

# 複合的環境条件における 都市空間の快適性評価手法に関する研究

木内 豪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 建設省土木研究所河川部都市河川研究室主任研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭一番地)

都市の屋外空間は人間の聴覚、視覚、嗅覚、触覚に対して様々な刺激を与える複合的な環境条件にある。本論文では、水辺、公園、街路、住宅地などの都市の屋外空間における快適性の支配構造を明らかにして複合的環境条件における快適性の評価手法を提案した。まず、屋外空間の音環境、視環境、熱環境、大気環境を表す環境条件と心理反応の関係について検討を行い、各環境を代表する指標を明らかにした。次に、これらの指標を入力層に持つニューラルネットワークを用いて快適性を推定する手法を構築し、本手法により未学習データに対して精度の良い快適性推定ができることを確認した。また、ニューラルネットワークを用いて各環境条件と快適性との非線形な関係を明らかにするとともに、快適性への影響度合いの大きい順番は景色の美感、体感温度、天空率、自然音指数、芳香指数であることがわかった。

*Key Words: comfort, human senses, urban outdoor, combined environment, neural network, psychological response*

## 1. 序論

都市の社会基盤整備においては従来、機能を重視するあまり利用者の視点からの計画・設計が不十分であったことから、憩い、ふれあい、くつろぎ、感性を重視した快適な生活環境によって人間らしい生活を享受できる社会を構築しようとする流れがある<sup>1)</sup>。都市空間の計画・設計においても、心の安らぎや快適性を考慮することが重要であり、そのためには人々が安らげる快適空間とは一体どのようなものかを明らかにする必要がある。

快適性がいかなる要因により支配されているかについては、建築物の内部空間を主たる対象に研究が行われてきたが、多様な環境が存在する都市屋外空間の快適性の支配構造についてはほとんど検討されていないのが現状である。そこで、本論文では都市の屋外空間で実施した快適性に関する調査結果に基づき、屋外空間の快適性を左右する環境条件を明らかにするとともに、様々な環境条件における屋外空間の快適性を評価するためニューラルネットワークを用いたモデルを構築した。ニューラルネットワークは非線形的な情報伝達を表現でき、脳神経細胞(ニューロン)の情報処理メカニズムも模擬しており、本研究で対象とする快適性評価に適した手法であると考えられる。

## 2. 快適性評価に関する既往の研究

快適性は、人間の「こころ」の状態のうち、まだ解明されていない感情の一つであり、生理学や心理学、医学などの分野で研究が行われている。

生理学的検討としては、脳波などの生理的反応と快適性との関連性を明らかにする研究が行われている。筆者は、脳波を計測することにより人間の快適性を評価できる可能性があることを見いだした<sup>2)</sup>。

人間の視覚、聴覚、嗅覚、触覚の全て、あるいはその一部に刺激が加わる複合的な環境下(以下、複合環境と呼ぶ)の快適性と外的刺激の関係を明らかにしようとする取り組みとしては、室内を対象に堀江ら<sup>3), 4)</sup>が室温、騒音、照明の環境要因と室内快適性に関する検討を行い、これらの要因の影響を共通の尺度上で表現することを試みている。しかし、環境条件がより複雑な屋外空間の快適性評価の検討を行った例は極めて少なく、筆者らが屋外の複合環境下における快適性と環境因子との関係を重回帰分析や数量化理論を用いて分析した例<sup>5), 6)</sup>や、ある地域の代表的な環境指標を基に地域の総体的な快適性指標を求めている例<sup>7)</sup>があるに過ぎず、複合的な環境条件においてニューラルネットワークを用いて快適性を推定する試みは著者の知る限り全く行われていない。

一方、個別の外的刺激(環境条件)と心理反応の関係

は、騒音や振動など個別の環境要素について検討されてきた。騒音については、55~60ホン(A)をこえると尿中ホルモン量や血液成分の変化などの生理的影響、会話妨害度(聴取明瞭度70%以下、会話可能距離2m以下)が顕著となり、不快感を訴える者が50%を越すことから、騒音規制法における日中の規制値が定められている<sup>9)</sup>。また、屋外の熱環境に関しては、人体の熱収支解析に基づき様々な屋外空間の温熱的な快適性評価の指標が検討されている<sup>9)~11)</sup>。長谷部・井上<sup>12)</sup>は都市屋外の音環境と居住環境の快適性の関わりについて報告している。臭いに関しては、悪臭物質の臭い成分ごとに物質濃度の対数値と臭気強度が線形関係が求められている<sup>13)</sup>。また、臭気強度と不快度が高い相関にあることが報告されている<sup>14)</sup>。しかし、様々な種類の音源、臭源を持つ屋外空間の複合音、複合臭の質や量と快適感あるいは心地よさとの関係は整理されていない。屋外空間の視環境については様々な対象物に対して検討が行われている。内田<sup>15)</sup>は、街路空間の開放感を天空率や道路幅などにより評価する手法を整理している。篠原・屋代<sup>16)</sup>も同様に街路を対象に景観の与える心理反応と街路構造の関係を検討している。また、青木<sup>17)</sup>は緑量感と緑視率(標準レンズで捉えた写真内の緑被面積率)の対応関係を探り、両者の間に比例関係が存在していることを示している。島谷<sup>18)</sup>は河川の親水活動に着目し、散歩の快適性が風景の良さと臭いのなさに深く関連していることを示している。しかしながら、様々な景色の善し悪しを統一的客観的指標により評価する方法はまだ確立されていない。

このように個別の環境条件と人間の心理反応の関係については多くの研究が行われてきているが、屋外空間の様々な環境条件のもとで快適性が一体何に支配されているか、また、どのような手法により快適性を客観的に予測できるかという点についてはほとんど検討が行われていないのが現状である。

### 3. 複合環境における快適性評価モデルの概要

屋外空間において人体への外的刺激をもたらす環境は視環境、音環境、熱環境、大気環境に大別される。図-1に示すように、それぞれの環境要因は人体の感覚器(視覚、聴覚、温熱覚、嗅覚)に何らかの刺激を与え、その情報は一次中枢を経て脳へと送られる。快適性は脳での情報統合により形成される感情の一種であり、主として連合野と呼ばれる前頭葉の一部にその機能が存在している。本研究においては非線形的な情報伝達を表現でき、脳神経細胞(ニューロン)の情報処理メカニズムを模擬して考えられたニューラルネットワークを用いて、複合環境要素から人間の快適性を予測する快適性評価モ

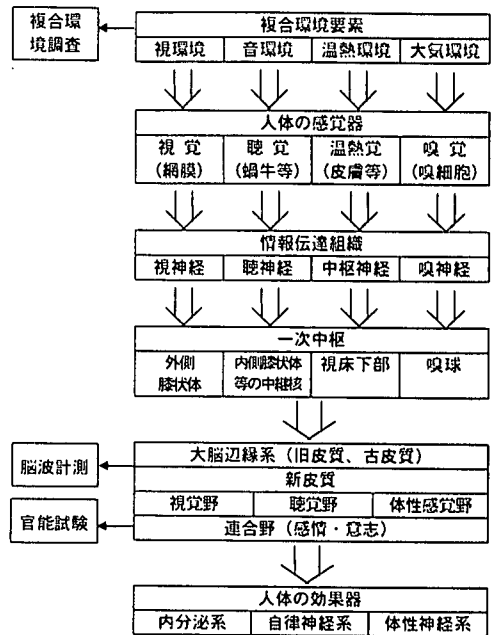


図-1 複合環境における外的刺激-脳内反応-心理反応・行動の流れ

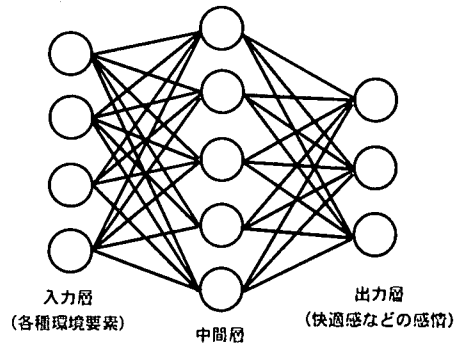


図-2 階層型ニューラルネットワークの模式図

デルを構築する。

図-1に示すように視環境、音環境、温熱環境、大気環境のそれぞれに関する情報に対応する感覚器に刺激として伝わり、これらが統合されて快適感情が形成される。また、人間の感情には個々人の育った環境や年齢、性別などが左右するが、本論文の主眼はあくまでも屋外空間の環境要素と平均的快適性との関連を探ることにあり、個人の性質(暑がりである、音に鈍い、匂いに敏感など)が快適性に及ぼす影響をみることを目的としていない。このような理由から、ニューラルネットワークの構造は、視環境、音環境、熱環境、大気環境の状態を表す要素を入力因子とし、平均的な感覚量を出力因子とする図-2に示す階層型ネットワークを基本とする。個別環境要素の刺激は、基本的にはそれぞれの感覚受容器から神

表-1 調査地点の分類

都市名	地点数	観測地点の種類
新潟市	9	公園, 駐車場, 水辺, 堤防上, 緑地
大宮市	5	住宅地, 公園, 水辺
名古屋市	7	住宅地, 堤防上, 緑地, 水辺
松山市	10	幹線道路, 緑地, 水辺
大分市	5	緑地, 水辺, 広場, 駐車場

表-2 現地調査における測定項目

環境分類	測定項目
音環境	音の種類, 等価騒音レベル
視環境	天空率, 緑被占有率, 照度
大気環境	臭いの種類, 臭気強度
熱環境	気温, 相対湿度, 風速, 黒球温度

表-4 被験者の年齢・性別構成

年齢	10代	20代	30代	40代	50代	60代	70代
男性	1	4	7	3	4	7	1
女性	1	6	4	3	4	1	0
合計	2	10	11	6	8	8	1

経系統を通じて刺激と関連する大脳皮質の各領域に投射されるものの、ある感覚とは直接影響しないはずの刺激の存在により感覚に変化が生じる可能性も否定できない(例えば、視覚が温熱感覚に及ぼす影響が検討されている<sup>19)</sup>)。本研究で用いるニューラルネットワークはこのような生理現象にも対応できるという利点がある。本モデルの入力となる個別環境を表す具体的要素と出力の快適感等のデータについては以降で説明する。

#### 4. 都市の屋外空間における快適性の調査

##### (1) 調査の概要

複合環境を表す各種環境因子と人間の快適性との関係を明らかにするための検証データを得る目的で、都市屋外空間における環境調査と官能試験を実施した(図-1)。本調査では、表-1に示す5都市の河川や池の水辺、緑地、住宅地、沿道等において、夏期晴天日の9時、13時、17時の3回に分けて、5~10地点を移動しながら各種の環境要素の計測を行い、同時に、官能試験により快適感などの心理反応に関する申告実験を行った。計測した環境要素は複合環境を代表すると考えられる表-2の項目である。また、申告実験で用いた回答項目は表-3に示すとおりで、複合環境を構成する個々の環境に対応した感覚と、場の総合的な快適性を人間の感覚尺度で表した快適感とリラックス感を用いた。これらの回答項目は筆者のこれまでの研究<sup>5), 6), 10)</sup>に基づき設定したもので、各項目は6~7段階の選択肢から成る。

表-3 心理反応の申告実験で用いた項目と選択肢

1. 温冷感 0. 極端に暑い 1. 非常に暑い 2. 暑い 3. やや暑い 4. どちらでもない 5. やや涼しい 6. 涼しい 7. 非常に涼しい	2. 発汗感 1. 全くない 2. ごくわずかにある 3. わずかにある 4. ある 5. かなりある 6. 汗が流れている
3. 気流感 1. 感じない 2. ごくわずか感じる 3. わずかに感じる 4. 感じる 5. かなり感じる 6. 非常に感じる	4. 芳香感 1. 非常に悪い臭いがする 2. 悪い臭いがする 3. やや悪い臭いがする 4. どちらでもない 5. やや良い香りがする 6. 良い香りがする 7. 非常に良い香りがする
5. 開放感 1. かなり閉鎖的な感じ 2. 閉鎖的な感じ 3. やや閉鎖的な感じ 4. どちらでもない 5. やや開放的な感じ 6. 開放的な感じ 7. かなり開放的な感じ	6. 明度感 1. 非常に明るい 2. 明るい 3. やや明るい 4. どちらでもない 5. やや暗い 6. 暗い 7. 非常に暗い
7. 緑量感 (周囲の草木等の緑の量) 1. 非常に多い 2. 多い 3. やや多い 4. どちらでもない 5. やや少ない 6. 少ない 7. 非常に少ない	8. 人工物量感 (周囲の建物や構造物の様子) 1. 非常にごてごてしている 2. ごてごてしている 3. ややごてごてしている 4. どちらでもない 5. ややすっきりしている 6. すっきりしている 7. 非常にすっきりしている
9. 音色感(音の心地よさ) 1. 非常に心地よい 2. 心地よい 3. やや心地よい 4. どちらでもない 5. やや耳障りである 6. 耳障りである 7. 非常に耳障りである	10. 音量感(音の大きさ) 1. 音が全くない 2. 音がわずかにする 3. 音がする 4. 大きい音がする 5. かなり大きい音がする 6. 非常に大きい音がする
11. 色彩感(周囲の色彩) 1. 非常に調和している 2. 調和している 3. やや調和している 4. どちらでもない 5. やや調和していない 6. 調和していない 7. 非常に調和していない	12. 周囲の景色の美感 1. 非常に美しい 2. 美しい 3. やや美しい 4. どちらでもない 5. やや醜い 6. 醜い 7. 非常に醜い
13. 精神的なリラックス感 1. 非常に落ちつく 2. 落ちつく 3. やや落ちつく 4. どちらでもない 5. やや落ちつかない 6. 落ちつかない 7. 非常に落ちつかない	14. 総合的な快適感 1. 非常に不快 2. 不快 3. やや不快 4. どちらでもない 5. やや快適 6. 快適 7. 非常に快適

申告実験の回答結果は、被験者の性別、年齢差により、同一環境下であっても異なることが想定されたため、性別、年齢層ができるだけ偏らないようにした1都市あたり原則10名の被験者からの回答の平均値を後述する解析で用いた。被験者の人数と性別、年齢構成を表-4に示す。被験者は各地点で約5分間立位状態で居た後、表-3の回答項目ごとに選択肢より最も適当と思われるものを選び、用紙に記入する。被験者各人の情報としては年齢、性別、身長、体重、着衣状態を記録した。

##### (2) 熱環境の調査

熱環境の調査では、気温、湿度、風速、黒球温度を1

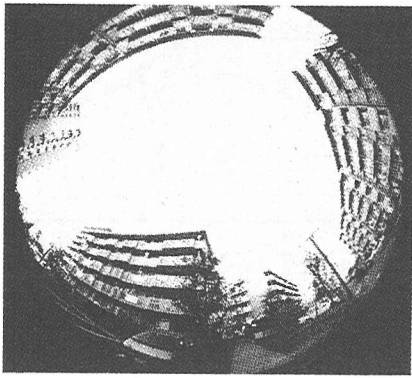


写真-1 天空写真の例

表-5 音源の種類

区分	種類
1) 川の音	せせらぎの音, 水の落下音
森・林の音	木の葉の触れ合う音
2) 生物の音	鳥の鳴き声, 虫の鳴き声, 犬の鳴き声
3) 人の音	人の声, 人の足音
楽器の音	笛・ギターなどの音
4) 交通音	自動車・バイクの音, 電車の音, 航空機・ヘリコプターの音
5) 工場音	工場の音
街の音	店舗からの宣伝音, クーラー(室外機)の音
工事の音	各種工事の音
6) その他	上記以外

地点あたりおよそ5分間計測した。後述する体感温度の算定に必要な人体への入力放射量は黒球温度等から推定した。温度と湿度の計測には、ステンレス製強制通風管内に仕込んだセンサーを用いた。黒球温度計は指示値が安定するまで時間がかかるため、それぞれの計測地点に予め設置しておいた。器差は測定前後に同一条件のもとで確認し、器差が許容値よりも大きい場合はアスマン通風乾湿計等を用いて観測データを補正した。後述する解析では、温度、湿度、風速ともに5分間の平均値を用いた。

### (3) 視環境の調査

視環境については、景観、空間の広がり、明るさに関連する要素を対象に調査を行った。景観を構成する要素として大きくは自然的なものとならぬ人工的なものがあり、さらに、両者が空間に占める割合や位置的關係、それぞれの色彩や色調、人工的なものが創り出す秩序、歴史的価値などが景観を作り上げる。このような複雑な景観要素に対する人間の心理反応である景色の美感を推定する一般的な手法は現在のところ確立されていないことから、視環境を規定し、かつ快適性とも関連すると想定される

表-6 臭気の種類

区分	種類
1) 芳香性臭気	芳香臭, 薬味臭, メロン臭, すみれ臭, にんにく臭, きゅうり臭
2) 植物性臭気	藻臭, 青草臭, 木材臭, 海藻臭
3) 土臭・かび臭	土臭, 沼沢臭, かび臭
4) 魚臭	魚臭, 肝油臭, はまぐり臭
5) 薬品性臭気	フェノール臭, ケール臭, 油様臭, 排ガス臭, 油脂臭, パラフィン臭, 硫化水素臭, 塩素臭, クロフェノール臭, 薬局臭, その他薬品臭
6) 金属臭	金気臭, 金属臭
7) 腐敗性臭気	厨芥臭, 下水臭, 豚小屋臭, 腐敗臭
8) その他	し尿臭

環境要素として天空率、緑被率、照度のみを測定した。天空率とは建物の遮蔽から残された天空から水平面上の点への立体角放射率で、正射影型魚眼レンズ付きのカメラにより、光軸を天頂に向けて撮影し、写真の全面積と天空面積の比により表した<sup>20)</sup>。

天空率と同様の定義で緑被面積の全面積に対する比率を緑被率と定義した。天空と緑被以外の部分は建物や道路施設などの人工物が占めることから、この部分を人工物占有率と呼ぶこととする。したがって、緑被率、人工物占有率と天空率の和は1となる。撮影された写真の例を写真-1に示す。

照度計測に使用した機器は一般型A級以上のもので、高さ1.5mにおける水平面照度と鉛直面照度（それぞれ受光面を測定位置の地面に対して水平・鉛直向き）を30秒間測定し、その間の平均値を照度とした。測定手法はJIS規格（照度計JIS C1609-1193, 照度測定方法JIS C7612-1985）を参考にした。測定では、測定者の陰や服装による反射が影響を与えないように注意した。

### (4) 音環境の調査

音環境調査では、音の種類と等価騒音レベルを調査した。音の種類は表-5に示す分類から番号を選択する方法を用い、複数回答を許した。等価騒音レベルは1地点あたり5分間計測した。風の影響を少なくするため、騒音計のマイクロフォンには防風スクリーンを装着した。

### (5) 大気環境の調査

大気環境要素としては、臭気のもととなる物質濃度を調べる方法も考えられるが、本調査では簡便かつ高感度な手法として人間の嗅覚を活用し、臭気強度と臭気の種類との2つの項目を調べた。臭気強度は環境庁の6段階強度表示<sup>21)</sup>（「無臭」「やっと感知できるにおい」「なんのにおいであるかがわかる弱いにおい」「楽に感知できるにおい」「強いにおい」「強烈なにおい」）から被

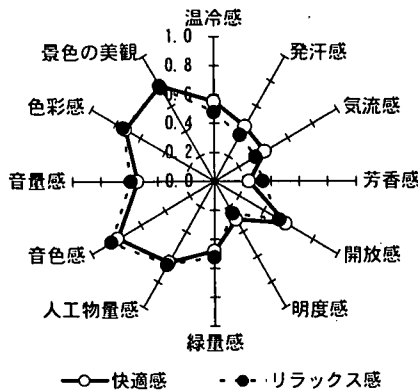


図-3 快適感と他の心理反応項目の相関係数

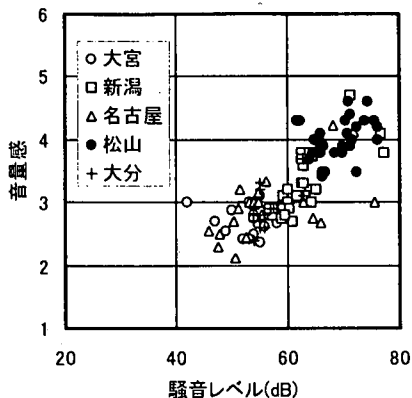


図-5 騒音レベルと音量感の対応関係

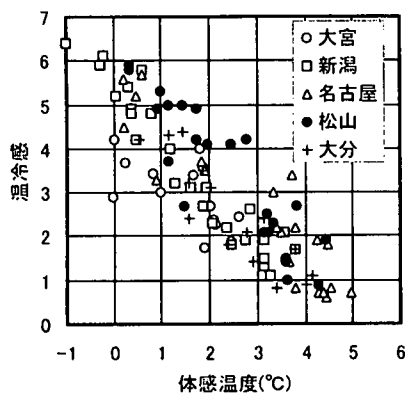


図-4 体感温度と温冷感の対応関係

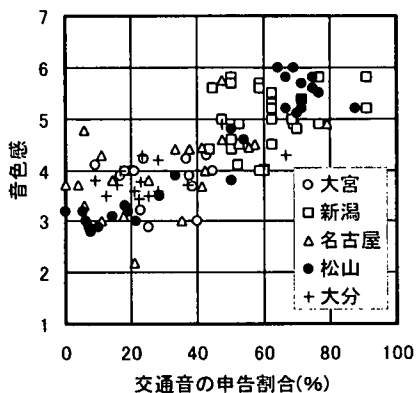


図-6 交通音と音色感の対応関係

験者が選択し、臭気の種類は表-6の分類<sup>22)</sup>から被験者が複数回答可で選択した。

## 5. 調査結果の一次分析

### (1) 心理反応項目と快適感の相関関係

本研究で用いた各心理反応項目と快適感の相関について調べた。図-3は快適感、リラックス感と表-3に示した各心理項目の相関係数の絶対値を表示したものである。これより明らかなように、景色の美観、色彩感、人工物量感、開放感といった視環境に関連する項目が高い相関を示している。音環境では音色感、熱環境では温冷感も比較的高い相関値となっているが、大気環境を代表する芳香感と快適感の相関は低い。これは後述するようにデータのばらつき具合とも関係していると考えられる。

### (2) 熱環境の調査結果

熱環境に関しては、観測時、気温20~38℃、風速は最

大6m/s、湿度は30~100%、黒球温度で20~55℃となっており、夏期の屋外空間の特徴があらわれた広範な気象データが得られた。

屋外の熱環境は室内と異なり気温の他に風や放射条件に大きく左右されるため、不快指数などの単純な指標では温熱感との対応が良くない。そこで、気温、湿度、風速、放射条件の他に、性別、年齢、作業状態、着衣状態を入力として、人体の温熱生理特性に基づく人体熱収支解析により体感温度を算定し、温冷感との対応関係を整理したのが図-4である。縦軸の座標は温冷感のレベルを表し、表-2の選択肢と同一である（以下、温冷感以外の心理項目についても同様）。体感温度の指標には体温調節機能を考慮したGaggeら<sup>23)</sup>の人体熱収支モデルを基本に計算される皮膚温度と体深部温度をもとにした指標を用いた。この指標はSET<sup>24)</sup>よりも温冷感との対応関係が良いことが筆者の検討により確認されている。図-4より、同一の体感温度に対して温冷感のレベルで±0.5程度の開きが見られるものの、温冷感と体感温度はほぼ比例の関係にあることがわかる。

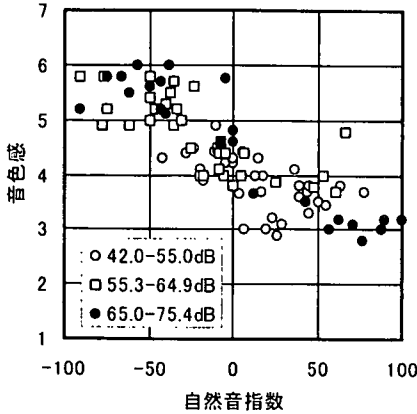


図-7 自然音と音色感の対応関係

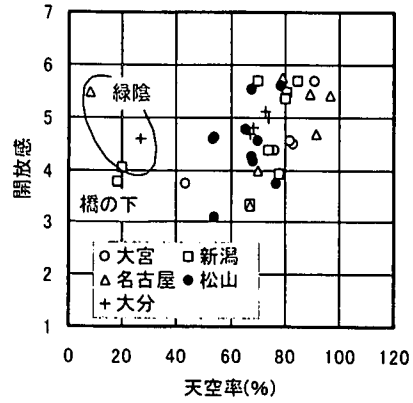


図-8 天空率と開放感の対応関係

### (3) 音環境の調査結果

音に関する申告結果を全調査地点について集計した結果、延べ申告数全体の42%で「交通音」が感知された。次いで「生物の音」(30%)、「川、森・林の音」(13%)が多く申告された。音の認識はその大きさと質によってなされると仮定し、まず、音量感と騒音レベルの関係を見たのが図-5である。視覚、聴覚、皮膚感覚などは、ある範囲において感覚の大きさが刺激の強さの対数に比例するというWeber-Fechnerの関係が成立することが知られているが、図-5からも音量感は明らかに音エネルギーを対数表示した騒音レベルと比例関係にあり、45dB程度で音が認知され(音量感レベル2)、70dBでは「大きい音がする」(音量感レベル4)という感覚を有することがわかった。一方、音の心地よさに関する音色感は騒音レベルとは一義的に対応していなかった。単一の音源(波)に対しては音量が小さくなるほど快さが増大することが報告<sup>24)</sup>されているが、今回のような複合音源の場合には、音の質によって音の大小と心地よさ(音色感)の関係が異なると考えられる。そこで、各地点における交通音の存在割合を申告結果から算出し、音色感の申告値と比較したのが図-6である。ここで、申告割合は音の分類ごとのエネルギーの大小を表すパラメータであると解釈できる。この図から、明らかに交通音の割合が増えると耳障りになる傾向が見られる。自然音の存在を指標化するため、次式で示される自然音指数 $NSI$ を定義し、騒音レベルの範囲別に音色感と $NSI$ の対応関係を見たのが図-7である。

$$NSI = (SC_1 + SC_2 - SC_3) / \sum_{i=1}^5 SC_i \quad (1)$$

ここに、 $SC_i$ : 表-5で分類した音源区分 $i$ の存在割合で、分

母は=1~5の和を表す。

$NSI$ を用いることにより交通音の存在割合のみを指標とした図-6より音色感との相関が良くなっており、都市空間では、交通音に代表される都市騒音と心地よさをもたらすとされる自然音(ここでは川の音、森・林の音、生物の音)の存在割合が音の心地よさを決めるファクターになっていると推察される。環境庁<sup>25)</sup>では日常生活で好ましいと感じる音の調査を行っており、自然系の音が上位にランクされている点とも整合している。図-7では騒音レベルの範囲による違いは明瞭には現れていないものの、騒音レベルが小さいほど自然音指数と音色感との対応関係が悪くなる傾向が見られる。また、ここでは示さないが、騒音レベルが65.0~75.4dBのデータでは、自然音指数と快適感との相関係数が0.68と高かった。以上のことから、音の大きさ(等価騒音レベル)と音源に占める特定の音の存在割合が音に関する人間の心理反応を推定するのに重要であると考えられることから、自然音指数と騒音レベルを後述するニューラルネットワークの入力項目として用いた。

### (4) 視環境の調査結果

図-8は開放感と天空率の対応関係を整理した結果である。これによると、天空率が40%以上では、天空率が大きくなると開放感が高くなる傾向が見られるが、データのばらつきが大きい。また、緑陰地点では小さな天空率の割に開放感が高い値を示している。これまでも筆者は開放感と天空率には一定の相関関係があることを示す一方、緑陰の場合には小さい天空率でも開放感が高くなる傾向を指摘した<sup>9)</sup>。これは、木洩れ日が差し込む程度の葉と葉の間から覗く細かな天空を天空率の算出で考慮することが難しいという測定の限界に起因するものもあるが、可視光線の一部は葉を透過することから、天空率を見かけ上大きくしていることも関連していると思われる。

景色の美感と他の視環境に関連する心理項目との間の相関係数を調べたところ、景色の美感と色彩感の相関が最も高く、相関係数が0.89であった。次いで、人工物量感、開放感、緑量感の順に景色の美感との相関が高い結果となった。色彩感については、例えば佐川<sup>26)</sup>は視覚的快適性を景色の色彩数や彩度（原著では彩度変換率）で表現できる可能性を示しており、このような方法で色彩感の定量化が可能なものと考えられる。緑量感については、例えば青木<sup>17)</sup>が緑量感と緑視率（標準レンズで捉えた写真内の緑被面積率）の間の比例関係を示している。ただし、緑量感をもたらす視野が地形や周辺の構造物によって異なるとしており、景観の特徴に応じて緑被率算出用の視野を予め定める必要がある。人工物量感については本研究のデータを用いて緑被率や人工物占有率といった計測可能な指標で表すため、緑量感、人工物量感と緑被率、人工物占有率との対応関係を整理したが、よい相関関係は見いだせなかった。この理由としては回答時に向く方向を一方向に定めず、その場の全体的（すなわち360度視野における）景色から緑量感、人工物量感を判断するようにしていたものの、その場の全体的特徴を把握するための天空写真では遠近の情報を得ることができず、遠方の緑と近傍の緑を同等に扱ってしまう傾向があることによると考えられる。人間の実感にあった緑被率あるいは人工物占有率の算出方法については今後の検討課題である。

明るさと快適性の関係については、Kruithofによる照明光の色温度に応じた快適に感じる照度の範囲に関する研究がよく引用される<sup>27), 28)</sup>。例えば、白色光では高い照度で快適と感じ、ろうそくの光ではずっと低い照度で快適と感じるというものである。屋外でも明るさの程度が視覚反応に与える効果については同様な関係が存在するものと考えられる（例えば夕暮れ時は明るいとは言えないが、それが景色を趣のあるものにする）。しかし、明る過ぎるということは日射を直接受けることから、熱環境としては好ましくない状況をもたらすこともあり得る。図-3で明度感と快適感の相関が低いのもこのような理由が原因となっていると考えられる。

### (5) 大気環境

臭気分類の申告結果によると、全体の53%が「無臭」と申告していた。次いで多く申告されたのが臭気分類2（21%）、臭気分類5（10%）、臭気分類3（8%）であったことから、薬品性の臭気（主として排ガス）と植物性臭気（主として草や木の香り）が芳香感を左右しているものと考えられる。各地点における芳香感の回答結果（平均値）はほとんどが「どちらでもない」の付近に分布しており、平均が3.9、標準偏差が0.3となった。「無臭」の回答が多かった反面、芳香感のばらつきが小さか

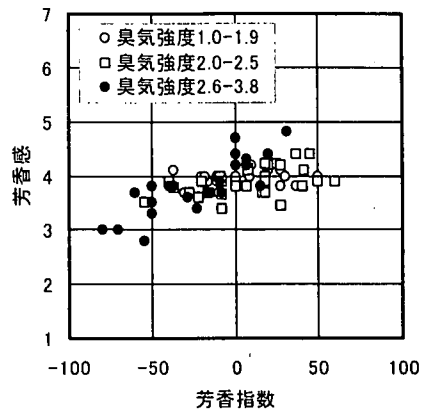


図-9 芳香指数と芳香感の対応関係

ったことが、快適感と芳香感の相関が低くなった原因と考えられる。

臭いは血圧の変化や興奮、鎮静などの生理的・心理的作用を促す<sup>29)</sup>。また、悪臭はほとんどの人が重要性を認識している環境問題の一つであり<sup>30)</sup>、空間の快適性を論じる上でも欠くことの出来ない要素であると考えられることから、調査で得られた臭気分類、臭気強度と芳香感の間に何らかの関係が存在するかどうかについて整理した（図-9）。図中に示す芳香指数 $OI$ とは、臭気分類1, 2の申告割合から3~8の申告割合を差し引いた値で、次式で表される。

$$OI = OC_1 + OC_2 - \sum_{i=3}^8 OC_i \quad (2)$$

図-9では、臭気強度が小さい場合（○）には芳香感の芳香指数にほとんど関係なく一定（「どちらでもない」に相当）であるが、臭気強度が高い場合（●）には、芳香指数が大きくなると芳香感も比例して高くなる傾向がみられる。芳香性臭気や植物性臭気といった自然がもたらす臭いが芳香感を高めているためと言える。これらの結果に基づき、ニューラルネットワークを用いた分析では芳香指数と臭気強度を入力項目として利用した。

## 6. ニューラルネットワークを用いた環境条件と心理反応の関係に関する分析

### (1) 分析方法

ここでは、5. で抽出された物理指標等をニューラルネットワーク（以下、NN）の入力項目として快適感を予測する手法について検討する。NNは図-2の構造を基本とし、入力層には環境調査等により得られた値を与え、出

表-7 快適性評価用NNモデルの選定条件

視環境	・景色の美観が高くなるほど快適感が高くなる。 ・天空率が高くなるほど快適感が高くなる。
音環境	・騒音レベルが高い場合、自然音指数が高くなるほど快適感が高くなる。
熱環境	・体感温度が低くなるほど快適感が高くなる。
大気環境	・臭気強度が高い場合、芳香指数が高くなるほど快適感が高くなる。

力層には快適感を用いた。学習データは現地の環境調査で得られた延べ108地点のデータの2/3で、残り1/3のデータの認識度を指標として中間層の数や中間層のユニット数などのネットワーク構造を決定する。

ニューロンの出力関数には式(3)で表されるシグモイド関数を用いる。また、各ニューロンの出力値は式(4)で表される。

$$f(x) = 1 / (1 + \exp(-x)) \quad (3)$$

$$O_j^k = f \left( \sum_i W_{ji}^k O_i^{k-1} + \theta_j^k \right) \quad (4)$$

ここで、 $O_j^k$ はk層のニューロンjの出力、 $W_{ji}^k$ は結合係数、 $\theta_j^k$ は閾値である。各結合係数の値は快適感に関する申告データとネットワークにより算出される出力値との間の誤差が所定の値以下になるように逐次修正するバックプロパゲーション法を用いて決定される。バックプロパゲーション法は次式により表される<sup>3)</sup>。

$$\Delta W_{ji}^k(t) = -\epsilon \frac{\partial E(t)}{\partial W_{ji}^k(t)} + \alpha \Delta W_{ji}^k(t-1) \quad (5)$$

$$E(t) = \frac{1}{2} \sum_p (T_{pi} - O_i^k)^2 \quad (6)$$

ここで、 $T_{pi}$ は入力パターンpに対する出力ニューロンiのための教師信号、 $E$ はパターンpに対する誤差関数である。閾値 $\theta_j^k$ についても式(5)と同様に修正量を求める。

## (2) 入力データの仕様

調査結果の一次分析により得られた快適感と各心理量との相関関係及び各心理量と環境指標との相関関係を参考に入力項目を選定した。各心理量と快適感の相関関係からは視環境、音環境、熱環境のいずれも重要であることがわかったので、それぞれの環境を代表する指標を入力項目に用いた。音環境については各地点における音の量と質を代表するものとして騒音レベルと自然音指数の2種類の項目を用いた。熱環境を代表する指標としては、測定された気象条件と個人の属性を基に人体の体温調節反応モデルを用いて算出される体感温度を用いた。視環境に関しては、開放感との関連性が高い天空率および景

表-8 計算条件一覧

	景色 の美観	天空率 (%)	体感温 度(℃)	自然 音指数	芳香 指数
不快側	5.0	43.0	5.0	-91	-80
平均値	3.3	69.7	2.3	5	-10
快適側	1.7	96.5	-0.3	100	60

臭気強度：2.4 騒音レベル：58.7dB

色の美観の申告値の2種類を用いた。これによって、“景色の美観があまりよくなくても天空が大きくて開放感が高い空間”というような場合にも対応が可能となる。図-8で説明したように、緑陰等の日陰においては天空率の値が低いにも関わらず開放感が比較的高くなる傾向を示すことから、今回の解析では緑陰等のデータは除外した。景観は空間快適性にとって重要であるが、現段階では様々な種類の景色の美観を一般的な定量化尺度を用いて推定することは難しいことから、「景色の美観」のみ、申告結果を用いた。照度は明度感と快適感の相関が低いことから入力項目としては利用しなかった。大気環境（芳香感）は快適感との相関は他に比べ低い結果であったが、一般的には香りは重要な要素であることから、各地点における臭いの量と質を代表すると考えられる臭気強度と芳香指数の2種類を用いた。

## (3) 分析結果

中間層が1層及び2層のニューラルネットワーク（以下NN）を用いて学習させた場合の認識度（学習誤差）と未学習データの推定誤差を、中間層ユニット数を様々に変化させて比較した。ここで、データセットjに対する学習（未学習）誤差Error<sub>j</sub>は次式で定義する。

$$Error_j = \frac{1}{n_j} \sum_{n_j} |R_i - r_i| \quad (7)$$

ここで、 $n_j$ はデータ数、 $R_i$ はデータiの実際の快適感、 $r_i$ はデータiの推定された快適感である。学習の収束性を勘案して式(5)の定数は $\epsilon=0.7 \sim 1.0$ 、 $\alpha=0.8$ とした。局所最小解の存在<sup>3)</sup>により、結合度と閾値の初期値の与え方によって最適結果が異なるため、今回の検討では乱数パターンを10通り用意して、NNによる学習誤差が5%以内になったときの未学習データによる推定誤差を比較した。その結果、全体的な傾向として、中間層が1層、2層にかかわらず、平均的には中間層ユニット数が多いほど、未学習データに対する誤差が最も小さい値を示すことがわかった。例えば、中間層が2層でユニット数が10の場合では未学習データの誤差は13.2、ユニット数が50の場合には10.2であった。

最終的なNNの選定にあたっては、未学習データに対す



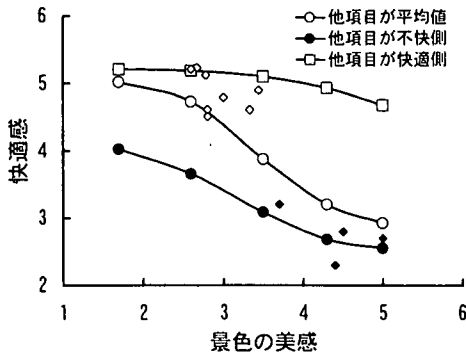


図-10 NN から得られる景色の美感と快適感の関係

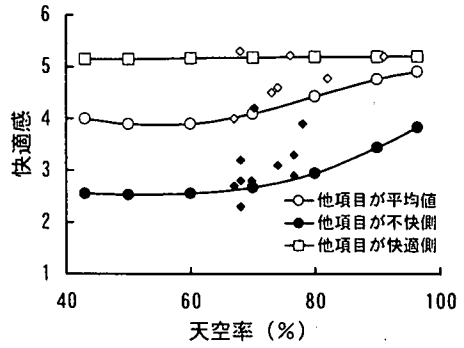


図-11 NN から得られる天空率と快適感の関係

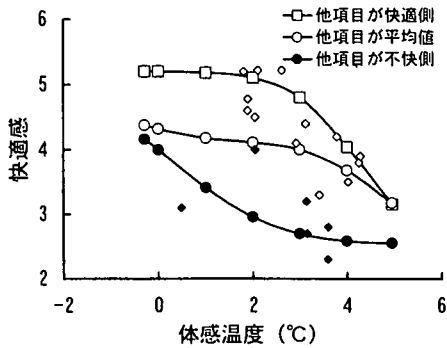


図-12 NN から得られる体感温度と快適感の関係

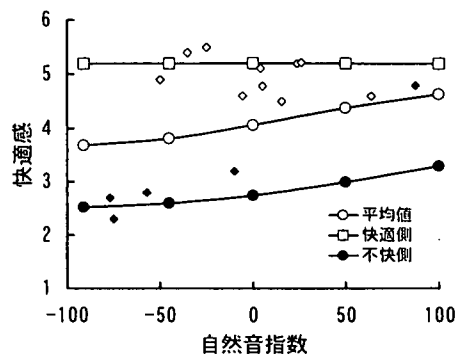


図-13 NN から得られる自然音指数と快適感の関係

る認識誤差が小さいだけでなく、NNの構造が人間感覚に関する一般的特性と整合していることが必要である。ここでいう一般的特性とは環境条件と快適感との対応関係を意味しており、具体的には表-7の条件を設定した。表-7の条件を満たすNNとして、中間層2層、中間ユニット数50のNNを用いて、各入力項目と快適感の関係を整理したものが図-10～図-14である。図-10は景色の美感のみ変化させ、それ以外の入力項目には表-8に示す全データの平均値、最も不快側、最も快適側の値を与えた結果である。ただし、臭気強度と騒音レベルには3ケースとも表-8に示す平均値を用いた。図-10で平均値を与えた場合には、環境調査結果の範囲内（景色の美感で1.7～5.0）で快適感のレベルは約2だけ変動し、美感のレベルが1あるいは6に近づくほど快適感の変化は小さくなる傾向が見られる。景色の美感以外の項目に快適側あるいは不快側の値を用いた場合には景色の美感の影響度は小さくなる結果となった。これは、景色以外の条件の影響が相対的に大きくなることに起因すると考えられる。図-10には、すべての環境条件が快適側と平均値の間の値に該当する調査結果（◇）とすべての環境条件が不快側と平均値の間の値に該当する調査結果（◆）もプロットした。NNから得られる関係は、調査結果とも概ね一致していること

がわかる。

図-11～14には同様にして求めた快適感と天空率、体感温度、自然音指数、芳香指数の関係を示す。図-11で、不快側条件を与えた場合（●）には、天空率の違いにより快適感レベルが1.5程度違ってくるが、快適側の場合（□）は天空率の影響がほとんど見られないことがわかる。図-12では、快適側と不快側の場合、体感温度に対して非線形的に快適感が増減し、快適感レベルで1.5以上の変化が生じることがわかる。平均的条件の場合には、体感温度が高くなると快適側の曲線に近づく傾向が見られるが、これは厳しい熱環境になるほど、他の環境要因の影響よりも熱環境の影響が相対的に大きくなることを示すものと考えられる。

図-13は平均的な騒音レベルのもとでの自然音指数と快適感の関係を表している。平均値と不快側を与えた場合には快適感で1レベル程度の違いが生じるが、快適側の条件では快適感ほとんど変化しない。一方、図-15は表-8の平均的条件のもとで騒音レベルの違いの影響を調べたものである。この図からは騒音レベルが高いと変動幅が大きくなる傾向が見られる。自然音指数がマイナスの場合（音源に占める不快成分が多いとき）には騒音レベルが高くなるほど快適感が低下するが、自然音指数が

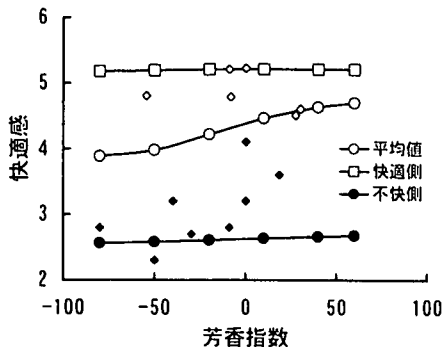


図-14 NNから得られる芳香指数と快適感の関係

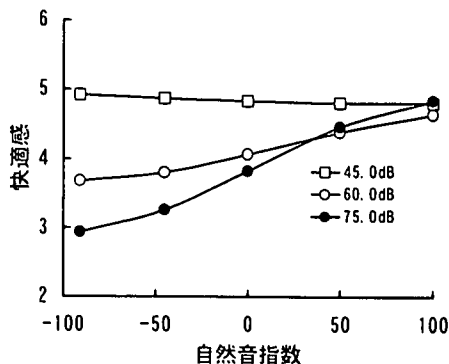


図-15 NNから得られる自然音指数と快適感の関係

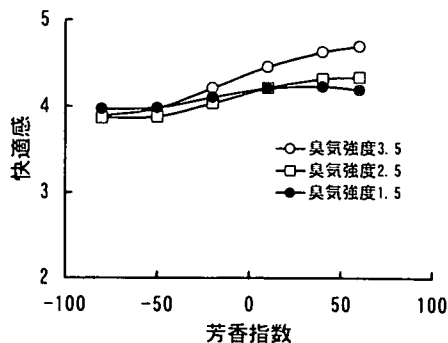


図-16 NNから得られる芳香指数と快適感の関係

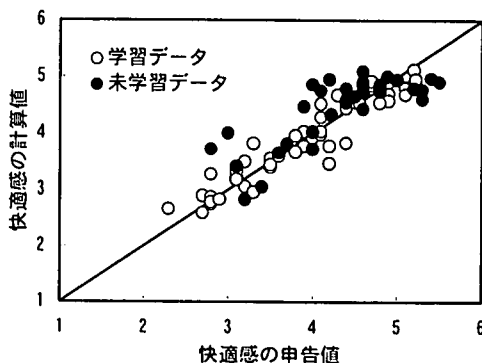


図-17 物理環境要素を入力層とするNNを用いた快適感の計算結果と申告値の比較

50以上になると騒音レベルの影響は小さくなるという特徴を示した。また、音がわずかに聞こえるレベル(45dB)では自然音指数の大小に関わらず快適感が高い値を示す。これらの特徴は我々の感覚とも適合する。

図-14は平均的な臭気強度のもとでの芳香指数と快適感の関係を表している。他項目が平均値の場合に最も快適感の変動幅が大きく、快適側、不快側の条件では芳香指数の影響はほとんどみられない。図-16は表-8の平均的条件と異なる臭気強度のもとでの芳香指数と快適感の関係を示している。臭気強度が1.5(無臭に近い状況)の場合には、芳香指数の変化に対して快適感ほとんど変動しない。一方、それ以外の臭気強度では、芳香指数が高くなると芳香感も高くなる傾向が見られ、良い臭いがする場合(芳香指数がプラス)では臭気強度が大きいほど快適感も高くなる特徴がある。

図-11~14には、図-10と同じく、すべての環境条件が快適側と平均値の間の値に該当する調査結果(◇)とすべての環境条件が不快側と平均値の間の値に該当する調査結果(◆)をプロットしてある。図-11~14の◇や◆の印は、それぞれ、ほぼ快適側と平均値、不快側と平均値

の曲線の上にプロットされており、NNの構造が調査データとも整合する信頼性できるものであることを示している。

このNNを用いて算出される快適感と実際の申告値を比較したものが図-17である。この場合、学習データの誤差は5.0%、未学習データの誤差は9.1%である。入力項目に「景色の美感」を用いており、すべての入力項目が客観的に計測される物理指標ではないが、7種類の入力データを用いたNNにより屋外空間における快適感を高い精度で推定できることがわかる。

以上のように、ニューラルネットワークを用いることにより、視環境、熱環境、音環境、大気環境に関する質的、量的な環境条件の違いが相互に作用をしながら非線形的に快適感に影響を及ぼすという、外的刺激に対する心理反応の複雑な過程をモデル化できることがわかる。

複合的環境条件においては、各環境条件が快適感に及ぼす影響度合いが他の環境条件にも左右されることから、音環境、視環境、熱環境、大気環境が快適性に与える影響を一概に順位づけることは難しいが、図-10~14の「他項目が平均値」の変動幅から判断すると、景色の美感、

体感温度、天空率、自然音指数、芳香指数の順に快適性への影響度合いが大きいと言える。なお、天空率と自然音指数はほぼ同等の変動幅であった。これらの何れの項目も、自然的な環境ほど快適感を高くする方向に作用している。脳波と快適性の検討<sup>9)</sup>でも、水辺や緑陰では生理学的にも快適性が高いと思われる脳波の特徴が抽出されており、自然環境の保全が快適性の向上にとって重要であることを物語っている。

本研究の最大の目的は屋外空間の複合的な環境条件において快適性を推定する手法を提示することであり、視環境に関しては、景色の美感を推定する手法が確立されていないことから、「景色の美感」の申告結果を入力項目として利用した。実際の空間設計において「景色の美感」の申告値を得るためには景観画像等を用いることが考えられる。他の方法としては、景色の美感が色彩感と人工物量感が特に高い相関にあったことから、前述のように景色の色彩数や彩度、人工物率を用いて予測することが可能であると考えられる。音環境や大気環境に関しても、周辺の自然環境や交通量、土地利用等の情報に基づき自然音指数や芳香感指数を予測・評価することができれば、本研究で構築したニューラルネットワークに応用することにより、空間の快適性を予測することができるようになると思われる。

## 7. 結論

本論文では、都市屋外空間の複合環境調査によって得られた環境データを用いて快適性の度合いを左右する環境指標を抽出し、これらの環境指標等を入力とするニューラルネットワークにより快適性を予測する手法を構築し、客観的に得られるデータ等から快適感を高い精度で推定できることを確認した。具体的には、以下の結論を得た。

- 1) 複合音、複合臭が基本となる屋外空間の音環境と大気環境を代表する指標として、自然音指数と芳香指数を新たに提案した。
- 2) 複合的な環境条件を代表する指標として、体感温度、景色の美感、天空率、騒音レベル、自然音指数、臭気強度、芳香指数の7種類の環境指標を入力層に与え、中間層が2層、中間層ユニット数50×50のニューラルネットワークにより快適感を予測する手法を構築した。
- 3) このニューラルネットワークを用いることにより、学習データに対する誤差5%以内、未学習データの誤差約9%で快適感を推定することが可能であった。
- 4) このニューラルネットワークを用いて各環境条件と

快適感の関係を整理した結果、ニューラルネットワークの構造が調査結果とも整合し、人間感覚を適切にモデル化していることを示すとともに、各環境条件の値に応じて快適感是非線形な挙動を示すことがわかった。

- 5) ニューラルネットワークを用いて得られる各環境条件と快適感の関係から、快適感への影響度合いは景色の美感が最も大きく、次に体感温度、天空率と自然音指数はほぼ等しく、芳香指数が最も小さい傾向を示した。ただし、この傾向は当該項目以外の環境条件により変化する。

快適な都市づくりは、本論文で対象とした空間の快適性の他に、生きがいのある地域社会の実現、自然環境や生態系の保全、安全な社会、省エネルギーや資源リサイクルに配慮した都市基盤の整備といった幅広い観点から総合的に考えていく必要がある。そのような全体像の中で、屋外空間における人間の快適性の支配構造を明らかにすることが、より良い都市空間の創造に少なからず寄与できると考える。また、今後さらに多くのデータによりモデル構造の改善を行えば、人間の心の状態を把握するという最も複雑で未解明の問題を明らかにすることにもつながるものと考えられる。

**謝辞：**本論文は、建設省技術研究会指定課題「都市域における熱環境改善を考慮した河川改修等に関する調査」の一環で得られた水辺の快適性に関するデータ等をもとに、独自に解析を行った結果をまとめたものである。調査の実施にあたっては建設本省並びに各地方建設局の担当者に協力頂いた。また、土木研究所企画課の小林裕明氏（前都市河川研究室研究員）には基礎データの収集で協力頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 建設技術開発会議：真に豊かな「ひと・地域・国」の未来を創る技術を目指して、1997年7月。
- 2) 木内豪、小林裕明：屋外空間における快適性と脳波の関連について、土木学会論文集 No. 629/VII-12, 143-152, 1999。
- 3) 堀江悟郎、桜井美政、松原斉樹、野口太郎：室内における異種環境要因がもたらす不快さの加算的表現、日本建築学会計画系論文報告集 No. 387, 1-7, 1988。
- 4) 堀江悟郎、桜井美政、松原斉樹、野口太郎：加算モデルによる異種環境要因の総合評価の予測、日本建築学会計画系論文報告集 No. 402, 1-6, 1989。
- 5) 木内豪、栗城稔、小林裕明：複合環境下における河川空間と周辺市街地の快適性評価、環境システム研究 Vol. 23, 561-566, 1995. 8。
- 6) 栗城稔、木内豪、小林裕明：河川環境調査と被験者実験によ

- る河川空間の快適性評価, 第2回河道の水理と河川環境シンポジウム, 175-182, 1995. 6.
- 7) 原科幸彦, 東林知隆: 快適環境評価のための客観データ指標の改善—川崎市の環境観察調査を用いて—, 環境情報科学, 18-4, 50-57, 1989.
  - 8) 環境庁大気保全局: 騒音規制法の解説, 新日本法規出版, 1972.
  - 9) 石井昭夫, 片山忠久, 塩月義隆, 吉水久雅, 阿部嘉孝: 屋外気候環境における快適感に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集 No. 386, 28-36, 1988.
  - 10) 木内豪, 栗城稔, 小林裕明: 屋外空間における夏期の温熱環境評価指標の検討, 土木技術資料, Vol. 38, No. 12, 32-37, 1996.
  - 11) 神田学, 木内豪, 小林裕明: 新しい屋外用温熱感指標による河川の熱環境評価—多摩川河川敷における観測を例に—水工学論文集 第40巻, 237-242, 1996.
  - 12) 長谷部正基, 井上泰宏: 都心部における快適性と音環境に関する基礎的研究, 土木学会論文集 No. 552/V11-1, 95-100, 1996.
  - 13) 日本環境衛生センター: 悪臭物質の測定等に関する研究 (昭和54年度環境庁委託研究), 1980.
  - 14) 岩下剛, 木村健一, 田辺新一, 吉沢普, 池田耕一: 人間の嗅覚に基づく室内気質の評価に関する基礎的研究, 日本建築学会計画系論文報告集 No. 410, 9-19, 1990.
  - 15) 内田茂: 閉空間に対する感覚量に関する実験的研究(1), 日本建築学会論文報告集 No. 282, 113-122, 1979.
  - 16) 篠原修, 屋代雅充: 街路景観のまとまりに及ぼす沿道建物の効果に関する計量心理学的研究, 土木学会論文集 No. 353/IV-2, 131-138, 1985.
  - 17) 青木陽二: 視野の広がりや緑量感の関連, 造園雑誌, 51(1), 1-10, 1987.
  - 18) 島谷幸宏編著: 河川風景デザイン, 山海堂, 1994.
  - 19) 大野秀夫, 堀越哲夫, 久野覚, 土川忠浩, 松原斎樹, 伊藤尚寛: 快適環境の科学, 朝倉書店, 1993.
  - 20) 武井正昭: 建築群密集状態の判定手段に関する研究 (第1部), 日本建築学会論文報告集 No. 162, 43-49, 1969.
  - 21) 西田耕之助: 臭気の評価方法に関する知識と情報, 臭気の研究, 19巻1号, 359-367, 1988.
  - 22) 日本水道協会: 上水試験方法, 199-204, 1985.
  - 23) Gagge, A.P., Nishi, Y., and Nevins, R.G.: The role of clothing in meeting FEA conservation guidelines, ASHRAE Transactions, 234/247, No.2417, 1976.
  - 24) 灘岡和夫, 玉嶋克彦: 海岸環境要素としての波の音の特性について, 海岸工学論文集 第36巻, 869-873, 1989.
  - 25) 環境庁編: 環境白書, 平成8年度版.
  - 26) 佐川賢: 色彩環境の評価, 平成8年度生命工学工業技術研究所研究講演会資料, 9-13, 1996.
  - 27) 望月衛, 大山正編: 環境心理学, 朝倉書店, 1982.
  - 28) 日本建築学会編: 建築設計資料集成1 (環境), 丸善, 1988.
  - 29) 岩崎基行: 香りと環境, 空調和・衛生工学会新書, 理工図書, 1995.
  - 30) 環境庁長官官房総務課: 「臭い環境について」の調査結果, 1996. 12.
  - 31) 中野馨監修, 飯沼一元編集: 入門と実習ニューロコンピュータ, 技術評論社, 1989.
  - 32) 矢川元基編: ニューラルネットワーク, 培風館, 1992.

(2000. 1. 24受付)

## STUDY ON THE METHOD OF EVALUATING HUMAN COMFORT FOR THE COMBINED OUTDOOR ENVIRONMENT IN URBAN AREAS

Tsuyoshi KINOUCHI

This study attempts to establish a method to predict human comfort for outdoor environments using a neural network. First, the correlation between physical properties which represent outdoor environment and sensations corresponding to thermal, sound, visual and air environments was investigated to derive indices appropriate for the inputs to a neural network. Then, a neural network was successfully applied to predict human comfort with the error of about 9% for non-learning data. The sensitivity analysis of the neural network showed that the human comfort is sensitive to aesthetic of landscape, temperature index, natural sound index, sky view factor and odor index in the order of appearance under average conditions of combined environment.