

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	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

ペースメーカーや神経刺激装置など、体内で電池駆動する消費電力数十 μW の埋込機器が増加しているが、例えば神経刺激装置の場合、1.5年から4年程度で電池交換外科手術が必須であり、患者の精神的、肉体的な負担となっている。また、先進各国では人口の高齢化が進行しつつあり、従来の延命治療を目的とした医療から、生涯現役を目指した健康寿命向上のための医療へ、技術革新が求められている。そのためには、癌や心臓病、アルツハイマーなどの重大疾患を事前に予測して治療する“未病検知技術”もしくは“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、体内IoT技術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。

これら給電に関する課題を解決するために、申請者は図1に示す、骨格筋の収縮力を利用して体内の閉じた系で電気エネルギーを発電・蓄電するコンセプトを提案している。このシステムは、電気刺激によって必要に応じて筋収縮を制御可能な点の特徴としている。本提案で用いる体内発電機には、メンテナンス不要な機構、小型かつ骨格筋の特性に合わせた発電機設計、高効率な骨格筋の収縮制御など、一般の産業用発電機とは異なる挑戦的課題がある。

本研究では、外部電気刺激特有の筋収縮を利用した共振型体内発電システムの設計・試作、疲労を考慮した最適刺激制御の開発、および大型動物を用いた発電評価実験を実施する。提案システム実現の先には、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。

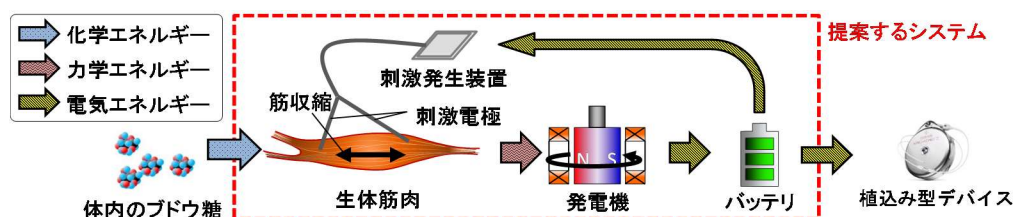


図1 提案する骨格筋収縮を利用した体内発電システム

3. 研究内容及び成果

本研究では骨格筋に矩形波状の外部電気刺激を与え、意図的に収縮を発生させる。その際、刺激用矩形波電圧の振幅や周波数に応じて、刺激に要する消費電力と、筋肉が外部に行う仕事率が変化する。すなわち、外部刺激を用いた体内発電を実現するためには、なるべく低消費電力でなるべく大きな筋仕事率を引き出す必要がある。今回は図2に示すように、発電機が生じた電力と刺激に要した消費電力の差、すなわち正味電力が最大となるように、システム全体の最適設計を目指した。

今年度の助成でアフリカツメガエルを購入し、図3に示すとおり、その腓腹筋(ふくらはぎの筋肉)をばね、ロードセル、レーザ変位計で構成される実験系に接続した。この実験系を用い、電気刺激筋による筋収縮が外部になす仕事率を計測した。その結果の一例を図4に示すが、3g程度の筋肉に対して、8.5mW程度の仕事率を確認した。また、これまでに開発した骨格筋収縮ダイナミクスモデルを用い、実験による筋収縮と、計算による筋収縮を比較し、十分一致することを確認した。この収縮ダイナミクスモデルを利用し、電気刺激を入力したときに、正味電力が最大となる発電機の設計を行った。発電機サイズはペースメーカーの電池程度の5mm×40mm×20mm以下に収まるようにした。この発電機は振動子が平行ばねで支持された振動型とした。振動子には電荷を半永久的に保持可能なエレクトレットを設置し、固定子側には電極を設置することで、静電誘導によって発電を行うことを想定した。

図5(a)はエレクトレット厚さを変えた時の発電量の計算値であり、エレクトレットを薄く製作した方が発電量の向上が見込めることを確認した。ただし、厚さ10 μ m以下となると、電荷保持性能が低下することが知られているので、今回はエレクトレット厚さを10 μ mとする。図5(b)は扇形エレクトレットの角度を変化させたときの発電量試算値である。扇形のエレクトレット形状を想定しているが、その角度が1度を下回ったところから発電量が大きく向上することを確認した。今回の設計では製作のしやすさも考慮して、1度とし、この発電素子を数層積層することとした。以上より、カエルの腓腹筋を電気刺激したときの挙動を基に、振動型発電機の設計を実施した。設計上はペースメーカーの電池程度の大きさで数十 μ Wの正味発電が見込めており、今後実験的に性能評価を行う予定である。

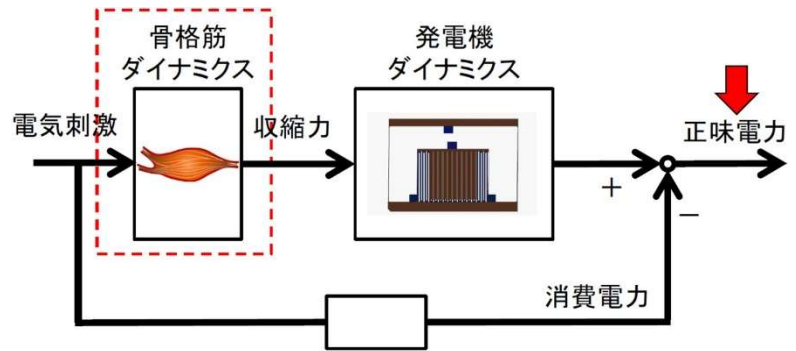


図2 提案する発電システムのエネルギーフロー

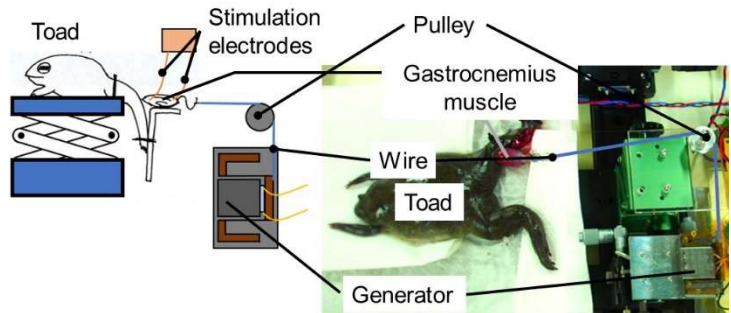


図3 筋収縮仕事率測定実験系

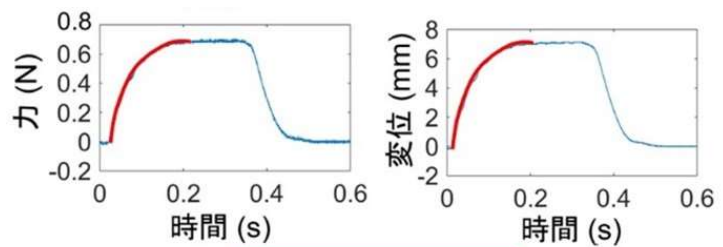


図4 筋収縮仕事率測定結果

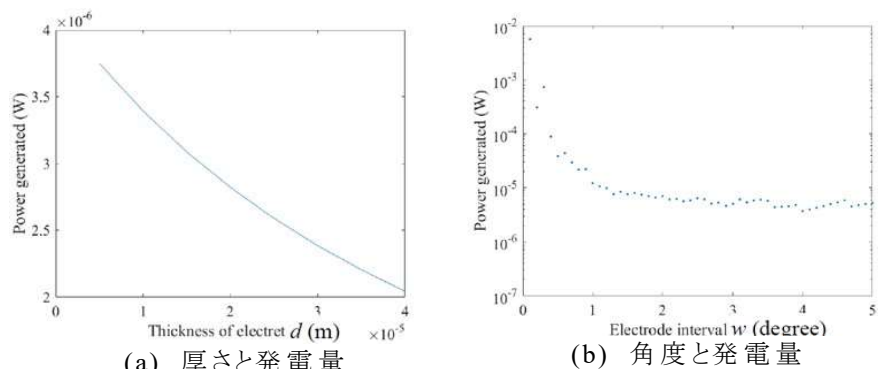


図5 エレクトレット寸法と発電量シミュレーション結果

4. 今後の研究の見通し

助成いただいた3年間で、原理検証用の大サイズの発電機設計と評価、電気刺激に対する骨格筋の収縮ダイナミクスのモデル化、正味発電量に基づき埋込を考慮した小型発電機の設計を実施することができた。今後実施すべき項目として、下記が挙げられる。

- ・疲労を考慮した筋収縮ダイナミクスモデルの導出

筋肉が疲労していない状態における、外部電気刺激による収縮特性はシミュレーション可能になった。一方、骨格筋の一部を体内発電システムの一部として用いる場合、適切なインターバルを設けて恒常的に刺激を与える必要がある。その際に筋疲労が蓄積されると発電量の低下につながる。そこで、筋収縮ダイナミクスモデルに筋疲労の影響も考慮し、筋疲労が蓄積されない間隔で最大の発電量を得られる最適な刺激信号を導出する必要がある。

- ・発電機の試作と耐久性を含めた性能評価

本研究ではペースメーカーの電池程度の5mm×40mm×20mm以下の小型発電機を設計した。今後はこれを試作し、カエル等の小型動物の筋肉を利用して発電量を評価する、また、長期駆動に伴う耐久性の評価も必要であると考えられる。

- ・動物体内における発電量評価

最終的にウシやブタとの大型動物の体内に発電機、および刺激信号生成回路を埋め込み、正味発電量の評価を実施する。本実験では50 μ W以上の正味発電量を得られることを最終目標とする。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. Tomoki Tahara, Takumi Mochida, Tatsuki Fujiwara, Katsuhiro Ohuchi, Wataru Hijikata, Haruna Seki, Hirokuni Arai. Design of energy harvester for development a self-generating implantable medical device by energy of a heartbeat, The 8th Meeting of the International Federation for Artificial Organs, 2019.
2. Takumi Mochida, Wataru Hijikata. Implantable contactless generator driven by the electrically-stimulated skeletal muscle, The 8th Meeting of the International Federation for Artificial Organs, 2019.
3. Genta Sahara, Akihiro Yamada, Yusuke Inoue, Yasuyuki Shiraishi, Wataru Hijikata, Aoi Fukaya, Tomoyuki Yambe. Development of muscle connection parts for implantable power generation system, 生体医工学シンポジウム2020, 2P-37, 2020.