

# 共振器結合型無線電力伝送システム用 7mm ピッチ逆巻型 Dual-Spiral 共振器の 共振周波数調整法とその特性評価に関する研究

## Adjustment of Resonant Frequency for 7mm Pitched Reverse-Winding Dual-Spiral Resonator Used for Resonator-Coupled Type Wireless Power Transmission System

山田 大貴      島津 祐香      堀田 昌志  
Hiroki YAMADA      Yuka SHIMAZU      Masashi HOTTA

山口大学大学院創成科学研究科

### 1. まえがき

近年、電気自動車への給電方法として、走行中に路面から車両へ無線で電力を供給するシステムが注目されており、この技術には共振器結合型無線電力伝送(Resonator-Coupled type Wireless Power Transfer : RC-WPT)システムが用いられている[1]. RC-WPT システムは送受電装置内部に共振器を設置し、磁界結合を利用することで数十 cm から数 m といった中距離での電力伝送を可能としている. また, RC-WPT システムは現在一般に普及している電磁誘導方式による無線給電システムと比べて、送受電装置の位置ずれや角度ずれに対して強いといった特徴を持っている. 当研究室では、この RC-WPT システムのさらなる性能向上についての検討を行っている.

RC-WPT システムは中距離での電力伝送を可能としている一方、その影響により電力伝送路内に損失等を持った障害物が侵入する可能性が高くなる. 従って当研究室では、共振周波数が等しく、巻形状の異なる 2 つのスパイラル共振器を同一平面内で組み合わせた Dual-Spiral 共振器を提案し、損失媒質等による伝送効率の低下を改善できることを示してきた. また、Dual-Spiral 共振器は 2 つのスパイラル共振器の巻線方向の組み合わせにより順巻と逆巻が存在し、当研究室ではこれまで巻線ピッチが 5 mm の Dual-Spiral 共振器は順巻と逆巻の両方について、巻線ピッチが 7 mm の Dual-Spiral 共振器は順巻のみ、既に検討を行っている. さらに、Dual-Spiral 共振器は前述の通り 2 つのスパイラル共振器を組み合わせで 1 つの共振器とするため、所望の共振周波数をもったものを作製することが困難である [2]-[9].

そこで本研究では、線間距離を 7 mm とし、2 つのスパイラル共振器の巻線方向を逆とした逆巻型 Dual-Spiral 共振器の設計法の検討を行うと共に、実際に作製した 7 mm ピッチ逆巻型 Dual-Spiral 共振器の特性評価を行い、従来検討を行ってきた他の共振

器と比較する. その結果から、巻ピッチが伝送効率に及ぼす影響を明らかにする.

### 2. 逆巻型 Dual-Spiral 共振器の作製

#### 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. 図に示すように送電用ループコイルとスパイラル共振器、受電用のスパイラル共振器とループコイルの順番で配置されている. また、それぞれの中心が一直線上に並ぶように配置することで効率よく送電することが可能となる. なお、本実験で用いたループコイルは送・受電用共に 1.0 mm 径の銅線 (2-UFW) を使用した直径 175 mm のループコイルとし、ループコイルの開放端には、システムの特性測定に用いるベクトルネットワークアナライザ (Vector Network Analyzer, Keysight E5071C ; VNA) に接続するために、50  $\Omega$  の SMA コネクタを取り付けた.

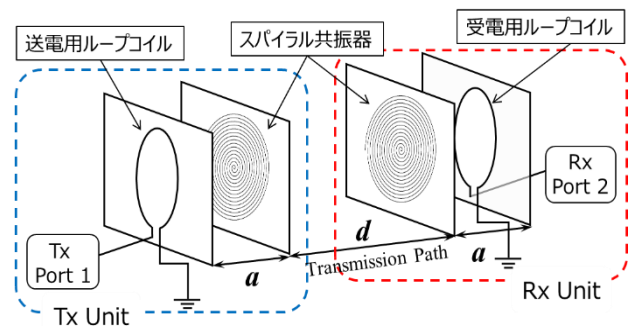


図 1. RC-WPT システム

#### 2.2 逆巻型 Dual-Spiral 共振器の構成原理

共振器結合型無線電力伝送システムにおける伝送効率は、共振器が形成する電磁界の形状や広がりや密接に関係しており、電力伝送路中に存在する損失物体が効率に影響を与えるのは主に電界であると考えている. 従って当研究室ではその電界を共振器面内に閉じ込め、かつ発生する磁界分布が電力伝送方向へ張り出した形となるような共振器の構造として

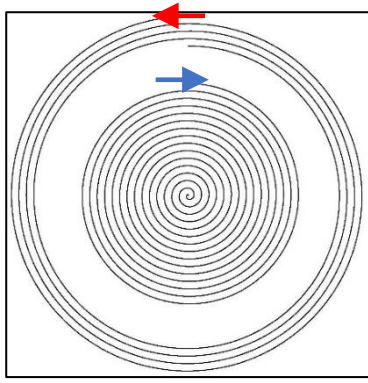


図 2. 逆巻型 Dual-Spiral 共振器

図 2 に示すような逆巻型 Dual-Spiral 共振器を提案してきた[9]。同共振器は、等しい共振周波数を持った内巻のシングルスパイラル共振器と外巻のエッジワイズスパイラル共振器を、巻線方向を逆として同一平面上に配置した共振器である。2 つの構成スパイラル共振器の間に電位差が生じることで、スパイラル面内に電界が発生するため、スパイラル面と垂直な方向に漏れ出す電界の量を減少させる。また、両スパイラルから発生する磁束は逆方向となるため、逆巻型 Dual-Spiral 共振器が発生させる磁界分布は電力伝送方向に張り出して伝送路外へ広がることを防ぎ、より効率よく電力を送電することが可能となると考えられる。

### 2.3 Dual-Spiral 共振器が持つ共振周波数

Dual-Spiral 共振器は前述の通り、2 つの構成スパイラル共振器からなる結合型共振器であるため、独立した 2 つの共振点が観測される。この 2 つの共振点の内、周波数の低い方を mode1、もう一方を mode2 と称する。本研究では mode1 の共振点を電力伝送に利用することとして、その共振周波数を 10 MHz に調整することを目標とする。共振周波数の測定には送電側のループコイルとスパイラル共振器を使用し、VNA の port1 から得られる振幅反射係数 $|S_{11}|$ の周波

数特性を用いた。

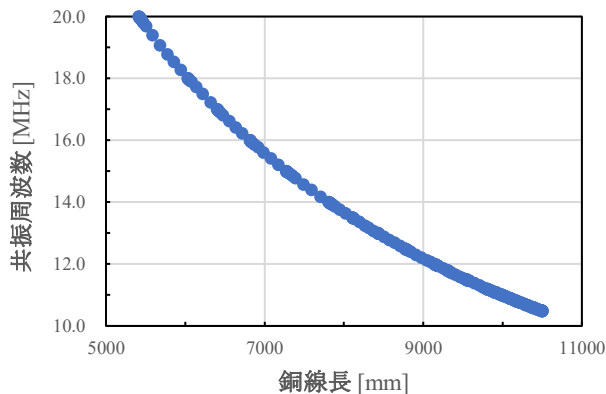
ここで、Dual-Spiral 共振器は分布インダクタンスや寄生キャパシタンスを利用した結合型共振器であるため、上記のパラメータを厳密に反映した等価回路を得ることができれば所望の共振周波数を持った共振器を設計することができる[5]。しかしながら、等価回路を得ることが実際には困難であるため、本研究では 2 つの構成スパイラル共振器の銅線長と共振周波数の関係をそれぞれ求め、さらに構成スパイラル共振器の共振周波数と Dual-Spiral 共振器の共振周波数の関係を求めることで作製用チャートを得て、所望の共振周波数を持った逆巻型 Dual-Spiral 共振器を作製した。

また、作製するスパイラル共振器の再現性を高くするため、縦 500 mm、横 420 mm のポリエチレン板上にピッチが 7 mm であるスパイラル状の溝を幅・深さ共に 1.3 mm で形成し、途中から巻方向を反転させたスパイラルガイドを用いた[10]。さらに、共振器の作製には 1.0 mm 径の銅線 (2-UEW) を使用した。

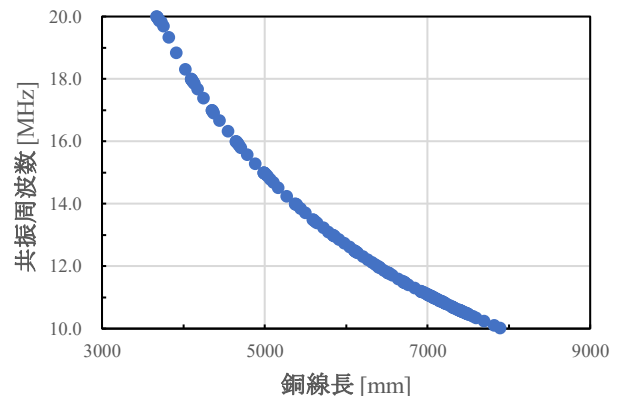
### 2.4 7 mm ピッチ逆巻型 Dual-Spiral 共振器の作製

まず、上記のポリエチレン板を用いて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作製し、各共振器の銅線長と共振周波数の関係を調べた。なお、シングルスパイラル共振器は中心を固定し外側から、エッジワイズスパイラル共振器は外径を 416 mm、中心から銅線の最外端までの距離を 210 mm で固定し内側から銅線をカットして、長さを調整した。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銅線長と共振周波数の関係をそれぞれ図 3(a)および(b)に示す。

次に同一の共振周波数を持った構成スパイラル共振器を同一平面状に配置した、逆巻型 Dual-Spiral 共



(a) シングルスパイラル共振器



(b) エッジワイズスパイラル共振器

図 3. 各スパイラル共振器の銅線長と共振周波数

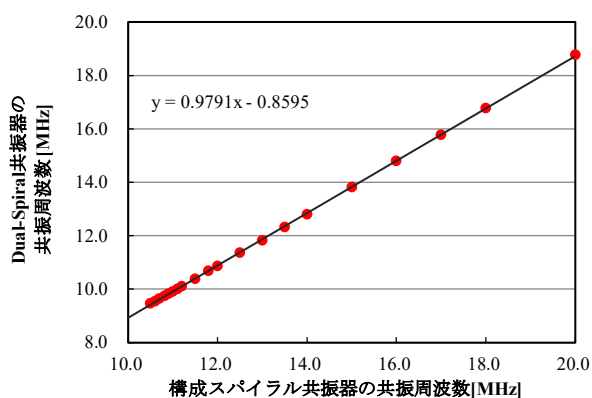


図 4. Dual-Spiral 共振器と構成スパイラル共振器の共振周波数

共振器を作製し、作製した逆巻型 Dual-Spiral 共振器の model における共振周波数とそれを構成するスパイラル共振器の関係を図 4 に示す。同図から、Dual-Spiral 共振器の共振周波数と構成スパイラル共振器の共振周波数の関係は一次関数で近似できることがわかる。この関係から回帰直線を求めると、Dual-Spiral 共振器の共振周波数を  $y$  [MHz]、構成スパイラル共振器の共振周波数を  $x$  [MHz] とすれば  $y = 0.9791x - 0.8595$  と表せる。

以上の作製用チャートを用いて、実際に 10 MHz の Dual-Spiral 共振器の試作を行った。まず、回帰直線の式から目標周波数である  $y = 10$  を代入し、そのときの構成スパイラル共振器の共振周波数を求めると 11.0913 MHz とすれば良いことが分かる。共振周波数が 11.0913 MHz となるときの各共振器の銅線長は図 3 よりそれぞれ、シングルスパイラル共振器はおよそ 9900 mm、エッジワイズスパイラル共振器はおよそ 7000 mm となる。これらの値を用いて逆巻型 Dual-Spiral 共振器を作製すると、その共振周波数は

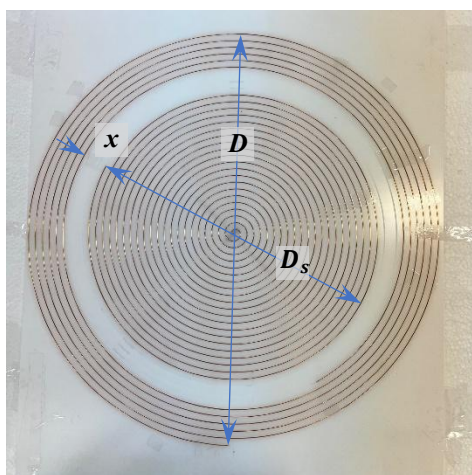


図 5. 7 mm ピッチ逆巻型デュアルスパイラル共振器

目標値である 10 MHz となる。従って、この作製用チャートを用いると所望の共振周波数を持った逆巻型 Dual-Spiral 共振器を作製することができる。

実際に作製した 7 mm ピッチ逆巻型 Dual-Spiral 共振器を図 5 に示す。この共振器の共振周波数は 10.00 MHz となり、Dual-Spiral 共振器を構成するシングルスパイラル共振器の銅線長は 9949 mm、エッジワイズスパイラル共振器の銅線長は 7036 mm となった。このことから、作製用チャートを用いて精度良く 7 mm ピッチ逆巻型 Dual-Spiral 共振器を作製できたと考えられる。なお、この共振器の直径  $D_1$  は 416 mm であり、シングルスパイラル共振器の直径  $D_{s1}$  は 292 mm、2 つの構成スパイラル共振器間の距離  $x_1$  は 25 mm となった。

## 2.5 電力伝送効率

次に、今回作製した 7 mm ピッチ逆巻型 Dual-Spiral 共振器の電力伝送効率を測定し、5 mm ピッチ逆巻型 Dual-Spiral 共振器の電力伝送効率と比較した。比較に用いた 5 mm ピッチ逆巻型 Dual-Spiral 共振器は、共振器の直径  $D_2$  が 7 mm ピッチの共振器と等しい 416 mm であり、共振周波数  $f_0 = 10.00$  MHz、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銅線長はそれぞれ 9998 mm、6490 mm、シングルスパイラル共振器の直径  $D_{s2} = 251$  mm、2 つの構成スパイラル共振器間の距離  $x_2 = 5.9$  mm であった。それぞれの共振器で構成したシステムにおいて、 $|S_{11}|$  及び 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  $d$  と電力伝送効率の関係を算出した結果を図 6 に示す。なお、ループコイル共振器間距離  $a$  を 100 mm から 10 mm まで 10 mm 刻みで変化させ、システムの整合を満たす  $d$  を選択して測定した。

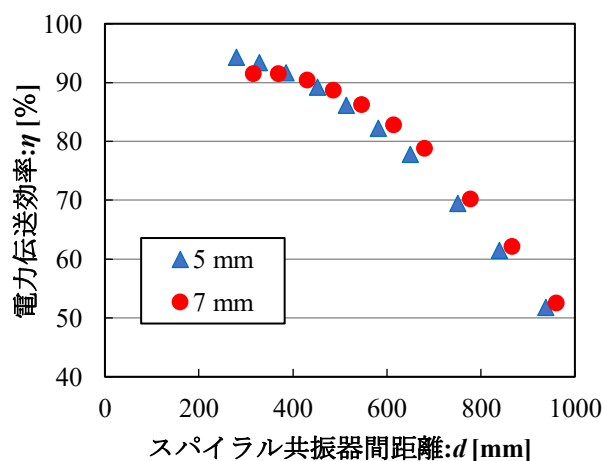


図 6. 電力伝送効率

本結果より、 $d$ が 400 mm よりも大きい場合には、7 mm ピッチの共振器を用いたシステムの方が 5 mm ピッチの共振器を用いたシステムよりも、高い電力伝送効率を維持している。これは、スパイラル共振器の巻ピッチによって、共振器の容量性と誘導性の比率が変化し、その共振器を用いて作製した RC-WPT システムの特性が変化しているものと考えられる。

また、共振器の巻ピッチによって共振器周辺に形成されるモードの電磁界分布形状が変化し、電力伝送効率特性に変化が生じたのではないかと推察される。

### 3. あとがき

本研究では、7 mm ピッチ逆巻型 Dual-Spiral 共振器の作製を行うために、同共振器を構成するスパイラル共振器の銅線長に対する共振周波数の関係と、Dual-Spiral 共振器と構成スパイラル共振器の共振周波数の関係を明らかにし、それをチャートとして用いる設計法を構築した。また、得られた結果から実際に共振器を作製し、その電力伝送効率を測定した。測定結果から共振器の巻ピッチによって電力伝送効率特性に変化が生じたことが分かった。

今後は 5 mm や 7 mm 以外の巻ピッチを持った共振器の作製や電磁界シミュレータによる電磁界分布の解析を行うことで、想定伝送距離に応じた最適な巻ピッチを解明する予定である。

### 謝 辞

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

### 参考文献

- [1] 「EV の走行中給電に現実味、盛り上がる開発に政府が導入指針策定へ」、日経クロステック／日経エレクトロニクス  
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02935/090200002/> [閲覧日 2025 年 8 月 22 日]
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” *Science*, vol.317, pp.83-86, 2007-07.
- [3] 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, 2010-06.

- [4] 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, 2011-11.
- [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,” *電気学会論文誌 C 分冊*, 130 巻, 12 号, pp.2192~2197, 2010-12.
- [6] Nur Syafiera Azreen Binti Norodin, Masashi Hotta, and Kousuke Nakamura, “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.
- [7] 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)*, no.A1-7, pp.17~20, 2017-12. DOI:10.1587/transele.2021ECP5025
- [8] Nur Syafiera Azreen Binti Norodin and Masashi Hotta, “Performance improvement of resonator-coupled wireless power transfer system using dual-spiral resonator with angular misalignments,” *URSI Radio Science Bulletin*, pp.22-28, 2020.
- [9] 安達 天哉, 石灘 真人, 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(広島)*, no.B6, pp.173-177, 2024-11.
- [10] 原田慧吾, 村岡義泰, 堀田昌志, 羽野光夫, “再現性の良い 共振器結合型無線 電力伝送 システム 用共振器の作製,” *第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集(山口)*, no.A2-19, pp.61-65. 2016-11.