特集論文 人文・社会科学へのファジィ理論の応用

ファジィ推論による騒音の心理評価法[†]

加藤 裕一^{*1} 山口 静馬^{*2}

変動する騒音刺激に晒された場合、知覚・感覚レベルに属する表層的水準での心理的印象が刺激音の時間的变化に追従しながら生じた後、この刺激全体に対して情緒レベルに属するより深層的水準での心理的印象が生ずる。

我々はこれまで、人間の主観に支配される心理的印象は“あいまいな”事象であるとの立場から、前者の瞬時的に生ずる印象を定量的に評価するための試みを行っている。本論文は、これまでの考察を更に発展させ、前者の瞬時的印象から後者の騒音全体に対する印象を推定・予測することを考察目的としたものである。このような試みは、騒音に対する人間の態度や行動等を予測して騒音対策問題を考える実際の立場から重要な工学的意味を持っている。

具体的には、上記の2つの印象に対して、“騒々しさ”と“うるささ”に関するカテゴリーを予め設定し室内心理実験を行った。ここに、刺激騒音の典型的な例として道路交通騒音を用いている。次に、得られた実測データに基づいて前者の瞬時的印象から後者の全体的印象を推定・予測することを、(1) 線形回帰式、及び(2) if-then 規則の2つの手法を用いて考察している。その結果、次の諸点が明かになった。

- (1) 上記2つの心理的印象に対する平均的出現事象には強い相関が見られること、
- (2) 前者の心理的事象の変動が大であると、後者の印象としてよりうるさく感じること、
- (3) if-then 規則による推定・予測手法は線形回帰式による手法で生ずる不都合を取り除き、しかもデータの節約ができること。

キーワード：心理的评价、騒音刺激、騒々しさ、うるささ、ファジィ推論

1. はじめに

騒音刺激から受ける人の不快感を大別すれば、音そのものに起因する不快感(聴覚的要因の不快感)と、音に随伴して生ずる不快感(非聴覚的要因の不快感)とがあることが知られている。前者の不快感は知覚・感覚レベルに属する心理的印象であり、“Noisiness”と呼ばれる。日本語では、“騒々しい”、“やかましい”、“喧噪感”等が当てられる。一方、後者の印象は、知覚・感覚レベルでの心理的印象が生じた後、音の意味や連想等の多種の要因によって生ずる印象である。一般に、両者を

包含した総体的な不快感は“Annoyance”と呼ばれ、情緒レベルでの不快感として用いられている。日本語では、“うるささ”をあてることが多い¹⁾。

人間の騒音に対する心理的印象は、個人差やその個人の置かれている時間的・空間的及び肉体的・精神的因子等の様々な影響を受けると考えられるが、我々はこのような印象を第一義的に“あいまいな”事象と見立てて、ファジィ理論の導入のもとに、まず知覚・感覚レベルでの心理的印象を定量化する試みを行ってきた²⁾³⁾⁴⁾。具体的には、カテゴリー化した“騒々しさ”に対する心理的印象 $F_i (i=1, 2, \dots, 7; F_1: \text{非常に静か}, F_2: \text{かなり静か}, F_3: \text{やや静か}, F_4: \text{どちらでもない}, F_5: \text{やや騒々しい}, F_6: \text{かなり騒々しい}, F_7: \text{非常に騒々しい})$ を予め設定し、騒音レベル値 $L[\text{dB(A)}]$ がこれらの各印象に属する程度を実験的に調べることで、により、“あいまいな”事象であることを示した。また、単純なメンバーシップ関数 $\mu_{F_i}(L)$ の推定法

[†] A Psychological Evaluation Method of Random Noise Based on Fuzzy Reasoning

Yuichi KATO and Shizuma YAMAGUCHI

^{*1} 呉工業高等専門学校

Kure Technical College

^{*2} 山口大学 工学部

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

も提案した。次いで、考察状況での大略のメンバーシップ関数が一旦分かれば、任意のレベル確率分布 $P(L)$ に従う不規則変動騒音に晒された場合、これから生起する各ファジィ事象 F_i の出現時間率 $P(F_i)$ を算定することが可能となり、 $\{P(F_i) | i=1, \dots, 7\}$ の形で心理的印象を評価することを提案した。

本報告は従来の研究を更に発展させ、上述した知覚・感覚レベルといった表層的水準での印象 (F) と、ある一定時間騒音に晒された後に変動騒音全体から受ける情緒レベルといった深層的水準での心理的印象 (A) との関係を考察している。具体的には従来の研究と同様な室内心理実験を通して、知覚・感覚レベルでの心理的印象を一旦定量化する。この後、情緒レベルでの印象との関連性を (1) 線形回帰式による手法、(2) いわゆる if-then 規則に基づく手法、の 2 つの方法を用いて情緒レベルでの心理的印象の性質や予測の可能性を考察している。概念図を図 1 に示す。

前者の表層的水準での印象は比較的物理量との対応が良いことが知られている⁵⁾。従って、両者の印象間の関連性を考察しておけば、騒音レベル値といった物理量としての客観的騒音評価値が与えられた場合に、この騒音により引き起こされる情緒レベルでの心理的印象をある程度予測することが可能となろう。このような可能性を探ることは、騒音に対する人間の態度や行動等を予測して、騒音対策を具体化する実際的分野で重要な工学的意味を持つものと思われる。

2. 心理実験の概要

(A) 実験状況：図 2 に室内心理実験を行った状況を示す。実験室は、縦：7.3[m]×横：12.1[m]×高さ：2.6[m]程度の容積を有する教室である。残響時間⁶⁾は、中心周波数：500 Hz, 1 KHz, 2 KHz の 1/3 オクターブ帯域制限白色雑音に対して、それぞれ 1.8[秒], 1.8[秒], 1.7[秒]程度である。(C) に示す刺激音の周波数成分は、ほぼこの領域内に納まっている。実験は 8 月中旬から 8 月下旬にかけて行った。

(B) 被験者：聴力正常な 20 才の男子学生 5 名。

(C) 刺激音：代表的な変動騒音として道路交通騒音、建設機械騒音、工場騒音などがある。本実験では、従来の研究との整合性をも考慮して、道路交通騒音を採り上げた。具体的には、異なる 4 箇所の道路端で予めデジタル・オーディオ・テープ (DAT) に録音した道路騒音を、増幅器を通して

図2 心理実験状況

(▲：被験者，■：騒音計及びレベルレコーダ，●：スピーカ)

図1 騒音刺激と各心理的応答との関係

スピーカーに供給し、被験者に5分間連続して呈示した。増幅器のボリュームによりレベル変動域を種々変更し、合計23種類の騒音を呈示した。図3は呈示騒音の一部をレベルレコーダに記録したものである。この例からも分かるように、変動波形そのものにそれほど意味がある訳ではなく、騒音の分野では、通常騒音レベル値 L が区間 $(-\infty, L]$ 内に出現する確率 $P(L)$ を用いて騒音の不規則変動性を表現している。図4は、その騒音レベル変動に関する確率分布形の一例を示したものである。ガウス型に近い分布(a)から非ガウス性の強い分布(b)まで、またその変動幅も約20[dB(A)]から40[dB(A)]まで、様々な分布形に従う変動騒音が呈示されていることが分かる。

(D)短時間スケールでの心理的印象の測定法：難波らのカテゴリ連続判断法⁷⁾にならって心理実験を行った。まず、表層の水準での心理的印象に対して先の7つのカテゴリ $F_i (i=1, 2, \dots, 7)$ を設定したシートを用意しておき、各被験者には、“デジタル・ストップウォッチを眺めながら、5秒ごとにその時刻での騒音に対し、受けた印象をチェックすること”と教示した。図5(a)はその記入例である。各被験者はこの実験を実施する前日に、判断や操作に戸惑うことのないように数時間の練習を予め積んでいる。一方、この時の呈示音は、レベルレコーダで記録している。双方の記録から、第 j 番目($j=1, \dots, 23$)の騒音において第 i 時点($i=1, \dots, 60$)でのレベル値 $L(i,$

図3 呈示した道路交通騒音の一例

図4 呈示騒音のレベル変動分布形の例

(a)：短時間スケールでの測定シートと測定例

非常に	うるさい	(A ₇)
かなり	うるさい	(A ₆)
⊖	うるさい	(A ₅)
少し	うるさい	(A ₄)
あまり	気にならない	(A ₃)
	気にならない	(A ₂)
	まったく気にならない	(A ₁)

(注) 音のうるささの判定においては単に音が大きいとか小さいとかだけでなく、耳障りであるとか、不快であるとか、びっくりしたとかいった感じをも含めて全体的な印象に基づいて評価する

(b)：長時間スケールでの測定シートと測定例

図5 心理的印象の測定シート

j [dB(A)] に対して被験者 k ($k=1, \dots, 5$) の判断 $F(i, k, j)$ が得られる。即ち、データ対 $\{L(i, j), F(i, k, j) \mid i=1, \dots, 60, j=1, \dots, 23, k=1, \dots, 5\}$ が得られる。

(E) 長時間スケールでの心理的印象の測定法：一つの変動騒音に対し、この騒音全体から受けた深層的水準での心理的印象 $A=A_i$ ($i=1$ ；全く気にならない, $i=2$ ；気にならない, $i=3$ ；あまり気にならない, $i=4$ ；少し気になる, $i=5$ ；うるさい, $i=6$ ；かなりうるさい, $i=7$ ；非常にうるさい⁸⁾) を予め用意したシート上に記録した。被験者には“音のうるささの判定においては単に音が大きいとか小さいとかだけでなく、耳障りであるとか不快であるとか、びっくりしたとかいった感じを含めて全体的な印象に基づいて評価するこ

と”を予め教示しておいた。図 5(b) はこの記入例である。このような測定を図 2 に示す実験状況(被験者は 5 人)で 23 種類の変動騒音に対し、呈示順序をランダムに変更して 5 回行った。従って、被験者 5 人それぞれに対し全実験時間は、5[分] $\times$ 23[種類] $\times$ 5[回] = 575[分] である。このうち 1 回は (D) の測定も併せ行っている。即ち、 j 番目 ($j=1, \dots, 23$) の種類の騒音に対しデータ対 $\{L(i, j), F(i, k, j) \mid i=1, \dots, 60, k=1, \dots, 5\}$ を採取した後、本測定を 1 回行った。

3. 短時間スケールでの心理的印象 $F(t)$ の評価

短時間スケールで生ずる瞬時的な印象は不規則に変動する騒音に追従しながら変化することから、このような心理的印象の評価法として、次式で与えられる出現時間率を用いることを既に提案している²⁾³⁾。

$$P(F_i) = \int \mu_{F_i}(L) p(L) dL \quad (1)$$

$$(i=1, 2, \dots, 7)$$

ここに、 $\mu_{F_i}(L)$ は印象 F_i に関するメンバーシップ関数であり、 $p(L)$ は変動騒音のレベル確率密度関数である。

図 6 は文献 2) に示す本研究と同様な 15 分間、同じく文献 3) の 20 分間及び本実験での 25 分間の心理実験データを用いて、道路騒音に対する心

図6 騒音レベル L に対する心理的印象 $F_i (i=1, 2, \dots, 7)$ のメンバーシップ関数

理的印象 $F_i (i=1, 2, \dots, 7)$ のメンバーシップ関数を推定したものである。即ち、メンバーシップ関数の形状をより安定化させるために、本実験で得たデータ以外にほぼ同様の条件下で実験した文献2)3)におけるデータ(被験者は異なっている)を加えて推定したものである。また、本実験での25分間の心理実験データとは、図4(b)に示すレベル分布に従う騒音5種類を呈示し得られた心理データのことである。具体的な推定手続きを付録1に示す。ここに、2.で述べた心理実験の性質及び心理反応の性質上次の2つの条件

直交性⁹⁾：

$$\sum_{i=1}^7 \mu_{F_i}(L) = 1 \quad (\forall L \in D_L = [30, 100]) \quad (2)$$

凸性¹⁰⁾：

$$\mu_{F_i}(\lambda L_1 + (1-\lambda)L_2) \geq \min(\mu_{F_i}(L_1), \mu_{F_i}(L_2)) \quad (\forall L_1, \forall L_2 \in D_L, \forall \lambda \in [0, 1]) \quad (3)$$

を満足している点に留意する必要がある。即ち、(2)式はあるレベル値 L の騒音刺激を呈示すると、この刺激に対し $F_i (i=1, 2, \dots, 7)$ の中の何れかの反応が生起することを表現したものである。(3)式は呈示騒音レベル値 L の大小関係に対する心理的反応の自然な順序関係を表したものである。制御分野では、繰り返し修正動作に主点を置くため演算操作面の簡易化を考慮したメンバーシップ関数を用いられている。しかしながら、メンバーシップ関数の形状そのものが、結果的評価値に直接影響する分野においては、メンバーシップ関数の形状を極端に単純化することは許されない。従

って本論文においても実測データにできるだけ忠実に設定している。

同図から次の事項が読み取れる。即ち、(1)例えば $\mu_{F_5}(L)$ に着目した場合、心理的印象を F_5 (やや騒々しい) と判断する騒音刺激は約 52~85[dB(A)] の広い範囲にわたっている。(2)同一レベルの騒音刺激、例えば 75[dB(A)] に対して、その心理的応答は F_4 (どちらでもない)、 F_5 (やや騒々しい)、 F_6 (かなり騒々しい) のように様々な印象が出現する。これらの事実から、人間の主観が介入する物理的騒音刺激入力—心理的反応出力の関係をあいまい量として捉える妥当性が認められる。

呈示騒音のレベル確率分布が与えられれば、図6を用いて(1)式から各心理的印象の出現時間率 $P(F_i) (i=1, 2, \dots, 7)$ が求まる。更に文献7)には、 $F_i (i=1, \dots, 7)$ がほぼ等間隔尺度として取り扱えることが実験的に示されていることに着目し、マクロ的に捉える他の簡便な方法として、順序尺度 F_i を近似的に距離尺度： $F_i = i$ として扱い、2つの代表的パラメータ：

$$\mu_F = \sum_{i=1}^7 i \cdot P(i) \quad (4)$$

$$\sigma_F = \left(\sum_{i=1}^7 (i - \mu_F)^2 \cdot P(i) \right)^{1/2}$$

で定義される平均的出現事象 μ_F とその周りの揺らぎ幅 σ_F によって評価することも考えられる。

図7は2節で述べた23種類の騒音レベル分布関数 $P_j(L) (j=1, \dots, 23)$ を用いて、(1)、(4)式より算定した理論値 $\mu_F^T(j)$ と、本心理実験による実測値とを比較したものである。ここに実測値は測

定データから次式により直接算定している。

$$\mu_F^E(j) = \sum_{i=1}^{60} \sum_{k=1}^5 F(i,k,j) / (60 \times 5)$$

(但し, $F(i,k,j) = F_m (m=1,2,\dots,7)$ の時 $F(i,k,j) = m$ とする)

図6のメンバーシップ関数は、本実験データの一部と文献2)3)のデータを付加し、更に付録1に示したようにこれらのデータに一種のスミージングをして求められている。従って、このメンバーシップ関数を利用して算定した μ_F^T と上記の実測値 μ_F^E は決して同一のデータを用いての異なった算定法による比較ではない。両者には多少のばらつきは見られるものの大略的な一致性は認められる。本論文の主目的は、次節に示すように、このように実測値とかなり良い一致性を示す μ_F^T , σ_F^T を用いて、長時間スケールでの心理的印象(A)を推定することである。

図7 μ_F に対する理論値と実験値との比較
(μ_F^T : 理論, μ_F^E : 実験)

4. 長時間スケールでの心理的印象(A)の推定

騒音刺激にある時間晒された場合、まず短時間スケールでの表層的な心理的印象 $F(t)$ が生じた後、この騒音全体に対する心理的印象 A が生ずることは日常よく経験するところである。この事実に基づいて、長時間スケールでの印象 A の推定・予測法を考察する。

4.1 線形回帰的推定法

短時間スケールでの心理的印象 F に関するパラメータ μ_F , σ_F を用いて、 μ_A を推定・予測することを考える。ここに μ_A は印象 A の平均的出現事象であり、事象 $A_i (i=1,\dots,7)$ がほぼ等間隔尺度として取り扱え得るとの研究結果⁸⁾に立脚している。

[A] 1つのパラメータ μ_F による推定

2つの心理的印象 F と A との大略的關係を調べるため、2節の心理実験で得られた実測データを用いて、両者の平均的事象 μ_F と μ_A に関する散布図を描いたのが図8である。ここに、 μ_F^T は(4)式から求めた μ_F に関する理論値であり、 μ_A^E は心理実験による長時間スケールでの心理的印象 A の実測値から得られた平均的出現事象である。同図から両者の間にかんがりの相関があることが直察され、(4)式による理論値 μ_F^T を用いて μ_A を推定できることが期待できる。従って本論文では、最も直接的で単純な方法として、

$$\mu_A^T = a \cdot \mu_F^T + b \quad (5)$$

なる回帰式にまず着目する。図8で示した各値 ($\mu_F^T(i)$, $\mu_A^E(i)$) ($i=1,2,\dots,23$) を用いて(5)式の回帰係数 a, b を推定した後、この回帰係数を用いて μ_A の理論的推定値 $\hat{\mu}_A^T(i) (= \hat{a} \cdot \mu_F^T + \hat{b})$ を求め、これらの値と実測値 $\mu_A^E(i)$ ($i=1,2,\dots,23$) との比較を示したものが図9である。同図には両者間の相関係数 r 及び残差分散 σ_e^2 も併せ示している。

[B] 2つのパラメータ μ_F , σ_F による推定・予測

(4)式から得られる μ_F と σ_F に関する情報から

図8 μ_F と μ_A に関する散布図

$$\mu_A^T = a \cdot \mu_F^T + b \cdot \sigma_F^T + c \quad (6)$$

によって μ_A を推定することを考える。(4)式から得られた $\mu_F^T(i)$ と $\sigma_F^T(i)$ ($i=1,2,\dots,23$) の散布図を図 10 に示す。これらの各値 ($\mu_F^T(i), \sigma_F^T(i)$) と $\mu_A^E(i)$ ($i=1,2,\dots,23$) を用いてまず (6) 式の回帰係数を求めた後、これらの値を用いて μ_A の理論的推定値 $\hat{\mu}_A^T (= \hat{a} \cdot \mu_F^T + \hat{b} \cdot \sigma_F^T + \hat{c})$ を求め、実測値 $\mu_A^E(i)$ ($i=1,2,\dots,23$) との比較を示したものが図 11 である。(5)式と(6)式による 2 つの線形回帰モデルの当てはまりの良さに関し、AIC¹¹⁾を用いて考察した結果を付録 2 に示す。この結果から、 σ_F^T の項を付加した (6) 式のモデルは AIC の値をかなり改善しており、 μ_A^E の推定精度に大きく寄与していることが分かる。

4.2 IF-THEN 規則による推定法

4.1 での考察を直接数値的に調べる。図 10 で示したデータ ($\mu_F^T(i), \sigma_F^T(i)$) ($i=1,2,\dots,23$) の中で、 μ_F^T がほぼ等しく且つ σ_F^T に差異がある組として、 μ_F^T が小さい A-A'、中くらいの B-B'、及び大きい C-C' の 3 組を代表点として選び、これらの値 (μ_F^T, σ_F^T) に対する (μ_A^E, σ_A^E) の値の対応を示したものが表 1 である。但し μ_A^E は心理実験による測定データから直接算定した心理的印象 A の平均的出現事象であり、 σ_A^E はその周りでの揺らぎ幅である。

この表から次のことを確認することができる。A-B-C あるいは A'-B'-C' と μ_F^T が大きくなるに従って、 μ_A^E も増加する。次に、A-A' 点に関して、 μ_F^T はそれぞれ 2.50, 2.43 とほぼ等しいにも拘らず、 σ_F^T が大である A' 点での μ_A^E は A 点でのそれより約 0.7 大となる。また、B-B' では、 σ_F^T の差異による μ_A^E は約 1.6、C-C' では約 0.3 となる。特に、 σ_F^T による μ_A^E の差異の程度は μ_F^T が 3.8 である B-B' が他の 2 例に比較して顕著である。即ち、

(1) μ_F が大きくなるに従って、 μ_A も大きくなる。

この事実は図 8 の傾向と一致している。

(2) μ_F の値が殆ど等しくても、 σ_F の値が大きくなると μ_A の値が増加する。この事実は (6) 式

図9 μ_A に対する理論的推定値 μ_A^T と実測値 μ_A^E との比較 ($\hat{a}=1.31, \hat{b}=-1.24; r=0.935, \sigma_e^2=0.220$)

図10 (μ_F^T, σ_F^T) の散布図

図11 μ_A に対する理論的推定値 μ_A^T と実測値 μ_A^E との比較 ($\hat{a}=1.58, \hat{b}=3.31, \hat{c}=-5.35; r=0.979, \sigma_e^2=0.0726$)

表1 (μ_F^T, σ_F^T) と (μ_A^E, σ_A^E) の関係

	$(\mu_F^T, \sigma_F^T) \rightarrow (\mu_A^E, \sigma_A^E)$	
A	(2.50, 0.86)	(1.87, 0.34)
A'	(2.43, 1.13)	(2.55, 0.50)
B	(3.82, 0.82)	(2.95, 0.50)
B'	(3.84, 1.11)	(4.50, 0.50)
C	(5.31, 0.73)	(5.73, 0.85)
C'	(5.32, 0.93)	(6.00, 0.77)

の傾向($\hat{b} > 0$)とも一致する。

(3) F に関する評定尺度の中央付近で σ_F の効果は大きいことも窺える。

呈示騒音の変動幅が大であれば短時間スケールにおける心理的印象 $F(t)$ も大きく変動し、例えば $F_1, F_2 \sim F_6, F_7$ までの印象が生起することにより、 σ_F^T は大となる。このような場合、 μ_F が同程度であっても F_6, F_7 といった印象が強く作用して、人間は全体としての心理的印象 A をよりうるさく判断する傾向になることを、上記(2)(3)は示唆している。従って、長時間スケールで生じる心理的印象 A を評価するためには、 μ_F あるいは μ_L (騒音レベルの平均) を捉えておくだけでなく、 σ_F あるいは σ_L (騒音レベルの標準偏差) といった騒音レベル変動のダイナミックレンジに関連する情報を同時に把握しておく必要が分かり、大略的に $(\mu_A, \sigma_A) = (\mu_A(\mu_F, \sigma_F), \sigma_A(\mu_F, \sigma_F))$ と表現出来る。以上の考察結果に立脚して、 (μ_F, σ_F) に対する (μ_A, σ_A) を予め実験的に調べて次のような if-then 規則：

if $(\mu_F(i), \sigma_F(i))$ then
 $(\mu_A(i), \sigma_A(i)) \quad (i=1, 2, 3)$ (7)

として規則化しておけば、任意の騒音レベル分布 $P(L)$ に従う変動騒音に晒された場合の心理的印象 A を推定・予測することが可能となる。即ち、 $P(L)$ に対する (μ_F, σ_F) を(1)(4)式を用いて算定する。図12に示すように μ_F - σ_F 平面を台とする

図12 $(\mu_F(i), \sigma_F(i))$ による推定法

$(\mu_A(1), \sigma_A(1))$ らしさを表現するメンバーシップ関数を設定すれば、算定した (μ_F, σ_F) に対する適合度 ω_1 は、相似の関係から $\omega_1 = \overline{01}' / \overline{11}' = d_1 / D_1$ と算定される。規則2, 3に対する適合度 ω_2, ω_3 も同様である。従って (μ_F, σ_F) に対する (μ_A, σ_A) を次式と算定する。

$$\mu_A^T = (\sum_{i=1}^3 \omega_i \mu_A(i)) / (\sum_{i=1}^3 \omega_i) \quad (8)$$

$$\sigma_A^T = (\sum_{i=1}^3 \omega_i \sigma_A(i)) / (\sum_{i=1}^3 \omega_i)$$

以上の考察を推定手順としてまとめる。

Step 1. レベル分布 $P(L)$ に従う騒音に晒された場合の (μ_F, σ_F) を(1)(4)式を用いて算定する。

Step 2. μ_F - σ_F 平面上で、 (μ_F, σ_F) を内部に含む、三角形の頂点 $(\mu_F(i), \sigma_F(i))$ ($i=1, 2, 3$) を探す。見つからない場合は推定不能とする。

Step 3. (8)式において $\alpha_i = \omega_i / \sum_{i=1}^3 \omega_i$ と置き、

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i \mu_F(i) = \mu_F, \quad \sum_{i=1}^3 \alpha_i \sigma_F(i) = \sigma_F, \quad \sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1 \quad (9)$$

を満たす補間パラメータ α_i ($\alpha_i \geq 0, i=1, 2, 3$) を算定する。必ず一意に定まる。

Step 4. (μ_F, σ_F) に対する (μ_A, σ_A) を次式により推定する。

$$\mu_A^T = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \mu_A(i), \quad \sigma_A^T = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \sigma_A(i) \quad (10)$$

図13は2節での23ケースの心理実験結果を用いて上記 if-then 規則による推定法の適用を試みたものである。即ち、同図中 $(\mu_F, \sigma_F) = (4.67, 0.76)$ に対する (μ_A, σ_A) の実測値は $(4.40, 0.490)$

図13 μ_A の推定例

であるが、これを次の2つの推論規則を用いて推定することを試みた。

1-2-3点を推論規則に選定した場合：

規則 1: if (4.51, 0.76) then (4.45, 0.67)

2: if (4.89, 0.71) then (4.80, 0.40)

3: if (4.77, 1.02) then (5.80, 0.51)

推定: $(\mu_A^T, \sigma_A^T) = (4.67, 0.56)$

1'-2'-3'点を推論規則に選定した場合：

規則 1': if (2.50, 0.86) then (1.87, 0.34)

2': if (5.31, 0.73) then (5.73, 0.85)

3': if (5.32, 0.93) then (6.00, 0.78)

推定: $(\mu_A^T, \sigma_A^T) = (4.85, 0.74)$

これらの推定例より内挿法であることから異常な推定結果とはならないが、精度良く推定するためには近くの点を推論規則として選ぶ必要があることが窺える。換言すれば、非線形な関係も存在することからこのような配慮が必要である。このような考察に基づき、図13で13点を推論規則とし、本例も含めて斜線内の10点に対する (μ_A, σ_A) を推定した結果を図14に示す。

一方、推論規則に用いた13ケースの実測データを使用して(6)式の回帰係数を求め、残り10ケースを予測したものが図15である。両者の一致性を相関係数の形で比較すると、if-then規則による推定結果は(6)式による結果とほぼ同程度となっている。しかし、以下の事項を考え併せるとif-then規則による手法がより合理的と思われる。

(1) (6)式の回帰係数を高信頼度で設定するためには、心理実験による多くの実測データを必要とするのに対し、(7)式を利用する場合には数少ないデータで事足りる(基本的には3点でよい)。

(2) 一般に μ_A と μ_F , σ_F の間に(6)式の線形関係が常に保存されている保証はなく、従って非線形関係の存在する場合には大きな推定・予測誤差を生ずる。これに対し(7)式の推定法は基本的に非線形関係を局所線形化で対処していることから、上記のような非線形関係の存在するような場合に対しても柔軟に対応可能である。

(3) (2)の考察に関連して、(7)式による推定法は内挿法に基づくことから安定した推定結果が得られる。

次の1例からも上記if-then規則の合理性を窺うことが出来よう。今、 $(\mu_F, \sigma_F) = (2.5, 0.5)$ に対する μ_A の推定を試みる。if-then規則を用いれば、今回の実験データからは内挿する3点が取れないので推定不能が結論である。他方、回帰手法を用いれば、 $\mu_A^T = 0.415 (= 1.55 \times 2.5 + 3.46 \times 0.5 - 5.19)$ と推定される。しかし、この結果は $1 \leq \mu_A^T \leq 7$ が要請されていることから不合理である。これは μ_A^T の値を常に固定した1つの線形関数で推定することに無理があることを示している。

図14 μ_A に対する理論的予測値 μ_A^T と実測値 μ_A^E との比較($r=0.978$)

図15 μ_A に対する理論的予測値 μ_A^T と実測値 μ_A^E との比較($\hat{a}=1.55$, $\hat{b}=3.46$, $\hat{c}=-5.19$; $r=0.981$)

5. おわりに

本論文では、人間が任意のレベル変動分布に従う騒音にある時間曝された場合、騒音から受ける心理的印象は“あいまいな”事象であるとの立場に立ち、短時間スケールでの知覚・感覚レベルに属する心理的印象 $F(t)$ から、この騒音全体に対する情緒レベルに属する長時間スケールでの心理的印象 A を推定・予測する問題を考察した。

具体的には、“あいまいな”事象である上記2つの心理的印象に対し、 $F(t)=F_i$ と $A=A_i$ ($i=1,2,\dots,7$) のカテゴリーを設定した後、これらの印象間の関係を考察した。この結果、短時間スケールでの平均的印象 (μ_F) が殆ど同程度であっても、その変動幅 (σ_F) が大きい場合には、長時間スケールでの印象 (μ_A) を大きく判断する傾向にあることが分かった。従って、 μ_A を推定・予測するためには μ_F 以外に σ_F (騒音レベルの変動幅に直接関係している) の情報が不可欠となる。 μ_A の推定・予測手法の具体化として、本論文では線形回帰関係に基づくものと、if-then 規則に基づくものの2種を考察したが、次の利点を考慮すれば if-then 規則による手法はより有効性を発揮すると思われる。

(1) 少数データの ($\mu_F(i)$, $\sigma_F(i)$) と ($\mu_A(i)$, $\sigma_A(i)$) の関係 ($i=10\sim15$ 点程度) を実測値から予め調べておくことにより、かなり広い範囲に亘る変動騒音に対し μ_A の予測が可能となる。

(2) 最近点を用いて内挿法により推定することから、安定した推定結果が得られる。

(3) 局所的にのみ線形性を仮定して推定していることから、考察対象全体にある心理評価の非線形構造に十分に耐えることができる。

以上のことから、騒音のレベル変動形態をレベル分布として与えれば、人間の情緒レベルでの心理的印象が予測可能となる。例えば、道路騒音の予測手法は今日まで、多くの研究者によって提案され、実用化されている手法¹²⁾もあり、これらの結果が利用できる。従って本手法により、物理的入

力としての騒音と出力としての心理的印象との関係を定量的に議論することが可能となり、実際の騒音対策といった問題を考える上での一つの道具を提供することが期待できよう(図1参照)。

従来の研究及び本研究での考察は、2節で述べたように、一つの実験環境を設定した上での心理実験データに基づく方法論に重点を置いた考察である。また、始めから、各被験者の個性に目を向けるのではなく、心理的出力を合成し平均的な出力に着目している。しかしながら、一般に、騒音刺激に対する人間の心理的応答には個人差があるのみならず、その個人の置かれている時間的・空間的・環境的因子に影響を受ける。例えば、深夜戸外を通り抜ける車両を非常にうるさく感じるといった体験を多くの人は持っているだろう。交通量が昼間と比較して極端に少なくなり、物理的には騒音レベルはかなり低いはずである。一方交通量の多い昼間、活動しているときはさほど道路騒音が気にならないことも体験する。本手法の有効性を高めて行くためには、上記の各種要因により心理的印象の評価がどのように変容するのか考察していくことが今後の課題である。

謝 辞

本研究に多大の援助を戴いた小森崇・西村照正・川本浩司の3氏並びに老松建成氏に深謝の意を表す。尚、本研究は一部財団法人 中国電力技術研究財団の助成金補助を受けた。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会編：“騒音の評価法,” 彰国社(1981) p.290.
- 2) 加藤, 山口：“ファジィ理論に基づく変動騒音の心理評価法,” 日本音響学会誌, 47, 5, pp.305-309 (1991).
- 3) Y.Kato and S.Yamaguchi: “A systematical study

for psychological impression caused by fluctuating random noise based on fuzzy set theory," Journal of Acoustical Society of America, 91, (5), pp.2748-2755 (1992).

- 4) 山口, 加藤, 老松: "騒音のパワースペクトル情報に基づく心理的応答の一予測手法," 日本音響学会誌, 49, 1, pp.2-9 (1993).
- 5) 日本建築学会編: "騒音の評価法," 彰国社(1981) p.37.
- 6) 前川純一: "建築音響," 共立出版(1982) p.40.
- 7) 難波, 桑野, 中村: "カテゴリー連続判断法による自動車騒音の評価," 日本音響学会誌, 34, 1, pp.29-34 (1978).
- 8) 降旗, 柳沢: "各種騒音源の心理的影響を共通に評価できる評価尺度の構成に関する検討," 日本音響学会誌, 45, 8, pp.577-582 (1989).
- 9) D.Dubois, H.Prade: "Fuzzy sets and systems: Theory and Applications," Academic Press (1980) p.13.
- 10) D.Dubois, H.Prade: "Fuzzy sets and systems: Theory and Applications," Academic Press (1980) p.25.
- 11) 板坂慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎 "情報量統計学," 共立出版(1983) p.127.
- 12) 日本音響学会編: "騒音・振動(下)" コロナ社(1982) p.36.

付 録 1

騒音レベル L [dB(A)] を台とするメンバーシップ関数 $\mu_{F_i}(L)$ ($i=1, \dots, 7$) を推定する手掛かりは, 心理反応に起因する各メンバーシップ関数の凸性という自然な条件(3)式と心理実験データから得られる相対度数分布 $R_{F_i}(L)$ ($=n_i(L)/N(L)$; $N(L)$ は騒音レベル L の出現回数, $n_i(L)$ は F_i と判断した回数)である ($i=1, \dots, 7$)。即ち, 実測データであることからバラツキは見られるものの, L が F_i と判断される度合いは $R_{F_i}(L)$ 程度と考えられる。 $R_{F_i}(L)$ には $\sum_{i=1}^7 R_{F_i}(L) = 1$ なる条件があることから $\mu_{F_i}(L)$ に対しても直交条件(2)式を設定する。この直交条件はあるレベル L の騒音刺激に対し, F_i ($i=1, \dots, 7$) の何れかの反応が生起することからも合理的な条件と思われる。このような条件(2)(3)式を満たすメンバーシップ関数 $\mu_{F_i}(L)$ ($i=1, \dots, 7$) を推定する簡易な一手法を以下にまとめる。尚, 通常の変動騒音を扱う場合, 台の領域として $D_L = [30, 100]$ [dB(A)] の範囲を考えれば十分である。

Step1. $R_{F_1+F_2+F_3}(L) = \sum_{i=1}^3 R_{F_i}(L)$,
 $R_{F_5+F_6+F_7}(L) = \sum_{i=5}^7 R_{F_i}(L)$ を計算する。

図 A-1 メンバーシップ関数の推定過程(Step1から Step3)

Step2. 点: $(L_j, R(L_j))$ ($j=1,2,\dots$)を適当に選定して, 直線: $R(L)=[R(L_{j+1})-R(L_j)]/(L_{j+1}-L_j) \times (L-L_j) + R(L_j)$ ($L_j \leq L \leq L_{j+1}$)で $R_{F_1+F_2+F_3}(L)$ 及び $R_{F_5+F_6+F_7}(L)$ を近似し, $\mu_{F_1+F_2+F_3}(L)$ ($=\sum_{i=1}^3 \mu_{F_i}(L)$) 及び $\mu_{F_5+F_6+F_7}(L)$ ($=\sum_{i=5}^7 \mu_{F_i}(L)$) を推定する(図 A-1参照)。

Step3. $\mu_{F_4}(L)=1-\mu_{F_1+F_2+F_3}(L)-\mu_{F_5+F_6+F_7}(L)$ を算定する。もし, $\exists L \in D_L \rightarrow \mu_{F_4}(L) < 0$ あるいは(3)式を満たさなければ, Step2.へ戻り, 点: $(L_j, R(L_j))$ ($j=1,2,\dots$)の選定をやり直す。

Step4. Step2.と同様にして, $R_{F_5}(L)$, $R_{F_7}(L)$ を直線近似し $\mu_{F_5}(L)$, $\mu_{F_7}(L)$ を推定する(図 A-2参照)。

Step5. $\mu_{F_6}(L)=\mu_{F_5+F_6+F_7}(L)-\mu_{F_5}(L)-\mu_{F_7}(L)$ を算定する。もし, $\exists L \in D_L \rightarrow \mu_{F_6}(L) < 0$ あるいは(3)式を満たさなければ, Step4.へ戻る。

$\mu_{F_i}(L)$ ($i=1,2,3$)の推定はStep4., Step5.の手順と同様である。本手順は(2)式を自動的に満足している。手順が簡易であるから, 例えば BASIC プログラミングにより容易に実現できる。

付 録 2

重回帰モデル:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + \dots + a_m \cdot x_m + e \quad (\text{A-1})$$

ここに e は平均0, 分散 σ^2 の正規分布に従う

に対して, n 組のデータ $\{y(i), x_1(i), x_2(i), \dots, x_m(i) | i=1, \dots, n\}$ が与えられたとき, AIC は次のようになる¹¹⁾。

$$\text{AIC} = n \cdot (\log 2\pi + 1) + n \cdot \log \sigma_e^2 + 2 \cdot (m+2) \quad (\text{A-2})$$

ここに σ_e^2 は残差分散である。

今, データとして具体的に $(\mu_{F^T}(i), \mu_{A^E}(i))$ ($i=1,2,\dots,23$) が与えられた場合, (5)式に対する AIC は(A-1)式で $y=\mu_{A^E}$, $x_1=\mu_{F^T}$, $a_0=b$, $a_1=a$, $n=23$, $m=1$ とおき, $\sigma_e^2=0.220$ と算定されることから, (A-2)式から $\text{AIC}=36.4$ となる。一方, (6)式に対する AIC は同様に $y=\mu_{A^E}$, $x_1=\mu_{F^T}$, $x_2=\sigma_{F^T}$, $a_0=c$, $a_1=a$, $a_2=b$, $n=23$, $m=2$ とおき, $\sigma_e^2=0.0726$ と算定されることから $\text{AIC}=12.9$ となる。説明変数 σ_{F^T} を付加することにより回帰モデルがかなり改善することが分かる。

図 A-2 メンバーシップ関数の推定過程(Step4から Step5)

[問い合わせ先]

(1992年 8月29日 受付)
 (1993年 2月17日 再受付)
 (1993年 5月20日 再々受付)

〒737 呉市阿賀南2-2-11
 呉工業高等専門学校 電気工学科
 加藤 裕一
 ☎: 0823-71-9121(内)2514
 ☎: 0823-71-9125

—— 著 者 紹 介 ——

加藤 裕一 (かとう ゆういち)

呉工業高等専門学校 電気工学科

1979年 広島大学 大学院 工学研究科博士課程 前期修了。同年ダイセル化学工業㈱ 入社。'83年 呉工業高等専門学校 電気工学科 助手。'90年 同 講師 現在に至る。主として、確率システム・環境システム等の研究に従事。システム制御情報学会、日本音響学会、応用統計学会などの会員。

山口 静馬 (やまぐち しずま)

山口大学 工学部 知能情報システム工学科

1967年 福井大学 大学院工学研究科 応用物理学専攻修士課程 修了。同年 福井大学工学部助手。'69年 広島大学工学部助手。'73年 同 講師。'78年 同助教授。'84年 海上保安大学校教授。'92年 山口大学工学部教授、現在に至る。確率的信号理論、環境騒音の統計的解析・評価・予測、水中可聴音場の解析等に関する研究に従事。工学博士、日本音響学会、海洋音響学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会、日本ファジィ学会などの会員。