

# 後方散乱偏光画像を用いたプランクトン計測

Back scattering Mueller matrix imaging applied to plankton measurements

山岸 進、成田美穂、荒川久幸、村山利幸  
S. Yamagishi, M. Narita, H. Arakawa, and T. Murayama

東京海洋大学  
Tokyo University of Marine Science and Technology

## Abstract

Measurements of turbid media using a backscattering Mueller matrix imaging have been applied to monitor the growth process of phytoplankton. Noticeable variations were found for depolarization ratio and matrix elements during the growth process.

## 1. はじめに

Mueller Matrix を用いた偏光計測は、大気、生体、微粒子等広範な計測手段として活発に研究が進められている。海洋分野では海水の光学的特性を、Voss<sup>2)</sup>等はミューラー行列を用いて計測した。Sevensen<sup>3)</sup>等は、形状、大きさ、細胞壁、屈折率に特徴を持つプランクトンを選び、ミューラー行列要素にどのような影響を与えるかを実験的に調べ、m11、m12、m33、m44等の比較的大きな変化が表れることを示した。

我々は、後方散乱光を用いた方法が、測定対象を“その場”(In-situ)計測に好都合であることから、プランクトン増殖過程のモニターに適すると考え、珪藻類フェオダクチュラム(*Phaeodactylum tricorutum*)の培養について計測を試みている<sup>4)</sup>。本報は、偏光解消度へ影響を及ぼす微粒子散乱特性の抽出について検討した。

## 2. 理論

偏光状態をStokes-Vector  $\mathbf{S}=[I, Q, U, V]^T$  を用いて表す。入射光の $\mathbf{S}_i$ が変換(散乱)により $\mathbf{S}_s$ 状態へ移行する過程を $\mathbf{S}_s=\mathbf{M}\mathbf{S}_i$ で表す。 $\mathbf{M}$ はMueller matrixを表し、(1)式中の4x4行列で<sup>2)</sup>、偏光解消度(Depolarization ratio)を(2)式で定義する。PSG(Polarization state generator)を用いて偏光状態 $\mathbf{S}_i$ に設定された入射光を照射し、散乱光をPSA(Polarization state Analyzer)を用いて検光することによって $\mathbf{S}_s$ を求めて、Mueller matrix imageを算出し、実験的に散乱体の偏光特性を推定する。

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

$$Dep = 1 - \frac{m_{22}}{m_{11}} \quad (2)$$

## 3. 実験と考察

**Mueller matrix 測定装置:** 偏光散乱光測定装置は、He-Ne(632nm、無偏光)を光源とし、PSGとPSAの偏光状態を組み合わせて偏光状態をCCDカメラで記録し、Mueller Matrixを求めた。装置の偏光度の不完全さを抑制するためPSG直前に偏光解消素子を設置した。要素値は、ビーム入射点を中心とする環状(散乱角度177°相当)部分の平均値である。

**プランクトン試料:** 珪藻類フェオダクチュラム(*Phaeodactylum tricorutum*)は、養殖初期飼料として広く用いられ、紡錘形(幅約12 $\mu\text{m}$ 、長さ約50 $\mu\text{m}$ )をしており、無性生殖(2分裂)で増えるがサイズの低下を伴わない。また、珪藻でありながら、細胞壁はほとんど珪酸化されていないとされている。比較のため次の3種類;デュナリエラ(*Dunaliella*)、テトラセルミス(*Tetraselmis*)、ナンノクロプシス(*Nannochloropsis*)も測定した。偏光測定では試料を希釈せずそのまま測定した。**細胞数測定:** Coulter Counterを用いて粒径、個数濃度等を比較参考に測定した。

### 考察:

フェオダクチュラム増殖過程履歴 **Fig.1**はMueller matrix より求めた偏光パラメータとCoulter counter の測定値を縦軸にとり、横軸に経過時間をとってプロットしたものである。Dep と粒径(Praticle diameter)、表面積(Surface Area)は、特に、培養初期には高い相関を示した。増殖後半(14days過ぎ)には相関が崩れ、表面積は急増するが、Depは緩やかな増加から低下に転じた。同時に求めたm12の画像を増殖前半比較すると、後半ではコントラストが低下し、粒形が大きくなっていることが推定される。またm12の画像が粗くなっていた。この時期の顕微鏡写真(**Fig.2**)によって、塊直径149 $\mu\text{m}$ 以上の細胞凝集が確認されており、**Fig.1**の相関の崩れた時期と照合する。**Fig.3**は他のプランクトンについて、Muller matrix 要素とCoulter counter の測定値を比較したものである。ここで取り上げた要素、m12は粒子径に<sup>5)</sup>、m34は非球形の度合いに大きく影響され、m44は粒子径が小さいと絶対値は小さく、m33とm44の差は非球形度合いを示すことが実験及びシミュレーション研究により明らかにされている。比較に取り上げたプランクトン試料についての各要素の差は密度、粒子径、非球形度等の相違を表していると考えられる。増殖過程履歴 **Fig. 1** で取り上げた偏光解消度(Dep)はこれらによって影響を受けると考えられるので、Dep の変化の内容を対応する要素を分析することにより詳細に推定することができる。

#### 4. おわりに

後方散乱を用いて Mueller matrix imaging による計測を行い、要素に及ぼす粒子径、濃度の影響を実験的に調べた。偏光解消度 (Dep) は状態変化を把握することができるプランクトンモニターとして有効な指標と考えられる。これは、衝突頻度 (濃度)、粒子サイズ、形状等の影響を受けると考えられ、今後、Mueller matrix imaging によりプランクトンの特性を分離評価する方法を開発検証して行きたい。

#### 参考文献

- 1) C. F. Bohren and D. R. Huffman, "Absorption and Scattering of Light by Small Particles," (Wiley, New York, 1983)
- 2) K. J. Voss and E. S. Fry, "Measurement of the Mueller matrix for Ocean water," Appl. Opt. 23, (1984) 4427-4439
- 3) Ø. Sevensen, J. J. Stamme, M. Kidemo, L. M. Sandvik Aas, S. R. Erga, and Ø. Frette, "Mueller matrix measurements of algae with different shape and size distributions," Appl. Opt. 50, (2011) 5149-5157
- 4) S. Yamagishi, M. Narita, H. Arakawa, and T. Murayama, "Measurements of Suspended Material in Water by Mueller Matrix Imaging," Proc. of LSS32, (2014) 98-99
- 5) S. Bartel and A. H. Hielsher, "Monte Carlo simulations of the diffuse backscattering Mueller matrix for highly scattering media," Appl. Opt. 39, (2000) 1580-1588.

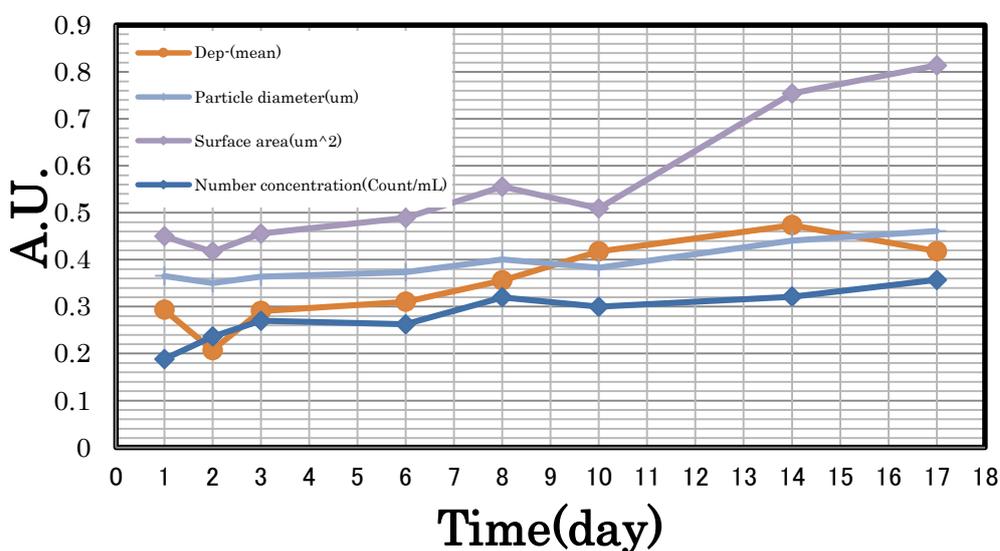


Fig.1 Growth process of *Phaeodactylum tricornutum*



Fig.2 Photo of Coagulation status of *Phaeodactylum*

Marked item is 149  $\mu$  m in diameter.

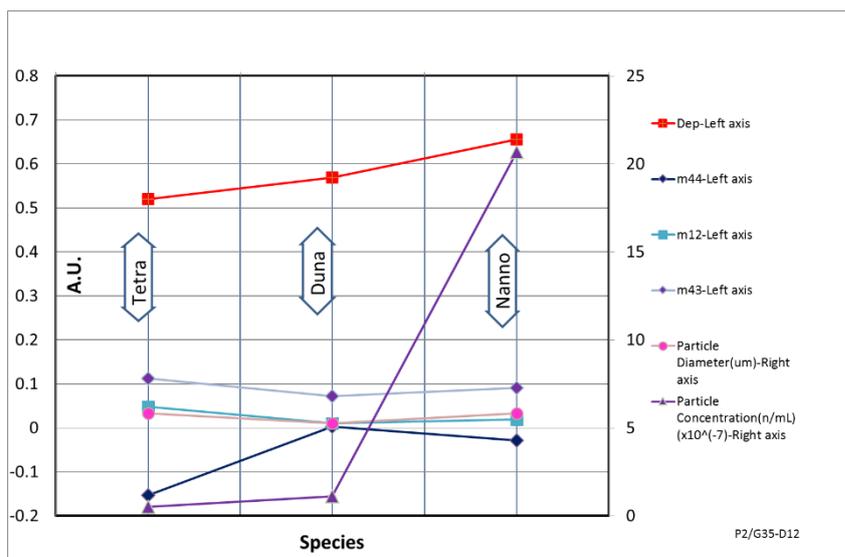


Fig.3 Mueller matrix elements of 3 kinds of Plankton compared with Coulter Counter measurements.