

コイル間のクロスカップリングを考慮した複数ワイヤレス給電 における電力及び効率改善

池田 圭一[†] 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 高効率、長い伝送距離及び位置ずれの許容を可能とするワイヤレス給電への高い有用性を示す磁界共振結合について、送電側あるいは受電側に複数のコイルを設けて給電を考える場合には近接するコイルの結合(クロスカップリング)が懸念要素となる、送電側或いは受電側で生じるクロスカップリングが伝送電力及び効率に与える影響を考慮した理論化、さらにクロスカップリングキャンセリングによる伝送特性改善の検証を行った。

キーワード ワイヤレス給電、磁界共振結合、複数給電、クロスカップリング

Power and Efficiency Improvement in Multiple Wireless Power Transfer Considering Cross Coupling between Coils

Keiichi IKEDA[†] Takehiro IMURA[†] and Yoichi HORI[†]

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

Abstract For magnetic resonance coupling, which is highly useful for wireless power transfer that enables high efficiency, long transmission distance, and tolerance of misalignment, if multiple coils are provided on the power transmission side or power reception side and power supply is considered, the coils are close to each other. Coupling (Cross Coupling) is a concern. Theorizing considering the effect of Cross Coupling on the transmitting side or receiving side on transmission power and efficiency, and verifying the improvement of power feeding characteristics by Cross Coupling Canceling.

Keywords Wireless Power Transfer, Magnetic Resonance Coupling, Multiple Feed, Cross Coupling

1. 序論

ワイヤレス給電(WPT)システムへの用途のひとつである磁界共振結合方式は、従来の電磁誘導方式に比べ伝送距離が比較的長い、位置ずれによる効率低下を抑えられる等の利点が挙がる。WPTのシステムでは、送電対受電コイルは1対1のみならず、1対複数或いは複数対複数が考えられる。その場合、複数の送電、受電コイル間には伝送を行うにあたり直接的には設計に考慮されない結合(飛び越し結合)が生じる^{[1][2]}。これをクロスカップリング(Cross Coupling; CC)という。磁界共振結合の複数給電においてCCは考慮すべき要素であるが、CCそのものが伝送電力及び効率に及ぼす影響の定式化はなされていない^{[3]~[5]}。

そこで本研究では、送受コイル個数が2対2または3対3の構成において、コイル間のCCを考慮した等価回路における伝送電力と効率の理論式化を提案する。加えてコイル間のCCによる伝送特性への影響を打ち消す手法であるクロスカップリングキャンセリング(Cross Coupling Canceling; CCC)についても理論式化に組み込む。その後、提案する伝送特性の理論式の

妥当性、併せてCCCの有用性について数値計算及び実測で検証する。

2. CCを考慮した伝送特性の理論式化

2.1 コイル構成別の理論式化

本節ではコイル構成がそれぞれ2対2、3対3の場合での伝送電力及び効率の理論式導出について述べる。本研究のコイル構成を図1に、理論導出に用いた回路を図2に示す。(1)式より、共振周波数 f_0 (ここでは85kHz)で動作させるときに自己インダクタンスによるリアクタンスとキャパシタンスによるリアクタンスは理論上打ち消される。(1)式を満たしたうえで4Coils(送電コイル2個、受電コイル2個)の場合に関し、全ての箇所におけるクロスカップリングを考慮した自己インダクタンスと相互インダクタンス、各素子の電圧及び電流の関係を(2)式に示す。入力電力は送電側及び受電側の各素子で消費される電力の総和と等価とみなすことができる。送電側の入力電力 P_{in} 、受電側の出力電力 P_{out} を(3)式に、伝送効率は(4)式に示す。CCCを図るべく送電側の回路内に自己インダクタンス L_{Tcan} 、受電側の回路内に自己インダクタンス L_{Rcan} のリアクタンスをもつキャンセルコイルをそれぞれ挿入する場合の回路方程式は(5)式のようなになる。同様に、6Coils

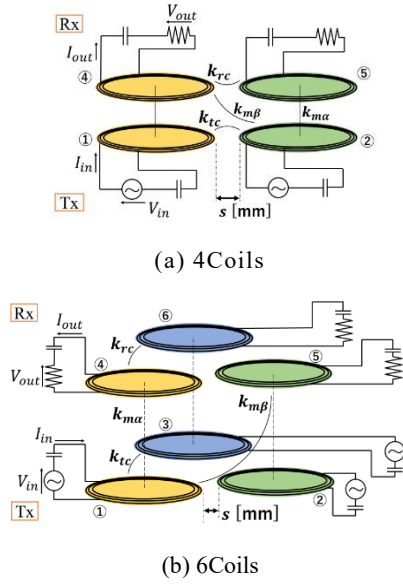


図 1. コイル構成

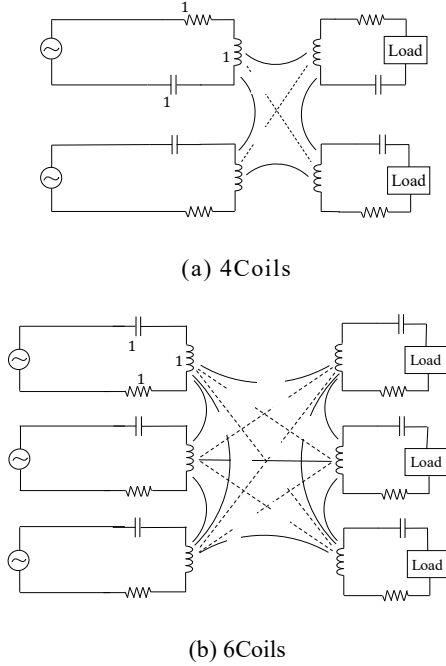


図 2. 理論式導出に用いた回路図

$$j\omega L_n + \frac{1}{j\omega C_n} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ V_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & -j\omega L_{tc} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{mb} \\ -j\omega L_{tc} & r_2 & -j\omega L_{mb} & j\omega L_{ma} \\ j\omega L_{ma} & -j\omega L_{mb} & r_3 + R_L & -j\omega L_{rc} \\ -j\omega L_{mb} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{rc} & r_4 + R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{in} = P_{rin} + P_{rout} + P_{RL} \\ \quad = r_{in}|I_{in}|^2 + r_{out}|I_{out}|^2 + R_L|I_{out}|^2 \\ P_{out} = P_{RL} = R_L|I_{out}|^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4)$$

(送電コイル 3 個, 受電コイル 3 個) の場合の回路方程式について, CCC がある場合と無い場合はそれぞれ (6), (7) 式となる.

2.2 コイル配置による CC 変化

送受電間距離 200 mm を固定とすると, CC の発生有無として送受同一側面でのコイル間距離を, CC が存在しない場合では 50 mm, CC が存在する場合では 0 mm すなわちコイルが密着して配置されている状態と, -40 mm すなわちコイルが互いに 40 mm ほど重なり合っている状態とする(表 1 参照). 相互インダクタンス L_{tc} , L_{rc} はそれぞれ結合係数 k_{tc} , k_{rc} に起因し, L_{ma} , L_{mb} はそれぞれ k_{ma} , k_{mb} に起因する. 本研究において CCC によって CC の影響を補償できるのは L_{tc} , L_{rc} のみであり, L_{mb} は補償不可能である.

表 1. コイル間距離による結合係数変化

結合位置		s [mm]		
		50	0	-40
送電同士	k_{tc}	0	0.03	0.06
受電同士	k_{rc}	0	0.03	0.06
送受電間	k_{ma}	0.078	0.078	0.078
	k_{mb}	0	0	0.01

2.3 理論式における CC の存在

コイル構成が 2 対 2, 3 対 3 の場合での伝送電力及び効率の理論式導出結果をそれぞれ表 2, 3 に示す. CC の要素 L_{tc} , L_{rc} が係る項により電力及び効率が低下することがいえる.

3. CC による影響および CCC の検証

本節では 2 章で導出した理論式に基づき, CC による影響及び CCC による伝送電力及び効率の改善を数値計算及び実測で検証する. 本研究での伝送条件として, 共振周波数 $f_0=85\text{kHz}$, 送電側電源電圧振幅 10V 及び位相 0deg. は固定とする. 実測におけるコイル配置を図 3 に, 2.2 節で述べたコイル間距離変化の様子を図 4 に示す.

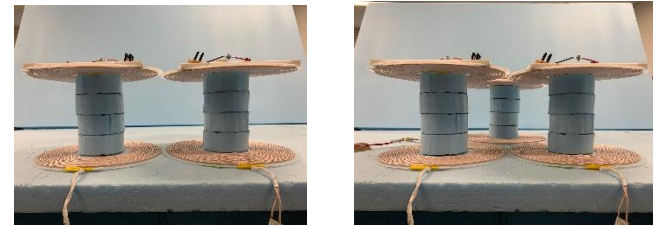


図 3. 実測におけるコイル配置

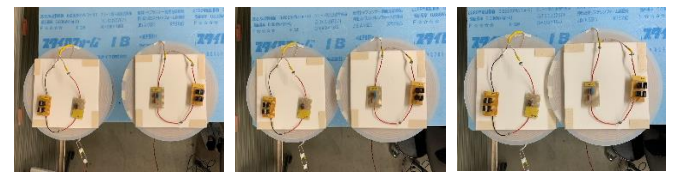


図 4. 水平方向コイル間距離の変化 (4Coils)

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ V_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + j\omega L_{Tcan} & -j\omega L_{tc} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{m\beta} \\ -j\omega L_{tc} & r_2 + j\omega L_{Tcan} & -j\omega L_{m\beta} & j\omega L_{ma} \\ j\omega L_{ma} & -j\omega L_{m\beta} & r_3 + R_L + j\omega L_{Rcan} & -j\omega L_{rc} \\ -j\omega L_{m\beta} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{rc} & r_4 + R_L + j\omega L_{Rcan} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ V_{in} \\ V_{in} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & -j\omega L_{tc} & -j\omega L_{tc} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{m\beta} & -j\omega L_{m\beta} & I_1 \\ -j\omega L_{tc} & r_2 & -j\omega L_{tc} & -j\omega L_{m\beta} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{m\beta} & I_2 \\ -j\omega L_{tc} & -j\omega L_{tc} & r_3 & -j\omega L_{m\beta} & -j\omega L_{m\beta} & j\omega L_{ma} & I_3 \\ j\omega L_{ma} & -j\omega L_{m\beta} & -j\omega L_{m\beta} & r_4 + R_L & -j\omega L_{rc} & -j\omega L_{rc} & I_4 \\ -j\omega L_{m\beta} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{m\beta} & -j\omega L_{rc} & r_5 + R_L & -j\omega L_{rc} & I_5 \\ -j\omega L_{m\beta} & -j\omega L_{m\beta} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{rc} & -j\omega L_{rc} & r_6 + R_L & I_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ V_{in} \\ V_{in} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + j\omega L_{Tcan} & -j\omega L_{tc} & -j\omega L_{tc} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{m\beta} & -j\omega L_{m\beta} & I_1 \\ -j\omega L_{tc} & r_2 + j\omega L_{Tcan} & -j\omega L_{tc} & -j\omega L_{m\beta} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{m\beta} & I_2 \\ -j\omega L_{tc} & -j\omega L_{tc} & r_3 + j\omega L_{Tcan} & -j\omega L_{m\beta} & -j\omega L_{m\beta} & j\omega L_{ma} & I_3 \\ j\omega L_{ma} & -j\omega L_{m\beta} & -j\omega L_{m\beta} & r_4 + R_L + j\omega L_{Rcan} & -j\omega L_{rc} & -j\omega L_{rc} & I_4 \\ -j\omega L_{m\beta} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{m\beta} & -j\omega L_{rc} & r_5 + R_L + j\omega L_{Rcan} & -j\omega L_{rc} & I_5 \\ -j\omega L_{m\beta} & -j\omega L_{m\beta} & j\omega L_{ma} & -j\omega L_{rc} & -j\omega L_{rc} & r_6 + R_L + j\omega L_{Rcan} & I_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

表 2. 伝送電力及び効率理論式 (4Coils)

P_{in}	$\frac{V^2 \left[(L_{ma} - L_{m\beta})^2 (r_3 + R_L) + r_1 L_{rc}^2 \right] \omega^2 + r_1 (r_3 + R_L)^2}{\left[(L_{ma} - L_{m\beta})^2 - L_{tc} L_{rc} \right] \omega + r_1 (r_3 + R_L)^2 + \omega^2 \{ r_1 L_{rc} - L_{tc} (r_3 + R_L) \}^2}$
P_{out}	$\frac{V^2 R_L (L_{ma} - L_{m\beta})^2 \omega^2}{\left[(L_{ma} - L_{m\beta})^2 - L_{tc} L_{rc} \right] \omega + r_1 (r_3 + R_L)^2 + \omega^2 \{ r_1 L_{rc} - L_{tc} (r_3 + R_L) \}^2}$
η	$\frac{(L_{ma} - L_{m\beta})^2 R_L \omega^2}{\left[(L_{ma} - L_{m\beta})^2 (r_1 + R_L) + r_1 L_{rc}^2 \right] \omega^2 + r_1 (r_3 + R_L)^2}$

表 3. 伝送電力及び効率理論式 (6Coils)

P_{in}	$\frac{\left\{ (L_{ma} - 2L_{m\beta})^2 (r_4 + R_4) + 4r_1 L_{rc}^2 \right\} V_1^2 \omega^2 + r_1 (r_4 + R_4)^2 V_1^2}{\left\{ 4L_{tc} L_{rc} - (L_{ma} - 2L_{m\beta})^2 \right\}^2 \omega^4 + \left[2(L_{ma} - 2L_{m\beta})^2 r_1 (r_4 + R_4) + 4\{ L_{tc}^2 (r_4 + R_4)^2 + r_1^2 L_{rc}^2 \} \right] \omega^2 + r_1^2 (r_4 + R_4)^2}$
P_{out}	$\frac{(L_{ma} - 2L_{m\beta})^2 R_4 V_1^2 \omega^2}{\left\{ 4L_{tc} L_{rc} - (L_{ma} - 2L_{m\beta})^2 \right\}^2 \omega^4 + \left[2(L_{ma} - 2L_{m\beta})^2 r_1 (r_4 + R_4) + 4\{ L_{tc}^2 (r_4 + R_4)^2 + r_1^2 L_{rc}^2 \} \right] \omega^2 + r_1^2 (r_4 + R_4)^2}$
η	$\frac{(L_{ma} - 2L_{m\beta})^2 R_4 \omega^2}{\left\{ (L_{ma} - 2L_{m\beta})^2 (r_4 + R_4) + 4r_1 L_{rc}^2 \right\} \omega^2 + r_1 (r_4 + R_4)^2}$

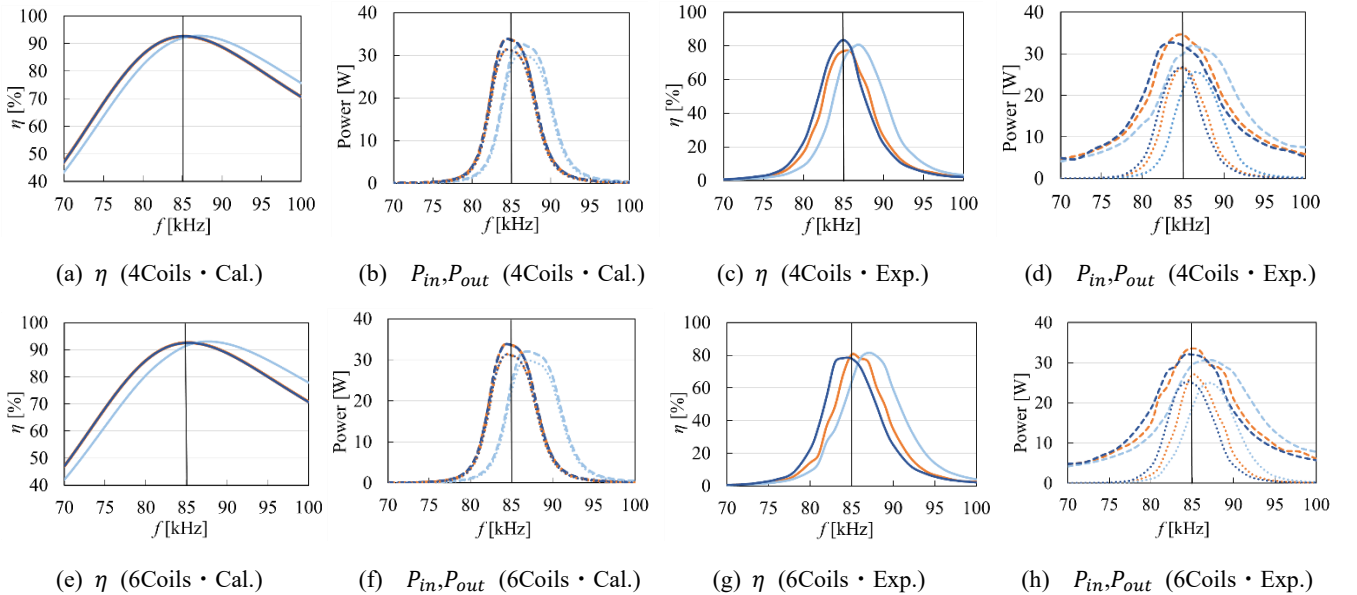


図 5. 伝送特性(s=50mm & s=0mm)

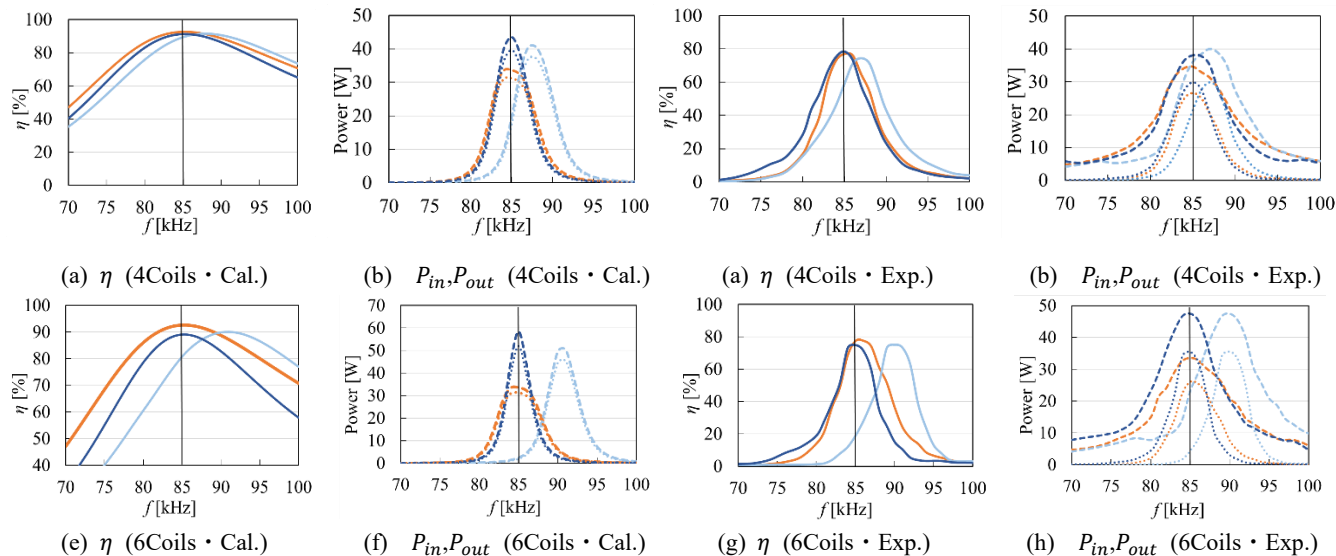


図 6. 6Coils における伝送特性($s=50\text{mm}$ & $s=-40\text{mm}$)

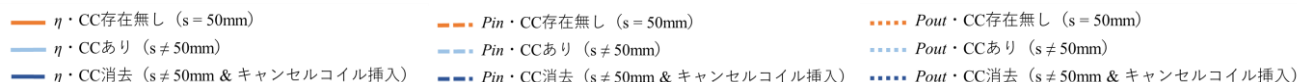


表 4. 85kHz における電力及び効率の改善率 (Exp.)

	4Coils		6Coils	
	$s=0\text{mm}$	$s=-40\text{mm}$	$s=0\text{mm}$	$s=-40\text{mm}$
P_{in}	6.8%	5.4%	8.9%	105%
P_{out}	24.5%	39.9%	33.4%	708%
η	16.5%	32.7%	22.5%	294%

CC による伝送特性への影響の本質は、所定の共振周波数下から電力と効率の最大点がずれることである。システムの設計上、動作周波数を固定しなければならない場合にはその動作周波数下での電力と効率の低下を招く。このとき CC による相互インダクタンスの影響により、各回路の直列共振が十分に達成されない状態にある。本研究における CCC は、CC が存在する状態においてキャンセルコイルを接続することで各回路系のリアクタンスを補償し、十分に直列共振が達成される状態にすることである。CC が存在しない場合($s=50\text{mm}$)に対し、コイル間距離が $s=0\text{mm}$ の場合及び $s=-40\text{mm}$ の場合の CC による周波数特性と CCC による伝送電力及び効率改善を評価する。数値計算結果及び実測結果を、 $s=50\text{mm}$ と $s=0\text{mm}$ の場合について図 5 に、 $s=50\text{mm}$ と $s=-40\text{mm}$ の場合について図 6 に示す。すべての特性について 85kHz における電力及び効率が CCC によって改善することが確認できた。表 4 に実測における 85kHz での伝送電力及び効率の CCC による改善率を示す。 $s=-40\text{mm}$ の場合では $s=0\text{mm}$ の場合よりも CC の相互インダクタンスが大きいため伝送電力と効率のピークが 85kHz から大きく離れる。ゆえに 85kHz において CCC の達成による伝送特性の改善幅が著しく大きくなる。

4. 結言

本研究では複数のコイルを用いる給電システムにお

いて、近接するコイル間の CC は伝送電力及び効率に影響を及ぼすこと、理論上数式モデル下での CC の要素を消去することで伝送特性を改善できることを提示した。また、それらの理論について CC を考慮したうえで CCC により伝送電力及び効率が改善可能であることを数値計算及び実測により確認した。今後の展望として、本研究で固定としていた電源電圧の入力条件を変化させることに対する CC の影響の検証や、コイル間距離を狭めた状態での CCC の近傍磁界への影響の検討を行う。

文 献

- [1] J. Kim, H. -C. Son, D. -H. Kim, and Y. -J. Park: "Impedance matching considering cross coupling for wireless power transfer to multiple receivers", Wireless Power Transfer (WPT), IEEE, pp.226-229 (2013)
- [2] T. Imura: "Simultaneous Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling to Multiple Receiving Coils", 2014 the Institute of Electrical Engineers of Japan Industry Applications Society, Vol.134, No.6 pp.625-633
- [3] T. Imura: "Cross-Coupling Canceling Method for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling", The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan on Industry Applications, Vol.134, No.5, pp.564-574 (2014)
- [4] D. Cui, T. Imura, and Y. Hori: "Cross coupling cancellation for all frequencies in multiple-receiver wireless power transfer systems", 21st International Symposium on Antennas and Propagation, ISAP 2016 - Ginowan, Okinawa, Japan, 24-28 Oct (2016)
- [5] K. Ikeda and T. Imura, "Basic Study of Cross Coupling Canceling in Power Transmission by Two Pairs of Coils Using Magnetic Resonance Coupling," 2019 Asian Wireless Power Transfer Workshop (AWPT2020), Dec. 2020.