(昭和32年2月1日受理)

繊維物性論 (IB) 繊維集合体の弾性論的考察

第7報 スライバ状集合体の引張りにおける履歴現象

山形大学工学部 繊維物理学教室 木 下 茂 武

THEORETICAL INVESTIGATION INTO THE PHYSICAL PROPERTIES OF TEXTILE MATERIALS. (IB) ELASTIC BEHAVIOUR AND BINDING MECHANISMS OF THE FIBER SYSTEMS. (PART VII) CHARACTERISTICS OF HYSTERESIS LOOPS IN STRESS-STRAIN CURVES OF SLIVER-LIKE FIBRE SYSTEMS.

by Shigetake Kinoshita

(Faculty of Engineering, Yamagata University, Yonezawa, Japan)

In order to gain more information as to the nature of elastic hysteresis phenomena observed in cyclic loading sliver-like fibre system which had been discussed experimentally in previous paper¹⁾, the present study was undertaken to determine the theoretical relationships between the amounts of tensile resilience ϕ , dissipated energy loss H and the variations of sliver constants *i. e.* fibre length $\bar{l}$, fibre diameter b , density ρ , Young's modulus ϵ_f , Poisson's ratio σ , coefficient of friction f , sliver length L and sliver density $\bar{\rho}$. By the application of the law of thermodynamics to the double elastic fibre system, it was possible to obtain a general expression of external work W_1 and recovery work W_2 done by the applied load on deformed system in a cycle of extension γ_r .

For the loose sliver having Poisson's ratio Σ_0 , the following expressions were derived:

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= \frac{1}{2} \phi_0 (\epsilon_0 / \lambda_0) \gamma_r^2, \\ W_2 &= \frac{1}{2} \phi_0^2 (\epsilon_0 / \lambda_0) (1 - \Sigma_0 \gamma_r) \gamma_r^2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Then, according with the definitions of resilience $\phi(\gamma_r) = W_2 / W_1$, energy loss $H(\gamma_r) = W_1 - W_2$, it was shown that, in the case of small γ_r .

$$\phi(\gamma_r) = \phi_0 (1 - \Sigma_0 \gamma_r) \quad \text{and} \quad H(\gamma_r) = \eta_0 \left(\frac{1}{2} \epsilon_0 \gamma_r^2 \right). \quad (2)$$

Where $\phi_0 \equiv (\Sigma_0 / \sigma) \alpha_0 \lambda_0$ and $\eta_0 \equiv (\Sigma_0 / \sigma)^2 \alpha_0 (1 - \lambda_0)$ denote the standard measures of hysteresis.

Where Poisson's ratio of sliver $\Sigma_0 = \sigma / \{1 - (1 - \alpha_0) \lambda_0\}$, effective Young's modulus of fibre $\epsilon_0 = \epsilon_f (\bar{\rho} / \rho)$, frictional factor of inter-fibre $\alpha_0 = f(4/\pi)^2 (\bar{l}/2b) (\bar{\rho}/\rho)^2$ and specific length of fibre $\lambda_0 = \bar{l}/(4L)$ were determined from the given sliver constants respectively. The quantitative behaviour of standard measures of hysteresis ϕ_0 and η_0 shown in Fig. 7. 2 as the function of frictional factor α_0 and specific fibre length λ_0 which varies between zero to unity.

Finally, experiments on the repeated loading for crimped staple sliver and direct roller cutting sliver of viscose rayon fibres have been performed to check the theoretical predictions concerning the precise manner of hysteresis expressed in formulae (2). (Received 1. 2. 1957)

緒 言

引張りにおける履歴現象を解析するために、第6報第3節¹⁾では Maxwell 模型を用いて収縮のとき繊維の中

心間の伸びのヤング率 $\bar{\epsilon}$ は ∞ になるとして回復曲線を導いたが、それから得られる弾性度 ϕ は実験結果を充分説明しえなかつた。よつて本報では改めて、摩擦のある場合の繊維系の変形に関する熱力学的な考察を試み、

その結果外部からの仕事 W_1 と、回復の仕事 W_2 とがエネルギー則に基いて合理的に定められ、それから系の弾性度 $\phi = W_1/W_2$, hysteresis loss $H = W_1(1-\phi)$ また resilience $\varphi = (\gamma_r - \gamma_p)/\gamma_r$ などがそれぞれ構造因子、弾性因子などの函数として表式された。そしてこれらの量の構造依存性が実験的に検討され、今度はスライバの引張りに関して妥当なものであることが確められた。

1. 繊維系の内部摩擦による発熱量

第4報第5節²⁾で提示した二重弾性を示すようなわれわれの繊維系に、外部から dW の仕事を与えられて系の内部エネルギーが dU 増加して、このとき外系の吐出す熱量が δQ_a であるとする、熱力学の第一法則から、

$$dU = \delta Q_a + dW \quad (7.1)$$

が成り立つ³⁾。一方、系の吸収する熱量を δQ また系内の繊維媒質には応力 S が働いて微小変形 $[de]$ を生ずるとすれば第一法則は $dU = \delta Q + S[de]$ となり、絶対温度を T , エントロピーの増加を $d\Phi$ とすると

$$dU = Td\Phi + S[de] \quad (7.2)$$

でなければならない。しかるに系の外形の変形 $d\gamma$ は第3報⁴⁾の定長比λを用いて第1近似では $d\gamma = \lambda d\epsilon + (1-\lambda)d\bar{\epsilon}$ と与えられているから、第1項 $\lambda d\epsilon$ は平均的な繊維媒質の変形 $[de]$ に相当して、第2項 $(1-\lambda)d\bar{\epsilon}$ は繊維の中心間の摩擦的なズリの大きさに対応している。よつて

$$[de] = \lambda d\epsilon = d\gamma - (1-\lambda)d\bar{\epsilon} \quad (7.3)$$

であつて、これを(7.2)式に代入して $dU = Td\Phi + Sd\gamma - (1-\lambda)Sd\bar{\epsilon}$ と(7.1)式とを比較することにより

$$dW = Sd\gamma \quad (7.4)$$

$$\delta Q_a = Td\Phi - (1-\lambda)Sd\bar{\epsilon} \quad (7.5)$$

なる関係がえられる。(7.4)式は当然であるが、(7.5)式は系に流入する熱量 $\delta Q = Td\Phi$ は系外の熱源からのもの δQ_a と繊維系が内部摩擦に対してする仕事による発熱

$$\delta H = (1-\lambda)Sd\bar{\epsilon} \quad (7.6)$$

とから成つてていることを示している。なおこの変形が非可逆であることは、たとえば断熱変化なら $\delta Q_a = 0$ であつて(7.5)式を用いて

$$Td\Phi = \delta H/T > 0 \quad (7.7)$$

がえられ、系のエントロピーが増加することからも知られる。

こうして繊維系の変形は非可逆過程であり、外形が γ だけ変化する際に外部からなされる仕事は

$$W = \int_0^\gamma dW = \int_0^\gamma S(\gamma) d\gamma \quad (7.8)$$

で、かつこのとき摩擦仕事

$$H = \int_0^\gamma \delta H = \int_0^\gamma (1-\lambda) S d\bar{\epsilon} \quad (7.9)$$

が熱として散逸してゆくことがわかる。ただし以上の関係式で系の体積変化による仕事は無視してある。

2. 繰返し荷重による伸びの履歴

われわれの系が準静的に γ_r まで伸され、ここから荷重が減じられて除々に零に戻されるような繰返し荷重を受けるものとする。加重の際外部から与えられる仕事を W_1 , 摩擦熱を H_1 , また除荷の際外部に与える仕事を W_2 , 摩擦熱を H_2 とすると、(7.2)式を前節の結果を用いて書き改めた式

$$dU = \delta Q + dW - \delta H \quad (7.10)$$

において可逆的な dU , δQ の項は消失して

$$W_1 - W_2 = H_1 + H_2 \quad (7.11)$$

Fig. 7.1 Illustration of hysteresis curve of repeated loading sliver.

がえられる。ここで更に Fig. 7.1 で見られるように添数1で伸びを、添数2で縮みを表わし、 E_1 , E_2 をそれぞれの径路での集合体のヤング率とすると、変形 γ の第1近似では状態方程式が

$$S_1(\gamma_1) = E_1 \gamma_1, \quad S_2(\gamma_2) = E_2 \gamma_2 \quad (7.12)$$

$$d\bar{\epsilon}_i = 1/[1 - (1-\alpha_i)\lambda_i] d\gamma_i, \quad (i=1,2) \quad (7.13)$$

となるから、(7.11)式の各項は

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= \int_0^{\gamma_r} S_1(\gamma_1) d\gamma_1 = \frac{1}{2} E_1 \gamma_r^2, \\ W_2 &= \int_0^{\gamma_r - \gamma_p} S_2(\gamma_2) d\gamma_2 = \frac{1}{2} (E_1^2/E_2) \gamma_r^2, \\ H_1 &= \int_0^{\gamma_r} (1-\lambda_1) S_1 d\bar{\epsilon}_1 = \frac{1}{2} (1-\lambda_1) (E_2^2/\bar{\epsilon}_1) \gamma_r^2, \\ H_2 &= \int_0^{\gamma_r - \gamma_p} (1-\lambda_2) S_2 d\bar{\epsilon}_2 = \frac{1}{2} (1-\lambda_2) (E_2^2/\bar{\epsilon}_2) \gamma_r^2 \end{aligned} \right\} \quad (7.14)$$

とかける。ただし上式で伸びのヤング率 E_1 は第2報のごとく⁵⁾,

$$\frac{1}{E_1} = \frac{\lambda_1}{\epsilon_1} + \frac{1-\lambda_1}{\bar{\epsilon}^1}, \quad (7.15)$$

また縮みのヤング率 E_2 は回復曲線がエネルギーの法則

に支配されねばならぬことから、(7.14) 式を (7.11) 式に代入して知られるように

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_1}{\varepsilon_1} + \frac{\lambda_2}{\varepsilon_2} \right) \quad (7.16)$$

である。われわれは先に第6報では E_2 を簡単のために $\varepsilon_2 \rightarrow \infty$ において $E_2 = \varepsilon_2 / \lambda_2$ と表式したが、これは正確には (7.16) 式を用うべきであった。

3. 伸長変形のレジリエンスとエネルギー損失

いま上述の繰返し過程における仕事の弾性度を ϕ 、履歴のエネルギー損失（発熱量）を H 、また伸びのレジリエンスを φ とすると、(7.14) 式から

$$\phi \equiv \frac{W_2}{W_1} = \frac{E_1}{E_2} \quad (7.17)$$

$$H \equiv W_1 - W_2 = \frac{E_1^2}{2} \left(\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right) \gamma_r^2 \quad (7.18)$$

$$\varphi \equiv \frac{\gamma_r - \gamma_p}{\gamma_r} = \frac{E_1}{E_2} \quad (7.19)$$

が導かれる。この定義式において E_2 が (7.16) 式で与えられる限り、エネルギー則 (7.11) 式が保証され、また状態方程式が (7.12) 式で近似されるときは、 $\phi = \varphi$ として差支えないことなどが注意される。

そこで次にレジリエンスおよびエネルギー損失：

$$\phi = \varphi, \quad H = W_1(1 - \phi) \quad (7.20)$$

に対する集合体の構造因子、弾性因子の影響を調べてみよう。これは原理的なことを目的にすれば、特別な例として伸びと縮み過程における繊維媒質のヤング率が等しく、かつその際の定長比が変らないような繰返し変形を考察すればよい。実際には繊維同志が密に集合した束あるいは糸で繰返しを幾回も行つた後のサイクルでは、このことが近似的に適用されるであろう。仮定から

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \equiv \varepsilon, \quad \lambda_2 = \lambda_1 \equiv \lambda \quad (7.21)$$

であつて、このとき (7.11) 式が成り立つ以上、滑渡度は $\alpha_2 = \alpha_1 \equiv \alpha$ である。よつて (7.15)、(7.16) 式の $E_1 = \alpha \varepsilon / \{1 - (1 - \alpha) \lambda\}$ 、 $E_2 = \varepsilon / \lambda$ を (7.17)、(7.18) 式に代入して

$$\phi = \varphi = \frac{\alpha \lambda}{\{1 - (1 - \alpha) \lambda\}} \quad (7.22)$$

$$\eta = \frac{2H}{\varepsilon \gamma_r^2} = \frac{\alpha(1 - \lambda)}{\{1 - (1 - \alpha) \lambda\}^2} \quad (7.23)$$

がえられる。この (7.22) 式をみるとレジリエンス φ は定長比 $\lambda = \bar{l} / (4L)$ 、滑渡度 $\alpha = \bar{e} / \varepsilon = f(4/\pi)^2 (\bar{l} / 2b) (\bar{p} / \rho)^2$ が大きいほど増加することがわかる。換言すれば繊維長が大となるか試長が短いほど、また繊維の伸びに較べて繊維の中心間がズリにくくなるほどレジリエンスが大となり、変形量はよく回復する。一方 (7.23) 式の履歴の

エネルギー損失 H は繊維媒質のヤング率 $\varepsilon = \varepsilon_f(\bar{p} / \rho)$ 、伸率 γ_r が大きいほど増大する。そして λ が 1 の附近では多少傾向が逆転するが、その他の範囲では滑渡度 α が大になるほど H は増加し、定長比 λ が大きくなると逆に減少することが知られる。

以上の関係を図示してえられる Fig. 7.2 の特性図に基いて、われわれは繊維系に所要のレジリエンス φ 、ヒステリシス H を附与するためには平均繊維長 $\bar{l}$ 、繊維 b 、繊維密度 ρ 、繊維の弾性率 ε_f 、摩擦係数 f および束の密度 $\bar{p}$ 、把持距離 L などの因子を如何に組合わせればよいのかの見当がつけられる。

Fig. 7.2 Characteristic diagram representing quantitative behaviour of standard measures of hysteresis ϕ , η as the function of specific fibre length λ and inter-fibre frictional factor α .

4. 空隙性スライバの伸長レジリエンス

ところで前節の結果 (7.22)、(7.23) 式は特に (7.21) 式が成り立つような簡単な場合について導かれたものである。これはレジリエンスの構造依存性の本質を知る目安にはなるが、現実の空隙のあるスライバでは変形 γ_r の影響によつて Fig. 7.2 の関係そのままが成り立たず、多少とも歪んでくるであろう。よつてその程度を実験と比較するために前に第6報3節で述べた空隙性スライバの場合をここで再検討してみよう。まず (6.8)~(6.10) 式からわれわれの場合

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_0, & \lambda_2 &= \lambda_0 \{1 - (1 - \alpha_0 \Sigma_0 / \sigma) \gamma_r\}, \\ \varepsilon_1 &= \varepsilon_0, & \varepsilon_2 &= \varepsilon_0 \{1 + (2 \Sigma_0 - 1) \gamma_r\}, \\ \alpha_1 &= \alpha_0, & \alpha_2 &= \alpha_0 \{1 + 2(2 \Sigma_0 - 1) \gamma_r\} \end{aligned} \right\} \quad (7.24)$$

である。これから、(7.15)、(7.16) 式は $E_1 = \alpha_0 \varepsilon_0 / \{1 - (1 - \alpha_0) \lambda_0\}$ 、 $E_2 = (\varepsilon_0 / \lambda_0) \{1 + \Sigma_0 (1 - \alpha_0 / 2 \sigma) \gamma_r\}$ となり、(7.17)、(7.18) 式に代入してレジリエンス $\phi(\gamma_r) =$

$\phi(\gamma_r)$ およびヒステリシスのエネルギー損失 $H(\gamma_r) = \frac{1}{2} \varepsilon \gamma_r^2 \eta(\gamma_r)$ がそれぞれ

$$\phi(\gamma_r) = \phi_0 \left\{ 1 - \Sigma_0 \left(1 - \frac{\alpha_0}{2\sigma} \right) \gamma_r \right\}, \quad (7.25)$$

$$\eta(\gamma_r) = \eta_0 \left\{ 1 + \frac{\alpha_0 \lambda_0}{1 - \lambda_0} \Sigma_0 \left(1 - \frac{\alpha_0}{2\sigma} \right) \gamma_r \right\} \quad (7.26)$$

の如く表式される。ただし ϕ_0, η_0 は (7.22), (7.23) 式で添数 0 を附したものであるが、これらは上式において $\Sigma_0 = 0$ (束が充分密集している場合) か、 $\alpha_0 = 2\sigma$ (束内の繊維が充分緊張している場合) としたときの値であることが知られる。

なお、通常の試料では $\alpha_0^2 / (2\sigma) \cdot \gamma_r \ll 1$ と見なされる故、この項を省略して得られる

$$\phi(\gamma_r) = \phi_0 (1 - \Sigma_0 \gamma_r), \quad (7.27)$$

$$H(\gamma_r) = \eta_0 \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 \gamma_r^2 \right) \quad (7.28)$$

を以て、実際の近似式として差支えないであろう。(7.28) 式は基準形 (7.23) 式と変りなく、また (7.27) 式は第 6 報の (6.27) 式を一層正確にしたものであつて、定量的にも実験と合うことが期待される。すなわち (7.27) 式は $\phi_0 = \alpha_0 \lambda_0 \Sigma_0 / \sigma$ とかけるから、 Σ_0 と γ_r とが、特に大でない限り、 $\phi(\gamma_r)$ は α_0, λ_0 が大となり、 Σ_0 が増大するにつれて大きくなつてゆき、経験事実が満足される。

次に 2, 3 の場合について以上の結果と実験との比較を試みよう。

5. 実験との比較

(1) 推縮スフ・スライバの試長と伸長レジリエンスとの関係

これは第 6 報第 4 節の (4) 項の実験結果第 III 表で与えられている。そこでは十分の吟味ができなかったから、ここで取上げることにして、上述の (7.27) 式に同表の $\phi(\gamma_r)$ の値と、同じく第 (1) 項第 I 表の $\Sigma_0 = 1.17 \sim 4.73$ の値とを代入して基準のレジリエンス ϕ_0 を求めてみる。そうすると ϕ_0 の試長依存性は第 I 表の如く算出される。

試長 L_0 が 5 cm 以下で極端に短くなると近似が成り立たなくなるが、それ以上の場合の計算値は (7.22) 式の理論的な ϕ_0 が定長比 $\lambda_0 = \bar{l} / (4L_0)$ の増加に伴つて増大する傾向とよく一致し、しかも倍加振幅で繰返したのに 1st., 2nd. cycle と ϕ_0 はほとんど等しくなっている。しかし数値を厳密に (7.22) 式に載せようとすれば $\bar{l}$ を数 10 cm に α_0 をかなり 1 に近くとらねばならぬという点で、第 6 報の応力-変形曲線 $S(\gamma)$ から求められたこの試料の特性値 $\bar{l} \approx 2 \sim 6$ cm, $\alpha_0 \approx 0.02$ なる

Table I Effect of sliver length on tensile resilience of repeated loading sliver of viscose staple fibres.

Sliver length		Resilience, ϕ_0	
L_0 (cm)	$L_0^{-1}(\text{cm}^{-1})$	1st. cycle	2nd. cycle
80	0.0125	0.252	0.207
40	0.025	0.355	0.293
20	0.05	0.400	0.374
10	0.1	0.521	0.525
5	0.2	(1.55)	(1.74)
2.5	0.4	—	—

結果とは喰ひ違つてくる。われわれの場合は繰返しの変形 γ_r が $S(\gamma)$ 曲線の初期において戻されるということから、おそらく初めからあつたスライバ内繊維のもつれが効いているのであろう。また第 I 表の 2 回目のサイクルの ϕ_0 は 1 回目のものに較べて長試長ではやや低下し、短試長では少し増し気味であるが、これも同じ理由からであろう。つまり一度繰返された後には長試長の試料では繊維のもつれが離れてズリ易くなり、短試長ではより多くの繊維の両端が掴まれているので、繰返し変形をうけてももつれが減少するよりは却つて緊つてくるものと考えられる。

(2) 牽切スフ・スライバの伸長レジリエンスにおよぼす変形量、密度、試長などの影響

この試料の繰返し履歴に関して第 10 報⁹⁾、第 11 報¹⁰⁾に述べてある。まず第 10 報第 6 節で示した太さの異なる牽切スライバを同一荷重から除荷した場合のレジリエンス ϕ の測定値は、スライバが細いほど変形量 γ_r が大きくなっているから、(7.27) 式の理論式で $\phi(\gamma_r)$ の函数形を check するのに恰好な data である。Fig. 7.3 は第 10 報の Fig. 10.10 を Fig. 10.9 で補正して一つに纏めたものであるが、これによると (7.27) 式はよく成立し、 ϕ は γ_r の増大と共に直線的に減少している。そして図からこの試料では 1st, 2nd., 3rd. cycle とほとんど区別なく

$$\phi_0 = 0.963, \quad \Sigma_0 = 14.7 \quad (7.29)$$

であることが知られる。ここで第 10 報の記号を使えば、(7.27) 式は $(1 - \phi/\phi_0) = \Sigma_0 P_r / (mk_0)$ とかけるが、われわれの場合 ϕ_0, Σ_0 の値は (7.29) 式の程度なので第 10 報 (10.4) 式で用いた近似 $(1 - \phi) = \left(\Sigma_0 - \frac{1}{2} \right) P_r / (mk_0)$ は、ここで改めて導かれた正確な式と較べて大差ないことがわかる。またレジリエンス $\phi(\gamma_r)$ がサイクルを繰返しても変らぬことは、この試料は太いものを縦に分割して作つたので、実験前に既にある程度ショックが与えられていることから説明され、一方、 $\phi_0 \approx 1$ となつたこと

は上の理由の他に試長 $L_0=30$ cm 附近が定長比 $\lambda_0 \approx 1$ に相当していることから理解される。

Fig. 7.3 Dependence of resilience $\phi(\gamma_r)$ on repeated elongation γ_r , draft cutting sliver.

—○— 1 st., —●— 2nd., —⊗— 3rd. cycle.

次に第11報 Fig. 11.3 に掲げた試長 $L_0=50$ cm の試料に対する ϕ とスライバ密度 $\bar{\rho}_0$ との関係は、セロハン紙で包んで変えた密度範囲が $\bar{\rho}_0=0.1\sim 0.5$ g/cm³ で余り広くないから確定的なことは云えないが、 $\lambda_0 \approx 1$ の近くでは滑沢度 α_0 の大小はレジリエンス ϕ_0 の値にほとんど響かないことを示しており、(7.22) 式の理論的結果を支持している。したがって $\phi_0=1$ とおいて 2nd. cycle の $\phi(\gamma_r=0.0213)=0.89$ なる値を (7.27) 式に代入して $\Sigma_0=5.17$ がえられるが、これは第11報3節の荷重-伸長曲線 $P(\gamma)$ からえられる裸の牽切スライバのポアソン比 $\Sigma_0=5.56$ とほぼ一致している。そして 1 st. cycle の値 $\phi(\gamma_r=0.0202)=0.31$ は試料を包んだセロハンの摩擦があるため低くなると考えたが、やはり $\phi_0=1$ としてこの値から Σ_0 を算出すると、 $\Sigma_0=35$ となり、これは第11報4節のセロハンで包んだ試料の $S(\gamma)$ 曲線からの推定値 $\Sigma_0=82$ に order が近づいている。これらの数値から判断すると、セロハンで包めば直接 Σ_0 は測定できないが、その影響は裸のときより試料の Σ_0 を増大させるように現われることになり、普通の弾性論の側面を束縛した場合に教えるところと同じ結果である。

同様に第11報 Fig. 11.4 の倍加振幅での繰返し

の際のレジリエンス $\phi(\gamma_r)$ の試長 L_0 による挙動の相違が (7.27) 式によつてよく説明される。すなわち試長が短く、定長比 λ_0 の大なるものは最初の cycle では ϕ が大きくなるが、 γ_r が大になるほど漸次減少し、他方試長が長くて λ_0 が小さなものは最初の ϕ は小さく出ても繰返すうちに試料全般が緊つてきて滑沢度 α_0 が大となり、このため ϕ が増し、やがて更に γ_r が大となるにつれて再び低下してゆき、 ϕ の値に極大が現われるのであろう。

以上牽切スライバのレジリエンスの測定値は第10報、第11報では (6.27) 式の近似式 $\phi=1-\left(\Sigma_0-\frac{1}{2}\right)\gamma_r$ を用いたのでは充分納得されなかつたが、本報の表式 $\phi=\phi_0(1-\Sigma_0\gamma_r)$ によつて満足な解釈が行われた。

(3) 引揃レーヨン繊維束の伸長レジリエンスに対する油剤と温度の効果

前項の牽切スライバの一部をとつて、試長 $L_0=4$ cm、線密度 $k_0=0.004$ g/cm 程度の引揃繊維束を作り、試料が各温度の空気中にある場合と温度の異なる流動パラフィン液に浸されている場合とについて、K. S. 式セニメータで繰返し変形を与えて静的の伸長に対する荷重と直径の変化とを記録して伸長レジリエンス $\phi(\gamma_r)$ を測定した。その結果は第II表に示した通りであるが、前項までの実験はいずれも斜面型引張り試験器で繰返し荷重を与えて画いたのに対し、今回の準静的繰返し変形曲線はたとえば Fig. 7.4 のごときものとなるので、 $\phi(\gamma_r)$ の測定値は伸長曲線の直線部のヤング率 E_1 と収縮曲線の

Table II The effect of measuring temperature on the tensile resilience of bundle of viscose rayon filaments which subjected to repeated loading in either liquid paraffin or dry air of different temperatures.

Measuring temperature (°C)	Tensile resilience, $\phi(\gamma_r)$			
	Measured in liquid paraffin		Measured in air	
	Initial cycle	Repeated cycle	Initial cycle	Repeated cycle
0	0.348	0.388	0.123	0.298
10	0.489	0.564	0.391	0.574
20	0.499	0.627	0.320	0.503
40	0.484	0.611	0.303	0.436
60	0.296	0.665	0.135	0.348
80	0.289	0.419	0.247	0.455

直線部のヤング率 E_2 との比をとつて (7.17) 式を用いて算出し、各温度ごとに数本の試料のものについて平均した。空気中、パラフィン油中ともに初回の繰返しはおよそ $\gamma_r \approx 4\%$ で $E_1 \approx 2\sim 5 \times 10^8$ g/cm²、 E_2 は E_1 の 2～3倍程度で、2回目以後は $\gamma_r \approx 2\%$ 、 $E_1 \approx 5\sim 15 \times 10^8$ g/

Fig. 7.4 Example of repeated stress-strain curve of the bundle of viscose rayon filaments, in dry air at 80°C.

○● 1st, △▲ 2nd, □■ 3rd, × 4th. cycle.

cm², E_2 はやはり E_1 の 2~3 倍程度, 以後 3 回, 4 回と繰返したのも 2 回目とほぼ同様であった。

第 II 表をみるとレジリエンスは各サイクル各温度とも空気中よりパラフィン油中の方が幾分大きく, またいずれの場合も常温附近に max. がでているが, 80°C 以上ではパラフィン中のものは次第に低下し, 空気中では再び増加する傾向がうかがわれる。こうした挙動は, 実は引揃糸なら繊維間のズリが起らず, レジリエンスに対しては純粋に環境の温度効果だけが現われるであろうという最初の期待に反して, 試料は完全な引揃糸とは見なし難く, 単繊維そのものの性質のほかには繊維相互のズリ機構におよぼす温度や油剤の効果が加わって生じたものとして理解される。すなわちセメータで別個に測定した繊維一本のヤング率は $\epsilon_f \approx 4 \times 10^6$ g/cm², そのレジリエンスは $\phi(\gamma_r = 0.05) \approx 0.8$ 程度の値となり, いずれも束の観測値に比較して相当大きいから, 試料には両端が掴まれている繊維や掴まれているものもかなり多く含まれていると考えられる。そうすると定長比 λ_0 は 1 に近いが, 幾分 1 より小さくなり, この際のレジリエンスは (7.25) 式に従って定められ, ここで ϕ_0 はほとんど 1 であり, 空気中よりも繊維がよけい密着しているパラフィン油中のポアソン比 Σ_0 の方が小さいこ

とが原因して, 前者よりも後者のレジリエンスが幾分大きく観測されるのである。また 80°C 以上の高温ではパラフィン油の粘度は著しく低下して, それに浸している繊維相互はズレてしかも吸着され易いのに対し, 乾燥空気中にある繊維は却つてもつれが増して伸びの可逆性が増加して, レジリエンスがより大きくなるのであろう。なお, 0°C 附近でいずれの場合もレジリエンスが小さくなるのは常識的であろう。

こうしてわれわれの実験からは真の引揃糸のレジリエンスに関する定量的な特徴は見出しえなかつたが, 以上の結果から副次的に携んでいる繊維束のポアソン比 Σ_0 の effective な order が見当づけられる。それは (7.25) 式で $\lambda_0 \approx 1$, したがって $\phi_0 \approx 1$, $\Sigma_0 \approx \sigma/\alpha_0$ とおくと, (6.27) 式と同様な

$$\phi(\gamma_r) = 1 - \left(\Sigma_0 - \frac{1}{2} \right) \gamma_r \quad (7.30)$$

がえられ, これに 20°C の初回のサイクルの値を代入してみると

$$\Sigma_0(\text{air}) = 17.5,$$

$$\Sigma_0(\text{paraffin}) = 13.0$$

となる。この程度の値は第 10 報 5 節で見出した $\lambda_0 \rightarrow 1$ に近い場合の緊切スライバのポアソン比と same order であつて, われわれの模型では系内の繊維が携んでいる場合には, ポアソン比の値が相当大きくなることが納得される。

6. 結果の総括

繊維系の繰返し変形を, 熱力学における非可逆過程として考察することにより, 伸長曲線 $S_1(\gamma) = E_1 \gamma$ と回復曲線 $S_2(\gamma) = E_2 \gamma$ とが見出された。これから変形 γ_r で除荷したときの伸長レジリエンス $\phi(\gamma_r) = E_1/E_2$ および履歴によるエネルギー損失(発熱量) $H(\gamma_r) = (1/2)E_1 \gamma_r^2 (1 - \phi)$ が繊維系の構造因子ならびに弾性因子 λ , α , ϵ などの函数としてあらわに表式された。その結果, 繊維長を長くすること ($\lambda \rightarrow 1$) と, 系の密度を増するあるいは繊維相互の滑りを渋くすること ($\alpha \rightarrow 1$) とは共にレジリエンスを増し, 履歴を少くすることに効果があるが, ある程度繊維がズリ易いスライバでは繊維長が極端に大きくなると却つて履歴のエネルギー損失が増加することが知られた (Fig. 7.2 参照)。このあとの場合は, たとえば紡績中繊維が平行に揃うか, 合成繊維などで滑り易

いものほどゲージを厳密にとるか、ゲージが一定なら油剤をよく吟味した方が効果的なドラフトが行われるであろうことに関連している。

また空隙性スライパの繰返し変形の実験結果については、従来ほとんど定量的な吟味が加えられなかったが、本報では上述の表式を用いて捲縮スフ・スライパおよび牽切ビスコース・スライパのレジリエンスや履歴による発熱量を束の構造に基いて論究することができた。そしてその際束内繊維のもつれや撓みが敏感に影響していることが判つたが、こうして得られた構造因子、弾性因子などに関する推論の結果は別に測定した繰返さない場合の荷重一伸長曲線から求めたものと概ね一致したものであつた。

以上本報ではもつぱら伸長履歴について述べてきたが、この取扱い方はその導き方からいつて繊維系の振れや圧縮の繰返し変形にも同様に適用されるものであり、

さらには繊維系のみでなく二重弾性模型の使えるような一般の変形論においても成り立つものであるから、今後これらの個々の場合に対する応用と一層詳細な検討とが期待される。

おわりに本研究に対し研究費を援助された文部省当局に感謝し、実験を手伝われた山口博司君、鈴木柳子嬢の熱心な努力に対し御礼申上げる。

文 献

- 1) 木下茂武；本誌，12，877 (1956) なお 884 頁右下から 2 行目で Voigt model としたのは Maxwell model の誤記につき訂正する。
- 2) 木下茂武；本誌，12，120 (1956)
- 3) たとえば 杉田元宜；過度現象の熱力学（岩波書店），114 (1956)
- 4) 木下茂武；本誌，12，116 (1956)
- 5) 木下茂武；本誌，11，472 (1955)
- 6) 木下茂武；本誌，13，327 (1957)
- 7) 木下茂武；本誌，13，399 (1957)

正 会 員 増 大 に つ い て の お 願 い

本学会におきましては前々から会員の増大運動を行つており、正会員、学生会員、維持会員、賛助会員を益々増大して機関誌の充実、事業の活潑な運営をはかりたいと存じます。お蔭様で各会員共逐次増大はいたしておりますが本年は特に正会員の皆様にお願ひして正会員の倍大をはかりたいと存じます。つきましては正会員各位が必ず一名づつ新会員を御紹介下さいますよう御協力をお願い申し上げます。

会 員 の 声 募 集 に つ い て

会員各位の声を「会員の声」として掲載したいと存じますから原稿をお寄せ下さい。字数は本学会所定の原稿用紙 1 枚以内（450 字）以内といたします。お気軽に御投稿願ひます。

総 目 次 頒 布 に つ い て

本学会誌昭和 31 年総目次（1 月号～12 月号）の別刷が若干ありますので御入要の方は御申越下さい。実費送料共 50 円（切手でお払込み下さい）であります。

昭 和 31 年 秋 期 研 究 発 表 会 要 旨 頒 布 に つ い て

昨年 10 月 27 日、28 日名古屋において開催した本学会単独の研究発表会の要旨が残っておりますから希望者は本学会宛お申込下さい。送料共 1 部 170 円でお願ひいたします。