

2017年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名 (大学、大学院、研究所名)	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うえ、生活の質(QOL)低下の原因となっている。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、ヘルスマニタリングセンサなどの体内 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。

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に示すように、電気刺激で発生させた骨格筋の収縮力を利用して、電気エネルギーを得るシステムを開発している。これまでの研究では、筋肉の収縮力でフライホイール(はずみ車)を回転させる回転式の体内発電機を設計・試作し、ペースメカの駆動に十分な $100\mu\text{W}$ オーダーの発電量を得た。しかし、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。そこで本研究では、摺動部レス・小型・扁平な高効率体内埋込み用発電機の実現を目的とする。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。

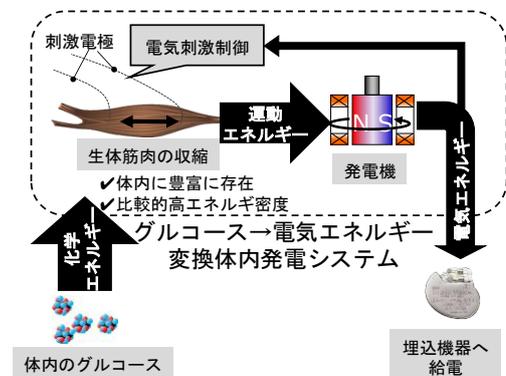


図1 提案する体内発電システム

3. 研究内容及び成果

本研究では、図2に示す摺動レス発電機を提案し、設計・試作した。本発電機は二重の平行ばねを備えており、外側・内側の平行ばね間に反発力を生じる永久磁石を配置した非接触クラッチ機構を配している。外側平行ばねを筋収縮で牽引することで、非接触で内側平行ばねを振動させることができる。また、外側平行ばねの復元力によって、筋弛緩時にも非接触クラッチが作動し、振動を生じさせる。内側平行ばねには発電用永久磁石を設置し、対向するステータコイル間との電磁誘導によって、振動エネルギーを電気に変換する。本発電機は摺動部を排除しているため、高耐久性が期待できる。

ただし、外側・内側平行ばねの剛性を適切に設計しないと大きな発電量が得られず、場合によっては筋収縮・弛緩時にクラッチ機構が動作しない。そこで、振動子のダイナミクスや永久磁石間の反発力をモデル化し、外側・内側平行ばねの剛性 k_1, k_2 を設計変数とした最適化を実施した。図3にその結果を示す。黒塗りはプラッキング機構が動作しない領域である。この結果より、発電量が最大となる外側平行ばね剛性 $k_1=600\text{N/m}$ 、内側平行ばね剛性 $k_2=205\text{N/m}$ を設計値として採用した。

この結果に基づき設計・試作した発電機の概要を図4に、試作機の写真を図5に示す。本発電機は小型化のため、平行ばねを上下に配置した構造となっており、骨格筋は上側の平行ばねを牽引する。また、振動子の固有振動数を高くするため、質量の小さいコイル側が振動するムービングコイル型を採用した。

また、埋込を考慮して、機構部の厚さを7.7mmに抑えた扁平構造とした。全体の体積はペースメーカーの半分程度を実現した。

次に試作発電機の外側平行ばねを、ワイヤを介してステッピングモータに接続し、発電性能を評価した。ステッピングモータは予備実験で得たカエル骨格筋の収縮力を模擬するように制御し、最大1.5Nを平行ばねに与えた。実験によって得られた上側コイルと下側コイルの発電電力を図6に示す。発電機の電力は、上側コイルが21.8 μW 、下側コイルが32.8 μW 、合計で54.6 μW となり、目標としていた50 μW を達成した。

最後に、試作発電機をカエル腓腹筋に接続し、筋肉を電気刺激して発電を行った。使用した筋肉の質量と自然長は3.8g、31mmであった。刺激を与えたところ、筋収縮・弛緩時両方の場合で発電機は駆動され、3秒間の平均で56.2 μW を達成した。

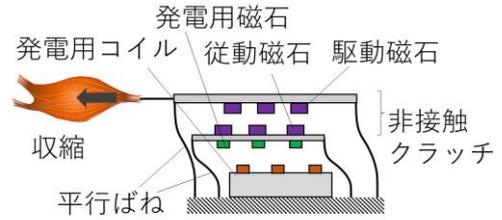


図2 摺動レス発電機の概略図

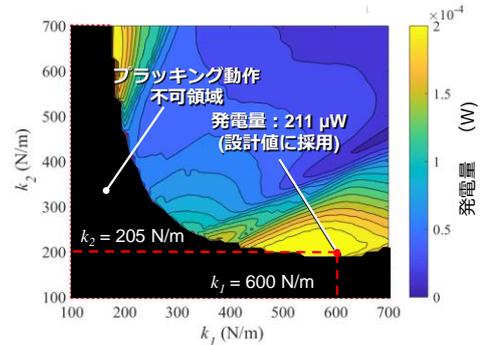


図3 平行ばね剛性と発電量の関係

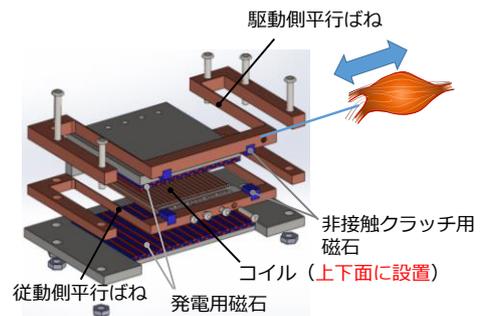


図4 発電機の分解図

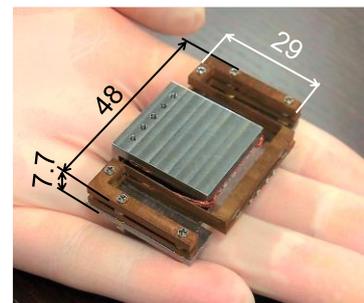


図5 試作発電機

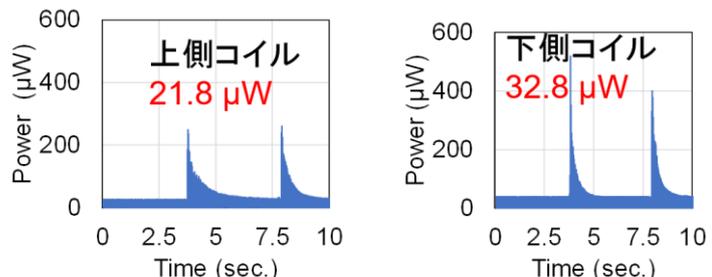


図6 発電実験結果

4. 今後の研究の見通し

本助成による研究を通して、摺動部のない骨格筋収縮用発電機構の開発と原理検証実験は遂行できた。今後、体内に埋め込んで運用する場合は生体適合材料によるパッケージングが必要である。例えば、チタン合金で発電機構をカバーする方法が考えられる。また、今回の実験では筋肉と発電機をワイヤで接続したが、ワイヤを筋肉に縫合する場合、縫合部からの壊死が懸念される。そこで、現在、縫合を用いずに発電機と筋肉を接続する方法を検討しており、今後の研究で確認する予定である。

骨格筋の電気刺激に関しては、なるべく小さい刺激電力で、なるべく大きな骨格筋出力を得た方が、高効率な発電が可能である。そこで今後の研究では第一歩として、外部からの矩形波電気刺激に対する筋細胞内のカルシウムイオン放出の関係、筋細胞内のカルシウムイオン濃度と骨格筋の発揮張力、及び骨格筋の電氣的動特性と機械的動特性をモデル化する。さらに、動物の筋肉を電気刺激し、その時の収縮力を測定することで、各モデルパラメータを同定する。その後、構築した収縮モデルを用い、骨格筋出力と刺激電力量の差が最大となるような矩形波刺激信号を算出する最適化アルゴリズムを構築し、発電システムの高効率化を目指す予定である。本項目の研究は、骨格筋をアクチュエータとして捉え、最適な制御信号を得るコントローラ設計ともとらえることができる。

発電機設計に関しては、今回は電磁誘導に焦点を当てて設計を実施した。今後は、より小型・薄型化するために、今回提案する摺動レス発電機構の形状をベースに、半永久的に電荷を保持するエレクトレットを利用した静電誘導型の発電機も検討する予定である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. Takumi Mochida, Wataru Hijikata, Tadahiko Shinshi. Development of an in-vivo generator with a contactless plucking mechanism driven by muscle contraction, The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering, Proceedings of The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering, pp. 212-213, Nov. 2018.
2. Takumi Mochida, Wataru Hijikata. Development of a contactless energy harvesting system driven by contraction of skeletal muscle for implantable medical devices, 40th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Proceedings of IEEE EMBC 2018, pp. 4648-4652, Jul. 2018.
3. 持田 匠, 土方 亘. 電気刺激による骨格筋収縮を用いた体内エネルギーハーベスティング用非接触発電機的设计, LIFE2018, LIFE2018 講演論文集, pp. 439-442, Sep. 2018.
4. Takumi Mochida, Wataru Hijikata, Tadahiko Shinshi. Evaluation of a frictionless vibration generator for an in-vivo energy harvester, The 2nd International Symposium on Biomedical Engineering, Abstract of The 2nd International Symposium on Biomedical Engineering, pp. 268-269, Nov. 2017.