

課題番号 25

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

(心臓病電子医学・非臨床試験推進分野)

分担者：

白石 泰之

(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

(心臓病電子医学分野)

佐原 玄太

(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、電気刺激は筋肉を収縮させる信号として用いるため消費電力はわずかである。筋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克服すべき課題はまだ多い。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。初年度にはまず① 出力、④ 制御、⑤ 大型哺乳類での実証に関連して、筋収縮特性調査および電気刺激波形の改良を行った。続く本年度は、③ 生体適合性に関連して筋肉接続部品の開発を行った。

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。

[3] 成果

(3-1) 研究成果

[筋肉接続部品の開発]

当該システムは生体組織と発電機構の接続を要する。接続する対象として、骨や腱は抗荷重組織であることから接続自体は比較的容易であると考えられるが、体内でそのような接続が可能な部位はわずかであり、体内埋め込みという観点からシステムの実現性が乏しくなる。

骨や腱ではなく筋肉に直接接続できれば、システムの設置可能範囲が広がるだけでなく、筋肉の一部から力を取り出すことで犠牲となる筋肉量が減らすことができる。このため筋線維方向に対し垂直に横たわる3本の構造体からなる筋肉接続部品を考案・開発した。中央の棒が筋肉を押し上げる構造で、筋収縮により筋肉が接続部品から受ける力を筋線維が構造強度を持つ方向に変換し、筋断裂を防止するというコンセプトである(図1)。

この接続部品が筋肉の血流を阻害していないことをヤギで検証した。押し上げられた筋肉表面の血流が維持されていることを光電脈波計により確認した(図2)。また3Dモデルによる応力分布シミュレーションでは、筋肉に対する応力は接続部品により分散できることが示唆された。ヤギを用いた電気刺激による筋収縮負荷試験では、荷重に対して部品は安定しており筋肉に損傷も見られなかった(図3)。

これらの結果から、開発した筋肉接続部品は有用である可能性を示した。今後は、接続部品による慢性的な負荷が筋肉に与える影響を調べるため、長期的な植え込み試験の実施を予定している。

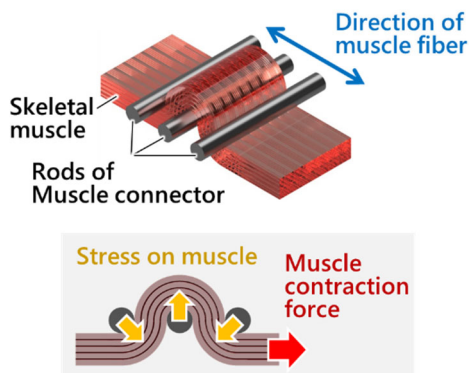


図1 筋肉接続部品のコンセプト

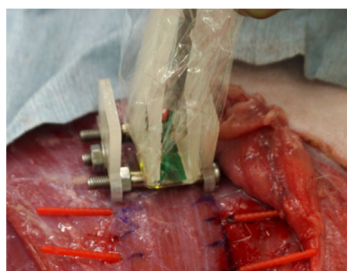


図2 筋肉血流測定の様子

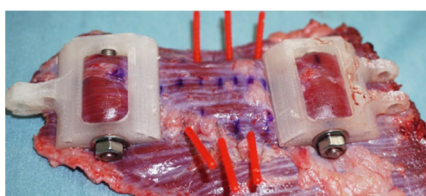


図3 筋肉と接続部品(筋肉切離後)

(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、発電システムと筋肉を接続する部品を開発した。本システムでは、生体組織から人工物に力が伝わるのが必須となるが、そのような実例は骨と人工関節など、硬性組織を対象としたものに限られている。開発した部品は人工物と生体軟部組織を力学的に接続するインターフェースとして、新たな応用先も期待される。

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、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)