

磁界共鳴型無線電力伝送に及ぼす磁性体の影響に関する検討

川野 浩康 下川 聡 内田 昭嘉 松井 清人 尾崎 一幸 田口 雅一

株式会社富士通研究所 〒674-8555 兵庫県明石市大久保町西脇 64

E-mail: {kawano.hiroyasu, sshimo, auchida, matsui, ozaki.kazuyuki, taguchi}@jp.fujitsu.com

あらまし 磁界共鳴方式による無線電力伝送を用いたモバイル電子機器において良好な電力伝送効率を得るためには、送受電コイルとコイル近傍に位置する充電池などの金属の間にフェライトなどの絶縁性磁性体を設けることが不可欠である。本報では、等価回路モデルと磁界解析を用いて磁性シートを伴った送受電系を解析し、磁性シートの効果を調べた。また、一枚の磁性板から成るリジッド型磁性シートと磁性小片の集合体から成るフレキシブル型磁性シートを用いた場合について解析し、比較検討を行なった。その結果、比透磁率が大きな磁性シートの使用により、伝送効率が向上することを確認した。一方、2種類の磁性シートが数百以上の比透磁率をもつ同じ磁性材料で作られている場合、フレキシブル型はリジッド型に比べて伝送効率が小さくなることを明らかにした。

キーワード 無線電力伝送, 磁界共鳴, 磁性シート, 比透磁率, 伝送効率

A Study of the Effect of Magnetic Sheet on Wireless Power Transfer using Magnetic Resonant Coupling

Hiroyasu KAWANO Satoshi SHIMOKAWA Akiyoshi UCHIDA Kiyoto MATSUI

Kazuyuki OZAKI and Masakazu TAGUCHI

Fujitsu Laboratories Ltd. 64 Nishiwaki, Ohkubo-cho, Akashi-shi, Hyogo, 674-8555 Japan

E-mail: {kawano.hiroyasu, sshimo, auchida, matsui, ozaki.kazuyuki, taguchi}@jp.fujitsu.com

Abstract To achieve higher efficiency in mobile consumer electronic devices with a wireless power transfer system using magnetic resonant coupling, it is essential to place insulating magnetic sheets between coils and metals such as batteries located near coils. In this report, we simulated the model composed of a pair of transmitter and receiver with magnetic sheets by means of an equivalent circuit model and electromagnetic analysis. Besides, we examined characteristics for the models with a rigid magnetic sheet composed of a single piece of magnetic plate and with a flexible magnetic sheet consisted of hundreds of small magnetic chips. Through this work, we confirmed the increase of efficiency with the increase of relative permeability of the magnetic sheet. Also, we clarified that efficiency decreases using the flexible magnetic sheet, compared to the rigid type, when the same magnetic material with hundreds of relative permeability is used for both types of magnetic sheets.

Keyword Wireless Power Transfer, Magnetic Resonant Coupling, Magnetic Sheet, Relative Permeability, Efficiency

1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレット PC など内蔵された充電池を主電源として駆動するユビキタスなワイヤレスモバイル機器が急速に普及している。一方、頻繁に充電池を主電源として駆動するユーザの場合、機器の消費電力に対し充電池の供給電力が少ないため、ユーザは頻繁に充電を行なうことが必要となる。さらに、充電する度に機器に充電ケーブルを接続するという煩わしさをユーザは依然として強いられている。この課題の解決策として、電磁誘導技術を用いた非接触

充電器が商品化され始めている[1]。また、利便性の高い次世代の非接触充電技術として、磁界共鳴型のワイヤレス電力伝送方式が精力的に研究開発されている[2]-[5]。磁界共鳴型は、従来の電磁誘導型よりも送受電器間の距離や相対的な位置ずれに対するマージンを大きく設計できるという利点がある。

磁界共鳴方式は、直列共振モードの送受電コイルを近傍界領域に配置することでコイル同士を磁氣的に強く結合させて高い伝送効率を得ている。電力（エネルギー）は送受電コイル間に生じる共鳴現象により磁界を

介して伝送される。磁界共鳴の理論はモード結合理論で整理されているが[6],[7]、工業的応用の観点からは取り扱いが難しい。そこで、コイルや回路の設計を簡便に行なうために、等価回路モデルを用いた解析手法により検討が行なわれている[4],[5],[8]。

磁界共鳴方式による電力伝送の検討は、その多くが送受電コイルだけから成る系について行なわれている。一方、送受電コイルを電子機器に実装すると、充電電池などの金属部品がコイルの近傍に配置される。このため、電力伝送の媒介である磁界と金属が相互作用することにより、電力の伝送効率が著しく低下する。この悪影響を抑止するため、フェライトなどから成る絶縁性の磁性シートをコイルと金属部品の間に設けることが実用的に不可欠である[9]。ところが、コイルだけで最適設計された共振系に磁性シートを追加すると、送受電系の磁気的な結合状態の変化により伝送効率あるいは共振周波数が変化する[10]。よって、実用的な設計に際し、磁性シートによる磁気的な影響を含めて送受電系を検討する必要がある。

本報では、等価回路モデルと磁界解析を用いて[4],[5]、磁性シートを伴った送受電系に対する解析的な検討を行なった。

2. 解析モデルおよび解析方法

本報で用いた送受電系の構造および計算パラメータを図1に示す。送電コイル系は1次コイルと2次共振コイルから成る。受電コイル系は3次共振コイルと4次コイルから成る。送受電コイル間の距離は50mmとする。各コイルは1ターン、1層の構成とする。コイルの導電率は $5.52 \times 10^7 \text{ S/m}$ (銅に相当)とする。1次コイルには高周波電源、4次コイルには負荷抵抗を接続する。送電周波数は2MHzとする。2次および3次共振コイルには、共振用コンデンサを直列に接続する。誘電正接は 1.0×10^{-5} とする。各条件において2MHzで共振するように容量値を調整する。磁性シートを設けない場合、その容量値は $0.063 \mu\text{F}$ である。同じ比透磁率をもつ磁性シートを送受電コイルの両方に設ける。

本報では、図2に示すように、2種類の磁性シートを検討する。リジッド型は1枚の磁性薄板(80mm×80mm)から成る。フレキシブル型は複数の磁性小片(正方形)から成り、その外形サイズはリジッド型と同じとする。シート厚さは、0.2mmまたは0.5mmとする。本報で表記する比透磁率の値は、磁性シートに用いる磁性材料の比透磁率である。磁性シートに用いる磁性材料の磁気正接は0.012(比透磁率によらず一定)、導電率は $2.0 \times 10^{-6} \text{ S/m}$ (絶縁体に相当)、比誘電率は1とし、いずれの特性値も等方性とする。フレキシブル型における磁性小片間のギャップ部の比透磁率は1と

する。

伝送効率(η)は、1次コイルに流入する実効的な電力(P1)に対する4次コイルで取り出される電力(P4)の比、つまり $\eta = P4/P1$ として定義する。2次および3次共振コイル間の結合係数(k_{23})は、2次および3次共振コイルの自己インダクタンス(L_2, L_3)および相互インダクタンス(M_{23})を用いて、 $L_2 L_3 = (M_{23}/k_{23})^2$ の関係式から求める。

モデル解析は、等価回路モデルを用いた解析手法により行なった[4],[5]。等価回路モデルに適用する回路定数を求めるため、有限要素法による近傍界向けの電磁界シミュレータ(市販品)を用いた。抽出した回路定数を用いて回路シミュレーションを行なった。

3. リジッド型磁性シートを用いた送受電系の検討

ここでは、リジッド型の磁性シートを伴った送受電系を用いて、伝送効率に及ぼす磁性シートの効果につ

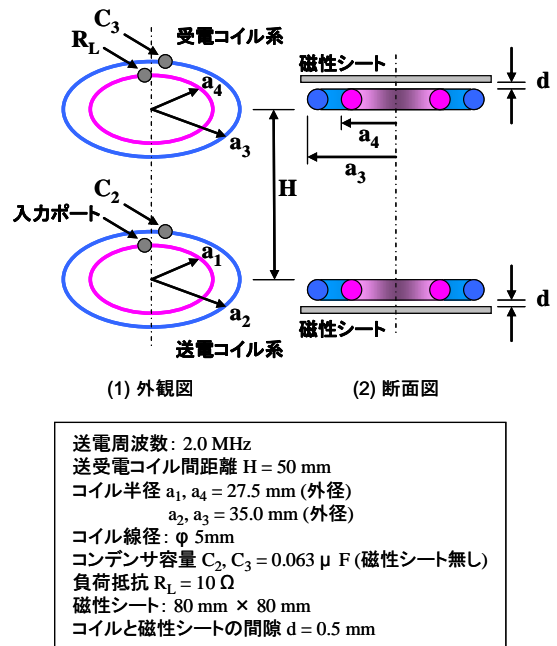


図1. 解析モデルの構造と計算パラメータ

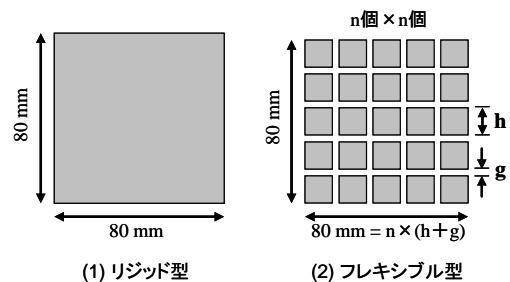


図2. 磁性シートの構造

いて検討する。

モデル構成と解析から得た伝送効率を図 3 に示す。送受電コイルの近傍に金属(アルミ板)を配置すると、伝送効率が著しく低下した。しかし、コイルと金属の間に磁性シートを設けることで伝送効率は回復した。これは、大部分の磁束が絶縁性の磁性シート中を流れることにより渦電流の発生などの磁界と金属の相互作用が抑止される(遮蔽効果)ためである。これらの解析結果は、一般に知られている事象と定性的な矛盾はない。

図 1 に示したモデルにおいて、伝送効率および 2 次および 3 次共振コイル間の結合係数と磁性シートの比透磁率の関係を図 4 に示す。ここではリジッド型の磁性シートを用いるため、磁性材料と磁性シートの比透磁率は同じ値とする。比透磁率の増大に伴って、伝送効率、結合係数はともに大きくなった。このことから、大きな比透磁率によりコイル間の磁気的な結合が強くなり、伝送効率が向上することがわかる。

以上のことから、伝送効率を改善するためには、大きな比透磁率をもつ磁性シートの使用が好ましい、と言える。

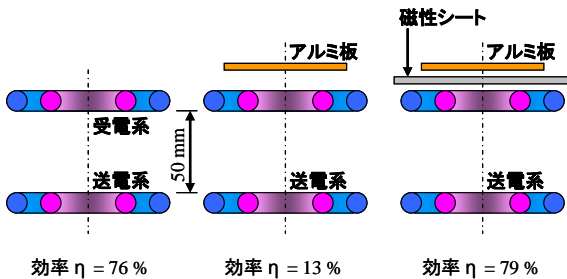


図 3. 伝送効率に対する磁性シートの効果： リジッド型磁性シートのサイズは 80mm×80mm×0.5mm であり、比透磁率は 500。アルミ板のサイズは 60mm×60mm×1mm。磁性シートとアルミ板の間隙は 0.5mm。

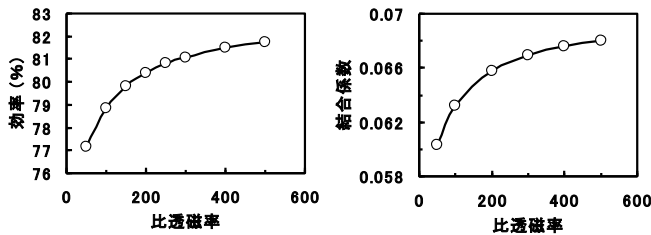


図 4. 伝送効率あるいは 2 次および 3 次共振コイル間の結合係数の比透磁率依存性： リジッド型磁性シートの厚さは 0.5mm。コイル近傍に金属は無い。

4. フレキシブル型磁性シートを用いた送受電系の検討

磁性シートには磁性セラミックスであるフェライトを用いることが多い[9],[10]。よって、大面積のセラミックス薄板そのものであるリジッド型の磁性シートは、実装時の破損の観点から、電子機器への適用は限られる。このため、実用上は、数 mm サイズのフェライト小片を敷き詰めたフレキシブル型の磁性シートを使用することが多い[9]。

ここでは、フレキシブル型磁性シートを用いた送受電系について解析を行ない、リジッド型を用いた場合と比較を行なう。

4.1. フレキシブル型磁性シートのモデル検討

フレキシブル型磁性シートのように磁性体と非磁性体が混在する系では、非磁性体の透磁率が小さいため、混在系全体に対する実効的な比透磁率は、混在系の構成要素である磁性体の比透磁率よりも小さくなることが知られている[11]。一方、図 4 に示したように、比透磁率が小さくなると、伝送効率が低下する。つまり、リジッド型と同じ磁性材料から成るフレキシブル型を用いた場合、フレキシブル型の実効的な比透磁率はリジッド型よりも小さくなるため、リジッド型を用いた

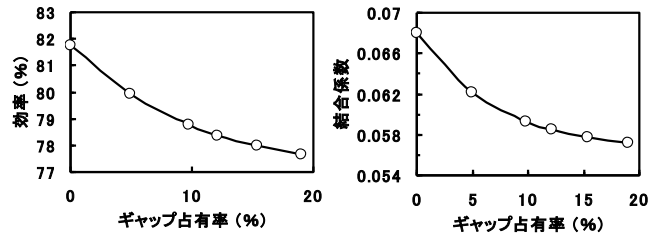


図 5. フレキシブル型磁性シートにおけるギャップ占有率に対する伝送効率あるいは 2 次および 3 次共振コイル間の結合係数： 磁性シートの厚さは 0.5mm であり、用いた磁性材料の比透磁率は 500。隣接する磁性小片間のギャップ長は 0.2mm に固定し、磁性小片のサイズを変化させて占有率を設定。

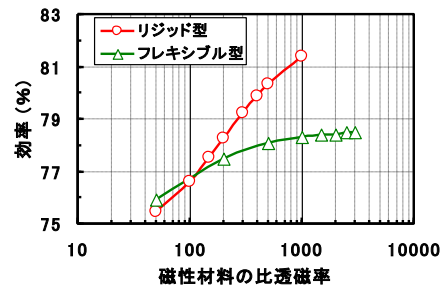


図 6. 磁性シートに用いる磁性材料の比透磁率に対する伝送効率： 磁性シートの厚さは 0.2mm。

文 献

場合に比べて、伝送効率が低下すると予想される。モデル解析によりこのことを示すことが可能か確かめるため、フレキシブル型磁性シートに占める非磁性部(磁性小片間のギャップ部)の割合を変えて伝送効率に及ぼす影響を調べた。磁性シート全体に対するギャップ部分の占有率に対する伝送効率および2次および3次共振コイル間の結合係数の変化を図5に示す。ギャップ占有率の増大に伴って、伝送効率、結合係数はともに小さくなった。一方、ギャップ占有率の増大(磁性体占有率の低下)は磁性シート全体の磁化を小さくするため、ギャップ占有率の増大に伴ってフレキシブル型の実効的な比透磁率は小さくなると考えられる。これらことから、ギャップ占有率の増大に伴って生じる実効的な比透磁率の低下によってコイル間の磁気的な結合が弱くなり、伝送効率が低下すると考えられる。これは、前述の予想と矛盾しない。

4.2. フレキシブル型とリジッド型の比較

フレキシブル型およびリジッド型に用いる磁性材料の比透磁率を変化させて伝送効率の変化を調べた。ここで、フレキシブル型モデルは0.05mmのギャップをもつ1,600個の磁性小片(1.95mm×1.95mm×0.2mm)から成り、個々の磁性小片に対して磁性材料がもつ比透磁率を設定した。解析結果を図6に示す。リジッド型では、比透磁率の増大に伴って伝送効率が増大し続け、比透磁率が1,000の時に伝送効率は81~82%まで向上した。一方、フレキシブル型では、比透磁率の増大に伴って伝送効率が増大するけれども、比透磁率が1,000を越えると伝送効率は78~79%で飽和した。このことから、数百~数千に及ぶ大きな比透磁率をもつ磁性材料を用いてフレキシブル型を構成しても、伝送効率の著しい改善には寄与しないと言える。これは、フレキシブル型では、ギャップの影響により、その実効的な比透磁率が磁性材料の比透磁率と比例的な関係になく飽和することを反映した結果と考えられる。

5. まとめ

磁界共鳴型無線電力伝送において、磁性シートを用いた送受電系に対し、等価回路モデルと磁界解析を用いて検討を行なった。比透磁率が大きな磁性シートの適用により、伝送効率が向上することを確認した。また、フレキシブル型では、同じ磁性材料を用いたリジッド型に比べて伝送効率が小さくなることを明らかにした。

今後、実験による実測結果とシミュレーションによる解析結果の比較を行ない、フレキシブル型磁性シートを用いた送受電系について理解を深める。

- [1] 久米秀尚, “いよいよ離陸するワイヤレス給電,” 日経エレクトロニクス, vol.2011-7-11, no.1060, pp.55-63, July 2011.
- [2] H. Shoki, “Issues and Initiatives for Practical Use of Wireless Power Transmission Technologies in Japan,” Proc. International Microwave Workshop series on Innovative Wireless Power Transmission, no.IWPT5-1-2, pp.87-90, Uji (Kyoto), Japan, May 2011.
- [3] T. Miyamoto, S. Komiyama, H. Mita, and K. Fujimaki, “Wireless Power Transfer System with a Simple Receiver Coil,” Proc. International Microwave Workshop series on Innovative Wireless Power Transmission, no.IWPT6-5, pp.131-134, Uji (Kyoto), Japan, May 2011.
- [4] 下川聡, 川野浩康, 松井清人, 内田昭嘉, 田口雅一, “磁界共鳴型無線電力伝送における共振容量変化の影響に対する検証,” 2010 信学通信ソサイエティ大会講演論文集, no.B-1-7, pp.7, Sept. 2010.
- [5] S. Shimokawa, H. Kawano, K. Matsui, A. Uchida, and M. Taguchi, “A Numerical Study of Power Loss Factors in Resonant Magnetic Coupling,” Proc. International Microwave Workshop series on Innovative Wireless Power Transmission, no.IWPT-P-7, pp.219-222, Uji (Kyoto), Japan, May 2011.
- [6] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” Science, vol.317, no.5834, pp.83-86, July 6, 2007.
- [7] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, “Efficient wireless nonradiative mid-range energy transfer,” Annals of Physics, vol.323, no.1, pp.34-48, Jan.2008.
- [8] 居村岳広, 堀洋一, “電磁界共振結合による伝送技術,” 電気学会誌, vol.129, no.7, pp.414-417, Jul.2009.
- [9] 藤丸琢也, 西村弘治, 藤本秀次, 安村浩治, 椎葉健吾, “携帯電話 RFID(13.56MHz)フェライトシート” 松下テクニカルジャーナル, vol.51, no.5, pp.86-90, Oct. 2005.
- [10] 岡部浩之, 居村岳広, 加藤昌樹, 小柳拓也, 大手昌也, Beh Teck Chuan, 内田利之, 堀洋一, “kHz帯における磁界共振結合の実験とフェライトの効果,” 2010 信学通信ソサイエティ大会講演論文集, no.B-1-28, pp.28, Sept. 2010.
- [11] ANSYS, “フォワードコンバータ用トランスの解析,” アプリケーション別例題集, Aug. 2009.