透 湿 性 防 水 布*

安 田 武**

最近の技術

1. まえがき

最近, "Gore Tex" Fabrics と呼ばれる透湿性防水布がアウトドアスポーツ, 特に登山界で注目されている¹⁾²⁾. あとで詳しく説明するように, "ゴア テックス" とは, ポリテトラフルオロエチレン (テフロン) を高温で引伸ばして造った多孔性材料で, このフィルムを布にはり合わせたものが "ゴア テックス" ファブリックスである. この布は, 多孔性のために水蒸気を通すが, テフロンが高い はっ水性をもっているのを水を通しにくい. このように透湿性がある, 防水性のある布は登山者に待望されたものであった. このほかコーティングによって同様な機能をもたせた布も多く, 最近, これらを利用して, 雨の中を登山する「全天候登山」という言葉も流行しはじめた³⁾. また, "ゴア テックス" 第二世代と呼ばれる改良品が発売されて注目されている⁴⁾. この布と他の類似の布とを JIS の規格等で比較して, 細かい数値を並べて比較したり, JIS の再検討や詳しい実用性能の分析はこれからの問題である. そのために有益な解説もある⁵⁾.

2. 雨衣と凍死

雨にうたれて凍死した例は数えきれないほど多い. 夏山でも凍死は起る. 凍死は凍傷と違って, 0℃にならなくても起ることに注意する必要がある. 文献⁶⁾によると「第2次大戦中にドイツ医師団が強制収容所で行った非人道的な実験によると, 人間を 0℃近くの水中に浸したときに, 直腸温が 25℃くらいになると死に至る. 体温が 35℃以下になった場合を低体温症といっているが, 脳機能の障害によって, 判断や活動がにぶり, 歩行が無器用になり, 応答がまともでなく, 不可解な言動がみられる.

体温 (直腸温) 30℃ぐらいになると意識が失われるが, 回復しにくい死は, 体温 (直腸温) 26℃ぐらいで訪れる。」とのことである. もし, 同伴者がいて, 雨にうたれた遭難者を危険な行動から守ってやれたとしても, ぬれたまま停止しておれば活動中のように産熱によって自分の体を暖めることができないから, どんどん体温が低下して 2 hr ぐらいで死に至る. かつて富士山で元気な若者たちが雨の中をテントから出て下山を始め, まもなく大量凍死したことがあるが, 極めて当然の事故である. 夏山でも雨中の登山は極めて危険である.

3. 不通気性防水布

ナイロンが市場に現われてから 20 年以上の年月が経つが, 合繊織物の通気性防水布は, ついに成功しなかったといつてよい. そのために, コーティング加工が盛んになって, 織物の目を合成樹脂でつめて, 防水性だけを高めた製品が普及している. 内部から汗ばんでぬれるということだけでなく, 不通気性防水布は, テントや寝袋に用いられたときに, 酸欠や一酸化炭素中毒の危険がある. 1953 年の冬, アメリカ K2 登山隊は高所で激しい頭痛がして, 吐き気があり, 物が二重に見えた. 彼らは不通気性ナイロン テントの半窒息状態が原因だと非難した. 8 月 10 日, テントのなかで, 夜, 隊長のハウストンは精神が錯乱し, 胸の苦しいのは, テントのなかの酸素の不足によるものだとし, 「僕はちゃんと調べてあるんだ, もし僕にテントに穴をあけさせないなら, みんな 3 分間で死んでしまうぞ」と繰返し繰返しテントに爪で穴をあけようとして虚脱におちいっていった. アメリカはその頃, コーティング加工の輝かしい発展を誇っていたが, ヒマラヤ登山史における栄光の機会を失った.

1958 年 7 月中旬, アラスカのある山陵で, 通気性テン

* Waterproof Breathable Cloth.

** T. Yasuda, 武庫川女子大学 家政学部 教授(工博)

トと不通気性テントに、それぞれ2人ずつの登山者が入っていた。吹雪にとじこめられた3日目の朝、不通気性テントに眠っていた1人は、酸欠、炭酸ガス充満によって意識を失い1人は死亡した。

その他、寝袋の上に不通気性シートをかぶっていて死亡した例もある。また不通気性テントのなかでストーブを燃やして、一酸化炭素中毒死した例もいくつか知られている。しかし、実は現在、日本で市販されているテントの大半が不通気性ナイロン コーティング テントであって、その中で炊事をしたり、寝たりすれば、頭痛や吐き気にはいたらぬまでも、翌日の行動に目に見えない影響を及ぼしていることは、容易に想像し得る。このような、いろいろな意味で、通気性透湿性防水布の出現が待望される。

1961年7月に、京都大学探検部が「知床半島無名湖学術調査隊」を出した。著者が隊長になって参加した。雨の対策が重視され、ウレタン コーティングをした不通気性完全防水のテントが携行された。そのときおもしろい体験をした。冷たい雨が降り、激しい風が吹いて、テントにとじこめられていた日に(気温は15℃だったが)テントの天井を眺めていた。ドドッ……と風がテントをゆさぶると、パラパラッ……と水滴が落ちてくる。それが、隊員の寝袋に降りかかる。若い隊員の体温で、寝袋の表面からは水蒸気が立ちこめている。天井で結露し、雨のように降ってくるわけである。これではいつまでもたっても乾くわけではない。換気孔を全開にして、内部の水蒸気がいくらかでも出ていける状態にしてみても、結露は防ぎきれず、内部の温度を下げる以外に方法がなかった。

3. 通気性防水布

いわゆるビニール レイン コートの内部が、汗のために水蒸気が増して、高温度になると不愉快な状態になるので、小さい穴をあけ水蒸気を外部に出してやれば、快適さが取戻せると考える人が多いようである。

これまで、十年ぐらい前に、たとえば“ブレステックス”などの通気性防水を特長にしていた製品が発売されたことがあるが、これらを実用してみると、雨に遭ってはじめはうまくいくようだが布の表面が無数の水滴におおわれ、やがて全面が水の膜でおおわれるようになると、毛細管現象のように、内面に水がしみ込んでくる。このように通気性は気やすめにすぎないことがわかった、いつものこと、ポリエチレンや塩化ビニルやゴム引き布のレイン コートの方が完全防水でよいと思うようになる。

蒸れない防水布にはいくつかの型があるが従来の加工法から大別すると、①コーティング膜のような耐水膜に穴をあけるもの、または、②布のように穴のあるものに

防水するもの、の2種になる。しかし実用結果として、明らかに最も優れているのは、第3の種類の“ゴア テックス”である。これを上記の①と同じと思違いしている人が多いが、上記の2種の方法のいずれでもなく、その合成されたようなものである。

4. 透湿(通気)性防水性の条件⁷⁾

一般に模型的に無数の毛細管を束ねて水面に立てたような場合を考えてみると、液体の表面張力を T 、この液体と管の素材との接触角を θ 、管外と管内の液面の高さの差を h 、液体の密度を ρ 、重力の加速度を g とし、 h について管内の液面が管外の液面より高い場合を正、低い場合を負とすれば、

$$h = 2 T \cos \theta / \rho g r$$

となる。ここで、

$$\theta < 90^\circ \text{ のとき } h > 0$$

$$\theta = 90^\circ \text{ のとき } h = 0$$

$$\theta > 90^\circ \text{ のとき } h < 0$$

となる。 $h > 0$ とは、毛管中へ液体が(表面張力によって)入り込んでいくことを意味する。 $h < 0$ とは、圧力をかけてやらない限り液体は入れないことを意味する。毛管の集合体と見なせるような衣服素材について考えると、 $\theta < 90^\circ$ なる物質の衣服素材では水が浸透し、 $\theta > 90^\circ$ なる物質の衣服素材では、一定の耐水圧を有することになる。このことから、水がしみ込まないためには、材料の接触角が 90° 以上でなければならないことがわかる。結局、透湿性防水布の決め手となるものは、網状膜の材料の水の接触角 θ である。文献によると、例えば、 $\theta > 90^\circ$ のものはシリコン、ポリプロピレン、テロンであり、多孔性防水層の材料としては、これらが用いられねばならないことがわかる。なお、この式を利用して耐水圧を考えてみると、

$$F = -2 T \cos \theta / r$$

の関係が得られ

$$T = 72.5 \text{ dyne/cm}$$

$$\theta = 104^\circ$$

$$r = 0.2/2 = 0.1 \mu$$

とすると

$$F \approx 3.58 \text{ kg/cm}^2$$

の値が得られる。実測値は最大孔径 0.2μ のとき、ほぼ 4 kg/cm^2 付近の値が得られていて、計算値とおおむね一致する。このように耐水圧は孔径と素材の接触角からおおむね予想しうる。

5. ゴアテックス

5.1 歴 史

ポリテトラフルオロエチレン(テフロン)のフィルムを

研究していたロバート ウィルトン ゴアは、テフロンフィルムを327℃まで加熱して、たて・よこに引伸ばしてのちに冷却すると、1 in² 当たり90億個の穴があいたものができることを発見し、1973年6月14日に W. L. Gore 社によって、米国特許が出願された。この製品はフィルタ バッグ、マイクロ フィルタ膜、紐、スフ、縫糸、接着シール材、人工血管、ラミネート織物等が工業化され、いろいろな分野で実用され、このうちラミネート織物は4年間の研究ののちに、1976年1月1日から主として戸外用材料として市販されている。極東地域ではゴア ジャパン社によって製造販売が行われている。

5.2 電顕観察

“ゴア テックス” (ラミネート織物) を電子顕微鏡で見ると、ナイロンやポリエステル繊維の間に、“ゴア テックス” (フィルム) が見える。図1は表面側から

図1 表面から見た図 (×10 000)

見たものである。これをナイフで切断して側面から見ると、網目状構造が立体的になっていることがわかる (図2)。だから、90億個の穴といっても、実際には非常に複雑な曲がりくねったトンネルになっているわけである。“ゴア テックス”はフィルムだけでは強度が不足する

図2 断面から見た図 (×2 000)

ので、他の織物または不織布と2層または3層のラミネート構造になっている。これを“ゴア テックス”ファブリックスと呼んでいる。さらに最近、第二世代の“ゴア テックス”ファブリックスが出ている。これは中層裏面に親水透湿性の膜をコーティングしたもので、この膜は通気性はないが透湿性があり、人体から出た脂質が“ゴア テックス”層に入って防水性を低下することのないように吸収する機能を持っている。

6. 透湿性

水分が膜や布を通る原因となる driving force に対して透湿性の値を評価しなければならない。一般に、JIS等によって測定して、透湿性の値の高い材料は、どんな条件でも蒸れないと考えられている場合が多いのである。膜の両面の水蒸気圧の差を ΔE とすると、透湿量は ΔE に比例し、水蒸気分圧 (E) の高い方から低い方に水分は移動している。たとえば水を入れたカップの中の E よりも外部の E が高いときには外部から内部に水蒸気は移動する。人体をカップの中の水分にたとえたとすると、いかに発汗して蒸れていても、外部の方の E が高ければ、水蒸気は出ていかぬどころか、外部から内部に入って、いっそう蒸れる。また、たとえば、衣服内が20℃75%のとき、外面が一面に5℃に雨水におおわれてたとしても、水蒸気は内から外に出てゆく、だから“ゴア テックス”ファブリックスの表面には防水性を持たせることにはあまり意味がない。

6.1 蒸発法

直径40 mm、高さ65 mmの秤量ビンに水を30 cc 入れて、各試料布でカップの口をおおい、ことに密にカバーをしておく。それを秤量し、容器の中の水が試料布を透って蒸発する、水分の減少量を測定する。測定はいずれも、20℃±1℃、湿度65%内外の恒温恒湿中で行った。結果を図3に示す。この蒸発透湿性をみると、“ゴア テック

図3 蒸発法

ス”がすぐれた蒸発透湿性を示している。また、ビニール レイン コートは、水を入れた容器を密閉するとすぐ、内部に水滴が生じはじめ、まったく水蒸気の透過が行われないことを示している。

6.2 酢酸カリ法

口径56 mm, 高さ82 mm のポリプロピレン カップのなかに過飽和酢酸カリウム溶液を2/3ほど入れ, ラミネート用“ゴア テックス”フィルム(第1世代)で密封したものを測定カップとし試験布は, (1)“ゴア テックス”第1世代布, (2)“ゴア テックス”第2世代布, (3)“エントラント”を用いた。試験布でおおった測定カップを倒立させて, 水槽の中に入れ, 試験布を通過する水蒸気を測定カップがどれだけ吸収するか, 時間ごとの重量増加を測定した。実験は常温で行った。水温は15.8℃~17.2℃である。結果を図4に示す。“ゴア テックス”の

図4 酢酸カリ法による時間と透湿量の関係

第2世代は裏面を水に向けると第1世代と同様の結果となるが, 表を水面に向けると異なった値となる。

7. 着用テスト

“ゴア テックス” レイン パーカの着用時における, 防水性についての初歩的なテストを各種行ってみた。

ホースで水をかけた場合, 一箇所に水圧がかかって身体が痛く冷たさが身にしみたので放水時間は2~3 min 程度であったが, “ゴア テックス” は水を全然透すことなく, また着用している間, 走ったり跳んだりしていたが蒸し暑さは感じなかった。

次に, レイン パーカ上, 下を着用し, 小雨の中を約6 min 間バイクで走った。その感想は, 今までの自転車やバイク用のレイン コートはナイロンに樹脂加工されたものだったので, 水は透さないが空気も通さないといったものであるため, 着用すると蒸れ, 雨にぬれると外気

温と体温との温度差で, 中まで湿気をおよび肌にひっつく感じがしたが, “ゴア テックス” レイン パーカは, 水がかかると冷たいという感触はあるが, サラッとした感じで, ベタツとするような湿気をおよびることはなかった。フードにしても口からはく息で, 顔中が蒸せてきて顔にひっついて困ったが, “ゴア テックス” はそういうことはなかった。

また, “ゴア テックス” の快適さを確かめるのに, “ゴア テックス” のレイン パーカとビニール レイン コートを上下着用し, 走ったあとの身体の湿度を比較した。気温, 24℃, 湿度63.6%, 天候晴れのとき, 被験者A, Bを走らせて, 湿度を測った。測定部位は胸囲線上の胸中心と背中, そして後胴の3点である。測定機器はヒューミック温湿度計を使用した。なお, 個人差をなくすために, 被験者は交互に両方のレイン ウェアを着用し, 2回走った。レイン ウェアの下には綿のランニング シャツを着用した。その結果を表1に示す。これによると, A,

表1 着用テストの衣服内湿度変化 湿度(%)

被験者	測 定	ビニール レイン コート			“ゴア テックス” レイン パーカ		
		背	後胴	胸	背	後胴	胸
A	前	59.6	60.4	61.7	75.0	74.0	73.0
	後	87.9	85.0	86.2	89.9	90.0	93.0
	その差	22.3	19.9	24.5	14.9	16.0	20.0
B	前	59.4	65.7	65.9	63.0	64.3	69.5
	後	89.1	87.2	88.0	79.0	73.5	84.3
	その差	29.7	21.5	22.1	16.0	9.2	14.8

B両者とも“ゴア テックス”の方が低い値を示している。そして“ゴア テックス”は走っても湿度が上がらないことを示している。ビニール レイン コートの着用中, 体温の上昇によりレイン コートの内部に露を生じ, その逃げ場がないため身体がぬれて冷たくなったが, “ゴア テックス”は水滴(露)を生じることはなかった。このことから“ゴア テックス”はすぐれていることがわかる。

8. テントの実用テスト

衣類と同様に, テントは人間が自然に対するシェルタである。ダンロップ社で, “ゴア テックス” テントとナイロンにウレタン加工した不通気性防水テントを, 降雨装置をつけた人工気候室において, それぞれに人が2人ずつ入って, 炊事等を行って実用テストをしたところ, 図5(温度), および図6(湿度)のような結果が得られた。不通気性テントに比べて“ゴア テックス” テントは, 高温多湿にならずはるかに快適であったとのことである。

図5 テントの実用テスト (温度)

図6 テントの実用テスト (湿度)

9. “ゴア テックス” 布の用途

“ゴア テックス” 布の商業ベースで成功している用途はおおよそ次のようなものといわれている。

1. バック パッキングおよびハイキング用品
2. 登山用品
3. 荒天装具 (帆布用品)
4. ハンティング、フィッシング用品
5. ランニング ウェア
6. ランニング シューズ
7. ファッション ブーツ
8. ハイキング ブーツ
9. スキー ウェア

などである。“ゴア テックス” は機能性利用して、このほか、たとえば、病院のマットレスや おしめ、手袋、消防服、化学工場作業衣、水上スキー服などいろいろの分野に用いられている。

参考文献

- 1) 安田 武; 話題を呼ぶ新素材の効用, 岳人, 377号, P.72, 11月号 (1978) 東京新聞出版局
- 2) 桑原 清; 新素材の評判と実際, 岳人別冊 '82の冬山, P.86 (1982), 東京新聞出版局
- 3) 安田 武; 全天候ウェアの素材, 山と溪谷, 6月号, P.92 (1982), 山と溪谷社
- 4) 辰野 勇; 新素材とゴアテックス第2世代, 岳人, 420号, P.28, 6月号 (1982), 東京新聞出版局
- 5) 西川尅弘; 防水・透湿加工ファブリックスの現状, 加工技術, 17, No. 6, P.372 (1982)
- 6) マイクル・ウォード著, 御手洗, 中島訳; 高所医学, 山と溪谷社
- 7) 安田 武, 横山宏太郎, 井尻登美子; 透湿性防水布の性能について, 繊維製品消費学会誌投稿中