【論文】

体内埋込型人工心臓用経皮エネルギー情報同時伝送システムにおける 外周2回巻き8の字形コイルの設計

Design of Two Turns of the Outer

Circumference of Figure-eight Coil for Transcutaneous Energy and Information

Transmission for a Totally-Implantable Artificial Heart

河井卓也(学生会員), 山本隆彦(正会員), 越地耕二(正会員)

Takuya Kawai, Takahiko Yamamoto and Kohji Koshiji

Abstract

This paper describes the design and development of an outer circumference figure-eight coil, which can be used in a high-frequency region for a totally-implantable artificial heart (TIAH). The transcutaneous energy and information simultaneous transmission system is useful for providing driving energy and controlling and monitoring TIAH. It is necessary to embed the energy transmission coil and the information transmission coil separately in the conventional system, increasing the treatment time and the implantation areas. We propose transformers for both energy and information transmission. The transformer for information transmission consists of two outer circumference figure-eight coils, which have a twice-wound outer circumference, for a tradeoff between increasing the frequency to adapt to the radio laws in Japan and miniaturization.

As a result, a smaller information transmission coil, which can be embedded in the body, with a diameter of 2.8 cm and operating at 429 MHz, is developed. The transmission characteristics between the transformer for information transmission is -12.14 dB. The energy transmission efficiency between the transformer for energy transmission is 84.4%. 1,000 characters of data can be transmitted without error when transmitting energy and information simultaneously.

Key Words

Transcutaneous energy transmission system, Transcutaneous information transmission system, Artificial heart, Figure-eight coil, Simultaneous transmission

1. 緒言

2010 年の改正臓器移植法施行に伴い¹⁾, 心臓移植件数は年々増加しているが, 現在も心臓移植希望者の 1 割に満たない²⁾. その原因の 1 つとしてドナー不足が挙げられる. これを解決するために, QOL(Quality of Life)の高い人工心臓の普及が急務である. 普及のための課題の 1 つとして, 駆動用エネルギーや情報の伝送を非侵襲に行うことが挙げられる³⁾. 現在, 実用化されている駆動用エネルギーの伝送は, 体外から体内にケーブルを貫通

させるものである⁴⁾. このため, 患者は皮膚貫通部における感染症のリスクにさらされている. QOL 向上のためには, 経皮エネルギー伝送システム(Transcutaneous Energy Transmission System : TETS)の実用化が不可欠である. また, 体内外の情報伝送は, 経皮情報伝送システム(Transcutaneous Information Transmission System : TITS)⁵⁾が不可欠であるが, TETS とは独立した装置を体表面に装着する必要がある. これは患者にとって煩わしい. したがって, 体表に装着するエネルギー伝送用デバイスと情報伝送用デバイスを単一化することで QOL の向上が期待できる⁶⁾.

これらを満たす一例として, 空心扁平形エネルギー伝送用コイルと 8 の字形情報伝送用コイルを一体にした伝送装置を使用する方法が提案されている⁷⁾. 先行研究では 8 の字形コイルを用いて 1.6 MHz および 3.2 MHz において情報伝送を行っていたが, 電波法の観点から, 使用者が免許を取得することなく使用可能な医療用テレメーター用特定小電力無線局⁸⁾に割り当てられている

2017 年 9 月 31 日受付

2019 年 1 月 8 日掲載決定

東京理科大学

〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

2641 Yamazaki, Noda, Chiba 278-8510, Japan

周波数帯(410 MHz~430 MHz 及び 440 MHz~470 MHz)で使用する事が望ましく、高周波化が必要となる。本研究では、同周波数帯で動作し一般的な 8 の字形コイルよりも小型となるよう巻き方の工夫を施した外周 2 回巻き 8 の字形コイルの提案と、これをエネルギー伝送用コイルと一体化した試作経皮トランスフォーマの諸特性評価を研究の目的とした。

2. 8 の字形コイルの諸特性

2.1 経皮エネルギー情報伝送用トランスフォーマ

経皮エネルギー情報伝送用トランスフォーマの概略を Fig.1 に示す。体内側、体外側それぞれにおいてエネルギー伝送用空心扁平コイルと情報伝送用 8 の字形コイルを重ねて一体化した。一般的なコイルを重ねて一体化した経皮トランスフォーマでは、エネルギー伝送用コイルに流れる電流によって生じる磁束が情報伝送用コイルに鎖交し情報伝送用コイルに誘導電流が流れることから、通信機器の故障が懸念される。これに対して、情報伝送用コイルに Fig.2 に示す 8 の字形コイルを用いることでエネルギー伝送用コイルに流れる電流によって生じる磁束が情報伝送用コイルに鎖交し生じる誘導電流は、コイルの左右で逆向きになり磁束を打ち消すことができる。

ここでは、エネルギー伝送と情報伝送の相互干渉について評価を行うため、直径 60 mm、20 回巻きのエネルギー伝送用コイルに対し、直径 60 mm、1 回巻きの情報伝送用コイル、同一寸法で 8 の字に巻いた情報伝送用コイルをそれぞれ密着させ、駆動用エネルギー伝送を行っていない状態でネットワークアナライザ (Agilent Technologies, N5230A, California, USA)を用いてエネルギー伝送用コイルから情報伝送用コイルへの透過特性を測定した。結果を Fig.3 に示す。駆動用エネルギー伝送周波数である 300 kHz⁹⁾において、一般的な 1 回巻きコイルを用いた場合の透過は-26.1 dB であるのに対して、1 回巻き 8 の字形コイルを用いた場合は-49.8 dB と、エネルギー伝送用コイルによる誘導電流の影響を 23 dB 低減していることがわかる。

Fig.1 Transcutaneous transformer for the energy and information transmission system

Fig.2 Structure of a figure-eight coil and cancellation of magnetic flux linkage

Fig.3 Comparison of transmission characteristics between a figure-eight coil and a single-turn coil

Fig.4 Frequency characteristics of a figure-eight coil at 50 mm, 55 mm, and 60 mm

2.2 8の字形コイルの寸法の検討

体内への埋め込みにはエネルギー伝送用コイル及び情報伝送用コイルの直径を 50 mm 以下にすることが望ましい⁹⁾。8の字形コイルがアンテナとして動作する周波数は幾何学的寸法に依存するため、ここでは 429 MHz 帯での情報伝送に適した寸法を検討した。情報伝送用 8の字形コイルをエネルギー伝送用コイルの中央に密着させ、エネルギー伝送を行わない状態において、情報伝送用 8の字形コイルの直径と反射特性の関係をネットワークアナライザを用いて測定した。結果を Fig.4 に示す。コイルの直径を小型にすると、共振周波数が高域にシフトすることがわかる。特に、エネルギー伝送用コイルを装着した 8の字形コイルを目標の周波数帯で共振させる直径は 60 mm であった。これは目標寸法である 50 mm より大型であり、8の字形コイルの小型化が必要である。

2.3 複数回巻き 8の字形コイルの周波数特性

外直径を 50 mm 以下とし、共振周波数を低域にシフトさせるために、Fig. 5 に示すような複数回巻いた 8の字形コイルを試作し、外直径 50 mm、内直径 18 mm の 20 回巻きのエネルギー伝送用コイル⁷⁾に密着させ同様の測定を行った。結果を Fig. 6 に示す。巻き数を増加させることにより、共振周波数は低域にシフトしたものの、その効果はわずかであり、別の巻き方を検討する必要がある。

2.4 外周 2 回巻き 8の字形コイルとその周波数特性

Fig.7 に本稿で提案する外周 2 回巻き 8の字形コイルを示す。これは 8の字形コイルの外側にさらに 2 回折り返して巻いたものである。単に外周にコイルを 1 回巻くのみでは、共振周波数は低域にシフトするもののエネルギー伝送用コイルに流れる電流から生じる磁束と鎖交する。そこで、外周に巻いたコイルをさらに巻き戻す工夫を施し磁束の鎖交面積を低減した。

エネルギー伝送用コイルからの磁束の影響を評価するため、2.1 と同様の測定を行った。結果を Fig.8 に示す。300 kHz における透過特性は -46.1 dB と折り返しの影響で 3.0 dB 増大したものの、従来の 8の字形コイルと同様にエネルギー伝送用コイルによる誘導電流を低減できているといえる。

Fig.5 Image and schematic of a dual-turned figure-eight coil

Fig.6 Frequency characteristics of a figure-eight coil for one turn, two turns, and three turns

Fig.7 Image and schematic of two turns of the outer circumference figure-eight coil

Fig.8 Relation between the misalignment and transmission characteristics at 427 MHz

429 MHzにおいて外周2回巻き8の字形コイルが共振する外周2回巻きの字形コイルの直径を2.2と同様に検討した。結果をFig.9に示す。共振する直径は、28 mmとなり、1回巻き8の字形コイルと比較して大幅に小型化できた。比較のため、同じ直径の1回巻き8の字形コイルの共振周波数を測定した。結果をFig.10に示す。1回巻き8の字形コイルの共振周波数は980 MHzであり、外周2回巻き8の字形コイルは小型でありながら共振周波数を低域にシフトできることがわかる。

3. 一体型トランス伝送特性

3.1 外周2回巻き8の字形コイル間の透過特性

一体型経皮エネルギー情報伝送トランスフォーマーに外周2回巻き8の字形コイルが適応可能であるか確認するため、体内外双方の外周2回巻き8の字形コイルにエネルギー伝送用体内外コイルを密着したものを試作し、これを用いたエネルギーと情報の伝送に関する諸特性評価を行った。ここでは体内外コイル間に皮膚厚を考慮し5 mmの間隙を発泡スチロールを用いて設けた。外周2回巻き8の字形コイルで構成される情報伝送用トランスフォーマー間の透過特性をFig.11に示す。一例として、後述の通信実験に用いる通信ユニット(MU1N-429, 株式会社サーキットデザイン)のキャリア周波数である429 MHzにおける透過特性は-12.14 dBであった。なお、同ユニットを用いた実験では送信出力1 mWのとき、透過が-60 dB以下であっても通信可能であることを確認している。したがって十分な伝送特性を有していることがわかる。

3.2 エネルギー伝送の諸特性

一体型経皮トランスフォーマーのエネルギー伝送体内用コイルに人工心臓の負荷を想定した30 Ω の抵抗負荷を接続し、体外から体内へ20 W¹⁰⁾の駆動用エネルギーを伝送した。このときのエネルギー伝送効率、85.7%であった。エネルギー伝送用経皮トランスフォーマー単体での伝送効率は89.0%であり、両者を比較すると3.0%低下したものの、情報伝送機能を付加とシステム全体の小型化を実現できたといえる。

3.3 エネルギーと情報の同時伝送

エネルギー伝送用経皮トランスフォーマーと外周2回巻き8の字形コイルを用いた情報伝送用経皮トランスフォーマーを一体化させた一体型経皮トランスフォーマーを用いてエネルギーと情報の同時伝送を検討した。20 Wのエネルギーを体外から体内へ伝送した状態で、1,000文字分の情報を双方向で伝送した。その結果、エネルギー伝送効率は84.4%、情報伝送においては、符号誤りは無く、エネルギーと情報を同時に伝送することができた。

4. 位置ずれ発生時の諸特性

体内コイルを患者に埋め込んだ際には、位置ずれが生じ、エネルギーや情報の伝送に影響が生じる可能性がある。ここでは、一体型経皮トランスフォーマーの体内外コイル間に結合異常が生じたときの諸特性を評価した。

本稿では、Fig.12(a),(b)に示すようなx方向およびy方向の位置ずれと θ 方向の回転によるずれが生じた場合の諸特性評価を

Fig.9 Frequency characteristic of each turn of the outer circumference figure-eight coil

Fig.10 Frequency characteristic of two turns of the outer circumference figure-eight coil

Fig.11 Transmission characteristics

行った。

4.1 x 方向, y 方向の位置ずれの評価

4.1.1 エネルギー伝送用コイル間の結合係数

エネルギー伝送用経皮トランスフォーマの結合異常は伝送効率の低下を引き起こすため、ここではエネルギー伝送用コイル間の結合係数の測定を行った。一体型経皮トランスフォーマに x 方向の結合異常ずれが生じた際のエネルギー伝送用コイル間の結合係数を、Fig.13 に示す。x = 0 mm において結合係数が 0.37 であるのに対して、x = 25 mm においては 0.02 に低下した。

4.1.2 外周 2 回巻き 8 の字形コイル間の透過特性

体内外コイル間に位置ずれが生じた際の 429 MHz におけるずれと透過特性の関係を Fig.14 に示す。位置ずれの増加に伴い透過特性は劣化し、x = 0 mm のとき -12 dB であったのに対し、x = 30 mm のときに -23 dB であった。先行研究では、8 の字形コイルに位置ずれが生じた際にコイルの中間地点に、通信が不可能となる点が存在したのに対し⁵⁾、本研究では、透過特性の急峻な低下は見られず、特に位置ずれ 50 mm 以下において通信不可能な点は存在しなかった。なお、エネルギー伝送用コイルの直径に重なる位置ずれ 50 mm 以下において 3.3 節と同様の実験を行ったところ、符号誤りなく情報伝送可能であった。

4.2 θ 方向ずれ発生時の外周 2 回巻き 8 の字形コイル間の透過特性

一体型トランスフォーマ間に θ 方向のずれを生じさせた際の情報伝送の透過特性を同様に測定した。結果を Fig.15 に示す。先行研究³⁾では、 $\theta = 90^\circ$ に近づけると透過特性が劣化し、通信が不可能な角度が存在した⁵⁾。一方で 429 MHz における透過特性の変化は 1.0 dB とほとんど変化が見られなかった。

4.3 位置ずれ発生時のエネルギー伝送用コイルの影響の変化

一体型経皮トランスフォーマに x 方向ずれが生じた場合、8 の字形コイルの 2 つのコイルに鎖交する磁束に差が生じ誘導電流を打ち消さなくなる可能性がある。そこで、x 方向ずれが生じた際のエネルギー伝送周波数 300 kHz におけるエネルギー伝送用コイルから外周 2 回巻き 8 の字形コイルへ透過特性を測定した。結果を Fig.16 に示す。8 の字形コイルの直径の 50%にあたる x =

Fig.13 Relation between misalignment and coupling coefficient

Fig.14 Relation between the vertical and side misalignments and the transmission characteristic at 429 MHz

Fig.12 Misalignment of communication test

Fig.15 Relation between the angular deviation and transmission characteristics at 429 MHz

Fig. 16 Relation of transmission at 427 MHz and misalignment

15 mm のずれが生じたとき透過は-43.12 dB になることが確認できた。なお、同条件で、エネルギー伝送用コイルの直径にあたる 50 mm 以下の x 方向ずれが生じている状態において情報伝送を行った結果、いずれのずれにおいても符号誤りなく情報伝送が可能であった。

5. 結言

本稿では、特定小電力無線局割当て周波数帯域での 8 の字形コイルの使用を目指し、小型でありながら同周波数帯域において使用可能となる巻き方の工夫を施した外周 2 回巻き 8 の字形コイルの提案と、その伝送特性評価を行った。さらに、エネルギー伝送用コイルに外周 2 回巻き 8 の字形コイルを装着し、駆動用エネルギーと情報の同時伝送を試みた。その結果、429 MHz で動作する一般的な 8 の字形コイルが直径 60 mm であるのに対し、提案する外周 2 回巻き 8 の字形コイルは直径 28 mm と小型化することができた。エネルギー伝送用コイルと外周 2 回巻き 8 の字形コイルを密着させた一体型経皮トランスフォーマの体内外の外周 2 回巻き 8 の字形コイルの位置ずれが生じてない場合の 429 MHz における透過は-12.14 dB であった。エネルギー伝送を行った状態で通信ユニットを用いて体内外間で 1,000 文字分の情報を双方向で伝送したところ、誤りなく伝送することができた。コイル間に 50 mm の位置ずれが生じた場合においても同様の結果が得られた。以上より、本稿で提案する外周 2 回巻き情報伝送用コイルの有用性を示すことができた。

参考文献

- 1) 厚生労働省, 厚生労働省政策レポート 改正臓器移植法. 2010; <http://www.jotnw.or.jp/studying/1-4.html>
- 2) 日本臓器移植ネットワーク, 臓器移植に関する提供件数と移植件数. 2017; <https://www.jotnw.or.jp/datafile/offer/index.html>
- 3) 高橋護, 松木英敬, 経皮コイルによる体内埋め込み機器動作監視に関する実験的検討. 電気学会論文誌 A 2008; 121(11):1025-1031.
- 4) 村上遥, 齋藤逸朗, 阿部祐輔, 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. 医用電子と生体工学 2016;54(27):191.
- 5) 山本隆彦, 越地耕二, 体内埋込型人工心臓用経皮光情報伝送システム. 一偏光板を用いた光のクロストークの低減-. 電気学会論文誌 2012;132(7):1202-1203.
- 6) 田村望, 山本隆彦, 青木広宙, 越地耕二, 本間章彦, 巽英介, 妙中義之, 完全埋込型人工心臓用経皮エネルギー・情報伝送システム. 一体外結合型経皮エネルギー・情報伝送トランスの一体化-. 電気学会誌 2008; 128(1):150-151.
- 7) 染川達郎, 田倉哲也, 佐藤文博, 松木英敏, 佐藤忠邦, 8 の字形コイルを用いた全二重信号伝送システムの評価. 日本応用磁気学会誌 2007;31(4):385-388.
- 8) 総務省電波利用ホームページ, 周波数割当て・公開. 2017; <http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/>
- 9) 若林春貴, 山本隆彦, 越地耕二, 完全体内埋め込み型人工心臓駆動用経皮エネルギー伝送システム-空心型経皮トランスのコイル寸法検討による結合特性の向上-. 生体生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010 講演論文 2010; 10(52):245-246.
- 10) 三浦英和, 電磁誘導による無線給電方式の現在と未来. 電気学会誌 2015;135(9):617-619.