

電気自動車の走行中無線給電における 金属異物の発熱量の基礎研究

出口 裕也*, 永井 栄寿, 藤田 稔之, 藤本 博志, 堀 洋一 (東京大学)

Fundamental Investigation on Induction Heating of Metal Objects in Dynamic Wireless Power Transfer
Yuya Deguchi, Sakahisa Nagai, Toshiyuki Fujita, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

In the static wireless power transfer (WPT) for electric vehicles, the temperature of metal objects between two coils rise by induction heating. However, in the dynamic WPT, the objects' temperature may not rise because of short supply time and long waiting time. We investigated metals' temperature rise using simulation model and WPT test bench. In the static WPT, ferromagnetic objects quickly generate heat by induction heating; nevertheless, they did not significant raise their temperature in the dynamic WPT at 30 km/h. This results show that high-precision detection equipment used in static WPT may not be necessary for dynamic WPT when supply time is limited.

キーワード：走行中無線給電, 誘導加熱, 異物検知

(Dynamic wireless power transfer, Induction heating, Foreign object detection)

1. 序論

地球温暖化や大気汚染などの環境問題に対する1つの解決策として、電気をエネルギー源として走行することで走行時にCO₂などを排出しない電気自動車 (Electric Vehicle: EV) が世界中で注目を集めている。しかしEVの普及率は未だ低い水準に留まっており、この原因として消費者がEVの短い航続距離と長い充電時間に不満を持っていることが考えられる⁽¹⁾。したがって、EVの普及にはこれら問題の解決が求められる。

この問題に対し、2007年にMITが発表した磁界共振結合方式のワイヤレス電力伝送 (Wireless Power Transfer: WPT) 技術⁽²⁾を応用し、道路内に埋設された送電コイルとEVに設置された受電コイルの間で走行中に給電を行う走行中ワイヤレス給電 (Dynamic-Wireless Power Transfer: D-WPT) というアイデアが注目を集めている⁽³⁾。この技術により、EVは走行中に路面から給電されるため航続距離が理論上無限になり、また充電の手間も不要になる。

しかし、D-WPTを含むEVへのWPT技術の確立には未だ課題が残されており、その一つとして送受電コイル間に異物が侵入した場合の安全性の問題が挙げられる。特に電気自動車を対象とするWPTでは送受電コイル間に強い磁場が生じ、それは生物に健康被害を、金属に誘導電流による発熱をもたらす⁽⁴⁾。図1に示すように、1kW規模の停車中給電において送受電コイル間に金属異物であるスチールシートを置いた場合、金属表面の最高温度は数秒後に158°Cまで達する。したがってWPTを安全に動作させるためには迅

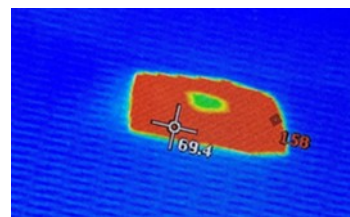


図1 1kW規模、数秒後のスチールシート温度
Fig. 1. The temperature of a steel sheet between two coils after a few seconds. (1 kW power scale)

速に異物を検知しそれらに対処する必要がある。

以上の理由から、WPT装置における異物検知 (Foreign Object Detection: FOD) について盛んに研究が行われている。本研究では金属異物を対象に、特にD-WPTにおける金属異物の影響について実験及び考察を行った。FODの先行研究は停車中の給電を想定したWPT装置についての研究が殆ど⁽⁶⁾であり、走行中給電を想定した金属異物の影響について調査した文献は少ない。そこで本稿では、実験ベンチを用いて走行中給電を模した給電を行い、特に金属異物の発熱量について調査を行った。

2. 回路解析

〈2・1〉 S-S方式の回路解析 磁界共振結合方式のWPTシステムにおいて、共振用のコンデンサを送受電回路ともに直列 (series) に接続したS-S方式の等価回路を図2に示す⁽⁵⁾。Rはコイルの内部抵抗、Lはコイルの自己インダクタンス、Cはキャパシタンス、Mはコイル間の相互インダク

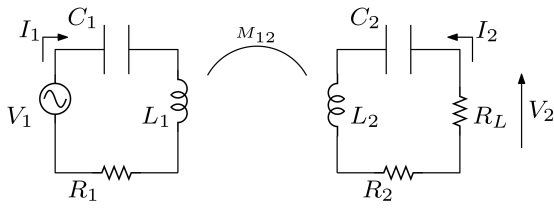


図2 送受電コイルの等価回路 (S-S方式)

Fig. 2. Equivalent circuit of primary/secondary coil. (Series-Series)

タンスを表す。また、 I は電流、 V は電圧を表す。

図2より、回路のZ行列は式(1)のように表せる。

$$Z = \begin{bmatrix} R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) & j\omega M_{12} \\ j\omega M_{12} & R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)より、電圧 $\mathbf{V} = [V_1, V_2]^T$ と電流 $\mathbf{I} = [I_1, I_2]^T$ について

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) & j\omega M_{12} \\ j\omega M_{12} & R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) \end{bmatrix} \mathbf{I} \quad \dots (2)$$

が成立する。ここで受電側回路について図2のような抵抗負荷 R_L を想定する場合、受電側電圧 V_2 について

$$V_2 = -I_2 R_L \quad \dots (3)$$

が成立し、式(2)・式(3)を解くことで送受電電流値および受電電圧値が式(4)・(5)・(6)として求められる。

$$I_1 = \frac{R_2 + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)}{\left\{R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)\right\}\left\{R_2 + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)\right\} + (\omega_0 M_{12})^2} V_1 \quad \dots (4)$$

$$I_2 = -\frac{j\omega_0 M_{12}}{\left\{R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)\right\}\left\{R_2 + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)\right\} + (\omega_0 M_{12})^2} V_1 \quad \dots (5)$$

$$V_2 = \frac{j\omega_0 M_{12} R_L}{\left\{R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)\right\}\left\{R_2 + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)\right\} + (\omega_0 M_{12})^2} V_1 \quad \dots (6)$$

送電効率 η は送電電力と受電電力の比で計算でき、式(7)のように表される。

$$\eta = \frac{(\omega M_{12})^2 R_L}{\left\{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2\right\} + (\omega M_{12})^2 (R_2 + R_L)} \quad \dots (7)$$

実際には動作角周波数 ω は式(8)に示す共振角周波数 ω_0 を満たすように設計する。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad \dots (8)$$

式(8)を満たすように動作周波数を定めることで回路が共振し、式(1)においてインピーダンスの虚部が常に0になる。

〈2・2〉金属異物がWPTに与える影響 金属異物が送受電コイル間に侵入した場合の回路を図3に示す。金属異物は等価回路としてRL直列回路で表される⁷⁾。

この場合は各コイル間のクロスカップリングを考慮する必要があるため、Z行列は式(9)の3×3行列とな

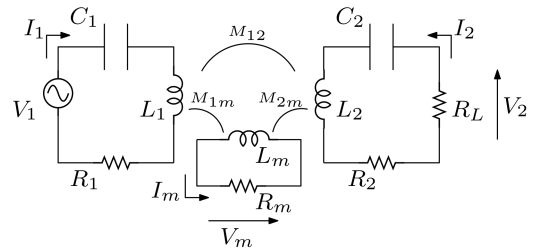


図3 送受電コイルと金属異物の等価回路

Fig. 3. Equivalent circuit of primary/secondary coil and foreign metal object.

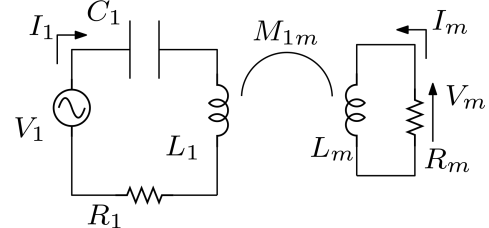


図4 送電コイルと金属異物の等価回路

Fig. 4. Equivalent circuit of primary coil and foreign metal object.

る。しかし、式(2)と同様に解くためには金属異物の抵抗値 R_m や自己インダクタンス値 L_m 、また金属異物と各コイル間の相互インダクタンス M_{1m}, M_{2m} を求める必要があり、それらを実際に計測することは困難である。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_m \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + Z_1 & j\omega M_{1m} & j\omega M_{12} \\ j\omega M_{1m} & R_m + j\omega L_m & j\omega M_{2m} \\ j\omega M_{12} & j\omega M_{2m} & R_2 + Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_m \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Z_1 = j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) \quad \dots (10)$$

$$Z_2 = j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) \quad \dots (11)$$

そこで、送受電コイル間が十分に離れている状態を考える。金属異物は一般に送電コイル上にあるため、この場合は金属異物と受電コイルの距離が大きく、受電コイルと金属異物の相互インダクタンス M_{2m} が非常に小さいと仮定できる。したがって、金属異物の影響は図4のように送電コイルと金属異物の結合のみを考えればよい。この場合、電圧 $[V_1, V_m]^T$ と電流 $[I_1, I_m]^T$ について

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + Z_1 & j\omega M_{1m} \\ j\omega M_{1m} & R_m + j\omega L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_m \end{bmatrix} \quad \dots (12)$$

が成立する。

式(12)を解くと、受電コイルから見た送電コイルのパラメータが金属異物の影響で式(13)・(14)にした

がって変化したように見なせる。この時の値は金属異物が存在する状態で送電コイルの抵抗・自己インダクタンスを計測することによって容易に取得できる。

$$L_1 \rightarrow L_1 - \frac{(\omega M_{1m})^2}{R_m^2 + (\omega L_m)^2} L_m \dots\dots\dots (13)$$

$$R_1 \rightarrow R_1 + \frac{(\omega M_{1m})^2}{R_m^2 + (\omega L_m)^2} R_m \dots\dots\dots (14)$$

式(13)・(14)より送電コイルの自己インダクタンス L_1 が減少し、抵抗値 R_1 が増加する。これらの影響で式(4)の分母が増加し、送電電力が減少する。また金属との結合により金属異物に電流 I_m が流れ、金属異物の抵抗成分 R_m で発熱が生じる。

3. 給電状況の違いによる金属温度の変化

先行研究より、停車中給電では1つのコイルで給電する時間が長いこと、小規模給電かつ鍵や硬貨のような小さい金属異物であっても高温になることが示されている⁽⁸⁾。

しかし、今回対象とする走行中ワイヤレス給電では1台の車両に対し複数のコイルで短時間給電するため、加熱時間が短く放熱時間があることを考慮すると、1つの送電コイル上にある金属異物の発熱は停車中給電の発熱より小さくなると予想できる。そこで、計算ソフト上で発熱シミュレーションを行い金属の温度を比較した。計算ソフトは matlab を用いた。

〈3・1〉 金属の発熱量の計算 発熱量の計算式は先行研究の式を用いる⁽⁹⁾。円盤状の金属を磁界に対し垂直に置いた場合、発熱量は以下の式で表される。

$$P = \left(\frac{D}{\delta} \cdot \frac{1}{\frac{\mu}{\mu_0} \frac{\sqrt{2}\delta}{D} + 1} \right)^2 \frac{\pi}{27} H_0^2 \sqrt{\frac{\mu\omega}{\sigma}} \left(\frac{D}{2} \right)^2 e^{-2j\omega t} \dots\dots\dots (15)$$

$e^{-2j\omega t}$ は振動項であるため絶対値を取り、給電時間との積としてジュール熱を計算した。パラメータを表1に示す。金属異物の材質は鉄を想定し、磁場は送電電流が40 Aの場合における実測値を使用した。

〈3・2〉 放熱の計算 放熱先として自然対流と空気への輻射を検討する。自然対流熱伝達率 α_1 と輻射熱伝達率 α_2 は近似的に式(16)・(17)で計算できる。金属平板が水平に置かれている状況を想定している。

$$\alpha_1 = 0.54 \lambda \left(\frac{Pr g \beta}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{T_w - T_\infty}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots (16)$$

$$\alpha_2 = \epsilon \sigma \frac{T_w^4 - T_\infty^4}{T_w - T_\infty} \dots\dots\dots (17)$$

パラメータを表2に示す。

〈3・3〉 想定する走行状況・その他パラメータ 発熱

表1 発熱量計算に使用したパラメータ
Table 1. Parameters to calculate heat generation.

Definition	Parameters	Value
δ	Skin depth (85 kHz)	0.104 μm
μ_0	Vacuum permeability	1.257×10^{-6} H/m
μ	Permeability	6.3×10^{-3} H/m
H_0	Magnetic field at surface	1.19 A/m
ω	Angular frequency of H_0	$85000 \times 2\pi$ rad/s
σ	Electrical conductivity	5.544×10^6 / Ωm

表2 放熱量計算に使用したパラメータ
Table 2. Parameters to calculate heat release.

Definition	Parameters	Value
P_r	Prandtl number	0.71
λ	Thermal Conductivity of Air	0.0256 W/mK
g	Gravitational Acceleration	9.80665 m/s ²
β	Coefficient of thermal expansion	3.4×10^{-3} /K
ν	Kinematic viscosity	15.4×10^{-6} m ² /s
σ	Stefan-Boltzmann constant	5.67×10^{-8} W/m ² K ⁴
ϵ	Emissivity of metal	0.71
c	Specific heat of metal	461 J/(kg · K)
ρ	Density of metal	7800 kg/m ³
T_0	Initial temperature	293 K
T_∞	Air temperature	293 K

表3 給電状況に関するパラメータ
Table 3. Parameters of power transfer.

Parameters	Value
Length of primary coil	69.9 cm
Length of secondary coil	18.2 cm
Length of a car	4.8 m
Operating Frequency	85 kHz
Current of primary coil	40 A

量と放熱量の計算に必要な給電時間と待機時間について、今回は以下の3ケースを想定した。

Case 1 渋滞時：車速 5 km/h · 車間距離 5 m
(給電時間 432 ms, 停止時間 3600 ms)

Case 2 市街地走行：車速 30 km/h · 車間距離 20 m
(給電時間 72 ms, 停止時間 2400 ms)

Case 3 準走行中給電：1.5 分間の停車中給電⁽¹⁰⁾

すべての Case について、受電コイルが送電コイル上にある場合のみ給電が行われる。使用したパラメータを表3に示す。

発熱の許容値は国際規格である SAE J2954 を参考に、10 分間のシミュレーションにおいて金属温度が 80°C を超えることを発熱の基準とした⁽¹¹⁾。また金属異物の大きさについても SAE J2954 基準の 50 mm×75 mm に加え、より小さい 50 mm×50 mm とより大きい 100 mm×100 mm を比較した。

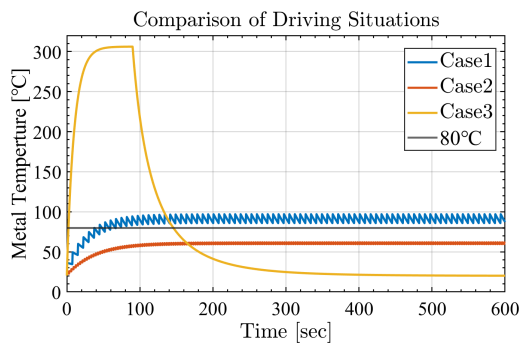


図5 走行状況による変化 (50 mm×75 mm 想定)

Fig. 5. Comparison of Different Driving Situations.

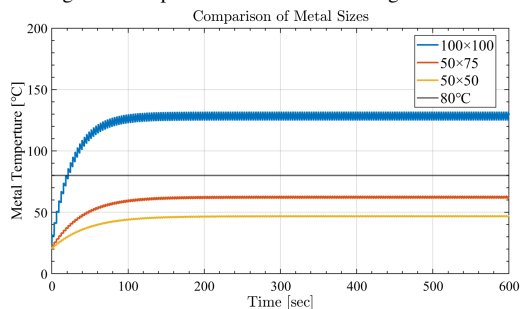


図6 金属の表面積による変化 (市街地走行想定)

Fig. 6. Comparison of Different Metal Sizes.

〈3・4〉 シミュレーション結果 走行状況に応じたシミュレーション結果を図5に、金属異物のサイズに応じたシミュレーション結果を図6に示す。

走行状況による変化は、図5より Case 1 と Case 3 では 80°C を超えるが、Case 2 では 60°C 付近で飽和した。この結果から、車速が低速であるほど金属温度は高くなることが予想できる。

金属異物のサイズによる変化は、図6より表面積が大きいほど高温になることがわかる。

以上より、車速が低速かつ金属異物が大きいほど金属の飽和温度が高くなる。しかし金属のサイズによって飽和温度は大きく異なるため、車速がある程度以上あれば小さな金属異物の温度は許容値以下にとどまり、異物検知機構などを使用せずに無視して給電を続けられる可能性がある。

また、本シミュレーションでは道路との熱伝導を考慮せず、かつ金属の侵入による送電電流値の減少を考慮していないため、実際の金属温度は今回のシミュレーション結果より低温になると予想される。

4. 走行中給電を模した発熱実験

シミュレーション結果より、走行中ワイヤレス給電における金属異物は停車中給電の金属異物より発熱しにくいことが示された。

そこで、実際に金属温度を確認するため、研究室の実験ベンチを用いて走行中ワイヤレス給電を模した短時間かつ断続的な給電を行い、送電コイル上に配置した金属異物の表面温度を計測した。

〈4・1〉 実験設備 使用した実験ベンチの写真を以下に示す。0.7 m 長の給電コイル上に厚さ 4 mm の木製平板を置き、その上に金属を置いてサーモメータで金属の表面温度を測定した。実験風景を図7に示す。

金属異物としてアルミ板 (100 mm×100 mm)、銅板 (100 mm×100 mm)、スチールシート (50 mm×50 mm, 50 mm×75 mm, 75 mm×75 mm, 100 mm×100 mm) を用意した。

金属の表面温度は、数分待機し金属温度が飽和温度に達したのちサーモメータ (testo 881-2) を用いて計測した。

〈4・2〉 状況設定 走行中給電の給電規模は研究機関によって異なるが、著者らの研究グループでは送電電圧 500 V、送電電流 40 A の 20 kW を一例として検討している⁽¹⁰⁾。今回使用した実験機では 20 kW 規模の電圧に耐えられないため、金属を発熱させる渦電流は送電電流が起こす磁界によって励起されることを考慮し、受電コイルを取り外すことで低電圧で比較的大きな送電電流を生じさせ、大規模給電と同様の磁界を発生させた。

また式 (15) より金属の発熱量は磁界の 2 乗に比例し、磁界は電流に比例することから、最小二乗法を用いて電流値で 2 次近似を行いグラフを外挿することで 20 kW での状況を検討した。

〈4・2・1〉 金属の材質・サイズによる金属温度変化 金属の磁性・サイズが金属温度に与える影響について確認するため、給電時間と待機時間を調節し機器を破損させない範囲で金属の温度を上昇させた。今回は給電時間を 1000 ms、待機時間を 1000 ms とした。

ここで給電時間と待機時間がともに 1000 ms という状況は、給電時間が非常に長く停車を挟む渋滞時のような状況でしか起こりえないことに留意する。したがってこの結果については、金属温度と温度許容値の比較は行わない。

〈4・2・2〉 走行状況による金属温度変化 走行中給電の状況を模すため、常に一定の車速かつ車間距離で車が往来すると仮定して、以下の 2 ケースについて給電時間と待機時間を定めて給電を行い金属温度を測定した。金属はスチールシートを使用した。

Case A 渋滞時：車速 5 km/h・車間距離 4.45 m
(給電時間 432 ms, 停止時間 3200 ms)

Case B 市街地走行：車速 30 km/h・車間距離 20 m
(給電時間 72 ms, 停止時間 2400 ms)

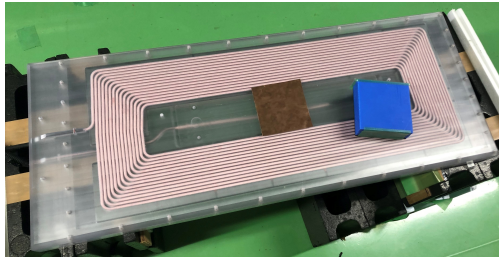


図7 WPT 送電コイル

Fig. 7. Primary coil of wireless power transfer.

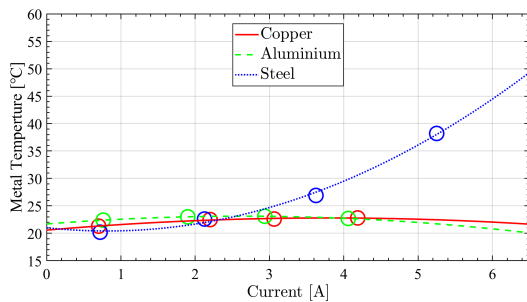


図8 実験結果：金属の種類と金属温度の関係
(100mm×100mm 想定)

Fig. 8. Relationship between metal kinds and metal temperatures.

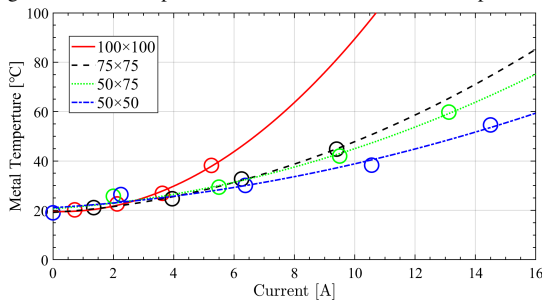


図9 金属のサイズと金属温度の関係 (スチールシート 想定)

Fig. 9. Relationship between metal sizes and metal temperatures.

〈4・3〉 実験結果 金属の種類と金属温度の関係を図8に示す。シミュレーション通り、比透磁率が1に近いアルミや銅は発熱しなかったが、強磁性体である鉄は電流値の2乗に比例して大きく発熱した。

金属のサイズと金属温度の関係を図9に示す。表面積が大きいほど金属温度は上昇し、これもシミュレーションの結果と合致する。

走行状況と金属温度の関係を図10に示す。送電電流が40Aの地点が20kW規模の給電に相当する。渋滞時を想定したCase Aでは、40A地点では発熱許容値を超えてしまうが、33Aまでは許容値以内で送電することが可能である。これは12kWに相当するため、センサなど何らかの方法でこの金属を検知できるならば、定格から電力量を絞ることによって送電が継続で

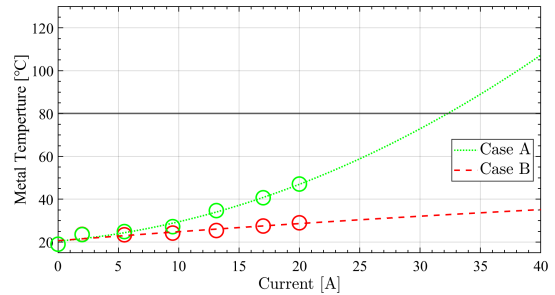


図10 走行状況と金属温度の関係 (スチールシート, 50mm×75mm 想定)

Fig. 10. Relationship between driving situations and metal temperatures.

きる可能性がある。

市街地走行を想定したCase Bでは40A地点において金属温度は40°C近辺に収まるため、発熱を考慮する必要がなく送電を継続できると考えられる。5km/hと30km/hの間に速度の閾値があると考えられ、今後の実験で確かめる予定である。

5. 結論

本研究では、磁界共振結合方式WPTを用いた走行中給電における金属異物の発熱について、シミュレーションから傾向を取得し、ベンチを用いた実験により金属の材質・サイズと車速が及ぼす影響について調査した。

停車中給電における金属異物検知では小物体も発熱する危険があるため高い検知精度が必要だが、走行中給電では一定速度以上が担保される状況では小物体の発熱が無視できることが示された。したがって、走行中給電で求められる金属検知精度は停車中給電よりも低くなると予想される。

走行中給電の社会実装への障害として送電コイルの高い設置コストが存在し、異物検知機構もこのコストに含まれる。しかし本研究の結果より、走行中給電では低コスト・低精度の検知機構でも十分機能する可能性があることが示された。

今回は金属の表面積を変化させて計測することで実験的に金属サイズと温度の関係を計測したが、回路解析において金属異物の抵抗値・自己インダクタンス値、また金属と各コイルの相互インダクタンスを求めることができれば任意の材質・大きさの金属について発熱量を計算できる。この場合、計算ベースでより精密に検知すべき金属のサイズを求めることが可能だと考えられる。

-
- (1) EV/PHV 普及の現状について | 国土交通省, 経済産業省,
<https://www.mlit.go.jp/common/001283224.pdf>
(2020年12月15日閲覧)
 - (2) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljačić : “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances (RESEARCH ARTICLES)”, SCIENCE, vol. 327, no. 5834 (2007)
 - (3) N. Xia, Z. Yuan, Y. Zhu and Y. Wang : “Integrated receiver with high misalignment tolerance used in dynamic wireless charging”, IET Electric Power Applications, vol. 14, no. 10 (2020)
 - (4) S. Y. Jeong, V. X. Thai, J. H. Park and C. T. Rim : “Self-Inductance-Based Metal Object detection With Mistuned Resonant Circuits and Nullifying Induced Voltage for Wireless EV Chargers”, IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 34, no. 1 (2019)
 - (5) 居村岳広 : 「磁界共鳴によるワイヤレス電力伝送」, 森北出版 (2017)
 - (6) J. Jeong, S. Ryu, B. Lee and H. Kim : “Tech tree study on foreign object detection technology in wireless charging system for electric vehicles”, IEEE INTELEC (2015)
 - (7) Takehiro Imura : “Simple Equivalent Circuit Model with Foreign Object on Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling”, Proceedings of 2017 IEEE CAMA, Tsukuba, Japan.
 - (8) L. Lan, N. M. Ting, S. Aldhafer, G. Kkelis, C. H. Kwan, J. M. Arteaga, D. C. Yates and P. D. Mitcheson : “Foreign Object Detection for Wireless Power Transfer”, 2nd URSI AT-RASC, Gran Canaria (2018)
 - (9) Toshiya Hashimoto : “A Study on Maximum Heat Value of Foreign Metal Object at Wireless Charging”, Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, Inc.(2018)
 - (10) Daisuke Gunji and NSK : “A Basic Study on Deployment of In-motion Wireless Power Transfer to Urban Roads” (2018)
 - (11) SAE J2954, “Wireless Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicle” | SAE International (2019)