

キャパシタ装荷スパイラル共振器を用いた角度ずれを有する共振器結合型無線電力伝送システムの電力伝送効率改善に関する研究 Improvement of Power Transmission Efficiency of Resonator-Coupled Wireless Power Transmission System with Angular Misalignment by Using Spiral Resonators with Lumped Constant Capacitors

堀内 賢太 藤本 悠之介 石川 潤一郎 堀田 昌志
Kenta Horiuchi Yunosuke Fujimoto Junichiro Ishikawa Masashi Hotta

山口大学大学院創成科学研究科

1. まえがき

スマートフォンや電気自動車など、電気エネルギーを動力源とする移動体に給電を行うには、電力ケーブルなどの拘束が無く、効率的で安定した電力を供給する方法の確立が求められる。この問題の解決策の一つとして、無線電力伝送システムが注目されている[1].

無線電力伝送システムには、電磁誘導方式、電波受信方式、電界結合方式および本論文で取り扱う共振器結合型無線電力伝送(Resonator-Coupled Type Wireless Power Transfer: RC-WPT)方式などがある[2]. 現在、家電製品などに広く応用されている無線給電システムは、電磁誘導方式が一般的である。しかし、同方式は電力伝送可能距離が数mm程度と極端に短く、送受電装置の位置ずれや角度ずれに非常に弱いと言った欠点がある。これに対して、共振器結合型無線電力伝送方式は、電力伝送可能距離が比較的長く、送・受電ユニットの位置ずれや角度ずれに強いといった特徴を併せ持つため、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[3]-[8].

しかし、この共振器結合型無線電力伝送システムを一般的な家電製品へ応用する場合、システムの小型化や電力伝送効率の向上が必要不可欠であると考えられる。当研究室では、システム小型化の試みの一環として、RC-WPTシステムの送・受電で用いる平面型のスパイラルコイル共振器に、キャパシタを装荷することでシステムの小型化を検討してきた[3],[10]. また、送・受電端ユニット間に角度ずれが存在する場合、電力伝送効率が低下するが、同ユニットに適切な軸ずれを与えることで伝送効率の改善が見込まれることを、これまでの研究で明らかにし

ている[8]-[9]. そこで、今回はキャパシタを装荷したスパイラル共振器において、損失性媒質を伝送路内に挿入した場合の影響と軸ずれによる改善が有効であるのか否かについて詳細に検証する。

2. 角度ずれを有する RC-WPT システム

2.1 RC-WPT システムの構成

図1に本研究で取り扱う RC-WPT システムの構成を示す。

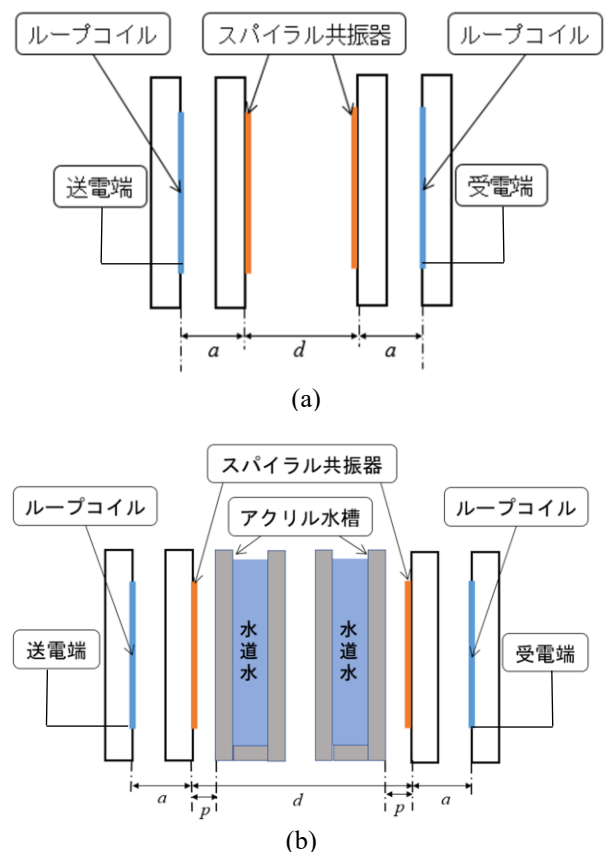


図1 RC-WPT システムの構成

図1(a)は基本構成を示している。通常、本システムの理想的な構成では、図1(a)のように送電用のループコイルとスパイラル共振器および受電用のスパイ

ラル共振器とループコイルは、すべて、その中心が一直線上になるように配置している。それに対し、図 1(b)では、同 RC-WPT システムの共振器付近に水道水（導電率 25.8 mS/m@24.0°Cを想定）を充填したアクリル水槽を損失性媒質として配置した場合を示している。また、損失性媒質とスパイラル共振器間距離を p と定義した。

この損失性媒質設置レイアウトは、降雨中の屋外で使用する移動体において、地面に貯まった水膜と、被給電物の表面に水膜が存在する場合を想定している。なお、水槽に満たす水については、様々な導電率を持ったものを検討する必要があると思われるが、今回はもっとも身近な水道水を損失性媒質として選んだ。

2.2 キャパシタを装荷したスパイラル共振器

今回使用したスパイラル共振器は、厚さ 2.0 mm のポリエチレン板にスパイラル形状で幅 1.3 mm、深さ 1.0 mm の溝を掘り、1.0 mm 径の銅線をはめ込むことにより製作した。スパイラル中心から均一に銅線をはめ込んだシングルスパイラル共振器では、その共振周波数を 10.0 MHz と設計したとき、共振器の直径は 37.20 cm、銅線長は 1119.0 cm、巻き数は 19 回であった。

この共振器の小型化するには、銅線長を短くする必要がある。しかし、それだけでは共振周波数は増加してしまう。そこで、文献[10]に示す様に、銅線長を短くした後に、スパイラル形状に沿って静電容量 47 pF の積層セラミックコンデンサを中心から 8~9 cm の中心対称位置の銅線間に 12 個装着することで、共振周波数が 10.0 MHz のままで、その直径を 49.73 %小型化できた。最終的に完成したスパイラル共振器の形状を図 2 に、キャパシタの装荷位置を丸で示す。このときの共振器の直径は 18.50 cm、銅線長は 282.6 cm、巻き数は 10 回であった。

本研究では、キャパシタ装荷型のスパイラル共振器を用いた RC-WPT システムについて、損失性媒質が共振器付近に存在する場合の影響を詳細に調べると共に、受電端に角度ずれが存在することによる電力伝送効率の低下を軸ずれで改善する方法について

検討する。



図 2 キャパシタを装荷した共振器

2.3 損失性媒質が存在する場合の電力伝送効率

図 1 において、ループコイルとスパイラル共振器間の距離 a を、 $a=1.0$ cm から 7.0 cm まで 1.0 cm 間隔で変化させ、それぞれの場合においてシステム整合が取れるようにスパイラル共振器間距離 d を調節した。そして、図 1 中に示した、損失性媒質とスパイラル共振器間の距離 p を、 $p=1.0$ cm から 7.0 cm まで 2.0 cm 間隔で変化させた場合および損失性媒質が存在しない場合の電力伝送効率 η を測定した。

キャパシタを装荷していないシングルスパイラル共振器を用いたシステムの電力伝送効率の測定結果を図 3 に、キャパシタ装荷スパイラル共振器を用いたシステムの電力伝送効率の測定結果を図 4 に示す。

図 3 および 4 より、キャパシタを装荷したスパイラル共振器を用いたシステムの電力伝送効率は、伝送距離（共振器間距離）が長くなるに従って急激に減衰している。しかし、共振器と損失性媒質の距離 p が変化した場合の特性変化が極めて少ない。ここで、導電損失や誘電損失を持つ物体は、共振器の形成する電界に作用して損失を発生させる。したがって、キャパシタを装荷した共振器では、キャパシタ内に電界エネルギーが閉じ込められ電力伝送路に漏れ出す電界が減少したため、損失物体の位置に対する損失発生自体が減少したものと考えられる。なお、電界エネルギーがキャパシタ内部に閉じ込められたということは、共振器が持つ電磁界のうち、磁界形成に関与する電界がキャパシタ内に閉じ込められたため外部電磁界に関与できず、形成される磁界エネルギーが減少したためではないかと考えられる。そ

ここで、電力伝送効率、伝送距離が長くなるに従って急激に低下したと考えた。

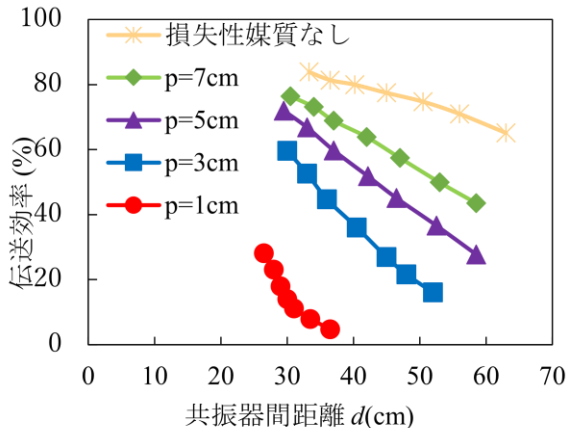


図3 キャパシタなしの電力伝送効率

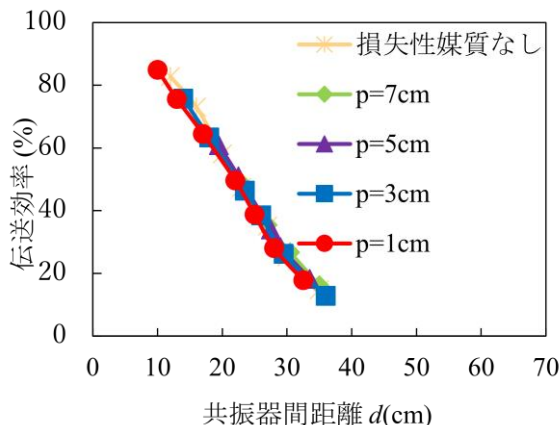


図4 キャパシタありの電力伝送効率

以上の結果より、キャパシタを装荷した共振器をRC-WPTシステムに利用することで、損失性媒質の影響を受け難いシステムが構築できると考えられる。

2.4 損失性媒質が存在しない場合におけるRC-WPTシステムに対する角度ずれの影響とその対策

図5に、キャパシタ装荷スパイラル共振器を組み込んだRC-WPTシステムにおいて損失性媒質が存在せず、受電端に角度ずれが生じた場合の測定系を示す。同図中の $c=0\text{ cm}$ の場合、電力伝送効率は角度ずれの増加と共に低下する。

なお、送電側コイルから出る磁力線が受電コイルに垂直に入射することで電力伝送効率が最大になり、コイルの中心軸からずれると外側に広がっていく傾向があるため、角度ずれのある受電コイルに磁力線が垂直入射するように軸ずれを起こすことで電力伝

送効率が改善できることを当研究室では確認している[11]。そこで、最適地がどのように得られるかを、電磁界分布を調べることで評価したい。もし説明することができれば、軸ずれによる伝送損失の改善法として確立されるだろう。

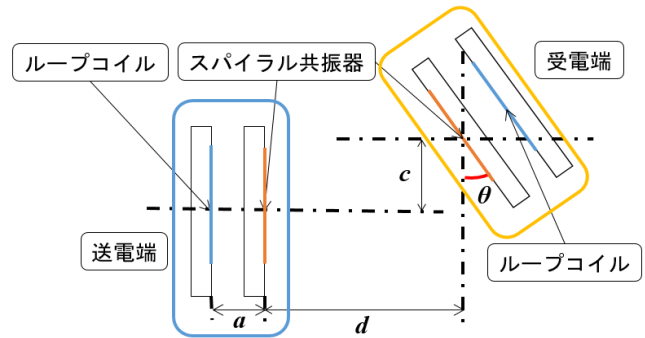


図5 測定系

図6の軸ずれなしの結果として、ループコイルとスパイラル共振器間の距離 a とシステム整合を取った場合の共振器間距離 d の組合せが、 $a=5\text{ cm}$ 、 $d=27.0\text{ cm}$ の場合について示している。なお、受電端の角度ずれについては 0° から 60° の間で 10° ずつずらした。そのときの電力伝送効率を●で示している。また、それぞれの角度ずれにおいて軸ずれ量 c を 1.0 cm から 20.0 cm の範囲で変化させて、それぞれの場合の電力伝送効率を測定することで最大伝送効率を示す位置を調べ、そのときの軸ずれ量を最適値と定義した。そして、軸ずれ量が最適値のときの電力伝送効率を▲で示している。軸ずれが存在せず、角度をずらした時の電力伝送効率と、角度ずれが起きた時の軸ずれ量の最適値とそのときの電力伝送効率およびその改善率を表1に示す。

図6および表1より、キャパシタを装荷したシングルスパイラル共振器を用いる場合、角度ずれによって電力伝送効率が低下しており、軸ずれを最適値にすることによって電力伝送効率が改善していることが分かる。そのときの最大改善率は、角度ずれが 60° の時に 17.42% 改善した。これより、角度ずれが存在していても、軸ずれによって電力伝送効率の改善が可能であると考えられる。

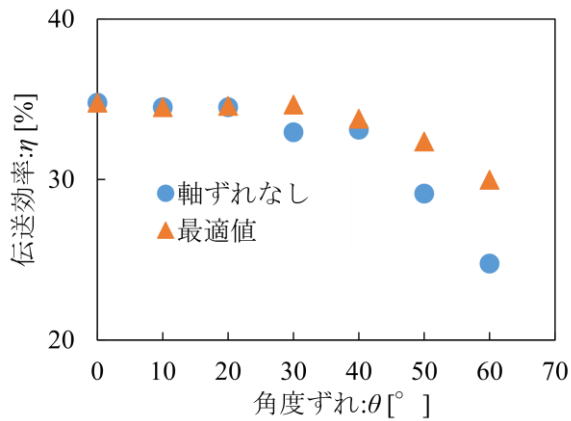


図6 $a=5.0$ cm のときの電力伝送効率
($d=27.0$ cm)

表1 電力伝送効率の変化
 $a=5.0$ cm($d=27.0$ cm) 損失性媒質なし

軸ずれなし		最適値		改善率 [%]
θ [°]	η [%]	c [cm]	η [%]	
0	34.79	0.0	34.79	0.000
10	34.52	0.0	34.52	0.000
20	34.50	2.0	34.59	0.258
30	32.96	2.0	34.68	4.962
40	33.11	3.0	33.79	2.033
50	29.13	4.0	32.37	9.995
60	24.77	6.0	30.00	17.42

2.5 損失性媒質が存在する場合における RC-WPT システムに対する角度ずれの影響とその対策

図7に、キャパシタ装荷スパイラル共振器を組み込んだRC-WPTシステムにおいて損失性媒質が存在し、受電端に角度ずれが生じた場合の測定系を示す。今回、 $p=1.0$ cm の場合における電力伝送効率の変化を測定した。

なお、2.4節でキャパシタを装荷したシングルスパイラル共振器を用いた場合において、各角度ずれ量に対して、受電端の中心軸のずれ c を最適に選ぶことで、電力伝送効率の改善が見込まれることを確認している。同様の効果が損失性媒質を挿入した場合におけるキャパシタ装荷スパイラル共振器を用いたRC-WPTシステムでも実現できるのかを確認する。

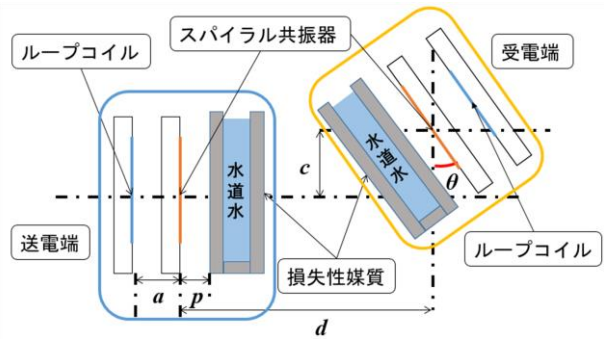


図7 測定系

図8の軸ずれなしの結果として、ループコイルとスパイラル共振器間の距離 a とシステム整合を取った場合の共振器間距離 d の組合せが、 $a=5$ cm、 $d=24.2$ cm の場合について示している。ただし、装置の配置の都合上、装置がぶつかってしまうため、取れるデータの数が少なくなっている。したがって、受電端を 0° から 40° の間で 10° ずつの角度ずれを行い、そのときの電力伝送効率を●で示している。そして、それぞれの角度において軸ずれ量 c を変化させることで最適値を調べ、最適値のときの電力伝送効率を▲で示している。軸ずれが存在せず、角度をずらした時の電力伝送効率と、角度ずれが起きた時の軸ずれ量の最適値とその時の電力伝送効率およびその改善率を表2に示す。

図8および表2より、損失性媒質が存在する場合においても、軸ずれを最適値にすることによって電力伝送効率が改善していることが分かる。そのときの最大改善率は、角度ずれが 60° の時に 4.739% 改善した。これより、損失性媒質が存在する場合においても同様に改善が可能であると考えられる。

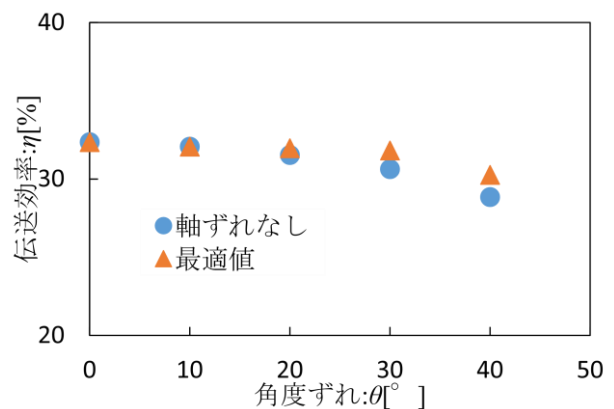


図8 $a=5.0$ cm のときの電力伝送効率
($d=24.2$ cm)

表 2 電力伝送効率の変化
 $a=5.0$ cm($d=24.2$ cm) 損失性媒質あり

軸ずれなし		最適値		改善率 [%]
θ [°]	η [%]	c [cm]	η [%]	
0	32.35	0.0	32.35	0.000
10	32.07	0.0	32.07	0.000
20	31.54	1.0	31.95	1.311
30	30.63	2.0	31.81	3.714
40	28.83	2.0	30.27	4.739

3. あとがき

本研究では、キャパシタ付き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において、損失性媒質を伝送路内に挿入した場合の影響と軸ずれによる改善が有効であるか否かを検討した。その結果、キャパシタを装荷することで、損失性媒質によって発生する電力伝送効率低下の影響を受け難いシステムが構築できた。そして、スパイラル共振器間距離が短い範囲においては効率が改善されたが、スパイラル共振器間距離が長い範囲においては効率が改善されなかった。

また、角度ずれを有するシステムの電力伝送効率低下を受電装置の中心軸を適切にずらすことで回復できることを検証した。損失性媒質を挿入した場合においても同様に電力伝送効率の低下を改善することができた。

今後の検討課題としては、スパイラル共振器間に損失性媒質として水道水や海水などの導電率を持った物体が介在する場合のシステムの動作について詳細に検討していきたい。

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] 「ワイヤレス給電とは？活用メリットや原理、種類、効率について解説」, NTT R&D Website.

(<https://www.rd.ntt/se/media/article/0023.html>) , (2023-8-19 閲覧).

- [2] 「ワイヤレス給電の方式の比較 | ローム株式会社」, ROHM.
 (https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/wireless-charging/wireless-charging_what2) , (2023-8-19 閲覧).
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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 (HISS) 論文集, no.B-3, pp.220-223, 2011-11.
- [6] 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,” 電学技報(無線電力伝送), no.WPT2010-01, pp.1~7, 2010.
- [7] 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.
- [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] 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
- [10] 藤本悠之介, 堀田昌志, “キャパシタを用いた共振器結合型無線電力伝送システム用スパイラル共振器の小型化に関する基礎研究,” 第24回IEEE広島支部学生シンポジウム(HISS@岡山) 論文集, no.TP-C-3, pp.126-129, 2022-11.
- [11] 石川潤一郎, 堀田昌志, “デュアルスパイラル共振器を用いた角度ずれを有する共振器結合型無線電力伝送システムに対する純水の影響に関する研究” 第24回IEEE広島支部学生シンポジウム(HISS@岡山) 論文集, no.TP-C-4, pp.130-133, 2022-11.