

感性工学および自己組織化マップ (SOM) を用いた 住環境音の感性性能評価

Evaluation of Kansei performance on residential sounds using Kansei Engineering and Self-Organizing Map(SOM)

白木渡*, 井面仁志**, 壇上稀代子***, 伊藤則夫****
Wataru Shiraki, Hitoshi Inomo, Kiyoko Danjyou, Norio Itou

*工博, 香川大学教授, 信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

**工博, 香川大学助教授, 信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

*** 明石被服興業(株) (〒711-0903 岡山県倉敷市児島 1-3-44)

**** 工博, (有) シー・エー・イー (〒680-8064 鳥取県岩美郡国府町分上 2-210)

In 2000, the performance indication system for houses was started. It has nine checking items for evaluating house performances such as safety, durability, maintenance, livability, and so on. The performance for residential sound is also considered as one of these nine items. However, the performances for most sound sources have not been quantified. In this study, a quantification method using Kansei Engineering and SOM approach is proposed. The effectiveness of this proposed approach is verified through simple Kansei experiments.

Key Words: residential sound, Kansei, performance based on evaluation

キーワード: 住環境音, 感性, 性能評価

1. はじめに

子供の飛び跳ね音など共同住宅の各住戸間で日常的に発生する騒音問題は, 住民が快適な生活を送る上での深刻な問題となっている。平成 12 年には, 消費者が住宅の性能を客観的に判断できるものさしを提供するとして, 住宅性能表示制度が施行された。住宅性能表示制度では, 安全性, 維持管理など 9 つのチェック項目が設定されており, その中で, 音環境に関する性能として足音などの重量物の衝撃音にあたる重量床衝撃音, 軽量物の落下音にあたる軽量床衝撃音, そして住戸間の壁, あるいは開口部のサッシによる空気伝搬音の遮断性能を示す透過損失係数について規定されている¹⁾。

これらの指標はすべて, 特定の試験機器により発生させた騒音を, 一定の条件下で受信した場合の音圧レベルに基づいて定義されている。音圧レベルは音の大きさを表す 1 つのパラメータであるが, 快・不快といった人々の音に対する感覚は音の大きさのみによって評価できるものではない。また, 性能表示が適応されている音源の種類も限られている。そこで, 本研究では, 感性工学手法により人々の音に対する感性を把握し, さらに自己組織化マップ (以下 SOM と略)²⁾を用いて音に関する種々のパラメータと感性の関係性を明らかにする。なお, 本研究では研究の第一段階として物体を落下させた際の空気音を用いる。

2. 音に関する住環境の性能表示

平成 12 年に施行された住環境性能表示制度では, ①構造の安定, ②火災時の安全, ③劣化の軽減, ④維持管理への配慮, ⑤温熱環境, ⑥空気環境, ⑦光・視環境, ⑧音環境, ⑨高齢者への配慮の 9 つに関するチェック項目が規定されている³⁾。

音に関する性能表示としては, 1)重量床衝撃音, 2)軽量床衝撃音, 3)透過損失等級 (界壁), 4)透過損失等級 (外壁開口部) に関して等級により規定されている³⁾。軽量床衝撃音の評価基準を表-1 に示す。表-1 からわかるように音の性能表示は, 従来の周波数帯における音圧レベルで

表-1 軽量床衝撃音の評価基準

(イ) 等級	(ロ)				
	重量床衝撃音レベル				
	125Hz 帯域	250Hz 帯域	500Hz 帯域	1kHz 帯域	2kHz 帯域
5	58dB 以下	51dB 以下	45dB 以下	42dB 以下	41dB 以下
4	63dB 以下	56dB 以下	50dB 以下	47dB 以下	46dB 以下
3	68dB 以下	61dB 以下	55dB 以下	52dB 以下	51dB 以下
2	73dB 以下	66dB 以下	60dB 以下	57dB 以下	56dB 以下
1					

基準化されている。さらに、透過騒音等の遮音性能については、住宅の立地や構造方法などによるニーズの違いや、遮音性能の仕様による評価の困難さから、あくまでも選択項目とされている。

音に関する性能表示は、上述のように音圧レベルのみで標準化されているため性能表示の適応範囲は、安岡らの研究⁴⁾(表-2 参照)に示されているように、適応範囲が少なく個々の騒音源に対する対応が不十分であると言える。

3. 音の感性要素

音の感覚的印象は「音の大きさ」、「音の高さ」、そして「音色」の3つの要素で表現される。本研究で用いる音の感性要素は次のような音に関する物理量である⁵⁾⁶⁾。

(1) ラウドネス(Loudness): 人間の聴覚によって知覚される音の大きさをいう。日本工業規格(JIS)では、音の大きさの意味として、「音の強さに関する聴覚上の属性で、小から大に至る尺度上に配列される。」と定めている。音の周波数が異なれば音の強さは同じであっても音の大きさは異なる。純音の大きさの周波数依存性を図-1に示す⁷⁾。

図-1の等ラウドネス曲線のグラフ中央の、[phon] 単位の数値は音の大きさのレベル(loudness level)とよばれており、大きさのレベルの単位には[phon]を用いる。ラウドネスレベルとラウドネスの関係は、式(1)で表される。

$$P = 40 + 10 \log_2 S \tag{1}$$

P: ラウドネスレベル, S: ラウドネス
1,000 [Hz], 40 [phon] の音を 1 [sone] と定義し、式(2)の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} 1[sone] &= 40[phon] \\ 2[sone] &= 50[phon] \\ 4[sone] &= 60[phon] \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

すなわち、sone 値の2倍は、知覚ラウドネスの2倍に対応し、phon 値では、音の強さや音圧を測定するのに用いられる対数尺度のデシベル単位で表すと、

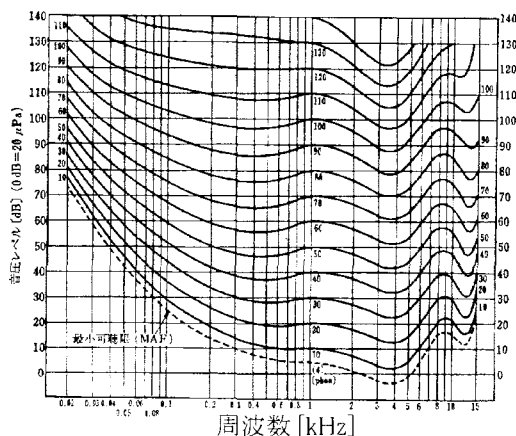


図-1 等ラウドネス曲線

10 [dB] の増加に対応する。ラウドネスは定常ラウドネス(Stationary Loudness)と非定常ラウドネス(Non-Stationary Loudness)から求められる。

(2) シャープネス(Sharpness): 音色に関わるパラメータで音の甲高さ(鋭さ)を表す。この基準は、まだ規格化されていないため本研究に用いた実験装置に実装されている式(3)の定義式を用いる⁵⁾。なお、単位は acum で表される。

$$S = 0.11 \frac{\int_1^{24} N'(z) \times g(z) \times z \times dz}{\int_1^{24} N'(z) \times dz} \quad [acum] \tag{3}$$

表-2 住宅における騒音の種類と性能表示の適応範囲⁴⁾

騒音源	性能表示	建築学会基準	一般的な設計基準
机・椅子の引きずり	—	—	—
皿・コップ・スプーン落下	○	○	○
話し声・笑い声	△	○	○
テレビ・ステレオ・電話	△	○	○
子供の飛び跳ね	○	○	○
おもちゃ	△	○	○
日曜大工	—	○	—
ピアノ・楽器	—	○	—
ベット	—	—	—
歩行	△	○	○
扉・襖・サッシの開閉	—	—	—
ドアチャイム	△	○	○
スイッチ音	—	—	—
サッシ笛鳴り	—	—	—
熱変形音(不思議音)	—	—	—
台所換気扇	—	△	—
給排水音	—	△	—
デイスボーサ	—	△	—
ソク扉等の開閉	—	—	—
便所行為音	—	△	△
便所排水音	—	△	△
浴室手桶音	—	△	—
気泡風呂	—	△	—
洗濯機・脱水機	—	△	—
洗面給排水音	—	△	—
共用排水音	—	△	—
布団たたき	△	△	—
成り行き			
ベランダの話し声	△	△	—
成り行き			
エレベータ音	—	△	△
ホールの歩行	—	—	—
オートドア開閉音	—	△	△
階段の歩行	—	△	—
設備機械音・ポンプ・ファン	—	○	△
電気設備音・トランスなど	—	○	△
駐車場騒音	△	△	—
成り行き			
道路騒音	○	△	○
成り行き			
鉄道騒音	○	△	○
成り行き			
航空機騒音	○	△	△
成り行き			
工場・店舗などの騒音	△	△	△
成り行き			
街路騒音	△	△	—
成り行き			

○: 適応されている
△: 適応されているが全体ではない、もしくは分類されていない
—: 適応されていない

ただし、

$$g(z) = \begin{cases} 1 & \text{for } z \leq 16 \\ 0.066 \times e^{0.17 \ln z} & \text{for } z > 16 \end{cases}$$

Z : 周波帯, $g(z)$: 重み関数, $N'(z)$: スペシフィックラウドネス

- (3) ラフネス(Roughness) : 音の粗さを表す。変調が 15 ~ 300[Hz] の範囲である音の振幅変調と周波数変調の尺度である。70[Hz] 周辺の変調が最大荷重となり、粗い音の不愉快な感覚を与える。ラフネスは、信号の振幅変調で、中間から低周波数 (20 ~ 300[Hz]) の変化の総和として導出される。まだ、規格化されていないので、本研究で使用した実験装置でのスペシフィックラフネス R の定義式 (4) を用いる^⑧。なお、単位は asper で表される。

$$R'(z) = 0.0003 \times f_{\text{mod}}(z) \times \Delta L_E(z) \times \Delta z \quad [\text{asper}] \quad (4)$$

ただし、

$$\Delta L_E = 20 \log(N'(1)/N'(99))$$

f_{mod} : 変調周波数, z : 周波帯, $N'(z)$: スペシフィック

ラウドネス

ラフネス R は、スペシフィックラフネスの総和であり、式 (5) で表される。

$$R = \sum_{z=1}^{24} R'(z) \quad [\text{asper}] \quad (5)$$

- (4) 変動強度(Fluctuation Strength) : 音の大きさがゆっくり変動しているときに感じる感覚を表す。信号の振幅変調において低周波数 (20Hz 以下) の変動の総和である。高周波数でのコンポーネントの振幅変調と周波数変調により変動強度が生じる。

変動強度は、1 つの値か、スペシフィック変動強度 $F'(z)$ を与える周波数 (Bark 尺度) の関数のどちらかで与えられる。まだ、規格化されていないため、本研究で使用した実験装置のスペシフィック変動強度 F' の定義式 (6) を用いる^⑨。なお、単位は vacil で表される。

$$F'(z) = \frac{0.032 \times \Delta L(z) \times \Delta z}{f_{\text{mod}}(z)/4 + 4/f_{\text{mod}}(z)} \quad [\text{vacil}] \quad (6)$$

ただし、

$$\Delta L = 20 \log(N'(1)/N'(99))$$

f_{mod} : 変調周波数, z : 周波帯, $N'(z)$: スペシフィックラウドネス

変動強度 F は、スペシフィック変動強度の総和であり、式 (7) で表される。

$$F = \sum_{z=1}^{24} F'(z) \quad [\text{vacil}] \quad (7)$$

- (5) Minimum/Maximum Value : 周波数ごとの定常ラウドネスの最小値および最大値を用いる^⑩。

4. 音の感性評価実験

4.1 音の感性評価実験

本研究では、まず、一般的な家庭の普段の生活の中で頻繁に起こりうる物の落下音について調べることにした。音源の種類と諸元について表-3 に示す。

表-3 に示した茶碗、コップ、硬貨、本、おもちゃ等比較的軽量物を普通のテーブルの高さに当たる床上 70cm の高さから天然木化粧複合フローリングに自由落下させ、その際に発生した音を水平距離 3m、床上 130cm の位置に設置したマイクによって録音した。なお、自由落下をさせているため、落下物によっては床に落ちる部位により音が変わってくる。また、床上 130cm は成人が椅子に座った状態を考慮して決めた高さである。

落下物は陶器、ガラス、金属、木材、プラスチックなどを素材とする 35 品目で重量は 1 ~ 830g である。

表-3 音源の種類と材質

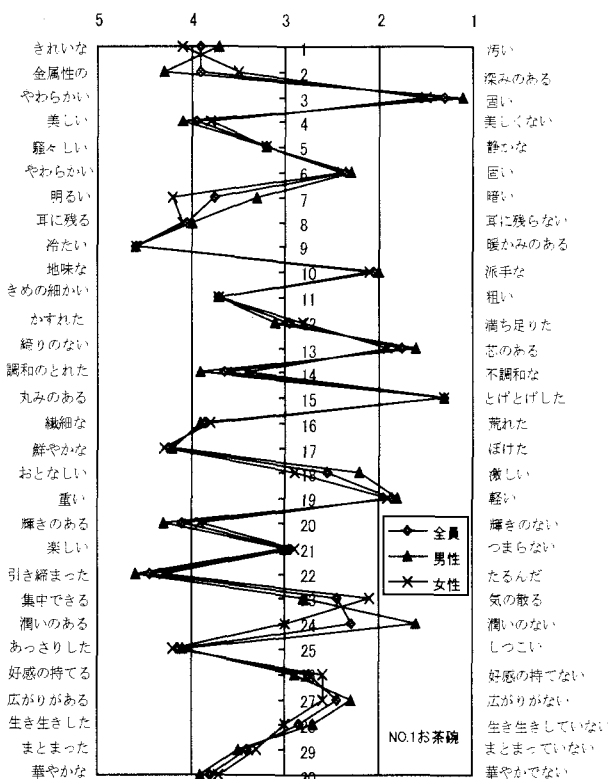
No	音源の種類	重さ	材質
1	茶碗	130g	陶器
2	ガラスコップ 1	270g	ガラス
3	ガラスコップ 2	200g	ガラス
4	スプーン	26g	鉄
5	ティッシュの箱	228g	紙
6	ペットボトル (500ml)	35g	プラスチック
7	マウス	135g	プラスチック ナイロン
8	割り箸	4g	木
9	缶 (お菓子)	106g	鉄
10	蛍光ペン	6g	プラスチック
11	鍵・キーホルダー	112g	鉄・布
12	紙コップ	5g	紙
13	定規	6g	プラスチック
14	湯飲み	130g	陶器
15	筆箱	185g	布
16	本	413g	ハード
17	辞書	830g	紙
18	ファイル	742g	プラスチック
19	手帳	160g	ナイロン (外) 紙 (中)
20	学生証	5g	プラスチック
21	10 円玉	4g	青銅
22	100 円玉	5g	白銅
23	1 円玉	1g	アルミニウム
24	500 円玉	7g	ニッケル黄銅
25	フロッピーディスク	21g	プラスチック
26	MD	31g	プラスチック
27	灰皿	69g	アルミ
28	空き缶	31g	スチール
29	ボール	117g	ゴム
30	おもちゃ 1	117g	プラスチック 布
31	おもちゃ 2	22g	プラスチック
32	おもちゃ 3	64g	木
33	缶 (お菓子)	78g	鉄
34	おもちゃ 4	212g	木
35	将棋のコマ	60g	木

表—4 感性ワード

No	感性ワード	No	感性ワード	No	感性ワード
1	きれいな—汚い	11	きめの細かい—粗い	21	楽しい—つまらない
2	金属性の—深みのある	12	かすれた—満ち足りた	22	引き締まった—たるんだ
3	やわらかい—固い	13	締りのない—芯のある	23	集中できる—気の散る
4	美しい—美しくない	14	調和のとれた—不調和な	24	潤いのある—潤いのない
5	騒々しい—静かな	15	丸みのある—とげとげした	25	あっさりした—しつこい
6	融け合った—ばらばらな	16	繊細な—荒れた	26	好感の持てる—好感の持てない
7	明るい—暗い	17	鮮やかな—ぼけた	27	広がりがある—広がりが無い
8	耳に残る—耳に残らない	18	おとなしい—激しい	28	生き生きした—生き生きしていない
9	冷たい—暖かみのある	19	重い—軽い	29	まとまった—まとまっていない
10	地味な—派手な	20	輝きのある—輝きのない	30	華やかな—華やかでない

表—5 因子分析結果

因子	感性ワード	寄与率(%)	累積寄与率(%)	因子名
1	丸みのある—とげとげした 引き締まった—たるんだ	46.87	46.87	やわらかさの因子
2	繊細な—荒れた きめの細かい—粗い	24.90	71.77	粗さの因子
3	広がりがある—広がりが無い かすれた—満ち足りた	10.48	82.26	乾きの因子
4	まとまった—まとまっていない 融け合った—ばらばらな	5.13	87.39	不調和性の因子



図—2 茶碗の落下音のSDプロフィール

4.2 感性アンケート

音および感性工学に関する書籍^{8),9)}から、音の評価にふさわしい、対となる形容詞62組を抽出した。そして、これらの形容詞対を用いて少数の被験者を対象とした予備

実験を行い、相関が高い形容詞対および評価しにくいと判断された形容詞対を除いた、表—4に示す30対の感性ワードを選択した。

感性アンケートの実施においては、1度に2人の被験者にヘッドホンを通してあらかじめ録音しておいたサンプル音を聞かせ、表—4の感性ワードに対して5段階のSD尺度による評価を求めた⁹⁾。被験者の総数は20名(男性10名、女性10名)で、年齢は21~23歳である。

4.3 感性アンケートの分析結果

一例として、茶碗の落下音に対する感性アンケートのSD評価プロフィールを図—2に示す。図—2において◆印が全員の評価の平均値、▲が男性の評価の平均値、×が女性の評価の平均値を示している。この図から茶碗の落下音に対しては、「固い」、「冷たい」、「とげとげした」、「引き締まった」音と評価していることがわかる。男性と女性を比較すると形容詞対「明るい—暗い」において女性の方が、茶碗の落下音に対して明るい音と感じていることがわかる。しかし、男女間において大きな差は見られない。他の音に関しても男女間において大きな差は見られず、今回の実験に用いたサンプル音に関しては、性差において音の感じ方に違いがないと考えられる。

そこで、全員の音の評価結果を用いて因子分析を行った結果を表—5に示す。表—5より、落下音に対する人々の感性は「やわらかさの因子」、「粗さの因子」、「乾きの因子」、「不調和性の因子」の4つの因子に集約できることがわかる。さらに、表—5で第1因子の寄与率が50%に近いことから、落下音は主に「やわらかさの因子」に属する感性ワードによって評価されていることがわかる。

5. 数量化理論Ⅰ類による感性評価

各サンプル音が持つ Loudness, Sharpness, Stationary Loudness, Roughness, Fluctuation Strength および Minimum/Maximum Value の7つの音の感性を表す物理量の値を表-6に示した大・中・小の3つのランクに分け外的要因とし、感性アンケートにより1つの感性ワードが得たSD評価の得点の平均値を外的基準として数量化理論Ⅰ類による分析を行った。

図-3は感性ワード「騒々しい-静かな」のカテゴリースコアを示す。重相関係数は0.8706となり、この感性が7つの感性要素によってよく説明されていることがわかる。また、偏相関係数より Sharpness が 0.5958, Stationary Loudness が 0.5618 と大きく、音の騒々しさを評価する上でこの2つの要素の影響が大きいと判断することができる。さらに、Sharpness の値が小さいほど「静かな」、Stationary Loudness が小さいほど「静かな」音と評価されることが分かる。

同様に、図-4に感性ワード「集中できる-気の散る」のカテゴリースコアを示す。この感性ワードについては、偏相関係数より Roughness が 0.6969, Stationary Loudness が 0.5311 と大きく、Roughness が大きく Stationary Loudness が大きくなるほど気の散る音と評価されている。

紙面の都合上、すべての感性ワードのカテゴリースコアを掲載できないが、数量化理論Ⅰ類の分析より音の感性評価においては、Sharpness と Fluctuation Strength との感性要因が大きく影響を与えることが分かった。

6. SOM による感性分析

表-6に示す7つの感性要素に1つの感性ワードの得点を加えた8要素を入力としてSOMによる強化学習¹⁰⁾を行った。

表-6 アイテムとカテゴリ

アイテム	カテゴリ
Stationary Loudness [sone]	1 2.0以上8.0未満 2 8.0以上14.0未満 3 14.0以上21.0未満
Loudness (Mean) [sone]	1 0以上2.0未満 2 2.0以上4.0未満 3 4.0以上6.5未満
Sharpness (Mean) [acum]	1 0.9以上1.3未満 2 1.3以上1.7未満 3 1.7以上2.0未満
Roughness [asper]	1 0.5以上1.75未満 2 1.75以上3.0未満 3 3.0以上4.25未満
Fluctuation Strength [vacil]	1 0.4以上1.1未満 2 1.1以上1.8未満 3 1.8以上2.4未満
Minimum Value [sone/Bark]	1 0以上0.03未満 2 0.03以上0.06未満 3 0.06以上0.1未満
Maximum Value [sone/Bark]	1 0以上0.6未満 2 0.6以上1.2未満 3 1.2以上1.8未満

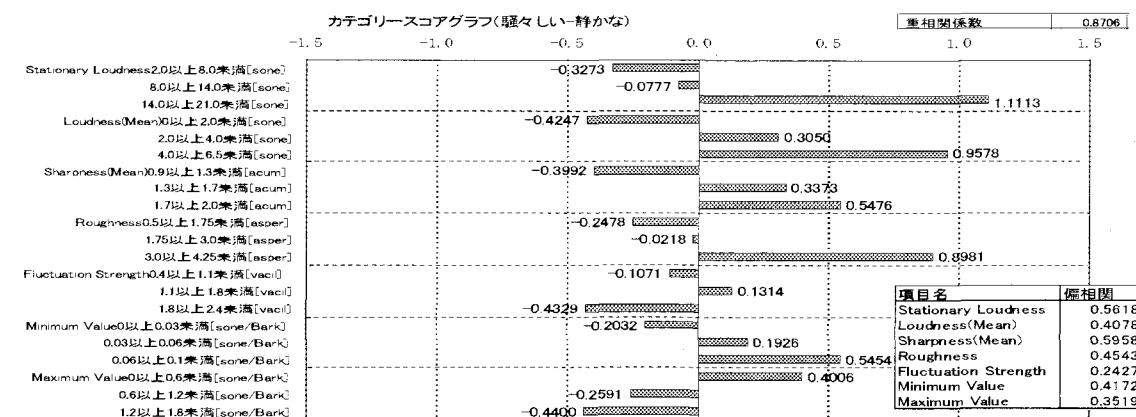


図-3 「騒々しい-静かな」のカテゴリースコア

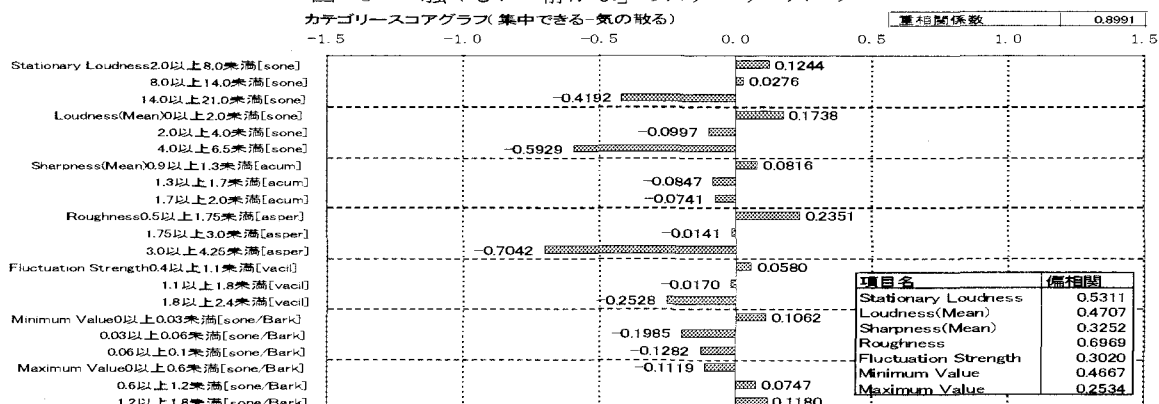


図-4 「集中できる-気の散る」のカテゴリースコア

図-5に感性ワード「騒々しいー静かな」を学習したマップ、図-6に「集中できるー気の散る」を学習したマップを示す。SOMによる学習の設定条件は、以下の通りである。①競合層：6×6、②学習回数：300回、③初期近傍：3、④初期学習率：0.15、⑤強化学習の重み係数：3.0。

図-5 (a)からわかるようにSOMによる強化学習がうまく

く行われ、騒々しい音がマップの右側に、静かな音がマップの左下に配置されている。

図-5 (b)～(h)は各感性要素の重みの分布を示したものである。重みの分布からは、どの感性要素が図-5のマップの配列へ影響したかの明確な断定は出来ないが、数量化の偏相関が特に高い値となっていないことから、数量化

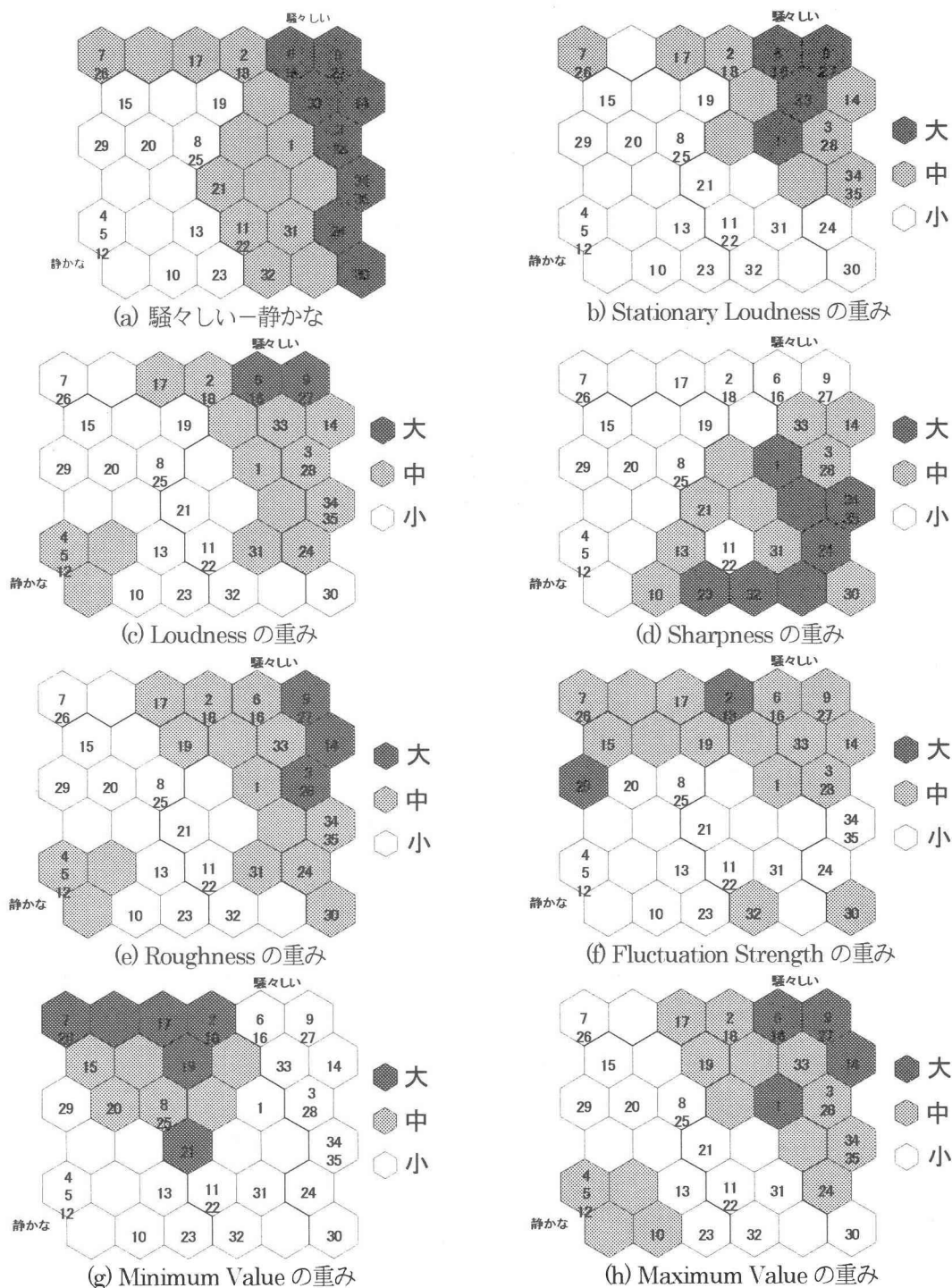


図-5 「騒々しいー静かな」のマップ

の分析結果と一致している。しかし、7つの感性要素の重みの分布を個別に分析することにより、個々の音源の微妙な感性評価の違いが分析できる。例えば、数量化理論Ⅰ類

による分析では偏相関係数の大きさから、落下音全体の傾向として Sharpness と Stationary Loudness の影響が大きいことが分かるのみで、騒々しい音の感性評価には、35.将棋

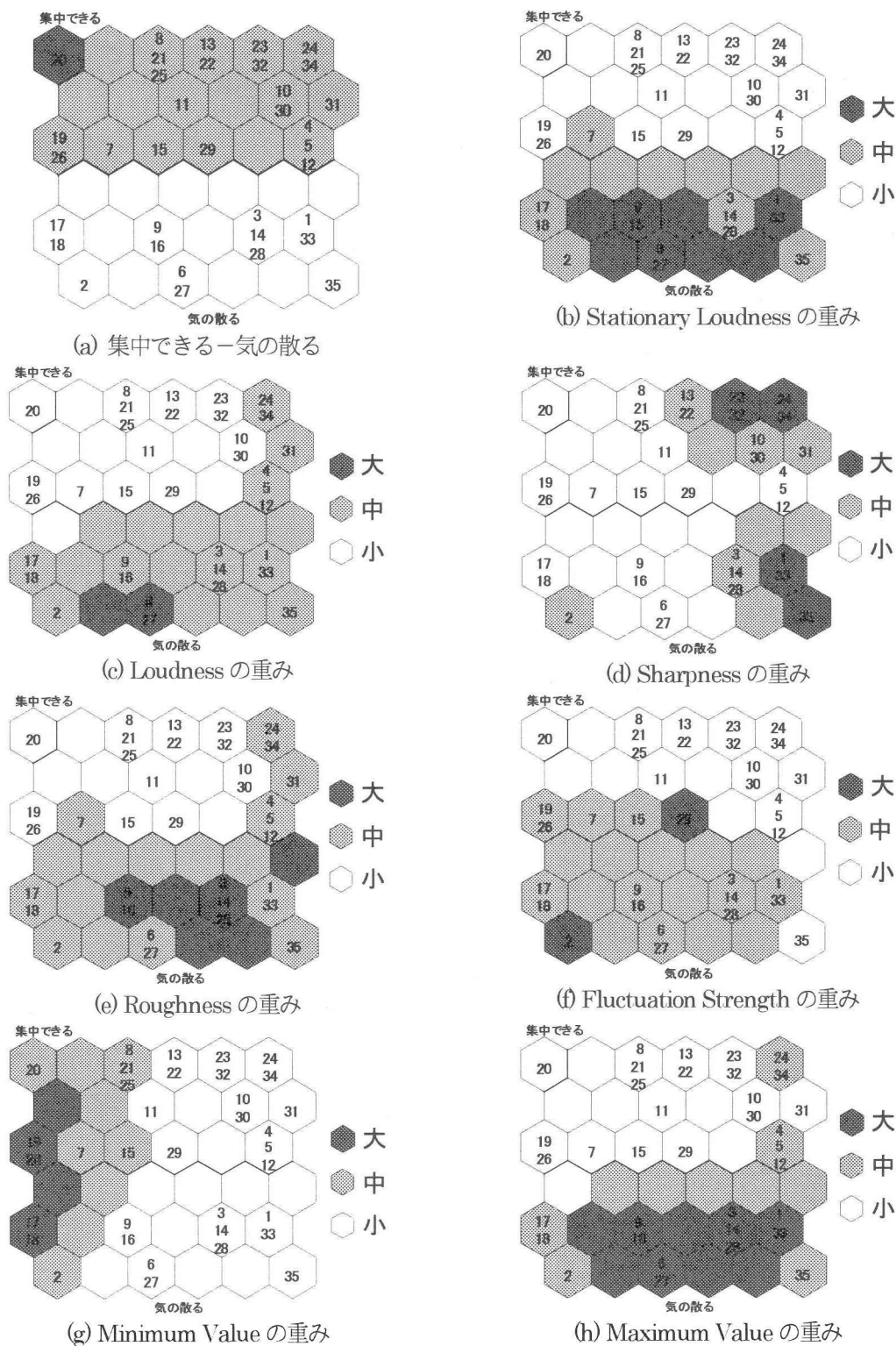


図-6 「集中できる-気の散る」のマップ

のコマ, 34.木製おもちゃのように Sharpness の影響が大きい音と, 27.金属製灰皿, 33.缶のように Stationary Loudness の影響が大きい音に分類できるといった微妙な感性の違いまでは分析できない。さらに, 3.ガラスコップ, 14.陶器製の湯のみのように Roughness の影響により騒々しいと評価される音があることもわかる。

図-6(a)から分るように, この場合も SOM による強化学習がうまく行われ, 集中できる音はマップの上側に配置され, 気の散る音はマップの下側に配置されている。数量化理論Ⅰ類で偏相関係数が最も大きかった Stationary Loudness についてみると重みの大きいニューロンはマップの下側に位置しており(図-6(b)), Stationary Loudness が大きいと気の散るという数量化Ⅰ類の結果と一致している。Roughness (図-6(e)) についても同様な結果となっている。

さらに, 図-6(d)より 16.本, 17.辞書, 18.ファイルのように Sharpness の値が小さい場合でも気の散る音と評価されるといった微妙な感性評価が分析できることがわかる。

このように, SOM を用いれば落下物の種類により「騒々しさ」, 「集中できる」に関する感性が異なること, さらにその違いを Sharpness, Stationary Loudness や Roughness という音の感性要素により分析可能であり, これらの感性要素を用いることにより個々の落下物ごとに微妙に異なる感性性能評価が可能となる。

以上示した住環境音に関する感性評価結果と SOM による分析結果をもとに, 表-3 に示す各音源について「騒々しい」, 「気の散る」等の不快な音の感性性能限界を7つ (Loudness, Sharpness 等) の感性要素について定量化することが可能になる。

7. あとがき

本研究において, 感性工学手法を用いて一般家庭にある様々なものの落下音が人々にどのようなイメージを与えているかを調べ, さらに, 音に関する種々の物理パラメータと人が音に対して持つイメージの関係を調べた。その結果, SD プロフィールより音の評価に関して男女差が無いことがわかった。さらに音のイメージに対して Sharpness, Fluctuation Strength などの影響が大きいことがわかつ

た。

また, SOM を用いて分析を行うことにより, 音に関する全体的な傾向を把握するだけでなく, 個々の音に関する特性を細かく分析することが可能になることを示した。

本研究をさらに進めていくことで, 人々に不快感を与える音の性質を定量的に把握が可能となり, 人の音に対する感性を考慮した性能限界を表示することができると考えられる。

今後は, 住居において実際に問題となっている階下の部屋への床衝撃音についても同様な分析を行うことにより, より現実的に即した音の感性性能評価が可能となる。その結果, 不快な音をカットできるような素材および工法の選定あるいは開発につなげることが期待できると考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省住宅局：既存住宅性能表示ガイド, 2002.
- 2) T.コホネン (徳高平蔵, 岸田悟, 藤村喜久郎共訳)：自己組織化マップ, シュプリング・フェアーク東京株式会社, 2000.
- 3) 国土交通省：住環境性能表示制度, 2000.
- 4) 安岡博人, 赤尾伸一, 岩本毅, 嶋田泰：集合住宅における最近の音源と建土工法による遮音設計に関する研究 (その1) 音源の洗い出しと実音の測定法・評価に関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.129-130, 2001.
- 5) LECTURE NOTE 音質評価—メトリクス—, 松下インターテクノ, BA7473-11, 2001.
- 6) LECTURE NOTE 心理音響—定性的記述—, 松下インターテクノ, BA7615J-13, 2001.
- 7) 境久雄編：聴覚と音響心理, コロナ社, 2002.
- 8) 福島邦彦, 大串健吾, 斎藤秀昭：視覚情報処理, 森北出版, 2001.
- 9) 長町三生：感性工学のはなし, 日本規格協会, 1995.
- 10) CAE：ニューラルネットワークアシスタント
(2003年9月12日受付)