布の水分拡散係数の同定

Determination of Water Diffusivity of Cloth

高田 暁*、鉾井修一*、梅野徹也*

Satoru Takada, Shuichi Hokoi, Tetsuya Umeno

エネルギーの無駄なく人間にとって好ましい空調を行うためには、時間的に変化する人体の温熱生理反応を適切に評価する必要がある。発汗を伴う場合は特に、水分の蒸発が温熱反応の非定常特性に大きく影響するため、着衣における汗の移動性状を十分正確に予測することが不可欠となる。本論文では、基礎的検討として、布における水分移動のモデルを検討した。布の一端を水に浸した場合について、布面に沿った方向の水分移動を測定し、実験結果を再現する拡散係数を決定した。これは、布面に沿った方向の水分移動は拡散現象として扱えることを示すものである。さらに、このモデルを用いて液滴を布面に垂らした場合の水分移動について検討した。

In order to realize healthy and comfortable air conditioning suitable for human being without wasting energy, the transient thermal response of human body should be predicted precisely. Especially the evaporation of sweat has a significant influence on thermal response. Therefore, it is essential to understand the water behavior in clothes in detail. This paper deals with a model of liquid water movement in cloth. The water movement in the direction parallel to the plane of cloth is measured and is analyzed by a diffusion-type model. A liquid water diffusivity is determined, with a good agreement between the measured and calculated results. A two dimensional absorption process of water is also investigated.

[Keywords: clothes, water diffusivity, sweat, thermophysiology, non-steady state]

1. はじめに

夏期、暑い戸外で汗をかき、直後に冷房された空間に入ると、最初は爽快感を伴う涼しさを感じるが、その後、寒さを感じることもある。このような場合に、適切な空調を行うためには、時間的に変化する人間の温熱応答を正しく評価することが必要である。暑熱環境下での非定常的な温熱応答に、発汗に伴う水分蒸発が大きく関与していることは明らかである。[1,2]水分蒸発量は、その時点における発汗量だけでなく、それ以前に着衣に吸収された水分量によっても変化する。したがって、温熱快適性、温熱生理応答の評価には着衣における水分の移動および蓄積を考慮する必要がある。特に、皮膚表面に液滴が見られるほど大量の発汗がある場合、着衣中での液相水分の挙動が、着衣表面での水分蒸発量に大きく関係すると考えられる。

ここで、着衣における熱および水分の蓄積を考慮したモデルによる数値計算例を Figure 1 に示す。このモデル[3]は、人体を深部と皮膚の2つの節点で表現した温熱生理モデル[4,5]をもとに作成されたものである。計算条件は、Tシャ

ツおよびトランクスを着用した人が最初、高温高湿(35℃、RH80%)の環境に20分間滞在し、その間に大量に発汗し、その後冷房された低温低湿(25℃、RH40%)の環境へ移動する場合に対応している。図には、低温低湿環境へ移動した後のTシャツの下の皮膚温を示している。細線は、着衣と皮膚の間に厚さ5mmの空気層があり、分泌された汗はいったん皮膚表面で蒸発し着衣に吸着された後、再び周囲へ蒸発するとモデル化した場合の結果である。また、太線は、着衣と皮膚が接触し、汗が液水の状態のまま着衣に吸収されることを考慮した場合の結果である。十分に時間が経過した後においては両者に差はほとんどないが、低温低湿環境へ移動した直後の10~15分間における皮膚温の変化傾向は大きく異なっている。人間の温熱快適性の観点からは、この差は極めて大きい。これより、外部環境へ蒸発するまでの汗の移動性状を的確に予測することが重要であるとわかる。

この計算に用いたモデルにおいては、着衣含水率の布面に沿った方向の分布が考慮されていない。実際には、皮膚の一部だけが着衣に接触し、接触した部分から汗が布面に沿って広がると考えられる。的確な予測のためには、汗が布に吸収され布面上を広がる過程も含めて、水分の挙動を知る必要がある。米田・丹羽[6,7]は、布における非定常的な水分移動のモデルを提案しているが、布に蓄積される水分量の予測を目的としたモデルではない。人体と着衣から

*京都大学大学院工学研究科生活空間学専攻、〒606-8501 京都市左京区吉田本町。Department of Architecture and Environmental Design, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Kyoto 606-8501. Fax:075-753-5779 E-mail: takadas@archi.kyoto-u.ac.jp

なる系の熱・水分性状を評価するためには、着衣の含水率が重要な情報となる。そこで本研究では、蓄積される水分量の予測を目的として、布における水分移動のモデルを検討した。

Figure 1 Skin temperature

2. 衣類における水分移動の測定

2.1 実験の目的

水分移動に関して、衣類などの布が異方性を有することはよく知られている。布における水分移動は、布面に垂直な方向と布面に沿った方向とに大別される。本論文では、布面に垂直な方向については含水率分布が一様と考えられる薄い布を対象とし、布面に沿った方向の水分移動について検討する。

検討対象は、夏期にオフィスなどで着用される薄いカッターの布地を想定して、60番ブロード(綿100%)とした。服地店で売られている布を、洗浄せずそのままの状態で行った実験に使用した。しわになっていない部分を選んで切り出された3cm×20cmの布片を試料とした。ここでは、よこ糸に平行な方向への水分移動について述べる。

Figure 2 Section of experimental apparatus

2.2 実験方法

実験装置を Figure 2 に示す。試料高さでの水の圧力を一定とするため、水面と試料台(Stand)上面の高さがほぼ等しくなるように、水槽(1000cm³)に一定量の水を入れた。長さ20cmの試料のうち5cmの部分の水に浸し、残り15cmの部

分を水分が移動するものとした。試料台は、水分の移動方向に対して垂直に1cm間隔で釣り糸をびんと張った網状のものであり、布が他の物体に接触する面積をできるだけ小さくした。

2通りの実験を行った。

〔実験①：水分移動速度の測定〕水槽から試料中へと移動する液相水分の先端部（以下では wetfront と称する）の変位を目視観察し、その時間経過を10秒ごとに記録する。wetfront は、「水分により初期状態と比べて明らかに変色して見える部分」の先端とした。

〔実験②：含水率分布の測定実験〕①と同様な実験を行い、適当な時刻に試料を1cm間隔に切断する。各々の布片の重量とその乾燥重量を測定することにより、重量含水率の分布を求める。100、200、300、400、600秒後の計5時刻における分布を求めた。それぞれの実験が同じ条件で行われたことを確認するために、wetfront の変位の観測も行い、実験①での結果との一致を確認する。

Figure 3 Position of wetfront

Figure 4 Distribution of degree of saturation (Elapsed time=100, 200, 300, 400, 600[s])

2.3 実験結果

実験①、②の結果を Figure 3 および 4 に示す。実験②での wetfront の変位は、どの時刻の測定においても実験①の結果と非常に良く一致し、差は最大で0.1cmであった。実験の再現性は良いと言える。

3. 解析

3.1 解析の目的

布における水分移動を表現するモデルについて検討する。布はその厚さが非常に薄い多孔質材料であり、平均化操作に基づき連続体として扱うことの是非は必ずしも自明ではない。そこで、連続体としての扱いが可能であると仮定し、実験結果の再現を試みることに、仮定の妥当性を検討する。以下では、拡散モデルを用いて水分拡散係数の同定を行う。

解析対象は、wetfront が進行する方向の 1 次元系とした。Figure 2 において、試料が水面と交わっている部分を $X=0$ とする。実験中に水槽の水がこぼれることを防ぐために、試料台上の試料は水面より 0.2cm 程度高くしてある。このため、 $X=0 \sim 0.3$ [cm] 付近では試料が若干湾曲し、高低差が存在している。したがって、その区間を解析対象から除外し、 $X=0.5$ [cm] を原点とする座標系 x の正の領域の解析を行うことにした。

3.2 基礎方程式

布を繊維実質部と空気、水分からなる混合体と見なす。詳細に見ると布の表面には凸凹があり、布の境界は必ずしも明確ではない。本検討では、布を構成する糸のうち最外郭に存在する糸に接する平面で囲われる直方体を布と定義する。このとき、布の体積は、布の厚さを測定することにより決定される。また、繊維実質部の密度が既知であれば、単位面積の布重量を測定することにより、空隙率 a を決定できる。繊維実質部の密度 ρ_f に文献値 $1540[\text{kg/m}^3]$ [8] を、布の厚さ l_z にノギスで測定した値 $0.25[\text{mm}]$ を用いると、 $a=0.67$ となる。 a と ρ_f を用いて、体積含水率 w と重量含水率(被服学での水分率) ϕ の関係を表すと、

$$w = \frac{\rho_f}{\rho_w} \cdot (1-a) \cdot \phi \quad (1)$$

体積含水率 w を用いて水分収支式を書く、

$$\rho_w \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_w \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (D_T \frac{\partial T}{\partial x}) - \frac{E}{l_z} \quad (2)$$

ただし、 $E = N\alpha(X - X_s)$ である (X_s は実験室の絶対湿度)。本実験では温度勾配による水分移動は比較的小さいと考えられるので、右辺第 2 項は無視する。

ここで、飽和度 u を $u = w/a$ と定義し、 $D = D_w/\rho_w$ とおくと、(2)式は次のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{1}{a \rho_w} \cdot \frac{E}{l_z} \quad (3)$$

熱収支式は、液水移動に伴う顕熱移動を無視すると、

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) - H \frac{E}{l_z} + \frac{C+R}{l_z} \quad (4)$$

実験室の温湿度と平衡する u を u_s 、実験室温を T_s とすると、初期条件は、

$$u = u_s, \quad T = T_s, \quad (0 \leq x < \infty, t = 0) \quad (5,6)$$

$x=0$ における飽和度を u_0 、水槽内水温を T_w とすると、半無限系に対する境界条件は、

$$u = u_0, \quad T = T_w \quad (x = 0, t \geq 0) \quad (7,8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (x = \infty, t \geq 0) \quad (9,10)$$

前進型有限差分法により式(3)~(10)を数値的に解いた。なお、 u_0 は実験②の結果を用いて決定した。

3.3 解析方法

数値計算においては、次の 3 条件を満たす水分拡散係数 D を決定する。

- a) 飽和度分布が実験②の結果と一致すること
- b) wetfront の変位が実験①の結果と一致すること
- c) 飽和度分布の形状が、飽和度 0.2 から 0.5 の間で急激に立ち上がっていること

基本的には、条件 a) のみで十分であるが、含水率分布の測定における分割幅はかなり粗くならざるを得ない。(実験②では 1cm 刻み) そこで、比較的詳細に得られる wetfront の情報 b) と条件 c) の定性的な情報を併せて検討することで、試料の分割幅の粗さをカバーできると考えた。以下、もう少し詳細に説明する。

条件 b) を検討するためには、実験①で目視観察される wetfront とそこでの飽和度を対応づけることが必要である。wetfront が既に到達している領域の飽和度は、実験②より、0.5 以上であった。一方、綿の平衡含水率曲線[8]において、相対湿度 100% 近くでは飽和度が 0.2 付近から 1 まで急激に変化することを考慮すると、wetfront が未到達の地点では、飽和度は 0.2 未満であると考えられる。したがって、実験①において wetfront がはっきりと観察されたことと併せ考えると、wetfront 付近の飽和度の分布形は 0.2 から 0.5 の間で急激に立ち上がっていると考えられる。これが条件 c) である。そのような分布形であれば、飽和度 0.2 から 0.5 の範囲内のどのような飽和度で wetfront を定義しても結果に大きな差はない。以下では、飽和度 0.3 以上の領域の先端を wetfront と定義し、実験結果との比較を行う。

なお、水分拡散係数は、(11)式のように飽和度 u の指数関数で近似して与える。 $d1$ および $d2$ は定数である。

$$D = d1 \cdot \exp(d2 \cdot u) \quad [\text{cm}^2/\text{s}] \quad (11)$$

数値計算により、条件 a)~c) を満たすような $d1$ と $d2$ の組み合わせを探す。

Figure 5 Distribution of degree of saturation per 100s

Figure 6 Distribution of degree of saturation per 100s

3.4 解析結果

前節で述べた条件 c) が満たされるためには、 d_2 の値を比較的大きく取る必要がある。例えば $d_2 = 0$ とした場合、すなわち、 $D = d_1$ (定数) とした場合、Figure 5 に示す通り、飽和度の分布形状はなだらかであり、条件 c) を満たさない。一方、 d_2 を大きくしていくと、7 を超えたあたりから比較的急激な勾配を持つ飽和度の分布形が得られるようになる。(Figure 6 参照)

Figure 8 Distribution of degree of saturation (Elapsed time=100, 200, 300, 400, 600[s])

試行錯誤により、飽和度の空間分布、および wetfront の変位の計算値が、実験結果と一致するような D を求めた。得られた D は、

$$D = 1.4 \times 10^{-5} \cdot \exp(9u) \text{ [cm}^2/\text{s]}$$

この値を用いたときの wetfront の変位および含水率分布を Figure 7 および 8 に示す。実験値とよく一致している。Figure 8 において、 x が大きくなるにつれて一致の度合いが悪くなる傾向がある。これは、実験②の試料分割が $x=0.5 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 1.5$ 、 $1.5 \sim 2.5$ 、 $2.5 \sim 3.5$ 、 $3.5 \sim 4.5$ のように $x=0$ に近い側から順番に行なわれ、切断順位が後半の布片の飽和度が本来の値より大きくなること一因と考えられる。

今回の測定においては、飽和度として 1cm の区間の平均値しか得られないため、詳細な分布形状の検討はできていない。また、数値計算における $x=0$ での飽和度の境界条件は、区間 $x=0.5 \sim 0.5$ における実験値を用いて決定されている。これらより、測定精度は研究の目的に対してまだ十分でないが、現状の精度の範囲内では、水分移動性状が拡散モデルで記述できることを示す結果と言える。

Figure 7 Position of wetfront

4. 布面に液滴を落とした場合の濡れの広がり

4.1 検討の目的

3章までに、布の一端を水に浸した場合の1次元的な水分移動についてモデルの提案を行った。本章では、皮膚表面の汗の一部が着衣に付着し蒸発する過程を予測するという本研究の目的に一步近い状況を考える。すなわち、布表面に液滴を落とした場合に濡れが布面で2次元的に広がる様子を、提案しているモデルを用いて検討する。

検討対象であるブロードは、たて糸の密度がよこ糸の約2倍になるように織られた平織の織物である。ここまで検討した水分移動は、よこ糸に平行な方向の1次元系(x)についてのものであった。同様の方法で、たて糸に平行な方向の1次元系(y)の水分移動についても実験および解析を行い、水分拡散係数を同定した。その結果をすでに示したx方向についてのものと併せて示すと、

$$D_x = 1.4 \times 10^{-5} \cdot \exp(9u) \quad [\text{cm}^2/\text{s}]$$

$$D_y = 2.0 \times 10^{-5} \cdot \exp(9u) \quad [\text{cm}^2/\text{s}]$$

これより、糸が密である方向に平行な水分移動の方が速いことが分かる。(Figure 9 参照) もし、水分移動の異方性の原因が糸の織り密度の違いのみであるなら、直交するx方向、y方向それぞれの水分拡散係数を用いることにより、布面上の2次元的な水分移動は記述できると予想される。

Figure 9 Water diffusivity

4.2 実験方法

10cm×20cm 程度の布を網目 2cm 間隔の網に載せて水平に支持する。布面の約 0.5cm 上から、注射器により液滴を一滴布面に落とす。その水分が布面上で移動する様子をビデオカメラで記録する。試料布にあらかじめスケールを書き入れておき、記録された映像から wetfront の位置の時間経過を測定する。液滴は網の目の中央に滴下し、支持台に布が接していない状態で水分移動が起こるようにした。

Figure 10 に実験の概念図を示す。

Figure 10 Schematics of experiment on two-dimensional water movement

4.3 実験結果

液滴が布面に接触してから3~4秒間は、布面上に水膜が形成されていた。その水膜は短軸約 0.4cm、長軸約 0.5cm の楕円と見なせる形状であった。水膜が消えた後12秒後までに、wetfront が通過した領域は短軸 0.55cm、長軸 0.70cm の楕円状に広がった。12秒後以降は、観察できるような wetfront 通過領域の広がりは見られなかった。短軸、長軸それぞれと wetfront との交点の変位を Figure 11 に示す。

Figure 11 Length of minor/major axes of the ellipse formed by wetfront

4.4 計算方法

短軸方向をx座標、長軸方向をy座標とする。対称性を考慮して、 $x>0$ かつ $y>0$ の領域のみを解析対象とする。基礎方程式は、水分蒸発を無視すると、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (12)$$

液滴が布に接触した時点をとると、初期条件は、

$$u = u_i, \quad (0 \leq x < \infty \text{ and } 0 \leq y < \infty, \quad t = 0) \quad (13)$$

水膜は、実験における観察結果より、短軸 0.40cm、長軸 0.50cm の楕円とした。 m_d を液滴の重量、 m_{in} を布に吸い込まれた水分重量の合計とし、 $m_d - m_{in} > 0$ の場合に水膜が存在していると判定する。

境界条件は、

a) $m_d - m_{in} > 0$ のとき、水膜が存在している領域の境界において、

$$u = 1 \quad (14)$$

b) $m_d - m_{in} = 0$ のとき、

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \quad (x = 0, \infty, \quad t \geq 0), \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= 0 \quad (y = 0, \infty, \quad t \geq 0) \end{aligned} \quad (15, 16)$$

解析対象とした実験では、液滴一滴の重量は 0.012[g] であった。なお、15 秒前後という非常に短い時間なので、布表面での蒸発は無視している。

4.5 計算結果

計算結果を実験結果とともに Figure 12 に示す。t=12[s]以降における wetfront 通過領域の面積および形状については、実験結果とよく一致する結果が得られた。一方、t=3~5[s]においては、実験と比べて速く水分が移動する傾向が見られる。測定では t=3~4[s] で消えた水膜が、計算では t=1.5[s] で消えるという結果（ここでは省略）となっている。水膜の消滅が速すぎるのが、t=0~12[s]における実験値と計算値のずれの主な原因となっていると思われる。液滴が布に取り込まれる過程のモデルについてはさらに検討する必要がある。

Figure 12 Area of wetting

5. 結論

衣類における水分移動に関する検討を、綿 100% のブロードを用いて行い、以下の結論を得た。

1. 布面に沿った方向の水分移動速度、およびその時の含水率分布の測定を行った。
2. 布面に沿った方向の水分移動は、水分拡散係数の含水率依存性を考慮した非線形拡散型の水分移動モデルで大略記述できる。
3. 水分拡散係数をたて糸方向、よこ糸方向それぞれについて同定し、布面上の水分拡散の異方性を定量的に表現した。
4. 液滴を布面に滴下した時の布面上の 2 次元的水分分

散について、実験と解析を行った。提案しているモデルにより、十分に時間が経過した後の性状は予測できているが、液滴が布に吸収される過程における性状についてはさらに検討する必要がある。

NOMENCLATURE

ρ_w	: density of water, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$
a	: porosity of cloth, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$
w	: volumetric water content, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$
t	: time, s
x	: coordinate, cm
D_w	: water diffusivity due to water content gradient, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
D_T	: water diffusivity due to temperature gradient, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
T	: temperature, K
X	: humidity ratio, $\text{kg} \cdot (\text{kg}')^{-1}$
E	: evaporation rate at surface of cloth, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
C	: heat flux due to convection, $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
R	: heat flux due to radiation, $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
H	: latent heat of evaporation, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
c	: specific heat of cloth, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ρ	: density of cloth, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$
λ	: thermal conductivity of cloth, $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
N	: number of faces where evaporation occurs (1 or 2)
a'	: vapor transfer coefficient related to humidity ratio difference, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg}/\text{kg}')^{-1}$
l_c	: cloth thickness, cm

謝辞

本研究は(社)空調・衛生工学学会近畿支部環境工学研究会研究助成金(高田 隆)、および文部省平成 8 年度科学研究費補助金(基盤研究(B), 研究代表者: 鈴木 修一, 課題番号 08455268)の助成を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 持田 徹・横山 真太郎: 着衣の透湿抵抗に関する工学的研究, 空調・衛生工学学会論文集, 3(1977), 79-87.
- [2] 垣 鈞直・勝浦 哲夫: 局所発汗量と蒸汗量の同時測定と局所蒸発熱伝達率の算出法, 日本建築学会計画系論文集, 464(1994), 65-70.
- [3] 梅野 鈴井・高田: 着衣における水分の移動と蓄積を考慮した人体の熱環境に対する非定常応答(その 3), 日本建築学会近畿支部研究報告集(環境系), 38(1998), 313-316.
- [4] Gagge, A.P. et al; A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Transactions, 92(2)(1986), 709-731.
- [5] Jones, B.W. et al; Transient interaction between the human and the thermal environment, ASHRAE Transactions, 98(2)(1992), 189-195.
- [6] 米田 守宏・丹羽 雅子: 布面に沿った水分移動の測定, 繊維学会誌, 48(6)(1992), 243-253.
- [7] 米田 守宏・丹羽 雅子: 圧力センサ法による布面に垂直な吸水の測定とその解析, 繊維学会誌, 49(5)(1993), 288-298.
- [8] 「繊維便覧」第 2 版, (繊維学会編) (1994).

[Received Mar. 1, 1998, Accepted Apr. 24, 1998]