

走行中ワイヤレス電力伝送におけるキャンセルコイルを考慮したベクトルポテンシャルを用いた遠方の漏洩磁界推定

長谷川 蒼真[†] 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 近年、ワイヤレス電力伝送の応用先として走行中ワイヤレス給電が注目されている。走行中ワイヤレス給電の実現には、いくつか課題があり、そのうちの 하나가漏洩磁界の影響である。漏洩磁界は人体や電子機器へ悪影響を及ぼすため抑制させる必要があり、キャンセルコイルや磁気シールド等数多くの抑制方法が検討されているが、発生する遠方の漏洩磁界に注目している研究例は少ない。そこで本稿では、ワイヤレス電力伝送で発生した遠方の漏洩磁界をベクトルポテンシャルによって推定を行う。送受電コイルの他に磁界抑制用のキャンセルコイルを設置した場合に発生するコイル中心から 3 m~20 m 先の磁界強度を解析し、計算結果との比較を行うことでベクトルポテンシャルによる推定の妥当性を実証した。電磁界解析ソフト「FEKO」による解析結果と比較すると、ベクトルポテンシャルによる推定は誤差 1 % 以内の精度で行えることが確認できた。

キーワード 走行中ワイヤレス電力伝送, 漏洩磁界, アクティブシールド方式, ベクトルポテンシャル

Estimation of Far-field Leakage Magnetic Field Using Vector Potentials Considering Cancellation Coils in Dynamic Wireless Power Transfer

Soma HASEGAWA[†] Takehiro IMURA[‡] and Yoichi HORI[‡]

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

Abstract In recent years, Dynamic Wireless Power Transfer has been attracting attention as an application of wireless power transmission. There are several challenges in realizing wireless power transfer while driving, one of which is the effect of leaking magnetic fields. Since leaky magnetic fields have adverse effects on the human body and electronic equipment, they must be suppressed. Many suppression methods, such as cancellation coils and magnetic shielding, have been studied, but few studies have focused on the far-field leaky magnetic fields that are generated. In this paper, the far-field leakage magnetic field generated by wireless power transmission is estimated by vector potential. The validity of the estimation by vector potential is demonstrated by analyzing the intensity of the magnetic field generated 3 m to 20 m from the center of the coil when a cancellation coil for suppressing the magnetic field is installed in addition to the transmitting and receiving coils, and by comparing the results with the calculation results. Compared with the results of the analysis using the FEKO electromagnetic field analysis software, the vector potential estimation was confirmed to be accurate to within 1 % error.

Keywords Dynamic Wireless Power Transfer, Magnetic Fields Leakage, Active Shielding, Vector Potentials

1. 序論

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、あまり普及は進んでいない。現在 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ー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。EV 向け WPT における漏洩磁界は CISPR や ICNIRP など規制値が設けられており [1][2],

抑制させる技術が必要不可欠である。

EV 向けの EMC 課題においては、コイルから 1~3 m 地点（近傍）の磁界について多く検討されてきたが、10 m 離れた地点（遠方）の磁界についての研究例は少ない。そこで本稿では、まだ研究例の少ない遠方における漏洩磁界に注目する。漏洩磁界の抑制法として磁界抑制用のコイルであるキャンセルコイルを用いた手法[3]~[9]が挙げられる。本稿では、送受電コイルとキャンセルコイルによって発生する 3 m より先の漏洩磁界を理論計算によって推定することを目的とする。本稿では、磁界の推定を行うにあたってベクトルポテンシャルを利用した。先行研究[9][10]においてもベクトルポテンシャルの記載があるが、相互インダクタンスや近傍漏洩磁界の導出に用いられており、遠方漏洩磁界の導出には使用されていない。

2. ベクトルポテンシャルによる理論計算

微小線分 Δs に流れる電流 I [A] により r [m] 離れた位置で発生するベクトルポテンシャルは式(1)で表される。

$$\Delta A = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \Delta s \quad (1)$$

Fig. 1 のような長方形の電流ループを考えた場合、点 $P(x,y,z)$ におけるベクトルポテンシャル A は A_x, A_y 成分のみを有し、それぞれ式(2), (3)のようになる。

$$A_x \approx \frac{\mu_0 a I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_4} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

$$A_y \approx \frac{\mu_0 b I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_3} \right) \quad (3)$$

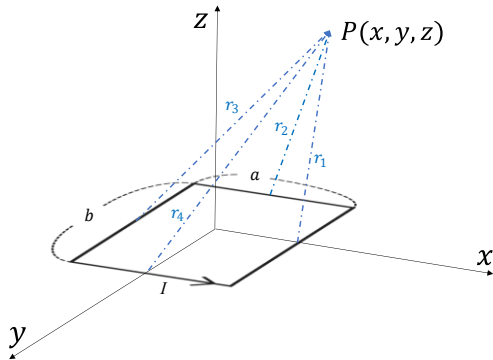


Fig. 1. 長方形の微小電流ループ

ここで、 $a, b \ll r$ と仮定した場合ベクトルポテンシャルは式(4)で表せる。ただし以降 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ とする。

$$A(r) \approx \left(-\frac{\mu_0 a b I}{4\pi} \frac{y}{r^3}, \frac{\mu_0 a b I}{4\pi} \frac{x}{r^3}, 0 \right) \quad (4)$$

点 P におけるベクトルポテンシャルを用いて磁界の算出を行う。 $B = \text{rot } A$, $B = \mu_0 H$ より、点 P における

磁界は式(5)のように求められる。

$$H(r) = \begin{pmatrix} \frac{a b I 3 x z}{4\pi r^5} \\ \frac{a b I 3 y z}{4\pi r^5} \\ \frac{a b I 2 z^2 - x^2 - y^2}{4\pi r^5} \end{pmatrix} \quad (5)$$

n 回巻のコイルを Fig. 2 のような n 個の微小ループとみなした場合、上式における ab は各ループ面積の総和を表す。したがって、 ab は式(6), (7), (8)のように置き換えられる。

$$ab = \sum_{k=1}^n a_k b_k \quad (6)$$

$$a_n = a_1 - 2p(n-1) \quad (7)$$

$$b_n = b_1 - 2p(n-1) \quad (8)$$

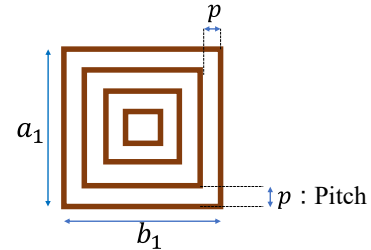


Fig. 2. n 個の微小ループ

次に、Fig. 3 に示すような送受電の 2 つのコイルが存在し、磁界抑制用のキャンセルコイル 1 つが存在する場合の点 P における磁界 H_p を求める。 H_p は、1 次側コイルによる磁界 H_{Tx} と 2 次側コイルによる磁界 H_{Rx} 、そしてキャンセルコイルによる磁界 H_{cancel} をそれぞれ求め、合成することで計算を行った。

$$|H_p| = |H_{Tx} + H_{Rx} + H_{cancel}| \quad (9)$$

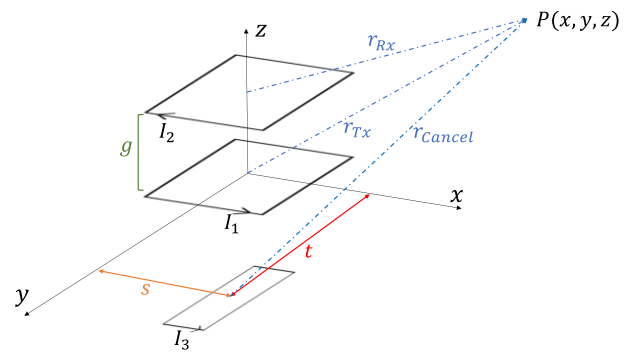


Fig. 3. 3つのコイルを模した電流ループ

1 次電流 I_1 [A] と 2 次電流 I_2 [A] の位相差 θ , I_1 [A] とキャンセルコイルに流れる電流 I_3 [A] の位相差 φ を考慮した時、各コイルが発生させる磁界は式(5)より式(10), (11), (12)で表せる。

$$H_{Tx} = \frac{\sum_{k=1}^n a_k b_k \frac{3xz}{4\pi r_{Tx}^5} \cdot I_1 \sin \omega t}{\frac{\sum_{k=1}^n a_k b_k \frac{3yz}{4\pi r_{Tx}^5} \cdot I_1 \sin \omega t} + \left(\frac{\sum_{k=1}^n a_k b_k \frac{2z^2 - x^2 - y^2}{4\pi r_{Tx}^5} \cdot I_1 \sin \omega t \right)} \quad (10)$$

$$H_{Rx} = \frac{\frac{\sum_{k=1}^m c_k d_k \frac{3x(z-g)}{4\pi r_{Rx}^5} \cdot I_2 \sin(\omega t + \theta)}{\frac{\sum_{k=1}^m c_k d_k \frac{3y(z-g)}{4\pi r_{Rx}^5} \cdot I_2 \sin(\omega t + \theta)} + \left(\frac{\sum_{k=1}^m c_k d_k \frac{2(z-g)^2 - x^2 - y^2}{4\pi r_{Rx}^5} \cdot I_2 \sin(\omega t + \theta) \right)} \quad (11)$$

$$H_{Cancel} = \frac{\frac{\sum_{k=1}^l e_k f_k \frac{3(x-s)z}{4\pi r_{Cancel}^5} \cdot I_3 \sin(\omega t + \varphi)}{\frac{\sum_{k=1}^l e_k f_k \frac{3(y-t)z}{4\pi r_{Cancel}^5} \cdot I_3 \sin(\omega t + \varphi)} + \left(\frac{\sum_{k=1}^l e_k f_k \frac{2z^2 - (x-s)^2 - (y-t)^2}{4\pi r_{Cancel}^5} \cdot I_3 \sin(\omega t + \varphi) \right)} \quad (12)$$

ただし、 $\sum_{k=1}^n a_k b_k$, $\sum_{k=1}^m c_k d_k$, $\sum_{k=1}^l e_k f_k$ はそれぞれ 1 次側コイル, 2 次側コイル, キャンセルコイルの微小ループ面積の総和を表し, $a_n, b_n \ll r_{Tx}$, $c_m, d_m \ll r_{Rx}$, $e_l, f_l \ll r_{Cancel}$ である. また, $r_{Tx}, r_{Rx}, r_{Cancel}$ [m]は各コイルから点 P までの距離であり,

$$r_{Tx} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (13)$$

$$r_{Rx} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-g)^2} \quad (14)$$

$$r_{Cancel} = \sqrt{(x-s)^2 + (y-t)^2 + z^2} \quad (15)$$

とする.

これらよりコイルサイズと各コイルに流れる電流によって遠方の磁界を導出することができた.

3. シミュレーション概要及び結果

3.1. 解析モデル

本稿では, 電磁界解析ソフト「FEKO」を用いた MoM 法によるシミュレーション解析を行い, ベクトルポテンシャルによって算出された漏洩磁界との比較を行った. 1 次側コイルと 2 次側コイルは外径 400×400 mm, ピッチ 3 mm, 巻数 10 に設定し, 伝送距離は 150 mm とした. また, キャンセルコイルは外径 100×400 mm, ピッチ 3 mm, 巻数 10 とし, 全てのコイルの共振周波数は EV への給電に広く用いられる 85 kHz である.

キャンセルコイルの配置パターンを変え, 2 通りの抑制法について解析を行った. 使用した解析モデルを Fig. 4, Fig. 5 に示す. Fig. 4 に示す解析モデルは送電コイルに隣接するキャンセルコイルで磁界抑制を行う手法を表しており, 以下, 手法 1 とする. Fig. 5 に示す解析モデルは先行研究[7]で提案された進行方向隣の送電コイルに取り付けられたキャンセルコイルを使用する手法を表しており, 以下, 手法 2 とする.

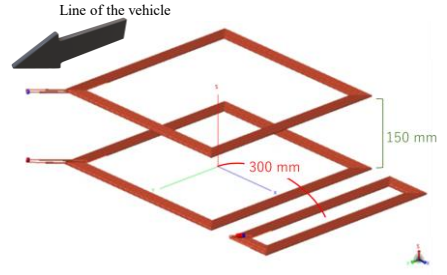


Fig. 4. FEKO で作成した解析モデル（手法 1）

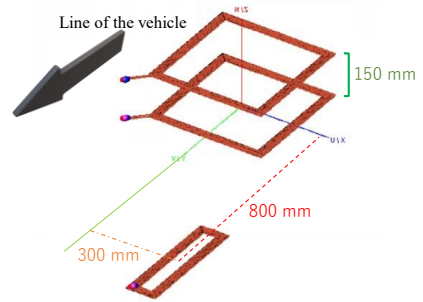


Fig. 5. FEKO で作成した解析モデル（手法 2）

3.2. 解析概要

1 次側コイルとキャンセルコイルにそれぞれ 100 V, 1.5 V の電圧を印加させた場合の WPT を想定し, 電磁界シミュレーションを行う. Fig. 6, Fig. 7 に示すコイル中心から 3~20 m 地点の磁界強度を解析し, 得られた磁界強度と 2 章で示した式から求めた値を比較した. 本稿では, 各電流のピーク値と位相はシミュレーションで得られた値を使用して磁界の導出を行った. シミュレーションが示した各電流とその位相を Table 1, Table 2 に示す.

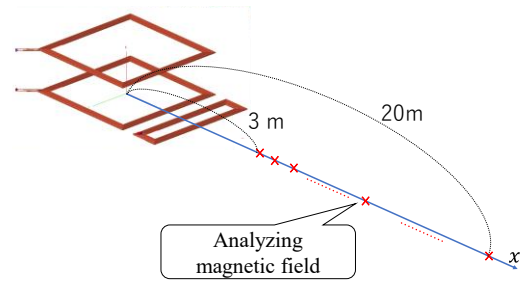


Fig. 6. 手法 1 の解析点

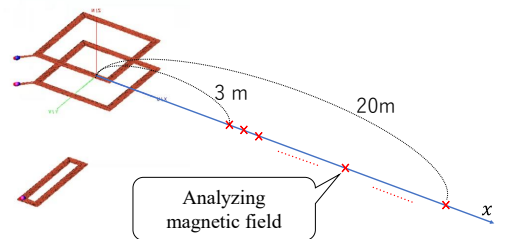


Fig. 7. 手法 2 の解析点

Table 1.各電流の振幅及び位相（手法1）

	Magnitude [A]	Phase [deg]
I_1	13.22	-4.51
I_2	11.25	-94.5
I_3	6.14	167.6

Table 2. 各電流の振幅及び位相（手法2）

	Magnitude [A]	Phase [deg]
I_1	13.35	-0.22
I_2	11.38	-90.3
I_3	15.89	155.3

3.3. シミュレーション結果との比較

シミュレーション値と計算値の比較について Fig. 8, Fig. 9 に示す. どちらも誤差 1% 以内で一致し, 計算式の妥当性を示せた. また, EV 向け WPT において遠方とされる 10 m 地点の誤差率を求めると, 手法 1 の結果では 0.0302 %, 手法 2 の結果では 0.168 % であった. 以上の結果からベクトルポテンシャルによる磁界計算は十分な精度であると言える.

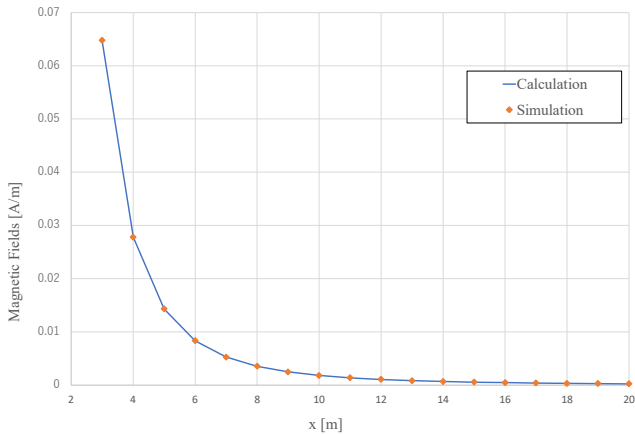


Fig. 8. 手法 1 の解析結果及び計算結果

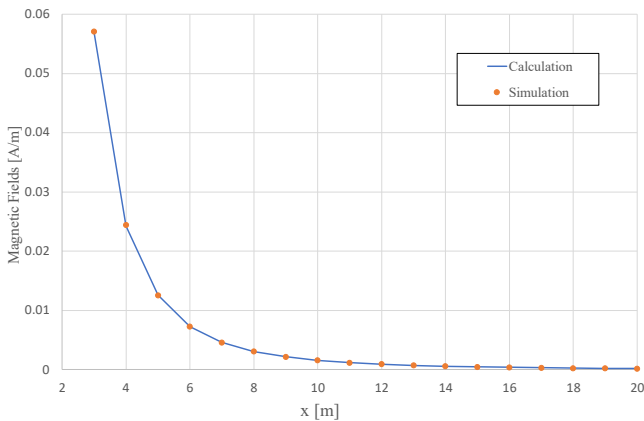


Fig. 9. 手法 2 の解析結果及び計算結果

4. 結論

キャンセルコイルを挿入した場合における遠方の漏洩磁界の導出をするにあたって, ベクトルポテンシャルを利用した計算を行った. シミュレーション結果との比較によってシミュレーションと同等の精度を示すことができた. 以上から遠方の漏洩磁界を容易に求めることができるため, キャンセルコイルの効果を数値計算のみで推定することが可能である. 本稿ではシミュレーションから得られた電流値を使用して計算を行っている. 今後, 理論的に求めた電流値や位相を使用した計算結果との比較を行っていく. また, 本稿で用いた式は空芯コイルにしか適用できない. そのため, フェライトコアやアルミシールドを含めた理論構築も今後の課題となる.

文 献

- [1] SAE International, "Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology J2954," Issued 2016-05, Revised 2020-10.
- [2] <https://kanpou.npb.go.jp/old/20160315/20160315g00057/20160315g000570003f.html>
- [3] S. Cruciani, T. Campi, F. Maradei and M. Feliziani "Active Shielding Design for Wireless Power Transfer Systems," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 61, no. 6, pp. 1953-1960, Dec. 2019
- [4] S. Lee, S. Jeong, S. Hong, B. Sim and J. Kim, "Design and Analysis of EMI Shielding Method using Intermediate Coil for Train WPT System," 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2018, pp.1-4.
- [5] J. Park, Y. Shin, D. Kim, B. Park and S. Ahn, "Planar Resonance Reactive Shield for Reducing the EMI in Portable WPT Device Application," 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI & PI), 2018, pp. 419-422.
- [6] 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
- [7] 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," 電気学会産業応用部門大会, Aug. 2021.
- [8] B. Zhang et al., "Concept Design of Active Shielding for Dynamic Wireless Charging of Light-duty EV," 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), 2020, pp. 844-850.
- [9] J. Park et al., "Multi Resonant Reactive Shield for Reducing the Electromagnetic Fields from Wireless Charging Electric Vehicle," 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, 2020, pp. 1-4.
- [10] Y. Liu, A. P. Hu and U. Madawala, "Determining the power distribution between two coupled coils based on Poynting vector analysis," 2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), 2017, pp. 1-6.