

淡水・海水を介するワイヤレス給電の検討

澤原 裕一¹ 石崎 俊雄¹ 堀田昌志² 栗井 郁雄³

1. 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

2. 山口大学理工学研究科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

3. 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 hotta@yamaguchi-u.ac.jp, 3 awai@ryutech.com

あらまし

ワイヤレス給電は通常障害物のない空間を介して行われるが、送受電用の2つの共振器間に淡水や海水が介在する場合がある。それらは大きな誘電率と損失を持つため、システムに多大の影響を与え、性能を劣化させることが多い。その程度がいかほどであり、それを軽減する方法があるかについて検討する。

キーワード 淡水、海水、シングルスパイラル共振器、C付きスパイラル共振器、C付き2重スパイラル共振器

Study on a WPT system via fresh and salty water

Yuichi SAWAHARA¹ Toshio ISHIZAKI¹ Masashi HOTTA² and Ikuo AWAI³

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

2. Faculty of Science & Technology, Yamaguchi Univ., 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi Pref. 520-2194 Japan

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

E-mail: 1 t090135@mail.ryukoku.ac.jp, 2 hotta@yamaguchi-u.ac.jp, 3 awai@ryutech.com

Abstract

In addition to the case that the wireless power transfer is carried out through an unobstructed space, it might be important to transfer power through fresh water or seawater. Having a large dielectric constant and loss, they often give a significant impact on the system, and degrade the performance. The present report studies the extent of those effects and a way to reduce them.

Keyword fresh water, salty water, open spiral resonator, spiral resonator with capacitor, two-layered spiral resonator with capacitor

1. まえがき

WPT システムは多くの分野から注目されている発展途上の技術であり、様々な状況・状態での無線伝送が求められている。そのなかで解決すべき項目は多々存在すると考えられ、今回我々は今後重要になると考えられる水中での伝送のため、淡水や海水を介しても高効率な無線電力伝送が行えるシステム構築の方法の検討を行った。通常、共振器の作る電界中に誘電性物質が存在するとその影響で共振器の特性の劣化や変化が起きてしまう。しかし、誘電性物質に対しては電界のみが影響し、磁界の影響はないと考えられる。それならば、電界を閉じ込めた共振器を工夫することで伝送特性を改善できると考えられる。ただ、実際には淡水と海水で水質の特性の違いがありそれぞれでの検討が必要となる。また、海水の塩分濃度も必ずしも想定している濃度とは限らない。そこで、淡水と海水を塩分濃度を制御した水を用いて模擬し、共振器特性の比較を行った。それにより淡水や海水を介したワイヤレス給電システムの高効率化を実現するための基礎検討を行った。

2. 測定の構成・配置

実験はシステム構成を考える上で必要となる共振周波数の変動、無負荷 Q 値、結合係数、透過特性の計 4 つの測定を中心に行った。そして、淡水を模擬した媒体は 2 リットルペットボトルに水道水を 1.7 リットル入れてそれを並べた。又、海水はそれに食塩を濃度 3.5% となるよう加えた。ペットボトルの寸法は図 1 に示す。

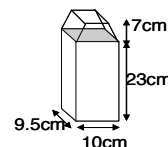


図 1. ペットボトルの概略図

次に検討に使用する共振器は図 2 に示す 3 タイプの構成を用いた。スパイラル直径を 30cm に固定し、タイプ A は単層オープンスパイラル共振器 (約 100 巻きの自己共振を用いるコンデンサを使用しないオープンスパイラルコイル共振器)、タイプ B は 1 重 22 巻きスパイラル共振器 (スパイラルコイル共振器に 95pF コ

ンデンサを装荷した共振器)、タイプ C は 2 重 15 巻きスパイラル共振器(2 重のスパイラル間隔は 1cm に固定した 10pF コンデンサ装荷共振器)である。使用周波数は単層オープンスパイラル共振器の自己共振周波数の 2.3MHz に 3 タイプとも合わせている。タイプ B,C の周波数調整は装荷するコンデンサで行っている。

続いて実験の構造・配置について説明しておく。まず、共振周波数の変動と無負荷 Q 値の測定のために図 3(左)のような構成にしてループ・スパイラル共振器間は疎結合となるように十分に離れた上でペットボトルを共振器から徐々に遠ざけるように測定を行った。そして、結合係数と透過特性はペットボトルを 2 つ使用して図 3(右)のように常に対称配置となるようにしながらペットボトルを徐々に近づけていった。

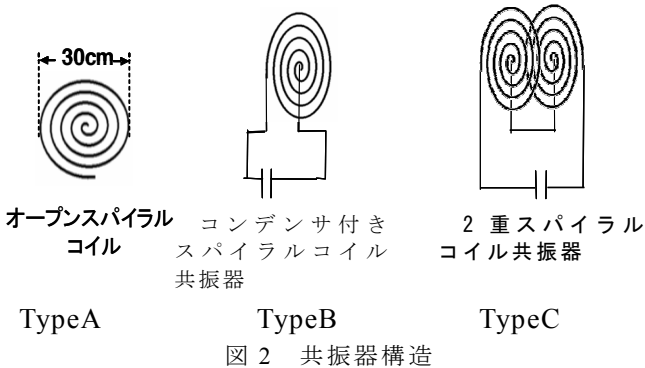


図 2 共振器構造

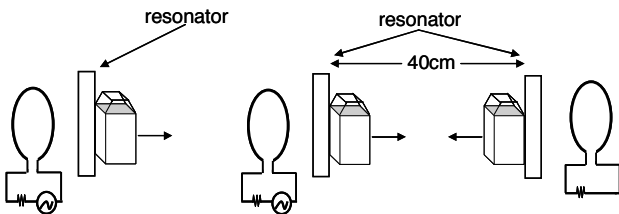


図 3. ペットボトル配置移動実験図

(左)周波数ずれ 無負荷 Q 検討 (右)結合係数 透過特性

3. 水による共振周波数のシフト

電界中に誘電体が存在すると低周波数へ共振周波数がずれる現象が起きてしまう。オープンスパイラル共振器は共振器周りの電界漏れが多いためその他の共振器に比べ、大きく周波数ずれが起きると予想される。システムの構築を考えると共振周波数がずれてしまうと使用できる周波数帯からはみ出てしまう可能性がある。この影響の検討は図 3(左)のように水と共振器の間隔に対する共振周波数を測定し、図 4,5 に結果を示す。横軸の一番右には空気中の測定結果を示している。オープンスパイラル共振器はやはりペットボトルが近づくほど大きく低周波数へずれてしまっている。その他の共振器ではコンデンサを装荷していることにより電気エネルギーを溜め込むことができるため、共振周

波数のずれが小さくなると考えられ、かつ 2 重スパイラル共振器はさらにスパイラル間の容量で電界の閉じ込めを行っているため 1 重スパイラル共振器と比べ、周波数のずれが半分程度になっていると思われる。淡水と海水での周波数ずれの測定は考えられる測定誤差を除くと等しく、共振周波数ずれは誘電率の実数部が影響しているために淡水と海水で違いが見られないと考えられる。

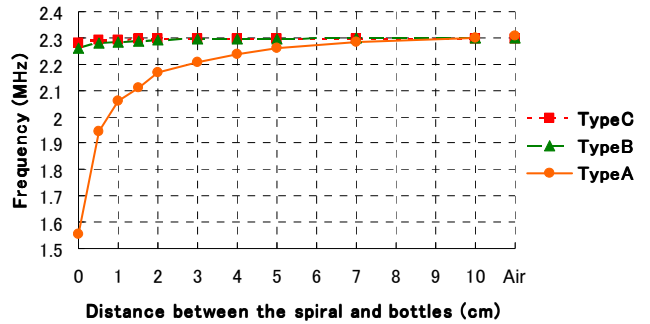


図 4. 淡水に対する共振周波数ずれ

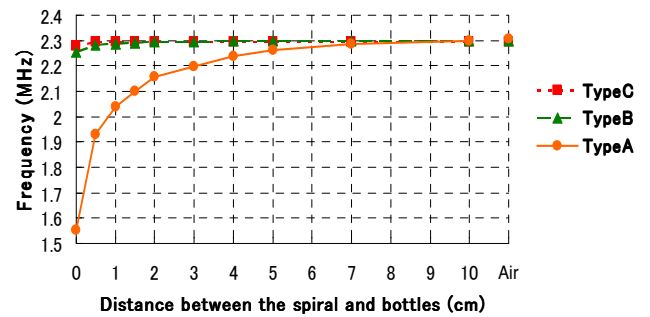


図 5. 海水に対する共振周波数ずれ

4. 共振器無負荷 Q の水による劣化

先にも述べたが誘電性物質の誘電率の実数部が周波数特性に影響を与える。そして虚数部は無負荷 Q 値に影響を与えることになる。そのためペットボトルと共振器との距離によって無負荷 Q 値の変動が起こる。また、淡水と海水では誘電率の実数部は等しいのだが虚数部は違うため無負荷 Q 値への影響は異なることになる。

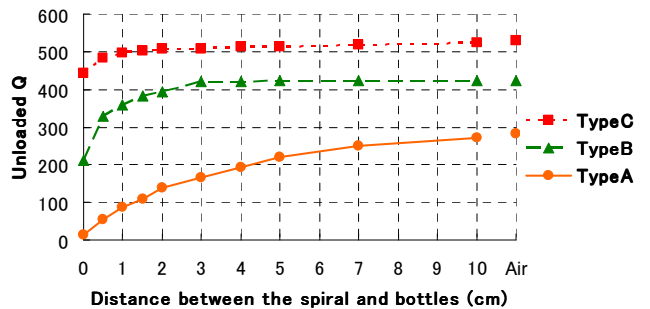


図 6. 淡水に対する無負荷 Q 値

検討は周波数ずれと同様図 3(左)のような配置を用いた実験を行った。結果は図 6,7 に示すようになり、淡水ではオープンスパイラル共振器にペットボトルが近づくと限りなく減少し続けることになり、1重スパイラル共振器や2重スパイラル共振器では0~3cmの間で影響が見られるに過ぎなかった。それ以降はほぼ一定を保っているが、2重スパイラル共振器は1重スパイラル共振器より0~3cmの間でさらに変動が少ない。つまり共振周波数のずれの検討と同様にオープン共振器→1重共振器→2重共振器の順に特性がよく傾向も一致していることから電界の影響が大きいことがいえると思われる。しかし、海水では3タイプの共振器とも大きく無負荷Q値が減少している。特性の良さの順は一致しているが傾向は全く違っており、ペットボトルに近づくと連れて特性は常に悪化傾向であることがわかる。このことから海水は虚数部の無負荷Q値への影響が非常に大きいこと、もしくは別のなんらかの原因が影響をしている可能性が考えられるため現在検討中である。

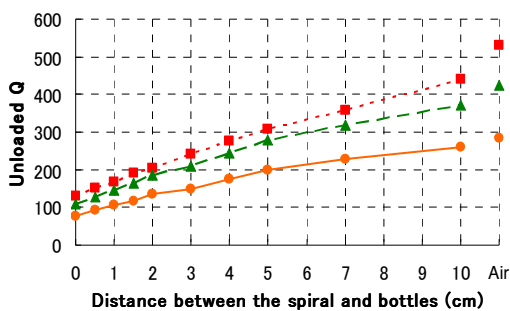


図 7. 海水に対する無負荷 Q 値

5. 塩分濃度による無負荷 Q の変動

誘電率の虚数部は塩分濃度によって変動すると考えられる。常識的には、濃度の増大によって虚数部は増大し、その結果無負荷 Q は悪化すると思われる。また、海水の濃度も地域によって多少の差があり、多彩なケースに対応できるように濃度による無負荷 Q の測定を行った。検討は水道水を用いると元々の不純物が影響する可能性があるため不純物がほとんど混じっていない蒸留水を使用し、塩を加えていった。測定構造は先と同様図 3(左)のような配置を用いて、結果を3タイプのそれぞれの共振器に対して図 8~10 に示す。パラメータとしてペットボトルと共振器間距離を取り、横軸は塩分濃度として無負荷 Q を測定した。奇妙なことにすべての共振器に対して塩分濃度が 0.01% 付近で Q は一旦最も低下する。その後濃度とともに回復するが最終的には大きな塩分濃度で再度低下に向かう。更に、水道水は一旦 Q が低下する塩分濃度の水とほぼ同

等の Q 値を与えることが判明した。即ち、淡水とは言いながら水道水は電氣的には非常に悪い特性の媒質であるということが出来る。

無負荷 Q の値について述べると、やはりオープン共振器が最も大きな影響を受け、C 付き共振器は影響が少ない。特に2重共振器は最も優れていることが分かる。このような水の特性は我々にとって全く予想外のものであり、現時点では理由が説明できていない。

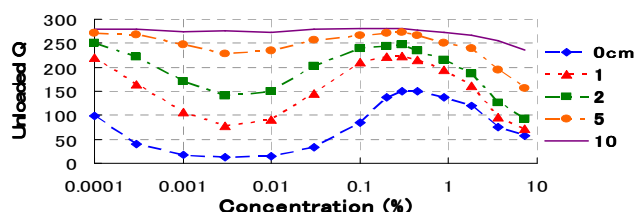


図 8. オープン共振器の塩分濃度による無負荷 Q 変動

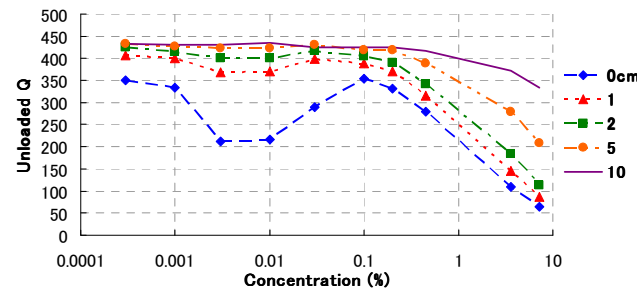


図 9. 1重共振器の塩分濃度による無負荷 Q 変動

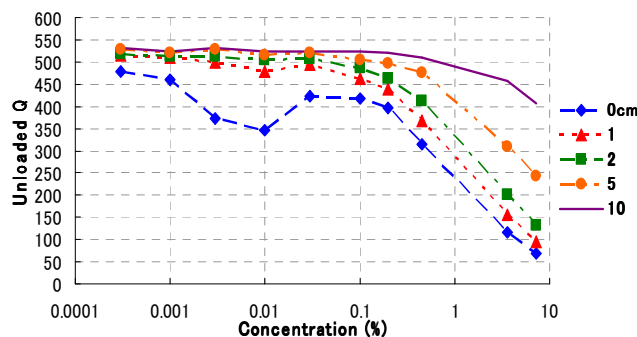


図 10. 2重共振器の塩分濃度による無負荷 Q 変動

6. システムの伝送特性

システム構築を行う際に必要となる結合係数の測定を行い、その上で透過特性の比較・検討を行った。方法は図 3(右)のようにして行った。この狙いは一定量の水を配置した際に同じ厚みの層を通すとき共振器をどのように配置すれば最も伝送特性が良くなるかを見出すことである。図 11,13 に示したように、1重スパイラル共振器と2重スパイラル共振器では淡水でほぼ一定となっているが、海水では共振器近くで少しとは言え淡水よりも大きく減少している。またオープンスパイラル共振器の結合係数は淡水/海水による差がより大きい。

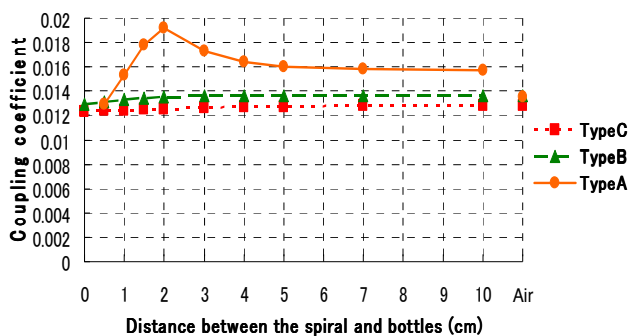


図 11. 淡水における結合係数

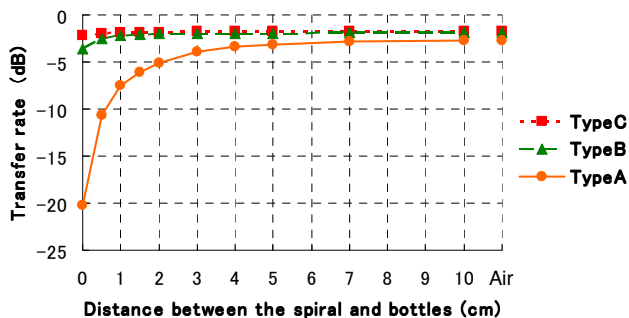


図 12. 淡水における透過特性

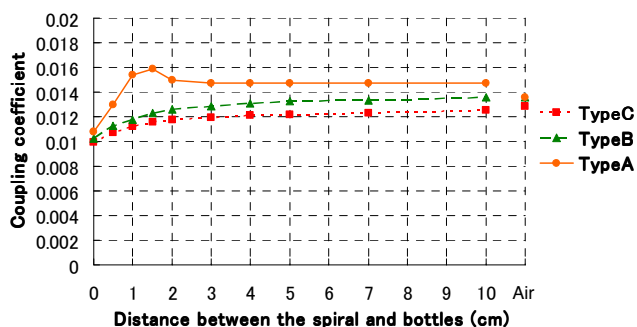


図 13. 海水における結合係数

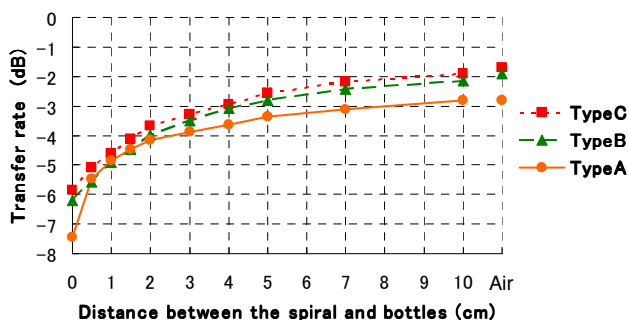


図 14. 海水における透過特性

淡水と海水とでは虚数部が違うだけであるはずなので、海水に対して結合係数が少しとはいえ減少するのはおかしいと思われ、二つの共振が共に同じ周波数ずれるのであれば結合係数は変動しないはずである。この説明はおそらく損失が電磁界分布に与える 2 次の効果と

いうことで可能ではないかと考えているが、まだよくわからない部分も多々あるため現在検討を進めている。また、オープン共振器は最も近づけた際に結合係数が低くなるが、約 2cm 程度離れた際に最も結合係数の数値が大きくなる傾向が見られ予想していない結果が得られた。これは電気力線のガイド効果が表れていると考えられる。詳しくは 8 章で検討を行う。ただし結合係数の数値が大きくても図 12,14 のように透過特性では淡水でやはりオープン共振器の特性が悪いのは図 6 の無負荷 Q の結果を反映しており、1 重スパイラル共振器や 2 重スパイラル共振器はほぼ一定値を示しているのも同様である。海水においては一律に損失影響が大きく透過特性が悪くなっている。しかし、狙い通り共振器から遠ざけることですべての共振器で特性がよくなった。

7. kQ 積による効率評価

通常、真空中であれば kQ 積から効率計算が行え、システム構築を行わずとも透過特性の検討・評価を行うことが可能である。

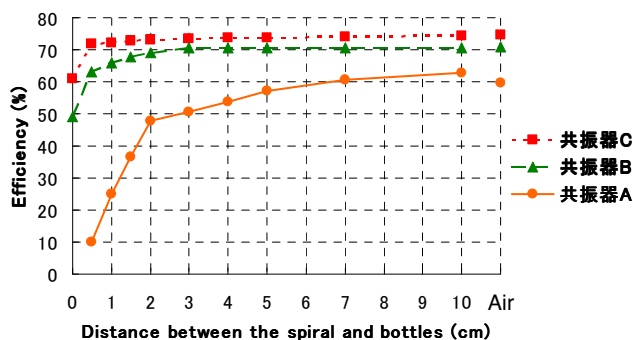


図 15. 淡水における kQ 積効率

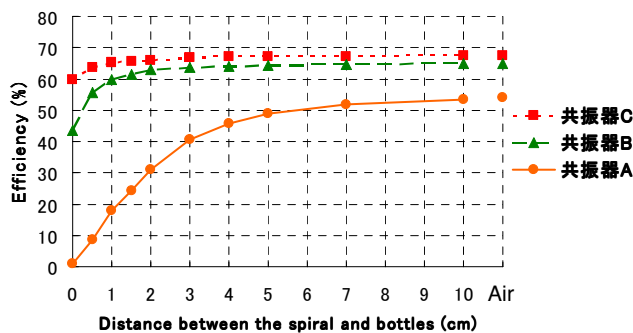


図 16. 淡水における実測効率

今回は淡水や海水を介したシステム構築であるため kQ で効率が算出できるという保障はない。しかし、淡水において透過特性が無負荷 Q 値と結合係数とによく似た傾向を示しているように思われる。そこで、確認のため淡水と海水に対する kQ 積と実測での透過特

性から効率を算出し、比較を行った。結果を図 15~18 に示した。kQ 積による効率に比べ、実測では全体的に約 5%の効率減少となったが淡水と海水共に傾向がほぼ一致していることから真空空中と同様 kQ 積からの効率評価が成り立つことが示せたと考える。

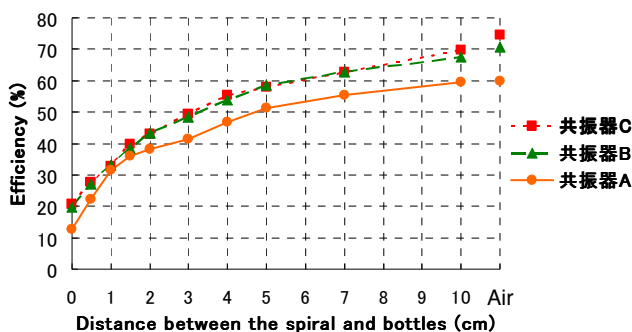


図 17. 海水における kQ 積効率

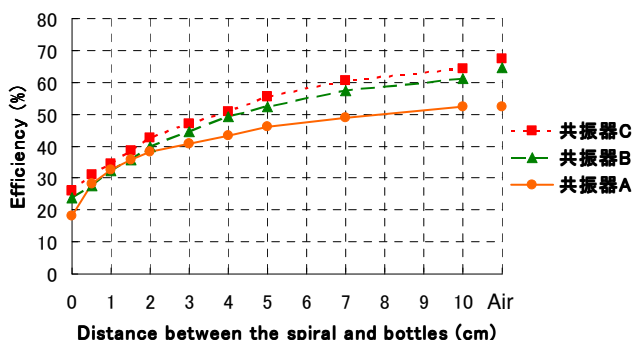


図 18. 海水における実測効率

8. 結合係数の検証

先の測定によってオープン共振器で異様な結合係数の上昇が見られたのでその理由の検討を行う。予想ではガイド効果と述べたが、ペットボトルが 1 本だと共振器間を繋ぐ道のようになっていると考えたためである。

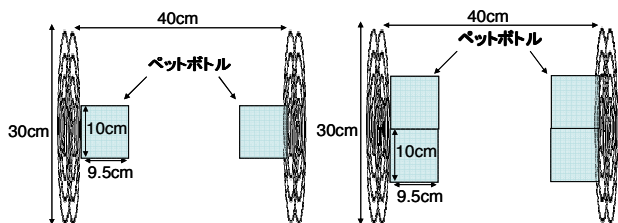


図 19. ペットボトルの配置図(左 1 本, 右 2 本)

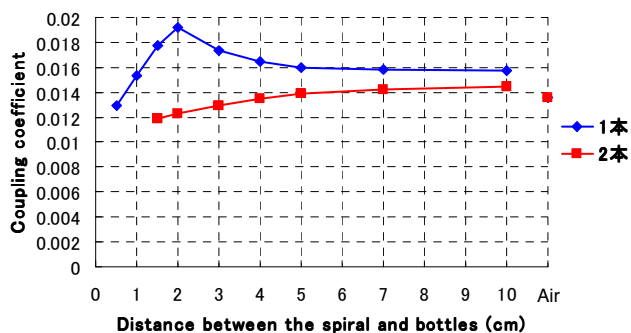


図 20. 淡水における本数に対する結合係数変化

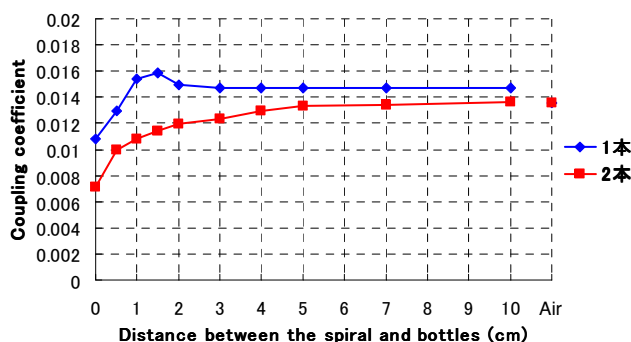


図 21. 海水における本数に対する結合係数変化

この効果を減らすために図 3(右)の配置でペットボトルをそれぞれ壁のように 2 本ずつ並べて測定を行い、その概略図を図 19 に示す。図 20 の淡水が共振器に近づいた時には無負荷 Q が大幅に下るため結合係数の測定を行うことができなかったが、図 21 の海水の結果からも 2 本並べた際に結合係数の全体的な減少が確認され、1 本の時には見られた 2cm 程度での結合係数の上昇もほとんど変化が見られなくなった。このことからやはり 1 本ではガイド効果が現れていたと考えられる。

9. 淡水・海水中給電への提案

(a) 淡水

淡水では図 3(右)で行った透過特性の測定結果の図 12 を見るとオープン共振器では特性が悪いが、1 重スパイラル共振器、2 重スパイラル共振器では共振器にペットボトルがほぼ密着している状態以外ではほとんど特性の劣化が見られなかった。このことから淡水ではできる限り電界を抑えることでほとんど影響を受けずに伝送が可能であると思われる。

(b) 海水

海水では 3 タイプの共振器とも共振器にペットボトルが近いほど透過特性の劣化が図 14 より確認され、10cm 離れた際に空気中と同等の特性となったので、共振器を海水から大きく離せばよい事になる。

しかし、今回の実験では海水を模擬した媒体を動かしたが、海水の厚みが決められている場合には

- ①共振器は海水から離せば無負荷 Q 値が増大する。
- ②共振器同士を離すほど結合係数が減少するというトレードオフの関係が考えられる。これは伝送の最適条件が存在することになる。そこで、図 22 のような構成で 2 本のペットボトルを並べて、その両側の送受電共振器を対称的に離していき伝送損失の最小条件を調べた。その結果によれば図 23 に示したように、それぞれの共振器構造によって最適点が見出された。1 重スパイラル共振器と 2 重スパイラル共振器では大きな違いはないが多少離れた方がよく、オープン共振器では共振器がペットボトルから 1cm 離れた時がその他の 2 共振器よりも特性がよくなった。これは図 24 に示す高い結合係数が与えた結果であると思われる。つまり、透過効率がよくなり又図 4, 5 のように周波数ずれも小さくなるので、水から共振器を多少離れたシステム構築を行うことで最も良い伝送が可能であると言える。

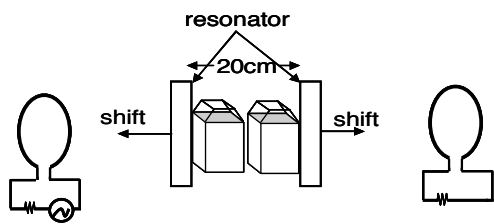


図 22. 共振器配置移動の実験図

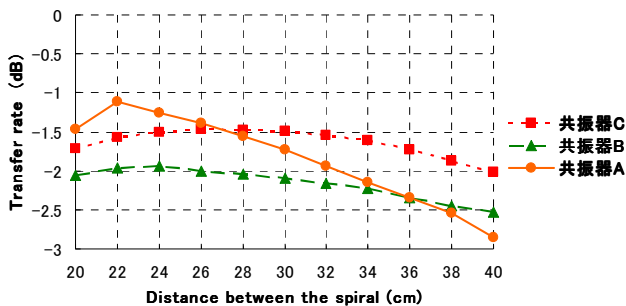


図 23. 海水における共振器移動の透過特性

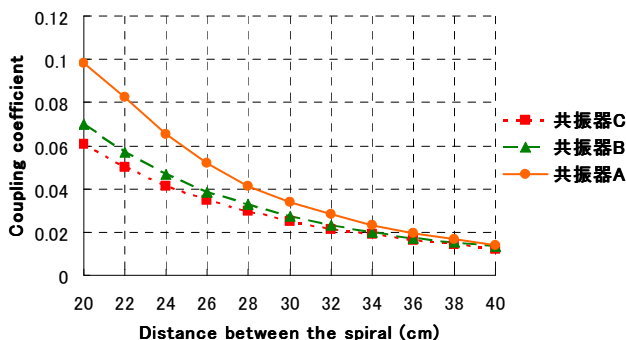


図 24. 結合係数の共振器間隔依存性

10. まとめ

今回、淡水や海水を通して無線電力伝送が行えるための指針について検討した。共振器が水に近いと大きく影響を受けたがある程度距離を離せば淡水や海水が間にあってもほぼ空気中と同等の伝送が可能であった。

- ・透過特性は電界の影響を減らすほどよくなっており、2 重共振器を使用することが最も特性が良いことが確認できた。
- ・淡水・海水を介した伝送でも真空中と同様に kQ 積からの効率と透過特性からの効率がほぼ一致して検討・評価に使用することが可能であることを示した。

つまり、淡水であれば電界を抑えることで共振器と誘電体の距離は比較的近くともほとんど影響なく伝送が可能である。海水なら距離による特性劣化が大きい電界の影響範囲は限られるため誘電性物質と共振器間にある程度の空気層を挟むことで共振器の性能劣化は抑えることができると考えられる。また、淡水と海水共に特性の良い濃度の媒体を通すことでオープンスパイラル共振器でも改善が可能であると考えられる。

今後は現段階で不明な傾向を示している現象の原因追及や更なる効率のよい無線電力システムの構築の検討を進めていくことを計画している。

文献

- [1] 澤原、石崎、栗井”環境の変化に対して安定な結合共振器型 WPT システム”、WPT 研究会、2012 年 11 月
- [2] 澤原、石崎、栗井、”WPT システムにおける誘電体損失の低減の検討”、信学総体、2013 年 3 月
- [3] <http://www.delphis.co.jp/mame/mame02.html>
- [4] 栗井郁雄・小森琢也、”共振器結合型ワイヤレス給電システムの簡便な設計”、電学論 C, 130 巻, 12 号, pp. 2198-2203, (2010).
- [5] 栗井郁雄、”磁気結合共振器型ワイヤレス給電システムの BPF 理論による設計法”、電学論 C, 130 巻, 12 号, pp. 2192-2197(2010)