

後方散乱 Mueller Matrix による水中懸濁物の測定

Measurements of Suspended Material in Water by Backscattering Mueller Matrix

山岸 進, 村山利幸, 森永勤

S. Yamagishi, T. Murayama, T. Morinaga

東京海洋大学

Tokyo University of Marine Science and Technology

Abstract

We present experimental results that show the spatial variation of the diffuse-backscattered intensity when polarized light is incident upon highly scattering media. Experiments on milk and plankton suspensions demonstrate that the radial and azimuthal variations of the observed pattern depend on the concentration, size, and anisotropy factor of the particles that constitute the scattering medium. Measurements performed on suspensions show the potential of the characterization for particles including plankton-cell.

1. はじめに

偏光の散乱現象は、浮遊する粒子の特性情報を得る多くの可能性を持った方法として研究されており、大気中の微粒子、海水中の懸濁粒子などに関する実験や数値計算の報告がある^{1, 2)}。また近年、バイオ関連の測定方法としても注目されている³⁾。測定は前方散乱を含めて広範な角度から散乱強度を測る方法が一般的であるが、我々は水域のリモートセンシングへの応用の観点から後方散乱⁴⁾について研究を始めた。微粒子濃度の高い液体を測定対象としており、入射光が液中で多重散乱した結果生ずる散乱光をMueller matrix で記述し、懸濁粒子の特性情報を得ようとするものである。測定は、細いレーザービームでの水面を照射して、そのスポットの周囲を画像として記録し、Matrix 要素を算出した。得られた要素は2次元像で、光強度分布は入射ビーム中心からの距離と、入射面からの角度の関数である。入射側及び受光側の偏光条件を変えることによって各種のクローバ状のパターンが現れる。ここでは、粒子濃度、サイズ、形状等がパターンに及ぼす影響を実験的に求めた。実験装置とデータ処理について述べ、プランクトン等を測定した結果を示す。

2. 実験方法

装置: 後方散乱光測定装置をFig. 1 に示す。He-Ne レーザ (5mW, 632.8 nm) を光源とし、集光レンズ (L1) により、ミラー (M1) の中心にある穴を通して試料面に集光する。この集光スポット (< 500 μm) の周辺(約 8 x 8 cm)の様子をレンズ (L2) により結像する。この中間像の位置にOptical mask (d=1 ~ 2 mm) を置いてレーザーの強い直接反射光を遮断した。中間像をレンズ系 (L3, L4) を使ってCCDカメラ (Bitran 社製, BS-40L) の画像素子上に結像した。入射側偏光素子 (PO1) をL1の前に、受光側偏光素子 (PO2)はL3 と L4 の間に設置した。CCD カメラの画像素子は8.3 x 8.3 μm, 772 x 580 Pixel, 分解能は16 bit である。PC を用いてカメラ付属のソフトでCCD を制御し、画像データの記録と処理を行った。絞り(FX) を調節し、1 ~ 5秒積分した。

試料: 参照とした懸濁液標準力オリン(柴田科学)は沈降が比較的早く、濃度を均一に保つことが難しいため、機器の調整には市販のホモジナイズド・ミルクを準標準として用いた。プランクトン試料 (*Igalbana*) は、ろ過処理された海水で培養されたもので、細胞壁の無い単細胞で、遊泳性があり、米粒に似た形状を持っている。その直径は 4 μm (モード)、粒子密度は 1.789×10^6 cells/ml (3 ~ 6 μm) である。

3. データ解析

我々はCCD 画像から散乱光の偏光特性を表す方法として、偏光解消効果も扱うことができるMueller matrix を用いた。偏光状態は、Stokes-Vector (1)式で表すことができる。ここで、Sの要素は、通常 I, Q, U, V で表記され⁵⁾、光の電場成分の時間平均値(< >)で表すことができる。E_h と E_v は散乱面に平行および垂直な向きの電場成分を示す。一般的に、光散乱による S 状態から S' 状態への変化は S' = M S (2) 式で表すことができる。Mは 4 x 4 要素を持つMueller matrix とよばれるもので、Stokes-Vector の添え字i は入射、S は散乱されたことを示す。Mueller matrix の要素が未知の場合、既知の偏光状態を作って観測することによって各要素を実験的に求めることができる⁶⁾。

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle E_h E_h^* + E_v E_v^* \rangle \\ \langle E_h E_h^* - E_v E_v^* \rangle \\ \langle E_h E_v^* + E_v E_h^* \rangle \\ \langle i(E_h E_h^* - E_v E_v^*) \rangle \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot (1)$$

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}_s = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}_i \cdot \dots \cdot (2)$$

4. 実験結果

濃度の影響 : Fig. 2 は濃度の異なる試料をクロス偏光素子 (OP1:H, OP2:V) で測定したものである。水平偏光 (H) した入射光による散乱を垂直偏光素子(V) を通して観測すると、(b), (c)では4枚葉のクローバ状パターンが見られるが、(a) では同心円状の分布しか観測されない。これは、高濃度試料による多重散乱のため偏光解消が進み、パターンが観測されないもので、中心部の非常に狭い範囲のため Optical mask に隠されたと考えられる。なお、円の上半分の途切れは Optical mask を吊るしている針金によるものである。濃度による変化は偏光素子を入れない光強度の測定でも (M11) でも半径方向に Exponential 状の減衰が観測されるが、偏光を用いるとより明瞭にパターンとして変化が現れている。

プランクトン : Fig. 3 はプランクトン試料における Mueller matrix 要素 M22 と M44 の画像である。M22 は画像的に $\{(HH+VV)-(HV+VH)\}/4$ の演算を行って求めたものである。H は水平偏光、V は垂直偏光を示し、HH は入射側、受光側両方水平偏光で観測した事を示す。このパターンは milk 試料に比べて円周周りの変化が大きく、粒子径が大きい場合の特徴を示している。円偏光に関連した M44 も演算結果で milk 同様円周周りの変化が小さい。しかし、わずかに偏光パターンが残っていることは装置の誤差が混入していると考えられる。他の円偏光に関連した要素の値も非常に小さい事が示され、球形に近い形状であることが実験的に確認された。

5. おわりに

水中懸濁粒子の後方散乱観測を行い、半径方向、円周方向に変化する2次元パターンを取得でき、これから実験的に Mueller matrix の要素を求め、懸濁粒子の偏光特性を表すことができた。パターンは、濃度、粒径により変化することが示された。測定したプランクトンは円偏光に対する matrix 要素が小さい値であり、形状が球に近いことが示された。この方法で実試料の計測を行い、理論値との比較を進める予定である。

参考文献

- 1) Alexei Kouzoubov et al., Appl. Opt. Vol.37, 3873-3885(1998)
- 2) S.Bartel and A. H. Hielsher, Appl.Opt. Vol.39, No.10, 1580-1588(2000).
- 3) K.J. Voss and E. S. Fry, Appl. Opt. Vol.23,4427-4439(1984)
- 4) M.I.Mishichenco, J.Opt.Soc. Am.A8,871-882(1991)
- 5) C.F.Bohren and D.R.Huffman, "Absorption and Scattering of Light by Small Particles", WILEY-VCH,2004
- 6) W.S.Bickel and W.M.Bailey, Am.J. Phys. 53,468-478(1985)

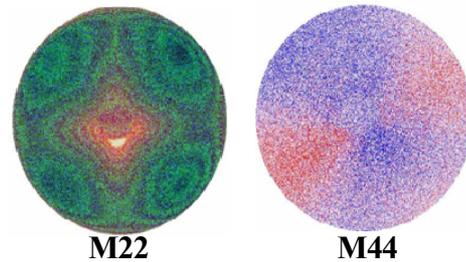
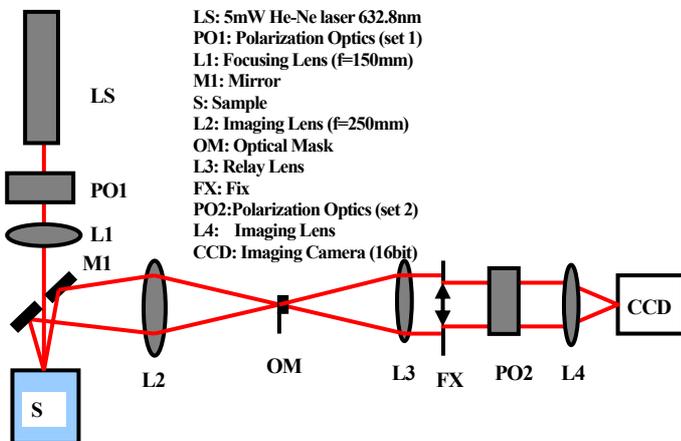


Fig.3 Experimental backscattering Mueller matrix for Plankton (*I.galbana*). Each image displays 8 cm in diameter area of the surface..

Fig. 1 Experimental setup for measuring diffuse-backscattered polarized light

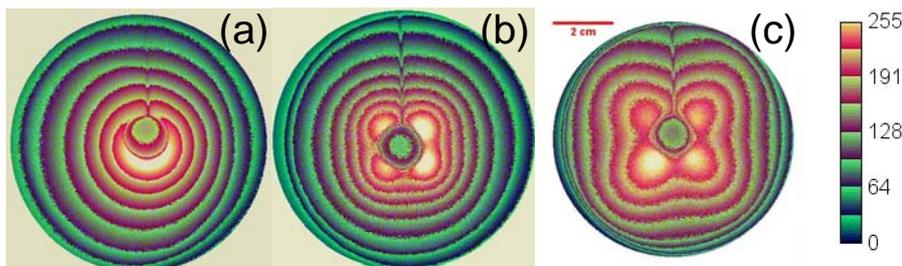


Fig. 2 Image of diffuse-backscattered intensity from homogenized milk taken crossed polarizer of LP1 and LP2. Sample is diluted by water: (a)x5, (b)x50, (c)x125. The scale bar of 2 cm in figure corresponds 100 pixels.