触覚センサによる建築仕上げ材料の触覚定量化

TACTILE RESPONSE OF BUILDING MATERIALS BY TACTILE SENSOR

岡島達雄*, 呉 健丹**, 堀越哲美***, 武田雄二****,
水谷章夫*****, 河辺伸二*****

*Tatsuo OKAJIMA, Jiandan WU, Tetsumi HORIKOSHI, Yuji TAKEDA,
Akio MIZUTANI and Shinji KAWABE*

The object of this paper is to clarify the tactile response of building materials by tactile sensor. We developed the compact tactile sensor that can measure the physical values of warmth, hardness and roughness of building materials. At a temperature of 20°C, psychological values of warmth, hardness and roughness were obtained from the physical values of sixty materials by the tactile sensor. The tactile comfort value can be expressed from physical values of warmth, hardness and roughness by the tactile sensor. It was found that physical values of warmth hardness and roughness at 20°C can be predicted from the values measured by the tactile sensor in the region of 10~30°C other than 20°C. Its applicability was verified.

Keywords : *building materials, tactile response, tactile sensor, warmth, hardness, roughness*
建築仕上げ材料, 触覚, 触覚センサ, 温冷感, 硬軟感, 粗滑感

1. はじめに

建築空間を構成するにあたって, 建築仕上げ材料の選択は極めて重要であると考えられる。その選択においては, 「強度」や, 「耐久性」といった物理的性質を満足させるとともに, 「温かさ」・「硬さ」などの感覚的性質についても考慮する必要がある。

触感覚を評価するには, 被験者を用いて心理量を求める直接評定法と, センサを用いて得られた物理量を介して, 定量化する間接評定法が有効である。

本研究では, 10°C から 30°C までの室温における多種多様な建築仕上げ材料を測定できるような実用的で, コンパクトな触覚センサを開発して, 基本感覚¹⁾の温冷感, 硬軟感, 粗滑感の物理量を計測し, その値をもとにして, 触覚の心理量を推定することを目的とする。

2. 建築仕上げ材料の触感覚の定量化の既往の研究

刺激 (stimulus) と, それに対する反応 (response)

の間の関係を数量的にとらえようとするのが精神物理学である。Weber, Fechner によれば, 感覚量 R と刺激量 S との間に $R = K \log S$ が成り立つという²⁾。

建築学の分野における, 建築材料と触覚センサとの関係についての研究は少ないが, その主だったものについて見てみる。

温冷感について, Hensel は温冷感を構成する刺激として熱を提唱し, さらに, 温・冷の刺激閾を求めた²⁾。

芝らが温冷感に対応する刺激は温度変化速度であるとの前提に立ち, その測定方法について種々の報告をしている²⁾。

栗山ら³⁾や吉田ら⁴⁾は材料の熱伝導率が温冷感によく対応すると報告している。

岡島ら⁵⁾は熱移動量測定器について研究している。

松井ら⁶⁾は感触温度測定器による測定値から求めた温度変化速度が温冷感に対応することを報告している。

梶井⁷⁾は接触温冷感測定器を用いて, 瞬時の接触温冷

本論文の一部は既に文献 13) において発表した。

- * 名古屋工業大学工学部社会開発工学科 教授・工博
- ** 名古屋工業大学工学部社会開発工学科 大学院生・工修
- *** 名古屋工業大学工学部社会開発工学科 助教授・工博
- **** 今宮工業高 教諭・工博
- ***** 名古屋工業大学工学部社会開発工学科 助手・工博
- ***** INAX(株)・工博

- Prof., Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
- Graduate stud. Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, M. Eng.
- Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
- Imamiya Techn. High School, Dr. Eng
- Research Assoc., Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng
- INAX Co. Ltd., Dr. Eng.

感について研究している。

硬軟感の定量化について、岡島ら⁸⁾は材料のくぼみ剛性^{注1)}を硬軟感測定器で求めることについて研究している。

粗滑感の定量化について、岡島ら⁹⁾は粗滑感と材料表面の動摩擦係数について報告している。

3. 触覚センサの開発

測定すべき物理量としては、材料・構法の固有の性質が評価でき、さらに、要求される感覚の心理量との関係を定量的にとらえるようなものでなければならない。しかし、一般の測定器はごく限られた材質の物理量しか測定できない。そこで、多種多様の建築仕上げ材料のほとんどを測定できるような実用的でコンパクトな触覚センサの開発が要望される。本研究は触覚センサで物理量を測定した触覚感覚は温冷感と硬軟感と粗滑感である。

3.1 触覚センサの構造

開発したセンサは図-1のシステム図と、図-2の構造概略図に示したものである。これは温冷感、硬軟感と粗滑感それぞれの個別センサをコンパクトに総合したものである。

3.2 温冷感センサ

建築仕上げ材料が常温の下に部材として構成されるとき、その材料表面での温冷感覚は建築仕上げ材料の表面の熱量と、接触した人間の表面部分の熱量との間に起こる熱の移動量の多少によって決定されることを、筆者らは既に述べ、検証している⁵⁾。

ここでは、この原理によるが、よりコンパクトにしたセンサを開発する。すなわち、図-2のように、温冷感センサは、銅素子の直径は6mm、高さ25mmである。その中に熱電対が挿入されている。また銅素子のまわりには、ヒーターとして働くコンスタンタン線が巻かれてい

図-1 触覚センサのシステム図

図-2 触覚センサの構造図

る。さらに、そのまわりには、断熱材としてコルク材が用いられている。また、コイルバネによって材に加える荷重を一定にしている。

室温 20°C の時、電気回路によって銅素子を皮膚の表面温度と考えられる 35°C に設定する。そして、その銅素子をこれより低温の試料に接触させる。(ただし、試料に銅素子が触れた瞬間に 35°C を維持していた電気回路は遮断する) そこで、熱は試料の方へ流れ、銅素子の温度は低下する。この場合に、銅素子の初期設定温度 35°C から 1°C 下がった 34°C に至るまでの時間 Δt を測定する。検出部銅素子の保有する熱が試料以外へ移動しないと仮定すれば、熱移動量は単位面積、単位時間あたりに移動した熱量と定義できる。熱移動量 Q は次の式で算定される。

$$Q = c\rho v\Delta\theta/(\Delta t \cdot f) \dots \dots \dots (1)$$

Q : 熱移動量

c : 銅素子の比熱

ρ : 銅素子の密度

v : 銅素子の体積

$\Delta\theta$: 銅素子の降下温度

Δt : 銅素子の温度降下時間

f : 銅素子の接触面積

3.3 硬軟感センサ

ある力で材料を押さえつけた場合、“硬”と判断される材料の表面のくぼみ^{注1)}は小さく、また“軟”と判断される材料のくぼみは大きいはずである。こうしたことから硬軟感覚は、圧感覚に対する平均した刺激、つまり人間が手で材料を押さえつけたときの材料のくぼみにくさによって決定されることを、筆者らは既に述べ、検証

している⁸⁾。

ここでは、この原理によるが、よりコンパクトにしたセンサを開発する。すなわち、図—2のように、硬軟感センサは、圧子として直径7mmのステンレス鋼円柱を用い、コイルバネが圧力を加えるために組み込まれている。また、差動トランスはコイルバネの変位を読み取るものである。

室温20°Cの時、触覚センサの本体からやや突き出している圧子を、測定しようとする建築仕上げ材料に押しつける。この場合、コイルバネによって材料表面に圧力が加えられる。ここで、差動トランスを用いて、試料に加えた圧力 P と押し付けたときの圧子の移動量 L を求め、それによってくぼみ⁽¹⁾ δ を測定する。くぼみ剛性 K は次の式で算定される。

$$K = P / \delta \cdots \cdots (2)$$

K : くぼみ剛性

P : 圧子が試料に加えた圧力

δ : くぼみ ($L_0 - L$)

L_0 : 測定前の圧子の突き出している長さ

L : 測定時の圧子の移動量

3.4 粗滑感センサ

人間が材料のうえに手をのせて実際に粗さを感じるためには、指や掌をある程度押しつけた上、押しつける方向と垂直方向に動かしてみることが必要である。そこで、粗滑感覚はその時の材料表面の凹凸による刺激や手を動かすときの抵抗の度合い、すなわち、動摩擦係数の多少によって決定されることを、筆者らは既に述べ、検証している⁹⁾。

ここでは、この原理によるが、よりコンパクトにしたセンサを開発する。すなわち、図—2のように、粗滑感センサは、本体から接触子を回転させるために直径58mm、高さ30mmの円筒形をくり抜き、その中に従動軸とそれに接続している接触子2個が取り付けられている。接触子の直径は18mmでフェルトが貼付けられている。

室温20°Cの時、測定する材料に本体を接触させた場合、接触子がやや突き出しているためコイルバネによって一定の圧力が加えられる。そしてモーターによって接触子を材料表面で等速回転させる。その時材料表面と接触子の間に動摩擦力が生じる。その動摩擦力、つまり力の回転モーメント T_r を測定し、動摩擦係数 μ を次の式で求める。

$$\mu = T_r / (PD) \cdots \cdots (3)$$

μ : 動摩擦係数

T_r : 力の回転モーメント

P : 接触子が試料に加えた圧縮力

D : 2つの接触子の中心間距離

4. 物理量の測定

本研究は心理量の求まった表—1に示すような材質別9種、62種類の建築仕上げ材料¹⁾を対象とする。なお、本論と文献1)の試料記号の示す試料は同一のものである。

表—1 試料

	材 質	番号	試 料 名
A	金 属	①	アルミニウム (5mm)
		2	アルミニウム (0.3mm)
		3	アルミニウム (1mm)
		4	アルミニウム (1mm, AA80)
		5	アルミニウム (1mm, AA30)
		7	ステンレス (0.5mm)
		8	ステンレス (0.2mm)
		9	銅
B	木 材	①	ラワン
		2	杉
		3	檜
		4	檜 (AA80)
		6	檜 (塗装)
		7	檜 (AA80, 塗装)
		8	檜 (AA30, 塗装)
		9	ふな
		⑩	ふな (AA80)
		11	ふな (AA30)
		12	ふな (塗装)
		13	ふな (AA80, 塗装)
		14	ふな (AA30, 塗装)
		15	ハードボード
		16	インシュレーションボード
C	セメント	1	トリゾール
		②	木毛セメント板
		3	セメントモルタル板
		4	ALC
		5	石綿セメント板
D	石 材	1	プラスチックテラゾー
		2	テラゾー
		3	大理石 (荒磨仕上げ)
		④	大理石 (水磨き)
E	ガ ラ ス 陶 磁 器	1	型板ガラス (梨地)
		2	型板ガラス (かすみ)
		3	型板ガラス (つづれ)
		4	型板ガラス (石目)
		5	透明板ガラス (3mm)
		6	透明板ガラス (5mm)
		⑦	すりガラス
		8	タイル
		9	レンガ
		10	クリンカータイル
F	石膏・石灰	①	石膏板
G	高分子 プラスチック 合成樹脂	1	アクリル板
		②	アクリル系吹付材
		3	リシン (細目)
		5	プラスチックタイル
		6	プラスチックタイル (エンボス)
		7	プラスチックタイル (AA80)
		8	プラスチックタイル (AA30)
		9	エポキシ板
H	織 維	2	じゅうたん (アクリル)
		③	じゅうたん (バイル織)
I	そ の 他	1	畳
		2	毛皮
		3	なめし皮
		4	ふすま
		5	バックスキン
		6	コルク (A)
		7	コルク (B)
		⑧	ござ
		9	発泡スチロール板

写真一 測定装置

写真二 測定風景

実験は恒温恒湿室で行った。室内条件は温度を $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ で一定（外気温は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）、湿度を 60~70% に設定した。試料は恒温恒湿室内に 1 日間放置し、設定した室内温度に達した後、実験に供した。

各々の試料に対して、中央、左上、右下、左下、右上の順に 5 か所について測定し、同じ部分の測定は避けた。測定値は 5 回の測定から中央値を採用し、この測定値を Q （熱移動量）、 P/δ （くぼみ剛性）、 μ （動摩擦係数）に換算したものを実験結果とする。

測定装置および測定の模様を、写真一、写真二に示す。

5. 各感覚の定量化

5.1 基本感覚の定量化

触覚センサにより求めた基本感覚の物理量と心理実験による心理量^(注2)について次のように定量化する。

5.1.1 温冷感の定量化

図一3には、表一1に示す全試料について、室温 20°C での温冷感の心理量とそれに対応する物理量をプロットした。併せて、回帰分析により求めた両者の関係も示した。縦軸に前述した心理量を、横軸に物理量としての熱移動量の対数をとったものである。図中の実線は回帰直線で、点線は推定の誤差の標準偏差を示す。各試料とも片対数座標上で直線関係を示し、両者は高い相関を示す。求めた回帰直線式を次に示す。

図一3 温冷感心理量と物理量の相関図

図一4 硬軟感心理量と物理量の相関図

図一5 粗滑感心理量と物理量の相関図

$$W_{20} = -3.63 - 2.94 \log(Q) \dots\dots\dots (4)$$

W_{20} は 20°C 温冷感心理量の推定値である。これから、温冷感の物理量からほぼ正確に心理量が求められるといえる。

5.1.2 硬軟感の定量化

図一4には、温冷感と同じ方法で、表一1に示す全試料について、室温 20°C での硬軟感の心理量とそれに対応する物理量をプロットした。各試料とも片対数座標上で直線関係を示し、高い相関を示す。求めた回帰直線式を次に示す。

$$H_{20} = 1.0 - 1.55 \log(K) \dots\dots\dots (5)$$

H_{20} は 20°C 時の硬軟感推定値である。これから、硬軟感の物理量からほぼ正確に心理量が求められるといえる。

5.1.3 粗滑感の定量化

図一5にも、温冷感と同じ方法で、表一1に示す全試料について、室温 20°C での粗滑感の心理量とそれに対

応する物理量をプロットした。各試料とも片対数座標上で直線関係を示し、高い相関を示す。求めた回帰直線式を次に示す。

$$R_{20} = 1.27 + 8.40 \log(\mu) \dots \dots \dots (6)$$

R_{20} は 20°C 時の粗滑感推定値である。これから、粗滑感物理量からほぼ正確に心理量が求められるといえる。

5.2 快・不快感と粗滑感の定量化

筆者らの既往の研究¹⁾により、建築仕上り材料の触覚的特性の快・不快感と乾湿感の心理量は、基本感覚の温冷感、硬軟感、粗滑感などの心理量の一次関数としてとらえることができる。

実験結果により、快・不快感は基本感覚である硬軟感と粗滑感で次のように表される¹⁾。

$$A = 0.63 H - 0.96 R \dots \dots \dots (7)$$

同様に乾湿感の基本感覚の温冷感と粗滑感で次のように表される¹⁾。

$$D = 0.60 W + 0.40 R \dots \dots \dots (8)$$

図—6 基本感覚の物理量による推定の相関

図—7 基本感覚の物理量による推定の相関

A, H, R, D, W は温度 20°C 時の快・不快感、硬軟感、粗滑感、乾湿感と温冷感の心理量である。

ここでは、物理量による定量化した基本感覚の心理量推定値を用いて、快・不快感などの基本感覚の物理量による推定を試みる。

快・不快感、乾湿感の測定値と、式(7)、(8)により得られた推定値との対応はそれぞれ図—6、7である。高い相関を示した。このことから、本研究の結果に関して、快・不快感と乾湿感も基本感覚量の物理量で表すことができる。

6. 各温度における触覚センサの適合性

筆者らの既往の研究¹⁾により、室温、試料温度が 10°C ~ 30°C の範囲内では、建築仕上り材料の温冷感、硬軟感、粗滑感、快・不快感および乾湿感は、常温 20°C の温冷感、硬軟感および粗滑感の 3 基本感覚で表示される。すなわち、20°C の基本感覚の心理量評定値が分かれば、温度による触覚感の変化は推定できることが既に検証されている。

一方、本研究では 20°C における触覚センサによる物理量の測定結果より、基本感覚の心理量を推定できることを既に示した。

そこで、温度が 20°C でない時の、触覚センサの測定方法について検討する。

6.1 温冷感センサについて

材料表面での温冷感覚は建築仕上り材料の表面の熱量と接触した人間の表面部分の熱量との間で起こる熱の移動量の多少によって決定することができることは既に述べた。したがって、本研究の場合は銅素子とこれより低温の試料との熱交換量である。

参考文献^{10)~12)}により、銅素子が試料と接触する時、銅素子と試料を半無限の物体と設定すると、銅素子と試料の熱交換量は次の式で表される。

$$q_m = \frac{b_1 b_2 (T_1 - T_2)}{(b_1 + b_2) \sqrt{\pi t}} \dots \dots \dots (9)$$

ここに、

$$b = \sqrt{\lambda c \rho}$$

T_1 : 銅素子の設定温度

T_2 : 試料の温度

b_1 : 銅素子の b

b_2 : 試料の b

q_m : 熱交換量

t : 時間

λ : 熱伝導率

c : 比熱

ρ : 密度

式(9)により、10°C から 30°C の範囲で、 λ, c および ρ はほぼ一定である¹¹⁾から、 b もまたほぼ一定とみ

なせる。すなわち、同じ試料に対して、時間 t あたり、熱交換量 q_m は温度差 ($T_1 - T_2$) のみ関数として表せる。

6.2 硬軟感センサと粗滑感センサについて

筆者らの既往の研究¹⁾によれば、10°C から 30°C の範囲で、建築仕上げ材料の硬軟感、粗滑感の心理量には差がない。また、3.3 節ならびに 3.4 節の原理に照らしてみると、物理量にも差があるとは言えない。すなわち、10°C～30°C の任意温度でも、本センサにより、20°C 時と同じ硬軟感、粗滑感の測定値が得られると考えられる。

6.3 センサの非温度依存性の検証

検証は室温および試料温度が 10°C と 30°C について以下のような条件で行う。

実験は 4 節と同じ方法で行った。室内条件は気温をそれぞれ $10 \pm 0.5^\circ\text{C}$ と $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度を 60～70 % に設定した。試料は表—1 の番号に○印を付けたもの 10 種類を用いた。

図—8 10°C 温冷感センサの検定図

図—9 30°C 温冷感センサの検定図

室温 10°C の時、温冷感センサの銅素子の温度を 25°C とし、室温 30°C の時、銅素子を 45°C とし、室温と素子の温度差はいずれも 15°C とした。

室温 10°C と 30°C の時のセンサで測定された熱量の結果を 20°C の測定結果と比較して、図—8, 9 に示す。図から 10°C のも 30°C のもその測定結果は 20°C の結果とほぼ一致している。硬軟感と粗滑感も温冷感と同様の検証を行ったが、温度による差は認められなかった。

以上より、10°C から 30°C までの任意の温度域での基本感覚量はもちろん、快・不快感や乾湿感も本センサから求められる。

7. 結 論

室温、試料温度が 10°C から 30°C の範囲で、建築仕上げ材料の触感覚について、次のことが言える。

- (1) 温冷感・硬軟感・粗滑感の物理量を測定できるコンパクトで実用的な触覚センサを開発することができた。
- (2) 触覚センサにより温冷感・硬軟感・粗滑感を定量化して、その値をもとにして心理量を推定することができた。
- (3) 快・不快感の心理量は基本感覚量により推定することができる。
- (4) 乾湿感の心理量は基本感覚量により推定することができる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、大きな刺激を与えていただいた日本建築学会建築計画委員会建築人間工学小委員会（主査 岡島達雄）ならびに環境工学委員会 接触感覚 WG（主査 松井 勇 日本大学生産工学部助教授）の委員各位に厚くお礼申し上げます。卒業研究として本研究の一部を担っていただいた長谷川利樹氏（現中部電力株式会社）に厚く謝意を表する。また、センサの製作にご協力いただいた東洋精機製作所にお礼を申し上げます。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費一般 C によって行っている。記して謝意を表する。

注

- 1) 文献 8) では、“たわみ”あるいは“たわみ剛性”と称していた。正確を期するためこれらを“くぼみ”あるいは“くぼみ剛性”と称することとした。
- 2) 文献 1) では建築仕上げ材の触覚的特性に及ぼす温度の影響を明らかにすることを目的とし、数十種の建築材料を選び出し、各触覚（温冷感、硬軟感、粗滑感、快・不快感、乾湿感）の特性について、10, 20, 30°C の気温下で心理実験を行い、それらを尺度化して、心理量を求めている。そして、気温による各感覚の変化と各感覚間の相関を調べ、評価した。

参考文献

- 1) 岡島達雄ほか5名：建築仕上げ材の触覚的特性に及ぼす温度の影響に関する研究，日本建築学会論文報告集，第419号，pp.1～10，1991.1
- 2) 和田陽平ほか2名：感覚+知覚ハンドブック 誠信書房，pp.15～17，778～780，793～800，1969.2
- 3) 栗山 寛ほか2名：建築仕上げ材料の質感に関する研究（1），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.191～192，1968.10
- 4) 吉田正昭ほか3名：熱伝導率が異なる物質の表面触，製品科学研究所報告，No.60，1976
- 5) 岡島達雄ほか3名：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，第245号，pp.1～7，1976.7
- 6) 松井 勇ほか1名：仕上材の感触に関する研究（その2），日本建築学会論文報告集，第294号，pp.1～12，1980.8
- 7) 梶井宏修：接触温冷感と材料の放射率，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.205～208，1990
- 8) 岡島達雄ほか2名：建築仕上げ材料の感覚的評価に関する研究（その2），日本建築学会論文報告集，第246号，pp.1～5，1976.8
- 9) 岡島達雄ほか2名：建築仕上げ材料の感覚的評価に関する研究（その3），日本建築学会論文報告集，第261号，pp.1～6，1977.11
- 10) 藤本武助ほか1名：伝熱学概論 共立出版，pp.69～72，1956.10
- 11) 川下研介：熱伝導論 オーム社書店，pp.87～95，5～6，1966.11
- 12) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger：Conduction of Heat in Solids, OXFORD, pp.51～91，1959
- 13) 岡島達雄ほか2名：触覚センサによる建築仕上げ材料の触覚定量化，日本建築学会大会学術講演梗概集（E），pp.665～666，1990.10

（1991年2月10日原稿受理，1991年5月14日採用決定）