

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03299

研究課題名（和文）嚥下力の定量的評価に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Quantitative Evaluation of Swallowing Motion

研究代表者

竹井 裕介（Takei, Yusuke）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究チーム長

研究者番号：00513011

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、微弱で利用されてこなかった舌骨筋の表面筋電位を深層学習で高精度に検出し、非侵襲的に舌の動きを推定する方法を開発した。医師が診断に用いる舌の3方向の運動を対象に、被験者の舌骨筋筋電をラベル付き学習データとして分類学習器を生成した。頸部に貼付可能な無線型計測デバイスを試作し、舌の動き推定の高精度化を実現した。この技術は医療や食品開発、発声評価などに応用可能性が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：舌骨筋の表面筋電位を用いた舌運動の高精度推定を実現し、嚥下能力の定量的評価が可能となる。生体計測技術や人工知能の分野に新たな知見を提供し、医療、食品開発、発声評価など多岐にわたる応用が期待される。

社会的意義：本研究で実現したデバイスおよび計測解析手法は、加齢による嚥下能力の低下（オーラルフレイル）を早期に発見し、適切な介入を行うことで、高齢者の健康寿命とQOLを向上させる。誤嚥性肺炎のリスクを軽減し、適切な食事形態の維持により嚥下機能を保つ。介護施設や病院での誤診防止にも貢献する。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a method to noninvasively estimate tongue movements by detecting surface myoelectric potentials of the hyoid bone muscle, which are weak and have not been utilized, with high accuracy using deep learning. A classification learner was generated for the three-directional movements of the tongue used by physicians for diagnosis, using the subject's hyoid myoelectricity as labeled training data. A prototype wireless measurement device that can be affixed to the neck was developed to achieve high accuracy in tongue movement estimation. This technology is expected to have potential applications in medicine, food development, and speech evaluation.

研究分野：センシングシステム、MEMS、センサ、生体計測

キーワード：嚥下 誤嚥 ウェアラブルデバイス 機械学習 筋電

1. 研究開始当初の背景

加齢による嚥下能力の低下は、近年「オーラルフレイル」として注目されており、オーラルフレイルの早期発見および、口腔体操指導等の介入による嚥下能力の回復が、誤嚥リスク低減には重要である。オーラルフレイルの早期発見の課題となるのが、嚥下能力の定量的な評価手法の確立である。これまで食事時の舌の動きを計測する手法はなく、嚥下能力の診断には、歯科医師や口腔外科医師が、咀嚼中の口全体の動きや、口を開けた状態で舌を上下前後左右に動かすように指示して、その動き具合から判断するにとどまっていた。

本研究では、医師が舌の運動能力を診察する際に、舌が前後上下左右に動いているかを指標としていることに着目し、舌を動かす舌骨筋の非常に微弱な表面筋電位を計測するための筋電計測デバイスの製作と、舌骨筋筋電から舌が前後・上下・左右どの方向に動いているかを高精度に推定するニューラルネットワークの構築することを目指す。また並行して、舌骨筋筋電による舌運動の推定の確からしさを検証するために、口腔内に貼付可能な非常に薄型の3軸力センサを作製し、食事時の実際の舌の動きを計測し、必要に応じてニューラルネットワークのパラメータの補正に活用する(図1)。今まで誰も計測ができていなかった喫食時の舌の精緻な時系列運動推定の実現により、高齢者のQOLの向上や、食品開発への活用、新しい舌を使った入力インターフェースの開発などへの展開が期待できる。

人は、高齢になるにつれて嚥下能力が衰えていき、嚥下障害が起こるリスクが高まっていく。この嚥下障害は、場合によっては誤嚥性肺炎に繋がり、毎年7万人弱の方が亡くなっている。この加齢による嚥下能力の低下は、近年「オーラルフレイル」として注目されており、いち早くこのオーラルフレイルの予兆を発見し、介入して口腔回りの体操、トレーニングを行うことで、嚥下能力をある程度回復させることが健康寿命の延伸には重要である。

また、介護施設や病院では、たまたま一度でも食事中にむせると誤嚥を防ぐために、食事の形態レベルを下げられてしまう。しかし偶発的にむせてしまい不当に食事形態のレベルを下げられた場合は、著しく対象者の食事のQOLが下がるのに加えて、常食に比べて舌を動かさずに摂食することが可能なため、食事のせいで嚥下機能が低下してしまうという問題が指摘されている。またオーラルフレイルを放置することは、十分な栄養摂取ができない状態を放置することになり、結果として身体全体の筋力の低下(=フレイル)を引き起こすことになる。また、しっかりと咀嚼して食事をするのが、脳神経への適度な刺激となり、高齢者の認知機能の低下を緩和することが最近の研究の成果で明らかになってきている。このように嚥下能力を定量的に評価して、その人の嚥下力に応じた適切な食事を摂ることは、QOL向上および健康寿命の延伸に重要である。

一般的な嚥下能力の診断方法は、歯科医師や口腔外科医師が、対象者の咀嚼中の口全体の動きを観察するか、口を開けた状態で舌を上下前後左右に動かすように指示した際の舌の動き具合から判断するにとどまっていた。嚥下能力の定量的な評価を確立するべく、これまで表1に示すような様々な手法が試されてきたが、食事の際の舌の動きを非侵襲かつ定量的に計測する手法は、いまだ確立されていないのが現状である。食事時の舌の動きは、口を閉じているため外から観察できないため、X線透視下でバリウムなどの造影剤を含んだ食事を食べてもらう嚥下造

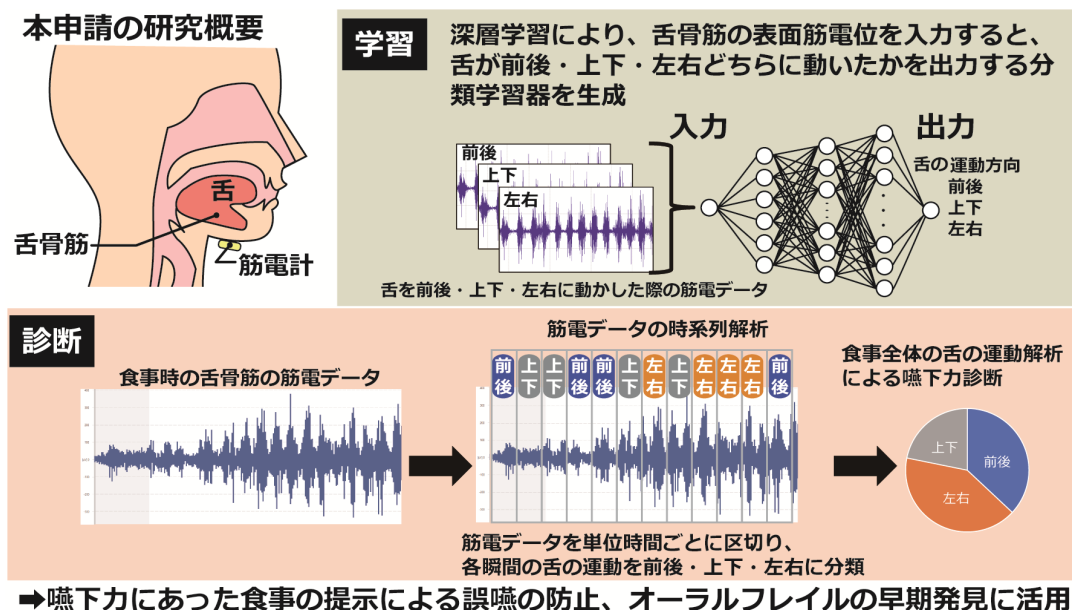





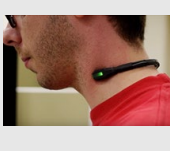

図1：本研究の概要

影検査が行われているが、口腔内の食事の流れは明瞭に見えるが、舌そのものの運動は観察できないため活用が難しく、さらに X 線の長時間暴露が被験者の負担となっていた。また、表面筋電位で舌の動きを把握しようにも、舌の動きを司る舌骨筋は首の筋肉の内側にあるため困難であった。そのため長い電極針を首または口腔内に刺入する直接的な筋電計測も試みられてきたが、被験者の肉体的な負担が非常に大きいというのに、針の刺入による痛みで正常な嚥下動作が行えないという問題があった。また最近の人を対象とした医工学実験の倫理審査の厳格化によって、針を刺入する筋電計測は実施が不可能な状況である。そこで本研究では、食事中的の人の舌の動きがどのようになっているのかを、核心をなす問いとして設定し、センシングシステム、生体計測、人工知能、嚥下診断の専門家によるチームを結成し、非侵襲かつ正確に食事中的の舌の動き＝嚥下力を評価するための手法を創成し、人々の QOL の向上に寄与することを目指す。

2. 研究の目的

本研究では独自の着眼点として、いままで信号が微弱で他の筋肉の筋電に埋もれていたため、有効に利活用されてこなかった舌骨筋の表面筋電位に注目し、深層学習による信号検出の高精度化を行うことで、非侵襲かつ正確な舌の動きの推定を試みる。特に、医師が舌の運動能力を診断する際に指標としている、舌の前後・上下・左右の 3 方向の運動に着目し、深層学習に用いる学習データとして、被験者に舌を前後・上下・左右それぞれの方向に動かしてもらった際の舌骨筋筋電をラベル付き学習データとして、入力された舌骨筋筋電に対して、舌が前後・上下・左右どの方向に動いているかを判定する分類学習器を生成し、食事中的の各瞬間における舌骨筋の筋

表 1：本提案手法と既存の嚥下力診断手法との比較

	X線造影検査	筋電計測 (電極針刺入)	パラトグラム	嚥下音 GOKURI@筑波大	本提案手法 舌骨筋筋電+AI
概要	 バリウムなどの造影剤を含んだ食事をX線透視下で食べてもらう	 長い電極針を首の内側の舌骨筋、または口内の口蓋帆挙筋に刺入して、活動電位を計測。	 発音時に舌が口蓋や歯列との範囲で接触するかを検査する方法。	 音響センサを喉の付近に設置し、嚥下の際の飲食物が喉を通過する音を計測。正常な嚥下か判定する。	 事前に前後上下左右に舌を動かした際の筋電を学習し、舌骨筋の表面筋電位から、舌の運動方向を推定。
嚥下力診断への有用性	× 造影剤入りの食事が体内をどう流れているかを可視化。舌の動きは不明瞭。	○ 口蓋帆挙筋や舌骨筋の活動電位を直接計測	× 舌と口蓋の接触位置の検査では、舌の時系列の動きの計測ができない。	▲ 嚥下音により、飲食物が喉を通過する際の様子をモニタリング。正常な嚥下を判定。	○：咀嚼・嚥下時の舌の3次元の動きを計測可能。
侵襲性	×：侵襲性高 X線被曝	×：侵襲性高 電極針刺入	▲：侵襲性やや高 口蓋面にワセリンを塗り、アルジネート印象材の粉末を散布して検査	○：侵襲性低 ネックレス型デバイスを首に装着	○：侵襲性低 小型筋電計を頸の下に貼付

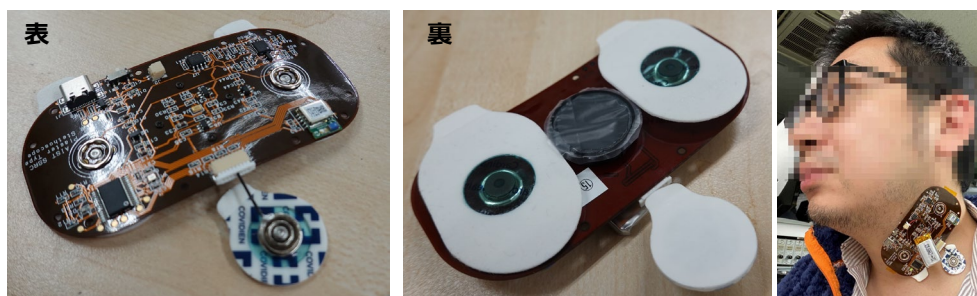
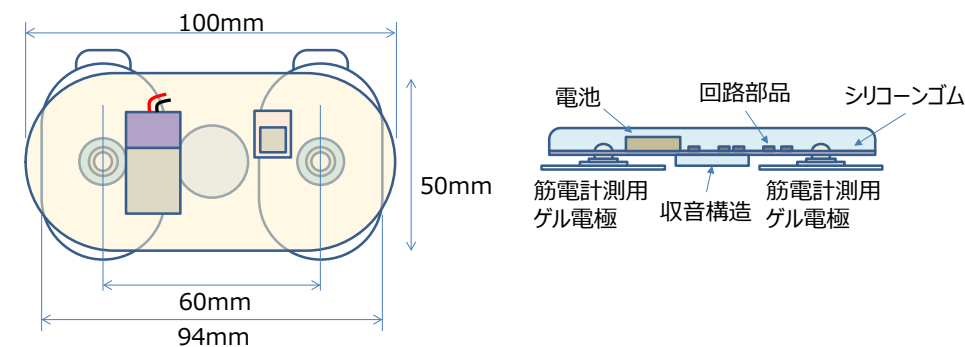


図 2：作製した舌骨筋 筋電・嚥下音 同時計測デバイス

電波形が、前後・上下・左右どの方向に動いているのか分類していくことで、食事中の時系列の舌の運動の推定を行う。これまで食事中の舌の動きを計測した例として、極薄の3軸力センサを口蓋に貼り付けて、舌が口蓋に及ぼす力を直接計測した以外になく、本研究ではこの3軸力センサを、舌骨筋表面筋電位から深層学習を用いて推定した舌の動きの「確からしさ」を検証するために用いる。嚥下力の定量的な評価方法の確立には、「深層学習による舌の動きの推定」と「センサによる舌の動きの実測」、双方を連携しながら推進することが重要となる。

「舌骨筋表面筋電位から舌の動きを推定し嚥下力を評価する手法」が確立することで、医療・介護現場での嚥下力診断の在り方が変わることが期待される。また高齢者や幼児向けの食品開発における新しい評価指標や、新しい入力インターフェースとしての活用、語学学習における発声の正確性の評価など、様々な分野への展開も期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、①舌骨筋の筋電を皮膚表面で高品質に計測するためのデバイスの作製、②舌骨筋の筋電から精度よく舌の動きを推定するための深層学習を用いた分類学習器の構築に取り組んだ。

① 頸部に貼付可能な舌骨筋用筋電計測デバイスの作製

フィルム基材に印刷電極および薄化した電子部品を実装し、フレキシブルな筋電計測デバイスを試作する。初年度は小型化にはこだわらず、まずはしっかりと機能するデバイスを目指す。その後、被験者実験を通じて、デバイスに関するフィードバックを得ながら、より使い勝手のよい嚥下力評価用デバイスの作製に取り組む。

② 舌骨筋の筋電から精度よく舌の動きを推定するための深層学習を用いた分類学習器の構築

健康者20名に対して舌骨筋の筋電データを収集し、分類学習器を構築する。舌骨筋のみで精度が十分でない場合、加速度や他のバイタル信号を加えたマルチモーダル化の検討を行う。また並行して介護施設での高齢者の筋電データ収集に向けて、実証実験プロトコルの検討を行い、倫理審査申請を進め、研究期間内に高齢者の嚥下力評価実験を行う。

4. 研究成果

① 頸部に貼付可能な舌骨筋用筋電計測デバイスの作製

図2に示すような、舌骨筋筋電および嚥下音を同時取得可能な、無線型貼付デバイスを試作した。このデバイスは、顎の下に取り付けることで、嚥下運動時の筋電データと音データを同時に収集するものである。具体的には、100mm×50mmのフレキシブル基板上に電池、無線通信用モジュール、信号処理回路、舌骨筋の筋電計測用のゲル電極、嚥下音計測用の收音機構を集約した。作製したデバイスを被験者の頸部に装着し、水を嚥下する際の舌骨筋の筋電および嚥下音を計測する実験を行った。その結果、デバイスが嚥下時の筋電信号と音信号を正確に検出できることを確認した。

② 舌骨筋の筋電から精度よく舌の動きを推定するための深層学習を用いた分類学習器の構築

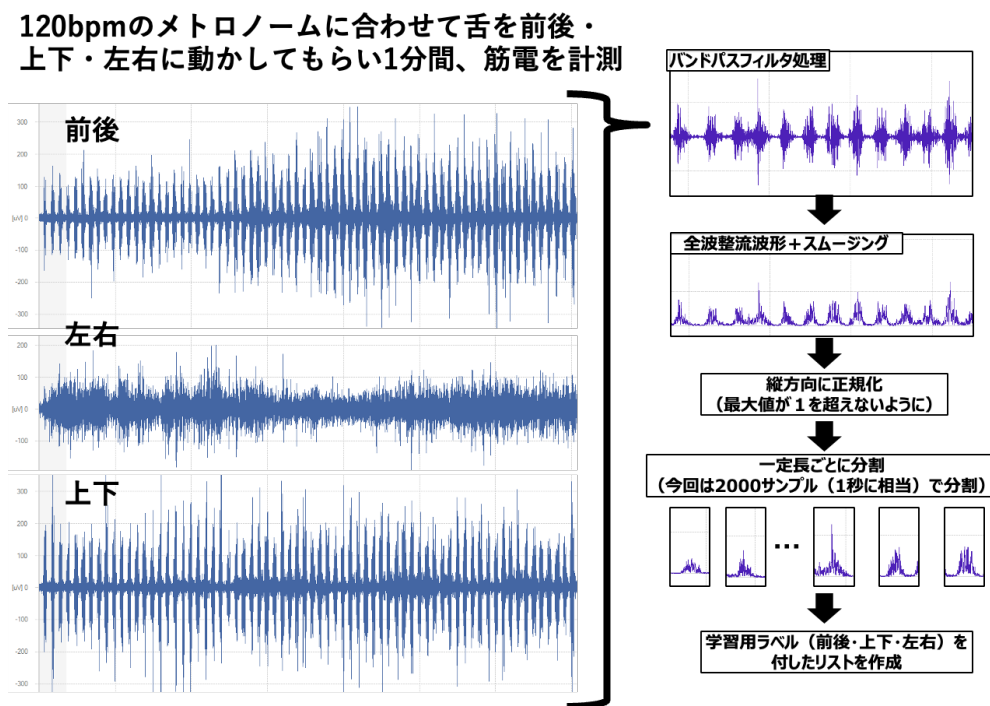


図3：前後上下左右に舌を動かした際の筋電計測例と機械学習に向けたデータ処理概要

上記デバイスを用いて、20人の被験者に対して、舌を前後・上下・左右に各1分間、連続的に動かした際の舌骨筋電波形を記録した。その後、バンドパスフィルタ処理、全波整流、スムージングを行い、一定長（1500）ごとに分割し、前後・上下・左右のラベル付けをしたものを機械学習用データとした。3層全結合ニューラルネットワークで機械学習を行い、入力した筋電データが前後・上下・左右どの方向に舌を動かした際の筋電であるかを判別する分類学習器を生成した（図3、図4左）。

機械学習に用いなかった筋電計測データを評価用データとして、生成した分類学習器でデータを分類した結果を図4右に示す。当初は、舌の前後運動：56%、左右運動：77%、上下運動66%の認識率であったが、エポック数および結合係数の最適化により、舌の前後運動：73%、左右運動：84%、上下運動76%の認識率まで向上した。

構築した分類学習器にて、高齢者の食事の際の舌骨筋筋電を解析した結果の一例を図5に示す。図5右に示すように、“肉じゃが”と“にゅう麺”にて、舌の動かし方が異なることが評価できていることがわかる。また、複数の高齢被験者にて検証を行った結果、同じ食品を食べていても、舌の動かし方が異なることが計測により明らかになった。特に、嚥下力が低下していると診断されている人ほど、左右に舌を動かす頻度が少ない傾向にあった。これは、歯科医師が嚥下力を診る際の診断基準にも合致するものであり、本デバイスおよび解析手法の有効性を示すものである。

これらの研究を通じて、舌骨筋や嚥下運動に関するデータ収集と解析の精度向上に貢献することができた。今後は、収集したデータを基にさらなる解析を進め、嚥下障害の診断および治療に役立つ技術の開発を目指していく。

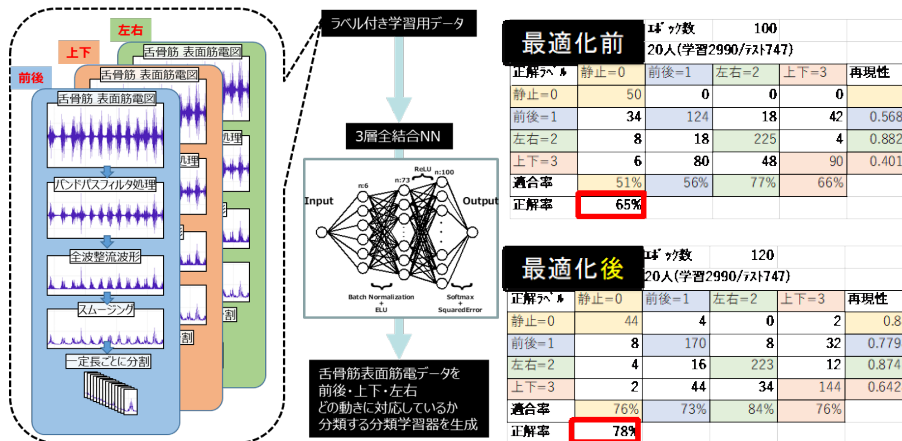


図4：機械学習による分類学習器の構築と分類精度の検証結果

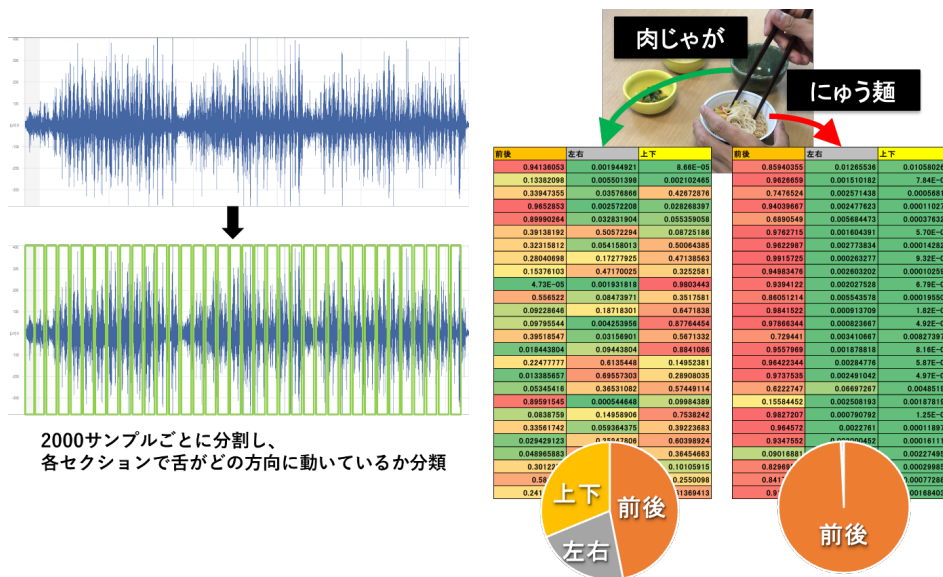


図5：高齢者の食事時の舌骨筋筋電による舌運動評価事例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takeshita Toshihiro, Yoshida Manabu, Takei Yusuke, Ouchi Atsushi, Hinoki Akinari, Uchida Hiroo, Kobayashi Takeshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Development of wearable multi-lead ECG measurement device using cubic flocked electrode	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 19308-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-24043-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto Yuki, Nguyen Thanh-Vinh, Takahashi Hidetoshi, Takei Yusuke, Okada Hironao, Ichiki Masaaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Highly sensitive low-frequency-detectable acoustic sensor using a piezoresistive cantilever for health monitoring applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-33568-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takeshita Toshihiro, Yoshida Manabu, Kobayashi Takeshi, Takei Yusuke	4. 巻 370
2. 論文標題 Relationship between motion artifacts and fiber length of a flocked electrode in electrocardiogram measurement	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 115259 ~ 115259
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sna.2024.115259	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 ZYMELKA Daniel, 竹下 俊弘, 竹井 裕介, 小林 健
2. 発表標題 Ultra-Thin MEMS Packaging Based on Auxetic Stretchable Structures for Applications in Wearable Electronics
3. 学会等名 The 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹井 裕介、竹下 俊弘、ZYMELKA Daniel、小林 健
2. 発表標題 Development of an Electrical-Stimulation-Induced Mechanomyogram Probe for Muscle Contraction Characteristics Evaluation
3. 学会等名 The 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹井 裕介、小林 健
2. 発表標題 ウェアラブル筋音センサによる筋肉の収縮性の評価
3. 学会等名 日本機械学会 シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2022 (SHD2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹井 裕介、竹下 俊弘、ZYMELKA Daniel、小林 健
2. 発表標題 筋音による筋疲労の評価
3. 学会等名 LIFE2022 第21回日本生活支援工学会大会 日本機械学会 福祉工学シンポジウム2022 第37回ライフサポート学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹井 裕介、竹下 俊弘、ZYMELKA Daniel、小林 健
2. 発表標題 極薄ピエゾ素子を用いた生体振動計測デバイスの開発
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹井 裕介
2. 発表標題 フレイル早期発見のためのパッチ型筋質センサの開発
3. 学会等名 令和3年度 第3回メドテックマッチング 若手研究者による革新的診断機器開発への挑戦：がん・免疫・リハビリ分野の応用
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹井裕介
2. 発表標題 元気に年を取るお手伝い ~パッチ型筋量センサと嚙下力評価システム
3. 学会等名 FIoTコンソーシアム令和4年度 第2回メディカル・ウェルネスデバイス分科会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nguyen Thanh-Vinh、岡本 有貴、竹下 俊弘、竹井 裕介、岡田 浩尚、KhoaNguyen、Hoang-Phuong Phan、一木 正聡
2. 発表標題 HIGHLY SENSITIVE LOW-FREQUENCY ACOUSTIC SENSOR USING PIEZORESISTIVECANTILEVER
3. 学会等名 The 35th IEEE International Conference on Micro ElectroMechanical Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 device, 竹下 俊弘、山下 崇博、竹井 裕介、ZYMELKA Daniel、小林 健
2. 発表標題 Development of lamination sealing method for ultra-thin PZT MEMS device
3. 学会等名 IEEE ISAF2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nguyen Thanh-Vinh、岡田 浩尚、竹井 裕介、武居 淳、一木 正聡
2. 発表標題 A BAND-AID TYPE SENSOR FOR WEARABLE PHYSIOLOGICAL MONITORING
3. 学会等名 The 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nguyen Thanh-Vinh、岡本 有貴、岡田 浩尚、武居淳、竹井 裕介、一木 正聡
2. 発表標題 SOFT LITHOGRAPHY-BASED FABRICATION METHOD FOR FLEXIBLE SUPEROMNIPHOBIC SURFACE
3. 学会等名 The 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹井 裕介、岡本 有貴
2. 発表標題 (筋肉の声に)耳をすませば
3. 学会等名 第32回 2023JIEP修善寺ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹井 裕介、竹下 俊弘、ZYMELKA Daniel、小林 健
2. 発表標題 極薄圧電薄膜を用いた電気刺激誘発筋音センサによる筋収縮性の評価
3. 学会等名 第40回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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	小林 健 (Kobayashi Takeshi) (20415681)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究チーム付 (82626)	
研究分担者	岡本 有貴 (Okamoto Yuki) (40880753)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員 (82626)	
研究分担者	竹下 俊弘 (Takeshita Toshihiro) (90784124)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	グエン タン・ヴィン (Nguyen Thanh Vinh) (20773427)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員 (82626)	

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
---------	---------