

キャパシタを装荷した逆巻型 Dual-Spiral 共振器の基本特性に関する研究

Study on Reverse-Winding type Dual-Spiral Resonator Loaded with Capacitors

穴田 怜旺那
Reona ANADA

カ石 一輝
Kazuki CHIKARAISHI

堀田 昌志
Masashi HOTTA

山口大学大学院創成科学研究科

1. まえがき

現在、身近に数多く存在する IoT(Internet of Things)機器や各種センサー等への電力供給方式として、非接触で電力を供給する無線電力伝送システムが注目されている[1].

数ある無線電力伝送方式の内、現段階で最も実用化が進んでいるのは、時変磁束による起電力を利用した電磁誘導方式であるが、本方式では、電力伝送可能距離が数mm～数cmと極めて短く、送・受電装置間で位置ずれが生じると漏れ磁束による電力伝送効率の低下という欠点がある[2].

このような欠点を克服する方式として、システム内部に共振器を組み込んだ共振器結合型無線電力伝送 (Resonator-Coupled Type Wireless Power Transmission: RC-WPT)システムがある. 本研究では、この RC-WPT システムを取り扱う[2]-[8].

RC-WPT システムでは、電磁誘導方式などに比べて電力伝送距離を数十 cm～数 m まで大幅に延伸できるといった利点を有するが、その反面、電力伝送路内に電氣的障害物等が侵入する可能性が高くなるという危険性もある. このような障害物の影響を抑制する目的で、当研究室では二つの共振器を同一平面内で結合させた Dual-Spiral 共振器を提案し、結合させる二つの共振器の巻き方向(順巻・逆巻)に対する特性変化についての検討を行ってきた[9], [10].

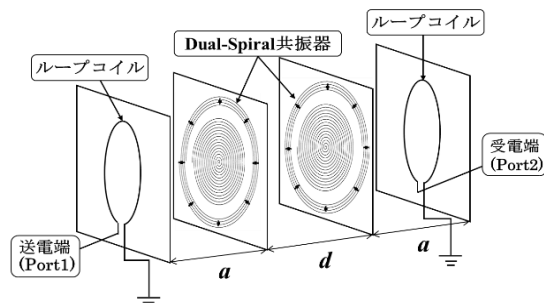


図1 RC-WPT システムの構成

また、RC-WPT システムを実用化するには、共振器を組み込む装置の大きさに合わせたサイズで作製する必要がある. そこで、電力伝送特性をできる限り低下させない状態で Dual-Spiral 共振器にキャパシタを装荷して共振器を小型化する手法についても検討している[11], [12].

本研究では、Dual-Spiral 共振器にキャパシタを装荷した RC-WPT システムの特性を検討する.

2. キャパシタを装荷した共振器を用いた 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. 同システムは、電源や家電装置と共振器を結びつける送・受電用のループコイルと薄い平面型の Spiral 共振器を用いたものであり、二つの共振器間における電磁界の結合によって電力伝送を行っている. ここで、ループコイルと Spiral 共振器間の距離を a [cm]、そして、Spiral 共振器間の距離を d [cm]とする. また、Spiral 共振器には、当研究室で電力伝送路内の損失物体の影響を受けないような構造として提案した Dual-Spiral 共振器[9]を用いている. 通常の Dual-Spiral 共振器は、二つの同じ方向に巻き上げた銅線による結合型共振器であるが、本研究では、二つの Spiral 共振器の巻き方向を逆にした逆巻型 Dual-Spiral 共振器を検討の対象とする.

2.2 逆巻型 Dual-Spiral 共振器[10]の構造

図2に、線間距離 5.0 mm の逆巻型 Dual-Spiral 共振器を示す. 本研究で使った Spiral 共振器は、厚さ 2.0 mm のポリエチレン板に Spiral 形状で深さ 1.3 mm の溝を掘った Spiral ガイドに直径 1.0 mm の銅線をはめ込んで作製した. なお、共振周波数は結合した共振器で 10 MHz となるように、巻き線長を調整している. 本研究ではこの共振器の小型化を試みる. ここで、内側・外側の Spiral 共振器を、以下では、それぞれ Single-Spiral および Edgewise-Spiral と呼ぶことにする.

2.3 キャパシタを装荷した逆巻型 Dual-Spiral 共振器の構造

図2に示した逆巻型 Dual-Spiral 共振器を小型化するには、共振器を構成する銅線をカットする必要があるが、Spiral 共振器の共振周波数は、分布インダクタンス L と分布静電容量 C の積の逆数に比例するため、銅線をカットすると LC が減少し共振周波数は高くなる[13], [14].

銅線をカットした共振器で、共振周波数を図 2 で示した共振器と同様の 10 MHz とするためには、何らかの手法で Spiral 共振器の LC を増やす必要がある。そこで、Edgewise-Spiral の形状に沿って静電容量が 10 pF のキャパシタ(積層セラミックコンデンサ, 村田製作所:RDE5C1H100J0M1H03A)を, 8 個中心対称位置に装荷することで、共振器内の総合静電容量を大きくして共振周波数を調整した。

先行研究[12]によると, Dual-Spiral 共振器を用いた RC-WPT システムでは, 内側の Single-Spiral が主として電力伝送に寄与している。そこで, 本研究では, 逆巻型 Dual-Spiral 共振器の Edgewise-Spiral 内にキャパシタを装荷した。

図 3 は, 二つの Spiral 間距離 x [cm] を図 2 の場合と同様の値とし, Edgewise-Spiral の外側から銅線をカットすることで小型化を施した共振器である。

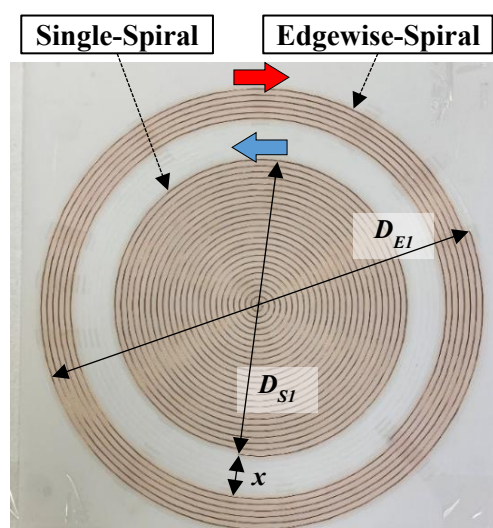


図 2 逆巻型 Dual-Spiral 共振器 (線間距離 5.0 mm)

[共振周波数]

- mode1 : 10.02 MHz
- mode2 : 12.63 MHz
- Spiral 間距離 : $x=3.5$ cm

【構成要素】

[Single-Spiral]

- 共振周波数 : 11.07 MHz
- 銅線長 : 981.8 cm, 直径 D_{S1} : 24.7 cm

[Edgewise-Spiral]

- 共振周波数 : 11.07 MHz
- 銅線長 : 662.5 cm, 外径 D_{E1} : 37.0 cm

このとき, キャパシタの装荷位置は, Edgewise-Spiral の最内巻から一卷外側とした。その結果, Spiral 間距離 x は, 作製用のガイドの都合で 3.5 から 3.7 cm と 0.2 cm 拡大したが, 外径は 37.0 から 36.0 cm と 1.0 cm 縮小し, 約 2.70 %の小型化を実現できた。

次に, 比較の対象として, 図 4 に示すように Dual-Spiral 共振器の外径はそのままにして, 図 3 の場合と同じキャパシタを Edgewise-Spiral 共振器に装荷し, 共振器の内側から銅線をカットすることで共振周波数を 10 MHz に調整 (Spiral 間距離 x を変化) した外径固定の Dual-Spiral 共振器を作製した。加えて, 図 5 に示すように, キャパシタ装荷なしに小型化を実現するため, Spiral 間距離 x を短くすることで外径を 36.0 cm としたキャパシタ装荷なしの逆巻型 Dual-Spiral 共振器も作製した。

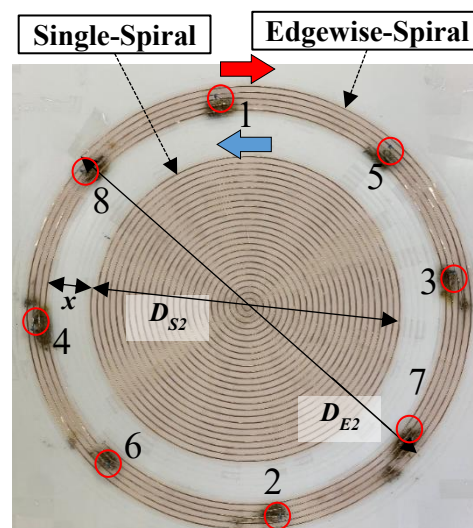


図 3 キャパシタ装荷した小型化共振器

キャパシタ装荷した逆巻型 Dual-Spiral 共振器 (線間距離 5.0 mm ; 小型化)

静電容量 : 80 pF (10 pF $\times$ 8)

[共振周波数]

- mode1 : 9.994 MHz
- mode2 : 12.62 MHz
- Spiral 間距離 : $x=3.7$ cm

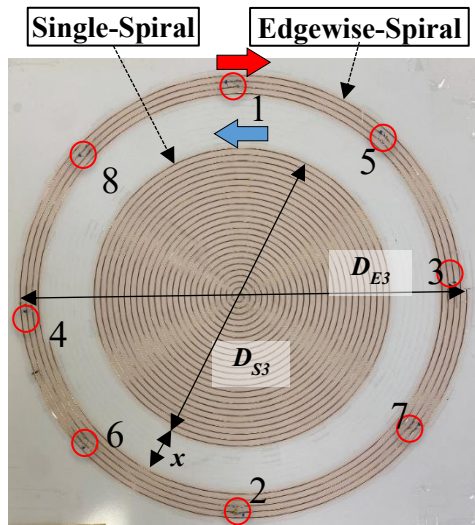
【構成要素】

[Single-Spiral]

- 共振周波数 : 11.07 MHz
- 銅線長 : 982.1 cm, 直径 D_{S2} : 24.7 cm

[キャパシタ装荷 Edgewise-Spiral]

- 共振周波数 : 11.07 MHz
- 銅線長 : 505.1 cm, 外径 D_{E2} : 36.0 cm



キャパシタ装荷した逆巻型 Dual-Spiral 共振器
(線間距離 5.0 mm ; 外径固定)
静電容量 : 80 pF(10 pF × 8)

[共振周波数]

- mode1 : 9.995 MHz,
- mode2 : 12.43 MHz
- Spiral 間距離 : $x = 3.9$ cm

【構成要素】

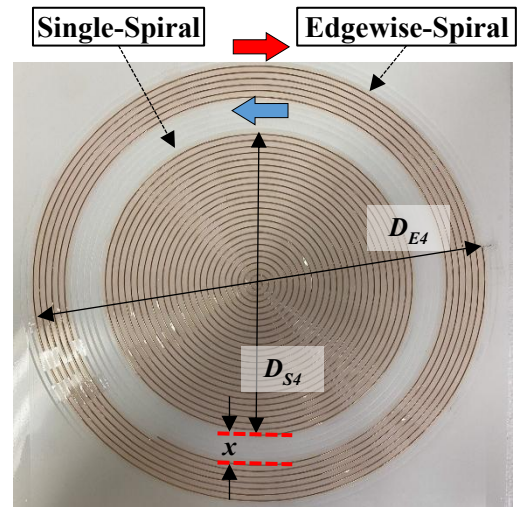
[Single-Spiral]

- 共振周波数 : 11.02 MHz
- 銅線長 : 987.6 cm, 直径 D_{S3} : 24.8 cm

[キャパシタ装荷 Edgewise-Spiral]

- 共振周波数 : 11.02 MHz
- 銅線長 : 491.6 cm, 外径 D_{E3} : 37.0 cm

図 4 キャパシタ装荷した外径固定共振器



逆巻型 Dual-Spiral 共振器 (線間距離 5.0 mm)

[共振周波数]

- mode1 : 10.00 MHz
- mode2 : 12.74 MHz
- Spiral 間距離 : $x = 2.5$ cm

【構成要素】

[Single-Spiral]

- 共振周波数 : 11.08 MHz
- 銅線長 : 982.3 cm, 直径 D_{S4} : 24.8 cm

[Edgewise-Spiral]

- 共振周波数 : 11.08 MHz
- 銅線長 : 661.4 cm, 外径 D_{E4} : 36.0 cm

図 5 逆巻型 Dual-Spiral 共振器 (外径 36.0 cm)

2.4 各種 Spiral 共振器を用いたシステムの電力伝送効率

前節で示したキャパシタ装荷なし外径 37.0 cm の逆巻型 Dual-Spiral 共振器(図 2), キャパシタを装荷して外径を小型化した共振器(図 3)および外径固定共振器(図 4), キャパシタ装荷なしで外径 36.0 cm と小型化した逆巻型 Dual-Spiral 共振器(図 5)を用いた各 RC-WPT システムの電力伝送効率特性を測定した。その結果を図 6 に示す[6]。このときの測定点は、図 1 のループコイルと Spiral 共振器間の距離を $a = 1 \sim 8$ cm の間で 1 cm ずつ変化させ、各 a に対してシステムマッチングが取れ、電力伝送効率が最大となる Spiral 共振器間距離 d とした点での測定値である。

本結果より、キャパシタを装荷した逆巻型 Dual-Spiral 共振器はいずれともキャパシタ装荷なし逆

巻型 Dual-Spiral 共振器より電力伝送効率が低下している。これは、共振器が生成する電磁界エネルギー

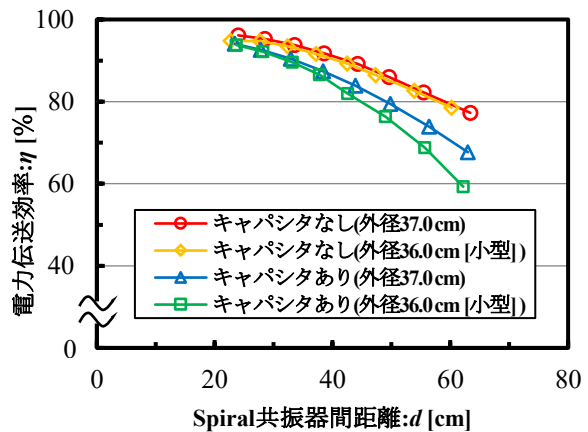


図 6 電力伝送効率

ギーの一部が電子素子キャパシタ内部に電界エネルギーとして閉じ込められてしまったため、電力伝送に寄与する電磁界のエネルギーが相対的に減少したためであると考えられる。

また、キャパシタ装荷した小型化共振器および外径固定共振器を用いたシステムで、その特性を比較すると、小型化共振器のほうが、電力伝送効率の低下幅が大きかった。これは、キャパシタ装荷することで、外径を変化させた場合のほうが、電力伝送特性の変化が大きいと考えられる。さらに、共振器の外径サイズが小さくなると、電力伝送可能距離が僅かであるが短縮することもわかる。

以上の結果から、キャパシタを装荷すると、電力伝送効率は低下し、共振器の外径を縮小することでも電力伝送効率の低下および電力伝送可能距離が短縮してしまうこともわかった。

3. あとがき

本研究では、Dual-Spiral 共振器の小型化を目指し、電子部品であるキャパシタを装荷する、あるいはキャパシタ装荷なしで構造変化により小型化することが可能であることを示した。

そして、小型化することで、電力伝送効率は低下するが、低下の原因が、キャパシタ装荷によるものなのか、もしくは共振器のサイズの小型化によるものなのか、どちらが主要因であるかを調べた。その結果、RC-WPT システムにおける電力伝送効率の低下の主要因は、キャパシタ装荷であることを示した。これは、電界がキャパシタに閉じ込められることで、共振器間の磁界の結合に影響を与えたと考えられる。

今後は、共振器の小型化において、位置ずれや水などの損失媒質が電力伝送路内に存在する場合の特性について検討していきたい。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP23K03818 の助成の下に実施されたものである。

参考文献

[1] 「ワイヤレス給電とは？活用メリットや原理、種類、効率について解説 | 地球の未来を宇宙から考えるメディア Beyond Our Planet」, NTT
<https://www.rd.ntt/se/media/article/0023.html>
(2025-08-07 閲覧)。

[2] 庄木裕樹, 「ワイヤレス電力伝送(WPT)技術の実用化に向けた動向と今後の取り組み〜制度化、国際協調、標準化の動向と普及に向けた活動〜」, 特許庁技術懇談会資料, no.279, pp.15-23, 2015.11.
<http://tokugikon.jp/gikonshi/279/279tokusyu2.pdf>

[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,” *電子情報通信学会技術報告 (無線電力伝送)*, no.WPT2010-01, pp.1~7, 2010-04.

[9] Nur Syafiera Azreen Norodin, K. Nakamura, and M. Hotta, “Effects of Lossy Mediums for Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System using Conventional Single- and Dual-Spiral Resonators,” *IEICE Trans. on Electron.*, vol. E105-C, no. 3, pp. 110-117, 2022-03.
DOI:10.1587/transele.2021ECP5025

[10] 安達天哉, 石灘真大, 富田智士, 堀田昌志, “逆巻型 Dual-Spiral 共振器を用いた共振器結合型無線電力伝送システムの角度ずれによる伝送効率低下の改善法,” *第 26 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集*, no. TP-B-6, pp.173~177, 2024-11.

[11] 藤本悠之介, 堀田昌志, “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,” *第 24 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集*, no. TP-C-3, pp.126~129, 2022-11.

[12] 相原右京, “共振器結合型無線電力伝送システム用逆巻型 Dual-Spiral 共振器の特性に関する基礎的研究,” 山口大学大学院創成科学研究科電気電子情報系専攻令和 6 年度学位論文 (修士), 2025-03.

[13] 山口昌一郎, 基礎電磁気学 改訂版, pp.270~272, オーム社, 2002.

[14] 小西良弘, マイクロ波技術講座 第 3 巻, ケイラボ出版, 2001.