

(a)電気 電磁波工学

共鳴型無線給電システムの伝送効率改善に関する検討
Setup Tolerance for Resonant-type Wireless Power Transfer

結城 亨
Tohru Yuki

堀田 昌志
Masashi Hotta
山口大学理工学研究科

羽野 光夫
Mitsuo Hano

栗井 郁雄†
Ikuo Awai †

† (株) リューテック

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、電磁誘導方式などを利用したシステムが製品化されている。電磁誘導方式は、近距離送電においては優れた送電効率を実現できるが、送・受信部が離れるにつれて、受信部に到達する磁界が広がり、強度も弱くなりため実用的な給電可能距離を延ばすことは困難である[1]。これに対して、送・受信部間に共振器を配置して、この共振器間の共鳴を利用して送電する共鳴型無線給電システムが提案され、フィルタ設計理論に基づいて効率的なシステムを構築可能であることが示されている[2]。本システムでは、適切な設計を行うことにより、電磁誘導方式に比べて実用的送電距離を延ばすことが可能である。本研究では、実用性の観点から、共鳴型無線給電システム中の共振器に位置ずれが発生した場合でも、設計理論に基づいて適切に各部のパラメータを設定すれば伝送効率を大幅に改善できることを報告する。

2. 無線給電システムの設計

本研究では、まず 1.0mm 径の銅線を用い、直径 17.5cm の送受信用ループコイルと、線間距離 1.0cm で均等巻きした直径 25.5cm (共振周波数 21.5MHz) のスパイラル共振器をそれぞれ 1 組ずつ作製し、位置固定のために、それらを厚さ 1.0cm の発泡スチロール板に貼りつけて、図 1 に示す様に配置することで共鳴型無線給電システムを構築した。この際、2 つのスパイラル共振器は一方から見たとき、スパイラルの巻き方向が互いに逆方向になる様に配置した。また、各特性の測定には本システムの Port 1 及び 2 はベクトルネットワークアナライザ (VNA) に接続して行う。

本システムを設計する上で必要となるパラメータはループコイルとスパイラル共振器からなる共振系の無負荷 Q、外部 Q 及び共振器間の結合係数である。本章ではそれらの特性の測定法及びシステムの整合について説明する。

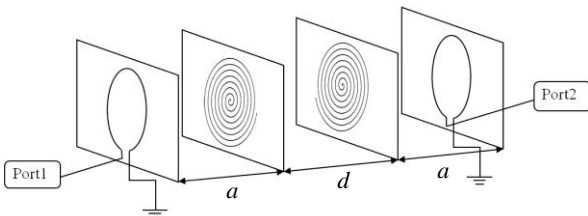


図 1 測定系

2.1 Q 値の測定

共振器の無負荷 Q 及びループコイルと共振器間の外部 Q を測定するために図 1 中のループコイルとスパイラル共振器を 1 組だけ用いて図 2 に示す様に測定系を構築した。

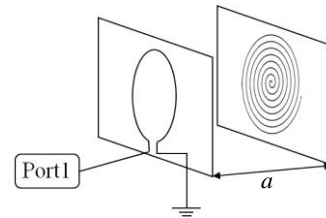


図 2 Q 値の測定系

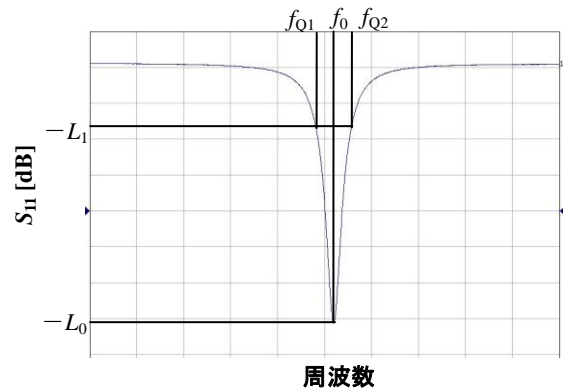


図 3 S₁₁ 周波数特性からの各値の読み方

この測定系によって振幅反射係数 S₁₁ を測定すると図 3 に示す様な周波数特性が得られた。この S₁₁ の最小値を -L₀ とし、そのときの周波数を共振周波数 f₀ とし、次式より L₁ を求める。

$$L_1 = -10 \log \left(\frac{10^{-\frac{L_0}{20}} + 1}{2} \right) \quad (2.1)$$

そして、同図に示す様に周波数特性曲線上において S₁₁ が -L₁ となる 2 点の周波数 f_{Q1} 及び f_{Q2} (但し f_{Q1} < f_{Q2}) を読み取り、次式から共振系の負荷 Q (Q_L) を得る。

$$Q_L = \frac{f_0}{f_{Q2} - f_{Q1}} \quad (2.2)$$

次に、VNA の表示モードをスミスチャート型に切り替えて S₁₁ の軌跡を観測する。その軌跡がチャートの原点を取り囲んでいれば(2.3)式を、囲んでいなければ(2.4)式を用いて β_e を求める。

$$\beta_e = \frac{1 + 10^{-\frac{L_0}{20}}}{1 - 10^{-\frac{L_0}{20}}} \quad (2.3)$$

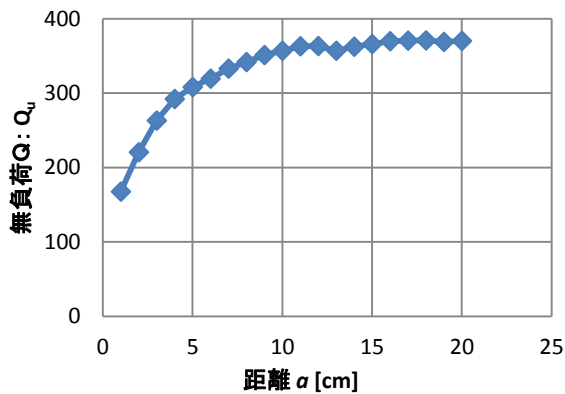
$$\beta_e = \frac{1 - 10^{-\frac{L_0}{20}}}{1 + 10^{-\frac{L_0}{20}}} \quad (2.4)$$

以上の手順から求めた Q_L および β_e を用いることで、無負荷 Q (Q_u) および外部 Q (Q_e) を次式より求めることができる。

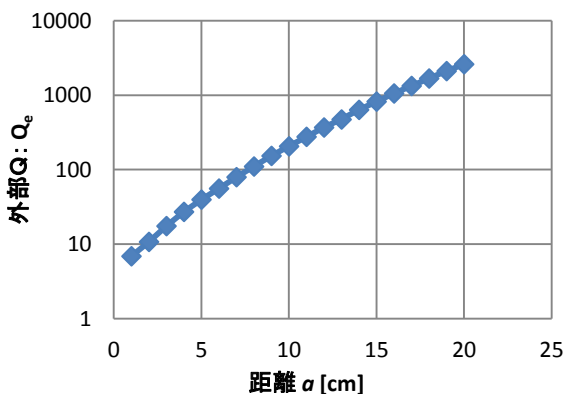
$$Q_u = Q_L(1 + \beta_e) \quad (2.5)$$

$$Q_e = Q_L \left(1 + \frac{1}{\beta_e}\right) \quad (2.6)$$

図4に、ループコイルとスパイラル共振器間の距離 a [cm] を変化させた時の各 Q 値を測定した結果を示す。(a)より、距離 a の増加に伴い無負荷 Q も増加するが、十分に大きくなると変化が見られなくなることがわかる。無負荷 Q は本来スパイラル共振器内での損失に関係した値なので、無負荷 Q に変化が見られる距離ではループコイルによって共振器の共振に影響があるものと考えられる。また、(b)より距離 a の増加に伴い外部 Q も増加していることがわかる。



(a) 無負荷 Q



(b) 外部 Q

図4 共振系の Q 値の測定結果

2.2 結合係数

次に、2つのスパイラル共振器間の結合係数を求めるために図5に示す様に $a=15.0\text{cm}$ で一定とし、共振器間距離 d を変化させる測定系を用いて振幅透過係数 S_{21} を観測した。その結果、図6に示す様に2つに分離した共振周波数 f_{c1} 及び f_{c2} (但し $f_{c1} < f_{c2}$) が観測された。この共振周波数より結合係数 k を次式として求めた。

$$k = \frac{f_{c2}^2 - f_{c1}^2}{f_{c2}^2 + f_{c1}^2} \quad (2.7)$$

図5に示す2つのスパイラル共振の器間の距離を d [cm] としたときの測定結果を図7に示す。同図より、共振器間距離 d の増加にもない結合係数は低下していくことがわかる。

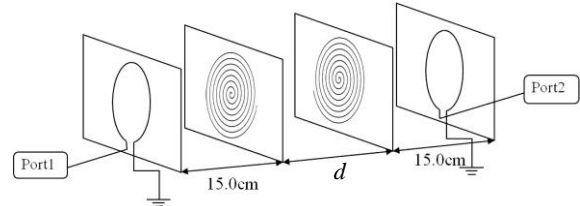


図5 結合係数の測定系

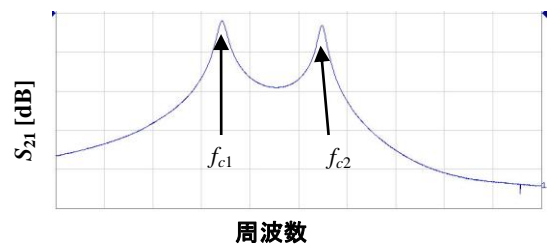


図6 S_{21} の共振周波数の分離

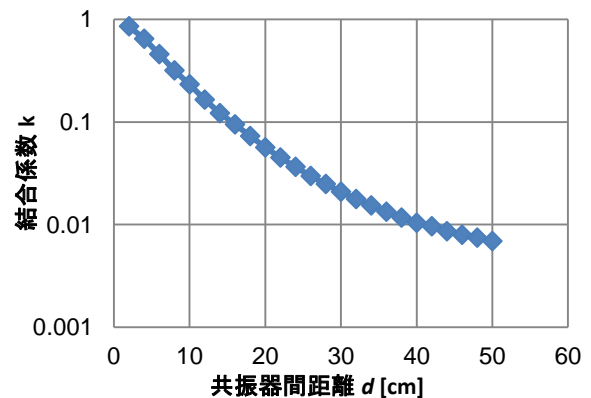


図7 共振器間結合係数

2.3 伝送効率

本システムはその等価回路を考慮すれば、2段帯域通過フィルタ(BPF)に相当すると考えられる。従って、回路の整合は外部 Q と共振器間の結合係数との間に次式の関係がある時成立すると考えられる。

$$k = \frac{1}{Q_e} \quad (2.8)$$

そこで、外部 Q の逆数を外部 k (k_e) という値でおき、外部 k と結合係数の値が一致するときのループスパイラル間距離 a と共振器間距離 d を選択することで、整合のとれた伝送効率の良いシステムを実現できると考えられる。図4(b)の外部 Q から外部 k を求めた結果を図8に示す。同図より、例えば、 $a=1.0\text{cm}$ としたときの外部 k は $k_e=0.15$ である。そこで、図7の結果から結合係数 k が 0.15 となる共振器間距離 d を読み取ると $d=13.0\text{cm}$ であることがわかる。

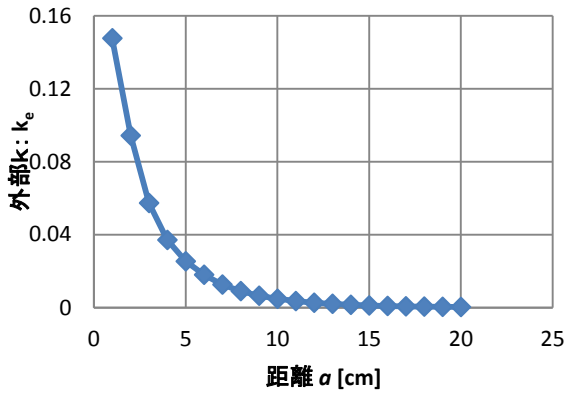


図8 外部k

整合のとれたシステムにおいて、その伝送損失は以下の式によって表せる[3].

$$L = 4.343 \frac{1}{w} \sum_{i=1}^2 \frac{g_i}{Q_{u_i}} \quad (2.9)$$

この式中の w は比帯域であり、本システムが相当するバターワース型の2段BPFにおいては比帯域 w と結合係数 k との間に以下の関係がある.

$$w = \sqrt{2k} \quad (2.10)$$

したがって、測定した無負荷Qと結合係数から伝送損失を求めることができ、同時にシステムの伝送効率の理論値を導くことができる. $a=1.0\text{cm}$ 及び $d=13.0\text{cm}$ としたシステムにおける伝送効率の理論値と実際にシステムを構築して測定した結果を表1に示す.

表1 伝送効率

	理論値	測定値
伝送効率[%]	92.3	93.5

この結果より伝送効率の理論値と測定値は比較的良く一致している.

3. 位置ずれと伝送効率の改善

これまで説明してきたシステムは送信側と受信側の中心軸が一致していることを前提としてきた.しかし、無線給電システムの実用性の観点から考えれば送信側と受信側はそれぞれ別システムのシステムに属することが多く、両者の中心軸間に図9に示す様な位置ずれを含む場合が多いと考えられる.そこで本研究では、送信側と受信側との間で位置ずれがある場合におけるシステムの伝送効率とその改善法を検討する.

位置ずれが存在しない場合において整合のとれているループ-スパイラル間距離 $a=a_1=1.0\text{cm}$ 、共振器間距離 $d=13.0\text{cm}$ のシステムにおいて送・受信部の中心軸間に位置ずれが生じたときの伝送効率を測定した.その結果を図10に示す.同図より、位置ずれが大きくなるに従って伝送効率が低下していることがわかる.

次に、位置ずれが存在するシステムで、送信側のループ-スパイラル間距離 a を 1.0cm で固定したまま受信側の a_1 を変化させて伝送効率測定を行った.その結果を図11に示す.なお、同図は位置ずれ $c=6.0\text{cm}$ 及び

$c=10.0\text{cm}$ の場合において a_1 を変化させたときの結果である.同図を見ると、 $c=6.0\text{cm}$ の場合 $a_1=3.0\text{cm}$ 付近で、 $c=10.0\text{cm}$ の場合 $a_1=5.0\text{cm}$ 付近で伝送効率が極大値をとっており、位置ずれによって a_1 に最適値が存在することを確認できる.また、同様の傾向が図10中で示した各位置ずれ量の場合において確認できた.

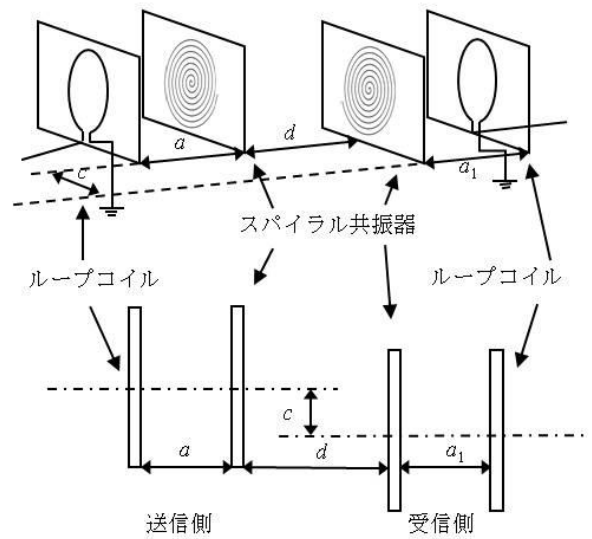


図9 送受信間に位置ずれの生じたシステム

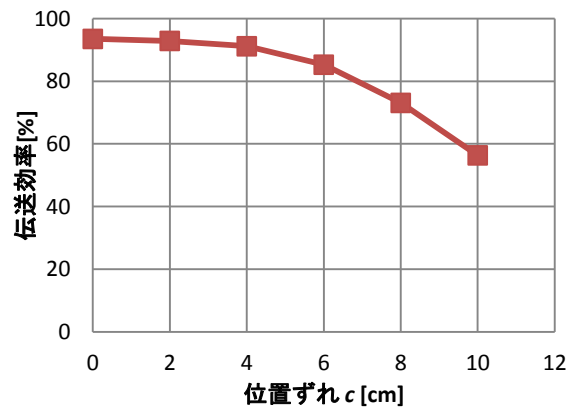


図10 位置ずれの変化に対する伝送効率

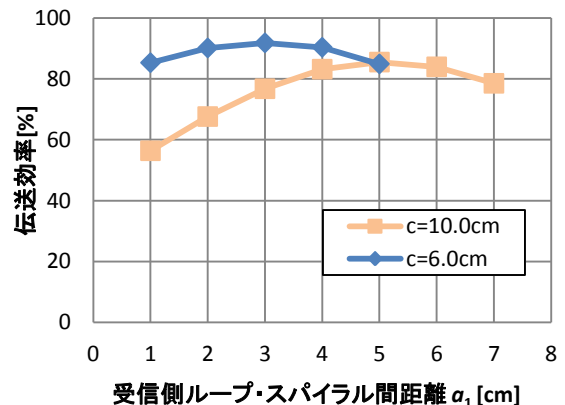


図11 a_1 の変化に対する伝送効率

各位置ずれ量における伝送効率改善の結果をまとめたものと、図 10 にも示した $a_1=1.0\text{cm}$ に固定したときの伝送効率とを比較したものを図 12 に示す。同図を見ると、位置ずれによる伝送効率の低下を a_1 の調整によって改善できたことがわかる。また、同図の最適値が得られた際の a_1 の値を表 2 に示す。

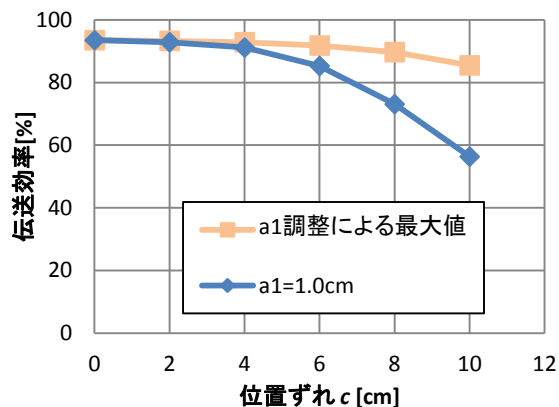


図 12 受信側の調整による効率改善

表 2 位置ずれ量に対する a_1 の最適値

c [cm]	a_1 [cm]
2.0	2.0
4.0	2.0
6.0	3.0
8.0	4.0
10.0	5.0

4. あとがき

本研究では、共鳴型無線給電システムについて検討した。システムの送・受信部の中心軸間に位置ずれが生じることはシステムの実現において問題となることが考えられる。そのためにもまず、提案されているフィルタ理論によるシステム設計法に基づき実際にシステムを構築し、そのシステムにおける伝送効率が理論値とよく一致していることを確認した。そして、共鳴型無線給電システム内に位置ずれが生じた場合、その伝送効率が低下することを確認した。最後に、フィルタ設計理論に基づく調整を行うことで伝送効率の改善が可能であることを実験的に示した。

今後は、共振器の形状の最適化により更なる高効率伝送及び伝送距離の延長を目指したい。

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, 2010.
- [3] 栗井, 小森, 石田, 石崎, “共鳴型ワイヤレス電力伝送に用いる共振器の比較検討”, 信学総大, BS-9-8, 2010.