

# 磁気結合共振型無線電力伝送用コイルの近接物体からの影響解析

石田 将也<sup>†</sup> 渡辺 俊明<sup>‡</sup>

<sup>†‡</sup>株式会社 豊田中央研究所 〒480-1192 愛知県長久手市横道 41 番地の 1

E-mail: <sup>†</sup>mishida@mosk.tytlabs.co.jp, <sup>‡</sup>wnabe@mosk.tytlabs.co.jp

**あらまし** 磁気結合共振型無線電力伝送において、コイルのインダクタンスや結合係数はコイルに電気的特性を持った物体が近接することにより変化する。従ってシステムを車両に搭載する場合には、この影響を把握した上で設計することが重要である。本稿では、車載を想定して周辺に近接する金属や誘電体のような媒質の送受コイルのインダクタンスや結合係数への影響について解析し、さらに車両に搭載した場合の床面媒質の環境（金属床、大地）および搭載位置の違いによる近傍磁界分布の変化について解析する。

**キーワード** 非接触給電、電磁界共振、磁界解析

## Analysis of Effects from Proximate Objects of Coupling Coils for Magnetic Resonated Wireless Power Transfer

Masaya ISHIDA<sup>†</sup> Toshiaki WATANABE<sup>‡</sup>

<sup>†‡</sup>Toyota Central R&D Labs., Inc. 41-1 Yokomichi, Nagakute, Aichi, 480-1192 Japan

E-mail: <sup>†</sup>mishida@mosk.tytlabs.co.jp, <sup>‡</sup>wnabe@mosk.tytlabs.co.jp

**Abstract** In a wireless power transfer system via magnetic coupling resonance, the resonant frequency of the coils and the coupling coefficient between the coils fluctuate by the influence of the proximate objects on the coils. In order to mount this system on a vehicle, it is very important to be designed the coils taking this influence into account. In this paper, the influence of the proximate object such as a conductor or a dielectric upon the inductance and the coupling coefficient is investigated. And the difference of the magnetic near field in relation to the mounted position of the coil is also investigated.

**Keyword** Wireless Power Transmission, Magnetic Resonance, Magnetic Analysis

### 1. はじめに

車や家電、電子機器を簡単に充電する方式として非接触給電の研究が盛んに行われている。近年は実用化を見据えて、国内外において標準化活動が進められており、非接触給電コイルを模擬車両へ搭載した場合の電磁気的な特性の評価もなされている[1]。

非接触給電の実際の利用シーンでは、コイル周辺における周辺車両(導体物体)が近接することや、路面材質が導体や大地、アスファルトであることなど様々な条件が考えられる。コイル構成やコイル周囲の環境が変化すると、共振コイルのインダクタンスや一次-二次コイル間の結合係数も変化し、一次-二次コイルの結合状態が変化するため各コイルに接続されるインピーダンス整合回路を再設計して計算をする必要がある。

非接触給電の分野ではソレノイドコイル単体の特性に関しては報告[2,3]されているが、コイルの周囲の条件の影響を考慮した研究報告はほとんどない。そこで本研究では非接触給電を行う周囲環境が変化した場合のインダクタンスや結合係数の変化と、それらの値の近傍磁界への影響に関して解析した。

まず2章でコイル単体において近傍の導体と大地の

影響を述べ、3章では模擬車両搭載時のコイル特性変化とコイル周囲の磁界分布の変化について述べる。4章でより実車に近いモデルでの解析を行い、5章でまとめる。なお本稿ではアンシス・ジャパン株式会社の有限要素法の電磁界シミュレータ HFSS<sup>TM</sup>を用いた。

### 2 コイル単体の特性解析

#### 2.1 コイル単体の背面導体板の影響

非接触給電コイル単体の解析モデルを図1(a)に示す。コイル単体の構成はソレノイドコイルとした。文献[1]を参考に一次コイルと二次コイルのサイズは同一とし、コアサイズは横 400mm×縦 400mm×厚さ 10mmとした。コイルの巻き数 10、磁性体(フェライト)コアの比透磁率  $\mu_r$  は 1800 である。このようなソレノイドコイルを用いる場合、結合係数をより増加させるために、コイル背面に導体板を配置する方法が報告されており[2,3]、本稿においても図1(b)に示す背面金属板(5mm厚)を配置した。本節ではこの背面導体板の影響について解析する。まず、図1の構成で背面板1辺の大きさ  $d$  に対する一次コイルのインダクタンスの変化を図3に示す、また一次-二次コイル間の結合係数  $k$  の変化を図4に示す。解析周波数は 85kHz とした。

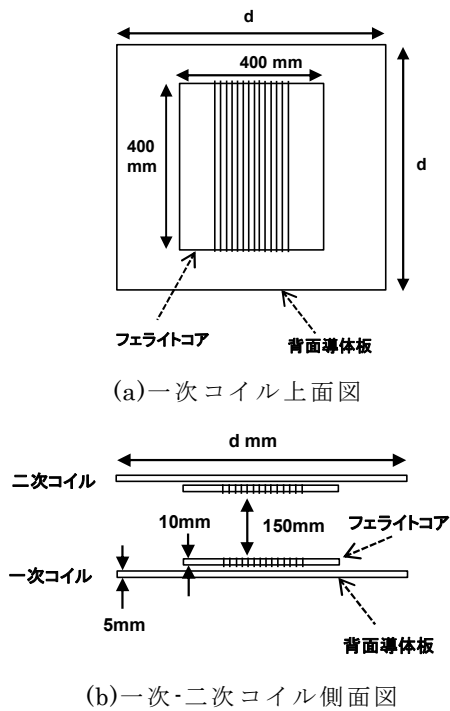


図 1 コイル単体の解析モデル

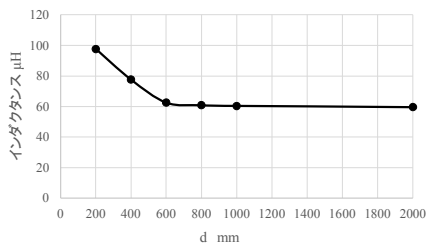


図 2 d に対するインダクタンス

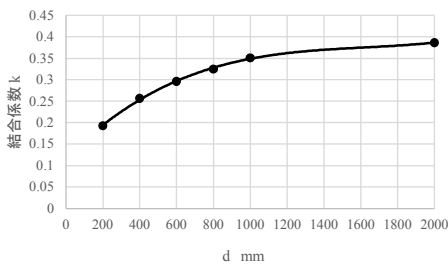


図 3 d に対する結合係数

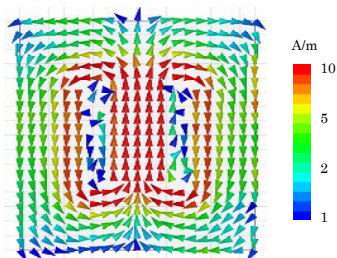


図 4 背面導体板に発生する渦電流

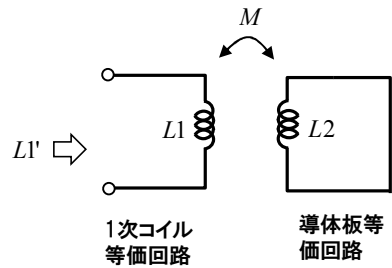


図 5 コイル背面導体板の等価回路

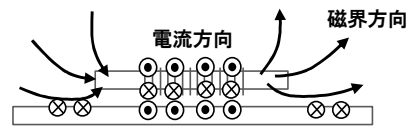
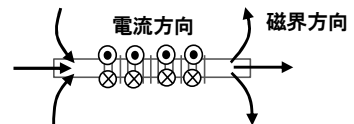


図 6 発生磁界の背面導体板の影響

図 2,3 の結果から、背面導体板を大きくしていくとインダクタンスは低下し、結合係数が増加することがわかる。これは電力伝送時に背面導体板には図 4 のように渦電流が流れていることが原因である。

インダクタンスの低下を説明するためコイルの渦電流の動作を等価回路で表すと図 5 のようになる。ここでソレノイドコイルのインダクタンスを  $L1$ 、背面導体板の等価インダクタンスを  $L2$ 、それらの相互インダクタンスを  $M$  とすると、その合成インダクタンスは  $L1' = L1 - M^2 / L2$  となる。  $0 < M^2 / L2$  であるため、導体板が付加されると、インダクタンスは低下する。導体板が大きくなり、 $d=800\text{mm}$  以上ではインダクタンスの低下はほぼなくなっている。これは導体板に発生する渦電流はコイル近傍に発生するものが多くコイルから離れた位置における導体はインダクタンスに対しては影響ほぼ影響しないからだと考えられる。従って以降の解析では  $d=800\text{mm}$  とした。

同様に結合係数の増加に関しては、コイル単体では図 6(a) のように広がっていた磁界が背面導体板を付加すると、背面導体板に発生した渦電流との合成磁界となり、磁界が導体板と反対方向に集中することが原因と考えられる。すなわちコイルの発生する全磁界に対する導体板側の磁界の割合が減少し、導体板と反対側の磁界の割合が増加するため結合係数が増加することになる。

## 2.2 大地の影響

本節では設計したコイルを大地上に配置した場合の特性について解析する。使用する解析モデルは図 7 に示すようにコイルの下部に横 10m×縦 10m×高さ 5m の大地を配置したモデルである。大地の特性は比透磁率  $\mu_r$  は 1, 誘電率  $\epsilon_r$  は 4, 導電率  $\sigma$  は 0.01 S/m とした[4]。床面が自由空間の場合と、床面が大地の場合を比較すると、表 1 のようになり、インダクタンスと結合係数ともに同程度の値となっている。これは今回のコイルでは背面導体板により床面の影響を受けにくくなっていること、電界よりも磁界による結合の方が支配的であることが原因である。

図 7 のモデルの xz 面における 3kW 伝送時の磁界の計算結果を図 8 に示す。コイルを自由空間中に配置した場合と、大地上に配置した場合の磁界分布を比較すると同様の分布になっていることがわかる。

表 1 コイル周囲環境によるコイル特性の変化

床面媒質特性	$L_{s1}$ ( $\mu$ H)	$L_{s2}$ ( $\mu$ H)	k
自由空間	61.3	60.8	0.350
大地	61.3	61.7	0.354

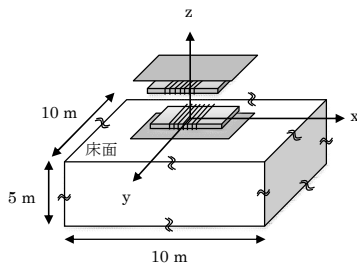
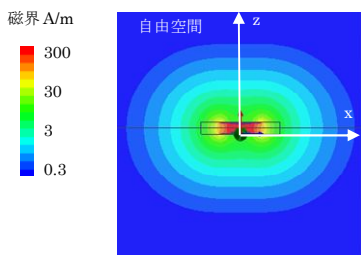
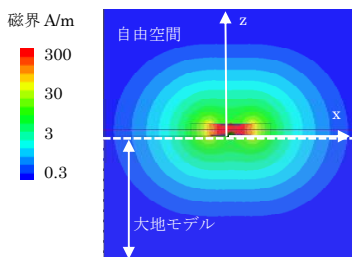


図 7 床面影響解析モデル



(a)自由空間中に配置した場合



(b)大地上に配置した場合

図 8 自由空間と大地モデルの磁界分布比較

## 3 模擬車両搭載時のコイル特性解析

### 3.1 解析モデルと大地の影響

コイルを模擬車両へ搭載した場合のコイル特性について解析する。解析モデルと座標を図 9 に示す。非接触給電コイルから発生する磁界を評価する場合は、床面を導体として評価する。しかし、非接触給電の実際の利用シーンでは、床面が大地のような絶縁体であるケースが想定される。そこで非接触給電コイルを模擬車両へ搭載した場合の床面材質の違いを検証する。ここで模擬車両は箱形状の完全導体でサイズは縦 1700mm×横 1700mm×高さ 1250mm とした。

本モデルでの一次コイルのインダクタンス  $L_{s1}$  と二次コイルのインダクタンス  $L_{s2}$  と結合係数  $k$  の計算結果を表 2 に示す。本コイルでは、コイル背面に導体板があるため、模擬車両導体箱を付加してもインダクタンスや結合係数の変化はほとんどない。

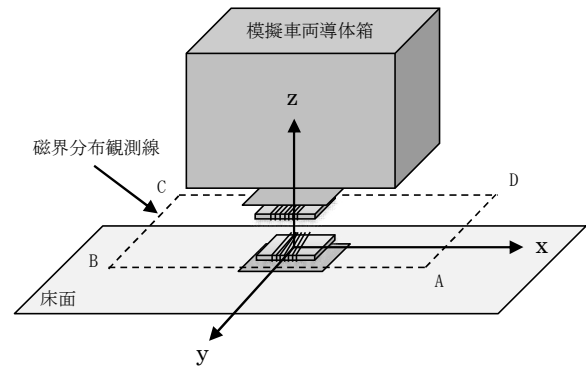


図 9 非接触給電コイル車載時の解析モデル

表 2 模擬車両搭載コイルの床面材質に対する変化

床面媒質特性	$L_{s1}$ ( $\mu$ H)	$L_{s2}$ ( $\mu$ H)	k
大地	61.0	61.5	0.359
導体	59.5	59.9	0.361

### 3.2 床面特性に対する磁界の比較条件

次に床面が大地の場合と導体の場合での近傍磁界の比較を行う。近傍磁界の計算方法として、回路シミュレータから求めた一次・二次コイルの電流値と電流位相差を用いて、電磁界シミュレータで磁界を計算する方法が提案されている[5]。ここではコイル周囲環境の変化によりインダクタンス  $L$  や結合係数  $k$  が変化した場合における磁界の比較条件について述べる。比較する上では伝送電力  $P$  と整合条件を揃えることとする。

電磁界共振回路として、図 10 に示す LC 直列共振回路を想定する。ここで図 10 の  $r$  はコイルの銅損による直流抵抗、 $L$  はコイルのインダクタンス、 $C$  は共振容量である。一次コイルと二次コイルは同一のコイルを用いているため、これらのパラメータは一次と二次で同一である。また、コイル周囲に他の導体近づいてきた場合でも、その影響は背面導体板により遮られるため無視できるとする。

このとき共振回路の共振の鋭さ  $Q$  は  $Q = \omega L / r$  であり、最も伝送効率が高いときの出力インピーダンス  $R_{opt}$ 、すなわち整合がとれた場合の最適負荷は、以下のようになる[6]。

$$R_{opt} = r \sqrt{1 + (kQ)^2} \quad (1)$$

実際のコイルにおいて  $k\omega L$  に対して  $r$  は十分小さいため、最適負荷は以下のように近似できる。

$$R_{opt} = \sqrt{r^2 + (k\omega L)^2} \approx k\omega L \quad (2)$$

従って、負荷の消費電力を一定値  $P$  として計算した場合、コイル電流は以下のようになる。

$$I = \sqrt{P / k\omega L} \quad (3)$$

以上から、周囲環境の変化によりインダクタンス  $L$  や結合係数  $k$  が変化した場合の近傍磁界は(3)式の電流値を電磁界シミュレータ上のコイルへ入力することで同一の整合条件として比較ができる。このとき、二次コイル電流の位相は一次コイル電流の位相から 90 度遅れるとする[5]。

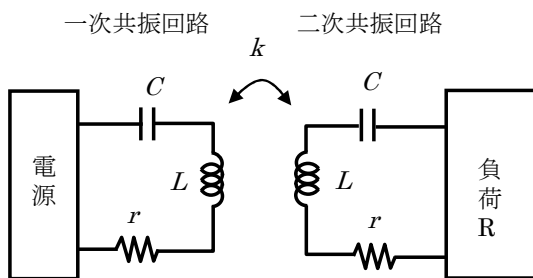


図 10 電磁界共振回路

### 3.3 床面特性に対する近傍磁界の比較

前節の条件で近傍磁界の計算を行う。図 9 の解析モデルでの模擬車両周囲の磁界を計算した結果を図 11 に示す。磁界分布観測線の高さは一次・二次コイルの中心の高さとし、横方向は模擬車両導体箱から 20cm 離れた距離である。伝送電力は 3kW である。

この結果から導体箱周囲の磁界はコイルの  $x$  軸(中心軸)方向が最も大きい。その最大値は床面が導体の場合は 11.79 A/m、床面が大地の場合は 5.18 A/m となっており、床面が大地の方が最大磁界は小さくなることわかる。この時の図 9 の  $xz$  面の磁界を図 12 に示す。図 12(a)の結果から床面が導体の場合、磁界は  $z > 0$  の範囲にしか存在しない。一方で図 12(b)のように床面が大地の場合、磁界は大地内部にも分布し磁気エネルギーが広範囲に分散されるため図 11 のように地上部の磁界は小さくなる。

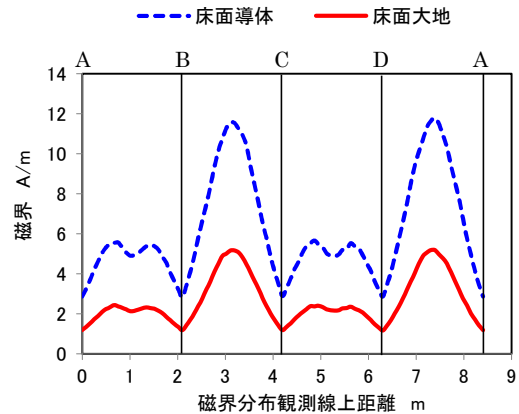
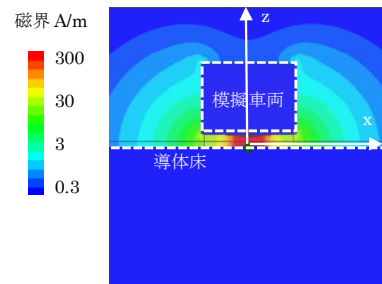
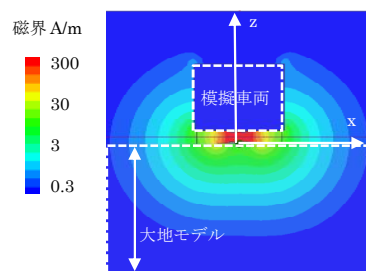


図 11 磁界計算結果



(a)床面導体の場合



(b)床面大地の場合

図 12 磁界分布

#### 4.非接触給電コイルの車両搭載位置による諸特性の比較

前章では、箱を模擬車両とした場合のコイル周囲の導体や床面の材質によるコイル特性の変化に関して述べた。本章では形状やサイズがより普通乗用車に近い車両モデルへ搭載した場合のコイル特性と磁界分布の比較を行う。車両モデルの外観を図 13, xz 面における断面図を図 14 に示す。車両の全長は 4500mm 幅は 1700mm, 床面は完全導体とした。

コイルの搭載位置は図 14 のように後方配置, 中央配置, 前方配置の 3 通りとした。中央配置は車体の中央に配置し, 後方配置, 前方配置とはそれぞれ 1500mm の間隔とした。車体部は完全導体とし, 車体後部のバンパー部は絶縁体であるため電気定数を設定していない。

本モデルを用いて電磁界シミュレーションから求めた一次コイルのインダクタンス  $L_{s1}$ , 二次コイルのインダクタンス  $L_{s2}$ , 結合係数  $k$  を表 3 に示す。

表 3 車両搭載時のコイル特性

コイル配置	$L_{s1}$ ( $\mu$ H)	$L_{s2}$ ( $\mu$ H)	$k$
後方配置	60.0	59.5	0.377
中央配置	60.4	60.2	0.395
前方配置	59.6	59.8	0.388

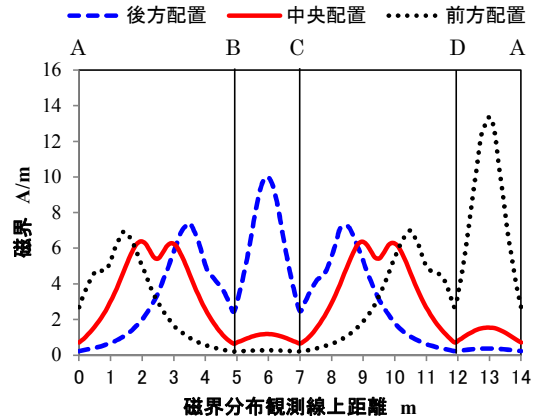


図 15 車両周囲の発生磁界

この結果から, 搭載位置が変化してもインダクタンス  $L_{s1}$ ,  $L_{s2}$  の変動はほぼない。これはコイルに背面導体板を配置したためである。本パラメータを用いて算出した, 伝送電力 3kW での図 13 の磁界分布観測線における磁界を図 15 に示す。磁界出力は 3 章と同様に一次二次コイル間の中心の高さで, 車両端から 20cm, 離れたライン上とした。

本結果から, コイルの搭載位置により車両周囲の磁界強度は変化し, 前方配置では車両前方磁界が最も大きく (13.36A/m), 後方配置では車両後方磁界が最も大きい (9.94 A/m)。中央配置では車両の側方が最も大きい, その値は 6.39 A/m であり前方配置や後方配置における最大磁界と比較すると小さいことがわかった。

#### 5 まとめ

本研究ではコイル周辺環境による非接触給電コイルの特性変化を電磁界シミュレーションにより解析した。単体のソレノイドコイル背面へ導体板を配置すると, コイルのインダクタンスは低下し, 結合係数は増加することが分かった。このことから背面導体板により磁界が導体板と反対方向へ集中するため, コイルに他の近接した導体の影響を受けにくくできることが分かった。

次にコイルを模擬車両ボックスへ取り付けられた場合, コイルの軸方向の磁界が最も大きく, 床面の材質が導体の場合に比較して, 床面が大地の場合の方が磁界は

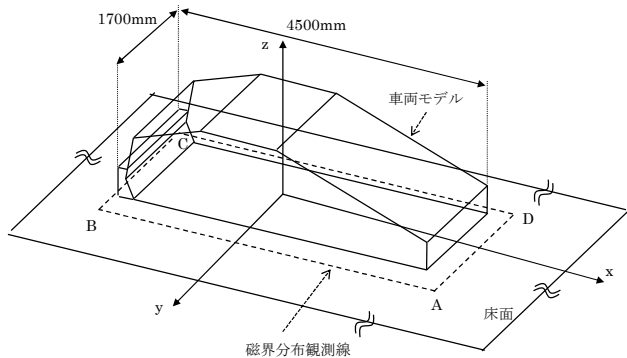


図 13 車両搭載コイル解析モデル

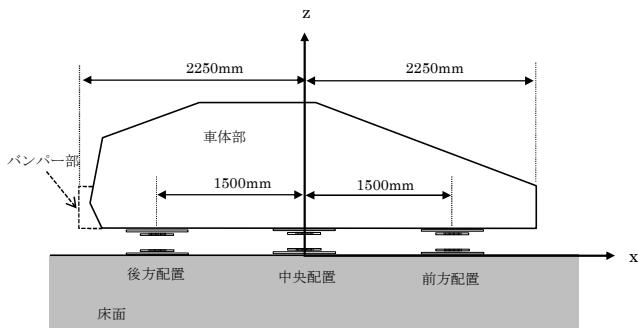


図 14 コイル配置位置

小さくなることが分かった。このことから電波暗室やオープンサイト等の床面が導体の評価条件に比べ、実使用環境では、エミッション強度が低減されることが想定される。

最後に、より実際の車両に近いモデルへコイルの位置を前方、中央、後方の3通りで配置して磁界を計算した。その結果、車両モデルから20cm離れた位置での磁界を計算すると、各配置における磁界の最大値は中央配置が、前方配置や後方配置に比較して最も低くなることが分かった。

## 文 献

- [1] 市川真士, 森晃, 川久保淳史, "磁界共鳴型近距離無線電力伝送試験装置の開発(3)ソレノイド型コイルを用いた kW 級システムにおける磁界特性," 2013 学ソ大, 講演論文集, p.27, Sept.2013.
- [2] 阿部茂 他, "漏れ磁束遮蔽アルミ板付き非接触給電の特性," 電気学会全国大会, 第4分冊, pp.323-324, Mar.2008.
- [3] Mickel Budhia, Grant Covic, John Boys, "A New IPT Magnetic Coupler for Electric Vehicle Charging Systems," IECON 2010, pp.2487-2492, 2010.
- [4] "アンテナ工学ハンドブック(第2版)," 電子情報通信学会, p.999, 東京, 2008
- [5] 庄木裕樹 他, "磁界共鳴型近距離無線電力伝送試験装置の開発(5)kHz 帯システムの近傍電磁界分布の解析の一方法," 2012 信学ソ大, 講演論文集, p.39, Sept.2012.
- [6] 小紫公也(著), "電気自動車のためのワイヤレス給電とインフラ構築," 堀洋一, 横井行雄(編), p.10, シーエムシー出版, 2011.