FDTD法による電磁波シミュレーションの有用性

The usefulness of the electromagnetic simulation using FDTD method.

猿橋正之¹⁾, 辺見茂²⁾, 鴻巣理³⁾ Masayuki Saruhashi, Shigeru Hemmi and Osamu Kounosu

1)伊藤忠テクノソリューションズ(株)(〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5, masayuki.saruhashi@ctc-g.co.jp)
2)理博 伊藤忠テクノソリューションズ(株)(〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5, shigeru.hemmi@ctc-g.co.jp)
3)伊藤忠テクノソリューションズ(株)(〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5, osamu.kounosu@ctc-g.co.jp)

We have developed a software package (MAGNA/TDM) based on finite difference time domain method (FDTD) in order to provide a useful simulation tool for high frequency electro-magnetic phenomena, and have improved it to one of wide applicability in that field. In FDTD method one can visualize the propagation of electro-magnetic wave directly and can use for larger scale models because of the simplicity of calculation per element. We have recently attained the scale capability of over 100,000,000 cells. In this report the usefulness of FDTD in electro-magnetic wave analyses is discussed with the calculated samples.

Key Words : FDTD, electro magnetic wave, simulation

1. はじめに

電子機器、電子部品を扱う産業分野では時代の要求に 応じて益々高速な信号を扱うようになってきた。その結 果としてそれらが発する電磁波による機器間の相互干渉 が業界の大きな問題として台頭し、1990年頃より製品の 電磁波発生に対する厳しい規制がかかるようになってき た。また、機器、部品の開発現場では当初適切な対応手 段もなく最終段階の製品に対し試行錯誤をもって対処し たが、これを設計の中に取り込む要求が高まってきた。

このような状況に対応すべく、我々は学会などで将来 を有望視されていた時間領域差分法(FDTD法)を採用し て、電磁波解析用ソフトウエア「MAGNA/TDM」を開発 し市場に提供してきた。しかしながら、解析対象は一般 的に複雑で、通常の計算資源を超える大規模なモデルに なりがちであること、さらに、基本的な設計が回路理論 に基づいているために、現場技術者にとって物体の形状 配置に敏感な電磁波現象を理解することが困難であると いうことによって、このソフトウェアの市場への浸透は 必ずしも順調ではなかった。

しかし、昨今のパーソナルコンピュータの高速大容量 化に呼応して、従来で困難であった大規模計算が可能と なった。例として、32ビットOS、メモリ2GBのマシンで 約2000万セルの解析が可能で、64ビットOSではメモリ 8GBで約1億セルの大規模モデルの解析が可能である。

本稿では、MAGNA/TDM Ver.6.0を使用した大規模モデ ルの解析例と、伝送線路の立体形状パラメータ設計の一 例をもって電磁波解析における有用性を示したい。

2. FDTD法の概要

電磁現象を記述する基本はマクスウェルの方程式であ り、FDTD法では(1), (2)式に示されるファラデーの法則、 アンペアの法則を使用し、時間ステップn における差分 式は(3), (4)式のようになる[1]。

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\mu \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} \quad (1)$$
$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \sigma \boldsymbol{E} + \varepsilon \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{E}^{n} = \frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \boldsymbol{E}^{n-1} + \frac{\Delta t/\varepsilon}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \nabla \times \boldsymbol{H}^{n-\frac{1}{2}} \quad (3)$$
$$\boldsymbol{H}^{n+\frac{1}{2}} = \boldsymbol{H}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{U} \nabla \times \boldsymbol{E}^{n} \quad (4)$$

アンテナや散乱体を含む空間をセルと呼ばれる直方体 または立方体の微小要素でメッシュ分割を行い、(3),(4) の差分式に従って各セルの電磁界を時刻ごとに逐次更新 していく(図1)。



また、電磁界の空間配置としては、電界Eをセルの辺上 に、磁界Hをセルの面中央に配置することで、両者の関係 ができるだけ基本の方程式に沿うようにしている(図2)。



このようにFDTD法の計算手順はシンプルであり、プロ グラムコーディングが容易であるとともに単位演算が速 いという特長がある。また、FDTD法の演算量はモデルの 規模(セル数)にほぼ比例するため、要素数に対して幾 何級数的に増大する有限要素法(FEM)やモーメント法 (MoM)といった他の手法と比較して、大規模な問題を

解くのに有利な条件となっている。

モデルによって異なるため一概には言えないが、最近市場に出回りつつある64ビット対応Windowsを使用した場合、MAGNA/TDMでは8GBの主記憶メモリがあれば1 億セルのモデルの演算が可能となっている(図3)[2][3]。



図3 FDTD法のセル数と必要メモリ

3. 電磁界計算における境界の問題

周知の通り電磁界は無限の空間に分布する性質をもっ ているが、コンピュータでは無限空間をそのまま扱うこ とができない。そのため、解析空間を一定の境界内部に 限定する必要があり、電磁界にとってはあたかも空間が 無限に広がってみえるような境界を設定する必要がある。

電磁波の反射がない吸収境界としては、過去にいくつ かの提案があったが、現在では架空の媒質定数を持つ吸 収層を定義して電磁波の反射をほぼ完全に抑制するPML

(Perfectly Matched Layer)が最も高精度な吸収境界とし て用いられている[4]。これ以外にも無限遠方から届く電 波として平面波を励振する平面波境界や、さらにそれに 周期構造を扱えるようにした周期境界なども必要である。

MAGNA/TDMはこれらの境界条件を装備し、大規模モ デルの作成、計算、結果の可視化が可能なプリポストー 体型のソフトウェアとパッケージとなっている。次節以 降、同ソフトウェアを使用した解析例について示す。

4. 大規模解析例「電波暗室内の電波伝搬」

大規模解析の例として、電波暗室内の電波伝搬解析の 例を示す。暗室の大きさは長さ8.2m、奥行5.2m、高さ5.2 mとし、このモデルでは床面を完全反射面とし、周囲の 壁および天井には底面10cm正方の角すいの電波吸収体を 約3,000個配置している(図4)。室内の机上には一方が 開放された金属筐体を置き、その内部に送信アンテナを 水平方向に置き(図5)、送信アンテナに対向したやや 高いところに受信アンテナを置いた、約1,400万セルのモ デルとなっている。

ここでは、周波数1GHz、5ns幅のウェーブレット波形(図 6)を送信アンテナの給電部に入力し、解析を行った。 水平方向(励振方向)の電界強度コンター図(瞬時値) を図7に示す。



図4 3m電波暗室モデル図



図5 アンテナ部拡大図





図7 電界Eyコンター図

図7より、アンテナからの直接波、床からの反射波、 また受信アンテナからの反射波などがはっきりと可視化 されているのが確認できる。

5. 1億セルモデル解析例

さらに大規模な解析例として、1億セルのモデルについて解析した例を示す。

ここでは、前節の電波暗室の中にCADデータから取り 込んだ自動車車体を配置し、正面の送信アンテナから周 波数1GHzのウェーブレット波形の電波を照射したとき の電波散乱について計算している。今回のモデルは、車 体を完全導体とし、最小セルサイズを10~13mmとしてい る。モデル概要を図8に示す。



図8 解析モデル

電界強度コンター図(瞬時値)を図9に示す。図より 車体前方,車内後方での電磁波散乱の様子が明確に確認 できる。



図9 電界強度Eコンター図(瞬時値、1億セルモデル)

6. 異種伝送線結合における周波数特性

前節までの表示は、時間領域での解析によって可能に なるもので、定常状態を解析する周波数領域での計算結 果や実験などで得られる測定値からは、定常状態に達す るまでの経過を直接知ることはできない。時間領域法で 定常状態での様子を視覚化するには、励振に含まれる任 意の周波数を使用して、時間領域の解析結果を離散フー リエ変換(DFT)することで可能である。また、ガウシ アンパルスのような広範囲の周波数を含む波形を入力波 形として使用することで、同時に多くの周波数の解析を 実行でき、時間領域の計算結果一回DFTするだけで、伝 送線路における反射や透過などの周波数特性を求めるこ とが可能である。

ここでは、高周波における代表的な伝送線路である導 波管と同軸ケーブルを接続したときの、導波管から同軸 ケーブルに通過する電力の周波数特性についての解析例 を示す。今回のように異なる形状の伝送線路を接続する 場合、伝搬モードの変換がスムーズに行われないと反射、 散乱を起こし伝送ロスとなるため、その特性を知るのは 重要である。

導波管のモデルとしては、10.2×22.9mm (WRJ-10) タ イプの導波管を使用し、導波管側面、導波管右側端部は 完全導体とし、導波管左側端部に励振面を設置し、中心 周波数10GHzのウェーブレット波形をTE10モードで励振 を行った。一方、同軸ケーブルについては、外径、内径 それぞれ4.2mm、1.27mmとし、比誘電率は2.0とした。そ して、導波管右側端部から導波管内波長の1/4程度離れた 位置に、同軸ケーブル外側導体と導波管壁が結合するよ うに垂直に配置した。モデル概要を図10に示す。



図10 導波管-同軸ケーブル結合

ここでは、同軸ケーブルの内側導体の導波管側への延 伸寸法を導波管高さの0%, 25%, 50%, 75%, 100%と変化さ せたときの同軸ケーブル観測面での電力透過率の解析結 果を図11に示す。横軸は周波数、縦軸は観測面における 電力の入力電力に対する比率を示す。

図より、同軸ケーブル内側導体の寸法のわずかな違い により伝送効率が大きく変わっていることが分かる。



図11 電力透過率

また、50%延伸したモデルについて、f=10GHz、定常状 態における電界強度コンター図を図12に示す。結合部付 近の電界強度が強くなっているのが分かる。



図12 電界強度Eコンター図(f=10GHz, 定常状態)

7. 光学分野への適応

光は電磁波の一種であるから、扱うモデル規模の拡大 は光学、特に波動光学分野への応用を可能としている。 光の波長は極めて小さいために、大規模モデルといえど も実寸法は限られた大きさになるが、メタマテリアル、 フォトニック結晶、金属表面波などの解析にもFDTD法の 応用が拡大しつつある。

マイクロ波の場合、金属は完全導体としてモデル化を 行う場合が多いが、光のように周波数が高くなってくる と、ごく薄い金属膜を透過するようになる。この現象を 解析するには、金属の材料として負の誘電率の考慮が必 要となってくるが、この場合、金属の比誘電率をDrude分 散モデルの式で表現することで可能である。

ここでは、波長650nmの平面波を銀の薄膜に垂直入射した場合の透過係数について計算した例を示す。モデル概要を図13に示す。銀には負の誘電率が考慮できるように Drude分散材料を適用し、銀の側面には周期境界を適用している。

薄膜の厚さを変えたときの透過係数の計算結果と理論 値[5]との比較結果を図14に示す。図より理論値と非常に よく一致していることが分かる。



図13 モデル概要



8. まとめ

電磁波シミュレーションの必要性は電子機器における 高周波化に伴って益々増大しつつある。機器の機能を高 性能化するだけでなく、機器相互の干渉(EMI, EMC)を 避ける技術の開発のための重要な手段になってきた。

機器内部の電磁波現象は複雑で大規模な解析モデルを 必要とするが、最近のパーソナルコンピュータの高性能 化とあいまった上述のようなソフトウェアの充実によっ て、シミュレーションによる設計が現場技術者等の手に 届く範囲にきたといえる。電磁現象は一般的に難解な部 分が多いが、可視化するシミュレーションによって直感 的に理解し、構想の構築を含めた設計工程の時間短縮が 期待される。計算工学が目指すこの大いなる目標に向か いコンピュータの並列稼動機能など、さらに大規模対応 の高性能で使いやすいソフトウェア開発に努力していき たい。

参考文献

1) 宇野亨, FDTD法による電磁界およびアンテナ技術, コ ロナ社 (1998).

2) 池上泰史, 酒井幸広, 猿橋正之, 大規模 3 次元波動シ ミュレーション, 計算工学講演会論文集 Vol.12 (2007)

3) 猿橋正之,大規模問題への取り組み,自動車EMCの CAEとシミュレーション特集,月間EMC5月号(2007).

4) J. P. Berenger "A Perfectly Mutched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves", J. Computatinal Physics, vol.144 (1994)

5) J. A. Stratton, "Electromagnetic theory, " McGraw-Hill, New York (1941)