

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560441

研究課題名(和文)人体周辺電波利用機器安全評価のためのハイブリッドシミュレータの開発

研究課題名(英文)Development of Hybrid Simulator for Safety Assessment of Body Area Wireless Equipments

研究代表者

宇野 亨(Uno, Toru)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80176718

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)：携帯情報端末や人体通信、無線電力伝送などの人体周辺で用いられる無線機器を誰もが安心して使用してゆくためには、電磁波ばく露に対する人体の安全性を科学的に明らかにしておく必要がある。このためには人体内部の電磁界や発熱を正確に予測する必要があるが、市販の電磁界シミュレータや従来の計算法では満足できる計算精度が得られなかった。本研究は、電磁環境的要素を含めた人体周辺電波利用機器の安全性を正確に評価するために、電磁界や人体近傍アンテナを高精度で解析できるハイブリッドシミュレータの開発を目的としたもので電磁波ばく露軽減法のためのメタマテリアルについても検討を加えたものである。

研究成果の概要(英文)：It is required for a safety assessment of body-area wireless equipments that the electromagnetic fields exposed from the equipments are carefully investigated. In the design of these kinds of antenna and/or the electromagnetic field distributions in the human body, commercially-provided simulators are often used, however their calculation precision is not always satisfied. In this research project, some basic investigation results were provided for the purpose to develop a hybrid 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. Basic study for analysing metamaterials is also investigated, because it is recently recognized that they have high possibility to protect the electromagnetic exposure.

研究分野：電磁波工学

キーワード：計算電磁気学 電磁波 アンテナ シミュレータ 数値ファントム FDTD法 メタマテリアル

1. 研究開始当初の背景

コンピュータの発達に伴って計算機に適合した電磁界・アンテナ解析法の研究が1960年後半から盛んになった。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てきたのが米国を中心とするIEEE、欧州を中心とするIETである。国内では電子情報通信学会のアンテナ・伝播研究会やマイクロ波研究会を中心に、北海道大学、東北大学等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。一方最近では、パーソナルコンピュータでさえ80年代の大型コンピュータの性能を超えるまでになり、市販の電磁界シミュレータが広く普及するようになった。多くは米国製のものであるが、申請者が開発に携わった国産のシミュレータもある。しかしながら、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や計算精度が向上しないことなどは良く経験することである。これらの問題は、電子情報通信学会マイクロ波研究会を中心に詳細に検討されたが結論には至っていない。結局は新たなシミュレーション技法開発の必要性が提起されただけである。

携帯情報端末や人体通信、無線電力伝送などの人体周辺で用いられる無線機器を開発する上で、電磁波曝露に対する人体の安全性確保は極めて重要で、このためには人体内部の電磁界や発熱を正確に予測する電磁界シミュレーション法の開発が不可欠である。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解析は今のところ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ができなかったため、新たな高精度化技法を導入したアンテナシミュレータを開発してきた。この方法は比較的簡単な形状のアンテナに対しては極めて有効であるが、無線電力伝送に用いられるスパイラルアンテナのような曲線形状に対しては不向きである。また、人体安全性の指針となるSAR測定のための熱解析を同時に行うことはできなかったため、人体周辺電波利用機器の安全性評価のためのシミュレータ法の開発が強く望まれていた。

2. 研究の目的

携帯情報端末や人体通信、無線電力伝送などの人体周辺で用いられる無線機器を誰もが安心して使用してゆくためには、電磁波ばく露に対する人体の安全性を科学的に明らかにしておく必要がある。このためには人体内部の電磁界や発熱を正確に予測する必要

があるが、人体組織・アンテナ形状・発熱などが強く相互結合するために市販の電磁界シミュレータや従来の計算法では満足できる計算精度が得られない。本研究の目的は、電磁環境的要素を含めた人体周辺電波利用機器の安全性を正確に評価するために、電磁界・アンテナ・高周波回路・熱を同時に高精度で解析できるハイブリッドシミュレータを開発することである。

一方、電磁波ばく露に対する安全性を科学的に立証するためにはシミュレーションだけでは不十分で、実験的な検証も必要である。本研究では人体ばく露用のアンテナの開発に関しても検討し、その精度を本研究で開発したシミュレータを用いて検証する。それに加えて、人体ばく露を軽減するような新たな方法についても検討を加えて、人体周辺電波利用機器の安全性に関する基本的な指針の一つを得ることもまた目的に加える。

3. 研究の方法

情報携帯端末、人体通信用アンテナ、無線電力伝送装置などを念頭におきながら、人体周辺で用いられる電波利用機器の電磁環境を含めた安全性評価のための、ハイブリッド電磁界シミュレータの開発を行う。一方、人体の電磁波ばく露に関するシミュレーションはFDTD法を中心に行われているため、本研究でもFDTD法を基礎とするが、まず最初に「FDTD法の高精度化」について検討を行い、「FDTD法とモーメント法とのハイブリッド法」、「電磁界と熱および回路とのハイブリッド法」の開発を行う。また、人体ばく露用アンテナを開発して、シミュレーション法の妥当性を検証する。一方、メタマテリアルは人体ばく露の軽減に有効な手段となることが分かってきた。そこで本研究でもメタマテリアルの解析法もまた検討することとした。

4. 研究成果

(1) ARMA-FDTD法を利用した低周波帯の高精度化

FDTD法を安定に実行するための時間ステップはセルサイズによって決まってしまうため、微細構造までをモデル化して低周波帯の解析を実行しようとする、莫大な時間を必要とする。そこで、信号処理の分野で用いられる自己回帰移動平均推定(ARMA: Auto-Regressive Moving-Average)法を用いて計算回数の削減を図った。

一例として、図1のように、半径 $a=10\text{cm}$ 、比誘電率 $\epsilon_r=43$ 、導電率 $\sigma=0.86\text{ S/m}$ の球状ファントムの近傍に長さ $L=15\text{cm}$ のダイポールアンテナが、球の表面から $d=1\text{cm}$ だけ隔てて置かれている場合の入力インピーダンスの周波数特性を計算した。その結果を図2に示す。なお、球状ファントムを多層球状ファントムにしても収束性に関する結果はほぼ同じであった。

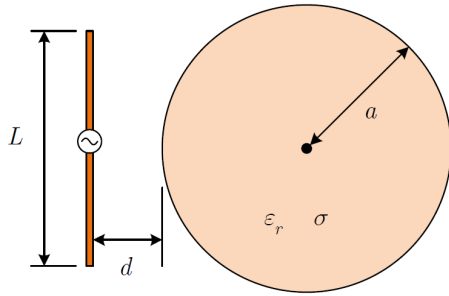
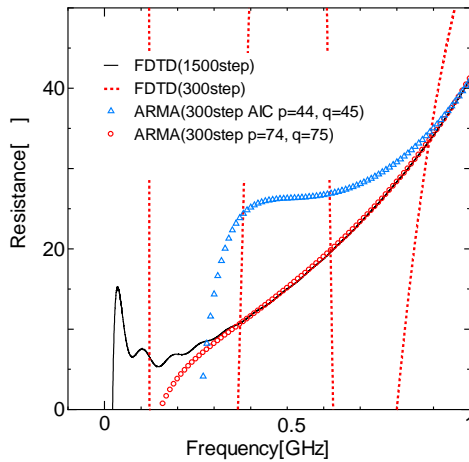
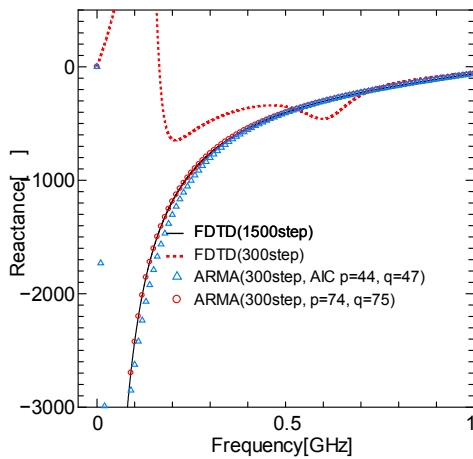


図1 球状ファントム近傍のダイポールアンテナ



(a) レジスタンス

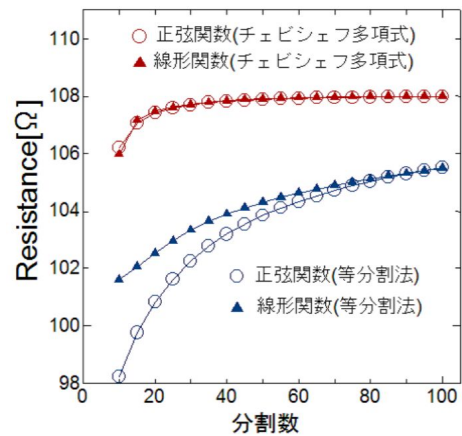


(b) リアクタンス
図2 入力インピーダンス

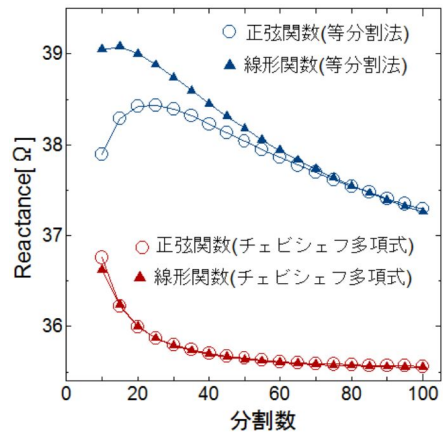
(2) 線状アンテナのモーメント法解析の高精度化

モーメント法と FDTD 法とのハイブリッド法を構築する際、前者は周波数領域の解法であり、後者は時間領域の解法であるため、時間領域と周波数領域との数値的に変換をしなければならない。この時、一方の計算精度が他方に比べて著しく劣ってはハイブ

リッド化が困難である。FDTD 法はセルサイズの 2 乗の精度があることが分かっているため、本研究ではモーメント法の精度について検討した。モーメント法は基底関数の選び方と分割数によって精度が異なることが知られており、分割数を多くとっても収束するとは限らない。そこで、ダイポールアンテナの厳密なモデル化を行うと共に、基底関数と分割法による入力インピーダンスの収束の程度を検討した。その結果を図 3 に示す。これより、等分割にすると分割数を大きくしても収束はしないが、チェビシェフ多項式の零点を利用した分割法にすると収束が大幅に改善されることが分かった。また、この傾向は基底関数の選び方には依らないことも分かった。



(a) レジスタンス



(b) リアクタンス

図3 半波長ダイポールアンテナ
入力インピーダンスの収束性

(3) FDTD 法と熱解析のハイブリッドシミュレーション

電磁波が人体に入射すると、電磁波のエネルギーの一部は熱に変化し、それが熱源となって体温がわずかに上昇する。また、熱によって電気定数も変化すると考えられる。このため、電磁界と熱との結合解析が必要であるといわれてきたが、人体周辺で使用される電

波利用機器の放射電力は一般に非常に小さいため、それらを独立に扱ってもほとんど問題が無いことが明らかとなった。

(4) FDTD 法と回路とのハイブリッドシミュレーション

代表的な回路シミュレータは SPICE であり、回路方程式をニュートン法を用いて時間領域で解析している。したがって、FDTD 法との親和性が高い。以前より SPICE と FDTD 法とのハイブリッド化を目指した研究を行ってきたが、本研究を通してある程度実用に供するまでのレベルに達した。

(5) メタマテリアルの解析手法

アンテナやマイクロ波の分野でメタマテリアルと言ったときには、それを構成する分子や原子といった微視的な性質が顕著になる物質(マテリアル)ではなく、導体や誘電体といった巨視的な性質をもつ物体で構成された人工周期構造のことを指す。

メタマテリアルの構造を工夫することによって電磁波ばく露量を低減できる可能性があることが最近分かってきた。そこで本研究においても、このようなメタマテリアル構成物質を考え、メタマテリアルの基本特性を検討するために、図4のような周期構造による平面波の散乱問題と、周期構造上にある単一アンテナ、および境界 I_U, I_L に囲まれた領域の伝搬特性解析について検討を行った。

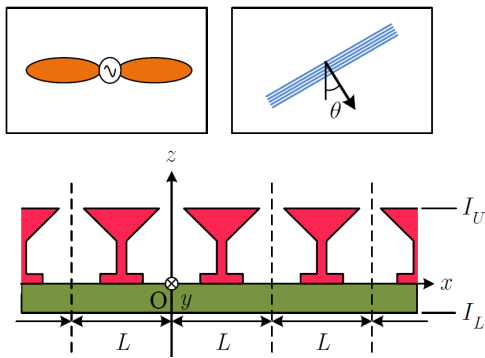


図4 メタマテリアルの概念図

(a) メタマテリアルによる平面波の散乱

周期構造内の複素電磁界はフロケの定理を満足するが、FDTD 法は時間領域の解法であるため、従来の方法では解析することができない。そこで、実電磁界を複素領域に拡張した US-FDTD 法を用いた。また、モーメント法ではグリーン関数の収束性が極めて遅いため、級数の加速法を新たに開発した。その両方を用いて図5のような誘電体スラブ表面に直方体導体板が周期的に並んでいる構造に平面波が入射した場合の反射係数を計算した、その数値例を図6に示す。このとき、収束性を改善するために、ARMA 法を組み入れた FDTD 法を用いた。

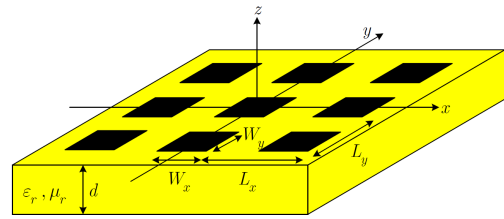


図5 誘電体スラブ上の無限周期導体板

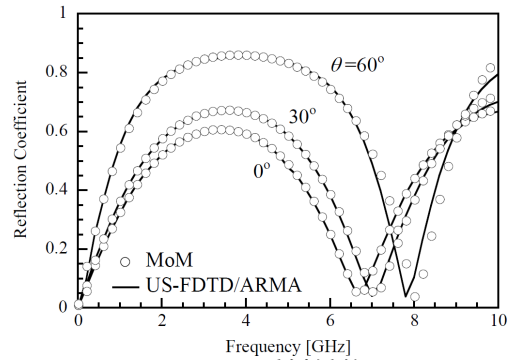


図6 反射係数

(b) メタサーフェス上の単一アンテナ

メタマテリアルの近くにアンテナがある場合には、周期構造と単一アンテナが共存するためにフロケの定理を用いることができない。そこで、ASM(Array Scanning Method)と呼ばれる手法を FDTD 法に組み入れた。それによる散乱過渡電界の計算例を図7に示す。これは、図4のメタマテリアルの上に、水平点電流源が置かれている場合であり、BF-FDTD 法とは従来の手法を用いて収束するまで解析領域を広げた場合の結果である。両者ともほぼ一致していることから、ASM-FDTD 法は、強制励振波源に対する散乱特性を精度よく計算できることが分かった。しかし、アンテナとメタマテリアルとの相互作用は計算できない。今後の課題として残されている。

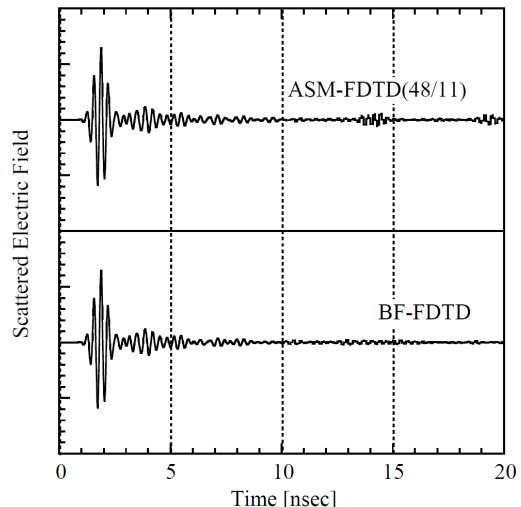


図7 過渡散乱電界

(c) 分散特性

図4のような周期構造帯に電磁波が入射すると、その表面で反射すると共に、境界 I_U , I_L に囲まれた領域内を x 方向に伝搬するモードが発生する。この伝搬特性は分散ダイアグラムによって知ることができる。本研究では、分散ダイアグラムを計算する手法として、FDTD 法と FDFD 方とを検討した。その計算例を図8に示す。両者とも互いによく一致しているが、計算機資源を詳細に検討した結果、FDFD 法の方が計算効率が良いことが分かった。

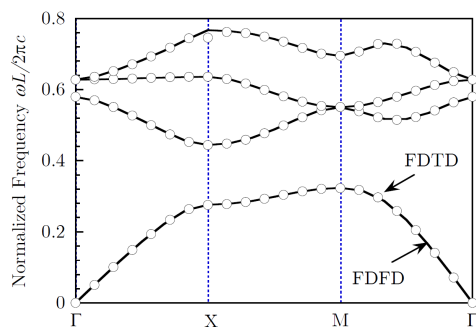


図8 分散ダイアグラム

(6) 人体ばく露用アンテナの開発

人体周辺電波利用機器の安全性を評価するには、数値計算だけではなく、実験的な検証もまた必要である。局所ばく露用アンテナとして、図9のようなアンテナが開発されているため、本研究では、その基本的なアンテナ特性と、小動物に対するばく露実験および電磁界の数値解析を行い、その有効性を確認した。

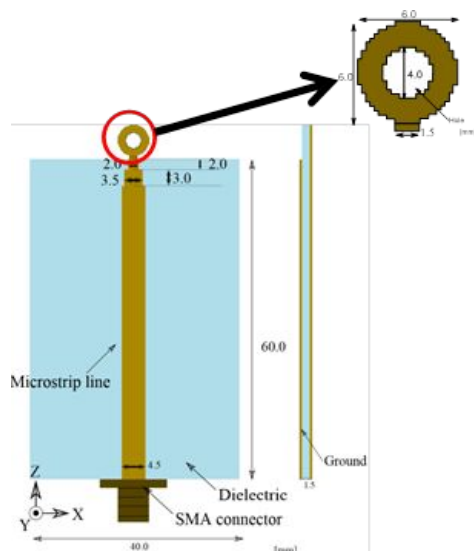


図9 局所ばく露用アンテナ

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5件)

川岸達也, 塩川孝泰, 有馬卓司, 宇野亨, 異なる誘電率基板で構成される UWB / WiMAX アンテナ, 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, J97-B, 2014, 1179-118.

T.Uno, Electromagnetic Modeling of Metamaterials, IEICE Trans. Commun., 査読有, E96-B, 2013, 2340-2347.

H.Sakamoto, T.Uno, T.Arima and Y. Kushiya, Classification of Degenerate and Non-degenerate Modes of Photonic Crystals in FDTD Analysis by Group Theory, IEICE Commun. Express, 査読有, 2, 2013, 211-216.

Y.Kushiya, T.Arima and T.Uno, Experimental Verification of Spoof Surface Plasmons in Wire Metamaterials, 査読有, Optical Express, 20, 2012, 18238-18247.

A.G.Hanif, T.Uno, and T.Arima, New Derived Finite Difference Frequency Domain Method Used for Band Structure Analysis of 2-D EBG Structure Composed of Drude-Type Dispersive Media, 査読有, IEICE Electronics Express, 2012, 951-957..

[学会発表](計37件)

郡司将宏, 宇野亨, 有馬卓司, 表面インピーダンスを組み込んだ FDTD 法による周期構造上のアンテナ解析, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, 2015.1.22, 愛媛大学(愛媛県・松山市). T.Arima and T.Uno, ARAM-FDTD Analysis of Reflection Characteristics of Periodic Structures with Oblique Incidence, Vietnam-Japan Int. Symp. Antennas Propagat., 2015.1.8, Ho Chi Min (Vietnam).

K.Kuwabara, T.Uno and T.Arima, An Efficient MHz Range Analysis by ARMA-FDTD Method with AIC, Int. Symp. Antennas Propagat., 2014.12.3, Kaohsiung (Taiwan).

船倉洸太郎, 榎山祐次郎, 宇野亨, 有馬卓司, 6-10GHz 用小動物局所ばく露用アンテナの電界分布特性, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014.9.25, 徳島大学(徳島県・徳島市).

T.Arima and T.Uno, Development of Boardband Negative Permeability Structures in Microwave Region, Asian Workshop Antennas Propagat., 2014.5.15, 金沢文化センター(石川県・金沢市). 坂本寛明, 宇野亨, 有馬卓司, ASM-FDTD 法を用いた周期構造解析空

間中の非周期アンテナの入力インピーダンス解析, 電子情報通信学会総合大会, 2014.3.19, 新潟大学(新潟県・新潟市).

T.Arima, Y.Tanno and T.Uno, An Efficient Edge Structure of Finite Size EBG Structure, Vietnam-Japan Int. Symp. Antennas Propagat., 2014.1.9, Hanoi (Vietnam).

有馬卓司, 宇野亨, FDTD 法におけるインピーダンス境界を用いた簡易型吸収境界条件について, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, 2013.5.16, 別府国際コンベンションセンター(大分県・別府市)

今勇武, 笹森崇行, 戸花照雄, 磯田陽次, 高橋応明, 宇野亨, 2.4GHz 帯 WBAN に用いるためのアンテナの評価, 電子情報通信学会総合大会, 2013.3.20, 岐阜大学(岐阜県・岐阜市).

T.Arima and T.Uno, Whole Body SAR Measurement Technique by Using Wheeler Cap Method for Human Head Size Phantom, Int. Symp. Antennas Propagat., 2012.10.31, 名古屋国際センター(愛知県・名古屋市).

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・准教授
研究者番号: 20361743

(3)連携研究者

なし