

# 透明材料の屈折率均一性を低コストで評価できる 背景型シュリーレン法を用いた可視化手法

Method for Quantitative Visualization of Refractive Index Uniformity in  
Transparent Material Based on Background-Oriented Schlieren Technique

## 精密な光学部品の品質を低コストで評価する技術を開発し、 製造条件の最適化を効率的に行う仕組みを構築

光学部品を高精度に製造するためには、材料内部の屈折率を均一に制御することが重要です。射出成形で製造される樹脂光学部品は、製造条件によって応力が生じて密度が不均一になると、屈折率が変化します。

東芝は、従来手法と比較して簡易な光学系で、透明材料内部の屈折率分布を定量的に測定する、背景型シュリーレン (BOS: Background-Oriented Schlieren) 法を用いた可視化手法を開発しています。開発した手法により、応力で生じる微小な屈折率変化を定量的に測定できることがわかりました。製品検査工程において、屈折率の均一性を低コストで評価することで、製造条件を効率的に見直し、生産性を向上させる新しい仕組みを構築できます。

### 背景と目標

複合機に用いられるレンズなどの光学部品には、非常に高い光学精度が求められます。高精度な光学部品を製造するためには、形状精度のほか、材料内部の屈折率を均一に制御する技術が必要です。射出成形で加工する樹脂製の光学部品の場合、加工時の温度分布など様々な要因で、固化時に応力が残留して密度が不均一になり、その結果、屈折率が不均一になります。したがって、生産性を向上させるためには、応力を可視化し応力が残留しにくいように、加工温度など様々な製造条件を最適化する必要があります。

透明材料内部の応力の可視化には、様々な実験的手法が用いられます。光学的手法の一つである光弾性法は、非接触かつ全視野で応力分布を可視化できる利点があり、広く利用されています。しかし、一般的に光学的手法には複雑で高精度な光学系が必要で、低コスト化や、測定を容易にすることが課題となっています。

近年、衝撃波などによる流体中の密度変化に伴う屈折率変化を可視化する、BOS法が開発されています<sup>(1)</sup>。これは、屈折率勾配を持つ媒質中を通過する光線が高屈折率側に曲がる性質を利用し、その曲がり(偏角)により生じる外観画像のゆがみを定量化し、屈折率変化を可視化する技術です。BOS法には簡易な光学系で低コストに屈折率変化に伴う偏角を測定できるメリットがあります。BOS法で観測される

偏角は光線経路上で積分された値であるため、屈折率変化を定量的に求めるためには、偏角から屈折率分布を再構成する技術が必要になります。しかし、従来の再構成技術は定量性に課題があり、残留応力で生じる微小な屈折率変化を求めることが難しく、BOS法は高い精度が必要な固体材料の屈折率変化の観測には余り用いられていませんでした。

そこで東芝は、BOS法の定量性向上を目指し、偏角と屈折率の関係を表す光線方程式を応用し、軸対称な屈折率変化が生じる現象について、BOS法で得られた偏角から屈折率分布を再構成する手法を開発しました。この手法を用いて、ガラス中をレーザーが透過した際に熱膨張で生じる応力や、ガラスに荷重を与えた際に生じる応力による、ガラス内部の屈折率変化を定量的に可視化しました<sup>(2), (3)</sup>。例として、屈折率と応力の関係が既知であるガラスに球面を接触させて、生じた応力による屈折率変化を開発手法で可視化し、定量性を検証しました。

### ガラスの圧縮応力可視化技術

図1に実験装置を示します。透明なガラスの背後に斑点模様のある背景を配置し、ガラスを透過した背景の画像をデジタルカメラで撮影します。球面でガラスに垂直荷重を与えると、接点近傍の密度が増加し、局所的に屈折率勾配が生じます。すると、接点近傍を通過した光線は偏向し、カメラからは、撮像素子上の点Pに結像していた点Aが、

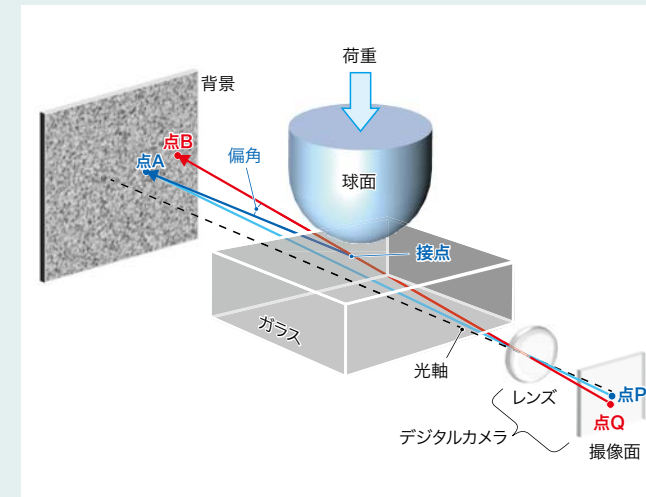


図1. BOS法の実験装置  
光線の偏角を、背景模様の移動量PQから求めます。

点Bに移動したかのように、点Qで観測されます。このときの偏角は、移動距離PQから幾何学的な関係により求められます。

図2に背景模様の移動量分布の測定例を示します。荷重を与えた前後の画像を、オプティカルフローと呼ばれる画像の特徴点追跡技術で処理すると、模様の移動量(画素数(ピクセル))分布が得られます。図2では、球面とガラスの接点近傍で大きな移動量が観測されました。ここで、接点を含み撮像面に平行な面上に、接点を原点とし、深さ0.5 mmの位置を上辺中央とする幅4 mm×深さ1 mmの検証範囲を定義します。検証範囲の偏角を求め、開発した再構成手法により屈折率変化量 $\Delta n$ の実験値を得ました。

一方、平面と球面の接点近傍に生じる応力は、ヘルツの接触理論により、z軸上について理論解が得られます。z軸上の解析結果が理論解と一致するように構造解析を行い、検証範囲の応力を求め、 $\Delta n$ の計算値を得ました。

### 開発した再構成手法の検証

図3に検証範囲で得た $\Delta n$ の実験値と計算値を示します。実験値の分布はほぼ計算値と同様であることが示されました。 $\Delta n$ の測定分解能は $10^{-5}$ オーダーであり、実験値と計算値の差は約 $1 \times 10^{-5}$ でした。したがって、開発した再構成手法により、圧縮応力により生じた微小な $\Delta n$ を、 $10^{-5}$ オーダーの正確さで定量的に測定できることがわかりました。

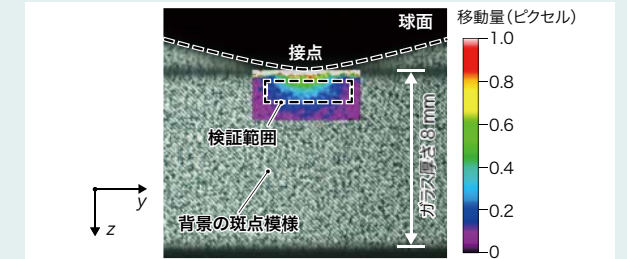


図2. ガラスを透過した背景模様の移動量分布  
ガラスを透過して見える接点付近の背景が、僅かに移動しています。

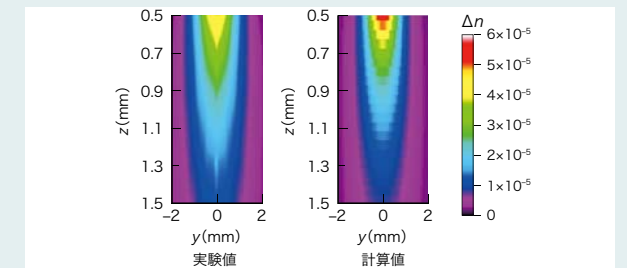


図3. 検証範囲の屈折率変化  
開発した再構成手法により、理論に基づいた計算値に近い実験値が得られました。

実験値と計算値の差異は、主に、BOS法では避けられない撮影画像のぼけや、撮像素子のノイズなどの要因で生じたと推定されます。ノイズ低減技術の適用や、撮影時の光源の工夫などの改善を図ることで、より精度の高い測定結果が得られると考えています。

### 今後の展望

透明材料の屈折率均一性を低コストで評価する技術は、光学部品製造における現象理解を助け、製造条件の最適化や製品品質の安定化に寄与すると期待されます。今後、測定感度や精度の改善とともに、測定対象である材料の種類や形状などの違いに対応できるように、汎用性の向上を目指していきます。

### 文献

- Raffel, M. Background-oriented schlieren (BOS) techniques. Experiments in Fluids. 2015, 56, 3, p.1-17.
- 戸谷公紀, 大野博司. "ひずみ分布の光学的可視化". 日本機械学会 2018年度年次大会講演論文集. 大阪, 2018-09, 日本機械学会. 2018, G0300404. (CD-ROM).
- Ohno, H.; Toya, K. Scalar potential reconstruction method of axisymmetric 3D refractive index fields with background-oriented schlieren. Optics Express. 2019, 27, 5, p.5990-6002.

### 戸谷 公紀

研究開発本部  
生産技術センター 構造設計技術研究部  
日本機械学会会員 技術士(機械部門)