【土木計画学研究・講演集 No.9 1986年10月】

交通機関選択におけるファジィ性の取扱いについて

Some Formulations for Expression of Fuzziness on Modal Split

木下栄蔵*、佐佐木綱**、秋山孝正***
By Eizou Kinoshita, Tsuna Sasaki, Takamasa Akiyama

Fuzzy set theory have been introduced by L.A.Zadeh since 1965. The theory is conceived to be useful for describing the human perception. There exist some problems with fuzziness in the field of Transportation Planning. Thus, consideration of the human fuzziness has became more necessary. In the study, the fuzziness on modal split problem is investigated. Firstly, the fuzziness on modal-split is repoted. Secondly, the basic concept of fuzzy munbers is introduced. The concept is useful to extend the ordinary models. Thirdly the aggregate model and disaggregate model are considered as two typical modal split models. Some formulations with fuzzy numbers are proposed to fuzzify these models, which is sutable especially for improving the regression methods.

1．はじめに

近年、推論をおこなうための計算機など、人間の思考過程を計算機上で表現しようとする知識工学的な動向がある。また、人間の判断が介在するような問題を取扱う方法としてファジィ手法が用いられている。この方法は、L.A.Zadehの提唱以来、すでに20年が経過し、これまでに方法論の拡張、各種分野への応用が研究され、近年では、わが国においても実用的な研究成果も多数見られるようになった。[1]

交通計画の分野においても、人間の判断過程を内包する問題は多く存在し、[2] この判断プロセスの表現にファジィ手法を用いようとする研究がこれまでにもいくつか現れている。具体的には、住民意識の分析のためのアンケート調査の解析、[3] 意識構造の抽出、[4] 交通機関選択問題の定式化、[5] 代替案の評価[6]、交通制御の方法[7] などが検討されている。そして、実際の分析のための方法としては、ファジィクラスタリング、ファジィ積分、ファジィ推論などの方法が検討され用いられている。

これらは、いずれも人間の判断は正確かつ厳密な情報のもとで行われている場合ばかりではなく、あいまいな情報下であってもこれを処理し、その判断結果により行動を行っているという考え方に基づいている。要するに、ファジィな状態とは、判断結果がその度ごとに異なるといった「いいかげんな」場合をいうのではなく、多くの可能性を含んだ情報をそのままの判断に用いている場合をいうものである。

本研究では、このようなファジィ性を持つ問題の

* 正会員 工修 神戸市立工業高等専門学校助教授 土木工学科 （〒606 神戸市垂水区舞子台8丁目3番1号）
** 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室 （〒606 京都市左京区吉田本町）
*** 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室 （〒606 京都市左京区吉田本町）

ひとつとして交通機関選択を取り上げ、これに内在するファジィ性の表現とその具体的な取扱い方法を検討することが目的である。

そこで本研究では、まず交通機関選択問題で解決すべきファジィ性について、簡単に検討する。さらに、こうした問題を具体的に検討する場合の最も基本的な理論であるファジィ集合の概念とこれを応用した「ファジィ数」の取扱い方法について述べる。

さらに、簡単な例題を用いてこのファジィ手法により表現される交通機関選択の問題における物理的意味を検討する。この場合、交通機関選択に2つの方法、すなわち集計型モデルと非集計型モデルを念頭におき、それぞれについて検討を行う。

2．交通機関選択とファジィ性

交通機関選択の問題は、利用者が交通機関をどのような要因によって、交通手段を選択するかを検討し、最終的には各ゾーン（地域）の将来の交通機関別の交通量を知ることで交通計画の資料とするものである。このために、各種調査データを用いて、交通機関分担の推計モデルが作成されている。これらのモデルを形式的な面から大別すると、近年開発が進んでいる非集計タイプのものと従来からの検討されてきた集計タイプのモデルに分類できる。

交通機関選択を考える場合、いずれのタイプのモデルを用いる場合にもファジィ性が存在している。

非集計行動モデルは、簡単にいえば個人単位の行動をモデル化し、個人のトリップに対する魅力（効用差）から個人単位の交通機関の選択率を求めるものである。このようなモデルを検討する場合には、個人の選択行動そのものをモデル化するものと考えられている。したがって、モデルの構造、行動決定のための各要因、あるいは個人の効用といったモデルの構成要素は、選択が本来人間の判断にもとづくことから、漠然とした認識下であることをを前提として構成されている。たとえば、モデル作成の資料となる交通調査データにしても個人単位で詳細な（所要時間が 0.5分刻みなどの）情報を認識しているとはいいがたい。またこうした詳細データより得られる個々の推定結果をそのまま交通需要推計のための情報として用いることが可能であろうか否か、あるいは、個人単位で算出される選択率が人間の思考の結果の表現として妥当なものとなっているであろうかといった問題点があり、これらはいずれも人間の持つファジィ性に起因するものと考えられる。

集計型モデルでは、各ゾーンの選択率、所要時間など交通機関選択のモデルに用いられる多くの要因が統計的な数字（普通は平均値）として用いられる。したがって、モデルによって推計されるものは、やはり平均値的な数字であり、統計的処理には適当であるが必ずしも実用性の高いものとはいいがたい。またここで用いられるデータには統計的な誤差は考慮されているが、予測に対する余裕幅といったファジィな考慮はなされていない。つまり集計的にファジィ性を考慮するということはその計算結果にある程度の余裕幅をもって予測を行うということである。

交通機関選択の問題におけるファジィ性考慮の必要性は上記のように非集計、集計のいずれのタイプにも考えられるが、代表的な視点として以下のようにまとめることができよう。

①データ等のファジィ性：

普通、交通機関選択のモデルを作成する場合にはPT調査などの交通調査データが用いられる。実際にはこの種のデータは、特性値が記憶にない、あいまいであるなどの理由から詳細までの検討が十分できないものがあり、[5] ファジィな要因として取り扱うべきである。

②人間の判断構造のファジィ性：

個人の選択を考えた場合、ファジィな思考過程で交通機関の選択を行っている。すなわち、意志決定のための要因が確定的な情報が与えられてもファジィな判断プロセスにより決定される。

③交通機関分担情報としてのファジィ性：

最終的に得られる交通計画上の情報として必要な情報は、必ずしも一意の将来予測値である必要はなく、情報量の多く残されるファジィな表現がその利用方法を吟味すれば有効であるかもしれない。

このようにファジィ数を用いて検討することは、交通機関選択におけるファジィな選択内容（要するに0か1かの割切り型の表現でなくソフトな判断内容）をモデル化するものである。この点では同様な発想から、これまでにもファジィ積分を用いたモデル化が行われているが、思考過程や演算の十分な研究成果を得られないままその後の研究が行われてい

ないのは、非常に残念なことである。

3．ファジィ性の取扱い

ここでは、さきに述べたようにファジィ性の取扱い方法を具体的に検討する。実際には、基本的なファジィ集合の概念とこれを応用したファジィ数の演算方法（拡張原理）について述べる。

3．1　ファジィ集合[9)]

ファジィ集合(Fuzzy Sets)の概念は1965年にL.A. Zadehによって提唱された。これは従来の集合論の拡張で既存集合を内包した形で議論が進められている。

まずXを全体集合とし，xをXの要素とする。X上のファジィ集合Aはメンバシップ関数$\mu_A(x)$によって表現される。

$$\mu_A(x):\ X \rightarrow [0,1] \qquad (1)$$

この関数$\mu_A(x)$は、xが集合Aに属する程度を示す。たとえば$\mu_A(x)$の値が0のときxはAに全く属さず、逆に$\mu_A(x)$の値が1のときはxは完全にAに属している。たとえば$\mu_A(x)$の値が0.6 といった場合には要素xが集合Aにそれなりに属することを示している。このファジィ集合は一般に以下のような表記法を用いて表現されることが多い。

$$A = \int_X \mu_A(x)/x \quad (x \text{ が連続量}) \qquad (2)$$

あるいは

$$A = \sum \mu_A(x)/x \quad (x \text{ が離散量}) \qquad (3)$$

このような、表現方法を用いれば、従来の（含む、含なれないの）集合も全く同様な方法で記述することができる。

3．2　ファジィ数について

ファジィ集合の定義は、一般の数の定義にも適用可能であり、ファジィな表現のまま数を定義することができる。たとえば「5ぐらい」の数はファジィ集合の表記法によれば以下のようになる。

$$\begin{aligned}\{x：5\text{ぐらい}\} &= \cdots +0.0/3+0.5/4+1.0/5+0.6/6+0.0/7+\cdots \\ &= 0.5/4+1.0/5+0.6/6 \end{aligned} \qquad (4)$$

（メンバシップ値0の要素は省略可）この表記法によれば、従来の数も同様に示すことができ、たとえば以下のようである。

$$\begin{aligned}\{x：5\} &= \cdots +0.0/3+0.0/4+1.0/5+0.0/6+0.0/7+\cdots \\ &= 1.0/5\ (=5)\end{aligned} \qquad (5)$$

これはファジィ集合が従来の集合を包含した形で定義されていることを示すものである。また上記の表記法で示される{x：5ぐらい} ($=\sum \mu_A(x)/x$)のような形で表現される数を「ファジィ数」とよぶ。

3．3　拡張原理

ファジィ集合の関数、あるいはファジィ集合同士の任意の計算を行うために次の拡張原理が定義されている。これは上記の表記法を用いると、

$$f(A) = \sum_{i=1}^{n} \mu_i / f(x_i) \qquad (6)$$

ここに、 A：ファジィ集合
f(A)：任意の関数

と定義される。この原理によりファジィ数の演算が可能となる。たとえば、あるファジィ数 Aを

$$A = \sum \mu(x_i)/x_i \qquad (7)$$

とし、f(A)を「2乗」とすると、ファジィ数Aの2乗A^2は以下のように計算することができる。

$$f(A) = A^2 = \sum \mu(x_i)/(x_i)^2 \qquad (8)$$

すなわち、ファジィ数の演算では個々の数に対して定義された演算を行い、このときの各計算結果のメンバシップ値はもとのメンバシップ値によって規定されることを示している。

さらに、複数のファジィ数の演算もこの原理を用いて行うことができる。すなわち2つのファジィ集合A，Bに対して、以下のように定義される。

$$f(A,B) = \sum_{i,k} (\mu_A \wedge \mu_B) / f(x_i, x_k) \qquad (9)$$

たとえば、「5ぐらい」(=0.5/4+1.0/5+0.6/6)と「2ぐらい」(=0.7/1+1.0/2+0.4/3)の和を求めると、

$$0.5/5+0.7/6+1.0/7+0.6/8+0.4/9 \qquad (10)$$
=「7ぐらい」　　(Appendix参照)

となり人間の認識に近い演算が行えることがわかる。

このときの「ファジィ数」の演算での相互の関係を図示したものが図－1である。このようにファジィ数同士の演算を行うと一般に広がりの増加したファジィ数が得られることがわかる。

4．非集計型モデルでの検討

さきに述べたように、ここでは非集計型のモデルでのファジィ性の取扱について検討する。基本的には前章で示した拡張原理の適用である。これに関する簡単な実用例がHammerbacher & Yagar[11]らによって紹介されている。これは、TV産業歳入（TV industry revenues）の予測の回帰分析結果の改良を試みたものであり、具体的には、従来の方法によって回帰分析式をもとめ、これを予測に用いるに際して、ファジィ数を入力しファジィな予測値を求める方法をとっている。すなわち、パラメータは非ファジィ数によって求められるが、これを拡張原理を用いた計算を行うことによって一般的なファジィ表現を行うことを可能とする方法である。

ここでは、同様の手順を非集計ロジットモデルの例に適用しファジィ性を取扱う方法を検討する。表－1は参考文献 12)より引用した非集計ロジット型モデル推計のためのデータである。この例では、問題はマイカー(i=1)とマストラ(i=2)の機関選択であり、それぞれの効用V_{in}は以下のように示される。

$$V_{1n}=\theta_1+\theta_2 x_{1n2} \qquad (11)$$
$$V_{2n}=\qquad \theta_2 x_{2n2}$$

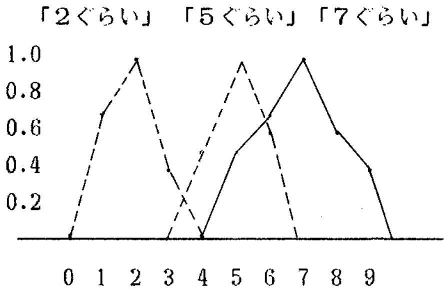
ここで、θ_1，θ_2はパラメータで、x_{2n2}はi機関の所要時間である。

この例のデータによって最尤推定法の計算を行い、パラメータを求めると、θ_1=-0.237，θ_2=-0.053が得られる。（第4ステップ）[12]

このパラメータを決定することによって各サンプルの機関選択率計算することができる。すなわち、i機関(i=1,2)の選択率は、次のように求められる。

これらの値を本例の個々のサンプルに対して具体的に計算したものが表－2である。

本表からもわかるように、各選択率は非常に詳細な数値として計算することができる。そして、たと



図－1　ファジィ数の計算

表－1　非集計モデル推計用データ

No	x_{1n2}	x_{2n2}	mode	No	x_{1n2}	x_{2n2}	mode
1	52.9	4.4	2	12	18.5	84.0	1
2	4.1	28.5	2	13	82.0	38.0	1
3	4.1	86.9	1	14	8.6	1.6	2
4	56.2	31.6	2	15	22.5	74.1	1
5	51.8	20.2	2	16	51.4	83.8	1
6	0.2	91.2	1	17	81.0	19.2	2
7	27.6	79.7	1	18	51.0	85.0	1
8	89.9	2.2	2	19	62.2	90.1	1
9	41.5	24.5	2	20	95.1	22.2	2
10	95.0	43.5	2	21	41.6	91.5	1
11	99.1	8.4	2				

表－2　モデルによる計算結果

No	P_{1n}	P_{2n}	No	P_{1n}	P_{2n}
1	0.057	0.943	12	0.962	0.038
2	0.742	0.258×	13	0.071	0.929×
3	0.985	0.015	14	0.353	0.647
4	0.176	0.824	15	0.924	0.076
5	0.129	0.871	16	0.815	0.185
6	0.990	0.010	17	0.029	0.971
7	0.926	0.074	18	0.827	0.173
8	0.008	0.992	19	0.776	0.224
9	0.243	0.757	20	0.016	0.984
10	0.049	0.951	21	0.917	0.083
11	0.006	0.994		（注）	×：誤判別

$$P_{1n} = 1/(1+\exp\{-(V_{1n} - V_{2n})\}) \qquad (12)$$

$$P_{2n} = 1 - P_{1n}$$

えばこのP_{in}の値が0.5を越えるものは機関iを選択するとすれば、このモデルでは、この値の前後で選

択行動が急激に変化する状況が表現されることになる。また、モデルの適合程度もこの値から直接計算される。本例でいえば、表中の×印のものが誤判別されたものであるから、モデルの的中率は0.905である。(21-2/21=0.905)

ここで、説明変数である所要時間に対するファジィ性を考えてみよう。具体的には、サンプルの入力変数に「ファジィ数」を用いることになる。
たとえば、サンプル No.19の場合、マストラの時間は何らかの計測値から 90.1分といった値が得られているのであろうが、個人の認識ともいえる車(マイカー)の所要時間は62.2分といった報告値がデータとして妥当であろうか。本研究では、これを「60分ぐらい」というファジィ数として考えてみる。

「60分ぐらい」はたとえば

$$x = 0.4/55 + 0.9/60 + 0.8/65 + 0.3/70 \qquad (13)$$

のように書くことができる。

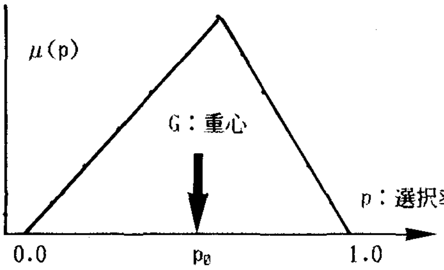
このとき、拡張原理にもとづき計算をおこなえば、まず(11)式よりファジィなV_{1n}、V_{2n}が求められ、さらに(12)式より選択率もファジィ数として求めることができ、実際には次のようになる。

$$P_1 = 0.4/0.835 + 0.9/0.795 + 0.8/0.749 + 0.3/0.696$$

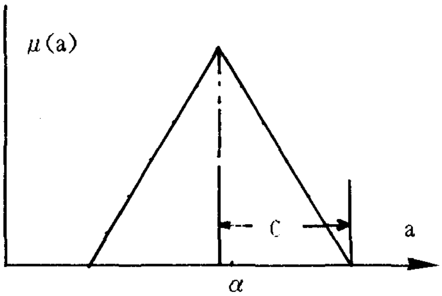
$$P_2 = 0.4/0.165 + 0.9/0.205 + 0.8/0.251 + 0.3/0.304 \qquad (14)$$

このように個人の選択率は広がりを持った数として表現されるのがこの方法の特徴である。これは、選択率に対して人間がある特定の範囲の値として認識していることに対応している。この場合P_1は、「0.8よりやや大きい」選択率である。

このようなPを連続的な分布として図示したものが図－2である。一般には、求められる選択率は本図のように分布しており、この分布が個人の判断結果に対応していると考えられる。この分布の解釈にはいろいろな方法があるが、たとえばこの分布をそれぞれの値のウエイトと考え、重心の位置が実際の結果として現れる値と考えれば、具体的な選択率を求めるモデルを作成することも可能である。(図中p_0で示されている。)



図－2　出力分布の例



図－3　ファジィパラメータ

5．集計モデルでの検討

従来からの交通機関選択モデルには非集計型のもばかりではなく集計タイプも多く存在する。一般には説明変数に各ゾーンの選択率を被説明変数とし各種の交通機関選択要因を用いて説明する形のモデルが一般的である。これは、近年宇野によって提唱されたモデル[13]なども同様な取扱が可能なものである。この場合には普通、計算方法としては線形(あるいは非線形)の回帰分析が用いられることが多い。

田中らは[14]上記のファジィ数の考え方を拡張して、従来の誤差最小を基準とした回帰分析に対して、ファジィ線形回帰分析を提案している。これは残差の確率分布ではなく、可能性分布として取扱いを試みたものである。

すなわち、次式の推定値とデータの差

$$y_i - a_k x_{ik} = \varepsilon_i \; ; \; i=1, \cdots, N \qquad (15)$$

は通常の線形回帰モデルでは、観測誤差とみなされている。ファジィ線形回帰分析では、線形モデルとデータの不整合は線形関数の係数の可能性に依存しているとみなしている。すなわち、図－3に示すようなファジィ係数A＝(α、c)をもとめることである。具体的な誘導は省略するが、(詳細は文献14)

問題は次の線形計画問題に帰着される。

$$\min s = k_0c_0+, \cdots, +k_nc_n \tag{16}$$

$$(1-h)\Sigma c_k|x_{ik}| + \Sigma \alpha_k x_{ik} \geqq y_k$$

$$(1-h)\Sigma c_k|x_{ik}| - \Sigma \alpha_k x_{ik} \geqq -y_k$$

$$i=1, \cdots, N$$

結局この方法を用いると、推定に幅をもった区間推定のような、結果をもたらすパラメータを算出することができる。

この場合は、たとえば宇野によるモデルで次式のような関数形を考えてみると、[15]

$$P_1/P_2 = \exp\{f(x_{ik}, y_{ik})\} \tag{17}$$

ただし

$$f(x_{ik}, y_{ik}) = ax_{ik}+by_{ik} = a(x_i-x_k)+b(y_i-y_k)$$

x:所要時間　y:コスト

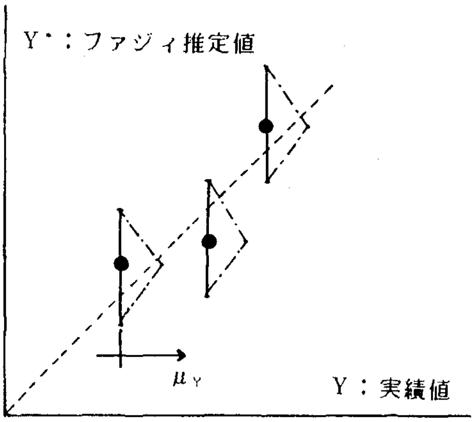
普通このパラメータ推定には、従来型の回帰を行い一意な値を求めるが、上記のファジィ線形回帰分析を用いることも可能である。この場合にはパラメータ a, b がファジィ数としてえられる。そしてこのパラメータを用いれば、予測される選択比率もファジィ数として与えられるので、最終的には図－3に模式的に示すような推定が可能となる。これは、推定値にも広がりをもったファジィな予測を行うもので、図からもわかるように、実績値を一定のメンバシップ値（広がり幅に対応）で包含するものである。すなわち、ある確定値のまわりに分布する線形ファジィ数が推定値として求められることになる。

本例についての具体的な計算結果は省略するが、前例と同様ファジィな表現が比較的簡単な計算で可能となることがわかる。

6．おわりに

本研究では、交通機関選択におけるファジィ性の取扱い方法について、いくつかの検討を行った。実際には、定式化の方法を中心として述べたため、必ずしも十分な検討が行われてはいないが、本研究で示したファジィ性の取扱いの方法についていくつかの特徴を整理すると以下のようである。

①本研究の方法では、入力、出力情報が多くの情報を持つファジィな数とすることができる。したがって、入力においては自然言語的な情報を利用可能でまた出力では、変数をその後の検討に適した形とすることが可能である。



図－4　ファジィ回帰分析の例

②モデルでは、従来の一意の変数の場合と異なりファジィ数が用いられている。こうしたひとつの分布を持った数を計算するためのモデル構造を吟味することでより人間の思考過程に近いものが抽出される可能性がある。

③この方法は、一般に従来の多くの方法の拡張として定義されるものであり、これまでの結果と相反するものではない。従来の方法の改良のための一手順として利用することができる。

このような特徴を生かしたモデルとするためにはさらに実際的な例を用いた詳細な検討が必要である。なかでも今後の課題として中心的なものを挙げると以下ようである。

①ファジィな方法は、従来法の拡張にはなっているが、計算プロセスが若干煩雑となっている。実用的な効率的アルゴリズムの整理が必要である。

②このような、方法の有効性を検討するためには、とくにファジィ数として出力される推定値の実用的な利用方法についての吟味する必要がある。

③本例のような、線形的な構造を持つモデルに限らずファジィ的な検討は可能であり、ファジィ推論などの積極的に人間の判断過程をモデル化する方法を適用することも考えられる。[16]

④人間の思考過程をモデル化し交通機関選択、経路選択などの分析を行うためには、選択要因につい

てもその構造を明らかにすることが重要である。この点では、階層構造分析の方法を用いた検討を行っている。[17),18)]

最後に、本研究の内容に対して、具体的な御検討をいただいた京都大学工学部飯田恭敬教授に感謝の意を表する次第である。

参考文献

1）稲葉則夫　実用化が始まったファジィ理論●2 日本では電車の自動運転、浄水場の制御などに利用 日経エレクトロニクス　'84.12月号，pp.183-192, 1984.

2）飯田恭敬、不確実性の定式化と分析、④交通計画、土木学会誌、vol.65, No.9, pp.24-27, 1980. 9.

3）佐佐木綱、秋山孝正、道路整備に対する住民意識の基礎的分析、第16回日本道路会議論文集、pp. 1005- 1006, 1985.

4）石田東生、森地茂、土屋謙、バス導入計画に対する住民の評価に関する研究、土木学会第34回年次学術講演会講演概要集 4 pp.156-157, 1979.

5）本田均、渡辺隆、森地茂、あいまいさを考慮した経路選択モデルについて、土木学会第33回年次学術講演会講演概要集 4，pp.91-92, 1978.

6）飯田恭敬、児玉健、高山純一、最適代替案の図形表示による総合評価手法特性の比較分析、土木計画研究講演集、No.8, pp.437-444, 1986.1.

7）秋山孝正、佐佐木綱、奥村透、都市高速道路交通管制の効率化に関する検討、 土木計画学研究発表会講演集、No.8, pp.129-135, 1986.

8）山形耕一、非集計モデルのための調査とデータ作成、土木計画学講習会テキスト15　非集計モデルの理論と実際、pp.67-103, 1984.

9）L.A.Zadeh, Fuzzy Sets, Information & Control, vol.8, No.3, pp.338-353, 1965.

10）寺野寿郎、システムモデルとしてのファジィ集合、pp.218-316、システム工学入門、共立出版

11）I.M.Hammerbacher & R.R.Yagar, Predicting Television Revenues Using Fuzzy Subsets, Fuzzy Sets and Decision Analysis, pp.469-477, North-Holland, 1984.

12）森杉寿芳、非集計モデルの推定と検定、土木計画学講習会テキスト15　非集計モデルの理論と実際 pp.25-66, 1984.

13）宇野敏一、関数方程式論を用いた経路選択モデルの統一に関する研究、京都大学学位論文、1985.

14）田中英夫、可能性モデルとその応用、システムと制御、 vol.28, No.7, pp.447-451, 1984.

15）佐佐木綱、西井和夫、通勤交通における経路別利用者数の予測　－宇野モデルの検討－、土木計画学研究論文集　No.1, pp.91-98, 1984.1.

16)馬野元秀、あいまいな知識の表現と利用、大阪大学計算機センタニュース，vol.15, No.2, 1985.

17）木下栄蔵、交通経路選択モデルにおける意志決定理論の適用に関する研究、神戸高専研究紀要第24号、1986.2.

18）木下栄蔵、階層分析法による交通経路選択特性の評価、運輸と経済、第46巻、第６号、pp.64-73、1986.6.

Appexdix

ファジィ数の計算：
３．３で示した例題を具体的に示す。

$$x = 「５ぐらい」 + 「２ぐらい」$$
$$= (0.5/4+1.0/5+0.6/6) + (0.7/1+1.0/2+0.4/3)$$

拡張原理により個々の要素について演算（和）を行うと、

$$= (0.5/5+0.5/6+0.4/7) + (0.7/6+1.0/7+0.6/8) + (0.6/7+0.6/8+0.4/9)$$

$$= 0.5/5+0.7/6+1.0/7+0.6/8+0.4/9$$
$$(\because \mu_1/x+\mu_2/x \rightarrow (\mu_1 \vee \mu_2)/x)$$

=「７ぐらい」