

人工心臓用経皮エネルギー伝送の高周波化と伝送効率の向上
—スパイダー巻きを用いたコイルの線間容量の低減—

Higher frequency and improvement of the transmission efficiency
of transcutaneous energy transmission for the artificial heart

- Reduction of the capacity between windings of the coil using a spider winding -

○ 前田真太郎(理科大) 村松大陸(理科大) 山本隆彦(理科大) 越地耕二(理科大)

Shintaro Maeda, Tokyo University of Science
Dairoku Muramatsu, Tokyo University of Science
Takahiko Yamamoto, Tokyo University of Science
Kohji Koshiji, Tokyo University of Science

Abstract: Transcutaneous energy transmission (TET) is the most promising way for providing driving energy to an implantable artificial heart from the viewpoint of infectious diseases and QOL. A double-layer spiral coil, which is conventionally used, has high stray capacitance and it prevents downsizing and higher-frequency transmission. This paper describes spider coil wound wire alternately onto a disk with odd segment both sides. We investigated the number of segment of the Spider Coil line. As a result, stray capacitance was decreased by 80%. In addition, the inductance of spider coil increased 4.2 times that of a spiral coil and energy transmission efficiency was improved to 97%.

Key Words: Artificial Heart, TETS, Spider Coil, Higher Frequency, Stray Capacitance

1. はじめに

人工心臓による治療はすでに実用化され、近年増加しているものの⁽¹⁾、さらなる普及に向けた課題として、人工心臓への電力供給システムの改善が挙げられる。現在の人工心臓は電力供給のためにケーブルが皮膚を貫通している。そのため、貫通部からの感染症の恐れや、Quality of Life(QOL)の観点から好ましくない。このような問題を解決するために、経皮エネルギー伝送システム

(Transcutaneous Energy Transmission System: TETS)が研究されている。TETSは、体外の一次コイルと体内の二次コイルの間の電磁誘導を利用して経皮的に電力供給を行う。コイルの種類として体外結合型や空心型などがある⁽²⁾。空心型コイルにおいて、二層巻きにすることで、巻き数を多くし、インダクタンスを増加させ高効率化できることが報告されている⁽³⁾。また、高周波化により、高効率化できることも報告されている⁽⁴⁾。しかしながら、二層巻きは線間容量の増加により自己共振周波数が低下し、高周波化の妨げとなる問題点がある。

本稿では、空心型経皮エネルギー伝送システムにおいて、二層構造でのインダクタンスを保ちつつ、自己共振周波数の向上が可能なスパイダーコイルの使用について提案する。

2. 経皮エネルギー伝送システム

Fig.1 に経皮エネルギー伝送システムの等価回路を示す。 V_1 , V_2 は入力電圧と出力電圧、 I_1 , I_2 は一次側及び二次側の電流、 L_1 , L_2 は一次側及び二次側のコイルのインダクタンス、 C_1 , C_2 は一次側及び二次側コイルとの共振用コンデンサのキャパシタンス、 M はコイル間の相互インダクタンス、 r_1 , r_2 は一次側及び二次側コイルの巻線抵抗、 R_L は人工心臓システムを想定した負荷抵抗、 ω は電源の角周波数である。伝送効率向上のため一次側及び二次側において、コイルとコンデンサを直列接続し、共振させている。コイルとコンデンサが共振しているときの共振角周波数を ω_0 とすると伝送効率 η は式(1)で表される⁽³⁾。

$$\eta = \frac{R_L}{\frac{r_1(r_2 + R_L)^2}{(\omega_0 M)^2} + (r_2 + R_L)} \tag{1}$$

相互インダクタンス M は式(2)で、コイルの自己共振周波数 ω_s は式(3)で表される。

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \tag{2}$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L C_s}} \tag{3}$$

k は結合係数、 C_s はコイルの線間容量である。式(1)より、伝送効率 η は相互インダクタンス M を増加させることで向上する。また、式(2)より、一次及び二次側のインダクタンスを増加すれば、相互インダクタンス M が増加することがわかるが、一次および二次のインダクタンス L の増加には、巻き数の増加による、大型化の問題がある。また、式(3)に表されるコイルの自己共振角周波数 ω_s を超えたとき、コイルのインピーダンスはキャパシタンス成分が支配的になり、伝送効率は急峻に低下する。

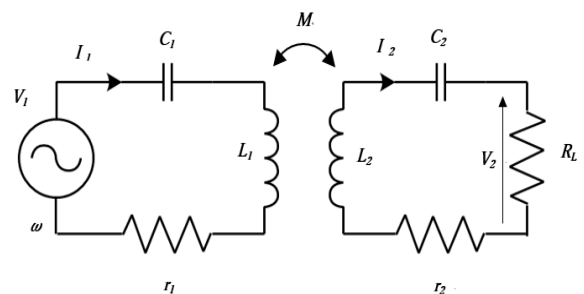


Fig.1 Equivalent circuit of transcutaneous energy transmission system

3. スパイダーコイル

Fig.2 に従来の二層巻きコイルの外観と断面図を示す. 二層構造にすることで，外直径を変えることなく，巻き数を増加させることが可能である. しかしながら，隣接する巻線間の距離が短く，コイルの自己共振周波数は著しく低下する. そこで，線間容量を低減できるスパイダーコイルを Fig.3 に示す. このスパイダーコイルは奇数本の脚をもつ円盤に導線を表裏交互に巻く. 導線間に円盤の脚が挟まることにより導線間の距離が増加し，線間容量の低減が可能である. スパイダーコイルの脚の本数を変化させた際，線間容量と自己共振周波数を測定し，伝送効率の向上の可能について検討した.

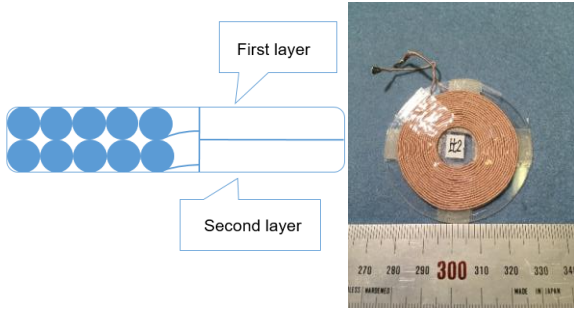


Fig.2 Spiraal coil of two layers

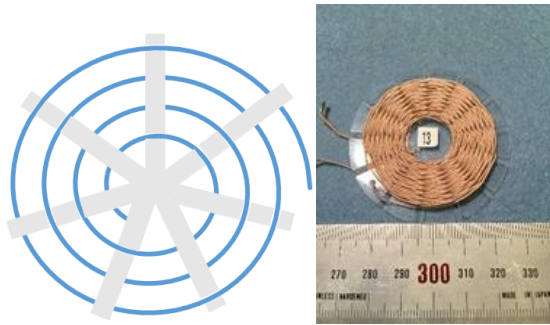


Fig.3 Spider coil

4. コイルの特性と伝送効率の検討

スパイダーコイルの脚の本数を変化させた際，線間容量と自己共振周波数を測定し，伝送効率の向上の可能について検討した. コイルの寸法は埋込みを考慮し，さらに内直径が外直径の 1/3 のとき，最も有用であることが報告されている⁽⁶⁾ことから，内直径を 16 mm，外直径を 48 mm と設定した. また，スパイダーコイルの脚の本数は 9(A)，11(B)，13(C)本とし，さらに比較用として，二層巻き (D)，一層巻き (E) のコイルも試作した. 試作コイルの外観を Fig.4 に示す.

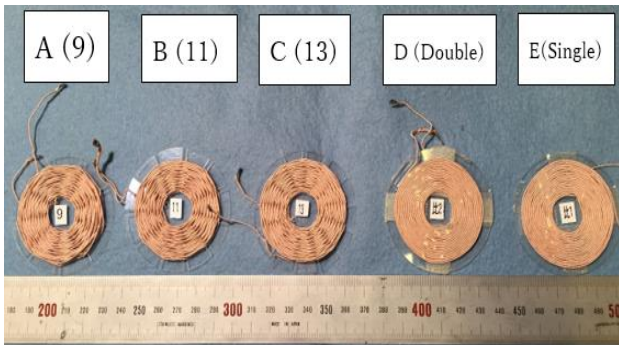


Fig.4 Prototype coil

また，巻き線には表皮効果を考慮し，0.05 mmφ，120本束のリッツ線を使用した. 測定結果を Table 1 に示す. コイ

ルの巻線間の容量 C_s は式(3)より，測定値を用いて算出した.

Table 1 Parameters of the prototype coil

Number	L [μ H]	r [Ω]	f_s [MHz]	C_s [pF]
A	49.3	0.538	17.3	1.72
B	38.9	0.459	20.2	1.59
C	38.5	0.455	21.4	1.44
D	40.0	0.450	7.1	12.4
E	11.5	0.181	45.6	1.06

インダクタンス L と巻線抵抗 r は $f = 400$ kHz での数値である. スパイダーコイル(A)においては，一層巻きコイル(E)の約 4.2 倍のインダクタンスを得ることができた. 自己共振周波数 f_s は，二層巻きコイル(E)が一層巻きコイル(D)に対して，84%減少しているのに対して，スパイダーコイル(A)は 62%の減少に抑えられた. 二層巻きコイル(E)と比較して，スパイダーコイル(A)は線間容量 C_s を 80%低減可能であることが確認できた.

また，一例として，結合係数 $k = 0.3$ ，伝送周波数 $f_0 = 400$ kHz，負荷抵抗 $R_L = 60 \Omega$ (Faulhaber 社 0620...B モーターの入力抵抗)，コイルのパラメータと式(1)から得られる伝送効率は一層巻きで 87%，二層巻きで 96%，スパイダーコイルでは 97%であった.

したがって，スパイダーコイルによる線間容量の低減は有用であり，インダクタンスの増加と自己共振周波数の高周波化が可能で，伝送効率の向上が確認できた.

5. まとめ

本稿では，スパイダーコイルを用いることで，インダクタンスの増加と，自己共振周波数の低減による伝送周波数の高周波化と効率向上を目指した検討を行った. その結果，スパイダーコイルによる線間容量の低減は有用であり，インダクタンスが増加し，高周波化を実現した. これにより，理論計算により，伝送効率 97%と高効率を示した.

6. 参考文献

- (1) 西田正浩：人工心臓(基礎). 人工臓器44, 130-135, 2015
- (2) 松原弘幸, 柴 建次, 越地耕二, 藤原 修, 中村恭之, 巽 英介, 妙中義之, 高野久輝：完全埋込型人工心臓用経皮エネルギー伝送システム—妨害波強度の測定と評価—. 人工臓器29, 18-23, 2000
- (3) 若林春貴, 山本隆彦, 越地耕二：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—. 日本機械学会[No.10-52]生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会2010講演論文集, 245-248, 2010
- (4) 稲垣謙吾, 青木広宙, 越地耕二：カプセル型体内カメラ用エネルギー伝送システム—高周波化によるエネルギー伝送特性改善の検討—. ライフサポート, Vol.18, No.Supplement, 142, 2006
- (5) 瀬下貴仁：体内埋込型機器における経皮エネルギー伝送システムに関する研究—経皮コイルの小型化と伝送特性の改善—. ライフサポート, Vol.26, No.1, 24, 2014