

電気自動車の走行中ワイヤレス給電における 受電コイル側キャンセルコイルによるフェライトとアルミと鋼板の 影響を考慮した遠方漏洩磁界抑制手法の提案

小林 樹生* 居村 岳広 堀 洋一 (東京理科大学)

Proposal of a Far-Field Leakage Suppression Method Considering the Influence of Ferrite and Aluminum and Steel Plate by
Cancellation Coil on Receiving Coil Side for Wireless Power Transfer in Running Electric Vehicles
Tatsuki Kobayashi*, Takehiro Imura, Yoichi Hori, (Tokyo University of Science)

The proposal method in this paper aims to reduce the magnetic leakage by placing a cancellation coil on the vehicle body side, while reducing the cost of burying the cancellation coil on the road side. The effectiveness of this method in reducing magnetic leakage was confirmed.

キーワード：ワイヤレス電力伝送 (WPT)，電気自動車 (EV)，電磁両立性，磁界，漏洩磁界，アクティブシールド，
(Wireless power transfer (WPT), electric vehicle (EV), electromagnetic compatibility, magnetic field, magnetic leakage, active shielding)

1. 序論

近年、環境問題への解決策としてガソリン車から電気自動車への移行が進められている。しかし、現在の電気自動車は航続距離が短い、充電に時間がかかるなどの理由から、普及が進んでいない。

この問題の解決策として有効とされているのが走行中ワイヤレス給電である。走行中の電気自動車に対して道路に埋設した送電コイルから磁界共振結合により電力を伝送することができれば停車して充電する必要がなくなり、航続距離の制限もなくなる。さらには車載バッテリーを減らすことができるので車両の軽量化、低価格化が実現でき、電気自動車の普及につなげることができると考えられる。

しかし、走行中ワイヤレス給電の実用化には様々な課題があり、そのうちのひとつが漏洩磁界の問題である。漏洩磁界とは送受電コイル間から漏れ出た磁界のことを指し、周囲の人体や電子機器に悪影響を及ぼしてしまう。走行中ワイヤレス給電を行うには道路に埋設された送電コイルの上を受電コイルを搭載した自動車が通過する間に電力を供給しなくてはならないため瞬間的に大電力を扱うことになる。扱う電力が大きくなれば周囲に漏れ出る磁界も大きくなるため、これを抑制する必要がある。

ここで、走行中ワイヤレス給電における漏洩磁界は送受電コイル周辺数 cm~2 m 程度の近傍漏洩磁界と送受電コイルから 10 m 先の遠方漏洩磁界に分けられる。近傍漏洩磁界は人体に悪影響を与えるが走行中給電においては車体によって防護される。対して、遠方漏洩磁界は主に電子機器の誤

動作の原因となり車体を回り込んで広がっていく。走行中給電が検討されるような高速道路や交通量が多い車道では通常人間が立ち入ることは想定されないため、本研究では遠方漏洩磁界について扱っていく。

また、停車中給電の漏洩磁界には規制値が設定されている。本研究で扱う共振周波数 85 kHz での 10 m 先の磁界規制値は日本では電波法施行規則⁽¹⁾⁽²⁾の 68.4 dB μ A/m と定められている。走行中給電に関する規制値は未だ確定していないが先に述べた停車中給電の規制値を本研究での下回るべき規制値としてターゲットにしていく。

キャンセルコイルを用いた漏洩磁界抑制についての先行研究の多くが送電側にキャンセルコイルを配置した構造をしている⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。受電側でキャンセルを行っている研究⁽⁷⁾⁽⁸⁾でも多くが近傍の磁界の抑制についてのみ言及されており、遠方漏洩磁界の抑制に触れられているものは少ない。

送電側でキャンセルコイルを用いて漏洩磁界を抑制しようとする、道路上に多数存在する送電コイルに対応させるためキャンセルコイルの必要個数も多くなり、配置したそれぞれのキャンセルコイルの電圧、位相を制御する必要が出てくる。

受電側で漏洩磁界をキャンセルすることができればこの問題を解決できるため、本研究では受電側にキャンセルコイルを配置したコイル構造を提案し、その効果を確認する。

2. 磁界共振結合

本研究では S-S(Series-Series)方式の磁界共振結合を使用している。

磁界結合のワイヤレス電力伝送では送電側コイルに交流電流を印加することによって磁界を発生させ、受電側のコイルに誘導起電力を発生させることで電力伝送を行っている。特に、S-S方式の磁界共振結合では送電側と受電側双方に直列にコンデンサを挿入して任意の周波数で共振が起こるようにしている。これにより送受電コイル間の距離が離れていても高効率で電力伝送を行うことができる。

Fig. 1にS-S方式の基本回路とT型等価回路を示す。Fig. 1から一次側と二次側の電流を I_1, I_2 、電圧を V_1, V_2 、自己インダクタンスを L_1, L_2 、励磁インダクタンスを L_m 、共振コンデンサを C_1, C_2 、内部抵抗を r_1, r_2 、負荷抵抗を R_L 、角周波数を ω とすると

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})}{\{r_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})\}\{r_2 + R_L + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})\} + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{j\omega L_m}{\{r_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})\}\{r_2 + R_L + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})\} + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (2)$$

$$V_2 = \frac{j\omega L_m R_L}{\{r_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})\}\{r_2 + R_L + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})\} + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (3)$$

このとき、共振条件を満たしているとき共振周波数 ω_0 は

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (4)$$
より(1)～(3)式は

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L}{r_1(r_2 + R_L) + \omega_0^2 L_m^2} V_1 \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{j\omega L_m}{r_1(r_2 + R_L) + \omega_0^2 L_m^2} V_1 \quad (6)$$

$$V_2 = \frac{j\omega L_m R_L}{r_1(r_2 + R_L) + \omega_0^2 L_m^2} V_1 \quad (7)$$

と書ける。また、効率 η は入力電力 P_1 と受電電力 P_2 より

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{-V_2 I_2}{V_1 I_1} = \frac{(\omega L_m)^2 R_L}{(r_2 + R_L)^2 r_1 + (\omega L_m)^2 (r_2 + R_L)} \quad (8)$$

となる。ここで(8)式の効率が最大となるのは

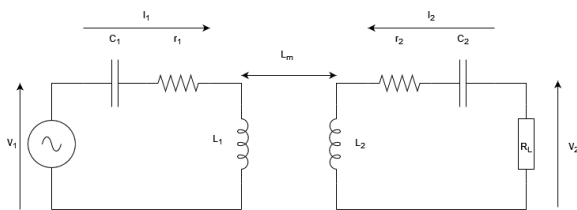
$$\frac{\partial \eta}{\partial R_L} = 0 \quad (9)$$

の時のので最大効率を $\eta_{\max}$ 、最適負荷を R_{Lopt} とすると

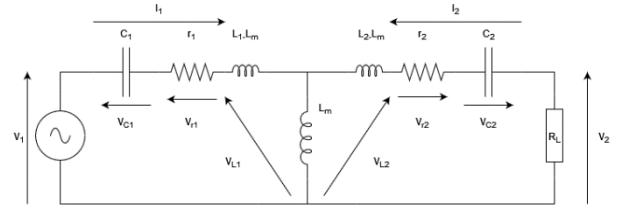
$$R_{\text{Lopt}} = \sqrt{r_2^2 + \frac{r_2(\omega_0 L_m)^2}{r_1}} \quad (10)$$

$$\eta_{\max} = \frac{(\omega_0 L_m)^2}{\{\sqrt{r_1 r_2} + \sqrt{r_1 r_2 + (\omega_0 L_m)^2}\}^2} \quad (11)$$

となる。



(a) Circuit of S-S method



(b) T-shaped equivalent circuit

図1 S-S方式の回路とT型等価回路⁽¹⁰⁾

Fig.1. Circuit of S-S method and T-shaped equivalent circuit⁽¹⁰⁾

3. 提案する漏洩磁界低減手法

〈3・1〉 使用するコイル及び素材と構造

本研究で使用する送受電コイルとキャンセルコイルの配置をFig.2に示す。キャンセルコイルは受電コイルと同じ高さに設置されている。送受電コイル間の距離は150 mm離れておりS-S方式で電力伝送を行っている。送電コイルはFig.3, 受電コイルはFig.4, キャンセルコイルはFig.5の構造のものを使っている。コイルのパラメータはTable.1に示す。

提案するコイル構造は受電コイルとキャンセルコイルの上にFig.6のようにフェライト、アルミ板、銅板の順で素材を重ねている。それぞれの素材の間隔は3 mmとなっている。また、使用する素材のパラメータをTable.2に示す。銅板とアルミの大きさはSAE Internationalによる規格J2954⁽⁹⁾を参考に決定した。また、キャンセルコイルの上のフェライトは幅80 mm、厚さ3 mmのフェライトを配置しており、アルミ板からの影響でコイルのインダクタンスが低下してコイル特性が悪化するのを防いでいる。

本研究ではフェライトを受電コイル上部とキャンセルコイル上部の2枚に分けている。これは1枚の大きなフェライトを配置した時にフェライト内を磁束が交差することによってフェライトの効果が弱まることを考慮したためである。

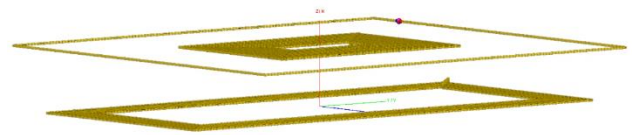


図2 コイルの配置⁽¹⁰⁾

Fig. 2. Positioning of coils⁽¹⁰⁾

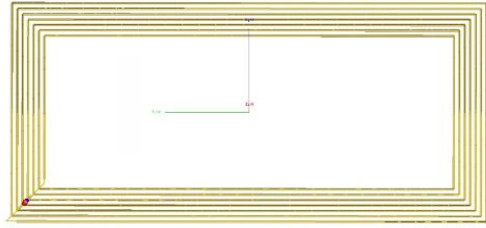


図3 送電コイル⁽¹⁰⁾

Fig. 3. Shape of power transmission coil⁽¹⁰⁾

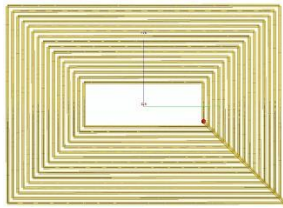


図4 受電コイル⁽¹⁰⁾

Fig. 4. Shape of power receiving coil⁽¹⁰⁾

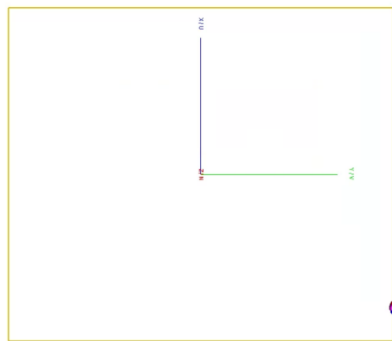


図5 シールド素材も含めたコイル構造

Fig.5. Positioning of coils and shielding material

表1 コイルのパラメータ

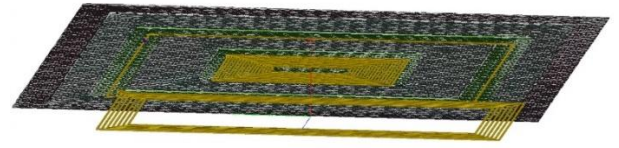
Table. 1. Parameters of coils

	Transmission coil	Receiving coil	Cancel coil
Coil size [mm ²]	600×1300	420×580	1020×1180
Coil turns [turns]	7	16	1
Pitch [mm]	10.85	10.85	-
Radius [mm]	3.5	3.5	3.5

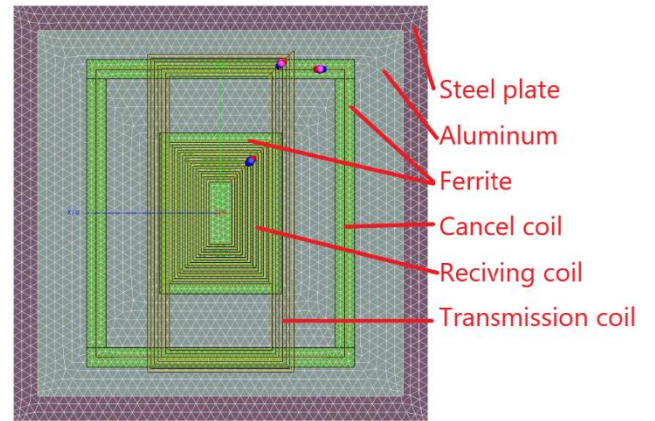
表2 シールド素材のパラメータ

Table. 2. Parameters of shielding material

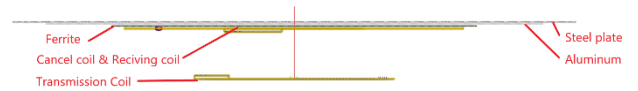
shielding material	Size [mm ³]
Steel plate	1700×1700×3
Aluminum	1500×1500×3
Ferrite of receiving coil	440×600×3



(a) Oblique downward view



(b) Bottom view



(c) Side view

図6 シールド素材を含めたコイル構造

Fig.6. Positioning of coils and shielding material

〈3・2〉 シミュレーション方法

Fig.6 のコイル構造について共振周波数を 85 kHz として受電電力を 20 kW に固定して解析ソフト Altair Feko を用いてモーメント法による電磁界解析を行った。磁界の解析値は Fig.7 のようにコイルの進行方向横 10 m 先の 4×2 m² の領域で最も大きい値とした。

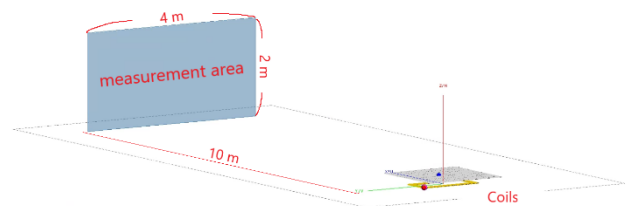


図7 測定領域

Fig. 7. Measurement area

〈3.3〉 シミュレーション結果

キャンセルコイルの電圧を 50 V に固定して受電コイルとキャンセルコイルの電流位相差を変化させた場合の解析結果を Fig.8 に示す。Fig.8 では受電コイルとキャンセルコイルの電流位相差を変動させたときの磁界をキャンセルコイルを使用しない送受電コイルのみの場合とキャンセルコイルに電圧を印加させない場合、電波法施行規則の規制値 68.4 dB μ A/m の 3 つの値と比較及び評価を行った。

Fig.8 から適切な位相を取れば漏洩磁界を減少させることができることがわかる。また、電流位相差が 84 度の時に漏洩磁界は最小の 66.60 dB μ A/m をとり、キャンセルコイルがない場合から 8.57 dB μ A/m の磁界の低減ができており、電波法の規制値 68.4 dB μ A/m を下回っている。また、Fig.8 からキャンセルコイルに電圧を印加していなくてもキャンセルコイルがあるだけで漏洩磁界を低減することができているのがわかる。これはキャンセルコイル自体に電圧を印加していなくても送受電コイルから発生した磁界による電磁誘導で電流が流れたことで磁界が発生し、漏洩磁界を打ち消したためだと思われる。しかし、キャンセルコイルに電圧を印加していない状態では電波法の規制値を下回ることができていないため、キャンセルコイルに電圧を印加する必要がある。

次に、キャンセルコイルに印加する電圧を変化させた結果を Table.3, Fig.9 に示す。Table.3, Fig.9 では位相差 84 度付近の最も磁界が低減できていた位相を使用している。Table.3 の効率 η を求める式については送電電力を P_1 、受電電力を P_2 、キャンセル電力を P_c とおいて

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_c} \dots \dots \dots (12)$$

として求めた。

Table.3 からキャンセルコイルに印加する電圧が上がるほど効率が落ちていることがわかる。キャンセルコイルに印加する電圧は伝送効率の低下を抑えるためにできる限り小さくしたいが、漏洩磁界の規制値から必要な電圧の大きさが決定される。本研究で提案した形状のコイルの漏洩磁界はキャンセルコイルに 40 V 以上印加することで電波法の規制値 68.4 dB μ A/m を下回ることができた。

表 3 キャンセル電圧を変えた時の漏洩磁界

Table.3. Magnetic leakage when cancel voltage is changed

Cancel voltage [V]	Current phase difference [deg]	Cancel power [kW]	Power of receiving coil [kW]	efficiency	Magnetic leakage [dB μ A/m]
30	88.7	0.57	19.9	0.899	69
40	86.7	1.57	19.5	0.872	68
50	84.0	2.96	19.5	0.844	67
60	81.5	4.69	20.6	0.820	65
No cancel coil			20.0	0.988	75

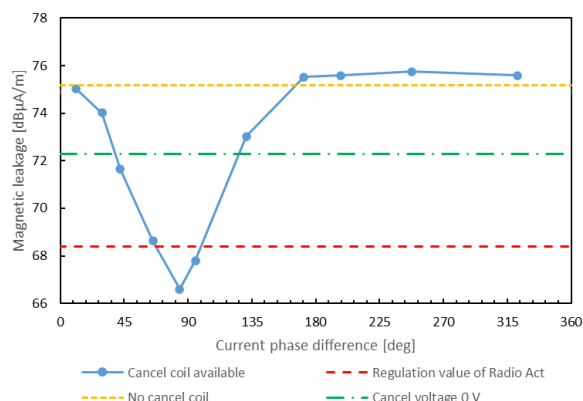


図 8 キャンセル電流位相を変えた時の漏洩磁界

Fig.8. Magnetic leakage when cancel current phase is changed

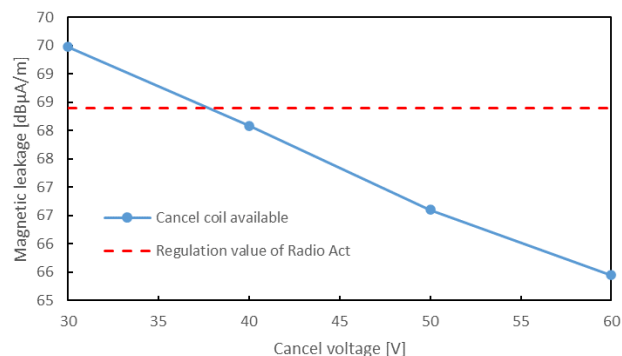


図 9 キャンセル電圧を変えた時の漏洩磁界の図

Fig.9. Diagram of magnetic leakage when cancel voltage is changed

4. 結論

提案したキャンセル手法はキャンセルコイルがあるだけで漏洩磁界の低減効果があった。さらに適切な電流位相を取るようキャンセルコイルに電圧をかけるとより大きな漏洩磁界の減少がみられた。キャンセルコイルに印加する電圧が多くなるほど伝送効率は落ちてしまうが 40 V 以上の電圧をキャンセルコイルにかけることで電波法の規制値 68.4 dB μ A/m を満たせることを示した。

しかし、本研究ではキャンセルコイルの半径、配置、巻き数や位置ずれ等検討できていない項目がまだあるのでこれらを最適化することでより高効率で漏洩磁界の小さいコイル構成を作ることができると考えられる。

文 献

-
- (1) 電波法施行規則
https://www.tele.soumu.go.jp/horei/law_honbun/72002000.html#e000001260
 - (2) 無線設備規則第六十五条第一項の規定に基づく通信設備以外の高周波利用設備の電源端子における妨害波電圧並びに利用周波数による発射及び不要発射による磁界強度又は電界強度の最大許容値の特例
https://www.tele.soumu.go.jp/horei/law_honbun/72ab4780.html
 - (3) B. Zhang et al., "Concept Design of Active Shielding for Dynamic Wireless Charging of Light-duty EV," 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Chicago, IL, USA, 2020, pp. 844-850.
 - (4) 長谷川蒼真, 居村岳広, "走行中給電における隣のキャンセルコイルを用いた遠方漏洩磁界抑制方法の検討", 2021 年電気学会産業応用部門大会, Aug. 2021.
 - (5) 明石晃槻, 居村岳広, 堀洋一, "走行中ワイヤレス電力伝送における I 型キャンセルコイルを用いた遠方漏洩磁界抑制", 電子情報通信学会無線電力伝送研究会, Mar. 2022.
 - (6) T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei and M. Feliziani, "Active Coil System for Magnetic Field Reduction in an Automotive Wireless Power Transfer System," 2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI), New Orleans, LA, USA, 2019, pp. 189-192.
 - (7) W. Songcen et al., "Electromagnetic shielding design for magnetic coupler of N-type dynamic electric vehicle wireless power transfer systems," 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 2019, pp. 1-7.
 - (8) S. Y. Choi, B. W. Gu, S. W. Lee, W. Y. Lee, J. Huh and C. T. Rim, "Generalized Active EMF Cancel Methods for Wireless Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 11, pp. 5770-5783, Nov. 2014.
 - (9) SAE International, "Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology," Issued 2016-05, Revised 2022-08.
 - (10) 小林樹生, 居村岳広, 堀洋一, "電気自動車の走行中ワイヤレス給電における受電側のフェラライトとアルミと銅板が伝送効率と漏洩磁界に与える影響についての検証", 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, Mar. 2023.