

## 環境計測・精密測定用電磁界シミュレーションに関する研究

宮崎 俊之, 新井 浩成, 波 通隆

Research on Electromagnetic Simulation for  
Electromagnetic Environment Analysis and Precise Measurement

Toshiyuki MIYAZAKI, Hironari ARAI, Michitaka NAMI

## 抄 録

電子ノイズ発生源の増加, 電子機器の電磁ノイズ耐性の低下によりEMC問題が世界的な問題となっている。効果的なEMC対策には設計段階からの電磁ノイズのシミュレーションが今後不可欠になってくると考えられる。一方, 従来の無線通信だけではなくセンサー等へも電磁波の利用技術は広がっており, より高精度な電磁界解析が必要となっている。本研究では, 電磁界シミュレーション手法として注目されているFDTD法を用いた電磁界シミュレータをパーソナルコンピュータ上に構築し, FDTD法のもつ任意形状に対応可能, 過渡現象の解析が可能という長所を生かし, 電磁環境問題や電磁波の精密測定等に対して本シミュレーションが有効であることを確認した。

**キーワード:** 電磁界シミュレーション, FDTD法, EMC問題, 散乱体問題, 電磁界センサー

## Abstract

According to the increase of electromagnetic(EM) noise sources, and the fall of the EM immunity of electric devices, the EMC problems have posed the global big problems. In order to take counter-measure against EMC problems effectively, it will be necessary to carry out the EM simulation from design stage. On the other hand, the EM wave has come to used for not only the conventional radio communication but also the EM sensor, etc. For these applications, EM analysis with high precision is necessary. The FDTD method has the strong point that this simulator can analyze arbitrary form models, and the analysis of transient phenomenon is possible. In this research, we built the EM simulator on the personal computer using the FDTD method and confirmed that this simulation was effective to the EMC problems, precise measurements of EM wave, etc.

**KEY-WORDS:** Electromagnetic simulation, FDTD method, EMC, Scattering problem, Electromagnetic sensor

## 1. はじめに

## 1.1 電磁環境両立性問題

電子機器にはノイズ源となり周囲の電子機器に影響をあたえる可能性と, 周囲の電子機器が発生するノイズの影響を受

---

事業名: 経常試験

課題名: 環境計測・精密測定用電磁界シミュレーションに関する  
研究

ける可能性の二面性がある。放電ノイズなどの自然界のノイズに加えて、近年、次世代携帯電話のサービス開始やパーソナルコンピュータの普及、高クロック化などにより、身の周りのいたるところに人工的な電磁ノイズの放射源が存在するようになり、さらにその強度は増大し、「電磁環境」は大きく悪化している<sup>1)</sup>。一方、電子機器の高速化・低消費電力化のための低電圧化は電磁ノイズに対するSN比の悪化をもたらす、機器の軽量・小型化のためのパッケージのプラスチック化は機器のシールド効果を低下させ、電磁ノイズの侵入、放射をより容易なものとしている<sup>2)</sup>。この様に電磁ノイズへの耐性は弱くなる傾向にあり、またシステムの複雑化に伴い、医療分野や交通システムなど、一部の機器の誤作動がシステム全体に致命的な影響を与えたり、直接人間に危険性をもたらす可能性も増加してきている。さらに、電磁ノイズの生体影響も社会的に大きな関心事となり、WHO(世界保健機構)の国際EMFプロジェクトや米国のRAPID計画、日本の電磁界生体別委員会(電気学会)など、生体への電磁界の影響の調査・報告が行われている<sup>3)</sup>。

電子機器の高速化は動作クロックの高周波化による部分が大きい。このことは、プリント基板の線路の長さやシールドのすきまの大きさが波長に比べて同程度またはそれ以上の大きさになり、極めてノイズを放射・受信しやすい状態になっていることを意味している。現在は電子部品の配置、配線の変更、フィルタの挿入などによりノイズ対策を行っているが、完全な対策を行うのは手法的にも、またコスト的にも難しく、さらには対策自体が電子機器の本来の機能や操作性に影響を及ぼすこともある。このため、ノイズの発生を「抑制」するのはもちろんであるが、障害の程度や対策の容易さ、経済性、機器の機能・操作性などを総合的に勘案して、多少の電磁ノイズがあってもその環境の中で正常に動作が可能となるように「耐性」を持たせ、両者のバランスをとった総合的なノイズ対策をするという考え方が一般的となっている。このような電子機器、自然現象、人間の電気的な共存、言い換えると電磁環境問題と情報化社会における利便性との両立性は電磁環境両立性(EMC)と呼ばれている。この両立性確保(EMC対策)は世界的にも大きな問題となっており、電磁ノイズの規制値やノイズ耐性の規格値がCISPR(国際無線妨害特別委員会)やIEC(国際電気標準会議)、国内ではVCCI(情報処理装置等電波障害自主規制協議会)や電波法などで規定、規制が行われている<sup>2)</sup>。

## 1.2 電磁波の高度利用

電磁波を物質に照射すると、媒質中や異なった媒質の境界面において反射、透過、吸収、散乱、回折などの現象が生じ、その媒質や照射した電磁波の波長(電波法で定義された「電波」では100km~0.1mm)<sup>4)</sup>によりその性質は異なる。これらの現象は電磁波のパラメータである振幅・周波数・位相・偏波・位相速度などに「変化」を生じさせる。この変化を精密に測定することにより従来の音波などよりも高精度な計測を行ったり、また従来は計測が不可能であった物質内部や環境

の状態をセンシングできる可能性がある。また電磁波の熱作用、磁界の圧電気現象などを医療へ積極的に利用することも行われている<sup>5)</sup>。このように通信への利用だけではなく、電磁波のもつ様々な特性を積極的に利用しようとする動きが盛んになっている。

## 1.3 電磁界シミュレーションの必要性

このように電磁波を取りまくさまざまな問題に対応するためには、物体の内部や空間内で電磁界がどのような振る舞いをするのかを知ることが必要となる。本研究ではこれらの問題に幅広く対応できる電磁界シミュレータをパーソナルコンピュータ上に構築し、幾つかの問題について解析を行ったので報告する。

## 2. シミュレーション手法

### 2.1 時間領域差分法

EMC対策においては、プリント基板上の配線パターンの電磁界放射現象や電磁界結合の解析など、複雑形状に対応したシミュレータが必要となる。また、電磁波を用いたセンサー、例えば電磁波パルスの到達時間を用いた位置測定装置などの開発においては、電磁波が時間的にどのように伝播していくのかを知る必要があり、過渡現象の解析が必要となる。この目的のためには、電磁波を定在状態として解析を行う従来のスペクトル領域法などでは十分な解析が行えず<sup>6)</sup>、また電磁界が複雑な状態となっている放射源のごく近くの領域(極近傍領域やフレネル領域)での解析も必要となるため、幾何光学近似などの手法を用いることはできない<sup>4)</sup>。

FDTD法は、電磁界の基本方程式であるMaxwellの微分方程式を差分(Finite Difference)化し、時間領域(Time Domain)で解く手法で、1966年にK.S.Yeeによって電磁界解析に初めて応用された<sup>7)</sup>。本手法はモーメント法や有限要素法と同様に数値電磁界解析の一手法であるが、Maxwellの方程式の積分方程式に基礎をおくこれらの解析手法では適用が困難な問題にも適用可能である。反面、大容量のメモリや速い計算機速度を必要とし、これが最大の欠点とされてきた。しかし、近年のコンピュータ、特にパーソナルコンピュータの性能向上と搭載メモリ容量の大幅な向上にともない、比較的容易に大きな計算機資源を確保できるようになり、これとタイミングを合わせるように急速に発展してきた。

### 2.2 Yeeアルゴリズム

Maxwellの微分方程式は式(1)により表現される<sup>7)</sup>。

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} \quad \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \mathbf{H} \quad (1)$$

$\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  はそれぞれ複素電界・磁界ベクトル、 $\varepsilon$ ,  $\mu$  は媒質の誘電率、透磁率である。これを直交座標系で表現すると、以下の形となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} (2a) \quad \left. \begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} (2b)$$

物理量  $f$  の  $x$  方向に対する微分項はTaylor展開を用いて

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ f\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) - f\left(x - \frac{\Delta x}{2}\right) \right\} - \frac{(\Delta x)^2}{24} f'''(x) + \dots \quad (3)$$

と表せる。 $\Delta x$  が十分小さい場合は上式の右辺第二項以降は無視でき、差分として表現することができる。これを用いて、例えば電界  $E$  の  $x$  方向の微分は差分形式で

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ E\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) - E\left(x - \frac{\Delta x}{2}\right) \right\} \quad (4)$$

と表現できる。Maxwell方程式の空間・時間微分演算を差分に置き換えることで、連続的な空間・時間ではなく、離散的な空間・時間で電磁界を計算することが可能となる。

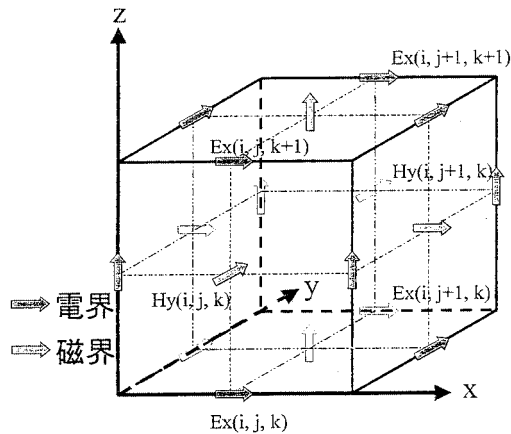


図1 Yeeセル  
Fig.1 Yee cell

FDTD法においては解析空間を縦・横・高さがそれぞれ  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  のYeeセル(図1)の集合体として表現する。Yeeセル上の各電界、磁界を計算する際に、そのセルが位置する媒質の誘電率、透磁率、導電率などを用いることで、そのセルの占める領域を金属、誘電体など任意の媒質として表現することができる。なお、解析領域のモデル化において、表現可能な最小の構造はセルの大きさにより決定されるが、FDTD法の計算量はセル総数の4/3乗に比例することから、微細構造にあわせて解析領域全体を一様な微細セルで表現するとセル数が急激に増加する問題がある<sup>7),8)</sup>。この場合は微細構造の近傍だけを特別なセルを用いてモデル化する局所サブセル法や、微細構造を含む領域を周囲のセルよりも小さなサイズを用いて分割する局所サブグリッド法を用いる事でメモリサイズを抑える事ができる<sup>7)</sup>。

Yeeセル上には図1の様に交互に電界と磁界が配置される。

電界(磁界)は隣り合った電界(磁界)と  $\Delta x$ (または  $\Delta y, \Delta z$ ) 離れており、また隣り合った電界と磁界とは  $\Delta x/2$ (または  $\Delta y/2, \Delta z/2$ )の空間的な間隔をもつ。差分されたMaxwellの方程式では、電界、磁界はそれぞれ  $\Delta t$  ごとに計算される。例えば  $t = t_0 + \Delta t$  に  $(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$  に位置する  $y$  方向の磁界は  $t = t_0$  におけるその位置の磁界  $H_y(i, j, k)_{t=t_0}$  と周囲の電界成分を用いて

$$H_y(i, j, k)_{t=t_0+\Delta t} = H_y(i, j, k)_{t=t_0} + \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta x} (E_z(i+1, j, k) - E_z(i, j, k)) + \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta z} (E_x(i, j, k+1) - E_x(i, j, k)) \quad (5)$$

と計算される。同様に  $t = t_0$  に  $(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$  に位置する  $z$  方向の電界  $E_z(i, j, k)_{t=t_0}$  と周囲の磁界を用いて  $t = t_0 + \Delta t$  における電界は

$$E_z(i, j, k)_{t=t_0+\Delta t} = E_z(i, j, k)_{t=t_0} + \frac{\Delta t}{\varepsilon \cdot \Delta x} (H_y(i+1, j, k) - H_y(i, j, k)) + \frac{\Delta t}{\varepsilon \cdot \Delta y} (H_x(i, j+1, k) - H_x(i, j, k)) \quad (6)$$

となる。このとき、磁界計算に  $\Delta t/2$  前の電界の値を用い、また電界計算に  $\Delta t/2$  前の磁界の値を用いることで、 $\Delta t/2$  ごとに交互に電界・磁界を計算できる。

### 2.3 吸収境界条件

FDTD法における重要な要素のひとつに、吸収境界条件(abc: absorbing boundary condition)がある。アンテナ解析など無限の空間における解析を行う場合にも、FDTD法では有限個のセルでこれを表現する必要がある。解析空間が

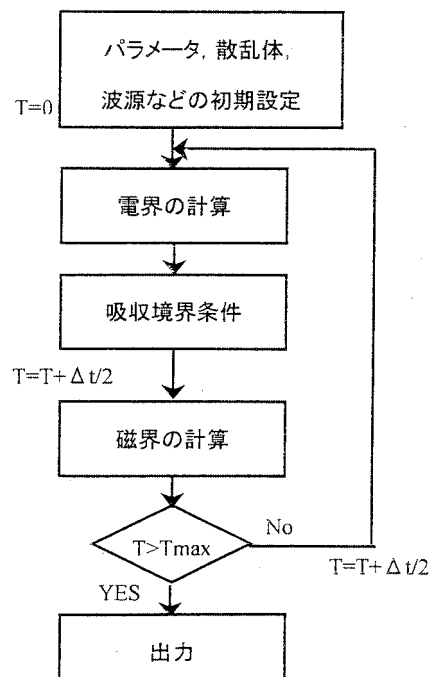


図2 FDTD法のフローチャート  
Fig.2 Flow chart of FDTD method

全て完全導体で覆われている場合、境界面の完全導体内部には電磁界は存在しないため、解析領域の最外部をすべて完全導体とした閉じた解析空間を用いることができる。また、最外部が有限の導電率を有する通常の導体の場合も、境界面から指数関数的に電磁界は減少するため、ある程度の厚さの金属で囲んだ有限の空間で解析が可能である。しかしそれ以外の場合、例えば無限長の線路(導波管など)や自由空間などを解析する場合、解析空間の最外部をどのように処理するかが問題となる。

無限長の線路や自由空間を有限の空間でモデル化する場合、最外部に到達した電磁界は、全てそこで「吸収」され、反射波が生じないようにする必要がある。このため、最外部においては吸収境界と呼ばれる特殊なセルを用意するのが一般的である。吸収境界に用いる条件としては、現在までにさまざまなものが提案されているが、(1)D\_abc(Differential-based absorbing boundary condition)型、(2)M\_abc(Material-based absorbing boundary condition)型、(3)その他の型に分類される<sup>7)</sup>。(1)のD\_abc型は、境界において反射が生じない、という微分方程式の条件から導き出されたもので、最もよく使われているMurの吸収境界条件はこの型に属する。(2)のM\_abc型は境界に仮想的な媒質において、これにより入射波を減衰させる。現在、もっとも高い精度をもつといわれているBerengerのPML(perfectly matched layer)はこの型に属している。(3)の型としてはMeiとFangが提唱したsuper-absorption等があるが、あまり用いられていない。いずれの吸収境界条件を用いても入射波の角度によっては反射が生じてしまう角度依存性を持ち、完全な吸収境界条件はまだ無い。本研究においては、コーディングが容易で有効性の高いMurの1次ならびに2次の条件を用いている。

以上の点を考慮したFDTD計算の流れを図2に示す。吸収境界に用いる条件は一般に電界成分に対して適用されるため、電界の計算後に吸収境界条件を適用する。

## 2.4 安定性

FDTD法は空間・時間をサンプリングし、離散的な空間・時間での計算を行う手法である。このため、アナログ/デジタル変換におけるShannonの標本化定理に現れるNyquist間隔と同様に、空間サンプリング間隔  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  は解析しようとする最高周波数における波長  $\lambda$  の1/2以上にはしてはならない。実際には  $\lambda/10$  程度で解析を行うのが一般的である。これは空間を直方体のYeeセルを用いて表現しているため、差分法に基づくFDTD法では、平面波の伝播速度が進行方向によって厳密には異なってしまいう数値誤差(グリッド分散誤差)が存在し、これを極力抑える必要があるからである<sup>7)</sup>。また空間サンプリング間隔と時間サンプリング間隔  $\Delta t$  は以下の条件(Courantの安定条件)を満たす必要がある<sup>7),8)</sup>。

$$v\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (7)$$

式中、 $v$  はその媒質中における電磁波の位相速度である。Courantの安定条件は厳密に満たされる必要があり、例えば(7)式の左辺が右辺よりわずかに0.05%だけ大きいような場合でも時間ステップを進めるにつれ電磁界が発散し、正しい解析が行えない。実際の計算において(7)式で等号とした条件(Courant基準)とした場合も、計算機内部の数値精度のオーダーで(7)の条件が満たされず、不安定が生じる場合がある。なお、時間ステップを上式のCourantの条件以下に設定しても(すなわち、右辺を左辺よりずっと小さくしたとしても)グリッド分散が生じるため精度は向上しない。

## 3. 解析例

### 3.1 シミュレーション構築環境

パーソナルコンピュータ(PC)上に、GNUのCコンパイラを用いてシミュレータを構築した。使用した機器ならびにコンパイラを表1に示す。

PC : Pentium III 500MHz, Memory 640MB  
 コンパイラ : gcc version 2.91 on Cygnus (Windows NT 4.0)

表1 本解析に用いたコンピュータ

Table.1 Computer used for this Analysis

この環境での100×100×100セル程度の中規模なモデルの計算速度は倍精度で1タイムステップあたり10秒以内であり、4000タイムステップ程度の解析を9時間程度で解析可能である。なおこのときのメモリ使用量は120MB程度である。計算速度、メモリ使用量は、プログラムの効率化により改善できる可能性がある。また、本シミュレーションを作成するにあたりgcc特有の機能は使っておらず、他のC++コンパイラでもコンパイル可能である。以下、このシミュレータを用いて、電磁波の伝播現象、散乱現象のシミュレートを行った。

### 3.2 平面波の自由空間伝播の解析

図3に示すような解析領域(100×100×100セル)の中心部で平面波を励振し、 $z+$ 方向と $z-$ 方向に伝播していく様子をシミュレートした。吸収境界条件はMurの1次吸収境界条件

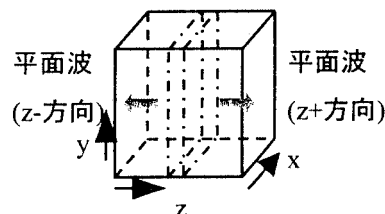


図3 平面波の伝播

Fig.3 Propagation of plane wave

を用いている。 $x-z$ 平面における電界の大きさを示したのが図4である。平面波が光速で減衰なしに伝播していく様子が

わかる。

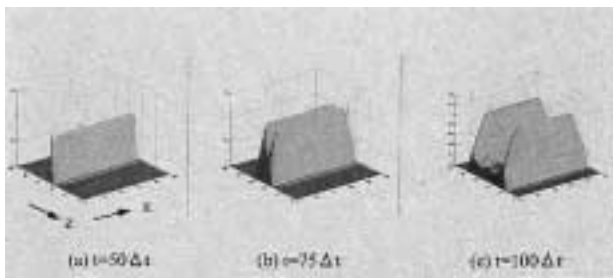


図4 平面波の伝播の解析

Fig.4 Analysis of plane wave propagation

なお、解析領域の最外部の  $y-z$  平面にて電磁界の乱れが生じている。これはMurの1次吸収境界条件の角度依存性によるものである。この吸収境界条件では、境界に垂直に入射する平面波に対しては反射は生じないが、入射角が浅くなるに従い反射を生じ、 $90^\circ$  近くの入射についてはほとんど反射係数の大きさが  $0\text{ dB}$  近くになってしまう。このため、吸収境界に沿って伝播する平面波が存在する場合は、他の方式を用いる必要がある。現実のモデルの解析を行う場合には電磁波の強度が十分小さくなる地点や平面波の入射角度が垂直近くになるように吸収境界を設ける場合がほとんどであるが、解析空間を十分大きく取れないような場合に注意が必要である。

### 3.3 導波管中の電磁波の伝播

$32\text{mm} \times 32\text{mm} \times 500\text{mm}$  の方形導波管の中心に  $E_y$  方向にGaussianパルスを励起した際の電磁波の伝播現象を解析したのが図5である。導波管においては平面波は伝播できず、また伝播が可能な形態(モード)が決まっておりこれ以外の形態は指数関数的に減少するエバネッセント波となる<sup>9),10)</sup>。本解析においても主モード(#1)ならびに1次の高次モード(#2)、エバネッセント波の発生が認められる。

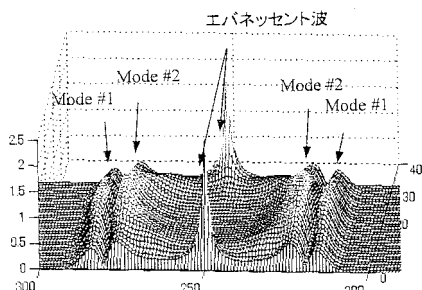


図5 方形導波管内モードの解析

Fig.5 Analysis of rectangular wave guide modes

### 3.4 散乱体問題

電磁波のシミュレーションにおいて重要となる解析に散乱体問題がある。ある媒質中を電磁波が伝播しているとき異な

る媒質(散乱体)が存在すると、そこで散乱現象が生じる<sup>10),11)</sup>。この現象で生じた散乱波には散乱体の情報が含まれており、その電磁界を測定することで散乱体の構造や媒質を特定することもできる(逆散乱体問題)。これはレーダー等の電磁波センサーにおいて非常に重要な問題であり、センサーなどの電磁波の高度利用においては不可欠な技術となる。そこで、FDTD法を用いていくつかの散乱体問題のシミュレーションを行った。

図6は自由空間中に  $1\text{ cm}$  立方の完全導体があった場合の散乱波の発生の様子をシミュレートし、200タイムステップ後の電界の大きさを図示したものである。解析空間の中央に正弦波で振幅変調したGaussianパルスを励起し、これを波源とする。ここから発生した電磁波は同心球面上に伝播し、解析空間の最外部の境界に到達し、吸収境界条件(Murの2次の吸収境界条件を適用)にエネルギーを吸収される。一方、完全導体でできた散乱体に到達した電磁波は、その表面において境界条件を満たすため、境界面に入射電界の接線成分の逆位相の電界が生じ、これが散乱体を新たな波源とする散乱波を発生させる。また、散乱体近傍には回折波も認められる。この様にFDTD法を用いることで電磁界の時間的な伝播状態を解析でき、直感的に電磁界の様子を把握するのに本シミュレーションは極めて有効なツールである。

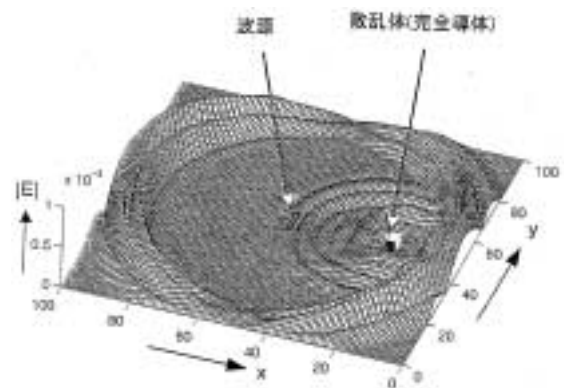


図6 自由空間中に置かれた完全導体による散乱

Fig.6 Scattering by perfect conductor placed in the free space

## 4. まとめ

本研究で用いたFDTD法は(1)各セルごとに異なる物理定数を入れることで任意の複雑形状モデルに対しての解析が可能である、(2)過渡現象の解析が可能である、(3)計算機の演算速度、メモリ容量などの向上により、パーソナルコンピュータ等でもシミュレータを構築可能である、(4)過渡状態から定常状態にいたる電磁界の状況を視覚的に観察でき、教育面などでも有効であるなどの長所を持った優れた手法である。反面、(1)メモリ等の計算機資源を多く消費する、(2)基本的に有限空

間に対するシミュレーション手法であり、そのままでは無限空間を扱うことができないなどの問題も有している。本研究では、近年のPCの性能向上ならびに低価格化を背景に、吸収境界条件などの手法を取り入れた電磁界シミュレータをPC上に構築し、EMC問題や電磁波を用いたセンサー開発等において必要となる電磁波伝播現象、散乱体問題等の解析を行い、本シミュレータの有効性を確認した。今後はモデリングを容易にする、シミュレーション結果の解りやすい表示などユーザインターフェース部の改良などを行うと共に、本シミュレータを用いたセンサー開発等への応用を進める予定である。

## 引用文献

- 1) 井手口健, 他 “情報通信システムの電磁ノイズ問題と対応技術” 森北出版株式会社, 1997
- 2) 清水康敬, 他編 “最新 電磁波の吸収と遮断” 日経技術図書株式会社, 1999
- 3) 多氣昌生 “高周波電磁界と生体” 第8回電磁界の健康影響に関するシンポジウム予稿集, 2000.2.9
- 4) 安達三郎 “電磁波工学” 電子情報通信学会編, コロナ社, 1983
- 5) 伊坂勝生 “身の回りの電磁界” 第8回電磁界の健康影響に関するシンポジウム予稿集, 2000.2.9
- 6) 宮崎, 伊藤 “間隙を介して給電される偏波切替マイクロストリップアンテナのスペクトル領域解析”, 電子情報通信学会, 論文誌(B-II), Vol.J78-BII, No.2
- 7) 宇野亨 “FDTD法による電磁界おようびアンテナ解析”, コロナ社, 1998
- 8) 橋本修, 他 “FDTD 時間領域差分法”, 森北出版株式会社, 1996
- 9) 内藤喜之 “情報伝送入門”, 株式会社昭晃堂, 1987
- 10) R.F.Harrington “Time Harmonic Electromagnetic Fields”, McGraw-Hill, 1961
- 11) 中島将光 “マイクロ波工学”, 森北出版株式会社, 1975