

裏地素材の選択とその布構造最適化のための シミュレーションシステムの開発

兵庫教育大学 福田 光 完
(共同研究者) 広島女子大学 鳥居 隆 司
大阪市立大学 新平 鎮 博

Development of Simulation System for Selecting and Optimizing the Function of Lining Textiles

by

Mitsuhiro Fukuda

Department of Practical Life Studies, Hyogo University of Teacher Education

Takashi Torii

Department of Science for Living Environment, Hiroshima Women's University

Shizuhiko Niihira

Department of Child Health, Osaka City University

ABSTRACT

Diffusion of moisture in cupra filament has been analyzed at room temperature and the numerical equations that explain the diffusion behavior has been constructed. The woven fabric was modeled as a slab with multiple holes and the numerical equations obtained was applied for justifying the moisture diffusion behavior in cupra woven fabric. We showed that the estimation of the moisture diffusion in woven fabrics at various environment was possible by using the present simulation. Finally, we also showed the significance of the present simulation system to account for the moisture transfer property by comparing the experimental results on polyester and cupra-warp/polyester-filling fabrics.

要 旨

裏地として使用されるキュブラ繊維に対して常温における水分拡散挙動を詳細に検討し、吸放湿速度を数値的に定式化した。織布を多孔体平面と仮定し、織布内の水蒸気移動特性を示す一次元拡散方程式に繊維から得られた数値式を組み入れ、モデルを構築した。繊維の吸放湿特性から任意の環境での織布の水蒸気移動特性をシミュレーションによって予測することが可能であることを示した。透湿に関してはポリエステルとの比較も行い、本シミュレーションシステムが有効であることを示した。

緒 言

一般に防寒着を含む上着の選択に当たって、表地に対しては素材、手触り、色柄など多くの関心が払われるが、裏地に関してはあまり注目されていないのが現状であろう。衣服内気候は、水分と熱の同時移動特性に依存することは古くから指摘されている¹⁾。裏地も重ね着の場合の外衣から二番目の内部衣料と見なせば、裏地まわりの衣服内気候は、従来の考え方が適応できる。季節・人体の活動状態とこれらの移動特性を考える上で、裏地は直接汗に接しない場合が多いので、とくに気相の水である水蒸気移動特性と熱移動特性が重要である²⁾。

裏地素材としては、キュブラとポリエステルが多く用いられており、その他にもアセテートやレーヨン等も使用されている。しかし、高級品には主にキュブラが、普及品にはポリエステルが用い

られるという知識はあっても、両者の裏地としての機能性、とりわけ衣服内温湿度の調整を考える上で重要な水蒸気移動特性や熱移動特性の違いについてはほとんど報告例が見あたらない。本研究では、裏地素材（繊維そのもの）のこれらの移動特性と、裏地布に使用された場合の移動特性の関係を明らかにすることを目的とし、シミュレーション化を試みた。本研究題目は非常に大きな領域を含む課題であり、紙面の都合ですべてを記述することはできないため、今回はとくに水蒸気移動特性について得られた結果について報告する。すなわち、代表的な裏地素材であるキュブラを中心に、ポリエステルとの比較も含めて、その繊維の基本的な吸・脱湿に関するデータから、織布としての裏地の水蒸気移動特性を予測することの可能性を検討する。

1. 実験方法

1.1 試料繊維と布

旭化成工業（株）より供与されたキュブラフィラメント、キュブラ織布、ポリエステル織布およびキュブラ/ポリエステル交織布を用いた。これらの試料の形態等に関する詳細は表1にまとめた。

1.2 平衡水分率と水分拡散挙動

繊維の平衡水分率と水分拡散速度は、石英スプリング法を用いて、25℃で測定した。キュブラ繊維ではフィラメントを約100mgの輪状にして用い、布は約1cm×5cm程度に切断したものをを用いた。測定の精度は0.02mgである。測定装置の概要を図1に示した。試料を十分乾燥させた状態から、所定の蒸気圧雰囲気を設定した直後の吸湿に

表1 布の形態および物理的特性

布 試 料	糸 径 タテ/ヨコ (den/den)	目 付 (g/m ²)	厚 み (cm)	密 度 (g/cm ³)	キュブラ 混合率 (%)	繊維充填率
キュブラ	75/100	82.6	0.014	0.6272	100	0.418
キュブラ/ポリエステル交織布	50/75	61.5	0.010	0.6476	49	0.449
ポリエステル	50/75	54.6	0.0085	0.6424	0	0.465

伴うスプリングの伸びを測定し、重量変化 $M(t)$ を求めた。十分時間が経過した後、一定重量 $M(\infty)$ に達した試料を再び乾燥雰囲気下に曝した直後の脱湿挙動を測定した。さらに、ある一定の蒸気圧で平衡水分率に達した試料を異なる蒸気圧雰囲気下に置き、その直後の吸湿あるいは脱湿挙動の測定も行った。以下では前者のような測定を積分収着法と記し、後者の測定法を微分収着法と呼ぶ。他の実験の詳細については前報で述べた³⁾。

布の場合には、上記の方法に加えて、大気中での測定も行った。この場合には一定温度・湿度条件に保った環境試験室内に電子天秤を設置した。あらかじめ絶乾（積分収着法）あるいは所定の湿度（微分収着法）に調整した約15cm平方の布試料をデシケーター内より取り出して電子天秤に置き、その後の試料の水分率変化をコンピューターに接続して重量法によって時間変化を追跡した。なお風速は0.4 m/sであった。大気中での測定は旭化成工業（株）繊維商品科学研究所の協力で行った⁴⁾。

2. 解析方法

2.1 布中の水蒸気移動特性モデル

織布を一種の平面体モデルとして取り扱う場合、

織布に対する水蒸気拡散は高分子フィルムに対するそれと同様な解析法を用いることができる。ここではモデル化のために、以下のような条件あるいは仮定をおいた。

- ①布は多孔質体として取り扱い、空隙部を水蒸気が拡散する。構成する繊維部分（充填部）でのみ吸・脱湿に関与する。
- ②水蒸気拡散は布の厚さ方向の一次元の問題として取り扱う。
- ③吸湿と放湿は同時に起こらず、繊維部分の吸湿率と環境の水蒸気圧によりどちらかが起こる。
- ④布の中で空気の流れはない。
- ⑤液相水（汗）は直接裏地布に触れない。

このような考えに基づいた平面体モデルを図2に示した。

一方、キュプラのようなセルロース系繊維では、ガラス転移温度 (T_g) が乾燥時の250℃付近から飽和水分率時には室温程度にまで低下する⁵⁾。したがって、繊維中への水蒸気拡散は非Fick型となり、換算吸収・脱着曲線 ($M(t)/M(\infty)$ vs. $t^{1/2}$) は複雑な挙動が予想される⁶⁾。ここでは、キュプラ-水蒸気系の換算吸収・脱着曲線を物理的にではなく、数値的に取り扱い定式化する。このように考えることにより、繊維素材の違い、あるいは

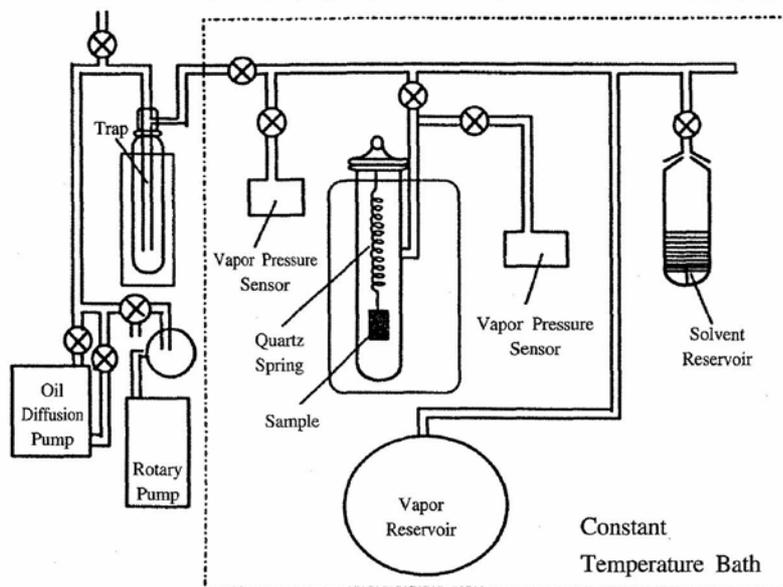


図1 水分吸着・拡散測定装置の概略図

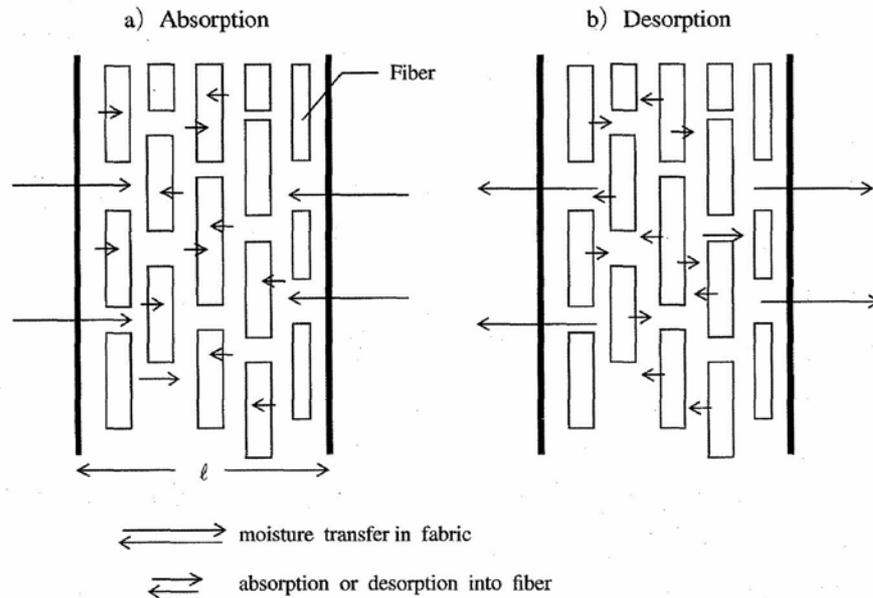


図2 織布に対する吸放湿モデル a) 吸湿 b) 放湿

織布に限らず，編布や不織布にも適用可能な汎用性のあるモデルが構築できる。

2. 2 吸放湿シミュレーション式

前節で示したモデルに基づき，織布内の水蒸気拡散を以下のように式で表現した。

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} = D_v \frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} + \frac{1}{\beta} S \quad (1)$$

$$S \approx \frac{dm_r}{dt} = k (p_a - p_0) \quad (2)$$

式(1)はCrankが彼の書物で示している式と同等のものであり⁷⁾，また，見方を変えれば筆者が以前にアラミドフィルム中の水蒸気拡散の解析に用いた「吸着を伴う拡散モデル」と同様の考えに基づく拡散式である⁸⁾。式(1)は，通常の平面体に対する拡散方程式に，布を構成する繊維中に存在する収着水の時間変化を表わす項 S を加えたものであるが，ここでは S は，実験値と対応させやすいように，水分率 m_r と水蒸気圧の関数で表した。各パラメーターの意味は以下の通りである。
 C_v : 水蒸気の質量分布
 D_v : 布中の水蒸気の拡散定数
 β : 布の空隙率に関するパラメーターで，織り方等によって変化する

m_r : 繊維中の水分率

p_a : 繊維がおかれた環境の水蒸気圧

p_0 : 繊維表面の水蒸気圧で m_r の関数

k : 吸湿速度あるいは脱湿速度で m_r, p_a, p_0 の関数

吸湿と放湿とは同時に起こらないという仮定から，吸湿と脱湿とで速度定数 k を別々に取り扱う。また m_r, p_a, p_0 の関数とすることにより，非Fick型の換算吸収・脱着曲線を数値的に取り扱うというものである。微分収着法と積分収着法による結果も一括して説明できることも試みた。

3. 結果と考察

3. 1 平衡水分率

25℃において真空系で測定したキュプラフィラメントとキュプラ布，および大気中で測定したキュプラ布に対する水分収着等温線を図3に示した。同じキュプラ布を比較すると，大気中で測定した場合の方が平衡水分率は低く観察された。これは吸湿を始める時点での布試料の乾燥状態が異なる点が大きな要因であると考えられる。大気中では完全な乾燥試料を得ることは難しい。しかし，真空中で測定した場合と，収着等温線の形状は変わらない点から，現実的な状況では空气中で測定

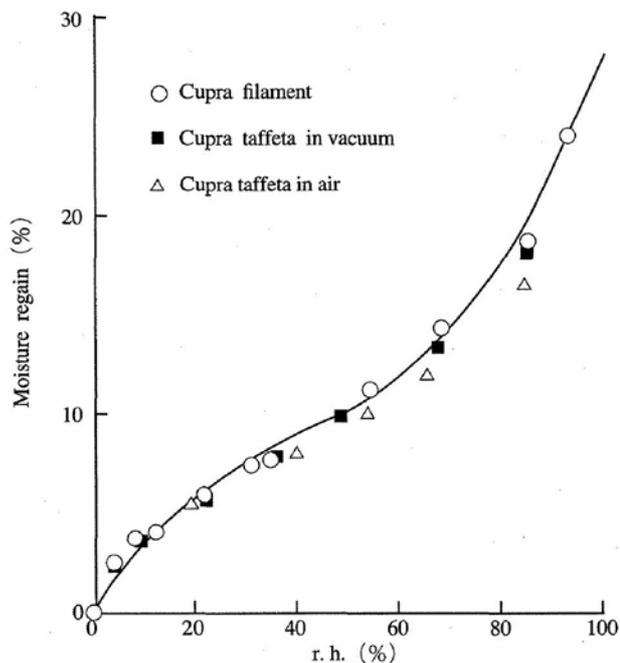


図3 キュプラフィラメントとキュプラ織布に対する25℃における収着等温線

した場合の結果を平衡水分率としても差し支えないと思われる。なお真空系で測定した場合、平衡水分率は繊維の化学組成および物性で決まるため、フィラメントであっても布であっても違いはない。

3. 2 フィラメントの吸放湿速度

低湿度領域 (4.3 % r.h.) および高湿度領域 (85.0 % r.h.) におけるキュプラフィラメントに対する換算吸収・脱着曲線の例を図4 aと図4 bにそれぞれ示した。図4で示した結果は吸湿では乾燥状態からの、そして脱湿では乾燥状態への変化を表す積分収着法による換算吸収・脱着曲線である。

直径10 μ m程度のポリエステル繊維に対する吸湿速度はきわめて速く (拡散定数 $D=1 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s} - 3 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$ ⁹⁾), また吸湿率も飽和蒸気圧下でも1%以下の低い値のため¹⁰⁾, 我々の実験装置では測定不能であった。先にも述べたようにセルロース系の繊維を始め、吸湿性の大きい繊維では水蒸気の拡散挙動は極めて複雑である。本研究では、繊維中の水拡散を分子論的に展開することは目的ではないので、実験結果の揭示のみに止め

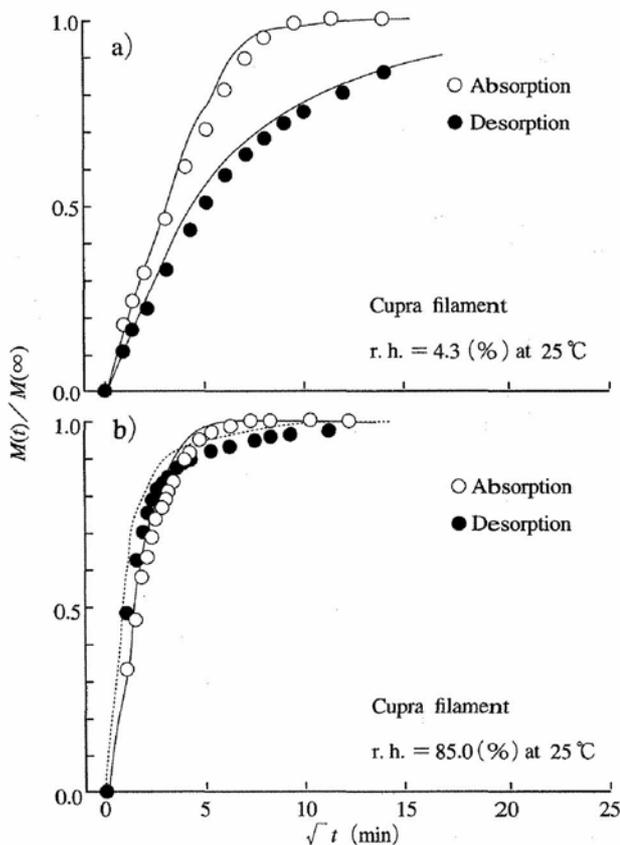


図4 キュプラフィラメントに対する積分収着法による換算吸収・脱着曲線 a) r.h.=4.3%, b) r.h.=80% 25℃で測定

る。詳細な解析については他で論じた¹¹⁾。

図5には64.4% r.h.と85.9% r.h.間の微分収着法による換算吸収・脱着曲線を示した。この程度の相対湿度では繊維は収着水によりかなり可塑化されており、換算吸収・脱着曲線はかなりFick型に近い形状になる。しかし、低相対湿度領域に入ると換算吸収・脱着曲線は再び複雑な形状を示す。

3. 3 速度パラメーターの決定

前節で示した測定結果を用いてキュプラフィラメントに対し、まず式(2)における速度定数 k の評価を試みた。図4および図5からわかるように、換算吸収・脱着曲線は環境の水蒸気圧に応じて極めて複雑な挙動を示すため、便宜上以下の式のように初期速度 k_0 , 定数項 a および水分率のべき乗項 m_r^b との積で表した。

$$k = k_0 \times a \times m_r^b \quad (3)$$

あくまでも数値モデルであり、各パラメーターの

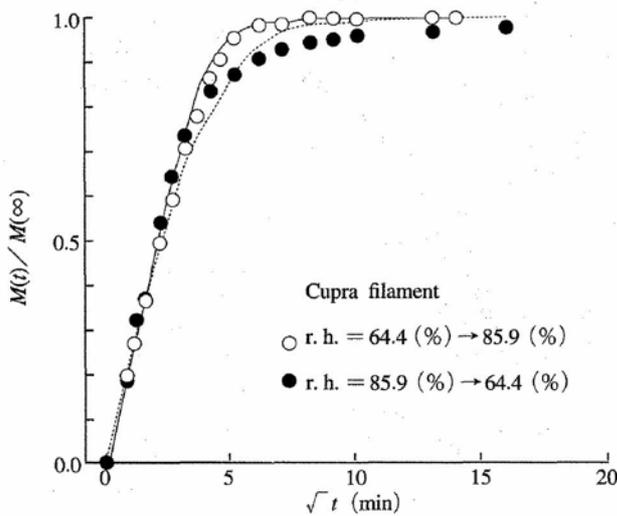


図5 キュプラフィラメントに対する
微分収着法による換算吸収・脱着曲線
25℃で測定

物理的な根拠はないが、実用上はこれで十分であろう。なお k は積分収着曲線と微分収着曲線とで、同時に説明できるようにするが、吸湿と放湿過程にわけて考える。

各水蒸気圧における積分および微分収着速度曲線の実測値から一定の時間間隔で速度を算出し、 m_r は収着等温線から水蒸気圧の多項式で表現した。非線形最小自乗法により最もフィットする k_0 、 a および b の値を求めた。

ここで3つのパラメーターはいずれも蒸気圧の差 ($\Delta p = p_a - p_0$) に依存するパラメーターであり、以下の形で表現した。

$$a = a_0 \times \Delta p \quad (4)$$

$$b = b_0 \times \Delta p \quad (5)$$

吸湿過程では

$$k_{0a} = k_{01} + k_{02} \Delta p + k_{03} p_a \quad (6)$$

脱湿過程では

$$k_{0d} = \{k_{01} + k_{02} \ln(\Delta p)\} \left(\frac{p_0}{\Delta p}\right)^{k_{03}} \quad (7)$$

表2 キュプラ布に対して式(3)で使用したパラメーターの値

	a_0	a_1	b_0	b_1	k_{01}	k_{02}	k_{03}
吸湿過程	-1.20	0.0488	-1.96	0.0739	5.10×10^{-5}	2.53×10^{-6}	-1.96×10^{-6}
脱湿過程	-0.0426	-0.150	-1.65	-0.0369	3.36×10^{-5}	3.74×10^{-5}	-0.63

決定したそれぞれのパラメーターの値を表2に示した。最終的に、吸放湿速度は繊維の置かれた環境の水蒸気圧 p_a と、収着等温線から決定される蒸気圧 p_0 の2つの値の関数である。図4および図5中の実線は、これらのパラメーターを用いて再現した吸湿曲線であり、破線は同様に脱湿曲線である。実験値との一致は部分的にはまだ問題が残るものの定性的には実験曲線をよく再現しているといえる。

3.4 布の吸放湿速度

図6にはキュプラ布に対して真空系で測定した吸湿速度と空気中で測定した場合のそれとを比較した。空気中での測定は、試料環境まわりの水蒸気圧の変化が、真空系のように一定ではないため、吸湿速度は相対湿度に依存する。したがって一定の水分率に到達する時間も低湿度では真空系に比べて遅く、高湿度では早く観察された。しかし全般的には空気中の測定でも、真空系とほぼ対応した結果が得られている。空気中の場合には、吸放湿速度に影響を与える大きな要因、例えば空気流等が存在するため測定方法によっては異なる結果が得られると推察されるが、使用した測定方法と真空系との差異の傾向を把握していれば、布の吸放湿データとして問題ないと思われる。

3.5 布の吸放湿シミュレーション

布の場合、式(1)と式(2)を解くにあたり初期条件および境界条件をまず決定することが必要である。通常差分法を用いて拡散方程式を解く場合と同様に、織布が一定水蒸気圧下に置かれた場合には、布の両面で水蒸気圧は同じであり、また時間により変化しないとする。Crankの書物で示されている空隙率 β に関するパラメーターを、

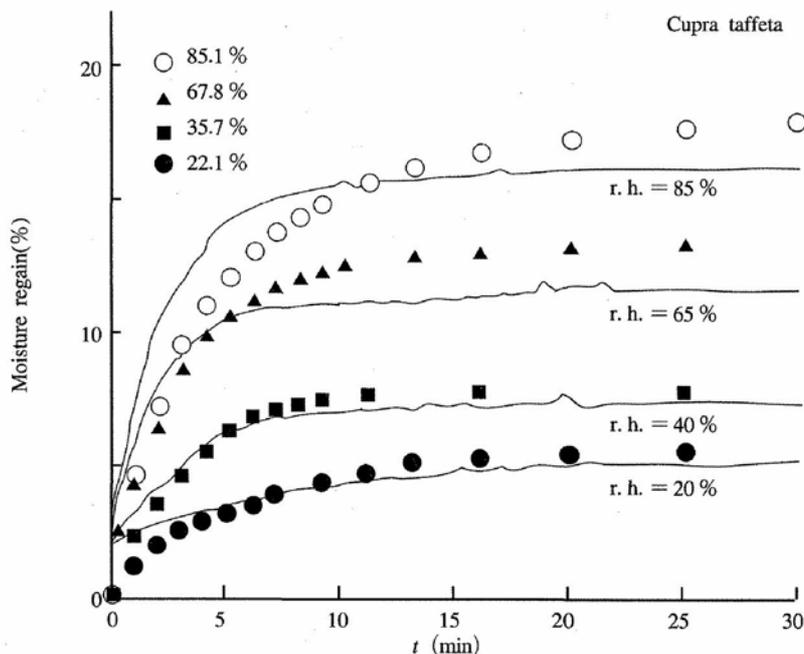


図6 真空中と空気中におけるキュプラ織布の吸湿速度の比較 実線曲線は空気中での測定

布中で空気が占めている比率 ν , 繊維が占めている比率 $(1-\nu)$, 繊維の密度 ρ_s で表現すると

$$\beta = \frac{\nu}{\rho_s(1-\nu)} \quad (8)$$

となる。一方、布の空隙部の水蒸気拡散定数を実験的に算出するため、吸湿性がほとんど無視できるポリエステル布を用いて透湿実験を以下のような方法で行った。ポリエステル布によって分割された密閉容器の一方側を高湿度に、他方を低湿度に設定し、ポリエステル布を通して水蒸気が拡散する速度を高湿度側、低湿度側各々の湿度の経時変化から算出した。

実験的に求めた拡散定数 D , は空気中の水蒸気拡散定数の0.01倍であり、極めて小さい値であった。布中を水蒸気が拡散する場合は、繊維による障害は予想以上に大きいことが確認できた。

図7は、20℃の大気中で測定したキュプラ/ポリエステル交織布の20% r.h.から65% r.h.への吸湿およびそれに対応する脱湿についてシミュレーション結果を実測値と比較した。計算の簡略化のためにポリエステルの部分は、キュプラに比較

すると平衡水分率は無視できると仮定した。実験曲線とシミュレーションとの一致はほぼ良好であるといえる。

3.6 布の透湿シミュレーション

式(1)の境界条件を布の両面で蒸気圧が異なると設定すると、透湿のシミュレーションが可能である。一例として布の片面側を65% r.h.に固定

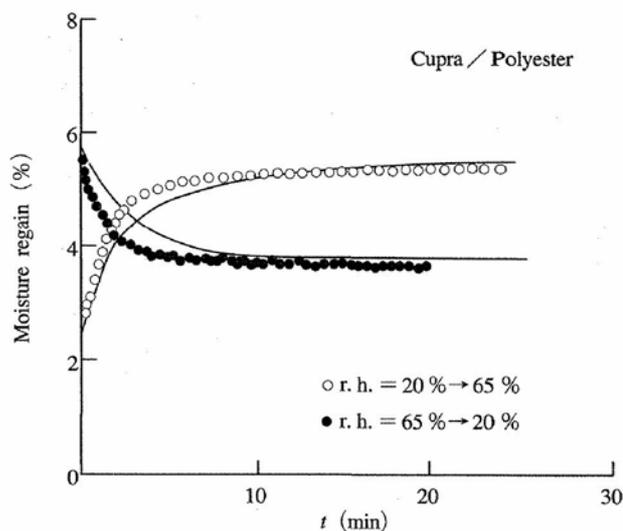


図7 キュプラ/ポリエステル交織布に対する吸放湿測定結果とシミュレーションとの比較 20℃における測定

し、もう一方側を 20% r.h. とした場合のシミュレーション結果をキュプラとポリエステルについて示す。低湿度側は、布を通して水蒸気が移動され徐々に湿度は増加する。その時の湿度の上昇を 2 種の布で比較したものが図 8 である。キュプラは吸湿量が多いため高湿度側の湿度低下が速く大きい一方で、低湿度側の湿度はほとんど増加しない。これは汗をかいて衣服内湿度が環境湿度よりも大きくなったとき、キュプラ裏地の方が水蒸気を吸湿して衣服内温度を下げる能力があることを暗示している。両布地による透湿実験値との比較は今後の課題であるが、シミュレーションによってキュプラとポリエステルとで明らかな透湿挙動の差が得られたことは、大きな成果であろう。

このように、繊維の平衡水分率、吸・脱湿速度の測定結果が整えば、織布に対する吸・脱湿速度および透湿挙動も予測することがシミュレーションによって可能である。

4. まとめ

繊維から得られる基礎的な水分拡散データを用いて、とくに裏地として用いられる織布の水蒸気移動特性を予測するシミュレーションシステムを開発す

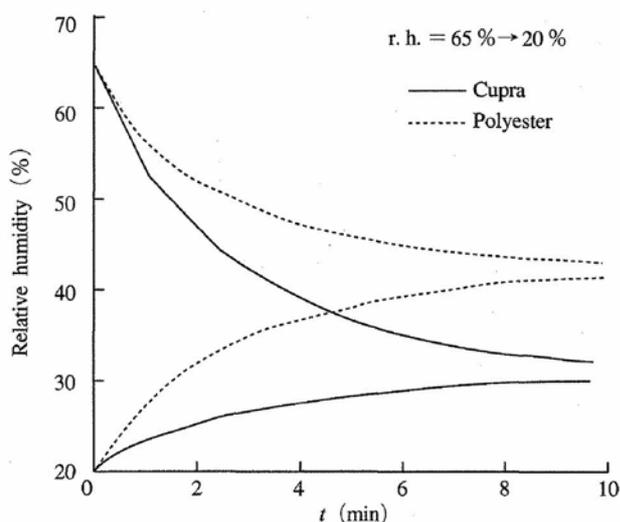


図 8 キュプラとポリエステル織布に対する透湿シミュレーションの比較
高湿度側 r.h.=65%, 低湿度側 r.h.=20%

ることを目的とし、以下のような結論を得た。

織布を一次元多孔体と仮定し、布内の水蒸気移動特性を示す拡散方程式に繊維の水分拡散挙動を数値的に定式化した式を組み入れた平面体モデルを構築した。このモデルを用いて繊維の吸放湿特性から任意の環境での織布の水蒸気移動特性をシミュレーションによって予測することが可能であることを示した。

キュプラを裏地として用いた場合には、ポリエステルに比較して裏地の吸湿性が大きいため、衣服内湿度を下げる効果があることをシミュレーションによって明らかにした。

謝 辞

本研究は、旭化成工業（株）との共同研究として行われたものの一部である。本稿をまとめるにあたり旭化成工業（株）ライニング研究所の小原和幸氏に謝意を表します。

文 献

- 1) P. S. H. Henry ; *Disc. Faraday Soc.* , No. 3, 243 (1948)
- 2) 原田隆司, 土田和義, 丸山淳子 ; 繊維機械学会誌, 35, P350, (1982)
- 3) M. Fukuda, and H. Kawai ; *Text. Res. J.*, 63, 185 (1993)
- 4) 松原和美, 小原和幸, 内幸彦 ; 繊維学会シンポジウム予稿集 ps-128 (1995)
- 5) 山根千弘, 小野博文, 本郷智子, 斉藤政利, 岡島邦彦 ; 繊維学会誌, 53, 321 (1997)
- 6) A. C. Newns ; *Trans. Faraday Soc.*, 52, 1533 (1956)
- 7) J. Crank ; "The Mathematics of Diffusion", Second Ed. Oxford University Press (1975)
- 8) M. Fukuda ; *Polym. Eng. Sci.*, 36, 558 (1996)
- 9) M. Fukuda, H. Kawai, N. Yagi, O. Kimura, and T. Ohta ; *Polymer*, 31, 295 (1990)
- 10) M. Iwasaki, M. Fukuda, and H. Kawai ; *Sen'i Gakkaishi*, 46, 1 (1990)
- 11) 福田光完, 小原和幸 ; 繊維学会誌, 投稿準備中