

# WPT システムにおける共振器最適化の検討

澤原 裕一<sup>1</sup> 石崎 俊雄<sup>2</sup> 粟井郁雄<sup>3</sup>

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

E-mail: 1 t13m012@mail.ryukoku.ac.jp, 2 ishizaki@rins.ryukoku.ac.jp 3. awai@ryutech.com

**あらまし** WPT システムの伝送特性を改善するには無負荷  $Q(Q_u)$ 、結合係数( $k$ )の特性を向上させる必要がある。無負荷  $Q$  値はコイル線間の近接効果や誘電体が外部から侵入することによる誘電体損失などにより特性が劣化することが考えられる。これまで無負荷  $Q$  の向上を目指し、ループの改善などを行ってきた。今回は 3 種類の共振器構造を用いてそれぞれの特性を比較し、外部からの影響に対する耐性や直結特性を含めて検討することで更なるシステム特性向上に向けて検討を行った。

**キーワード** 一重コイル共振器、二重コイル共振器、オープンスパイラル共振器、誘電体、直結

## Study of resonator optimization in a WPT system

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

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

E-mail: 1 t13m012@mail.ryukoku.ac.jp, 2 ishizaki@rins.ryukoku.ac.jp, 3 awai@ryutech.com

**Abstract** It is necessary to improve the characteristics of unloaded  $Q$  ( $Q_u$ ) and coupling coefficient ( $k$ ) to improve the transmission property of the WPT system. Unloaded  $Q$  value is considered to be degraded due to the proximity effect between the coil wires and dielectric loss of the surrounding dielectric materials entering from the outside. We have tried various loop structures with the aim to improve the unloaded  $Q$  so far. Now we compare the characteristics of each resonator structure of three proposed types. And, we will investigate system characteristics to improve them further including the direct connection characteristics and tolerance to external influences.

**Keyword** 1-layered coil resonator, 2-layered coil resonators, open spiral resonator, dielectric material, direct connection

### 1. まえがき

結合共振器型無線電力伝送システムは、電磁誘導方式と比べてより遠く、コイル直径の約 2~3 倍の距離を低損失で電力伝送できるのが特徴である。また、使用する共振器の無負荷  $Q(Q_u)$  と結合係数( $k$ )の積が大きいほど伝送効率が高いことが知られている。

しかし、システム構築の際に時には共振器の結合空間内に異物が入ってしまったたり、何らかの物質を介して給電したりする場合も考えられ、その影響による  $Q_u$  の低下に対する配慮が足りないと、共振器間距離を近づけて  $k$  を大きくしても効率が上昇しないという結果を招く可能性がある。

これまでに我々のグループでは平面的であるために最もスペース効率の高いスパイラルコイル共振器に的を絞ってその改善を行ってきた。例えば、無負荷  $Q$  値の向上を目指し、スパイラル共振器を励振するためにループコイルを用いる場合では、金属体の表面に流れる電流の抵抗損を減らすためにループ導体を直径の太い銅パイプに置き換えることにより、無負荷  $Q$  値が改善されることを示した[1]。

しかし、これまでにスパイラル共振器自身の構成に関する系統的な検討は行っていない。今回はスパイラル共振器に 3 種類の共振器構成法を用いて比較検討することでシステム設計とシステム特性向上への資料作成を行う。そしてさらに共振器を回路に接続する方法として、ループを用いて間接的に行う場合と、直接接続した場合の共振器特性の変化を観測する。

### 2. 共振器構成

まず今回の比較に使用する共振器構成を図 1 に示し、それらについて説明する。その際、平等な比較を行うために構成法の統一条件として共振周波数は 2.3MHz、スパイラルコイルの直径は 30cm、線径は 1mm としている。

図 1(a)はオープンスパイラル共振器と呼び、コンデンサを装荷せずに線間の寄生容量とコイルの自己インダクタンスによる自己共振を用いた共振器である。図 1(b)は一重コイル共振器と呼び、1 つのスパイラルコイルにコンデンサを装荷した共振器である。図 1(c)は二重コイル共振器と呼び、2 つのスパイラルコイルを直

列接続してコンデンサを装荷した共振器である[2]。

なお、二重コイル共振器は2つのスパイラルコイルのそれぞれのコイルで電磁界が発生するためコイルの巻く方向によって違う特性を示すことになる。今回は磁界成分が打ち消し合わないよう同方向に巻いたコイルを向かい合わせるように配置して中心同士、端同士を接続した。また、コイル間隔( $r$ )によってもコイル間容量が変わるため共振器特性が変わることになる。

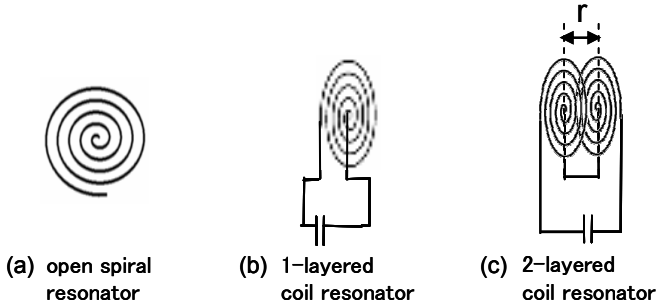


図 1. 共振器構成図

### 3. 測定構成

次に測定項目によるそれぞれの配置構成について説明する。まず、無負荷  $Q$  や周波数ずれの測定を行う際には図 2(a)のような配置で測定を行う。近接誘電体に対する耐性を確認するために水道水の入ったペットボトルを 10mm 離れた位置に置き、その有無による特性比較を行う。その際に用いたペットボトルの寸法は図 3 に示すような 2 リットルサイズのものである。MHz 台の周波数では水道水の比誘電率は 80、導電率は 0.01-0.02S/m である[3]。これにより損失誘電体である水による共振器への影響を測定することができる。なお、ループによる影響を受けないように共振器はループから十分に離して疎結合にしている。

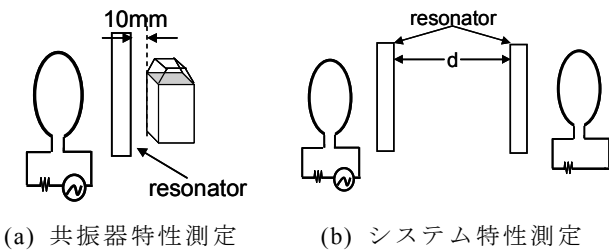


図 2. 測定構造図

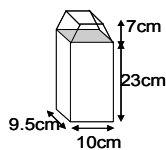


図 3. ペットボトル寸法

次に結合係数を測定する際には図 2(b)のような配置

で実験を行った。共振器間距離を変更して測定を行っており、オープンスパイラル共振器や一重コイル共振器ではスパイラル面間の距離をそのまま共振器間距離とする。二重コイル共振器では結合空間の内側のスパイラル同士の距離を共振器間距離  $d$  として測定を行う。

ここではすべての測定はループを介して行っており間接接続と称する。後に共振器を直接回路に接続する直接接続法と比較対照する

### 4. 一重共振器

共振器の作る電界中に誘電体が存在すると共振周波数が低周波側へずれてしまう。そのため共振器からの電界漏れが多いほど大きく共振周波数が低周波数へ変動し、設計したシステムが元の動作周波数から外れてしまう可能性がある。そこで電界が漏れないようにするには、コンデンサが蓄える電界エネルギーを増やすためにコンデンサ容量を増やせば良い。

図 4 からスパイラルコイル巻き数が少ないほどインダクタンスが小さくなり、共振周波数を一定に保つためには大きいコンデンサ容量が必要となるので、共振器が誘電体の影響を受けにくくなると考えられる。測定結果を見ると、予想通りに巻き数が少ないほど周波数変動が小さくなっていることが図 5 からわかる。なお、巻き数 100 ではコイルは 2.3MHz で自己共振し、外付け容量は不要でオープンスパイラル共振器となる。

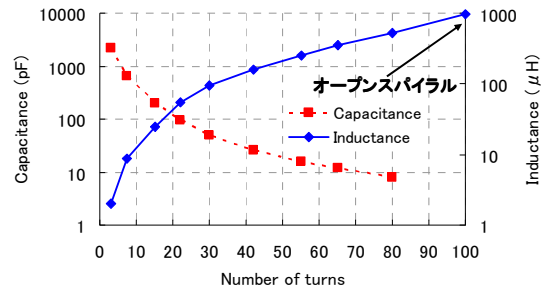


図 4. コイルの自己インダクタンスと外付けキャパシタンスの関係

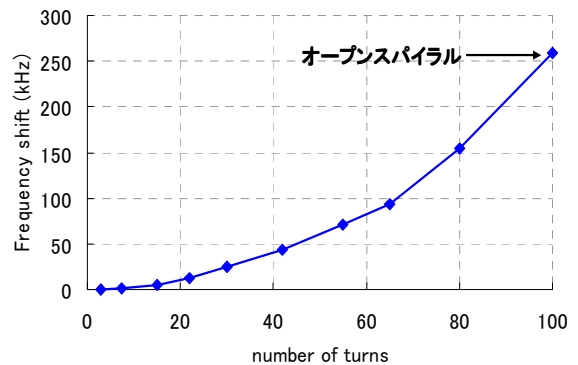


図 5. 水による周波数変動

図 4 の LC の比の平方根は共振器の特性インピーダンスと呼ばれ、コイルの巻き数を変えることによって数 100 倍の範囲で変動していることが分かる。この値は共振器と負荷を整合させるために必要な量であり、この調整範囲が大きいことは様々な負荷に対応できることを示唆している。

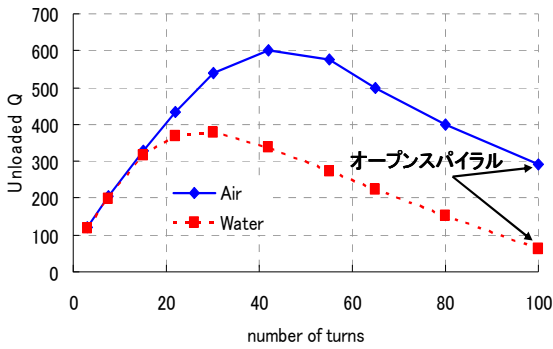


図 6. 水による無負荷 Q の劣化

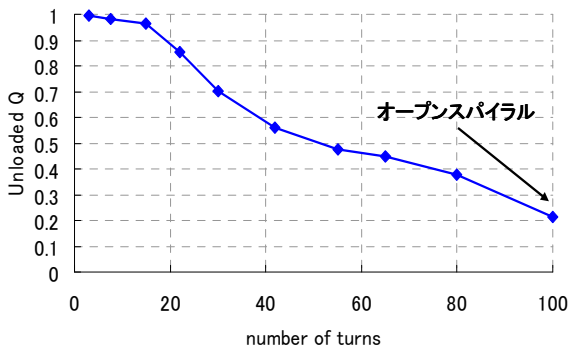


図 7. 無負荷 Q 値の劣化比

次に無負荷 Q のコイル巻き数への依存性を調べてみよう。図 6 によれば巻き数を増やすほど無負荷 Q 値が高くなるが、増やしすぎると反って Q 値が下がっている。その理由は巻き数増加によってインダクタンスは線抵抗より急速に増えるため当初は Q が増大するが、巻き数増加に伴いスパイラル線が密着し線間の近接効果が影響して抵抗増加が起こるため、最適な巻き数が存在する事になる。

更に図 6 から、巻き数が増えるほど接近した水による無負荷 Q 値の劣化が大きくなっていることを読み取ることができ、巻き数増加の極限としてオープンスパイラル共振器の特性は一重コイル共振器の延長線上にあって、最も無負荷 Q の低下が激しい事がわかる。一重コイル共振器の水に対する耐性は、周波数の変動と同様に巻き数の増加に伴って外付け容量が減る結果として無負荷 Q の減少が大きくなっているために、図 7

のように水の影響を含む共振器無負荷 Q を空気中の共振器無負荷 Q で割り、比率で示すことでよくわかる。

第 3 に結合係数に関しては図 8 に示しており、巻き数が多いほど結合係数が増加している。これは巻き数を増やすとインダクタンスが増えるために磁界結合が増加すると共に、外付け容量の減少によって漏れ電界が増加して電界結合が増加するため、全体として結合係数が増加したためと考えられる。つまり、システム設計で重要となる結合係数  $k$  と無負荷 Q や周波数変動はトレードオフの関係にあるので巻き数には使用する目的に応じた最適点が存在することになる。

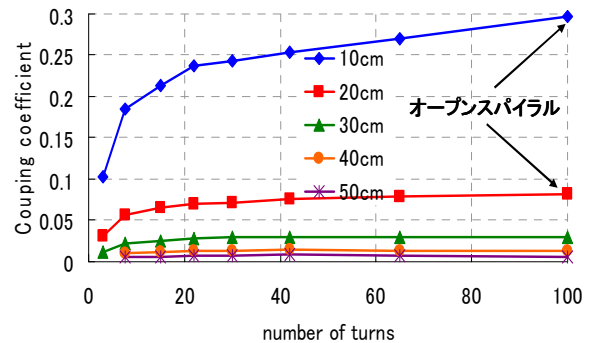


図 8. 結合係数

オープンスパイラル共振器は近接する誘電体の影響を受けやすいために共振周波数、無負荷 Q の変動が大きいという欠点を持つが、磁気結合/電気結合の協調作用によって結合係数が図 1 の 3 共振器の中で最大であるという特長を持っている。更に特筆すべきことは、電界エネルギーが全て共振器近傍に蓄えられているために、我々の開発したディスクリピータの励振用として用いるのに最適であるという点である[4]。

## 5. 二重共振器

二重コイル共振器が一重コイル共振器と異なる点はスパイラルコイル周辺の電界を 2 つのコイル間に閉じ込めること、インダクタンスがコイルを重ねることで最大約 3~4 倍に増大することである。それにより共振器特性が向上する。なお、周波数の調整用にコンデンサを加えるのでコンデンサの効果も含むことになってさらに性能がよくなる可能性がある。そこで、二重コイル共振器においても一重コイル共振器と同様に共振周波数の安定性、無負荷 Q、結合係数の検討を行った。しかし二重コイル共振器にはコイル間隔という新しいパラメータが存在するのでその量への依存性にも着目した。

まず、コイル間隔を変更することでインダクタンスが変化することを図 9 に示す。コイルを近づけるほどインダクタンスが増えていくことがわかる。2 枚のコ

イル間のインダクタンスが全体の増大に寄与しているのでコイルを離すことで外部に磁束が漏れてしまい自己インダクタンスは低下してしまうと考えられる。

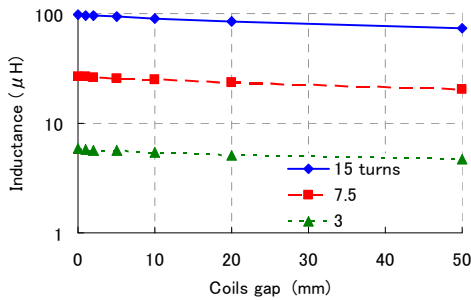


図 9. コイルギャップによるインダクタンス変化

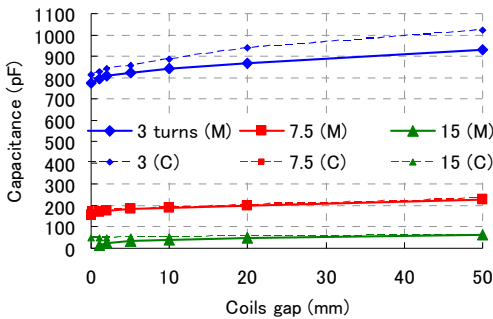


図 10. 外付けキャパシタンス変化

次に実際に装荷したコンデンサ容量とインダクタンス値から計算した装荷すべき容量値を図 10 に示している。実線が実際の装荷容量、点線がコイルインダクタンスから計算した装荷すべき容量である。この容量値の差が線間容量を含むがコイル間容量値に対応するということになるだろう。

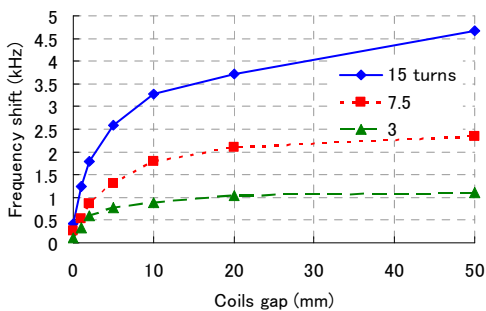


図 11. 水による周波数変動

周波数変動は一重コイル共振器と同様に巻き数が少ないほど低減できており、変動値は 1~2 桁減少している。加えてコイル間隔は狭いほど特性が良いことが図 11 からわかる。無負荷 Q 値は巻き数が多いほど元々の特性は良く、誘電体による劣化も僅かであることが図 12 からわかる。しかし周波数変動とは異なりコ

イルギャップによる無負荷 Q 値の最適点が存在する。これは、コイルギャップに対するインダクタンス値と近接効果による抵抗値のバランスが最適のときに最も特性がよくなるためだと考えられる。

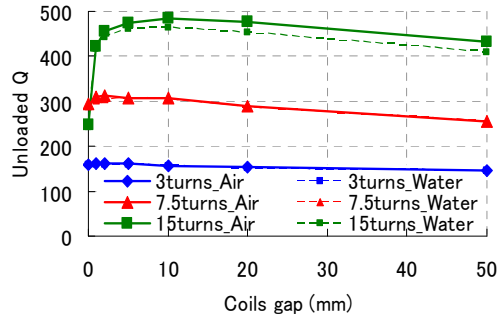


図 12. 無負荷 Q の水による劣化

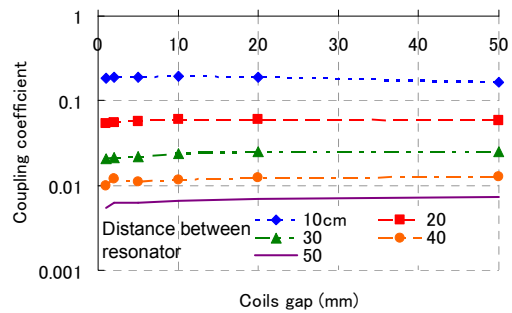


図 13. 結合係数 (15 巻のみ)

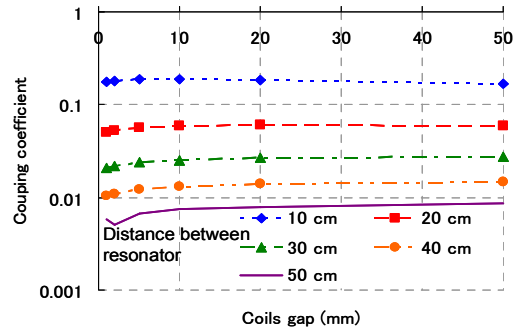


図 14. 回路シミュレーション結果

次に結合係数は 15 巻のデータのみを図 13 に示す。結合共振器型の無線電力伝送では基本的にコイル直径が最も結合係数に影響するが今回の構成では 30cm に固定しているため、一重コイル共振器と同様にインダクタンスが最も大きくなる際最大値を示すと考えた。二重コイル共振器では最も狭いコイル間隔でインダクタンスが最大となるのでそこで結合係数が最大値を示すと予想されたのだが、実際には約 10mm の際に最も高い値を示した。また、この構成に関しては回路シミュレータ WIPL-D を用いて解析を行った結果、図 14 のように実測で得られた結果と同様の傾向を示した。

現段階では理由はわかっていないが電磁界分布などの解析を行うことで原因が解明できるものと考えている。

なお、15巻のコイルギャップ=0mmはオープンスパイラル二重共振器を意味する。この共振器は図1(a)の共振器を2重にしたものであるがコイルギャップを狭くしすぎているため無負荷Qが低く魅力に乏しい。しかしギャップが5mm程度であれば十分Qは高くなるので周波数安定度の高さを考えるとそれは利用できそうである。

## 6. 多重コイル共振器

これまでの結果の延長として、共振器を多重コイル共振器にすることで更なる共振器特性の向上が可能かを電磁界シミュレーションによって検討しよう。そこで、二重コイル共振器と同様の構成方法でコイルを多数配置して直列に接続し、水入りペットボトル1個の場合はボトルを1cm離れた所に配置、2つの場合は共振器を挟み込むように配置して共振周波数変動をWIPL-Dによって解析した。容量閉じ込め効果の比較のために外付けコンデンサを装荷しないオープン共振器構造で各コイル間隔は1cmとし、コイルの巻き数を多重にする際に調整して共振周波数を2.3MHzに固定して水の影響を調べた。結果は縦軸を対数目盛として広範囲の変化が見えるようにして図15に示している。

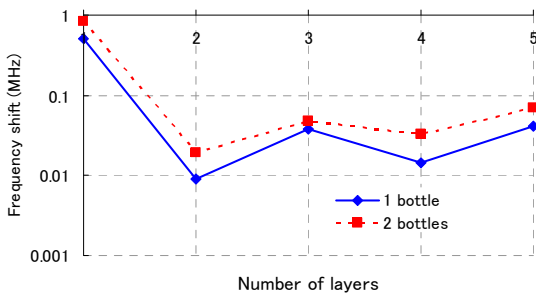


図15.共振周波数への水の影響

多重にすることで一重よりは飛躍的に安定化しているが、二重コイル共振器が最も特性が良いことが見てとれる。また、2重よりは特性劣化はしているが奇数よりは4重など偶数層コイルを重ねた方が特性が良い。理由は不明であるが可能性としては偶数コイルでは対になるコイルが存在するが、奇数コイルでは必ず対にならないコイルがあるために容量閉じ込めを行えていない部分があると思われる。

3重以上に巻き数を増やすことは周波数安定度に関してあまり意味は無さそうであるが、無負荷Qは巻線間距離が増大するために向上するものと予想できる。また層数の増大とともに各コイルの作る磁界が同一方向に揃えられるために結合係数の増加も期待できるので

今後実験によって確かめたい。

## 7. 直結回路特性

実際にWPTシステムを構築する場合、ループ結合を用いた時には直接接続に比べて嵩張り、より広い空間が必要となる。逆に直結共振器の構成であればコンパクトになるが、巻き数固定では調整が難しいという欠点がある。また直結は調整が難しいがループ結合よりも高い外部kが期待できるのに対して、ループ結合では値は小さいとはいえ外部kを広範囲に調整することができる。以上の特性は目的によって使い分けが必要があるので、各共振器の直接接続(直結)の特性を間接接続(ループ結合)のそれと比較した。項目は共振周波数と共振器無負荷Qの2点である。

### 8.1 一重コイル共振器

測定を行った結果、説明ができない不明な点が多々あったため今後の課題として検討を進めていく予定であるが、測定結果は参考のためそのまま示しておく。ループ結合から直結に変更すると共振周波数は低下する。図16に示すように巻き数が増えるほどその変化が大きくなっている。

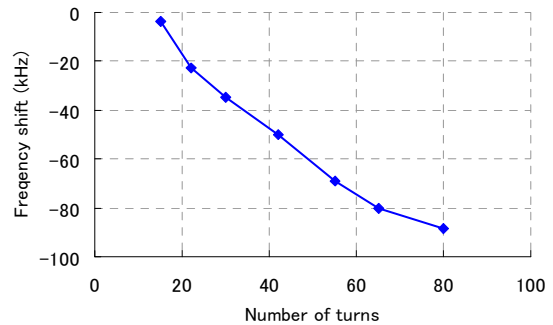


図16.直結による共振周波数変動

無負荷Qについては、ループ結合と直結のどちらでも理論上は共振器特性が観測できるため等しくなるものと予測したが、図17のように直結のほうが低い値を示している。また、これは比率で表すと図18のように巻き数が増えるに伴い劣化が激しいことがわかる。

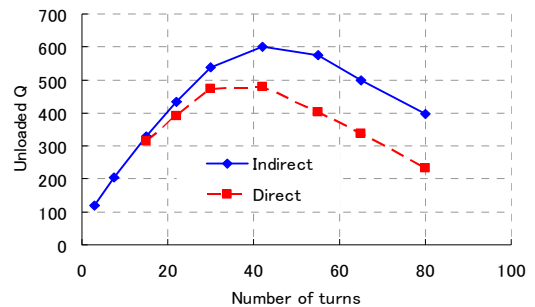


図17.直結による無負荷Qの劣化

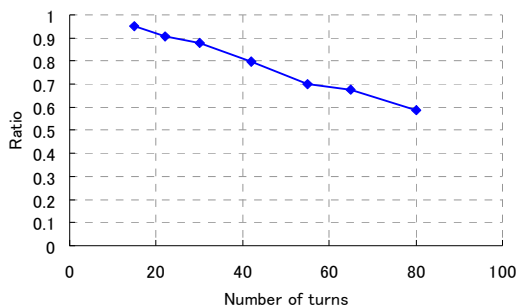


図 18. 無負荷 Q の劣化比

改善策は同軸ケーブルがアンバランス回路であるので、共振器をバランス回路化して更にバランスを装荷し、共振器に外部影響を与えないことで特性劣化を抑えることができるのではないかと考えられる。しかし、一重コイル共振器をバランス回路化することはできないため、改善することは実質的に難しいと思われる。

## 8.2 二重コイル共振器

これまで使用してきた 3 巻きの共振器は直結にすると外部 k が大きすぎ共振周波数などの測定が不可能であったので 7.5, 15 巻きの結果のみを示す。また、一重コイル共振器と違い二重コイル共振器はコンデンサ接続位置の違いによってバランスとアンバランス型を区別して作製可能であるので、それによる特性の違いを示す。配線は図 19 に示す通りである。

周波数変動について、アンバランス型では図 20 に示すように一重コイル共振器と同様巻き数が多いほど大きい。コイルギャップに関してはある間隔にピークが存在することがわかる。バランス型では多少のばらつきはあるが 10kHz 以内のずれであったので図示していない。無負荷 Q もまた図 21 に示すようにアンバランス型の直結はループ結合で得られた無負荷 Q より低い値を示している。しかし、バランス型の直結ではループ結合と等しい値を示している。また無負荷 Q に関してもコイルギャップにピークが存在する。そして、図 18 と同様図 22 のように無負荷 Q の比率を見ると、アンバランス型では巻き数が多くギャップが広がるほど劣化するが、バランス型では劣化していない。

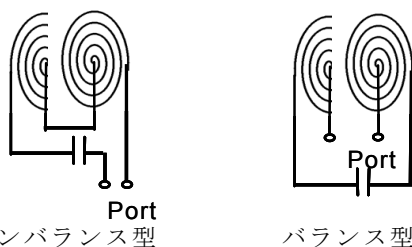


図 19. 二重コイル共振器の 2 つの構成法

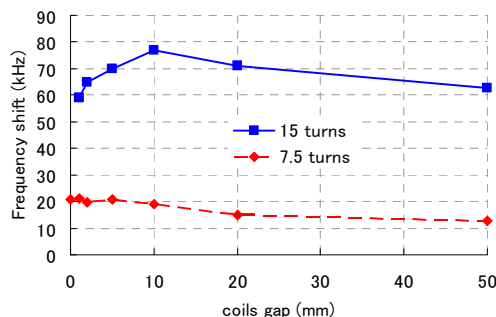


図 20. アンバランス型二重コイル共振器周波数変動

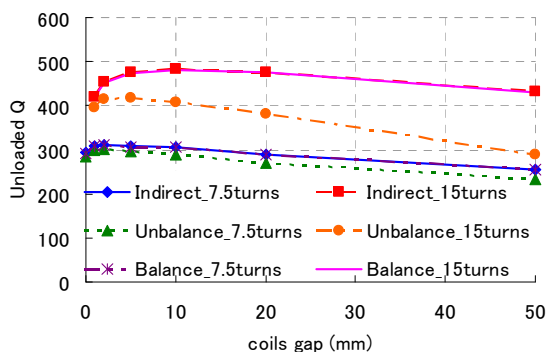


図 21. 無負荷 Q の直結による劣化

以上の結果からアンバランス型では一重と二重コイル共振器はどちらも直結によって無負荷 Q が劣化すると言える。それに対してバランス型ではループを用いた間接接続とほぼ同等の特性を示した。そのためこれらの回路にはバランスを用いる必要はなく、それを用いた際には周波数特性は変わらないがむしろ無負荷 Q 値はバランスのロスの影響で多少の劣化が生じた。

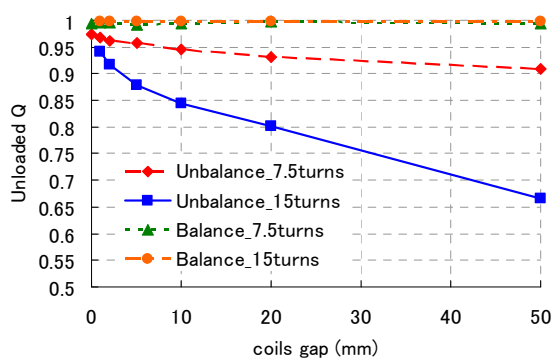


図 22. 無負荷 Q の劣化比

## 8. 3 種の共振器の評価—まとめに代えて—

無線電力伝送システムにおける伝送特性の向上を目指して共振器構成の検討を行った。その結果、比較した 3 種の共振器は目的に応じて使い分けることが望ましいとの結論に達した。オープンスパイラル共振器はコンデンサを装荷していないので電界結合が磁界結

合に加わり結合係数は最も大きい[5]、誘電体などの異物の影響を受けやすいことがわかった。しかし、我々の考えているディスクリピータなどの電界エネルギーによる結合が重要なシステムでは非常に有効な共振器である。

一重コイル共振器はコンデンサを装荷しているのでオープン共振器より誘電的な外乱に対して周波数変動が低減できている。その上浮遊容量の影響が少なく動作が安定で、また容量とインダクタの値を変えることによって共振周波数の制御や外部回路との整合の調整も容易である。無負荷  $Q$  はコイルのピッチを適切に保つことによって外形寸法とのトレードオフとすることができる。これらの特徴によってこの共振器は最も広く一般的な用途に適している。

最後に二重コイル共振器は誘電的外乱に対して最も安定であり、カプセル内視鏡や水中給電などの特殊な用途に適している。2層であることによってコイルの線間距離の制御性がより高いので無負荷  $Q$  を最も高くすることが出来るとともに、厚さの増大はあるもののスパイラルに加えてソレノイドコイル的要素が加味されるため、軸方向への結合係数の減少が抑えられる利点もある。

その延長として二重コイルを多重コイル共振器に拡張しても、誘電体影響の二重コイル以上の軽減を行うことはできないことを示した。しかし、巻線間隔の拡大による近接効果の軽減が可能であることを考えると、共振器無負荷  $Q$  や結合係数の向上が得られる可能性はあると考える。

また、間接接続で設計されているシステムを直接接続のシステムに置き換えることは回路の簡素化に役立つが、一重コイル共振器で実際に行うのは容易ではないことを示し、二重コイル共振器では平衡型構成法を採用することで特性の劣化がほとんどないようにできることを示した。しかし、なぜバラバラな特性が良いのか理由は現在明らかではない。

今後は電磁界解析ソフトなどを用いて原因不明な点の解明や共振器特性の向上を目指して検討を進めていく。

## 文 献

- [1] 小坂修平、石崎俊雄、栗井郁雄、「共振型無線電力伝送システムの伝送効率最大化」、信学技報、WPT2011-12(2011-10)、2011年10月
- [2] 澤原裕一、石崎俊雄、栗井郁雄、「環境の変化に対して安定な結合共振器型 WPT システム」、信学技報 WPT2012-26、2012年11月
- [3] [http://www.horiba.com/jp/horiba-advanced-techno/hatwave/vol2/f\\_s\\_dic/](http://www.horiba.com/jp/horiba-advanced-techno/hatwave/vol2/f_s_dic/)
- [4] 栗井郁雄、澤原裕一、生田祐也、張陽軍、石崎俊

雄、「WPT ガイドの応用」、信学技報 WPT2013、2013年7月(発表予定)

- [5] I. Awai, Y. Zhang, T. Komori and T. Ishizaki, "Coupling coefficient of spiral resonators used for wireless power transfer", Proc. 2010APMC, pp. 1328-1331, Dec. 2010.