

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月28日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22659249

研究課題名（和文） 磁気共鳴現象を用いた体深部埋込機器へのエネルギー・情報伝送

研究課題名（英文） energy and information transmission to implanted medical device using magnetic resonance

研究代表者

井街 宏（IMACHI KOU）

東京大学・大学院医学系研究科・名誉教授

研究者番号：10010076

研究成果の概要（和文）：

磁気共鳴現象を用いて体内埋込型補助人工心臓に対してエネルギーや情報の伝送を行う装置を開発すべく、磁気共鳴現象用コイルの小型化・伝送信号用回路の開発・磁気共鳴現象によるエネルギー伝送の *in vitro* 試験を行った。生体への埋め込み可能なコイルが完成し、30-50W出力の送信機は完成したが、高周波領域での受信機の高効率化が実現できなかったため、システムとしての効率が低く、従来のエネルギー伝送方式の方が有利であるとの結論となった。

研究成果の概要（英文）：

A system that transmits energy and information to implanted ventricular assist device using magnetic resonance was developed. As a part of the system, a small coil for magnetic resonance and a transmitter were developed, and, *in vitro* tests that energy was transmitted using magnetic resonance were performed. The small coil that can be implanted into a human body and the transmitter that output was 30-50 Watts were made. However, performance of the system was lower than conventional system and the conventional system was better than developed system, because performance of a system's receiver could not improve in high frequency.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	0	1,500,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	390,000	3,190,000

研究分野：医用生体工学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・胸部外科学

キーワード：心臓大血管外科学・エネルギー情報伝送

1. 研究開始当初の背景

体内埋込型補助人工心臓は治験にてその有用性が示されており、欧米を中心に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や情報の伝送に皮膚貫通ケー

ブルを用いている。皮膚貫通部は主要な感染源の一つであるため、補助人工心臓における解決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（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, ISAO Press, 400-4, 1986. など)が研究され、臨床応用もなされている。

経皮的エネルギー伝送システム (TETS) は電磁誘導の原理を用いたエネルギー伝送システムであり、皮膚を挟んで二つのコイルを向かい合わせることで、体外より体内にエネルギーを送るシステムである。そのため、TETS は、体内埋込型補助人工心臓における皮膚貫通ケーブルをなくすための要素技術として、不可欠な研究であるとされていた。

しかし、TETS では効率的なエネルギー伝送を行うためにはコイルを近接させて設置する必要がある、皮下へ埋め込みや皮膚表面への装着が必要とされている。皮下への埋め込みは人工心臓の埋込手術の煩雑化をもたらし、手術侵襲が大きくなるばかりでなく、感染の危険性も高めている。また皮膚表面への装着は、固定用の粘着剤による皮膚の炎症や圧迫による潰瘍の発生などをもたらしている。さらにコイル同士の位置ずれ防止など、TETS は解決すべき様々な問題を内包している。これらの問題のため、感染の確率は期待ほど低下しないなど臨床的には有用性が低く、臨床例に至った例はごくわずかである。これらの問題はコイルを近接させて設置する必要から生じている問題であり、TETS が電磁誘導の原理を用いている以上、解決が困難な問題である。

一方、近年、電磁誘導とはまったく別な原理である磁気共鳴現象 (A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Solijacic, “ Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, Science, 317, 83-6, 2007.) が非接触エネルギー伝送方式として注目されている。磁気共鳴現象とは、特殊な二つのコイルと伝送信号を用いた時にコイル間で共鳴が発生する現象である。共鳴状態では、コイル間の距離が離れていても効率的にエネルギーが伝送でき、さらに共鳴条件を切り替えることで情報の伝送も可能となる特徴を持つ。

2. 研究の目的

本研究では、ケーブルやコネクタを必要とせず血液ポンプユニットに駆動制御回路など必要な機能すべてが組み込まれた究極の完全体内埋込型補助人工心臓の完成を目指して、胸腔内や腹腔内など体深部に埋込まれた補助人工心臓に対して直接エネルギーや情報の伝送を行う装置の開発を目的とする。

具体的には、携帯電話サイズのコイルを用

いた伝送装置を開発し、磁気共鳴現象によりエネルギーが伝送できることを実証すると共に、共鳴条件を切り替えることで情報の伝送が可能であることを示す。さらにコイルを埋込型補助人工心臓表面に装着し体内に埋め込み、体外よりエネルギーを供給しつつ補助人工心臓を駆動させることで、駆動装置や生体が磁気共鳴現象に与える影響を調べると共に、磁気共鳴現象が生体に与える影響を調べる。

本研究は、磁気共鳴現象を使用することで、TETS の問題を解決するものである。従来は皮膚表面での伝送を行わない限り、生体の内部へのエネルギーや情報の伝送は不可能であると考えられていた。本研究は磁気共鳴現象の特徴を利用することで、この考え方を完全にひっくり返し、エネルギーや情報を新しい原理を用いることで伝送用コイル間の距離による伝送効率の低下を防ぎ、体深部への効率的なエネルギー・情報伝送を実現するものである。

本研究が成功した場合、TETS に内包された問題すべてが解決されるばかりでなく、エネルギー・情報伝送装置を補助人工心臓本体に組み込むことができるため、ケーブルがない一体型の埋込型補助人工心臓が実現できる。また埋込手術の簡素化やケーブルレスによる信頼性の向上が図れ、感染や故障のリスクの大幅な低下をもたらすため、臨床成績の大幅な向上が見込まれるとともに、体外に設置した装置の取り扱いが簡便になるため、患者の利便性の向上も見込まれる。

さらに、距離が離れてもエネルギーや情報の伝送が行えるため、体外装置を体に密着させる必要がなくなり、患者の利便性も向上する。このように本研究は補助人工心臓をはじめとする体内埋込型医療機器のエネルギー・情報伝送に関する問題のブレークスルーとなる研究である。

3. 研究の方法

(1) 磁気共鳴現象用コイルの小型化

従来より研究されている磁気共鳴現象用のコイルは、直径 50cm 程度と大きく、そのままでは体内に埋め込むことは不可能である。そこで、体内への埋込ができるよう、コイルの構成や伝送信号を工夫することで初期目標として直径 7cm 以下・厚み 1cm 以下になるように、磁気共鳴現象用コイルの小型化を行った。

磁気共鳴現象はコイルの誘導成分と浮遊容量による容量成分による電気的な共振現象により引き起こされると考えられている。そこで、形状を変えつつコイルの巻き数を増やすとともにコイルにコンデンサーを付加させ、さらに伝送信号の周波数を上げることで小型で

も磁気共鳴現象が発生するようにした。作製したコイルは体内埋込に耐えられるようコイル本体をエポキシ樹脂にてモールドした。

(2) 伝送信号用回路の開発

補助人工心臓の駆動用電力としては、20W 程度の直流電源が用いられている。一方磁気共鳴現象は数 MHz 以上の高い周波数の信号でみられる現象であるため、伝送信号は高周波電力信号となる。そのため、磁気共鳴現象を用いてエネルギー伝送を行うためには、直流から高周波電力信号への変換と高周波電力信号から直流への変換を行う専用の回路が必要となる。

そこで、直流と高周波電力信号との変換回路の設計・開発を行った。伝送信号用変換回路の設計に際しては、磁気共鳴現象を用いた信号伝送による電力で補助人工心臓の駆動が行えるよう伝送能力を 25W 以上とし、変換による損失を抑えるため変換効率が 95%以上になるような回路を利用した。

また、伝送信号用回路には情報伝送の機能も組み込んだ。体外から体内への情報伝送は、体外に設置した伝送信号用回路で伝送信号の発生を高速で ON/OFF することで実現した。体内から体外への情報伝送は、体内に設置した伝送信号用回路で磁気共鳴現象の共鳴条件を切り替えて共鳴の発生を高速で ON/OFF し、体外に設置した伝送信号用回路で伝送電力の変化をモニターすることで実現した。

伝送信号用回路への機能の組み込みに際しては、情報伝送機能として、補助人工心臓の駆動に必要な情報を伝送できるように、情報伝送速度は 1kbps 以上とし、伝送時のエラー発生確率が 1%以下となるように設計・開発を行った。

(3) 磁気共鳴現象によるエネルギー伝送の in vitro 試験

小型化した磁気共鳴現象用コイルと伝送信号用電子回路とを組み合わせ、エネルギー伝送実験を行った。

4. 研究成果

(1) 磁気共鳴現象用コイルの小型化

磁気共鳴現象用のコイルは高周波での駆動を行うため、配線による表皮効果の駆動を行うため、配線による表皮効果が問題となる。そこで、巻き線自体にリッツワイヤを用いることで、表皮面積の拡大を行い、コイル巻き線の銅損の低減を図った。

複数のサイズのコイルの作製を行い、最小のものではエポキシ樹脂モールド後に直径 7cm 以下、厚み 1cm 以下となるコイルが完成し、コイルそのものは生体への埋め込みに耐えるものが完成した。



図 1：磁気共鳴現象用コイル

(2) 伝送信号用回路の開発

伝送信号用回路の開発は送信機と受信機の開発からなる。送信機はエネルギー変換効率の向上を狙って MOSFET を Hブリッジ型に構成し、スイッチング回路で高周波を発生することとした。現在までに数 MHz までの帯域で周波数をプログラマティックに調整可能で 30-50W 程度の高周波出力が可能な回路が実現できており、送信機としては十分な性能が得られるものが完成した。

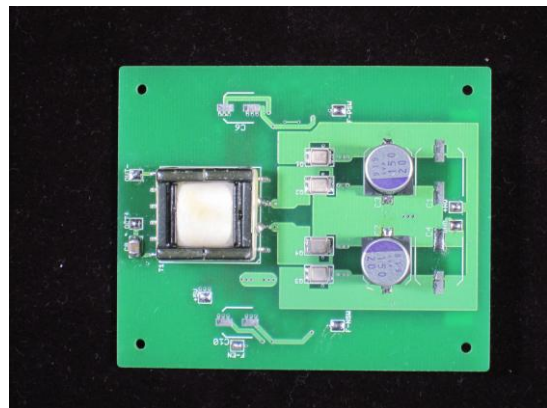


図 2：伝送信号用回路プロトタイプ

一方、受信機に関しては高効率化を狙って同期整流を試みているが、スイッチングのタイミングが合わないためうまく動作しておらず、ダイオードによる整流のみの実現となった。

伝送信号用回路への情報伝送機能の付加に関しては、情報伝送機能の付加方法として、発信器の発振周波数を切り替

えるとエネルギー伝送量が変化する性質を利用して実現した。周波数の切り替え回路及び伝送量の変化は観察でき、伝送信号用回路へ情報伝送機能を付加することは可能であるとの結果が得られた。



図 3：情報伝送機能を組み込んだ伝送信号用送信回路

(3) 磁気共鳴現象によるエネルギー伝送の in vitro 試験

エネルギー伝送の効率向上に関しては、送信コイル—受信コイル間でのエネルギー伝送効率の向上と、送信機および受信機のエネルギー変換効率の向上の二点について考慮する必要がある。送信コイル—受信コイル間のエネルギー効率に関しては、そもそも受信コイルを小型化したため、効率向上は非常に困難であり、限界があることが判明した。

また、送信機及び受信機のエネルギー効率の向上については、いずれも 100kHz 程度の低周波では 90%以上と高効率のものが実現したが、当初の目標周波数である、数 MHz になると効率が低下した。特に受信機に関してはダイオードによる整流のため、整流の損失が大きく、当初の目標は実現できなかった。

この二つの問題点により、システム全体の効率は低く、総合的には従来のエネルギー伝送方式の方が有利であるとの結論となった。

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 1 件)

- ① Yusuke Abe, Takashi Isoyama, Itsuro Saito, Wei Shi, Yusuke Inoue, Kohei Ishii, Hidemoto Nakagawa, Toshiya Ono, Minoru Ono and Kou Imachi: “Results of Animal Experiments With the Fourth

Model of the Undulation Pump Total Artificial Heart”, *Artificial Organs*, 査読有, 35(8), 2011, pp.781-790, DOI: 10.1111/j.1525-1594.2011.01318.x

[学会発表] (計 1 件)

- ① Yusuke Abe: “The helical flow pump for the total artificial heart”, 第 19 回 国際ロータリー血液ポンプ学会, 2011.9.9, ルイビルマリオットタウンコンベンションホテル・アメリカ合衆国

[その他]

ホームページ: <http://www.bme.gr.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井街 宏 (IMACHI KOU)

東京大学・大学院医学系研究科・名誉教授
研究者番号: 10010076

(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

斎藤 逸郎 (SAITO ITSURO)

東京大学・大学院医学系研究科・特任研究員
研究者番号: 80334225