

金属円柱の電磁界時間 - 周波数応答解析
 — FDFD 法及び高速逆ラプラス変換の併用 —
Time-Frequency Analysis of EM Scattering from a Metallic Cylinder
 - Combination of FDFD Method and FILT -

○呉迪¹, 山口隆志², 大貫進一郎³

*Di Wu¹, Takashi Yamaguchi², Shinichiro Ohnuki²

Abstract: In recent years, analysis of electromagnetic wave scattering from microscopic metal is paid attention for realizing miniaturization of optical devices. This paper describes a novel time and frequency domain algorithm for designing optical devices efficiently.

1. まえがき

近年, アンテナや光デバイスの設計において電磁界シミュレーションが必須となり, アルゴリズムの開発が盛んにおこなわれている. 本報告は Finite-Difference Frequency-Domain (FDFD)法^[1]及び高速逆 Laplace 変換 (FILT)法^[2]に基づく新しい時間 - 周波数応答解析手法を提案する.

2. 解析手法

本解析では複素周波数($s = \sigma + j\omega$)領域において定式化を行う. 複素周波数領域の Maxwell 方程式を以下に示す.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -s\mu_0\mu_r \mathbf{H} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = s\epsilon_0\epsilon_r \mathbf{E} + \mathbf{J} \quad (2)$$

これらを空間について差分近似することで, 連立一次方程式が得られる^[3]. 複素周波数領域の電磁界はこの方程式を従来法により解くことで求める^[3]. また, 可視光領域における金属の周波数分散性は Lorentz-Drude モデルにより考慮した^[3].

時間応答解析は s 領域で求めた電磁界に逆 Laplace 変換を適用する. FILT 法では, Bromwich 積分を双曲線関数により近似し, 留数定理を用いて整理した次式を利用する^[3].

$$f_{ec}(t, \alpha) = \frac{e^\alpha}{t} \left(\sum_{n=1}^{k-1} F_n + \frac{1}{A_{p0}} \sum_{q=0}^{p-1} A_{pq} F_{n+q} \right) \quad (3)$$

ここで

$$F_n = (-1)^n \text{Im}[F(s)] , \quad s = \frac{\alpha + j(n-0.5)\pi}{t} \quad (4)$$

$$A_{pp} = 1, \quad A_{p0} = 1, \quad A_{pq-1} = A_{pq} + \frac{(p+1)!}{q!(p+1-q)!} \quad (5)$$

k は無限級数の打ち切り項数である. 交代級数に対する収束を早めるために, Euler 変換が適用されており, p

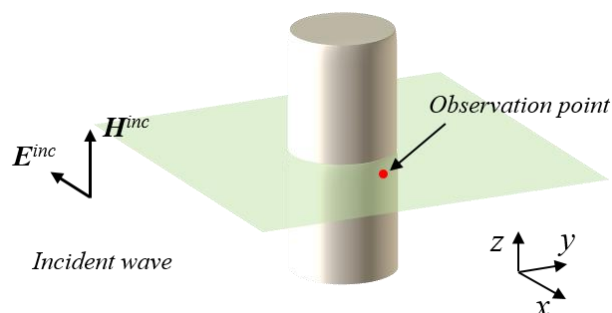


Figure 1 Computational model

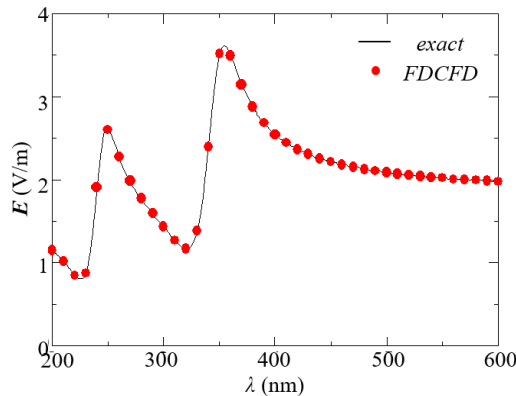


Figure 2 Wavelength response of field intensity

はその項数を示す. 本手法は観測時間及び時間間隔を自由に選ぶことができ, 逆ラプラス変換を行うときの計算精度は誤差パラメータ α に依存する.

3. 解析結果

本手法の計算精度を検証するため, Figure 1 に示す金属円柱による電磁界の散乱解析を行う. 半径 $r = 5\text{nm}$ の金属円柱に振幅 1V/m の平面波を入射し, 散乱波は円柱表面から 0.5nm 離れた点で観測する. FDFD 法のセルサイズは $0.1 \times 0.1\text{nm}$ に設定した.

Figure 2 に示す波長応答では、波長 350nm 付近において、電界が増幅され、表面プラズモンが最も強く励振される。また、本手法の解析結果は厳密解と 3 桁程度一致した。

金属円柱の共鳴波長で変調した Gaussian パルス入射に対する過度応答を検証する。Figure 3 は観測時間 20~30fs における応答を示す。パルスに含まれる共鳴波長の成分により、表面プラズモンが励振されることで円柱近傍における電界が増幅されている。また、パルスが通過後徐々に減衰する応答となっている。実線及び点のプロットはそれぞれ FDTD 及び本手法で計算された解析結果で 4 桁程度一致した。また、FDTD 法の時間間隔 $\Delta t = 2 \times 10^{-19}$ s に対し、本手法は 1000 倍の $\Delta t = 2 \times 10^{-16}$ s とした。本手法は時間間隔にかかわらず同精度での解析が可能である。

Figure 4 に波長 320nm の正弦波が入射された場合の E_y の時間応答を示す。Figure 4a は散乱波の過度から定常状態への推移を示している。15fs 以降は定常応答を解析した Figure 4b の結果とほぼ一致する。本手法は過度応答と定常応答のいずれも効率的に解析することが可能である。

4. まとめ

FDFD 法を s 領域で定式化し、新たな時間 - 周波数応答解析法を提案し、金属円柱による電磁波の散乱問題を解くことによって本手法の計算精度を検証した。また、提案手法の有用性を明らかにした。

5. 謝辞

本研究の一部は、日本大学学術研究戦略プロジェクト及び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] D. Wu, R. Takahashi, K. Nagasawa, T. Takeuchi, T. Yamaguchi, S. Ohnuki, IEICE Technical Report EMT2016-45, pp.33-36, 2016.
 [2] T. Hosono, Radio Sci., 1981, vol. 16, no.6, pp.1015-1019.
 [3] D. Wu, T. Yamaguchi, S. Ohnuki, IEICE Technical Report vol.117, no.37, pp.5-8, 2017.

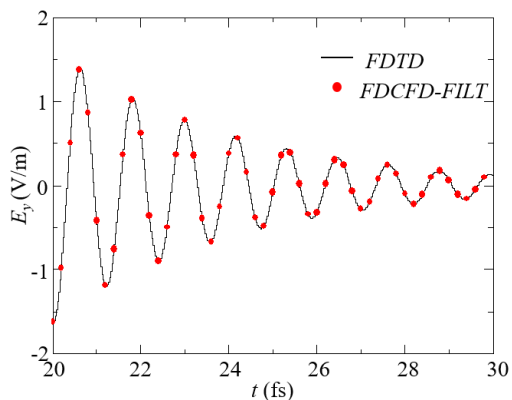
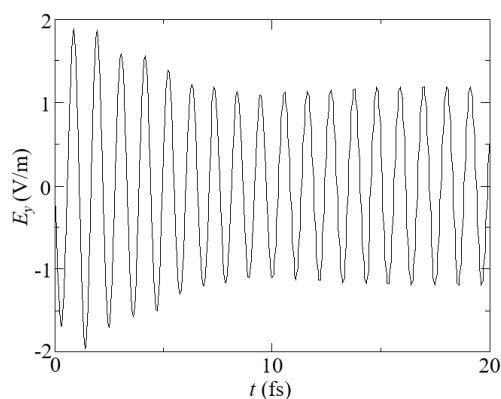
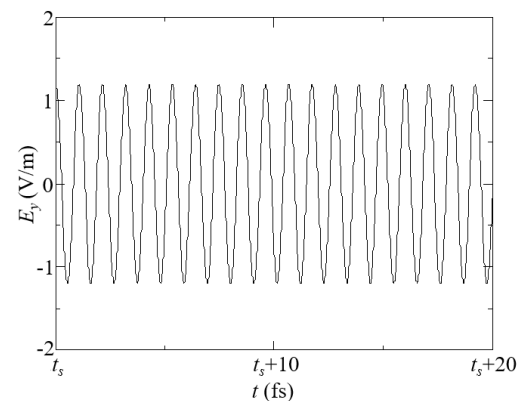


Figure 3 Time response for modulated Gaussian pulse



a) Transient response



b) Steady-state response

Figure 4 Electric field intensity with sine-pulse incidence

[4] S. Ohnuki, D. Wu, S. Watanabe, R. Takahashi, T. Yamaguchi URSI-GASS 2017, B8P-4, 2017.
 [5] D. Wu, S. Watanabe, T. Yamaguchi, S. Ohnuki, Proceedings of the 2017 IEICE General Conference, C-15-1, 2017.
 [6] D. Wu, T. Yamaguchi, S. Ohnuki, PIERS 2017 Singapore, 0A9-5, 2017.