

コイルをアスファルト内に埋設した 磁界共振結合型走行中給電路での電力伝送評価 *

清水修¹⁾ 永井栄寿¹⁾ 藤田稔之¹⁾ 藤本博志¹⁾ 角谷勇人^{1) 2)} 高橋英介²⁾ 山口宜久²⁾ 谷恵亮²⁾ 佐藤正憲³⁾

Evaluation of Dynamic Wireless Power Transfer with Asphalt Road Embedded Transmitter Coils

Osamu Shimizu Sakahisa Nagai Toshiyuki Fujita Hiroshi Fujimoto
Hayato Sumiya Eisuke Takahashi Nobuhisa Yamaguchi Keisuke Tani Masanori Sato

Dynamic wireless power transfer has been proposed to solve the issue of performance problem of electric vehicles, which is a short cruising range. There is the eddy current loss in the conductors, which is in the magnetic field by the wireless power transfer system. This research reveals the influence on the efficiency of wireless power transfer by road structures with the road embedded transmitter coils. The reinforced concrete reduces 4.5% of coil efficiency. The aluminum shield plate of the transmitter coil can improve coil efficiency with reinforced concrete. However, it reduces coil efficiency on the soil pavement. Road embedment also reduces coil efficiency.

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

1. 研究の背景

運輸による二酸化炭素排出量の削減のために電気自動車の研究開発が進められている。電気自動車の主な性能的課題として航続距離が挙げられる。電気自動車は大容量のバッテリーを車両に搭載することで航続距離を伸長可能である一方で、バッテリーを大量に搭載することで車両重量が重くなり、走行抵抗が増大することにより走行に係るエネルギー効率の低下を招く。さらに大容量バッテリーの搭載は車体を高価格にするため、普及の阻害要因となる。

上記の課題を解決するために走行中の車両に電力を供給する走行中給電が提案されている。走行中給電とは走行中の車両に連続的、もしくは断続的に給電することで車両に搭載するバッテリー容量の削減を可能にするシステムである⁽¹⁾。走行中給電には接触式の給電方法⁽²⁾と非接触式(WPT: Wireless Power Transfer)の給電方法がある。接触式の給電には電極の摩耗などの課題がある。非接触式の給電方法には電界共振結合方式⁽³⁾と磁界共振結合方式⁽⁴⁾が提案されている。すでに電気自動車の停車中非接触給電では磁界共振結合方式の規格化がSAE J2954⁽⁵⁾として進んでいる。停車中給電ではコイルを停車区間上に配置することに対して、走行中給電では走行中にコイルに高速で乗り上げる危険性があるため地中への埋設が必

要である。

道路への機能追加という点では自動運転用に磁気マーカを埋設し、それを検出しながら走行する実証実験⁽⁶⁾等も進められている。一方で、磁界共振結合方式では道路に設置する給電コイルの周辺に金属等の導電体が存在すると、給電コイルの発生する磁界により導電体内部に渦電流が発生し、損失になるという課題を抱えている。道路構造は大きく分けて表層、基層、路盤、路床という4つの構造になっており、橋梁部等の路盤構造には鉄筋コンクリートが用いられる場合もある。

そこで本研究では道路に埋設することにより走行中給電システムが受ける性能的影響を検証する。ここで使用する道路構造は電力伝送の効率検証用である。2章では対象とする走行中給電システムについて述べ、3章でコイルを埋設した路面構造について述べる。そして4章で埋設による電力伝送効率への影響と、路盤構造による電力伝送効率への影響をそれぞれ検証した結果を述べる。そして、5章で結論を述べる。

2. 対象とするシステム

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た給電システム⁽⁷⁾である。本研究で対象としたシステムを図1、図2に示す。図1に示した走行中給電路は従来使用していたものである。コンクリートで補強された溝に送電コイルを配置し、給電することが可能である。従来使用していた走行中給電路はコイルの入れ替えが容易である一方、コイルの埋設状態を模擬できない。公道での実装ではコイルの耐久性やタイヤのグリップ力の確保のために埋設コイルを舗装内に埋設することを想定しているため、埋設状態の模擬

*2021年*月*日受理。2021年5月28日自動車技術会春季大会にて発表

1)東京大学(277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

2)(株)デンソー(448-8661 愛知県刈谷市昭和町1-1)

3)(株)大林組(108-6125 東京都港区港南2-15-2)

が別途必要になる。

給電システムは系統から得られる三相交流電源を直流に変換し、その後、インバータを用いて交流に変換する。ここで用いる周波数は停車中給電の規格である SAE J2954 に準拠し、79kHz-91kHz の範囲とする。本研究では 85kHz を基本周波数とするシステムとしている。磁界共振結合の回路トポロジーとしては送受電コイルと共振コンデンサをそれぞれ直列に接続する Series-Series (SS) 方式としているため、インバータとコイルの間に共振コンデンサが配置される。

本研究で対象とした走行中給電システムはモータに供給する電力線と受電電力を供給する線が共用となっているため、走行中に受電する場合は受電電力をバッテリーへの充電を伴わずにモータで利用できる。バッテリーに充電してから電力を使用する場合は充電の際に電池の内部抵抗や DC/DC コンバータによる損失が発生するが、直接モータで受電電力を使用する



Fig.1 DWPT System with Vehicle

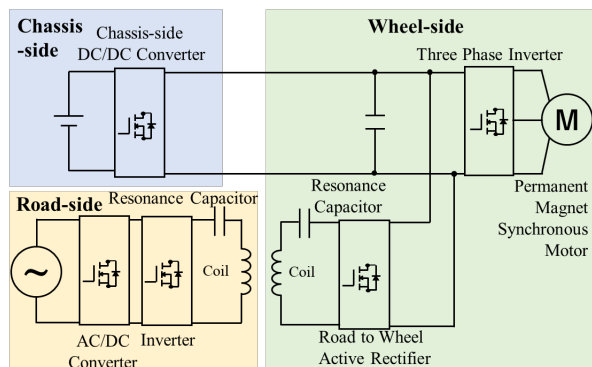
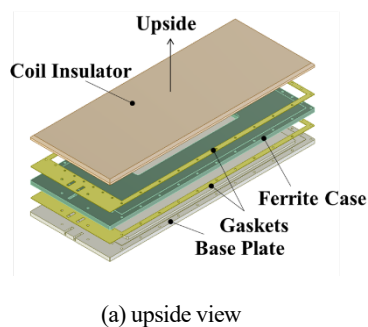
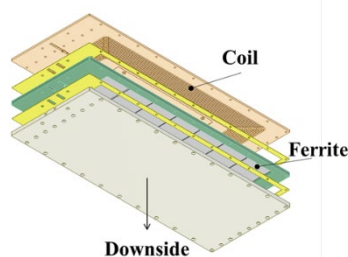


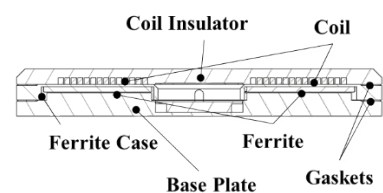
Fig.2 System Configurations of W-IWM3



(a) upside view



(b) downside view



(c) sectional view

Fig.3 Structure of Road Embedded Coil

ことで受電から駆動までのエネルギー効率を向上させることができる。これが本研究で対象とする走行中給電システムの特長の一つである。

埋設に用いた送電コイルを図.3 に示す。埋設用の給電コイルはコイルケース、線材、フェライトにて構成される。コイルと直列に接続される共振コンデンサはコイルケースの外付けであり、共振コンデンサも防水されたケース内に収めてコイルと共に埋設する。フェライトの配置はコイル下面として、下方に漏れる磁束を低減する効果を狙っている。コイルケースはポリカーボネート製であるため絶縁体である。コイルケースは三層構造となっており、最上面がコイルを巻くためのボビンを兼ねて溝を設けたケースとなっている。中間のケースがフェライトを収めるための構造となっており、最下面のケースが蓋をする構造となっている。ケース間には防水のためのシリコン製ガスケットが挿入されており、コイルの線のケース出口はシリコンシーラントを充填することで防水している。検証に用いた埋設用送電コイルと受電コイルの主要諸元を表.1 にまとめる。

3. 路面構造

3.1 路面断面構造

道路構造は大きく表層、基層、路盤、路床という 4 つの構造で分類される。その中で舗装と呼ばれるものが表層、基層、路盤であり、約 1 メートルの深さまでが相当する。表層、基層はアスファルト混合物で構成されることが多い。本研究では表層、基層はアスファルト混合物としており、路盤構造として市街地等の一般的な道路構造を模擬した土工部

Table 1 Specifications of Coils

	Transmitter	Receiver
Width of Coil Case	338 mm	230 mm
Length of Coil Case	868 mm	230 mm
Width of Coil	700 mm	180 mm
Length of Coil Case	280 mm	180 mm
Turns	14	13
Layers	1	2
Specifications of Wire	Litz	AWG44×6250
Ferrite	TDK PC95	

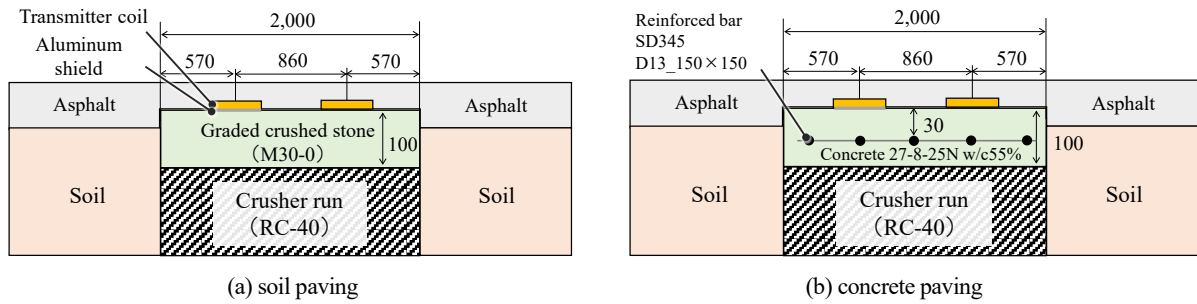


Fig.4 Cross Sectional View of Coil Embedded Road

と、橋梁、トンネル、高速道路の高架等を模擬した鉄筋コンクリートの2種類を用いた検証を行う。橋梁部は高速道路全体の25%程度⁽⁸⁾であるものの、連続している区間も多いことから、走行中給電の普及を目指す上で橋梁部での影響を検証することは重要である。本研究で用いた路面構造を図.4に示す。

コイル下部の幅2000mm、深さ500mmの範囲の土壌は全て再生クラッシャーランに入れ替えている。その上に碎石を配し、土工部は碎石上にコイルを配置していることに対し、鉄

筋コンクリート部では碎石ではなく100mmの厚さのコンクリートの上にコイルを配置している。鉄筋コンクリートに用いている鉄筋材料はSD345である。SD345はJIS G 3112により機械特性や成分が規定されているが、透磁率や電気抵抗率については規定されていない。鉄筋コンクリートに送電コイルが発生する磁束が鎖交すると渦電流損となるため、コイルは下面に1mmのアルミシールドを用いたものとアルミシールドのない2つの仕様を用意し、アルミシールドの効果を検証する。



Fig.5 Procedures of Road Construction

表層，基層には常温硬化型のアスファルトを用いており，コイル上面から舗装表面までの厚さは20mmとした。

3.2 埋 設 工 程

ここでは埋設工程について述べる。埋設工程を図.5に示す。路面工事は，(a)既設舗装板の切断，(b)既設舗装板の除去，(c)地中配管，(d)基面整正，(e)路盤整正，(f)コンクリート打設，(g)コイル配置，(h)アスファルト舗設，(i)転圧仕上げ，(j)コイル位置のマーキングの10工程で行った。(k)は工事完了後の路面概観である。本研究で行った路面工事に要する日数は，(a)から(e)で1日，(g)で1日，(e)から(j)で1日である。

(g)コンクリートの打設後はコンクリートが完全に硬化するまでの期間として3日間の養生期間を設けているが，実際に作業を要する工事日数は養生期間と雨天や休日の工事の出来ない期間を除いて3日間である。速乾性を持つコンクリートを使用することで，養生期間は短縮可能である。

4. 電 力 伝 送 試 験

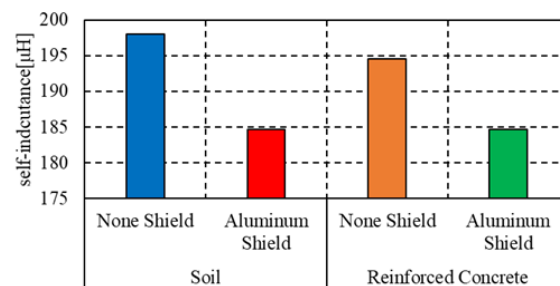
4.1 路盤構造による電力伝送効率への影響

埋設前にコイルの配置とアルミシールド有無による路盤構造による電力伝送効率への影響を検証した。電力伝送試験に用いた装置を図.6に示す。送電側の直流電圧は300V一定として，受電側の直流電圧は最も総合効率が高くなるように設定した。送電周波数は85kHz，コイル間のギャップは80mmである。共振周波数はコンデンサの実装数で調整している。

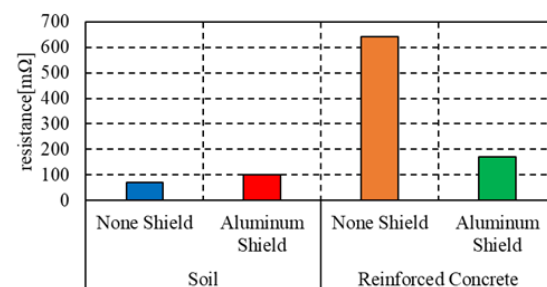
実験の結果を図.7に示す。効率はコイル効率であり，整流器入力をインバータ出力で除算した結果である。土工部でアルミシールドを用いない場合が最も効率が高く，続いて土工部でアルミシールドを用いる場合，鉄筋コンクリートでアルミシールドを用いる場合，そして鉄筋コンクリートでアルミシールドを用いない場合の順となった。要因分析のためにコイルパラメータの確認を行った。

各条件にて取得したコイルパラメータを図.8に示す。計測周波数は85kHzである。路盤構造によるパラメータ変動を確認すると鉄筋コンクリート上に配置することにより送電側のコイル抵抗が大幅に上がっていることが分かる。そして，アルミシールドをコイルと鉄筋コンクリートの間に設けることにより，コイル抵抗を低下させることが可能である。アルミシールドにより地中への漏れ磁束が減少し，鉄筋に発生する渦電流損が低下したものと考えられる。一方で，土工部ではアルミシールドはアルミシールドを内に発生する渦電流によりコイル抵抗を上げるとともに相互インダクタンスを下げる効果を生むことから土工部ではアルミシールドを用いることで効率の低下を招くことが分かる。

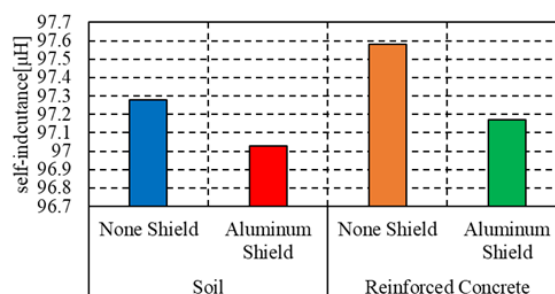
次に理論最大効率による評価を行う。SS方式のコイル理論最大効率は次式によって求められる。



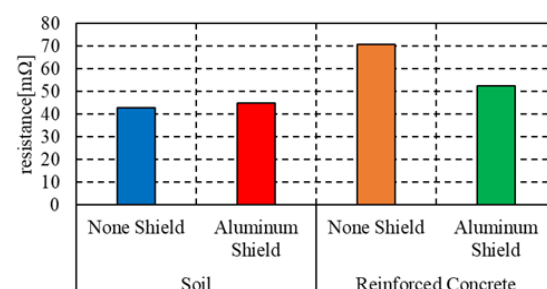
(a) inductance of transmitter coil



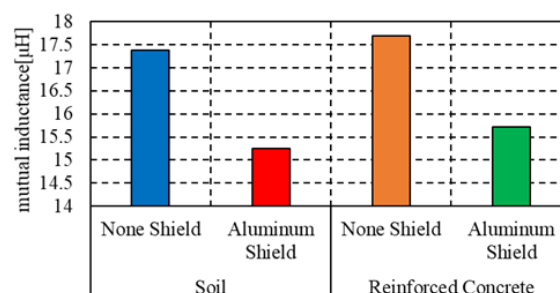
(b) resistance of transmitter coil



(c) inductance of receiver coil



(d) resistance of receiver coil



(e) mutual inductance

Fig.8 Coil Parameters of Each Road Structure

$$k = \sqrt{\frac{L_m}{L_1 L_2}} \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{\omega_0 R_i}{L_i} \quad (i = 1 \text{ or } 2) \quad (2)$$

$$\eta_{\max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \quad (3)$$

ここで k はコイルの磁気的な結合の強さを示す結合係数, L_i は自己インダクタンス, L_m は相互インダクタンスを表し, Q_i はコイルの電気エネルギーから磁気エネルギーへの変換しやすさを示す Q 値(Quality Factor), ω_0 は給電角周波数, R_i はコイルの抵抗値を表す。添字の 1 は給電側であり, 2 は受電側である。図. 8 の値と式 1, 2, 3 より得られる結合係数, Q 値, 理論最高効率を図. 9 にまとめる。

理論効率は実測と同様の傾向を表している。また鉄筋コンクリート上では Q_1 が著しく低下していることが分かる。

4.2 埋設による電力伝送効率への影響

埋設前後での電力伝送効率の変化を確認した。評価に使用した設備構成は路盤構造による電力伝送効率への影響を検証した際に使用した設備と同様である。

埋設前後の電力伝送の比較を図. 10 に示す。送電周波数は 85kHz, コイル間のギャップは 80mm である。各地上側電圧に応じて受電側の電圧は効率が最大になるように設定している。埋設前後で 3.5% 程度の効率低下が確認された。

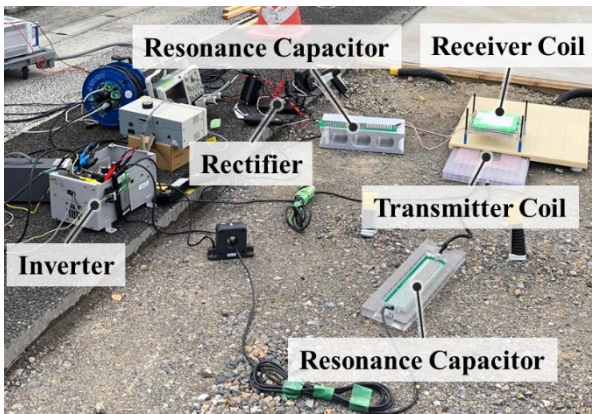


Fig.6 Evaluation Equipment of WPT

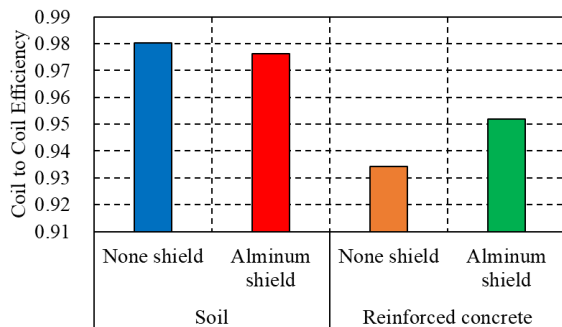
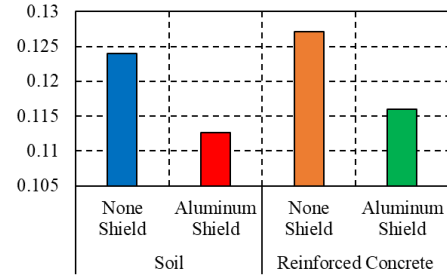
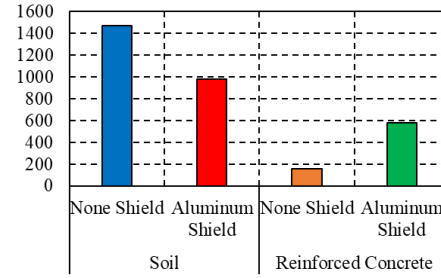


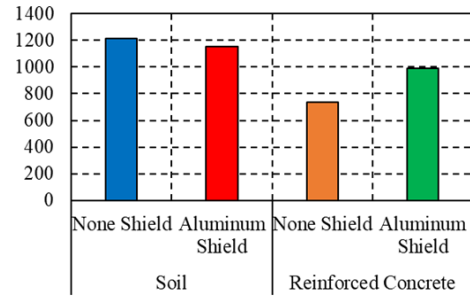
Fig.7 Coil to Coil Efficiency



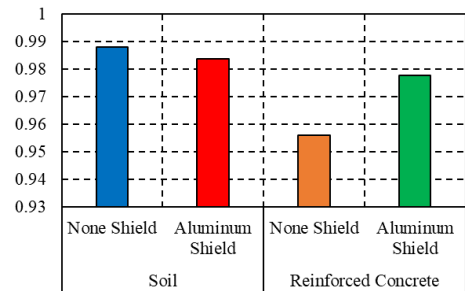
(a) k



(b) Q_1



(c) Q_2



d) η_{\max}

Fig.9 Coil Performance of Each Road Structure

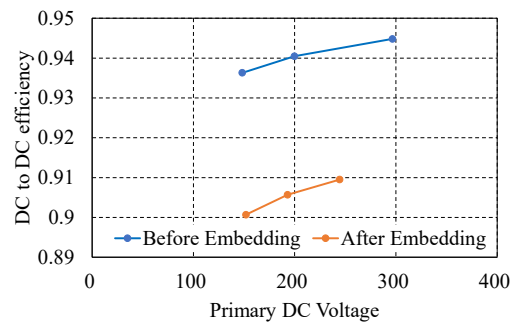


Fig.10 Efficiency Change by Embedding

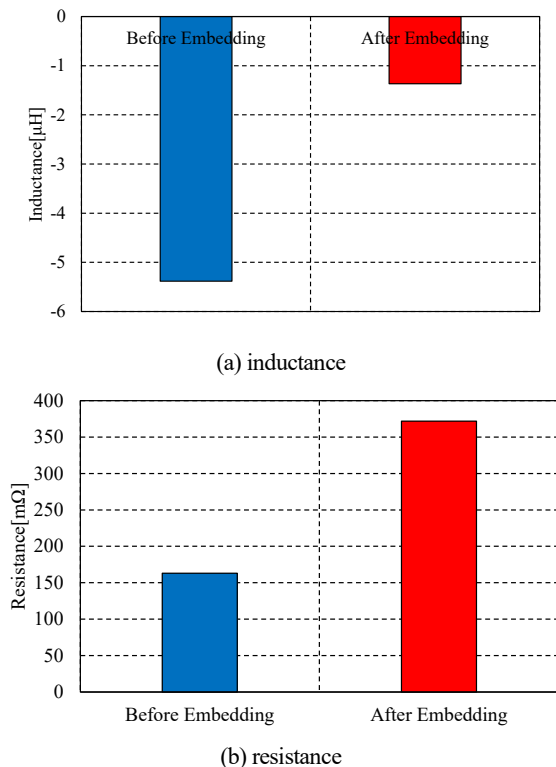


Fig.11 Coil Parameter Change by Embedding

要因分析のために埋設前後のコイルパラメータの確認を行った。測定周波数は85kHzである。計測結果を図.11に示す。共振コンデンサを直列に接続して計測しているため容量成分も併せて計測され、インダクタンスは負の値となっている。コイル単体の計測時とはインダクタンス値が大きく異なる。コイル抵抗が増加していることが確認された。コイルと共振コンデンサの直列回路を測定しているため内訳は不明であるが、インダクタンスが増加、もしくはキャパシタンスが減少していることが確認された。インダクタンス値が0に近づいていることから、埋設により共振条件に近づいていると考えられ、効率低下はコイル抵抗の増加によるものと推測できる。乾燥したアスファルト材混合物が電力伝送効率に影響を与えないことは確認済みである⁽⁹⁾ため、アスファルト材をかぶせたこと以外が効率低下の要因である。水分を含んだ土壌は乾燥した土壌に対して高い導電性を持つため⁽¹⁰⁾、渦電流損が発生する等の理由で水分を含んだ土壌を始めとする道路構造物の導電性が電力伝送効率とコイルパラメータに影響したものと考察される。

5. 結 論

本研究では路盤構造による電力伝送効率への影響とコイルの埋設をした際の影響の検証をアスファルト路面内にコイルを埋設し、電力伝送を行うことで検証した。本研究で得られた結論は下記のとおりである。

1. 鉄筋コンクリートの路盤構造ではコンクリート内の渦電流

損により電力伝送効率が低下する。

2. 鉄筋コンクリート上ではアルミシールドを用いることで効率低下を防ぐことができるが、土工部では効率低下を招くため、路盤構造によってコイル仕様を選定することでより効率の高いシステムを構築可能である。

3. 埋設により電力伝送低下を招く場合がある。

埋設による電力伝送効率の低下の要因としては水分を含んだ道路構造物の導電性による渦電流もしくはコイルからの漏れ電流の影響が考えられる。道路構造物の導電性の計測と分析については今後の課題とする。

謝 辞

施工協力大林道路。本研究の一部はJST 未来社会創造事業(グラント番号:JPMJMI17EM), JSPS 科研費(基盤研究A 課題番号:JP18H03768)によって実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- (1) 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), pp. 302-307
- (2) T. Tajima, W. Noguchi, T. Aruga : Study of a Dynamic Charging System for Achievement of Unlimited Cruising Range in EV, *SAE Technical Paper 2015-01-1686*, 2015.
- (3) T. Ohira: Via-wheel power transfer to vehicles in motion: 2013 IEEE Wireless Power Transfer, pp. 242-246, 2013.
- (4) T. Fujita, T. Yasuda, H. Akagi: A Dynamic Wireless Power Transfer System Applicable to a Stationary System: *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, Issue 4, pp3748-3757, 2017.
- (5) Society of Automotive Engineers International: Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology, revised 2020.
- (6) 中野公彦：沖縄本島・石垣島での自動運転バス実証実験，国際交通安全学会誌，43 巻，2 号 pp.114-118，2018.
- (7) 藤本博志，清水修，永井栄寿，藤田稔之，郡司大輔，大森洋一，大塚拓一：第3 世代ワイヤレスインホイールモータの開発，自動車技術会 2020 年秋季大会，pp.1-6，2020.
- (8) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会：第一回委員会資料，2012.
- (9) 馮喆，角谷勇人，清水修，藤本博志：“Influence of Road Material and Contamination with Dynamic Wireless Power Transfer to In-wheel Coil”，*半導体電力変換／家電・民生／自動車合同研究会*，pp.1-6，2020.
- (10) 吉村貴広，長岡直人，馬場吉弘，雨谷昭弘：土壌の周波数依存導電率および比誘電率の二平板電極による測定，*電気学会論文誌 B*，126 巻，9 号，pp. 994-995，2006