

シリーズ「透湿防水衣料, アウトドアウェアの現状」

7. 安全登山のための衣料品の考え方

織方 郁映

繊維製品消費科学 Vol. 53 No. 1 別刷

社団法人 日本繊維製品消費科学会

7. 安全登山のための衣料品の考え方

織方 郁映

1. はじめに

筆者の専門は有機合成用の触媒に関する分野で、化学技術に関する研究組織の管理に携わったことはあるが繊維や衣料には素人である。にもかかわらずこの分野に関心を持ったのは、約 10 年前に日本山岳会の科学委員会の例会で「寒いとき暖かく、暑いとき涼しい」とエアコン並みの宣伝をする登山用衣類のことが話題になってからだ。調べたところ、この肌着の繊維は米国NASAの為に開発された温度調整素材と称して、約 26°C を境に液体⇄固体の相変化をするパラフィンのマイクロカプセルが約 20% 含まれているため、これを着て暖かいところから寒い場所へ出た際には、そのパラフィンの全部が固体に変化し終わるまで、またその逆の場合には全部が液体になるまで約 26°C に保たれるというのだ。そこまでは科学的に正しいのだが、保温時間は含まれるパラフィンの量次第だから、重さも分厚さも気にする必要がなく、布地が擦り切れる心配もない宇宙服ならまだしも、肌着では相変化は瞬時に終わってしまう。従って、ゴルフ場の冷房が効いたクラブハウスから真夏の太陽が照りつけるコースに出た途端や、暖房が効いた部屋から寒風の中に飛び出した当座などの急激な温度変化ショックから一時的に体を守る程度の効果しかないのだ。ほかにも「汗の水分を吸って発熱するから暖かい」と宣伝する肌着もあり、一頃は店頭で透明な小袋に入った発熱繊維の綿が置かれてあり、客にその綿を取り出して手に持たせ、水をスプレーして感じる一瞬の発熱で宣伝文句を納得させていたが、探究心のある客がその濡れた綿を持ち帰っていろいろと乾燥してみても再度の発熱は認めていないはずだ。商品の宣伝にはこのような科学知識の誤用や誇張がありそうなので、それを正しく判断するための基礎知識を登山者に持ってもらおうと、日本山岳会内で講演会を開いた。本稿はその内容から登山の安全に係わり

そうな部分のみを引用したので本誌の読者には周知のことが多いと思われるが、登山者側の考え方が少しでもご参考になることを願って執筆依頼をお受けしたことをご了承いただきたい。

2. 登山の安全と衣料品

登山用衣料は肌着、中間着、保温着、防風着（ウインドブレーカー）、雨着（レインウェア）に大別され、夫々に要求される性能がある。肌着には肌触りが特に要求されるが、肌着、中間着、保温着に共通するのは丈夫さ、軽さ、洗濯し易さのほかは乾き易さが最も重要であり、これらの性能は企業の創意工夫と努力によって、夏用と冬用を考えてほぼ満足すべき状態にまで高められており、レイアリング（重ね着の仕方）^{1), 2)} によってあらゆる気象や行動条件に対処することが登山の楽しみでもある。しかし登山者が商品の購入に際して困るのは性能の説明が解り難いことである。

衣料の宣伝文句に科学的な間違いがあったり性能表示が不正確だったりしても消費生活センターに苦情が出るようなことがないのは、ザイルやカラビナなどとは違って安全には直接関係ないからである。しかし 2009 年夏の北海道トムラウシ山での低体温症による大量遭難を機に防寒着や雨着の性能への登山者の過信が浮かび上がった。かつては、確実に安全地帯に到達できる目算が立たない限り雨の日には行動を止めて停滞するのが原則であったが、雨着を信頼するあまりに強い風雨の中に突入したとも考えられるのだ。防水・透湿性能や防寒の限界を知って賢く行動しなかった登山者にも責任はあるが、性能を過信させるような宣伝をした側にも責任の一端はあるだろう。

濡れても冷たさを感じず、また乾き易くてすぐに保温性を回復できることは登山用衣料の最も大事な条件であり、少々濡れても着たままで乾かすことができる必要がある。雨具の透湿性能がいか

に優れていても、着用の仕方が不適切であれば汗による内からの濡れは激しく、登山者の命の安全を脅かす。安全性は科学的に選ばれた衣料の合理的な重ね着の仕方によって確保される。

3. 低体温症を避けるには

人体では摂取したカロリーの約 75%は熱として放散されるというから、大人 1 日当りの平均必要摂取カロリーを 2,400Kcal とすると 1 日の発熱量は 1,800Kcal となり、これを電力に換算すると約 90W であり、行動していれば体脂肪も燃焼して更に 100~200W はすぐに増える。人体はこれだけの熱源を抱えているのだから、この熱を逃がさなければ暑くて仕方がないが、その熱がどんどん失われて肌の温度が下がれば寒さを感じ、体温が失われ続ければ遂には低体温症になる。体温が失われないようにするには、衣類の熱伝導性を低くすれば良い。水の熱伝導率は空気のそれよりも 20 数倍も高いから、濡れた衣類は乾いたものよりも格段に速く体温を逃がし、溜め込んだ水の蒸発によっても体温を奪う。従って衣類は乾燥状態に保たれねばならない。濡れていても衣類の繊維の間に空気が含まれていればそれだけ保温性は高くなる。従って、登山用衣類は、少なくとも繊維間に水を溜め込まないこと、そして乾き易い必要がある。水を溜めないためには繊維には撥水性が必要だが、ポリエチレン製のレジ袋に付いた水滴がなかなかなくならないように、撥水性の繊維で作った布の水滴は飛び難いし、汗を吸い取らないから肌がじめじめして気持が悪い。しかし水を溜め込まないから、シャワーライミングのように濡れることが前提の着用条件では保温性が高い。濡れた布が速く乾くのは、蒸発させる水の量に対する表面積が広くなるように水が繊維の表面に薄く広がる場合である。水が表面に広がるには水と繊維の親和力が大きくなければならない。しかし、親和力が強過ぎると水は繊維表面から離れ難くなって繊維の間に溜まってしまう。繊維と水との親和性を親水性と呼ぶが、登山用衣類の繊維素材の親水性は強過ぎても弱過ぎてもならない。

4. 乾き易い肌着

4-1 衣料用繊維の親水性

繊維の親水性は表 1 に見るように、その度合いは吸湿率³⁾や接触角⁴⁾の値で表わされ、親水性が強いものほど接触角が小さくて繊維表面に薄く広がる。

表 1 繊維の種類と吸湿性 —接触角と濡れやすさ—

繊維素材名	吸湿率 (wt%/1気圧, 20°C) ³⁾		接触角 ⁴⁾ (θ°)
	(65%RH)	(95%RH)	
ポリプロピレン	0	0	95
ポリエステル	0.4~0.5	0.6~0.7	81
ポリウレタン	0.4~1.3	—	
アクリル系	0.6~1.0	1.0~1.5	
アクリル	1.2~2.0	1.5~3.0	
ナイロン	3.5~5.0	8.0~9.0	70
ビニロン	3.5~5.0	8.0~12.0	
羊毛	16	22	
綿	7	24~27	
レーヨン (再生セルロース)	12~14	25~30	
某社製発熱繊維 (アクリレート系)	27	48	

註) 溶融することができず平滑な表面を作れない素材の接触角は測れない。発熱繊維の吸湿性はメーカーのカタログの等温吸湿曲線から読み取った。

表 1 の吸湿率は相対湿度 (RH) が 65%か 95%の空气中にその繊維素材を長時間保持した後で測った重さの増加割合である。吸湿と乾燥にはヒステリシスがあって完全に可逆的ではないが、濡れたシャツでもポリエステル製なら雨の日でも湿度が 95%の室内に長時間干せば 99%程度の水は蒸発してしまうが、綿のシャツは乾燥時の重さの約 25%の水を残したまま、という違いがこの表からわかる。親水性は高分子化合物である繊維素材の高分子鎖に含まれる極性基が繊維の表面に露出している程度や極性基の種類に依存する。羊毛と綿のシャツでは吸湿率にさほどの違いがないにもかかわらず濡れた場合の冷たさの感じに大差があるのは、羊毛繊維の表面は、極性基の露出程度の少ないクチクラと称する層で覆われているので、吸われた水は表面には留まらず繊維の内部に入り込むからだと説明されている。

極性基とは異種の原子が複数結合した集団(基)が磁石のように極性を示すもので、極性は結合している異種の原子のどちらかが他方よりも電子を引き付ける力が強い場合に現われる。例えば酸素原子 (O) や窒素原子 (N) は炭素原子 (C) や水素原子 (H) よりも電子を引き付けるので、C-O, C-N, O-H, N-H などの結合では O や N はマイナ

スに、他方はプラスに帯電して恰も磁石のように振舞う。水の分子 (H-O-H) の O-H 結合も僅かに分極しているからその H は別の分子の O と引き合って n 個ずつ集まった集団 $(H_2O)_n$ となる。このような引き合いを“水素結合”という。集団間の水分子の入れ替わりは活発に行なわれながら一定の大きさの分子として振る舞っていると考えると解り易い。

水の分子の大きさはメタン (CH_4) とほぼ同じだから、仮に水分子に極性が無かったとすると、水の沸点はメタンの沸点の零下約 $160^\circ C$ に近いはずだが、実際は $100^\circ C$ なのはそのためである。水の分子が集団との結合を切って飛び出す、つまり気化して水蒸気となるにはエネルギーが要る。これが水の蒸発熱、または気化熱で、水 $1g$ 当たり $540cal$ のエネルギーが要る。反対に、バラバラで自由活発に運動している気体状態の水分子が凝集して水になる際には発熱が認められる。これが水の凝縮熱である。更に、水の中で乱雑に、かつ動的に結合している水分子が隣同士で整然と結合して氷になる際と逆に氷が水になる際には水 $1g$ 当たり $80cal$ のエネルギーが出入りすることも周知の通りである。

水素結合はあらゆる分子のプラスに帯電気味の H とマイナスに帯電気味の O や N との間でも形成され、OH や COOH のような強い親水性基は勿論、タンパク質やナイロンのアミド結合、ポリエステルやアクリレートのエステル結合などが露出している繊維の表面に大気中の水分が吸着し凝集して液体の水になるのも水素結合による。

自由だった分子同士が結合して安定化すると、結合前の運動エネルギーが熱エネルギーに代わって放出されるから発熱が観測され、逆にその結合を切るには同量以上のエネルギーが要る。これがエネルギー保存則、またはエネルギー不滅則であり、この法則に反する現象は起こらない。繊維と水分子の結合でも熱が発生する。

水分子 + 繊維 = 吸湿した繊維 + 熱

吸湿する際に他の繊維に較べて目立って多くの熱を発生する繊維が特に発熱繊維と呼ばれているが、吸着できる水の量には限界があるから発熱は間もなく止む。もう一度発熱させるには、熱を加えて吸着した水を追い出して乾燥状態にせねばならない。

濡れた着衣では、繊維との結合を切って水を外部に向けて移動させるためのエネルギーは体温でまかなわれる。体温で暖められた着衣の内側では

蒸発が、その隣のより低温側では凝集が起こり、それが繰り返されて吸着水は着衣の内側から外側に向かって次々と移動して行き、外気に放出される。

発熱量が多い繊維は沢山の水分子と結合することを示す。沢山の水と結合するのは、あたかも強い磁石が鉄粉を芋づる式に沢山引き付けるように強い極性基があるか、繊維表面の極性基の存在密度が高いか、その表面の凹凸が激しくて重さ当りの表面積が広いことを示す。そして、一旦吸湿した繊維を乾燥させるには沢山のエネルギーが必要だから、もし発熱繊維だけで作った肌着があったとしたら、それが濡れたら綿製品よりも乾きにくくて始末が悪いことは明らかである。従って、汗の水分を吸って発熱するから暖かいとの宣伝文句は、科学的には、吸湿性の強い繊維と吸湿性は弱い水分を受け取って放出し易い繊維とを巧みに組み合わせるために、両者間の水分の受け渡しが円滑に行なわれて着衣内部の湿度は低く保たれ、熱伝導率の低い静止空気層によって体温の放出を防ぐから暖かいのだ、と理解するのが正しい。

4-2 濡れた肌着が着たままで乾くメカニズム

上述のように、吸湿性が強い繊維に保持された水を吸湿性が弱い繊維が受け取ることができるのは毛細管現象による吸水力による。

吸湿性が弱い素材は接触角が大きいが、次式から分かるように接触角 (θ) が 90° より小さければ、狭い隙間ではそれなりの吸水力が生じる。水を吸い取る力は毛細管現象によって水が重力に逆らって管の中や隙間を上昇させる高さ (h , 単位は m) で表わされる:

$$h = \frac{2 T \cos \theta}{\rho g \gamma}$$

水の表面張力 (T) は $0.0728 N/m (20^\circ C)$ 、ポリエステルと水の接触角は 81° 、水の密度 (ρ) は $1000 kg/m^3$ 、重力の加速度 (g) は $9.8 m/s^2$ だから、内径 (γ) $0.1mm$ のポリエステルの管を水中に立てると水は管内を約 $4.7cm$ 上昇する計算になる。ポリプロピレンの接触角は 95° 、テフロンは 108° だから $\cos \theta$ の値はマイナスになり、水は圧力を掛けないと隙間に入り込むことができない。ポリエステルやナイロンの布地には水は毛細管現象で浸み込むが、撥水処理を施すと耐水性が生じるのは接触角が大きくなるためである。

吸湿性が強い繊維間に溜まった水を吸湿性が弱い繊維が毛細管現象によって次々と吸い取ることができるのは、後者は吸湿性が弱いために、前述のようにどンドンと水を外部に移動させ放出することで常に吸水性が保たれるからだ。

ポリエステル、ナイロン、アクリルなどで作った衣料が登山用衣料として適しているのは、適度に吸湿性で適度の接触角を持っているから毛細管現象による吸水と温度差による水の移動と放出が容易だからである。従って、着衣の内外の温度差を大きく保てる衣類ほど肌に接する内部から外側に向けての水の移動は速くなる。同じポリエステル製の衣料でも、その繊維が中空になっていたり表面に狭い隙間があるなどの違いのほかに、紡織の仕方によっても乾燥性、従って保温性は大いに異なるから、この面での技術開発競争が活発である。

肌着が濡れていても透湿性の防寒着を重ね着して保温すれば、体温は水分を肌に接する内側から順次追い出すのに有効に使われて空気層は次第に厚くなり、体温による乾燥は順調に進む。重ね着が充分でないと、体温は着衣の外表面からの水の蒸発に使われて肌の温度は下がるから、肌着の乾燥は進まず、体温の低下は一気に進む。

5. 雨着の選び方と着方

5-1 雨着の透湿性能

雨中の行動でもっとも不愉快なのは汗で蒸れて雨具の内側から濡れることだ。ゴアテックス製品が防水・透湿性能が高い雨着の代表のような昨今だが、ゴアテックス製品も最近では初期のものよりも透湿性は落ちているように感じられる。洗濯するとシェル（表布）からゴアテックス膜が剥がれて皺になっていた頃の商品のタグには透湿性能の値が記されていたが、記されなくなって久しい。ゴアテックス膜とシェルの接着度が高まった分、投錨効果（Anchor Effect）による接着によってより多くの透湿用の微細孔が埋められたはずなのだ。雨着は透湿性能を比較して購入したいのだが、それが表示された商品は残念ながら少なく、表示されていても測定法が記載されていなかったり、メーカーによって測定法が異なったりして比較できない場合が大部分だ。

防水・透湿膜はゴアテックスのように膜の素材が疎水性のために液体の水は逆の毛細管現象によって通れないが、気化した水の分子は通れる大きさの細孔を有しているものと、ディアプレックス、

ミズノ・ベルクテック、ダーミザックスなどのように、膜の素材は親水性だが、毛細管現象によって水を通る細孔は無く、水は水蒸気圧の高い側で膜に溶け込み、水蒸気圧の低い方向に拡散して外界に放出されるものの2種類に大別される。

どの膜も水分の透過は膜の両側の水蒸気圧の差によって進められる。水蒸気圧は温度によって決まり、温度が高いと水の分子の運動が激しくなって圧力は高まる。従って、水蒸気の透過速度を高めるには膜の両側の温度差を大きくする必要があり、雨着の下はできるだけ薄着にして体温で内側の温度を高めるようにする。

5-2 透湿性能はどのようにして測定し、表示され、その値から何が分かるのか？

日本では JIS L 1099「繊維製品の透湿度試験方法」に A-1 法（塩化カルシウム法）、A-2 法（ウオーター法）、B-1 法（酢酸カリウム法）、B-2 法（酢酸カリウム法の別法）の4種が記載されている。

A-1 法：

CaCl₂で乾燥した空気と40℃で湿度90%RHの空気の間を試験片で隔てて測る。膜の表裏の水蒸気圧の差は約30mmHgと推定される。

A-2 法：

40℃の水と接して湿度が100%RHの空気と、40℃で湿度が50%RHの空気の間を試験片で隔てて測る。膜の表裏の水蒸気圧の差は約28mmHgと推定される。

B-2 法：

23℃のCH₃COOK飽和水溶液と同温度の純水の間を、試験片よりも透湿性能が優れた防水フィルムで挟んだ試験片で隔てて測る。水が浸透する膜用とされるが、雨着についていえば、防水・透湿膜の両側が水でびしょ濡れの状態を想定して測っていることになる。膜の表裏の水蒸気圧の差は約16.5mmHgと推定される。

アメリカには ASTM E-96-94「Standard Test Method for Water Vapor Transmission of Materials」があり、JISはこれに準拠したと思われるが測定条件は若干異なる。

透湿性能の測定値はJISもASTMも共に透湿速度（g/m²・hr）で表わされる。この値を測定時の膜の表裏の水蒸気圧の差で除した値、即ち透湿速度係数（g/m²・hr・mmHg）によってその膜の透湿性能の大小を比較できる。

例えば、ある雨着の透湿性が9,000 g/m²・24hrsと表示されていたとし、これがJIS B-2法で測っ

表2 雨着の下に着る衣類の種類と透湿性能

下に着る衣類	厚手の 防寒着	中間着	肌着	中間着	肌着
膜の外側の温度(°C)	5	5	5	20	20
水蒸気圧 p_o (mmHg)	6.5	6.5	6.5	17.5	17.5
膜の内側の温度(°C)	6	15	25	22	30
水蒸気圧 p_i (mmHg)	7.0	12.8	23.8	19.8	31.8
膜内外の水蒸気圧差 (Δp) = $p_i - p_o$ (mmHg)	0.5	6.3	17.3	2.3	14.3
透湿速度 ($g/m^2 \cdot hr$) = $23 (g/m^2 \cdot hr \cdot mmHg) \times \Delta p$ (mmHg)	11.4	143.0	392.7	52.2	324.6

た値だとすると、B-2法での膜の両側の水蒸気圧差は約16.5mmHgだから、この値を16.5と24で除した約 $23 g/m^2 \cdot hr \cdot mmHg$ がこの膜（ここでいう「膜」は透湿膜とシェルを貼り合せた布地のことである）の透湿速度係数、つまり $1 m^2$ の膜の両側の水蒸気圧差が1mmHg（1気圧で沸騰している水蒸気の圧力の1/760）の条件で1時間に通過する水の量が23gだということ、透湿量は膜の両側の水蒸気圧の差に比例し膜の厚さに反比例する。従って、外気温が5°Cと20°Cの雨の中でこの布地で作った雨着を着た場合、その下に厚手の防寒着か普通の中間着を着た場合と、肌着の上に直に着用した場合について透湿速度を推算すると表2のようになり、厚着をすると体温は遮断されて布地の表裏の温度差は小さくなるから透湿速度も小さくなる。但し、この表での雨着の内側の温度は推定値であり、外側の湿度は降雨中なので100%RH、内側の湿度も結露寸前の100%RHとし、温度と水蒸気圧の関係は化学便覧⁴⁾によった。

山本⁵⁾によれば体重60Kgの大人の脱水速度は約300g/hrで、その内で吐く息に伴って出る分を40%とすれば発汗速度は180g/hrとなり、雨着の汗の湿気が通過できる部分の面積を $1 m^2$ とすると、表2の透湿速度の値が180より小さいほど雨着の内側の結露はひどいことを示す。表2によれば、肌着の上に直に雨着を着た場合の透湿速度は発汗速度より遥かに大きいから、雨着の内部は十分に乾燥状態に保たれるが、ダウンジャケットの上に着たりするとダウンはびしょ濡れになる。従って雨の中に出かける際の心掛けは、若干寒さを感じる程度に薄着して、汗をかかない程度で休まずに行動することである。雨着を着た上にポンチョなどを被ると、透湿膜の表裏の温度差は小さくなる

から蒸れ具合は激しくなる。

最近では透湿性能を透湿速度ではなくISO 11092による透湿抵抗値(Ret値)で示す傾向がある。このRet値は膜を透過する水蒸気が持ち出したエネルギー量(W/m^2)の逆数で、透湿性能が高い雨着ほど水蒸気によって持ち出される熱量が多くてRet値は小さい。従って、低温・低湿の同じ場所で着較べた際に寒さをより感じる商品の方が透湿性は高いことになる。

将来的には、全ての商品に同一の測定法による性能値が表示されることが望ましいが、同一試料をJISの4種の方法で測定して得た値の相関関係を調べて相互の換算係数が求められれば、異なる測定法による値からでも性能を比較できて有難い。それぞれの測定値間には相関性があるはずで、東京工業大学化学工学研究室・伊東章教授によれば、B法とA法による測定値の相関性は疎水性透湿膜と親水性透湿膜では異なるが透湿度モデル計算に良く合うことが確認されている。現在の測定法の問題点は、たとえばA法では7cm×7cmの試験片を切り取って試験機関に持ち込む必要があることであり、相対値で良いから、雨着のままで登山者が自ら測定して性能を比較できる方法を開発したいものと考えている。

6. おわりに

肌着やシャツ類に関しては、更なる改良や差別化は着心地やファッション性の問題であって、安全上は現在の性能で充分といえるが、雨着については透湿性や軽さ丈夫さの面で更なる進化の余地がある、といえよう。

雨着の布地は機械的に弱い防水・透湿膜を保護するためにシェルと称する表布と貼り合わせたも

のが一般的であり、シェルの外表面は撥水処理してある。その理由は、雨着の表面が濡れそぼつのは不快であるばかりか、濡れた布は熱を速く逃がすし、汚水が付着して汚れ易いし乾かし難いからだ。

いずれにせよ、貼り合わせではなくて薄くて軽く、耐水性、透湿性、強度でも優れた雨着の出現が待望され、世界に冠たる技術力を有する日本の繊維・紡績企業によって、ほどなくその希望が叶えられることを期待したい。

文 献

- 1) 細田 充, 賢い山のウエア選択術, 山と溪谷社 (1999)
- 2) 今井 泰博・西原 彰一, 山で着る・使う, 山と溪谷社 (1995)
- 3) 日本化学会「化学便覧応用化学編」丸善 (1986) p 1138~1144
- 4) 日本化学会「化学便覧基礎編」改訂 2 版 丸善 (1975) 接触角は p 625, 水の蒸気圧は p 707
- 5) 山本正嘉著「登山の運動生理学百科」東京新聞出版局 (2001)



おがた いくえい
織方 郁映

昭和 5 年生。

東大工学部応用化学科大学院修士課程を終了して北炭(株)石炭化学研究所, 東大工学部助手を経て通産省工業技術院東京工業試験所(後に化学技術研究所に改称。現在の産業技術総合研究所の一部門)に勤務し, 同所を所長で退官。直ちに英国の総合化学会社 ICI(インペリアル・ケミカル・インダストリーズ)の筑波技術研究所の所長を務めた後に東芝系商社の技術顧問や日大文理学部非常勤講師を経て平成 18 年 3 月以降は無職。工博。東大スキー山岳部OB。日本山岳会会員。