

銀円柱を用いたプラズモン導波路の電磁界解析
 Analysis of Electromagnetic Fields for a Plasmonic Waveguide of Silver Cylinders

○長澤和也¹, 竹内嵩², 奥田太郎³, 関口洋平³, 大貫進一郎⁴

*Kazuya Nagasawa¹, Takashi Takeuchi², Taro Okuda³, Yohei Sekiguchi³, Shinichiro Ohnuki⁴

Abstract: Recently, it has been attracted attention to study and design plasmonic waveguides consisted of nano metals. The waveguide can realize efficient energy transmission, and propagate the localized plasmon which is coupled among nano metals. In this report, we analyze the plasmonic waveguide consisted of silver cylinders and discuss enhancement of electromagnetic fields.

1. はじめに

近年, 多数の微小金属を入射波の伝搬方向に配置したプラズモン導波路が注目を集めている^[1,2]. この導波路では, 微小金属に発生した局在型プラズモンが隣接する微小金属と結合しながら伝搬し, 低損失なエネルギー伝送と高い電界強度の増幅を実現できる^[3]. 本報告では, 銀円柱を用いたプラズモン導波路の電磁界解析を行い, 銀円柱間の距離と電界強度増強の基礎検証を行う.

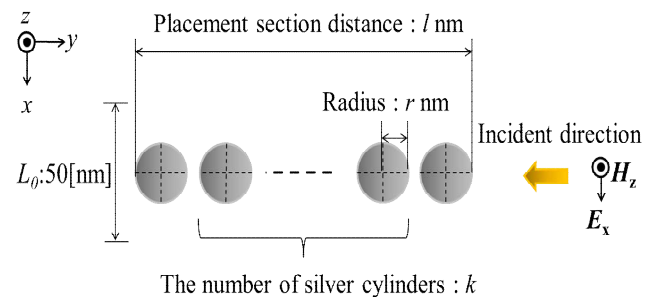


Figure 1. Geometry and coordinate system

2. 解析手法

誘電体中の Maxwell 方程式は次式で与えられる.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1)$$

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

ここで, \mathbf{J} は分極電流密度を示す.

銀の周波数分散性は, 以下に示す電子の運動方程式により近似した Drude モデルとする.

$$m \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} + m \nu \frac{d\mathbf{u}}{dt} = q\mathbf{E} \quad (3)$$

ここで, m は電子の有効質量, ν は衝突周波数, q は素電荷量, \mathbf{u} は変位ベクトルを示す. この式(3)より, 分極電流密度 \mathbf{J} に対する次式が得られる.

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} = -\nu \mathbf{J} + \varepsilon_0 \omega_p^2 \mathbf{E} \quad (4)$$

ここで ω_p はプラズマ周波数である.

本報告では, 電磁界解析に ADE-FDTD 法を用いる^[4]. ADE-FDTD 法の計算式は, 式(1), (2), および(3)の時間・空間微分に 2 次精度差分式を適用することで得られる^[4,5].

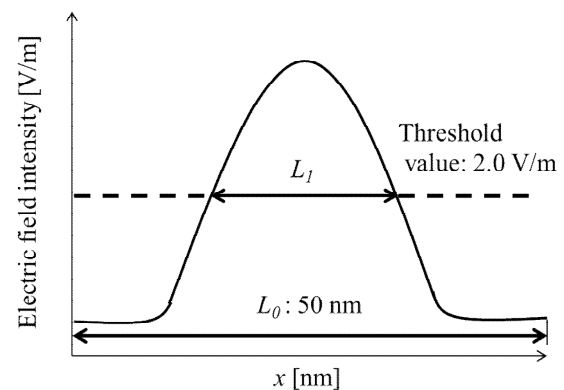


Figure 2. Calculation of electric field enhancement rate

3. 解析結果

Fig. 1 に解析モデルを示す. ここでは半径 $r = 5 \text{ nm}$ の銀円柱を等間隔に配置し, プラズモン導波路を構成する. 入射波源は振幅 1 V/m , 波長 197.6 nm の H 波とした. 銀円柱を配置する区間 l は 100 nm に設定した. 以下では, 両端を除く銀円柱の個数 k を変化させ, 導波路の性能を評価する. 導波路の性能評価には, 次式で定義される増強度 β を用いた.

$$\beta = \frac{L_1}{L_0} \quad (5)$$

ここで, L_1 は電界強度が入射波の 2 倍以上に増強する区間の長さとする.

1 : 日大理工・学部・電気 2 : 日大理工・院 (後)・電気 3 : 日大理工・院 (前)・電気 4 : 日大理工・教員・電気

Fig. 3 (a)に $k=5$ の場合における電界強度分布, (b)に増強度 β を示す. 図より, 両端の銀円柱近傍で, 電界強度の増強が確認でき, 増強度 β は約 0.8 と高い値となる.

Fig. 4 に $k=1$ の結果を示す. (a)より, 波源から見て最初の銀円柱で電界強度の増強が確認される. しかし, Fig. 3 と比較して最後尾の銀円柱近傍の電界強度は弱い. (b)より最初の銀円柱近傍の増強度 β は, 約 0.9 であるのに対し, 最後尾の銀円柱近傍の増強度は約 0.4 となり, 増強度の低下が確認できる.

Table. 1 に円柱の個数 k に対する最後尾の銀円柱近傍の増強度 β の最大値を示す. 銀円柱の個数 k が 5 個の時, 増強度が最大の $\beta=0.812$ となる.

4.まとめ

本報告では, 銀円柱を用いたプラズモン導波路の電磁界解析を行い, 円柱間の個数と電界強度増幅の関係性について検討を行った. 円柱の個数によって導波路の電界強度の分布が変化することを確認した. また円柱の個数が少ないほど, 最後列の銀円柱近傍における電界強度の増強度が低くなることを示した.

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.

5.参考文献

- [1]大津 元一, 「ナノフォトニックデバイス・加工」, オーム社, pp.75-82, 2006 年.
- [2]長澤和也, 大貫進一郎: 「量子暗号通信に向けた光検出器の設計」, 電気学会 2013 第 3 回学生研究発表会, 2-5, 8 月, 2013.
- [3]大津 元一, 「ナノフォトニクス基礎」, オーム社, pp.181-185, 2006 年.
- [4] T. Yamaguchi, and T. hinata: “Optical near-field analysis of spherical metals, Application of the FDTD method combined with the ADE method”, Opt. Express, 15 , pp .11481-11491, 2007.
- [5]宇野 亭, 「FDTD 法による電磁解およびアンテナ解析」, コロナ社, pp. 3-9, 1998.

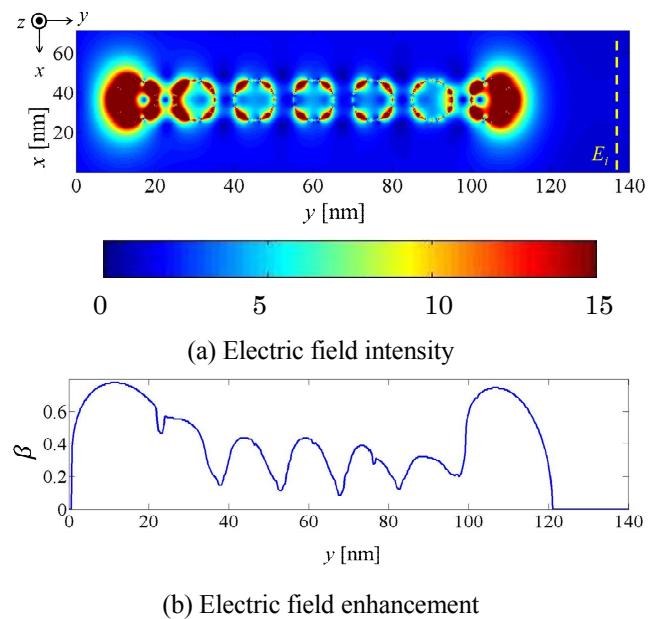


Figure 3. Distribution of electric field intensity and electric field enhancement in the case of $k=5$

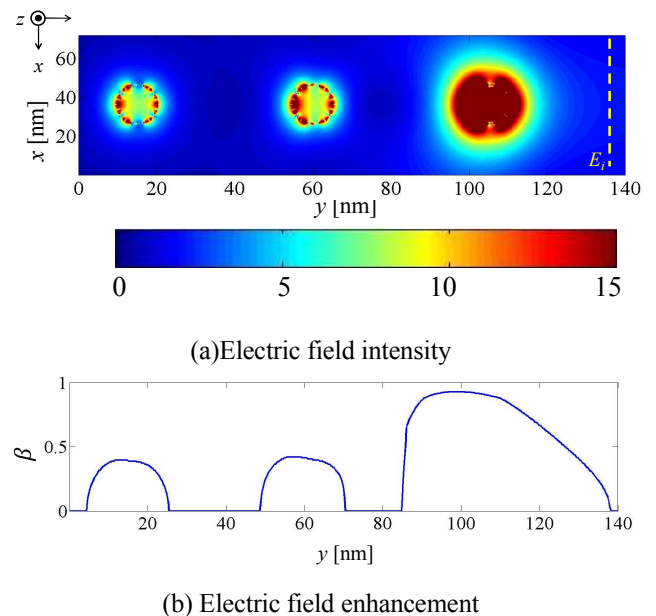


Figure 4. Distribution of electric field intensity and electric field enhancement in the case of $k=1$

Table 1.Characteristics of enhancement for varying k

Number of cylinders : k	Enhancement rate
5	0.780
4	0.676
3	0.428
2	0.396
1	0.388