

## ADE-FDTD 法による 2 準位系の誘導放出のシミュレーション

## Simulation of the Stimulated Emission of Two-Levels System by the ADE-FDTD Method

○上垣将洋<sup>1</sup>, 竹内高<sup>2</sup>, 長澤和也<sup>3</sup>, 影山雄一<sup>3</sup>, 大貫進一郎<sup>4</sup>\*Masahiro Kamigaki<sup>1</sup>, Takashi Takeuchi<sup>2</sup>, Kazuya Nagasawa<sup>3</sup>, Yuichi Kageyama<sup>3</sup>, Shinichiro Ohnuki<sup>4</sup>

Abstract: In recent years, FDTD method is an effective means in the electromagnetic field analysis. In this paper, we study the two-levels system modeled by ADE-FDTD method.

## 1. はじめに

時間領域有限差分法 (Finite Difference Time Domain; FDTD)法は電磁界解析における有効な手段として広く利用されている。また補助方程式(Auxiliary Differential Equation; ADE)を組み込むことにより、周波数分散性や非線形光学現象を扱うことが可能である。本報告では、ADE-FDTD 法を用いて 2 準位系の誘導放出のシミュレーションを行い、吸収媒質に光を入射した時の電界の時間応答を解析する。

## 2. 解析手法

FDTD 法は、式(1)に示すファラデーの法則と、式(2)に示すアンペアの法則を時間及び空間領域で離散化し、電磁界を計算する手法である。

$$\nabla \times \mathbf{E}(r, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(r, t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(r, t) = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(r, t)}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}(r, t)}{\partial t} + \mathbf{J}(r, t) \quad (2)$$

解析対象物の周波数分散性を考慮するため、式(3)を補助微分方程式として用いる。

$$\frac{d^2 \mathbf{P}(t)}{dt^2} + \gamma_{ceo} \frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} + \omega_a^2 \mathbf{P}(t) = \Delta N \frac{e^2}{m} \mathbf{E}(t) \quad (3)$$

ここで、 $\Delta N$  は 2 準位間の電子数の差、 $\gamma_{ceo}$  は媒質による定数、 $e$  は電荷素量、 $m$  は電子の質量、 $c$  は光速、 $\varepsilon_0$  は真空中の誘電率、 $\omega_a$  は媒質の共振周波数である。

解析対象物の非線形光学現象を考慮するため、式(3)の  $\Delta N$  を次式に示すレート方程式から求める。

$$\frac{d\Delta N(t)}{dt} = -\frac{2}{\hbar\omega_a} \mathbf{E}(t) \cdot \frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} - \frac{\Delta N(t) - \Delta N_0}{\tau_{21}} \quad (4)$$

ここで、 $\tau_{21}$  は電子の緩和時間、 $\Delta N_0$  は電子数の初期状態、 $\hbar$  はディラック定数である。式(1)から(4)を逐次計算することで、周波数分散性ならびに非線形光学現象を考慮した電磁界解析が可能となる。

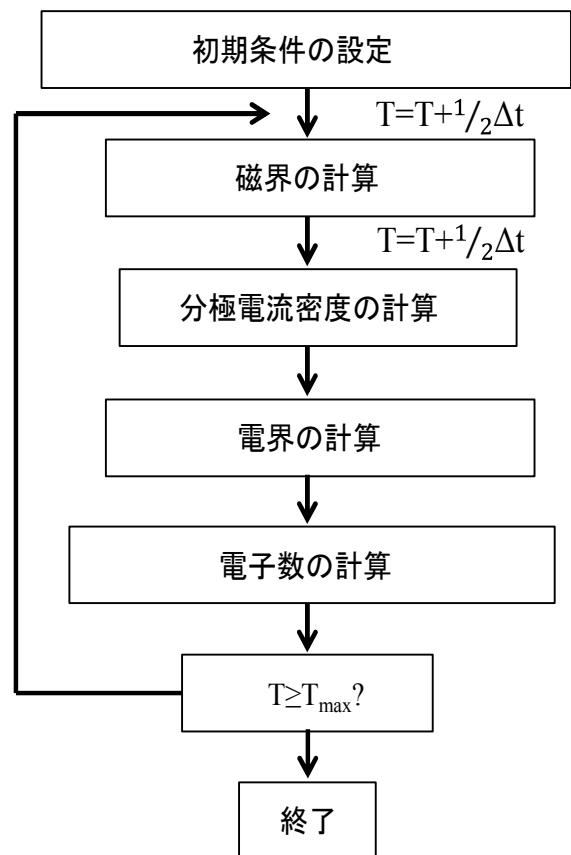


Figure 1. Flow chart ADE-FDTD algorithm

Fig.1 に、本解析手法の計算フローチャートを示す。

## 3. 解析結果

解析モデルを Fig. 2 に示す。真空と 2 準位系の吸収媒質から成り、 $z$  方向に光が伝搬する 1 次元モデルを想定する。真空 1 の空間に波源を設け、吸収媒質中に観測点を置く。真空 1 と吸収媒質の境界からの距離を変化させ、その時の電界の時間応答を観測する。

ここで、時間離散間隔  $\Delta t = 1.8 \times 10^{-17}$  s, 空間離散間隔  $\Delta z = 6$  nm とする。また、入射波源には、振幅  $E_{max} = 100$  V/m, 周波数  $f = 5 \times 10^{14}$  Hz の正弦波を用いる。

Fig. 3 に  $l = 0.6 \mu\text{m}$  での解析結果を示す。吸収媒質に光が入射し、それから徐々に光の電界が減衰して定常状態を迎える。また、青の実線が本解析結果、赤のプロットが参考にした論文<sup>[1]</sup>の結果である。グラフより結果が一致することを確認した。

Fig. 4 に  $l = 1.2 \mu\text{m}$  での解析結果を示す。Fig. 3 の波形よりも電界の減衰が著しく、その後更に低い値で定常状態を迎える。媒質中の電界の波形は、入射波と媒質によって放射される界の和で定義される。また、吸収媒質では入射波と放射される界の位相が  $180^\circ$  変化するため、互いに打ち消し合い、媒質中の電界は減衰する。また、同様に本解析結果と論文<sup>[1]</sup>の結果が一致することを確認した。

#### 4. まとめ

本報告では ADE-FDTD 法を用い、2 準位系の誘導放出のシミュレーションを行った。解析結果より、吸収媒質中を伝搬する光の電界が減衰することを確認した。また、文献<sup>[1]</sup>の結果と一致することを確認した。

#### 5. 謝辞

本研究の一部は、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の援助を受けて行われた。

#### 6. 参考文献

[1] A. S. Nagra and R. A. York, : “FDTD Analysis of Wave Propagation in Nonlinear Absorbing and Gain Media”, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol.46, No.3, pp.334-340, 1998.

[2] A. E. Siegman and M. Valley, : “Lasers”, Univ. Sci. Books, 1986.

[3] J. L. Young, : “Propagation in linear dispersive media: Finite difference time domain methodologies”, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol.43, pp. 422-426, 1995.

[4] R. W. Ziolkowski, J. M. Arnid, and D. M. Gogny, : “Ultrafast pulse interactions with two level atoms”, Phys. Rev. A, Vol.52, No. 4, pp. 3082-3094, 1995.

[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.

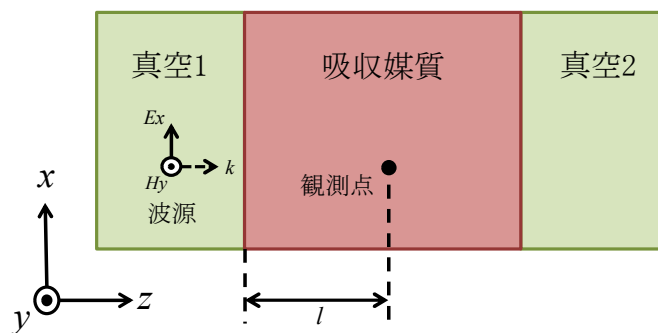


Figure 2. Computational model

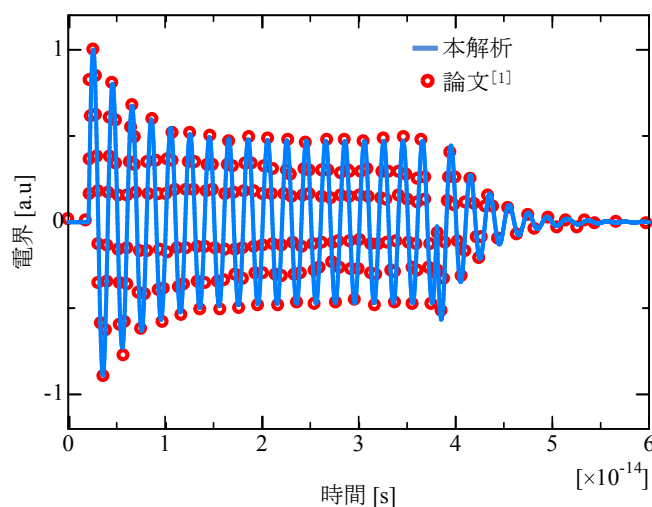


Figure 3. Transient response of the medium ( $l = 0.6 \mu\text{m}$ )

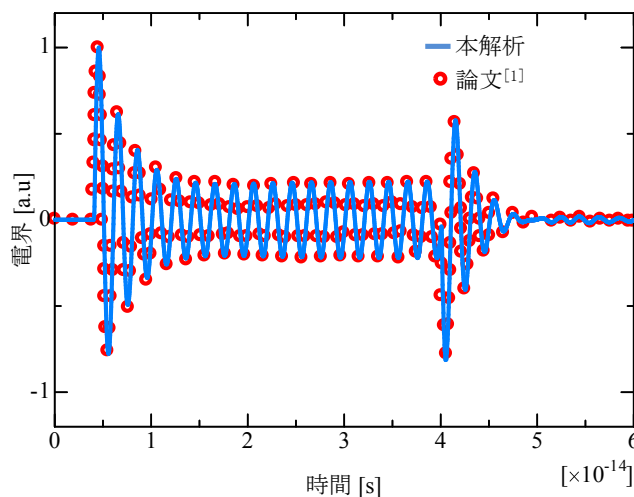


Figure 4. Transient response of the medium ( $z = 1.2 \mu\text{m}$ )