

<b>Title</b>	ファジー・ベイズ定理によるリスク認知傾向の表現について
<b>Author(s)</b>	標, 宣男
<b>Citation</b>	聖学院大学論叢, 12(2): 125-134
<b>URL</b>	<a href="http://serve.seigakuin-univ.ac.jp/repos/modules/xoonips/detail.php?item_id=520">http://serve.seigakuin-univ.ac.jp/repos/modules/xoonips/detail.php?item_id=520</a>
<b>Rights</b>	

聖学院学術情報発信システム : SERVE

SEigakuin Repository for academic archiVE

# ファジィ・ベイズ定理によるリスク認知傾向の表現について

標 宣 男

## A Representation of the Tendency of Risk Perception Using the Fuzzy-Bayes' Theorem

Nobuo SHIMEGI

In the risk assessment, the estimation of uncertainty is an important theme for which probability theory has been used. It is, however, quite difficult to assess uncertainty in terms of a tendency of public risk perception relying on probability, because this type of tendency is strongly influenced by subjectivity on the part of the public which is exposed by the risk in the environment.

This paper proposes a mathematical method to assess this tendency in the public perception of the risk involved in nuclear power plants by applying the Fuzzy theory. Especially, the Fuzzy-Bayes' theorem is applied to estimate the tendency using the Fuzzy-probability for potential causes which could possibly result in observable danger, and to calculate the process of risk perception on the part of public.

### 1. 序 論

巨大化学プラント及び原子力発電所等の科学技術システム、化学物質に汚染されている環境さらには交通機関など、危険事象発生（リスク事象の発生）が予測される対象について、その危険の度合いはリスクと言う共通の概念によって表される。このリスクの表現方法として良く使われているのは、それをリスク事象の発生確率とその影響の大きさの関数として考える方法である。最も簡単にはこの両者の積により表されるが、この場合リスク事象の影響としてを生物個体（しばしば人間）の死と考えるならば、このリスクは個体の死の確率のみによって表されることになる。このことはリスクにとって確率が本質的なものであることを示している。しかし、リスクにとってより本質的

---

**Key words;** Risk Assessment, Uncertainty, Fuzzy-Bayes' Theorem, Nuclear Power Plants, Fuzzy-Probability

なことは確率に比してより広い概念を持つ不確定性である。確率はこの不確定性を表す一つ的手段として使用されているに過ぎない。しかもリスク解析に用いられるこの確率が常に客観的に得られているわけではなく、しばしばそれは主観確率として与えられる場合が多い。それゆえ確率の値そのものの信頼性に対する主観的な揺らぎが存在する。まずこの意味においてリスク解析にファジィ的（あいまいな）要素が存在するのであるが、さらにリスク事象に曝されリスク認知を迫られている公衆は一般に確率的判断が不得意であり、しばしば確率的に表される以上に大きくリスクの程度を評価をしがちである。そこに、大きな主観的不確実性が存在しリスク認知に影響すると考えられる。このような傾向を、確率とその影響の大きさとの積で表わす通常の「リスク」とは別に「リスク嫌悪感」(risk aversion) としてとらえ、それを (確率)×(影響の大きさ)<sup>1,2</sup> として表わそうということも試みられた<sup>(1)</sup>。この1.2乗はこれまでの事故や災害の事例により決められたものである。筆者は前報<sup>(2)</sup>においてこのような公衆のリスク認知の傾向を表す方法としてファジィ理論を使うことの可能性を示した。本報においても前報とは別の観点からリスク認知傾向におけるファジィ理論の応用可能性を追求する。

リスク科学を積極的に取り入れようとしている分野の一つに、原子力の安全性評価が在る。その概要については参考文献(3)に纏めた。そこでの結論は、リスク解析を原子力発電所のリスク評価に適応するにはまだ多くの問題点があり、現状では事故によるハードウェアの損傷の程度とその発生確率の評価により、それに対する機能上の信頼性評価を目的としたものに限られている。従って現在のところ公衆あるいは地域住民が曝される健康上のリスクを評価し、原子力施設の総合的安全評価手段として安全審査等に役立てるほど有力な手法と位置づけられているわけではない。適応が強く望まれてはいるが今後の課題である。これまで、原子力発電所について公衆のリスク認知に関連した研究として、文献(4)とこれに関連して文献(5)がある。これは公衆が、原子力発電所についていかなる理由で反対あるいは賛成の意見を持っているか、その理由を特定したものである。しかし、これは、原子力発電所に対する公衆のリスク認知に直接に関連した研究ではなかった。その中で、事故の発生あるいは無事故運転の経験が公衆の原子炉に対する信頼性を表す主観確率に如何に影響するかをベイズの定理より算出した、原子力発電所の信頼性形成過程について研究が、山形などによってなされている<sup>(6)</sup>。信頼性は主観確率の有力な理解の仕方であり、その点に着眼したこの研究は一定の評価に値するものである。しかしながら、特に原子力発電所の信頼性形成は公衆の持つリスク認知の傾向（以下リスク感と言う）と裏腹の関係にあり、その大きさは確率によって決まる比較的客観的なリスクよりも主観的不確実性の強いリスク感に基づくものである。それ故単なる主観確率では信頼性形成の評価を十分表せないと思われる。本論ではこの山形等の信頼性形成過程評価で用いられた方法を拡張し、原子力発電所についての公衆のリスク認知過程に含まれる一般的不確定性を表現するため、ファジィ・ベイズ定理の応用による定式化を試みる。

以下第2章においては、山形等の研究について本論文に関係した部分の紹介と考察を述べ、第3

章においてファジィ・ベイズ定理を説明し、これを用い原子力発電所に対する公衆のリスク感の大きさを表現する。第4章は結論を述べる。尚、本文中に使用された記号の意味は、その都度説明することにする。

## 2. 「原子力開発における信頼性形成過程に関するベイズ的考察」<sup>(6)</sup> について

### 2.1 信頼度とその形成過程のベイズの定理による表現について

ベイズの定理<sup>(7)</sup>は観測された事象から、事前に知られている確率を用い、観測された事象の原因と推測される事象の確率を求めるものであり、次の式によってあたえられる。

$$\hat{\xi}(\theta_i | \chi_p) = \{ \hat{\xi}(\theta_i) f(\chi_p | \theta_i) \} / f(\chi_p) \quad (1)$$

ここで  $\theta_i$  : 原因と推測される事象,  $\chi_p$  : 観測された事象

$\hat{\xi}(\theta_i)$  : 事象  $\theta_i$  の事前確率

$f(\chi_p | \theta_i)$  : 事象  $\theta_i$  が生じたと言う条件の下で事象  $\chi_p$  が生じる条件付確率

$\hat{\xi}(\theta_i | \chi_p)$  : 事象  $\chi_p$  が観測されたと言う条件の下で事象  $\theta_i$  が原因である確率 (事後確率とも言う)

なお添え字  $i$  ( $i=1 \sim n$ ) は原因と考えられる事象の種類、添え字  $p$  ( $p=1 \sim m$ ) は観測された事象の種類を示す。

また、 $f(\chi_p)$  は周辺確率と言い次式で与えられる。

$$f(\chi_p) = \sum_{i=1}^n \hat{\xi}(\theta_i) f(\chi_p | \theta_i) \quad (2)$$

表記の論文では、原子力発電所の運転状況と言う観測された事象 (一年間無事故,  $\chi_1$  か、事故が発生,  $\chi_2$  か) より、その原因が「安全な原子力炉」( $\theta_1$ )にあるのか、「安全でない原子力炉」( $\theta_2$ )にあるのかを推測することになる。ここで両者は条件付確率  $f(\chi_p | \theta_i)$  の値によって区別される。安全な原子炉では事故を起こさない確率を  $\alpha_1$  起こす確率を  $\alpha_2$ 、安全でない原子炉では事故を起こさない確率を  $\beta_1$  起こす確率を  $\beta_2$  とする ( $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ,  $\beta_1 + \beta_2 = 1$ )。Table 1 はこの場合の条件付き確率  $f(\chi_p | \theta_i)$  とこれらの確率との関係を示したものである。

Table 1 条件付き確率  $f(\chi_p | \theta_i)$

	No Accident ( $\chi_1$ )	Accident ( $\chi_2$ )
Safe reactor ( $\theta_1$ )	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Unsafe reactor ( $\theta_2$ )	$\beta_1$	$\beta_2$

山形等は  $\alpha_1 = 1/1000$  ( $\alpha_2 = 999/1000$ ),  $\beta_1 = 1/2$  ( $\beta_2 = 1/2$ ) と想定している。問題になるのは事前確率  $\xi(\theta_i)$  の値  $\gamma_i$  ( $i=1, 2$ ) である。これは、特定の原子炉においてその原子炉が安全なものか、安全で無いものか信頼性の判断を示す確率である。全く新しい原子力発電所の場合この値をどう決めたら良いであろうか。山形等はこの値を  $\gamma_1 = \gamma_2 = 1/2$  と等確率と想定している。この想定は、対象についての情報が全く無く判断がつかない場合、しばしば取られる方法である。

これらの条件が与えられた上で、運転開始後一年間に事故を起こした場合の、この原子炉が「安全ではない原子炉」である確率を式(1)より計算する

$$\begin{aligned}\xi(\theta_2 | \chi_2) &= \xi(\theta_2) f(\chi_2 | \theta_2) / \{ \xi(\theta_1) f(\chi_2 | \theta_1) + \xi(\theta_2) f(\chi_2 | \theta_2) \} \\ &= \{ 1/2 \times 1/2 \} / \{ 1/2 \times 1/1000 + 1/2 \times 1/2 \} \\ &= 0.998\end{aligned}$$

同様に「安全な原子炉」である確率は

$$\xi(\theta_1 | \chi_2) = 0.002$$

となる。

もし一年間事故を起こさなかったならばその原子炉が「安全な原子炉」である確率は

$$\xi(\theta_1 | \chi_1) = 0.666$$

「安全でない原子炉」である確率は

$$\xi(\theta_2 | \chi_1) = 0.334$$

となる。ベイズの定理の性質よりこの一年間の運転実績から求められる事後確率  $\xi(\theta_i | \chi_p)$  を、新しく原子力発電所の信頼度を表す事前確率と定義すると、上記の例において事故を起こした場合の信頼性が、1/2から0.002へ著しく悪くなることが示される。このことを繰り返すことにより、一年間の運転実績に基づいた信頼性の大きさの年毎の変化を計算することが可能になる。

## 2.2 検討と考察

前節で紹介した内容について検討する。用いられた数値については、仮の値であり取りたててその信憑性を云々することは意味が無いが、実際に信頼性形成過程を解析しようと思うときには、新しい原子力発電所と言えどもその信頼性を1/2という主観確率により評価すべきかどうか議論があるであろう。しかしながら、ベイズの定理を用いることにより、公衆の原子力発電所への信頼性形成過程が運転実績と結びついて表されることが示された点は評価すべきである。

この様な利点を持っているにもかかわらず、この研究にも尚検討の余地が在ると言わなければならない。まず、それはこの研究が確率論に基礎を置いている為の当然の欠点であるが、いかなる事故も「安全でない原子炉」が原因となって生じたことに対する確率への寄与分として評価されてしまう点である。もちろん事故であるからそれが「安全な原子炉」への信頼性に寄与することはありえないが、どちらともいえない場合、すなわちどちらへの寄与もゼロの場合を考慮することが確率

論では難しいのである。さらに、事故が発生した場合、その被害の程度によって原子力発電所の安全性への信頼性評価に差が生じることも考えられよう。また現象的に同じような程度の被害をもたらす事故であっても、その事故を発生させた潜在的事故原因によっては、見かけの事故の大きさよりも信頼性へのダメージは大きいことも考えられ、これをも評価しなければならない。またそれは多分に主観による不確定性を強く含むであろう。このことは、信頼性と言う概念を、主観確率と言う確率のみにより表すことに無理があることを示している。以下ではこの信頼性喪失の程度を‘リスク感の大きさ’と言う用語により表そうと思う。リスク感の大小は信頼性の強弱とは裏腹の関係にある。

この様な事故の質の持つ信頼性あるいはその逆のリスク感の大きさへの影響は、単なる確率論では表現することが出来ない。ここにファジィ理論の応用の可能性が存在すると考えられる。

### 3. リスク認知傾向評価へのファジィ・ベイズ定理の応用

#### 3.1 ファジィ確率とファジィ・ベイズ定理の概要

この節では文献(8)に従ってファジィ確率とファジィ・ベイズ定理の概要を説明する。尚ファジィ理論の中に、信頼関数 (belief function) とするファジィ測度論に関する理論である Dempster-Shafer theory (DS 理論)<sup>(9)</sup> があり、主観確率による信頼度の評価をその特殊な場合として含んでいる。これもリスク論への応用の可能性を持っているが、ここでは DS 理論ではなく、リスクの形成過程を取り扱える可能性があるファジィ・ベイズ定理を用いることにする。

##### (1) ファジィ確率の定義

いま離散的標本空間を  $\Omega (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_s)$  としその要素の生起確率を  $f(\omega_q)$  ( $q=1\sim s$ ) とする。さらに  $\Omega$  上のファジィ事象を  $F$  とし、メンバーシップ関数を  $\mu_F(\omega_q)$  ( $q=1\sim s$ ) とすると、一般にファジィ事象  $F$  の確率  $P(F)$  は次の式で定義される。

$$P(F) = \sum_{q=1}^s \mu_F(\omega_q) f(\omega_q) \quad (3)$$

ここでファジィ事象  $F$  の確率とはメンバーシップ関数の期待値とも考えられるが、むしろメンバーシップ関数を重みとして得られるファジィ事象  $F$  の生起確率と理解するほうが分かり易い。

##### (2) ファジィ・ベイズ定理

ファジィ・ベイズ定理を考えるに当たり、次のように記号を定める。まず集合  $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n)$  をベイズの定理により推定すべき原因の集合とする。また観測空間を  $X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_m)$  とし、観測された  $X_p$  に対し、事前確率  $\hat{\pi}(X_p)$  と条件付確率  $f(X_p|\theta_i)$  が

与えられているとすると、原因が $\theta_i$ である事後確率 $\xi(\theta_i|\chi_p)$ は前出の式(1)により与えられる。

次に $\Theta$ 上のファジィ事象の集合を $\mathbf{F}=(F_1, F_2, F_3, \dots, F_r)$ とする。今、或 $\theta_i$ に対しファジィ事象 $F_k$ のメンバーシップ関数を $\mu_{F_k}(\theta_i)$ とする。また、これにより造られるファジィ状態空間は直交しているとする。

$$\sum_{k=1}^r \mu_{F_k}(\theta_i) = 1 \quad (i=1 \sim n) \quad (4)$$

ここでさらに、情報を観測空間 $\mathbf{X}$ 上のファジィ事象として受け取ることを考え、ファジィ観測空間を $\mathbf{M}=(M_1, M_2, M_3, \dots, M_g)$ とする。ここでも、 $\mathbf{X}$ 上の或 $\chi_p$ に対しファジィ事象 $M_j$ のメンバーシップ関数を $\mu_{M_j}(\chi_p)$ とし、かつここでも直交条件を満たすとする。

$$\sum_{j=1}^g \mu_{M_j}(\chi_p) = 1 \quad (p=1 \sim m) \quad (5)$$

以上の変数とファジィ事象の確率の定義を用いるとファジィ・ベイズ定理を導くことが出来る。

まずファジィ確率の定義式(3)とベイズの定理(1)より、 $\chi_p$ が観測されたときファジィ事象 $F_k(k=1 \sim r)$ が原因である確率を次のように表す。

$$P(F_k|\chi_p) = \sum_{i=1}^n \mu_{F_k}(\theta_i) \xi(\theta_i) f(\chi_p|\theta_i) / (\chi_p) \quad (6)$$

以下にその他のファジィ・ベイズ定理の式を示すが、これらの式の導出は文献(4)では省略されているので、その意味を考えながら本論文において多少順序立てて導出を試みる。

事象 $\theta_i$ の発生と言う条件下でのファジィ事象 $M_j$ の生起確率を式(3)の定義から次のように表す。

$$P'(M_j|\theta_i) = \sum_{p=1}^m \mu_{M_j}(\chi_p) f(\chi_p|\theta_i) \quad (7)$$

次に事象 $\theta_i$ とファジィ事象 $M_j$ の同時生起確率を $P''(M_j \cdot \theta_i)$ とし、またファジィ事象 $M_j$ の生起した後に、事象 $\theta_i$ が原因である事後確率を $\xi(\theta_i|M_j)$ とすれば、これらは次のように表される。

$$P''(M_j \cdot \theta_i) = \xi(\theta_i) P'(M_j|\theta_i) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \xi(\theta_i|M_j) &= P''(M_j \cdot \theta_i) / P(M_j) \\ &= \xi(\theta_i) P'(M_j|\theta_i) / P(M_j) \end{aligned} \quad (9)$$

ただし $P(M_j)$ はファジィ事象 $M_j$ のファジィ周辺確率であり次式で与えられる。

$$P(M_j) = \sum_{p=1}^m \mu_{M_j}(\chi_p) f(\chi_p) \quad (10)$$

最後にファジィ事象 $M_j$ が観測された後にその原因がファジィ事象 $F_k$ である事後確率 $\xi(F_k|M_j)$ は式(9)を用い、かつファジィ確率の定義式(3)から次に与えられる。

ファジィ・ベイズ定理によるリスク認知傾向の表現について

$$\begin{aligned}\xi(F_k|M_j) &= \sum_{i=1}^n \mu_{F_k}(\theta_i) \xi(\theta_i) P'(M_j|\theta_i) / P(M_j) \\ &= \sum_{i=1}^n \mu_{F_k}(\theta_i) \xi(\theta_i|M_j)\end{aligned}\quad (11)$$

ここで式(11)の前半をベクトルと行列によって表すことを考える。まず  $\xi(F|M_j)$  をその  $k$  番目の要素が  $\xi(F_k|M_j)$  であるファジィ事後確率ベクトル、 $\mu(F, \theta)$  をその  $(k, i)$  要素が  $\mu_{F_k}(\theta_i)$  である行列、また  $\xi(\theta)$  をその  $(k, i)$  要素が、 $\xi(\theta_i)$  ( $k=i$  の時) あるいは  $0$  ( $k \neq i$  の時) である行列とすると、式(11)の前半は次のように表される。

$$\xi(F|M_j) = \mu(F, \theta) \cdot \xi(\theta) \cdot P'(M_j|\theta) / P(M_j) \quad (j=1 \sim g) \quad (12)$$

また、式(11)の後半は行列  $\mu(F, \theta)$  と式(11)の左辺の  $\xi(\theta_i|M_j)$  を  $i$  番目の要素とするベクトル  $\xi(\theta|M_j)$  を用い次のように表わされる。

$$\xi(F|M_j) = \mu(F, \theta) \cdot \xi(\theta|M_j) \quad (13)$$

このベクトル  $\xi(\theta|M_j)$  は、ファジィ事象  $M_j$  が生じたと言う条件下での  $\theta$  が原因である事後確率である。

さらに、 $\xi_\mu(F, \theta)$  をその  $(k, i)$  要素が  $\mu_{F_k}(\theta_i) \cdot \xi(\theta_i)$  であるファジィ事前確率行列、また  $P'(M_j|\theta)$  を  $i$  番目の要素が  $P'(M_j|\theta_i)$  であるファジィ条件付き確率ベクトルとする。式(11)の前半は次のように表される。

$$\xi(F|M_j) = \xi_\mu(F, \theta) \cdot P'(M_j|\theta) / P(M_j) \quad (j=1 \sim g) \quad (14)$$

この式(14)を式(1)と形式的に比較すると、ファジィ事象  $M_j$  が観測されたことにより、 $\Theta$  上のファジィ事象  $F$  が原因となるファジィ事後確率  $\xi(F|M_j)$  が求められることが分かる。

### 3.2 原子力発電所のリスク認知傾向評価への応用についての検討

原子力発電所で発生するトラブル等の事象はその被害の程度によって評価する「国際評価尺度」によって分類されている。それによるとトラブル等の事象は大きく4つに別れる。それらは影響が軽微なほうから順に、「評価対象外」、「尺度以下」、「異常な事象」、「事故」である。さらに、「尺度以下」を0レベルとし、「異常な事象」をレベル1からレベル3まで3段階に分け、さらに「事故事象」はレベル4からレベル7までの4段階に別れている。日本においては、さらにこの0レベルを0+と0-の2つのレベルに分けている。或原子炉の運転実績の内、特にトラブル等の発生状況は毎年「原子力安全白書」<sup>00</sup>に記載されている。その多くは0レベルであり、日本の全商用原子炉あたり毎年1回程度レベル1のトラブルが発生している。開発段階にある原子炉である高速増殖炉「もんじゅ」において1995年に生じたナトリウム漏洩事故は破損個所が2次冷却系であったため放

射能汚染が少なかったことによると思うが、トラブルの段階はレベル1とされ、1999年8月12日の敦賀原子力発電所2号炉の事故は1次冷却水の漏洩により炉内が放射能に汚染された為レベル2以上のトラブルと推定されよう。

原子炉のトラブルの危険度はこのように影響度によって分けられているが、それが一般に与える心理的影響ともなると、たとえレベル0のトラブルであっても無視できず原子炉への信頼性に影響する。言いかえると、それは一般公衆が原子炉に対して持つリスク感の増大をもたらすことも考えられる。この様な主観的事象はファジィ事象であり、前節の記号を用いるならばこのファジィ事象は、ファジィ集合  $\mathbf{M} = (M_1, M_2, M_3, \dots, M_g)$  の要素として表される。また原子炉のトラブルは観測空間  $\mathbf{X} = (\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots, \chi_m)$  上の要素として表される。この場合ファジィ事象は  $g=3$  として、 $M_1 =$  (このトラブルがリスク感の大きさに影響しない)、 $M_2 =$  (リスク感に影響するともしないともいえない)、 $M_3 =$  (リスク感の大きさには影響する)、とすることになる。これらに対するメンバーシップ関数は、 $\mu_{M_j}(\chi_p)$  ( $j=1\sim 3, p=1\sim m$ ) である。

(1) 観測されたファジィ事象  $\mathbf{M}$  から原因事象  $\Theta$  の推定

前述のように、ファジィ事象  $M_j$  が生じた場合の原因事象の空間は  $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n)$  で示される。ところで何らかの事故が生じた場合、その直接の原因は分かるであろうが、重要なのはそれをもたらした潜在的な原因である。山崎等の研究<sup>(6)</sup>ではこれを「安全な原子炉」( $\theta_1$ )と「安全でない原子炉」( $\theta_2$ )とした。ここで、観測事象がファジィであるが、原因事象がファジィとは考えない場合を想定する。この想定は、2.2節における山崎らの研究への批判の一つに対する対策を示している。この様な場合、原因事象の事後確率は式(9)の  $\xi(\theta_i | M_j)$  で与えられる。但し本論の場合は、リスク感の大きさを考察の対象としているため、 $i=2$  の場合を取り上げる。この場合のリスク感の大きさは次式で表される。

$$\text{全リスク感の大きさ} = \sum_{j=1}^3 \xi(\theta_2 | M_j) \quad (15)$$

(2) 観測されたファジィ事象  $\mathbf{M}$  から原因ファジィ事象  $\mathbf{F}$  の推定

ここでは事故の潜在的な原因を、山崎等の抽象的なものと異なり、設計上の原因、製造工程上の原因、あるいは材料の材質による原因、教育・訓練をも含め運転管理上の原因、その原子炉特有な原因、あるいは原子炉の外に在る原因などより具体的なものとして考えることにする。言いかえると、原子炉に対するリスク感の大きさは、その原子炉の持っている潜在的な事故原因の種類とその確率に関係するとみなしていることを意味する。観測されたトラブル事象  $\chi_p$  がこれらの原因の内一つ  $\theta_i$  が生じる確率が条件付き確率  $f(\chi_p | \theta_i)$  によって与えられる。ここで、さらに  $\Theta$  上の事象もまたリスク感の大きさに関係したファジィ事象であるとし、ファジィ事象の集合  $\mathbf{F} = (F_1, F_2, F_3,$

…… $F_r$ ) の要素として、集合  $\mathbf{M}$  の要素と同じ内容のものを考える。すなわち、 $r=3$  として、 $F_1 =$  (この原因がリスク感の大きさに影響しない)、 $F_2 =$  (リスク感に影響するともしないともいえない)、 $F_3 =$  (リスク感の大きさには影響する) である。また、この  $F_k$  に対するメンバー・シップ関数を  $\mu_{F_k}(\theta_i)$  ( $k=1\sim 3, i=1\sim n$ ) とし、式(12)より  $\xi(F|M_j)$  を求める。より具体的には式(11)よりファジィ事後確率  $\xi(F_k|M_j)$  を求めることが出来る。さらにある事象  $\chi_p$  の生起と言う条件下におけるリスク感は、 $k=3$  (この原因がリスク感の大きさに影響する) とし、あらゆる  $M_j$  (この場合  $j=1\sim 3$ ) に対する  $\xi(F_k|M_j)$  の和として、次のように定義するのが妥当であろう。

$$\text{全リスク感の大きさ} = \sum_{j=1}^3 \xi(F_3|M_j) \quad (16)$$

これらの式(15)、(16)の示す意味は、ファジィ事象  $\mathbf{M}$  が生じた結果から推定される原因によるリスク感の大きさである。それは観測された事象が  $M_3$  「リスク感に影響する場合」はもとより、ファジィ事象  $M_2$  「リスク感に影響するともしないともいえない場合」でも、さらに特に式(16)の場合には  $M_1$  「リスク感の大きさには影響しない場合」ですら、その潜在的原因によっては原子炉のリスク感の大きさに寄与し得ることを表すことが出来る。

### (3) 事前確率の更新について

式(1)に見られるように通常のベイズ法則では、事後確率  $\xi(\theta_i|\chi_p)$  は次のステップの事前確率  $\xi(\theta_i)$  とすることが出来、これは文献(1)における信頼性形成過程追跡のための重要なポイントであった。しかし、式(14)において、 $\xi(F|M_j)$  はベクトルである故に次のステップの行列  $\xi_{\mu}(F, \theta)$  としてそのまま用いることは出来ない。一つの方法としては、メンバーシップ関数  $\mu_{F_k}(\theta_i)$ 、 $\mu_{M_j}(\chi_p)$  を不変とし、式(1)により事後確率  $\xi(\theta_i|\chi_p)$  を求めそれを次のステップの  $\xi(\theta_i)$  とし式(11)により  $\xi_{\mu}(F, \theta)$  を計算する方法である。また、式(12)および(13)中の事後確率  $\xi(\theta|M_j)$  を新たな事前確率  $\xi(\theta)$  として用いることも考えられる。求められたファジィ事後確率ベクトルの計算結果を、如何に次のステップのファジィ事前確率行列の内容に反映させるかと言う点については尚一考を要すかもしれない。

## 4. 結 論

リスク科学はまれにしか生じない故に確率的なものとしてしか扱えないような、危険性を取り扱う学問である。原子力発電所の危険性もこの様な危険の範疇に入るものである。実際問題として、日本の原子力発電所の安全管理は世界的に観て優れており、レベル1以上の重大なトラブルの回数は比較的小さく、確率からのみ考えると原子力発電所のリスクは小さいと考えられている。しかしながら原子力発電所の安全性に対する一般公衆の認知は必ずしも正確ではなく、実際以上に高いリ

スクを持つものとされているように思う。実際、他の巨大産業施設と比較して人的被害が少ないにもかかわらず原子炉は危険性が大きいシステムであるしている者も多い<sup>(5), (11)</sup>。本論文ではこの様な公衆のリスク感の大きさを、観測されたトラブルに対する潜在的事故原因の種類とその確率に関係するとみなした。さらに、リスク感そのものをトラブルの種類や、原因の種類の場合上のファジィ事象と考え、ファジィ・ベイズ定理を用いることにより、トラブルの原因に対するファジィ確率をリスク感の大きさを表わす方法として定式化することを試みた。これは、リスク感とか信頼性など、主観的不確実性を伴った事柄を確率で表すことへの疑問に基づいている。この論文におけるリスク感の大きさの表し方（特に式(16)）は、被害が小さいトラブルがほとんどであるという実際の原子力発電所の運転経歴を一般公衆が知らされた場合の、リスク感の形成過程を評価する上で有用なものであると考えられる。

もちろん本論は評価手法の定式化のみを試みたものであり、これを実際に適応するに際しいくつかの問題があろう。まず具体的に、原因事象とトラブル事象の洗い出しとその関係を示す条件付き確率を如何に与えるかと言う問題がある。次に、事前確率の初期値の推定を必要とする。さらに3.2節でも述べたように計算されたファジィ事後確率を、事前確率の更新に如何に役立てるかと言う点についても検討が必要である。

#### 参考文献

- (1) US NRC/ACRS “An approach to quantitative safety goals for nuclear power plants” NUREG-0739 (1980)
- (2) 標 宣男「“リスク” 認知傾向の数学的表現に関する試論——ファジィ理論の応用として——」聖学院大学論叢, 第11巻, 第2号 (1999)
- (3) 標 宣男「リスク科学および原子力発電所のリスク評価の現状」聖学院大学論叢, 第10巻, 第2号 (1998)
- (4) T. Onisawa, M. Sugeno ‘Fuzzy measure analysis of public attitude towards the use of nuclear energy’ Fuzzy Sets and Systems, vol. 20, pp. 259-289 (1986)
- (5) T. Onisi, M. Sugeno ‘A model of human evaluation process using Fuzzy measure’ Int. J. Mann Machine Studies, vol. 22, pp. 19-38 (1985)
- (6) 山形浩史, 神田啓治「原子力開発における信頼性形成過程に関するベイズ的考察」日本原子力学会誌, 第38巻, 第8号 (1996)
- (7) ベイズ法則についての専門書は多くあるが、ここでは次の本を上げておく。  
H. チャーノフ, L. E. モーゼス (宮沢光一訳) 「決定理論入門」, pp. 239~244, 紀伊国屋書店 (1970)
- (8) 寺野寿郎, 浅井喜代治, 菅野道夫「ファジィシステム入門」, pp. 83~97, オーム社 (1988)
- (9) 菅野道夫, 室伏俊明「ファジィ測度」, pp. 47~71, 日刊工業社 (1993)
- (10) 原子力安全委員会「平成9年版 原子力安全白書」, 大蔵省印刷局 (1998)
- (11) 下岡 浩「原子力発電所に対する公衆の態度決定構造」日本原子力学会誌, 第35巻, 第2号 (1993)