学術論文

体内埋込み型人工心臓用経皮エネルギー情報伝送システム —外周 2 回巻き 8 の字形コイルの外周切断による磁界影響の低減—

The system of Transcutaneous Energy and Information Transmission for a Totally-Implantable Artificial Heart -Reduction of Magnetic Field Effects by Cutting the Outer Circumference of Two Turns of the Outer Circumference of Figure-eight Coil-

片田 恭平^{*1}(学生員), 山本 隆彦^{*1}(正員), 越地 耕二^{*1}(正員)

Kyohei KATADA (Stu. Mem), Takahiko YAMAMOTO (Mem.), Kohji KOSHIJI (Mem.)

For a totally-implantable artificial Heart (TIAH), the transcutaneous energy transmission system (TETS) and the transcutaneous communication system (TCS) are useful to reduce the risk of infection. Integration of TETS and TCS is expected to reduce patient's burden, including miniaturizing the device. We have studied the two turns of the outer circumference of figure-eight coil for the integration of transdermal energy transmission and transdermal information transmission. In this study, a part of the two turns of the outer circumference of figure-eight coil is cut off to further reduce the effect of the magnetic field on information transmission by energy transmission. In addition, the magnetic field effects caused by the misalignment of the transdermal transformer are compared before and after cutting the circumstance of the coil in the information transmission system.

Keywords: Transcutaneous energy transmission system, Transcutaneous communication system, Artificial heart, Figure-eight coil, Transdermal transformer.

(2020 年 11 月 30 日受付, 2021 年 3 月 16 日再受付)

1 緒言

心臓移植は内科的, 外科的治療では救うことのできない重篤な心疾患をもつ患者への治療法として普及している。日本国内においても, 2010 年の改正臓器移植法施行[1]により, 心臓移植件数は年々増加している。しかしながら, 現状としてドナー不足により心臓移植希望者の 1 割にも満たず, 多くの移植希望者が 1 年以上待機している[2]。心臓移植希望者がドナーを発見するまでの橋渡しとともに, 半永久的な代替として QOL(Quality of Life)の高い人工心臓が求められている。現在, 実用化されている埋込み型人工心臓の駆動用エネルギー供給は, 体外から体内にケーブルを貫通させるものであり, 断線や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, 非侵襲にエネルギー伝送を行う経皮エネルギー伝送システム(Transcutaneous Energy Transmission system: TETS)の実用化が提案されている[3]。また, 体内外の情報伝送では, 経皮情報伝送システム(Transcutaneous Communication

System: TCS) [4]が研究されているものの, TETS とは独立した装置を体表面に装着することが必要であり, 患者にとって煩わしい。人工心臓駆動用エネルギー伝送と情報伝送を単一化し, 体表に単一装着するのみでこれらを行うことで部品点数の削減もでき, QOL 向上が期待できる[5]。単一化にあたり, 通信機器の故障を防ぐため, 情報伝送コイルに発生する誘導起電力の抑制が必要となる。これらを満たす一例として, 空心扁平型エネルギー伝送コイルと 8 の字形情報伝送コイルを一体にした伝送装置を使用する方法[6]や, 医療用テレメータ用周波数帯(410 MHz~430 MHz 及び 440 MHz~470 MHz)[7]で動作し, 一般的な 8 の字形よりも小型になるよう巻き方を工夫した外周二回巻き 8 の字形コイル[8]が提案されている。しかしながら, これらの 8 の字形コイルは, エネルギー伝送コイルとの位置ずれが生じた際, 8 の字の左右で磁界の打ち消しあいができず, 誘導起電力の抑制ができないことが課題となっている。本研究では, エネルギー伝送による磁界が情報伝送に及ぼす影響をこれまで以上に低減するため, 外周 2 回巻き 8 の字形コイルの一部を切断した。さらに, 経皮トランスフォーマの位置ずれによって発生する誘導起電力を, 情報伝送用体内コイルの外周切断の前後で比較をしたので報告する。

連絡先: 山本 隆彦, 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641, 東京理科大学理工学部電気電子情報工学科,
e-mail: t_yamamoto@rs.tus.ac.jp

^{*1} 東京理科大学

2 8の字形コイルの諸特性

2.1 経皮エネルギー情報同時伝送用トランスフォーマ

経皮エネルギー情報同時伝送用トランスフォーマの概要を Fig.1 に示す。体内側と、体外側それぞれに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ることで一体化した。情報伝送用コイルとして一般的に扱われるループコイルを重ねて一体化した経皮トランスフォーマの場合、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、誘導起電力を生じさせることから通信機器の故障が懸念される。これに対し Fig.2 に示すように、8の字形コイルを情報伝送用コイルとして用いることで、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をコイルの左右で逆向きにし、磁束を打ち消すことができる。

2.2 外周2回巻き8の字形コイル

外周2回巻き8の字形コイルとは8の字形コイルの外側にさらに2周分折り返して巻いたものである。単に8の字コイルの外周にコイルを1回巻くだけでは、

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.

エネルギー伝送コイルに流れる電流が発生させる磁束と鎖交する。そのために、Fig.3 に示すように外周に巻いたコイルを巻き戻し磁束の鎖交する面積を低減した。経皮エネルギー情報同時伝送用トランスフォーマの体内の埋込みには、施術の簡易化や患者の負担を考慮してエネルギー伝送コイル及び情報伝送コイルの直径を50 mm 以下にすることが好ましい[9]。情報伝送コイルは一般的に直径を小さくすることで位置ずれ特性や伝送効率が低下する。本稿では、防水用のコーティングを考慮し、エネルギー伝送コイル及び情報伝送コイルの直径を48 mm に設定し検討を行った。

2.3 外周2回巻き8の字形コイルの外周切断時の検討

経皮エネルギー情報同時伝送用トランスフォーマに横軸方向の位置ずれが生じた場合8の字形コイルのそれぞれ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こと[8]がある。そこで、本稿では外周2回巻き8の字形コイルの外周部分を切断した。提案コイルを Fig. 4 に示す。人工心臓駆動用の電力を送送するための300 kHz[9]の磁束が外周2回巻き8の字コイルに鎖交すると、電流は巻き線に沿って流れようとするものの、折り返し部分の切断によりインピーダンスが増加することから、これを遮断できる。また、折り返し部分に発生する意図しないわずかなループを除去し、鎖交磁束を低減できるため反射特性の向上が期待される。

Fig.3 Image and schematic of two turns of the outer circumference figure-eight coil.

Fig.4 Image and schematic of a suggested coil.

3 外周切断時の諸特性

3.1 反射特性及び透過特性

情報伝送用コイルの外周切断による通信性能への影響を調べるために、直径 48 mm の外周 2 回巻き 8 の字コイルをネットワークアナライザ(Agilent Technologies, N5230A, California, USA)に接続し、反射特性 S_{11} の測定を行った。その後、外周 2 回巻き 8 の字コイルの折り返し部分を切断し同様の測定を行い、結果を比較した。測定結果を Fig.5 に示す。両者の共振周波数は 280 MHz であり、外周を切断しても共振周波数のシフトは見られなかった。また、外周切断時には 560 MHz ~ 680 MHz の範囲において $S_{11} < -10$ dB が得られているため、切断により反射損失が減少していることがわかる。

次に 2 つの外周 2 回巻き 8 の字コイルを厚み 5.0 mm の発泡スチロールの両側に挟み固定した状態で、ネットワークアナライザに接続し、透過特性 S_{21} の測定を行った。その後、外周 2 回巻き 8 の字コイルの折り返し部分を切断し同様の測定を行い、結果の比較を行った。測定結果を Fig. 6 に示す。切断時、共振周波数が 250 MHz から 254 MHz とわずかにシフトしたが、この時の透過特性は、非切断時の $S_{21} = -8.35$ dB に対し

Fig. 5 Reflection coefficient of proposed coil.

Fig.6 Transmission coefficient of proposed coil.

切断時 $S_{21} = -8.85$ dB であり、ほとんど変化が見られなかった。透過 S_{21} は -60 dB 以下であっても通信可能である[8] ことから外周切断時においても十分な伝送特性を有していることがわかる。

3.2 シミュレーションによる表面電流の解析

共振周波数において、折り返し部分を切断した場合においても反射・透過特性はほぼ変化しなかった。この理由を考察するため、コイル巻き線の表面を流れる電流の分布を FDTD 法 (Finite-difference time-domain method; FDTD method) を用いた電磁界解析 (CST MWS[11]) により調査した。シミュレーションに使用したモデルを Fig.7 に示す。Table 1 にシミュレーションモデルの各パラメータを示す。折り返し部分を切り取ったモデルの反射特性 S_{11} を解析したところ切り取

Fig.7 Simulation model of proposed coil and two turns of the outer circumference figure-eight coil.

Table 1 Parametric of the Simulation model.

Notations	Value
R	24 mm
L	10 mm
g	0.2 mm
d	0.5 mm

Fig.8 Simulation model of two turns of the outer circumference of figure-eight coil.

Fig.9 Simulation model of proposed coil.

り前と後では共振周波数のシフトは 1.2 %に抑えることができた。共振周波数での表面電流を Fig.8 及び Fig.9 に示す。シミュレーションの結果、外周切断時においても通信用の共振周波数においてはループコイルのように表面電流が流れていることを確認できた。

4 一体型経皮トランスフォーマの諸特性

4.1 エネルギー伝送の諸特性

体外用と体内用の直径 48 mm, 15 回巻きのエネルギー伝送コイルを作成し、それぞれ外周 2 回巻き 8 の字コイルをエネルギー伝送に密着させた。発振器 (KEYSIGHT 33500B Series) から入力した 300 kHz の正弦波を、増幅器 (NF HAS 4101) を用いて増幅し、それをエネルギー伝送用体外コイルに入力した。エネルギー伝送用体内コイルには、エネルギー伝送用体内コイルには、人工心臓の負荷を想定した $10\ \Omega$ の負荷抵抗を接続し、負荷抵抗に駆動エネルギーである 9 W のエネルギー伝送を行った。これらの値は日本メドトロニック社の HVAD[10]を給電対象の人工心臓と想定した。体内外のエネルギー伝送用コイルには、それぞれ共振用コンデンサを直列に接続し、インピーダンスの低減を行った。測定構成を Fig. 10 に示す。このときのエネルギー伝送効率は 69.1 %であった。次に一部を切断した外周 2 回巻き 8 の字コイルをエネルギー伝送用トランスフォーマに密着させ同様の測定を行った。このときのエネルギー伝送効率は 72.4 %であった。エネルギー伝送用経皮トランスフォーマ単体での伝送効率は 80.0 %であり、情報伝送用コイル挿入時はエネルギー伝送効率が低減したが、外周切断時はエネルギー伝送効率の低下を 3.3 %低減できた。

4.2 反射特性及び透過特性

一体型経皮トランスフォーマの通信性能の評価を行うため、Fig. 10 の測定構成を用いてエネルギー伝送コイルに外周 2 回巻き 8 の字コイルを密着させ、エネルギー伝送を行わない状態で、反射特性 S_{11} をネットワークアナライザを用いて測定した。その後、外周 2 回巻き 8 の字コイルの外周部分を切断し同様の測定を行い、これらの比較を行った。結果を Fig. 10, 11 に示す。このときの外周 2 回巻き 8 の字コイルの共振周波数は 300 MHz であり、密着前と比較すると共振周波数が高域にシフトした。反射特性は切断を行う前の -9.4 dB に対し切断後は -11.8 dB と 2.4 dB 改善された。透過特性は、切断後において 184 kHz ~ 1 GHz の周波数帯において -40 dB 以上を得られており、一体型経皮トランスフォーマとして十分な伝送特性が得られている。次にエネルギー伝送時の反射特性と透過特性の影響を

Fig.10 Measurement system of magnetic field intensity.

Fig. 11 Reflection coefficient of proposed coil and two turns of the outer circumference figure-eight coil.

Fig. 12 Transmission coefficient of proposed coil and two turns of the outer circumference figure-eight coil.

Fig. 13 Reflection coefficient of proposed coil in energy transfer

Fig. 14 Transmission coefficient of proposed coil in energy transfer.

評価するため、エネルギー伝送コイルに提案コイルを密着させ、負荷抵抗に駆動エネルギーである 9 W のエネルギー伝送を行った状態で反射特性、透過特性の測定を行った。結果を Fig. 13, 14 に示す。測定の結果、エネルギー伝送を行った状態においても反射特性、透過特性の値、共振周波数のシフトは見られなかったため、通信性能の影響がないことがわかった。

5 位置ずれ時の誘導起電力の測定

一体型トランスフォーマの位置ずれが生じた際のエネルギー伝送コイルと情報伝送コイルの相互干渉の影響を調べるために、エネルギー伝送時にエネルギー伝送用体外コイルに流れる電流が発生させる磁界から受ける情報伝送用体内コイルの誘導起電力の測定を行った。エネルギー伝送用体外コイルに 400 mA の電流を流した。情報伝送コイルに生じる誘導起電力をスペクトラムアナライザ(Anritsu MS2661C)をつなぎ測定した。測定の構成を Fig. 15 に示す。測定では Fig. 16 のように情報伝送用体内コイルを固定し、エネルギー伝送用体外コイルをコイルの位置ずれがない状態を原点として、x 軸方向及び y 軸方向に -3.0 cm から 3.0 cm の範囲で変位させ、測定を行った。まず切断前の状態で測定を行った。測定結果を Fig. 17 に示す。測定結果は外周 2 回巻き 8 の字コイルとエネルギー伝送コイルの位置ずれがない状態を基準(0 dB)とした相対強度で表した。Fig. 17 から横方向の位置ずれがない状態では、磁界の打ち

Fig. 15 Measurement system of magnetic field intensity.

Fig. 16 Measurement points.

Fig. 17 Induced electromotive force of two turns of the outer circumference figure-eight coil.

Fig. 18 Induced electromotive force of proposed coil.

消しあいが生じ、誘導起電力の低減されていることがわかる。しかしながら、x 軸方向に 1.0~2.0 cm の位置ずれが生じると鎖交面積に差が生じ、誘導起電力が増加した。次に外周を切断し、同様の測定を行った。測定結果を Fig. 18 に示す。Fig. 18 から、切断前の原点の誘導起電力と比較して、すべての測定点において相対強度 -25 dB 以下に誘導起電力を低減することができた。また位置ずれによる磁界影響も切断前と比較してほとんど見られなかった。

6 結言

本稿では経皮エネルギー情報伝送システムにおける情報伝送用コイルの外周折り返し部分の切断について提案し、その有用性を明らかにした。まず、従来の外周 2 回巻き 8 の字コイルおよび提案コイルの反射特性及び透過特性の測定をエネルギー伝送コイルと一体化した状態での測定を行った。その結果、外周の折り返し部分を切断することで反射特性が向上し、透過特性においても通信可能な値を示すなど、提案コイルの有用性を示した。次に、外周の折り返し部分を切断する

ことにより、エネルギー伝送用コイルに流れる電流が発生させる磁界によって外周 2 回巻き 8 の字コイルに生じる誘導起電力を低減することができた。今後は免許不要な周波数帯 (410 MHz~430 MHz 及び 440 MHz~470 MHz) に共振周波数をシフトさせること、埋込みを想定したコーティングを施した状態での通信を行うことが必要である。

謝辞

本研究の一部は科学研究費助成事業（課題番号 20K12631）の助成により行われた。

参考文献

- [1]厚生労働省:政策レポート 改正臓器移植法
<https://www.jotnw.or.jp/explanation/01/04/>
- [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, 2020 5-31.
<https://www.jotnw.or.jp/datafile/offer/index.html>.
- [3]村上, 齋藤, 阿部, 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 54 巻, 2016, 191
- [4]岡本, 井上, 三田村, 完全埋込み型人工心臓システムにおける経皮的情報通信, 日本 AEM 学会誌 vol27, No.3, 296-301, 2019
- [5]田村, 山本, 青木, 越地, 本間, 巽, 妙中, 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 128 巻 1 号, 2008, 150-151
- [6]染川, 田倉, 佐藤, 松本, 佐藤, 巽, 妙中, 8 の字コイルを用いた全二重信号伝送システムの評価, Journal of Magnetics Society of Japan, 2007, 385-388
- [7]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/>
- [8]河井, 山本, 越地, 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. ライフサポート学会 2019;2:58-63.
- [9]若林, 山本, 越地, 完全体内埋込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]日本メドトロニック社, HVAD press release, <https://www.medtronic.com/content/dam/medtronic-com/jp-ja/corporate/documents/newsroom/2018-12-13.pdf>,
- [11]CST Studio Suite, Dassault Systemes, <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/> (参照 2020-11-19).