

キャパシタを用いた共振器結合型無線電力伝送システム用 スパイラル共振器の小型化に関する基礎研究

Fundamental Study on Size Reduction of Spiral-Resonators Used for Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System

藤本 悠之介 堀田 昌志
Yunosuke Fujimoto Masashi Hotta

山口大学大学院創成科学研究科

1. まえがき

移動体や IoT(Internet of Things)機器センサなどへの給電方法として、電源ケーブルを用い無い無線電力伝送システムが注目されている[1], [2]. 代表的な無線電力伝送システムとしては、スマートフォンなどの充電に一部実用化されている電磁誘導方式、電波を電気エネルギーとして収集するエナジーハーベスティング方式、そして、本論文で取り扱う共振器結合型無線電力伝送(Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer: RC-WPT)方式等がある.

電磁誘導方式は、電力伝送可能距離が極端に短く、送・受電ユニット間の位置や角度ずれに弱いと言った問題点がある. 一方、共振器結合型無線電力伝送方式システムは、送・受電ユニット中に内蔵された共振器間における近傍電磁界結合を利用しており、中距離の電力伝送を効率的に実行できる. また、送・受電ユニットの位置や角度ずれに強いといった特徴も併せ持つため、当研究室も含めて様々な機関で活発な研究が行われている[3]~[8].

このRC-WPTシステムを一般的な電気機器などへ適用する場合、共振器間に損失媒質が介在する場合や共振器間に位置や角度ずれが生じた場合に電力伝送効率が低下する問題や共振周波数を商用周波数に近づけようとするとシステムのサイズが極めて大きくなる問題が存在する. 当研究室では、前者に対して、二つの共振周波数は等しいが形状の異なるスパイラル共振器を同一平面内に組み合わせる構成を提案し、損失媒質の影響を軽減できる事を示している[9],[10].

本研究では、後者の共振器サイズ縮小に関する基礎的な検討を行っている. すなわち、共振周波数とスパイラル共振器を構成する銅線の線間距離を維持したままで共振器サイズを小型化する為に、キャパシタを装荷する方法を用いた. そして、その性能を従来のキャパシタ無しの共振器と比較検討し、今後の新しい共振器構成の基礎データを求めている.

2. キャパシタを装荷した RC-WPT システム

2.1 RC-WPT システムの構成

本研究で取り扱う RC-WPT システムの構成を図 1 に示す. 同システムでは、共振器としてスパイラル共振器を用い、送電用のループコイル、スパイラル共振器、受電用のスパイラル共振器、ループコイルの順にすべての中心が一直線上になるよう配置している.

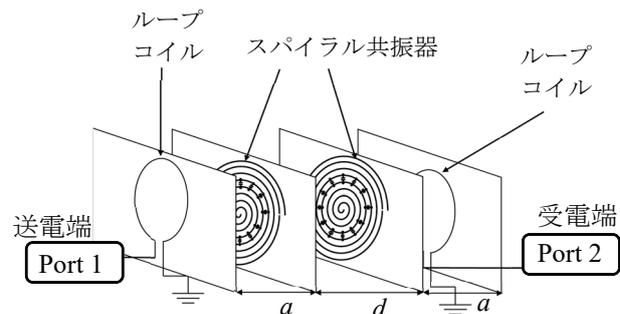
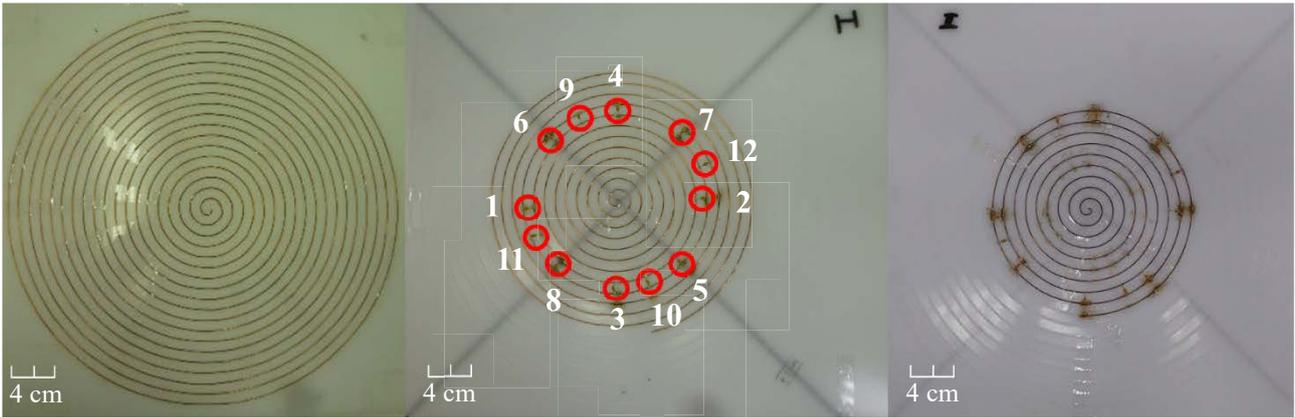


図 1 RC-WPT システムの構成

2.2 スパイラル共振器の共振周波数

図 2(a)に従来用いていたスパイラル共振器(線間距離 1.0 mm)の形状を示す. 本スパイラル共振器は、1.0 mm φの銅線を、ポリエチレン板上にスパイラル形状で形成した幅 1.3 mm、深さ 1.0 mm の溝に中心から埋め込んだもので、共振周波数は 10.0 MHz に調整した場合、その直径は 37.20 cm、銅線長は 1119.0 cm、巻き数は 19 であった. ここで、共振器の共振周波数を 10.0 MHz としているのは、共振器を実験設備内で取り扱う際のサイズおよび、10.0 MHz 帯の ISM バンドに近いためである.

この共振器のコンパクト化をはかるために、まず、共振器の共振周波数が 23.0 MHz となるように銅線長を調整すると図 2(b)の様になった. この時、共振器の直径は 24.6 cm、銅線長は 491.9 cm となった. この直径が小さくなったスパイラル共振器にキャパシタを装荷する事で共振周波数を 10.0 MHz とする事を試みる.



(a) 従来型共振器 (キャパシタ無し) (直径:37.20 cm) (b) 23.0 MHz 共振器にキャパシタ装荷 (直径:24.60 cm) (c) キャパシタ装荷で共振周波数が 10.0 MHz (直径:18.50 cm)

図2 スパイラル共振器

実際には、静電容量が 47 pF のキャパシタ(積層セラミックコンデンサ)を、共振器内に複数個装荷した。共振器に装荷したキャパシタの装荷順は図 2(b)中に示す様にできる限り対称性を持つようにした。

また、共振器内へのキャパシタ装荷位置は、後の調整が行いやすいように、スパイラル共振器の外側終端から 4~5 巻目にかけてとした。装荷したキャパシタの総静電容量に対する共振器の共振周波数の値を測定すると、図 3 の様になった。同図より、スパイラル共振器に 47 pF のキャパシタを 12 個装荷(総静電容量 564 pF)した時、共振器の共振周波数は 10.0 MHz よりも低い 9.38 MHz になった。

次に、この 12 個のキャパシタを装荷した共振器の共振周波数を 10.0 MHz とするために、共振器の銅線長を調整した。その結果、共振器の銅線を外側から 209.3 cm 切り取った図 2(c)の様にした場合(銅線長: 282.6 cm, 巻き数 10)に共振周波数が 10.0 MHz となり、同じ共振周波数で直径を 49.73 %に小型化できた。

次に、従来使用してきた図 2(a)のスパイラル共振器(以降、従来型共振器と呼ぶ)と、キャパシタを 12 個装荷した上で共振周波数を 10.0 MHz に合わせた図 2(c)のスパイラル共振器(以降、キャパシタ装荷共振器と呼ぶ)の特性を実験的に比較する。

ここで、スパイラル共振器の共振周波数は、インダクタンス L と静電容量 C の積の平方根の逆数に比例するので、共振器の銅線を短くしたことによって、共振器のインダクタンス L 成分が小さくなり、共振周波数は上昇する[11], [12]。また、スパイラル共振

器にキャパシタを装荷すると分布型及び集中型の総合静電容量 C が増加するので、共振周波数を低下させる事ができると考えられる。これらの方針に従って、共振器の直径を小型化した同じ共振周波数を持つ共振器を作製した。キャパシタ装荷共振器自身の性能及び同共振器を RC-WPT システムに搭載した際の特性を調査し、従来型共振器を用いたシステムでの特性と比較検討する。

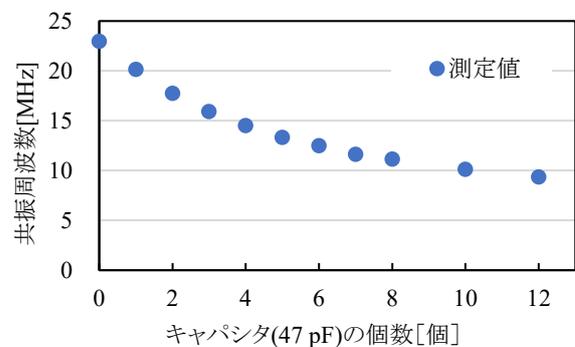


図3 キャパシタの数を調整した際の共振周波数

2.3 無負荷 Q の測定結果

まず、共振器単体の損失の逆数に比例する無負荷 $Q(Q_0)$ の測定を行った。従来型共振器で構成したシステムと、キャパシタ装荷型共振器で構成したシステムにおいて、送電側のループコイルとスパイラル共振器だけを使用し、ループ・スパイラル共振器間距離 a を 1~20 cm で変化させ、port1 における電力の振幅反射係数 S_{11} の周波数特性を測定し、それより無負荷 Q を計測した。その結果を図 4 に示す。なお、測定の詳細は文献[6]と同様である。

本結果より、キャパシタ装荷共振器は、従来型共振器と比べて、無負荷 Q が低くなっている。これは、電界エネルギーがキャパシタ内部に閉じ込められ、損失となっているからであると考えられる。また、従来型共振器の無負荷 Q の様に、ループ・スパイラル共振器間距離 a の短い部分で大きく変化しているのは、共振器の電磁界が近接するループコイルの影響で乱されている為であると考えられる。そこで、キャパシタ装荷共振器の無負荷 Q が低い値で一定となっている原因としては、電界エネルギーがキャパシタ内部に閉じ込められている為、共振器周辺に発生する電磁界分布の拡がり狭く、ループコイルの影響を受け難かった為であると考えられる。

2.4 結合係数 k の測定

次に、RC-WPTシステムのスパイラル共振器間結合係数 k の測定を行った。従来型共振器で構成したシステムと、キャパシタ装荷型共振器で構成したシステムにおいて、ループ・スパイラル共振器間距離 a を十分に広い15 cmとし、スパイラル共振器間距離 d を2~70 cmで変化させ、結合係数 k を測定した。その結果を図5に示す。なお、詳細な測定方法は文献[6]と同様である。

本結果より、結合係数 k はキャパシタ装荷共振器の方が従来型共振器に比べ、低下している。また、キャパシタ装荷共振器の共振器同士の結合係数 k が測定できる間隔が、従来型共振器と比べ短くなっている。これらは、共振器内にキャパシタを装荷したことで、本来、共振器が結合するために用いられていたエネルギーが、キャパシタ内に蓄えられた為、共振器が送出する電磁界分布の範囲が狭くなり、互いの結合度が低下したためと考えられる。

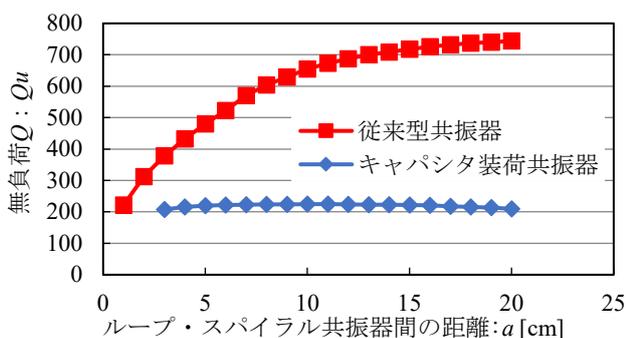


図4 無負荷 Q

2.5 電力伝送効率の測定

最後に、電力伝送効率の測定を行った。従来型共振器で構成したシステムと、キャパシタ装荷型共振器で構成したシステムにおいて、システムマッチングをとり、スパイラル共振器間距離 d と電力伝送効率の関係性を測定した結果を図6に示す。なお、詳細な測定方法は文献[6]と同様である。

本結果より、キャパシタ装荷共振器は、従来型共振器に比べて、スパイラル共振器間距離 d が長い領域で急激に電力伝送効率が低下している。ただ、スパイラル共振器間距離 d が10 cm前後の場合には、非常に高い効率を示している。これらは、共振器内にキャパシタを装荷したことが原因であると考えられる。具体的には、スパイラル共振器内にキャパシタを取り付けた事で、キャパシタ内部に電界エネルギーが閉じ込められる。閉じ込められた電界エネルギーは直接磁界を作る事ができなくなり、共振器自体の共振に寄与する、閉じ込められていない電界エネルギーが相対的に少なくなる。従って、共振器周辺の電磁界分布は、共振器の近傍に集中して存在するという事が理由であると考えられる。

以上の結果より、キャパシタ装荷共振器では、直径を小さくした分、長距離電力伝送を犠牲にし、電

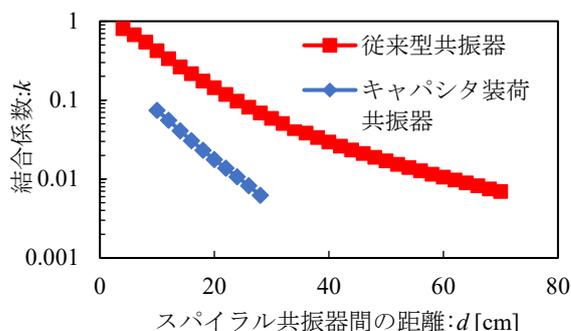


図5 結合係数 k

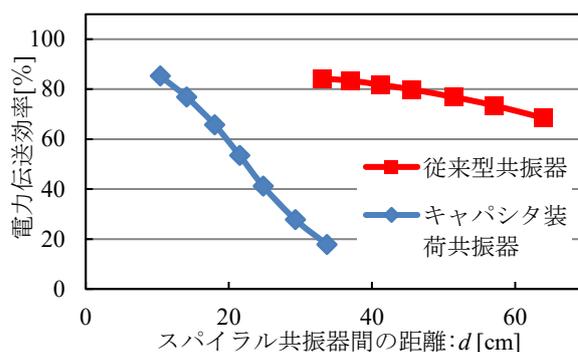


図6 電力伝送効率

磁誘導方式よりも長いですが、近距離電力伝送用には使用できると考えられる。

今後は、小型化可能なキャパシタ装荷共振器の特徴を基礎として、コンパクトなRC-WPTシステムでも、電力伝送距離が長い領域において高効率伝送が可能な共振器の開発・検討を行っていききたい。

3. あとがき

筆者らは、スパイラル共振器を用いた共振器結合型無線電力伝送システムの小型化に向けて、まずはスパイラル共振器の小型化を検討した。今回用いた手法は、最初に共振周波数が高くサイズの小さいスパイラル共振器を作製し、その共振器にキャパシタを装荷する事で共振周波数を目的共振周波数以下まで下げた。その後、スパイラル共振器の銅線長を調節する事で目的共振周波数（今回は 10.0 MHz）とした。この様な方法で、共振器の小型化やその共振周波数調整は可能であることを確認した。次に、キャパシタ装荷による共振器小型化がシステム性能へ与える影響を共振器の無負荷 Q 、共振器間の結合係数および同共振器を組み込んだRC-WPTシステムでの電力伝送特性から調べた。その結果、キャパシタ装荷共振器の電力伝送効率は、従来型共振器に比べて、比較的近い距離間では高い効率を示したが、電力伝送距離を長くすると伝送効率は急激に減衰する事がわかった。これは、スパイラル共振器にキャパシタを装荷したことで、共振器の電磁界がキャパシタ内に閉じ込められ、共振電磁界分布の範囲が共振器近傍に集中したためであると考えられる。

今後は、キャパシタ装荷共振器の外側の同一平面上に、共振周波数は等しいが形状の異なるスパイラル共振器を形成するなどし、キャパシタを装荷するなどして小型化した共振器でも、電力伝送距離を長い範囲まで有効にする形状の開発・検討などを予定している。

参考文献

- [1] 「ワイヤレス給電とは？原理やメリットを紹介」, Technology Geeks.
https://www.daihen.co.jp/technologygeeks/cat01/cat01_04/69/ [閲覧日 2022年8月17日]
- [2] 「世界から電源コードがなくなる日：ワイヤレス電力伝送が実現する未来」, CORAL.

<https://coralcap.co/2020/06/wireless-power-transfer/>
[閲覧日 2022年8月17日]

- [3] 篠原真毅, 電界磁界結合型ワイヤレス給電技術-電磁誘導・共鳴送電の理論と応用, pp.290~299, 科学情報出版株式会社, 2014.
- [4] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, *SIENCE*, vol.317, pp.83-86, 2007.
- [5] 栗井郁雄, “共鳴型ワイヤレス電力伝送の新しい理論,” *電気学会論文誌 C 分冊*, 130 巻, 6 号, pp.966~971, 2010.
- [6] 結城亨, 堀田昌志, 羽野光夫, 栗井郁雄, “共鳴型無線給電システムの伝送効率改善に関する検討,” *第13回IEEE広島支部学生シンポジウム (HISS) 論文集*, 広島, no.B-3, pp.220~223, 2011.
- [7] 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,” *電気学会論文誌 C 分冊*, 130 巻, 12 号, pp.2192~2197, 2010.
- [8] 栗井郁雄, 小森琢也, 石田哲也, 石崎俊雄, “共鳴型ワイヤレス電力伝送に用いる共振器の比較検討,” *電学技報(無線電力伝送)*, no.WPT2010-01, pp.1~7, 2010.
- [9] X. Duan, K. Harada, H. Onari, and M. Hotta, “Fundamental Characteristics of Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System By Using Planar Type Dual-Spiral Resonators,” *Proc. the 19th IEEE Hiroshima Section Student Symposium (Matsue, Japan)*, no.A1-7, pp.17~20, 2017-12.
DOI:10.1587/transele.2021ECP5025
- [10] Nur Syafiera Azreen Binti Norodin, “Study on Performance Improvement of Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System Using Spiral Resonators Towards Practical Use,” *Doctoral Thesis on Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University*, pp.17, 19~50, 2022-03.
- [11] 山口昌一郎, 基礎電磁気学 改訂版, pp.270~272, オーム社, 2002.
- [12] 小西良弘, マイクロ波技術講座 第3巻, ケイラポ出版, 2001.