

磁気共鳴方式における第3のコイルおよび アレー化による電力伝送効率の向上

小川 健一郎[†] 工藤 浩喜[†] 大舘 紀章[†] 尾林 秀一[†] 庄木 裕樹[¶] 諸岡 翼[‡]

[†] ¶ 株式会社東芝 研究開発センター 〒211-8582 川崎市幸区小向東芝町1

[‡] 東芝リサーチコンサルティング株式会社 〒211-8582 川崎市幸区小向東芝町1

E-mail: [†] [‡] {kenichiro.ogawa, hiroki.kudo, noriaki.oodachi, shuichi.obayashi, tasuku.morooka}@toshiba.co.jp
¶ shoki@cs.lrdc.toshiba.co.jp

あらまし 磁気共鳴方式による無線電力伝送において、送電側コイルと受電側コイル間の伝送効率は、コイル間の距離とコイルの回転角度の関数となる。コイル間の距離が長くなる時、伝送効率は小さくなる。また、2つのコイルの軸が一致するとき伝送効率は最大となり、コイルが回転すると伝送効率は小さくなる。本稿では、これらの伝送効率の劣化を改善するために第3のコイルを用いる方法と送電コイルアレーを提案する。第3のコイルを用いる方法は、伝送距離と回転角度が変わった場合の効率改善を目的としている。一方、送電コイルアレーは回転角度が変わった場合の効率改善を目的としている。提案方法の有効性は測定とシミュレーションから確認される。

キーワード 無線電力伝送、磁気共鳴方式、伝送効率、第3のコイル、送電コイルアレー

Efficiency improvement of wireless power transfer via magnetic resonance using the third coil or an array coil.

Kenichiro Ogawa[†] Hiroki Kudo[†] Noriaki Oodachi[†] Shuichi Obayashi[†] Hiroki Shoki[¶]
Tasuku Morooka[‡]

[†] ¶ Corporate Research & Development Center, TOSHIBA Corporation 1, Komukai-toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki, Kanagawa, 212-8582 Japan

[‡] Toshiba Research Consulting Corporation 1, Komukai-toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki, Kanagawa, 212-8582 Japan

E-mail: [†] [‡] {kenichiro.ogawa, hiroki.kudo, noriaki.oodachi, shuichi.obayashi, tasuku.morooka}@toshiba.co.jp
¶ shoki@cs.lrdc.toshiba.co.jp

Abstract The transfer efficiency between a transmission coil and a reception coil is a function of the distance and the orientation between the coils. When the distance between the two coils is long, the transfer efficiency is small. When two coils share a single axis, the transfer efficiency is maximal, but otherwise the efficiency becomes lower. In this paper, two wireless power transfer systems via magnetic resonance are proposed to improve the transfer efficiency. The first proposal is the wireless power transfer systems via magnetic resonance using the third coil. The second proposal is the wireless power transfer systems via magnetic resonance using an array coil. The first proposed system can improve the transfer efficiency when the distance between two coils is large. Also, the first and the second proposed systems can improve the transfer efficiency when one of the coils rotates and their axes become separated. The effectiveness of the proposed systems is confirmed by measurement using a vector network analyzer and simulation by a method of moment.

Keyword Wireless power transfer, Magnetic resonance, transfer efficiency, The third coil, Array coil

1. はじめに

磁気共鳴による無線電力伝送システムが、いくつかのグループから報告されている[1-3]。これらの報告では、共振コイルが送電側コイルおよび受電側コイルとして機能している。送電側コイルと受電側コイル間の

伝送効率は、コイル間の距離と角度の関数となる。コイル間の距離が長くなる時、伝送効率は小さくなる。また、2つのコイルの軸が一致するとき伝送効率は最大となり、そうでないときには伝送効率は小さくなる。コイル間の距離、角度を固定できない利用シーンでは、

伝送効率の改善が望まれる。

本稿では、伝送効率を改善する方法を2つ提案する。1つめの提案は、第3のコイルを用いる方法である[4-6]。この方法では、伝送距離と角度が変わった場合の効率が改善される。なお、第3のコイルは増幅器や整流器などの電子デバイスを必要としない。報告[7-9]では理論的な検討がおこなわれているが、本稿では測定を用いて評価した結果を報告する。2つめの提案は、送電側にコイルアレーを用いる方法である[10,11]。この方法では、角度が変わった場合の効率を改善する。なお、送電側には送電回路を必要とするため、第3のコイルを用いる場合に比べて回路規模が増大する。送電コイルアレーは、より効率を改善するために提案する方法である。

2. 第3のコイルを用いた伝送効率の改善

2.1. 伝送コイルの構造

図1に提案する第3のコイルを用いた無線電力伝送システムの構造を示す。送電コイルと受電コイルは距離 d 離れて配置される。第3のコイルは送電コイルと受電コイルの間に配置されている。送電コイルと受電コイルと第3のコイルのパラメータ値は同一である。このように第3のコイルを配置することで、第3のコイルがリピータとして機能し、伝送効率の改善が期待される。

コイルの直径 r_1 は 15cm、コイルの高さ h は 3cm、コイルワイヤの直径は 2.2mm である。また、コイルは銅で構成されている。これらのパラメータは約 27MHz で伝送効率が最大になるように設定した。

送電コイルと受電コイルはそれぞれループで励振されている。送信コイルとループとのギャップを g_1 、受信コイルとループとのギャップを g_2 とする。コイルの入力インピーダンスは、ギャップ g_1 と g_2 を調整することで 50Ω に整合するように調整される。

測定においては、 S パラメータをベクトルネットワークアナライザを用いて測定する。図2は測定に用いたコイルの写真である。



図2 測定に用いたコイルの写真

2.2. 測定結果

一般的に、大きなコイルの伝送効率は小さなコイルの伝送効率より高い。そこで、伝送距離 d をコイルの直径で規格化した規格化伝送距離を導入する。規格化伝送距離を $d_n=d/r_1$ で定義する。以降の測定結果の表示では、規格化伝送距離を用いている。

はじめに、送電コイルと受電コイル間の距離 d を変える。第3のコイルは送電コイルと受電コイルの間に置く。つまり、 $d_1=d_2=d/2$ である。

図3は、伝送距離 d を変えた場合の伝送効率と S_{11} 、 S_{22} を示している。 S_{11} と S_{22} は伝送効率が最大となる周波数で測定された値である。比較のために、第3のコイルがない場合の特性も合わせて示している。第3のコイルを用いた場合の効率は、第3のコイルを用いない場合の効率よりも高くなる。

図4は、伝送効率の改善量を示している。規格化伝送距離が4のときに、最大の伝送効率改善量 39.6% が得られている。

次に、送電コイルと第3のコイル間の距離 d_1 を変えた場合の伝送効率を図5に示す。なお、規格化伝送距離 $d_n=5.33$ である。図5の横軸は、送電コイルと第3のコイル間距離 d_1 と受電コイルと第3のコイル間距離 d_2 の比である。第3のコイルがない場合の伝送効率が 5.6% であるので、第3のコイルを用いることで効率が改善されている。また、 $d_1/d_2=1$ のときに最大の伝送効率 40.2% が得られている。以上のことから、伝送距離が長くなる場合に第3のコイルを用いることが効率改善に有効であり、また、伝送効率の最大化のためには、送受から等距離に第3のコイルを設置することが必要であることがわかった。

最後に、コイルの角度が変わった場合の検討を行う。図6に角度を変える場合の構造を示す。受電コイルは、図6に示すように90度回転させている。この条件は、第3のコイルがない場合に最も伝送効率が小さくなる条件である。第3のコイルは、送電コイルと受電コイルから等距離に配置する。つまり、 $d_1=d_2=d/2$ である。第3のコイルの回転角度を θ と定義して、第3のコイルを回転させた場合の伝送効率を測定する。なお、規格化伝送距離 $d_n=5.33$ である。

図7に伝送効率の測定結果を示す。第3のコイルがない場合の伝送効率は 0.4% と非常に小さいが、第3の

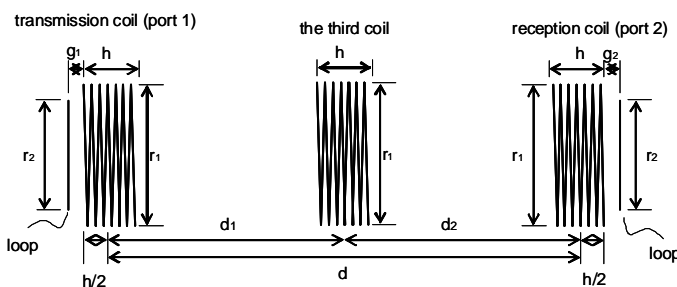


図1 第3のコイルを用いた伝送コイルの構造

コイルを用いることで効率が改善される。今回の測定では、回転角度 $\theta = 45$ 度 のときに、最大伝送効率 9.9% が得られている。この結果から、第 3 のコイルは受電コイルの角度が変わった場合にも有効であるといえる。

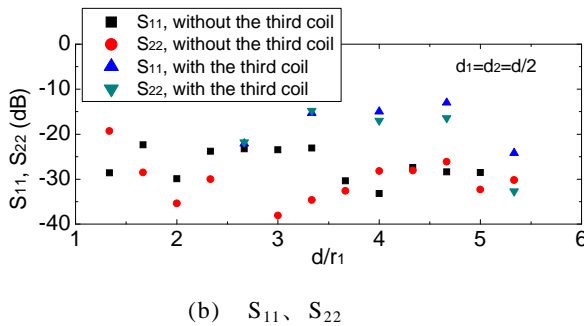
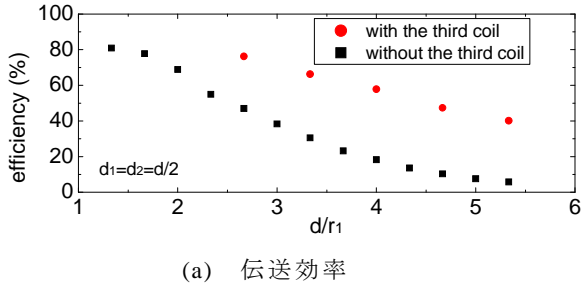


図 3 伝送距離に対する伝送効率 (S_{21}) と 反射特性 (S_{11} 、 S_{22})

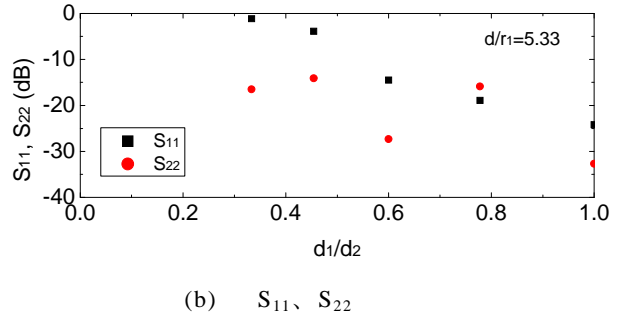
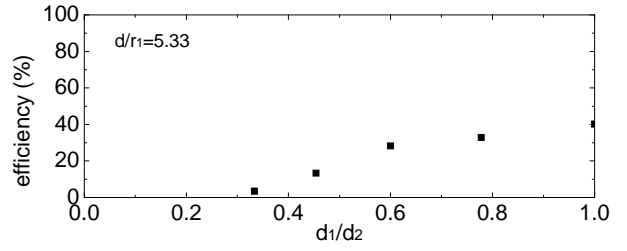
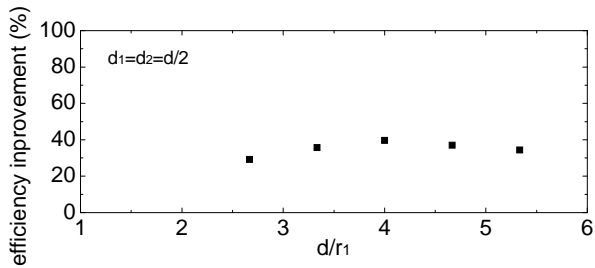


図 5 第 3 のコイルの位置を変えた場合の特性

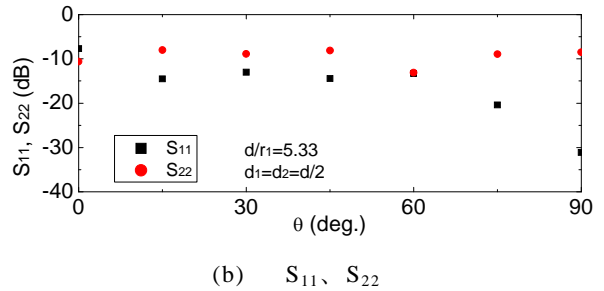
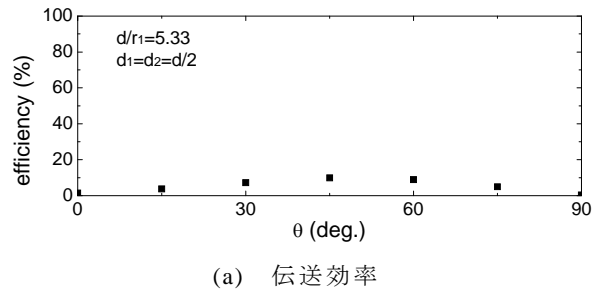
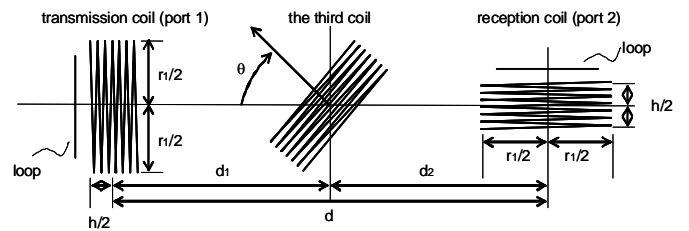


図 7 第 3 のコイルを回転させた場合の特性

3. 送電コイルアレーを用いた伝送効率の改善

3.1. 伝送コイルの構造

図 8 に提案する送電コイルアレーを用いた無線電力伝送システムの構造を示す。送電コイル 1 と送電コイル 2 が分配器を介して励振されている。送電コイル 1 と送電コイル 2 間の距離を d_t 、伝送距離を d とする。受電コイルの回転角度を θ と定義する。

送電コイル 1 と送電コイル 2 が同位相で励振される場合を同位相励振と呼び、送電コイル 1 と送電コイル 2 が逆位相で励振される場合を逆位相励振と呼ぶこととする。同位相励振と逆位相励振を切り替えることで、磁束の向きを制御することが可能となる。この結果、受電コイルが回転した場合の伝送効率の改善が期待される。

なお、第 3 のコイルを用いた場合と同じように、ループを使ってコイルを励振する。また、入力インピーダンスは、コイルとループのギャップを調整することで 50Ω に整合するように調整される。また、第 3 のコイルを用いた測定と同じコイルを用いている。

測定においては、S パラメータをベクトルネットワークアナライザを用いて測定する。図 9 は測定に用いたコイルの写真である。

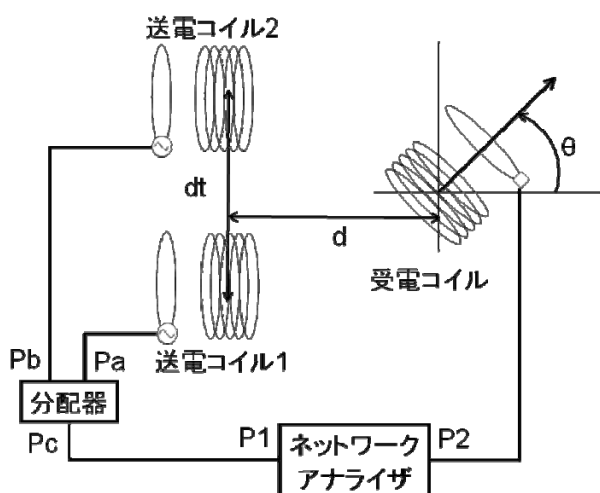


図 8 送電コイルアレーを用いた無線電力伝送システムの構造



図 9 測定に用いたコイル

3.2. 測定結果とシミュレーション結果

図 10 は、受電コイルの回転角度に対する伝送効率の測定値を示している。なお、同位相励振の場合、逆位相励振の場合に加えて、比較としてアレー化なしの場合も示している。なお、規格化送電コイル間距離 d_t/r_1 =規格化伝送距離 $d_n=2.67$ である。

アレー化なしの場合には、受電コイルの回転角度 θ が 0 度で最大の伝送効率を得られ、 $\theta = \pm 90$ 度で最小の伝送効率となる。また、同位相励振の場合も、アレー化なしと同様の振る舞いを見せる。

一方、逆位相励振の場合には、受電コイルの回転角度 $\theta = 0$ で最小の伝送効率となり、 $\theta = \pm 90$ 度で最大の伝送効率となる。このように、逆位相励振によって、通常のコイルとは異なる伝送特性を得ることが可能となる。

以上のことより、送電コイルアレーを採用し、受電コイルの回転角度 θ が -60 度 $\leq \theta \leq +60$ 度の場合には同位相励振、 $\theta \leq -60$ 度、 $+60$ 度 $\leq \theta$ の場合には逆位相励振と切り替えることで、受電コイルの回転角度の変化による伝送効率の劣化を低減することが可能になることが確認できた。

なお、今回の測定においては、給電線路とループの接続方法を物理的に切り替えて同位相励振と逆位相励振を実現している。今後、励振条件を切り替え可能な給電回路が必要である。

図 11 は、図 10 と同じ条件におけるシミュレーション結果を示す。シミュレーションにはモーメント法を用いている。シミュレーションにおいても測定と同様に、同位相励振と逆位相励振を切り替えることで、受電コイルの回転角度の変化による伝送効率の劣化を低減することが可能になることが確認できた。

ここで、シミュレーションに比べて測定の伝送効率が小さくなっている。この伝送効率の差は送電コイル間の結合が影響していると考えられるので、送電コイル間の結合量を測定した。

図 12 は送電コイル間の結合量を測定したときの構成図を示している。図 13 は、送電コイル間の結合量を受電コイルの回転角度に対して示している。この測定結果からも明らかなように、逆位相励振の場合には、送電間が強く結合している。この結果、特に逆位相励振の場合に測定された伝送効率が小さくなったと考えられる。

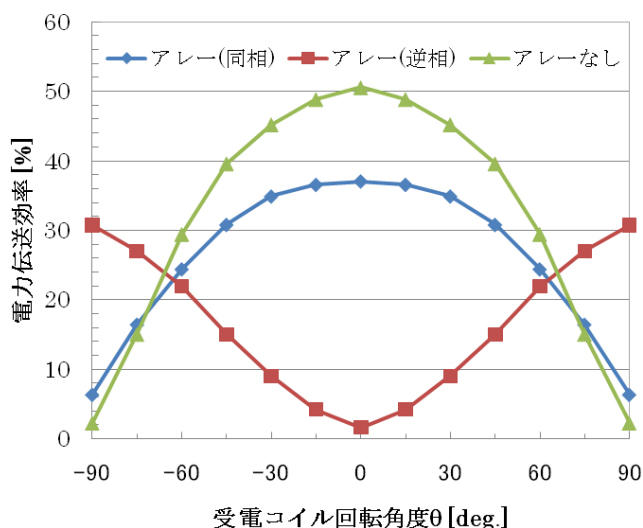


図 10 送電コイルアレーの測定結果

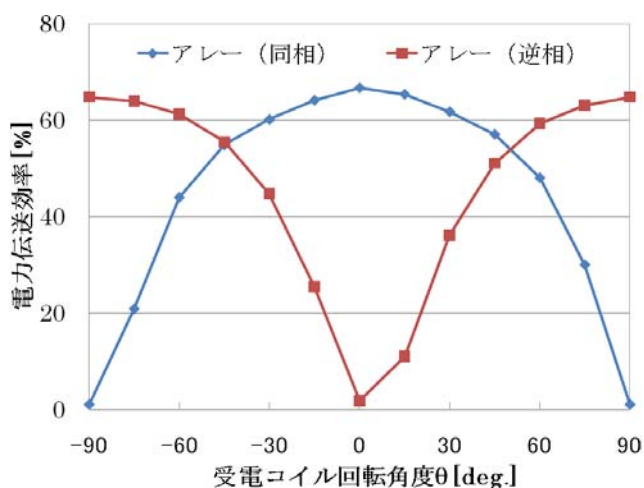


図 11 送電コイルアレーのシミュレーション結果

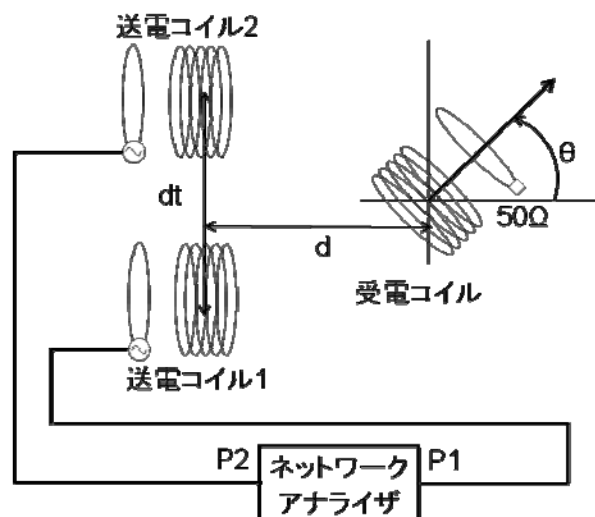


図 12 送電コイル間結合量測定時の構成

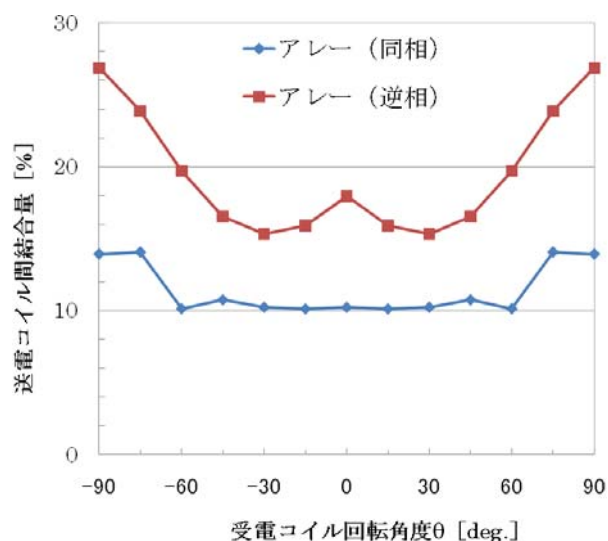


図 13 送電コイル間結合量の測定結果

4. まとめ

磁気共鳴による無線電力伝送システムにおいて課題となる伝送効率の改善方法を提案した。伝送距離と角度による特性改善として第3のコイルを用いる方法を提案し、有効性を測定により確認した。また、送受コイルから等距離に第3のコイルを配置することが、最大の効率を得るためには必要であることがわかった。

また、角度による特性改善として送電コイルアレーを提案し、有効性を測定とシミュレーションによって確認した。受電コイルの回転角度に応じて、同位相励振と逆位相励振を切り替えれば伝送効率の劣化が改善できることがわかった。また、シミュレーションと測定の違いを検討した結果、逆位相励振時の送電コイル間の結合の影響で、測定における伝送効率が小さくなったと考えられる。

文 献

- [1] A. Kurs, et al., “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *SCIENCE*, vol. 317, pp. 83-86, July 2007.
- [2] Y. Tak, et al. “Mode-based analysis of resonant characteristics for near-field coupled small antennas,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1238-1241, 2009.
- [3] T. Ishizaki, et al. “Comparative study of coil resonators for wireless power transfer system in terms of transfer loss,” *IEICE Electronics Express*, vol. 7, no. 11, pp. 785-790, 2010.
- [4] 柏木一平、大館紀章、小川健一郎、尾林秀一、庄木裕樹、諸岡翼、“第3のコイルを用いた磁気共鳴型無線電力伝送の効率改善、”2010年信学総大、B-1-31、March 2010.
- [5] 大館紀章、工藤浩喜、小川健一郎、尾林秀一、庄木裕樹、諸岡翼、“第3のコイルを用いた磁気共鳴型無線電力伝送の伝送効率測定、”2010年信学ソ大、B-1-4、Sept. 2010.
- [6] N. Oodachi, H. Kudo, K. Ogawa, H. Shoki, S. Obayashi T. Morooka,” Efficiency improvement of wireless power transfer via magnetic resonance using the third coil”, ISAP2010, paper ID 52, Macao, China Nov. 2010.
- [7] 橋口宜明、込山伸二、三田宏幸、藤巻健一、“磁界共鳴型ワイヤレス給電用中継デバイスの開発、”2010年信学総大、B-1-25、March 2010.
- [8] 粟井郁雄、“磁気結合共振器型ワイヤレス電力伝送の多段化、”2010年信学ソ大、B-1-6、Sept. 2010.
- [9] 西村太、安倍秀明、“磁気共鳴型ワイヤレス電力伝送コイルのアレー化に関する一検討、”2010年信学ソ大、B-1-5、Sept. 2010.
- [10] 工藤弘喜、大館紀章、出口典孝、庄木裕樹、“磁気共鳴型無線電力伝送における送電コイルアレー、”2009信学総大、B-1-30、March 2009.
- [11] 小川健一郎、工藤浩喜、大館紀章、尾林秀一、庄木裕樹、諸岡翼、“磁気共鳴型無線電力伝送における送電コイルアレーの効率測定、”2010年信学ソ大、B-1-2、Sept. 2010.