

アウトドアスポーツ衣料のためのモデルとしての レイヤードシステムの研究

ミズリー・コロンビア大学 安田 弘 次

Dynamic Heat and Water Vapor Transport Through Layered Fabrics ; a Model Study for Out-door Sport Wear Fabrics

by

Hirotsugu Yasuda

Center for Surface Science & Plasma Technology

University of Missouri - Columbia

ABSTRACT

It is conceived that the activity of water vapor in air space adjacent to skin is the major factor which influence the sensation of discomfort associated with "hot" feeling, because the high activity resists the heat dissipation process by sweating. If one can maintain the activity of water vapor in the space low by selection of fabric systems, it is likely to result in higher level of comfort (lower discomfort). On the other hand, it is also important to recognize that the comfort factor (or discomfort factor) of a fabric system is governed by the dynamic response of the system to the changes in environmental conditions such as the rate of evaporation of water and the excessive sweating from the skin, rather than the equilibrium characteristics of the system.

While there are abundant data dealing with equilibrium characteristics such as moisture regain, steady state permeation rate, etc., there seems to be relatively few data available in literature which deal with dynamic changes of those characteristics in relevant environmental changes, For this reason, dynamic water vapor and heat

transports in transient state were investigated for fabrics made of polyester, acrylic, cotton, and wool fibers by MU Simulator developed at the Center for Surface Science and Plasma Technology, University of Missouri-Columbia. The simulator is designed to investigate dynamic water vapor and heat transport across layered fabrics under two major cases of pure water vapor and sweating.

The overall dissipation rate of water vapor is dependent on both the water vapor transport rate and the water vapor absorption rate by fibers which are mutually interrelated. It was found that water vapor transport is governed by the vapor pressure gradient which develops across a fabric layer. When fabrics having the same water vapor permeability are subjected to a given environmental conditions, the actual water vapor transport rate greatly differs depending on the nature of fibers.

The characteristic differential vapor pressure which develops across the layer is dependent on the water vapor absorption characteristics of the fibers. The differential vapor pressure depends on the balance between the rate of water vapor supply and the rate of water vapor absorption by the fabric material. If these rates are maintained at a comparable level, the higher is the water vapor absorption rate, the lower is the differential vapor pressure for water vapor transport and thus the lower is the overall water vapor transport rate.

It is important to point out that polyester fabric which has low water vapor absorption showed the highest overall water vapor transport rate. However, this high water vapor transport rate is largely due to high differential water vapor pressure across the fabric (due to low water vapor absorption rate by the polymer).

Thus, the highest water vapor pressure near the skin is observed with fabric of highest water vapor transport rate. This observation agrees with a general consensus feeling that polyester is relatively less comfortable despite its relatively high water vapor permeability.

In the case of sweating, the wicking characteristic of fibers plays a very important role. By spreading out liquid phase water in a wider area and depth quickly, dissipation of water is accelerated.

It was also found that the temperature of air space in between two layers of fabric rises when water vapor transport occurs. The temperature rise is nearly proportional to the water vapor absorption

rate of a fabric which is dependent on the chemical nature of the constituent fibers. The temperature rise in the air space by heat of absorption of water by fibers is an important factor when survival factor in severely cold environment (rather than comfort factor in warm weather) is considered.

The importance of water vapor absorbing capability of fibers is two fold. One is the buffering effect in water vapor transport which reduces the differential pressure gradient and the water vapor pressure in air space adjacent to skin. Another is the release of heat of absorption which raise the temperature of air space adjacent to skin. How these factors influence the wearability of fabrics would depend whether comfort factor or survival factor is the major issue. The wearability of fabrics should be evaluated by considering the distinction between the comfort factor in warm and humid environment and the survival factors in extremely cold environment. A careless application of conclusions obtained in the former conditions to the latter cases would lead to a disastrous consequence. The simulator used in this study enable us to investigate this issue in a well defined manner.

This study has clearly demonstrated the importance of the dynamic response rather than steady state or equilibrium characteristics of fabrics. Further studies are needed to elucidate effects of combination of fabric layers which have different characteristics, particularly for the purpose of developing improved out-door sport wear for winter sports.

要 旨

暑いとき、皮膚に接する空間層の水蒸気圧が低く保たれておれば、発汗時に蒸散が容易であるから、快適性が高い（不快感が少ない）と思われる。繊維の種類によって、このような皮膚に近い層の水蒸気圧がどのように違うかを知るために、ミズリー型透湿性測定装置¹⁾を用いて測定を行なった。

測定は、水蒸気法と水滴法について行なったが、水蒸気法の結果から、繊維の吸湿性が衣服の

最内層間水蒸気圧を低く保つために非常に重要で、透湿性が良くても吸湿性が悪ければ、高い水蒸気圧となり快適とはいえない、とのきわめて重要な知見を得た。また、液体状の発汗に相当する水滴法の場合、集合体（織物、編物）として吸水性のある繊維の方が、水分のぬれ広がり容易で、広いぬれ面から蒸散が速く行なわれ、皮膚表面から出された水分が、水蒸気として速やかに外部に移動するため快適であると考えられた。

緒 言

重ね着の層を通して水蒸気が外部にもたらされる場合に、ドライビングホースとなるものは水蒸気圧の差であり、温度にかかわらず水蒸気は水蒸気圧の高い方から低い方に移動する²⁾が、一般に冬期は外気の水蒸気圧は低いから、外部への水蒸気移動は容易である。それに比べて夏期は、外気の水蒸気圧が高いから外部への水蒸気移動は起こりにくく、衣服の蒸れは深刻な問題である。快適性のためには、肌に近い衣服層間の空気の水蒸気圧が低いことが望ましいのは明らかであるが、それを実現するためには、重ね着の順序と材質、つまりレイヤードシステムを工夫することが大切であろうと考えられる。

体温調節のための発汗が容易に起こるためには、例えば皮膚温を 33°C とすると、それに相当する飽和水蒸気圧 38 mmHg よりも、最内層の層間水蒸気圧が低くなければならない。人間は環境条件の変化に応じて重ね着をしたり薄着になったりして、最内層をほぼ 32°C 50% に保っている事実が知られているが、この場合水蒸気圧は 18 mmHg となり、38 mmHg との差によって快適な発汗が行なわれ、体温の維持が行なわれていると思われる。温度も重要なファクターであることは言うまでもないが、これまで、快適性が温度に深くかかわって論じられたことが多いので、水蒸気圧の重要性について注目することは重要であると思われる。

被服材料の透湿性については多くの既往の研究があり、その多くはアイソサーマルな一定条件下で測定されたものであるが、ノンアイソサーマルな条件で測定された研究もみられる。

丹羽³⁾は、実際の透湿条件を考えて、繊維組成の異なる織物（一層）について、透湿が定常状態に至るまでの透湿初期における挙動について検討している。その結果、布の通気性と気孔率との間に

は有為な相関がみられず、吸湿性が大きく関係することをみいだしている。高湿度側から織物を通して低湿度側への透湿現象は、一部は繊維に吸湿され、そして放湿拡散されながら、一部は織物空間を自由拡散していく現象と考えた。吸湿率の大きいものほど透湿速さが緩慢となり、定常状態になる時間も長くかかる。これに反し、吸湿率の小さい合成繊維は、透湿が速やかであるとともに定常状態になる時間も短いと述べている。この知見は著者らの多層系についての実験の結論と一致していきわめて興味深い。

Galbraith ら⁴⁾は、綿、はっ水性綿およびオーロンスーツの被験者の快適性に及ぼす効果を比較し、被験者が発汗した場合、皮膚の上の多量の汗が不愉快さの原因であるとしている。

丹羽³⁾は、肌着の透湿性について論じ、肌着材料の液相水分の吸収能が透湿性よりもむしろ、肌着の着心地を大きく支配すると述べている。すなわち肌着の快、不快は、皮膚面に残留する水分量のいかんによってもたらされ、それは肌着材料の水分吸収量に依存するとしている。この知見も著者らの得たところと一致している。

尾崎⁵⁾は、布の着用快適性の評価には布の初期現象が必要で、非定常状態でのダイナミックな測定が必要であると述べている。

Hollies ら⁶⁾は、各種繊維素材のシャツについて多数のパネラーに着用試験を行ない、天然と合織とにかかわらず、吸湿性のある繊維が良好な着心地を与える最大因子であることを発表している。

Scheurell ら⁸⁾は、皮膚と衣服の間水分の存在が不快感と密接に関係し、その湿度が 3 ~ 5% 上昇するだけで不快感をもたらすとしている。

安田⁹⁾は、透湿性防水布は、その外面と内面の水蒸気圧差によって優れた透湿性を発揮するものであることを明らかにした上で、極限状態について考察し、透湿性防水布が最外衣に用いられ外部が氷点下になった場合に、内層に水分移動性の大

きく吸湿性の低い衣料が用いられていると、透湿性防水布の内面に水分が霜や氷となって付着し、それが、氷点以上のテントなどの中で溶けて水になり、再び水分移動性により重ね着相を逆行して人体の肌の方に移行し、著しく体温を奪うことになるため、凍死などの事故につながるおそれがあることを指摘し、吸湿性のある素材を重ね着として用いるとこのような危険な傾向は改善されると論じている。

Farnworth¹⁰⁾ および Scheurell ら¹¹⁾は、ポリエステル、ポリエステル・綿混紡、綿の3種について汗をかいた体表面の湿度の変化を求め、ポリエステル(数秒)と綿(数十~数百秒)とでは、飽和に達する時間に大きい差があることを示している。

本研究では、最近ミズリー大学に完成した、レイヤードシステムのノンアイソサーマルでトランジェットな測定の出来る透湿性測定装置¹⁾を用い、各種繊維の布の層の間の温度、湿度、水蒸気圧の変化を秒単位で測定した。なお、汗には気体状態の不感蒸泄と液体状態の発汗があるから、水蒸気が布を通過する水蒸気法と、水滴が布に直接接する水滴法の2つの場合について測定を行なった。

1. 試料および実験方法

(1) 試料および処理

東洋紡績(株)で試作提供された、平織で織密度のほぼ等しいポリエステル、アクリル、綿、羊毛布を用い、非イオン界面活性剤スコアロール[#]

400 2g/lで約40℃、20分間、第二リン酸ナトリウム2g/lで10分間、再び第二リン酸ナトリウム2g/lで10分間洗浄した後十分水洗し、風乾させ、10cm×10cmの大きさに切りシリカゲルの入ったデシケータ中で保存した。JIS等に準じ布の性質を測定した結果を表1に示す。

(2) 透湿性測定装置

概要を図1に示す。拡散カラムは、20±1℃、R.H.5±2%に保たれたほとんど無風の環境試験室(株奥野技術研究所)内に置かれ、カラムの周囲を30±1℃に保った。恒温水槽の温度は37±0.2℃とした。あらかじめ飽和塩で校正した温湿度センサー(ヴァイサラ HMP 113 Y)を3つのチャンバー内およびカラム保温器、環境試験室内に取り付け温度、湿度をデータ・コレクター(安立計器(株)AM-7101)からコンピュータに取り込み、プログラムファイルに記録した。

拡散カラムは、水蒸気法の場合図2のように組み立て、水滴法の場合は図3のように、チャンバー1の下のゴアテックスフィルムの代わりに銅板を使用し、水蒸気がカラム内に上がらないようにした。20℃、R.H.5%に保たれた環境試験室内で、水槽(10cm×10cm×10cm、厚さ1.3cm)の上にゴムパッキング(厚さ0.1cm)とシャッター(厚さ2.6cm)を、その上にゴムパッキングではさんだ3枚のゴアテックスフィルム(厚さ0.0023×3cm、水蒸気法の場合)あるいは銅板(厚さ0.1cm、水滴法の場合)を置き、さらに試料布(水蒸気法ではポリエステル、水滴法ではL

表1 Characteristic of Fabrics

Fabric	Fabric density (cm ⁻¹)		Thickness (mm)	Weight (g/m ²)	Cover factor	Porosity (%)	Air permeability (cm ² /cm ² /s)	Rate of moisture absorption (g/g (fibers)/min) ×10 ⁴
	Ends	Picks						
Polyester	36.4	22.5	0.27	121.7	21.4	67.5	77.8	3.3
Acrylic	37.0	22.1	0.29	116.4	21.3	66.4	81.0	6.1
Cotton	38.1	23.8	0.31	125.0	22.0	74.8	28.2	10.1
Wool	34.9	24.4	0.32	113.9	21.1	73.4	54.9	15.0

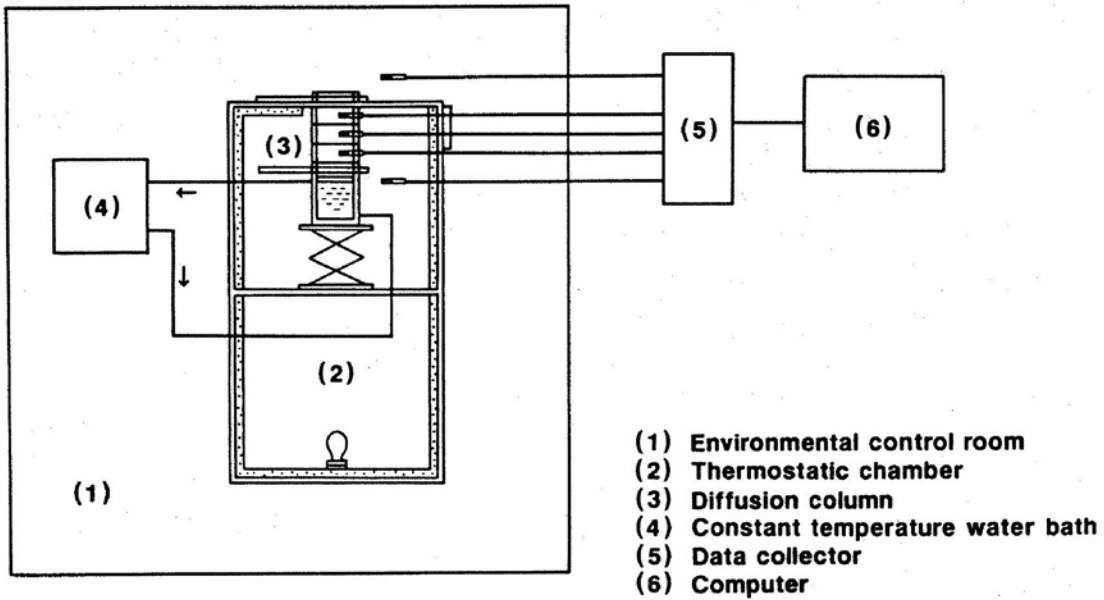


図1 Schematic Representation of Equipment

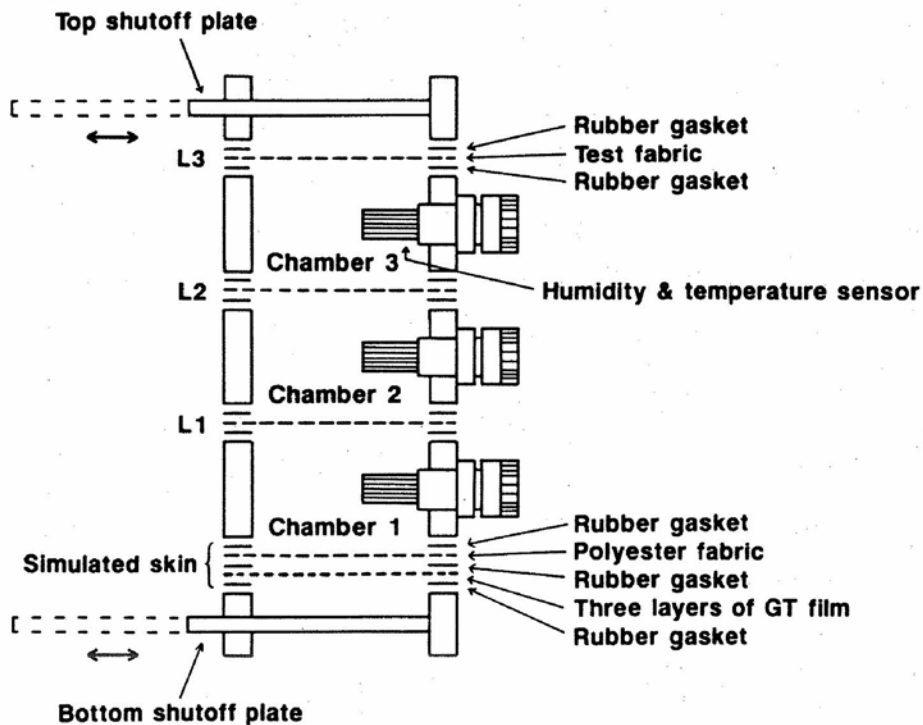


図2 Assembly of Fabric Samples in Diffusion Column for the Water Vapor Case

1), ゴムパッキングを重ね 10 cm × 10 cm × 4 cm, 厚さ 1.3 cm の枠 (チャンバー 1) を置いた。さらにゴムパッキングではさんだ試料布 (水蒸気法では L1, 水滴法では L2) をのせ, チャンバー 2 を置き同様に試料布 (L2 あるいは L3), チャンバー

3, 試料布 (L3 あるいは L4), 上部シャッターを置いた。水蒸気法の場合, 全体の高さは約 28.2 cm で, 下部水槽水面とポリエステル布との距離は約 4.6 cm である。チャンバー等の接続部はスコッチテープで密閉し, シャッターはスライド式のた

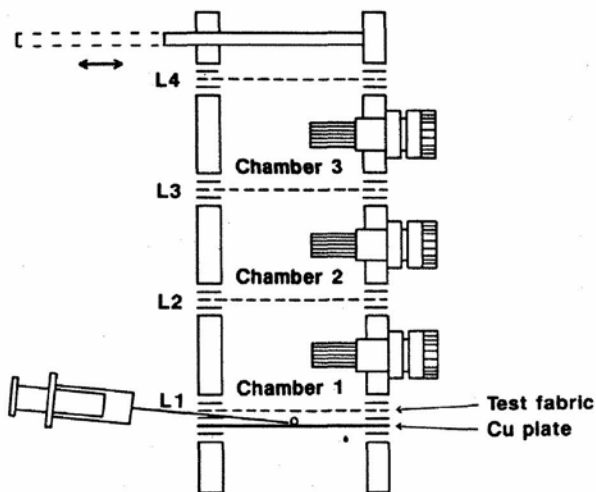


図3. Assembly of Fabric Samples in Diffusion Column for the Sweat (Liquid Water) Case

め蒸気がもれないようにワセリンを塗った。

(3) 実験方法

環境試験室を 20°C, R. H. 5% に, 恒温水槽を 37°C, カラム保温器を 30°C にセットして, 水蒸気法の場合は下部シャッターを閉じ上部シャッターを開けた状態で, また水滴法の場合は下部上部シャッターとも開けた状態で下部シャッターの下の水槽に水を循環させ, 約 5 時間拡散カラムの湿度が安定するまで放置した後, 上部シャッターを閉じた。水蒸気法の場合は下部シャッターを開けた瞬間から (初期の水蒸気上昇速度は試料布を取り付けない状態で 0.1 g/cm²/min), 水滴法の場合は銅板と L1 の間に 37°C の水 0.5 ml を注入した瞬間から測定を開始し, 10 秒ごとに温度湿度を読み取った。また, 測定は 30 分間行なった。

2. 結果および考察

(1) 水蒸気法の場合

ゴアテックスフィルムとその上のポリエステル布を肌と仮定し, L1~L3 におおのこの試料 (同一) を用いた。チャンバー 1 について試料による違いをみてみると, 羊毛<綿<アクリル<ポリエステルの順に層間水蒸気圧上昇は速かった (図 4)。ところで, 透湿性と吸湿性とは負の相関関係

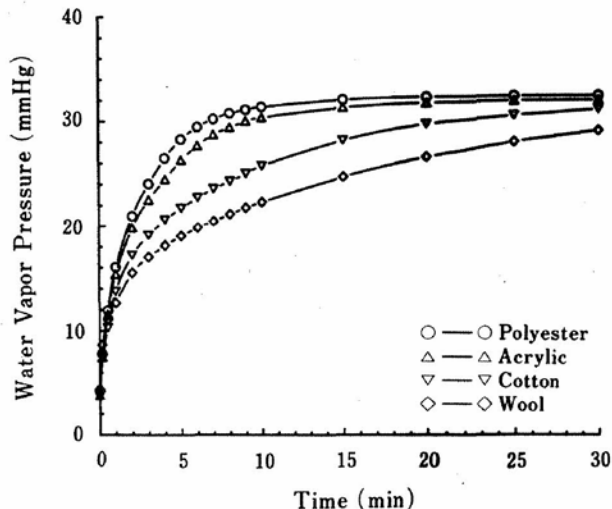


図4. Comparison of Water Vapor Pressure Buildup Curves in Chamber 1 in the Water Vapor Case

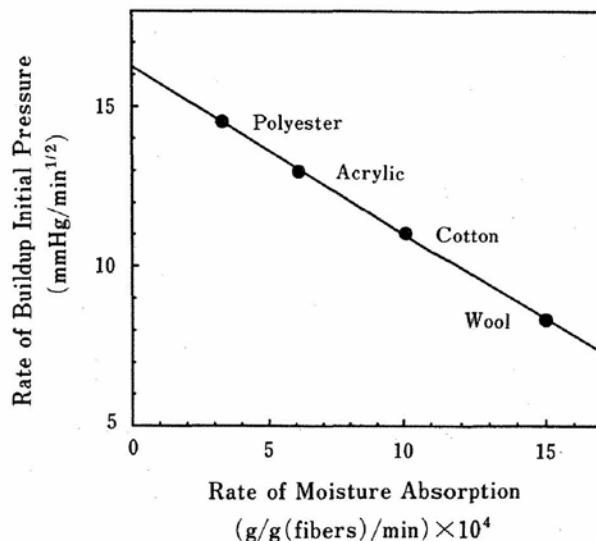


図5. Correlation between the Rate of Moisture Absorption and the Rate of Buildup Initial Pressure in the Water Vapor Case

があることが知られている⁹⁾が, 染料の繊維内拡散の研究の場合によく用いられるように, \sqrt{t} プロットにより初期段階を直線化しその傾きから水蒸気圧上昇速度を求め, 別に測定した吸湿速度⁹⁾に対してプロットしてみると, 図 5 のようになり両者に負の相関関係がみられた。このことから, 例えばポリエステルは透湿性は良いが吸湿性が悪いため層間水蒸気圧が高くなり, 羊毛は, 透湿性は悪いが吸湿性が良いため層間水蒸気圧が低く

なると推測される。

次に吸湿性ということが、層間水蒸気圧に非常に関係があることが明らかになったが、もし吸湿が起きているのであれば、吸湿熱の発生がみられるのではないかと考え、時間に対して衣服層間の温度をプロットしてみると、例えば羊毛の場合、チャンバー1について図6のような温度上昇が認められた。この温度上昇はピークが4分位のところにみられた。この場合、チャンバー内の空気より温度の高い水蒸気がL1に向かって浸入してきたのであり、温湿度センサーはL1の前面(下)に置かれているのであるから、L1がバリアーになってチャンバー1に水蒸気が滞って空気の温度を上昇させたとの疑いがある。しかし、異常な湿度の上昇はみられないので、この温度上昇は吸湿熱によるものと考えて良いと思われる。このような温度上昇は、寒冷地の肌着の温感に好ましい効果を与え寒冷ショックをやわらげるであろう。

また、温度上昇が吸湿熱によるものであるとすれば、温度上昇の程度と吸湿性が関係づけられるはずであるので、上昇温度と吸湿速度の関係を求めてみると図7のようになりほぼ比例関係が認められた。この点についてはさらに詳しい熱量の検

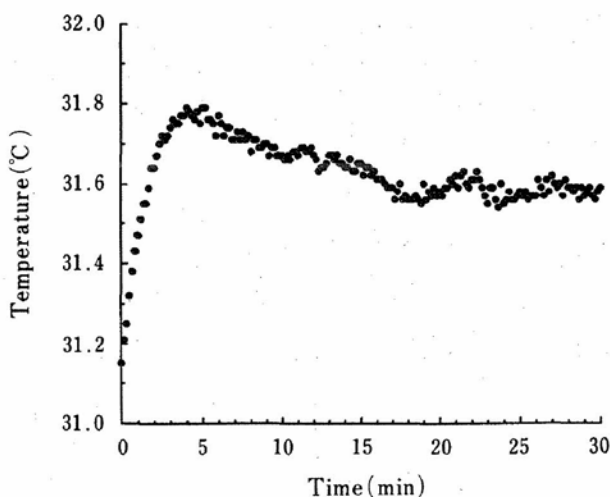


図6 Change of Temperature in Chamber 1 with Time for Wool Fabrics in the Water Vapor Case

討を行なっている。

(2) 水滴法の場合

下部シャッターの上に銅板を置き、その上にL1を置いて、この中間に注射器で0.5 mlの水(37°C)を注入して透湿挙動を測定したが、このような水の注入は皮膚からの液体状の発汗に相当するものとして考えたものである。L1の種類によって、L1が水を速やかに吸収して蒸散させるものもあれば、吸湿性があるにもかかわらず吸水性の低いものもある。また、吸水性が大きくぬれやすいにもかかわらず吸湿せず透湿(透過)するものもある。

L1~L4に同一試料を用いて実験を行なった結果を、チャンバー1の水蒸気圧について上昇の遅いものから速いものを示してみると、図8に示したように羊毛<ポリエステル<綿≦アクリルのようになった。一見して非常に不思議に思うことは、同じ吸湿性の良い繊維に属している羊毛と綿が両極端に異なっていることである。その中間にポリエステルがある。綿は、吸湿性が大きいと同時に吸水性が大きく、水を速やかに吸い、布に広がって広い面積から蒸散していく特徴を持っている

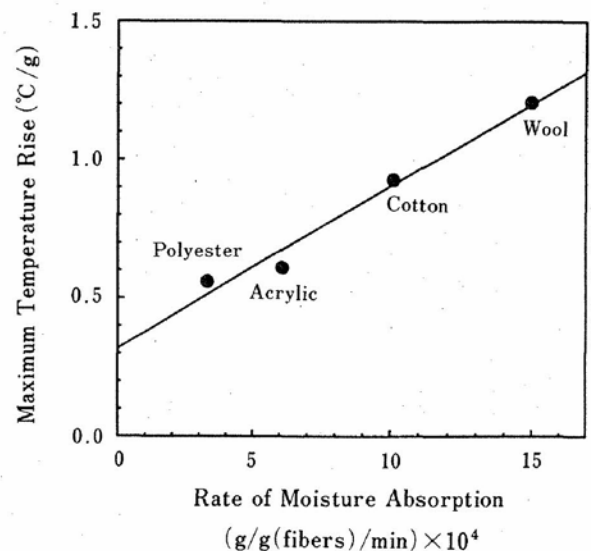


図7 Correlation between the Rate of Moisture Absorption and the Maximum Temperature Rise in the Water Vapor Case

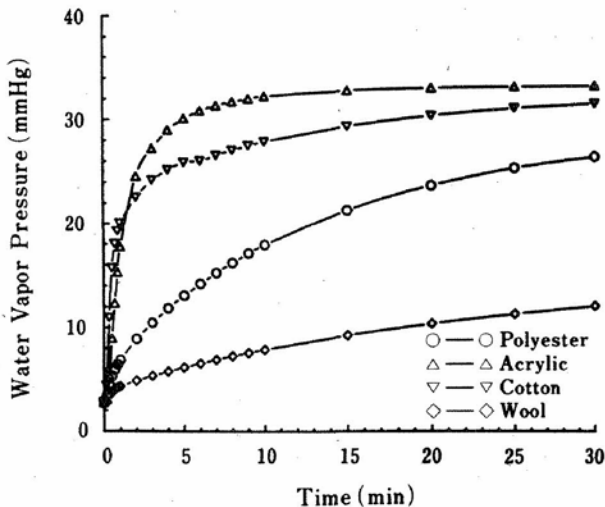


図8 Comparison of Water Vapor Buildup Curves in Chamber 1 in the Sweat (Liquid Water) Case

る。一方羊毛は、吸湿性は綿より大きいにもかかわらず吸水性が乏しく（はっ水性が大きい）、水が布に吸われずまた広がらず、水の周辺の布に水蒸気として吸湿されて、それがゆっくりと蒸散するかまたは、水蒸気の形で織目を通して蒸散していくものと考えられる。

このことは、肌着に羊毛が良いか綿が良いかは発汗の程度、つまり季節や運動量によって異なることを示唆していると思われる。すなわち、夏のように激しく発汗する場合には、それを速やかに吸って蒸散させてくれる綿を肌着に使うことが適切であろうと思われるし、一方冬のように体温を保つ必要のある場合には、むしろ汗が肌着をぬらすことが少なく、水蒸気の形で水分を吸湿してゆっくりと外部に放散する羊毛が、快適さを保証するものでありと思われる。冬に綿の肌着を着て激しく発汗したような場合には、その汗が綿に吸収されて水を含んだ状態になり、そのまま寒気にさらされれば著しく体温を奪われることになる。夏、羊毛の肌着を着て激しい運動をした場合には、皮膚表面の汗を羊毛が吸水できないから非常に暑く感じられることであろう。しかし、綿の肌着を着用すれば速やかに汗を吸ってくれるので

快適だ、ということになる。

以上のことについて解説を補うと、これまで衣服の快適性について季節による違いがほとんど考慮されていない。冬に快適なものが夏にも快適であると考えるのは早計であるし、また快適なものは安全であると単純に考えるのも早計である。

例えば、夏は一般に暑く、皮膚温の上昇を防ぐために発汗がみられるのが普通である。この場合、汗が速やかに蒸散してくれなければ体温調節に役立たないわけである。したがって、肌着はウィッキング性にすぐれ、かつ外部に蒸散のしやすいようなものでなければならない。一方冬には、一般に寒冷から身を守るために保温性のすぐれた肌着が要求される。そのためには、空気を保有する性質のすぐれたものでなければならない。しかも、空気層が水（汗）によって置き換えられるものでは困るわけである。

カンフォートファクターとサバイバルファクターは、時には相反することもある。一例としてアクリルは、ウィッキング性や吸水性にすぐれているから、夏の運動用の肌着に快適であるとしても、快適なのはそれを一枚だけで着用していて、外部に容易に汗が蒸散し得る状態に限られる。そのような肌着を冬に着用した場合には、汗はよく吸うが、水分を含んだ肌着は保温性が低下し危険になることもあるであろう。

このようなことは、重ね着について考察すればいっそう問題は複雑になり、カンフォートファクターとサバイバルファクターの一致することはむしろ少なくなるであろう。

このようなカンフォートファクターやサバイバルファクターを、重ね着について研究するのに適当なシミュレータがなかったが、本報の装置および研究方法はこのような問題の考察に有益である。今後、このような装置によって、多数のケースについていろいろの測定が行われれば、レイヤードシステムとカンフォートファクターおよび

サバイバルファクターについての関係が、しだいに明らかにされるものと期待される。

ま と め

これまで一般に透湿性は、ひとつの平面状の布の両面に水蒸気圧差をもうけて、一定時間にその布を通過する水蒸気量によって透湿性を評価し、透湿性が大きければ快適であると考えられがちであったが、皮膚表面空間層の水蒸気圧をできるだけ低くすることが快適性につながるの考えのもとに、衣服の層間水蒸気圧の短時間に起こる水蒸気圧変化をダイナミックに測定して、次のようなことを見いだした。

- 1) 水蒸気法の場合の層間水蒸気圧の上昇は、透湿性よりもむしろ吸湿性と関係が深い。
- 2) 吸湿性繊維の場合、層間温度の上昇が認められた。
- 3) 水滴法の場合、布がぬれやすければ水が速く蒸散する。
- 4) 実験結果から考えて、一般的に透湿性が良いから快適だと考えることはできない。
- 5) 激しい発汗をとまなうスポーツ用途の肌着

の選択にあたっては、吸湿性と吸水性を環境条件にあわせて考慮することが必要である。最近、透湿性のみが強調される傾向がみられるが、実用上人命にかかわることがあるから慎重な配慮が望まれる¹²⁾。

文 献

- 1) J. H. Wang, H. Yasuda ; *Textile Res. J.*, **61**, 10 (1991)
- 2) 安田 武, 横山宏太郎, 井尻登喜子 ; 織消誌, **24**, 486 (1983)
- 3) 丹羽雅子 ; 家政学研究, **8**, 113 (1961)
- 4) R. L. Galbraith, J. E. Werden, M. K. Fahnestock, B. Price ; *Textile Res. J.*, **32**, 236 (1962)
- 5) 丹羽雅子 ; 織消誌, **9**, 446 (1968)
- 6) 尾崎晶子 ; 織学誌, **31**, T-254 (1975)
- 7) N. R. S. Hollies, R. N. DeMartino, H. N. Yoon, A. Buckley, C. L. Becker, W. Jackson ; *Textile Res. J.*, **54**, 544 (1984)
- 8) D. M. Scheurell, S. M. Spivak, N. R. S. Hollies ; *Textile Res. J.*, **55**, 394 (1985)
- 9) 安田 武, 井尻登喜子 ; 織消誌, **27**, 31 (1986)
- 10) B. Farnworth ; *Textile Res. J.*, **56**, 462 (1986)
- 11) D. M. Scheurell, S. M. Spivak, N. R. S. Hollies ; *Textile Res. J.*, **56**, 463 (1986)
- 12) 安田 武 ; 植村正己の冒険, 本多勝一, 武田文男編, p171, 朝日文庫, 朝日新聞社 (1991)