

## 有限差分時間領域法による室内電磁環境の予測解析（その1）

—— FDTD法の建築空間への応用 ——

笠井 泰 彰

## Forecast Analysis of Electromagnetic Environment in a Room by FDTD Method (Part 1)

—— Application of FDTD Method to Building Space ——

Yasuaki Kasai

## Abstract

To rationalize and minimize the cost of design and construction, it is important to determine the electromagnetic environment of a room before it is designed. However, analysis of the electromagnetic environment is generally complicated. In conventional analysis techniques, we can only consider simple models or the predicted values won't agree with measured ones. There is presently no effective forecasting technique.

We have applied the Finite Difference Time Domain Method to an indoor space which has been used with a microwave plane circuit design, and carried out a three dimensional electric field strength distribution analysis. Based on an expert's skill, the origin of waves is good in both the interior of the room and in a distance place. Even if there are household articles inside, analysis is possible. It is a flexible and adaptable analysis technique. Comparison of numerical analysis results and experiment measurements. Indicated that the forecast error was in the range of a few dB.

## 概 要

室内の電磁環境を設計あるいは施工前の段階において予測することは、設計施工の合理化とコストダウンのためにも必要不可欠である。しかし、電磁環境の解析は一般に複雑であり、簡単なモデルしか扱えなかったり、測定値との整合性が無いなど、有効な予測手法が存在しないのが現状である。

そこで、従来マイクロ波平面回路設計などで用いられてきた有限差分時間領域法(Finite Difference Time Domain Method) (以下 FDTD法) を室内空間に応用し3次元電界強度分布解析を行った。本手法は、波源が室内にあっても遠方にあってもよく、室内にどのような什器があっても解析が可能な自由度の高い解析手法である。数値解析結果と実験計測結果を比較した結果、数dBの誤差範囲内で予測が可能であることが確認された。

## 1. はじめに

近年悪化している建築物をとりまく電磁環境を改善するためには、電磁シールド・電波吸収・磁気シールドといった建物レベルの対策が必要である。

設計施工の合理化とコストダウンのためには、対象となる空間の電磁環境を設計あるいは施工前の段階において予測することが必要不可欠である。

本研究は、部屋の電磁環境の基本的な特性である電界強度分布の予測を目的としている。これまでの電界強度分布予測手法は複雑であり、建築空間のモデル化が困難であるばかりか、空間の測定値との整合性が取れないからである。電磁理論・電磁解析を建設業としての立場から見つめ直し、複雑な解析対象を効率よく扱うことのできる解析手法を検討し建築空間に応用することは極めて重要である。

今回検討した解析手法は、採用した時間領域差分法(FDTD法)のほかに、光線近似法(Ray-Tracing法)、境界要素法、等価波源法などがあつたが、

- 1) 簡単なモデルしか扱えない
- 2) 自由な物性値を与えにくい
- 3) 過渡応答が得られない

等、問題点が多く不採用とした。

時間領域差分法(Finite Difference Time Domain Method) (以下 FDTD法) は基礎方程式であるマクスウェルの方程式を差分化する解析手法<sup>1)</sup>であり信頼性も高い。また解析領域を方形のセルで分割するため曲線や曲面の少ない建築空間は解析対象に適している。

今回はFDTD法を用いて室内の3次元電界強度分布解析を行ったので、これを報告する。また、実測値との比較を行い解析の有効性を示した。

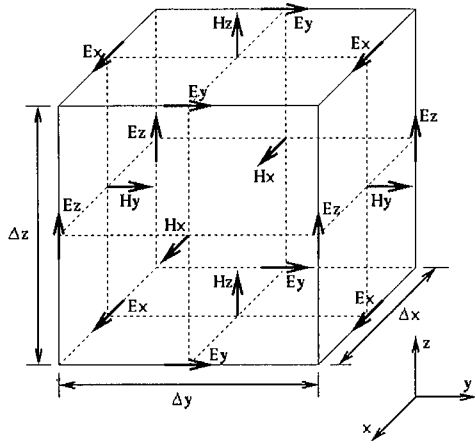


Fig. 1 3次元Yeeセル  
Three-Dimensional Yee's Cell

## 2. 3次元FDTD法

### 2.1 基礎方程式の離散化

FDTD法の定式化はYeeのアルゴリズム<sup>1)</sup>によって行う。波源、散乱体を囲むように解析領域をとり、解析領域を微小直方体セルに分離する。次に全セルに対して、マクスウェルの方程式 式(1)、式(2)を適用する。Eが電界ベクトル、Hが磁界ベクトルである。

離散化は  $(x, y, z, t) = (i \Delta x, j \Delta y, k \Delta z, n \Delta t)$  と割り当てて。また、精度を考慮して中心差分を適用すると、マ

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\epsilon} \mathbf{E} + \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \mathbf{H} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\mathbf{E}^n - \mathbf{E}^{n-1}}{\Delta t} = -\frac{\sigma}{\epsilon} \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}^n \quad \dots\dots\dots (4)$$

クスウェルの方程式は 式(3)、式(4)の様になる。ただし、 $\epsilon$ は誘電率、 $\mu$ は透磁率、 $\sigma$ は導電率である。

3次元単位セル内の電磁界をFig. 1に示す。電界は各辺上に、磁界は面の中心に垂直に割り当てられている。

### 2.2 格子サイズと安定条件

格子サイズは、問題とする最大周波数に対して、セルの一辺を1/10波長程度以下にすればよい。今回はパルスではなく100MHzのCW波が対象であったためセルサイズは15cm立方、一辺の長さが1/20波長として解析を行った。

また、他のFDM同様、Courant安定条件を満たさなければならない。セルサイズと時間ステップの間に、

$$v \Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

の関係がなければならない。この条件は極めて厳しく、わずかでも満足しなければ不安定となる。しかし逆に時

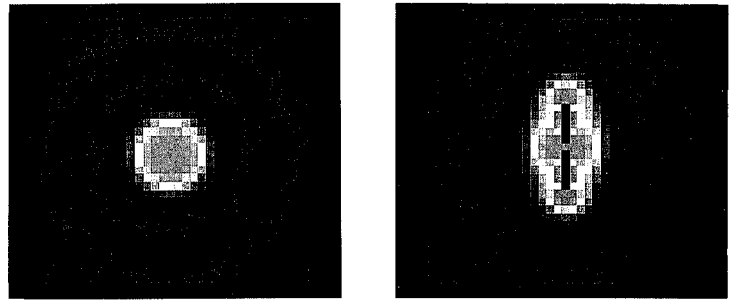


Fig. 2 半波長ダイポールアンテナの放射界  
Radiation Field of Half Wavelength Dipole Antenna

間ステップが短すぎると、計算時間が膨大になるばかりでなくグリッド分散も大きくなる。

### 2.3 δギャップ給電

今回は送信アンテナとして工学アンテナの中では最もプリミティブな半波長ダイポールを選んだ。

アンテナの表現手法としては「δギャップ給電法」<sup>6)</sup>を採用した。「δギャップ給電法」はアンテナのエレメント部分はモデル化し、給電部として1セルだけ確保する解析手法である。

Fig. 2は解析領域を「34×34×34」のメッシュで分割し、中央に半波長ダイポールを設置した場合の垂直偏波および水平偏波の解析例である。色が濃いほど電界強度が強いことを示している。

## 3. 吸収境界条件の検討

FDTD法を散乱解析あるいはアンテナ解析などの解放領域の問題に適用する場合には解析領域端部で吸収境界条件(Absorbing Boundary Condition)が必要となる。

今回は、精度は中程度であるが安定であり、メモリ効率の良いMurの吸収境界条件<sup>2)</sup>と、現在のところ最も精度の良いPML<sup>3)</sup>を用いることにした。

### 3.1 Murの吸収境界条件

直角座標系での3次元の波動方程式は(6)式になる。

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) E_i = 0 \quad i = x, y, z \quad \dots (6)$$

解析領域端部では、上記の波動方程式を満たしつつ遠方に広がる波のみが存在するように基礎方程式を変えてやればよい。

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} - \frac{1}{c} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{c}{2} \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \right\} E_i \Big|_{x=0} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

これがMurの3次元吸収境界条件(2次)である。

### 3.2 Perfectly Matched Layer

吸収層に用いるPML媒質は、整合条件を満たす導電率 $\sigma$ と導磁率 $\sigma^*$ を持つ解析上の架空の媒質である。PML媒質内の特性インピーダンス $Z$ は、

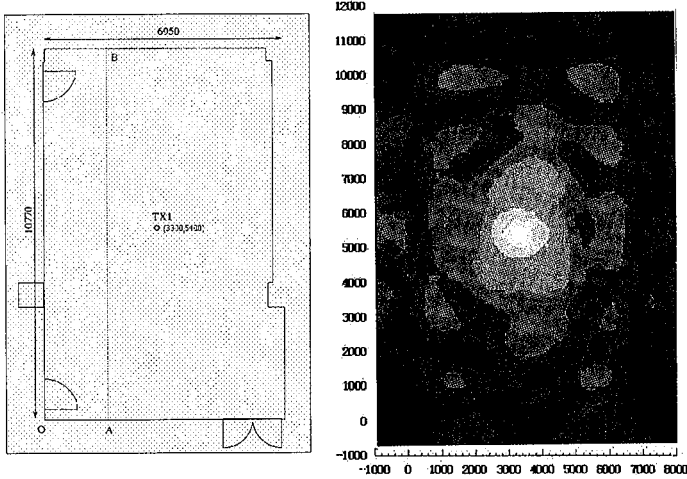


Fig. 3 解析モデル平面図  
Analysis Model Floor Plan

Fig. 5 電界強度分布  
Electric Field Strength  
Distribution

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\omega_x \cos^2 \varphi + \omega_y \sin^2 \varphi}} \dots \dots \dots (8)$$

$$\omega_x = \frac{1-i(\sigma_x/\epsilon_0\omega)}{1-i(\sigma_x^*/\mu_0\omega)} \quad \omega_y = \frac{1-i(\sigma_y/\epsilon_0\omega)}{1-i(\sigma_y^*/\mu_0\omega)} \dots \dots (9)$$

となる。このとき整合条件

$$\frac{\sigma_x}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_x^*}{\mu_0} \quad \text{and} \quad \frac{\sigma_y}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_y^*}{\mu_0} \dots \dots \dots (10)$$

が満たされているとき、角周波数 $\omega$ 、入射角 $\phi$ によらず真空と完全整合し反射が起きない。また、PML媒質内では損失性媒質となり電磁波を吸収する。

4. 数値解析例および結果

以上の理論に基づき、3次元の数値解析を行った。解析の有効性を示すために、実在する部屋の測定と解析を行いその結果を比較した。

4.1 解析モデル概要

対象とした部屋の平面図をFig. 3に示す。天井がロックウール吸音板、柱および壁面はコンクリート（一部石膏ボード）、床はカーペットタイル、西側に金属製のドアが2枚、南側の入り口ドアは木製である。実在する一般的な会議室で、窓はない。

Fig. 5の外枠部分が解析領域全体を示しており、水平方向のメッシュ数は61×84、高さ方向は29メッシュとした。よってメッシュ総数は148,596（約15万）である。解析のモデル化は、Courant安定条件を満たすように15cm角のメッシュで分割した。建材の物性値のパラメータは、誘電率および導電率を入力した。透磁率については磁性材料がないことから真空と同じである。また、吸収境界条件としては精度の高いPMLを用いている。

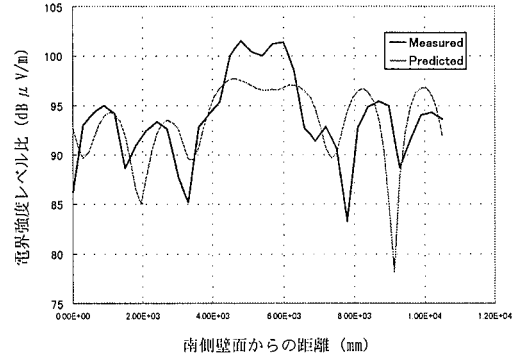


Fig. 4 AB上の電界強度  
Electric Field Strength  
on Segment AB

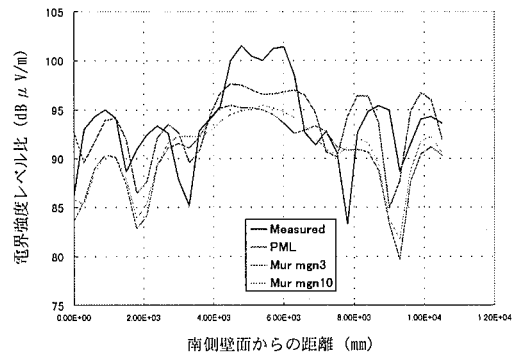


Fig. 6 吸収境界条件比較  
Comparison of Absorbing Boundary Condition

4.2 計測概要

測定は、部屋内の什器を全て外に出して行った。半波長ダイポールを用い、送信機にSG、受信機に電界強度計を使用した。周波数は100MHzである。送信アンテナはFig. 3のTX1に高さ1245mmで垂直に設置した。

4.3 計測値との比較

Fig. 4は、Fig. 3の平面図上の線分AB上の測定値と解析値の比較、Fig. 5は部屋全体（解析領域全体）の電界強度分布予測のコンター表示である。座標はFig. 3の○点を原点としx(mm)（東西方向）、y(mm)（南北方向）で表した。

Fig. 4を見ると、波源付近以外は誤差が2~3dB μV/m程度であり、良く一致している。定在波の腹や節も正しく予測できているのがわかる。波源付近でも誤差は5dB μV/m程度である。数dBの誤差範囲内で電界強度分布が予測できていれば、設計支援ツールとしては十分である。

また、室内の電磁環境だけでなく部屋の外側部分に漏れ出た電磁波の解析も可能であり、電磁シールド設計用の解析にも応用が可能である。

4.4 吸収境界条件の比較

Fig. 6は吸収境界条件を変えたときの線分AB上の電界強度分布の予測結果の比較である。モデルの外側から3セル（メッシュ）離れたPMLを用いた場合、同様に3セル

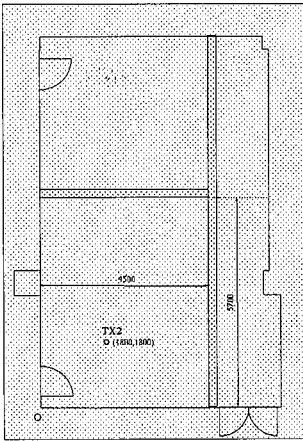


Fig. 7 平面図 (設計変更)  
Redesigned Floor Plan

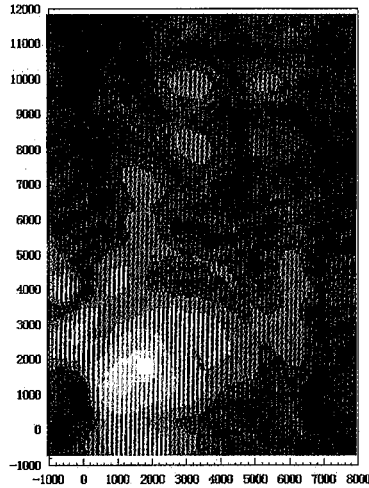


Fig. 8 電界強度分布  
Electric Field Strength  
Distribution

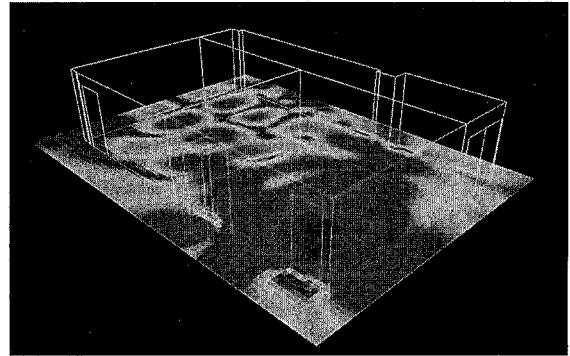


Fig. 9 可視化処理  
CG Processing for Presentation

離れたMur (2次) を用いた場合、さらにMurで10セル離れた場合の3つを比較した。

Murの吸収境界を用いても、十分に電磁環境の傾向を把握することが出来ているが、PMLを使用した方が精度が向上するのは明らかである。

ただ、必ずしもPMLがよいというわけではない。Murの吸収境界はメモリ効率が良く、大規模なモデルの電磁環境をおおまかに知りたい場合などには有用である。

#### 4.5 予測解析

解析対象とした部屋に若干の設計変更を加えた場合を想定し、部屋内の電磁環境がどのように変化するかを試算してみた。

Fig. 7は、300mm厚のプラスターボードで小部屋に分割する設計変更をした場合の平面図である。なお、送信アンテナはTX2に設置した。

Fig. 8はこのときの、電界強度分布の予測結果(コンター図)である。

電磁波をほとんど遮断・吸収できないプラスターボードのパーティションが電磁環境に大きく影響を与えていることがわかる。また、金属ドアの影響で送信アンテナの指向性が変化している。

またFig. 9は同じ結果の図であるが、プレゼンテーション用にモデルを重ね角度を変えて描かせたものである。FDTD法は過渡応答の解析が可能であるので、このままアニメーションにすることも可能である。

### 5. まとめ

FDTD法を建築空間に応用し、室内の3次元電界強度分

布解析を行った。実測値との比較を行い解析の有効性を示した。室内の電界強度分布の変化を予測・分析できるため、設計にフィードバックすることが可能である。

現状では解析対象が100m<sup>3</sup>程度までの空間でかつ対象周波数が低い場合の解析しか扱えないが、室内の電磁界解析の基礎を築くことができた。

#### 参考文献

- 1) K. S. Yee: Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-14, p. 302~307, May, (1966)
- 2) Gerrit Mur: Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field Equations, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-23, No. 4, p. 377~382, November, (1981)
- 3) J. P. Berenger: A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, J. Comput. Phys., vol. 114, p. 185~200, (1994)
- 4) A. Taflov: Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time-Domain Method, Norwood, MA, Artech House, (1995)
- 5) 橋本 修: 阿部琢美, FDTD時間領域差分法入門, 森北出版, (1996)
- 6) 宇野 亨: 電磁界解析の基礎とアンテナ工学への応用 [III・完], 電子情報通信学会誌, vol. 80 No. 2, p. 184~191, Feb, (1997)