

二次元導波路を用いた選択的給電のための低放射損失型カプラ

野田 聡人(東京大学) 篠田 裕之(東京大学)

Low Radiation Loss Coupler for Selective 2D Waveguide Power Transmission

Akihito NODA(University of Tokyo) and Hiroyuki SHINODA(University of Tokyo)

Abstract In this paper we propose a selective wireless power transmission method that uses a two-dimensional waveguide sheet coated with a thick insulator layer. With this method electronic appliances put on the sheet can receive the power for operation through the sheet surface. The power should be selectively transferred only to the target device and not to extraneous objects. The waveguide sheet requires in principle that a significant electromagnetic (EM) energy is stored around the outer side of the surface for a significant power flowing out of the sheet. We show that the thick insulator layer prevents such a large EM field from being confined around the surface by the extraneous objects and reduces the unexpected power extraction. We evaluate the unexpected power extraction by computer simulations on a benchmark model where a ideal conductor plate with arbitrary length is put on the sheet. The result shows that the unexpected power extraction is less than about 2.5% even in the worst case. Moreover we design a special coupler that confine strong EM energy and extract significant power from the sheet through trial and error as an existence proof of the selective power transmission. The coupler achieves 70% internal efficiency in the 2D model simulation. The measured output power ratio of the fabricated coupler is 0.19.

1. はじめに

近年、机上・室内程度の範囲の生活空間で利用可能な中距離のワイヤレス電力伝送技術の需要が高まっている。このような環境では、遠方への送電が可能であるが遮蔽による影響を受けやすい電磁波ビームによる手法 [1] に比べ、放射ではなく近接場を利用する方式 [2] や、送電用コイルをアレイ化して大面積に対応する方法 [3,4] などが実用的であると考えられ、多くの研究開発がなされている。

本研究は、Fig. 1 に示すような受動的かつ単純な構造のシート状導波路を用いて、上述の環境で利用可能な選択的電力伝送を実現することを目標としている。このシート状媒体による二次元通信 [5] はデータ通信の用途としてはすでに実用化がなされている [6]。シートに供給されたマイクロ波はシートに沿って伝搬し、シートに接触したデバイスは特殊な受電カプラによりシート内から電力を取り出すことができる。ここで受電カプラとシートとは、シート表面の絶縁層によって電氣的に絶縁されている。シートは受動的かつ単純な構造であるから、大量生産技術により低コストで大型のシートを製造し、給電システムの大型化が可能になると期待できる。一枚のシートで電力伝送とデータ通信の両方を行うことも可能であることも特徴の一つである。フェーズドアレイによってシート上の特定の領域に電磁波の焦点を形

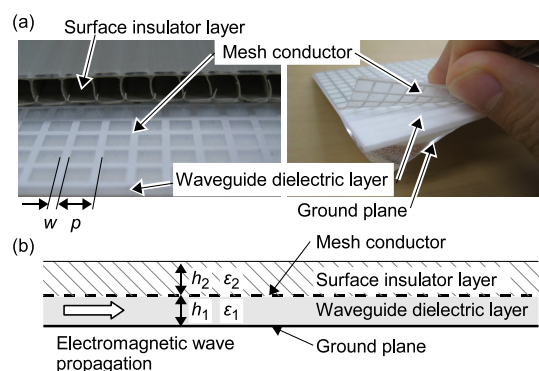


Fig. 1 A 2DC sheet consists of four layers: a ground conductor plane, a waveguide dielectric layer, a mesh conductor layer, and a surface insulator layer. (a) Photographs and (b) a cross section model of the sheet.

成する収束給電も可能である [7]。

ワイヤレス電力伝送システムにおいては、電力は選択的に負荷に供給されるべきである。すなわち、電力を吸収するように意図的に設計された特別なデバイスのみが受電可能で、それ以外の一般の物体による電力の吸収がないことが理想である。二次元通信による電力伝送において給電の選択性を向上するための基本的なアイディアは以下の二つの部分に分けることができる。

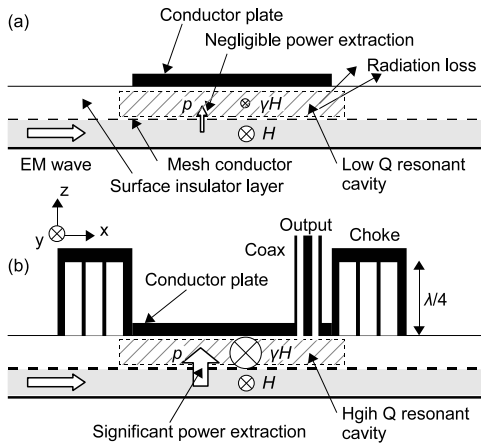


Fig. 2 Cross section models where (a) a conductor plate and (b) a choke-enclosed coupler are put on the sheet.

まず一つは、一般の物体によって、シート表面に強い電磁界の蓄積が生じないように、シート表面の絶縁層を厚く設計することである。そしてもう一つは、そのような厚い絶縁層を持ったシートに接触した際に強い電磁界を蓄積できるように受電力プラを設計することである。これは、シート外への電磁波の染み出しを低減した実用的なシートにおいて、メッシュ層を横切ってシート外に電力を取り出すためには、シート表面近傍に大きな電磁界が蓄積されていることが必要条件となる、という理論的な解析の結果 [8] に基づいたものである。カプラを電磁バンドギャップ (EBG) 構造で取り囲んで不要な電磁波放射を抑制することは、小林ら [9] によって提案されており、本研究はこれを基礎としたものである。またシート表面の絶縁層の重要性については [8] において指摘されている。本稿で示す新たな成果は、以下の 2 点に要約される。

(1) 一般の物体と放射損を低減した特殊カプラとの間で、シートからの電力取得率の差が顕著になるように、厚い絶縁層を持ったシートを設計すること。

(2) 上記のシートから有意な電力を取得可能なカプラが実現可能であることをシミュレーションと実験により実証すること。

厚い絶縁層の効果について第 2 章において説明し、一般の導体板を接触させた場合に生じる放射のシミュレーション結果を第 3 章に示す。チョーク構造をもつカプラの設計とその実験結果について第 4 章および第 5 章において示す。第 6 章で結論と今後の展望を述べる。

2. 厚い絶縁層を持つ通信シート

本章では、一般の物体の接触による不意の電力吸収を低減するために、メッシュ層を厚い絶縁体層で覆うことを考える。Fig. 2(a) のように TM モードの電磁波がシートに沿って x 軸方向に伝搬する二次元問題において、シート表面およびその周辺の電磁界の理論的な解析により、磁界強度比 γ とメッシュ層を横切る電力密度 p とに関する次の関係式を得る。

$$p \propto X\gamma \quad (1)$$

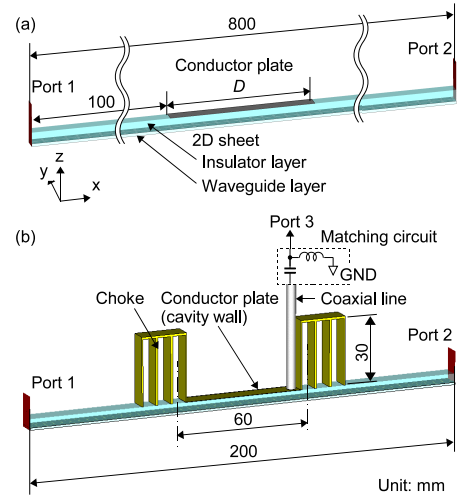


Fig. 3 Quasi 2D simulation models that (a) the conductive plate and (b) the coupler are placed on the sheet. The boundary condition at $\pm y$ ends are set to simulate periodic structure whose period is significantly smaller than the wavelength.

ここで X はメッシュ層の表面リアクタンス [5] である。磁界強度比 γ は誘電体導波層内のメッシュ層近傍の磁界強度に対する、表面絶縁層内のメッシュ層近傍の磁界強度の比として定義される。ここではその他の設計パラメータおよびシートに供給される電力は一定とする。また材質起因の誘電損、抵抗損は無視する。なお (1) は [8] に述べられている関係式を、ここでの議論に十分な程度に簡潔に表記し直したものである。

通常の導波モードでは、磁界強度比 γ は十分に小さい ($\gamma \ll 1$)。十分に Q 値の高い共振体をシート表面で励振した場合にのみ、大きい磁界強度比 ($\gamma > 1$) が得られる。厚い表面絶縁層は、一般の共振体がシート表面に接触した場合の空中への放射損を高め、高 Q 値の共振を防ぐ効果があると期待できる。ここで、放射損を高めるということは、空中への放射電力の絶対値の増加を意味するものではないことに注意を要する。放射損を高めることで磁界強度比 γ が低下すれば、それはすなわちシート外に流れ出る電力の低下を意味し、結果的に空中に放射される電力の絶対値も低下するからである。

3. 放射電力のシミュレーション

ここでは、一般の物体による電力吸収のベンチマーク問題として、Fig. 3(a) に示すように完全導体の平板がシート表面に接触した状況で生じるシート外への電磁波の放射を評価する。簡単のため Fig. 2 のような二次元問題を考えるため、モデルは y 軸方向には波長より充分小さい周期を持つ無限の周期構造と等価になっている。このモデルにおいて、三次元の電磁界シミュレーションを行い S パラメータを計算する。シミュレーションツールとしては CST 社製 MW Studio を用いる。導体板による放射電力 P_{rad} は S パラメータを用いて次式により求める。

$$P_{rad} \equiv 1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2) \quad (2)$$

ここで S_{11} , S_{21} はそれぞれポート 1 での反射係数、ポート 1 か

Table 1 Sheet design parameters

Symbol	Value	Description
ϵ_1	2.1	Relative permittivity of waveguide layer
ϵ_2	1.0	Relative permittivity of surface insulator layer
h_1	1.0 mm	Thickness of waveguide layer
h_2	4.0 mm	Thickness of surface insulator layer
p	4.0 mm	Mesh conductor pitch
w	1.0 mm	Mesh conductor line width

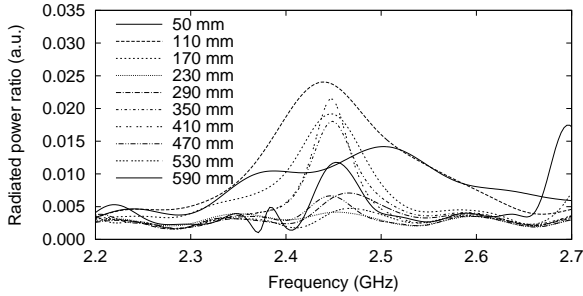


Fig. 4 Radiation power caused by the conductor plates with length $D = 50, 110, 170, \dots, 590$ mm. All of them have a peak near 2.5 GHz. The peak value is nearly equal to or less than 2.5%.

ら 2 への透過係数である．シート各設計パラメータは Table 1 に示すように定めた．表中のシンボルは Fig. 1 中のそれと対応している．ここで決定した表面絶縁層の厚さ $h_2 = 4.0$ mm は従来のそれ (0.05–0.25 mm) と比較して十分に厚い．さらに、誘電体導波層と表面絶縁層との比誘電率はそれぞれ $\epsilon_1 = 2.1$ および $\epsilon_2 = 1.0$ であり、両者の導波モードの波数が異なる．したがって位相整合条件を満たさないため、シートに接触する導体板の長さが長いほど吸収電力が増加するという結果にはならないと予測される．

Fig. 4 は、導体板の長さ D を 50, 110, 170, ..., 590 mm と変化させた各場合について放射電力 P_{rad} の評価を行った結果である．これらの導体の寸法は、2.5 GHz 付近で共振するもののうち、短いものから順に 10 パターンを採用したものである．同図の示すように、放射電力 P_{rad} は 2.5 GHz 付近において、最大の (最悪の) 場合でも 2.5% 程度以下となり、また上述の予測通り、導体板サイズを大きくすればするほど放射が大きくなってしまいうという傾向は見られない．

シートはさらに放射が小さくなるように設計することも可能であるが、今回は選択的給電の実現可能性を立証することを目的に、有意な電力取得率を持つカブラが設計可能な範囲で試行錯誤的にパラメータを決定した．

4. チョーク構造付き受電カブラ

本章では、前章で設計した通信シートに接触した際に、カブラ直下の表面絶縁層内に強い電磁界を蓄積することのできる受電カブラ (Fig. 2(b)) を設計する．ここでは複数の $\lambda/4$ チョークを並べた構造によりカブラ端部からの放射を抑制することを提案する．単一のチョークではなく複数個並べることで、EBG

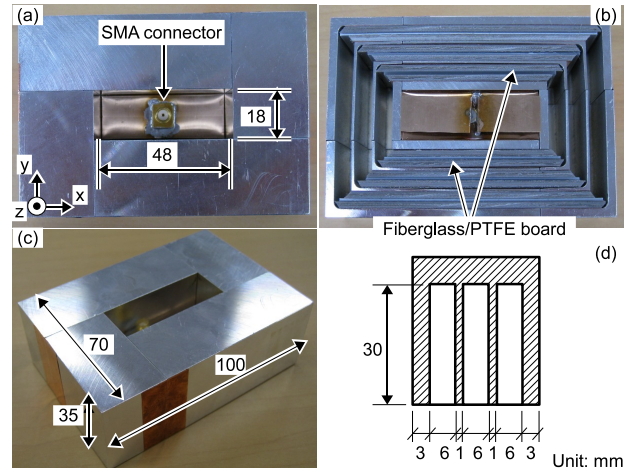


Fig. 5 (a) Top view, (b) bottom view, and (c) perspective view of the produced coupler. (d) The cross section of the multiple-choke. The choke is made of aluminum.

構造のように遮断周波数帯域を拡大し、カブラとシートの接触状況の変化等に対して放射抑制機能がよりロバストになると期待できる．

Fig. 3(b) にカブラのシミュレーションモデルを示す．カブラ出力の同軸ケーブル接続部において反射が生じるが、同図に示すようにインピーダンスマッチング回路を同軸線路とポート 3 との間に挿入してその影響を取り除く．マッチング回路のパラメータを $|S_{33}|^2 < 0.01$ となるように選ぶと、シートからカブラ出力への電力の透過率は $|S_{31}|^2 \approx 0.29$ となった．カブラの接触によってシート内から消散した電力成分は $1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2) \approx 0.41$ であり、これらの比によってカブラ内効率 η_{int} を定義すると、 $\eta_{int} \approx 70\%$ となる．したがって同じカブラを複数並べることで合計の電力取得率は最大 70% に近づくと予測される．

5. カブラの製作と出力の実測

本章では実験により、チョーク構造付きカブラの性能を検証する．Fig. 5 に試作したカブラの構造を示す．ここでは約 60 mm × 30 mm の長方形領域に TM_{100} モードを励起するものとし、その長方形の各辺上で磁界の接線成分がゼロとなる境界条件を設定する．また各辺の上には同一の深さ ($\lambda/4$) のチョークを設けると、チョークの先端はショート端であるから電界がゼロとなる境界条件になる．ここで長方形領域の長辺上のチョーク内の比誘電率を 2 とし、それ以外の領域を比誘電率 1 とすることで、長方形領域およびチョーク内のすべてが同一周波数において共振するモードが得られる．試作カブラでは、ガラス繊維強化 PTFE 基板 (比誘電率 2.17, 誘電正接 0.0009, いずれも 10 GHz における値) を当該チョーク内に挿入した．

このように設計した三次元構造に対するシミュレーションの結果は、Fig. 6 に示すように、空洞共振器の領域は約 60 mm × 30 mm となり TM_{100} モードが励起されることを示している．またその長方形領域外では磁界強度が十分に減衰しており、この領域から外に流れ出る電力流密度が充分小さいことを示している．

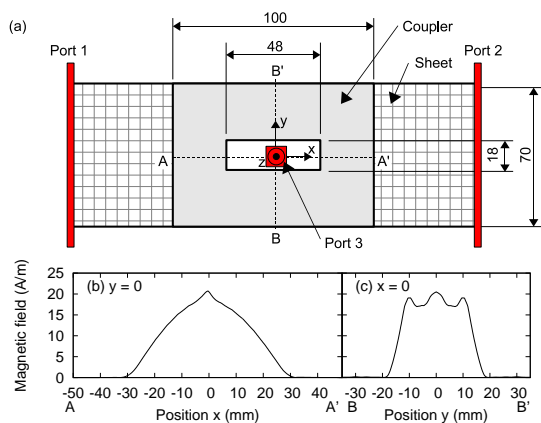


Fig. 6 (a) Top view of the three-dimensional simulation model. Simulated magnetic field distribution along (b) x -axis and (c) y -axis at the center of the insulator layer thickness, when the EM power is fed into the coupler from port 3.

製作した実機での S パラメータはネットワークアナライザ E5071B (Agilent Technologies) により測定した。シート入力端およびカブラ出力端における、同軸ケーブルとのインピーダンス不整合による反射の影響を取り除くため、ネットワークアナライザ上の処理によって Fig. 7 に示すようにインピーダンス整合回路を仮想的に挿入した状態とした上で得られた測定結果を Fig. 8 に示す。カブラの電力取得率の最大値は、2.57 GHz において 0.19 を示している。シートの幅 (y 方向寸法) が 80 mm であるのに対し、カブラ直下で強い磁界強度を持ち電力取得に寄与している領域の幅は Fig. 6 より大きく見ても 40 mm 程度であるから、シート内で y 方向の電磁界分布が一様であると仮定すれば、カブラ構造の対称性による制約と合わせて電力取得率の理論限界は 0.25 程度と考えられ、実測結果はその 76% を達成している。

6. まとめ

本稿では、二次元通信により選択的ワイヤレス給電を実現するための方法として、シート表面に厚い絶縁層を持たせることおよび受電カブラにチョーク構造を持たせることを提案し、その効果を実測とシミュレーションにより検証した。

二次元的な電磁界シミュレーションにより、任意の長さの導体板がシートに接触した場合の空中への電力放射を 2.5% 以下に抑え、かつチョーク構造を持つカブラによって 70% の効率で電力取得が可能となるシートを設計した。このシートは従来のものと比較して 10 倍以上厚い 4 mm の厚さの表面絶縁体層を持つ。製作した実機においては、80 mm の幅のシートに対し、約 30 mm の共振領域幅を持つカブラによって、シート内に供給された電力の約 19% を取得した。カブラの設計の最適化、小型化等が今後の課題となる。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究 13701 および日本学術振興会特別研究員奨励費 22-6659

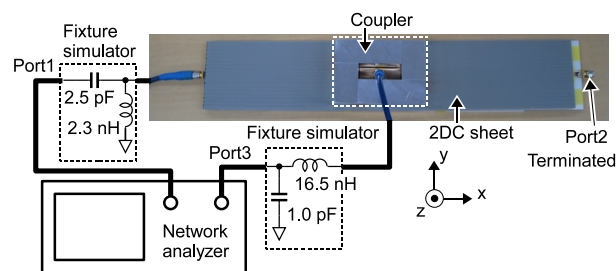


Fig. 7 Schematic diagram of the experiment setup. The fixture simulator is used to minimize S_{11} and S_{33} .

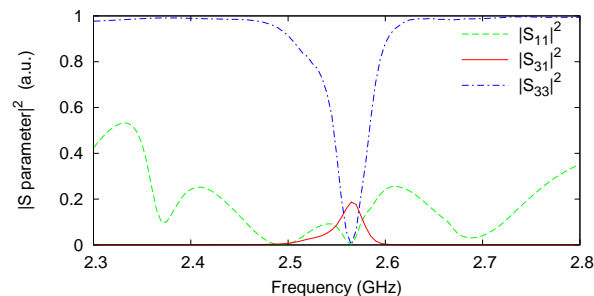


Fig. 8 Measurement result of the produced sheet and coupler. The maximum coupler output, $|S_{31}|^2$, is 0.19 at 2.57 GHz. By tuning the fixture simulator parameters of network analyzer, S_{11} and S_{33} are minimized at the same frequency.

の助成によるものである。

文献

- [1] 松本, 橋本: “宇宙太陽発電衛星”, 電子情報通信学会誌, **92**, 9, pp. 755–760 (2009).
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljačić: “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances”, *Science*, **317**, pp. 83–86 (2007).
- [3] T. Sekitani, M. Takamiya, Y. Noguchi, S. Nakano, Y. Kato, T. Sakurai and T. Someya: “A large-area wireless power-transmission sheet using printed organic transistors and plastic mems switches”, *Nature Materials*, **6**, pp. 413–417 (2007).
- [4] E. Waffenschmidt and T. Staring: “Limitation of inductive power transfer for consumer applications”, *Proc. 13th European Conference on Power Electronics and Applications* (2009).
- [5] H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira and H. Itai: “Surface sensor network using inductive signal transmission layer”, *Proc. Fourth International Conference on Networked Sensing Systems*, pp. 201–206 (2007).
- [6] 株式会社イトーキ: “LANシート”, <http://www.itoki.jp/lansheet/>.
- [7] B. Zhang, A. O. Lim, Y. Kado, H. Itai and H. Shinoda: “An efficient power supply system using phase control in 2D communication”, *Proc. Sixth International Conference on Networked Sensing Systems*, Pittsburg, USA (2009).
- [8] A. Noda and H. Shinoda: “The lower-bound of electromagnetic leakage of 2D wireless power transmission”, *Proc. Seventh International Conference on Networked Sensing Systems*, pp. 138–144 (2010).
- [9] N. Kobayashi, H. Fukuda and T. Tsukagoshi: “Challenging EMC problems on two-dimensional communication systems”, *Proc. Seventh International Conference on Networked Sensing Systems*, pp. 130–137 (2010).