

ミュラー・マトリクスを用いた水中懸濁粒子の計測 (プランクトン増殖過程の観測)

Measurements of Suspended Material in Water by Mueller Matrix Imaging
(Observation of a plankton growth process)

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

We report the experimental analysis of Mueller matrix imaging on plankton suspensions of growth process. Measured polarization parameters are compared with Coulter counter values. Results show the potential of in-situ characterization of plankton growth status.

1. はじめに

海水中懸濁粒子は極めて多様であり、生態を計測には難しい問題が多い。本研究は、懸濁液の後方散乱特性を Mueller matrix imaging を用いて観測して、粒子の特性を推定するもので、比較的高濃度の懸濁液を測定対象としている。これまで、粒子濃度、サイズ、形状等の影響を実験的に調べてきたが、Matrix 要素から直接偏光特性を抽出するには限界があるため、Mueller matrix要素全体 (4 x 4) を対象として分析を試みた。測定では、養殖初期飼料として広く用いられる珪藻類プランクトン (*Phaeodactylum tricornutum*) 増殖過程を追跡し、他の手法による測定値(Coulter counter)との相関を調べた。

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) 式で定義する。また、散乱体の偏光特性である複減衰を(2)式、偏光能を(3)式、偏光解消度を(4)式で表す⁽¹⁾。Mueller matrixを実験的に求めるにはPSG (Polarization state generator)を通して既知の偏光状態 \mathbf{S}_i の入射光を作り、懸濁試料に照射し、散乱光をPSA (Polarization state Analyzer)を通して \mathbf{S}_s を画像記録して、Mueller matrixを算出した。

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

$$d = \frac{1}{m_{11}} \sqrt{m_{12}^2 + m_{13}^2 + m_{14}^2} \dots (2)$$

$$p = \frac{1}{m_{11}} \sqrt{m_{21}^2 + m_{31}^2 + m_{41}^2} \dots (3)$$

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

3. 実験と考察

Mueller matrix 測定装置: 偏光散乱光測定装置を作成した⁽²⁾。

装置に起因する偏光度の不完全さを抑えるためPSG 直前に

偏光解消素子を設置し、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フィルターで (0.5~30秒露光) 調整した。培養試料はそのままの状態を容器に移して計測した。また、標準粒子(直径 $0.5 \mu\text{m}$ Polystyrene :Latex) を蒸留水に懸濁させたものを参照データとした。

プランクトン試料: 供試プランクトンは珪藻類*Phaeodactylum tricornutum*で、紡錘形(幅約 $12 \mu\text{m}$,長さ約 $50 \mu\text{m}$)をしている。培養に当たっては滅菌処理した容器、培地を用い、温度、光量を管理した培養庫で増殖した。細胞数計測にはCoulter Counterを用いて粒径、個数濃度等を測定した。

考察:

(a) Fig.1は観測したMueller matrix 要素(m_{11} で正規化した)を示す。値は、ビーム入射点を中心とする環状(外径150、内径145Pixel、10.3Pixel/mm)部分の平均値である。プロファイルを標準粒子に比較する、プランクトンは m_{12} 、 m_{21} の絶対値が小さく、粒径が大きい特徴を示している。また、 m_{44} が大きな値を示している。

(b) Fig.2は m_{12} の画像を比較したもので、培養開始から2日目と14日目(Pha(2day)とPha(14day))ではコントラストに大きな差が見られ、経過時間とともに大きな粒子が増え、画像が粗くなっている事が分かる。顕微鏡写真によって、増殖安定期を過ぎて、後半(14days)には $200 \mu\text{m}$ 以上の細胞凝集状態が現れたことが確認されており、Fig.2の結果と良く照合する。

(c) Fig.3は増殖過程履歴を示す。Mueller matrix より求めた偏光パラメータとCoulter counter の測定値を比較するため、夫々一定係数を掛けた値を縦軸にとり、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)は高い相関を示している事が分かる。特に、培養初期に見られる、値が一旦低下してから上昇する過程が良く表われている。d, p は粒子個々の特性を示すものと考えられるが、より詳細な検討が必要である。

4. おわりに

プランクトン増殖過程を対象に後方散乱を用いた Mueller matrix imaging 手法により、粒子径、濃度、形状等の変化を実験的に調べた。観測結果、抽出された偏光特性と Coulter counters 測定値に高い相関がある事が示された。

今後、マトリクス各要素について更に詳細な検討を進めると共に他のプランクトンについても調べ、In-situ 計測法としての有効性を確認したい。

参考文献

1. C.F. Bohren, and D.R. Huffman. "Absorption and Scattering of Light by Small Particles" Wiley-VCH, 199
2. S. Yamagishi and T. Murayama, H. Arakawa, Proceedings of LSS30, 2012

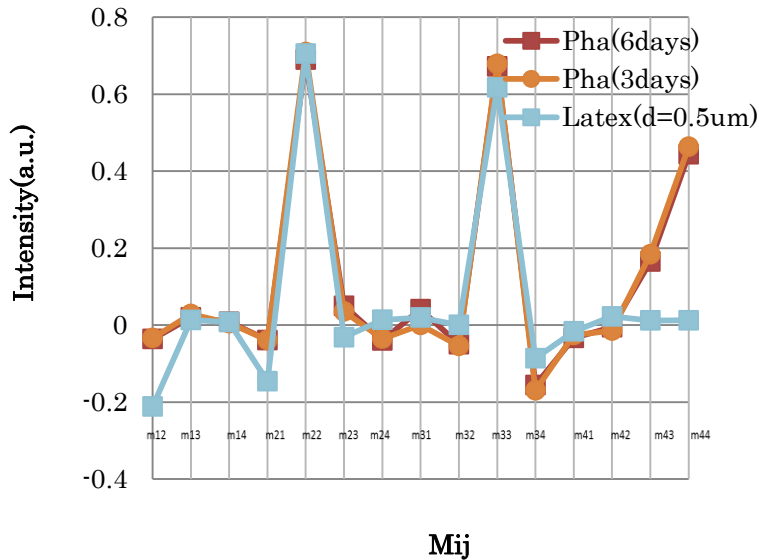


Fig.1 Mueller matrix elements of *Phaeodactylum tricornerutum*
Each element is normlized by m11.

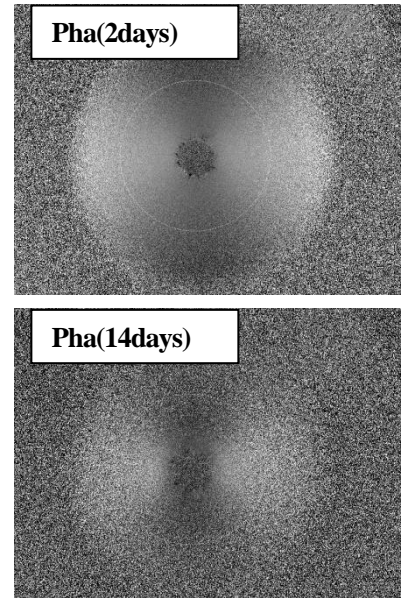


Fig.2 Comparison of m12 images
Image of early stage is much clear than the last stage that correspond s to smaller diameter of cells.

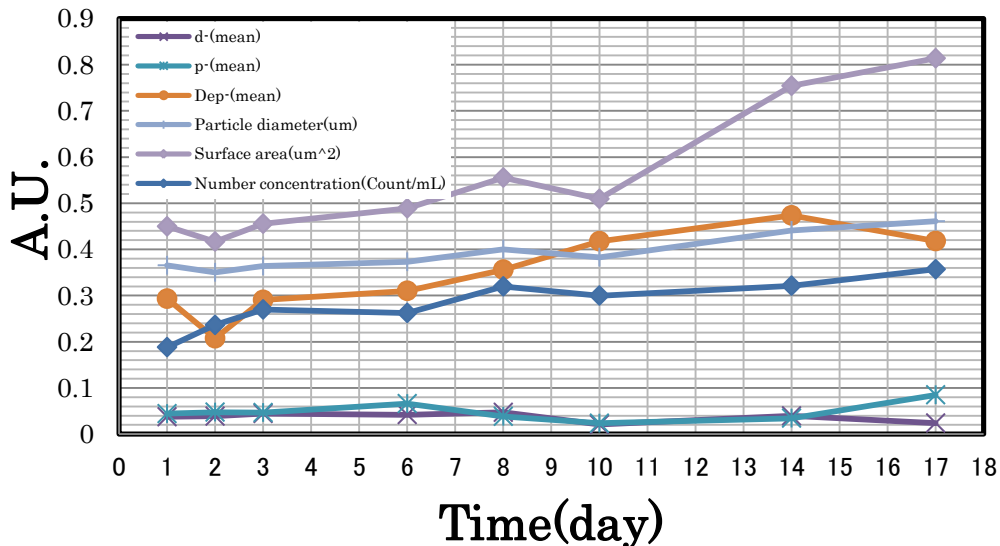


Fig.3 Growth process of *Phaeodactylum tricornerutum*
Dep(Mueller matrix imaging) is well related to the particle diameter and the surface area(Coulter counter).