

2次元平面で移動可能端末への共振型小電力無線電力伝送システム

石崎 俊雄[†] 野尻 諭司[†] 粟井 郁雄[‡]

[†] 龍谷大学理工学部 〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5

[‡] 株式会社リューテック 〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5

E-mail: [†] ishizaki@rins.ryukoku.ac.jp, [‡] awai@ryutech.com

あらまし 共振型無線電力伝送システムにおいて移動可能端末に小電力を自在に供給したいという需要が強くなる。例えば、携帯電話端末の充電などがそうである。従来の無線電力伝送では、効率良く給電するためには端末の位置に対する制約が厳しく、自由に移動できる無線のメリットが活かしていない。そこで本報告では、送信側共振器を端末側共振器に比べて大きくして伝送距離を稼ぐと共に、送信側共振器上の2次元平面内で効率良く給電するための方策について検討した。また、端末の角度についても検討を行った。

キーワード 共振型無線電力伝送, 携帯端末, 移動, 2次元平面, 角度

Wireless Small Power Transfer System for 2-D Movable Handy Terminals

Toshio ISHIZAKI[†] Satoshi NOJIRI[†] and Ikuo AWAI[‡]

[†] Faculty of Science & Technology, Ryukoku University 1-5 Yokotani, Seta Oe-cho, Otsu, Shiga, 520-2194 Japan

[‡] Ryutech Corporation 1-5 Yokotani, Seta Oe-cho, Otsu, Shiga, 520-2194 Japan

E-mail: [†] ishizaki@rins.ryukoku.ac.jp, [‡] awai@ryutech.com

Abstract There are strong demands for resonance-type wireless power transfer system to provide small power for movable handy terminals. Charging for cellular phone terminals is a good example. The conventional wireless power transfer systems have a strong restriction for the terminal position, so they don't utilize the merit of wireless transfer. In this report, we studied the methods to gain transfer distance and to transfer power in 2-D region by adopting different size resonators. Also, the transfer efficiency for inclined terminals was studied.

Keyword Resonance-type wireless power transfer, Handy terminal, Movable, 2-dimensional, Inclined

1. まえがき

近年、共振型無線電力伝送に関する研究が盛んに行われている。これらの共振型無線電力伝送システムは、バンドパスフィルタの設計理論で設計が可能であることが既に示されてきた[1]、[2]。また、これまでの研究での最大の関心は、いかに長い伝送距離を高効率・低損失で伝送できるかということであった。結果として、最大伝送距離を稼ぐためには、共振器の直径を大きくすることが有効であるという知見を得ることができている。

一方で、無線で電力を送るという利点を最大限生かすためには、受電側を移動可能にしたいという強い要望がある。受電側共振器を移動可能端末に搭載するためには、共振器のサイズを限りなく小さくする必要があり、前述の伝送距離を最大化する条件と矛盾する。

そこで、当然の帰結として、送電側の共振器の直径は大きくし、受電側の共振器の直径を小さくするというサイズの異なる非対称共振器を用いる無線電力伝送が考えられる。しかし、これまでに、そういう提案はなされておらず、また実際の効果・設計指針も明確ではなかった。本報告では、そのような新しい非対称共

振器を用いた無線電力伝送システムを提案し、その有効性を示すとともに、設計法を明確にする。

本報告では、非対称共振器を用いた2次元平面で移動可能端末に送電可能な無線電力伝送システムを提案する。また、その有効性を示し、設計法を明確にするとともに、端末が傾いた場合の伝送効率についても検討する。

2. システム構成

図1に提案する非対称共振器型無線電力伝送システムの構成図を示す[3]、[4]。電源から送られた送信信号は、第1の結合ループを介しインピーダンス整合をされて、送信側共振器に送られる。この送信側共振器は、今まで用いられてきたような直径の大きなスパイラル・コイルのようなものである。それから、送信信号は、距離 d に対応する結合係数でもって受信側共振器に結合される。そして、インピーダンス整合のための第2の結合ループを介して負荷抵抗に電力は送られる。

送信側共振器は、図2に示すように、床に埋め込んだり、壁に掛けたりすることを想定している、床面、壁面近傍のどこでも電力を受け取るためには、究極的には、送信側共振器の大きさは、床面、壁面全体に渡るような大きさが期待される。

ここで、受信側共振器はサイズを小さくするために狭ピッチのスパイラル・コイルとするとともに、さらに負荷キャパシタを接続し共振周波数を下げることによって小型化を図っている。図3に、2種類の受信側コイルA、Bの写真を示す。ここで、電力伝送の周波数は26MHzとした。受信コイルAの直径は3.1cm、線間ピッチは0.2cm、巻数は4.5巻で負荷キャパシタは68pFである。受信コイルBの直径は3.1cm、線間ピッチは0.2cm、巻数は3.0巻で負荷キャパシタは110pFである。このサイズであれば、十分携帯端末のような小型機器の中にも配置可能だと考えられる。コイルの無負荷Qは、Aが260、Bが210である。

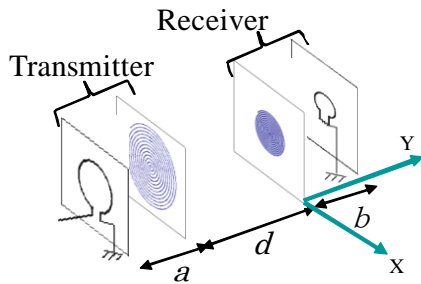
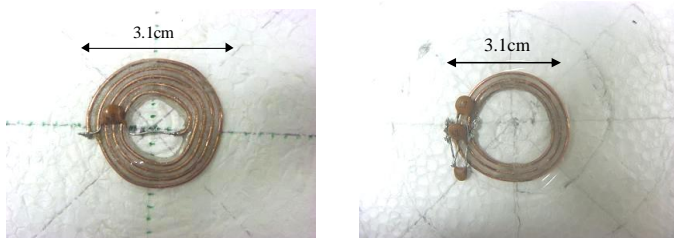


図1. 提案する非対称共振器型無線電力伝送システム



図2. 移動可能端末への無線給電のイメージ

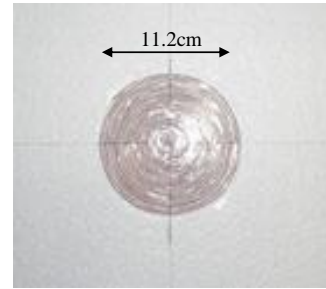


(a) 受信コイルA (b) 受信コイルB

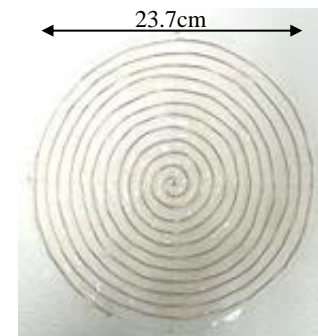
図3. 受信側小型スパイラル・コイルの写真

3. 送信側コイル直径と到達距離

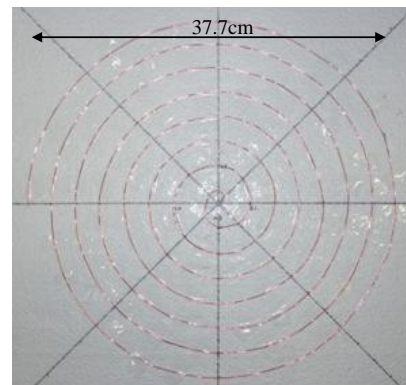
送信側コイルには、図4に示すような3種類のスパイラル・コイルを用意した。1つめのコイルは、直径11.2cm、線間ピッチ0.2cm、巻数24.6巻のスパイラル・コイルである。2つめのコイルは、約2倍の直径を持つ直径23.7cm、線間ピッチ1.0cm、巻数10.4巻、3つめのコイルは、約3倍の直径を持つ直径37.7cm、線間ピッチ2.5cm、巻数7.5巻の同じくスパイラル・コイルである。



(a) 送信コイル小



(b) 送信コイル中



(c) 送信コイル大

図4. 送信側大型スパイラル・コイルの写真

直径17cmのループ・コイルを用いて測定した送信コイルの無負荷Q値を図5に示す。この結果より、周波数を一定とした場合には無負荷Qが最大となる適切なコイルの大きさがある。大きいほうが必ずしもQが高いということでもないようである。また、ループが

近づいた場合の無負荷 Q 値の劣化の様子が異なっていることも見て取れるが、これについては別途報告をする。

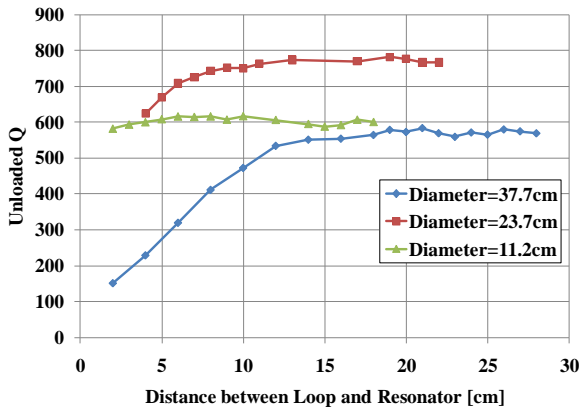


図 5. 送信コイルの無負荷 Q 値

前記の 3 つの送信側共振器について共振器間結合係数を測定した結果を図 6 に示す。いずれも、受信側に用いたのは前述の受信小型コイル A である。図 5 から分かるように、直径の大きい送信コイルのほうが、距離 d が大きくなっても結合度の劣化の程度は小さく、結果として遠い距離まで電力伝送を出来ることが読み取れる。また、小さい送信コイルが距離 d の小さいところでは結合係数が大きくなっているが、これは共振周波数を一定としているため、中心付近での巻線密度が大きいことによると考えられる。これより、直径の小さい送信コイルでは、ごく近傍では低ロスで送電できるものの、距離が 5cm 以上離れると急激にロスが増え、それ以上では送電が困難になってくることを確認された。

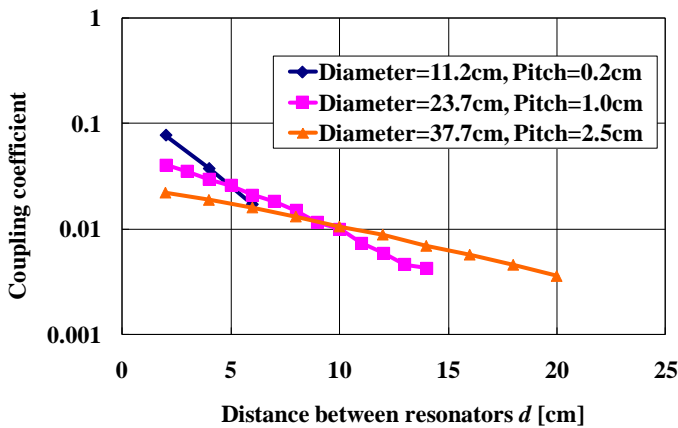


図 6. 共振器間結合係数の距離依存性

4. 横方向スライド時の結合係数

前記の 3 つの送信側共振器について、今度は横方向

にスライドさせた時の共振器間結合係数を測定した結果を図 7 に示す。送信コイルの直径が大きいほうが送電エリアが広くとれている。しかし、円周より内側で結合係数は劣化する結果となった。これは、送信側共振器周辺の電磁界の分布が、共振器の面積に応じて薄まったためと考えられる。

結合係数の大きさを詳しく見ると、送信コイルの中心から円周方向に半径の半分ほど行ったところで、結合係数は小さくなり始め、円周上では 10 分の 1 程度になってしまっている。これでは、送信コイルの中心付近でしか良好な給電はできないことがわかる。

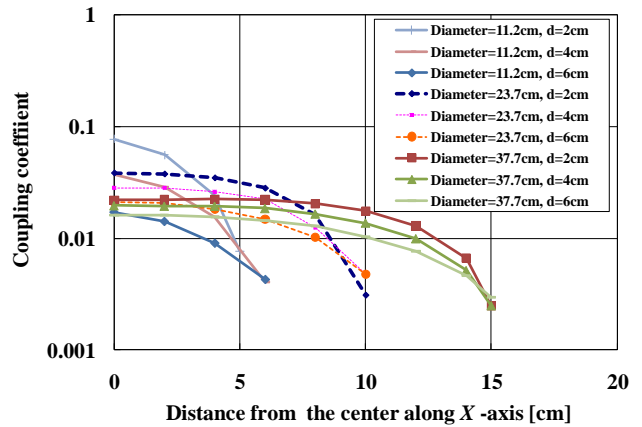


図 7. 横方向にスライドさせた時の共振器間結合係数

5. 送信コイルの巻き方の最適化

前記課題を解決するため、送信コイルの巻き方の最適化を行う。今までの結果より、送信コイル上の電磁界分布を一様化することが必要ではないかと考えられる。そこで、送信コイルを図 8 に示すような、エッジワイズ・スパイラル・コイルに置き換える。エッジワイズ巻は、外側から一定ピッチで巻き始め、中央部は巻き線がない巻き方である [5]。コイルの直径は 23.7cm、線間ピッチは 0.4cm、巻数 4.1 巻とした。直径は送信コイル中と同じである。エッジワイズ・スパイラル・コイルの結合係数の変化を送信コイル中の場合と比較してみた。

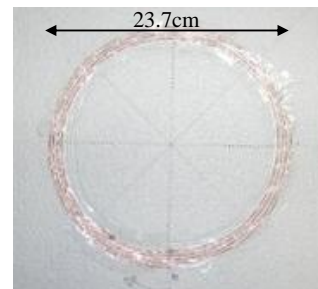


図 8. エッジワイズ・スパイラル・コイル

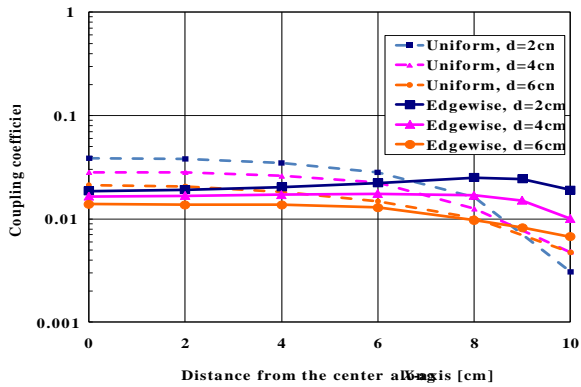


図9. 横方向にスライドさせた時の共振器間結合係数 (送信コイル中とエッジワイズ・コイルの比較)

図9より、円周付近での結合係数に大幅な改善が認められる。しかし、逆に中央部分の結合度が下がりすぎてしまった。そこで、均等巻とエッジワイズ巻の良い所取りをするために、周辺はエッジワイズ巻とし中央部は均等巻とするハイブリッド巻型コイルを作成し、その場合の結合係数について確認をした。

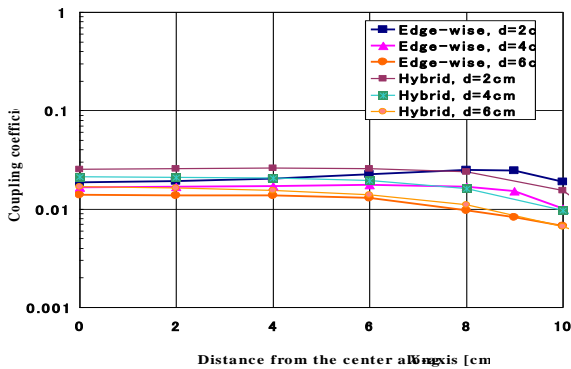


図10. エッジワイズ巻とハイブリッド巻の結合係数の比較

図10は、エッジワイズ巻とハイブリッド巻の比較結果を示している。図からわかるようにハイブリッド巻では、円周付近での結合係数はほぼ維持したまま、中央付近の結合度の改善が図られている。

6. システム設計

このようなシステムにおいては、それぞれの共振器の物理サイズが異なるため、各共振器のスロープパラメータが異なる。通常のフィルタ設計では、同型の共振器を用いることが多く、各々のスロープパラメータは等しいと見なしている。しかし、このような場合でも、従来のバンドパスフィルタの設計理論[6]が適用できる。本システムでは、共振器が2個あるので、2

段のバンドパスフィルタとして、システム設計が可能である。ここで、インピーダンス・インバータを K_{01} 、 K_{12} 、 K_{23} で表すと、

$$K_{01} = \sqrt{\frac{R_S x_1 W}{g_0 g_1 \omega_1}}$$

$$K_{12} = \frac{W}{\omega_1} \sqrt{\frac{x_1 x_2}{g_1 g_2}} \quad (1)$$

$$K_{23} = \sqrt{\frac{R_L x_2 W}{g_2 g_3 \omega_1}}$$

となる。ここで、 R_S 、 R_L は信号源抵抗、負荷抵抗、 w は帯域幅、 ω_1 は対応するローパスプロトタイプフィルタの遮断各周波数、 g_0 、 g_1 、 g_2 、 g_3 はエレメント値である。2段マキシマリーフラット型フィルタ特性の場合は、 $g_0=g_4=1$ 、 $g_2=g_3=1.414$ である。 x_1 、 x_2 は、各々の共振器のインピーダンス・スロープ・パラメータである。これらは、(1)からわかるように任意の値を設定でき、値が異なっても設計上で何ら差し障りはない。

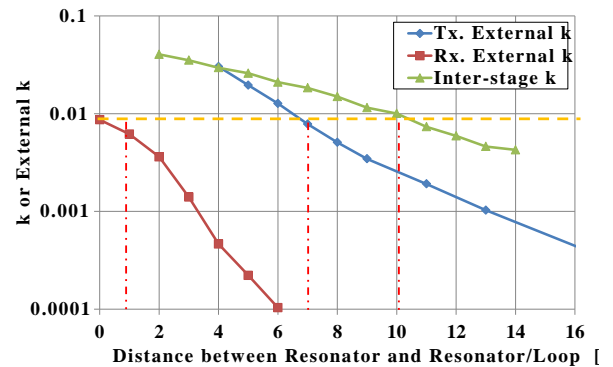


図11. 無線電力伝送システム設計チャート

図11は、送信コイル中と受信コイルAを用いた場合の無線電力伝送システムの設計チャートを示している。(1)式から結合係数が求まり、段間結合係数と外部結合係数が等しくなることが分る。そのため、伝送距離を決めると、図表上では水平線を引きその交点を求めることにより、送信ループと送信コイル間距離、受信ループと受信コイル間距離が簡単に求まる。試作例として、送信距離を10cmとすると、それぞれのコイル・ループ間距離は7cm、1cmとなる。

7. 伝達特性

設計した無線電力伝送システムの伝送特性実測値を図12に示す。伝送損失は2.29dB、効率は59.0%が得られた。

ここで、伝送損失の理論近似式はフィルタの理論か

ら式 (2) で得られる [7]。

$$L[\text{dB}] = 4.343 \times \frac{1}{w} \sum_{i=1}^2 \frac{g_i}{Q_{0i}} \quad (2)$$

ここで、 $Q_{e1}=780$ 、 $Q_{e2}=260$ 、比帯域幅を $w=0.015$ とすると伝送損失の理論値は 2.10dB となり、ほぼ理論どおりの伝送効率が得られていることがわかる。

次に、受信コイルを A から B に変えて同様に設計を行う。入出力整合の関係で伝送距離を 8cm とするとうまく整合することができ、図 1 3 のような伝送特性を得ることができる。得られた伝送損失は 2.81dB、伝送効率は 52.3% であった。理論値は、受信コイルの無負荷 Q 値を 210 とすると 2.47dB である。0.52dB の損失の増加は、受信コイルの無負荷 Q 値の低下に起因するものと思われる。

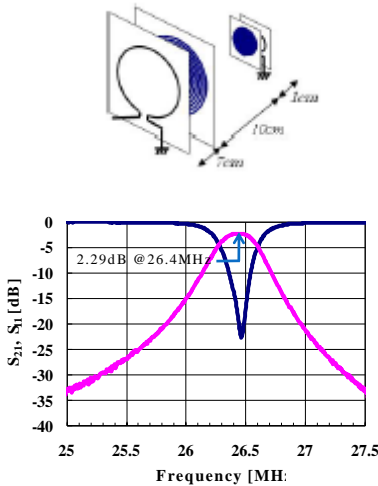


図 1 2. 設計したシステムの伝送特性 (1)

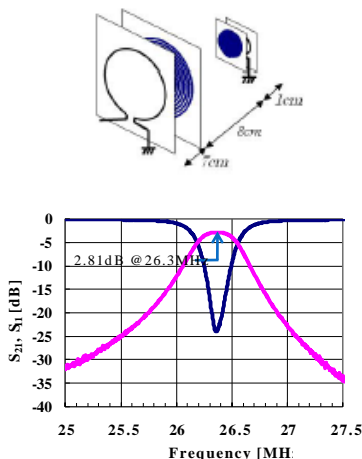


図 1 3. 設計したシステムの伝送特性 (2)

図 1 4 に、受信コイルの無負荷 Q 値が伝送損失に与える影響を図示する。容易に予想されるように、受信コイルと送信コイルの無負荷 Q 値が低いほう、すな

わち本構成においては小型コイルを用いる受信コイルの無負荷 Q 値がシステムの伝送損失に対して支配的となる。

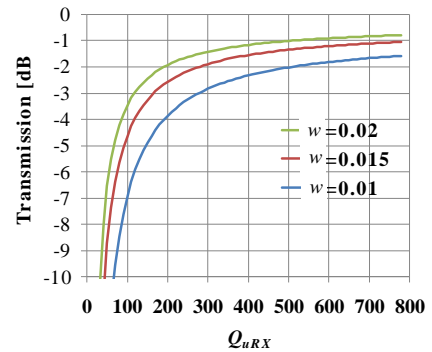


図 1 4. 受信コイルの無負荷 Q 値が伝送損失に与える影響

8. 受信コイルの傾きの影響

これまでの検討により、2次元平面のある領域において無線給電できる目途が立ったので、次に受信コイルが送信コイルに対して正対せず、図 1 5 で示すように、ある角度 θ で傾く場合について検討を行う。

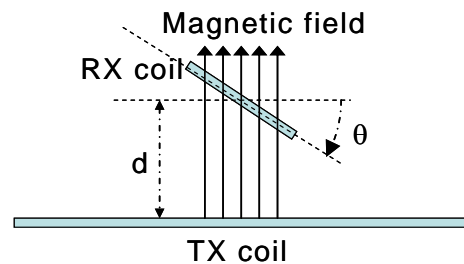


図 1 5. 受信コイルの傾き

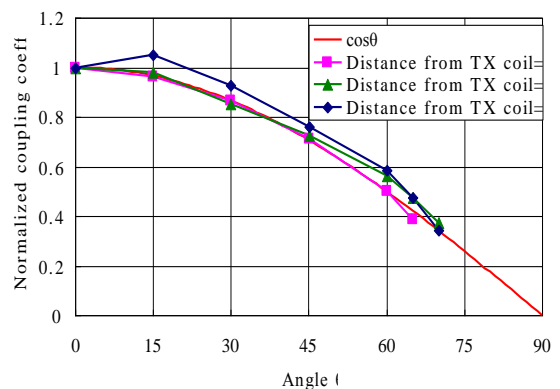


図 1 6. 受信コイル角度と結合係数の関係

図 1 6 は、受信コイルの傾き角度と結合係数の関係を測定した結果を示している。結合係数は、 0° の結合係数で規格化した値を表示している。グラフは $\cos\theta$ の線と共に描かれており、よく一致していることが分る。このことから、図 1 5 に示すように、送信コイルから

面に垂直に発せられた磁界ベクトルがほぼ平行を保ったまま、受信コイルに捕捉されていると推測される。これにより、2分の1までの結合係数の低下を許すならば60°程度の傾きまで対応できることがわかる。それ以上の傾き角に対しては何らかの追加的な対応が必要となる。

9. 結論

移動可能な小型端末への小電力無線電力伝送を考え、送信コイルと受信コイルにサイズの異なる非対称共振器を用いたシステムを提案した。受信側コイルは狭ピッチ巻きとし、さらに負荷キャパシタを装荷することで直径3.1cmを実現した。送信側コイルは直径の大きいほうが遠くまで送電できることを確認した。送信コイルの巻き方に、エッジワイズ巻と均一卷を組み合わせたハイブリッド型巻を採用することにより、送信コイル上ではほぼ一様な結合係数を得ることができた。実験により、提案したシステムが所期の目的にかなうものであることを実証した。また、受信コイルの無負荷Q値が伝送損失に対して支配的であることを確認した。さらに、受信コイルの傾きに対して、結合係数が2分の1の減少までを許容するならば、60°程度の傾きまで動作可能であることが確認できた。

文 献

- [1] 粟井、電学論 C、130 巻 12 号、pp.2192-2197, 2010 年 12 月.
- [2] I. Awai et al., "A simple and versatile design method of resonator-coupled wireless power transfer system", IEEE ICCAS International Conference, Digest, pp.616-620, July 28-30, 2010.
- [3] 石崎他, "サイズの異なる非対称共振器を用いた無線電力伝送の検討", 2011年電子情報通信学会総合大会, BS-2-6, S29-30, 2011年.
- [4] T. Ishizaki et al., "A Novel Concept for 2-Dimensional Free-Access Wireless Power Transfer System Using Asymmetric Coupling Resonators with Different Sizes", IMWS IWPT2011, Proceedings, pp.243-246, May 2011.
- [5] T. Ishizaki et al., "Comparative study of coil resonators for wireless power transfer system in terms of transfer loss", IEICE Electronics Express, Vol.7, No.11, pp.785-790, June 10, 2010.
- [6] G. L. Matthaei et al., "Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures", Artech House, 1980.
- [7] 粟井:「共鳴型ワイヤレス電力伝送の新しい理論」、電気学会論文誌 C、IEEJ Trans. EIS, Vol.130, No.6, pp.966-971, 2010.