

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：11201

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19621

研究課題名（和文）ホワイトボックス型AIによる睡眠データからの不顕性誤嚥群検出とそのメカニズム解明

研究課題名（英文）Detection of subclinical aspiration and elucidation of its mechanism from sleep data using explainable artificial intelligence

研究代表者

佐々木 誠（Sasaki, Makoto）

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：80404119

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、睡眠時マルチモーダル生体信号と覚醒時基礎データからの不顕性誤嚥患者の検出可能性について検討した。AIを用いた覚醒時のデータ解析では、前頸部表面筋電位信号から、随意運動や嚥下反射における嚥下諸器官の運動を分類できることを明らかにした。また、PVDFセンサを用いて検出した嚥下前後における呼吸パターンの変化から、誤嚥リスクを評価できる可能性を見出した。睡眠時のデータ解析では、不顕性誤嚥患者と健常者のマルチモーダル生体信号を計測し、唾液嚥下やその前後の呼吸変化の自動検出を行った。そして、深層学習による不顕性誤嚥群の分類可能性を検討することで、新たな見守り技術に対する基礎的な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不顕性誤嚥は、ムセや自覚症状がなく、静かに肺炎を発症・進行させるため、医療従事者や介護者であってもその兆候や変化を捉えることは難しい。本研究では、睡眠時マルチモーダル生体信号と覚醒時基礎データからの不顕性誤嚥患者の検出可能性について基礎的検討を行ったが、患者に共通する生体信号の特徴とその検出法をより詳細に解明できれば、不顕性誤嚥を理解、克服するうえでの新たな展開が期待できる。例えば、不顕性誤嚥の検出法や、誤嚥性肺炎発症の予測システムなどが考えられ、これらの実現に向けた第一歩として、本成果の学術的、社会的意義が認められる。

研究成果の概要（英文）：We investigated the possibility of detecting subclinical aspiration from multimodal biological signals during sleep and basic physiological data during wakefulness. Analysis of the awake data using artificial intelligence (AI) revealed that the movements of swallowing-related organs could be classified from surface electromyography signals of the hyoid muscles. In addition, we found that the risk of aspiration during sleep could be evaluated based on changes in breathing patterns before and after swallowing detected by the polyvinylidene fluoride film sensor. In analysis of the sleep data, we measured multimodal biological signals of a dysphagic person with subclinical aspiration and automatically detected saliva swallowing and respiratory changes before and after the swallowing. Furthermore, the feasibility of classifying subclinical aspiration groups by AI was verified, and basic knowledge for a new monitoring technique for dysphagia patients was obtained.

研究分野：医療福祉工学関連

キーワード：嚥下障害 不顕性誤嚥 マルチモーダル生体信号計測 AI 機械学習

### 1. 研究開始当初の背景

嚥下反射が低下する夜間睡眠時に、細菌を含んだ唾液や消化液等を繰り返し気道に吸引することで引き起こされる不顕性誤嚥（サイレントアスピレーション）は、ムセや自覚症状がなく、静かに肺炎を発症・進行させるため、医療従事者や介護者であってもその兆候や変化を捉えることは難しい。また、嘔声や発熱などを認めた時点で既に重症化している場合が多いため、誤嚥性肺炎発症後の検査技術だけでなく、日常生活の中から不顕性誤嚥の疑いや兆候を早期発見するような革新的かつ画期的な見守り技術の開発が不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、AI 技術を用いて、睡眠時マルチモーダル生体信号と覚醒時基礎データから、不顕性誤嚥群の検出可能性を検討することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) AI による嚥下諸器官の運動予測

まず、非侵襲的に計測可能な生体信号から、嚥下条件や嚥下機能によって異なる嚥下諸器官の運動状態を検出できるかどうか検討するため、AI 解析の第一歩として、嚥下障害者の覚醒時嚥下データを収集した。対象は、嚥下造影検査（Videofluoroscopic examination of swallowing, 以降 VF 検査）を要する 80 代女性であり、岩手大学の研究倫理委員会で承認（第 201905 号）を得た後、通常検査の範囲内で実施した。VF 検査は、X 線透視装置を用い、108w/v%の硫酸バリウムを加えたところみなし通常嚥下（1, 3, 6ml）、ところみなし努力嚥下（6 ml）、1%ところみ付与通常嚥下（6 ml）の条件で 3 回ずつ行った。また、研究代表者が開発した 44 チャンネルフレキシブル電極を用いて、VF 検査時の舌骨上筋群と舌骨下筋群の表面筋電位信号（surface electromyography signal, 以降 sEMG 信号）をサンプリング周波数 2,000 Hz で計測した。

次に、VF 検査で観察した嚥下諸器官の運動のうち、①舌尖が動作開始、②食塊の咽頭流入、③舌背が口蓋へ接触、④食塊が喉頭蓋谷へ到達、⑤喉頭蓋が反転開始、⑥食塊が食道入口部へ到達、⑦喉頭蓋谷のクリア、⑧気道閉鎖の 8 項目のイベントに着目し、動画解析ソフトウェア DIPP-Motion V で各タイミングを検出した。そして、時系列データ予測手法である Long short-term memory を用いて、舌骨上筋群、舌骨下筋群と関係する①③⑤⑧のイベント群と、食塊の動きに関係する②④⑥⑦のイベント群の検出を試みた。AI の入力信号には、時間領域の特徴量である Root mean square と、周波数領域の特徴量である Cepstrum coefficient を用い、これらの筋活動情報から、嚥下諸器官の運動状態等を分類できるかどうか考察した。

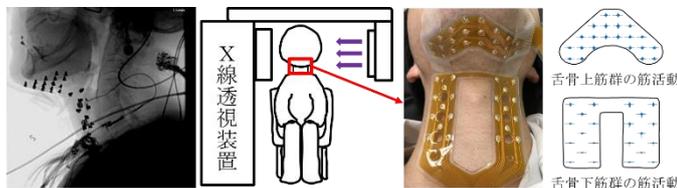


図1 VF 検査と sEMG 信号の同期計測

#### (2) 嚥下と呼吸の協調評価アルゴリズム

睡眠時の嚥下と呼吸の状態、ならびにバイタル情報の変化を自宅等で簡便に計測できるように、嚥下検出用の筋電センサ、小型マイクロフォン、伸縮性ひずみセンサ、呼吸検出用の PVDF (Polyvinylidene Fluoride film) センサ、睡眠検出用の脳波センサ、ならびに、その他バイタルデータ計測用の血圧センサと SpO2 センサ等を組み合わせたマルチモーダル生体信号計測システムを製作した。一方、嚥下と呼吸は密接な協調関係にあり、嚥下時に呼吸が停止し、かつ、嚥下前後で呼吸パターンが変化するため、睡眠時の嚥下・呼吸の詳細な評価には、呼吸の有無や呼吸数などの信号解析だけでなく、嚥下前後の呼吸相や呼吸パターン変化等の信号解析が必要となる。そこで、本研究では、嚥下と呼吸の協調性を評価するアルゴリズムを開発した(特許出願)。

対象は、健常成人男性 6 名 (22.3±1.7 歳) とした。頸部には、伸縮性ひずみセンサを装着し、嚥下時喉頭運動から、嚥下開始点と終了点を検出した。鼻孔下には、PVDF を配置し、呼気と吸気の切り替わり点から、「呼気時間」、「吸気時間」を算出した。また、嚥下前後の呼吸相(吸気、呼気)を判定することで、「呼吸パターン」を判別した。提案手法による「呼気時間」、「吸気時間」、「呼吸パターン」の検出精度は、差圧式呼吸流量センサ(以降 FLOW センサ)と比較することで検証した。実験は、3 種類の異なる呼吸リズム(正常呼吸: 20 回/分、頻呼吸: 25 回/分、徐呼吸: 12 回/分)での呼吸計測、ならびに、呼気中、吸気中の各タイミングでの水 10ml の嚥下・呼吸計測(3 試行)とした。



図2 VF 検査と sEMG 信号の同期計測

### (3) 不顕性誤嚥患者の睡眠データの解析

嚥下内視鏡検査により不顕性誤嚥が認められた嚥下障害患者2名(平均80歳)を対象とし、昼間睡眠時のマルチモーダル生体信号を計測した。計測データは、舌骨下筋群の sEMG 信号、PVDF センサによる呼吸信号、伸縮性ひずみセンサによる喉頭運動、足人差し指に装着したパルスオキシメータ (SpO2 センサ) からの血中酸素飽和度、脈拍とし、約2時間の計測を行った。また、比較のため、健常成人男性のデータも収集した。そして、開発した嚥下・呼吸の協調評価アルゴリズムを用いて、唾液誤嚥の区間を検出し、その前後の呼吸変化を評価した。また、検出区間の生体信号に対して、畳み込みニューラルネットワークを用いて、不顕性誤嚥群と健常者群の分類可能性を検討した。



図3 データ収集の様子

## 4. 研究成果

### (1) AI による嚥下諸器官の運動予測

嚥下諸器官の運動に関するイベント①③⑤⑧の検出誤差は0.03~0.10 s (通常嚥下6 ml) となり、VF 検査でなければ観察できない嚥下イベントを、舌骨上筋群と舌骨下筋群の sEMG 信号から予測できる可能性が示された。一方、嚥下諸器官の運動や、嚥下姿勢、嚥下物等によって変化する食塊イベント②④⑥⑦は、検出誤差が0.12~0.15 s となったが、VF 検査の撮影速度は30Hz であり、画像4枚以内の誤差であることから、十分許容できる精度といえる。非侵襲的に嚥下諸器官と食塊の運動を予測する本手法は、嚥下反射の遅れ等の嚥下機能評価だけでなく、個人に適した食品形態や姿勢の選択などに応用できる可能性がある。

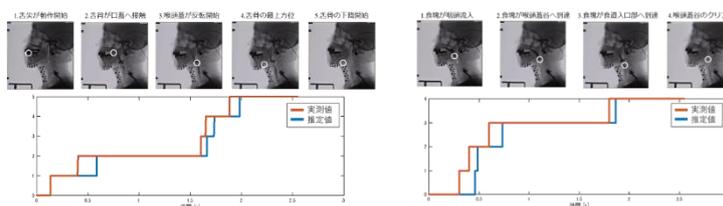


図4 嚥下諸器官(左)と食塊(右)の運動予測結果

### (2) 嚥下と呼吸の協調評価アルゴリズム

呼気時間、吸気時間に対する呼吸10回分の平均誤差は、どの呼吸リズム(正常呼吸:20回/分、頻呼吸:25回/分、徐呼吸:12回/分)においても0.08秒未満となり、PVDF センサを用いた本手法により、FLOW センサと同等の精度で呼気・吸気時間を検出できる可能性が示された。また、FLOW センサで検出した呼吸パターンは、呼気-嚥下-呼気 (EE) タイプが16データ、呼気-嚥下-吸気 (EI) タイプが4データ、吸気-嚥下-呼気 (IE) タイプが9データであった。これに対して、提案手法の誤検出は1データに留まり、97%の精度で、嚥下前後の呼吸パターンを検出できることが示された。気道内に侵入した食塊および貯留した分泌物を喀出し、気道の浄化を図るための咳嗽力が低下すると誤嚥性肺炎のリスクが増加するように、嚥下後の呼気の長さ・強さは誤嚥・窒息リスクと密接に関係する。高齢者や嚥下障害者、脳血管障害者では、嚥下後吸気から呼吸が再開する頻度が増えるとの報告もあり、嚥下前後の呼吸時間や呼吸パターンを評価する本手法により、高齢者や嚥下障害者の誤嚥・窒息リスクを評価できる可能性が示唆された。

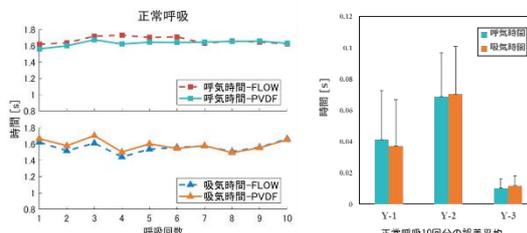


図5 呼気・吸気時間の検出誤

表1 嚥下前後の呼吸パターンの検出精度

		検出値 (PVDF)		
		EE	EI	IE
正解値 (FLOW)	EE	16	0	0
	EI	0	4	0
	IE	1	0	8

### (3) 不顕性誤嚥患者の睡眠データの解析

睡眠データの中には、睡眠時無呼吸やいびき、体動等の様々なイベントが含まれていたが、嚥下・呼吸の協調評価アルゴリズムにより、唾液誤嚥の区間を検出し、その前後の呼吸パターンを分類できることを確認した。また、畳み込みニューラルネットワークと Grad-CAM により、不顕性誤嚥群の分類可能性ならびに判断根拠の考察を試みたが、コロナ禍において睡眠データを十分に収集できなかった背景もあり、得られた解析結果が、不顕性誤嚥の有無、加齢、個人差のいずれの影響を強く受けているのか結論付けることはできなかった。一方、本研究を通して、信号計測・解析技術の基礎は十分に確立できたと言え、今後不顕性誤嚥患者の睡眠データを蓄積することで、不顕性誤嚥の疑いや兆候を早期発見しうる新たな見守り技術を実現できる可能性がある。

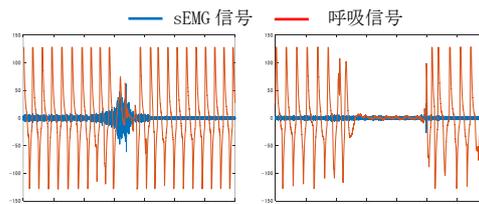


図6 睡眠時の嚥下(左)と無呼吸(右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐々木誠
2. 発表標題 飲み込みを科学する ～嚥下機能計の開発～
3. 学会等名 ヘルステック・デバイス・フォーラム2021（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木誠
2. 発表標題 多チャンネル表面筋電図を用いたAIベースの嚥下機能解析
3. 学会等名 第26・27回合同学会大会日本摂食嚥下リハビリテーション学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木誠
2. 発表標題 表面筋電と工学技術との融合 ～基礎から先端技術まで～
3. 学会等名 第1回表面筋電リハビリテーション研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本大輔, 佐々木誠, 佐々木颯真, 玉田泰嗣, 戸原玄
2. 発表標題 PVDFセンサを用いた嚥下・呼吸の協調パターン評価法の開発
3. 学会等名 日本顎口腔機能学会第67回学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木誠
2. 発表標題 前頭部多点表面筋電図を用いた嚙下機能評価技術
3. 学会等名 日本機械学会第34回バイオエンジニアリング講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木誠
2. 発表標題 表面筋電の基礎と可能性
3. 学会等名 第28回日本摂食嚙下リハビリテーション学会学術大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉田泰嗣，高橋陽助，高畠英昭，劉宇曦，佐々木誠
2. 発表標題 AIによるsEMGを用いた嚙下イベントの検出
3. 学会等名 第28回日本摂食嚙下リハビリテーション学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉田泰嗣，高橋陽助，高畠英昭，劉宇曦，佐々木誠
2. 発表標題 AIによるsEMG信号を用いた舌骨位置の推定
3. 学会等名 第28回日本摂食嚙下リハビリテーション学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉田泰嗣
2. 発表標題 歯科から発信する新たな医療AI
3. 学会等名 日本補綴歯科学会第131回学術大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本大輔, 佐々木誠, 玉田泰嗣, 高橋陽助
2. 発表標題 ウェアラブルデバイスを用いた嚥下・呼吸のモニタリングシステム
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasushi Tamada, Makoto Sasaki, Masahiro Suzuki, Yuta yokohama, Katsuhiko Kamata, Yosuke Takahashi, Hideaki Takahata
2. 発表標題 Using AI to Noninvasively Capture Aging Changes in Swallowing Function
3. 学会等名 IAGG Asia/Oceania Regional Congress 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉本大輔, 板離子, 佐々木誠, 真柄仁, 鈴木拓, 井上誠
2. 発表標題 ストロー摂取時の舌運動と呼吸の協調の分析
3. 学会等名 日本顎口腔機能学会第70回学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤川敦大, 佐々木誠, 杉本大輔, 玉田泰嗣
2. 発表標題 食事中の咀嚼, 嚥下, 呼吸の協調評価システムの開発
3. 学会等名 第33回ライフサポート学会フロンティア講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 呼吸モニタリングシステム	発明者 佐々木誠, 米田直輝, 佐々木颯真, 杉本大輔	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-174361	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	玉田 泰嗣  (Tamada Yasushi)  (50633145)	長崎大学・病院(歯学系)・助教   (17301)	
研究分担者	土井 めぐみ  (Doi Megumi)  (50899044)	長崎大学・病院(医学系)・技術職員   (17301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------