

表面センサネットワークにおける高効率カプラ (第二報) 共鳴周波数制御による選択的給電方法

野田 聡人、久保 伸太郎、大野 紘明、篠田 裕之 (東京大学)

High Efficiency Coupler for Surface Sensor Network (Second Report) Selective Power Supply by Controlling the Resonant Frequency

Akihito Noda, Shintaro Kubo, Hiroaki Ohno, Hiroyuki Shinoda (The University of Tokyo)

Abstract In this paper we propose a wireless power transmission method to supply electricity to a certain device selectively by using two-dimensional communication (2DC) technology. By using 2DC, the electricity can be transferred to the device placed anywhere on the 2DC sheet surface. In order to reduce the power absorption by unexpected objects on the sheet, the frequency spread method can be effective. In this paper, an overview of the method and a concept of the power extraction coupler are presented. The characteristics of the coupler element are examined through the electromagnetic simulation. The results indicate that the resonant frequency of the coupler can be controlled by changing the capacitance of the element.

Keyword Sensor network, two-dimensional communication, selective power supply

1. はじめに

近年、電子機器類にワイヤレスで電力を伝送する技術の研究開発が盛んに行われている。ワイヤレス電力伝送は、センサネットワークシステムにおいてもセンサノードへの電源供給の選択肢の一つとして有用である。ワイヤレスセンサネットワークシステムにおいて、各センサノードはバッテリーで駆動するケースが多い。このバッテリーの交換・充電サイクルを長くとるために、通常これらのノードはその消費電力を極端に小さく抑えるための様々な工夫がなされる。あるいは太陽電池のように周囲環境からエネルギーを収穫する技術[1]を用いて、その場で発電するデバイスを用いる場合もある。この場合も発電能力の限界からセンサノードの消費電力は厳しい制約を受ける。そこでセンサノードにワイヤレスで電力を供給し、ノードの消費電力に関する極端な制約を取り除くことができれば、ワイヤレスセンサネットワークシステムの新たな可能性を拓くことができると期待される。

ワイヤレス電力伝送技術として、これまでに多くの研究開発がなされている。これらは4つの主要な方式に分類できる。電磁誘導方式、電磁波放射方式、磁気共鳴方式[2]、そして二次元通信方式[3-5]である。電磁誘導方式は送電側と受電デバイスがほぼ密着した近距離での電力伝送において高い伝送効率を実現でき、民生用機器類に採用されている非接触給電の多くはこの方式を用いている。電磁波放射方式は、送電アンテナから遠方(使用する電磁波の波長に対して長距離)にある受電アンテナまで送電することが可能である。ま

た室内を微弱な電磁波で満たし、室内のどこでもその電力を利用できるユビキタス電源も提案されている[6]。磁気共鳴方式は、使用する電磁波の波長以下程度の近距離で高効率な送電が可能である。二次元通信方式は、二次元のシート状の通信メディア(二次元通信シート)の表面全体が給電のためのインタフェースとして利用可能である。シート外に電磁波を放射しないため、シートから離れた位置にある物体に影響を与えない。

本研究は、この二次元通信を利用した電力伝送システムの構築を目標としている。実用上の課題は安全性の確保である。Fig. 1に示すように、シート上に給電対象のデバイスおよび無関係な一般の物体あるいは人体が混在する状況化において、デバイスだけに選択的に給電することが必要となる。筆者らは先行研究において、シート表面に人体が接触した状況を想定し、

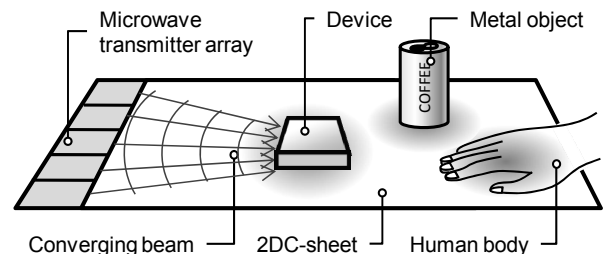


Fig. 1. 二次元通信による電力伝送システムの模式図。給電対象のデバイスサイズに対し充分広い面積のシート上の任意の位置で給電を可能とする。マイクロ波収束ビームをシート内に形成し、スポット給電が可能である。シート表面にはデバイス以外に一般の物体や人体が混在し得るため、このような状況下で選択的にデバイスに給電する方法が必要である。

人体への影響を低減しつつデバイスに十分な電力を供給するための手法を提案した[5]。本稿では特に、シート上に共振的な電力吸収特性を持った物体が接触した場合に、その物体の電力吸収を低減しながらデバイスに給電する手法を検討する。

2. 選択的給電の実現方法

二次元通信シート表面に物体が接触すると、シートを伝搬する電磁波に影響を与える。物体内部で熱エネルギーに変換される場合とそのまま電磁波のエネルギーとしてシート外の空間に放射あるいは構造に沿って導波される場合が存在する。いずれにしてもシート内から外部に電力が取り出された分をその物体による電磁波の吸収と考えると、その吸収率の周波数特性によって物体を二種類に大別できる。一つは Fig. 2(a)に示すように特定の周波数において鋭いピークを示すもの、もう一つはそのようなピークを持たず同図(b)のように緩やかな吸収特性を示すものである。

(b)のタイプの典型例は人体である。このタイプの物体による電力吸収は、通信シートの表面インピーダンスを低く設計すること低減できる[5]。

一方、金属製の構造物などは(a)のように共振的な特性をもつ。例えば送電に使用する電磁波の空中での波長の 1/2 に等しい長さの金属棒を、電磁波の伝搬方向に沿ってシートに近接させると、シート表面のエバネッセント場によって金属棒両端に正負の電荷が誘導される。これが半波長ダイポールアンテナとなり、シート内の電力を吸い上げてシート外の空間に放出する効果を生じる。本稿ではこのような物体による電力吸収のリスクを低減する手法を検討する。

このような目的のため、本稿では送電電力を複数の周波数に分散させる方式を考える。本方式の有効性は以下のように説明できる。まず、Fig. 3(a)に示すように単一の周波数で送電を行っている場合、シート表面にこの周波数に等しい共振周波数を持つ物体が近接すると、有意なエネルギー吸収を生じる。そこで同図(b)のように、その共振体が高いエネルギー吸収率を示す周波数帯域に比べ、充分広い帯域に周波数を分散させ

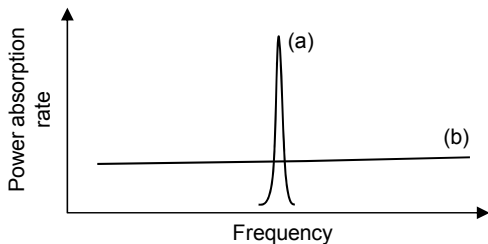


Fig. 2. シート表面に接触する物体の電力吸収率の周波数特性。(a)共振的なピーク特性を持つ物体と(b)平坦な周波数特性の物体に大別される。

て電力を伝送すれば、物体の電力吸収量の合計は小さくなる。送電に用いる周波数帯域を広げることで、単一周波数の場合に比べて、この帯域内に共振周波数を持つ物体がシート上に存在する確率は高まる。しかしシートに接触している複数の物体のうち一部だけが共振的な吸収特性を持つとして、それらの共振点をすべて合わせても充分少数であるという条件の下では、全体としてのエネルギー吸収のリスクは低減される。

このようにして一般の物体に対する偶然の給電を低減した上で、給電対象の負荷に対しては選択的に高効率で給電することが目標である。これを達成するためには、送電電力が分散された周波数帯域全域において負荷の電力吸収率が高くなければならない。従来提案している受電カプラ[4, 5]は、特定の周波数において最も良い電力取得性能を持つように各構成要素の機械的寸法が設計される。一つのカプラで広い周波数帯域において高い電力取得率を実現することは困難である。そこで本稿では、周波数分散給電に対応できる新たなカプラの構成法を検討する。

3. 周波数分散給電システム

本稿で前提とする周波数分散給電システムの構想図を Fig. 4 に示す。電源は一度に一つの周波数 f_s で電力を送出し、受電カプラの電力取得効率が最大となる周波数を f_p とする。電源側では f_s を時刻とともに切り替え、時間平均すると複数周波数に電力が分散するようにする。受電デバイス側で常に $f_p = f_s$ となるよう同期して f_p を切り換えれば、常時最大効率での電力伝送が可能となる。したがって本方式で使用するカプラの要求仕様として、周波数特性が何らかの方法で制御できることが必要となる。

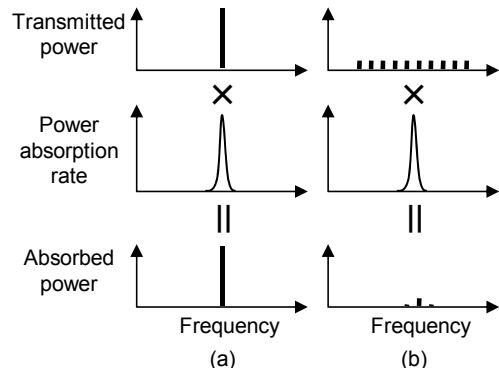


Fig. 3. (a)送電周波数に偶然一致した共振周波数を持つ Q 値の高い共振体がシートに接触した場合、共振体は有意な電力を吸収し得る。(b)総パワーを変化させずに周波数を複数に分散させるとこの共振体の吸収パワーを低減できる。

4. 周波数特性可変型カブラ

カブラの構成は Fig. 5 に示すように、波長より充分小さい導体ループとキャパシタから成る受電エレメントをアレイ化した構造を仮定する。この理由は以下の通りである。まず、周波数特性はカブラの機械的寸法によって固定されるのではなく、回路的な要素でコントロール可能でなければならない。このような機能を実現する方法の一例として、導体ループとキャパシタによる構造において、キャパシタとして可変容量ダイオードを用いる方法が挙げられる。そして、この構造を波長より充分小さくすることで集中定数系として近似でき、キャパシタンスを変化させた時の周波数特性変化が予測しやすく、設計が容易になると期待できる。仮に使用する周波数帯域の波長と同程度の寸法の構造であるとすると、構造中の電磁界の位相分布が送電周波数によって大きく変化する。そのため所望の周波数

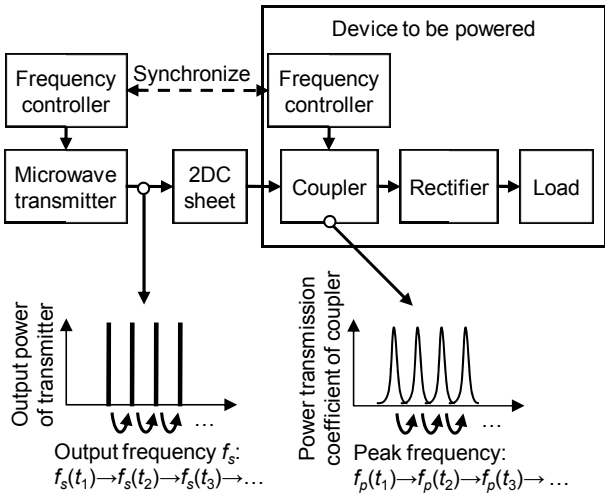


Fig. 4. 電力伝送システムのブロック図。マイクロ波送信器は出力周波数を時刻とともに切り替えていき、受電デバイスはそれに同期してカブラの周波数特性を切り換える。

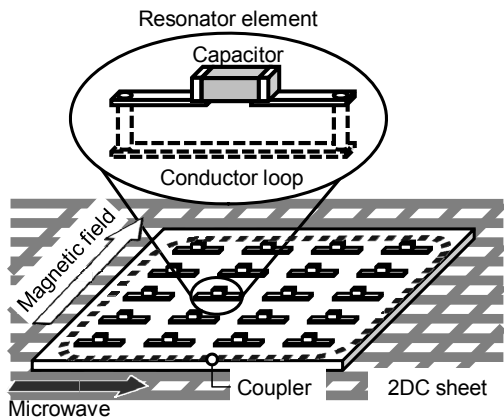


Fig. 5. カブラは小さな LC 共振体エレメントを基板上に複数並べアレイ化したものを想定する。

特性を得るためのキャパシタンスの設計が困難となると予測される。

このカブラを、Fig. 6 に示すように通信シート上のエバネッセント場の磁界が導体ループの面を垂直に貫くように配置する。導体ループとキャパシタンスから成る共振回路に直列に負荷を接続する。この磁界によって導体ループに誘導起電力を生じ、負荷に電力が供給される。負荷として、ここに伝送線路を接続してその先で整流回路に接続して直流に変換する方法や、ループのすぐそばに整流回路を作り込んでループから直ちに整流回路に接続する方法などが考えられるが、ここではそうした具体的構造まで踏み込まない。次節において、まずこの共振エレメント単体に純粋な抵抗負荷を接続したと仮定して、負荷に供給される電力をシミュレーションにより調査する。

5. 電磁界シミュレーション

上述の受電エレメントを二次元通信シート上に配置し、シートに電磁波を伝搬させた時に負荷に供給される電力をシミュレーションにより評価する。シミュレーションは三次元電磁界シミュレーションと回路シミュレーションを統合した、CST 社製 MW-STUDIO および DESIGN STUDIO を使用する。モデルの主要な寸法は Fig. 6 に示すとおりである。受電エレメントはプリント基板上の導体パターンおよびビアにより導体ループを形成し、上面にキャパシタおよび負荷を接続することを想定してモデルを作成した。共振周波数が 2.5 GHz 程度で、その周波数のシート内波長 (約 10 cm)

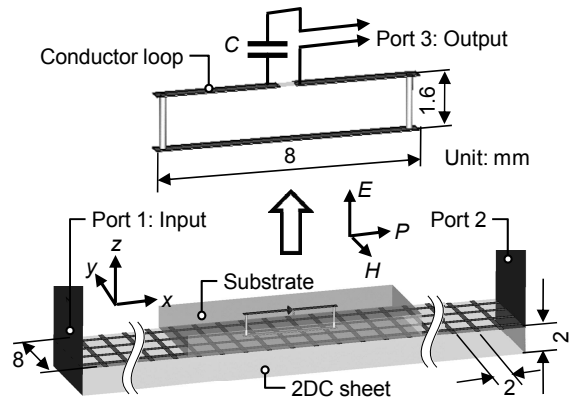


Fig. 6. 電磁界シミュレーションモデル。導体ループとキャパシタが LC 直列共振回路を形成する。導体ループの一部をカットしてキャパシタと出力ポートを直列に接続する。シート上で磁界が導体ループを貫く向きに配置すると、この共振回路が励振される。導体ループを形成する基板の比誘電率は 2.17 と設定した。 E, H, P の矢印はそれぞれ電界、磁界、ポインティングベクトルの主要な成分の方向を表す。ポート 1 からポート 3 への透過係数 S_{31} によって、このエレメントがシートから電力を取り出す能力を評価する。シミュレーションの境界条件として、 y 方向には同一の構造が周期的に無限に並んでいる条件を課す。

に対し充分小さいサイズとなるようにサイズを決定した。導体ループは基板の上面で開いており、ここに回路シミュレータ上でキャパシタンスと出力ポート 3 を接続する。なおシートの寸法はシート内の電力密度が 3.0 W/cm の場合に、人体がシート表面に接触した際の局所比吸収率 (局所 SAR) の 10 g 平均値が 2.0 W/cm を下回ること [7] を条件に設計した [5]。

シミュレーションによりこの構造の散乱行列 (S パラメータ) を求める。シートの入力端 (ポート 1) からエレメントの出力ポート (ポート 3) への透過係数 S_{31} によって、電力取得の性能を評価する。なお本稿では S パラメータの絶対値のことを絶対値記号を省いて単に S_{31} と表記する。シミュレーション条件を適宜設定し、以下の点について調査する。

1. 出力ポートの特性インピーダンスの最適値
2. 出力ピーク周波数の可変性
3. 複数エレメントをアレイ化した場合の出力特性以下、それぞれの結果について概観する。

5.1. 出力ポートの特性インピーダンスの最適値

ポート 3 の特性インピーダンスを変化させたときの透過係数の周波数特性の変化を Fig. 7 に示す。特性インピーダンスの値によらず、ピーク周波数はほぼ一定であることがわかる。 S_{31} のピーク値と特性インピーダ

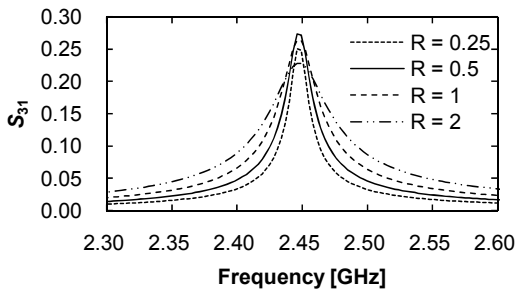


Fig. 7. 受電エレメントの出力ポート (ポート 3) の特性インピーダンスの変化による、シート入力端 (ポート 1) からポート 3 への透過係数 (S_{31}) の変化。 S_{31} のピーク周波数は約 2.45 GHz で特性インピーダンスによってほとんど変化せず、ピーク値が変化する。

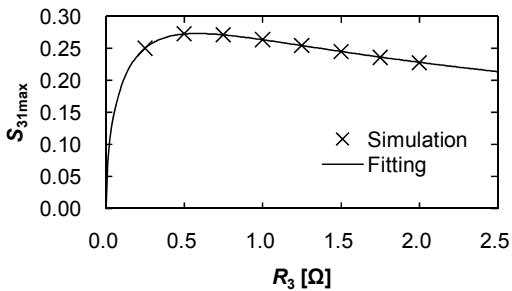


Fig. 8. S_{31} ピーク値とポート 3 の特性インピーダンス R_3 の関係。プロット点はシミュレーション結果、実線は (1) 式をプロットデータにフィッティングした曲線。フィッティングの結果、最適インピーダンスの推定値は 0.58 Ω である。

ンスの関係をプロットすると Fig. 8 のようになる。実線は Fig. 9 のモデルに基づく次の理論式

$$S_{31} = \frac{V_0 \cdot \sqrt{R_3}}{R_3 + r} \quad (1)$$

を、 V_0 および r を変数として最小二乗法によりプロットデータにフィッティングした曲線である。これより、等価内部抵抗は $r \approx 0.58 \Omega$ と推定された。したがって、ポート 3 の特性インピーダンスが 0.58 Ω の場合に最大の電力が出力される。このとき S_{31} のピーク値の推定値は 0.27 である。この二乗が出力パワーに相当するため、このエレメントによりシート内電力の約 7% を取り出すことができる。

5.2. 出力ピーク周波数の可変性

共振エレメントのキャパシタンスを変化させたときの S_{31} の周波数特性の変化を Fig. 10 に示す。これより、およそ 0.3-0.8 pF のキャパシタンス変化によって、2-3 GHz の範囲の共振周波数が実現できることが分かる。この程度のキャパシタンス変化を回路的に制御することで、目標とする周波数特性可変のカプラが実現できる。

5.3. 複数エレメントをアレイ化した場合の出力特性

Fig. 11 は同じ寸法のエレメントを電磁波の伝搬方向 (x 方向) に 2 個並べて配置したシミュレーションモデルである。二つのエレメントそれぞれに Fig. 6 と同

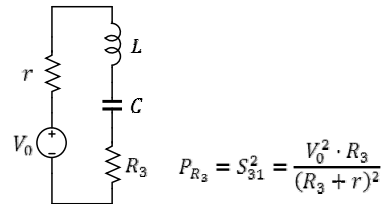


Fig. 9. 共振エレメントの等価回路モデル。ポート 1 から入射した電磁波による共振エレメントへの誘導起電力の効果等を等価電圧源 V_0 および等価内部抵抗 r により表す。共振時、 L および C の合成リアクタンスはゼロとなり、 R_3 で表される出力ポートに供給される電力 P_{R_3} は図中の式のようなになる。

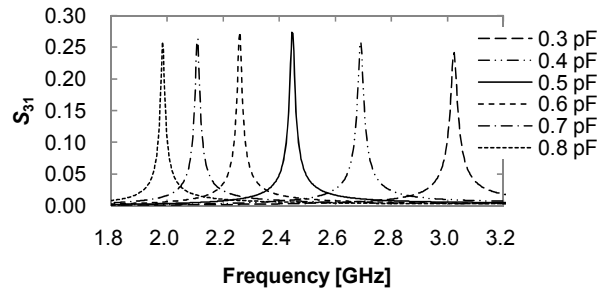


Fig. 10. キャパシタンスを変化させた時の S_{31} 周波数特性の変化。キャパシタンスを 0.3-0.8 pF の範囲で変化させると共振周波数はおよそ 2-3 GHz の範囲で変化する。ポート 3 の特性インピーダンスは 0.5 Ω で一定とした。

様にキャパシタンスと出力ポート 3 および 4 を接続する。キャパシタンスは 0.5 pF、出力ポートの特性インピーダンスは 0.5 Ω で両エレメントとも等しく設定した。このモデルでの S_{31} および S_{41} のシミュレーション結果を Fig. 12 に示す。 S_{31} と S_{41} の両者はほぼ等しいピーク周波数を持っている。特に S_{31} においては単体でのシミュレーションとほぼ等しい特性を示している。一方 S_{41} においてはピーク値が低く現れている。エレメント 1 と 2 とが完全に独立に動作しておらず、相互作用により特性に影響を及ぼしていると考えられる。

6. まとめ

二次元通信を利用した安全な電力伝送実現のために、周波数分散給電方式を考案した。それを実現するために必要となる、周波数特性可変型のカブラの構成法について基礎的検討を行った。カブラは小さな受電エレメントを複数アレイ化する方法が有効と考えられる。このエレメントについて、周波数分散給電のために要求される周波数特性の可変性、アレイ化の可能性をシミュレーションにより確認した。

周波数の可変性については、キャパシタンスを 0.3-0.8 pF の範囲で変化させることで共振周波数を 2-3 GHz の範囲で変化させられることが確認された。

電力取得の能力としては、エレメントを電磁波の伝搬方向に 1 個だけ配置した場合の電力取得率が約 7%

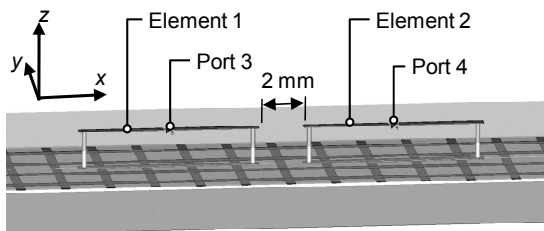


Fig. 11. 受電エレメントを x 方向に 2 mm 間隔で 2 個並べたシミュレーションモデル。それぞれにキャパシタとポート 3 および 4 を接続する。ポート 1 および 2 は Fig. 6 と同様である。

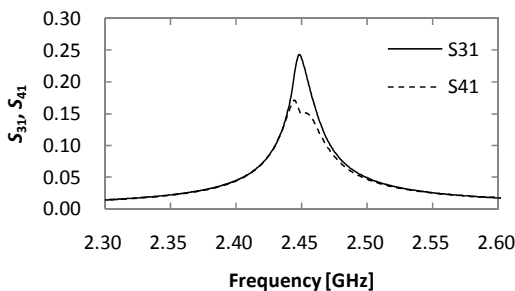


Fig. 12. Fig. 11 のモデルのシミュレーション結果。 S_{31} および S_{41} の両者はほぼ等しいピーク周波数を持つが、エレメント一つの場合と比較して、 S_{41} の方にピーク値の明らかな低下が見られる。 S_{31} および S_{41} のピーク値はそれぞれ 0.24、0.17 となった。

と確認された。仮にこれをいくつ近接して並べても特性が変化することがないとすれば、電磁波の伝搬方向に沿って 10 cm の長さに 10 個のエレメントを配置することで、 $1 - 0.93^{10} \approx 0.51$ となってシート内を伝搬する電磁波の 51% を取り出すことができる計算となる。シート内電力密度 3 W/cm での送電であれば、10 cm 角程度のカブラで 15 W の電力が取得できる計算となり、これは実用上充分有用な性能と言える。

ただし電磁波の伝搬方向に沿って 2 mm 間隔で 2 個のエレメントを配置した場合には完全に独立に動作せず、一方のピーク値が他方の 70% 程度に低下した。これは二つのエレメントの相互作用による影響と考えられる。これを防ぐためにはエレメント間隔の変更やエレメント間の相互結合を抑制する構造の追加などの対策が考えられ、今後検討を進める予定である。

本稿の内容は最低限の原理的な実現可能性の確認である。今後は各構成要素で生じる損失などを含めた、より詳細なシミュレーションによる実現可能性の確認と、実機製作のための具体的な構造の設計、周波数特性制御用の回路構成の検討などを行う予定である。

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 の助成によるものである。

文 献

- [1] 篠原, “バッテリーレス社会に向けたエネルギーハーベスティング技術,” 電子情報通信学会誌, vol. 92, pp. 695-699, Aug.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, Vol. 317, pp.83-86, Jul.2007.
- [3] H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai, “Surface Sensor Network Using Inductive Signal Transmission Layer,” Proc. INSS 2007, pp. 201-206, Braunschweig, Germany, Jun.2007.
- [4] 板井, 箱崎, 張, 篠田, “シート状媒体を用いたワイヤレス電力伝送の一手法,” 2008 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会論文集, pp.S-220-221, Sept.2008.
- [5] A. Noda and H. Shinoda, “Safe Wireless Power Transmission Using Low Leakage 2D-Communication Sheet,” Proc. SICE Annual Conference 2009, Aug.2009.
- [6] 篠原, 松本, 三谷, 芝田, 安達, 岡田, 富田, 篠田, “無線電力空間の基礎研究,” 信学技報, SPS2003-18, pp. 47-53, May.2004.
- [7] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz),” Health Phys., vol. 74, pp. 494-522, Apr.1998.