

位置ずれを伴う共鳴型無線給電システムにおける 伝送効率低下の主要因に関する検討

Study on Decline Factor in Power Transfer Efficiency for Misaligned Resonant-type Wireless Power Transfer System

原田 晃希 堀田 昌志 羽野 光夫
Koki Harada Masashi Hotta Mitsuo Hano

山口大学大学院理工学研究科

1. まえがき

昨今、非接触型の無線給電システム構築に関する研究が活発に行われており、近距離電力伝送に適した電磁誘導方式を利用した無線給電システムが実現化され始めている。これに対して、中距離電力伝送に適した共振器間の共鳴を利用する共鳴型無線給電システムに関する性能改善に関する研究も活発に行われている[1]-[4]。また、共鳴型無線給電システムにおいては、フィルタ設計理論に基づいた効率的なシステムを構築法も示されている[2], [3]。

この共鳴型無線給電システムを実用化するためには、システム内の共振器間に生じる位置ずれの影響をできるだけ容易かつ効率的に除去する必要があり、我々のグループでも、位置ずれによる伝送効率の低下を改善する簡易手法についての検討を行ってきた[4]。

本研究では、位置ずれによる伝送効率低下の主要因を検討することで、より一層の伝送効率改善手法の指針を探求する。

2. 共鳴型無線給電システムの構築

本研究で構築した無線給電システムの基本形は、1.0mm 径の銅線を用い、直径 17.5cm の送受電用ループコイルと、線間距離 1.0cm で直径 26.5cm (共振周波数 20.3MHz) のスパイラル共振器をそれぞれ 1 組ずつ作製し、厚さ 1.0cm で 50.0×50.0cm の発泡スチロール板に貼りつけた。そして、図 1 で示す様にループコイルとスパイラル共振器の中心軸が一致する様に各構成要素を配置した。なお、入出力特性は、システムの入出力端に接続したベクトルネットワークアナライザ(VNA)により測定する。

2.1 構成要素の特性とシステム整合

位置ずれの無い本システムにおいて、効率的に無線送電できる構造を設計する際に必要となるパラメータ

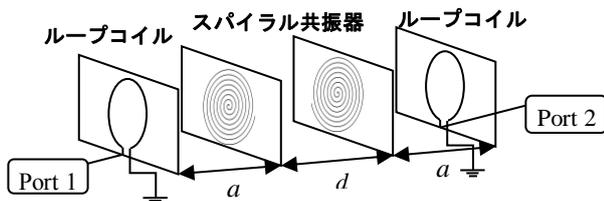


図 1 共鳴型無線給電システム

は、無負荷 $Q(Q_u)$ と外部 Q の逆数で表される外部 $k(k_e)$ 及び共振器間の結合係数 k である。これらは、本システムに接続した VNA で測定した S パラメータ (S_{11} および S_{21}) から求めることができる[3], [4]。今回、実験に用いたシステムの無負荷 $Q(Q_u)$ および外部 $k(k_e)$ の測定結果を図 2 および 3 に示す。図 2 より、 Q_u には一カ所ディップが見られてはいるが、ループコイルとスパイラル共振器間距離 a が長くなると共に増加し、 a がある一定距離以上になると定常値に落ち着く傾向にある。また、図 3 の k_e は a の増加と共に減少していることが分かる。

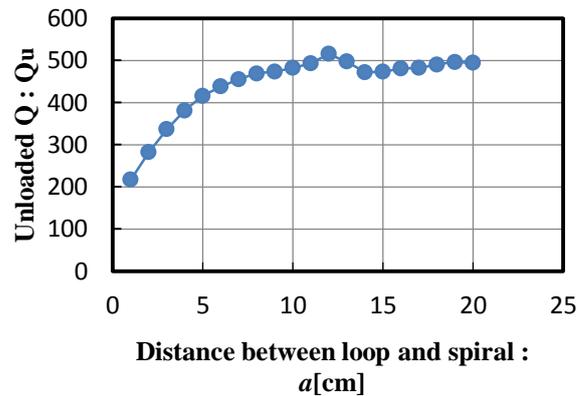


図 2 スパイラル共振器の無負荷 Q

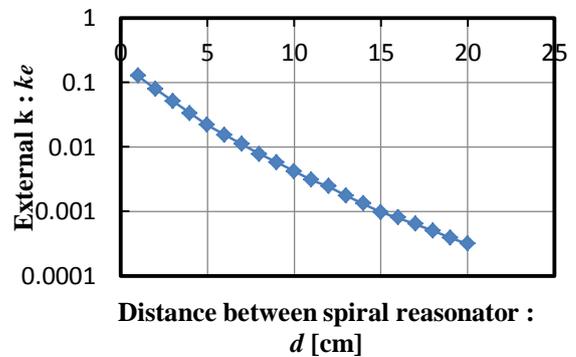


図 3 スパイラル共振器の外部 $k : k_e$

ここで、本システムの Q_u はループコイルとスパイラル共振器間の距離 a が大きくなるに従って増加し、共振器固有の値に漸近する。また、 k_e は、 a が大きくなるにつれて急激に減少する。さらに、共振器間の結合係数 k は共振器間距離 d の増加と共に急激に減少する。この時、 $k=k_e$ となる a と d に設定することで、システム整合が取れ効率の良い無線給電システムを実現することができる。表 1 に本実験で用意したスパイラル共振器およびループコイルを用いたシステムでの整合条件を示しておく。

表 1 本システムの整合条件

a [cm]	d [cm]
1.0	15.0
2.0	18.0
3.0	22.0
4.0	26.0
5.0	30.0
6.0	36.0

2.2 位置ずれを伴う共鳴型無線給電システム

ここで、本無線給電システムを、電気自動車や移動体など、産業機械等へ応用する場合、図 4 に示す様に送電側のループコイルとスパイラル共振器（送電ユニット）と受電側のループコイルとスパイラル共振器（受電ユニット）の中心軸に位置ずれが生じる可能性が高い。また、位置ずれを伴う無線給電システムでは、電力伝送効率が低下することが報告されており、この電力伝送効率低下の原因を明らかにすることが、システムの性能改善法を考案する際には非常に重要となる。そこで、今回は、送電側と受電側ユニットの中心軸間に位置ずれ c が存在する場合における、システム内部の各種パラメータを詳細に調べ、電力伝送効率低下の原因について検討する。

3. 位置ずれを伴うシステムの電力伝送特性

以下では、位置ずれを含む共鳴型無線給電システムについて検討するが、ここでは、位置ずれの無い場合にループ・スパイラル間距離 $a=1.0\text{cm}$ および 3.0cm で

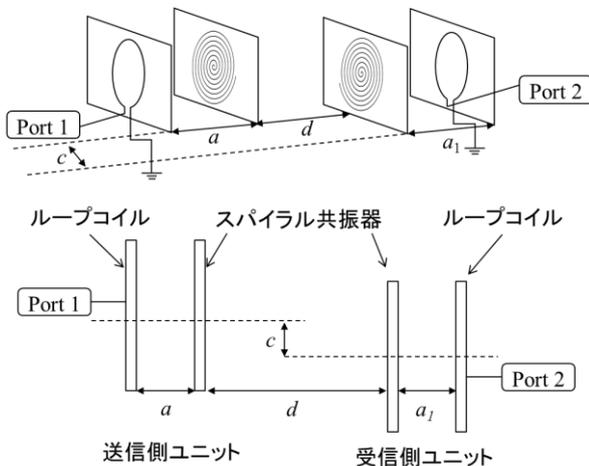


図 4 位置ずれを含む共鳴型無線給電システム

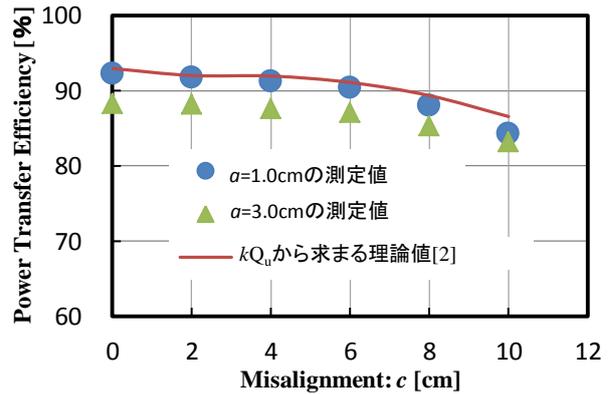


図 5 位置ずれの変化に対する伝送効率

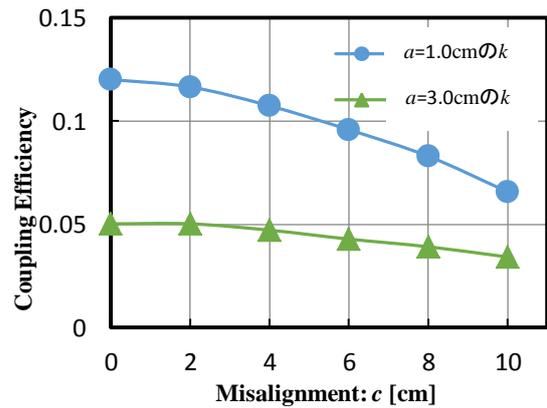


図 6 位置ずれ量の変化に対する結合係数

システム整合の取れる、共振器間距離 $d=15.0\text{cm}$ および 22.0cm としたシステムについて位置ずれの依存性を測定した結果を図 5 に示す。

まず、 $a=1.0\text{cm}$, $d=15\text{cm}$ の場合の測定値 ● を見ると、位置ずれがない ($c=0.0\text{cm}$) 場合に 90% を超えていた伝送効率が、位置ずれが増加し $c=10.0\text{cm}$ となると 85% 程度まで低下している。また、 $a=3.0\text{cm}$, $d=22.0\text{cm}$ の場合の結果 ▲ は、位置ずれがない場合に 88% 程度であった伝送効率が $c=10.0\text{cm}$ では 83% 程度まで低下している。

3.1 位置ずれによる電力伝送効率低下の要因検討

次に、位置ずれによる伝送効率低下の原因を探るべく、位置ずれが存在する場合における、システム内の各種パラメータ値を測定した。すると、システムの共振周波数が僅かにシフトしていること、および、位置ずれ量が増えるに従って共振器間の結合係数 k が低下することが分かった。図 6 に $a=1.0\text{cm}$, $d=15.0\text{cm}$ および $a=3.0\text{cm}$, $d=22.0\text{cm}$ の場合の位置ずれ量 c に対する結合係数の測定結果を示す。

同図を見ると $a=1.0\text{cm}$, $d=15\text{cm}$ の場合の結合係数 ● は、位置ずれ量 c の増加と共に低下している。また、 $a=3.0\text{cm}$, $d=22.0\text{cm}$ の時の結合係数 ▲ も、前者ほどではないが緩やかに低下している事が分かる。

ここで、 k_e と Q_u は送受電ユニット内の構成要素固有の特性とその配置により定まる量であり、位置ずれには依存しない。したがって、位置ずれが存在する場合

には、送受電ユニットで、それぞれ、 $k_e \neq k$ となりシステムの整合が崩れていると考えられる。また、本システムの伝送損失は kQ_u の逆数に依存することが示されている[2]。したがって、 k_e と k また Q_u に依存する伝送効率が位置ずれによって低下した主要因は、 k の低下によるものと推測される。さらに、本無線給電子システムの伝送効率は文献[2]に示されている kQ_u 積から求まる伝送損失の理論値から計算する事ができ、結合係数 k が低下するとシステムの伝送損失が増加し、電力伝送効率は低下することが示されている。そこで、図 5 中に、文献[2]の式 (19) から求めた電力伝送効率の理論値を実線で示している。図 5 中の結果より、低下した k を用いて計算した電力伝送効率の理論値と測定値が良く一致していることが分かる。ただ、位置ずれが大きくなった際に理論値と測定値の差が大きくなっている。

ここで、位置ずれ量の増加に伴って共振周波数が僅かにシフトすることも確認されているので、位置ずれが大きくなった場合における電力伝送効率の低下の要因としては、結合係数の低下のみならず、共振周波数のシフトなども含まれていると考えられる。

3.2 位置ずれによる電力伝送効率低下の改善検討

本無線給電システムの位置ずれによる電力伝送効率低下の主要因は、位置ずれによる共振器間結合係数の低下による、システム整合の崩れおよびシステムの伝送損失増加によるものである可能性が明らかとなったが、次に、低下した電力伝送効率の改善法について示す。一般に、本システムでの整合が崩れた場合、送・受

電ユニットでそれぞれ整合を取り直す必要がある。具体的には、送・受電ユニットで、それぞれのループコイルとスパイラル共振器間の距離を調節し、各ユニットの k_e を低下した結合係数 k と等しくなる様に設定し直す必要がある。

しかし、実際に本システムを産業応用するためには出来るだけ簡便な方法で電力伝送効率改善をはかることが望まれる。そこで、当研究室では、受電ユニットにおけるループコイルとスパイラル共振器間距離 a_1 のみを調節して電力伝送効率を改善する手法を提案している[4]、[5]。今回も、本簡易型伝送効率改善法を適用し、その改善度について検討する。

表2 $a=1.0\text{cm}$ の時の各位置ずれにおける a_1 の最適値と k_e および結合係数

$c[\text{cm}]$	$a_1[\text{cm}]$	k_e	k
2.0	2.0	0.079102	0.116593
4.0	2.0	0.079102	0.107428
6.0	2.8	0.057345	0.095843
8.0	3.0	0.051431	0.082983
10.0	3.4	0.044531	0.065727

表3 $a=3.0\text{cm}$ の時の各位置ずれにおける a_1 の最適値と k_e および結合係数

$c[\text{cm}]$	$a_1[\text{cm}]$	k_e	k
2.0	3.0	0.051431	0.050232
4.0	3.0	0.051431	0.047149
6.0	4.0	0.033270	0.042824
8.0	4.0	0.033270	0.039103
10.0	5.0	0.021767	0.034141

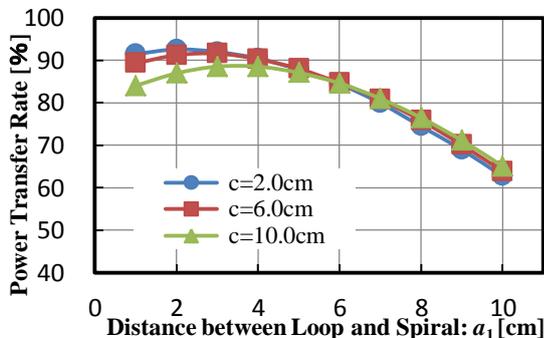


図7 $a=1.0\text{cm}$ の時の位置ずれ量に対する伝送効率の最適値

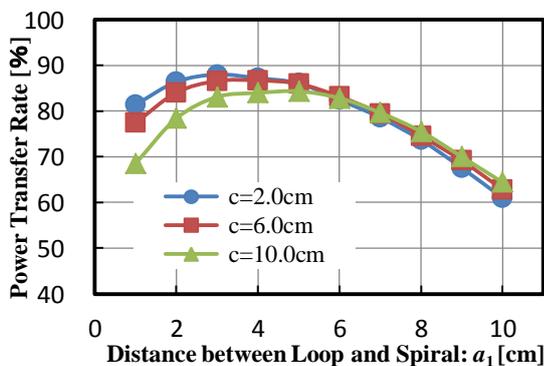


図8 $a=3.0\text{cm}$ の時の位置ずれ量に対する伝送効率の最適値

まず、本システムの電力伝送効率は kQ_u の逆数から求まる伝送損失に依存しており、 k の低下は伝送効率の低下を引き起こす。そこで、受電ユニットの Q_u に着目し、 k の低下を補うだけ Q_u が大きくなれば伝送損失による電力伝送効率の低下を改善できると考えられる。ここで、図 2 より、受電ユニットの Q_u を大きくするには、受電ユニットのループコイルとスパイラル共振器間の距離 a_1 を長くする必要がある。また、図 3 より、 a_1 を長くすれば、受電ユニットの k_e が小さくなり低下した k に近づく。これらの相互効果によって受電ユニット内での整合が改善されると考えられる。

このように、受電ユニットの整合を改善するだけであれば、 $k_e=k$ となるように a_1 を調整すればよいことになる。そこで、図 7 および 8 に示す様に $a=1.0\text{cm}$, $d=15.0\text{cm}$ および $a=3.0\text{cm}$, $d=22.0\text{cm}$ で各位置ずれ量を持つシステムで受電側ユニットのループ・スパイラル間距離 a_1 を変化させて伝送効率の測定を行うと、位置ずれが生じても伝送効率が最大となる a_1 の最適値が見出せた。なお、図中には位置ずれ量 $c=2.0\text{cm}$, 6.0cm および 10.0cm の場合の結果のみを示している。また、各位置ずれ量に設定した際の a_1 の最適値における k および k_e

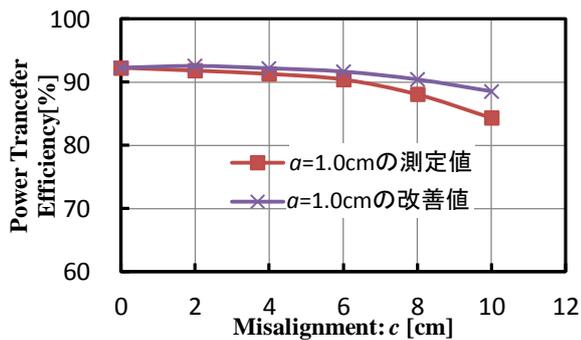


図9 $a=1.0\text{cm}$ の時の各位置ずれにおける最適値を用いた伝送効率

の値を表2および3にまとめた。同表を見れば、 a_1 の最適値で必ずしも k と k_e は等しい値とはなっていないが近い値となっているのが分かる。これより Q_0 が大きくなった場合の方が整合の改善される効果が大いと考えられる。

ここで、 $a=1.0\text{cm}$ 、 $d=15.0\text{cm}$ および $a=3.0\text{cm}$ 、 $d=22.0\text{cm}$ の時の各位置ずれにおける a_1 の最適値を用いて整合を取り直した測定結果をそれぞれ図9および図10に示す。まず、 $a=1.0\text{cm}$ 、 $d=15\text{cm}$ の場合の改善値 \times を見ると、位置ずれが発生する $c=2.0\text{cm}$ から終わりの $c=10.0\text{cm}$ まで全体的に伝送効率が高くなっていることが分かる。また、位置ずれ量が大きくなるほど両者の差も明らかに開いている。次に、 $a=3.0\text{cm}$ 、 $d=22.0\text{cm}$ の場合の改善値 \bullet は、僅かではあるが測定値 \blacktriangle より高くなっている。しかし、 $a=1.0\text{cm}$ 、 $d=15\text{cm}$ の場合の変化量に比べ全体的に大きな改善は見られなかった。また、両者とも位置ずれがない($c=0.0\text{cm}$)場合の伝送効率までの完全な回復は見られなかった。

すなわち、本伝送高効率の簡易改善法は単に受電側ユニットの再整合を行った訳ではなく、他の要因が伝送効率改善に大きく寄与していると考えられる。ここで、 a_1 を a よりも大きく設定することで変化する量として、無負荷 Q がある。無負荷 Q は a_1 の増加に伴い、増加する傾向が見られる。したがって、本改善法では、 k と k_e が近接することによる受電端における整合条件の改善および a_1 が長くなることによる無負荷 Q の増加

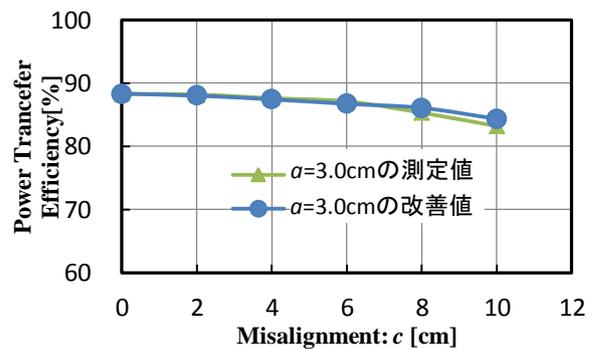


図10 $a=3.0\text{cm}$ の時の各位置ずれにおける最適値を用いた伝送効率

の相乗効果によると推察される。

3. あとがき

共鳴型無線給電システム内に位置ずれが存在した場合、そのずれによる伝送効率の低下の主要因は共振器間の結合係数低下にあることを実験的に示した。

ここで、位置ずれに伴いシステムの共振周波数に僅かながらシフトが確認されている。今後は、この共振周波数のシフトなどが伝送効率に及ぼす影響についても引き続き検討していきたい。

参考文献

- [1] 栗井郁雄 他, ワイヤレス・エネルギー伝送技術の最前線, 吉田隆 (編), 株式会社エヌ・ティー・エス, 東京, 2011.
- [2] 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”, 電学論C, 130号, no.12, pp.2192~2197, 2010.
- [3] 小森琢也, 栗井郁雄, “共鳴型ワイヤレス給電システムの簡易設計”, 電学論C, 130号, 12巻, pp.2198~2203, 2010.
- [4] 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論文集, no.B-3, pp.220~223, 2011.
- [5] 堀田昌志, 結城亨, 春山隆行, 羽野光夫, “軸ずれを有する共鳴型無線給電システムの伝送特性改善法に関する一検討”, 信学論(C), vol.J97-C, no.12, 2014-12. (印刷中)