繊維集合体としての布の特性について

Research on the Mechanics of Fibrous Materials

井 上 真 理

1. はじめに

繊維集合体である織物や編布は、古くから被服材料として、直接人が身につけ、手に触れる材料として使用されてきた。それは、顕著な異方性をもつ平板状材料であるため、動作によって変形する人体の曲面をうまく被覆するのに適していること、適度な熱・水分・空気移動特性を持つことなどにより、被服としてその機能を十分発揮し得たからである。図1は21歳女性の手甲の皮膚表面の引張特性を示している¹⁾。初期の傾斜が低く、漸次高くなって上方へスイングアップする、下に凸の非線形性をえがくのが特徴である。

図1 手の甲の皮膚表面の引張特性

布の引張特性もまた皮膚と同様の特有の性質を持っている。この性質は、構成単位である繊維自身の性質だけでなく、糸構造さらには織り構造、もしくは編み構造の繊維集合構造によって付与されている。

本稿では、被服材料として適した繊維集合体である布の特性の解析と、解析に必要な糸、繊維の特性に関するこれまでの研究を概説し、被服材料のみならず、さまざまな用途に用いられ、またさらにその応用範囲を広げようとして

いる繊維状材料について概説する。

2. 布の風合いに関わる布の材料特性

人間は、直接人体あるいは手足に触れる材料について、その良し悪し、好き嫌いなどを感覚的に評価している。このような布の触感には、比較的低荷重域の布の力学的性質や表面特性が影響する。また布の製造時、縫製時、使用または着用時、管理・保全においては、さまざまな変形が複雑に複合した力学的特性が関与している。基本的な変形は、引張、せん断、曲げ、圧縮変形である。構造主軸方向への引張特性は、形態安定性に関する主特性であり、伸長変形の微小領域に見られる顕著な非線形特性は、被服の機能に重要な意味をもつ感覚的性能を支配する要因の一つである。布状繊維集合体の中でも、特に織物は強い直交異方性を持ち、糸軸方向の剛性は大きい、それ以外の方向にはわずかの力で変形を起こすという特徴がある。この織物のせん断変形のしやすさが、身体各部の曲面に沿わせ、身体の動きに適応させることを可能にしており、風合いや着心地と直接関係している。一方、同じ繊維集合体である紙などが一般に被服材料として用いられていないのは、この特性を持ち合わせていないからである。

感覚として捉えられていた布の風合いと材料特性との関係に関する研究は1960、70年代に多くなされ、現在では川端ら²⁾により、風合いの客観評価法が確立し、図2に示す基本的な特性が風合い評価に必要な材料特性であることが明らかになっている。

さらに肌着やスポーツウェアなどの場合は接触冷温感や熱損失といった熱・水分移動特性も直接かかわってくる。

図2 布の風合い計算に用いられる材料特性

3. 布の材料特性と構造理論

布の引張、曲げ、せん断特性は構造力学に基づいて、構造理論が展開されている。実験装置の開発に始まり、力学

MARI INOUE
神戸大学大学院 人間発達環境学研究科
准教授 博士(学術)
〒657-8501 神戸市灘区鶴甲3-11
神戸大学大学院 人間発達
環境学研究科
Tel&Fax : 078-803-7772
E-mail : inouema@kobe-u.ac.jp
〈専門〉衣環境学、被服材料学、繊維工学
〈趣味〉音楽鑑賞

的変形特性の直接測定を経て構造の幾何学から力学特性を理論的に計算し、その計算値と実測値との比較による理論の検証を行う研究がなされてきた。織物の力学的性質を理論的に解析しようとした試みは、1928年、F. T. Peirce³⁾によって始められ、織物構造に対する幾何学的モデルを考えてその構造を解析し、その後の研究の発展に大きな影響を及ぼした。1960年代の代表例としてはB. Olofsson⁴⁾や、P. Grosberg⁵⁾などが挙げられる。1960年代後半から1970年代には、川端らによって布の構造と糸の力学的性質から織物、編布の引張特性およびせん断特性を構造力学的に誘導する方法が提出された^{6,7)}。図3、図4はそれぞれ平織物、平編布の基本構造モデルである。これらの理論は比較的高い精度で予測できることが確認されている。布の構造定数は、織物では経緯方向の糸密度と織り縮み率、編布ではウェール、コース方向の編目密度とループ長が基本構造定数として与えられると図3や図4の布の基本構造モデルが定まり、この構造モデルと糸の性質とから布の基本的な力学的性質が誘導される。

織物の場合、引張変形を与えると、経緯それぞれの糸に引張力が生じ、かつ糸の交点にはこの張力によって糸が互いに押し合う圧縮力が X_3 軸方向に作用する。変形時の構造パラメータは、与えられた変形ひずみ下の、各交差点における力のつり合いによって決定する。糸と糸との圧縮力は、糸の張力と織り角度の関係から導くことができ、織り角度は糸が引っ張られることによって糸の直径が減少するため、その減少量より捉える事ができる。したがって、変形前の構造定数と引張変形に伴う糸の引張特性および糸の直径の減少量によってその布の変形ひずみに対する引張荷重を計算することができる。1984年には川端によって糸の曲げ剛性の効果の導入により理論を改良して、布の低荷重域から破断にいたる伸長過程に適用できる方法が確立されている⁸⁾。せん断変形の場合は経緯それぞれの糸に交差角変化が生じ、交差トルクが発生するので、その効果を理論計算に加える必要がある。編布の場合は糸の引張、曲げ、圧縮、ねじり特性がかかわる。

1993年には三軸織物の引張特性、せん断特性の理論が発表されている^{9,10)}。三軸織物は図5のように、竹籠の構造を織物に応用したもので、単位構造としての基本構造モデルをとともに示している。三軸織物の場合も一般の織物の構造理論を応用することによって、織り構造と糸の引張、圧縮、曲げ、交差トルクの特性をを用いて引張特性、せん断特性を誘導することができる。

これらの理論を用いることによって、織物のさまざまな方向への引張力を求めることもできる。図6左図は、三軸織物の三

図3 平織物の基本構造モデル
y: 糸と糸との間隔、 ϕ : 織り角度、l (エル): 単位構造中の糸の長さ、H: 布の厚さの中心線と糸軸との距離、PP': 布の厚みの中心線、添字 1: 経糸、2: 緯糸、3: 厚さ方向、0: 変形前

図4 平編布の基本構造モデル
y: 糸と糸との間隔、l (エル): 単位構造中の糸の長さ (PQ および RS 間の糸の長さ)、添字 1: 経糸、2: 緯糸、3: 厚さ方向、0: 変形前

本の糸が全く同じ場合に各方向への伸長ひずみ λ と引張力 f との関係をモデル計算した結果である。図6右図は三軸織物と同じ糸で単位面積当たりの重量が等しい平織物の場合を計算した結果である。三軸織物の場合は平織物と異なり、等方性に近い性質をもつため、被服材料として利用するのは困難であるが、保形性にすぐれると考えられる。以上のように布の理論計算は被服材料に限らずさまざまな

図5 三軸織物と基本構造モデル
y: 糸と糸との間隔、 ϕ : 織り角度、l (エル): 単位構造中の糸の長さ、H: 布の厚さの中心線と糸軸との距離、PP': 布の厚みの中心線、添字 1: 縦方向、2: 横方向、3: 厚さ方向、0: 変形前

図6 三軸織物と平織物の異方性

用途の布の設計に有用である。

4. 布の力学特性との関係における糸の力学的特性

上記のように布の力学特性は糸の特性と布の構造から導かれる。糸の性質は糸の構造すなわち糸の太さ、撚り数、糸を構成する繊維の形態や物性に依存する。糸の基本変形は引張、曲げ、糸軸と直交する方向の圧縮、交差トルク、ねじりであり、これらの力学特性のすべてが布の力学特性に関与している。糸軸と直交する方向の圧縮、交差トルク、ねじりの測定装置と測定例をそれぞれ図7¹¹⁾、図8¹²⁾、図9¹²⁾に示す。これらの糸の力学的性質と布の力学特性との関係を図10に示す。

5. 糸の力学的特性と単繊維

糸は細い繊維が一軸に沿って平行に並べられて、形作られている。軽く撚りがかかると繊維はらせん形状をとる。紡績糸では繊維間に多くの空気層が生じ、らせん形状の変形は繊維自身の伸びよりもらせんが糸本体を圧縮しつつ伸びる変形が優先する。この変形は斜線断面の最密充填状態

図7 糸の交差トルク

図8 糸の圧縮特性

図9 糸のねじり特性

図10 糸と布の力学的性質の関係¹³⁾

まで続き、以後は主に繊維自身の伸びとなる。したがって糸の初期変形では、糸の圧縮特性からもたらされる弾性エネルギーが糸伸長の主要な要因となる。そして初期に伸びやすい非線形な引張特性が生じる¹⁴⁾。このような下に凸の非線形な引張特性は繊維の集合構造からのみ生まれてくる。

6. 単繊維の力学的特性

糸を構成する繊維は繊維軸方向に沿った分子の配向により力学特性に強い異方性をもつ。繊維軸方向に沿った伸長

特性は基本特性であるが、他の方向の性質もまた繊維の構造上だけでなく、糸や布といった繊維集合体の力学的挙動を詳細に研究する上で重要である。たとえば、糸のごく初期の伸長特性は糸を構成する繊維のせん断や曲げ特性が関係する。

また、実用時の繊維の破壊は伸長応力によるだけでなく繊維のせん断変形から生じるダメージによる場合が、特に配向度の強い高強度高弾性率繊維にみられる。

繊維の力学特性の詳細を明らかにすることは繊維や繊維集合体の研究をさらに促進するためにも必要である。川端は繊維の力学特性を測定する装置を開発し、さまざまな繊維を計測している¹⁶⁾。

繊維を線形弾性体であり、繊維対称異方性の性質をもつと仮定する。この弾性体の物質特性は図11に示す5個の弾性定数で与えられる。そのうち繊維軸方向、繊維に直交する方向、ねじりによるせん断変形に対応する弾性率、それぞれEL、ET、GL¹⁵⁾について取り上げる。

ヤング率ELは引張試験機によって測定することができる。

ETは、繊維の横圧縮に伴う直径方向の変形量u(m)と圧縮力F(N/m)との間にETが介在する性質を応用して求めることができる。u、FとETとの関係は弾性理論¹⁵⁾と、有限要素法による両方からその一致を確認して用いている。圧縮試験機と横圧縮の原理図を図12に示す。EL>>ETの場合、近似式として

$$u = 4F(0.19 + \sin h^{-1}(R/b))/\pi ET \quad (1)$$

$$\text{ただし、} b = (4FR/\pi ET)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、R；繊維半径、F；圧縮力/単繊維長

実際には実測の2つのF₁、F₂に対し、変形差Δu(=u₁-u₂)を求め、ETを導く方法をとっている。最大応力は圧縮加圧点付近でF/2Rで推定した平均化応力の約2倍となる。

図11 繊維の異方性弾性定数

図12 圧縮試験機と横圧縮の原理図¹⁵⁾

円形以外の繊維の場合は、繊維軸と直交する方向の圧縮特性の分析が困難なため、樹脂で固めるなどして複合則によって求めるなどの手法が必要であると考えられる。

GLはねじり特性より求めることができる。高感度のトルクセンサーをもつねじり試験機を用いている。円形断面をもつ繊維に関しては側面から観察した太さを直径として計算に用いることができる。円形以外の繊維は繊維断面写真から断面積および断面二次極モーメントを求める必要がある。

引張、圧縮、ねじりの等速変形における典型的な羊毛繊維の応力-ひずみ曲線を図13⁶⁾に示す。

これらの図からもわかるように羊毛繊維は屈曲点を持ち、変形過程と回復過程の間にはヒステリシスが存在する。

図13 羊毛繊維の引張、圧縮、ねじり特性

また濡れによってその性質も変化する。

各種衣料用繊維について測定したヤング率とせん断弾性率の関係を図14¹⁷⁾に示す。絹はヤング率だけでなくせん断弾性率も高いことや、高級服地として用いられるカシミアは、ヤング率は他の毛の繊維と同様に高いがせん断弾性率は低いことなど、ヤング率とせん断弾性率の関係から繊維の特徴を位置づけることができる。その他、オーガニックコットンの繊維の性質を捉えた研究もなされている¹⁸⁾。

延伸比の異なるポリエステル繊維とナイロンの異方性については、図15のような結果が得られており、延伸比とともにELは上昇し、GLは減少する傾向がみられた。

次に被服材料ではないが、高強度高弾性率繊維と呼ばれる繊維の直交方向への圧縮変形に注目してみると、ケブラー繊維のように屈曲点をもつタイプと、カーボン繊維やセラミック繊維のように屈曲を生じず砕けるタイプとに分けられる。これらの繊維のELとETの関係を図16¹⁵⁾に、

ETと破断応力または屈曲応力との関係を図17¹⁵⁾に示す。

圧縮特性のタイプの違いにより、ヤング率と圧縮弾性率との関係は異なる傾向がみられるが、圧縮弾性率と破断応力または屈曲応力との関係は同一の直線状にのる傾向が見られる。

7. おわりに

被服材料としての繊維集合体の性質は、図18のように布、糸、単繊維の各性質と構造が組み合わされて作り上げられたものである。

この図では被服を最終用途としているが、繊維集合体は産業用途としてさまざまに利用されている。たとえば、この6月には、BMWグループのデザインチームにより生み出された布製の「BMW GINA Light Visionary Model¹⁹⁾」が発表された。さまざまな用途に応じた製品設計を行うためには、本来繊維が持っている性質を総合的に捉え、その

図14 ヤング率とせん断弾性率の関係

図15 延伸比の異なるポリエステルおよびナイロン繊維のヤング率とせん断弾性率の関係¹⁷⁾

図16 ヤング率と圧縮弾性率との関係¹⁵⁾

図17 圧縮弾性率と破断・屈曲応力との関係¹⁵⁾

図18 被服材料の性質とその要因¹³⁾に著者が加筆

集合構造から生み出される繊維集合体の特性を理論的に把握することがますます必要になってくるであろう。このスタンスを持った上でのさらなる繊維集合体研究がなされることを期待する。

参考文献

- 1) 小島、井上、川端、丹羽；繊維学会誌 **61**, 35-39(2004)
- 2) 川端季雄；風合い評価の標準化と解析 第2版、風合い計量と規格化研究委員会、日本繊維機械学会(1980)
- 3) F. T. Peirce ; *J. Text. Inst.*, **19**, T237(1928)
- 4) B. Olofsson ; *J. Text. Inst.*, **55**, T541(1964)
- 5) P. Grosberg ; *Text. Res. J.*, **36**, 205(1966)
- 6) S. Kawabata, M. Niwa and H. Kawai ; *J. Text. Inst.*, **64**, 21(1973)
- 7) S. Kawabata, M. Niwa and H. Kawai ; *J. Text. Inst.*, **64**, 45(1973)
- 8) 川端；第14回繊維工学研究討論会要旨集、繊維機械学会(1984)
- 9) S. Kawabata, M. Inoue, M. Niwa ; *J. Text. Inst.*, **83**, 104-119(1992)
- 10) S. Kawabata, M. Inoue, M. Niwa ; *Composites Science and Technology (Special Issue Textile Composites)*, **56**, 261-271(1996)
- 11) S. Kawabata, M. Niwa, M. Matsudaira ; *J. Text. Mach. Soc. Japan (English ed.)*, **31**, 7(1985)
- 12) 川端、丹羽、間宮；日本繊維機械学会誌、**29**, T119(1976)
- 13) 丹羽雅子編；「アパレル科学」朝倉書店(1997)
- 14) 川端、丹羽、中林；日本繊維機械学会誌、**28**, 153(1973)
- 15) S. Kawabata ; "Modern Textile Characterization Methods", edited by Mastura Raheel, Marcel Dekker, 311(1996)
- 16) S. Kawabata, M. Niwa, C. Muraki, M. Inoue, M. Uyama, R. S. Rengasamy ; *proceedings of the 9th International Wool Textile Research Conference*, Vol. II, 124-133(1995)
- 17) 井上、丹羽、村木、海沼；繊維製品消費科学、**34**, 356-362(1993)
- 18) M. Inoue, S. Yamamoto, Y. Yamada and Masako Niwa ; *Textile Research Journal*, Vol. 76, 534-539(2006)
- 19) http://www.excite.co.jp/ism/concierge/rid_1833/