

(a) 電気

スパイラル共振器対を用いた共鳴型無線給電システムに関する一検討
A study on Resonant-Type Wireless Power Transfer System with Paired Spirals

江藤 悟
Satoru Etoh

堀田 昌志
Masashi Hotta

羽野 光夫
Mitsuo Hano

山口大学大学院理工学研究科

1. まえがき

共鳴型無線給電(Wireless Power Transfer; WPT)システムは、電気自動車(EV)やカプセル型医療機器への送電や水中移動体などへの中距離給電に有効と考えられる[1]。当研究室でも、送受信端にそれぞれ1個のループコイルとスパイラル共振器を配置した磁気共鳴型WPTシステムについて検討し、本システムでは帯域通過フィルタの設計手法に基づく設計理論によりシステム整合条件等を求める事ができる事やWPTシステム内の構成要素に配置ずれが存在する場合においても、システム整合条件を再度見直して調整する事で電力伝送効率を大幅に改善できる事を示してきた[2], [3]。

しかしながら、本WPTシステムは共振器間の共鳴現象を利用している事を考えれば、電力伝送効率は各共振器が有するモードの電磁界分布に依存すると考えられ、伝送距離が長くなると電力伝送効率が顕著に低下した。

そこで、本研究ではシステムに用いる共振器に二枚のスパイラルコイルを重ねて構成したスパイラル共振器対(Paired Spiral)を用いる事で共振器のモードが持つ電磁界分布形状を操作し、伝送距離に対する電力伝送効率の低下を抑制できるか否かについて検討する。

2. 無線給電システムの構成

まず、これまでに当研究室で検討してきた共鳴型WPTシステム(以下では、従来のシステムと呼ぶ)は、1.0mm径の軟銅線を用いて作製した図1(a)に示す様な直径17.5cmの送受信ループコイル(Loop Coil)と共振周波数が19.9MHzとなるように調整した同図(b)に示す様な線間ピッチ $p=10\text{mm}$ 、スパイラル直径27.0cmのスパイラル共振器を図2に示す様に配置したものである。なお、システムの各構成要素は位置固定のために厚さ1.0cm、縦横 $50\times 50\text{cm}$ の発泡スチロール板(実測比誘電率1.01)に貼り付けて設置している。

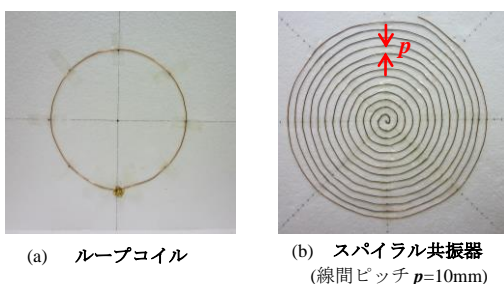


図1. WPTシステムの構成要素

本WPTシステムにおいて各要素における共振器間距離に対する電力伝送効率を測定した結果を図3に示す。なお、各伝送距離に対して電力伝送効率が最大となる様にループスパイラル間距離 a によりシステムの整合を取っている。同図より、共振器間距離が大きくなると電力伝送効率が低下している事がわかる。これはスパイラルコイルが有するモードの電磁界分布に起因するものであると考えられる。

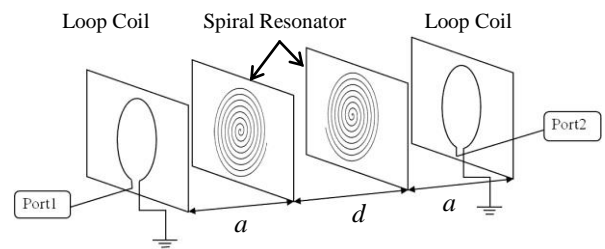


図2. 従来の共鳴型WPTシステム

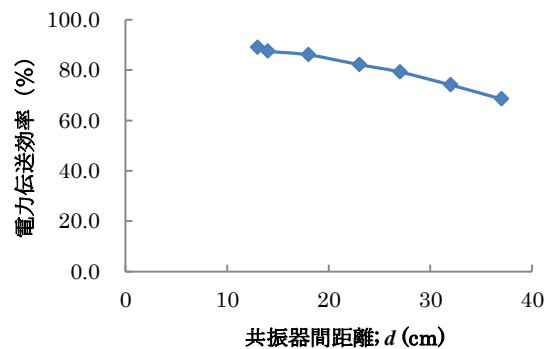


図3. 従来のWPTシステムにおける電力伝送特性

3. スパイラル共振器対を用いたWPTシステムの構築とその電力伝送効率

従来のWPTシステムでは図1に示す様にシングルスパイラル共振器を用いてきたが、共振周波数が等しい共振器を対にして用いる事で伝送距離に対する電力伝送効率を改善できる事が示されている[4]。そこで本研究では、共振周波数は等しいが線間ピッチとスパイラル直径の異なる二種類のスパイラル共振器を対にしたスパイラル共振器対を用いた場合の電力伝送特性について詳細に検討を行う。

今回用いたスパイラル共振器対は、図1(b)に示した線間ピッチ10mm、スパイラル直径27.0cmのスパイラルコイルと図4に示す様な共振周波数が等しく

19.9MHz となる様に調整した線間ピッチ $p=5\text{mm}$, スパイラル直径 19.5cm のスパイラルコイルを間隔 g 隔てて重ね合わせたものである. なお, 二つのスパイラルコイルは中心軸が一致する様に調整している. 以下では, このスパイラル共振器対を図 5 に示す様に送受信側にそれぞれ配置した WPT システムの特性を考察する. なお, 以下では, 同図中に示す様に各スパイラル共振器対のループコイル側をスパイラル 1, システム内側をスパイラル 2 と呼ぶ事にする.



図 4. スパイラル共振器
(線間ピッチ $p=5\text{mm}$)

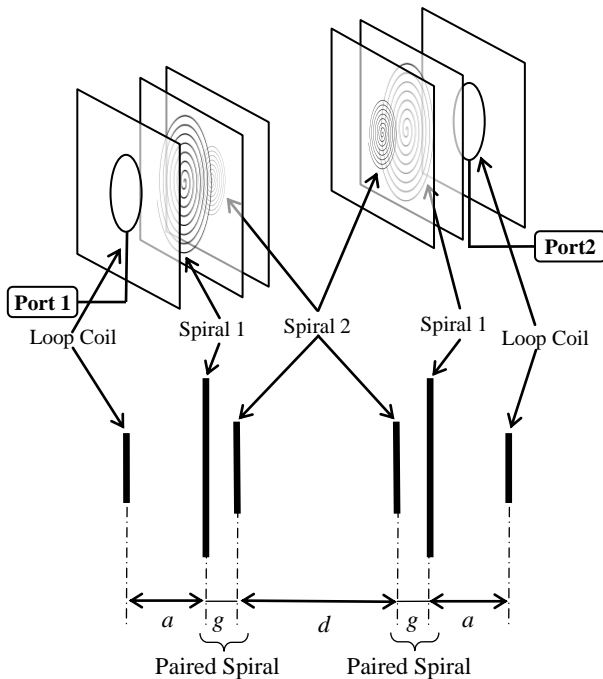


図 5. スパイラル共振器対を用いた WPT システム
(規格の異なるスパイラルを使用)

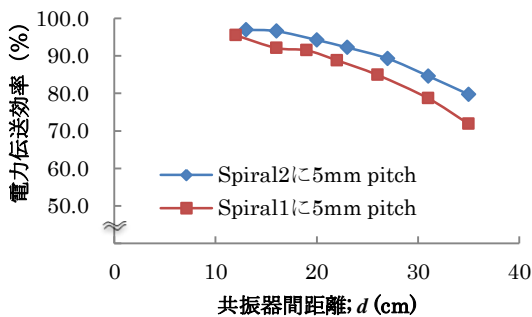


図 6. スパイラル共振器対の配置構成による電力伝送効率の変化

まず, 共振器対内における 5mm ピッチスパイラルと 10mm ピッチスパイラルの配置について検討する.

図 6 はスパイラル 1 に 10mm ピッチスパイラルを, スパイラル 2 に 5mm ピッチスパイラルを配置した場合とスパイラル 1 に 5mm ピッチスパイラルを, スパイラル 2 に 10mm ピッチスパイラルを配置した場合の電力伝送特性の測定結果である. ただし, 測定では全てスパイラル間距離 $g=1\text{cm}$ としている.

同図より, スパイラル 1 に 10mm ピッチを, スパイラル 2 に 5mm ピッチを配置した場合に安定して高い電力伝送効率で示す事がわかる. そこで, 以下の検討ではスパイラル 1 に 10mm ピッチ, スパイラル 2 に 5mm ピッチを配置して検討を行う事にする.

次に, スパイラルの巻き方向の組み合わせに関する検討を行う. ここで, 巻き方向とは入力側, 出力側ともにループコイル側からスパイラルを見たときのスパイラル外周から中心に向かう巻き方向であり, WPT システム内に存在する 4 個のスパイラルに対して, 表 1 に示す 4 種類の巻き方向組み合わせを適用した場合における電力伝送特性の測定結果を図 7 に示す. ここでも, 全てスパイラル間距離 $g=1\text{cm}$ としている.

表 1. スパイラルの巻き方向の組み合わせ

	組み合わせ	スパイラル 1	スパイラル 2
巻き方向	A	左巻き	左巻き
	B	左巻き	右巻き
	C	右巻き	左巻き
	D	右巻き	右巻き

同図より, パターン D, すなわち, スパイラル 1 および 2 が共に送受信側の各ループコイルから見て右巻きとすると電力伝送効率が顕著に向上している. また, その改善度は伝送距離が長くなるに従ってきわめて大きくなっている.

更に, スパイラル共振器対を構成するスパイラル 1 および 2 のスパイラル間隔 g を変化させた場合の電力伝送特性について検討した. 測定にあたっては, スパイラル 1 を 10mm ピッチ, スパイラル 2 を 5mm ピッチとし, スパイラルの巻き方向は表 1 中のパターン D の巻き方向とした. 図 8 に g を 1cm から 4cm まで変化させたときの電力伝送効率の測定結果を示す.

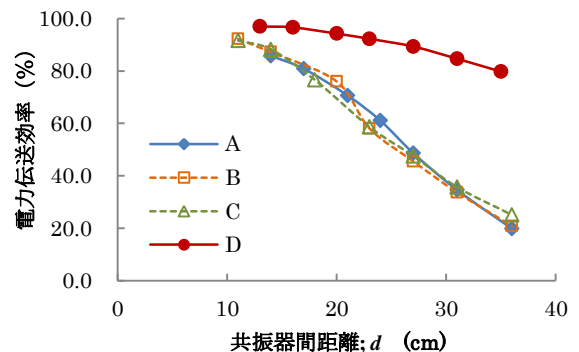


図 7. 巻き方向による電力伝送効率の変化

同図より、スパイラル共振器対内のスパイラル間隔 g を変化させると、 g が 1cm の場合よりも 2cm および 3cm の場合の方が伝送距離の長いところで電力伝送効率がわずかに上昇している。しかし、 g を 4cm まで広げると全体的に電力伝送効率は低下している。すなわち、スパイラル共振器対を構成するにはスパイラル間隔 g も適切に設計しなければならないと考えられる。

最後に、今回検討を行った共振器対を用いた WPT システムと従来のシングルスパイラルを用いたシステムの電力伝送特性の比較を行った結果を図 9 に示す。同図中の実線は、図 8 中のスパイラル間隔 $g=2\text{cm}$ および 3cm としたスパイラル共振器対を用いた場合の結果である。また、点線は共振器対構成に用いた線間ピッチ $p=5\text{mm}$ および 10mm のシングルスパイラルを単体で用いた従来システムの結果を示している。

同図より、シングルスパイラルを用いた場合には、線間ピッチが 5mm のスパイラルを用いた方が近距離では電力伝送効率が高くなっているが、伝送距離が長くなるに従って急激に効率低下が見られる。これは、スパイラルを密に巻く事でスパイラル近傍に分布する電磁界強度は強くなったが、スパイラル直径が小さくなった為に電磁界分布の空間的な広がりが抑制されたためであると思われる。この点に関しては、今後電磁界シミュレータ等によって各スパイラルコイルおよびスパイラル共振器対における固有モードの電磁界分布を求める事で詳細な原因究明を行っていきたいと考えている。

さらに、スパイラル共振器対をシステムの共振器として用いた場合の電力伝送効率は、シングルスパイラルと比較すると、伝送距離が短い場合でも従来システムの効率と同程度で、伝送距離が長くなった場合でも高い効率を維持している。これを電磁界分布の観点から考察すれば、スパイラル共振器対のモードが持つ電磁界分布は、伝送方向に広がりが広がったのではないと思われる。この確認のためには、左記に述べた電磁界シミュレータによる解析と共にシステム内での構成要素の位置ずれの影響を調べれば良いのではないかと考えられる。

4. あとがき

本研究では、スパイラル共振器対を用いた共鳴型無線給電システムについて検討し、スパイラル共振器対を用いたシステムでは電力伝送効率が今回測定した伝送距離の範囲においては、伝送距離にあまり依存せず、安定して高い効率を示す事を確認した。

また、今回の実験に用いたシステムの仕様では、送受信様ループコイルに近いスパイラル 1 に 10mm ピッチ（直径が大きい）を、システム内側のスパイラル 2 に 5mm ピッチ（直径が小さい）のスパイラルを用いた場合の方が高効率であり、電力伝送距離が長くなったでも電力伝送効率の低下が少ない事が分かった。

次に、システムの向上のため効率の良いスパイラルの巻き方向の組み合わせについて検討し、最も高効率

なのは、スパイラル 1 および 2 が共に送受信側各ループコイルから見て右巻きの場合である事を示した。

さらに、スパイラル 1 および 2 の間隔 g を変化させて電力伝送特性を測定し、スパイラル共振器対を構成する場合には、共振器間隔も重要な設計パラメータの一つとして考えるべきである事も示した。

今後の課題として、スパイラル共振器対近傍での電磁界分布をシミュレータ等で解析し、本研究で得られた結果の詳細な物理的検証を行う事および様々な形状を持つスパイラルコイルを組み合わせた共振器対を用いた場合の電力伝送特性を検討し、外部環境条件に対応した共振器対を見いだす事等が挙げられる。

参考文献

- [1] 吉田隆 編, “ワイヤレス・エネルギー伝送技術の最前線,” 株式会社エヌ・ティー・エス, 2011.
- [2] 小森, 栗井, “共鳴型ワイヤレス給電システムの簡易設計,” 信学技報, WPT2010-01, pp.1-7, 2010-04.
- [3] 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 HISS 論文集, no.B-3, pp.220-223, 2011-11.
- [4] 栗井, 澤原, 石崎 “デュアルスパイラル共振器の作る電磁界とその WPT システムへの応用,” 信学技報, WPT2012-20, pp.29-34, 2012-08.

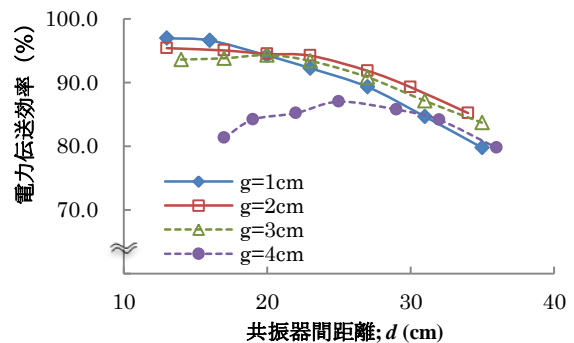


図8. スパイラル間距離 g と電力伝送効率の変化

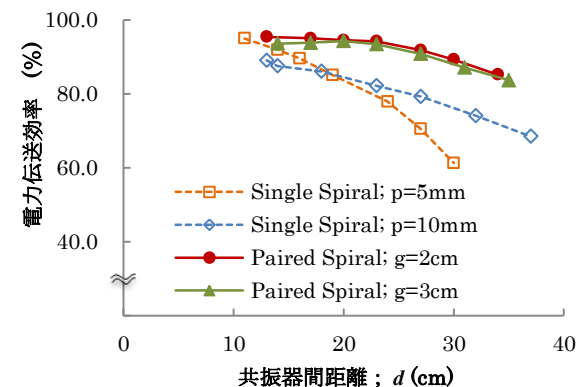


図9. 従来システム(Single Spiral)と共振器対を用いたシステムの電力伝送効率比較