

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25670551

研究課題名(和文) 静電誘導を用いた経皮的エネルギー・情報伝送

研究課題名(英文) energy and information transmission using electrostatic induction

研究代表者

齋藤 逸郎 (Saito, Itsuro)

東京大学・医学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：80334225

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、電極を用いた静電誘導によるエネルギーと情報の伝送を行う装置の開発を目的として、電極、エネルギー送受信装置を開発し、エネルギー伝送のin vitro試験を行った。電極材として厚さ0.1mmのアルミ箔を2cm角とすることで最大2Aの電流まで使用できる電極を作製した。エネルギー送受信回路に関して、数MHzまでの帯域で任意の周波数で30-50Wの高周波出力が得られる回路が完成した。in vitro試験では、負荷抵抗が500Ωでは伝送効率は10%以下になったが、負荷抵抗が5Ωでは80%の伝送効率が得られ、可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed electrodes and energy transmitter/receiver and performed in vitro test as a development of the apparatus for performing the transmission of energy and information by electrostatic induction using an electrode. An electrode can be up to 2A of current to the 2cm square of aluminum foil having a thickness of 0.1mm as the electrode material was developed. For the energy transmitter circuit, the circuit 30-50W high frequency output at any frequency band up to several MHz is obtained has been completed. In the in vitro test, transmission efficiency is equal to or less than 10% at 500Ω load, however, transmission efficiency is obtained 80% at 5Ω load, the possibility has been shown.

研究分野：医用生体工学

キーワード：人工臓器学 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、欧米のみならず日本国内においても、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、エネルギーや情報の伝送に皮膚貫通ケーブルを用いられるが、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, ISA 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る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対面で設置する必要があり、適切な位置にコイルを装着する必要がある。しかし、コイルは銅線と鉄心でできているため、固いうえ重く、特に体外用コイルに関しては、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。さらにコイル同士的位置ずれ防止など、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。

### 2. 研究の目的

本研究では、完全体内埋込型補助人工心臓の完成を目指して、コイルを使用せず、位置ずれや固定方法に関して問題とならない、新たな方法により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、名刺サイズの電極により、皮膚を介した静電誘導を用いてエネルギー及び情報が伝送できることを実証する。さらに、皮下に設置した電極と体表面に張り付けた電極との位置をずらした状態で、エネルギーの伝送効率の変動を調べるとともに、生体を与える影響を調べる。

本研究は、電磁誘導の代わりに静電誘導を用いてエネルギーと情報とを伝送するという研究である。静電誘導による結合は、言わばコンデンサーによる接続と考えられるため、必要とするエネルギーや情報を容易に伝送できるようになる。静電誘導による結合を行うためには、皮膚表面に電極を貼りつける必要があるが、導電性があればよく金属箔で

十分なため、従来の TETS の様な固定に伴う問題はない。また、電磁誘導では、鉄芯の部分でのエネルギーロスが存在するため、伝送信号の周波数に制限があったが、静電誘導ではそのような制限はなく、数 MHz 以上の周波数を用いることができ、電極および装置本体の小型化が容易に実現できる。

さらに、電界は磁界と異なりシールドにより容易に外部との関係性を断ち切ることが可能である。これにより、外部より電磁的なノイズを受けにくくなるばかりでなく、外部に対してもノイズを出しにくくすることが容易にできる。

生体は商用周波数程度の低い周波数では、微弱なエネルギーに対しても、神経や筋に対して刺激を与えるが、MHz 近傍の高い周波数に対しては、刺激を受けることがない。また、エネルギー伝送に関して、ジュール熱による熱傷が問題とされるが、ジュール熱の発生量は電流密度に依存するため、広い面積を用いて電流を分散させることで、ジュール熱の問題は解決できる。

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、皮膚貫通ケーブルがない完全埋込型補助人工心臓が実現でき、信頼性の向上が図れる。また電極を小型にできるほか、皮膚とは絶縁状態で稼働するため、体外電極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) 体外・体内用電極の作製

電極、特に体外用電極に関しては装着による負担を軽減するため、柔軟性に富みつつ、高い耐久性が必要とされる。また電極までの配線には高周波電流が流れるため、通常の電線は使用できない。そこで、電極を金属箔およびメッシュ構造にするとともに、配線に高周波特性に優れたリッツワイヤーを使用して作製した。

静電誘導用の電極は、表面を絶縁しておく必要がある。絶縁膜に厚いものを用いると電極の柔軟性が失われるとともに、静電容量の低下を招くため、絶縁膜を薄くする必要がある。また、体内埋込用電極は、生体適合性に優れる必要があるため、生体適合性を持つ絶縁材を用いて絶縁を施す必要がある。そこで、薄い樹脂を用いて、作製した電極に絶縁を施した。

#### (2) エネルギー送受信回路の開発

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、エネルギー伝送で利用できる電力信号は、数 MHz の信号となる。そのため、静電誘導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、静電誘導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 95%以上を目標とした。

また、伝送信号用回路には情報伝送の機能も組み込んだ。情報伝送は、出力信号を On/Off することで実現した。伝送信号用回路の改良に際しては、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) エネルギー伝送の in vitro 試験

作製した電極とエネルギー送受信回路とを組み合わせ、エネルギー伝送実験を行った。電極同士の距離や向きを変えつつエネルギー伝送を行い、伝送効率がどのように変化するか調べるとともに、電極やエネルギー送受信回路の発熱についても検討を行う。さらに、生体や補助人工心臓の駆動装置による影響を調べるため、電極の近傍に水や金属を設置した際の伝送への影響などについても評価を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 体外・体内用電極の作製

当初、電極としてフィルム基板および金属メッシュを用いて作製した。フィルム基板は十分な柔軟性と強度を持つことを確認したが、金属厚が薄すぎ、電極そのもののインピーダンスが高く実用性が低いことが判明した。また金属メッシュは柔軟性、強度ともによく、インピーダンスも低い、電流集中により利用できなかった。これらより電極としては、電流集中を避けるため広い面積で接触する必要があるほか、高周波電流による表皮効果を考慮する必要があることがはなめいた。そこで、電極材として厚さ 0.1mm のアルミ箔を使用することで電流集中を避けつつインピーダンスの低い電極を作製した。

生体に流せる電流は、200kHz 以上の高周波では電流による筋や神経への刺激がないため、電流による温度上昇のみが問題とされる。成人に対しての電流許容量としては 0.5A/cm<sup>2</sup> 以下であれば問題ない。そこで電極の大きさは、最大で 2A までの電流が流せるよう、2cm 角とした。

体内および体外電極について、電極の対向面と反対面にポリメチルペンテンの

フィルムで覆うことで絶縁を確保し体外。体内用電極とした。



図 1 : 体内・体外用電極

### (2) エネルギー送受信回路の開発

エネルギー送受信回路として、送信機側はエネルギー変換効率の向上を狙い 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。数 MHz までの帯域で任意の周波数で 30-50W の高周波出力が得られる回路が完成した。また、送信機側のスイッチング回路を CPLD を用いてスイッチングするようにすることで、外部からスイッチングの On/Off を短時間で切り替えられるようにした。これにより数 MHz でのスイッチングをしながら 100kHz 以上の応答性を持って On/Off ができるようになり高速での信号伝送が実現した。

受信機側は電圧が高いこともありファストリカバリーダイオードによるブリッジ整流回路とし、25W 以上の整流が実現できた。

### (3) エネルギー伝送の in vitro 試験

作製した電極を、模擬生体として使用した鶏肉の表面および内部に設置することで、TETS を構成した。TETS の入力として体外電極を高周波電源に、TETS の出力として体内電極を整流回路を通して抵抗負荷に接続して、エネルギー伝送試験を行った。高周波電源としては、周波数 4MHz、出力インピーダンス 500Ω とした。負荷抵抗を変化させつつ高周波電源と整流回路との 2 本の接続のうち、2 本とも直接接続した場合、1 本は直接接続しもう 1 本は TETS を介した場合、2 本とも TETS を介した場合とで伝送電力の比較を行った。

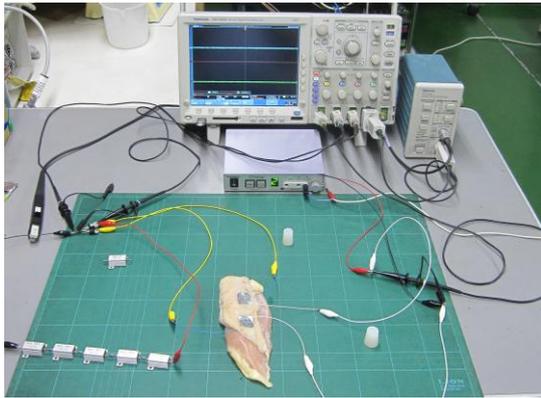


図 2 : エネルギー伝送試験

2 本とも直接接続をした際の負荷抵抗を変化させた際の伝送電力を図 3 に、1 本は直接接続をもう 1 本を TETS を介した場合および 2 本とも TETS を介した場合における負荷抵抗を変化させた際の伝送効率を図 4 に示す。

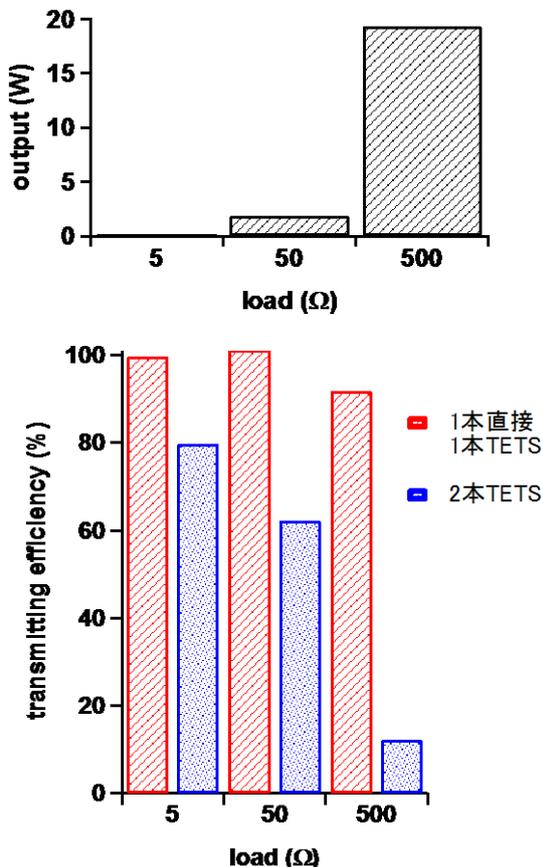


図 3 : 負荷抵抗の変化による伝送電力  
図 4 : 負荷抵抗の変化による伝送効率

2 本とも直接接続したときの伝送電力は、500  $\Omega$  負荷では 20W 近くの伝送ができていたが 5  $\Omega$  負荷では 0.2W 程度と低かった。これは高周波電源の内部インピーダンスが 500  $\Omega$  と高いことが原因と考えられる。

1 本のみ TETS を介して接続したときの伝送効率は、500  $\Omega$  でも 90% で 50  $\Omega$  と 5  $\Omega$

では 100% 近くであり、直接結合による伝送効率の低下は小さかった。2 本とも TETS を介して接続したときの伝送効率は、500  $\Omega$  負荷では 10% 近くまで低下したが、5  $\Omega$  負荷では 80% の効率が得られた。2 本とも TETS を介して接続したときの伝送効率が低い原因としては、体外電極同士の距離が 10cm 程度と近いこと、供給電力の一部が鶏肉を経由して流れたことによるものと思われる。

## 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 1 件)

齋藤逸郎、村上遥、阿部裕輔：「直接結合および静電結合による 経皮的エネルギー伝送に関する基礎的研究」第 54 回日本生体医工学会大会、2015 年 5 月 17 日、名古屋 (名古屋国際会議場)。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等  
<http://www.bme.gr.jp>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 逸郎 (ITSURO SAITO)

東京大学・大学院医学系研究科・特任研究員

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)

東京大学・大学院工学系研究科・特任研究

員

研究者番号：80611079