

---

# 磁界共鳴方式電力伝送用低損失アンテナの検討

## Analysis of Low Loss Antenna for Wireless Power Transfer that Uses Magnetic Resonant Coupling

藤枝 智之, 鈴木 雅美

Tomoyuki Fujieda, Masami Suzuki

---

**要旨** 我々は磁界共鳴方式を用いたワイヤレス電力伝送システムの開発に取り組んでいる。システム実現には電源回路, 整合回路, 受電回路などの電気回路技術, 空間と電力をやり取りするためのアンテナ技術が必要であり本報告ではアンテナ技術に焦点を当て論じる。磁界共鳴方式ワイヤレス電力伝送に用いられるアンテナには高Q値が要求される。この方式は共振現象を利用することでアンテナ間ギャップが大きく結合が弱くなり送電効率が悪化するような場合においても高Q値アンテナを用いることで効率悪化を防ぎ伝送距離を大きく取れることを特徴としている。このことは古くから知られている電磁誘導方式では10cm程度が実用的な伝送距離範囲であるが, 磁界共鳴方式では2mもの伝送が可能との発表もありその応用範囲の広さに注目が集まっていることにかがいが知れる。本報告では磁界共鳴方式に用いるアンテナにて高Q値を実現するための要件を電磁界シミュレーションにて検討し実験により確認を行った。これにより得られた知見に基づき来るべきEV(電気自動車)に向け, 薄型化したアンテナを試作し実験にて検証した。

**Summary** The loss-factor is analyzed in this paper for the antenna that uses the magnetic resonance coupling method. It reveals that the influence of the dielectric loss is larger than the radiation loss and the conductive loss in the electro-magnetic simulation. It is necessary to use a low loss dielectric for high efficient antenna. And forming the groove guide for wiring on the surface of the dielectric, we obtain the low tolerance of manufacturing the antenna.

**キーワード** : 磁界共鳴方式, 誘電損, 無線電力伝送, 電気自動車

---

### 1. はじめに

現在, ワイヤレス電力伝送に関する研究が盛んに行われている<sup>(1)(2)</sup>。その中でワイドギャップ, 位置ずれに強いなどの特色を持つ磁界共鳴を用いた電力伝送方式が電気自動車への応用として期待されている。この方式に用いられるアンテナに関しては高Q値が要求される。本報告では磁界に着目し磁界結合型アンテナを取り上げた。このタイプのアンテナにて高Q値を実現するためには高インダクタンス, 低損失が必要とされる。インダクタンス値の増加にはワイヤを長くすることが考えられるが, ワイヤ長が変わると共振周波数の変化や銅損の増加等のトレードオフの解消が必要となる。ゆえに低損失なアンテナを如何にして実現するかが非常に重要となる。以上より本報告ではアンテナ損失の要因の割合をシミュレーションにより明らかにした。

アンテナの共振周波数に着目すると, ワイヤピッチなどのアンテナパラメータにより共振周波数が変化することが知られている。送受電に使用される一対のアンテナの共振周波数は等しいことが高効率な電力伝送をする上で必要である。そのため製作誤差に起因する共振周波数のずれは極力少なくすべきである。一方, アンテナの機械的強度の確保も実用化する上で課題の一つである。しかし製作誤差, 機械的強度などを考慮してワイヤ支持材まで含めて検討された報告はまだ少ない。これらを実現するため誘電体側面にワイヤ固定用の溝を形成しワイヤピッチのばらつき等の製作誤差を抑える構造を採用した。

最後に, 電気自動車への搭載を考え薄型化<sup>(3)</sup>し低損失誘電体を用いた電力伝送用アンテナの実現について報告する。

## 2. シミュレーションによるアンテナ損失分析

### 2.1 アンテナの損失要因

アンテナの損失要因には放射損、銅損、誘電損が知られている。放射損はアンテナ形状に、銅損は使用するワイヤの材質に大きく依存する。アンテナに使用するワイヤを固定するため何らかの支持材を必要とするが、このとき使用する誘電体の誘電損がアンテナの損失に加わる。ゆえに、これらの損失の割合についてシミュレーションにより詳細に分析した。

### 2.2 アンテナ損失要因の割合と誘電損の影響

シミュレーションに用いたアンテナはヘリカル形状で中心給電し先端を開放にしたダイポール型構造とした。アンテナパラメータは直径300mm、線径2mm、巻数5、線間ピッチ7mm、高さ33mmとした。誘電体をリング状のポビンにしてワイヤを支持する構造とする。俯瞰図を図1に示す。シミュレーションにはAnsys社製HFSSを使用した。HFSSの設定により、放射損だけを求める際にはワイヤを完全導体にし、誘電体を空気と見なした。さらに銅損を考慮する際にはワイヤに銅の導電率を与えた。誘電損を考慮するに当たっては、損失の異なる2種類の誘電体について評価することにした。今回は入手の容易なポリアセタールとフッ素樹脂(PTFE)を用い、それらの誘電率、誘電正接を与えシミュレーションした。上記シミュレーション条件の違いによる共振周波数におけるレジスタンス値を評価した。放射損のみ、銅損付加時におけるアンテナの共振周波数は共に12.65MHzであった。図2に放射損のみの場合と銅損を付加した場合のレジスタンスを示す。共振周波数における銅損付加によるレジスタンス増加分は0.65Ωであった。

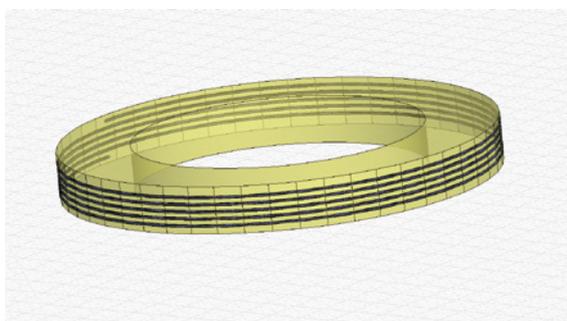


図1 ヘリカルアンテナHFSSモデル

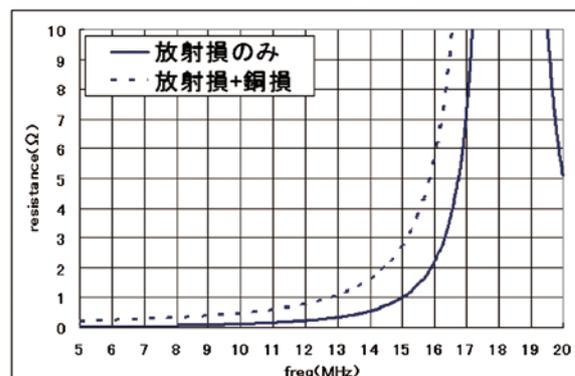


図2 放射損ならびに銅損付加時のレジスタンス

次にさらに誘電損を加えた場合のレジスタンスを図3に示す。ポリアセタールの条件は $\epsilon_r = 3.7$ ,  $\tan \delta = 0.014$ , フッ素樹脂の条件は $\epsilon_r = 2.1$ ,  $\tan \delta = 0.0002$ としてシミュレーションした。

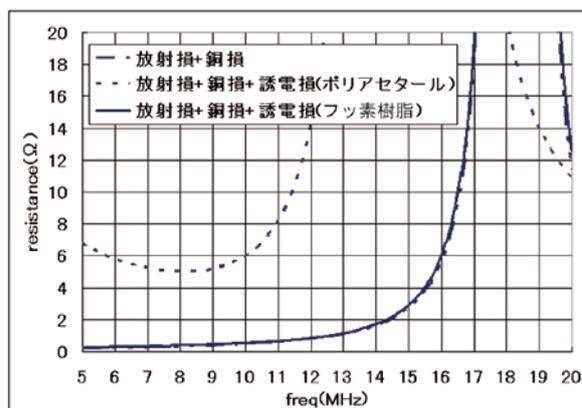


図3 誘電体違いによるレジスタンス (HFSS)

ポリアセタール使用時の共振周波数は10.35MHz, フッ素樹脂時のそれは12.64MHzであった。それぞれの共振周波数におけるレジスタンス値は6.5Ωと1.0Ωとなった。フッ素樹脂使用時には銅損を付加した時と比較し差が無かったが、ポリアセタールでは6Ω弱の増加となった。これは誘電損の値がフッ素樹脂では0.0002であったのに対しポリアセタールでは0.014と大幅に増加していることに起因すると考える。

このことからアンテナの放射損、銅損を抑える以外に、誘電損も極力抑制する必要があることが分かった。

### 3. 実測によるアンテナ損失比較

続いて実測においても誘電損の大小がアンテナ損失に与える影響を確認した。作成したアンテナを図4に示す。測定にはネットワークアナライザ(8753E)を用いた。レジスタンスの測定結果を図5に示す。

ポリアセタールを用いたアンテナの共振周波数は10.66MHz, その時のレジスタンス値は9.83Ω。フッ素樹脂を用いたアンテナの共振周波数は12.68MHz, その時のレジスタンス値は1.06Ωであった。このことから実測においても誘電損がアンテナ損失に与える影響が大きいこと, 誘電損の小さい誘電体を用いることが望ましいことが確かめられた。



図4 ヘリカルアンテナ実測モデル

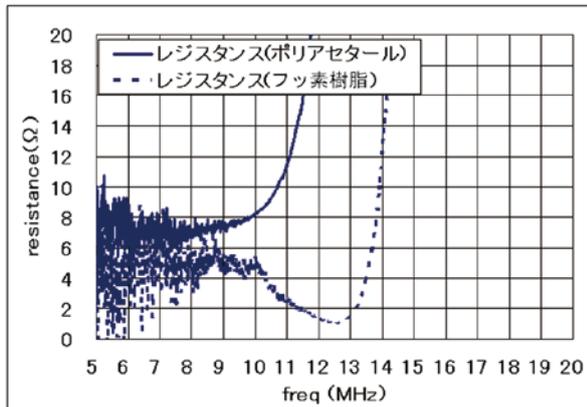


図5 誘電体違いによるレジスタンス (実測)

なお, 今回使用した支持材は誘電体側面にワイヤをはめ込むための溝を切ることで線間ピッチのばらつきを抑える構造を採用している, それにより共振周波数の個体差を低減することを意図している。

### 4. 伝送効率測定

本節では前節までに比較した2種類の誘電体を用いたアンテナを各一対作成し, アンテナ軸方向のギャップを5cmから20cmまで5cmおきに変化させた時の伝送効率を測定した。測定系を図6に示す。

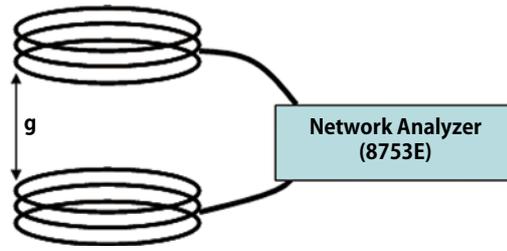


図6 測定系

伝送効率  $\eta$  はネットワークアナライザにて  $S_{21}$  を測定し(1)式を用いて導出した。

$$\eta = |S_{21}|^2 \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

測定結果を図7, 図8に示す。誘電率の違いから共振周波数に違いが見られる。誘電損の小さいフッ素樹脂の方がどのギャップにおいても高い効率を示していることがわかる。このことから誘電損が伝送効率に大きな影響を与えていることを実測においても確認できた。

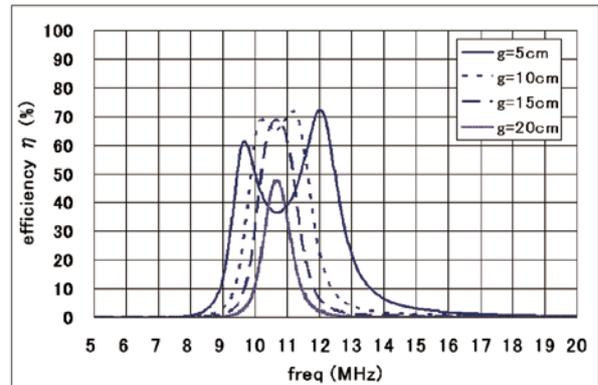


図7 ポリアセタール使用時の伝送効率

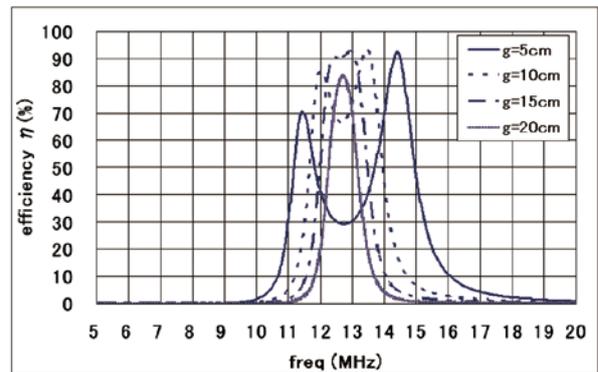


図8 フッ素樹脂使用時の伝送効率

作成した各一対のヘリカルアンテナの特性値を表1に示す。これらの値はそれぞれのアンテナ単体でのインピーダンス測定値を用い導出した<sup>(2)</sup>。Q値から明らかに低損失誘電体を用いた方が磁界共鳴方式に適したアンテナが作成可能なが分かる。また共振周波数も概ね一致していることから個体差無く作成できたと思われる。

表1 ヘリカルアンテナ特性値  
(a)ポリアセタール

	共振周波数 (MHz)	インダクタンス (uH)	キャパシタンス (pF)	レジスタンス (Ω)	Q
No.1	10.66	8.45	26.38	9.83	58
No.2	10.63	8.35	26.86	9.70	57

(b)フッ素樹脂(PTFE)

	共振周波数 (MHz)	インダクタンス (uH)	キャパシタンス (pF)	レジスタンス (Ω)	Q
No.1	12.68	8.35	18.90	1.06	627
No.2	12.60	8.26	19.33	1.09	598

## 5. アンテナの薄型化

これまでの議論から磁界共鳴用アンテナには誘電損の小さい誘電体を用いることが有効であることがわかった。この結果を踏まえ、電気自動車への搭載を考慮し薄型のスパイラル形状にしたアンテナを試作した<sup>(3)</sup>。リング状に形成した誘電体上下面にワイヤ固定用の溝を切りそこにワイヤをはめ込むようにした。アンテナパラメータは直径300mm，線径2mm，巻数5.2（片面2.6ターン），線間ピッチ7mm，高さ18mmとした。アンテナ形状を図9に示す。そのインピーダンス測定結果を図10に，アンテナ間ギャップを5cmから25cmまで5cmおきに変化させた場合の伝送効率を図11に示す。



図9 スパイラルアンテナ

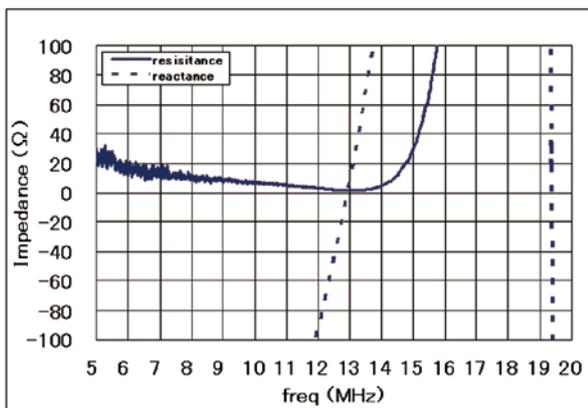


図10 スパイラルアンテナのインピーダンス

アンテナの損失であるレジスタンス値は1.1Ω程度と小さく，Q値は600を超えている。20cmギャップ時の電力伝送効率は91%を得ることができた。図4のヘリカルアンテナの高さが33mmであったのに比べ，本アンテナは18mmと薄くすることができた。薄くしても伝送効率が悪化することなく良特性を示している。

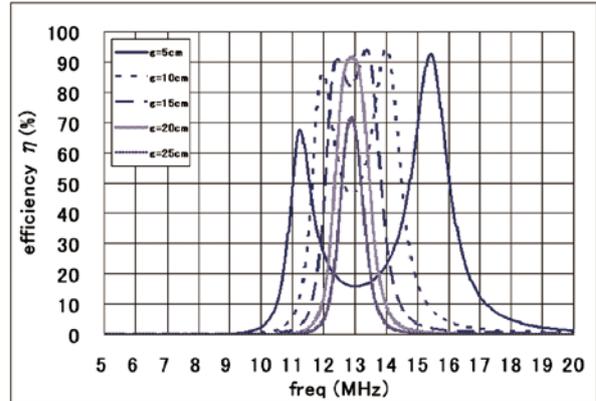


図11 スパイラルアンテナの伝送効率

一対作成したアンテナの特性値を表2に示す。共振周波数を見ると差は非常に小さく，個体差無く作成できていることがわかる。

表2 スパイラルアンテナ特性値

	共振周波数 (MHz)	インダクタンス (uH)	キャパシタンス (pF)	レジスタンス (Ω)	Q
No.1	12.95	8.69	17.41	1.11	637
No.2	12.96	8.76	17.22	1.17	609

## 6. まとめ

ヘリカルアンテナを用いたシミュレーションによりアンテナが持つ損失の内，放射損，銅損と比較し誘電損が電力伝送効率に与える影響が大きいことを明らかにした。実測においてもシミュレーションの妥当性を確認した。

この結果をもとに，低損失誘電体であるフッ素樹脂を用い低損失で高Q値，つまり高効率な電力伝送を可能とするアンテナを作成できた。また製作誤差の低減を狙い誘電体にワイヤをはめ込むための溝を作成し，線間ピッチばらつきを抑え，共振周波数の個体差を無くすようにした。このことも実測にて確認した。

さらに電気自動車への搭載を考慮し薄型化したスパイラルアンテナを低損失誘電体を用いて試作し，実験により高効率な電力伝送が可能なることを確認した。

以上の考察により，磁界共鳴用アンテナの支持材に必要とされる材料特性が明らかになった。今後はさらなるアンテナの薄型化，高Q値化，誘電体使用量を抑えての軽量化などに取り組み，電気自動車用途への適用を目指して開発を進めていく。

## 参 考 文 献

- (1) 居村岳広・岡部浩之・内田利之・堀洋一：「共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力伝送」，電学論D, Vol.130, No.1, pp.76-83 (2010年)
- (2) 居村岳広・岡部浩之・内田利之・堀洋一：「等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究」，電学論D, Vol.130, No.1, pp.84-92 (2010年)
- (3) 居村岳広・岡部浩之・小柳拓也・加藤昌樹・ベテック チュアン・大手昌也・島本潤吉・高宮真・堀洋一：「kHz~MHz~GHzにおける磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送用アンテナの提案」，電子通信学会総合大会，通信講演論文集1, S-24-25 (2010年)
- (4) 小丸堯・小泉正剛・小紫公也・荒川博義・柴田貴行・加納一彦：「高Q値アンテナによる強結合共鳴を用いた無線電力伝送」，平成21電気学会産業応用部門大会，II-363 (2009)

## 筆 者 紹 介

### 藤枝 智之 (ふじえだ ともゆき)

研究開発部第9研究部 所属。車載地上波デジタル用アンテナの研究開発を経て，現在ワイヤレス電力伝送の研究に従事。

### 鈴木 雅美 (すずき まさみ)

研究開発部第9研究部 所属。オーディオ信号の圧縮符化の研究，MPEG-2 AAC等の標準化業務を経て，無線ネットワークシステムの開発を担当。現在はワイヤレス電力伝送の研究に従事。