

# 啓巻<sup>けいかん</sup>：微細な筋肉の震えを計測する軽量な圧電デバイス

長澤 達哉\* 藤吉 さと子\* 安藤 潤人\* 野間 春生\*

**概要.** 本研究では、変形に対して高感度なワイヤー状の圧電センサを用いて、筋の微細な震えを計測し、簡便に客観的な筋疲労指標を得られるデバイス「啓巻（けいかん）」を開発した。本デバイスは伸縮性テープとベルクロテープにより容易に腕部に装着でき、その動きを妨げない特長を持つ。本デバイスを用いて健康な成人男性 14 名を対象に、前腕に対して負荷をかけ、筋疲労した際に発生する震えを計測した。筋疲労に伴い 10 Hz 付近の震えが減少する傾向が観測できた。これにより、本デバイス「啓巻」が筋疲労の簡易評価に有効であることを示した。今後は、筋疲労を定量的に評価し、適切なリハビリやトレーニング強度の提示を目指す。

## 1 諸言

筋疲労の客観的な評価は、スポーツ医学やリハビリテーションの分野で重要な課題である。適切な筋疲労の評価により、トレーニングの効果を最大化し、過度な負荷による障害を防止することができる。筋肉は筋疲労時に 8~12 Hz で震えることが知られている[1][2][3]。この震えを計測・解析することで、筋疲労の状態を客観的に評価できる。しかし、従来はその計測・評価方法は専門的な機器や高度な知識を必要とし、一般の人が活用することは困難であった。

本研究の目的は、客観的な筋疲労指標を簡便に得られるようにすることである。これにより、専門家なしでどこでも効果的なリハビリや筋力トレーニングを実施できるようになる。

## 2 既存手法との比較

筋疲労が進行すると、力を維持するために調節を行い、その結果として 8~12 Hz の周波数帯域で当該する筋肉に“震え”が発生することが知られている[4]。この震えを検知・解析することで、筋疲労の状態を評価できる。この震えの検出手法として、筋電計測装置と加速度計が広く用いられている[5][6]。まず、筋電計測装置は筋肉の電気的活動を、皮膚に貼り付けた電極を用いて皮膚表面電位を計測する方法で、筋の動きを高い精度で計測できる。しかし、電極の貼り付け位置は十分に配慮する必要があり、また微弱な筋電信号はノイズに敏感であるため適切なフィルタリングが必要である。一方で加速度計による計測は、当該筋肉付近に加速度センサを固定して、その動きを定量的に測定できる。しかし、筋肉の微

細な震えを正確に検出するためにはセンサを肌に密着させることが必要であり、装着が困難であることと、装着に伴う動作の自由度を制限することが考えられる。

以上のように、既存の手法では装着や固定が困難であり、一般の人が日常的に利用することは難しい。本研究では、簡便に装着でき、動作を妨げることなく筋疲労を計測できるデバイスを提案する。

## 3 提案する筋疲労計測デバイス

本研究では、高感度に動きを計測可能な圧電ワイヤ（三井化学、PIEZORA®）を用いた筋肉の動きを計測するデバイス「啓巻」を提案する。この圧電ワイヤは、内部導体と外部導体の間にリボン状の圧電素子を巻き込み、全体を PTFE で被覆した構造を有する。これを 3cm の長さに切断し、片側に信号を引き出すシールドケーブルを半田付けした。この圧電ワイヤを幅 1.5cm の伸縮性テーピングで上下から挟み込み、両端にはベルクロテープ（幅 1.5cm）を接着し、腕への容易な装着と脱着を可能にした（図 1、図 2）。作成した「啓巻」を圧電信号の増幅器（AD01、三井化学）に接続し、専用の計測ソフトウェアを使用して、サンプリング周波数 1 kHz で動作を収録した。



図 1. 啓巻の装着例



図 2. 啓巻の拡大図

Copyright is held by the author(s). This paper is nonrefereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

\* 立命館大学 情報理工学部

## 4 検証実験

### 4.1 実験：筋力に対する負荷実験

啓巻を用いて、筋疲労の進行と筋の震えの関係を荷重試験で明らかにする。被験者は14名で、20代の男性で右利きであった。被験者は着席した状態で、利き腕で重りを複数回引き上げる運動を課した。重りの重量は被験者の筋力に合わせて6, 8, 10 kgから選んだ。反対の手は机について体を支えるよう指示した。この条件で全力の速度で20回胸の高さまで袋を上げ下げさせた。

計測した時間全体に周波数分析を行った際の被験者Aの結果を図3に示す。ここでは、3 Hz 周辺と、10 Hz 周辺にそれぞれピーク周波数を観察できた。3 Hz 周辺のピークは被験者の動きが、10 Hz 周辺のピークは筋の震えが要因として発生している。

この結果に基づいて、より周波数の変化を明らかにするために時系列に関して分析を行った。持ち上げ動作の最初の3回と最後の3回における、8~12 Hz の周波数帯域の強度の変化を比較した結果を図4に示す。この結果は、14人の被験者のうち11人は運動開始直後に対して終了前時に8~12 Hz の周波数強度が低下していること、つまり、筋疲労の極度な進行に伴い10 Hz 付近の筋肉の震えが減少することを示している。先行研究でも同様の結果が報告されており、「啓巻」で腕の震えが適切に取得可能であると言える。

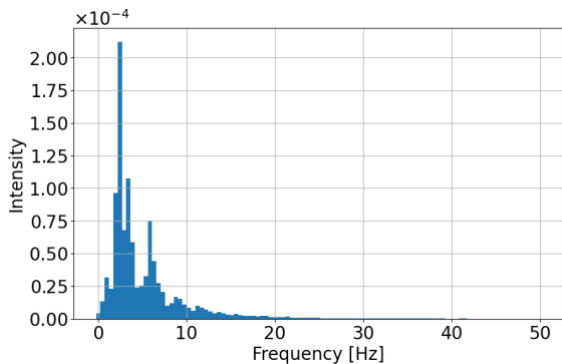


図3. 被験者Aの計測期間全体の連続スペクトル

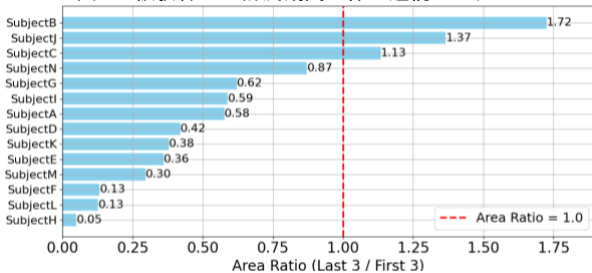


図4. 各被験者の動作中、筋の震えの8-12 Hzの周波数成分を最後の3回分を最初の3回分で除算したもの

### 4.2 応用システム：腕相撲での筋疲労の提示

啓巻は運動時の筋肉の疲労を計測できる。そこで、被験者2名の体格の近いペア5組に対して啓巻を装着させ腕相撲をさせ、勝負の経過に伴う筋疲労の状態を提示する応用システムを提案する。ここでは前腕の疲労に着目し、啓巻を肘頭より5 cmほど手側の位置に圧電ワイヤが当たるように装着した。

試合中のデータを前章と同様の方法で周波数解析し、8~12 Hzの周波数強度の時系列結果を図5に示す。ここでは両者ともに時間経緯とともに、8~12 Hzの成分が減少する傾向がみられた。さらに、勝敗との関係性として、敗北する被験者の8~12 Hzの周波数強度の減少量が時間とともに大きくなった。他の被験者での試行でも同様の傾向が観察された。これらの結果より、運動中の筋疲労の度合いを表示することができる。

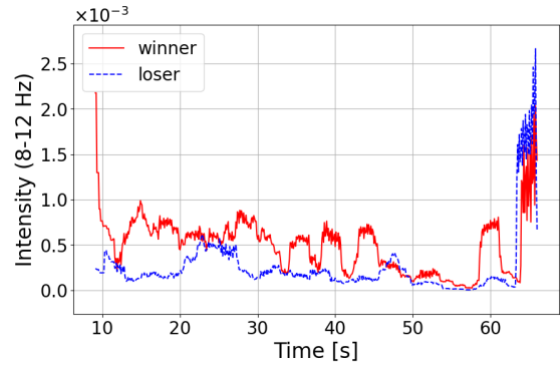


図5. 腕相撲中の8-12 Hzの周波数帯域における時間経過に伴う強度の変化

## 5 結言

本研究では、ワイヤー状の変形に対して高感度な圧電センサを用いたデバイス「啓巻」を開発し、腕の微細な震えを計測することで、筋疲労の簡便な評価を目指した。本研究により、開発した「啓巻」は、筋肉の震え、さらに、それに繋がる筋肉の疲労状態を検出できるデバイスであることが示された。本デバイスは、その取り扱いが容易であるため、従来の筋疲労評価手法の課題であった装着の困難さや専門的知識の必要性を克服し、一般の人が活用できる可能性を示した。また、腕相撲中の筋の震えを取得・解析することによって、運動中の筋疲労の度合いを計測することができた。

## 参考文献

- [1] B. Köster, M. Lauk, J. Timmer, T. Winter, B. Guschlbauer, F. Glocker, and C. Lücking, "Central mechanisms in human enhanced physiological tremor," *Neuroscience Letters*, vol. 241, no. 2, pp. 135–138, 1998.
- [2] T. Novak and K. M. Newell, "Physiological tremor (8–12 Hz component) in isometric force control," *Neuroscience Letters*, vol. 641, pp. 87–93, 2017.
- [3] M. Hallett, "Overview of Human Tremor Physiology," *Movement Disorders*, vol. 13, no. S3, pp. 33–48, 1998.
- [4] 在原雅人, 宮本靖久, 坂本和義, "生理的振戦と筋電図を用いた筋疲労評価の研究", *人間工学*, vol. 35, 特別号 2, pp. 398-399, 2000.
- [5] 仲山勉, 古川勉寛, 「筋疲労に対する他者認識の可能性について—膝伸展筋の等尺性収縮による検討—」, *日本感性工学会論文誌*, 第 20 巻, 第 2 号, pp. 187-193, 2021.
- [6] 田巻弘之, 荻田太, 竹倉宏明, 倉田博, 「持久性運動中の筋疲労に対する生理的振戦の効果」, *デザンツスポーツ科学*, 第 24 巻, pp. 38-43, 2003.