

# 鉄道用電磁誘導式非接触給電装置の位置ずれ及びギャップ長変化による性能変化の評価

松岡 秀樹\* 古関 隆章 (東京大学)

Evaluation of the change of the performance in an electromagnetic induction contactless power transformer for Railways by the coil misalignment and the gap length  
Hideki Matsuoka\*, Takafumi Koseki, (The University of Tokyo)

The contactless power transfer system (CPT system) is the solid solution for the high cost of installing and maintenance on electric railways. However, the CPT system for the railway application needs to have the high capacity and the tolerance to misalignment of coils. In this paper, the authors shows the need for the movable coil system and explain the design methodology of the movable area by calculating the transfer efficiency which is obtained by equivalent circuits and the finite element method (FEM).

キーワード：非接触給電, 位置ずれ, コア, 効率, 共振, 有限要素法  
(contactless power transfer, misalignment, core, efficiency, resonance, finite element method)

## 1. 背景と目的

**〈1・1〉 非接触給電技術導入の必要性** 近年, 環境問題に関する意識の高まりから, 電気鉄道はクリーンで省エネルギーな輸送機関としてより一層の注目を集めている。電気鉄道は自家用自動車やバスに比べて温室効果ガスの排出が少なく, 電気鉄道を普及させることによって環境問題の解決に寄与することができると考えられる。その一方で, 非電化路線全線を電化するには大きなコストがかかるうえ, 都市部に LRT 路線等を敷設する場合には架線が景観を損ねるなどの問題がある<sup>1)</sup>。

これを解決するのが, 車上蓄電装置を搭載した車輛に非接触で電力を供給する方法である。本稿では駅や停留所等の停車地点の軌条間に送電装置を設置し, 車輛がその上に停車した際に電力を伝送する方式を想定する。伝送された電力は車上蓄電装置に充電され, 車輛は次の停車地点までこの電力を使用して走行する。これにより全線に架線を設置するコストとその維持費を削減することができる。すなわち, 電気鉄道の導入が容易になると考えられる。

**〈1・2〉 非接触給電装置への要求** 前節のようなシステムでの使用を想定した場合, 非接触給電装置には(i)位置ずれ耐性, (ii)大容量という2点が要求される。(i)は停車目標に対する停車位置のずれが数 10cm 程度までは避けられないため, (ii)は限られた停車時間で走行に必要な電力を伝達することを想定しているためである。このような要求をみたす非接触給電装置について, コア形状と位置ずれ

の関係に着目し, 漏れ磁束の低減と効率向上に向けた電磁界解析と回路計算を行なう。具体的には複数のコア形状の装置について位置ずれ耐性を電磁界解析によって求める。さらに等価回路によって, それぞれのコア形状・位置ずれにおいて漏れインダクタンス, 励磁インダクタンスを評価する。これらの値から伝送効率を計算し, 位置ずれの許容範囲を決定するとともにコイル可動領域をどの程度設ければよいのかを明らかにする。

## 2. 非接触給電技術について

本章では, 非放射性の非接触給電における主要な2方式である電磁誘導方式と電磁界共振結合方式について挙げ, その概要と特徴を述べる。そして, これらの2方式を比較検討し, 本研究に用いる方式を選んだ理由を説明する。

**〈2・1〉 電磁誘導方式** 電磁誘導現象を利用したもので, 対向するコア(鉄心・フェライト)間の磁束によって電力を伝送する。装置はコイルとコアから形成され, その形状は1次側・2次側間にギャップが存在する変圧器で近似される。このため, 発熱を低減し, 効率を向上させるためには漏れ磁束を少なくすることが必要である。今後は特に断りのない限り, 1次側を地上側, 2次側を車上側として議論を進める。

**〈2・2〉 電磁界共振結合方式** 同じ共振周波数を持つ送電コイル・受電コイル間の磁界結合と電界結合を利用した方式である。結合の係数 $\kappa$ と損失 $\Gamma$ を用いて式(1)で表される状態である強結合レジームを利用するため, 電磁誘

導方式と比べて大きな位置ずれ及びギャップ長でも高効率の電力伝送ができる<sup>(2)</sup>。

$$\frac{\kappa}{\Gamma} \gg 1 \dots\dots\dots (1)$$

このように位置ずれには強い半面、現行の装置で伝送電力が数 kW 程度と小さいのが欠点である。

〈2・3〉 比較 2方式について特徴をまとめると、表1のようになる。本稿では(ii)大容量という鉄道用非接触給電装置に対する要求を満たすため、電磁誘導方式を採用する。そして、電磁誘導方式の欠点である位置ずれによる効率低下対策について研究を行ない、鉄道用非接触給電装置に対するもうひとつの要求である(i)位置ずれ耐性に関する設計論を明らかにする。

表 1 2方式の比較

Table 1. Comparison of two theories.

|         | 容量         | 位置ずれによる効率低下 |
|---------|------------|-------------|
| 電磁誘導    | 数 10~100kW | 大           |
| 電磁界共振結合 | 数 kW       | 小           |

### 3. 研究手法

〈3・1〉 コイル可動範囲の検討 電磁誘導方式の非接触給電装置では共振を利用することを想定しているが、コイルの位置ずれによって漏れインダクタンス、励磁インダクタンス等が変化するため、位置ずれは共振状態の維持にも影響を与えると考えられる。先行研究では 2 次側の負荷である PWM 整流回路によって零電流スイッチング (ZCS) 制御を行なうことで効率を向上させる手法を提案していたが、位置ずれが大きくなるとこのような回路的な手法のみでは対応が難しくなる<sup>(3)</sup>。従って、本研究では回路的控制とコイルの位置制御の両方を用いることにする。ただし、設置場所やコストの制約から、コイルの可動範囲は小さい方がよい。そこで、回路的控制とコイルの位置制御を併用した際、コイルの可動範囲はどの程度必要なのかという設計論について検討を行なう。

〈3・2〉 等価回路を用いた研究手法 非接触給電システムの等価回路は図 1 のようになる。Cs, Cc は電力補償用コンデンサ、r1, r2 は 1 次側・2 次側の巻線抵抗、X1 は 1 次側漏れインダクタンス、X2 は 2 次側漏れインダクタンス、Xm は励磁インダクタンスである。RL は負荷の蓄電装置を表す負荷抵抗である。電力補償用コンデンサ Cc、Cs は 1 次側・2 次側ともに直列接続としている。コイルの巻線抵抗がインダクタンスより十分小さいと仮定して無視すると、等価回路中の直列コンデンサの値を式 (2)、(3) のように定めることで、1・2 次側がともに直列共振となる<sup>(3)</sup>。

$$C_s = \frac{1}{\omega_0^2(l_m + l_1)} \dots\dots\dots (2)$$

$$C_c = \frac{1}{\omega_0^2(l_m + l_2)} \dots\dots\dots (3)$$

図 1 の等価回路中の 1・2 次側漏れインダクタンス、励磁インダクタンスに電磁界解析で求めた値を代入することによって伝送効率を計算することができる。

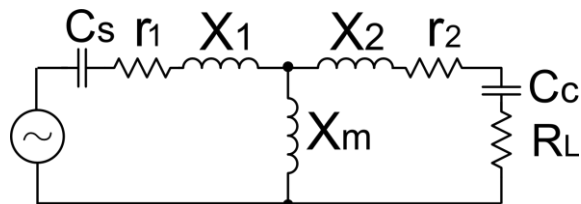


図 1 非接触給電システム等価回路

Fig. 1. The equivalent circuit of contactless transfer system

### 4 3次元電磁界解析

〈4・1〉 3次元電磁界解析の概要 H型コア、円形コア、正方形コアの3つの形状を作成し、3次元電磁界解析を行なった。本研究で3次元解析を用いているのは以下の理由による。まず、着目している漏れ磁束を正確に解析するためである。3次元解析では、2次元解析とは異なり、対象面に垂直な方向の漏れ磁束も考慮することができる。もう一つの理由は、コアの形状と空間的位置関係が必ずしも2次元形状に近似できないからである。コア単体では2次元に近似することができても、位置ずれを含んだ1次・2次側間の相対的な位置関係まで2次元モデル化することは困難である。

本稿ではH型コアと円形コアでの解析結果を示す。

〈4・2〉 形状 H型コア概形は図2のとおりである。2次側が車載コイルになるという制約から、コアが800mm四方、厚さ100mmの空間に収まるように設計した。コイルはφ5mmの銅線を想定し、50巻を2段の計100巻とした。位置ずれはH字の上下方向と定義している。円形コアの概形は図3の通りで、半径400mm、厚さ99.47mmである。この形状はコアが800mm四方に収まり、かつH型コアと体積が等しくなるように決定した。コイルはH型コアと同じ銅線を想定し、巻数は50巻を2段重ねた計100巻とした。

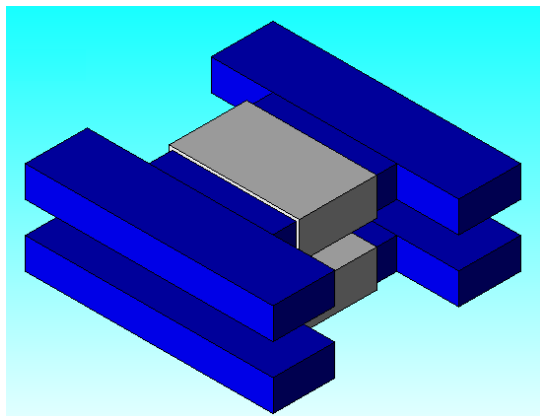


図2 H型コア概形  
Fig. 2. Form of H-shaped core.

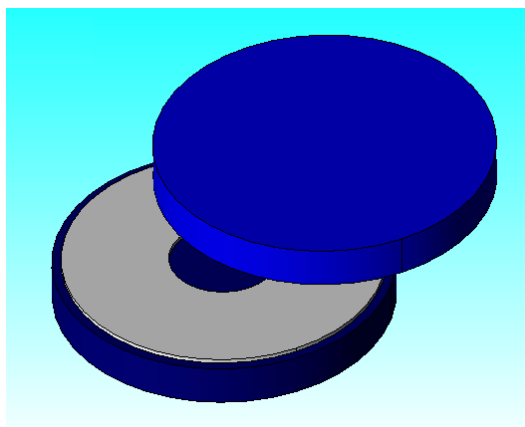


図3 円形コア概形  
Fig. 3. Form of circular core.

〈4・3〉 回路定数の算出 電磁界解析時の外部回路の設定は、1次側に1500V、1kHzの電圧源を接続し、2次側を開放とした。この解析結果から1次側漏れインダクタンス  $X_1$  と励磁インダクタンス  $X_m$  を求めた。なお、図4は非接触給電装置の2次側開放試験時の等価回路を示したものである。補償用コンデンサと負荷抵抗は記されていない。

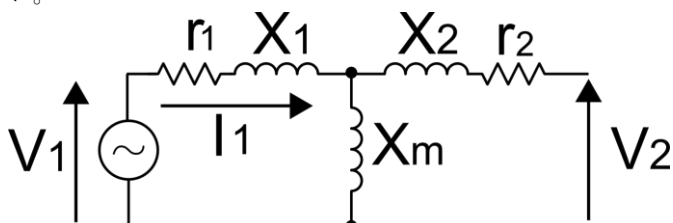


図4 非接触給電装置等価回路  
Fig. 4. The equivalent circuit of contactless transformer

〈4・4〉 3次元電磁界解析の解析結果 H型コア、円形コアの励磁インダクタンスを図5に、1次側漏れインダクタンスを図6に示す。

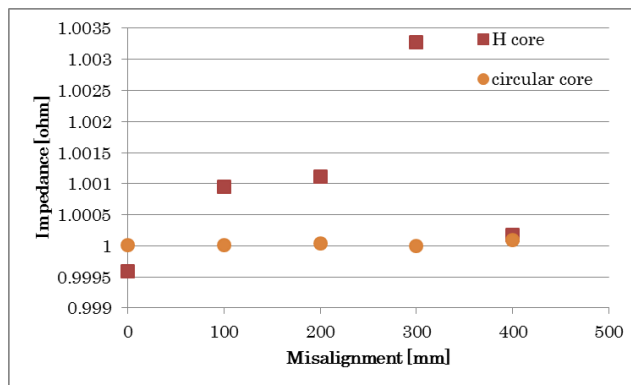


図5 漏れインダクタンスの位置ずれ特性  
Fig. 5. Leakage inductances of two cores for each misalignment

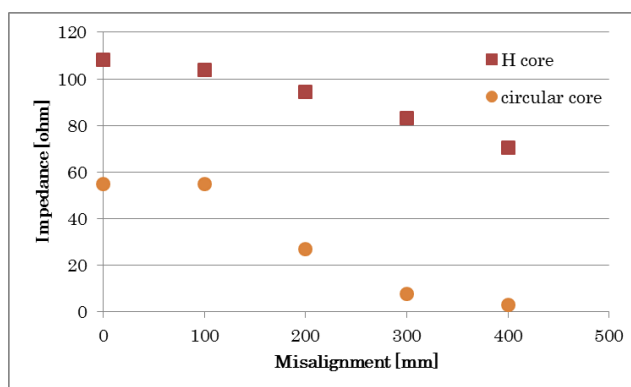


図6 励磁インダクタンスの位置ずれ特性  
Fig. 6. Excitation inductances of two cores for each misalignment.

漏れインダクタンス、励磁インダクタンスともにH型コアと円形コアの間で顕著な違いが見られる。漏れインダクタンスはH型コアでは位置ずれ300mm付近に極大値を持っているが、円形コアではほぼ横ばいである。励磁インダクタンスは位置ずれ0mm時でH型コアが円形コアの約2倍の値を持ち、両コアともに位置ずれに対して単調減少している。この結果から、コア形状によって位置ずれ耐性も異なるものになることが予想される。今後の課題となっている伝送電力は漏れインダクタンス、励磁インダクタンスを非線形に含んだ式で表されるため、本解析で求めた値を用いて各位置ずれ時の伝送電力を計算し、形状による位置ずれ耐性の違いを評価することが必要である。

## 5 まとめ

本研究では、まず鉄道用非接触給電技術として、電磁誘導方式と電磁界共振結合方式の2方式の候補を示し、伝送電力容量から電磁誘導方式を採用した。そして、電磁誘導方式では効率向上のため、回路制御と位置ずれ制御の両方が必要であることを述べた。その後、等価回路と電磁界解析を用いた伝送効率の計算法について説明し、H型コアと円形コアの非接触給電装置について、3次元電磁界解析から求

めた回路定数を示した。そしてこの結果から、コア形状によって各回路定数の位置ずれ特性に顕著な違いがあることを示した。

## 6. 今後の課題

〈5・1〉 形状の検討 本稿ではH型コア，円形コアについて解析を行なったが，伝送効率の位置ずれ特性について，より定量的な特性を把握するため，その他の形状についても同様に解析を行ない，形状と回路定数の関係について検討を進める必要がある。現在は正方形コア，八角形コア等でも解析を進めている最中である。これらの結果をもとにレール方向の位置ずれに強いコア形状を決定する。

〈5・2〉 等価回路を用いた伝送効率の算出 電磁界解析で得た回路定数をもとに，等価回路を用いた計算によって各位置ずれ時の伝送電力を算出する。この計算に2次側回路の変換方式や1次側電源を反映することにより，各回路制御方式を採用した際のコイルの位置ずれ供用範囲及び可動範囲を決定する。

## 文 献

- 
- (1) 柏木均・柏木隆行・坂本康明・笹川卓：「非接触給電システムの技術開発動向」，鉄道総研報告，Vol.24，No.1 pp.45～48 (2010)
  - (2) Kurs A, Karalis A, Moffatt R, Joannopoulos JD, Fisher P, and Soljacic M: "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science, Vol.317, No.5834 pp.83-86 (2007)
  - (3) 北澤智志・近藤圭一郎・柏木隆行: 「非接触給電システムの電力変換回路におけるコイル位置ずれ時の定電力伝送制御法とその特性」，電気学会論文誌 D, Vol.133, No.5 pp.518-525 (2012))