

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

明石 晃槻[†] 居村 岳広[†] 堀 洋一[†]

[†] 東京理科大学理工学部 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

あらまし 走行中ワイヤレス給電の課題として漏洩磁界がある。漏洩磁界は近傍と遠方の 2 つに大別され、走行中ワイヤレス給電の実現には漏洩磁界抑制が必要となる。近傍磁界の抑制方法については多く研究されているが、遠方磁界に対する検討はあまりされていない。本論文では、遠方漏洩磁界を抑制するための新たなコイルを提案し、遠方磁界抑制の効果を電磁界シミュレーションと実験により評価する。その結果、10m 離れた地点において、電磁界シミュレーションと実験により提案する I 型キャンセルコイルの遠方漏洩磁界の抑制効果を示した。

キーワード ワイヤレス電力伝送, 走行中ワイヤレス給電, 遠方漏洩磁界, アクティブシールド方式

Far Field Leakage Suppression Using I-Type Cancellation Coil in Dynamic Wireless Power Transfer

Koki AKASHI[†] Takehiro IMURA[†] and Yoichi HORI[†]

[†] Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science 2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba, 278-8510 Japan

Abstract One issue in Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) is the magnetic field leakage. The magnetic field leakage can be divided into two major categories: near and far. In order to realize DWPT, it is necessary to suppress the magnetic field leakage. Many studies have been done on how to suppress near field leakage, but not many studies have been done on far field leakage. In this paper, a new coil for far field leakage suppression is proposed and evaluated the effect of the far field leakage suppression by electromagnetic simulation and experiments. As a result, at a distance of 10 m, it was showed the effectiveness of the proposed Type-I cancel coil in far field leakage suppression by electromagnetic simulation and experiments.

Keywords Wireless Power Transfer, Dynamic Wireless Power Transfer, Far Field Leakage, Active Shielding

1. まえがき

近年、ワイヤレス電力伝送の応用として現在注目を集めているのが電気自動車 (EV) である。走行中給電は EV の普及の妨げとなる航続距離の短さ、充電の利便性の悪さの解決として期待されており、EV が普及することで CO₂ の削減にも繋がる。走行中給電の実現に向けた解決すべき課題として漏洩磁界がある。漏洩磁界は人体や電子機器への悪影響が懸念されており、走行中給電は大電力を扱うことになるので漏洩磁界が大きくなり抑制が必要とされる。漏洩磁界は近傍と遠方の 2 つに大別される。先行研究として、近傍磁界を抑制する方法^[1]として電力伝送するコイルとは別に磁界を抑制するためのキャンセルコイルを用いる方法^{[2][3]}やアルミやフェライトを利用した磁気シールドを用いる方法^{[4]-[7]}、漏洩磁界の少ないコイル形状で電力伝送する方法^[8]が検討されているが、遠方磁界に対する検

討はあまりされていない。走行中給電においては、車体から 1~2 m 程度の近傍に対し、遠方は 10 m と距離が遠く走行中の EV に 1~2 m まで近づく状況が少ないこと、近傍は車体によりある程度抑えられるが、遠方は回り込んで広がること (図 1) から遠方磁界の抑制が重要である。また、遠方漏洩磁界抑制の先行研究としてコの字型のキャンセルコイルを用いた方法が提案されている^[9]。しかし、この先行研究では、受電側にもキャンセルコイルを用いていることやキャンセルコイルをコの字に曲げていることによる実際に使用する際の構造的な難しさがある。

本論文では、遠方における漏洩磁界を抑制するために上記の先行研究における構造的問題を解決した新たなコイルを提案し、提案するコイルによる遠方磁界抑制効果を電磁界解析ソフト「FEKO」のシミュレーションと作製したコイルによる実験によって評価する。

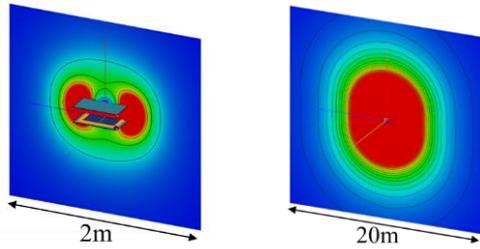


図 1 近傍と遠方の磁界放射

2. 提案する I 型キャンセルコイル

遠方漏洩磁界の抑制に当たり、本論文で提案するコイルを図 2 に示す。図 3 に電力伝送をシミュレーションする際のモデリング図を示す。シミュレーションには電磁界解析ソフト「FEKO」を用いて、MoM 法で解析を行う。主コイルは、外径 400×400 mm、巻数 20、ピッチ 3 mm に設定し、キャンセルコイルは、巻数 20、ピッチ 3 mm の同じソレノイドコイルを 2 つ組み合わせたコイルである。各コイル線の太さは 3 mm、送受電間距離は 150 mm である。共振周波数は 85 kHz とし、主コイルとソレノイドコイル 1 つのインダクタンスと内部抵抗を表 1 に示す。

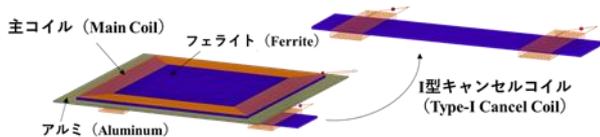


図 2 提案する主コイルとキャンセルコイル

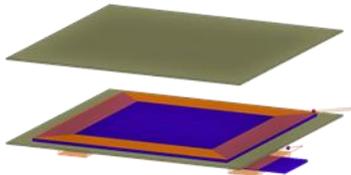


図 3 電力伝送時の全体図

表 1 主コイルと I 型キャンセルコイルの L 値, R 値

	Main Coil	Type-I Cancel Coil
Inductance [μH]	343	128
Resistance [$\text{m}\Omega$]	545	59.7

3. シミュレーションと実験

CISPR 及び電波法施行規則で「79 kHz 以上 90 kHz 以下の周波数においては $68.4 \text{ dB}\mu\text{A}/\text{m}$ @10 m とする」と定められている。上記は 7.7 kW 入力に対する規則だが、本論文では 15 W 入力の低電力におけるシミュレーションと実験での評価のため、10 m における基準値を $68.4 \text{ dB}\mu\text{A}/\text{m}$ の代わりに提案する主コイルのみによる 10 m における磁界値を基準にして、I 型キャンセルコ

イルを用いた際の磁界の変化をその基準値と比較して評価する。

3.1. 実験準備

図 4 に作製した主コイル及び作製した I 型キャンセルコイルを示す。各コイルの構造はシミュレーションと同様の大きさで作製し、表 2 に各コイルのインダクタンスと内部抵抗を示す。また、本論文の実験において 10 m の磁界の測定方法はループアンテナを使用した三軸測定を行う。図 5 に示すようにループアンテナで H_x (x 軸の磁界), H_y (y 軸の磁界), H_z (z 軸の磁界) を測定し、合成して全体の磁界 H を求める。

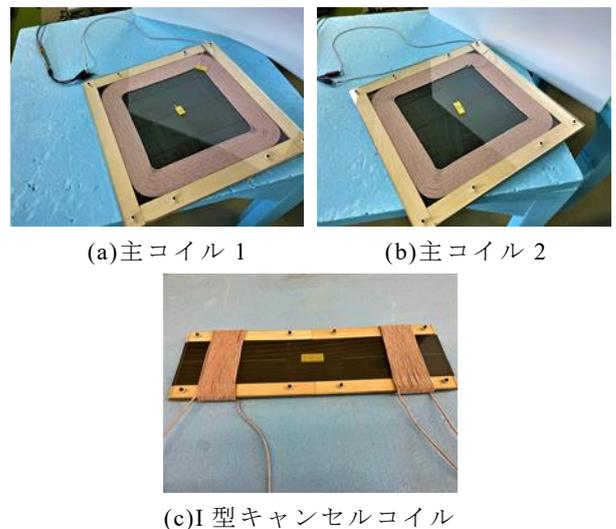


図 4 作製した主コイル及び I 型キャンセルコイル

表 2 作製した各コイルの L 値, R 値

	Main Coil 1	Main Coil 2
Inductance [μH]	367	365
Resistance [$\text{m}\Omega$]	514	531

	Type-I Cancel Coil-R	Type-I Cancel Coil-L
Inductance [μH]	147	148
Resistance [$\text{m}\Omega$]	194	210



図 5 ループアンテナの三軸測定方法

3.2. 主コイル単体のシミュレーションと実験

図 2 で示した主コイルのみ用いた電力伝送実験とループアンテナを用いた磁界測定の結果を示す。測定場所は東京理科大学野田キャンパス敷地内にある走行路で行う。測定距離（コイルからループアンテナの距離）10 m, 送受電間距離 150 mm, 最適負荷 27.1Ω である。この時、主コイルの印加電圧（主電圧）を 1~20 V まで変化させて測定する。10 m 先の磁界の変化を図 6, 入力電力の変化と電力伝送効率の変化を図 7 にシミュレーション結果と合わせて示す。この結果から、シミュレーションと実験の値がほぼ一致しており本論文でのシミュレーションと実験の比較による評価は妥当性があると言える。10 m 先の磁界のシミュレーションと実験値のわずかな差は実験機器等の周りの環境による影響によるものであると考察する。

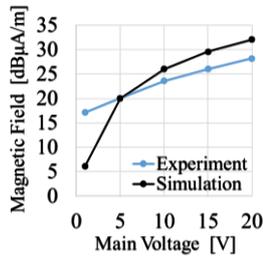


図 6 主コイル単体での磁界変化@10 m

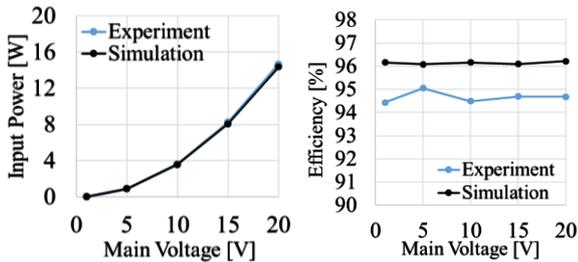
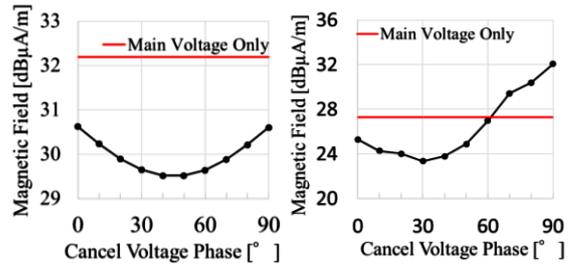


図 7 主コイル単体での入力電力と電力伝送効率の変化

3.3. I 型キャンセルコイルの電圧位相変化

提案する I 型キャンセルコイルの印加電圧の位相を変化させた時のシミュレーションと実験による 10 m 先の磁界の変化を図 8 に示す。主電圧を 20 V, キャンセルコイルの印加電圧を 5 V にし, キャンセルコイルの印加電圧の位相を $0 \sim 90^\circ$ まで変化させる。グラフの赤線は主コイルのみに電圧 20 V 印加時の磁界強度である。この結果から、位相変化による磁界の抑制効果の変化が確認できる。シミュレーションと実験で磁界の変化が違う原因に、実験で位相を変化させていくときのキャンセルコイルの電流が安定しておらず、短時間で位相を変化させたことによる残留磁場の影響があると考えられる。



(a) シミュレーション (b) 実験

図 8 キャンセル電圧位相変化による磁界変化

3.4. I 型キャンセルコイルの電圧振幅変化

I 型キャンセルコイルの電圧を変化させた時のシミュレーション結果を図 9 に示す。図 9 はキャンセル電圧を変化させた時の 10m 先の磁界の変化を示しており、主電圧は 20 V, キャンセルコイルの電圧の位相は 50° で固定している。この結果から、提案する I 型キャンセルコイルでの遠方磁界の抑制効果を確認できる。I 型キャンセルコイルに流れる電流と電流の位相を表 3 に示す。表 3 で主電圧 20 V のみ印加した時の I 型キャンセルコイルに流れる電流位相と I 型キャンセルコイルに電圧 2 V 位相 50° のみを印加した時の I 型キャンセルコイルに流れる電流位相を比較するとほぼ逆位相であることがわかる。キャンセルコイルを用いて遠方における漏洩磁界を抑制するにあたり、キャンセルコイルに流れる電流の位相が関係していることが考えられる。

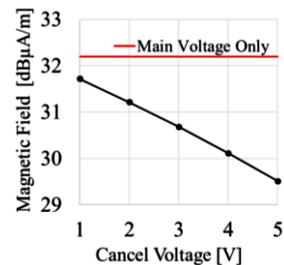


図 9 キャンセル電圧の振幅変化による磁界 (シミュレーション)

次に、作製したコイルを使用して測定を行う。測定場所は主コイル単体時と同様である。主電圧 20 V, キャンセル電圧の位相を 50° に固定した時に、キャンセル電圧を 1~5 V まで変化させて測定する。また、測定方法として I 型キャンセルコイルを x 軸と y 軸方向に向けた時の 2 方向で測定する(図 11)。図 12 にそれぞれの方向の磁界変化を示す。この結果から、提案する I 型キャンセルコイルは I 型キャンセルコイルの配置する方向によらず 10 m 先の地点において全方位の磁界抑制効果を得られることが考えられる。

表 3 I型キャンセルコイルに流れる電流と電流の位相

Main Voltage[V]	Cancel Voltage Phase [°]	Cancel Voltage[V]	Cansel-Tx1		Cansel-Tx2	
			Currnt [mA]	Phase [°]	Currnt [mA]	Phase [°]
20	0	0	10.5	-59.6	10.3	-52.8
0	50	2	98	140	100	140

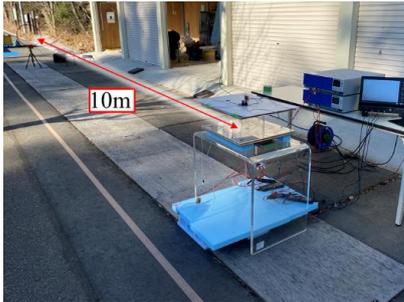
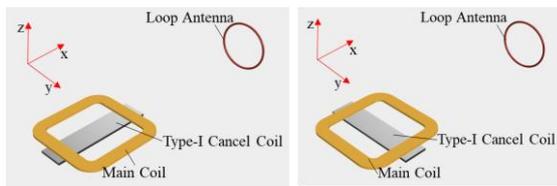
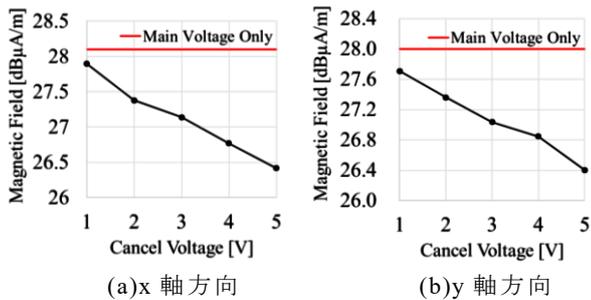


図 10 10 m 磁界測定時の実験風景



(a) x 軸方向 (b) y 軸方向

図 11 I型キャンセルコイル測定配置図



(a)x 軸方向 (b)y 軸方向

図 12 I型キャンセルコイル x, y 軸方向時の磁界

4. 結論

本論文でのシミュレーションと実験で提案するキャンセルコイルによる遠方磁界の抑制効果を得られた。また、提案するキャンセルコイルは向きに関係なく遠方磁界を抑制することができる。キャンセルコイルを用いる際、キャンセルコイルの電流位相を変えることで遠方磁界の抑制効果を高められるとも言える。

今後の展望として、本論文では送電側と受電側に同コイルを用いたが、今後は SAE の J2954 に近づけたコイルを使用したコイルによる検討を行う。また、シミュレーションにより遠方磁界と電流位相の関係について逆位相である可能性が見えたので、これを理論による数値計算での検討を行う。

文 献

- [1] Wang Songcen, Wei Bin, Wu Xiaokang, Xu chong, Xu Jinxing, Ge Weimei, Xu Jiaqi, "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, pp. 1-7(2019), 2019.
- [2] Abiezer Tejada, Claudio Carretero, John T. Boys, Grant A. Covic, "Ferrite-Less Circular Pad With Controlled Flux Cancellation for EV Wireless Charging," IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 32, Issue: 11, Nov. 2017), 2016.
- [3] S. Cruciani, T. Campi, F. Maradei, M. Feliziani, "Active Shielding Design for Dynamic Wireless Power Transfer Systems," 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, 2020.
- [4] C. Rong, X. Tao, C. Lu and M. Liu, "Investigation of Magnetic Field Shielding by Mesh Aluminum Sheet in Wireless Power Transfer System," 2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), London, United Kingdom, pp. 126-129, 2019.
- [5] F. Corti, F. Grasso, L. Paolucci, L. Pugi, L. Luchetti, "Circular Coil for EV Wireless Charging Design and Optimization Considering Ferrite Saturation," 2019 IEEE 5th International forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI), 2019.
- [6] Mostak Mohammad, Jason Pries, Omer Onar; Veda P. Galigekere, Gui-Jia Su, Saeed Anwar, Jonathan Wilkins, Utkarsh D. Kavimandan, Devendra Patil, "Design of an EMF Suppressing Magnetic Shield for a 100-kW DD-Coil Wireless Charging System for Electric Vehicles," 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2019.
- [7] K. Kadem, Y. Le Bihan, M. Bensetti, É. Laboure, A. Diet, M. Debbou, "Reduction of the shielding effect on the coupling factor of an EV WPT system," 2019 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), 2019.
- [8] Feng Wen, Qiang Li, Rui Li, Li Liu, Tao Wu, "Harmonic and Magnetic Leakage from Wireless Charging System for Electric Vehicles," 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2019.
- [9] 明石晃槻, 居村岳広, "ワイヤレス電力伝送におけるコの字型キャンセルコイルを用いた遠方の漏洩磁界抑制の基礎検討," 令和 2 年電気学会全国大会, Mar. 2020, 2020.