

# 近傍界結合による無線電力伝送の数値解析

柴田 岳, 陳 強, 澤谷 邦男 (東北大学大学院工学研究科)

概要: 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の検討を行った. 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に導く. 導波管のカットオフ周波数で伝送を行うことにより, 放射ではなく近傍界結合を用いて電力伝送を行っていることを示す. また, MIT で用いられたモデルと比較し, 導波管モデルの妥当性を示す.

キーワード: 無線電力伝送, 導波管アンテナ, インピーダンス整合.

## 1. まえがき

近年, 無線通信技術や充電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, 充電の技術として無線電力伝送技術が期待されている.

無線電力伝送技術には電波放射方式 [1]-[6], 電磁誘導方式 [7], [8], そして電磁界共振方式 [9]-[17] があると言われている. 電波放射方式は, 電力を放射電力に変換し, 遠方界を介して電力を伝送する. 伝送距離は長いが伝送効率が低いという欠点がある. 宇宙太陽光発電構想の伝送方式として期待されている. 電磁誘導方式は, 送信コイルが発生する磁束の変化を利用し, 受信コイルに電力を伝送する. コイルの大きさにより伝送距離が変化するが, 伝送距離は短く, 伝送効率は高い. 民生分野では, 小型コイルを用いた電動歯ブラシなどへの充電に実用化されている. 電磁界共振方式は, 2006 年に MIT の研究グループが発表した新方式で, 近傍界に発生する電磁界で送受信素子を共振させて電力を伝送する. 数 m ほどの伝送距離で高効率伝送が可能であり, 軸ずれにも影響を受けにくいといわれているため, 多くの技術領域で期待されている.

特に, 電磁界共振方式は新しい方式であるため, 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. 現在では, MIT の研究グループが発表した電力伝送システムモデルの等価回路の表現方法 [13] や, インピーダンス整合の方法 [12] などが示されている. しかし, 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. 線状アンテナに関しては, インピーダンス整合時の電力伝送システムの特長, アンテナ導体の損失や負荷の損失の影響の点から研究されている [18]. 本論文では MoM(Method of Moment) による数値解析を行い, 開口導波管を用いて同様の検討を行う.

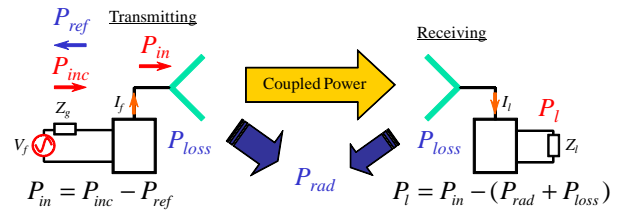


図 1: 近傍界の無線電力伝送における電力の流れ

## 2. 電力伝送効率の算出

### 2.1 電力伝送効率

電力伝送効率  $\eta$  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

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

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.

### 2.2 S パラメータによる電力伝送効率の算出

図 2 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.

$$\eta = \frac{P_D}{P_S} = \frac{-a_2^* a_2 + I_2^* b_2}{a_1^* a_1 - b_1^* b_1} \quad (4)$$

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

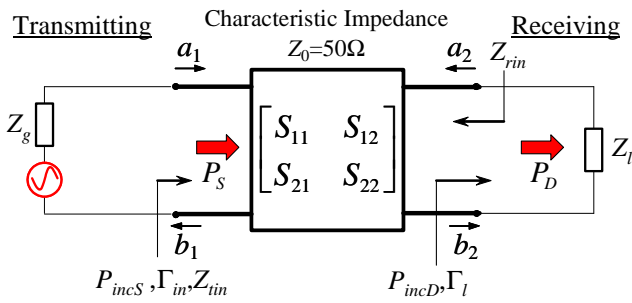


図 2: 送受信素子の二端子回路網

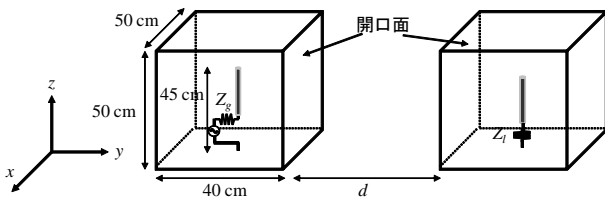


図 3: 開口アンテナとして導波管を用いた無線電力伝送

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

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

### 3. 解析モデル

本研究ではアンテナとして導波管を用いる。導波管のカットオフ周波数よりも低い周波数で電力伝送を行うことで、放射ではなく近傍界結合により電力伝送を行っていることを示す。伝送システムの解析モデルを図 3 に示す。

図 3 において導波管は  $50 \times 40 \times 50$  cm,  $d$  間隔で、 $z$  軸と平行に置かれている。このアンテナ開口  $50$  cm に対してカットオフとなる周波数は  $300$  MHz 以下であり、用いる周波数帯は  $1 \sim 30$  MHz である。導波管の中心部にモノポールアンテナを設置し、給電は  $1$  V で行う。モノポールの半径は  $1$  cm で導波管の壁の厚さは  $1$  mm である。導波管とモノポールの素材は断りがない限り PEC (Perfect Electric Conductor) とする。送信素子の内部抵抗を  $Z_g = 50 \Omega$  とし、受信アンテナの負荷インピーダンスを  $Z_l$  とし、負荷インピーダンスもまた負荷の最適条件である  $Z_l = Z_{in}^*$  を常に満たしているものとする。解析手法としてモーメント法が用いられる。

### 4. 計算結果

#### 4.1 最適負荷を用いたときの電力伝送効率

アンテナ間距離  $d = 1, 2, 3$  m として、最適負荷を用いたときの伝送効率の周波数特性を図 4 に示す。

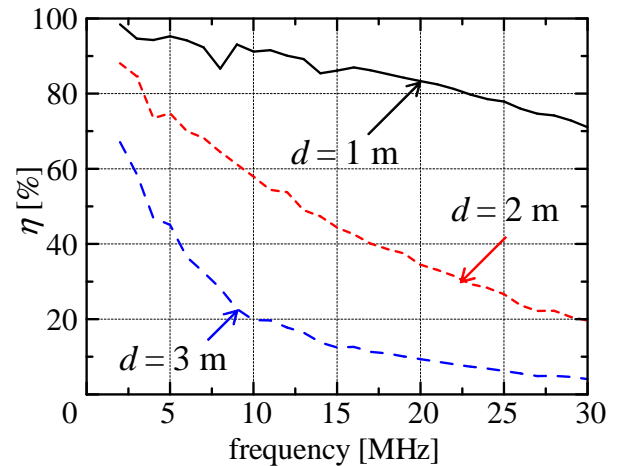


図 4: 最適負荷を用いたときの伝送効率の周波数特性

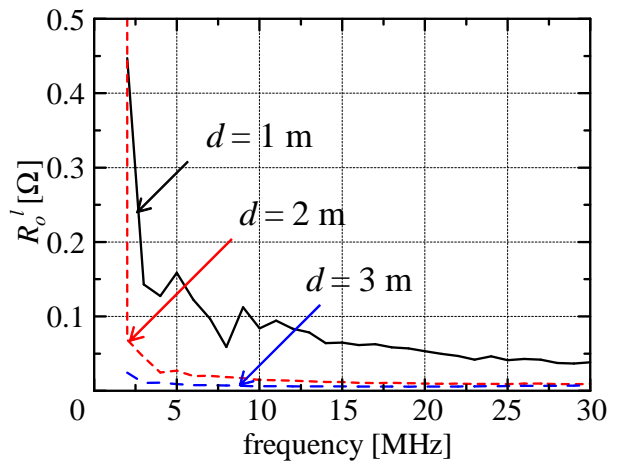


図 5: 最適負荷の実部の周波数特性

周波数が高くなるにつれて効率は低下していることがわかる。また、距離が遠くなるほど伝送効率の減衰が早いことが確認できた。そのときの最適負荷の周波数特性を図 5, 6 に示す。虚部は距離  $d$  における大きな変化はなく、実部も虚部も周波数が高くなるにつれて減衰した。

次に MIT により提案されたモデルとの比較を行う。MIT が提案したモデルを図 7 に示す。用いる周波数は  $9.9$  MHz である。ループアンテナの半径は  $25$  cm で、コイルは半径  $30$  cm, 高さは  $20$  cm, 巻き数は  $5.25$  となっている。ループとコイルに用いるワイヤの素材は銅であり、ワイヤ半径は  $3$  mm である。

導波管モデルの最適負荷を用いたときの伝送効率を MIT のモデル [9] と比較したものを図 8 に示す。導波管モデルは周波数を  $10$  MHz で解析を行った。導波管モデルは MIT のモデルよりも高効率な伝送を実現している。また、そのときの最適負荷の距離特性を図 9, 10 に示す。距離による変化はほとんどないことが確認できた。

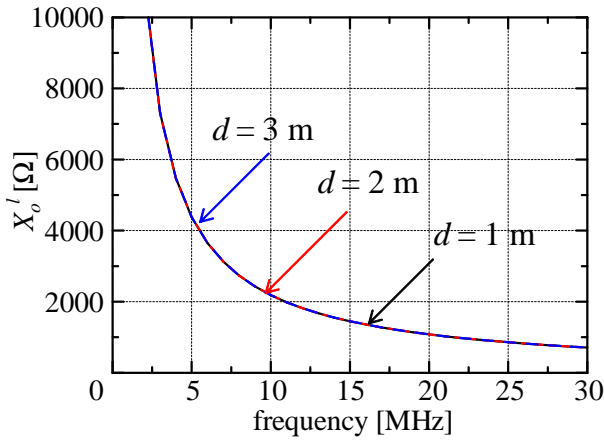


図 6: 最適負荷の虚部の周波数特性

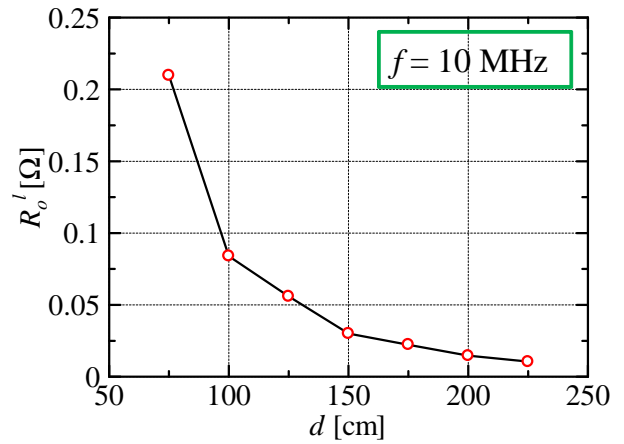


図 9: 最適負荷の実部の距離特性

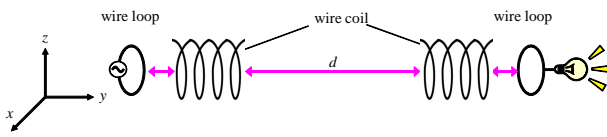


図 7: MIT モデル [9]

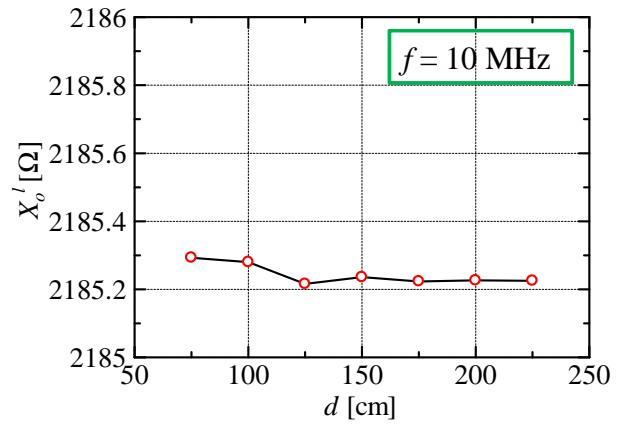


図 10: 最適負荷の虚部の距離特性

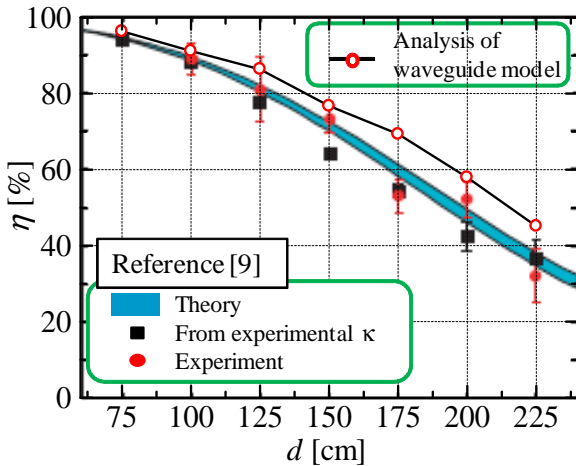


図 8: MIT モデルとの比較

#### 4.2 銅損を考慮した電力伝送効率

アンテナに銅損を入れた伝送効率の周波数特性を図 11 に示す。アンテナ間距離  $d$  は 1 m で解析を行った。

銅損を入れると伝送効率は低下するが値は安定した。周波数が高くなるほど銅損の影響が大きく伝送効率は低下したが、低周波では高効率を実現した。そのときの最適負荷の周波数特性を図 12, 13 に示す。最適負荷において銅損による大きな変化は見られなかった。

次に銅損を入れた伝送効率の距離特性を図 14 を示す。どの距離においても銅損を入れた場合のほうが伝送効率は低下した。  $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$  のときの伝送効率をの距

離特性を MIT のモデルと比較したものを図 15 に示す。MIT のモデルよりも伝送効率は多少低下したがほぼ同程度の効率で伝送を行えたことを確認した。

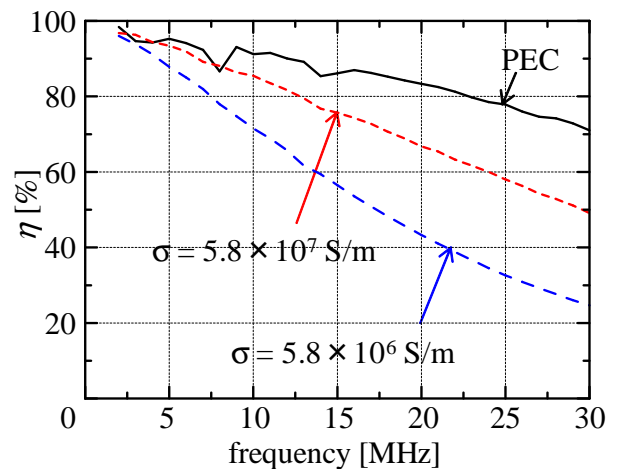


図 11: 銅損を入れた伝送効率の周波数特性

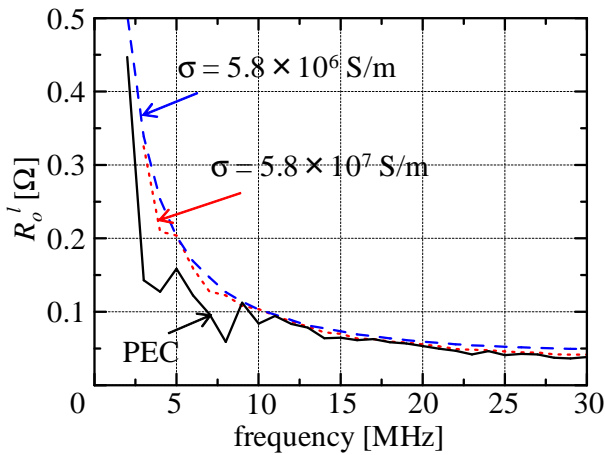


図 12: 銅損を入れた最適負荷の実部の周波数特性

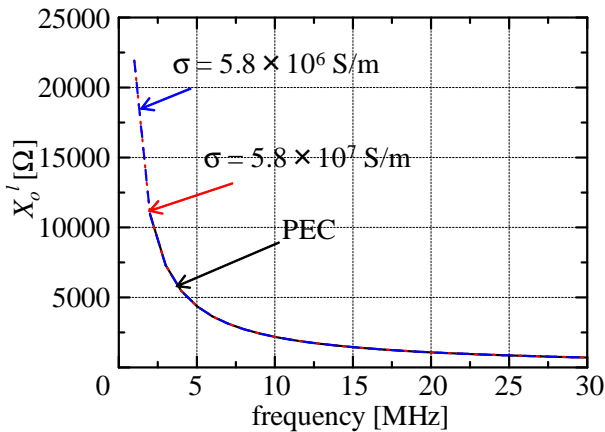


図 13: 銅損を入れた最適負荷の虚部の周波数特性

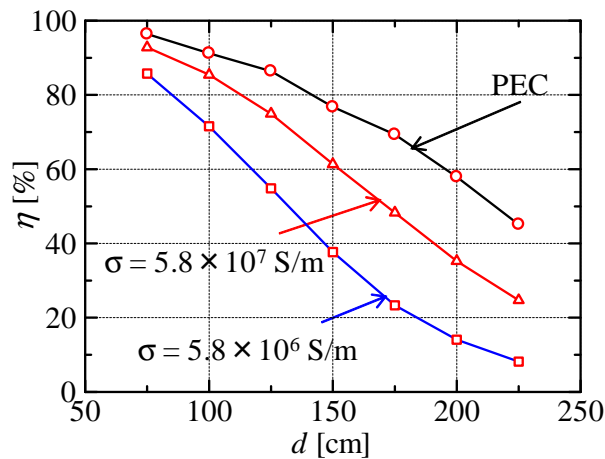


図 14: 銅損を入れた伝送効率の距離特性

## 5. むすび

本論文では導波管アンテナについてモーメント法を用いて、インピーダンス整合と銅損を考慮した解析につい

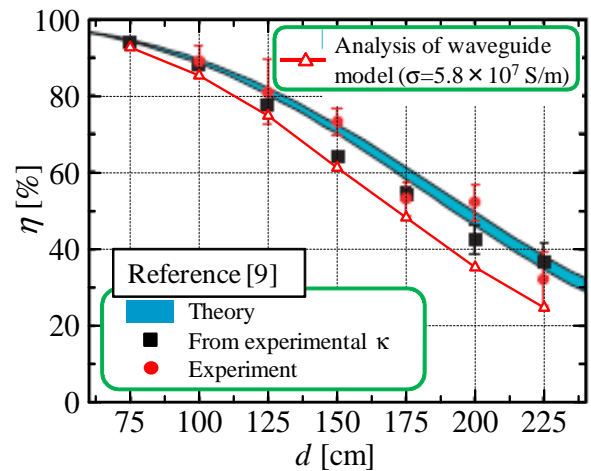


図 15: MIT モデルとの比較

て検討を行った。その結果、受信側に最適負荷を与えた場合、MIT で提案されたモデルと比較しても同程度の伝送効率を実現することができた。

## 参考文献

- [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 Joannopoulos, 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, 榎原久二男, “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.
- [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.
- [18] 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*, A·P2011-9, pp.21-26, 2011年5月.