

ナノ金粒子による光散乱

○ 瀧本大二郎, 松田豊稔, 小田川裕之 (熊本高等専門学校)

川野光則 (Lumerical Solutions Inc.)

1. はじめに

近年, ナノテクノロジーの進展に伴ってナノ粒子などのナノサイズの構造を持つ物体やそれらの集合体からの光散乱・吸収に関する研究が行われている. その中で直径が数~数十 nm の金属ナノ粒子による著しい光吸収が, 局在プラズモン (Localized Surface Plasmons LSP) に関連して興味を持たれている⁽¹⁾. 本報告では, 数十~数百 nm の大きさを持つ金属でできたナノ粒子を複数個配置したナノ金属粒子群による光の散乱問題を Generalized Multipole Technique (以下, GMT) により数値解析し⁽²⁾, ナノ金属粒子に励起する局在プラズモン及びナノ金属粒子間での局在プラズモンの相互作用を調べる. なお, GMT の解法については, 文献(2)を参照されたい. ここでは, ナノ金粒子に励起される局在プラズモンの数値計算の結果のみを示す.

2. ナノ金属粒子に励起される局在プラズモン

図 1 に示すように直径が $2a$ の金でできた球 (以下, ナノ金粒子と呼ぶ) を, (a) $L=1$ 個, または同じ金粒子を (b) $L=2$ 個, (c) $L=6$ 個, (d) $L=7$ 個配置した集合体を考える.

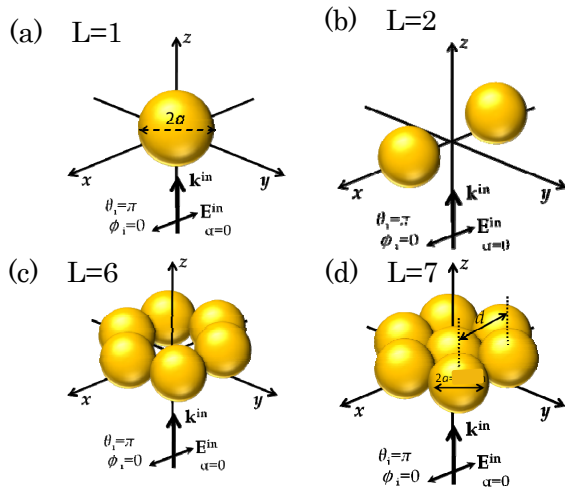


図 1. ナノ Au 粒子とその集合体

(a) $L=1$ 個のナノ金粒子 : 図 1(a)

原点に直径 $2a$ のナノ金粒子を置き, z 軸の負方向から x 軸方向に偏光した平面波を入射したときの消光効率 Q_{ext} の波長特性を図 2 に示す. 消光効率は, 吸収断面積 C_{abs} と散乱断面積 C_{sc} の和として定義される消光断面積 $C_{\text{ext}}=C_{\text{abs}}+C_{\text{sc}}$ を入射光のナノ金粒子への照射面積で割ったもので, $L=1$ のときは $Q_{\text{ext}} = C_{\text{ext}} / \pi a^2$ で計算される.

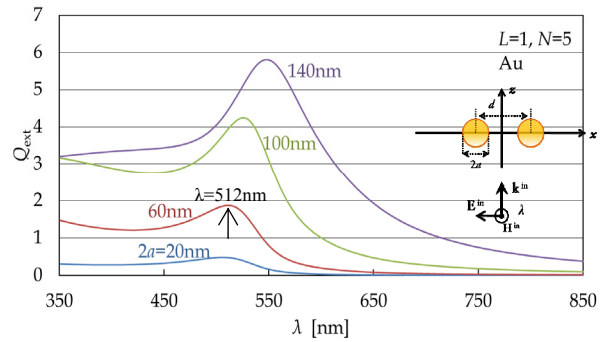


図 2. 直径の異なるナノ金粒子消光効率の波長特性

ナノ金粒子の直径が $2a=60\text{nm}$ のとき, 消光効率は $\lambda=512\text{nm}$ 付近で最大となり, この増大はナノ金粒子に局在プラズモンが励起したことによるものである⁽¹⁾. 図 4 に, 局在プラズモンが励起しているときのナノ金粒子及びその近傍での電界分布を示す. 同図から分かるように, 入射光の偏光 (x 軸) 方向にナノ金粒子の表面で電界の増強が発生している.

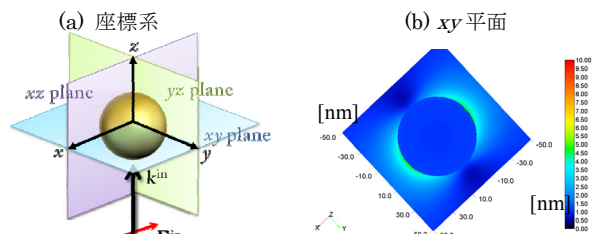


図 3. ナノ金粒子に励起する局在プラズモンの電界分布 : $2a=60\text{nm}$, $\lambda=512\text{nm}$.

(b) $L=2$ 個のナノ金粒子 : 図 1(b)

直径 $2a = 60\text{nm}$ のナノ Au 粒子 2 個を x 軸上に間隔 d だけ離して配置し, z 軸の負方向から x 軸方

向に偏光した $\lambda=512\text{nm}$ の平面波を入射する．粒子間距離 d をパラメータとして，消光効率 $Q_{\text{ext}}=C_{\text{ext}}/(\pi a^2)$ ($L=2$) の波長特性を図 4 に示す．粒子間距離 d により消光効率の最大値は変化し， $2a=60\text{nm}$ のナノ金粒子では $d=65\text{nm}$ 付近で Q_{ext} は最大となる．これは，それぞれのナノ金粒子に励起された局在プラズモンの相互作用によるものと考えられる．

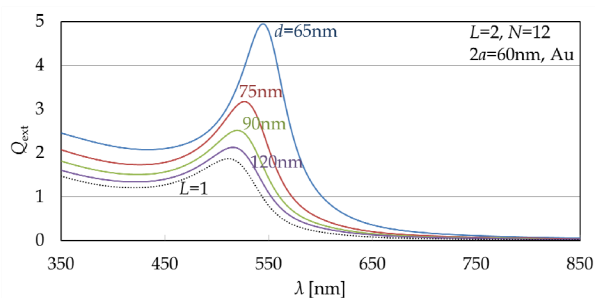


図 4 2 個のナノ金粒子の消光効率の波長特性

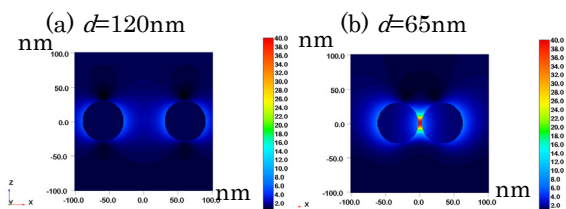


図 5. $L=2$ での全界のフィールド分布 ($\lambda = 545\text{nm}$)

図 5 に，(a) $d=120\text{nm}$ と (b) $d=65\text{nm}$ のときのナノ粒子近傍の電界分布を示す． $d=120\text{nm}$ では局在プラズモンの相互作用は弱く，電界分布はそれぞれの粒子に励起される局在プラズモンによるものである．ところが，粒子間が近い $d=65\text{nm}$ では各粒子の局在プラズモンの干渉，つまり相互作用による電界の増強（入射波の 40 倍程度）が粒子間に生じる．

(c) ナノ Au 粒子の正六角形配置：図 1(c) と (d)

図 1(c) と (d) に示すような，原点を中心とした xy 平面上の正六角形の (c) 各頂点及び (d) 頂点と原点に同一のナノ Au 粒子を配置したときの局在プラズモンを調べる．この配置は Hexamer と Heptamer と呼ばれており，中心部（原点）にナノ金粒子を配置することによって波長特性が大きく異なる⁽³⁾．図 6 は，文献(3)と同じパラメータ（直径 $2a=150\text{nm}$ ，各頂点の間隔 $d=170\text{nm}$ ）で， x 軸方向に偏光した光が z 軸の負方向から入射したときの消光断面積 C_{ext} の波長特性で結果である． $L=6$ では A: $\lambda=580\text{nm}$ のときに消光断面積が最大となり， $L=7$ では B: λ

$=675\text{nm}$ のときに最小となる．Hexamer 及び Heptamer に励起する局在プラズモンの調べるために，消光断面積の曲線上の点 A と B での全界の電界分布を図 7 に示す．Hexamer の A: $\lambda=580\text{nm}$ では，入射光の偏光方向(x 軸)に配置された両側の 2 個のナノ金粒子の間に電場増強が起こっている．Heptamer で B: $\lambda=675\text{nm}$ では，7 個のナノ金粒子のすべてに入射光の偏光(x 軸)方向に局在プラズモンが励起し，このとき消光断面積は減少する．

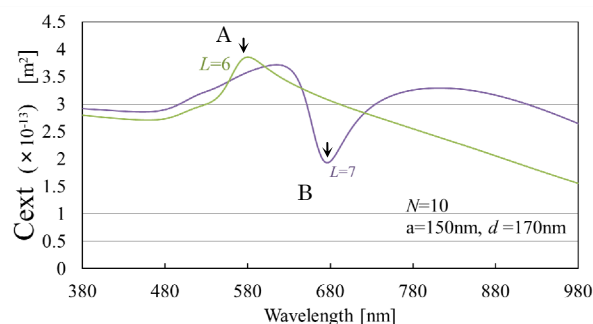


図 6. Hexamer と Heptamer の消光断面積の波長特性

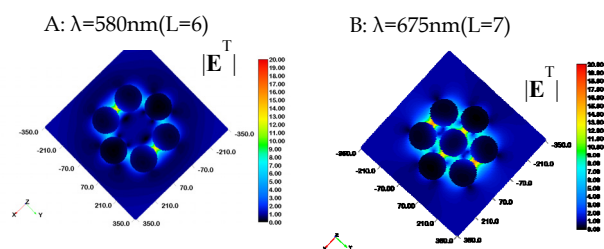


図 7 Hexamer と Heptamer に励起する局在プラズモン

3. まとめ

複数個のナノ金属粒子による光の散乱問題を GMT により数値解析し，ナノ金属粒子に励起する局在プラズモンについて調べた．特に，局在プラズモンが励起しているナノ金粒子を近づけると相互作用により，非常に強い電場増強がナノ粒子間に発生することを明らかにした．

謝辞 本研究の一部は，科学研究費補助金 22560045 によるものである．

文献 [1] C. F. Bohren and D. R. Huffman : Absorption and Scattering of Light by Small Particles, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KgaA, Weinheim, 2004.

[2] 歌丸, 松田, 小田川, 川野: 複数のナノ金属粒子による光の散乱: 電気学会研究会資料, EMT-11-41 (2011).

[3] K. Bao, N.A Mirtin, and P. Nordlander: "Fano resonance in planar silver nanosphere clusters," *Appl. Phys. A* **100**, pp.333-339(2010).

問い合わせ先: 熊本高専・松田 豊稔・ 096-242-6063・tmatsu@kumamoto-nct.ac.jp