

同径の逆巻型 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における損失性媒質の影響に関する研究

A Study on Lossy Media in Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer Systems Using Reverse-Winding Dual-Spiral Resonators with the Same Diameter

石灘 真大*¹
Manato ISHINADA

富田 智士*¹
Satoshi TOMITA

末金 晋平*²
Shinpei SUEKANEI

堀田 昌志*¹
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

無線で電力を供給する無線給電技術は、国内でも成長戦略の1つとしてテーマに上がり、国を挙げたプロジェクトとして様々なメーカーや大学で研究が進められている世界的にも注目の技術である[1]. 最近では、EV（電気自動車）向けのワイヤレス給電や走行中ワイヤレス給電の研究が進められている[2].

現在、無線で電力を供給する方式の中でも、送電側と受電側との間で発生する誘導磁束を利用して電力を送電する電磁誘導方式が多く用いられている[3]. しかし、本方式は高効率である反面、近距離でしか送電できないことや送電側と受電側の位置がずれると電力伝送できないという欠点がある. そこで近年、システム内に配置した2つの共振器間による電磁界結合を利用した共振器結合型無線電力伝送 (Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer : RC-WPT)システムが注目を浴び、活発に研究されている. このRC-WPTシステムは数十cm~数mの中距離電力伝送に適しており、位置ずれや角度ずれに対する許容度も比較的高いという利点がある[4]~[9].

本研究では、RC-WPTシステムの送・受電ユニットに用いる共振器を当研究室で提案した巻方向の異なるDual-Spiral共振器とし、屋外での天候に考慮したRC-WPTシステムの実用化また、天候や環境による電力伝送効率の低下の改善を目指し、損失性媒質の影響を検討している[10].

2. Dual-Spiral 共振器を用いた RC-WPT システムにおける損失性媒質の影響

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. 同図に示すように本研究で取り扱うRC-WPTシステムは、送電側から送電用のループコ

イルとSpiral共振器、そして受電用のSpiral共振器とループコイルの順に全ての中心が一直線上となるように配置する. このシステム内の2つの共振器間における電磁界の結合を利用することで電力を伝送している. ここで、ループコイルとSpiral共振器間の距離を a [cm]、送・受電用Spiral共振器間の距離（電力伝送距離）を d [cm]とする.

また、今回用いるDual-Spiral共振器は、厚さ2.0mmのポリエチレン板上に幅1.2mm×深さ1.0mmかつ溝と溝の中心間距離が5.0mmまたは7.0mmとなるような溝を掘り、その溝に1.0mm径の銅線をはめ込むことで線間距離が均一なDual-Spiral共振器を作製した. 図2に使用したDual-Spiral共振器の形状

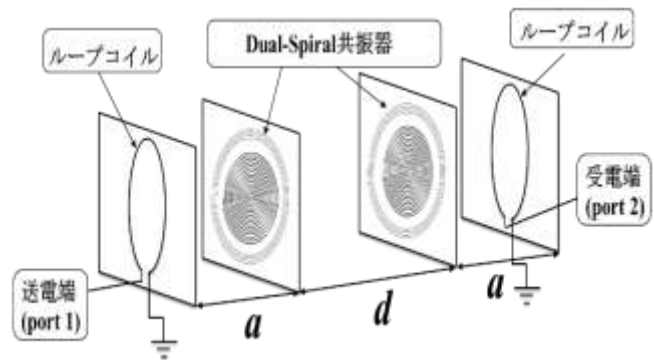


図1 RC-WPTシステムの構成図

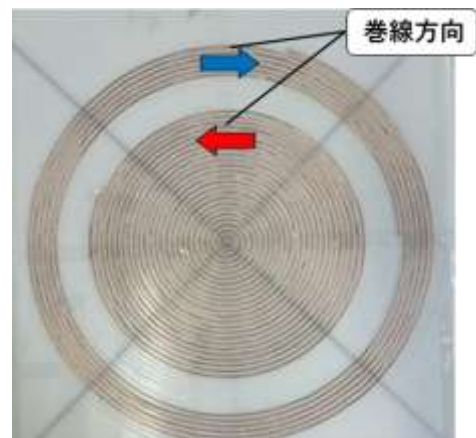


図2 逆巻型Dual-Spiral共振器

を示す。

線間距離 5.0 mm の共振器は直径が 41.6 cm，銅線長は内巻が 991.16 cm，外巻が 647.86 cm で作製した。また，線間距離が 7.0 mm の共振器は直径が 41.6 cm，銅線長は内巻が 994.9 cm，外巻が 703.65 cm で作製した。さらに今回は比較のため，線間距離が 10.0 mm の Single-Spiral 共振器も作製した。なお，共振周波数を 5 mm および 7 mm ピッチの Dual-Spiral 共振器と同様に 10 MHz に調整すると，その直径は 37.7 cm，銅線長は 1101 cm であった[11]。

2.2 損失性媒質が存在する RC-WPT システムの電力伝送効率

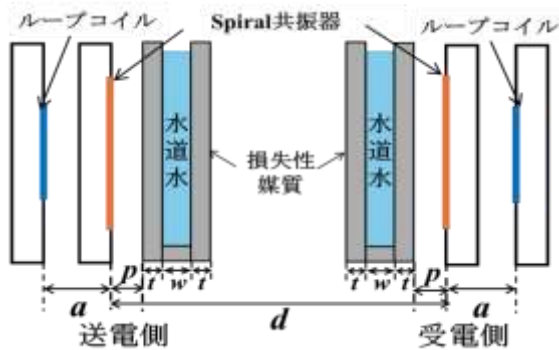
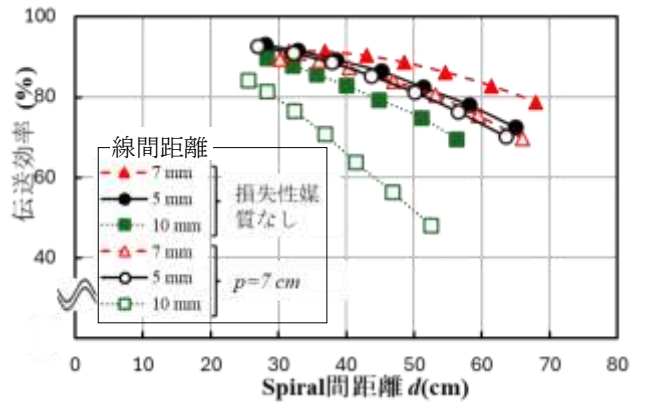


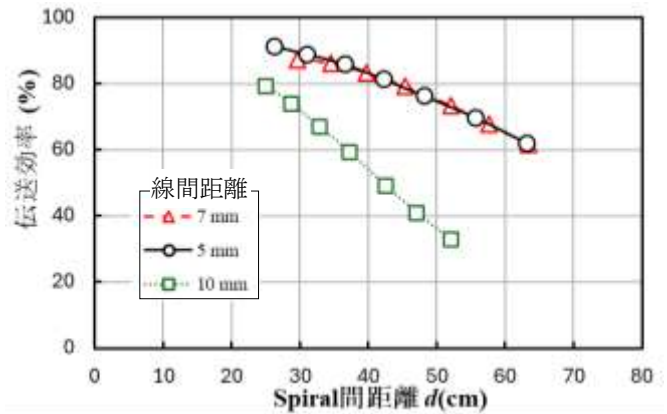
図 3 電力伝送効率の測定系

本システムを屋外で使用する場合を考慮すると，システム内に雨水などの障害物が侵入することが想定される。そこで，本研究では障害物として，導電率を有する水道水入りアクリル水槽を損失性媒質として検討した。アクリル水槽の形状は，図 3 中に示すように広さ 50.0×50.0 cm，厚さ $t=0.5$ cm のアクリル板 2 枚を 1.0 cm 角のアクリル角材を棧として挟み， $w=1.0$ cm として対峙させている。同図に示すような測定系を用い，導電率が 28.1 mS/m@23.5°C 程度の水道水を充填したアクリル水槽を Spiral 共振器から距離 $p=1\sim 7$ cm に設置し，ループ・Spiral 共振器間距離 a を 1~7 cm の範囲で変化させて電力伝送効率を数回測定し平均した結果を図 4 に示す。

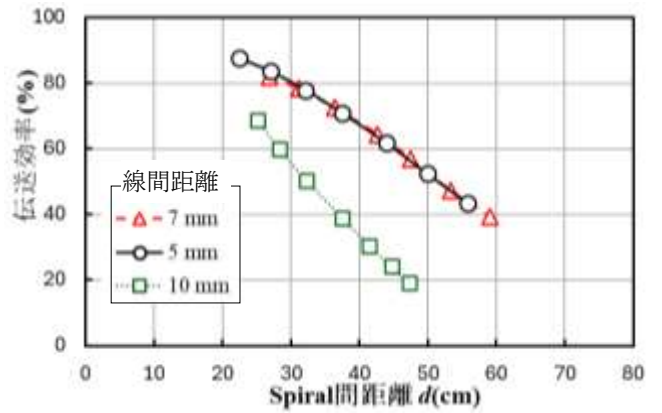
なお，水道水入りの水槽を送・受電装置両側の共振器近辺に配置する理由は，本 RC-WPT システムの設計や各種測定における理論的検討は全てシステムの形状がシステムに対して対称であることを想定している。そこで，システムの形状を対称のままに損失性媒質を挿入する際には，同規格の水槽を 2 つ設置した。また，このような設置レイアウトは，例えば屋外で地中に埋設された送電装置から，移動体



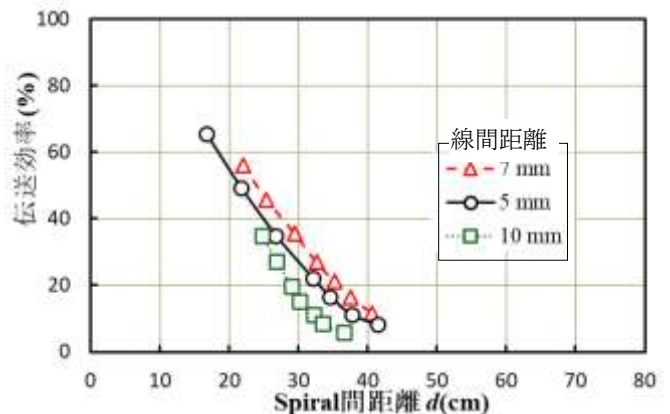
(a) 損失性媒質なし，および， $p=7.0$ cm



(b) $p=5.0$ cm



(c) $p=3.0$ cm



(d) $p=1.0$ cm

図 4 損失性媒質が存在する場合の伝送効率

に電力を送る際において、降雨にさらされた場合、地表面に水の層ができるが、移動体によって巻き上げられた水が受電装置を設置する側の表面にも付着する場合が考えられ、その場面における送電状態測定に対応していると考えている。なお、このような場合には、送・受電装置近傍の水膜の厚さは等しいとは限らないが、先に述べたように、測定精度を落とさず現象を理解する意味で、同規格の水道水入り水槽を利用している。

また、本研究で扱う RC-WPT システムは、ループコイルと Spiral 共振器の結合度を表す量として外部 k_e と Spiral 共振器間の結合係数 k の値が一致するとき、システムマッチングがとれ、最大の電力伝送効率を得ることができる。そこで、その測定点は、ループコイルと共振器の距離 a を 1 cm ずつ変化させた場合、それぞれに対し、システムマッチングが取れる Spiral 共振器間距離 d に合わせた場合の測定値をプロットしている。なお、比較のため損失性媒質が存在しない場合の測定結果も同図中に併記している。ここで、RC-WPT システムの電力伝送効率は、送電用共振器から受電用共振器に移行する電力量で定義している。従って、電力伝送効率が 100% となるのは、送電用共振器の持つエネルギーがすべて受電用共振器に移行した場合を表している。

測定結果より、電力伝送路に損失性媒質が存在しない場合と比較して、水道水を損失性媒質として挿入した場合は電力伝送効率が小さくなっている。これより、導電体を電力伝送路内に挿入すると、電界が導電率に作用して、導電損失が発生し、伝送効率が低下すると考えられる。また、損失性媒質と Spiral 共振器を $p=1.0$ cm まで近づけると、共振器から出る電界が損失性媒質の影響を受け、電力伝送効率が低下している。しかし、 $p=7.0$ cm まで離すと電界の影響が少なくなり、損失性媒質がない場合と比較しても、伝送効率の低下度は小さくなっている。これより、RC-WPT システム利用時には Spiral 共振器を可動式の密閉ボックスに入れ、損失性媒質と共振器間に空気領域を設けることで、屋外でも高効率で電力を送ることができると考えられる。

次に、線間距離による違いを見ていく。同じ Dual-Spiral 共振器である線間距離が 5.0 mm と 7.0 mm の

共振器を比較すると、特性に大きな違いはないが、Spiral 間距離が小さくなると 5.0 mm の方が伝送効率が大きくなっており、共振器同士が近い場合は 5.0 mm の方が適していることがわかる。また直径の値が近い、線間距離 10 mm の Single-Spiral 共振器と比較すると、Dual-Spiral 共振器を用いた方が伝送方向に電界が漏れ出す量が少なくなり全体的に伝送効率が大きくなっていることがわかる。

3. あとがき

本研究では、共振器の線間距離が異なる 2 つの逆巻型 Dual-Spiral 共振器を用いた RC-WPT システムにおいて、電力伝送路内に損失性媒質である水道水が存在する場合について検討した。その結果として、伝送路内に損失性媒質が存在する場合でも、共振器と損失性媒質との間に空気領域を設けることで電力伝送効率を改善することができた。また、共振器の線間距離を変化させても電力伝送効率に大きな違いはないことがわかった。

今後は、損失性媒質の導電率を変化させた場合の RC-WPT システムへの影響について検討していく予定である。また、線間距離 7 mm の Single-Spiral 共振器を新たに作製し、損失性媒質が存在する場合について、既存の線間距離 7 mm Dual-Spiral 共振器との比較を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費基盤研究 (C) 23K03818 の助成の下に実施されたものである。

参考文献

- [1] 今後、大きく広がるワイヤレス給電のマーケット!」, B&PLUS.
https://www.b-plus-kk.jp/wireless_1/wireless_1_2.html
(2025-8-31 閲覧)
- [2] EV ワイヤレス給電事業
https://sinanen.com/ev_wireless_power/
(2025-8-31 閲覧)
- [3] 電磁誘導方式とは? | ワイヤレス給電とは? | エレクトロニクス豆知識 | ローム株式会社・

ROHM Semiconductor

https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/wireless-charging/wireless-charging_what3

(2025-8-31 閲覧)

- [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(広島) 論文集*, 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] 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.
- [11] 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.17~50, 2022-03.