

鉄道車両用非接触給電装置におけるレール損失の評価

依田 裕史* 浮田 啓悟* 坂本 泰明*
 柏木 隆行** 笹川 卓***

Evaluation of the Power Loss in Rails of a Non-contact Power Supply System for Railway Vehicles

Hiroshi YODA Keigo UKITA Yasuaki SAKAMOTO
 Takayuki KASHIWAGI Takashi SASAKAWA

We have evaluated of the power loss in rails caused by the magnetic flux leakage of a non-contact power supply system for railway vehicles that is composed of figure-of-eight coils. We show that this system which has figure-of-eight coils whose leakage flux is small has an advantage that it is more efficient than the system composed of typical rectangular coils.

キーワード：非接触給電，8 の字コイル

1. はじめに

電気鉄道は環境負荷が小さく、また省エネルギーな交通機関である。一般的に鉄道車両への給電は、架線や第三軌条に対し、パンタグラフに代表される車載の集電装置を接触させることにより行われるため、定期的なメンテナンスが必要であり、また充電部が露出していることから、異物介在による地絡や感電の懸念がある。鉄道車両への非接触給電の適用によって、これらの課題が解消できる可能性がある。

自動車分野においては、近年の環境規制強化やバッテリーの性能向上に伴い、電気自動車（EV）やプラグインハイブリッドカー（PHV）の普及を背景として、利便性の高い充電方式として数 kW 級の非接触給電技術が注目されており、技術開発並びに規格策定が進められて

いる。鉄道分野においても、非電化区間での走行が可能なバッテリー搭載電車の導入が進みつつあるが、その充電においては旧来のパンタグラフ-架線系が用いられている。前述の通り、これを非接触方式とすることによる利点は少なくない。しかしながら、非接触給電技術の鉄道への適用においては、自動車用と比較して 10 倍から 100 倍の給電容量が必要となり、また損失要因となる鋼鉄レールが至近に存在するといった相違から、鉄道分野独自の技術開発^{1) 5) 6) 7)}が必要とされている。本稿では、鉄道総研において開発を行っている、8 の字コイルを用いた鉄道車両用非接触給電装置の概要、及び課題となるレールによる損失に関して報告する。

2. 鉄道車両用非接触給電装置

2.1 非接触給電の原理と損失要因

鉄道総研で開発を行っている鉄道車両用非接触給電装置は変圧器（電磁誘導）方式を採用している。本方式は一般的な変圧器の原理と同様に、交流電流が作り出す変動磁束を通じて、分離された 2 つの電気回路間で電力伝送を行うものである。通常の変圧器と異なるのは、変動磁束の磁路となる鉄心が分離されている、あるいは省略されているという点である（図 1）。すなわち磁気結合が小さく、したがって、十分な電力を効率よく伝送するためには通電周波数を高める必要がある。一般的に導体に高周波電流を通電すると、電流が導体周縁部に集中し（表皮効果）損失が増加する。この表皮効果による損失は、導体を細かく分割し、互いに絶縁された素線の集合体とすることで低減することが可能であるが、単純に各素線を並行に束ねて構成した場合、各素線が作り出す磁場の

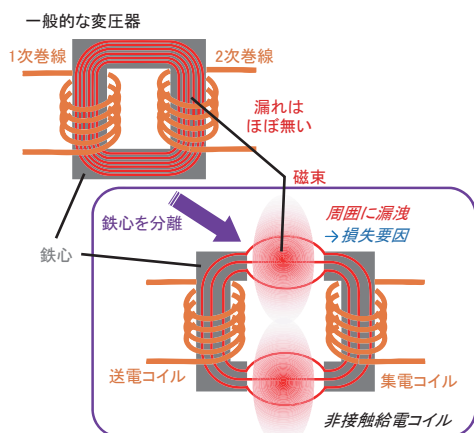


図 1 変圧器方式非接触給電の概要

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室
 ** 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室
 *** 浮上式鉄道技術研究部

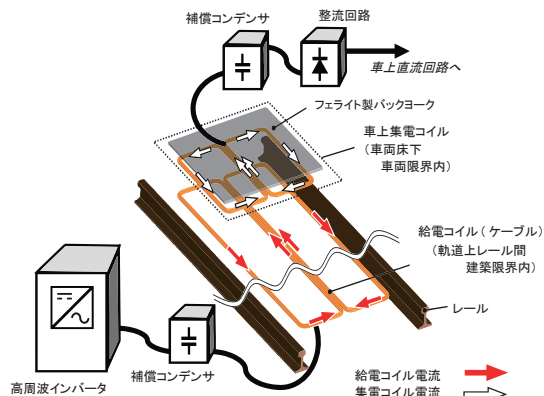


図2 鉄道車両用非接触給電装置の概要

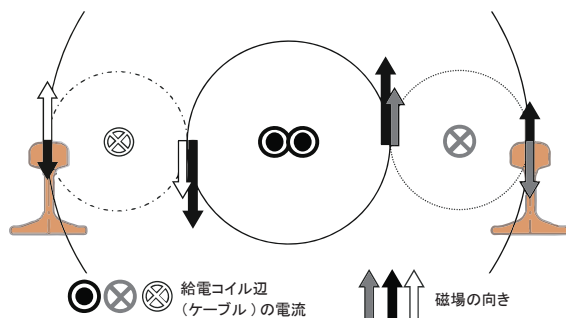


図3 8の字給電コイルによる磁場の様子

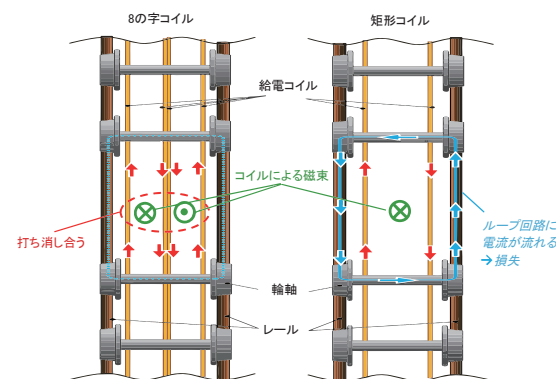


図4 8の字給電コイルによる損失低減

影響で電流分布が不均一となり（近接効果）、特定の素線にのみ集中して電流が流れるため、表皮効果と同様に損失が増加する。これらの損失（交流抵抗損失）は、絶縁された素線を束ね、撚りを施した構造のリッツ線を使用することで抑制することができる。

また、電力伝送に寄与しない周囲への漏れ磁束の存在も非接触給電特有の損失要因となる。漏れ磁束も高周波数で変動するため、鎖交した金属に渦電流が生じ損失を生む。特に、鉄などの強磁性体の場合には狭い領域に渦電流が集中するため影響が大きい。さらに、磁化に伴うヒステリシス損失も無視できない。

2.2 装置の構成と特徴

鉄道総研で開発を行っている鉄道車両用非接触給電装置の概要を図2に示す。本装置は左右レール間に設置さ

れる給電コイル、車両床下に設置される集電コイル、給電コイルに電力を供給する高周波インバータ装置と、過剰な電圧を抑制する無効電力補償コンデンサ、直流出力のための整流回路から構成される。給電コイルは一般的な矩形や円盤状ではなく、一条のケーブルを8の字形に敷設する構造となっている。これは長尺とした場合のコスト低減を狙った、鉄心レスのコイルである。集電コイルも同様に8の字形状であるが、4ターン巻となっており、また磁気結合増加および車体に対する磁気シールドを目的としたフェライト製バックヨークを有している。この8の字コイルの特徴として、レール近傍や周囲への漏れ磁束の低減効果があげられる。図3に示すように、給電コイルのそれぞれのコイル辺（ケーブル）が作る磁場は、レール付近や周辺部では弱め合い、レール間中央部で強め合う。また、給電コイルの作る磁場はレール間で総和がゼロとなるため、左右のレールが2本の輪軸で短絡されて形成されるループ回路に電流が誘起されず、単純な矩形コイルと比較して損失を低減できる（図4）。

2.3 これまでの開発成果

鉄道総研では、前節で示した鉄道車両用非接触給電装置について、1両あたり300kWの集電が可能なシステムを設計し、それを基に50kW級の試験装置を製作した。表1に試験装置の仕様を示す。また、図5に製作した給電コイルの敷設状況を、図6に制作した集電コイルの車両床下への設置状況をそれぞれ示す。所内試験線を用いて給電試験を実施し、約40kWの電力伝送を確認した。この結果の詳細については文献2)を参照されたい。



図5 給電コイルの敷設状況



図6 集電コイルの車両床下への設置状況

表 1 試験装置の仕様

電源最大出力	50 kW
通電周波数	10 kHz
ギャップ (給電コイルー集電コイル間隔)	75 mm
給電コイル	寸法 13.2 × 0.8 m ターン数 1 Turn 定格電圧 1500 V _{RMS} 定格電流 400 A _{RMS}
給電コイル (1 パネル)	寸法 0.4 × 0.8 m ターン数 4 Turn 定格電圧 440 V _{RMS} 定格電流 160 A _{RMS}

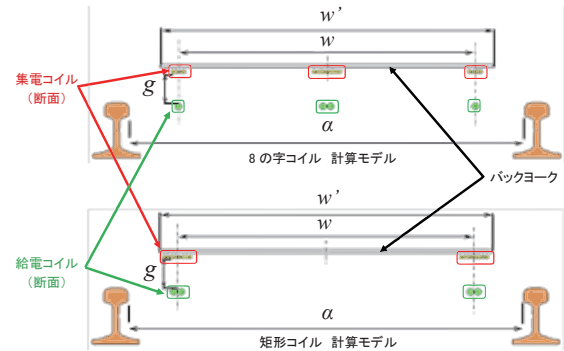


図 7 解析モデルの概要

3. 性能と損失に対するレールの影響の評価

鉄道車両用非接触給電特有の問題である近接するレールの影響について、有限要素法による電磁界解析（2次元断面）を行い、コイル磁気結合特性と損失に対するレールの影響を評価した。評価においては、鉄道車両に適した8の字コイルと一般的な矩形コイルの双方を想定し、まくらぎ方向寸法を変化させた複数のケースにおいて比較を行った。比較における給電・集電コイルの車両長手方向寸法については、単位長さあたりの性能で評価した。図7に解析モデルの概要図、表2に基本的な諸元を示す。ここで、8の字コイルモデルの諸元は前章で示した所内試験時の仕様と同一であり、等価な矩形コイルとして、同8の字コイルに対して断面あたりの使用導体量が一定となるようコイル巻数を設定している。また、レールと輪軸によるループ回路での誘導電流の影響を模擬し、左右レールを短絡した条件で解析を行った。加えて、レールの影響を明確化するため、レールの無い条件での解析も行った。図8に集電コイル対向部の磁束密度振幅の分布を示す。ここでは、ほぼ回路特性が等価となる8の字コイル $w=700\text{mm}$ と矩形コイル $w=300\text{mm}$ について示している。コイル幅に大きな違いがあるにもかかわらず、8の字コイルのレール近傍磁束密度が低いことがわかる。

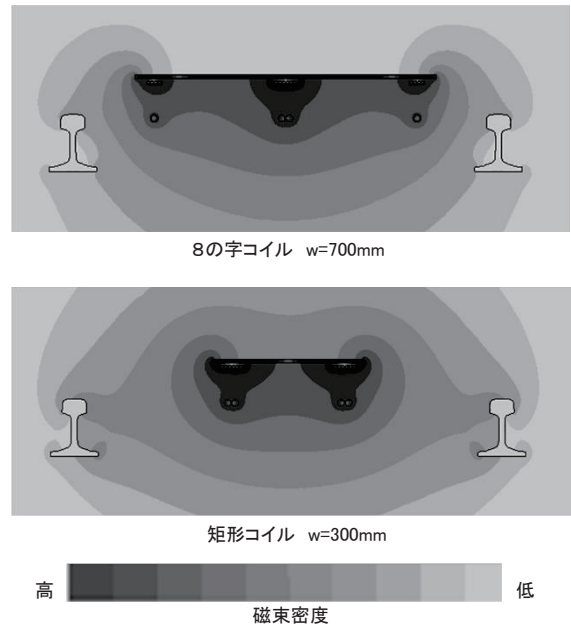


図 8 集電コイル対向部の磁束密度振幅の分布

3.1 コイル磁気結合特性への影響

非接触給電の性能を表す指標として、コイル同士の結合係数 k とコイルの Q 値（コイルのインダクタンスと抵抗値の比による値）が挙げられる。 Q はコイル巻数や導体量によってある程度設計に自由度を持つが、結合係数はコイル巻数、導体量に関係なく、コイル導体と磁性体の幾何学的配置で決まる。結合係数が高いほど無効電力増加による回路の電圧・電流の増加を抑えることができ、通電電流による損失を低減することが可能となる。従って、レールの影響による損失増加を検討するにあたり、レールにおける直接的な損失だけでなく、磁気結合特性への影響も確認する必要がある。

表 2 解析モデルの諸元

	8の字	矩形
軌間 α (mm)	1067	
給電コイルターン数 N_1 (turn)	1	2
集電コイルターン数 N_2 (turn)	4	8
周波数 (kHz)	10	
メカニカルギャップ g (mm)	75	
コイルまくらぎ方向幅 w (mm)	300 - 800	
バックヨーク幅 w' (mm)	$w+100$	

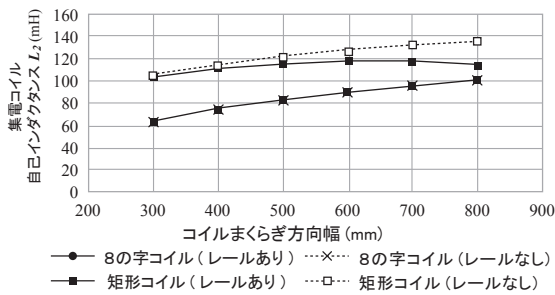


図9 結合係数の解析結果

図9に結合係数 k の解析結果を示す。レールがない場合、結合係数は8の字コイルと比較して矩形コイルが大きい。しかし、レールがある場合は矩形コイルの結合係数がレールなしの場合と比較して減少し、レールの影響を受けているのがわかる。また、コイル幅の拡大に伴い影響が顕著になっていく。これはレールに鎖交する磁束がレールに発生する渦電流による反作用磁界を受け、等価的な磁気抵抗が増加したためと考えられる。一方、8の字コイルは結合係数がレールの有無でほぼ変化がなく、レールの影響を受けにくいことがわかる。ここで図9より、8の字コイルはまくらぎ方向幅が大きいほど結合係数が大きく、8の字コイル $w=800\text{mm}$ と矩形コイル $w=400\sim 800\text{mm}$ が概ね同等の値となっている。

3.2 レールでの損失

レールでの損失について8の字コイルと矩形コイルに対して評価した。本評価においては、長手方向1m当たりの集電電力が一定値40kWとなる条件下で比較を行った。実際の非接触給電装置では、集電コイルは車両の一部に取り付けられるため、給電コイルと集電コイルが対向していない部分が存在する(図10)。また、走行中の給電を実施する場合、給電コイル敷設長は列車長よりも長くなり、給電ケーブル上に車両が在線していない場所が存在する。そのような状態での損失についても評価

した。

図11に集電コイル対向部のレール方向長さ1m当たりのレール損失を示す。集電コイル対向部には給電ケーブルの上に車両が在線しているため、図4に示した左右レールと輪軸によるループ回路が形成される。これを再現するため、解析において左右レールを短絡する(同電位)条件を与えている。8の字コイルはコイル幅を幅広としても、コイル幅の狭い矩形コイルより、レール損失が小さい。ここで、8の字コイル $w=700\text{mm}$ では、矩形コイル $w=300\text{mm}$ の損失と比較して、レール損失を1/3以下に低減できている。また、8の字コイル $w=700\text{mm}$ でのレール損失は、電源出力に対して約1%であり、コイル幅を拡大しても効率への影響が小さいことも確認できた。

給電コイルの上に車両が在線し、集電コイルが対向していない場所の1m当たりのレール損失を図12に示す。この場合も8の字コイルはコイル幅を大きくしても、コイル幅の狭い矩形コイルより、レール損失が小さい。このとき、8の字コイル $w=700\text{mm}$ の損失は矩形コイル $w=300\text{mm}$ と比較して約1/5に低減できている。また、図11の集電コイル対向部の損失と比較すると、8の字コイル同士で同じ幅での損失が約1/4～1/100、矩形コイル同士で同じ幅での損失が約1/2～1/4となっている。従って、集電コイルの存在が損失に大きな影響を与えていることがわかる。

給電ケーブルの上に車両が在線していない場所の1m当たりのレール損失を図13に示す。図11、図12と異なり、幅広の8の字コイルと幅が狭い矩形コイルのレール損失が同程度になる場合がある。例えば、8の字コイル $w=700\text{mm}$ と損失がおおよそ一致する矩形コイルのコイル幅は $w=300\text{mm}$ であった。また、図13の矩形コイルのレール損失を同じコイル幅で比較すると、損失が1/3～1/4に減少しており、給電ケーブルの上に車両が在線し、集電コイルが対向していない場所では、レール損失の大部分がレールと輪軸によるループ回路電流による損失であると考えられることができる。

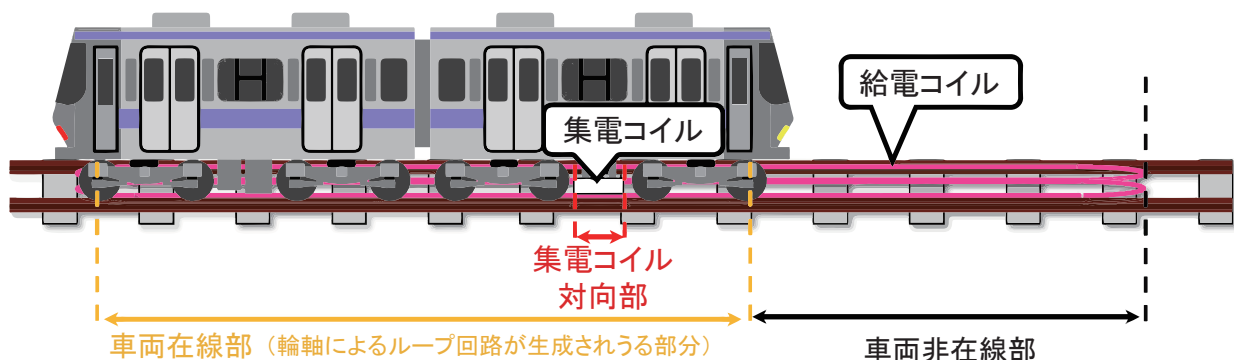


図10 車両と給電コイルの位置関係

以上の結果より、給電ケーブルの上に車両が在線している場所では、8の字コイルは、コイル幅をレール間に近いところまで拡大した場合でも、コイル幅の狭い矩形コイルと比較してレール損失を大幅に低減できることがわかった。

3.3 実システムを想定した効率分析

長尺の給電コイルを用いる場合、敷設長の増加によって走行中の受電時間を延長し、受電電力量を増加させることが可能である。その一方で、給電電力に対する銅損とレール損失が増加することによる効率の低下が懸念される。8の字コイルと矩形コイルについて、給電コイル敷設長を変化させた場合について、電源出力から集電コイル出力までの効率を計算した。集電能力を300kW（集電コイルのレール方向長さ7.5m）と想定し、給電コイルの上に在線する車両編成長を40mと設定したケースにおいて、給電コイル上に在線する場所と在線しない場所の損失を総合して試算した。給電コイル、集電コイルの導体断面積をそれぞれ $80\text{mm}^2/\text{turn}$ 、 $30\text{mm}^2/\text{turn}$ とし、導体の抵抗率を $1.8 \times 10^{-8}\Omega\text{m}$ として銅損を計算した。なお、計算には2次元電磁界解析結果を用いており、コイルのまくらぎ方向辺による銅損の増加は考慮していない。まず集電コイルと給電コイルのレール方向長さを一致（7.5m）させたケース、すなわち定置での給電を前提とした場合の効率を図14示す。8の字コイルはコイル幅が狭くなると二次銅損が増加し、効率が低下している。一方、矩形コイルはコイル幅が拡大するとレール損失が増加し、効率が大きく低下している。回路特性（給電性能）がほぼ同一となる8の字コイル $w=700\text{mm}$ 、矩形コイル $w=300\text{mm}$ を比較すると、8の字コイル $w=700\text{mm}$ の効率はほぼ同等となっており、定置給電を前提とした場合、効率という面に限っては両者に大きな差は無いといえる。しかしながら、長尺の給電コイルを考慮した場合、図12、図13で示した集電コイル非対向部の損失より、効率に差異が生じると考えられる。8の字コイル $w=700\text{mm}$ のケース、矩形コイル $w=300\text{mm}$ のケースそれぞれについて、給電コイル敷設長に対する効率を図15に示す。給電ケーブル長さの増加に伴い給電電力に対する給電コイルでの一次銅損とレールでの損失が増加するため、効率が低下していくことがわかる。給電ケーブル長が200mでの結果を比較すると、8の字コイル $w=700\text{mm}$ では効率85%、一方矩形コイル $w=300\text{mm}$ では効率81%となっている。給電ケーブルが長尺になるに従い、両者の効率が近づく傾向がある。これは、長尺になるほど、全体損失に占める車両が在線しない部分の損失が対して支配的になるためであり、図13に示した通り、この部分のレールでの損失は8の字コイル $w=700\text{mm}$ の方が若干大きいためである。

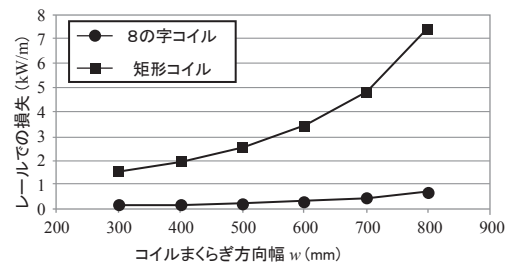


図11 レールでの損失（車両在線・集電コイル対向部）

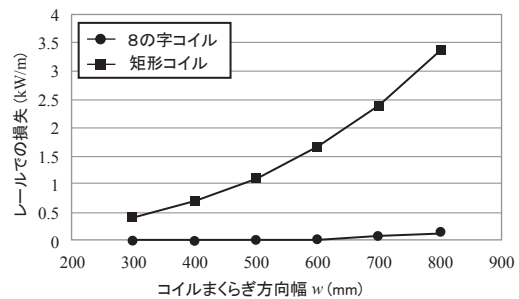


図12 レールでの損失（車両在線・集電コイル非対向部）

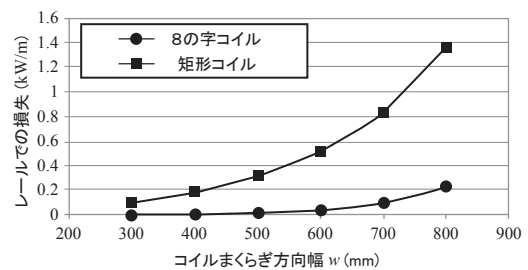


図13 レールでの損失（車両非在線部）

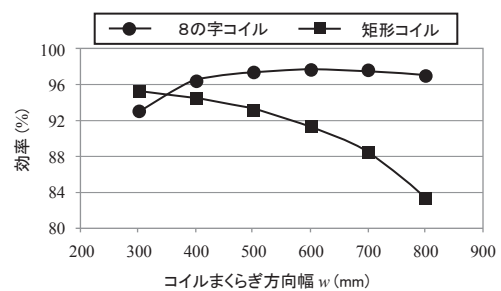


図14 コイルまくらぎ方向幅による効率の変化

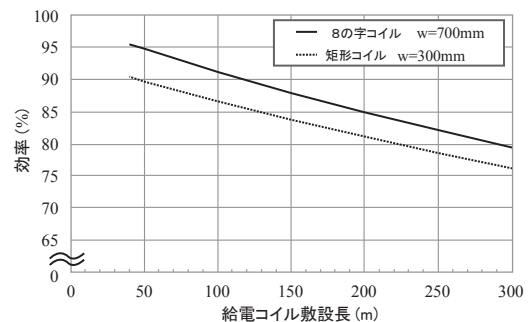


図15 給電コイル敷設長による効率の変化

3.4 実測との比較

8の字コイルのレールによる磁気結合特性への影響を評価するため、2.3節で示した試験装置を用い、レールがある状態とない状態で、励磁インダクタンスを測定した。図16に励磁インダクタンスの実測値と解析値のギャップ（給電コイルー集電コイル間隔）による変化を示す。ギャップ75mmの点において、レールの有無で励磁インダクタンスにほとんど変化がないことがわかる。従って、8の字コイル実機においても、レールによる影響を受けにくい特性が確認できた。また、実測値と解析値の差が小さいことから、解析結果の妥当性も確認できた。

同様にレールに生じる損失の測定を行った。給電コイルをレールの間に敷設して通電した場合、レールでの損失により、等価的に導体の抵抗が増加したように見える。この抵抗の増加分をレール損失の等価抵抗として、レールでの損失を評価した。これはレールがある状態とない状態で同じ値の電流を通電し、消費電力の差分から求めることができる。図17にレールでの損失の等価抵抗の実測値と解析結果を示す。実測値と解析値の差の要因についてはレール以外の地上敷設物の漂遊損失によるものと考えられる。

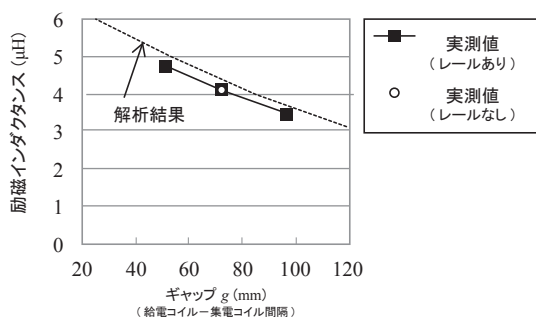


図16 励磁インダクタンスのギャップ依存性
(8の字コイル)

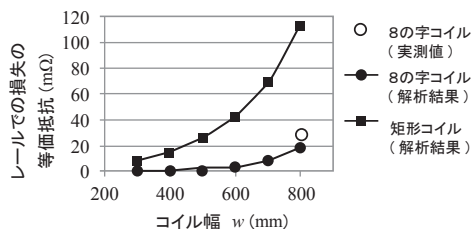


図17 レールでの損失の比較

4. まとめ

非接触給電技術の鉄道への適用においては、損失要因となる鋼鉄レールが至近に存在する点が懸念事項となる。本稿では、鉄道総研において開発を行っている、レール損失の抑制を狙った8の字コイルを用いた鉄道車両用非接触給電装置について、一般的な矩形コイルとの比較を行い、電磁界解析によりレール損失の評価を行った。その結果、8の字コイルを用いた場合、一般的な矩形コイルと比較してレールによるコイルの磁気特性への影響を低減可能であることが明確となった。

レールに生じる渦電流による損失については、既報文献3)、4)での基礎検討の発展として、コイル幅による影響を考慮した検討を行った。また本稿では、車両が在線している部分に関して、輪軸を経由したループ回路の影響を含めた評価を行った。その結果、特に輪軸を経由したループ回路電流による損失が大きいため、それが発生しない8の字コイルを用いることで、同等性能の一般的な矩形コイルに対して損失を大幅に低減可能であることがわかった。

文 献

- 1) 浮田啓悟, 柏木隆行, 坂本泰明, 近藤圭一郎: 磁気結合特性とレールにおける損失を考慮した鉄道用非接触給電装置のコイル設計法, 電気学会論文誌, Vol. 137-D, No. 6, pp. 518-525, 2017
- 2) 柏木隆行, 浮田啓悟, 坂本泰明, 加藤佳仁: 鉄道車両用非接触給電装置の電力供給性能検証, 鉄道総研報告, Vol. 29, No. 11, pp. 35-40, 2015
- 3) 柏木隆行, 長谷川均, 坂本泰明, 加藤佳仁: 在来方式車両用非接触給電装置に用いるコイルの構成, 鉄道総研報告, Vol. 26, No. 5, pp. 41-46, 2012
- 4) 長谷川均, 柏木隆行, 坂本泰明, 笹川卓: 非接触給電コイルの鉄道レールへの影響検討, 電気学会研究会資料, SPC-08-179, LD-08-82, pp. 37-41, 2008
- 5) 松岡秀樹, 渡邊翔一郎, 古関隆章: T字形等価回路モデルを利用した鉄道用電磁誘導式非接触給電装置のコア形状・位置ずれによる特性変化の研究, 電気学会論文誌, Vol. 135-D, No.7, pp. 746-754, 2015
- 6) 下出大輔, 村井敏昭, 澤田理: 試験装置を用いた鉄道車両用非接触給電システムの実用化検証, 電気学会論文誌, Vol. 136-D, No.1, pp. 37-45, 2016
- 7) 山口淑幸, 河村篤男: ギャップ付き同軸トランス方式非接触給電を用いた電気鉄道ミニモデルによる走行試験, 平成28年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 5-39, pp. 289-292, 2016