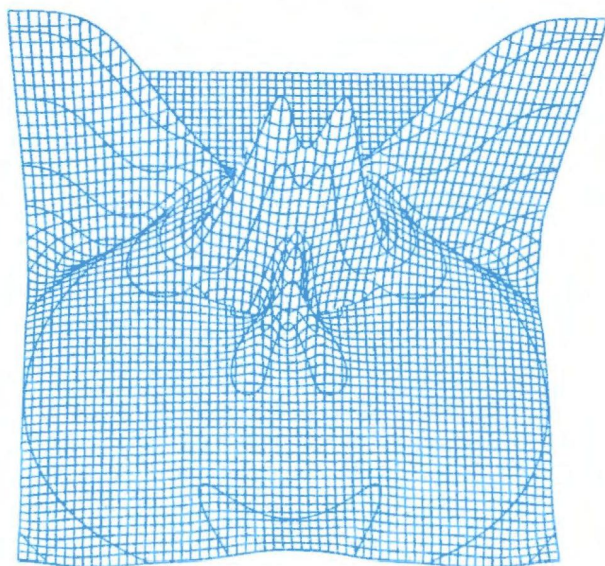


# 数値電磁界解析のための FDTD法

—— 基礎と実践 ——

宇野 亨 編著  
何 一偉 共著  
有馬 卓司



コロナ社

# 数値電磁界解析のための FDTD法

—— 基礎と実践 ——

工学博士 宇野 亨 編著  
博士(工学) 何 一偉 共著  
博士(工学) 有馬 卓司

コロナ社

# ま え が き

FDTD 法 (finite difference time domain method) とはマクスウェルの方程式の差分近似解法で、電磁界の過渡応答が直接計算できる点に特徴がある。FDTD 法が本格的に電磁界解析に応用され始めたのは高性能コンピュータが広く普及し始めた 1990 年初頭頃からであるが、アルゴリズムがきわめて単純で特別な工夫をすることなく実用的なレベルの精度が容易に得られることから、アンテナやマイクロ波の問題ばかりではなく電磁環境や光デバイスなどのさまざまな分野に応用されてきた。また、国内外を問わず FDTD 法の市販ソフトが広く普及し、アイデアの具現化や製品化に少なからず貢献している。このように、FDTD 法は電磁界解析法の定番の一つであると言ってよい。一方、コロナ社から『FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析』が刊行されてから長い年月が経過した。この間、FDTD 法の応用分野の広がりとともに新たに生まれた方法もあれば、逆に淘汰された方法もある。また、多くの読者から具体的なプログラムコードを公開してほしいとの要望をたびたびいただいた。本書はこれらの声に応えるために執筆したもので、新しい解析手法を書き加えるとともに基本的なプログラムコードを掲載してその内容を詳細に説明している。できるだけ特殊なコーディングはしないように心掛けたが、それでも計算機環境によっては正しく動作しない可能性がないとは言えない。しかし、本書の内容が把握できれば修正は容易であろうと考える。

本書は FDTD 法を一度経験した技術者、大学院生向けに執筆したものであるが、初学者にも理解できるように工夫した。1 章では FDTD 法を理解するために必要な最小限度の基本事項をまとめた。2 章は無限空間を扱うための吸収境界について述べている。FDTD 法に習熟している読者も復習を兼ねて一読をお願いしたい。その後は具体的な解析手法とそれに対応するプログラムを説明

している。3章では1次元から3次元までの基本的なプログラムを載せてその詳細を説明するとともに、コーディングにあたっての基本事項を述べている。4章は周波数分散性媒質と異方性媒質の取り扱いを説明した章であり、これらの媒質に対する吸収境界についても記述している。5章は電磁波の散乱問題とその実装例を解説した章で、いくつかの解析例を示すとともに、そのプログラム例も掲載している。6章ではアンテナの特性を計算する方法を説明している。7章はメタマテリアルの解析法を示した章であり、具体的には無限周期構造による平面波の散乱問題と周期構造の分散特性を計算する方法を説明している。8章ではFDTD法に関連する手法を簡単に解説しているが、著者らの独断的な説明になっているところも少なくない。詳細は文献で補っていただきたい。また、本文に導出過程までを載せると冗長になりすぎると思われるものは章末問題として取り上げたが、解答はあえて載せなかった。読者自らが挑戦して試行錯誤することが理解を深めるこだと考えたからである。

参考文献は読者の便宜を考慮してできるだけ入手しやすい文献を挙げており、必ずしもオリジナルの論文ではない。各引用文献中の参考文献を参照していただきたい。一方、FDTD法は計算機的能力に大きく依存した数値解析法である。このため、いかに高速に計算するかは実用上重要な問題である。しかしながら、読者のおかれた計算機環境は多種多様でありすべてをカバーすることはできない。このことから、簡単なコメントは加えたものの大きく取り上げるのは適当でないと判断した。この分野の専門書や学術論文などで補っていただきたい。

最後に、本書はいろいろな方々からのご協力、ご支援によって完成することができた。有益なご助言をいただいた電子情報通信学会をはじめとする各種研究専門委員会の委員の皆さん、研究室の学生諸君に感謝する。また、出版に際し著者らのわがままなお願いを聞いて下さったコロナ社の皆さんに大変お世話になった。ここに記して深く謝意を表する。

2016年3月

宇野 亨・何 一偉・有馬 卓司

# 目 次

## 1. FDTD 法基礎

1.1 電磁方程式	1
1.1.1 マクスウェルの方程式	1
1.1.2 物質と構成方程式	2
1.1.3 境界条件	6
1.2 Yee アルゴリズム	8
1.2.1 差分近似と記号法	8
1.2.2 時間差分	10
1.2.3 1次元空間差分	12
1.2.4 2次元空間差分	14
1.2.5 3次元空間差分	18
1.3 物体のモデル化	22
1.3.1 誘電体と磁性体	23
1.3.2 完全導体と完全磁気導体	23
1.3.3 境界の取扱い	24
1.4 外部波源と励振パルス	25
1.4.1 平面波	26
1.4.2 励振パルス	27
1.5 時間ステップとセルサイズ	29
1.5.1 時間ステップ	29
1.5.2 セルサイズ	30

章 末 問 題	33
---------	----

## 2. 吸 収 境 界

2.1 Murの吸収境界	35
2.1.1 1次吸収境界条件	35
2.1.2 2次吸収境界条件	37
2.2 PML吸収境界	39
2.2.1 基本概念	39
2.2.2 1次元PML	43
2.2.3 2次元PML	46
2.2.4 3次元PML	51
2.3 UPML	55
2.3.1 BerengerのPMLとストレッチ座標	56
2.3.2 異方性PML媒質	57
2.3.3 FDTD表現	59
2.4 CPML	63
2.4.1 CPMLパラメータ	63
2.4.2 FDTD表現	65
章 末 問 題	69

## 3. 基本プログラム

3.1 計算の流れ	72
3.2 1次元問題	74
3.2.1 解析モデル	74
3.2.2 プログラム例	75

3.2.3	計 算 結 果	81
3.2.4	注 意 事 項	83
3.2.5	PML吸収境界	85
3.3	2 次 元 問 題	90
3.3.1	解 析 モ デ ル	91
3.3.2	プ ロ グ ラ ム 例	91
3.3.3	完 全 導 体	105
3.3.4	不 均 質 媒 質 に 対 す る PML	107
3.3.5	平 面 波	108
3.4	3 次 元 問 題	110
3.4.1	プ ロ グ ラ ム 例 と 計 算 結 果	110
3.4.2	コ ー デ ィ ン グ 上 の 注 意 事 項	112
3.4.3	ID 配 列	114
3.4.4	BPML と CPML の 比 較	115
	章 末 問 題	117

## 4. 分散性・異方性媒質

4.1	代 表 的 な 分 散 性 媒 質	119
4.2	RC 法 と PLRC 法	121
4.2.1	誘 電 体	121
4.2.2	磁 性 体	122
4.2.3	デ バ イ 分 散	125
4.2.4	ド ウ ル ー デ 分 散	125
4.2.5	ロ ー レ ン ツ 分 散	125
4.3	ADE 法	126
4.3.1	D-E 法	127

4.3.2	補助関数の導入	128
4.4	左手系媒質の取扱い	130
4.4.1	右手系媒質と左手系媒質	130
4.4.2	左手系媒質のモデル	132
4.4.3	PLRC 表現	133
4.5	分散性媒質に対する PML	133
4.5.1	損失性媒質	134
4.5.2	デバイ分散	136
4.5.3	左手系媒質	136
4.6	異方性媒質	136
4.6.1	PLRC 法	137
4.6.2	ADE 法	138
4.6.3	運動方程式の利用	138
4.6.4	異方性媒質に対する PML	140
章 末 問 題		144

## 5. 電磁波散乱解析とその実例

5.1	散乱界に対する FDTD 法	146
5.1.1	誘電体と磁性体	146
5.1.2	完全導体と完全磁気導体	148
5.1.3	完全電気壁と完全磁気壁	149
5.2	全電磁界・散乱界領域分割法	149
5.2.1	電磁界の接続	150
5.2.2	プログラム例と解析例	152
5.3	セル構造の変形	155
5.3.1	不均一メッシュ	155



5.3.2	サブグリッド法	156
5.3.3	CP 法	157
5.3.4	多重領域 FDTD 法	158
5.4	良導体の取扱い	161
5.4.1	内部電磁界	161
5.4.2	外部電磁界と表面インピーダンス法	163
5.5	遠方界	165
5.5.1	過渡指向性関数	166
5.5.2	プログラム例	171
5.5.3	散乱断面積と散乱幅	174
	章末問題	177

## 6. アンテナ解析とその実例

6.1	アンテナ導体のモデル化	179
6.1.1	細線導体と導体板	179
6.1.2	導体端部	180
6.1.3	近接導体	181
6.1.4	導体板と線状導体の接続部	181
6.2	アンテナ給電モデルと給電点電流	182
6.2.1	微小ギャップ給電	182
6.2.2	同軸線路給電	186
6.2.3	マイクロストリップ線路給電	187
6.3	入力インピーダンス	188
6.3.1	計算法	188
6.3.2	ダイポール系アンテナ	190
6.3.3	ループ系アンテナ	191

6.3.4	マイクロストリップアンテナ	192
6.4	反射係数と散乱行列	194
6.4.1	入射電力と入力電力	194
6.4.2	反 射 係 数	195
6.4.3	インピーダンス行列と散乱行列	195
6.5	アンテナの放射効率と SAR	197
6.5.1	放 射 効 率	198
6.5.2	SAR	199
6.5.3	電 力 の 計 算	199
6.5.4	計 算 例	201
6.6	遠 方 界 特 性	203
6.6.1	指 向 性	203
6.6.2	利 得	206
6.6.3	複素指向性関数の計算	208
6.6.4	半 無 限 領 域	212
6.7	電流分布と電荷分布	213
6.7.1	線 状 導 体	213
6.7.2	面 状 導 体	214
	章 末 問 題	215

## 7. メタマテリアル

7.1	メタマテリアルと FDTD 法	217
7.1.1	メタマテリアルアンテナ	217
7.1.2	フロケの理論	218
7.1.3	解 析 領 域	219
7.2	平面波の垂直入射	220

7.2.1	周期境界条件	220
7.2.2	完全電気壁と完全磁気壁	225
7.3	斜め入射	228
7.3.1	Sine-Cosine 法	228
7.3.2	電磁界変換法	229
7.3.3	US-FDTD 法	229
7.3.4	伝送線路近似	237
7.4	アンテナ問題	239
7.4.1	ASM-FDTD法	239
7.4.2	等価媒質近似	242
7.5	分散ダイアグラム	243
7.5.1	伝送線路近似	243
7.5.2	FDFD 法	246
	章末問題	246

## 8. 関連手法

8.1	FDTD関連手法	249
8.1.1	陰解法	249
8.1.2	高精度化	254
8.1.3	その他の手法	255
8.2	FDTD連成解析	257
8.2.1	電磁波と電気回路	257
8.2.2	電磁波と熱	262
8.3	周波数領域の電磁界解析手法	263
8.3.1	規範問題	263
8.3.2	モーメント法	264

8.3.3 有限要素法	268
8.3.4 高周波近似法	270
章末問題	273

## 付録 A. 物理定数と物質の電気定数

A.1 基本定数	276
A.2 物質の電気定数	277
A.2.1 基本媒質定数	277
A.2.2 その他の媒質定数	279

## 付録 B. プログラム

B.1 2次元平面波の散乱プログラム	280
B.2 3次元プログラム	284
B.3 全電磁界・散乱界プログラム	308
B.4 時間領域遠方界	314
B.5 ダイポールアンテナ	332

## 付録 C. 数値積分と離散フーリエ変換

C.1 滑らかな関数の積分	336
C.1.1 台形則	337
C.1.2 シンプソン則	338
C.1.3 ガウス・ルジャンドル則	339
C.1.4 そのほかの積分	340
C.2 多重積分	341

C.3 離散フーリエ変換 ..... 341  
    C.3.1 フーリエ変換と離散フーリエ変換 ..... 341  
    C.3.2 高速フーリエ変換とそのプログラム例 ..... 344

付録 D. 連立一次方程式と逆行列

D.1 連立一次方程式 ..... 347  
D.2 逆 行 列 ..... 349

引用・参考文献 ..... 350  
索 引 ..... 358

# 3

## 基本プログラム

本章は FDTD 法による電磁界計算をプログラムとして具現化する章である。FDTD 法は大規模計算になることが多いことや大型計算機では今でもなお FORTRAN が主流であることなどを考慮して、本章では FORTRAN90 に準拠したプログラムを掲載した。これに習熟していない読者も少なくないと予想されるため、FORTRAN に特有の命令は極力避け、前章までに示した表現式とおりのコーディングをした。また、初学者でも容易に理解できるように基本的な問題だけを取り上げてできるだけいい説明を心掛けた。本章で示したプログラムを他の言語や自らの計算機環境に合わせて書き換えることは容易であろうと考える。

### 3.1 計算の流れ

Yee アルゴリズムに基づく電磁界計算のフローチャートを図 3.1 に示す。これは 1 次元であっても 3 次元であっても同じである。まず最初に解析領域の大きさやプログラム全体で使う共通変数などを宣言するとともに、解析モデルの設定や電磁界を計算するための係数、初期値  $\mathbf{E}^0(\mathbf{r})$  と  $\mathbf{H}^{1/2}(\mathbf{r})$  などあらかじめ決めておく「初期設定」を行う。このようにしたのは、FDTD 法の計算は解析領域内の「電界の計算」と

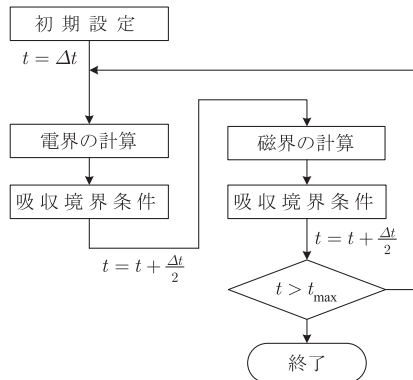
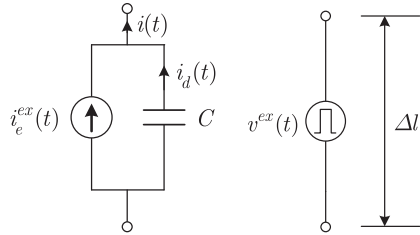


図 3.1 フローチャート

辺は全電流  $i(t)$  と解釈することができる。さらに  $i_d(t)$  は

$$i_d(t) = \varepsilon_0 \frac{\Delta S_e}{\Delta l} \frac{\partial (E_z \Delta l)}{\partial t} \tag{3.4}$$

と書き換えられる。ここで、 $v(t) = E_z \Delta l$  は端子電圧で、 $C = \varepsilon_0 \Delta S_e / \Delta l$  は平行平板コンデンサのキャパシタンスであるから、式 (3.3) は図 3.16 (a) のような等価回路に書き換えることができる。したがって、電流源としてガウスパルス



(a) 電流源 (b) 電圧源

図 3.16 等価回路

印加して十分時間が経過してもコンデンサの部分に等価的な電荷が残ることになるから、図 3.17 (a) のように波源近傍の電磁界はいつまでも強いままである。

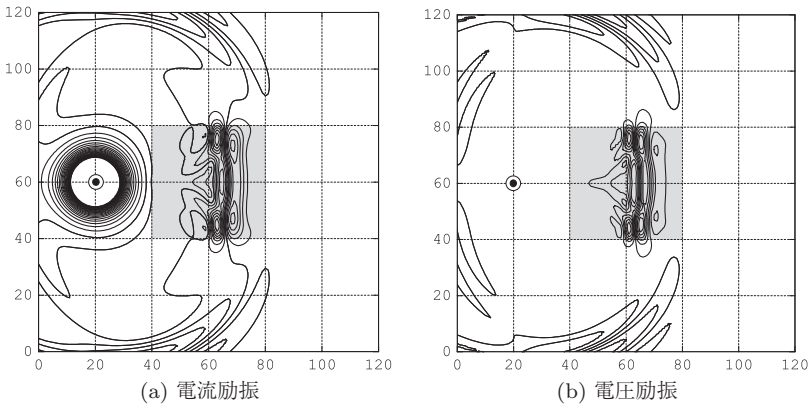


図 3.17 電界  $E_z(x, y, 0, 160\Delta t)$

これに対して、励振点の電界を強制的に与えたい場合がある。これは印加電圧  $v^{ex}(t)$  によって電界が  $E_z(t) = v^{ex}(t) / \Delta l$  が生じたと考えればよいから、図 3.16 (b) のような等価回路に置き換えられる。 $v^{ex}(t)$  としてガウスパルスを与えたとすると、励振点の電界は十分時間が経過すれば 0 になるから、電流給電のように電界がいつまでも残ることはなく、図 3.17 (b) のような電界分布とな

- (1) プログラムコード B.10 を観測角ごとに過渡指向性関数  $\mathbf{D}(t)$  を求めるプログラムに書き換えよ.
- (2) 上問 (1) の  $\mathbf{D}(t)$  をフーリエ変換して周波数領域の指向性  $\dot{\mathbf{D}}(\omega)$  を求めるプログラムを作れ.
- (3) プログラムコード B.9 と B.12 を利用してダイポールアンテナの指向性を求めるプログラムに書き換えよ.

【4】 つぎの問題に答えよ.

- (1) プログラムコード 6.1, 6.2 を完成させて, 微小電流源による指向性を計算せよ. また, 吸収境界と閉曲面  $S$  との距離をパラメータとして, 指向性の収束性を検討せよ.
- (2) 閉曲面  $S$  上の複素電磁流から放射電力を計算するプログラムを作り,  $\dot{\mathbf{D}}(\theta, \phi)$  から計算した放射電力の値と比較せよ. ただしこのとき, 吸収境界と閉曲面  $S$  との距離をパラメータとせよ.
- (3) 指向性利得  $G_d(\theta, \phi)$  の角度パターンを計算せよ.

【5】 つぎの問題に答えよ.

- (1) 図 6.29 に対するダイアディックグリーン関数を求めよ. ただし, スラブ内の誘電率, 透磁率はともに一定値であるとする.
- (2) 鞍部点法を用いて遠方界に対するダイアディックグリーン関数を求めよ.
- (3) アンテナは境界 I にあり, その電流分布を  $\mathbf{K}_e(x, y)$  とする.  $z > 0$  の空間における遠方電界の表現式を求めよ.
- (4) FDTD 法を用いて指向性を計算するプログラムを作れ.



側の磁界の計算には  $P_B$  上の電界を使う。この電界は周期境界条件を満たす。例えば、図 7.4 の  $H_z^{n+1/2}(i+1/2, 1/2, k)$  は式 (1.50) より

$$\begin{aligned}
 H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, k\right) &= a_m\left(i+\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, k\right) H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, k\right) \\
 &\quad - b_m\left(i+\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, k\right) \left[ \frac{E_y^n\left(i+1, \frac{1}{2}, k\right) - E_y^n\left(i, \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta x} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, 1, k\right) - E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, N_x, k\right)}{\Delta y} \right] \quad (7.7)
 \end{aligned}$$

となる。このようにして  $P_B$  上の電磁界とその半セルだけ内側の磁界にだけ周期境界条件を与えればよいことになる。ところが、式 (7.4) や式 (7.5) などは式 (1.45) や式 (1.46) に周期境界条件を代入しただけであるから、プログラムコード 7.1 のように `call e_cal`, `call h_cal` の直前で周期境界条件を計算するようにすれば、プログラムの修正は最小限で済むことになる。ただし、散乱界は PML 吸収境界内部にまで伝搬してゆくので、PML 内でも周期境界条件を導入しなければならない (章末問題【1】)。

プログラムコード 7.1 ftd3d.pb.f

```

1  . . . .
2  . . . .
3  !-----
4  !      メインプログラム
5  !-----
6      program ftd3d_pb
7      use ftd3d_variable
8
9      call setup()                ! FDTD の初期設定
10     call init_pml()             ! PML の初期設定
11     call init_plane()           ! 平面波の初期設定
12
13     t=dt
14     do n=1, nstep
15         write(*,*) 'Time step:', n
16         call h_pbc                ! 磁界に関する周期境界条件
17         call e_cal
18         call e_pml()
19         t=t+0.5*dt
20         call e_pbc                ! 電界に関する周期境界条件
21         call h_cal
22         call h_pml()
23         t=t+0.5*dt
24         call out_emf(n)

```

FDTD 法に関連した手法のうち、代表的な物を簡単に紹介する。細かく分類するとここで述べる手法以外にも多種多様な方法があるが、紙面の都合でそれらすべてを網羅することはできない。巻末にあげた参考文献などで補っていただきたい。また、FDTD 法以外の代表的な電磁界解析法についても簡単に紹介する。一方、計算機の能力が格段に向上したため、たがいに複雑に絡み合った複数の物理現象を連成させた数値解析が可能になりつつある。これをマルチフィジクス解析 (multiphysics analysis) という。本章では分子・原子といったマイクロ領域には立ち入らないで、電磁波工学で重要と思われる電磁界と熱、および電磁界と電気回路との連成解析法について簡単に紹介する。

## 8.1 FDTD 関連手法

### 8.1.1 陰 解 法

陽解法 (explicit methods) の一つである FDTD 法ではセルサイズと時間間隔  $\Delta t$  とは 1.5.1 項で示した Courant 安定条件を満足しなければならないため、 $\Delta t$  をこの条件より大きくとることはできない。また、グリッド分散誤差を最小にするには  $\Delta t = \Delta t_c$  としなければならないため、セルサイズを決めると  $\Delta t$  も一意的に決まってしまって自由に選ぶことはできない。このため、セルサイズを小さくすると計算時間がそれに伴って増加する。これに対して、**ADI-FDTD 法**<sup>74), 75)</sup> (alternating direction implicit FDTD method) や **LOD-FDTD 法**<sup>76), 77)</sup> (locally one-dimensional FDTD method) に代表

```

146      subroutine hpmcw_y0(p)
147      use pml_variable
148      type(pml)::p
149
150      j=p%j0
151      do i=p%i0,p%i1-1
152          p%hypml(i,j)=p%amxpml(i,j)*p%hypml(i,j)
153      &      +p%bmxpml(i,j)*(ez(i+1,j)-ez(i,j))
154          hy(i,j)=p%hypml(i,j)
155      end do
156      end subroutine hpmcw_y0
157
158      !-----
159      !      磁界の計算(j=ny)
160      !-----
161      subroutine hpmcw_y1(p)
162      use pml_variable
163      type(pml)::p
164
165      j=p%j1
166      do i=p%i0,p%i1-1
167          p%hypml(i,j)=p%amxpml(i,j)*p%hypml(i,j)
168      &      +p%bmxpml(i,j)*(ez(i+1,j)-ez(i,j))
169          hy(i,j)=p%hypml(i,j)
170      end do
171      end subroutine hpmcw_y1

```

## B.2 3次元プログラム

### プログラムコード B.3 ftdtd3d.f

```

1  !-----
2  !      FDTDの共通変数
3  !-----
4  module ftdtd_variable
5  !解析領域
6      integer,parameter::nxx=120,nyy=120,nzz=120      !解析領域分割数
7      integer,parameter::nstep=1000                  !計算ステップ数
8      real,parameter::dx=0.005,dy=0.005,dz=0.005    !セルサイズ
9      real::dt,t                                       !時間ステップ, 時間
10 !PML吸収境界
11      integer,parameter::lpml=8,order=4              !PMLの次数, 層数
12      real,parameter::rmax=-120.0                    !要求精度 [dB]
13 !全計算領域
14      integer,parameter::nx=nxx+2*lpml,ny=nyy+2*lpml,nz=nzz+2*lpml
15 !電界, 磁界の配列, 係数の配列
16      real::ex(0:nx,0:ny,0:nz),ey(0:nx,0:ny,0:nz),ez(0:nx,0:ny,0:nz)
17      real::hx(0:nx,0:ny,0:nz),hy(0:nx,0:ny,0:nz),hz(0:nx,0:ny,0:nz)
18      real::aex(0:nx,0:ny,0:nz),aey(0:nx,0:ny,0:nz),aez(0:nx,0:ny,0:nz)
19      real::bexy(0:nx,0:ny,0:nz),bexz(0:nx,0:ny,0:nz)
20      real::beyx(0:nx,0:ny,0:nz),beyz(0:nx,0:ny,0:nz)
21      real::bezx(0:nx,0:ny,0:nz),bezy(0:nx,0:ny,0:nz)
22      real::amx(0:nx,0:ny,0:nz),amy(0:nx,0:ny,0:nz),amz(0:nx,0:ny,0:nz)
23      real::bmxxy(0:nx,0:ny,0:nz),bmxzz(0:nx,0:ny,0:nz)
24      real::bmyx(0:nx,0:ny,0:nz),bmyz(0:nx,0:ny,0:nz)
25      real::bmzx(0:nx,0:ny,0:nz),bmzy(0:nx,0:ny,0:nz)
26 !媒質定数の配列と背景媒質定数

```

## B.5 ダイポールアンテナ

## プログラムコード B.12 ftdt\_dpl.f

```

1  !-----
2  !   FDTD法の共通変数
3  !-----
4  module ftdt_variable
5  . . . . .
6  . . . . .
7  real,parameter::dx=0.006,dy=0.006,dz=0.006      !セルサイズ
8  . . . . .
9  . . . . .
10 real,parameter::epsr=1.0                          !四角柱の比誘電率
11
12 real,parameter::duration=0.25e-9,t0=4.0*duration !パルス幅, ピーク時刻
13 integer,parameter::ifed=20, jfed=jc, kfed=kc      !給電位置
14 real,parameter::V0=1.0                            !パルスピーク値
15 . . . . .
16 end module ftdt_variable
17 !-----
18 !   メインプログラム
19 !-----
20 program ftdt_dpl
21 use ftdt_variable
22
23 call setup()
24 call init_pml()
25 call setup_dip()      !ダイポールアンテナの初期設定
26
27 t=dt
28 do n=1,nstep
29   write(*,*)'Time step:',n
30   call e_cal
31   call e_pml()
32   call e_dip          !ダイポールアンテナ上の電界の計算
33   t=t+0.5*dt
34   call h_cal
35   call h_pml()
36   call h_dip         !ダイポールアンテナ上の磁界の計算
37   call out_vi(n)    !ダイポールアンテナの給電点電圧, 電流の出力
38   t=t+0.5*dt
39 end do
40 end program ftdt_dpl
41 !-----
42 !   FDTD法の初期設定
43 !-----
44 subroutine setup()
45 . . . . .
46 . . . . .
47 end subroutine setup
48 !-----
49 !直方体の媒質定数
50 !-----
51 subroutine epsmu()
52 . . . . .
53 . . . . .
54 end subroutine epsmu

```

# 索 引

<b>【あ】</b>		<b>【こ】</b>	
ID 番号	114	高周波近似法	270
RC 法	121	更新方程式	13
RWG 関数	267	構成方程式	2
<b>【い】</b>		構造体	113
Yee アルゴリズム	8, 72	高速フーリエ変換	188, 344
ETA	162	後方散乱断面積	174
EBG 構造	243	コンパイラ	112
異方性媒質	3, 136	<b>【さ】</b>	
陰解法	250	Sine-Cosine 法	229
インピーダンス整合条件	40, 133	サブグリッド法	156
<b>【う】</b>		サブセル法	see CP 法
運動方程式	139	散乱行列	196
<b>【え】</b>		散乱断面積	174
ASM-FDTD 法	239	散乱電磁界	146
ASM	239	散乱幅	176
SAR	199	<b>【し】</b>	
局所——	199	CIP 法	257
全身平均——	199	CFS-PML	see CPML
ADE 法	126	CFL 安定条件	see Courant 安定条件
SF-PML	55	時間差分公式	11
S-F 法	229	時間ステップ	9, 29
ADI-FDTD 法	249	磁気伝導率	3
NS-FDTD 法	255	磁気壁	see 完全磁気壁
FIT	256	指向性関数	165, 203
FDFD 法	243	自己回帰移動平均推定法	189
FDTD(n,m) 法	254	CP 法	157, 179
FVTD 法	256	CPML	43, 63
<b>【お】</b>		周期境界	219
OFDM	197	準静電磁界	255
重み付残差法	266, 269	磁 流	1
<b>【か】</b>		シンプソン則	242, 338
ガウスパルス	27, 80		
		ガウス・ルジャンドル則	242, 339
		完全磁気導体	7, 149
		完全磁気壁	149, 225
		完全電気壁	149, 225
		完全導体	7, 105, 148
	<b>【き】</b>		
	幾何光学	271	
	幾何光学的回折理論	272	
	逆行列	349	
	給電電圧	182	
	給電点電流	183	
	給電モデル	182	
	デルタギャップ給電	183	
	同軸線路給電	186	
	微小ギャップ給電	183, 187, 191	
	マイクロストリップ線路		
	給電	187	
	磁気フリル給電	187	
	境界条件	6	
	均質媒質	5	
	<b>【く】</b>		
	空間回路網法	257	
	空間差分公式		
	1 次元——	13	
	2 次元——	15	
	3 次元——	18	
	Courant 基準	30, 80, 83	
	Courant 安定条件	30, 83, 249	
	クランク・ニコルソン法	251	
	グリッド分散誤差	31	

<b>【す】</b>	等方性媒質	3	フロケ	
ストレッチ座標	56		——条件	219, 228, 246
SPICE	259	<b>【な】</b>	——の理論	218
<b>【せ】</b>	内部抵抗	191	プロッホの定理	
静的配列	113	Navier-Stokes の方程式	see フロケの理論	
$z$ 変換	188			
セルサイズ	8, 30	<b>【に】</b>	分散関係式	
全電磁界	146	2 階偏微分方程式	デバイ型——	119
全電磁界・散乱界領域分割法	149	だ円型——	ドゥルーデ型——	120
		双曲線型——	ローレンツ型——	120
		放物線型——	分散性媒質	4
<b>【そ】</b>	入射電磁界	146	分散ダイアグラム	243
双異方性媒質	5	入射電力	<b>【へ】</b>	
双等方性媒質	5	入射波	平面波	26
		入カインピーダンス	平面波領域	230
<b>【た】</b>	ダイアディックグリーン関数	188, 190		
	264	入力電力	<b>【ほ】</b>	
台形則	242, 337	ニュートン法	ホイゲンス・フレネルの原理	158
ダイポールアンテナ	180, 190		放射効率	198, 207
		<b>【ね】</b>	ボウタイアンテナ	190
多重領域 FDTD 法	158	熱伝導方程式	Pocklington の積分方程式	265
たたみ込み積分	4, 65, 121			
WE-FDTD 法	256	<b>【は】</b>		
<b>【ち】</b>	ハイブリッド法	256		
力ずく法	218, 242	汎関数		
中心差分	8	反射電力		
		反射波		
<b>【て】</b>	<b>【ひ】</b>			
TE <sub>z</sub>	PML 吸収境界	39		
——モード	PML 空間差分公式			
——平面波	1 次元——	46, 85	マイクロストリップアンテナ	187, 212
TEM	2 次元——	49, 93	マクスウェルの方程式	1
——モード	3 次元——	53, 112	マルチグリッド法	see サブグリッド法
TM <sub>z</sub>	PLRC 法	121	マルチフィジクス解析	249
——モード	BOR-FDTD 法	255	<b>【み】</b>	
——平面波	非線形媒質	5	右手系媒質	130
定 $k$ 法	see US-FDTD 法			
電気伝導率	see 導電率		<b>【む】</b>	
電気壁	see 完全電気壁		Mur の吸収境界条件	
電流源法	260		1 次——	36, 80
			2 次——	38, 93
<b>【と】</b>	表面インピーダンス法	164	<b>【め】</b>	
等価定理	<b>【ふ】</b>		メタマテリアル	6, 217
動的配列	フェルマーの原理	271		
導電率	FORTRAN90	73	<b>【も】</b>	
導波領域	不均一メッシュ	155	モーメント法	181, 264
	不均質媒質	5	<b>【ゆ】</b>	
	物理光学近似法	273	US-FDTD 法	229
	ブリルアンゾーン	240	有限要素法	39, 268
			有能電力	195
			UPML	55

ユニットセル	219	利得	206	<b>【れ】</b>	
<b>【よ】</b>		指向性——	207	励振パルス	26
陽解法	249	絶対——	206	レーダ断面積	
<b>【ら】</b>		相対——	207	see 後方散乱断面積	
ライトライン	230	動作——	207	連立一次方程式	347
ラヴの等価定理	159	<b>【る】</b>		<b>【ろ】</b>	
ランダム媒質	5	ループアンテナ		LOD-FDTD 法	249
<b>【り】</b>			28, 186, 191		
離散フーリエ変換	188, 344				

<b>【A】</b>		CFS-PML		dynamic array	113
alternating direction		see <i>convolutional PML</i>		<b>【E】</b>	
implicit FDTD method	249	compiler	112	electric conductivity	3
anisotropic medium	3, 136	constant-k method		electromagnetic band gap	
array scanning method	239	see <i>US-FDTD method</i>		structure	243
ASM-FDTD method	239	constitutive equations	2	equation of motion	139
auto-regressive moving		contour path technique	157, 179	equivalence theorem	158
average method	189	convolution integral	4, 65, 121	excitation pulse	26
auxiliary differential		convolutional PML	43, 63	explicit methods	249
equation method	126	Courant criteria	30, 80, 83	exponential time-stepping	
available power	195	Courant stability condition	30, 83, 249	algorithm	162
<b>【B】</b>		Crank-Nicolson method	251	<b>【F】</b>	
back-scattering		cubic-interpolated pseudo-		fast Fourier transform	
cross-section	174	particle method	257		188, 344
bi-anisotropic medium	5	<b>【D】</b>		FDTD(n,m) method	254
bi-isotropic medium	5	dipole antenna	180, 190	feed models	182
Bloch theorem		directivity function	165, 203	coaxial cable feed	186
see <i>Froquet theorem</i>		discrete Fourier transform	188, 344	delta-gap feed	183
body of revolution FDTD		dispersion diagram	243	magnetic frill feed	187
method	255	dispersion relation		microstrip-line feed	187
boundary condition	6	Debye——	119	small gap feed	183, 187, 191
bow-tie antenna	191	Drude——	120	feed point current	183
Brillouin zone	240	Lorentz——	120	feeding voltage	182
brute-force method	218, 242	dispersive medium	4	Fermat's principle	271
<b>【C】</b>		dyadic Green's function	264	finite difference frequency	
cell size	8, 30			domain method	243
central difference	8			finite element method	39, 268
CFL stability condition				finite integration techniques	256
see <i>Courant stability condition</i>					

- finite volume time domain method 256
- Floquet  
—periodic boundary condition 219, 228, 246  
—theorem 218
- FORTRAN90 73
- functional 268
- [G]**
- gain  
absolute— 206  
actual— 207  
directive— 207  
relative— 207
- Gauss–Legendre’s rule 242, 339
- Gaussian pulse 27, 80
- geometrical optics 271
- geometrical theory of diffraction 272
- grid dispersion error 31
- guided wave region 230
- [H]**
- heat transfer equation 250
- high–frequency approximation techniques 270
- homogeneous medium 5
- Huygens–Fresnel principle 158
- hybrid methods 256
- [I]**
- ID number 114
- impedance matching  
condition 40, 133
- implicit methods 250
- incident fields 146
- incident power 194
- incident wave 195
- inhomogeneous medium 5
- input impedance 188, 190
- input power 194
- internal resistance 191
- inverse matrix 349
- isotropic medium 3
- [L]**
- left–handed material 130
- light line 230
- locally one–dimensional FDTD method 249
- loop antenna 28, 186, 191
- Love’s field equivalence theorem 159
- [M]**
- magnetic conductivity 3
- magnetic current 1
- Maxwell’s equations 1
- metamaterials 6, 217
- method of moments 181, 264
- method of weighted residuals 266, 269
- microstrip antenna 187, 212
- multigrid technique  
see *subgrid technique*
- multiphysics analysis 249
- multiple region FDTD method 158
- Mur’s absorbing boundary condition  
1–st order— 36, 80  
2–nd order— 38, 93
- [N]**
- Navier–Stokes’ equation 262
- Newton’s method 259, 262
- nonlinear medium 5
- nonuniform mesh 155
- Norton equivalent circuit 260
- NS–FDTD method 255
- [O]**
- OFDM 197
- [P]**
- PEC wall 149, 225
- perfect electric conductor 7, 105, 148
- perfect magnetic conductor 7, 149
- perfectly matched layer  
absorbing boundary 39
- periodic boundary 219
- physical optics  
approximation 273
- piecewise linear RC method 121
- plane wave 26
- plane wave region 230
- PMC wall 149, 225
- PML update equation  
1D— 46, 85  
2D— 49, 93  
3D— 53, 112
- Pocklington’s integral equation 265
- [Q]**
- quasi–static fields 255
- [R]**
- radar cross–section  
see *back–scattering cross–section*
- radiation efficiency 198, 207
- random medium 5
- Rao–Wilton–Glisson function 267
- recursive convolution  
method 121
- reflected power 195
- reflected wave 195
- right–handed material 130
- [S]**
- scattering cross–section 174
- scattering fields 146
- scattering matrix 196
- scattering width 176
- second order partial  
differential equation 250
- elliptic— 251
- hyperbolic— 250
- parabolic— 250



Simpson's rule	242, 338	subcell method		total fields	146
simultaneous linear equation	347		see <i>countour path technique</i>	trapezoidal rule	242, 337
sine-cosine method	229	subgrid technique	156	<b>[U]</b>	
spatial network method	257	surface impedance method	164	uniaxial PML	55
				unit cell	219
specific absorption rate	199	<b>[T]</b>		update equations	
local—	199	TEM		1D—	13
whole-body average—	199	—mode	193	2D—	15
split-field method	229	TE <sub>z</sub>		3D—	18
split-field PML	55	—mode	17	US-FDTD method	229
SPICE	259	—plane wave	230	<b>[W]</b>	
static array	113	time step	9, 29	wave equation FDTD	
stretched-coordinate	56	TM <sub>z</sub>		method	256
structure	113	—mode	17	<b>[Y]</b>	
		—plane wave	230	Yee's algorithm	8, 72
		total-field/scattered-field		<b>[Z]</b>	
		technique	149	z transform	188

— 編著者・著者略歴 —

宇野 亨 (うの とおる)

- 1980 年 東京農工大学工学部電気工学科卒業
- 1985 年 東北大学大学院博士課程修了 (電気及通信工学専攻)  
工学博士
- 1985 年 東北大学助手
- 1991 年 東北大学助教授
- 1994 年 東京農工大学助教授
- 1998 年 東京農工大学教授  
現在に至る

何 一偉 (か いちえい)

- 1985 年 南京大学物理系無線電物理学科卒業
- 1992 年 東北大学大学院博士課程修了 (電気及通信工学専攻)  
博士 (工学)
- 1992 年 東北大学助手
- 1995 年 九州大学助手
- 1996 年 大阪電気通信大学講師
- 2009 年 大阪電気通信大学准教授  
現在に至る

有馬 卓司 (ありま たくじ)

- 1998 年 東京農工大学工学部電子情報工学科卒業
- 2003 年 東京農工大学大学院博士後期課程修了  
(電子情報工学専攻)  
博士 (工学)
- 2003 年 東京農工大学助手
- 2009 年 東京農工大学講師
- 2013 年 東京農工大学准教授  
現在に至る

# 数値電磁界解析のための FDTD 法

——基礎と実践——

FDTD Method for Computational Electromagnetics

——Fundamentals and Practical Applications——

© Toru Uno 2016

2016 年 5 月 25 日 初版第 1 刷発行

検印省略

編著者 宇野 亨

著者 何 一 偉

有 馬 卓 司

発行者 株式会社 コロナ社

代表者 牛来真也

印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00884-5 (鈴木) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします