繊維配列度の光学的な連続測定の研究*

(第1報) スライバの反射理論

(昭和37年4月2日受理) 会 員 宇 野 稔 齊 藤 洋 塩 見 昭**

小 出 晃 柳 川 良 樹

→ 摘 要 ←

目 的

光学的方法でスライバ中の繊維の配列度を連続測定するため、スライバの反射を理論的に考察する。

成 果

- 1) 断面が円形の単繊維の軸に垂直に光を当てたときの軸に任意の角度をなして交わる平面内での正反射, 乱反射を与える式を導いた。
- 2) つぎに多くの繊維がならんだときのマスキングの影響を与える式を求めた。
- 3) 反射光量より繊維配列度を定義し, 1 計算例を示した。

1. 緒 言

個々の繊維が繊維束の軸方向にどれだけ平行に配列しているかを評価する繊維配列度の測定は、紡績工程においてきわめて重要なものである。したがって古くよりいろいろの方法が考えられ、Lipowsky, Löfgren¹⁾ はスライバの引張強度から推定し、Foster²⁾, Lindsley³⁾, 石川⁴⁾, 井谷⁵⁾らは一定長に切断したスライバをすき取り、繊維重量の変化より評価し、白樫⁶⁾, Morton⁷⁾らはスライバ中でトレサ繊維がどのような形で存在しているかより求めた。また井谷は顕微鏡の視野(直径2~6 mm)に入る各繊維の両端を結ぶ線分が、繊維束の長さ方向となす角を配向角と称し、この配向角の平均余弦で繊維配列度を表わした。

しかし、これらの方法は一般に非常な手段を要するので、比較的簡単な Orchard¹¹⁾, 石川¹²⁾, 宇野¹³⁾らの光学的方法が考えられた。すなわち Orchard はカード ウェブの一方から回転光線を当て、回転角に対し透過光が示す最高最低値の比率より配列度を定義し、石川はスライバの軸方向反射光量より平行度を推定した。したがって前者はスライバのようにほとんど光を通さないものには利用しにくく、後者は表面の凹凸や反射率の変化が直接影響

し、正確さを欠いている。よって宇野はこの誤差を除くため、繊維束の垂直上方より光を入射したときの、軸方向および軸に垂直方向の反射光量の比率から配列度を定義した。

しかし以上の方法は、いずれも測定のたびごとに試料を静止させる必要があり、非連続的な測定法である。しかし最近の傾向として連続自動記録が要求され、またむらの原因を追求し、それを取り除いて均質な製品をうるには連続測定がぜひ要求される。したがって本報においては、もっとも手軽な光学的方法を利用し、スライバを一定速度で走らせながら、その繊維配列度を自記させる方法および装置を研究し、若干の測定値を報告する。なお初めに反射理論について考えてみる。

2. まっすぐな単繊維の軸に垂直な面内の反射

スライバの光に対する反射特性を知るため、まず初めにまっすぐな単繊維の軸に垂直な面内での反射を考えてみよう。

さて多くの物体はこれに光を当てると、一部はそのまま反射され、他は内部に屈折して侵入し、何回か屈折していずれは再び外に出る。前者は物体の光沢の原因とな

* Optical Continuous Measurement of Fiber Orientation. Part 1: Reflection Theory of Slivers.

** M. Uno, H. Saito, A. Shiomi, A. Koide, Y. Yanagawa, Member. 京都工芸繊維大学

り、正反射または鏡面反射 M とよばれ、Fresnel の法則にしたがう。後者は拡散反射 D とよばれ、どの方向からみても常に輝度一定という Lambert の法則にしたがう。なお物体の表面は種々の方向をむいた小面素の集りであるという Barkas¹⁴⁾ の模型を考えれば、反射特性は幾何光学的に取扱いうる。

(第1図) 軸に垂直な面内の反射

いま第1図において半径 r の円筒状繊維の軸が Y 軸に一致するとし、 z 軸に平行に光が照射されたときの xz 面内の反射を考える。表面の小部分 $rd\alpha dy$ より z 軸と ϕ をなす方向への反射は、 ϕ がちょうど正反射方向となる小面素 mn によって与えられる。よっていま I を光源から単位的面積に垂直に入射される光束、 A を繊維表面の小面積中ちようど ϕ が正反射の方向になるような面素の面積の割合とすると、この小面素に対しては正反射法則が当てはまり、小面素の法線に対し入射、反射角はともに $\phi/2$ となるので

$$A \text{ 面に対する入射光量} = Ir \cos \phi/2 \cdot A d\alpha dy$$

A 面に対する反射光量 M_α は

$$M_\alpha = Ir \cos \phi/2 \cdot A \cdot s d\alpha dy$$

ただし s はフレネル係数とよばれ、入射角を i 、屈折角を d 、繊維表面の屈折率を n とすると

$$\sin i = n \sin d$$

$$s = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(i-d)}{\sin^2(i+d)} + \frac{\tan^2(i-d)}{\tan^2(i+d)} \right\}$$

いま $i = \phi/2$ であるから

$$s = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(\phi/2-d)}{\sin^2(\phi/2+d)} + \frac{\tan^2(\phi/2-d)}{\tan^2(\phi/2+d)} \right\}$$

$$= s(\phi, n)$$

また多くの実験によれば、表面の小面素の分布 A は、角度 α における平均平面にたてた法線に対し、各小面素が xz 面および yz 面に平行な面内で傾いている角を β 、 γ とすれば、第2図のようにほぼ正規分布をなす。よって β 、 γ の標準偏差を σ_1 、 σ_2 、比例定数を a とすれば

$$A = (a/\sigma_1 \sigma_2) \exp\{(-\beta^2/2\sigma_1^2) + (-\gamma^2/2\sigma_2^2)\} d\beta d\gamma$$

(第2図) 小面素の分布曲線 (文献 14 による
実線は酸化マグネシウム、点線はブリスト
ル紙の反射)

xz 面内の反射に対しては $\gamma = 0$ であるから

$$M_\alpha = \frac{a}{\sigma_1 \sigma_2} Ir s \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \exp\left(\frac{-\beta^2}{2\sigma_1^2}\right) d\alpha dy d\beta d\gamma$$

受光角が ϕ であるとき、 α の位置にある小面素の β は $\phi/2 - \alpha$ である。よって受光器の開き角が ψ であれば、ある α については上式の β を $(\phi/2 - \alpha - \psi/4)$ より $(\phi/2 - \alpha + \psi/4)$ まで積分すればよい。また α については、光の当たる側の繊維表面へひいた接線 BD の接点 B に相当する角 α_B より、光が当らなくなる点 C に相当する角 α_C まで積分すればよい。

いま照らされた繊維表面の軸方向の長さ l にくらべ、受光器が十分遠いとすれば $\gamma \approx 0$ 。よって ψ に関する積分の間、指数関係は 1 と考え、近似的に

$$\int \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2\sigma_2^2}\right) d\gamma \approx \int_{-\psi/4}^{\psi/4} d\gamma = \psi/2$$

$$\therefore M = \int_{-\psi/2}^{\psi/2} \int_{-\alpha_B}^{\alpha_C} \int_{\phi/2 - \alpha - \psi/4}^{\phi/2 - \alpha + \psi/4} Ir s \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-\beta^2}{2\sigma_1^2}\right) \frac{a}{\sigma_1 \sigma_2} \cdot \frac{\psi}{2} d\alpha dy d\beta$$

また ϕ にくらべ ψ が十分に小さいと考えると

$$\int_{\phi/2 - \alpha - \psi/4}^{\phi/2 - \alpha + \psi/4} \exp\left(\frac{-\beta^2}{2\sigma_1^2}\right) d\beta = \frac{\psi}{2} \exp\left\{-\frac{\left(\frac{\phi}{2} - \alpha\right)^2}{2\sigma_1^2}\right\}$$

$$\therefore M = Ir l \left(\frac{\psi}{2}\right)^2 \int_{-\alpha_B}^{\alpha_C} s \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot$$

$$\exp\left\{-\frac{\left(\frac{\phi}{2} - \alpha\right)^2}{2\sigma_1^2}\right\} \frac{a}{\sigma_1 \sigma_2} d\alpha \dots\dots (1)$$

一方拡散反射については、表面の小部分に垂直に反射される光の割合を B とすれば、入射角 α で入る光の拡散反射を ϕ の方向でうけると、Lambert の法則により

この光量は反射角 β の余弦に比例するので、単位の受光角では

$$D=I B r \cos \alpha \cos \beta d \alpha d y$$

前と同様受光器の開き角 ψ は ϕ に比し小さいと仮定すると、 $\cos \beta$ は ψ の間では一定と考えることができるので、開き角 ψ に対しては

$$D=\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{\alpha_B}^{\alpha_C} I B r \psi^2 \cos \alpha \cdot \cos (\phi-\alpha) d \alpha d y \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

よって繊維軸に垂直な全反射光量は

$$E_{\perp}=M+D$$

となる。

3. まっすぐな繊維の軸に傾斜した面内の反射

3.1 第1受光面に関する反射

第3図において、ある受光面 HOA' (これを第1受光面と称する) に対し繊維軸が θ の余角だけ傾いている場合を考える。受光方向は光軸 HO に対し ϕ だけ傾いているとすれば、 ϕ が正反射方向となる面素の傾きは $\phi/2$

(第3図) 軸に傾斜した面内の反射

で、これを OA 方向とする。光軸 HO をふくみ、繊維軸に垂直および平行な面を考え、図のように立方体の各点をとる。いま O 点は第1図のごとく繊維表面で光軸から α だけ傾き、 OE が点 O における平均平面の法線とすれば

$$\angle HOB=\alpha+\beta_1$$

$$\angle EOC=\gamma_1$$

となる。ただし添字1は第1受光面に関する値であることを示す。

一方図形の上で

$$\tan (\alpha+\beta_1)=O B^{\prime} / B B^{\prime}=\cos \theta \tan \phi / 2$$

$$\therefore \beta_1=\tan ^{-1}[\cos \theta \tan \phi / 2]-\alpha$$

同様にして

$$\tan \gamma_1=O A^{\prime} \sin \theta / D D^{\prime} \sec \alpha=\tan \frac{\phi}{2} \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha$$

$$\therefore \gamma_1=\tan ^{-1}\left[\sin \theta \tan \frac{\phi}{2} \cdot \cos \alpha\right]$$

よって ϕ 方向への正反射光量による受光量は、この β_1, γ_1 を用いて

$$M=I r l \iiint \frac{a}{\sigma_1 \sigma_2} s \cos \frac{\phi}{2} \exp \left(\frac{-\beta_1^2}{2 \sigma_1^2}\right) \exp \left(\frac{-\gamma_1^2}{2 \sigma_2^2}\right) d \alpha d \beta d \gamma$$

ψ が小さければ、 β, γ を受光角 ψ の $\frac{1}{2}$ の範囲で積分する間は、被積分関数は一定と考えてもよいので

$$\int \exp \left(\frac{-\beta_1^2}{2 \sigma_1^2}\right) d \beta \doteq \frac{\psi}{2} \exp \left(\frac{-\beta_1^2}{2 \sigma_1^2}\right)$$

$$\int \exp \left(\frac{-\gamma_1^2}{2 \sigma_2^2}\right) d \gamma \doteq \frac{\psi}{2} \exp \left(\frac{-\gamma_1^2}{2 \sigma_2^2}\right)$$

よって

$$M_1=I r l \psi^2 f_1 \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$f_1=\frac{a s \cos \frac{\phi}{2}}{4 \sigma_1 \sigma_2} \int \exp \left(\frac{-\beta_1^2}{2 \sigma_1^2}\right) \exp \left(\frac{-\gamma_1^2}{2 \sigma_2^2}\right) d \alpha \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

積分領域に関しては後述する。

拡散反射に関しては、平均平面の法線 OE に関する反射角 δ は $\triangle AOE$ より

$$\cos \delta_1=\frac{O A^2+O E^2-A E^2}{2 O A \cdot O E}$$

$$O E=B B^{\prime} \sec \alpha=O A \cos \frac{\phi}{2} \sec \alpha$$

$$A E^2=A B^2+B E^2=O A^2\left[\sin ^2 \frac{\phi}{2}+\cos \frac{\phi}{2} \operatorname{cosec} \alpha \times\left\{\cos \frac{\phi}{2} \operatorname{cosec} \alpha-2 \sin \frac{\phi}{2} \cos \theta\right\}\right]$$

$$\therefore \cos \delta_1=\frac{1}{2}\left\{\sec \frac{\phi}{2} \cos \alpha+\cos \frac{\phi}{2} \sec \alpha-\tan \frac{\phi}{2} \sec \frac{\phi}{2} \cos \alpha-\cos \frac{\phi}{2} \cot \alpha \operatorname{cosec} \alpha+2 \tan \frac{\phi}{2} \cos \frac{\phi}{2} \cos \theta \cot \alpha\right\}$$

乱反射による ϕ 方向の入射光量は、この δ_1 を用いて

$$D_1=\iint I r B \psi^2 \cos \alpha \cos \delta_1 d \alpha d y=I r l \psi^2 g_1 \quad \cdots \cdots (5)$$

ただし

$$g_1=\int B \cos \alpha \cos \delta_1 d \alpha \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

(第4図) 第2受光面での反射

よって第1受光面での反射受光量は

$$E_1 = M_1 + D_1$$

3.2 第2受光面内での反射

第4図において繊維軸に対し光軸 HO が垂直であるとする。 HO を含み繊維軸と角 θ をなす第2平面を考えれば、これは前述の第1平面と直角をなす。この面内で HO と角 ϕ をなす方向に受光器を置いたときの入射光量を考えると、第3図の θ を $\frac{\pi}{2} - \theta$ と置き変えればよいから

$$\begin{aligned} \beta_2 &= \tan^{-1} \left\{ \sin \theta \tan \frac{\phi}{2} \right\} - \alpha \\ \gamma_2 &= \tan^{-1} \left\{ \cos \theta \tan \frac{\phi}{2} \cos \alpha \right\} \\ \cos \delta_2 &= \frac{1}{2} \left\{ \sec \frac{\phi}{2} \cos \alpha + \cos \frac{\phi}{2} \sec \alpha \right. \\ &\quad \left. - \tan \frac{\phi}{2} \sec \frac{\phi}{2} \cos \alpha - \cos \frac{\phi}{2} \cot \alpha \operatorname{cosec} \alpha \right. \\ &\quad \left. + 2 \tan \frac{\phi}{2} \cos \frac{\phi}{2} \sin \theta \cot \alpha \right\} \end{aligned}$$

よって正反射による入射光は

$$M_2 = I r l \psi^2 f_2 \dots \dots \dots (7)$$

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{a s \cos \frac{\phi}{2}}{4 \sigma_1 \sigma_2} \int \exp \left(\frac{-\beta_2^2}{2 \sigma_1^2} \right) \cdot \\ &\quad \exp \left(\frac{-\gamma_2^2}{2 \sigma_2^2} \right) d\alpha \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

乱反射による入射光は

$$D_2 = I r l \psi^2 g_2 \dots \dots \dots (9)$$

$$g_2 = \int B \cos \alpha \cos \delta_2 d\alpha \dots \dots \dots (10)$$

よって第2受光面での反射受光量は

$$E_2 = M_2 + D_2$$

となる。

4. マスキングの影響

4.1 繊維軸に垂直な面内での受光

(第5図) 垂直面内のマスキング

多数の繊維が密にならんでいるときは、互に干渉してマスキングの現象を生ずる。このため受光量の積分範囲に影響を与える。簡単なためいま各繊維が一平面上に、互いに接して平行にならんでいるとし、第5図に示すように、繊維軸に垂直な受光面を考えると、面 AB 、面 CD 間は光が当たっても受光器への入射光線は生じない。このときの角 α_B 、 α_C を求めると

$$\alpha_B = \frac{\pi}{2} - \left(\phi - \frac{\psi}{2} \right) \text{ ただし } \alpha_B \leq \frac{\pi}{2}$$

α_C は点 C を通り方向係数が $\tan \left[\frac{\pi}{2} - \left(\phi + \frac{\psi}{2} \right) \right]$ の直線が右側の円の接線になる条件より求めると

$$\begin{aligned} &\frac{\{\cos \alpha_C (\sin \alpha_C - 2) \pm 2\sqrt{1 - \sin \alpha_C}\}}{(1 - \sin \alpha_C) (3 - \sin \alpha_C)} \\ &= \cot \left(\phi + \frac{\psi}{2} \right) \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

の関係にある。実際に各 α_C を与えて $\left(\phi + \frac{\psi}{2} \right)$ を求めると第6図のようになる。よって受光角 ϕ と受光器の開き角 ψ が決まれば、限界の α_C をこの図より読みとることができる。

(第6図) α_C の限界を与える曲線

4.2 繊維軸に対し傾斜した面内での受光

繊維軸に対し受光角が $\frac{\pi}{2} - \theta$ だけ傾いているときは、第7図において左側の繊維表面上の一点を A とし、 OA を傾角 ϕ をもって右側の繊維に接する直線とする。

(第7図) 傾斜した面のマスキング

繊維に垂直な面を $BB'O$, A より繊維表面で繊維軸に平行な直線を引き平面 BOB' との交点を B とし, A , B より垂線 AA' , BB' を下すと, 前述の角 ϕ の代りに ϕ' を入れれば, 必要な積分領域 (α_B , α_O) を求めることができる. 図において

$$OB' = OA' \cos \theta, AA' = BB'$$

$$\therefore \phi' = \tan^{-1} [\cos \theta \tan \phi]$$

受光面 $AA'O$ に垂直な面に関しては ϕ' の代りに

$$\phi'' = \tan^{-1} [\sin \theta \tan \phi]$$

とおけばよい.

5. 繊維配列度

5.1 定義

スライバ中の各繊維がスライバ軸の方向にどれほど平行に配列しているかを知る1方法として, スライバの軸に平行および垂直な2種の受光面をもうけ, 両平面の交線上でスライバ軸に垂直に光を当て, いま各受光面内での反射光量を測定し

$$\text{配列度 } D.O. = \frac{\Sigma E_1}{\Sigma (E_1 + E_2)} \dots\dots\dots (12)$$

ただし E_1 = スライバ軸に垂直な面内での受光量

E_2 = スライバ軸に平行な面内での受光量

と定義すれば, E_1 , E_2 中には方向に無関係な乱反射光量 D を含み, また後述するように, 正反射光量 M に比し乱反射光量が非常に大きいため $E_1 \approx E_2$, よって $D.O. \approx \frac{1}{2}$ となり繊維の配列度を正しく表わすことはできない.

しかし何らかの方法で乱反射光量を取り去り, 正反射光量のみを測り

$$D.O. = \frac{\Sigma M_1}{\Sigma (M_1 + M_2)} \dots\dots\dots (13)$$

と定義すれば, (3), (4), (7), (8) 式より

$$D.O. = \frac{\Sigma I r l \psi^2 f_1}{\Sigma I r l \psi^2 f_1 + \Sigma I r l \psi^2 f_2} = F(I, r, l, \psi, \alpha, \sigma_1, \sigma_2) \dots\dots\dots (14)$$

本式はスライバを構成する繊維の光学的特性の外に, 各繊維がスライバ軸となす角 θ を間接に含んでいるので, これによって繊維配列度を表わすことができる. 特に同

じ種類の繊維のみが多数配列しているときは, 式は簡単になり

$$D.O. = \frac{f_1}{f_1 + f_2} \dots\dots\dots (15)$$

となる.

5.2 計算の一例

(15)式で表わされる繊維配列度が, θ に対してどのように変化するかを見るため, 特別な場合として

$$\phi = 45^\circ, \quad \sigma_1 = 18^\circ (= \pi/10)$$

$$\sigma_2 = 9^\circ (= \pi/20) \quad \psi = 5^\circ 44' (= 0.100 \text{ rad})$$

のときを考える. このときは

$$\beta_1 = \tan^{-1} [0.4142 \cos \theta] - \alpha$$

$$\gamma_1 = \tan^{-1} [0.4142 \sin \theta \cos \alpha]$$

$$\beta_2 = \tan^{-1} [0.4142 \sin \theta] - \alpha$$

$$\gamma_2 = \tan^{-1} [0.4142 \cos \theta \cos \alpha]$$

積分域 (α_B , α_O) については

第1平面について

$$\alpha_{B1} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} [0.41422 \cos \theta] + \frac{\psi}{2}$$

α_{O1} は $\tan [0.4142 \cos \theta]$ に対応する α_O を第6図より読みとる.

第2平面について

$$\alpha_{B2} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} [0.4142 \sin \theta] + \frac{\psi}{2}$$

α_{O2} は $\tan^{-1} [\sin \theta \tan \phi]$ に対応する α_O を第6図より読みとる.

計算の一過程を第8図に示す. これは $\theta = 10^\circ$ のときの被積分を α に対しプロットしたもので, 垂直上方より

(第8図) 反射光量分布曲線 (縦軸の単位は便宜上の比較値) $\sigma_1 = 18^\circ$, $\sigma_2 = 9^\circ$, $\theta = 10^\circ$

やや右にずれて最大の反射光量が得られることを示す. なお積分域は f_1 については $\downarrow$, f_2 については $\uparrow$ 印で示す. このような計算を各 θ について行ない, 積分し, 配列度を求めた結果を第9図に示す. 各繊維がスライバ軸となす角 θ がふえると繊維配列度は低下し, 45° では 0.5 と一致し, 以後は 45° を点対称として $0^\circ \sim 45^\circ$ 間の曲線と同じ形をして 0 に近づく. しかし $\theta = 0$ で 1.0,

(第9図) 配列度と θ の関係

あるいは $\theta=90^\circ$ で0に一致することはない。これは繊維表面が完全に平滑でないため、繊維の軸方向にもいくらかの正反射光量があるため(σ_2 が0でないため)である。

なお常識的に考えて、各繊維とスライバ軸とのなす角はかなり0に近く、 $0^\circ \sim 10^\circ$ 付近のように思われる。しかし後述する実験結果から見ると、繊維配列度は0.7~0.9で、これに相当する θ は $15^\circ \sim 35^\circ$ となり、非常に大きいようである。しかしこれはつぎに説明する繊維のクリンプや表面の凹凸、重なりなどのためである。また繊維の形態を光学的に測って配向角 θ を求めた井谷らの研究によっても、 θ はカード工程でほぼ 23° 、練条工程でほぼ 11° であるから、以上の計算式の示す θ はほぼ正しいものと思われる。

また $\theta > 60^\circ$ を除いては、一般に θ の変化に伴う配列度変化率、すなわち曲線の傾斜は、本報の方が井谷らの配列度を表わす $\cos \theta$ よりもするどい。よって本測定の方がわずかの θ の変化をも鋭敏に表わし、試験法としては性能がよいことを示している。また $\theta=45^\circ$ でちょうど繊維配列度が0.5となる方が、常識的にも一致してよいようである。

6. ま と め

光学的方法でスライバ中の繊維の配列度を測定するため、スライバの反射を理論的に考察した。そして

1) 繊維は多くの小面素の集りで、ある方向を向く面素の分布は、その平均平面に立てた垂線を中心とする正規分布にしたがうという仮定のもとに、断面が円形の単繊維の軸に垂直な面内での正反射、乱反射光量を与える式(1)、(2)を導いた。

2) また反射面が繊維軸に垂直でないときの正反射、乱反射光量を与える式(3)、(7)および(5)、(9)を導いた。

3) つぎに多くの繊維がならんだ場合のマスキングの影響を考慮した。

4) また繊維配列度を、スライバの軸に垂直および平行な面内での正反射光量より(13)、(14)、(15)式のごとく定義し、その1応用例として、ある繊維群がスライバ軸と任意の角度に傾いたときの配列度を計算した。

なお繊維の断面が円形でない場合、およびいろいろな形態をした場合の影響は次報で述べる。

文 献

- 1) E. Lipowsky; Mell. Textilber. (Eng. ed.) **16**, 97 (1935-2)
- 2) S. Löfgren; Proc. Swed. Inst. for Text. Res., No. 12 (1950)
- 3) G. A. R. Foster, et al; J. Text. Inst., **36**, T 311 (1945-5)
- 4) C. H. Lindsley; Text. Res. J., **21**, 39 (1951-1)
- 5) 石川章一; 繊維学会誌, **4**, 240 (1948-10)
- 6) 井谷和十郎; 本誌, **9**, 461 (1956-7)
- 7) 白樫, 田畑; 綿研報告, 第51号, 11 (1956-11)
- 8) W. E. Morton, R. J. Summers; J. Text. Inst., **40**, P 106 (1949-2)
- 9) W. E. Morton, K. C. Yen; J. Text. Inst., **43**, T 463 (1952-9)
- 10) 井谷和十郎; 本誌, **10**, 293 (1957-3)
- 11) G. A. J. Orchard; J. Text. Inst.; **44**, T 380 (1953-8)
- 12) 石川章一; 繊維学会誌, **8**, 303 (1952-6)
- 13) 宇野, 奥田, 松村; 本誌, **10**, 639 (1957-8)
- 14) W. W. Barkas; Proc. Phys. Soc. (L.) **51**, 274 (1939)
- 15) 井谷和十郎; 本誌, **11**, 107 (1958-2)
- 16) 田中俊一; 応用物理, **25**, 207 (1956)
- 17) 栗田, 矢野, 奈良, 蓮沼; 応用物理, **24**, 318 (1955)
- 18) 田中俊一; 応用物理, **26**, 85 (1957)
- 19) 井谷和十郎; 本誌, **11**, 107 (1958-2)