

微小金属円柱列における局在表面プラズモンの電磁界解析

—励起光の偏光方向と波長応答—

Electromagnetic Field Analysis of Localized Surface Plasmons in a Gold Nano-Cylinder Chain

—Polarization Directions of Excitation light and the Wavelength responses—

○長澤和也¹, 大貫進一郎²*Kazuya Nagasawa¹, Shinichiro Ohnuki²

Abstract: Recently, the study of plasmonic device comprised of metal nano-particle chains has been attracted attention. The diffraction limit can be exceeded by using Localized Surface Plasmon (LSP) via the metallic nano-particle chains. In this report, we investigate the wavelength responses of the gold nano-cylinder chain due to the polarization direction of excitation light.

1. はじめに

近年, 微小金属列を用いたプラズモニックデバイスの研究^[1, 2, 3]が盛んに行われている. 微小金属列を介して局在表面プラズモンを伝搬させることで, 回折限界を超えて光を制御することができる^[4]. 本報告では微小金円柱列について電磁界解析を行い, 局在表面プラズモンを励起する光の偏光方向を変化させた際の円柱内におけるダイポールモーメントの波長応答について検討を行う.

2. 解析手法

本報告では, 時間領域有限差分(Finite Difference Time Domain; FDTD)法を用いて解析を行う^[5]. 本解析手法は, 次式に示すマクスウェル方程式を空間的, 時間的に中心差分を用いて離散化することで時間領域の電磁界解析を行う手法である.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

また, 金属の周波数分散性を考慮するために, 次式に示す電子の運動方程式を補助方程式として用いる.

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

ここで $m, \mathbf{u}, \gamma, q$ はそれぞれ, 電子の有効質量, 変位ベクトル, 衝突係数, 素電荷量を示す.

式(3)に中心差分を適用することで以下の金属内部の分

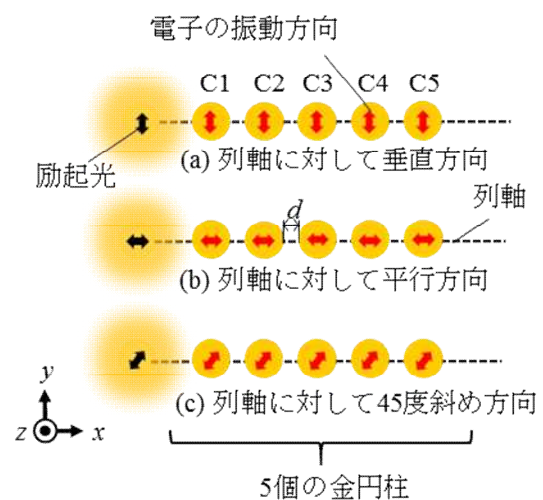


Figure 1. Polarization directions of excitation light

局電流 $\mathbf{J}_D$ に関する差分式を得る.

$$\mathbf{J}_D^{n+1} = C_{J1} \cdot \mathbf{J}_D^n + C_{J2} \cdot \mathbf{J}_D^{n-1} + C_{J3} \frac{\mathbf{E}^{n+1} - \mathbf{E}^{n-1}}{2\Delta t} \quad (4)$$

但し,

$$C_{J1} = \frac{4}{2\Delta t}, \quad C_{J2} = \frac{2 - \gamma\Delta t}{2 + \gamma\Delta t}, \quad C_{J3} = \frac{2\varepsilon_0\omega_p^2\Delta t^2}{2 + \gamma\Delta t}$$

ω_p はプラズマ周波数である.

3. 解析結果

Fig. 1 に解析モデルを示す. 直径 $a=10$ nm の金円柱 5 個を等間隔で直線状に配置する. 円柱 C1 に局在表面プラズモンを励起するための励起光について, その偏光方向を変化させる. 円柱 C5 内部のダイポールモーメントを求めることにより, 円柱列の波長応答を評価する.

Fig. 2 に励起光が垂直方向の場合の波長応答を示す.

共振波長のピークは円柱間距離 d が短くなるにつれて、短波長側に遷移している。共振ピーク波長は $d = 10$ nm の場合 503 nm, $d = 2$ nm の場合 449nm であることを確認した。

Fig. 3 に励起光が平行方向の場合の波長応答を示す。共振ピークの波長は、垂直方向と対照的に円柱間距離が短くなると長波長側に遷移している。このとき共振ピーク波長はそれぞれ $d = 10$ nm の場合 565 nm, $d = 2$ nm の場合 700nm で有ることを確認した。以上の結果より、偏光方向によって円柱間距離の変化に伴う波長応答の遷移が異なることがわかる。

Fig. 4 に励起光が斜め方向の場合の波長応答を示す。各円柱間距離で、2 つの大きな共振ピークが確認できる。斜め方向では、平行方向と垂直方向の波長応答が混在していることがわかる。

4. まとめ

本報告では、局在表面プラズモンを励起する光の偏光方向を変化させた際の微小金円柱列におけるダイポールモーメントの波長応答について検討を行った。円柱間距離が短くなると偏光方向が垂直方向は長波長側、平行方向では短波長側に波長応答が遷移することを確認した。また偏光方向が斜め方向の場合、垂直方向と平行方向の波長応答が混在することを明らかにした。

5. 参考文献

- [1] W. Nomura, et al., “Nanodot coupler with a surface plasmon polariton condenser for optical far/near-field conversion”, Appl. Phys. Lett., Vol. 86, pp. 181108-1—181108-3, April, 2005.
- [2] T. Coenen, et al., : “Directional emission from Plasmonic Yagi—Uda Antennas Probed by Angle-Resolved Cathodoluminescence Spectroscopy”, Nano Lett. Vol. 11, pp.3779—3784
- [3] K. Nagasawa, and S. Ohnuki,,” Wavelength Response Analysis of Localized Surface Plasmons in a Gold Nano-Cylinder Chain”, IEICE Society Conference 2015, C-1-11
- [4] S. Maier, et al.,,” Local Detection of Electromagnetic Energy Transport Below the Diffraction Limit in Metal Nanoparticle Plasmon Waveguides”, Nat. Mater., pp. 229—232, 2003.
- [5] T.Yamaguchi, et al., “Optical near-field analysis of spherical metals: Application of the FDTD method combined with the ADE method,” Opt. Express, vol. 15, pp. 11481—11491, 2007.

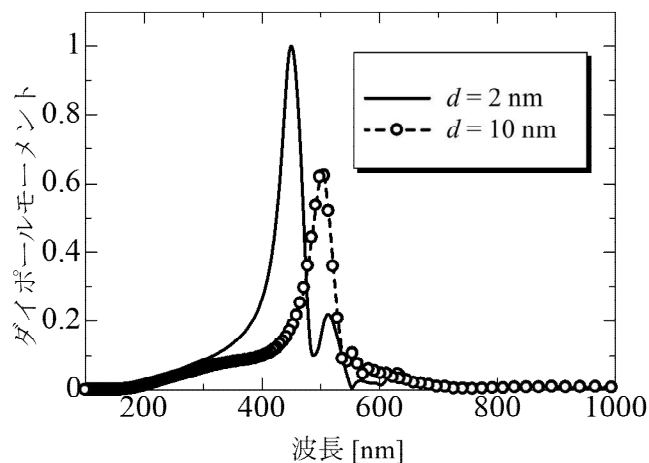


Figure 2. Wavelength responses of dipole moments: vertical to the chain axis

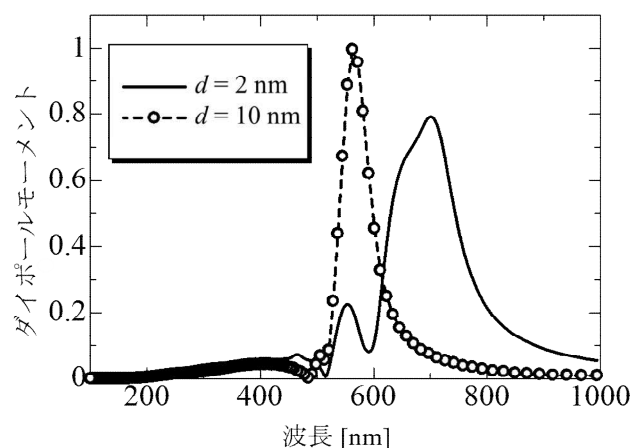


Figure 3. Wave length responses of dipole moments: horizontal to the chain axis

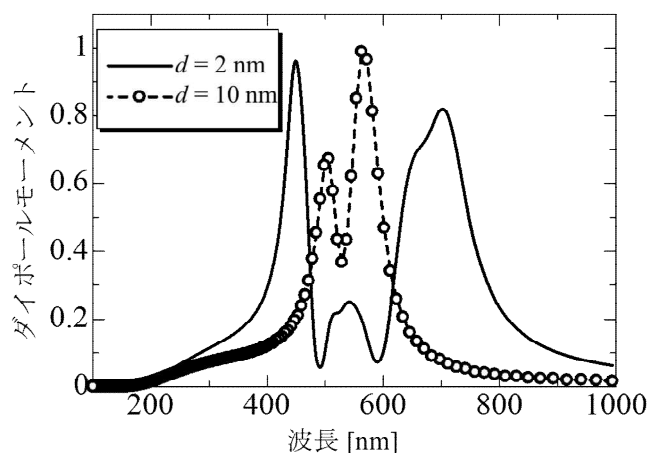


Figure 4. Wave length responses of dipole moments: slant direction to the chain axis