(昭和 45 年 1 月 7 日 受理)

織物のせん断変形時に生じる交差糸の抵抗トルクに関する研究*

奈良女子大学 丹羽 雅子**

京都大学工学部 川端 季雄***・河合 弘迪***

TORQUE REQUIRED FOR CHANGING INTERSECTING
ANGLE BETWEEN WARP AND WEFT YARNS IN
SHEAR DEFORMATION OF WOVEN FABRICS

By Masako Niwa**, Sueo Kawabata*** and Hiromichi Kawai***

**(Department of Clothing Science, Nara Women's
University, Nara City, Nara Prefecture, Japan)*** (Department of Polymer Chemistry, Kyoto
University, Sakyo-ku, Kyoto, Japan)

Previously, the shear deformation theory which covers general shear deformation composed with biaxial tensile and shearing in finite deformation, has been developed by the authors.

In this theory, the moment for rotating the intersecting angle between warp and weft yarns was characterized by five constants by following linear approximation formula.

$$T_r = \pm T_{r0} \pm C_1 F_c \pm C_2 F_c \phi + C_3 \phi + C_4 \phi F_c$$

As we have no theoretical knowledge about these constants at this stage, it is important to obtain these constants by experimental method.

In this paper, a method for obtaining these constants from yarn measurement is studied. Two yarns are crossovered with each other, and compressible force F_c is applied at the cross-over point, and the torque T_r required for changing the intersecting angle ϕ is measured as a function of ϕ and F_c .

Several kinds of samples are measured and it has been confirmed that the linear approximation formula is sufficient for practical calculations using the shear deformation theory.

In above formula, C_1 , C_2 and T_{r0} are the constants related to the yarn property which is concerned with some frictional effect on contact area of these yarns accompanied by the change of ϕ . C_1 represents the pure frictional effect, but T_{r0} and C_2 have more complicated characteristics. The effect of mechanical entanglement of fibres in the contact area may be represented by T_{r0} and C_2 .

On the other hand, C_3 and C_4 characterize the elastic behaviour. It was found that C_2 takes very small value compared with the others and was negligible, and also found that the values of C_3 and C_4 measured from this direct method must be corrected for practical use.

Since these constants are obtained experimentally by this method as a yarn property, the mechanical behaviour of fabrics in general shear deformation state can be calculated theoretically.

(Received January 7, 1970)

1. 緒 言

一般に、織物のせん断変形特性は、たて糸、よこ糸方

向に沿う引張特性に比較して非常に変形しやすい特性を示すのが特長である。これは織物がたて糸、よこ糸方向に構造主軸をもつ直交異方性体であることを同時に意味するが、この異方性を明らかにするうえにもせん断特性の解析は重要である。このようなせん断変形特性は、それを構成するたて糸とよこ糸の交差角が容易に変角する

* この報文を「平織物のせん断変形に関する研究(第1報) Studies on the Shear Deformation Properties of Plain Woven Fabrics (Part 1)」とする。

ことに基いている。

従来における織物のせん断変形に関する研究は、その初期において B. Mörner と Eeg-Olofsson¹⁾ ついで B. Behre²⁾ によって測定法に関する研究がなされた。これらの測定法は、いずれもせん断荷重のほかに、せん断方向と交差する糸の配列方向に一定荷重を与えて織物に張力を加えた状態でせん断力を測定する方式である。このうち、変形後もつねに変形前の糸の配列方向に一定荷重を与える方式が B. Mörner と Eeg-Olofsson の方法であり、変形状態での糸の配列方向（せん断変形のため、初期の方向とせん断角だけずれている）に一定荷重を与えるのが B. Behre の方法である。

L. R. G. Treloar³⁾ や S. M. Spivak^{4,5)} は前者の方法と原理的に同じ方法で、織物のせん断荷重-せん断ひずみ特性の解析のための新しい測定方法を立案し、織物のせん断変形挙動におよぼす試料片の大きさや荷重の影響、座屈を生じる臨界荷重におよぼす試料の寸法効果などを検討し、せん断変形の機構を定性的に検討している。しかしせん断変形機構の理論的解析まではおよんでいない。

P. Grosberg ら^{6,7)} は後者の方法、すなわち B. Behre の装置を用いて織物のせん断変形特性を測定し、この特性を糸の力学的性質と織物構造の幾何学的パラメータとの関連において理論的に解析し、両者の間により一致を得ている。また、R. L. Shishoo や B. Olofsson⁸⁾ も B. Behre の装置を用いてせん断挙動や織物構造の幾何学的形態におよぼす熱処理効果について実験し考察を加えている。しかし、以上の諸研究や、その他⁹⁻¹³⁾ はいずれも織物の変形をきわめて小さく限定し、さらに非現実的な仮定が多く、また限られた変形様式にしか適用できない。そしてそれらはすべてせん断方向と直交に強制伸長荷重を加えた状態でのせん断変形挙動を検討してきたものである。

筆者らは、さらに一般的な織物のせん断変形理論をつくり上げ^{14,15)}、平面張力状態でのせん断変形特性の解析を行ない、その特性を糸の力学的特性と織物構造とから理論的に導いた。すなわち、平織物に面内二軸強制変形を与えた状態でのせん断変形特性および、同じく強制荷重を与えた状態でのせん断変形特性について解析しており、もちろん特別な場合として前述の B. Mörner らや B. Behre の方法のような変形様式を含んだ理論である。

この平織物のせん断変形理論では、理論計算のために与えられるべき条件として、糸の伸長特性、横圧に対する圧縮特

性のほかに、たて糸、よこ糸の交差部分における糸の交差角変化に対する抵抗トルクの特性がある。この特性は糸の表面摩擦が主になるようであるが、前二者に比較するとその性格は複雑であり、また測定も困難である。しかし、せん断変形特性の主要な部分を示める特性であるので、これも糸の一つの特性として織物と切り離して計測したい特性である。

本報では、まず糸の交差角変化に対する抵抗トルクをいくつかの定数で性格づける方法を論じ、それら定数の誘導方法について検討する。まずこのトルクを直接測定するための装置を試作して実測を行ない、実測値からトルク定数を決定する方法を検討する。他方において、織物のせん断変形特性から逆に誘導することもできるが、その方法も述べ、両者の方法で求めたトルク定数について比較検討したい。そして、糸のこのような特性を繊維の性質および繊維の集合構造と関連づけて考察する。

2. 理 論

2.1 セン断変形理論と抵抗トルク定数

まずはじめに、織物のせん断変形について筆者らの理論^{14,15)}においてこの抵抗トルクがどのように導入されたかを述べておきたい。

織物構造の特長は、たて糸とよこ糸の交差部分での交差角変化に対しての抵抗が小さいことで、織物をせん断変形させたとき糸の曲げはほとんど無視できることが多い。このことに関して、S. M. Spivak ら⁵⁾ も観測しているが、第1図のように観測される。

すでに、われわれはせん断変形理論において次のような仮定を設けている。

仮定 (1) 織物のせん断変形によって、たて糸とよこ糸の交差点における糸の構造中心線間の交差角変化が生じるが、構造中心線（第2図参照）は曲がらない。

仮定 (2) 仮定 (1) の交差角変化のみによって糸の屈曲角は変化しない。

Fig. 1. Plain woven fabric under deformation.

- (a) Undeformed state.
- (b) Deformed state.

Fig. 2. Structural center lines of plain woven fabric.

- (a) Structural center line.
(b) Structural center lines of warp and weft directions.

Fig. 3. Coordinate system.

- (a) Coordinate system for undeformed state.
(b) Coordinate system for deformed state.

すなわち、仮定 (1) より、たとえば織物にたて糸、よこ糸方向の張力 F_1, F_2 を与えると糸の屈曲角はその張力に釣合う新しい屈曲角をとる。この状態でせん断変形を与えると、すなわち、交差角が変化しても屈曲角はせん断変形前の状態を保つ。

織物では第2図および第3図(a)に示すように、たて糸とよこ糸の構造中心線は同一平面内で互いに直交する直線群をつくる。

織物のせん断変形は、第3図(a)のように変形前、直交座標系 X_1, X_2 の軸方向にそれぞれたて糸、よこ糸の構造中心線が沿うものとする。せん断変形は、一般には第3図(b)のように伸長変形も同時に受けた場合を考える必要がある。この変形は新しい座標系 x_1, x_2 を用いる。ただし、 x_1 軸、 x_2 軸はそれぞれ、たて、よこ方向の糸の構造中心線が沿うように選んでいる。

平織物の単位構造として、第3図に点線で囲んだ部分を考える。この単位構造を取り出して示したのが第4図で、単位構造でのせん断変形時の外力と内力との釣合いを

第4図(b)に示している。上述の仮定 (1), (2) に従い、力の平衡状態では、交差角変化に要するトルクによって生じる偶力 F_{tr1}, F_{tr2} と織物のたて、よこ糸方向に働くそれぞれの引張力 F_1, F_2 の4つの力がせん断力 F_{s2} と釣合う。この釣合いからせん断ひずみとせん断力との関係が導かれる^{16,16)}。引張力は糸の引張特性から測定できるが、問題はこのトルク特性にある。

このトルクは、 X_1 軸に沿う糸を固定し、静かに X_2 軸に沿う糸のみを構造中心線を含む面内で回転するときの回転に要するトルクとして定義する。ここで、トルク T_r と偶力 F_{tr1}, F_{tr2} との関係は次式ようになる。

$$T_r = F_{tr1}y_1 = F_{tr2}y_2 \quad (1)$$

ただし、 y_1, y_2 は x_1 軸、 x_2 軸方向の織物の単位構造の長さで、これは織物が伸長すると変化する量である。

このトルクは、たて糸とよこ糸の交差点に働く摩擦に基づくことがまず考えられるが、糸が一般に繊維の集合体であり、かつバルク性を有するので、両糸の接触点もしくは接触面付近において一部の繊維が引張り、ねじれなど弾性的にひずむ局所的弾性ひずみからもたらされる弾性トルクも考えられるなど複雑である。

この摩擦トルクや局所的弾性ひずみのいずれにも繊維の形状や力学的性質が直接関係するが、ここではこのトルク特性は糸の特性の一つであり、交差点でたて糸とよこ糸が互いに押し合う力 F_c と交差角 ϕ の関数であると考えてみる。すなわち

$$T_r = f(F_c, \phi) \quad (2)$$

関数 f は繊維の性質や糸構造によって異なる。特に、 $F_c = 0$ のときの T_r を零トルクと称し、 T_{r0} で表わすこととする。ただし、 T_{r0} は圧力はなくとも接触が密であれば糸の立体的幾何学構造によって繊維がからみ合って生まれるトルクを考えて設けたものである。

Fig. 4. Unit structure model and its shear deformation

- (a) Undeformed state.
(b) Deformed state.

Table 1. Predicting torque by linear approximation.

T_r	1. Frictional torque at the intersection by fibre to fibre friction during at the contact surface of two yarns.	Frictional component at $F_c=0$. ————— T_{r0}
		Frictional component which is proportional to F_c ————— $C_1 F_c$
		Component which is independent from ϕ . ————— $C_2 F_c \phi$
		Component which depend to ϕ . ————— $C_3 \phi$
	2. Elastic torque caused by local elastic deformation of fibres at the contact area.	Component which is proportional to ϕ . ————— $C_4 \phi F_c$
		Component which is proportional to ϕ and F_c . ————— $C_5 \phi F_c$

予想される関数 $f(F_c, \phi)$ を F_c と ϕ の線形項と一次の相互作用項を含む次式で近似する。

$$T_r = \pm T_{r0} \pm C_1 F_c \pm C_2 F_c \phi + C_3 \phi + C_4 \phi F_c \quad (3)$$

ただし, T_{r0} , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 はいずれも定数で糸の特性値である。上述のように抵抗トルクを一次近似で示すことは第1表に示すような思考に基づいている。

(3) 式より

$$T_r = \pm T_{r0} \pm (C_1 + C_2 \phi) F_c + (C_3 + C_4 F_c) \phi \quad (4)$$

(3) 式の右边第1～3項および(4)式の同じく第1, 2項の正負は第1表に示したように, この項は摩擦に基づく項であるので, ϕ の増加過程で正, 減少過程で負をとる。

(3) 式に含まれる定数は繊維固有の性質および繊維の形態や繊維の集合構造に基づくものと考えられるが, これらの定数は糸固有の特性として繊維とは切離して測定する方法をみつける必要がある。この方法は次節で示すが, 逆に繊維のせん断変形特性の実測値からこれらの T_r 定数を決定することもでき, 二つの方法で求めた結果の確認もできる。この方法もあわせて述べる。

2.2 トルク定数の求め方

T_r が ϕ と F_c の関数として実測されたものとする。これより(3)式の成立を仮定してトルク定数は次のように決定される。まず(3)式を ϕ に関して偏微分し,

$$\frac{\partial T_r}{\partial \phi} = C_3 + C_2 F_c \quad (5)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} C_F &= C_1 + C_2 & \phi \text{ の増加過程のとき} \\ &= C_1 - C_2 & \phi \text{ の減少過程のとき} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(5) 式より $\partial T_r / \partial \phi$ と F_c の直線関係の切片は C_3 を与え, また, ϕ の増加, 減少過程のそれぞれの直線の勾配は C_2 を与える。そして, 増加, 減少の二過程の C_F 値を(6)式に代入して C_2 , C_4 を決定できる。

次に, (3) 式を F_c に関して偏微分し,

$$\frac{\partial T_r}{\partial F_c} = \pm C_1 + C_F \phi \quad (7)$$

(7) 式より $\partial T_r / \partial F_c$ と ϕ の直線関係の切片より C_1 が決定でき, また ϕ の増減二つの直線の勾配より C_2 , C_4 が決定でき, これはすでに前述のように求まっている値であ

り, ここで繰返してその値の確認ができる。

T_{r0} を求めるには, (3) 式において $\phi=0$ として得られる次式

$$T_r = \pm T_{r0} \pm C_1 F_c \quad (8)$$

の関係を利用する。 $\phi=0$ における F_c と T_r の関係がわかればよいが, $\phi=0$ における T_r の値は測定が困難であるから, $T_r-\phi$ の関係の $\phi=0$ での外挿値を用いる。異なる F_c 値での $T_r-\phi$ 関係より各外挿値から $\phi=0$ における F_c-T_r の関係は容易に得られる。

また, 同様に T_r-F_c の関係より $F_c=0$ に外挿して求めた T_r と ϕ との関係より

$$T_r = \pm T_{r0} + C_3 \phi \quad (9)$$

このように T_{r0} も (8), (9) 式のいずれかを用いて求めることができる。さらに C_1 , C_3 も (8), (9) 式より求まる。

2.3 トルクの直接測定と定数決定法

第5図のように, 糸を交差させ, かつ交差圧を変えて交差角変化に対する抵抗トルクを測定する。ここで, PQ , RS は実際の繊維の糸間隔に等しくするのが理想であるが, 実際の間隔はきわめて微小で, RS を拡大しないと測定が困難である。そこで, 実際の糸を2本交差

Fig. 5. Measurement of torque under given lateral compressive force F_c on the intersection area of warp and weft yarns.

させて用いるが、織物の単位構造の糸間隔を約 10 倍に拡大した模型を用いてトルクを測定する方法をとる。第 6 図は測定装置の外観で第 7 図はその原理図である。

交差点でたて糸とよこ糸が互いに押し合う力 F_c は第 6 図のように分銅で与え、第 7 図のように糸 Y_1, Y_2 を直角に交差させ、実際の織物構造の平均的な屈曲角 60° を θ に選ぶ (考察の項参照)。糸の上部ホルダー H_1 を中心線 A, B のまわりに回転させながら R 点を保持する力 F_{tr} を電氣的に力計を用いて連続測定し、記録するが、 T_r はこれより次式を用いて計算できる。

$$T_r = F_{tr} RS/2 = F_{tr} RO \quad (10)$$

Fig. 6. The apparatus for measuring torque.

Fig. 7. Schematic diagram of the apparatus for measuring the torque.

(a)

(b)

Fig. 8. Model of local elastic deformation of fibres at the contact area of warp and weft yarns.

(a) Undeformed state.

(b) Deformed state.

ここで、測定の際には第 7 図の PQ, RS を実際の織物構造における糸間隔と等しくすることは技術的に困難であるから糸間隔より大きくとらなければならないが、ここでは測定操作上、糸間隔の約 10 倍にして測定している。ここで一つの問題が生じる。すなわち、前述したように、 T_{r0}, C_1, C_2 は摩擦に基づく T_r 成分を定める定数で、これらの T_r 定数には PQ, RS の大きさは関係しないと思われるが、 C_3, C_4 は弾性抵抗を表わす定数で、この弾性は第 8 図のように、交差する糸が回転すると繊維がひきつれることから生れるものと推定される。このひきつれの量は回転角 ϕ に依存するので、繊維に生じるひずみ ϵ は糸長すなわち織物の糸間隔 y_0 によって変る。

いま、織物の糸間隔を y_0 とし、第 9 図の poq の繊維に着目すると、糸の交差角変化によってこの繊維は、 p 点が p' 点へ、 q 点が q' 点にそれぞれ移動してひきつれが生じる。このひきつれ量は回転角 ϕ が微小のときはこれに比例する一次近似を仮定する。回転角を ϕ とすると

$$\overline{p'o} - po = k\phi \quad (11)$$

ただし k は定数である。一方、繊維の伸びひずみ ϵ は

$$(\overline{p'o} - po)/po = k\phi/po = \epsilon \quad (12)$$

定数 C_3, C_4 はこの繊維のひずみ ϵ に比例するものと考えたと、(12) 式より

Fig. 9. Local elastic deformation of fibres at the contact area of warp and weft yarns.

$$C_3, C_4 \propto 1/\rho_0 \quad (13)$$

したがって、この測定装置によって求めた糸の T_r 定数、 C_3, C_4 に関しては、織物の糸間隔 y_0 によって次のような補正が考えられる。

$$\bar{C}_3 = \bar{R}\bar{O}/y_0 \cdot C_3 \quad (14)$$

$$\bar{C}_4 = \bar{R}\bar{O}/y_0 \cdot C_4 \quad (15)$$

ただし、 C_3, C_4 は $\bar{R}\bar{O}$ を実際の構造のそれより大きくとって測定した値である。本測定装置では、

$$\bar{R}\bar{O} = \bar{S}\bar{O} = \bar{P}\bar{O} = \bar{Q}\bar{O} = 0.5 \text{ cm} \quad (16)$$

である。

たて糸密度とよこ糸密度の異なる織物の場合、すなわち y_{01} と y_{02} が異なる値をとるときは、大きい y_0 値を用いた。

2.4 織物のせん断変形特性を利用する誘導法

織物のせん断変形特性は、せん断変形様式により異なるが、織物に加える伸長荷重のせん断力への寄与分と糸の交差角変化に対する抵抗トルクに抗する偶力の寄与分とから成る。したがって、せん断変形特性の実測値とそのときの織物の張力がわかれば偶力が求まり、 T_r と ϕ の関係が得られる。この T_r と ϕ の関係および織物の二軸伸長変形理論^{15,16,17)}より、トルク定数を次のように決定できる。

(1) 強制伸長変形下でのせん断変形特性からの誘導

第10図のような織物のせん断変形様式、すなわち X_1 軸、 X_2 軸方向に A_1, A_2 の強制伸長変形を与えた状態でのせん断変形様式において、せん断角 ϕ とせん断力 F_{s2} の関係が実測によって求めたものとする。いま、 X_2 軸方向に任意の伸長比 A_2 を与え、 X_1 軸方向の伸長比 $\lambda_1 = 1$ として、この状態を保持して ϕ のせん断角を与える場合をとりあげると、このときの F_{s2} は第4図に示した外力と内力の釣り合いより

$$F_{s2} = F_{tr2} \cos \phi + F_2 \sin \phi \quad (17)$$

として表わされる^{14,15)}。

ここで、 F_2 は仮定 (1), (2) より織物が構造主軸方向のみの引張変形を受けるとして、織物の X_1 軸を拘束して X_2 軸方向に伸長したときの荷重—伸長特性より求めることができる。 x_1, x_2 軸方向の織物の伸長比 λ_1, λ_2 は次式の関係で計算できる。

Fig. 10. The case of given A_1, A_2 and ϕ in shear deformation.

$$\lambda_1 = A_1 = 1 \quad (18)$$

$$\lambda_2 = A_2 / \cos \phi \quad (19)$$

したがって、せん断角 ϕ に対する λ_1, λ_2 を (18), (19) 式で計算し、また F_1, F_2 は実測または理論計算により織物の二軸伸長特性から求めることができる。このとき同時に計算によって交差圧 F_c も求まり、結局次の3つの関係が判明する。

$$F_1 = g_1(\lambda_1, \lambda_2) \quad (20)$$

$$F_2 = g_2(\lambda_1, \lambda_2) \quad (21)$$

$$F_c = \Phi(\lambda_1, \lambda_2) \quad (22)$$

平織物の二軸伸長変形理論^{15,16)}およびその測定法¹⁷⁾に関してはずでに筆者らによって明らかにされている。

近似的に F_c を計算する簡便法としては、 $\lambda_1 = 1$ として λ_2 を与えたとき λ_2 と F_2 との関係（この関係は実測してもよいし、理論計算もできる）をなす曲線を用いて次式で求まる。

$$F_c = 2 F_2 / (\lambda_2 \tan \theta_{02}) \times 0.8 \quad (23)$$

ここで、 θ_{02} は伸長前の糸の屈曲角で、織縮み率 S_2 を用いて次式で計算する。

$$\theta_{02} = \sin^{-1} \{1 / (S_2 + 1)\} \quad (24)$$

(23) 式の右辺の 0.8 は補正係数で、たて糸、よこ糸の交差点で両糸は交差圧 F_c によって圧縮するための構造変化を導入して理論的に得た係数で伸長比 λ_2 の比較的小さい範囲に適用できる。

F_{tr2} は (1) 式より

$$F_{tr2} = T_r / y_2 \quad (25)$$

ここで、

$$y_2 = \lambda_2 y_{02} \quad (26)$$

(17) 式に (25), (26) 式を代入して

$$T_r = (F_{s2} - F_2 \sin \phi) \lambda_2 y_{02} / \cos \phi \quad (27)$$

(27) 式に、 A_1, A_2 の変形下での ϕ に対する F_{s2} の実測値を代入し、さらに ϕ に対する λ_1, λ_2 を (18), (19) 式より求める。また、二軸伸長変形理論または実測値より λ_1, λ_2 の伸長に対応する F_2 を求めると (27) 式より ϕ に対する T_r の関係が得られ、また F_2 に対する F_c が (23) 式より求まるので、 F_c と T_r の関係も求まる。

このようにして求めた T_r と ϕ および F_c の関係から、(3) 式を適用して各トルク定数を決定することができるが、ここですべての定数を決定するには少なくとも2つの変形様式を用いなければならない。

具体例を示すと、 $A_1 = 1, A_2 = 1$ の条件下でのせん断変形特性 (a) と $A_1 = 1, A_2$ を1より大きいある一定値にとったときのせん断変形特性 (b) をとる。これは、変形様式が測定しやすいからである。いずれも ϕ の増減両過程の描くヒステリシス曲線を測定しておく。(a) では $\phi = 0$ のとき $F_c = 0$ となり、このときの F_{s2} を (27)

式に入れて求めた T_r が T_{r0} である。ただし、 $\phi=0$ での F_{s2} は実測の場合は外挿法で得る値をとる。以下同様である。

(b) の測定結果から、 $\phi=0$ のときの T_r とすでに得た T_{r0} を次式に代入して C_1 が求まる。

$$T_r = T_{r0} + C_1 F_c \quad (28)$$

次に、(a), (b) の結果より任意の ϕ を定め、これに対する ϕ の増減過程における T_r と先に求めた T_{r0} , C_1 を (3) 式に入れて C_2 , C_3 , C_4 を未知数として含む連立方程式が得られるがこれを解けば C_2 , C_3 , C_4 がそれぞれ決定できる。

(2) 強制伸長荷重下でのせん断変形特性からの誘導

第 11 図に示すようなせん断変形様式、すなわち X_2 軸方向に W_2 の強制伸長荷重を与え、これを一定に保持したせん断変形特性の実測値からも若干の近似を用いて次のような方法でトルク定数を求めることができる。

Fig. 11. The case of given A_1 , W_2 and ϕ in shear deformation.

強制伸長荷重時のせん断変形特性は次式で表わされる^{14,15)}。

$$F_{s2} = \{ \pm T_{r0} + C_3 \phi \pm (C_1 + C_2 \phi \pm C_4 \phi) k_2 W_2 / \cos \phi \} / \{ \cos \phi \lambda_2 y_{02} \pm (C_1 + C_2 \phi \pm C_4 \phi) k_2 \sin \phi \} + W_2 \tan \phi \quad (29)$$

(29) 式で、 ϕ が $0^\circ \sim 8^\circ$ のせん断角の範囲では、

$$(C_1 + C_2 \phi \pm C_4 \phi) k_2 \sin \phi \approx 0 \quad (30)$$

として、(29) 式は次式のように近似できる。

$$F_{s2} \approx \{ \pm T_{r0} + C_3 \phi \pm (C_1 + C_2 \phi \pm C_4 \phi) k_2 W_2 / \cos \phi \} / (\cos \phi \lambda_2 y_{02}) + W_2 \tan \phi \quad (31)$$

ここで、 $F_c \approx k_2 F_2$, $F_2 \approx W_2 / \cos \phi$ として (29) 式を誘導していることから

$$k_2 W_2 / \cos \phi \approx F_c \quad (32)$$

である。したがって、(32) 式を (31) 式に代入すると、

$$(F_{s2} - W_2 \tan \phi) \lambda_2 y_{02} \cos \phi \approx \pm T_{r0} + C_3 \phi \pm (C_1 + C_2 \phi \pm C_4 \phi) F_c \quad (33)$$

または、

$$(F_{s2} - W_2 \tan \phi) \lambda_2 y_{02} \cos \phi \approx \pm T_{r0} \pm C_1 F_c + (\pm C_2 F_c + C_3 + C_4 F_c) \phi \quad (34)$$

測定で求めた F_{s2} を用いて (34) 式の左辺を計算し、これとせん断角 ϕ との関係を図 12 のように図示すると、

Fig. 12. Relation between $(F_{s2} - W_2 \tan \phi) \lambda_2 y_{02} \cos \phi$ and ϕ which calculated from shear property of the fabric under forced tensile load.

ϕ の増減二過程の勾配 $\tan \alpha$, $\tan \beta$ は (34) 式から、

$$\tan \alpha = C_2 F_c + C_3 + C_4 F_c = C_3 + C_F F_c \quad (35)$$

$$\tan \beta = -C_2 F_c + C_3 + C_4 F_c = C_3 + C_F F_c \quad (36)$$

ただし、 C_F は (6) 式で表わされる。

いま、異なる 2 つの W_2 について、せん断変形特性を実測し、 ϕ の増加過程における勾配を求め、それぞれ $\tan \alpha(a)$, $\tan \alpha(b)$ とすると、

$$\tan \alpha(a) = C_3 + C_F F_c(a) \quad (37)$$

$$\tan \alpha(b) = C_3 + C_F F_c(b) \quad (38)$$

(37), (38) 式を解いて C_3 , C_F が得られる。同時に ϕ の減少過程における勾配 $\tan \beta(a)$, $\tan \beta(b)$ から C_3 , C_F が得られ、 ϕ の増加減少の二過程の C_F 値を (6) 式に入れて C_2 , C_4 が求まる。

一方、第 12 図のヒステリシスの幅を H とすると、(34) 式より、

$$H(a) = 2(T_{r0} + C_1 F_c(a)) \quad (39)$$

$$H(b) = 2(T_{r0} + C_1 F_c(b)) \quad (40)$$

(39), (40) 式より T_{r0} , C_1 が求まる。ただし、

$$F_c(a) \approx W_2(a) k_2 / \cos \phi \quad (41)$$

$$F_c(b) \approx W_2(b) k_2 / \cos \phi \quad (42)$$

(41), (42) 式に含まれる定数 k_2 は織物の二軸伸長変形理論から W_2 が比較的小さい範囲では織糸の屈曲角 θ は伸長前の屈曲角 θ_0 にほぼ近似した値をとるとして、次のように誘導できる。

$$k_2 = (2 / \tan \theta_{02}) \times 0.8 \quad (43)$$

ただし、 θ_{02} は (24) 式で求まる。(43) 式に含まれる補正係数 0.8 は (23) 式で適用したと同様の理由に基づく。

3. 測定結果の例

3.1 直接測定法による場合

第 2 表に示す試料について、糸の交差角変化に対する

Table 2. Details of samples.

Samples	Fibre contents	Yarn counts	Yarn twist (turns/m)	Fibre diameter		Mean number of the fibre in the yarn cross-section N
				$\bar{d} (\times 10^{-3} \text{cm})$	CV	
#1	Cotton	30's	612(z)	1.39	0.31	90.3
#2	Wool	30's	515(z)	2.03	0.25	41.6
#3	Polyester (spun)	30's	667(z)	1.43	0.20	75.2
#4	Polyester (filament)	200 den.	150(s)	2.62	0.08	30.0

抵抗トルクを次のような測定条件を選んで測定した。測定は、第7図のように糸 Y_1, Y_2 (それぞれ織物のたて糸, よこ糸と同じ糸を用いている) を直角に交差させ、糸の屈曲角は実際の織物構造の平均的な角度 60° を θ に選んだ。交差圧 F_c は、分銅で 1 g から 30 g まで変化させて与え、各 F_c において、 ϕ を 30° まで漸次増加させた後、逆に回転して F_{tr} のヒステリシス特性を実測し、回転速度は $30^\circ/\text{min}$ とした。

このようにして実測した F_{tr} と ϕ の関係を (10) 式により T_r と ϕ の関係に換算する。第13図は ϕ と T_r との関係を試料 #2 の羊毛糸の例について示している。

異なる F_c において $\phi=0$ 付近で T_r は急激に上昇し、以後 ϕ とともに直線的に増加し、ついで ϕ の減少につれて図のようなヒステリシスを描く。いずれの試料についても T_r は ϕ に対しても、また F_c に対しても直線関係を示すことが測定結果から明らかになり、(3) 式の近似

Fig. 13. Relation between T_r and ϕ measured by direct method for #2 (wool) sample.

Fig. 14. Relation between $\partial T_r / \partial \phi$ and F_c for #2 (wool) sample. C_2, C_3 and C_4 can be obtained from this reduced data.

の妥当性を示している。さらに、構成繊維の種類の違いによる T_r と ϕ との関係の差異も顕著に認められる。

このような T_r の測定結果より、第13図の例について、トルク定数の決定法を示す。

まず、第13図に示したように、 F_c をパラメータとした ϕ と T_r の関係の実測値から、各 F_c について $\partial T_r / \partial \phi$ を求め、これらと F_c との関係を第14図に示している。各試料ともに $\partial T_r / \partial \phi$ と F_c との間に図のような直線関係が成立し、これらの直線の勾配と切片から C_3, C_2, C_4 の値が (5), (6) 式を用いて求まり、その結果を第3表に示している。

次に、第13図の実測値より $\partial T_r / \partial F_c$ を求めるため、 ϕ をパラメータとして、 T_r と F_c の関係を再プロットしたのが第15図である。 T_r と F_c との間に直線関係が得られ、これから求めた $\partial T_r / \partial F_c$ と ϕ との関係は第16図で、図のたて軸の切片が C_1 である。

第15図に示した T_r と F_c との関係より、 $F_c=0$ に

Table 3. Torque constants measured by direct method.

Samples	Fibre contents	T_{r0} ($\times 10^{-3}$ g·cm)	C_1 ($\times 10^{-3}$ cm)	C_2 ($\times 10^{-3}$ cm)	C_3 ($\times 10^{-3}$ g·cm)	C_4 ($\times 10^{-3}$ cm)
#1	Cotton	1.95	1.52	-0.008	0.102	0.115
#2	Wool	0.65	0.79	-0.002	0.053	0.089
#3	Polyester (spun)	3.10	1.12	-0.029	0.100	0.194
#4	Polyester (filament)	3.92	5.56	-0.020	0.206	0.188

Fig. 15. Relation between T_r and F_c measured by direct method, this relation is obtained from Fig. 13.

における T_r を求め、この T_r と ϕ との関係を示している。各試料ともに図のような $F_c=0$ における T_r と ϕ との間に直線関係がみられ、(9) 式により、この直線の切片より T_{r0} 、その勾配から C_3 が得られる。

以上のようにして求めたトルク定数をまとめて示したのが第3表である。本測定に用いた試料のすべてについて、定数 C_2 は負の値をとるが、他の定数に比較してその絶対値がきわめて小さい値をとることから、(3) 式に含まれる定数のうち C_2 はほとんど無視してよい。これは各種試料系についても一般に無視できる量になるようである。以上の実験結果から、トルクは次式で表わされることが実験的に明らかになった。

$$T_r = \pm T_{r0} \pm C_1 F_c + C_3 \phi + C_4 \phi F_c \quad (44)$$

3.2 織物のせん断変形特性から導く場合

上記の直接測定により求めた各トルク定数の結果を確認するため、すでに述べた方法で織物のせん断変形特性から定数を導いてみた。ただし、この織物は特別な加工は施されていない。

Fig. 16. Relation between $\partial T_r / \partial F_c$ and ϕ for #2 (wool) sample. C_1 is obtained from this reduced data. Fig. 17. Relation between T_r and ϕ at $F_c=0$ for #2 (wool) sample. T_{r0} is obtained from this reduced data.

Table 4. The structure of the samples.

Samples	Fibre contents	Yarn density (cm ⁻¹)		Yarn crimp (shrinkage by weaving)	
		n_1	n_2	S_1	S_2
#1	Cotton	35.3	22.7	0.170	0.038
#2	Wool	34.1	22.5	0.118	0.036
#3	Polyester (spun)	34.9	21.0	0.130	0.018
#4	Polyester (filament)	35.8	20.2	0.088	0.015

第 10, 11 図に示したせん断変形様式により, 第 4 表に示す織物試料について, 二軸引張試験機¹⁹⁾を用いてせん断変形特性を実測した。織物のせん断変形特性の測定法に関しては別報^{19, 20)}を参照されたい。実験に用いた試料織物は第 2 表に示した糸を用いて製織している。

(1) 強制伸長変形下でのせん断変形特性から求めたトルク定数

第 4 表の試料織物に $A_1=1$, $A_2=1$ の強制伸長変形を

与え, これを保持してせん断変形を与えた場合と, $A_1=1$, $A_2=1.03$ の場合についてせん断変形特性を実測した。第 18 図は実測例である。

このような変形様式での織物の伸長状態は, A_1, A_2 を与えるとせん断角 ϕ と x_2 軸方向の織物の伸長比 λ_2 との関係が (19) 式により求まり, x_1 軸方向の伸長比は ϕ に関せずつねに $\lambda_1=1$ である。

Fig. 18. Experimental results of shear property of the stretched fabric by forced deformation for #2 (wool) sample.

Fig. 19. Relation between F_2 and λ_2 in the strip biaxial tensile deformation for #2 (wool) sample, the relation between F_2 and ϕ is also shown.

Table 5. Torque constants calculated from shear property of the fabric under forced tensile deformation.

Samples	Fibre contents	T_{70} ($\times 10^{-3}$ g·cm)	C_1 ($\times 10^{-3}$ cm)	C_2 ($\times 10^{-3}$ cm)	C_3 ($\times 10^{-3}$ g·cm)	C_4 ($\times 10^{-3}$ cm)
#1	Cotton	1.98	2.25	-0.012	0.988	1.211
#2	Wool	0.69	0.80	-0.002	0.486	0.833
#3	Polyester (spun)	2.88	2.44	-0.004	1.005	1.345
#4	Polyester (filament)	4.90	8.07	-0.012	2.130	1.641

織物に λ_1, λ_2 の二軸伸長変形を与えたときの F_2 と λ_2 との関係は、第 18 図に示した試料織物の場合、その実測値は第 19 図のようになる。また、このときの F_c と λ_2 の関係は (23) 式を用いて計算できる。

以上の ϕ に対する λ_2, F_2 とせん断変形特性の実測値 F_{s2} を (27) 式に入れて ϕ と T_r との関係が求まる。第 18 図のようなヒステリシス曲線から $\phi=0^\circ$ および $\phi=5^\circ$ における T_r を求めて、これらを (3) 式にそれぞれ代入し、 $T_{r0}, C_1, C_2, C_3, C_4$ を決定し、各試料の T_r 定数を第 5 表に示している。この場合も、3-1 の直接測定法による場合と同様、定数 C_2 は無視できることがわかる。

(2) 強制伸長荷重下でのせん断変形特性から求めたトルク定数

$W_2=15 \text{ g/cm}$ および 50 g/cm の強制伸長荷重を与えて、せん断角 ϕ に対するせん断荷重 F_{s2} を実測した。第 20 図はその実測例を示している。

第 21 図は第 20 図の実測値より (34) 式の左辺を求め、これと ϕ との関係を図示している。いずれの試料織物についても ϕ の増減 2 過程における第 21 図に示す勾

Fig. 20. Experimental results of shear property of the stretched fabric by forced load for #2 (wool) sample.

Fig. 21. Relation between $(F_{s2} - W_2 \tan \phi) \lambda_2 y_{02} \cos \phi$ and ϕ , these relations are obtained from Fig. 20.

配 $\tan \alpha, \tan \beta$ はほぼ近似した値をとることより、(35), (36) 式に含まれる定数 C_2 が 0 に近い値をとることがわかる。また、このことは直接測定法による結果とも一致し、 C_2 はほとんど無視できると考えて、

$$\tan \alpha(15) = C_3 + C_1 F_c(15) \quad (45)$$

$$\tan \alpha(50) = C_3 + C_1 F_c(50) \quad (46)$$

とおき、(45), (46) 式より定数 C_1, C_3 を決定した。一方、 $\phi=5^\circ$ におけるヒステリシスの幅を第 21 図から読みとり、これらを (39), (40) 式に入れて T_{r0}, C_1 を求めた。これらの結果を第 6 表に示している。第 5, 6 表ではいずれの試料においても各定数ともに近似した値を得ていることがわかる。

4. 考 察

たて糸、よこ糸の交差角変化に対する抵抗トルクを(3)式で近似し、実験に用いた各種の試料について(3)式の成立することを確認した。そして、抵抗トルクは結局(44)式で表わされることを実験的に捉えた。

直接測定法によって得られたトルク定数の確認のためにせん断変形特性の実測値から逆算したトルク定数と比較してみる。

Table 6. Torque constants calculated from shear property of the fabric under forced tensile load.

Samples	Fibre contents	T_{r0} ($\times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}$)	C_1 ($\times 10^{-3} \text{ cm}$)	C_2 ($\times 10^{-3} \text{ cm}$)	C_3 ($\times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}$)	C_4 ($\times 10^{-3} \text{ cm}$)
#1	Cotton	2.01	2.47	0	0.813	1.080
#2	Wool	0.71	0.76	0	0.532	0.782
#3	Polyester (spun)	3.28	2.47	0	0.933	1.211
#4	Polyester (filament)	6.89	7.28	0	2.681	1.574

4.1 直接法および逆算法によるトルク定数の比較

実際の織物にみられる糸の交差状態のように、2本の糸を互いに交差させてトルクを測定した第3表の結果と、逆算法によって織物のせん断変形特性から求めた第5, 6表の結果を比べると、定数 T_{70} , C_1 の値については大差ないことがわかる。しかし、定数 C_3 , C_4 については直接法による値を約 10 倍した値が逆算法によって得た値に一致する。

弾性成分である C_3 , C_4 は織物の糸間隔と、それに相当する本装置の $\bar{R}\bar{O}$ または $\bar{S}\bar{O}$ とが相違するため、異なってくるものと思われる。すなわち、本実験の $\bar{R}\bar{O}$ または $\bar{S}\bar{O}$ が 0.5 cm であるのに対して、実際の織物では約 0.045 cm である。

2.3 で述べた理由から、 C_3 , C_4 に関しては (14), (15) 式を用いて直接測定法で得た値を補正すると両者はほぼ一致した値をとることから、この補正はほぼ正しいものと思われるが、もちろん厳密にはきわめて粗い推定によ

る補正である。

すでに述べたように、これらの定数が定まると、織物のせん断変形特性が理論計算できるが、第 22 図は直接法によって求めた定数のうち、 C_3 , C_4 については前述の構造による修正を加え、これらを用いて強制伸長荷重下でのせん断変形特性を (29) 式により計算した理論計算曲線を点線で、第 6 表に示した逆算法によるトルク定数を用いて、同様に (29) 式で計算した特性を一点鎖線で、実測曲線を実線でその一例を示している。表にみられるようなトルク定数の 2 つの測定法による差異は実際の計算結果には大きくくひかない程度であることがわかる。このような結果は他の試料についても同様の結果が得られた。すなわち、直接法によって求めた定数を用いてせん断変形特性の理論計算を行なうと、かなり精度の高い結果の得られることが認められた。

4.2 トルク定数の物理的意味

次に、各トルク定数について、その物理的意味ならびにこれらを理論的に誘導する方法について検討してみよう。

まず、摩擦成分である C_1 に関しては次のように考えられる。織物のたて糸、よこ糸の交差部分において糸の接触面は第 23 図のように円であり、かつ交差圧 F_0 は均等であると仮定し、交差部分の接触半径 R を糸の太さ

Fig. 22. Comparison between the theoretical and experimental results of shear property under forced tensile load for #2 (wool) sample.

Fig. 23. Circular model of contact area.

Table 7. Some estimated values of the torque constants.

Samples	Fibre contents	μ	D^* ($\times 10^{-3}$ cm)	$2/3 \cdot D/2 \cdot \mu$ ($\times 10^{-3}$ cm)	E ($\times 10^{-6}$ g/cm ²)	EI^* ($\times 10^{-6}$ g·cm ²)
#1	Cotton	0.23	15.2	1.17	89.4	26.3
#2	Wool	0.16	15.1	0.81	37.8	43.7
#3	Polyester (spun)	0.38	14.3	1.81	91.2	23.3
#4	Polyester (filament)	0.34	16.5	1.87	92.7	223.0

* Calculated by assuming the circular cross-section of fibres.

D の $1/2$ に等しいとみなして、摩擦による回転トルク T_{rf} を考えると、 T_{rf} は

$$T_{rf} = \mu R F_c / 2/3 \quad (47)$$

となり、繊維の摩擦係数 μ と R および交差圧 F_c を (47) 式に代入して求まる。そこで、(47) 式の $\mu R / 2/3$ は交差圧 F_c に比例する摩擦成分の定数 C_1 に相当するものと考えられる。すなわち

$$C_1 \approx \mu R / 2/3 \approx \mu D / 3 \quad (48)$$

ここで、 D は繊維が最密充填したときの糸の太さとし、次式で求まる。

$$D = (d \sqrt{12N-3}) / 3 \quad (49)$$

ここで、 d および N は第 2 表に示した繊維の直径および糸の断面繊維本数である。

直接測定法により求めたトルク定数 C_1 と比較するために、(48) 式を用いて計算した値を第 7 表に示している。両者間かなり密接な関係のあることが認められ、定数 C_1 は (48) 式でほぼ推定できるのではないかと考えられる。

定数 T_{r0} は、 $F_c = 0$ でも接触が密であれば糸の幾何学的な立体構造の交絡によって生まれる抵抗トルクと考えられることはすでに述べたが、これらには繊維の摩擦係数 μ も直接関係しているように思われる。また、糸を構成する繊維と繊維とのひっかかりや交差部分の繊維のかさ高さなどにも関係すると考えられる。

抵抗トルクのうち弾性成分については、 C_3, C_4 で表わされるが、これらは繊維の弾性係数 E 、曲げ剛性 EI などが関係するよう思われる。第 7 表に示すように、 C_3 には弾性係数 E がほぼ比例的に関係しているようである。

C_4 に関しては、第 8 図にみられるように、糸を構成する繊維の交差部分で部分的なねじれやひきつれが生じ、第 9 図のような単位構造において第 8 図の写真にみられるような現象が生じること起因して生まれるトルク定数と考えられる。したがって、この定数には EI および μ の両者が関係するのではないかと考えられる。そして、糸 1 本交差させて繊維の単位構造の約 10 倍拡大の装置を用いて測定した結果から得られる C_3, C_4 は繊維のせん断変形特性から逆算して求めたこれらの値の約 $1/10$ に相当する事実、 C_3 および C_4 が第 8 図にみられる現象から生じるものであることを裏付けているといえる。

4.3 トルク直接測定法に関する問題点

糸の交差角変化に対する抵抗トルクを実測するに際して次のような問題点がある。

その一つは、交差糸の屈曲角を 60° として実験していることである。交差圧 F_c の増加につれて糸は伸長し、屈曲角は次第に減少することになり、現実の繊維構造で

は逆の現象が生じる。このため、屈曲角がトルク定数にどの程度の影響をおよぼすかについて検討した結果、 $60^\circ \pm 5^\circ$ では、 F_{tr} は実験誤差の範囲内でトルク定数にはほとんど影響しないことを確かめている。

F_c の変化に伴う糸の屈曲角変化は厳密には、織物の二軸伸長変形理論¹⁶⁻¹⁷⁾を用いて計算できるため、トルクの測定に際して、各 F_c ごとに計算で求めた屈曲角を適用することもできる。しかし、実験操作上煩雑になり、実用的でなくなるおそれがある。

以上のように、現在の段階では、糸の交差角に対する抵抗トルクは理論的に誘導する段階には至らないが、現象的には以上のようにして実験的に捉えることが可能である。そして、このようにして求めたトルク定数を用いて織物のせん断変形特性を理論計算し、実測結果をきわめて精度よく予測できることについては別報で述べる。

5. 結 語

すでに開発した平織物のせん断変形理論を実際に応用するに際して、糸の力学的特性として糸の交差角変化に対する抵抗トルクを実測し、これを糸の特性として与える必要がある。

本報では、まず実験的に糸の交差圧 F_c を与えてトルクを測定する方法を考え、測定装置を試作した。そして、これにより各種の繊維から成る糸の抵抗トルクを実測した。他方、織物のせん断変形特性からトルク定数を導く方法についても検討した。これは前記の直接法で得られる測定値確認のためである。

さて糸、よこ糸の交差角変化に対する抵抗トルクを (3) 式で近似できるとし、すなわち

$$T_r = \pm T_{r0} \pm C_1 F_c \pm C_2 F_c \phi + C_3 \phi + C_4 \phi F_c$$

実測結果から、すべての試料について (3) 式の成立することを確認した。そして、(3) 式に含まれる定数を求めた結果、定数 C_3 は無視でき、抵抗トルクとして交差圧 F_c に比例する摩擦トルク (定数 C_1) のほか F_c に無関係の摩擦トルク T_{r0} の存在が明らかになった。また、糸と糸との接触面での繊維間の部分的な引張りやよじれなどによる局所的弾性ひずみもたらすトルク定数 C_3, C_4 が定量的に得られた。

これらのトルク定数を理論的に繊維の力学的特性や繊維の形態、その集合構造などから誘導する段階には至らないが、本測定により現象的に捉えることができた。

本報文の一部は昭和 43 年 5 月日本繊維機械学会第 21 回年次大会において発表した。

終りに、本研究に対して種々の有益なご討論、示唆をいただいた京都大学工学部高分子化学教室内、集合体力学研究会の諸氏に深く感謝の意を表わす。

文 献

- 1) B. Mörner, T. Eeg-Olofsson ; *Textile Res. J.*, 27, 611 (1957)
 - 2) B. Behre ; *Textile Res. J.*, 31, 87 (1961)
 - 3) L. R. G. Treloar ; *J. Text. Inst.*, 56, T 533 (1965)
 - 4) S. M. Spivak ; *Textile Res. J.*, 36, 1056 (1966)
 - 5) S. M. Spivak, L. R. G. Treloar ; *Textile Res. J.*, 37, 1038 (1967)
 - 6) P. Grosberg, B. J. Park ; *Textile Res. J.*, 36, 420 (1966)
 - 7) P. Grosberg, G. A. V. Leaf, B. J. Park ; *Textile Res. J.*, 38, 1085 (1968)
 - 8) R. L. Shishoo, B. Olofsson ; *J. Text. Inst.*, 60, 211 (1969)
 - 9) G. E. Cusick ; *J. Text. Inst.*, 52, 95 (1961)
 - 10) F. C. Brenner, C. S. Chen ; *Textile Res. J.*, 34, 505 (1964)
 - 11) G. E. Cusick ; *Textile Res. J.*, 34, 1102 (1964)
 - 12) B. Olofsson ; Proc. Int. Wool Text. Res. Conf., Paris, IV-439 (1965)
 - 13) B. Olofsson ; *J. Text. Inst.*, 58, 232 (1967)
 - 14) 川端, 丹羽, 河合 ; 織機学会年次大会講演論文集, No.21, 124 (1968)
 - 15) S. Kawabata, M. Niwa, H. Kawai ; *J. Text. Inst.*, in press
 - 16) 川端, 丹羽, 河合 ; 織機学会第 20 回年次大会講演前刷, 180 (1967)
 - 17) 丹羽, 川端, 河合 ; 織機誌, 22, T 85, T 133 (1969)
 - 18) 坂口, 川端, 河合, 裕 ; 材料, 17, 356 (1968)
 - 19) 高力, 丹羽, 川端, 河合 ; 織機学会年次大会講演論文集, No.21, 136 (1968)
 - 20) 丹羽, 川端, 河合 ; 織学誌, 投稿中
-