

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04751

研究課題名(和文) MEMS筋音センサを用いた筋肉の定量的評価

研究課題名(英文) Quantitative Evaluation of Muscle Using MEMS Mechanomyogram Sensor

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・主任研究員

研究者番号：00513011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、市販の音響センサを用いた筋音の計測を通じて、筋音と筋質の関係の検証を行った。また並行して、簡便に筋音を計測するためのフィルム型MEMS筋音センサの作製を行った。また、他者との筋音計測を行うにあたって、電気刺激による筋収縮が、電気刺激の電圧値や周波数等で規定でき、再現性良く筋収縮を誘発できることに着目した「アクティブ筋音計測」という筋質計測手法を開発した。この手法を用いることで、筋収縮速度や筋疲労など、様々な筋肉の特性が評価できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、今までの筋電計測法や、筋音計測法ではわからなかった、筋繊維の損傷や回復の状況、速筋や遅筋など筋肉の質に関する情報、筋肉の凝りや疲労などの定量的な評価が進む。また、筋音計測デバイスはMEMSによりウェアラブルなサイズにまで小型化され、センサを設置したまま、被験者に負担をかけずに筋活動状況を計測することが可能となり、スポーツ中の競技者の詳細な筋肉の情報をリアルタイムに取得することにより、新しい観点からの運動解析が促進され、オリンピックに向けた競技力の向上にも貢献できると考える。

研究成果の概要(英文)：In this study, we examined the relationship between mechanomyogram and muscle properties by measuring mechanomyogram using commercially available acoustic sensors. In parallel, we fabricated a film-type MEMS mechanomyogram sensor for easy measurement of mechanomyogram. In addition, we developed a method for measuring muscle properties called "active mechanomyogram sensing method", which focuses on the fact that muscle contraction caused by electrical stimulation can be specified by the voltage value and frequency of the electrical stimulation, and that muscle contraction can be induced reproducibly. By using this method, it became clear that various muscle characteristics such as muscle contraction speed and muscle fatigue can be evaluated.

研究分野：センシングシステム

キーワード：筋肉 筋音 MEMS 電気刺激

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

筋肉の活動量を定量的に評価することは、スポーツ運動解析やトレーニング、リハビリテーションに関連した医療分野などで重要である。例えば、スポーツ運動解析では、主にモーションキャプチャを用いて、体の各部位の移動量を計測し、その情報をもとに、運動により発生した力を推定している。しかし、この方法では、例えば、上腕全体での運動により発生した力は計算により推定が可能であるが、上腕を構成する筋肉群のうち、どの部位の筋肉がどのくらい収縮し力を発揮したかは、推定が困難であった。そのため、特定の筋肉の活動量を計測するデバイスが求められている。また、スポーツ競技者はトレーニングにおいて、筋肉に適切な負荷を与えて筋繊維を破損させ、超回復をさせることで筋力を向上させている。その際の負荷は、10回持ち上げることができる重量を、1回も持ち上げられなくなるまで繰り返す、といったように定性的な指標に基づいて決められており、トレーニング中に、特定の筋肉がどの程度、運動負荷により損傷しているかを知ることの効果的なトレーニングを行いたいという競技者の声は数多い。

医療分野、特にリハビリテーションでは、運動機能の回復の度合いを、筋力計測や、運動タスクをどの程度達成できるかなどで評価しているが、筋繊維自体の損傷の回復を直接評価する方法がなく、ある程度体を動かすまで評価できないという問題があった。

従来、筋活動を定量的に評価するために筋電図法が主に使われてきたが、皮膚と電極の接触抵抗が不安定なため長期的な計測は困難であった。また運動に伴う発汗が、皮膚と電極間のインピーダンスに影響を与えるため、激しい運動時の計測には利用できないという問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、新たな筋活動評価手法として「筋肉が収縮時に生じる圧力波」=「筋音」に着目し、筋肉の損傷・回復の定量的評価、筋肉の質の定量的評価、筋肉の凝り・疲労の定量的評価に取り組む。筋音とは、筋肉の収縮時に生じる圧力波で、皮膚表面に置いたセンサで計測を行う。筋音は音波というメカニカルな信号であるため、発汗の影響を受けにくく、センサと皮膚との接触による電氣的ノイズも発生しない。このため筋電の利用が困難な、激しい動きを伴う運動時の筋活動の評価方法として注目されている。

3. 研究の方法

本研究では、市販の音響センサを用いた筋音の計測を通じて、筋音と筋質の関係の検証を行い、

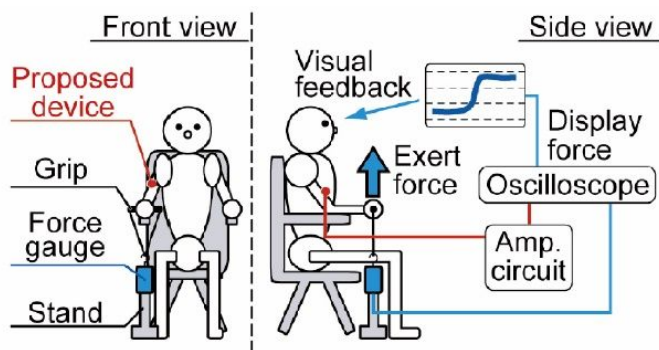


図1：上腕二頭筋の等尺性収縮時の筋音計測セットアップ

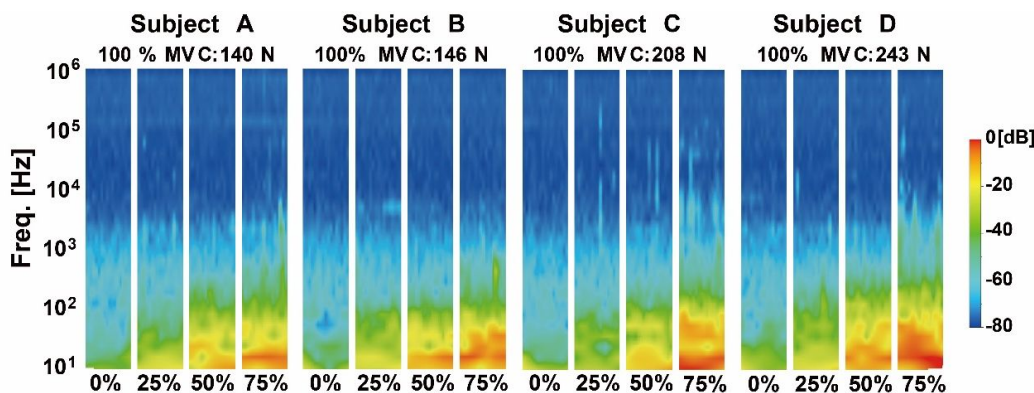


図2：4名の被験者の%MVC（最大筋発揮力）に応じた筋音の周波数解析結果

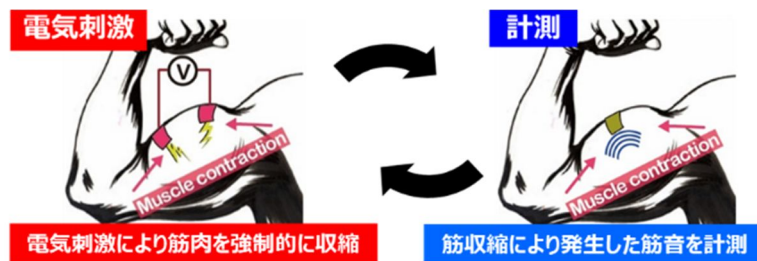


図 3：電気刺激誘発筋音による筋質評価

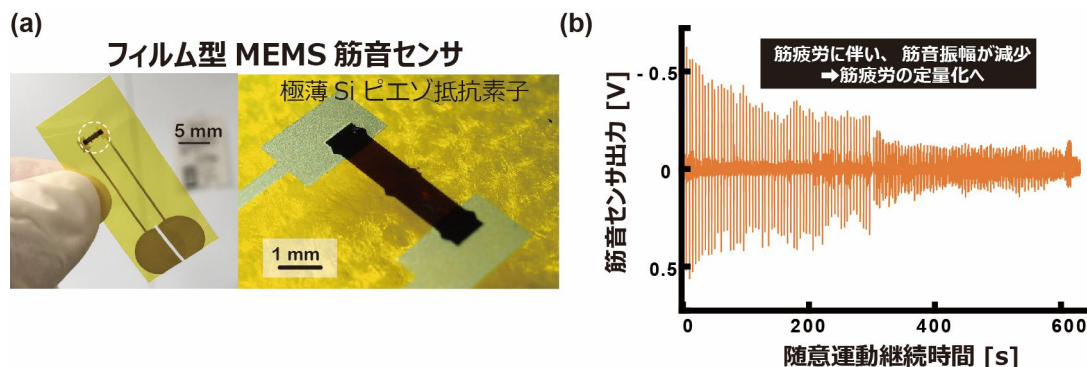


図 4：(a)フィルム型 MEMS 筋音センサ、(b)有酸素運動時の筋音計測結果。筋疲労に伴い筋音振幅が減少することを確認。

並行して、簡便に筋音を計測するためのフィルム型 MEMS 筋音センサの作製を行った。また、他者との筋音計測を行うにあたって、電気刺激による筋収縮が、電気刺激の電圧値や周波数等で規定でき、再現性良く筋収縮を誘発できることに着目した「アクティブ筋音計測」という筋質計測手法を開発した。また、アクティブ筋音計測のためのスマートウェアも併せて作製した。

4. 研究成果

初年度にあたる 2017 年度は、極薄シリコンピエゾ抵抗素子を用いた、MEMS 筋音センサの試作を行った。また、試作した MEMS 筋音センサを用いて、ヒトの上腕二頭筋の筋音の計測を行った(図 1、図 2)。複数人の筋音を比較するためには、筋肉に定量的な負荷を与えた時の筋音を比較する必要がある。そこで、本研究では、筋肉への刺激を定量的に規定できる筋肉電気刺激デバイスを用いて、筋肉電気刺激時の筋音を計測した(図 3)。この手法により、被験者間の筋音の比較が容易になり、筋肉の定量的な評価のための、土台整ったと考えている。本研究成果を通じて、知財 2 件出願、国内学会 3 件・国際学会 2 件の発表を行った。

2 年目となる 2018 年度は、筋肉電気刺激用のテキスタイル電極の研究開発に成功した。そこで、MEMS 筋音センサとテキスタイル電極を組み合わせることで、筋肉電気刺激中の筋音を計測し筋肉の定量的な評価を行うことが可能なウェアラブルデバイスの試作を行った(図 4(a))。本デバイスは、学会や展示会等で発表を行ったところ、新聞報道や多数の企業からの関心を集めた。

2019 年度は、電気刺激信号の条件によって筋収縮がどのように変化するののかについて、市販の筋肉電気刺激用信号生成装置を用いて実験を行った。また、使用する電気刺激用のゲル電極のサイズによって皮膚との接触インピーダンスが変わることから、最終的に作成するデバイスで使用する電極サイズを想定して、改めて電気刺激条件についての精査を行った。

最終年度となる 2020 年度は、局所的に筋肉の電気刺激を行い、筋収縮を励起させ、そこから発生する筋音を計測するための小型端末を試作した。そして試作した小型端末を用いて、被験者の運動によって生じる筋疲労の評価や、ストレッチ・ウォーミングアップによる筋肉の状態変化についての計測を行い、データの蓄積を行った(図 4(b))。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Takei Yusuke, Aoki Ryo, Kobayashi Takeshi, Takahata Tomoyuki, Shimoyama Isao	4. 巻 57
2. 論文標題 Mechanomyogram measurement by lead zirconate titanate-based acoustic sensor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 11UD09 ~ 11UD09
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.11UD09	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 Takei Yusuke, Goto Shintaro, Takamatsu Seiichi, Itoh Toshihiro, Kobayashi Takeshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Flexible Contact Pressure Sensor based on Ultrathin Piezoresistive Silicon Membrane Capable of Strain Compensation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2999 ~ 2999
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18494/SAM.2018.2033	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 Takei Yusuke, Nomura Ken-ichi, Horii Yoshinori, Zymelka Daniel, Ushijima Hirobumi, Kobayashi Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Fabrication of Simultaneously Implementing "Wired Face-Up and Face-Down Ultrathin Piezoresistive Si Chips" on a Film Substrate by Screen-Offset Printing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 563 ~ 563
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi10090563	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 Takei Yusuke, Takeshita Toshihiro, Yoshida Manabu, Kobayashi Takeshi	4. 巻 58
2. 論文標題 Evaluation method for muscles, measuring mechanomyogram induced by electrical muscle stimulation using lead zirconate titanate-based acoustic sensor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SLLD11 ~ SLLD11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab3e52	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18件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yusuke Takei, Takeshi Kobayashi
2. 発表標題 Mechanomyogram Measurement by PZT-Based AE Sensor
3. 学会等名 2018 ISAF-FMA-AMF-AMEC-PFM Joint Conference (IFAAP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Takei, Kenichi Nomura, Yoshinori Horii, Daniel Zymelka, Hirobumi Ushijima, Takeshi Kobayashi
2. 発表標題 Novel Method for Simultaneously Implementing “Wired Face-up and Face-down Chips” on a Film Substrate by Using Simple Screen-offset Printing
3. 学会等名 The 32nd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹井裕介, 吉田学, 竹下俊弘, 小林健
2. 発表標題 筋肉電気刺激・筋活動モニタリング可能なスマートウェア
3. 学会等名 第35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 2018年

1. 発表者名 竹井裕介, 吉田学, 竹下俊弘, 小林健
2. 発表標題 筋肉電気刺激・筋活動モニタリング可能なスマートウェア
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2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹井裕介
2. 発表標題 筋肉電気刺激と筋活動モニタリング可能なスマートウェア
3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会2018ワークショップ『AI & IoT時代のエレクトロニクス実装技術 ~エッジコンピューティングを支えるキー技術~』
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹井裕介
2. 発表標題 転写印刷を利用した極薄MEMSのフィルム実装
3. 学会等名 第3回有機/無機接合研究委員会公開シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹井裕介 吉田学 竹下俊弘 小林健
2. 発表標題 Wearable Muscle Training and Monitoring Device
3. 学会等名 The 31st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹井裕介 後藤慎太郎 高松誠一 伊藤寿浩 小林健
2. 発表標題 極薄シリコンピエゾ抵抗素子を用いたフレキシブルな圧力センサ
3. 学会等名 第34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 2017年

1. 発表者名 竹井裕介 高畑智之 下山勲
2. 発表標題 高周波筋音による筋肉の評価
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2017 (SHD2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹井裕介 吉田学 竹下俊弘 小林健
2. 発表標題 筋肉電気刺激&筋活動モニタリング可能なウェアラブルデバイス
3. 学会等名 第32回エレクトロニクス実装学会講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹井裕介
2. 発表標題 ウェアラブル筋肉電気刺激・筋活動モニタリングデバイス
3. 学会等名 コンバーティングテクノロジー総合展、次世代プリンテッドエレクトロニクス技術セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹井裕介 後藤慎太郎 高松誠一 伊藤寿浩 小林健
2. 発表標題 Flexible pressure sensor based on ultra-thin Si piezo-resistive membrane
3. 学会等名 International conference on BioSensors, BioElectronics, BioMedical Devices, BioMEMS/NEMS & Applications (Bio4Apps 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹井 裕介、野村 健一、堀井 美徳、ZYMELKA Daniel、牛島 洋史、小林 健
2. 発表標題 Novel Method for Simultaneously Implementing “Wired Face-up and Face-down Chips” on a Film Substrate by Using Simple Screen-offset Printing
3. 学会等名 IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹井 裕介、吉田 学、竹下 俊弘、小林 健
2. 発表標題 筋肉がしゃべる？ ～筋肉の音から見えるもの～
3. 学会等名 JASIS2018コンファレンスセミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹井 裕介
2. 発表標題 筋肉電気刺激と筋活動モニタリング可能なスマートウェア
3. 学会等名 2018 ワークショップ『AI & IoT時代のエレクトロニクス実装技術 ～エッジコンピューティングを支えるキー技術～』（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹井 裕介、野村 健一、堀井 美徳、ZYMELKA Daniel、牛島 洋史、小林 健
2. 発表標題 転写印刷を利用した極薄 MEMS のフィルム実装
3. 学会等名 第3回 有機/無機接合研究委員会 公開シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹井 裕介
2. 発表標題 アクティブ筋音センシングスマートウェアの開発
3. 学会等名 JIEP最先端実装技術シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹井 裕介
2. 発表標題 ACTIVE MUSCLE SENSING SYSTEM
3. 学会等名 VANJ CONFERENCE 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020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

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