

都市高速道路交通安全対策立案へのファジィ理論の応用

AN APPLICATION OF FUZZY SET THEORY TO TRAFFIC SAFETY PLANNING
ON URBAN EXPRESSWAY

秋山孝正*・邵 春福**・内田 敬***・佐佐木 綱****

By Takamasa AKIYAMA, Chun-Fu Shao, Takashi UCHIDA and Tsuna SASAKI

Traffic safety planning on urban expressway becomes important problem. Three methods to obtain better combination of countermeasures within certain budget were already proposed. They all have mathematical crisp formulation. On the contrary, fuzziness in actual economical evaluation should be considered for advanced traffic safety planning. Some application of fuzzy set theory will be shown in this study. Fuzzy budget constraints are used for modification of Incremental Benefit-Cost Analysis and Dynamic Programming Approach. For further investigation, fuzzy benefit coefficients are also discussed to obtain and display more actual alternatives.

Keywords : fuzzy budget constraints, urban expressway, traffic safety planning

1. はじめに

都市内交通の円滑・安全・快適な輸送を目指す都市高速道路は一般道路に対して道路構造上からも交通の安全性は高いといえる。したがって道路交通全体の安全確保という意味では一般道路を主とした広域的交通安全施策を検討することは必要不可欠である¹⁾。

しかし本来、交通安全対策は人身事故の危険、円滑交通阻害の側面から高速道路交通計画においてもなお検討すべき課題であり、また混合交通ではない状況下での一般道路とは異なる安全施策の必要性もあり、この問題に特に注目し検討することは有意義である。

また都市高速道路においては、高速走行を基本とする道路構造となっていること、交通安全施設の設置が基本となること、安全対策立案では路線単位の個別対策案を考えこれらを特定予算制約の中で実行するという計画の枠組みをもつことなどから、問題の具体的な定式化にお

いては、数理計画法の応用が提案されてきた。すなわち効率的かつ有効な対策案とする手順の定式化と求解について考察するものであり、いくつかの方法の比較検討がなされてきた。

こうした数理計画法の定式化を採用する場合、現実的には、①都市高速道路における交通安全対策立案に際して、運営上、交通安全対策経費を独立して計上していないこと、②各安全施策を実施した場合に生じる交通事故の軽減によって得られる経済的効果（便益）が必ずしも計量的確定値として予測することが難しいといったことから、現実性のある実行可能な計画立案を考える場合には、これらの不確定的な状況を考慮に入れた検討を行う必要がある。

そこで本研究では、まず都市高速道路における個別の交通安全対策から構成される代替案作成問題とその従来の解法について検討する。次に個別の安全対策の組合せとして安全対策の代替案を作成する方法について検討結果を整理する。また都市高速道路における実際的な適用について検討する。さらに安全対策の立案方法に対して、ファジィ性を考慮した方法論的改良について検討することとした。ファジィ化により、従来の数理計画的な交通安全対策案導出手順の合理性と各方法の利点を拡張し、より一般的に利用可能とすることを目指すものである。

* 正会員 工博 京都大学講師 工学部交通土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 学生会員 工修 京都大学大学院 工学研究科交通土木工学専攻 (同上)

*** 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室 (同上)

**** 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室 (同上)

2. 都市高速道路の安全対策立案

(1) 安全対策立案問題と従来の解法

従来の研究にも示されるように、ここで注目する問題は、都市高速道路の交通安全対策代替案の構成要素である各地点の詳細な安全施設設置計画の内容と、その個別計画実施による費用・効果が貨幣価値で計上されているとき、これらの組合せとして高速道路路線全体の交通安全対策案を作成するものである。

つまり計画目標は「交通安全対策に要する費用上限に対し、この範囲内で最も効果的な代替案を求めること」である。同種の問題については、アメリカのFHWA (Federal Highway Administration) 報告書に具体的検討結果が示されており²⁾、またこれらの計算方法に関して基礎的整理が行われている。

まず本研究で取り扱う都市高速道路における交通安全対策の概要を検討する。

都市高速道路では各種原因の交通事故が発生し、また偶発的事象ではあるが、道路構造上の問題や過大な交通量が事故の原因となる場合も多く、事故多発場所を知ることが可能である。このことから曲線部、合流部、分岐部での交通安全対策が考えられる。具体的には表-1に示すように、それぞれの対策案で個々の安全施設を何処に設置するかが基準となっている³⁾。

たとえば環状線の第1案(表中のI-1)は、具体的には、曲線部で赤色点滅灯と注意標識をそれぞれ10か所(C₁×10, C₃×10)、分岐部で路面標示を20か所(D₁×20)、合流部で路面標示を20か所(G₁×20)にそれぞれ設置するものである。したがってこの費用は、これらの個別施設の経費の総額で1820万円である。また便益はこの対策案の実施効果を予測計上したものである⁴⁾。

費用・便益に関する厳密不変な方法が存在すれば、当然これらの値は確定的に決定される。しかし実際には現実的制約、計測可能性などから確定値を設定しにくいいため、特定の問題に限定し(ここでは施設設置)、また以下で行うような数理計画的な解法を用いる差異には1つの最確値としてこれらを用いる。

ここで考慮すべき問題は具体的には表中に挙げられているそれぞれの対策案から路線ごとに高々1案を選択し、ある安全対策予算内で適当な対策案を抽出してこの組合せとして代替案を作成するものである。

(2) 最適安全対策の導出方法

さきに示した問題解決において、単純な便益・費用の比から検討する方法のほかに数学的アルゴリズムとして記述可能な方法として以下のような手法が提案されている。①増分費用便益分析による方法 (Incremental Benefit-Cost Analysis)、②ダイナミックプログラミング

表-1 個別交通安全対策案の例

NO	路線	番号	対策案の内容	費用	便益
①	I	1	C ₁ ×10, C ₃ ×10, D ₁ ×20, G ₁ ×20	1820	19200
②		2	C ₁ ×10, C ₃ ×10, D ₂ ×20, G ₂ ×20	3340	21700
③		3	G ₁ ×200 C ₂ ×10, C ₃ ×10, C ₅ ×6, D ₁ ×20	2440	25600
④	II	1	C ₃ ×10, D ₁ ×20, D ₂ ×20, G ₂ ×20	1420	13300
⑤		2	C ₂ ×4, D ₁ ×20, D ₂ ×10	502	6400
⑥	III	1	C ₁ ×8, C ₄ ×10, D ₁ ×10, G ₁ ×10	1090	10520
⑦		2	G ₂ ×10 C ₁ ×2, C ₅ ×2, G ₁ ×10, G ₂ ×20	930	6750
⑧		3	C ₂ ×10, C ₃ ×10, G ₁ ×20, G ₂ ×40	2340	22520
⑨	IV	1	D ₁ ×40, D ₂ ×20	380	3000
⑩		2	C ₁ ×10, D ₁ ×20, D ₂ ×10, G ₂ ×10	1390	12300
⑪		3	C ₁ ×10, C ₃ ×10, C ₄ ×10, D ₁ ×40, D ₂ ×10, G ₁ ×10, G ₂ ×20	2410	24710
⑫	V	1	C ₁ ×10, D ₁ ×40, G ₁ ×20	1180	7200
⑬		2	C ₂ ×10, C ₃ ×10, C ₅ ×6, D ₂ ×10,	2540	24890
⑭		3	G ₁ ×10 C ₂ ×10, C ₄ ×10, G ₁ ×10	840	5980
⑮	VI	1	C ₁ ×10, C ₂ ×10, C ₅ ×10, D ₁ ×20, D ₂ ×20, G ₂ ×20	4000	40400
⑯		2	C ₁ ×10, C ₅ ×6, D ₁ ×40, D ₂ ×40,	2740	24100
⑰		3	G ₂ ×10 C ₃ ×10, C ₄ ×10, D ₂ ×20, G ₁ ×10, G ₂ ×10	1220	11590
⑱	VII	1	C ₃ ×10, D ₁ ×10, G ₁ ×10	760	7300
⑲		2	C ₅ ×2, D ₂ ×20, G ₁ ×20, G ₂ ×20	1020	9420

[note] C₁:赤色点滅灯の設置; C₂:警戒標識の設置 (万円)
C₃:注意標識の設置; C₅:無画面表示
C₄, D₁, G₁:路面標示; D₂:クッションドラム
G₂:レーンパバイダ

による方法 (Dynamic Programming), ③整数計画法による方法 (Integer Programming). これらは、さきのFHWAの研究に基づき、これまでに著者らが紹介しているものであり、その詳細な演算手順についてはここでは割愛する^{4)~6)}。

さきの表-1に示した安全対策案集合に対して、計画予算制約として、7900万円を設定した場合を例とする。この場合の便益最大という点からの組合せ最適解は唯一であり、[採択案: I-3, II-2, IV-3, V-2, 便益: 81600万円/費用: 7892万円]である。当然ながら、①~③のいずれによってもこの解を得ることができる。したがって各計算法の特徴は計算の厳密性と効率性、計算結果の表現形式等によって比較を行うことになる。

a) 増分便益費用分析による方法

この方法は、各対策案相互の関係について一方の対策案を選択するために必要な費用増分(ΔC)に対して、どの程度の便益増分(ΔB)が見込まれるかという点から開発されたアルゴリズムである⁵⁾。

この方法における表現上の利点は、演算結果から得られる増分便益費用比について表-2に示すようなワークシートが得られることである。この表は増分便益費用比(R_{ij}=ΔB/ΔC)の順位により作成されており、代替的対策案の選択されるべき順序が容易に把握でき、またこの表は一意的に決定される。したがって当該予算額が変化した場合にも、総費用欄の値を用いて実行可能性(予算制約の範囲内での)を検討することで、新た

表一 増分便益費用分析のワークシート

対策番号	増分費用	増分便益	R _{ij}	総費用	総便益	採否
II-2	502	6400	12.75	502	6400	*
I-1	1820	19200	10.55	2322	25600	
I-3	620	6400	10.32	2942	32000	*
IV-3	2410	24710	10.25	5352	58710	*
VI-1	4000	24890	10.10	9352	97110	
V-2	2540	10520	9.80	7892	81600	*
III-1	1090	7300	9.65	8982	92120	
VII-1	760	12000	9.60	8652	88900	

(単位: 万円)

な対策案の組合せを知ることが可能である。

b) DP による方法

この方法の定式化の基本的部分は次のようである。

$$f_n(S_n) = \max \{r_n(S_n, d_n) + f_{n-1}(S_{n-1})\} \dots\dots\dots (1)$$

$$S_{n-1} = S_n - C(d_n) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 S_n : n ステップにおける総費用、 d_n : n ステップでの選択対策案、 $f_n(S_n)$: n ステップにおける最大総便益、 $r_n(S_n, d_n)$: 総費用 S_n で d_n 案を採用した際の便益、 $C(d_n)$: d_n 案実施に要する費用

つまり、各ステップ(本例では各路線を順に考慮することに対応する)において、対策案 d_n を採用していき、順次加算されて得られる総便益を最大化しようとするものである。

この方法では、定式化を行ううえで計画における増分単位費用 (increment of cost) を考えることができる。つまり「個別安全対策が複数同時に実施されて初めて効果を与える場合」、「投資予算が一定単位額で計上されている場合」に対応し、いずれの場合も連続的な投資額にはならないからである。

本問題では個々の対策案が最小 10 万円の単位で表示されており、増分単位費用を 10 万円として計算すれば、当然最大便益解 (81 600 万円) と一致する。また増分単位費用の値を大きくしていけば、単調ではないが全般的傾向として計算結果の便益額は小さい値の組合せとなる。

たとえば単位費用 100 万円の場合には最適解から 2.3% の便益減少がみられる。この程度の便益減少が現実的な解の良否に関係するか否かは実際の (上記 2 つの理由などから) 検討の必要がある。

また計算上の問題では、一般的に小さな幅で計算を行うことは当然その各ステップの演算回数を増加させることになり、演算に要する時間は増大することは明らかである。つまり計算効率からは増分単位費用を大きくとることが望ましく、逆に解の厳密性からいえばこれを小さくする必要はある。

したがってこの方法においては、いかなる「増分単位費用額」を用いるかを計画段階で考慮できる点が重要な特徴となっている。

c) 整数計画法による解法

この方法は、いわゆる 0-1 計算問題として定式化したものであり、計算アルゴリズムとしての複雑さはあるが、数式的表現は明解である。すなわち、予算制約 (式 (4)) と路線の制約 (式 (5): 各路線で高々 1 案を採用すること) のもとで総便益を最大化するものである。

$$\max \sum_i \sum_j b_{ij} \cdot x_{ij} \quad \begin{matrix} j \in J: \text{路線集合} \\ i \in N: \text{対策案集合} \end{matrix} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{s.t.} \quad b_{ij}: \text{対策実施便益}$$

$$\sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij} \leq B \quad \begin{matrix} c_{ij}: \text{対策案実施費用} \\ B: \text{予算制約} \end{matrix} \dots\dots\dots (4)$$

$$\sum_k x_k \leq 1 \quad \begin{matrix} k \in G: \text{各路線での実行} \\ \text{可能案の数} \end{matrix} \dots\dots\dots (5)$$

$$x = 0, 1 \dots\dots\dots (6)$$

この方法における特徴は次のような点である。

① 組合せ最適化問題として基本的な定式化がなされているので、当然数学的に厳密な最適解を求めることができる。具体的には通常の整数計画法の解法手順を用いることができる (必ずしも一般的に容易ではないが、パッケージプログラムなどもある)。

② 定式化が数理的に簡潔であるので、制約条件、便益額あるいはその他の計画条件の変化は、定式化の若干の変更で対応することができる (本例のような場合には、計画実施のための優先路線を考慮した場合などが挙げられる)。

(3) 安全対策立案とファジィ性の考慮

以上のような数理計画的方法は計算実行上のいくつかの特徴をもち、それぞれ組合せ最適解を得る方法として有効であることが紹介されている。したがって安全対策立案時の計画条件と合致する方法を用いることで、各方法の現実的有效性が見出されるものと思われる。

また、表一の値がきわめて正確に計測され、またこの数量を厳格に用いた計画の場合には、上記のおおの最適解が現実の安全対策実施上も確実な効果を発揮すると考えられる。

しかしこれらの方法を都市高速道路の交通安全対策立案に一層適切に応用するためには、現実計画実施に伴って生じる不確定な要因を考慮することが重要となると考えられる。ここでは主要なものとして以下の 2 点を考えることにした。

① 都市高速道路の交通安全対策に用いることのできる経費は、普通「維持管理費」等の関連経費に内包されて考えられていることが多い。したがって安全対策への予算は概略的には計上することができるが確定的には難しい。実際の運営を考慮しても計画変更に対する柔軟性をもたせた方法を用いることは現実的である。

② 経済効率から最適な安全対策案を立案する場合に、各対策案の費用・便益が中心的な資料となるが、実

際には定量的、画一的に計測が困難な要因も含まれる(たとえば快適性の向上など)。したがって特に予測される便益値等に若干の判断の幅を含めて検討することが現実的である。

以下では、このような検討結果に基づき従来方法のファジィ理論を用いた修正を行うことにする。

3. ファジィ制約を用いた代替案立案計画

(1) ファジィ数値計画法

まず一般的なファジィ数値計画の方法について述べる。

ファジィ最適化の概念は1970年に R. E. Bellman と L. A. Zadeh がファジィ環境における意思決定として、代替案集合 X 上にファジィ目標 (fuzzy goal) とファジィ制約 (fuzzy constraints) が与えられた際の検討を行ったものが端緒である⁷⁾。ここでファジィ目標 G とファジィ制約 C は、メンバシップ関数 μ_G, μ_C によって定義される代替案の集合 X 上のファジィ集合である。

このときファジィ目標とファジィ制約を統合した決定集合を定義する必要がある。Bellman と Zadeh は、ファジィ目標 G とファジィ制約 C を同時に満たすことを考慮して、ファジィ決定 (fuzzy decision) D を、ファジィ目標 G とファジィ制約 C との共通集合と定義した。

すなわちファジィ決定 D は、

$$D = G \cap C \dots\dots\dots (7)$$

であると定義され、そのメンバシップ関数は、

$$\mu_D(x) = \mu_G(x) \wedge \mu_C(x) \dots\dots\dots (8)$$

である。一般に複数個のファジィ制約が存在する場合への拡張は容易に行うことができる。 G_1, G_2, \dots, G_n をファジィ目標とし、 C_1, C_2, \dots, C_m をファジィ制約とすればファジィ決定 D は、

$$D = G_1 \cap G_2 \cap \dots \cap G_n \cap C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_m \dots\dots\dots (9)$$

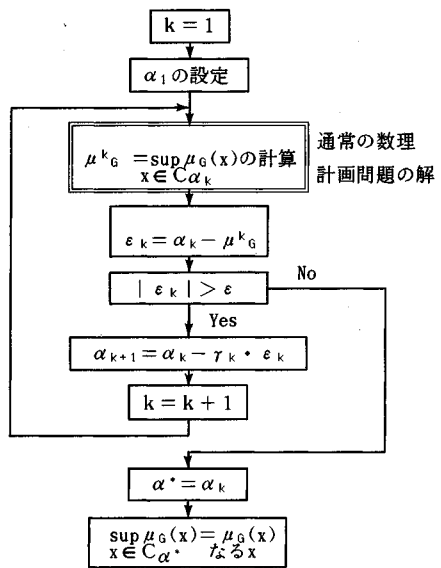
と定義され、このメンバシップ関数は以下のようなものである。すなわち目標と制約の共通の満足度をメンバシップ関数として表現したものである。

$$\begin{aligned} \mu_D(x) &= \min_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (\mu_{G_i}(x), \mu_{C_j}(x)) \\ &= \min (\mu_{G_1}(x), \dots, \mu_{G_n}(x), \mu_{C_1}(x), \dots, \mu_{C_m}(x)) \end{aligned} \dots\dots\dots (10)$$

ファジィ決定 D における意思決定としては、 D に帰属する度を最大にするような x を選ぶという最大化決定が提案されている。すなわち、

$$\mu_D(x^*) = \max_{x \in X} \mu_D(x) \dots\dots\dots (11)$$

となるような x^* を求めるものである。ここで、このような x^* は存在しない場合もあれば、無数に存在する場合もある。またこの最大化決定のほかに「凸ファジィ決定」や「積ファジィ決定」などが提案されている。



図一1 ファジィ数値計画問題の解法手順

[ファジィ数値計画法の解法]

さきに述べた最大化問題は、 α -レベル集合を用いて次の最大化問題に転化できる⁸⁾。すなわち、

$$\sup_x \mu_D(x) = \sup_{\alpha \in [0,1]} \left[\alpha \wedge \sup_{x \in C_\alpha} \mu_G(x) \right] \dots\dots\dots (12)$$

この式は α レベルごとの各問題における解のうち、最大のものを求めることを示している。このファジィ数値計画法の解法は一般に図一1に示すような、 α カットを用いて反復計算で求めることができる (ϵ : 収束判断基準)。

本図よりわかるように、このアルゴリズムには「通常の数値計画問題」の解法をプログラム中に含んでいる。したがって、このアルゴリズムを用いることで、通常の数値計画問題はすべてファジィな意思決定問題に拡張できることがわかる。

このフローからわかるように一般に目的関数のメンバシップ関数値 (μ_G) と制約条件のメンバシップ関数値 (μ_C) の一致性から解を求めることができる。したがって、特定の収束判定基準を満たすものを解とするものである。

本研究では、このアルゴリズムを利用したファジィ数値計画問題として各解法を考えるために、ファジィ目標 μ_G を定義する。ここでは、いずれの解法の場合も予算の上限制約をもつ便益の最大化決定問題であることから、次のように定義した。

$$\mu_G(x) = Z(x) / Z^*(x) \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 $Z(x)$: $x \in C_\alpha$ の際の数値最適解、 $Z^*(x)$: 制約を最大限 ($\mu_D(x)=0$) とした場合の数値最適解

またファジィ制約を示す μ_C は次のように定義される。

$$\mu_c(b) = \begin{cases} 1 & b \leq B^- \\ \phi(b) & B^- \leq b \leq B^+ \dots\dots\dots(14) \\ 0 & b \geq B^+ \end{cases}$$

ここに、 B^- ：設定制約値、 B^+ ：制約可能最大限度、 $\phi(b)$ ：単調減少関数

(2) ファジィ制約をもつ増分便益費用分析

a) 計算手順の概要

ここで検討する「ファジィ制約」は計画段階において予算面の余裕をもつ計画を行うことに相当する。もし予算面で従来のクリスプ制約を用いて計画立案を行う場合には、これを若干でも超過する代替案は選択可能性がない。これに対してファジィ制約を付加することによって、余裕を見込んだ計画立案を試みるものである⁹⁾。

すでにみたように増分便益費用分析においては、予算制約は、最終的に増分便益費用比の順が決定され(既出のワークシートに相当)、この組合せ選択時に考慮される。したがって予算の変化に対しては無理なく対応できる方法であるといえる。したがって、ファジィ費用制約の場合にも従来手順を組み込んだ同様のファジィ数理計画の解法手順を用いることができる。

ただし本研究での代替案作成問題は組合せ最適化問題であるから、解は連続的には変化せず段階的な変化をする。したがって目的関数と制約条件のメンバシップ関数はそれぞれ階段関数と連続関数となり「ファジィ最適化問題」は必ずしも交点をもつとは限らない^{9),10)}。

この状況を制約条件と目的関数のメンバシップ関数の関係として示す。いずれの場合においても、予算制約値 b の増加に伴って μ_c は減少、 μ_g は増加する傾向をもつ。図-2 のような両関数に交点が存在する場合はこれが解となり問題がないが、各関数が交点をもたない図-3 のような場合には、定義に従えば図中の $P(s, \mu_d(s))$ がファジィ最適決定点である。すなわち、式(11)を満たす最大化決定がなされたということである。

これを計算アルゴリズムとして考慮する必要があるが、本図からもわかるように、このときの両メンバシップ関数値の関係は必ず、

$$\mu_d(s) \geq \mu_c(s) \dots\dots\dots(15)$$

である。この性質を利用して、ファジィ最適化の演算アルゴリズムを図-4 に示すようなものとした。

簡単にそのメカニズムを考えると、制約条件のメンバシップ関数を考え α カット集合を $\alpha=1$ から(したがって $\mu_c=1$ から)計算を始め、 α を順次微小なステップ幅で減少させ、ある値に至ったとき、当該ステップにおいて、初めて $\mu_d(s) \geq \mu_c(s)$ の条件が満たされなくなった場合(つまり $\mu_d(s) < \mu_c(s)$) に、その直前ステップの目的関数値を求めるといふものである。

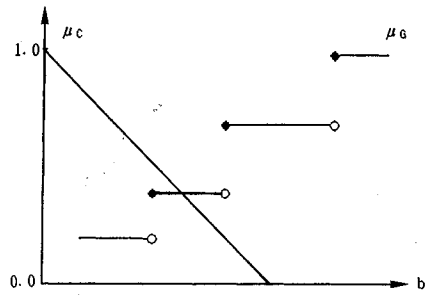


図-2 ファジィ制約(ケース1)

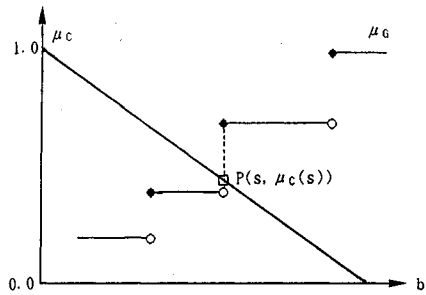


図-3 ファジィ制約(ケース2)

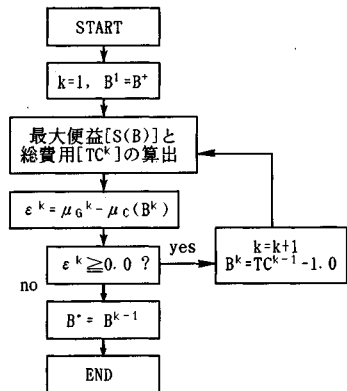


図-4 ファジィ増分便益費用分析の解法手順

b) 計算結果とその検討

ここでは、予算制約条件に対して、変化傾向の異なる2種類のメンバシップ関数のタイプを考えた。

図-5 は線形に変化するメンバシップ関数であり、図-6 は Z-関数とよばれる非線形の変化をするものである。ここで、 B^- は当該問題の初期予算額(したがって、7900万円)とし、それぞれの関数タイプに対して制約条件の B^+ を変化させて最適解を求めた場合の総費用と総便益を表-3 に示す。

制約条件の上限(B^+)を大きくすると当然のことながら得られる解も大きくなる。また関数形($\phi(x)$)による差異を比較すると、 $\mu_c > 0.5$ の部分(変曲点より B が小の部分)では、Z 関数の偏曲により、同一満足度であっ

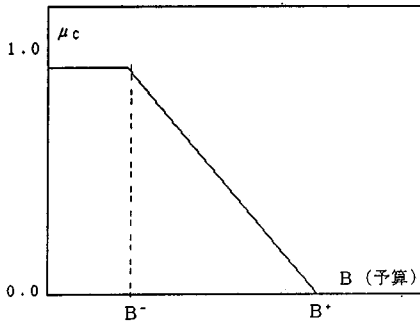


図-5 線形の費用制約条件

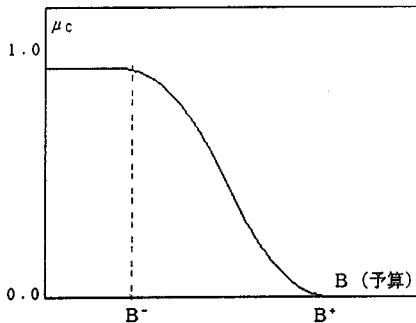


図-6 Z関数による費用制約条件

表-3 ファジィ増分便益費用分析の計算結果

予算制約	8000	9000	10000	11000	12000	13000
線形制約	81600 (7892)				91020 (8912)	97110 (9352)
Z関数制約	81600 (7892)	88900 (8652)	91020 (8912)	97110 (9352)	104410 (10112)	
	総便益 (総費用)					

でも線形関数に比べて大きい予算額を設定することになるので、式(13)、式(14)を参照すれば便益(Z_b の値の増加)、費用(b が B^* に近づく)ともに前者より大きな値となることがわかる。

このような定式化を行った場合には、以下のような点が解の決定に関与することになる。

① この問題の定式化において、制約条件の最大値は結局、各変数の許容される変化分を示すことになる。これは結局、目的関数メンバシップ値の最大可能範囲を決定していることになる。したがって B^* の値が増加すれば、当然目的関数の変化上限($Z^*(x)$)が大きくなり、この問題より得られる最終決定の満足度は小さくなる(つまりメンバシップ関数の変化は緩慢になり、関数値の小さい箇所まで均衡する)。

② 制約条件の上限 B^* 値の変化は、メンバシップ関数の傾斜(変化の勾配)を変更していることになる。したがってこの値を増加させると傾きは緩やかになり、これに伴い、得られる組合せ解の変化も緩慢になる。

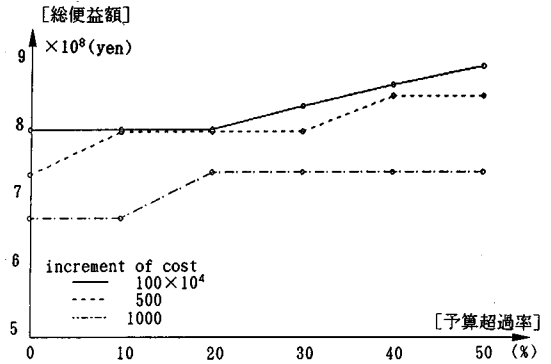


図-7 ファジィ DP による計算結果

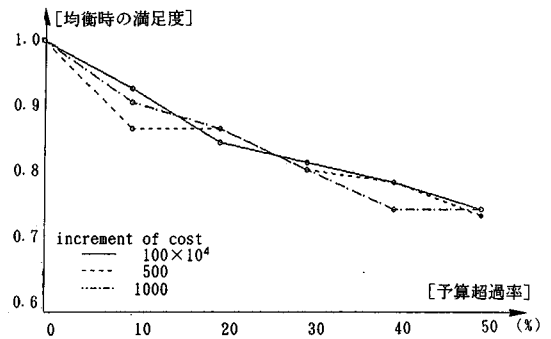


図-8 均衡値 μ の値の変化

(3) ファジィ制約をもつ動的計画法

a) ファジィ制約をもつ動的計画の解法

すでに述べたように、ファジィ数理計画法は従来の数理計画問題に一般的に用いることができる。したがって「増分便益費用分析」の拡張に利用したアルゴリズムは、ファジィ予算制約をもつ動的計画問題を取り扱う場合も同様に用いることができる。したがって、ファジィ意思決定としての解法上は全く変わる点はない。

しかし動的計画法においては、「増分単位費用」と併せた検討が定式化の性質上重要である。この点から得られる解の特徴をみるために、予算の制約に対するメンバシップ関数は線形の場合を考え検討を行った。

b) 計算結果とその検討

ここでは解の変化傾向をみるために、増分単位費用を100万円、500万円、1000万円の3ケースとし、またファジィ制約の最大値(B^*)を初期予算額の10%~50%までの10%ごとに変化させて、ファジィ DP 問題を解いた。それぞれの計算結果から得られる総便益と均衡下のメンバシップ関数値 μ を図示したものが図-7および図-8である。図-7から単位費用増加分が大きくなると、従来の非ファジィ動的計画問題自体が鈍感な解の変化しか与えなくなるので、ファジィ制約条件の示す予算余裕分に対しても敏感ではなくなる。たとえば、1000万円

を単位とする計画では、20%以上のファジィ性導入効果は現われていないことがわかる。

また、図-8より均衡下の満足度を示す μ の値は、いずれの場合も制約条件の幅が大きくなると（制約条件のメンバシップ関数の傾きが小さくなるので）徐々に均衡値は小さい（満足程度の小さい）対策案が抽出されることになる。また、当然のことではあるが、予算超過率 $([B^+ - B^-]/B^-)$ が0%のときには、従前のクリस्प問題と一致し、均衡時の満足度 $(\mu_0(x^*))$ はいずれの場合にも1.0となる。

c) ファジィ制約とその意義

前項では増分便益費用分析、ここではDPによる方法について、おのおのファジィ予算制約を付加するための手順を述べた。

このように従来の方法を用いて解決される各種の問題にファジィな制約条件を用いることは、最も典型的なファジィ性考慮の方法である。したがって、これは一般に費用に関する余裕を考えたものである。都市高速道路のような施設の場合には交通安全対策に関する費用だけで予算が計上されることは少なく、通常維持管理費用に含まれ、安全対策が必要ときに用いることができるものとなっている場合も多くみられる。したがって厳密に維持管理費用全体の何%を占めるかをあらかじめ決定していくことは難しい。ファジィな数として決定されたと考えることは現実的である⁹⁾。

また仮に、交通安全対策費用として一定の予算が計上されている場合においても、従来の方法では、若干の予算の超過も許すことのない意思決定がなされることになり、適切な代替案を選択しているかどうかは疑わしい。

これは、計画問題の頑健性(robustness)を考慮するものである。したがってあらかじめ計画における余裕(本研究の場合予算に関するもの)を考えて、この中でできるかぎり満足されるものを採用するということである。

4. ファジィ便益を用いた整数計画法

(1) ファジィ便益についての検討

これまで、予算の制約におけるファジィ性を考えたが、次に予測される便益のファジィ性について検討する。本研究のような問題で各対策により予測される便益は実際には、あらかじめ厳密に算定しておくことは難しく、これをクリस्प数として決定的に定義するよりもある程度の幅をもったファジィ数として表現することが実用的であると考えられる。

具体的には整数計画における定式化のうち、便益に関するパラメーターをファジィ量として取り扱った。さきに定式化されたもののうち係数 b で示される便益項について検討したものである。

ここでは、安全施設の設置便益におけるファジィ性を考慮するための例として、各対策案の中でも直接効果の観測しにくいと思われる「クッションドラムの設置」に着目した。すなわち表-1の対策案集合において、クッションドラムの設置を個別対策の中にも含むものを対象としている。ここで最終的な便益に影響を与える大きさは、「クッションドラム設置費用」の対策案全体に占める割合を用いた。たとえばII-1においてはクッションドラム設置費用260万円 $(=D_2 \times 20)$ であることから、18% $(=260/1420)$ のファジィ性を導入している。

このときのファジィ便益パラメーター b_f は、簡単のために、区間 $[b - 0.18 \cdot b, b + 0.18 \cdot b]$ にある三角型ファジィ数(Triangular Fuzzy Number)であるとする¹¹⁾。

同様に、関連する各便益パラメーターのファジィ化を行った。本研究の問題では、総便益に関連したパラメーターは19個で構成されているが、このうち11個がファジィパラメーターとなった。

(2) 計算結果とその考察

本問題の計算は、最終的にファジィ集合に関する「拡張原理」を用いて演算を行うことができる。実際には式(12)に示すように、 α カット集合を用いることで容易に求めることができる。ここでは、 $\alpha=0.0$ から0.1ごとに $\alpha=1.0$ までの計算を行った。

この例では個々の対策実施時の予測便益額がファジィ数で与えられるので、当然最終的な計算結果の便益もファジィ数で得られる。この計算結果を図示したものが図-9である。

この結果から、まずファジィ総便益の可能性分布を知ることができる。この場合は α カット集合ごとに計算が実行されるので、必ずしも最終的な対策案の組合せが一意ではなく、 α -レベルごとに異なってくる。したがって最終的な分布は非線形なものとなっている。

またこうした分布を利用する場合に、これを期待される総便益の可能性の範囲として利用できる。これは従来厳密に設定することが難しい便益額をファジィ数として設定しても、ある程度の判断が可能であることを示している。また計算結果として、一意的な値とすることが必

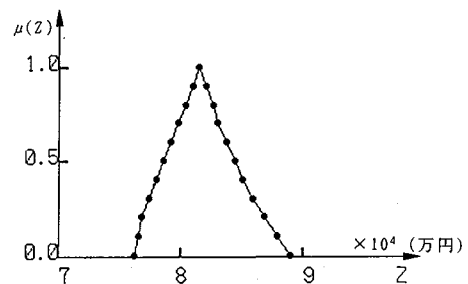


図-9 ファジィ数を用いた総便益額の表現

要である場合には、非ファジィ化 (defuzzification) の操作をすることによって代表値を求めることができる¹¹⁾。一般によく用いられる重心による方法を用いれば、この場合は、 $Z=81\ 850$ となりメンバシップ値1の点とほぼ同一になっていることがわかる。

このようにファジィ理論を用いた方法論の拡張により、従来の算出結果を包含した形の計画案検討が可能となる。

5. おわりに

本研究は都市高速道路における交通事故安全対策の策定方法に関して、従来の数値計画的な方法にファジィ理論を用いた展開の方法について検討した。

まず都市高速道路での交通安全対策の策定手順について、数値計画的な解法について、3種類の方法を紹介しその方法論の特徴を比較して検討した。最適解を求める点では各方法とも同様であるが、定式化と分析可能な項目での相違が明らかになった。さらにこれらの検討結果に基づき、各方法へのファジィ性導入方法を行った。具体的には計画におけるファジィネスとして予算の余裕、予測便益に対する判断の幅についての計算方法を示すとともに例題による検討を行った。以上のような手順により得られた研究成果として以下の点が挙げられる。

(1) 都市高速道路において、交通事故の発生は人身、物損はもとより、高速道路の使命である高速性も阻害されることになり安全対策の合理的作成方法の検討は重要である。この場合、詳細で厳密な計画案の導出方法が確立されていない現状では、規範的手順で得られた解を頑健性を含んだ形で利用する必要がある。この点で、計画の余裕を考慮したファジィ性の導入は重要である。

(2) 交通事故多発地点が都市高速道路では明確であること、路線ごとに分離して検討が可能であることなどの理由から「予算制約内の個別代替案の組合せ」として定式化が可能でありいくつかの解法が考えられる。これらはその解の厳密性、立案作業の容易性などからそれぞれの方法の特徴を生かしながら、ファジィ性を考慮することが可能である。

(3) 代替案作成計画においてファジィ理論を導入することは、従来のクリスプな計画立案を含んだ形での拡張となっており、この可能性分布の有効な利用を考えることで、計画上有益な情報を与えるものとなり得る。特に本研究で示したファジィ制約の利用と、便益のファジィ数表現はその最も典型的な方法として各種検討の基礎となり得る。

最後に本研究で提案した方法をさらに実用的なものとし、またさらに有効で現実的な交通安全対策案を導くために検討すべき今後の課題を述べる。

(1) 本研究では代替案の評価プロセスにおいて、交通安全対策に対する各側面からの評価を試みているが、評価項目の決定についての十分な検討が行われていない。特に利用者の快適性や対策案の実行可能性についての十分な検討が望まれる。この点についてもファジィネスに対する考慮が可能である。

(2) ここでは、交通安全対策として施設整備などの物理的施策について述べたが、実際には注意喚起のための広報的活動、円滑交通実現のための情報伝達など副次的対策とそのファジィ性については言及していない。本研究で述べたような安全対策もこうした各種施策との総合的な取扱いの中で初めて効率的である。したがって各施策を含んだ体系的検討も必要である。

(3) 計画においてファジィ決定を行うことは、意思決定における余裕あるいは頑健性を考慮していることになる。定式化を行ううえでファジィな取扱いが可能であるのは、必ずしも制約条件だけではなく、この点その他の定式化とその意義は検討する必要がある。

謝 辞：本研究を終えるにあたって、関連資料の収集に関して、阪神高速道路公団大阪管理部に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 総務庁編：平成元年版交通安全白書，大蔵省印刷局，1989.
- 2) National Technical Information Service：Assessment of Techniques for Cost-effectiveness of Highway Accident Countermeasures，1979.
- 3) 阪神高速道路公団：阪神高速道路のしごと，1988.
- 4) 秋山孝正：交通事故安全対策の系統的策定方法についての研究，交通安全対策振興助成研究報告書，Vol. 3，pp. 7～16，(財)佐川交通社会財団，1988.
- 5) 秋山孝正・佐佐木綱：都市高速道路交通安全対策案作成方法についての比較研究，土木計画学研究・講演集，No. 11，pp. 275～282，1988.
- 6) 秋山孝正・邵 春福・佐佐木綱：都市高速道路における交通安全対策の作成方法についての方法論的考察，交通工学，Vol. 25，No. 6，pp. 9～19，1990.
- 7) 坂和正敏：線形システムの最適化，森北出版，1984.
- 8) 浅居・ネゴイタ：ファジィシステム理論入門，第8章，オーム社，1987.
- 9) 秋山孝正：高速道路交通計画におけるファジィ理論と知識工学手法の応用に関する研究，京都大学学位論文，第6章，1989.
- 10) Takamasa Akiyama and Takashi Uchida：Traffic Safety Planning：Incremental Benefit-Cost Analysis with Fuzzy Budget Constraints，International Workshop on Fuzzy System Applications，pp. 161～162，1988.
- 11) 本多中二・大里有生：ファジィ工学入門，海文堂，1989.
(1990.1.23・受付)