自然言語を用いたシステムの 信頼性解析における ファジィ集合の演算について†

鬼沢 武久*

システムの信頼性解析に専門家の主観や自然言語を導入する場合、ファジィ集合の演算について検討する必要がある。なぜなら解析結果に対する言葉による表現は専門家の主観によるからである。本論文はファジィ集合の演算についてファジィ信頼性解析の観点から考察を加える。

本論文ではファジィ集合の演算としてそれぞれ、最小 t-norm (激烈積) から最大 t-norm (論理積) までの範囲、最小 t-conorm (論理和) から最大 t-conorm (激烈和) までの範囲をカバーする、パラメータ化された t-norm, t-conorm を考えている。システムの信頼性解析の観点からすると、最小の t-norm, t-conorm は最も楽観的な演算を意味し、最大 t-norm, t-conorm は最も悲観的な演算を意味する。つまり、最も楽観的な信頼性解析のモデル化から最も悲観的な信頼性解析のモデル化までがパラメータ化されたファジィ集合の演算によって可能となる。

最後に、例題によって3種類の主観的な信頼性解析の結果について比較検討し、別な観点からパラメータ化された演算の意味を論じている。またこの例題によって、パラメータ化された演算は評価者の主観や過去の経験に基づいた感覚的知識を反映していることも示す。

信頼性評価にだけでなく、ファジィ集合の演算にも専門家の主観を導入することによって、主観的な信頼性解析が行える。

キーワード：主観的な信頼性解析，パラメータ化されたファジィ集合の演算，専門家の主観，自然言語表現

1. はじめに

信頼性・リスク解析の分野にも確率論的手法のみならず、ファジィ理論的手法が必要であるとの観点から、ファジィ理論の応用が試みられている^{1)~4)}。従来の信頼性やリスクの定量的解析には、機器の故障の確率や人間の過誤率といった数値情報が必要である。これらの数値情報を推定するには多くのデータが必要であるが、直接推定できるほどのデータが十分無いのが実状である。この場合、数少ないデータからの外挿や専門家の判断によって推定することが多い。したがってこれらの数値情報には数値が示しているほどの正確さは無

く、また主観的判断が入り込んでいることになる。そこでこのようにして推定された確率をファジィ集合(これをファジィ確率と呼んでいる)で表現したほうが適切であるとの考えから、ファジィ確率を用いた信頼性解析手法も提案されている^{5)~8)}。また数値で表現しにくく、主観的判断が入り込んだ情報は言葉で表現したほうが良く、言葉による情報を使って信頼性やリスクを解析しようとする考えもある⁹⁾。言葉の持つ意味はあいまいであるから、主観的判断が入り込んだ情報を言葉で表現することによって、情報に関するあいまいさのニュアンスが表現できる。

さて確率論的手法を用いた信頼性解析では、基本的な演算として代数積($x \times y$)、代数和($x + y - x \times y$)が用いられている。例えば図1に示されるような並列システム、直列システムを考えてみる。ただしこれらのシステムは互いに独立であるとす

† On Fuzzy Sets Operations in System Reliability Analysis with Natural Language

* Takehisa ONISAWA

筑波大学 構造工学系

University of Tsukuba, Institute of Engineering Mechanics

る。それぞれのサブシステムが不都合になる確率を p_1, p_2 とする(機器の場合は故障確率, 人間の場合は過誤率に相当する)。確率論的手法では, システム全体が不都合になる確率はそれぞれ, $p_1 \times p_2$, $p_1 + p_2 - p_1 \times p_2$ で求められている。ファジィ確率を用いる手法では, 基本的には確率論的手法と同じで拡張原理¹⁰⁾によってファジィ集合の演算に拡張している。

言葉による情報を使って信頼性やリスクを定量的に解析する場合, 言葉の意味を定量的に表現すること, そしてその演算について検討することが必要になってくる。そこで本論文では, 信頼性に関する情報を言葉で表現し, その言葉の意味をファジィ集合で表したとき, このファジィ集合の演算を信頼性解析という観点から検討する。

図1 並列システムと直列システム

2. ファジィ信頼性解析モデル^{11),12)}

本章では, ここで用いるファジィ信頼性解析のモデルの概要を述べる。

2.1 Failure Possibility

機器, 人間の信頼性を $[0, 1]$ 上のファジィ集合で表現し, これを failure possibility と呼ぶ。ただしメンバーシップ関数として

$$F(x) = \frac{1}{1 + 20 \times |x - x_0|^m} \quad (1)$$

を持ち, x_0, m はパラメータである。 x_0 は最大グレードを与えるパラメータで, $0 \leq x, x_0 \leq 1$ であ

る。 m はあいまいさに関するパラメータである。failure possibility は図2に示されるようなファジィ集合である。横軸は主観的不信頼度を表しており, 横軸の値が1に近いほど主観的不信頼度が高いことを表している。横軸の値が1とは, システムが絶対に不都合を起こすとの主観的評価, 横軸の値が0とは, システムは絶対に不都合を起こさないとの主観的評価をそれぞれ意味している。したがって横軸の値が0.5とは, 評価者が主観的に持っている基準の信頼度と解釈できる。

①故障確率, 過誤率などの数値情報が得られる場合

普通, 故障確率や過誤率は $[p_L, p_M, p_U]$ のように三項組で与えられる。 p_M は故障確率や過誤率の最良の推定値, p_L はその下限値, p_U はその上限値である。

図2 Failure Possibility

(1)式のパラメータ x_0 を

$$x_0 = \frac{1}{1 + (K \times \log(1/p_M))^3} \quad (2)$$

$$K = \frac{1}{\log(1/p_S)} \quad (3)$$

の意味で p_M を評価して求める。ただし, $p_M \neq 0$ であり, $p_M = 0$ のときは $x_0 = 0$ とする。また, p_S は評価者が持っている基準の故障確率, 過誤率であり, パラメータ K は主観的な評価基準を表していると言える。

パラメータ m は $p_M/p_L, p_U/p_M$ の比をもとに決める。 $k = p_M/p_L, p_U/p_M$ として, ここでは表1

のように m を決める。表 1 は k が大きいほどあいまいさが大きいという考えにたっている。

②言語情報が与えられている場合

実際問題として上記の数値情報が得られにくい場合がある。しかしこの場合でも、我々が日常使っている言葉でならその情報を表現しやすいこともある。そこでここでは言葉による表現として、信頼性の評価とその評価のあいまいさという形をとることにする。信頼性の評価に関する表現は表 2 に示すように 11 個の表現を考える。クラス 5 での表現は、機器や人間の信頼性が評価者が持っている評価基準と同等であるとの意味があり、それ以下のクラス (1 ~ 4) では信頼性の評価が基準より低く、それ以上のクラス (6 ~ 11) では高いことを意味している。

信頼性の評価のあいまいさに関する表現は、表 3 に示すように 4 個の表現を考える。

言葉での表現はその意味があいまいであるため、表 2, 3 での表現の意味をファジィ集合を用いて表現する。ここでは言葉による表現とパラメータ x_0 , m を対応させ、(1) 式で表されるファジィ集合でこの意味を表現する。表 2 にはパラメータ x_0 との対応、表 3 にはパラメータ m との対応を示してある。なお表 2 でのカッコ内の数値は各クラスでの x_0 の代表値である。なお、クラス 1, クラス 11 の表現の意味はそれぞれ次のようなファジィ集合で表されるとする。

$$F(x) = \begin{cases} 1 & : x = 1 \\ 0 & : x \neq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$F(x) = \begin{cases} 0 & : x \neq 0 \\ 1 & : x = 0 \end{cases} \quad (5)$$

2.2 積演算, 和演算

failure possibility の積演算, 和演算をそれぞれ次の関数 H , G と拡張原理を用いて行う。

$$H(x, y) = \frac{1}{1 + [\{(1-x)/x\}^{1/3} + \{(1-y)/y\}^{1/3}]^3} \quad (6)$$

ただし, $0 < x, y \leq 1$, $H(0, y) = H(x, 0) = 0$ である。

$$G(x, y) = \frac{[\{x/(1-x)\}^3 + \{y/(1-y)\}^3]^{1/3}}{1 + [\{x/(1-x)\}^3 + \{y/(1-y)\}^3]^{1/3}} \quad (7)$$

ただし, $0 \leq x, y < 1$, $G(1, y) = G(x, 1) = 1$ である。

表 1 パラメータ m とパラメータ k

クラス	パラメータ k	パラメータ m
1	$k \leq 3$	2.0
2	$3 < k \leq 5$	2.5
3	$5 < k \leq 10$	3.0
4	$10 < k$	3.5

表 3 信頼性評価のあいまいさに関する表現とパラメータ m との対応

クラス	信頼性評価のあいまいさに関する表現	パラメータ m
1	あいまいさは小さい	2.0
2	あいまいさは中程度である	2.5
3	あいまいさはやや大きい	3.0
4	あいまいさは大きい	3.5

表 2 信頼性評価に関する表現とパラメータ x_0 との対応

クラス	信頼性評価に関する表現	パラメータ x_0 (代表値)
	(システムの信頼性は)	
1	全くない	—
2	非常に低い	0.9 - 1.0 (0.95)
3	低い	0.7 - 0.9 (0.8)
4	どちらかという低い	0.55 - 0.7 (0.625)
5	標準的である	0.45 - 0.55 (0.5)
6	どちらかという高い	0.3 - 0.45 (0.375)
7	高い	0.2 - 0.3 (0.25)
8	かなり高い	0.1 - 0.2 (0.15)
9	非常に高い	0.05 - 0.1 (0.075)
10	事故, 故障, エラーはないに近い	0.0 - 0.05 (0.025)
11	事故, 故障, エラー全くない	—

2.3 解析結果の定性的表現

ファジィ集合を言葉で表現する問題は、いろいろなレベルでの解が存在し、むずかしい問題である。これまでにいろいろな手法^{13),14)}が提案されていて一般的な解法は無い。ここでは2つのファジィ集合の距離を考えることにする。

解析の結果得られた failure possibility を F_R , あらかじめ用意されている failure possibility を F_S とし, そのメンバーシップ関数を(1)式とする。 F_R , F_S の α -カット¹⁰⁾をそれぞれ,

$$(F_R)_\alpha = (x_{1R}(\alpha), x_{2R}(\alpha)), (F_S)_\alpha = (x_{1S}(\alpha), x_{2S}(\alpha)) \text{ とする。}$$

F_R と F_S との距離を

$$d = \int_0^1 [\{x_{1R}(\alpha) - x_{1S}(\alpha)\}^2 + \{x_{2R}(\alpha) - x_{2S}(\alpha)\}^2]^{1/2} d\alpha \quad (8)$$

とする。 F_S のパラメータ x_0 を $0 \leq x_0 \leq 1$, パラメータ m を 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 の範囲で変化させて, d を最小にする F_S を, 信頼性の評価とそのあいまいさの形で定性的に表現する。このとき表2, 表3を参考にする。

3. システムの信頼性

システムの信頼性を考えるとき, 機械の信頼性, 人間の信頼性の両方を考慮する必要がある。しかしシステム内での人間の信頼性を考えるとき, そのシステム内における人間の作業内容を細かく分析していかないと人間の信頼性を過誤率で表現するのは困難である¹⁵⁾。しかし逆に, 人間の信頼性の定量的な分析は, 細かく分析してもそれほどの精度は持ち合わせていない¹⁵⁾。つまり過誤率を用いた人間の信頼性解析では, 巨視的に分析した場合, ヒューマン・エラーの発生確率である過誤率が推定できないという問題があり, また逆に細かく分析していてもそれほどの精度を持っていないため, その分析が無駄になるというジレンマをかかえている。こういう場合, 人間の信頼性を表現するのに言葉で表現できるくらいの分析にとどめておくのは意味のあることである。

システムの信頼性解析を行うには機械の信頼性と人間の信頼性の両方を考慮しなければならず, 両方共通して扱える尺度が必要である。従来用いられている機械の故障確率は単位時間当りの故障発生率で定義されており, 過誤率は, (対象作業でのエラー回数)/(その作業の要求回数)で定義されており, 統一的な尺度とは言えない。また, 機械の信頼性を故障確率で表現するにしても, その機械が使われている状況を評価して故障確率を修正しなければならないなど専門家の主観的判断が入り込んでおり, 故障確率自身にも数値が示すほどの精度はない。したがって人間の信頼性を言葉で表現し, その意味を表現するのなら, 機械の信頼性も言葉で表現し, 同じファジィ集合で表現することは意味のあることである。2章で述べた failure possibility は, 故障確率, 過誤率が情報としてあれば, それを主観的に評価して得られたものである。一方数値情報が得られなければ, 数少ない情報を主観的に評価した結果を言葉で表現し, その意味を failure possibility で表したものであるから, failure possibility は機械の信頼性, 人間の信頼性を統一的に表現した尺度と言える¹⁶⁾。なお故障確率や過誤率の他にも信頼性では, たとえば, 破損確率などのような尺度もある。このような尺度を考えるときは, (2)(3)式の p_M , p_S をその尺度に置き換えて, その尺度に対応した主観的尺度上のファジィ集合を考えることも可能である。

以上のように機械や人間の信頼性評価を failure possibility で表現した場合, その解析における演算では, 確率的手法における代数積($x \times y$), 代数和($x + y - x \times y$)や2章で述べた積演算 H , 和演算 G のように画一的な演算よりは, 評価者の主観や解析対象であるシステムに対する過去の経験や知識を反映するような演算が必要である。なぜなら, 信頼性に関する情報が言葉で与えられ, システム全体の信頼性評価を言葉で表現するとき, その表現は評価者の主観に基づくものであり, 評価者によってその表現も異なるし, また信頼性に関する情報が言葉でうまく表現できなくても, 過去の経験に基づいた感覚的な知識を情報として使

うことは意義があるからである。次章では信頼性解析の観点から *failure possibility* の演算について検討する。

4. 演算のパラメータ化と信頼性解析的見地からの考察

(6)式, (7)式は, Dombi の t-norm, t-conorm¹⁷⁾

$$\frac{1}{1 + [\{(1-x)/x\}^p + \{(1-y)/y\}^p]^{1/p}} \quad (p > 0)$$

$$1 - \frac{1}{1 + [\{x/(1-x)\}^p + \{y/(1-y)\}^p]^{1/p}}$$

$$= \frac{[\{x/(1-x)\}^p + \{y/(1-y)\}^p]^{1/p}}{1 + [\{x/(1-x)\}^p + \{y/(1-y)\}^p]^{1/p}} \quad (p > 0)$$

の特別な場合である。(6)式における数値ファクタ 1/3, (7)式における数値ファクタ 3 は故障確率, 過誤率の演算との整合性から選ばれたものである¹¹⁾。図 1 に示したシステムの信頼性解析を 2 章で述べた手法によって解析を行うとき, システム全体の *failure possibility* のパラメータ x_0 を計算すると次のようになる。

それぞれの確率を同じ評価基準で評価して,

$$x_{01} = \frac{1}{1 + (K \times \log(1/p_1))^3} \quad (9)$$

$$x_{02} = \frac{1}{1 + (K \times \log(1/p_2))^3} \quad (10)$$

とする。並列システムの信頼性を求めるための積演算では

$$x_0 = H(x_{01}, x_{02})$$

$$= \frac{1}{1 + (K \times \log(1/p))^3} \quad (11)$$

と確率の演算との整合性がとれている¹¹⁾。ただし $p = p_1 \times p_2$ である。一方, 直列システムの信頼性を求めるための和演算では

$$x_0 = G(x_{01}, x_{02})$$

$$= \frac{1}{1 + (K \times \log(1/p))^3} \quad (12)$$

と, この場合は完全な整合性はとれていないが, 近似的な整合性はとれている¹¹⁾。ただし $p = p_1 +$

$p_2 - p_1 \times p_2$ である。

本論文では(6)式, (7)式を

$$H'(x, y) = \frac{1}{1 + [\{(1-x)/x\}^{1/n} + \{(1-y)/y\}^{1/n}]^n} \quad (13)$$

$$G'(x, y) = \frac{[\{x/(1-x)\}^c + \{y/(1-y)\}^c]^{1/c}}{1 + [\{x/(1-x)\}^c + \{y/(1-y)\}^c]^{1/c}} \quad (14)$$

のようにパラメータ化し, システムの信頼性解析の立場から考察を加える。

①積演算 H' について

パラメータ n については, $n \rightarrow \infty$ のとき

$$H'(x, y) = \begin{cases} x : y=1 \\ y : x=1 \\ 0 : x, y < 1 \end{cases} \quad (15)$$

と激烈積となり, $n \rightarrow 0$ のとき

$$H'(x, y) = \min(x, y) \quad (16)$$

と論理積になる¹⁷⁾。パラメータ n を変えることにより, 積演算 H' は最小 *t-norm* (激烈積) から最大 *t-norm* (論理積) まで変化し得る。この点を図 1 (1) に示す並列システムの信頼性を例にして述べる。並列システムは両方のサブシステムが故障したときシステム全体が故障するので, システム全体の不信頼度はサブシステムの不信頼度の積演算の結果として得られる。 $n \rightarrow 0$ のとき, サブシステムの不信頼度の一番低い不信頼度をシステム全体の不信頼度とするモデルになる。したがってこのモデルでは, 不信頼度の大きいサブシステムはシステム全体の不信頼度に影響してないため一番悲観的な評価をしていることになる。これは, 多数の繊維からなる束で一番強い(不信頼度が一番低いことに相当)繊維が束の強度を決めるというモデルである¹⁸⁾。

一方 $n \rightarrow \infty$ のとき, 不信頼度が 1 (つまりサブシステムが絶対に故障するとの評価) の場合を除いて, システム全体の不信頼度は 0 となり, システムは絶対に故障しない, 事故を起こさないと評価するモデルになる。よってこのモデルでは一番楽観的な評価をしていることになる。

主観的不信頼度 x, y ($\neq 1$ とする) を使って説明

すると、 0 (激烈積) $\leq H'(x, y)$ (積演算) $\leq \min(x, y)$ (論理積) を意味する。

②和演算 G' について

パラメータ c については、 $c \rightarrow \infty$ のとき

$$G'(x, y) = \max(x, y) \quad (17)$$

と論理和になり、 $c \rightarrow 0$ のとき

$$G'(x, y) = \begin{cases} x : y=0 \\ y : x=0 \\ 1 : x, y > 0 \end{cases} \quad (18)$$

と激烈和になる¹⁷⁾。パラメータ c を変えることにより、和演算 G' は最小 t -conorm (論理和) から最大 t -conorm (激烈和) まで変化し得る。この点を図 1 (2) に示す直列システムの信頼性を例にして述べる。直列システムはサブシステムの 1 つが故障するとシステム全体として故障するので、システム全体の不信頼度はサブシステムの不信頼度の和演算の結果として得られる。 $c \rightarrow 0$ のとき、不信頼度が 0 (つまり、サブシステムが絶対に故障しないとの評価) の場合を除いて、システム全体の不信頼度は 1 となり、システムは完全に故障する、あるいは事故を起こすと評価するモデルになる。この場合、一番悲観的な評価をしていることになる。

一方 $c \rightarrow \infty$ のとき、サブシステムの不信頼度の一番大きい不信頼度をシステム全体の不信頼度とするモデルになる。したがってこのモデルでは、不信頼度の小さいサブシステムはシステム全体の不信頼度に影響しないとの評価から、一番楽観的な評価をしていることになる。これは、鎖を構成する環の中で一番弱い (不信頼度が一番大きいことに相当) 環が鎖全体の強度を決めるというモデルである¹⁸⁾。

主観的不信頼度 x, y ($\neq 0$ とする) を使って説明すると、上記の内容は、 $\max(x, y)$ (論理和) $\leq G'(x, y)$ (和演算) ≤ 1 (激烈和) を意味する。

パラメータ化された演算で激烈積から論理積まで変化する積演算、論理和から激烈和まで変化する和演算には、Dombi の演算の他に Yager の演算、 $1 - [1 \wedge \{(1-x)^p + (1-y)^p\}^{1/p}]$, $1 \wedge (x^p + y^p)^{1/p}$, Schweizer の演算、 $1 - [(1-x)^p + (1-y)^p - (1-x)^p \times (1-y)^p]^{1/p}$, $(x^p + y^p - x^p \times y^p)^{1/p}$

などがある¹⁷⁾。ただし $p > 0$ であり、 $\wedge$ は min 演算を表す。したがって信頼性解析の観点からすると、これらの演算を用いても上で述べたのと同じモデルを考えることができる。しかし (11) 式、(12) 式の意味で確率の演算との整合性を考えるときは、(13) 式、(14) 式の演算が適当である。

5. 解析例

システムを構成する個々のサブシステムの信頼性の評価が言葉で表されたとき、言葉によるシステム全体の信頼性の評価は、評価者の主観に基づくため評価者によって異なってくる。4 章の考察から、積演算、和演算のパラメータ n, c を変えることによって評価者の主観に応じた信頼性解析が行える。

5.1 パラメータ n

図 1 (1) のサブシステム A, B の信頼性の評価が図 3 の failure possibility で表されるとする。言葉で表現すると、「標準的な信頼性であり、そのあいまいさは中程度である」。ここではシステム全体の信頼性が図 4 の failure possibility で表されるようにパラメータ n を 2.9, 2.05, 1.0 のように選ぶ。 F_s のパラメータ x_0 は、図 4 (1) では 0.15, 図 4 (2) では 0.25, 図 4 (3) では 0.37 である。信頼性の評価を言葉で表現すると、それぞれ、「システムの信頼性はかなり高い。その評価のあいまいさは小さい」、「システムの信頼性は高い。

図 3 図 1 のサブシステムの Failure Possibility

その評価のあいまいさは小さい, 「システムの信頼性はどちらかというが高い。その評価のあいまいさは中程度」である。この3例を比較すると, 図4(1)は楽観的な評価をする評価者に相当し, 図4(3)は悲観的な評価をする評価者に相当する。図4(2)はその中間的な評価者に相当する。ここではそれぞれ, 「楽観的な評価者」, 「悲観的な評価者」, 「中間的な評価者」と呼ぶことにする。

図4 並列システム全体の Failure Possibility

5.2 パラメータ c

図1(2)のサブシステム A, B の信頼性の評価が前節と同様に, 図3の failure possibility で表されるとする。このシステム全体の信頼性が図5の failure possibility で表されるようにパラメータ c を 2.5, 1.3, 0.85 のように選ぶ。 F_S のパラメータ x_0 は, 図5(1)では 0.55, 図5(2)では 0.6, 図5(3)では 0.65 である。言葉で表現すると, 図5(1)

図5 直列システム全体の Failure Possibility

は「システムの信頼性は標準的だ。その評価のあいまいさは中程度」であり、図5(2)(3)は「システムの信頼性はどちらかというと低い。その評価のあいまいさは中程度」である(図5(2)(3)では、言葉での表現は同じであるが、パラメータ x_0 の値は異なっている)。この3例を比較すると、図5(1)は楽観的な評価をする評価者に相当し、図5(3)は悲観的な評価をする評価者に相当する。図5(2)はその中間的な評価者に相当する。ここではそれぞれ「楽観的な評価者」、「悲観的な評価者」、「中間的な評価者」と呼ぶことにする。

5.3 例1

ここでは例として図6(1)に示したシステムの信頼性を評価する。サブシステムの不都合としては、機械の故障、作業におけるヒューマン・エラーのどちらでもよい。なおサブシステムの信頼性は前節同様に、図3の failure possibility で表されるとする。①楽観的な評価者の場合、②中間的な評価者の場合、③悲観的な評価者の場合として、システム全体の failure possibility は図7のようになる。システム全体の信頼性を言葉で評価する

(1) 解析対象のシステム

(2) フォールトツリー (1)

図6 解析対象のシステムとそのフォールトツリー

と、それぞれ、「システムの信頼性は高い。その評価のあいまいさは小さい」、「システムの信頼性はどちらかというと高い。その評価のあいまいさは中程度」、「システムの信頼性は標準的だ。その評価のあいまいさは中程度」である。①②③を比較すると、悲観的な評価者の場合だけがシステム全体の信頼性が標準の信頼性と一番低い評価となっ

(1)

(2)

(3)

図7 解析結果の Failure Possibility

ており、他の2例は標準の信頼性より高くなっている。これは、悲観的な評価者は並列システムの信頼性を高く評価しない、直列システムの信頼性を低く評価することから、システム全体の信頼性を低く評価する結果である。

5.4 積演算、和演算のパラメータ化の別な解釈

図6のサブシステムの故障確率の最良の推定値 p_M が 10^{-3} として与えられているとすると、前節の例では①②③の場合ともに、(2)式、(3)式の意味で p_M を評価するときの基準の故障確率 p_s は 10^{-3} である。またシステム全体の故障確率は 4×10^{-6} である。failure possibility の演算のパラメータ化は、サブシステムの故障確率を使って解析したシステム全体の故障確率を、 p_s とは異なる基準の故障確率 p_s' を使って(2)式、(3)式の意味で評価しているとも解釈できる。 p_s はサブシステムやシステムの構成要素の信頼性を評価するときの評価基準であり、 p_s' はシステム全体の信頼性を評価するときの評価基準ということになる。この例で p_s' を求めてみると、① 3.98×10^{-4} 、② 4.71×10^{-5} 、③ 2.86×10^{-6} となる。ただしこのときの x_0 は F_s のものである。楽観的な評価者になるほど、評価基準の故障確率 p_s' は大きくなっていることがわかる。

5.5 例2

例1では、2つの直列システムに不都合が起こるとシステム全体の不都合になるとしているが、評価者の経験的知識からシステム全体の不都合に必ずしもならない場合があるとする。例えばシステム全体の不都合を監視する作業員がいて、不都合が生じれば修理などしてシステムを正常に保つ場合である。この部分をフォールトツリーに描くと図8のようになる。このフォールトツリーを定量的に解析していくには、「監視・修理エラー」についての情報も必要になる。この情報が例えば、「信頼性はどちらかというと低い」と評価され、その評価のあいまいさが「やや高い」などのように与えられていれば、図8のフォールトツリーを解析していけばよい。しかし場合によってはそういった情報が得られにくい場合もある。例えばヒューマンエラーに関して、人間は自分の犯したエラーに気づけばやり直す。しかしそのやり直しの際にまた別なエラーをしてしまうことがある。このようにヒューマンエラーをミクロにとらえていくと、定量的に解析しにくい。言葉で表現することはマクロにとらえていくことに相当するが、言葉で表現しにくい情報もある。その場合図8のフォールトツリーは定量的に解析できないこ

図8 フォールトツリー(II)

とになる。しかし評価者の過去の経験からシステム全体の不都合に関して、例えば信頼性は低いが人間の監視、修理を考えると楽観的にみてよいとする場合もある。このときその判断に基づいて解析するとすれば、図6(2)のフォールトツリーを解析することになるが、積演算については楽観的な演算をすることになる。図9(1)に、和演算のパラメータ $c=1.3$ (中間的), 積演算のパラメータ $n=2.9$ (楽観的)とした場合の解析結果を示す。「システムの信頼性は高い。その評価のあいまいさは小さい」という評価になり、和演算、積演算のパラメータを共に中間的とした場合の解析結果(図7(2))よりは楽観的な評価になっている。なおこの結果は、図8のフォールトツリーで「監視・修理エラー」の基本事象の評価が、「信頼性はどちらかという低い」、この評価のあいまいさが「やや高い」と与えられた場合で、和演算、積演算のパラメータが共に中間的とした場合の解析結果(図9(2))とほぼ同じである。このことから、基本事象の信頼性に関する情報が数値的にも、言語的にも得られにくい場合であっても、評価者の過去の経験からの知識を和演算、積演算のパラメータに反映させることによって評価者の判断に基づいた解析が行えることを示している。

6. おわりに

本論文では、サブシステムの信頼性評価を言葉で表現したとき、言葉によるシステム全体の信頼性評価は評価者の主観に基づくため評価者によって異なるという観点から、failure possibility を用いたシステムの信頼性解析で、failure possibility の積演算、和演算をパラメータ化することによって評価者の主観が導入できることを示した。パラメータ化することによって、本論文で用いた積演算、和演算はそれぞれ、最小 t -norm から最大 t -norm まで、最小 t -conorm から最大 t -conorm までカバーできるので、パラメータを適当に選ぶことによって、信頼性解析の観点からすると一番楽観的な評価から一番悲観的な評価に対応するモデル化ができることを述べた。また解析例によって、

図9 解析結果の Failure Possibility (II)

楽観的な評価者の場合、中間的な評価者の場合、悲観的な評価者の場合の結果について比較検討した。さらに評価者の過去の経験からの知識を演算のパラメータに導入することによって評価者の判断に基づいた解析も行えることを示した。

今後の課題としては、パラメータ化した演算を用いて主観的な信頼性解析が行えるような解析用システムを構築することである。ここで問題になるのがパラメータ n, c の決め方であるが、次のような決め方が考えられる。図1に示した並列システム、直列システムを考え、各サブシステムの信頼性評価を「標準」としたとき、並列システム、直列システムの信頼性を評価者がどのように評価するかによってパラメータ n, c を決める。例えば解析例で示したように、「並列システムの信頼性は

かなり高い」と評価すれば $n=2.9$, 「直列システムの信頼性は標準」と評価すれば $c=2.5$ と決められる。

参 考 文 献

- 1) M.Shahipoor and D.J.Wells : Applications Possibilities for Fuzzy Failure Analysis, and Diagnosis of Reactor Plant Components and Areas, Nuclear Engineering and Design, 61, pp.93-100, 1980.
- 2) H.Furuta and N.Shiraishi : Fuzzy Importance in Fault Tree Analysis, Fuzzy Sets and Systems, Vol.12, No.3, pp.205-213, 1984.
- 3) Cai Kai-Yuan, Wen Chuan-Yuan and Zhandg Ming-Lian : Posbist Reliability Behavior of Typical Systems with Two Types of Failure, Fuzzy Sets and Systems, Vol.43, No.1, pp.17-32, 1991.
- 4) Y.Nishiwaki and C.Preyssl : Uncertainties in Estimating Dose-Effect Relationships and Optimization of Radiation Protection Based on Fuzzy Risk Analysis, Proc. of the 4th IFSA Congress, Brussels, Vol. Engineering, pp.151-154, 1991.
- 5) 野間圭介, 田中英夫, 浅居喜代治 : ファジィ確率を用いる欠陥関連樹木法について, 日本人間工学会誌, Vol.7, No.6, pp.291-297, 1981.
- 6) H.Tanaka, L.T.Fan, F.S.Lai and K.Toguchi : Fault Tree Analysis by Fuzzy Probability, IEEE on Trans. on Reliability, Vol.R-32, No.5, pp.453-457, 1983.
- 7) D.Singer : A Fuzzy Set Approach to Fault and Reliability Analysis, Fuzzy Sets and Systems, Vol.34, No.2, pp.145-155, 1990.
- 8) R.Kenarangui : Event-tree Analysis by Fuzzy Probability, IEEE Trans. on Reliability, Vol.R-40, No.1, pp.120-124, 1991
- 9) K.J.Schmucker : Fuzzy Sets, Natural Language Computations, and Risk Analysis, Computer Science Press, Rockville, MD, 1984. (鬼沢訳 : ファジィ集合 - 自然言語演算とリスク解析 -, 啓学出版, 1990.)
- 10) 本多中二, 大里有生 : ファジィ工学入門, 海文堂, 1989.
- 11) 鬼沢武久 : システムの事故の定性的表現とその信頼性解析, 日本ファジィ学会誌, Vol.2, No.2, pp.231-245, 1990.
- 12) T. Onisawa : Fuzzy Reliability Analysis Using Natural Language Information and Numerical Information, Proc. of the 4th IFSA Congress, Brussels, Vol.Engineering pp.163-166, 1991.
- 13) D.P.Clements : Fuzzy Ratings for Computer Security Evaluation, Ph.D.Dissertation, Univ. of California at Berkeley, 1977.
- 14) F.Eshragh and E.H.Mamdani : A General Approach to Linguistic Approximation, Int. J. of Man-Machine Studies, Vol.11, pp.501-519, 1979.
- 15) 林喜男 : 人間信頼性工学-人間エラーの防止技術, 海文堂, 1984.
- 16) T.Onisawa : Fuzzy Model for System-Reliability Analysis and a Prototype of a Fuzzy-Reliability Analyzer, Submitted to IEEE Trans. on Reliability.
- 17) M.Mizumoto : Pictorial Representations of Fuzzy Connectives, Part I : Cases of t-norms, t-conorms and Averaging Operators, Fuzzy Sets and Systems, Vol.31, No.2, pp.217-242, 1989.
- 18) 塩見弘 : 故障解析と診断, 日科技連, p.119, 1979.

(1992年4月16日 受 付)

[問い合わせ先]

〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1

筑波大学 構造工学系

鬼沢 武久

TEL : 0298-53-5060

FAX : 0298-53-5207

e-mail : onisawa@kz.tsukuba.ac.jp

著 者 紹 介

鬼沢 武久 (おにさわ たけひさ)

筑波大学構造工学系

1975年 3月東京工業大学工学部制御工学科卒業。1977年 3月同大学大学院理工学研究科制御工学専攻修了。東京工業大学総合理工学研究科助手、熊本大学工学部講師、助教授を経て、現在筑波大学構造工学系助教授。ファジィ理論とその応用に関する研究に従事。現在は信頼性解析、ヒューマン・インタフェースへの応用に関心がある。工学博士。1987年日本人間工学会から橋本賞受賞。国際ファジィシステム学会、IEEE、計測自動制御学会、日本人間工学会、電子情報通信学会などの会員。