

ノート

# 光を用いた生体組織配向評価法の開発

海老澤 瑞枝\*<sup>1)</sup>

## Development of aligned tissue evaluation method using optical techniques

Mizue Ebisawa \*<sup>1)</sup>

キーワード：偏光計測，ミュラー行列，混濁媒質，複屈折，旋光性

Keywords：Polarimetry, Mueller matrix, Turbid media, Birefringence, Optical rotation

### 1. はじめに

生体組織の配向特性は，組織の形態や強度と密接な関係があり，再生医療や硬組織疾患の治療法の開発等に不可欠な情報である。透明な高分子材料の配向評価では，偏光を用いて配向方向とその垂直方向とで生じた屈折率の差を計測する複屈折計測が広く用いられている。生体組織においても複屈折は繊維状高分子や微小構造の配向性を評価する上で重要な指標となるが，たんぱく質分子のらせん構造や結晶構造では旋光性も生じ，偏光特性が混在している。更に生体組織の多くは光を強く散乱する混濁媒質でもあるため，試料を透過した検出光は，複屈折と旋光からなる偏光成分と散乱による非偏光成分を含む。本稿では，偏光成分と非偏光成分を弁別し，各偏光特性を分離して定量化する方法について報告する。

### 2. 配向評価法

**2.1 評価法の原理** 生体組織の配向評価のために，複屈折，旋光性，偏光解消などの情報が同時に得られる Mueller 行列を計測する。Mueller 行列は4次の正方行列で各要素が物質の偏光特性を表し，物質入射前後での光の偏光状態の変換行列である。行列の要素を計測する光学系を図1に示す。光源の光強度を  $I_m$  とし，試料入射前の1/4波長板の回転角を  $\theta$ ，出射後の1/4波長板の回転角を  $5\theta$  とすると検出器における光強度  $I_\theta$  は，

$$I_\theta = \frac{I_m}{4} \left\{ a_0 + \sum_{n=1}^{12} (a_n \cos 2n\theta + b_n \sin 2n\theta) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

となる。フーリエ級数  $a_0, a_n, b_n$  は Mueller 行列要素  $m_{ij}$  ( $i, j=0, 1, 2, 3$ ) からなる関数であるため，検出光強度から行列の要素が得られる。また，試料の偏光特性が単一の場合，各種偏光特性のパラメータは行列要素から直接算出できる<sup>(1)</sup>。

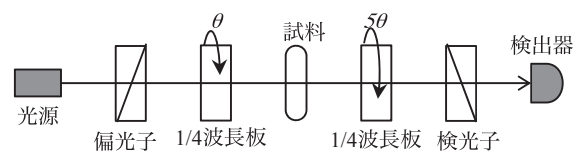


図1. Mueller行列計測のための光学系  
波長633nmのHe-Neレーザを光源とし，検出器にはSiフォトダイオードを用いた。また，1/4波長板の回転角 $\theta$ を $0^\circ$ から $180^\circ$ の間で等間隔に32回変化させ光強度 $I_\theta$ をサンプリングした。

**2.2 計測性能の評価** 本研究で構築した光学系の計測性能を調べるために既知の偏光特性をもつ光学素子を試料として計測を行った。まず，偏光子を試料として，透過軸を $0^\circ$ から $90^\circ$ まで $10^\circ$ 毎に回転し，偏光軸方位を計測した。結果を図2に示す。この時の設定角度と計測角度の平均誤差は $0.2^\circ$ であった。また，1/4波長板を試料として，主軸方位を $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ と回転させそれぞれ計測した結果，主軸方位の平均誤差は $0.2^\circ$ ，複屈折位相差は $89.2^\circ$ （平均誤差 $0.3^\circ$ ）であった。この1/4波長板は，複屈折計測専用機器によるメーカー計測値が位相差 $88.4^\circ$ （平均誤差 $0.2^\circ$ ）であり，複屈折計測専用機器とほぼ同等の結果が得られた。

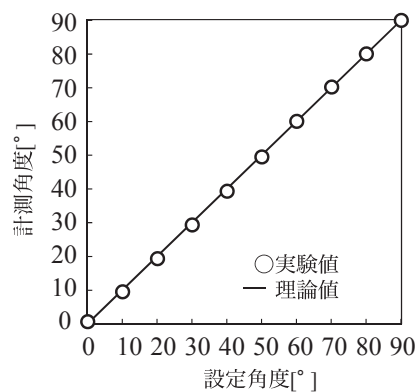


図2. 偏光子の透過軸方位の計測結果

事業名 平成23,24年度 科研費若手研究B (22760203)  
\*<sup>1)</sup> 光音技術グループ

### 3. 生体組織模擬試料の偏光特性計測

3.1 偏光特性の分離方法 複数の偏光特性が混在する場合、試料を偏光解消層  $M_\Delta$ 、位相変調層  $M_R$  と吸収層  $M_D$  からなる構造とし、2.1の計測から得られた Mueller 行列を個々の偏光特性に分離する<sup>(2)</sup>。ここで、試料の Mueller 行列  $M$  は、

$$M = M_\Delta M_R M_D \dots\dots\dots (2)$$

$$M_R = M_{\delta,\phi} M_\gamma \dots\dots\dots (3)$$

とする。  $\delta$  は複屈折位相差、  $\phi$  は主軸方位、  $\gamma$  は旋光角である。まず、  $M_D$  は次の様に表される。

$$M_D = \begin{bmatrix} 1 & \vec{D}^T \\ \vec{D} & m_D \end{bmatrix},$$

$$m_D = \sqrt{1 - D^2} \mathbf{I} + (1 - \sqrt{1 - D^2}) \hat{D} \hat{D}^T, \dots\dots\dots (4)$$

$$\vec{D} = \frac{1}{m_{00}} [m_{01}, m_{02}, m_{03}]^T, \quad \hat{D} = \frac{\vec{D}}{|\vec{D}|}$$

ここでの  $\mathbf{I}$  は単位行列とする。式 (2) より吸収層  $M_D$  を除いた残りの行列は

$$M M_D^{-1} = M' = M_\Delta M_R \dots\dots\dots (5)$$

となる。  $M_\Delta$ 、  $M_R$  および  $M'$  はそれぞれ、

$$M_\Delta = \begin{bmatrix} 1 & \vec{0} \\ \vec{P}_\Delta & m_\Delta \end{bmatrix}, \quad M_R = \begin{bmatrix} 1 & \vec{0} \\ \vec{0} & m_R \end{bmatrix}, \quad M' = \begin{bmatrix} 1 & \vec{0} \\ \vec{P}_\Delta & m' \end{bmatrix} \dots (6)$$

と表され、式 (6) の各行列のベクトル及び部分行列は以下の通りである。

$$\vec{P}_\Delta = \frac{\vec{P} - m\vec{D}}{1 - D^2}, \quad \vec{P} = \frac{1}{m_{00}} [m_{10}, m_{20}, m_{30}]^T,$$

$$m' = m_\Delta m_R, \quad m_R = m_\Delta^{-1} m', \dots\dots\dots (7)$$

$$m_\Delta = \left[ m'(m')^T + (\sqrt{\lambda_1 \lambda_2} + \sqrt{\lambda_2 \lambda_3} + \sqrt{\lambda_3 \lambda_1}) \mathbf{I} \right]^{-1}$$

$$\times \left[ (\sqrt{\lambda_1} + \sqrt{\lambda_2} + \sqrt{\lambda_3}) m'(m')^T + \sqrt{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} \mathbf{I} \right]$$

ここでの  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  は  $m'(m')^T$  の固有値である。以上の計算より各層に分離した行列が得られる。

3.2 複数の偏光特性をもつ混濁媒質の計測 生体組織と同様に複屈折、旋光および偏光解消の混在した模擬試料を作製し、各偏光特性を分離し計測した。模擬試料の材料には、結晶構造において旋光性を示す PLLA (ポリ-L-乳酸) を用いた。PLLA のペレットを 230°C で融解させた後、結晶化が促進するとされる<sup>(3)</sup>100°C 付近まで温度を下げてから一軸応力を加え、複屈折性を与えた。PLLA を固化させた後、試料を回転ホルダに取り付け応力を加えた方位を 10° 毎に回転し、図1の光学系において各設置角度での複屈折位相差、主軸方位、旋光角、偏光解消を計測した。図3に計測結果と試料外観を示す。PLLA の非結晶試料では偏光解消

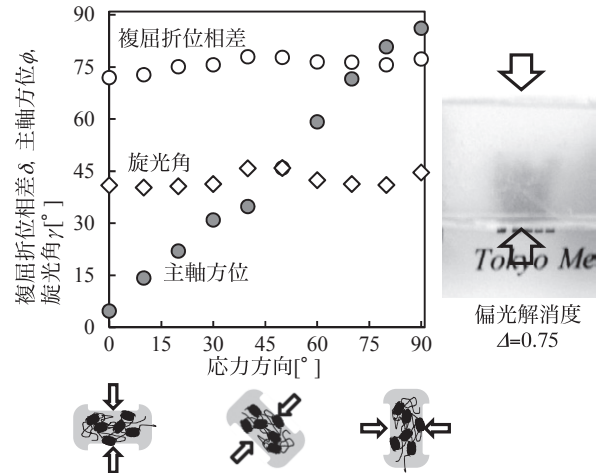


図3. PLLA の偏光特性の計測結果と試料外観

度が 0.003 で外観も透明であったのに対して<sup>(4)</sup>、本試料の偏光解消度(各角度の平均値)は 0.75 で外観も白く濁っており、充分結晶領域が成長した試料と言える。

計測結果の横軸は応力を加えた方位の設置角度とし、縦軸を偏光特性の計測結果とする。光の透過距離に比例する複屈折位相差と旋光角は、試料の厚みを 1 mm として規格化した。主軸方位は応力方向の設置角度とよく一致している。これに対して複屈折位相差と旋光角は、主軸方位の変化とは独立にほぼ一定の値を示している。これらのことから、散乱による非偏光成分と偏光成分とを弁別し、偏光成分からは複屈折(複屈折位相差、主軸方位)と旋光性が分離して得られていると言える。

### 4. まとめ

生体組織のように複数の偏光特性が混在する試料の計測方法を示した。複屈折と旋光性が混在し、散乱による偏光解消が生じる模擬試料を作製し、本分離方法が有効である事を実験的に確認した。

これより、本計測法が生体組織の配向特性の定量化において有効な手法となる可能性を示した。

謝辞

本研究は、科研費若手研究 B (22760203) の助成を受けたものである。

(平成 25 年 7 月 17 日 受付、平成 25 年 8 月 7 日 再受付)

### 文 献

(1) R. M. A. Azzam : "Photopolarimetric measurement of the Mueller matrix by Fourier analysis of a single detected signal", Opt. Lett., 2, 6, pp.148-150 (1978)

(2) S. Y. Lu, and R. A. Chipman : "Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition", J. Opt. Soc. Am. A, 13, 5, pp.1106-1113 (1996)

(3) 望月政嗣:「高L組成ポリ乳酸(LLA-rich PLA)の結晶化挙動」, 繊維と工業, Vol.66, No.2, pp.70-77 (2010)

(4) 海老澤瑞枝:「結晶性生体吸収材料の光学特性の計測」, 電気学会論文誌A, Vol.132, No.6, pp.458-459 (2012)