

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

(東北大学加齢医学研究所)

分担者：白石 泰之 (東北大学加齢医学研究所)

井上 雄介 (東北大学加齢医学研究所)

山田 昭博 (東北大学加齢医学研究所)

佐原 玄太 (東北大学大学院医工学研究科)

研究費：物件費 20 万円

[2] 研究経過

心臓ペースメーカーなどの植込み型能動型医療機器は、安定的な電源の確保が課題である。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。これらの問題解決のため、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注目した。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、電気刺激は信号として用いるため消費するエネルギーはわずかである。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に電気刺激を与え、より大きな力学的エネルギーを得る電気刺激波形と筋肉の収縮特性を調べた。この結果を元に発電機構の設計・試作を行い、カエルの筋肉で発電を試み、刺激電力 $22 \mu\text{W}$ に対し発電量 $112 \mu\text{W}$ をわずか 1.3g の筋肉で実現した。しかしこの発電機構は原理検証機であり、システムの実用化のためにはまだ克服すべき点が多い。現時点での主な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による増速機構やばねによる復元機構を有しており、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: 荷重の掛かる筋肉組織との接続部や筋肉刺激用の電極、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、本年度はまず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。主に上述の

① 出力、④ 制御、⑤ 大型哺乳類での実証に関連して、筋肉収縮特性調査および電気刺激波形の改良を行った。

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。東北大学にて対面式の会議も 2 回行った。

[3] 成果

(3-1) 研究成果

[筋肉収縮特性調査]

先行した骨格筋の基礎的検討では試料としてヒキガエルを用いたが、サイズや動物種がヒトと異なるため、ヒトの筋肉における目標出力の実現は不確実であった。そこでヒトに近い大型哺乳類であるヤギを用い、コンセプトに近い量の筋肉の収縮特性を調査した。ヤギの体表の筋（広背筋）の中腹部分の両端を切断することなく測定機器と接続するセットアップ（図 1、2）を考案し、筋肉収縮が発生する変位と力を同時かつ経時的に測定した。また刺激電極についても検討し、電極配置パターンにより収縮形態に差があることを見出した。その結果、微小な刺激電力で十分に発電機構を駆動しうる機械的エネルギーを発生できることが実証され、ヒトにおいても筋肉の一部のみで十分な発電が可能であることが示唆された。

【電気刺激波形の改良】

当該システムでは任意の筋収縮を得るため神経発火パターンに近似した電気刺激を用いる。前述のカエルやヤギの筋肉に与えた連続矩形パルス電圧では電流が一方方向となるため、電気分解の機序で電極境界面に塩素などのガスを発生させ、長期的には電極周囲の組織を傷害する可能性があった。そこで1つのパルスの直後に正負が逆のパルスを加えることで電流の向きを反転し、生じた酸化還元反応を直後に逆行させることで通電の影響を軽減するような両極性パルスの使用を検討した。両極性パルスを発生する回路およびセットアップを製作しヤギの筋肉を刺激したところ、有効な筋収縮が得られた。この結果を踏まえ、当該システムでもこの電気刺激波形を採用する方針とした。

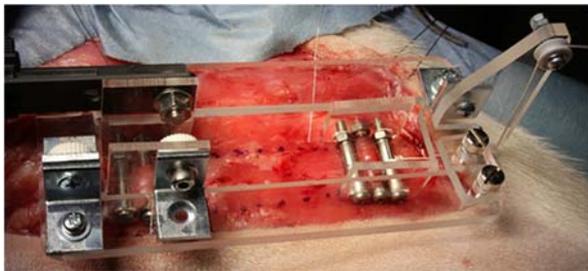


図1 筋収縮特性調査 - 筋接続部

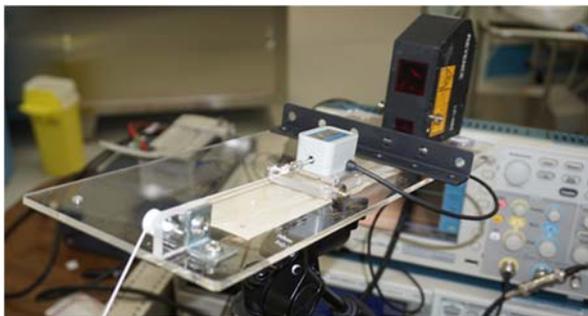


図2 筋収縮特性調査 - 測定機器部

(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せる。さらに、常に電池残量に気を掛け、交換手術を先送りするため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、植込み型医療機器装着患者の QOL の飛躍的向上が期待できる。

また植込み型医療機器の開発においても、これまで小型化は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。

本年度は大型哺乳類の骨格筋を用いた電気刺激による筋収縮実験から、ヒトの筋肉による発電の実現性を示すことができた。次の段階として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

- (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、鶴崎 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.