

平成 26 年 6 月 7 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760306

研究課題名(和文) 時間領域におけるマルチスケール電磁界解析のためのCIP-B S法の開発

研究課題名(英文) CIP Basis Set Method for Electromagnetic Simulation in the Time Domain

研究代表者

安藤 芳晃(Ando, Yoshiaki)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：30323877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：数値電磁界解析のチャレンジングな問題として、微細構造を持ちながら大規模構造となるマルチスケール問題がある。この問題に取り組むために、波長に対してセルを大きくしても低数値分散である手法が望まれている。そこで本研究では低数値分散であることが知られているCIP-B S法に着目し、電磁界問題に取り組むための各種個別技術の開発を行った。その結果、吸収境界条件としてPML、連続的に変化する誘電率に対する解析、TF/SF境界条件などの個別手法を開発できた。

研究成果の概要(英文)：Multi-scale problems are challenging ones in the field of computational electromagnetics. In order to attack the multi-scale problems, solvers with low numerical dispersion are demanded because relatively large cells can be adopted. In this study, we pay out attention to the constrained interpolation profile basis set (CIP-BS) method which is known as a solver with low numerical dispersion, and develop particular techniques necessary to solve various electromagnetic problems. We have implemented the perfectly matched layer to the CIP-BS method and continuously inhomogeneous media, and developed the total-field/scattered-field boundary conditions.

研究分野：電磁界解析

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：電磁界解析

### 1. 研究開始当初の背景

近年の計算機の発展に伴い、数値電磁界解析手法の技術も向上し、数多くの問題に短時間で取り組めるようになってきた。しかし、未だチャレンジングな問題は存在している。例えば、散乱体の周期的配置による人工媒質(メタマテリアル)であるが、この設計するには波長の数分の一程度の散乱体の周期構造を解析する必要がある。従来の研究では、これを無限に配列した周期構造とみなすことで解析が行われてきたが、現実の応用においてはメタマテリアル媒質端部の影響を考慮する必要があるなど、有限周期構造の問題を考慮しなければならない。このように、波長以下の構造が重要になりながらも、全体で大きな解析対象となり、シミュレーションが困難となることをマルチスケール問題と呼ぶ。

これまで、このマルチスケール電磁界問題は、周波数領域手法である高速多重展開やそれを発展させた手法で解析されてきたが、時間領域解析を必要とする問題が存在する。例えば構成したメタマテリアル媒質の媒質定数を知るには、数値計算と実験のいずれでも透過・反射特性から媒質定数を同定する必要があるが、波長に対して厚い媒質の場合には位相回転による不確実性が生じるため、正確な同定のためには時間領域解析をする必要がある。時間領域のマルチスケール問題は計算機資源を消費する問題であるが、これを解くための新たなシミュレーション技法を開発することは、インパクトの大きい研究と言える。

このような状況において、流体力学の分野でグリッド間を任意多項式で近似する Constrained Interpolation Profile (CIP)法が開発され、混合相を含む解析を可能としてきた。物理構造を忠実にモデル化できる、離散化した空間格子(グリッド)を用いる解析手法であり、これを電磁界問題に応用する価値は高いと言える。従来広く使われてきた有限差分時間領域(Finite-Difference Time-Domain; FDTD)法においては、グリッド間の場を直線近似で計算を行ってきた。しかしながら、この原理では一波長を表現するのに最低でも 10 セル程度を要し、細かな離散化によってメモリや計算量が増大する。最近では、並列化や分散コンピューティングの発展によりメモリ不足の懸念は払拭されつつあるが、大規模混合問題の解析を行うには、更に簡易・省計算資源・高速・高精度な手法が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、CIP法を電磁界解析に適用し、高精度な汎用電磁界シミュレーション手法を確立することにある。

CIP法を電磁界解析に適用する手法は開発されているものの、Maxwell の方程式に直接 CIP法を適用できないため、方向分離法を用

いて、近似的な計算を行っている。本研究では、Maxwell の方程式に直接適用できる CIP Basis Set(CIP-BS)法に着目し、CIP-BS法で各種電磁界問題を解析する際に必要な個別手法の開発を目的とする。

電磁界 CIP-BS法については、1次元問題における基本原理はすでに本研究者が開発しており、高精度であり、多彩な時間スキーム(蛙跳び差分、完全陰解法、Crank-Nicolson 法等)を選べる柔軟性を持ち合わせている手法であることが分かった。

本研究では、既に基本原理を確立した CIP-BS法を、アンテナ解析・電波伝搬・平面型高周波回路などの時間領域マルチスケール問題を解ける汎用手法に完成させることを目的としている。これらの解析のためには、各用途に応じた特殊個別技術を開発する必要がある。

### 3. 研究の方法

#### (1) CIP-BS法の基本原理

CIP基底関数系  $\Phi_{i,j}^{(l)}(x,y)$  を用いて、電磁界各成分( $E_x, E_y, E_z$ )を未知係数付きで展開する。例えば  $E_x$ であれば以下となる。

$$E_x(x,y) = \sum_{i,j,l} E^{(l)}(i,j) \Phi_{i,j}^{(l)}(x,y) \quad (1)$$

ここで、添え字の  $i,j$  は離散化した  $x,y$  座標を表すインデックスである。また、 $l$  は基底関数の種類を表し、 $l=1, 2, 3$  でそれぞれ場の値、 $x$  方向微分、 $y$  方向微分に相当する基底関数となる。これを Maxwell の方程式に代入し、試験関数との内積をとることで、未知係数を決定する。時間微分については有限差分法により積分を行う。

#### (2) PMLの実装

Perfectly Matched Layer(PML)は吸収境界条件の一つであり、その吸収性能のよさから広く用いられている。本研究では、この PML を CIP-BS法に適用する。特に、ここでは Nearly PML(NPML)を適用する。NPMLでは、補助電磁界成分を導入する。例えば  $E_z$  については、以下の2式を満たす補助電磁界成分  $E_{zx}, E_{zy}$  を導入する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} &= \frac{\partial E_z}{\partial t} \\ \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} &= \frac{\partial E_z}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_x, \sigma_y$  はそれぞれ  $x, y$  方向に減衰させるためのパラメタである。補助電磁界成分も基底関数により展開するが、計算量低減のため、試験関数を Dirac のデルタ関数とする(点整合法)。特に、 $l=2$  のときの係数を決定する式は以下ようになる。

$$E_{zx}^{2,n}(i, j) = \frac{2 - \Delta t \sigma_x}{2 + \Delta t \sigma_x} E_{zx}^{2,n-1}(i, j) - \frac{\Delta t \frac{\partial \sigma_x}{\partial x}}{2 + \Delta t \sigma_x} \{E_{zx}^{1,n}(i, j) + E_{zx}^{1,n-1}(i, j)\} + \frac{2}{2 + \Delta t \sigma_x} \{E_{zx}^{2,n}(i, j) - E_{zx}^{2,n-1}(i, j)\} \quad (3)$$

### (3) 連続的に変化する誘電体の実装

連続的に誘電率が変化する場合、誘電率自体を基底関数展開しておくことで、簡単に実装することができる。誘電率の基底関数展開は係数も既知であり、試験関数との内積をとった結果を数種類用意しておけば、計算を増加させることなく数値計算が可能となる。各式の展開については、煩雑となるため、ここでは割愛する。

### (4) TF/SF 境界の実装

空間を離散化する数値電磁界解析手法では、解析領域が有限であるため、無限に広がる平面波などを入射させるには特殊な技術を用いる必要がある。その一つが Total-Field/Scattered-Field(TF/SF)境界であり、解析領域中を全電磁界(TF)を計算する領域と散乱界(SF)を計算する領域に分け、その境界上で全電磁界または散乱界の Maxwell の方程式を満たすよう入射波を加減するものである。CIP-BS 法で実装するには、境界上で全電磁界または散乱界の式として基底関数を展開、必要な入射波の加減は右辺ベクトルに以降することで実装が可能となる。展開式は煩雑となるため、ここでは省略する。

## 4. 研究成果

### (1) PML の吸収性能の評価

図 1 に示すように、解析領域内に線電流を配置、変調したガウシアンパルスで励振する。観測点で PML からの反射波を観測し、同じ距離伝搬した箇所での波も観測することで参照の振幅を計測、その比で反射係数を導出する。

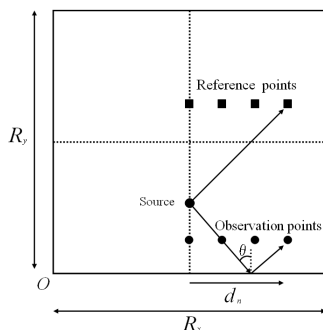


図 1. PML の反射係数の測定

計算に用いたパラメータとして、層数は 8、導伝率プロファイルはべき乗の関数となるように与えている。このときの反射係数の入射角度依存性は図 2 のようになる。

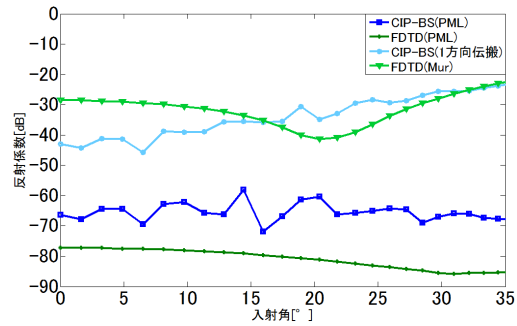


図 2. 反射係数の入射角依存性

図 2 を見てわかる通り、CIP-BS 法の PML はいずれの入射角度でも約 -70dB 程度の反射係数となっており、良好な減衰特性を示していることが分かる。また、同様に本研究で開発した簡易な 1 方向励振は約 -40dB 程度が最大の減衰であることが分かった。

### (2) 連続的に変化する誘電体があるときの数値計算結果

3 節(3)で解説した連続的に誘電率が変化する数値計算結果について示す。ここでは、誘電率は解析領域全体にわたって変化しているものとし、比誘電率が次式で与えられる関数の分布をしている。

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{\varepsilon_{r1} - 1}{2} \left\{ \tanh \left( \gamma \left\{ \frac{R_y}{2} - y \right\} \right) + 1 \right\} \quad (4)$$

ここで、 $R_y$  は解析領域の  $y$  方向の距離、 $\gamma, \varepsilon_{r1}$  は変化を決めるパラメータであり、ここでは  $\gamma = 50, \varepsilon_{r1} = 90$  とした。また波源は  $y = 3R_y/4$  の位置にある(図 3 参照)。

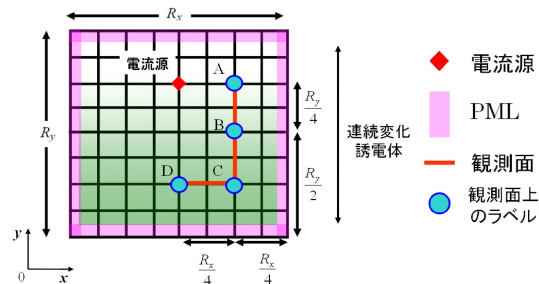


図 3. 不均質誘電体を実装した計算領域

このとき、セル数を  $100 \times 100$  としたときの計算結果の振幅を図 4 に示す。また、FDTD 法で同条件で計算したときの結果も示す。この場合は解析解が存在しないので、FDTD 法で十分に細かくサンプルした  $400 \times 400$  の結果を参照解とする。

図 4 から分かる通り、 $100 \times 100$  のサンプリングでも CIP-BS 法はよく近似できており、高精度な計算が可能ということが分かる。

### (3) TF/SF 境界の数値評価

3 節(4)で開発した TF/SF 境界の性能の数値評価を行う。通常用いられる手法としては、

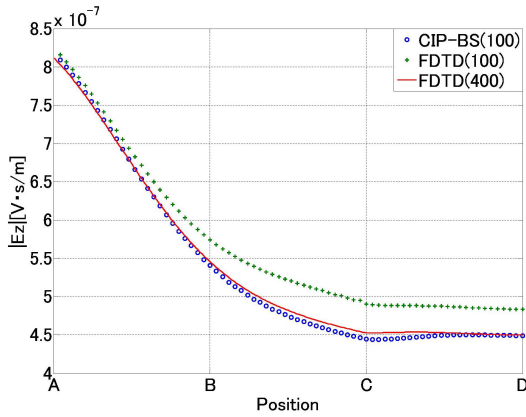


図 4. 観測点における振幅

何も散乱界を置かずに平面波を入射させる方法がある。TF/SF 境界より入射された平面波は反対側の TF/SF 境界に到達して、SF 領域には何も観測されないはずであるが、数値誤差により若干の電磁界の「漏れ」が生じる。これを TF/SF 境界の誤差として用いる

図 5 は今回用いた計算領域の構造である。赤で示したのが TF/SF 境界である。

図 5 において、次式のような  $\theta = 0$  の入射角を持つガウシアンパルスを入射波として用いる。

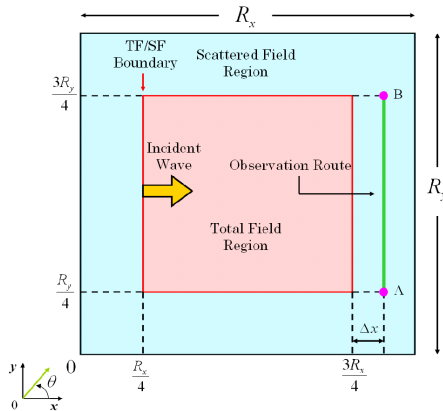


図 5. TF/SF 境界の評価のための解析領域

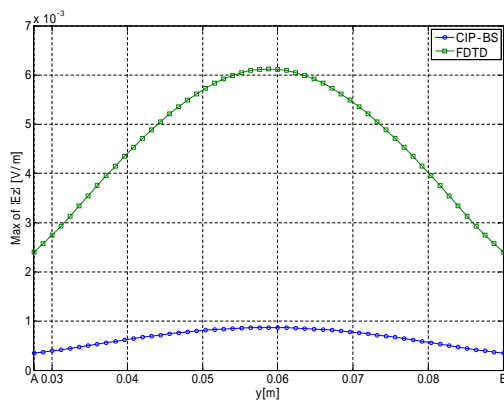


図 6. 各観測点における漏れ場の最大値

$$E_z(x, y) = \exp\left(-\frac{\{c_0 t - x - \eta_0\}^2}{2\sigma^2}\right)$$

$\eta_0$  はオフセットのためのパラメタであり、今回は  $\eta_0 = 4\sigma$  とした。

このとき、図 5 における AB 点間の最大の漏れを観測した結果が図 6 である。ここでは参考のため、FDTD 法での数値計算結果も示している。ここから見てわかる通り、CIP-BS 法では FDTD 法の約 1/6 に誤差が抑えられている。

## 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 2 件)

Y. Ando and Y. Takahashi, “CIP basis set method for electromagnetic simulation,” IEICE Trans. Electron., 査読有, 2014, vol. E97-C, no. 1, pp. 26-32, DOI: 10.1587/transele.E97.C.26, [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e97-c\\_1\\_26&category=C&year=2014&lang=E&abst=](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e97-c_1_26&category=C&year=2014&lang=E&abst=)

Y. Ando and S. Murakoshi, “A total-field/scattered-field boundary for the multi-dimensional CIP method,” IEICE Trans. Electron., 査読有, 2012, vol. E95-C, no. 1, pp. 115-121, DOI: 10.1587/transele.E95.C.115, [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e95-c\\_1\\_115&category=C&year=2012&lang=E&abst=](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e95-c_1_115&category=C&year=2012&lang=E&abst=)

[学会発表](計 3 件)

Y. Ando and Y. Takahashi, “A multi-dimensional CIP-BS method for electromagnetic simulation,” PIERS 2012, 2012 年 3 月 30 日 (Kuala Lumpur, Malaysia)

高橋祐輔, 安藤芳晃, “CIP-BS 法における各種個別技術の開発,” 電気学会電磁界理論研究会, 2012 年 11 月 16 日 (熊本県阿蘇プラザホテル)

高橋祐輔, 安藤芳晃, “2 次元 CIP-BS 法における各種個別技術の開発 - PML と不均質媒質中の伝搬 -,” 電子情報通信学会総合大会, 2012 年 3 月 22 日 (岡山大学).

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 芳晃 (ANDO YOSHIKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・准教授

研究者番号: 30323877