

## 特集 測定・検査・分析技術のトピックス

# 多角的偏光イメージングシステムによる歪み・異方性の数値化

〈Polamazing® 1000の紹介〉

東京都立産業技術研究センター 海老澤 瑞枝  
日本ビジュアルサイエンス株式会社 滝 克彦

### 1. はじめに

樹脂材料は、高分子の配向や成形品内部に残留応力が生じることで、屈折率が異方的となる複屈折性を示す。屈折率によって光の進む速さは変化するため、特定の方向に振動する光（偏光）を複屈折材料に入射すると、振動方向の異なる光の間には屈折率の差に応じて位相差 $\Delta_n d/\lambda$ （ $d$ ：厚み、 $\lambda$ ：光の波長、 $\Delta_n$ ：屈折率差）が生じる。この位相差は複屈折位相差と呼ばれ、定量的に計測することができ、高分子の配向度や残留応力・歪みの大きさを示す。位相が遅れる方位（もしくは進む方位）は主軸方位と呼ばれ、配向や応力の方向を示す情報となる。検出器にイメージセンサを用い、これらの複屈折情報を計測すれば、数値データは画素毎に記録される。これを疑似カラーによるマッピング表示をすれば成形品の定量的な内部情報分布が得られる。

一方、古くから利用されている歪み計などの検査装置では、偏光と複屈折によって生じる色によって内部情報を可視化している。これは複屈折位相差の波長依存性によるもので、可視光域で半波長を超える300 nm程度の位相差になると、2枚の偏光子で試料を挟んで見たとき、複屈折の大きさに応じて色として観察される。複雑な形状の成形品でも、見る角度を変えながら位相差をリアルカラーで直観的に観察できる優れた手法である。しかし、歪み計による目視検査では、小さい複屈折位相差を検出するためには鋭敏色板と呼ばれる位相板を挿入する必要があることや、主軸方位の情報が得られないこと、色と位相差の対応づけに経験を有し情報共有が困難なことなどの課題がある。

本システムでは、複屈折計測による歪み・異方性の定量化とリアルカラー観察の併用によって、歪み計の課題を解決し観察性と定量性を兼備した画像取

得システムを目指した。さらに、樹脂成形品は、ファイラーが分散する不透明な材料や表面に微小な凹凸をもつ物体など、材料も形状も多様である。検査や観察の点から、プローブとする照明光を偏光に限定せず、様々な照明条件で試料の撮影を可能とした。

### 2. システムの概要、特徴、原理、構成

#### 2-1 概要

樹脂成形品を初めとするさまざまな試料の観察・検査のために、本システムは多様な照明条件で、試料の画像を多角的に自動取得する装置である。照明系や光学素子の切り替えはPCから制御し、偏光を用いた内部情報取得のための画像や反射・透過照明光による外観画像を試料の置き換えなしに自動取得できるオールインワンシステムである。撮影角度や照射条件を変えて取得した大量の画像データや複屈折位相差・主軸方位の解析画像はWebブラウザ上で再生可能で、情報の共有が容易である。システム全体を写真1に示す。



写真1 多角的偏光イメージングシステムPolamazing®1000全体像

#### 2-2 特徴

偏光を含めさまざまな照明光をプローブとして観

察できること、大きな試料を多角的に高解像な画像で自動記録できることが、本システムの大きな特徴である。

(1) 高解像な偏光画像の取得

検出器には一眼レフのデジタルカメラを用い、解像度の高い画像を取得する。一般に、偏光解析では複数の画像データを演算処理するため、解析時間の節約のために解像度を犠牲にすることが多い。しかし、本システムはデジタルカメラ画像をそのまま解析に用いるため、高解像な偏光解析画像が得られ、ディスプレイ上で微小領域をズーム拡大して見ることができる(写真2)。これによって、複雑な形状の成形品でもレンズを付け替えることなく、成形品全体の画像から細部の樹脂の流れを表す分子配向や残留応力・ひずみの情報まで見ることができる。また、複屈折情報(複屈折位相差:0~315 nm、主軸

方位 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ )の擬似カラーマッピング(写真3)の他に、偏光情報を色として見る従来の歪み計モードでの偏光画像や擬似カラーマップと外観画像を重ね合わせた表示なども可能である。

(2) 大型試料回転ステージ

平板状のサンプルでは撮影時の試料の向きが問題になることは少ないが、複雑な立体形状では光が透過しない向きや影となる向きが生じるため角度を変えた画像取得が必要となる。本システムでは、最大約400×400 mmの大型試料が設置可能な360度自動回転ステージを備え、任意の角度と分割数を指定し、多角的な画像を自動取得できる(写真4)。さら

細部もレンズ交換なく  
ディスプレイ上で拡大可能

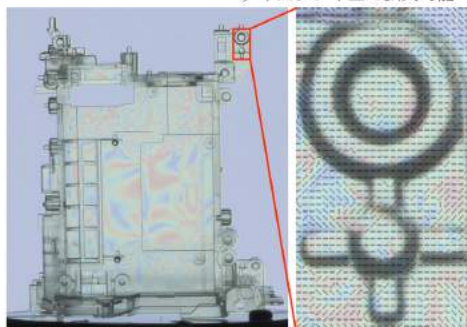


写真2 歪み計モードの画像とズーム機能

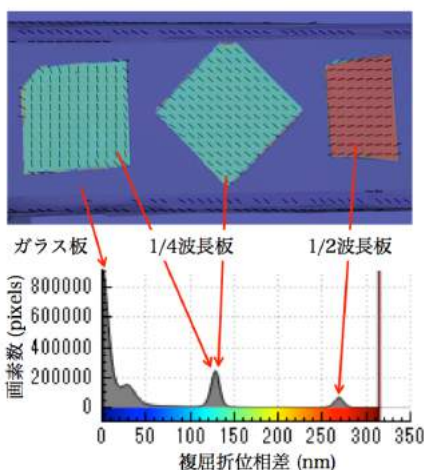
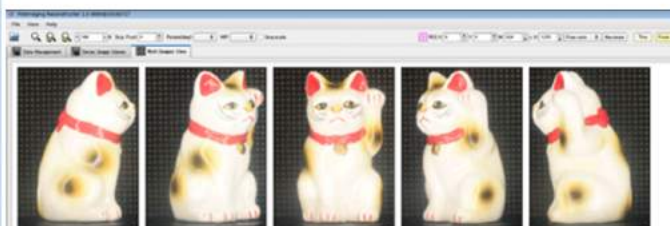


写真3 位相差フィルムの複屈折位相差および主軸方位解析画像



撮影する角度範囲や  
分割数を指定



回転ステージ上の試料を自動撮影

写真4 試料回転ステージ



に、回転ステージ2台を並べて同時に制御でき、縦長の500 mlペットボトル大の成形品であれば、2検体を同時に比較しながら計測・撮像することも可能である。

(3) 多様な照明条件

試料内部の異物や気泡、材料の不均一に由来する散乱や試料表面の傷や微小な凹凸は偏光計測に影響を与えるだけでなく、散乱や凹凸自体も検査の観点から重要な情報となる。これらの情報を可視化する上で、照明条件を変えることは有効な手段である。例えば、不透明な樹脂の成形品内部の不均一性を可視化する場合は、赤外透過光が効果的である。一方、透明材料内のわずかな散乱を強調して観察するのであれば、紫外や青色光といった短波長の光が有効である。本システムでは、さまざまな試料に対応するために多様な照明条件での撮像を可能としている。

2-3 原理

内部歪みや高分子の配向に起因する複屈折位相差および主軸方位の定量化の原理について述べる。複屈折計測のための光学系を第1図に示す。光源から出射した光は偏光子(透過軸方位 $\theta_p$ )と位相板(方位 $\theta_1$ )を透過し、試料に入射する。試料透過後は位

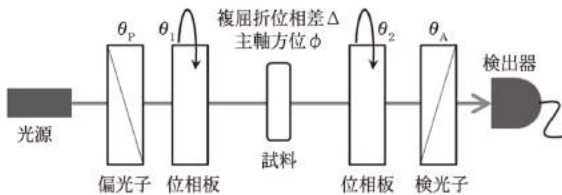
相板(方位 $\theta_2$ )と検光子(透過軸方位 $\theta_A$ )を透過し、検出器に入射する。光学素子の方位は既知で可変とする。それぞれの光学素子の方位を複数パターン変えることで偏光変調を行い、光強度を記録する。既知の光学素子の方位と光強度から、未知数である試料の複屈折位相差 $\Delta$ と主軸方位 $\phi$ を計算する。本システムでは、第1表の8パターンの光学素子の方位の組み合わせで取得した光強度を計算に用いている。

一般的な偏光計測では、光源に単色光を用い、位相板には光源波長を基準にした1/4波長板を用いる。理想的な1/4波長板を用いることで解析時の計算コストが下がる反面、光源と位相板の波長がずれると計測誤差が生じる。計測方法や解析手法にもよるが、誤差の程度としては、波長100 nmの差で誤差は20%程度である。本システムでは、基本的には赤色光を用いて複屈折を計測しているが、試料に応じて計測用の光源を選択できるよう実光路で位相板のキャリブレーションを行っている。この方法では、位相板の位相差によらず誤差のない複屈折計測が可能である。さらに実光路内で位相板をキャリブレーションするため、入射角特性や面内の不均一の影響も補正できる。

2-4 構成

(1) 偏光計測のための光学系

光源にはRGB-3LEDをマトリクス状に配置した直下型のバックライトを用いている。偏光子は、発光面を均一にする拡散板の後に固定する。入射光の偏光変調は主軸方位の異なる位相差板の切り替えによって行う。同一位相差で主軸方位が直交する2種



第1図 偏光計測の光学系

第1表 本システムにおける偏光素子の方位 (基本設定)

偏光子 $\theta_p$	位相板 $\theta_1$	位相板 $\theta_2$	検光子 $\theta_A$	光強度
$\theta_p$ 度	$\theta_p+45$ 度	$\theta_p$ 度	$\theta_p$ 度	$I_1$
		$\theta_p+22.5$ 度		$I_2$
		$\theta_p+45$ 度		$I_3$
		$\theta_p+67.5$ 度		$I_4$
	$\theta_p-45$ 度	$\theta_p$ 度		$I_5$
		$\theta_p+22.5$ 度		$I_6$
		$\theta_p+45$ 度		$I_7$
		$\theta_p+67.5$ 度		$I_8$

$$I_i(\theta_p, \theta_1, \theta_2, \theta_A, \Delta, \phi) = I_i \quad i=1\sim 8$$



試料の複屈折位相差 $\Delta$ 、主軸方位 $\phi$

類の位相差フィルムを光源と同じサイズの枠に固定し、リニアステージで切り替える。カメラ側の位相板は円形の自動回転ホルダに固定し、PCからの制御によって所望の角度を実現する。計測中はカメラ直前の偏光子の透過軸は固定のため、手動の回転ホルダに固定し、偏光計測時以外はリニアステージで光軸外に移動する。カメラは、デジタル一眼レフカメラを用い、最高解像度7360×4912の撮像・解析画像が取得可能である。

(2) 外観検査のための光学系

透過光による観察では、偏光計測に使用するバックライトを光源に使用する。バックライトは、赤、緑、青（中心波長：630 nm、508 nm、470 nm）を独立かつ任意の組み合わせで点灯可能である。さらに、カメラの検出感度は波長400 nm以下、750 nm以上にもあるため、別付けのLED光源を用いることで近紫外・近赤外光の透過画像が撮影できる。また、通常物体を見る多くの場合は、反射光を目で検出していることから、自然な物体像を取得するために、白色の反射リング照明を備えている。

(3) ソフトウェア

照明、偏光計測の光学系、試料回転ステージおよびカメラはPCとコントローラに接続され、全ての動作はソフトのインターフェース画面から制御できる。使用したい照明の種類や試料回転ステージの範囲などを設定し、撮像をスタートすれば全ての条件の画像を自動取得する。撮像後に偏光計測を行う場合は、使用する画像フォルダを指示しソフト内で解析を実行する。ピクセル毎に複屈折位相差と主軸方位の解析結果を持つ画像データが得られるため、擬

似カラーやベクトルでマッピングするだけでなくヒストグラム解析なども可能である。また、他の照明条件で取得した外観画像と解析結果を重ねて表示することや画像の拡大・トリミングなどもソフト上で操作できる。また、これらの画像データはWebブラウザ上で表示可能なため、専用ソフトを持たない他者との情報共有も容易である。

3. 適用事例

画像検査において必要な情報を取得するために、照明の種類や撮影の幾何的配置は重要な条件である。本システムは、樹脂成形品の検査に加えて、検査システム開発における光学的な条件探索にも活用できると考えられる。

透過偏光照明によって定量化・可視化が可能な試料内部の屈折率の異方性の情報は、製品検査の評価指標となるだけでなく、成形時の樹脂の流れや冷却時の収縮状態などを考察する上で有力な手がかりとなる。また、異方性のない透明な樹脂で作製したモデルに力を加え、力学的負荷によって生じる複屈折を観察すれば、モデル形状での立体的な応力分布を可視化することもできる。

偏光以外の照明条件では、最適な波長の光源を選択することで、吸収特性の異なる材料の分布や屈折率の不均一によって生じるモヤ状の影などが観察しやすくなる。また、白色光では見えにくかった、希薄に存在する微小な異物やポイド、キズなどによる物体の内部や表面でのわずかな散乱は、短波長の光を照射すると見やすくなることが多い。

写真5は、紫外光源下で撮影したクラゲである。

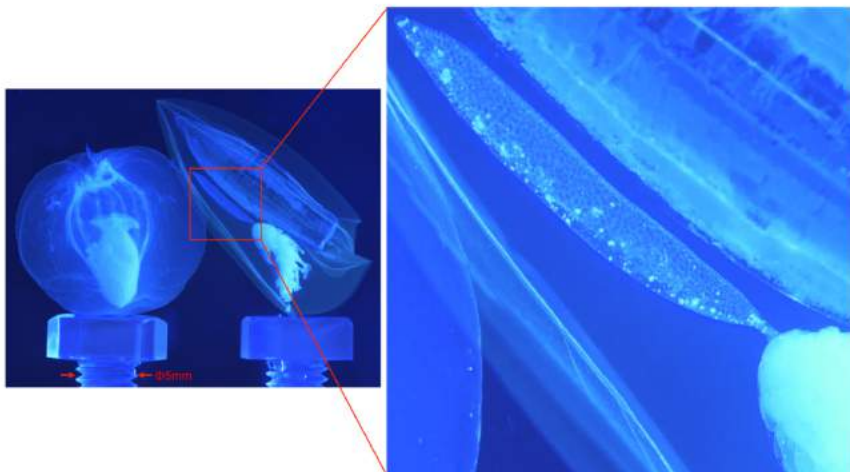


写真5 生体試料観察への活用事例：紫外光源下で撮影したクダクラゲ（協力：海洋研究開発機構）





写真6 金属試料観察への活用事例：反射2色光源で撮影した500円硬貨の潜像加工面

可視光ではほぼ透明な組織が高いコントラストで観察できている。一方、コンポジット材料や乳白色・着色材料など強い散乱によって可視光で不透明な材料の内部情報観察には、波長の長い赤外光照明が有効である。赤外光は可視光に比べて光が散乱しにくいため、樹脂の吸収波長を除けば透過像を得られる可能性があるためである。さらに本システムでは、透過画像だけでなく入射角を変えて反射物体像も撮像できるため、写真6のように金属などの不透明物体にも適用できる。

#### 4. おわりに

本システムでは、偏光をはじめとする多様な条件を創出し、自動撮影することで、多角的な可視化データを簡便に得ることができる。樹脂成形品、ガラス等については、歪みや異方性を数値化、不透明材

料では表面の凹凸や欠陥をさまざまな条件下で効果的に観察できる。工業製品の検査装置の構築を事前検討したり、貴重品を高画質な写真データでアーカイブする目的にも有用である。「偏光」は200年前から知られている現象だが、最新のハード/ソフトウェアを新しいアイデアのもとでシステムインテグレーションすることにより、高度な利便性と多機能、高性能化を実現した。

本システムは、産業技術大学院大学における研究成果をもとに、東京都立産業技術研究センターとの共同研究を経て、日本ビジュアルサイエンス㈱において事業化した。東京都中小企業振興公社の助成を受けて装置開発を行った。龍谷大学 田原大輔准教授、仙台高等専門学校 奥村真彦助教、両氏には装置開発にご協力頂いた。東京大学 生産技術研究所 横井秀俊教授には、樹脂分野における適用について、ご助言を頂いた。各位に謝辞を申し上げる。

#### 【筆者紹介】

##### 海老澤瑞枝

東京都立産業技術研究センター  
光音技術グループ 主任研究員

##### 滝 克彦

日本ビジュアルサイエンス㈱  
代表取締役