

研究

マイクロ光弾性とその画像処理

新谷 隆一・吉川 寿治・船吉 俊充

関西学院大学理学部物理学科 〒662 西宮市上ヶ原 1-1-115

(1984年12月5日受理)

Micro-photoelasticity and Its Picture Processing

Ryuichi SHINTANI, Toshiharu YOSHIKAWA and Toshimitsu FUNAYOSHI

Department of Physics, Faculty of Science, Kwansei Gakuin University,
1-1-115, Uegahara, Nishinomiya 662

Two models of micro-photoelastic equipments, reflective and transparent model, are made by improving of a metallurgical microscope. The sensitivity of the former model is twice compared with the latter one. Photoelastic fringes can be observed clearly in a monofilament with 200-400 μm in diameter. Analyses of its fringes were carried out by numerical integration. Then, it is revealed that the periphery of monofilament was elongated more than the inner part at early stage of stretching, but finally its elongation becomes uniform. Some tests were also carried out preliminary with polymer monofilaments under some atmospheres. Moreover, fringe patterns are taken by a TV camera, and then its video signals are fed to a micro-computer after being converted into digital signals by an A/D converter. Its processed results are consistent with the results analyzed photographs.

1. はじめに

最近、高分子繊維を利用した optical fiber や釣糸等の需要が急速に増大し、その大量生産はいうまでもなく、高品質のものが要求されるようになった。そこで、これらの製品を光学的に検査し、工業的な品質管理と物理化学的性質の研究のため、工学的手段として光弾性法が有効である。そのためわれわれは、細い高分子繊維にも応用できるようにマイクロ光弾性法を開発し、その実用性を試みてきた¹⁾。

モノフィラメント (直径 100~500 μm) のように細く、かつ断面が円形の試料に引張り応力を加え、その光弾性縞を観察するには特別な工夫を必要とする。本研究では、金属顕微鏡を改良した透過型および反射型のマイクロ光弾性装置を試作した。これらの装置より観察できる光弾性縞を写真撮影し、モノフィラメントの延伸および曲げの歪み測定を行ない解析した。また測定の高速度処理を行なうため、光弾性縞をモノクロのビデオカメラで撮影し、そのビデオ信号を A/D 変換した後、マイクロコンピュータに入力し解析する方法も行なった。今回の

実験で使用したモノフィラメント試料は、ポリアミドとナイロン6の共重合体である。

2. 装置の概要

マイクロ光弾性装置として反射型と透過型の2種類の装置を試作した。これらの装置の特長は、干渉フィルター (432, 542 および 634 nm) からの単色光を偏光板と 1/4 波長板で円偏光にし、試料に照射していることである。Gurnee の研究では直線偏光を使用しているため応力が一方向の場合のみ観測が可能であったが²⁾、われわれの実験装置では曲げ等の応力方向が一定でない光弾性縞を鮮明に観測することが可能となった。また対物レンズの倍率は 5~10 倍におさえ、フィルムには 25~50 倍で撮影している。低倍率の対物レンズを使用する理由として、1) 焦点深度を深くする、2) 対物レンズと試料の間隙を拡げ操作性をよくするため等による。印画紙には全倍率を 100~400 倍にし、光弾性縞を観測した。

2.1 反射型マイクロ光弾性装置

反射型マイクロ光弾性装置の光学系は、Fig. 1(a) に示すようにまったく金属顕微鏡と同様である。試料は

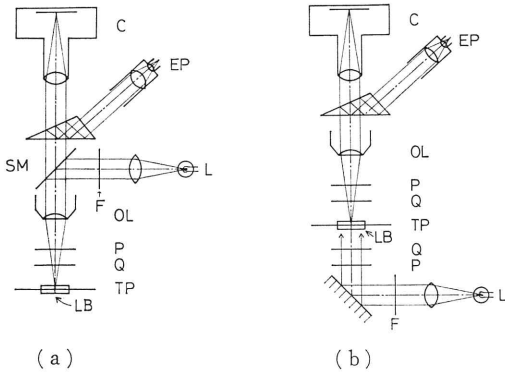


Fig. 1 Optical alignment of micro-photoelastic equipment, (a) reflective model, (b) transparent model.

L: light source, F: interference filter, P: polarizer, Q: quarter-wave plate, TP: test piece, LB: liquid bath, OL: object lens, EP: eye piece, C: camera, SM: semi-silvered mirror.

断面が円形で空気中ではレンズ効果のため、光は平行に通過しないので試料を浸漬槽に入れて観察している。浸漬液は α -ブロムナフタリンと流動パラフィンの混合液で試料と同じ屈折率をもつように調合されている。また浸漬槽の底面を鏡にし、そこで反射された光は試料を2

度通過するので、透過型に比べて2倍の感度をもつことになる。しかし光源より出た光は半透鏡により光量が半分となり視野は非常に暗くなる。この反射型では浸漬槽の底面の鏡で反射光の位相が反転するので、暗視野でのみ観測可能である。

2.2 透過型マイクロ光弾性装置

装置の光学系を **Fig. 1 (b)** に示すごとく、円偏光は顕微鏡の下部より試料を照射し、浸漬槽の底面は透明な光学ガラスからできている。透過型の場合には、検光子の回転により明視野・暗視野の選択が可能となり明瞭な光弾性縞の観測が可能である。

3. 代表的な光弾性写真

上で述べたマイクロ光弾性装置で、モノフィラメントの曲げならびに延伸の光弾性縞を撮影した。**Fig. 2** は直径 $410 \mu\text{m}$ の曲げによるモノフィラメントの光弾性縞である。(a), (b) および (c) は透過型装置でそれぞれ、432, 542 および 634 nm の干渉フィルターを用いて撮影したものである。また (d) は反射型装置で 542 nm の干渉フィルターを用いたものであり、透過型に比べて縞次数が2倍になっていることが観察される。解析に使用される光弾性写真は明瞭な像を得るため透過型で撮影し

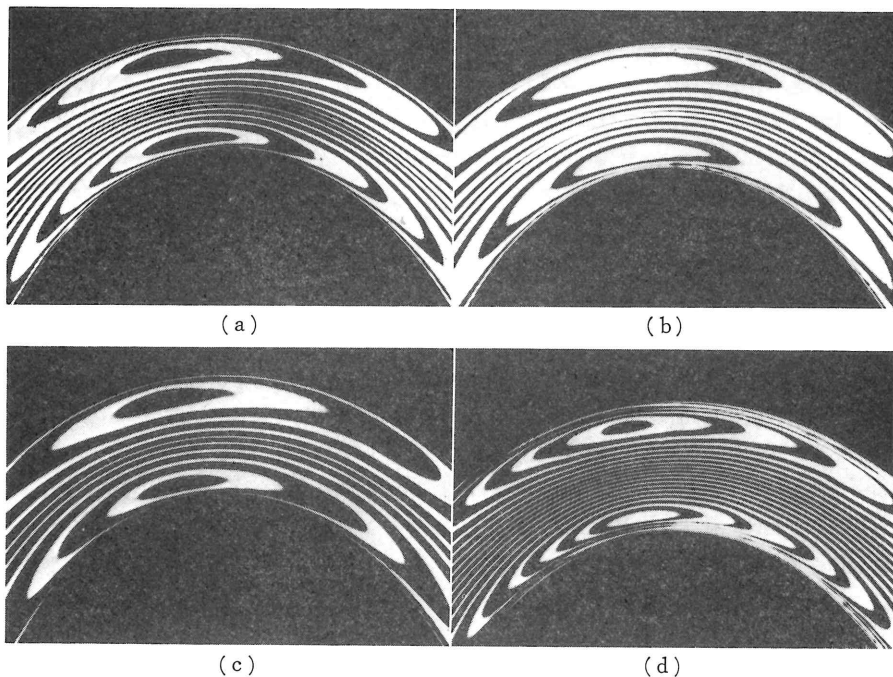


Fig. 2 Photoelastic fringes in a monofilament with the diameter of $410 \mu\text{m}$ by bending. (a), (b) and (c) are taken by the transparent model with the interference filter 432, 542 and 634 nm in wave length, respectively. (d) is a picture by the reflective model with a filter of 542 nm.

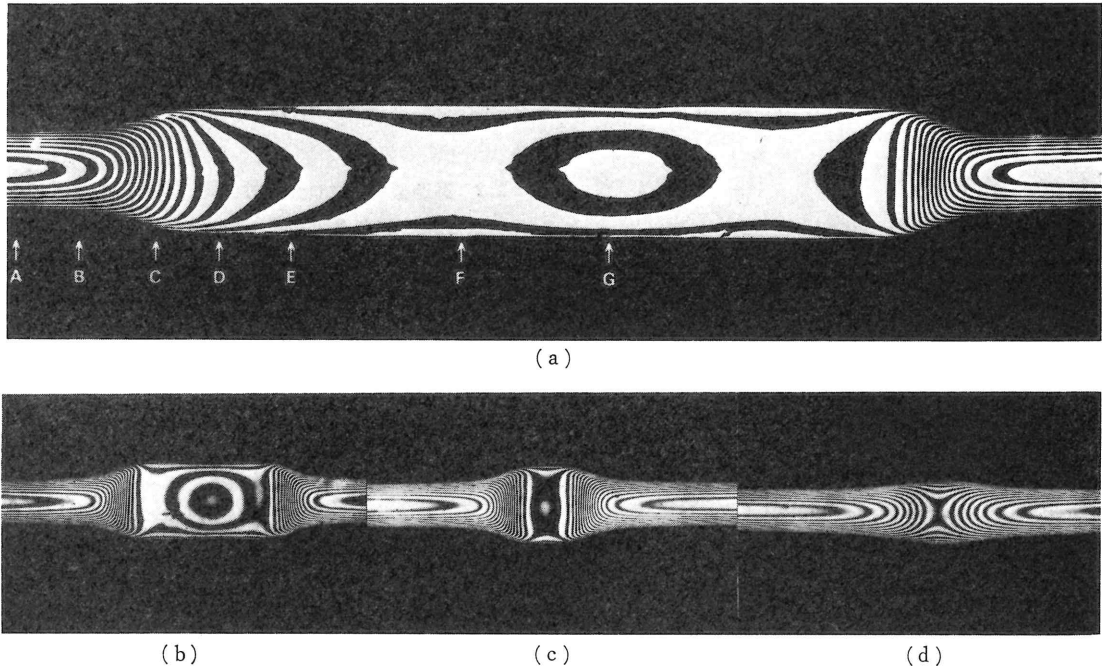


Fig. 3 Photoelastic fringes in an elongated monofilament. The initial diameter is $410 \mu\text{m}$. (a) is about 20% stretching. (b), (c) and (d) show the fringes under stretching more about 20% at a time, respectively.

たものである。光弾性縞を解析するには、干渉フィルターを変えることにより、試料の光弾性感度を変えることができ数種の観測が短時間に行なえる。一方、数本の光弾性縞を観測するとき、カラー写真が便利である。一枚の写真を数種の干渉フィルターを通して観察することにより上記の効果が得られる。

Fig. 3 は透過型装置の暗視野で撮影したモノフィラメントの延伸による光弾性縞である。試料 (直径 $410 \mu\text{m}$) を 70°C の湿潤な空气中で約 20% ずつ延伸させたものを、室温で観察した光弾性縞である。応力は試料に一樣にかかるのではなく、ある場所から突然伸び始める。**Fig. 3(a)** の中央部では約 5%、両端では約 30% 伸びていて光弾性縞は複雑な様相を示している。この光弾性縞の解析の結果、複屈折率 (光弾性感度) $B(\rho)$ の断面動径分布が一樣でないことが見られた。**Fig. 3(a)**, (b) で見られる円形の縞は、伸びの初期の段階であり、試料をさらに延伸させると、**Fig. 3(c)**, (d) のように両側から伸びていくことがわかる。最後に十分延伸させると縞は完全に延伸方向に平行になり、直径 $170 \mu\text{m}$ となった。

4. モノフィラメントの光弾性縞の解析

Fig. 3 からわかるように、延伸初期の状態でもモノフ

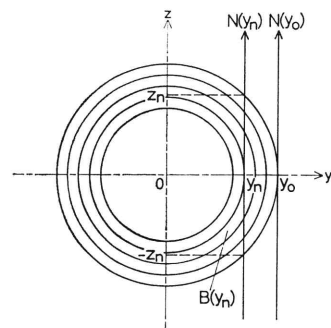


Fig. 4 Cross section of a monofilament. Concentric circles in which $B(\rho)$ may be uniform show division for numerical integration.

ィラメントのネッキング部分では、縞模様から計算される複屈折率 $B(\rho)$ は一定ではない。**Fig. 3(a)** で、A 点から G 点の各点の縞次数 N と複屈折率 $B(\rho)$ は、次に述べる数値積分によって求めることができる。B, C, D, E, F および G 点は A 点からそれぞれ 0.21, 0.43, 0.65, 0.87, 1.41 および 1.87 mm のところにある。

Fig. 4 は半径 R のモノフィラメントの延伸時における断面を表わし、光は z 軸に平行に通過するものとする。また複屈折率 $B(\rho)$ は定数ではなく、動径ベクトルの関数で表わされるものとする。 y 点での微分縞次数は、

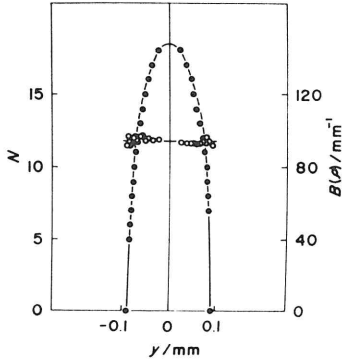


Fig. 5 Fringe order and coefficient of birefringence in a fully stretching monofilament. y : radius vector, N : ●: fringe order, $B(\rho)$: ○: coefficient of birefringence.

$$dN = B(\rho) dz \quad (1)$$

で与えられるので, y_n 点での縞次数 $N(y_n)$ は,

$$N(y_n) = \int_{-z_n}^{+z_n} B(\rho) dz \quad (2)$$

となる. ここで $y_0 = R$ とし, y_n をモノフィラメントの表面から内側に $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots$ と分割した n 番目の円と y 軸の交点とすれば, (2) 式は, 次式のように表わされる.

$$N(y_n) = 2 \sum_{i=1}^n B(y_i) \left\{ \sqrt{y_{i-1}^2 - y_n^2} - \sqrt{y_i^2 - y_n^2} \right\} \quad (3)$$

また, 上式より $B(\zeta)$ を求めると,

$$B(\zeta) = \frac{N(y_n) - 2 \sum_{i=1}^n B(y_i) \left\{ \sqrt{y_{i-1}^2 - y_n^2} - \sqrt{y_i^2 - y_n^2} \right\}}{2 \sqrt{y_{n-1}^2 - y_n^2}} \quad (4)$$

となる. この式を用いて, 十分延伸させたモノフィラ

ントについて $B(\rho)$ を数値積分すると, **Fig. 5** のように一定となることがわかる. 延伸中のモノフィラメントの場合, A 点から G 点の各点での縞次数 N をモノフィラメントの中心部から動径分布として **Fig. 6(a)** に, 複屈折率 $B(\rho)$ については **Fig. 6(b)** に示す. これから数% までの延伸初期においては, $B(\rho)$ の値は小さくかつほぼ一定であるが, 中期になるとその値は大きくなり, モノフィラメントの表皮で急激に大きくなっている. 十分延伸した後は, **Fig. 5** で示されるように $B(\rho)$ は一定となる. これらのことから, 延伸過程でのモノフィラメントの応力状態は, 延伸中期で表皮と中央部では異なり, 表皮でとくに延伸が進んでいると推察される.

5. モノフィラメントの雰囲気による影響

この実験では, 次の3種類の前処理を行なった. モノフィラメントは, 1) デシケートのなかでシリカゲルに

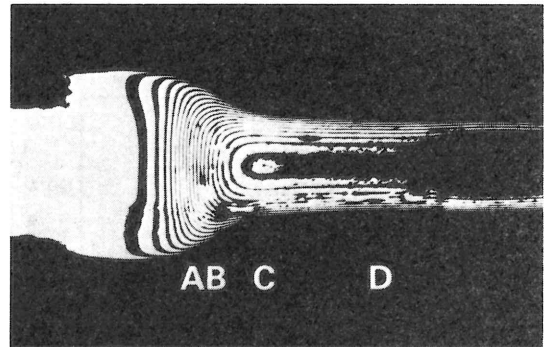


Fig. 7 Photoelastic fringes in dried sample under stretching. The opaque parts can be seen as dark shadows at the picture.

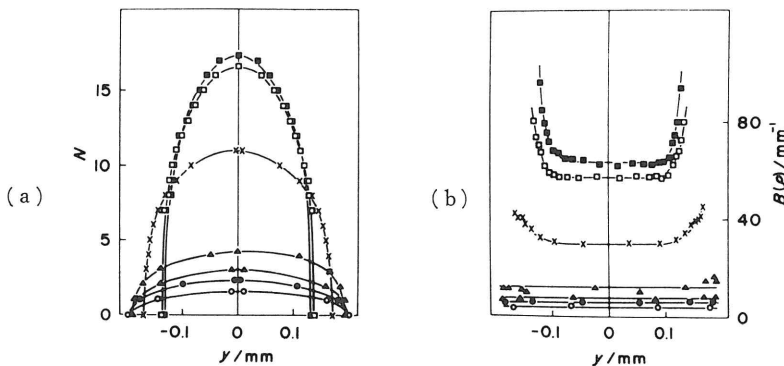


Fig. 6 Fringe orders and coefficients of birefringence in the early stage of stretching at A (■), B (□), C (×), D (▲), E (△), F (○) and G (●) in **Fig. 3(a)**. (a) fringe orders, (b) coefficients of birefringence.

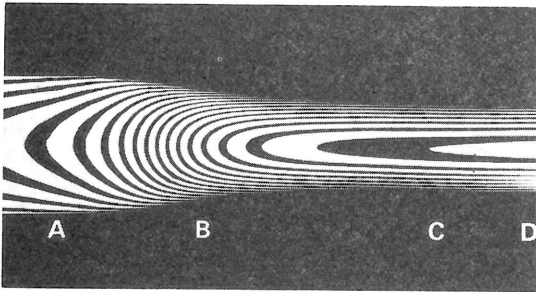


Fig. 8 Photoelastic fringes in moist sample under stretching.

より十分乾燥させたもの、2) 無処理、3) 長時間水中に浸したのについて実験を行なった。Fig. 7は乾燥させ、 $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ で延伸させた試料の光弾性写真である。この写真で縞が観測できない不透明な部分がある。この部分は高分子鎖が、延伸速度に追従して配向できずに切れたためと考えられる³⁾。しかしA、B、CおよびD点の透明な部分では、密で高い縞次数が観測され、高分子鎖の配向が十分行なわれていると思われる。伸びる前の部分 (Fig. 7のA、B点)では、同様な解

析の結果、中央部の $B(\rho)$ は周辺部より若干大きいことがわかった。次に無処理の試料を $1,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ の速度で延伸させたときは、 $B(\rho)$ はほぼ一定の値となり一様に伸びていることがわかった。同様に、Fig. 8は水中で十分処理した試料を $10,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ の速度で延伸させたときの光弾性写真である。この写真から解析し縞次数 N および複屈折率 $B(\rho)$ を求めた結果をFig. 9に示す。モノフィラメントのネッキング部分が滑らかに延伸されていることから、 $10,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上の速度で延伸しても分子鎖は容易に配向が可能であると推定される。これは高分子鎖間に水分子が浸入し潤滑剤として寄与しているのであろう。以上の結果を裏づけるX線回折実験も行なった^{1,4)}。

6. 画像システムによる高速処理

本研究の高度処理化を行なうため、モノフィラメントのビデオカメラによる画像処理を行なった。実験に使用した装置の光学系は透過型装置と同様で、延伸過程の光弾性縞を観察できるように装置に改良を加えた。この装

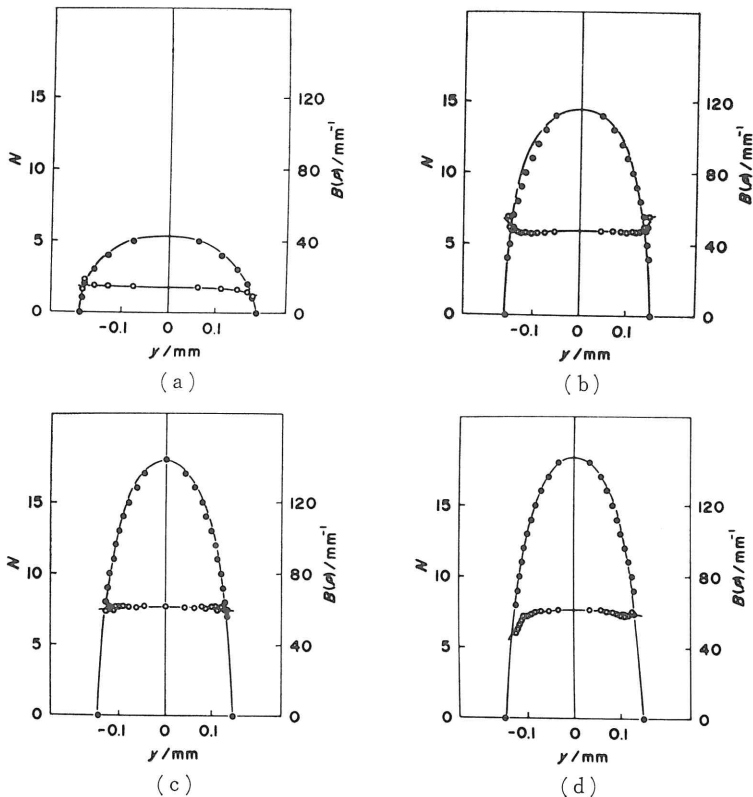


Fig. 9 Fringe orders and coefficients of birefringence in moist sample at points A-D in Fig. 8.

Axis name and symbols are the same as those in Fig. 5.

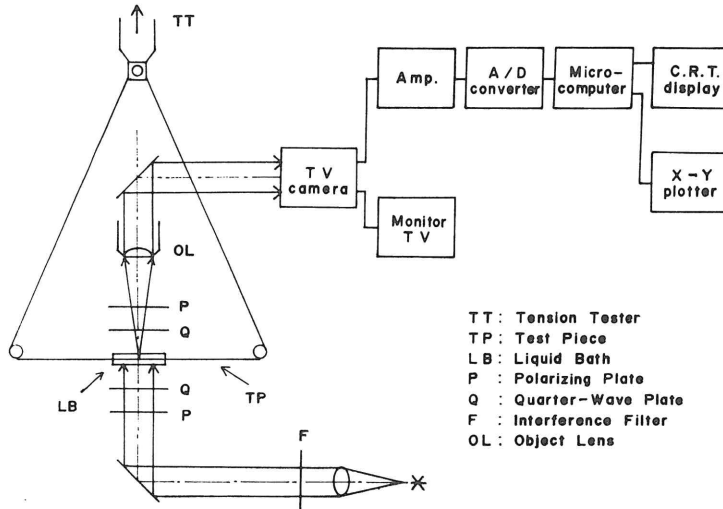


Fig. 10 Block diagram of micro-photoelastic equipment with the picture processing unit.

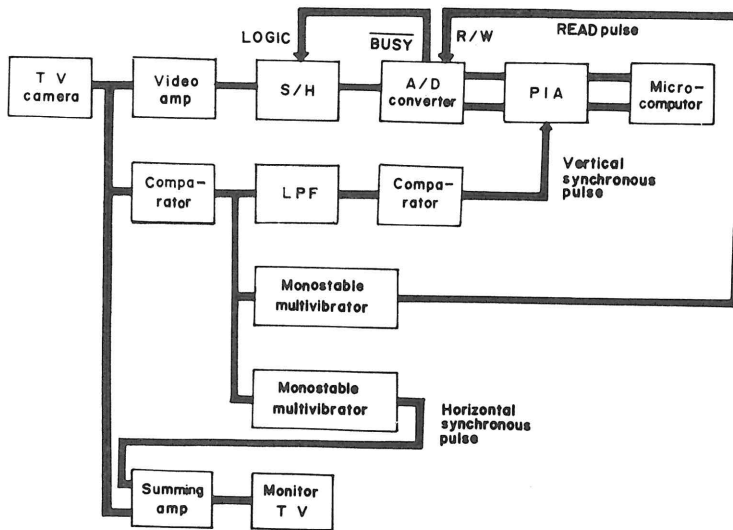


Fig. 11 System diagram for processing video signals to the picture processing unit.

置のblock diagram を Fig. 10 に示す. 浸漬槽中の試料 TP は, 接着剤でステンレスワイヤー SW に固定されている. そしてこのステンレスワイヤーを顕微鏡のステージの両端にある滑車を介して, 万能引張り試験機の移動クロスヘッド TT に取りつけ, これを上を移動させることにより試料に引張り応力を加えることができる. このようにして対物レンズ OL から観察できる光弾性縞はビデオカメラで撮影される. このビデオカメラから出力される映像信号から垂直同期信号と水平同期信号をコンパレーターで分離する (Fig. 11). 前者は, マイクロコンピュータにデジタル化された映像信号を取り

込むための PIA (peripheral interface adaptor) のコントロール信号となり, 後者は, データをデジタル化するための A/D コンバーターの信号となる. また, 約 $0.2 \mu\text{s}$ の正のパルスで映像信号を変調させ, モニターテレビの画面上にカーソルとして白線を現わした. 可変抵抗でパルスのタイミングをずらせ, データのサンプリング位置を変え, その位置をカーソルによって読みとれるようになっている. データをマイクロコンピュータに取り込む過程のフローチャートを Fig. 12 に示す. ビデオアンプで増幅された映像信号は, A/D 変換された後, PIA が垂直同期信号を検波すると, 一水平走査期間に

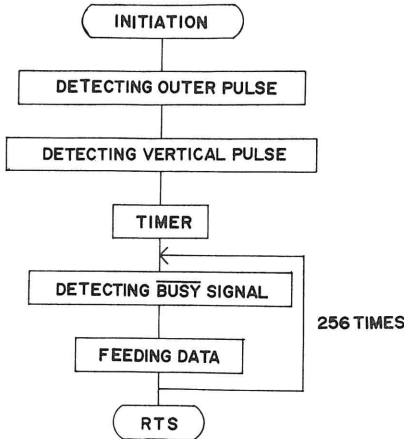


Fig. 12 Flow chart for feeding video signals to the picture processing unit.

1画素のデータを取り込み、1/2フレームで256点のデータをマイクロコンピュータのメモリ領域に格納する。これに要する時間は1/60秒である。次に、メモリ領域に格納されたデータの解析を行なうためのフローチャートが Fig. 13 である。モノフィラメントのエッジを決定するため、メモリに格納されたデータで隣との差をとることで一次の微分を行なった。画面上で端からカーソ

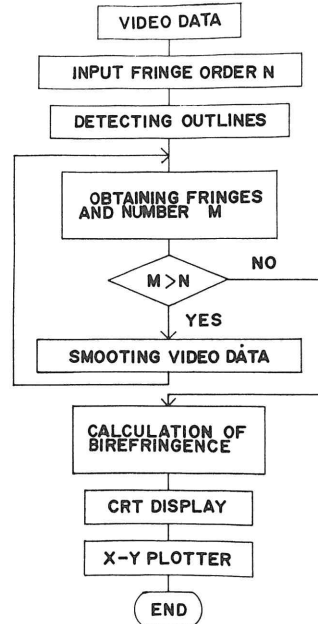


Fig. 13 Flow chart for processing digital video data to the unit.

ルに沿って計算を行ない、有限値を得たところを試料のエッジとした。縞次数と位置の決定もこの一次の微分が

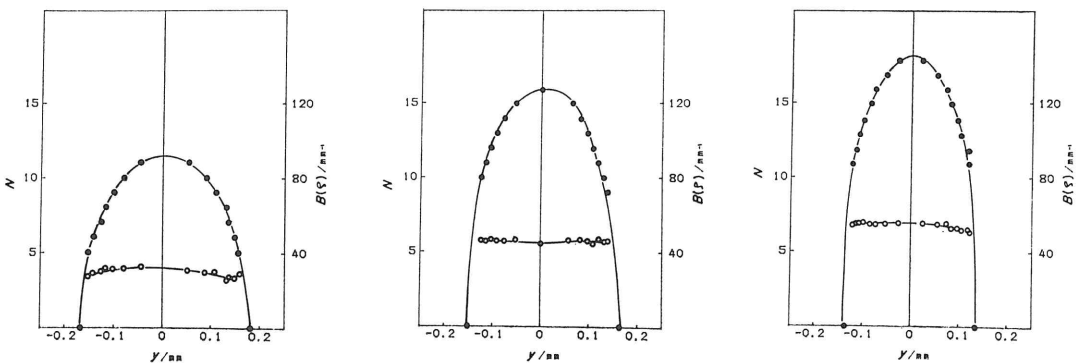
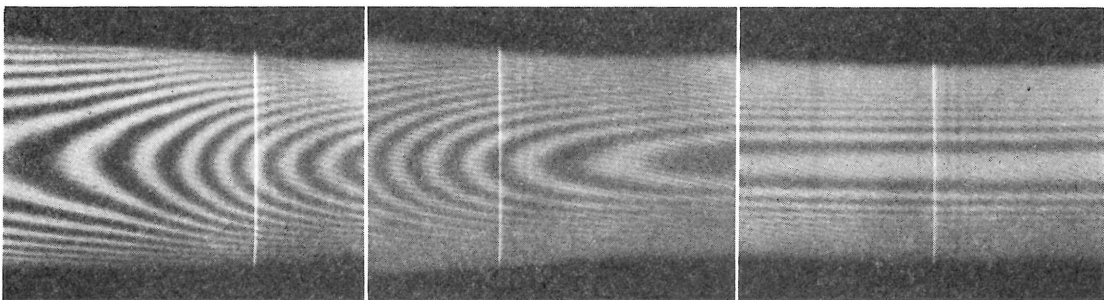


Fig. 14 Photoelastic fringes on the monitor TV (upper part), and fringe orders and coefficients of birefringence at the cursor (lower part). Axis name and symbols are the same as those in Fig. 5.

ら求めた。試料の周辺では縞間隔が密になり、縞次数の決定がむずかしく、カーソル縞上の縞次数の最高値を入力する必要がある。この実験では延伸の初めから積算し、その値を入力している。ノイズ等により得られた縞次数が入力した縞次数より大きいときには、メモリに格納されたデータを平滑し同じ操作を行なう。この平滑する方法は、相隣る三つのデータを平均し、その点でのデータとして用いた。このようにして各縞次数と中心からの距離を定め、(4)式の数値積分で複屈折率 $B(\rho)$ を計算し、その結果を CRT ディスプレイと X-Y プロッターに出力させる。

実際に実験を行なった結果を示す。水中で十分処理した試料を用い、延伸前は直径 $410\ \mu\text{m}$ を $200\ \mu\text{m}$ になるまで延伸させた。Fig. 14 はモニターテレビに映る光弾性縞と各断面での縞次数 N と複屈折率 $B(\rho)$ の関係である。これは同じ条件で写真から解析した結果と一致している。

7. おわりに

以上マイクロ光弾性法によるモノフィラメントの延伸および曲げに対する光弾性縞の縞次数および複屈折率について論じてきた。この実験方法は、小さな形状の応力

状態やその物性を研究するのに有力な手段となるものであろう。また試料の前処理に関する実験結果から、延伸過程におけるモノフィラメントの配向機構は周辺部の雰囲気によりかなりの影響を受ける。このことから一般に使用される光弾性材料についても、その保管や実験条件に十分留意する必要があると考えられる。optical fiber や釣糸等の使用条件についても防湿被膜等同様な配慮が望まれる。

最後に試料を提出していただきました UNITIKA 株式会社へ厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) R. Shintani, T. Kubota and T. Yoshikawa: Analyses of monofilaments in stretching process by micro-photoelasticity. Proc. Jpn. Soc. Photoelasticity, **5** (1984) 1.
- 2) E. F. Gurnee: Theory of orientation and double refraction in polymers. J. Appl. Phys., **25** (1954) 1232.
- 3) R. S. Stein and A. V. Tobolsky: Determination of the statistical segment size of polymer chains from stress-birefringence studies. J. Polym. Sci., **11** (1953) 285.
- 4) J. B. Nichols: X-ray and infrared studies on the extend of crystallization of polymers. J. Appl. Phys., **25** (1954) 840.