

# 光弾性法による接着層の応力評価

## Stress Evaluation of Adhesive Layer by Photoelastic Method

落合 龍生(東京電大) ○関 颯斗(東京電大) ◎五味 健二(東京電大)

Tatsuo OCHIAI, Department of Mechanical Engineering, Tokyo Denki University 5 Senjyu-asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551

Hayato SEKI, Department of Mechanical Engineering, Tokyo Denki University 5 Senjyu-asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551

Kenji GOMI, Department of Mechanical Engineering, Tokyo Denki University 5 Senjyu-asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551

### 1. 緒言および目的

接着接合はその名の通り、接着剤を用いて複数の物体を接合する接合方法である。この接着接合の産業における利用例として、自動車産業での利用がある。

近年の自動車産業では、地球温暖化問題の大きな要因である自動車の排気ガスに含まれる二酸化炭素を削減するために、軽量化による燃費向上の動きが進んでいる<sup>(1)</sup>。この軽量化の手段の 1 つに、アルミニウム、CFRP といった鋼材以外の複数材料も使用する自動車材料のマルチマテリアル化<sup>(1)</sup>がある。そして、異種材料の接合において、溶接を行うと金属間化合物の生成<sup>(2)</sup>が起こる場合があるほか、異種金属が接触すると電食<sup>(2)</sup>が起こることがある。これらの課題に対応する接合方法として、接着接合がある。

しかし、接着接合では、接着剤の層(以降、接着層とする)の端部に応力が集中し、端部から剥がれる。これは、接着接合をしている物体が外力を受けると、一般に接着剤の弾性率は接着剤で接合されている物体(被接着物体)の弾性率よりもはるかに低いため接着層が変形するが、接着層は被接着物体の接着面に固定されているため変形が拘束され 3 軸応力状態となる<sup>(3)</sup>からである。この応力分布を均一化できれば、接着接合の接着強度の向上に寄与できると考えられる。応力分布を均一化するためにまず、応力分布を可視化する必要がある。

応力分布を測定および可視化の手法については、レーザ光弾性法を用いる。レーザ光弾性法とは、物体に外力を加えた状態でレーザ光を照射するとき、外力の方向とそれ以外の方向とで密度変化を生じ、それによって透過光に位相差が発生する。この位相差をもって応力を間接的に測定する方法である。光弾性法を用いる理由として、非破壊的に測定できるほか、微小な応力分布の測定もでき、試験片の形状に比較的制限がないといった利点があるためである。

本研究の目的は、接着接合の応力分布を均一化できるような接着接合の構造を実験的に検討することである。そのために、接着層の応力分布を光弾性法で複屈折位相差を測定することで、間接的に求める。応力分布と複屈折位相差の関係は、測定の原理・理論の項目で示す。

### 2. 測定の原理・理論

#### 2.1. 複屈折位相差と応力の関係

複屈折位相差は応力によって生じることを前章で述べた。すなわち、応力と複屈折位相差の関係式を求める必要がある。

図 1 は応力を加えた透明な弾性体にレーザ光を照射した図である。応力と同じ方向の主応力を $\sigma_1$ 、それと直交する方向の主応力を $\sigma_2$ とすると、Brewster の法則<sup>(4)</sup>によれば、複屈折位相差 $\gamma$ と主応力の差 $\sigma_1 - \sigma_2$ は比例の関係にあるため、次の式(1)が成り立つ。

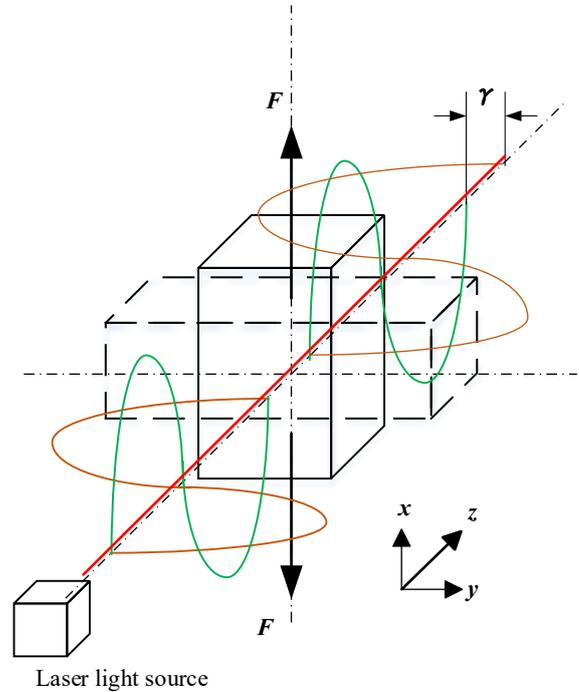


Fig.1. Laser irradiation of stressed transparent elastic material

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} Cd(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

この式(1)が、複屈折位相差と応力の関係を示す Brewster の式である。式(1)における $\lambda$ は入射するレーザ光の波長 [nm]、 $d$ はレーザ光に垂直な断面の厚さ [mm]、 $C$ は光弾性定数 [ $10^{-6}\text{MPa}^{-1}$ ]と呼ばれる材料定数である。

また、複屈折を起こしている物体にある条件を満たした光が透過すると、光の偏光状態は楕円偏光となる。屈折率の小さい空気を常軸としたとき、これに対する楕円の長軸とのなす角 $\theta$ を複屈折方向と呼ぶ。

$\lambda$ と $d$ は既知の量であるので、複屈折位相差 $\gamma$ と光弾性定数 $C$ を光弾性実験により測定することで、応力を求めることができる。

#### 2.2. 複屈折位相差と光強度の関係

光弾性実験で扱う物理量、すなわち複屈折位相差は光信号であり、値を測定するにはこれを電気信号に変換する必要がある。

光強度と複屈折位相差の関係は、Jones の計算法<sup>(5)</sup>により求めることができる。これより、光弾性実験装置の受光部で検出される光強度 $I$ は、次の式(2)で表される。

$$I = \frac{\alpha I_0}{4} \{1 + \sin \gamma (\sin \delta \cos 2\theta + \cos \delta \sin 2\theta)\} \quad (2)$$

ここで、 $I_0$ は透過前の光強度、 $\alpha$ は材料の透明度を表す定数である。また、 $\delta$ は光弾性変調器(PEM)の複屈折位相差であり、PEM の変調の振幅を $\delta_0$ とすると、次の式(3)で表される。

$$\delta = \delta_0 \sin \omega t \quad (3)$$

式(3)を式(2)に代入してフーリエ級数展開すると、

$$I = I_{DC} + I_{AC1} \sin \omega t + I_{AC2} \cos 2\omega t + I_{AC3} \sin 3\omega t \quad (4)$$

$$I_{DC} = \frac{\alpha I_0}{4} \{1 + J_0(\delta_0) \sin \gamma \sin 2\theta\} \quad (5)$$

$$I_{AC1} = \frac{-\alpha I_0}{2} J_1(\delta_0) \sin \gamma \cos 2\theta \quad (6)$$

$$I_{AC2} = \frac{\alpha I_0}{2} J_2(\delta_0) \sin \gamma \sin 2\theta \quad (7)$$

ここで、 $I_{DC}$ 、 $I_{AC1}$ 、 $I_{AC2}$ はそれぞれ直流成分、交流成分の第一高調波成分、第二高調波成分である。また、 $J_0(\delta_0)$ 、 $J_1(\delta_0)$ 、 $J_2(\delta_0)$ は Bessel 関数である。そして、 $J_0(\delta_0) = 0$ となるように $\delta_0$ を調整することで、式(5)における $\alpha$ は $\gamma$ と $\theta$ に依存しない値となる。また、式(4)~(7)を連立することにより、未知数 $\alpha$ 、 $I_0$ を消去することができる。よって、交流成分 $I_{AC1}$ および $I_{AC2}$ と直流成分である $I_{DC}$ の比から、以下の式(8)、(9)のように、入射レーザー光の強度や試験片の測定点における透明度に依存しない値を得ることができる。

$$\frac{I_{AC1}}{I_{DC}} = A \cdot \sin \gamma \cos 2\theta \quad (8)$$

$$\frac{I_{AC2}}{I_{DC}} = B \cdot \sin \gamma \sin 2\theta \quad (9)$$

$A$ および $B$ は試験片の力学的状態や透明度に依存しない定数である。式(8)、(9)より、複屈折位相差 $\gamma$ 及び複屈折方向 $\theta$ は以下の式(10)、(11)のように求めることができる。

$$\gamma = \sin^{-1} \left[ \sqrt{\left(\frac{I_{AC1}}{I_{DC} \cdot A}\right)^2 + \left(\frac{I_{AC2}}{I_{DC} \cdot B}\right)^2} \right] \quad (10)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{A \cdot I_{AC1}}{B \cdot I_{AC2}} \right] \quad (11)$$

以上より、直流成分、交流成分の第一高調波成分、第二高調波成分の値を計測することで、試験片の複屈折位相差および複屈折方向を求めることができ、応力分布に相当する複屈折位相差の分布を求めることができる。

### 3. 実験装置や試料および実験方法

#### 3.1. 実験装置

図 2 は、実験に使用する透過型光弾性実験装置の概略図である。図における白色の円が素子であり、黒い部分がホルダーである。光源から発せられた He-Ne レーザ(波長 1150 nm, 8 mW)は、鏡を一度反射して直角に進んだのち、アテネータ(Attenuator)、偏光子(Polarizer)、光弾性変調器(PEM)、1/4 波長板(Q1)、試料(Sample)、1/4 波長板(Q2)、検光子(Analyzer)を透過し、光検出子に到達する。

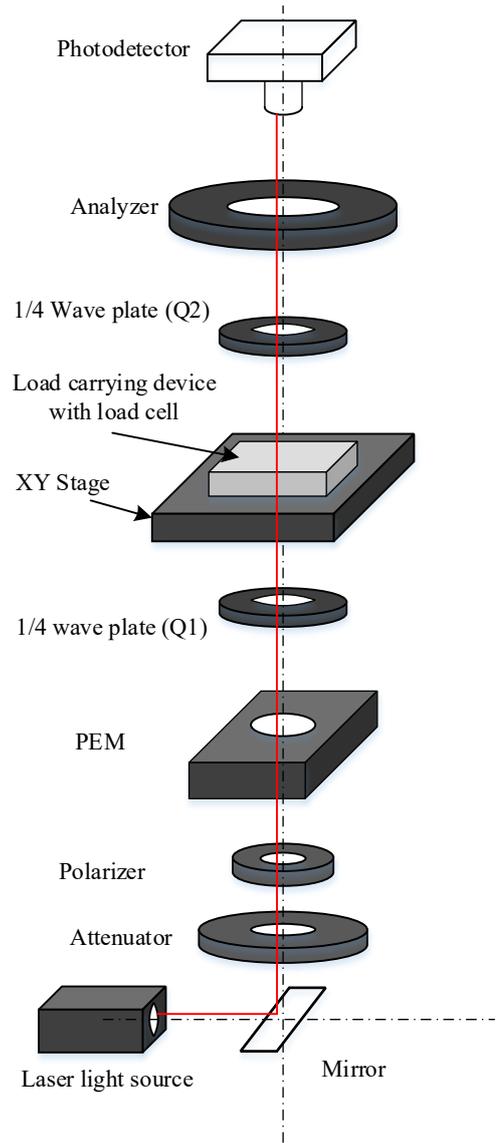


Fig2. Schematic diagram of the transmissive photoelastic device

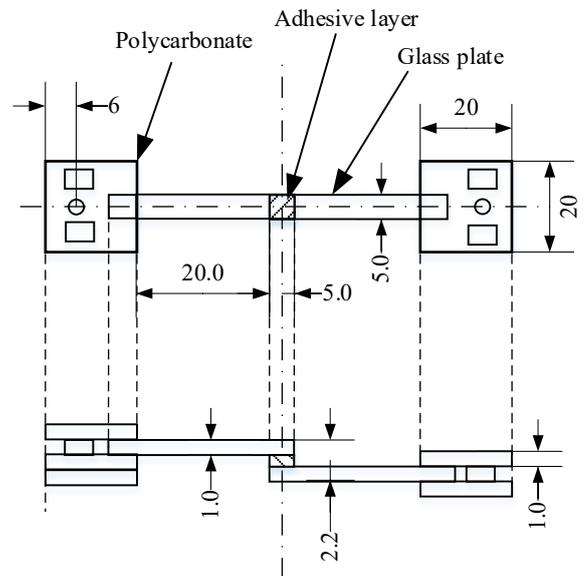


Fig3 . Test specimen and their dimensions

### 3.2. 試験片について

図 3 は本実験に使用したガラス板を母材とした段違い接着試験片であり、図のハッチングした部分が接着層である。この図における中央のガラス板で挟まれた接着層の複屈折位相差分布を測定する。試験片母材には松浪硝子工業株式会社製ガラス板 D263 を使用した。ガラス板の寸法は  $5.0 \times 60 \times 1.1$  mm である。また、試験片取付部には  $20 \times 20 \times 1.0$  mm のポリカーボネート板を使用し、端部から 6 mm の位置に取付け用の穴をあけた。さらに、ポリカーボネート板の間に入れたスペーサについて説明する。ポリカーボネート板の間には、ガラス板をスペーサとして入れた。このガラス板は、ポリカーボネート板が自身の重みで傾かないようにするために挟んだものである。ガラス板やポリカーボネート板の接着には、コニシ社製 2 液混合型エポキシ系接着剤を用いている。

試験片の作り方について述べる。まず、2 枚のガラス板を接着剤で貼り合わせた。次に、貼り合わせたガラス板の両端にポリカーボネート板を貼り、ポリカーボネート板の間にはスペーサのガラス板を挟んだ。接着剤が乾燥した後、端部から 6.0 mm の位置にピンバイスを用いて直径 3.0 mm の穴をあけた。

接着層厚さは、作成した試験片の厚さを測定し、ガラス板の厚さ 2 枚分の差から求めた。本研究の試験片の接着層厚さは 0.03 mm となった。

### 3.3. 実験方法

#### 3.3.1. 実験装置キャリブレーション

複屈折位相差を測定する前に、実験装置のキャリブレーションを行う。その目的は、実験装置に取り付けた各光学素子が正しく構成されたかを確認すること、式(8)、(9)における実験装置の装置定数  $A$ ,  $B$  を求めること、無試料状態、すなわち空気の複屈折位相差を測定し、初期ノイズを把握することである。キャリブレーションでは、試料に複屈折位相差が既知である  $1/8$  波長板を用いる。 $1/8$  波長板は透過光に  $2\pi/8 = \pi/4$  rad 分の位相差を与える。実験で使用するレーザー光の波長は 1150 nm ゆえ、 $1/8$  波長板の複屈折位相差  $\gamma$  の理論値はレーザー光の波長の  $1/8$ 、つまり 143.75 nm である。実験装置に取り付けた各光学素子が正しく構成されていると、 $1/8$  波長板を用いた複屈折位相差の測定を行った時に、横軸を  $I_{Ac1}(I_{Dc}A)$ 、縦軸を  $I_{Ac2}(I_{Dc}B)$  とした座標平面上にその中心を原点とする半径  $\sin(\pi/4) = 0.707$  の円が描かれる。

#### 3.3.2. 接着層の複屈折測定

図 2 に示すように、ロードセル付きの荷重負荷装置(Load carrying device)を XY ステージ(XY Stage)に載せる。ポリカーボネート板にあけた取付用穴と荷重装置をピンで接続することで、試験片を固定する。試験片の両端から長手方向に 16.5N の引張荷重を加えた状態で、図 4 に示すように、 $10000 \times 5000$   $\mu\text{m}$  の範囲で複屈折位相差を測定し、 $5000 \times 5000$   $\mu\text{m}$  の接着層領域を抜き出して分布化する。

測定方法は図 5 に示すように、長手方向に 4.0  $\mu\text{m}$  間隔で XY ステージを 200  $\mu\text{m}/\text{sec}$  の速さで移動させながら複屈折位相差を測定する。これを 1 セットとして、長さと垂直な方向に XY ステージを 250  $\mu\text{m}$  ずつ移動させ、1 セットを繰り返す。次に、表 1 に示すように、得られた 250  $\mu\text{m}$  ごとの複屈折位相差を Excel 上で線形補間し、2 点間をさらに 31.25  $\mu\text{m}$  ずつ、計 8 つの点に分ける。Excel 上で処理した  $5000 \times 5000$   $\mu\text{m}$  の複屈折位相差をコンターマップとするこ

とで、接着層の複屈折位相差分布を得る。

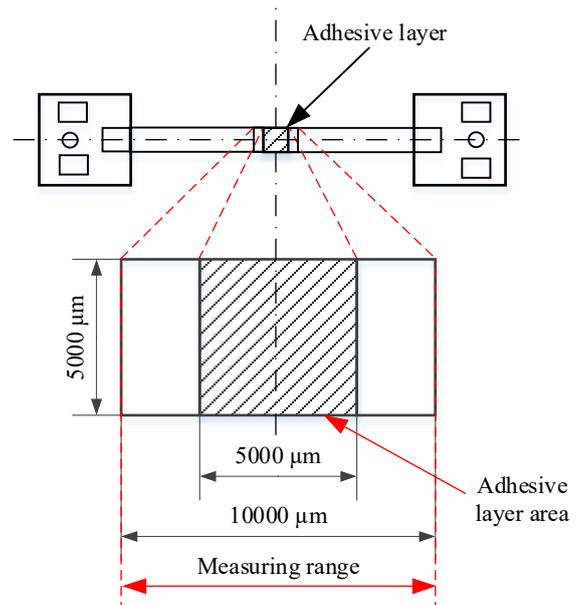


Fig4. Measuring range and adhesive layer area

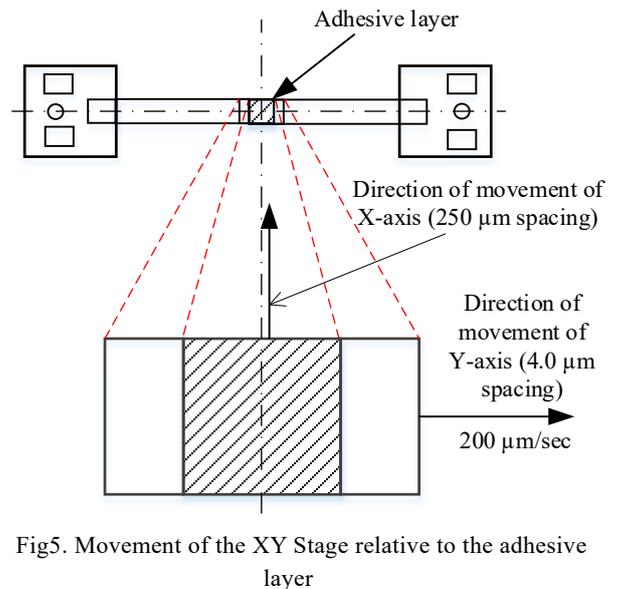


Fig5. Movement of the XY Stage relative to the adhesive layer

Table1. Linear interpolation of birefringent phase difference

Y coordinate [ $\mu\text{m}$ ]	Before linear interpolation (source data) [nm]	After linear interpolation [nm]
0	5.050805921	5.050805921
31.25		5.099469198
62.50		5.148132475
93.75		5.196795752
125		5.24545903
156.25		5.294122307
187.50		5.342785584
218.75		5.391448861
250	5.440112139	5.440112139

4. 実験結果および考察

4.1. キャリブレーション結果

3.3.1. 項で述べたキャリブレーションの結果を、図 6、7 に示す。図 6 は、横軸を  $I_{AC1}/(I_{DC} \cdot A)$ 、縦軸を  $I_{AC2}/(I_{DC} \cdot B)$  とした座標平面上に、直流および交流成分の測定値をプロットした結果であり、円の方程式を満たしていることがわかる。この実験で得られた 1/8 波長板の複屈折位相差は、光強度 4 V に対して 144.92 nm、2 V に対して 144.95 nm であり、それぞれ理論値 143.75 nm に対して 0.813、0.833 % の誤差率となった。また、図 7 は、直流および交流成分の電圧波形であり、縦軸がカウント数、横軸が電圧値[mV] である。直流成分(図 7 における紫のプロット)の最大値と最小値の差は高光強度で 55.89 mV、低光強度で 24.89 mV であり、それぞれ直流成分の算術平均値に対して 1.41%、1.23% 変動している結果となった。また、式(8)~(10)を用いて、装置定数  $A, B$  は  $A=0.1889, B=0.1637$  を得た。同様にして、無試料状態における複屈折位相差、つまり空気の複屈折位相差は 4.614 nm となった。これら、誤差率、直流成分の変動および空気の複屈折位相差は限りなくゼロに近いことが望ましいため、装置のセットアップにはまだ課題があると言える。

4.2. 複屈折位相差分布測定結果

3.3.2. 項で述べた複屈折位相差分布測定の結果を、図 8 に示す。図 8 は、接着層領域  $5000 \times 5000 \mu\text{m}$  における複屈折位相差の分布であり、これは接着層の応力分布に相当する。縦軸は長さ垂直つまり幅方向 [ $\mu\text{m}$ ](X 軸)、横軸は長さ方向 [ $\mu\text{m}$ ](Y 軸)である。また、複屈折位相差の大きさについては 10 nm 刻みで配色した。前節で述べたように、無試料状態の複屈折位相差が 4.614 nm であることから、 $0 \leq X \leq 500 \mu\text{m}$  の領域は接着層ではなく無試料の領域であると考えられる。すなわち、実際の接着層は  $500 \leq X \leq 5000 \mu\text{m}$  にあることになる。その領域に注目すると、長さ方向の両端部  $Y=0$  および  $Y=5000 \mu\text{m}$  付近に 20-30 nm の複屈折位相差が分布していることがわかる。従来の研究では、段違い接着した試験片に引張荷重を加えた場合の有限要素解析上での応力分布は、接着層全体で一様にならず、端部に局在することがわかっている<sup>(6)</sup>。本研究の光弾性実験の結果においても、複屈折位相差の分布が接着層の端部に局在するという結果が得られ理論計算と一致したことから、レーザ光弾性法によって接着層の応力分布を可視化できることを示せたと言える。

また、引張荷重の作用線が試験片の軸上にあるか、つまり試験片に対して正確に引張荷重が加わっているかどうかの議論も必要である。これについては、図 9 に示す接着層の幅方向に測定した複屈折位相差分布から評価できる。試験片の軸と荷重の作用線が一致していれば、引張荷重は垂直断面に対して一様に分布するため、複屈折位相差の分布も測定方向に沿って一様であるはずである。図 9 からは、接着層領域における複屈折位相差の分布が右肩上がりであり、試験片に対して正確に引張荷重が加わっていないことがわかる。この原因として、ポリカーボネート板にあけた取付用穴の位置が試験片の軸とずれたことによって、見かけ上単純引張にならず、曲げを含んだ応力状態になっていることを意味する。試験片の完成度についても課題が残る結果となった。

今後は、無負荷におけるガラス板の複屈折位相差を測定し、装置のセットアップ以外が原因のノイズを把握することで、複屈折位相差分布の評価を行うことも課題である。

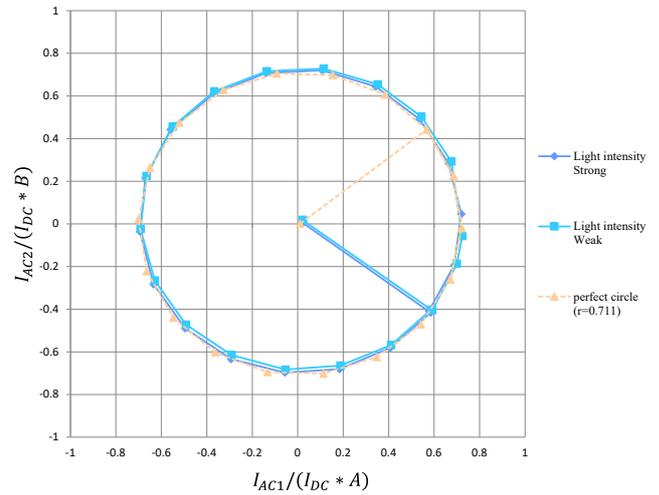


Fig6. Calibration test result for 1/8 wavelength plate

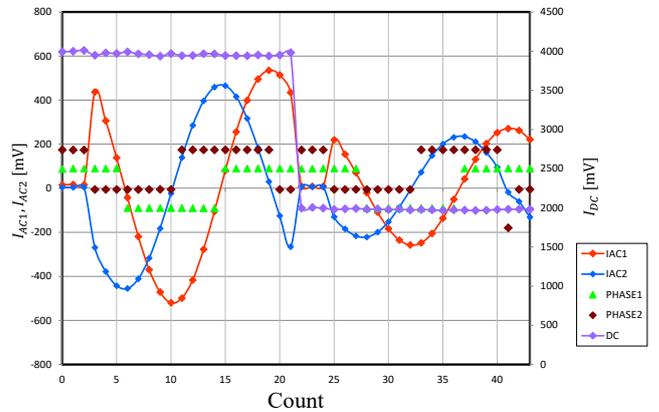


Fig7. Voltage waveforms of the DC and AC components

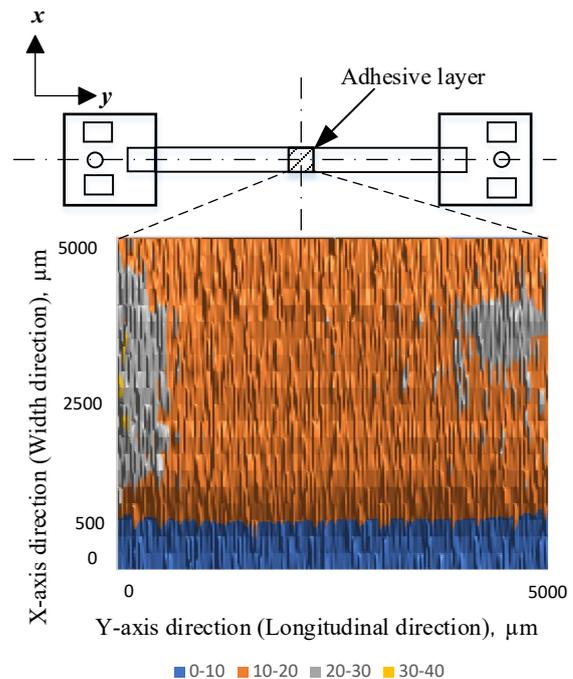


Fig8. Distribution of birefringence phase difference in the adhesive area

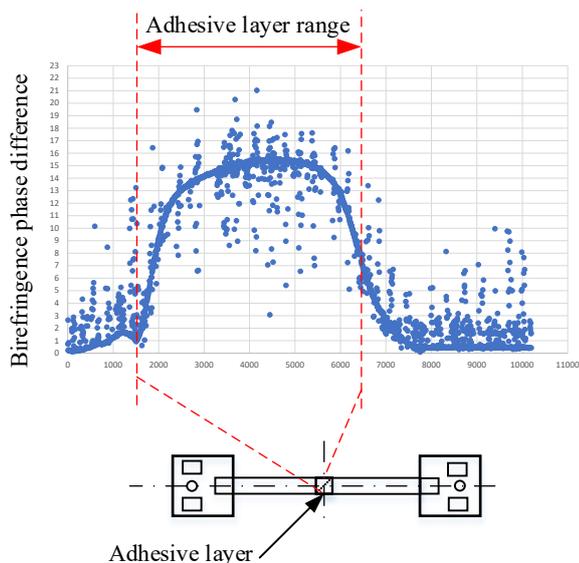


Fig9. Distribution of birefringence phase difference measured in the width direction of the adhesive layer

## 5. 結論

本研究では、ガラス板を用いた段違い接着試験片における接着層の複屈折位相差分布をレーザ光弾性法により測定した。その結果、複屈折位相差の分布は、従来の研究と同様に接着層の端部に局在するという結果を得た。これによって、接着層の応力分布を光弾性法により可視化できることが実験的に示せた。一方で、試験片の完成度については課題が残された。以下、今後の課題を示す。

- (1) 正確に引張荷重を作用させるために、試験片における取付用穴の位置精度を高めるための方法を検討する。
- (2) 本研究の試験片の接着層厚さは 0.03 mm であり、ガラス板に対して 2.7% と、極端に小さくなった。これでは、接着層の強度が十分に発揮されないことが予想される。JIS-K6850 に定める接着剤の接着強さ試験方法によれば、母材に対して 12.5% が代表的な接着層厚さとしている<sup>(6)</sup>。これに基づいた、十分な接着層厚さを確保する。

## 参考文献

- (1) 高橋健治, 【特集/最近の自動車用材料のトレンドとマルチマテリアル化】 I. マルチマテリアル化の背景と動向, 特殊鋼, 第 67 巻第 5 号 (2018-9), pp. 2-4.
- (2) 鈴木励一, 内藤純也, 【特集/最近の自動車用材料のトレンドとマルチマテリアル化】 III. 部品メーカーにおける新素材へのチャレンジ 3. 自動車車体骨格のマルチマテリアル化とそれを支える異種金属接合技術, 特殊鋼, 第 67 巻第 5 号 (2018-9), pp. 25-27.
- (3) 井上幸彦, 接着強度, 材料試験, 第 7 巻第 60 号 (1958-9), p.461.
- (4) 辻二郎, 西田正孝, 河田幸三, 光弾性実験法 上, (1965), p.2, p.43.
- (5) Nao Terasaki, et al(2017), " Direct visualization of stress distribution related to adhesive through mechanoluminescence ", ECS Transactions, 75:9-16.
- (6) 日本産業規格, 接着剤-剛性被着材の引張せん断接着強さ試験方法(1999), K6850, 日本産業標準調査会.