

建設マネジメントにおけるファジィ理論の 応用に関する一考察

A BRIEF SURVEY ON APPLICATIONS OF FUZZY SETS TO CONSTRUCTION MANAGEMENT

楠鴻池組 技術研究所 ○折田 利昭

名古屋工業大学 山本 幸司

By Toshiaki Orita, Kohshi Yamamoto

人間のあいまいな思考・判断の過程をモデル化することを出発点としたファジィ理論の応用は、土木分野において土木計画学を初めとし構造工学、土質工学等で多数実施されており、人間的思考が重要な要素である建設マネジメント分野においては、きわめて応用性が高いと考えられる。

このような観点から、これまでに発表されている研究について、建設マネジメントに着目した文献調査を行い、利用されている分野ならびに应用しているファジィ理論の具体的手法について分類・整理する。

つづいて、具体的手法を応用した数事例を取り上げ、建設マネジメントへの応用に関する特徴を考察する。さらに、ファジィ拡張演算を応用したファジィPERTプログラムの概要ならびにその計算事例についてのべる。

キーワード：建設マネジメント、ファジィ理論、工程計画

1. はじめに

ファジィ集合論は、1965年にザデー教授により考案され、それ以降論理および測度を含めてファジィ理論へ発展し、プロセス制御を初めとして、金融から医療診断まで幅広く実用化が進んでいる。

建設マネジメントの分野は、構造物の計画・設計の段階と工事施工の段階の2つに大きく分けられ、前者では要求される品質や機能、あるいはその供用面における不確かさ、後者では工事施工に伴う不確かさならびにその計画・管理に付随する不確かさに起因する問題がある。これらの問題に対して、土木技術者は経験、勘等を含めてより適切に対処することが要求されている。

したがって、建設マネジメント分野においては、人間の判断、推論等の思考方法や主観的なあいまい量を比較的無理なく表現できるファジィ理論を適用することによって適切な対処が行えると考えられる。

ここでは、はじめにファジィ理論の利用に関する

発表事例を調査し、それらの特徴についてのべることとする。次に、土木技術者の主観が影響すると考えられる工程計画へのファジィ理論の応用について考察し、ファジィ変数を組み込んだファジィPERTプログラムの概要およびその計算事例についてのべる。

2. ファジィ理論応用の動向

(1) ファジィ理論の応用分野

建設に関する応用状況を調査することとし、文献検索システムJOISを利用して検索を行った。なお、ファジィ理論の応用が注目されてきたのが最近であることを考慮して、検索対象期間は1984.4から1989.10の約5年間とした。

建設マネジメントに関連すると考えて抽出した見出し語13個とファジィ集合を検索条件として検索すると、総文献数としては表-1に示すように60件抽出された。このうち、日本関連が30件と半数を占めており、建設マネジメント分野においても積

表-1 建設マネジメントにおける文献検索結果 表-3 ファジィ理論の方法と建設マネジメント分野での適用

検索条件 (ファジィシュウゴウAND)	件数	
	全件数	(国内)
ドボクコウガク	3	1
ドボクコウゾウブツ	4	4
ドボクケイカク	3	2
セキサン	1	1
ケンセンコウジ	14	4
ドボクコウジ	2	0
コウジケイカク	6	3
ドコウケイカク	1	1
コウジゲンバ	0	0
ケンセンカンリ	7	2
ゲンバカンリ	1	0
ホゼン	16	12
ケンセツギジュツ	2	0
合計	60	30

参考：ファジィシュウゴウ（2812件）

極的に応用に取り組んでいることがわかる。

また、表-1から保全（建設分野以外は除外した件数としている）に関しての応用が顕著であり、土木分野において保全が重要視される時代背景とも合致し、興味深い傾向がうかがえる。

上述の検索結果では、工事管理への応用例が少ないため、あらたに工事管理で重要な要素である工程管理、原価管理、品質管理、安全管理を検索条件として検索した。

その結果を示すと表-2であり、建設マネジメントに関連するものとしては、安全管理に該当する2件だけであった。

表-2 管理を中心とした文献検索結果

検索条件 (ファジィシュウゴウAND)	件数		
	全件数	(国内)	(土木)
コウテイカンリ	6	1	0
ゲンカカンリ	1	0	0
ヒンシツカンリ	15	5	0
アンゼンカンリ	10	3	2
合計	32	9	2

これは、上述の検索条件が適切ではないとも考えられるが、工事管理よりも工事計画への応用から取り組まれている傾向にあると考えられる。

(2) ファジィ理論の具体的手法による分類・整理

最適化、意思決定などの分野で、OR手法など従来手法のファジィ理論による拡張が行われており、ファジィ理論の具体的手法は数多く提案されている。

したがって、具体的手法がどのように応用されているかを整理することは、今後の応用に関して有効なことと考えられる。

しかし、今後の応用に対しては、上述の検索条件では適用分野として不明確であると考え、建設マネジメントの一般的フェーズ、すなわち、企画、調査、計画、設計、積算、施工計画、施工管理、保全（維持を含む）を適用分野の分類とすることとした。

分類	主要な具体的手法	適用分野	
		フェーズ	具体的課題
ファジィ集合の基礎理論	・ファジィ数 ・拡張原理 ・ファジィ確率 ・ファジィ統計	・計画 ・積算 ・施工計画 ・施工管理	・概略見積 ・施工機種の選定
ファジィOR	・ファジィ線形計画 ・ファジィ動的計画 ・可能性回帰分析 ・ファジィ数量化理論	・施工計画 ・保全	・土量配分計画 ・橋梁の安全度評価
ファジィ推論とファジィ制御	・ファジィ推論 ・ファジィ制御 ・ファジィエキスパートシステム	・設計 ・施工計画 ・施工管理 ・保全	・RC床版の健全度評価 ・シールドの掘進制御
その他の手法	・ファジィ積分 ・ファジィクラスティング ・ファジィ構造分析	・企画・調査 ・計画・施工計画 ・保全	・岩盤分類 ・斜面崩壊の危険度評価

一方、ファジィ理論の主要な具体的手法の分類に関しては、秋山の方法³⁾に従い文献検索結果を整理すると表-3のようになる。

表-3の対象とされた具体的課題にも見られるように、専門家の評価が伴う課題に対してファジィ理論を応用した例が多い。これは、AIと同様に人間の判断能力を十分に利用するという流れと同じと考えられ、両者が共存することによって、より有効となると思われる。

(3) ファジィ集合の対象

前述の検索結果からは、建設マネジメントで多く用いられている手法として、ファジィ確率、ファジィ線形計画法、ファジィ制御、ファジィエキスパートシステム、ファジィ積分があげられる。

個々の手法についての詳細な説明は、他の参考文献²⁾を参照されたい。

ここでは、上述した各々の手法を応用した具体例5つを取り上げ、それぞれが何をファジィ集合の対象としたのか、どのようにメンバシップ関数を設定したのかについて手法との関連から考察する。

a) ファジィ確率の応用例

黒田ら³⁾による施工機種の選定があげられる。

土工機械は運搬距離、走路条件により、ある程度機種が絞られるが、その候補の中からファジィ集合と考えられる地山状態（軟弱土、普通土、良質土）および走行路の土質状態（トラフィカビリティが悪い、普通、良い）を把握して選定するプロセスがとられている。

ここでは、地山状態の先験確率、確率的情報（コーン指数）がえられた地山状態の条件付確率および土質状態の情報が得られた地山状態の条件付確率の3つの場合に対して期待効用を最大とする工法を選

択する方法としている。なお、ファジィ集合のメンバシップ関数は技術者から獲得している。

b) ファジィ線形計画法の応用例

見波ら⁹⁾による現場間土量配分計画があげられる。一般に、「各現場の進捗状況は必要な土量をいつごろ搬出」できるだろうというようにそれぞれあいまいである。そこでこのような条件を加味するため土量の搬出・搬入時期をファジィ制約とし、総費用をファジィ目標と考えて、解を求めている。このように判断に幅と余裕を持たせられることにより、より現実的なアプローチとなっている。なお、メンバシップ関数は台形ならびに三角形分布を用いている。

c) ファジィ制御の応用例

桑原ら⁵⁾によるシールドの掘進制御があげられる。専門家はシールドの動き（水平変位量、土圧変化量等）を総合的に判断し、操作量（コンベア回転数、ジャッキスピード等）を決定している。

このように、掘進制御は専門のオペレータの経験により行われており、自動化を目指すためにはその専門知識を応用することが必要である。

ここでは、動きと操作量のファジィ関係をルールとし、ファジィ制御を行っている。なお、メンバシップ関数は計測結果から算出し、シールドの動きを数値シミュレーションで検証している。

d) ファジィエキスパートシステムの応用例

川上ら⁶⁾によるRC床版健全度評価があげられる。RC床版の健全度評価は専門家が行っているが、それらのノウハウを獲得し、専門家ではなくとも評価できるようにすることが重要となっている。

ここでは、点検データおよび損傷原因等を推論する専門家知識にはあいまいさが含まれていることから、ファジィ理論を導入することにより解決している。すなわち、ファジィ集合としての点検データからファジィ推論により損傷原因、損傷程度、損傷進行度を推定している。なお、メンバシップ関数は専門家からヒアリングにより導出している。

e) ファジィ積分の応用例

吉松ら⁷⁾による斜面崩壊危険度評価があげられる。斜面崩壊の危険性を判断するのは専門家であり、斜面踏査結果と過去の経験により行われていることが多い。ここでは、斜面崩壊の要因を文献より抽出し、ファジィ集合として横断形状、地質、勾配、植

生の状況等を取りあげ、これらの要因に対する言語的情報（メンバシップ関数は標準関数を設定）を入力・推論し、危険度のメンバシップ関数を推定する。そのメンバシップ関数を被積分関数としてファジィ積分を行い、境界積分値により伊豆地震による崩壊斜面と崩壊しなかった斜面との比較を行っている。

上述のように、メンバシップ関数の設定には、経験者からの知識から得る方法、実験結果および実績情報から得る方法、標準関数を利用することも行われている。いずれもモデル化の対象により設定方法が影響を受けていると考えられる。

また、ファジィ集合の対象としては、専門家が感覚で把握している事象、すなわち実験、試験および測定によって正確に知ることができるが、これまでの経験を通じておおよその推定が可能な事象が多いと思われる。

3. 工程計画へのファジィ理論の応用

(1) 工程計画における不確定性

P E R Tは、わが国へ導入されて以来、多くの工事に利用され工程計画手法として重要な位置を占めているのが現状である。しかし、P E R Tにおいて重要な要素である作業日数および順序関係には、不確定性を伴うことが多いにもかかわらず一点見積りおよび確定的な順序関係が採用されている場合が多く、その計算結果は確定的なものとなり、意思伝達には不十分なものとなっている。

ここで、各作業の所要時間に関する不確定性を表す方法としては、作業日数が β 分布に従うと仮定する確率P E R Tや一般分布を想定したモンテカルロ・シミュレーションによる方法も提案されている。

一方、順序関係として当初は、“先行作業が終了したら後続作業を始めることができる”という単一の順序関係しか許されなかったが、プレシーデンス型において“先行作業が何日か進んだら後続作業を始めることができる”等の順序関係⁹⁾に融通性を付加した形へ改良されてきたものの、ここでも“何日か進んだら”という日数が関係しており、作業日数と同様に日数見積りに関する不確定性の取扱いが重要となっていると思われる。

さて、日数見積りに関して確率理論を導入するう

えで、最も重要な問題は作業日数分布の特定である。

過去に同様の施工実績が多くあり、しかもそのデータが揃っている場合は作業日数の分布を特定することも可能であるが、一般的にこのような条件を満足していることは少く、多くの場合必然的にプロジェクトの計画を立案する人が主観に基づいて作業日数を見積ることになる。

そこでは“大体何日かかるであろう”とかいった主観的な作業日数見積りの方法がとられており、これまでの経験を通して蓄積された作業日数へ影響する様々な要因（例えば、作業条件が良い、作業員の技能は高い、世話役の経験が豊富、等）を考慮して想定していると考えられる。

さて、これらの情報は言語的に集約された形で人間の頭に蓄積されていると考えられるが、言語におけるあいまいさが見積りに反映されてるため、それに対処できることが必要と考えられる。

すなわち、作業日数への影響要因をファジィ集合の対象として考えることは、より実際的な対処の方法と考えられる。

(2) 日数見積りのファジィ演算

作業日数見積りの不確定性を具体化するためには、言語表現された要因、つまり作業日数に影響を及ぼす情報を数学的変数に変換しなければならない。

一例として現場経験の期間と関連強い作業員の技能を取り上げて数学的変数への変換を示すことにする。いま、ファジィ集合を、

$$X = \{x_i / \mu_A(x_i)\} \quad (i=1,2,3,\dots)$$

の形で表すことにする。ここに、 x_i はファジィ集合に属する要素であり、 $\mu_A(x_i)$ はそのメンバシップ関数で、グレード（所屬度）を意味し、その値が大きいほど集合への属性が強まることを表す。

例えば、経験の有無による分類だけの場合は、 $\mu_A(x_i) = 0$ （経験なし）、 $\mu_A(x_i) = 1$ （経験有り）となるが、「経験が少ない」という状態は、

$A = \{x_i / \mu_A(x_i) \mid 0.3/0.5, 0.2/0.7, 0.1/0.9\}$ のファジィ集合として表すことができる。ここで、 x_i は経験レベルの高低を表す。つまり、作業経験のない人は、 $x = 0$ 、作業経験のある人は、 $x = 1$ のレベルである。そして経験をつむことによって $x = 0.1, 0.2, 0.3$ と徐々に増加することを表している。

表－4は作業日数に影響を与える要因の発生頻度

とその影響度を small, medium, large を基本とする言語情報で表したものであるが、それらのメンバシップ関数は適切に設定する必要がある。

表－4 作業日数に影響を与える要因の発生頻度とその影響度

要 因	m	発生頻度(Fm)	影響度(Cm)
A 作業条件	悪い	1	small
	普通	2	medium
	良い	3	medium
B 作業員の技能	低い	4	large
	普通	5	medium
	高い	6	quite small
C 世話役の経験	未熟	7	small
	中堅	8	medium
	豊富	9	quite small
D 使用設備	悪い	10	small
	普通	11	small
	良い	12	large

ここに、表中のメンバシップ関数は以下のように設定できる。

$$\text{large} = (0.8/0.5 \ 0.9/0.9 \ 1/1)$$

$$\text{medium} = (0.3/0.2 \ 0.4/0.8 \ 0.5/1 \ 0.6/0.8 \ 0.7/0.2)$$

$$\text{small} = (0/1 \ 0.1/0.9 \ 0.2/0.5)$$

$$\text{very small} = (\text{small})^2 \quad \text{quite small} = (\text{small})^{1.25}$$

$$\text{very large} = (\text{large})^2 \quad \text{quite large} = (\text{large})^{1.25}$$

例えば、 $m = 4$ の場合は、作業員の技能が低いことは多いが、その場合には作業日数へ中位の影響を与えるということを表している。

ここで、表－4の一行（例えば、 m 行）を示すファジィ関係は、それぞれの事象の発生頻度（ F_m ）とその発生による影響度（ C_m ）の直積（式における記号は $\times$ ）で表され、

$$\mu_R(x_i, y_j) = \mu_{F_m \times C_m}(x_i, y_j) \\ = \min\{\mu_{F_m}(x_i), \mu_{C_m}(y_j)\} \quad \dots\dots (1)$$

となるメンバシップ関数で特徴づけられる。

各要因は個別に作業日数の分布に影響するのではないため、これらすべての式を合成しなければならない。ここで、総合的な影響は、これらの式の和集合で与えられ、そのファジィ行列を T とすると、 $T = (F_1 \times C_1) \cup (F_2 \times C_2) \cup \dots \cup (F_n \times C_n) \dots\dots (2)$ によって求まる。次に作業日数のばらつきを考慮したファジィ集合を表－5のように仮定する。

表－5 影響度と作業日数の関係

n	影響度(Cn)	作業日数(Dn)
1	large	very large(D)
2	medium	large(D)
3	small	small(D)

ここに、影響度に関する言語情報のメンバシップ関数は、表－4、作業日数では、以下のように設定できる。

$$\text{large}(D) = (15(H)/0.2, 18(H)/0.9, 20(H)/1.0)$$

$$\text{small}(D) = (10(H)/1, 15(H)/0.5, 18(H)/0.2)$$

$$\text{very large}(D) = (\text{large}(D))^2 \\ = (15(H)/0.04, 18(H)/0.81, 20(H)/1.0)$$

これは、 $n = 2$ では影響が中位の場合、想定した作業日数の中では大きくなることを表しており、表－5における影響度（ C_n ）と作業日数（ D_n ）の

ファジィ関係は、(3)式によって求められる。

$$\mu_Q(y_j, z_k) = \mu_{C_n \times D_n}(y_j, z_k) \\ = \min\{\mu_{C_n}(y_j), \mu_{D_n}(z_k)\} \quad \dots\dots(3)$$

また、前述と同様に総合的な影響を考えたファジィ行列をSとすると、(4)式によって求まる。

$$S = (C_1 \times D_1) \cup (C_2 \times D_2) \cup \dots \cup (C_n \times D_n) \quad \dots\dots(4)$$

次に事象が発生することと作業日数のばらつきとの関係を求めるには、事象の発生とその影響度のファジィ関係Tと、事象の発生による影響度と作業日数とのファジィ関係Sを次式で合成すればよい。

$$\mu_{T \circ S}(x_i, z_k) = \max\{\min\{\mu_R(x_i, y_j), \mu_Q(y_j, z_k)\}\} \quad \dots\dots(5)$$

(5)式で求められた行列を利用して、作業日数のメンバシップ関数が求められる。さらにザデーの定義により作業日数の平均値と分散等の基本統計量を求めることができる。

表-5のlarge(D)を例として以下に示す。

$$\text{平均値} = 15 \times \frac{0.2}{0.2+0.9+1.0} + 18 \times \frac{0.9}{2.1} + 20 \times \frac{1.0}{2.1} = 18.67$$

$$\text{分散} = 15^2 \times \frac{0.2}{2.1} + 18^2 \times \frac{0.9}{2.1} + 20^2 \times \frac{1.0}{2.1} - 18.67^2 = 3.39$$

4. ファジィPERTのプログラム概要と計算事例

(1) スケジュール計算の方法

前述のファジィ演算により、作業日数のメンバシップ関数および基本統計量(平均値、分散)まで算出できる。これらが求められた状態において、以下のような3つのスケジューリング方法があげられる。

①メンバシップ関数をそのまま利用して、拡張演算により計算する方法⁹⁾

②メンバシップ値1.0を境界として左右を異なる関数で近似し、拡張演算により計算する方法¹⁰⁾

③基本統計量を利用して、確率PERTのデータとして計算する方法

これらの中では一見①の方法が良いと考えられるが、メンバシップ値ごとの計算が必要であり、結果の解釈が難しい。②および③は関数に近似するのは同じであるが、②は③に比べて各作業日程の解釈が難しい。このことから、③の方法をとることにした。

(2) 基本統計量の算出

YAOの方法¹¹⁾、AYYUBの方法¹²⁾とがあり、一概にいずれが妥当なのか言えない状況にある。い

ずれも上述の行列 $\mu_{T \circ S}(x_i, z_k)$ の一行あるいは一部を取り出すことにしており、ファジィ行列全体を表現していない。したがって、ここではファジィ行列全体から求める方法、すなわち行列全体のメンバシップ値を合計し、各々の日数の列に存在するメンバシップ値の和を合計値で割った値をその日数の出現確率とみなす方法をとることにした。

(3) プログラムの概略フロー

各作業の作業日数に影響する要因、ならびに各作業に想定される作業日数(D)が異なっているため、入力データについて汎用性のあることが要求される。そこで、影響する要因については、各作業毎に入力できるようにした。

一方、作業日数については、言語情報(例えば、large, small)のメンバシップ関数と関連付ける必要がある。そこでlargeにおけるメンバシップ関数を、 $large = \{a1/0.0, a2/0.0, a3/0.5, a4/0.9, a5/1.0\}$ のように5段階で設定したのであれば、日数も5日間を考慮できるようにした。例えば、入力として作業日数を(3, 4, 5, 6, 7)とすれば、以下のよう

$$large = \{3/0.0, 4/0.0, 5/0.5, 6/0.9, 7/1.0\}$$

概略フローを図-1に示す。

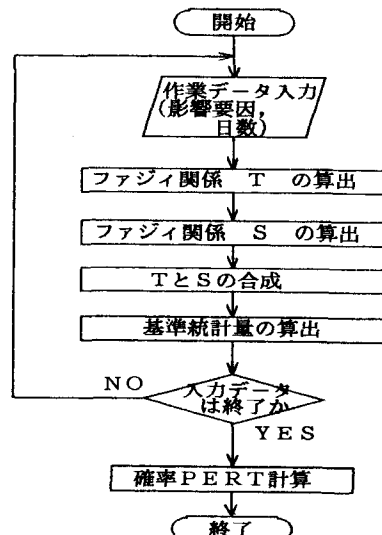


図-1 ファジィPERTの概略フロー

(4) 計算事例

計算事例のネットワークを示したのが図-2であり、その入力は通常のPERT計算における作業日数をファジィ拡張演算に必要な項目へ変更した形と

している。

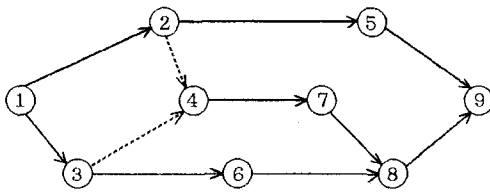


図-2 計算事例のネットワーク

計算へ使用した入力値は表-6に示すとおりであり、工期の平均値は25.5, 分散は4.59となった。なお、各作業の基準統計量を、表-7に示した。

表-6 作業に対する要因と作業日数の入力表

作業 (i, j)	要因	想定した作業日数
(1, 2)	A, B, C	2, 3, 4, 5
(1, 3)	A, B, C	1, 2, 3, 4, 5
(2, 4)	-	0
(3, 4)	-	0
(2, 5)	A, C	10, 11, 12, 13, 14
(3, 6)	A, C	6, 7, 8, 9
(4, 7)	A, B	7, 8, 9, 10
(6, 8)	A, C	4, 5, 6
(7, 8)	A, D	2, 3, 4, 5
(5, 9)	A, B, C	7, 8, 9, 10
(8, 9)	A, B, C	8, 9, 10

表-4の要因参照

表-7 基本統計量の計算結果

作業 (i, j)	作業日数	分散
(1, 2)	3.7	1.32
(1, 3)	2.8	4.83
(2, 4)	0	0
(3, 4)	0	0
(2, 5)	11.4	16.90
(3, 6)	7.5	1.38
(4, 7)	8.7	1.40
(6, 8)	4.9	0.65
(7, 8)	3.9	1.06
(5, 9)	8.7	1.26
(8, 9)	9.2	0.81

この方法は、一点見積りに比べ不確定さを良く表現でき、また確率PERTにおける分布形設定への補助手段としても有効と考えられる。

5. おわりに

土木工学は経験工学といわれ、専門家は経験した工事の情報を様々な言語情報により、圧縮して蓄積・利用している。建設マネジメント分野の応用調査では、それらを具体化する方法としてファジィ理論を導入している傾向がみられる。

ファジィPERTならびにOR手法の応用では、結果の解釈が重要となり、メンバシップ関数の設定と共に今後の課題と考えられる。

また、現地生産、単品生産という生産形態から同一工事はないが、ある程度施工条件の一致した工事を検索し、その情報を活用することが必要であり、

この点でファジィデータベースが今後重要となると思われる。

最後に、本報告をまとめるにあたり、ご助言、ご協力頂いた東北大学湯沢昭先生をはじめとする建設マネジメント委員会計画・管理技法分科会のメンバー各位に感謝の意を表する次第である。

【参考文献】

- 1) 秋山孝正：ファジィ理論の土木計画分野における適用に関する整理と展望, 土木学会論文集, 第395号/IV-9, pp23-32, 1988
- 2) たとえば, 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, 1987
- 3) 黒田勝彦・山田睦郎・金井進・小竹望：現場におけるファジィ土質情報の活用法, 土質工学における確率・統計の応用に関するシンポジウム論文集, pp99-106, 1982
- 4) 見波潔・島津晃臣：建設残土の有効利用のための土量配分計画モデル, 土木学会論文集, 第395号/IV-9, pp65-74, 1988
- 5) 桑原洋・原田光男・背野康秀・竹内幹雄：ファジィ理論のシールド掘進制御への適用, 土木学会論文集, 第391号/VI-8, pp169-178, 1988
- 6) 川上宏一郎・白石成人・古田均・馬野元秀：RC床版の健全度評価のためのファジィエキスパートシステム, 第43回土木学会学術講演会講演概要集, I, pp18-19, 1988
- 7) 吉松弘行・三井宏人・青木隆典・大浦二郎：ファジィ理論による地震時斜面崩壊危険度の判定, 土木技術資料 No.31-4, pp39-44, 1989
- 8) 山本幸司：Precedence Networkの拡張とコンピュータ処理に関する研究, 土木計画学研究論文集, No.4, pp77-84, 1986
- 9) Stefan Chanas・Jerzy Kambrowski：THE USE OF FUZZY VARIABLES IN PERT, Fuzzy Sets and Systems 5, pp11-19, 1981
- 10) Henri Prade：USING FUZZY SET THEORY IN A SCHEDULING PROBLEM: A CASE STUDY, Fuzzy Sets and Systems 2, pp153-165, 1979
- 11) Bilal M Ayyub・Achintya Haldar：PROJECT SCHEDULING USING FUZZY SET CONCEPTS, ASCE, The Journal of Construction Engineering and Management, Vol.110, No.2, pp189-204, 1984