補聴器の主観的評価について ——ファジィ測度・ファジィ積分を用いた解析——

大阪大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：松永 亨教授）

林 治 博

THE ANALYSIS OF SUBJECTIVE EVALUATIONS FOR HEARING AIDS USING FUZZY MEASURE AND FUZZY INTEGRAL

HARUHIRO HAYASHI, M.D.

Department of Otolaryngology, Osaka University, Osaka

The important items of subjective estimations were investigated for hearing aid users.

In this study, data of subjective evaluations were gathered from 166 peoples who have used a hearing aid for more than six months. Four principal factors in the subjective evaluations were found by factor analysis. Their four factors were the factor regarding loudness and noise ($\{S'_1\}$), the factor regarding nature of sound and speech ($\{S'_2\}$), the factor regarding feeling of fullness of sound and speech ($\{S'_3\}$), and the factor regarding feeling of wear and so on ($\{S'_4\}$).

The model of fuzzy measure and fuzzy integral was applied to the result in order to make a mathematical model, and fifteen fuzzy measures were evaluated. Moreover, the Shapley values of four factors by fifteen fuzzy measures were solved.

As a consequence, hearing aid users attach great importance to nature of sound and speech when they select their hearing aids.

Key words: 補聴器, 主観的評価, ファジィ, Shapley 値, 因子分析

A95-0015-20588

I. はじめに

従来、補聴器のフィッティングや評価にはいくつかの方法が提案されている。フィッティング法として、聴力レベルより数値的に求める Berger 法¹⁾, half-gain rule²⁾, NAL 法³⁾, POGO 法等⁴⁾があり、語音を比較検討する Carhart 法⁵⁾⁶⁾も提唱されており、また適合した補聴器の評価に関しても、種々の質的評価^{7)~9)}や ME 法¹⁰⁾¹¹⁾, 異聴地図を用いた方法¹²⁾, ノイズインパルス聴力検査法¹³⁾なども提案されているが、いまだどの方法が最良かは不明である。

そして上記のいずれかの方法により、補聴器をフィッティングしても、装用者本人の好みや意向に沿わなければ、そのフィッティングが成功したとは言い難い。つまり、最終的な補聴器の評価は、その装用者である

患者本人の意志決定にかかっているのである。

一方、人間はある対象に対して、いろんな情報を主観的に評価・統合し、それらを判断、評価、意志決定をする。ところが人間の評価・統合には常にあいまいさが伴っており、多くの場合加法性が満たされておらず、この加法性という公理が主観的判断を性格づけるものとしてはきびしすぎるとの指摘もある¹⁴⁾。

1972年菅野は、必ずしも加法性を持たない、確率測度を一般化したファジィ測度を提案した¹⁵⁾。

今回の研究は、補聴器装用者が補聴器の主観的評価に関して、どのような事柄を重要視し、どのように補聴器の総合評価を決定しているかを知る目的で、アンケート調査を行い、その評価・統合のあいまいさを扱う手法として、ファジィ測度・ファジィ積分を用い

て分析した¹⁶⁾¹⁷⁾。分析には、質問項目の分類、評価モデルの構造決定のための因子分析、さらに求めたファジィ測度に対して情報因子間の重要度を表わす指標としてゲーム理論で用いられる Shapley 値を用いて考察した。

II. 方 法

1. 対象

1986年11月から1989年12月までに大阪大学耳鼻咽喉科補聴器外来にて補聴器フィッティングを行った255名の内、現在すでに補聴器を6カ月以上使用している患者に対して郵送によるアンケート調査を行った。アンケートは自由記名とした。住所不明例や死亡例、補聴器を現在ほとんど使用していない例を除いた168例が有効回答であるが、さらに総合評価を不明と回答した2例を除いた166例を分析対象とした。

2. アンケート内容

アンケート内容は表1に示す。回答は6段階評価で回答してもらったが、できるだけ回答を間隔尺度に近いものとするため、副詞として表1のように「非常に」、「かなり」、「多少」、「すこし」、「まったく」、あるいは「いつも」、「しばしば」、「多少」、「ときどき」、「まったく」の語群を使用した。

3. 解析方法

1) 因子分析

各質問項目に対する回答を1から5に点数化した。例えば質問(1)の回答では、「非常にうるさい」=1点、「かなりうるさい」=2点、「多少うるさい」=3点、「すこしうるさい」=4点、「まったくうるさくない」=5点、というように、補聴器装用にとって、より大きな欠点と考えられる回答項目から1より順に点数をつけた。質問項目について「わからない(不明)」(=欠損値)との回答に対してはリストワイズ除去は行わず、欠損値を持つケースを除いた平均値で充当した。既述のように、総合評価が欠損値の場合はその症例を分析対象例から除外した。

これらを医学統計解析ソフト NAP (医学書院) Ver. 2 の因子分析プログラム PFA を用いて、質問項目を分類し、評価モデルの構造を決定した。なお、各点数化された変数は、平均値=0, 分散=1に正規化して分析に使用された¹⁸⁾。

2) ファジィ測度とファジィ積分

数学モデルとして菅野の提案したファジィ測度・ファジィ積分を用いた。

ファジィ測度の定義は、ある集合 $X=\{x\}$ において、 X の任意の部分集合 A (A はクリスプ集合) を実数区間 $[0,1]$ 内の実数値に対応づける関数 g で、次の2つの性質をもつものをファジィ測度という^{14)19)~21)}。

$$(1) \quad g(\phi)=0, \quad g(X)=1$$

$$(2) \quad A \subset B \text{ ならば } g(A) \leq g(B)$$

なお、(1)を有界性、(2)を単調性というが、(1)はあまり重要ではない。

ファジィ測度同定には、森らの開発した Choquet 積分 (ファジィ積分) によるモデル化を用いたファジィ測度同定アルゴリズム (FIA) にて分析した²²⁾。

FIA は図1のように、4つの因子から合成したモデルの出力としての Choquet 積分値 ($\bar{z}$) と、患者自身が回答した補聴器の総合評価としての実測値 (z) との差を誤差 (e) として、その大きさに従ってパラメーターを調整してゆくものである。

$$\text{誤差} \quad e = z - \bar{z}$$

$$\text{Choquet 積分} \quad z = (C) \int_K h(s_i) dg$$

$h(s_i)$ は各因子 s_i に対して評価値を与える関数である²³⁾。

収束条件は、すべてのデータに対して修正した後のファジィ測度が、修正前の測度とほとんど同じであったならば、つまりその前後の測度の差が 10^{-5} 以下であれば収束したと判定した。なお、 $h(s_i)$ は、因子分析に際して行ったアンケート回答の点数化したものを、さらに以下のようなロジスティック関数 $y(x)$ にて、区間 $[0,1]$ に定量化した。(以下、ロジ化と略す)

$$y(x) = \frac{1}{1 + \text{EXP}(-x + 2.5)}$$

また同じく、区間 $[0,1]$ に $y(x) = x/5$ により、直線

図1 Fuzzy measure Identification Algorithm (森, 室状²²⁾より) z は実測値, つまり補聴器装用者が行った総合評価値, $\bar{z}$ は各因子から Choquet 積分モデルで合成した値であり, その差 e によりファジィ測度を修正してゆく。

表1 補聴器アンケート内容

1) まわりの雑音について、うるさいですか。 a. 非常にうるさい b. かなりうるさい c. 多少うるさい d. すこしうるさい e. まったくうるさくない f. わからない(不明) 2) ことばが、はっきりわかりますか。 a. 非常にはっきりする b. かなりはっきりする c. 多少はっきりする d. すこしはっきりする e. まったくはっきりしない f. わからない(不明) 3) 大きな音が、耳や頭にひびきますか。 a. 非常にひびく b. かなりひびく c. 多少ひびく d. すこしひびく e. まったくひびかない f. わからない(不明) 4) よく、ピーピーと音がしますか。 a. いつもする b. しばしばする c. 多少する d. ときどきする e. まったくしない f. わからない(不明) 5) まわりの音や他人の言葉が、自然に聞こえますか。 a. 非常に自然だ b. かなり自然だ c. 多少自然だ d. すこし自然だ e. まったく不自然だ f. わからない(不明) 6) 自分の声が、自然に聞こえますか。 a. 非常に自然だ b. かなり自然だ c. 多少自然だ d. すこし自然だ e. まったく不自然だ f. わからない(不明) 7) まわりの音や他人の声が、こもって聞こえますか。 a. 非常にこもって聞こえる b. かなりこもって聞こえる c. 多少こもって聞こえる d. すこしこもって聞こえる e. まったくこもらない f. わからない(不明)	8) 自分の声が、こもって聞こえますか。 a. 非常にこもって聞こえる b. かなりこもって聞こえる c. 多少こもって聞こえる d. すこしこもって聞こえる e. まったくこもらない f. わからない(不明) 9) 運動する時や動いた時に、補聴器が落ちやすいですか。 a. いつも落ちる b. しばしば落ちる c. 多少落ちる d. ときどき落ちる e. まったく落ちない f. わからない(不明) 10) 補聴器は、「目立つのでかっこう悪い」と思いますか。 a. 非常にかっこう悪いと思う b. かなりかっこう悪いと思う c. 多少かっこう悪いと思う d. すこしかっこう悪いと思う e. まったくそうは思わない f. わからない(不明) 11) 耳せんやイヤーマールドに違和感(異物感)がありますか。 a. 非常にある b. かなりある c. 多少ある d. すこしある e. まったくない f. わからない(不明) 12) 相手の話し声やまわりの音が、大きくないですか。 a. 非常に大きい b. かなり大きい c. 多少大きい d. すこし大きい e. まったく大きくない f. わからない(不明) 13) 総合的にみて、今の補聴器に満足ですか。 a. 非常に満足 b. かなり満足 c. 多少満足(どちらとも言えない) d. すこし満足(かなり不満もある) e. まったく満足していない(非常に不満) f. わからない(不明)

的に定量化したもの（以下、リニア化と略す）も用いた。

ただし $h(s_i)$ としては因子分析の結果、因子の代表値として因子に含まれる項目の定量化された評価値の

平均 $h'(s'_i)$ を用いた。

$$\text{つまり、} h'(s'_i) = \sum_{j \in J} h(s_j) / n$$

J: 因子 $\{s'_i\}$ が含む項目番号の集合

$$|J| = n$$

表 2 アンケートの回答と項目の変数名

質問 番号	変数名	回答	例数	度数	パーセント (*は2例)
(1)	e-noise (s1)	非常にうるさい かなりうるさい 多少うるさい すこしうるさい まったくうるさい (不明) わからない (不明)	19 40 48 38 18 3	***** ***** ***** ***** ***** **	
(2)	c-speech (s2)	非常にきりする かなりきりする 多少きりする すこしきりする まったくきりしない わからない (不明)	9 51 52 42 10 2	***** ***** ***** ***** ***** *	
(3)	l-sound (s3)	非常にひびく かなりひびく 多少ひびく すこしひびく まったくひびかない わからない (不明)	24 34 50 37 20 1	***** ***** ***** ***** ***** *	
(4)	hawing (s4)	いつもしばする しばしする 多少する ときどきする まったくしない わからない (不明)	8 28 23 65 36 6	***** ***** ***** ***** ***** **	
(5)	n-sound (s5)	非常に自然だ かなり自然だ 多少自然だ すこし自然だ まったく不自然だ わからない (不明)	9 39 48 44 20 6	***** ***** ***** ***** ***** **	
(6)	n-self (s6)	非常に自然だ かなり自然だ 多少自然だ すこし自然だ まったく不自然だ わからない (不明)	9 64 35 32 19 7	***** ***** ***** ***** ***** *****	
(7)	o-sound (s7)	非常にこもって聞こえる かなりこもって聞こえる 多少こもって聞こえる すこしこもって聞こえる まったくこもらない わからない (不明)	8 23 47 34 34 20	***** ***** ***** ***** ***** *****	
(8)	o-self (s8)	非常にこもって聞こえる かなりこもって聞こえる 多少こもって聞こえる すこしこもって聞こえる まったくこもらない わからない (不明)	8 17 36 42 38 25	***** ***** ***** ***** ***** *****	
(9)	move (s9)	いつも落ちる しばしば落ちる 多少落ちる ときどき落ちる まったく落ちない わからない (不明)	3 8 7 34 94 20	** ***** ***** ***** ***** *****	
(10)	look (s10)	非常にかつこう悪いと思 う かなりかつこう悪いと思 う 多少かつこう悪いと思 う すこしかつこう悪いと思 う まったくそうは思わない わからない (不明)	14 23 29 46 50 4	***** ***** ***** ***** ***** *****	
(11)	mold (s11)	非常にある かなりある 多少ある すこしある まったくない わからない (不明)	10 28 42 48 27 11	***** ***** ***** ***** ***** *****	
(12)	loud (s12)	非常に大きい かなり大きい 多少大きい すこし大きい まったく大きくない わからない (不明)	6 15 33 55 44 13	** ***** ***** ***** ***** *****	
(13)	total (総合評価)	非常に満足 かなり満足 多少満足 (どちらとも言えない) すこし満足 (かなり不満もある) まったく満足していない (非常に不満)	9 30 70 42 15	***** ***** ***** ***** *****	

FIA のプログラムには、表計算ソフト・ロータス1-2-3 (ロータス社) のマクロ命令・関数を用いて作成した。

3) Shapley 値²³⁾²⁴⁾¹⁵⁾

1953年 Shapley により任意の n 人協力ゲームについて、各プレイヤーに対するゲームの値 ϕ_i (Shapley 値と呼ばれる) を特性関数形 (characteristic functional form) だけに基づいて算出する方法を見いだした。 n 人のプレイヤーからなる協力ゲームにおいて、プレイヤーの集合を $N = \{1, 2, \dots, n\}$ とし、 n 人の中の任意の提携が可能である時、そのゲームを表現するにあたって、次のような関数を定義する。任意の提携 S に対して、実数値 $v(S)$ を対応させる関数 v が存在して、この関数を特性関数 (characteristic function) と呼び、 $v(S)$ を提携 S のもつ提携値という。

同定したファジィ測度については、このゲーム理論で用いられる Shapley 値 $\phi(v)$ を求めて、各ファジィ測度の重要度を検討した。

x はプレイヤーの集合、 $S \subseteq 2^x$ を提携、 $v(S)$ を提携値とした特性関数形ゲーム (X, v) において、ゲーム (X, v) の Shapley 値 $\phi(v)$ は、

$$\phi(v) = \sum_{S \subseteq X} \frac{(n-s)! (s-1)!}{n!} [v(S) - v(S - \{x\})] \quad \forall x \in X$$

で表わせる。

III. 結 果

1. アンケート回答結果

各質問項目に対する変数名や各回答の例数を表 2 に示した。ほとんどの質問項目については中央に多く分布しているが、質問 (4), (6), (9), (10) に関しては偏りが見られた。回答を点数化した場合、特に質問 (9) では全体的に高得点が与えられている。

「わからない (不明)」という回答が最も多いのは、「自分の声がこもるか」という質問で、次いで「音や声がこもるか」、「補聴器が落ちやすいか」という項目で、音や声のこもりに関する質問に対しては回答しにくい、という結果であった。

2. 因子分析結果

総合評価の項目を除いた 12 項目のバリマックス回転後の因子負荷量表 3 より、固有値 1 以上という基準で共通因子数を 4 個とし、各因子を次のように解釈し、質問項目を 4 群にグループ化した。

(1) 音の大きさや雑音に関する因子 ($\{s'_1\}$)

...e-noise ($\{s_1\}$)
l-sound ($\{s_3\}$)
loud ($\{s_{12}\}$)

(2) 音や言葉の自然さに関する因子 ($\{s'_2\}$)

...c-speech ($\{s_2\}$)
n-sound ($\{s_5\}$)
n-self ($\{s_6\}$)

(3) 音や声のこもりに関する因子 ($\{s'_3\}$)

...o-sound ($\{s_7\}$)
o-self ($\{s_8\}$)

(4) 装用感等に関する因子 ($\{s'_4\}$)

...move (s_9)
look ($\{s_{10}\}$)
mold ($\{s_{11}\}$)

なお、共通性の推定値として重相関係数の 2 乗を用いたが¹⁸⁾、hawling ($\{s_4\}$) は共通性が 0.1546 と小さかったため、4 群の中には組み入れなかった。

3. 同定したファジィ測度

同定したファジィ測度は、ロジ化したもの、リニア化のものを表 4 に示した。

表 4 において、 $g(\{s'_1\})$ は、因子 $\{s'_1\}$ のみを単独で評価した時の重視度と考えられ、 $g(\{s'_1\}, \{s'_2\})$ は因子 $\{s'_1\}$ と因子 $\{s'_2\}$ の両方を評価した時の重視度と考えられる。

単独評価では因子 $\{s'_2\}$ の重視度が非常に高く、2 因子同時評価では ($\{s'_2\}, \{s'_4\}$) の時、($\{s'_1\}, \{s'_2\}$) の場合に高い重視度が与えられている。3 因子同時評価では、($\{s'_1\}, \{s'_2\}, \{s'_4\}$)、($\{s'_2\}, \{s'_3\}, \{s'_4\}$)、($\{s'_1\}, \{s'_2\}, \{s'_3\}$) の順に重視度が高い。

また、 $g(\{s'_1\}, \{s'_2\}) > g(\{s'_1\}) + g(\{s'_2\})$

$$g(\{s'_2\}, \{s'_4\}) > g(\{s'_2\}) + g(\{s'_4\})$$

となり、このことは優加法性 (相乗効果) を表し、一方 $g(\{s'_2\}, \{s'_3\})$ については、

$$g(\{s'_2\}, \{s'_3\}) < g(\{s'_2\}) + g(\{s'_3\})$$

となり、劣加法性 (相殺効果) を示した。

同様にリニア化したもののファジィ測度は、ロジ化したものとよく似た傾向であったが、2 因子同時評価の場合、($\{s'_1\}, \{s'_2\}$) と ($\{s'_2\}, \{s'_3\}$) がほぼ同じ重視度を示した。

4. Shapley 値

ファジィ測度より計算した Shapley 値は表 5 のようになり、ロジ化、リニア化ともよく似た値となった。これにより主観的な補聴器の総合評価は、大部分が、

表3 バリマックス回転後の因子負荷量
(Varimax rotated factor loading)

	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子	共通性
(1) e-noise	-0.127	-0.761	-0.130	-0.042	0.614
(2) c-speech	-0.669	0.010	-0.097	-0.119	0.471
(3) l-sound	-0.104	-0.653	-0.125	-0.160	0.478
(4) hawling	-0.087	-0.060	-0.161	-0.343	0.155
(5) n-sound	-0.841	-0.076	-0.115	-0.071	0.732
(6) n-self	-0.718	-0.227	-0.185	-0.002	0.601
(7) o-sound	-0.275	-0.254	-0.754	-0.153	0.732
(8) o-self	-0.344	-0.371	-0.524	-0.059	0.534
(9) move	-0.003	-0.007	-0.328	-0.520	0.379
(10) look	-0.005	-0.115	0.056	-0.493	0.260
(11) mold	-0.137	-0.315	0.068	-0.468	0.342
(12) loud	0.013	-0.526	-0.166	-0.278	0.382
EV	1.917	1.659	1.102	1.001	
寄与率(%)	15.974	13.823	9.180	8.345	
累積寄与率	15.974	29.797	38.977	47.323	

(EV: 因子負荷量の2乗和)

表4 同定したファジィ測度I (ロジ化)

$g(\{S'_1\})=0.002$	$g(\{S'_1\}, \{S'_2\})=0.681$	$g(\{S'_1\}, \{S'_2\}, \{S'_3\})=0.681$
$g(\{S'_2\})=0.452$	$g(\{S'_1\}, \{S'_3\})=0.010$	$g(\{S'_1\}, \{S'_2\}, \{S'_4\})=0.963$
$g(\{S'_3\})=0.009$	$g(\{S'_1\}, \{S'_4\})=0.070$	$g(\{S'_1\}, \{S'_3\}, \{S'_4\})=0.349$
$g(\{S'_4\})=0.005$	$g(\{S'_2\}, \{S'_3\})=0.457$	$g(\{S'_2\}, \{S'_3\}, \{S'_4\})=0.929$
	$g(\{S'_2\}, \{S'_4\})=0.924$	
	$g(\{S'_3\}, \{S'_4\})=0.013$	
$g(\{S'_1\}, \{S'_2\}, \{S'_3\}, \{S'_4\})=0.964$		

同定したファジィ測度II (リニア化)

$g(\{S'_1\})=0.001$	$g(\{S'_1\}, \{S'_2\})=0.450$	$g(\{S'_1\}, \{S'_2\}, \{S'_3\})=0.545$
$g(\{S'_2\})=0.450$	$g(\{S'_1\}, \{S'_3\})=0.012$	$g(\{S'_1\}, \{S'_2\}, \{S'_4\})=1.017$
$g(\{S'_3\})=0.010$	$g(\{S'_1\}, \{S'_4\})=0.127$	$g(\{S'_1\}, \{S'_3\}, \{S'_4\})=0.134$
$g(\{S'_4\})=0.005$	$g(\{S'_2\}, \{S'_3\})=0.456$	$g(\{S'_2\}, \{S'_3\}, \{S'_4\})=0.604$
	$g(\{S'_2\}, \{S'_4\})=0.595$	
	$g(\{S'_3\}, \{S'_4\})=0.014$	
$g(\{S'_1\}, \{S'_2\}, \{S'_3\}, \{S'_4\})=1.018$		

表5 Shapley 値

(ロジ化)	(リニア化)
$\phi(S'_1)=0.084$	$\phi(S'_1)=0.167$
$\phi(S'_2)=0.644$	$\phi(S'_2)=0.625$
$\phi(S'_3)=0.028$	$\phi(S'_3)=0.014$
$\phi(S'_4)=0.209$	$\phi(S'_4)=0.212$

音や言葉の自然さに関する因子 ($\{s'_2\}$) により決定され、次に装用感等に関する因子 ($\{s'_4\}$)、音の大きさや雑音に関する因子 ($\{s'_1\}$) の順で重要視されていると考えられる。

5. モデル化

今回求めたファジィ測度, Shapley 値により図2のようなモデルを考えた。なお, Shapley 値の小さな $\{s'_1\}$ 因子, $\{s'_3\}$ 因子はモデル構成より除外した。

図2 補聴器の主観的評価モデル

質問項目の定量化の際用いた、ロジ化とリニア化の精度を比較するため、

$$P = \sum_{n=1}^{166} e_n^2 / 166 \quad (e_n: \text{誤差})$$

を使用した。

ロジ化の場合 $P=0.0260$ 、リニア化の場合 $P=0.0284$ となり、ロジスティック関数を用いて定量化した方が、少し優れていた。

IV. 考 察

1. アンケートについて

今回用いた補聴器の主観的評価のためのアンケートは、以前に著者らが行った補聴器アンケート²⁶⁾を参考に、補聴器装着者の不満や使用場面を想定して、補聴器を主観評価する場合の主だった項目を集めた。しかも老人でも理解しやすい言葉を選んだつもりであったが、「音や声のこもり」に関しての質問は「わからない(不明)」と答えたものが多く、今後一考を要する。「補聴器が落ちやすいか」との質問に対する「わからない(不明)」との回答の多くは、老人の場合あまり動きまわる機会がなく、実際問題として遭遇しないという意味に考えられる。

また、回答に用いる副詞を慎重に選び、因子分析を行うため、できるだけ間隔尺度に近いものにした。そのため正常者から事前にいくつかの副詞のイメージを調査した。その代表的な副詞のイメージは以下のように、「非常に」「きわめて」は80～100%、「よく…する」は70～100%、「かなり」「しばしば」は60～80%、「多少」「だいたい」は40～70%、「すこし」「ときどき」「たまに」は20～50%、「ほとんど…ない」は0～30%、「まったく」は0～20%という結果であった。今回は、その中から回答に用いる副詞として表1のようなものを選んで使用した。しかし、このようなアンケート調査では大抵の場合、回答が山型の分布になりやすく、使用した言葉だけの問題ではなく、人間の心理的傾向が働くのかもしれない。患者の補聴器に対する評価をいかにすれば正確に把握できるか、今後もアンケート内容をさらに検討し、工夫する必要がある。

補聴器の評価に関して細井らの Magnitude Estimation による総合評価法¹¹⁾が提案されている。また、広田ら²⁷⁾は補聴器の音質評価に、23組の形容詞のリストを用いて詳細に分析している。しかし補聴器未経験者や使い慣れていない者が補聴器の総合評価を数値で簡単に表現したり、逆に音質に対する細かな質問に対して答えることは難しいと思われる。

2. 因子分析について

相關論のひとつの発展である因子分析法は、もともと心理学の分野から生まれたもので教育学、経済学、医学等々にも広く応用されている多変量解析法であり、主因子分析法、バリマックス法、正準因子分析法、量尤法、セントロイド法など、いくつかの方法がある。一般的によく用いられるのは、いずれの諸変量ともできるだけ高い相関をもつ因子を求めていこうとする主因子法と、変量の異質性を前提として変量をできるだけはっきりといくつかのグループにわけようとするバリマックス法である²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾。

因子分析に使用するデータは、本来間隔尺度以上でなければならない。アンケートに対する回答というような順序尺度の場合は、数量化理論第III類を用いるのが一般的であるとされているが³¹⁾³²⁾³³⁾、今回因子分析を用いたのは以下の理由による。それは先に述べたように、回答をできるだけ間隔尺度に近いものにするため、予め特に回答項目の副詞に注意を払ったことと、今回は因子分析の結果を詳細に分析するのが目的ではなく、回答項目のグループ分けをし、大ざっぱに各項目間の関係を把握するのが目的であったためである。表には示さなかったが、相関係数行列では、同一因子内の質問項目間の相関係数は当然高かったが、それ以外の(6)n-self と(8)o-self も0.510と比較的高い相関係数であった。また「装着感等に関する因子」の3つの項目(9)、(10)、(11)は互いにそれ程高い相関係数ではなかったが、バリマックス回転後の因子負荷量より1つのグループとした。4軸まで用いた場合の累積寄与率は、あまり大きな値にはならなかった。つまり、4つの共通の因子では半分程度しか説明できないことを表しているが、これは尺度の問題と線形の仮定に問題があるのかもしれない。

3. ファジィ測度とファジィ積分について

ファジィ理論は、1965年 L.A. Zadeh³⁴⁾によって提案された概念であり、2つのファジィネスを扱うとされている。1つは、言葉の包含する意味のあいまいさをメンバーシップ関数で扱うファジィ集合、ファジィ推

論であり、現在工学系の分野で最も応用されている。もう1つは、物事の判断のあいまいさを扱うファジィ測度であり、ファジィ集合、ファジィ推論とは異なった概念である。

ファジィ測度は、菅野が提案したルベグ測度（確率測度）の拡張概念であり、ファジィ積分とはルベグ積分を拡張したファジィ測度による積分概念である。測度というのは、長さや面積など対象の属性を測るものさし（尺度）のことで、ファジィ測度は通常のものさしに課せられた条件をゆるめたものである。通常の尺度は、ある「もの」を測るとき、その「もの」を部分に分解して測り、結果を足し合わせれば全体を測ったことになるという性質（加法性）を有している。（加法的集合関数と呼ばれる）例えば、5mの長さの棒は、2mと3mと別々に測って加えても5mになる。

それに対しファジィ測度は一般に加法性を持たない、単調性のみを規定される、非加法的集合関数である³⁵⁾。つまり5mの棒を、2m、3mと別々に測定してそれらを加えると5mより大きいこと（優加法性）や逆に小さいこと（劣加法性）があるのである。

さて、いくつかの属性を持つ対象の評価問題にファジィネスの概念を用いるのは、評価対象の持つあいまいさと、評価主体の持つあいまいさという2つのあいまいさが、評価問題に存在するからである。従来の線形評価モデルは、属性の評価値に重みを付けた和であって、このモデルは属性と尺度の独立性の仮定のもとに有効であるとされている。

ファジィ測度・ファジィ積分モデルは属性や尺度の独立性を仮定しなくてもよく、この点では線形モデルより一般性がある。また、同定されたファジィ測度を観察することにより、独立性を含めた評価構造を決定することができる²¹⁾³⁵⁾。

今回、評価主体のあいまいな尺度を用いて評価プロセスのモデルを作り、評価構造の同定を試みた。実際には、このファジィ測度を同定する方法として、次のような研究がある。λ-ファジィ測度とファジィ積分を用いたもの¹⁶⁾¹⁹⁾²⁰⁾、凸2次計画問題の解法アルゴリズム（Lemke法）³⁶⁾³⁷⁾、ファジィ測度同定アルゴリズム（FIA）²²⁾²³⁾などである。FIAは誤差がLemke法よりやや大きくなるが、アルゴリズムが簡単であり、また新たなデータにもすぐに対応でき、ノイズに対しても強い利点があるため使用した。

同定したファジィ測度Ⅰ、Ⅱ表4より、因子1つずつの評価では $\{s_2\}$ 因子のみを重視し、2つの因子や

3つの因子を同時評価する際も、この $\{s_2\}$ 因子が含まれていなければほとんど重視されていないという極端な結果となった。これはFIAでは誤差を最小にしていないので、いわゆる最適化問題³⁸⁾での最小値ではなく、極小点に収束している可能性もある。単調関数の問題について、ロジスティック曲線は経済学などで成長曲線や人口増加曲線のモデルとしてしばしば使われるが³⁹⁾、ファジィ測度での単調曲線として有効かどうかは不明であり、少なくとも直線モデルよりは誤差は小さかったが、その他累積正規曲線モデルや2項誤差モデルも試みる必要があるかもしれない。

今後の課題として、扱える属性の数をさらに増やすこと、最小値に収束するためのファジィ測度同定アルゴリズムの開発が重要である。

4. Shapley 値、およびモデルについて

ゲーム理論は、経済問題に対する新しいアプローチのために創られたが、その後、政治学、数学、心理学、社会学、金融など幅広く応用されるに至っている²⁴⁾²⁵⁾。ファジィ測度は属性数により多数の測度が同定されるわけで、場合により同定した測度どうしの関係を簡便に知ることは困難である。

しかし、それぞれのファジィ測度はゲーム理論で言う提携値と見なすことができ、ある意味で各プレイヤーの配分と考えられるShapley値を求めることにより、全体の中での各因子の役割の大きさを知ることができる²³⁾。実際に求めたShapley値は各因子の重要度を一目で理解することができ、非常に有用であると考えられる。

補聴器の主観的評価についてモデル化したものは、補聴器の総合評価がほとんど2つの因子、つまり「音や言葉の自然さに関する因子($\{s_2\}$)」と「装用感等に関する因子($\{S_1\}$)」によって決まるという結果であった。これは補聴器に対する不満が、周囲の雑音に関するものが最も多いという結果²⁶⁾とは異なり、装用者が補聴器を評価する場合、あまり重要視されていない、という意外な結果であった。Killion⁴⁰⁾は補聴器使用者にとっての重要な因子の順位として、第1に「スピーチのきこえの改善」を挙げ、「音質がよい」は第4になっているが、これともかなり違った結果となった。

しかし補聴器が主に言葉を聴く器械であることを考慮すれば、患者は音や言葉の自然さを第一に考え、周囲の雑音はない方が好ましいとは思いうが補聴器評価の重要な基準にはしなかった、とも考えられる。

このようなモデルを用いることにより、補聴器を初

めてフィッティングする際、補聴器に対する具体的な質問、例えば音の自然さ等について尋ねることにより、総合評価を合成することができるのである。ただ、すべて「音や言葉の自然さ」と「装用感等」だけで補聴器のフィッティングをしてよいとは考えにくい。それは大多数の人はそのようなフィッティングでうまく行くかもしれないが、補聴器に対して個人個人の求めているものは異なっており、実際にはきめ細かなフィッティングが要求されるからである。

今後さらに補聴器のフィッティングという面からは、これから主観的評価のみではなく、客観的を加えた形での総合評価というものが、必要であろう。特に、音の自然さと音響的特性がどのように結びつくのかという研究や補聴器間の差やフィッティング間の差が的確に表われるような単音節、単語、文などを用いた検査法の開発が急務と考えられる。

V. ま と め

補聴器装用者が、どのような主観的項目を用いて総合評価を行っているかについて、アンケート調査を施行し、166例について分析した。分析にはアンケート項目のグループ化に因子分析法を用いた。それぞれの質問項目を、(1) 音の大きさや雑音に関する因子 ($\{s'_1\}$)、(2) 音や言葉の自然さに関する因子 ($\{S'_2\}$)、(3) 音や声のこもりに関する因子 ($\{S'_3\}$)、(4) 装用感等に関する因子 ($\{s'_4\}$) の4つの因子に分類した。

4つの因子と補聴器の総合評価との関係をあいまい尺度であるファジィ測度、ファジィ積分を用いて解析し、さらに同定したファジィ測度の中での重要度をみるため、ゲーム理論の1つである Shapley 値を使って補聴器の主観的評価のモデル化を行った。この結果、補聴器の総合評価は、音や言葉の自然さに関する因子 ($\{s'_2\}$) と装用感等に関する因子 ($\{s'_4\}$) によってほとんど決定されており、特に自然さに関する因子が重要であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) Berger KW, Tonisson W: Prescription of Hearing Aids: Rationale, procedure, and results. Kent, Hearld Pub. House, 1977.
- 2) 中村賢二: 補聴器の選択と調整, 大和田健次郎 編: 補聴器装用マニュアル, 医学書院, 東京, 1984, 85-119頁.
- 3) Byrne D, Dillon H: The National Acoustic Laboratories' (NAL) new procedure for selection the gain and frequency response of a hearing aid. Ear and Hearing 7(4): 257-265, 1986.
- 4) McGandless GA, Lyregaad PE: Prescription of gain/output (POGO) for hearing aids. Hearing Instrument 34: 16-21, 1983.
- 5) Carhart R: Selection of hearing aids. Arch Otolaryngol 44: 1-18, 1946.
- 6) Carhart R: Tests for selection of hearing aids. Laryngoscope 56: 780-794, 1946.
- 7) Jeffers J: Quality judgement in hearing aid selection. J Speech Hear Res 25: 259-266, 1960.
- 8) Punch JL: Quality judgements of hearing aid-processed speech and music by normal and otopathologic listeners. J Am Audit Soc 3: 179-188, 1978.
- 9) 鈴木 悟: 主観的評価による補聴器の選択法に関する研究. 昭医会誌 45: 209-216, 1985.
- 10) Harris RW, Goldstein DP: Hearing aid quality judgements in reverberant and nonreverberant environments using a magnitude estimation procedure. Audiology 24: 32-43, 1985.
- 11) 細井裕司, 神野揮久, 村田清高, 太田文彦: Magnitude Estimation による補聴器の評価法と語音聴取能. 日耳鼻 91: 703-709, 1988.
- 12) 細井裕司, 今泉 敏, 村田清高, 太田文彦: 日本語単音節の聴覚心理的類似性にもとづく補聴効果の評価. 日本音響学会資料 S85-83, H-86-9: 647-654, 1986.
- 13) 杉内智子: 補聴器フィッティングシステム TR60 による補聴器装用評価法の検討. 日耳鼻 90: 874-886, 1987.
- 14) 本多中二, 大里有生: ファジィ工学入門. 海文社, 1989, 1-14頁, 119-135頁.
- 15) 菅野道夫: Fuzzy 測度と Fuzzy 積分. 計測自動制御学会論文集 8: 218-226, 1972.
- 16) 菅野道夫: Fuzzy 測度の構成と Fuzzy 積分によるパターンの類似度評価. 計測自動制御学会論文集 9: 361-368, 1973.
- 17) Murofushi T, Sugeno M: An interpretation of Fuzzy measures and the Choquet integral as an integral with respect to a Fuzzy measure. Fuzzy Sets and Systems 29: 201-227, 1989.
- 18) 青木繁伸: 医学統計解析リファレンスマニュアル. 医学書院, 東京, 1989, 262-271頁.
- 19) 寺野寿郎, 浅居喜代治, 菅野道夫共編: ファジィシステム入門. オーム社, 東京, 1987, 17-37頁, 131-138頁.
- 20) 浅居喜代治, Negoita CV 共編: ファジィシステム理論入門. オーム社, 東京, 1978, 135-146頁.
- 21) 菅野道夫, 室伏俊明: ファジィ測度論入門 [I]. 日本

- ファジィ学会誌 Vol 2: 174-181, 1990.
- 22) 森 勉, 室伏俊明: ファジィ測度・Choquet 積分を用いた評価モデルの解析. 第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 207-212, 1989.
 - 23) 森 勉: ファジィ測度・Choquet 積分を用いた評価モデルの解析. 東京工業大学制御工学専攻修士論文, 1989.
 - 24) 鈴木光男: ゲーム理論入門. 共立全書, 東京, 1981, 161-177頁, 204-220頁.
 - 25) Davis MD 著, 桐谷 維, 森 克美共訳: ゲーム理論入門. 講談社, 東京, 1973.
 - 26) 林 治博, 松永 亨, 浅井英世, 森 望, 三好敏之: 補聴器外来患者に対するアンケート調査結果. *Audiology Japan* 32: 613-614, 1989.
 - 27) 広田栄子, 小寺一興: 補聴器の音質と電気音響的特性との関係. *Audiology Japan* 27: 144-152, 1984.
 - 28) 安本美典, 本多正久: 因子分析法. 培風館, 東京, 1981.
 - 29) 木下栄蔵: 多変量解析入門. 啓学出版, 東商, 1987.
 - 30) 芝 祐順: 因子分析. 東京大学出版会, 1988, 58-126頁, 221-223頁.
 - 31) 駒澤 勉: 多次元的データ分析の基礎. 朝倉書店, 東京, 1978.
 - 32) 柳井晴夫, 高根芳雄: 新版多変量解析法. 朝倉書店, 東京, 1985.
 - 33) 駒澤 勉, 橋口捷久: パソコン数量化分析. 朝倉書店, 東京, 1988.
 - 34) Zadeh LA: Fuzzy sets. *Inform Control* 8: 338-353, 1965.
 - 35) 菅野道夫: ファジィ測度と積分, 日本ファジィ学会関東支部編: 講習会「ファジィ理論の基礎」テキスト, 日本ファジィ学会, 横浜, 1990, 93-113頁.
 - 36) 田中和彦, 菅野道夫: カラー印刷画像の主観評価について. 第4回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 229-234, 1988.
 - 37) 小島正和: 相補性と不動点. 産業図書, 東京, 1981, 26-73頁.
 - 38) 上坂吉則: 神経回路網の力学系. (社)日本工業技術振興協会, ニューロコンピュータ研究部会編: ニューロコンピューティングの基礎理論. 海文堂, 東京, 1990, 59-97頁.
 - 39) 池田 央: 統計的推定, 伊東太郎編: 心理学的研究法. 東京大学出版会, 東京, 1973, 95-138頁.
 - 40) Killion MC: 変換器・イヤモールド・音質についての考察, 中西靖子訳: 補聴器適合の基礎. 医学書院, 東京, 1986, 77-87頁.
-
- 本稿を終えるにあたり, ご指導, ご校閲をいただきました恩師, 大阪大学耳鼻咽喉科学教室, 松永 亨教授に心より感謝いたします。また, ご助言, ご協力いただきました箕面市立病院耳鼻咽喉科部長, 三好敏之先生, 香川医科大学耳鼻咽喉科学教室助教授, 森 望先生, 吹田市民病院耳鼻咽喉科部長, 浅井英世先生, 松下電器産業中央研究所, 森 勉様に深く感謝いたします。併せてご協力頂きました教室の皆様方に感謝いたします。
- なお, 本論文の要旨は第35回日本聴覚医学会総会において発表した。
-
- (1991年 4月17日受稿 1991年 7月11日受理)
 別刷請求先 〒553 大阪市福島区福島1-1-50
 大阪大学医学部耳鼻咽喉科学教室 林 治博