

磁界共振結合型走行中給電の路面埋設型コイルの効率が周辺環境によって受ける影響の検証

清水 修, Feng Zhe, 永井 栄寿, 藤田 稔之, 藤本 博志 (東京大学)
角谷 勇人, 高橋 英介, 山口 宜久, 谷 恵亮 (デンソー)
佐藤 正憲 (大林組)

Evaluation for Influence for Efficiency of Magnetic Resonance Coupling Type Wireless Power Transfer by Surrounding Environment Using a Road Embedded Transmitter Coil

Osamu Shimizu, Feng Zhe, Sakahisa Nagai, Toshiyuki Fujita, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)
Hayato Sumiya, Eisuke Takahashi, Nobuhisa Yamaguchi, Keisuke Tani (DENSO CORPORATION)
Masanori Sato (OBAYASHI CORPORATION)

To solve the problem of short cruising range, which is a performance problem of electric vehicles, a magnetic resonance coupling type dynamic wireless power transfer has been proposed. Since there are conductors such as metal in the road structure, this paper mentions the influence of the road structure on the power supply efficiency. We also examined the effects of changes in the surrounding environment such as rainwater and snow melting agent.

キーワード：ワイヤレス電力伝送, 電気自動車, 走行中給電, 路面, 電力伝送効率

(wireless power transfer, electric vehicles, dynamic wireless power transfer, road, wireless power transfer efficiency)

1. はじめに

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。電気自動車の性能的課題として航続距離が挙げられる。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が、バッテリーの搭載により車両重量が重くなることによって走行に必要なエネルギーが増大する。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⁽¹⁾⁽²⁾ために走行中に車両に電力を供給する走行中給電が提案されている。電気自動車への走行中給電には接触式の給電方法⁽³⁾と非接触式の給電方法がある。非接触式の給電方法には電界共振結合方式⁽⁴⁾と磁界共振結合方式⁽⁵⁾が提案されている。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⁽⁶⁾として進んでおり、本研究グループでは道路に給電コイル配置する磁界共振結合方式の走行中給電⁽⁷⁾を提案している。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。さらにコイルのインダクタンスの変化を起す場合にはコイルのインピーダンスを増加させ、効率の低下を招く。そこで本研究では給電コイル周辺の環境変化や異物が混入した場合の走行中給電システムの電力伝送効率の変化を検証する。2章では対象とする走行中給電シ

ステムについて解説し、3章で検証に用いた給電コイルと道路構造について述べる。4章にて評価結果を述べ、5章で結論を述べる。

2. 走行中給電システム

ここでは本研究が対象とする走行中給電システムについて述べる。対象とする走行中給電システムは第3世代ワイヤレスインホイールモータ(WIWM-3:the third generation wireless in-wheel motor)⁽⁸⁾である。WIWM-3の概観をFig 1に示す。

WIWM-3は受電コイル、整流器、モータ駆動用インバータ、モータをばね下に搭載していることが特徴である。ばね下にコイルを配置することの利点は下記の通りである。

- 1) サスペンションの伸縮による受電コイルと路面との距離の変動を受けない。
- 2) タイヤと一体となって動くため、タイヤの動きに合わせて



(a) Overview of WIWM3 (b) WIWM3 with Vehicle

図 1: 第3世代ワイヤレスインホイールモータ

Fig. 1. the Third Generation Wireless In-Wheel Motor

て路面の段差や突起を避けられるようになり、受電コイルと路面との距離を短くできる。

そして、インホイールモータとばね下に受電コイルを配置したワイヤレス給電システムを組み合わせによっても利点を生むことができる。

路面に配置された給電コイルから受電した電力は受電コイル近傍に設置した整流器によって整流され、車体に搭載されたバッテリーに充電されるか、もしくはインバータを通じて駆動に直接利用される。駆動に直接電力を利用する場合には、バッテリーまでの配線が持つ電気抵抗やバッテリーの内部抵抗による損失が発生しない。また受電から駆動までの電流の経路を短くできるため、受電から駆動までの電力損失を低減することができる。

WIWM-3 のシステム構成を Fig 2 に示す。給電側、受電側共にコイルと共振コンデンサを直列に接続する Series-Series(SS) 方式の磁界共振結合である。バッテリーと整流器の間には双方向の DCDC コンバータを搭載しているため、受電側の DC 電圧は可変である。また給電の基本周波数は停車中非接触給電の規格である SAE J2954 が定める 79kHz から 90kHz までの間として、85kHz を標準としている。

3. コイルと路面の構造

ここで研究に用いたコイルと路面の構造について述べる。給電コイルは路面のアスファルト内部に埋設する。給電コイルと受電コイルの諸元を表 1 に示す。ここで示す寸法はケースの外形寸法である。給電コイル、受電コイル共に平面上にコイルを巻くスパイラルコイルであるが、受電コイルは巻線を二層構造としている。そして給電コイルの構造を Fig 3 に示す。

給電コイルは三層構造である。最上層はコイルを巻くためのインシュレータとなっており、中間層にフェライトを配置している。そして最下層が蓋の役割を果たしている。それぞれの層は最上層に配置されたボルト穴に対して、下

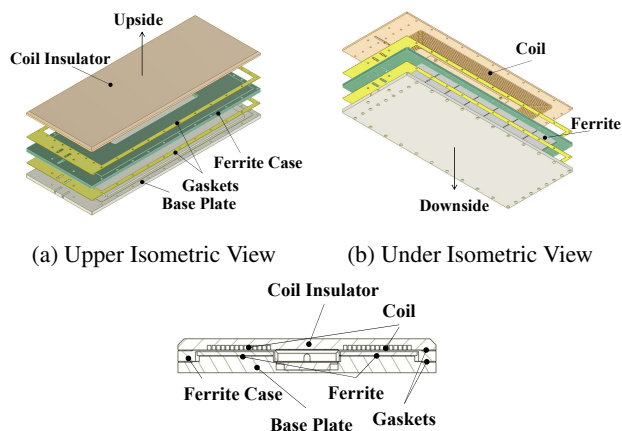
面より樹脂製のボルトで締結されている。コイルケースの材料はポリカーボネートである。層の間にはシリコン製のガスケットを設けており、防水している。また配線の取り出しは最下層から行い、取り出し部分はシリコン製のシーリング材を充填し防水している。コイルケースの外の配線もリッツ線を用いており、コイルケースの外に出る部分は熱収縮チューブとコルゲートチューブを用いて保護している。この給電コイルを東京大学柏キャンパス内の電気自動車倉庫前に埋設している。埋設工事をした場所を Fig 4 に示す。

倉庫内には電力伝送用の三相 200V の電源、AC/DC コン

表 1: コイル諸元

Table 1. Specifications of Coils

Item	Unit	Transmitter	Receiver
Length	mm	868	230
Width	mm	338	230
Number of Turns	-	13	12
Number of Layers	-	1	2
Wire	-	Litz wire AWG42x6250	



(c) Cross Sectional View

図 3: 給電コイルの構造

Fig. 3. Structure of Transmitter Coil

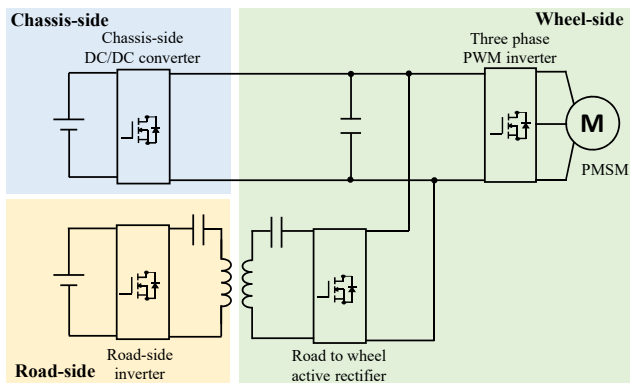


図 2: システム構成

Fig. 2. System Configuration of WIWM3



図 4: 給電コイルの埋設位置

Fig. 4. Construction Area of Transmitter Coils



図 5: 給電コイルの埋設工程
Fig. 5. Procedures of Road Construction for Transmitter Coils

バータ, 給電用インバータ, 給電用インバータ制御装置, 電子負荷装置, 工具等の電力伝送に必要な設備や物品が収められている。倉庫の横には倉庫内に配線を取り込むための端子台が設けてあり, 給電コイルから取り出した配線は端子台に取り付けられる。そして端子台からさらに配線を伸ばし, 倉庫内の給電用のインバータと接続することで電力伝送を行うことができる。

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。

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。

それぞれの工程の様子を Fig 5 に示す。

(d) 地中配管で行う地中の配管はコイルへの配線を通すためのものであり, 給電コイル 1 個につき 1 本使用している。すなわち配線は配管内を 2 本通ることとなる。地中の配管には直径 40mm の波付硬質ポリエチレン管を用いている。地中配管は既設の走行中給電路⁹⁾を迂回して埋設しており, 端子台に近いもので約 14m, 端子台から遠いもので約 16m

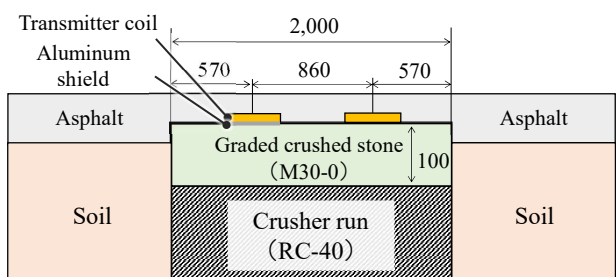
である。地中の配管への通線の際は鉄製の呼び線をあらかじめ配管に通し、呼び線に配線を括り付けて引き上げることで通線している。

(h) アスファルト舗設には常温硬化型の材料を使用した。

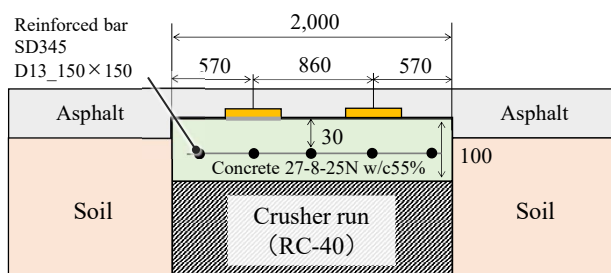
今回のコイル埋設の目的は埋設状態での電力伝送効率や出力の評価である。そのため、基層構造による影響の比較評価にも用いることができるように、基層は橋梁とトンネル部の基層構造を模擬した鉄筋コンクリートと一般的な道路の基層構造を模擬した2種類を用意した。更に給電コイルの底面に2mmのアルミ板を設けたものとないものの2種類の計4枚のコイルを埋設している。本研究は道路構造以外の環境変化の影響を検証するため、土の基層構造で給電コイルの底面にアルミ板のないものを用いて検証を行う。コイルを埋設した路面構造の断面を Fig 6 に示す。

4. 評価手法

ここでは周辺環境の変化による影響の評価手法について述べる。既往研究⁽¹⁰⁾にて海中の電力伝送では電力伝送効率への影響が報告されているため、本研究では周辺環境の変化として、路面埋設時の雨水を模擬し、水道水が与える影響と融雪剤の影響について検証する。埋設したコイルの上部を中心に3平方メートルの範囲に水道水を散布し、2リットル毎に電力伝送効率に与える変化を電力伝送にて確認する。路面に水が浸透するまでに時間がかかるため、水を散布して5分後に電力伝送をしている。水による影響の評価



(a) Soil Paving



(b) Concrete Paving

図 6: 路面構造の断面図

Fig. 6. Cross Sectional View of Road Structure

後、路面の表面の水溜りがないことを目視で確認した後に、融雪剤の評価を行っている。路面内には水がとどまることが想定されるが、実際に融雪剤を利用するときには雪により路面内には水が十分に浸透した状態であると考え、上記条件としている。融雪剤の評価は融雪剤のみを路面に撒いた場合と、融雪剤を水に溶かしたものを路面に散布した場合の2条件で評価する。ここで使用した融雪剤は99%が尿素で構成されている。評価する値は電力変換効率を含むDC to DC 効率である。給電周波数は85kHz、受電コイルは給電コイルの中央に配置し、コイルギャップは80mmである。評価の様子を Fig 7 に示す。

5. 評価結果

ここで評価結果をまとめる。水道水を散布した後の電力伝送効率の変化を Fig 8 に示す。

水道水が電力伝送効率に影響を与えることが分かる。また、4リットルまで効率低下が確認され、以降は飽和の傾向がみられる。今回行った試験条件では水道水を散布することにより最大1.2%の効率低下を確認できた。土壌は含水

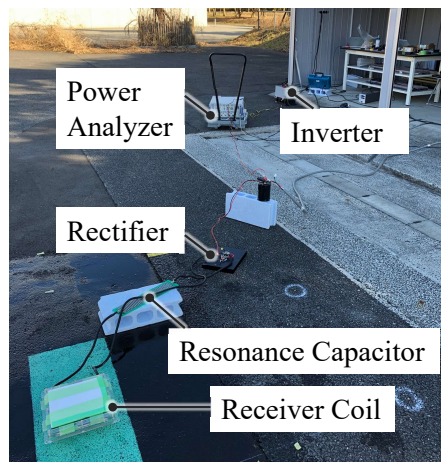


図 7: WPT 評価装置

Fig. 7. WPT Test Equipment

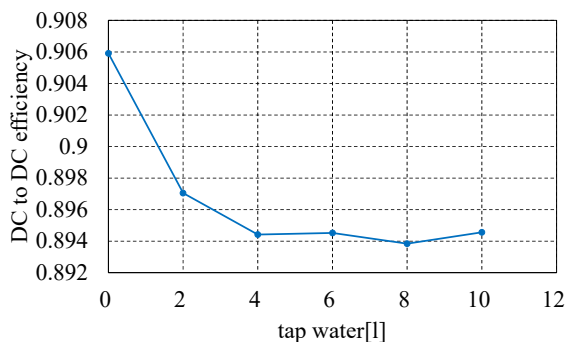


図 8: 水道水散布量に対する電力伝送効率

Fig. 8. Amount of Tap Water vs. DC to DC Efficiency

文 献

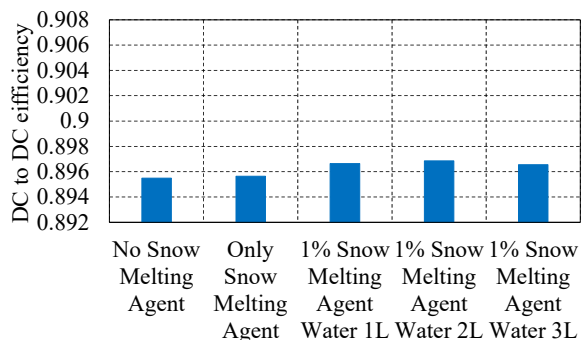


図9: 融雪剤が電力伝送効率に与える影響

Fig. 9. Effect for DC to DC Efficiency by Snow Melting Agent

することで抵抗率が低下する⁽¹¹⁾ため、渦電流が発生することにより損失が発生していると考察できる。

次に融雪剤が与える影響の検証結果を Fig 9 に示す。

融雪剤を撒いた場合に電力伝送効率に与える影響に有意な差はなく、融雪剤による影響はないと考える。今回使用した融雪剤が金属の腐食の影響を抑えるための尿素系融雪剤であったため、低効率に大きな影響を与えず、影響がなかったと考察できる。

6. 結 論

本研究では走行中給電用に埋設した給電コイルに周辺環境や異物が与える影響として水道水と尿素系融雪剤の影響を検証した。結論として、水道水は影響を与えるが、尿素系融雪剤は影響を与えないことを明らかにした。給電コイル周辺に存在するものの電気抵抗率が電力伝送効率には大きく影響するため、水の侵入を防ぐことが重要であることが示唆される。本研究で行った埋設工事は性能評価用であるため、今後は自動車のタイヤに踏まれても問題ない耐久性を加味した開発が必要である。埋設深さはコイル間の距離を決める重要な要素になるため、耐久性を加味した開発では、薄くかつ高強度、さらに渦電流の発生を防ぐために金属を含まない材料を用いた基層構造として埋設することが求められる。有機繊維補強コンクリートなど引張韌性に富み、かつ高抵抗率の材料を用いた走行中給電回路の検討は今後の課題とする。

7. 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。

- (1) O. Shimizu, S. Nagai, T. Fujita, H. Fujimoto, "Potential for CO2 Reduction by Dynamic Wireless Power Transfer for Passenger Vehicles in Japan", *Energies* 2020, 13, 3342, 2020
- (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), pp. 302-307
- (3) 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
- (4) Y.Suzuki, M.Mizutani, T.Sugiura, N.Sakai, T.Ohira, "Prototype Experiment of a 1/32-Scaled Model Via-Wheel Power Transfer Running Electric Vehicle", IEEJ Transactions on Industry Applications, no.134, vol.7, pp.675-682, 2014(in Japanese)
鈴木良輝, 水谷豊, 杉浦貴光, 坂井尚貴, 大平孝: 「電化道路をタイヤ集電で走行する電気自動車の1/32スケールモデル試作実験」電気学会論文誌D, no.134, vol.7, pp.675-682(2014)
- (5) J.Huh, S.Lee, W.Lee, G.Cho, C.Rim, "Narrow-Width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.26, no.12, pp. 3666-3679, June 2011
- (6) SAE Hybrid - Ev Committee, "SAE Standard J2954 : Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology", Society of Automotive Engineers International, Oct. 2020
- (7) H.Fujimoto, T.Takeuchi, K.Hanajiri, K.Hata, T.Imura, M.Sato, D.Gunji, G.Guidi, "Development of Second Generation Wireless In-Wheel Motor with Dynamic Wireless Power Transfer", The 31st International Electric Vehicle Symposium & Exhibition and International Electric Vehicle Technology Conference 2018
- (8) H. Fujimoto, O. Shimizu, S. Nagai, T. Fujita, D. Gunji and Y. Ohmori, "Development of Wireless In-wheel Motors for Dynamic Charging: From 2nd to 3rd generation", 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), pp. 56-61, 2020
- (9) K. Hata, T. Imura, H. Fujimoto, Y. Hori, "Charging Infrastructure Design for In-motion WPT Based on Sensorless Vehicle Detection System", 2019 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power, pp. 205-208, 2019
- (10) K. Zhang, Y. Ma, Z. Yan, Z. Di, B. Song, A. P. Hu, "Eddy Current Loss and Detuning Effect of Seawater on Wireless Power Transfer," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no. 1, pp. 909-917, 2020
- (11) K. Nishida, C. Aoyama "THE CHARACTERISTICS OF RESISTIVITY OF THE UNSATURATED SOIL AND THE APPLICATION OF ELECTRIC PROSPECTING FOR EVALUATION OF SEEPAGE FLOW THROUGH THE GROUND", , vol. 1993, no.475, pp1-9, 1993
西田一彦, 青山千彰: 「不飽和土の電気比抵抗特性と不飽和浸透計測への電気探査法の適用」土木学会論文集, 1993 巻, 475 号, pp. 1-9, 1993