

## 2018年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名	東京工業大学 工学院機械系
職位または役職	准教授
氏名	土方 亘

### 1. 研究題目

筋収縮を用いた体内埋込み型摺動レス発電機の研究

### 2. 研究目的

先進各国で高齢社会を迎える時代になり、人工心臓やペースメーカなどの体内埋込みデバイスへの需要は年々増加している。これらデバイスの電力供給は、消費電力に応じて、皮膚貫通ケーブル(感染による死亡リスクが非常に高い)や、電池(数年ごとに交換手術を要する)により行われており、いずれも患者にとって身体的負担が大きい。また、超高齢社会においては、癌や心臓病、アルツハイマーなどの重大疾患の”予防医療”が必須である。そこで、体内に様々なセンサを埋込んで、生体情報を常時収集する、ヘルスマonitoringセンサなどの体内IoT技術の実現が期待されているが、電源確保がボトルネックとなり、実現を妨げている。

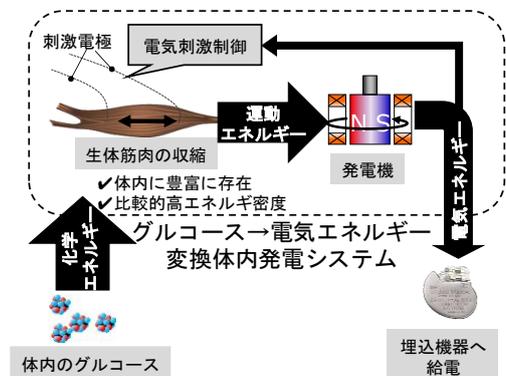


図1 提案する体内発電システム

そこで申請者は、図1の骨格筋を利用して、体内の閉じた系で発電するコンセプトを提案している。本提案で用いる体内発電機には、①メンテナンス不要で半永久的に動作できる機構、②小型かつ埋め込み易いように扁平な形状、③生体適合材料の適用など、一般の産業用発電機とは異なる挑戦的課題がある。これまでの研究では、可動部と固定部間に接触部を有しない二重平行ばね型振動式発電機構を提案した。本研究では、現在開発している発電機の小型化、高効率化を目指すとともに、発電に用いている骨格筋の収縮制御を高効率に行うための、制御系設計の開発を目的とする。これら課題を打破した先には、患者のQOLの飛躍的向上や、体内IoT技術の普及による医療費削減、健康寿命の向上など、社会的インパクトの大きい成果が期待できる。

3. 研究内容及び成果

本助成では、(i)発電機の小型・高効率化、(ii)骨格筋の高効率収縮制御に取り組んだ。

(i)では、本研究で提案する摺動レス発電機について、非接触クラッチ機構を面内方向から面外方向に設置可能なように磁気回路を工夫した。その結果、ペースメーカーと同等サイズの発電機構を実現した。この発電機構を図2のようにカエルの腓腹筋に接続し、実際に発電実験を実施したところ、刺激電力よりも発電電力が上回り、正味 1.2μW の発電を確認した。また、東北大学と共同で、ヤギの広背筋を用いた大型動物実験も実施しており、今後、実験プロトコルを確立して詳細な発電評価を行う。

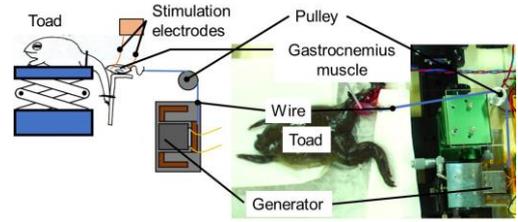


図2 カエル腓腹筋を用いた発電実験

(ii)の骨格筋の高効率収縮制御では、筋肉の生じる仕事量と刺激電力量の差(正味仕事量)が最大となる最適な刺激信号の生成を最終目的とし、その第一歩として外部電気刺激に対する骨格筋の収縮応答をモデル化した。具体的には、外部電気刺激を受けてから筋収縮に至るプロセスを下記の3段階に分割した。

- A) 外部刺激電圧に対して骨格筋に供給される電荷量を決定する“電気的動特性”
- B) 供給された電荷量に応じて細胞内でカルシウムイオン放出が行われ、ミオシンとアクチンによって内力を生じるまでのプロセスを決定する“生理学的特性”
- C) ミオシンとアクチンが生じる内力によって筋組織が収縮し、外部負荷に対して収縮力と変位を発生させる“機械的動特性”

図3がA~Cのモデルの概要であり、赤字の変数は実験的に同定する。このモデルに基づきシミュレーションした骨格筋収縮力の応答と、アフリカツメガエルの腓腹筋を用いて実験的に応答を計測した。比較結果の一部を図4に示す通り、強縮、不完全強縮、単縮ともによく一致した。このモデルを用い、筋出力仕事と刺激電力量の差が最大となるように、矩形波刺激信号の最適化を行った。今回は図5左に示すパラメータのうち、刺激継続時間と刺激電圧振幅を最適化した。図3のモデルを用い、ニュートンラプソン法によって信号の最適化を行ったところ、刺激継続時間 0.11 s、刺激電圧振幅 14.5 V が最適値であった。一方、実験的にこの二つのパラメータを変更し、筋出力仕事と刺激電力量の差を計測したところ、図5右に示すように刺激継続時間 0.10 s、刺激電圧振幅 12 V が最適であった。両者はおおむね一致し、提案モデルから最適刺激制御を行えることを実験的に示した。

※赤字は実験によって同定するパラメータ

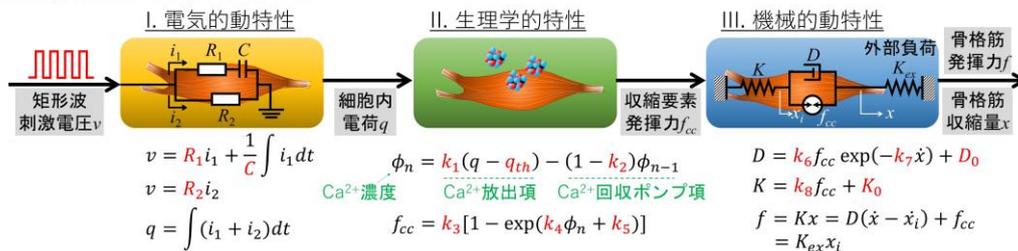


図3 外部刺激に対する骨格筋収縮のモデル

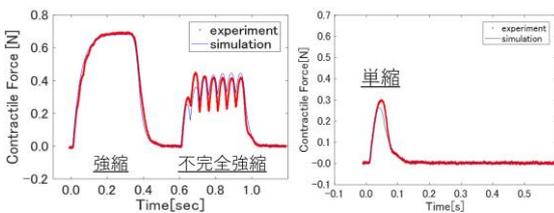


図4 収縮応答のシミュレーションと実験値の比較

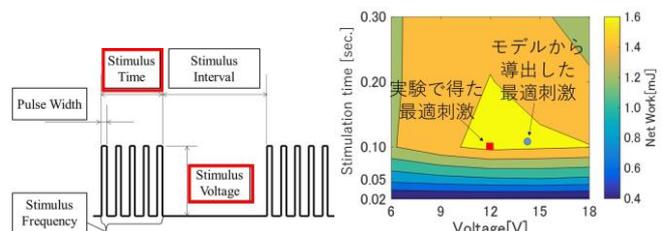


図5 刺激信号の最適化パラメータと最適化結果

#### 4. 今後の研究の見通し

本研究助成によって、摺動部を有さず正味発電量が正となる発電機を実現することができた。しかし、ペースメーカーに適用するには正味発電量を  $50\mu\text{W}$  程度まで向上する必要がある。今回、骨格筋の収縮をモデル化の中で、筋肉を短い時間で収縮・弛緩させることで、より高い発電量を実現できる可能性を見出した。そこでこれまでの研究の知見を活かし、より小型で発電量の大きい発電システム実現を目指す。具体的には下記3項目を実施することによって、より実現可能性が向上するものと考えている。

##### (i) 筋肉の収縮・弛緩運動に合わせた発電機的设计

筋肉の収縮と弛緩運動の連続的な動きから発電可能な発電機を提案する。設計にあたっては、発電機の運動部質量、ばね剛性、磁気回路の最適設計を行い、筋肉の収縮に合わせて発電素子が運動する機構を設計する。目標はペースメーカーの電池程度の  $5\text{mm}\times 40\text{mm}\times 20\text{mm}$  以下で正味発電量  $50\mu\text{W}$  以上とする。

##### (ii) 骨格筋の仕事率と刺激消費電力の差が最大となる最適刺激制御系の設計

これまでの研究で、外部刺激に対する筋収縮を電氣的動特性、生理学的特性、機械的動特性に切り分け、モデル化した。今後はこのモデルに筋疲労の影響を考慮することで、長い時間刺激したときに疲労を考慮した状態で、筋出力と刺激電力の差を最大化する最適化問題に帰着し、リアルタイムで最適刺激信号を生成する制御系を構築する。

##### (iii) 大型動物を用いた発電実験

上記二項目で開発した発電機を、ヤギなどの大型動物に接続し、急性の発電実験を行い、目標正味発電量  $50\mu\text{W}$  の到達度確認、生体組織への設置の確認を行う。すでに基礎実験には着手しており、実験設備等は整っている。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

##### 【学術論文】

1. Takumi Mochida, Wataru Hijikata. Development of an energy harvesting device with a contactless plucking mechanism driven by a skeletal muscle, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, The Japan Society of Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 3, p. JAMDSM0068, Sep. 2019.

##### 【国際会議発表論文】

1. Takumi Mochida, Wataru Hijikata. Implantable contactless generator driven by the electrically-stimulated skeletal muscle, *Proceedings of the 8th Meeting of the International Federation for Artificial Organs*, Nov. 2019.
2. Takumi Mochida, Wataru Hijikata. Design optimization of contactless generator for implantable energy harvesting system utilizing electrically-stimulated muscle, *Proceedings of IEEE EMBC 2019*, 358-363, Jul. 2019.
3. Takumi Mochida, Wataru Hijikata, Tadahiko Shinshi. Development of an in-vivo generator with a contactless plucking mechanism driven by muscle contraction, *Proceedings of The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering*, pp. 212-213, Nov. 2018.

##### 【国内会議発表論文】

1. 杉本渉, 土方亘. 筋電気刺激による骨格筋収縮モデルの構築と体内発電システムにおける高効率筋収縮制御への応用, *日本機械学会 第31回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集*, May. 2019.