

走行中給電用プレキャストコイル構造体の 載荷試験と機械的及び電氣的評価*

清水修¹⁾ 山田翔太¹⁾ 藤本博志¹⁾ 田中浩一²⁾ 佐藤正憲²⁾ 角谷勇人³⁾ 高橋英介³⁾ 山口宜久³⁾ 谷恵亮³⁾

Mechanical and Electrical Evaluation of Precast Coil for Dynamic Wireless Power Transfer as Road Structure

Osamu Shimizu Shota Yamada Hiroshi Fujimoto Koichi Tanaka Masanori Sato
Hayato Sumiya Eisuke Takahashi Nobuhisa Yamaguchi Keisuke Tani

Dynamic wireless power transfer (DWPT) has been proposed to solve the issues of a short cruising range and Green House Gas emissions in manufacturing electric vehicles. Both the durability of the road structure and the transmitter coils of DWPT are important for the implementation of DWPT system on public roads. On the other hand, it is important to thin road structure on the coils to improve the transmitting efficiency. To realize both high durability and the high transmitting efficiency, the precast coil that has the transmitter coils in the high-performance fiber reinforced cement composite is proposed. This paper presents the evaluation method and the measured results of the durability of the precast coil as the road structure.

KEY WORDS: EV and HV systems, charge/discharge, wireless power transfer, road (A3)

1. 研究の背景

温室効果ガス (GHG : Green House Gas) 排出量削減のために電気自動車 (EV : Electric Vehicle) の普及が進められている。しかし、EV の持つ性能的課題として航続距離が挙げられる。

大量の電池を車両に搭載することで EV の航続距離を伸長できるが、電池のコスト増加による車体コストの増加や電池の製造による GHG 排出量の増加が課題⁽¹⁾になる。さらに電池重量の増加により走行抵抗が増加し、発電から走行までのエネルギー効率が低下する。以上のことより、EV をより持続可能にするためには電池の使用量を削減することが重要であることが分かる。

電池の使用量を削減しつつ、航続距離を伸長できる技術として、走行中給電がある。走行中給電とは走行している車両に対して電力を供給する技術である。走行中に連続的もしくは間欠的に給電を行うことで、車両に搭載する電池容量を減らすことができ⁽²⁾、さらに航続距離を大幅に伸長することができる。

走行中給電には接触式と非接触式がある。さらに非接触式には電界結合方式⁽³⁾と磁界結合方式⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾が提案されている。その中でも本稿では磁界結合方式の走行中給電を対象とする。

磁界結合方式の送電原理は送電コイルが発生した磁界を受電コイルに鎖交させて、電力に変換するという電磁誘導である。停車中給電ではすでに規格化が進んでおり⁽⁷⁾、送電コイルは路面上に設置することを想定されている。これは駐車場の利用を想定しており、万が一車両が送電コイルに乗り上げたとしても車両速度が低く、車両挙動に大きな影響がないためである。

一方で、走行中給電は一般道や高速道路での利用を想定しているため車両速度が高い状態で送電を行うことがある。車両速度が高い状態で送電コイルに乗り上げると、車両挙動が不安定になり危険であるため、走行中給電では送電コイルを路面内に埋設する必要がある。

日本では道路構造の設計のガイドライン⁽⁸⁾が定められている。送電コイルを埋設する際のガイドラインは定められていないが、一般的な道路では、その道路上の交通量が多いほど舗装の厚さを厚くする必要がある。これは路面の耐久性を高めるために舗装の厚さを厚くすることが重要であることを示している。

しかし舗装の厚さが厚いほど、コイルを埋設する深さが深くなり、送電コイルと受電コイルの距離は遠くなる。すると送電コイルと受電コイルの結合係数は減少し、送電効率が低下する。すなわち路面の耐久性と送電効率とはトレードオフの関係にあることが分かる。

路面耐久性と舗装厚さの両立のために、本研究では繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC : High Performance Fiber Reinforced Cement Composite) を活用したプレキャスト構造

*2023年 月 日受理. 2023年 5月 26日 自動車技術会
春季学術講演会において発表.

1) 東京大学 (277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

2) (株)大林組 (108-0075 東京都港区港南 2-15-2)

3) (株)デンソー (448-8661 愛知県刈谷市昭和町 1-1)

の路面を提案する。繊維補強セメント複合材とはセメントに樹脂等の繊維を練り混ぜ、セメントの強度を高めたものである。プレキャスト構造とは道路上でセメントを現場打設するのではなく、工場であらかじめ打設・養生して、セメントの強度を高めた状態にしたものである。このプレキャスト構造の路面と送電コイルを一体化したものを、本研究ではプレキャストコイルと呼ぶ。

本研究ではプレキャストコイルの試作と耐久性評価について述べる。2章では本研究で対象とする走行中給電システムを紹介し、3章でプレキャストコイルの構造について述べる。4章ではプレキャストコイルの製作と埋設の工程を紹介する。5章では路面の評価方法について述べ、6章で評価結果をまとめる。そして最後に7章で結論を述べる。

2. 走行中給電システム

本研究で対象とする走行中給電システムは、磁界共振結合方式を用いている。システム構成を図1に示す。送電側はACDCコンバータ、インバータ、共振コンデンサと送電コイルで構成され、受電側は受電コイル、共振コンデンサ、整流回路と出力調整回路で構成される。路面内に埋設されるものは、送電コイルと送電コイルと接続される共振コンデンサ、それらを入れるためのケースと、ケースとインバータと接続するための配線である。ACDCコンバータやインバータ、電力の引き込みに必要なブレーカー等の系統側の機器は、植樹帯などの道路脇の地上に設置することを想定している。

本研究で対象とする走行中給電システムを搭載した車両を

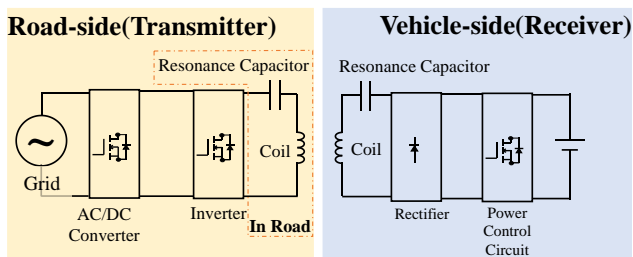


Fig. 1 System Configuration of DWPT



Fig. 2 Test Vehicle with DWPT System

図2に示す。本研究で扱う走行中給電システムは左右それぞれのばね下に1個ずつ受電コイルを搭載している。そのため、送電コイルも左右に配置することとなる。

3. プレキャストコイルの構造

アスファルト舗装の道路構造とプレキャストコイルの道路構造を図3に示す。道路構造は道路表面から表層、基層、路盤、路床という4層構成になっている。路盤を上層路盤、下層路盤と分けたり、排水性をよくするためにフィルタ層を設けたりすることもある。

表層と基層にはアスファルト混合物を敷設し、路盤と路床に粒度調整砕石やクラッシュランといった岩石や玉石を砕いたものを敷設する。アスファルト混合物とはアスファルトと砂利などの骨材を混ぜたものである。アスファルト混合物の骨材には粒径の規定があり、最小でも13mm以下と定められている。アスファルトは荷重によって流動し、骨材が荷重を分担できない部分があると陥没やひび割れが起こるため、路面の強度を発現させるためには、アスファルト混合物内に満遍なく骨材が存在する必要がある。よって、十分な強度を得るためにはある程度のアスファルト混合物の厚さが必要である。交通量の多い一般道では50mmの表層が必要となり、高機能舗装を使用し、メンテナンス頻度が高い高速道路等の路面でも40mmの表層が必要であることから、アスファルト路面内にコイルを埋設するためには40mm程度の埋設が必要になることが分かる。

一方で、HPFRCCはセメントを用いた材料であるため、アスファルト混合物のように材料の持つ強度発現のための材料的な厚さへの制限はなく、より薄い舗装を実現できる。今回製作したプレキャストコイルの送電コイル上の厚さは25mmである。

プレキャストコイルの道路構造は表層、基層と一部の路盤の役割を果たす。プレキャストコイルの周辺はアスファルト

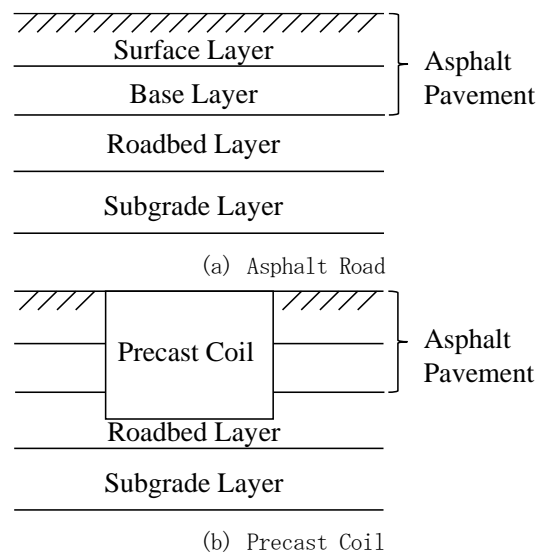


Fig. 3 Basic Structures of Roads

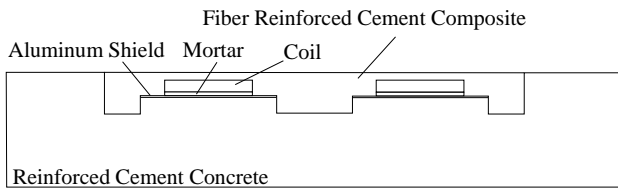


Fig. 4 Cross Section View of Precast Coil

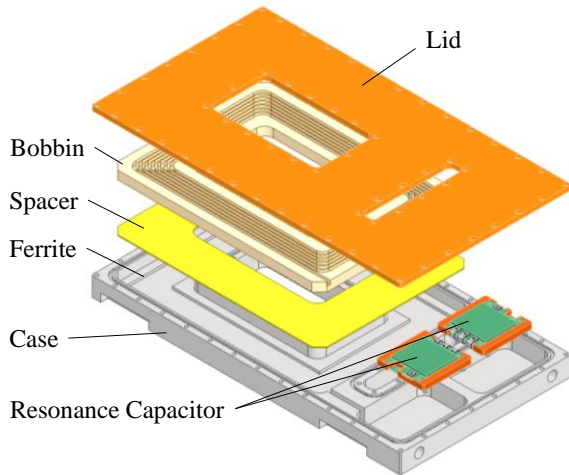


Fig. 5 Structure of Transmitter Coil

Table 1 Dimensions of Precast Coil

Items	Unit	Value
Height	mm	470
Width	mm	2530
Length	mm	1050

Table 2 Dimensions of Transmitter Coil Case

Items	Unit	Value
Height	mm	30
Width	mm	360
Length	mm	650

で再度舗装し、プレキャストコイルの上面をアスファルト路面の上面と同じ高さに合わせて舗装となる。

プレキャストコイルの構造断面図を図4に示し、外形寸法を表1に示す。プレキャストコイルはHPFRCC層、コイル、鉄筋コンクリートで構成される。鉄筋コンクリートの基礎の上にHPFRCCを構成し、HPFRCCの内部に送電コイルを2個配置している。建築ではセメントの補強材として鉄繊維を使用することがあるが、ここでは送電コイルが発生する磁界による渦電流損の発生を防ぐためにポリプロピレン(PP: polypropylene)の繊維を混合したHPFRCCを使用している。

送電コイルの下部には鉄筋コンクリートに鎖交する磁束を遮蔽するためのアルミシールドを設けている。またコイルとアルミシールドの距離が近すぎるとシールドによる渦電流が大きくなるため、スペーサーとしてモルタルを用いている。

コイルにかかる力の低減を狙い、プレキャストコイルの中

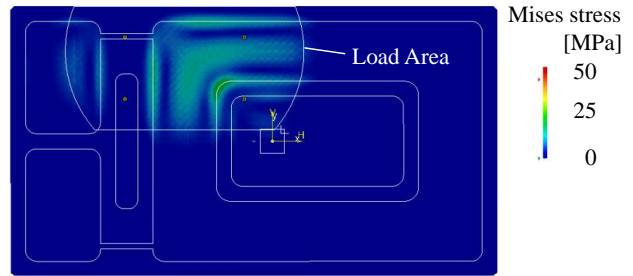


Fig. 6 FEM Result of Transmitter Coil



Fig. 7 Overview of Precast Coil

のHPFRCCはアーチ形の構造としている。鉄筋コンクリートに凹部を作り、そこにHPFRCCが入り込むことによりアーチ構造を実現している。HPFRCCが路面の上から力を受けた際にHPFRCCが横方向に広がる力を鉄筋コンクリートが抑える構造となっている。

送電コイルの構造を図5に示し、主要緒元を表2に示す。送電コイルの外殻はケースと蓋で構成され、その内部にコイルを巻くためのボビンと磁気回路を構成するためのフェライト、ボビンとフェライト間の絶縁を確保するためのスペーサーと共振コンデンサが配置されている。ケース、蓋、ボビン等の材質はHPFRCCと同様にPPである。基本的な設計思想はHPFRCCで力を受けることとしているが、コイル単体でも5tの輪荷重まで耐えうる設計とするために、HPFRCCが入るようにコイルの中央部分に穴を設けている。トラックのタイヤの接地を模した⁽¹³⁾範囲に50kNの静荷重をかけた場合のコイルの蓋にかかる応力解析の結果を図6に示す。静荷重の範囲内では荷重は一律に設定している。想定したタイヤサイズは11R22.5 14PRであり、空気圧は700kPaである。

図6に示した位置でコイルの蓋に発生する最も応力が高くなっている。コイルのエッジ部分で発生する応力が最も高く25MPaであった。PPの引張降伏応力は30MPaであるため、直接トラックがコイル上に乗っても問題ないことが分かる。

4. プレキャストコイルの製作と設置

4.1 プレキャストコイルの製作

プレキャストコイルの製作工程は下記の5工程である。

1. 送電コイルの製作
2. 基礎となる鉄筋コンクリートの打設・養生
3. 鉄筋コンクリートへの送電コイルの設置・通線
4. モルタルでの送電コイルの固定
5. HPCRCC の打設・養生

鉄筋コンクリートやモルタル、HPCRCC といったセメント系の材料は強度が発現するまで一般に4週間程度の時間を要する。道路工事は道路の封鎖を伴うため、交通に大きな影響を与えないようにするためには1夜での完了することが好ましい。これらの工程を道路工事現場で行うことは現実的でないことからプレキャスト工法をとっている。

完成したプレキャストコイルを図7に示す。コイルから出た配線は、樹脂製の黒いコルゲートチューブで保護されながら、プレキャストコイルの中を通して側面から取り出される。赤い線や青い線は実験測定用のセンサ類である。プレキャストコイルの側面には道路設置の際に使用する治具を取り付けるためのボルト穴も配置されている。

4.2 プレキャストコイルの設置

プレキャストコイルの設置は主に下記5つの行程で行われる。各工程を図8に示す。

- (a) 既設路面、路盤の掘削
- (b) 路盤の高さ調整
- (c) プレキャストコイルの設置
- (d) プレキャストコイル間のモルタルでの間詰め
- (e) プレキャストコイル周辺のアスファルト再舗装

既設路面と路盤の掘削はアスファルト舗装と同様の工程である。路盤の高さの調整もアスファルト舗装でも行うが、プレキャストコイルでは路面の傾きがこの行程で決まるため、粒度調整砕石で精緻に高さを設定する。そしてプレキャストコイルを設置する。プレキャストコイルは吊り具を用いてクレーンで吊り下げて設置をする。設置後にはプレキャストコイルの側面から出てきた配線をパイプに通線し、配線を地上に出しておく。2台のプレキャストコイルを設置した後、2台のプレキャストコイルの間は速乾性のモルタルで間詰を行う。ここで扱うモルタルは速乾性でかつ少量であり、強度発現までに時間がかからないため、現道でも扱える。そして最後にプレキャストコイルの周辺にアスファルト舗装をしながらプレキャストコイルの設置工程は完了となる。

5. プレキャストコイルの耐久性評価手法

プレキャストコイルの耐久性評価として、国立開発法土工木研究所の舗装走行実験場にて荷重車を用いて載荷試験を行った。載荷試験とは車輪によって路面に負荷を与える試験で



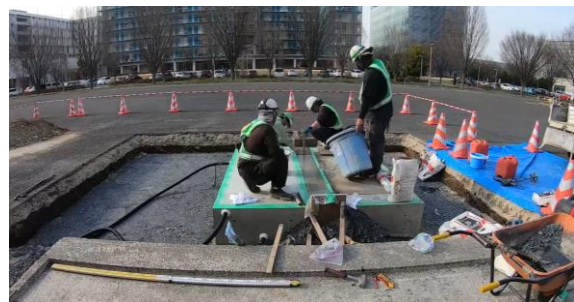
(a) Excavation



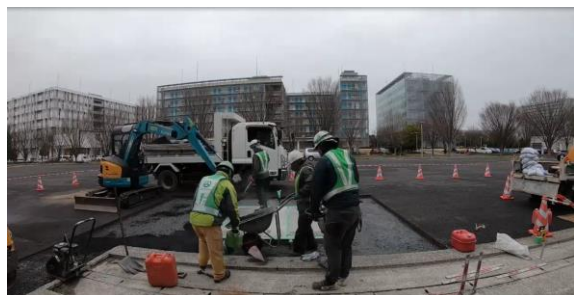
(b) Adjusting Height



(c) Setting Precast Coil



(d) Filling Mortar



(e) Paving with Asphalt

Fig. 8 Procedures of Setting Precast Coil

ある。舗装走行実験場に試験をしたい路面を舗装し、その上に荷重車を走行させることで負荷を与える。舗装走行実験場では自動運転の大型車4台を用いることにより、約1か月の耐久試験で10万輪の試験ができる。

耐久試験前後の評価項目は下記の通りである。

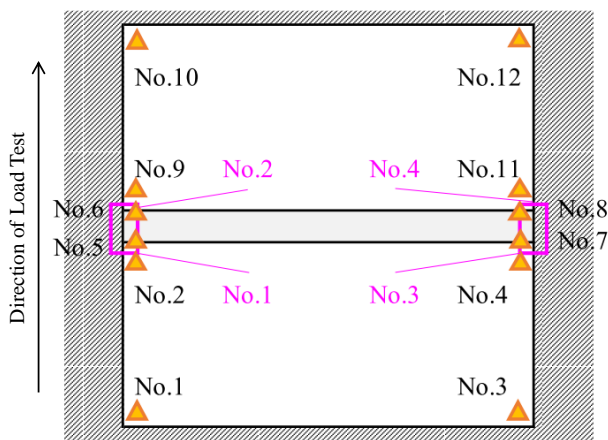
1. プレキャストコイル・間詰部の変位
2. プレキャストコイルと周辺の変位
3. コイルパラメータ

プレキャストコイルの変位はレベルを用いた水準測量を行い、プレキャスト周辺を含んだ変位はレーザースキャナで計測している。双方とも変位の測定に使用するが、レーザースキャナは計測結果に塵等の影響を受ける可能性があるため、水準測量と併用している。コイルパラメータは電気特性の確認のためにLCRメータにて測定した。

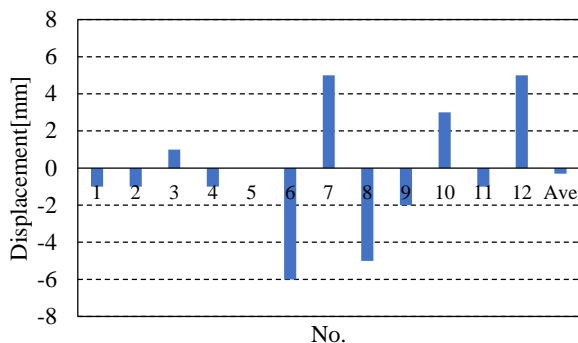
6. プレキャストコイルの耐久性評価結果

6.1 プレキャストコイル・間詰部の変位

水準測量の点と測量結果を図9に示す。プレキャストコイルの四隅と目地部を測量している。計測分解能は1mmである。高さが下がったところと上がったところがあり、平均では0.3mmの低下という計測分解能に対して小さい結果が得られたことから、全体的な沈下ではなく、プレキャストの傾きが発生するという結果となった。これはプレキャスト自体の変形では



(a) Measurement Point



(b) Measurement Result

Fig. 9 Displacement in Precast Coil

なく、路盤の変位によるものと考えられる。

6.2 プレキャストコイルと周辺の変位

試験前後にそれぞれレーザースキャナで測定した位置の差を変位としてまとめたものを図10に示す。計測のメッシュサイズは10mm角である。試験途中にアスファルト部の一部に20mm程度の沈下が認められたため、試験途中で1度補修をしている。プレキャスト周辺の路盤は転圧機のローラが十分に接地しなかったことから、路盤の締め固めが十分でないことから、沈下が起こったと考えられる。中央の水色部分がプレキャストコイルであり、その周辺はアスファルトである。マイナスの値が沈下、プラスの値が隆起を表している。

アスファルトの沈下が大きい部分は載荷試験で車輪が載っている部分であり、轍掘れが発生している。その周辺は轍掘れの影響でアスファルトが隆起している。一方でプレキャストコイル内ではほとんど変位がないことから、プレキャストコイルの轍掘れへの耐性がアスファルト路面に対して高いことが明らかになった。また、部分的な沈下等も起きていない。プレキャストコイル内で一部変位が確認できる部分は設置の際に吊り具を誤って当てたことによって起こった部分的な破損から進展した破損であることから、今回は評価対象外としている。

6.3 コイルパラメータ

プレキャストコイルのパラメータを設置後と、耐久試験後にそれぞれ計測している。計測周波数は85kHzである。計測結果を図11に示す。青が耐久試験前、赤が耐久試験後を示している。1つのコイルは設置工程で発生した断線でコイルパラメータの正確な計測が困難になっているため、3つのコイルの結果を示す。コイル部の形状はすべて同一だが、コイルケースまでの配線用の配線長が11.5m、12.5m、12.8mと異なっているため、コイルパラメータに違いが発生している。また共振調整を共振コンデンサの実装個数によって調整しているため、リアクタンスと抵抗は同様の傾向とならない。

耐久試験後に抵抗値が微小に増加していることが分かる。コイル部に大きな力がかかることは考えづらいため、配線部

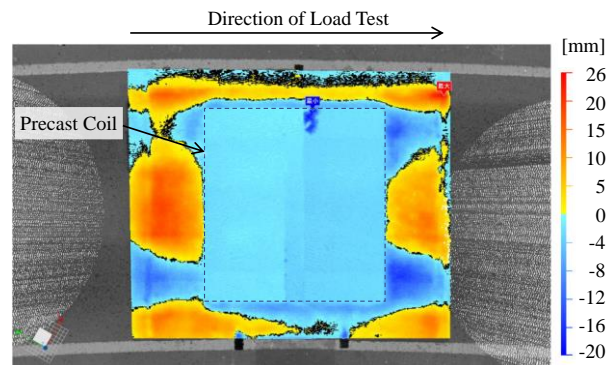
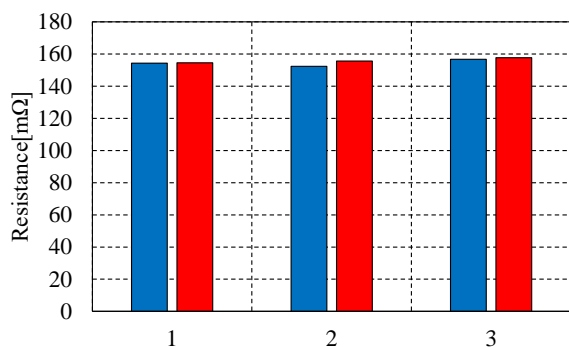
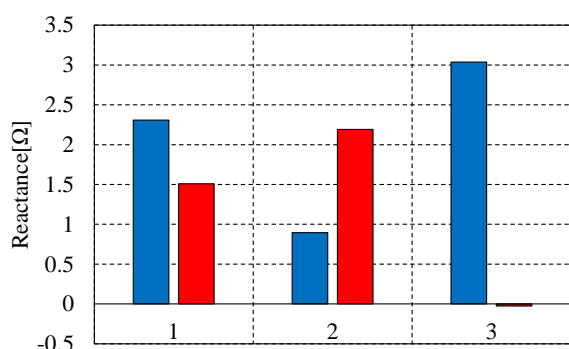


Fig. 10 Displacement Around Precast Coil



(a) Resistance



(b) Reactance

Fig. 11 Coil Parameters Change by Endurance Test

Blue is before test, and red is after test

に力がかかり、圧縮され、近接効果が大きくなったことによる影響と考えられる。リアクタンスは変化傾向が一定でなく、また微小であるため、計測時のコイルまでの配線の配策経路の変化による影響と考えられる。

7. 結論

本研究ではHPFRCCを活用した磁界結合方式の走行中給電可能な路面を開発し、耐久試験を行った。本研究で得られた結果は下記のとおりである。

1. 耐久試験によりプレキャストコイルに傾きは発生するが、プレキャストコイル内での変位は4 mm以下と微小
2. 自重による沈下はアスファルトの変位と比較すると小さく、問題ない範囲である
3. 耐久試験によって送電コイルパラメータの変化が起こる
 今後は送電コイルのパラメータ変化の要因分析及び対策を進める。またプレキャストコイル周辺の舗装に追加補修が必要だったため、プレキャストコイルと周辺の舗装を含めた改善策を検討する。

謝 辞

本研究の一部は JST 未来社会創造事業（ Grant 番号: JP-

MJMI21E2）の支援を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- (1) 清水修, 永井栄寿, 藤田稔之, 藤本博志, 郡司大輔, 角谷勇人, 高橋英介, 山口宜久, 谷恵亮: “製造・発送電・走行を考慮した走行中給電による温室効果ガスの削減効果”, 電気学会論文誌 D, No.142, Vol.10, pp.736-743, 2022
- (2) D.Gunji, K.Hata, O.Shimizu, T.Imura, H.Fujimoto “Feasibility Study on In-motion Wireless Power Transfer System Before Traffic Lights Section”, 2019 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (WoW), 2019
- (3) F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann and C. Mi, "A Double-Sided LCLC-Compensated Capacitive Power Transfer System for Electric Vehicle Charging," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 11, pp. 6011-6014, 2015
- (4) R. Ota, S. Hoshi, K. Uchida, "Improving the Efficiency by Controlling the Switching Frequency for Secondary-side Converter of an Inductive Power Transfer System," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 137, no.2, pp. 95-103, 2017
- (5) V. Z. Barsari, D. J. Thrimawithana and G. A. Covic, "An Inductive Coupler Array for In-Motion Wireless Charging of Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol.36, no 9, pp.9854-9863, 2021
- (6) 清水 修, 永井 栄寿, 藤田 稔之, 藤本 博志, 大森 洋一: 第3世代ワイヤレスインホイールモータにおける走行中給電用コイルの開発, 電気学会論文誌 D, Vol.141, No.8, pp.638-645, 2021
- (7) Society of Automotive Engineers, “SAE J2954”, Society of Automotive Engineers, 2020
- (8) 日本道路協会: 「舗装設計施工指針平成18年版」, 日本道路協会, 2006