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イトとアルミと鋼板が伝送効率と漏洩磁界に与える影響についての検証

小林 樹生*　居村 岳広　堀 洋一 (東京理科大学)

Verification of the Influence of Ferrite and Aluminum and Steel Plates of the Receiving Side on Transmission Efficiency and Magnetic Leakage in Wireless Power Transfer in Running Electric Vehicles

Tatsuki Kobayashi*, Takehiro Imura, Yoichi Hori, (Tokyo University of Science)

In wireless power transfer to electric vehicles, it is necessary to reduce the magnetic leakage in order to reduce negative effects on electronic devices and the human body. In this paper, we analyze and measure the magnetic leakage and transmission efficiency of the ferrite, aluminum plates, and the car body.

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（ＥＭＣ），磁界，漏洩磁界，
(Wireless power transfer (WPT), electric vehicle (EV), electromagnetic compatibility (EMC), magnetic field, magnetic leakage,)

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，そのうちの一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。

ワイヤレス電力伝送において漏洩磁界を抑制するために多くの先行研究[(1)-(3)]ではフェライトやアルミ板をシールド素材として使っている。しかし，それぞれの素材が磁界にどれだけの影響を与えているかについての先行研究[(4)]では近傍の磁界にのみ着目しており，シールドを回り込んで広がっていく遠方の磁界については語られていない。また，電気自動車に対してのシールドを考えると車体に使用されている鋼の影響も考慮しなくてはならない。

そこで，本研究ではフェライト，アルミ板，鋼板が遠方の磁界と伝送効率に与える影響についてそれぞれのシールド素材がある時とない時を比較して明らかにする。

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

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

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

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

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

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad \cdots\cdots (4)$$

より(1)～(3)式は

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

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

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

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

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

となる。ここで(8)式の効率が最大となるのは

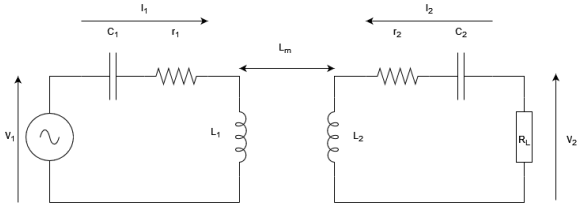
$$\frac{\partial \eta}{\partial R_L} = 0 \quad \cdots\cdots (9)$$

の時なので最大効率を$\eta_{\max}$，最適負荷をR_{Lopt}とすると

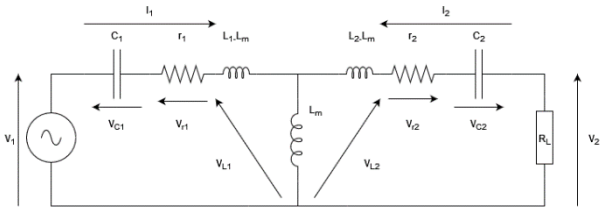
$$R_{\mathrm{Lopt}} = \sqrt{r_2^2 + \frac{r_2(\omega_0 L_m)^2}{r_1}} \quad \cdots\cdots (10)$$

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

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

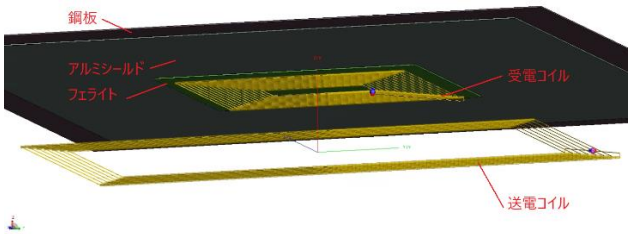
Fig.1. Circuit of S-S method and T-shaped equivalent circuit

3.　シールド素材による効果の検証

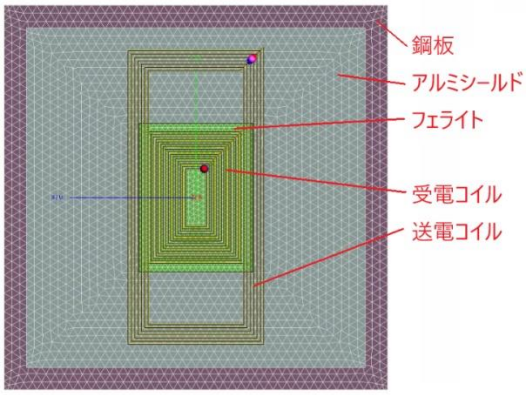
〈3･1〉　使用するコイル及び素材と構造

本研究で使用するコイル構造を Fig.2 に示す。送受電コイルの上にフェライト，アルミ板，鋼板の順で素材を重ねている。それぞれの素材の間隔は鋼板，アルミ板間が 3 mm，アルミ板，フェライト間が 12 mm となっている。送受電コイル間の距離は 150 mm 離れており送電コイルは Fig.3，受電コイルは Fig.4 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。

また，使用する素材のパラメータを Table.2 に示す。鋼板とアルミの大きさは SAE International による規格 J2954[5]を参考に鋼板の大きさを 1700×1700×3 mm^3，アルミ板を 1500×1500×3 mm^3，フェライトを 440×600×3 mm^{3}とした。



(a) Oblique downward view



(b) Bottom view

(c) Side view

図 2　シールド素材とコイルの構造

Fig. 2. Positioning of coils and shielding material

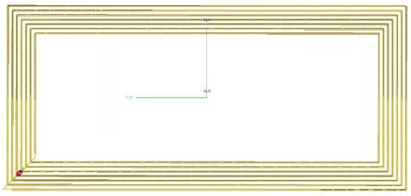


図 3　送電コイル

Fig. 3. Shape of power transmission coil

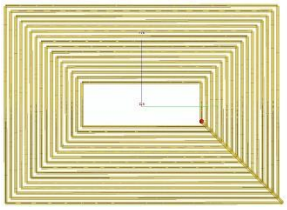


図 4 受電コイル

Fig. 4. Shape of power receiving coil

表 1 コイルのパラメータ

Table. 1. Parameters of coils

	送電コイル	受電コイル
コイルサイズ [mm^2]	600×1300	420×580
巻き数 [巻]	7	16
ピッチ [mm]	10.85	10.85
線の半径 [mm]	3.5	3.5

表 2 シールド素材のパラメータ

Table. 2. Parameters of shielding material

	鋼板	アルミ	フェライト
サイズ [mm^3]	1700×1700×3	1500×1500×3	440×600×3
導電率 [S/m]	1100000	38160000	0.166666667

〈3･2〉　シミュレーション方法

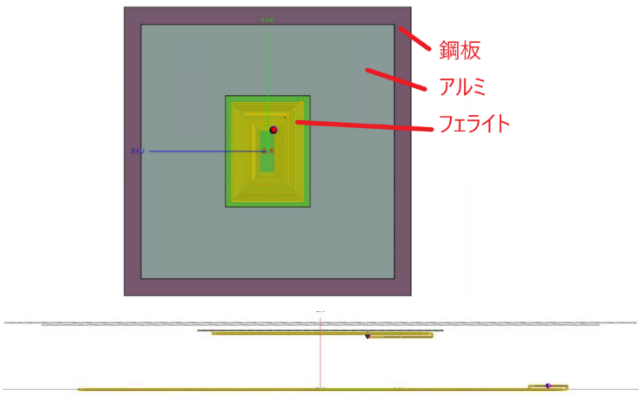
Fig.2 のフェライト，アルミ，鋼板，それぞれの素材がある時とない時について条件を変えてモーメント法による電磁界解析を行った。解析ソフトは Altair Feko を使用した。

それぞれの条件については以下のとおりである。

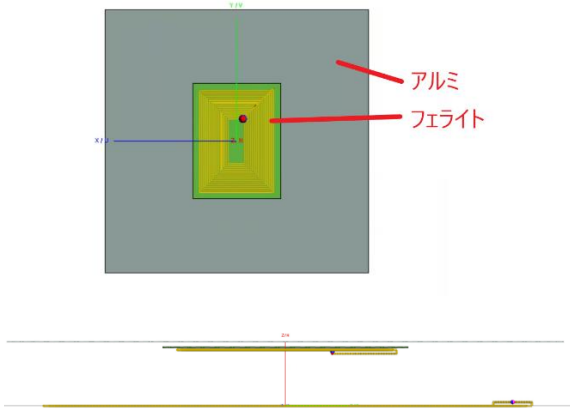
⓪シールド素材が存在せず空芯の送受電コイルのみの状態
①フェライト，アルミ，鋼板全て存在する状態
②フェライト，アルミが存在する状態
③フェライト，鋼板が存在する状態
④フェライトのみ存在する状態
⑤アルミ，鋼板が存在する状態
⑥アルミのみ存在する状態
⑦鋼板のみ存在する状態

条件⓪～⑦の時の配置を Fig.5 に示す。

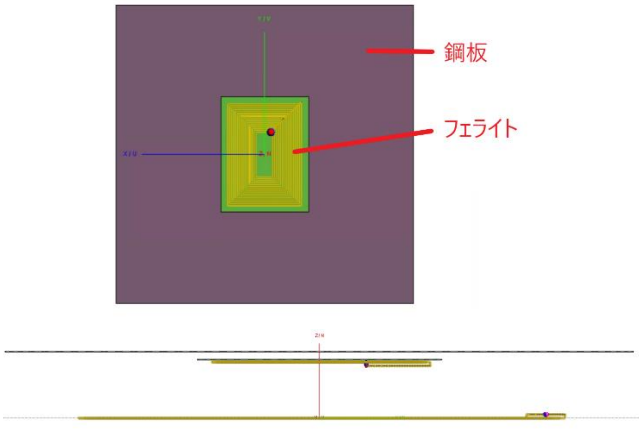
条件⓪～⑦それぞれで最適効率負荷を接続し，受電電力が 20 kW を取るように固定し，Fig.6 のようにコイルの新工法方向横 10 m 先の 4×2 m^2の領域で最も大きい磁界を解析値とした。



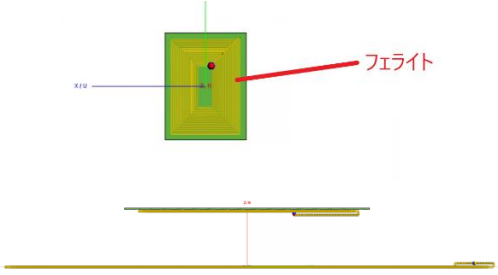
(a) ①Ferrite, aluminum, steel plate



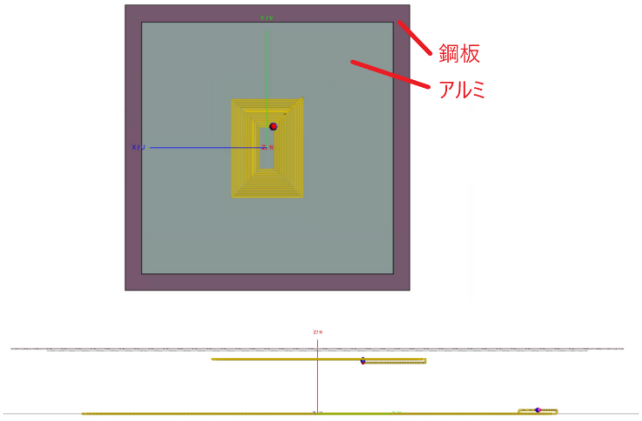
(b) ②Ferrite, aluminum



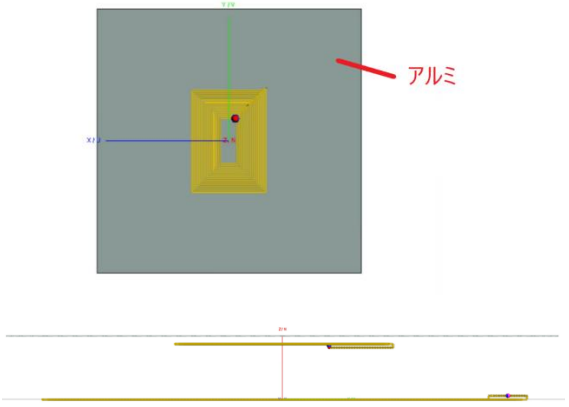
(c) ③Ferrite, steel plate



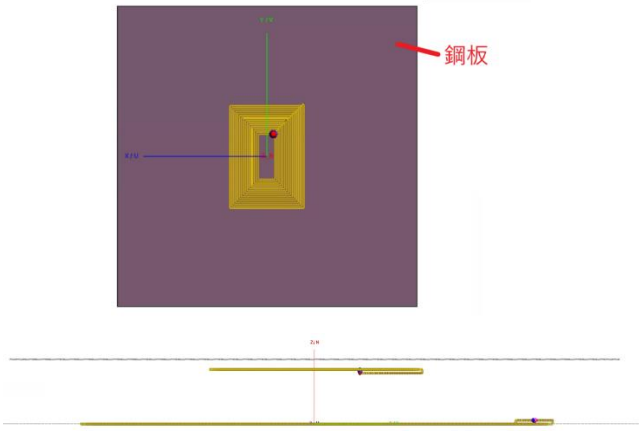
(d) ④Ferrite



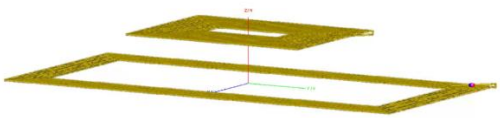
(e) ⑤Aluminum, steel plate



(f) ⑥Aluminum



(g) ⑦Steel plate



(h) ⓪Air core coil

図 5 解析したコイルのモデル

Fig.5. Coil configurations to analyze

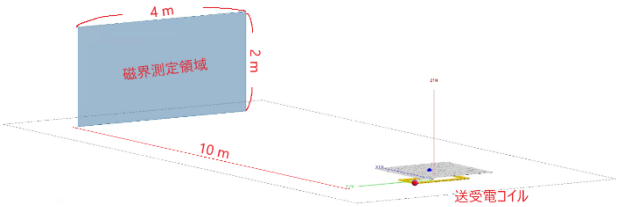


図 6 磁界測定領域

Fig. 6. Measurement area

〈3.3〉 シミュレーションの結果と考察

共振周波数 85 kHz での解析結果を Table.3, Fig.7 に示す。Fig.7 よりフェライトがない時の条件⑤～⑧について着目すると，条件⑥，⑦のアルミと鋼板片方のみ存在する場合の磁界は条件⓪の空芯コイルの磁界よりも大きくなってしまっていることがわかる。

しかし，条件④のようにアルミと鋼板を重ねて配置することによってアルミ，鋼板が単体の時よりも磁界を小さくできていることがわかる。

これは，アルミや鋼板などの金属をコイル周辺に置いたことによって渦電流が発生し，伝送効率が低下するが，本研究では受電電力を 20 kW に固定しているため減った効率の分の電力を担保するため送電電力も大きくなり，条件⑥，⑦での漏洩磁界も大きくなったのではないかと思われる。

また，条件⑥の効率が 82 %，⑦の効率が 70 %程度であることから鋼板の方がアルミ板より効率の損失が大きいことがわかる。ここで，条件⑤での効率が 82 %であることから，条件⑤では鋼板をコイルからカバーするようにアルミ板が配置されているため鋼板からの効率の低下の影響が小さく，条件⑤で⑥，⑦よりも磁界が低下しているのは鋼板が効率低下に寄与することなく磁界のシールドを行えたためではないかと考えられる。

フェライトについて着目すると条件①，②，③，④からフェライトを挿入することでいずれの場合も漏洩磁界は空芯のコイルよりも小さくなっており，アルミや鋼板があったときに低下していた効率も高い水準を保っていることがわかる。

漏洩磁界はフェライト，アルミ，鋼板全てが存在するときに最も小さくなっており，空芯の時と比較すると 17.87 mA/m から 5.19 mA/m と 1/3 以下にまで減少させることができている。

表 3 解析結果

Table.3. Simulation result

番号	ﾌｪﾗｲﾄ	アルミ板	鋼板	受電電力 [W]	効率	磁界 [mA/m]	[dBμA/m]
①	○	○	○	19787.83	0.990	5.19	74.30
②	○	○		19999.76	0.994	6.46	76.21
③	○		○	19999.85	0.982	5.60	74.96
④	○			20000.37	0.997	15.40	83.75
⑤		○	○	20000.06	0.823	15.26	83.67
⑥		○		19999.69	0.826	18.37	85.28
⑦			○	19999.49	0.704	19.02	85.58
⓪				20000.16	0.981	17.87	85.04

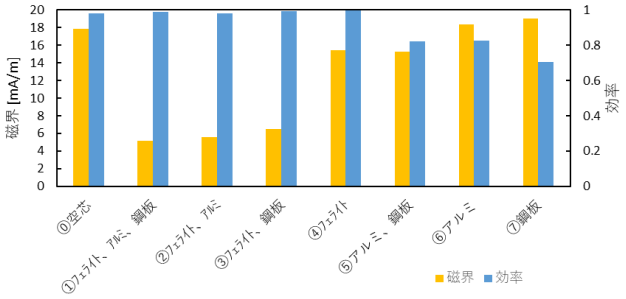


図 7 シールド素材による影響

Fig.7. Effects of shielding material

〈3･4〉 実測

3.1, 3.2 節で解析を行ったのと同様の条件で実際に測定を行った。実験の様子を Fig.8 に示す。

解析上ではシールド素材は 1 枚の板として解析していたが素材を発注する際の大きさの上限から鋼板は 1700×425×3.2 mm³のものを 4 枚，アルミ板は 500×750×3 mm³のものを 6 枚合わせて使用している。

またそれぞれの素材の間隔は Fig.8 (c)のように磁界やコイルに影響の少ない発泡スチロールとポリウレタンシートで調節した。

(a) Transmission and receiving coil

(b) Ferrite, alminium, and steel plate loaded

(c) Spacing between alminium and steel plate

図 8 実験の様子

Fig.8. Photographs of the experiment

〈3･5〉 測定結果と解析結果の比較

実験に使用したバイポーラ電源の出力の上限から 3.2 節の各条件について受電電力を 15 W に合わせて測定し，20 kW 時の磁界に換算してまとめた測定結果と解析結果の比較を Table.4, Fig.9 に示す。ただし，条件⑤，⑥，⑦の時は効率の低下から受電電力 15 W が取れなかったため 1.5 W で測定して換算した。

Fig.9 から条件⑤，⑥，⑦に着目すると測定した結果も解析結果と同様にアルミ板，鋼板それぞれ単体で使用した場合の漏洩磁界はコイルのみの磁界と比べて悪化してしまうが，2 つを重ねて使用することで単体の時よりも漏洩磁界を低減できている。

また，条件⑤，⑥，⑦で悪化していた効率はフェライトを挟むことによって条件①，②，③では改善されており，漏洩磁界も小さくなっていることがわかる。

一方，測定結果は解析結果と比べてすべての条件で効率が悪化しており特に条件⑤～⑦では顕著である。

これはコイルに接続した共振コンデンサや負荷抵抗の値を共振条件や最適負荷に厳密に一致させることができていなかったことと，アルミ板や鋼板が一枚板ではないことで渦電流のループのふるまいが変わったことが原因であると考えられる。

今回受電電力を 20 kW にそろえて磁界を評価しているため，効率が低下すると受電電力を担保する分，送電電力が

大きくなり磁界も増加する。

そこで効率が磁界に与える影響を無視して素材が磁界に与える影響を評価するために送電電流を 50 A にそろえて測定値と解析値を比較すると Fig.10 のようになる。Fig.10 から効率を無視すると測定値と解析値の傾向が一致していることがわかる。

また，送電電流に着目して磁界を評価するとフェライトを挿入することでわずかに磁界は増加し，鋼板，アルミは大きく磁界を減少させることができるとわかる。

表 4 測定値と解析値の比較

Table.4. Conparison of measured and analyzed values

ﾌｪﾗｲﾄ	アルミ板	鋼板	測定磁界換算値[mA/m]	解析値 [mA/m]	測定効率	解析効率
○	○	○	15.60	5.19	0.809	0.994
○	○		17.08	6.46	0.801	0.982
○		○	18.86	5.60	0.769	0.994
○			21.60	15.40	0.930	0.997
	○	○	30.84	15.34	0.270	0.823
	○		31.62	18.67	0.329	0.704
		○	31.69	18.28	0.380	0.826
			20.85	17.87	0.900	0.981

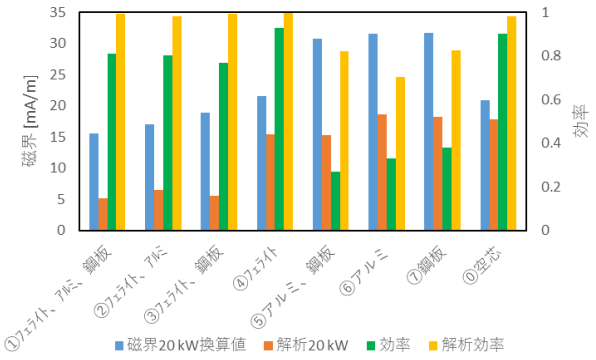


図 9 測定値と解析値の比較のグラフ

Fig.9.Graph of comparison between measured and analyzed value

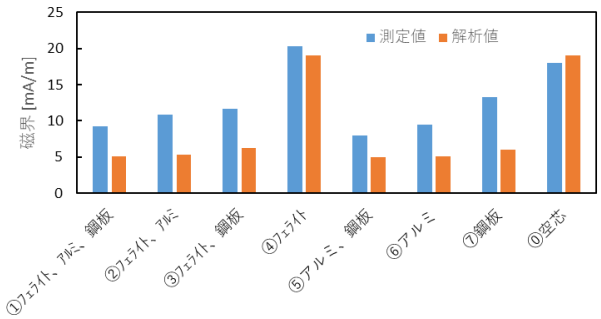


図 10 送電電流を一定とした時の磁界

Fig.10. Magnetic field at constant transmission current

4. 結論

フェライトは送電電流が一定の場合漏洩磁界を増加させるがコイル間の結合を高めて効率を上昇させることができる。一定の受電電力を確保したいときは効率が上昇すれば送電電力を抑えることができるので漏洩磁界も減少する。

また，鋼板，アルミは効率を低下させるが漏洩磁界を減少させることができる。

フェライト，アルミ，鋼板を組み合わせて使うことで最も漏洩磁界を減少させることができることがわかった。これは，フェライトが受電コイルとアルミ板の間にあることによってアルミ，鋼板が原因となっての伝送効率を低下させるのを防ぎつつ，アルミ，鋼板の強力な磁界低減効果を受けることができたためだと考えられる。

フェライトがある時のアルミと鋼板について送電電流をそろえた時に着目するとアルミの方がわずかに磁界低減効果が高い。また，フェライト，鋼板がある時とフェライト，アルミ，鋼板がある時について比較すると解析ではほとんど結果に差がないが，今回鋼板は車体の模擬とみなしており，実際に車体にシールドを組み込むことを考えると車体下部が均一な一枚の公判でないことや車体への影響を考慮してフェライトと鋼板の間にアルミ板を挿入した方がよいと考えられる。

本研究ではシールド素材の位置と大きさを固定していたためアルミ板やフェライトの配置や形状を最適化することでより漏洩磁界を低減することができると思われる。また，本研究では地面による影響を考慮していなかったので今後はコイルを地面に埋設したとき，シールド素材の影響が変化するのかどうか明らかにしていく必要がある。

謝辞

本研究の一部は、株式会社ダイヘンの協力のもと国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業（JPNP21028）の結果得られたものです。

文　　献

(1) 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.

(2) 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.

(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) K. Knaisch, M. Springmann and P. Gratzfeld, "Comparison of coil topologies for inductive power transfer under the influence of ferrite and aluminum," 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco, 2016, pp. 1-9.

(5) SAE International, “Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology,” Issued 2016-05,Revised 2022-08.