

# EV 充電用無線電力伝送のコイル系の特性についての研究

2010SE138 長屋拓見 2010SE149 南部孝幸 2010SE270 山本将大

指導教員：奥村康行

## 1 はじめに

無線電力伝送とは、金属接点やコネクタなどを介さずに無線で電力を送ること、およびその技術のことを言う。ワイヤレスで電力伝送が可能になれば、スマートフォン、タブレットといったモバイル端末や電気自動車 (EV:Electric Vehicle) などの電池を内蔵した機器などへ手軽に充電することが出来るようになる。最終製品の市場規模は、青色 LED を抜くのではと期待されている。2007 年には伝送距離 2m で 45~50% の伝送効率を得られる共鳴方式ワイヤレス電力伝送技術が発表され [1][2], コビキタス エネルギー社会の実現の道が拓かれた。様々なベンチャー企業や研究機関で多岐にわたる応用化を目指して、今も盛んに研究がされている [3][4].

## 2 技術の課題と目的

EV 電力伝送において、電源から EV への電力伝送効率が 90% 以上となることが理想とされている。しかし、現在の電力伝送技術では経由するインバータ等の影響もあり、実際に EV 用電池へ送電される電力の量は電源と比較して 5% のロスが生じる。このことを踏まえ、90% 以上の伝送効率を達成するためには、無線電力伝送においても送信側のコイルから受信側のコイルへ 95% 以上の伝送効率が必要となる。このことを念頭においた上で、高い伝送効率を持つ無線電力伝送回路の設計と開発を行う。

## 3 課題の解決方法

はじめに第 1 章に述べた電磁誘導方式について述べる。その後、平面型コイルと横置き型コイルの 2 種類のコイルでの磁界結合の方法を考える。2 種類のコイルによる無線電力伝送の回路を実験により、目標の伝送効率を満たすことを確認してどちらの回路が実用化に適しているか検討を行う。また、EV に取り付けることからコイルから発生する磁界が金属の車体の影響を受けることが考えられるため、金属の影響を防ぐ方法について考える。その方法としてフェライトシートを用いる。

### 3.1 電磁誘導方式

電磁誘導方式を利用した無線電力伝送回路の回路図を図 1 に示す。

電圧源が接続されている送電側を電源として、負荷が接続されている受電側を充電される EV として考える。このとき、電力伝送効率は等価回路を 2 ポート回路と見たときの S パラメータによって求めることができる。

$$\eta = |S_{21}|^2 \quad (1)$$

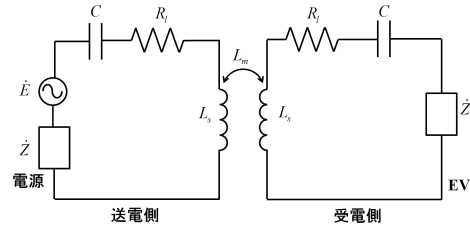


図 1 電磁誘導方式による無線電力伝送回路

また, S パラメータは性能指数  $fom$  を用いると

$$S_{21} = \frac{1}{1 + \frac{1}{fom} + \frac{2}{fom^2}} \quad (2)$$

と表すことができる。性能指数は

$$fom = kQ \quad (3)$$

となる。Q と k は回路の共振の鋭さと 2 つのコイルの結合係数である。式 (2) より目標の伝送効率を達成する無線電力伝送のシステムの回路を設計する。回路を設計するための条件を表 1 に示す。

表 1 設計の条件

伝送効率 $\eta$ [%]	95
電源の周波数 $f$ [kHz]	85
送受信機のインピーダンス $Z$ [ $\Omega$ ]	10
回路の体積 [cm]	$50 \times 50 \times 3$
送受電コイルの間隔 [cm]	20

### 3.2 平面型コイルによる無線電力伝送

電力伝送効率が 95% となるように平面型コイルによる無線電力伝送回路を設計する。図 2 に平面型コイルによる無線電力伝送回路を示す。

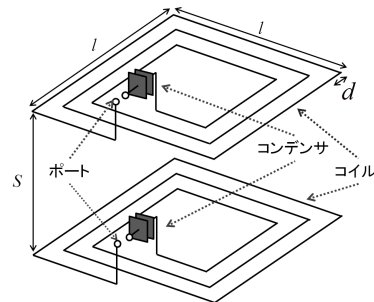


図 2 平面型コイルによる無線電力伝送回路

表 2 平面型回路の設計

コイルの巻き数 $n$	28
コイルの幅 $l$ [cm]	35
導線の半径 $r$ [mm]	1
導線の間隔 $d$ [mm]	4
導線の材質	エナメル線
送受電コイルの間隔 $S$ [cm]	24

図 2 の設計条件を表 2 に示す. 設計した回路の特性を表 3 に示す. この設計で回路を製作してシミュレーションと

表 3 設計した回路の特性

コイルの自己インダクタンス $L_s$ [mH]	240
相互インダクタンス $L_m$ [ $\mu$ H]	18
コンデンサのキャパシタンス $C$ [nF]	15
コイルの銅損 [ $\Omega$ ]	0.028

実験を行う.

### 3.3 横置型コイルによる無線電力伝送

縦置型コイルを使わずに横置型にすると, 位置ズレによる影響を受けにくくなり電力伝送効率を維持することができる. また, 縦置型に比べて小形化が見込める. しかし, デメリットもある. 漏れ磁界が多く, 物体や人体に影響が出る可能性もある. そこで, 漏れ磁界の減少や漏れにくい構造設計が求められる. 図 3 にフェライトバーが有無それぞれの横置型コイルの構成を示す. 表 4 に横置型コイルのパラメータを示す.

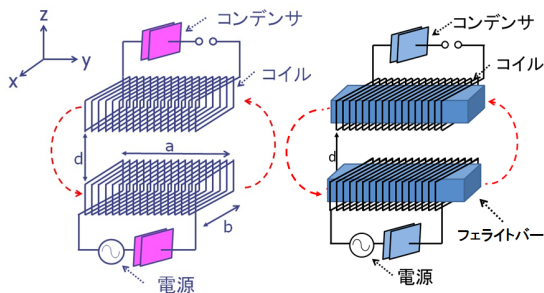


図 3 横置型コイルの構成比較図

### 3.4 フェライトシート

現在 EV 無線電力伝送では, 車体の底にコイルから電磁誘導を受け充電する, という方法が考えられている. しかし, このようにコイルを用いる際に「渦電流の発生」が問題の一つとしてあげられる. 渦電流は, 金属付近で磁界に変化がある際, その磁界変化を妨げるように金属に流れる電流のことで, これによりコイルのインダクタンスが小さくなる. 自動車にコイルを設置する場合にも, この影響が出ることが考えられる. この損失を減らすには, 金属とコ

表 4 横置型コイルのパラメータ

奥行き $a$ [cm]	21
横幅 $b$ [cm]	40
2つのコイルの間隔 $d$ [cm]	14
導線の材質	銅
コイルの巻数	20
導線の半径 [mm]	2
導線の間隔 [mm]	7

イルの間に高透磁率, 低導電率の材料を用いると良いとされており, その材料の一つとして, 高周波数下において高い透磁率を誇るとされるフェライトシートが挙げられる. しかし, 現在フェライトシートを製造する企業のデータには周波数が 1MHz 未満のものは提示さ公表おらず, EV 電力伝送で使用するとされる周波数約 100kHz での透磁率はわかっていない. このため, この 100kHz の周波数における透磁率の測定が必要と考えられる. 現在透磁率を測定する場合, 測定材質のコアを中心としたトロイダルコイルの測定値を比較する方法が多く用いられるが, フェライトシートのような薄い材質でコアを作るのは難しく, また測定誤差が大きくなるものと考えられる. そこで, 私達は既存の測定方法とは異なる, 簡易的かつ誤差の少ない測定方法を模索し, この方法を利用することでフェライトシートの透磁率の測定を行う. 最終的に, フェライトシートが EV 電力伝送においても効果が得られるかどうか判断する.

## 4 シミュレーションと実験

各課題のシミュレーションと実験方法を示す.

### 4.1 平面型コイルでのシミュレーションと実験

設計した回路は電磁界解析シミュレータ FEKO を使いシミュレーションする [5]. シミュレーションでは送電側をポート 1, 受電側をポート 2 として S パラメータ  $S_{21}$  をシミュレーションする. シミュレーション後に, 回路を製作してネットワークアナライザ (NA: Network Analyzer) で S パラメータ  $S_{21}$  を測定する. 設計では回路に 10 $\Omega$  のインピーダンスが接続された時に,  $S_{21}$  が最大と成るようにした. しかし, 測定器は 50 $\Omega$  であるため, シミュレーションは 10 $\Omega$  と 50 $\Omega$  で 2 回行い, 実験は 50 $\Omega$  で行う. 50 $\Omega$  の実験により, 50 $\Omega$  でのシミュレーションの正当性を確認して, 50 $\Omega$  でのシミュレーションにより, 10 $\Omega$  でのシミュレーションの正当性を確認する.

### 4.2 横置型コイルのシミュレーション

設計した回路は電磁界解析シミュレータ FEKO を使いシミュレーションする. シミュレーションでは送電側コイルをポート 1, 受電側コイルをポート 2 として S パラメータ  $S_{21}$  をシミュレーションする. シミュレーションは周波数を 70~100kHz の間で 1kHz ずつ変化させ電力伝送効率を求める. シミュレーション条件は表 5 に示す. シミュ

レーション結果の正当性を確認した後、回路を製作してネットワークアナライザでSパラメータ  $S_{21}$  を測定する。

表5 シミュレーション条件

コイルの自己インダクタンス $L_s$ [ $\mu\text{H}$ ]	49.7
コイルの相互インダクタンス $L_m$ [ $\mu\text{H}$ ]	18.77
キャパシタンス $C$ [ $\text{nF}$ ]	7.05
結合定数 $k$	0.37
フェライトの比透磁率	3300

### 4.3 フェライトシートの透磁率測定

私達が考えたのは FEKO と呼ばれるソフトを用いての測定である。FEKO は電磁界問題の解析を目的としたソフトウェアで、様々な計算エンジンを用いることで、電気的な問題を解くことが可能である。このソフトを用いてシミュレーションを行った結果と実際の測定結果を比較することで、フェライトシートの透磁率が求められると考える。

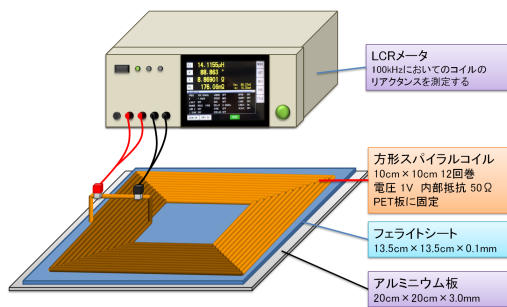


図4 測定方法の構成

測定の構成を図4に示す。厚さ3.0mmのアルミニウム板の上にフェライトシートを敷き、その上に方形スパイラルコイルを設置する。このコイルにLCRメータを繋ぎ、周波数100kHzの交流電流を流した際のリアクタンスを測定する。また、FEKOでも同様の状態のモデルを作成し、フェライトシートの比透磁率を変化させ、その際のリアクタンスのデータを取る。この解析したデータと測定した測定で得られたリアクタンスを比較することで、フェライトの比透磁率が求められると考えられる。

今回はFLX-953と呼ばれるフェライトシートの測定を行った。このフェライトシートは13.56MHzにおいて104の比透磁率を持っている。厚さは約0.2mmだがその内のフェライトの部分は0.1mm程で、PETや粘着テープに挟まれる形となっている。

方形スパイラルコイルはインダクタンスが1.412 $\mu\text{H}$ 、100kHzでのリアクタンスが8.87 $\Omega$ のものをシミュレーションした。実際に製作したコイルのリアクタンスは8.93 $\Omega$ となっており、誤差は1%未満に留めることができた。

## 5 結果と考察

ここでは、各課題について取り組んだ実験結果を示し、考察を述べる。

### 5.1 平面型コイルによる無線電力伝送

平面型コイルでの無線電力伝送回路の  $S_{21}$  のシミュレーションと実験を行った。図5にシミュレーションと実験の結果を示す。

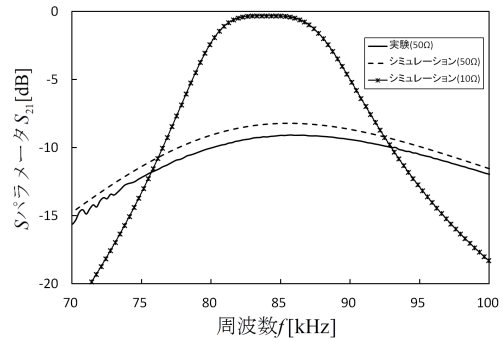


図5 シミュレーション結果

50 $\Omega$ でのシミュレーションと実験の結果は傾向が一致しているので、設計とシミュレーションは正しく行っている。また、10 $\Omega$ でのシミュレーションでは84kHzのときに最大となった。このとき  $S_{21}$  が-0.31dBで伝送効率が93%となり、目標の伝送効率の可能性を示せた。50 $\Omega$ のシミュレーションと実験に誤差があるのは回路のQ利得が設計より低くなったためと考えられる。回路のQ利得を上げるには抵抗の小さいコンデンサを取り付けることで解決できる。

### 5.2 横置型コイルによる無線電力伝送

図6はフェライトを含む場合と含まない場合の横置型コイルのシミュレーションと実験による測定値のSパラメータを示す。

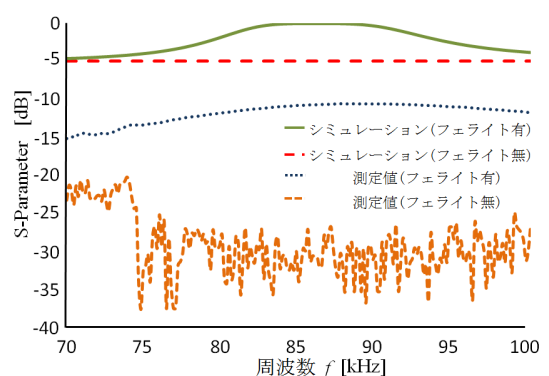


図6 横置型コイルのSパラメータの結果

フェライトを含めた横置型コイルの結果は、シミュレーションにおいて  $f=85.6\text{kHz}$  で  $\eta=0.99$  となり、電力伝送効率99%となった。しかし、測定値が  $f=87.7\text{kHz}$  で  $\eta=0.1$

となり、電力伝送効率が10%となってしまった。大きな誤差を生んでしまった原因として考えられるのは、回路のQが小さくなってしまったため、構成素子の特性にわずかな誤差を含んでいたこと、ネットワークアナライザと設計した回路のインピーダンスの整合が取れていなかったことが考えられる。インピーダンスの整合については、トランスを製作し、再度測定を試したが状況が改善されなかった。簡易的にトランスを製作したため、トランスで大きなロスが発生したと考えている。

フェライトを含めない横置型コイルの結果は、シミュレーションと実験ともに共振周波数 85kHz で共振しなかった。これは共に必要な自己インダクタンスを満たせず、シミュレーション条件を満たせなかったからである。ここから、フェライトの有効性も明確にすることができた。より小形化を図るには、高い透磁率を誇るフェライトを含めると効果的なことがわかる。

### 5.3 フェライトシートの透磁率の測定結果

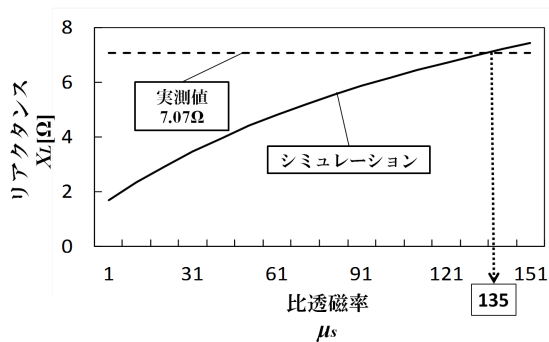


図7 測定結果

測定結果を図7に示す。縦軸はリアクタンスの大きさを表し、横軸はシミュレーションでのフェライトシートの比透磁率を表しており、実測値とシミュレーションのグラフが交わっている地点がフェライトシートの比透磁率であると考えられる。シミュレーションでは、フェライトシートの比透磁率が大きくなるほどリアクタンスが大きくなっていることが分かる。このことより、透磁率が高いほど渦電流の影響を緩和していることが判断できる。

LCRメータで測った実測値では、コイルのリアクタンスは7.07Ωとなっており、シミュレーションでリアクタンスが同様の値になるのは比透磁率が135の時である。このことから、フェライトシートの透磁率が135であることが考えられる。

また、他にも二つのパターンで測定を行った。一つは、アルミニウム板を敷かず、フェライトシートとコイルのみで測定した場合の結果である。この際のコイルのリアクタンスは10.63Ωとなっており、元々のコイルのリアクタンスよりも大きい結果となった。この時のフェライトシートの透磁率は136であった。これは図7の結果と+0.7%程の誤差があるが、概ね一致しているといえる。

また、アルミニウム板の上に二枚のフェライトシートを重ねたものも測定した。この際のコイルのリアクタンスは9.31Ωとなり、こちらも元々のコイルのリアクタンスより大きくなった。このことから、フェライトシートの透磁率だけでなく、その厚さによっても効果に違いがあるものと考えられる。この際のフェライトシートの透磁率は133であった。これは図7の結果と-1.4%程の誤差でできてしまった。

## 6 終わりに

本研究ではより小形で伝送効率95%の可能性のある平面型コイルがEV充電用の無線電力伝送回路として、適しているとした。シミュレーションと実験より低い電力伝送効率となってしまった原因を究明し、改善していく必要があることがわかった。1つの策として考えているのは、導線として用いている銅線をLitz線に替えて、表皮効果を抑えることである。さらに、測定方法にも問題があることがわかった。そこで、インピーダンス整合を取り、ロスの少ない測定方法を確立していく必要があることもわかった。フェライトシートの透磁率測定においては、100kHzにおいて130以上の比透磁率になっていることがわかった。しかし、今回の結果ではフェライトシートを敷いた際でも、元のコイルのリアクタンスよりも小さくなってしまい、という問題点もあった。これに関してはフェライトシートの厚さ、コイルの距離なども関わって来るものであり、今後はこれらを適切に設定した上で、元々のコイルのリアクタンスを損なわないような設計を試みたい。また、今回は3つのパターンで測定を行ったが、それぞれに約±1%の誤差があった。今後は誤差の要因を明らかにした上で再度測定を行いたい。

## 謝辞

本研究で、有益なアドバイスを頂いた藤井勝之講師、様々なご指導を頂きました稲垣直樹先生に深謝いたします。

## 参考文献

- [1] A. Karalisa, J.D. Joannopoulos, M. Soljaci'c, "Efficient Wireless Non-radiative Mid-range Energy Transfer," Annals of Physics, 323, pp.3448, Elsevier, Available online 27, Apr 2007.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. d. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljaci'c, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science Express, Vol.317, No.5834, pp.83-86, Jul. 2007.
- [3] 庄木裕樹, "ワイヤレス電力伝送の技術動向・課題と実用化に向けた取り組み," 信学技報, WPT2010-07, pp.19-24, Jul. 2010.
- [4] 居村岳広, 堀洋一, "電磁界共振結合による伝送技術," 電学誌, Vol.129, No.7, pp.414-417, 1991.
- [5] FEKO ホームページ, <http://www.feko.info/>.