

# 近傍界用磁界アンテナの共振を利用した高効率電力伝送の解析と実験 —基本特性と位置ずれ特性—

学生員 居村 岳広 正員 内田 利之 上級会員 堀 洋一 (東京大学)

## Experimental Analysis of High Efficiency Power Transfer using Resonance of Magnetic Antennas for the Near Field - Geometry and Fundamental Characteristics -

Takehiro Imura, Student member, Toshiyuki Uchida, Member, Yoichi Hori, Senior Member (The University of Tokyo)

This paper gives analysis of contact-less power transfer relaying on magnetic coupling principle between two resonant coils, i.e., antennas. The performance changes due to geometric location as well as coil parameters are discussed in the viewpoint of power transfer efficiency. It will be shown that there exists certain sets of parameters to realize effective power transfer with high efficiency.

キーワード : 非接触充電, 電力伝送, 共振, 磁界結合, 電界結合, 磁気共鳴, WiTricity, 近傍界, 電気自動車, 位置ずれ, 電磁誘導  
Keywords : Contactless power transfer, power transfer, resonance, magnetic coupling, electric coupling, magnetic resonance, WiTricity, near field, electric vehicle, displacement, electromagnetic induction

### 1. まえがき

近年、非接触充電がにわかに注目されつつある。従来、非接触充電は電動歯ブラシ、電動髭剃り等に使われていたが、低い効率と、1cm 程度の短い電力伝送距離の為、それ以外の大きな発展が見られなかった。しかしながら、現在、生活の変化と共に、充電電池を内蔵したモバイル可能な機器である携帯電話やデジカメや電気自動車などを使用するにあたって、コンセントに脱着する機会が増え、コンセントに繋がずに手軽に充電したいという潜在的な要求が高まっている。

一方、非接触充電は、50Hz, 60Hz の商用電源周波数を用いた電磁誘導や 2.45GHz, 5.8GHz のマイクロ波送電[1]や THz のレーザーエネルギー伝送[2]が有名である。ただし、商用電源周波数を用いた電磁誘導は、電力伝送距離が短く、マイクロ波送電やレーザーエネルギー伝送は未だ効率が低い。電磁誘導といわれる技術においても、数十 kHz の周波数における電力伝送においては、数十 cm オーダーの高効率な電力伝送が可能である。従来、そのような、電磁誘導による、一つの伝送距離の目安として、コイルの直径と電力伝送距離を考えた場合、コイル直径の長さに対し、同等もしくはそれ以上のギャップへの電力伝送は困難とされていた。しかしながら、近年、WiTricity という名称で磁界共鳴を利用した 4 素子を使った電力伝送を約 10MHz で行い、アンテナ直径以上である 2m の電力伝送が行なわれた事が報告されている。ここでは、電界的・磁界的共鳴現象に対し幅広く詳細な検討が主な内容となっており、50cm 以下に関する事象やアンテナ素子自体の詳細な報告はされていない

[3]。同様の技術としては、FeliCa に見られる通信を目的とした RFIC カードにおける電力伝送技術もあり、数十 cm の範囲における電力伝送が可能である。これら、数十 kHz の電磁誘導や磁界共鳴や RFIC 技術に共通する事として、LC 共振を利用した高 Q での磁界結合による電力伝送を利用していると思われる。

以上より、本稿は、共振における磁界結合による電力伝送を行なう。今後の様々なアプリケーションへの適応を想定し、その基礎研究として、電力伝送の要となる近傍界用磁界型送受信アンテナを提案し、電力伝送の基本特性を示すと共に、その具体的応用例として、電気自動車の非接触充電のコイルの位置ずれ状態への適応を想定し、軸ずれ特性を示す。EV における電力伝送の研究においては、電磁誘導によって 10cm 程度、またはそれ以上のギャップでの電力伝送が可能となっている。しかしながら、送受信コイルの位置がずれると充電効率が悪化する問題がある。

構成は、より単純な物を目指し、送信コイルと受信コイルの 2 素子のみとする。モーメント法を用いて、送信コイルと受信コイル間の電力伝送について数値解析を行なう。各パラメータがどのような影響を及ぼすのかを詳細に検討する。主に、50cm 以下のギャップと電力伝送効率と共振周波数について調べ、その際、半径、巻数、ピッチを適宜変化させ、電力伝送効率と共振周波数とギャップの一特性を示し、高効率かつギャップが長くなる事を目指す。また、2 素子構成において、コイルの直径に対し、ギャップが同じ場合においても高効率、また、コイルの直径に比べ、より長い場合においても電力伝送が可能である事を示す。更に、EV への電力伝送を想定し、位置ずれの特性を解析と実験を

以って示す。

## 2. 現象の概要と数値計算の必要性

共振現象を利用した非接触充電に関して、アンテナ理論の側面からアプローチをすることが可能である。そもそも、共振とは回路におけるリアクタンス成分が 0 となる状態であり、コイル自身の共振による励振現象は、アンテナの共振現象そのものである。しかしながら、一般的な通信用のアンテナの利用との違いとしては、近傍界における現象を利用しているという事である。その為、遠方界でのパターンに注目するのではなく、近傍界のパターンや相互結合に注目する必要がある。更に、本稿では、アンテナを一種の共振器とみなし、共振器間の磁気結合として問題を捉える。ここでいう近傍界とは、 $\lambda/2\pi$  以内の領域である。例えば、1MHz の時は約 47.7m、10MHz の時は約 4.8m である。また、電力伝送距離自体に関してはそれよりも短い距離となる。

本研究の構成におけるアンテナ形状は、ヘリカルコイルであり、ヘリカルアンテナの一種といえる (図 1 参照)。しかし、波長に対して一巻の周囲長が小さいという理由で、通常のヘリカルアンテナのノーマルモードのパターンとして捉えてしまうと、電力伝送の向きをコイルの軸方向に対し垂直の方向と見誤ってしまう。むしろ、近傍界でのパターンを考えると、主に、一般的な電磁誘導として捉えた時の方向である、軸方向への電力伝送である事がわかる。また、アンテナの共振現象も電気回路的な捉え方としての LC 共振とみなす事ができる。共振周波数と共振角周波数を  $f_0$ ,  $\omega_0$ 、半値幅における各々の周波数と角周波数をそれぞれ、 $f_1$ ,  $\omega_1$ ,  $f_2$ ,  $\omega_2$  ( $f_1 \leq f_2$ ,  $\omega_1 \leq \omega_2$ ) とすると、共振の強さは式 (1) の Q 値に代表されるが、アンテナ素子長に対して波長の長さを見捨てる程度に十分波長が長く低周波の場合、 $\omega$  が小さい為、高 Q の為には、大きなインダクタンス L やキャパシタンス C が必要となる。つまり、大きなコイルとコンデンサが必要であり、装置が大きくなってしまふ。

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (1)$$

一方、高周波の場合  $\omega$  が大きいので、小さな L や C で高 Q が実現できる。その為、従来に比べて高い周波数での共振を利用する。一方で、波長の長さを考慮する必要があり、その為、分布定数回路として問題を捉えることが出来る。構造としては、素子の両端が開放されたアンテナであるので、端で電流が 0 になり、中央で最大電流となり、電圧は端で最大となり、中央で最小となる。これは、半波長ダイポールアンテナの共振現象と同じなので、光速 c、素子の全長 l、波長  $\lambda$  とすると、半波長ダイポールアンテナ (図 1)

の共振周波数を求める式  $f = \frac{c}{2l}$  がある。しかしながら、この式のように単純に素子長から共振周波数を求める事は出来ない。コイルは当然ながら、インダクタンス成分を有し、また、ピッチ間でキャパシタンス成分を持つので、全長から求められる共振周波数に対して大きなずれを生じる。そ

こで、数値解析による精度の高い計算が必要となる。以下、モーメント法を用いて、送信コイルと受信コイル間の電力伝送を解析する。

## 3. 電力伝送の構成と実験構成

電力伝送における、ギャップと効率を検証する。電力伝送におけるアンテナ素子間の現象を捉える為、なるべくシンプルな形状である事が望ましいので、送信コイルと受信コイルの 2 素子構成とする (図 1 参照)。パラメータは、半径 r、巻数 n、ピッチ p、ギャップ g、素子の太さ、軸ずれ d である。本稿においては、特に断らない限り、基本パラメータを半径 150mm、巻数 5 巻、ピッチ 5mm、素子の太さ 1mm (実験時 2mm)、軸ずれ 0mm とし、条件により適宜各パラメータを変化させていく。

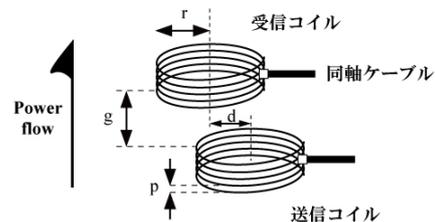


図 1 送信コイルと受信コイル

本研究においては、以下の構成で、電力伝送を測定する。ベクトルネットワークアナライザを用いて、周波数と反射係数と透過係数を測定する。反射係数  $S_{11}[\text{dB}]$ 、透過係数  $S_{21}[\text{dB}]$  に対し、反射電力の効率を  $\eta_{11}$ 、透過電力の効率を  $\eta_{21}$  とすると、

$$\eta_{11} = 100 \times \left( 10^{\frac{S_{11}}{10}} \right)^2 \quad (2)$$

$$\eta_{21} = 100 \times \left( 10^{\frac{S_{21}}{10}} \right)^2 \quad (3)$$

となる。本稿においては煩雑さを避ける為、電力伝送効率である透過電力の効率  $\eta_{21}$  と共振周波数について述べる。

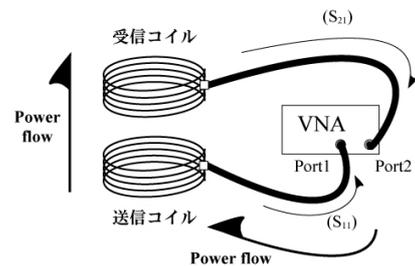


図 2 非接触充電実験構成

## 4. 半径と巻数とピッチに関する効率と周波数の数値解析

### 4.1 半径とギャップと電力伝送効率と共振周波数

効率が高く、かつ、ギャップが長くなる事を目的とする。各半径におけるギャップと効率を図 3 に示す。図 3 より、半径が大きいとギャップが長い事がわかる。また、ギャッ

ブが短いところに関して注目すると、若干であるが、半径が小さい程効率が高い。EV への電力伝送を考えた場合、当然ながら、ギャップが長い方が良いので、半径が大きいほうが適しているといえる。

また、各半径におけるギャップと共振周波数を図 4 に示す。図 4 より、半径が大きいと周波数が下がる事がわかる。この一因としては、半径が大きいと全長が伸び、共振周波数が下がる為である。また、ギャップが短いところにおいては、共振周波数が 2 つに分かれている。これは次節で述べる。

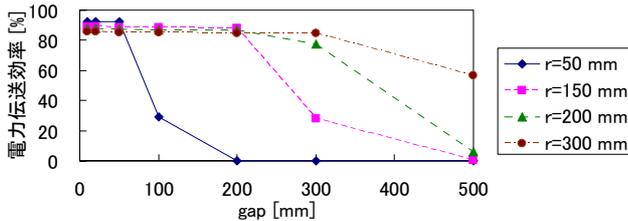


図 3 各半径におけるギャップと効率

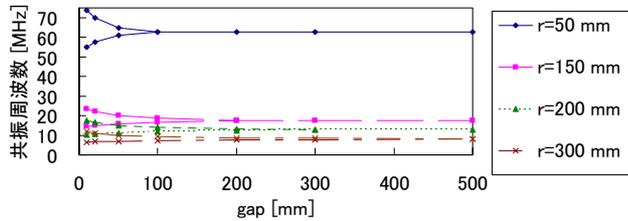


図 4 各半径におけるギャップと共振周波数

〈4・2〉 巻数とギャップと電力伝送効率と共振周波数

次に、巻数に対する電力伝送の効率を検証する。半径は大きいほうが EV への電力伝送には向いている事がわかったが、一定の半径に固定した際に、巻数を変える事により、ギャップが変化するかを確認する。半径の一つの目安として小型の EV でも容易に搭載可能な大きさを今回は採用し、半径 150mm とする。

各巻数におけるギャップと効率を図 5 に示す。図 5 より、巻数が少ないと効率が高いが伝送距離が短い。5 巻きにおいて、ギャップ 20cm、85%以上であり、10 巻きにおいて、ギャップ 30cm、80%以上である。巻数を多くすると、伝送距離は伸び、直径より長い距離においても電力伝送が可能である。ただし、効率は全般的に下がり、30 巻きの場合、最大でも約 70%である。また、構造として見た場合は、当然ながら巻数を増やすと厚みを増す事になり、アプリケーションへの適応が好まれない傾向がある。

今回、一つの目安として、直径とギャップを比較すると、直径と等しいギャップの時、つまり、半径 150mm、ターン 10 巻、ピッチ 5mm にギャップが 300mm で効率 82%を得られた。

次に各巻数におけるギャップと共振周波数を図 6 に示す。巻数を増やすと、インダクタンスが増加する一方、全長が伸びるので、共振周波数が低くなる。Q 値という観点から見ると、インダクタンスの増加は Q 値を上げるが、周波数

の低下はインダクタンスを下げ、Q 値が下がる要因となる。

また、一定のギャップを越えると、急峻に効率が低くなる。図 5 と図 6 をより、急峻に効率が悪化するギャップにおいて共振周波数が一つになっている事が分かる。これらは、先の図 3 と図 4 においても顕著に見られる。アンテナを一種の共振器として捉えると、これは共振器の結合理論から、次のように説明できる。

簡略化のため、損失がない場合の共振器を LC で表す。この共振器は同じものとする、自己共振周波数  $f_0$  は共に同じであり、共振角周波数は共に、 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  であり、主に磁束による結合なので、相互インダクタンスで結合した回路としてみなす事ができる。共振器と共振器が相互インダクタンス  $L_m$  で結合しているとする、結合係数  $k$  は、 $k = \frac{L_m}{L}$  であり、等価回路は、図 7 の様になる。T-T'面から見た左側のアドミタンスを  $Y_L$ 、右側のアドミタンスを  $Y_R$  とすると、共振条件より  $Y_L = -Y_R$  なので、次式で与えられる。

$$\frac{1}{\omega(L-L_m) - \frac{1}{\omega C}} + \frac{1}{\omega L_m} + \frac{1}{\omega(L-L_m) - \frac{1}{\omega C}} = 0 \quad (4)$$

これにより、次式が得られる。

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{(L+L_m)C}} \quad (5)$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{(L-L_m)C}} \quad (6)$$

$$k = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2 + \omega_1^2} = \frac{L_m}{L} \quad (7)$$

よって、式(5)、式(6)より、共振周波数が 2 つに分離することがわかる。つまり、共振周波数が 1 つの場合である、 $\omega_0 = \omega_1 = \omega_2$  の時は、式(7)より  $k=0$ 、 $L_m=0$  となる。但し、

これは、オーム損と放射損を無視した為  $k=0$  となる。式(7)は、共振周波数が 1 つになった時に急峻に効率が落ちる理由を説明するには適しているが、より正確な  $k$  を知りたい場合、損失を含めた式で計算する必要がある[3]。

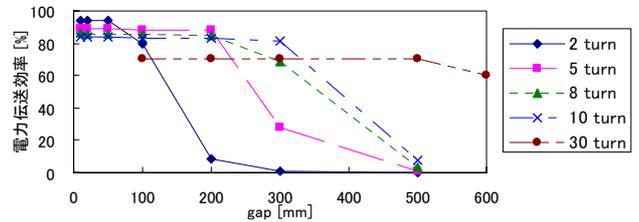


図 5 各ターンにおけるギャップと共振周波数

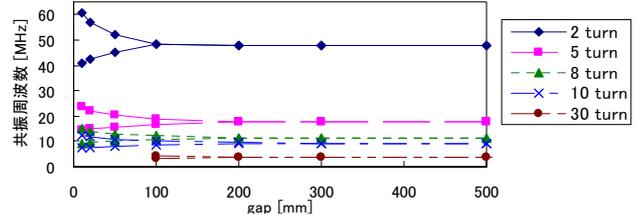
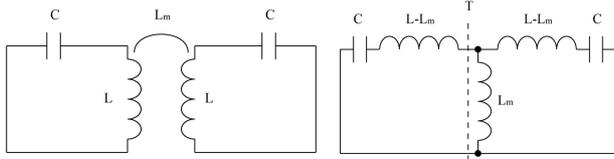


図 6 各ターンにおけるギャップと効率



(a) 対称な磁界結合共振回路 (b) 等価回路  
図 7 共振器間結合回路

〈4・3〉 ピッチとギャップと電力伝送効率と共振周波数

次に、ピッチに対する電力伝送の効率、共振周波数を検証する。各ピッチにおけるギャップと効率を図 8 に示し、各ピッチにおけるギャップと共振周波数を図 9 に示す。図 8 より、電力伝送効率については、わずかな影響のみであり、前節のピッチ 5mm より更に薄型化が可能であるといえる。また、図 9 にあるように、周波数に関しては大きく変化するので、周波数の調整が可能である事がわかる。

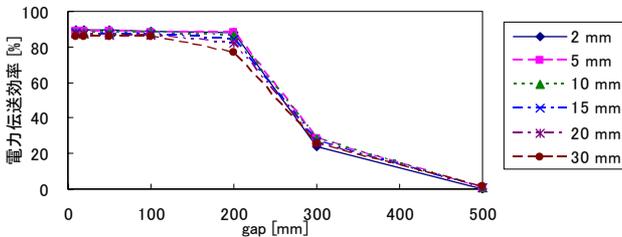


図 8 各ピッチにおけるギャップと効率

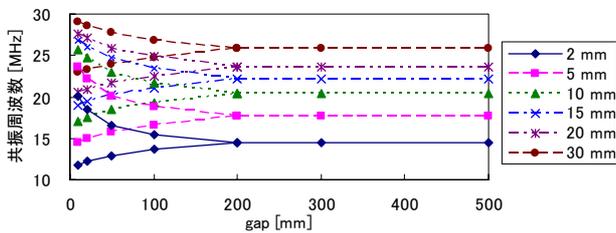


図 9 各ピッチにおけるギャップと共振周波数

〈4・4〉 位置ずれにおける解析と実験的検証

図 10 に軸ずれを起こした場合の効率、図 11 に共振周波数を示す。この節では、解析値 (Cal) と実験値 (Exp) を示す。d は中心軸からの軸ずれ、または、位置ずれの距離である。半径 150mm のコイルを使用している。軸ずれが少ない場合は、実験値の極端にギャップが短い場合を除き、高効率の電力伝送が行なわれている。半分以上軸ずれした場合でも、ギャップによっては、効率よく電力伝送ができる。ギャップが延びるほど効率は低下する。コイルを半分ずらした地点、d=150mm に注目すると、ギャップが 100mm 以下であれば、効率は 80% 以上、ギャップが 150mm であれば、効率は約 80% 前後となるが、ギャップが 200mm になると、約 50% になる。

以上より、位置ずれを起こしても、効率の高い電力伝送が技術的に可能である事が分かった。一方、これらをアプリケーションに適応させる場合、効率の高い電力伝送を可

能にするコイル配置は、周波数遷移という特徴が大きくアプリケーション設計に関わることが分かる。

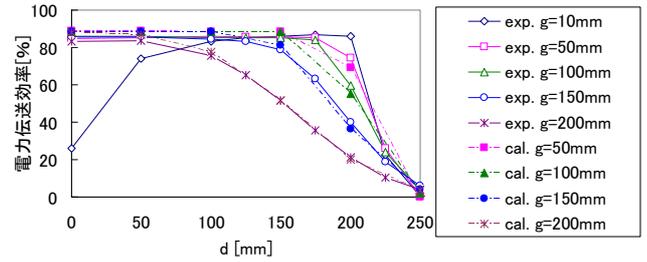


図 10 各ギャップにおける軸ずれと効率

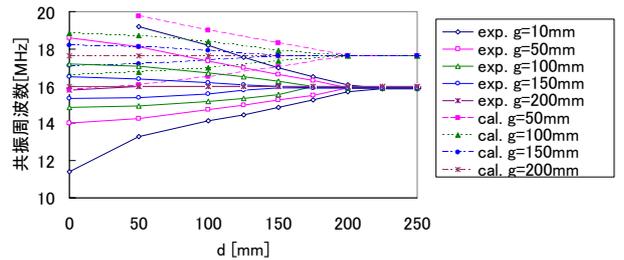


図 11 各ギャップにおける軸ずれと共振周波数

5. まとめ

本研究において、送信コイルと受信コイル間の電力伝送について数値解析を用いてその主な特性を示した。また、軸ずれ特性に関して数値解析と実験を用いて検討を行った。設計値は EV 搭載を想定した値とした。

半径が大きく、巻数が多く、ピッチが短い時に電力伝送効率が高い事が示された。コイルの直径と等しい距離であるギャップ 300mm において、効率 82% を得られた。コイルが半分以上、位置ずれした場合でも、80% 以上の高効率の電力伝送ができることを示した。

もちろん、これは、EV だけでなく、携帯電話等、幅広いアプリケーションに適応可能な技術である。今後は更なる形状の最適化を行い、素子の太さの影響や薄型化の構成、周波数遷移への対応についても検証を行なう。

文 献

- (1) 篠田健司, 篠原真毅, 三谷友彦, 松本紘, 橋本隆志, 岸則政: 「マイクロ波送電を用いた電気自動車充電システムの評価研究」, 信学技報 SPS2005-11(2006-02), pp.1-4, (2006)  
著書名: 「タイトル」, 雑誌名, Vol.巻数, No.号数, p.頁数 (発行年)
- (2) 武田和也・橋本和久・河島信樹: 「半導体レーザーを利用した月極地氷探索ローバーへのエネルギー伝送システムモデル開発」, 近畿大学理工学部研究報告, Vol.35, pp23 (1999)
- (3) André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljai1: "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science Magazine, Vol.317, No.5834 pp.83-86 (2007)