用してRSSTの自動計測を行った。

実験は、頸部にエレクトレットコンデンサ型咽喉マイクを装着して行った。RSST 30秒間の嚥下回数はスマートフォンを用いて記録し、嚥下の検

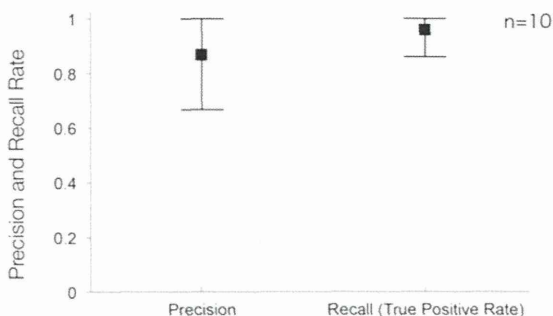


図 C-1-1. 嚥下検出の精度と再現率

出にはこれまで記録された嚥下音をもとにして、音の持続時間と振幅閾値などからリアルタイムに解析を行うものである。30秒間の継時的な計測が行われた後に自動的に停止、その間の嚥下回数や嚥下音持続時間を表示する。

なお、嚥下音が検出された場合はスマートフォンの画面にリアルタイムに波形が描出することとした。また、嚥下した場合には画面が緑色に点滅し嚥下回数を加算する。なお、RSST終了時にも

30秒間の音の波形、嚥下回数と嚥下音持続時間などの情報を確認することが可能である。本実験での嚥下検出の精度と再現率は83.7%と93.9%であった（図C-1-2）。このように、新規開発したデバイスではRSSTは自動計測することが可能であり、専門知識を有さない人の使用が可能だと考える。さらに、嚥下区間と認識された区間のうち、嚥下要素の構成区間の検出を行ったところ、55回の嚥下に対して正常に区間認識を行うことが出来た。適合率は73.3%であるが、改善の余地が

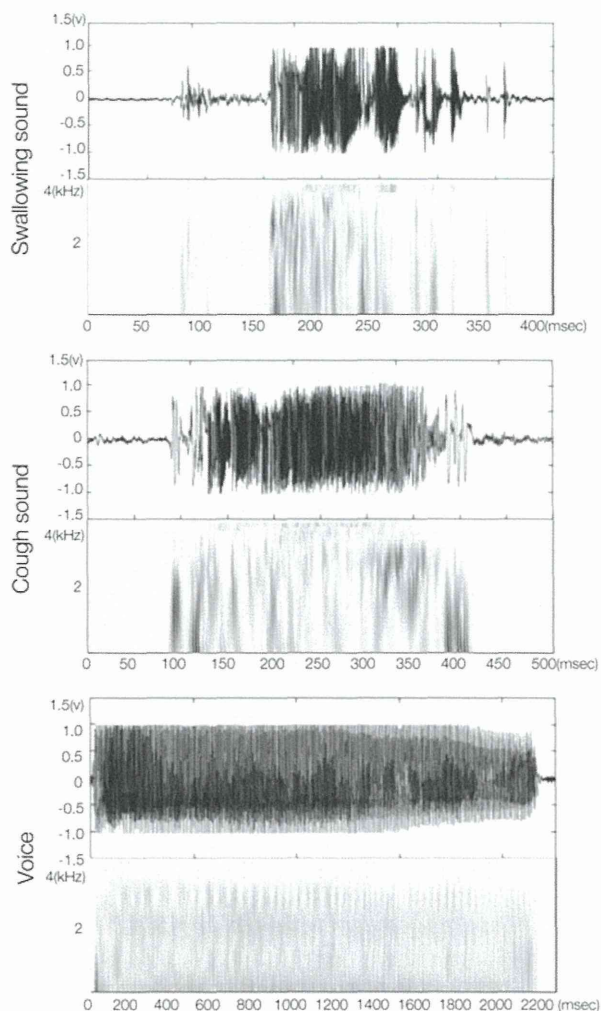


図 C-1-2. 取得した信号パターンとウェーブレット解析後の信号例（上から嚥下・咳・音声）

あると考えている。取得した信号パターンの例を図C-1-2に示す。



図 C-1-3. スマートフォンによる嚔下音実時間解析およびデータ収集システムの概要図

また、健常な若者と嚔下能力に衰退の疑いのある高齢者の嚔下音を採取し、それぞれの嚔下時間と嚔下音要素の構成間隔を調べた。健常者群として20代の男性3名、高齢者群として50～80代の高齢者男女8名に、こちらからの指示に対し空嚔下と水嚔下を複数回行わせ、開発したインタフェースにより嚔下音を計測した。若年健常者群の嚔下時間には個人差はあまり見られないが、高齢者群には大きなばらつきが見られるとともに殆どのケースで嚔下時間が長いことがわかった。さらに各個人の結果を見ても若年健常者群では、嚔下運動毎における嚔下時間のばらつきが見られなかったが、高齢者群では一部で嚔下時間は一定でなく、かなりの差異が見られた。

高齢者群の中には、非常に長い嚔下のあとに、むせが見られたケースもあった。また、高齢者群の実験の中で、短い嚔下を連続で繰り返すパターンも見られた。これは、嚔下の際に飲み込みが上手くいかず食塊が口腔内に残留し、残留物を食道に押し込むため反射的に嚔下運動が行われた現象と推測される。そこで、嚔下時間だけでなく嚔下時間中の第2段階、つまり食塊が食道を通過するまでの時間も評価指標として使用することを検討を行った。嚔下のタイミングとは前述した嚔下音を構成する3音の内、中間にあたる第2段階の音に注目するものである。全体の嚔下時間をT1とし、中間の食道通過音の中間時間までの時間をT2としたとき、嚔下・食道通過時間比 $T2=T1$ を評価関数とする。

若年者群の嚔下では、この評価関数はほぼ0.5で一定であり、大きな変動はあまり見られない。一方、高齢者ではかなりの差異がみられ、食塊の食道通過時刻にばらつきがあると予想される。嚔下能力が弱い際にこのような現象が生じると推

測されることから、この評価関数は嚔下能力の評価として妥当性があることを示唆している。

図C-1-3にスマートフォン上に実装したインタフェースとデータ収集システムの概要図を示す。画面上部にはマイクからの入力を視覚化し波形を表示する。なお、マイクからの入力を超えた区間だけ表示することとした。画面中央には、録音時間、録音中の嚔下回数、平均嚔下時間および解析結果（嚔下音の有無）を表示させる。画面の操作は録音のみの録音ボタン、録音と同時に解析を行う解析ボタン、録音停止用ボタンおよび過去に録音したデータを参照するデータボタンを操作するボタンのみからなり、介護者や医療従事者にとっても使いやすいインタフェースとなるように設計している。

録音ボタンでの実行時は、咽頭マイクからの入力を録音し、嚔下音データの生成のみ行うものであるが、同時に嚔下音解析は行わない。一方、解析ボタンでの実行時には、マイクからの入力を録音すると同時に入力データ群に対し、嚔下音解析を行う。この際、嚔下活動が見られた場合、スマートフォンの画面上で複数の色を用いた情報提示（緑：録音画面、青：嚔下音判定、赤：ノイズ判定）を行う。また、無線通信（Bluetooth）機能により、インタフェースに備えたLEDを点灯させるための制御信号を生成する。また、データ参照ボタンは、これまでに取得したファイルを聴取するために用いると同時に、取得した嚔下音データはネットワークを介してデータサーバへアップロードする機能を持たせた。

一方、計算機上でも同様に解析を行うシステムを構築した。スマートフォンと同様に録音のみ、解析と録音、録音停止ボタンからなる。解析ボタンでの実行時には同時に音響解析を行い、解析結

果を示す提示部を制御するための信号を生成する。このような嚥下音の特性を理解するための臨床研究を実施してきた。本システムでは、嚥下音の識別に加え、その他口腔内の活動により消日咳や、患者自身の声との判別を行う必要がある。嚥下とその他の音との区別を行うためには周波数特徴が有用であるが、本システムは実時間応答性も重要であるため時間領域の情報も利用する必要がある。

本システムでは、嚥下音の識別に加え、その他口腔内の活動により消日咳や、患者自身の声との判別を行う必要がある。嚥下とその他の音との区別を行うためには周波数特徴が有用であるが、本システムは実時間応答性も重要であるため時間領域の情報も利用する必要がある。そこで嚥下音の判断を行うため、ウェーブレット変換により解析を行う。窓関数にはガウス窓を用いる。

まず、有意音声部を抽出することで、嚥下または咳、発声が終了したとみなし、有意音声データ全体に対し、ウェーブレット変換を行う。ここで得られる周波数特徴から嚥下、咳、声などの時間区間を同定するものである。なお、嚥下音の前後では嚥下時無呼吸時間が続くため嚥下音データの後には無音データが続くことが分かっている。

嚥下音の判断後、嚥下時間の計算及び記録を行い、結果に応じて提示部にて音響情報の同定結果の表示を行うとともに、インタフェース上で嚥下音に関する情報を表示させる。取得した音データから嚥下音を区別するため、音波形の振幅情報と周波数情報の両方を用いて判別する。図C-1-3は嚥下音、咳、発声の振幅波形とウェーブレット解析の例を示す。本手法は、嚥下特有の波形の形を利用し、振幅数の違いで大まかに嚥下区間とその他の音の区間との区別を行い、最終的には周波数解析によって出た周波数要素を各区間に照らし合わせそれぞれの区間の区別を行うものである。

嚥下音要素構成区間推定法： 嚥下音を構成する要素の時間間隔は極めて重要である。この3要素を解析することにより、これらに起因する嚥下活動が異なるため、この関係を明らかにすることで口腔内の動態解析に寄与するものと考えている。この3音の構成は飲み込む食塊などによっても

変化するが、高齢化などの要因で飲み込みの筋力が衰えることにもよって変化する。

そこでこれらの嚥下の要素音が嚥下音全体でどのような構成間隔を持つかを調べ嚥下音個々の評価としていく。この時の嚥下活動中の3要素それぞれの時間を嚥下音要素構成間隔と呼ぶ。

我々は、この嚥下音要素の構成間隔を抽出するアルゴリズムを提案している。ここではまず、嚥下音を構成する3要素のそれぞれのピークを検出するため、入力信号の疑似的な包絡線を求める。まず、入力信号に対してヒルベルト変換を行う。そこで、嚥下区間と判定された区間を参照し、嚥下判定区間内で弁別された区間が3区間あれば、その区間を順番に嚥下要素の構成区間とする。なお、早い嚥下などは嚥下要素の第2音目が前後の音と近づきすぎてしまうと2区間以下に弁別される場合があるが、全嚥下区間の2分の1以上を占める要素が抽出された場合は、適応的に閾値を変化させ、再判定を行う。

測定場所の影響に関する検証： 頸部での嚥下音聴取位置は嚥下運動に伴う生理的活動上、輪状軟骨の近くの気道外側に設置するのが望ましい。しかしながら、計測者の体格や日常の体動により、毎回同様の位置での計測は難しい。そこで計測位置における差異が信号強度や周波数特性に与える影響を検証する必要がある。ここでは、頸部6カ所から嚥下音を採取し、それぞれの計測位置で5回の嚥下を2セットずつ繰り返し行い計測位置の違いによる音響特性を検証する。

それぞれの計測位置における音響波形とウェーブレット解析した結果より、各計測位置における信号損失と嚥下特有の波形形状が確認できるか評価を行った。ここでは、各計測位置での嚥下の波形特徴はどの点でも、ほぼ同様の結果となった。なお、気道及び食道から距離があり、かつ筋活動の影響を受けやすい箇所においては、信号強度が低いという結果が得られたが、周波数解析においては問題ないという結果が得られた。このように、計測位置に対して大きな制約を設けず嚥下音抽出が可能であるといえる。今後、このデバイスの携帯性を活かしたベッドサイドや在宅での嚥下障害のスクリーニング方法として発展させていきたい。

C. 2 嚥下造影検査および高解像度マノメトリーとの同時記録による嚥下音の検討

C. 2. 1 研究目的

現在、嚥下造影検査（VF）は嚥下障害におけるゴールドスタンダードとして確立している。また、高解像度マノメトリー（HRM）は嚥下圧から嚥下動態を理解するのに非常に有用なツールである。この2検査と嚥下音を同時に記録することで音の特性を解明することを目的としている。本研究では、既存の検査方法である嚥下造影検査（videofluoroscopy：VF）および高解像度マノメトリー（high-resolution manometry：HRM）と嚥下音を同時記録することで、嚥下音が嚥下動態とどのように関連しているのかを解析することを目的としている。

C. 2. 2 本研究に用いた機器

(1) 嚥下造影

VFの撮影には多目的デジタルX線透視撮影装置（MDX-8000A1，東芝メディカルシステムズ株式会社，栃木）を使用。録画にはCanon iVIS HF R31を使用し64GBのSDカードで記録，画像のサンプリングレートは30fpsとした。

(2) 嚥下圧測定

HRMシステム（スターメディカル株式会社，東京）を使用。1センチメートルごとに20か所，全周性の圧センサーが配置された12フレンチのカテーテル（図C-2-1）より圧情報を記録，データのサンプリングレートは40Hzとした。

C. 2. 3 検査方法

まず、頸椎C6レベルにコンタクトマイクروفオンを経皮的に装着。次に、HRMカテーテル先端に少量の局所麻酔薬（キシロカイン® 2%ゼリー，アストラゼネカ株式会社，日本）を塗布した後，通気の良い方の鼻腔より上部食道まで約26センチメートル挿入した（図C-2-2）。造影剤はバリテスターA240散（株式会社伏見製薬所，日本）を使用，可能な限り純水と近似した流体特性とするため濃度を20%に調整した。シリンジで3mlに計量された造影剤を対象者の口腔前庭に注入，検査者の合図の後可能な限り一回で飲み込むよう嚥下を指示。嚥下音とVF，HRMを同時記録した。記

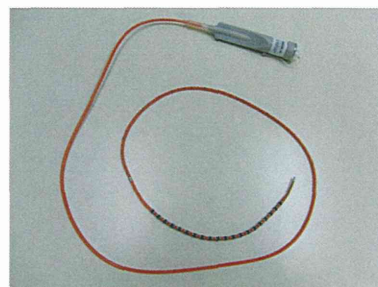


図 C-2-1 HRM 圧センサーカテーテル



図 C-2-2 HRM カテーテル挿入，マイク装着後

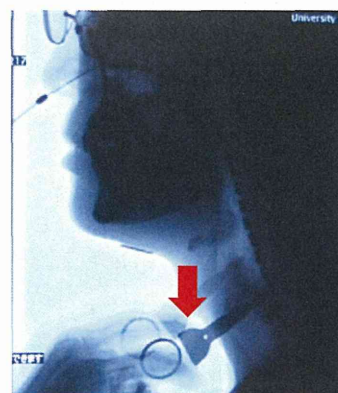


図 C-2-3 VF でのマーク

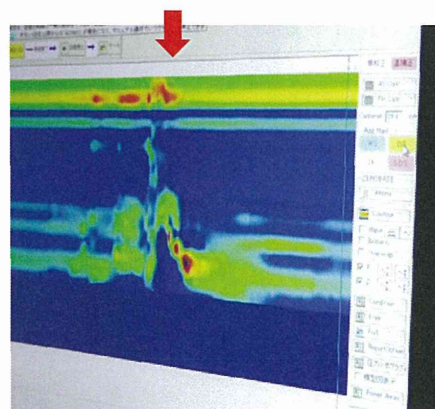


図 C-2-4 HRM でのマーク

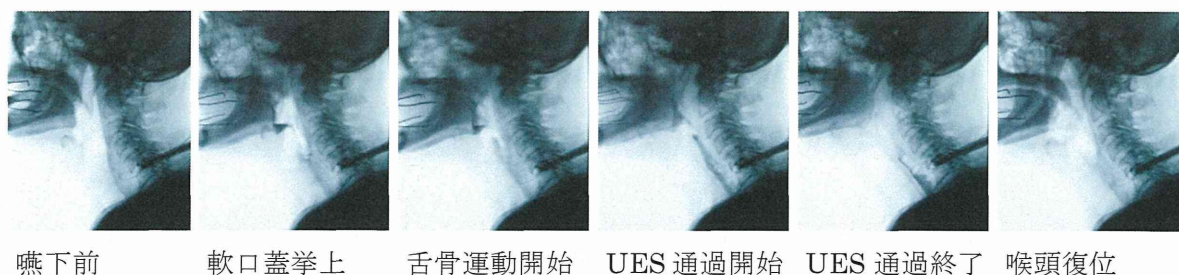
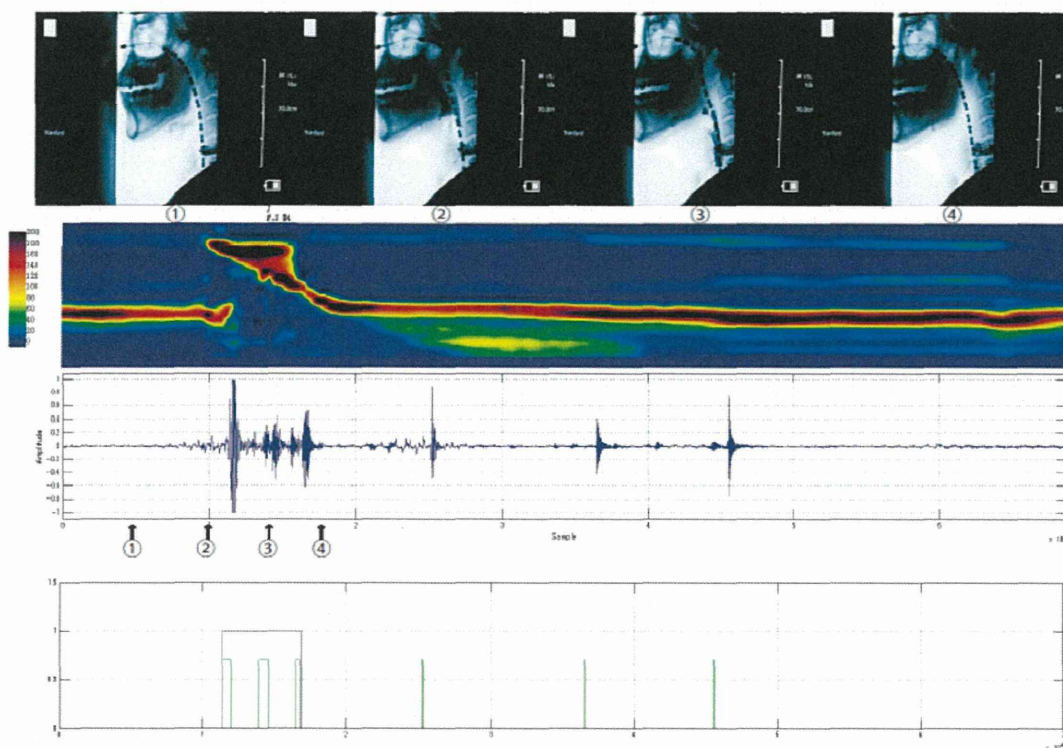


図 C-2-5 嚥下中の主なイベント



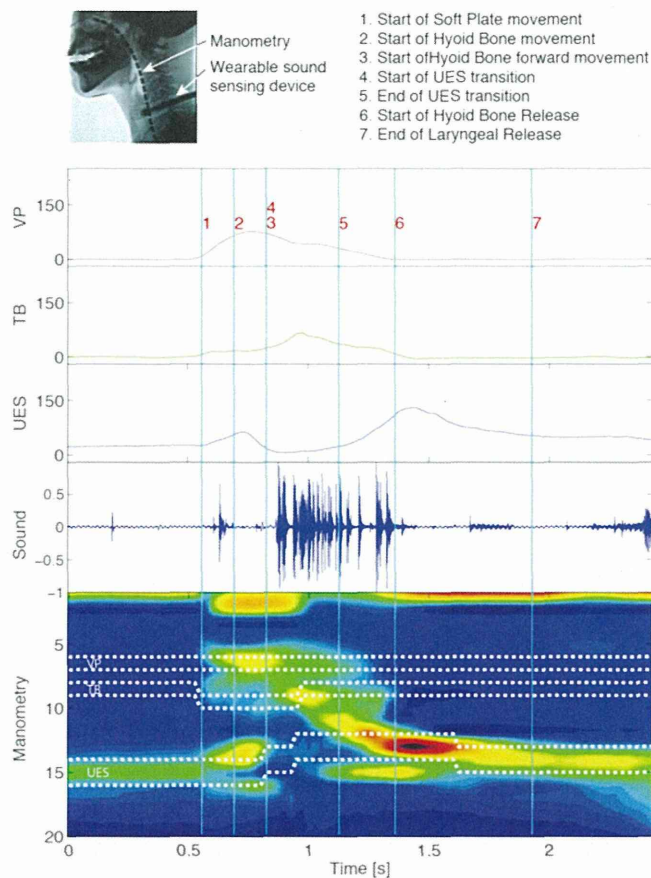
図C-2-6. 正常嚥下中の嚥下造影検査画像（上図）・嚥下圧（中図）・嚥下音（下図）同時計測結果

録後に VF では軟口蓋や舌骨、食塊の動きなど嚥下中に起こるイベントのタイミングをビデオ用オーディオ編集ソフト Audio Director（サイバーリンク株式会社，日本）によって確認，その時間を記録した。

また，記録された動画と音データは200ミリ秒前後のずれが生じているため，ビデオ録画中にX線透視下でコンタクトマイクロフォンに金属を接触させ同期をするための目印とした（図C-2-3）．さらにHRMにおいても画面上にライン表示したものをビデオで記録することで（図C-2-4），嚥下音とVF，HRMという3種類の異なるデータにおける時間の同期を行った。

まず，一般的な嚥下機能検査である嚥下造影検

査（VF）を用い，開発した機器で取得した嚥下音とを比較し，嚥下時の口腔動作が嚥下音に与える影響について解析を行った．図C-2-5に嚥下造影検査による嚥下中の主なイベントを示す．事前に検証実験を行い，嚥下造影検査中に混入するノイズの影響を明らかにした後，実験を実施した．これに加え，口腔内での挙動を詳細に解析するために口腔内圧の測定も同時に行う．ここでは，嚥下造影検査（VF）を行う際，頸部装着型機器と嚥下圧測定機器とが同期して測定し，記録できるようソフトウェアの開発・検証をおこなった．具体的には VF による画像計測，開発したインターフェースからの音声信号計測，高解像度マノメトリーによる口腔内圧計測を同時に行い，嚥下時の動態解析を行う。



図C-2-7. 神経筋疾患患者による嚥下音，口腔内圧計測，VF同時計測の例

この測定では，正常嚥下が可能な健常者（男性 28 歳）を撮影し，それぞれの装置を同期させるための実験設備を整えることで，3つの計測を同時に行うことが可能になる．なお，VF の動画撮影は30fpsで行った．

図C-2-6は嚥下時のタイミングで切り出したVF画像と音声データ，マノメータの値，開発したインタフェース上での嚥下判断区間および嚥下要素構成間隔を推定したものである．マノメータは16ch の圧力センサの値を読み取り，それぞれの測定位置における圧力値によって色分けされている．ここではマノメータは鼻腔から入れ，喉頭蓋上部から食道入口付近までの位置における圧を表す．図中②の時刻における嚥下音から判断すると，この時点が嚥下開始動作にあたる．ここで，対応するVF画像の1と2を比べると，喉頭蓋挙上が見られる．また，マノメータの値から判断すると，喉頭蓋上部に圧力増加が見られることがわかる．さらに，マノメータの圧力値同様，嚥下音の振幅強度も高くなっており，嚥下圧と嚥下音の関係が示唆される．③の時刻では，食塊が食

道入口にまで到達していることがVF画像からみて取れる．嚥下音解析では，第2要素部分にあたるのがわかる．また，マノメータでは，圧力値のピークが下方に移動していることがわかる．最後に，④の時刻では，喉頭蓋はすでに最初の状態に戻っていることがVF画像からわかり，同様にマノメータでも圧力値の低下がわかる．

なお，開発したインタフェース上での判定結果は，青線が嚥下区間の判定，緑線は嚥下要素の構成区間候補の判定である，嚥下要素の構成区間は最終的に嚥下区間の判定結果と参照し決定するため，嚥下区間以外でも判定が出ているが，最終的な判定（緑線）では嚥下要素の構成区間とは判定していないことがわかる．これより，喉頭蓋開閉にあわせて嚥下区間として判定できていることがわかる．また，嚥下要素構成間隔をみても，②，③，④のそれぞれの時刻で推定していることより，本インタフェースによる嚥下音計測が，実時間で口腔内の動態解析を示すことが出来る可能性を示唆している．

C. 2. 4 神経筋疾患患者での嚥下音の集積

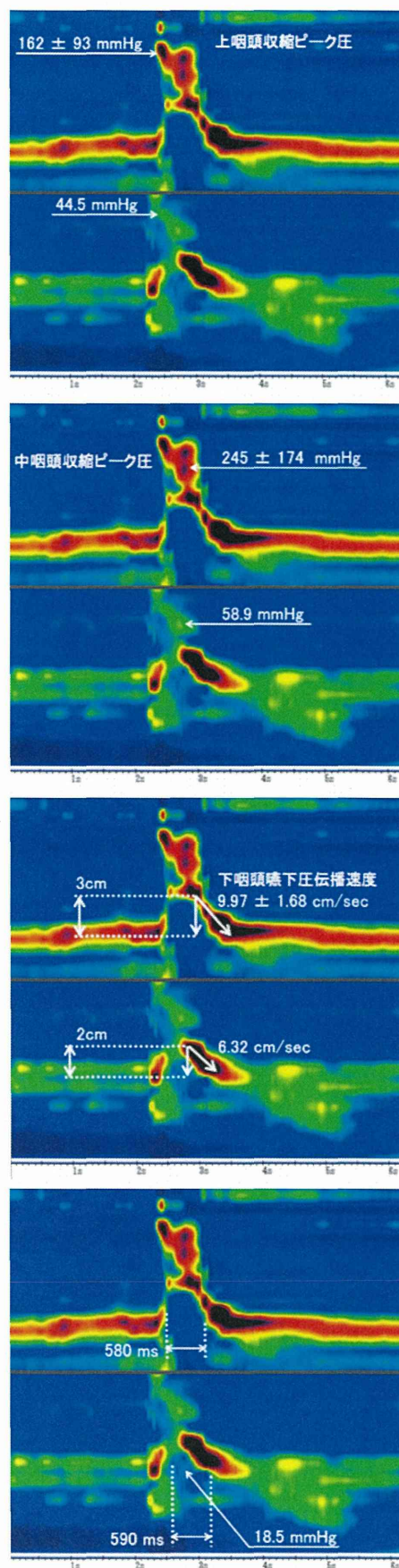
ここでは、嚥下障害を有した神経筋疾患患者14名に装着し、嚥下造影検査、嚥下圧測定と同時に測定を行った。ここでは、コマンド嚥下及びコップより随意嚥下の際の嚥下音収集を行った。特に、進行性球麻痺における嚥下圧および嚥下音の検証について詳細な解析を行った。嚥下障害をもつ患者の嚥下はその病態ごとに健常者の通常の嚥下とは違う異常音となる嚥下音が含まれるケースがあることがわかっている。こうした異常音が生じる場合、誤嚥の危険性が非常に高い。さらにこうした異常音嚥下は口腔内の機能不全から成るため、感覚が鈍ることから不顕性誤嚥になりやすい。不顕性誤嚥では、食塊の食道流入を防ぐための咳の反射が起こりにくいため、非常に危険な状態であるといえる。こうした嚥下機能の低下した患者に対し、開発した装置によりどのような嚥下音解析が可能であるか検証を行った。

ここでは進行性球麻痺の症状を持つ75歳男性の例を示す。対象となる被験者は、自発的な嚥下運動の誘発が思わしくない患者であり、VF所見では、舌の運動不良、口腔保持困難、早期咽頭流入、嚥下反射惹起遅延、軟口蓋挙上不良、喉頭流入と誤嚥、咳嗽反射域値の低下、喉頭蓋谷、梨状陥凹の残渣、口腔残渣、嚥下後の咽頭流入が見られた。

(重度の構音障害、発話明瞭度：4/5、改訂水飲みテスト：3点、摂食・嚥下能力のグレード：7)

ここでは、3ccの水、及びゼリーを複数回コマンド嚥下による計測実験を行った。健常者の嚥下音に比べ嚥下圧、音圧ともに非常に小さいことがわかる。また、喉頭蓋付近の圧力変化が少なく、開閉がほとんど行われていないことがわかる。このため、嚥下音の構成要素抽出も困難であり、識別にも失敗している。第1要素の嚥下音は極めて小さいが、周波数解析での特徴量は抽出され、判定できた。しかしながら、第3要素の抽出は困難であり、全体として正常嚥下と判断されなかった。

図C-2-8に、嚥下圧からみた正常嚥下との比較を順に示す。上咽頭収縮ピーク圧の著明な低下、中咽頭収縮ピーク圧の低下、嚥下圧伝播速度の遅延、UES開大中に陰転化不良が見られる。これらを嚥下音の観点から見て、VF画像による所見と嚥下圧との比較を行った結果を示す。



図C-2-8. 正常嚥下圧（上）と神経筋疾患患者の嚥下圧（下）パターンの比較

- (1) 喉頭挙上音の振幅低下：VF画像からは、軟口蓋挙上不全が認められ、同様に嚥下圧からは上咽頭収縮ピーク圧の低下が認められる。
- (2) UES開大までの時間延長：VF画像からは、咽頭残留が認められ、同様に嚥下圧からはUES開大不全の低下が認められる。
- (3) 喉頭下降音の持続時間延長：VF画像からは、咽頭残渣が認められ、同様に嚥下圧からは嚥下圧伝播速度の遅延が認められる。

対象患者は筑波大学附属病院に入院中の神経筋疾患を有した男性4名、女性6名の計10名（平均年齢 63歳）。疾患は筋萎縮性側索硬化症3名の他に、脊髄性筋萎縮症、脳幹梗塞、サルコペニア、重症筋無力症、筋緊張性ジストロフィー、多系統委縮症が各一名となっている。事前に筑波大学附属病院倫理委員会へ、研究内容の申請のうえ、審査を受け、承認を得たのち、被験者全員に実験内容の説明を十分に行い、同意書に署名をもらった。

被験者に対し嚥下音計測と同時に嚥下造影検査（Videofluoroscopy：VF）および嚥下中の咽頭内圧の記録を行った。被験者には20%バリウム水を3ml計3回の飲水をしてもらい、計30回の嚥下から解析を行った。20chの全周性圧力センサーを1cm毎に配置した12Frカテーテルを鼻腔より挿入し、上咽頭から上部食道括約筋（UES）下数センチまでの食道内圧を計測した。嚥下音は頸部のC6レベルに装着したエレクトレットコンデンサ型咽喉マイクによって記録した。記録された各データの同期を行い、VFでは嚥下運動において重要な、1. 軟口蓋挙上舌、2. 骨挙上開始、3. 舌骨前方移動、4. BolusがUES通過開始、5. BolusがUES通過終了、6. 舌骨復位、7. 喉頭復位、の各時間を、HRMにおいては特に重要と思われる、軟口蓋（VP）、舌根（TB）、上食道括約筋（UES）領域の2～3チャンネルをVF上で確認しデータの抽出をした。抽出されたデータをもとにMATLABで作成されたプログラムを使用し3領域の圧力とVFの情報を同一図内に表示し、これをもとに解析を行った。

なお、被験者ごとにMATLABで処理した結果を図C-2-14以降に示す。最上段にVP、TB、UES領域の圧力とVFで確認された1～7のラインを追記し

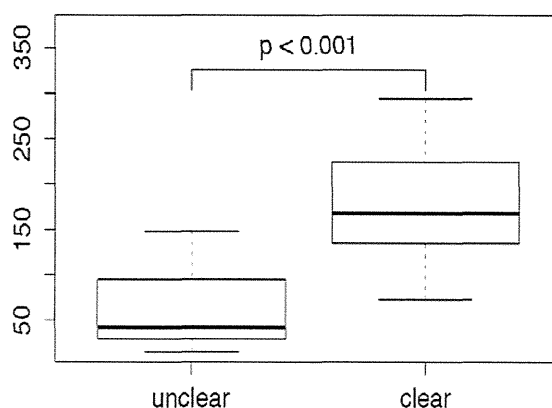


図 C-2-9. 嚥下初期の明瞭な嚥下音の有無と VP の最大圧

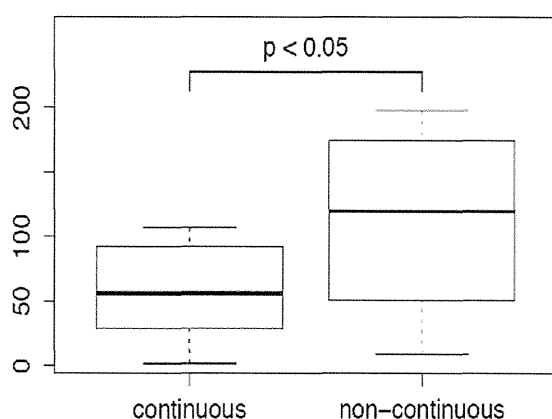


図 C-2-10. Bolus の UES 通過区間中の持続的な音の有無と VP の平均持続圧

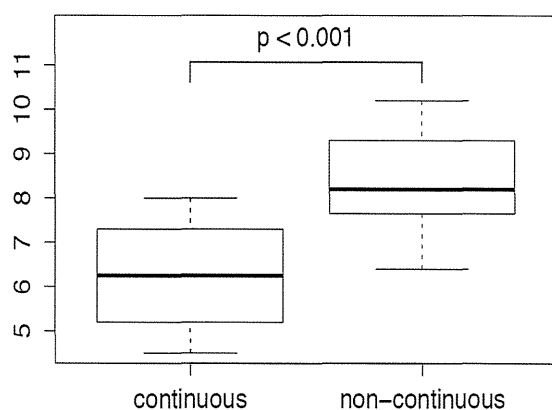


図 C-2-11. Bolus の UES 通過区間中の持続的な音の有無と UES 開大径

ており、その下には嚥下音の波形、下段が処理前のHRMの圧力図を示す。図C-2-14はほとんど嚥下に問題のない筋萎縮性側索硬化症患者、図C-2-15は開鼻声と食物の飲み込みにくさを訴えていた

重症筋無力症患者である。赤線で示しているのは軟口蓋および舌骨運動区間となっており、図C-2-14ではこの区間にはっきりと音成分を確認することができる。このとき、VP領域の最大圧は図C-2-15と比較すると著明に高値を示している。次に図C-2-15の赤線で示しているのはBolusがUESを通過している区間であり、図C-2-16ではこの区間において継続的な音成分を確認することが可能である。この時のVP領域の圧はほとんどかかっていない状態であったが、図C-2-17では持続的に圧がかかっていることを読み取ることができる。30回の嚥下データにおいて、軟口蓋拳上と舌骨運動中に音成分が明瞭に確認された群は18嚥下であり、確認されなかった群とのVP最大圧は平均171mmHg VS. 61mmHg, $p\text{-value} < 0.001$ と有意差がみられた(図C-2-9)。次に、BolusのUES通過区間中(平均274msec)に持続的な音が確認

された群と確認されなかった群では、その区間中におけるVPの平均持続圧が平均56mmHg VS. 112mmHg, $p\text{-value} < 0.05$ となり、さらに、UESの開大径においても平均6.23mm VS. 8.30mm, $p\text{-value} < 0.001$ と有意差がみられた。

上記の結果より嚥下音における特徴が嚥下圧においてVP領域の圧の違いやUESの開大など咽頭期嚥下の状態を反映していると考えられる。嚥下音において初期に明瞭な音成分が確認された場合はVP領域にも十分な圧がかかっていると予想される。さらにその後も持続して(300msec程度か)音成分が確認された場合、VPに持続的に圧がかかっていない、もしくはUES開大が十分でないことが予想される。しかし、今回は症例数が少なく今後さらなるデータの蓄積と検討が必要である。また、TBやUES領域の圧と嚥下音との関連も今後の検討課題である。

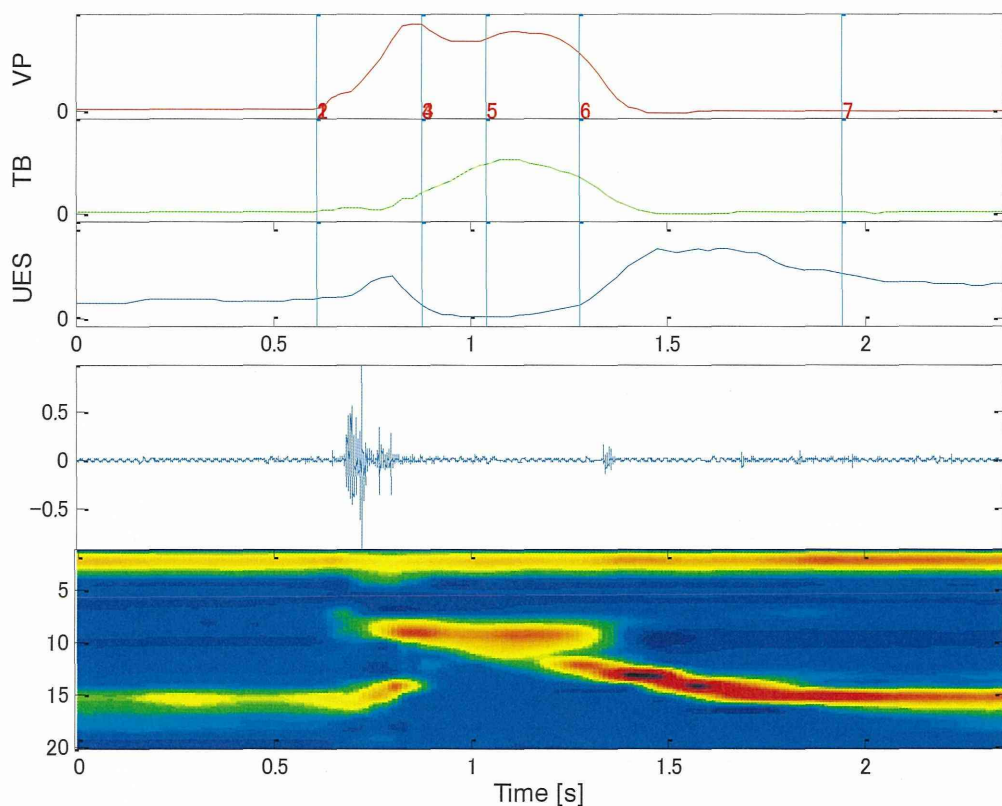


図 C-2-12 : 筋萎縮性側索硬化症

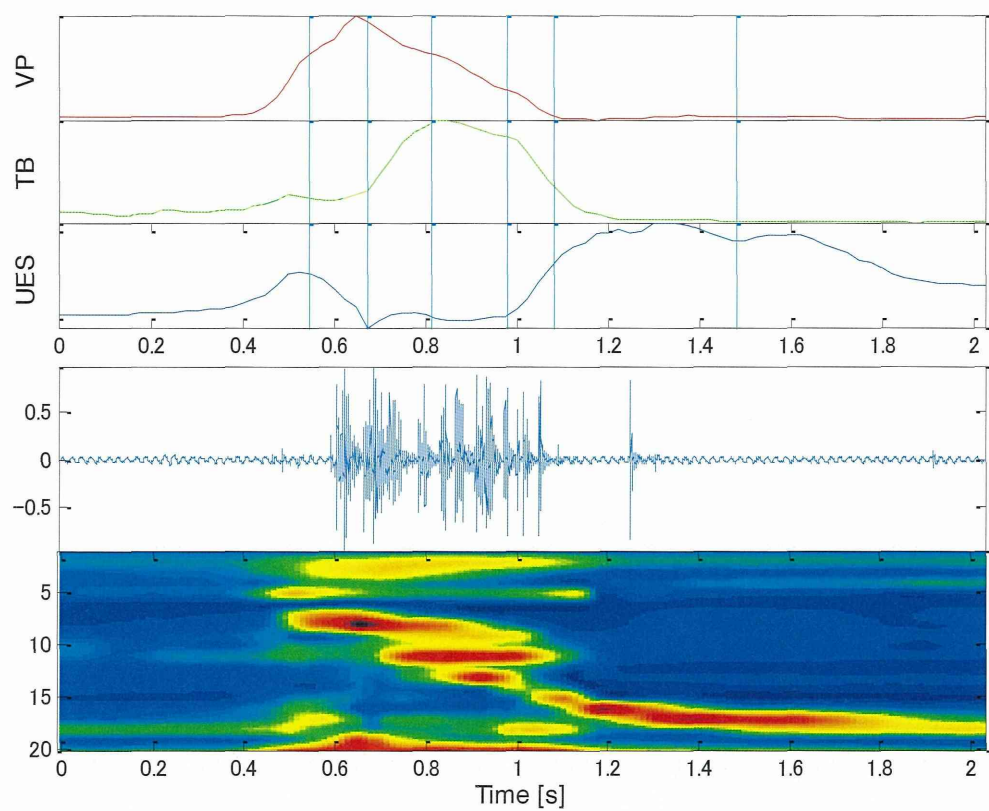


図 C-2-13. 脊髄性筋萎縮症

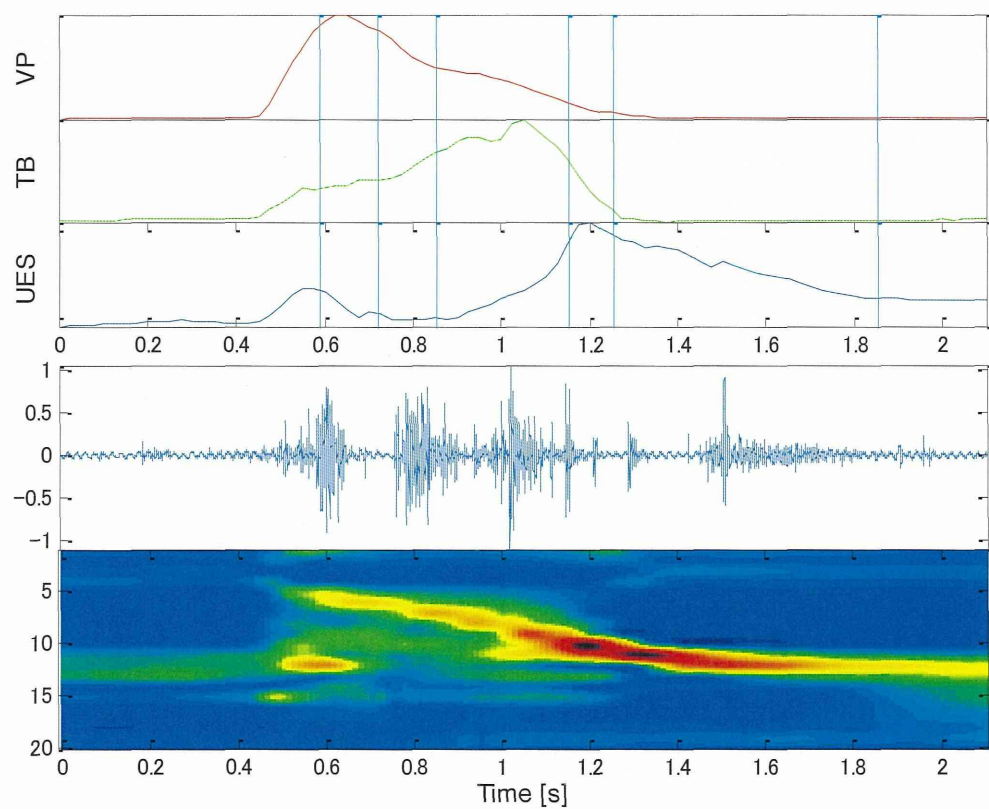


図 C-2-14. 筋萎縮性側索硬化症

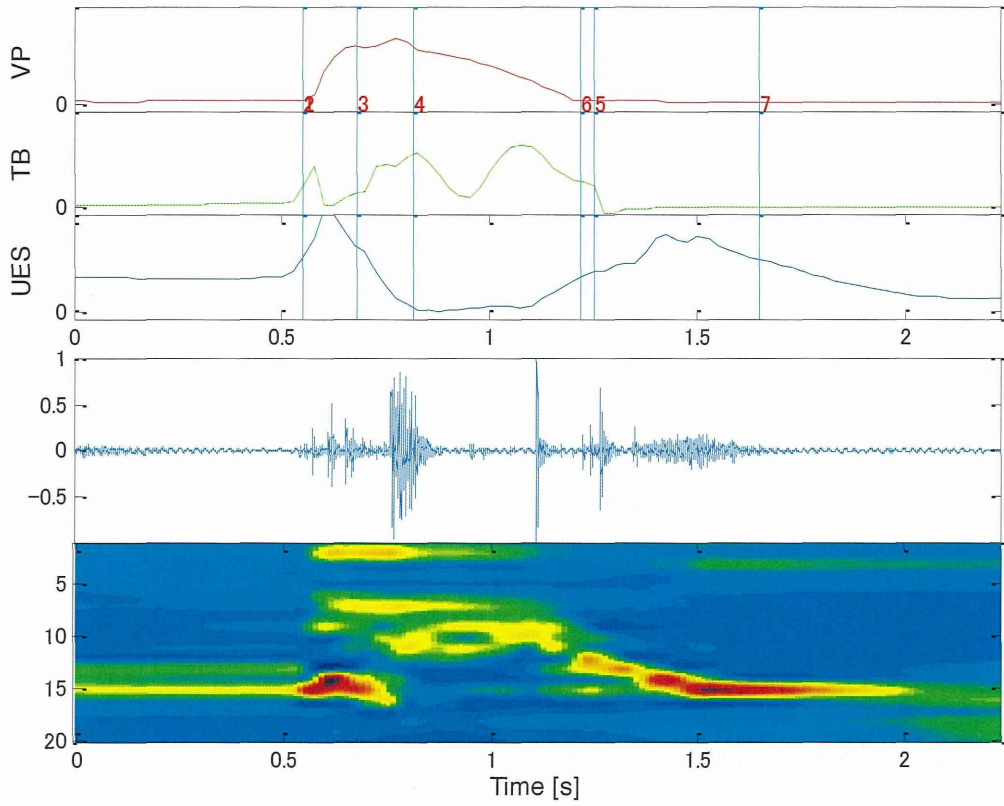


図 C-2-15. 脳幹梗塞

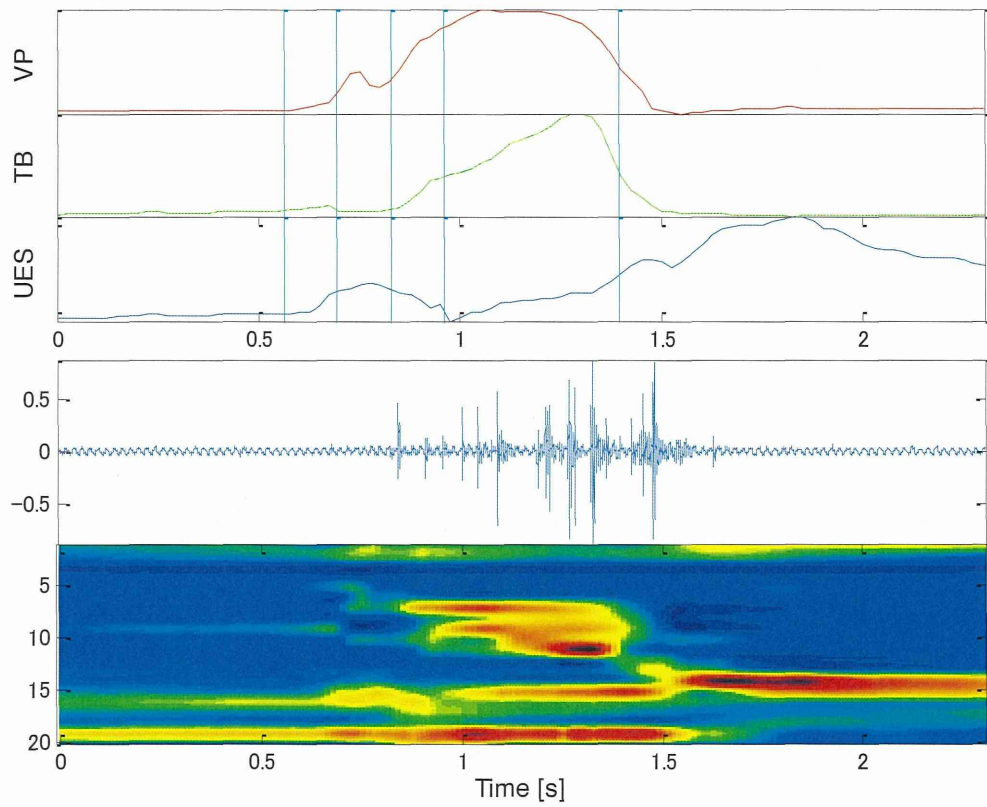


図 C-2-16. サルコペニア（急性肝障害、心房細動、慢性心不全）

C. 2. 5 脳卒中患者における嚥下音の変化を認めた症例について

脳卒中により嚥下障害を発症した場合、嚥下造影検査（VF）による診断・評価は有用かつ一般的である。しかし、VFは検査場所や検査者、被曝など様々な問題もあり短期間の継時的な評価には適さない。そこで当院ではより簡便に記録可能な嚥下音を用いたベッドサイドや在宅での嚥下評価方法の確立を目指している。本実験において、右視床出血を発症し入院中と退院後に嚥下造影検査を行い嚥下音の変化をみとめた症例について検討を行った。

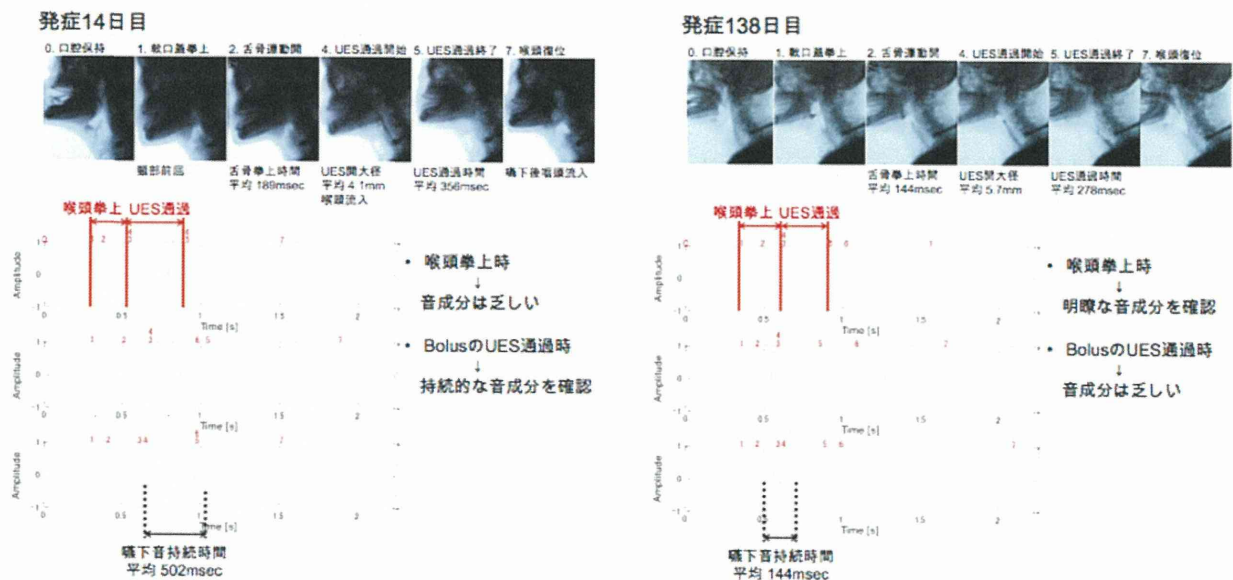
発症14日目と138日目において座位で20%バリウム水3mlの飲水を3回実施。嚥下造影検査時に頸部C6レベルにエレクトレットコンデンサ型咽喉マイクを装着し嚥下音を同時記録。画像と音データを同期した後、MATLABを使用し、嚥下音波形上に軟口蓋や舌骨運動、BolusのUES通過などのVF情報を表示することで嚥下音についての解析を行った（65歳、男性、診断名：右脳出血（視床出血、脳室穿破）、症状：左麻痺、左感覚障害）。嚥下音初期における音成分の明瞭度は、喉頭拳上時の舌骨運動やBolusの口腔移送など口腔期嚥下機能と関連していること、また、UES通過中の持続的な音成分の有無は、咽頭収縮やUES開大、Bolusの

UES通過時間など咽頭期嚥下機能と関連していることを確認した。またさらに、嚥下音の変化から、口腔期および咽頭期の全体的な機能改善が予想され、嚥下音ではVFではとらえにくい咽頭収縮力などの質的な変化を反映している可能性がある、と考察している。

C. 2. 6 嚥下音面積の検討

筑波大学附属病院リハビリテーション部へ嚥下評価を依頼された20名の神経筋疾患を有する患者。内訳は男性10名、女性10名、年齢は31歳から82歳、平均年齢65歳であった（表B-1）。本研究は筑波大学附属病院倫理委員会の承認を受け、検査前にすべての参加者本人に研究趣旨の説明を行い、同意を得た上で実施した。

VFでは誤嚥の有無をPenetration Aspiration scale (PAS) [1]（表C-2-1）、咽頭残渣の有無をEisenhuberらの評価尺度[2]（表C-2-2）を用いて点数化した。また、嚥下惹起遅延、喉頭蓋反転不良、鼻咽腔逆流の有無についても確認を行った。HRMではMielens[3]らの研究を参考に、軟口蓋（velopharynx：VP）と舌根（tongue base：TB）領域の最大収縮圧、最大収縮圧までの1秒あたりの圧上昇率、圧上昇開始から安静時圧に至るまでの持続時間、持続圧合計をHRMより得られたCSVファイルからMicrosoft Excel 2010（マイクロソフト株式会社、アメリカ）を使用し計算した。



図C-2-17. 脳卒中患者における入院中と退院後における嚥下音の変化を認めた症例

Penetration Aspiration scale (喉頭侵入・誤嚥の重症度スケール)

1. 喉頭に侵入しない
2. 喉頭侵入があるが、声門に達せずに排出される
3. 喉頭侵入があるが、声門に達せず、排出もされない
4. 声門に達する喉頭侵入があるが、排出される
5. 声門に達する喉頭侵入があり、排出されない
6. 声門下まで食塊が入り(誤嚥)、喉頭または声門下から排出される
7. 声門下まで食塊が入り、咳嗽しても気道から排出されない
8. 声門下まで食塊が入り、排出しようとする動作がみられない

日本摂食・嚥下リハビリテーション学会誌

表 C-2-1 Penetration Aspiration scale

咽頭残渣尺度

- | | |
|------------|----------------------|
| 0. 咽頭残渣無し | |
| 1. 少量残渣有り | (喉頭蓋谷、梨状陥凹に25%未満) |
| 2. 中等度残渣あり | (喉頭蓋谷、梨状陥凹に25~50%未満) |
| 3. 多量残渣あり | (喉頭蓋谷、梨状陥凹に50%以上) |

表 C-2-2 咽頭残渣評価尺度

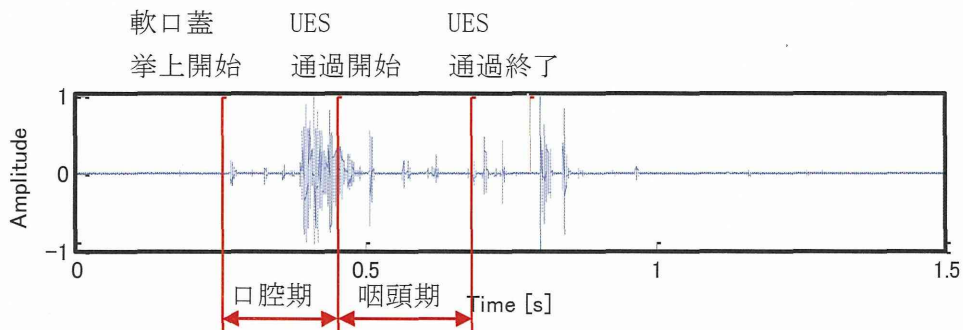
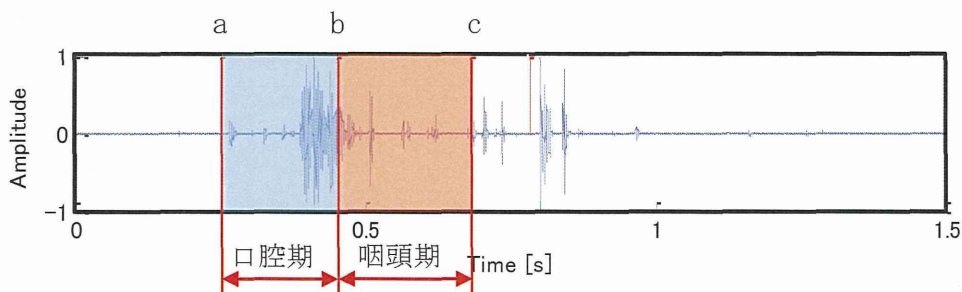


図 C-2-18 嚥下音の分割



$$\text{口腔期嚥下音面積} = \int_a^b |S_t| dt \quad \text{咽頭期嚥下音面積} = \int_b^c |S_t| dt$$

図 C-2-19 嚥下音面積計算

上部食道括約筋 (upper esophageal sphincter : UES) 領域においては、UES開放前後の最大圧、UES開放中の最少圧、UES開放時間、その間の持続圧合計を計算。さらにVPからUESへの最大圧が伝播する時間および圧伝播速度を計算した。同期されたVFとHRM、嚥下音の異なる3種類のデータを、MATLAB (The MathWorks, Inc., アメリカ) を使用して同一画面に表示できるよう処理を行った。嚥下音はVFで確認された、軟口蓋挙上もしくは舌骨運動開始から食塊のUES通過開始までの口腔期、そして食塊がUES通過終了するまでの咽頭期の区間に分割 (図C-2-18), 2期それぞれについてMATLABを使用し嚥下音振幅から嚥下音面積を計算した (図C-2-19)。また、咽頭期面積から口腔期面積を除いて2面積の比率を計算した。計算した嚥下音と嚥下圧の値を統計解析言語RStudio 0.97.336 (R Development Core Team) を使用しピアソンの積率相関係数を求めた。(結果) 全20症例に3回から6回の3ml飲水検査を行い、計69嚥下を記録することができた。検査後、研究参加者は発熱やその他の検査の合併症はみられなかった。

MATLAB で処理を行い嚥下音と VF, HRM データを同時表示したものを図 C-2-20 に示す。3 種類のデータはマーキングすることによって時間の同期が可能であった。3 種類の情報を同時表示することで、HRM の圧分布や嚥下音の音成分がどこで発

生しているかの確認が容易であり、嚥下音を解析するにあたり助けとなった。

VF から得られた結果は表 C-2-3、HRM は表 C-2-4、嚥下音は表 C-2-5 のとおりである。VF においては、口腔期と咽頭期はほぼ同じ時間内、約 300 ミリ秒の間に完了していることが確認された。嚥下反射惹起遅延 8 例、喉頭蓋反転不良 7 例、鼻咽腔逆流 3 名、咽頭残渣は 12 例で認められた。喉頭侵入は 4 例、誤嚥は 2 例で確認された。

C. 2. 7 嚥下音面積と HRM 圧データとの相関

口腔期と咽頭期の嚥下音領域と 2 期の比、それと HRM で得られた圧データとの相関係数を表 C-2-6, 表 C-2-7 に示す。

口腔期の嚥下音面積と HRM の VP, TB 領域では相関がみられ、UES 領域でも弱い相関がみられた。しかし、UES 領域と嚥下時間、嚥下圧伝播とは有意な相関は高くなかった。咽頭期の嚥下音面積と HRM の TB 領域、嚥下圧伝播速度の間には比較的よい正の相関がみられた。VP と UES 領域、嚥下時間との相関はみられなかった。2 期の面積比は UES 開放前と閉鎖後の最大圧と低い負の相関がみられた。