紡績糸の構造およびその初期引っ張り変形時の力学的非線形性に関する研究

(第1報) 紡績糸の構造測定と解析

帝 人 (株) 野 呂 田 進 (会員)
 京都大学工学部 川 端 季 雄 (会員)
 京都大学工学部 河 合 弘 勉 (会員)

Structure of Spun Yarn and Its Mechanical Non-linear Property in Initial Tensile Deformation

Part I : Observation and Analysis of Spun Yarn Structure

Susumu Norota*, Sueo Kawabata and Hiromichi Kawai

Department of Polymer Chemistry, Kyoto University, Kyoto

Abstract

This article analyzes the mechanical non-linear property of spun yarn in initial tensile deformation which has an important bearing on the handle of fabrics.

The article describes observation and a statistical analysis of spun yarn structures in different stages of tensile deformation.

This analysis mathematically expresses spun yarn structure and makes it possible to assume an idealized mechanical structure model.

(Received February 8, 1969)

摘 要

目 的 紡績糸の初期引っ張り変形過程における糸構造を観測し、統計的な解析を行なう。

成 果 (1) 十分短く切断された紡績糸の内部で、撚り中心から半径 r の位置にある任意の繊維セグメントをベクトル $\mathbf{C}(r)$ で表示すると、その平均 $\overline{\mathbf{C}(r)}$ は

$$\overline{\mathbf{C}(r)} = r \cdot \mathbf{t} + \overline{\mathbf{b}}$$

であらわされる。ただし、 $\mathbf{t}$ は糸の撚り方向と回転角の大きさを表す定数ベクトルで、 $|\mathbf{t}| = 2\pi T \cdot |\overline{\mathbf{b}}|$ (T は撚り数)、また、 $\mathbf{b}$ は軸平行成分で、 $\overline{\mathbf{b}}$ はその平均である。

(2) 変形前 $\mathbf{C}(r)$ なる繊維セグメントベクトルは、糸の伸びひずみ ϵ によって、平均 $\overline{\mathbf{C}'(r')}$ に変わり、 $\overline{\mathbf{C}'(r')} = \varphi(\epsilon) \cdot r \cdot \mathbf{t} + (1 + \epsilon) \overline{\mathbf{b}}$ であらわされる。ただし、 $\varphi(\epsilon)$ は繊維セグメントの糸半径方向の位置の移動量を表す関数で指数関数(4式)で表わされる。

(3) 繊維セグメントの位置の分布は、レイリー分布で近似できる。

(昭和44年2月8日受理)

1. 緒 論

巻縮のない長繊維の引きそろえ糸と紡績糸の二者を比較すると、初期引っ張り変形時の挙動が一般に著しく異

なる。すなわち、引きそろえ糸の場合は、撚り効果や単繊維¹⁾の特性変動による統計効果などの繊維集合効果が若干あるとはいえ、構成単繊維そのものの引っ張り挙動と実質的に大差ないのに対し、紡績糸の場合は、第1図、

* Present Address: Fiber and Textile Research Institute, TEIJIN Co., Ltd. Ibaraki shi, Osaka

第1図 梳毛糸と構成繊維の初期引っ張り変形の比較

第2図 ポリエステル紡績糸と構成繊維の初期引っ張り変形の比較

および第2図の例に示されるように、著しく異なった顕著な非線形挙動を示す。このような両者の差は、まさしく糸構造の差によるものであるが、この差が織物になるとさらに拡大され、織物の風合に決定的な差を生むものと考えられる。従来、上記のような紡績糸の初期引っ張り変形時の非線形挙動に関しては、定性的に、バルキー性によるもの、として簡単にかたづけられてきたきらいがあったが、従来の紡績糸とは構造が異なる種々の加工糸、例えば、オープンエンド方式の紡績糸、タスラン糸、ウーリー加工糸、コア スパン糸などが多数出現し、またしつつある今日、従来法による紡績糸独特の性質を改めて知る必要が生じ、その構造と性質の定量的な解析の必要にせまられている。

そこで、本研究では、紡績糸の構造を詳細に観測することによって、初期引っ張り変形時の非線形挙動の定量的な解析を試みようとするものである。本報では、まず紡績糸構造の観測方法とその結果について報告する。この方法はまたオープンエンド糸など各種糸の構造解析にも応用することができる。

2. 糸構造の数学的表現法

紡績糸の構造は本質的に不確定な性質を多分にもつものであるから、従来引きそろえ糸の場合によく行なわれたような確定した構造を考える幾何学的把握の方法よりも統計的な把握の方法のほうが妥当と考える。この場

合、構成単繊維の応力と歪の関係は、糸の変形過程における構造変化の統計的な把握によって、統計的にとらえることが可能である。

本研究で構造観測を行なう試料としては、普通の紡績法による梳毛糸 (30/-) を選んだ。また、糸の構造を安定化するために次のようなコンディショニングを行なった。すなわち、糸を絶状にして 60°C の温水処理をしたのち乾燥しこれを4%まで10回繰返し引っ張ってから24時間以上放置する。第1図および第2図の引っ張り曲線は、このようにコンディショニングされた糸から得られたものである。このようなコンディショニングを行なった理由は、第1に構造を安定化させるためであり、第2に紡績糸の特徴が上記の処理に類似の処理 (織物になってからの精練仕上など) によって最も発揮されることにある。

いま、紡績糸の糸軸方向に垂直な2つの十分接近した平面 A, A' を考えると、平面 A, A' によって切断される任意の繊維セグメントは、その空間における位置と方向を表わすためにベクトル C であらわす。また、この紡績糸に F なる張力が加わり全体として ϵ だけ変形したとき、その繊維セグメントが $C'(\epsilon)$ に変化するものとする (第3図、第4図)。ところで、われわれの知りたいのは、繊維セグメント ベクトル C と $C'(\epsilon)$ の統計的な関係であるが、そのためには紡績糸が本質的には糸軸のまわりに“燃られた構造体”であることを考慮し

第3図 変形前繊維セグメントのベクトル表示

第4図 変形後繊維セグメントのベクトル表示

て、ベクトル $\mathbf{C}$ を糸軸成分（これを軸ベクトルと呼ぶ） $\mathbf{b}$ と糸軸垂直成分（これを射影ベクトル） $\mathbf{a}$ に分解しておく、 $\mathbf{b}'$ は糸の歪 ε の関数 $\mathbf{b}'(\varepsilon)$ 、 $\mathbf{a}$ は糸の撚り中心 O からの距離 r の関数 $\mathbf{a}(r)$ 、 $\mathbf{a}'$ は r と ε の関数 $\mathbf{a}'(r, \varepsilon)$ としてあらわせるから便利である（第5図、第6図）。

第5図 変形前繊維セグメント ベクトルの分解

第6図 変形後繊維セグメント ベクトルの分解

ところで、糸構造内の局所的なスリップなどにより、変形後の糸の長さ $b(1+\varepsilon)$ と糸内の任意の繊維セグメントの糸軸成分の長さ $|\mathbf{b}'|$ とは厳密に等しいとは限らないが、紡績糸内の繊維の末端がすべて引っ張り試験機に完全に把持されているか、または繊維相互にマクロな意味でのスリップがなければ

$$\mathbf{b}'(\varepsilon) = (1+\varepsilon)\mathbf{b} = (1+\varepsilon)b \dots\dots\dots (1)$$

が成り立つ。本研究の場合のように、十分コンディショニングを行ないかつ歪をただか0.05（5%）以内にとどめる限り(1)式はほぼ成立するものとみてよい。なぜならば、試料長を平均繊維長 83mm より十分短く(10mm)にした場合と平均繊維長より長く(100mm)した場合とではその引っ張り特性になんら有意な差はみられなかった。

さて、(1)式の成立のもとでは、繊維セグメントのベクトル $\mathbf{C}$ と $\mathbf{C}'(\varepsilon)$ の統計的な関係を求めるかわりに射影ベクトル $\mathbf{a}(r)$ と $\mathbf{a}'(r, \varepsilon)$ の統計的な関係を求めれば十分である。

3. 糸構造の観測方法

次に射影ベクトル $\mathbf{a}(r)$ および $\mathbf{a}'(r, \varepsilon)$ の測定方法について述べる。まず、糸を $\varepsilon(=0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ の5段階)だけ引っ張って第7図のような箱内に固定し

第7図 ポリエステル樹脂による紡績糸構造の固定

てから箱の中にポリエステル樹脂を流し込み、樹脂が完全に糸構造内に浸透した後固化させる。なお、この樹脂の浸透が糸構造を変化させることがないかどうかをきわめて不安定な綿塊でチェックした。固化された樹脂は、切断の際の変形を防ぐためさらに第8図のように周囲

第8図 試料片の切断方法

をワックスでかためられてから、マイクロームを改造したギロチン式カッターで $|\mathbf{b}'| = b' = 80(1+\varepsilon)\mu$ に連続的に切断される。このようにして切断された2枚の連続的試料片を顕微鏡で写真撮影すると第9図のようになる

第9図 二枚の連続試料片の顕微鏡写真

第10図 連続断面の重ねあわせ

が、これを重ね合わせて示すと第10図ようになる。この場合、繊維の個別は太さの相違および繊維の陰影によって容易に判別できるから、繊維断面の中心から中心へ矢印を引くことによって射影ベクトル α が得られる。このようにして、すべての繊維について射影ベクトルを描いたのが第11図である。ここで、射影ベクトルの位置を定めるため撚り中心を見出さなければならないが、もともこれは厳密に定められた点ではないから、ここでは個々のベクトルについて統計処理をすることを考慮して、射影ベクトル図内の任意の点 O' を中心に半径 Δr (50μ) の小さな円を描いたとき、この円内にはいるすべての射影ベクトルの平均が他のどの点を中心にした円内のベクトル平均より小さければ、これをあらめて撚り中心 O と定める。

4. 実測結果および考察

紡績糸の構造を統計的にまとめるまえに、まず直感的なイメージを得ておきたい。

まず、第11図の射影ベクトル図を見て気がつくことは

第11図 射影ベクトル図

撚り中心が糸の中心からずれていることである。これは特定の断面、あるいは特定の繊維の糸のみに見られる現象ではなく、第12図のポリエステル紡績糸にも見られるように、従来の普通の紡績法による紡績糸全般に見られるものであって、J.W.S. Hearle^{4,5)}などの指適するように、第13図に示すリボン巻き (Ribbon Wrapped) 的な性格の強い構造体であるといえよう。容易に推定されるように、これはきわめてバルキーになりやすい構造体である。

第12図 ポリエステル紡績糸の射影ベクトル図

第13図 リボン巻き構造

第14図 紡績糸の各引張り歪みにおける典型的な断面射影ベクトル図

第14図は、紡績糸の各歪における典型的な断面射影ベクトル図である。これによると、 $\epsilon=0.04$ 程度の変形によって繊維がほぼ充填されているが、この付近の引張り曲線の形は直線的である。また、各断面の撚り中心は ϵ にかかわらずいづれも中心部からはずれており、その形はおおむね第15図のようなものとみてよい。そこで各

第15図 紡績糸の平均的断面形態

断面にあえて第15図のような対称軸を定め、同じ歪の断面ベクトル図 100 枚を重ね合わせてみたのが第16図である。また、軸には無関係に撚り中心のみをあわせたのが第17図である。第16図は平均的な紡績糸断面形態のイメージを、第17図は概観的な太さのイメージを与える。第18図は、1本の紡績糸について、個々の繊維の射影ベクトルを連続的に追求したものである。すべての繊維を同じ図面に描くと非常に複雑になるので断面を左上のごとく8つの象限にわけて各象限内にある繊維について追跡図を描いた。

このような方法によれば、繊維相互の隣接関係、(マイグレーション) の測定、あるいは紡績糸構造のモデル的再現も可能である。

次に、定量的な測定結果について述べる。

まず、最初撚り中心からの距離が r の位置にあった射

第17図 撚り中心のみを定めた場合の射影ベクトルの重ねあわせ

第18図 1本の紡績糸の中の射影ベクトルの連続追跡

第16図 対称軸を定めた場合の射影ベクトルの重ねあわせ

影ベクトルが、糸の変形によって平均的にどのような位置に移動するかを知るために、変形前と変形後の糸断面上の各位置における射影ベクトル数の累積度数曲線を求めた。第19図のように、変形前（実線）と変形後（点線）の累積度数曲線が得られた場合、同一のベクトル数 n に対応する位置 r と r' を比較することにより、変形前に半径 $0 \sim r$ の円内に含まれた射影ベクトルが変形によって $0 \sim r'$ の円内に収縮したことがわかる。そこで各段階

第19図 糸の変形前と変形後の射影ベクトルの累積度数曲線

の n に対応する r と r' の関係を追求していけば最初任意の位置 r にあった射影ベクトルが平均的にどの位置 r' に移動したかを知ることができるはずである。第20図左は糸の各変形率における射影ベクトルの累積度数曲線である。この図より、各段階における n に対応する r と r' を求め $r'/r = \varphi$ としてプロットしたのが同図右である。この図から明らかなように

$$r'/r = \varphi(\epsilon) \dots \dots \dots (2)$$

がほぼ成り立つ。これは糸の引っ張り変形による繊維セグメントの移動後の平均位置 r' がもとの位置 r にほぼ比例することを意味している。したがって、この比例定数 φ は糸の毛羽などの不均一要素を除いた実質的平均外径比と同一でありこれを糸径収縮関数と名づける。これは糸径を求める適当な手段があれば容易に測定可能である。ここでは、第20図左より容易に第21図のように求められる。この $\varphi(\epsilon) - \epsilon$ 曲線の厳密な理論式は今のところ見出せないが、糸がある一定の値 $\epsilon = m$ までひずん

第20図 糸の各歪に対応する累積度数曲線

第21図 第20図より求めた糸径収縮関数

だとき糸内の繊維が最密充填され $\epsilon \geq m$ ではもはや糸径がほとんど変わらないものとするとき次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \varphi(0) &= 1 \\ \varphi(m) &= \varphi(\infty) = \varphi_m = \text{const} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

この $\varphi(m) = \varphi_m$ は、糸内で繊維が最密充填されたときの値である。このような条件を満足するような式は無数に考えられるが、第21図の φ の変化の様子から、次のような最も簡単な指数関係をあてはめてみた。

$$\varphi - \varphi_m = \exp(-\alpha\epsilon - \beta) \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 $\alpha, \beta = \ln(1 - \varphi_m)$ は定数。第21図の実線は(4)式において、 $\varphi_m = 1.02$, $\alpha = 77.8$, とした場合の計算値であり、実測結果とよく一致する。他の2, 3の紡績糸に関して、ごく簡単な光学的方法により糸外径を測定して $\varphi(\epsilon) - \epsilon$ 曲線を求め、(4)式をあてはめてみると、だいたい良好な一致がみられた。なお、 $\varphi(\epsilon)$ のパラメーター φ_m, α のうち φ_m は変形前の糸径 R_0 と最密充填されたときの糸径 R_m の比 R_m/R_0 として一義的に定まるが、 α についてはさらに多数の糸について詳細な検討をしたうえでなければ、いまのところなんらの物理的解釈をくだすこともできない。これについては今後の問題点として残しておきたい。次に糸の変形前後の射影ベクトルについて調べてみる。そのために、射影ベクトル $\mathbf{a}(r)$ をさらに撚り中心 O (半径) 方向の成分 $\mathbf{a}_r$ と、それに直角 (撚り方向) 成分 $\mathbf{a}_t$ に分解し、それぞれの平

第22図 射影ベクトル $\mathbf{a}(r)$ の分解

均 $\overline{a_r(r)}$, $\overline{a_t(r)}$ および射影ベクトルの大きさの平均 $|\overline{a(r)}| = \overline{a(r)}$ の3つにわけて測定することにした(第22図). まず, 半径方向成分 $a_r(r)$ については, 当然予想されるように, プラスとマイナスが相殺されて,

$$\overline{a_r(r)} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

であった. $\overline{a_t(r)}$ および $\overline{a(r)}$ については, その測定結

果をそれぞれ第23図1~5, および第24図1~5にまとめた. 図より明らかなように, $\overline{a_t(r)}$ と $\overline{a(r)}$ はいずれも撚り中心からの距離 r にほぼ比例している. なお, r の大きいところで比例直線よりはずれているものもあるが, 第23図-1の度数分布曲線(点線)を見てもわかるように, 数としては問題にならない毛羽状繊維である.

第23図 撚り方向ベクトル a_t の平均と r の関係

第24図 射影ベクトルの大きさ $a(r)$ の平均と r の関係

第23図-6および第24図-6はそれぞれの比例定数を $\mathbf{t}$ (撚り回転角ベクトル), $\mathbf{k}$ として各 ε に対してプロットしたものである。これより, $\mathbf{t}$, $\mathbf{k}$ はいずれも ε に無関係に一定であることがわかる。また, 第24図1~5における直線の截片の長さ l として同様に第24図-6にプロットした。明らかに l もまた ε に無関係に一定である。以上のことから,

$$\frac{\overline{\mathbf{a}}(\mathbf{r})}{r} = \frac{\mathbf{a}'(\mathbf{r}')}{r'} = \mathbf{t} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\overline{\mathbf{a}}(\mathbf{r}) - l}{r} = \frac{\mathbf{a}'(\mathbf{r}') - l}{r'} = \mathbf{k} \dots\dots\dots (7)$$

ここで, $\overline{\mathbf{a}} = \overline{\mathbf{a}}_r + \overline{\mathbf{a}}_t$ が成り立つことを考慮に入れて, (2), (5), (6)式から,

$$\frac{\overline{\mathbf{a}}(\mathbf{r})}{r} = \frac{\mathbf{a}'(\mathbf{r}')}{r'} = \mathbf{t} \dots\dots\dots (8)$$

$$\mathbf{a}'(\mathbf{r}') = \varphi(\varepsilon) \cdot \overline{\mathbf{a}}(\mathbf{r}) = \varphi(\varepsilon) \cdot r \cdot \mathbf{t} \dots\dots\dots (9)$$

(8), (9)の幾何学的意味は, 変形前 r の位置にある射影ベクトル $\mathbf{a}(\mathbf{r})$ の平均 $\overline{\mathbf{a}}(\mathbf{r})$ は $r \cdot \mathbf{t}$ (大きさが $r \cdot t$ で方向は撚り方向) であり, これが糸の ε なる変形によって, $r' = r \cdot \varphi(\varepsilon)$ の位置に移動し $\mathbf{a}'(\mathbf{r}') = \varphi(\varepsilon) \cdot r \cdot \mathbf{t}$ に変わるということである。さらに, 繊維セグメントベクトル $\mathbf{C}$ にさかのぼってベクトル的に表示するならば,

$$\begin{aligned} \mathbf{C}'(\mathbf{r}') &= \varphi(\varepsilon) \cdot \overline{\mathbf{a}}(\mathbf{r}) + (1 + \varepsilon) \overline{\mathbf{b}} \\ &= \varphi(\varepsilon) \cdot r \cdot \mathbf{t} + (1 + \varepsilon) \overline{\mathbf{b}} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

(10)式の関係を図示すると, 第25図のようになる。ここで, 撚り回転角ベクトル $\mathbf{t}$ の大きさ $|\mathbf{t}|$ は幾何学的に紡績糸の撚り数 T と次のような関係がある。

第25図 糸の変形前と変形後の平均繊維セグメントベクトルの関係

$$|\mathbf{t}| = 2\pi \cdot T \cdot |\overline{\mathbf{b}}| \dots\dots\dots (11)$$

本実験の場合は $|\overline{\mathbf{b}}| = 80\mu$ であるから, (11)式より撚り数を計算すると $T = 0.57/\text{mm}$, 一方実測撚り数は $0.61/\text{mm}$ であった。

以上は繊維セグメントをベクトルとして, つねにその平均を考えてきたが, これだけで十分かどうか疑問が残る。たとえば, 繊維セグメントを単に長さとして考えた場合, その平均値 $\overline{\mathbf{C}}(\mathbf{r})$ は明らかに $|\mathbf{C}(\mathbf{r})|$ とは異なり,

$|\overline{\mathbf{C}}(\mathbf{r})| > |\mathbf{C}(\mathbf{r})|$ であるが, 糸の変形による長さの平均変化については, (2)式と(7)式が成り立つ以上, ベクトルの場合と全く同様に導くことができる。しかし, この両者の力学的効果の差は, 第2報での詳細な理論計算過程から容易に推察されるように, きわめて少なく, ほとんど問題とならない。

最後に, 射影ベクトルの糸断面内位置分布について述べる。第26図は, 糸の撚り中心 O から半径 r と $r + \Delta r$

第26図 射影ベクトルの位置に関する相対度数分布図

の円の間に含まれる射影ベクトル数の相対度数分布図である。ここで後の理論計算の都合上, この分布に最もよくあてはまる理論分布を検討した結果, レイリー分布を見出した。レイリー分布のあてはめは次のように行なった。

レイリー分布は,

$$\text{確率密度関数が, } p(r) = \frac{2r}{\lambda^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\lambda^2}\right) \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{分布関数が, } P(r) = \int_0^r p(r) dr = 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{\lambda^2}\right) \dots\dots\dots (13)$$

(ただし, λ は分布パラメーター)

で表わされるが, (13)式より

$$r^2 = -\lambda^2 \ln(1 - P(r)) \dots\dots\dots (14)$$

であるから, 第26図から, 第27図のような累積度数曲線 $P(r)$ を求め, r^2 と $1 - P(r)$ の対数が直線関係になるかどうか確かめる。その結果が第28図である。この直線から $\lambda = 0.965\text{mm}$ として求められる。なお, ここで注意すべきことは, 以上のような分布は, 多数の糸断面を単に撚り中心を基準に重ねあわせたものであるから, 単

第27図 射影ベクトルの位置に関する累積相対度数

第28図 レイリー分布のあてはめ

一の断面内の繊維セグメントの相互隣接関係，あるいは密度状態を示すものではない．先に述べたように，紡績糸の個々の断面はおおむね第15図のような形をしているが，あえて第15図のように，対称軸を定めて，多数重ねあわせた場合の分布図は第29図のようになり，密度状態

第29図 対称軸を定めた場合の射影ベクトルの位置の分布図

は予想以上に均一である．なお，このような繊維の隣接関係の力学的効果は，すでに考察した $\varphi(\varepsilon)$ に反映されるものであるから，ここでは r だけを問題にすれば十分である．

4. 総括

紡績糸の初期引っぱり変形過程における構造を観測し，統計的な解析を行なった．その結果，

(1) 十分短く切断された紡績糸の内部で，撚り中心から半径 r の位置にある任意の繊維セグメントをベクトル $\mathbf{C}(r)$ で表示すると，その平均 $\overline{\mathbf{C}(r)}$ は

$$\overline{\mathbf{C}(r)} = r \cdot \mathbf{t} + \overline{\mathbf{b}}$$

で表わされる．ただし， $\mathbf{t}$ は糸の撚り方向と回転角の大きさを表す定数ベクトルで，

$$|\mathbf{t}| = 2\pi \cdot T |\overline{\mathbf{b}}| \quad (T \text{ は撚り数}), \text{ また, } \overline{\mathbf{b}} \text{ は糸軸平行成分である.}$$

(2) 変形前 $\mathbf{C}(r)$ なる繊維セグメントベクトルは， ε なる糸の引っぱり変形によって，平均 $\overline{\mathbf{C}'(r')}$ に変わり， $\overline{\mathbf{C}'(r')} = \varphi(\varepsilon) \cdot r \cdot \mathbf{t} + (1 + \varepsilon) \overline{\mathbf{b}}$ で表わされる．ただし， $\varphi(\varepsilon)$ は糸の変形 ε による繊維セグメントの糸半径方向の位置の移動量を表す関数で，次のような実験式で表わされる．

$$\varphi(\varepsilon) = \exp(-\alpha \varepsilon - \beta) + \varphi_m$$

ここで

$$\varphi_m = \frac{\text{最密充填のときの糸径}}{\text{変形前の糸径}},$$

$$\beta = -\ln(1 - \varphi_m), \quad \alpha: \text{定数}$$

(3) 糸内の繊維セグメントの位置の分布は，レイリー分布で近似できる．

次報では，以上の解析結果をもとに紡績糸の初期引っぱり変形時の力学的非線形性の理論的解析を試みる．

本研究は昭和42年5月，本学会年次大会で発表したものの一部である．

文献

- 1) M.M. Platt; Text Res. J., **10**, 1 (1950)
- 2) 山口，川端，河合；繊維機械学会年次大会講演 (1966)
- 3) 丹羽，川端，河合；本誌 **19**, T157 (1966)
- 4) J.W.S. Hearle, O.N. Bose; Text. Res. J., **35**, 693 (1965)
- 5) J.W.S. Hearle, O.N. Bse; J. Text. Inst., **57**, T294 (1966)