

足から床への伝導による熱の逃げに関する研究 (その1)

田中辰明 岡建雄
渡辺真知子

Heat Fluxes Conducted to the Floor from the Sole of the Human Foot (Part 1)

Tatsuaki Tanaka Tatsuo Oka
Machiko Watanabe

Abstract

Thermal properties of the floor affect not only comfort of the sole of the human foot, but also setting of room air temperature. This paper describes experimental and theoretical evaluations of floor materials from the viewpoint of thermal comfort of the floor. The b values of various floor materials indicating thermal properties of floors were obtained by a test box equipped with an electric heater. The relationships between b values and heat fluxes from the sole and b values corresponding to the sole of the human foot were obtained by direct measurements of heat fluxes between the sole and the floor. It is concluded that b values can express the thermal properties of floor materials with regard to thermal comfort even including cases of multilayer floors.

概要

床の熱的特性は、人間の足に感じる温冷感のみならずそれに伴う室温設定にも大きな影響を与えると考えられる。本報告は床の熱的特性を実験及び理論的側面から捉え、床構成材料の評価を行なうものである。測定箱により床の熱的特性を表わす熱浸入率 b 値を各種材料について計測した。また人間の足から床に逃げる熱量を直接測定し、 b 値と熱流の相関を求め、人間の足に対する b 値を算出した。 b 値および熱流の計測から床の熱的性能は複層材の場合も含めて、 b 値によって表現できると結論された。

1. はじめに

欧州等では床の温冷感が快適環境指標の一つに取り上げられており、床の熱的特性は人間の足に感じる温冷感のみならず、それに伴う室温設定にも大きな影響を与えると考えられる。特に冬季に足から床へ多量の熱を奪われることは健康上良くないとされ足の温かい床が望まれる。足の温冷感を評価するために種々の尺度が提案されているが、しばしば熱浸入率 b (熱伝導率 λ × 比熱 C × 比重 ρ の平方根) が使われている。その他の方法として、人工足を用いて測定した瞬時的熱損失の研究も進められている。足の温冷感は何だけの熱量が足から床へ伝導により瞬時的に奪われたかによるもので、ここでは床の非定常伝熱の基礎研究として熱浸入率 b と足から床への熱流の測定を行なった。

2. 測定と評価法

単一材で構成されている半無限体の表面に一定の熱量 Q' を与えた場合、熱量 Q' と表面温度の関係式は次式で与えられる。但し b 値は熱浸入率 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{1/2}\text{°C}$)、比熱 C ($\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)、比重 ρ (kg/m^3) で示される材料の物性値であり、熱浸入率と呼ばれ $b = \sqrt{\lambda c \rho}$ $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{1/2}\text{°C}$ である。

$$Q' = \frac{\sqrt{\pi}}{2} b \sqrt{t} (\theta_0 - \theta_{\infty}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$b = \sqrt{\lambda c \rho} \quad \dots\dots\dots(2)$$

(Q' : 熱量 (kcal/m^2), θ_0 : 表面温度 ($^{\circ}\text{C}$), θ_{∞} : 半無限固体初期温度 ($^{\circ}\text{C}$), t : 経過時間 (h))

測定方法は、図-1、写真-1 に示される測定箱を考案し、面発熱体 (グラスファイバーの布にカーボンブラックを塗布 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$, 基準低抗 $100\ \Omega$) により床面を加熱し、表面温度の上昇を測定した。発熱体に加えられる熱量及び表面温度の上昇から(1)式により b 値が算出される。(1)式は半無限固体に適用できるものであるが、

ここでは文献2)に従い、評価時間を10分間としたので複層材あるいは薄い床材にも適用できると仮定して下記の9通りの床材に関して行なった。

- ①コンクリート (厚 10 cm)
- ②コンクリート (〃)+P タイル (厚 2 mm)
- ③コンクリート (〃)+ジュータン (厚 8 mm)
- ④コンクリート (〃)+タタミ (厚 6 cm)
- ⑤コンクリート (〃)+板 (厚 1.5 cm)
- ⑥床板 (厚 1.2 cm)+P タイル
- ⑦床板 (〃)+ジュータン
- ⑧床板 (〃)+タタミ
- ⑨床板

3. 測定箱による b 値

各材料の表面温度変化と試験体への熱流を2分間隔の値として図-2, 3に示した。結果は次の通りである。

- (1) 床板の場合の熱量はコンクリートよりも小さいが、表面温度はコンクリートよりも高い値を示す。
- (2) 仕上げ材がPタイルの場合も上記と同様なことが言える。
- (3) ジュータンの表面温度は床板の場合、コンクリートに比べ10℃ぐらい高い。熱流は10分後ぐらいになるとほとんど差がなくなる傾向にある。
- (4) タタミの場合、表面温度は下地材が床板でもコンクリートでもほとんど同じである。又熱流もまったく同じ値である。

図-2, 3に示した測定値を用い(1)式より床材の b_f 値を算出した。結果を図-4, 5に示した。図より各仕上げ材の b_f 値を見るとコンクリート及びコンクリートにPタイルを貼った床材は時間と共に増大しているが、他の床材は概ね一定した値になっている。文献4)から求めた床表面材の b_{rc} 値と測定値とを比較するとPタイルの

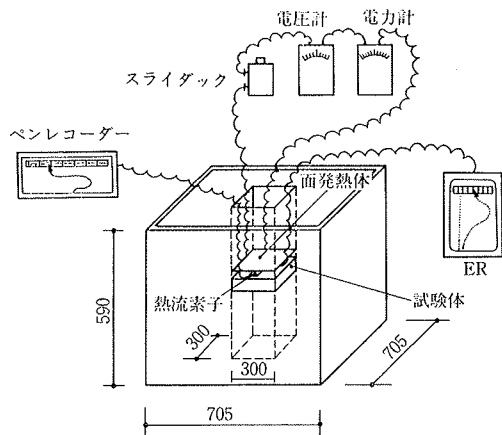


図-1 測定箱

ように薄い材料に関しては、その下の材料の影響が現われていると考えられるがタタミ、ジュータン等に関してはあまり現われていないようである。又Pタイル以外の床材に関しては下地材がコンクリートでも板でも同様の値となっている。又(2)式から求めた b 値は、小さいほど足が床に接触した時の伝導による瞬間的な熱損失が少なくなるわけであるが、文献2)によると次のように足の温冷感が分類されている。

評価	熱浸入率 b
足がとても温かい	< 5
足が温かい	5 ~ 10
ほどよく冷たく、かつ温かい	10 ~ 20
足が冷たい	> 20

これから見るとコンクリートやコンクリート下地のPタイルは冷たく、タタミやジュータン仕上げは温かい床であると言える。

4. 足から床に逃げる熱流

温度の異なる2種の半無限固体が接触すれば、その接触面温度は両固体の b 値により決定され、接触面での熱流は次式で表わされている。

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot b \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} (\theta_0 - \theta_\infty) \quad \dots\dots\dots(3)$$

従って床板も人間の足も半無限固体と仮定して、床板に足を接触させ足から床に伝導で逃げる熱流を測定した。被験者は日本人男性16人、女性13人の合計29人である。測定方法は写真-2, 図-6に示すもので、熱流素子板の上下にサーモカップルシートを貼り付けその上に足が乗るようにした。床材はコンクリート (厚 10 cm) を用いた。一方(3)式とは別に床の b 値がわかっていたら次式により人間の足の b 値が計算できる。但し、この報告では人間の足の温度 θ_∞ を 35℃ と仮定している。

$$\theta_0 = b_f \theta_{\infty f} + b_r \theta_{\infty h} / b_f + b_h \quad \dots\dots\dots(4)$$

(添字 h は人間の足: f は床材を表わす。 θ_0 は足と床材の接触温度 (℃))

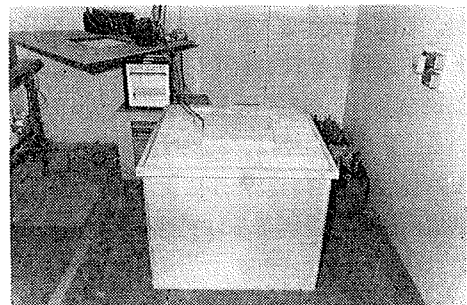
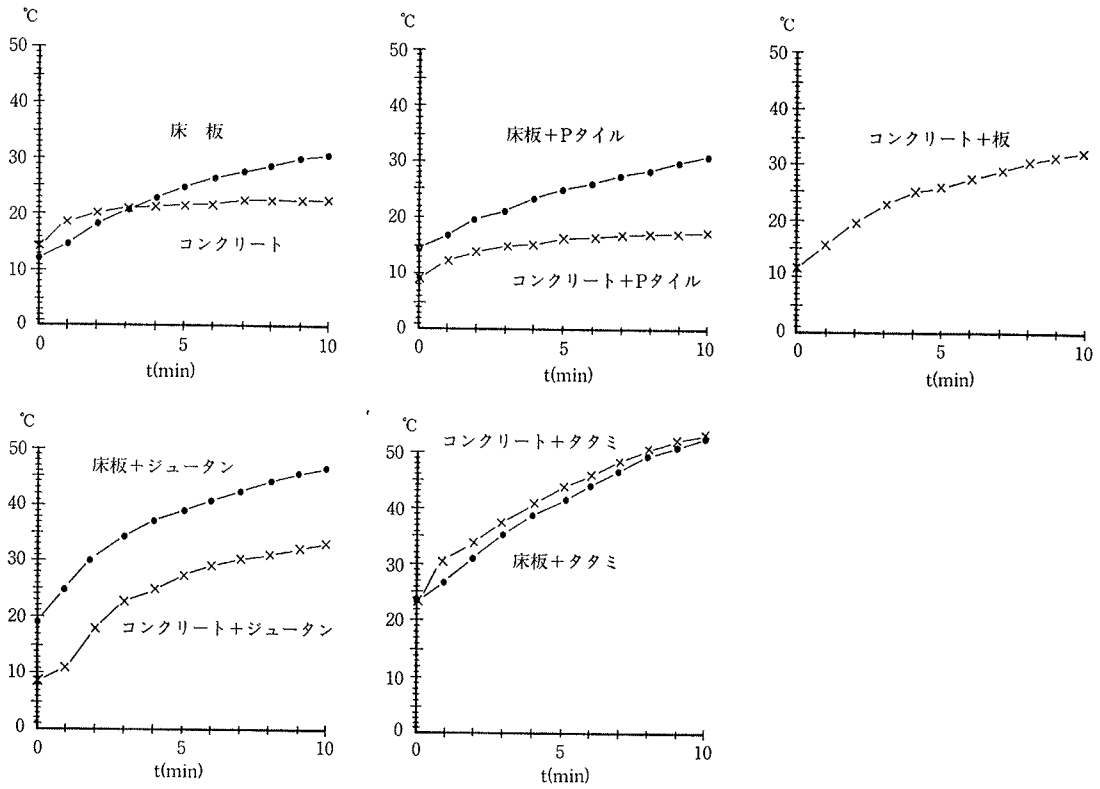
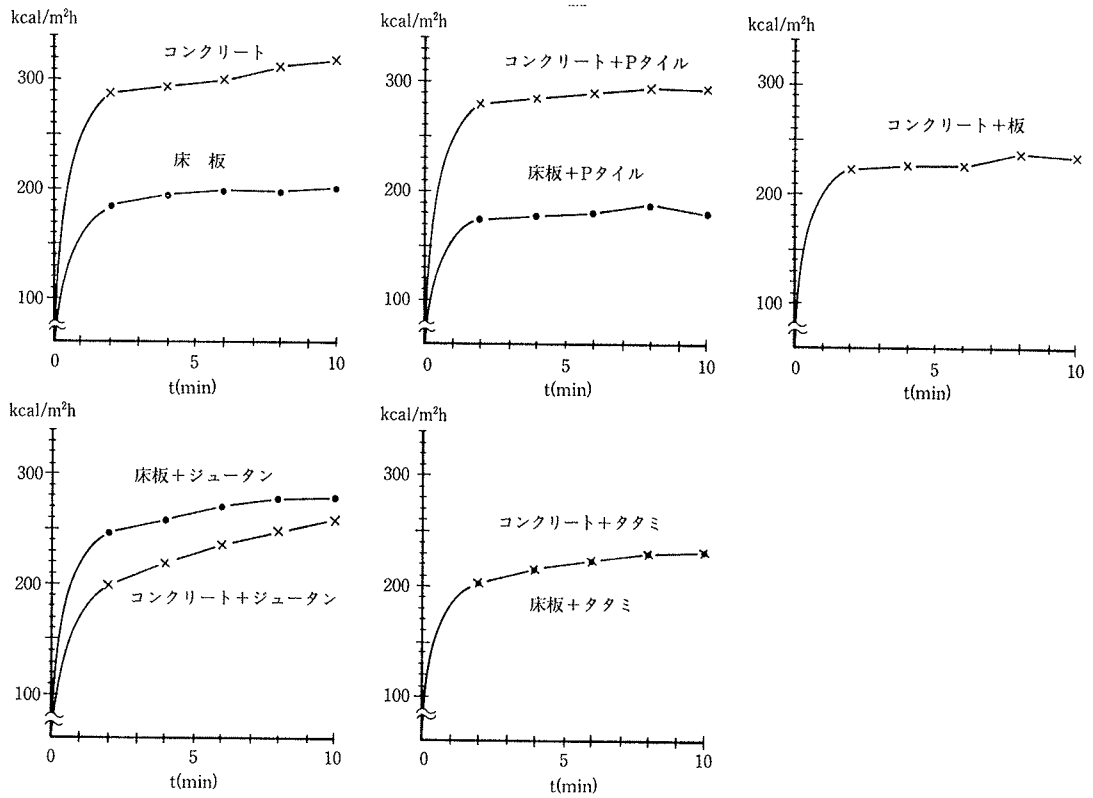


写真-1 測定箱全景



図—2 各材料の表面温度変化



図—3 試験体への熱流

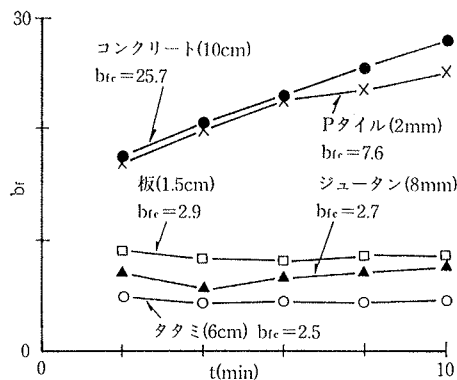


図-4 測定箱による b_r 値と経過時間 (コンクリート下地 ⑦ 10 cm)

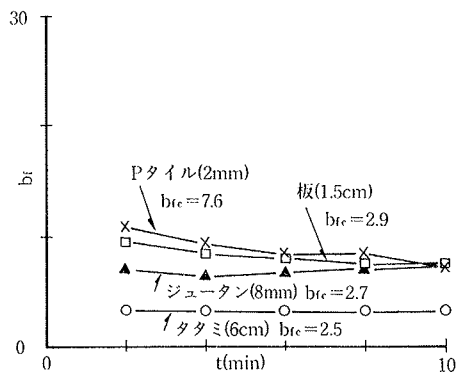


図-5 測定箱による b_r 値と経過時間 (木造下地 ⑦ 1 cm)

測定法及び測定された値を確認するためにも(3)式, (4)式から計算された人間の足の b 値を比較した(図-7)。この図を見ると男女による差異は見られなかったが, 熱流にかなりのばらつきがある。これは特に底の厚いくつを履いた人や運動直後の人は足裏の表面温度が高く足からの熱流も大きい。逆に素足にサンダル履きの人などは足からの熱流が小さい。29人の被験者の平均 b 値は $10 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{1/2}\text{C}$ で文献2)による b_h 値(16)に比べて小さい値になっている。

2章の項に示す②~⑨の床材に関して写真-2, 図-6に示される測定方法と同様の測定法により, 人間の足裏から床に伝導で伝えられる熱流を測定した。この場合, 被験者は女性1人を含む3人で評価時間は10分間とした。文献3)の評価方法に従い10分間の測定において始めの1分間の総熱量 Q_1 , 10分間の総熱量 Q_{10} から床材の評価を行なった。測定結果を図-8に示す。これによらずとも熱流 Q は測定時間 t に対して近似的に $1/\sqrt{t}$ で減少している。一方測定から算出された b_r 値と b_h 値を図-8に示す。これらの値は図-4, 5中に示された b_r 値と同程度であった。又文献2), 3)による床材の評価を表-1に示す。表-1より温かい床では $Q_1 < 9 \text{ kcal/m}^2$, $Q_{10} \leq 45 \text{ kcal/m}^2$, 温かさが不十分な床では $Q_1 > 12$, $Q_{10} > 70$ である。本測定に用いた床材の1分間及び10分間の総熱量を図中に示す。これと文献3)の規格を比較すると, 例えばPタイル+コンクリートは冷たい床材であり, タタミは温かい床に分類される。これは文献2)による分類(足の温冷感を熱浸入率 b 値で規定)と一致している。

5. 結論

この報告では文献2), 3)に従って我国で床の熱的評価を行なうための基礎的研究として行なったものである。床材の熱浸入率 b_r 値, 人間の足の b_h 値等の測定を行なった結果をまとめると以下ようになる。

(1) 複層材を含めた床材の総合的な b_r 値に関して評価

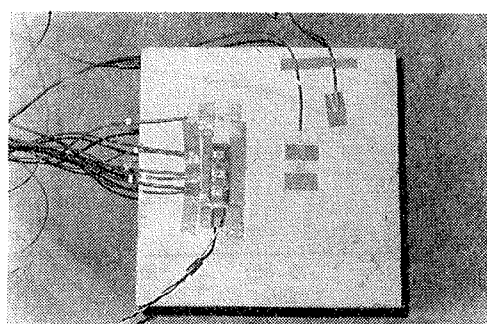


写真-2 床材と熱流板

時間が10分間であれば概ね安定した値が得られたと言える。

(2) Pタイルのように薄い材料に関してはその下の材料の影響が現われると考えられる。

(3) コンクリートの b_r 値が時間とともに上昇しているがこれはコンクリートの初期値のとり方に問題があったようだ。

(4) 人間の足の b 値では男女による差異は見られなかったが, かなりのばらつきが見られた。これは測定する直前の足の状態によるものと考えられる。すなわち素足にサンダル履きの人あるいは運動直後の人とを比べると前者の b 値は小さく後者の b 値は大きい。

(5) 人間の足も床材も半無限固体と仮定すれば材料の b_r 値, 人間の b_h 値及び材料表面の初期温度, 人間の足裏表面温度から(4)式, (1)式を用いて人間の足から床に伝導で逃げる熱量が算出できる。

(6) 文献2), 3)における評価によるとコンクリート及びコンクリート+Pタイルは冷たい床材であり, それ以外の実験に用いた床材は温かい床に分類される。

謝辞

本研究は工業技術院から(財)建材試験センターへ委託された「省エネルギー用建材及び設備等の標準化に関する調査研究(総合委員長 藤井正一)」の一環として

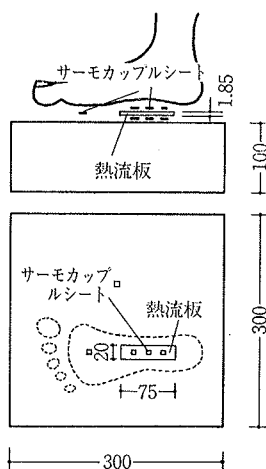


図-6 床材と熱流板による測定方法

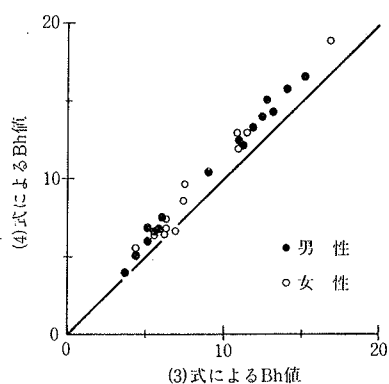


図-7 人間の足の B_h 値

熱 損 失		評 価
1分につきKcal/m ²	10分につきKcal/m ²	
9未満	45未満	特に足が温かい
9~12	45~70	十分足が温かい
12~15	70~95	足温不十分
15以上	95以上	足が冷たい

表-1 測定された熱損失の値に対する足温の評価

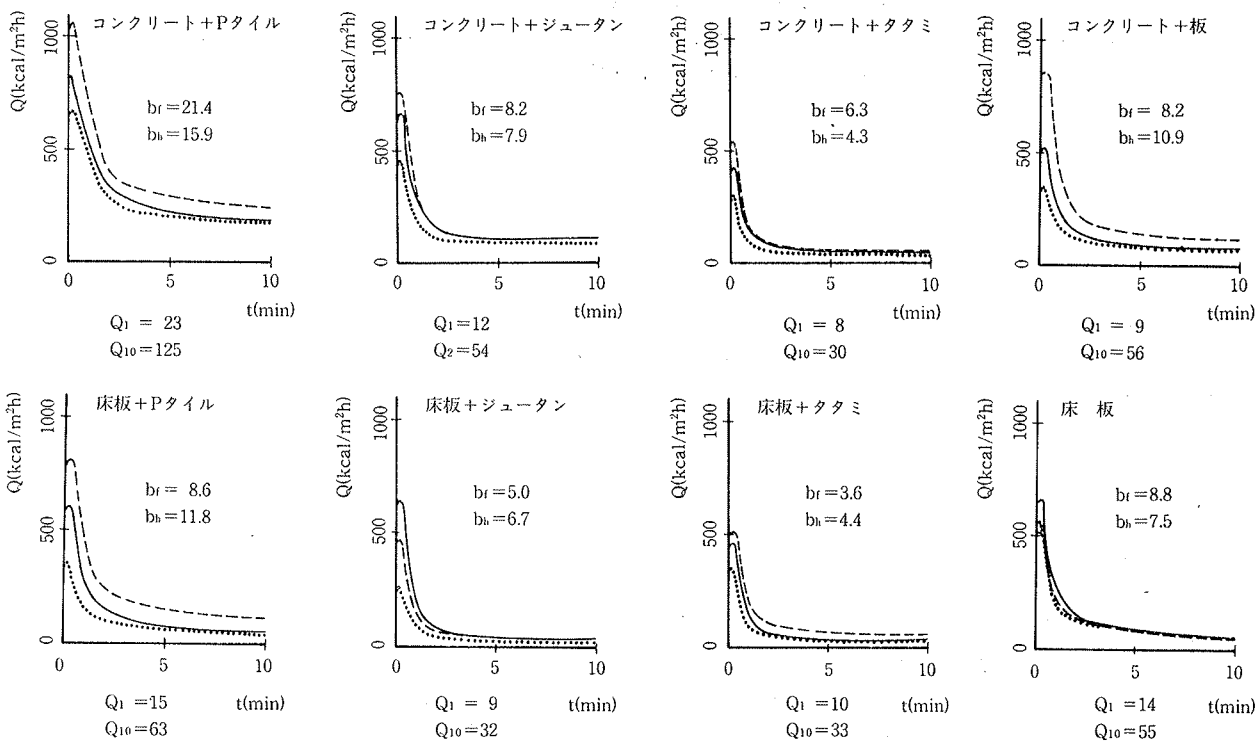


図-8 人間の足から床に逃げる熱流 Q と経過時間

行なわれたものである。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡島, 他: 建築仕上げ材料の感覚的評価に関する研究 (その1), 日本建築学会論文報告集, (昭和51. 7)
- 2) Berber: Bophysik, Bernh. Frieder. Voigt
- 3) DIN 52614: Bestimmung der Wärmeableitung Von

Fußböden

- 4) 木村幸一郎: 建築計画原論, 共立出版
- 5) 渡辺 要: 防寒構造, 理工図書
- 6) 田中辰明, 他: 足から床へ伝導による熱の逃げに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(昭和56. 9)