

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420353

研究課題名(和文) 高効率の無線電力伝送システムの設計法の研究

研究課題名(英文) Research on design method of wireless power transfer system with high efficiency

研究代表者

陳 強 (Chen, Qiang)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30261580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：まず、散乱行列による無線電力伝送効率を最大化する設計法として、モーメント法を用いて、複雑な環境においても、高速でかつ高精度に誘電体近傍のアンテナを含む無線電力伝送システムの散乱行列を抽出する方法の開発に成功している。また、アンテナの入力インピーダンスの整合回路に損失を考慮した整合回路の設計法を提案している。さらに、アンテナの入力インピーダンスを動的に補正する方法として、インピーダンスのスイッチ付き散乱素子アレーをアンテナ近傍に設置し、スイッチングを制御することにより、システムの送受信アンテナ間の位置ずれや姿勢の変化による伝送効率の低下を抑制することができた。

研究成果の概要(英文)：A approach was developed to calculate the scattering matrix of the antennas in the near-field wireless power transfer system in a complex environment by using the method of moments to design the system with the maximum power transfer efficiency, Loosy matching circuits were successfully designed to improve the impedance matching condition. A method was proposed to compensate the change of input impedance of the antennas to solve the problem of efficiency reduction due to the change of the relative distance and position between the transmitting and receiving antennas in the system. In the proposed system, a parasitic array with a impedance switch in each array element is electrically controlled.

研究分野：電磁波工学

キーワード：無線電力伝送 伝送効率 アンテナ 無線充電 アレーアンテナ インピーダンス整合

1. 研究開始当初の背景

無線電力伝送技術は、家電機器や電気自動車、無線通信端末へのワイヤレス充電を行う技術として大きく期待されており、関連の研究が活発に進められている。また、政策面においては、2009年12月に公表された総務省のICT分野戦略ビジョンで、2020年までにコードのいらぬワイヤレスブロードバンド家電の世帯普及率80%の実現という目標が掲げられている。

無線電力伝送技術を実用するために、いくつかの研究課題が残っているが、高い伝送効率の実現が最も重要でかつ困難な研究課題の1つである。日常生活環境における安全でかつ安定したワイヤレス給電を実用化するために、高効率の無線電力伝送技術の確立が必須である。

多くの研究では、電力の送受信アンテナを共鳴させることが高い伝送効率を実現するための必須条件とされているが、申請者らは、アンテナ同士の共鳴は伝送効率の向上の必須条件ではなく、送受信アンテナを電氣的に十分に小さくすること、そして、アンテナ間の相互結合を考慮して送受信アンテナのインピーダンスを整合させることが重要な手法だと指摘している。

アンテナを波長よりはるかに小さくすると、アンテナの導体損失が伝送効率を低下する主要な原因となり、アンテナを設計するために、複雑な環境における小形アンテナの高速で高精度な数値解析法が必要となる。また、近傍電磁界領域におけるアンテナ間の相互結合が非常に強いため、アンテナ間の相対位置の変化や周辺の電波散乱体の動きなどにより、アンテナの入力インピーダンスが大きく変化する。そのため、強い相互結合を有する送受信アンテナのインピーダンス整合の制御技術を開発する必要がある。

2. 研究の目的

誘電体を含むアンテナの高速、高精度な数値解析をするための解析モデルと定式化を行い、複雑な環境におけるアンテナの高精度、高速の電磁界の数値解析手法を提案し、極めて小形なアンテナでもその導体損失を高精度に解析できるようにする。また、アンテナ間の電磁結合を考慮したアンテナのインピーダンス整合回路とその制御法を提案し、有効性と実用性を明らかにする。

3. 研究の方法

電源装置や電子機器、近傍人体などの誘電体による影響を考慮でき、アンテナの導体損失を正確に計算できる高精度、高速なモーメント法を提案することにより、無線電力伝送システムの伝送効率の最適化設計法を確立にする。次に、強い近傍電磁界による相互結合を有する送受信アンテナのインピーダンス整合できるインピーダンス補正法を検討し、アンテナの姿勢や位置、周辺の電波散乱

体などの影響を受けにくい無線電力伝送システム制御法を確立する。最後に、本設計法と制御法を用いた無線電力伝送システムの試作と実験を行い、本研究の妥当性を示す。

4. 研究成果

(1) 多層誘電体媒質中におけるアンテナ、電波散乱体を解析するための高精度、高速なモーメント法の定式化提案

従来のモーメント法では、自由空間のグリーン関数を用いて誘電体近傍アンテナの数値解析を行っていた。この手法では、誘電体に流れる電流をブロックセグメントで展開し、未知数として扱う必要があるため、計算時間が長いという問題があった。また、誘電体とアンテナの結合が計算結果に十分に反映されないという問題もあった。

そこで、本研究では以下のようなグリーン関数から成るモーメント法を構築した。

$$\bar{G}_{LM}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \bar{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + \bar{G}^{TE}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + \frac{1}{k_{nm}^2} \bar{G}^{TM}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$$

上式の右辺第一項は、波源から観測点に到来する直接波成分、第二項と第三項はそれぞれ

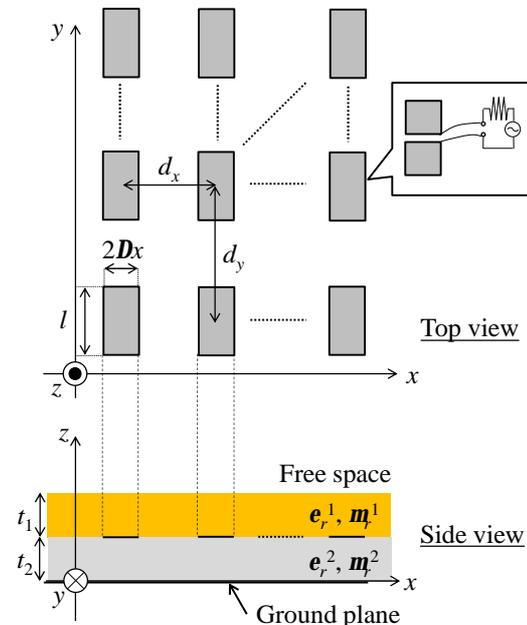


図1：二層媒質境界上のマイクロストリップダイポールアレーアンテナ。

TE波とTM波成分を表す。このグリーン関数を用いてモーメント法を構築すると、誘電体の影響がグリーン関数の中に含まれるため、誘電体そのものに流れる電流を未知数として扱う必要がなくなる。したがって、層状の誘電体のある環境下でのアンテナ数値解析がたいへん高速になる。また、誘電体とアンテナとの結合をスペクトル領域のSommerfeld積分で厳密に評価するため、表面波やラテラル波などのエヴァネッセント波の影響が十分に反映され、計算結果が高精度になるという利点もある。

このようなグリーン関数を用いて、マイクロストリップアンテナの数値解析のためのモーメント法を構築した。第  $i$  電流セグメントと第  $j$  電流セグメント間の自己・相互インピーダンスの表示式は以下ようになる。

$$Z_{ij} = j\omega\mu_0 \iint_S \mathbf{J}_y(x, y) \cdot \iint_{S'} \mathbf{J}_y(x', y') \cdot \bar{G}_{LM}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dx' dy' dx dy$$

上式に含まれる座標に関する四重積分は、座標変換によって複数の二重積分の和に変換した。また、多層媒質のグリーン関数に含まれる二重の無限スペクトル積分も、座標変換によって半無限の単積分、いわゆる Sommerfeld 積分に変換した。さらに、Sommerfeld 積分の計算回数を減らすため、被積分関数に含まれるベッセル関数に対して高次の Taylor 展開を施し、スペクトル積分を数値補間するという手法を提案・適用した。

提案手法の有効性を明らかにするために、図 1 に示すような二層媒質境界上のマイクロストリップダイポールアレーアンテナの数値解析を行った。素子が 1 つの場合の入力インピーダンスの数値解析結果を図 2 に示す。参考のため、商用の電磁界数値解析シミュレータである FEKO を用いた数値解析結果も同じグラフに示してある。図 2 から分かる

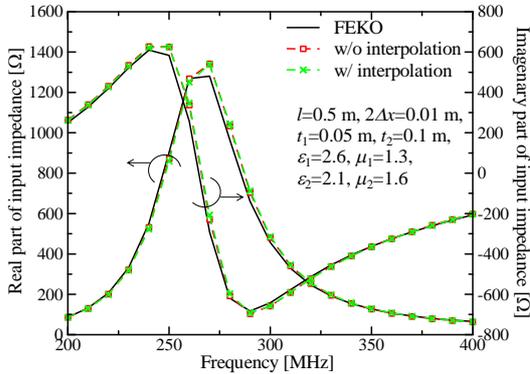


図 2 : 入力インピーダンス。

ように、構築したモーメント法によって得られた数値解析結果は、FEKO によって得られた数値解析結果とよく一致している。また、高次の Taylor 展開を利用して Sommerfeld 積分を数値補間して得られた結果と、Sommerfeld 積分を直接数値積分して得られた結果は互いによく一致している。各周波数の数値計算結果を得るために要した計算時間は、数値補間を適用した場合が 0.3 秒程度だったのに対し、数値補間を適用しなかった場合は 10 秒程度必要であった。したがって、提案した数値補間法によって、数値計算が 30 倍程度高速化されたことになる。

## (2) 導体損失を考慮したインピーダンス整合回路の設計法

近傍界を用いた無線電力伝送には、放射の小さい小形アンテナをよく使用されている。

しかし小形アンテナのインピーダンスの不整合による無線電力伝送効率の低下を招き、通常は整合回路が必要となる。インダクターまたはコンデンサで構成されている L 型や T 型、 $\pi$  型回路がよくその目的で使用されている集中定数整合回路である。それらの整合回路に関しては、今までの設計手法は回路素子の抵抗損失が考慮していない。しかし、アンテナが小さいため、整合回路素子の抵抗損失による伝送効率の低下が大きく、整合回路素子の損失を考慮した設計手法が必要となる。本研究で、その手法を提案し、具体的設計例に応用し、手法の有効性を確認する。

### A. 損失なしの整合回路の設計手法

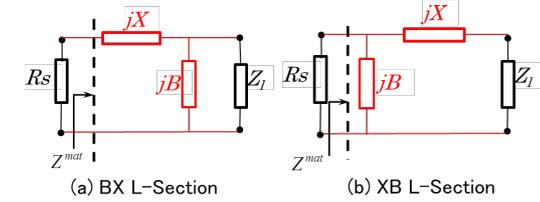


図 3 . L 型整合回路

図 3 に示す L 型整合回路は一般に用いられるものである。目標インピーダンスとして実部だけの  $R_s$  を考える。

$Z_l$  の実部と  $R_s$  の大小関係で  $Z_l$  を先に並列素子かまたは先に直列素子と接続することにより、BX 型と XB 型に分かれている。なお、それぞれの並列サセプタンス  $B$  と直列リアクタンス  $X$  の値は下記の式から計算できる。

( ) BX 型 ( $G_s > G_l$ )

$$B = -B_l \pm \sqrt{G_l G_s - G_l^2}; X = \pm \frac{\sqrt{G_l G_s - G_l^2}}{G_l G_s} \quad (2)$$

( ) XB 型 ( $R_s > R_l$ )

$$X = -X_l \pm \sqrt{R_l R_s - R_l^2}; B = \pm \frac{\sqrt{R_l R_s - R_l^2}}{R_l R_s} \quad (3)$$

これらのパラメータは以下に定義されている。

$$Z_l = R_l + jX_l; Y_l = \frac{1}{Z_l} = G_l + jB_l$$

$$G_l = \frac{R_l}{R_l^2 + X_l^2}; B_l = j \frac{X_l}{R_l^2 + X_l^2} \quad (4)$$

なお、整合回路のサセプタンス  $B$  とリアクタンス  $X$  をインダクターまたはコンデンサで実現する。サセプタンス  $B$  が正の場合はコンデンサ、負の場合はインダクターを使用する。逆に、リアクタンス  $X$  が正の場合はインダクター、負の場合はコンデンサを使用する。

### B. 損失性整合回路の設計の定式化

抵抗損を整合回路素子  $B$  と  $X$  に考慮した場合、抵抗損を考慮した整合回路素子の設計法を述べる。 $Q_b$  と  $Q_x$  をそれぞれ  $B$  と  $X$  の  $Q$  値を表す。 $Q$  値と素子損失は下記の関係がある。

$$Q_B = \frac{|B|}{G}; Q_X = \frac{|X|}{R}$$

ここで  $G$  は  $B$  に含まれるコンダクタンス,  $R$  は  $X$  に含まれる抵抗である. 両方とも抵抗損を表す.

整合条件から, 下記  $B$  と  $X$  に関する 2 次方程式が得られる.

( ) BX 型 ( $G_s > G_l$ )

$$|X|/Q_X + \frac{G_l + |B|/Q_B}{(G_l + |B|/Q_B)^2 + (B_l + B)^2} = R_s$$

$$X = \frac{B_l + B}{(G_l + |B|/Q_B)^2 + (B_l + B)^2}$$

( ) XB 型 ( $R_s > R_l$ )

$$|B|/Q_B + \frac{R_l + |X|/Q_X}{(R_l + |X|/Q_X)^2 + (X_l + X)^2} = G_s$$

$$B = \frac{X_l + X}{(R_l + |X|/Q_X)^2 + (X_l + X)^2}$$

以上の連立方程式から,  $B$  と  $X$  を解くことができる.

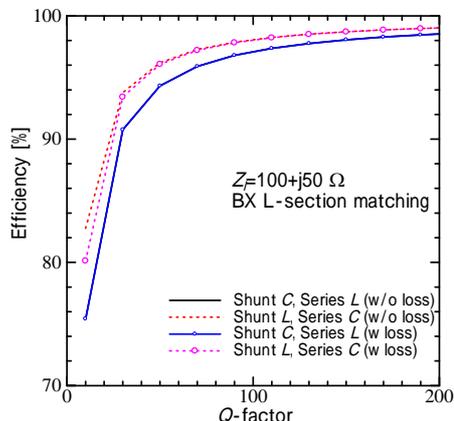
インピーダンス  $R_s=50$  と  $Z_l=100+j50$ , またはインピーダンス  $R_s=50$  と  $Z_l=1+j6$  の整合回路を損失なしと損失ありの整合回路設計例を説明する.

$Z_l=100+j50$  の場合は  $G_s > G_l$  のため, BX の L 型整合回路を用い, また  $Z_l=1+j6$  の場合,  $R_s > R_l$  のため, XB の L 型整合回路を用いる. 無損失整合素子または損失性整合素子を使用した整合回路の素子値が求められる. BX 型においても XB 型においても, コンデンサかインダクターの使用によるそれぞれ 2 種類回路が存在する.

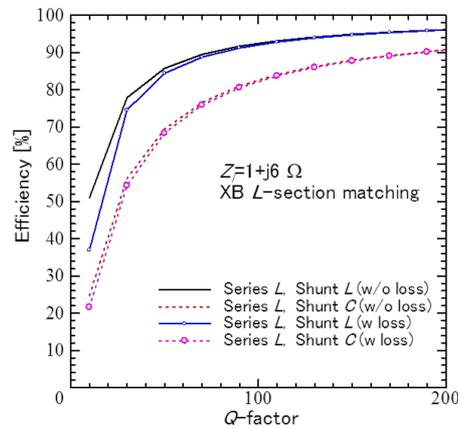
図 4 には  $Q$  値による伝送効率の変化を示す. なお, 伝送効率は下記のように定義する.

$$\eta = \frac{P_l}{P_{in}} (1 - |\Gamma|^2)$$

ここで,  $P_l$  は  $Z_l$  で消費された電力,  $P_{in}$  は整合回路と  $Z_l$  で構成された回路の入力電力, つまり,  $Z^{mat}$  で消費した電力になる.  $1 - |\Gamma|^2$  は不整合による反射損である.



(a)  $Z_l = 100 + j50 [\Omega]$



(b)  $Z_l = 1 + j6 [\Omega]$

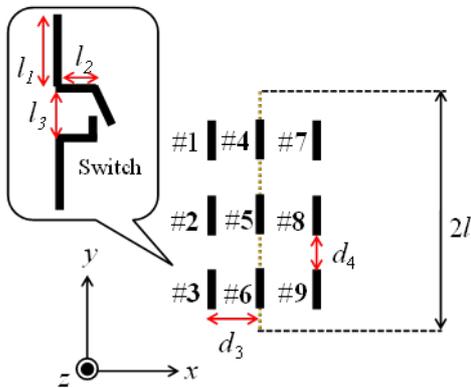
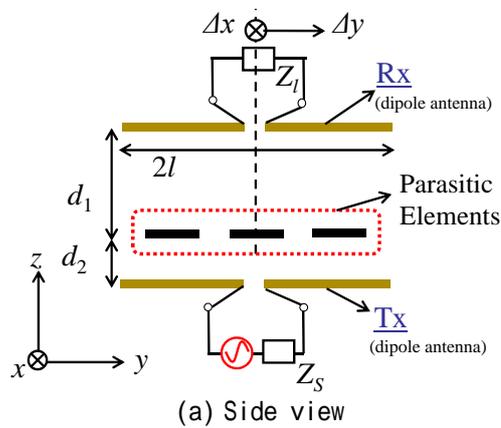
図 4  $Q$  値による伝送効率の変化

図 4 から,  $Q$  値が 50 以下になると, 効率が著しく低下していることが分かった. しかし, 回路の素子がコンデンサかインダクターの選択によって効率は顕著に異なり, 損失が小さい整合回路が存在することが分かった. また, 反射損を低減したにもかかわらず, 提案手法による効率には期待したほど改善されていない. これは, インダクターとコンデンサの損失が反射損失よりはるかに大きいことに原因があると考えられる. 今後, その原因を解明するための検討を行う.

### (3) 負荷装荷散乱アレーを用いたアンテナシステムの設計法と制御法

電力伝送効率を高めるためには, 送受信アンテナのインピーダンス整合を取ることが重要である. しかしながら送受信アンテナが位置ずれすることで, 整合状態はすぐに崩れてしまう. そのため, 送受信アンテナが動いても高い電力伝送効率を維持できる, ロバストな無線電力伝送システムが求められている. 本研究では, 無給電素子アレーを用いた新しい無線電力伝送システムのモデルを提案する. 提案システムの最大の特徴は, 無給電素子アレーを送信アンテナの近傍に設置したことである. 数値解析によって, 提案システムを評価する. またモデルを簡易化することによって, システムの高速化・大規模化を実現する.

提案の無線電力伝送システムを示す. 送受信アンテナにダイポールアンテナを用い, 送信アンテナ近傍に無給電素子を配置している. 無給電素子にもダイポールアンテナを用いる. 各無給電素子にはスイッチが装荷しており, スwitchングにより終端条件を "短絡" もしくは "開放" のどちらかに切り替えることができる. 受信アンテナが位置ずれした際, 終端条件を適応的に切り替えることでインピーダンスの整合状態を維持し, 電力伝送効率の改善を図る.



(b) Top view  
図5 提案システム

提案システムについて、モーメント法を用いて数値解析を行った。なお各素子の素材は全て銅であり、銅損を考慮している。Sパラメータ法を用いて電力伝送効率を求めている。

提案システムは次の3つの異なる条件によって評価されている。

#### w/ Optimum loads

各  $x(y)$  に対して送受信アンテナには常に最適負荷が装荷されており、無給電素子の終端条件も常に最適である。つまり理想的な電力伝送効率である。

#### w/ Switching

送受信アンテナには常に固定負荷  $Z_{s^0}$ ,  $Z_{l^0}$  が装荷されている。 $Z_{s^0}$ ,  $Z_{l^0}$  とは  $x(y) = 0$  かつ無給電素子の終端条件が全て開放であるときの最適負荷である。各  $x(y)$  に対して、スイッチングにより無給電素子の終端条件は常に最適である。

#### w/o Switching

送受信アンテナには常に固定負荷  $Z_{s^0}$ ,  $Z_{l^0}$  が装荷されている。また無給電素子の終端条件は常に開放である。

図6, 7に数値解析結果を示す。図6は受信アンテナがx軸方向にずれる場合、図7は

y軸方向にずれる場合を示している。 $x(y)$ が増加するにつれ、電力伝送効率(青線)は急激に低下している。一方、電力伝送効率(赤線)は全ての点で電力伝送効率を上回っており、最大約50%の改善効果を確認することができる。

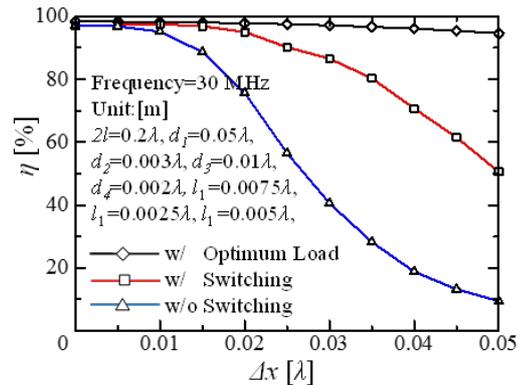


図6: 受信アンテナがx軸方向に位置ずれした時の電力伝送効率

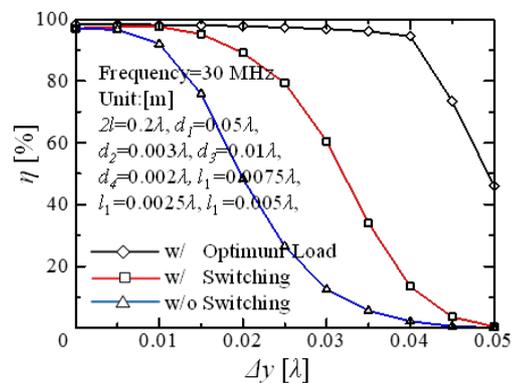


図7: 受信アンテナがy軸方向に位置ずれした時の電力伝送効率

以上のことから、近傍に無給電素子アレーを設置した新しい無線電力伝送のモデルを提案した。各無給電素子の終端条件をスイッチングによって切り替えることで、インピーダンスを変化させ、送受信アンテナが位置ずれした際の不整合損失を抑制することができた。数値解析によって提案システムを評価し、電力伝送効率が大幅に改善されることを数値的に明らかにした。また無給電素子の終端条件の組み合わせ数を減らすことで、計算時間を大幅に短縮できることを確認し、その精度についても数値解析によって明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

[1] B. Nishina and Q. Chen, "Estimation of Equivalent Current Distribution of Modulated EM Radiation Source," IEEE Trans. Antennas Propag., 査読有, vol. 64, no. 4, pp. 1334-1341, April 2016.

[2] 吉川 幸広, 陳 強, 澤谷 邦男, "ガラキーンモーメント法によるプリントアンテナ数値解析の高精度化に関する検討," 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, vol. J98-B, no. 1, pp. 44-52, 2015年1月.

[3] K. Konno and Q. Chen, "The numerical analysis of an antenna near a dielectric object using the higher-order characteristic basis function method combined with a volume integral equation," IEICE Trans. Commun., 査読有, vol.E97-B, no.10, pp. 2066-2073, Oct. 2014.

[学会発表](計6件)

[1] K. Konno and Q. Chen, "Numerical Analysis of Planar Dipole Antennas in the Vicinity of Dielectric Object Using HO-CBFM," International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2014), TH2B-01, pp. 245-246, Kaohsiung (Taiwan), Dec. 2-5, 2014.

[2] Qiang Chen, Mingda Wu, and Qiaowei Yuan, "Antenna Characterization for Wireless Power Transfer Using Near-Field Coupling of Multi-antenna," Proc. of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, Harbin (China), July 24-29, 2014.

[3] Keisuke Konno and Qiang Chen, "Numerical Analysis of Antenna near Dielectric Object by Using CBFM with Arbitrary Block Division," Proc. of The 2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, IF342.4, pp. 2112-2113, Memphis, Tennessee (USA), July 6-11, 2014.

[4] K. Konno, Q. Chen and H. Katsuda, "Acceleration of various direct/iterative solvers for MoM by GPU and its computational cost," Proc. IEICE Int. Symp. Electromagn. Compat., 16P1-S1, pp.824-827, Hitotsubashi Hall (Chiyoda, Tokyo), May 13-16, 2014.

[5] Mingda Wu, Qiang Chen, and Qiaowei Yuan, "Analysis of Near-Field Power Transfer of Multi-Antenna Using Multipoint Scattering Parameters," International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2013), Nanjing (China), Oct. 23-25, 2013.

[6] Qiaowei Yuan, Mingda Wu, Qiang Chen, and Kunio Sawaya, "Analysis of Near-Field Power Transfer Using Scattering Parameters," 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2013), pp. 2965-2967, Gothenburg (Sweden), April 8-12, 2013.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

陳 強 (CHEN QIANG)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 3 0 2 6 1 5 8 0

(2)研究分担者

今野 佳祐 (KONNO KEISUKE)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 2 0 6 3 3 3 7 4

袁 巧微 (YUAN QIAOWEI)

仙台高等専門学校・情報電子システム工学専攻科・教授  
研究者番号: 8 0 5 0 9 7 2 9

(3)連携研究者

なし