

## 12. 光近接場の理論解析と遠方界変換

浮田 宏生

### 12.1 光近接場の電磁界

#### (a) 近接場の発生と応用

近接場光を発生するには、全反射、微小開口、微小散乱体などを利用して光の伝播を阻止すればよい。この近接場光を用いると、波長より微細な構造を観察でき、代表的な光学機器に走査型近接場光学顕微鏡 (SNOM: scanning near field optical microscopy) がある。また、光近接場は分光分析、加工、光記録などへの応用が可能である。

#### (b) 時間領域差分法 (FDTD) による解析

波長よりも小さい領域に局在する近接場はベクトル理論によって解析する。しかし、ベクトル理論ではごく限られた構造に対してしか解析解が得られない。そこで、コンピュータによる時間領域差分法 (FDTD 法: Finite Difference Time Domain method) がよく用いられる。<sup>[1]</sup>

FDTD 法は、電磁界の逐次的な時間変化をシミュレーションする手法で、専門的な知識を必要としないので、いろいろな科学技術分野で利用されている。光学関連では、近接場光学やフェムト秒ソリトンなどの分野で標準的な解析手法になっている。

### 12.2 解析例 1 (完全導体近似)

(a) 光ファイバプローブ (コア材質: シリカ, クラッド材質: 完全導体) の 2 次元モデルにおいて、円開口の直径がそれぞれ(a)34nm, (b)68nm, (c)136nm の場合の先端部の電磁界分布 Ex を解析・比較する。

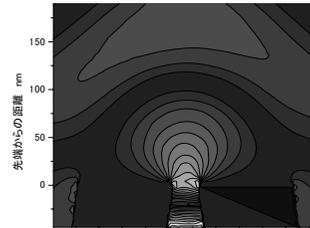


図 1 先端開口部電磁界分布

(b) 全反射によりプリズム表面に生成されたエバネッセント光を、光ピンセットされた微小金属球で散乱した場合の電磁界を解析する。

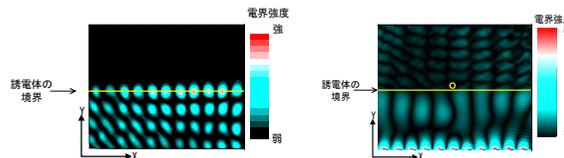


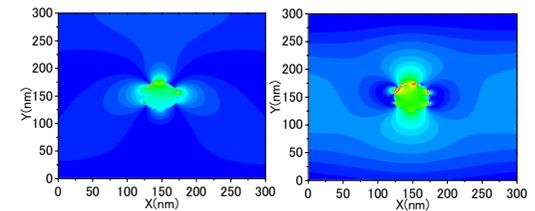
図 2 プローブ無 (左), 有 (右: 直径 100nm 金) と電磁界

### 12.3 解析例 2 (波長分散あり)

金微粒子の誘電率に Drude の式<sup>[2,3]</sup>,

$$\epsilon_f(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \Gamma^2} = 1 + \chi(\omega)$$

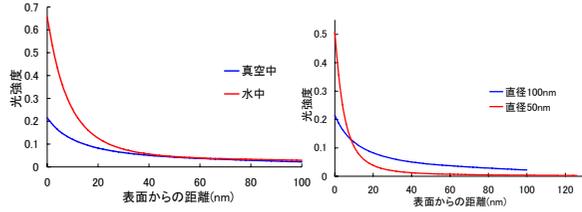
( $\chi$ : 電気比感受率,  $\omega_p$ : プラズマ角周波数,  $\Gamma$ : 減衰定数) により波長によって誘電率が変化するので、金微粒子から発生する近接場光の強度も波長で変化する (図 3)。以下、微粒子付近の近接場光強度を粒径、媒質、波長依存性の観点から解析する。



(a)  $\lambda=500\text{nm}$  (b)  $\lambda=550\text{nm}$   
図 3 波長  $\lambda$  による電界強度分布の比較

図 4 より、近接場光強度は真空中より水中の方が大きいですが、減衰も大きいことがわかる。また、直径が小さいと近接場光強度は大きいですが、局在範囲は狭くなっている。ピーク値の 10~90% で定義した局在

範囲を求めると、直径 100nm で 98nm, 50nm で 16nm となり分解能が向上すると考えられる。



(a) 媒質の影響 (b) 直径の影響

図 4 近接場光強度の表面からの距離依存性

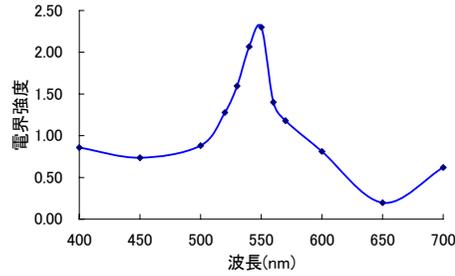


図 5 近接場光強度の波長依存性 (金微粒子)

図 5 は金微粒子表面の電界強度の最大値の波長依存性である。波長 550nm で強度が最大になることがわかる (共鳴)。SNOM では近接場光強度が大きいことが望ましいため、照明用のレーザーの波長にはこの付近の値を選ぶ。

### 12.4 解析例 3 (屈折率格子の観測シミュレーション) [4]

金微粒子で物体表面を走査し、その散乱光強度を対物レンズで捕捉して観測する (SNOM 信号)。

#### < 孤立金微粒子の散乱光 >

##### (a) 入射波源

平行光  

$$E_x(I, J) = \sin(2\pi \frac{c}{\lambda} n \Delta t) \quad , \quad E_y = 0$$

$$H_z(I, J) = \sin[2\pi \frac{c}{\lambda} \{ (n - \frac{1}{2}) \Delta t - \frac{\sqrt{\epsilon}}{c} \frac{\Delta y}{2} \}] \cdot \frac{\sqrt{\epsilon}}{Z}$$

ここで  $\Delta y$  はセルサイズ、 $\Delta t$  はタイムステップ数、 $c$  は光速、 $\lambda$  は波長、 $n$  は整数、 $\epsilon$  は誘電率、 $Z$  は真空中のインピーダンスである。

##### 集光光

$$E_x(I, J) = \sqrt{\frac{W_0}{W}} \exp(-\frac{1}{W^2} \cdot ((I - \frac{1}{2} - Ispot)\Delta x)^2) \cdot \cos(\omega \cdot n \Delta t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (J - 1 - Jspot)\Delta y - \frac{\pi}{\lambda R} \cdot ((I - \frac{1}{2} - Ispot)\Delta x)^2 + \frac{1}{2} \tan^{-1}(\lambda \cdot \frac{(J - 1 - Jspot)\Delta y}{\pi W_0^2}))$$

ただし、

$$W = W_0 \sqrt{1 + (\frac{2(J - 1 - Jspot)\Delta y}{2\pi / \lambda \cdot W_0^2})^2}$$

$$W_0 = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{(\frac{1}{\sin \Delta \theta})^2 - 1}$$

ここで、 $I, J$  は解析点の  $x, y$  座標、 $Ispot, Jspot$  は集光点の  $x, y$  座標を示している。 $W_0$  はビームウェスト、 $\Delta$

$\theta$  は集光点での対物レンズの開口角で、対物レンズの NA、イメージンオイルの屈折率、平面光銅は路 (PLC) の屈折率により定まり、 $R$  は曲率半径である。

磁界  $H_z$  はファラデーの電磁誘導の法則による。

$$H_z = \frac{1}{j\omega\mu} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial y}$$

$$\frac{\partial E_x(I, J)}{\partial y} \doteq \frac{E_x(I, J\Delta y) - E_x(I, (J-1)\Delta y)}{\Delta y}$$

##### (b) 近接場光分布

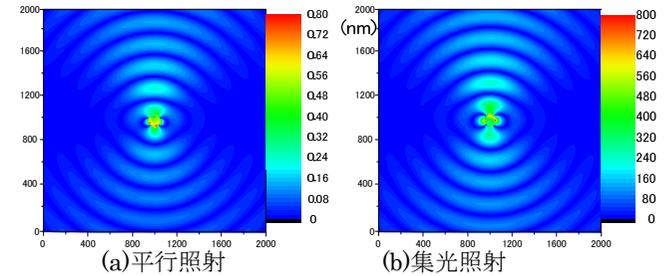


図 6 近接場光分布

##### (c) 遠方界での散乱パターン

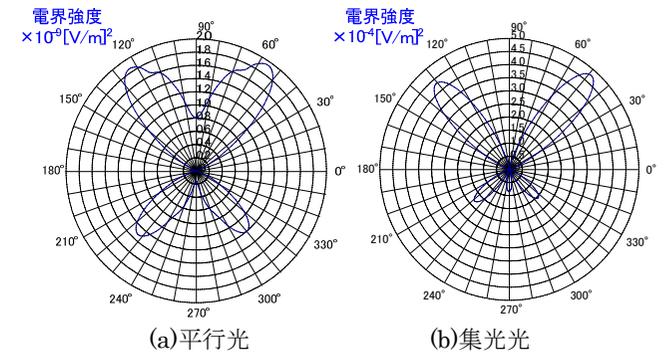


図 7 遠方界の散乱パターン

<石英系光導波路(PLC)の屈折率分布の観測>

(a) 解析モデル図

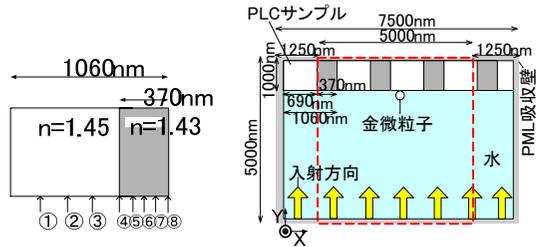
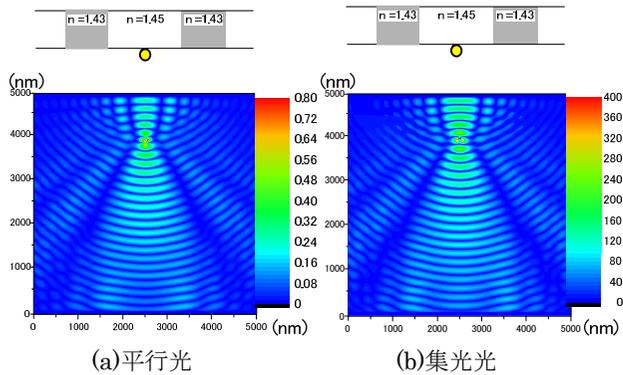


図 8 金微粒子の配置位置

図 9 解析モデル図

(b) 近接場光分布



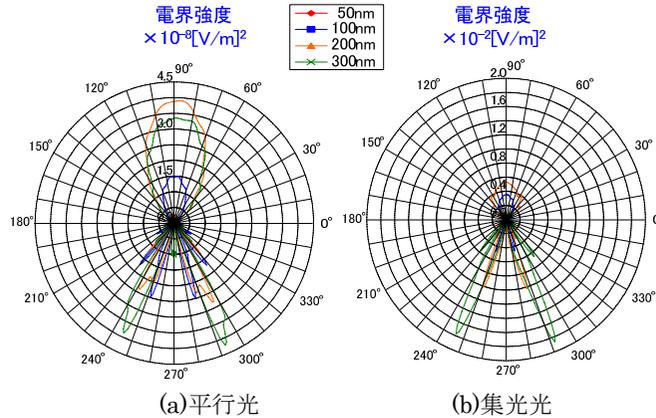
(a) 平行光

(b) 集光光

図 10 近接場光分布

(c) 遠方界 (散乱パターン)

金微粒子の粒径は、50nm (赤), 100nm (青), 200nm (オレンジ), 300nm (緑) である。



(a) 平行光

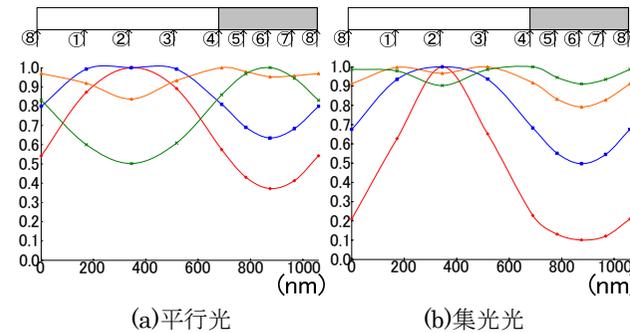
(b) 集光光

図 11 遠方界 (散乱パターン)

(d)

SNOM 信号の粒径依存性

金微粒子の粒径とともに SNOM 信号が大きくなる。また平行光から集光光にすれば、SNOM 信号が粒径 50nm で  $3.05 \times 10^4$  倍, 100nm で  $2.15 \times 10^5$  倍, 200nm で  $7.59 \times 10^5$  倍, 300nm で  $9.08 \times 10^5$  倍向上する。



(a) 平行光

(b) 集光光

図 12 SNOM 信号 (規格化)

e. SNOM 信号の分解能

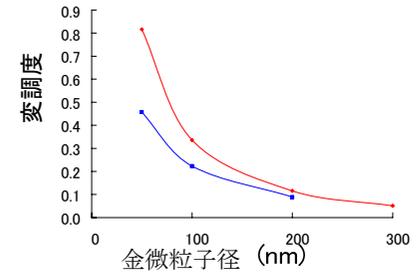


図 13 金微粒子プローブ径と変調度の関係

文献

- (1) Stefan A. Maier : Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **722**, 1-6, 2002.
- (2) 岡本隆之: 局在プラズモン共鳴の基礎, 日本分光学会テキスト, 2004, pp. 7-12
- (3) 宇野亨: FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 2002, pp. 2-223
- (4) R. Yotsutani and H. Ukita: Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Analysis of Refractive Index Grating on Planar Light Waveguide Circuit with Optically Trapped Gold Particles, Optical Review **17**, 1, 2010.