

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560385

研究課題名（和文）人体通信用小形アンテナ設計のための超高精度電磁界シミュレータの開発

研究課題名（英文）Development of Ultra High Accuracy Electromagnetic Simulator for Design of Antenna Used in Wireless Body Area Network System

研究代表者

宇野 亨（UNO TORU）

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80176718

研究成果の概要（和文）：人体通信等に用いられるアンテナには小形・軽量化だけではなく、人体の安全性を考慮した設計が求められる。このようなアンテナの設計には市販のシミュレータが用いられることも少なくないが、必ずしも満足できる計算精度が得られない。本研究は電磁波曝露に対する人体の安全性を含めた超高精度電磁界シミュレータの開発を目的に、FDTD 法およびモーメント法の高精度化・高速化について基本的な検討をしたものである。

研究成果の概要（英文）：It is required for a design of antennas used for the body-area network system that not only a downsizing of their shapes and weights but also a careful consideration to a safety for an electromagnetic wave exposure. In the design of this kind of antenna, commercially-provided simulators are often used, however their calculation precision is not always be satisfied. In this research project, some basic investigation results were provided for the purpose to develop the super high accuracy electromagnetic simulator which includes the precise estimation of the safety of the human body for electromagnetic wave exposure. Improvements of computational resources of the FDTD method and the method of moments were investigated because their methods are mainly used in the discipline of computational electromagnetics.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：アンテナ，人体通信，計算電磁気学，FDTD 法，準静近似，表面インピーダンス法，モーメント法

1. 研究開始当初の背景

コンピュータの発達にタイミングを合わせるように、計算機に適した電磁界・アンテナ解析法の研究が 1960 年後半頃から盛んになった。この分野を総称して計算電磁気学

というが、その中心的役割を果たしたのが、米国を中心とする IEEE の Antennas and Propagation Society や Microwave Theory and Technology Society、欧州を中心とする IET（旧 IEE）である。国内では電子情報通信

学会がその牽引役を果たしてきた。申請者も早くからこの分野の研究を開始し、1998年には“FDTD法による電磁界およびアンテナ解析”をコロナ社から出版した。一方、パーソナルコンピュータの性能が格段に向上したことに伴い、市販の電磁界シミュレータが普及するようになり、アンテナの設計に広く用いられるようになった。

携帯情報端末や人体通信などに用いられるアンテナには、可搬性と利便性の観点から小形・軽量化が求められる。アンテナを小形化すればするほど放射効率が低下すると共に、周波数帯域が著しく狭くなるが、従来の方法を用いてこれらを共に正確に計算するには莫大な計算機資源が必要であった。また、市販のシミュレータは一般に高速化のために幾つかの近似を内在させているために、シミュレータによって計算結果が異なることも良く経験する。このようなことから、小形アンテナの設計には高精度な電磁界シミュレータの開発が不可欠であるが、特性がアンテナ単体では決まらず周囲の影響を強く受ける人体通信や携帯情報端末の分野ではその開発が急務となっている。一方、日本人の標準人体構造や電気定数の数値データはCTやMRI画像に基づく直方体メッシュデータとして与えられるため、3角形要素を用いる有限要素法やモーメント法は適用が困難で、人体を含めた電磁界・アンテナの解析はFDTD法の独壇場であるといっても過言ではない。しかしながら、従来のFDTD法では高精度な小形アンテナの解析には十分にはできなかった。また、アンテナだけではなく、使用されるアンテナから発生する電磁波の安全性を科学的に立証しておくことも重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、電磁波曝露に対する人体の安全性評価を含めた超高精度電磁界・アンテナシミュレータの開発することを目的とする。これを達成するために、以下の項目について詳細に検討する。

(1) 準静電磁界解析を前処理とする高精度FDTD法の開発

アンテナ導体表面近傍の電磁界は準静電磁界が支配的であることに注目し、準静電磁界の解析解を予め求めておき、それをFDTD法の前処理として導入することによって高精度化を図る。近似的に準静電磁界が予想できる場合はこれを用いるが、そうでない場合には、モーメント法などを利用するが、この解がある程度精度よく求まっておく必要がある。そこで、解の収束を早めるモーメント法についても検討する。

(2) 電磁波曝露に対する安全性評価法の開発 人体通信では電磁波の発生源であるアン

テナが人体の近傍にあるため、電磁波曝露に対する安全性評価し、その安全性を科学的に立証しておく必要がある。安全性評価の一つの方法は、人体内部の電磁界を正確に予測することである。本研究ではFDTD法を用いてアンテナおよび人体内部の電磁界を正確に計算する方法を検討し、有効性を実験的に検証する。また、それに基づいた人体等価ファントムを提案する。

(3) 電磁環境評価への応用

省電力電子部品の増加により、電磁障害波に対する電子機器の免疫性が脆弱になる傾向にある。人体通信用機器についても誤動作が発生する環境が増えている。電磁障害波を受信するのは電子部品間を結ぶ線路であると考えられるため、これらを高精度に計算できる方法を確立する。

(4) 人体通信容量の定量的評価

人体通信では秘匿性や省電力の観点から人体自体を伝送路とする通信形態がとられる。本研究では、伝搬損失が小さくなるようなアンテナを用いて伝搬特性や伝送容量を定量的に明らかにする。

3. 研究の方法

人体通信を支える基盤技術を確立するために、具体的には「超高精度電磁界シミュレータの開発」、「電磁波曝露に対する安全性検証のための電磁界シミュレーション法とその実験的検証法」、「電磁環境評価のための電磁界シミュレーション法」および「人体通信における通信容量の定量的評価」について検討した。具体的には

(1) 電磁界シミュレーション法の高精度化 ① 準静近似を利用したFDTD法の計算精度改善手法の検討

アンテナ導体近傍では準静電磁界が狩猟的な成分となる。そこでFDTD法の前処理として準静電磁界の空間分布を求めておき、それをFDTD法の計算グリッド上でスケール変換することにより係数を修正して計算精度の高精度化を図る。

② モーメント解の収束改善法の検討

簡単なアンテナ形状の場合は準静電磁界が予測できるが、一般のアンテナの場合は難しい。そこでモーメント法とFDTD法とのハイブリッド法を検討するための前段階として、モーメント法の解の収束性を改善する方法を検討する。

(2) 電磁波曝露に対する安全性検証のための電磁界シミュレーション法とその実験的検証法

① 近傍界曝露

人体近傍に置かれたアンテナによる人体内部電磁界の安全性を検証するために、ラット等価ファントム内の電磁界をFDTD法によって計算すると共に、温度上昇分布を測定し

て計算法の妥当性を検証する。

② 遠方界曝露

遠方から到来する電磁界による、大地上の人体内部の電磁界を FDTD 法を用いて計算しようとする、地面内部の電磁界まで計算しなければならないため、膨大な計算機資源が必要となる。ここでは、大地を表面インピーダンスで置き換える手法を検討する。また、この結果に基づいて遠方界曝露用人体等価ファントムを作成する。

(3) 誘電体基板上導体ストリップによる電磁波散乱の高速計算法

電子回路基板上の配線を周期ストリップ導体に置き換えて、それによる散乱電磁波を高速に計算する方法を検討する。

(4) 人体通信における通信容量の検討

ISM バンドにおける腕を利用した人体通信システムにおけるアンテナの位置や給電方法に対する性能を把握するために、誘電体円柱近傍のアンテナによる電磁界を厳密に計算して通信容量などの基本量を評価する。

4. 研究成果

(1) 屈曲部を有する誘電体基板上アンテナの FDTD 法解析解の高精度化

誘電体基板上のアンテナを FDTD 法で解析しようとするセルサイズを極めて小さくとらなければならないため、莫大な計算機資源を必要とする。直線状のアンテナに対しては準静電界近似を利用して FDTD 法の係数を修正することにより高精度化が可能であることが著者らの研究でわかっている。ここでは、その手法を図 1 のような方形ループアンテナとメアンダダイポールアンテナに適用した。その結果、直線状ダイポールほどの著しい効果はないものの、セルサイズを細かくすることなく高精度化が可能であることが分かった。屈曲部の効果を考えることが課題となった。

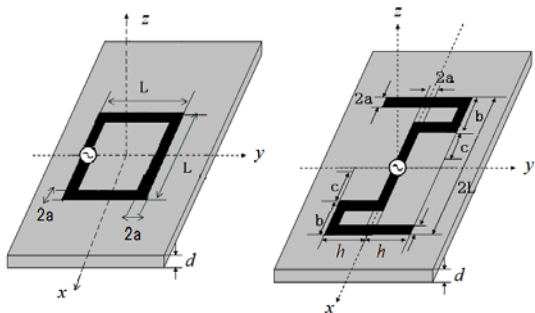


図 1 方形ループアンテナとメアンダダイポールアンテナ

(2) ダイポールアンテナのモーメント法解析における解の収束性改善

準静電界近似を導入した FDTD 法の高精度化を実現するには準静電界をある程度高精

度で求めておく必要がある。一方、モーメント法と FDTD 法とのハイブリッド法の確立のためには、モーメント法自体を高精度化しておく必要もある。ここでは、基本的なアンテナであるダイポールアンテナを例にとり、その解の収束性を改善する方法を検討した。分割の方法をパラメータとしたときの、分割数に対する入力インピーダンスを図 2 に示す。これより、一様に分割するよりもアンテナ端部付近の分割の数を増やした方が収束が格段に向上することがわかる。また、その分割の仕方はチェビシェフ多項式の零点の基づくのが良い。このことは FDTD 法とのハイブリッドを検討する際の指針となると考えられる。

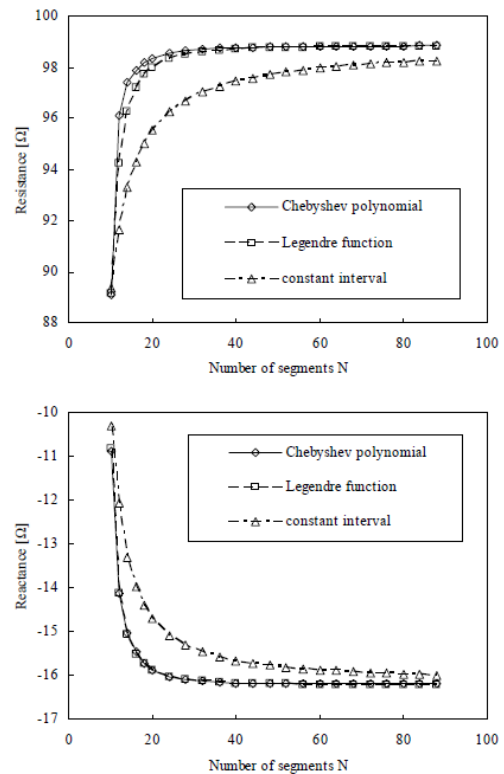


図 2 アンテナ分割数に対する入力インピーダンスの収束性

(3) ラット頭部曝露用アンテナの開発

人体通信における電磁波曝露に対する安全性評価は通常ラットを用いるのが一般的である。また、最も安全面で危惧されるのが頭部であることから、ラットなどの小動物曝露用ループアンテナを開発した。その写真と構造を図 3 に示す。アンテナ中央に電界が集中するように 2 つのループが 8 の字状に配置されている。ループ導体の部分は整合回路として動作する。また、基板には頭部観察用の窓が開けられている。

図 4 は SAR (Specific Absorption Rate) 分布であり、左図が FDTD による計算結果、右図が実験値である。両者は良く一致し、FDTD

法が SAR 分布を正しく計算できることがわかる。

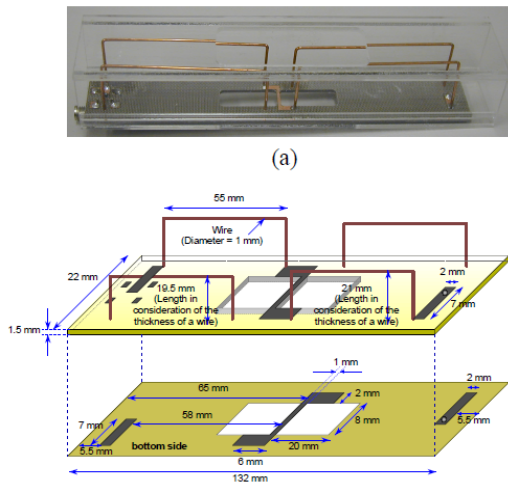


図 3 ラット頭部曝露用アンテナ

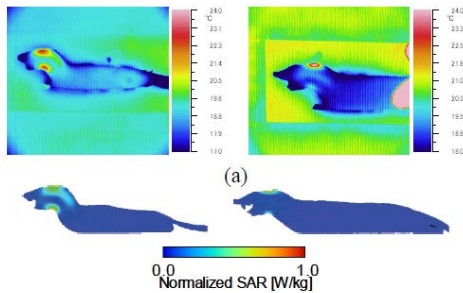


図 4 SAR 分布の計算値と実験値

(4) 遠方電磁波曝露の計算法と簡易人体等価ファントムの試作

平面大地上に人体が直立した状態で、電磁波にさらされると人体上に誘導電流が生じる。足首は人体の中で最も断面積が小さいため比較的大きな電流密度が流れると考えられる。これを FDTD 法を用いて解析するには、半無限媒質と整合を取った PML 吸収条件を用いるのが一般的であるが、損失性媒質に対する PML 吸収境界条件は計算コストの面で非常に不利である。そこで本研究では、VHF 帯における大地の損失が小さい事に着目し、低損失媒質に対する表面インピーダンス条件を用いた。この方法の妥当性を検証するために、平面大地上に垂直に立てられた線上導体に平面電磁波が到来したとき、導体に流れる電流分布を計算した。その結果を図 5 に示す。また、参考のためにモーメント法による計算結果も示してある。PML 吸収境界を用いた場合と鏡面インピーダンスを用いた場合とはよく一致している。また、後者の計算機資源に関しては、メモリは 60%程度、計算時間は 33%程度まで軽減されている。なお、モーメント法とはその絶対値が若干異なるが、この

傾向は FDTD 法とモーメント法との一般的な性質であり、

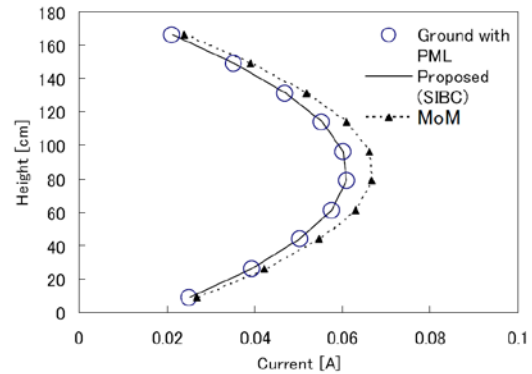


図 5 大地上垂直線導体上の電流分布

このように、遠方界曝露に対しても FDTD 法によってその電磁界分布が正確に計算できることから、FDTD 法を用いて遠方界曝露評価用人体ファントムの試作を行った。この時、実用上その構造は単純であることが望ましいため、できるだけ線上的になるよう心掛けた。試作したファントムの構造を図 6 に示す。左から順に、成人男性、成人女性、7 才児、5 才児、3 才児用ファントムで、直方体ボックスには塩分濃度が異なる水が充てんされている。これは各年齢層によって異なる人体の等価的な導電率と誘電率を模擬するためである。

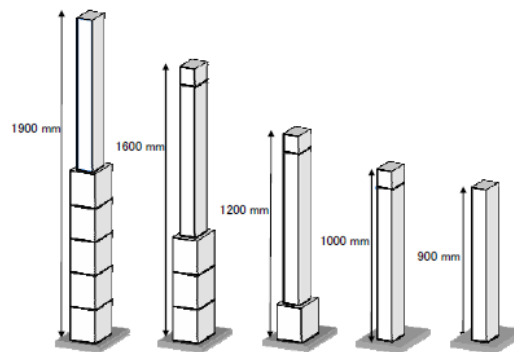


図 6 試作した簡易人体等価ファントム群

簡易人体ファントムの有効性を示すために、計算機内に作った精密な標準人体モデルに誘導される電流を FDTD 法によって計算し、その値と等価ファントムに流れる電流と比較を行った。その結果の一例を図 7 に示す。上図は成人男性、下図は 3 才児のものである。成人男性の場合は肩から腹部付近までは大きな違いがあるが、3 才児は全体的に両者は一致している。これは体型の違いによるものと考えられ、今後の簡易ファントム改善の指針を与えるものである。また、足首付近はい

ずれの年齢層でもおおむねよく一致しているため、当初の目的はほぼ達成できたと考えられる。

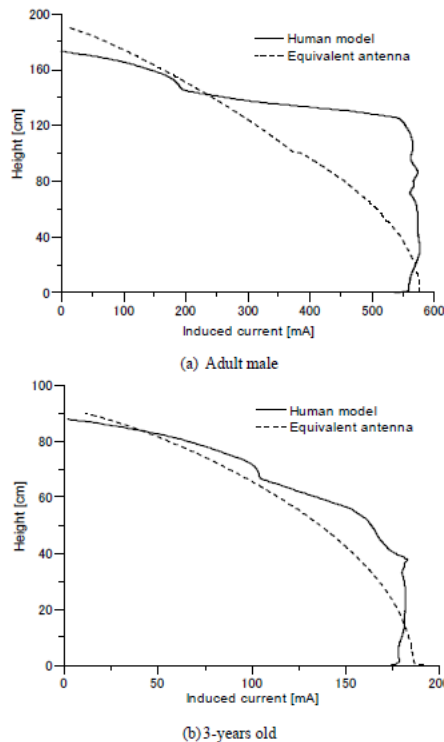


図7 誘導電流分布

(5) 誘電体上ストリップ導体による平面波の散乱

電子機器のイミュニティを正確に評価するためには回路素子を結ぶ線路に流れる電流を正確に計算することが必要になるが、複雑な配線を考えては本質を見失うことになる。そこで図8のような、誘電体基板上に周期的にプリントされたストリップ導体に平面波が入射する場合の散乱波を解析した。計算手法としてはモーメント法と FDTD 法が考えられるが、計算の複雑性や計算機資源の観点からそれぞれ一長一短があるが、本研究は高精度電磁界シミュレータの開発にあることから、両者の計算精度の比較という観点から検討を行った。

平面波が垂直に入射した場合のモーメント法と FDTD 法による反射係数の計算結果を

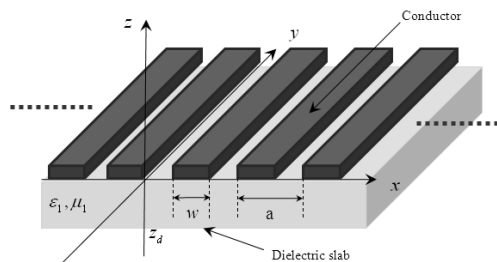


図8 誘電体基板上周期ストリップ導体

図9に示す。両者は極めてよく一致し計算の妥当性が示された。ただし、モーメント法では計算速度を向上させるために多くの工夫を施しており、FDTD法に比べて計算は煩雑である。しかし、計算速度の点ではかなり高速である。

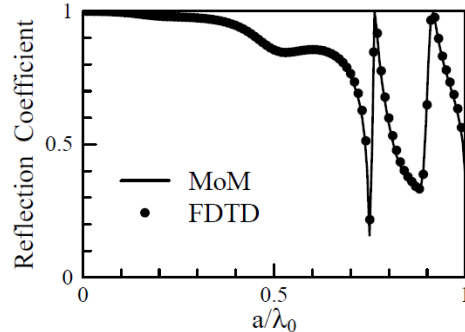


図9 反射係数

(6) UWB/ISM バンドにおける腕を介した人体通信の通信容量

腕を介した通信におけるアンテナの設計指針や通信容量を評価するために、腕を無限長誘電体円柱にモデル化し、アンテナは伝搬特性が良いであろうと予想される垂直ダイポールとしたときの通信容量を評価した。周波数帯はUWBバンドのUWB-IR方式とISMバンドの一つである915MHzとした。その結果、アンテナが互いに直行する場合には、円柱に沿う表面波のために伝達係数が大幅に改善されること、またすべての場合でBER特性が改善されることなどが明らかになった。

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7件)

- ① A. Itou, A.Y. Shimba, L. Hamada, S. Watanabe, T. Arima, and T. Uno Development of Liquid-Type Human-Body Equivalent Antennas for Induced Ankle Currents Measurements at VHF Band, IEEE Trans. Electromagn. Compat, 査読有, 印刷中, 2012.
- ② T. Arima, H. Watanabe, K. Wake, H. Masuda, S. Watanabe, M. Taki, and T. Uno Local Exposure System for Rad Head Using Figure-8 Loop Antenna in 1500MHz Band, IEEE Trans. Biomedical Engineering, 査読有, 58, 2011, 2740-2747.
- ③ 井上駿, 宇野亨, 有馬卓司, 屈曲部を有する誘電体基板上プリントアンテナの FDTD 解析精度向上に関する研究”電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, J94-B, 2011, 1198-1201.
- ④ 多田雅俊, 宇野亨, 有馬卓司, Pocklington

- 型積分方程式を用いたダイポールアンテナのモーメント法解析における解の収束性について, 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, J94-B, 2011, 11195-1197.
- ⑤ 井出守, 宇野亨, 榎山祐次郎, 有馬卓司, 誘電体スラブ上周期ストリップ導体による平面電磁波散乱の高速モーメント法解析, 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, J94-B, 2011, 1086-1093.
- ⑥ 佐藤雄大, 笹森崇行, 戸花照雄, 磯田陽次, 高橋応明, 宇野亨, UWB/ISM バンドを用いた WBAN システムの BER による定量的評価, 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, J94-B, 2011, 205-213.
- ⑦ 有馬卓司, 渡辺総一, 宇野亨, 高橋応明, FDTD 法による電磁波散乱解析における平面大地のモデル化, 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, J92-B, 2009, 1457-1463.
- [学会発表] (計 33 件)
- ① 荒田実成, 宇野亨, 有馬卓司, Cole-Cole 型分散媒質に対する PML 吸収境界条件について, 電子情報通信学会総合大会, 2012. 3. 23, 岡山大学.
- ② 山本雄太, 宇野亨, 有馬卓司, FDTD 法における遠方界を用いた放射効率計算法に関する研究, 電子情報通信学会総合大会, 2012. 3. 23, 岡山大学.
- ③ 赤石亘, 宇野亨, 有馬卓司, 屈曲部を有する誘電体基板上プリントアンテナの FDTD 解析精度向上に関する研究, 電子情報通信学会総合大会, 2012. 3. 23, 岡山大学.
- ④ 浜田航, 宇野亨, 有馬卓司, 周期グリーン関数を用いたモーメント法による 3 次元 EBG 構造の解析, 電子情報通信学会総合大会, 2012. 3. 23, 岡山大学.
- ⑤ 伊藤晶, 有馬卓司, 浜田リラ, 渡辺総一, 宇野亨, VHF 帯用液剤型人体ファントムの構造に関する検討, 電子情報通信学会電磁環境研究会, 2011. 12. 9, 名古屋工業大学.
- ⑥ A. Itou, A. Y. Simba, T. Arima, L. Hamada, S. Watanabe, T. Uno, A Liquid-Type Human-Body Equivalent Antenna with Improved Induce Current Distribution, Int. Symp. Antennas Propagation, 2011. 10. 28, Jeju, Korea.
- ⑦ I. Kon, T. Sasamori, T. Tobana, Y. Isoda, M. Takahashi, T. Uno, A Study on Radio Propagation for Wireless Body Area Network Communication of 2.4GHz Band, Int. Symp. Antennas Propagation, 2011. 10. 28, Jeju, Korea.
- ⑧ 笹森崇行, 佐藤雄大, 戸花照雄, 磯田陽次, 高橋応明, 宇野亨, 400, 900 MHz 帯 WBAN システムの変調方式に関する一検討, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, 2011. 5. 12, 屋久島環境文化村センタ.
- ⑨ 井出守, 宇野亨, 榎山祐次郎, 有馬卓司, 誘電体スラブ上周期ストリップ導体による平面散乱電磁界の高速モーメント法解析, 電子情報通信学会総合大会, 2011. 3. 15, 東京都市大学.
- ⑩ T. Arima, S. Watanabe, T. Uno, FDTD Analysis of PEC Wire in Contact with Surface Impedance Boundary, Int. Symp. Antennas Propagation, 2010. 11. 25, Macau, China.
- ⑪ A. Itoh, T. Arima, A. Y. Simba, S. Watanabe, T. Uno, A Numerial Study of the Liquid-Type Human-Body Equivalent Antenna, Asia-Pacific Radio Sci. Conf. 2010. 9. 16, Toyama Int. Conf. Center.
- ⑫ 木目健太郎, 宇野亨, 有馬卓司, 階段形状の吸収境界を用いた FDTD 法解析, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2010. 9. 14, 大阪府立大学.
- ⑬ T. Arima, S. Watanabe, K. Wake, T. Uno, An FDTD Analysis of Induced Current in PEC Wire Which Touched Semi-Infinite Ground Plane by Using Surface Impedance Boundary Condition, IEEE AP-S Int. Symp., 2010. 7. 14, Toront, Canada.
- ⑭ 有馬卓司, 渡辺総一, 宇野亨, FDTD 法における表面インピーダンス境界と接触した金属の解析方法に関する検討, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, 2010. 4. 9, 同志社大学.
- ⑮ D. Usui, T. Arima, H. Kawai, K. Wake, S. Watanabe, T. Uno, Development of Tunable Head Local Exposure System for Rats Using Rectangular Loop Antenna in 3.4 GHz Band, 2010. 3. 3, Lisbon, Portugal.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
宇野 亨 (UNO TORU)
 東京農工大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号: 80176718
- (2) 研究分担者
有馬 卓司 (ARIMA TAKUJI)
 東京農工大学・大学院工学研究院・講師
 研究者番号: 20361743
- ② 連携研究者
 なし