

近接場プローブと銀ナノ微粒子が作るプラズモン分布の FDTD モデル解析と近接場顕微計測

FDTD model analysis of plasmon distribution produced by near-field probe and silver nanoparticles and SNOM microscopy experiment

杉浦直子(B4), 寺田有里(M2)
N.Sugiura, Y.Terada

Abstract

We calculated plasmon distribution produced by near-field probe and silver nanoparticles with FDTD method. We changed calculation condition for the incident laser polarization and probe-sample positions. We can see the variation of probe-sample interaction by incident laser polarization. We did SNOM microscopy experiment with a chirped pulse. We could obtain SNOM mapping with both FTL pulse and chirped pulses at the same place.

1 はじめに

近年, FDTD 法による電磁界シミュレーションが盛んに行われている. FDTD 法とは, 時間領域差分法 (Finite-Difference Time-Domain Method) の略称である. 従来の差分法を時間領域まで拡張したものであり, 3 次元の Maxwell 方程式を時間と空間について差分法で解くことができる. そして, 電磁界の変動が空間を伝搬していく状態を逐次的, 過渡的に計算できる. また, モーメント法をはじめとしたスペクトル領域における各種電磁界解析法に比べて, FDTD 法にはいくつかの特徴がある.

一つ目の特徴として, 対象とする解析構造ごとに積分方程式の定式化を行う必要があるモーメント法に比べて, FDTD 法では解析構造をメッシュに分割し, その部分に既知の電気的特性を与えるだけでよい. また, 同一のアルゴリズムを用いて困難なく各種解析を行うことが可能であり, 汎用性に富んでいる.

二つ目の特徴として, 線形問題しか解くことのできない解析法に比べて, FDTD 法では非線形問題も解析可能である. そのため, FDTD 法を用いるときダイオード・FET 等の非線形デバイスの大信号特性を, 回路シミュレーションに直接取り入れることが可能である.

その他の特徴として, FDTD 法は広帯域性を有している. 1 回の計算で 1 つの周波数特性しか得られない

モーメント法に対して, FDTD 法では, 広範囲の周波数成分を含むガウス型パルスの励振源を用いれば, その計算結果に高速フーリエ変換 (FFT) を施し, 直流から数百 GHz までの広帯域な周波数特性を 1 回の計算で得ることができる.

そこで, 今回 FDTD 法による解析ソフト “Poynting” を用いて, プローブと銀ナノ粒子がフォトダイオードの表面近傍に作る近接場光の電界の様子を調べるために, 実験を簡略化したモデルを作成し, 入射光の偏光, プローブ - 試料間距離, プローブと試料の配置を変えて計算を行い, 解析を行った.

また, FDTD 法による解析結果についてまとめた後, 補足実験として行ったチャープパルスによる SNOM マッピングの結果についても示す.

2 FDTD 法の計算モデル

Fig.1 に計算モデルを示す. 今回の計算モデルでは, 入射光は CW 光を用いており, 平面から 30° の角度をつけて, 図中の矢印のように y 軸の負の方向から対物レンズでしぼって入射している. また, 実験では GaAsP フォトダイオードを基板として用いているが, 計算モデルでは, 基板に GaAs の誘電体を用いている. Fig.1 の下半分を占める立方体が, 誘電体基板を簡略化したモデルであり, この表面に到達した電界が二光子電流として検出されていると考えている. 計算モデルは 3 次元だが, 結果の画像は 2 次元なので, 図の 2 つの平面 ($z=0$ の面と $x=0$ の面) で結果を示す. $z=0$ の面の結果を (a), $x=0$ の面の結果を (b) とする. その他の計算条件として, 入射光の中心波長が 800 nm, 銀粒子 (導電率 $\sigma = 3.22 \times 10^4 \text{ Sm}^{-1}$) を半径が 50 nm の球とし, 焦点を金プローブ (導電率 $\sigma = 4.09 \times 10^4 \text{ Sm}^{-1}$) の先端にしている. 計算における空間分解能が, 銀粒子の周囲およびプローブ先端の周囲およびフォトダイオードの表面近傍は 5 nm, それ以外は 60 nm で

ある．今回の計算では，入射光の偏光，プローブ - 試料間距離，プローブと試料の配置を変えて計算を行った．(a) 図は下側が x 軸の正の方向で，右側が y 軸の正の方向である．また，(b) 図は上側が z 軸の正の方向で，右側が y 軸の正の方向である．

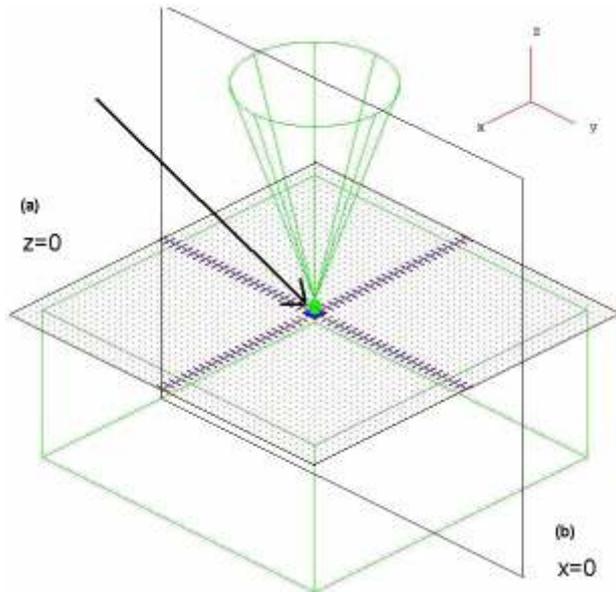


Fig.1: Calculation model

3 FDTD 法の計算結果

Fig.2(a), (b)は，銀粒子を原点に，その真上にプローブを配置し，プローブ - 試料間距離を 5nm として，入射光の偏光を，yz 平面において入射光に対し垂直になるようにしたとき（以下 P 偏光とする）の計算結果である．Fig.3(a), (b)は，Fig.2(a), (b)の状態からプローブを 5nm 上にあげた状態の計算結果である．

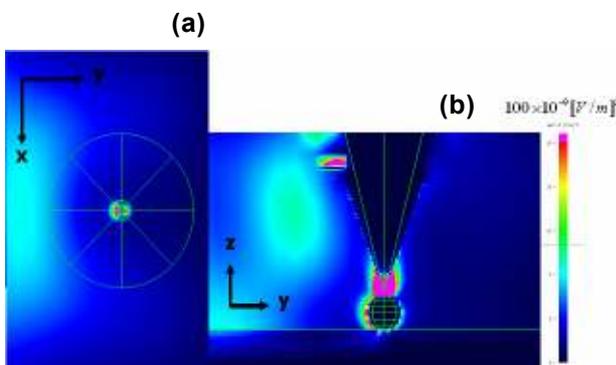


Fig.2: Calculation result (1): p-polarization, probe-sample distance is 5 nm.

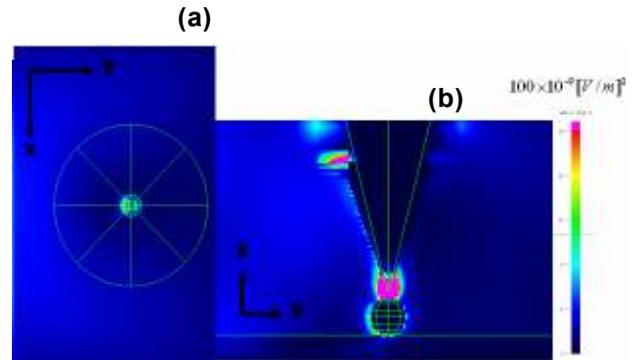


Fig.3: Calculation result (2): p-polarization, probe-sample distance is 10 nm.

また，銀粒子を原点に，その真上にプローブを配置し，プローブ - 試料間距離を 5nm として，入射光の偏光を，xz 平面において x 軸に対し平行になるようにしたとき（以下 S 偏光とする）の計算結果が Fig.4(a), (b) である．Fig.5(a), (b)は，Fig.4(a), (b)の状態からプローブを 5nm 上にあげた状態の計算結果である．

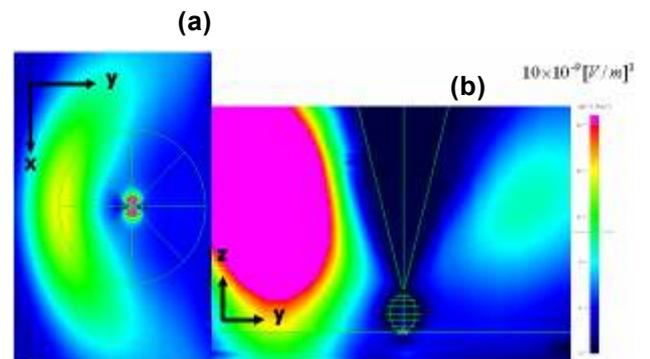


Fig.4: Calculation result (3): s-polarization, probe-sample distance is 10 nm.

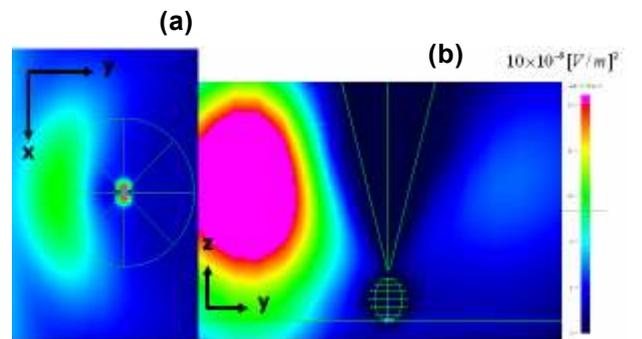


Fig.5: Calculation result (4): s-polarization, probe-sample distance is 10 nm.

Fig.2~Fig.5 の計算は、プローブが振動周波数において振動することで、近接場光が変調されている様子を調べるために行ったものである。実験系では、フォトダイオード（誘電体モデルである Fig.1 の下半分の立方体の表面）に流れ込んでくる電流を、プローブの振動周波数の2倍の周波数でロックイン検出しているため、P 偏光においては Fig.2 と Fig.3 の (a) 図の電界の差が、S 偏光においては Fig.4 と Fig.5 の (a) 図の電界の差が、二光子電流に変換されて検出されていると考えられる。また、Fig.2, Fig.3 から銀粒子とプローブ先端の相互作用により発生した電界が、銀粒子をまわりこんでフォトダイオードの表面に到達している様子がうかがえる。入射光の偏光が S 偏光のとき、P 偏光に比べて電界の強さが 1/10 以下になっており、銀粒子とプローブ先端の相互作用がとて小さいことがわかる。また、プローブと試料間の距離の違いによる電界の違いから、プローブの振動により実際に近接場光が変調されていることがわかる。

Fig.6 は、プローブの位置を試料の中心から y 軸の負の方向に 70 nm（プローブを原点に置いて試料の位置を相対的に動かしている）移動させ、入射光の偏光を P 偏光で計算したときの結果である。また、入射光の偏光を S 偏光にし、その他の条件を Fig.6 と同じにして計算した結果が Fig.7 である。

Fig.8 は、プローブの位置を試料の中心から y 軸の正の方向に 70 nm（プローブを原点に置いて試料の位置を相対的に動かしている）移動させ、入射光の偏光を P 偏光で計算したときの結果である。また、入射光の偏光を S 偏光にし、その他の条件を Fig.8 と同じにして計算した結果が Fig.9 である。

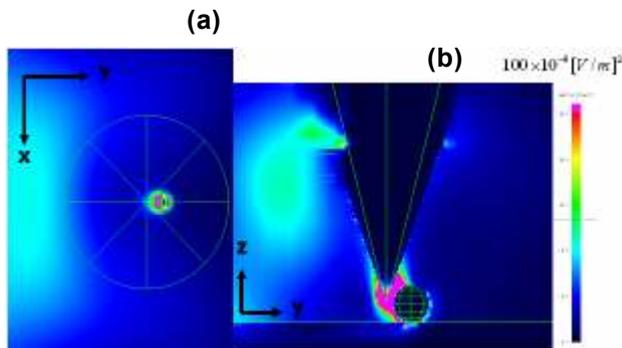


Fig.6: Calculation result (5): p-polarization, the probe is located in front of the sample.

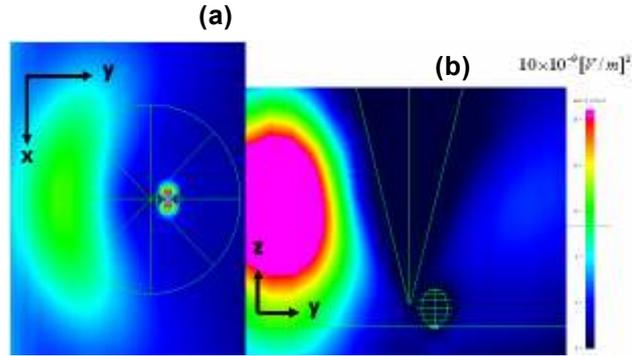


Fig.7: Calculation result (6): s-polarization, the probe is located in front of the sample.

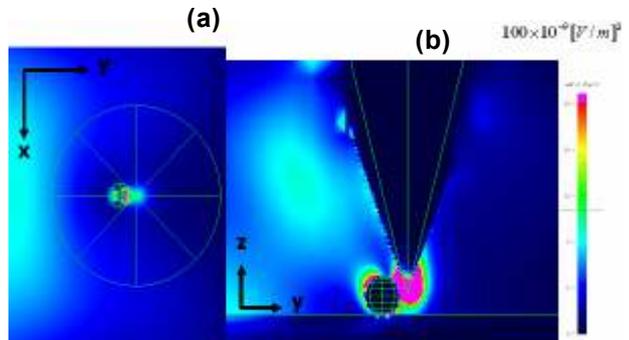


Fig.8: Calculation result (7): p-polarization, the probe is located behind the sample.

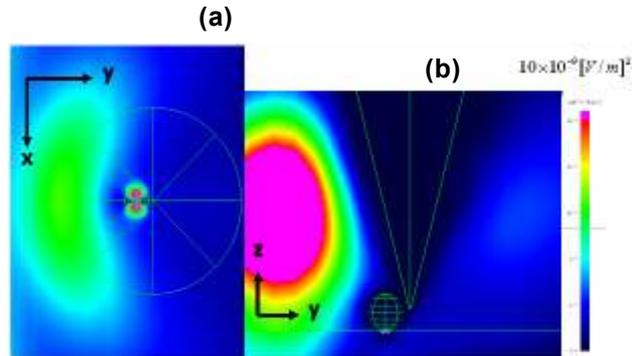


Fig.9: Calculation result (8): s-polarization, the probe is located behind the sample.

Fig.6~Fig.9 の計算は、プローブが試料の真上の位置からずれたとき、銀粒子の下に電界がまわりこむ様子を見るために行ったものである。Fig.6, Fig.8 から入射偏光が P 偏光のとき、プローブ先端と銀粒子の間に強い相互作用が起き、銀粒子の下に電界がまわりこんでいるのがわかる。また、Fig.7, Fig.9 から入射偏光が S 偏光のとき、プローブ先端と銀粒子の間の相互作用は

とても小さく、そのため銀粒子の下にまわりこむ電界が小さいことがわかる。

4 FDTD 法の結論

実験を簡略化したモデルにより、入射偏光とプローブ - 試料間の位置関係を変えて計算を行った。S 偏光に比べて P 偏光の方がプローブと銀粒子の間の相互作用が大きく、銀粒子の下にまわりこむ電界も大きいことがわかった。また P 偏光においては、プローブが銀粒子の真上に位置しなくても、銀粒子との距離が近ければ、プローブと銀粒子の間に相互作用が起り、銀粒子の下に電界がまわりこむことがわかった。

5 近接場顕微計測

ここでは、補足実験として行ったチャープパルスによる SNOM マッピングの結果について述べる。今までは、入射光を FTL パルスに限定し、測定場所を変えて近接場光のマッピングを行ってきた。今回、FTL パルスによる近接場光のマッピングを行った後、同じ範囲をチャープパルス (362 fs^2) によりマッピングすることができた。その結果が Fig.10~Fig.13 である。

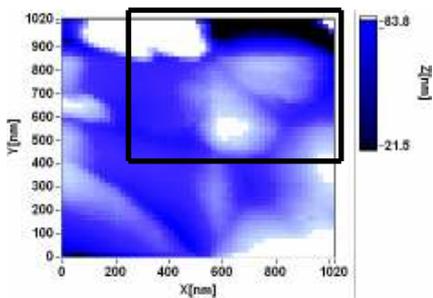


Fig.10: Topography with FTL pulse. (p-polarization)

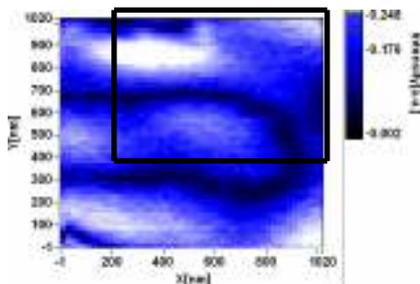


Fig.11: SNOM mapping with FTL pulse. (p-polarization)

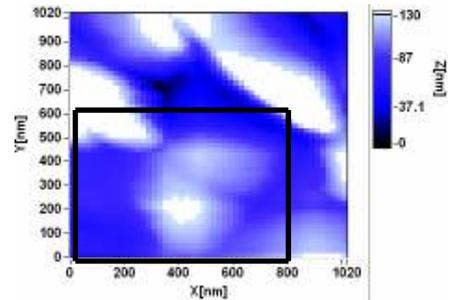


Fig.12: Topography with a chirped pulse. (p-polarization)

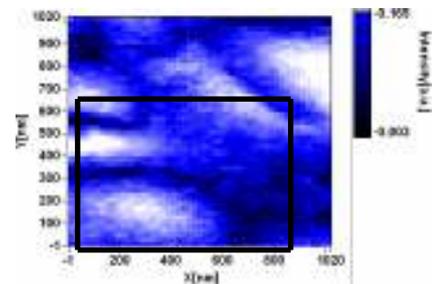


Fig.13: SNOM mapping with a chirped pulse. (p-polarization)

トポグラフィから、Fig.10 の上半分と Fig.12 の下半分が対応していることがわかる。SNOM マッピングにおいても、Fig.11 の上半分と Fig.13 の下半分を見比べると、同じように対応していることがわかり、近接場信号の強度分布の差を調べる精度をもったマッピングができたことがわかる。以上から、入射波形に変化を加えても、近接場光によるマッピングの手法が確立された。

今後は、入射波形の偏光も変えて近接場光によるマッピングを行い、近接場信号の強度分布の様子を調べ、時間波形における入射波形依存性の解析へとつなげていきたいと考えている。