

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18830

研究課題名（和文）筋収縮を利用した生体内グルコースをエネルギー源とする埋込型発電システム

研究課題名（英文）Implantable power generation system driven by muscle contraction

研究代表者

土方 亘（HIJIKATA, Wataru）

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：30618947

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：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医療機器の電源として、電気刺激による骨格筋の収縮力を利用した体内発電システムを開発した。特に本研究では、1.筋収縮に適した発電機の提案と設計・評価、2.少ない刺激電力で高出力・低筋疲労となる電気刺激制御系の確立、3.動物実験による有効性検証を目的とした。発電機の設計と評価では、低周波駆動の筋肉に対して周波数アップコンバータやエレクトレットを用いた発電機構を提案した。また、筋収縮モデルの構築によって、最適な刺激信号を求めるコントローラを設計した。さらに、カエルの子腹筋を用いて、発電電力が刺激電力を上回ることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ペースメーカーなど、体内で電池駆動する消費電力数十 μ W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。予防医療の点から体内埋込ヘルスマニタリングセンサの実現も望まれるが、体内での電源確保が課題である。その解決策として、本研究では人間の体内に豊富に存在する骨格筋を使って、体内で電気エネルギーを得るシステムを提案・開発した。本システムが実現した暁には、上記医療機器を装着した患者のQOL向上や、体内ヘルスマニタリング技術実現による健康寿命延伸など、医療・福祉分野での大きな貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We have developed an implantable power generation system that utilizes the contractile force of skeletal muscle induced by electrical stimulation as a power source for battery-driven medical devices such as pacemakers and neurostimulators. In particular, this study aims to: 1) propose, design, and evaluate a generator suitable for muscle contraction; 2) establish an electrical stimulation control system that provides high output and low muscle fatigue with low stimulation power; and 3) verify the effectiveness of the system through animal experiments. In the design and evaluation of the generator, we proposed a power generation mechanism using a frequency up-converter and an electret for low-frequency-driven muscles. We also designed a controller that finds the optimal stimulus signal by constructing a muscle contraction model. Furthermore, we demonstrated that the generated power exceeds the stimulated power using the gastrocnemius muscle of a frog.

研究分野：機械工学

キーワード：体内発電システム 骨格筋 電気刺激 エレクトレット 周波数アップコンバータ 電磁誘導 静電誘導 骨格筋収縮モデル

1. 研究開始当初の背景

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。予防医療の点から体内埋込ヘルスマonitoringセンサの実現も望まれるが、体内での電源確保が課題である。

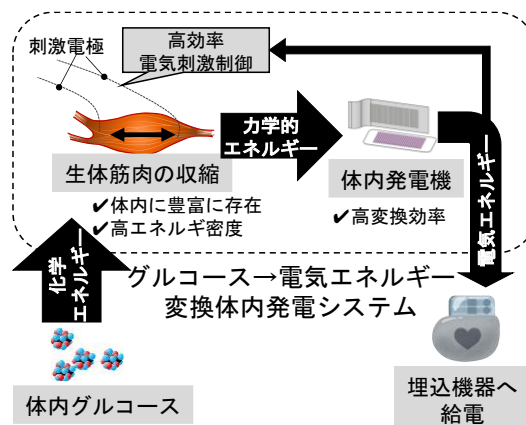


図1 提案する発電システム概要

そこで、体内グルコースを、筋肉を介して電気エネルギーに変換する図1のシステムを提案する。本システムでは、電気刺激によって必要に応じて筋収縮を制御可能な点を特徴とする。

2. 研究の目的

本研究では図1の原理の発電システム実現に向け、①筋収縮に適した発電機の提案と設計・評価、②少ない刺激電力で高出力・低筋疲労となる電気刺激制御系の確立、③動物実験による有効性検証を目的とする。

3. 研究の方法

① 筋収縮に適した発電機の設計・評価

筋収縮は大変位・低応力であり、かつ動作周波数は数 Hz と低い。この特性を考慮すると、発電原理は電磁誘導もしくは静電誘導が適している。また、低周波の動作を周波数アップコンバータ機構を介して高周波に変換した上で発電する方法と、大変位をダイレクトに電気エネルギーに変換する方法が考えられる。これらを鑑みて、本研究では(i)周波数アップコンバータ機構を備えた電磁誘導型発電システム、および(ii)大変形可能なフレキシブル静電誘導発電システムを開発する。

② 少ない刺激電力で高出力・低筋疲労となる電気刺激制御系の確立

生体筋肉への刺激は矩形波で行うため、刺激パラメータは振幅や繰り返し周波数、矩形波継続時間など複数ある。このため所望の発電量 P_0 以上を発生する際に、「発電電力 P_{out} ・刺激電力 P_m 」を最大化する制御系を確立する。具体的には外部電気刺激による筋収縮応答と発電機の挙動をモデル化し、実験的にパラメータを同定し、最適計算によって「発電電力 P_{out} ・刺激電力 P_m 」を最大化する刺激信号を算出するコントローラを設計する。

生体筋肉については弾性と減衰を用いて収縮モデルが提案されているが、刺激パラメータに対する応答の遅れや刺激電力と収縮強度の関係は未解明である。そこで本研究では、実験的にカエルの筋肉を刺激した時の収縮力、収縮量、速度を計測し、「外部刺激に対する筋収縮モデル」を構築、同定する。

③ 動物実験による発電実験

①で設計した発電機と②で設計した制御系を合わせ、動物実験にて発電実験を実施する。将来的には長期慢性動物実験を目指す。その第一歩として、今回はカエルの腓腹筋を用いた急性動物実験を行う。

4. 研究成果

① 筋収縮に適した発電機的设计・評価

(i) 周波数アップコンバータ機構を備えた電磁誘導型発電システム

筋肉の強縮が数 Hz であるのに対し、図 2 のように発電用の振動子を二組の平行ばねで支持し、永久磁石のプランキング機構を用いることで 20~30Hz の振動に変更可能な周波数アップコンバータ機構を備えた電磁誘導型の発電システムを設計した。試作した発電機構は図 3 に示すように、手の平サイズであり、ペースメーカーの電池と同等の体積である。筋肉の収縮を模擬したアクチュエータで本発電システムを駆動し、瞬時 100 μ W 以上の発電が可能であることを確認した。

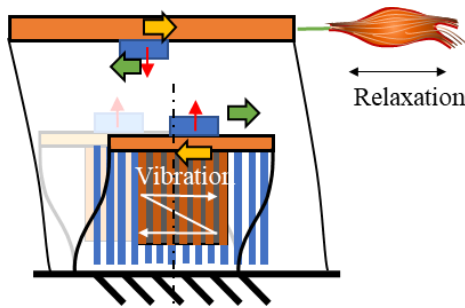


図 2 発電機構の原理

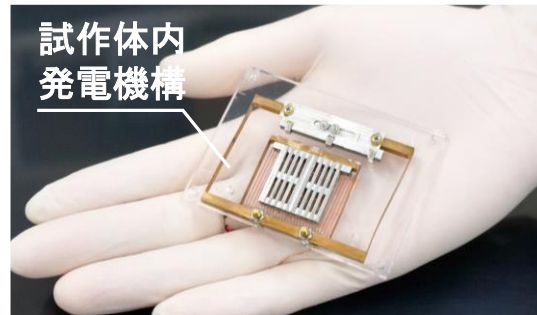


図 3 試作発電機構

(ii) 大変形可能なフレキシブル静電誘導発電システム

本項目では、エレクトレット（電荷を半永久的に保持する樹脂材）を用いた図 4 に示すフレキシブルな静電誘導型発電シートを開発した。このシートは筋肉など複雑な形状にならって変形可能であることを特徴とする。本研究では、シートに用いる各材料の厚さ等を最適設計し、かつ、エレクトレットの大面积かつ薄型の成膜法を開発した。筋収縮によってエラストマーが変形し、上側銅箔とエレクトレットの距離が近づくと正電荷が対向電極に移動し、発電する原理である。

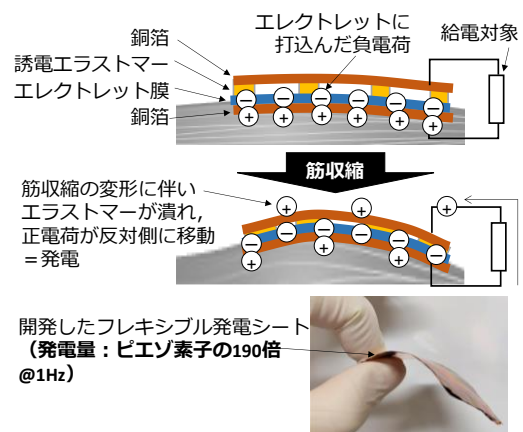


図 4 フレキシブル発電シート

本シートを 1Hz の応力を発生可能な評価試験機に設置して発電量を計測したところ、同サイズの圧電素子 (PVDF) と比較して実験的に 190 倍の発電量を達成可能であることを実証した。

② 少ない刺激電力で高出力・低筋疲労となる電気刺激制御系の確立

本項目では、図5に示すように骨格筋が外部の電気刺激を受け、筋収縮に至るまでの一連のプロセスを本研究では下記の3

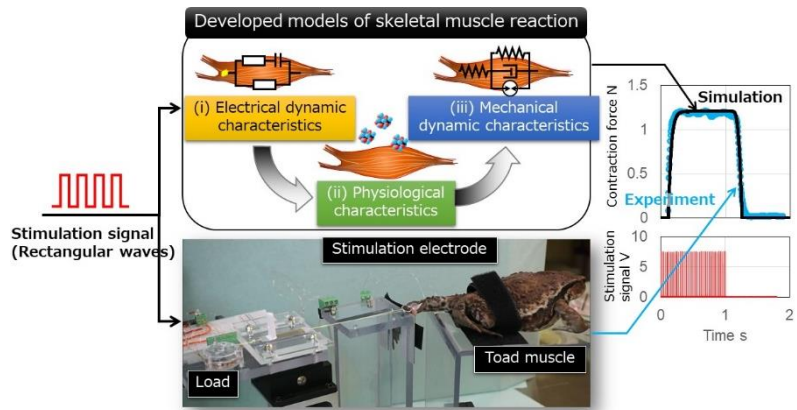


図5 外部刺激に対する骨格筋収縮モデルと実験の収縮力の比較

つに分割し、それぞれのモデルを構築した。

- i.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”
- ii.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”
- iii.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”

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6(a)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。ニュートンラプソン法によって筋出力と刺激電力量の差が最大となるよう

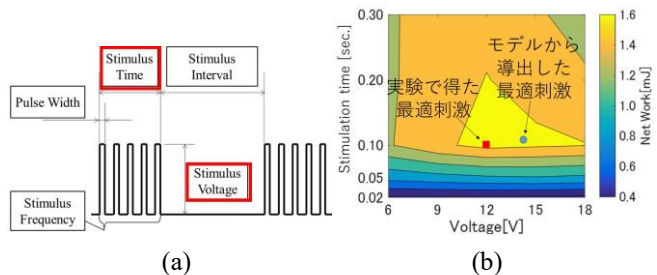


図6 刺激信号の最適化パラメータと最適化結果

に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、カエル腓腹筋を用いた発電実験で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6(b)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示した。

③ 動物実験による発電実験

本研究の成果として、カエルの腓腹筋を用いた発電実験を実施した。実験には全長約 240 mm、体重 193.4 g のメスの個体を使用した。実験の結果、図7に正味発電量（発電電力 P_{out} ・刺激電力 P_{in} ）を示す通り、一度の刺激に対して最終的に正の発電量が得られ、刺激に要する電力よりも大きな電力が得られることを実証した。また、用いた筋肉は 2g 程度であり、20g 程度の少量の筋肉を用いればペースメーカー等の給電に十分なエネルギーが得られる可能性を示した。

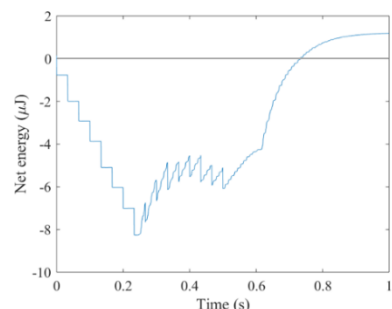


図7 発電結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 MOCHIDA Takumi, HIJIKATA Wataru	4. 巻 13
2. 論文標題 Development of an energy harvesting device with a contactless plucking mechanism driven by a skeletal muscle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 JAMDSM0068
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2019jamdsm0068	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 SAHARA GENTA, HIJIKATA WATARU, INOUE YUSUKE, YAMADA AKIHIRO, SHIRAIISHI YASUYUKI, FUKAYA AOI, KARUBE MASATO, GENDA TATSUYA, IWAMOTO NAOKI, TACHIZAKI YUMA, MORITA RYOSUKE, YAMBE TOMOYUKI	4. 巻 22
2. 論文標題 METHODS FOR INVESTIGATING CONTRACTION CHARACTERISTICS OF A PART OF MUSCLES FOR IMPLANTABLE POWER GENERATION SYSTEMS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics in Medicine and Biology	6. 最初と最後の頁 2250007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0219519422500075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 リュウキトウ, 持田匠, 土方亘
2. 発表標題 筋収縮モデルに基づいた培養筋肉アクチュエータの設計に関する研究
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021 in Osaka
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Mochida, Wataru Hijikata
2. 発表標題 Implantable contactless generator driven by the electrically-stimulated skeletal muscle
3. 学会等名 The 8th Meeting of the International Federation for Artificial Organs (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Tahara, Takumi Mochida, Tatsuki Fujiwara, Katsuhiko Ohuchi, Wataru Hijikata, Haruna Seki, Hirokuni Arai
2. 発表標題 Design of energy harvester for development a self-generating implantable medical device by energy of a heartbeat
3. 学会等名 The 8th Meeting of the International Federation for Artificial Organs (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Mochida, Wataru Hijikata
2. 発表標題 Design optimization of contactless generator for implantable energy harvesting system utilizing electrically-stimulated muscle
3. 学会等名 IEEE EMBC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本渉, 土方亘
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第 31 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Mochida, Wataru Hijikata
2. 発表標題 Development of a contactless energy harvesting system driven by contraction of skeletal muscle for implantable medical devices
3. 学会等名 40th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takumi Mochida, Wataru Hijikata, Tadahiko Shinshi
2. 発表標題 Development of an in-vivo generator with a contactless plucking mechanism driven by muscle contraction
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 持田 匠, 土方 亘
2. 発表標題 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
3. 学会等名 LIFE2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土方亘
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本学術振興会 第131委員会第289回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	永井 亜希子 (NAGAI AKIKO) (40360599)	愛知学院大学・歯学部・准教授 (33902)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------