

# 電気自動車のワイヤレス走行中給電システムの性能が道路構造から受ける影響の検証

清水 修<sup>1</sup>・永井 栄寿<sup>2</sup>・藤本 博志<sup>3</sup>・角谷 勇人<sup>4</sup>・佐藤 正憲<sup>5</sup>

<sup>1</sup>非会員 東京大学特任講師 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5)  
E-mail: shimizu.osamu@edu.k.u-tokyo.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>非会員 東京大学特任助教 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5)  
E-mail: nagai-saka@edu.k.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 東京大学教授 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5)  
E-mail: fujimoto@k.u-tokyo.ac.jp

<sup>4</sup>非会員 株式会社デンソー エレクトロフィケーションシステム開発部  
(〒448-8661 愛知県刈谷市昭和町1-1)  
E-mail: hayato.sumiya.j2g@jp.denso.com

<sup>5</sup>正会員 株式会社大林組 技術本部技術ソリューション部 (〒108-6125 東京都港区港南2-15-2)  
E-mail: sato.masanori.au@obayashi.co.jp

電気自動車の性能的課題である航続距離の課題解決のため磁界結合方式の走行中給電が提案されている。磁界結合方式の走行中給電のコイルが発生する磁界中に導体中存在すると渦電流が発生することにより、損失となる。道路構造にも金属を始めとする導電体が存在するため、給電性能が道路構造によって受ける影響の検証を実機試験を用いて検証した。検証の結果、表層、基層の材料は本研究で提案する走行中給電システムには影響を及ぼさないが、構造材の鉄筋が4.8%の効率低下をさせることを明らかにした。またアルミ製の磁気シールドを用いることで鉄筋の影響を半分程度に低減できることを明らかにする一方で、路盤が粒度調整砕石の場合はシールドを用いると0.4%の効率低下をするため、路盤構造によってコイルを選定する必要性を明らかにした。

**Key Words:** road structure, wireless power transfer, electric vehicles, reinforced concrete, road surface

## 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、車両重量が重くなることによって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に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<sup>1)</sup>システムである。走行中給電には接触式の給電方法<sup>2)</sup>と非接触式の給電方法がある。接触式の給電には電極の摩耗や課題がある。非接触式の給電方法には電界共振結合方

式<sup>3)</sup>と磁界共振結合方式<sup>4)</sup>が提案されている。すでに電気自動車の停車中給電では磁界共振結合方式の規格化がSAE J2954<sup>5)</sup>として進んでいる。

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<sup>6)</sup>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。

そこで本研究では道路構造が走行中給電システムに与え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解説し、3章で埋設による性能影響の確認として表層、基層材料の材料と、路盤構造による電力伝送効率への影響をそれぞれ検証する。また検



図-1 走行中給電システム

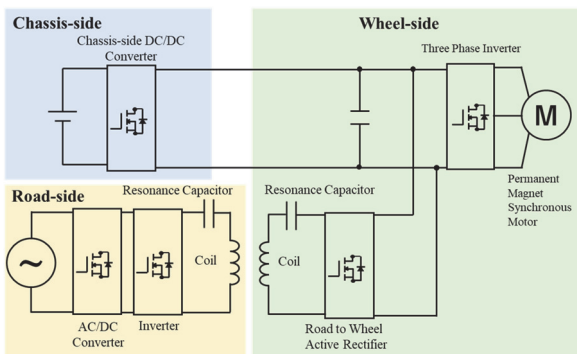


図-2 走行中給電システム回路構成

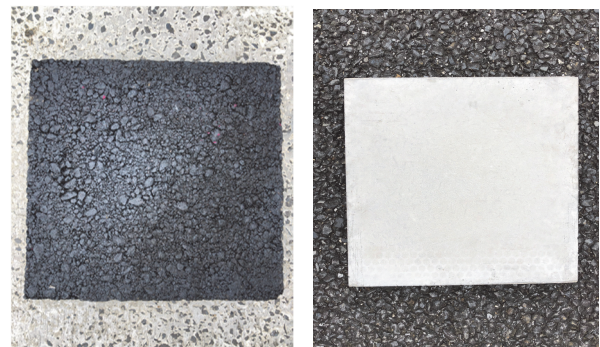
証に用いた道路構造について解説し、評価結果を述べる。そして、4章で結論を述べる。

## 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た給電システム<sup>7)</sup>である。本研究で対象としたシステムを図-1、図-2に示す。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。インバータで変換された電力はコイルで磁気エネルギーに変換され、受電コイルに送られる。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 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。受電コイルで受けた磁気エネルギーは電磁誘導により電力に変換される。受電コイルの交流電力は整流器によって直流に電力変換されて DC/DC コンバータを通してバッテリーに充電される。また走行中に受電する場合は受電電力はバッテリーを介さずにモータで使用できる。バッテリーに充電してから

表-1 表層、基層材料による影響検証用コイル諸元

	給電側	受電側
コイルケース幅	308 mm	230 mm
コイルケース長さ	1086 mm	230 mm
コイル幅	250 mm	180 mm
コイル長さ	1000 mm	180 mm
ターン数	12	13
層数	1	2
線材	リッツ線 AWG44×6250本	
フェライト材料	TDK 製 PC95	



(a) アスファルトスラブ (b) コンクリートスラブ

図-3 評価に使用した表層・基層材料

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。

受電コイル以下の部品は車両に搭載されている。地上の設備は三相交流電源を直流に変換する AC/DC コンバータ、コイル励磁用のインバータ、共振コンデンサ、給電コイルである。これらの中で地中に埋設をすることを想定しているのは共振コンデンサ、給電コイルである。そして給電のための磁界を発生させるのは給電コイルである。給電コイルと受電コイルは相互に影響を受ける関係にあるため、本研究では送受電コイルが道路構造から受ける影響と電力伝送効率について検証を進める。

## 3. 道路構造による影響の検証

### (1) 表層、基層材料の影響検証<sup>8)</sup>

表層と基層の材料としてコンクリートとアスファルトがコイルパラメータを選定し、電力伝送効率に与える影響を検証する。図-3に示すように縦 300mm、横 300mm、高さ 50mm のアスファルトとコンクリートのスラブを用いる。電力伝送時に最も磁束密度が高くなり、異物が侵入してきた場合に電力伝送効率に影響を与えるコイル間

にスラブを挿入して、何も挿入しない場合との電力伝送効率を比較し、材料の影響を検証する。

表層材料が与える影響の検証に用いた送受電コイルの緒元を表-1に示す。給電時間はコイルの長さで決まるため、コイル長さによって決まるため、コイル長さを大きくすることで給電エネルギー量を大きくできる。受電側の重量を大きくすると車体重量が大きくなり、走行にかかるエネルギーが増大するため、給電側のコイルを大きくしている。

給電実験の様子を図-4に示し、送電効率を図-5に示す。コイルケースの厚さが10mm、治具の厚さが10mmであり、スラブを出し入れする間隙10mmを含むためコイル間距離90mmでの評価を行った。ここでの距離は法規等

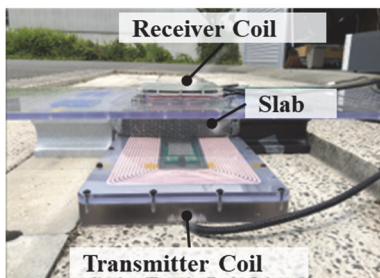


図4 表層・基層材料評価実験装置

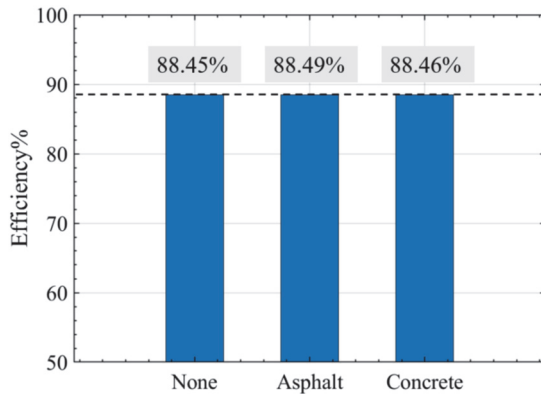
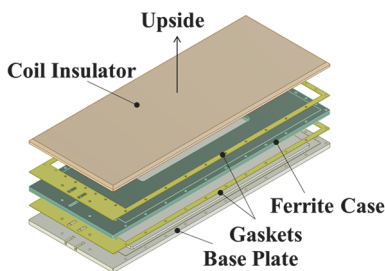
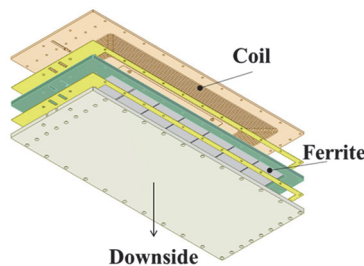


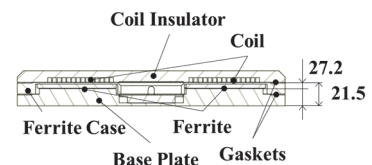
図5 表層・基層材料評価実験結果



(a) 上面概観図



(b) 下面概観図



(c) 断面図

図6 路盤構造検証用給電コイルの構造

との関連はない。給電周波数は85kHzである。給電側の直流電圧は200V、受電側は120Vである。給電コイルはコンデンサ実装数の変更にて共振周波数が85kHzとなるように調整している。アスファルト、コンクリートの有無では共振調整していない。スラブを挿入した際の効率変化は測定誤差範囲内であり、ギャップに占めるスラブの割合が50%程度では影響を与えないことが分かった。

## (2) 路盤構造の影響

典型的な基層構造として、橋梁部を模した鉄筋コンクリートと土工部がコイルパラメータと電力伝送効率に与える影響を検証する。橋梁部は高速道路全体の25%程度であるものの、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。磁界は距離の3乗で減衰することからコイルとの距離が近いものから大きな影響を受ける。金属の埋設物としては、ほかにも水道管なども考えられるが、最もコイルの近くにある金属埋設物が橋梁部の鉄筋コンクリート内の鉄筋であることから、ここでは鉄筋コンクリートの検証を行う。

路盤構造の影響を検証するためのコイル緒元を表-2に示す。埋設を前提としたコイル構造としたため、表層、基層材料検証用コイルとは給電側が異なる。路盤構造の検証用給電コイルの構造を図-6に示す。

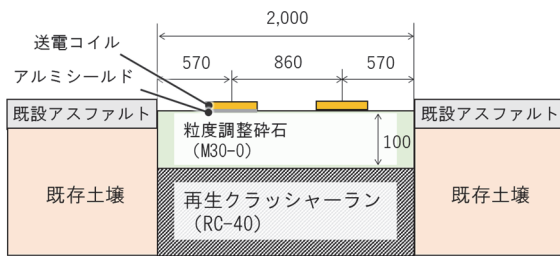
表-2 路盤構造による影響検証用コイル緒元

	給電側	受電側
コイルケース幅	338 mm	230 mm
コイルケース長さ	868 mm	230 mm
コイル幅	700 mm	180 mm
コイル長さ	280 mm	180 mm
ターン数	14	13
層数	1	2
線材	リッツ線	AWG44×6250本
フェライト材料	TDK製PC95	

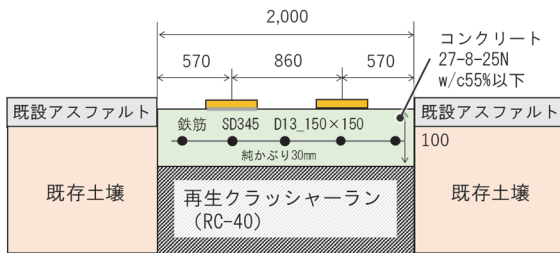
路盤構造検証用の給電コイルはコイルケース，線材，フェライトにて構成される．共振コンデンサはコイルケースの外付けである．フェライトの配置はコイル下面として，下方に漏れる磁束を低減する効果を狙っている．コイルケースはポリカーボネート製であるため絶縁体である．コイルケースは三層構造となっており，最上面がコイルを巻くためのボビン兼ねて溝を設けたケースとなっている．中間のケースがフェライトを収めるための構造となっており，最下面のケースが蓋をする構造となっている．ケース間には防水のためのシリコン製ガスケットが挿入されており，コイルの線のケース出口はシリコンシーラントにて防水加工している．

表-3 SD345の成分

成分	C	Si	Mn
割合[%]	0.27以下	0.55以下	1.60以下
成分	P	S	C+Mn/6
割合[%]	0.040以下	0.040以下	0.50以下



(a) 土工部構造



(b) 橋梁部模擬構造

図-7 検証用路盤構造断面図

路盤構造の与える影響の比較検証用の路盤構造を図-7に示す．検証用路盤構造を作成した場所はアスファルト舗装をされていたため，まず長さ10m幅2m深さ500mmで掘削し，土を入れ替えているため500mmの範囲には金属物は存在していない．そして，その上に再生クラッシャーランを配置している．土工部は再生クラッシャーランの上に100mmの高さで粒度調整砕石を用いている．橋梁部は再生クラッシャーランの上に100mmの厚さの鉄筋コンクリートを用いている．鉄筋の井桁は150mm四方として針金で組んでいる．純かぶりは30mmとしているためコイルから鉄筋の距離は57.2mmである．コンクリートは27-8-25Nを用いている．

検証用基板構造の概観を図-8に示す．約半分が土工部，残りが鉄筋コンクリートという構成となっている．鉄筋コンクリートに用いている鉄筋材料はSD345である．磁界の影響を受けづらい非磁性鉄筋<sup>11)</sup>や樹脂コート鉄筋がある<sup>12),13)</sup>が，今回は特殊鉄筋を用いていない．SD345はJIS G 3112により機械特性や成分が規定されているが，透磁率や抵抗率については規定されていない．JISG3112によって規定されている成分を表-3に示す．97%以上が強磁性体である鉄で構成されていることから渦電流が発生することが想定されるため，ここでは，磁界の漏洩を防ぐためにアルミの板を用いたシールドによる，磁気シールドの効果も検証する．

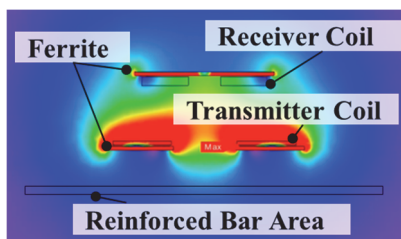
シールドのサイズはコイルの運搬の容易さを考慮してコイルケースと同様として，厚さは1mmのものとしている．材料はA5052を使用している．A5052の比透磁率と電気抵抗率を表-4に示す．表面電流の0.37倍になる表

表-4 A5052の磁気・電気的特性

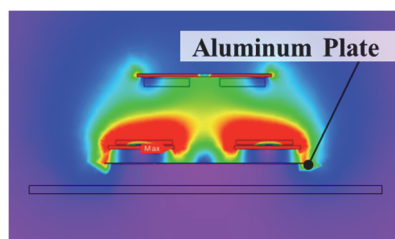
比透磁率	電気抵抗率
1.002以下	$4.93 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$



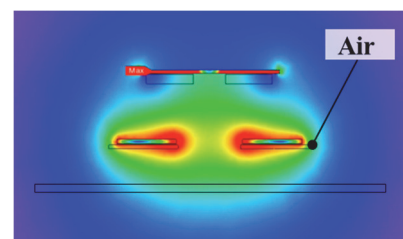
図-8 検証用路盤構造概観



(a) 埋設設用コイル



(b) アルミプレート追加



(c) 給電コイル側フェライトなし

図-9 アルミプレートとフェライトによるコイル下部の磁束密度の比較

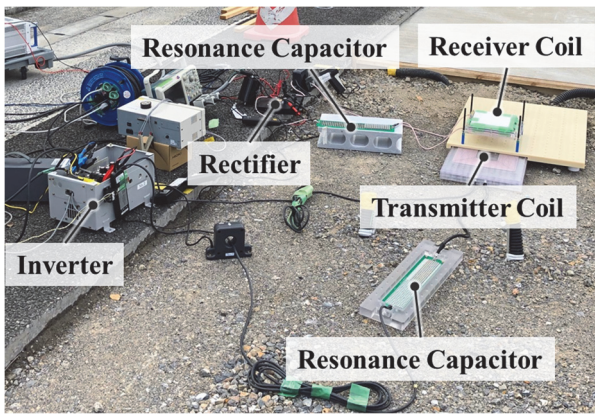


図-12 電力伝送実験装置構成

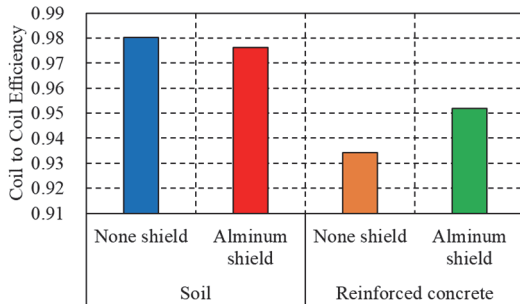


図-13 電力伝送実験結果

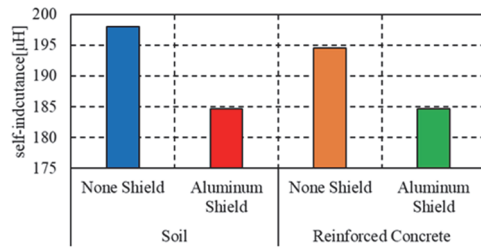
皮深さは式(1)によって得られるため、表4の値を用いて表皮深さを求めることができる。

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1)$$

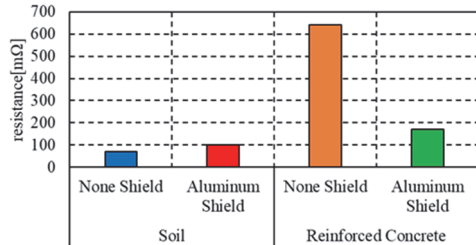
アルミ板のシールドの効果とフェライトをコイル背面に配置しない場合の変化を3次元の磁界解析にて可視化して確認する。解析結果は給電側に85kHz、300Vの電圧印加をして給電した場合を想定し、20Amsの電流を流したものである。解析結果を図-9に示す。給電コイルと受電コイルを中央に対向した配置の中心の断面図である。磁束密度の分布を色で表しており紫が最も磁束密度が低く、青、緑、黄、赤の順で磁束密度が高くなる。紫が0T、赤が2mT以上である。鉄筋の配置されているコイル下部の磁束密度はアルミ板を用いることで削減可能であることが分かる。またフェライトを用いない場合はよりコイル下部の磁束密度が増加するからフェライトを用いることも鉄筋による影響を低減する効果があることが期待できる。

土工部、橋梁部でそれぞれアルミシールドを用いる場合と用いない場合のコイルパラメータをLCRメータを用いて計測する。計測の際の受電コイルと給電コイルの距離は80mmであり、計測周波数は85kHzである。計測の結果を図-10にまとめる。

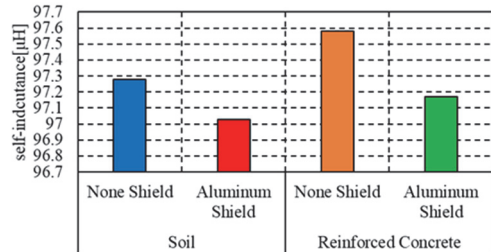
アルミシールドによって磁束が阻害されるため給電側、受電側双方の自己インダクタンスの低下が起こっている。導体内に発生する渦電流損はLCRメータで測定する場



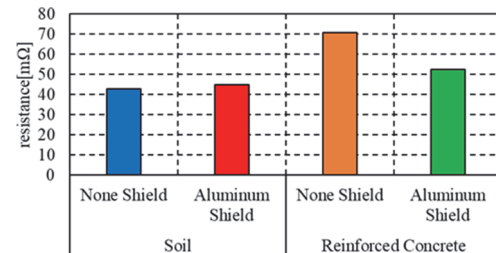
(a) 給電側自己インダクタンス



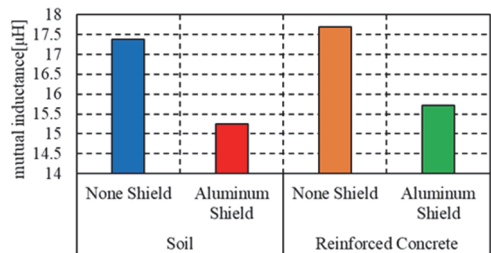
(b) 給電側抵抗



(c) 受電側自己インダクタンス



(d) 受電側抵抗



(e) 相互インダクタンス

図-10 路盤構造によるコイルパラメータの変化

合、抵抗値として測定されるため、土工部ではアルミシールドを設けた場合に抵抗値も同様に上がっている。一方で、橋梁部を模擬した鉄筋コンクリートでは鉄筋で発生する渦電流損よりもアルミシールドで発生する渦電流損の方が小さいことから、鉄筋コンクリートの上では

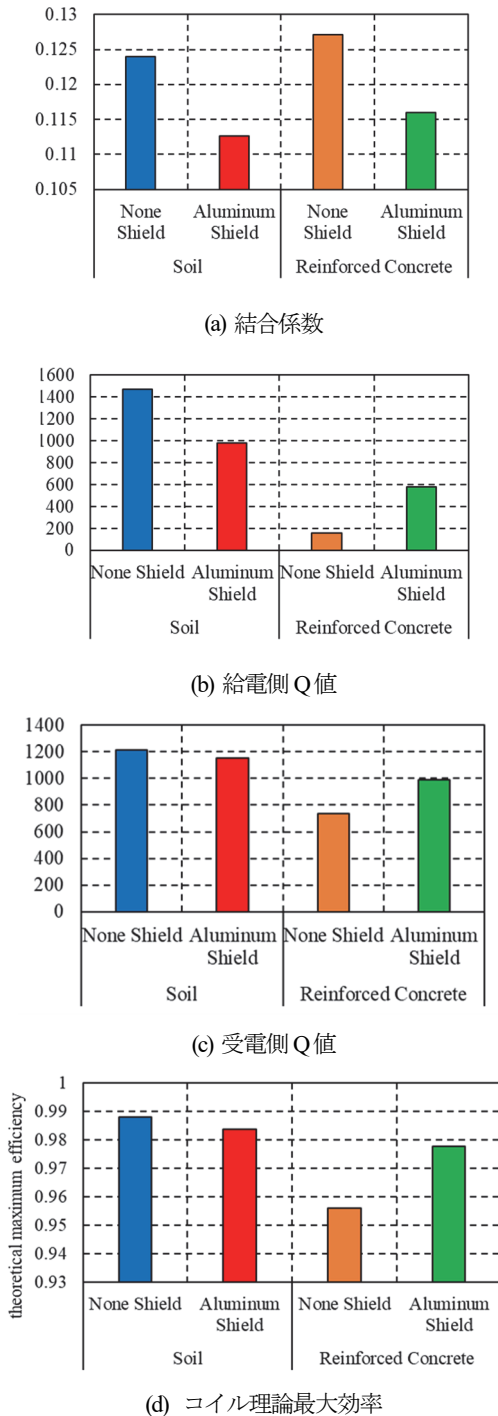


図-11 路盤構造によるコイル性能の変化

アルミシールドを用いることで抵抗値を低減する効果が得られている。

シールドのない土工部と鉄筋コンクリートの比較から給電側の自己インダクタンスは鉄筋によって減少するが、受電側の自己インダクタンスと相互インダクタンスは増加するという結果が得られた。

ここでコイルパラメータから理論的なコイルの最高効率を求める。本研究で提案する走行中給電システムは磁界共振結合方式の中の SS 方式を採用しているため、理

論的なコイルの最高効率 $\eta_{\max}$ は式(2c)で表される<sup>10)</sup>。

$$k = \sqrt{\frac{L_m}{L_1 L_2}} \quad (2a)$$

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

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

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、 $L$ 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)、 $\omega_0$ は給電周波数、 $R$ 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-10の値と式(2a)、(2b)、(2c)より得られる結合係数、Q値、理論最高効率を図-11にまとめる。

鉄筋コンクリートの上にコイルを配置してシールドを用いない場合、磁気的な結合は向上するが、抵抗値の増加によるQ値の低下により、結果的に効率低下することが分かる。

電力伝送効率も同様の条件での比較を行った。電力伝送実験の装置構成を図-12に示す。送電コイルと受電コイルの位置関係を一定にする治具を用いて位置決めをしながらコイルを土工部、鉄筋コンクリートの上部に移動して電力伝送効率の測定を行っているため位置ずれによる効率の変化はない。コイル間距離は80mm、送電周波数は85kHzである。給電コイルはコンデンサ実装数の変更にて共振周波数が85kHzとなるように調整している。給電コイルの入力電力と受電コイルの出力電力の比であるコイル効率を図-12に示す。理論効率と同様の傾向が得られており、鉄筋が入ることによってコイル効率は4.6%低下することに対してアルミシールドを用いることで2.8%の効率低下に抑えられることが明らかになった。一方で土工部ではシールドを用いることで0.4%の低下となった。理論最大効率と異なる点として理論最大効率の算出の過程では電流が完全な正弦波となっているため高調波の影響がないこと、回路のインダクタンスとキャパシタンスが完全共振条件であり、コンデンサやコイルの製造ばらつきによる共振ずれが考慮されていないことが挙げられる。

#### 4. 結論

本研究では道路構造が走行中給電システムに与える性能的影響を検証した。検証の結果、得られた結果は下記のとおりである。

- 1) アスファルト、コンクリートは磁界共振結合の走行中給電システムの中に挟まれても影響を与えない
- 2) 鉄筋コンクリートは給電効率を4.6%程度低下させる

- 3) 鉄筋コンクリートの上で給電する際はアルミ板によるシールドを用いることで効率向上が可能
- 4) 土工部で給電する際はアルミ板によるシールドを用いることで効率が低下する

本研究で得られた 2), 3), 4)の結果から磁界共振結合方式の走行中給電システム用のコイル敷設時には土工部用と橋梁部用とコイルの仕様を分けて敷設することでより効率の高い走行中給電システムを構築できることを明らかにした。

今後は公道での実証実験に向けてコイルを道路に埋設した状態での給電を目指し、道路へのコイルの埋設方法や磁界の影響を受けにくいステンレス鉄筋などを用いた場合の影響についてさらに研究を進める。またアルミ板の設計方法についても今後の課題とする。2021年1月現在、給電コイルは道路付属物に含まれない。政省令として道路付属物に給電コイルを含めるために安全性、信頼性の証明も今後の課題として挙げられる。

**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) Gunji, D., Hata, K., Shimizu, O., Imura, T. and Fujimoto, H.: 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, 2019.
- 2) Tajima, T., Noguchi, W. and Aruga, T.: Study of a Dynamic Charging System for Achievement of Unlimited Cruising Range in EV, *SAE Technical Paper 2015-01-1686*, 2015.
- 3) Ohira, T.: Via-wheel power transfer to vehicles in motion, 2013 IEEE Wireless Power Transfer, pp. 242-246, 2013.
- 4) Fujita, T., Yasuda, T. and Akagi, H.: A Dynamic Wireless Power Transfer System Applicable to a Stationary System: *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, Issue 4, pp. 3748-3757, 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) 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.
- 9) 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.
- 10) Li, S. and Mi, C. C.: Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 4-17, 2015
- 11) 山本孝一, 永井義規: 高 Mn 非磁性鉄筋, コンクリート工学, 27 巻, 10 号, pp. 15-23, 1989.
- 12) 田所裕, 佃有射, 山路徹, 丸屋剛, 二羽淳一郎: ステンレス鉄筋のコンクリート中における腐食発生塩化物イオン濃度に関する実験的研究, 土木学会論文集 E, 65 巻 4 号, pp. 522-529, 2009.
- 13) 三浦尚, 板橋洋房, 新井哲三: エポキシ樹脂塗装鉄筋の許容塗膜損傷度に関する研究, 土木学会論文集, 1992 巻, 451 号, pp. 79-88, 1992.

(Received March 4, 2021)  
(Accepted March 9, 2021)

## EVALUATION OF THE EFFECT BY ROAD STRUCTURE ON THE EFFICIENCY OF DYNAMIC WIRELESS POWER TRANSFER FOR ELECTRIC VEHICLES

Osamu SHIMIZU, Sakahisa NAGAI, Hiroshi FUJIMOTO,  
Hayato SUMIYA and 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 wireless power transfer system. Since road structures contain conductors such as metals, the effects of road structures on the power supply efficiency were verified by actual measurement. The results show that the surface and base materials do not affect the proposed dynamic wireless power transfer system. However the reinforcing steel in the structure reduces the efficiency by 4.8%. The magnetic shield made of aluminum reduces the influence of the steel bars by half, while the use of the shield reduces the efficiency by 0.4% in the case of the granularity-adjusted crushed stone in the roadbed.