

アンテナのインピーダンス整合の視点から見た共鳴方式の無線電力伝送

陳 強[†] 小澤 和紘[†] 袁 巧微^{††} 澤谷 邦男[†]

[†] 東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻 〒980- 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{††} 仙台電波工業高等専門学校 〒989- 3128 仙台市青葉区愛子中央 4-16-1

E-mail: chenq@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 近傍界結合による無線電力伝送の最大伝送効率を得るための送受信アンテナ設計法について、放射、導体損失、インピーダンスマッチングというアンテナ設計の観点から議論する。受信素子の負荷インピーダンスによって変化する伝送効率を最大化する最適負荷条件を検討し、伝送効率を最大とする最適な負荷の条件を導く。また、アンテナ導体損失、インピーダンス整合回路の損失による伝送効率の低下を数値シミュレーションにより明らかにする。

キーワード 無線電力伝送, アンテナ, 近傍界結合, 導体損失, インピーダンス整合

Effect of Impedance Matching on Efficiency of Wireless Power Transfer by Near-field Coupled Resonance

Qiang CHEN[†], Kazuhiro OZAWA[†], Qiaowei YUAN^{††}, and Kunio SAWAYA[†]

[†] Department of Electrical and Communication Engineering,
Graduate School of Engineering, Tohoku University

6-6-05 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980- 8579 Japan

^{††} Sendai National College of Technology,

4-16-1 Ayashi-chuo, Aoba-ku, Sendai 989- 3128 Japan

E-mail: chenq@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract A fundamental study is focused to investigate the power transmission efficiency of the wireless power transmission system by near-field coupling from a view point of antenna theory. Two types of antennas, dipole and loop antennas, are used as the transmitting antennas and receiving antennas for electrical near-field coupling and for magnetic near-field coupling, respectively. The relation is clarified between the power transmission efficiency and antenna geometry, antenna electrical size, impedance matching of the antennas, and ohmic loss in antennas and impedance matching circuits. Several observations have been obtained to demonstrate the influence on the power transmission efficiency from the impedance matching and ohmic loss in the wireless power transmission system by near-field coupling.

Key words Wireless Power Transmission, Wireless Power Transfer, Antennas, Near-field Coupling, Efficiency, Conjugate Impedance Matching

1. ま え が き

近年、無線通信技術や充電電池の技術の発展に伴い、様々な機器のワイヤレス化が進んでいる。しかし、充電時は有線を介さなければならず、真のワイヤレス化には至っていない。そのため、給電、充電の技術として、小型電子機器への充電、家電製品への給電、電気自動車の充電、小型医療機器への電力供給などの広い応用分野で、無線電力伝送技術が期待されている。

無線電力伝送技術は電波放射方式 [1]- [3]、電磁誘導方式 [4]、

[5]、そして電磁界共振方式 [6]- [14] と分類されている。電波放射方式は、電力を電磁波の遠方界を介して電力を伝送する。伝搬損失が伝送距離の 2 乗に比例して増大するため、長距離の伝送が可能であるが伝送効率が低いという欠点がある。電磁誘導方式は、近傍界の結合によって電力を伝送する。送受信アンテナの大きさにより電力伝送効率が変化するが、数ミリメートルから数メートルにも及ぶ高い伝送効率の無線送電が可能である。電磁界共鳴（共振）方式は、近年議論されてきた方式である。数メートルほどの伝送距離で高効率伝送の実現が可能であり、

軸ずれにも影響を受けにくいという利点があるというため、多くの技術領域で期待されている。

しかしながら、電磁界共振方式については、電力伝送の原理や最適な送受信素子の設計、金属、誘電体の効率への影響、人体への影響など不明な点が多い。当初発表された電力伝送システムモデルの等価回路の表現方法 [10] や、インピーダンス整合の方法 [9] などが示されているが、電力伝送に最適なアンテナの大きさの検討や、オーム損失が電力伝送に及ぼす影響などについて十分に検討されていないように思われる。

本稿では、電磁界共振方式を用いた場合、最大の電力伝送効率を得るために、分布常数の伝送線路理論と電磁界の数値シミュレーションにより、送受信アンテナの負荷インピーダンスの整合と電力伝送効率の関係を考察する。また、アンテナの導体損失及びインピーダンス整合回路の損失による伝送効率の低下を数値シミュレーションにより示し、実環境における無線電力伝送効率を向上するための要素について考察する。

2. 最大電力伝送効率と負荷インピーダンス整合

図 1 に示すような、送受信アンテナとして最も簡単な線状ダイポールアンテナを用いた無線電力伝送システムを考える。長さ l のダイポールアンテナは、 d の間隔で、 z 軸と平行に置かれている。また、送信アンテナの内部抵抗を Z_s とし、受信アンテナの負荷インピーダンスを Z_l とする。

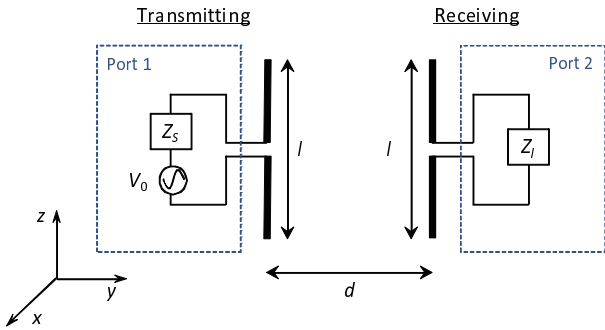


Figure 1 ダイポールアンテナを用いた無線電力伝送システム

電力伝送効率 η を以下の式で定義する。

$$\eta = \frac{P_l}{P_{in}} \quad (1)$$

ここで、 P_{in} は送信アンテナの入力電力、 P_l は受信アンテナの負荷による吸収電力であり、伝送電力である。この定義では、電力伝送効率は入力電力で規格化するため、送信アンテナのインピーダンス整合の影響を考慮せず、受信アンテナのインピーダンス整合の影響のみ議論することになる。

図 1 の無線電力伝送システムを図 2 に示すような 2 端子等価回路に置き換えることができ、この 2 端子回路の S パラメータを用いた電力伝送効率を次のように表現する。

$$\eta = \frac{P_l}{P_{in}} = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_l|^2)}{|1 - S_{22}\Gamma_l|^2 (1 - |\Gamma_{in}|^2)} \quad (2)$$

ここで、 Γ_l は負荷 Z_l における反射係数、 Γ_{in} は回路のポート

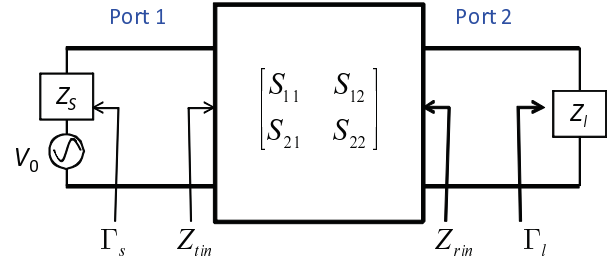


Figure 2 無線電力伝送システムの等価回路

1 を見た反射係数であり、それぞれ

$$\Gamma_l = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} \quad (3)$$

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_l}{1 - S_{22}\Gamma_l} \quad (4)$$

と定義される。ここでは、 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} はモーメント法によって計算される。また、 Z_0 は伝送線路の特性インピーダンス (50Ω) である。

式 (2) では、電力伝送効率 η は、負荷インピーダンス Z_l の関数となっているため、 η が最大値 η_{max} となるような負荷インピーダンス Z_{ol} を数学的に求めることができる。

二端子回路網の入出力を同時に共役整合をとるためには

$$\Gamma_l = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2} \quad (5)$$

$$\Gamma_s = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1} \quad (6)$$

を満たせばよい [15], [18]。ここで、

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 \quad (7)$$

$$C_1 = S_{11} - \Delta S_{22}^* \quad (8)$$

$$B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2 \quad (9)$$

$$C_2 = S_{22} - \Delta S_{11}^* \quad (10)$$

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \quad (11)$$

本研究では、送受信に同形のアンテナを用い、上記の条件を満たす最適負荷インピーダンス Z_{ol} は

$$Z_{ol} = Z_{tin}^* \quad (12)$$

となる [16], [17].

以下に、ダイポール長 $l = 15\text{cm}$ 、間隔 $d = 3\text{cm}$ として、数値シミュレーションの結果を示し、考察を行う。

負荷インピーダンスを数値的に走査することにより最大電力伝送効率 η_{max} とそれを実現するための最適負荷 Z_{ol} を求めた。

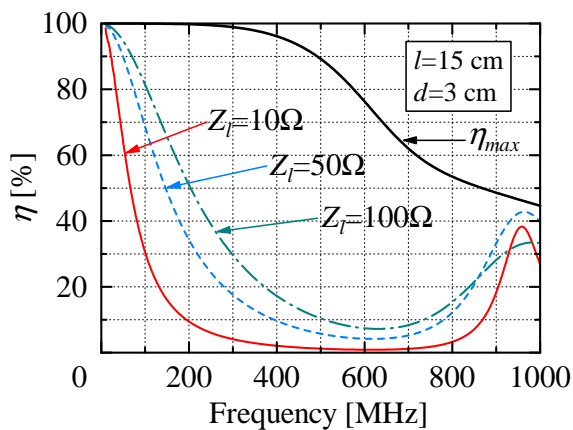


Figure 3 最適負荷 Z_{ol} をつけたときの電力伝送効率 η_{max}

図3に最大電力伝送効率 η_{max} の周波数特性を示す。比較のため、 $Z_l = 10, 50, 100 \Omega$ のときの電力伝送効率も同図にプロットされている。低周波領域、例えば200MHz（アンテナ長0.1波長、距離0.02波長）以下の領域では、送受信アンテナの放射電力は受信アンテナの負荷インピーダンスによる吸収電力（伝送電力）と比べると無視できるため、 η_{max} がほぼ100%となっている。周波数が高くなると、アンテナの放射電力が増加し、 η_{max} が減っていく。一方、最適負荷ではない $Z_l = 10, 50, 100 \Omega$ のときに、電力伝送効率 η は、DC付近では高いが、周波数がDCより少し高くなると急速に減少する。DC付近は、電磁誘導方式を用いる周波数領域である。一方、1000MHz付近は、受信アンテナのインピーダンス整合により電力伝送効率が上昇するため、電磁放射方式を用いる領域となる。

図4と図5に、数値的な走査で求められた最適負荷 Z_{ol} の実部、虚部の周波数特性と、最適負荷 Z_{ol} を取り付けた場合、送受信アンテナの入力インピーダンスの共役 Z_{in}^*, Z_{rin}^* の実部、虚部の周波数特性を比較する。数値的に求めた電力伝送効率を最大化する最適負荷 Z_{ol} は、 $Z_{ol} = Z_{rin}^*$ を満たしていることが確認でき、式(12)の結果を証明した。ここで、 $Z_{rin} \neq Z_{tin}$ となっているが、これは、波源の内部インピーダンスを $Z_S = 50$ としていることが原因である。これらの結果から、伝送効率を最大化する条件は送受信アンテナと送受信側の負荷インピーダンスとの共役整合であることが分かる。そのため、近傍界領域の「共鳴」方式による電力伝送は、送受信アンテナの相互結合を考慮した「インピーダンスの共役整合」条件を満たすことにより実現されると言える。

ここで、アンテナの導体損失を無視したため、周波数が低ければ、またはアンテナが小さければ、伝送効率が高くなるという都合のよい結論になったが、アンテナの導体損失を考慮し、より現実な結論を出すべきである。

3. 導体損失を考慮した電力伝送効率

最適負荷を装荷した場合、ダイポールアンテナモデルの導体損失を考慮した電力伝送効率の関係を図6、7に示す。

導体の導電率が小さくなるほど、導体自体で消費される熱損失で伝送効率が低下している。また、アンテナ間距離が $d = 0.05 \lambda$

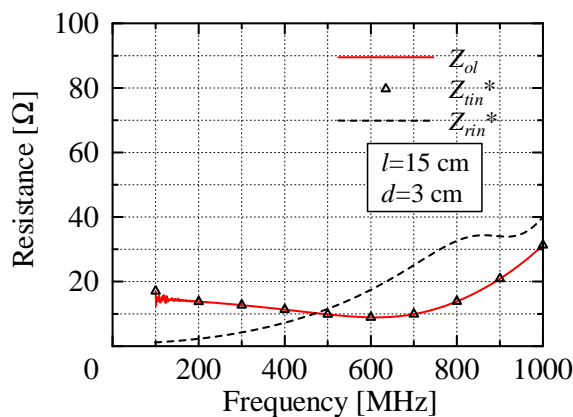


Figure 4 最適負荷 Z_{ol} と送受信素子の入力インピーダンスの実部比較

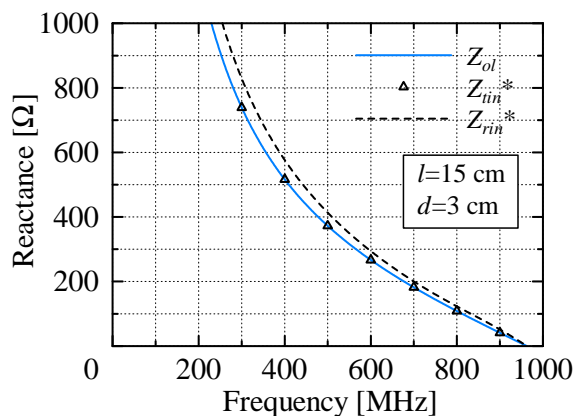


Figure 5 最適負荷 Z_{ol} と送受信素子の入力インピーダンスの虚部比較

と比べ、 $d = 0.1 \lambda$ と大きくなると、電力伝送効率が著しく低下している。これはアンテナ間距離が小さいほど結合が強く、損失電力に比べ伝送電力の割合が大きいためと考えられる。

導体損失を考慮したことにより、電力伝送効率が低下したことが確認できたが、それでも電気長の小さい小形アンテナが有利である。しかしながら、小形アンテナに装荷する最適負荷は、大きなりアクタンス成分が必要のため、現実では、さらに最適負荷の損失を考慮する必要がある。

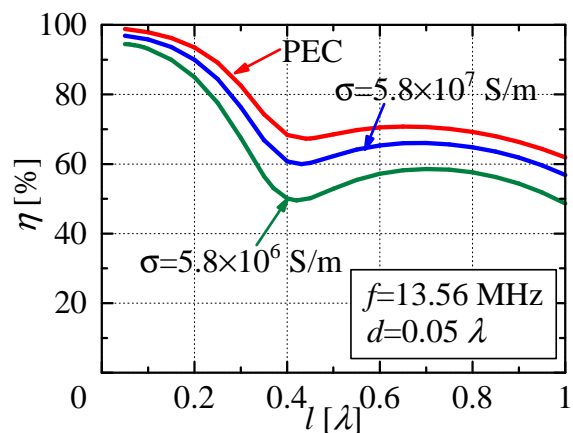


Figure 6 $d = 0.05 \lambda$ アンテナ導体損失を考慮したダイポールアンテナ長と電力伝送効率

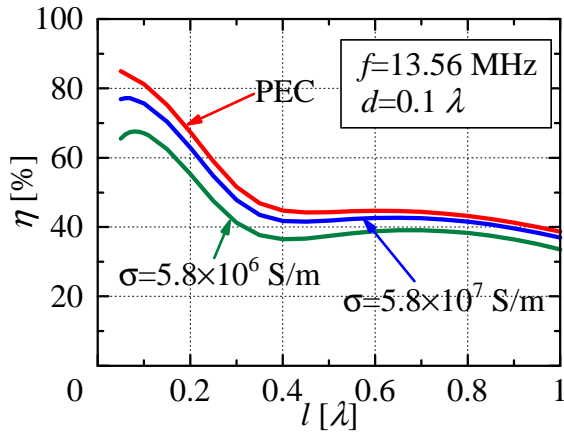


Figure 7 $d = 0.1\lambda$ アンテナ導体損を考慮したダイポールアンテナ長と電力伝送効率

4. 整合回路の損失を考慮した電力伝送効率

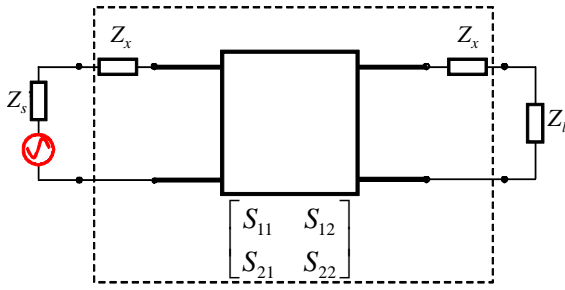


Figure 8 2-port equivalent circuit including matching circuit.

ここでは、整合回路の損失を考慮した電力伝送効率の関係を検討する。整合回路の Q 値は以下のように定義される。

$$Q = \frac{|X|}{R} \quad (13)$$

ここで、 X はインピーダンスの虚部、 R は X がもつ損失抵抗を表している。小形アンテナの最適負荷インピーダンス Z_{ol} は、 R_{ol} に比べて $\frac{|X_{ol}|}{Q}$ が大きく、負荷の損失を考慮した最適負荷インピーダンスの検討が必要となる。

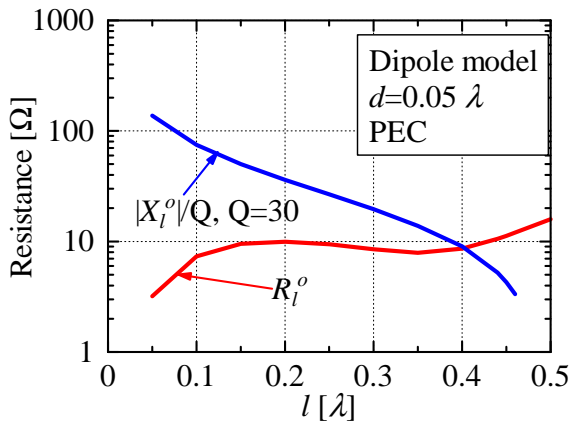


Figure 9 回路素子の損失と最適負荷インピーダンスの実部

整合回路の損失を考慮した最適負荷インピーダンスを Z_l^o とを以下に計算する。

1. Z_l への伝送効率を最大化する最適負荷インピーダンス Z_{ol} を送受信アンテナの S パラメータから計算。
2. X_{ol} に損失抵抗 $\frac{|X_{ol}|}{Q}$ を付加し、図 8 に示すように Z_x を回路に挿入。

$$Z_x = \frac{|X_{ol}|}{Q} + jX_{ol} \quad (14)$$

3. Z_x をアンテナの一部とみなした S パラメータ \tilde{S} を算出。 \tilde{S} を用いて Z_l^o の最適負荷インピーダンス Z_l^o を算出。

以上の方法で求めた Z_l^o を整合回路の損失を考慮した最適負荷インピーダンスとし、 Z_l^o に吸収される電力の伝送効率を負荷の損失を考慮した伝送効率とした。また、 Z_l^o は虚部成分 X_l^o を持つが、実部 R_l^o に比べ小さいため、 X_l^o での損失を無視するものとする。

このように、整合回路の損失を考慮した電力伝送効率は図 10, 11 に示している。整合回路損失を考慮するとアンテナが小さいほど伝送効率が大きく減少しており、アンテナ間距離が大きいほど大きく減少していることが確認できる。長距離伝送には必ずしも小形アンテナがよくなく、最適なアンテナ長、場合によって大きいアンテナが必要となることが分かった。また、アンテナ導体損失に比べ、整合回路の損失の影響の方が大きいことが確認できる。

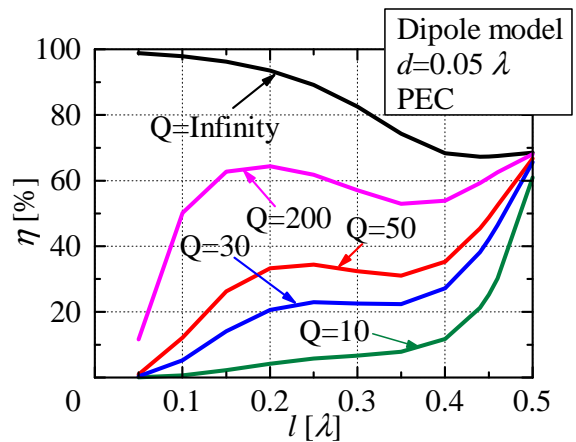


Figure 10 $d = 0.05\lambda$ のとき、整合回路損失を考慮したダイポールアンテナ長と電力伝送効率

さらに、アンテナ導体損と整合回路の損失の両方を考慮した電力伝送効率を検討した。結果を図 12 に示している。電力伝送効率が大きく低下しており、アンテナは小形であるほど効率が劣化していることが分かった。そのため、比較的長距離でも高い電力伝送効率を実現するためには、整合回路の Q 値を上げることが非常に重要である。

5. まとめ

本稿では、分布常数の伝送線路理論と電磁界の数値シミュレーションにより、無線電力伝送用の送受信アンテナの負荷インピーダンスの整合と電力伝送効率の関係を考察した。その結

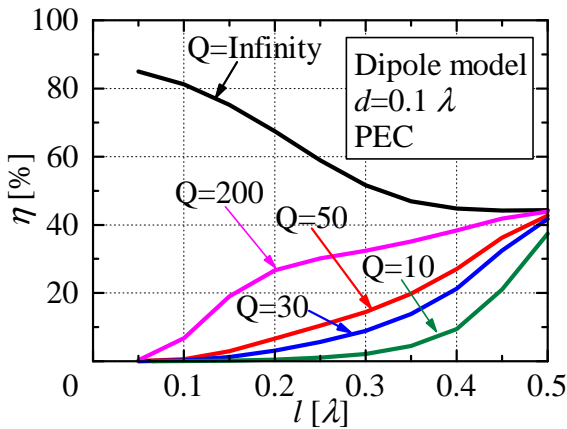


Figure 11 $d = 0.1\lambda$ のとき、整合回路損失を考慮したダイポールアンテナ長と電力伝送効率

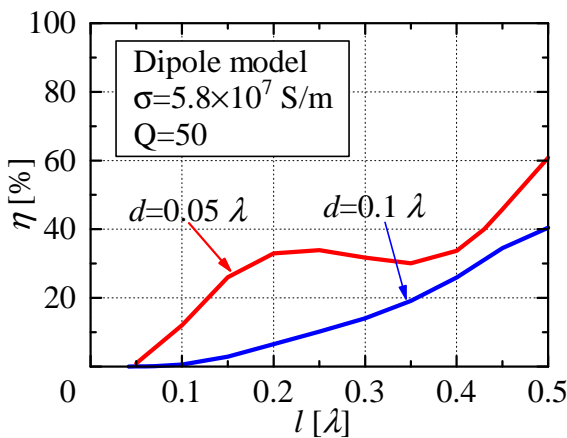


Figure 12 アンテナ導体損失と整合回路損失を考慮したダイポールアンテナによる電力伝送効率

果、近傍界結合方式による無線電力伝送は、共鳴（共振）というコンセプトを利用せず、送受信アンテナ間の相互結合を考慮した送受信アンテナのインピーダンス整合をすれば、最大電力伝送効率を得ることができ、高効率の近傍界による無線電力伝送はアンテナと負荷インピーダンスとの共役整合を行うことが条件であることが分かった。また、数値シミュレーションの結果から、比較的長距離でも高い電力伝送効率を実現するためには、アンテナの導体損失を減らし、整合回路の Q 値を上げることが非常に重要であり、アンテナの最適なサイズは、伝送距離、アンテナの導体損失と整合回路の損失の程度から決められることが分かった。

References

- [1] 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.
- [2] H. Matsumoto, "Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan," IEEE Microw. Mag., vol. 3, no. 4, pp. 36-45, Dec. 2002.
- [3] C. T. Rodenbeck and K. Chang, "A limitation on the small-scale demonstration of retrodirective microwave power transmission from the solar power satellite," IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 47, no. 4, pp. 67-72, Aug. 2005.
- [4] 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.
- [5] 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. 3329-3331, Sep. 2002.
- [6] Andre Kurs, Arsteidis Karalis, Robert Moffatt, John Ioannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science Magazine, Vol.317, No.5834, pp.83-86, 2007.
- [7] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," Ann. Phys., vol. 323, pp. 34-48, 2008.
- [8] 袁巧微, 陳強, 澤谷邦男, "人体の影響を考慮したエバネセント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.
- [9] 丸地智博, 稲垣直樹, 藤井勝之, "誘導電界を用いた新しい無線接続方式," 信学技報, AP2009-84, pp.29-34, 2009年9月.
- [10] 平山裕, 小澤俊之, 平岩洋介, 菊間信良, 榊原久二男, "無線電力伝送の共鳴モードと等価回路表現," 信学技報, AP2009-85, pp.45-40, 2009年9月.
- [11] 袁巧微, 陳強, 澤谷邦男, "Efficiency Improvement of Wireless Power Transfer System Using Resonant Near-Field Coupling," 信学技報, A · P2009-87, pp.47-52, 2009年9月.
- [12] 常川光一, "屋内コビキタス無線アクセスシステムにおいて相互インピーダンス補償による効率改善に関する検討" 信学技報, AP2009-88, pp.53-56, 2009.
- [13] 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.
- [14] Y. Tak, J. Park, and S. Nam, "Mode-Based Analysis of Resonant Characteristics for Near-Field Coupled Small Antennas," IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol. 8, pp. 1238-1241, Nov. 2009.
- [15] Shepard Roberts, "Conjugate-Image Impedances," Proc.I.R.E and Waves and Electronics, vol. 34, pp. 198-204, Apr. 1946.
- [16] 陳強, 小澤 和紘, 袁巧微, 澤谷邦男, "近傍無線電力伝送のアンテナ設計法についての検討," 無線電力伝送時限研究専門委員会(通算 30 回) 研究会, WPT2010-05, pp.6-9, 2010年10月.
- [17] 陳強, 小澤 和紘, 袁巧微, 澤谷邦男, "近傍界結合による無線電力伝送のアンテナ設計法についての検討," 信学技報, AP2011-9, pp.21-26, 2011年5月. (注1)
- [18] Qiaowei Yuan, Qiang Chen, Kunio Sawaya, "Transmitting Efficiency of WPT System Calculated by S-Parameters," 無線電力伝送時限研究専門委員会(通算 36 回) 研究会, WPT2011-18, 2011年10月. (注2)

(注1) : <http://www2.nict.go.jp/w/w122/satcom/wpptg/workshop/30th20100727.html>

(注2) : <http://www2.nict.go.jp/w/w122/satcom/wpptg/workshop/36th201110.html>