

合成繊維の光弾性実験

田中啓介*・小林節子**・鈴木 恵**

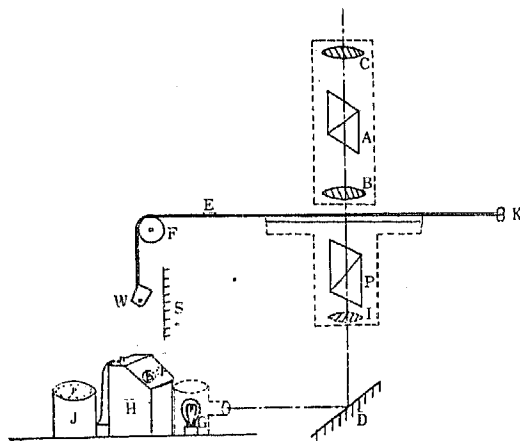
Keisuke TANAKA, Setsuko KOBAYASHI and Megumi SUZUKI
On the Photo-plasto-elastic Experiments of the Synthetic Fibers.
(1960.9.1受理)

1. ま え が き

物性論的な観点から研究したポリマーの光弾性的性質は、機械工学的方面から要求される応力解析法に使用されることが多かつた。しかしこの方面に使用されたポリマーは網状ポリマーであつた。網状ポリマーの複屈折率と応力との関係は、破壊まではほとんど直線的にゆくものが多いが、破壊応力に近くなると一般にねてくる傾向がある。応力とひずみの関係も同様に破壊の近くを除いて直線的で、最大ひずみは%の桁とみられていて、光弾性材料としては良好な条件を具えていた。

しかしながら、織物はいうに及ばず工業材料に最近使用され始めた合成繊維は、弾性領域が広くて光弾性実験を行い易い網状ポリマーでなく、弾性領域が狭い鎖状ポリマーである。鎖状ポリマーでは降伏を起すまで複屈折率と応力がほぼ直線的で、その先の塑性領域については正確な実験がまだ十分集積されていない¹⁾。

また鎖状ポリマーは力学的クリープは多いが、光学的クリープは概して少なく、時間の経過と共に複屈折率の増加するもの、逆に0となり更に逆符号の複屈折率となるものがあるといわれている。それゆえ、鎖状ポリマーである合成繊維の力学的および光学的クリープ実験を行つて、工業材料の基礎的な資料を提供しようとするものである。



第1図 実験装置

* 昭和34年度科学教育研究生(南佐久実業高等学校)

** 信州大学繊維学部材料工学研究室

ここにクリープのいかに現れるかは分子構造と関連をもつものと明らかに考えられ、特に光学的クリープの原因としては、ガラス弾性に対応する複屈折率のほかに、二次結合のすべりによつて分子鎖の *orientation* 効果の混入してくることが考えられている。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

第1図の如き LEITZ 社製の偏光顕微鏡を光弾性実験装置として使用した。ここにAは分析ニコール、Pは偏光ニコール、Bは接物鏡、Cは接眼鏡、Dは反射鏡、Eは試料（長さ20.0cm）、Iは集光レンズである。光源には波長590m μ のナトリウムランプGを使用し、試料の一端に荷重Wをかけるために摩擦の非常に小さい滑車Fを使用してそのクリープ量をスケールSで読めるようになってゐる。

2.2 実験方法

試料としては合成繊維の未延伸ナイロンおよび未延伸テトロンを使用した。繊維の初めの直径は顕微鏡のマイクロメーターで読んでそれぞれ約0.0725mm, 0.0750mmをえた。繊維はおおよそ円筒状をなしてあるので縦軸に並行して荷重を加え、光をこの軸に直角に当てたとすれば繊維の軸を通過する光線のみが入射光線と同一方向に進み、其他の光線は分散して実験装置の視野中に入ることができないので、繊維と同一屈折率を有する透明液すなわちトリクレゾールホスフェイト（屈折率1.556）、ジブチルフタレート（屈折率1.506）、ジフェニールアミン（屈折率1.583）の混合液を浸液（繊維の平均屈折率に等しい屈折率の液でこの確定には *Beckes Line* を利用した）として入れて光の分散を防いだ。

繊維に一定荷重を加えたとき、時間の経過とともに内部構造および形態が変化する。それで経過時間に対する直径およびリターデーションを測定する。リターデーションは縁効果のない繊維の中心部で読んだが、その読み方は Berek のコンペンセーターによつた。そのコンペンセーターを零点（目盛では30°）から一方に回転する。そうすると最初の暗黒帯が接眼鏡の十字糸の交点に一致する。それに相当する目盛を a とし、次に反対側にコンペンセーターを回転すると前と反対側から来る最初の暗黒帯が接眼鏡の十字糸に表われる。その点の目盛を b とする。これによつて得られる回転角 $i = (a - b)/2$ である。これらの回転角 i からリターデーション Γ を読むために次式による。

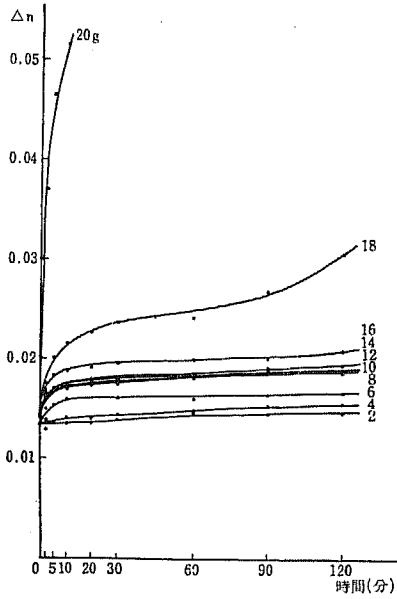
$$\Gamma = \frac{\sin^2 i (1 + 0.204 \sin^2 i)}{f(J)} \lambda = \frac{f(i)}{f(J)} \lambda$$

ただし、 λ は用いた光の波長を表わし、 $f(J)$ は十字糸の交叉点で 1λ の Γ を表すに要する傾角 i に相当する函数である。しかしながら Berek は計算に便なため Leitz 社から 0° から 30° までの $\log f(i)$ の表と、 $\log C (\lambda/f(J) = \text{Compensator constant } C)$ に対する黄色 (590m μ)、における対数表を作つてあるから、計算はこの表より

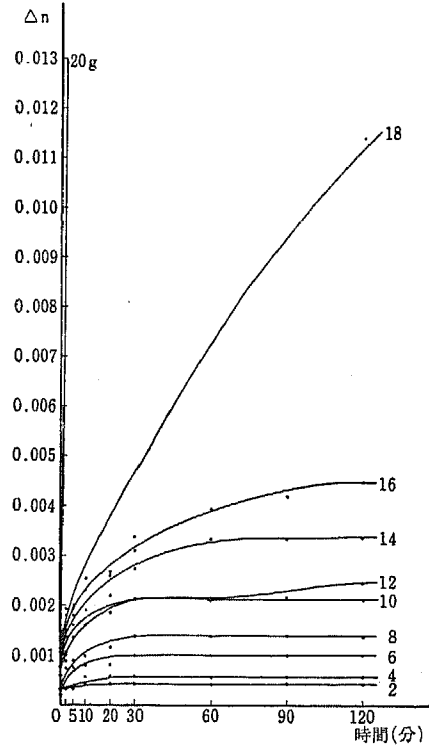
$$\log \Gamma = \log f(i) + \log C$$

で行えばよい。

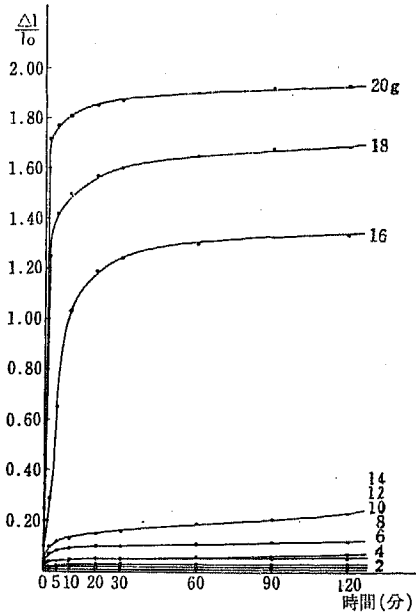
このようにしてリターデーション Γ が求められるので、試料の中心部の厚さ d を顕微鏡のマイクロメーターで読めば、複屈折率 Δn は



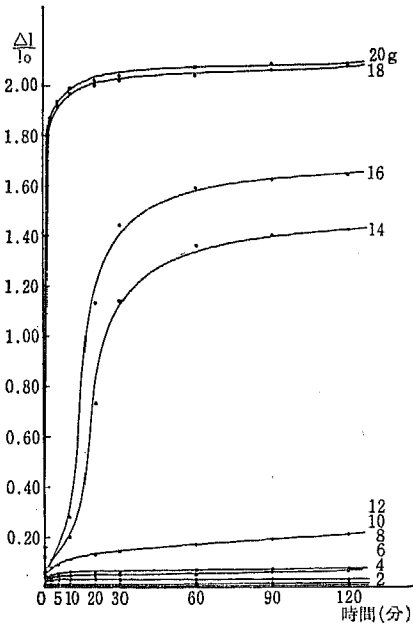
第2図 未延伸ナイロン繊維の複屈折率と荷重時間曲線



第3図 未延伸テトロン繊維の複屈折率と荷重時間曲線



第4図 未延伸ナイロン繊維のクリープ量と荷重時間曲線



第5図 未延伸テトロン繊維のクリープ量と荷重時間曲線

$$\Delta n = \frac{\Gamma}{d}$$

で求められる。

同時にクリープ量をスケールSで読む。

3. 結果および考察

未延伸ナイロン，未延伸テトロン両繊維について，複屈折率と荷重時間との関係はそれぞれ第2，3図に示した。

また両繊維のクリープ量と荷重時間との関係も第4，5図に示した。

これらの実験結果から次の如く考察される。

(1) いわゆる光弾性材料の複屈折率の一般形

光弾性材料としては鎖状ポリマーが適当しているが，塑性域での応力—ひずみ関係は勿論，複屈折率—応力，複屈折率—ひずみ関係が明らかにされなければならない。複屈折率は HERRING⁴⁾ が示した6～6ナイロンの *Strain dependent*，河田⁵⁾ が示したエポキシ樹脂についての *stress dependent* の外に温度 θ についても異なり，さらに荷重時間 t についても著しく異なることがわかった。それゆえ，合成繊維などの光弾性材料についての複屈折率は，*strain* (ϵ) *dependent* または *stress* (σ) *dependent* すなわち k を比例常数としたときの

$$\Delta n = k\epsilon \quad \text{または} \quad \Delta n = k\sigma$$

で表わすよりむしろ一般には

$$\Delta n = f(\sigma, \epsilon, \theta, t)$$

で表わした方が適当であり，*strain dependent* または *Stress dependent* に示される挙動はその中の特殊の場合と言える。西田⁶⁾のセルロイドについての実験およびこの両繊維についての実験により，光弾性材料についての複屈折率の一般形が実証された。

(2) 光弾性感度からの検討

光弾性感度を α (mm/kg)，使用した波長を λ (Å)，応力を σ (kg/mm²) とすると

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\Delta n}{\sigma}$$

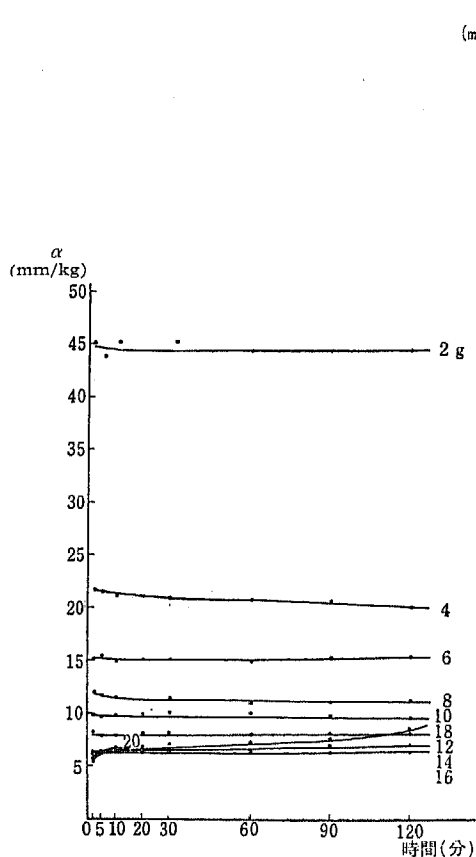
ここに $\lambda = 5900 \text{ \AA} = 590 \text{ m}\mu$ を使用すると

$$\alpha = \frac{10^4}{5.9} \cdot \frac{\Delta n}{\sigma} \quad (\text{mm/kg})$$

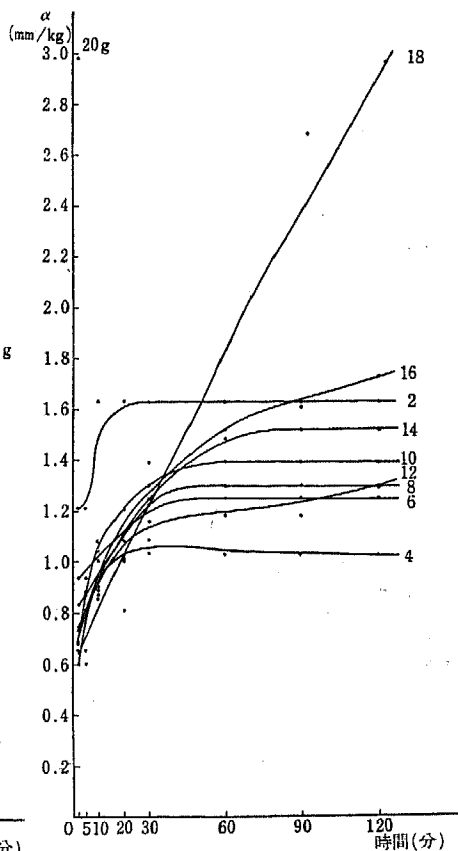
となる。すなわち光弾性感度とは1 kg/mm²の単純応力（または主応力差）を作用するとき現れる複屈折率を表わして，感度の高い材料程大きな値を示す。

両繊維についての荷重時間に対応する光弾性感度をとると第6，7図である。両繊維の光弾性感度を比較すると，ナイロンの光弾性感度はテトロンの光弾性感度より相当大きい。またナイロンの場合は荷重を2gから16gまで変化させると光弾性感度は減少し，18gよりは光弾性感度は増加する。テトロンの場合には荷重を2gから4gまで変化させると光弾性感度は減少し6gよりは光弾性感度は増加する。⁷⁾

今までに使用された光弾性材料の主なものの光弾性感度を第1表にのせる。これらの光弾性材料の光弾性感度と両繊維の光弾性感度を比較すると，ナイロンはゼラチンとベークライトの中間位，テトロンはベークライト，フェノライト位の値である。それゆえ，光弾性感度の高



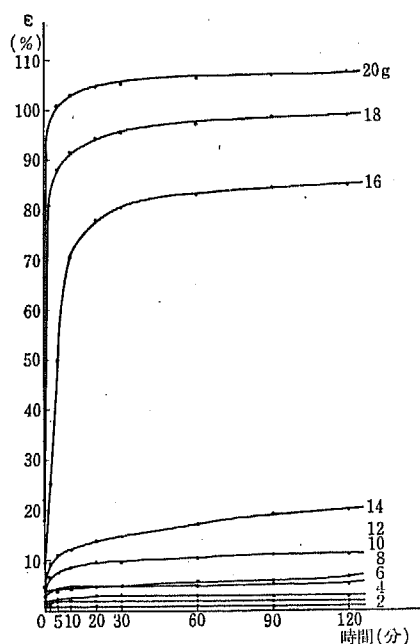
第6図 未延伸ナイロン繊維の光弾性感度と荷重時間曲線



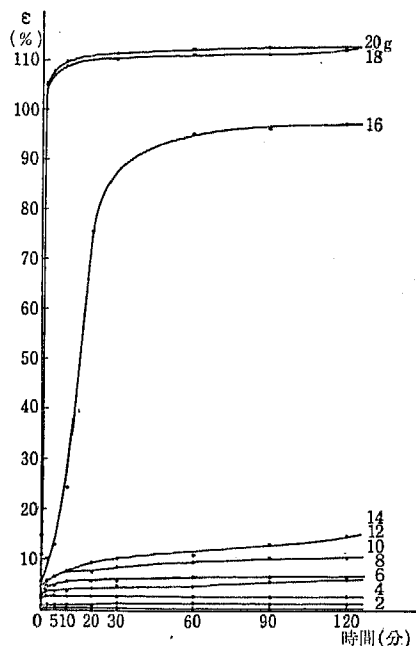
第7図 未延伸テトロン繊維の光弾性感度と荷重時間曲線

第1表 光弾性材料の性質

材料名	機械的性質				光弾性的性質 ($\lambda=5461\text{\AA}$)			その他の性質	
	弾性限度 σ_C kg/mm ²	引張強さ σ_B kg/mm ²	縦弾性係数 E kg/mm ²	ポアソン 数 m	光弾性係 数 C Brewster	光弾性感 度 α mm/kg	フリント 力 S kg/mm ²	色	化学組成, 用途等
ガラス (Glass)	—	6.5	6,500	2.5	2.68	0.049	20.5	無色透明	無機
セルロイド (Celluloid)	2.8	5.0	200	3.0	13.7	0.25	4.0	淡黄色	ニトロセルロース
プレキシガラス (plexiglass)	—	—	200	—	10.9	0.2	5.0	無色透明	メタクリル酸メチルの重合体
ベークライト (Bakelite BT-48-005)	—	—	210	—	56	1.03	0.97	無色透明又は淡黄色	石炭酸樹脂
フェノライト (Phenolite)	4.5	6.0	410	3.0	52	0.95	1.05	淡黄色	石炭酸樹脂石炭酸とホルマリンの縮合体
ゼラチン (Gelatin)	—	—	0.01	2	16,380	300	0.0033	淡黄褐色	水65%, グリセリン14%
エポキシ樹脂 (Epoxy resin KT-101)	—	—	300	—	51	0.94	1.06	淡黄色又は黄褐色	エポキシ樹脂重合体, 凍結兼用



第8図 未延伸ナイロン繊維のクリープひずみと荷重時間曲線



第9図 未延伸テトロン繊維のクリープひずみと荷重時間曲線

い未延伸ナイロン繊維の円形断面であることを利用し、丸棒の微小の引張、曲げ、振りを実験し、織物中の繊維の力学的挙動などについて類推することもできる。

(3) 力学的クリープと光学的クリープとの比較

原繊維の長さを l_0 (200mm), 伸びを Δl , ある荷重時間のときの繊維の長さを l とすると, $l = l_0 + \Delta l$, 従つて伸度 ϵ は

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right)$$

で表わせる。この関係を両繊維について示したものが第8, 9図である。両繊維の伸度は各荷重に対して同様な傾向を示した。

しかしながら未延伸ナイロンの複屈折率は未延伸テトロン⁸⁾の複屈折率よりはるかに大きいとともに力学的クリープ量が増加すると光学的クリープ量も正に増加した。ここに正に増加すると記したのは、荷重を加えると複屈折率は減少し、符号が逆になる繊維もあるからである。

4. む す び

本論文は光塑性材料として適当であるといわれている鎖状ポリマーの未延伸ナイロン、未延伸テトロン⁸⁾両繊維の光学的クリープおよび力学的クリープ実験を行ったものである。そこでえられた結果を要約すると

(i) 合成繊維などの光弾性材料の複屈折率 Δn は、応力 σ , ひずみ ϵ , 温度 θ , 荷重時間 t の函数となり、一般に

$$\Delta n = f(\sigma, \varepsilon, \theta, t)$$

で表わすことができる。

(ii) 未延伸ナイロン繊維の光弾性感度は未延伸テトロン繊維の光弾性感度より相当大きく、ナイロンは荷重2g~18gで45~5、テトロンでは0.6~3.0である。両繊維とも荷重の増加とともに光弾性感度は減少するが、荷重がある程度まで増加すると光弾性感度は逆に増加し始める。

(iii) 力学的クリープと光学的クリープを比較すると、両繊維の伸度は各荷重に対して同様な傾向を示したが、未延伸ナイロンの複屈折率は未延伸テトロンの複屈折率より大きい。しかし、ともに力学的クリープ量が増加すると、光学的クリープ量も増加した。

参 考 文 献

- 1) 辻, 河田; 光弾性実験法(下) p.98 (日刊工業新聞社)
- 2) 伊藤武男監修; 絹糸の構造 p.397 (千曲会出版部)
- 3) 金丸, 租父江, 高分子構造論(上) p.134 (修教社); 神原 周編; 高分子の物性II p.82 (共立出版株式会社)
- 4) M. HETENYI; Proc. 1st U.S. Nat. Cong. Appl. Mech. (1951) 499
- 5) 河田幸三; 科研第51回講演会講演(昭和30年11月)
- 6) 西田, 本堂, 蓮沼; 同 上
- 7) 応力測定技術研究会編; 応力測定法 p.574 (朝倉書店)
- 8) M. REINER; レオロジーの基礎理論(柳沢延房訳) p.151 (コロナ社)

Summary

We have got the fundamental data of the industrial materials by doing the photo-creep and mechanical creep experiments of undrawing nylon filaments and "tetoron" filaments which are proper for photoplastic materials in this paper. According to the results, we may show as follows:

(1) The double refractions Δn of the plasto-elastic materials as the synthetic fibers are generally shown below;

$$\Delta n = f(\sigma, \varepsilon, \theta, t)$$

where stress is σ , strain ε , temperature θ and loading time t .

(2) The photoelastic sensitivity of the undrawing nylon filament is much larger than that of the undrawing tetron filament, and nylon is 45~5 and tetron is 0.6~3.0 when the load is 2~18g.

With the increase of the loads, the photoelastic sensitivities decrease but in the case of the increase of the loads the photoelastic sensitivities begin to increase.

(3) Comparing the mechanical creep with the photo-creep, the extension of both filaments shows same tendency for the loads but the double refraction of the undrawing nylon filament is larger than that of the undrawing tetron filament. But when the quantities of mechanical creep of both filaments increase, their quantities of photo-creep increase at the same time.