

懸濁液の後方散乱偏光解消度の測定

Depolarization measurements of light backscattering polarization in turbid media

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

We report on the measurements of the polarized backscattered light from a laser beam penetrating into highly scattering media. Using Stokes-Mueller formalism and experiments, it is shown that these patterns can be used to differentiate turbid media, such as polystyrene-sphere and milk suspensions. Our technique employs polarized light from a He-Ne laser(633nm), which is focused onto the surface of scattering medium. A surface area of 8cm diameter is imaged on CCD camera.

1. はじめに

偏光の散乱現象は、粒子の特性を非接触で知る方法として、大気中の微粒子、バイオ関連で広く研究されている。微粒子濃度の高い液体を測定対象としており、入射光が液中で散乱光を経て出てくる光を観測し、懸濁している粒子の特性情報Mueller matrix を用いて記述しようとするものである。これまで、測定方法や誤差等について報告した。ここではMueller matrix 要素に及ぼす粒子径、濃度の影響を偏光特性の観点から実験的に求め、偏光特性と多重散乱の効果を推定した。

2. 実験方法

偏光散乱光測定装置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(直径約 8 cm) CCDカメラ (Bitran 社製、BS-40L、分解能16 bit、-8度°C冷却) で撮影し、デジタル記録した。装置による偏光度の不完全さの影響は、Polarimeter (Pax5710-vis-T : Thorlab) を用いてビーム状態を測定し補正した。測光量を CCD の線形感度内 (2×10^4 カウント以内) に納まるよう ND フィルターを用いて (1~30秒露光) 調整した。標準粒子としては polystyrene sphere の粒子直径 $0.3 \mu\text{m}$ と $5 \mu\text{m}$ のものを使用し、超音波で懸濁させた。牛乳試料は市販のホモジナイズド・ミルクを用いた。粒子直径は $1 \mu\text{m}$ (モード) である。

3. 結果と考察

偏光状態を Stokes-Vector $\mathbf{S}=[S_0, S_1, S_2, S_3]^T$ を用いて表す。S は PSA (Polarization state Analyzer) 用いて測定された光強度 (W/m^2) によって(1)式のように定義される。ここで、 P_H 、 P_V 、 P_{45} 、 P_{135} 、 P_R 、 P_L は水平、垂直、45度直線偏光、135度直線偏光、右回転、左回転の PSA を用いて測定した光強度を示す。S 状態の入射光が変換 (反射、透過、散乱等) によって S' 状態へ移行した場合、 $\mathbf{S}'=\mathbf{M}\mathbf{S}$ と表すことができる。M は Mueller matrix を示し、(2) 式で定義した 4 x 4 要素を持つこととする。全偏光度は DOP は Stokes-Vector 要素によって(3)式で表される。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_H + P_V \\ P_H - P_V \\ P_{45} - P_{135} \\ P_R - P_L \end{bmatrix} \dots (1)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \dots (2)$$

Mueller matrix 要素の算出 : 実験的に M の要素は求めるには、入射光の偏光状態 S を PSG (Polarization state generator) で作り、出力光 S' を PSA で観測することによって、算出することができる⁴⁾。例えば、H/H、V/H、H/V、V/V の組み合わせについて得た測定値を P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 とすれば、 $m_{00} = P_0 + P_1 + P_2 + P_3$ 、 $m_{01} = P_0 + P_1 - P_2 - P_3$ 、 $m_{10} = P_0 - P_1 + P_2 - P_3$ 、 $m_{11} = P_0 - P_1 - P_2 + P_3$ となる。同様に他の偏光状態の組み合わせを用いて 16 要素を決定する事ができる。

$$DOP = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} / s_0 \dots (3)$$

Mueller matrix 観測結果 : 懸濁した試料に、PSG を通した細い偏光ビーム (直径約 2mm) を照射し、PSA を通して観測した画像をから求めた。標準粒子 Polystyrene の場合、直線偏光に関する要素 ($m_{00} \sim m_{11}$) にクローバ状のパターンが観測される。しかし、円偏光に関する要素 (m_{03} の列、 m_{30} の行) は円偏光度がゼロに近い値を示し、光学活性度 (chiral) を持たない粒子の特徴が現れている。一方、懸濁液として牛乳を試料とした場合、円偏光に関する要素にもパターンが見られる。これは、牛乳の成分中に光学活性度を持つ粒子が含まれているためと考えられる。なお、糖度の影響は、Glucose を加えても変化がほとんど無い事から、溶液の影響は小さいと考えられる。DOP は、牛乳 1250 倍希釈試料 (5cm) で 100% であった。

Mueller Matrix 要素に及ぼす粒子径の影響 : Fig. 1 は、Polystyrene 標準粒子懸濁試料を観測した画像をから求めた m_{01} 要素である。クローバ状パターンの中心部は入射光の表面直接反射を避ける Optical mask のため欠落

している。左のグラフは、 m_{01} の強度分布を、入射点を中心として試料面での直径4cm の円周上に沿ってプロットしたものである。粒子径小さいと m_{01} のパターンは明瞭に現れるが、粒子径が大きいとほとんどゼロとなる。これは入射光に対する単独粒子の散乱特性（Phase function）、即ち、波長に対して粒径が小さい場合 Rayleigh 散乱に近い偏光特性を示すが、粒子径が大きくなるとこの特性は失われることから推定できる。

Mueller Matrix 要素に及ぼす濃度の影響 : Fig.2 は、 m_{11} の円周強度分布を異なる希釈倍率の牛乳についてプロットしたものである。縦軸は m_{11} を m_{00} で基準化した値を示す。濃度が高いと多重散乱により偏光解消が進み、狭い範囲で偏光特性が失われ値は小さくなる。より濃度が高いと、パターンは中心部の狭い領域に限られ、Optical mask に隠れてしまう。希釈率が高いと偏光解消度が小さく偏光特性はより広い範囲で保持されていることを示している。

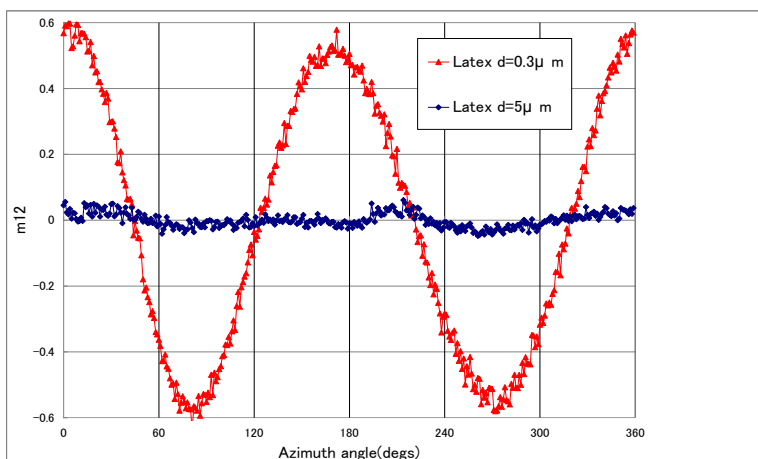
4. おわりに

懸濁液の後方散乱偏光画像から Mueller matrix を求め、粒子の大きさ、濃度等の特性が matrix 要素に及ぼす影響を検討した。今後、海洋試料について実測を行い、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。

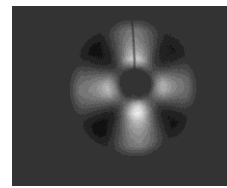
参考文献

- 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 28thLSS, Ogoto-Shiga 2010
- 3) X. Wang, G. Yao, and L. V. Wang. Applied Optics Vol. 41, No.4, 792-800(2002)
- 4) C.F. Bohren, and D.R. Huffman. "Absorption and Scattering of Light by Small Particles" Wiley-VCH, 1998

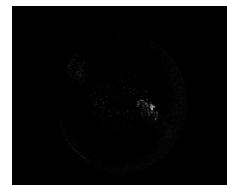
Fig. 1 Experimental backscattering Mueller matrix values of m_{01} on ring with 3cm diameter for suspension of polystyrene particles of $0.3 \mu\text{m}$ and $5 \mu\text{m}$.



Effects of

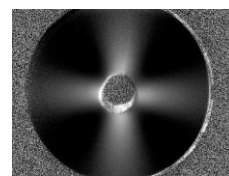
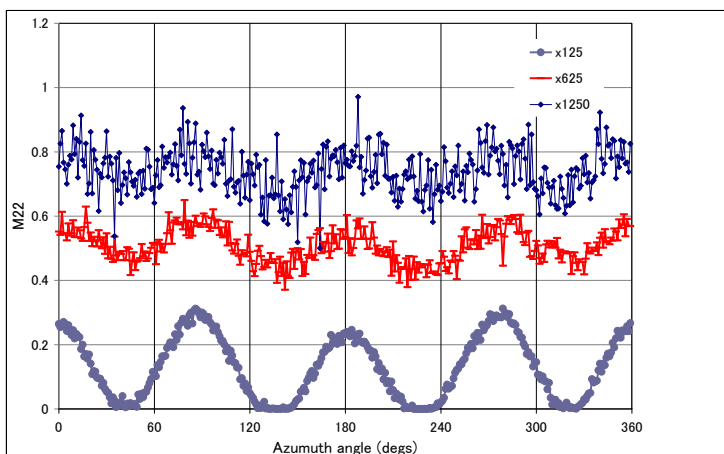


[1-a]
 m_{01} for a $0.3 \mu\text{m}$ diameter polystyrene-sphere.

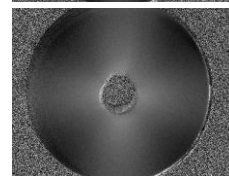


[1-b]
 m_{01} for a $5 \mu\text{m}$ diameter

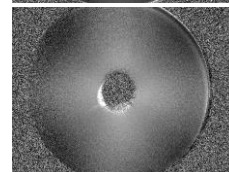
Fig. 2 Experimental backscattering Mueller matrix values of m_{22} on ring with 4cm diameter for suspension of milk. Each line corresponds to different dilution ratio of samples.



[2-a]
 m_{11} for milk x125



. m_{11} for milk x625



m_{11} for milk x1250