

フレキシブルコイルを用いた経皮エネルギー伝送効率

The Transmission Efficiency of Transcutaneous Energy Transmission System with Flexible Coils

○ 村上 遥（東京大学） 斎藤逸郎（東京大学） 阿部裕輔（東京大学）

Haruka MURAKAMI, The University of Tokyo
Itsuro SAITO, The University of Tokyo,
Yusuke ABE, The University of Tokyo

Abstract: Artificial hearts need a percutaneous driveline for power supply, which causes serious infection as well as inconvenience in life. TETS: Transcutaneous Energy Transmission System is a solution to eliminate the driveline by electromagnetic induction. Previous TETS has a problem of reduction in transmission efficiency by positional displacement between coils, due to difficulty of fixing hard and thick coils. The previous imbedding coils also damage patients' bodies by pressure. We made flexible and thin coils of flexible printed circuits which were easily fixed and prevented positional displacement by embedding into side chest; too narrow to insert for the previous coils. The flexible coil consisted of four single flexible coils connected in serial, 106 mm across, 0.70 mm thick, ESR 0.395 Ω, and inductance 10.89 uH. We compared the flexible and the previous coils by transmitson experiment. Consequently, max efficiency of the flexible coil was 0.66 and the previous coil was 0.66.

Key Words: TETS, Coil, Artificial Heart

1. 背景

1.1 TETS の研究背景

体内埋込式人工心臓は駆動電力の大きさから、電池埋込みのみでは電力が賅えず、現状では体内機器と体外バッテリーとを皮膚貫通ケーブルで繋いで電力を供給している。貫通ケーブルは使用者に感染症のリスクに加え、生活上の不便さも発生させる。この問題を解決するため、体内外にコイルを置いて電磁誘導により体内機器に非接触で電力を送る経皮エネルギー伝送（Transcutaneous Energy Transmission System: TETS）が研究されている。

1.2 TETS の課題

従来の TETS に使用するコイルは、リッツワイヤーを巻いて作製されたかたく重みがあり変形しづらいものだった。そのため、固定が難しく、体内外のコイルの位置がずれて伝送効率が低下するという大きな課題があった。また、使用者の体内組織を圧迫するという問題も生じた。

2. 目的

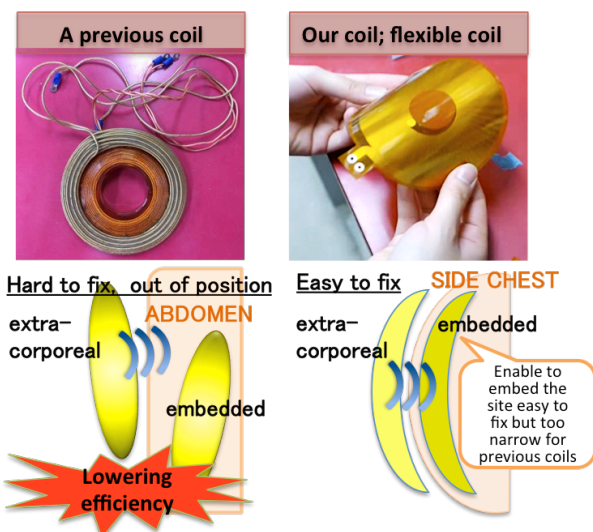


Fig. 1 Concept of the flexible coil

本研究では TETS 用コイルをフレキシブル基板上で作製し、薄く湾曲可能なコイルにすることで固定を容易にし、身体への圧迫のないシステムを目指した。(Fig. 1)

しかし、フレキシブルコイルは従来コイルに比べ導線にあたる銅箔の断面積が小さくなるために等価直列抵抗 (ESR: Equivalent Series Resistance) が大きくなりやすいという問題がある。大きな ESR は伝送電力や伝送効率を下げ、コイルの発熱にも影響する。従来コイルと同程度のサイズで ESR を低くする設計をすると、伝送電力及び効率に関わるインダクタンスも下げることになる。そのため、両者のバランスを取った設計が求められる。本稿では伝送効率に着目し、フレキシブルコイルを用いた TETS の伝送効率を高くするために求められる条件について検討した。

3. 方法

3.1 使用コイルと実験概要

まず、フレキシブル基板を用いて直径 106 mm、片面当たり 1 回巻き、両面で 2 回巻きとなるコイルを作製した。コイルのインダクタンスと ESR は 0.894 uH、0.081 Ω になった。

Table 1 Data of the previous and the flexible coils

Ver.	Inductance (uH)	ESR (100kHz) (Ω)	Number of turns	Diameter	Internal diameter	Number of slits	Weight (g)	Max thickness (mm)
Previous Primary Coil	139.4	0.307	30	113	79 /		104.0	12.5 with coating
Previous Secondary Coil	74.2	0.247	30	80	50 /		89.0	17.8 with coating
A Flexible Coil	0.894	0.081	2	106	84	50	5.4	0.20
4 Flexible Coils in Serial	10.894	0.395	8	106	84	50 /		0.70
5 Flexible Coils in Serial	16.782	0.567	10	106	84	50	23.0	0.88
6 Flexible Coils in Serial	22.551	0.709	12	106	84	50 /		1.05

* "Primary" means extracorporeal side, "Secondary" means embedded side.

このフレキシブルコイルを複数枚直列に繋ぐことで、インダクタンスと ESR が共に増加するモデルとなる。従来コイル及び直列数 $s = 4-6$ 枚のモデルの性能を Table 1 に示す。従来コイルと各モデルについて以下の電力伝送実験により比較し、フレキシブルコイルの条件と伝送効率との関係を調べた。

3.2 実験回路と実験条件

3.2.1 実験回路及び性能測定

伝送回路として Fig.2 に示す回路を用いた。共鳴共振を利用するため一次側（送電側）、二次側（受電側）共に同一の共振用コンデンサを挿入し、二次側には人工心臓の模擬として 25Ω の抵抗を付加した。共振周波数が 100-150kHz 程度になるよう、コンデンサ容量 C を従来コイルでは 10 nF、フレキシブルコイル $s = 4$ では 400 nF、 $s = 5, 6$ では 145 nF にして調整した。

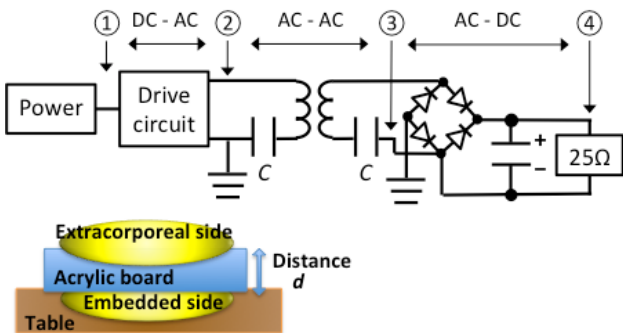


Fig. 2 Transmission circuit and setting of the coils

一次側に 20 Vpp、50-150 kHz の方形波を入力し、コイル間距離 d を 0 mm から 10 mm へと変化させて電圧源における電力①と二次側での出力電力(Fig.2④)を測定し、伝送効率を求めた。

3.2.2 共振周波数の違いによる伝送効率の変化の測定

$s = 4, d = 0$ mm 及び $s = 6, d = 10$ mm において、コンデンサ容量をそれぞれ $C = 145$ nF, 45 nF に、3.2.1 と同様の実験を行い、3.2.1 における結果と比較することで共振周波数の違いによる効率の変化を調べた。

3.2.3 回路の各所出力及び発熱の測定

回路による損失を調べるため、コイル直列数 s 、コイル間距離 d 、コンデンサ容量 C の各組み合わせのうち、伝送効率が最も低い条件での回路各所の伝送効率と発熱を測定した。共振周波数における伝送効率が 3.2.1 及び 3.2.2 の全ての条件よりも低い $s = 6, d = 10$ mm, $C = 145$ nF において、システム各所の効率を調べるため①、②、③、④の箇所の電力を測定し、効率を導出した。また、回路全体の発熱を観察した。

4. 結果

4.1 従来コイルとフレキシブルコイルの性能比較

結果は Fig. 3 のようになった。フレキシブルコイルでは、距離 $d = 0$ mm の際には直列数 s が少ないほど出力は高いが伝送効率が低く、 $s = 4$ では最大出力電力 20.05 W、最大伝送効率 0.62 であった。 $d = 10$ mm の際には直列数 s が多いほど出力電力も伝送効率も高く、 $s = 6$ では出力電力 10.56 W、最大伝送効率は 0.49 となった。従来コイルでは $d = 0$ mm の際の最大出力電力 15.19 W、最大伝送効率 0.66 となり、フレキシブルコイルの結果を下回った。しかし、従来コ

イルでは $d = 10$ mm においては最大出力電力 13.73 W、最大伝送効率 0.59、とフレキシブルコイルに比べ距離の増加による伝送電力及び効率の低下が少なかった。

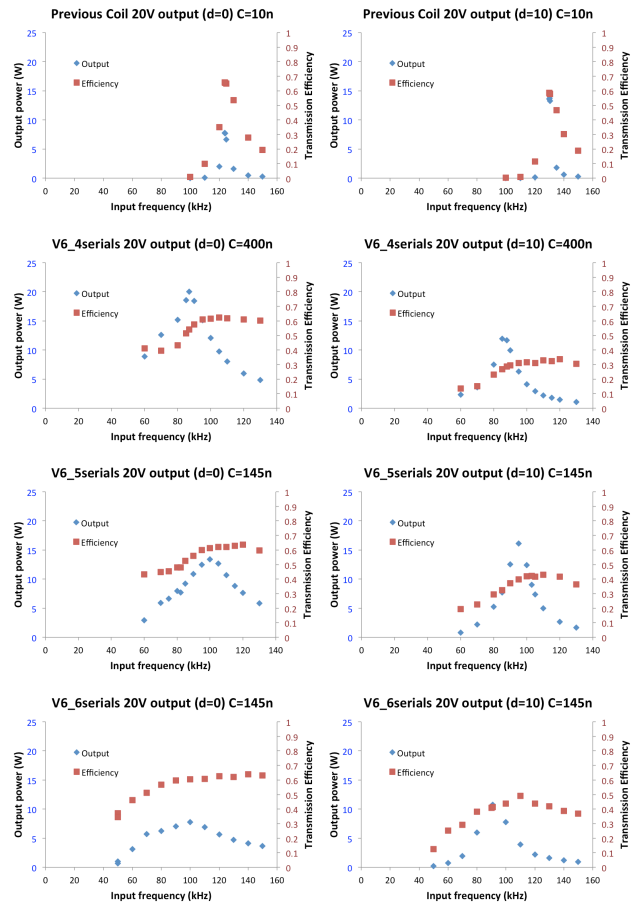


Fig. 3 Comparison of output and transmission efficiency of coils

4.2 フレキシブルコイルの共振周波数による伝送効率変化

$s = 4, d = 0$ mm 及び $s = 6, d = 10$ mm の際に共振周波数をコンデンサ容量により変化させた結果を Fig. 4 に示す。

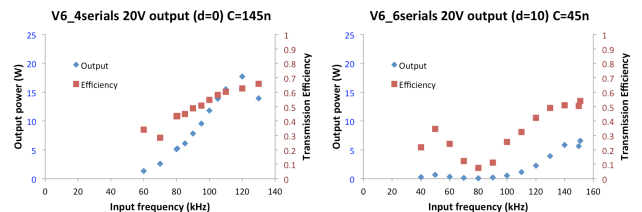


Fig. 4 Effect of different resonant frequency on output and transmission efficiency of the coil

$s = 4, d = 0$ mm ではフレキシブルコイルにおける最大伝送電力 17.69 W と結果 4.1 と比較して低下しているが、最大伝送効率は 0.66 と上がった。 $s = 6, d = 10$ mm の際には最大伝送電力 6.57 W、最大伝送効率 0.54 となり、結果 4.1 と比較し、伝送効率が上昇した。

4.3 回路間の効率比較

$s = 6, d = 10$ mm, $C = 400$ nF において共振周波数 $f = 54$ kHz となった。このとき、①入力電力 36.8 W、②駆動回路の出力電力 20.85 W、③二次側コイルへの伝送電力 10.64 W、④出力電力 9.53 W となった。伝送効率は DC-AC 効率 0.57、AC-AC 効率 0.51、AC-DC 効率 0.90 となり、AC-AC 効率が最も悪かった。室温 24.5 °C で電力伝送実験を行ったとき、電源配線及び駆動回路のハーフブリッジにおいて 40.4 °C、

一次側共振用コンデンサで 30.9 °C、整流回路で 31.5 °C、整流用コンデンサで 31.9 °C、発熱が見られた。コイルにおいては一次側コイルでは温度が 58.8 °C、二次側コイルが 27.8 °Cであった。

5. 考察

結果 4.1 から、密接距離におけるフレキシブルコイルの伝送効率は従来コイル及びフレキシブルコイルの直列数 s の違いによる差は見られなかったが、 $d = 10 \text{ mm}$ では、インダクタンスが大きいモデルほど伝送効率の減少が少なくなった。作製したフレキシブルコイルにおいては ESR がインダクタンスの増加につれて増加しても、インダクタンスを重視することで密接時以外の伝送効率を上げられた。

結果 4.1 及び 4.2 から、共振周波数を変えることにより伝送電力、伝送効率の改善を図ることが分かった。4.3 で共振用コンデンサが発熱していたことを考慮すると、4.2 の結果に共振周波数の違いのみでなくコンデンサの性能が影響していたことも考えられ、使用する共振用コンデンサを変えることでも伝送効率が改善する可能性がある。

回路間の効率について、結果 4.3 より、DC-AC 効率と AC-AC 効率の間に大きな効率の低下があることが分かった。DC-AC 効率に関して、駆動回路の一部において発熱が見られたことから、発熱部位の対策をすることで効率を改善できると思われる。AC-AC 効率に関して、1 次側共振コンデンサのみ発熱したことから共振の成立を妨げ、効率を低下させている可能性がある。また、これに伴ってコイルの結合率の低下が補えずコイルが発熱し、更に効率の低下に拍車をかけていると考えられる。AC-DC 効率に関しては 0.90 と他と比較して高いが、整流回路が発熱していることから改善が可能であると思われる。

6. まとめ

フレキシブルコイルは、コイル間距離が密接している場合には伝送効率において従来コイルと同等以上の性能であった。距離を離れた場合にはインダクタンスが低いために従来コイルと比較して伝送効率が低くなったが、共振周波数を変えることにより、伝送効率の改善は図ることができた。本研究においては、使用回路による伝送効率の低下が見られ、回路の改善によっても TETS の伝送効率を上げることができると見込まれる。