しわの科学(2, 完)*

しわの力学

会 員 篠 原 昭**

1. レジリエンスとしわ

繊維は弾性と粘性とを適度な割合いでもつ物質である。というより、*織物や編物の材料としてはこの3つの力学的性質を適度の割合いでもっていることが必要なのである。たしかに、しわということだけを考えれば、塑性的性質は必ずしも好ましいものではないが、もし塑性がまったくなく、弾性的な性質が圧倒的に優位な物質では紡績による撚止めができないし、織物や編物のクランプやループのような幾何学的な構造を安定させることもできない。ズボンに折目もつかないなど、実用的に不都合である。ゴムの糸で織物や編物が不可能なのと同じである。被服材料としての繊維にはこのような二律背反が常につきまとうから厄介である。

粘性的な性質は弾性と塑性という、一般的には時間依存性の少ない性質の間で、その極端な性質を調整し、緩和させるのに役立っているのである。したがって繊維のこのような粘弾塑性的な性質を簡単に数式化することはむずかしい。むしろ実験結果を経験的な方法で図示する方が実用的な目的には便利である。その一番手っ取り早い方法は、引張りの応力-ひずみ曲線とその除荷回復曲線を求めることである¹⁾。

普通の繊維の応力-ひずみ曲線とその回復曲線を模式的に示したのが図1である。粘性の大きい繊維では引張速度によって、この曲線の形状も違ってくることはいうまでもない。ひずみ ϵ_A (応力 σ_A) から除荷すると、ひずみは ϵ_r だけ回復し、 ϵ_p が永久ひずみとして残留する。 ϵ_A が大きいほど ϵ_p も大きくなるが、ある特定の繊維について ϵ_A と ϵ_p との関係を理論的に求める方法はない。この ϵ_p が多かれ少なかれ、しわに関係する量であるこ

図1 繊維の応力-ひずみ、除荷回復曲線

とはいうまでもない。したがって、しわを論ずる場合には必然的に ϵ_A 、すなわち最初に加えるひずみの大きさが重要な因子となる。 ϵ_A と ϵ_p との比を伸長弾性回復率と呼んでいる。すなわち

$$\text{伸長弾性回復率} = \epsilon_r / \epsilon_A \quad \dots\dots\dots (1)$$

一般には%で示す。この値が大きいほど塑性変形による永久ひずみの割合は小さくなる。また、伸長によるひずみエネルギーと回復のエネルギーとの比をレジリエンス (resilience あるいは resiliency) という。応力-ひずみ曲線の面積 OAC に対する面積 BAC の比で示すこと

*Scientific Approach for Crease and Wrinkle of Fabrics(2).

**A. Shinohara, Member. 信州大学 繊維学部 教授 (工博)

ができる。すなわち

レジリエンス=

$$\frac{\text{面積}BAC\text{で表わせるエネルギー}}{\text{面積}OAC\text{で表わせるエネルギー}}\cdots\cdots(2)$$

この両者の差、すなわち面積 OAB のエネルギーの一部は熱エネルギーとして消費され、一部は内部エネルギーとしてたくわえられ、時間の経過とともに徐々に回復エネルギーに使われるのである。

図1の回復曲線 AB の A に近い部分は、 OA 曲線の O に近い部分と似ており、この2つの曲線の O および A における接線の勾配はほぼ同じである。これは完全な弾性挙動を示している。 CD が瞬間的に回復するひずみ量で ϵ_a である。 BD 部分は時間の経過とともにじわじわもどる遅れ弾性によるひずみ部分である。したがって ϵ_p は時間を十分長く経過したあとに残る永久的なひずみと理解してよい。

このように考えると伸長弾性回復率のように、 ϵ_A と ϵ_r の比をとるだけでは、この性質を代表する尺度としては不十分である。むしろ、 ϵ_A と ϵ_a 、 ϵ_r のそれぞれの比をとる方が、しわを考えるときに便利である。Susick と Backer はこの関係を図2のようなグラフで表示している。綿では $\epsilon_A = 5\%$ の伸長で ϵ_a が40%くらい、永久ひずみ ϵ_p は25%くらいである。ポリエステル繊維では $\epsilon_A = 5\%$ の伸長のとき、 ϵ_a は同じく40%くらいであるが、遅れ弾性による回復ひずみ量が相対的に大きく、ほとんど永久ひずみは残らない。同じポリエステル繊維でも $\epsilon_A = 10\%$ の伸長では、 $\epsilon_a = 20\%$ と減少し、逆に永久ひずみ ϵ_p は25%くらいになる。ナイロ

ンでは遅れ弾性によるひずみ量が相対的に大きく、永久ひずみ ϵ_p は $\epsilon_A = 10\%$ のときでもほとんど零である。

では一体衣服にできるしわの局部では、繊維はどの程度のひずみを受けているのだろうか。前回³⁾示した棒の最大ひずみを求める公式を用いると、厚さ(直径) t の棒を曲率半径 ρ に曲げたときの最大ひずみ ϵ はその皮は部分に生じ、 $\epsilon = (2\rho)$ である。細かい繊維が集束された糸を1本の固体の棒とみなし、中立軸が糸の断面の図心を通ると仮定すれば、一番外(内)側にある単繊維にこの程度のひずみが生ずることを意味している。繊維をシャープに折り曲げ、その曲率半径がその繊維の直径くらいだとすれば、最大ひずみは50%にもなってしまふ。しかし布を曲げる場合には、糸も構造もソリッドでないから、構成単繊維が実際に受けるひずみ量ははるかに小さいはずである。綿繊維は10~15%のひずみで切断するが、綿布を折り曲げてシャープなクリーズを作ったとしても、繊維が切断するようなことはない。この事実から考えても、折り目部分の繊維に生ずる最大ひずみは5~8%程度あるいはそれ以下とみてよいのではないかと思う。

したがって、しわを単繊維のレオロジの性質に絞って考えれば、降伏ひずみを大きくし、永久ひずみがなるべく小さくなるようなものであれば、しわになりにくいという常識的な結論になる。図2からもわかるように、天然繊維では羊毛がこの条件を満たしており、ナイロン、ポリエステル、アクリル繊維など多くの合成繊維がこの条件にかなっている。その意味で、綿繊維は一番しわに

図2 各種繊維の除荷回復特性²⁾

なりやすいわけである。しかもブロードのような綿織物としては比較的薄地のものに しわがでやすい。絹は単繊維では綿より優れた しわ回復性を示すが、一般に布地が薄い^{ちりめん}ため しわになりやすい。縮緬類は単繊維が複雑に ねじれているため、しわになりにくいとされている。これも単繊維が受ける ひずみが小さいためと考えられる。

2. しわ回復曲線

しわ回復挙動を調べるために普通行われる方法は、幅 1 cm くらい、長さ数 cm ほどの布片を 2 つに折りたたみ、一定の荷重を加えて しわをつけ、一定時間後に除荷して、その折り曲げ角度の時間的な変化を読み取るものである。各国の規格によって多少の違いはあるが、原理的にはすべてこの方式に基づいている。

図 3 は各種織物の しわ回復曲線を示したものである⁴⁾。従軸にしわ回復角をとり、横軸に除荷後の時間がとってある。しわ回復角の代りに しわ回復率をとる場合もある。この場合、完全回復の 180° に対する比でとる場合と、曲率の比で表わす場合とがある。また しわ角として 180° と しわ回復角との差をとる場合もあるが、この場合は図 3 とは逆に時間に対する減少曲線になる。そのための測定機も数多く考察されている。筆者も綿、絹、毛織物などの しわ回復実験を行った経験があるが、何百回となく単調な測定を繰返していても、なかなか再現性のあるデータをうることができない。それほど しわ回復実験はむずかしい。試料の截断法、装置へ

試料をセットする方法、さらに試料自体が ねじれている場合の処置など注意すべき問題が沢山ある。折りたたんだ布面と布面とがくっつかないように、そして曲率を調整する目的も兼ねて折りたたんだ布面と布面との間に薄い物体をスペイサとして はさむこともある。しかしこんな方法によっても、しわ回復挙動のおおよその傾向をつかむことができる。

しわ回復曲線は一見フォークト模型によるクリープ曲線に似ている。また布は 180° にシャープに折りたたまれている間に、曲げモーメントが緩和し、また除荷後の回復は緩和回復に対応するとも考えられるので、繊維の伸長の応力緩和挙動とも似ている。マックスウェル模型による挙動と対比して考えられそうである。そのため しわ回復挙動をその構成繊維の応力緩和実験やクリープの実験結果から、あるいはもっと簡単な応力—ひずみ曲線から推測することも可能であろう。

織物の しわが、構成繊維の力学的性質に大きく依存することは当然であるが、このほかに、繊維間に働く固体摩擦も少なからず しわ回復挙動に関与している点を無視することはできない。しわ回復の測定装置に低周波の振動を加えてやると、しわの回復が促進されることが確かめられている。

しわ回復挙動を知るためには、しわ回復曲線を数式化し、時間無限大での しわ回復角の収斂値を予測する必要がある。そのため多くの人によって、しわ回復曲線の数式化の試みが提出されてきている。浜田、川村⁵⁾は毛織物および繊維素系スフ織物について実験し、百分率で示した しわ回復率 y (%) と、除荷後の経過時間 t (min) を両対数グラフにプロットすると、10 ~ 30 min 経過後くらいまではほぼ直線になることから、しわ回復曲線として

$$\log y = m \log t + k \quad \dots\dots\dots(3)$$

を提唱した。あるいは

$$y = k_1 t^m \quad \dots\dots\dots(4)$$

としてもよい。 k_1 は除荷 1 min 後の回復率であり、直線部分を外挿して求めることができる。 m はこの直線の勾配であり、1 より 2 桁くらい小さな値で、織物のしわ回復性を示す定数である。図 4 はその測定例である。これをみてもわかるように、 $t = 30$ min における y の値 y_{30} と、その差は非常に小さい。特にレーヨン系の織物ではその差がほとんどなく、しわになりにくい毛織物でもその差は僅少で 1 % 程度である。このことはレーヨン織物などでは、30 min くらいで回復の収斂値に達してしまうことを意味している。したがって y_{30} の値で t が無限大の最終しわ回復値にかえることができる。このこ

図3 各種織物の しわ回復曲線²⁾

図4 対数時間で表わした しわ回復曲線⁵⁾

A, B: 毛織物, C: ビスコース・スフギャバジン
D: ビスコース・スフ単糸綾織, E: アセテート・スフ
プライムは防しわ加工布

とから $t = 10$ min 程度までの比較的短時間の観測で y_{30} の値の予測が可能になる。この傾向は綿織物についてもほぼ当てはまることが認められている。

図からもわかるように、 y の値は $t < 1$ min の範囲を除くと、せいぜいその最大値と最小値の値幅は 10 ~ 20% 程度と せまいため、 y の対数をとらずに、

$$y = m' \log t + k' \quad \text{.....(5)}$$

とすることもできる。防しわ加工によって k の値が大きくなり、 m の値は減少することがわかっている。

しかし、これらはあくまでも実験式であり、実用的には便利であるが、物理的な意味は必ずしも明確ではない。岡島、池田⁶⁾は粘弾性体の回復挙動の式を用いて

$$y = b + a(1 - e^{-t/\lambda}) \quad \text{.....(6)}$$

を仮定した。ただし a , b , λ は定数であり、これはいわゆる 3 要素模型の示す挙動である。式(6)の両辺を t で微分して対数をとると、

$$\log \dot{y} = a' - b' t \quad \text{.....(7)}$$

となる。しわ回復曲線の接線の勾配の対数と時間 t との関係は直線となる。単繊維、糸および織物の しわ回復実験を行った結果、単繊維については式(7)のように 1 本の直線になり、単糸については勾配の違う 2 本の直線に、織物では 3 本の直線部分になることが報告されている。しかし、しわ回復曲線の接線の勾配を正確に求めることがむずかしいため、実用的には必ずしも便利な式とはいえない。しかしこの事実は繊維間の摩擦等による効果が重要であることを示している点で注目すべきものであ

る。ではこの摩擦の効果はどの程度のものであろうか。スコットランドの Hilyard らが一つの答を出している。

Hilyard, Elder, Hari⁷⁾は綿織物について、折曲げ曲率を広範囲に変え、曲げ回復率 R と、しわ回復挙動の関係を調べている。曲げ回復率 R として、曲げたときの局所の曲率 K_m と残留曲率 K_r の、 K_m に対する比をとっている。すなわち

$$R = (K_m - K_r) / K_m \quad \text{.....(8)}$$

これは曲げモーメント M と曲率との関係

$$M / (EI) = K_m - K_r \quad \text{.....(9)}$$

がスプリング バックなど弾性的な変形に対して用いられることに基づくもので、式(8)の導入は妥当である⁸⁾。 EI は曲げ剛さである。

この R と K_m の関係を未処理綿布と DMEU 処理布とについて観測した結果は図 5 のようになっている。曲率

図5 曲率と しわ回復率(たて, よこの和)の関係⁷⁾

○: 加工布, ●: 未加工布

図中Wは たて方向, Fは よこ方向を示す

の小さい場合には樹脂加工処理の効果は少なく、曲率が大きくなると未処理布では回復率が大きく減少するが、処理布では曲率の効果は少なく、曲率が大きいときにやや回復率が低下する。この結果から曲率の小さい場合には繊維間の摩擦がこの効果に影響するが、曲率の大きいときには繊維の流動が曲率効果を支配しているといえよう。すなわち DMEU 処理によって架橋ができ、回復が促進されるわけで、繊維間摩擦にはこの処理ではあまり効果がないことがわかる。同様の結果は他の研究によっても得られている。図 6 は曲率 100 cm^{-1} すなわち曲率半径 0.1 mm のかなりシャープに折りたたんだ場合の荷重時間の効果を示したもので、10 日間近く観測した結果を示している。

衣服を着て座ったり、腕を曲げたりしてシャープな折

図6 時間 t と たる方向の しわ回復率⁷⁾
曲率 $km=100\text{ cm}^{-1}$, 荷重時間(a)1 min, (b)10 min,
(c) $1.07\times 10^3\text{ min}$, (d) $1.44\times 10^4\text{ min}$

曲げ状態が長く続いた場合ほど、しわは強固なものになるが、長時間放置すればかなりの しわが消えてしまうことを上の実験は意味している。これは我々の経験とも一致する。一つの例を示そう。長谷川、吉井⁹⁾は各種素材の和服を着用して60 min 間正座したときにできる しわの状態を、(a)座りじわによる後すその部分、(b)帯の下部分、(c)腰ひもによる しわ部分の3か所について観察し、そのしわが消滅していく様子を官能検査によって観測している。和服を衣紋掛にかけて故置し、脱衣後24 hr, 48 hr, 78 hr に3名の実験者によって肉眼鑑定を行った。表1はそれをまとめたものである。これによると絹の着物では1日たつとほとんど しわが消えてしまうのに対し、化学繊維の着物では しわが消滅するまでに時

表1 しわの自然消滅状態⁹⁾

	試	料	部位	直後	24hr	48hr	72hr
A	表 地	ポリエステル	a	強	強	強	弱
	胴裏地	ポリエステル	b	弱	弱	—	—
	裾回り	ポリエステル	c	弱	弱	弱	弱
B	表 地	ポリエステル	a	強	弱	微弱	微弱
	胴裏地	ポリエステル	b	強	弱	弱	弱
	裾回り	ポリエステル	c	弱	—	—	—
C	表 地	ベンゾエイト	a	強	強	強	強
	胴裏地	ベンゾエイト	b	強	弱	微弱	微弱
	裾回り	ベンゾエイト	c	弱	弱	—	—
D	表 地	アセテート75 ナイロン 25	a	強	強	弱	弱
	胴裏地	アセテート65 ナイロン 35 よこアセテート	b	弱	弱	—	—
	裾回り	絹 10 アセテート50 ナイロン 40	c	強	強	弱	—
E	表 地	絹	a	強	弱	—	—
	胴裏地	絹	b	弱	—	—	—
	裾回り	絹	c	弱	—	—	—

間がかかり、3日たっても しわが残っている場合もあることがわかる。

Hilyard らはこれら一連の実験結果から DMEU で防しわ加工した綿織物と未処理布とについて、繊維間摩擦、繊維の降伏、遅れ弾性、流動の しわ回復に関与している各割合を求めている。表2はそれを示したものである。曲率 100 cm^{-1} で1 000 min 間荷重して しわをつけ、

表2 しわに及ぼす因子⁷⁾

しわの因子	しわ残留率 (%)	
	加工 布	未加工 布
繊維 間 摩 擦	16 ± 2	16 ± 2
降 伏	7 ± 4	44 ± 5
遅 れ 弾 性	18 ± 2	24 ± 2
流 動	13 ± 2	10 ± 3

除荷後1 min 経過したときの値を基に計算したものである。これによると綿織物の しわというのは、繊維の降伏によるものが圧倒的で、防しわ加工は繊維の降伏点を上昇させる効果をもっているわけである。このことから樹脂による防しわ処理が架橋によることがわかる。

したがって防しわという立場に立てば降伏点の高い繊維ほど しわになりにくいという当然の結果になってくる。降伏点といっても応力で示すか、ひずみで示すかによって評価が違ってくるが、この場合ヤング率の変化が重要な意味をもっている。秋山¹⁰⁾はレーヨンの応力—ひずみ挙動をマックスウェル模型と ばねとが並列した3要素模型で近似できることを仮定し、防しわ加工はこの3要素模型のマックスウェル要素の ばね定数を大きくすることを示している。

3. ひずみ分布と しわ回復挙動

以上は しわおよび しわ回復挙動を現象論的にとらえようとする試みについての総括である。しかし曲げの現象を力学的に考察しようとする、そこにいくつかの複雑な問題が頭をもたげてくる。その第一は曲げられた繊維内に生ずる ひずみが複雑な分布を示している点である。これは曲げの曲率が一定でないということ、曲率が局部的に非常に大きくなるという2つの問題を含んでいる。まずこの点について考えてみよう。

繊維の引張実験にしても、クリープや応力緩和実験にしても、繊維の長さが太さに比べて十分長い場合(多くの繊維はすべてこの条件を満たしている)には、その応力分布、ひずみ分布は一様で均一とみなすことができる。このような場合の挙動はフォークト模型、マックスウェル模型あるいはそれらの組合わさった分布模型等で記述

することも可能である。ところが、しわ回復実験のように、布を 180° 折りたたむ場合には、曲げられた繊維の局部では繊維軸にそって ひずみ分布は一樣にならないし、局部の横断面内の ひずみ分布も予測不能なほど複雑になっていると考えられる。このようなものに、一樣な ひずみの場合にあてはまる模型をそのまま適用することはできないし、意味もない。

一般に、初等塑性力学などでは、曲げに対して通常つぎのような仮定をおいている¹¹⁾。

- (1) 横断面は平面を保持し、変形前に繊維軸に垂直な平面は、変形後も中立軸に垂直である。
- (2) 横断面の形状は曲げても変らない。
- (3) 垂直応力以外の応力成分はすべて零である。
- (4) 縦方向の繊維の垂直応力と垂直ひずみの関係は、引張試験および圧縮試験の応力-ひずみ関係と同じである。

この条件は弾性学や塑性学での仮定であるが、仮定3から、繊維軸に沿ってのせん断応力が0であるから、明らかに純曲げを要求することを意味している。純曲げでは曲げモーメント図が一樣なもので、その変形した形は円弧でなければならない。したがって しわの場合には ひずみ分布は繊維軸に沿って一樣ではない。

横断面の条件にしても変形が大きくなると弾性変形であってもあてはまらない。厳密に言えば弾性変形であっても、ポアソン効果によって横断面の形状が変化する。その程度は非常に少ないが大きな曲率で曲げた場合は無視できない程度に大きく変形する。たとえばゴムホースを曲げてみるとよくわかる。これほど極端ではないが、繊維の太い単繊維を折曲げると座屈によって円形断面がそら豆形につぶれることが知られている¹²⁾。

いずれにしても一般の弾性学や塑性工学で扱うような手法だけでは しわの挙動の数学的記述はむずかしい。線形重合せによるレオロジ的方法もそのままでは応用できない。しかし最近の研究成果のなかには、実にきれいにレオロジ的な記述を行っている報告がみられる。これらについては多くの材料を用いた実験による検証をまたなければ、その是非を判断できないが、まったく疑問点がないわけでもなさそうである。

曲げられた繊維内の応力分布はどうなっているのだろうか。偏光顕微鏡を用いて光弾性的に応力分布の観察を行うことができる。ベルギーの Elöd¹³⁾はセルロース繊維のクリープ部分についてユニークな研究を行ったことで知られている。これは光弾性と同じ光学系で等色線を観測したものである。図7は Elöd の論文¹³⁾にのっている折曲げられた繊維の等色線である。これを見ると、曲げの局部近傍でのおおよその応力分布の状態を定性的に推測することができるが、これのみで定量的な解析を行

図7 折曲げられた繊維の光弾性写真¹³⁾

うことは不可能である。しかし、曲げの局部に ひずみが集中し、それから遠ざかるに従って ひずみが急激に減少しているらしいことはわかる。少なくとも純曲げとはかなり違った応力状態になっていることはたしかである。

光路の繊維の厚さが一定でない円形のような繊維の場合、その縞が等色線すなわち主応力差一定(主せん断応力一定)のフリンジになっていない。折曲げられた繊維の中心軸(断面の図心を連らねた線)を含む平面に平行な面でスライスした試片について観察する必要があるが、技術的に非常にむずかしい。このようにして求めた ひずみ分布を考慮に入れて、しわ回復挙動をレオロジ的に解析した初期のものに祖父江、村上^{15)~16)}の研究がある。繊維を 180° 折曲げたときの2次元的な ひずみ分布を模式的に示したのが図8である。これによると、曲げの局部ばかりでなく、幾何学的には曲げ部分に入らない図の L_c 部分にも ひずみの影響が及んでいて、しかも L_c の長さが時間の経過とともに大きくなる。これをクリープ現象としてとらえようというのが祖父江、村

図8 折曲げられた繊維の ひずみ分布の模型¹⁶⁾

上の基本的な考え方である。そして、4要素模型を仮定し、クリープおよびクリープ回復現象として しわ回復挙動の解析を行ったのである。

その結果 しわつけ時間 τ のときの しわ角 ψ と、除荷後の経過時間との間につぎの関係のあることを導いてい

る。すなわち、

$$\phi(t, \tau) \pi(a - be^{-\tau/\lambda}) \dots\dots\dots (10)$$

ここで λ は緩和時間、 a, b は定数である。しわ時間 τ は、しわ回復が始まる以前に繊維が受けた履歴である。この式はしわ角が指数的に変化していくことを示しており、岡島、池田の式(6)と形の上では同じになっている。

すでに述べたように、実際にしわ回復の実験をやってみると、すべてがこの式で記述可能な挙動を示すわけではなく、これから相反するものも少なくない。祖父江、村上の方法はひずみ分布を考慮してはいるが、材料力学的に厳密なひずみ分布に基づいた計算をしているわけではない。断面の形が円の場合はもとより、複雑な異形断面を有する繊維の3次元的ひずみ分布を基に、大きな曲率に曲げた粘弾塑性体の挙動を計算することは極めてむずかしくひずみの大きな領域での、実用的な「しわ」の研究を進める立場に立てば、それほど厳密な解析は必ずしも必要とも思われない。むしろ繊維内応力分布を考えず、応力やひずみをバルクにとらえて、現象を解析する方がよい場合もある。

4. しわのレオロジ的解析

しわ特にクリーズの場合は単に曲げ曲率が大きいばかりでなく、ひずみもかなり大きくなるわけで、これをオースドックスな線形粘弾性体として取扱うにはかなりの無理がある。曲率は大きい、微小ひずみが仮定できる場合には線形粘弾性体として取扱うことも可能である。

T. G. Rogers, E. H. Lee(1962)¹⁷⁾は粘弾性片持りの自由端に集中荷重を加えた場合のクリープ現象の解析を行っている。これは自由端の撓みの時間的変化と、片持りの変形の形状を時間の関数として求めようとするものである。一般に線形粘弾性体の応力 σ とひずみ ϵ の関係は

$$\epsilon(t) = \int_{-\infty}^t J(t-\xi) \frac{d\sigma(\xi)}{d\xi} d\xi \dots\dots\dots (11)$$

のようになる。ここで $J(t)$ はクリープコンプライアンスである。これを曲げに適用するために、弾性はりの曲げモーメント M と曲率 K の関係を表わすオイラーベルヌーイの式

$$K = M / (EI) \dots\dots\dots (12)$$

とアナログカルに取扱えることを仮定している。式(12)で E はヤング率、 I は断面二次モーメントである。この2つの式から曲率変化に対するレオロジ方程式として

$$K(s, t) = \frac{1}{I} \int_{-\infty}^t (t-\xi) \frac{\partial M(s, \xi)}{\partial \xi} d\xi \dots\dots\dots (13)$$

を導き解析を行っている。ここで S ははりの位置を示す量である。片持りの場合、曲率ははりの部位の関数になっているからであるが、もし純曲げの場合には曲率は時間のみの関数となる。

しわのレオロジ的研究を精力的に行っているオーストラリアのB. M. Chapman¹⁸⁾は、羊毛およびナイロン繊維が一定の温湿度条件のもとではひずみが小さいかぎり、線型粘弾性体として挙動することを確かめ、曲げ応力 f と曲げによるひずみ ϵ_s の間に

$$f(t) = \int_0^t G(t-\tau') d\epsilon_s(\tau') \dots\dots\dots (14)$$

の関係が成立つことを仮定した。 $G(t)$ は曲げに対する応力緩和弾性率である。これは式(11)に対応するものであり、弾性体についてのフックの法則に相当するものである。式(12)と組合わせ、曲げモーメントと曲率の関係におすと、

$$M(t) = \int_0^t G(t-\tau') IdK(\tau') \dots\dots\dots (15)$$

となる¹⁹⁾。これは式(13)に対応するものである。

Chapman²⁰⁾はさらにこれを繊維集合体の場合にも拡張できるとし、布の曲げに対して次式を示した。

$$M(t) = l \int_0^t B(t-\tau') dK(\tau') \dots\dots\dots (16)$$

ここで l は布の幅であり、 $B(t)$ は布の曲げ応力緩和弾性率である。

布のような繊維集合体の変形では、繊維間に働く固体摩擦が少なからぬ効果をもっていることはすでに述べたとおりである。Chapmanは線形粘弾性模型と並列に固体摩擦模型のスライダを入れた図9のような模型を考え、式(16)に摩擦項を加えて、

図9 摩擦(スライダ)を考慮した線形粘弾性(LVE)模型

$$M(t) = l \int_0^t B(t-\tau') dK(\tau') + \frac{\dot{K}}{|\dot{K}|} l M_0 \dots\dots\dots (17)$$

とした。 M_0 は摩擦項に相当する定数であり、 $\dot{K}/|k|$ は曲げの方向を示す符号である。この式を用いて繊維や布の曲げ緩和やしわ回復の解析をするためには、どうしても純曲げに近い形に試料を曲げ、曲率と曲げモーメントとの関係を求める必要がある。繊維や布について純曲げに近い条件で曲げモーメントを測定する方法ではB. G. LiveseyとJ. D. Owen^{21)~22)}のものが有名である。Chapman²³⁾はこの原理を利用した図10のような簡単な方法を提案している。

図10 Chapmanの曲げ緩和試験機²³⁾

幅15 mm、長さ35 mmの試片の一端に振子状の重しのついた把持器(jaw) J_1 をつけ、試片と振子とが鉛直に垂下するように他端を把持器 J_2 にはさむ。 J_2 は回転板に固定されており、この板を回転させると図10(b)のようになる。このとき試料が直角に曲げられた状態にする。もし試料が緩和すると振子が下方へ下がる。これを板上に目印点 S_1 で感知し、常に試料が直角になるように板を回転する。試料の正味の長さは2 mmと短くとってあるため、曲げモーメント M は $M = WL \sin \theta$ となるといわれている。 W は振子の重さ、 L は試料の中間点から振子の重心までの距離である。

図10でもわかるように把持器 J_2 は板に固定されているので、この試料は片持り状態になっていて、その荷重状態は自由端に荷重 W を加え、かつ(試料の長さに比べ L が十分大きいときは) $WL \sin \theta$ なる時計まわりのモーメントが自由端に集中的に加えられた場合と等価になる。純曲げというのは自由端にモーメントだけを加えられた場合であり、はりに沿って曲げモーメントが一定になり、せん断力は零になる。図10の場合には厳密には純曲げとはいえない。そのために試料の正味の長さを2 mmと随分小さくすることによって、集中荷重項を無視できるようにしている。これは巧妙な方法である。織物のようなものでは試片が大きくなると、形態的に不安定となり、それだけ測定が困難で測定値もばらつきやすいものであるから、試料の正味の長さ(スパン)を極力短くすることは測定技術として優れたアイデアである。しかしこの長さにも問題がないわけではない。布の曲げで

も構成単繊維が独立な挙動をするといえどもこれでもよいが、燃糸などのように単繊維が独立に変形できない場合には、弾性学でのサン・ブナンの原理の制約にもふれてくる。

しかし、厳密なことよりも傾向をつかむことの方が重要であるので、この方法もその意味では妥当な手段と考えてもよいのではないかと思う。なおこの方法を用いれば、いわゆる coercive couple から摩擦力の測定が可能であり、緩和あるいはその回復過程での繊維間摩擦力など固体摩擦力の効果を知ることができる。

5. 解析例

式(17)を仮定してしわ回復曲線を求めようとする場合、どうしても曲げ応力緩和弾性率 $B(t)$ を実験的に求める必要がある。B. M. Chapman²⁴⁾は多くの繊維の場合、 $B(t)$ が時間の対数に対して直線的に減少すると仮定して

$$B(t) = a - b \log t \quad \dots\dots\dots (18)$$

とした。除荷後の回復時間としわ残留率の関係をしわつけ時間をパラメータとして求め、式(17)から近似的に求めたしわ残留率曲線とよく一致することを示している。

Chapman²⁰⁾は羊毛繊維については温湿度の効果がその履歴としてしわ回復曲線に大きく影響するとして、式(17)を修正して次式を提唱している。

$$M(t_A) = l \int_0^{t_A} B(t_A, t_A - \tau) dK(t_A) + \frac{\dot{K}}{|K|} l M_0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

t_A はagingの時間である。水に浸漬して濡らした羊毛繊維を一定の湿度の下で時間 t_A の間コンディショニングするのがagingである。羊毛繊維についての曲げ応力緩和実験の結果は図11のようになり、時間軸に平行にシフトするとほぼ重なる曲線が得られることを示している。このことは式(18)の仮定の妥当性を裏付けるものでもある。

模型式(19)に従う例として、梳毛織物について行ったしわ回復実験すなわち時間としわ残留率との関係は理論とよく一致することを示している。一方模型式(17)の場合はその傾向が一致する程度である。いずれにせよ羊毛やナイロンの場合は繊維の曲げ挙動から織物のしわ回復挙動をある程度推定できることがわかる。

羊毛、ナイロンについてしわを作り、回復させる環境条件を変えて測定するという面白い結果が得られることをChapman^{25)~26)}は報告している。温湿度を図12の(a)のように変化させ、それに対応して織物を時間 t_1 で一定曲率に折曲げ、時間 t_2 まで15 minの間30℃85%の状態におく。この間応力が緩和する。時間 t_3 で回復させる。一方、同じ織物を時間 t_2 で折曲げ、そのまま回復させる。この両者の t_3 における曲げ緩和弾性率を $B(1)$, B

図11 羊毛の曲げ応力緩和曲線²⁰⁾
 t_A はエイジングの時間

図12 曲げ応力緩和実験と温度・湿度変化²⁷⁾

(2)とすると、同じ条件で行った しわ回復率

$$R_c = B(1) / B(2) \quad \dots\dots\dots (20)$$

で表わせることを示している。

これを利用して混紡織物の しわ回復率を推定することができる²⁷⁾。Y, Z 繊維の混紡織物を考える。Y 繊維の混紡率を b とし, Y, Z それぞれが100%の織物の緩和弾性率を B_Y, B_Z とすると, 混紡織物の緩和弾性率 B_b は

$$B_b = bB_Y + (1-b)B_Z \quad \dots\dots\dots (21)$$

で与えられるとする。Y, Z それぞれについて式(20)にあてはめると

$$\left. \begin{aligned} R_Y &= B_Y(1) / B_Y(2) \\ R_Z &= B_Z(1) / B_Z(2) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (22)$$

これから混紡織物の しわ回復率 R_b は

$$R_b = R_Z + \frac{R_Y - R_Z}{1 + \frac{1}{f} \left(\frac{1}{b} - 1 \right)} \quad \dots\dots\dots (23)$$

となる。ここで

$$f = B_Y(2) / B_Z(2) \quad \dots\dots\dots (24)$$

である。図13はポリエステル/羊毛織物の混紡率と しわ回復率との関係を示したもので、実験値(○印)は De Boos ら²⁸⁾の求めた値である。実線が式(23)で求めた理論曲線である。

図13 羊毛/ポリエステル混紡織物の しわ回復特性²⁷⁾

6. まとめ

しわを研究する場合、製品の評価だけが目的の場合がある。そんなときにはいわゆる しわ回復角の観測や、それを構成している繊維のレジリエンスのような簡便に測定できる物理量を目安として用いればよいわけである。

しかし、一方、しわをレオロジ的に考察したいというのが、しわ研究者の願望でもある。それには大きな曲率に曲げられた繊維の応力分布を微視的にとらえ、厳密に曲げモーメントを求めるという一つの行き方がある。しかしこれには応力分布の測定が困難なこと、仮りにそれが実験的にわかったとしても解析的な形で表現できないという決定的な問題点が含まれているのである。

応力分布の問題から逃れる一つの方法は純曲げ状態に曲げることである。すなわち円弧に曲げることである。

そのための一つに Livesey, Owen の方法がある。これは試料の長さを極度に短くして、ほぼ全長にわたって曲げモーメントを一定にしようというものである。これは従来のしわの実験に比べて試長が短いため、かえって試料のくせや不均一さに原因した測定上の問題から回避できるという利点もある。

しかし、これでは大きな曲線に曲げられないという観点もあるが、そのために線形理論にのせられるということにもなる。オーストラリアの Chapman, Denby ら CSIRO のグループは、これに着目し主として羊毛、ナイロンについて繊維の曲げのレオロジと織物のしわ回復のレオロジとの関係を精力的に研究し、成果をあげている。筆者のところでこの追試の形で少し実験をしているが、疑問点がまったくないというわけではない。多くの人が、より多くの繊維について実験を重ね、初めて結論が出てくるものと思う。もう少し時間が必要である。

本稿を書くに当って、これらばう大な文献を改めて読みなおしたが、難解な部分が多く、完全に消化し、自家薬籠中のものとしてまとめるまでには至らなかったため、十分な紹介ができなかった。

参考文献

- 1) J. Skelton ; Science, **117**, 657(1972)
- 2) G. Susich and S. Backer ; Text. Res. J., **21**, 482(1951)
- 3) 篠原昭 ; 繊維誌, **35**, P 479 (1982)
- 4) E. R. Kaswell ; " Textile Fibers, Yarns and Fabrics " p.

273(1953), Reinhold Pub.

- 5) 浜田政忠, 川村一夫 ; 繊維誌, **12**, 222(1956)
- 6) 岡島三郎, 池田佐喜男 ; 繊維誌, **10**, 564, (1954)
- 7) N. C. Hilyard, H. M. Elder and P. K. Hari ; J. Text. Inst., **63**, 627(1972)
- 8) J. Skelton ; J. Text. Inst., **56**, T 454(1965)
- 9) 長谷川喜久子, 吉井順子 ; 衣生活, **21**, No. 4, p. 50(1978)
- 10) 秋山好弘 ; 旭化成繊維の研究, **1**, No. 1 (1955)
- 11) 例えば益田森治, 室田忠雄 ; " 工業塑性力学 " p. 37(1980—改訂版), 養賢堂
- 12) 篠原昭 ; 繊維誌, **34**, P 143(1981)
- 13) E. Elöd ; Industriel Chimi, Belge, **10**(1955—7)
- 14) A. Shinohara and M. Nakazawa ; Proc. 1982 Joint Conference on Experimental Mechanics, Part II, p. 687 (1982, USA)
- 15) H. Sobue and K. Murakami ; Text. Res. J., **29**, 251(1959)
- 16) 神戸博太郎, 村上謙吉 ; " 応用レオロジー ", pp. 155—174 (1963), 日刊工業新聞社
- 17) T. G. Rogers and E. M. Lee ; Proc. 4th US National Congress of Applied Mechanics, **2**, 977(1962)
- 18) B. M. Chapman ; J. Appl. Polymer Sci., **17**, 1693(1973)
- 19) B. M. Chapman ; Text. Res. J., **44**, 306(1974)
- 20) B. M. Chapman ; ibid, **44**, 531(1974)
- 21) R. G. Livesey and J. D. Owen ; J. Text. Inst., **55**, T 516 (1964)
- 22) J. D. Owen ; ibid, **57**, T 435(1966)
- 23) B. M. Chapman ; Text. Res. J., **46**, 525(1976)
- 24) B. M. Chapman ; ibid, **45**, 137(1975)
- 25) B. M. Chapman ; ibid, **46**, 113(1976)
- 26) B. M. Chapman ; J. Appl. Polymer Sci., **18**, 3523(1974)
- 27) B. M. Chapman ; Text. Res. J., **46**, 711(1976)
- 28) A. G. Boos, F. W. Jones, J. D. Leeder and D. S. Taylor ; Proc. V. Int. Wool. Text. Res. Conf., Aachen (1975)

書

評

M. J. ホーン／L. M. ガレル著、藤原康晴／杉村省吾／池本 明 訳

被服心理学序説

ファッションと個性

B 5 判270ページ、定価2,300円

被服心理学に関するまとまった書物が日本で初めて刊行された。表題の書物は被服心理学者として著名な M. J. ホーンが The Second Skin として1968年に初版を出し、その後版を重ね、1981年にこれも被服心理学者として著名な L. M. ガレルと共同して増補改定し、第3版として出版された The second Skin, 3rd edition の訳出書である。The Second Skin の初版がアメリカで刊行された直後日本にも紹介され、日本の繊維技術者が新素材の発見かと思つて早速読んでなんのこともわからず、投げ出したという逸話が伝わっているほど被服心理学は日本では関心が払われていなかった。この訳書も裏表紙に The Second Skin と書いてあって表紙にはファッションと個性という一般的で親しみやすい表題にしてある。原書は5部20章、514ページに及ぶ大著で、全部にわたって目を通すことはなかなか大変である。しかし、この原著はアメリカでは被服心理学の定本として各大学で教科書として広く採用されている。今回武庫川女子大学の藤原康晴教授ほか2氏によってこの定本が訳出され、日本にもはじめて被服心理学の定本が出現したことは誠に喜ばしいことである。この訳書は原著の20章のうち初めの10章について訳出されたものであるが、基礎的部分は余すところなく訳され、訳文も明確で読みやすく、被服心理学の入門書として好適である。原著のはじめの10章はこの訳書で7章にまとめられ、第1章被服の起源と機能、第2章習俗・習慣・慣習・法律、第3章ファッションの変化と社会秩序、第4章被服と自己概念、第5章被服の象徴性、第6章服装における同調と個性、第7章価値観・態度・関心となっており、最後に221篇にわたる原注に現われた引用文献が各章別にまとめられていて研究者にとっても参考になり親切である。この訳書は270ページで携帯にも便利で各大学、短大の教科書、参考書としても好適で、この書物を通して後に原著を読むのがかりとしてもよいと思う。

発行所 (株) 昭 和 堂

〒606 京都市左京区田中門前町73

TEL 075 (721) 4541

(大阪市立大学 名誉教授 田中 道一)