

Evaluation of Tactile Warmth for Wood by Heat Transfer Analysis

- Influence of Anisotropy of Thermal Conductivity -

○正 小畑 良洋 (産総研中部) 竹内 和敏 (産総研中部)

杉野 秀明 (NEDO) 金山 公三 (産総研中部)

Yoshihiro OBATA, AIST-Chubu, Anagahora, Shimoshidam, Moriyama-ku, Nagoya
 Kazutoshi Takeuchi, Temporary Research Staff dispatched to AIST-Chubu
 Hideaki SUGINO, NEDO Industrial Technology Researcher in AIST-Chubu
 Kozo KANAYAMA, AIST-Chubu

Key Words: Wood, Tactile Warmth, Contact Surface Temperature, Thermal Conductivity, Anisotropy

1. はじめに

最近, 持続可能な発展という考え方が重要視されてきており, 環境に負荷をかけない発展が求められてきている. 木材は光合成により地球温暖化の原因である炭酸ガスから炭素を固定化したものであり, 長期有効利用することは固定化された炭酸ガスの長期貯蔵を意味し, 地球環境に好影響を与える. また, 将来的に枯渇が心配される地下資源に対し, 木材は伐採→植林→育林を適切に繰り返すことにより, 半永久的に入手できる持続・再生可能な資源である. したがって, 持続可能な発展の観点から木材は 21 世紀型の材料として最近見直されてきている. しかしながら, 日本は 67% という高い森林率を誇りながら, 経済性の観点から多くの木材が輸入され, 国内の木材が伐採されない結果, 新たに植林をする場所が年々減少し, 若い森林ほど光合成が盛んに行われるにも関わらず, 日本的人工林は高齢化しつつある. さらに, 間伐などの手入れが満足に行われていない人工林が増加しており, 日本の森林の持続可能性が脅かされてきている. このような国内産の木材, 特に間伐材の利用を促進するために, 間伐材の欠点である強度や硬さ不足を改善して付加価値を与える工業技術や, 有限な地下資源である金属等の代替として木材の利用拡大を図るために木材の長所を工業的に評価する技術が重要となってきた.

著者らは木材の長所として木材が持つ良好な接触温冷感を取り上げ, 金属等の他の工業材料と同じ指標で比較できる接触温冷感の指標として, これまでに接触面温度と熱浸透率を提案してきた⁽¹⁾. これは, 手と各種材料の接触による熱移動問題を, 近似的に接触前の初期温度と物性値が異なる二つの均質半無限体が接触する問題としてモデル化し, その理論解析から導かれたものであり, その接触面温度と熱浸透率の関係は経験的に知られている木材の接触温冷感に関する知見を合理的に説明するものである. しかしながら, 実際の木材は年輪内に傾斜構造を持つ材料であり, また, 繊維方向の熱伝導率は, 繊維に直交する方向の熱伝導率の 2~2.5 倍と大きな直交異方性を示す材料であり⁽²⁾均質体ではない. このうち, 傾斜性の影響に関しては, 一層の傾斜機能木質ボードを想定し, 傾斜のパターンによっては, 同じ平均密度を持つ均質体よりも接触面温度が高くなり, より温かく感じることができることを示してきた⁽³⁾. 本報告では, もう一つの木材の特性である, 熱伝導率の異方性を考慮した場合の熱伝導問題を取り上げ, 異方性が木材の接触温冷感に及ぼす影響について検討した結果に関して報告する.

2. 解析と考察

木材を含む材料系の接触温冷感に関して, 一対比較法による官能検査の結果と材料物性値の関係がいくつか報告されている^(4,5). しかしながら, 統計的に数値化された接触温冷感, 官能検査がなされた材料系にしか適用されず, また, 木材から金属まで含む材料系の一対比較において試験片を増やすと, 比較の組合せ数が多くなりすぎ, 被験者の疲労を招くことから, 正確な結果を得ることが困難である. このようなことから, 著者らは木材や金属に共通的な熱伝導現象の理論解析から接触温冷感の指標を導くこととした.

2. 1 均質体接触モデル

手と各材料の接触を, 初期温度と物性値が異なる有限厚さの均質平板が接触する一次元非定常熱伝導問題としてモデル化することができる. この場合の接触面温度 T_{cs} は次式で与えられる⁽⁶⁾.

$$T_{cs}(t) = (T_{iniH} - T_{iniM}) \left\{ \frac{1}{1 + \lambda_M b_H / (\lambda_H b_M)} - 2\eta_M \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\tan(\sqrt{p_m / \kappa_H} b_H)}{\sqrt{p_m} F_d} \exp(-p_m t) \right\} + T_{iniM} \quad (1)$$

ここで, λ , η , κ , b , T_{ini} はそれぞれ熱伝導率, 熱浸透率, 熱拡散率, 板厚, 接触前の初期温度であり, 添え字 H, M は, 手側, 材料側の物理量であることを示す. また,

$$F_d = \frac{b_H \eta_M}{\sqrt{\kappa_H} \cos^2 \sqrt{p_m / \kappa_H} b_H} + \frac{b_M \eta_H}{\sqrt{\kappa_M} \cos^2 \sqrt{p_m / \kappa_M} b_M}$$

さらに, p_m は次式を満足する固有値である.

$$\eta_M \tan(\sqrt{p_m / \kappa_H} b_H) + \eta_H \tan(\sqrt{p_m / \kappa_M} b_M) = 0 \quad (2)$$

しかしながら, 接触温冷感に支配的な熱移動現象は接触直後の接触面近傍で起こると考えられるが, 式(1)から接触直後にどの物性値が支配的であるかを知ることは困難である. この問題を解決するため, 手と各種材料の接触による熱移動問題を, 近似的に接触前の初期温度と物性値が異なる二つの均質半無限体が接触する一次元非定常問題としてモデル化し, その理論解析から接触面温度 T_{cs} を求めると次式が得られる⁽¹⁾.

$$T_{cs} = \frac{T_{iniH} - T_{iniM}}{1 + \eta_M / \eta_H} + T_{iniM} \quad (3)$$

また、半無限体接触モデルによる、手から奪われる熱流束は次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$q(t) = \frac{T_{iniH} - T_{iniM}}{\sqrt{\pi t}} \frac{\eta_H \eta_M}{\eta_H + \eta_M} \quad (4)$$

式(3)、(4)より、半無限体接触モデルが近似的に成り立つ接触直後の時間内においては、接触面温度も熱流束も熱浸透率が支配的な物性値である。ここで、熱浸透率は次式で表されるように、熱伝導率 λ 、比熱 C 、密度 ρ の積の平方根である。

$$\eta = \sqrt{\lambda C \rho} \quad (5)$$

木材が温かく感じられる理由として、従来は木材の熱伝導率が小さく手から木材へ流れる熱量が小さいためとされてきたが⁽⁵⁾、熱浸透率による評価では比熱も関係する。比熱が小さい場合、木材表面近傍の温度が少ない熱量で高くなる。その結果、手と木材間の温度差は小さくなり、手から木材へ熱が流れにくくなると考えられる。このことは、木材の板目面や柃目面の縦断面に接触した場合、木材は繊維方向の熱伝導率が繊維直角方向の熱伝導率の2～2.5倍という異方性を持つことから、板厚方向へ熱が流れるよりも表面が先に加熱され、表面温度がより先に上昇することを示唆する。したがって、熱伝導率の異方性を考慮した場合の接触面温度に関しても検討を行っておく必要がある。

2. 異方性体接触モデル

木材の熱伝導率の異方性を考慮する場合、二次元非定常問題となる。手と木材の接触を Fig.1 に示すように、二つの有限厚さ、幅を持つ平板が接触する熱伝導問題を考える。

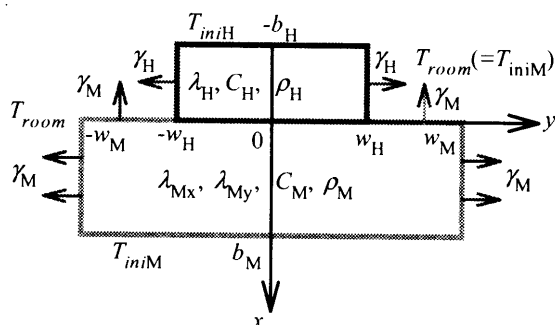


Figure 1 Analytical model and coordinate system.

この場合、 γ を熱伝達率として、基礎式、初期条件、境界条件は以下のように整理できる。

【基礎式】

$$\lambda_H \frac{\partial^2 T_H(t, x, y)}{\partial x^2} + \lambda_H \frac{\partial^2 T_H(t, x, y)}{\partial y^2} = C_H \rho_H \frac{\partial T_H(t, x, y)}{\partial t} \quad (6)$$

$$\lambda_{Mx} \frac{\partial^2 T_M(t, x, y)}{\partial x^2} + \lambda_{My} \frac{\partial^2 T_M(t, x, y)}{\partial y^2} = C_M \rho_M \frac{\partial T_M(t, x, y)}{\partial t} \quad (7)$$

【初期条件】

$$t = 0 \text{ で } T_H(0, x, y) = T_{iniH} \quad (8)$$

$$t = 0 \text{ で } T_M(0, x, y) = T_{iniM} \quad (9)$$

【境界条件】

$$x = -b_H \text{ で } T_H(t, -b_H, y) = T_{iniH} \quad (10)$$

$$x = 0 \text{ で } T_H(t, 0, y) = T_M(t, 0, y) \quad (-w_H \leq y \leq w_H) \quad (11)$$

$$x = 0 \text{ で } \begin{cases} \lambda_H \left[\frac{\partial T_H(t, x, y)}{\partial x} \right]_{x=0} = \lambda_{Mx} \left[\frac{\partial T_M(t, x, y)}{\partial x} \right]_{x=0} \\ (-w_H \leq y \leq w_H) \\ -\lambda_{Mx} \left[\frac{\partial T_M(t, x, y)}{\partial x} \right]_{x=0} = \gamma [T_M(t, 0, y) - T_{room}] \\ (w_M \leq y < -w_H, w_H < y \leq w_M) \end{cases} \quad (12)$$

$$x = b_M \text{ で } T_M(t, b_M, y) = T_{iniM} \quad (13)$$

$$y = w_H \text{ で } \lambda_H \left[\frac{\partial T_H(t, x, y)}{\partial y} \right]_{y=w_H} = -\gamma_M [T_H(t, x, w_H) - T_{room}] \quad (14)$$

$$y = -w_H \text{ で } \lambda_H \left[\frac{\partial T_H(t, x, y)}{\partial y} \right]_{y=-w_H} = \gamma_M [T_H(t, x, -w_H) - T_{room}] \quad (15)$$

$$y = w_M \text{ で } \lambda_{My} \left[\frac{\partial T_M(t, x, y)}{\partial y} \right]_{y=w_M} = -\gamma_M [T_M(t, x, w_M) - T_{room}] \quad (16)$$

$$y = -w_M \text{ で } \lambda_{My} \left[\frac{\partial T_M(t, x, y)}{\partial y} \right]_{y=-w_M} = \gamma_M [T_M(t, x, -w_M) - T_{room}] \quad (17)$$

上記の解は数値計算により求めることとする。

3. 数値計算

3.1 計算条件

人体側の物理量は個人差があるが、表皮は厚さ2mm程度と考えられているため⁽⁷⁾、手側の板厚を $b_H = 2\text{mm}$ とする。この厚さは、皮膚表面からそれぞれ0.2mm、0.4mmの深さにある温度受容体の冷点と温点を含む厚さ⁽⁷⁾である。手のひらの熱浸透率として $\eta = 1.263 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ s}^{1/2} \text{ K})$ 、また、熱伝導率として $\lambda = 0.512 \text{ W}/(\text{mK})$ の文献値を採用する⁽⁸⁾。Fig.2は手からクヌギ(oak)とキリ(paulownia)に流れる熱流束を測定したものと、均質体の平板接触モデルと半無限体接触モデルで計算した熱流束と比較したものである。平板接触モデルと測定値とは非常によく一致しており、先に示した計算緒元が妥当であると判断できる。

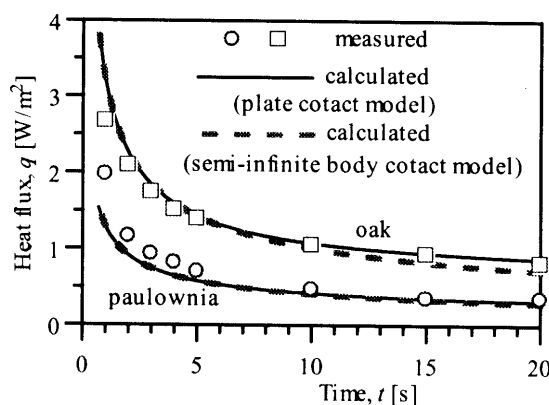


Figure 2 Comparison of measured heat flux and calculated ones.

参考文献

- 小畑良洋ら, 木材学会誌, **46**, (2000), 137-143.
- 伏谷賢美ら, 木材の物理, (1991), 202, 文永堂出版.
- 小畑良洋ら, 2002年度傾斜機能材料論文集, (2003), 48-53.
- 岡島達雄ら, 日本建築学術論文報告集, **309**, (1981), 1-10.
- 原田康裕ら, 木材学会誌, **29**, (1983), 205-212.
- 小畑良洋ら, 機講論, 02-22, (2002), 389-390.
- 日本機械学会編, 生体力学, (1991), 217, 221, オーム社.
- 横山真太郎, 生体内熱移動現象, (1993), 75, 北海道大学図書刊行会.