

セルロイドの力学的性質に関する一研究

戸 伏 壽 昭 ・ 鳴 海 裕

An Investigation on Mechanical Property of Celluloid

Hisaaki TOBUSHI ・ Yutaka NARUMI

一定温度におけるセルロイドの比例負荷試験により得られた要点は次の通りである。(1)セルロイドの力学的性質は加熱時間の影響をほとんど受けず、同じ板から製作した薄肉円管に生じる残留応力は小さく、面内の等方性は保たれる。(2)ポアソン比は0.47であり、非圧縮性の条件は非弾性変形についても6%程度の誤差の範囲内で成り立つ。(3)引張りとなじりの応力-ひずみ関係では、ねじりの方が変形抵抗は大きい。

1. 緒 言

加熱により軟化したセルロイドは、高温における金属材料と力学的に相似な挙動を示すため、種々の模型実験¹⁾に使用されている。また、この模型実験法の精度を向上させるために、複合負荷を受ける軟化セルロイドの変形の実験的検討が行なわれている。^{2) 3) 4) 5)}これらの場合、セルロイドの力学的性質に対する基本的な仮定として、セルロイドは等方であり、セルロイドの力学的性質は実験の雰囲気中で経過時間と共に変化せず、体積ひずみは弾性変形のみにより、また弾性定数は変形と共に変化しないという条件が用いられている。

本研究は、セルロイドの変形挙動に対する負荷履歴と温度変化の影響を検討する第1段階として、一定温度の比例負荷試験により、上述の等方性、雰囲気中の経過時間の力学的性質に対する影響および引張りとなじりの応力-ひずみ関係の検討を行なう。

2. 実験装置および実験方法

試験片は、図1に示す偏光流性実験法の較正試験片²⁾(a)と、図2に示す複合負荷試験用の試験片(b)を用いる。試験片(a)は、セルロイドの板(縦1385mm, 横630mm, 厚さ3mm)の縦方向と横方向から切り出して製作する。試験片(b)は、このセルロイドの板から薄肉円管を作り、両端に補強環を付けて製作する。⁶⁾

実験は、試験片(a)に対する引張試験A、および試験片(b)に対する引張試験Bとなじり試験Cを行なう。

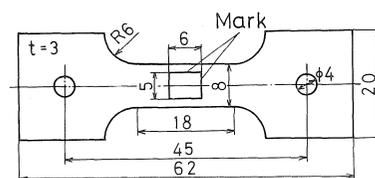


図1 試験片(a)

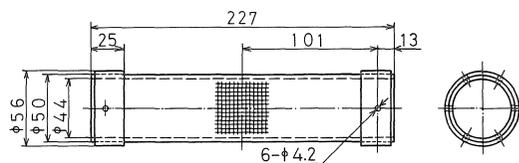


図2 試験片(b)

実験装置は、実験Aに対しては偏光流性実験法の較正試験装置²⁾を、実験BとCに対してはプラスチック複合負荷試験装置⁵⁾を使用する。

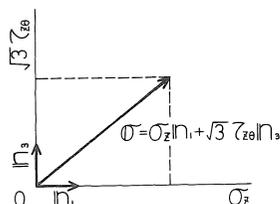


図3 偏差応力ベクトル平面

いずれの実験も、試験片は65℃の油中⁴⁾におき、図3に示す偏差応力ベクトル平面の縦軸と横軸に沿う比例負

荷試験を行なう。ここで、 σ_z は軸引張応力、 $\tau_{z\theta}$ はねじり応力を示し、応力ベクトル σ の絶対値 $|\sigma| = \sqrt{\sigma_z^2 + 3\tau_{z\theta}^2}$ は相当応力 σ_e に等しい。実験Aは、65℃に達してから1時間加熱した後、引張応力 σ_z の変化率を一定値 $\dot{\sigma}_z = 8 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^2/\text{min}$ に保つ引張試験である。セルロイド板の縦方向から切り出した試験片に対する実験を実験A-1、横方向を実験A-2とする。実験Bは、65℃に達した後の実験開始までの加熱時間 t_h を種々変化させた、応力速度 $\dot{\sigma}_z = 9.47 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^2/\text{min}$ の引張試験である。加熱時間 t_h が0.5, 1, 2, 5 hrに対する実験番号を実験B-1, B-2, B-3, B-4とする。実験Cは、65℃に達した後の加熱時間 t_h を変化させた、応力速度 $\dot{\sigma}_e = \sqrt{3}\tau_{z\theta} = 9.47 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^2/\text{min}$ のねじり試験である。加熱時間 t_h が0.5, 1, 2 hrに対する実験番号を実験C-1, C-2, C-3とする。これらの実験番号と対応する実験条件を表1にまとめて示す。

表1 実験条件

Exp.No.	Specimen	Method	Heat Time t_h (hr)	Stress Rate (kg/mm ² /min)	
A-1 A-2	(a)	Longi. Trans.	Tension	1	8.00×10^3
B-1 B-2 B-3 B-4	(b)	Tension	0.5 1 2 5	9.47×10^3	
C-1 C-2 C-3	(b)	Torsion	0.5 1 2	9.47×10^3	

3. 実験結果と検討

3.1 加熱時間の影響

引張試験Bの結果を軸応力 σ_z と軸ひずみ ϵ_z との関係について図4に示し、ねじり試験Cの結果をねじり応力 $\tau_{z\theta}$ とせん断ひずみ $\gamma_{z\theta}$ との関係について図5に示す。

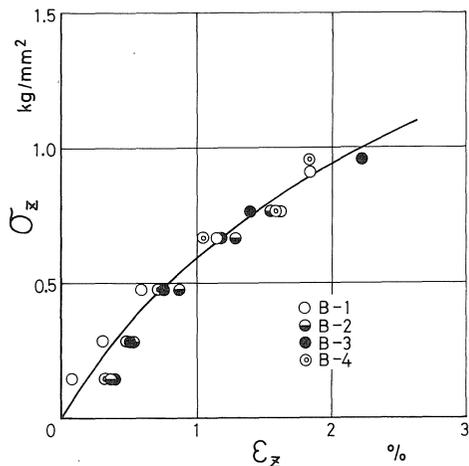


図4 σ_z と ϵ_z の関係(実験B)

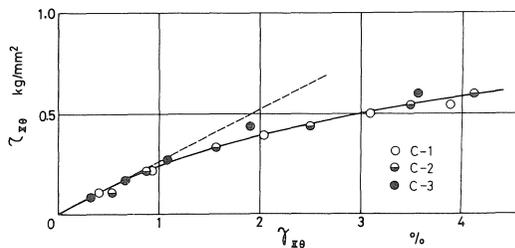


図5 $\tau_{z\theta}$ と $\gamma_{z\theta}$ の関係(実験C)

図4では実験B-1の軸応力 σ_z が小さいときに生じる軸ひずみ ϵ_z が小さい傾向にあり、図5では実験C-3のねじり応力 $\tau_{z\theta}$ が大きいにせん断ひずみ $\gamma_{z\theta}$ が小さい傾向が見られる。しかし、実験B-2~B-4と実験C-1~C-2ではこれらの傾向は現われない。したがって、若干の材料の不均一性を考えれば測定精度の範囲内で、加熱時間 t_h の力学的性質に対する影響はほとんどないものと思われる。このことから、油中での加熱時間 t_h を1hr程度とした実験を行えば、セルロイドの硬化や軟化等の時効は現われず、時効の入らない力学的性質の検討が行なえることがわかる。他方、加熱時間 t_h が0.5hr以上では、力学的性質が同じになることより、セルロイドは一様に均熱されていることが推察される。このことに関する温度と板厚が異なる場合の材料内部の温度分布については今後の研究課題である。

3.2 セルロイドの等方性

3.2.1 板について

引張試験Aの結果を、引張応力 σ_z と伸びひずみ ϵ_z との関係について図6に示す。

図からわかるように、実験A-1とA-2の結果はほぼ一致している。これから、セルロイドの板の縦方向と横方向の引張りに対する性質は同じであり、セルロイドの板は面内については等方であることがわかる。

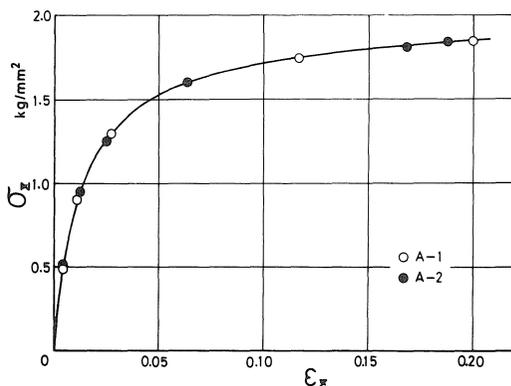


図6 σ_z と ϵ_z の関係(実験A)

3. 2. 2 薄肉円管について

前節の面内等方なセルロイドの板から作ったセルロイド薄肉円管には残留応力が生じ、また軸方向と円周方向に異方性が生じる可能性がある。この加工により生じる残留応力が非常に小さいことは、予めポラリスコープで調べており、さらに小さな応力で等傾線が主応力方向を示すことで確かめられている。ここでは、引張試験Bとねじり試験Cより求めた弾性定数間の関係から、セルロイド薄肉円管の面内の等方性を検討する。

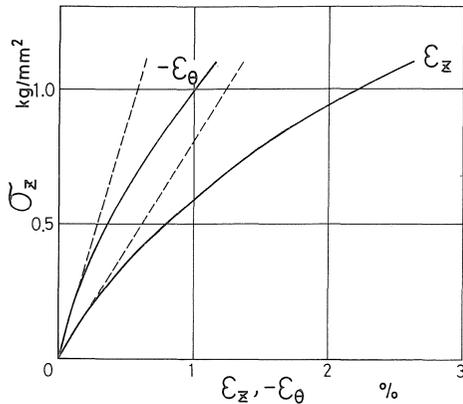


図7 ϵ_z と $-\epsilon_\theta$

引張試験Bの結果を、軸ひずみ ϵ_z と円周ひずみ $-\epsilon_\theta$ について図7に実線で示す。ここで、軸ひずみ ϵ_z は、実験B-1~B-4のパラッキが小さいことから、その平均値として図4の実線を表わしており、円周ひずみ $-\epsilon_\theta$ も同様に実験B-1~B-4の平均値を表わしている。図中の破線は、弾性ひずみ成分と非弾性ひずみ成分の大きさの違いがわかり易いように示してある。また、軸ひずみ ϵ_z に対する円周ひずみ $-\epsilon_\theta$ の割合 $-\epsilon_\theta/\epsilon_z$ を、各応力値 σ_z について、表2に示す。この表の中で、弾性ひず

表2 ϵ_z と $-\epsilon_\theta$ の割合 $-\epsilon_\theta/\epsilon_z$

σ_z (kg/mm ²)	ν	$-\frac{\epsilon_\theta}{\epsilon_z}$	$-\frac{\epsilon_\theta}{\epsilon_z}$
0.4	0.471	0.445	0.467
0.5		0.465	0.470
0.6		0.486	0.475
0.7		0.481	0.474
0.8		0.474	0.471
0.9		0.470	0.470
mean		0.470	0.471

み成分についてはポアソン比 ν で、非弾性ひずみ成分 ϵ^i については $-\epsilon_\theta^i/\epsilon_z^i$ で、全ひずみについては $-\epsilon_\theta/\epsilon_z$ で示してある。この表から、軸ひずみに対する円周ひずみの割合は、弾性成分についても非弾性成分についてもほぼ0.47となる。したがって、セルロイドの非圧縮性の

条件は、円周方向と半径方向の等方性を仮定すれば、6%の誤差の範囲内で成立することがわかる。他方、図7の軸応力 σ_z の小さい範囲内での傾き σ_z/ϵ_z から、縦弾性係数Eの値は $E=80.1\text{kg/mm}^2$ となり、図5のねじり応力 $\tau_{z\theta}$ の小さい範囲内での傾き $\tau_{z\theta}/\gamma_{z\theta}$ から、横弾性数Gの値は $G=27.2\text{kg/mm}^2$ となる。軸方向と円周方向が等方であれば、これらの弾性定数の間には $G=E/2(1+\nu)$ の関係が成立する。引張試験Bで定めたEと ν の値を用いて求めたGの値は $G=27.2\text{kg/mm}^2$ となり、ねじり試験Cから求めたGの値と一致しており、軸方向と円周方向は等方であることがわかる。一方、このように、板から薄肉円管への加工により生じる残留応力は小さく面内の等方性が保たれる点からも、セルロイドは模型材料として適していると言える。

3. 3 相当応力-相当ひずみ関係

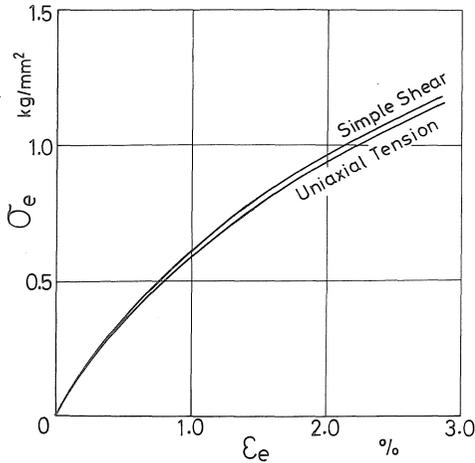
薄肉円管試験片の軸引張り σ_z とねじり $\tau_{z\theta}$ の組合せ応力状態に対応する応力テンソル T_σ とひずみテンソル T_ϵ は、次のようになる。

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_z & \tau_{z\theta} & 0 \\ \tau_{z\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_z & \frac{1}{2}\gamma_{z\theta} & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_{z\theta} & \epsilon_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_r \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、指標z, θ , rは円管の軸, 円周, 半径の各方向を表わす。円周方向と半径方向の等方性 $\epsilon_\theta = \epsilon_r$ および、前節で検討した非圧縮性を仮定すれば、式(1)に対応する偏差応力テンソル D_σ と偏差ひずみテンソル D_ϵ は

$$D_\sigma = \begin{pmatrix} \frac{2}{3}\sigma_z & \tau_{z\theta} & 0 \\ \tau_{z\theta} & -\frac{1}{3}\sigma_z & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}\sigma_z \end{pmatrix}, \quad D_\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_z & \frac{1}{2}\gamma_{z\theta} & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_{z\theta} & -\frac{1}{2}\epsilon_z & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2}\epsilon_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

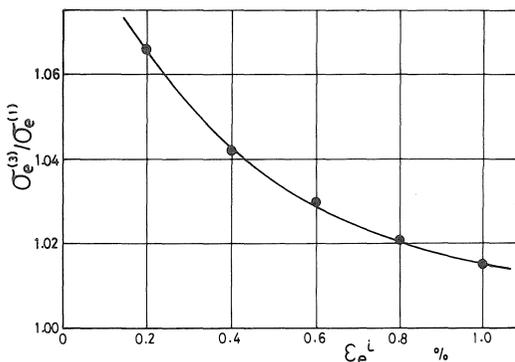
となる。引張試験Bとねじり試験Cの結果を、 D_σ と D_ϵ の第2不変量に対応する相当応力 σ_e と相当ひずみ ϵ_e の関係について表わすと、図8のようになる。これは、図3で示される縦軸と横軸の応力ベクトルの大きさと、対応するひずみベクトルの大きさととの関係を表わしていることになる。図8の引張り σ_e とねじり $\tau_{z\theta}$ の曲線を比較してみると、同じ σ_e に対し生じる ϵ_e は、ねじりより引張りの方が大きく、金属の場合と逆になる。これは、セルロイドの変形に対する T_σ の第1不変量と D_σ の第3不変量の影響により生じるものと考えられるが、高分子材料の変形に対し静水圧の影響が大きいことを考慮すれば説明できる。すなわち、高分子材料では静水圧が大きくなる程、降伏点が高くなり、同じ応力に対し生じる変形が小さくなる⁹⁾¹⁰⁾ことが報告されている。これは、

図8 σ_e と ε_e の関係

応力テンソルの第1不変量が小さくなる程、材料の変形抵抗が大きくなることを表わしている。したがって、第1不変量は、ねじり試験では0になり、引張試験では正 ($\sigma > 0$) になるので、第1不変量の小さいねじり試験の場合の方が変形抵抗は大きくなり、同じ応力で生じるひずみは小さくなることがわかる。

図3のベクトル平面で負荷履歴の影響を検討する場合図3では偏差応力テンソルの第2不変量しか陽には表わせないで、このような第1不変量の効果を正しく反映できない可能性がある。この応力状態の違いによる影響を考慮するために、同じ相当非弾性ひずみ ε_e^i を生じる横軸と縦軸の応力の強さ $\sigma_e^{(1)}$ と $\sigma_e^{(3)}$ の割合 $\sigma_e^{(3)}/\sigma_e^{(1)}$ の ε_e^i に対する関係を表わせば、図9のようになる。この関係は次式で表わせる。

$$\frac{\sigma_e^{(3)}}{\sigma_e^{(1)}} = 0.095e^{-243\varepsilon_e^i} + 1.007 \quad (3)$$

図9 $\sigma_e^{(3)}/\sigma_e^{(1)}$ と ε_e^i の関係

したがって、図3の横軸の尺度を、この割合 $\sigma_e^{(3)}/\sigma_e^{(1)}$ を掛けて修正しておけば、応力状態の違いによる第1不変量

の効果が反映された形で負荷履歴の影響を検討できることになる。

4. 結 言

引張りとねじりの比例負荷試験により、セルロイドの変形に対する加熱時間の影響と等方性に関する検討を行なった。得られた要点は次の通りである。

- (1) セルロイドの力学的性質は加熱時間によりほとんど影響を受けない。
- (2) 面内について等方な板から薄肉円管を製作した場合、生じる残留応力は小さく、面内の等方性は保たれる。
- (3) ポアソン比は0.47であり、非圧縮性は6%程度の誤差の範囲内で成り立つ。
- (4) 引張りとねじりの応力—ひずみ関係は、ねじりの場合の方が変形抵抗は大きくなり、金属材料の場合と逆なる。これは、応力テンソルの第1不変量の影響によるものと考えられる。

終りに、本研究に対する助言と実験装置の便宜を計っていただいた名古屋大学工学部 大橋義夫教授ならびに実験の一部に協力された本学卒研究生 近藤浩章、齊木雅宏、庄田泰基、服部善明君に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 大橋, 村上, 鈴木 : 日本機械学会論文集, 39—326 (昭48—10), 2939
- 2) 大橋 : 塑性と加工, 12—129 (1971—10), 790
- 3) Y. Ohashi, T. Nishitanj : Memories of Faculty of Engineering, Nagoya University, 26—1 (1974—5), 1
- 4) 大橋, 徳田, 戸伏 : 日本機械学会論文集 38—310 (昭47—6), 1223
- 5) 大橋, 戸伏, 鈴木 : 日本機械学会論文集, 42—364 (昭51—12), 3744
- 6) 大橋, 徳田, 戸伏 : 日本機械学会論文集, 38—310 (昭47—6), 1237
- 7) 大橋, 徳田, 水野 : 日本機械学会論文集, 40—329 (昭49—1), 89
- 8) Y. Ohashi, K. Kawashima, N. Mori : J. Eng. Mater. Tech., Trans. ASME, Series H, 98 (1976—7), 282
- 9) 大橋, 小倉, 吉村, 黒田 : 材料, 23—244 (昭49—1), 26
- 10) D. R. Mears, K. D. Pae : J. Polym. Sci. B, Polymer Letters, 7 (1969), 349