ラップトップパソコンの液晶ディスプレイを光源に用いた光弾性法

松田 伸也^{*1}

Photoelasticity using liquid crystal display of laptop computer as light source

Shinya MATSUDA^{*1}^{*1} National Institute of Technology, Numazu College, Department of Mechanical Engineering
3600 Ooka, Numazu-shi, Shizuoka 410-8501, Japan

Received 9 September 2014

Abstract

This paper presents photoelasticity using liquid crystal display (LCD) of laptop computer as light source for engineering education. First, angle of the polarizing axis in LCD was investigated using analyzer. Second, the photoelastic experiments were performed to acrylic rod using an LCD and commercially available educational photoelasticity device, respectively. As the results, the isochromatic line fringe pattern obtained using LCD was seen as well as that of the commercially available device. The photoelastic sensitivity values measured from these fringe patterns were good agreement. Therefore, the photoelasticity using LCD can be ensured a certain level of quantitativity. Moreover, the photoelastic experiments using polarizing lights of red (R), green (G) and blue (B) primary colors of LCD were performed. Optical spectrums of the lights were also measured. As the results, it was confirmed that colors of the isochromatic line fringe patterns correspond directly to the each spectrums. In addition, it was shown that measurement of photoelastic constant and stress analysis can be performed on the basis of single fringe method using the polarizing light of G primary color. For using this method, it is important that the characteristics of polarizing lights of R, G and B primary colors is understood. Finally, the photoelasticity experiment using LCD was lectured to corporate engineers in open lecture of National Institute of Technology, Numazu College. The questionnaire results showed that the photoelasticity experiment was an effectual method for mechanics of materials education since the corporate engineers admired for easy investigating a stress concentration. Photoelasticity using LCD denotes handy method which can be learned fundamental photoelasticity and mechanics of materials including association with characteristics of the lights because of LCD is given variety of polarizing lights.

Key words : Photoelasticity, Fringe method, Liquid crystal display, RGB primary colors, Engineering education

1. 緒 言

ガラスやプラスチックなど透明な等方性弾性体材料（光弾性体）は、外力が作用したとき光学的異方性が生じるため複屈折現象を起こす。この性質は光弾性と呼ばれており、1816年にD. Brewsterによって発見された。それ以来、光弾性実験は材料の応力を解析する実験的手法として現在でも幅広く適用されている。例えば、加工されたプラスチック材料の残留応力評価（山川 他, 2009）や疲労き裂進展中のき裂周りの応力場解析（Christopher, et al., 2008）、介在物周りの応力拡大係数解析（伊藤 他, 2004）などが行われている。さらに実用的な観点から、自動車用電球の残留応力測定（鈴木 他, 2011）やメガネのレンズ固定時におけるひずみ（鈴木 他, 2010）・応力分布測定（格内 他, 2013）が行われている。また光弾性パラメータの取得から応力分布の解析まで自動化もされている（梅崎, 2013）。他方で、近年では医療分野においても国内外で積極的に適用されている。例えば、模擬手術中の脳血管壁面応力の評価（池田 他, 2008）や人工膝関節インサートの応力解析（廣川 他, 2009）、インプラントと骨との間の応力およびひずみ評価（Brosh, et al., 1998）、インプラントで強化された総義歯の応力分布解析（Kenney and Richards, 1998）などが行われている。したがって光弾性実験は、国内外問わず様々な分野で研究から実用まで幅広く行われており、グローバル化が進む現代では、高等教育機関や企業でのエンジニア育成におい

No.14-00456 [DOI: 10.1299/transjsme.14-00456], J-STAGE Advance Publication date : 16 January, 2015

^{*1} 正員, 沼津工業高等専門学校 (〒410-8501 静岡県沼津市大岡 3600)

E-mail of corresponding author: matsuda@numazu-ct.ac.jp

て光弾性実験は習得しておくべき手法と考えられる。

教育分野において光弾性実験は、初等物理教育（例えば、加藤, 2006）や力学教育（例えば、Shakerin and Jensen, 2001）において力の作用を可視化する際によく用いられている。また従来から高等教育機関において、材料力学の工学実験では 2 次元光弾性実験から光弾性定数の測定や応力解析がしばしば行われている。基本的な手法として、光源（超高圧水銀灯やナトリウムランプなど）、偏光子、検光子および 1/4 波長板を組み合わせ、暗縞模様を測定する単色フリンジ法および白色光を光源とするフリンジ法がある（辻 他, 1975）。しかしながら、これら光源や偏光器を設置して実験を行うためには場所や負荷方法が制限される。光源の種類もまた制限されるため、光の特性と光弾性縞模様の関係はブラックボックスになりやすい。

近年、テレビやデスクトップまたはラップトップパソコンモニターとして液晶ディスプレイ（Liquid Crystal Display, 以下 LCD）が主流である。LCD は光源と偏光板を組み合わせで構成されているため、画面の光は偏光であることが知られている（例えば、藤掛, 2008）。ゆえに、LCD の偏光を光弾性体に通して偏光サングラスや偏光レンズ付きデジタルカメラなどで観察すれば、簡単に光弾性縞模様を in-situ 観察できる。その上、画面の色は RGB3 原色（R ; 赤, G ; 緑, B ; 青）を利用して表現されているため、様々な色の偏光を得ることができる。近年は安価なパソコンが市場に多く出ており、入手が容易であるため手軽に光弾性実験を行える。また、ラップトップパソコンの中でも軽量かつ小型のモバイルパソコンは、持ち運びが便利であり、設置が容易である。その上、LCD の角度も調節できるため、さまざまな方向に対して偏光を与えることができる。したがって、簡易的に光弾性実験が可能であるため教育には最適なツールと考えられる。若林（若林, 2006）は、パソコンの LCD を利用して CD プラスチックケースやメガネのプラスチックレンズに生じる残留応力による光弾性縞模様や砂糖水の旋光性の観察を紹介しており、初等物理教育としては十分適用できることを示している。Sato ら（Sato, et al., 2009）もまた LCD を利用した光弾性実験を行い、力の可視化を行っている。しかしながらいずれの研究も力の作用による光弾性縞模様の観察のみであり、初等材料力学（光弾性と材料に作用する応力との関係）を対象とした定量的な観点からは議論されていない。特に、LCD の画面は RGB3 原色によって表示されているため、白色光のみならず 3 種類の R・G・B 原色光による光弾性実験も容易に行える。そのため工学教育上、光の特性との関連性を含めて基本的な光弾性と材料力学の関係を学ぶことができると予想され、先に述べた問題点を解決できる可能性があるため非常に興味深い。また LCD を光源として用いた光弾性実験を教育実践した事例は著者の知る限り存在しておらず、工学教育上の利点は定かではない。

そこで本研究では、ラップトップパソコンの LCD を光源に用いて、様々な色の偏光に対する光弾性実験を行った。初めに市販されているラップトップパソコンの LCD の偏光特性について調査した。次に、LCD および市販されている教育用光弾性実験装置を用いて曲げ静荷重を受けたアクリル材の光弾性縞模様をそれぞれ観察した。得られた縞模様を用いてフリンジ法により測定した光弾性感度を比較し、定量性について調査した。さらに、曲げ静荷重を受けたアクリル材に対して 3 種類の R・G・B 原色光を利用した光弾性実験を行うとともに、それぞれの分光スペクトルを測定した。これより、3 種類の原色光による縞模様とスペクトル分布の関連性を調査し、フリンジ法について検討した。最後に、LCD を光源に用いた光弾性実験を企業技術者対象の公開講座で実践し、受講者のアンケート結果から有用性を検討した。

2. 光弾性実験の原理

本節では文献（辻 他, 1975）を参考にして光弾性実験の原理について簡単に論じる。図 1 (a) に示すように、直線偏光が得られる偏光子 P_1 と検光子 P_2 の間に弾性限度以内で外力が作用した平面応力状態にある光弾性体平板 T を配置した場合を考える。このとき、図 1 (b) に示すように P_1 と P_2 の偏光軸が互いに直交する状態を考える。また T 内に作用する応力は互いに直交する主応力 σ_1 および σ_2 で表され、 σ_1 と P_1 の偏光軸とのなす角度を θ とする。光源から与えられる単色光が P_1 を通過し、変換された直線偏光が T を通過する。このとき、 σ_1 および σ_2 の方向に分離して通過する 2 つの偏光によって位相差 δ を生じ、 P_2 から得られる偏光強度 I_0 は式 (1) で表わされる。

$$I_0 = A^2 \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (1)$$

ここで、 A は振幅である。また通過点の主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ と δ との間には次式のような関係がある。

$$\delta = \frac{2\pi w}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

w は試験片の幅、 λ は使用光の波長、 C は光弾性定数（ブリュースターの定数）である。式 (1) より図 1 の場合、 I_0 は θ と δ に依存するため等色線と等傾線の双方が混在した光弾性縞模様が得られることを示している。そこで、図 2 (a) に示すように P_1 と P_2 の間に、2 枚の $1/4$ 波長板 Q_1 および Q_2 を入れ、その間に T を配置する。 P_1 による直線偏光を Q_1 により円偏光に変換し、 T を通過後さらに Q_2 によって直線偏光へ再変換して P_2 を通過する。このとき図 2 (b) に示すように、 Q_1 および Q_2 の光軸は互いに直角で、 Q_1 の光軸と P_1 の偏光軸とのなす角度を $\pi/4$ rad とする。したがって P_2 から得られる I_0 は、

$$I_0 = A^2 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3)$$

と表され、 δ のみの関数となり θ に依存しない。ゆえに $\sigma_1 - \sigma_2$ の大きさのみで決定され、光弾性縞模様は明暗の等色線のみが観察されることを示している。式 (3) において、 $\delta = 2\pi N$ ($N = 0, 1, 2, \dots$) のとき $I_0 = 0$ となり、暗視野が得られる。式 (2) において δ を $2\pi N$ と置き換えれば、

$$N = \alpha(\sigma_1 - \sigma_2)w \quad (4)$$

となり、暗視野の縞次数 N を測定することによって $\sigma_1 - \sigma_2$ を解析できる。ここで $\alpha = C/\lambda$ であり、光弾性感度である。 α の逆数をとれば、フリンジ応力 S となる。この方法は単色フリンジ法と呼ばれている。なお白色光の場合、式 (3) で示される単色光の集合なので偏光強度 I は、

Fig.1 Figure 1(a) shows schematic of photoelasticity using polarizer P_1 and analyzer P_2 only, where T denotes photoelastic materials. Figure 1(b) shows relationship between polarizing axes of P_1 and P_2 and directions of principal stresses of σ_1 and σ_2 acting in T for figure 1(a), where angle between polarizing axis of P_1 and σ_1 is θ .

Fig.2 Figure 2(a) shows schematic of single fringe method, where Q_1 and Q_2 denote quarter wave plates, respectively. Figure 2(b) shows relationship between polarizing axes of P_1 and P_2 and optical axes of Q_1 and Q_2 for figure 2(a).

$$I = \sum I_0 = \sum A^2 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (5)$$

と与えられる.

3. LCDの偏光特性と光弾性縞模様

市販されているラップトップパソコン (Inspiron 15z Ultrabook™ 15.6 インチ, DELL 製) の LCD (偏光子) P_1 と直線偏光板 (125mm×125mm×0.2mm, セルロースアセテートフィルム, ケニス製) (検光子) P_2 を重ね合わせて観察した様子を図 3 にそれぞれ示す. なお観察は, 検光子を通してデジタルカメラ (Power Shot S120, Canon 製) で行い, LCD の画面は白色とした. 図中の実線は P_2 の偏光軸を示している. P_2 の偏光軸の向きは市販されている偏光サングラスと重ね合わせて観察することで確認した. 市販されている偏光サングラスの偏光軸の向きは水平面の反射光をカットするため垂直方向に設定されており, このことを利用している. 図 3 (a) は, P_2 の偏光軸が水平となるように検光子を配置して観察した様子を示す. また図 3 (b) および (c) は, 図 3 (a) の状態から検光子を左周りに $\pi/4$ rad および $3\pi/4$ rad 方向へ回転させて観察した様子をそれぞれ示す. 図 3 (b) では最も暗く, P_1 の偏光軸は P_2 の偏光軸と直交していることを意味する. 一方, 図 3 (c) では最も明るく, P_1 と P_2 の偏光軸の向きが一致していることを意味する. このことから本実験で用いたラップトップパソコンの LCD から得られる偏光は直線偏光であり, 図 3 (b) に示すように P_1 の偏光軸の方向は, $\pi/4$ rad である. 他社のラップトップパソコン (Endeavor, EPSON 製) の LCD についても同様に調査したところ, 先に述べた結果と同様であった. 若林 (若林, 2006) の調査でも LCD の偏光軸の向きは先に述べた結果と同様であるが, 一部では水平方向の LCD もあると報告している. したがって, パソコンの LCD は製品によって偏光軸の向きは異なることに注意が必要である.

Fig.3 Characteristic of linearly-polarized light of white color given from LCD (polarizer) P_1 was investigated using a linearly polarizing plate (analyzer) P_2 . When the linearly polarizing plate was turned counterclockwise $\pi/4$ rad from a state of figure 3 (a), the linearly-polarized light was shaded. Therefore, polarizing axis of P_1 was vertical to the polarizing axis of P_2 in the shown figure 3 (b).

Fig.4 Photoelasticity using LCD was demonstrated in the shown figure. Photoelasticity fringe patterns for polycarbonate plate with a hole after annealing was undergone a color change compared to that before annealing. It was shown that residual stress acting in polycarbonate plate was removed. In addition, a stress concentration with deformation due to annealing was observed.

図4にLCDを用いた光弾性の実例を示す。各写真は、図3(b)に示す状態での P_1 と P_2 の間に焼きなまし前後の円孔を有するポリカーボネート(PC-1600, タキロン製)をそれぞれ配置して観察した光弾性を示す。ここでポリカーボネートの焼きなましは、文献(白石, 曾山, 1984)を参考に加熱炉を用いて140℃で5時間加熱後、炉冷した。焼きなまし前に比べて焼きなまし後の光弾性縞模様は変化しており、ポリカーボネートの残留応力の除去が確認できる。また円孔周りには、焼きなましによる変形によって生じた応力集中も確認できる。

4. 光弾性実験方法

試験片の材料として、ホームセンターなど身近で入手できる市販の亚克力角材(幅 $w=6.05\text{mm}$ ×厚さ $t=5.85\text{mm}$)を用いた。これを長さ $L_{\text{long}}=170\text{mm}$ および $L_{\text{short}}=50\text{mm}$ に切り出してそれぞれ試験片とした。

図5(a)に精密万能試験機およびLCDを用いた光弾性実験の様子を示す。3節で得られた知見を基に各偏光器とパソコンを図2の状態に配置した。荷重を与える試験機として、長さ L_{long} の試験片では精密万能試験機(AG-Xplus 5kN, 島津製作所製), 長さ L_{short} の試験片では自作したてこ式の静荷重試験機を用いた。負荷方法は、図5(b)に示すように長さ L_{long} および L_{short} の試験片に対してそれぞれ3点曲げ(スパン $L=90\text{mm}$)および4点曲げ(上スパン $L_1=10\text{mm}$, 下スパン $L_2=30\text{mm}$)で静荷重 P を与えた。ここで荷重負荷および支点には平行ピンを用いた。パソコン、偏光子および検光子には、3節で使用したラップトップパソコン(OS; Windows 8)およ

Fig.5 A photoelastic experiment using LCD is shown in the figure 5 (a). Three and four point bending loads were given to acrylic rods in the shown figure 5 (b), respectively. Colors of the desktop background were then changed using RGB tool shown in the figure 5 (c) for obtain polarized lights of white, red, green and blue colors.

Fig.6 Commercially available educational photoelasticity device.

び直線偏光板を使用した。また円偏光を得るために、1/4 波長板(厚さ 45nm, 波長 550nm に対する位相差値 140nm, CR-140P, ポラテクノ製)を使用した。偏光子側の 1/4 波長板は、セロハンテープを用いて PC に固定した。一方、検光子側は、工作紙を用いて直線偏光板と一緒に挟み込み、試験機に固定した。LCD の画面の色は図 5 (c) に示すように、OS 機能のコントロールパネルから「デスクトップの背景の変更→その他(色の設定)」の RGB 機能を利用して白色 ((R) 255, (G) 255, (B) 255), 赤色 (255, 0, 0), 緑色 (0, 255, 0), 青色 (0, 0, 255) にそれぞれ設定した。これより、白色光および 3 種類の R・G・B 原色光を用いて光弾性実験を実施した。比較のために図 6 に示す市販されている教育用光弾性装置(簡易型光弾性実験装置 PE-200, 理光研製)を用いた。市販品は、光源(10W の蛍光管 3 本)と偏光子、検光子および 1/4 波長板の基本的な偏光器で構成されている。負荷方法は、てこ式の 3 点曲げ静負荷方式である。ここで荷重負荷および支点には、装置付属の専用治具を用いており、負荷を与える先端の形状が平行ピンとは若干異なることを付記する。

5. 実験結果および考察

5・1 LCD および市販品を用いた光弾性実験

図 7 に LCD および市販品を用いた光弾性実験から得られた 3 点曲げ静荷重 ($P=60N$) に対する光弾性縞模様をそれぞれ示す。ここで LCD の画面は白色である。また表 1 に白色光での光弾性による消光および透過される光の模様との関係(辻 他, 1975)を示す。図 7 に示すように、いずれも応力が増加する方向へ順次、波長の長い光が消えて変化する等色線が明瞭に現れており、表 1 と対応していることが確認できる。またそれぞれを比較すると、等色線の縞模様の様相は同様である。

図 8 に 3 点曲げ引張応力 σ_{3b} と等色線の縞次数 N との関係をそれぞれ示す。ここで N は、デジタルカメラから撮影した光弾性縞模様の画像から数えた。その際に縞次数は、 $\lambda=546.1nm$ の単色光(緑色光)に対する値とした。使用した 1/4 波長板は、波長 550nm に対して位相差値 140nm なので十分対応している。表 1 より $\lambda=546.1nm$ に対する縞次数は、透過される赤色光と赤紫色光の間と対応しているが、赤色光と赤紫色光の区別は困難であったため、図 7 に示すように紫色光と赤色光の間を次数と考えて測定した。なお引張応力側端部までの次数は、図 7 を例に説明すると、0 次から 1 次までの長さと 1 次から端部までの間の長さの割合から決定した。また σ_{3b} は初等梁(ベルヌーイ・オイラー梁)(例えば、ティモシェンコ 他, 1977)の 3 点曲げより、

$$\sigma_{3b} = \frac{3PL}{2wt^2} \quad (6)$$

として評価した。各文字は図 5 (b) と対応する。図 8 に示すように、 σ_{3b} の増加に伴い N は線形的に増加している。図 8 から式 (4) を用いてそれぞれの α を測定した。このとき、 σ_{3b} が作用する位置では $\sigma_1 = \sigma_{3b}$, $\sigma_2 = 0$ のため α は、

$$\alpha = \frac{N}{w\sigma_{3b}} \quad (7)$$

として与えられる. 測定した α 値および換算した S 値を表 2 に示す. LCD および市販品から得られた α 値はそれぞれ, $8.27 \times 10^{-3} \text{mm/N}$ および $8.28 \times 10^{-3} \text{mm/N}$ であり, 両者の値はよく一致している. したがって, ラップトップパソコンの LCD を光源として用いた光弾性法によって定量性は十分に確保できる. ゆえにパソコンを準備し, 1/4 波長板および直線偏光板を購入するのみで, 安価でかつ簡易的に実験を行うことが可能である. またこの結果からパソコンの LCD が与える直線偏光は高精度であると言える.

Fig.7 Isochromatic fringe patterns to 3-point bending load of 60N were observed from photoelastic experiments using (a) LCD and (b) commercially available device. The isochromatic fringe pattern shown in figure 7(a) was exactly similar that shown in figure 7(b).

Table1 Relationship between winked out light and penetrated light to optical path difference for light of white. (Data of table 4・5 from Tsuji, J., Nishida, M. and Kawata, K., Experimental methods in photoelasticity (1975) , p.94, THE NIKKAN KOGYO SHIMBUN,LTD. (in Japanese)).

Optical path difference [nm]	Winked out light	Penetrated light	Flange at single color light of 546.1nm
0		Black	0 flange
390~430			
430~455	Purple		
455~483	Blue	Yellow-red	
483~487			
487~493	Blue-green		
493~498			
498~530	Green	Red	
530~560			1 flange
560~570	Yellow-green		
570~576			
576~580	Yellow		
580~587	Orange-yellow	Red-purple	
587~598	Orange		
598~620	Red-orange	Blue	
620~800	Red	Blue-green	
940	Blue	Yellow-red	
1050	Green	Red	
1150	Yellow	Red-purple	2 flange

Fig.8 Plots of fringe order and 3-point bending stress obtained from each photoelastic experiments.

Table2 Values of photoelastic sensitivity and fringe stress for acrylic given using each photoelastic experiments.

Device	LCD	Commercially available device
Photoelastic sensitivity α [mm/N]	8.27×10^{-03}	8.28×10^{-03}
Fringe stress S [N/mm]	120.92	120.77

5・2 3種類のR・G・B原色光を用いた光弾性実験

5・2・1 光弾性縞模様と分光スペクトル

図9に3種類のR・G・B原色光によって得られた4点曲げ静荷重 ($P=379\text{N}$) に対する光弾性縞模様を示す。比較のために、白色光を用いた場合も示す。白色光の場合、前節で述べたようにいずれも応力が増加する方向へ順次、波長の長い光が消えて変化する等色線が明瞭に確認できる。一方、G原色光の場合は図9(b)に示すように、中立軸の暗(黒色)縞模様から始まり、黄緑色および緑色の縞模様と暗縞模様が観察された。他方で、R原色光の場合は図9(c)に示すように、中立軸の暗縞模様から始まり、応力が増加する方向へ順次、オレンジ→赤→紫の順に繰返し変化する色付いた縞模様のみが観察された。また図9(d)に示すようにB原色光の場合もまた、中立軸の暗縞模様で始まり、薄い紫→水色→青色の順で赤色と同様に繰返し変化する色付いた縞模様のみが観察された。RおよびB原色光のいずれも、G原色光のような暗縞模様は観察されなかった。

図10に分光器で測定した白色光およびR・G・B原色光から得られた分光スペクトルおよび代表的な可視光のスペクトルを色別で示す。分光器には、浜松フォトニクス製のミニ分光器(C11007MA)を用いた。縦軸のA/Dカウントは、光強度と比例する値である。図10に示すように、白色光はR・G・B原色光の重ね合わせになっている。R・G・B原色光のスペクトルは、いずれもピーク値(R; 592.3nm, G; 539.1nm, B; 453.4nm)が見られるが、広範囲に渡って分布している。特にR原色光のスペクトルは、ピーク値が橙色で示しており、また450nm前後でも分布しているため、紫色光や青色光も含んでいる。したがってR・G・B原色光は、一見それぞれ赤色、緑色、青色のピーク値が高いため単色光に見えるが、実際は白色光と同様に他の色が混ざって表現されている。室谷(室谷, 2012)もまた、パソコンのLCDの色はすべての色が正しく再現されているわけではないと論じている。したがって、白色と同様に3種類のR・G・B原色光の偏光強度は、各スペクトルの偏光強度の総和で決定されるため式(5)で表される。そのため、図9に示すR・G・B原色光に対する等色線縞模様は複数の色から構成されており、図10のR・G・B原色光のスペクトルとおおよそ対応していることがわかる。実際、図9に示す等色線はデジタルカメラで撮影しているため、デジタルカメラのCCD素子のスペクトル応答にも依存している。そのため、図9の等色線と図10のスペクトル分布が完全には一致しないことを付記する。

ここで図9(b)に示すようにG原色光の場合は黄緑色および緑色の縞模様と暗縞模様を示しており、単色光を用いたときの傾向と類似している。このことは、表1に示す白色光の消光と透過される光から定性的に説明できる。緑色が消える波長では赤色光が透過されるが、図10に示したようにG原色光は赤色光のスペクトルは持たない。そのため暗縞模様が現れる。図9(a)に示す白色光の縞模様と比較したとき、白色光において赤色縞模様が見られる位置においてG原色光では暗縞模様となっていることから明らかである。したがって本実験で使用したラップトップパソコンの場合、緑色の波長を用いて単色フリンジ法が適用できると考えられる。

Fig.9 Isochromatic fringe patterns for 4-point bending load of 379N were observed from photoelastic experiments using polarized lights of (a) white, (b) green, (c) red and (d) blue colors of LCD.

Fig.10 A/D count vs wavelength diagrams for polarized lights of green, red, blue and white colors obtained from LCD and spectrum distribution of typical optical wavelength.

5・2・2 光弾性定数の測定と応力解析

前節で論じたことを検証するため、G 原色光を用いた光弾性実験により C 値の測定を行った。図 11 に 4 点曲げ引張応力 σ_{4b} と N との関係を示す。ここで縞次数は、図 9 (b) に示すように暗縞模様を数えた。その際、引張応力側端部での次数は、5・1 節で述べた方法で測定した。また σ_{4b} は、初等梁の 4 点曲げより、

$$\sigma_{4b} = \frac{3P(L_2 - L_1)}{2wt^2} \quad (8)$$

として評価した。各文字は図 5 (b) と対応する。図 11 に示すように σ_{4b} の増加に伴い縞次数は線形的に増加している。図 11 から式 (4) を用いてそれぞれの α を測定した。このとき、 σ_{4b} が作用する位置では $\sigma_1 = \sigma_{4b}$ 、 $\sigma_2 = 0$ のため C は、

$$C = \frac{\lambda N}{w \sigma_{4b}} \quad (9)$$

として求められる。ここで、 λ は図 10 から得られたピーク値の 539.1nm を用いた。算出した C は 5.17×10^{-6} 1/MPa であった。この値は、一般的に知られているアクリルの値 6×10^{-6} 1/MPa (例えば、今井 他, 2000) とおおよそ一致しており、その誤差は 13.9% である。今回使用した 1/4 波長板は、波長が 550nm において 140nm の位相差を生じる波長板である。図 10 から得られた G 原色光の波長のピーク値は 539.1nm であり、使用した波長板とほぼ対応している。そのため波長板の影響はほとんど受けない。したがって主な原因として、式 (9) から理解できるように光弾性定数は、測定した λ 値と N 値の影響を受けたと考えられる。LCD の G 原色光は完全な単色ではないため、 N 値の測定精度が十分でないことが挙げられる。それに伴い、本実験よりさらに高次の縞次数を測定する場合はその影響をさらに受けると予想される。それに加えて λ 値は、図 10 に示した分光器を用いて LCD から測定したピーク値を用いたが、前節で論じたように図 9 に示す等色線はデジタルカメラで撮影しているため、縞模様はデジタルカメラの CCD 素子のスペクトル応答にも影響を受けている。そのため、デジタルカメラから得られる λ 値が LCD から得た λ 値と緑色波長の範囲において異なり、図 10 で撮影した N 値の測定に影響が表れたことも原因の 1 つとして考えられる。

さらに得られた C 値を用いて、図 5 (b) に示す 3 点曲げを受けたアクリル試験片の応力を G 原色光による光弾性実験により解析した。図 12 に 3 点曲げ引張応力の理論値と解析値を示す。ここで理論値 σ_{3b-th} は、式 (6) より与えた。解析した応力 $\sigma_{3b-analysis}$ は、式 (9) において σ_{4b} を $\sigma_{3b-analysis}$ に置き換えることで、

Fig.11 Plots of fringe order and 4-point bending stress obtained from photoelastic experiment using polarized lights of green color.

Fig.12 An example of stress analysis with the aid of photoelastic experiment using polarized lights of green color. (Plots of experimental and theoretical values of three-point bending stresses.)

$$\sigma_{3b\text{-analysis}} = \frac{\lambda N}{wC} \quad (10)$$

として求めた。なお N 値は先に述べた方法と同様に、3 点曲げによる等色線縞模様から観察される暗縞模様を数えた。その際、図 11 に示した N 値の範囲内で N 値を測定できるように荷重を与えた。図 12 に示すように解析値と理論値はおおよそ一致しており、その誤差は平均して 12.8% である。理論値と解析値の誤差の原因として、式 (9) と式 (10) の比較から理解できるように、 N 値の測定精度が挙げられる。平行ピンで 3 点曲げ荷重を負荷しているため、サンブナンの原理により引張応力側の応力集中が若干緩和されていることが原因の一つとして考えられる。ただし、荷重支点から評価応力までの距離は十分あるので、その影響は小さい。そのため主な原因として、LCD の G 原色光は完全な単色ではないことに関連すると考えられる。以上の結果より、ある程度の精度を確保して光弾性定数の測定および応力解析が可能であり、先に述べたことの妥当性を検証した。パソコンの LCD を光源として用いることで、様々な光に対する光弾性が得られ、光の特性との関連性を含めて基本的な光弾性と材料力学の関係を定量的な観点から学ぶことができる。ゆえに 2 節で論じた光弾性実験の原理もより深く理解することができると考えられる。

6. LCD を光源として用いた光弾性実験の教育実践

2013 年 9 月 5 日 (木) (13:00~17:00) に沼津高専において、公開講座「材料強度学入門～金属疲労の基礎知識と光を利用した力の可視化」(定員 10 名)を企業技術者に対して実施した。受講者は、6 名(機械系技術者 5 名、铸造専門技術者 1 名)であった。受講者は、平日の開催であることを考えれば、事業と関連した基礎的内容のため会社におけるエンジニア育成教育の一環として参加されたと推察される。本講座では、まず初めに金属疲労現象の基礎的な特性について講義を行い、疲労試験の実演および走査型電子顕微鏡による疲労破面観察を実施して破壊原因を調査する手法を説明した。その後、機械構造物の疲労破壊では、応力集中が破壊の起点となることが多いため、応力集中箇所を特定するための手法として光弾性実験の基本原理を講義するとともに実演を交えて説明した。図 13 に光弾性実験の実演の様子を示す。初めに、図 6 に示した市販の光弾性装置を用いて、図 13 (a) に示すように各コーナー部の曲率半径が異なるコの字型モデルに生じる光弾性縞模様を観察し、曲率半径と応力集中の関係を説明した。その後、光弾性実験の簡易的な手法として LCD を光源として用いた光弾性実験を実施した。3 節で論じたようにノートパソコンと直線偏光板のみを用いて、CD プラスチックケースやプラスチック製保護メガネの実験を実施し、生じている残留応力や応力集中と光弾性縞模様の関係を説明した。その際、LCD 画面の色を変えることで、様々な光弾性縞模様を表現することで光特性との関連性も説明した。さらに、図 13 (b) に示すように実際に円孔 ($\phi 10$) を有するポリカーボネートの引張試験を実施し、引張荷重に伴う円孔周りの光弾性縞模様の変化を観察した。このとき 1/4 波長板は用いておらず、受講者に直線偏光板を配布して実際に観察

Fig.13 In Thursday, September 15, 2013, National Institute of Technology, Numazu College held an open lecture on basic knowledge of fatigue of metals and visualization of force by photoelasticity. Figures are shown appearance of the open lecture. The participants observed photoelasticity fringe patterns due to stress concentration by photoelasticity experiments using (a) commercially available educational photoelasticity device and (b) LCD.

していただいた。本講座の最後にアンケートを実施した。光弾性実験に対するアンケートとして、「LCD を用いた光弾性実験は、今後お仕事関係などにおいて少しでも役に立ちそうな内容でしたか。」との質問に 6 名中 5 名(機械系技術者 4 名, 材料系技術者 1 名) から「はい」の回答を得た。さらに、「はい」と回答をいただいた受講者からコメントをいただいた。以下に抜粋して示す。

- 1) 金属等実際に実験を行えないものでも透明の樹脂のモデルを作れば簡単に実験を行えるため、部品が壊れて強度を上げたいときの対応と効果を調べるときなどにやってみようと思いました。(機械系技術者)
- 2) 金属疲労に関して提案が出来ると思います。(鑄造技術者)
- 3) 簡易的に応力集中の場所がわかるので、ちょっとしたときに役立ちそう。(機械系技術者)

得られたコメントの共通点として、身近な製品を用いて応力集中を容易に特定できることが受講者に対して有益な情報となっている。企業技術者にとっては、簡易的な形状設計対策など課題解決のための便利なツールと考えていることも読み取れる。したがって、LCD を光源に用いた光弾性実験は、身近な製品を用いて応力集中を容易に特定できるため材料力学教育ツールとして利点がある。本論文で示した手法によって光弾性感度・光弾性定数の測定や応力解析を行えば、形状設計や金属疲労対策と関連して定量的な観点からもその効果はさらに期待できると考えられる。

7. 結 言

本研究では、ラップトップパソコンの LCD を光源に用いて白色光および 3 種類の R・G・B 原色光による光弾性実験を行い、定量的な観点から論考した。さらに、公開講座において企業技術者を対象として光弾性実験の教育を実践した。その要約を以下に示す。

1. 白色光を光源とした LCD および教育用光弾性装置を用いて測定したそれぞれの光弾性感度の値はほぼ一致した。
2. R・G・B 原色光による等色線縞模様の色は、LCD から得られるスペクトル分布と対応していることを確認した。
3. R・G・B 原色光の偏光特性を把握した上で適切な原色光を選択することで、ある程度の定量性を確保した光弾性定数の測定および応力解析ができることを示した。
4. 公開講座アンケート結果より、LCD を用いた光弾性実験は簡易性が評価されており、企業技術者にとって身近な製品によって応力集中を容易に特定できるため有益な情報を与えた。

謝 辞

本論文を発表するにあたり、沼津高専機械工学科 5 年生の宮川綾音さん(現、東ブレ)には光弾性実験およびデータ解析に取り組んでいただいた。ここに感謝の意を表する。また本研究の一部は学内経費平成 25 年度校長リーダーシップ経費の助成を受けたものである。

文 献

- Brosh, T., Pilo, R. and Sudai, D., The influence of abutment angulation on strains and stresses along the implant/bone interface: Comparison between two experimental, The Journal of Prosthetic Dentistry, Vol.79, No.3 (1998), pp.328-334.
- Christopher, C.J., James, M.N, Patterson, E.A. and Tee, K.F., A quantitative evaluation of fatigue crack shielding forces using photoelasticity, Engineering Fracture Mechanics, Vol.75 (2008), pp.4190-4199.
- 藤掛英夫, 液晶材料/ディスプレイの現状と課題, 照明学会誌, Vol.92, No.10 (2008), pp.721-728.
- 廣川俊二, LAWI Ansarullah, 関屋圭輔, 瀧口純一郎, 高・深屈曲対応型人工膝関節インサートの光弾性応力解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.752 (2009), pp.1016-1025.
- 池田誠一, 岡田雄太, 福田敏男, 新井史人, 根来眞, 高橋郁夫, 脳血管内手術シミュレーションのための個別型脳血管立体モデル: 第 3 報, 光弾性法による血管壁面応力の模擬術中計測, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.743 (2008), pp.1914-1919.
- 伊藤秀明, 西村健太郎, 江角務, 回転円板中のき裂先端の変形に及ぼす介在物の機械的性質: 光弾性法とコース

- ティックス法による実験的検討, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.70, No.699 (2004), pp.1609-1615.
- 今井哲也, 志田宜義, 菅圭二, 飯田哲哉, 薄型基板における複屈折制御の検討, PIONEER R&D, Vol.10, No.3 (2000), pp.22-28.
- 格内敏, 徳田直子, 金子弘, 西村淳, めがねのレンズ固定がレンズひずみに及ぼす影響, 実験力学, Vol.13, No.1 (2013), pp.93-99.
- 加藤徹也, ものの壊れかた一破断に至る変形の観察に基づく「力」の導入法一, 千葉大学教育学部研究紀要, Vol.54 (2006), pp.285-291.
- Kenney, R. and Richards, M.W., Photoelastic stress patterns produced by implant-retained overdentures, The Journal of Prosthetic Dentistry, Vol.80, No.5 (1998), pp.559-564.
- 室谷心, 光の3原色と黒体輻射, 物理教育, Vol.60, No.2 (2012), pp.110-114.
- Sato, T., Mamiya, H., Koike, H. and Fukuchi, K., Photoelastic touch: Transparent rubbery tangible interface using an LCD and photoelasticity, Proceedings on the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'09) (2009), pp.43-50.
- Shakerin, S. and Jensen, D.D., Enhancement of mechanics education by means of photoelasticity and finite element method, International Journal of Mechanical Engineering Education, Vol.29, No.4 (2001), pp.307-320.
- 白石哲郎, 曾山義朗, 低 ΔK 領域におけるポリカーボネートの疲労き裂進展挙動に及ぼす応力比の影響, 材料, Vol.33, No.373 (1984), pp.1311-1316.
- 鈴木新一, 山口徹, 吉武春樹, 成田紘之, 光弾性法を用いたプラスチックメガネレンズのひずみ測定, 実験力学, Vol.10, No.2 (2010), pp.193-197.
- 鈴木新一, 村井大我, 西北昇平, 片山陽太, 光弾性法を用いた自動車用電球の残留応力測定, 実験力学, Vol.11, No.3 (2011), pp.188-194.
- S. ティモシェンコ, 鶴戸口英善, 国尾武, 材料力学 上巻 (1977), pp.88-92, 東京図書株式会社.
- 辻二郎, 西田正孝, 河田幸三, 光弾性実験法 (1975), 日刊工業新聞社.
- 梅崎栄作, 光弾性法による応力分布測定技術の現状と展望, 精密工学会誌, Vol. 79, No. 7 (2013), pp. 607-611.
- 若林文高, 液晶ディスプレイを用いた光弾性, 旋光性の観察(私のくふう), 科学と教育, Vol.54, No.2 (2006), pp.122-123.
- 山川昌文, 早川伸哉, 中村隆, 長谷川達也, 熱可塑性樹脂のレーザ溶着における温度と光弾性縞の同時観察, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.750 (2009), pp.491-495.

References

- Brosh, T., Pilo, R. and Sudai, D., The influence of abutment angulation on strains and stresses along the implant/bone interface: Comparison between two experimental, The Journal of Prosthetic Dentistry, Vol.79, No.3 (1998), pp.328-334.
- Christopher, C.J., James, M.N, Patterson, E.A. and Tee, K.F., A quantitative evaluation of fatigue crack shielding forces using photoelasticity, Engineering Fracture Mechanics, Vol.75 (2008), pp.4190-4199.
- Fujikake, H., Recent technology and challenge on liquid crystal materials and displays, Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan, Vol.92, No.10 (2008), pp.721-728 (in Japanese).
- Hirokawa, S., Lawi, A., Sekiya, K. and Takiguchi, J., Photoelastic study of contact stress on the tibial insert of knee prosthesis for high/deep flexion, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.75, No.752 (2009), pp. 1016-1025 (in Japanese).
- Ikeda, S., Okada, Y., Fukuda, T., Arai, F., Negoro, M. and Takahashi, I., Patient-tailored cerebral artery model for simulating neurovascular intervention : 3rd report, photoelastic stress measurement on vascular wall under simulated operations, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.74, No.743 (2008), pp.1914-1919 (in Japanese).
- Ito, H., Nishimura, K. and Ezumi, T., Influence of mechanical properties of inclusion on deformation of crack tip in rotating disc : experimental examination by photoelasticity and method of caustics, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.70, No.699 (2004), pp.1609-1615 (in Japanese).
- Imai, T., Shida, N., Suga, K. and Iida, T., Study on control of birefringence for a thin disk replication, PIONEER R&D, Vol.10, No.3 (2000), pp.22-28 (in Japanese).
- Kakunai, S., Tokuda, N., Kaneko, H. and Nishimura, J., Influence of lens clamping on lens strain of spectacles, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol.13, No. 1 (2013), pp.93-99 (in Japanese).

- Kato, T., An introduction to force with the observation of inhomogeneous deformation at the intended break, Chiba University's Repository for Access to Outcomes from Research, Vol.54 (2006), pp.285-291 (in Japanese).
- Kenney, R. and Richards, M.W., Photoelastic stress patterns produced by implant-retained overdentures, The Journal of Prosthetic Dentistry, Vol.80, No.5 (1998), pp.559-564.
- Muroya, S., The three primary colors and the black-body radiation, Physics Education Society of Japan, Vol.60, No.2 (2012) pp.110-114 (in Japanese).
- Sato, T., Mamiya, H., Koike, H. and Fukuchi, K., Photoelastic touch: Transparent rubbery tangible interface using an LCD and photoelasticity, Proceedings on the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'09) (2009), pp.43-50.
- Shakerin, S. and Jensen, D.D., Enhancement of mechanics education by means of photoelasticity and finite element method, International Journal of Mechanical Engineering Education, Vol.29, No.4 (2001), pp.307-320.
- Shiraishi, T. and Soyama, Y., Effect of stress ratio on fatigue crack propagation behavior of polycarbonate at low stress intensity factor range level, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.33, No.373 (1984), pp.1311-1316 (in Japanese).
- Suzuki, S., Yamaguchi, T., Yoshitake, H. and Narita, H., Strain measurement of plastic lens for glasses by photoelasticity, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol.10, No. 2 (2010), pp.193-197 (in Japanese).
- Suzuki, S., Murai, T., Nishikita, S. and Katayama, Y., Measurement of residual stress of light bulbs for automobiles by photoelasticity, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol.11, No. 3 (2011), pp.188-194 (in Japanese).
- Timoshenko, S., Udoguchi, T. and Kunio, T., mechanics of materials the first volume, pp.88-92 (1977), TokyoTosho Co.,Ltd (in Japanese).
- Tsuji, J., Nishida, M. and Kawata, K., Experimental methods in photoelasticity (1975), THE NIKKAN KOGYO SHIMBUN,LTD. (in Japanese).
- Umezaki, E., Stress distribution measurement techniques using photoelasticity : Current status and future prospects, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 79, No.7 (2013) , pp. 607-611 (in Japanese).
- Wakabayashi, F., Observation of optical elasticity and rotation using LCD, Chemical Education, Vol.54, No.2 (2006), pp.122-123 (in Japanese).
- Yamakawa, M., Hayakawa, S., Nakamura, T. and Hasegawa, T., Simultaneous observation of temperature and photoelastic fringes in laser welding of thermoplastic resin plates, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.75, No.750 (2009), pp.491-495 (in Japanese).