

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	電気刺激による骨格筋収縮を利用した体内エネルギーハーベスティング
Title(English)	Implantable energy harvesting system utilizing electrically-stimulated muscle contraction
著者(和文)	持田匠
Author(English)	Mochida Takumi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12354号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:土方 亘,岡田 昌史,進士 忠彦,中野 寛,石田 忠
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12354号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

# 論文要約

持田 匠

先進国では高齢化が進んでおり、ペースメーカーなどの植込型医療機器や、患者のバイタルサインを常時計測するヘルスマonitoringデバイスの需要が増加している。植込型機器は内蔵のバッテリーによって駆動しており、電池残量の低下に伴い数年に1度の交換外科手術を要するため、患者の経済的、身体的負担が大きい。ヘルスマonitoringデバイスも体内で使用するものが研究開発されているが、電力供給源が不可欠である。この解決策の一つとして体内に分布するエネルギーを電気エネルギーに変換する体内エネルギーハーベスティングが挙げられる。そこで本論文では骨格筋の収縮力による力学的エネルギーを利用した発電システムを提案している。

提案するシステムを実現するため、まず1 Hz程度の骨格筋の収縮力を数十 Hzの振動に変換する周波数アップコンバート式電磁誘導型発電機を開発した。提案する発電機は骨格筋に接続した駆動側平行ばねと、振動子を搭載した従動側平行ばねで構成される。平行ばね間には同極同士を向かい合わせた永久磁石を配置しており、骨格筋の収縮によって駆動側平行ばねが変位すると、磁石同士の斥力を介して非接触で従動側平行ばねに力が伝達される。ばねの復元力が斥力を上回ると振動子が自由振動し、電磁誘導によって発電する。また骨格筋が弛緩する際、駆動側平行ばねは骨格筋収縮によって蓄えられたエネルギーによって初期位置に戻り、その際も同様に振動子が自由振動するため、1度の骨格筋収縮で2度発電できる機構となっている。この機構について静的な力学的関係から平行ばねの条件を求めてばねの剛性を設計し、試作した発電機を用いた原理検証試験によって提案する発電機の駆動を確認した。

次に植込型医療機器への適用を目指し、発電電力を最大化するように発電機を設計した。発電機の設計では、駆動側平行ばねの剛性、従動側平行ばねの剛性を設計変数とし、筋収縮力と平行ばねのダイナミクスに基づいた数値シミュレーションによって電力を試算した。各平行ばね剛性を総当たりで変えていき発電電力を求めたところ、駆動側を600 N/m、従動側を205 N/mとしたとき、最大211  $\mu\text{W}$ の発電電力が試算され、植込型医療機器の駆動が可能であることを確認した。以上の設計に基づいて発電機を試作し、収縮力をモータで再現した実験では、最大35.8  $\mu\text{W}$ の発電電力を実現し、ペースメーカーの消費電力である10  $\mu\text{W}$ を上回った。さらにカエル骨格筋3.5 gを電気刺激することで発電機を駆動し、筋収縮時、および筋弛緩時に発電可能であることも確認した。ただし、発電電力から刺激電力を差し引いた正味発電電力は1.2  $\mu\text{W}$ であった。提案する試作発電機は摩耗部がなく、かつ正の正味発電電力が得られることを実証したが、目標とする正味発電電力10  $\mu\text{W}$ には満たなかった。

発電機の正味発電電力を向上させるため、骨格筋の収縮形態に着目し、電気刺激の周波数に同期して振動する不完全強縮を利用した共振式静電誘導型発電機を新たに考案した。筋収縮および発電機のダイナミクスや静電誘導現象をモデル化し、発電機の正味電力最適化設計を行った。電気刺激のパルス幅、電圧、共振周波数、振動子質量、負荷抵抗を設計変数とし

て最小二乗法を用いて設計した。カエル骨格筋を使用し、試作した発電機の正味電力を評価した結果、植込型医療機器への給電が可能であることを示した。

さらなる正味電力の向上と植込型医療機器への実装を目指し、発電素子の改良と小型化を行った。素子に使用しているエレクトレットは表面に半永久的な電荷を保持しており、厚さや作成条件によって保持できるエレクトレット表面の電荷量、及び電位（表面電位）が変化する。そこでエレクトレット厚さ、作成条件を変えて表面電位を計測したところ、試作機で使用した素子よりも大きな表面電位が得られることを確認した。また、植込型医療機器に搭載できるよう MEMS 技術を利用して発電機構を小型化し、所望の固有振動数が得られる作成手法を確立した。これらの知見を合わせて小型、高出力な発電機を試作し発電電力を評価したところ、骨格筋の電気刺激による消費電力を考慮してもペースメーカーへの実装が可能であることを示した。

以上より、本研究では骨格筋を用いた体内発電システムの設計方法論を提案し、植込型医療機器へ十分な電力供給が可能な発電機を開発した。また本研究を通して発電機の体積当たりの発電電力を大幅に向上させており、提案システムの実現可能性を示した。