皮膚/木質材料界面における熱挙動のシミュレーション[†]

佐 道 健* 野間田 匡**

Computer Simulation of Thermal Behavior at Human Skin-Woody Material Interfaces

by

Takeshi SADOH* and Tadashi NOMATA**

This paper deals with the simulation of thermal behavior at a boundary between skin and woody materials when the woody materials laid over a cement mortar block are in contact with a man's palm. Plywoods, MDF (medium density fiberboards), and cork boards with different thickness were used as the overlays. Changes in temperature at the skin-overlay-underlayment interfaces were measured with thermo-couples at 10 to 30 sec intervals. Furthermore, a thermal transfer model based on a numerical method with finite differences was proposed to analyze the changes in temperature and rate of heat transfer at the interfaces. Thermal constants for the model were obtained by fitting them with the experimental values. Then the changes in temperature and rate of heat transfer were simulated by this model for various overlay materials having different thickness. Not only the model is able to obtain the thermal behavior at the interfaces in good agreement with the experimental results on the samples of various woody materials, but also it is valuable to estimate the sensory warmth felt by man's palm in contact with the surface of the overlays, since both the temperature at the skin surface and the heat transfer across the boundary are highly related with the sensory warmth.

Key words : Skin, Composite wood, Plywood, MDF, Thermal behavior, Computer simulation

1 緒 言

人が物体に触れると皮膚/物体の界面で熱が温度の高い方から低い方へ流れ、その熱量の多少によって人はその物体を冷たくまたは緩かく感じる。著者らは皮膚/材料界面における熱挙動と接触温冷感の関係、下地材料の上に木材単板を重ねたときに、下地材料の熱伝導率と木材単板の厚さを変えたときの接触温冷感について明らかにした。一方、外部から熱が供給されている木材中の熱移動と表面温度の解析には、差分法を用いた熱伝導解析が有用であることが報告されている³⁾。このように人の温冷感に関する心理量がその物質の熱的物性に関わるので、接触時の熱挙動を予測することにより様々な物の温冷感を予測できるはずである。本研究では、コンクリート下地材の上に木質材料を被覆した複合系において人が接触したときの熱挙動の実測を行い、さらにこれを予測するためのシミュレーションを行った。

2 実 験

2・1 実験材料および装置

測定に用いた材料を Table I に示す。表面材料として市販のラワン合板、MDF (中質繊維板)、およびコ

ルク板を用い、セメントモルタル板は下地材として用いた。寸法は 20 cm×15 cm で、熱伝導率は比較法で測定したものである。これら材料を室温 20°C、湿度 55% の恒温恒湿室に十分な期間放置したのち、実験に供した。

Table I. Specimens used.

Specimen	Thickness (cm)	Density (g/cm ³)	Thermal conductivity (cal/cm sec °C)
Plywood (commercial)			
P15	1.53	0.71	0.44×10^{-3}
P9	0.91	0.62	0.41
P5	0.54	0.64	0.40
P3	0.24	0.61	0.39
Medium density fiberboard (MDF)			
F15	1.51	0.64	0.28
F9	0.90	0.70	0.28
F5	0.55	0.66	0.28
F3	0.27	0.77	0.28
Cork board			
C5	0.50	0.25	0.13
C1	0.095	0.25	0.21
Cement mortar			
	3.0	2.3	3.06

[†] 原稿受理 平成 4 年 4 月 30 日 Received Apr. 30, 1992

* 正 会 員 京都大学農学部林産工学教室 〒606-01 京都市左京区北白川追分町, Dept. of Wood Sci. & Tech., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

** 京都大学農学部林産工学教室 〒606-01 京都市左京区北白川追分町, Dept. of Wood Sci. & Tech., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

温度測定にはあらかじめ熱電対間の誤差が 0.1°C 以内であることを確認した銅-コンスタンタン熱電対を用いた。熱電対感熱部を下地材として用いたセメントモルタル板の両面中央および内部に厚さ方向に5mm間隔で埋め込み、表面材料表面中央にも感熱部が半分程度だけ埋まるようにして固定した。温度の記録にはマルチチャンネルデジタルレコーダ(アドバンテスト社製TR2724)を用いた。

表面材料をセメントモルタル板下地材にクランプで固定し、下地材の裏面が空気に触れるように台の上に乗せ、熱電対をレコーダに接続した。

2.2 実験方法

2.2.1 手のひらからの熱の伝達 手のひらに熱電対をセロハンテープで固定し、手のひらの温度が安定するまで数分間安静にした後、手のひらと表面材料の熱電対が向かい合うように、手のひらを乗せた。その後、手のひら、表面材料、下地材の表面および内部の温度を最初10sec間隔、ついで30sec間隔で10min間測定した。

2.2.2 一定熱源からの熱の伝達 手のひらの温度は、人の条件および測定中も変動するので、底面に薄いゴム製の膜を取り付けたプラスチック容器に温水を入れ、熱源とした。水温はサーモスタットを用いて 30°C に保った。この熱源を用いて手のひらと同様の条件で温度測定を行った。

3 コンピュータ・シミュレーション

3.1 シミュレーションモデル

熱挙動のシミュレーションには、手のひら直下の部分での熱挙動に注目したため、厚さ方向の熱の移動だけの1次元差分法を用いた。シミュレーションを行うにあたり、下地材に表面材料を被覆した材料に手のひらをのせたときの熱挙動についてモデル化を行い、熱の移動についてはFig. 1中の①～⑥の6つの部分に分けて考えた。

- ① 手のひら内部での熱移動
- ② 手のひらと表面材料の界面での熱移動
- ③ 表面材料内の熱移動
- ④ 表面材料と下地材の界面での熱移動
- ⑤ 下地材内の熱移動
- ⑥ 下地材裏面と雰囲気気の界面での熱移動

なお、材料を体温より低い温度におき、初期条件として材料がその温度と平衡に達していることとした。

3.2 材料内での熱伝導

Fig. 1のように、表面材料を Δx_1 で n 等分、下地材についても同様に Δx_2 で m 等分した。それぞれの材料での i 番目の分割点での温度を θ_i としたとき、 Δt 時間後のこの点の温度 θ_i^* は式(1)で表わされる。

- ① In a man's palm (eq. 2).
- ② At palm-overlay interface (eq. 2).
- ③ In overlay (eq. 1).
- ④ At overlay-underlayment interface (eq. 3, 4).
- ⑤ In underlayment (eq. 1).
- ⑥ At underlayment-air boundary (eq. 5).

Fig. 1. Heat transfer model of palm-overlay-cement mortar block system.

$$\theta_i^* = \theta_i + \frac{\alpha_i \Delta t}{\Delta x_i^2} (\theta_{i-1} + \theta_{i+1} - 2\theta_i) \quad (1)$$

ここで α は材料の熱拡散率で、熱伝導率を λ 、比熱を c 、密度を ρ としたとき、 $\alpha = \lambda / \rho c$ で表わされる。また、比熱の値は表面材料はいずれも木質であることから、 $0.39 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ 、セメントモルタルは $2.0 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ とした。計算は $m=6$ 、 n は厚さに応じて5または6とし、 $\Delta t=1 \text{ sec}$ で行った。

3.3 手のひらの熱挙動モデル

手のひらは熱源として作用するが、定温のものではなく、体外への熱の流動の大小によって変動する。そこで次のような熱挙動モデルを想定した。

まず体温を θ_{bd} で表わし、常に 36°C で一定であるとした。また手のひらの表面温度 θ_{sk} の変化は θ_{bd} と θ_{sk} の差、および θ_{sk} と材料表面の温度差 θ_0 の差によって決まるとした。したがって、 Δt 時間後の手のひらの表面温度 θ_{sk}^* を

$$\theta_{sk}^* = \theta_{sk} + \Delta t [A(\theta_{bd} - \theta_{sk}) - Bh_1(\theta_{sk} - \theta_0)] \quad (2)$$

で表わした。ここで、 A 、 B 、 h_1 は手のひらの温度変化および手のひらからの熱の伝達に関与する定数である。

3.4 材料界面での熱伝達

通常、層を成している材料間での熱の伝達では、接している材料の両表面の温度は同一であるとして取り

扱われる。しかし、実際には接触面での熱抵抗があると考えてよい。そこで、表面材料裏面の温度を θ_n 、それに接している下地材表面の温度を θ_{c0} とおいた場合に、それぞれの表面での Δt 時間後の温度 θ_n^* 、 θ_{c0}^* は

$$\theta_n^* = \theta_n + \Delta t \left[h_2(\theta_{c0} - \theta_n) - \lambda_1 \frac{\theta_n - \theta_{n-1}}{\Delta x_1} \right] \left(\frac{2}{c_1 \rho_1 \Delta x_1} \right) \quad (3)$$

$$\theta_{c0}^* = \theta_{c0} + \Delta t \left[h_2(\theta_{c0} - \theta_n) - \lambda_2 \frac{\theta_{c0} - \theta_{c1}}{\Delta x_2} \right] \left(\frac{2}{c_2 \rho_2 \Delta x_2} \right) \quad (4)$$

で表わされるとした。ここで h_2 は熱の伝達に関する定数、 λ_1 、 λ_2 、 c_1 、 c_2 、 ρ_1 、 ρ_2 、 Δx_1 、 Δx_2 はそれぞれの材料の定数 λ 、 c 、 ρ 、および分割幅 Δx である。

また下地材裏面と雰囲気との熱伝達については次式の関係を用いた。すなわち下地材裏面の温度を θ_{cm} とおくと、この面での Δt 時間後の温度 θ_{cm}^* は

$$\theta_{cm}^* = \theta_{cm} + \Delta t \left[h_3(\theta_{air} - \theta_{cm}) - \lambda_2 \frac{\theta_{cm} - \theta_{cm-1}}{\Delta x_2} \right] \left(\frac{2}{c_2 \rho_2 \Delta x_2} \right) \quad (5)$$

で表わされる。ここで h_3 は裏面での熱伝達率、 θ_{air} は雰囲気温度である。

3.5 熱流量

皮膚/材料界面での熱流量 Q は、表面から厚さ $\Delta x_1/2$ 部分の温度を上昇させるに必要な熱量と、この部分を通過する熱量の和であるとし、式(6)で計算した。

$$Q = c_1 \rho_1 \frac{\Delta x_1}{2 \Delta t} (\theta_0^* - \theta_0) + \frac{\lambda_1 (\theta_0 - \theta_1)}{\Delta x_1} \quad (6)$$

4 結果および考察

4.1 測定結果

手のひらの表面温度は測定ごとに変動する。サーモグラフを用いて手のひらの表面温度を測定すると、個人差があり、同一人であっても測定たびごとに異なる。また、手のひらの部位によって 5°C 程度の差異がある。この変動は人の生理条件の違いによるものと考えられ、熱挙動の測定結果にバラツキがみられた。したがって、比較的条件的揃ったケースである手のひらの温度が 30°C 前後のものをシミュレーションとの比較に用いた。

4.2 諸定数の決定

測定結果を元に上述の定数 h_1 、 h_2 、 h_3 、 A 、 B を次のような手順で決定した。定数の値を変えてシミュレーションを実行し、0.5、1、2、4、8 min における実測値とシミュレーションで得られた値（以下、

計算値と呼ぶ）の差の自乗和が最小となる場合に、求める定数の値とした。

(1) 初めに温水熱源を用いた実験によって手のひらの温度変化に關与する定数 A 、 B の影響を除いた。

まず単一材料を用いた実測値と、 h_1 の値を変えて得られた計算値を比較し、適合性が最も良い h_1 を求めた。ついで下地材だけを用いた実測値と、 h_3 の値を変えて得られた計算値を比較し、適合性が最も良い h_3 を求めた。さらに表面材料と下地材の複合系における実測値と、上のようにして求めた h_1 、 h_3 を用い、かつ h_2 の値を変えて得られた計算値を比較し、適合性が最も良い h_2 を求めた。

ここで h_2 と h_3 の値は熱源によらない。しかし、ここで求めた h_1 はゴム膜/材料間の定数であるので、皮膚/材料間の h_1 の値は次の方法で最終決定した。

(2) 手のひらで行った実験値を用いて、定数 A 、 B および皮膚/材料間の h_1 の値を決定した。まず上記の方法で求めた h_1 と実測値を式(2)に代入し、連立方程式を解いて A 、 B を決定したのち、得られたこれらの値を多少変動させてシミュレーションを行い、その計算値と実測値とを比較し、適合性が最も良い h_1 、 A 、 B を求めた。

(3) 得られた定数の値は、諸元の単位を cm, g, sec, cal, $^\circ\text{C}$ とすると、 $h_1 = 5.0 \times 10^{-3}$ 、 $h_2 = 4.0 \times 10^{-3}$ 、 $h_3 = 2.0 \times 10^{-3}$ 、 $A = 2.0 \times 10^{-3}$ 、 $B = 1.65$ であった。

4.3 実測値と計算値の比較

厚さ 9 mm の合板を表面材料としたときの、時間の経過に伴う手のひら表面温度 θ_{sk} および表面材料の表面温度 θ_0 の実測値と計算値、および熱流量 Q の変化の 1 例を Fig. 2 に示す。

実測値と計算値を比較するために、厚さを変えた合板を表面材料としたときの、0.5、1、2、4、8 min における表面温度の実測値と計算値との関係を Fig. 3 に、表面材料として MDF、コルク板を用いた場合の結果をそれぞれ Fig. 4 および Fig. 5 に示す。後半部にややズレがみられる場合もあるが、おおむね両者の温度差が 1°C 以内に収まっており、ほぼよい一致がみ

Fig. 2. Changes in temperature and rate of heat transfer, Q , at skin-overlay boundary.

Fig. 3. Comparison between observed and calculated temperatures at plywood overlay surface in contact with palm after 0.5, 1, 2, 4, 8 min.

Fig. 4. Comparison between observed and calculated temperatures at MDF overlay surface in contact with palm after 0.5, 1, 2, 4, 8 min.

られた。これらの材料では熱的な物性が類似している
ので、上述の定数を使用できることを示している。

4・4 表面材料の厚さの影響

4・4・1 表面の温度上昇 表面材料としての合板
の厚さを変えた場合の表面温度の上昇の経過を Fig. 6
に示す。

手のひらと、表面材料が接触した瞬間に表面温度が
急上昇し、10 sec あたりまでは厚さに拘らず同じ挙
動を示すが、時間経過とともに温度上昇に変化がみら
れた。表面材料の厚さが薄いものほど、温度上昇が抑
えられ、厚さが1 mm 以上となると、下地材の影響が
ほとんどない結果となった。これは、熱伝導率が大
きいセメントモルタル下地材の影響と考えられ、荒川ら²⁾

Fig. 5. Comparison between observed and calculated temperatures at cork overlay surface in contact with palm after 0.5, 1, 2, 4, 8 min.

の実測結果とよく一致した。MDF、コルク板でも同
様の厚さ依存性が認められた。これらの結果は、下地
材が表面温度変化に影響を与えていることなど、複合
系材料の熱挙動をシミュレーションによって表現でき
ることを示している。

4・4・2 熱流量 合板を表面材料としたときの熱
流量と時間の関係を両対数グラフを用いて Fig. 7 に示

Fig. 6. Change in temperature at skin-overlay boundary for plywood of various thickness in simulation.

Fig. 7. Log-log relationship for change in calculated rate of heat transfer, Q , at skin-overlay boundary for plywood of various thickness.

す。時間の対数と熱流量の対数の関係は2本の直線で表わされ、直線の傾きの変化から、表面温度の変化と同様に、熱流量に対しても表面材料が薄いものほど下地材の影響が早く現れることがわかる。

初期の段階での直線関係は、原田¹⁾らが報告して熱流計を用いて実測したものとよく対応しており、シミュレーションが熱流量変化をもよく表現できることがわかった。

5 結 論

セメントモルタル下地材の上に木質材料を被覆した複合系の手のひらを接触したときの熱挙動のコンピュータ・シミュレーションを行った結果、合板、MDF、コルク板については、手のひら、表面材料、下地間の熱伝達、熱伝導の差分方程式を用い、諸定数を決定することができ、それらを用いて行った計算値と実測値が一致することがわかった。とくに手の温度変化を求める式を導入したことにより、手のひらの表面温度変化と皮膚/木質材料界面での熱流量の変化を追跡することができた。ただ、Fig. 3~Fig. 5 にみられるよう

に実測値と計算値の間に多少のズレが認められた。これは4・1節で述べたように、実測値は人の生理条件によって変動することがあり、このような不確定の要因がズレの原因と考えられる。

以前の研究^{1),2)}によって、材料単体や下地材を被覆した木材に接触したときの温冷感が界面での温度および熱流量変化によって決まることから、シミュレーションによって皮膚/材料界面での熱挙動を予測するのが可能であるだけでなく、接触温冷感の予測も可能となることを示している。

おわりに、合板およびMDF試料のご提供を頂いた朝日ウッドテック(株)に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 原田康裕, 中戸莞二, 佐道 健, 木材学会誌, **29**, 205 (1983).
- 2) 荒川純一, 佐道 健, 中戸莞二, 木材学会誌, **31**, 145 (1985).
- 3) 信田 聡, 木材学会誌, **38**, 13 (1992).