

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 Study on the Effect of Pure Water on Resonator-Coupled Wireless Power Transmission System with Angular Misalignment Using Dual Spiral Resonators

石川 潤一郎
Junichiro Ishikawa
山口大学大学院

堀田 昌志
Masashi Hotta
創成科学研究科

1 まえがき

電気エネルギーを動力源とする電気自動車(EV)やスマートフォン等の移動体へ非接触で電力供給を行う方式として、共振器結合型無線電力伝送(Resonator-Coupled Type WPT : RC-WPT)システムが注目を浴び、活発に研究されている。また、最近では、本システムを医療用内視鏡カプセルや水中で動作する電動機器への送電にも利用しようとする試みが進められている[1]-[6]。

この様にRC-WPTシステムの適用分野は非常に広範囲にわたっているが、特に、湿気などの水分や誘電体物質の存在が懸念される環境や、医療用分野における体内デバイスへの送電では、その60%以上が水分で構成される人体の影響等、水分が存在する環境下でも効率的な電力伝送可能なシステム構成が必要である。ここで、水は誘電損を持つ誘電体であると共に導電損を持つ導電体でもある。誘電損や導電損は電磁界の内、主に電界に作用してエネルギーを減衰させる。従って、RC-WPTシステムの電力伝送路内にこのような損失性媒質が存在すれば電力伝送を担う電磁界の内の電界に作用して電磁エネルギーを減衰させ、システム性能の低下をもたらすと考えられる。

また、RC-WPTシステムを実際に移動体などへ実装する場合、送・受電ユニット間に角度ずれが起こることは避けられない。そこで本研究では、RC-WPTシステム内に電氣的損失性媒質が存在し、角度ずれを有する場合でも、その影響を軽減可能なシステムを実現するために、軸ずれによる影響を実験的に検証する。

2 デュアルスパイラル共振器を用いた角度ずれを有するRC-WPTシステムの損失性媒質の影響

2.1 共振器結合型無線電力伝送システムの構造

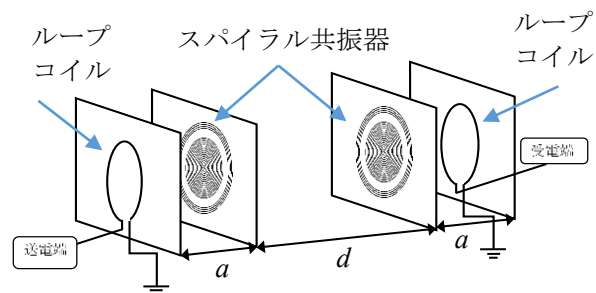
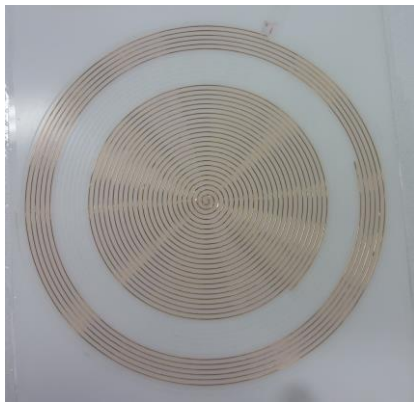


図1 RC-WPTシステムの概観図

まず、本研究で取り扱うRC-WPTシステムの外観を図1に示す。同図に示すとおり、本システムは送・受電用のループコイルと共振器から構成されている。そして、ループコイルとスパイラル共振器間の距離を a [cm]、スパイラル共振器間の距離（電力伝送距離）を d [cm]とする。

今回の検討では、ループコイルは1mm径の銅線を用い、直径17.5mmの1ターンループ形状を構成した。次に、スパイラル共振器については、RC-WPTシステムにおいて電氣的損失の影響を受ける主要因となる電界を共振器内に閉じ込める為に、Single-Spiral共振器とEdgewise-Spiral共振器を図2の様に同一PE板上に形成したDual-Spiral共振器を提案している[7]。今回用いるDual-Spiral共振器の各パラメータを図2に示している。銅線は、1mm幅のスパイラル形状に溝を掘った厚さ2mmのポリエチレン(PE)板に1mm径の銅線を埋め込んでスパイラル共振器を構成している。



Dual-Spiral 共振器	
(線間距離 0.5 cm)	
[内巻(Single-Spiral)]	
共振周波数	: 11.4 MHz
銅線長	: 950 cm
直径	: 24.4 cm
巻き数	: 24 回
[外巻(Edgewise-Spiral)]	
共振周波数	: 11.4 MHz
銅線長	: 630 cm
外径	: 37.2 cm
巻き数	: 6 回
共振器の間隔	: 3.5 cm
[共振周波数]	
mode 1	: 10.0 MHz
mode 2	: 13.4 MHz

図 2 Dual-Spiral 共振器

なお、Dual-Spiral 共振器には、2 つのモードが存在する事を確認しているが、Dual-Spiral 共振器の場合における検討[7]から、共振周波数が低いモード(mode 1[7])についてのみ検討を行う。

2. 2 損失性媒質が存在する場合の電力伝送効率の測定

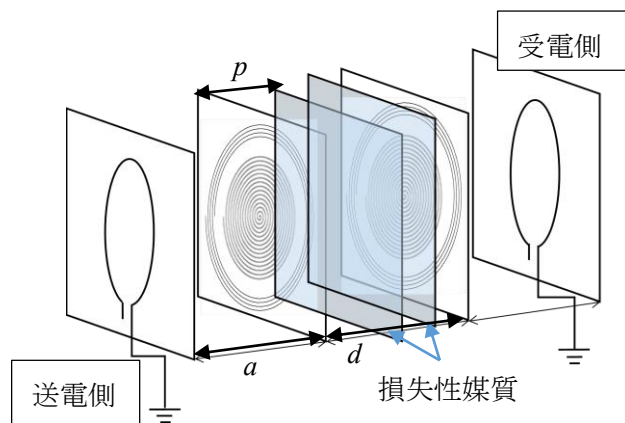


図 3 電力伝送効率の測定系

本システムを屋外での使用を考慮して、水や雪などの様々な導電率を持った障害物が伝送路内に侵入することが想定される。純水は塩化ナトリウムを加えることで導電率を調整できるため、今後様々な導電率を検討できる純水を損失性媒質として選んだ。

測定方法は、図3に示す様な測定系を用いて、Dual-Spiral 共振器に導電率が 0.120 mS/m @24.0 °C 程度の純水を充填したアクリル水槽を損失性媒質として距離 $p=1,5,7$ cm まで近接させた場合の電力伝送効率を測定した。本研究で取り扱う RC-WPT システムでは、ループコイルと共振器の距離 a [cm] と電力伝送距離に相当する共振器間距離 d [cm] をシステムの外部 Q の逆数 k_e と共振器間の結合係数 k が等しくなる様に選べば、システムのマッチングが取れ、最大の電力伝送効率を得る事が出来る。 $a=1\sim 7$ cm まで 1 cm 毎のそれぞれの場合における測定結果を図 4 に示す。この時、参考のために損失性媒質が存在しない場合の結果も併記している。

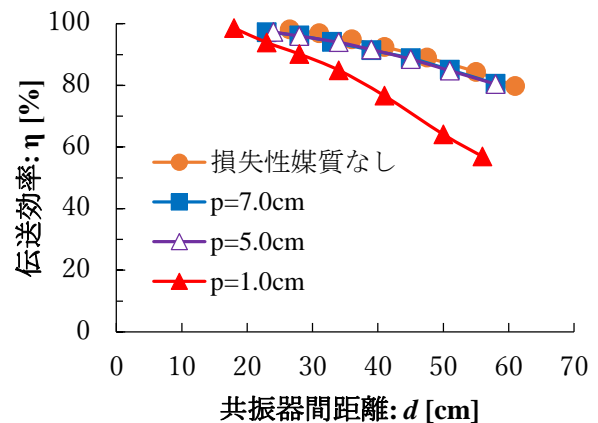


図 4 伝送効率の測定結果

本結果より、ループコイルと共振器の距離 a [cm] が大きくなるほど、 d の長い領域で高い伝送効率を示すマッチングポイントが得られた。また、損失性媒質がない場合と比較して、純水を損失性媒質として伝送路に挿入した場合は伝送効率の低減が見られる。これより、導電体を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生じ、伝送効率が低くなると考えられる。しかし、共振器と損失物体の距離 p を大きくすると、共振器から漏出する電界

の影響が少なくなり、伝送効率の低下はほとんど見られない程度まで低下している。損失性媒質を $p=1\text{cm}$ まで近づけると電界が損失性媒質の影響を受け、伝送効率が低下している。よって、デュアルスパイラル共振器をケーシングさせ損失性媒質との間隔を空けることで、屋外でも電力を伝送することが可能になると考えられる。

2.3 角度ずれを有する場合の軸ずれによる影響

本システムでは、送電側コイルから送出される磁力線が受電コイルへ垂直に入射すれば最大の電力伝送効率を得られると考えられる。ここで受電コイルに角度ずれが生じると入射角度が垂直からずれ、伝送効率が低下すると考えられる。またコイルから送出される磁力線は、コイル中心軸からずれると外側に向かって拡がる傾向がある。そこで、図5に示すように傾いた受電コイルに磁力線が垂直入射するように適宜、横ずれさせれば、受電コイルに角度ずれ

があったとしても、伝送効率が改善できると考えた。

測定方法は、図5に示す様に、受電側ユニットをスパイラル共振器の中心軸を基準に $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ で 10° ずつ角度ずれを生じさせて、それぞれの角度で軸ずれ量 c を $c=1.0\sim 20.0\text{ cm}$ まで 1.0 cm ずつ変化させ、その時の電力伝送効率を測定した。そして、軸ずれがない場合と、軸ずれ量 $c=1.0\sim 20.0\text{ cm}$ のうち最も伝

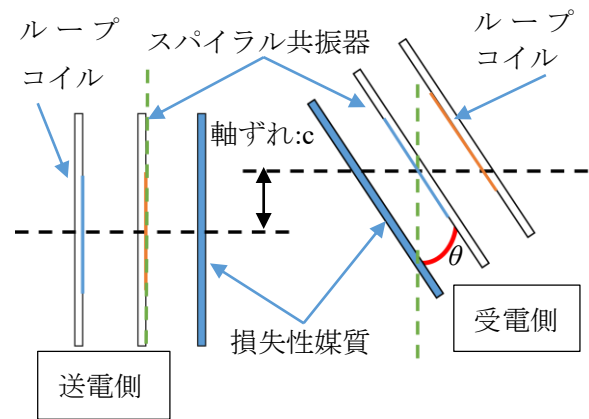
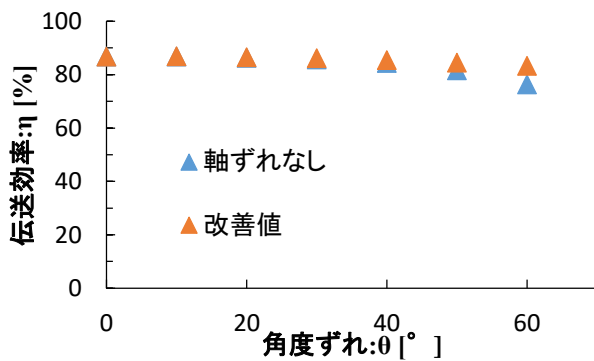
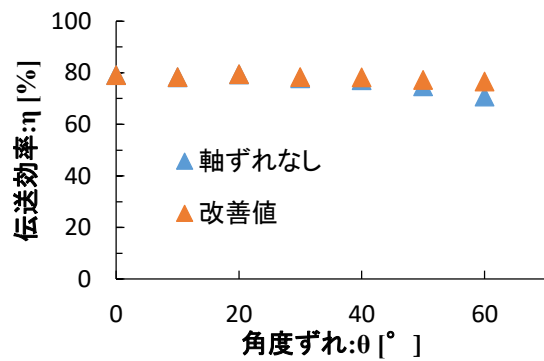


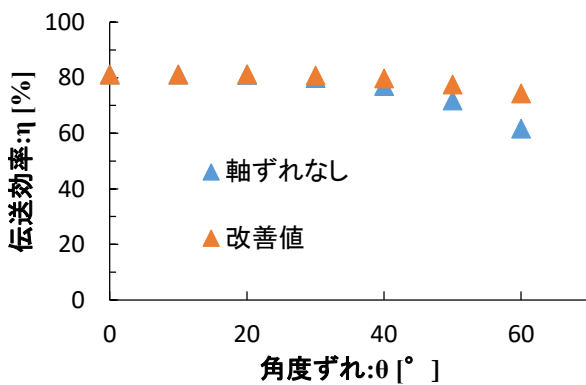
図5 測定系



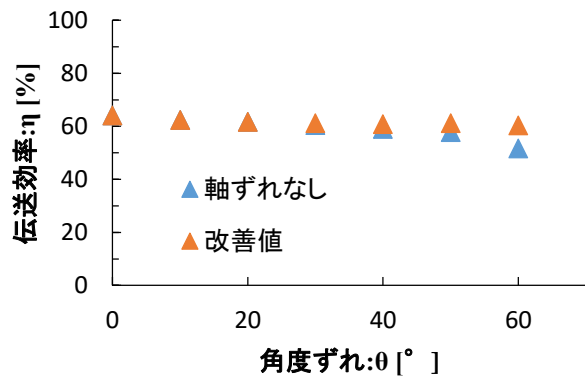
(a) $d=47.7\text{ cm}$ ($a=5.0\text{ cm}$), 損失性媒質なし



(b) $d=34.5\text{ cm}$ ($a=5.0\text{ cm}$), $p=1.0\text{ cm}$ 損失性媒質あり



(c) $d=61.0\text{ cm}$ ($a=7.0\text{ cm}$), 損失性媒質なし



(d) $d=46.5\text{ cm}$ ($a=7.0\text{ cm}$), $p=1.0\text{ cm}$ 損失性媒質あり

図6 電力伝送効率の変化

送効率が高くなった時を改善値として比較した。また、2.2節と同様に、 a と d は、システムのマッチングがとれる値とする。今回は、損失性媒質がない場合と、2.2節で用いた純水を充填したアクリル水槽を損失性媒質として挿入した場合について検討した。損失性媒質の影響がある場合を検証するため、図4より、損失性媒質の影響が顕著な $p=1\text{ cm}$ の場合を測定した。この時の測定結果を図6に示す。例として図6(a)の結果を表1に示す。

表1 伝送効率の変化
 $d=47.7\text{ cm}(a=5.0\text{ cm})$ 損失性質なし

軸ずれなし		改善値	
θ [°]	η [%]	c [cm]	η [%]
0	86.873	0.0	86.873
10	86.807	1.0	86.889
20	86.360	2.0	86.619
30	85.726	2.0	86.230
40	84.366	5.0	85.540
50	81.672	6.0	84.583
60	76.333	8.0	83.312

本結果より、角度ずれを有する場合、角度が大きくなるほど伝送効率の低減が見られるが、軸ずれによって伝送効率が改善していることがわかる。これより、角度ずれを有する場合でも、軸ずれによって送電側コイルから送出される磁力線を垂直に捉えることで、伝送効率の改善が可能であると考えられる。純水を伝送路内に挿入した場合でも同様の結果が得られたことから、損失性媒質が存在する場合でも軸ずれによる改善は有効であると考えられる。

3 あとがき

本研究では、RC-WPTシステムにおいて、損失性媒質が存在し角度ずれを有する場合の伝送特性について調べ、軸ずれによる伝送特性への影響について検討した。その結果として、損失性媒質が存在する場合でも共振器との間隔をあけることで効率よく伝送可能であった。また、角度ずれを有する場合でも、軸ずれによって送電側コイルから送出される磁力線を垂直に入射するように配置すれば伝送効率は改善

可能であることが分かった。

今後の検討課題としては、損失性媒質として水道水や海水などを用いて、導電率の異なる場合のシステムへの影響について検討していく予定である。

謝辞

本研究の測定に際し、ご協力いただいた山口大学院創成科学研究科情報通信システム工学研究室卒業(現住本鉄工所)の、Dr. Nur Syafiera Azreen binti Norodin氏に感謝を表す。

参考文献

- [1] 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), 2014-12.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffet, J. D. Jonopoulos, P. Fisher, and M. Soliačić, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, *SIENCE*, vol.317, pp.83~86, 2007-07.
- [3] 粟井郁夫, “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] 粟井郁夫, “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.
- [5] 粟井郁夫, 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.
- [6] 結城亨, 堀田昌志, 羽野光夫, 粟井郁雄, “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.
- [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, Japan)*, no.A1-7, pp.17~20, 2017-12.