

# フィルムモニタリング装置の開発 —超短パルスレーザ加工技術の応用—

Development of Film Monitoring Equipment: Application of Ultrashort Pulse Laser Processing Technology



大 淵 隆 文	Takafumi Ohfuchi	①
山 田 雄 也	Yuya Yamada	②
岡 本 拓 也	Takuya Okamoto	②
福 田 直 晃	Naoaki Fukuda	①
小 崎 修 司	Syuji Ozaki	③
鈴 川 正 紘	Masahiro Suzukawa	③

## あらまし

当社は光の偏光状態をイメージングすることで、フィルムなどの透明材料の性状をモニタリングできる装置を開発した。偏光イメージングを行うため、装置に用いている特殊な光学素子は、超短パルスレーザをガラス内部に集光照射することにより形成されるナノ周期構造を応用したものである。

開発した装置をフィルム製造ラインに組み込むことで、リアルタイムでフィルムの位相差分布の計測が可能となり、製造の条件出しの効率化が図れることを確認している。当社精密機械センター内にデモ装置を設置し、フィルム製造テストや各種サンプルの計測などに活用している。

## Abstract

Hitachi Zosen has developed equipment that can monitor properties of transparent materials such as films by imaging the polarization state of light. A unique optical element that enables the polarization imaging of light was fabricated using ultrashort pulse laser processing technology.

The equipment can measure retardation distribution of film and contribute to the improvement of setting conditions efficiency. Demonstration equipment has been installed in the precision machinery center of Hitachi Zosen, and it has been used for film manufacturing trials and various sample measurements.

## 1. 緒 言

液晶テレビ、スマートフォンなどの液晶ディスプレイを含む様々な製品で光学フィルムが用いられている。これらの製品の普及に伴い、光学フィルムの需要が増え、その光学特性の高機能化や高品質化に対するニーズが高まっている<sup>1)</sup>。

当社が取り扱っている製品には、光学フィルムやシートを成形するプラスチック成形装置があり、顧客の成形品のニーズに対応すべく装置開発とテスト運転を行っている。一般的にフィルムの品質評価は製造ラインからフィルム

を切り取る、あるいはライン上で定点計測を行うことが多い。フィルム製造時にインラインでフィルム全面を評価することによって、より高度なフィルムの品質管理が可能となり、製品製造時の歩留まりが向上する（原料ロスの低減）。また、フィルム製造条件の探索が簡易になることも期待できる（作業効率の改善）。

そこで当社は、偏光状態を二次元でイメージングし、インラインでフィルムをモニタリングできる装置を開発した。本装置では、レーザ加工技術により作製した特殊な光学素子を用いて偏光イメージングを行っている。光学フィルムの多くは材料の屈折率に異方性があり(複屈折)、光がフィルムを透過することで光の偏光状態が変化する。この偏光状態の変化を解析することで、フィルム性状、例えばフィルムの位相差分布を詳細に知ることが可能となる。

本論文では、まずフィルムモニタリング装置による偏光

① 技術研究所 ものづくり基盤研究センター 博士(工学)

② 技術研究所 ものづくり基盤研究センター

③ 機械事業本部 システム機械ビジネスユニット システム機械設計部

解析の原理を説明する。次に、偏光イメージングのキーデバイスである特殊光学素子の作製方法について説明する。最後に、開発したフィルムモニタリング装置、およびその撮影結果を紹介する。

## 2. 複屈折と偏光解析

**2.1 偏光と複屈折** 光は電磁波であり、色や明るさ、偏光という情報を有している。偏光とは、光の振動状態のことである。人間の目や通常のカメらは色や明るさの情報を取得して物体を認識しているが、偏光を情報として識別できない。偏光を情報として取得することで、色や明るさだけでは識別が難しい物体の形状や、透明材料の内部応力の観察などが可能となる<sup>2)</sup>。

続いて、偏光の概念について簡単に説明する。光の振動状態は直交する2成分の波の合成波で表すことができる。図1に示すように、直交する二つの波の位相や振幅により偏光状態は異なる。

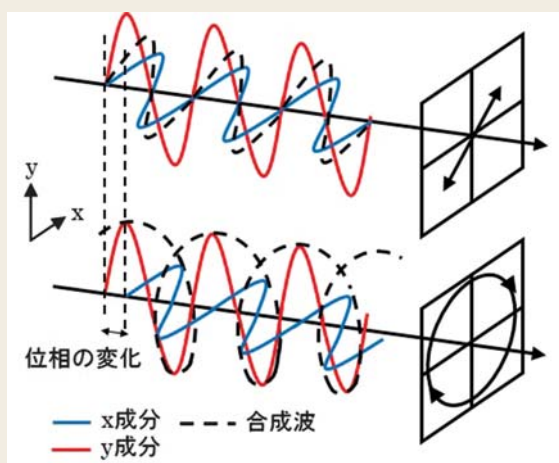


図1 位相の変化による偏光の違い

プラスチックフィルムのような透明材料を光が透過すると、材料が有する複屈折により透過前後で偏光状態が変化する。図2に複屈折材料を透過する光が伝播するイメージを示す。

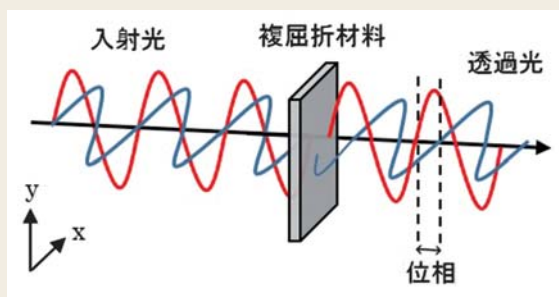


図2 複屈折による偏光の変化

光が材料内部を進む速さは屈折率に依存する。その

ため、直交する2成分に分解した波が材料内部を進む速さはそれぞれの屈折率によって異なる。その結果、材料透過前後の2成分の波の位相に差が生じ、偏光状態が変化する。このように偏光状態の変化を計測することで、複屈折材料の性状を評価することができる。

**2.2 偏光解析** 偏光情報を取得する方法として、カメラの前に偏光子などの光学素子を配置し、それらの角度を変えて画像を取得し、光強度を解析する手法がある<sup>2)</sup>。この方法の場合、光学素子を回転させ、同じ位置の対象物を撮影する必要がある。そのため、動いている物体の偏光解析は難しい。

異なる4種類の微小な光学素子を二次元状に周期的に配列させた光学素子を用いることでリアルタイムでの偏光解析が可能となる<sup>2), 3)</sup>。我々は微小な複屈折セルを配列させた特殊光学素子を偏光解析に用いた。

特殊光学素子を用いた偏光解析は図3に示す構成となる。

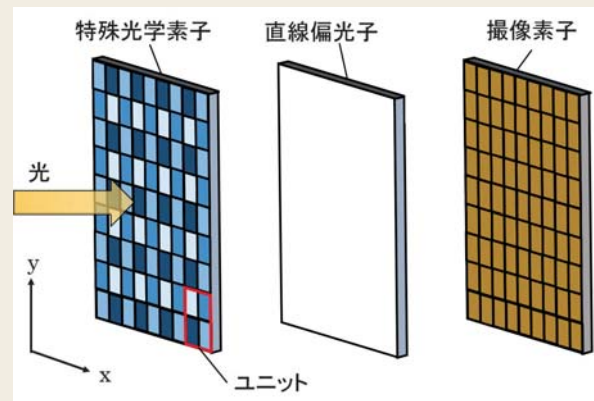


図3 特殊光学素子を用いた偏光解析の構成

光は特殊光学素子に入射し、偏光状態が変化した後、直線偏光子を通り、その強度分布が撮像素子によって検出される。特殊光学素子は複屈折特性の異なる四つのセルを周期的に配列しており、それらのセルの位置と撮像素子のピクセルの位置が対応している。四つの隣接する $2 \times 2$ のセルをユニットとする。あるユニットでの入射光の検出イメージを図4に示す。

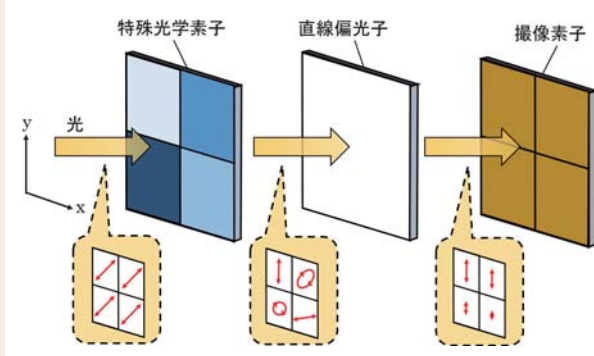


図4 特殊光学素子のユニット



特殊光学素子の1ユニット中の四つのセルは異なる複屈折特性を有するため、各セル透過後の偏光状態は異なる。そのため、直線偏光子の透過光強度が異なり、撮像素子が取得する光強度に差異が生じる。この四つのセルの光強度の差異を利用して、入射光の偏光解析を行う。光学素子の回転が不要であり、取得した1枚の画像から偏光解析を行い、リアルタイムでの偏光イメージングが可能となる。

### 3. 超短パルスレーザー加工による偏光イメージング用特殊光学素子の作製

#### 3.1 超短パルスレーザーによる材料の内部加工

パルス幅がフェムト秒やピコ秒オーダーの超短パルスレーザーを透明材料内部に集光すると、非線形光学効果を経て集光点近傍のみで構造変化を誘起することができる。そのため、ガラスなどの透明材料表面をレーザーで損傷させることなく、材料内部の局所領域を加工することが可能となる<sup>4)</sup>。近年、超短パルスレーザーのガラス内部加工として、自己組織ナノ周期構造の形成に関する研究が盛んに行われているが<sup>5)-7)</sup>、その応用に関する研究は皆無に等しい。そこで、我々はこの自己組織ナノ周期構造の応用に着目した。

石英ガラス内部に超短パルスレーザーを集光照射後、ガラスを研磨し、内部誘起構造を表面に露出させて観察した。電子顕微鏡写真を図5に示す。図5(a)は内部誘起構造を上から観察した写真、(b)は構造断面を観察した写真である。

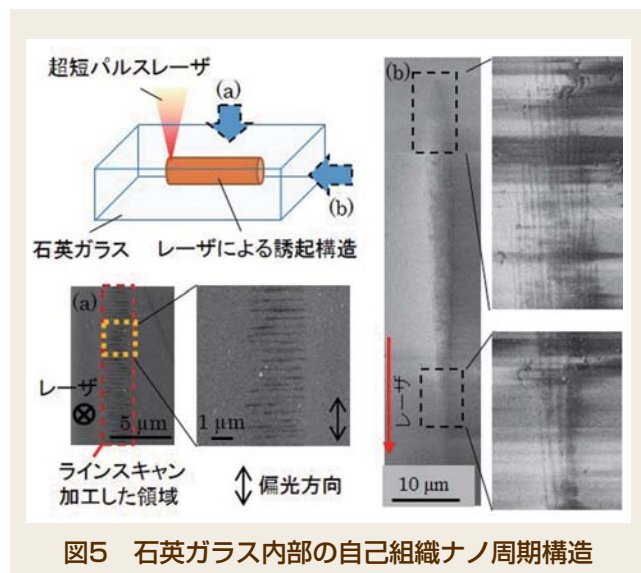


図5 石英ガラス内部の自己組織ナノ周期構造

図5に示す自己組織ナノ周期構造は、凹凸構造を形成しているのではなく、ナノ空孔を含む酸素欠乏欠陥領域が回折格子状に分布した構造であり、屈折率の異なる領域が特定方向に分布するため、構造的複屈折を発生する<sup>7)</sup>。従って、超短パルスレーザーの照射により光学的に等方な石英ガラス内部の微小領域(幅数 $\mu\text{m}$ )に複屈折を付与することが可能となる。

複屈折は主軸方位と位相差の二つで特徴づけられる。レーザーにより形成される自己組織ナノ周期構造の場合、主軸方位は照射するレーザーの偏光方向と垂直に形成され、位相差はレーザー加工条件(例えば照射パルスエネルギー、パルス幅)に依存する。

#### 3.2 レーザ加工方法

超短パルスレーザーの集光照射により特殊光学素子を作製するためのレーザー加工光学系を図6に示す。光学系中のエネルギー調整部で照射するレーザーのパルスエネルギーを調整し、形成される複屈折領域の位相差を制御する。また、偏光方向調整部で照射するレーザーの偏光方向を調整し、形成される複屈折の主軸方位(ナノ周期構造の方位)を制御する。この二つの調整部とXYZ精密ステージにより、4種の異なる複屈折セルを周期的に配列させた特殊光学素子を作製する。

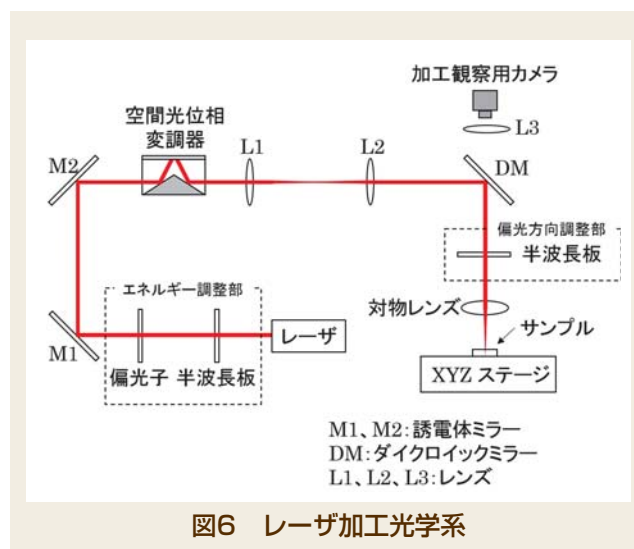


図6 レーザ加工光学系

特殊光学素子を作製するためには、レーザー加工条件を最適化し、所定の特性の複屈折セルをレーザー加工による透過損失を抑えて形成する必要がある。そのため、我々はレーザー加工条件と複屈折セルの加工特性の関係を詳細に調べた。その結果、100 pulse/ $\mu\text{m}$ 以上のレーザーパルス照射し、ナノ周期構造をレーザーの光軸方向に対して連続的に形成することが透過率の損失抑制に有効であることを見出した<sup>8)</sup>。

一方、通常のレーザー加工ではレーザーは1点に集光されるため、撮像素子のピクセル数に対応した複屈折セルを有する特殊光学素子を作製するには多くの時間を要するという課題がある。

そこで、特殊光学素子の製造を効率化するために、レーザーの多点同時照射による加工を試みた。多点同時照射加工を実現するために、レーザー加工光学系に空間光位相変調器を導入した。空間光位相変調器は、レーザー波面の位相を二次元で変調し、レーザーの集光状態を変化させる装置である<sup>9)</sup>。加工の一例として、空間光位相変調器を利用したレーザーの50点の多点同時照射加工の様子を図7に示す。50点の多点同時照射により、特殊光学素子の作製時間を1/50に短縮することができる。

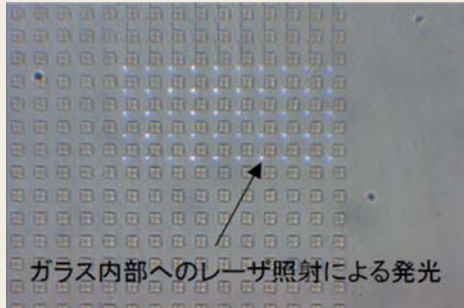


図7 多点同時照射加工の様子

特殊光学素子の作製イメージを図8に示す。超短パルスレーザーの偏光方向をある方向に設定し、同じ加工条件で多点同時照射加工とXYZ精密ステージを組み合わせ、ユニット中の1セルを特殊光学素子全面に対して加工する。他のセルも同様に超短パルスレーザーの偏光方向や加工条件を調整した後、加工を行う。

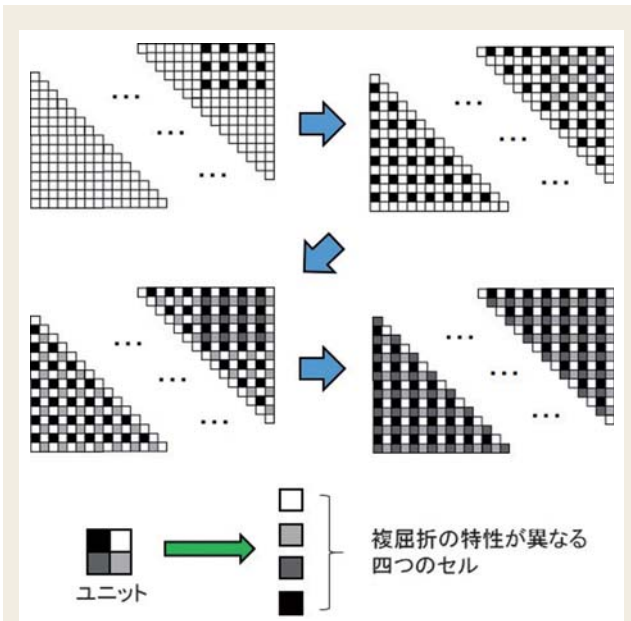


図8 特殊光学素子の作製イメージ

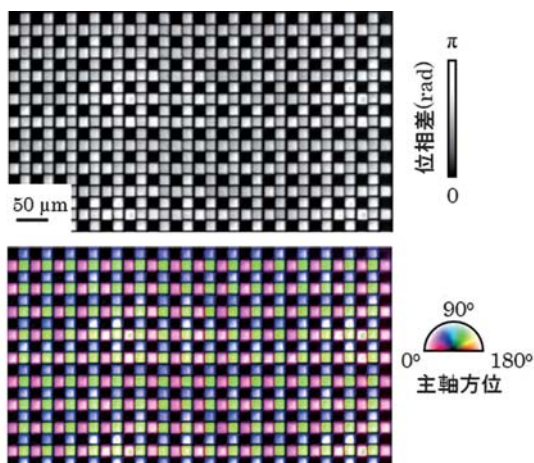


図9 作製した特殊光学素子の偏光顕微鏡画像

作製した特殊光学素子の偏光顕微鏡画像を図9に示す。照射するレーザーの偏光方向や照射パルスエネルギーを調整することで、複屈折特性が異なる4種のセルを周期的に配列させることができる。

## 4. フィルムモニタリング装置

前章の方法で作製した特殊光学素子を用い、偏光イメージングを利用したフィルムモニタリング装置を開発した。当社精密機械センター内に設置しているフィルムモニタリング装置の外観と概略構成を図10に、主な仕様を表1に示す。本章では、本装置を用いた透明材料の撮影結果を紹介する。

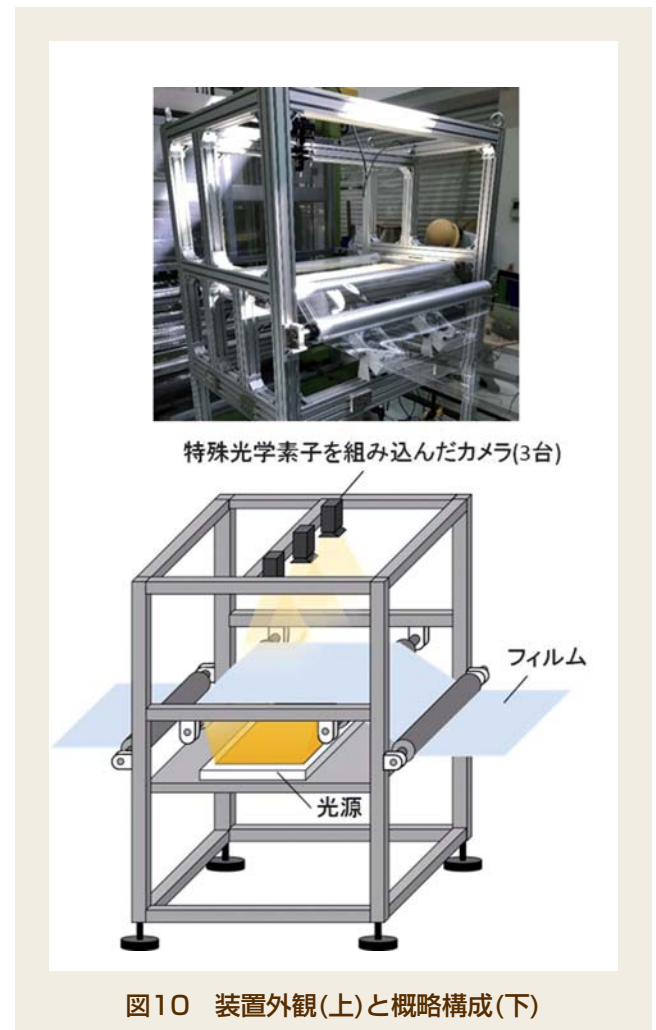


図10 装置外観(上)と概略構成(下)

表1 装置の主な仕様

カメラ台数	3台
視野範囲(調整可)	約 150 mm × 90 mm (1台)
画素数	約 590 × 350 pixel
計測中心波長	500 nm、550 nm、600 nm
光源	白色 LED
最大フィルム幅	1000 mm



**4.1 フィルム延伸実験時の位相差分布計測** 加熱されたフィルムを引き伸ばすことで、フィルム特性が変化する。これは、フィルム延伸技術として知られており、例えば、延伸によりフィルムに歪みを発生させることで、フィルムの位相差を制御できる。そこで、当社精密機械センター内の一軸延伸装置を用いて、フィルムを一軸延伸した際のフィルム位相差分布を観察した。実験の概略を図11に示す。

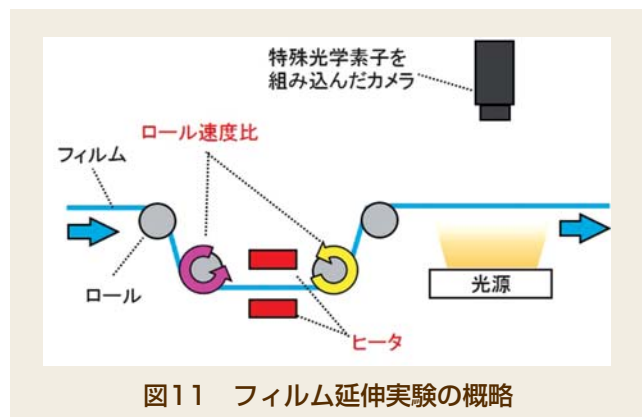


図11 フィルム延伸実験の概略

ヒータを用いてフィルムを加熱し、ロールの速度比を変えることでフィルムの延伸を行う。延伸直後にフィルムモニタリング装置を設置し、フィルム位相差分布を観察する。実験では、モニタリング装置でフィルム位相差分布を観察しながら、位相差分布が均一になるようヒータ温度やロール速度比などの延伸条件の変更を行った。図12に計測したフィルム位相差分布を示す。

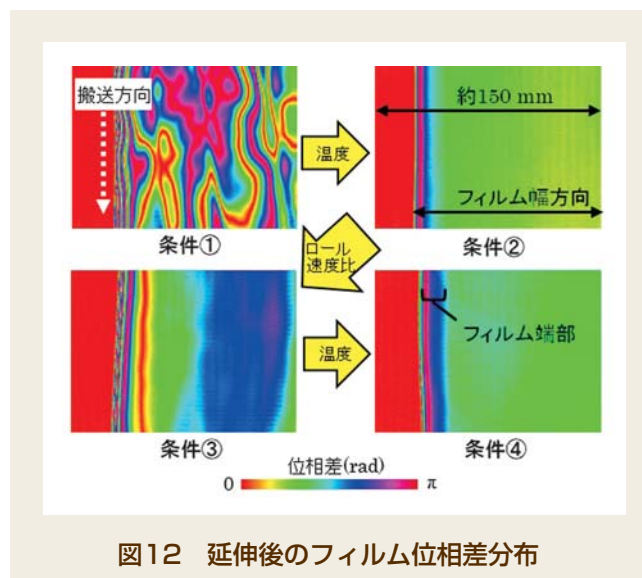


図12 延伸後のフィルム位相差分布

フィルム位相差分布をリアルタイムで観察しながら、フィルム延伸時のヒータ温度、ロールの速度比などを調整し、フィルムの位相差分布を均一にすることができた。このように、モニタリング装置を用いることで延伸条件の探索時間の短縮化を図ることが明らかとなった。

**4.2 プラスチック成形品の歪み計測** 射出成形や押出成形により、様々な形状のプラスチック製品が製造されている。製造時の成形条件や冷却過程により、プラスチック製品に応力がかかり、歪み（複屈折）が発生

することが知られている。このようなプラスチック製品の複屈折の分布は、偏光イメージングにより観察することが可能である。

そこで、モニタリング装置でプラスチックカップ、スプーン、ケースを撮影した。図13に通常のカメラとモニタリング装置で撮影した結果の比較を示す。モニタリング装置では、通常のカメラでは観測できない製品の複屈折分布などが詳細にわかる。

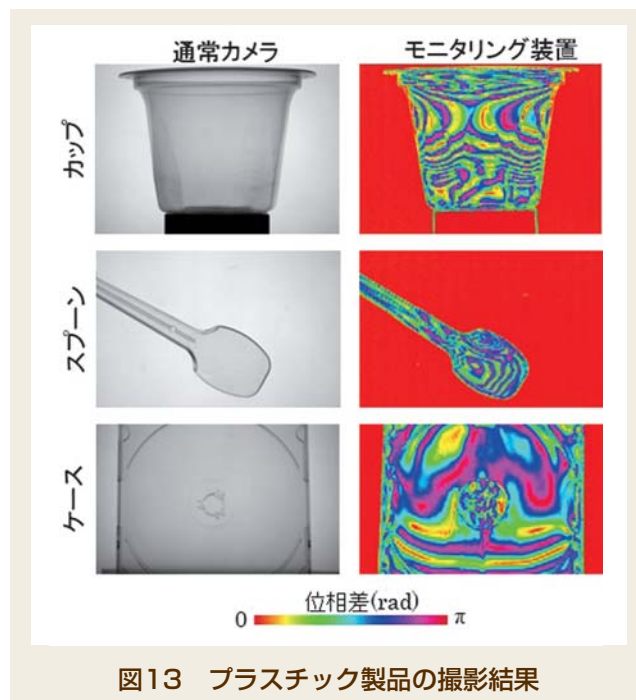


図13 プラスチック製品の撮影結果

## 5. 結 言

偏光イメージングを利用したフィルムモニタリング装置を開発した。フィルムモニタリング装置には超短パルスレーザー加工技術で作製した特殊光学素子を用い、偏光イメージングを行っている。

当社内のフィルム製造テストラインにフィルムモニタリング装置を設置し、フィルムを観察することで、フィルム製造の条件出しの効率化が図れることを確認している。他にもプラスチック成形品など、様々な透明材料の評価が可能である。

当社精密機械センター内にフィルムモニタリング装置は常設されており、各種フィルムやプラスチック製品の撮影テストを受け付けている。

### 【謝辞】

本研究に関しては、京都大学 工学研究科 三浦清貴教授、下間靖彦准教授、サウサンプトン大学 坂倉政明シニアリサーチフェローに多大なご協力をいただきました。深く感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 今田潔：押出成形装置の高度化と新しい技術開発の

- 取組み, プラスチックエージ, **2018**, 6, 63-68.
- 2) Goldstein, D. H.: Polarized Light, 3rd Ed., **2011**.
  - 3) Gruev, V.; Perkins, R.; York, T.: CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters, Opt. Express, 2010, 18, 19087-19094.
  - 4) Glezer, E.; Milosavljevic, M. et al.: Three-dimensional optical storage inside transparent materials, Opt. Lett., **1996**, 21 (24) , 2023-2025.
  - 5) Shimotsuma, Y.; Kazansky, P. et al.: Self-Organized Nanogratings in Glass Irradiated by Ultrashort Light Pulses, Phys. Rev. Lett., **2003**, 91 (24) , 247405.
  - 6) Beresna, M.; Gecevicius, M.; Kazansky, P.: Ultrafast laser direct writing and nanostructuring in transparent materials, Adv. in Opt. Phot., **2014**, 6, 293-339.
  - 7) Shimotsuma, Y.; Sakakura, M. et al.: Ultrafast Manipulation of Self-Assembled Form Birefringence in Glass, Adv. Mater., **2010**, 22, 4039-4043.
  - 8) Ohfuchi, T.; Yamada, Y. et al.: The Characteristics of Birefringence and Optical Loss in Femtosecond-Laser-Induced Region in terms of Nanogratings Distribution, J. Laser Micro/Nanoeng, **2017**, 12 (3) , 217-221.
  - 9) Hayasaki, Y.; Sugimoto, T. et al.: Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator, Appl. Phys. Lett, **2005**, 87, 031101.

## 【文責者連絡先】

Hitz日立造船株式会社 事業企画・技術開発本部  
技術研究所 ものづくり基盤研究センター  
大淵隆文

Tel : 06-6551-9128 Fax : 06-6551-9841

e-mail : ohfuchi@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation  
Business Planning & Technology Development  
Headquarters  
Technical Research Institute  
Innovative Manufacturing & Technology  
Research Center  
Takafumi Ohfuchi  
Tel : +81-6-6551-9128 Fax : +81-6-6551-9841  
e-mail : ohfuchi@hitachizosen.co.jp



大淵 隆文



山田 雄也



岡本 拓也



福田 直晃



小崎 修司



鈴川 正紘