レオ・オブティックス－基礎原理，機器，最近の動向－ Rheo-Optics－Basic Theory, Apparatus, and Recent Trends－

高橋 勉

長岡技術科学大学 機械創造工学専攻

〒940-2188

新潟県長岡市上富岡町 1603-1

Tsutomu TAKAHASHI

Department of Mechanical Engineering,
Nagaoka University of Technology.

1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188
Japan

論文要旨:レオ・オブティックスはレオロジー計測と同期して光学的な計測，観察を実施する技術であり，流動により発生する分子配向からミリサイズのテクスチャ形成までのマルチスケールな現象を取り扱うことができる。具体的な光学的観察手法としてはサブミクロン程度の構造変化を観察できる小角光散乱，分子配向からサブミクロン程度の構造形成までを観察できる複屈折・二色性測定，ミクロンオーダーの構造を明らかにする光学顕微鏡観察などがよく用いられている。これらの結果はそれぞれ同時に測定されたレオロジーデータをキーとして用いることで総括して検討することが可能となり，マルチスケールな現象の解明に有効な情報が得られる。本稿ではこれらの手法について原理や測定方法，装置について具体的な事例をもとに概説する。さらに，最近の動向として2次元的な光学異方性分布の評価技術についても解説を行う。

Abstract: The Rheo-Optics is an experimental method that the optical measurement method or the flow observation is synchronously carried out with the rheological measurement. There are several methods to detect the structure change during the flow. The macroscopic and microscopic flow observation can visualize the phenomenon in the scale of the micrometer to the millimeter order. The small angle light scattering can observe the sub-micrometer to the micrometer size structures. The optical anisotropy, the birefringence and dichroism, can estimate the molecule orientation in the intrinsic effect and the sub-micrometer size structure change in the form effect. These optical methods can detect the specific scale size, but the results of these measurements can be directly compared by using the rheological data as a key data. Therefore, the Rheo-Optics can apply to understand the multiscale phenomena. The basis of the optical measurement techniques and the instruments are summarized. Moreover, the recent topic about the new technology that can detect the two-dimensional optical anisotropy distribution is reviewed.

Key words: rheo-optics, microscopic flow visualization, small angle light scattering, birefringence, dichroism, rheometry

1 はじめに

レオロジーの大きな目的のひとつは物質の応力と変形・流動の関係を明らかにすることである。実験的に応力と変形の構成関係を明らかにする手法をレオメトリーとよび，任意の応力あるいは流れ場を与えて，それに伴って発生する変形または応力を測定し，それらの関係を評価する。また，新たな機能性材料を生み出す立場にお

いては試料の微視的構造に関する知見をレオロジーから評価することが重要な目的となる。レオメトリーにより得られた応力と変形の関係を手がかりとして，流動中の物質の内部で発生している微視的・巨視的構造変化を推測する。たとえば微小振幅の正弦せん断ひずみに対する応力の応答の測定，すなわち動的粘弾性試験からは貯蔵弾性係数と損失弾性係数が求まる。正弦せん断ひずみの周波数や振幅を少しずつ変えながら測定することで（それぞれ周波数分散試験，ひずみ分散試験という），微視的構造の変化が発生する臨界条件を見いだすことができ

連絡者：高橋 勉
E-mail : ttaka@nagaokaut.ac.jp

る。

レオメトリーに用いる代表的な測定装置がレオメータである。レオメータでは試料が接触する流路壁面を移動して変形を与え、壁面に作用する応力を測定する。このとき流路内の試料を連続体と仮定し、壁面に作用する応力が試料全体にわたって均等に作用するものとして平均的な物性を算出する。連続体として扱える物質に対しては簡単で、かつ接触面積を大きくすることで感度を上げることができる有効な手法である。

一方、本特集で取り扱うようなソフトマター・複雑流体の応力と変形の構成関係は分子構造や相状態、分散物や層構造、テクスチャーなど様々なスケールの要因から影響を受ける。微視的構造の変化に伴うわずかなレオロジー特性の変化を検知できるように測定器の高精度化が推し進められてきたが、試料内部の応力分布や速度分布が一樣ではない場合も多く、平均的な応力と変形の関係だけでは現象を正しく把握できない。そこで、変形や流動に伴う微視的な構造変化、状態変化を直接観察する手法が開発されてきた。本特集で取り扱う光による計測はもちろんであるが、それ以外にも様々な手法がある。例えば X 線の小角散乱 (Small Angle X-ray Scattering : SAXS) を観察することでサブミクロン以下の構造の異方性が類推でき、中性子線散乱 (Small Angle Neutron Scattering : SANS) を使えばさらに微細な構造の異方性が求まる。NMR を用いた流動中の構造解析なども 1990 年代から検討されている。レオロジー計測と同時にこれらの微視的な構造変化の情報が得られれば、物質内部で起こっている現象をより正確に把握できる。

レオロジー計測と X 線散乱観察を同期して同時に行う解析手法を Rheo-SAXS、レオロジーと中性子線散乱観察を同時に行う手法を Rheo-SANS とよぶ。同様に、レオロジーと光による計測の同時測定が Rheo-Optics (以下レオ・オブティックス) である。レオ・オブティックスは Rheo-SAXS や Rheo-SANS のような特定の測定技術を指すものではなく、各種の光を用いた観察・計測のいずれかとレオロジー計測を同期して実施する評価方法の総称となる。光を用いた計測としては、サブミクロンからミクロン・オーダーの構造に起因する小角光散乱観察、流動中の試料の様子をミリ・オーダー、あるいは光学顕微鏡によるミクロン・オーダーで直接観察する流れの可視化、さらには分子構造や配向に起因するナノ・オーダーの複屈折・二色性などの偏光解析などが代表的なものである。マルチスケールの現象を対象とする場合はそれぞれのスケールにあった技術で観察・測定し、結果を総合して検討を行うことが必要となる。その際に、レオロジー計測とこれらの観察・測定を同時に行えば、別々

に実施した異なるスケールの結果がレオロジー計測を鍵とすることでマッチング可能となり、総合的な評価を行うことができる。加えて、光による観察・計測は X 線や中性子線よりも遥かに取り扱いが容易な小型で安価な機器で実施可能で、市販のレオメータに簡単に取り付けることも可能である。すなわち、レオ・オブティックスは幅広いサイズの構造変化に対応でき、広く一般の研究者が比較的容易に実施できる実用的測定技術である。

本稿ではレオ・オブティックスに関して測定方法の紹介、基礎的な原理、使用する機器、最近の動向などについて概説する。

2 レオ・オブティックスで使用する光学測定手法

レオ・オブティックスはレオメータによる応力と変形の関係を求めるレオロジー計測と同時に光学的な手法を用いた測定あるいは観察を同時に実施する測定手法である。一般的な光学的測定・観察技術としては (i) 流れ場の可視化, (ii) 小角光散乱観察, (iii) 偏光解析, (iv) 蛍光解析およびその他, に大別される。このうち (i) から (iii) までは多くの実施例が報告されており、比較的安価な装置や簡単な装置でも実施可能である。そこで、本稿では (i) から (iii) について解説を行う。

2・1 流れ場の可視化

変形や流動による構造変化の様子を直接観察できるならば、その画像や動画は現象を理解する上で最も重要な情報となる。流動中の液体に対して電子顕微鏡観察を行うことは難しいため、光学顕微鏡または通常のマクロレンズを取りつけたカメラ (ビデオ) での観察が主となる。

通常のマクロレンズを取りつけたカメラによる可視化ではミリからセンチメートル・オーダーの観察が主となる。Fig. 1 は直径 40 mm のガラス製平行円板流路において観察されたひも状ミセル水溶液 (cetylpyridinium

Fig. 1 Photograph of blinking opaque ring of a wormlike micellar solution, CPyCl/NaSal aqueous solution, at disk rotation rate 115 rpm. The opaque ring shows a banding of the shear-induced structure¹⁾.

chloride : CPyCl/sodium salicylate : NaSal 水溶液) のシアバンドを可視化したものである¹⁾。シアバンドは流路隙間方向と半径方向の二方向にわたり形成されるが、半径方向のバンド形状を可視化するには通常のデジタルカメラで十分である。ひも状ミセルは流動誘起構造 (Shear-Induced-Structure : SIS) が形成されると透明な試料が白濁化する。この例ではリング状の SIS 層が観察された。SIS 層は定常せん断流動場においても周期的に直径が変化するため、応力変動を同時に測定すると SIS 層形成による粘度の増加が定量的に評価できる。流路隙間方向のシアバンドを可視化するには 1 mm 以下のサイズを観察するために光学顕微鏡を用いる必要がある。光学顕微鏡を用いた流れ場の観察ではミクロン・オーダーの構造変化、テクスチャーの形成などが観察できる。ただし、拡大された視野では画像が高速で動くため高速なシャッター速度と強い光源が必要となる。動画として撮影する場合には高速度カメラを使用することが望ましい。

2・2 小角光散乱観察

Fig. 2 に小角光散乱観察の実験装置の概略図を示す²⁾。Fig. 2 では可視化用せん断流動装置 (CSS450) を使用しているが、レオ・オプティックスの場合にはガラス製流路を設置したレオメータを使用する。光源としてレーザーを使用する。試料に照射された光は試料内に分散している粒子や液滴により散乱し、流路下部に設置したスクリーンに散乱パターンが投影される。粒径と光の波長に依存した散乱角が生じるため、均一の粒径を持つ球形粒子の懸濁液の場合、スクリーンにはリング状の散乱パ

Fig. 2 Schematic diagram of Small Angle Light Scattering experiment system²⁾.

ターンが形成される。試料からスクリーンまでの距離とリングの半径から散乱角が求まり、粒径を容易に推定できる。棒状や板状など形状異方性を有する粒子が流動配向している場合や縞状のテクスチャーが形成される場合、バタフライ状のパターンや一方向に強く伸びる散乱像が生じる。流動により変化する散乱像を動画として記録し、レオメータにより得られる情報と合わせて構造の形成や変化を検討する。濃度揺らぎなどの等方性散乱と異方性散乱を分離して検討するなど、より詳細な検討が必要な場合には流路前後に偏光板を設置しその光学軸を直交および平行として散乱光を比較する場合もある²⁾。

2・3 偏光解析

物質内を直線偏光が透過する場合、偏光面の方向により光の透過速度が異なることがある。つまり、偏光面の方向により屈折率が異なることになる。これを複屈折という (正確には直線複屈折とよばれる。右回り円偏光と左回り円偏光で透過速度に差が生じる場合は円複屈折という)。ベンゼン環のような誘電異方性を有する分子を持つ高分子の場合、静置状態ではランダムな配置により個々の誘電異方性は平均的には相殺されるが、流動により分子の伸張が誘起されると誘電異方性を有する分子が伸張方向あるいは直交方向に配向し、複屈折が発生する。これを流動複屈折という。鎖状の高分子流体やひも状ミセル溶液では応力テンソルと屈折率テンソルの間に比例関係が表れ、その比例定数は分子構造やミセルの形状に基づく物性値となる。この関係を光弾性則といい、比例定数を光弾性係数とよぶ。これらの複屈折は分子構造に起因する現象であり、分子配向など極めて小さいスケールの配向を評価することができる。分子やミセルの構造に依存する物性であるため、固有複屈折とよばれる。一方、光の波長オーダーの異方性構造やテクスチャーの形成によっても複屈折が発生する。これを形状複屈折という。複屈折が検出された場合、固有複屈折と形状複屈折が同時に発生するとそれらが重ね合わさった値として測定され、それぞれの効果の寄与率を分離して評価することは難しい。形状複屈折を誘起する構造は光を散乱する大きさでもあるため、小角光散乱や光学顕微鏡観察により形状効果が現れているかどうかを確認しておく必要がある。

また、直線偏光の透過に際して偏光面の方向により光の減衰率が変わる現象を二色性という。これも入射光の偏光状態により直線二色性と円二色性が存在する。直線二色性が最大の物質、すなわちある特定の方向の偏光のみを透過し、それ以外は透過させない物質が偏光板である。二色性に関しても固有効果と形状効果が存在する。

複屈折および二色性は試料の透過光に直交する面内に

おける屈折率、減衰率の異方性を表す。異方性の大きさを表す複屈折、二色性に加えて異方性が最大となる方向、すなわち光学主軸がそれぞれの性質に対して存在する。偏光特性を正確に把握したり、光弾性則を確認したりするためには複屈折（二色性）に加えて光学主軸の方向（配向角）を求める必要がある。配向角を知るためには偏光面を少しずつ変化させて透過光の屈折率（減衰率）を測定し、その値が最大、最小となる角度を測定する必要がある。測定対象が鉱物のように時間に対して物性が変化しないものであれば、ゆっくりと時間をかけてもよいので偏光面をすこしずつ回転させて屈折率（減衰率）を評価し、最大・最小となる方向から配向角を求めることができる。しかし、レオ・オプティックスの場合、過渡的な状態を対象としており、流動に伴って発生する複屈折と配向角の時間的な変化を求める必要がある。この場合、複屈折と配向角の評価にかかる時間が対象となる現象に対して十分に短い必要がある。そこで非常に短い周期でこれらを測定する手法である偏光変調式光学異方性測定法が用いられる。Fig. 3 に偏光変調式光学異方性測定法のブロック図を示す。レーザー光源で発生した直線偏光は偏光変調器（Polarization State Generator : PSG）を透過することにより偏光面の方向が周期的に変化する状態となる。試料を透過した光は偏光解析器（Polarization State Analyzer : PSA）を通り偏光状態に応じた光強度を有する光を出射する。出射光の光強度と PSG の偏光面の情報を同期させて、光学異方性（複屈折、二色性）の大きさと配向角を同時に評価する。これらの偏光状態を変調させる方法としては水晶などの光学素子をピエゾ素子で歪ませて偏光状態を変化させるフィールドエフェクト法と偏光板などの光学素子をモーターなどの機械的な装置で回転させる回転素子法がある³⁾。フィールドエフェクト法では偏光情報を 50~100 kHz の速度で測定できる。回転素子法では電気的なモーターを利用する場

Fig. 4 Schematic diagram of Rheo-Optical-Analyzer.

合で秒間 50~60 データ程度の速度で測定できる。エタービンなどを利用すれば回転素子法でも高速データ収集が可能となる。また、半導体レーザー素子を用い偏光面の方向が異なる複数のレーザー光源を束ねて一本の光線を形成し、それぞれから異なるタイミングでパルス的に発光させることで、各レーザー光の偏光面に対する透過光強度をひとつの受光素子で時系列的に測定し、光学異方性と配向角を高速に評価する方法もある。Fig. 4 はフィールドエフェクト法のひとつである光弾性素子による高速偏光解析装置を用いたレオ・オプティックス計測装置の概略を示している。光学測定用の制御・データ解析 PC はレオメータと同期しており、同時計測が可能となっている。

3 レオ・オプティックスに必要な機器

レオ・オプティックスを実施する上で必要な機器はプラットフォームとなるレオメータ、ガラス製の流路、および各光学測定・観察に必要な機材である。

Fig. 3 Schematic diagram of optical anisotropy measurement system.

3・1 レオメータ

レオ・オプティックスに使用するレオメータとしては、カメラや光学計測機器を取り付けが容易なものが使いやすい。たとえば応力制御型のレオメータの場合、流路の駆動と計測がひとつのユニットでよいので、レオメータの下部にはスペース的に余裕があるものが多い。光学顕微鏡や高速度カメラなど大型の機器も取り付けが可能な機種もある。また、複屈折・二色性測定モジュールや小角光散乱観察モジュールなどがオプションパーツとして提供されているレオメータもある。これらのレオメータの場合、後述するレオ・オプティックス用のガラス製の流路もオプションとして提供されており便利である。計測開始のタイミングをトリガー信号として外部出力できる機能を有するレオメータは同時計測を行う上で便利である。トリガー出力がないレオメータの場合でも、多くの機器はレオメータのトランスデューサーで計測されたトルクとスラスト力およびエンコーダの回転角を信号として出力する端子を持つ。これらの値を光学測定データと同時に記録することで同期を行うことも可能である。

3・2 流路

光により観察・計測を行うためにガラス製の流路が必要となる。レオロジー測定では平行円板型流路、円錐円板型流路、および同心二重円筒型流路が用いられる。光学観察・測定を行う場合、流路により発生するせん断面に対してどの方向から観察するか、が重要な問題となる。Fig. 5 に高分子流体の単純せん断流動場において観察方向により得られる複屈折の違いを模式的に示す。せん断面に対して垂直（渦度軸方向）に光線を透過させると x-y 面に投影した複屈折と配向角が求まるが、速度こ

う配方向および流動方向の光線では配向角を求めることができない。平行円板型と円錐円板型では通常は速度この配方向（流路壁面に垂直方向）に光線を透過させるためせん断による配向角は評価できない。同心二重円筒型では渦度軸方向に光線を透過できるため配向角の計測が可能となる。また、平行円板型流路ではすき間を任意に変えられること、およびすき間が狭いことから液晶のような極めて複屈折性の大きい物質や濁った試料に対して有効である。一方、同心二重円筒型は光路長を長く取れるため複屈折性が弱い試料に対して高精度で測定が可能となる。

平行円板型の場合は2枚の光学ガラス製円板を回転側、静止側に使用する。各レオメータのディスプレイ・フィクスチャ（使い捨て用の平行円板型流路を取り付けられる治具）を用いて少し加工や部品を追加すれば自作も可能である。自作の場合には回転側のガラス円板において回転軸に対する垂直と偏心に関して高精度な調整が必要であるので注意しなければならない。平行円板型流路はすき間を変えた実験が可能であり、計測結果の厚さ依存性を評価することができる。また、不透明な試料の場合でもすき間を狭くすることで透過光が得られ計測が可能となる場合がある。筆者はマヨネーズとカロリー半分マヨネーズの違いをレオ・オプティックスにより計測した経験がある。すき間が0.1 mm 程度で複屈折測定が可能な程度の透過光強度が得られた。

光学測定用の同心二重円筒型流路は底面と天板にガラス板を用い、回転軸方向に光線を透過させることが多い。上述のように光路長を長く取れることから複屈折などを高精度で測定でき、配向角も評価できる。一方では、

Fig. 5 Three-dimensional information of flow birefringence induced by shear. (巻頭カラー写真参照)

透明度の低い試料は使用出来ず、試料の装填時に気泡が混入しやすく、平行円板型流路に比べて取り扱いが難しい。

レオメータのオプションとして提供されている光学測定用流路の場合は温度制御が可能なものが多い。自作の場合は温調を独自に工夫する必要がある。流路内の温度ムラや温度制御における変動を考えると、温度依存性が強い試料の場合には各レオメータの純正の光学測定用流路を使うことを推奨する。

3・3 光学観察・測定機器

流れ場の可視化については前章で説明したとおりである。光学顕微鏡を用いた観察の場合には高速度カメラの導入を推奨する。

小角光散乱観察は Fig. 2 で示したとおり簡単な機材で実施可能であり、記録も市販のカメラやビデオで十分である。レーザーポインターを光源として使用することも可能である。散乱光は光路軸上の直接光に対して極端に弱いので、スクリーンの中央に穴をあけ直接光を透過させるか、ビームストッパーにより消光させて散乱光のみをスクリーン上に投影させる。さらに、レオメータと観察機材を暗幕で覆うなど、外部光の影響を極力排除できる実験環境が必要である。

複屈折・二色性測定については、専門の装置を購入するのが便利である。自作する場合、光学素子の選定だけでも計測に適した精度、性能、サイズのものを見つけるのに経験と知識が必要となる。筆者はスタンフォード大学 Fuller 先生のもとでレオ・オプティックスの新技术開発と並行して市販用レオ・オプティカル・アナライザの開発を行い、1993年には製品化に至った。しかし、使用している光学素子の中には入手が難しいものや、メーカーの生産拠点変更で性能が悪化したものなどが多数ある。購入しても性能が不十分で無駄にした機材・素子が山積みである。本稿では書ききれないノウハウがたくさんあるので、自作やカスタマイズした計測装置が必要である場合は筆者に直接問い合わせていただきたい。

4 レオ・オプティックス測定の例

本稿で解説した技術を利用した例を紹介する。Fig. 6 は高分子液晶であるヒドロキシプロピルセルロース (Hydroxypropylcellulose, 以下 HPC) 液晶相溶液に対してステップせん断流動を与えたときのせん断応力、複屈折、二色性の過渡的变化を示している²⁾。また、Fig. 7 は Fig. 6 の図中に示した時刻における小角光散乱画像と顕微鏡観察画像を示している²⁾。小角光散乱は試料前後に設置した偏光板の光学主軸方向を一致させた場合 (VV 散乱) と直交させた場合 (HV 散乱) の結果を示し

Fig. 6 Transient behavior of shear stress, birefringence and dichroism of a 50 w% aqueous solution of Hydroxypropylcellulose in step shear²⁾.

Fig. 7 Small angle light scattering patterns and microscopic images of a 50 w% aqueous solution of Hydroxypropylcellulose in step shear²⁾.

ている。使用した HPC 溶液は静置時においてコレステリック液晶相にあり、せん断流動を与えるとネマチック相に相変化する。図をみると複屈折は流動開始後 5~10 秒で極小・極大値を示し、その後 20 秒で定常値に達する。一方、せん断応力と二色性はいずれも流動直後に極大値を示したのち徐々に変化し 80 秒で定常値に達する。散乱像と可視化画像を見ると 20 秒では散乱を起こす構造が消失していることから複屈折の挙動はコレステ

リックからネマチックへの相変化に対応した分子レベルの構造変化、すなわち固有効果の様子を示していることが分かる。一方、その後は流動方向のテクスチャーが形成され流れと直交方向の強い散乱光が現れる。二色性の変化は形状効果が支配的に現れており、せん断応力、すなわち粘度はテクスチャー形成に係わるミクロン・オーダーの大きな構造変化に強く支配されることが分かる。

このように、複数の光学観察・計測結果をせん断応力というレオロジー計測結果をキーとして同期させることで統合的に考察でき、同時に発生している様々なスケールの構造変化を評価することが可能となる。

5 レオ・オプティックスの最新動向

レオ・オプティックスの技術は機器の高性能化と新たな技術開発により日々進化している。ここでは中でも特に二次元の複屈折分布を高速に評価する技術について紹介する。ひとつは一般的なデジカメを用いた安価な技術、もうひとつは新開発機器により可能となった技術である。

二次元的な複屈折分布を可視化する方法として光弾性実験がある。単色光の偏光を透明な試料に透過し、前後にクロスニコル配置（直交配置）した偏光板を用いて複屈折による位相差が π 異なる位置に現れる暗線の縞模様を観察する方法である。複屈折による位相差が非常に大きい場合には有効であるが、流動による複屈折を観察する場合は非常に強い固有複屈折を有する流体と大きな光路長を持つ二次元流路が必要で、高分子メルトの流動などに適用例が限られてきた。Itoらは、光源に白色光を用いてクロスニコル配置の偏光板により複屈折による位相差を干渉色分布として求める方法を開発した⁴⁾。複屈折は光の波長により同じ光路長でも発生する位相差が異なる。光源として白色光を用いると複屈折分布が存在する場合には光の波長による干渉が生じ、色鮮やかな模様が浮かび上がる。発生した色を干渉色図とよばれるカラーチャートと比較することで複屈折による微細な位相差を定量的に求めることができる。具体的にはクロスニコル配置で観察される画像をデジタルカメラで記録し、その画像をHSB表色系（色相 Hue, 彩度 Saturation, 明度 Brightness）における「色相 (Hue)」を用いて解析し、二次元の分布を得る。代表的な干渉色図である Michel-Lévy interference color chart に基づいて定式化した位相差と色相の関係を用いて、撮影・解析した色相の二次元分布から位相差（および複屈折）の分布を算出する。Itoらはレオメータに設置した同心二重円筒流路内のひも状ミセル水溶液のシアバンド構造を本手法により観察し、内円筒側（回転壁面側）のバンドにおいて流

Fig. 8 Entire circumference observation images of CTAB/NaSal solution visualized by crossed-Nicol method at shear rate of (a) 1.0, (b) 2.0, (c) 5.0, and (d) 10 s⁻¹. Enlarged view of each image is also shown. Bottom of enlarged view is inner wall⁴⁾. (巻頭カラー写真参照)

動誘起構造が周期的に形成され、これが周期的応力変動を発生させる原因であることを見いだした。Fig. 8にこの手法により解析された同心二重円筒型流路内の複屈折分布を示す⁴⁾。流路全周にわたりシアバンドが一様に形成されていることが分かる。この手法を用いると、白色光源と2枚の偏光板、デジタルカメラ、そして画像解析ができるPCがあれば二次元の複屈折分布が算出できる。一般的なラボレベルで実施できるが、解析にノウハウと時間が必要であり、リアルタイムでの解析や動画への対応は容易ではない。

これに対して、近年製品化された革新的装置として偏光高速度カメラがある。これは高速度カメラの映像素子において、4つの画素を1セットとし、それぞれに異なる主軸方向を持たせた偏光素子を取り付けたものである。この4画素で得られた光強度信号から複屈折の位相差と配向角が算出されるため、1回の撮影で複屈折と配向角の二次元的な分布が得られる。さらに、ベースとなっているカメラが高速度カメラであるため、複屈折の位相差と配向角が高速度でリアルタイム観察が可能となる。すでにフィルム成形の現場では従来の製品管理とは全く異なる革新的な全領域検査装置として利用されている。この装置のカメラヘッドにマクロレンズや光学顕微鏡を取り付けレオメータに組み込むことで、シアバンドや流動誘起構造に起因するミクロンからミリ・オーダーの二次元的な複屈折・配向角分布を簡単に可視化することが

できる。本装置の詳細については開発者である大沼氏が本特集に寄稿くださっているので、ご覧いただきたい。さらに、同じく本特集に寄稿いただいている井上氏らは同等な原理を用いたカメラによるレオ・オブティックスの実施例を報告している⁵⁾。

6 まとめ

レオ・オブティックスは流動により誘起される様々なスケールの構造変化や流動配向、相変化、シアバンド、テクスチャー形成など様々な問題に適用出来る可能性を持っている。といっても炭素粒子懸濁液のように光が全く透過できない液体には適用できず、その他にも適用に条件がある場合も多い。また、光学測定で得られた結果にはいくつかの効果が重なった場合もあり、データの解

釈が困難なことも多々ある。そのため、流れ場の直接観察、小角光散乱や複屈折・二色性測定など複数の技術を複合して現象を考察することが重要である。計測技術を開発する立場としては、複雑流体の流動現象や微視的構造の解析などに新しい知見を与えられるよう、より正確で使いやすい技術を今後も検討していくつもりである。

文 献

- 1) 高橋勉, 八子信行, 白樫正高, 日本レオロジー学会誌, **29** (1), 27 (2001).
- 2) 高橋勉, 立井優也, 白樫正高, 日本レオロジー学会誌, **35** (2), 99 (2007).
- 3) G. G. Fuller & K. J. Mikkelsen, *J. Rheol.*, **33**, 761 (1989).
- 4) M. Ito, Y. Yoshitake & T. Takahashi, *J. Rheol.*, **60**, 1019 (2016).
- 5) N. Oba & T. Inoue, *Rheologica Acta*, **55**, 699 (2016).