投稿論文

ファジィ積分による高速道路路線の建設優先順位決定に関する研究

木下栄蔵*

高速道路の建設・計画に当たっては、複数個の路線を対象とする場合、どの路線から建設することが望ましいか、ということが大きな問題として提起される。その際、複数の価値観を導入した場合、この問題は多目的意思決定問題となる。そこで、本研究では、このような社会システムにおける多目的意思決定問題にファジィ積分を適用する際の具体的手法を提案するものである。

Research into Determining Freeway Route Construction Priorities Using Fuzzy Integral Calculus

Eizo KINOSHITA*

In the construction and planning of freeways we are confronted with the immense problem of which route to start construction from when dealing with multiple routes. It then becomes a problem of determining multi-purpose needs when multiple senses of value are taken into account. Therefore, this research will offer a specific process for employing fuzzy integral calculus to determine the multi-purpose needs in a social system such as ours.

1. はじめに

高速道路の建設・計画に当たっては、複数個の路線を対象とする場合、どの路線から建設することが望ましいか、ということが大きな問題として提起される。この望ましいという命題は、その人の所属する立場によって支配されるであろうし、個人的な主観や価値観によっても異なる。特に、価値観の多様化がみられる現代社会においては、しばしば、対立という現象になって現われる場合が多い。すなわち、ある目的水準を上げようとすると他の目的水準が下がるといったトレード・オフが生ずる。このトレード・オフをいかに処理して、総合的にバランスのとれた決定を行うかが重要な課題となる。多目的意思決定モデルは、まさに、このような多目的システムに対するシステム科学的手法である。

＊神戸市立工業高等専門学校土木工学科教授
Professor,Civil Engineering,
Kobe City College of Technology
原稿受理　1992年7月20日

一方、このような観点からThomas L.Saatyは、「階層分析法（ＡＨＰ）[1)]」という不確実な状況や多様な評価基準における意思決定手法を提唱した。この手法は、問題の分析において、主観的判断とシステムアプローチをうまくミックスした問題解決型意思決定手法の１つである。

そこで木下は、ＡＨＰによる道路の整備優先順位の決定に関する分析[2)]を行っている。すなわちＡＨＰとＩＳＭ（Interpretive Structural Modeling）との組合せによる分析、ＡＨＰにおける費用／便益分析・感度解析等である。さらに課題として他の手法との比較や高速道路を中心とした幹線道路における分析を提案し、ＡＨＰによる高速道路路線の建設優先順位決定に関する分析[3)]を行っている。ここでは、ＡＨＰと線形計画法との比較分析、ならびに不完全一対比較行列における間接的な近似法（固有値法）を紹介した。

しかし、課題として次の２つが考えられる。１つは、新しく代替案を付け加えることによって、いままでの代替案の順序が逆転する例が指適されている

が、このような場合、どのように対処すればよいのか。もう1つは、代替案の数が多くなると、ペア比較の数が極めて多くなり、1度にペア比較するのが困難となる。しかも首尾一貫性を欠く場合がある。このような場合、どのように対処すればよいのか。

そこで、木下は、このような課題を解決するための具体的手法を、文献4)で提案している。しかし、AHP手法において、各評価項目間、各代替案間、あるいは評価項目と代替案の間に従属性がある場合(従来は独立と考えてきた)、さらに階層構造(総合目的・評価項目・代替案)をFeedback Systemとして考える場合について検討しなければならない。そこでこのような課題を解決するための具体的手法を、文献5)、文献6)で提案した。たとえば、各評価項目間・各代替案間に従属性があるInner Dependence法、評価項目と代替案の間に従属性があるOuter Dependence法、Feedback System法、Series System法である。しかし、課題として、AHP手法と他の手法とを組み合わせた評価法の検討が考えられる。

そこで、本研究では、高速道路路線の建設優先順位決定問題にファジイ積分を適用する際の具体的手法をAHP手法と組み合わせて提案するものである。ところで、ファジィ積分とAHP手法を組み合わせる意義は、ファジィ積分で用いるファジィ密度がAHP手法により簡単に求められる所にあると思われる。

2. ファジィ集合とファジィ積分

本章では、ファジィ性の取扱い方法（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）とファジィ積分の概念について述べる。

2－1 ファジィ集合[7)]

ファジィ集合の概念は、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、$\boldsymbol{x}$をXの要素とする。X上のファジィ集合Aはメンバーシップ関数$\mu_A(\boldsymbol{x})$によって表現される。

$$\mu_A(x):\ x \to [0,1] \qquad \cdots\cdots(1)$$

この関数$\mu_A(\boldsymbol{x})$は、$\boldsymbol{x}$が集合Aに属する程度を示す。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。

$$A = \int_Y \mu_A(x)/x \ (\boldsymbol{x}\text{が連続量}) \qquad \cdots\cdots(2)$$

あるいは

$$A = \Sigma\, \mu_A(x)/x \ (\boldsymbol{x}\text{が離散量}) \qquad \cdots\cdots(3)$$

このような表現方法を用いれば、従来の集合（クリスプ集合）も全く同様な方法で記述することができる。

したがって、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。

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

この表記法によれば、従来の数も同様に示すことができる。

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

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。$\{\boldsymbol{x}:5\text{ぐらい}\}(=\Sigma\, \mu_A(\boldsymbol{x})/\boldsymbol{x})$のような形で表現される数を「ファジィ数」とよぶ。

また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、

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

ただし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。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ーシップ値はもとのメンバー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。

$$f(A,B) = \sum_{i,k} (\mu_A \wedge \mu_B) / f(x_i,\ x_k) \qquad \cdots\cdots(7)$$

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
＝「7ぐらい」

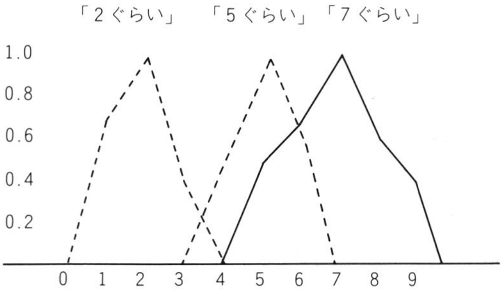

Fig.1 ファジィ数の計算

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 Fig.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。

2－2 ファジィ積分[8)]

ファジィ測度を一種のウエイトとして各代替案の総合評価を行う場合にファジィ積分が用いられる。この場合の総合評価値は評価する意思決定者がおのおのの評価項目について、メンバーシップ関数の値として評価したものを、ファジィ測度によって統合化した値である。また、この時用いられる演算からmax-min的な思考過程をもつ評価であることがわかる。以下、ファジィ積分の内容を数式で説明する。例えば、$\boldsymbol{x}$iを評価項目、Xi＝｛$\boldsymbol{x}_1$, …, $\boldsymbol{x}$i｝を評価項目 $\boldsymbol{x}$i の部分集合、X＝{$\boldsymbol{x}_1$, …, $\boldsymbol{x}$n}を全体集合、h($\boldsymbol{x}$i)を評点、g(Xi)をファジィ測度とする。ただし、h($\boldsymbol{x}$i)は0から1までの値（メンバーシップ値）とする。この時、

集合Xに対して、関数h：X→〔0, 1〕が与えられるとき、Xの部分集合F上のファジィ積分は、F′⊂Fに対して以下のように定義される。

$$\int_F h(x)\cdot g(\cdot)=\sup_{F'\subset F}[\inf_{x\in F'} h(x)\wedge g(F')] \quad \cdots\cdots(8)$$

(inf：下限)

すなわち、この積分により各評価h($\boldsymbol{x}$)をファジィ測度gで統合化（積分）するわけである。このファジィ積分は無限集合を前提としているが、われわれが実際に直面するような有限集合にも定義される。この時、(8)式は以下のように示される。

$$\int_X h(x)\cdot g(\cdot)=\bigvee_{i=1}^{n}[(\bigwedge_{j=1}^{i} h(x_j))\wedge g(\mathrm{x}_i)] \quad \cdots\cdots(9)$$

なお、実際の計算のために、あらかじめ

$$\mathrm{h}(\boldsymbol{x}_1)\geqq \mathrm{h}(\boldsymbol{x}_2)\geqq\cdots\geqq \mathrm{h}(\boldsymbol{x}_n)$$

のように並べておけば、部分集合Xiに対してつねに

$$\bigwedge_{j=1}^{i} h(x_j)=h(x_i)$$

が成立するので、(9)式は次のように書くことができる。

$$\int_X h(x)\cdot g(\cdot)=\bigvee_{i=1}^{n}[h(x_i)\wedge g(x_i)] \quad \cdots\cdots(10)$$

この式は、ファジィ積分の定義どおり、すべての部分集合（2^n個）に対して演算を行わずn回の比較計算でよいことを示している。

3．ＡＨＰの概要

ＡＨＰ手法は次に示す3STEPから成り立つ。

〔STEP 1〕

複雑な状況下にある問題を階層構造に分解する。ただし、階層の最上層は1個の要素から成り総合目的である。それ以下のレベルでは意思決定者の主観的判断により、幾つかの要素が1つ上のレベルの要素との関係から決定される。なお、各レベル（総合目的を除いて）の要素の数は（7±2）が最大許容数となる。また、レベルの数は問題の構造により決定されるもので、特に限界はない。最後に階層の最下層に代替案を置く（このような階層構造の例は、4章Fig.2である）。

〔STEP 2〕

各レベルの要素間の重み付けを行う。つまり、ある1つのレベルにおける要素間の一対比較を1つ上のレベルにある関係要素を評価基準として行う。nを比較要素数とすると意思決定者は、n(n－1)／2個の一対比較をすることになる。さらに、この一対比較に用いられる値は1/9, 1/8, …1/2, 1, 2, …8, 9とする（個々の数字の内容はTable 1参照）。ただし、分数は、重要でないときに用いる。すなわち、$a_{ji}=1/a_{ij}$となる。

以上のようにして得られた各レベルの一対比較マトリックスをA(a_{ij})で表わすとき、各レベルの要素間の重み(ωi)は、次式で近似される。

$$\omega i=\frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}^{k}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}^{k}} \quad \cdots\cdots(11)$$

すなわち、$\dot{\omega} i$は、マトリックスA^kのi番目の列和をすべての列和で割ったものである。このとき、ωiは、(12)式のようにωiに収束することがSaatyにより証明されている。

Table 1　重要性の尺度とその定義

重要性の尺度	定　義
1	equal importance　(同じくらい重要)
3	weak importance　(やや重要)
5	strong importance　(かなり重要)
7	very strong importance　(非常に重要)
9	absolute importance　(極めて重要)

注)2, 4, 6, 8は中間のときに用いる。

$$\omega i = \lim_{k\to\infty} \omega' i = \lim_{k\to\infty} \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}^{k}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}} \quad \cdots\cdots(12)$$

$$(i,\ j=1, \cdots, n)$$

ただし、a_{ij}^{k}は、Aを$\boldsymbol{k}$回乗じたあとの行列A^kのi，j要素である。

〔STEP 3〕

各レベルの要素間の重み(ωi)が計算されると、この結果を用いて階層全体の重みを計算する。これにより、総合目的に対する各代替案の優先順位が決定する。例えば、Fig. 2において、対象路線1の総合的な重みω_1は、

$$\omega_1 = \sum_{j=1}^{5} \omega_i \cdot \omega_{il} \quad \cdots\cdots(13)$$

となる。ただし、ω_iは各評価項目(Ⅰ～Ⅴ)の重みであり、ω_{i1}はi番目の評価項目に対する対象路線1の重みである。

4．AHPによる解析

本章では、高速道路路線の建設優先順位の決定をファジィ積分による解析の前段階としてAHPにより解析する。

さて、本稿では、優先順位を検討すべき路線を代替案とし、検討すべき項目を評価項目と呼ぶ。そこで、本研究における代替案は仮想の9路線（ただし、対象とする高速道路は都市内高速道路とする）とし、評価項目は、次の5項目とする。すなわち、

(Ⅰ)国幹道の補完・アクセス機能
(Ⅱ)地域サービス機能
(Ⅲ)物資流動円滑機能
(Ⅳ)投資効率
(Ⅴ)利用効率

である。

ところで、(Ⅰ)はネットワーク機能面からの評価指標であり、国幹道に対するネットワークとしての役割を国幹道と接続する交通量で表わしている。

Table 2　各路線の評価値

	百台	百台	百台	台／億円	百台／km
路線番号	(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)	(Ⅳ)	(Ⅴ)
1	130	330	40	40	60
2	80	180	30	45	55
3	90	140	20	60	45
4	40	120	20	55	30
5	250	200	280	70	65
6	60	80	50	65	40
7	50	40	40	30	38
8	75	90	70	55	35
9	20	80	40	50	48

(Ⅱ)(Ⅲ)は、サービス機能面からの評価指標であり、(Ⅱ)はその地域にとっての利用価値を利用交通のうちで、起点又は終点をその地域に有する交通量で表わしている。(Ⅲ)は、物資流動量・生活関連交通量を貨物車利用台数で表わしている。また、(Ⅳ)(Ⅴ)は、効率面からの評価指標であり、それぞれ、投資額に対する利用台数と路線延長に対する利用台数で表わしている。

さて、ケース・スタディのため、仮想の9路線に対する各評価項目の評価値はTable 2に示すように設定した。

ところで、AHPによる解析は次の3STEPから成り立つ。

［STEP 1］

高速道路路線の建設優先順位決定に関する階層構造は、Fig.2に示すようになる。すなわち、レベル1に総合目的を置き、レベル2に5つの評価項目を、そして、レベル3に9つの代替案をそれぞれ置く。

［STEP 2］

まず、レベル2の各評価項目間のペア比較を行う。その結果は、Table 3に示したとおりである。ただしこのペア比較マトリックスの数字の意味は、Table

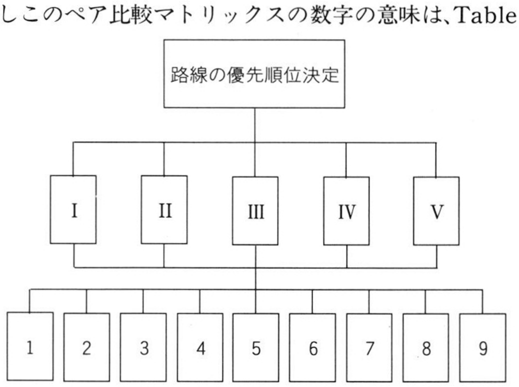

Fig.2　路線の優先順位決定に関する階層構造

1に示したとおりである。

この結果、各評価項目の重み(W_A)は(12)式により次のようになる。

$$W_A^T=(0.319,\ 0.289,\ 0.075,\ 0.198,\ 0.119)$$

したがって、建設優先順位の決定に最も影響する評価項目は5つの項目のうち、(I)国幹道の補完・アクセス機能の項目であり、32%弱の影響力を持つことがわかった。以下、(II)地域サービス機能の項目、(IV)投資効率の項目と続くことがわかる。

次に、各評価項目に関する各代替案の評価を行う。すなわち、各評価項目ごとの各路線の評価値(Table 2)の比をとることにより各代替案のペア比較を行った。さて、これら5つのペア比較マトリックスの紹介は省略するが、これらの結果により各評価項目ごとの9路線の評価の重みが計算される(Table 4)。

[STEP 3]

以上の結果より、各9路線の総合評価値E(階層全体の重み)は、

$$E=(W_{B1},\ W_{B2},\ W_{B3},\ W_{B4},\ W_{B5})W_A$$

となり、結果はTable 5に示すようになった。

5．ファジィ積分による解析

本章では、AHPとファジィ積分を組み合わせた具体的手法を、高速道路路線の建設優先順位決定問題を例として提案する。そこで4章で説明した代替案1(路線1)の総合評価値を求める計算ステップを代表として取り上げることにする。

1) 単純平均

ところで最も簡単な総合評価は、各要素の単純平均である。本稿の場合、要素は5つあり、各要素毎の評価マトリックスは、$W_Bij=(W_{B1},\ W_{B2},\ W_{B3},\ W_{B4},\ W_{B5})$である。したがってこの場合、総合評価値$E_1$は、

$$E_1=\sum_{j=1}^{5}W_{Bij}/5=0.145$$

Table 3 ペア比較表

	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)
(I)	1	1	4	2	3
(II)	1	1	3	1	4
(III)	1/4	1/3	1	1/2	1/3
(IV)	1/2	1	2	1	2
(V)	1/3	1/4	3	1/2	1

となる。しかし、実際には、各要素のウエイトは均一ではなく、寄与率の大きい要素と小さい要素がある。そこで次の総合評価は、それらを考慮した手法で行うことにする。

2) 加重平均

各要素の評価値に、その要素の寄与率の重みを掛けて、加重平均する。各要素の評点を$h(j)$($j=1,\cdots 5$)、各要素の寄与率の重みを$g(j)$とすると、総合評価値E_2は、

$$E_2=\sum_{j=1}^{5}h(j)\cdot g(j) \qquad \cdots\cdots(14)$$

となる。この方法は、4章AHPによる解析と同一である。したがって、4章の計算結果より、各要素の寄与率の重みは次のように定まる。

$$g(\mathrm{I})=0.319,\quad g(\mathrm{II})=0.289,\quad g(\mathrm{III})=0.075$$
$$g(\mathrm{IV})=0.198,\quad g(\mathrm{V})=0.119 \qquad \cdots\cdots(15)$$

これらの$g(j)$値によりE_2を求めると

$$E_2=\sum_{j=1}^{5}W_{Bij}\cdot WA=0.167$$

となる。ただしこの場合$g(j)$とW_Aは同一である。ところでこの手法は、「分析と総合」に関して、極めて形式的な立場をとっている。すなわち、各要素の評価を総計したものが、全体の評価になり、全体の評価を分解すれば、各要素の評価になるということである。ところが、実際には、要素の総和をとったものが、必ずしも全体そのものにならないということを経験することが多々ある。というのは、各要

Table 4 各路線の評価(W_{Bij})

路線名	I	II	III	IV	V
1	0.164	0.262	0.068	0.085	0.144
2	0.101	0.143	0.051	0.096	0.132
3	0.113	0.111	0.033	0.128	0.108
4	0.050	0.095	0.033	0.117	0.072
5	0.315	0.159	0.475	0.149	0.156
6	0.075	0.063	0.085	0.138	0.096
7	0.063	0.032	0.068	0.064	0.092
8	0.094	0.071	0.119	0.117	0.084
9	0.025	0.064	0.068	0.106	0.116
	W_{B1}	W_{B2}	W_{B3}	W_{B4}	W_{B5}

素同士の相乗効果とか相殺効果などが起こるからである。つまり各要素は正しく評価されているのに、全体の総合評価は、各要素の評価を加重平均した値と一致しない場合があるのである。そこで、次の総合評価は、総合の仕方をうまく考慮した手法で行うことにする。

3）ファジィ積分

〔STEP 1〕ファジィ測度の概念

加重平均による総合評価（AHPによる解析）の際、各要素の寄与率の重みを決定した。例えば、評価項目(Ⅰ)国幹道の補完・アクセス機能の重みは、31.9%、評価項目(Ⅱ)地域サービス機能の重みは、28.9%であった。ところが、この2つの要素を一緒にした寄与率の重みは31.9+28.9=60.8%ではなく、もっと大きいとみる場合（相乗効果）やもっと小さいとみる場合（相殺効果）がある。そこで、高速道路路線の総合評価を行うためには、各要素（評価項目）のあらゆる組合せに対する寄与率の重み（これをファジィ測度という）を決めなければならない。

ところで、本稿の例における各評価項目は(Ⅰ)から(Ⅴ)まで考えた。そして、これらの評価項目それぞれ単独の寄与率をAHPにより求めた。そこで、次に、これら5つの評価項目のなかから任意の2組、3組、4組、全部（5評価項目とも）を合わせたものに対する寄与率を与えなければならない。実際の要素の組合せは、以下に示す2^5個である。

要素が1つもない集合：1個

要素が1つだけの集合(Ⅰ)(Ⅱ)(Ⅲ)(Ⅳ)(Ⅴ)：5個

要素が2つの集合(Ⅰ+Ⅱ),(Ⅰ+Ⅲ),(Ⅰ+Ⅳ),(Ⅰ+Ⅴ),(Ⅱ+Ⅲ),(Ⅱ+Ⅳ),(Ⅱ+Ⅴ),(Ⅲ+Ⅳ),(Ⅲ+Ⅴ),(Ⅳ+Ⅴ)：10個

要素が3つの集合　集合の内容は省略：${}_5C_3=10$個

要素が4つの集合　集合の内容は省略：${}_5C_4=5$個

5つの要素全部の集合：1個

以上で、組合せは、$2^5=32$個となる。一般的に、要素がn個の場合、その部分集合は2^n個あり、この数の寄与率を与えなければならない。しかし、実際の計算のために、各評価項目の評点$h(\boldsymbol{j})$ $(\boldsymbol{j}=1,\cdots 5)$を、大きい順に並べておけば、n個の寄与率（ファジィ測度）を与えればよいことが証明されている[9]。本稿の例の場合、路線1を対象としているので、

$$h(\mathrm{II}) > h(\mathrm{I}) > h(\mathrm{V}) > h(\mathrm{IV}) > h(\mathrm{III})$$

となる（Table 6）。したがって、次の5つの寄与率（ファジィ測度）が必要となる。

$$g(\mathrm{II}),\ g(\mathrm{II}+\mathrm{I}),\ g(\mathrm{II}+\mathrm{I}+\mathrm{V}),$$
$$g(\mathrm{II}+\mathrm{I}+\mathrm{V}+\mathrm{IV}),\ g(\mathrm{II}+\mathrm{I}+\mathrm{V}+\mathrm{IV}+\mathrm{III})$$

［STEP 2］ファジィ測度の決定

さて、特に要素Xに対する測度を、ファジィ密度（AHPにより求めた寄与率）と呼ぶ。そして、このファジィ密度から他のファジィ測度を計算する生成規則は本研究においては次のものを採る[9]。というのは、この方法では、相乗・相殺効果の度合い$P_{\mathrm{I,II}}$が後述するアンケート調査により、導出できるからである。

$$g(x_1 \cup x_2) = g(x_1) + g(x_2) + \lambda \cdot P_{\mathrm{I,II}} \cdot g(x_1) \cdot g(x_2) \qquad \cdots\cdots(16)$$

ただしλ：$(0 \leqq \lambda \leqq 1.0)$

$P_{\mathrm{I,II}}$:相乗・相殺効果の度合い（要素$\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2$による）

$P_{\mathrm{I,II}} > 0$（相乗効果）

$P_{\mathrm{I,II}} < 0$（相殺効果）

したがって、ここでは、各評価項目間のP（相乗

Table 5　路線別総合評価値

路線	総合評価値
1	0.167
2	0.112
3	0.109
4	0.078
5	0.230
6	0.087
7	0.058
8	0.093
9	0.066

Table 6　評点による並べ換え

路線名＼順位	1	2	3	4	5
1	0.262(Ⅱ)	0.164(Ⅰ)	0.144(Ⅴ)	0.085(Ⅳ)	0.068(Ⅲ)
2	0.143(Ⅱ)	0.132(Ⅴ)	0.101(Ⅰ)	0.096(Ⅳ)	0.051(Ⅲ)
3	0.128(Ⅳ)	0.113(Ⅰ)	0.111(Ⅱ)	0.108(Ⅴ)	0.033(Ⅲ)
4	0.117(Ⅳ)	0.095(Ⅱ)	0.072(Ⅴ)	0.050(Ⅰ)	0.033(Ⅲ)
5	0.475(Ⅲ)	0.315(Ⅰ)	0.159(Ⅱ)	0.156(Ⅴ)	0.149(Ⅳ)
6	0.138(Ⅳ)	0.096(Ⅴ)	0.085(Ⅲ)	0.075(Ⅰ)	0.063(Ⅱ)
7	0.092(Ⅴ)	0.068(Ⅲ)	0.064(Ⅳ)	0.063(Ⅰ)	0.032(Ⅱ)
8	0.119(Ⅲ)	0.117(Ⅳ)	0.094(Ⅰ)	0.084(Ⅴ)	0.071(Ⅱ)
9	0.116(Ⅴ)	0.106(Ⅳ)	0.068(Ⅲ)	0.064(Ⅱ)	0.025(Ⅰ)

・相殺効果の度合い）をアンケート調査により求めた。被験者は、高速道路利用者（78名）であり、尺度は、相殺効果が最も著しいもの(−5)から相乗効果が最も著しいもの(5)まで整数で答えていただいた。この結果はTable 7 に示すとおりである。

したがって、(16)式より各ファジィ測度は以下のようになる。（ただしパラメータ $\lambda=1.0$ として計算した。ところで、最後に他のパラメータ値との比較のため $\lambda=0$ から1.0まで0.1きざみの値でファジィ測度を計算している。）

$$g(\mathrm{II})=0.289$$
$$g(\mathrm{II}+\mathrm{I})=g(\mathrm{II})+g(\mathrm{I})+\lambda\cdot P_{\mathrm{I,II}}\cdot g(\mathrm{II})\cdot g(\mathrm{I})$$
$$=0.497$$
$$g(\mathrm{II}+\mathrm{I}+\mathrm{V})=g(\mathrm{II}+\mathrm{I})+g(\mathrm{V})+\lambda(P_{\mathrm{II,V}}\cdot g(\mathrm{II})\cdot g(\mathrm{V})$$
$$+P_{\mathrm{I,V}}\cdot g(\mathrm{I})\cdot g(\mathrm{V}))=0.750$$
$$g(\mathrm{II}+\mathrm{I}+\mathrm{V}+\mathrm{IV})=g(\mathrm{II}+\mathrm{I}+\mathrm{V})+g(\mathrm{IV})$$
$$+\lambda(P_{\mathrm{II,IV}}\cdot g(\mathrm{II})\cdot g(\mathrm{IV})+P_{\mathrm{I,IV}}\cdot g(\mathrm{I})\cdot g(\mathrm{IV})$$
$$+P_{\mathrm{V,IV}}\cdot g(\mathrm{V})\cdot g(\mathrm{IV}))=0.987$$
$$g(\mathrm{II}+\mathrm{I}+\mathrm{V}+\mathrm{IV}+\mathrm{III})=1.0$$

Table 7　相乗・相殺効果のアンケート結果

	I	II	III	IV	V
I	——	−1.2	1.7	1.5	1.8
II		——	0.3	−0.8	1.9
III			——	−1.4	1.5
IV				——	−0.4
V					——

〔STEP 3〕ファジィ積分による総合評価

次に、評価項目(I)から(V)の評点のなかで最低点は、(III)の0.068である。そこでこの0.068に的を絞ると、他の評価項目の評点は、すべて0.068よりも高い点になる。つまり、0〜0.068の間には、すべての評価項目が含まれている。そこでこの間の評点は、0.068に(II＋I＋V＋IV＋III)のファジィ測度1.0を掛けた値になる。結局、

$$E(1)=0.068\times g(\mathrm{II}+\mathrm{I}+\mathrm{V}+\mathrm{IV}+\mathrm{III})$$
$$=0.068$$

と表現できる。

次に低い評点は、評価項目(IV)の0.085である。つまり、0.068以上0.085までには、評価項目(II＋I＋V＋IV)が含まれている。そこで、この間の評点E(2)は、

$$E(2)=(0.085-0.068)\times g(\mathrm{II}+\mathrm{I}+\mathrm{V}+\mathrm{IV})$$
$$=0.0168$$

となる。

同様にして、0.085以上0.144までの部分評点E(3)は、

Table 8　路線①のファジィ測度

ファジィ測度名 ＼ λ	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
g(II)	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289
g(II＋I)	0.608	0.596937	0.585874	0.574811	0.563748	0.552685	0.541623	0.53056	0.519497	0.508434	0.497371
g(II＋I＋V)	0.727	0.729304	0.731609	0.733913	0.736217	0.738522	0.740826	0.743131	0.745435	0.747739	0.750044
g(II＋I＋V＋VI)	0.925	0.931258	0.937517	0.943775	0.950034	0.956292	0.962551	0.968809	0.975067	0.981326	0.987584

Table 9　各代替案(路線)のファジィ積分による総合評価値

路線名 ＼ λ	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1	0.16710	0.16712	0.16714	0.16716	0.16718	0.16721	0.16723	0.16725	0.16727	0.16729	0.16731
2	0.11209	0.11258	0.11308	0.11357	0.11407	0.11457	0.11506	0.11556	0.11605	0.11655	0.11704
3	0.10880	0.10927	0.10974	0.11021	0.11068	0.11115	0.11161	0.11209	0.11256	0.11303	0.11350
4	0.07761	0.07764	0.07766	0.07768	0.07771	0.07773	0.07775	0.07778	0.07780	0.07782	0.07785
5	0.23013	0.23080	0.23148	0.23215	0.23282	0.23350	0.23417	0.23484	0.23552	0.23619	0.23687
6	0.08726	0.08745	0.08765	0.08785	0.08804	0.08824	0.08844	0.08863	0.08883	0.08903	0.08923
7	0.05807	0.05865	0.05923	0.05981	0.06040	0.06098	0.06156	0.06215	0.06273	0.06331	0.06390
8	0.09259	0.09290	0.09321	0.09352	0.09383	0.09414	0.09445	0.09476	0.09507	0.09538	0.09569
9	0.06636	0.06636	0.06635	0.06634	0.06634	0.06633	0.06632	0.06632	0.06631	0.06630	0.06630

$$E(3)=(0.144-0.085)\times g(\mathrm{II}+\mathrm{I}+\mathrm{V})$$
$$=0.0443$$

となる。

以下、0.144以上0.164まで、0.164以上0.262までのそれぞれの部分評点、E(4)、E(5)は、

$$E(4)=(0.164-0.144)\times g(\mathrm{II}+\mathrm{I})$$
$$=0.0099$$
$$E(5)=(0.262-0.164)\times g(\mathrm{II})$$
$$=0.0283$$

となる。

この結果、路線1(代替案1)の総合評価値E_3は、

$$E_3=E(1)+E(2)+E(3)+E(4)+E(5)$$
$$=0.1673$$

となる。この計算過程をFig. 3に示した。なお、この計算を路線2から路線9まですべての代替案について行った。ただし、⒃式のパラメータλは0から1.0まで0.1きざみの値でファジィ測度を計算した。その結果、例えば路線①のファジィ測度はTable 8に示すようになった。また、路線1から9までの総合評価値はTable 9に示した。

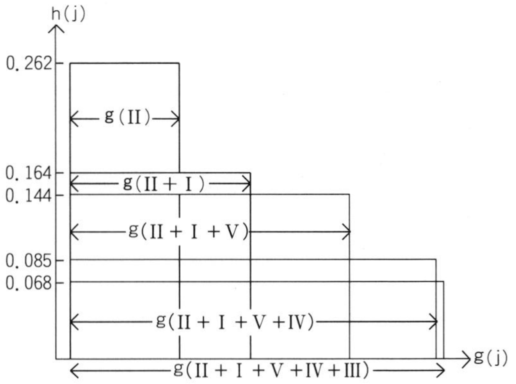

Fig.3　ファジィ積分

6．おわりに

本研究においては、高速道路路線の建設優先順位決定問題にファジィ積分を適用する際の具体的手法をＡＨＰ手法と組み合わせて以下の要点で提案した。

(1)ＡＨＰ手法(Saatyが提案した従来のＡＨＰ手法)により本稿の例を分析した。

(2)(1)により得られた各評価項目間のウエイトW_Aをファジィ密度とし、各評価項目毎の各代替案のウエイトW_Bを評価値とした。

(3)相乗・相殺効果の度合いをアンケートより抽出し、その結果と(2)で得られたファジィ密度よりファジィ測度を求めた。

(4)(3)により得られたファジィ測度を用いて、ファジィ積分の計算を本研究で提案した方法により行った。その結果、パラメータ$\lambda=0$のとき、ＡＨＰ手法の分析と同一であることがわかった。

また、今後の課題として次の2点が考えられる。

(1)本研究では、ファジィ積分を用いて、評価値がクリスプな場合を分析したが、評価値がファジィな場合についても検討しなければならない。

(2)ＡＨＰ手法の一対比較値は、線形尺度を用いているが、指数関数値やファジィな値を用いる場合について検討しなければならない。

最後に、本研究における計算は、長岡技術科学大学在学の松本勇男君にご協力頂いた。ここに感謝の意を表わす次第である。また、有益なご意見を頂いた国際交通安全学会編集委員の方々に対して深謝の意を表わす。

参考文献

1) T.L.Saaty:The Analytic Hierarchy Process,Mc Grau−Hill,1980
2) 木下栄蔵「階層分析法による道路の整備優先順位の決定に関する研究」『交通工学』Vol.25、No.2、pp. 9〜16、1990年3月
3) 木下栄蔵「階層分析法による高速道路路線の建設優先順位決定に関する研究」『交通工学』Vol. 26、No.6、pp.21〜27、1991年11月
4) 木下栄蔵「階層分析法による多目的意思決定問題への適用に関する研究」『交通工学』Vol.28、No.1、pp.35〜44、1993年1月
5) 木下栄蔵「多目的意思決定手法による高速道路路線の建設優先順位決定に関する研究」『土木計画学研究・講演集』No.15(1)、pp.137〜144、1992年11月
6) 木下栄蔵「階層分析法による代替案優先順位決定に関する研究」『高速道路と自動車』Vol. 35、No.12、pp.19〜25、1992年12月
7) 木下栄蔵他「交通機関選択におけるファジィ性の取扱いについて」『土木計画学研究・講演集』No.9、pp.337〜343、1986年10月
8) 木下栄蔵『意思決定論入門』啓学出版、1992年1月
9) 寺野寿郎他『あいまい工学のすすめ』講談社