

車上集電電力密度を向上した 鉄道車両用非接触給電システム

依田 裕史* 浮田 啓悟**

Wireless Power Transfer System for Railway Vehicles with Improved Power Density of Onboard Coil

Hiroshi YODA Keigo UKITA

To enhance the flexibility of installation of wireless power transfer (WPT) system on railway vehicles, we modified WPT to increase the power per unit opposing area of ground and onboard coil up to 150kW/m^2 by setting mechanical gap between coils at 150-mm. In this paper, we describe the design of improved WPT system capable of collecting 150kW with a single onboard coil and the results of bench test using a reduced model to verify the system.

キーワード：非接触給電，8の字コイル，バッテリー，ハイブリッド，充電

1. はじめに

非接触給電（WPT：Wireless Power Transfer）技術は、スマートフォン等の充電に用いられる Qi や電動歯ブラシ等、小容量の製品は広く普及している。近年ではより大容量の応用として、電気自動車の充電装置としての普及を目指し、国際規格が整理されつつある。一方、鉄道分野への適用については、以前より磁気浮上式鉄道における車上電源への給電装置として開発が進められてきたほか、この 10 年の間に在来方式鉄道への適用を目指してヨーロッパや韓国において基礎的な実証試験が行われており¹⁾、近年では EU における革新的鉄道技術の創出を目指すプロジェクトである Shift2Rail の課題の一つとして取り上げられている。鉄道総研においても、以前より走行用バッテリー搭載車両向けの簡易な充電設備としての導入を目指し、技術開発を進めている。2014 年には 50kW 級システムを試作し、レール間に設置した地上給電コイルから車両床下に搭載された車上集電コイルへの非接触給電を実証した。本稿では、この実証システムの基本思想を踏襲しつつ、主に車上集電コイル搭載性の向上を図った改設計システムについて、試験による設計検証と性能評価の結果を報告する。

2. 鉄道車両用非接触給電（WPT）システム

2.1 変圧器方式非接触給電の概要

開発している鉄道車両用 WPT システムにおいて、非接触給電の方式には変圧器方式（電磁誘導方式、磁界結合方式と呼称される場合もある）を採用している。これ

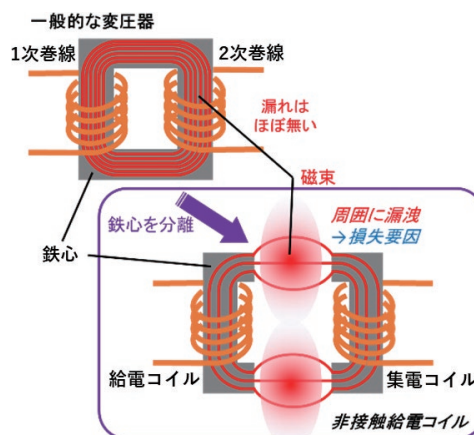


図1 変圧器方式による非接触給電

は図1に示す通り、一般的な変圧器の鉄心を分離し、1次側と2次側が互いに自由に移動できるようになったものと考えられる。変圧器は1次巻線と2次巻線の間で磁束を介して電力を伝送しており、鉄心はその磁束の経路を形成し、確実に互いの巻線を鎖交できるように用いられている。鉄心を分離しても、鉄心の間の空間を介して電力伝送が可能であるが、磁気結合に寄与する1次巻線と2次巻線を互いに鎖交する磁束は空間を広げるほど減少し、誘導起電力が大きく低下してしまう。その低下を補い、十分な電力伝送を行うためには周波数を高める必要がある。また、結合に寄与しない磁束は周囲に広がり、大きな無効電力を生じる。これを補償するために回路にコンデンサを挿入し、LC共振周波数で動作させることにより力率を1に調整することで、電源の皮相容量を最小化する手法が一般的に用いられている。

導体には、高周波電流を効率的に送電するため、リッツ線と呼ばれる極細のエナメル線を多数の束ねた撚り線を使用する。極細の線を束ねているのは、高周波電流が

* 浮上式鉄道技術究部 磁気浮上研究室

** 浮上式鉄道技術究部 電磁気研究室

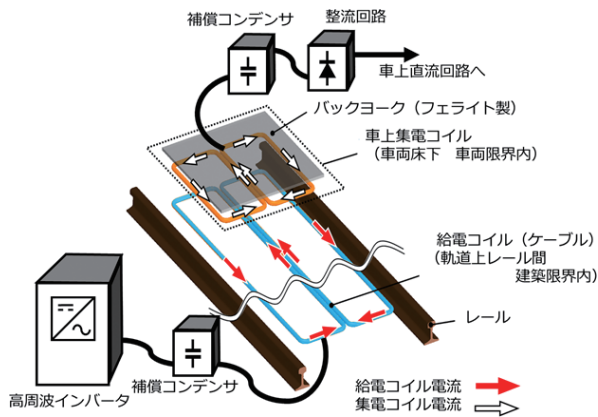


図2 鉄道用 WPT システム構成の概要

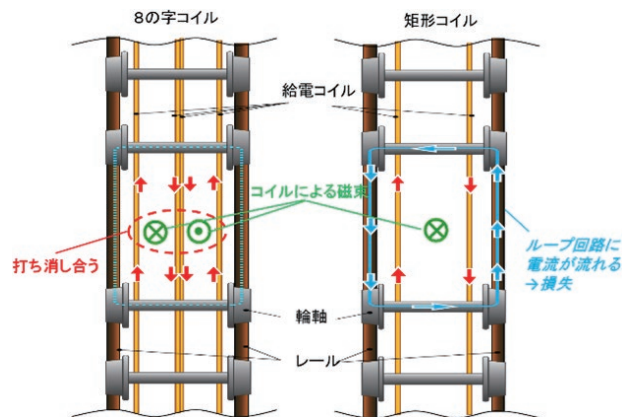


図3 8の字結線コイル

導体周縁部に集中して流れようとする表皮効果によって、太さのある導体では大部分が電路として機能しなくなるためである。また、コイルから周囲に広がった高周波磁束が導体に鎖交すると渦電流を生じ、損失を発生させる。特にレールや車両機器に使用される鉄のような強磁性体では表皮効果が強く、導体表面のごく浅い領域に渦電流が集中することから大きな損失が発生する。この損失の抑制は、レールがコイルの近傍に存在する鉄道への WPT 適用における一つの課題である。

2.2 鉄道車両用 WPT システムの構成

図2に鉄道用 WPT システムの全体構成の概要を示す。これは左右レール間に、リッツ線ケーブルからなる8の字ループ形状の地上給電コイルを敷設し、同じく8の字形リッツ線巻き線による車上集電コイルを対向させ、電力伝送を行うものである。また、走行中給電に用いる地上給電コイルについては、ケーブル1条のみからなる空芯の簡素な構成とすることで、敷設コストの抑制、地上コイルの長尺化に対応し、また保線作業への影響を抑制している。ここで、コイルを8の字形としていたのは、鉄道への適用において重要な意味を持つ。

レール間に地上コイルを敷設する場合、図3に示すように、左右レールと2本の輪軸によって構成されるループ回路に対し、単純な矩形コイルでは発生する磁束により電流が誘導され、損失要因となってしまう。これに対し、8の字形であれば、左右のコイルが発生する磁束が打ち消しあうため、理想的にはループ回路に電流は流れず、これによる損失は生じない。また、地上コイル磁束が鎖交することによるレール損失も、強磁場領域が軌道中心部に位置することになるため、低減が可能となる。

2.3 鉄道車両用 WPT システムの適用イメージ

鉄道車両用 WPT システムには、一般的な架線-パンタ系や第三軌条を用いた集電に対して、以下のような特長がある。

- ① 摩擦がなくメンテナンス低減を図れる
- ② 課電部露出がなく安全性が向上するだけでなく飛来物等による事故の恐れがない
- ③ 機械的な操作なしに停車中・走行中を問わずシームレスな給電を行える

近年、バッテリー電車やハイブリッド気動車等、走行用バッテリーを搭載した車両が相次いで導入されている。特に、国内で導入されているバッテリー電車はパンタグラフを搭載し、電化区間の走行中や、剛体架線設備を設けた折返し駅での停車中にバッテリーへの充電を行う運用を行っている。このような方式では一定の距離を走破し、また異常時の長時間停車に備えるため、大容量のバッテリーが搭載される。これに対し、例えば、線区走行中に小容量の充電を高頻度に行うことができれば、走行に伴い消費された容量をすぐに充電することができ、異常時の長時間停車時でも至近の充電設備で充電が可能であることから、バッテリー搭載量を抑制することが可能である。また、折返し駅でのみ充電する場合と比較して、充電電流が小さくなり、バッテリーへの負荷が軽減され、性能劣化の抑制が期待できる。また、このような充電設備はハイブリッド車両の長時間停車時の補機電力供給や、ディーゼルエンジン等主機での連続走行となる急こう配区間での補助的な給電等に使用することも可能である。

上記のような小容量・高頻度充電のための設備として、鉄道車両用 WPT システムは適合性が高い。WPT システム導入イメージを図4に示す。バッテリー搭載車両は地方閑散線区を中心に導入されることが予想されることから、特長①および②による維持管理コストの低減効果は重要である。架線-パンタ系で高頻度の充電を行う場合、パンタグラフ昇降操作を確実にするための停車時間延長や、上昇状態で充電区間から逸脱しない措置の導入が必要になるなどが考えられるが、特長③を有する WPT システムはこれらの対策が不要で、充電が有効な箇所へ地上設備を導入するだけで、充電を行うことがで

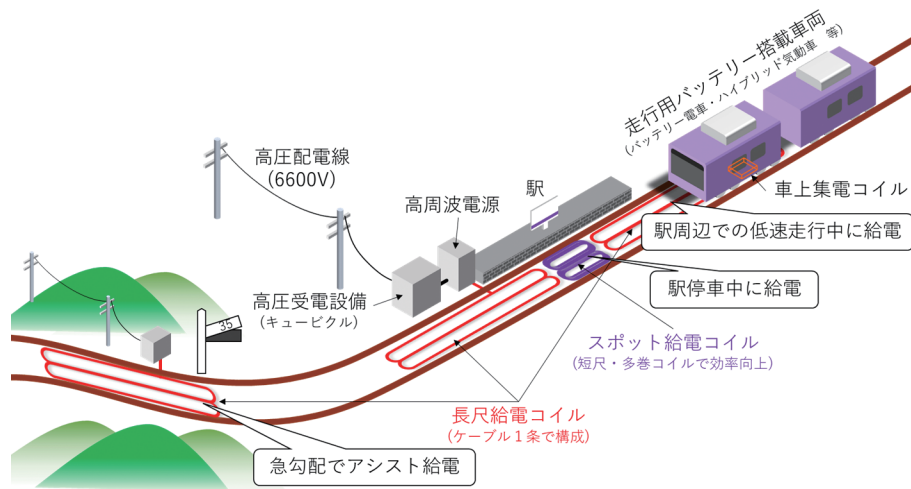


図4 鉄道車両用 WPT システムの導入イメージ

きる。

3. 高電力密度非接触給電システムの開発

3.1 原理実証システムの概要

新たに設計した高電力密度非接触給電システムは、2014年に製作した原理実証システム²⁾の基本構成を踏襲しつつ、性能向上を図っている。原理実証システムでは車上コイルを低圧の範囲で設計しており、車上コイルの搭載スペースとして、一般的な車体長約20mの在来線車両1両の前後台車間の床下機器の底面全てを使用することで、最大300kWを集電可能なシステムとなっている。通電周波数については、高周波とするほどシステムの小型化、軽量化を図ることができるが、先に述べた交流抵抗や、機器耐圧、また国内の電波法における制限などを考慮し、10kHz弱を基本としている。本システムは、地上コイル車上コイル間の離隔（メカニカルクリアランス）を建築限界―車両限界間で許容される最小値に設定している。その結果、車上集電コイルの薄型化と車上補償コンデンサの小型化を図ることができ、床下機器箱の底面に装着することで、その他機器に支障せずに台車間スペース全面を無理なく使用できる構造となっている。また、1台16.7kW集電可能なパネルの搭載台数により総集電電力を容易に調整可能なモジュラー設計を採用している。図5に実際に製作した、地上給電コイル（ケーブル）と集電コイル（パネル）3台による給電試験用50kW級システムを示す。

この原理実証システムの製作と給電試験において、鉄道への非接触給電技術の適用可能性が実証された。一方で、実用化を見据えた場合、以下の点を改善する必要がある。ひとつは床下スペース全面を使用する前提の設計であり、これはシステム搭載を前提とした車両設計が必

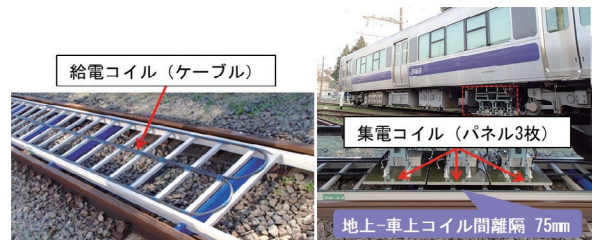


図5 試作した原理実証システム

要となること、また、走行用バッテリー搭載車両は床下スペースに余裕が少ないことから、改善が必要である。もうひとつは地上コイル車上コイル間の離隔であり、これは営業用車両では余裕を見て75mmより大幅に大きく設定されていることから、改善が必要となる。

3.2 改設計の指針とシステム全体構成

車上集電コイルの占有スペース縮小を目指し、単位面積当たりの集電電力、すなわち集電電力密度を原理実証システムの3倍となる150kW/m²以上に向上することを目標に、システムの改設計を行った。同時に、地上コイル車上コイル間の離隔についても、2倍となる150mmへの拡大を試みた。改設計では、原理実証システムの基本構成を踏襲しつつ、離隔拡大に伴う性能低下を補い、かつ集電電力密度を向上する。これは電気設計上厳しい条件を要求されることを意味しており、WPTシステムにおいては有効電力密度の増大以上に、無効電力の大幅な増大³⁾に対応する必要がある。したがって、地上ケーブル、車上コイルの導体量増加と耐圧向上を図ることが改設計における基本的な方策となる。

この方策により、原理検証システムにおける車上コイルは、単一コイル出力電圧が600V_{DC}になるようコイルの進行方向の寸法を制限し、多数のコイルを車両に搭載

する設計思想であったのに対し、改設計システムでは、単一のコイルで大きな電流・電圧を扱う設計となる。これに伴い、補償コンデンサが大型化するため、原理実証システムで採用した、コンデンサとパネルを一体とする構成から、コイルとコンデンサを分離した構成に変更した。また基本構造としてエポキシモールドとし、巻線構成は、コイル端子間電圧を抑制しつつ、導体占積率を高めるため、平巻き構成可能な巻き数・リッツ線外径を設定した。その上で、電磁界解析によりバックヨーク量・配置の適正化を図った⁴⁾。また、伝熱解析により想定した通電・冷却サイクル条件にて運用可能な電流密度を設定した。以上のプロセスで、車上コイルのまくらぎ方向断面の設計が定まる。次に、モールド機器としての製作性、車載振動条件に対する機械強度を考慮してコイルのレール方向長を定めた。以上より、1台のパネルで、定

格電流 600A にて 150kW の集電が可能なコイルを設計した。表 1 に改設計システムと原理実証システムの主要諸元を示す。ここで、コイル有効面積は幅のある巻線の中心線により作られる矩形の面積として定義している。また、図 6 に設計した車上集電コイルを示す。改設計における車上集電パネル 1 台は原理実証システムのパネル 9 台分の定格集電電力となるが、皮相容量は約 67 倍と大幅に増加していることがわかる。

4. 規模縮小試作と試験による性能評価

設計したシステムの製作性、および設計の妥当性を確認するため、試験用のシステムを製作した。以下に概要を示す。

4.1 試作システムの概要

4.1.1 地上給電コイル

地上給電コイルを構成する高圧リッツ線ケーブルは、一般的な定格 6.6kV 定格 PV ケーブルの構造を踏襲しつつ、誘導電圧が生じてしまうシールド層を省略し、芯線を導体量 100mm² のリッツ線としたものである。図 7 に軌道に敷設した状況を示す。

表 1 改設計システムと原理実証システムの主要諸元

		原理実証システム	改設計システム
通電周波数 [kHz]		10.0 (未満)	
地上給電コイル	構造	リッツ線ケーブル1条 8の字ループコイル	
	まくらぎ方向幅 [mm]	800	700
	素線総断面積 [mm ²]	80	100
	定格電流 [A _{rms}]	400	500
	定格電圧 [V _{rms}]	1500	6600
地上コイル車上コイル 離隔 [mm] (メカニカルクリアランス)		75	150
車上集電コイル (単位: パネル)	本体構造	薄型 GFRP フレーム	エポキシモールド
	補償コンデンサ 整流回路	パネル毎に 一体化	パネルと 別体
	パネル外寸 [mm] (レール方向×まくらぎ方向)	500×900	1470×930
	パネル質量 [kg]	42	162
	定格集電電力 [kW]	16.7	150
	コイル有効面積 [m ²]	0.32	0.89
	集電電力密度 [kW/m ²]	52.2	168.5
	コイル巻き数	4	8
	素線総断面積 [mm ²]	30	82.4
	定格電流 [A _{rms}]	160	600
	端子間電圧 [V _{rms}]	440	7850
	皮相容量 [kVA]	70.4	4710
	出力仕様 (電圧・電流) [V _{DC} ・A _{DC}]	600・27.8	250・600

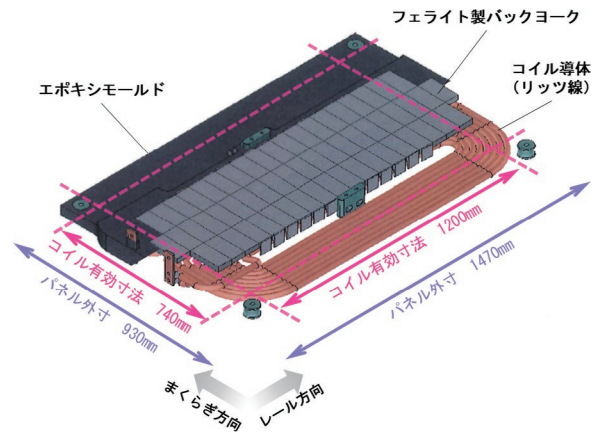


図 6 150kW 級車上集電コイルの概要



図 7 高圧リッツ線ケーブルによる地上コイル

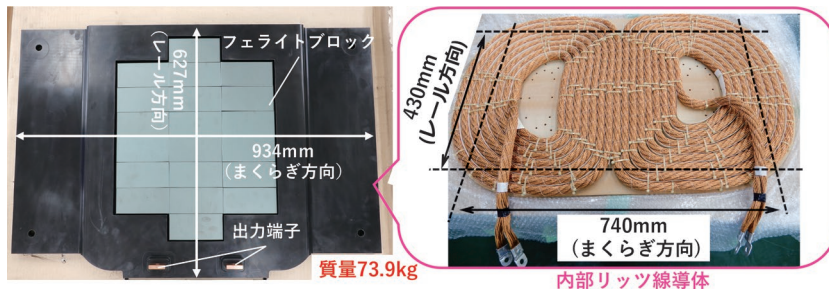


図8 規模縮小 50kW 級車上集電コイル

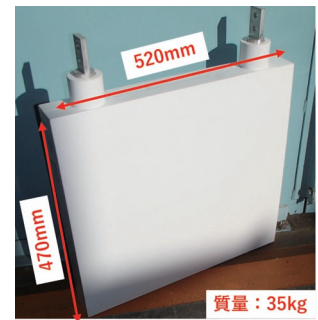


図9 車上補償コンデンサ

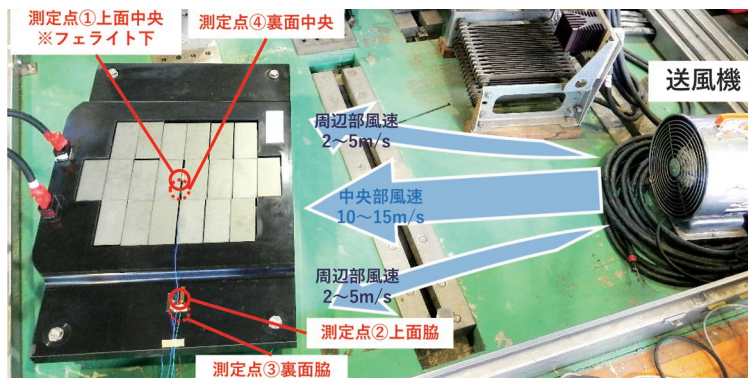


図10 車上コイル熱負荷試験

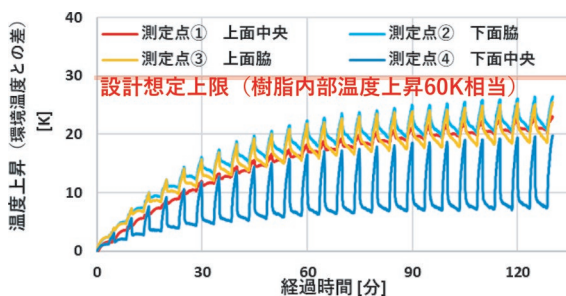


図12 表面温度測定結果

4.1.2 車上集電コイル

給電試験用の電源として 50kW 級の高周波インバータを使用することから、設計した 150kW 級車上集電コイルでは定格条件での試験が実施できない。そのため、150kW 級コイルの基本構造をそのままに、中央部のレール方向寸法を短縮することで、50kW 級に規模を縮小した試験用車上集電コイルを製作した。製作したコイルを図 8 に示す。なお、これは高圧機器としての製作性の確認と性能評価を目的とし、定格電圧 6.6kV 仕様で設計している。

4.1.3 車上補償コンデンサ

図 9 に製作した試験用高圧モールドコンデンサを示す。これを車上コイル 1 台に対し 2 台並列で用いる。

4.2 車上コイル熱負荷試験

車上コイルの実使用時の温度上昇を確認するため、設



図11 設定した通電・冷却サイクル

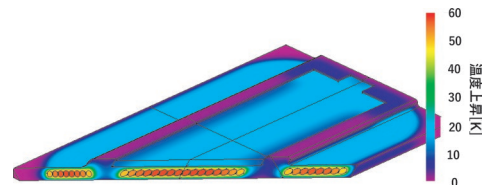


図13 伝熱解析結果

計時に考慮した、実使用を想定した通電パターンと走行風を模擬した冷却条件で熱負荷試験を実施した。図 10 に試験環境と風速分布、表面温度の測定点を示す。本試験における送風機を使用した冷却は、その風速から 40km/h 程度での走行風に相当するものと考えられる。試験時の通電サイクルと冷却条件を図 11 に示す。これは各駅で WPT システムによる充電を行うパターンを想定し、90 秒 600A 通電（駅停車中及び低速区間での充電を想定）、210 秒待機（駅間走行を想定）とするサイクルを繰り返すものである。

図 12 に各測定点での温度測定結果を示す。設計時に実施した伝熱解析（図 13）では、モールド樹脂内部が温度上昇限度値 60K 程度（初期温度を 40℃ とした際モールド樹脂許容温度である 100℃ までの上昇に相当）で飽和した際、表面温度上昇は 30K 以下となる結果が得られており、本試験の結果はそれを満足している。従って、車上コイル熱設計は妥当であることが本試験により確認できた。

4.3 長尺地上コイルと車体搭載車上コイルによる試験

電磁界解析を用いた設計の妥当性を検証するため、図 7 で示した地上コイルを敷設した所内試験線にて、床下

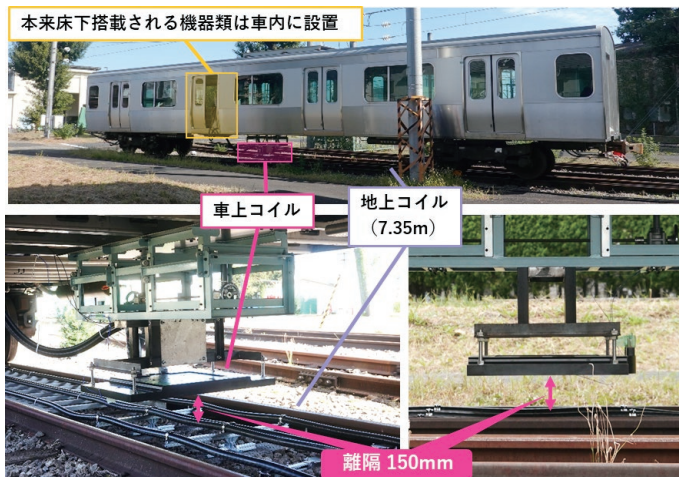


図 14 長尺地上コイルと車体搭載車上コイルによる試験

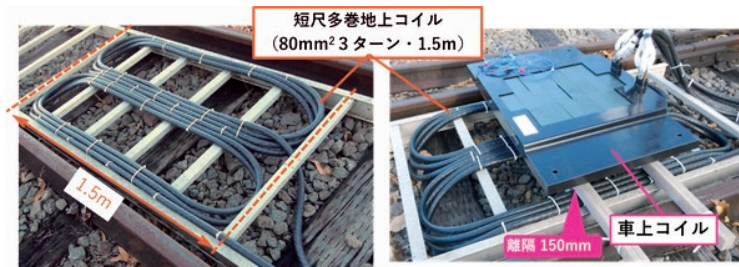


図 15 短尺多巻地上コイルを用いた試験

に車上コイルを取り付けた試験車両を留置し、給電試験を行った。図 14 に試験の状況を、表 2 試験結果を示す。表 2 より、本試験条件において実測値と解析値はよく一致しており、車上コイル設計における電磁界解析が十分な精度を有することが確認できた。

4.4 短尺多巻地上コイルを使用した高効率給電試験

本システムは走行中給電を行うための長尺地上コイルの使用を前提としている。このため地上コイルは簡素な構造とする必要があり、伝送効率向上が難しい一因となっている。一方で、停車中に限った給電であれば、地上コイルは最小限の長さで、かつより多くの導体を使用できる。これにより電流密度を低下させ、損失を抑制すれば、より高効率な電力伝送が実現できる。本試験は図 15 に示すように、3 ターンの短尺地上コイルと車上コイルを離隔 150mm で対向させ実施した。電源最大出力時の電力伝送効率の測定結果を表 3 に示す。伝送効率上有利な設定ではあるものの、前述の長尺地上コイルを用いた試験では 86% であったのに対し、90% 以上のコイル間効率にて、目標とした集電電力密度 150kW/m² の電力伝送を実証した。

表 2 試験結果と解析結果の比較

	試験結果 (実測)	試験条件での解析結果
通電周波数 [kHz]	9.50	←(入力条件)
地上コイル電流 [A _{rms}]	559	←(入力条件)
車上コイル端子間電圧 [V _{rms}]	2157	2043
車上コイル電流 [A _{rms}]	481	←(入力条件)
車上コイル集電電力 [kW]	36.2	34.0
コイル間伝送効率 [%]	85.8	84.0

表 3 電源最大出力時の測定結果

	試験結果
通電周波数 [kHz]	9.93
地上コイル電流 [A _{rms}]	338.6
地上コイル端子間電圧 [V _{rms}]	1003
車上コイル端子間電圧 [V _{rms}]	1002
車上コイル電流 [A _{rms}]	285.1
車上コイル集電電力 [kW]	49.4
集電電力密度 [kW/m ²]	155.2
コイル間伝送効率 [%]	92.0

5. まとめ

鉄道車両用非接触給電システムは、バッテリー電車に対し小容量の充電を高頻度に行うことでバッテリー搭載量を抑制する、あるいはハイブリッド車両の長時間停車時の補機への電力供給や、急こう配区間での補助的な給電等に使用する等の用途に適した、走行中・停車中を問わず使用できる簡素な給電システムである。これまでの開発で、課題となっていた車上集電コイルの占有スペース縮小と地上一車上コイル間の離隔拡大を目指し、集電電力密度を原理実証システムの 3 倍となる 150kW/m² 以上に向上すると同時に、離隔についても 2¥2 倍となる 150mm へ拡大できる改設計システムについて、150kW 級車上集電コイルの設計を行った。また、この設計の妥当性を、基本構造をそのままに 50kW 級に縮小し製作した試験用コイルにて検証した。その結果、電気設計、熱設計の妥当性を確認できた。なお、設計したコイルの実用にあたっては、コイルの高圧化と高周波通電長期耐久性の検討が必要と考えられる。また、停車中の高効率給電に特化した短尺多巻地上コイルを使用した給電試験においては、90% 以上のコイル間効率にて、

目標集電電力密度での電力伝送を実証した。

本研究の一部は、早稲田大学との共同研究として実施した。

文 献

- 1) Liming Shi, Zhenggang Yin, Longbin Jiang, Yaohua Li, "Advances in inductively coupled power transfer technology for rail transit," CES TEMS, pp.383-396, 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, 2018
- 3) 依田裕史, 坂本泰明, 柏木隆行, 笹川卓：高電力密度非接触給電システム用コイルの設計, 鉄道総研報告, Vol.33, No.5, pp.17-22, 2019
- 4) 浮田啓悟, 坂本泰明, 柏木隆行, 近藤圭一郎, 若尾真治：鉄道車両用非接触給電装置の集電コイルにおけるフェライトコア削減の検討, 日本 AEM 学会誌, 28 巻 4 号, pp.276-281, 2020