

カットオフ平行平板導波路を用いた 高効率無線電力伝送システムの実験的評価

佐藤 弘康^{†a)} 中道 大輔[†] 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: a) sahiro@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし カットオフ平行平板導波路を利用した無線電力伝送システムを実験的に評価し、設計法を提案している。動作周波数を平行平板導波路のカットオフ周波数よりも低くすることで漏れのない電力伝送を可能にするとともに、平行平板の端部に設けられた導波管のカットオフ周波数よりも高くすることで結合距離を延長している。特に、平行平板付導波管のカットオフ周波数に近い周波数を用いることで、送受アンテナ間の位置ずれに対する強い結合が維持できることを解析と実験により明らかにしている。

キーワード 無線電力伝送, カットオフ, 平行平板導波路, 導波管, エバネッセント波

Experimental Study of Highly Efficient Wireless Power Transfer System Using Cut-off Parallel Plate Waveguide

Hiroyasu SATO^{†a)}, Daisuke NAKAMICHI[†] and Qiang CHEN[†]

[†]Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-5 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Miyagi, 980-8579 Japan

E-mail: a) sahiro@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Experimental evaluation of wireless power transmission (WPT) system using cutoff parallel plate waveguide is presented. The operating frequency is set to be lower than the cutoff frequency of the parallel plate waveguide in order to make the WPT system leakage-free. A rectangular waveguide provided at the end of the parallel plate waveguide and the operating frequency is set to be higher than the cutoff frequency of the rectangular waveguide in order to extend the coupling length. It is shown by analysis and experiment that the strong coupling between transmitting antenna and receiving antenna is maintained over a long distance by using a frequency near to the cutoff frequency of rectangular waveguide.

Keywords Wireless power transfer, Cutoff, Parallel plate, Waveguide, Evanescent wave

1. まえがき

近傍界無線電力伝送では、波長に対するアンテナの大きさを小さくすることでアンテナからの放射が無い、いわゆる近傍界に送受アンテナが置かれた状態を構築する。さらに送受アンテナが互いに近傍界に存在する状態において双方の入力インピーダンスに対して整合回路を設計し、高効率の電力伝送を実現している[1, 2].

ところで、導波管や平行平板導波路にはカットオフがあり、カットオフ周波数以下の周波数では電磁界が伝送されずエバネッセント波となることが知られている。この場合上述の近傍界を構築しなくても、導波路のカットオフを利用すれば放射の無い状態を構築できる。このエバネッセント界に置かれた送受アンテナ間距離を、電磁波が減衰しきらない程度に選択することで強い結合を得ることが可能である。この特徴を利用した導波路として、NRD (Non-Radiative Dielectric) Waveguide [3]やフォトニック結晶[4]がよく知られて

いる。NRDガイドでは、カットオフ平行平板導波路の内部に誘電体を挿入して誘電体部分のみカットオフを解除することで、低損失で漏れのない伝送を可能にしている。フォトニック結晶では、バンドギャップを有する周期構造に欠損を与えて導波路を構成することで、漏れの無い伝送を可能にしている。本研究では、漏れの無い導波路のひとつであるカットオフ平行平板導波路を利用した無線電力伝送システムについて検討する。

近傍界無線電力伝送の課題として、送受アンテナの位置ずれの問題がある[5]。位置ずれにより送受アンテナのインピーダンスが変化するため伝送効率が低下してしまう。これを回避するためにインピーダンス自動整合回路も開発されている[6]。これまで我々はカットオフ平行平板導波路を用いた無線電力伝送システムを提案し[7]、平行平板導波路の端部に導波管を持たせることで送受アンテナ間距離の増加に対して結合を維持する方法を検討してきた[8]。しかしながら、送受アン

テナ間の位置ずれに対する伝送効率の低下を抑えるための構造の設計指針は未解明であった．そこで本報告では，カットオフ平行平板付導波管の管内波長を解析により明らかにするとともに，本無線電力伝送システムの設計指針を実験的に検討したので報告する．

2. 構造

構造を図1に示す．平行平板の端部に方形導波管を設け，管内の原点 O に置かれた送信アンテナからの電力を受信アンテナで受電する．本報告では逆L形アンテナとダイポールアンテナをそれぞれ送信，受信アンテナとした．平行平板間距離 d は，動作周波数の自由空間波長 λ_0 よりも小さくしてカットオフの状態を構築する．平行平板の高さ H を高くすることで z 方向への漏れを減少できる．底部導波管がない平行平板導波路のみの場合は x 方向もエバネッセントとなるが，この場合送受アンテナ間の結合距離を増加するにつれてエバネッセント結合が弱くなり，位置ずれに対処できない．そこで底部に導波管を配置して導波管内はカットオフを解除し，導波管を介した伝送モードを用いて伝送距離を延長する．導波管の x 方向は導体板で終端する．

図1に示した平行平板付導波管構造の伝送モードを明らかにするため，FDTD法を用いた電磁界解析を行った．動作周波数を2GHz帯とする．平行平板付導波管の x 方向をPML吸収境界条件に挿入して無限長導波路とし，導波管内の2点の電界 E_z 成分から伝搬定数を求め，管内波長を算出した．この結果を図2に示す．実線が平行平板付導波管の管内波長であり，比較のため平行平板のみと導波管のみの場合の管内波長もそれぞれ破線，一点鎖線で示した．導波管のみの場合， TE_{10} モードのカットオフ周波数 $f_{c-WG} = c/2a = 1.875$ GHzにおいて管内波長が無限大のカットオフが観測されている．平行平板導波路の場合， TE_1 モードのカットオフ周波数 $f_{c-PPW} = c/2d = 3.75$ GHzにおいて管内波長が無限大となるカットオフも観測されている．平行平板付導波管の伝搬モードは両カットオフ周波数の間にあり，周波数 $f_c = 2.1$ GHz付近においてカットオフが観測され，方形導波管のカットオフ周波数 f_{c-WG} よりも高い．以上の結果を踏まえた設計指針として，動作周波数が $f_{c-WG} < f < f_{c-PPW}$ となるように導波管と平行平板導波路の構造パラメータを決定する方法が挙げられる．

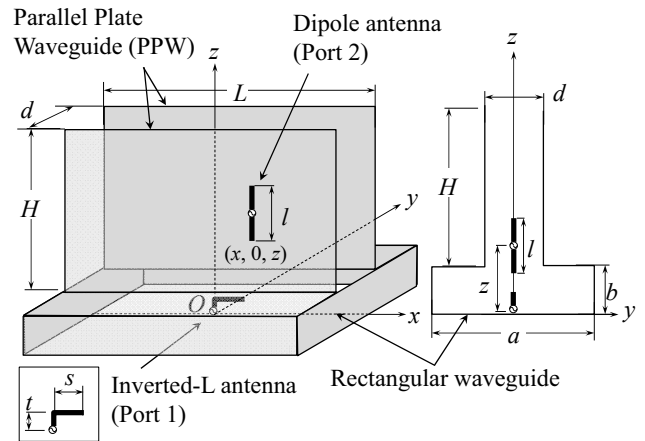


図1 カットオフ平行平板付導波管を用いた無線電力伝送システム

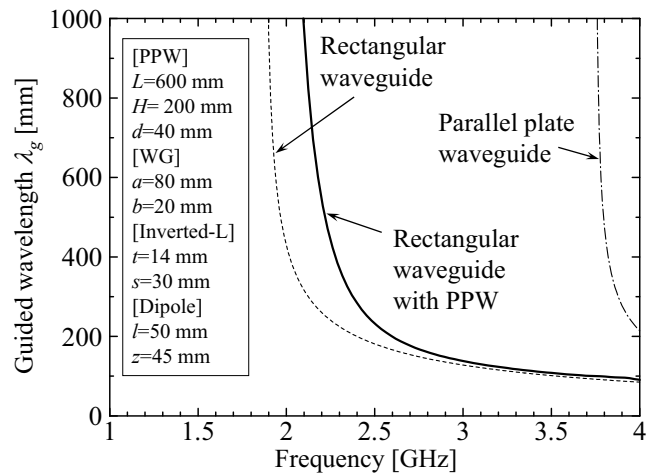


図2 平行平板付導波管の管内波長

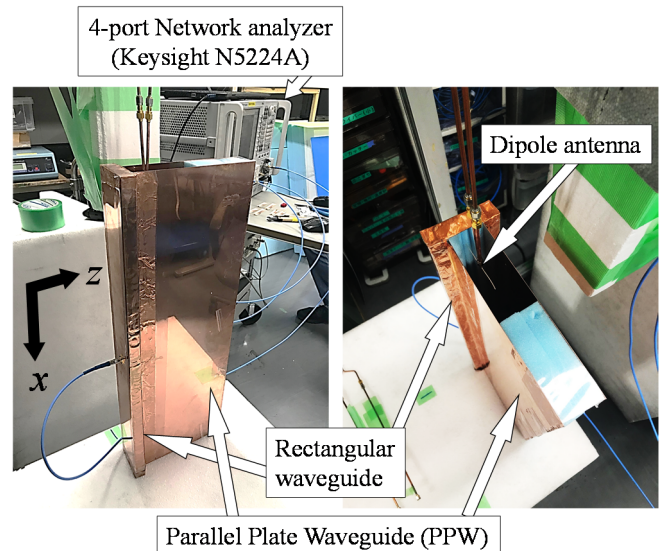


図3 2GHz帯平行平板付導波管無線電力伝送システム

3. 実験的検討

2 GHz 帯において試作した平行平板付導波管無線電力伝送システムの写真を図 3 に示す. 図 2 に示した寸法の導波管と平行平板を厚さ 0.3 mm の銅板を折り曲げて作製した. 導波管の構造保持と平行平板の間隔 $d=40$ mm の保持にはスタイロフォームを利用した. 広帯域にわたる伝送特性を評価するため, 4 ポートネットワークアナライザ(N5224A)と差動モード S パラメータ法[8]を用いて S パラメータを測定した. ダイポールアンテナの各モノポールにセミリジッド同軸ケーブルを接続し, 2 本のケーブルは半田で短絡している. この治具を XY スキャナに接続し, 図 3 の x 軸方向に走査した. 逆 L アンテナは長さ $L=600$ mm の中心にあたる原点 O に配置し, 治具付ダイポールアンテナを x 方向に 300 mm 走査した.

ダイポールアンテナの座標 x を変化したときの $|S_{21}|$ の周波数特性の実験値, および FDTD 法による計算値を図 4, 図 5 にそれぞれ示す. いずれも $f_{c-WG} < f < f_{c-PPW}$ の範囲において $|S_{21}|$ が大きくなる伝送モードが観測された. また, どの伝送モードにも定在波が観測され, 周波数が低いほど定在波の節の数が減少している.

ダイポールアンテナの座標が $x=100$ mm のときの $|S_{21}|$ の周波数特性の実験値と計算値を図 6 に示す. 計算による低周波側の共振周波数は実験値とあまり一致していないものの, カーブは概ね一致している. また, 計算では 2.12 GHz と 2.46 GHz 付近で $|S_{21}|$ がほぼ 0 dB となったが, 実験では 2.22 GHz における -3 dB が最大であった. これらの不一致の原因として, ダイポールアンテナの位置決め精度, 平行平板の間隔 $d=40$ mm を均一に維持できていないこと, 計算では導体損失を無視していること, FDTD 解析における解析時間が十分ではないために時間応答の収束が不十分と原因等が考えられる. また, ダイポールアンテナの保持を兼ねた 2 本のセミリジッドケーブルの治具は平行 2 本線路の形状を持つため, 線路に沿う TEM 波の漏れも考えられる.

ダイポールアンテナの座標 x を変化したときの, 周波数 2.215 GHz, 2.52 GHz, 2.78 GHz における $|S_{21}|$ 特性を図 7 に示す. 2.215 GHz の周波数は平行平板付導波管のカットオフ周波数 $f_c=2.1$ GHz に近い最低次モードであり, $x=0\sim 300$ mm の比較的大きな位置ずれに対して高い $|S_{21}|$ を維持できている. ただし, $x=0$ 付近では -6 dB 程度まで低下している. 一方, 周波数 2.52 GHz, 2.78 GHz の場合は強い定在波が観測されており, この周波数では位置ずれに対する受信電力の変化が大きい. なお, それぞれの定在波の節の間隔から求めた管内波長は 2.52 GHz の場合が 240 mm, 2.78 GHz の場合が 180 mm であり, 図 2 の解析で得られた管内波長の

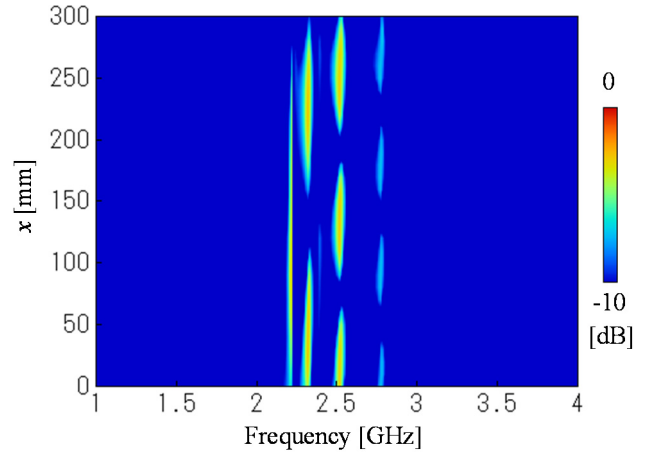


図 4 ダイポールアンテナの座標 x を変化したときの $|S_{21}|$ の周波数特性 (実験値)

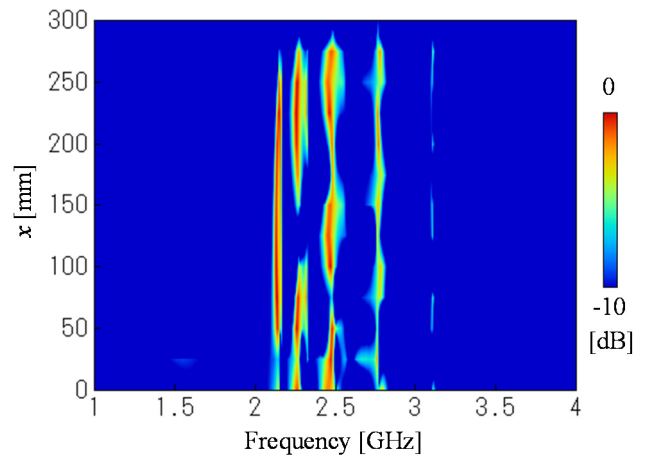


図 5 ダイポールアンテナの座標 x を変化したときの $|S_{21}|$ の周波数特性 (計算値)

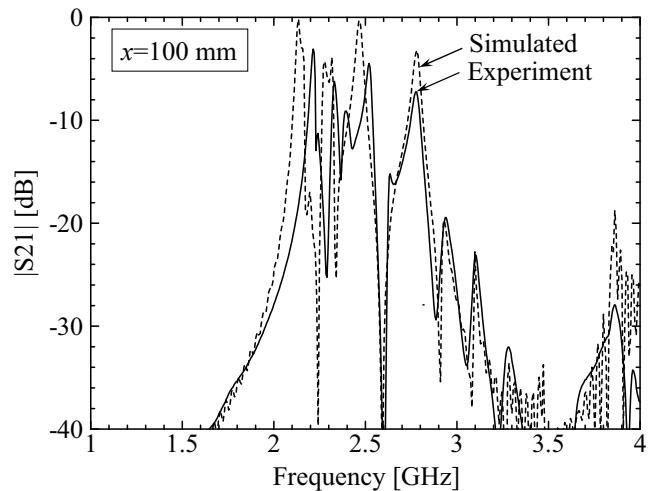


図 6 ダイポールアンテナが座標 $x=100$ mm のときの $|S_{21}|$ の周波数特性 (実験値と計算値)

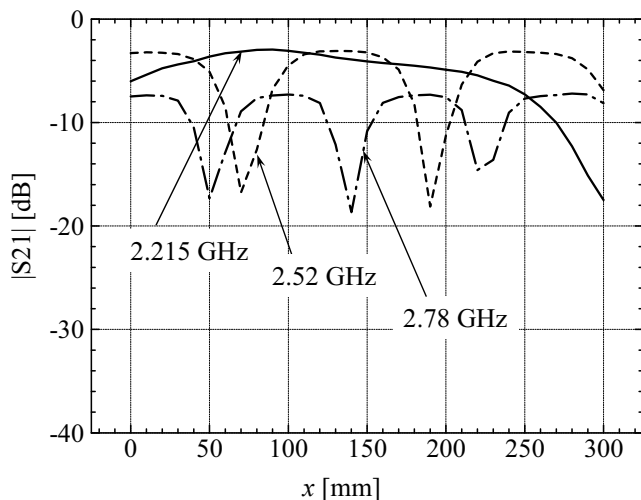


図7 ダイポールアンテナの座標 x に対する $|S_{21}|$ (実験値)

値と一致した．以上のように，カットオフ周波数付近の伝送モードを用いることにより，送受アンテナ間の位置ずれが大きい場合であっても強い結合が維持できることがわかった．

4. 結論

カットオフ平行平板導波路を利用した無線電力伝送システムを提案した．実験的評価を踏まえた本 WPT システムの設計法を以下に記す．

1. 動作周波数 f を決定し，導波管と平行平板のカットオフ周波数の間 ($f_{c-WG} < f < f_{c-PPW}$) となるように導波管と平行平板導波路の構造パラメータを決定 ($f_{c-WG}=c/2a$, $f_{c-PPW}=c/2d$)
2. 平行平板付導波管のカットオフ周波数 f_c 付近の伝送モードを用いることで結合距離を大きくすることが可能

文 献

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science Mag.*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, July, 2007.
- [2] Q. Chen, K. Ozawa, Q. Yuan, and K. Sawaya, "Antenna Characterization for Wireless Power Transmission System Using Near-Field Coupling," *IEEE Trans. Antennas Propag Mag.*, vol. 54, no. 4, pp. 108-116, Aug, 2012.
- [3] T. Yoneyama, S. Nishida, "Non radiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-29, pp. 1188-1192, Nov. 1981.
- [4] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, pp. 2059-2062, 1987.

- [5] 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一, "共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力伝送," *電学論 D*, vol. 130, No. 1, pp. 76-83, Jan. 2010.
- [6] 佐藤翔一, 齊藤彰, 水谷豊, 坂井尚貴, 大平孝, "リアルタイム負荷追従 2.4GHz インピーダンス自動整合回路," *信学論 B*, Vol.J98-B, No. 9, pp. 948-957, 2015.
- [7] D. Nakamichi, H. Sato and Q. Chen, "Evanescent-wave Coupling for Highly Efficient Wireless Power Transfer," 2017 Asian Wireless Power Transfer Workshop.
- [8] H. Sato, D. Nakamichi and Q. Chen, "Evanescent-wave Coupling for Highly Efficient Wireless Power Transfer," 2018 Asian Wireless Power Transfer Workshop.