

体内埋込機器のための磁気共鳴を利用した経皮エネルギー伝送

- コイル間の結合係数の向上 -

Transcutaneous energy transmission using magnetic resonance for implantable devices

- Improvement of the coupling factor between coils -

○ 瀬下貴仁¹ 山本隆彦¹ 越地耕二¹

1. 東京理科大学

Takahito Seshimo, Takahiko Yamamoto, Kohji Koshiji
Tokyo University of Science

Abstract: Transcutaneous energy transmission is useful to improve QOL (Quality of Life) and supply energy for implantable devices non-invasively. In order to supply highly efficient energy transmission through the skin, it is necessary to increase the coupling factor between the coils and increase the inductance of each coil. In this study, the optimal shape of the coils to increase the coupling factor was investigated.

Key Words: Transcutaneous Energy Transmission System, Magnetic Resonance, Coupling factor

1. はじめに

医療機器におけるワイヤレス電力伝送技術は非接触、非侵襲といった言葉に代表されるように体内埋込型の機器へのエネルギー供給方法として不可欠な技術である。体内埋込型の機器へのワイヤレス電力伝送は、経皮エネルギー伝送システム(Transcutaneous Energy Transmission System : TETS)と称される。TETSは従来より電磁誘導方式を用いており、その電磁誘導方式は伝送距離が短く送受電コイルの中心軸がずれると効率が低下する問題がある。これに対し、磁気共鳴方式⁽¹⁾は送受電コイルの中心軸がずれることによる効率の低下に対しても電磁誘導に比べ少ない。患者のQOL (Quality of Life)の観点から使用する体内コイルは小型であることが望ましいが、高い伝送効率を実現することが困難になるという問題が生じる。高効率でエネルギー伝送を行うには、コイル間の結合係数やコイルのインダクタンスの増加などが必要である。

本稿では小型かつ高い結合係数を目標に、コイルの内径や外径を変えて、経皮エネルギー伝送に最適なコイルの形状について比較・検討を行った。

2. TETSの概要

Fig. 1にTETSの概要を示す。体内外においては直流安定化電源または電池を電源とし、スイッチング回路により高周波の交流電力に変換される。変換された交流電力は経皮コイルを介してケーブルが皮膚を貫くことなく体内へ伝送される。伝送された交流電力は整流平滑回路により直流電力に変換され、体内埋込機器の駆動及び体内の二次電池の充電に用いられる。

3. 空心型コイル

TETSに用いられる経皮コイルとして、空心型や体外結合型などが開発されているが、本稿では渦巻きの空心偏平型コイルを採用した。

Fig. 2に経皮コイルを用いてエネルギー伝送を行う際の等価回路を示す。

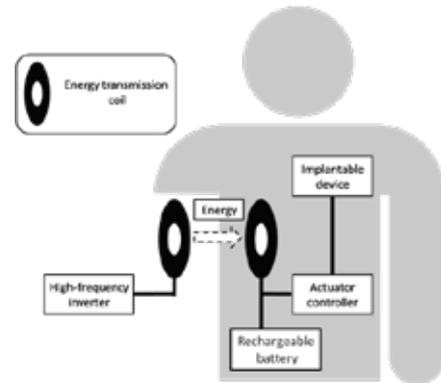


Fig. 1 TETS for Implantable device

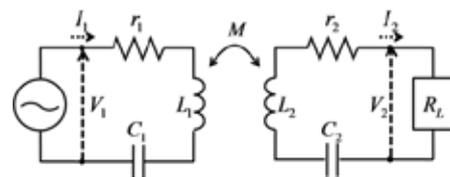


Fig. 2 Equivalent circuit to evaluate efficiency

L_1, L_2 はそれぞれ一次側(体外側)、二次側(体内側)のコイルの自己インダクタンス、 r_1, r_2 はそれぞれ一次側、二次側のコイルの巻線抵抗、 C_1, C_2 は伝送効率を向上させるために挿入する直列共振用のキャパシタ、 M はコイル間の相互インダクタンス、 R_L は体内埋込機器、整流平滑回路、二次電池などを等価的に表した負荷抵抗である。 V_1 は入力電圧、 V_2 は出力電圧、 I_1, I_2 はそれぞれ一次側、二次側のコイルに流れる電流である。伝送角周波数を ω とすると、

$$V_1 = \left\{ r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right\} I_1 - j\omega M I_2 \tag{1}$$

$$V_2 = j\omega M I_1 - \left\{ r_2 + j \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) \right\} I_2 \tag{2}$$

$$V_2 = R_L I_2 \tag{3}$$

と表せる．ここで共振角周波数を ω_0 とすると，

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (4)$$

と表せる．このときの伝送効率 η は

$$\eta = \frac{|V_2 I_2|}{|V_1 I_1|} = \frac{(\omega_0 M)^2 R_L}{r_1 (r_2 + R_L)^2 + (\omega_0 M)^2 (r_2 + R_L)}$$

$$= \frac{R_L}{r_1 (r_2 + R_L)^2 + (\omega_0 M)^2 (r_2 + R_L)} \quad (5)$$

と表せる．(5)式から伝送効率を高くするためには $(\omega_0 M)^2 \gg r_1 (r_2 + R_L)$ とする必要がある．したがって周波数及び相互インダクタンスを大きくすることが重要である．しかしながら，コイルを小型化すると自己インダクタンス及びコイル間の結合係数が低下する．そこで高い伝送効率を保つためにコイル間において高い結合係数を持つコイルの検討を行った．

4. 結合係数の測定方法

2つのコイル間の結合係数を測定する回路図を Fig. 3 に示す．二次側の電圧 V_2 は開放電圧である．

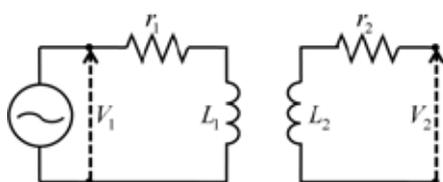


Fig. 3 Equivalent circuit to evaluate coupling factor

Fig. 3 から相互インダクタンスを M とすると

$$M = L_1 \frac{V_2}{V_1} = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (6)$$

$$k = \frac{V_2}{V_1} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (7)$$

と表すことができる．本稿では，(7)式を用いて結合係数を算出した．

5. 伝送用コイルの決定

5-1 外直径 50 mm コイル

二次側のコイルは体内に埋め込むため患者の QOL の観点から小型にすることが望ましい．そのためここでは外直径を 50 mm 一定とした．コイルの内直径を 0, 10, 16.7, 20, 30, 40 mm とし，それぞれ A, B, C, D, E, F と名付けた．試作コイルの外観を Fig. 4 に示す．一次側のコイルは二次側のコイルと同じ寸法のものを試作した．そして試作コイルのパラメータの測定した結果を Table 1 に示す．この実験で使用した巻線は表皮効果を考慮して，0.05 mmφ，120 本束のリッツ線とした．

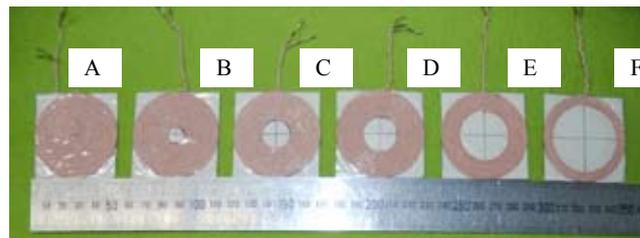


Fig. 4 Appearance of coreless coils

Table 1 Inductances and resistances of coils

Coil	Inductance[μH]	Resistance[Ω]
A	L ₁	14.24
	L ₂	14.72
B	L ₁	14.54
	L ₂	14.36
C	L ₁	13.34
	L ₂	13.25
D	L ₁	11.75
	L ₂	12.02
E	L ₁	8.858
	L ₂	8.810
F	L ₁	3.832
	L ₂	3.866

一次・二次コイル間距離 d を 0~30 mm の範囲において 5 mm 毎に変化させながら二次側の電圧の測定を行い，その結果と Table 1 の結果を式(7)に代入し結合係数を算出した．その結果を Fig. 5 に示す．

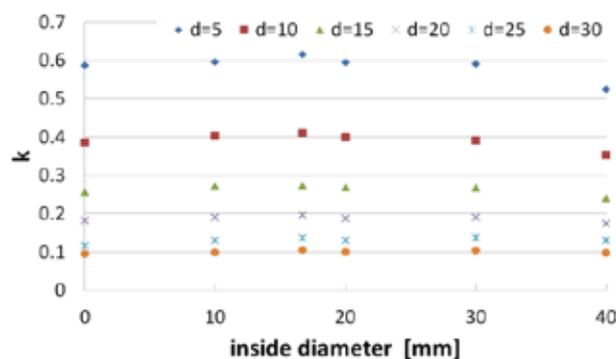


Fig. 5 Coupling factors (outside diameter 50 mm)

Fig. 5 より，コイル間距離に関わらずすべての場合において，試作コイル C の結合係数は他の試作コイルよりも大きい．よって内直径が外直径の 1/3 のときに最も大きい結合係数が得られると考えられる．

次にこの結果を確認するために外直径を変化させて同様の測定を行った．

5-2 外直径 40 mm コイル

外直径を 40 mm とし，内直径を 0, 10, 20, 30 mm とした場合と外直径の 1/5, 1/3, 2/5, 3/5, 4/5 とした場合のコイル A₁, B₁, C₁, D₁, E₁, F₁, G₁, H₁, I₁ について結合係数を算出した．インダクタンスを Table 2 に，結合係数を Fig. 6 に示す．

Table 2 Inductances and resistances of coils
(outside diameter 40 mm)

Coil		Inductance[μH]	Resistance[Ω]
A ₁	L ₁	7.914	0.149
	L ₂	8.229	0.149
B ₁	L ₁	7.756	0.140
	L ₂	7.883	0.142
C ₁	L ₁	5.769	0.117
	L ₂	5.826	0.117
D ₁	L ₁	2.667	0.0743
	L ₂	2.706	0.0791
E ₁	L ₁	8.004	0.145
	L ₂	7.844	0.144
F ₁	L ₁	6.650	0.123
	L ₂	6.955	0.125
G ₁	L ₁	6.661	0.125
	L ₂	6.710	0.127
H ₁	L ₁	4.989	0.104
	L ₂	4.961	0.105
I ₁	L ₁	2.181	0.0690
	L ₂	2.174	0.0692

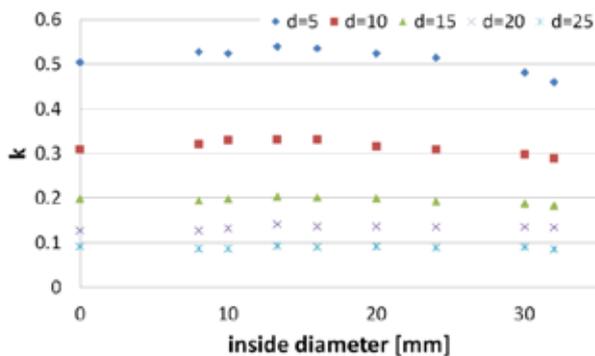


Fig. 6 Coupling factors (outside diameter 40 mm)

外直径が 40 mm の場合でも、外直径が 50 mm の場合と同様に内直径が外直径の 1/3 の場合に結合係数が最も優れているという結果になった。

5-3 外直径 60 mm コイル

外直径を 60 mm とし、内直径を 10 mm ずつ広げていった 0, 10, 20, 30, 40, 50 mm の場合と内直径を外直径の 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 とした場合のコイル A₂, B₂, C₂, D₂, E₂, F₂, G₂, H₂, I₂, J₂ について結合係数を算出した。インダクタンスを Table 3 に、結合係数を Fig. 7 に示す。

Fig. 7 より外直径が 60 mm の場合においても内直径が外直径の 1/3 の場合に最も高い結合係数を示した。

Table 3 Inductances and resistances of coils
(outside diameter 60 mm)

Coil		Inductance[μH]	Resistance[Ω]
A ₂	L ₁	26.78	0.322
	L ₂	26.39	0.315
B ₂	L ₁	26.17	0.309
	L ₂	26.42	0.307
C ₂	L ₁	24.31	0.288
	L ₂	24.25	0.285
D ₂	L ₁	19.08	0.245
	L ₂	19.42	0.247
E ₂	L ₁	12.46	0.188
	L ₂	12.49	0.188
F ₂	L ₁	5.036	0.115
	L ₂	5.114	0.113
G ₂	L ₁	26.00	0.301
	L ₂	25.63	0.300
H ₂	L ₁	22.09	0.267
	L ₂	21.83	0.264
I ₂	L ₁	14.68	0.205
	L ₂	14.82	0.205
J ₂	L ₁	6.23	0.130
	L ₂	6.29	0.128

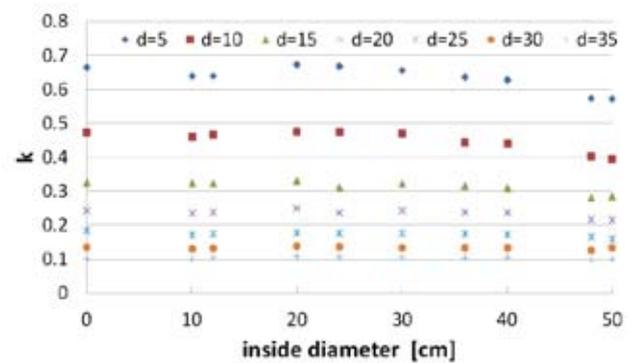


Fig. 7 Coupling factors (outside diameter 60 mm)

5-4 外直径 100 mm コイル

外直径を 100 mm とし内直径を 10 mm ずつ広げていった 0, 10, 20, 30, 33.3, 40, 50, 60, 70, 80, 90 mm としたコイル A₃, B₃, C₃, D₃, E₃, F₃, G₃, H₃, I₃, J₃, K₃ について結合係数を算出した。インダクタンスを Table 4 に、結合係数を Fig. 8 に示した。

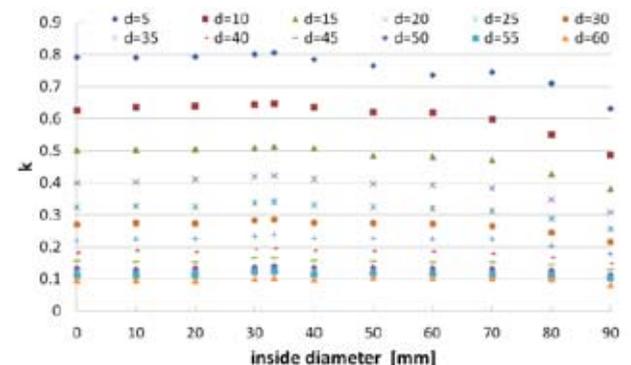


Fig. 8 Coupling factor (outside diameter 100 mm)

Table 4 Inductances and resistances of coils
(outside diameter 100 mm)

Coil		Inductance[μH]	Resistance[Ω]
A ₃	L ₁	122.9	0.905
	L ₂	122.3	0.899
B ₃	L ₁	115.8	0.857
	L ₂	116.8	0.859
C ₃	L ₁	117.0	0.854
	L ₂	113.0	0.823
D ₃	L ₁	105.7	0.785
	L ₂	106.7	0.794
E ₃	L ₁	109.7	0.807
	L ₂	109.4	0.805
F ₃	L ₁	95.36	0.722
	L ₂	94.47	0.721
G ₃	L ₁	83.07	0.663
	L ₂	83.93	0.661
H ₃	L ₁	64.40	0.556
	L ₂	64.71	0.557
I ₃	L ₁	48.01	0.460
	L ₂	47.91	0.457
J ₃	L ₁	27.71	0.329
	L ₂	27.73	0.328
K ₃	L ₁	10.31	0.190
	L ₂	10.38	0.191

Fig. 10 より外直径が 100 mm の場合にも内直径は外直径の 1/3 の場合に高い結合係数が得られた。

以上の結果から最も優れた結合係数を持つコイルは内直径が外直径の 1/3 のコイルであることが確認できた。このことは、内径がある特定の大きさ(ここでは外径の 1/3)で磁界の鎖交がもっとも大きくなることを意味している。

Table 5 に、外直径が 50mm および 100mm それぞれの場合の、外直径、内直径、コイル間距離の三者がそれぞれ相似 (1 : 2) の関係を有するときのコイル間の結合係数を示す。

Table 5 Coupling factors

	Outside diameter 50 mm		Outside diameter 100mm	
	d=10	d=15	d=20	d=30
0	0.3861	0.2576	0.3998	0.2697
10	0.4047	0.2727	0.4102	0.2730
16.7	0.4119	0.2741	33.3	0.4216
20	0.3999	0.2695	40	0.4115
30	0.3912	0.2679	60	0.3935
40	0.3538	0.2409	80	0.3484

Table 5 は、外直径、内直径、コイル間距離それぞれの比が 1 : 2 であるとき結合係数はほぼ同じ値を示しており、外直径、内直径、コイル間距離と結合係数は相似の関係にあることがわかる。

次にコイル間距離 5 mm の結合係数でそれぞれの距離における結合係数を正規化したグラフを、外直径 50 mm の場合を Fig. 9 に、外直径 100 mm の場合を Fig. 10 に示す。

Fig. 9, 10 において、内直径を大きくしたコイルの方がコイル間距離の増大に対して結合係数の減少の仕方が緩やかであることがわかる。このことは、内直径が大きいコイルは内直径が小さいコイルと比べると磁界が遠方まで及びやすいことを示している。したがって、コイル間距離が大きい場合には内直径が大きいコイルの方が有効であり、コ

イル間距離が小さい場合には内直径が外直径の 1/3 のコイルが有効であると言える。

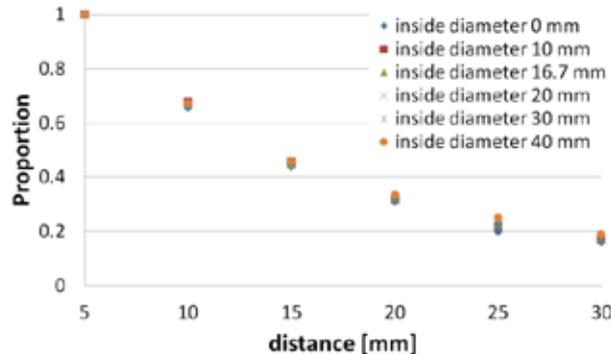


Fig. 9 Normalized coupling factor (outside diameter 50 mm)

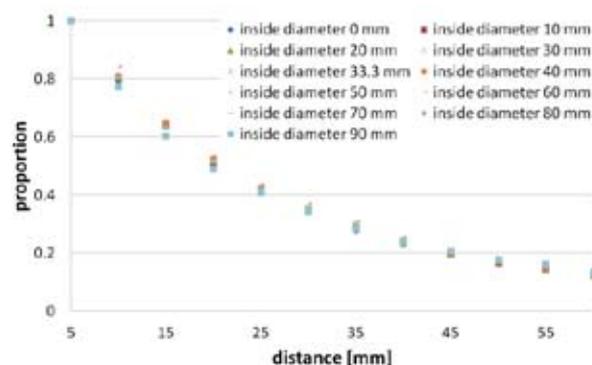


Fig. 10 Normalized coupling factor (outside diameter 100 mm)

6. 効率計算

外直径 50 mm, 内直径 16.7 mm のときの結合係数の測定結果を式(5)に代入して求めた効率 η を Table 6 に示す。

Table 6 Efficiency [%]

d	5	10	15	20	25	30
η	95.8	91.5	82.9	71.8	55.2	42.3

$r_1=0.191 \Omega$, $r_2=0.189 \Omega$, $R_L=50\Omega$, 結合係数 $k=0.412$, 周波数 $f_0=1\text{MHz}$ であるとする、コイル間距離が 10 mm, 15 mm のときに効率が 95%を超えるためには、コイルの自己インダクタンスは 37.8 μH 以上が必要である。

7. まとめ

本稿では TETS で用いる空心型コイルの結合係数の向上を目標に、内直径と外直径の異なるコイルを作製し、検討した。その結果、内直径、外直径、コイル間距離と結合係数は相似関係にあり、コイル近傍では内直径が外直径の 1/3 のコイルが、遠方では内直径を大きくしたコイルが有効であることが確認できた。

参考文献

- (1) 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 共振時の磁界結合を利用したワイヤレス電力伝送用ヘリカルアンテナのオープンショート特性評価, 電気学会産業応用部門大会, 2009