

[依頼講演] 磁界主共振器結合型無線電力伝送システムにおける 伝送効率低下への対処法

堀田 昌志* 安達 天哉 力石 一輝 島津 祐香

山口大学大学院創成科学研究科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

E-mail: * hotta@yamaguchi-u.ac.jp

あらまし 共振器結合型無線電力伝送 (Resonator-Coupled type Wireless Power Transfer : RC-WPT) システムでは、無線で電力供給可能な伝送距離を電磁誘導方式等に比べて長くすることができる。この電力伝送距離の延伸に伴い、電力伝送空間は広がる。すると、その空間へ損失を持った障害物が入り込んだり、送・受電ユニット間にずれが生じたりする可能性が高まり、その影響による電力伝送効率の低下が危惧される。本稿では、主に磁界結合を利用した RC-WPT システムにおいて、共振器形状に工夫を加えることで電力伝送路に損失性障害物が存在する場合の影響を軽減する手法を示す。また、送・受電ユニット間に位置ずれや角度ずれが生じた時の影響軽減法も報告する。

キーワード 無線電力伝送システム、磁界主共振器結合、Dual-Spiral 共振器、損失性障害物、位置・角度ずれ

[Invited Lecture] Way to Cope for Declined Power Transmission Efficiency in Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer System Mainly Using Magnetic Field Coupling

Masashi HOTTA* Takaya ADACHI Kazuki CHIKARAISHI and Yuka SHIMAZU

Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University

2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi 755-8611, Japan

E-mail: * hotta@yamaguchi-u.ac.jp

Abstract In Resonator-Coupled type Wireless Power Transfer (RC-WPT) system, the transmission distance for wireless power transfer can be extended compared to conventional Electromagnetic Induction system. However, as the transmission distance increases, the power transmission space also expands. This expansion increases the possibility of reduced power transfer efficiency due to misalignment between the transmitter and receiver units or the presence of lossy obstacles. In this study, methods to suppress the effects of obstacles in the power transmission path and the influence of axial or angular misalignments have been reported, focusing on RC-WPT systems mainly using magnetic-field coupling.

Keywords Resonator-Coupled type Wireless Power Transfer system, Magnetic field coupling, Dual-Spiral resonator, Lossy obstacles, Axial misalignment, Angular misalignment

1. まえがき

スマートフォンに代表される様な移動体はもちろん、昨今急速に普及している IoT 機器用センサーへの給電では、既設電力線のレイアウトによる設置位置の制限や不意なバッテリー切れといったリスクを回避できることから、ワイヤレスで電力を送る無線電力伝送システムの利用が世界的に脚光を浴び、活発に研究されている[1]。既に実用化されている無線電力伝送システムは電磁誘導現象を利用した非接触給電方式にすぎず、極短距離でしか効率的送電が行えず、送・受電ユニット(Tx/Rx units)間に僅かなずれが存在すると伝送効率が急激に低下すると言った欠点があった。これらの欠点を克服すべく、システム内に共振器を配して、

その電磁界結合を利用することで、数十 cm から数 m 離れた場所へ効率的に送電でき、送・受電ユニット間のずれにも強い共振器結合型無線電力伝送(Resonator-Coupled type Wireless Power Transfer : RC-WPT)システムが提案され、その実用化に関する研究が急速に推進されてきた[2], [3]。

しかし、電力伝送距離の延伸に伴い電力伝送空間は広くなり、損失を持った障害物が入り込んだり、送・受電ユニット間にずれが生じたりする可能性が高まる。そして、これらを要因として電力伝送効率が低下する可能性が指摘されている。本稿では、磁界主結合を利用した RC-WPT システムで、共振器形状に工夫を加えることで送・受電ユニットにおける共振器間の電力伝

送路に損失性障害物が存在する場合における影響軽減の手法を示す[4]。また、送・受電ユニット間に位置ずれが生じた場合には適切な角度ずれを、逆に角度ずれが生じた場合には適切な位置ずれを付加することで電力伝送効率が改善できることを示す[5]。

2. Spiral 共振器を用いた RC-WPT システム

本稿で取り扱う RC-WPT システムは、図 1 に示す様に電源供給(送電: Tx)および電力取り出し(受電: Rx)用のループコイルと送・受電ユニットを電磁結合させる Spiral 共振器で構成されている。ここで、理想的には、ループコイルと Spiral 共振器の各中心がすべて一直線上に並ぶ様に配置する。また、システムの要となる Spiral 共振器(Spiral Resonator)はコイル型共振器の一種であるため、電力伝送を主として担うのは磁界となる。なお、同図に示す様にループコイルと共振器の距離を a [cm]、共振器間の距離を d [cm] とする。

RC-WPT システムでは、既に実用化されている電磁誘導現象を利用したシステムに比べて、電力伝送可能距離を大幅に延伸できる。しかし、電力伝送距離の延伸は、送・受電ユニット間の空間が広くなることを意味し、その空間に損失を有する障害物等が入り込む可能性が高くなる。そこで、共振器の形状を変化させて電力伝送路に存在する障害物の影響抑制を試みる。

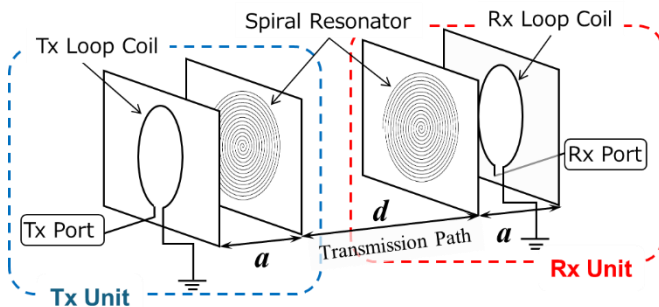


図 1 Spiral 共振器を用いた RC-WPT システム

2.1. Dual-Spiral 共振器の構造

RC-WPT システムにおける電力伝送効率は、共振器が形成する電磁界の拡がり形状やエネルギー密度分布と密接に関係している。この共振器が形成する電磁界に影響を及ぼすであろう、誘電損失や導電損失を有する障害物が電力伝送路内に存在する場合を想定する。

まず、誘電損失は、誘電体の誘電率虚部に作用して生じると考えられる。また、導電率 σ を持つ媒質中で生じる導電損失も、導電率に電界が作用して生じると考えられる。

以上の検討から、損失を有する物体が電力伝送路に存在した場合の影響は、主に電界が関与して生じると考えることができる。しかし、動的電磁界を分離し、磁界のみを存在させることはできない。そこで、電界

を共振器内部に閉じ込め、主に磁界で電磁エネルギーを受電端へ運べば、誘電損失や導電損失による影響を受け難い共振器やシステムの実現が期待できる。

共振器内部に電界を閉じ込める方法として、我々は、Dual-Spiral 共振器構造を提案している[4]-[8]。Dual-Spiral 共振器は、図 2 に示す様に、同じ共振周波数を持つ内巻きの(a) Single-Spiral 共振器と外巻きの(b) Edgewise-Spiral 共振器を同一平面状で組み合わせた結合型共振器である。Dual-Spiral 共振器の内外 Spiral 間に電位差が生じると、Spiral 面内に図 2(c)中に赤両矢印で記載した方向に電界が生じ、電力伝送方向に電界が漏れ出す量が抑制されるが、この電界は、共振器周りに磁界を形成することができる。よって、この Dual-Spiral 共振器を図 1 で示した RC-WPT システムの共振器として用いると、電力伝送路内に張り出す電界が少なくなり、損失性障害物等の影響を大幅に低減できると考えられる。

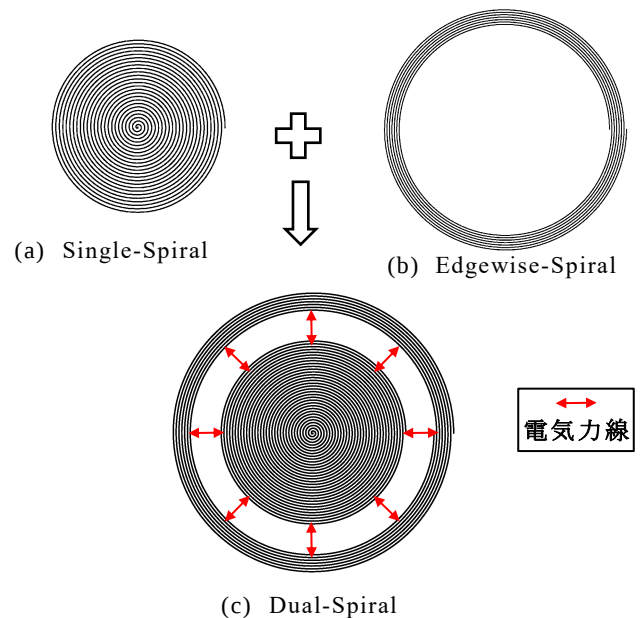


図 2 Dual-Spiral 共振器の構造

ところで、Dual-Spiral 共振器は同じ共振周波数を持つ二つの共振器の結合型共振器であるから、二つの共振周波数を持つ。これまでの基礎的検討より、安定して電力を供給できるのは共振周波数の低いモードであったため、以下では低い周波数を持つモードを Dual-Spiral 共振器の使用モードとする。

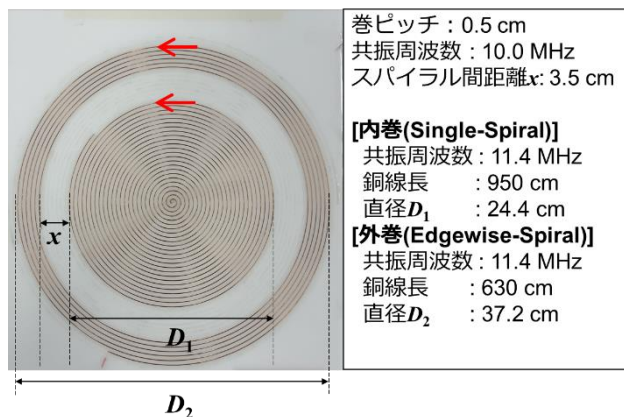
また、Dual-Spiral 共振器では、内側の Single-Spiral と外側の Edgewise-Spiral 共振器の巻き方向を変化させることができる。そこで、両者の巻き方向が同じ場合を順巻 Dual-Spiral 共振器と、巻き方向が逆の場合を逆巻 Dual-Spiral 共振器と称する。Spiral の巻き方向が反転すれば、そこに電流が流れた場合に発生する磁束の向きも反転し、電磁界分布が変化することとなる。

2.2. Dual-Spiral 共振器の作製

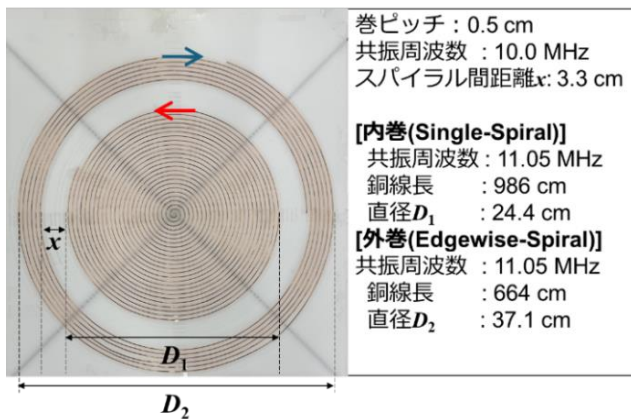
本稿では、巻ピッチ（線間距離）が 5mm で使用モードの共振周波数が 10.0MHz の順巻および逆巻 Dual-Spiral 共振器を作製した。作製には、1mm 径の軟銅線 (UEW) を用い、共振器特性の再現性を向上するために 2mm 厚のポリエチレン板状に幅 1.3 mm×深さ 1.3 mm のスパイラル形状をした溝を掘ったスパイラルガイドを利用し、その溝に銅線をはめ込むことで作製した。

作製した順巻・逆巻 Dual-Spiral 共振器の形状とパラメータを図 3 に示す。

また、比較のために、巻ピッチを 10mm として共振器直径が Dual-Spiral 共振器とほぼ同じ 37.2cm で共振周波数が 10.0MHz の Single-Spiral 共振器(図 2(a))も同時に作製した。



(a) 順巻 Dual-Spiral 共振器



(b) 逆巻 Dual-Spiral 共振器

図 3 作製した Dual-Spiral 共振器のパラメータ

2.3. Dual-Spiral 共振器を利用した RC-WPT システムへの障害物の影響

前節で示した 3 種類の共振器を図 1 の RC-WPT システムの Spiral 共振器の位置に装着し、その電力伝送特性を測定した。なお、図 4 に示す様に、共振器から電力伝送路側にそれぞれ距離 p [cm] 離れた位置に、水道水入りのアクリル水槽を誘電体損失と導電体損失を持

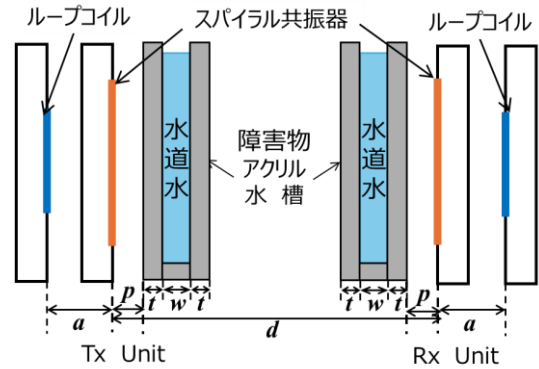


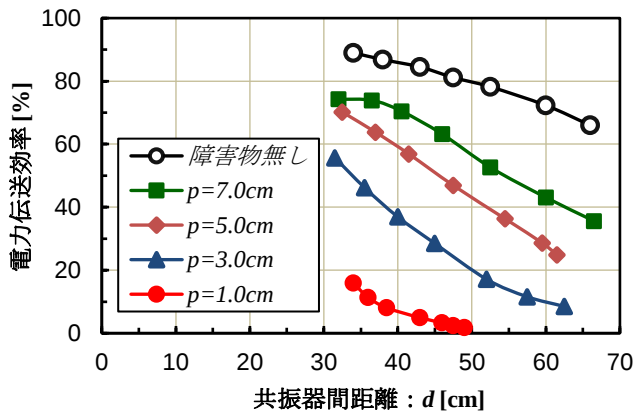
図 4 RC-WPT システムへの障害物設置レイアウト

つ障害物として挿入した場合の結果を図 5 に示す。

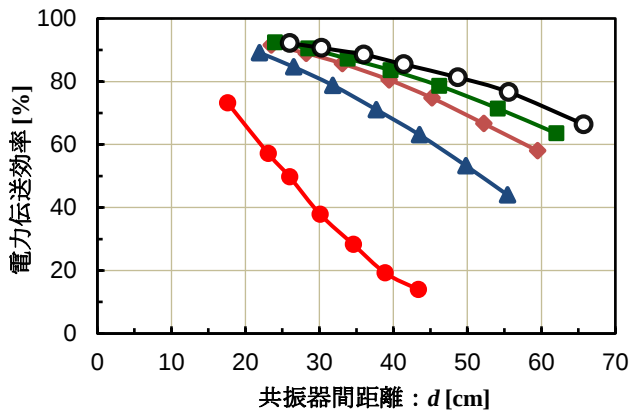
なお、アクリル水槽は、 $t=5$ mm 厚で 50×50 cm のアクリル板 2 枚を $w=10$ mm 角の直方体アクリル枠を挟み、そこへ水道水を充填して構成した。そして、各 Spiral 共振器を用いた RC-WPT システムに対し、障害物を共振器からの距離 $p=1.0, 3.0, 5.0$ および 7.0 cm とした場合、および、障害物を取り除いた場合に対して、電力伝送効率の測定を行っている。ここで、各図中の測定結果の凡例は同図(a)中にまとめて記してある。また、使用した水道水の導電率と水温は、それぞれ、測定日が異なるため、Single-Spiral 共振器を用いた場合は $22.3\text{mS/m}@21.0^\circ\text{C}$ 、順巻または逆巻 Dual-Spiral 共振器を用いた場合は、それぞれ、 $22.4\text{mS/m}@22.0^\circ\text{C}$ および $23.6\text{mS/m}@24.0^\circ\text{C}$ であった。

同結果より、WPT システム内の Single-Spiral 共振器に障害物が近接すると電力伝送効率は急激に低下しているが、2 種の Dual-Spiral 共振器を用いた場合には、電力伝送効率の低下が抑制されている。また、どの共振器を用いた場合でも、障害物を共振器から遠ざければ、障害物無しの WPT システムの効率に漸近していくが、Dual-Spiral 共振器を用いた場合の方が、障害物が存在する場合における電力伝送効率の低下が少なくなっている。これらの現象は、共振器周辺に分布する電界が損失物体に作用して損失となっており、Dual-Spiral 共振器では、Single-Spiral 共振器に比べて共振器内に電界がタイトに閉じ込められ、周辺に漏れ出す量が減っているためではないかと考えた[4]。

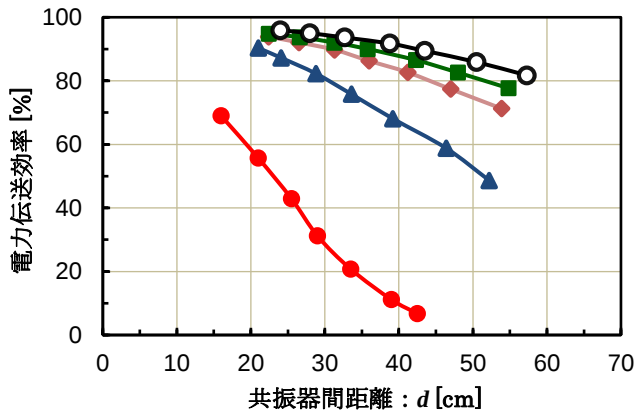
次に、順巻と逆巻 Dual-Spiral 共振器を用いた RC-WPT システムの特性を比較すると、障害物が $p=1$ cm 程度まで近接した際、順巻 Dual-Spiral 共振器を用いたシステムの方が、僅かではあるが電力伝送効率が高くなっている。しかし、障害物が共振器から $p=5$ cm 以上離れた場合、逆巻 Dual-Spiral 共振器を用いた方が順巻を用いた場合と比較して電力伝送効率は高くなり、その傾向は共振器間距離が長くなるにつれて顕著となる。これは、順巻と逆巻 Dual-Spiral 共振器が形成する電磁界分布形状の相違によるものと推察される[8]。



(a) Single-Spiral 共振器



(b) 順巻 Dual-Spiral 共振器



(c) 逆巻 Dual-Spiral 共振器

図 5 各 Spiral 共振器を用いた WPT システムの障害物を介した電力伝送効率

3. 位置ずれが生じた RC-WPT システムの電力伝送効率低下改善

先にも述べた様に、電力伝送路が長くなると、送電(Tx)ユニットと受電(Rx)ユニット間に位置ずれや角度ずれが生ずる可能性が高くなる。ここでは、送・受電ユニット間に図 6 で示す様な位置ずれが存在する場合について、その影響と特性変化について述べる。

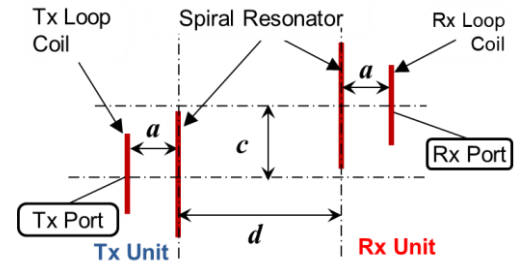


図 6 位置ずれ c を有する WPT システムの鳥瞰図

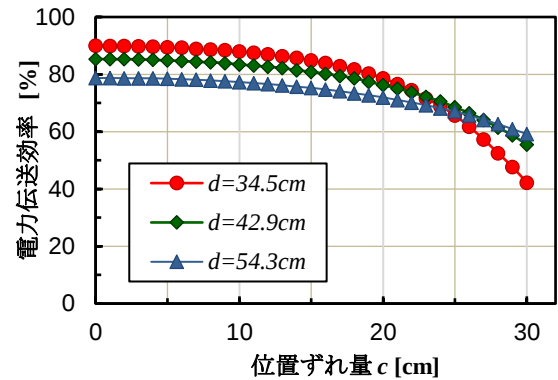


図 7 共振器間距離 d を変化させた場合の位置ずれの影響

なお、共振器は前章で示した順巻 Dual-Spiral 共振器を用いる。図 7 は、RC-WPT システムのシステム整合 [4]-[6] を取り、共振器間距離 $d=34.5\text{cm}$ ($a=3\text{cm}$), 42.9cm ($a=5\text{cm}$) および 54.3cm ($a=7\text{cm}$) としたそれぞれの場合において、位置ずれによって電力伝送効率がどの様に変化するかを調べた結果である。

同図より、位置ずれ量 c が大きくなると、WPT システムの電力伝送効率は低下するが、位置ずれが 25cm 以降の領域ではその特性が異なっている。

ここで、著者らは、Spiral 共振器を用いた RC-WPT システムにおいて位置ずれにより低下した電力伝送効率が適切な角度ずれを付加することで改善できることを示してきた [8], [9]。また、文献 [10] では、ソレノイド型共振器を用いた RC-WPT システムで、位置ずれした受電ユニットを送電ユニットの中心方向へ傾ければ電力伝送効率が改善できると示されている。

3.1. 位置ずれした受電ユニットへの角度ずれ付加

図 8 に示す様に位置ずれ量 c が生じた RC-WPT システムの受電ユニットを送電ユニットの方向に θ だけ傾けた場合を検討する。

まず、Spiral 共振器間距離 $d=34.5\text{cm}$ とした WPT システムでは、 $c=20.0\text{cm}$ の位置ずれが生じた場合、電力伝送効率は 95.2% から 78.6% に低下し、 $d=42.9\text{cm}$ の WPT システムでは、位置ずれ $c=20.0\text{cm}$ が生じた際には、電力伝送効率が 90.0% から 76.2% へと低下した。

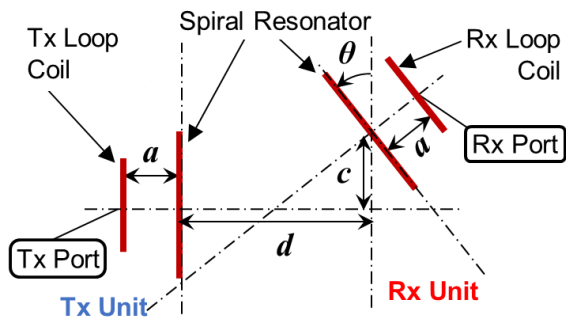
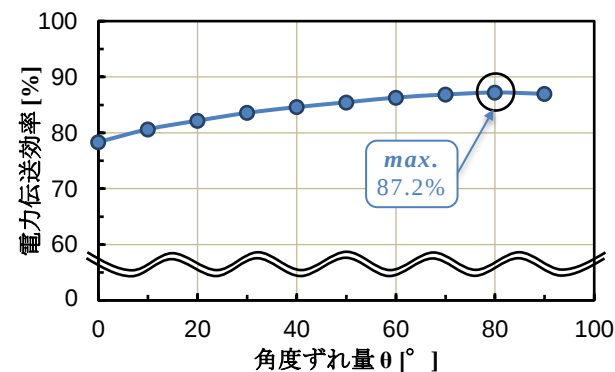


図8 位置ずれを有する WPT システムへの角度ずれ付加

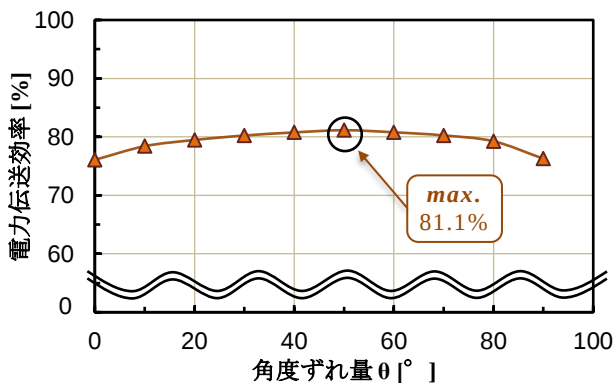
この位置ずれを有する WPT システムの受電ユニットに、 $0 \sim 90^\circ$ の範囲で角度ずれ θ を付加して電力伝送効率を測定すると図9のようになった。同図より、各電力伝送距離において電力伝送効率が最大となる角度ずれ量の存在が明らかになった。

そこで、共振器間距離 $d=34.5\text{cm}$ の場合について、各位置ずれ量に対して、最大電力伝送効率を示す角度ずれ角を同定し、それぞれ場合における電力伝送効率を測定すると図10の様な結果を得た。

同結果より、送・受電ユニット間での位置ずれによって低下した電力伝送効率が、今回測定した位置ずれ量 $c=20.0\text{cm}$ の場合には、最大約 8.9% 改善されていることが分かる。



(a) $d=34.5\text{cm}$



(b) $d=42.9\text{cm}$

図9 角度ずれ付加による電力伝送効率の変化

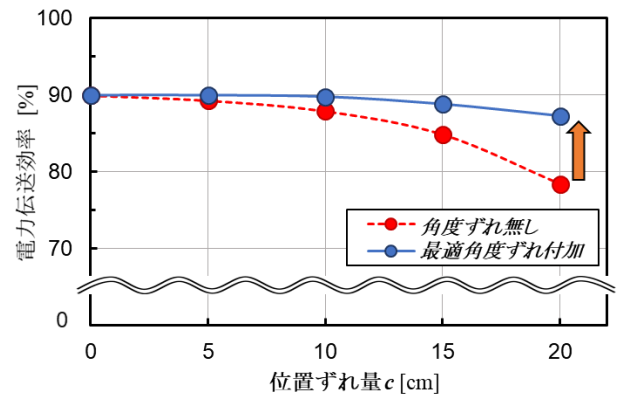


図10 角度ずれ付加による電力伝送効率の最適化

3.2. 最適角度ずれ量の推移

作製した RC-WPT システムにおいて、送・受電ユニット間に位置ずれが生じた場合でも、最適な角度ずれを付加することで電力伝送効率の改善が認められることが分かった。そこで、最適角度ずれ量がどのような値なのかを確認する。図11に示す様に、受電ユニットの共振器中心軸を延長し、送電ユニットの共振器面に到達した点を P とする。この時、送電ユニットの共振器中心 O から点 P までの距離 $OP=|d \tan \theta - c|$ を用いて検証した。この時、文献[10]で示されている条件 (受電ユニットの中心軸を送電ユニット中心へ向けた場合) は、 $OP=0\text{cm}$ の場合に相当する。

共振器間距離 $d=34.5\text{cm}$ および 42.9cm の場合について、位置ずれ量に対する最大電力伝送効率を示す距離 $OP=|d \tan \theta - c|$ を求めた結果を図12に示す。

同図より、位置ずれ量 c が大きくなるにつれて、距離 OP が急激に大きくなっていることが分かる。また、同図内に、測定点を指数関数近似した場合の曲線を併記すると、測定点と近似曲線が良く一致している。

ここでは示していないが、文献[10]に合わせて共振器をソレノイダルコイル型共振器に変更した場合についても同様の検討を行ったが、やはり上記で筆者らが行ったものと同様の結果が得られた。

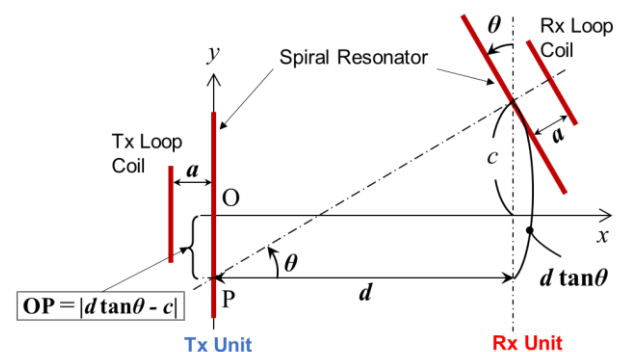


図11 最適角度ずれ量に関する検討

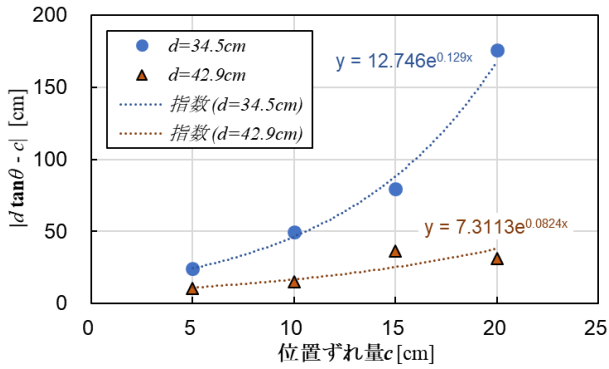


図 12 各位置ずれ量に対する最適角度ずれ量

4. あとがき

RC-WPT システムの出現によって電力伝送可能距離が延伸された結果として想定される，(1) 損失を持った障害物の電力伝送路への混入や(2) 送・受電ユニット間に生じたずれによる電力伝送効率の低下について，磁界主結合を利用した RC-WPT システムを用いた実験的検討から，その対応策を紹介した．

まず，損失を持った障害物の電力伝送路への混入について検討した．損失性障害物の影響は，共振器が形成する電磁界の内，電界が主として作用して発生すると考え，電界を共振器内に集中させることができる様に共振器形状の工夫を行い，Dual-Spiral 共振器を提案した．そして，Dual-Spiral 共振器を利用した RC-WPT システムの電力伝送特性の測定を行った結果，電力伝送路に損失性障害物が存在する場合における電力伝送効率の低下を軽減できることを示した．なお，Dual-Spiral 共振器は，2 種類の Spiral 共振器を同一平面状・同心で形成したものであるが，Spiral 共振器の巻き方向は自由に選べるため，内外 2 つのスパイラル共振器の巻き方向を変化させた順巻および逆巻 Dual-Spiral 共振器についても同様の検討を行った．その結果，障害物が共振器に近い場合は順巻が，離れている場合は逆巻 Dual-Spiral 共振器が有効であることを示した．

次に，送・受電ユニット間に生じたずれによる電力伝送効率の低下についての検討を行った．最初に，送・受電ユニット間に位置ずれが生じた場合に電力伝送効率が低下することを確認した．そして，各位置ずれ量を有する場合について詳細な検討を行い，それぞれ，適切な角度ずれを付加することで電力伝送効率が改善できることを示した．なお，角度ずれの最適値がどの様にして得られるのかについての物理的な解釈は未だ完了していない．ただ，最適角度ずれ量は，位置ずれ量が大きくなるに従って指数関数的に大きくなることが分かった．ところで，ソレノイダルコイル型共振器を用いた RC-WPT システムについて，同様の検討を行い，位置ずれした受電ユニットを送電ユニット中心方向へ向けることで電力伝送効率を改善できることが示

されている[10]．しかし，当研究室で同様の検討を行った結果，位置ずれした受電ユニットを傾ける最適角度ずれ量は，送電ユニットの中心よりも，さらに受電ユニットの位置ずれ方向と逆方向へ離れた点に向かう角度であることも確認している．

さらに，今回は位置ずれによって生じた電力伝送効率の低下を角度ずれで解消したが，逆に，角度ずれによって生じた電力伝送効率の低下は適切な位置ずれを加えることで解消できることも確認している．

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ことを付記し謝意を表する．

文 献

- [1] 篠原真毅，“無線電力伝送の送電距離に対する理論と技術,” 信学論 (B), vol. **J96-B**, no.9, pp.881-893, Sept. 2013.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljāčić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, vol. **317**, no.5834, pp.83-86, Jul. 2007.
- [3] 松木英敏, 高橋俊輔, ワイヤレス給電技術がわかる本, オーム社, 東京, 2011.
- [4] N.S.A. 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, Mar. 2022.
- [5] N.S.A. Norodin and M. Hotta, "Performance Improvement of Resonator-Coupled Wireless Power Transfer System using Dual-Spiral Resonator with Angular Misalignments," *URSI Radio Science Bulletin*, vol. **372**, pp.22-28, Mar. 2020.
- [6] 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 Sec. Student Symp.*, Shimane, no.A1-7, pp.17~20, Dec. 2017.
- [7] 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 広島学生シンポジウム集, 山口, no.A2-19, pp.61-65. Nov. 2016.
- [8] 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 広島学生シンポジウム集, 広島, no.TP-B-6, pp.173-177, Nov. 2024.
- [9] N.S.A. Norodin, D. Sugita, and M. Hotta, "Study on Performance of 10MHz Resonator-Coupling type Wireless Power Transfer System with Some Misalignments," *Proc. the 19th IEEE Hiroshima Sec. Student Symp.*, Shimane, no.A1-6, pp.13-16, Dec. 2017.
- [10] 日立マクセルエナジー株式会社, “磁界共鳴を利用した無線電力伝送方法,” 特許公報, 特開 2012-191699, (公開日) 平成 24 年 10 月 4 日.