

巻き方向組み合わせの異なる Dual 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基本特性に関する研究

Fundamental Study on Resonator-Coupled Type Wireless Power Transmission Systems Using Dual-Spiral Resonators with Different Winding Combinations

相原 右京*1 藤本 悠之介*1 力石 一輝*2 島津 祐香*2 堀田 昌志*1
Ukyo Aibara Yunosuke Fujimoto Kazuki Chikaraishi Yuka Shimadu Masashi Hotta

*1 山口大学大学院創成科学研究科 *2 山口大学工学部

1. まえがき

電気自動車(EV)や IoT(Internet of Things)対応センサなどへの給電方法として、非接触で電力供給が可能な無線電力伝送システムが注目を浴びている[1]~[3].

代表的な無線電力伝送システムとしては、現在、既に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であるが、電力伝送可能距離が極端に短く、送・受電装置間の位置ずれに対する許容性が非常に低いという問題点がある。これに対し、本研究で取り扱う共振器結合型無線電力伝送 (Resonator-Coupled Type Wireless Power Transmission: RC-WPT)方式は、数十 cm~数 m と言った中距離の電力伝送に適している上、送・受電装置間の位置ずれに対する許容度が高く、受電機器設置が送電線のレイアウト対して自由度が高いといった利点があり、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[4]~[9].

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、安定して高い電力伝送効率が得られるシステムの実現が不可欠である。そこで、電力伝送路の比較的広い RC-WPT システムで、伝送路内に電氣的な障害物等が入った場合でも電力伝送特性に影響が少なくなることが望まれる。この対策として、当研究室では Dual スパイラル共振器を提案している[10], [11]. 従来の Dual スパイラル共振器は、同方向巻きの 2 つの同心スパイラル共振器で構成された結合型共振器であった (従来型)。これに対し、本研究では、共振器間の結合状態を変化させ、共振器周辺の電磁界分布をコントロールすることで、RC-WPT システムの更なる高効率化を目指す。結合状態を変化させるために、今回は内外スパイラル共振器の巻き方向を変化させた (逆巻型) 状態における各共振器の共振特性やこれらの共振器を内蔵した RC-WPT システ

ムの基礎特性を詳細に検討した。なお、比較のため、共振器の共振周波数とスパイラル共振器の線間距離は、従来型と逆巻型で統一し、螺旋構造形成にはスパイラルガイドを用いる事で個体差の影響を受けないようにしている[12].

2. 巻き方向を変化させた Dual スパイラル共振器

2.1 RC-WPT システムの構造

本研究で取り扱う RC-WPT システムの構造を図 1 に示す。同システムでは、送・受電用のループコイルとスパイラル共振器から構成されている。そして、ループコイルとスパイラル共振器間の距離を $a[\text{cm}]$ 、スパイラル共振器間の距離 (電力伝送可能距離) を $d[\text{cm}]$ とし、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となるように配置している。

ここで、ループコイルは 1 mm 径の銅線を用い、直径 17.5 mm の 1 ターンループ形状を構成した。また、スパイラル共振器については、渦巻き形状作製時の再現性を向上するために、厚さ 2.0mm のポリエチレン(PE)板上に幅 1.3mm × 深さ 1.2mm のスパイラル形状溝を形成し、その溝に 1mm 径の銅線をはめ込むことで構成した。このポリエチレン板をスパイラルガイドと呼ぶ[12].

2.2 Dual スパイラル共振器の原理と構造

RC-WPT システムでは、電磁誘導方式を用いたシステムに比べて電力伝送可能距離が長くなるため、電力伝送路内に障害物が入り込む可能性が高くなった。当研究室では、RC-WPT システムの障害物耐性能向上のために Dual スパイラル共振器と称する結合型共振器を提案している[10]. その概形を図 2 に示す。

一般に、電氣的な損失では、物体の誘電率の虚部が電界に作用しておこる誘電損失や物体が持つ

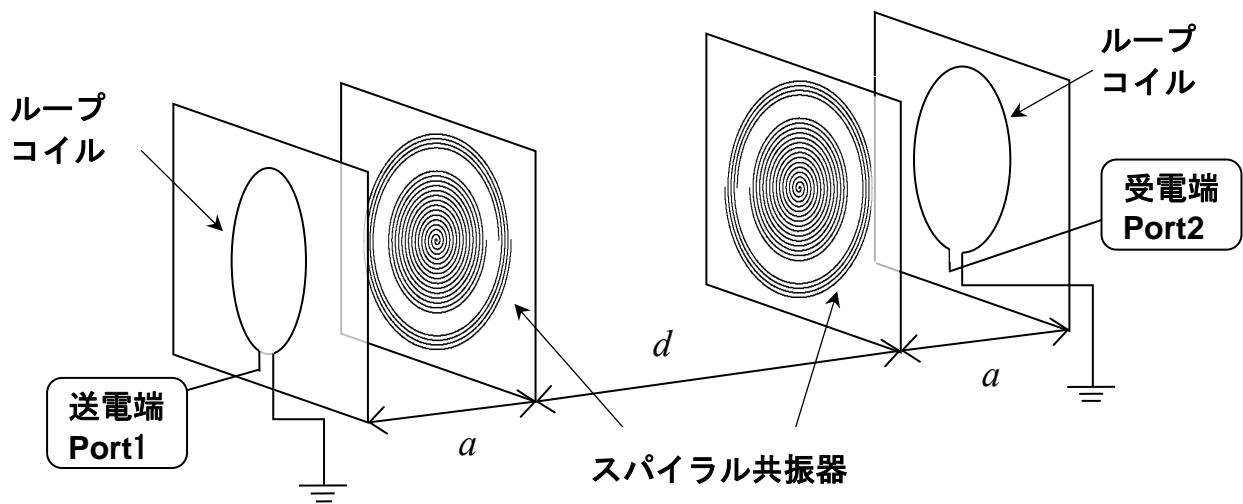


図 1 RC-WPT システムの概観図

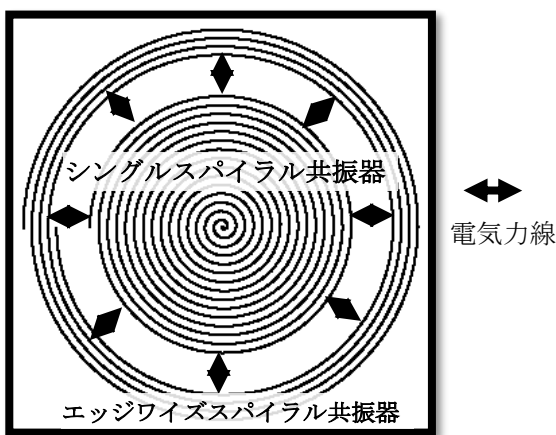


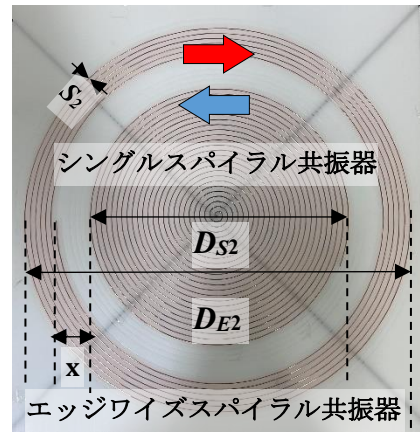
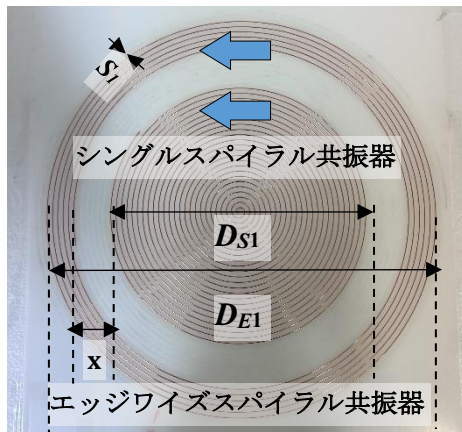
図 2 Dual スパイラル共振器とその電気力線図

導電率が電界に作用して生ずる導電損失がある。これらは、共振器が形成する電磁界の内、主として電界に作用して損失を発生させる。そこで、電氣的損失を生じる主要因となる電界を共振器内部に多く閉じ込め、磁界で結合する様なシステムを構築する事が出来れば、高い電力伝送効率を安定して獲得と考えた。Dual スパイラル共振器は、図 2 に示すように、中心から均一に巻いたシングルスパイラル共振器と、間隔を開けて形成された同心の外巻きエッジワイズスパイラル共振器を同一面内に形成した結合型の共振器であり、内外共振器間には同図に示す様な電気力線が発生すると期待される。この時、本共振器の電界はスパイラルが存在する面内に多く分布するため、共振器からの電界の漏れ出しは少なく、電氣的障害物の影響を受け難いと考えられる。

実際、本 Dual スパイラル共振器を用いた RC-WPT システムでは、通常のシングルスパイラル共

振器のみのシステムに比べ、電力伝送路内に存在する障害物の影響を受け難い事は、既に実験的に確認されている[10], [11].

図 3(a)に示したのは、実際に作製した従来型の Dual スパイラル共振器である。同共振器ではシングルスパイラル共振器とエッジワイズスパイラル共振器に同方向の電流が流れた場合、両スパイラルからは同方向向きの磁束が発生すると考えられる。すなわち、共振器の表から裏あるいはその逆方向に共振器を取り巻く様に磁束が形成されると考えられる。これに対し、本研究では、図 3(b)に示す様に、巻き方向の異なるシングルスパイラル共振器とエッジワイズスパイラル共振器を同一平面内で組み合わせた逆巻型 Dual スパイラル共振器を提案している。逆巻型 Dual スパイラル共振器では、同じ方向に電流が流れようとした場合に発生するシングルスパイラル共振器とエッジワイズスパイラル共振器の磁束は逆方向となり、2 つの内外共振器は磁束の出口と入口となり得るので、従来型に比べて電力伝送方向に張り出し、横方向にコンパクトな形状を呈すると期待できる。この磁束分布が実現すれば、RC-WPT システムの共振器間での磁界結合が強まる可能性があり、システム全体の高性能化が謀れるのではないかと考えた。そこで、今回作製した、従来型および逆巻型 Dual スパイラル共振器の特性や、当該共振器を使用した RC-WPT システムの電力伝送特性を評価、比較検討する。また、Dual スパイラル共振器は結合型共振器であるため、2 つのモードが存在するが、まずは共振周波数が低いモード (Mode1) についてのみ検討を行う [11], [12].



【構成要素】
 シングルスパイラル共振器
 (反時計廻り)
 共振周波数:11.4 MHz
 直径 D_{S1} :24.4 cm
 エッジワイズスパイラル共振器
 (反時計廻り)
 共振周波数:11.4 MHz
 直径 D_{E1} :37.2 cm
 Dual スパイラル共振器
 共振周波数 : 10.0 MHz
 スパイラル間距離 : $x=3.5$ cm
 線間距離 $S_1=5$ mm

【構成要素】
 シングルスパイラル共振器
 (反時計廻り)
 共振周波数:11.0 MHz
 直径 D_{S2} :24.8 cm
 エッジワイズスパイラル共振器
 (時計廻り)
 共振周波数:11.0MHz
 直径 D_{E2} :36.9 cm
 Dual スパイラル共振器
 共振周波数 : 10.0 MHz
 スパイラル間距離 : $x=3.5$ cm
 線間距離 $S_2=5$ mm

(a) 従来型

(b) 逆巻型

図3 巻き方向の異なる Dual スパイラル共振器

2.3 無負荷 Q の測定結果

初めに、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。従来型および逆巻型スパイラル共振器について、図 1 に示すシステムの送電側 (ループコイルと共振器のみ) を使用し、ループ・スパイラル共振器間距離 a を 1~20 cm の範囲で変化させて、port1 における振幅反射係数 S_{11} の周波数特性を測定し、無負荷 Q を算出した [7]。測定結果を図 4 に示す。

本結果より、逆巻型は従来型と比べて無負荷 Q が高くなっている。これは逆巻型の方が共振器モードが創り出す周辺電磁界分布が、伝送路内により密な電磁界分布を形成するからであると筆者らは考えている。後述するが、共振器周辺の電磁界シミュレーションにより物理的な理由を明らかにする必要があると考えられる。

2.4 電力伝送効率の測定結果

次に、各共振器を用いた RC-WPT システムでの電力伝送効率の測定を行った。従来型スパイラル共振器で構成したシステム及び逆巻型スパイラル共振器で構成したシステムにおいて、それぞれ、システムマッチングをとり、port1 から port2 への振幅透過係数 S_{21} の測定結果から、スパイラル共振器間距離 (電力伝送距離) d と電力伝送効率の関係を算出した結果を図 5 に示す [7]。

本結果より、スパイラル共振器間距離 d が広がるほど、従来型より逆巻型の共振器を用いた方が電力伝送効率が高くなっている。これは、共振器間の結合時においても電磁界分布形状が変化したことによると考えられる。

以上の結果から、今後は、逆巻型スパイラル共振器の性能向上に向け、送受電ユニット間の位置ずれによる影響や電力伝送路間に損失媒質が存在

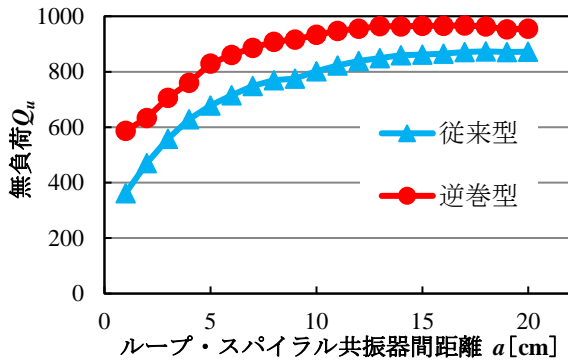


図4 各共振器の無負荷 Q

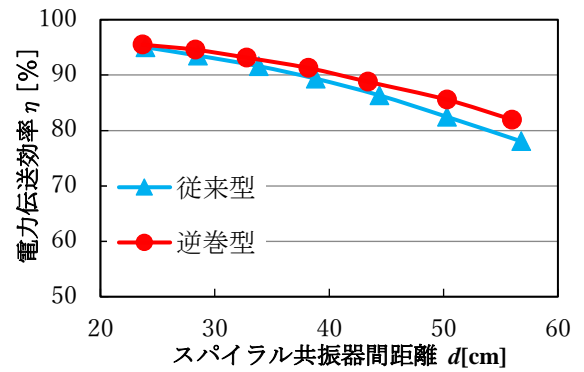


図5 電力伝送効率

した場合における影響を検証する必要がある。

3. あとがき

当研究室で考案した Dual 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更なる高効率化を目指し、Dual スパイラル共振器を構成する 2 種類のスパイラル共振器の巻き方向を変化させた逆巻型スパイラル共振器を提案・作製した。それを用いた RC-WPT システムの性能を共振器の無負荷 Q システム全体の電力伝送効率の観点から調査した。その結果、逆巻型スパイラル共振器を用いた場合の方が、従来型に比べて無負荷 Q 、電力伝送効率どちらも高いことが分かった。これらは、共振器構造の変化で共振モードの電磁界分布形状が変化したことによるものである可能性が高いと予測され、その影響で高い伝送効率が安定して獲られると考えられる。

今後は、本システムの実用化に向け、逆巻型スパイラル共振器において、送受電ユニット間の位置ずれによる影響や電力伝送路間に損失媒質が存在した場合における影響を検証すると共に電磁界シミュレータによる電磁界分布解析で、その物理的な動作原理を解明する予定である。

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] 福田昭, 「ワイヤレス電力伝送の基本原則 (後編)」
<https://ectimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2203/07/news028.html> [閲覧日 2023 年 8 月 24 日]
 [2] 「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 2023 年 8 月 24 日]

[3] 「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 2023 年 8 月 24 日]
 [4] 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.
 [5] 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.
 [6] 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.
 [7] 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論文集*, 広島, no.B-3, pp.220~223, 2011.
 [8] 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.
 [9] 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.
 [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] 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.

- [12] 田崎健斗, 堀田昌志, 羽野光夫, “共振
器結合型無線電力伝送システム用の安定した
特性を持つ共振器の構成”, 第17回IEEE広島
支部学生シンポジウム論文集, no.B-21,
pp.327-330, 2015-11.