

## 研究成果報告書

研 究 題 目		誘電体基板を用いた共振器結合型無線電力伝送システム用共振器の作製	実 施 年 度 H29～30 年度
代 表 研 究 者	所 属	山口大学大学院創成科学研究科電気電子工学分野	
	氏 名	堀 田 昌 志 印	
1. 研究の目的・背景			
<p>ワイヤレスで電力を供給する無線電力伝送技術は、現在、社会的に爆発的な広がりを見せている IoT(Internet of Things)用各種センサや移動体などへの有望な給電方式として世界的に注目を浴びている。中でも、システム内に配した共振器間の電磁界結合を利用する事で中距離電力伝送に適した共振器結合型無線電力伝送システムは、ハイブリット車や電気自動車への充・給電，医療分野におけるカプセル内視鏡への給電，そして工場内ロボットへの給電など幅広い分野に産業応用が期待されている。しかし、現状では、電力伝送路内に電氣的損失性物体（損失を持つ誘電体や導電性を持つ水など）が入り込むと、システム構成要素の諸特性に様々な悪影響を及ぼすと共に、電力伝送効率が急激に低下する事が明らかになっている。したがって、今後の実用化に際しては、屋外や人体内の様に湿気や水分等の損失媒質が存在する環境下でも効率的に使用可能なシステムの実現が望まれる。</p> <p>本研究課題では、低損失な誘電体を共振器の基板として用いることで、システム全体の電力伝送効率低下を可能な限り抑制可能で共振器の諸特性に対する再現性を向上させ、無線電力伝送システムの屋外使用機器への導入・普及を見据えて、電力伝送路に水や誘電体の様な電氣的損失を持つ物体が介在した場合でも、その影響を極力抑制できる構造実現を目標としている。その一手法として、システム内で用いる共振器構造を最適化する事で損失物体の影響を抑制する手法について検討を行う。具体的には、電力伝送を担う電磁界の内、電氣的損失物体により影響を受けるのは主に電界である。なぜならば、物質の電氣的損失は、誘電体の複素誘電率の虚部および物体の導電率に電界が作用して電流を誘起する事により生ずるからである。そこで、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i) 低損失誘電体基板を用い、誘電率の高さで内部に電界を閉じ込める。</li> <li>ii) 共振器構造最適化により共振器内部に電界がより封じ込め可能な構造を考案する。</li> </ul> <p>事で、送・受電ユニット間の電力移送を主に磁界が担う様にして、伝送路内に入り込んだ電氣的損失媒質の影響を可能な限り低減し、実用的で高性能な共振器結合型無線電力伝送システム実現を目指す。</p>			

## 2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

本研究では、図 1 に示す様な共振器結合型無線電力伝送（Resonator Coupled type Wireless Power Transfer; RC-WPT）システム内で用いる共振器構造の最適化で電力伝送路に損失性媒質が介在した場合でも、その影響を受け難い構造実現を検討した。

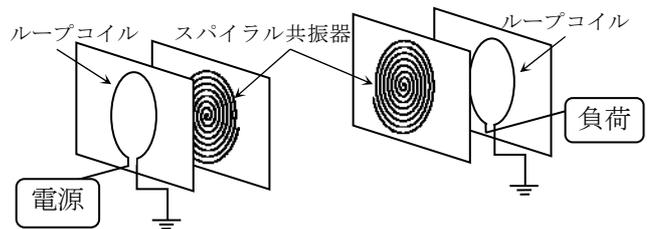


図 1 共振器結合型無線電力伝送システム

まず、これまでの共振器作製では、発泡スチロール板上に螺旋状に銅線を貼り付ける事でスパイラル型共振器を作製してきたが、図 2(a)に示す様に、螺旋状溝を形成したポリエチレン板に銅線をはめ込む構造とする事で共振器(Single-Spiral)特性の再現性を向上させた。また、ポリエチレン板は低損失で空気より高誘電率の誘電体であるため、同一共振周波数の共振器サイズの小型化が実現出来た。

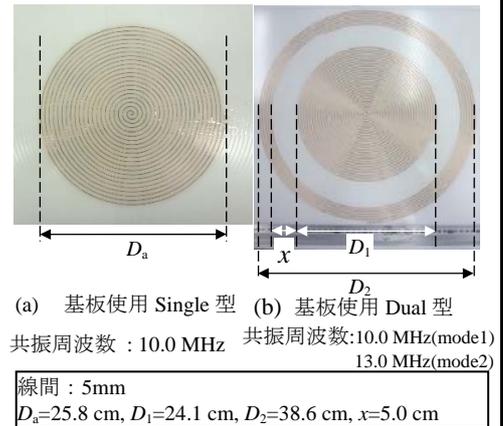
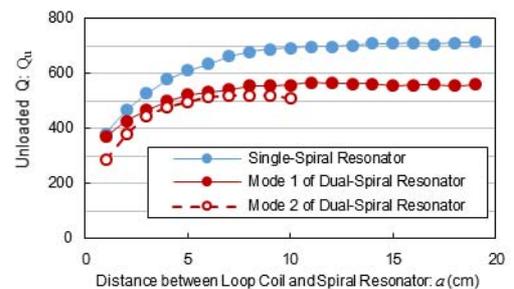


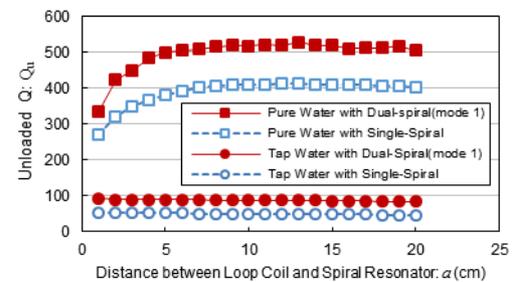
図 2 各種スパイラル共振器

次に、スパイラル共振器の構造変化で、共振器の高性能化を目指した。ここで、先行研究から、RC-WPT システムでは、電力伝送路に導電損や誘電損を持った水や誘電体物体が存在すると、電力伝送効率が大幅に低下する[1]。また、その損失は、共振器が持つ電磁界の主に電界に作用して発生する。そこで、構造最適化の一案として、図 2(b)に示す様な Dual-Spiral 共振器を考案した。本共振器では、内側と外側のスパイラル間でスパイラル面と平行な方向に電界を生じ、共振器内部に電界を閉じ込め、より磁界主の電力伝送が可能となり、損失物体の影響を受け難くなる事が期待できる。なお、この Dual-Spiral 共振器では、結合共振器のため共振点が 2 つ現れる。そこで、低周波数共振を mode1、高周波数共振を mode2 と呼ぶ。なお、共振器の構造パラメータは、図 2 中に記載したものを、全ての単体共振器および Dual-Spiral 共振器の mode1 の共振周波数を 10MHz で統一した[3]。

まず、共振器の特性を評価するため、図 2(a)の Single-Spiral 共振器と同図(b)の Dual-Spiral 共振器の無負荷  $Q$  ( $Q_u$ ) を測定した結果を図 3 に示す。なお、共振器は  $Q_u$  が高いほど高性能であると言える。図 3(a)を見ると、Single-Spiral 共振器の方が Dual-Spiral 共振器よりも高い  $Q_u$  を示している。また、Dual-Spiral 共振器では、



(a) 損失物体無し



(b)  $p = 1\text{cm}$  の位置に損失物体を設置

図 3 損失媒質の有無に対する共振器の無負荷  $Q$

mode1 の  $Q_u$  が高い値を取っているため、以下では mode1 のみについての結果のみを示す。

次に、共振器から  $p=1\text{cm}$  離れた位置に図 4 に示す様に導電損の少ない純水(pure water; 導電率  $0.1\mu\text{S/cm}$ )または導電損の大きい水道水(tap water; 導電率  $228\mu\text{S/cm}$ )入りの水槽を置いた場合の  $Q_u$  を測定すると図 3(b) の様な結果となった。図(a)および(b)を比較すると、

Single-Spiral 共振器では損失物体を近接させると  $Q_u$  は大幅に低下している。これに対し、Dual-Spiral 共振器では、水道水入り水槽を近接させると  $Q_u$  の大幅減少が見られるが、純水入り水槽を近接させても殆どその特性に変化が無かった。すなわち、Dual-Spiral 共振器では、

Single-Spiral 共振器に比べて電界が共振器内部に閉じ込められており、損失物体の存在に影響を受け難い事が期待できる。そこで、今回作製した 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と、従来の Single-Spiral 共振器を用いた RC-WPT システムを作製し、共振器と損失物体（水道水入り水槽）の距離（図 4 中の  $p$ ）を変化させて、その電力伝送特性を測定した。その結果を図 5 に示す。誘電体基板付 5mm ピッチ Single-Spiral 共振器を用いた WPT システムの結果同図(a)では、 $p=1\sim 3\text{cm}$  に損失性媒質を置くと、電力伝送距離 30cm で電力伝送効率率は 60%以下まで低下する。また、全体的に

今回のセットアップでは、電力伝送可能距離は 30cm 程度である。これに対して、同図(b)の Dual-Spiral 共振器を用いた WPT システムでは、 $p=1\text{cm}$  の場合こそ電力伝送効率の値は急激に減少しているが、 $p=3\text{cm}$  以上では、伝送距離 30cm で 80%以上の電力伝送効率が見られている。また、Single-Spiral 共振器を用いた場合と同じセットアップで、電力伝送可能距離が 60cm 程度迄伸びている。また、損失物体の影響は Dual-Spiral 共振器を用いたシステムの方が大幅に改善されることが明らかとなった[3]。今回の検討では、未だ Dual-Spiral 共振器構造の完全最適設計を施していない。この点を勘案すれば、本研究課題の達成度は 70%程度であると考えられる。今後、Dual-Spiral 共振器の構造最適化により、更に高性能な WPT システムを構成できる可能性を示し、近い将来、屋外で実用的使用可能なシステムとなる極めて大きな可能性が確認できた。

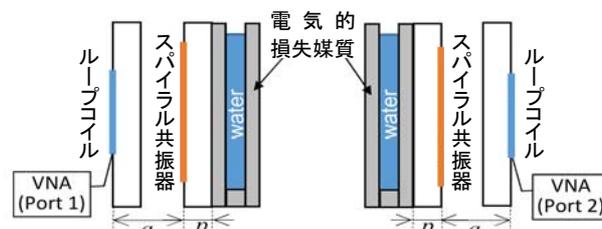
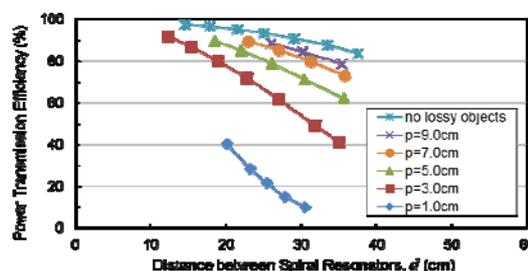
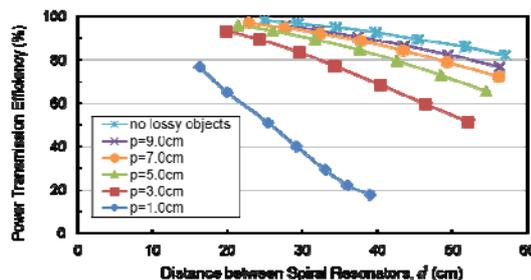


図 4 WPT システム内への損失媒質の設置条件



(a) Single-Spiral 共振器使用 WPT



(b) Dual-Spiral 共振器使用 WPT

図 5 水道水を充填した水槽を介した電力伝送特性

[1] 堀田昌志 他, 産業応用工学会論文誌, vol.2, no.2, pp.23-31, 2014-09.

[2] M. Hotta, et. al., Proc. 2018 Asia-Pacific Microwave Conf., vol.1, no.WE1-C2-1, pp.40-42, 2018-11.

### 3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

設備備品として申請していた、ベクトルネットワークアナライザ用電氣的校正器および導電率計は予定通り購入し、共振器や電力伝送システムの特性測定の測定精度向上や測定効率化、および、電氣的損失物体の特性測定を高精度に実施することができ、研究成果に多大な貢献をした。ただ、測定に際して必要となるコネクタ、測定ケーブル、導電率計測セルおよび予備測定に必要な各種測定器モジュールを予算内で追加購入した。また、測定系の位置決め精度向上に向けて共振器やループコイルを固定する治具を新たに自製した。治具作製用材料や工具は予算計上していなかったため、他の購入予定品の数量等を調整した。

消耗品については、当初の予算計上通り、加工ポリエチレン板、導線等を購入し、共振器の作製・特性測定を行った。

旅費は、研究成果の発表や情報収集のために使用し、国内開催のシンポジウムや国際会議参加旅費の一部として使用した。旅費の不足分は校費から支出した。国際会議では、本課題の成果に対して様々な問い合わせや質問が得られ、今後の研究推進に非常に役立っている。

予算計上していなかったその他経費として、上記国際会議（2018 Asia-Pacific Microwave Conference @Kyoto）の会議参加登録料を支出し、実り多き学会発表ができた。

### 4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本課題で取り扱っている共振器結合型無線電力伝送システムは、電気自動車やカプセル内視鏡等、各種移動体への給電のみならず、現在、普及が進んでいるIoT(Internet of Things)用センサ等への電力供給用として非常に有望視されているものである。ただ、既に電動シェーバや一部スマートホンの充電に利用されている電磁誘導方式のワイヤレス給電システムと混同されがちであるが、電磁誘導方式では、送・受電ユニット間の距離が数 mm 程度までであり、同ユニット間の位置ずれに非常にセンシティブであるのに対して、共振器の結合を利用した本共振器結合型無線電力伝送システムでは、数十 cm から数 m の距離を非常に効率良く電力伝送できると共にユニット間の位置ずれや角度ずれに非常に強いといった特徴を有する。

また、本課題では、損失物体の影響を受け難い磁界を主とした電力伝送システムの検証を行ったが、電界を電力キャリアとして用いる手法も検討されている。両手法については、使用する場所や用途に応じた選択が必要と考えられる。ただ、その製品化には電磁界が人体に及ぼす影響等が法的規制値以内となる様に最終調整や工夫が必要であると考えられる。

上記の様な状況を鑑みると、人体への影響を十分に検討吟味して、解決できれば、今後、共振器結合型無線電力伝送システムは、電力伝送の社会基盤の一部として近い将来に使用される可能性が非常に高いと期待できる。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

【国内シンポジウムなど】

- [1] X. Duan, K. Harada, H. Onari, and M. Hotta, “Fundamental Characteristics of Dual-Spiral Resonator Used for Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System,” 電気・情報関連学会中国支部連大予稿集, no.R17-10-11, pp.1-2, 2017-10. (岡山理科大学 10/21)
- [2] Nur Syafiera Azreen Norodin, D. Sugita, and M. Hotta, “Study on Performance of 10MHz Resonator-Coupling type Wireless Power Transfer System with Some Misalignments,” *Proc. the 19<sup>th</sup> IEEE Hiroshima Section Student Symposium*, Matsue, Japan, no.A1-6, pp.13-16, 2017-12.
- [3] 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 19<sup>th</sup> IEEE Hiroshima Section Student Symposium*, Matsue, Japan, no.A1-7, pp.17-20, 2017-12.
- [4] Wan Mehdi, Nor Iman Sallehuddin, and M. Hotta, “Fundamental Characteristics of Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System Using Paired Spiral Resonators,” *Proc. the 20<sup>th</sup> IEEE Hiroshima Section Student Symposium*, Tottori, Japan, no.B1-9, pp.211-215, 2018-11. [HISS 優秀研究賞受賞]
- [5] 竹上拓馬, Nur Syafiera Azreen Norodin, 大成洋行, 堀田昌志, “変形 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伝送特性解析,” 第 20 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS@鳥取)論文集, no.B1-10, pp.216-219, 2018-11.

【国際学会】

- [6] M. Hotta, Nur Syafiera Azreen Norodin, Nadia Natasya Muhammad Zakaria, H. Onari, and T. Takegami, “Influence of Lossy Objects for Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System with Coplanar Dual-Spiral Resonators,” *Proc. 2018 Asia-Pacific Microwave Conf.* (Kyoto, Japan), vol.1, no.WE1-C2-1, pp.40-42, 2018-11.