最近の電磁界シミュレータ

非会員 鈴木 敬久* 正員 多氣 昌生*

Trend of Simulator for Analysis of Electromagnetic Field

Yukihisa Suzuki*, Non-member, Masao Taki*, Member

Numerical simulators for electromagnetic field analysis are useful in development of wireless communication devices, dosimetry of radio frequency electromagnetic fields exposure, etc. Most of numerical simulators consist of preprocessor, postprocessor, and calculation kernel. Modeling of simulation and grid generation are made in the preprocessor. Numerical results are visualized and analyzed in the postprocessor. Electromagnetic field analysis is performed in the calculation kernel. Outlines of two methods, which are finite difference time domain (FDTD) method and moment method, frequently used in calculation kernels are introduced. In this article, examples of package simulator, in which FDTD method and moment methods are used, are shown.

キーワード：電磁界，数値解析，FDTD，モーメント法

Keywords : electromagnetic field, numerical analysis, FDTD, moment method

1. はじめに

近年，携帯電話をはじめとする無線通信機の普及に伴い，その電磁界解析の手法として数値シミュレーションを用いた方法はますます重要になってきている。この電磁界の数値解法は，アンテナやデバイスの設計，生体に対する曝露評価など様々な方面で用いられている。

たとえば携帯電話などを含む無線通信機などの設計を例にすると，アンテナと人体との相互的な結合について明確にする必要がある。アンテナ設計の立場では，人体などの生体組織による吸収をできるだけ小さくして，放射効率を高める工夫が求められる。環境電磁工学の立場においては生体への電磁界エネルギーの吸収を電磁界解析によって定量的に推測し，曝露評価を行う必要がある。効率が高く，生体への電力吸収が低いアンテナを精密に設計するにはアンテナの形状と実際の人体形状を模擬したモデルを用いるのが望ましい。最近では人体形状を模擬するだけではなく，内部の生体組織まで精密に再現したモデルが開発されている⁽¹⁾⁽²⁾。このような複雑形状を持ち導電率や誘電率の電気定数が不均一であるモデルに対して電磁界解析を行う場合に数値計算による手法が非常に有用である。実用的な電磁界解析の結果を得るためには，解像度を高めたより精密なモデルを用いるほうが望ましい。このような場合は計算機的能力としてより高いものが要求される。

計算機の CPU の処理能力やメモリの搭載量は飛躍的に伸びており，現状において数ギガバイト規模の計算であればデスクトップのパーソナルコンピュータ上でおこなえる。現在の一般的に使用されている計算機の環境は，研究開発などに必要な解像度のモデルを用いて数値電磁界解析を行うのに十分な性能を持っている。このような現状からデスクトップ上で効率よく電磁界のシミュレーションを行い，研究開発に使用できるようなパッケージソフトが普及してきている。本解説では，電磁界シミュレータに関してその構成例，シミュレータのなかで使用されている計算手法について述べていく。また実際のシミュレーションパッケージについても紹介する。

2. 電磁界シミュレータの構成

電磁界シミュレータの構成例を図1に示す。図に示すように大抵のシミュレータはおおよそ，前処理(preprocessor)，計算カーネル(calculation kernel)そして後処理(postprocessor)の各部分から構成されている。ここでは前処理と後処理について述べる。

〈2・1〉 前処理 前処理の部分では，計算カーネルに投入するモデルの準備を行う。最近ではグラフィカルなインターフェースの支援により，アンテナや誘電体・生体などの散乱吸収体のモデリングを行えるものも多い。SEMCAD[®]のように3次元のCADのようなモデル生成のインターフェースを使用できるパッケージもある。

モデル配置を行った後，それを基にして計算領域の設定，計算格子の自動生成を行う。たとえば FDTD（時間領域差

* 東京都立大学
〒192-0397 八王子市南大沢 1-1
Tokyo Metropolitan University
1-1 Minamiosawa, Hachioji 192-0397

図1 電磁界シミュレータの構成例
Fig. 1. Example for composition of electromagnetic field simulator.

分) 法などの場合は構造格子(structured grid), 有限要素法の場合は非構造格子(unstructured grid)を生成する⁽⁴⁾。計算の収束性, 計算結果の精度などは格子数, 格子の形状により影響される。そのため設定したモデルや問題設定に対する解の性質を考慮した格子を生成する必要がある。空間的に解の勾配が大きな場合には, その部分へ格子点の引き寄せを行う方法や, その領域だけ格子の分割数を増やすようなマルチグリッド法を使用して, 解の精度を向上させる。一方解の勾配がなだらかな領域では計算コストの節約のために幅の広い格子を適応するのが有効である。また複雑な形状をした媒質の境界面において, 境界適合型の格子を使用すれば解の精度も向上する。

FDTD 法を計算のカーネルに用いているものでは, 波源の設定を前処理で行う。問題により, 点波源, 電流・磁流による波源, 無限遠から来る平面波などを選択し, 周波数・振幅などを与える。時間領域で解析を行う FDTD 法では, 波源において複雑な時間波形を与えることが可能である。

〈2・2〉 後処理 数値シミュレーションにおいて後処理は得られた数値解についての解釈を支援するものである。高周波領域では, 生体への電磁界のエネルギー吸収に関して防護指針値との比較を行うために, 定量的な曝露評価が必要になる。最近の電磁界のパッケージシミュレータには後処理において得られた電界分布を用いて(1)式で与えられる比吸収率 (SAR) 分布を計算できるものが増えてきている⁽³⁾⁽⁵⁾。

$$SAR(x) = \frac{\sigma(x)E^2(x)}{\rho(x)} \dots\dots\dots(1)$$

ここで $\sigma(x)[S/m]$ は導電率, $\rho(x)[Kg/m^3]$ は生体組織の密度, $E(x)[V/m]$ は電界であり, $SAR(x)[W/kg]$ は比吸収率である。後処理ではこの他にも遠方界の計算, アンテナのインピーダンス計算などが挙げられる。

後処理のもう一つの重要な役割として数値データの可視化が挙げられる。数値解を理解するために3次元的な特徴

を抽出し可視化を行う場合には, 得られたそれぞれの数値解に対して理解しやすい表現法を使用すべきである。数値解の表現法として一般的なのは等高線表示, カラーイメージによる表示, ベクトル場表示などがある。またベクトル場を流線にして表す方法やボリュームレンダリングも電磁界の分布パターンを理解するのに有効な方法である。

3. 数値計算手法

電磁界のシミュレータにおいて図1の計算カーネルによく使用されるのはFDTD法, モーメント法, 有限要素法などの方法である。ここではFDTD法, モーメント法について概要を示す。この他にも様々な手法が存在するが紙面の都合上割愛する。

〈3・1〉 FDTD 法⁽⁶⁾⁽⁷⁾ FDTD 法は(2)式に示されるMaxwellの方程式中のアンペールの法則とファラデーの法則を直接離散化し, 陽的に時間発展の解析を行う手法であり, 高周波電磁界の解析に有効である。

$$\left. \begin{aligned} \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} &= -\nabla \times \mathbf{E} - (\mathbf{M}_{\text{source}} + \sigma^* \mathbf{H}) \\ \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \nabla \times \mathbf{H} - (\mathbf{J}_{\text{source}} + \sigma \mathbf{E}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ここで $\mathbf{E}[V/m]$ は電界, $\mathbf{H}[A/m]$ は磁界, $\epsilon[F/m]$ は誘電率, $\mu[H/m]$ は透磁率, $\sigma[S/m]$ は導電率, $\sigma^*[\Omega/m]$ は導磁率である。また $\mathbf{J}_{\text{source}}[A/m^2]$, $\mathbf{M}_{\text{source}}[V/m^2]$ はそれぞれ電流源, 磁流源である。この手法の特徴は離散化を行うときに Yee の空間格子⁽⁷⁾を用いることにある。このアルゴリズムにおいて電界の格子点と磁界の格子点が空間的にも時間的にも半ステップずれた差分化になっている。

時間発展する方程式の解を陽的な数値解法を用いて求める場合, 方程式の安定性に気をつける必要がある。FDTD の場合, 空間格子 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ と時間ステップ Δt の関係が(3)式で示すような CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)条件⁽⁸⁾を満たしていればよい。

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \dots\dots\dots(3)$$

ここで c は光速である。(3)式から分かるように空間解像度が高くなった場合タイムステップも細かくする必要がある。例えば生体電磁界解析を行う場合には複雑な形状や生体組織の違いを表現するために $1[mm]$ 程度の空間格子を用いる。この場合 Δt は約 $2[ps]$ 程度になる。このモデルを用いて $1[MHz]$ 程度の低い周波数の解析を行う場合1周期の計算に約50万ステップ必要である。FDTD法は格子の解像度とシミュレーションの追跡時間(周波数)の組み合わせによってはコストの高い計算手法になることに注意が必要である。

数値解析において波が無限遠に逃げていく場合がある。このような場合計算領域の境界上で波を完全に吸収する吸収境界条件を設定しなければならない。これに関して現在までに様々な手法が研究されている。例えば解析的な吸収

境界条件では, Mur⁽⁹⁾, Higdon⁽¹⁰⁾, Liao⁽¹¹⁾などの吸収境界条件などがある。また完全に電波を吸収できる理想的な電波吸収媒質を境界上に配置する PML⁽¹²⁾法は吸収境界条件として非常に有効であり, 最近ではパッケージのシミュレータにも取り入れられている。

FDTD 法の解析対象は広範囲にわたり, 複雑な形状や不均一な電気定数をもつものに対しても適用が可能である。また時間領域での解法であることから, パルス応答から周波数特性を容易に求められる利点がある。

〈3・2〉 モーメント法 モーメント法⁽¹³⁾は周波数領域での電磁界の解法であり, 線状, 面状アンテナの電流分布を求めるのに有効である。解析の概要は以下のようになっている。

(1) アンテナ上の波源分布のベクトル $\mathbf{I}(\mathbf{r})$ を未知数として, 境界条件を満足する電界積分方程式または磁界積分方程式を導出する。例えば線状アンテナの場合, (4)式の Pocklington の電界積分方程式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{n}(\mathbf{r}) \times \left(j\omega\mu_0 \int_{\ell} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{I}(\mathbf{r}') d\ell' - \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) \right) &= 0 \\ G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') &= (k_0^2 + \nabla \nabla \cdot) \frac{\exp(-jk_0 |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで μ_0 は真空の透磁率, $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 自由空間での波数である。また $\mathbf{n}(\mathbf{r})$ は観測点における単位法線ベクトル, $\mathbf{E}_i(\mathbf{r})$ は既知の入射電界, $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ は自由空間におけるグリーン関数である。

(2) 未知の電流分布 $\mathbf{I}(\mathbf{r})$ を(4)式のように N 個の既知の基底関数 $J_n(\mathbf{r}')$ のベクトルの 1 次結合で展開する。ここで $\mathbf{i}'_{\ell}$ はアンテナに沿った単位ベクトルである。

$$\mathbf{I}(\mathbf{r}') = \sum_{n=1}^N I_n J_n(\mathbf{r}') \mathbf{i}'_{\ell} \dots\dots\dots (5)$$

(3) 展開した電流分布を電界積分方程式に戻し, 既知の重み関数 $\mathbf{w}_m(\mathbf{r})$ と電界積分方程式との内積をとり線状アンテナ ℓ 上で積分を行い, 展開関数の係数 I_n について(6)式の連立一次方程式を導出する。

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n = V_m \dots\dots\dots (6)$$

ここで

$$\begin{aligned} V_m &= \int_{\ell} \mathbf{w}_m(\mathbf{r}) \cdot (\mathbf{n}(\mathbf{r}) \times \mathbf{E}_i(\mathbf{r})) d\ell \\ Z_{mn} &= j\omega\mu_0 \int_{\ell} \mathbf{w}_m(\mathbf{r}) \cdot \left(\mathbf{n}(\mathbf{r}) \times \int_{\ell} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') J_n(\mathbf{r}') \mathbf{i}'_{\ell} d\ell' \right) d\ell \end{aligned}$$

である。この連立一次方程式を数値的な手法で解きアンテナ上での電流分布を求める。

モーメント法において基底関数の選び方については全領域で定義するもの (フーリエ級数, チェビシェフの多項式, べき級数など) と部分領域で定義するもの (正弦関数, 三

角関数, 矩形関数など) がある。また重み関数としては基底関数と同じものを用いるガラーキン法, デルタ関数を用いる点整合法などがある。基底関数と重み関数の組み合わせは無数にあるが, 基底関数と重み関数に部分領域の正弦関数を用いる Richmond のモーメント法⁽¹⁴⁾が広く用いられている。この方法はガラーキン法に基づいており, 基底関数の数 N が少なくても精度がよいなどの利点がある。

モーメント法には線状アンテナ, 面状アンテナなどの問題に対して精度のよい解が得られる利点があるが, 解析対象に誘電体などが入るとそれに応じた手法が必要になる。

4. シミュレータパッケージ

以下にいくつかのシミュレータパッケージの例について述べていく。

図2は計算カーネルに FDTD 法を用いている XFDTD⁽⁵⁾の前処理部におけるモデリングの例である。図の左側に示されているのは解剖学的人体モデルの頭部断面図でその右側にループアンテナが設置されている。頭部断面図における濃淡は電気定数の違いを表している。このように XFDTD では電気定数が不均質で複雑な形状を扱うことができる。また直方体, 円筒, 球, 直線, ヘリカル形状などの基本的な図形がモデリングのツールに用意されている。吸収境界条件に関しては Liao の吸収境界と PML の選択が可能である。図3に示すのは図2で作成されたモデルを用いた計算結果である。この図は図2と同じ断面における SAR (比吸

図2 XFDTD の前処理部におけるモデリングと格子生成
Fig. 2. Modeling and grid generation with preprocessor in XFDTD.

図3 XFDTD の後処理部における計算結果の表示
Fig. 3. Visualization of calculation results with postprocessor in XFDTD.

図4 SEMCADの前処理部におけるモデリングの例
Fig. 4. Example of modeling with preprocessor of SEMCAD Niels Kuster, 3rd International EMF Seminar, Guilin China (2003).

収率)分布である。XFDTDの後処理部では電界分布, 磁界分布, SAR分布などを任意の断面でカラーイメージとして見ることができる。

SEMCAD[®]もまたFDTD法を計算カーネルとして用いたパッケージである。この解析ソフトの前処理部は3Dのモデリングツールを備えており, 作成したモデルを立体的に把握できる(図4)。また格子生成に関しては均一格子, 不均一格子を生成することができ, 不均一格子では格子間隔の設定がかなり細かくできる特徴がある。吸収境界条件についてはMur, Higdon, PMLを使用できる。後処理部ではXFDTDと同様に断面における電界強度, 磁界強度, SARなどの分布をカラーイメージにより示すことが出来, 電界, 磁界などに関しては, ベクトルによる視覚化もできる。また図4に示すように遠方界のパターンを立体的に確認することも可能である。SEMCADは熱伝導方程式を用いた温度場解析が可能である。つまり電磁界解析で誘電体へのエネルギー吸収を計算し, その吸収分布を基にして誘電体の温度上昇の分布を推測できる機能を持つ。

モーメント法のシミュレータではFEKO⁽¹⁵⁾やNEC2などがある。FEKOは前処理の部分に3次元モデリングツールを持ちある程度の複雑な形状のモデリングも可能である。またパルス波形などを周波数領域で計算し, フーリエ変換により時間領域のデータを得る機能を持っている。NEC2自体は前処理, 後処理部を持たないが, Windows上で前処理, 後処理部を付加した4NEC2がある。4NEC2もまた3次元のモデリングツールを持ち, 後処理部では, 電流分布, 遠方界などの可視化が可能である。

5. まとめ

本解説では電磁界シミュレータの構成について述べ, シミュレータの計算カーネルに用いられているFDTD法, モーメント法について概要をしめした。またいくつかのシミュレーションパッケージについても説明をした。

電磁界シミュレータはデスクトップの計算機のパフォーマンスとともに, デスクトップ上における解析モデルの作成から, データの処理まで出来るような便利なものになっている。

シミュレータに用いられている計算手法は解析対象によって得意なもの不得意なものがあり, 計算手法の特徴をよ

く知った上で使用する必要がある。

(平成16年1月21日受付)

文 献

- (1) X. G. Xu, T. C. Chao, and A. Bozkurt: "VIP-Man: An image-based whole-body adult male model constructed from color photographs of the Visible Human Project for multi particle Monte Carlo calculations", *Health Phys.*, Vol.78, pp.476-486 (2000)
- (2) 長岡智明・櫻井清子・国枝悦夫・渡部聡一・本間寛之・鈴木保・河合光正・酒本勝之・小川幸次・此川公紀・久保田勝巳・金鳳洙・多氣昌生・山中幸雄・渡辺敏: 「日本人成人男女の平均体型を有する全身数値モデルの開発」, *生体医工学*, Vol.40, No.4, pp.239-246 (2002)
- (3) <http://www.semcad.com/main.html>
- (4) J. F. Thompson, B. K. Soni, and N. P. Weatherill: *Grid Generation, PART I-PART II*, CRC Press (1999)
- (5) <http://www.remcominc.com/>
- (6) A. Taflov and S. C. Hagness: *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Second edition, pp.67-106, Artech House (2000)
- (7) K. S. Yee: "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol.14, pp.302-307 (1966)
- (8) W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery: *Numerical Recipes in C*, Second edition, pp.837-838, Cambridge University Press (1992)
- (9) G. Mur: "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, Vol.23, pp.377-382 (1981)
- (10) R. L. Higdon: "Absorbing boundary conditions for difference approximations to the multi-dimensional wave equation", *Mathematics of Computation*, Vol.47, pp.437-459 (1986)
- (11) A. Taflov and S. C. Hagness: *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Second edition, pp.265-268, Artech House (2000)
- (12) J. P. Berenger: "A perfectly matched layer for the absorption of electro magnetic waves", *J. Comp. Phys.*, Vol.114, pp.185-200 (1994)
- (13) R. F. Harrington: *FIELD COMPUTATION BY MOMENT METHODS* (IEEE Press Series on Electromagnetic Waves), John Wiley & Sons Inc (1993)
- (14) J. A. Richmond and N. H. Greary: "Mutual Impedance of Nonplanar-Skew Sinusoidal Dipoles", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. AP-23, No. 3, pp.412-414 (1975)
- (15) <http://www.feko.co.za/>

鈴木 敬 久

(非会員) 1970年2月4日生。1993年3月大阪大学工学部原子力工学科卒業。2001年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 博士(工学)。現在東京都立大学工学研究科助手。生体電磁気工学, 数値電磁界解析, プラズマ理工学の研究に従事。日本物理学会, プラズマ・核融合学会各会員。

多 氣 昌 生

(正員) 1953年生。1976年3月東京大学工学部電子工学科卒。1981年同博士課程修了, 工博。現在東京都立大学工学研究科教授。生体電磁気工学, 騒音制御工学の研究に従事。IEC TC106国内委員会委員長, 日本学術会議電波科学研究連絡委員会副幹事, 同K分科会委員長, 電気学会「生体内物質・機能に対する磁気効果調査専門委員会」委員長, 他。1996年度電子情報通信学会論文賞, 2003年度総務大臣表彰電波功績賞。