騒音に対する心理的印象の メンバーシップ関数計測システムの開発†

加藤 裕一*¹ 山口 静馬*² 老松 建成*³

従来加藤, 山口ら²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾は, 人間が騒音から受ける心理的印象を判断することは“あいまいな”事象であるとの立場から, ファジィ理論を援用してこの印象を定量化することを試みている。しかしながら, それらの騒音に対する静かさ-騒々しさに関するメンバーシップ関数の計測法は, 原理的段階に留まっていた。本論文は, 今後, 物理領域と心理領域との関係を押進めて考察して行くために, 従来の計測法の問題点を改善して, 多くの人々のメンバーシップ関数を容易かつ効率的に計測するシステムを提案したものである。具体的には, 本システムは大きく次の2つの機能からなっている。(1) ノート型パソコンの制御により, 被験者への呈示騒音とその心理的印象を測定し, データを集積する。(2) 測定データに基づき直交かつ凸なメンバーシップ関数を推定する。本システムを被験者4人に適用した結果, 各被験者は個性ある心理的応答を示し, そのメンバーシップ関数を安定して計測出来ることを示している。最後に, これまで他の研究者により提案されているいくつかのメンバーシップ関数推定手法を概括して, 本手法との差異・本手法の特色等をまとめている。その結果本手法は, (1) 分解原理に基づく新たな手法であること, (2) 多くの仮定を設定せず, 適用範囲が広く実用的な手法であること, 等を明かにしている。

キーワード: 騒々しさ, 静かさ, 個性, 分解原理

1. はじめに

騒音刺激に対する不快感の印象には, 知覚・感覚レベルに属する心理的印象と刺激音全体から受ける総体的な心理的印象があることが知られている。前者の印象は noisiness, 後者の印象は annoyance と呼ばれる¹⁾。例えば, 変動騒音入力に対する人間の心理的出力は, まず前者の印象 F が時々刻々変動する騒音レベル値 L に追従して生起した後, この騒音全体に対する後者の印象 A が生起する。概念図を図1に示す。我々はこれまで, 両印象は“あいまいな”事象であるとの立場から, 次のことを考察している。

(1) 前者の印象 F に対し, $F_1 =$ “非常に静か”, $F_2 =$ “かなり静か”, $F_3 =$ “やや静か”, $F_4 =$ “どちらでもない”, $F_5 =$ “やや騒々しい”, $F_6 =$ “かなり騒々しい”, $F_7 =$ “非常に騒々しい”の7つのカテゴリ化した印象を設定して, 騒音レベルを台とするメンバーシップ関数 $\mu_{F_i}(L)$ ($i=1, \dots, 7$) を実験的に推定し人間の心理的印象を定量化した。

(2) $\mu_{F_i}(L)$ ($i=1, \dots, 7$) が分かれば, 任意の騒音レベル変動分布 $P(L)$ に従う騒音に曝された場合, F_i ($i=1, \dots, 7$) の出現率 $P(F_i)$ を算定することが可能となる。そこで, これらの時間率 $\{P(F_i) | i=1, \dots, 7\}$ により物理的騒音を心理的に評価することを提案した²⁾³⁾⁴⁾。

(3) 刺激音に対する総体的な印象 A を推定・予測することは, 人の騒音に対する姿勢・態度・行動を予測する上で工学的に重要である。このような観点から印象 F の生起後印象 A が生ずる事実に基づいて, (2) で算定した $\{P(F_i) | i=1, \dots, 7\}$ を用いて A を評価する手法を提案した⁵⁾。

上述のように物理量域と心理量域との関係を考

† Developing a System for Measuring the Membership Functions of Psychological Impressions to Acoustic Noise
Yuichi KATO, Shizuma YAMAGUCHI and Kensei OIMATSU

*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

*3 海上保安大学校
Maritime Safety Academy

図1 騒音刺激入力と各心理的応答との概念図

察する上で、メンバーシップ関数を予め把握しておくことは第一義的に重要である。しかしながら、従来の研究では、次に記す問題点があった。(1)心理的印象の計測は文献3)5)に示すように、ストップウォッチとデータシートを用いた初歩的な計測方法であった。即ち、被験者は常にデジタル・ストップウォッチを注視しながら、呈示音に耳を傾け、5秒毎にその時の呈示音から受けた心理的印象を判断し、データ・シートに記入するという操作を行っていた。一方呈示騒音は、レベルレコーダのチャートに記録していた。従って、(2)得られた実測データには、人間の主観的判断の“あいまいさ”の他に、目視による判断時刻の誤差、チャートから5秒毎の呈示音レベル値を読み取る誤差、等の計測誤差も含まれて変動していたと思われる。(3)ストップウォッチを注視しながらの判断や操作は、それ程長時間の測定でなくても、被験者に大きな負担と精神的疲労を与えていたと思われる(従来の計測法では、判断や操作に馴れ戸惑うことのないよう実験実施の前日に数時間の練習を予め積んでおく必要があった)。(4)文献3)5)の付録に示すように、人の直観に頼り、試行錯誤的にメンバーシップ関数を推定していた。

一般に、人間の心理的印象は個人差があるのは勿論、その人の置かれている時間・空間的因子等の影響を受けると考えられる。このような問題を調査して定量化する上でも、感性情報を表現するメンバーシップ関数を容易に計測できるシステムの開発が重要である。本論文は、このような要請から、上記問題点を改善するメンバーシップ関数計測システムを提案するものである。具体的には、判断時刻の管理と伝達、心理的印象及びその時刻の呈示騒音のレベルデータの計測等すべてをノー

ト型パソコンで制御し、計測データを自動集積するシステムとすることにより上記問題点(1)(2)を改善する。このことによって被験者の直接的作業量(負担)を軽減し、何より被験者が騒音に対する心理的判断作業に集中できるようにする。結果的に精神的疲労(上記問題点(3))が緩和されよう。更に、新たなメンバーシップ関数推定手順を開発して、問題点(4)を解決する。本システムの有効性を検討するために、4日間にわたる被験者4人の計測例を示す。この結果、時間的にかなり安定してメンバーシップ関数を計測できること、各被験者間の個人差をかなりはっきりと把握できることを明かにする。最後に、従来発表されているメンバーシップ関数推定手法を概括し、本手法との差異を明らかにした上で、本手法の特色を明らかにする。その結果、本推定手順は適用範囲が広く、実用的手法であることを示す。

2. システムの概要

心理的印象の計測状況を図2に示す。文献6)のカテゴリー連続判断法にならい心理的印象を計測する。まず、DAT(Digital Audio Tape)に予め収

図2 心理的印象の計測状況
(○：騒音計，▲：被験者)

録した騒音を増幅器(Amp.)を通し、スピーカーSより被験者に連続して呈示する。一方、ノート型パソコンN.P.は、 T 秒毎に ΔT 秒間、図3に示す押しボタンスイッチ・ボックスのREADYランプを点灯させる(本実験では、呈示音として道路騒音を採用し、 $T=5[s]$ 、 $\Delta T=1[s]$ と設定している)。被験者は、このとき(READYランプ点灯時)の呈示音から受けた印象を1, ..., 7の押しボタンスイッチで応答する。1, ..., 7の押しボタンには予め“非常に静か”(F_1)、..., “非常に騒々しい”(F_7)の印象を割り当てている。N.P.は第 k ($k=1, 2, \dots$)時点での被験者 j の応答 $F(j, k)=F_i$ ($i=1, \dots, 7$)と、このとき(READYランプ点灯時)の呈示騒音レベル値 $L(k)$ をN.P.内に取り込む(詳細には、READYランプ点灯時間(1秒間)を0.1秒毎にサンプリングし、平均値を $L(k)$ としている)。このような手続きを K [回]繰り返した後、計測は終了し、 $\{L(k), F(j, k) | k=1, \dots, K\}$ をファイルとしてN.P.のフロッピーディスクに記録する。

図4はシステムを制御するN.P.の画面である。ファンクション・キーにより各種の処理が実行される。例えば、6 PROGには次章で示す推定手順に基づくメンバーシップ関数推定ソフトが登録されている。

図3 押しボタンスイッチ・ボックス

音環境評価システム

試験名	[]		
収録ファイル名	[]	Disk残容量	[] byte

測定条件				
判定スイッチ数	開始時間	インターバル	測定回数	サンプリングタイム

現在日時

騒音計		評価判定スイッチ状態	
レベル	[] dB [] LU	①	②
CAL	[] dB [] LU	③	④
		⑤	⑥
		⑦	⑧

1:設定 2:測定 3 4:CAL校 5:DISK 6:PROG 7:YON1 8:FILE 9:OPT 0:終了

図4 ノート型パソコンの制御画面

3. メンバーシップ関数推定手順

2.の計測結果 $\{L(k), F(j, k) | k=1, \dots, K\}$ を用いて、印象 F_i ($i=1, \dots, 7$)の騒音レベル L に対する相対度数分布 $R_{F_i}(L)$ ($i=1, \dots, 7$)が得られる。この $R_{F_i}(L)$ は呈示騒音レベル L に対して印象 F_i を判断した度合いと考えることができるから、 $R_{F_i}(L)$ に基づき合理的なメンバーシップ関数 $\mu_{F_i}(L)$ を推定することが出来よう。

図5は、 $R_{F_i}(L)$ の一例である(図5は、4.計測例での実測結果の一部である。実測状況等の詳細は4.を参照)。実測結果であることから、 $R_{F_i}(L)$ はかなり変動してはいるが、大略的傾向として単峰性即ち凸性を示していることが分かる。一方、この傾向は本論文で設定している人間の騒音に対する静かさ-騒々しさに関する7カテゴリー F_i ($i=1, \dots, 7$)が順序尺度となることを示す自然な結果と解釈できる。また図5は、7カテゴリー択一の相対度数分布である。従って、本論文で推定を試みる $\mu_{F_i}(L)$ には次の2つの条件を設定することが合理的である⁵⁾。

(A) 直交性:

$$\sum_{i=1}^7 \mu_{F_i}(L) = 1 \quad (1)$$

($L \in D_L = [L_{\min}, L_{\max}]$, $L_{\min}, L_{\max}$:
呈示音の最小値, 最大値)

(B) 凸性:

$$\begin{aligned} \mu_{F_i}(\lambda L_1 + (1-\lambda)L_2) \\ \geq \mu_{F_i}(L_1) \wedge \mu_{F_i}(L_2) \\ (\forall L_1, L_2 \in D_L, \forall \lambda \in [0, 1]) \end{aligned} \quad (2)$$

図5 騒音レベルに対する各印象の相対度数分布の実測例

本論文では、図5に示すようなかなり変動している $R_{Fi}(L)$ からでも、上記(A)(B)の2つの条件を同時に満足し、しかも $R_{Fi}(L)$ の変動傾向を捉えるメンバーシップ関数推定手法を分解原理に基づき提案する*1。即ち、本論文で扱っている所属度は、各カテゴリーのメンバーシップ関数が直交かつ凸となるよう、実験データより得られる相対度数分布をスムージングするものである。以下に一手順を記す。尚、以下の考察では簡単化のため、 L は1[dB(A)]毎の整数の階級値を取るものとする。

Step 1: 呈示騒音レベルデータの最小値 $L_{\min}$ 、最大値 $L_{\max}$ を見つける。 α カット集合を作る上で、きざみ $\Delta = 1/N$ を設定する。尚、DATからの呈示騒音レベル L はランダムに変動するために $D_L = [L_{\min}, L_{\max}]$ 区間内で出現しない階級レベル L_d が生ずることもある。このような場合は $R_{Fi}(L_d) = 0 (i=1, \dots, 7)$ とデータ欠損が生じ不都合であるので、次のように補間しておく。

$$R_{Fi}(L_d) = \{ (L_{nd2} - L_d) \cdot R_{Fi}(L_{nd1}) + (L_d - L_{nd1}) \cdot R_{Fi}(L_{nd2}) \} / (L_{nd2} - L_{nd1})$$

(L_{nd1}, L_{nd2} : データ欠損のない $L_{nd1} < L_d < L_{nd2}$ を満たす L_d に最近の階級値)

Step 2: $R_{F123}(L) = R_{F1}(L) + R_{F2}(L) + R_{F3}(L)$ を用いて、次の区間集合 $A_{123}^{(n)} (n=1, 2, \dots, N)$ を算定する。

$$A_{123}^{(n)} = [L_{\min}, L_{\min} + \Delta L_{123}^{(n)}]$$

ここに、

$$\begin{aligned} \Delta L_{123}^{(n)} &= (S_{123}^{(n-1)} - S_{123}^{(n)}) / \Delta \\ S_{123}^{(n)} &= \int_{R_{F123}(L) \geq n \cdot \Delta} (R_{F123}(L) - n \cdot \Delta) dL \\ S_{123}^{(0)} &= \int_{R_{F123}(L) \geq 0} R_{F123}(L) dL \end{aligned}$$

である。

図6に $S_{123}^{(n)}$ と $\Delta L_{123}^{(n)}$ の意味を模式的に示す。更に、特性関数 $\chi_{123}^{(n)}(L) (n=1, 2, \dots, N)$ を定義し、分解原理に基づき $\mu_{123}(L)$ を次のように算定する。

図6 $A_{123}^{(n)}$ と $\Delta L_{123}^{(n)}$ の図的意味

$$\chi_{123}^{(n)}(L) = 1 (L \in A_{123}^{(n)}), = 0 (L \notin A_{123}^{(n)})$$

$$\mu_{F123}(L) = \bigvee_{n=1}^N [n \cdot \Delta \wedge \chi_{123}^{(n)}(L)]$$

$A_{123}^{(n)}$ は実験的に推定した $\mu_{123}(L)$ の $\alpha (= n \cdot \Delta)$ カット集合であると考えられる。

Step 3: Step 2 と同様に $R_{F567}(L) = R_{F5}(L) + R_{F6}(L) + R_{F7}(L)$ を用いて、以下の諸量を算定する。

$$\begin{aligned} A_{567}^{(n)}(L) &= [L_{\max} - \Delta L_{567}^{(n)}, L_{\max}] \\ \Delta L_{567}^{(n)} &= (S_{567}^{(n-1)} - S_{567}^{(n)}) / \Delta \\ &= \int_{R_{F567}(L) \geq n \cdot \Delta} (R_{F567}(L) - n \cdot \Delta) dL \\ S_{567}^{(0)} &= \int_{R_{F567}(L) \geq 0} R_{F567}(L) dL \\ \chi_{567}^{(n)}(L) &= 1 (L \in A_{567}^{(n)}(L)), \\ &= 0 (L \notin A_{567}^{(n)}(L)) \\ \mu_{F567}(L) &= \bigvee_{n=1}^N [n \cdot \Delta \wedge \chi_{567}^{(n)}(L)] \\ &\quad (n=1, 2, \dots, N) \end{aligned}$$

Step 4: 直交性((1)式)に基づき次式により $\mu_{F4}(L)$ を推定する。

$$\mu_{F4}(L) = 1 - \mu_{F123}(L) - \mu_{F567}(L)$$

* 1 本論文での7カテゴリーのメンバーシップ関数は、他のカテゴリーとの相対関係、即ち比較を通して求められるために、カテゴリーの組み合わせに依存していることには注意

Step 5: Step 2, Step 3 と同様に $R_{F1}(L)$, $R_{F3}(L)$ を用いて $\chi_1^{(n)}(L)$, $\chi_3^{(n)}(L)$ を定義し, 次式により近似的に $\mu_{F1}(L)$, $\mu_{F3}(L)$ を推定する。

$$\mu_{F1}(L) = \bigvee_{n=1}^N [n \cdot \Delta \wedge \chi_1^{(n)}(L)]$$

$$\mu_{F3}(L) = \bigvee_{n=1}^N [n \cdot \Delta \wedge \chi_3^{(n)}(L)]$$

Step 6: Step 4 と同様に $\mu_{F2}(L)$ を次式で算定する。

$$\mu_{F2}(L) = \mu_{F123}(L) - \mu_{F1}(L) - \mu_{F3}(L)$$

Step 7: Step 5, Step 6 と同様に, $\mu_{F5}(L)$, $\mu_{F6}(L)$, $\mu_{F7}(L)$ を推定する。

$$\mu_{F5}(L) = \bigvee_{n=1}^N [n \cdot \Delta \wedge \chi_5^{(n)}(L)]$$

$$\mu_{F7}(L) = \bigvee_{n=1}^N [n \cdot \Delta \wedge \chi_7^{(n)}(L)]$$

$$\mu_{F6}(L) = \mu_{F567}(L) - \mu_{F5}(L) - \mu_{F7}(L)$$

Step 8: $\mu_{Fi}(L)$ ($i=1, \dots, 7$) が凸性を満たすならば, 推定終了 (Step 1 から Step 7 までの手順, Step 10 で推定した $\mu_{Fi}(L)$ は直交性 (1) 式を満たしていることに注意)。凸性を満たさないならば, Step 9 以下へ行く。

Step 9: $\mu_{Fi}(L_{\max}^{(i)}) \geq \mu_{Fi}(L)$ を満たす $L_{\max}^{(i)}$ を見つける ($i=1, \dots, 7$)。

$L \leq L_{\max}^{(i)}$ の $\mu_{Fi}(L)$ に対して,

$$\dots \leq \mu_{Fi}(L_{\max}^{(i)} - 2) \leq \mu_{Fi}(L_{\max}^{(i)} - 1) \leq \mu_{Fi}(L_{\max}^{(i)})$$

$L \geq L_{\max}^{(i)}$ の $\mu_{Fi}(L)$ に対して,

$$\mu_{Fi}(L_{\max}^{(i)}) \geq \mu_{Fi}(L_{\max}^{(i)} + 1) \geq \mu_{Fi}(L_{\max}^{(i)} + 2) \geq \dots$$

となるよう $\mu_{Fi}(L)$ の値を並べ変え, 凸化を図る。

Step 10: 直交性を満たさない $\mu_{Fi}(L)$ に対して, $\mu_{Fi}(L)$ を再び,

$$\mu_{Fi}(L) / \left(\sum_{i=1}^7 \mu_{Fi}(L) \right) \quad (i=1, \dots, 7) \text{ と算定し直し, 直交化を図る。Step 8 へ行く。}$$

以上の手順をフローチャート図 7 に示す。Step 9, Step 10 の修正は Step 1 から Step 7 までの手順で $R_{Fi}(L)$ から推定した $\mu_{Fi}(L)$ の面積率, 重心位置をあまり変動させず, 条件式 (1) (2) を満足させる一手順となっている。この検証は次章で

示す。また, Step 8, Step 9, Step 10 では無限ループに入る可能性がある。ループから抜けでる数学的条件は現在不明であるが, これまでの適用例ではいずれも 6~7 回以内で推定終了となっている。尚, 本推定手法は簡単化のために L を整数として離散値での $\mu_{Fi}(L)$ を推定した。実数値 L での $\mu_{Fi}(L)$ を必要とする場合には, 離散値でのメンバーシップ関数値を線形補間して使用するのも一法である。詳細を付録に示した。以下の結果は全て本手順と付録に従って推定したものである。

図 7 メンバーシップ関数推定手順のフローチャート

本推定手順の原理的検証を行うために、予め設定した三角型のメンバーシップ関数を $R_{F_i}(L)$ データ ($i=1, \dots, 7$) として与え、推定した結果を図8に示す。(a)は $N=5$ ($\Delta=1/N$) とした場合であるが、 Δ が粗く推定誤差が生じている。 $N=10$ として推定した(b)は元の三角型メンバーシップ関数を復元していることが分かる。

図8 推定手順の原理的検証例
(三角型メンバーシップ関数)
(a): $N=5$, (b): $N=10$ (—●—: 推定結果,
-----: 相対度数分布)

4. 計測例

2.の計測システム及び3.で提案したメンバーシップ関数の推定手順の有効性を検証するため、日中室内心理実験を行った。1日の実験状況は次の通りである。

(A)実験室: 7.3[m] (縦) × 12.1[m] (横) × 2.6[m] (高さ) 程度の容積を有する教室。残響時間は、中心周波数: 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz の 1/3 オクターブバンド帯域制限白色雑音に対して、それぞれ 1.8[s], 1.8[s], 1.7[s] 程度 ((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)。スピーカーから被験者までの距離 $r=4$ [m]。

(B)被験者: 聴力正常な(入学時、並びに就職試験時の身体検査において、聴力障害等は認められない)20才の男子学生4名。

(C)刺激騒音: 変動騒音の代表例として、道路交通騒音を取り上げた。具体的には、文献5)の心理実験で用いたものである。アンプのボリュームを調整・変更し、いくつかのレベル変動域を作成して呈示した騒音の変動分布の1例を図9(a)に示す。呈示はモノラルである。

(D)測定法: 1つの騒音レベル分布について $T=5$ [s], $\Delta T=1$ [s] と設定し、5分間連続して呈示した。呈示した騒音レベル分布は合計23種類で、順序をランダムに変更して計測した。即ち、延べ計測時間は115分($=5 \times 23$)である。図9(b)はこの全呈示騒音(115分間)のレベル分布である。

被験者には教示—押しボタンスイッチボックスのREADYランプは5秒毎に1秒間点灯する。こ

図9 呈示騒音のレベル分布
(a): アンプのボリュームにより変更した例
(—●—: 度数分布)
(b): 全呈示騒音のレベル分布 (—●—: 度数分布)

の READY ランプ点灯時の呈示騒音から受けた印象を 1 から 7 の押しボタンスイッチで応答せよ。押し間違えたときは、次の READY ランプが点灯するまでであれば変更可能である一を与えた。尚、READY ランプ点灯時から被験者が判断ボタンを押すまでの時間に関する統計量は計測していない。

(E)使用機材：スピーカー(ONKYO 製, MONITOR 2001, 周波数特性: 60[Hz]~14[KHz]でほぼフラット), アンプ(SONY 製, TA-F 555 ESJ), DAT(SONY 製, TCD-D 7), レベルレコーダ(RION 製, LR-04), 騒音計(RION 製, NL-14), ノート型パソコン(NEC 製, 98 noteNA)

このような心理実験を 4 日間連続して行った。尚, 23 種類の騒音の呈示順序はその日毎に異なっ

ているが, 全呈示騒音のレベル分布(図 9(b))は 4 日間同じである。先に示した図 5 は被験者 A の第 1 日目の $R_{Fi}(L)$ ($i=1, \dots, 7$) であった。この計測結果を用いて本推定手順に基づき推定した $\mu_{Fi}(L)$ ($i=3, 4, 5$) を図 10 に示す(3 章での N に関する考察と計算機の記憶容量・計算時間等を考慮して, 本例も含めて以下の推定例は全て $N=50$ を用いている)。いずれの場合もかなり変動のある $R_{Fi}(L)$ からその特徴を捉えて推定している。推定した全てのメンバーシップ関数を図 11 に示す。また表 1 は同 $R_{Fi}(L)$ と $\mu_{Fi}(L)$ の面積率 $s0i$ (パーセント表示), 重心 $S1i$, 広がり $S2i$ を下記の式より算定し, 数値的に比較したものである。

$$s0i = S0i / \sum_{i=1}^7 S0i, \quad (S0i = \int_{D_L} S_i(L) dL)$$

$$S1i = (\int_{D_L} L \cdot S_i(L) dL) / S0i$$

$$S2i = [(\int_{D_L} (L - S1i)^2 \cdot S_i(L) dL) / S0i]^{1/2}$$

図10 相対度数分布と推定したメンバーシップ関数例(被験者 A)1,

(a): $\mu_{F3}(L)$, (b): $\mu_{F4}(L)$,
(c): $\mu_{F5}(L)$ (—●—: 推定結果, - - - - -: 相対度数分布)

図11 推定したメンバーシップ関数(被験者 A)

表1 $R_{Fi}(L)$ (上段) と $\mu_{Fi}(L)$ (下段) の比較

	$s0i$ [%]	$S1i$ [dB(A)]	$S2i$ [dB(A)]
$F1$	8.6	39.2	3.5
	8.5	39.0	3.2
$F2$	9.7	44.4	4.6
	9.8	44.3	4.4
$F3$	14.1	49.6	6.1
	14.1	49.5	5.8
$F4$	11.4	57.3	6.5
	11.4	57.3	6.4
$F5$	13.6	62.7	7.0
	13.6	62.7	6.6
$F6$	16.5	70.6	7.2
	16.4	70.7	7.0
$F7$	26.1	80.9	6.3
	26.1	81.0	6.1

但し, $S_i(L) = R_{Fi}(L)$ あるいは $S_i(L) = \mu_{Fi}(L)$ である。

本推定手法の性質から, 面積率・重心のパラメータを殆ど変化させていないことが分かる。

図 12, 13, 14 は, 同様に第一日目の $R_{Fi}(L)$ ($i = 1, \dots, 7$) に基づいて推定した他の 3 名のメンバーシップ関数である。この中で特徴的なのは, 被験者 B (図 12) のメンバーシップ関数である。 $\mu_{Fi}(L)$ ($i = 4, 5, 6, 7$) が呈示騒音レベル領域 D_L を覆って

図12 推定したメンバーシップ関数(被験者 B)

図13 推定したメンバーシップ関数(被験者 C)

図14 推定したメンバーシップ関数(被験者 D)

おり, B はかなり騒音に対して神経質ではないかと思われることである。このように計測した $\mu_{Fi}(L)$ より各人間の個性をある程度推測することが出来る。

図 15 は被験者 A の 4 日間計測したメンバーシップ関数を $s0i, S1i, S2i$ ($i = 1, \dots, 7$) で評価し, ヒストグラムにより計測日毎の比較を示したものである。同様に, 図 16, 図 17, 図 18 はそれぞれ被験者 B, 被験者 C, 被験者 D のものである。ここで, 被験者 B の 2 日目, 3 日目の $S11, S21$ が現れていないのは, 同日の $s01$ が 0 [%] であったことによる。一般に, 心理的実験は物理的実験とは異なり, 再現性が保証されているわけではない。

図15 推定した4日間のメンバーシップ関数のパラメータ ($s0i, S1i, S2i$) による比較(被験者 A)

図16 推定した4日間のメンバーシップ関数のパラメータ
(s0i, S1i, S2i)による比較(被験者B)

図17 推定した4日間のメンバーシップ関数のパラメータ
パラメータ

図18 推定した4日間のメンバーシップ関数のパラメータ
(s0i, S1i, S2i)による比較(被験者D)

このようなことを考え併せると、これらの図より、各被験者は4日間ほぼ一定の心理的応答を示していると思われる。従って本計測システムは、被験者4名に限っての結果であるが、かなり安定したメンバーシップ関数を計測していることが窺える。

5. メンバーシップ関数推定手法に関する考察

メンバーシップ関数を如何に設定するか、あるいは推定するかはファジィ理論の基本的問題の1つである。従来、本推定手法と同様に何らかの計測データに基づく推定法が提案されている。ここでは、これらのいくつかを以下に整理して、本手法との差異・特色等を比較検討する。

[渡辺の推定法⁷⁾

渡辺は文献7)で上記問題を次の2つのタイプ、(I)頻度データをもとにして推定する方法、(II)評定尺度法などにより直接推定する方法、に大別し両者の特質を議論している。その中で、藪本らの手法⁸⁾(タイプ(I))を引き合いに出して、ファジィ確率変数の集合平均により推定する手法(タイプ(II))を推奨している。そのモデルの大略は次の様なものである。

ファジィ確率変数の実現値 $X(\omega)$ (ω : 標本) のメンバーシップ関数を次式で与える。

$$\begin{aligned}\mu_{X(\omega)}(x) &= f(x; \theta(\omega)) \\ f &: [0, 1] \text{区間の値を取るある関数} \\ \theta &: \text{パラメータベクトル}\end{aligned}$$

θ を通常の変数として θ に関する集合平均操作により、 X の集合平均 EX を推定するものである。実際には、 θ を観測して X の標本平均を推定する。この推定量には不偏性・一致性という良い性質があり、推定誤差に関する議論が可能である。しかしながら、渡辺の手法は、適用する上で以下に記すいくつかの留意点があると思われる。

(1) 推定結果はあくまでも“集団における平均的人物”のメンバーシップ関数であることには注意を要する。4章の適用例で示したように、主観を表現するメンバーシップ関数は個人に属するものであり、集団に目を向ける必要の無い場合あるいは集団の中での個性を調査する場合には、この手法

の適用は困難であろう。

(2) “ファジィ確率変数 X が観測可能という仮定が含まれており、この仮定はかならずしも一般的とは言えない”ことである。本計測例の場合でも観測することは困難であろう。

(3) (2)の問題と関連して、本論文での適用例のような制約条件式(1)(2)を満たす一般的関数型 $f(x; \theta)$ は分かっていない。

[玉木らの推定法⁹⁾

玉木らはファジィ観測データに基づく同定手法を提案している。この手法は制約条件式(1)(2)を満たすメンバーシップ関数の推定を目的とするものである。本論文での考察対象を例にして示せば次のようなものである。

今、不規則に変動する騒音レベル L の従う確率密度関数 $p(L)$ を既知(人為的に呈示するのであれば、予め測定しておけばよい)として被験者に呈示すれば、カテゴリ $F_i (i=1, \dots, 7)$ を観測する確率 $P(F_i)$ は次式で与えられる。

$$P(F_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_{F_i}(L) p(L) dL \quad (3)$$

一般には、 $p(L)$ が既知で $P(F_i)$ を観測しても(3)式から $\mu_{F_i}(L)$ を推定することは困難である。そこで、(1)条件式(1)(2)を満たすメンバーシップ関数集合を $\mu_{F_i}(L) + \mu_{F_{i+1}}(L) = 1$ である三角型あるいは台形型メンバーシップ関数集合に絞ること。(2) F_i と F_{i+1} の境界域 $\{L | \mu_{F_i}(L) > 0 \text{ かつ } \mu_{F_{i+1}}(L) > 0\}$ での $\mu_{F_i}(L)$ と $\mu_{F_{i+1}}(L)$ を確率分配則によって定めること、を仮定して同定するものである。しかしながら、騒音に対する人間の心理的印象の判断は、かなりあいまいであり、一般には正規性を仮定した三角型あるいは台形型メンバーシップ関数を適用できないことは、本計測例で明かである。従って、玉木らの推定法を本考察対象に適用することはかなり困難であろう。

[奥田らの推定法¹⁰⁾

奥田らは文献10)のシミュレーション実験で、人間の視覚に関するファジィ観測実験を行っている。得られた実測データの頻度分布に基づき、三角型あるいは台形型で近似してメンバーシップ関

数を推定している(渡辺⁷⁾の分類法でタイプ(I))。また, Kato and Yamaguchi³⁾および加藤ら⁵⁾も同様に区分的な直線で推定することを提案している。但し, 正規性を仮定していない。この推定法は, 簡易でしばしば用いられているが, 頻度分布を主観的に近似する問題点がある。何よりも推定基準がなく頻度分布に配慮しながら主観的にメンバーシップ関数を推定するのは, 煩わしく多くの時間を要する。

以上の考察から, 本論文で提案したメンバーシップ関数推定手法には次のような特色が窺える。

(1) 初めから関数型を仮定せず, 分解原理に基づく, 直交かつ凸なメンバーシップ関数の汎用的な推定手法である。即ち, 三角型あるいは台形関数等の簡単な数学的な関数で表現できない直交かつ凸なメンバーシップ関数を実験的に同定できることが特徴である。尚, 直交かつ凸なメンバーシップ関数は, ファジィ確率問題を考察するときには本質的である。

(2) 本手法は, 渡辺⁷⁾の分類でいえばタイプ(I)に属する。渡辺によれば, タイプ(I)の方法は理論的根拠が乏しく, 例えば推定精度に関する検定が出来ないことを指摘している。一方, 渡辺の推奨する手法の問題点は考察した通りである。本手法は, それらの問題点を補う実用的手法と言える。

(3) 3章で示した推定手順は, 例えばBASIC等のプログラミング言語で容易に具体化可能である。従って, 主観を介在させることなく, 頻度分布を入力データとしてアルゴリズムに従い推定可能である。

6. あとがき

本論文では, 騒音刺激に対する個人の騒々しさに関するメンバーシップ関数の計測システムを提案した。具体的には, 本計測システムは, 呈示騒音とカテゴリー化した心理的印象を計測し制御する機能と, その計測データ, 特に相対度数分布に基づきメンバーシップ関数を推定する機能の2つから成っている。次いでこの計測システムを利用

して, 被験者4人の騒音に対する個人の感性をメンバーシップ関数により, かなり安定して推定出来ることを示した。最後に, 本メンバーシップ関数推定手法は, 従来提案されているいくつかの手法と比較して, 分解原理に基づく新たな手法であること, 適用範囲が広く実用的な手法であること等を考察した。

今後の課題として次のことが残されている。

(1) 本計測例では, 4名の被験者であった。今後, 多くの人々の騒音に対するメンバーシップ関数を計測することにより, 更に本システムの有効性を検証していくこと。

(2) 個人差・地域差に関する問題を調査して, 感性を分類して把握すること。この後, 渡辺⁷⁾の意味での集団の平均的メンバーシップ関数を推定すること。

(3) 人間の騒音刺激に対する心理的印象は様々な要因より影響を受ける。これらを調査しメンバーシップ関数に及ぼす影響を定量化すること。

(4) 騒音対策問題は物理的基準値・規制値を満足させるだけでは不十分であり, 人間の感性をも含めた音環境の評価が重要である。このような問題を考察する上で, メンバーシップ関数と人間の騒音に対する態度・姿勢との関連性を調査すること。

(5) 本論文では, 1人のメンバーシップ関数を推定するために, $T=5[s]$, $\Delta T=1[s]$ として, 1回5分の計測を23回, 延べ115分の計測時間を要した。パラメータ T , ΔT や呈示時間・呈示方法等, 呈示騒音の種類も含めて検討して, 容易で精度の良い計測法を確立していくこと。

(6) 本論文で提案した推定手順は, 分解原理に基づく直交かつ凸なメンバーシップ関数を推定する一手順である。更に, 推定の良さに関する基準を設定して, より良い推定手法への改善を計ること。

謝 辞

本研究に多大の援助を戴いた河合 崇, 木本勉, 清水池忠, 谷口直樹の4氏に深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 例えば, 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, S.Yamaguchi: “A systematical study for psychological impression caused by fluctuating random noise based on fuzzy set theory,” Journal of the 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) 加藤, 山口: “ファジィ推論による騒音の心理評価法,” 日本ファジィ学会誌, 5, 4, pp.732-744 (1993).
- 6) 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).
- 7) 渡辺: “統計的方法によるメンバーシップ関数の推定,” 日本ファジィ学会誌, 5, 4, pp.816-826 (1993).
- 8) 藪本, 宮本, 村上: “スプライン関数による確率密度推定法を用いたメンバーシップ関数の同定,” 第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.261-264 (1992).
- 9) 玉木, 金川, 太田: “ファジィ観測データに基づくメンバーシップ関数の同定,” 日本ファジィ学会誌, 5, 2, pp.308-317 (1993).
- 10) 奥田, 古殿, 浅居: “2変量ファジィ観測データに基づくモーメント推定,” 日本ファジィ学会誌, 2, 3, pp.143-155 (1990).

(1994年5月19日 受 付)
 (1994年11月25日 再 受 付)
 (1995年4月20日 再々受付)

付 録

3章の手法により整数値 L で条件式(1)(2)を満足するメンバーシップ関数 $\mu_{F_i}(L)$ ($i=1, \dots, 7$)が, 既に推定されているとする。 $[L, L+1]$ での $\mu_{F_i}(L+\alpha)$ ($0 \leq \alpha \leq 1$)を次のように推定するのも一法である。

$$\mu_{F_i}(L+\alpha) = (1-\alpha) \cdot \mu_{F_i}(L) + \alpha \cdot \mu_{F_i}(L+1) \quad (\text{A-1})$$

$\mu_{F_i}(L+\alpha)$ は(2)式(凸性)を満足し,

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^7 \mu_{F_i}(L+\alpha) &= (1-\alpha) \cdot \sum_{i=1}^7 \mu_{F_i}(L) \\ &+ \alpha \cdot \sum_{i=1}^7 \mu_{F_i}(L+1) = 1 \end{aligned}$$

と(1)式(直交性)を満足している。従って, (A-1)式によって, $[L_{\min}, L_{\max}]$ で条件式(1)(2)を満足するメンバーシップ関数の推定が可能となる。

[問い合わせ先]

〒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

TEL: 0823-73-8467

FAX: 0823-73-8474

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, 現在助教授, 京都大学博士(工学), 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.

老松 建成 (おいまつ けんせい)

海上保安大学校電子回路学講座

1969年 海上保安大学校(通信工学専攻)卒業, '73年 電気通信大学大学院修士課程(電子工学専攻)修了, '73年 海上保安大学校助手, '83年 同助教授, '90年 同教授, 現在に至る, 主に, 環境騒音の評価, 水中可聴音の評価等の研究に従事, 電子情報通信学会, 日本音響学会, 海洋音響学会会員.

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

1965年 福井大学工学部応用物理学卒業, 1967年 同大学院修士課程修了, 同年 同大学工学部助手, 1969年 広島大学工学部助手, 1973年 同大学工学部講師, 1978年 同大学工学部助教授, 1984年 海上保安大学校教授, 1992年 山口大学工学部教授, 工学博士(京都大学), 確率的信号理論, 環境騒音の統計解析・予測・評価, 水中可聴音場の解析などの研究に従事, 日本音響学会, 海洋音響学会, 電子情報通信学会などの各会員.

Developing a System for Measuring the Membership Functions of Psychological Impressions to Acoustic Noise

by

Yuichi KATO, Shizuma YAMAGUCHI and Kensei OIMATSU

Abstract :

Up to now, the psychological impression to acoustic noise by use of fuzzy set theory has been quantitatively studied from the viewpoint that the psychological impression as judged by human beings is a fuzzy event. The membership functions of categorized impression on the noise level universe in the studies played an important role in the discussion of the quantitative relationship between the noise as the objective input and impression as the subjective output. However, this being the beginning stage of the studies the method used to estimate the membership function was very primitive. At the next stage, the system for measuring impression to the noise easily and effectively, and for estimating the membership function, is developed for the purpose of investigating individuality of response to the noise, changes of the function by various kinds of factor and so on. The validity and usefulness of the system are confirmed by applying it to the actual measurement for the functions of four subjects. Finally, several methods for estimating the function proposed before by other researchers are summarized and the differences between the present method and previous ones, and the features unique to the present method, are discussed. It is shown from the discussion that the proposed method is a new one based on the decomposition theorem, and a practical one with a wide application based on a small number of assumptions.

Noisiness, Calmness, Individuality, Decomposition theorem

Contact Address : Yuichi KATO

Kure Technical College

2-2-11 Aga-minami, Kure city, 737

TEL : 0823-73-8467

FAX : 0823-73-8474