

懸濁粒子の後方散乱偏光強度分布の測定

Measurements of light backscattering polarization patterns from suspended particles

山岸 進、 村山利幸

S. Yamagishi, T. Murayama

東京海洋大学

Tokyo University of Marine Science and Technology

Abstract

This paper describes the measurements of the polarized backscattered light from a laser beam penetrating into suspended particles in the water. It is shown that the pattern is symmetrical, that it originates from second-order scattering, and higher order scattering and varies its feature according to the characteristics and concentration of particles.

1. はじめに

細いレーザビームを懸濁液水面に照射すると、入射光偏光状態と受光側検光子の組み合わせに応じたクローバ状のパターンが観測される。この画像を基に散乱前後の偏光状態を観測することによって粒子のMueller matrixを実験的に求めることができる。観測面の光強度分布は入射ビーム中心からの距離 (radial distance) と入射面からの角度 (azimuthal angle) の関数で表される。ここでは後方散乱偏光強度分布の実測値と散乱モデルを使った理論値との比較を行い、散乱粒子の特性及び多重散乱の効果を推定した。

2. 実験方法

方散乱光測定装置²⁾は、He-Ne レーザ (7mW、632.8 nm、ランダム偏光) を光源とし、懸濁試料の光照射スポット周辺を(約 8 x 8 cm) CCDカメラ (Bitran 社製, BS-40L、分解能16 bit、-5度°C冷却) で撮影し、PC に記録した。NDフィルターを用いて光量を、20000カウント以内になるように (1~5秒露光) 調整した。なお、光路設定誤差や素子の不完全さに起因する影響を確認するため試料位置で偏光状態をPolarimeter (Pax5710-vis-T: Thorlab) で測定し、補正した。

3. 結果と考察

Azimuthal 分布強度の推定: Mie 散乱のMueller Matrix の対称性が解析的に求められている⁴⁾。特に、均一球形状粒子の場合は対角要素がゼロとなり、散乱角 θ の関数として(1)

式の形で与えられる。

Rakovic 等³⁾は Mie 散乱粒子へ入射した光が散乱を繰り返して、水面上に設置した検出器で受光される光強度を理論的に解析した。これによれば、入射が水平偏光ならば、強度は

(2,3) 式で与えられる。

$$M = \begin{bmatrix} a(\theta) & b(\theta) & 0 & 0 \\ b(\theta) & a(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d(\theta) & -e(\theta) \\ 0 & 0 & e(\theta) & d(\theta) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Cross: } I_c(\rho_s, \phi) = \beta_s^2 \frac{f_0(\rho_s) + f_4(\rho_s)}{4} (1 - \cos 4\phi) \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{Parallel: } I_p(\rho_s, \phi) = \beta_s^2 \frac{3f_0(\rho_s) - f_4(\rho_s)}{4} + f_2(\rho_s) \cos 2\phi + \frac{f_0(\rho_s) + f_4(\rho_s)}{4} \cos 4\phi \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 ρ_s は散乱光が水面に到達した点から入射地点までの無次元化した水平距離、 ϕ は入射面から測った角度、 β_s は散乱係数を表す。fは散乱粒子の Mueller matrix と散乱角によって与えられる。

さらに、粒子が入射光波長に比べて十分小さい Rayleigh 散乱が適用できる場合、(1)式の要素は簡単な関数で与えられ、解析的に求めることができる。比較のため、計算結果を Fig. [1-b]、Fig2. [2-b] に図示した。

交差偏光 (HV): Fig. 1 [1-a]は、Latex標準試料(1 μ m)水溶液に水平偏光した細いビーム (直径約 2mm) を照射し、垂直検光子を通して観測した画像を強調処理したもので、4枚葉のクローバ状パターンが明瞭に現れている。中心部は入射用ミラーの穴のため欠落している、上部の細い線はOptical maskを吊るす線の像である。

左側のグラフは、[1-a]の円周上強度分布をプロットしたもので、dは入射中心からの距離 (視野角に相当する) を pixel 単位で示した。HVの特徴は、dが大きくなってもパターンが明瞭に維持されていることである。これを数値で表現するため、コントラスト¹⁾ = (Imax - Imin) / (Imax + Imin) で整理すると、ほぼ一定値を示し、理論(2)式からの予想と一致する。ここで、Imax、Iminは測定円の光強度の最大、最小を示す。濃度が非常に高いと、多重散乱による減衰が大きくパターンHV、HHとも中心部の狭い領域に限られる。

平行偏光 (HH): Fig2はHHの場合を示す。中心から離れるとコントラスト値が低くなる。これは(3)式の因子が複雑に影響していることから予想される。また、大きなピークの間際に小さな高まりが見られる。これは、粒子径が大きい場合 (x=2 π r/ λ ≈5)、Rayleigh 散乱範囲から外れたためと考えられる。より大きな粒子径試料 (15 μ m) では分布が円形を帯びてくることが示された。Latex 標準試料で測定されたMueller Matrix は(1)式

の対称性を満足しており、観測される光強度パターンは理論値と良く似ており、2次の散乱モデルでパターンの主要な特性を推定できることが示された。しかし、他の試料、例えば牛乳(市販Homogenized milk)はMueller Matrixの対称要素がゼロでないことが測定されているが²⁾、HH及びHVパターンは同じ傾向を持つことが示された。これらについてはMueller matrix 要素および2次以上の散乱効果を理論と実測からより詳細に検討する必要がある。

4. おわりに

水中懸濁粒子の後方散乱偏光画像の強度分布について検討した。理論値と実験で得られたパターンは非常に良く似ており、2次の散乱モデルでこの分布の主要な特性が推定できると考えられる。今後、より広範な試料について実測を行い、クローバ状パターンに影響する粒子特性と多重散乱効果について理論との比較検討を進めたい。本研究は文部科学省科学研究費補助金(C)の援助を受けた。

参考文献

- 1) N. Roy, G. Roy, L.R. Bissonnette, and J.R. Simard. Appl. Opt. Vol. 43, No.13,2777-2785(2004)
- 2) S.Yamagishi and T.Murayama, Proceedings of 26thLSS, Kitakyusyu-shi, 2008
- 3) M.J.Rakovic et al. Applied Optics Vol. 37, No. 15, 3399-3408(1998)
- 4) H. C. van de Hulst "Light Scattering of Light by Small Particles" Dover, 1981

Fig. 1 Azimuthal distribution of cross polarization of particles (latex $1 \mu\text{m}$). Upper right figure [1-a] shows the measured HV pattern corresponding to the graph. Lower right figure [1-b] shows the calculated pattern of HV according to the Rayleigh model.

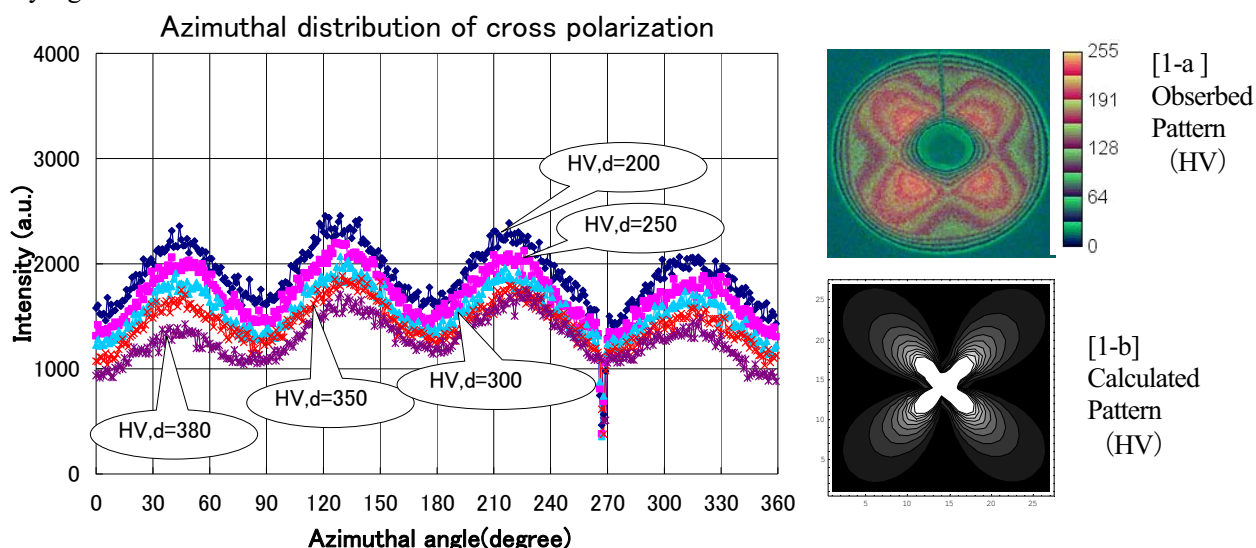


Fig. 2 Azimuthal distribution of parallel polarization of particles (latex $1 \mu\text{m}$). [2-a] shows the measured HH pattern. [2-b] shows the calculated pattern of HH according to Rayleigh case.

