

# 光弾性法によるセーフティフックの応力解析

夏目寛子<sup>1</sup>・小川和雄<sup>1</sup>

## Photoelastic Stress Analysis of Safety Hooks

Hiroko NATUME · Kazuo OGAWA

**Abstract** : In tests of the strength of fishing gear and other marine equipment, the authors and other researchers have considered the viscoelastic behavior of fishing line, which has the simplest structure of all the components of fishing gear.

This study presents a stress analysis of safety hooks was not only because they are an important item of safety equipment in seamanship training, but they are also widely used when working in high places. Of the several available procedures for stress analysis of photoelasticity, such as the Moire' method, strain gauges, X-rays, photoelasticity was chosen because it allows visualization of the stress.

**Key words** : Photoelasticity, Safety hook, stress Analysis, Shear Difference Method, Isochromatic Lines, Isoclinic Lines, Fringe.

### 緒 言

近年、種々の要因により漁獲量の減少に加えて、地球温暖化による異常現象などが加わり、漁業環境は厳しさを増している。しかしながら、私たち日本人にとって魚は食料として必要不可欠な物の1つである。そのため、昔から魚を獲るために様々な漁具を開発してきた。多種多様な漁具は、定置網、トロール、刺し網などで代表される網と釣りの2つに大別される。この漁具の強度評価の第一歩として、構造が簡単であるばかりでなくファミリーフィッシングとして広く普及し身近な釣りに注目し、ナイロン製釣り糸の強度を高分子材料特有の力学挙動を考慮した強度評価や引張り強度に与える結び目の影響を既に報告<sup>1), 2)</sup>した。

本研究では、漁具等水産関連機器の一つであるセーフティフックに注目した。セーフティフックは海技実習<sup>3)</sup>で使用されているばかりでなく救助や高所作業、レジャー等でロープを繋ぐ時に使われ一般社会にも普及し、名前の通り命綱のような役割を担うのでその強度評価は大変重要である。従って、応力解析により定量評価を行い、セーフ

ティフックの安全性を検討する事を試みた。

物体の応力測定法<sup>4)</sup>として、光弾性法<sup>5), 6)</sup>、ひずみゲージ法<sup>7)</sup>、X線<sup>8)</sup>、応力塗料<sup>9)</sup>、モアレ法<sup>10)</sup>等様々な方法が存在し、各方法の特徴を活かして目的に合わせて使い分けている。

本研究では、内部の応力が可視化できる光弾性法を用いて、本校の海技実習で使用されているものと同型のセーフティフックの応力分布形態<sup>11)</sup>を明らかにし、特徴的な複数定めた位置における分布応力の定量評価を行うことにより安全性を検討したので報告する。

### 光弾性法

#### 原理

エポキシ樹脂やガラス等の透明な等質等方体に荷重を加えると、一時的に複屈折現象が起きる。複屈折とは、物体に光を入射させた時、その透過光が互いに直交する偏光面を持ち、速度が異なる2つの平面偏光に分解される現象である。この現象を利用すると負荷を受けた物体に性質の異

なる等色線と等傾線と呼ばれる2種類の干渉縞が現れる。これらを利用して応力解析する方法を光弾性法という。光弾性法では、応力分布が可視化でき、等色線により主応力差の値が、等傾線により主応力の方向を知る事が出来る。等色線は主応力差が同じ値の点が連なり1つの色縞となって表れる。最初に出てくる黒色の縞を0次の縞といい、0次をはさんで、両側に1次、2次…と縞次数nを数えて応力値を求める。等傾線は主応力軸方向が同じ値の点の軌跡が黒線となって表れる。等傾線だけでは主応力の方向が分かりにくいので、これらをつなげ主応力線図を作成する。このように、性質の異なる二種類の干渉縞により応力解析ができる。

### 主応力分離法

試験片の縁、すなわち自由境界においては1つの応力しか存在しない。つまり $(\sigma_1, \sigma_2)$ の一方の応力が0となるので、等色線のみから主応力の値を求める事が出来る。

しかしながら、内部の各点では $\sigma_1, \sigma_2$ 共に存在するので等色線のみでは応力は計算できない。そこで主応力 $\sigma_1, \sigma_2$ を分離するため、せん断応力 $\tau_{xy}$ を利用した図式積分法により計算する。応力分離法には主応力和 $(\sigma_1 + \sigma_2)$ や主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ を利用する方法が数種あるが、主応力和を用いた実験は高度な技術・装置を要し簡単には行なう事が出来ない。そこで、今回は等傾線、等色線からのデータから求める事が出来る主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ を用いたせん断応力差積分法を利用して主応力を計算した。平面応力における応力の平衡方程式<sup>12)</sup>は次式のようになる。

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_x$ : x面に働く垂直応力

$\sigma_y$ : y面に働く垂直応力

$\tau_{xy}$ : x面, y面に働くせん断応力

X, Y: x軸, y軸に働く単位体積あたりの物体力

ここで、X, Yは静的荷重のため0となる。(1),(2)式を積分すると、

$$\sigma_x = (\sigma_x)_0 - \int_{x_0}^x \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx \quad (3)$$

$$\sigma_y = (\sigma_y)_0 - \int_{y_0}^y \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dy \quad (4)$$

ここで、 $(\sigma_x)_0, (\sigma_y)_0$ : 積分の基準点0, この場合境界線上における $\sigma_x, \sigma_y$ の値

(3)式は次式のように表せる。

$$(\sigma_x)_j = (\sigma_x)_0 - \sum_0^j \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \Delta x \quad (5)$$

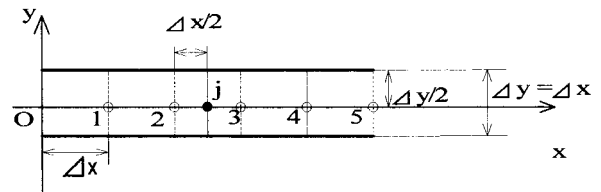


Fig. 1. Schematic drawing for explanation of shear difference method

jはFig.1に示すように基準点から各点までの距離となる任意の点である。試験片の長さをn等分し、 $\Delta x$ とする。便宜上 $\Delta x = \Delta y$ とし、 $\Delta x$ の中点をjとする。

各分割点における $\tau_{xy}$ を次式により求める

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta \quad (6)$$

$(\sigma_1 - \sigma_2)$ は等色線から求められ、 $\theta$ は主応力線の角度なので主応力線図により分かる。

また、 $\Delta x = \Delta y$ なので、(5)式は

$$(\sigma_x)_j = (\sigma_x)_0 - \sum_0^j \Delta \tau_{xy} \quad (7)$$

となる。この方法により試験片内部の各応力値を求める事が出来る。ただし、応力が積分値となり現れるので計測に少しでも誤差があると応力値に多大な影響を及ぼす。精度を上げるには荷重を大きくし等色線の数を増やせばいいのだが、縞がつぶれる恐れがあり解析が不可能となる。ゆえに、各測定値は特に注意して正確に求める必要がある。

## 実験

### 光弾性実験装置

一般的な光弾性装置の模式図をFig.2に示す。

光弾性装置は、光源、レンズ、偏光子、1/4波長板、検光子から構成される。等色線はFig.2の装置における一

組の1/4波長板により円偏光を発生させる事で得られる。円偏光は偏光面が光の進行方向に一様に回転し円振動をおこすと等傾線が消去され等色線のみを得る。等傾線を撮影する際はFig.2の装置から2枚の1/4波長板を取り除き平面偏光とすればよい。実験の際、光源はエルモ社のプロジェクターにより発生させた白色光を使用した。カメラはニコンのD3000デジタル一眼レフカメラを使用した。

**試験片**

市販のエポキシ樹脂板(300×300×5.8mm)を加工して、セーフティフックの模型試験片を製作する。実際のセーフティフックの形状をPhoto.1に示す。

実寸法では幅が約10mmと狭く解析が困難になる事が予想される。そのため、試験片全体が撮影出来る範囲、つまり実験で使用する偏光板の直径=150(mm)に収まる、1.4倍に拡大して製作する。実験に使用したセーフティフック試験片の寸法をFig.3に示す。また、実際のフックは上下対称ではないが、解析を容易にするため上下対称に修正した。実験の目的は全体の応力分布形態と応力集中部の解析であるので、この修正は結果に影響しないと考えた。

加工する際には、特に熱による残留応力が入らないよう注意する必要がある。

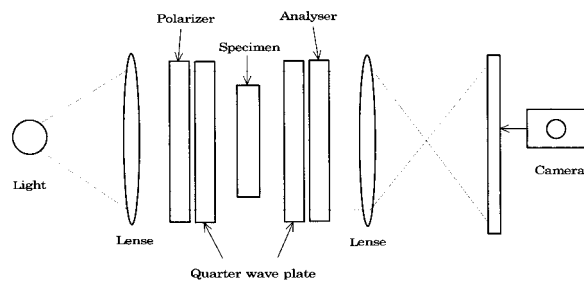


Fig. 2. Schematic diagram of experimental equipment

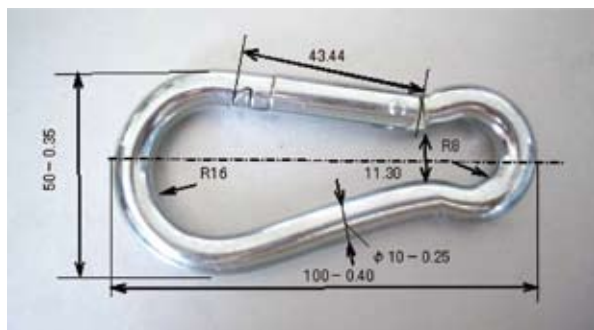


Photo. 1. Actual shape and dimensions of safety hook

**荷重装置**

セーフティフックに実際の使用条件に近い荷重をかけるには、両端にワイヤーをとりつけ引張荷重をかける方法が簡単である。しかし、光弾性実験においては、写真を撮影の際ワイヤー部の陰になり、応力集中部の等色線、等傾線が観察できない。従って、試験片の内側から荷重をかけられるような装置を設計、製作した。荷重装置をFig.4に示す。荷重を加えた時に試験片との接触が線接触になるように負荷点の形状は丸軸を採用した。また、荷重をかける際、ねじ部のみ動くようボルトと丸軸の間に細いピンを介した。荷重を加える際は、ボルト穴にレンチを入れ回転させる事で負荷を与える。

**実験条件**

等色線縞模様は、試験片に荷重装置をセットし、ねじ部をレンチで回転させる事により2段階の変位量、 $\lambda = 0.29\text{mm}$ ,  $\lambda = 0.44\text{mm}$ を与える。現れた等色線縞模様を撮影した。等傾線縞は、試験片と荷重装置の間の1/4波長板2枚を取り除き平面偏光とする。等色線が殆ど出ない程度の小さい荷重を加え、偏光子と検光子を同じ方向に $0^\circ \sim 90^\circ$ 回転させ、各角度における等傾線縞を撮影する。このとき、 $0^\circ \sim 5^\circ$ ,  $85 \sim 90^\circ$ は $1^\circ$ おきに、 $10^\circ \sim 80^\circ$ は $10^\circ$ おきの総計21段階を撮影した。

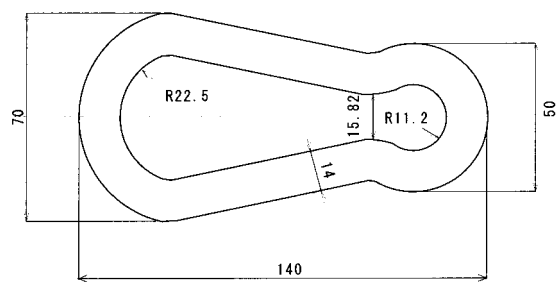


Fig. 3. Geometry of photoelastic specimen

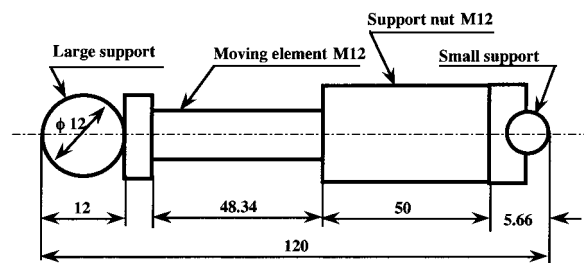


Fig. 4. Geometry of loading equipment

### 光弾性感度

光弾性実験において等色線縞次数から応力を求める際、光弾性感度が必要となる。光弾性感度 $\alpha$ とは厚さ1mmの板に $1\text{ N/mm}^2$ の応力が作用するとき生ずる等色線の縞次数を表す。そこで、対称4点曲げ試験により光弾性感度 $\alpha$ を測定する。試験片はセーフティフックと同じ市販のエポキシ樹脂板(300×300×5.8mm)から、長さ200mm、矩形断面( $b=5.8\text{ mm}$ ,  $h=30\text{ mm}$ )に加工したものを使用する。

## 結果及び考察

### 光弾性感度

対称4点曲げ試験において、荷重条件、約1kgf~約12kgfまでの8段階で得られた試験片中央部の等色線写真の一例をPhoto.2に示す。等色線縞が平行になっている中央部を計測する。中立軸に生ずる黒線が0次縞である。0次縞から順に1次、2次...と数え、中立軸から各縞までの距離 $y$ を計測し、それに対する曲げ応力 $\sigma$ を算出する。得られた曲げ応力と縞次数との関係をFig.5に示す。図中の直線は最小自乗法により近似した直線関係を示す。この近似直線の傾きからフリッジ応力 $S$ 、光弾性感度 $\alpha$ を次式により求める。

$$S = \frac{|\sigma|}{n} b \quad [\text{N/mm}] \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{1}{S} \quad [\text{mm/N}] \quad (9)$$

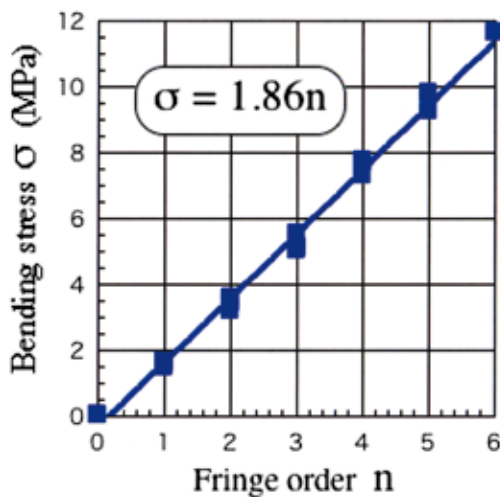


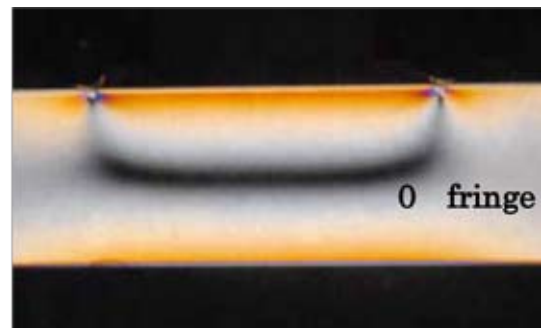
Fig. 5. Relationship between bending stress and fringe order

(8)式より $S=10.8\text{ (N/mm)}$ となる。

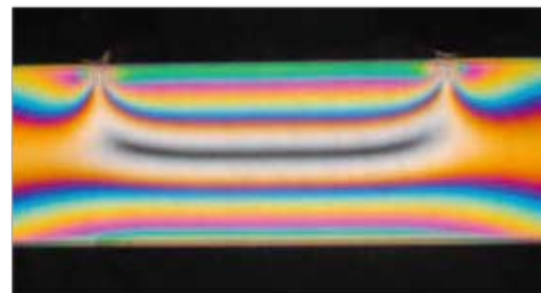
よって(9)式により $S$ の逆数をとると、 $\alpha=0.093\text{ (mm/N)}$ を得る。この値は一般のエポキシ樹脂のそれと同等な事が確認できたので、この値を以後に解析に使用した。

### 等色線

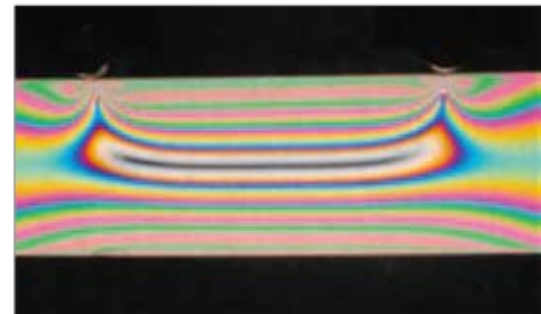
二段階の荷重により得られた等色線縞模様をPhoto.3に示す。2枚の写真と比較すると、等色線縞の色や縞の本数が明らかに変化している。いずれの場合も縞は荷重部に集中している。他の部分の縞は荷重方向に沿って現れている



a) P=0.99 kgf



b) P=3.03 kgf



c) P=6 kgf

Photo. 2. A typical examples of isochromatic line by four point bending

のに対して、荷重部では応力集中により、円弧状に現れている。この2枚を応力解析に使用した。

等傾線・主応力線図

0°から90°の範囲の22種類の角度で得られた等傾線写真の一例をPhoto.4に示す。等傾線は角度0°の時、主応力方向はx軸とy軸に向いている。角度を変化させると、縞は時計回りに変動し、90°の時、0°と同位置に戻っている。中心線に沿う等傾線は直線になると考えられるが、少しひずんでいる。これは、試験片が水平に置かれていないために生じたと思われる。このようにして得られた等傾線をすべて重ね合わせた図をFig.6に示す。等傾線は直交する主応力軸が偏光子の主面の角度だけ傾いている点の軌跡である。従って、それぞれの角度を滑らかに繋いでいくと、主応力線図が得られる。主応力線図をFig.7に示す。なお、実際の解析は上下対称を前提として上半分を行い下半分は転写した全面図である。



a)  $\theta = 0^\circ$

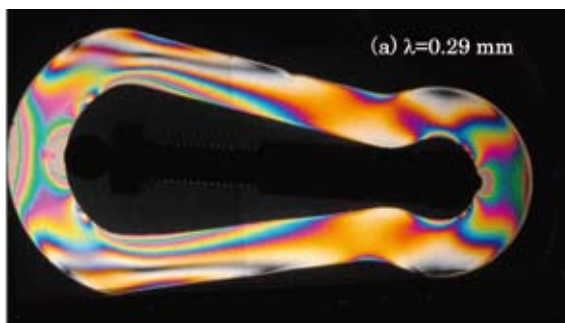


b)  $\theta = 30^\circ$

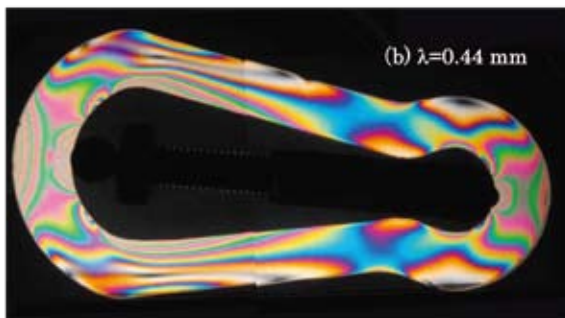


c)  $\theta = 45^\circ$

Photo. 4. Typical example of isoclinic lines under different rotating angles



(a)  $\lambda = 0.29 \text{ mm}$



(b)  $\lambda = 0.44 \text{ mm}$

Photo. 3. Isochromatic lines under different loading conditions, (a)  $\lambda = 0.29 \text{ mm}$  and (b)  $\lambda = 0.44 \text{ mm}$

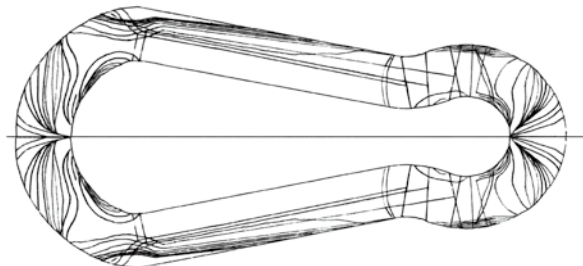


Fig. 6. Isoclinic lines

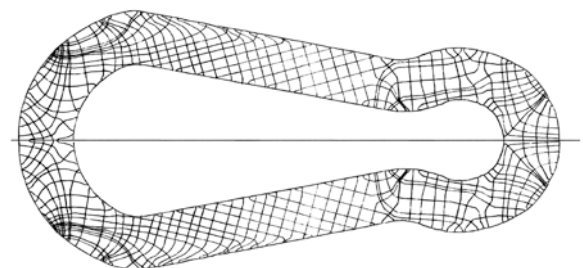


Fig. 7. Principal stress lines

応力解析

等色線と主応力線図, せん断応力差積分法により応力解析を行う。解析箇所は等色線縞パターンが特徴的な位置, すなわち, 特徴的な応力分布形態の位置を選定した。Photo.5に解析箇所を示す。

- ①中心線(荷重軸)上。 $\sigma_2=0$ となる。
- ②中心線に対し大きい円弧 $\angle=82^\circ$ , 小さい円弧 $\angle=89^\circ$ をとる。 $\sigma_1=0$ となる。
- ③中心線に対し大きい円弧 $\angle=41^\circ$ , 小さい円弧 $\angle=44.5^\circ$ をとる。

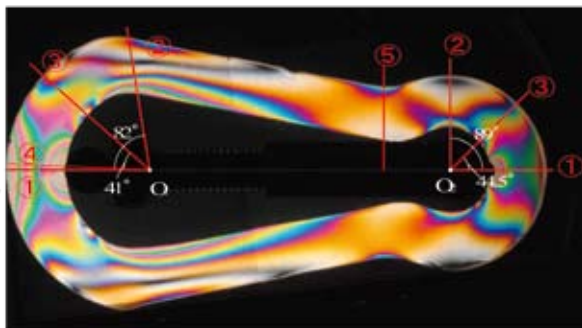


Photo. 5. Locations of stress analysis. Solid lines superimposed on photo 3 (a) represent.

④最大荷重点を含んでいる範囲。

⑤試験片がくびれている所。

大きい円弧の曲率半径をR, 小さい円弧の曲率半径をrとし, それぞれの中心を $O_1, O_2$ とする。ここで, Rの外半径=36.5 (mm), rの外半径=25.2 (mm)である。また, Photo.5の左側のように中心 $O_1$ から各地点までの距離をとると符号は-となるが, 便宜上, 両曲率半径の中心から試験片外側に向かって, 全て+とする。各位置の解析結果を以下に示す。

①中心線に対し $0^\circ$

中心線上, すなわち, 荷重軸上なので垂直方向の主応力 $\sigma_2=0$ となる。ゆえに等色線のみから主応力 $\sigma_1$ を求める事が出来る。Fig.8に得られた荷重軸上の応力分布を示す。左側に大きな円弧をLargeで, 右側に小さな円弧をSmallとして示した。以下のFig.9, Fig.10も同様に示してある。一方, 横軸は各等色線縞位置xを曲率半径R又はrで除し, 無次元化してある。従って, 横軸上の1は試験片の一番外側を現すことになる。また, マークの違いは負荷条件の違いを示す。円弧の大きい方では, 試験片内側, すなわち, 荷重点では圧縮応力が生じ, 試験片外側に向かっ

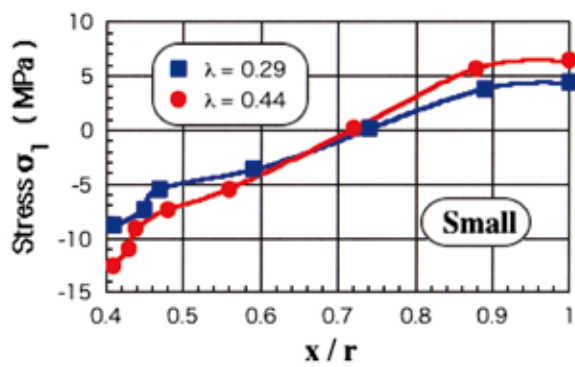
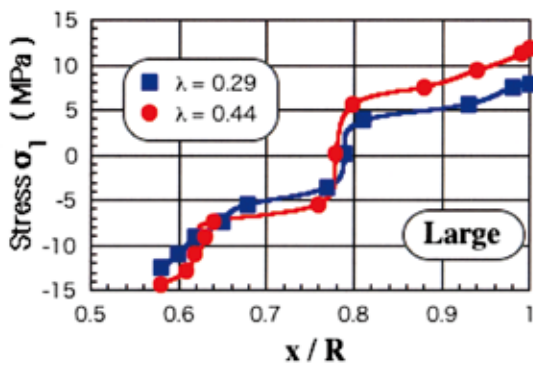


Fig. 8. Stress distribution along the loading axis

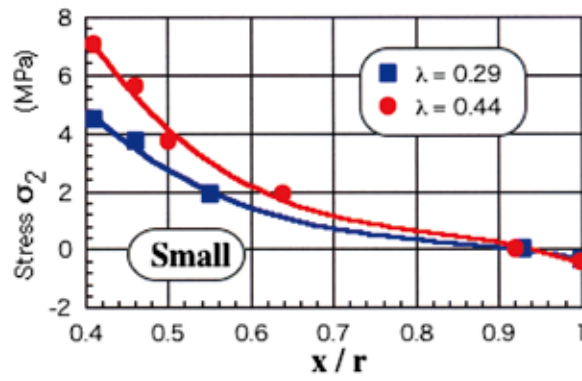
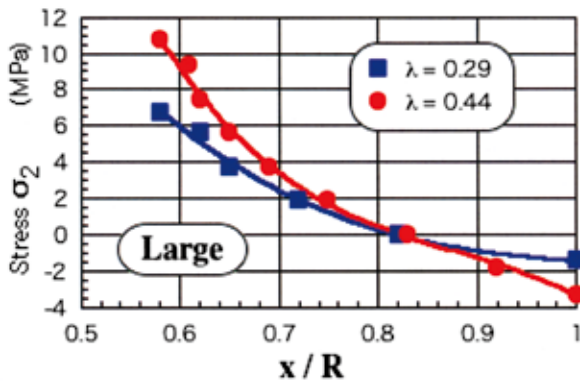


Fig. 9. Stress distribution along the vertical axis for loading axis

で引張りへと変化している。与える負荷の大小によらず応力の分布形態は同一であるが、負荷の増大に伴い応力は急激な変化を示している。負荷が大きくなると当然であるが応力は圧縮、引張り共大きくなる。一方、円弧の小さい方では、同一の分布形態に変化は観察されないが、大きい側に比べ全体的に応力値が低くなっている。従って、円弧が小さい方が同じ負荷を受けても発生応力が低くなる。また、いずれの条件でも圧縮と引張りの間に変化点が存在する。荷重条件の変化によらず同位置に存在し、この変化点に0次の縞が隠れていると推測される。このように、荷重を変化させることや、等色線の形状で縞次数を推測することが可能となる。

②中心線に対し、大きい円弧 $\angle=82^\circ$ 、小さい円弧 $\angle=89^\circ$

中心線に対しほぼ垂直であるので水平方向の主応力 $\sigma_1=0$ となる。①同様等色線のみから主応力 $\sigma_2$ を求める事が出来る。得られた結果をFig.9に示す。円弧の大きい方に注目すると、負荷の大小によらず、分布形態はほぼ同じ傾向を示し、引張りから圧縮へと単調に減少している。荷重点近傍の応力値を比較すると、当然ながら負荷の大きい方が小さい方に比べて、大きな応力が発生している。円弧の小さい方も大きい方と同様な応力分布形態を示している。また、応力値、変化範囲とも円弧の小さい方が狭い範囲である。引張りから圧縮応力への変化する位置はほぼ同じである。このことは、試験片の直線部分の影響を受けているものと考えられる。

③中心線に対し大きい円弧 $\angle=41^\circ$ 、小さい円弧 $\angle=44.5^\circ$

この箇所は自由境界上ではないため、せん断応力 $\tau_{xy}$ が存在する。そこで、せん断応力差積分法を用いて、応力値を求める。得られた結果をFig.10に示す。円弧の大小によ

らず、応力は内側から外側に向かって、引張りから圧縮そして引張りへと複雑な分布形態を示している。また、内側の応力と外側の応力値はほぼ同じ値を示している。この解析位置だけ小さい円弧の変化の方が顕著に表れている。これは、試験片形状が影響し複雑になり、かつ、大きな圧縮応力が発生したと考えられる。

④最大荷重点を含む範囲（中心線に対し $\angle=3^\circ$ ）

$\lambda=0.44$  (mm) における応力集中部を拡大した写真をPhoto.6に示す。写真の左側が引張り、右側が圧縮となっていることがわかる。ここで特に興味深いのは、よく観察すると、集中部の等色線は渦を巻いたような形となっている。これは、荷重を増加した際に試験片が変形し線接触が面接触に変化したためと思われる。従って、この部分を解析にあたっては、 $\sigma_2=0$ であるとし、等色線から主応力 $\sigma_1$ を求めた。得られた結果をFig.11に示す。等色線が渦巻き状のため内側の2点が同じ応力値を示し、以後は順次単調に減少する傾向を示している。また、各縞次数の間の距離がほぼ等間隔となっている。本試験範囲では試験片に最大18.54 (MPa) の応力が生じていることが分かる。

⑤試験片がくびれている所

この位置は中心線から試験片までの距離aを計測している。応力分離により得られた結果をFig.12に示す。

負荷の大小によらず、応力分布形態は垂直方向と比較しても更に滑らかな傾向を示し、応力値はほとんど変化が見られず、しかも、低い応力しか発生しない。ここは、Photo.1で示した様に、可動部が存在し一番弱いと部分で有ることが予想される。従って、くびれている位置に可動部を設けているセーフティフックの形状は非常に合理的であることを示している。

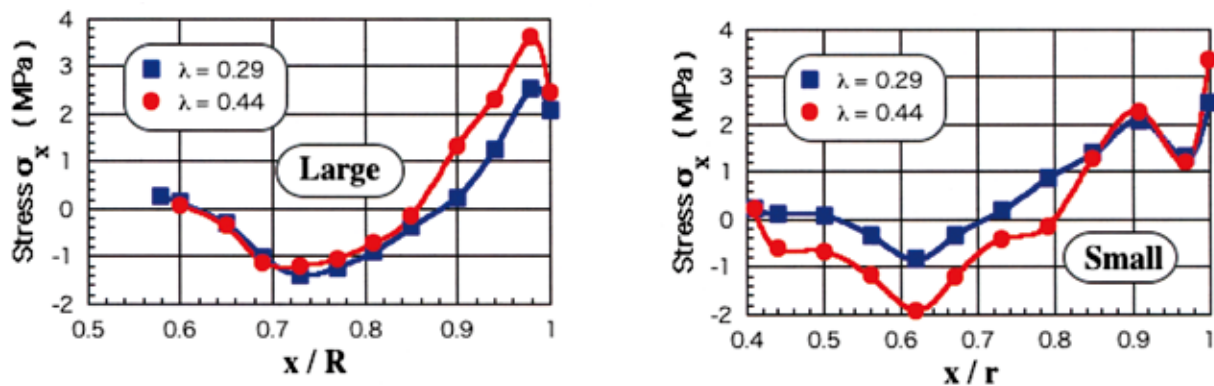


Fig. 10. Stress distribution along the half of vertical axis for loading axis

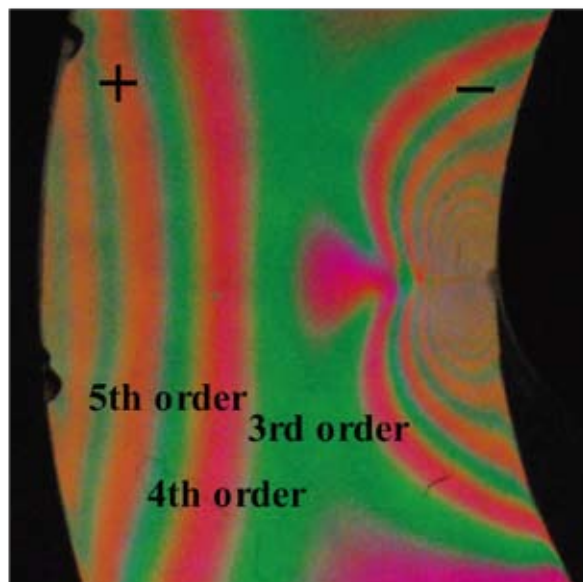


Photo. 6. Determination of fringe order near the loading point

## 結 言

光弾性法によりセーフティフックにおける応力の定量的評価を試みた結果を簡単にまとめると以下のようになる。

- 1) 複数定めた解析位置での応力分布形態には変化が観察されない。加えて、応力の圧縮から引張りへの変化点は負荷の大小によらず、同位置に存在する。
- 2) 試験片のくびれている位置には殆ど応力が発生せず、このくびれ位置に可動部を設けたセーフティフックの形状は最適である。

## 参考文献

- 1) 小川和雄, 渋谷浩隆: ナイロン釣り糸の強度評価, 水大校研報, 54, 217-222 (2006)
- 2) 小川和雄, 末武孝朗: 釣り糸の引張り強度に与える結び目の影響, 水大校研報, 57, 65-72 (2008)
- 3) 杉浦昭典監修: 海技実習ポケットブック, 海文堂, (1977)

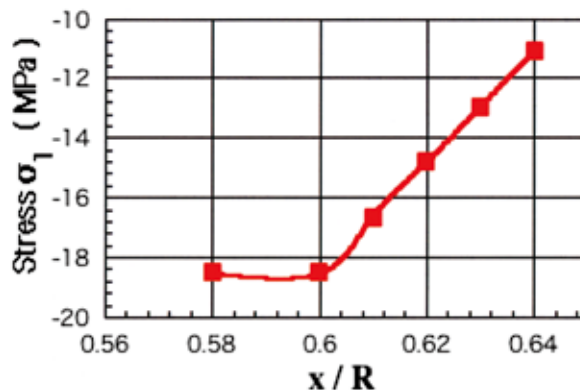


Fig. 11. Stress distribution of concentration part

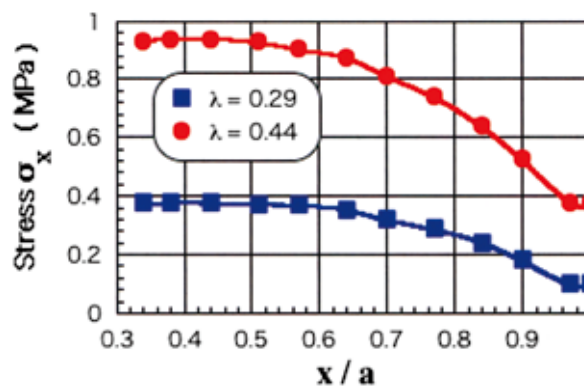


Fig. 12. Stress distribution along the narrow width axis

- 4) 応力測定技術研究会編: 朝倉書店, 472-572 (1955)
- 5) 横山隆, 松井剛一, 井口学編: よくわかる実験技術・学術用語, 日本実験力学会13-16 (2006)
- 6) 山崎良一, 三浦基弘: 光弾性実験構造解析, 日刊工業新聞社 (1997)
- 7) 応力測定技術研究会編: 朝倉書店, 158-191 (1955)
- 8) 応力測定技術研究会編: 朝倉書店, 693-713 (1955)
- 9) 応力測定技術研究会編: 朝倉書店, 413-424 (1955)
- 10) 横山隆, 松井剛一, 井口学編: よくわかる実験技術・学術用語, 日本実験力学会69-72 (2006)
- 11) 西田正孝: 応力集中, 森北出版 (2001)
- 12) 国尾武: 固体力学の基礎, 培風館 (1978)