

時間領域差分法

市川 裕之

Finite-Difference Time-Domain Method

Hiroyuki ICHIKAWA

Finite-difference time-domain (FDTD) method is currently the most popular numerical tool to solve Maxwell's equations. In this report, basic principles of the FDTD method are summarized and a range of its applications in the field of nano-order optical structure, including random, nonlinear and active media, are explained.

Key words: electromagnetic wave, numerical simulation, diffraction, nano-optics, subwavelength

光学の研究とは、歴史を遡ると、可視光が物体に当たり、そこからの散乱光を解釈するところから始まったといえるのではないかと。特に、波としての光を人為的に制御しようとする場合、その物体の構造は、永らく、光の波長よりも何桁も大きなものであった。20世紀の科学技術の進歩は、光の波長以下の微細構造を加工することを可能にし、ここに至り、電磁波としての光の挙動を微細構造との相互作用として解析できることが、実用面からも必要不可欠となってきたのである。これは数学的には、微細構造を誘電率分布にあてはめて、マクスウェルの方程式を解くことであり、一般的な問題に対しては、数値的な解法でなくては、事実上、対応ができない。現在、さまざまな電磁場解析の分野で最も広く使用されている解析手法は、時間領域差分法 (finite-difference time-domain method: 以下 FDTD 法) といっても間違いではないだろう。これは、1966年にマイクロ波の分野で Yee¹⁾によってその原理が提案され、計算機のハードウェアの進歩とともに急速に発展・普及してきたものである。本誌でも1998年に、筆者が光学分野への応用を念頭において、FDTD法の紹介²⁾を行った。当時は光学関係の学会へ行っても、国内外ともに、FDTD法を知っている参加者はほとんどいなかった

が、それからおよそ8年経つ今日では、逆に FDTD 法の名を知らない参加者は皆無に近い状態になっているように感じる。それだけ、光学にとって FDTD 法が一般的・魅力的になってきたのだと解釈したい。

本報告では、FDTD法の原理と特徴を簡単にまとめた後、ナノレベルの微細構造媒質への応用例などについて述べることにする。政府の総合科学技術会議の昨年末の答申^{*1}でも、ナノテクノロジーは引き続き重点研究分野とされている。光とナノ構造の相互作用の解析には FDTD法は現在、最も適しているといえる。解析する側には“このような使い道が…”と、ナノ構造を作る側には“こんな考え方が…”と、思っただけであれば幸いである。

1. FDTD法の概要

FDTD法の全容については Taflov^{3,4)} や宇野⁵⁾の教科書があるほか、光学分野向けの入門としては筆者の解説等^{2,6,7)}が出ているので、詳しい内容に関してはそれらを参照していただくことにして、ここでは基本的な必須内容を要約するとどめることとする。

1.1 原理

現在使用されている電磁場解析の数値解法の大半⁸⁾は、

愛媛大学大学院理工学研究科電子情報工学専攻 (〒790-8577 松山市文京町3番) E-mail: hichikaw@dpc.ehime-u.ac.jp

*1 <http://www8.cao.go.jp/cstp/output/toushin5.pdf>

いわゆる周波数領域の方法であり、正弦的な時間変化を前提とすることで、波動の表記 $\exp[i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]$ *2 から時間項を省いて $\exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ と表せるものである。ここで \mathbf{k} , \mathbf{r} はそれぞれ波数ベクトル, 位置ベクトルを表す。したがって、電磁場の問題は、光源以外の場所で、ベクトルヘルムホルツ方程式

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2)$$

を解くことに帰着する。

これに対して、FDTD 法とはマクスウェルの回転方程式

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (4)$$

に含まれるすべての微分を差分, 要するに変数 s の関数 f について

$$\frac{\partial f}{\partial s} \rightarrow \frac{f(s + \Delta s/2) - f(s - \Delta s/2)}{\Delta s} \quad (5)$$

と置き換えたものだと見える。式 (3), (4) は見方を変えれば, 磁場の値で電場を, 電場の値で磁場を表していると解釈できるため, 解析したい領域全体で, 図 1 の単位構造のように電場・磁場が交互になるように電磁場の 6 成分を評価する点 (図中の E_x , H_x など) を離散的に配置することにする。そして, ある瞬間には電場のみを, 次の瞬間には磁場のみを, という具合に時間的に交互に電磁場の計算を繰り返していくわけである。この図 1 の単位構造はセル, グリッドなどとよばれている。

ここからは, 話をわかりやすくするため, 二次元平面内の TE 偏光*3 の場合で説明を行うことにする。すなわち, y 方向に構造と電磁場が一様であり, 電場は y 方向の成分のみが存在する。これは, 図 1 において, $y = \Delta y/2$ の面内について考えることと思えばよい。さて, 式 (5) に従って式 (3)~(4) を変形すると, 以下のような FDTD 法の基本式が得られる。

$$E_y^{n+1}(i, k) = A(i, k)E_y^n(i, k) + B(i, k) \times \left\{ \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, k - \frac{1}{2}\right)}{\Delta z} - \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta x} \right\} \quad (6)$$

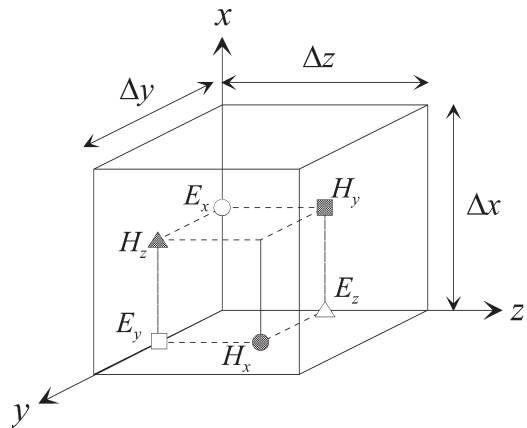


図 1 FDTD 法の空間的単位構造。

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) = H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{\mu_0} \frac{E_y^n(i, k+1) - E_y^n(i, k)}{\Delta z} \quad (7)$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) = H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) - \frac{\Delta t}{\mu_0} \frac{E_y^n(i+1, k) - E_y^n(i, k)}{\Delta x} \quad (8)$$

$$A(i, k) = \frac{1 - \sigma_y(i, k) \Delta t / 2 \varepsilon_y(i, k)}{1 + \sigma_y(i, k) \Delta t / 2 \varepsilon_y(i, k)} \quad (9)$$

$$B(i, k) = \frac{\Delta t / \varepsilon_y(i, k)}{1 + \sigma_y(i, k) \Delta t / 2 \varepsilon_y(i, k)} \quad (10)$$

ここで, (i, k) は (x, z) 方向の座標を表す自然数で $x = i\Delta x$, $z = k\Delta z$ であり, n は時間ステップ数で $t = n\Delta t$, $\varepsilon_y(i, k)$ と $\sigma_y(i, k)$ は電場 E_y に関する (i, k) の点が代表する誘電率と導電率, μ_0 は真空中の透磁率である。すなわち, 図 2 からわかるように, 電場・磁場の各評価点で, その最近接の磁場・電場の値を用いて計算を行うわけである。したがって, 基本式 (6)~(8) は回転方程式を四則計算で表現したものともいえる。なお, 時間・空間の離散化に関して, 媒質中の光速を v として

$$\Delta t \leq [(\Delta x)^{-2} + (\Delta z)^{-2}]^{-1/2} / v \quad (11)$$

なる安定化条件*4 が成り立たなければ, 正しい波動の伝搬を実現することができない。

1.2 実際の計算に際して

FDTD 法の解析領域, すなわち実際に計算を行う部分を図 3 のように表す。まず, 計算の初期条件として, 平面

*2 FDTD 法はマイクロ波の分野に端を発し, 現在でも電気系の学会・雑誌での発表が多いため, 文献調査の便を考慮し, 本報告でもこの形式の波動表記を使用する。

*3 特に, マイクロ波関係の FDTD 法の多くの文献では, TE, TM の定義が光学や物理学などで通常, 使用されているものと逆になっているので注意が必要である。本報告では, 光学の定義を用いている。

*4 三次元の問題の場合は, $\Delta t \leq [(\Delta x)^{-2} + (\Delta y)^{-2} + (\Delta z)^{-2}]^{-1/2} / v$ となる。

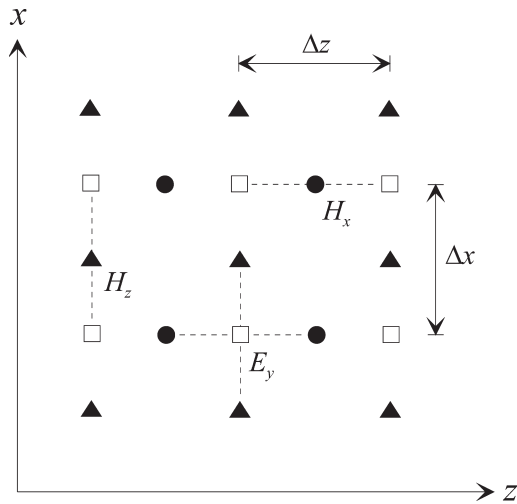


図2 電磁場の評価点相互の関係。

波や球面波など、解析する光学系に入射する光波を生成する必要がある。単色光源の場合、これは、所望の波面を生成するように一連の電場の評価点で $E_y(i, k)$ を時間的に正弦的に振動させることで実現できる。さらに、この時間振動をパルス波形にすれば、そのパルスを構成するスペクトルに相当する連続光による計算も一度にまとめて実行することが可能である。

一方、式(6)~(8)によれば、ある点の電磁場の計算には、必ずその最近接の評価点の電磁場の値が必要であるが、実際に計算を行う領域は有限である。したがって、計算領域の端(図3の太線)に適切な境界条件を施さなければ、物理的にはありえない反射波が境界で生成されることになる。したがって、解析領域から太線に入射した光が、あたかも何もないかのようにそのまま外へ伝搬するような条件が要求され、これを吸収境界条件とよんでいる。この境界条件は、FDTD法を実際に使用するうえで、最も大切な要素である。

これまでにさまざまな境界条件が提案されている中で、現在、最もすぐれた性能で広く使用されているのが perfectly matched layer (PML)⁹⁾ とよばれるもので、これは、図3で解析領域を取り囲む灰色の部分に、電場・磁場をともに吸収するような仮想的な媒質を置き、解析領域から出てくる光をもとに戻さないようにするものである。

このほかに、図3の太線上で解析領域外へ進行する波だけが存在するように太線上の電場を指定する Mur の境界条件¹⁰⁾がある。これは運用が容易であるため、初心者でもすぐに使用できる。

以上、FDTD法の基本的な部分について述べてきた。ところが、実際の問題では取り扱う媒質によって、細かい

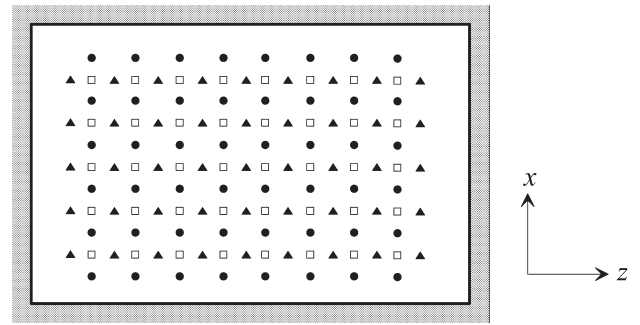


図3 FDTD法の解析領域。□: E_y , ●: H_x , ▲: H_z 。

ところで工夫や修正が必要になってくる。たとえば、金属の多くは可視光の周波数帯では、複素誘電率の実部・虚部ともに無視できない値をもち、しかも実部は負になる。この場合、FDTD法の基本式(6)~(8)をそのまま使用すると、途中で電磁場の値が発散して計算ができなくなる。その理由は、金属が周波数スペクトル上の共鳴領域にあるためである。周波数領域で表された構成方程式

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) = \varepsilon(\mathbf{r}, \omega) \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) \quad (12)$$

をフーリエ変換すれば

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t - \tau) d\tau \quad (13)$$

となる¹¹⁾。ここで、 $G(\tau)$ は ε の分散性を時間領域に変換したもので、実際には、デバイ型、ローレンツ型、ドルーデ型などの分散式を使用することが多い。すなわち、式(13)をみれば、FDTD法で分散性の媒質を扱う際には \mathbf{D} と \mathbf{E} の関係は単純ではなく、したがって、式(6)~(8)の中に \mathbf{D} と \mathbf{E} を関係づける式が必要となることがわかる。さらに、非線形媒質の場合には、式(12)は

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) = \varepsilon_0(\mathbf{r}, \omega) \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) + \mathbf{P}_L(\mathbf{r}, \omega) + \mathbf{P}_{NL}(\mathbf{r}, \omega) \quad (14)$$

となる。ここで、 \mathbf{P}_L , \mathbf{P}_{NL} はそれぞれ線形、非線形分極である。

1.3 特徴

FDTD法の基本は差分化であり、その多くの特徴は時間・空間の離散化に起因する。まず、時間の離散化による時間領域の計算法であり、一般に、光の時間振動の周期の数十分の一の時間ステップごとに式(6)~(8)を実行する。そのため、現象の時間変化を順を追って解析することが可能である。一方、それは非常に長い計算時間を要することも意味している。したがって、定常状態の現象を解析する場合には著しく不利であるといえる。次に、空間の離散化により、媒質の特徴は電磁場の各評価点での媒質定数として組み込めるため、さまざまな問題に対して柔軟に対処できるという長所がある。すなわち、ランダム媒質

を含む非周期構造の解析も容易であり、基本式に手を加えることで非線形光学効果や増幅媒質も扱うことができるなど、原理的に解析できない問題はないといえる。しかし、光の周波数の場合、通常、波長の20分の1以下の空間ステップが必要なため、この長所は逆に、膨大な計算機メモリを必要とする短所の裏返しである。それでは、FDTD法を使用する場合に必要な計算機性能はと問われると、たとえば、二次元でセル総数が80万個の解析領域でラメラ格子の問題を1997年当時のクロック50 MHz、RAM 64 Mbのワークステーションで解いた実績¹²⁾はあるので、二次元であれば、普通のパソコンでも取り扱える問題は多いはずである。なお、計算精度を保ちつつ計算量を減らすには、部分的にセルの大きさを変える方法などもあるが、Coleの提案している高次の差分の仕方を工夫したnon-standard FDTD法¹³⁾も有力である。また、時間ステップごとに全解析領域で電磁場の値を直接、求めているため、電磁場の分布を等高線グラフなどで直ちに表現することも魅力である。

ただし、実際の演算は基本的に四則計算だけなので、境界条件の不備などに起因する反射波の積み重ねによる電磁場の発散を除けば、たとえアルゴリズムやプログラムのどこかで間違いをおかしていても、とにかく何らかの計算結果は得られる。問題は、その計算結果が正しいかどうかはFDTD法だけでは判断できないことである。そのため、FDTD法を使用するにあたって、別の計算方法で得られた結果との比較や、得られた結果が物理的に妥当かどうかを判断する能力が、他の数値解析法以上に要求されるといえる。

2. 応用 例

原理的に、FDTD法は光が電磁波として振る舞う、すなわち偏光特性を示すような、すべての現象の解析に使用することができる。しかし、解析領域が波長に比べてあまり大きくなると、上述したように、空間離散化による計算コストの増大で、現実的には計算の実行が不可能になる。本報告では、FDTD法にとって一番適当であろうと思われる、(ナノレベル*⁵⁾を含む)波長程度以下の大きさの微細構造をもつ解析対象への応用例を紹介する。なお、フォトニックナノ構造の現在の花形ともいえるフォトニック結晶への応用例の文献は数百に及んでおり、多くの解説記

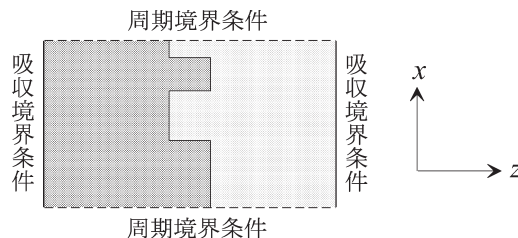


図4 回折格子の問題の考え方。

事¹⁴⁻¹⁶⁾も出ているため、本報告では他のトピックスとの関連のあるもののみにとどめている。

2.1 回折格子

周期構造の最も簡単な例として、一次元の回折格子の問題¹²⁾をFDTD法で考えると図4のようになる。二つの媒質の境界が回折格子の構造をなしており、ここに平面波が入射する。 z 方向の両端(図中太実線)はPMLなどの周期境界条件を用い、一方、 x 方向には解析する構造が周期的に無限に繰り返されているため、両端の境界(図中太破線)で電磁場が連続であるとする周期境界条件を用いる。これにより、比較的小さな解析領域で具体的な問題を扱うことができるほか、フーリエモード法^{17,18),*6)}など回折格子の分野で精度が確立されている周波数領域の解析法との比較ができるため、プログラムのチェック⁷⁾にも使用できる。普及が進んでいる回折光学素子の基本は誘電体格子であるため、応用例は非常に多い。また、フェムト秒パルスと微細構造の相互作用などの時間応答現象¹⁹⁾やその適用例として、共鳴領域の回折格子1枚によるフェムト秒パルスの圧縮²⁰⁾などもある。ただし、斜入射の場合、周期境界条件の設定が非常に面倒である⁴⁾ほか、計算精度・時間ともに、周波数領域の解析法に太刀打ちするのは不可能であるため、回折格子の単純な線形問題にはFDTD法は適していないといえる。

2.2 ナノ構造

まず、ナノ構造といえば、Ebbesenのサブ波長金属開口アレイからの光の透過の実験の発表²¹⁾以来、微小金属開口からの光の放射に関する報告が数多くなされている。単一スリット²²⁻²⁴⁾、副スリット^{25,26)}、ホールアレイ^{24,27)}のほか、円環アレイ^{28,29)}、さらにはC型^{30,31)}、H型³²⁾をした開口による放射、10~70 nmの開口の配置を工夫してレンズのように集光機能をもたせたもの³³⁾などがある。サブ波長の開口からの放射の重要な応用として、近接場リソグラ

*⁵冒頭でも述べたように、ナノレベルの微細構造は光学研究者にとっても非常に魅力的な分野である。ただし、現在までのところ、光の分野では本当の“ナノ”オーダーというよりは“サブマイクロ”オーダーも含めてナノレベルと称している例が多いようである。これは、光の波長を考えると、いまのところ、致し方ないのかもしれない。

*⁶厳密結合波解析(rigorous coupled wave analysis: RCWA)もフーリエモード法の一つである。

フィー³⁴⁾が挙げられる。非周期構造の計算が容易なFDTD法はこの問題の解析³⁴⁻³⁶⁾には最適であろう。さらに微細加工に関連して、三次元のホログラフィックリソグラフィによるフォトニック結晶作製の過程、およびでき上がった素子の解析の報告³⁷⁾もある。

最近のナノ構造分野のもうひとつの大きな流行ともいえる表面プラズモン共鳴については、半径25 nmの銀の細線³⁸⁾、半径5 nmのダイマー³⁹⁾、銀基板上のV溝⁴⁰⁾、さまざまな形状のナノ粒子⁴¹⁾などによるプラズモン振る舞いの解析がなされているほか、銀のナノロッド⁴²⁾、空隙⁴³⁾など、いわゆるプラズモン導波路に関する報告もある。近接場顕微鏡に関しては、ファイバークローブからの放射⁴⁴⁾や銀キューブの分光測定⁴⁵⁾などがあるほか、FDTD法と有限要素法との詳細な比較検討の報告⁴⁶⁾もおもしろい。微小共振器では、本報告では省略したフォトニック結晶関連のほかにも、リングやディスクと細線の結合によるもの⁴⁷⁾、液晶を用いた屈折率可変のもの⁴⁸⁾などがある。

このほか、実験的にはよく知られているモルフォ蝶の構造的発色の解析^{49,50)}や、FDTD法を用いて光放射圧を見積もる報告^{51,52)}もナノ構造分野の問題であろう。また、光学素子そのものというよりも、モノ作りの現場に目を向けたところでは、エバネセント光による加工表面の欠陥検出⁵³⁾、変わったところでは、階層化メモリーシステムの解析⁵⁴⁾などが、FDTD法のおもしろい使い方といえるのではないか。

2.3 ランダム媒質

マイクロ波の分野では地中探査⁵⁵⁾など、ランダム構造を取り扱う例も多いが、光学素子やデバイスは通常、規則的な構造を想定してきた。最近、これから述べるように、サブ波長・共鳴領域のランダム構造を含むものの検討も現れはじめている。このランダム構造を扱うことができることも、周期性を前提とする周波数領域の数値解析法に対する、FDTD法の強みである。

ランダム構造はその意義づけにより(1)本来は規則的であるべきだが、作製方法の制約などにより、致し方なくランダムになったもの、(2)自然ななりゆきとしてランダムになったもの、(3)ランダム構造の利点を積極的に利用しようとしたもの、の3つに大きく分類できる。その(1)にあたるものが、マイクロディスクレーザーの径のばらつき⁵⁶⁾、光ディスク表面の不規則性が特性に与える影響⁵⁷⁾であり、(2)には、super-RENSディスク中でランダムに配置された銀微粒子の周波数応答⁵⁸⁾などがあり、また、(3)としては、反射防止用三角格子の性能改善⁵⁹⁾が挙げられる。これらのランダム構造の具体的な扱い方は、いず

れも、ある特定の構造に対する電磁場の振る舞いをFDTD法で計算する、という過程をランダムに生成された多くの構造に対して行い、その結果を統計的に処理するものである。

2.4 電気光学効果

光学的異方性を扱うため誘電率楕円体を用いる。したがって、媒質定数として誘電率を用いるのではなく、 $E = \xi D$ で定義される逆誘電率テンソル ξ を用いるほうが計算には便利である。そのため、等方的な媒質の場合にはみられない項がFDTD法の基本式の中に見えてくる。Garcíaら⁶⁰⁾は三次元問題の扱いについて整理しており、筆者ら⁶¹⁾は導波モード共鳴格子フィルターに応用するため、二次元問題用の式を提出した。FDTD法の基本式(6)~(8)では誘電率などの媒質定数は各次元ごとに指定されるため、異方性媒質の扱いは非常に単純といえる。

2.5 非線形光学効果

周波数領域の数値解析法に対するFDTD法の非常に大きな強みは、非線形光学効果を取り扱えることであろう。式(14)を差分化する具体的な方法としては、Josephらによる補助微分方程式を用いるもの⁶²⁾、あるいはSullivanの提案する z 変換を用いるもの⁶³⁾が中心になっているようだ。なお、微細構造における非線形光学効果を詳しく説明したものとして、Ziolkowski⁶⁴⁾の論文が挙げられる。

例としてやはり多いのは、必ずしもナノレベルの構造とはいいがたいが、ファイバー中のパルス伝搬^{65,66)}であろう。また、非線形効果がより期待できる導波路や共振器では、誘電体導波路の端に非線形媒質を置いた際の反射・回折の解析⁶⁷⁾、フォトニック結晶導波路の直角曲がり部に非線形媒質を置いたもの⁶⁸⁾や、導波路型⁶⁹⁾、リング型⁷⁰⁾、フォトニック結晶型⁷¹⁾などいろいろな種類の共振器の報告がある。このほか、カー媒質を用いた導波モード共鳴格子フィルター^{72,73)}、カー媒質の微粒子などによるスイッチング⁷⁴⁾や表面プラズモン共鳴⁷⁵⁾の報告がある。

一次元構造だが不均質な非線形媒質への平面波の入射⁷⁶⁾、右手系非線形媒質と左手系線形媒質を組み合わせた系の問題⁷⁷⁾も将来の展望としておもしろい。また、計算テクニックに関しては、線形FDTD法とモード結合理論を組み合わせた方法の提案⁷⁰⁾や、並列計算導入の方法を述べたもの⁷⁸⁾などがある。

2.6 増幅媒質

レーザーを含む系をFDTD法で扱うためには、レート方程式を組み込む必要がある。Chang⁷⁹⁾の論文は、微細構造は扱っていないが、これまでの増幅媒質の扱いを手短かにまとめている。具体的な応用例としては、フォトニッ

ク結晶レーザーに関するものがいくつか報告されている^{80,81)}。

前半部で取り上げたFDTD法の原理に関する内容は、FDTD法の理解と、さらに詳しい文献を読む際の必要最小限の知識ととらえていただきたい。取り扱う問題に応じて、細かい部分で微調整がたくさん必要となってくる。続いて、ナノレベルの微細構造を特に念頭において、応用例の紹介を行った。FDTD法に関する文献の総数は5000を超えている。ここで取り上げたのは、その中で、“ナノ”に近いオーダーの構造を扱っており、しかもFDTD法の利用に関する説明がなされているものである。類似の例がある場合は、参考文献の便を考慮し、できるだけ新しいものを選んでいく。したがって、この文献リストがすべての重要な例を網羅しているわけでは決してなく、もし、容認しがたい抜け落ちなどがあれば、後学のため、ぜひご指摘いただきたい。

最後に、FDTD法に自分で実際にかかわっておられる方は、FDTD法の文献データベース <http://www.fDTD.org/> を一度参照されることをお勧めする。これはワシントン州立大学の J. B. Schneider 氏が主宰しているもので、きめ細かい文献収集に加えて検索機能もあり、非常に役に立つ^{*7}。

文 献

- 1) K. S. Yee: “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-14** (1966) 302-307.
- 2) 市川裕之: “時間領域差分法—光学分野への応用を期待して—”, *光学*, **27** (1998) 647-654.
- 3) A. Taflov and S. C. Hagness: *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 2nd ed. (Artech House, Norwood, 2000).
- 4) A. Taflov, ed.: *Advances in Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* (Artech House, Norwood, 1998).
- 5) 宇野 亨: FDTD法による電磁界およびアンテナ解析 (コロナ社, 1998).
- 6) 市川裕之: “FDTD法”, 最新「回折光学素子」技術全集 (技術情報協会, 2004) pp. 41-51.
- 7) 市川裕之: “時間領域差分 (FDTD) 法による回折光学素子の解析”, 回折光学素子入門, (社)応用物理学会日本光学会光設計研究グループ監修 (オプトロニクス, 2006) pp. 82-91.
- 8) たとえば, 電気学会: 計算電磁気学 (培風館, 2003) など.
- 9) J.-P. Berenger: “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,” *J. Comput. Phys.*, **114** (1994) 185-200.
- 10) G. Mur: “Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **EMC-23** (1981) 377-382.
- 11) J. D. Jackson: *Classical Electrodynamics* (John Wiley & Sons, New York, 1999)
- 12) H. Ichikawa: “Electromagnetic analysis of diffraction gratings by the finite-difference time-domain method,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **15** (1998) 152-157.
- 13) J. B. Cole and S. Banerjee: “Applications of nonstandard finite difference models to computational electromagnetics,” *J. Differ. Equat. Appl.*, **9** (2003) 1099-1112.
- 14) 特集 “フォトリック結晶”, *O plus E*, **25** (2003) 146-203.
- 15) 特集 “フォトリック結晶の新展開”, *応用物理*, **74** (2005) 146-207.
- 16) 特集 “フォトリックナノ構造を中心とした光技術の最新話題”, *オプトロニクス*, **24**, No. 11 (2005) 109-149.
- 17) J. Turunen: “Diffraction theory of microrelief gratings,” *Micro-Optics*, ed. H.-P. Herzig (Taylor & Francis, London, 1997) pp. 31-52.
- 18) 市川裕之: “フーリエモード法”, 最新「回折光学素子」技術全集 (技術情報協会, 2004) pp. 27-40.
- 19) H. Ichikawa: “Analysis of femtosecond-order optical pulses diffracted by periodic structure,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **16** (1999) 299-304.
- 20) H. Ichikawa: “Temporal superresolution: an application of frequency filtering by a grating in the resonance domain,” *J. Mod. Opt.*, **47** (2000) 2361-2375.
- 21) T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi and T. Thio: “Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays,” *Nature*, **391** (1998) 667.
- 22) P.-K. Wei, H.-L. Chou and W.-S. Fann: “Optical near field in nanometallic slits,” *Opt. Exp.*, **10** (2002) 1418-1424.
- 23) C. H. Wei, P. H. Tsao, W. Fann and P.-K. Wei: “Polarization dependence of light intensity distribution near a nanometric aluminum slit,” *J. Opt. Soc. Am. B*, **21** (2004) 1005-1012.
- 24) S.-H. Chang, S. K. Gray and G. C. Schatz: “Surface plasmon generation and light transmission by isolated nanoholes and arrays of nanoholes in thin metal films,” *Opt. Exp.*, **13** (2005) 3150-3165.
- 25) K.-M. Chae, H.-H. Lee, S.-Y. Yim and S.-H. Park: “Evolution of electromagnetic interference through nano-metallic double-slit,” *Opt. Exp.*, **12** (2004) 2870-2879.
- 26) P.-K. Wei, H.-L. Chou, Y.-R. Cheng, C.-H. Wei, W. Fann and J. O. Tegenfeldt: “Beaming effect of optical near-field in multiple metallic slits with nanometric linewidth and micrometer pitch,” *Opt. Commun.*, **253** (2005) 198-204.
- 27) R. Muller, C. Ropers and C. Lienau: “Femtosecond light pulse propagation through metallic nanohole arrays: The role of the dielectric substrate,” *Opt. Exp.*, **12** (2004) 5067-5081.
- 28) F. I. Baida: “Light transmission by subwavelength annular aperture arrays in metallic films,” *Opt. Commun.*, **209** (2002) 17-22.
- 29) J. Salvi, M. Roussey, F. I. Baida, M.-P. Bernal, A. Mussot, T. Sylvestre, H. Maillotte, D. Van Labeke, A. Perentes, I. Utke, C. Sandu, P. Hoffmann and B. Dvir: “Annular aperture arrays: Study in the visible region of the electromag-

*7 ただし, サイト中にある年ごとの文献数を示す棒グラフには注意が必要である。ここ数年の文献数の落ち込みについて, FDTD法の人気低下が始まったのかと, Schneider氏に質問したところ, “最新文献をタイムリーに収集する時間がないため, グラフ中の近年の文献数にはあまり意味はない”との返事をいただいた。

- netic spectrum,” *Opt. Lett.*, **30** (2005) 1611–1613.
- 30) X. Shi and L. Hesselink: “Mechanisms for enhancing power throughput from planar nano-apertures for near-field optical data storage,” *Jpn. J. Appl. Phys. Pt.1*, **41** (2002) 1632–1635.
 - 31) X. Shi, L. Hesselink and R. L. Thornton: “Ultrahigh light transmission through a C-shaped nanoaperture,” *Opt. Lett.*, **28** (2003) 1320–1322.
 - 32) E. X. Jin and X. Xu: “Finite-difference time-domain studies on optical transmission through planar nano-apertures in a metal film,” *Jpn. J. Appl. Phys. Pt.1*, **43** (2004) 407–417.
 - 33) H. Shi, C. Wang, C. Du, X. Luo, X. Dong and H. Gao: “Beam manipulating by metallic nano-slits with variant widths,” *Opt. Exp.*, **13** (2002) 6815–6820.
 - 34) 納谷昌之: “近接場光リソグラフィー”, *O plus E*, **27** (2005) 1383–1387.
 - 35) H. Ichikawa and H. Kikuta: “Numerical feasibility study of the fabrication of subwavelength structure by mask lithography,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **18** (2001) 1093–1100.
 - 36) D. B. Shao and S. C. Chen: “Numerical simulation of surface-plasmon-assisted nanolithography,” *Opt. Exp.*, **13** (2005) 6964–6973.
 - 37) R. C. Rumpf and E. G. Johnson: “Fully three-dimensional modeling of the fabrication and behavior of photonic crystals formed by holographic lithography,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **21** (2004) 1703–1713.
 - 38) J. M. Oliva and S. K. Gray: “Theoretical study of dielectrically coated metallic nanowires,” *Chem. Phys. Lett.*, **379** (2003) 325–331.
 - 39) P. Nordlander, C. Oubre, E. Prodan, K. Li and M. I. Stockman: “Plasmon hybridization in nanoparticle dimers,” *Nano Lett.*, **4** (2004) 899–903.
 - 40) D. F. P. Pile and D. K. Gramotnev: “Channel plasmon-polariton in a triangular groove on a metal surface,” *Opt. Lett.*, **29** (2004) 1069–1071.
 - 41) M. Futamata, Y. Maruyama and M. Ishikawa: “Local electric field and scattering cross section of Ag nanoparticles under surface,” *J. Phys. Chem. B*, **107** (2003) 7607–7617.
 - 42) W. M. Saj: “FDTD simulations of 2D plasmon waveguide on silver nanorods in hexagonal lattice,” *Opt. Exp.*, **13** (2005) 4818–4827.
 - 43) B. Wang and G. P. Wang: “Surface plasmon polariton propagation in nanoscale metal gap waveguides,” *Opt. Lett.*, **29** (2004) 1992–1994.
 - 44) H. Nakamura, T. Saiki, H. Kambe and K. Sawada: “FDTD simulation of tapered structure of near-field fiber probe,” *Comput. Phys. Commun.*, **142** (2001) 464–467.
 - 45) L. J. Sherry, S.-H. Chang, G. C. Schatz, R. P. Van Duyne, B. J. Wiley and Y. Xia: “Localized surface plasmon resonance spectroscopy of single silver nanocubes,” *Nano Lett.*, **5** (2005) 2034–2038.
 - 46) T. Grosjes, A. Vial and D. Barchiesi: “Models of near-field spectroscopic studies: Comparison between Finite-Element and Finite-Difference methods,” *Opt. Exp.*, **13** (2005) 8483–8497.
 - 47) D. S. Gardner and M. L. Brongersma: “Microring and microdisk optical resonators using silicon nanocrystals and erbium prepared using silicon technology,” *Opt. Mater.*, **27** (2005) 804–811.
 - 48) B. Wang, P. J. Bos and C. D. Hoke: “Light propagation in variable-refractive-index materials with liquid-crystal-infiltrated microcavities,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **20** (2003) 2123–2130.
 - 49) L. Plattner: “Optical properties of the scales of Morpho rhetenor butterflies: Theoretical and experimental investigation of the back-scattering of light in the visible spectrum,” *J. R. Soc. Interface*, **1** (2004) 49–59.
 - 50) D. Zhu, H. Kominami, J. B. Cole and D. Cai: “Measuring BRDF of Morpho butterfly using FDTD light simulation,” *情報処理学会研究報告*, 2004-CG-116 (2004) pp. 23–28.
 - 51) S. Chang, W. H. Choi, J. H. Jo and S. T. Chung: “FDTD analysis of optical forces on a nanometric object in the near zone of a metal slit,” *Proc. SPIE*, **3573** (1998) 536–539.
 - 52) C. Rockstuhl and H. P. Herzig: “Rigorous diffraction theory applied to the analysis of the optical force on elliptical nano- and micro-cylinders,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, **6** (2004) 921–931.
 - 53) 中島隆介, 高橋 哲, 三好隆志, 高谷裕浩: “赤外エバネッセント光によるシリコンウエハ加工表面層欠陥検出に関する研究 (第1報)”, *精密工学会誌*, **69** (2003) 1291–1295.
 - 54) M. Naruse, T. Yatsui, W. Nomura, N. Hirose and M. Ohtsu: “Hierarchy in optical near-fields and its application to memory retrieval,” *Opt. Exp.*, **13** (2005) 9265–9271.
 - 55) T. Dogaru, L. Collins and L. Carin: “Optimal time-domain detection of a deterministic target buried under a randomly rough interface,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **49** (2001) 313–326.
 - 56) B.-J. Li and P.-L. Liu: “Numerical analysis of microdisk lasers with rough boundaries,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **33** (1997) 791–795.
 - 57) 宮本浩明, 小嶋敏孝: “不規則面を有する青色レーザ光ディスクモデルからの光散乱特性の FDTD 法解析”, *電子情報通信学会論文誌 (C)*, **88** (2005) 589–591.
 - 58) M.-Y. Ng and W.-C. Liu: “Super-resolution and frequency-dependent efficiency of near-field optical disks with silver nanoparticles,” *Opt. Exp.*, **13** (2005) 9422–9430.
 - 59) H. Ichikawa: “Subwavelength triangular random gratings,” *J. Mod. Opt.*, **49** (2002) 1893–1906.
 - 60) S. G. García, T. M. Hung-Bao, R. G. Martin and B. G. Olmedo: “On the application of finite methods in time domain to anisotropic dielectric waveguides,” *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, **44** (1996) 2195–2206.
 - 61) H. Ichikawa and H. Kikuta: “Dynamic guided-mode resonant grating filter with quadratic electro-optic effect,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **22** (2005) 1311–1318.
 - 62) R. Joseph and A. Taflov: “FDTD Maxwell’s equations models for nonlinear electrodynamics and optics,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **45** (1997) 364–374.
 - 63) D. M. Sullivan: “Z transform theory and the FDTD method,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **44** (1996) 28–34.
 - 64) R. W. Ziolkowski: “The incorporation of microscopic material models into the FDTD approach for ultrafast optical pulse simulation,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **45** (1997) 375–391.
 - 65) S. Nakamura, N. Takasawa and Y. Koyamada: “Comparison between finite-difference time-domain calculation with all parameters of Sellmeier’s fitting equation and experimental results for slightly chirped 12-fs laser pulse propagation in a silica fiber,” *J. Lightwave Technol.*, **23** (2005) 855–863.
 - 66) D. Hovhannisyanyan and S. Manucharyan: “Modeling of energy redistribution process in a spectrum of laser pulse of a few optical cycles propagating in a fused silica,” *Micro-wave Opt. Technol. Lett.*, **47** (2005) 359–365.
 - 67) A. V. Brovko, A. B. Manenkov and A. G. Rozhnev: “FDTD-analysis of the wave diffraction from dielectric waveguide discontinuities,” *Opt. Quantum Electron.*, **35** (2003) 395–406.
 - 68) E. P. Kosmidou and T. D. Tsiboukis: “An FDTD analysis of

- photonic crystal waveguides comprising third-order nonlinear materials,” *Opt. Quantum Electron.*, **35** (2003) 931-946.
- 69) M. Fujii, T. Okamoto, M. Haraguchi, M. Fukui and S. J. Al-Bader: “Finite-difference time-domain analysis on nonlinear Fabry-Perot resonator in optical waveguide geometry,” *Jpn. J. Appl. Phys. Pt.1*, **40** (2001) 2259-2263.
- 70) Y. Dumeige, C. Arnaud and P. Feron: “Combining FDTD with coupled mode theories for bistability in micro-ring resonators,” *Opt. Commun.*, **250** (2005) 376-383.
- 71) C. Conti, A. Di Falco and G. Assanto: “Parametric oscillations in photonic crystal slabs 3-D time-domain analysis,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2004) 1495-1497.
- 72) A. Mizutani, H. Kikuta and K. Iwata: “Numerical study on an asymmetric guided-mode resonant grating with a Kerr medium for optical switching,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **22** (2005) 355-360.
- 73) A. Mizutani, H. Kikuta and K. Iwata: “Numerical study on efficient optical switching based on the nonlinear phenomenon in a guided-mode resonant grating with Kerr medium,” *Opt. Rev.*, **12** (2005) 313-318.
- 74) M. Haraguchi, T. Okamoto and M. Fukui: “Optical switching phenomena of Kerr nonlinear microsphere due to near-field coupling: Numerical analysis,” *IEICE Trans. Electron.*, **E85-C** (2002) 2059-2064.
- 75) M. Haraguchi, M. Fujii, M. Noguchi, T. Okamoto and M. Fukui: “Nonlinear optical response of a metal circular cylinder coated with a Kerr material: Numerical simulations,” *J. Korean Phys. Soc.*, **47** (2005) S33-S37.
- 76) M. Midrio: “Shooting technique for the computation of plane-wave reflection and transmission through one-dimensional nonlinear inhomogeneous dielectric structures,” *J. Opt. Soc. Am. B*, **18** (2001) 1866-1871.
- 77) A. D. Boardman, P. Egan, L. Velasco and N. King: “Control of planar nonlinear guided waves and spatial solitons with a left-handed medium,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, **7** (2005) S57-S67.
- 78) A. Bourgeade and B. Nkonga: “Dynamic load balancing computation of pulses propagating in a nonlinear medium,” *J. Supercomput.*, **28** (2004) 279-294.
- 79) S. H. Chang and A. Taflove: “Finite-difference time-domain model of lasing action in a four-level two-electron atomic system,” *Opt. Exp.*, **12** (2004) 3827-3833.
- 80) K. Nozaki and T. Baba: “Carrier and photon analyses of photonic microlasers by two-dimensional rate equations,” *IEEE Sel. Area Commun.*, **23** (2005) 1411-1417.
- 81) M.-K. Seo, G. H. Song, I.-K. Hwang and Y.-H. Lee: “Nonlinear dispersive three-dimensional finite-difference time-domain analysis for photonic-crystal lasers,” *Opt. Exp.*, **13** (2005) 9645-9651.

(2006年2月10日受理)