

電磁結合を用いた無線電力伝送システムの実験的検討

加藤 駿† 今野 佳祐† 陳 強†

† 東北大学大学院工学研究科通信工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: † kato-s@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 近傍界電磁結合を利用した無線電力伝送システムを作成し、その特性を実験的に明らかにする。ループアンテナを用いた無線電力伝送システムの伝送効率を測定し、送受信アンテナ間距離、アンテナの位置ズレが伝送効率に及ぼす影響を実験的に明らかにする。

キーワード 無線電力伝送, インピーダンス整合, 電力伝送効率

Experimental Study of Wireless Power Transfer System Using Electromagnetic Coupling

Shun KATO† Keisuke KONNO‡ and Qiang CHEN‡

† Department of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University 6-6-05

Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579 Japan

E-mail: † kato-s@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract A wireless power transfer system using near-field electromagnetic coupling is fabricated and its performance is experimentally clarified. Power transfer efficiency of the fabricated system using loop antennas is measured. Effects of spacing between the transmitting and receiving antennas on the power transfer efficiency are clarified. Moreover effects of position displacement on the power transfer efficiency are also clarified.

Keywords Wireless Power Transmission, Impedance matching, Power transfer efficiency

1. まえがき

無線電力伝送技術は、携帯電気機器や電気自動車、体内医療機器などの充電技術として期待されている。無線電力伝送技術には遠方界を用いた電磁放射方式[1][2]、電磁誘導による電磁誘導方式[3][4]、近傍界を利用した電磁結合方式[5][6]がある。特に電磁結合方式は、電磁誘導方式よりも遠距離伝送が可能であり、電磁放射方式よりも高効率な電力伝送が可能であるため盛んに研究が行われている[7][8][9]。電磁結合方式において、電力伝送の高効率化には伝送システム内でインピーダンス整合を取ることが重要であることが知られている。しかし、実際の使用環境では送受信アンテナに位置ズレが起こり、不整合損が生じることにより効率が低下することが考えられる。

そこで、本報告ではループアンテナを用いた近傍界電

磁結合による無線電力伝送システムのアンテナ位置の変化による影響について実験的に検討したので報告する。まず、アンテナ、整合回路、無線電力伝送システムの設計手順を示す。次に送受信アンテナ間の距離を変化させた場合に伝送効率に変化することを示す。最後に、アンテナの水平方向の位置ズレが伝送効率に与える影響を示す。

2. 無線電力伝送システムの設計

本章では無線電力システムの概要や WPT を構成する送受信アンテナ、整合回路の設計手順について述べる。

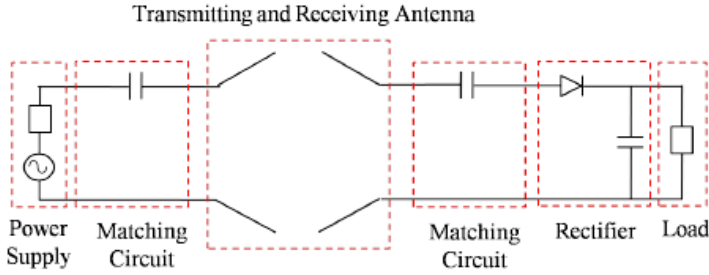
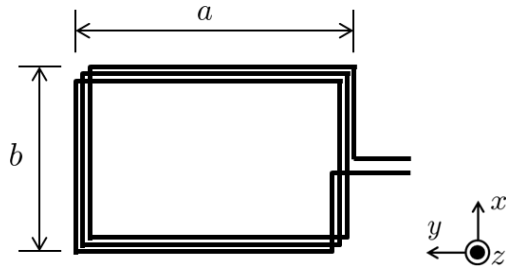
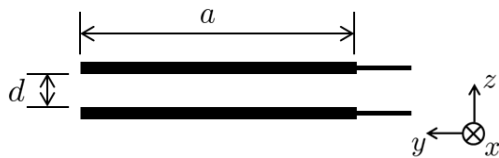


図 2.1 : WPT システムの概要



(a) top view



(b) side view

図 2.2 : 送受信アンテナ構造

表 2.1 : アンテナの設計パラメータ

a	90 mm
b	80 mm
d	5 mm
巻き数 N	6

2.1. 概要

無線電力伝送システムの概要を図 2.1 に示す。WPT システムは主に送受信アンテナ、整流回路、整合回路で構成されており、それぞれがシステム全体の効率において非常に重要である。アンテナは電力を無線で伝送するための高周波デバイスである。アンテナを用いて高周波電力を電磁波に変換して空間へ伝送、もう一方のアンテナでそれを受信する。受信した電力を整流回路で直流電力に変換することで、無線での電力伝送が実現できる。整合回路はアンテナと負荷の間に挿入される回路で、反射損失を小さくし効率を上げる役割を果たす。

2.2. 送受信アンテナ

本報告では 13.56 MHz での無線電力伝送を想定し、

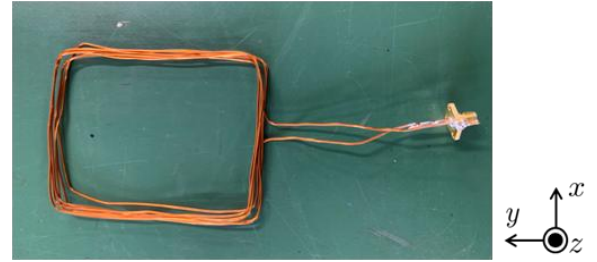


図 2.3 : 試作したアンテナ

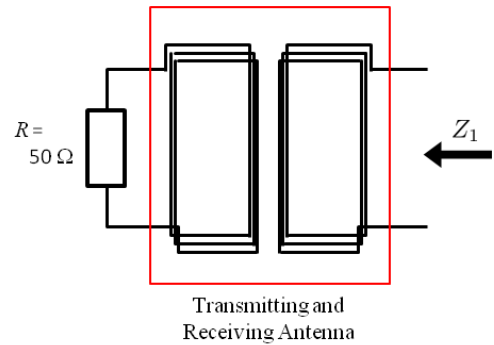


図 2.4 : インピーダンス Z_1 測定系

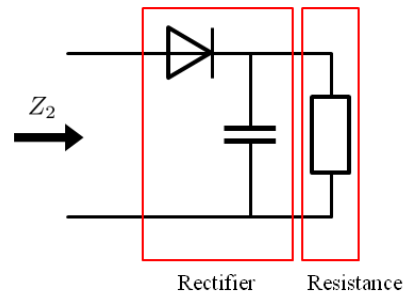


図 2.5 : インピーダンス Z_2 測定系

電磁結合方式、特に磁界結合方式による無線電力伝送に着目し、長方形のループアンテナを作成した。磁界結合方式とは電磁誘導の原理を用いて伝送を行う方式である。送受信アンテナの構造を図 2.2 に、パラメータを表 2.1 に、試作したアンテナの 1 つを図 2.3 に示す。

2.3. 整合回路の設計

異なる負荷抵抗 $r = 100, 150 \Omega$ に対して無線電力伝送システムを試作した。本実験では電源と送信アンテナの整合は考えず、受信アンテナと負荷との整合のみを考え、後述の送信アンテナへの入力電力から伝送効率を求めた。

送受信アンテナを 5 mm 間隔で対向させ、送信アンテナ側を 50Ω で終端し、ネットワークアナライザを用いて整流回路側から見たアンテナ側のインピーダンス Z_1 を測定した。使用したネットワークアナライザは KeysightE5071C である。

表 2.2: インピーダンス Z_1, Z_2

	Z_1	$693.870 + j2584.4$
Z_2	$r = 100 \Omega$	$68.465 - j4135.2$
	$r = 150 \Omega$	$314.9 - j3502.6$

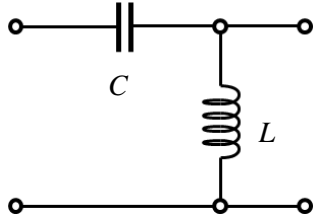


図 2.6: 整合回路の構成

表 2.3: 整合回路の集中定数素子パラメータ(計算値)

負荷抵抗 [Ω]	C [pF]	L [μ H]
100	0.74	36.95
150	1.49	24.81

表 2.4: 実際の整合回路に用いた集中定数素子パラメータ

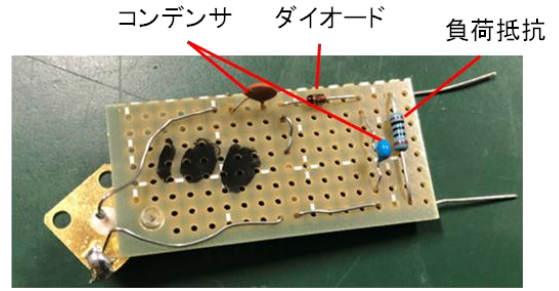
負荷抵抗 [Ω]	C [pF]	L [μ H]
100	1.5	33
150	1.5	22

次に、アンテナ側から見た整流回路側のインピーダンス Z_2 を入射電力 10 dBm で測定した。結果を表 2.2 に示す。

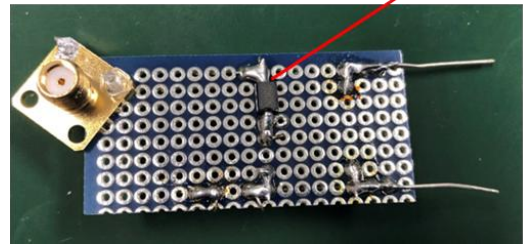
得られたインピーダンス Z_1, Z_2 より、整合回路の素子と構成を決定した。構成を図 2.6 に、素子のパラメータを表 2.3 に示す。設計周波数は 13.56 MHz である。

整合回路には素子を 2 つ用いる L 型と、素子を 3 つ用いる π 型と T 型がある。L 型の特徴は、整合回路側から見た電源側、負荷抵抗側のそれぞれのインピーダンスを用いて、整合を取ることができる素子を計算で求められる点である。一方素子を 3 つ用いる π 型、T 型は素子の 1 つを使用者が決める必要があるが、自由度が高く帯域の制御が可能であるという特徴がある。本報告では、帯域の制御の必要性が薄く、計算で素子が導き出せる簡便さから L 型整合回路で設計した。

また、整合回路の素子には電力を消費しないコンデンサとインダクタが用いられる。本報告では図 2.6 に示すようにコンデンサを直列に、インダクタを並列に接続した構成で素子のパラメータを計算から求めた。ここで、設計周波数 13.56 MHz の波長は約 22 m と基盤の大きさと比較し非常に長く、配線の長さや素子を置く位置が無視できるため集中定数素子を用いた。



(a)Front side インダクタ



(a)Back side

図 2.7: 試作した受信回路(整合回路, 整流回路, 負荷抵抗)

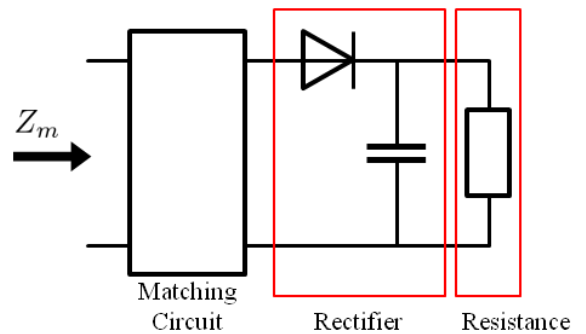


図 2.8: 受信回路とその入力インピーダンス Z_m

表 2.5: インピーダンス Z_m

負荷抵抗 [Ω]	Z_m
100	$325.06 - j4394.5$
150	$1676.4 - j3230.7$

計算で得られた集中定数素子の値に近い素子を用いて整合回路を作成した。実際の整合回路に用いた集中定数素子のパラメータを表 2.4 に、整合回路、整流回路、負荷抵抗を基盤上で一体化した受信回路を図 2.7 に示す。

試作した受信回路の入力インピーダンス Z_m を測定した。このときの入射電力は 10 dBm である。受信回路を図 2.8 に、その入力インピーダンスの測定結果を表 2.5 にそれぞれ示す。

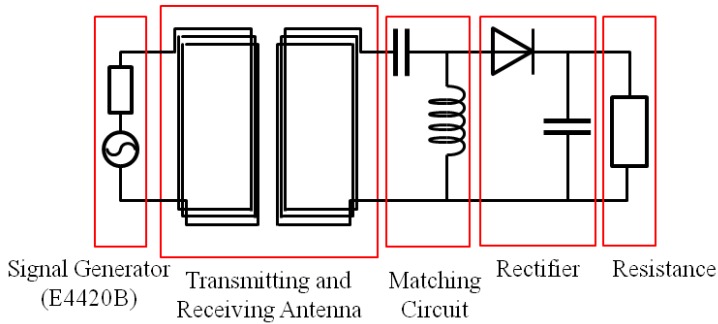


図 2.9：無線電力伝送システムの回路図

受信回路からアンテナ側を見たインピーダンス Z_1 と受信回路の入力インピーダンス Z_m の整合が取れているとき、 $Z_1 = Z_m^*$ となることが知られている。表 2.5 より、 Z_1 と Z_m を比較すると、おおむね互いに共役の菅家にある一方で、実部虚部の数値には差がみられた。これは Z_1 と Z_m が共役になるような整合回路の集中定数素子と値が異なる素子を試作品で使用したこと、はんだ付けの不完全さによるインピーダンスの変化が原因であると考えられる。

また、設計した受信回路を含む無線電力伝送システムの回路図を図 2.9 に示す。次章ではこの無線電力伝送システムの実験的評価を行い、送受信アンテナ間の距離と位置ずれに対する効率の変化を明らかにする。

3. 無線電力伝送システムの実験的評価

本章では無線電力伝送システムの伝送効率の算出方法を示し、送受信アンテナ間距離、位置の変化による伝送効率への影響について実験的検討を行う。

まず、送受信アンテナ間距離を変化させ電力伝送実験を行い、伝送効率の周波数特性の変化、距離特性を示す。次に、アンテナの位置を水平方向にずらして電力伝送実験を行い、伝送効率の変化を示す。

3.1. 無線電力伝送システムの伝送効率

本報告において、無線電力伝送の伝送効率 η は次の式で計算する。

$$\eta = \frac{P_D}{P_S} \quad (3.1)$$

ここで、 P_S は送信アンテナの入力電力（入射電力から反射電力を引いたもの）、 P_D は負荷抵抗での消費電力を表す。

本論文でのシステムでは電源と送信アンテナ側の整合は考えていないため、送信アンテナの入力電力は

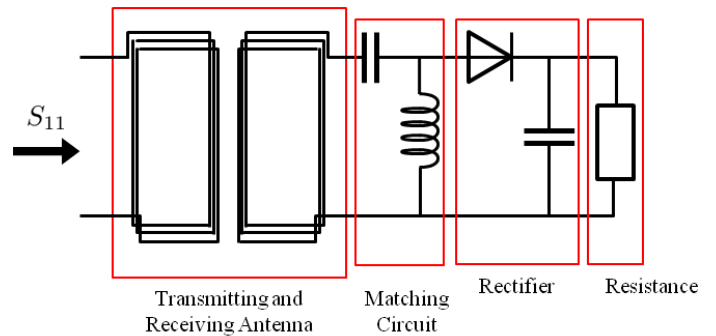


図 3.1：反射係数測定系

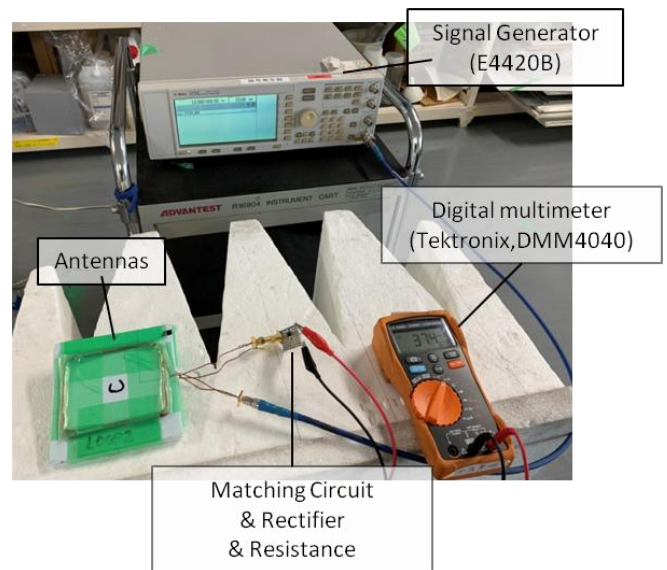


図 3.2：実験系

次の式で表される。

$$P_D = (1 - |S_{11}|^2) \times P_{inc} \quad (3.2)$$

ここで、 P_{inc} は送信アンテナの入射電力、 S_{11} は図 3.1 に示す測定系を用いて得られる送信アンテナでの反射係数を表す。

3.2. 無線電力伝送実験

試作した方形ループアンテナと受信回路から成る無線電力伝送システムの実験系を図 3.2 に示す。

信号発生器を用いて送信アンテナに 10 dBm の信号を入射し、デジタルマルチメータ (Tektronix, DMM4040) を用いて負荷抵抗にかかる直流電圧を測定することで負荷での消費電力を求めた。

また、送信アンテナでの反射係数を測定し送信アンテナへの入力電力を求め、式(3.2)を用いて伝送効率を求めた。

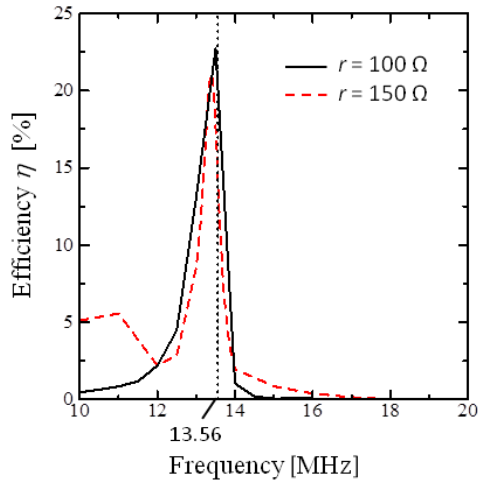


図 3.3 : 伝送効率-周波数特性

伝送効率の周波数特性を図 3.3 に示す。負荷抵抗 100,150 Ω のどちらの場合においても設計周波数 13.56 MHz で最大効率が得られた。最大効率は 25 % 未満に留まったのは、不整合損失や集中定数素子の損失、アンテナの導体損等が原因であると考えられる。

3.3. アンテナ間距離変更による影響

アンテナ間の距離をシステム設計時の 5 mm から 25 mm まで 5 mm 間隔で変化させ、周波数 13.56 MHz で電力伝送実験を行った。結果を図 3.4 に示す。

また、同様に距離を変化させたときの電力伝送実験を負荷抵抗 100 Ω, 周波数 10 MHz から 20 MHz まで 0.5 MHz 間隔で行った。結果を図 3.5 に示す。

13.56 MHz における伝送効率は $d = 5$ mm で最大であった。これは、アンテナ間距離が整合回路設計時の $d = 5$ mm から変化することで整合回路側からみた電源側のインピーダンス Z_1 が変化し、不整合損失が大きくなったためであると考えられる。

また、距離ごとに伝送効率の周波数特性を比較すると、アンテナ間距離 5 mm 以外の場合は 13.56 MHz 未満の周波数帯でピークが得られていることがわかった。これにより、アンテナ間距離が 10 ~ 25 mm の場合、13.56 MHz よりも低い周波数で整合が取れていると考えられる。

3.4. アンテナの位置ズレによる影響

負荷抵抗 100 Ω の回路を用いた伝送システムにおいて送信アンテナを固定し、受信アンテナを x 軸方向に 5 mm 間隔で 80 mm まで移動させそれぞれの位置で電

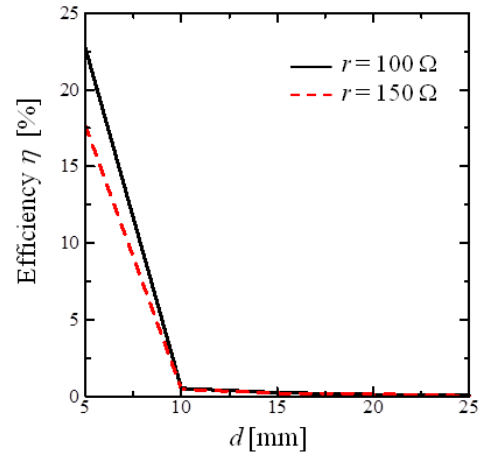


図 3.4 : 電力伝送効率-アンテナ間距離特性

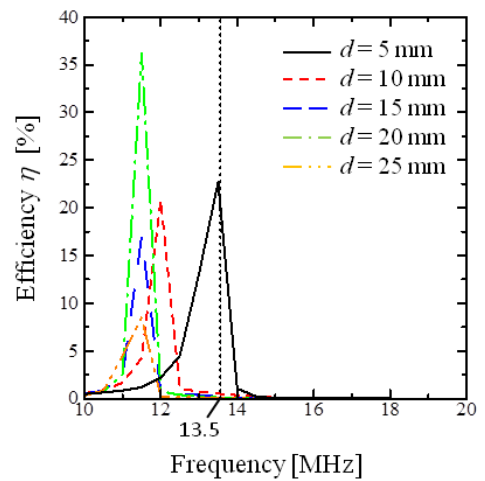


図 3.5 : アンテナ間距離別電力伝送効率 ($r = 100 \Omega$)

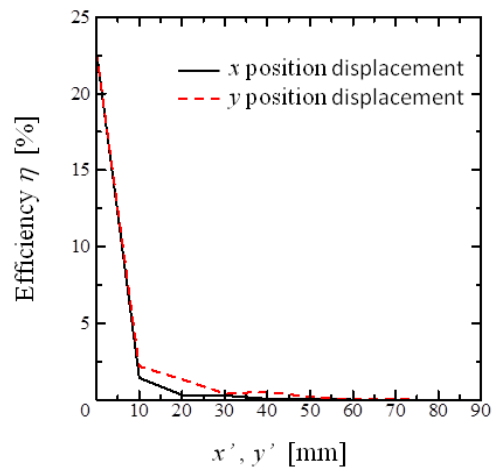


図 3.6 : 電力伝送効率-ズレ (x', y') 特性

力伝送効率を求めた。また、同様に送信アンテナを固定し、受信アンテナを y 軸方向に 5 mm 間隔で 90 mm まで移動させそれぞれの位置で電力伝送効率を求めた。 x 軸方向の移動量を x' 、 y 軸方向の移動量を y' とする。結果を図 3.6 に示す。

x 軸方向, y 軸方向のどちらにもズレが無い場合 ($x' = 0, y' = 0$)において伝送効率が最も大きく,ズレが大きいくほど伝送効率は小さくなった. これは, 厚さを変化させたときと同様に設計時の位置からアンテナを移動させたことで不整合損失が大きくなったことが原因であると考えられる.

また, 移動量が等しい場合 ($x' = y'$), y 軸方向へ移動させたときの方が比較的大きい効率が得られた.

作成したループアンテナは y 軸方向に長い長方形であり, 重なり合うアンテナの面積が y 軸方向へ移動させたときの方が x 軸方向へ移動させたときよりも変化が小さい. 重なり合う面積が大きいくほど送信アンテナのコイルで生じた磁束が受信アンテナのコイルを貫く面積も大きく, 受信アンテナに生じる電流が大きくなる. よって, 同距離移動させた場合は面積変化の小さな y 軸方向に移動させた場合の方が磁束が貫く面積も大きいことが, 比較的大きな効率が得られた一因であると考えられる.

4. まとめ

近傍界電磁結合を利用した無線電力伝送システムを作成し, その特性を実験的に明らかにした.

作成したループアンテナを用いた無線電力伝送システムの伝送効率を測定し, 送受信アンテナ間距離の変化, 対向させたアンテナの縦, 横方向のズレが設計周波数での伝送効率を減少させることが確認できた.

文 献

- [1] N. Tesla, "System of transmission of electrical energy," US0,645,576 (1900-03-20).
- [2] W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," IEEE Trans.Microw. Theory Tech., vol. 32, no. 9, pp. 1230-1242, Sep. 1984.
- [3] J. Murakami, F. Sato, T. Watanabe, H. Matsuki, S. Kikuchi, K. Harakaiwa, and T. Satoh, "Consideration on cordless power station- Contactless power transmission system," IEEE Trans. Magn., vol. 32, pp. 5017-5019, Sep. 1996.
- [4] K. Hatanaka, F. Sato, H. Matsuki, S. Kikuchi, J. Murakami, M. Kawase, and T.Satoh, "Power transmission of a desk with a cord-free power supply," IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 5, pp. 3328-3331, Sep. 2002.
- [5] Andre Kurs, Arsteidis Karalis, Robert Moffatt, John Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljagic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science Magazine, Vol.317, No.5834, pp.83-86, 2007.
- [6] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M.Soljagic, "Efficient wireless non-radiativemid-range energy transfer," Ann. Phys., vol. 323, pp. 34-48, 2008.
- [7] 袁巧微, 陳強, 澤谷邦男, "人体の影響を考慮した絵羽線と電磁界共振により無線電力伝送システムの伝送効率,"信学技報, AP2008-91, pp.95-99, 2008年9月
- [8] Qiaowei Yuan, Qiang Chen, Long Li, and Kunio Sawaya, "Numerical Analysis on Transmission Efficiency of Evanescent Resonant Coupling Wireless Power Transfer System," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.58, no.5, pp.1751-1758, May 2010.
- [9] 大尻勇氣, 丸山駿, 陳強, 袁巧微, "無線給電を用いた近傍界による無線電力伝送効率の改善", 伝送工学研究会資料, Vol.2014, No.568-3, December 2014.