

# 後方散乱ミューラー・マトリックス画像に及ぼす 懸濁粒子径と濃度の影響

Influence of particle size and concentration on the diffuse backscattering of  
Mueller matrix images from turbid media

山岸 進、村山利幸、荒川久幸

S. Yamagishi, T. Murayama and H. Arakawa

東京海洋大学

Tokyo University of Marine Science and Technology

## Abstract

We report on the experimental results that show the spatial variations of the diffuse -backscattered intensity when linearly polarized light is incident upon highly scattered media. Experiments on polystyrene sphere and plankton suspensions demonstrate that the azimuth and radial variations of the observed pattern depends on the size and concentration of the particles in the scattering medium. Measurements performed on marine planktons show the potential of this method for plankton characterization.

## 1. はじめに

海水中の微粒子光散乱について多くの研究がなされているが、懸濁粒子は極めて多様であり未解明な問題が多い。本研究は、懸濁液の後方散乱 Mueller matrix imaging を用いて粒子の散乱パラメータを推定するもので、比較的高濃度の懸濁液を測定対象としている。これまで、測定方法や誤差等について報告した<sup>1)</sup>。今回は Mueller matrix 要素に及ぼす粒子径、濃度の影響を実験的に調べ、プランクトン計測への適用について検討した。

## 2. 理論

入射光と散乱光の関係は、散乱面に対して平行な電場と垂直な電場を用いて (1) 式で表される。その偏光状態を Stokes-Vector  $\mathbf{S}=[I, Q, U, V]^T$  を用いて (2) 式で表す。入射光の  $\mathbf{S}$  が変換 (反射、透過、散乱等)

$$\begin{pmatrix} E_{lls} \\ E_{\perp ls} \end{pmatrix} = \frac{e^{ik(r-z)}}{-ikr} \begin{bmatrix} S_2 & S_3 \\ S_4 & S_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{lli} \\ E_{\perp li} \end{pmatrix} \dots (1)$$

によって  $\mathbf{S}'$  状態へ移行することを  $\mathbf{S}'=\mathbf{M}\mathbf{S}$  で表す。  $\mathbf{M}$  は Mueller matrix を表し、(3) 式で定義する<sup>2)</sup>。偏光解消度を (4) 式で示すと<sup>3)</sup>、  $m_{11}$  は無偏光入射に対する全散乱光を示し (5) 式で表され、一方、  $m_{22}$  は入射偏光方向の変化分を示し (6) 式で表される。散乱によって入射光の偏光方向が変化しない場合は (1) 式の  $S_3=S_4=0$  であり、散乱粒子が完全

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle E_{lls} E_{lls}^* + E_{\perp ls} E_{\perp ls}^* \rangle \\ \langle E_{lls} E_{lls}^* - E_{\perp ls} E_{\perp ls}^* \rangle \\ \langle E_{lls} E_{\perp ls}^* + E_{\perp ls} E_{lls}^* \rangle \\ i \langle E_{lls} E_{\perp ls}^* - E_{\perp ls} E_{lls}^* \rangle \end{pmatrix} \dots (2)$$

球対称の解に相当する、この時  $m_{11}=m_{22}$  となり、(4) 式=0 となる。いま、PSG (Polarization state generator) を用いて偏光状態  $\mathbf{S}$  に設定された入射光を、散乱体に照射し、散乱光を PSA (Polarization state Analyzer) を用いて検光することによって  $\mathbf{S}'$  が求まると、Mueller matrix 要素を算出できる。

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \frac{1}{k^2 r^2} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{pmatrix} \dots (3)$$

理論解が求まっている場合(完全球対称、円柱等)はこの結果から粒子の散乱パラメータを推定することができる。しかし、多様な形状の散乱体について一般的に解くことは困難で、測定対象について実験的な検討が必要である。

$$D = 1 - \frac{m_{22}}{m_{11}} \dots (4)$$

## 3. 実験と考察

**Mueller matrix 観測:** 偏光散乱光測定装置<sup>1)</sup> を製作し、PSG と PSA の偏光状態を適宜組み合わせることで偏光状態を観測し、Mueller Matrix 画像を求めた。データ処理の結果 Mueller

$$m_{11} = \frac{1}{2} (|S_1|^2 + |S_2|^2 + |S_3|^2 + |S_4|^2) \dots (5)$$

$$m_{22} = \frac{1}{2} (|S_1|^2 + |S_2|^2 - |S_3|^2 - |S_4|^2) \dots (6)$$

matrix 画像として Fig.2, Fig.3 の右側の画像のようなクローバ状のパターンが観測される。パターンの中心部の欠落はミラーに開けた孔と直接反射の強い入射を避けるための Optical mask の像である。装置に起因する偏光度の不完全さを抑えるため Polarimeter (Pax5710-vis-T:Thorlab) を用いて補正した。測光量を CCD の線形感度内 ( $2 \times 10^4$  カウント以内) に納まるよう ND フィルターで (0.5~30 秒露光) 調整した。

試料; 標準粒子は粒子直径  $0.5 \mu\text{m}$  polystyrene sphere (Latex) と  $15 \mu\text{m}$  Garnet を超音波で蒸留水に懸濁させて用いた。牛乳試料は市販のホモジナイズド・ミルク (平均直径は  $0.726 \mu\text{m}$ 、個数は  $89 \times 10^9/\text{ml}$ ) を用いた。プランクトンは養殖用の3種類である。 *I.galbana* ( $2\sim 4 \mu\text{m}$ ) は形状が球形に近く小さい。 *Tetraselmis tetrahele* ( $6\sim 10 \mu\text{m}$ ) は楕円形状である。 *Rotatoria Rotifer* ( $100\sim 200 \mu\text{m}$ ) は動物性プランクトンで比較的大型なものである。

**Mueller Matrix に及ぼす粒子径の影響:** Fig. 1 は、標準粒子懸濁試料を観測した画像をから求めた  $m_{12}$  要素である。グラフは、  $m_{12}$  の強度分布を、入射点を中心として試料面での直径  $5\text{cm}$  の円に沿ってプロットしたものである。粒子径が小さいと光強度振幅の大きいパターンが明瞭に現れるが、粒子径が大きいとその振幅

は小さくなる。これは粒径が波長に対して十分小さい場合、Rayleigh 散乱に近い偏光特性を示し、散乱角によって強度に大きな差がでるが、粒径が大きくなるとこの特性は失われることから推定される。Fig.2 はプランクトンについての  $m_{12}$  観測例である。I.galbana と Tetra はパターンが明瞭であるが、Roratoria (輪虫) は粒子個々が輝点として見えるようになり、パターンは不明瞭となる。

**Mueller Matrix に及ぼす濃度の影響** : Fig.3 は、牛乳試料について、光強度を希釈率に対してプロットしたものである。ここで、Parallel と Crossed とは、 $m_{22}$  を算出する前段階の値で、Parallel は PSG と PSA が同じ偏光状態での成分強度、Crossed は交差偏光状態での成分強度を表す。希釈率が大きくなると共に急速に光強度が低下するが、Parallel の方が Crossed より、パターンの特性 (偏光特性) が良く保持されている事が分かる。画像例のように、濃度が高いとパターンは中心部だけに限定され、高濃度 (ここでは希釈率が 20 倍以下) では Optical mask の像に隠れてパターンが見えなくなった。濃度が低下し、かつ中心から離れるに従いパターンが不明瞭となるので判別基準を 5% (計測誤差) とした。以上から半径方向の強度分布に及ぼす濃度の影響が分かると共に偏光解消度と濃度の関係も推定できる。

#### 4. おわりに

実測では、球形標準粒子を用いた観測でも Mueller matrix の対角要素は非常に小さくなるが、弱いパターンが残る。これは、散乱体が完全球対称ではない事、分布を持つ事、さらに実験誤差等に起因するものと考えられる。以上、後方散乱を用いた Mueller matrix imaging 手法による懸濁粒子計測はプランクトンにも有効と考えられ、より多くの試料について実測を行おうと共に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) S. Yamagishi and T. Murayama, Proceedings of 29<sup>th</sup>LSS, Nanao-shi-Ishkawa-ken 2011
- 2) C.F. Bohren, and D.R. Huffman. "Absorption and Scattering of Light by Small Particles" Wiley-VCH, 1998
- 3) S.D. Druger, J. Czege, Z. Li, and B. V. Bronk, Appl. Opt. Vol. 48, No.4, 2009

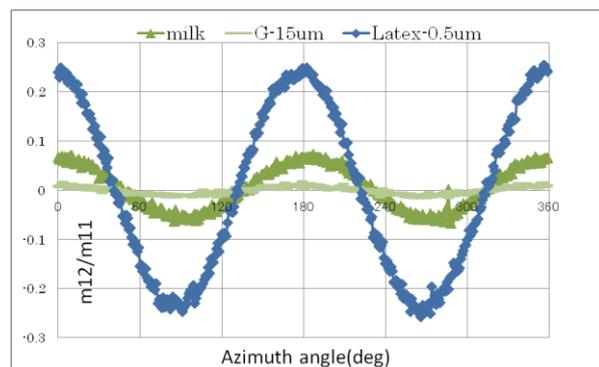


Fig. 1 Experimental backscattering Mueller matrix values of  $m_{12}$  on a ring with 3cm diameter for suspension of standard particles of  $0.5 \mu m$ ,  $15 \mu m$ , and milk.

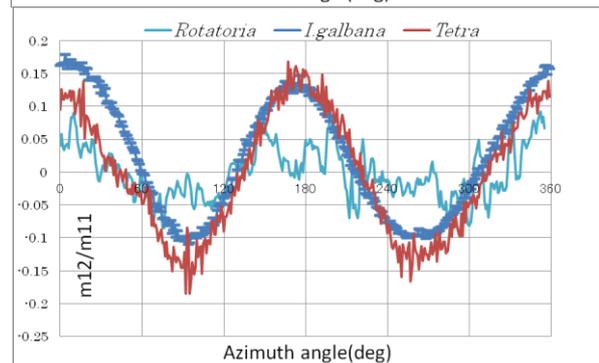
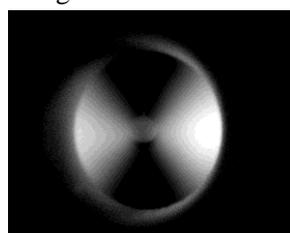


Fig.2 Experimental backscattering Mueller matrix values of  $m_{12}$  on a ring with 3cm diameter for plankton samples.

I.galbana



Roratoria

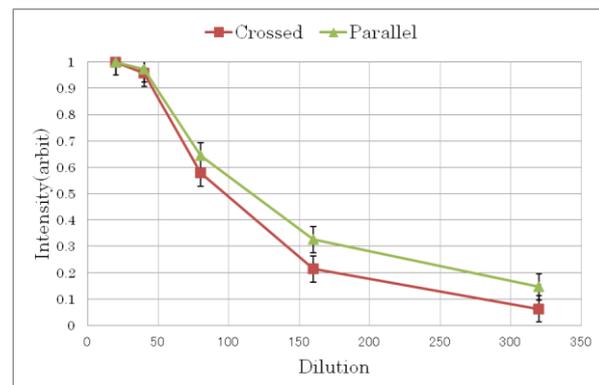
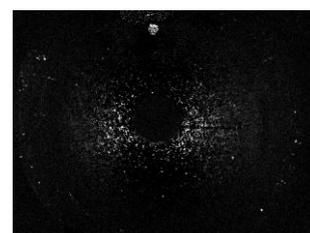
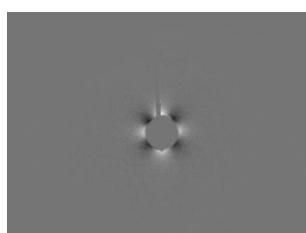


Fig.3 Intensities for the case of parallel and crossed polarizers for the homogenized milk as a function of concentration.

$m_{22}$  x20



$m_{22}$  x80

