

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),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第12354号,<br>授与年月日:2023年3月26日,<br>学位の種別:課程博士,<br>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),<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第12354号,<br>Conferred date:2023/3/26,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,, |
| 学位種別(和文)          | 博士論文   |
| Category(English) | Doctoral Thesis  |
| 種別(和文)            | 審査の要旨  |
| Type(English)     | Exam Summary   |

(博士課程)

## 論文審査の要旨及び審査員

| 報告番号        | 甲第  | 号     | 学位申請者氏名 | 持田 匠 |     |
|-------------|-----|-------|---------|------|-----|
| 論文審査<br>審査員 |     | 氏名    | 職名      | 氏名   | 職名  |
|             | 主査  | 土方 亘  | 准教授     | 石田 忠 | 准教授 |
|             | 審査員 | 岡田 昌史 | 教授      |      |     |
|             |     | 進士 忠彦 | 教授      |      |     |
| 中野 寛        |     | 准教授   |         |      |     |

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「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」と題し、全6章で構成されている。

第1章「緒論」では、本研究の背景と目的を論じている。高齢化に伴い植込み型医療機器の需要が増加しているが、多くは化学電池で動作しているため、数年毎に行われる電池交換外科手術が課題であると述べている。その解決方法として体内エネルギーハーベスティングを挙げており、特に出力密度に優れた骨格筋の利用が有望であると述べている。そこで本研究では、骨格筋に電気刺激を与え、その際に生じる収縮力を利用して発電する体内エネルギーハーベスティングの実現を目的としている。

第2章「非接触周波数アップコンバート式電磁誘導型発電機の提案」では、駆動側と従動側に設けた2組の平行ばねと永久磁石で構成された、非接触周波数アップコンバート機構を備えた電磁誘導型発電機を提案している。本発電機は、電気刺激で骨格筋を強縮させたとき、電気刺激を止めて筋肉を弛緩させたときに、振動子を数十 Hz で自由振動させることで、電磁誘導によって発電する。非接触周波数アップコンバート機構の静的な力のつり合い、および平行ばねの力学的エネルギーと永久磁石による磁場のポテンシャルエネルギーの関係を導出し、筋収縮と筋弛緩時に非接触周波数アップコンバート機構が動作するばね剛性を求め、発電機の設計に反映している。試作発電機を非生体環境で評価した結果、 $23.0 \mu\text{W}$  の発電電力を得たが、刺激消費電力よりも小さいことが懸念され、発電電力の向上を課題として挙げている。

第3章「非接触周波数アップコンバート式電磁誘導型発電機の電力最大化」では、発電機構の動特性、および発電回路の電気的特性を導出することで、筋収縮力を入力、発電電力を出力とするモデルを構築している。さらに、このモデルを用いて、刺激電力  $21.8 \mu\text{W}$  を与えたときの筋収縮力  $1.5 \text{ N}$  を入力とした条件で発電電力を最大化するばね剛性と磁気回路を設計している。この設計に基づき試作した発電機を非生体環境で評価した結果、最大  $35.8 \mu\text{W}$  の電力を得ている。カエルの腓腹筋を用いた発電実験では、刺激電力が  $16.9 \mu\text{W}$ 、発電電力が  $18.1 \mu\text{W}$  であり、 $1.2 \mu\text{W}$  の正味電力を得たが、植込み型医療機器の消費電力数十  $\mu\text{W}$  よりも小さく、正味電力を向上するためには、発電電力の向上と刺激電力の低減を両方考慮した発電システムの設計が必要であるとの結論を得ている。

第4章「不完全強縮を利用した共振式静電誘導型発電機の提案」では、エレクトレットの両端をばねで支持する共振式静電誘導型発電機を提案している。本発電機は、骨格筋の不完全強縮で動作する。不完全強縮は刺激周波数に同期して筋肉が振動的に収縮する現象であり、 $15 \text{ Hz}$  以下の刺激周波数で発生し、かつ強縮と比較して刺激に要する電力が小さいことを明らかにしている。この不完全強縮が発生する条件下で正味電力を最大化するために、電気刺激に対する骨格筋の収縮を表現した筋収縮モデルと、静電誘導型発電機の動的モデルを組み合わせて、刺激信号と発電機構の最適設計を行っている。この設計に基づき発電機を試作し、カエルの腓腹筋を用いて評価した結果、非接触周波数アップコンバート式電磁誘導型発電機と比較して、約10倍の  $13.1 \mu\text{W}$  の正味電力を得ている。しかし、発電機の体積は  $59.4 \times 10^3 \text{ mm}^3$  であり、ペースメーカーの電池から定めた目標体積  $12.0 \times 10^3 \text{ mm}^3$  よりも大きいことを課題として挙げている。

第5章「不完全強縮を利用した発電機の小型化と高性能化」では、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて発電機を小型化するために、深掘り反応性エッチングの加工精度を考慮して共振式静電誘導型発電機を設計している。また、エレクトレットとグリッド電極間の距離、および放電時間を実験的に変えることで、高い表面電位を有するエレクトレットの製作条件を明らかにしている。カエルの腓腹筋を用いて試作発電機の発電量を評価した結果、正味電力  $22.1 \mu\text{W}$  を確認している。この発電機の体積は  $2.99 \times 10^3 \text{ mm}^3$  であり、目標体積  $12.0 \times 10^3 \text{ mm}^3$  以下を実現している。さらに、体積電力密度は第4章の試作機と比較して33倍の  $7.39 \times 10^3 \mu\text{W}/\text{mm}^3$  であり、小型化と高性能化を実現している。

第6章「結論」では、各章で得られた結論を総括し、今後の課題を述べている。

以上を要するに、本論文は、電気刺激による骨格筋の収縮を利用した体内エネルギーハーベスティングを提案し、骨格筋の収縮特性を考慮した発電システムの設計手法を提案するとともに、実験によりその有効性を実証したもので、工学的および工業的に貢献するところが大きい。よって、博士 (工学) の学位論文として十分な価値があると認められる。

注意: 「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。