

# デュアルスパイラル共振器の作る電磁界と その WPT システムへの応用

栗井 郁雄<sup>\*1</sup> 澤原裕一<sup>\*2</sup> 石崎 俊雄<sup>\*3</sup>

\*1 株式会社リューテック 〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5 龍谷大学 REC ホール

\*2,\*3 龍谷大学理工学研究科 〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5

E-mail: \*1 awai@ryutech.com \*2 t090135@mail.ryukoku.ac.jp \*3 Ishizaki@rins.ryukoku.ac.jp

**あらまし** WPT システムには、出来るだけ広い範囲にわたって一様な送電効率を得たい応用が存在する。そのような要求に対応するために、薄型のプロファイルを持つスパイラル共振器を 2 個セットで用いることにより、かなり広い 3 次元空間で一様性が確保できることを明らかにしている。2 個をセットで用いる方法には 2 種類あるが、そのうち独立な共振器を 2 つ電磁氣的に結合させる方法をここでは採用し、それをデュアル共振器と名付けている。このタイプは 2 つの共振器のうち片方だけに給電すればよいため、構造がより簡単でメンテナンスの簡素化が図れる利点がある。デュアル共振器のつくる電磁界分布、小型受電共振器との結合係数をいくつかの構造に対して示し、それをうまく取り入れることによって一様な送電効率を得られることを示唆している。

**キーワード** 結合共振器型 WPT システム、スパイラル共振器、デュアル共振器、無給電共振器、奇モード、一様電磁界、一様伝送効率

## EM Field Made by a Dual Spiral Resonator and Its Application to the WPT System

Ikuo AWAI<sup>\*1</sup> Yuichi SAWAHARA<sup>\*2</sup> and Toshio ISHIZAKI<sup>\*3</sup>

\*1 Ryutech Corporation, 1-5 Yokotani, Seta Oe-cho, Otsu, Shiga Pref. 520-2194 Japan

\*2,\*3 Faculty of Science & Technology, Ryukoku Univ., 1-5 Yokotani, Seta Oe-cho, Otsu, Shiga Pref. 520-2194 Japan

E-mail: \*1 awai@ryutech.com \*2 t090135@mail.ryukoku.ac.jp \*3 Ishizaki@rins.ryukoku.ac.jp

**Abstract** There is sometimes a demand that a uniform power transfer efficiency as possible is desirable for the wireless power transfer system. Spiral resonators with thin profile are effective for such a demand, constituting a dual resonator that is made by two coupled resonators. Out of two methods for combining two resonators, we have adopted a scheme to couple them electromagnetically, which has simpler structure without feed line for the second resonator, naming it a dual resonator. Due to its simpler structure, the maintenance is easier compared with the other one. We have shown the electromagnetic field distribution of a dual resonator together with the coupling coefficient with a small receiving resonator, and thus pointed out that more uniform transfer efficiency is realizable using the new dual resonator system.

**Keyword** Coupled-resonator WPT system, Spiral resonator, Dual resonator, Non-feed resonator, Odd mode, Uniform electromagnetic field, Uniform transfer efficiency

### 1. まえがき

ワイヤレス給電 (WPT) システムの中で“磁界共鳴型”は近・中距離伝送に適しており、その伝送効率の増大と効率の空間一様性の向上はシステムの応用範囲を広げるために重要である。我々は複数の結合共振器

を用いてその目的を達成する一つの方法としてデュアル共振器という新しい構造を提案する。同じ構造はすでにいくつかのグループから提案されているがその使用目的がこの報告とは異なっており [1]-[3]、電磁界分布の一様化を通じて結合効率の一様化を図っている例

は存在しない。この共振器は名前の示すとおり 2 個の共振器によって形成されており、2 つは同じ共振周波数を持っている。複数の共振器を近づけると相互に結合し、その共振周波数は共振器の数と同じだけの個数に分裂することが知られており、2 個の共振器を用いればいわゆる偶モード/奇モードに分裂する。

この時点でこの 2 個の共振器は一体化されたのみならずことが出来るので[1],[2]、これをデュアル共振器と呼んで送電用に用いる。偶奇モードは周波数が異なるので低いほうの奇モードを基本モード、高いほうの偶モードを高次モードと考えることが出来る。そしてさらに別のもう一つの共振器を導入しこれを受電側に使用するため前記奇モード周波数に合わせて両者を結合させると WPT 伝送回路が形成される。この報告ではデュアルスパイラル共振器を用いて、WPT システムの伝送効率増大と空間一様性向上を図る。

### 2. 結合共振器の特性

筆者の一人は以前に上のようなアイデアに基づく共振器を帯域通過フィルタ (BPF) 小型化のために利用する提案を行った[1],[2]。文献 1 ではプリント基板の上面には通常の共振器を作製し、下のグラウンド面に同型の共振器を加えた図 1 のような共振器、文献 2 では低温同時焼結セラミクス (LTCC) 構造の図 2 のような多層インターディジタルストリップ共振器を提案した。これらは互いにブロードサイド結合するストリップ導体共振器からなるため、共振周波数が強結合によって大きく上下に分裂する。そこで最も低い周波数を基本モードとして BPF に用いれば、回路の小型化と低スプリアス化に貢献する。

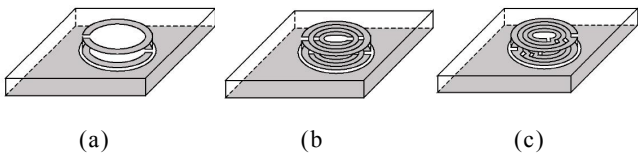


図 1 結合マイクロストリップ共振器 (a)オープンリング共振器 (b)マルチオープンリング共振器 (c)スパイラル共振器

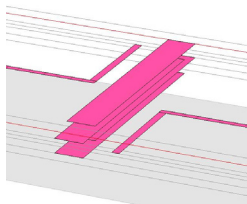


図 2 LTCC 4 重結合マイクロストリップインターディジタル共振器

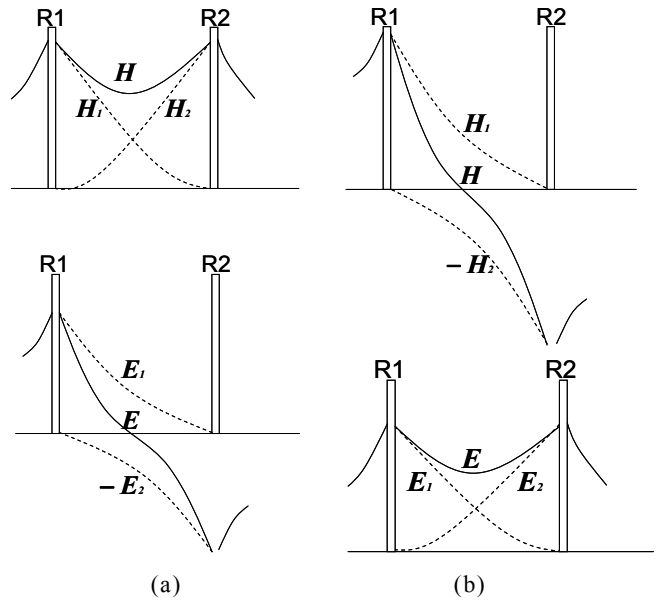


図 3 奇モードと偶モードの電磁界分布概念図 (a)奇モード (b)偶モード

しかし今回の報告では結合共振器の別の側面を利用する。それは図 3 のように 2 つの結合共振器の作る電磁界分布に着目するものである。同一のスパイラル共振器を対称的に配置したとき相互結合によって偶奇モードが生ずることを前述したが、結合モード理論によって電磁界分布を解析すると図 3 のようになることが知られている[4]。近似的には奇モードでは結合によって形成される磁界は各共振器基本モードの和、電界はその差となる。一方偶モードではその逆である。

磁界結合共振器型 (“磁界共鳴型”) WPT システムでは磁界分布が重要で電界分布は結合にはあまり寄与しないので、図 3 から奇モードを用いるのが良いことが分かる。受電共振器を送電共振器 R 1 と R 2 の中間部においたとき、最低の磁界強度を与える中心部で単独共振器の 2 倍の磁界が得られるので伝送効率も 2 倍になるものと予想される。

### 3. 電磁界分布

デュアル共振器の特性を明らかにするため、図 4(a)~(c)に示した代表的な構造を比較検討する。(a)は基本スパイラルコイルにコンデンサを直列に加えた通常のスパイラル共振器で単一共振器と呼ぶ。(b)は基本スパイラルコイル 2 つを適当な間隔だけ離して直列に接続し、共通のコンデンサを直列に加えて共振させる。これを分割共振器と呼ぶことにする。(c)は(a)の単一共振器を 2 つ対向して配置し結合させる。従って片方は外部から給電するが、他方は配線不要という特徴がある。また前述のように(c)は 2 つの共振周波数を持つがそのうちの低いほうのモード (奇モード) のみを用いる。

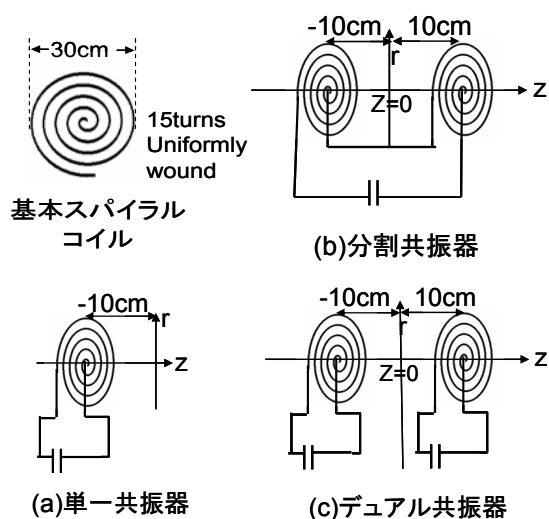


図4 比較検討する3つの共振器 (a)単一共振器(b)分割共振器 (c)デュアル共振器

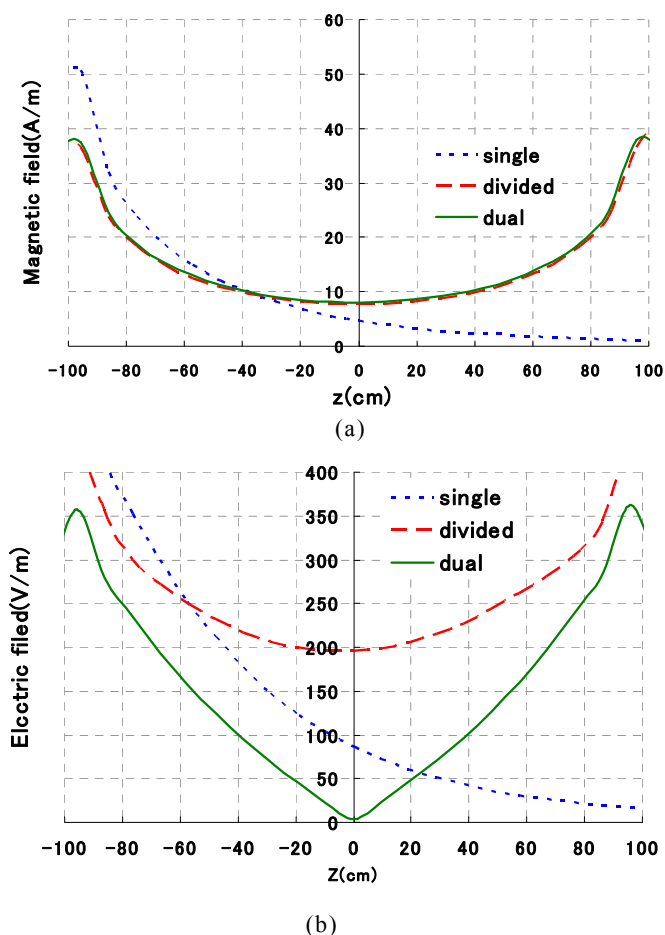


図5 単一、分割、デュアル共振器の中心軸上電磁界分布 (シミュレーション) (a)磁界 (b)電界

3つの構造が作る電磁界の共振器軸に沿った強度分

布を電磁界シミュレータ WIPL-D で計算して図5の結果が得られた。分割共振器、デュアル共振器を構成する2つのスパイラルコイル間隔を20 cmとし、丁度その中心を0として座標軸を決めたので、単一共振器の座標はそれにあわせて-10 cmのところにスパイラルコイルを置いたことにしている。

WIPL-Dの励振法では1Wの電力を入力し、その反射係数S11が表示されるのでS11=-3dBと3構造に対して共通になるよう励振用ループコイルを調整し、同じ量の電力が共振器に注入されるように注意した。その結果、前述のように(図3(a))単一共振器に対してデュアル共振器の奇モードは中心点で2倍の磁界強度となるはずであったが、ここでは1.5倍程度にとどまっている。また分割共振器の磁界強度がデュアル共振器と同程度になっているのは好ましいことである。

参考のため電界分布を図5(b)に示しているが、絶対値表示のためデュアル共振器の電界のうち図3(a)の負値は正值に変更されている。分割共振器の電界は大きいを受電共振器との結合には奇与しないと考えられるのでここでは関心はない。

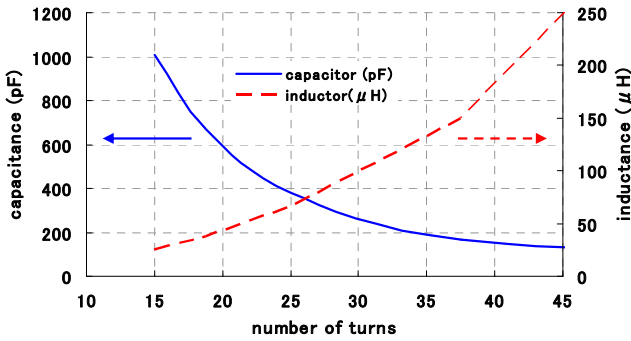
以上によって形成される電磁界分布から判断すると分割共振器、デュアル共振器は同程度の性能であるが、ワイヤで2つの共振器を接続する必要がないという利点を持ったデュアル共振器を利用することとする。

#### 4. デュアルスパイラル共振器の特性

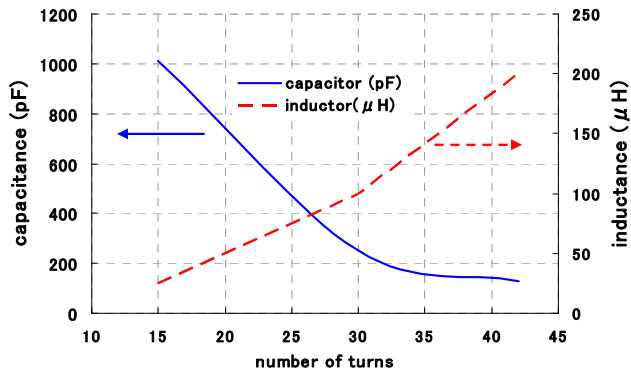
##### (1) コイル巻き数の影響

使用電力はmWオーダーを考えているので容量はチップ部品とする。各種容量値について無負荷Q値を測定すると、容量値によらず2000以上あったのでQ値が数100以下のコイルに比べて容量損失は無視してよい。スパイラルコイルの外形は30cmに固定して巻き数(ピッチも同時に変わる)を変更すれば何が起こるかを調べてみた。それによってインダクタンスが変わり、共振周波数は1MHzに固定しているので当然付加容量値は変わる。横軸をコイルの総巻き数にとってインダクタンス、付加容量の変化をシミュレーションした結果を図6に示している。巻き数をn、半径をrとした時コイルの総延長lはほぼ $\pi(n+1)r$ でありnが大ききときlは巻き数に比例するとしてよい。自己インダクタンスLは一次近似の範囲ではコイル長に比例するはずなので図6のLは直線になると予想される。しかし現実にはそうはなっていないのはコイル巻線間の相互インダクタンスおよび線間容量が等価的に全インダクタンスに寄与しているためと考えられる。一方コイル抵抗Rはもし近接効果が小さければコイル長に比例するので、この共振器の無負荷Qは

$$Q_u = \frac{\omega_0 L}{R}$$



(a)



(b)

図 6 コイル巻き数  $n$  によるインダクタンス  $L$ 、付加するべき容量  $C$  の変化（共振周波数は 1 MHz）、(a) シミュレーション (b) 測定

であることから巻数の増加とともに  $Q$  は増加することが期待できる。図 7 に巻数に対する無負荷  $Q$  の測定結果を示してあるが予測どおりに増大しており、伝送効率が結合係数と無負荷  $Q$  に支配されることを考えると、この特性は実用上重要である。

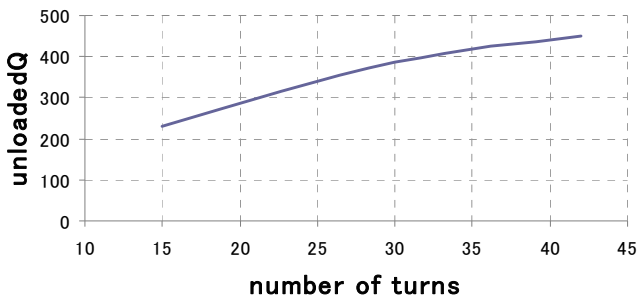


図 7 コイル巻き数による無負荷  $Q$  の変化（測定）

次に図 8 のような小さい受電コイルを用意して、結合係数がコイル巻き数の影響を受けるかどうかを調べる。結合係数は基本的にコイル直径で決まる [5] ことを考え

るとほとんど巻き数の影響はないと予想されるが、図 9 のシミュレーション結果はそれを裏付けるものである。図 9 では送電用として図 4(c) のデュアルスパイラル共振器の基本モードを仮定して、別のループプロブと疎結合状態にして計算した。また、2つのスパイラルコイルの外側を利用することも有るかもしれないので外側の結果も示している。

図 8 受電コイルの形状

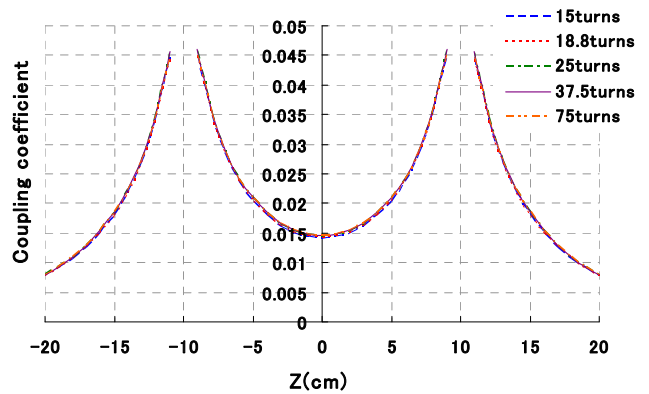
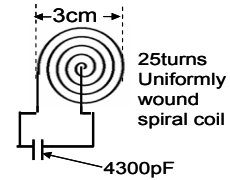


図 9 コイル巻き数の結合係数への影響（シミュレーション）

シミュレーションに加えて上記共振器を実際に製作して実験を行った結果を図 10 に示す。デュアルスパイラル共振器の巻数をパラメータとした図 9 に対応する測定結果は巻数の少ないときはシミュレーションより小さいが、巻数の増加に従って明らかに結合係数が増加し、シミュレーション値に近づいている。その理由は今のところ不明である。

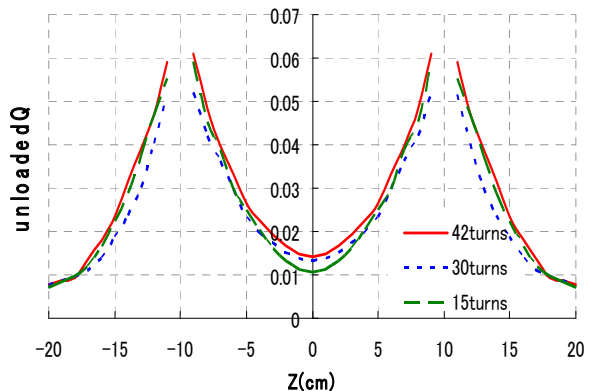


図 10 コイル巻き数の結合係数への影響（測定）

(2) ソレノイドコイルの導入

ソレノイドコイルは同じ直径のスパイラルコイルに比べてより遠方まで磁界が強度を保つことが知られている[5]。そこで図 11 のように片方だけをソレノイドコイルに置き換えてデュアル共振器を構築し、中心軸上の磁界分布を WIPL-D で計算したところ図 12 のような結果が得られた。ソレノイドコイルの巻数は 20 回としその奥行き  $t$  は 20~50mm と変えて図 8 と同じ直径 3cm、巻数 25 回の単一スパイラルコイルを受電用に使用した。ソレノイドコイルは  $z=10\text{cm}$  の場所にその左端面がおかれているが、受電コイルの直径は小さく、

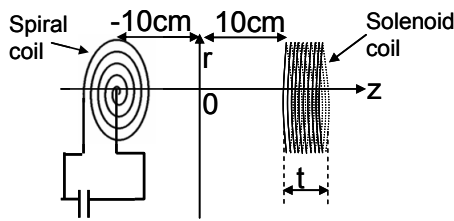


図 11 デュアル共振器の片方をソレノイドコイルに変更したタイプ

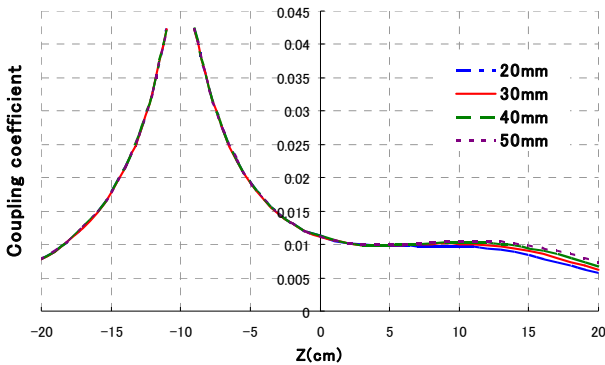


図 12 スパイラル-ソレノイド結合デュアル共振器の結合係数の中心軸上分布 (シミュレーション)

ソレノイドコイルの直径が 30cm あるため内部を貫通して受電コイルを移動できる。その結果  $z=20\text{cm}$  までデータが示されている。

図 12 の結果は図 9 に比べて結合係数が減少しあまり好ましくない。半径方向の変化を確認したうえで何らかの改善することは今後の課題である。

(3) コイル間隔

デュアル共振器を形成する 2 つのスパイラルコイルの間隔が何らかの理由で変わると共振周波数も変わって具合が悪いのでその影響を調べておく必要がある。実験によってそれを確認したので図 12 に示す。この結果からコイル直径程度に共振器が離れていれば共振周

波数シフトは問題とするほど大きくないことが分かる。

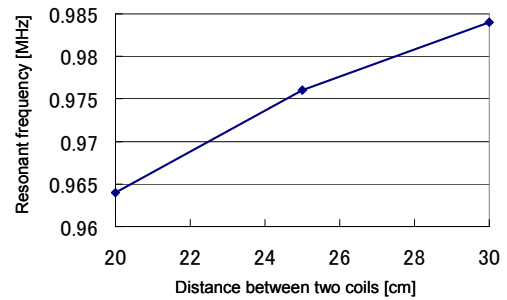


図 12 スパイラルコイルの間隔に対するデュアル共振器の最低次モード共振周波数 (測定)

5. 結合係数の空間的一様性の向上

同一のスパイラルコイルを 2 個用いることは変わらないが、巻き方を工夫して磁界分布の空間一様性を高めることによって結合係数の一様性を高める事が出来る。各コイルは従来の一様巻きに対して、図 13 のように円形を方形に変更し、エッジ部は従来どおり一様であるが、中心部は次第に疎に巻くようにする。この根拠は図 4 のように一様巻きの場合には図 14 に示すように中心軸方向、半径方向ともに磁界分布 (方向は無視して振幅のみの分布) が非一様となるからである。

最も強い箇所の強度を減らすような巻き方の一つとして図 13(b) のような巻き方を考えた。図 14 において各曲線はコイル中心軸から半径方向に  $r$  だけ位置をずらし、その値を保ったままコイル軸に平行に観測点をずらせて磁場強さを計算した結果である。また図 15 においては、同じく中心軸からコイル外形に平行に  $d$  だけ位置をずらせて同じ計算を行った。

図 15 によると一番外側である  $d=15\text{cm}$  以外の曲線は図 14 に対して非常に一様性が向上していることが分かる。 $d=10\text{cm}$  以下の範囲に限れば図 14 では場所によって 10 倍の磁界強度差があるのに対して、図 15 では 3 倍にまで減少していて、一様化が実現していることが分かる。

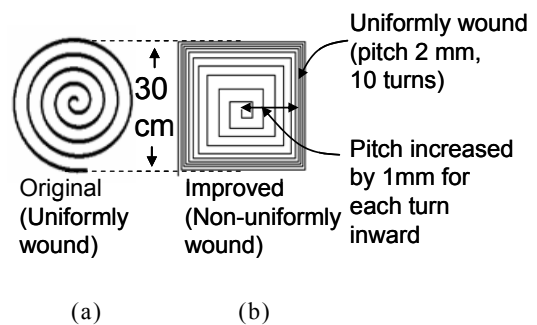


図 13 磁界分布の一様性を増加させるスパイラルコイルの巻き方

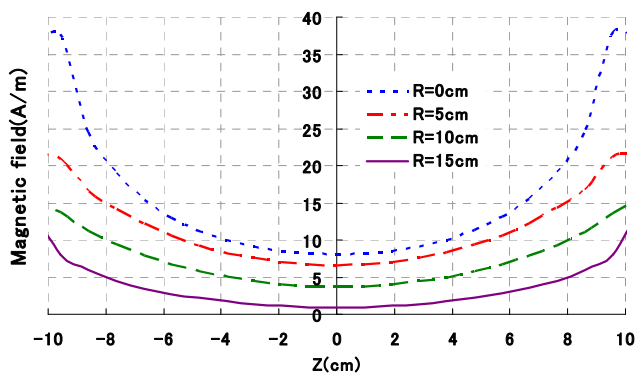


図 14 一様巻きデュアルスパイラル共振器の磁界分布 (シミュレーション)

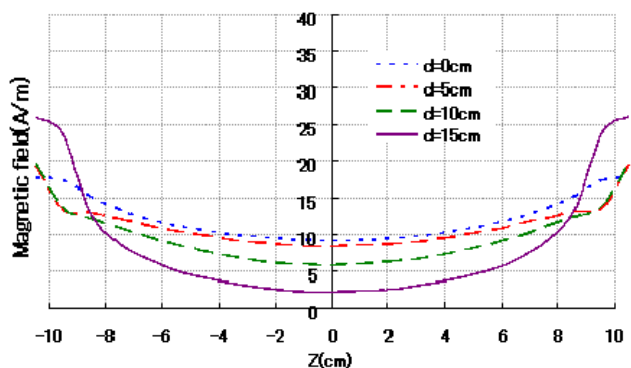


図 15 不均等巻きデュアルスパイラル共振器の磁界分布 (シミュレーション)

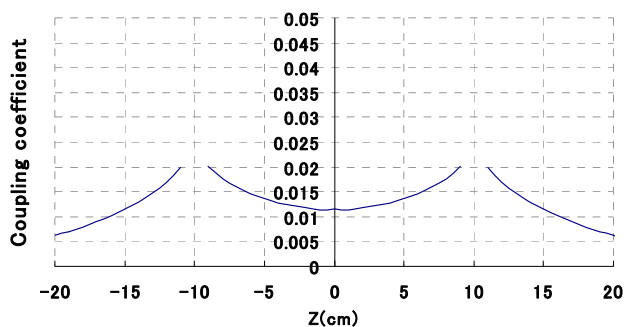


図 16 不均等巻きデュアルスパイラル共振器の結合係数 (シミュレーション、中心軸上分布、受電コイルは図 8 と同じ)

その結果として図 9 と同様に図 8 のコイルを用いて結合係数を計算してみると、図 16 のように一様巻きに比べて大幅な一様化を達成することが出来た。ただしこの結果は全体として結合係数を若干減らすマイナス面を持っているが、磁界の一様化は伝送効率一様化に直接つながり応用上重要である。

## 6. 結論

マイクロ波 BPF 作製時に小型化の有力な手段として提案した結合共振器という概念を別の目的、すなわち共振器電磁界の増強と一様化に役立て、“磁界共鳴型” WPT システムの伝送効率とその空間的一様性の向上を図った。

向上率は期待したほど大きくはなかったが、少しの向上であっても他の方法と組み合わせて積み上げることによって、大きな効果へと高められると考えている

## 文 献

- [1] 山本卓史, 粟井郁雄, 真田篤志, 久保洋, “プリント回路基板両面に作製された 2 重結合共振器とその応用,” 電子情報通信学会論文誌, J87-C, No. 12, 1045-1052, 2004 年 12 月
- [2] Ikuo Awai, “Wide Band Spurious Suppression of Multi-Strip Resonator BPF -Comprehensive Way to Suppress Spurious Responses in BPFs-“, IEICE Trans. Electron., Vol. E93-C, No. 7, pp.942-948, July 2010, invited.
- [3] Wei Wei, Yoshiaki Narusue, Yoshihiro Kawahara, Naoki Kobayashi, Hiroshi Fukuda, Tsuneo Tsukagoshi, Tohru Asami, “Characteristic Analysis on Double Side Spiral Resonator's Thickness Effect on Transmission Efficiency-Distance Feature for Wireless Power Transmission “、信学技報 WPT2012-01, 2012 年 5 月.
- [4] Ikuo Awai, “New expressions for coupling coefficient between resonators”, IEICE Trans. Electron., E88-C, No.12, pp.2295-2301, Dec. 2005.
- [5] Toshio Ishizaki, Takuya Komori, Tetsuya Ishida and Ikuo Awai, “Comparative study of coil resonators for wireless power transfer system in terms of transfer loss”, IEICE Electronics Express, Vol. 7, No. 11, pp. 785-790, June, 2010.