

偏光・干渉を用いた画像による非破壊検査技術の開発

光科 志智 亘 太田幸宏

Development of Non-Destructive Inspection Technique Using Polarization Interference

Wataru Shichi and Yukihiko Ohta

We have developed a non-destructive inspection technique using polarization interference to visualize the internal state of plastics. Birefringence distribution of externally forced plastic samples was observed by means of photo elastic measurement using liquid crystal display (LCD) as light source. Principal stress direction in plastic samples was visualized by means of photo elastic measurement and analysis. Furthermore, we have constructed Schlieren optical system in order to observe a density distribution inside the plastics.

1. はじめに

プラスチック材料は、金属やガラスに比べて軽量で、加工が比較的容易にできることから、自動車の部品、電子・電気製品や医療器具など様々な分野で利用されている。特に自動車部品に関しては燃料タンクやヘッドライトモジュールなど、軽量化や機能の集積化に向けてプラスチック材料の利用が積極的に行われている。

プラスチック材料は製品に加工する際に残留応力や密度ムラなどが発生し、それらが製品の破壊や変形といった不具合の原因となることが知られている。したがって、構造物に生じる応力や密度分布の把握は安全かつ低コストで経済的な製品設計および品質管理を可能とするために必要となる非常に重要な項目である。しかしながら残留応力や密度ムラなどは直接目視で確認することが難しいという問題点がある。

残留応力や密度ムラなどの構造物の内部状態を評価する方法には、被観察物を破壊して解析するものや、非破壊で解析するもの、また、領域を点で測定するものや全視野で測定するものなど様々な測定方法が存在し、それらには一長一短の特徴がある。また、コンピューターシュミレーションによる解析も行われている。

本研究は、当センター光科が有する光計測およびイメージング技術を利用して、光学的手法によりプラスチック製品の応力や密度ムラなどの内部状態に関する情報を可視化・評価する技術を開発し、安心・

安全なものづくりに向けた技術支援を行うことが目的である。この目的のために我々は応力分布の評価として光弾性実験、および密度分布の評価としてシュリーレン光学系に着目し研究を進めている。

光弾性実験は応力や分子配向によって生じた複屈折性を、領域で観察することが出来る全視野測定であるため、応力分布や分子配向に関する情報が一目で確認できる利点があり、また比較的簡単な光学系で観察が行えるなどから、広く利用されている。通常、光弾性実験はフィルムや平板など平面で透明なものが測定対象であるが、応力凍結法^{1),2)}や散乱光法^{3),4)}などにより三次元構造物を対象とした方法も存在する。本研究では通常行われている平面を対象とする光弾性実験系の構築を行い、この実験系を改良することにより、種々のプラスチック材料や製品に対する応力分布の評価を試みている。

平成22年度において我々は、通常可視光線を用いて透明な試料に対して行われる光弾性実験を、近赤外線を用いて、所謂不透明なプラスチック材料への応用を試みた⁵⁾。この結果、見た目が不透明であっても近赤外線が透過する一部の材料において可視化できることが分かった。

一方、シュリーレン光学系は、観察対象の屈折率が密度に依存するため、密度ムラが生じると屈折率差により光が屈折するシュリーレン現象を利用した実験であり、非常にわずかな密度ムラを平面的ではあるが観察することが出来る。通常、この実験は対流や衝撃波といった気体や液体などの流体を可視化

する際によく用いられる実験手法である。本研究ではプラスチック材料や製品を対象とした密度分布の観察を試みる。

平成23年度は、平成22年度に構築した光弾性実験系の改良、実験画像データの解析、および密度分布を評価するためのシュリーレン光学系の構築を行ったので本稿ではこれらについて報告する。

2. 光弾性実験系の改良

平成22年度に構築した光弾性実験系は可視光線(VIS)領域および近赤外線(NIR)領域の光を利用し観察を行ったが、観察範囲が可視光線領域において $\phi 50\text{mm}$ 、近赤外線領域では $\phi 25\text{mm}$ 程度であった。そこで平成23年度は、実験系の改良の一環として、液晶ディスプレイを光源として用いることにより、観察範囲の拡張を試みた。液晶ディスプレイはほぼ均一な面発光光源であり、また出力される光はある一方向に振動する直線偏光という特徴がある。すなわち、液晶ディスプレイはそれ単独で光弾性実験において被観察物への照射光光源として利用することができる。また、今回用いた液晶ディスプレイのバックライトは蛍光灯であるため、発光スペクトルは光の三原色(RGB)に対応する波長域に鋭いピークをもっている。すなわち限定的ではあるが光学素子を外装することなく単色に近い光を選択して利用することも可能である。この液晶ディスプレイを光源として導入することにより、観察範囲がディスプレイの大きさ程度に広げることが出来る。また、液晶ディスプレイを光源として利用することで、被観察物を液晶ディスプレイのみで照射すればよいことから、よりシンプルな実験系にすることが出来る。さらに、本実験系では被観察物の前と後ろに $\lambda/4$ 位相差フィルムを配置した。 $\lambda/4$ 位相差フィルムは直線偏光状態を円偏光状態に変換する光学素子である。またこの素子は円偏光状態を直線偏光状態に変換することも可能である。この光学素子を利用することにより、次節で議論する複屈折の主軸方位に関する情報が無くなり、複屈折の大きさに関する情報のみを得ることが出来る。

次に、この利点を援用し、当センターに配備され

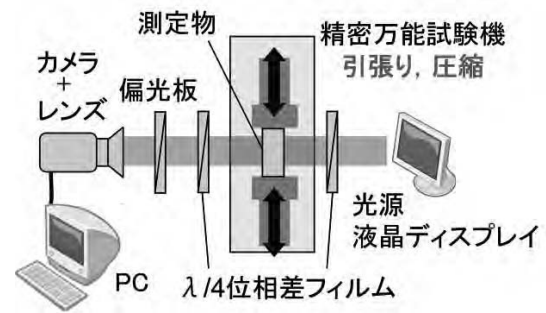


図1 平成23年度構築した光弾性実験系の概念図

ている精密万能試験機を利用した実験が行える光弾性実験系を構築した。精密万能試験機を用いることにより、引張りや圧縮といった外力を定量的に印加することができるため、この実験系を利用することにより、被観察物に所望の負荷を印加した際にその構造のどの部分に応力が集中しているかを推測するための情報を複屈折分布という形で得ることが出来る。また、外力の印加を時間的に制御することにより、被観察物の応力状態を反映した複屈折の変化をリアルタイムで観察することが出来る。さらに被観察物が破壊や変形に至るまでやその後の複屈折の変化などを観察することも出来る。ただし、プラスチック材料は外力により塑性変形が生じるため、弾性変形の領域外では外力と応力は線形関係を示さないことに注意する必要がある。

図1に構築した実験系の模式図を示す。光源の液晶ディスプレイから出力された直線偏光は $\lambda/4$ 位相差フィルムにより円偏光に変換され、精密万能試験機に取り付けた被観察物に直接照射される。被観察物を透過した光は $\lambda/4$ 位相差フィルム、偏光板とカメラを用いて観察される。ここで、カメラ前の $\lambda/4$ 位相差フィルムと偏光板は、これらを通して液晶ディスプレイを観察した際に、ディスプレイの表示が見えなくなるように調整している。このことにより、被観察物を透過した光が複屈折によって偏光状態が変化したものだけをカメラで観察できる。本実験系では前年度に構築した実験系に比べ、平行光線を観察していないためこれにより空間分解能が若干低くなっている。ただし、使用したカメラはこれまでに用いていたものよりも高画素($460 \times 680 \rightarrow 980 \times 1,280$)なものを用いることにより、カメラ起



図2 コンロッド模型の圧縮時の光弾性実験による観察像

因の空間分解能を改善した。

今回構築した実験系を用いて、コネクティングロッド（コンロッド）の模型に引張・圧縮応力を印加したときの複屈折分布を観察した。コンロッドはエンジンにおけるシリンダー内の爆発によるピストン運動を回転運動に変換するための部品であり、非常に強い圧縮や引張りを受ける。このためコンロッドの応力分布を把握することは重要となる。本実験はこのような目的の一環として行われた。模型の材料にはエポキシ樹脂を用いた。また、実験で使用するコンロッド模型はスライスした平面状のものを用意した。このようなコンロッド模型を精密万能試験機に取り付け、定量的に外力を印加した際の様子をリアルタイムで観察した。なお光源である液晶ディスプレイは全面緑色が表示されるように設定した。図2は精密万能試験機により約1.36 kNでコンロッド模型を圧縮した際の光弾性実験の観察画像である。観察画像において、コンロッドがつながる軸の部分の縞が集中している場所では応力の変化が大きいことが考えられる。また、上下で縞模様が異なることが確認できた。このようにコンロッドの形状を反映した応力に起因する縞模様を確認することが出来た。また、コンロッド全体を十分に観察できる実験系であることも確認することができた。

今回構築した実験系は印加する外力を定量的に制御することが出来るため、応力に関するさらに詳しい情報を得ることが出来るようになると思われる。

3. 観察画像の解析

光弾性実験における観察画像には、等色線と等傾線の二つの縞模様が現れる。等色線は複屈折の大きさ、等傾線は複屈折の主軸方向を反映している。ここで、被観察物のある点を透過した光強度は、入射する直線偏光と直行する偏光状態を観察する配置（クロスニコル配置）において

$$I = \sin^2[2\theta] \sin^2[\pi d \lambda^{-1} \delta n] \quad \text{式(1)}$$

で表される。ただし、透過方向には複屈折の変化がないものとする。また、光の最大強度は1としている。ここで θ は複屈折主軸方向と入射直線偏光方向のなす角度である。 d 、 λ 、 δn はそれぞれ透過距離、入射光の波長、複屈折である。また複屈折 δn は応力状態と

$$\delta n = C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{式(2)}$$

なる関係がある。 σ_1 、 σ_2 は透過方向と垂直方向の主応力である。また、 C は光弾性係数で、材料により値が異なる。すなわち、同じ応力が働いていても材料により観察像が異なる。したがって、観察像は光弾性係数が大きい材料ほど、複屈折による縞の数が多く現れ、光弾性係数が小さい材料では縞の数が少ない。光弾性係数が大きい材料としてポリカーボネート（PC）、塩化ビニル（PVC）、ポリエチレンテレフタレート（PET）、エポキシ樹脂などが挙げられる。対して光弾性係数が小さい材料としてガラスやアクリル（PMMA）、ポリプロピレン（PP）、フッ素系樹脂などが挙げられる。

式(1)からクロスニコル配置における光弾性実験では、被観察物のある点を透過した光を観察した際の強度は、 $d \lambda^{-1} \delta n$ が j であるか、 θ が $j\pi/2$ （ただし j は整数）のとき極小となることがわかる。この二つの条件のうち前者は被観察物の材料や構造また入射する光の波長などといった複数の量に依存しているが、後者は入射光の偏光方向と複屈折の主軸方向の成す角度のみに依存している。すなわち、入射させる直線偏光の方向を制御することにより、観察像における光強度の依存性から複屈折の主軸方向に関する情報を得ることが出来る。ただし、この方法で知ることが出来る情報は主軸の方位であり向きに関する情報は含まれていない。ここで上述の条

件から $d\lambda^{-1} \delta n$ が j (j は整数) であるときは入射直線偏光を変化させたとしても光強度が変化しないため、このような部分では主軸方位を推定することが難しい。そこでこのような問題を解決する方法として、発光スペクトルがブロードな白色光源が用いられる。このような光は複数の波長成分が含まれている。このため観察される光強度は、各波長に対する式(1)で記述される光強度を足し合わせたものとなる。ここで、式(1)において入射直線偏光方向と複屈折主軸方向のなす角度 θ を含む振動成分は波長に依存しない。したがって観察される光強度は θ 依存性が強く現れる。

図3は透明な塩化ビニル平板を矢印の方向に圧縮し、入射光の偏光方向を変化させた際の観察画像である。実験系は前年度構築したもので行った。光源はハロゲンランプを用い、可視光線領域である波長400nmから750nmまでの光を利用した。図3より入射光の偏光方向が異なると観察画像が異なることが分かる。解析では入射光の直線偏光方向を5度ずつ0度から180度まで変化させた。このときのある画素における光強度は直線偏光方向と複屈折の主軸方位が一致するときに極小値をとる。したがってこの角度が複屈折の主軸方位であると推定することが出来る。次に、上述の解析方法を各画素に適用しコンピューターで一括処理したものを図4に示す。この図では0度から90度までの主軸の方位を白黒の濃淡で示している。この角度の範囲は、平面内に二つの直交する主軸が存在することと、向きに関する情報が含まれていないことに起因している。図4(a)は外力の印加がない場合で(b)が図3で示した方向に圧縮した場合の解析結果である。外力がない状態では、被観察物の複屈折主軸方位はほとんどの場所で同じ角度を示しているが、これは分子配向の方位を示しているものと考えられる。次に、外力が印加されている状態では、被観察物に白黒の濃淡の分布が生じていることが分かる。すなわち、外力印加に伴い応力が生じ、これを反映した複屈折主軸方位の角度分布が現れている。

同様の解析を近赤外線(波長800nm~1,000nm)を利用した光弾性実験系に対しても行った。被観察



図3 透明塩化ビニル平板における光弾性実験観察画像の入射直線偏光状態(図中矢印)に対する依存性。図の上下方向から圧縮している。

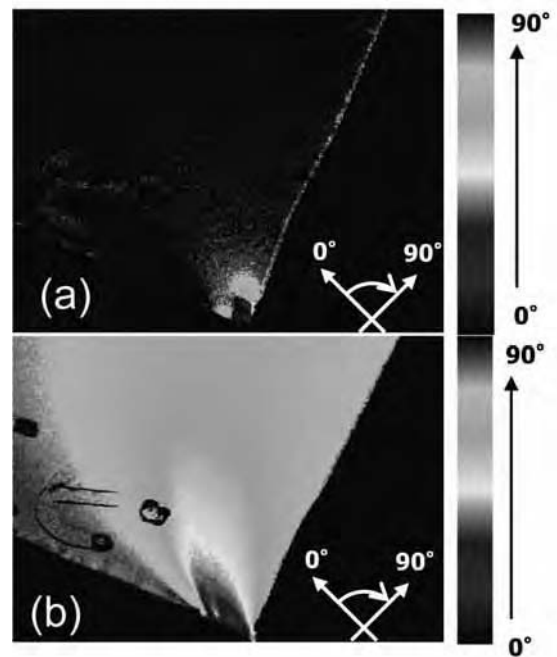


図4 透明塩化ビニル平板の無圧縮時(a)と圧縮時(b)の複屈折主軸方位の分布

物は赤色に着色された中央に穴があるアクリル平板を用意した(図5参照)。この試料は可視光線領域で透過光を観察することが難しいが、近赤外線領域では透過光を観察することが出来ることを平成22年度報告した⁵⁾。このアクリル平板に矢印方向に圧縮した際の解析を行った。図6に解析結果を示す。解析画像においてアクリル平板の下端から中央の穴にかけて白色で分布している。このことから複屈折主軸方位が圧縮方向と同じ上下方向であり、複屈折の主軸方位と応力の主軸方位の対応からこの方位に応力が働いていることが推定できる。一方、暗い部分では圧縮方向と応力の方位が異なっていることなどが推定できる。このように、近赤外線が透過する不透明な材料においても、今回用いた解析方法で複屈

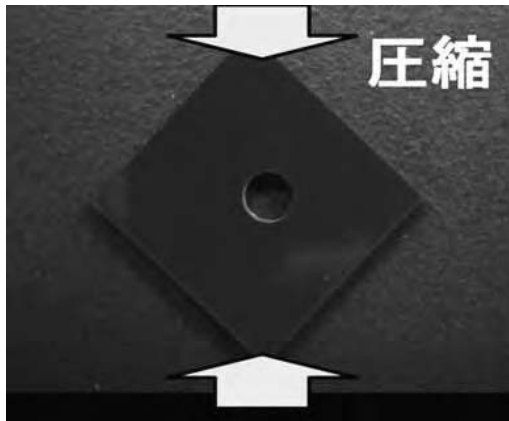


図5 赤色に着色された中央に穴のあるアクリル平板。矢印は圧縮方向。

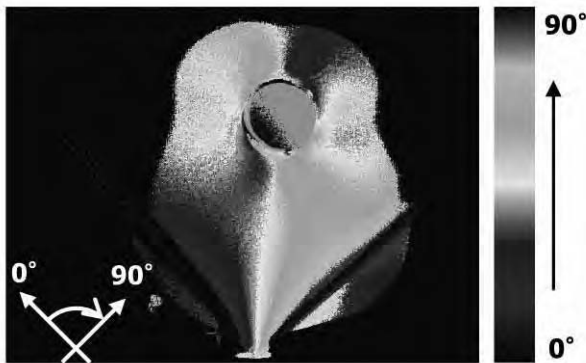


図6 赤色に着色された中央に穴のあるアクリル平板を圧縮した際の複屈折主軸方位の角度分布。角度は白黒の濃淡で表示。

折主軸方位の角度分布を推定することが出来た。

応力に起因する複屈折主軸方位の分布に関する情報は被観察物内においてどの方向に破壊が進行するかを推測する際に役に立つものと考えられる。

4. 密度分布の可視化

プラスチック材料内部の密度ムラの可視化を目的に、シュリーレン光学系を構築した。図7に実験系の概念図を示す。単色光源として波長が633nmの赤色のヘリウムネオンレーザーを用いた。光源からの光は、スペイシャルフィルターとレンズによりコリメートされる。この光は被観察物を通過した後、レンズで集光され、集光点に配置したナイフエッジを介してスクリーンに投影される。被観察物で屈折や散乱した光はレンズによって集光点を通過しないため、これを遮光するようにナイフエッジの位置を調整する。したがって、スクリーンに投影される像は被観察物を透過するとき屈折や散乱により進行方向が変化しなかった光が結像したものである。今回構



図7 シュリーレン光学系の概念図

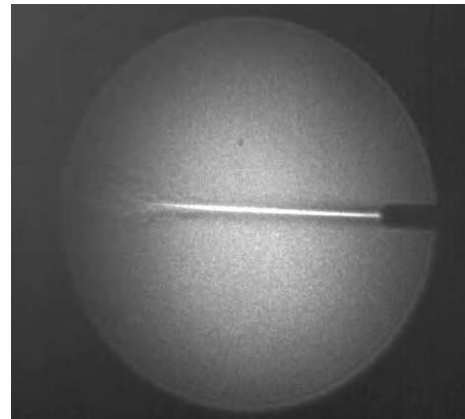


図8 シュリーレン光学系によるスプレーから噴射した空気の流れの観察像

築した光学系で観察可能な領域はφ50mm程度である。

図8は、エアスプレーの空気の流れを構築した光学系で観察した像である。通常エアスプレーから噴出す空気は目視することは出来ないが、観察画像において空気の流れによる僅かな密度ムラを白黒の濃淡として確認することができる。現状ではスクリーンに投影した像を目視、または、カメラで観察を行っているが、より明瞭な観察や画像データの処理の向上を図るため、直接カメラで観察することを考えている。

5. まとめ

光源として液晶ディスプレイを用いた可視光線領域の光弾性実験系を構築した。これを用いることで前年度に構築した実験系よりも観察範囲が拡張された。また、実験系がシンプルになったため、当センターに備わっている精密万能試験機を用いた光弾性実験が行えるようになった。これにより定量的に外力を印加した際の様子をリアルタイムで観察することが可能となった。この実験系を用いてコンロッド模型に外力を印加した際の光弾性実験を行い、応

力に起因する縞模様を観察した。今後は近赤外線を用いた光弾性実験系における観察領域の拡張を考えている。

観察画像の解析の一環として、被観察物に入射させる直線偏光状態を変化させて観察した画像をコンピュータで処理することにより複屈折主軸方位の推定を行った。画像を一括処理することにより、複屈折主軸方位の角度分布を色の変化として可視化することができるようになった。この解析方法で可視光線を用いて透明な塩化ビニル平板の複屈折主軸方位の角度分布の可視化を行うとともに、近赤外線が透過する不透明なアクリル平板に対しても可視化を行った。今後は、観察範囲の拡大および複屈折の分布に関する解析を考えている。

シュリーレン光学系を構築し密度分布の可視化を試みた。エアスプレーの空気の流れを可視化することが出来た。今後は、透明プラスチックやガラスなどへの応用を考えている。

謝辞

コンロッド模型に対する光弾性実験に関して、模型の作成および実験画像の提供をしていただいた株式会社アイゼンに心より御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 矢川元基編：構造工学ハンドブック, 423-440, 丸善 (2004)
- 2) 山崎良一他：光弾性構造解析, 12-52, 日刊工業新聞社 (1997).
- 3) 湯浅亀一他：散乱光法による光弾性応力の解析, 日本機械学会論文集 21 (111), 804-811 (1955).
- 4) T. Kihara : Photoelastic Model Measurement with Rotated Principal Axes by Scattered-light Photoelasticity, *Experimental Mechanics*, 44(5), 455-460 (2004)
- 5) 志智 巨他：不透明なプラスチックにおける残留応力の可視化, 静岡県工業技術研究所報告, 第4号, 202-203 (2011).