

強撚糸による表面効果織物に関する研究(第1報)

—ウール強撚糸の力学的特性の解析—

大野 博、河村博司

要 旨

ウール強撚糸織物のシボ発生機構を解析するため、解撚トルク計を試作し、撚糸条件と撚糸の力学的特性との関係を解析した。

糸トルク計の試作については、湿潤浸漬時の糸挙動をリアルタイムに計測でき、トルクと収縮力が同時計測可能な実用的な機構を備えることを目標に設計し、梳毛普通糸1/72から太番手強撚糸まで、広範囲かつ高精度なトルク ($6\text{mgf}\cdot\text{cm}\sim 3\text{gf}\cdot\text{cm}$) 及び収縮力 ($\text{max}180\text{gf}$) が測定可能となった。

ウール強撚糸によるシボ発生の基本的メカニズムについては、撚糸の撚セットが仮セットで、湿潤トルクは温度に関わらずある時間内で一定となることが分かり、ねじり座屈現象によるらせん形成によってしほが発現することが解明できた。

また、強撚糸の湿潤トルクとシボ織物の仕上時の収縮率との比例関係から、収縮率とクリンプ形状、経糸密度等により計算し、強撚糸のシボ形状(ねじり座屈)が近似できることを確認した。

1. はじめに

強撚糸は、湿潤等により収縮力と解撚トルクが作用し、激しい収縮挙動を示すことが知られている。¹⁾

この収縮挙動を利用し、独特の表面効果を出している織物に、クレープ(縮緬)や楊柳等があり、拘束された糸のねじり座屈現象により、しわ状の「しほ」を発現させている。

このしほの発現機構の解析として、絹やポリエステルにおいては、実際の設計・製造における詳細な研究があり、ねじり座屈による糸の3次元変形がらせんを形成すると報告されている。^{2) 3) 4)}

しかし、ウール強撚糸においては、湿潤解撚挙動を深く研究されたものはなく、強撚細番手化が進行しているウール業界において、その取り扱いが試行錯誤の状況となっている。

そこで本研究では、ウール強撚糸のしほ発現機構の基本的メカニズムを解析するために、まず、力学的特性として重要な湿潤解撚トルクと収縮力を精度良く、リアルタイムで計測できる糸トルク計を設計・試作した。

次にこの糸トルク計を用いて、ウール強撚糸の湿潤解撚トルク・収縮力を測定し、湿潤解撚挙動を明らかにするとともに、撚糸条件と撚糸の力学的特性との関係を実験的に解析することとした。

また、しほ織物中のウール強撚糸の形状について検討を加え、ねじり座屈形状の近似計算を行い実測値と比較を行ったので、ここにその結果も含め報告する。

2. 理論

しほは、仕上工程での強撚糸の解撚トルクと収縮力の相乗効果により発現し、糸は軸力が無い場合の両端球節のねじり座屈現象として、らせんを形成すると考えられている。⁵⁾

このため、ウール強撚糸においても、安定したしほ領域の検討と基本的メカニズムの解析には、湿潤解撚トルク（以下湿潤トルク）と湿潤収縮力の測定が不可欠であり、織物内で3次元変形可能なトルク及び収縮力の範囲を見出すことと、その範囲内での挙動を解析することが必要と考えられる。

この範囲内における糸を均一な円柱弾性体モデルとして近似すると、糸のトルク及びひずみエネルギーは次のようになる。⁶⁾

T：トルク

R：半径

X：単位長さ

L：全長

ϕ ：ねじれ角

θ ：単位軸長当たりのねじれ角

γ ：せん断ひずみ

G：横弾性係数

τ ：せん断応力

I_p ：断面極二次モーメント

U：ひずみエネルギー

単位軸当たりのねじれ角 $\theta = \frac{\phi}{X}$ とすれば、

$X\gamma = R\phi$ よりせん断ひずみ $\gamma = R\theta$

せん断応力 $\tau = G\gamma$ (G：横弾性係数) の関係から

$$\tau = GR\theta$$

よって、せん断応力で生じるトルク T は

$$T = \int_0^R (2\pi R dR \cdot \tau) \cdot R$$

$$= G\theta \int_0^R 2\pi R^3 dR$$

$$= G\theta I_p$$

$$(I_p = \frac{\pi R^4}{2} : \text{断面極二次モーメント})$$

トルクにより蓄えられるひずみエネルギー U は、応力、ひずみから

$$U = \frac{T\phi}{2} = \frac{T^2 L}{2GI_p}$$

これらのことから、ひずみエネルギーはトルクに比例し、トルクは糸半径の影響を受けることとなる。

次に、安定したしほ領域におけるウール強撚糸のしほ形状を考えると、糸の変形のみで完全ならせんが形成されると仮定すれば、織物収縮率との関係から、次のようにらせん半径 R の計算が可能である。^{2) 4)}

n：織物の緯方向の単位長さ当たりのらせん数（しほの数）

R：らせん半径

h：らせん一周あたりの糸の長さ

S：織物の収縮率

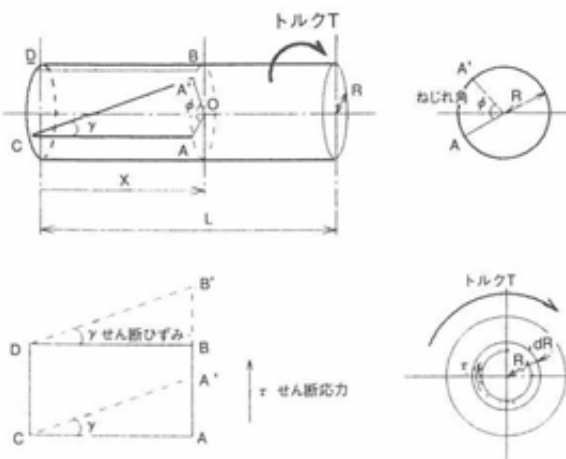
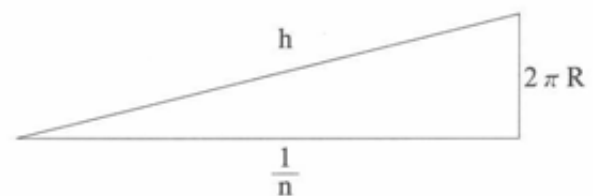


図1 円柱弾性体モデル



らせん一周あたりの糸の長さ h は

$$h = \sqrt{(2\pi R)^2 + \left(\frac{1}{n}\right)^2}$$

織物の収縮率を s とすると

$$h(1-s) = \frac{1}{n}$$

従って

$$R = \frac{1}{2\pi n} \sqrt{\frac{1}{(1-s)^2} - 1}$$

3. 糸トルク計の試作

湿潤状態での糸挙動の測定が可能な糸トルク計を設計・試作した。

この糸トルク計の基本仕様は、次のとおりである。

○測定項目

- ・加熱・解熱トルク：6mgf・cm～3gf・cm
- ・収縮力：0.3gf～180gf

一般に用いられる細番手の梳毛糸1/72から太番手強撚糸まで、広範囲に糸のトルク及び収縮力を測定可能。

○測定糸把持間隔

25cm（一定）

○熱水湿潤対応

加熱した糸の熱水湿潤浸漬直後以降のトルク及び収縮力をリアルタイムで計測可能。

○初荷重付加

糸番手相当の初荷重付加（JIS初荷重適用）。

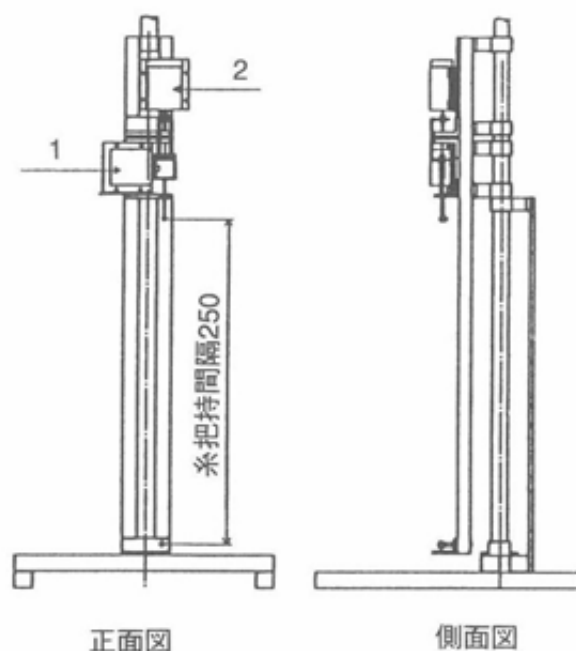
これまで糸のトルクは、ねじり特性試験として数種の測定法が研究されている。

しかし、簡単な操作で精度の良い測定機は少なく、川端式KES-YN等⁷⁾の高精度機はあるものの、強撚糸を対象としたものでなく、収縮力の同時測定や、湿潤トルクの測定はできなかった。

また湿潤解熱トルク計として、源間らの研究¹⁾があるが、精度の問題から数本の糸を束ねたモデル測定となっており、糸一本の実用測定はできなかった。

そこで本研究における糸トルク計は、湿潤浸漬時の糸挙動のトルク及び収縮力をリアルタイムに精度良く計測でき、操作が簡単で実用的な機構を備えていることを目標とした。

基本設計について図2に、全体構成について図3（写真）に示す。



- (1) トルク測定用微小荷重ロードセル
(2) 収縮力測定用微小荷重ロードセル

図2 基本設計

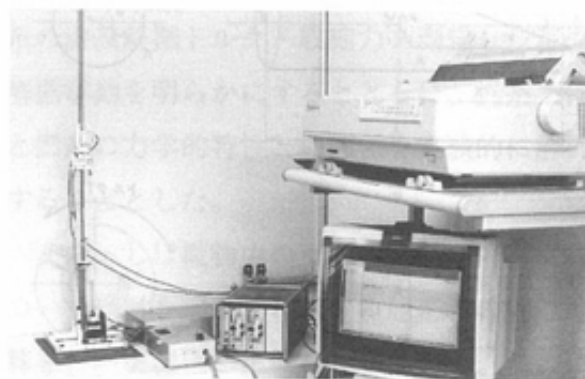


図3 全体構成

撚糸に発生するトルク及び収縮力は、パラランサー（ミシン針を軸とし、重心を下部に集中して水平方向に自由回転できる）機構により2つの微小荷重ロードセルを通して同時測定でき、データはコントローラ、AD変換ボードを経て、パソコン上に記録し、その後にデータ処理を行うこととした。（ソフトウェア：LaBDAQ - (98) Jr（マイクロサイエンス(株)製））湿潤浸漬測定時は、本体を上下に移動し、糸把持部を恒温水槽内に入れて測定し、加撚トルク測定時には、パルスモータを利用した加撚機構を本体下部に付加し、一定荷重下で測定することとした。加撚機構は、駆動制御部と回転速度設定・回転数検出部から構成し、正逆（S又はZ方向）回転、速度制御を行うこととした。

4. 実験

本研究では、表1の梳毛糸1/30（m当たりの撚係数 $k=81$ ）、梳毛クレーブ糸（以下梳毛強撚糸（ $k=150$ ））及び強撚糸の追撚糸（ $k=180$ 、210、261）を用い、以下の実験を実施した。

表1 糸試料

	強度 gf	伸度 %
梳毛糸1/30 ($k=81$)	216	20.7
梳毛強撚糸 ($k=150$)	216	20.7
◇ ($k=180$)	192	19.4
◇ ($k=210$)	181	22.7
◇ ($k=261$)	141	19.4

測定方法：JISL1095（一般紡績糸試験方法）

4-1 撚糸条件とトルクに関する実験

糸トルク計の加撚機構を用いて、3段階の初荷重(5gf,10gf,20gf)を垂下し追撚したときのトルクをリアルタイムで計測した。（加撚速度60回/分、読取速度2回/秒）

4-2 湿潤解撚作用に関する実験

温度4段階(20℃,40℃,60℃,80℃)の温水中で、糸の撚数に伴う湿潤トルクと収縮力の変化を湿潤浸漬直後からリアルタイムで測定した。

測定はリング撚糸機で加撚後、次の3とおりの試料について行った。

- ①撚セットなし（浸漬なし）
- ②撚セットあり（浸漬なし）
- ③熱セット後浸漬

ただし、撚セットは真空糸蒸し機（オートクレーブ）で85℃30分を行った。

4-3 撚数変化と織物のしぼ発現の実験

ウール強撚糸1/30の種々の撚係数におけるしぼ織物を試織し、収縮率、らせん半径の計測から、しぼ形状との関係を解析した。

経糸条件 梳毛糸2/60

経糸密度：20.5本/cm

箆通し幅：149.9cm

緯糸条件 梳毛糸1/30

緯糸密度：18.1本/cm

撚係数 k ：150,180,210,261

緯糸配列：S/Z,SS/ZZ (2S/2Z),

(S：S撚糸)SSS/ZZZ (3S/3Z),

(Z：Z撚糸)SSSS/ZZZZ (4S/4Z)

SSSSS/ZZZZZ (5S/5Z)

撚セット 85℃ 30分（真空糸蒸し機使用）

組織 平織

仕上条件 しぼ出し洗絨（40℃20分→98℃10分）→乾燥→煮絨

5. 結果と考察

5-1 撚糸条件とトルクの関係

撚係数と糸のトルクに与える加撚張力の影響を知るため、梳毛糸1/30をトルク計に取り付け初荷重（張力）をかけたまま追撚し、そ

の時のトルクを測定したのが、図4、5である。

撚数とトルクは比例関係にあるが、加撚張力が低いとトルクとともに増大する収縮力によって、二重撚（ねじり座屈現象）になりやすく、撚数増加に対しトルク増加は低下する。

このため加撚張力は、糸軸方向の収縮力以上の力を必要とし、例えばウール強撚糸1/30では、図5から撚数・トルクの比例関係が降伏しない20gf以上が必要である。

また、撚数とトルクの関係は、図4から梳毛普通糸（レギュラー糸）、強撚糸（クレープ糸）に関わらず、撚係数 $k=210$ 前後からトルクがほぼ同じ増大傾向になる。

図6に見られるようにこの撚係数前後から糸軸がねじり座屈し始めることから、半径方向の側圧が限界となって構成繊維が拘束され、糸直径が変化しにくくなり、ねじり座屈が始まると推定できる。

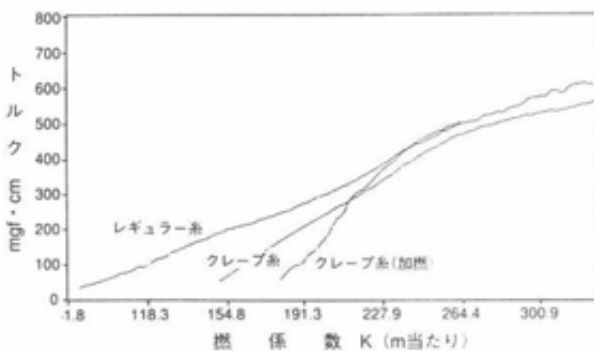


図4 撚係数とトルクの関係
(梳毛糸1/30 (加撚張力20gf))

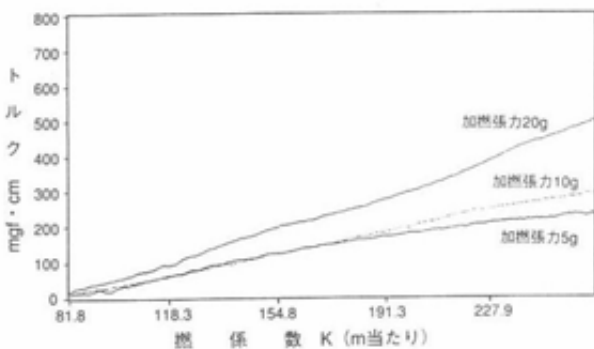
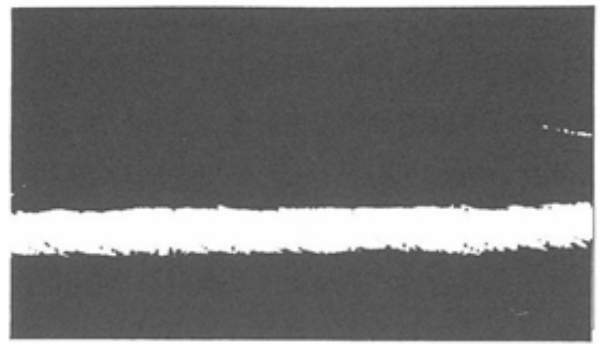
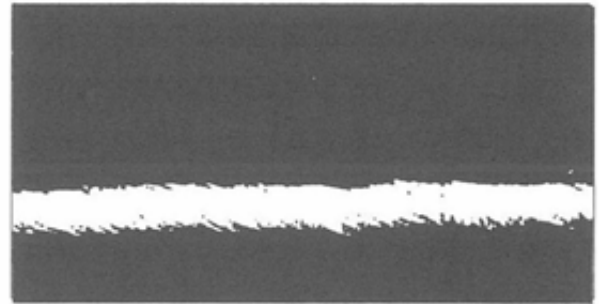


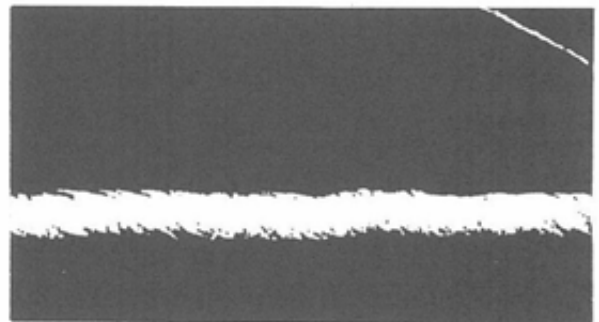
図5 撚係数・トルクに与える加撚張力
(梳毛糸1/30)



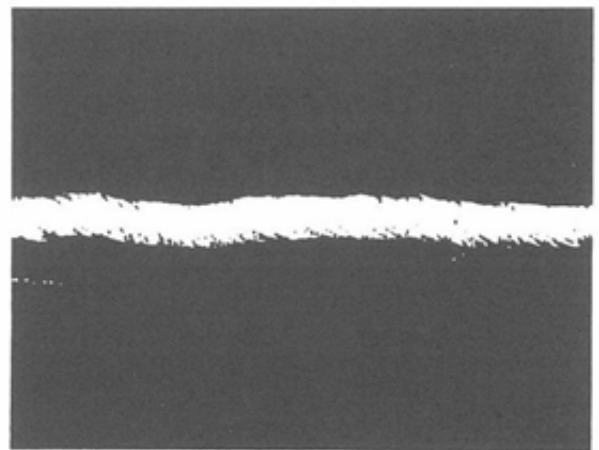
$k=215$



$k=223$



$k=238$



$k=274$

図6 撚係数と糸形状

この領域では糸を均一な円柱弾性体モデルとして近似でき、トルクが大きく残留ひずみエネルギーが大きくなるために、安定したらせん形状に変形し始める領域と推察できた。

5-2 湿潤解熱トルクの測定及び解析

湿潤トルクの測定に際しては、図7に示すように安定した湿潤トルクの測定が可能で、糸軸が伸びた状態と考えられるJISの初荷重(梳毛糸1/30で3gf)相当で行うこととした。

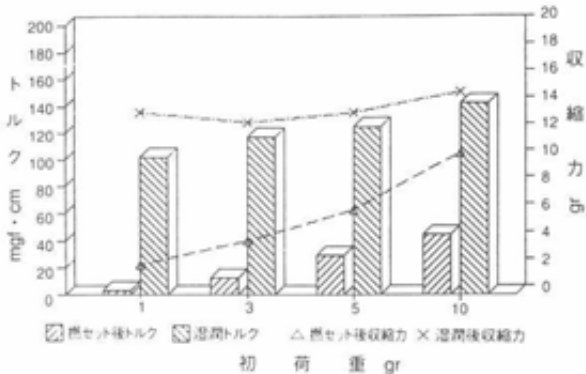


図7 初荷重と湿潤トルク・収縮力の関係
(梳毛強燃糸1/30 (k=261))

図8-1、8-2に示すように、トルク・収縮力の発生挙動から、強燃糸は、水中では一瞬伸長するが、次第にトルクと収縮力が増大し、ある一定の値に近づくことが分かった。

トルクに伴って収縮力も増大し、同一挙動を示すこととなる。

60℃、80℃では、わずか5秒以内にトルク、収縮力とも最大に上昇するが、40℃では、約30秒を要し、20℃では分単位の時間を要する。温度が上昇するに従って強燃糸の解熱作用は急激に作用することとなる。

このことから、しほ立ち加工では、糸間の

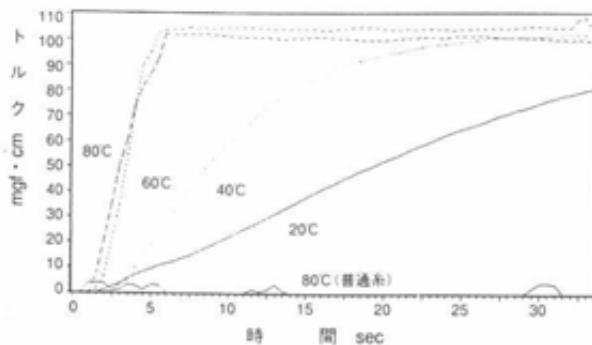


図8-1 湿潤トルク発生挙動 (温度別)
(梳毛糸1/30強燃糸) k=261

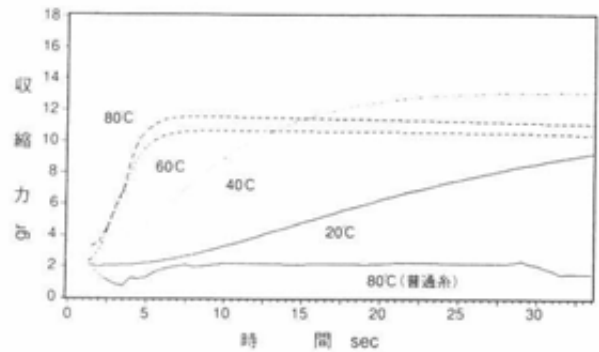


図8-2 湿潤収縮力発生挙動 (温度別)
(梳毛糸1/30強燃糸) k=261

摩擦抵抗以上の急激なトルクを発生する高温で処理した方が、しほ立ちが均一になると考えられる。

比較対象としての普通糸においては、80℃でもトルクはほとんどなく、糸はやや伸長するだけであった。

また、図9-1、9-2において、撚係数との関係を見ると、撚係数の増加とともにトルクが増大するが、収縮力はある値以上には上がらなくなり、撚係数と比例的に変化しないことが分かる。

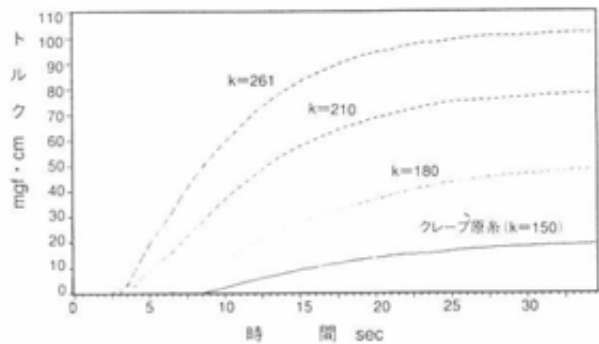


図9-1 湿潤トルク発生挙動
(梳毛糸1/30強燃糸)

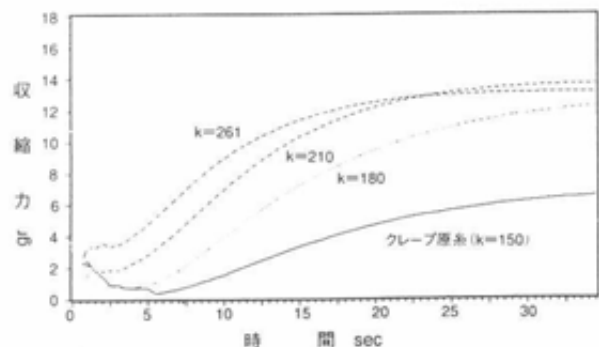


図9-2 湿潤収縮力発生挙動
(梳毛糸1/30強燃糸)

図10は、燃セットと湿潤温度のトルクに与える影響をまとめたものである。

燃セットにより加熱時のトルクがなくなっても、セット後の湿潤浸漬作用によって、湿潤トルクとして再現することが分かる。

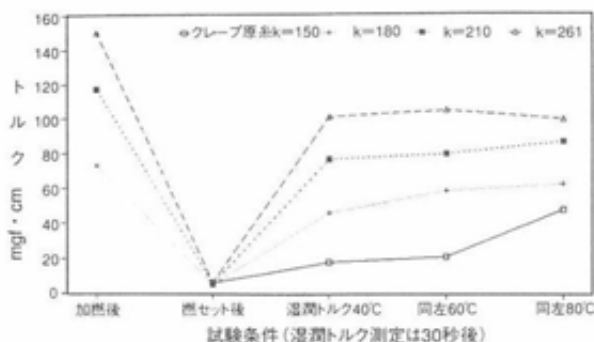


図10 湿潤温度と燃セットのトルクに与える影響 (梳毛糸1/30強燃糸)

5-3 しぼ発現のメカニズム

これまでの実験結果から、しぼ発現のメカニズムを考察すると、強燃糸を湿潤浸漬すると解燃作用が生じ、トルクと収縮力は、湿潤温度に関わらず燃数に応じ、ある時間で一定値となることが分かった。

また燃セットは、一時的なもので、セット前のトルクが湿潤時に再現され、収縮力は、一定のトルク値以上になると増大しなくなる。この領域から糸軸の直角方向への変形、つまり、ねじり座屈によるしぼが発現するものと推察できる。

以上のことから、ウール強燃糸のしぼ発現は、湿潤トルクが大きく関与し、湿潤によって一定値以上の湿潤トルクを生じた時、糸の半径方向の側圧が限界となるとともに、構成繊維が拘束され、ねじり座屈現象により糸軸の直角方向への3次元変形が生じたものと考えられる。

5-4 織物の湿潤収縮挙動の測定及び解析

しぼ形状の基本となる強燃糸の3次元変形の

形状を解析するため、燃係数の異なるウール強燃糸1/30を緯糸に用いて試織したしぼ織物により、湿潤収縮挙動を測定した。

図11は、仕上げ後の織物収縮率（緯）と緯糸強燃糸の湿潤トルクとの関係である。

強燃糸の湿潤トルクの増加とともに織物の収縮率は増加するが、燃係数 $k=210$ 以上では、トルクの増加に対し、織物収縮率の増加は少なくなっている。

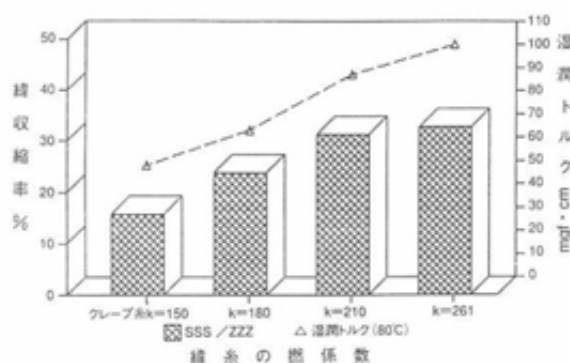


図11 収縮率と湿潤トルクの関係 (緯糸：梳毛糸1/30強燃)

これは図9-2で示した強燃糸の収縮力と同一傾向を示すもので、糸軸方向の収縮が限界となり、トルクにより糸軸がねじり座屈するものと考えられる。

また、図12からこの領域 ($k=210$ 以上)では、2S/2Z以上の緯糸配列になると収縮しにくくなることから、糸のねじり座屈による燃の半径方向への変形で、隣接する緯糸の影響を受け始め、しぼ形状が大きく変化していることが推察された。

そこで、強燃糸のねじり座屈が完全ならせん形状であると仮定すれば、織物収縮率かららせん半径を計算することができ、緯糸のクリンプ(曲がり)にこの計算値を加えたものをしぼのらせん半径として、織物内の糸の実測値と比較すると図13となる。

燃係数 $k=210$ 以上で実測値とはほぼ一致して

くることから、強撚糸のらせん形成により、織物のしぼが発現すると考えられる。

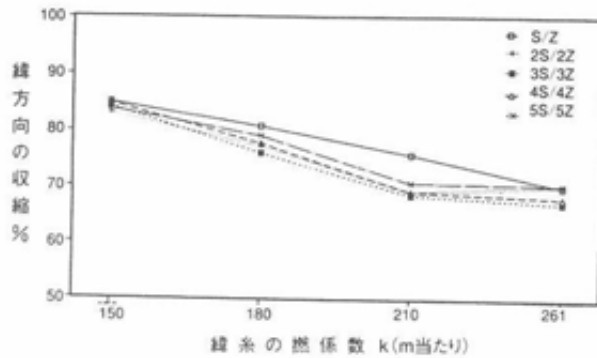


図12 撚係数・配列が緯収縮率に与える影響
(緯糸：梳毛糸1/30強撚糸)

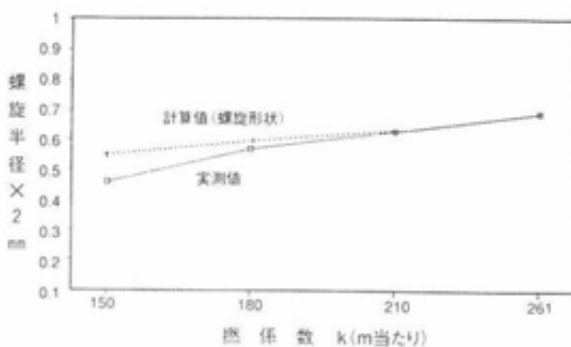


図13 撚係数と螺旋半径の関係
(緯糸：梳毛糸1/30強撚糸)

5-5 しぼ(強撚糸のねじり座屈)形状

今までの実験から、ある値以上の湿潤トルクが得られると強撚糸はねじり座屈し、らせんを形成し、しぼを発現することが分かった。

ここで、交錯する経糸間隔で緯糸のねじり座屈が生じ、収縮により経糸が移動し、1らせんが形成されるとすれば、平織の場合の織物断面の緯糸のしぼ形状(射影図)の近似を、織物内の緯糸のクリンプ(曲がり)形状を考慮して次式のように試みた。

$$A \sin\left(\frac{\pi D}{2(1-S)}x\right) + B \sin(\pi D x)$$

A：緯糸のクリンプ半径

$$\left(\cong \frac{\text{経糸半径} + \text{緯糸半径}}{2}\right) (\text{mm})$$

B：強撚糸のらせん直径 (mm)

D：経糸密度 (本/mm)

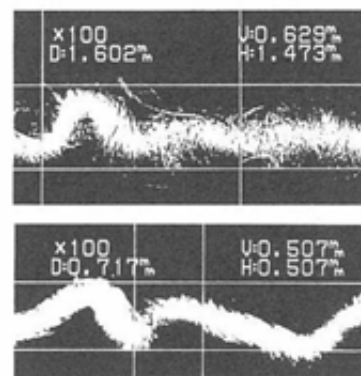
s：織物収縮率 (緯)

x：織物緯方向の座標 (mm)

ここで、 $A \sin\left(\frac{\pi D}{2(1-s)}x\right)$ は、織物中での緯糸のクリンプ(曲がり)形状を、 $B \sin(\pi D x)$ は、ねじり座屈による強撚糸の糸形状を近似したものである。

図13に織物断面中の緯糸強撚糸と織物からほぐした強撚糸の拡大写真およびこの計算結果による緯糸形状(射影図)を示す。これは、撚係数 $k=210$ の緯糸を使用した織物($A=0.12:B=0.09:D=2.8:s=0.24$)の例である。

この結果から、簡易な方法で強撚糸のしぼ形状(ねじり座屈)の近似が考えられる。



机上 織物中での緯糸のクリンプ(曲がり)形状



ねじり座屈



シミュレーション結果 $(A \sin\left(\frac{\pi D}{2(1-S)}x\right) + B \sin(\pi D x))$



図14 近似計算結果

6. まとめ

ウール強撚糸織物のしぼ発生機構を探るため、糸トルク計を試作し、加撚条件としぼ発生の関係を解析した。

結果をまとめると次のとおりである。

(1) 糸トルク計の試作および評価

ウール強撚糸によるしぼ発生の基本的メカニズムを探るため、湿潤浸漬直後から湿潤トルクと収縮力をリアルタイムで測定可能な糸トルク計を設計・試作した。

梳毛糸1/72から太番手強撚糸まで、広範囲かつ高精度なトルク ($6\text{mgf}\cdot\text{cm}\sim 3\text{gf}\cdot\text{cm}$) および収縮力 ($\text{max}180\text{gf}$) が測定可能で、実用的な糸トルク計であることが確かめられた。

(2) 撚糸の湿潤解撚トルクの測定及び解析

撚糸の撚セットは仮のセットで、湿潤トルクは、高温におけるほどトルク発現が早く起き、ある時間内で撚り数に応じたある一定値に近づくことがわかり、糸はねじり座屈現象によるらせんを形成することが解明された。

(3) 織物内の強撚糸の湿潤収縮挙動の測定としぼ形状の解析

強撚糸の湿潤トルクとしぼ織物の仕上時の

収縮率はほぼ比例関係にあることが確認できた。また、収縮率、クリンプ形状、経糸密度により織物断面における緯糸形状(射影図)を表す式が計算でき、強撚糸のしぼ形状(ねじり座屈形状)として近似できることが確認できた。

参考文献

1. 源間一郎ほか；織機誌, 14, No3, P188 (1961)
2. 山本孝ほか；織学誌, 48, P149 (1992)
3. 石倉弘樹ほか；織機誌, 45, T154 (1992)
4. 中田英俊ほか；織機誌, 28, P471 (1976)
5. 石倉弘樹ほか；織機誌, 44, No12, T260 (1991)
6. 寺崎俊夫；「材料力学入門」, 共立出版, P197 (1994)
7. 川端一郎ほか；織機誌, 29, No9, T119 (1976)