

201310011A

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25年度 総括研究報告書

研究代表者 松村 明

平成26(2014)年 5月

目 次

I. 総括研究報告

頸部装着型機器による嚥下活動評価に関する研究 ----- 1

松村 明

(資料) IEEE EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics採録論文

II. 研究成果の刊行に関する一覧表 ----- 17

頸部装着型機器による嚥下活動評価に関する研究

研究代表者 松村 明 脳神経外科・筑波大学附属病院副病院長

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。

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

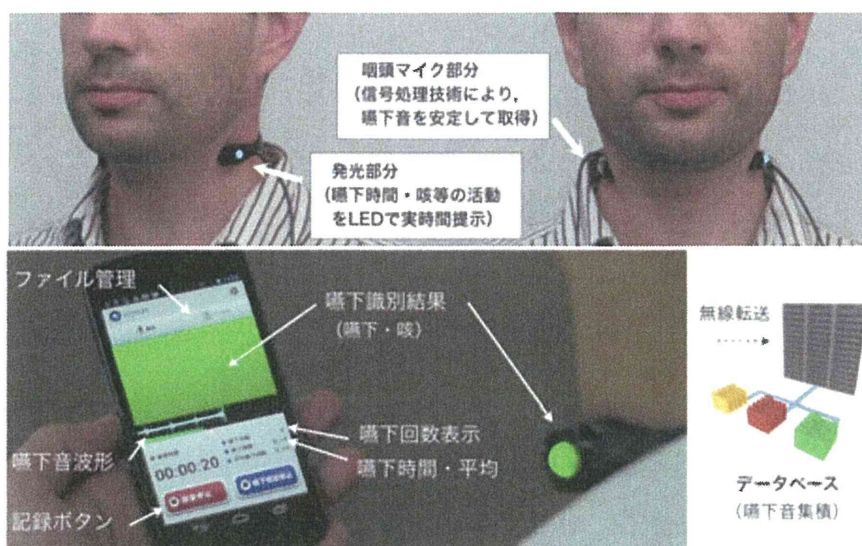


図4. スマートフォン(android 携帯)による嚥下音実時間解析およびデータ収集システムの概要図

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ものである．嚥下造影検査，嚥下圧測定とともに嚥下音を同時測定し，嚥下音との関

係を明らかにする．なお，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3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．



図 2. 嚥下音、口腔内圧計測、VF同時計測実験風景

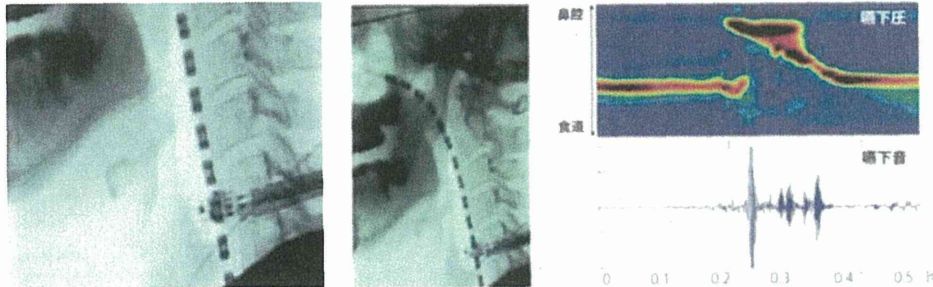


図 3. 嚥下造影検査中の嚥下圧・嚥下音同時計測（左：嚥下音計測部を拡大）

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され、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。

図2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、マイクからの入力が入力値が一定値を超えた区間だけ表示することとしている。

今年度も引き続き、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する。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。

（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、2014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、目標症例数20例賭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る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。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。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 嚥下造影検査及びマノメータとの比較

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。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。本年度は、昨年度に引き続き嚥下造影検査（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・検証をおこなっている。具体的には VF による画像計測、開発したインタフェースからの音声信号計測、マノメータ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ものである。ここでは、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。

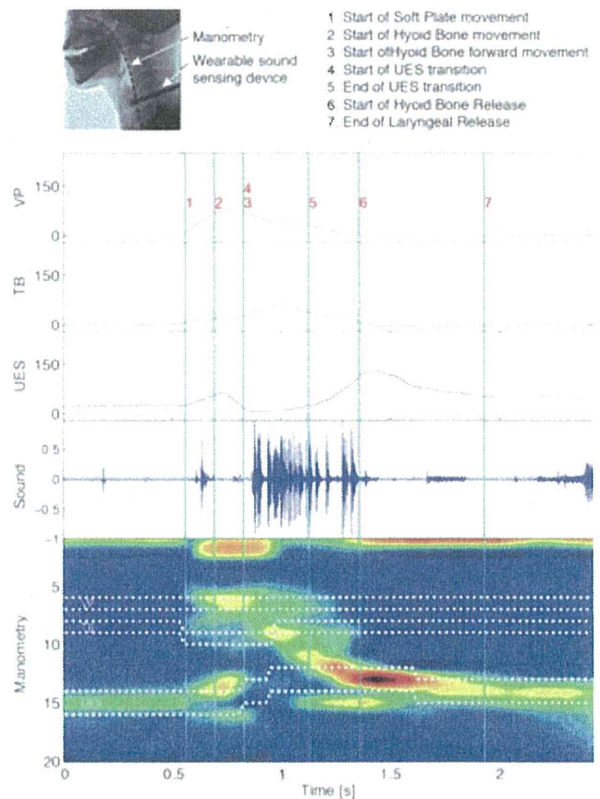


図4. 嚥下時のタイミングで切り出したVF 画像と音声データ，マノメータの値の比較グラフ

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。なお、マノメータの特性上、食塊通過時においてセンサ位置が上下するため、これを補正する必要が生じる。ここでは、新たにセンサ位置の上下を考慮に入れた評価方法を提案し、これらは、国際嚥下学会にて報告している。

なお、開発したインタフェースは、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

から、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. 3 嚥下造影検査と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

現在、嚥下造影検査 (VF) は嚥下障害におけるゴールデン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。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。咽頭内圧の記録にはスターメディカル社製の高解像度マノメトリー (High-Resolution Manometry : HRM) を使用。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. 骨拳上開始、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。

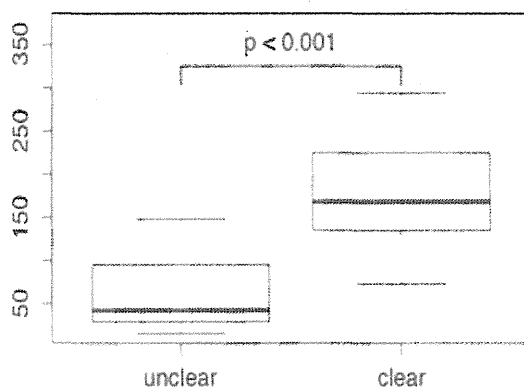


図 4: 嚥下初期の明瞭な嚥下音の有無と VP の最大圧

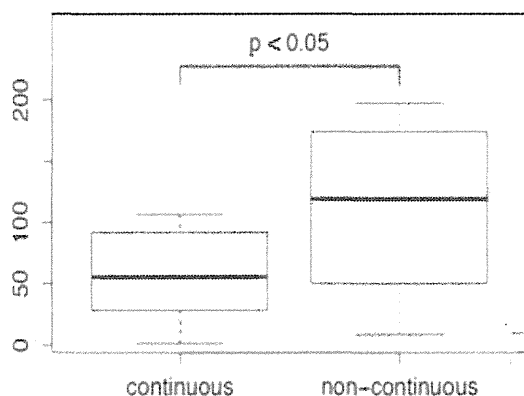


図 5: Bolus の UES 通過区間中の持続的な音の有無と VP の平均持続圧

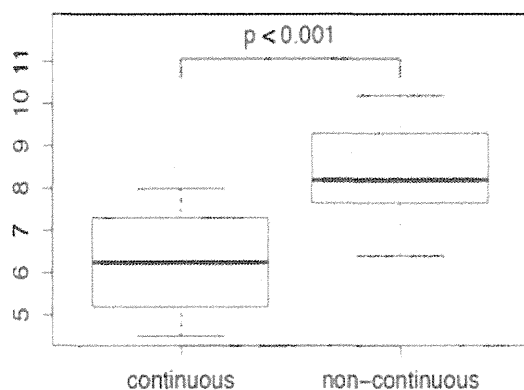


図 6: Bolus の UES 通過区間中の持続的な音の有無と UES 開大径

なお、被験者ごとにMATLABで処理した結果を図1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2-1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2-2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。図2の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2-1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2-2と比較すると著明に高値を示している。次に図3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3-2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かっていない状態であったが、図3-1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、軟口蓋挙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4)。次に、BolusのUES通過区間中(平均274msec)に持続的な音を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)音成分が確認された場合、VPに持続的に圧がかかっている、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。

C. 3 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、

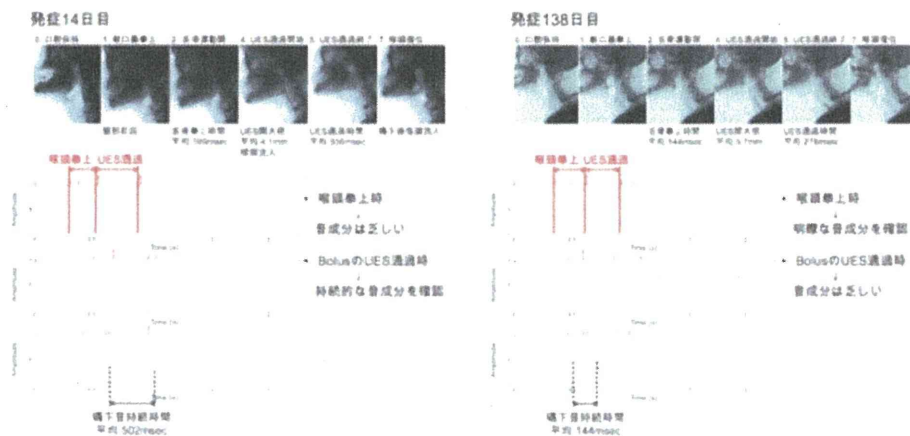


図3. 脳卒中患者における入院中と退院後における嚥下音の変化を認めた症例

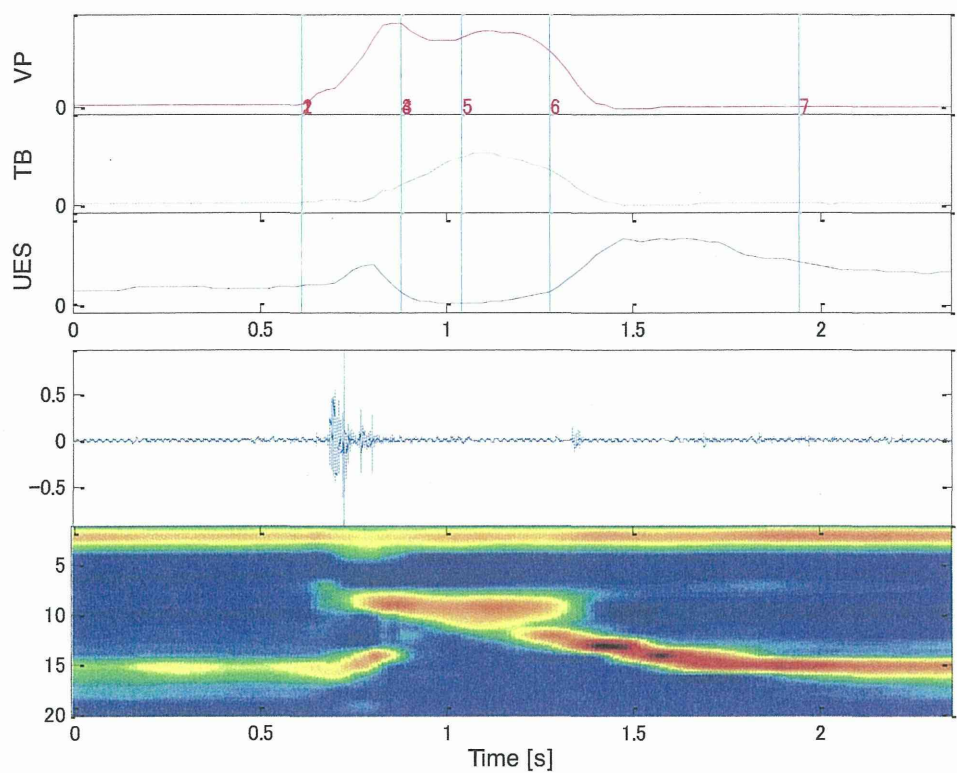


图 1-1：筋萎縮性側索硬化症

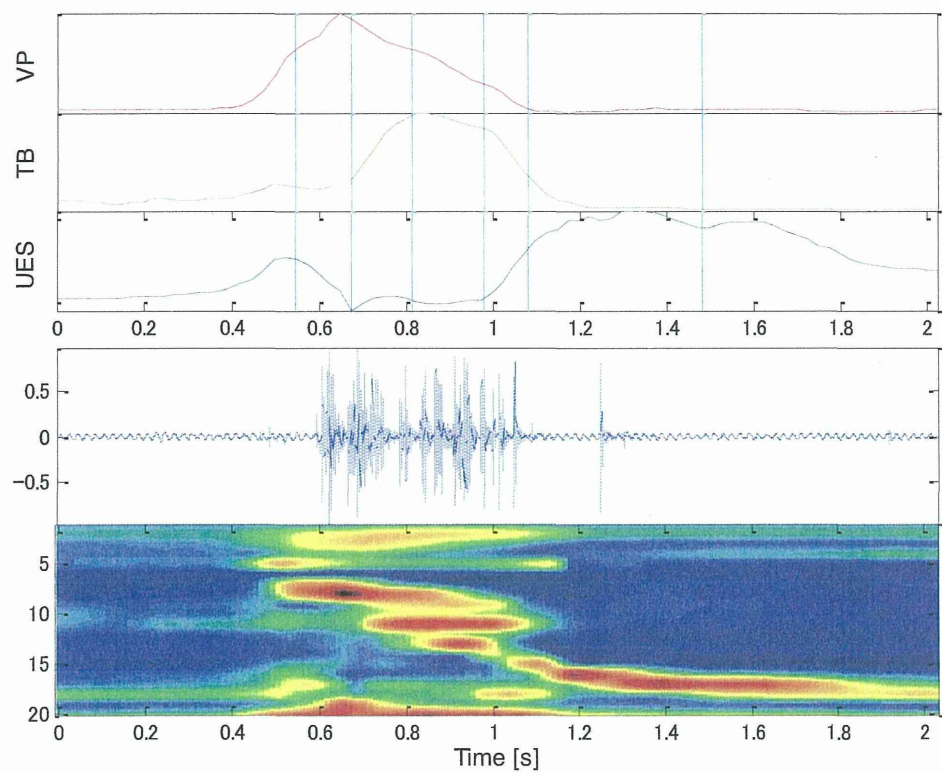


图 1-2：脊髓性筋萎縮症

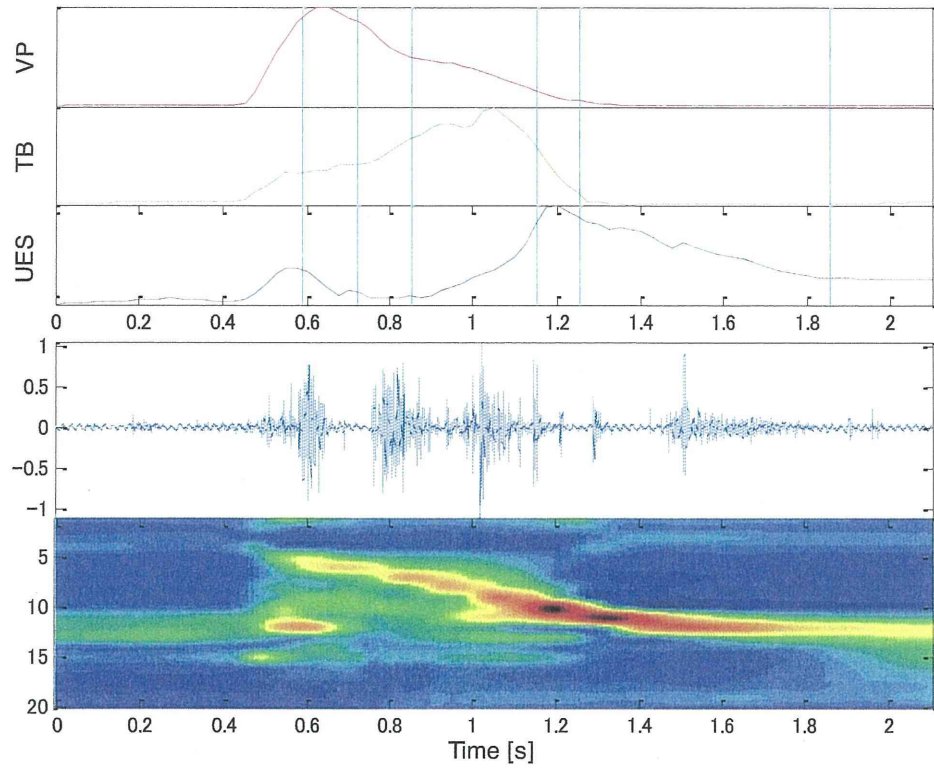


图 1-3：筋萎縮性側索硬化症

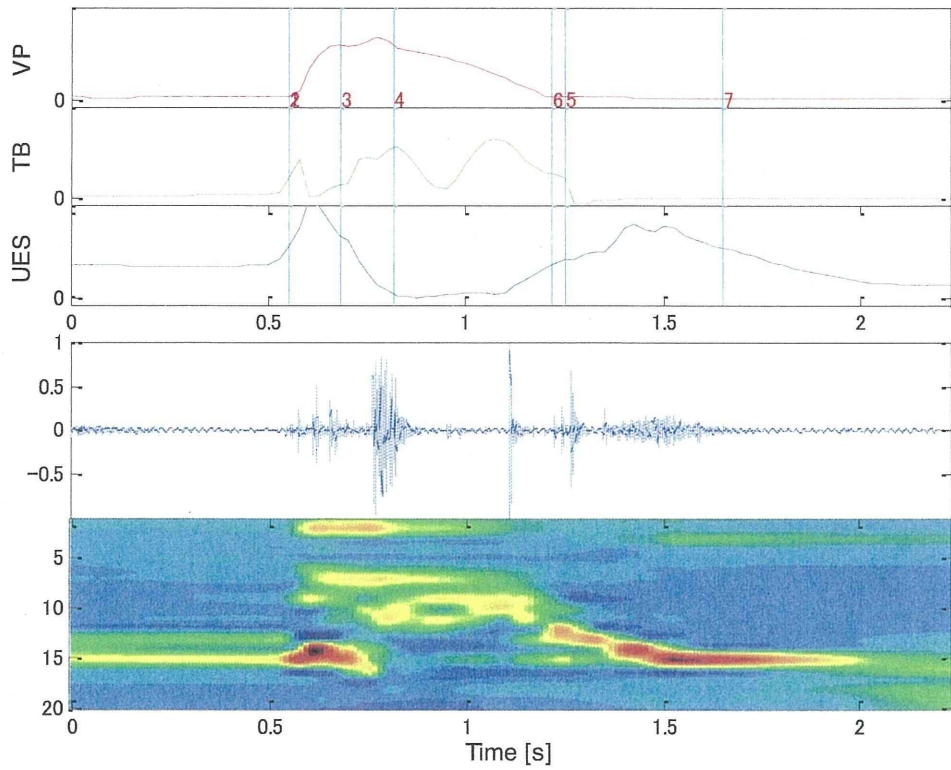


图 1-4：腦幹梗塞

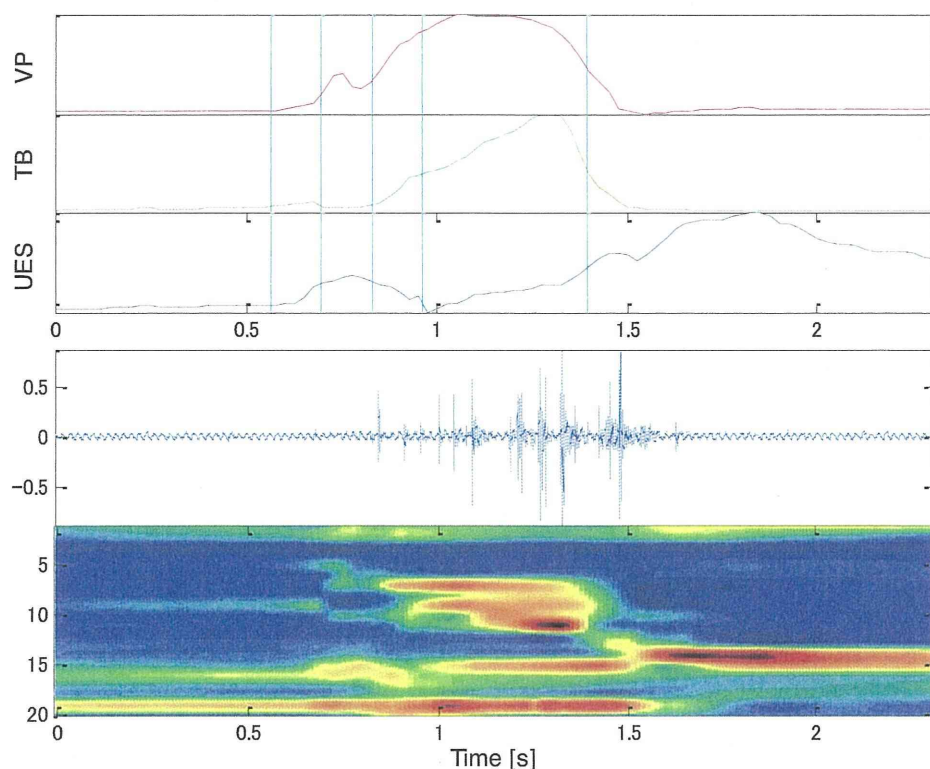


図 1-5 : サルコペニア (急性肝障害、心房細動、慢性心不全)

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. 4 高齢者や介護サービスの場における食事介助に関する調査

開発した機器の応用の一つとして、高齢者や介護サービスの場における食事介助を想定している。これより、高齢者施設や介護サービスの場において、嚥下機能の低下した高齢者の食事介助時に介護職の職員らが観察しているポイントや食事介助時に困難に感じている点などを明らかにすることを目的としたアンケート調査を進めて

いる。ここでは、

- ・食事介助の状況
- ・ヒヤリハット、心配や不安
- ・食事介助前の入居者に関する確認内容
- ・食事介助中の確認事項
- ・食事介助後の確認事項
- ・入居者(利用者)が食事を上手く飲み込んでいるかどうか確認できる機器(本研究で開発している機器)の有用性と期待について

などからなるアンケート用紙を作成した。今年度は、まず老人保健施設(ケアセンター阿見)にご協力頂き、看護師、介護福祉士、ケアマネジャーや管理栄養士らなど、食事介助に従事する方々から、意見を得ている。概ね回答は良好であり、具体的な指摘と変更点を踏まえ、来年度には大規模な調査を行っていきたい。

D. 考察

本研究では、実生活下での計測を可能にする嚥下計測のための頸部装着型インタフェースの開発を行い、嚥下音による口腔内での動態解析の商

法の確立、および実時間で嚥下音を推定するための特徴量の決定を行うための研究を実施している。特に、嚥下造影検査および、マンメータとの嚥下運動同時データ取得実験より、嚥下音解析による口腔内の動態解析を行った。これにより、健康者及び神経筋疾患患者、脳卒中患者など様々な疾患の患者における嚥下音と口腔内の動態の関係性について詳細な解析を行っている。

また、今回行ったVF、圧検査、音検査はそれぞれ特性が異なっており、本研究では口腔期・咽頭期・食道期などの障害の検知に利用可能かどうかを検証していきたい。

特に、嚥下障害患者での嚥下音には、その障害部位および程度によって、複数のパターンがあることが観察により明らかにしてきている。具体的には、1)上咽頭収縮圧低下型、2)下咽頭収縮圧低下型、3)咽頭収縮圧亢進型、4)嚥下反射惹起遅延型、5)食道入口部開大不全型、それぞれの障害パターンに応じての検討が必要であり、提案する機器により上記5型への分類を目指し、自動化のための信号処理に関する研究を進めている。

一方、摂食嚥下に関する懸念事項として、肺炎発症者が増加しわが国の死亡原因の第三位になった。肺炎による死亡者数の増加の背景には高齢化が挙げられるが、高齢社会において、高齢者が心身共に健康であるためには運動と栄養状態を良好に保つことが重要であると思われるが、咀嚼を含めた嚥下機能をいかに維持できるかが重要なポイントである。栄養状態の維持または改善を図りながら経口的に食事を摂取するという生活は高齢者のQOL向上に資するだけでなく、医療費抑制に繋がるものと考えられる。

E. 結論

本研究では、嚥下計測デバイスの改善とともに、スマートフォンを利用した計測システムの構築を行った。これより、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が実現したとともに、小型スマートフォンでの計測、及び計算機上での計測システムを実現し、実証実験用に高機能携帯端末による記録システムが実現した。

さらに、研究倫理審査の承認を受け、嚥下音の

解析の基礎となるデータ取得のための臨床研究を行っている。ここでは、嚥下造影検査時に同時に嚥下音の取得実験を実施し、すでに入院患者70名以上に対して観察実験を実施しており、マンメータ（圧力計測）を導入し、提案手法との比較実験を継続して行っている。

本年度得られた基礎的な成果に基づき、来年度も引き続き、在宅高齢者を対象としたフィールド研究や、リハビリ病院（会田記念リハビリテーション病院）と協力しながら、誤嚥との関連を明らかにするため、誤嚥を繰り返している患者の嚥下音パターン取得も行っていきたい。さらに、計測システム及びデータ収集のための基盤システムを利用し、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音信号解析の高度化を進めていく。

なお現在では、正常嚥下音の解析についても、未だ確立した知見が得られていない。このため、客観的評価法として確立されている嚥下造影検査、および、音と相関が高く、かつ高解像度での解析が可能な嚥下圧測定検査をあわせて実施する。両者を比較検討し、嚥下音の正常パターン、ならびに、異常パターンの分類を行い、嚥下音を用いた嚥下機能評価方法を作成する。

また、これまでの成果より、3成分からなる嚥下音の要素抽出について一定の知見が得られた。ため、今後は時間的特性を考慮して嚥下音検出の精度を向上するための研究を行っていく。また、各成分の音圧比、潜時と嚥下動態について比較検討を行い、嚥下音検査による異常の診断方法を確立することを目指す。これらが数値として客観的に評価できれば、ベッドサイドでのスクリーニング手段として、各評価者の技量によることなく、統一した基準で嚥下機能障害者を検出することができるとともに、嚥下機能の回復についての評価を可能とするものである。

なお、嚥下障害を有した患者が必ずしも、嚥下性肺炎を発症するとは限らない。要因としては、口腔内環境、気道内防御因子、咳嗽反射、さらには、嚥下直後呼吸再開時の呼吸相などが考えられる。嚥下性肺炎のリスクを検討するため、頸部装着型嚥下測定機器を使用して、夜間の嚥下状況の

モニタリングを行っていく。

また、誤嚥性肺炎の早期発見・予防という観点からも、頸部装着型機器によるモニタリングが必要であり、とりわけ施設や在宅などにおける有用性は高い。さらに、頸部装着型機器は嚥下時に発光することからも食事支援時の安全性の確保が可能である。また、これまでの研究において、意識障害者においても経口摂取が可能であったことから、高齢者のみならず障害者の嚥下状態のモニタリングならびに食支援としても有効性が高いと考える。

本研究により提案した、実生活下での計測を考慮した嚥下計測の手法は、嚥下障害治療の分野での利用や、嚥下情報の光フィードバックという新たな手法を食事介助の分野での確立を目指してこれらの分野に応用されることが期待される。今後は、長期的食事介助支援における本研究のインタフェースのさらなる有用性を検証していきたい。

F. 健康危険情報

当該実施期間の本研究の遂行にあたり、健康危険情報は認められなかった。

G. 研究発表

1. 論文発表

特になし

2. 学会発表

- ・ 上野 友之、寺元 洋平、鈴木 健嗣、江口 清、正常嚥下における嚥下音記録の検討 6/14、第50回日本リハビリテーション医学会学術集会 2013. 6. 13-15 東京
- ・ Kei NAKAI, Kenji SUZUKI, Kiyoshi EGUCHI, Satoshi AYUZAWA, Kikue HIDAKA, Tomoyuki UENO, Yohei TERAMOTO, Emiko OKAMOTO, Kaori SAITO, Akira MATSUMURA: Novel Neck Mounting Device Which Sense and Indicate the Swallowing Activity for Dysphagia Patients. XV WFNS world Congress of Neurosurgery Seoul, Korea 2013. 9. 8-13.
- ・ 鈴木 健嗣、上野 友之、寺元 洋平、Dushyanta Jayatilake、中井 啓、江口 清、鮎澤 聡、日高 紀久江、松村 明：頸部

装着型嚥下モニターを用いた反復唾液嚥下テストRSSTへの応用、第19回日本摂食・嚥下リハビリテーション学会学術集会 2013. 9. 22-23 倉敷。

- ・ 寺元 洋平、上野 友之、Dushyanta Jayatilake、鈴木 健嗣、中井 啓、日高 紀久江、江口 清、松村 明：重症筋無力症例におけるエドロホニウム投与前後の嚥下音の変化、第19回日本摂食・嚥下リハビリテーション学会学術集会 2013. 9. 22-23 倉敷
- ・ 寺元 洋平、上野 友之、Dushyanta Jayatilake、鈴木 健嗣、中井 啓、日高 紀久江、鮎澤 聡、江口 清、松村 明：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、The 1st International Conference on Global Aging Tsukuba 2014. 01. 24 つくば
- ・ Dushyanta Jayatilake, Kenji Suzuki, Yohei Teramoto, Tomoyuki Ueno, Kei Nakai, Kikue Hidaka, Satoshi Ayuzawa, Kiyoshi Eguchi, Akira Matsumura, Swallowscope: A Wearable Device for the Continuous Monitoring of Swallowing Activities、つくば医工連携フォーラム2014 2014. 01. 28 つくば
- ・ 寺元 洋平、上野 友之、Dushyanta Jayatilake、鈴木 健嗣、中井 啓、日高 紀久江、鮎澤 聡、江口 清、松村 明：嚥下造影検査と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、第37回 嚥下医学会学術講演会 2014. 02. 14-15 東京
- ・ Yohei Teramoto, Tomoyuki Ueno, Dushyanta Jayatilake, Kenji Suzuki, Kei Nakai, Kikue Hidaka, Satoshi Ayuzawa, Kiyoshi Eguchi, Akira Matsumura, "EXAMINATION OF SWALLOWING SOUND BY THE SIMULTANEOUS RECORDING OF VIDEOFLUOROSCOPY AND HIGH-RESOLUTION MANOMETRY," The Dysphagia Research society 22nd Annual 2014. 03. 06-08
- ・ 寺元 洋平、上野 友之、Dushyanta Jayatilake、鈴木 健嗣、中井 啓、日高

紀久江、鮎澤 聡、江口 清、松村 明：
右視床出血後に嚥下障害を発症し時間経過
で機能改善をみとめた一症例からみた嚥下
音の検討、第39回日本脳卒中学会総会
2014.03.13-15 大阪

H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

1. 特許取得

・装着型インタフェースによる嚥下機能計測に
関する特許は出願済である。(嚥下機能データ
測定装置及び嚥下機能データ測定システム及
び嚥下機能データ測定方法, 特願2011-154216
(出願人: 筑波大学))

・本年度の成果に基づき, 1件の特許出願を検
討している。

2. 実用新案登録

特になし

3. その他

特になし

Swallowscope: A Smartphone based device for the Assessment of Swallowing Ability

Dushyantha Jayatilake¹, Kenji Suzuki¹, Yohei Teramoto², Tomoyuki Ueno², Kei Nakai²
Kikue Hidaka², Kiyoshi Eguchi², Satoshi Ayuzawa³ and Akira Matsumura²

Abstract—Dysphagia can cause serious challenges to both physical and mental health. Aspiration due to dysphagia is a major health risk that could cause pneumonia, and even death. As a result, monitoring and managing dysphagia is of utmost importance. This study investigates the development of a smartphone-based device and a feasible real-time swallowing sound processing algorithm for the automatic screening for swallowing ability.

The videofluoroscopic swallow study (VFSS), which is considered the gold standard for the diagnosis of dysphagia, is not widely available, expensive and cause exposure to radiation. The screening tests used for dysphagia need to be carried out by trained staff and the evaluations are often non-quantifiable. The Swallowscope we developed is a wearable device based on mobile health, and uses the swallowing sound to quantitatively evaluate swallowing ability. As swallowing sound can be captured continuously and during activities of daily life with minimal intervention, it is an ideal approach to monitor swallowing activities, and its continuous monitoring has a better probability of capturing aspirations and risky swallow patterns.

This paper describes the real-time smartphone based algorithm and the application we developed to monitor swallowing activities and evaluates the recognition accuracy by comparing them with VFSS evidence.

I. INTRODUCTION

Deglutition, which is commonly known as swallowing, is a complex neuromuscular process that consists of both voluntary and reflexive actions of approximately 50 paired muscles [1]. The swallowing process is often divided into 3 phases: the oral phase, the pharyngeal phase and the esophageal phase. Dysphagia or difficulties in swallowing can result from a wide variety of functional or structural deficits in each of these phases. Most common of these are diseases and disorders such as strokes, Parkinson's disease, Amyotrophic lateral sclerosis (ALS), and cancer. Dysphagia could be both congenital and acquired and more common with the elderly. The medical, social, and psychological impacts of dysphagia could be serious. Aspiration, which is the misdirection of oropharyngeal or gastric contents into the larynx instead of the stomach, can cause pneumonia, in particular with the immunocompromised patients. In Japan, the upward trend of deaths due to pneumonia has risen to

*This work is supported by the Ministry of Health, Labour and Welfare in Japan

¹D. Jayatilake (dush at ieee.org) and K. Suzuki (kenji at ieee.org) are with Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba, 305-8573, Japan

² Y. Teramoto, T. Ueno, K. Nakai, K. Hidaka, K. Eguchi and A. Matsumura are with the University of Tsukuba Hospital, 305-8576, Japan

³ S. Ayuzawa is with the Tsukuba University of Technology, 305-8520, Japan

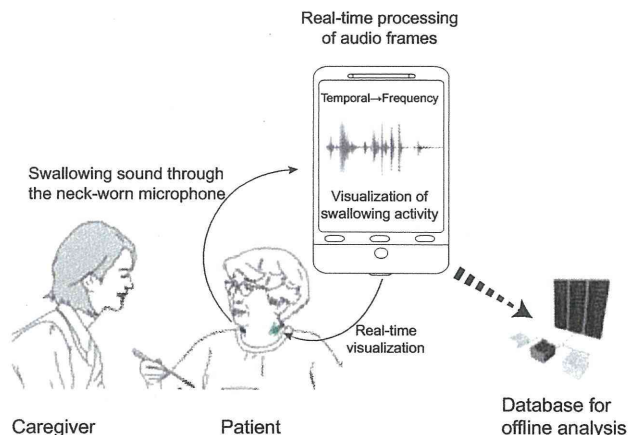


Fig. 1. The Swallowscope for the continuous monitoring of swallowing activities at the bedside and during activities of daily life

the 3rd place of leading causes of death by 2011 with 98.9 deaths/100000 people [2], and with the ageing population in Japan, this rate is expected to increase even further. Furthermore, inability to eat properly can adversely affect the health through dehydration and malnutrition, and it can also affect the quality of life [3], [4]. Dysphagia is also the most common symptom of esophageal cancer, and its early detection is crucial for the successful prognosis [5].

The videofluoroscopic swallow study (VFSS) is considered the gold standard for the diagnosis of dysphagia. VFSS, which is also known as the modified barium swallowing examination (MBS), captures sequential video-radiographic images of barium contrast-impregnated food and liquid as they are transported during the oral cavity, pharyngeal cavity, and esophagus in real-time. However, VFSS is needed to be performed by trained staff at designated facilities, and is subjected to exposure to radiation. Furthermore, the assessment is more qualitative and requires expert knowledge to interpret it. It is also imperative that clinicians observe patients during their usual eating and drinking environment to determine the external validity of the examination results and to assess the patient's ability to carry-over any learned swallowing strategies [6]. Considering those various complexities, some researchers such as laeder et.al [7] have suggested the use of screening techniques prior to the use of VFSS.

Screening tests for dysphagia are intended to find the individuals who are strongly suspected of having dysphagia. Dry swallowing, Repetitive saliva swallowing test (RSST), Water

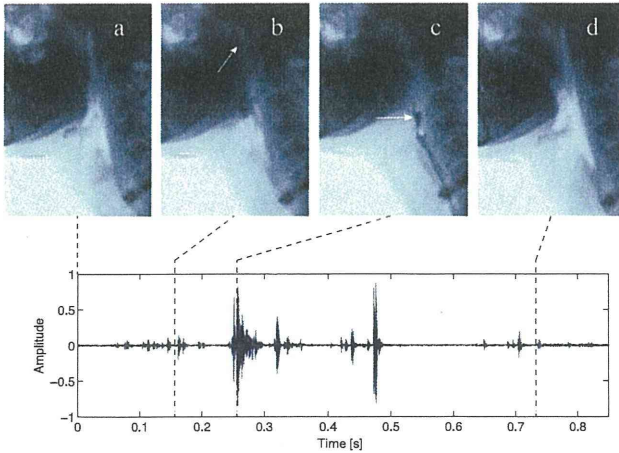


Fig. 2. Comparison of the swallowing sound with the corresponding VF images.

swallow test, Coloured water test, Cervical auscultation of swallowing and Swallowing provocation test (swallowing reflex test) are some of the screening test that can be performed without the need of any special tools [8]. However, these screening tests too need to be carried out by trained staff and the evaluations are often non-quantifiable. In order to address these limitations we developed the Swallowscope that can continuously monitor swallowing activities for assisting dysphagia screening by providing quantitative statistics on swallowing ability.

The Swallowscope is a wearable device, and uses the swallowing sound to evaluate swallowing ability (Fig. 1). Based on *mHealth*, it can be used conveniently during activities of daily life. Earlier we reported the specific features of sound produced during swallowing [9]. This paper describes the development of a feasible real-time algorithm and evaluates the Swallowscope by using in RSST-based screening.

II. METHODOLOGY

Since aspiration is not likely to happen with every swallow, especially in patients with mild dysphagia, continuous monitoring has a better chance of capturing aspirations or risky swallow patterns. As swallowing sound can be captured continuously and during activities of daily life (ADL) with minimal intervention, it is an ideal approach to monitor swallowing activities. The Swallowscope we conceptualized in Fig. 1 is a portable wearable system that can be used easily during ADL for the real-time assessment of swallowing function. The examiner could use the screen of the smartphone for a detailed description of swallowing activities, and a caregiver could use the visualizations at the neck-wear for a simpler real-time assessment of each swallow such as whether the swallowing happened normally or whether there has been signs of aspiration. By using a smartphone for processing the data, we wanted to make the technology widely available and more affordable. Furthermore, by automatically uploading the swallowing related raw-data to a remote server, it is possible to re-evaluate the whole swallowing process as

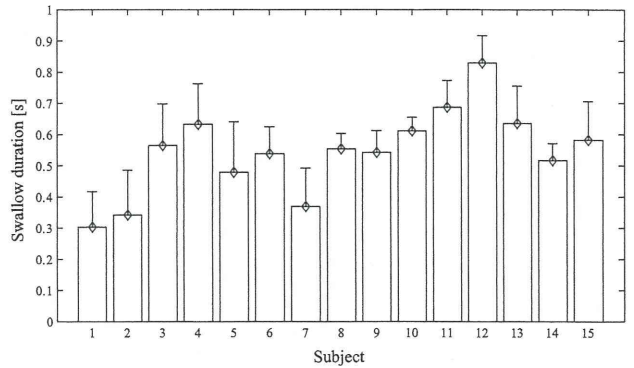


Fig. 3. Variation of average length of a swallow during RSST

well as perform more detailed analysis on a pc at a latter time by using more demanding algorithms.

By comparing the audio wave profile during swallowing with the corresponding VFSS images, Morinière et.al have reported on the origin of the sound components [10]. By carefully synchronizing videofluoroscopic (VF) images with the audio we analyzed the event based temporal and frequency characteristics of the audio waveform. In order to synchronize VF images with audio, we triggered an audio signal within the VF environment, and time-wise aligned the VF images with audio waveform, eliminating any delays associated with the VF and audio data capturing systems. Fig. 2 shows a comparison of audio waveform with VF images (the data, which corresponds to a dysphagia patient is fairly close to a healthy-swallow audio pattern). As it can be seen from Fig. 2, the sound components produced during swallowing are related to a chronological series of anatomical activities: (a) resting state, (b) movement of the soft palate and the larynx while bolus moving into the pharynx, (c) moving the bolus into the esophagus, and (d) returning of the larynx back to the resting position. Acoustic event related to (c) was the most prominent and present in 100% of the healthy samples we examined, however, events (b) and/or (d) were not observed in some of the samples.

A. Selection of parameters for the swallow activity recognition algorithm

In this study, we focused on the swallowing activities related to the RSST. The RSST is a simple test developed by Oguchi et.al for the screening for functional dysphagia [11]. RSST counts the number of repetitive dry swallows within a period of 30s, and if the count is less than 3, then the subject is considered to have a stronger possibility of having dysphagia. In RSST, the number of swallows is counted by the movement of laryngeal elevation, either visually or by palpating, which is difficult to perform without proper training and experience. We also believe the variation of length of swallows and the duration between swallows could provide further insights into the swallowing ability, and the simple swallow count is not the only parameter that can evaluate swallowing ability.

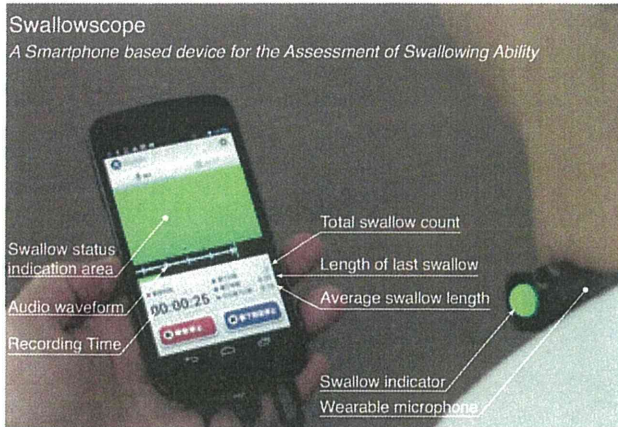


Fig. 4. Overview of the Swallowscope, showing the indicator side of the neck-worn microphone and the display of the smartphone application

In order to find necessary parameters for the swallow activity detection algorithm, we performed RSST on 15 subjects and asked a speech therapist and an experience swallowing sound coder to analyze the data for feature extraction by asking them to tag the starting and end points of each swallow during RSST. From the data, we noticed significant variations in lengths of swallow segments from person to person (p -value <0.001), but less variations for the same subject. Fig. 3 shows the variation of average swallow lengths of the 15 subjects. The test yielded an average swallowing time of 0.51 s (S.D = 0.16).

B. Real-time processing of swallowing sound

The swallowing sound processing consists of 3 phases: preliminary detection of swallow sound pattern, elimination of cough and vocalizations and final detection. In the smartphone based algorithm, audio is captured as 16-bit pcm (Pulse-code modulation) at a rate of 11025 Hz and processed after acquiring into a 512-size buffer.

In the preliminary detection, we capture the sound profiles that are bounded by silent segments longer than 139 ms (3 buffers) to a sound segment. Here, an acquired buffer is considered silent if the maximum value is less than a predefined threshold. As it can be seen from Fig. 2, typically the audio produced at different anatomical levels are separated by silent periods that are shorter than 3-buffers. As a result, a silent period within an audio segment indicates a switch in the anatomical region. After selecting the preliminary audio segment, a continuous wavelet transformation is performed and the amplitudes of the scale 19 is compared against a predefined threshold to detect cough and sections of vocalization. Finally, the audio segment is tested for: (a) total length, which should be between 232 ms (5-buffers) and 700ms (15-buffers), and (b) number of sections (detected anatomical regions), which should be between 2 and 4. If all the above conditions are satisfied, the audio segment is considered a proper swallow.

Fig. 4 shows the smartphone-based Swallowscope. The swallowing sound is captured from the neck-worn micro-

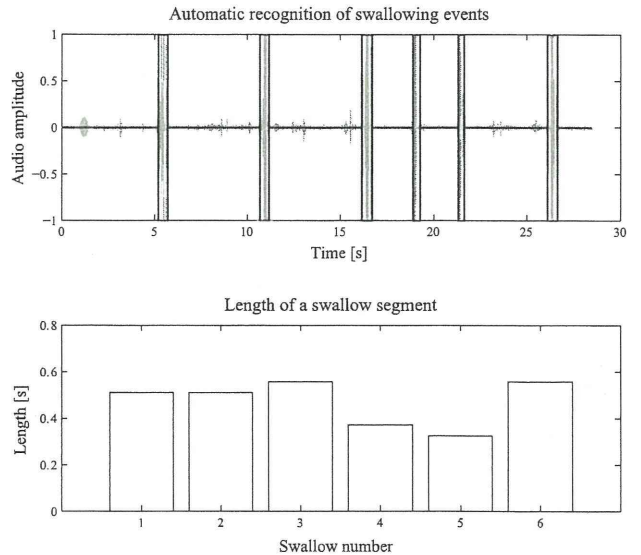


Fig. 5. Real-time automatic recognition of swallowing activities during RSST

phone and the real-time processing outcome is displayed on the screen. The display statistics consists of the number of swallows recognized, the total time taken for the last recognized swallow and the average time taken for a swallow. The recognition outcome is shown both at the indication area of the smartphone and with the indicating LED of the neck-worn microphone with 3 different colours: blue for no swallow or stand-by, green for proper swallow and red for cough.

III. EVALUATION AND RESULTS

In order to evaluate the accuracy of automatic recognition, we used the Swallowscope to evaluate RSST activity of 8 subjects while simultaneously performing VF, whereas the VF images were used as the ground-truth to calculate recognition accuracy. Fig. 5 shows the results of one of the RSST, reproduced with the exact offline version of the real-time algorithm. In this instance, the Swallowscope recognized all the swallowing events accurately.

Fig. 6 shows the precision (fraction of retrieved instances that are relevant) and recall (fraction of relevant instances that are retrieved) of automatic recognition estimated according to the ground-truth obtained from VF evidence. Overall, the automatic swallow recognition algorithm achieved a precision of 83.7% and a recall of 93.9%.

Due to the quantitative nature of evaluation, it is possible to use the Swallowscope to obtain more information about the swallowing process, and Fig. 7 compares the timing characteristics of swallows during RSST of a healthy subject (male, 35) and a dysphagic subject (female, 60's). The healthy subject managed 15 number of swallows within the period of 30s whereas the dysphagic subject could manage 2 swallows only.

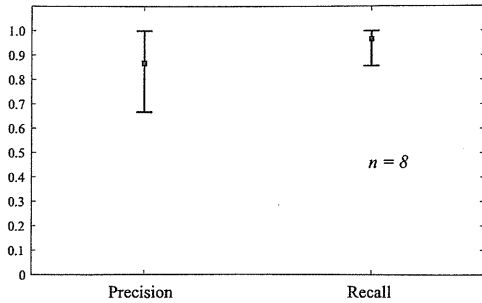


Fig. 6. VFSS evidence-based accuracy for the automatic detection of swallowing activities during RSST

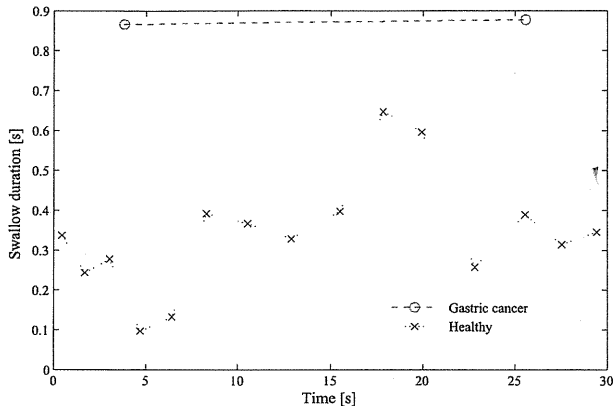


Fig. 7. Comparison of RSST timing characteristics of a healthy subject and a dysphagic subject due to gastric carcinoma

IV. DISCUSSION

Swallowscope is the smartphone based device we developed to continuously monitor swallowing activities and assess the swallowing ability. In the current stage where we focused more on the RSST, we wanted to increase the recall: the true positive rate, to make sure the Swallowscope's categorization of not risky could be accepted with high confidence. The standard screening techniques used to assess swallowing ability have 2 main limitations: the person who conducts the screening test needs to be an expert to identify various outcomes of the test and the outcome of the tests are subjected to qualitative interpretation of the examiner. The Swallowscope on the other hand does not require any special knowledge nor training and the results it produce are quantitative. Our current algorithm for instance is capable of recognizing precise temporal characteristics of swallowing activities. It can accurately determine when did the swallow has occurred and how long the swallow was. As a result, it could be possible to define more definitive parameters to evaluate swallowing ability.

As seen in Fig 5, we could analyze the progress of swallowing activities, whether the subject is slowing down by using gap between swallows, and whether the time for a swallow is increasing from the swallow length information. These parameters could indicate whether the swallowing function of the subject is getting unusually tired. As it

can be seen from Fig. 7, healthy subject, while managing 15 swallows, did not have any problem maintaining the swallowing rate. And the swallows too took much shorter time to complete, indicating much stronger and quicker swallows.

Just as coughing indicates possible aspiration, ability to cough properly is important to make sure that the person can cough any aspirated food particles out. Healthcare workers often would like to know it before feeding someone who is in a risk of aspirating, and we could use the cough detection feature of the Swallowscope to determine whether their coughs are strong enough to serve this purpose.

V. CONCLUSIONS AND FUTUREWORKS

We developed a smartphone-based device that can analyze swallowing sounds in real-time and generate quantitative results to assist the bedside screening for swallowing ability. We achieved a very high value for recall, indicating the Swallowscope's categorization of not risky could be accepted with confidence. We further demonstrated the ability to generate quantitative measures about the swallowing ability, and this could help to produce more reliable screening methods.

We are currently working on compiling a large database of healthy and dysphagic swallowing patterns and plan to develop a more sophisticated pattern-recognition algorithm to improve the screening accuracy as well as to directly detect dysphagic swallowing patterns. We also believe it is possible to describe swallowing pressure from the swallowing sound and currently conducting a study that combines swallowing sound, VFSS and high-resolution manometry (HRM).

REFERENCES

- [1] E. T. Cunningham Jr and B. Jones, *Normal and Abnormal Swallowing: Imaging in Diagnosis and Therapy*. Springer, 2003, ch. 2.
- [2] "Vital statistics in japan-the latest trends," Ministry of Health, Labour and Welfare, Tech. Rep., 2011. [Online]. Available: <http://www.mhlw.go.jp/english/database/report.html>
- [3] O. Ekberg, S. Hamdy, V. Woisard, A. Wuttge-Hannig, and P. Ortega, "Social and psychological burden of dysphagia: Its impact on diagnosis and treatment," *Dysphagia*, vol. 17, no. 2, pp. 139-146, 2002.
- [4] P. E. Marik and D. Kaplan, "Aspiration pneumonia and dysphagia in the elderly," *CHEST Journal*, vol. 124, no. 1, pp. 328-336, 2003.
- [5] V. Tentzeris, B. Lake, T. Cherian, J. Milligan, and A. Sigurdsson, "Poor awareness of symptoms of oesophageal cancer," *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, vol. 12, no. 1, pp. 32-34, 2011.
- [6] B. Martin-Harris and B. Jones, "The Videofluorographic Swallowing Study," *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, vol. 19, no. 4, pp. 769-785, 2008.
- [7] S. B. Leder, D. M. Suiter, H. L. Warner, L. M. Acton, and B. A. Swainson, "Success of recommending oral diets in acute stroke patients based on passing a 90-cc water swallow challenge protocol," *Topics in Stroke Rehabilitation*, vol. 19, no. 1, pp. 40-44, 2012.
- [8] S. Horiguchi and Y. Suzuki, "Screening tests in evaluating swallowing function," *JMAJ*, vol. 54, no. 1, pp. 31-34, 2011.
- [9] M. Nagae and K. Suzuki, "A neck mounted interface for sensing the swallowing activity based on swallowing sound," in *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE*, 2011, pp. 5224-5227.
- [10] S. Morinière, M. Boiron, D. Alison, P. Makris, and P. Beutter, "Origin of the sound components during pharyngeal swallowing in normal subjects," *Dysphagia*, vol. 23, no. 3, pp. 267-273, 2008.
- [11] K. Oguchi, E. Saitoh, M. Mizono, M. Baba, M. Okui, and M. Suzuki, "The Repetitive Saliva Swallowing Test RSST as a Screening Test of Functional Dysphagia. (1). Normal Values of RSST," *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*, pp. 375-382, 2000, In Japanese.

別添5

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書 籍 名	出版社名	出版地	出版年	ページ
------	---------	-----------	-------	------	-----	-----	-----

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
-------	---------	------	----	-----	-----

6. 研究成果による特許権等の知的財産権の出願・登録状況

特になし

7. 健康危険情報

- ・本研究の遂行にあたり、健康危険情報は認められなかった。

