

## FTD法によるガラス表面近傍における移動 ナノ粒子の光散乱特性解析

○平 佳那子 九州工業大学 情報工学部 ◎カチョーンシルアン パナート 九州工業大学 大学院情報工学研究院,  
鈴木恵介 九州工業大学 大学院情報工学研究院, 荒牧 弘親 九州工業大学大学院 情報工学府

### 要旨

現在静止した粒子におけるエバネッセント光散乱光特性について解析を行っているが、実際に観測されている水中の粒子は、1フレーム内で常に微小に移動し続けている。そこで、水中でごく微小に移動するガラス表面近傍の粒子における、エバネッセント光による散乱光特性を定性的かつ定量的に把握するため、二次元 FDTD 法を用いた数値シミュレーションを作成した。その散乱光特性の変化について解析を行ったので報告する。

### 1. はじめに

半導体産業では現在においても微細化が進み続けており、これに伴って加工単位も小さくなっている。そのため、加工物の品質の保証や、加工現象の解析における計測にも緻密さや正確さが求められており、微小単位の計測方法の一つとして、エバネッセント光を用いたナノスケールの計測方法が挙げられる。エバネッセント光を用いることで、全反射境界面から数百 nm しか存在しない局在性と電場強度が境界面から指数関数的に減少する特徴<sup>(1)</sup>により、ナノスケールで高精度の計測が可能となる。そのため観測される散乱光特性の詳細を知るための数値解析は過去にもなされてきているが、その多くは粒子が一定の場にとどまり続けることを仮定したものである。しかし実際に観測する粒子は静止し続けているわけではなく、常に微小量の移動を行っている。そこで本稿では、界面近傍に存在する単一微粒子のみに着目し、水中を垂直方向にごく微小に移動した場合のエバネッセント光の散乱光量の変化について詳細を知るため FDTD 法を用いて解析を行ったので報告する。

### 2. エバネッセント光を用いた粒子計測法

エバネッセント光とは、光を全反射させた際に低屈折率媒質側に滲み出る特殊な光である。全反射境界面から入射波の波長程度しか存在しない局在性を持ち、また染み出した光の強度は境界面から垂直方向に、指数関数的に減少していくという特徴を持つ<sup>(1)</sup>。この特徴を応用することで、界面近傍の情報のみを観察することができるほか、散乱光強度を測定することで高さの情報を得ることができる。

### 3. FDTD 法を用いた散乱光特性シミュレーション

マクスウェルの微分方程式を差分化して時間領域で解く、電磁界解析方法である FDTD(Finite Difference Time Domain)法<sup>(2)(3)</sup>を用いてシミュレーションを行った。解析領域橋からの反射を防ぐため、吸収条件に PML(Perfect Matched Layer)を用いた。

設定したパラメータを Table.1 に、シミュレーションモデルを Fig.1 に示す。微粒子の高さ  $z$  は境界面と粒子の下端との距離とする。高さ  $z$  および、粒子径  $d$  を変化させ解析を行った。

Table.1: Parameters

Wavelength : $\lambda$	nm	532
Incident angle : $\theta$	deg	60
Diameter of particle : $d$	nm	50, 100, 150
High refractive index : $n_1$		1
Low refractive index : $n_2$		1.5
Height : $z$	nm	0, 5, 10, 20, 25, 50, 100

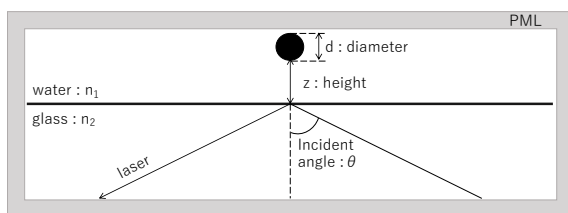


Fig.1: Analysis model (Mesh size: 5nm)

### 4. 散乱光強度の算出方法

粒子の存在しないエバネッセント場の電場分 Fig.2 (a)と粒子が存在するエバネッセント場の電場分布 Fig.2 (b)の差分の時間平均を求めることで散乱光強度を Fig.2 (c)のように算出した<sup>(4)</sup>。

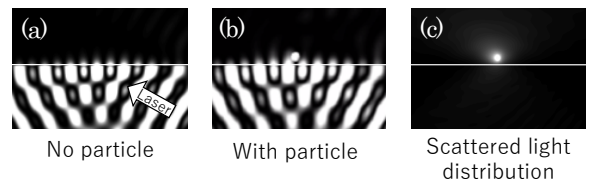


Fig.2 One example of simulation

### 5. 静止粒子の解析結果

シミュレーション結果の一例として、粒子径  $d$  が 50, 100, 150 nm の粒子それぞれについて、高さ  $z$  が 0, 50, 100 nm の場合の結果を Fig.3 に示す。次に Fig.4 に散乱光強度と高さ  $Z$  の関係を示す

Fig.3 より高さ  $Z$  が低いほど散乱光が強いことが見て取れる。

Fig.4 よりエバネッセント光の特徴である、電場強度が境界面より指数関数的に減少することが確認できた<sup>(2)</sup>。また、Fig.3 で見てとれるとおりに高さ  $z$  が大きいほど散乱光強度は強くなっており、また粒子径  $d$  は低いほど散乱光強度が強くなっていることが示されている。

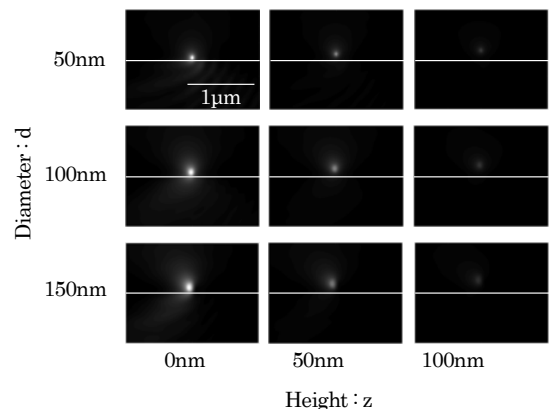


Fig.3 simulation result

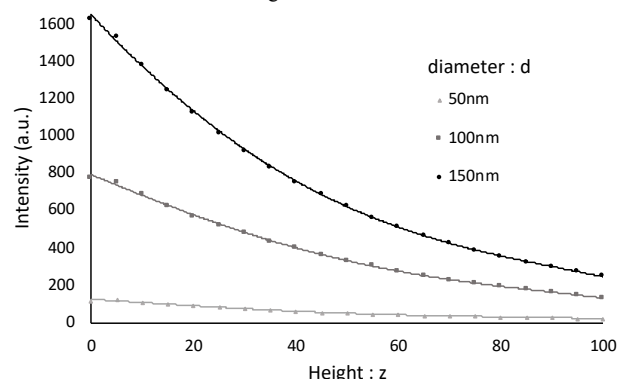


Fig.4 Relation between intensity and height

## 6. 移動粒子の散乱光強度の算出方法

今回の解析では粒子の移動は垂直方向に限定した。粒子が移動した場合の散乱光強度を高さ  $z$  を変化させて解析した結果を平均化することで算出した。

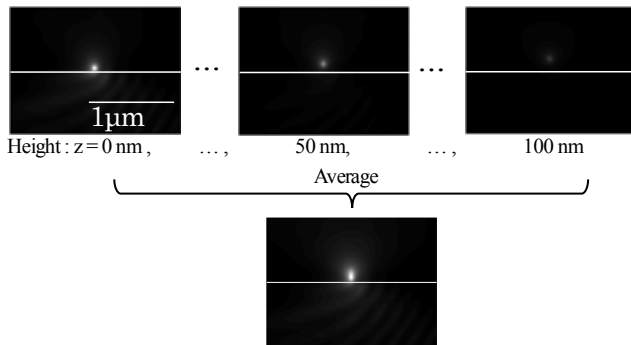


Fig.5 Scattering light of moving particle

粒子の速度は直径 105nm の粒子がおおよそ 100ms 間に 100nm 程度移動することが実験的にわかっている<sup>9)</sup>。そこで本解析では 1nm/ms で粒子が移動すると設定した。他の粒子径の粒子でも同様の速度とし、また加速度は考慮せず等速での移動を行なっているとす。散乱光量の計測時間を 100ms とした場合、移動距離は 100nm である。粒子を境界面から垂直に移動するとして、移動区間を境界面 0nm から高さ 100nm, 50nm, 25nm, 20nm, 10nm, 5nm までとすると、粒子はそれぞれの区間で Fig.6 に示すような運動を行なっていることになる。このような運動を行なった場合の粒子の区間の長さによる散乱光強度の変化を算出し、粒子径による比較を行なった。

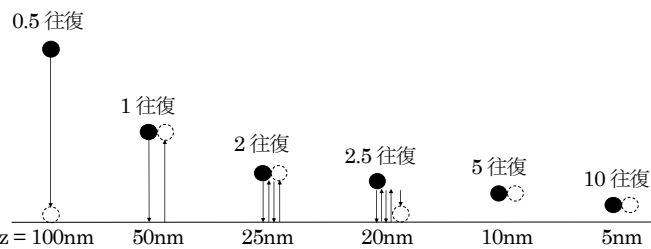


Fig.6 Particle movement in 100ms

## 7. 移動粒子の解析結果

それぞれの移動区間を移動する粒子の散乱光強度とそれぞれの高さで静止している場合の散乱光強度を、粒子の直径ごとに Fig.7 (a)から Fig.7 (c) に示した。また、Fig.7(a)から Fig.7 (c)の静止時の粒子の散乱光強度から最小二乗法を用いて指数関数を用いて近似式を求め、移動時の散乱光強度から高さを逆算した。これを用いて移動粒子の散乱光強度から見かけの高さを算出した。それぞれの移動区間ごとの移動粒子の見かけの高さを Fig.8 (a)から Fig.8 (c)に示した。

Fig.7 より移動粒子の散乱光強度は移動区間と同じだけ離れた地点で静止している粒子に比べ大きな散乱光強度となる。また Fig.8 より光強度から逆算される高さは移動距離が大きいほど大きくなる。粒子の散乱光強度は、移動区間の端で静止している粒子に比べ小さくなっており、例えば、100nm 区間移動する場合には、粒子は約 40nm の高さにあるように見られることがわかる。移動区間による粒子の高さの見え方は粒子の直径による変化は非常に小さいが、粒子が小さいほど減少量は小さくなっていることが示されている。

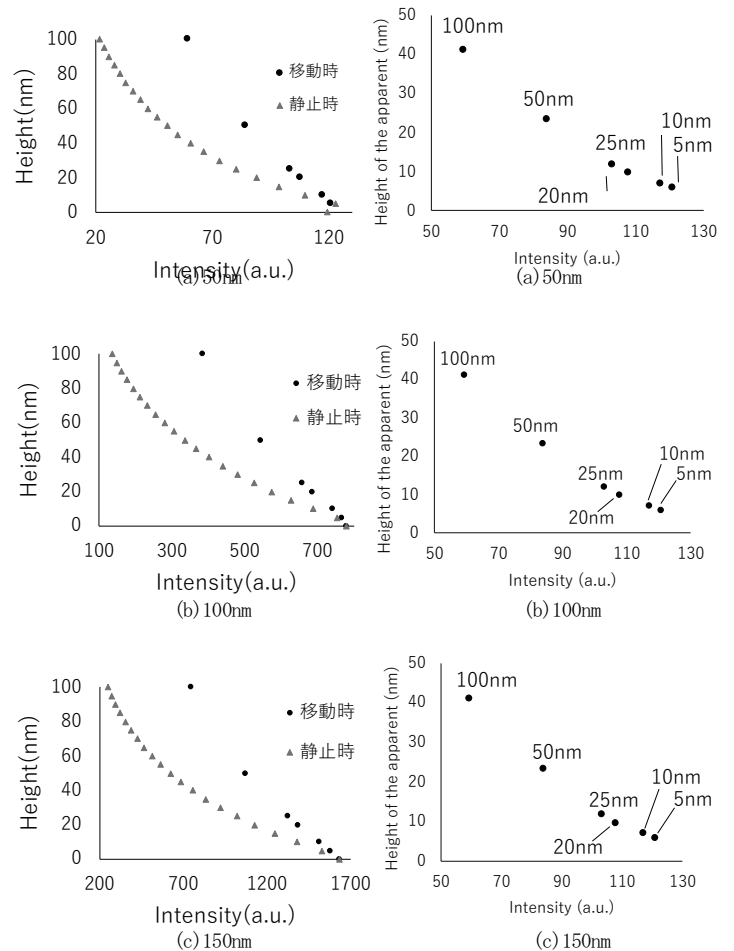


Fig.7 Relation between intensity and height

Fig.8 Observed height

## 8. まとめ

移動粒子のシミュレーションを作成し実行することで、以下のような結果が得られた。

- (1) 粒子の往復移動による散乱光強度の変化量を数値的に得ることができた。
  - (2) 散乱光強度から得られる高さについて、移動時の散乱光強度から見かけの高さを数値的に得ることができた。
  - (3) 見かけの高さの変化は、粒子の直径による違いはほぼなく、移動区間端の高さにより変化することが示された。
- 以上より、ナノ粒子が往復運動を行う場合の散乱光の特性を示すことができた。

### [参考文献]

- 1) P Khajornrungruang, S Korkmaz, P Angshuman, K Suzuki, K Kimura, S.V.Babu, Light scattering model for individual sub-100nm particle size determination in an evanescent field(2015)
- 2) 橋本修 実践 FDTD 時間領域差分法 (2006) pp.2-101
- 3) 宇野亨, 何一偉, 有馬卓司 数値電解解析のための FDTD 法-基礎と実践-(2016) pp.2-223
- 4) 杉本竜一, 工藤良太, 高橋哲, 高増潔, 白杵深, エバネッセント光を用いた界面近傍情報の三次元高分解能計測に関する研究-変調エバネッセント照明による高さ情報計測方の理論的検討- (2009)
- 5) 森田倫太郎 「エバネッセント光を用いたコロイダルシリカナノ粒子付着挙動の実時間観測」『北九州地方講演会第 19 回学生研究発表会講演論文集』(2018)