

羊毛繊維の特性 Properties of Wool

田中 弥江・仲西 正

Mie TANAKA・Tadashi NAKANISHI

(お茶の水女子大学大学院 ライフサイエンス専攻)

1. はじめに¹⁾

現在、衣料用に使われている獸毛の大部分は羊毛である。BC 6000 年には、野生の羊を家畜として飼育し、計画的に衣料を確保するようになった。原始羊から現在の羊になるまでには、うぶ毛だけが生えるようにする、毛の色を白くする、毛を細く柔らかくする、といった品種改良が長い間続けられてきた。古代ヨーロッパにおいては最高の財産として、あるいは軍事戦略物資として非常に重要であった。秦の始皇帝が築いた万里の長城の建築の目安は、羊が飛び越えられない高さであったと言われている。羊がいれば、衣食の確保が戦地で可能となるため、羊を連れて行けないようでは、補給が追いつかず、戦線の拡大ができなかったからである。また、「旧約聖書」では、子羊や雄羊が信仰の証として用いられており、有名なホメロスの叙事詩「オデュッセウス」は、「黄金の羊」を探し求める冒険に出るところから始まっている。このように実生活、軍事力、文学作品に至るまで、古代から欧州の人々にとって羊は格別な動物であった。一方日本では、羊は十二支として中国より伝来されたが、架空の動物の龍よりもなじみの薄い動物であったようである。明治時代になってやっと羊毛製品が庶民の目にも留まる程度に輸入され、その後軍人の制服から庶民の手にも渡るようになつた。古代よりあまりに羊と無縁であった日本は、いまや羊毛の最終消費国の一である。

2. 羊毛の 7 つの特徴

羊毛は羊が生きていくために重要な役割を持って いる。羊の体の一番外側にある羊毛は、どんな厳し

い環境にも耐えられるような、多様な性質を兼ね備えている。羊毛の特徴は、わかりやすく 7 つにまとめることができる²⁾。

- ① 水をはじくが、水を吸う。
- ② よく染まるが、汚れにくい。
- ③ 細胞は死んでいるが、呼吸をする。
- ④ 水を吸うのに、保温性は優れている。
- ⑤ 燃えにくい。
- ⑥ 紡ぎやすさとフェルト性。
- ⑦ 形状記憶性により弾力性に富む。

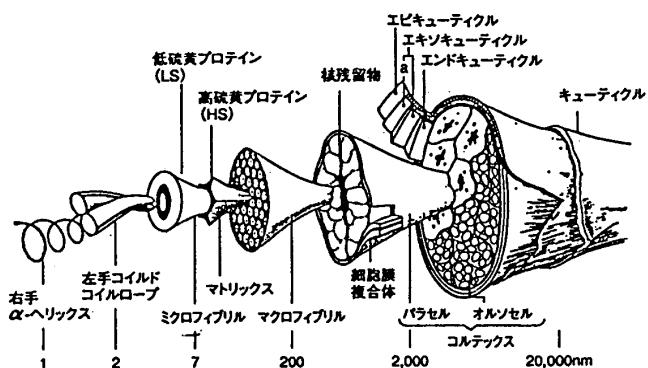
これらの特徴を、まずは主に現象面から説明する。

① 水をはじくが、水を吸う

羊毛の服は、雨水に触れてもすぐにはしみこまず、水滴が球状になることは経験があるだろう。これは、最外層のエピキューティクル (Fig.1) と呼ばれる部分が極めて疎水性の構造をしているからである。しかし、雨水に濡れ続けていると、服は完全に濡れてしまう。これは、羊毛が水蒸気を吸収し続けると、スケール部分全体が開いて親水性部分が露出し、エピキューティクルの疎水性を圧倒するからである。また、羊毛は、特に水を多く含むことのできる繊維として知られ、空气中では含水率 8 ~ 33% の間で変化する。そのため、商取引上の基準として、公定水分率 15% が定められている。

② よく染まるが、汚れにくい

羊毛は、綿や絹に比べて発色性に富み、非常に深い色相を出すことができる。また、染料と羊毛の結合は強固なので、染色堅牢度の面でも優位にある。これは、羊毛が 19 種類のアミノ酸と 1 種類のイミノ酸で構成されているため、染料と数多くのイオン結

Fig. 1 Minute structure of wool.³⁾

合やその他のさまざまな結合様式で強く結びつくことができるからである。

水系の汚れに対しては、水は纖維表面から纖維内部に入りにくいので、汚れの成分も纖維内部に到達することはできない。羊毛が水を吸うのは、水が水蒸気の場合か、含水率が高くなつて羊毛が濡れの状態になっている場合であり、通常の場合では、汚れ成分が纖維内部に侵入することはない。

③ 細胞は死んでいるが、呼吸する

当然、毛刈りされて以降、羊毛製品は死んだ細胞でできている。しかし、しばしば「羊毛は生きている」と表現されることがある。これは、羊毛が多重構造（Fig. 1）をしており、外的環境によって部分部分が異なつた動きをしようとする、つまり、水蒸気を放出したり、表層のスケールが開閉したり、纖維の屈曲が変化したりするため、あたかも生きている組織のように観察されるからである。

④ 水を吸うのに、保温性は優れている

羊毛がよく水を吸うことは前に述べたが、羊毛が水を吸収するときに発生する吸湿熱は綿の2.5倍、ポリエステルの20倍である。羊毛が多量に水を含んでも、含水率が33%以下であれば、水は纖維内部にため込まれるので、水が纖維表面に出て、気化熱で急激に体温を奪うようなことはない。

保温性は、熱伝導率の極めて小さい空気をいかに保持できるかにかかっている。羊毛纖維は捲縮というねりを持つので、隣接する纖維間にたくさんの隙間ができる、羊毛編物や織物は抜群の保温性を有することができる。

⑤ 燃えにくい

羊毛は、空气中では燃え続けることはない。綿やポリエステルなど通常の衣料用途の纖維は、羊毛以外のいずれもが、空气中で燃え続けてしまう。これは、羊毛が多量に水分を含んでおり、またアミノ酸の一部として窒素を多量に含んでいるからであると考えられる。

⑥ 紡ぎやすさとフェルト性

紡ぎやすいとは、ある構成纖維本数を維持したまま、撚りをかけるのが容易なことである。この過程で重要なのは、適度な纖維間摩擦である。羊毛纖維は、捲縮とスケールが存在することで、絡みやすく、纖維同士が点接触となるため、水と油剤を使った纖維間摩擦が調整しやすい。

フェルト性にも、纖維間摩擦が関わるが、こちらは方向性の差が重要であり、羊毛の場合はこれが他の纖維よりも格段に大きく、そのため、質の高いフェルトを作れる。フェルト化が発現するのは水に濡れた場合であり、乾いていたり、有機溶剤中では発現しない。これは、纖維表層のスケールが、水に対する膨潤度の異なる組織が層状に貼り合わさっているため、バイメタル現象で反り返り、スケールの重なり部分が開くからである。

⑦ 形状記憶性により弾力性に富む

純毛のスーツなどは、着用シワができても、風呂などの湿気の多い場所に一晩つるしておくと、たいていの着用シワは消えてしまう。この現象は、羊毛内部で共存する丈夫な構造（結合）と弱い構造（結合）で説明することができる。弱い構造は、温度、湿度、外力などによって容易に結合形態が変化し、これが着用シワとなって現れる。一方丈夫な構造は、スーツなどの元々の形状を作っていて、この丈夫な構造が破壊されない限り、変形を元に戻す安定化の方向に働く。

また、羊毛内部の骨格は、 α -ヘリックスと呼ばれるらせん構造になっていて（Fig. 1）、バネのような形状をしている。このらせん構造は、30%ほどま

で引き伸ばすことができ、また完全に元に戻すことができる。これほどの弾力性を有する繊維は非常にまれである。

3. 羊毛繊維の組織

羊毛は、同じタンパク繊維であっても、細胞からなるという点で絹とは異なり、また同じ細胞から成っていても綿とは単細胞ではない点で異なる。羊毛繊維は、大まかに①表皮(cuticle; キューティクル)、②皮質(cortex; コルテックス)、③毛髄(medulla)の部分に分けることができる(Fig. 1)。

① キューティクル

キューティクルは厚さ約 $0.5\mu\text{m}$ で、鱗片状の構造を呈しているため、一般に「スケール」と呼ばれている。このスケールによって、摩擦抵抗に異方性が生じ、それがフェルト化の原因となる。スケールは乾燥しているときは閉じ、湿ると開くという性質を有している。そのため、羊毛が濡れの状態になると、スケールが開き、スケールが絡み合ってフェルト化する。キューティクルはかなりの親水基を含むが、その最外層は疎水性であり、これが羊毛繊維の撥水性に起因している。この疎水性の源は、18-メチルエイコサン酸(18-MEA)という特殊な脂肪酸で、エピキューティクルのシステイン残基にチオエステル結合していることがわかっている。さらにこの18-MEAは、エピキューティクルの上(表面)のみに存在することがわかっている。つまり、乾燥状態の羊毛はスケールが閉じて疎水性であるが、含水率が大きくなりスケールが開くと、スケールエッジが立ち上がり、親水性部分が多く露出して、全体として親水性となる。

② コルテックス

コルテックスは、好塩基性のオルソコルテックスと好酸性のパラコルテックスとの2つに区分される。よく捲縮した羊毛では、両者が偏在しており、あたかも2つの部分が貼り合わさったような二層構造となっている。この二層構造は、バイラテラル構造となっている。

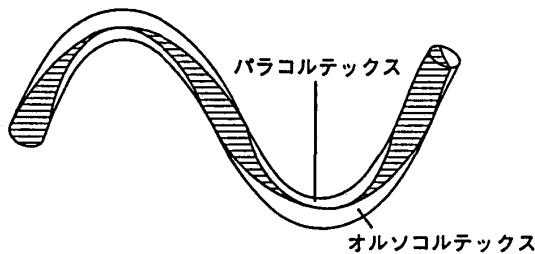


Fig.2 Model of bilateral structure of wool.⁴⁾

呼ばれ、バイメタル的な性質を持ち、吸湿度に応じて羊毛の捲縮は伸縮現象を起こす。捲縮とバイラテラル構造は、Fig. 2 で説明できる。これは、半波長に1回の周期でオルソコルテックスとパラコルテックスが反転している形態を表している。半波反転を繰り返すことで、パラコルテックスが常に捲曲の内側に位置し、二次元的な連続となることで捲縮が起こる。この捲縮は、羊毛の構造自体によるものなので、羊毛が糸や織物に加工されて何度も伸ばされても、容易に元通りになる。羊毛の織物が長い間型崩れを起こさないのはそのためである。またこの捲縮によって、保温性、弾力性などを得ることができる。

コルテックスの化学的な性質であるが、塩基性染料、カチオン性界面活性剤、重金属を含む多くの高分子イオンは、オルソコルテックスへの親和性が高く、選択的に結合する。これは、オルソコルテックスの方がシスチン架橋が少なく、膨潤しやすいので、水や化学物質が行き渡りやすく、化学反応が早く進むことが一つの要因であろう。

4. 羊毛の化学的性質

羊毛は、19種類のアミノ酸と1種類のイミノ酸で構成されているため、ポリペプチド結合、シスチン結合、アミノ基、カルボキシル基、システィン、アルコール性・フェノール性水酸基などが豊富で、しかもこれらの官能基は極めて反応性に富み、物理的化学的な作用を受けやすい。特に、活性なアミノ基とカルボキシル基とを有することから、一般的には



の形で示される。水溶液に入れた場合、溶液のpH

によって等電点の上下で電荷が次のように変わる⁵⁾.



羊毛は等電点 (pH4.5~5程度) で最も安定で、膨張しにくく、薬品に対しても耐久性が強い。アルカリには弱く、2%水酸化ナトリウム溶液で煮沸すると完全に溶解する。一方で、酸には強い。硫酸に浸漬後絶乾して植物性の混じり物を炭化する「化炭工程」にも耐えることができる⁶⁾。

羊毛がよく水を吸収することは前に述べたが、羊毛の水分率とその物性について紹介する。Fig. 3は、相対湿度 (RH) を変化させたときの羊毛の荷重伸長曲線である。ここで、相対湿度が高いほど、羊毛繊維の水分率も大きい。この曲線は、S字型であり、伸び率の約3%と約30%のところに変曲点があることが特徴である。この変曲点を境に3つの領域に分けて、繊維内部の挙動を説明することができる。はじめの荷重の小さい方では、 α -ヘリックスの水素結合やイオン結合が消滅する。中間の領域では、 α -ヘリックス鎖が引き伸ばされる。荷重が大きい方では、ジスルフィド (S-S) 結合の開裂が起こり、開裂の割合に見合って切断伸度が増す。グラフからは、羊毛繊維の水分率によらず、最終破断荷重は同程度であるが、そのときの伸長は倍ほどの差があることがわかる。

このように羊毛は複雑に水分子と結合しているのだが、ここで、羊毛の面白い性質を紹介する。「羊毛は凍結しない」ということである。羊毛を粉末にしてドライアイスで3時間冷却しても、液体窒素に浸しても、羊毛は凍らない。坂部らの研究⁸⁾によると、羊毛中の水分率が約30%のとき、つまり羊毛が濡れた状態になり始めるとき、羊毛繊維中に初めて自由水が生じるという。羊毛繊維中の水は、ほとんどが不凍水であって、どんなに低温でも凍結す

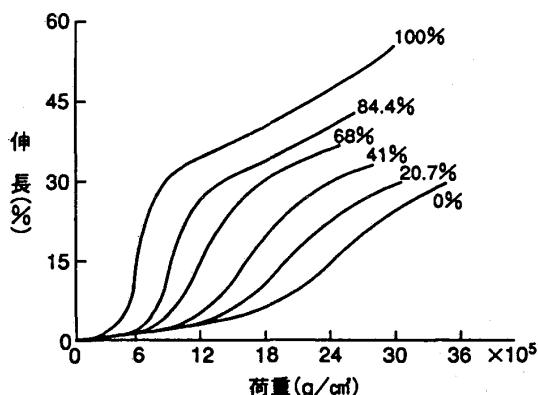


Fig. 3 Curves of stretch vs. load for wool in different relative humidity.⁷⁾

ることはない。これは、羊毛繊維中の水分子の状態が関係している。羊毛中のタンパク質に接近する前の水分子は、それぞれが一定の距離を保てるようクラスターを形成している。ところがその水分子のクラスターがタンパク質に近づくと、極性基同士が結びつく水素結合やクラスターを形成する凝集力よりも強固な、タンパク質と水分子との水和が生じる。クラスターが形成できない水分子は、凝固することなく、不凍水となる。それゆえ、水分率が30%以下であれば羊毛は凍結しないのである。しかし、羊毛のタンパク質の水和は非常に複雑で、その詳細については未だ議論されている。

5.まとめ

羊毛は、その優れた特性により、古代から私たちの生活を支えてきた。撥水性と吸湿性、染色性の良さと防汚性、保湿性、難燃性、紡糸性の良さとフェルト性、形状記憶性と弾力性など、あたかも相反するような性質を、それもこれほど数多くの特性を、羊毛は1本の繊維の中に兼ね備えているのである。

文献

- 1) 長澤則夫, 加工技術, 36(6), 21(2001).
- 2) 中村良治, テキスタイル&ファッショ, 12(7), 385(1995).
- 3) 長澤則夫, 加工技術, 36(10), 61(2001).
- 4) 日本繊維機械学会繊維工学刊行委員会, 繊維工学(II)繊維の製造・構造及び物性, 日本繊維機械学会, 1983, p.187.
- 5) 高分子学会高分子錯体研究会, 生体と金属イオン, 学会出版センター, 1991, p.284.
- 6) 改森道信, 染色工業, 38, 2(1990).
- 7) Astbury and Street, Phil. Trans. Proc. Roy. Soc., 230A, 75(1931).
- 8) H. Sakabe, H. Ito, T. Miyamoto and H. Inagaki, Textile Res. J., 57, 66(1987).