

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K15504

研究課題名(和文) ソフトコイルと共鳴共振を用いた経皮的エネルギー伝送システムの開発

研究課題名(英文) Development of transcutaneous energy transfer system using soft-coil and resonant inductive coupling

研究代表者

齋藤 逸郎 (Saito, Itsuro)

東京大学・大学院医学系研究科(医学部)・客員研究員

研究者番号：80334225

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではソフトコイルを用いた経皮エネルギー伝送を実現すべく、ソフトコイル及び伝送回路の製作・改良を重ね、ヤギを用いたin vivoでの電力伝送実験により性能を測定した。37日間断続的に7～30 Vの電圧を一次回路に入力し、伝送効率が最大となった24日目では1日の平均出力電力は10.2 W、平均伝送効率は0.72となった。実験全体の最高出力電力は17.8 W、最大伝送効率は0.88であった。周辺組織への影響を目視による所見とHE染色によって調べ、想定実験環境下における炎症等がないことも確認された。これらの電力は補助人工心臓駆動に十分な伝送量であり、ソフトコイルの有用性が証明された。

研究成果の概要(英文)：We proposed a new transcutaneous energy transmission system with a pair of soft coils. The validity of the system was proven by an energy transmission experiment in vivo with a goat: we got at most 17.8 W, 0.88 as efficiency, at an average of 10.2 W in a day of POD 24th and 0.72 as efficiency. As the ventricular artificial heart needs at least 7 W, we achieved to obtain necessary power. Any inflammation was found by sight and HE stain under the expectation of normal transmission condition.

研究分野：医用工学

キーワード：TETS 経皮的エネルギー伝送 磁気共鳴 共鳴共振 ソフトコイル

1. 研究開始当初の背景

重症心不全の治療方法として心臓移植が望まれる。しかし、改正臓器移植法が施行されドナーが増加した2016年10月31日現在でさえも、537人の待機患者に対し移植件数は年間41件に留まっており、心臓移植が受けられる患者は限られている。そのため、心臓移植までのブリッジ Bridge to transplant (BTT)として心臓のポンプ機能を補う人工心臓が開発されて来た。1957年に動物実験が成功したのを皮切りに国内外で研究開発が進み、2011年には国産の体内埋込型補助人工心臓 EVA HEART、Duraheart が保険償還された。在宅待機で日常生活を送る装着患者も年々増え、循環不全患者に対する治療機器として臨床利用が広まりつつある。大半の補助人工心臓では、エネルギーの伝送に皮膚貫通ケーブルが用いられるが、皮膚貫通部は主要な感染源の一つであるため、埋込型補助人工心臓における解決すべき課題の一つとされている。

この問題に対して、古くより経皮的エネルギー伝送システム (TETS) (C. Sherman, W. Clay, B. Daly and K. A. Dasse, " Transcutaneous Energy Transmission (TET) System for Energy Intensive Prosthetic Devices ", Progress in Artificial Organs-1985, ISA0 Press, 400-4, 1986. など) が提案されている。原理としては主に電磁誘導が利用されており、体内外にコイルを置き、体外側コイル (一次コイル) に交流電流を流すことで、体内側コイル (二次コイル) に変動磁場が鎖交し電流が誘導されて電力伝送される仕組みである。TETS は1961年に本格的に研究が開始され、米国で2機種の人造心臓、LionHeart と Abiocor について臨床試験が行われるまでに至ったが、埋込手術が煩雑になるため、感染の確率は期待したほど低下しないなど臨床的には有用性が低く、いまだ解決に至っていない。

さらに、TETS では、エネルギー伝送のために体外および体内のコイル間の磁気結合を用いているが、コイル同士の位置ずれにより結合率が容易に低下する問題がある。従来の TETS 用コイルは導線を巻いて作製した堅くかさばるものであるため埋込部位が限られ、ドレッシングパッチで一次コイルを位置固定するものの、皮膚自体が位置ずれをすることは防げていない。この問題に対して、既存の研究では、鉄心の導入やコイル形状の工夫により位置ずれが生じても結合率の低下を防ぐほか、伝送回路を工夫し結合率が低下してもエネルギー伝送効率が落ちにくくなるなどの対処が行われてきたが、大きな成果は得られていない。また、コイルによる周辺組織への圧迫も解決すべき課題として挙げられている。

2. 研究の目的

本研究は、位置ずれの問題に対して、従来

の研究とは真逆のアプローチとして、そもそも位置ずれを起こさない場所にコイルを埋め込むことにより解決を図るものである。人体において側胸部は、通常の動作において動くことが少なく位置ずれを起こさない場所として最適と考えられる。そこで、側胸部に埋込可能な柔らかなコイルを用いた TETS の開発を目的とする。具体的には、フレキシブル基板を用いたコイルを豊胸術に用いられるようなシリコン製バックに内包させることで、側胸部への埋込可能なソフトコイルを開発した。また、コイル同士を共鳴共振させ伝送効率を高めたエネルギー伝送装置を開発し、ソフトコイルと共鳴共振を用いた TETS を完成させ、動物実験により有用性を示した。

3. 研究の方法

(1) ソフトコイルの作製

ソフトコイルの大きさは従来のコイルとほぼ同等のものとして、直径100mm程度を目標としてフレキシブル基板を用いて複数種類作製した。フレキシブル基板の銅箔の厚みは35 μ mと薄く、そのままでは従来の TETS 用コイルに比べて直列等価抵抗 (ESR) が高くなると予想される。そこで、複数のフレキシブル基板を並列化して ESR を低下させることを目指したものと、フレキシブル基板の配線幅を広げ ESR を低下させたコイルを作製し直列接続することで従来と同じインダクタンスと ESR の実現を目指したコイルの二種類のコイルを作製した。

(2) 駆動回路の開発

ソフトコイルを用いた TETS の駆動には共鳴共振を用いることで伝送効率の向上を狙っている。そこで、TETS の一次側、二次側共に共振する回路を開発した。

(3) in vitro 試験

作製したソフトコイルと駆動回路を接続し、距離による最大伝送電力や伝送効率を調べた。まずフレキシブル基板そのものによる伝送電力を調べるため、フレキシブル基板を並列もしくは直列し接続したコイルを用いて電力伝送を行った。

ソフトコイルとして用いる際にはコイルの防水のためにフレキシブル基板によるコイルをシリコン樹脂によるバック内に入れる必要があり、コイル間の距離は密着時に比べて大きくなる。そこで、次として、in vivo 試験で使用するシリコンバッグ内にフレキシブル基板によるコイルを埋め込み、ソフトコイルとして完成した状態で電力伝送を行った。

(4) in vivo 試験

作製したソフトコイルと駆動回路を接続し、ソフトコイルを事件動物に埋め込むことで、実験期間中における伝送電力

や伝送効率を調べるとともに、電力伝送が生体に与える影響について検討した。

in vivo 試験に際して、ソフトコイルのシリコンバッグ以外に皮膚を挿むことでコイル間の距離が増え、共鳴共振条件が in vitro 試験と異なる。また、最終的には TETS により補助人工心臓を動かすのに十分な電力を伝送できる必要がある。そこで、in vitro 試験の回路の改良調整を行い、in vivo 試験における伝送電力を 7W 以上とした。

4. 研究成果

(1) ソフトコイルの作製

初期のテストモデルとして従来コイルの直径とインダクタンスと同等となるように設計したところ直列等価抵抗 (ESR) が従来コイルの 10 倍以上の 11.3 となった。そこで、コイルの並列化および直列化を行うこととし、並列化及び直列化に適したフレキシブル基板を設計・作製した。実際に作製したフレキシブル基板を図 1 に示す。

並列化向けフレキシブル基板を三枚並列に接続したコイルは、インダクタンス $10.07 \mu\text{H}$ 、ESR 0.406 となった。配線幅を広げ、直列化向けフレキシブル基板を五枚直列に接続したコイルは、インダクタンス $16.78 \mu\text{H}$ 、0.567 となった。



図 1 作製したフレキシブル基板
(左) 並列向けモデル (右) 直列向けモデル

完成したソフトコイルは、手で曲げることで容易に変形し十分な柔軟性を有していることが確認できた。また、フレキシブル基板の重量は一枚当たり 5g 程度と軽く、たとえ複数枚使用したとして、従来の TETS 用コイル (約 100g) に比べ軽く、コイル自重による位置ずれや周辺組織への圧迫がないコイルが完成した。

(2) 駆動回路の開発

開発した駆動回路のブロック図を図 2 に示す。本研究で開発するソフトコイルは柔軟性を持つため、体内埋込に際しての制約は少ないと考えられる。そこで一次側二次側共に同じコイルを用いることで、コイルの非対称性による効率低下を防ぐとともに、共鳴共振用のコンデンサーに同じものを使用することで、温度変化などによる共振条件の変化が最小とな

る様にした。

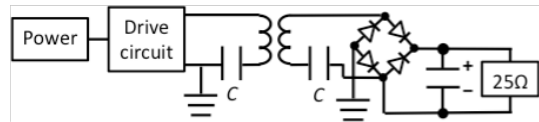


図 2 共鳴共振用駆動回路のブロック図

(3) in vitro 試験

フレキシブル基板を並列もしくは直列し接続したコイルを用いて電力伝送を行ったところ、一次側と二次側を密着させた状態での最大伝送電力はそれぞれ 18.3W と 20.1W となった。

ソフトコイルとして完成した状態での伝送電力と伝送効率の距離による変化を図 3 に示す。コイル間の距離が 3cm 程度までは、伝送電力は 2.5W 以上、伝送効率は 50% 以上となった。

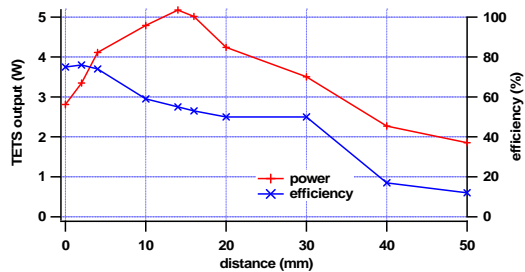


図 3 ソフトコイルの伝送電力と伝送効率の距離による変化

(4) in vivo 試験

ソフトコイルをヤギ胸壁に埋込、in vivo 試験を行った。試験の様子を図 4 に示す。また実験期間中の伝送電力と伝送効率を図 5 に示す。



図 4 in vivo 実験風景

実験を通じて最大 28 日間の電力伝送を実現でき、最大伝送電力は 17.8W で最大伝送効率は 0.88 となった。最も効率良く伝送できた 24 日目では平均伝送電力 10.2 W、平均効率 0.72 の伝送が行えた。

38 日目にソフトコイルの取り出しを行い、周辺組織を目視および HE 染色によって観察したところ、想定使用範囲内においては炎症等は見られず、生体適合面でも優れていることが示された。

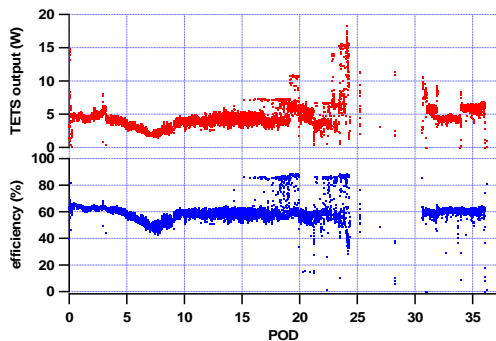


図5 in vivo 試験におけるの伝送電力と伝送効率

以上により、ソフトコイルを用いることでTETSにおける位置ずれ問題の解決の可能性が示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 10 件)

1) 村上遥、斎藤逸郎、阿部裕輔：完全人工心臓の為にフレキシブル TETS、第 54 回日本生体医工学会大会、2015 年 5 月 7 日、名古屋国際会議場(名古屋)

2) 村上遥、斎藤逸郎、阿部裕輔：埋め込み型人工心臓のための経皮エネルギー伝送用コイル形状の検討、第 53 回日本人工臓器学会、2015 年 11 月 20 日、東京ドームホテル(東京)

3) 斎藤逸郎、村上遥、阿部裕輔：経皮的エネルギー伝送システムにおける周波数自動追従システムの開発、第 53 回日本人工臓器学会、2015 年 11 月 20 日、東京ドームホテル(東京)

4) 村上遥、斎藤逸郎、阿部裕輔：経皮的エネルギー伝送システム用フレキシブルコイルの ESR を軽減するコイル形状、第 44 回人工心臓と補助循環懇話会学術集会、2016 年 3 月 5 日、ホテル松島大観荘(松島)

5) 村上遥、斎藤逸郎、阿部裕輔：経皮エネルギー伝送用コイルのインダクタンスが電力伝送に与える影響、第 55 回日本生体医工学会大会、2016 年 4 月 27 日、富山国際会議場(富山)

6) 斎藤逸郎、村上遥、阿部裕輔：コイルの非対称性が経皮的エネルギー伝送システムに与える影響についての検討、第 55 回日本生体医工学会大会、2016 年 4 月 27 日、富山国際会議場(富山)

7) Haruka Murakami, Itsuro Saito, Yusuke Abe: A Novel Coil with Flexibility for Transcutaneous Energy Transmission System of Artificial Hearts, 62nd ASAI0 2016, 2016.6.17, San Francisco(USA)

8) 村上遥、斎藤逸郎、阿部裕輔：フレキシブルコイルを用いた経皮エネルギー伝送効率第 32 回ライフサポート学会大会、2016 年 9 月 4 日、東北大学青葉山キャンパス(仙台)

9) 斎藤逸郎、村上遥、阿部裕輔：共鳴共振型経皮エネルギー伝送システムの駆動回路の設計開発、第 54 回日本人工臓器学会、2016 年 11 月 24 日、米子コンベンションセンター(米子)

10) 村上遥、斎藤逸郎、阿部裕輔：体内埋込式人工心臓のための経皮エネルギー伝送～フレキシブルコイルと従来コイルの比較～、第 54 回日本人工臓器学会、2016 年 11 月 26 日、米子コンベンションセンター(米子)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：経費無線電力伝送システム用伝送コイル

発明者：阿部 裕輔、村上 遥、斎藤 逸郎
権利者：国立大学法人東京大学

種類：特許願

番号：特願 2014-127635

出願年月日：2014 年 6 月 20 日

国内外の別：国内

取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

斎藤 逸郎 (ITSURO SAITO)

東京大学・大学院医学系研究科・客員研究員

研究者番号：80334225

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

阿部 裕輔 (ABE YUSUKE)

東京大学・大学院医学系研究科・准教授

研究者番号：90193010

磯山 隆 (ISOYAMA TAKASHI)

東京大学・大学院医学系研究科・講師
研究者番号：20302789

井上 雄介 (INOUE YUSUKE)
東北大学・加齢医学研究所・助教
研究者番号：80611079

(4)研究協力者

村上 遥 (MURAKAMI HARUKA)
東京大学・大学院医学系研究科・大学院生