

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560483

研究課題名(和文) 小型ダイポールアンテナを用いたワイヤレス電力伝送の基礎検討

研究課題名(英文) Study of a wireless power transmission using a small dipole antenna

研究代表者

常川 光一 (TSUNEKAWA, Koichi)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：40434568

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：電界結合型の無線電力伝送(独立伝送形)方式について、その等価回路解析により、動作原理と特性の検討を行った。シミュレーション、実験と比較してその各素子定数を決定した。伝送効率に対する各素子パラメータの影響について検討した。伝送効率では、周波数と負荷抵抗を適宜調整すれば伝送距離を伸ばせることを確認した。一方、同一アンテナにおいて金属板間のキャパシタンス(結合容量)を減らせば伝送効率を上げられる可能性がわかった。また、受信アンテナの近傍電界制御は位相線路の追加、調整により可能なことがわかった。さらに本システムを電子ペーパーとして活用するエネルギーマネジメントシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：Characteristics and operating principle are examined by the equivalent circuit analysis. An equivalent circuit was considered first and determined that each element constants. We have investigated the effect of each element parameters for the transmission efficiency. It was confirmed that the effect of the Q value of L and C is exactly equivalent for transmission efficiency and transmission distance is extended to be appropriately adjusted the load resistance and frequency. On the other hand, the reduced capacitance between metal plates of the antenna is increasing the transmission efficiency was found. Furthermore, near field control of the receive antennas additional phase lines, were found to be possible by the adjustment. Particularly "power saving Concierge", it operates as a function of a more convenient system contributing to power savings. This is a special performance of this method.

研究分野：アンテナ伝搬

キーワード：無線電力伝送 ダイポールアンテナ

1. 研究開始当初の背景

あらゆる人や物が通信により情報共有する「ユビキタス社会」の実現に向けて多くの研究開発が勢力的に進められている。しかしあらゆる物に通信システムを搭載することが可能となっても、装置の駆動エネルギーはバッテリーが主流となるため設置物が制限されたり、専用装置で定期的な充電をする必要がある等の問題が残る。また大型装置では通信はワイヤレスなのに電源コードの接続が必要という矛盾も生じる。この課題を解決し、真のワイヤレスを実現するにはワイヤレス電力伝送が必要となる。ワイヤレス電力伝送については古くから多くの研究がなされており、その本質的課題は「いかに3次元空間に1次元のワイヤレス伝送路を構築するか」に集約される。この課題の克服方法は主に以下の3技術が研究されてきた。

A. 送受信装置を密に近距離させることで、近接面に対して垂直方向に1次元伝送路を構築する。

B. 送信アンテナから受信アンテナへ鋭い電波指向性を向けることで1次元伝送路を構築する。

C. 送受信アンテナを強く空間結合させて1次元伝送路を構築する。

Aはマットのような2次元伝送路を予め用意しておく、その上に通信装置を近接させることでマットと通信装置間で1次元伝送路を作るものである。本方法は適切なピックアップを用いれば比較的効率も高く、実用化されているものもある。受信装置の給電場所がマット上に限定されるという課題がある。Bは鋭いアンテナ指向性により、3次元に拡散してしまう送信エネルギーを受信アンテナに集中させるものである。本方法は宇宙空間から地上への電力伝送などが考えられているが、マイクロ波の大型アンテナが必要なことと、受信アンテナが移動した場合に指向性制御が必要となる欠点がある。Cは近年注目されている研究であり、同一共振周波数の小形アンテナが近接した場合の強い結合を利用して電力を送るものである。小形アンテナは共振波長に応じた所望のクリアランス領域を持つので、その領域に他の共振アンテナが侵入すると強く結合する。

これらの手法において主に利用する電磁界は、A:誘導界、B:放射界、C:近傍界(誘導界、静電界)である。今のところ最も送受信間の距離を離せるのは「C方式」であり、実験でも1mの距離で80%近い伝送効率を得ている。しかし「C方式」において高い効率でかつ伝送距離を伸ばすには、共振器であるアンテナ(コイル)の導電率を上げ、非常に高いQを実現する必要がある。実アンテナでこの高いQ値の実現は大変難しく、現状では実装置での伝送距離は送受信アンテナの大きさ程度に限定されてしまう。

そこで本研究では、従来の放射・誘導電磁界による電力の伝送には限界があると考え、金属板同士の静電結合(コンデンサ)を用いて電力を伝送するワイヤレス伝送方式を提案する。上記従来方法にはない静電界を用いる新しい方式である。本方式はアンテナ(金属板)に対して垂直な電界を用いるため、非常に低い周波数でありながら指向特性が発生し伝送効率を上げられる可能性がある。またダイポールの2つの波源を任意の点に設定し、高周波を流して位相を調整すれば近傍界分布を制御でき、任意の受信点に電力を送れる。ただし、本方式は基本的に独立な2つの経路を用いて電位差(ポテンシャル)を伝送する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来に無い新しいワイヤレス電力伝送の方式として静電界を用いた方式について基礎検討を行うことにある。特に独立な2つの経路を空間に構築して2点間のポテンシャル(電位差)を独立に移動させる方法を検討し、波源の位相調整により近傍界を制御することで任意の点に電力を空間で伝送する。この電力伝送アンテナシステムを実現することが研究の具体的な目的である。本方法は、新しい概念を用いた非常に挑戦的な研究となる。

3. 研究の方法

伝送線路を空間に構成するため、送受信アンテナを2対のコンデンサの組と考える。すなわちアンテナ素子は単なる正負の電荷を溜める金属として動作させ、受信アンテナ素子に逆の電荷を発生させる。電極間隔の非常に広い極小容量のコンデンサ(0.1fF程度)でもある程度の距離の電力伝送が可能であることは回路シミュレーションで確認している。但し、本方法はアンテナ素子同士を独立なコンデンサとして動作させることと、放射界を発生させないアンテナを設計することが必要である。既にMIMO技術の応用で空間に独立な経路を構成できることは確認しているので、さらに周波数、時間による独立経路の構築方法も検討する。また、正弦波状に振動する電荷(交流)を用いて位相調整により近傍界を制御する。これにより任意の空間でポテンシャル(電位)差を発生させる検討を行う。最終的には本アンテナをユビキタスシステムに組込んでデモを行う。

4. 研究成果

4.1 独立伝送形電界結合方式の等価回路

本方式の着眼点は、図1に示すように伝送路の途中にコンデンサを入れたものである。従って、コンデンサとしては金属板に垂直な電界が主となる。一方、上下の金属板ではダイポールアンテナを形成し、垂直方向電界での結合も介在する。

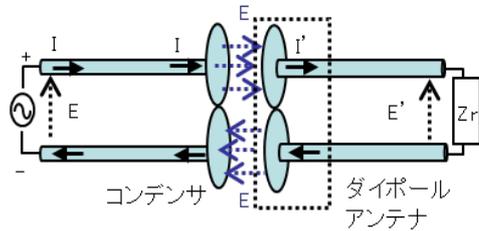
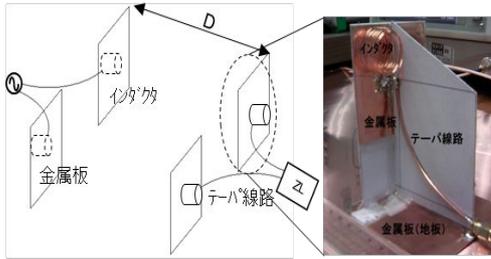


図1 独立伝送方式の概念図

2つの動作原理を両立するため図2に示すアンテナ構成を提案した。ダイポールモードとして動作させるには伝送路にインダクタを挿入してLC共振を起こす必要がある。従って本アンテナは電界結合型である。



(a)構成図

(b)実験アンテナ

図2 アンテナ構成

そこで、本アンテナの動作原理解明のため、等価回路を作成した。図3(a)に示すように電界共振結合型では各アンテナの自己キャパシタンス C と相互キャパシタンス C_m 、回路に挿入するインダクタ素子 L 、全ての損失抵抗 R と負荷インピーダンス Z_L で構成される。各パラメータ値の導出は難しく、シミュレーション等から決めることになるが、各回路素子の物理的意味はわかりやすい。ここから伝送効率 (S_{12}) と入出力インピーダンス ($S_{11} : Z_{in}$) を求める。まず、図3(b)に示すように形回路に変形し、簡単にキルヒホッフの法則を適用するためT型回路とする。これらより各パラメータの関係は以下となる。

$$C_e = \frac{C_m(C - C_m)}{C_m + 2(C - C_m)} \quad C_s = \frac{(C - C_m)^2}{C_m + 2(C - C_m)}$$

$$I1 \left(z_L + R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_e} \right) + (I1 + I2) \frac{1}{j\omega C_s} = V_S$$

$$I2 \left(z_L + R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_e} \right) + (I1 + I2) \frac{1}{j\omega C_s} = 0$$

C_m [F]	$j\omega C_s$ [F]	$j\omega C_s L$ [H]
5.4511E-14	8.0654E-13	1.94E-06

ここで $\omega = 2\pi f$ 、 f : 周波数、 $j = -1$ である。

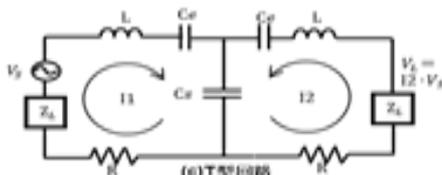


図3 等価回路

これらの式より以下が導出される。

$$\frac{V_L}{V_S} = \frac{-z_L}{z_T \left(z_T + \frac{2}{j\omega C_s} \right)} \quad (1)$$

$$z_{in} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_e} + \frac{z_T}{z_T + \frac{1}{j\omega C_s}} \quad (2)$$

ここで、 $z_T = z_L + R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_e}$ である。

これらの式から各回路素子の定数と伝送効率 (S_{12}) と入出力インピーダンス ($S_{11} : Z_{in}$) の関係を求める。

4.2 回路素子定数の決定

構成要素を基本に等価回路を作成したため、各パラメータの値を正確に導出することは容易ではない。そこで最も定量化が難しいLCの損失を0 (無損失)として、シミュレーションに一致する各定数を導出した。図2のテーパ線路の扱いが等価回路では難しいため、図4に示すように各要素がわかりやすいシミュレーションモデルとした。

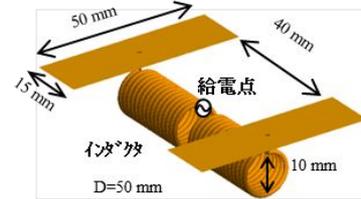


図4 シミュレーションモデル

このモデルを対向させて算出した S_{11} , S_{12} を図5に示す。また等価回路より計算した結果も示す。

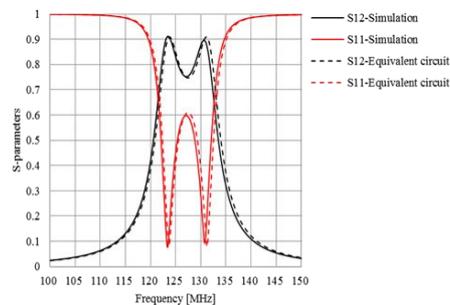


図5 Sパラメータ特性

表1 各素子パラメータ値

この結果、表1に示すようにシミュレーションとの結果が正確に一致する各素子の値が明らかになった。なお $Z_L = 50$ とした。

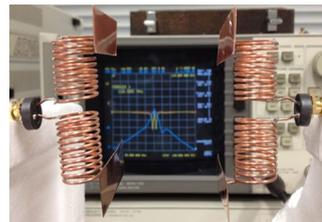


図6 実験の様子

さらに実際の現象を正確に表すため、実験との比較により LC の損失抵抗すなわち Q 値を求めた。実験の様子を図 6 に示す。平衡-不平衡系接続による測定誤差を軽減するためフェライトリングを給電部に付けた。距離 D に対する伝送効率 (S12) の特性を図 7 に示す。

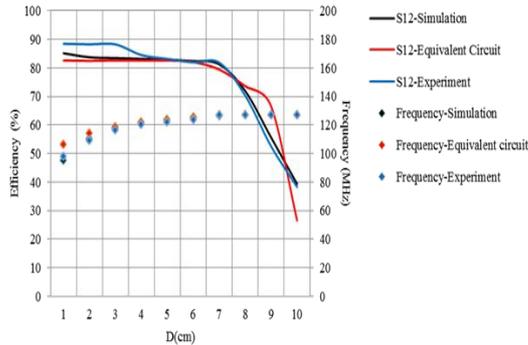


図7 実験結果との比較

この測定は、アンテナ間距離 D を変えながら最大効率を得られる点を追ったもので、D により周波数が変化している。これらより、明らかにシミュレーション、無損失等価回路とは大きく伝送効率 (S12) が違うことがわかる。そこで、図 8 に示すように等価回路において LC の Q 値 (QL、QC) をパラメータとして伝送効率 (S12) を計算した。

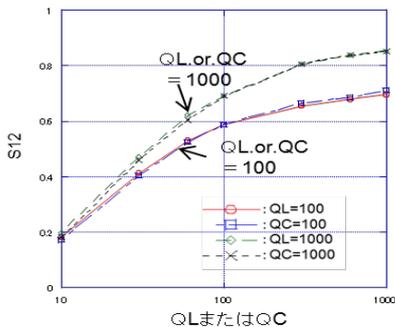


図8 Q値(QL、QC)によるS12の変化

この結果から、実験値とほぼ一致する Q 値は LC 共に約 100 程度 (約 16 / 127MHz) であることがわかった。さらにこの図から等価回路において伝送効率 (S12) への影響は、LC の Q 値は完全に同等の効果であることがわかる。

4.3 伝送特性の検討

等価回路の各パラメータが決定したので、幾つかを変えて特性を検討する。

・相互キャパシタンス (Cm)

相互キャパシタンス (Cm) は、具体的には伝送距離 D に対応する。伝送距離が変化した場合の最大伝送効率とその時の周波数の関係を図 9 に示す。ここでは LC の損失は 0 としている。

この図から言えることは、相互キャパシタンス (Cm) が小さくても、最大点を追って周波数を調整すれば高い伝送効率を保持し続けることである。相互キャパシタンス (Cm) が小さくなるということは、ア

ンテナ間の距離が遠ざかることであり、図 7 に示す結果を実証している。これは周波数を調整すれば伝送距離を伸ばせることを示している。

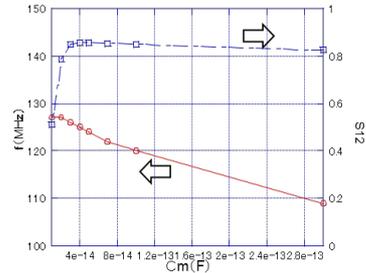


図9 Cmと最大効率S12、その周波数の関係

・自己キャパシタンス (C0)

自己キャパシタンス (C0) は、具体的には主にアンテナの金属板間隔などアンテナ構造に対応する。C0 による伝送効率の周波数特性変化を図 10 に示す。

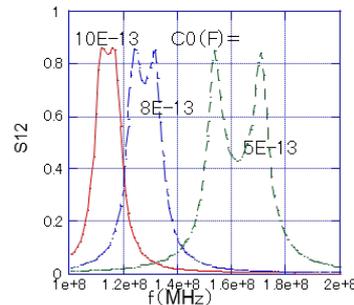


図10 C0によるS12の周波数特性

この図より最大効率の値はほぼ変わらないが、自己キャパシタンス (C0) が小さくなると最大効率を得られる周波数が上がり、双峰的な形状となることがわかる。これはアンテナ構造として金属板間隔を離すなどして自己キャパシタンスを小さくすると最大効率周波数が上がることを示しており、通常のダイポールアンテナ間の結合とは傾向が逆になっている。さらに周波数特性が双峰的な形状になる場合は負荷インピーダンスを調整することで伝送効率の向上が期待できる。

・負荷抵抗 (ZL)

そこで、負荷抵抗 (ZL) と伝送効率の関係を検討した。QL = QC = 100 として計算した結果を図 11 に示す。ZL = 50 では S12 = 0.59 であったが、ZL = 120 とすることで、S12 = 0.72 まで向上できることがわかった。図 11(a) に示すように、周波数特性が双峰的な形状の場合、適切な負荷を選択することで単峰的となり最大効率を得られる。またその時は (b) に示すようにインピーダンス整合も取れていることがわかる。

これらから、本構造のアンテナはダイポールアンテナとしての結合と伝送路の中に挿入したコンデンサとしての結合の両方の要素を持つことがわかる。すなわち共振点で最大効率を得ると共に、伝送路の独立性が高いほど伝送効率が良いという可能性がある。

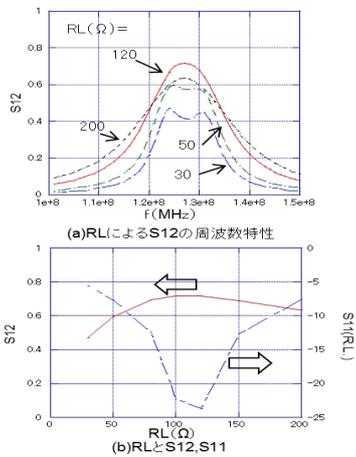


図11 RLと伝送効率(S12)特性の関係

4.4 近傍界分布の制御

本方式は近傍電界を用いているため、最も近傍において、最も高い電界は静電界である。この場合の電界は電荷からの距離を r として以下で表される。また成分は電荷からの放射方向すなわち X 軸であれば E_x 成分となる。:

$$E_x(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2} \dots\dots\dots(1)$$

$j = -1, 2$ f であり、 f, ϵ は周波数、誘電率、円周率である。また、 Q は点電荷量 (クーロン) である、従って、ダイポール形式とした場合は下記の E_{xv} 成分は:以下で表される。

$$E_{xv}(r, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} Q \left(\frac{e^{j\omega t}}{r_1^2} + \frac{e^{j\omega t + \phi}}{r_2^2} \right) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 r_1, r_2 は各ダイポールからの距離であり、 ϕ はその時間変動における位相差となる。そこで、図 12 のように 2 枚の放射板の間に位相調整線路を置いて、シミュレーションを行った。

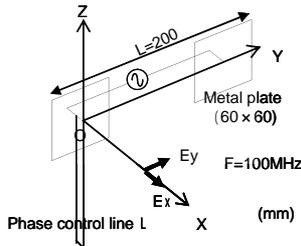


図 12 位相調整線路を追加したアンテナ
ここで、位相調整線路 L を変化させた場合の近傍界分布を図 13 に示す。明らかに近傍電界の制御が出来ていることがわかる。

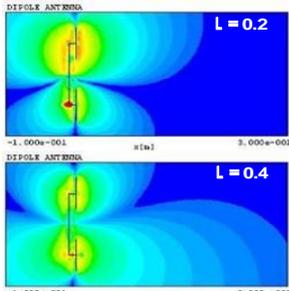


図 13 近傍電界の制御

これらのことから、近傍界も位相線路の追加により制御可能であり、受信アンテナの位置を検出してその方向に電界を向けることにより高い効率で伝送が出来ることがわかる。

4.5 具体的デモシステムの構築

本無線電力伝送システムは、電子ペーパーとして下記に示す “人の気持ちがわかる HEMS” の中でデモンストレーションシステムの構築を行った。このシステムは実際に動作することが重要であり本研究ではこのための各システムの開発と共に、設計法を明らかにする。本デモシステムの具体的構成を図 13 に示す。



図 13 デモンストレーションシステム

このように、本システムを実動するものとするには、大きく分けて伝送系、制御計、センサ系、電力モニタ系、と画像処理系に分けられる。画像データ処理系は画像解析の技術が必要であることから今後の開発事項とし、これ以外の項目の開発を進めた。現在、本デモシステムは中部大学内 1 4 号館 1 階 (141B) において一部稼働中である。

・設計指針

システムアーキテクチャは 3 群のネットワーク部 (A: センサネットワーク、B: 制御ネットワーク、C: 解析ネットワーク) と伝送部、制御部、データベース、付加システムからなる。これに付随してワイヤレス電力伝送を用いたスマートホンやタグへの給電、さらにはこれらの機能を集約したスマート充電スタンドやパワーデスク上で使う電子ペーパーがある。外部との通信は 2 か所あり、一つがインターネットへの接続、もう一方が ZigBee による隣接基地局との通信 (メッシュネットワーク) である。

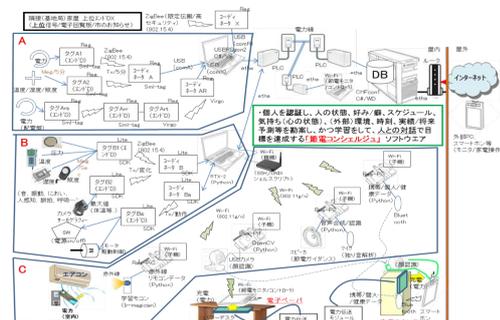


図 14 システムアーキテクチャ

・ネットワーク部
アナログ信号をモニタするのみの系であ

るので、タグは5分程度に1回のデータ送信を行うのみである。データ通信量も非常に少ないので無線部はZigBee等を用いており、タグ番号によりセンサを識別する。

Bではリアルタイムにセンサ信号を受けて直ぐ何らかの動作が必要な部分である。C群はインテリジェントなネットワークである。上述したように信号としてはエアコンの温度を上げたり、テレビのチャンネルを変えるだけである。

・伝送部

無線区間は、前記のように各センサ群で適切な方式を用いる。有線部分は主にイーサネットとUARTであるが、屋内配線ではイーサネットケーブルを這わせずにPLCを、UARTは汎用的なUSBポートで通信を行う。

・制御部（将来構想を含む）

“人の気持ちが変わる”ことを拡張することで、名称は「節電コンシェルジュ」とし、動作は「個人を認証し、人の状態、好み/癖、スケジュール、気持ち(心の状態)(外部)環境、時刻、実績/将来予測等を勘案し、かつ学習をして、人との対話で目標を達成する」ものである。

・データベース

最下部レイヤ(HEMS)ではそのネットワーク内にサーバとデータベース(DB)を置くことを考えている。

・電子ペーパー

本システムで「電子ペーパー」と「スマート充電スタンド」を作製した。両方ともワイヤレス電力伝送技術により、小型電子機器への電源供給や充電を行う。方式は独立伝送方式を用いているが、長距離の伝送は効率が落ちるため、ほぼ近接に近い近距離で伝送している。

5.1.4 まとめ

電界結合型の無線電力伝送(独立伝送形)方式について等価回路を作成し、シミュレーション、実験と比較してその各素子定数を決定した。アンテナにおいて金属板間のキャパシタンス(結合容量)を減らせば伝送効率を上げられる可能性がわかった。これは本方式特有の性質である。また、受信アンテナの近傍電界制御は位相線路の追加、調整により可能なことがわかった。さらに本システムを電子ペーパーとして活用するエネルギーマネジメントシステムを構築した。特に「節電コンシェルジュ」として、電力の節約に寄与するシステムをより便利にする機能として動作している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

[1] Yan, C, Tsunekawa, K ; " Analysis and Performance Improvement of Independent Electric Coupled Resonance WPT System with Impedance Transformer " IEICE Trans. Communications, Vol, E98-B, No.4, pp.630-637.2015

[参考] Yan, C, Tsunekawa, K ; " A Novel Resonator Design for Quality Factor

Improvement Using Tightly-Coupled Parallel Coils in Coupled Magnetic Resonance Wireless Power Transfer " IEEE Trans.on IEEE Industrial Electronics Communications,投稿済/現在査読中.

〔学会発表〕(計6件)

[1] Yan, C, Tsunekawa, K ; " A Novel Parallel Double-layer Spiral Coil for Coupled Magnetic Resonance WPT " IEEE Wireless Power Transfer Conference 2015, Colorado, USA. P1.4, 14 May 2015

[2] Tsunekawa, K, Yan, C ; " Mechanism Analysis and Characteristics survey of Independent Transmission Line Type WPT System " 2015 Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation, hotimin, Vietnam, 8 January 2015

[3] Yan, C, Tsunekawa, K ; " Analysis and Performance Improvement of Independent Electric Coupled Resonance WPT System with Impedance Transformer " IEEE Wireless Power Transfer Conference 2014, Jeju, Korea, pp.239-242, 8 May 2014

[4] Yan, C, Tsunekawa, K ; " A novel parallel double helix loop resonator for magnetic coupled resonance wireless power transfer " The 35th Progress in Electromagnetic Research, Guangzhou, China, pp.466-470. 20 16 April 2014

[5] 常川 光一 ; " 独立伝送形 WPT システムの動作原理解析とその特性 " 信学技報, AP2013-85, NHK 技術研究所、東京都、2013年9月24~25日

[6] Yan, C, Tsunekawa, K ; " Study of WPT system for charging portable devices on a desk " International Symposium on Antennas " 10h International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), pp. 320-324. Xi'an, China, 25 October 2012

〔その他〕

ホームページ等

研究者情報(中部大学HP)

<http://www.chubu.ac.jp/about/faculty/profile/17ef3e5d8ef3dfbe13bf0e842f4c3cbcabd4fb7.html>

中部の技術シーズ(中部科学技術センター)

<http://www.chubu.meti.go.jp/technology/hp/chapter7/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

常川 光一 (TSUNEKAWA, Koichi)

中部大学・工学部・教授

研究者番号: 40434568