

近傍無線電力伝送のアンテナ設計法についての検討

小澤 和紘[†] 陳 強[†] 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: {kaz, chenq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 電磁結合方式による最大伝送効率を得るためのアンテナ設計についてインピーダンスマッチングという観点から着目し、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ている。その結果、伝送効率を最大とする最適な負荷の条件を確認することができた。

キーワード 無線電力伝送, アンテナ, 整合

1. まえがき

無線電力伝送技術は、携帯型電気機器や、電気自動車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放射を用いた電磁放射方式 [1]-[6]、電磁誘導による電磁誘導方式 [7],[8]、そして近傍界を利用した電磁結合方式 [9],[10] があると言われている。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、かつ、電磁放射方式よりも高効率伝送が可能であるため、注目されている [11]-[17]。しかしながら、電磁結合方式は、最大伝送効率を得るための伝送路、送受信アンテナ、及び整合回路の最適設計にまだ不明な点が残っている。

本研究では、電磁結合方式における最大伝送効率を得るためのアンテナ設計について検討する。特に、近傍界における受信アンテナの負荷インピーダンスの整合によって電磁結合を最大化し、伝送効率を最大にすることができると考え、負荷インピーダンスと伝送効率の関係に着目する。具体的には、電磁界数値シミュレーションにより、受信アンテナの負荷インピーダンスを変化させ、送受信アンテナ間の電力伝送効率の変化を求め、伝送効率を最大化するための最適な負荷の条件について検討する。

2. 負荷インピーダンスによる電力伝送効率の解析

2.1 解析モデル

本研究では、電力伝送効率を最大化するためのアンテナ負荷の条件について検討することを目的とするため、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る。電力伝送システムの解析モデルを図 1 に示す。長 $l = 15\text{cm}$ のダイポールアンテナは、 d 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

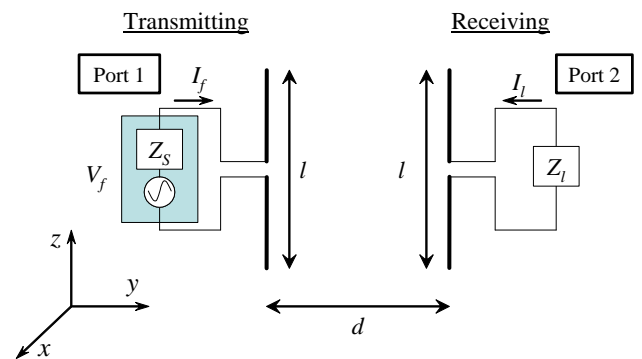


図 1 解析モデル

抵抗を $Z_S = 50\Omega$ とし、受信アンテナの負荷インピーダンスを Z_l とする。解析手法としてモーメント法が用いられる。

2.2 電力伝送効率の算出

電力伝送効率 η を以下の式で計算する。

$$\eta = \frac{P_D}{P_S} \quad (1)$$

ここで、 P_S は送信アンテナの入力電力（送信アンテナの入射電力から反射電力を引いたもの）、 P_D は受信アンテナの受信電力（受信アンテナの負荷に吸収される電力）を表している。

送信電力 P_S は

$$P_S = \frac{\text{Re}[V_f I_f^*]}{2} \quad (2)$$

で計算される。 V_f と I_f はそれぞれ送信アンテナの入力電圧と入力電流を表し、* は共役を表している。一方、受信電力 P_D は

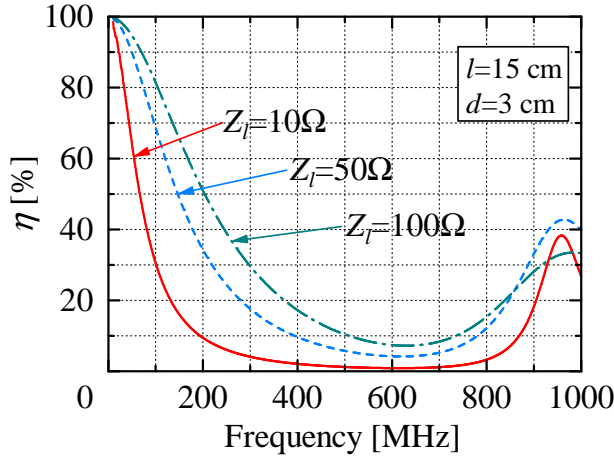


図 2 電力伝送効率の周波数特性

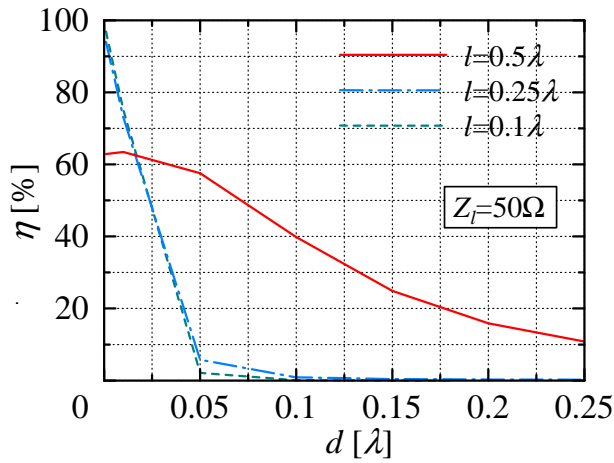


図 3 電力伝送効率の距離特性

$$P_D = \frac{|I_l|^2 R_l}{2} \quad (3)$$

で計算される．ここで、 I_l は受信アンテナの負荷を流れる電流、 R_l は負荷インピーダンス Z_l のレジスタンス成分を表している．

2.3 解析結果

アンテナ長 $l = 15\text{cm}$ 、アンテナ間距離 $d = 3\text{cm}$ と固定し、負荷 Z_l を 10Ω 、 50Ω 、 100Ω と変化させたときに、電力伝送効率 η の周波数特性の数値解析結果を図 2 に示す．また、図 3 には $Z_l = 50\Omega$ 、アンテナの電気長を固定したときの電力伝送効率の距離特性を示す．図 2 から、電力伝送効率 η の周波数特性が負荷のインピーダンス Z_l によって異なり、負荷 Z_l が伝送効率 η に影響を与えていることが確認でき、さらに電力伝送効率が低周波数で高効率となることが読み取れる．低周波数で高効率となるのは、アンテナの電気長が短くなり放射しなくなること、アンテナ間の距離の電気長が短くなり電氣的に近づくこと、アンテナの導体損失が考慮されていないことだと考えら

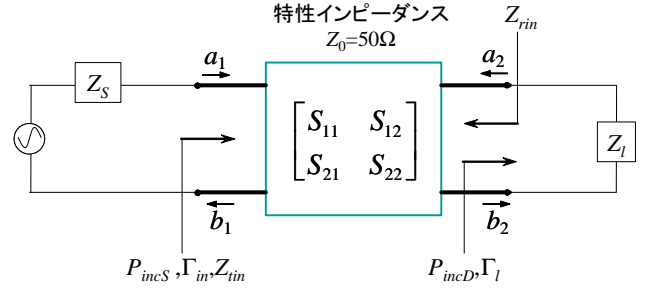


図 4 ダイポールアンテナによる送受信素子のモデル

れる．また、 1GHz 付近で極大となっている理由はアンテナ長 $l = 15\text{cm}$ が 1GHz の半波長であり、 50Ω 付近でインピーダンスマッチングがとれたためだと考えられる．しかし、図 3 よりアンテナ長が半波長のダイポールアンテナの電力伝送効率の距離特性は距離が離れているときは他のサイズのアンテナ ($l = 0.25\lambda$, 0.1λ) より効率が高かったが、近距離になるにつれて効率が 60% 付近に収束していることが分かる．これは半波長ダイポールアンテナが入射電力の一部を放射してしまっていることが原因であると考えられる．他のサイズのアンテナ ($l = 0.25\lambda$, 0.1λ) の伝送効率の距離特性はほぼ同じ特性を示しており、放射抵抗も小さいため近距離でほぼ 100% の電力が伝送されていると考えられる．

3. 最適負荷 Z_{ol} による電力伝送効率 η_{max}

3.1 S パラメータによる伝送効率最大値の算出方法

本節では負荷のインピーダンス Z_l によって変化する電力伝送効率 η の最大値 η_{max} を求めることを試みた． η_{max} を算出するためには、S パラメータによる伝送効率の算出式を導いた．

図 4 に示すように、送受信アンテナを 2 端子回路に置き換えて表すことができ、この 2 端子回路の S パラメータを用いた伝送効率の算出式を次のように表す．

$$\eta = \frac{P_D}{P_S} = \frac{-a_2^* a_2 + b_2^* b_2}{a_1^* a_1 - b_1^* b_1} \quad (4)$$

$$= \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_l|^2)}{|1 - S_{22}\Gamma_l|^2 (1 - |\Gamma_{in}|^2)} \quad (5)$$

ここで、 Γ_l は負荷 Z_l における反射係数、 Γ_{in} は送信側からの入射電力に対する反射係数である． Γ_l 、 Γ_{in} は次の式で定義される．

$$\Gamma_l = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} \quad (6)$$

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_l}{1 - S_{22}\Gamma_l} \quad (7)$$

S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} はモーメント法のシミュレーション

によって計算されたSパラメータであり、また Z_0 は伝送線路の特性インピーダンス ($Z_0 = 50\Omega$) である。式 (4) の P_S, P_D はともに式 (1) の P_S, P_D と同様、送信素子の入力電力、受信電力を表しており、図 4 の P_{incS}, P_{incD} との関係は

$$P_S = (1 - |\Gamma_{in}|^2) P_{incS} \quad (8)$$

$$P_D = (1 - |\Gamma_l|^2) P_{incD} \quad (9)$$

となる。式 (5) を用いて計算した電力伝送効率と式 (1) を用いて計算する電力伝送効率は同一である。

Sパラメータによる電力伝送効率の算出式 (式 (5)) を用いた電力伝送効率の最大値 η_{max} の算出の方法について述べる。電力伝送効率が最大値 η_{max} をとるときの負荷を最適負荷 Z_{ol} と表す。式 (5) は、モーメント法のシミュレーションによって得られるSパラメータと負荷インピーダンス Z_l から算出される Γ_l (式 (6)) を代入することで伝送効率が得られる。そのため、シミュレーションによって得られたSパラメータを代入した式 (5) に、絶対値1の範囲で値を小刻みに変えながら Γ_l を代入し、算出した効率を比較することで、 η_{max} を得ることができる。また、効率が最大となるときの Γ_l から最適負荷 Z_{ol} を算出でき、以上の作業を全ての周波数で行うことで、各周波数における最大効率 η_{max} と最適負荷 Z_{ol} を得ることができる。

以上がSパラメータによる電力伝送効率の算出方法と電力伝送効率の最大値 η_{max} の算出の方法である。式 (5) を η_{max} の算出に用いた理由としては、 Z_l を反射係数 Γ_l に置き換えることができるためである。負荷のインピーダンス Z_l によって変化する伝送効率 η の最大値 η_{max} を算出するため、様々な負荷を代入し比較する方法を考えたが、インピーダンスは複素数で実部、虚部おのおのが0から ∞ と範囲が広く、代入する方法が困難である。しかし、式 (5) を用いることで、 Z_l を反射係数 Γ_l に置き換えることができ、 Γ_l は絶対値1の範囲でしか値を取らないので、伝送効率を最大化する最適負荷インピーダンスを求めることが可能となるからである。

3.2 解析結果

図5は最適負荷 Z_{ol} による電力伝送効率 η_{max} の周波数特性を、図6と図7は最適負荷 Z_{ol} の実部、虚部の周波数特性と、各周波数において最適負荷 Z_{ol} をとりつけた場合の送受信素子の入力インピーダンスの共役 Z_{tin}^*, Z_{rin}^* の実部、虚部の周波数特性の比較を示し、図8はアンテナサイズにおける最大電力伝送効率 η_{max} の距離特性を表している。

図5より、 η_{max} は $Z_l = 10, 50, 100\Omega$ のときの効率と

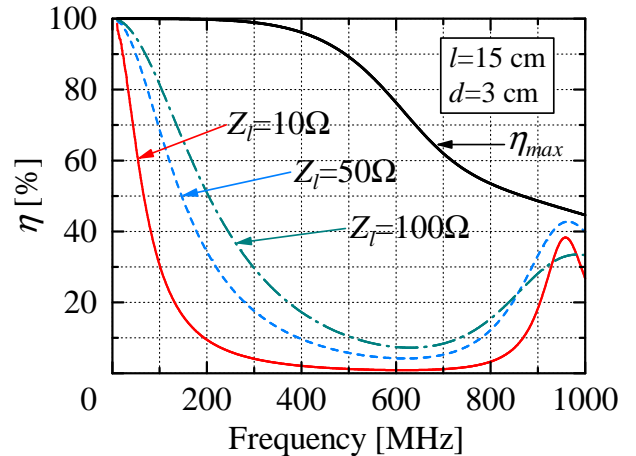


図5 最適負荷 Z_{ol} をつけたときの電力伝送効率 η_{max}

比べて、非常に高効率な結果となり、また η_{max} は高周波数に向かうにつれて減衰し、アンテナの共振周波数による極大をとらなかった。図3ではアンテナのサイズによって極端に結果が異なったが、 η_{max} による距離特性である図8は、アンテナのサイズによらず概ね同様の特性となった。また、結果からも分かるようにアンテナは小さいほど、高効率となることも確認できた。

最適負荷 Z_{ol} を最適負荷 Z_{ol} をとりつけた場合、送受信素子の入力インピーダンス Z_{tin}, Z_{rin} と比較した図6, 7の結果によると、伝送効率を最大化する最適負荷 Z_{ol} は $Z_{ol} = Z_{tin}^*$ となることが確認できる。ここで、 $Z_{tin} \neq Z_{rin}$ となったのは $Z_l \neq Z_S$ だからである。アンテナ間距離が非常に小さい近傍界にシミュレーションであり、カップリングの影響から Z_{tin} は Z_l の、 Z_{rin} は Z_S の影響を受けるため、 $Z_l \neq Z_S$ である本解析モデルでは $Z_{tin} \neq Z_{rin}$ となる。

4. まとめ

本論文では線状ダイポール間の電力伝送を問題として、モーメント法を用いて、電力伝送効率を最大化するアンテナの設計、特に整合について検討した。その結果、電力伝送効率 η は受信アンテナの負荷インピーダンスによって変化的ること、アンテナの負荷インピーダンスの整合が取れた場合、伝送効率が上昇すること、伝送効率を最大化する最適負荷の条件は負荷インピーダンスが送信アンテナ入力インピーダンスと共役整合であることが確認された。また、伝送効率の距離特性はアンテナサイズによらずほぼ同じ特性となるが、アンテナは小形であるほど効率が高いことも確認できた。

今後、数式的な最適負荷 Z_{ol} の算出、アンテナの種類と効率の関係、アンテナの導体損の影響、送信素子での反射を考慮した電力伝送効率等、検討していきたいと考えている。

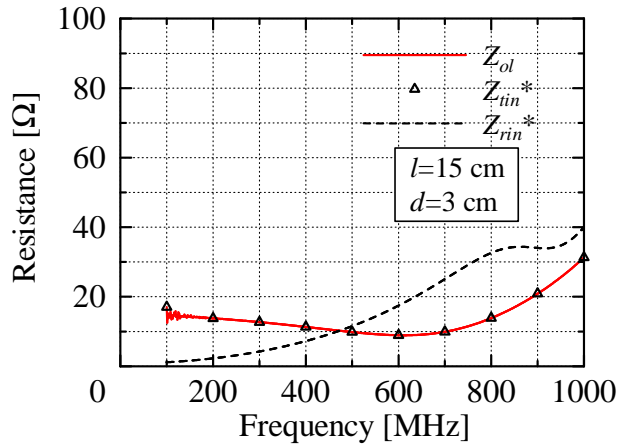


図6 最適負荷 Z_{ol} と送受信素子の入力インピーダンスの実部比較

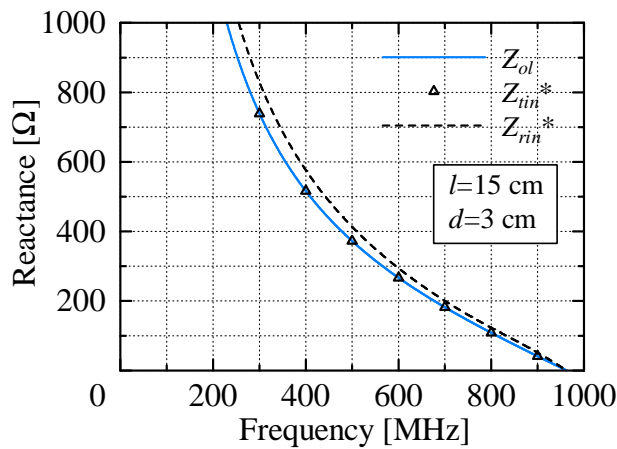


図7 最適負荷 Z_{ol} と送受信素子の入力インピーダンスの虚部比較

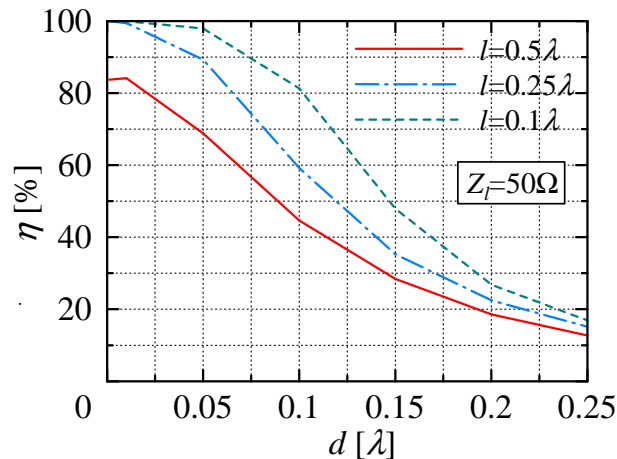


図8 η_{max} の距離特性

文 献

- [1] N. Tesla, "System of transmission of electrical energy," US0,645,576 (1900-03-20).
- [2] N. Tesla, "Apparatus for transmission of electrical energy," US0,649,621 (1900-05-15).
- [3] N. Tesla, "Art of transmitting electrical energy through the natural mediums," US0,787,412 (1905-04-18).
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," Ann. Phys., vol. 323, pp. 34-48, 2008.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 常川光一, "屋内ユ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.
- [16] 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.
- [17] 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.