

電気刺激による筋肉収縮を利用した体内発電の研究

[1] 組織

代表者：土方 亘

(東京工業大学 工学院 機械系
ヒューマンセントリックデザイン分野)

対応者：山家 智之

(加齢医学研究所 心臓病電子医学・非臨床
試験推進分野)

分担者：

白石 泰之 (加齢医学研究所 非臨床試験推進分野)

井上 雄介 (旭川医科大学 先進医工学研究センター)

山田 昭博 (加齢医学研究所 心臓病電子医学分野)

佐原 玄太 (東北大学大学院 医工学研究科)

研究費：物件費 15 万円

[2] 研究経過

心臓ペースメーカをはじめとする植込み型能動型医療機器は駆動に電力を要するため、安定的な電源の確保は重要な課題である。現在主流の電池駆動式では、定期的な電池交換手術が患者にとって大きな負担となる。この問題解決のため、本研究では体内発電、とりわけ電気刺激による筋肉収縮を利用したものに着目した。筋肉は体内の化学エネルギーを力学的エネルギーに変換する組織であり、筋肉を収縮させる信号となる電気刺激の消費電力はわずかである。筋肉収縮が電気刺激よりも大きなエネルギーを発生できることを活用し、従来提案されてきたものと比較して能動的で高出力な体内発電の実現が期待できる。しかし圧電型発電を用いた先行研究では発電量が小さく、植込み方法など臨床的観点からも問題があった。そのため本研究では現実的な、少量の筋肉を利用した体内発電システムの実現を目標とする。

基礎的検討として、生きたヒキガエルの骨格筋を用いて理論を実証したが、システムの実用化にはまだ課題が多い。主なものとその目標を以下に挙げる。

- ① 出力: 給電対象となる植込み型医療機器の適用範囲を広げるため、試作機の約 10 倍、数 mW の出力を目標とする。
- ② 耐久性: 試作発電機構はギヤやばねに起因する機

械的な耐久性が問題となる。このため新たな機構や発電方法を検討する。

- ③ 生体適合性: 荷重の掛かる筋肉接続部や刺激電極、機構の筐体を、異物反応の回避や密閉性に留意して長期間生体内に留置可能なものとする。
- ④ 制御: 発電・充電量の調整を適宜可能とする筋肉の電気刺激アルゴリズムや、それを実装する電子回路を開発する。
- ⑤ 大型哺乳類での実証: 人体内に近い条件で各種基礎データを取得し、それに基づき機構を設計・試作を行い、システムの植込み実証実験を行う。

これらを念頭に、大型哺乳類の筋肉による発電実証を目指して研究を推進した。本共同研究は継続課題で、初年度にはまず①、④、⑤に関連して、筋肉収縮特性調査および電気刺激波形の改良を行った。次年度は③に関連して筋肉接続部品の開発を行った。続く本年度も①、③、⑤に関連し、試作発電機構を用いてヤギの筋肉で実際に発電を試みた。研究打ち合わせについては Web 会議、メール会議を定期的に行った。

[3] 成果

(3-1) 研究成果

[大型哺乳動物における発電実証]

前述の基礎的検討ではヒキガエルの腓腹筋を用いて、両生類の一個の筋肉による「発電電力 > 刺激電力」という本システムの基礎となる理論を実証した。今回は本システムの実際の使用に近い状況として、大型哺乳動物の筋肉の一部のみを利用して理論実証を目指した。

筋肉の部分的な収縮から発電を行うための発電機構を試作した。これは汎用電磁誘導発電機にフライホイール、クランクギヤ、ポール・スライダ機構、筋肉接続部品等の要素と 3D プリンタで印刷した骨格を組み合わせて製作した。この発電機構を、先に開発した筋肉接続部品を用いて全身麻酔下のヤギの広背筋と接続した。そして筋肉刺入電極による局所的な電気刺激によって部分的な筋肉収縮を起こし、発電機構を駆動した (図 1)。筋肉接続部品は問題なく機能し、筋肉の血流を阻害することなく大きな筋肉の一部から収縮力を取り出すことができた。また発電機構も設計通り動作し、発電機を駆動した。発電機に繋ぐ負荷抵抗

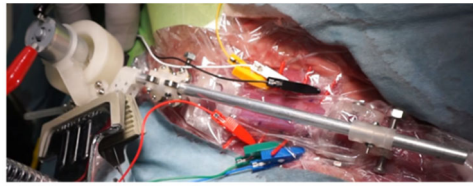


図1. 試作発電機構による発電実験

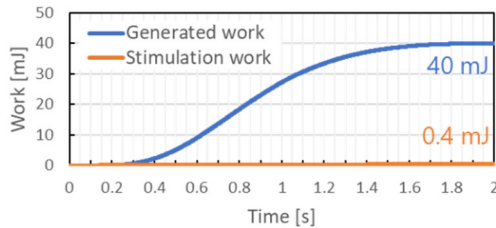


図2. 刺激電力と発電電力

を変えながら実験を行った結果、最大で 40 mJ の発電エネルギーを発生させ、その時の刺激に費やしたエネルギーは 0.4 mJ であった (図 2)。これにより大型哺乳動物の筋肉においても「発電電力>刺激電力」の基礎理論を実証できた。なおこの発電量はヒキガエル実験の 58 倍であり、その効率は使用筋肉重量比換算で 3.9 倍であった。

今回の試作発電機構は体内植込みを考慮した筐体を有さず、また耐久性の観点から各要素に改善の余地はあるが、この実証で私たちのシステムの実現可能性を高められたと考えている。今後、今回の成果を取りまとめて発表する予定である。

(3-2) 波及効果と発展性など

現在、実用的な小型の植込み型医療機器の電源は電池に限られ、消耗すれば交換手術が必要となる。本研究が実用化すれば、患者は手術という身体侵襲の機会を減らすことができる。さらに、交換手術を先送りするため、常に電池残量に気を掛け機器が駆動するような行動を忌避する、心理的負担のある生活からも解放される。これらにより植込み型医療機器装着患者の QOL を飛躍的に向上させられる。

また植込み型医療機器の開発においても、原理的に可能であっても消費電力の観点から電池の利用が困難であった用途にも門戸が開かれる。本研究は、電源という側面から全く新しい植込み型医療機器の誕生にも寄与できる潜在的な可能性を有している。

本年度は、ヒトでの使用状況に近い大型哺乳動物の筋肉の一部を用いて実際に発電を行うことができた。体内植え込みに耐えうる発電システムを開発するため、引き続き研究を推進する予定である。

[4] 成果資料 (初年度より)

- (1) 佐原 玄太、土方 亘、山田 昭博、井上 雄介、白石 泰之、軽部 雅人、源田 達也、岩元 直樹、舘崎 祐馬、盛田 良介、山家 智之:「電気刺激による筋肉収縮を利用した体内発電システム設計のための筋収縮特性調査方法」第 58 回日本生体医工学会大会、2019.6.6-8 (沖縄)
- (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, Nov. 2019.
- (3) Takumi Mochida, Wataru Hijikata. Development of an energy harvesting device with a contactless plucking mechanism driven by a skeletal muscle, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 13, No. 3, p. JAMDSM0068, 2019.
- (4) 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, 2020. 9 (青森 / オンライン)
- (5) Genta Sahara, Akihiro Yamada, Yusuke Inoue, Yasuyuki Shiraishi, Wataru Hijikata, Aoi Fukaya, Tomoyuki Yambe. Development of muscle connection components for implantable power generation system, 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 2021.11 (メキシコ / オンライン)
- (6) Genta Sahara, Wataru Hijikata, Yusuke Inoue, Tadahiko Shinshi, Akihiro Yamada, Yasuyuki Shiraishi, Aoi Fukaya, Masato Karube, Tatsuya Genda, Naoki Iwamoto, Yuma Tachizaki, Ryosuke Morita, Tomoyuki Yambe. METHODS FOR INVESTIGATING CONTRACTION CHARACTERISTICS OF PART OF MUSCLES FOR IMPLANTABLE POWER GENERATION SYSTEMS, Journal of Mechanics in Medicine and Biology, Vol. 22, No. 1, p. 2250007, 2022.