【土木計画学研究・論文集　No. 5　1987年11月】

# ファジィ多属性効用理論の定式化と水道システム評価への適用

# The Formulation of Fuzzy Multi-Attributes Utility Theory and its Application for the Evaluation of Water Supply System

永野孝一*　　金安公造**
By　Takakazu NAGANO　Kozo KANEYASU

The objective of water supply is to serve the pure, rich and cheap water. But the development of urban and the industrial activity cause the water resource problems. One of approaches to solve these problems is the dual water supply system. This system is studied from technical and economical aspects, but it is only a few study of user's, namely, citizen's evaluation for it. In this work, user's evaluation structure for water supply system is explored and the possibility to set up the dual water supply system against water resource problems is assessed by the Fuzzy Multi-Attributes Utility Function method. This method is that general Multi-Attributes Utility Theory is extended by introducing the fuzzy sets theory, especially the concepts of fuzzy number and fuzzy function, which can treat the human subjectibity. We show that, due to the questionnaire results and using these the calculated total utility of fuzzy utility function, it is sufficiently possible to set up the dual water supply system.

## 1．はじめに

水道法（昭和３２年）は、水道の目的を「清浄にして豊富低廉な水の供給を図り、もって公衆衛生の向上と生活環境の改善に寄与する」と規定している。しかし、都市域の拡大・集密化、都市・産業活動の活発化、生活様式の変化などによる水需要の増加に対する供給の不足、すなわち水資源問題は一層深刻ものとなりつつある。また、家庭下排水・産業廃水等による水質汚濁は、原水の取得の困難さに加え水道水の異臭味問題等も引き起こしている．これらの問題に対処するためにさまざまな対策が考えられている。そのなかで特に水需要の増加に対し下水や排水を再利用しよう，すなわち雑用水道の導入が大都市ならびに原水の取得困難な場所で考えられ実施されている。雑用水道には、再生水の利用形態あるいは実施形態などで分類することができる。前者においては開放循環利用や閉鎖循環利用、後者においては個別循環方式，地区循環方式，地域循環方式などに分けられるであろう。

＊学生会員　工修　北海道大学大学院
＊＊正会員　工博　北海道大学工学部
（〒060　札幌市北区北１３条西８丁目）

しかし、雑用水道の実施にあたってはさまざまな問題点がある。例えば、再生水の用途をいかなる範囲にするか、つまり用途別の要求水質や下排水処理プロセスなどを考慮せねばならない。また、費用の算定および現行の水道水費用との比較検討なども必要である。これら個別のまた技術的問題に関する研究はいくつか報告されている［１］。しかしながら、水道の利用者つまり一般市民の立場から雑用水道の導入に関するあるいは現行の水道システムに関する評価を報告する事例は少ない。雑用水道の導入は技術的・経済的評価が必要であるが、その視点は水道の専門家のみならず利用者のそれも必要であろう。

以上のような観点から、現行の水道システム及び今後導入が増加するであろう雑用水道に関する市民の評価構造を同定し、雑用水道の導入の可能性について検討することを目的とする。また本研究の大きな特徴として、上述の評価を行うために従来の多属性効用理論にファジィ理論、特にファジィ数，ファジィ関数の概念を導入しファジィ多属性効用理論へと拡張・定式化した。以下、まずファジィ理論ならびに多属性効用理論の概要を説明し、ファジイ多属性効用理論について述べ、その理論を用いて雑用水道の導入可能性について検討する。

## ２．ファジィ多属性効用理論の定式化

### （１）ファジィ集合とファジィ集合間の演算

ファジィ集合は1965年 L.A.Zadehによって提案された概念である［２］。ファジィ集合とは、境界のぼやけた（fuzzy）集合であり、これに関わる一連の理論体系をファジィ理論という。このファジィ理論によって、人間のあいまいな思考・判断の過程を表現することが試みられている［３］。ファジィ集合は次のように定義される［４］。

【定義１】　全体集合$\Omega=\{x\}$におけるファジィ集合Ａとは、次のメンバーシップ関数で定義される集合である。

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

通常の集合Ｅは、特性関数$\chi_E : \Omega \to \{0,\ 1\}$で定義される。次に、Ａ，ＢをΩのファジィ集合とすると、対等関係，共通集合，和集合，補集合は以下のように定義される。

【定義２】　Ａ，Ｂのメンバーシップ関数を$\mu_A(x)$，$\mu_B(x)$とすると、

$$\begin{aligned} A=B &\Leftrightarrow \mu_A(x)=\mu_B(x) \qquad (2)\\ A\cap B &\Leftrightarrow \mu_{A\cap B}(x)=\mu_A(x)\wedge\mu_B(x)\\ A\cup B &\Leftrightarrow \mu_{A\cup B}(x)=\mu_A(x)\vee\mu_B(x)\\ A^c(x) &\Leftrightarrow \mu_{A^c}(x)=1-\mu_A(x)\\ & \qquad x\in\Omega \end{aligned}$$

ここで、$\wedge=\min$，$\vee=\max$とする。

次に、$\Omega_1$，$\Omega_2$を全体集合とし、$A\subset\Omega_1$，$B\subset\Omega_2$とする。ファジィ関数とは次のようなものである。

【定義３】　ｆを$\Omega_1$から$\Omega_2$への関数とする。$\Omega_1$上のファジィ集合Ａの像ｆ（Ａ）は、次のように定義する。

$$\begin{aligned} \mu_{f(A)}(y) &= \sup_{x\in f^{-1}(y)} \mu_A(x) \qquad (3)\\ &= 0 \qquad : f^{-1}(y)=\phi \end{aligned}$$

ここで、$f^{-1}(y)$はｙの原像の集合である。

ファジィ関数は、通常の意味での関数，定義域，値域をそれぞれファジィ化したものであるが、ここでは特に定義域と値域がファジィ集合である場合を考える。

【定義４】　直積$\Omega_1\times\cdots\times\Omega_n$から全体集合Ξへの写像をｆとすると、$(x_1,\ldots,x_n)\in\Omega_1\times\cdots\times\Omega_n$，$y=f(x_1,\ldots,x_n)\in\Xi$は拡張原理を用いて次のように定義される。ここで、$x_i\in A_i\subset\Omega_i$でありｙ∈Ｂとする。

$$\begin{aligned} \mu_B(y) &= \sup_{\substack{x_1,\ldots,x_n\\ y=f(x_1,\ldots,x_n)}} \min(\mu_{A_1}(x_1),\ \ldots,\ \mu_{A_n}(x_n)) \qquad (4)\\ &= 0 \qquad : f^{-1}(y)=\phi \end{aligned}$$

全体集合が実数Ｒであり、ｘ，ｙ，ｚ∈Ｒとする。例えば、「だいたいｘ」のようなファジィ数をメンバーシップ関数$\mu_x(t)$，$\mu_y(t)$ $\mu_z(t)$、ｔ∈Ｒで表現する。ファジィ数の演算を次のように定義する。

【定義５】　ファジィ拡張和，ファジィ拡張積を⊕，⊗で表す。

$$\begin{aligned} z=x\oplus y &\Leftrightarrow \\ \mu_z(t) &= \bigvee_{z=x+y}[\mu_x(t)\wedge\mu_y(t)] \qquad (5)\\ z=x\otimes y &\Leftrightarrow \\ \mu_z(t) &= \bigvee_{z=x\times y}[\mu_x(t)\wedge\mu_y(t)] \end{aligned}$$

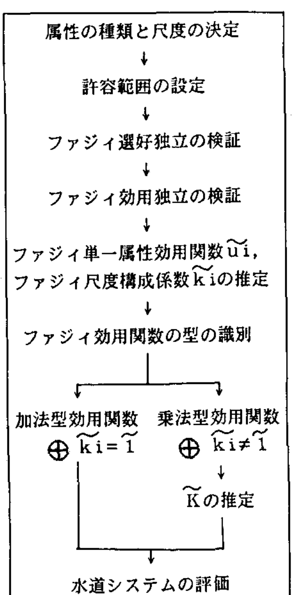
具体的にいうと、「だいたい２」と「だいたい３」というファジィ数の和は「だいたい５」という結果を求めることができる。

（２）多属性効用理論へのファジィ概念の導入

ａ）ファジィ概念導入の必要性

多属性効用理論は、R.L.Keeney, H.Raiffaらによって体系化された［５］［６］［７］。その特徴として、①意思決定者の選好を効用関数として明示できる　②目標間のトレードオフを測定することができる　③効用関数により代替案を評価することができるなどの利点を有している。このことから、清浄，豊富，低廉という三つの目的をもつ水道システムを評価するには、適切な手法といってよいであろう。

しかしながら、効用関数を構成するにあたっては属性値と効用値が常に１対１対応を示すとは限らない。すなわち、人間が評価をくだす場合にはある属性に対してファジィな効用値になる、あるいはある効用値を達成するための属性値はファジィなものとなると考えるのが自然である。したがって、従来の多属性効用理論にファジィ概念を導入することによって人間の主観的あいまいさ（ファジィネス）を取り扱うことのできるファジィ多属性効用理論を拡張定式化することが必要になってくる。以下、本研究で定式化したファジィ多属性効用理論の主要な概念と同定手順を説明する（図－１）。




図－１ ファジィ多属性効用関数の導出手順

まず、説明のために記号を定義する。代替案または結果の集合をX、各属性を$X_i$とする。$X \equiv X_i \times \cdots \times X_n$とし，各属性の特定水準の組を$x \equiv (x_i, \ldots, x_n)$、$x \in X$とする。ここで属性値がファジィな値をとる場合、～をつけて表す。$X_i$を除いた直積を$X_{\bar{i}}$、$X_i$と$X_j$を除いた直積を$X_{\overline{ij}}$とし、それぞれの特定水準を$x_{\bar{i}}$，$x_{\overline{ij}}$とする。各属性$X_i$の効用関数を$u_i(x_i)$，Xの効用関数をU（x）とする。効用値がファジィ値になる場合、$\tilde{u}_i$，$\tilde{U}$となりそれぞれファジィ単一効用関数，ファジィ多属性効用関数という［８］［９］。

ｂ）ファジィ選好独立，ファジィ効用独立の定義

さて、従来の多属性効用理論と同様に属性間に独立性が検証される必要がある。しかし、ファジィ属性値であることに注意して次のように表す。

【定義６】　属性の組（$X_i$，$X_j$）の水準（$\tilde{x}_i$，$\tilde{x}_j$）の選好順序が他の属性$X_{\overline{ij}}$の水準$\tilde{x}_{\overline{ij}}$に依存しないとき、（$X_i$，$X_j$）は$X_{\overline{ij}}$にファジィ選好独立であるという。

【定義７】　属性$X_i$の水準$\tilde{x}_i$の変化のみを含む「くじ」の選好順序が、他の属性$X_{\bar{i}}$の水準に依存しないとき、$X_i$は$X_{\bar{i}}$にファジィ効用独立であるという。

通常の多属性効用理論のもつ性質、つまり選好独立は確実な結果に関する選好を考慮し、効用独立は不確実な結果に関する選好を考慮しているという点は保存されている。実際のこれら二つの独立性の検証方法は従来の理論とほぼ同様である。

ｃ）ファジィ多属性効用関数の推定

従来の理論では確率くじ法によって得られる確実同値$\hat{x}_i$と期待効用から属性値－効用値の代表点を求め、関数形を仮定し未知パラメータを決定するという方法がとられている。ここでは、ファジィ確実同値$\hat{\tilde{x}}_i$とし、ファジィ属性値$\tilde{x}_i$とファジィ効用値$\tilde{u}_i$の関係を推定することになる。「だいたい$x_i$」を示すファジィ属性値を$\tilde{x}_i$、そのメンバーシップ関数を$\mu_{\tilde{x}_i}(x_i')$とし、属性値が$\tilde{x}_i$のときのファジィ効用値を$\tilde{u}_i(\tilde{x}_i)$、そのメンバーシップ関数を$\mu_{\tilde{u}_i}(u_i')$とおく。ここで、ファジィ属性値とファジィ効用値のメンバーシップ関数を得るために、以下の性質を仮定する。

《仮定１》　効用最大となる最良属性値を$x_{i1}$、効

用最小となる最悪属性値を$xi0$とすると、$xi1$, $xi0$はcrispな値になる。すなわち、

$$\mu_{\tilde{x}i0}(x'i)=\begin{cases}1 & : x'i=xi0\\ 0 & : x'i\neq xi0\end{cases}$$

$$\mu_{\tilde{x}i1}(x'i)=\begin{cases}1 & : x'i=xi1\\ 0 & : x'i\neq xi1\end{cases} \qquad (6)$$

$$\mu_{\tilde{u}i(xi0)}(\tilde{u}i)=\begin{cases}1 & : u'i=0\\ 0 & : u'i\neq 0\end{cases}$$

$$\mu_{\tilde{u}i(xi1)}(\tilde{u}i)=\begin{cases}1 & : u'i=1\\ 0 & : u'i\neq 1\end{cases}$$

ここで、$u'i$, $x'i$はファジィ数ではなく、また$\tilde{u}i$は最大値＝ 1，最小値＝0に規格化されている。

この仮定1は、最良値，最悪値をとる属性値及びそれと効用値との関係はファジィではないことを意味している。

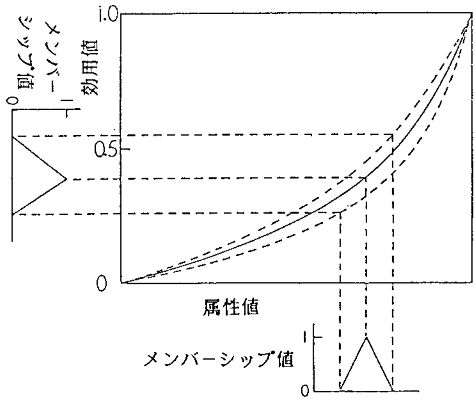
《仮定2》　メンバーシップ値が1である属性値にはメンバーシップ値が1になる効用値が存在し、その逆も成り立つ。すなわち、

$$\mu_{\tilde{x}i}(xi)=1\Leftrightarrow\mu_{\tilde{u}i}(ui(xi))=1 \qquad (7)$$

以上のことからファジィ単一属性効用関数を推定する手順を説明する。まず、crispな効用値よりファジィ属性値を確率くじ法にてファジィ確実同値$\hat{\tilde{x}}i$を求める。例えば、次のようなくじを考える。

$$ui(\hat{\tilde{x}}i)\sim\begin{cases}0.5 & ui(xi0)\\ 0.5 & ui(xi1)\end{cases}$$

ここで、選択肢のそれぞれの確率が0．5，ui（xi0）＝0，ui（xi1）＝1より期待効用値は0．5となる。これと無差別～な$\hat{\tilde{x}}i$がファジィ確実同値$\hat{\tilde{x}}i0.5$となる。以下同様に選択肢のメンバーシップ値が1についてのくじとのファジィ確実同値及びメンバーシップ関数を求めることができれば、ファジィ単一属性効用関数の等メンバーシップ線を得ることができる。実際のアンケート調査では、無限個のファジィ確実同値を得ることは不可能なので、有限個のファジィ確実同値に対して関数形を仮定して関数を推定する。仮定1より、xi0，xi1，ui（xi0），ui（xi1）に近づくにつれて$\mu_{\tilde{x}i}(x'i)>0$となる$x'i$の範囲は狭くなってくる。




図－2　ファジィ属性値$\tilde{x}i$から
ファジィ効用値$\tilde{u}i$の決定

次に属性xiに対応するファジィ効用値$\tilde{u}i$を求める。仮定2より$\mu_{\tilde{x}i}(xi)=1$，$\mu_{\tilde{u}i}(ui(xi))=1$となる点がある。また、$\mu_{\tilde{u}i}(ui(x'i))\neq 1$のとき等メンバーシップ線を用いてつぎのように定める。

$$\mu_{\tilde{u}i}(ui(x'i))=\mu_{\tilde{x}i}(x'i) \qquad (8)$$

最終的にファジィ属性値$\tilde{x}i$からファジィ効用値$\tilde{u}i(\tilde{x}i)$を求めるために、ファジィ単一属性効用関数のメンバーシップ関数をつぎのように定めることができる（図－2）。

$$\mu_{\tilde{u}i(\tilde{x}i)}(ui(x'i))=\sup_{ui(x'i)}\min_{x'i}\left(\mu_{\tilde{u}i(x'i)}(ui(x'i)),\ \mu_{\tilde{x}i}(x'i)\right) \qquad (9)$$

d）ファジィ尺度構成係数$\tilde{k}i$の推定

従来の方法である$\pi s$－確率実験を行う。ただし被験者の回答はファジィ数$\tilde{\pi}s$でよい。つまり、

$$(xs1,\ x\bar{s}0)\sim\begin{cases}\tilde{\pi}s & (x1)\\ 1-\tilde{\pi}s & (x0)\end{cases}$$

より、$\tilde{k}i=\tilde{\pi}s$となる。また、（xi0，xs1）と無差別な水準（$\tilde{x}i^*$，xs0）を質問することによって、$\tilde{k}s=\tilde{k}i\otimes\tilde{u}i(\tilde{x}i^*)$が得られる。つまり、$\tilde{k}s$，$\tilde{k}i$の相対比率がわかる。よって$\tilde{k}s$，$\tilde{u}i(\tilde{x}i^*)$から$\tilde{k}i$を求めることができる。この方法を順次それぞれの属性についてくりかえし適用していくとすべ

てのファジィ尺度構成係数$\tilde{k}_i$が推定でき、また斉合性の検証も可能になる。

ｅ）ファジィ多属性効用関数の表現型

従来の多属性効用関数にファジィ概念を導入した場合、尺度構成係数が$\tilde{k}_i$，単一属性効用関数が$\tilde{u}_i(\tilde{x}_i)$となり、和，積がファジィ拡張和，ファジィ拡張積になる。ファジィ多属性効用関数は、次のような加法型，乗法型に表現される。

［加法型］

$$\tilde{U}(\tilde{x}) = \bigoplus_{i=1}^{n} [\tilde{k}_i \otimes \tilde{u}_i(\tilde{x}_i)],\quad \bigoplus_{i=1}^{n} \tilde{k}_i = \tilde{1} \tag{10}$$

［乗法型］

$$\tilde{K} \otimes \tilde{U}(\tilde{x}) \oplus 1 =$$

$$\bigotimes_{i=1}^{n} [\tilde{K} \otimes \tilde{k}_i \otimes \tilde{u}_i(\tilde{x}_i) \oplus 1] \tag{11}$$

$$\bigoplus_{i=1}^{n} \tilde{k}_i \neq \tilde{1},\quad \tilde{K} \neq \tilde{1}$$

ここで、ファジィ尺度構成係数$\tilde{K}$は、以下のようにして求めることができる。すべての効用値が最大、すなわち$\tilde{u}_i(\tilde{x}_i) = 1$のとき

$$\tilde{K} \oplus 1 = \bigotimes_{i=1}^{n} [\tilde{K} \otimes \tilde{k}_i \oplus 1] \tag{12}$$

となり、これを解けば$\tilde{K}$を得ることができる。

これらの表現型の検証も、従来と同様の方法で行うことができる。

## ３．水道システム評価への適用

前節で定式化したファジィ多属性効用関数は、従来の多属性効用関数の特徴を保持しつつファジィ属性値及びファジィ効用値の取扱も許容しうるものである。ここでは、今後導入の増加が考えられる雑用水道も含めた水道システムを、市民の立場から評価するために本手法の適用を試みた。

（１）評価属性の選定と尺度の決定（表－１）

属性は水道の目的を適切に表現しかつ回答者である一般市民に実感できるものでなければならない。そこで、水道の目的である清浄・豊富・低廉を「きれいさ」「ゆたかさ」「安さ」という属性で表現する。それぞれの尺度は「飲める水と同じ質の水が使える用途の範囲」「浴槽を満水にするのに要する時間」「一ヶ月４人家族が支払う水道料金」とした。それぞれの尺度についてくわしく説明する。

ａ）「きれいさ」

清浄というのは生命及び健康の維持といった観点から安全性の概念が包含されているが、雑用水道においてもこの安全性は絶対的なものであることは明きらかである。よって、安全性を前提としてどの用途範囲にまで清浄な水つまり現行の水道水が使用できるかということを「きれいさ」という言葉で表現する。言いかえると、水道技術者，供給者からみれば「水質指標」そのものに他ならないが、それらを一般市民に理解してもらい効用を考えるのは困難であると考えた。そして、水の用途範囲を飲料・調理用から水洗トイレ用の７段階に分け、質のよい水の希求度の低い順に再生水を使用することを規定し点数づけた。この尺度は離散的であるが、ファジィ単一効用関数を推定する際は、便宜上連続であるとした。最良の状態はすべての用途に上質水が使用できるつまり現行の場合とし、最悪の状態は飲料・調理用以外の用途にはすべて再生水を使用する場合とする（表－２）。

ｂ）「ゆたかさ」

一般家庭の風呂を満水にするのに要する時間と「ゆたかさ」を対応させた。これも、例えば、ダム貯水量や渇水日数，給水制限の時間数などで代表させ

表－１　属性の種類と尺度

| 属性 | 尺度 | 最良値 | 最悪値 |
|---|---|---|---|
| きれいさ | 飲める水が使える範囲（点数） | ７点 | １点 |
| 豊かさ | 浴槽を満水にする時間（分） | １０分 | ６０分 |
| 安さ | １ヶ月の水道料金　（円） | １千円 | １万円 |

表－２　「きれいさ」の尺度

| 使用可能範囲 | 点数<br>７６５４３２１ |
|---|---|
| 飲料・調理用 | ○○○○○○○ |
| 洗面・手洗い用 | ○○○○○○× |
| 入浴用 | ○○○○○×× |
| 洗濯用 | ○○○○××× |
| 清掃用 | ○○○×××× |
| 散水・洗車用 | ○○××××× |
| 水洗トイレ用 | ○×××××× |

てもよい。しかし、被験者である札幌市民がほとんどそのような深刻な状況を経験したことがなく、また経験したとしても市民には考えにくいと思われる。つまり、「水質指標」と同様に、ダム貯水量等では市民に実感できず効用も同定しにくいと考えられる。そこで、水が豊富にあれば水圧も高く水の必要量が短時間で得られると考えた。尺度の範囲は１０分から６０分とした。

ｃ）「安さ」

一ヶ月の４人家族の水道料金は約２千円程度である。尺度の範囲は１千円から１万円とした。

（２）調査結果

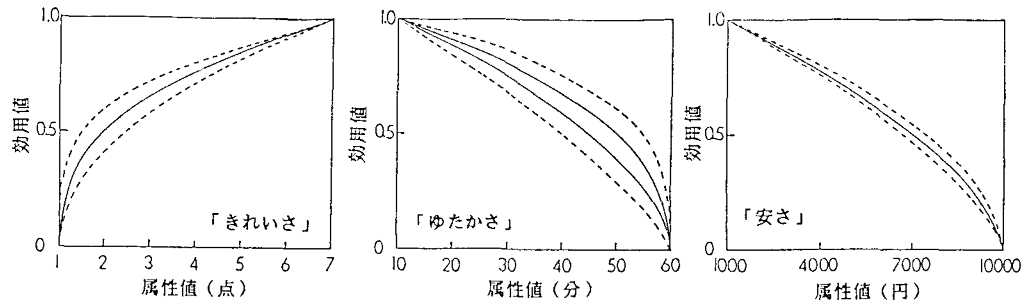
本研究の目的から調査対象を札幌市民及び札幌市下水道局職員とし、１１名に直接面接方式でアンケート調査した。効用関数を構築するために必要な独立性がすべて検証できたのは２名（以降被験者Ａ：主婦，被験者Ｂ：札幌市下水道局職員とする）であった。アンケート調査では、$\tilde{u}_i=\tilde{0.5}$となるファジィ属性値（確実同値）を質問し、単一効用関数は危険回避型，危険受容型の場合

$$u_i=\alpha(|x_i-\beta|)^{\gamma},\ \alpha\beta\gamma>0$$

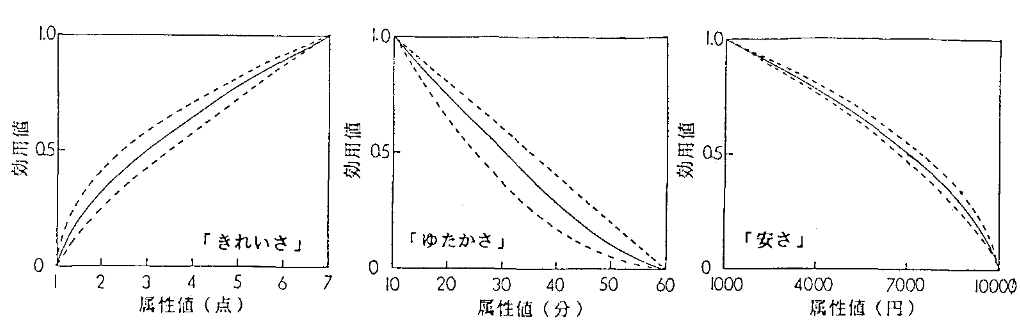
危険中立型の場合　$u_i=\alpha x_i+\beta$を仮定した。以下、添字ｉ＝１，２，３をそれぞれ「きれいさ」「ゆたかさ」「安さ」の属性を表すものとする。被験者Ａ，Ｂのファジイ単一効用関数を図－３，４に示す。実線はメンバーシップ値が１の効用関数、破線がメンバーシップ値が０の効用関数である。被験者Ａ「ゆたかさ」の図において実線が２本あるが、この２本の内側のメンバーシップ値はすべて１である。というのは、この被験者から「ゆたかさ」についての確実同値$\tilde{\hat{x}}_{0.5}$が４５～５０分という幅をもった回答を得たからである。これは、従来の理論を拡張した結果取り扱うことができるようになったことを示している。ただし、今回の調査では時間の制約等の理由から、それぞれのメンバーシップ関数は適切な範囲で仮定した。ファジィ確実同値とそのメンバーシップ関数を図－５，６に示す。さらに、$\tilde{\pi}_s$－確率実験の結果をもとに仮定したファジィ尺度構成係数とそのメンバーシップ関数を図－７，８に示す。また、表現型は２例とも乗法型になった。得られた$\tilde{K}$のメンバーシップ関数も合わせて示した。

（３）評価構造の特徴と水道システムの評価

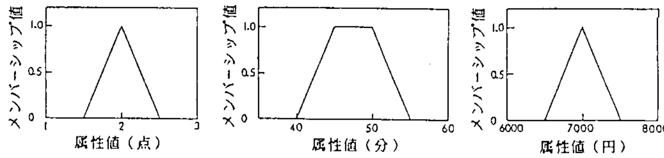
Ａ，Ｂともに「きれいさ」「安さ」について危険回避型（上に凸）を示した。このことから、極端に



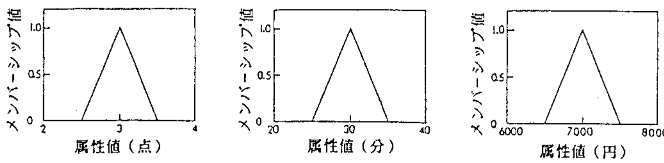

図－３　被験者Ａのファジィ単一属性効用関数




図－４　被験者Ｂのファジィ単一属性効用関数



図－5 確実同値$\tilde{\hat{x}}i$のメンバーシップ関数（被験者A）



図－6 確実同値$\tilde{\hat{x}}i$のメンバーシップ関数（被験者B）

悪い状況にならない限り効用値は急激に低下しない。逆に、現行の水道システムに満足していて、大きな変化を望まない保守的な評価主体であることがわかる。「ゆたかさ」については、Aは危険回避型、Bは危険受容型となり属性によって評価に差異が現れることがわかる。また、尺度構成係数は各属性に対する重視度のような意味をもつが、Aでは「きれいさ」Bでは「ゆたかさ」を重視していると考えられる。つまり、重視する属性にも個人差があることがわかる。

さて、得られた効用関数から現行の水道システムと雑用水道の導入を評価する。現行の状態を［きれいさ，ゆたかさ，安さ］＝［７点，２０分，２４００円］とする。ここでは、４人家族で、使用量２００l／day·人、水道料金１００円／$m^3$を仮定している。また、雑用水道の導入された状態を［５点，２０分，２９４０円］とする。すなわち、再生水は水洗トイレ用，散水，洗車用に使用し、これは使用量にして全体の１５％を占め再生水料金は２５０円／$m^3$と仮定する。それぞれの計算されたファジィ効用値を図－９，１０に示す。ここで注意することは、「きれいさ」は施設の存在に依存しているためファジィではなくcrispな属性値を用い、「ゆたかさ」「安さ」はファジィ属性値を用いたということである。計算の簡便さのためファジィ属性値には、それぞれ±５分，±５００円の幅をもつ三角形型メンバーシップ関数を設定した。また、図－９においてメンバーシップ値が１となる幅をもった部分は前述した「ゆたかさ」の影響である。

以上の結果Aではだいたい０．９６から０．９２Bはだいたい０．８０から０．７０となり、雑用水道の導入の結果効用値はA，Bともに０．１程度低下する。このことから、独立性の検証された２名の評価では雑用水道の導入は可能であると考えられる。

## ４．おわりに

本研究で得られた成果は以下のようになる。

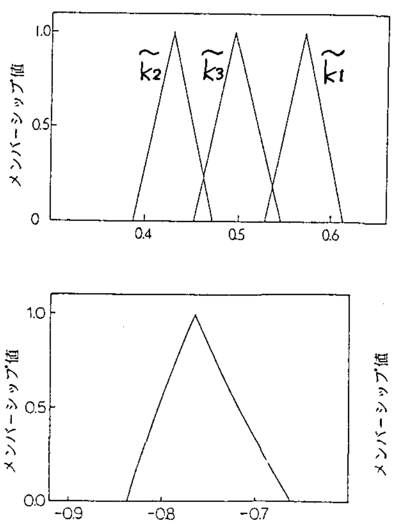
①従来の多属性効用関数にファジィ概念を導入した。これによって、ファジィ属性値からファジィ効用値を算出することができる。すなわち、厳密な数値だけでなく、「だいたいｘ」，「だいたいｘからx'」のように、一層人間よりの評価をすることができる。

②適用例として水道システムをとりあげ、評価構造の同定ならびに雑用水道導入について検討した。そして、独立性の検証された２名についてファジィ多属性効用関数を構成することができた。この２名に関しては、雑用水道の導入は可能であろうと推測された。

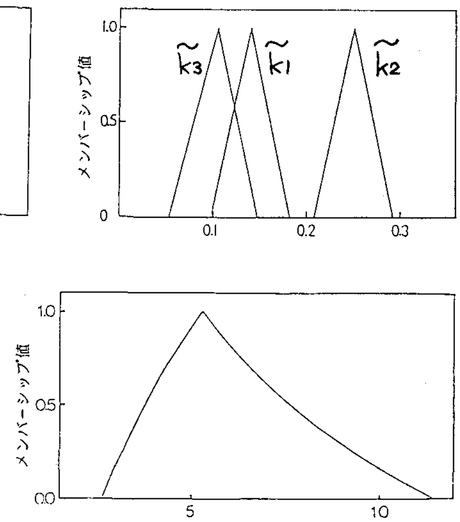
また、問題点と今後の課題は以下のようになる。

①今回の調査では独立性の満たされた結果が少数しか得られなかった。その理由の第一として、水道システムの評価の対象とした三つの属性について独立性の仮定が厳しいということがあげられる。つまり、単純な加法型・乗法型の効用関数では十分表現することができないと考えられる。これは、ファジィ概念を導入したことに原因があるのではなく、従来の手法の独立性の仮定そのものに問題があるということである。第二に本来、多属性効用関数を構築する際は、数回にわたる面接から属性・その尺度・独立性の検証などを実行していくか、あるいは属性間の独立性は成立しているという仮定から出発することが多い。今回の調査では、事前に属性を設定し面接調査は１回しか実施しなかった。このことも一因であると考えられる。

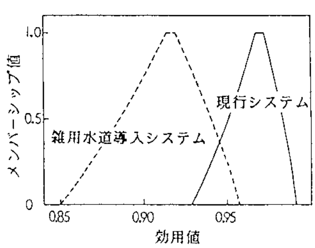
②以上のことから、今後の課題として、属性の数



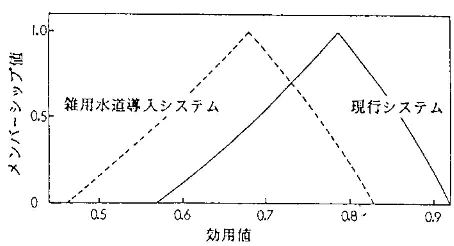

図－7　被験者Aのファジィ尺度構成係数 $\tilde{k}i$, $\tilde{K}$のメンバーシップ関数




図－8　被験者Bのファジィ尺度構成係数 $\tilde{k}i$, $\tilde{K}$のメンバーシップ関数




図－９　被験者Aのファジィ効用値のメンバーシップ関数




図－１０　被験者Bのファジィ効用値のメンバーシップ関数

・尺度の設定や独立性の検証およびそれにともなう一般型の効用関数を取り扱いができ、またメンバーシップ関数の決定などのファジィ性を迅速にかつ的確に取り込むことができうるような対話型のシステムの開発があげられる。

## 参考文献


［１］例えば第１回,第２回水資源シンポジウム概要集，1977,1982

［２］Zadeh,L.A.; Fuzzy Sets, Inform. and Control 8, pp338-353, 1965

［３］寺野寿郎，浅居喜代治，菅野道夫；ファジィシステム入門，オーム社，1987年

［４］Dubois,D.and Prade,H.; Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications, Academic Press, 1980

［５］市川惇信編；多目的決定の理論と方法，（社）計測自動制御学会，pp12-101, 1980年

［６］瀬尾芙巳子；多目的評価と意志決定，日本評論社，pp97-176,1987年

［７］Keeney,R.L.and Raiffa,H.; Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs, John Wilel & Sons,Inc., 1976

［８］永野孝一，金安公造；多属性効用理論による水道の評価，第５回知識工学シンポジウム資料，pp129-134, 1987年

［９］永野孝一，野口俊太郎，金安公造；ファジィ多属性効用関数法による水道システムに関する評価構造の同定，土木学会第４２回年次学術講演会，1987年