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基礎研究

学生員　長谷川　蒼真　　正　員　居村　岳広（東京理科大学）

Basic Research on a Leakage Far Magnetic Field Suppression Method Using the Adjacent Cancel Coil for Dynamic Wireless Power Transfer

Soma Hasegawa, Student Member, Takehiro Imura, Member (Tokyo University of Science)

In recent years, wireless power transmission via the magnetic field coupling method has attracted attention. In particular, the technology called Dynamic Power Transfer (DWPT) expected that electric vehicles become common. However, there are some problems in realizing DWPT, and one of them is the influence of the leakage magnetic field. In this paper, we propose a new method for suppressing the distant leakage magnetic field. Its effect of the proposed method surveyed by simulation and experiment. In the simulation using the electromagnetic field analysis software FEKO, it was possible to reduce the magnetic field by a maximum of 1.07 mA/m while suppressing it with high efficiency. In the experiment, we were able to degree the magnetic field. We were able to show the superiority of the proposed method.

キーワード：ワイヤレス電力伝送，漏洩磁界，走行中給電
Keywords：wireless power transfer, leakage magnetic field, dynamic power transfer

1.　研究背景

地球温暖化問題や化石燃料への依存などの解決策として電気自動車（EV：Electric Vehicle）が注目されているが，普及はあまり進んでいない。EV の普及を促進させる一つの手段としてワイヤレス電力伝送（WPT：Wireless Power Transfer）の技術が注目されており，特に走行中の EV へ WPT を行う走行中ワイヤレス電力伝送（DWPT：Dynamic Wireless Power Transfer）は，EV に搭載するバッテリの容量を最小限に抑えることができ，短かった EV の航続距離も制限がなくなると期待されている。しかし，DWPT の実用化には様々な課題があり，そのうちの 1 つとして漏洩磁界の問題が挙げられる。。近傍と遠方の 2 種類に分けられ，人体や電子機器へ悪影響を及ぼすため抑制が必要不可欠である。また，DWPT は停車中給電に比べて 10 倍近くの電力を要するため，本技術の検討は非常に重要であると言える。従来，キャンセルコイルや磁気シールドを用いる方法[(1)-(3)]などが検討されてきたが，ほとんどが近傍の漏洩磁界抑制に向けた研究であり遠方磁界の抑制に関する検討は進んでいない。そこで，本稿では遠方に焦点を当て，DWPT を行う際に生じる遠方の漏洩磁界を抑制させる新たな手法を提案する。提案する手法の磁界抑制効果は電磁界シミュレーションと実験により，実証した。

2.　研究概要

〈2･1〉想定する DWPT システム　本研究を行うにあたって想定した走行中ワイヤレス電力伝送システムのイメージを Fig.**1** に示す。大電力でかつ高効率であることで知られる磁界共振方式を用いた DWPT を想定し，EV の通過に合わせて送電を行うコイルを切り替えていくシステムを想定して検討を進めた。

Fig.1 想定する DWPT のイメージ図

〈2･2〉 **漏洩磁界抑制方法概要**　漏洩磁界抑制にあたって，磁界抑制用のキャンセルコイルを用いる方法の検討を進めた。使用したコイル構成を Fig.2 に示す。電力伝送を行う主コイルとその左右に配置された長方形型のキャンセルコイルから構成される。本稿で提案する手法のイメージを Fig.3 に示す。に示すように，電源が ON している主コイルのとなりに並ぶ主コイルに取り付けられたキャンセルコイルによって ON している主コイルが発する漏洩磁界を抑制する手法である。

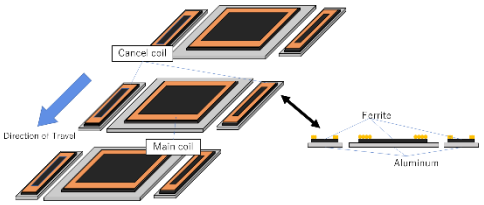


Fig.2 使用するコイル構成

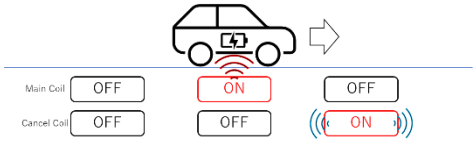


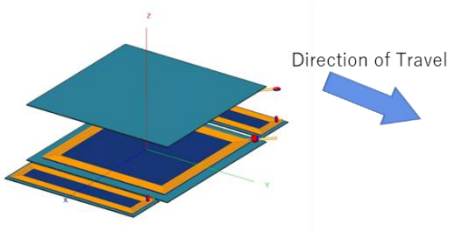
Fig.3 提案手法のイメージ図

3. シミュレーション

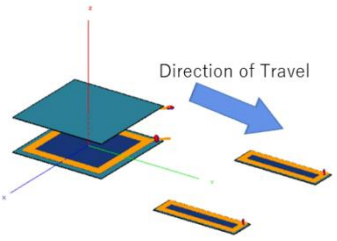
〈3･1〉 **FEKO の解析モデル**　今回，Hyper Works 社の製品である CEM ソフトウェア FEKO を用いて電磁界シミュレーションを行う。作成した解析モデルを Fig.4 に示す。(a)に示す解析モデルは，前章で述べた手法とは異なり，隣接したキャンセルコイルで磁界抑制を行う手法を表している。以下，(a)のような配置で行う漏洩磁界抑制を提案手法 A とする。 (b)は Fig.2 に示したような進行方向隣の主コイルに取り付けられたキャンセルコイルを使用する磁界抑制について表した解析モデルであり，以下，この手法を提案手法 B とする。また，通電していない主コイルは解析モデルでは考慮していない。送電距離は 150 mm，共振周波数は EV への給電で広く用いられる 85 kHz に設定し，リッツ線の太さは 3.0 mm，主コイルは 400×400 mm，12 巻，ピッチ 3.0 mm で作成した。キャンセルコイルは 100×400 mm，8 巻，ピッチ 3.0 mm で作成した。この時得られた解析モデルの各パラメータを Table 1 に記す。

Table 1 共振周波数 85 kHz における L 値，C 値，Q 値

	Main Coil	Cancel Coil
Inductance [μH]	252	40.8
Capacitance [μF]	139	245
Quality factor	551	73.0



(a)隣のキャンセルコイルを考慮しない場合の解析モデル



(b)隣のキャンセルコイルのみを考慮する場合の解析モデル

Fig.4 FEKO で作成した解析モデル

〈3･2〉 **漏洩磁界評価**　送電側の主コイルに 600 V の電圧を印加させた場合の WPT を想定し，シミュレーションを行う。総務省告示 207 号第 4 項[4]によると，DWPT で使用する周波数では遠方（10 m）における磁界強度の最大許容値は 2.66 mA/m である。本稿では Fig.5 に示すように，主コイルの中心から 10 m 先の磁界強度を，総務省の示す最大許容値 2.66 mA/m（規制値）と比較することで漏洩磁界の抑制効果を評価する。

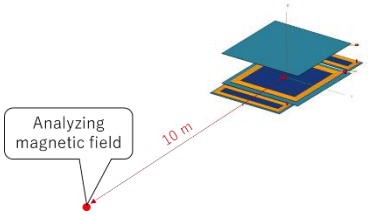


Fig.5 解析を行う地点

〈3･3〉 **シミュレーション結果**　10 m 先の磁界強度についてのシミュレーション結果を Fig.6 に示す。なお，どちらも主電圧は 600 V，キャンセルコイルに印加する電圧（キャンセル電圧）は 10 V に設定してシミュレーションを行っている。提案手法 A による磁界抑制では，最大でも 0.57 mA/m の低減しか得られず，規制値を下回ることができなかった。一方，提案手法 B で磁界抑制を行った場合では，最大で 1.07 mA/m の低減となり，磁界強度を規制値以下まで抑制することができた。さらに，キャンセル電圧の位相（キャンセル位相）を変化させることで磁界強度も変化することが確認できた（Fig.6）。このことから，遠方の磁界の抑制量はキャンセル位相によって変化し，コイル間の結合によって最適な位相が変化するということが考えられる。また，FEKO によるシミュレーションで得られた主コイルとキャ

ンセルコイルの電力から伝送効率を求めると，それぞれ提案手法 A は 93. 5 %，提案手法 B では 95. 5 %と改善した。提案手法 A と比較すると，提案手法 B におけるキャンセルコイルの電力による損失は少なく，高効率な電力伝送ができることが確認できた。

以上のシミュレーション結果より，磁界抑制の観点と伝送効率の観点の両方から提案手法 B が遠方の漏洩磁界抑制に有効であると言える。

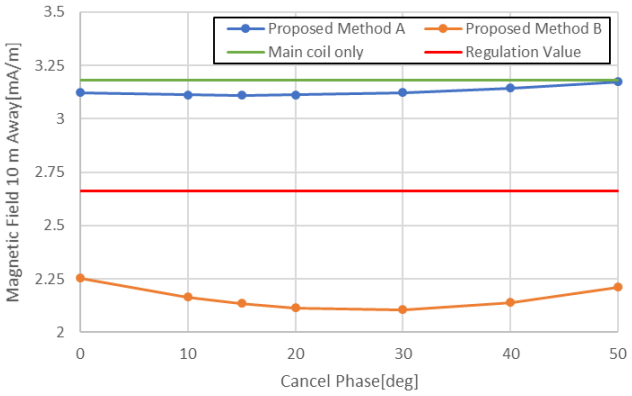


Fig.6 キャンセル位相と 10 m 先の磁界強度の関係

4. 実験

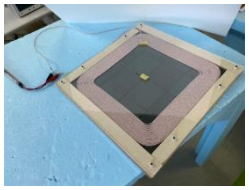
〈4･1〉作成コイル　実際に作成した主コイルとキャンセルコイルを Fig.7 に示す。主コイルは，太さ 3 mm のリッツ線を使用し，外径 400×400 mm、巻数 20、ピッチ 3.0 mm で作成した。キャンセルコイルは，太さ 3.0 mm の撚線を使用し，外径 400×100 mm 巻数 8、ピッチ 3 mm で作成した。作成した各コイルと作成に合わせたモデルのパラメータを Table 2 に示す。

Table2 作成したコイルのパラメータ

	Main Coil 1	Main Coil 2	FEKO Model
Inductance [μH]	363	367	342
Resistance [mΩ]	522	549	474
Quality factor	371	357	385

	Cancel Coil 1	Cancel Coil 2	FEKO Model
Inductance [μH]	35.0	34.7	35.5
Resistance [mΩ]	228	220	222
Quality factor	82.2	84.3	85.4

〈4･2〉実験方法　主電圧 20 V，キャンセル電圧 0.3 V で WPT を行い，主コイルの中心から 10 m 先の磁界強度をループアンテナで測定した。Fig.8(a)(b)に示すような主コイルとキャンセルコイルの配置で実験を行った。


(a)主コイル

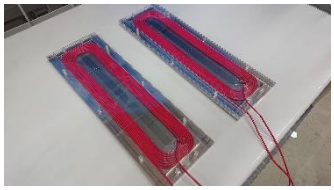
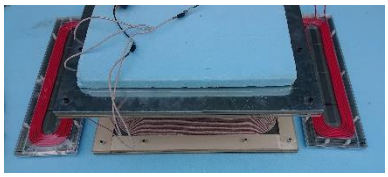

(b)キャンセルコイル

Fig.7 実験で使用したコイル


(a)提案手法 A のコイル配置

(b)提案手法 B のコイル配置

(c)磁界測定の様子

Fig.8 コイルの配置と実験の様子

〈4･3〉実験結果　磁界抑制の実験結果について示す。提案手法 A で磁界抑制をした場合の実験結果を Fig.9 に示す。実験値もシミュレーションと同様に，キャンセル位相が変化するごとに磁界強度も変化する様子が確認できた。どの位相でも磁界が抑制されており，位相 60 deg の時に最大で 0.48 dBμA/m の低減を示した。シミュレーションの変化は緩やかであるのに対し，実験ではキャンセル位相 50 deg, 60 deg で急激に磁界強度が上昇している。主コイルとキャンセルコイルの結合が強く，キャンセル電圧が不安定であったことによる測定誤差と考察する。

提案手法 B で磁界抑制をした場合の実験結果を Fig.10 に示す。こちらもシミュレーションと同様，キャンセル位相の変化によって磁界強度も変化していく様子が確認でき，最大で 0.69 dBμA/m の低減を示した。また，提案手法 B による磁界の変化は，Fig.9 のように急激に磁界が上昇してしまう点は見られなかった。これは主コイルとの結合が低くなりキャンセル電圧が安定したことで磁界強度も安定し，測定誤差が減少したと考えられる。以上より 2 パターンの実験比較から，実験においても提案手法 B の有効性が示された。

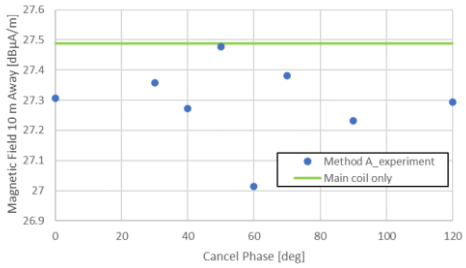


Fig.9 提案手法 A による漏洩磁界抑制

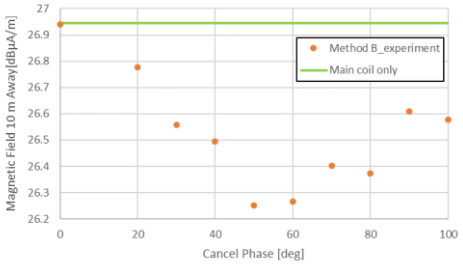


Fig.10 提案手法 B による漏洩磁界抑制

5. 漏洩磁界の簡単な換算

漏洩磁界抑制の効果を比較するため，実験値の換算を行う。主コイルのみのシミュレーションより電圧，電流，磁束の比例関係が確認できた。シミュレーションと実験では使用した主コイルの巻数が異なるため，主コイルとキャンセルコイルの電力から，主コイルとキャンセルコイルに流れる電流（主電流，キャンセル電流）を導出し，比例させることで磁界強度の換算を行う。キャンセルコイルが発生させた磁界H_{can}は，抑制前の磁界強度H_{main}と抑制後の磁界強度との差であると定義し，以下の(1)～(3)式による換算をした。

$$H'_{can} = H_{can} \times \frac{I'_{can}}{I_{can}} \tag{1}$$

$$H'_{main} = H_{main} \times \frac{I'_{main}}{I_{main}} \tag{2}$$

$$H' = H'_{main} - H'_{can} \tag{3}$$

ここで，H'は換算後の実験値を表す。I_{can}は，キャンセル電圧 0.3 V 時のキャンセル電流の実効値を表しており，I_{main}は，主電圧 20 V 時の主電流の実効値を表している。また，I'_{can}はキャンセル電圧 10 V 時のキャンセル電流を，I'_{main}は主電圧 600V 時の主電流を表しており，I'_{can}とI'_{main}はシミュレーション値である。

実験値を主電圧 600 V，キャンセル電圧 10 V の規模に換算した結果を Fig.11 に示す。提案手法 A では規制値以下まで抑制できないのに対し，提案手法 B では，規制値以下まで抑制が可能であることを示した。また，提案手法 A では最大 0.082 mA/m の低減，提案手法 B では最大 0.11 mA/m 低減を示した。シミュレーション結果と比べ，磁界の低減量が少なくなった要因として，周囲の測定機器による影響が考えられる。

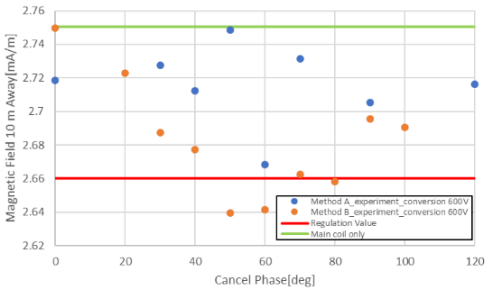


Fig.11 実験値から換算した磁界強度

6. まとめ

本稿では， DWPT を行う際に発生する遠方の漏洩磁界を抑制させるための手法を提案し，その効果と有効性をシミュレーションと実験によって検証した。シミュレーションでは主電圧 600 V の時，キャンセル電圧は 10 V で規制値を下回り，キャンセル位相を変えることでさらに効果が得られることが確認できた。提案手法 A と比べ，提案手法 B では 0.50 mA/m の漏洩磁界抑制を，効率低下なく可能であることを示した。さらに実験においても，キャンセル位相によって磁界強度が変化し，実際に漏洩磁界が抑制されることが検証できた。換算を行った結果では，提案手法 A と比べ，0.20 mA/m の漏洩磁界抑制が可能であることを示した。

本稿では，主コイルの中心から 10 m 先の 1 つの地点でしか効果の実証をおこなっていないため，今後，複数の地点での評価を行っていく。また，本稿では主コイルとキャンセルコイルの位置関係による遠方の漏洩磁界抑制効果について評価を行ったが，電源が ON していない隣の主コイルについては考慮していない。今後の展望として，隣の主コイルも考慮に含めたシミュレーション，実験も行っていく。

文　　献

（1） 古川 啓太，日下 佳祐，伊東 淳一，”非接触給電用コイルのインダクタンス変動を抑制する漏洩磁界キャンセルコイルの設計法”，半導体電力変換研究会, p.53-58(2018)

（2） 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, pp. 189-192(2019)

（3） 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)

（4） 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/reiki_honbun/a72ab47801.html

（5） F. Wen, Q. Li, R. Li, L. Liu and T. Wu, "Harmonic and Magnetic Leakage from Wireless Charging System for Electric Vehicles," 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, pp. 4117-4121(2019)

（6） W. Songcen, W. Bin, W. Xiaokang, X. chong, X. Jinxing, G. Weimei and X. 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)