

共鳴型ワイヤレス電力伝送に用いる共振器の比較検討

粟井 郁雄[†] 小森 琢也[†] 石田 哲也[†] 石崎 俊雄[‡]

[†] 龍谷大学理工学部 〒520-0227 大津市瀬田大江町横谷 1-5

[‡] パナソニック(株) 先行デバイス開発センター 〒569-1193 大阪府高槻市幸町 1-1

E-mail: [†] awai@rins.ryukoku.ac.jp, [‡] ishizaki.toshio@jp.panasonic.com

あらまし : 共鳴型ワイヤレス電力伝送では共振器が2つ用いられる。従ってシステムの総合的な特性を支配するのは共振器の性能である。特にその中で共振器間結合係数と無負荷 Q はシステムの伝送効率を決め、放射 Q は EMC 特性の鍵を握るのでこの3つの量の最大化が重要である。この報告では3量を2種の代表的なコイル共振器に対して実験的に求め最適化条件を見出そうとしている。スパイラル共振器に対しては均等、等間隔に線を巻き、適当なピッチにおいて最小の伝送損失を与えるものが見つかった。

キーワード : ワイヤレス電力伝送, 共鳴型, 共振器結合型, BPF, 共振器, 結合係数, 無負荷 Q

Comparative Study of Resonators for Resonant-type Wireless Power Transfer System

Ikuo Awai[†] Takuya Komori[†] Tetsuya Ishida[†] and Toshio Ishizaki[‡]

[†] School of Science & Technology, Ryukoku Univ., 1-5 Yokotani, Seta-oecho, Otsu, 520-2194, Japan

[‡] Panasonic Corporation, Advanced Device Development Center, 1-1 Saiwaicho, Takatsuki 569-1193, Japan

E-mail: [†] awai@rins.ryukoku.ac.jp, [‡] ishizaki.toshio@jp.panasonic.com

Abstract : Two resonators are used for a resonant-type wireless power transfer system, and hence, its over-all property is governed by the constituting resonators. Among all, the coupling coefficient, unloaded Q and radiation Q are key parameters, the former two parameters determining the system transfer loss while the latter governing the EMC property. The present article discusses the three parameters for the two typical coil resonators, that is, spiral and solenoidal resonators, trying to derive the optimum conditions experimentally. We have found the condition for the spiral resonators, which is homogeneous equi-pitch winding, giving the minimum transfer loss.

Keyword : Wireless power transfer, Resonant-type, Coupled-resonator-type, BPF, Resonators, Coupling coefficient, Unloaded Q

1. まえがき

共鳴型ワイヤレス電力伝送は送受電点が基本的に固定された用途に供される。従って3次元空間内において受電点の座標の移動がないという特徴から0次元伝送と分類することが可能であろう。それに対して線路に沿って移動する物体に対する伝送は1次元、面内を移動する物体には2次元、空間内の任意の点に移動する場合は3次元伝送となる。

伝送の次元が低いほど電磁波の空間的広がり小さくなるため、伝送損失は一般的に小さくなると考えられる。0次元の場合は共振器の周辺に存在するエバネセント界を用いるのが普通であり、本質的に放射しない電磁界であるから理論的には放射損失は0となる。現在提案されている0次元伝送においては2つの共振器間のエバネセント界による結合が利用され、整合条件をこのシステムに課すると結果的に帯域通過フイ

ルタ(BPF)を構成することになる。従ってその条件を満たしさえすれば誘電損失、導体損失も含めて伝送損失を限りなく0に近づける事ができる [1]。

2つの共振器の結合を用いた2段BPFという事になると、このシステムの性能の鍵を握るものは構成要素としての共振器である事は明らかである。このとき共振器に求められる性能は

- (1) 大きな結合係数
- (2) 高い無負荷 Q
- (3) 小さい放射損失(高い放射 Q)

である。なぜなら(1)、(2)はその積の大きさが直接伝送損失に逆比例するし、また(3)は既存の通信システムへの妨害や人体への影響を考えれば自明である。

遠方において大きな結合係数を実現するには電気結合よりむしろ磁気結合を用いるのが良い。それは一般的に電気壁は現実世界に存在するのに磁気壁は存在し

ないからであると考えられる。電気壁は共振器から出ていく電気力線を終端させ、遠方まで広がる事を妨げるため共振器の電気結合は小さくなりがちだからである。磁気結合の強い共振器としてはコイルが最も有力である。特にワイヤレス電力伝送に好都合な MHz 帯以下ではコイル共振器は大きな無負荷 Q を持つものが作り易くて上記(1)、(2)を満足させる。

そこで本報告においては代表的なコイル共振器を 2 つ取り上げ、その特性を実験的に解明する。それは MIT[2]やインテル[3]による実証実験で使用されているスパイラル及びソレノイダルコイルであり、この 2 つのコイルは他のグループによっても広く使われているにも拘らず、様々なパラメータに対する上記(1)~(3)の特性が調べられていないのは残念な状況であると考えからである。コイルの共振周波数については 25MHz 近傍に統一したが、我々の持っている測定系の都合で決めた値であり、他意はない。他の周波数に対しても定性的には同じ結果が得られると考えている。

2. 測定系

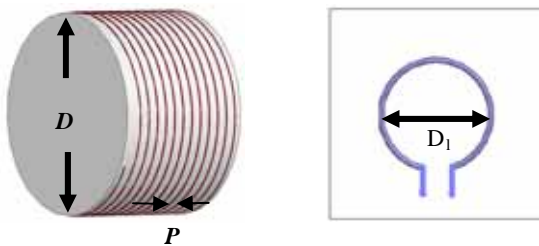
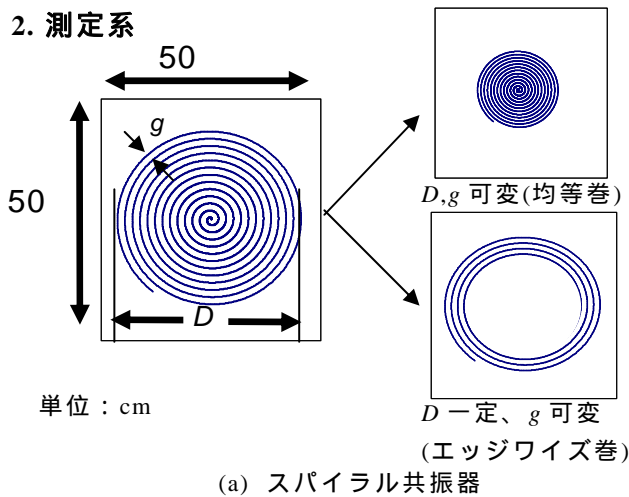


図 1. 各共振器の形状・寸法

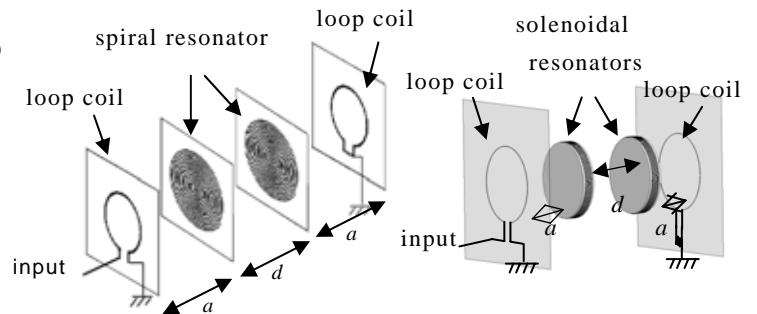
まず使用する共振器の形状を説明する。図 1(a)はスパイラル共振器であり、厚さ 1cm の発泡スチロールに 1 の銅線を貼り付けて作っている。パラメータの変更は

- ・巻線法 1(均等巻) : 線間距離 (ピッチ) g を一定に保って中心から外方へ巻いていく。その結果コイル

直径 D は変化する。

- ・巻線法 2(エッジワイズ巻) : コイル直径 D は 24.5cm と一定に保ちながら小さな線間距離 g を保って外から内側へ巻き込んでいく。そのためコイル中央に穴ができる。

の 2 種類の方法を試みた。又、ソレノイダル共振器は図 1(b)のように直径 24.5cm の円筒状発泡スチロールに一定ピッチ p で銅線を巻きつけた。更にこれらの共振器は直流的には回路と接続されていないため、図 1(c)のようなループプローブを用意し、これと電磁的に結合することによって回路と結合している。



(a) スパイラル共振器 (b) ソレノイダル共振器

図 2. 測定系の配置

次に結合係数の測定系について述べる。図 2 はスパイラル及びソレノイダル共振器の測定系を示しており、コイル間の距離を図示したように定める。片方のループプローブの入力端に VNA(ベクトルネットワークアナライザ)のポート 1 を接続し、もう一方のループプローブの入力端にポート 2 を接続して S_{21} を測定する。結合係数の測定においては、共振器間距離が大きく結合が弱いときには特にループプローブを共振器から十分に離して(a を大きくして)測定を行わなければならない。

一方共振器の無負荷 Q の測定は図 2 のシステムを中央で切ってしまうその片方だけの反射即ち S_{11} のみの測定により行う[4]。この方法は同時に外部 Q も測定できるため便利であるが、若干の計算を必要とするため、測定を進めながらその値を見てそれぞれの Q がどの程度の値を示しているのか不明である点が短所である。

3. 結合係数

結合係数は上記の通り VNA を用いて測定するが 2 つの共振器が結合する結果、元の共振周波数が 2 つに分裂し、 S_{21} の周波数特性を測定するとピークが 2 つ出現する。その周波数をそれぞれ f_1 、 f_2 とすると結合係数 k は

$$k = \frac{2(f_2 - f_1)}{(f_2 + f_1)} \quad (1)$$

によって求めることができる。

(1) スパイラル共振器

巻線法 1(均等巻)による結果を図 3 に示す。線間距離が小さいほど共振器間距離の増大と共に急速に k が減少するのは電磁界分布の集中によると考えれば説明できる。共振器間結合はエバネセント界の重なり積分に比例するという理論に基づいて考えると d に対して指数関数的に減るのではないかとと思われるが片対数グラフである図 3 の結果が直線になっていないのでそうは言い切れないという事である。そこで図 3 を更に両対数グラフに描き直したものを図 4 に示す。もし直線になれば k が共振器間距離のべき乗に比例することになるがその傾向もはっきりしない。更に $p=1\text{cm}$ の共振器の結合係数を電磁界シミュレータで解析して図 3 と同様の片対数グラフで表示してみた所図 5 のような結果が得られた。1 番上の曲線が全結合係数、2 番目はその磁気成分、一番下は電気成分である。この結合係数は明らかに距離と共に指数関数的に減少すること示している。このように距離依存性が実験とシミュレーションで大きく異なるのは恐らく空中に浮いた形になっている共振器の対地容量の不確定さによるものと考えられるが今後の説明を必要とする。

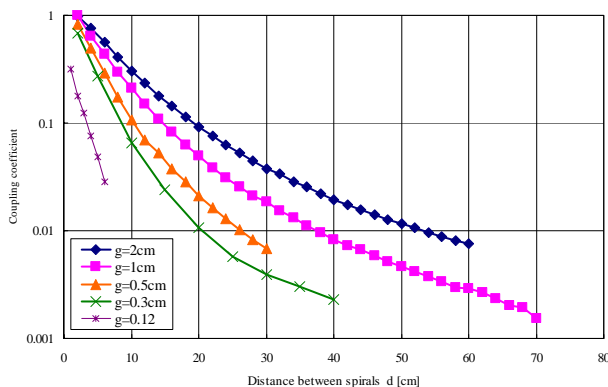


図 3. 結合係数の共振器間距離依存性(片対数グラフ)

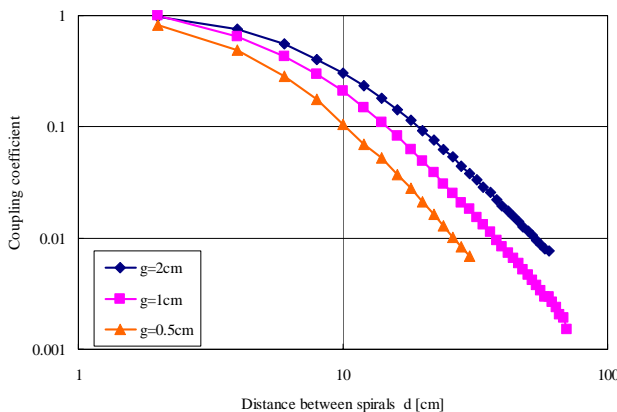


図 4. 結合係数の共振器間距離依存性(両対数グラフ)

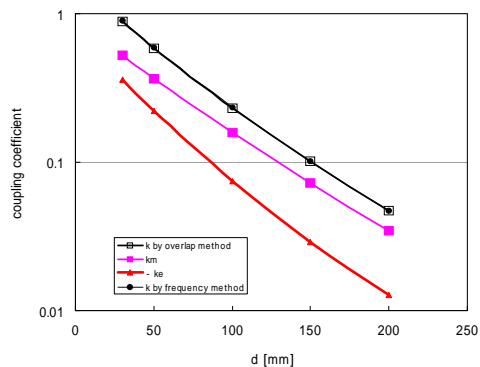


図 5. 結合係数の共振器間距離依存性
電磁界シミュレーション(片対数グラフ)

次に図 3 における横軸を共振器の直径で規格化して $g=0.5, 1, 2\text{cm}$ に対して k を書き直すと図 6 のように異なった線間距離 g に対する 3 本の曲線がほぼ重なった。これはコイルの巻き方を変えても電磁界分布が共振器の横方向と縦方向に対して同様に変わるであろうという洞察に合致している。

更に巻線法 2(エッジワイズ巻)に従って作製した $p=1, 0.5, 0.12\text{cm}$ の 3 種の共振器を比較測定した結果を図 7 に示す。結合係数はあまりピッチに依存しない特徴を持っているが、巻線法を変えることによって特に結合係数に対する積極的な意味は見出せなかった。

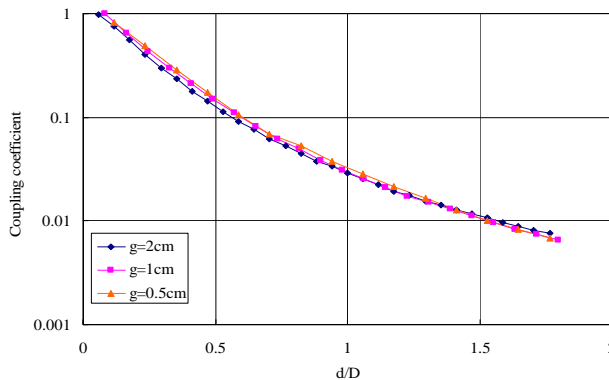


図 6. 結合係数の共振器間距離依存性(横軸 d/D)

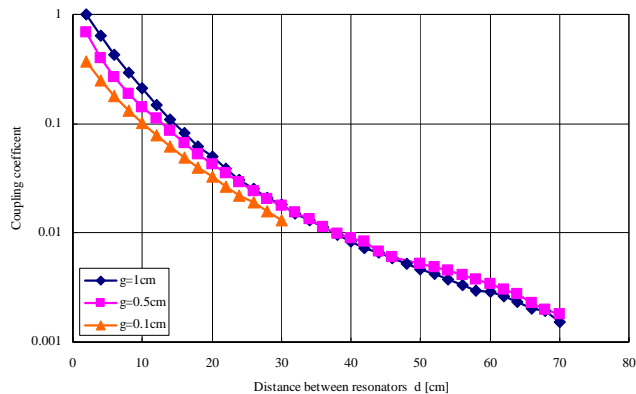


図 7. 結合係数の共振器間距離依存性(エッジワイズ巻)

(2) ソレノイダル共振器

図 1(b)において D は 24.5cm と一定に保ち、巻線間ピッチ p を変えながら図 2(b)の配置で結合係数の共振器間隔 d への依存性を測定した結果を図 8 に示している。ピッチが大きくなって結合係数が小さくならずむしろ大きな d に対してはピッチの大きいほうが結合係数が容易に減らない傾向にあるように見える。これはピッチの大きいほうが筒内を軸方向に磁力線が平行にそろいやすくなり、遠方まで届くのではないかと想像される。また曲線の傾きはスパイラルの場合と同様に大きく変化しており、指数関数的変化からは程遠い。念のために図 4 と同様に両対数グラフに描き直してみたが特に目立った傾向は読み取れなかった。

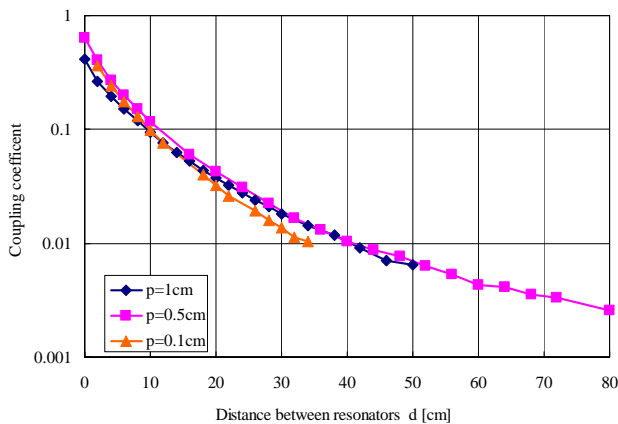


図 8. 結合係数の共振器間距離依存性(片対数グラフ)

(3) スパイラル/ソレノイダル共振器の比較

スパイラル共振器はパラメータの変更によって特性が大きく変わるため、気軽にソレノイダル共振器との比較をすることはできないが、代表的なものとしてスパイラルは図 7 の $g=1\text{cm}$ 、ソレノイダルは図 8 の $p=1\text{cm}$ のデータを選んで重ね書きしたものを図 9 に示す。ソレノイダルの方が遠方での減衰率が小さいようであるが、より遠方の測定値を加える必要がある。

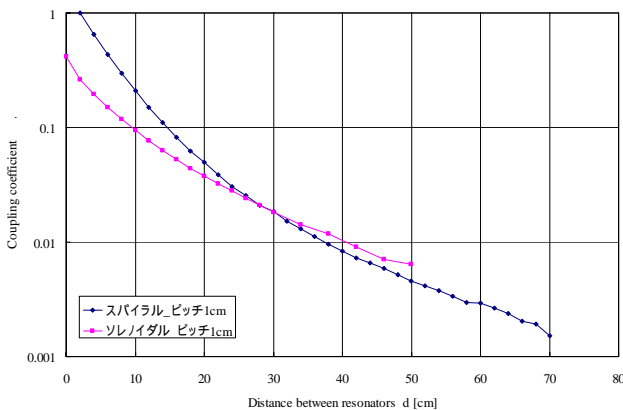


図 9. スパイラル・ソレノイダルの結合係数比較

4. 無負荷 Q

測定は矢張りベクトルネットワークアナライザ (VNA) による。原理は文献[4]に記述されているので手続きだけを示すと、 $|S_{11}|$ の周波数測定結果には図 10 のような谷が 1 つ現れるので、最も低く落ちた値 $-L_0[\text{dB}]$ を用いて以下の式で L_1 を算出する。

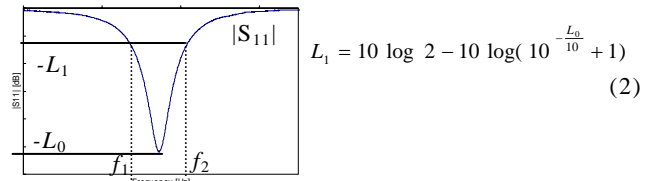


図 10. 各値の取り方

この L_1 値を図 10 に横線で記入し、その線と $|S_{11}|$ 曲線との交点の周波数を f_1 、 f_2 とする。この値を用いて次のように負荷 $Q(Q_L)$ が計算できる。

$$Q_L = \frac{\sqrt{f_1 f_2}}{f_2 - f_1} \quad (3)$$

次に VNA をスミスチャートモードに切り替え S_{11} の軌跡を観測し、もしそれが原点を囲んでいなければ

$$e = \frac{1 - 10^{-\frac{L_0}{20}}}{1 + 10^{-\frac{L_0}{20}}} \quad (4)$$

によって e を計算し、無負荷 $Q(Q_u)$ を次式で計算する。

$$Q_u = Q_c (1 + e) \quad (5)$$

このとき同時に外部 $Q(Q_e)$ も計算することができて

$$Q_e = Q_L \left(1 + \frac{1}{e}\right) \quad (6)$$

を得る。逆にスミスチャート上で S_{11} が原点を囲んでいる場合は(5),(6)の Q_u 、 Q_e の値を入れ替える。

(1) スパイラル共振器

2 種類の巻線法について実験結果を示そう。まず図 11 は巻線法 1 によるものである。横軸は共振器とループプローブ間の距離 a であり、その関数として無負荷 Q を表している。ループプローブがスパイラルコイルの電磁界分布を乱すために近距離においては Q_u が変化している。従って共振器の本来の Q_u 値は a の十分大きい値のときに得られる。図 11 においてピッチ g を 0.5cm から広げていくと Q_u が大幅に低下していくことがわかる。ピッチがそれなりに大きいときには電流の集中はあまりないと考えられ、導体損はむしろ減少するのではないかとと思われるので、 $g = 2\text{cm}$ に対する Q_u の低下は放射損の増大によるものではないかという懸

念が生まれるので 6 章で検討する。

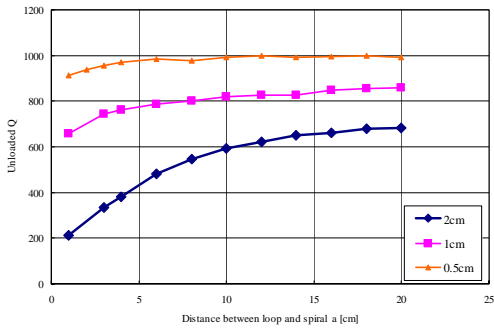


図 11. 巻線法 1 の無負荷 Q 比較

巻線法 1 で逆にピッチを小さくしていくと矢張り Q_u が低下していくことを図 12 に示す。前述の理由でこれは導体損が増大していくためであると考えられる。図 11、12 共にループコイルを十分に離すと Q_u が一定値に収束しているのをその値をピッチの関数として示すと図 13 のような結果が得られた。この最適ピッチの生まれる理由は是非とも解明する必要がある。

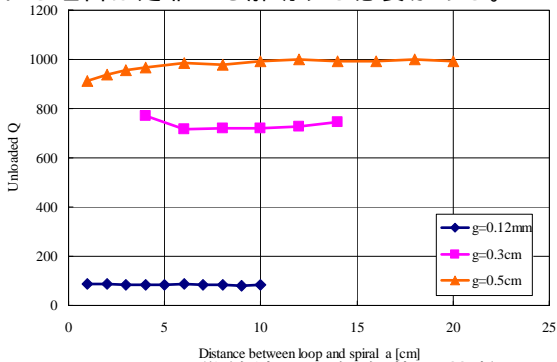


図 12. 巻線法 1 の無負荷 Q 比較

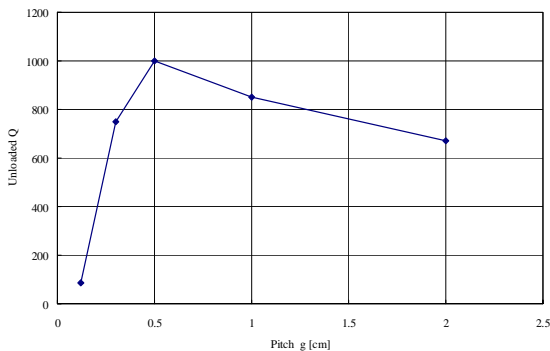


図 13. 巻線法 1 のピッチに対する Q_u の推移

一方、巻線法 2 ではピッチを小さくすることによって単調に Q_u の低下が生じている(図 14)。この理由は暫定的に上述のごとく電流集中によるものとしておこう。図 15 には図 13 と同様に共振器/プローブ間距離 a を十分に大きくとってプローブの影響をなくしたときの Q_u 値を示している。巻線を密着させていくと急激に Q_u 値が低下していくことがわかる。

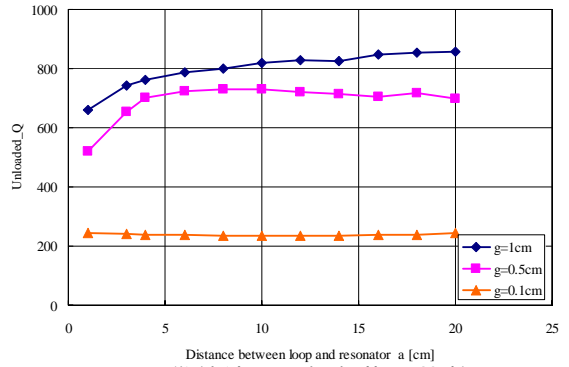


図 14. 巻線法 2 の無負荷 Q 比較

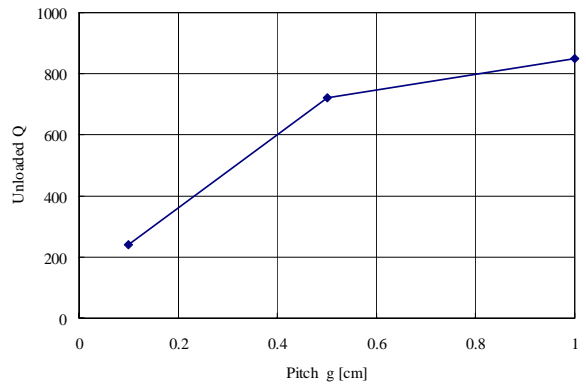


図 15. 巻線法 2 のピッチに対する Q_u の推移

(2)ソレノイダル共振器

半径を一定のままピッチを小さくしていき巻線をエッジワイズ巻きへ持っていくと図 16 に示すように大幅に Q_u が低下することがわかる。

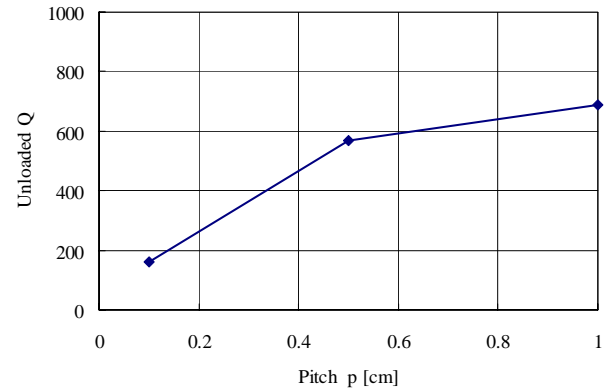


図 16. ソレノイダル共振器のピッチに対する Q_u の推移

5. kQ_u 積

この量は系の伝送損失 L [dB] を決定する。その表現は

$$L = 10 \log_{10} e \sum_{i=1}^2 \frac{g_i}{kQ_i} \quad (7)$$

であり[5]、 e はオイラー数、 Q_i は共振器 1、2 の無負荷 Q 、 g_i は原型低域フィルタの g 値と呼ばれる量でここでは $g_1 = g_2 = 1.4142$ としてよい。もし 2 つの共振器の無負荷 Q が等しければ式(7)は簡単化されて

$$L(\text{dB}) = 8.69 / kQ_u \quad (8)$$

となるので暗算によって大よそのシステム伝送損失が予測できる。この式からわかるように kQ_u 積が 10 以上あれば損失が 0.87dB 以下となるので 18% 以下の損失、即ち 82% 以上の伝送効率を意味し、 $kQ_u > 10$ が良好な伝送特性の目安となる。

さて無負荷 Q は前述のように共振器固有の量(これを本来値と呼ぼう)であるが周囲の影響を受けて電流分布が変われば値が変化する。その例が図 11、12、14 に示されている。しかし Q_u の値を気にする必要があるのは式(7)、(8)から分かるように結合係数 k の小さいときである。このときには伝送損失が増大する恐れがあるからである。ところが BPF の整合条件から明らかのように k の小さいときは外部 $Q(Q_e)$ は大きい必要がある(外部 k は小さい)。そしてそれは共振器/ループ間距離が大きい事を意味するので 11,12,14 では a が大きく Q_u が安定した値を示す場合となる。従って a が小さいときにのみ Q_u の本来値からのずれを考慮して伝送損失の評価をすればよい。

(1) スパイラル共振器

まず均等巻きの場合から結合係数の大きいケース(図 3 において $g=2, 1, 0.5\text{cm}$ の場合)を取り出して図 11 を考慮しながら kQ_u を描くと図 17 のようになる。 $g = 2\text{cm}$ に対して曲線が折れ曲がっているのは図 11 において a が小さいときに Q_u が大幅に減少しているためであり、 d の小さい場合に対して曲線が存在しないのは図 1(c) に示した 1 巻のループコイルでは整合が取れるだけの外部 k が得られないためである。

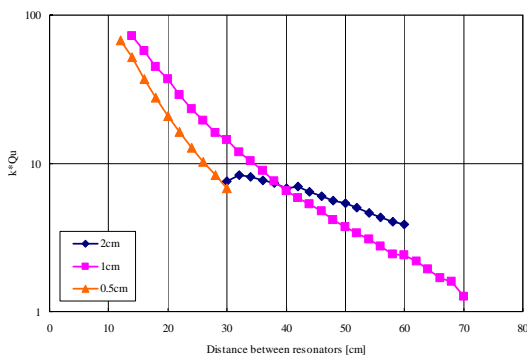


図 17.スパイラル間距離と kQ_u 積の関係(巻線法 1)

図 18 に $g = 0.5\text{cm}$ から減らしていった場合の kQ_u 積を図 3 と図 12 を利用して描くと急激に下がる事がわかる。これは Q_u だけでなく k も減少するためである。以上の結果から判断すると均等巻スパイラル共振器には kQ_u 積を最大にする条件があり、最適なピッチを選ぶ

ことによって伝送損失を最小にできることがわかった。

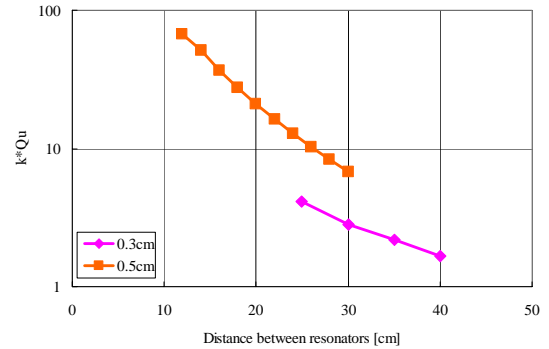


図 18.スパイラル間距離と kQ_u 積の関係(巻線法 1)

エッジワイズ巻でもピッチを小さくして行くと図 13 に示されたように Q_u は単調に減少するため kQ_u 積は減少する様子を図 19 に示した。但しもっと半径の大きい場合の測定を補充する必要がある。

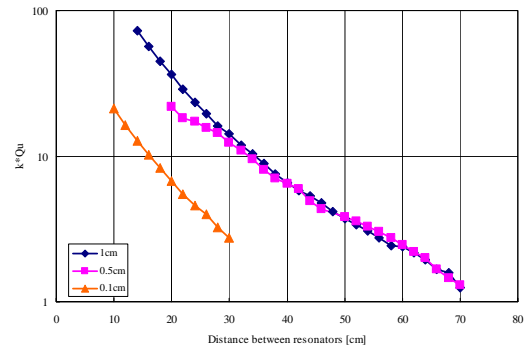


図 19.スパイラル間距離と kQ_u 積の関係(巻線法 2)

(2) ソレノイダル共振器

図 8 及び図 15 を用いて kQ_u 積を描くと図 20 のようになり、矢張り Q_u がピッチの減少に伴って減少する

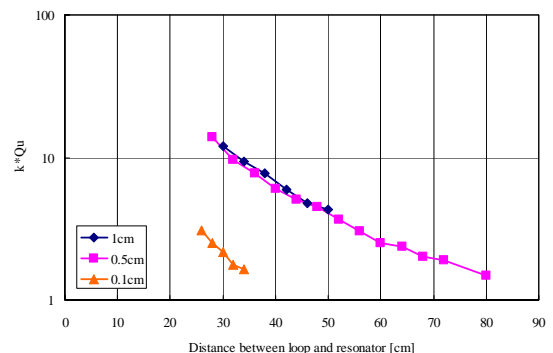


図 20.ソレノイダル間距離と kQ_u 積の関係

ことを反映している。しかし巻線間距離が巻線太さ程度以下になってから急激に減少する点は図 19 と共通している。この場合も図 19 のケースと同様もっとピッチの大きい場合の測定を加える必要がある。従って現時点ではソレノイダル共振器の最適条件は見つかっていない。

6. 放射 Q

今扱っている共振器は損失のある誘電体を使っていないので全損失 $1/Q_u$ は以下のように導体損と放射 -7- 射損からなる。

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r} \tag{8}$$

ここで Q_c 、 Q_r はそれぞれ導体 Q、放射 Q と呼ばれる。もし共振器の無負荷 Q 測定を開放空間で行えば導体損、放射損共に存在するが、導体壁で囲まれた閉空間で行うと放射損はなくなるはずである。そこでそれぞれの場での Q_u の測定値を Q_u^c 、 Q_u^o とすると

$$\frac{1}{Q_r} = \frac{1}{Q_u^o} - \frac{1}{Q_u^c} \tag{9}$$

という関係式から放射 Q は導出できると考えられる。その結果を図 21 に示したがいずれの共振器も Q_u^o より Q_u^c のほうが少し大きくなっており、式(9)を用いた計算が可能である。図中 0.5, 1, 2 と有るのは図 2(a) 0.5,1,2cm のスパイラル共振器である。そこでその計算結果を図 22 に描いた。ある程度のばらつきはあるが大抵どのタイプも Q_r は 10000 前後を示している。

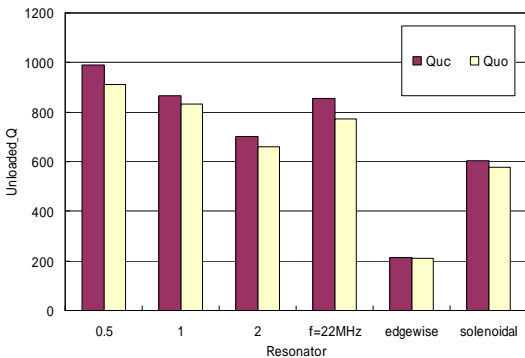


図 21. 共振器に対する Q_u^c と Q_u^o の比較

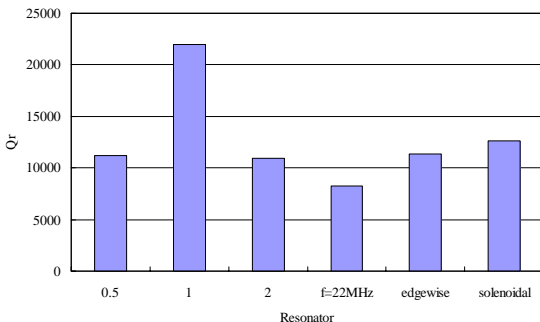


図 22. 各共振器と Q_r の関係

もしこれらの値が信頼できるものであればかなり望ましい結果であると言えることができるが、一回だけの測定結果である上にシミュレーションや理論による裏打ちもなく、パラメータ依存性も測定できていない。従って今回の結果は準備的なものに過ぎないとの評価に甘んじなければならない。

7. むすび

共振器結合型(共鳴型)ワイヤレス電力伝送においてシステム性能の最大決定要素となる共振器の性能を結合係数、無負荷 Q、放射 Q の 3 つの面から実験的に調べた。スパイラルコイル及びソレノイダルコイルは現在多くのグループによって使用されている最も人気の高い共振器であるので、巻き方をいくつか変更して最適化の方法を探してみた。その結果スパイラルコイルはある特定の間隔で巻くことによって最適化されることがわかった。ソレノイダルコイルについては更なる検討が必要である。

これらの結果からコイルの巻き方については全く異なった巻き方を含めてまだまだ検討の余地があると結論できる。

最後に、実験を手伝った頂いた龍谷大学理工学部 3 回生 杉山一聖君、小坂修平君、4 回生 深田大輔君、友田崇史君、シミュレーション計算をしていただいた龍谷大学理工学部講師 張陽軍博士、又シールドルームをお貸し下さった京都大学大学院工学研究科教授 和田修巳博士に感謝する。

文 献

- [1] G. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, "Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structures", Artech House Inc. Norwood MA, 1980.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science vol.317, pp.83-86, (2007-6).
- [3] "インテルが電源コード不要の「ワイヤレス電力」を開発、実演ムービーを公開", GIGAZINE, 2008 年 8 月 23 日.
- [4] 小林禧夫:「マイクロ波共振器の測定技術」, MWE2000 ダイジェスト pp.431-442,(2000-11).
- [5] S. B. Cohn, "Dissipation Loss in Multiple-Coupled-Resonator Filters", Proc. IRE, vol.47, no.8, pp.1342-1349, (1959-8).