

環境の変化に対して安定な結合共振器型 WPT システム

澤原 裕一^{†1} 石崎 俊雄[†] 粟井 郁雄^{‡2}

[†] 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

[‡] 株式会社リユーテック 〒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

E-mail: 1 t090135@mail.ryukoku.ac.jp, 2 awai@ryutech.com

あらまし 結合共振器型 WPT(Wireless Power Transfer)システムは複数の共振器間結合によってエネルギー伝送を行うため、相互に結合する共振器の共振周波数や結合係数が変化すると特性が劣化する。その主な原因は電力伝送環境に異物が侵入したり、受電共振器の移動や時間の経過に伴って環境が変わる事態である。共振器を取り巻く環境は多くの場合電気的には誘電体とみなせるので、電気エネルギーを出来るだけ排除したシステムを構築することによって表記の目的を達成できるであろう。

本報告の目的は結合する共振器の電気エネルギーを局所的に閉じ込め、外部に極力漏らさないことを主体として誘電体の存在の影響を受けないシステムを構築するものである。電気エネルギーを閉じ込める最も簡単な方法はコンデンサを用いることであるが、それに加えてコイルを分割して相対させることによるコンデンサ形成で、コイルから生ずる電気力線を閉じ込めてしまうことを活用している。

キーワード ワイヤレス給電、結合共振器、電気エネルギー閉じ込め、分割共振器、誘電体

A Coupled Resonator WPT System Immune to Environmental Variations

Yuichi SAWAHARA^{†1} Toshio ISHIZAKI[†] and Ikuo AWAI^{‡2}

[†] Faculty of Science & Technology, Ryukoku Univ., 1-5 Yokotani, Seta Oe-cho, Otsu, Shiga Pref. 520-2194 Japan

[‡] Ryutech Corporation, 1-5 Yokotani, Seta Oe-cho, Otsu, Shiga Pref. 520-2194 Japan

E-mail: 1 t090135@mail.ryukoku.ac.jp, 2 awai@ryutech.com

Abstract Since a coupled-resonator wireless power transfer (WPT) system delivers energy via a coupled resonator system, the fluctuations of the resonant frequency of each resonator and the mutual coupling between them deteriorates the quality of energy transfer. The causes of those fluctuations are intrusion of alien matters into the transfer space and change of the space itself due to movement of the receiver or time lapses. Considering the electromagnetic property of the surrounding material is dielectric, one may attain the stable system by taking off the electric energy from the system.

First, we study the effect of share between the inductance and capacitance of the resonator with the constant resonant frequency. It is expected a larger capacitance will reduce the stray electric energy more. Secondly, each coil is separated into two to construct an effective capacitor between them. By reducing the distance between each coil, the electric energy around the coils decreases.

Keyword Wireless power transfer, Coupled resonator, Confinement of electric energy, Divided resonator, Dielectric material

1. まえがき

我々は一定の閉じた空間内を自由に動き得る機器に対してワイヤレス給電するシステムの開発を目指して、そこに内在する課題の解決を図っている。このシステムに要求される特性は

- ① 高い伝送効率
- ② 空間的に一様な伝送特性
- ③ 受電体の方向に依存しない伝送
- ④ 複数機器への給電

が代表的なものであるが、新たに

- ⑤ 外乱の影響即ち送電空間内への異物の混入や送

電空間そのものの変化などへの耐性をここで検討したい。上記のような外乱は大きく分けて金属と誘電体によるものが考えられ、磁性体の存在は極めて稀であるから除外しても良い。具体的には人体による外乱を想定して金属、誘電体のうちここでは誘電体によるものを取り上げる。

システムは結合する複数の共振器によって構成されているので、各共振器の共振周波数及び共振器間の結合係数が外乱の影響を受けない事が肝要である。摂動法によれば、考えている空間に存在する電磁界を \mathbf{E}_0 、 \mathbf{H}_0 とすると共振周波数の変動は、

$$\Delta\omega = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = - \frac{\iiint_V (\Delta\varepsilon |E_0|^2 + \Delta\mu |H_0|^2) dV}{\iiint_V (\varepsilon |E_0|^2 + \mu |H_0|^2) dV} \quad (1)$$

である[1]。一方結合係数の変動は対応する2つの共振器の固有モード電磁界を E_1, H_1 及び E_2, H_2 とすると

$$\Delta k = \Delta k_m - \Delta k_e = \frac{\iiint_V (\Delta\mu H_1 \cdot H_2 - \Delta\varepsilon E_1 \cdot E_2) dV}{\iiint_V (\varepsilon |E_0|^2 + \mu |H_0|^2) dV} \quad (2)$$

と表すことができる[2],[3]。

これらの表現に共通している特徴はまず第一に電界/磁界の効果が分離されて独立している事と、第二に例えば電界の効果については電界の存在/振幅の影響、比誘電率の変化の影響を独立に評価できる事である。いま磁性体は存在しないとしているので $\Delta\mu$ は 0 であり電界に関する項だけを考えればよい。そこで外乱の影響を上の特徴に即して次のような方法によって低減する。

(1)積分領域において電界を極力小さくする。言い換えれば外付けのコンデンサを使って電気エネルギーをそこにため込む事により、コイル近傍の電界強度を減らす。

(2)電界の大きい所では $\Delta\varepsilon$ を 0 とする。言い換えれば局所的に電界の大きい空間を作ってそこへの異物の侵入を防ぐ。

以下ではこの二つの方法による異物の影響低減効果を確認すると共に、伝送効率を支配する無負荷 Q への効果についても検討する。

2. 共振器構成

システムの構成を行う上で重要となるスパイラル共振器の構造について説明を行っておく。今回使用する構造として、図 1(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。直径は 30cm または 3cm のスパイラルコイルを使用する。図 1(b)は基本スパイラルコイル 2 つを適当な間隔 r 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。(a)の単一共振器と違いコイル間容量が生まれ電界の閉じ込めの効果が得られる期待がある。間隔は送電共振器の際は r_t 、受電共振器の際は

r_a として間隔の違いによる電界閉じ込めの影響の確

認を行う。図 1(c)は(a)の単一共振器を 2 つ対向して配置し結合させ、結合共振器として使用し、これを単一デュアル共振器と呼ぶことにする。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。コイルの間隔は 20cm に固定し空間内の電磁界の検討などを行う。通常システム構成では送受電共振器は 1 つずつであるが、送電側を 2 つにして空間を挟むことで空間内の一様性の向上を目指した結果であり、送電共振器 2 つ、受電共振器 1 つの計 3 つの共振器を使用することが今までの成果である[4],[5]。図 1(d)は(c)の単一デュアル共振器の 2 つの共振器を両方とも分割共振器に置き換えたものであり、これを分割デュアル共振器と呼ぶことにする。

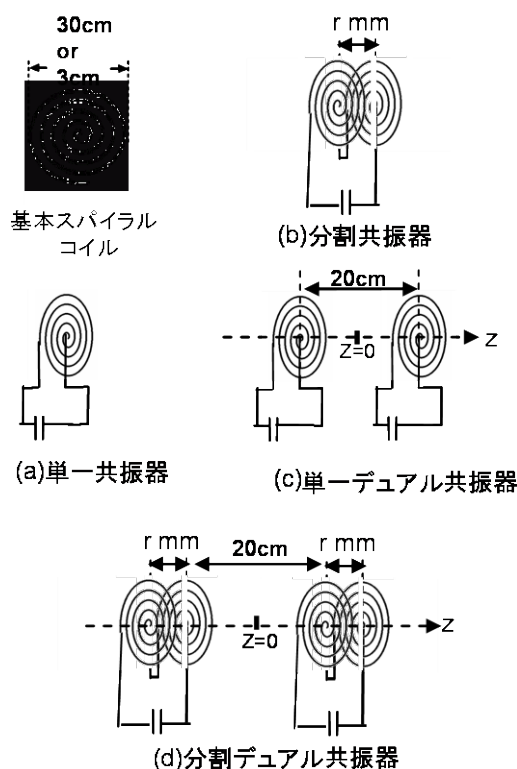


図 1. 共振器構成の概念図

3. 送電用デュアル共振器

コンデンサには電荷を蓄える機能がある。これを利用することで空間内に漏れる電界を閉じ込めることが期待できる。また、コイルを 2 つに分割して相互に向かい合わせ、共振器を分割共振器にすることでコイル間に電界が閉じ込められるため、電界を外に漏らさない効果が期待される。しかし、どちらの方がより電界の空間漏れを抑えるのに効果があるのかよくわからない部分がある。

そこで、単一デュアル共振器を用いた外付け容量による効果と分割デュアル共振器を用いた外付け容量 + 分割コイル間容量による効果の検証を行った。その際、

使用共振器の条件として、共振器の直径を 30cm に固定し、巻き数の変更によって変えたインダクタンスに対応してコンデンサの容量を変えることによって共振周波数を 1MHz に合わせた。そして、デュアル共振器の空間内に水（誘電体）をいれたペットボトルを配置することで、ペットボトルの有無での共振周波数のずれを確認して電界の閉じ込めの効果の確認を行った。使用するペットボトルの寸法を図 2 に示し、水は高さ 23cm までの直方体部分のみに入れている。

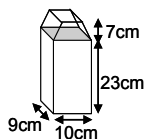


図 2. ペットボトル寸法

3-1. 外付け容量の効果

デュアル共振器の空間内の中心軸上での電磁界の計算にはシミュレーションソフト WIPL-D を使用した。励振は 1W の電力を入力し、コイルの巻き数によらずその反射係数 S11 がいつも -1dB 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。また、共振器は $z=-10$ および 10 cm の位置に設置している。各コイルの巻き数を減らすことによってインダクタンス値が減るので、図 3 に示すように共振周波数を合わせるためにはより大きな容量が必要になる。

デュアル共振器は結合共振器であるので、共振周波数が偶奇モードの二つに分かれる。そこで、偶奇モードにおいてデュアル共振器空間の中心で電界がなくなる奇モード（低い方の共振周波数）を使用することで図 4 の結果が得られた。結果としては、巻き数が少ない共振器ほど空間内の電界強度が弱くなっている。つまり、コンデンサは容量が大きいほど蓄えられる電荷の量が増えるので、コイルの巻き数を 75 巻きから

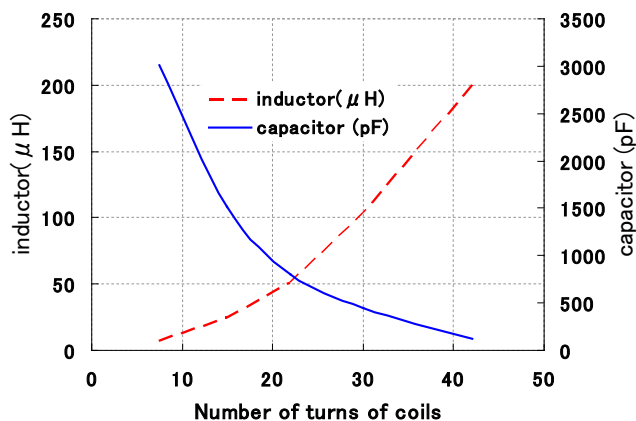


図 3. コイル巻き数によるインダクタンス L 、付加すべき容量 C の変化（共振周波数は 1 MHz）

15 巻きに減らすに従ってデュアル共振器の空間内電界が小さくなると考えられ、予想される通りの結果が得られた。しかし、巻き数を減らすことによって磁界も減ってしまうので、単に巻き数を減らせば良いというわけではないと考えられる。

実測における共振器配置図は図 5 に示す。デュアル共振器の空間内の電界分布は中心軸上の電界強度が強いので、中心軸に沿ってペットボトルを二つ配置して、水（誘電体）の有無での共振周波数のずれを測定することで電界閉じ込めの効果の検証を行った。その測定結果を図 6 に示しており、巻き数が少ない（つまり、外付け容量成分が大きい）ほど共振周波数のずれが小さく、シミュレーションで求めた電界強度の図 4 の結果と対応する傾向が見られた。また、巻き数を減らしていく上で、22 巻き程度から収束の傾向が見られ、共振周波数のずれの向上が小さくなるのがわかる。

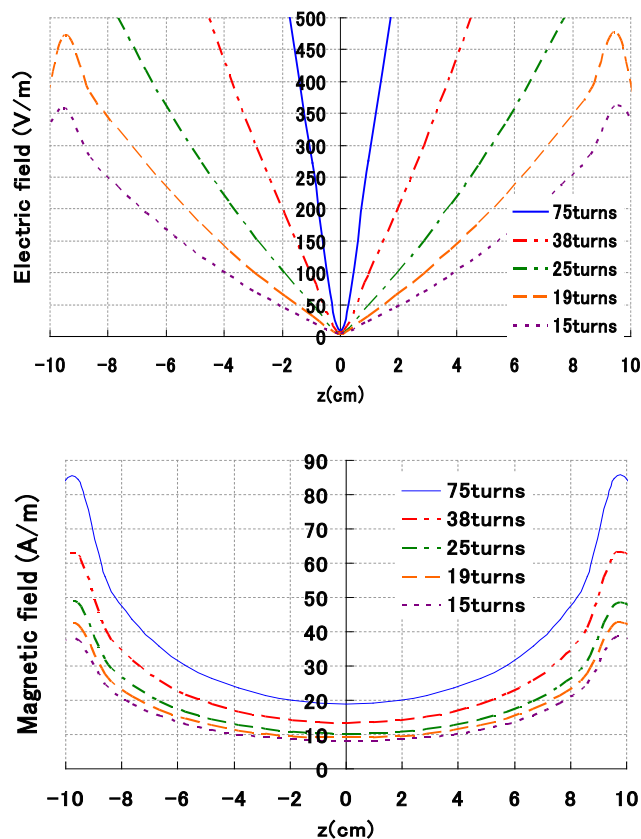


図 4. シングルデュアル共振器空間内の電磁界分布

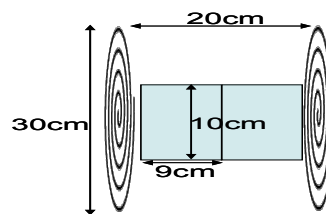


図 5. 共振器配置図（上から見た図）

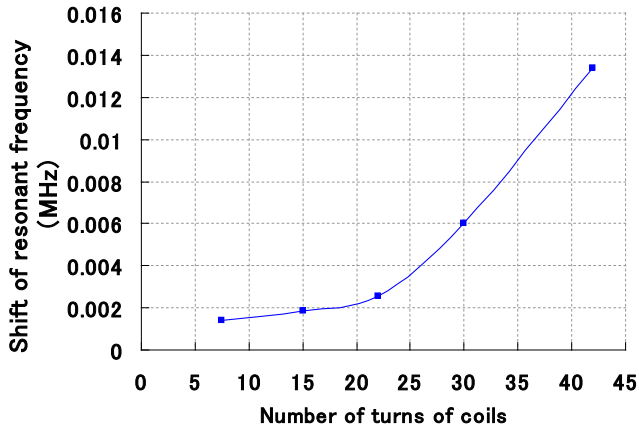


図 6. 実測による共振周波数ずれ

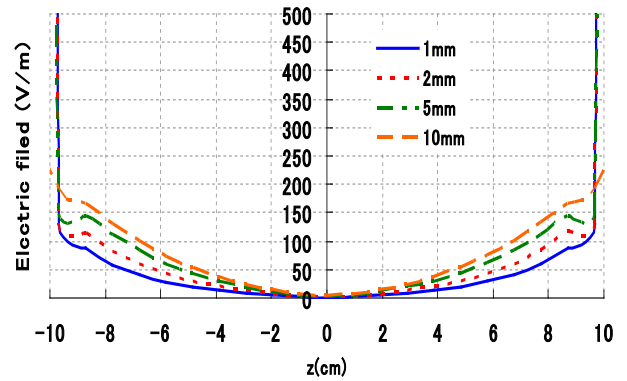


図 8. 分割コイル間隔変更による電界分布

3-2. 分割共振器の効果

3-1 節の外付け容量の効果検討の際と同様に分割デュアル共振器の空間内の電磁界の計算を行った。また、分割共振器ではコイル間距離を変更することによっても容量値に変化があるので、それぞれの計算を行い、結果を図 7、図 8 に示した。ただし、図 7 の巻き数変更の際には分割コイル間距離は 2mm に固定、図 8 の分割コイル間距離変更では巻き数を 15 巻きに固定して計算を行っている。磁界分布に関しては間隔による違いがほとんど見られなかったため載せていない。

結果は、単一デュアル共振器の際の電磁界の傾向と同様であり、巻き数が少ないほど空間内の電界強度が弱く、磁界強度もまた弱くなるのがわかる。しかし、分割デュアル共振器にした際のほうが大きく空間内の電界を減らすことに成功していることが確認できる。また、分割コイルの間隔はできる限り近づけたほうがより電界の閉じ込めを大きくすることができることがわかった。この計算結果の検証として水による共振周波数のずれの実測を行い、測定配置図を図 9、結果を図 10 に示す。

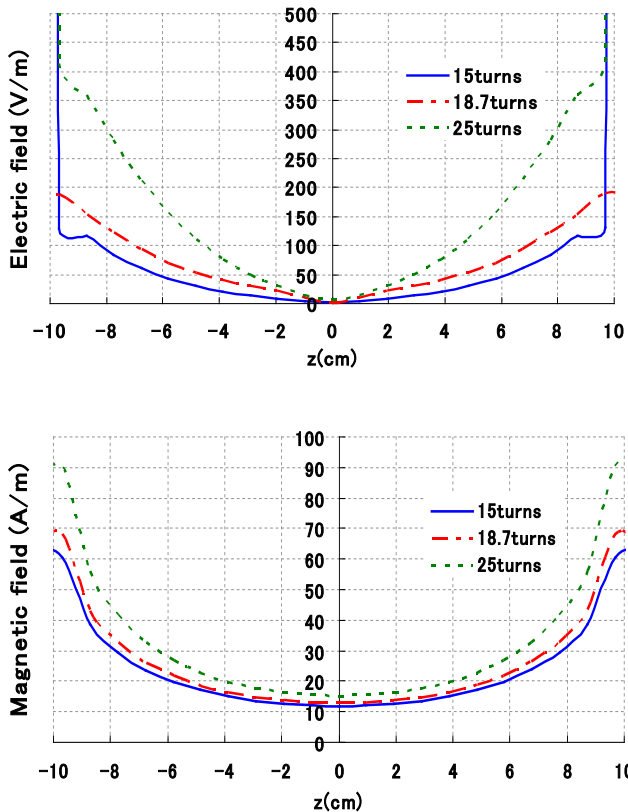


図 7. 巻き数変更による空間内電磁界分布

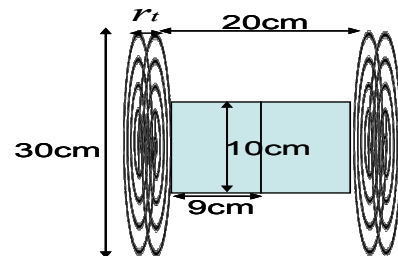


図 9. 共振器配置図（上から見た図）

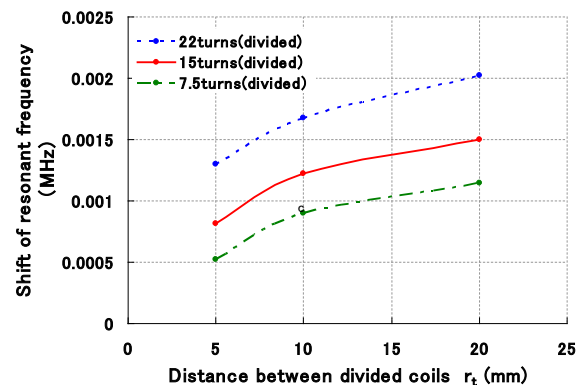


図 10. 実測による共振周波数ずれ

結果は、シミュレーションで求めた電磁界強度と一致して巻き数が少なく分割コイル間距離に近いほど共

振周波数のずれが小さくなることが確認できた。また、分割コイル間距離を小さくするほど強く減少する傾向が見られ、今回の測定では確認する余裕がなかったがコイルを近付けることで、さらに共振周波数のずれが小さくなることが期待できる。

3-3 無負荷 Q

システム設計を考える上で無負荷 Q 値は伝送効率を決定するので重要である。単一デュアル共振器、分割デュアル共振器それぞれについて無負荷 Q 値の測定を行った結果を図 12 に示す。傾向としては単一共振器に比べ、分割共振器にした際、インダクタンスが 2 倍になるのではなく約 4 倍になる傾向を図 11 に示す。表記としては横軸 0 が単一共振器でのインダクタンス値であり、横軸 25 がキャパシタンスを示す。また分割共振器では実線がインダクタンス、点線がキャパシタンスを示している。

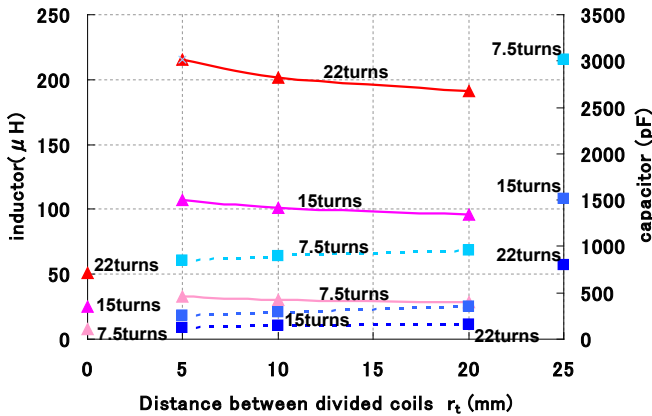


図 11. インダクタンス L 、付加すべき容量 C の変化 (共振周波数は 1 MHz)

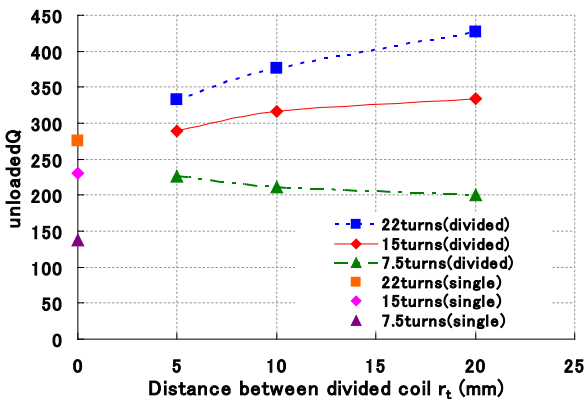


図 12. 送電共振器無負荷 Q

無負荷 Q 値も分割共振器のほうがよくなることがわかった。また、分割共振器間距離を離すことで、無負荷

Q 値が上昇していくことが見られ、近接効果による影響が減ったためではないかと考えられる。しかし、コイル間距離が離れるに従って少しずつインダクタンス値が減少しているのが図 11 で見られ、最終的には単一共振器の 2 倍程度になるのではないかとと思われる。つまり、分割コイル間距離も離しすぎると単一共振器が二つあるだけと変わらない状態となり無負荷 Q 値としてもまた、最終的には単一共振器の無負荷 Q 値と変わらなくなると考えられ、7.5 巻きの結果では、単一共振器と同じ状態へと近づいているのではないかとと思われる。

3-4 空間の誘電率変化

実測だけでなく、シミュレーションにおいても分割共振器を用いることによる効果が得られるかの計算を行った。条件としては、電磁界計算のときと同様に WIPL-D を使用し、励振法についても同様に 1W の電力を入力し、反射係数 S11 がいつも -1dB になるよう励振用ループコイルを調整して、同じ量の電力が共振器に注入されるように注意した。共振器は直径 30cm、15 巻きを使用、分割コイルの間隔は 2mm にしている。デュアル共振器の空間内には誘電体の箱を置き、比誘電率の数値変更を行って計算をした結果を図 13 に示す。結果としては、実測の場合と同様に分割共振器のほうがより共振周波数ずれが小さく、比誘電率が上がるにつれて差が大きくなっていくことが見られる。

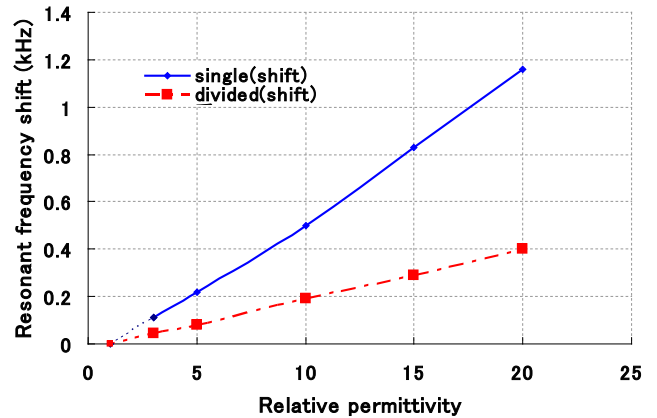


図 13. 誘電率変化

4. 受電共振器

受電共振器についても外付け容量 C の効果を利用することで電界の閉じ込めが期待でき、分割共振器を使用することによる更なる電界の閉じ込めも同様に期待できる。そこで、こちらについても単一共振器を用いた外付け容量による効果と分割共振器を用いた外付け容量+コイル間容量による効果の検証を行った。条件としては共振器の直径を 3cm に固定し、巻き数の変更

によってインダクタンス成分を変えてコンデンサの容量を変えることで共振周波数を 1MHz に合わせた。

4-1 外付け容量 C の効果

受電共振器についてはシミュレーションを省いて測定のみを行っている。測定方法は図 14 に示し、測定結果を図 15 に示す。送電共振器のときの傾向と違って、巻き数を増やすほど共振周波数のずれが小さくなる傾向が見られた。

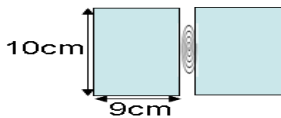


図 14. 共振器配置図(上から見た図)

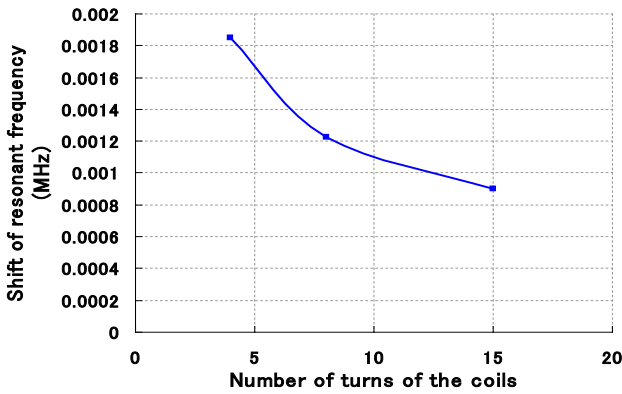


図 15. 共振周波数ずれ

4-2 分割共振器の効果

受電共振器においても送電共振器と同様に分割コイルの巻き数変更と分割コイル間距離の変更の検討の両方を行った。測定方法としては図 16 に示し、測定の結果を図 17 に示す。

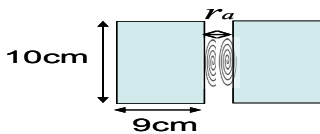


図 16. 共振器配置図 (上から見た図)

結果は、分割コイル間距離に対する傾向は送電共振器の結果と一致しているが、巻き数に関しては図 15 と同様に増やすことによって共振周波数ずれが小さくなっていて、送電共振器の結果と反対である。この原因としては全体的に L 成分がかなり小さいことが影響しているのではないかと考えているが、現時点では確認できていない。

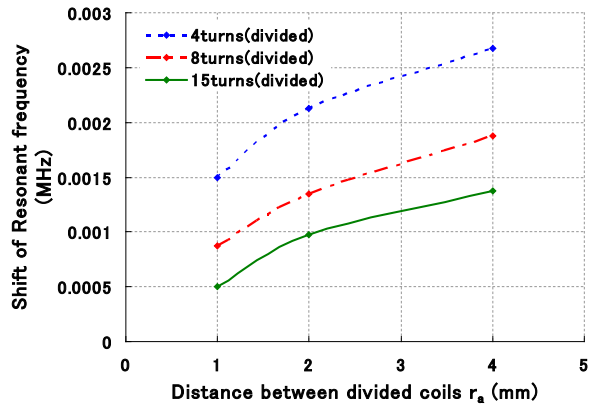


図 17. 共振周波数ずれ

4-3 無負荷 Q

送電共振器と同様に無負荷 Q の測定を行っている。結果を図 18 に示す。傾向としては送電共振器と同様、単一共振器に比べ、分割共振器の方がより無負荷 Q 値が良いことがわかり、共振器間距離を変更しても無負荷 Q 値にほとんど変化が見られない。LC の測定では図 11 と傾向としても同じ結果が得られたので今回は載せていない。

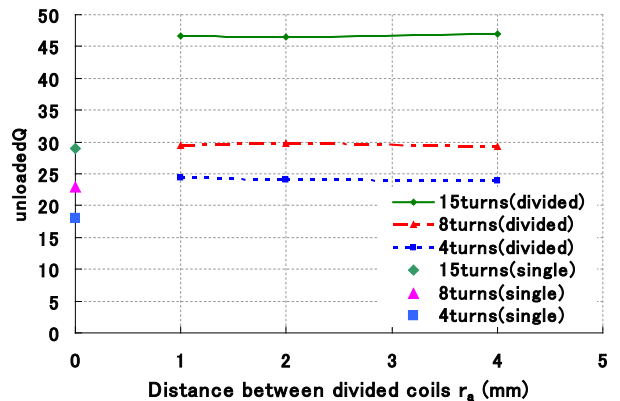


図 18. 無負荷 Q

5. 結合係数測定

これまでに行った送電共振器と受電共振器でシステム設計を考え、電界の閉じ込め、無負荷 Q 値の結果からよさそうな組み合わせで結合係数の算出のための測定を行った。測定は送電側に直径 30cm、15 回巻きの分割デュアル共振器を使用して共振器間距離は 20cm 離している。受電側には直径 3cm、15 回巻きの分割共振器および直径 5cm、15 回巻きの分割共振器を用い、位置はデュアル共振器の中心軸 (Z 軸) の電磁界解析での 0cm の地点において測定をした。結果は図 19 に示しており、直径 3cm の共振器は結合が小さいため共振周波数が分離しなかったため結合係数の計算

はできなかったが、5cmの方は0.025であった。念のため図16のように水入りボトルの有無で波形にずれが生じないか確認したところ、それが見られないことから結合係数は水による影響を受けていないものと考えられる。

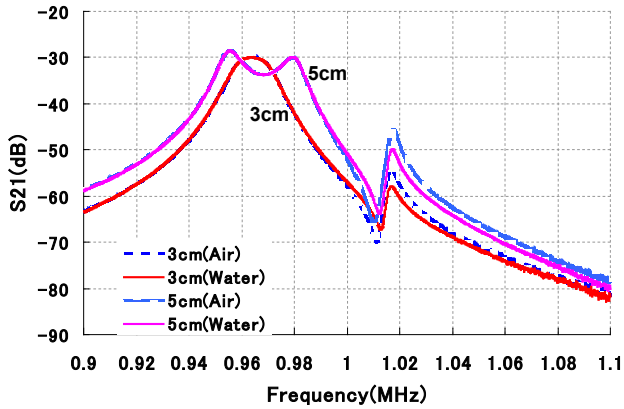


図 19. 結合係数測定

6. システムの伝送特性

ループの位置を調整することで外部 k を変えて伝送システム構築を行い、現在のところ伝送効率が最もよくなった結果を図20に示す。直径3cmの受電共振器では S_{21} (Gain)が-6.2dBとなり、約25%の効率となっている。さらに直径5cmのものは伝送効率では-2.4dB、約58%である。こちらでも水の有無による影響は見られなかった。

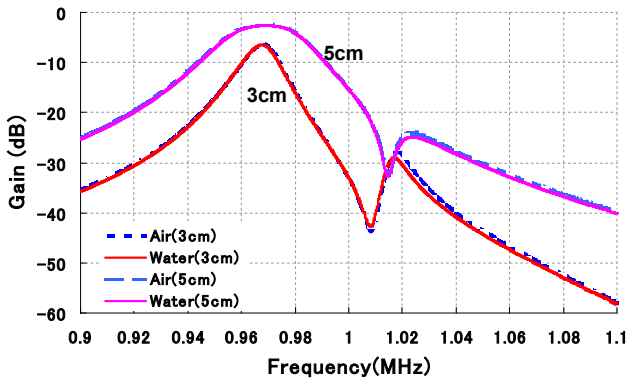


図 20. システム設計

7. まとめ

送受電共振器ともに、単一共振器での外付け容量 C の効果により容量が大きいほど電界を抑えることができ、さらに分割共振器を使用することで分割コイル空間内に電界を閉じ込めることができ、デュアル空間内電界をかなり抑えることができた。この結果、誘電体による影響をほとんど受けない状態になることが確認することが出来た。

更に分割共振器を用いることにより、無負荷 Q 値に関しても単一共振器より特性が良くなる副次効果も確認できた。共振器間隔をあけたほうが近接効果の影響が減り Q 値の上昇が見られたものと考えている。

原理確認は出来たので今後具体的な用途によって最適化を進める必要がある。

文 献

- [1] R. F. Harrington, "Time-harmonic Electromagnetic Fields", McGraw-Hill Book Co., p.322, 1961
- [2] Ikuo Awai, "New expressions for coupling coefficient between resonators", IEICE Trans. Electron., E88-C, No.12, pp.2295-2301, Dec. 2005.
- [3] 栗井、張、“共振器の結合係数—直感的理解への一つの道—”, 信学論誌, Vol.J89-C, pp.962-968, 2006年12月.
- [4] 栗井、澤原、石崎、“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”, 信学技報 WPT2012-20、2012年8月
- [5] 澤原、石崎、栗井、“デュアルスパイラル共振器を用いた閉空間 WPT システムの検討 “、信学ソ大 B-1-54、2012年9月.

