

感覚情報の定量化による機械システムの信頼性・安全性解析

亀山 嘉正, 倉重 賢治

1. はじめに

システムの設計と運用段階において、フォールトツリーによる信頼性・安全性解析は極めて重要な役割を果たす[3]。これまでに、基本事象の発生頻度がファジィ数で表現できる時に、トップ事象の発生頻度をファジィ数で推測する方法が提案されている[8]。しかし、機械システムの場合、基本事象の発生頻度に対するメンバシップ関数を感覚的に与えることは容易ではない。そこで、対象システムに経験の深い保安全管理技術者の持っている感覚的知識を一对比較法で定量化し、フォールトツリーの中で未だ収集されていない基本事象の発生確率を推定し、主観的クリティカルティ重要度を算出する方法について述べる[4][5]。また、この方法を小型エンジンの信頼性解析に適用して、信頼性向上のため改善すべき対策の優先順位を明らかにする。

2. フォールトツリー解析 [3]

2.1 クリティカルティ重要度解析

フォールトツリーは、システムにとって望ましくない重大事象をトップ事象とし、トップ事象につながる1次要因、2次要因を論理記号で結合して構成されるものである。また、フォールトツリー解析において、システムの信頼性・安全性を向上させる有効な対策を求めるためには、システムの故障（トップ事象）の発生に対して、いずれの基本事象がどの程度寄与しているかを定量的に知る必要があり、クリティカルティ重要度が定義されている。まず、フォールトツリーのトップ事象の発生確率 P_{top} は(1)式で表現される。

$$P_{top} = P(\mathbf{q}), \mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T \quad (1)$$

ここで q_i は、基本事象 $x_i (i=1, \dots, n)$ の発生確率であ

る。また、 x_i の確率重要度として、基本事象発生確率の増加に対するトップ事象発生確率の増加率が(2)式で表わされる。

$$I_p(x_i) = \frac{\partial P(\mathbf{q})}{\partial q_i}, (i=1, \dots, n) \quad (2)$$

(2)式より、大きな確率重要度を示す基本事象の生起確率を小さくすることができれば、トップ事象の発生確率を効率よく低減することが可能となる。しかしながら、もともと生起確率の小さな基本事象をさらに改善することは、生起確率の大きな基本事象を改善することよりも困難である。(2)式による評価では、この事実が反映されていない。そこで、これらの問題点を克服するために、基本事象発生確率のパーセント変化の増加に対する、トップ事象発生確率のパーセント変化の増加の割合として x_i のクリティカルティ重要度 $CI_p(x_i)$ が(3)式で定義されている。

$$CI_p(x_i) = \frac{q_i}{P_{top}} \cdot \frac{\partial P(\mathbf{q})}{\partial q_i}, (i=1, \dots, n) \quad (3)$$

すべての基本事象に対して、(3)式を用いてクリティカルティ重要度を求めて比較すれば、対象とするフォールトツリーの論理的構造とその基本事象の発生確率から考慮した、基本事象の重要性に順位をつけることが可能となる。

2.2 一对比較法を用いた基本事象発生確率の推定 [4][5]

一般的に、機械システムでは、クリティカルティ重要度の算出に必要な基本事象の発生確率データを収集することは困難である。しかしながら、一对比較法を用いて、対象システムの熟練者が持っている感覚的知識から、フォールトツリーに含まれている基本事象の相対的な発生確率の値を主観的に求める方法が考えられる。ただし、実際のフォールトツリー解析では、関連する基本事象の数は100個以上になることがある。このような場合、すべての基本事象の発生確率を一对

比較することは実用的ではない。そこで、比較回数の増加を抑制するために、すべての基本事象を3～5個ずつの要素を持つ複数のグループに分け、各グループ内の基本事象に対してのみ、発生確率を一对比較する方法を採用する。各グループの中での相対的発生確率は、最も高い基本事象の発生確率を基準にして表示し、この基準となる基本事象を、グループの代表基本事象と呼ぶ。それらグループの代表に対してのみ、再び発生確率を一对比較する。そうして、グループの代表基本事象に対する相対的発生確率と各グループの基本事象に対する相対的発生確率を合成することにより、フォールトツリーに関するすべての基本事象に対して、相対的発生確率を推測することができる。ここで、発生確率が既知の基本事象が1つでもあれば(トップ事象も含む)、推測した相対発生確率から未知の基本事象の発生確率を推測できる。

2.3 複数のフォールトツリーを考慮した解析 [7]

実際のフォールトツリー解析では、対象システムに対して1つのトップ事象だけではなく、複数のトップ事象を考慮する必要がある場合も存在する。この時、それぞれのトップ事象に対して、フォールトツリーを作成する必要がある。ある基本事象が複数のシステムの故障要因になることがある。そこで、複数のフォールトツリーに対して、それぞれのトップ事象が、システムに与えるリスクを総合的に評価した各基本事象のクリティカリティ重要度を算出する方法を述べる。まず、複数のフォールトツリーに対するクリティカリティ重要度評価の概念を図1に示す。トップ事象 T_j における、基本事象 x_i のクリティカリティ重要度を $CI_{pj}(x_i)$ とすると、基本事象 x_i の総合クリティカリティ重要度 $CI_{pTOTAL}(x_i)$ は(4)式により定義される。

$$CI_{pTOTAL}(x_i) = \sum_{j=1}^{n_t} w_j CI_{pj}(x_i) \quad (4)$$

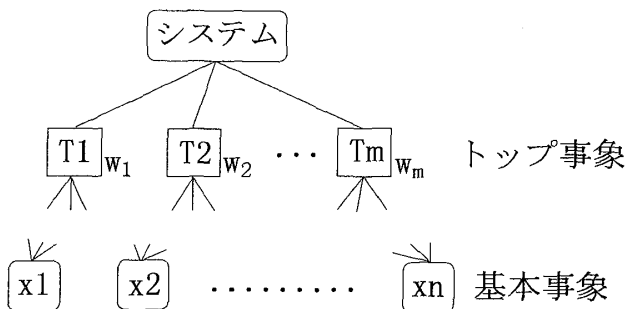


図1 複数のフォールトツリーからなるクリティカル重要度評価の概念

ただし、 n_t はトップ事象の数であり、 w_j はトップ事象 T_j が、システムに与える望ましくないリスクの相対的な大きさを示す。ここで、各トップ事象がシステムに与えるリスクは、そのトップ事象がシステムに与えるダメージ(損害)とそのトップ事象の発生確率の積で与えられる。また、

$$\sum_{j=1}^{n_t} w_j = 1 \quad (5)$$

を満たす。以上に述べた考え方に基づいて、複数のフォールトツリーに含まれている各々の基本事象に対する主観的総合クリティカリティ重要度を算出する手順を以下に示す。ここで、いくつかの基本事象は、複数のフォールトツリーの中で共通して現われると仮定する。

- Step1 対象システムに対して、望ましくないトップ事象 $T_j(j=1, \dots, m)$ とその発生確率 $P_{topj}(j=1, \dots, m)$ を収集する。これらの情報は、メーカーのサービスエンジニアリング部門に集積されていることが多い。
- Step2 各トップ事象に対して、その原因となる事象を探索して、すべての基本事象を得て、フォールトツリーを作成する。
- Step3 フォールトツリーに含まれている基本事象の相対的発生確率を、一对比較法を用いて推定する。ただし、最大の相対的発生確率を1として表現する。
- Step4 フォールトツリーの構造より、トップ事象の発生確率 P_{topj} を、最大の発生確率を示す基本事象の未知の発生確率 q_{max} の多項式で表わし、ニュートンラフソン法を用いて q_{max} を算出する。残りの基本事象の発生確率は、 q_{max} の値と残りの基本事象の q_{max} に対する相対的発生確率より推定する。
- Step5 トップ事象 T_j に対して、展開したフォールトツリー内に含まれている各基本事象 x_i のクリティカリティ重要度を(3)式により算出する。
- Step6 すべてのトップ事象に対して、それらの発生によりシステムが受けるダメージの相対的大きさ $d_j(j=1, \dots, m)$ を一对比較法により算出する。
- Step7 トップ事象 T_j に対して、相対的なダメージの大きさ d_j とその発生確率 P_{topj} の積により、相対的なリスク $w_j(j=1, \dots, m)$ を算出する。その後、 $\sum w_j = 1$ となるように正規化する。
- Step8 各基本事象 x_i に対して、それぞれのトップ事象により、システムが受ける相対的なリスクで評価した総合クリティカリティ重要度を(4)式により算出する。

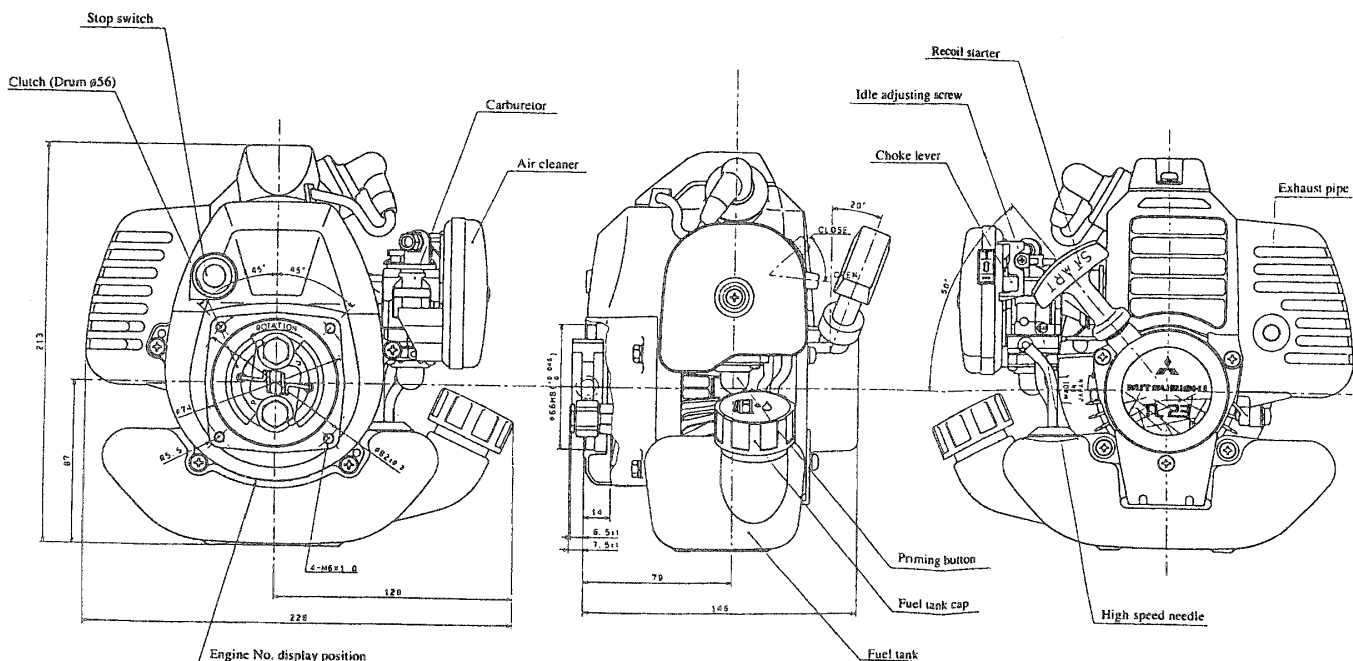


図2 小型エンジンの外観

以上のアルゴリズムで得られた基本事象の総合クリティシティ重要度の順位を参考にして、故障の発生を効果的に抑制するための対策を検討したり、取り扱い説明書などでユーザーへ注意を喚起したりすることに活用できる。

3. 小型エンジンの信頼性解析

3.1 対象システムに対するフォールトツリーの作成

刈払機用小型エンジンの信頼性解析を行う。刈払機は国内で年間40~50万台生産され、平均使用年数は1~5年、平均使用時間は300~500時間である。この刈払機に使用されている小型エンジンの構造は簡単であり、部品数も比較的少ないが、コンポーネントに冗長性がないため、個々の部品の故障がシステム全体の故障につながる。対象とするエンジンの外観は図2に示す。

まず、Step1に従って、刈払機メーカーのサービスエ

ンジニアの意見を参考にし、7つのトップ事象を取り上げる。また、これらのトップ事象の発生確率のデータは、すでにメーカーのサービス部門に収集されており、基本事象の数と合わせて表1に示す。ここで、システム全体では84種類の基本事象が存在しており、複数のトップ事象に共通する基本事象は39個存在している。(表1の数は重複を含んでいる)。次に、Step2に従って、“エンジンが始動しない”、“低速回転が滑らかでない”など、それぞれのトップ事象に対して、フォールトツリーを作成し、基本事象の重要度解析を実施する。

3.2 トップ事象ごとの重要度解析

ここでは、(TE2)の“低速回転が滑らかでない”のトップ事象を例に取り、各基本事象のクリティシティ重要度を求める。他のトップ事象についてはページ数の制限のため割愛する。

表1 トップ事象の発生確率と含まれる基本事象の数

トップ事象	トップ事象の発生確率(%)	基本事象の数
(TE1) エンジンが始動しない	3.00	31
(TE2) 低速回転が滑らかでない	0.84	17
(TE3) 高速回転が滑らかでない	2.16	19
(TE4) パワー不足	1.80	38
(TE5) エンジンが異音を発生する	0.36	9
(TE6) 燃料消費が多い	1.44	16
(TE7) 運転中にエンジンが停止する	2.40	28

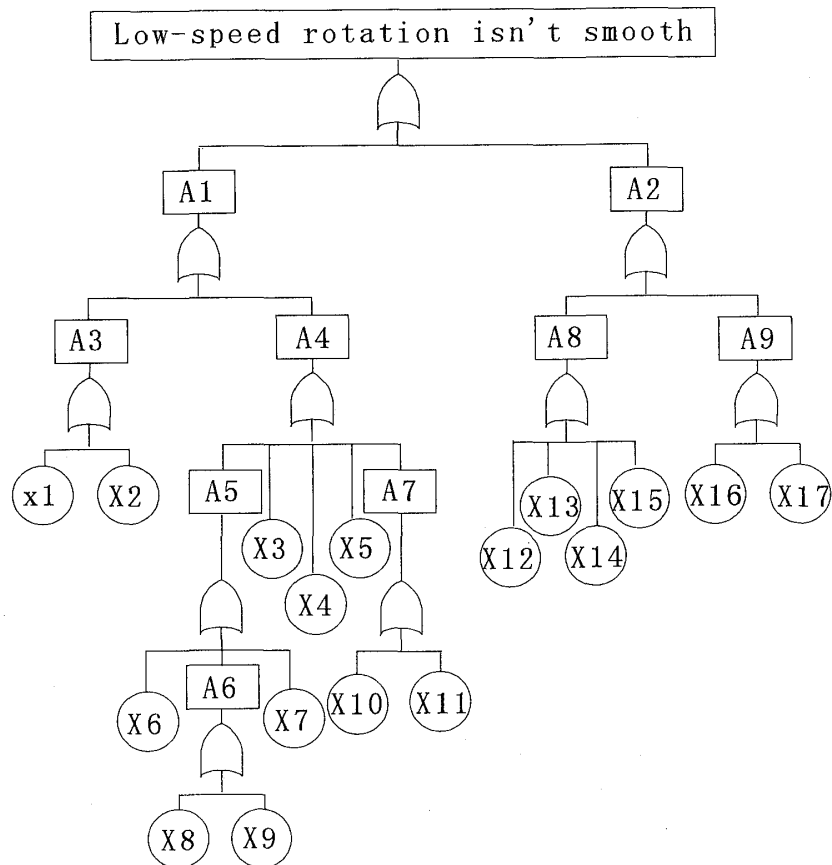


図3 トップ事象“低速回転が滑らかでない”のフォールトツリー

まず、低速回転が滑らかではない原因には、次の2つが考えられる。

- I. 電気系統の不良（点火プラグの火花が弱い）
- II. 燃料系統の不良（キャブレターや燃料フィルターの不良）

これらをトップ事象発生に対する第1次の要因としてとりあげ、さらに原因を掘り下げて図3に示すフォールトツリーを作成した。表2には、このフォールトツリーに含まれる中間事象と基本事象を示す。トップ事象“低速回転が滑らかでない”の発生確率を P_{top2} と

表2 トップ事象“低速回転が滑らかでない”に対する中間事象と基本事象

中間事象		基本事象	
A1 電気系統の 不良	A3 プラグ不良	x1	点火プラグの電極部の汚損
		x2	点火プラグの絶縁不完全
	A4 マグネット 不良	x3	コード類の異常
		x4	エアギャップ不良
		x5	フライホイール減磁
	A5 断続器不良	x6	断絶器絶縁不良
		A6 接点不良	x7
	x8		断続器接点汚損
		x9	断続器接点間隔不良
	A7 点火コイル不良	x10	ストップコード線のかみ込み
		x11	コイル部分、巻線のショート・断線
A2 燃料系統の 不良	A8 キャブレター 不良	x12	キャブレターのかみ込み
		x13	キャブレターガスケット不良
		x14	キャブレター取り付け不完全
		x15	ジェット、ニードルの摩擦
	A9 整備不良	x16	エアクリーナーの目詰まり
		x17	燃料フィルターの目詰まり

表3 使用する修飾語とその数値化案

使用する修飾語	数値化案
同じくらい	1
少し	1.7
かなり	3
非常に	10
圧倒的に	100

すると、図3に示すフォールトツリーの構造より、 P_{top2} と q_i には、(6)式に示す関係がある。

$$P_{top2} = 1 - (1 - (1 - (1 - (1 - (1 - q_1)(1 - q_2))) (1 - (1 - (1 - (1 - q_6)(1 - (1 - (1 - q_8)(1 - q_9))) (1 - q_7))) (1 - q_3)(1 - q_4)(1 - q_5)(1 - (1 - (1 - q_{10})(1 - q_{11})))))) (1 - (1 - (1 - (1 - (1 - q_{12})(1 - q_{13})(1 - q_{14})(1 - q_{15}))) (1 - (1 - (1 - q_{16})(1 - q_{17})))))) \quad (6)$$

Step3に従って、一対比較法により、すべての基本事象に対して相対的発生確率の算出を行う。表3に一対比較結果を表現する修飾語に対して、割り当てる代表値を示している。ここでは表4に示すように、4つのグループに分けて一対比較を行うことで、一対比較の回数の軽減を行う。その結果、 x_{16} である“エアクリーナの目詰り”が最も相対的な発生確率が高いのでこの値を1.0として、他のグループの基本事象の相対的

発生確率の値を与えている。Step4に従って、(6)式に含まれる x_1 から x_{17} までの基本事象の発生確率は q_{16} との相対的発生確率の積で与えられる。さらに、表1に示すように、トップ事象“低速回転が滑らかでない”の発生確率は、メーカーのサービス部門が収集したデータで0.84%という値が得られている。 $P_{top2} = 0.0084$ のもとで、 q_{16} のみで表わされる(6)式の多項式にニュートンラフソン法を適用して q_{16} を求めたところ、 $q_{16} = 0.001764$ が得られた。同様にして、すべての基本事象の発生確率を算出できる。ここで、一対比較法で得られた基本事象の相対的発生確率と、トップ事象の発生確率より推定された基本事象の発生確率を表4に表示する。Step5に従って、このトップ事象に関する各基本事象のクリティカリティ重要度のグラフは図4に示す。

3.3 各フォールトツリーにおける重要度解析の総合評価

個々のフォールトツリーに対するクリティカリティ重要度が算出されたとして、ここでは、システム全体としての総合的クリティカリティ重要度を算出する。Step6に従って、最初に、7つのトップ事象が対象システムに対してどれくらい大きなダメージを与えるかを一対比較法によって求める。そこで、メーカーのサービスエンジニアに行っていただいた一対比較行列を

表4 トップ事象“低速回転が滑らかでない”に対する基本事象の相対的な発生確率

グループと含まれる基本事象	Level 1: 各グループでの相対的発生確率	Level 2: 代表基本事象の相対的発生確率	全基本事象の相対的発生確率	主観的発生確率
グループA				
x1	0.454937	0.508927	0.231530	0.000408
x2	1.000000		0.508927	0.000898
x3	0.251404		0.127946	0.000226
x4	0.127239		0.064755	0.000114
x5	0.737778		0.037548	0.000066
グループB				
x6	0.139699	0.075599	0.010561	0.000019
x7	0.277417		0.020973	0.000037
x8	1.000000		0.075599	0.000133
x9	0.277419		0.020973	0.000037
グループC				
x10	0.018023	0.841395	0.015164	0.000027
x11	0.072183		0.060734	0.000107
x12	1.000000		0.841395	0.001484
x13	0.228528		0.192283	0.000339
グループD				
x14	0.339618	1.000000	0.339618	0.000599
x15	0.582742		0.582742	0.001028
x16	1.000000		1.000000	0.001764
x17	0.582742		0.582742	0.001028

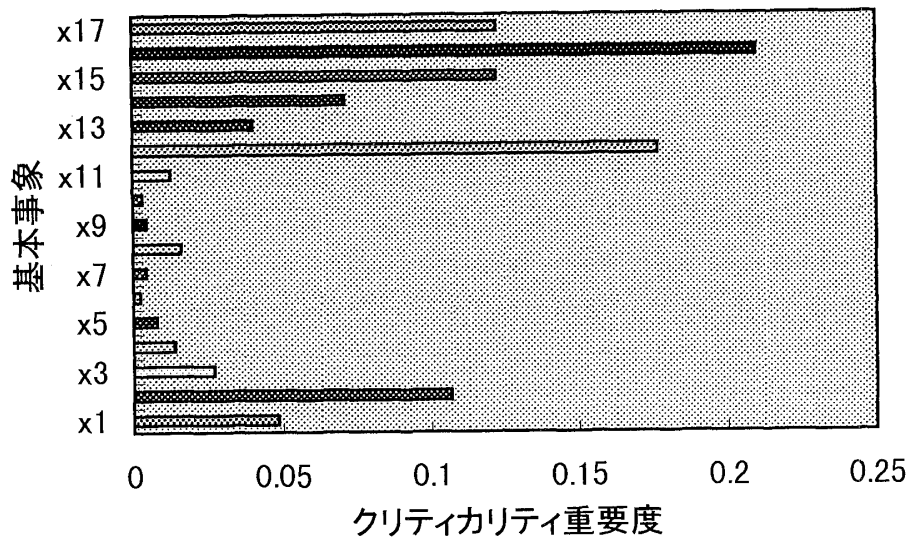


図4 トップ事象“低速回転が滑らかでない”のクリティカルティ重要度

表5に示す。この一対比較行列の整合度 $C.I. = 0.000057$ となり、整合性は満たしている。また、最大固有ベクトルの要素の和が1.0となるように正規化した結果が、各トップ事象の発生により、システムが受けるダメージの相対的な大きさ $d_j (j=1, \dots, 7)$ を示している。その結果、(TE1)の“エンジンが始動しない”と(TE5)の“エンジンが異音を発生する”が大きなダメージを発生することを示している。Step7に従って、リスク $w_j (j=1, \dots, 7)$ は、各トップ事象 T_j の発生によりシステムが受けるダメージ d_j と T_j の発生確率 P_{top_j} の積 $d_j \times P_{top_j}$ により算出される。後で、 $\sum w_j = 1$ となるように正規化して、トップ事象 T_j に対する相対的なリスク w_j を表6に示す。次に、Step8に従って、個々の基本事象のクリティカルティ重要度に対して、フォールトツリーのトップ事象のリスクを掛け合わせる。複数のフォールトツリーに共通して属する基本事象はさらにそれらの和を求める。84個の基本事象の中から総合クリティカルティ重要度の値が大きい上位5つの基本事象を表6に示す。

以上より、対象システムにとって望ましくない複数のトップ事象のリスクを総合的に考慮した最も大きな総合クリティカルティ重要度を示す基本事象は“燃料劣化”である。この基本事象は、トップ事象(TE1)“エンジンが始動しない”と(TE6)“燃料消費が多い”に対して大きなクリティカルティ重要度を示している。そのほかにも、大きな総合クリティカルティ重要度を示す上位基本事象としては、“点火プラグ間隙汚損”、“点火プラグ絶縁不良”、“燃料混合比不良”と“エアクリーナの目詰り”がある。

以上のように、各基本事象に対する総合クリティカルティ重要度は、システムの信頼性・安全性を総合的に向上させるには、いかなる基本事象を制御するのが効果的か明らかにしている。

4. おわりに

ここでは、システムのフォールトツリー解析の中でクリティカルティ重要度を算出する際、経験の深い技術者の、基本事象発生確率に対する感覚を一対比較法

表5 トップ事象に対するダメージの大きさの一対比較行列

	(TE1)	(TE2)	(TE3)	(TE4)	(TE5)	(TE6)	(TE7)	ウェイト
(TE1) エンジンが始動しない	-	1.700	1.700	1.700	1.000	1.700	1.700	0.2007
(TE2) 低速回転が滑らかでない		-	1.000	0.588	0.588	1.000	0.588	0.1008
(TE3) 高速回転が滑らかでない			-	0.588	0.588	1.000	0.588	0.1008
(TE4) パワー不足				-	0.588	1.700	1.000	0.1481
(TE5) エンジンが異音を発生する					-	1.700	1.700	0.2007
(TE6) 燃料消費が多い						-	0.588	0.1008
(TE7) 運転中にエンジンが停止する							-	0.1481

表6 トップ事象のリスクの大きさと総合クリティシティ重要度上位5つの基本事象

基本事象	トップ事象とその相対的リスク (w_j)							総合クリティシティ重要度
	(TE1)	(TE2)	(TE3)	(TE4)	(TE5)	(TE6)	(TE7)	
	0.3453	0.0486	0.1248	0.1529	0.0414	0.0832	0.2038	
燃料劣化	0.1380			0.0251		0.3221		0.0783
点火プラグ間隙汚損	0.0763	0.0482	0.0882				0.1024	0.0606
点火プラグ絶縁不良	0.1067	0.1061	0.0501				0.0602	0.0605
燃料混合比不良	0.1122					0.0612		0.0438
エアクリーナの目詰り	0.0099	0.2086	0.0341	0.0292		0.2395		0.0422

を用いて推測する方法を、システムフォールトツリー一定量解析において、熟練者の持っている感覚的知識を活用することにより、いまだ収集されていない基本事象の発生確率を推定し、主観的クリティシティ重要度を算出する方法を紹介した。また、複数のフォールトツリーに対するトップ事象間の相対的なリスクにより、各トップ事象の望ましくない程度を示し、それぞれの基本事象に対して、関係するトップ事象のクリティシティ重要度を総合的に評価する方法を述べた。

参考文献

[1] T.L.Saaty(1980), 「*The Analytic Hierarchy process*」, McGraw Hill
 [2] 刀根(1986), 「ゲーム感覚意思決定法」, 日科技連
 [3] 鈴木, 牧野, 石坂(1982), 「FMEA・FTA実施法」, 日科技連
 [4] Y.Kameyama, H.Sayama, K.Suzuki, A.Ohkura, M.Ohshima(1991), “Subjective estimation for

criticality importance of fundamental events in fault tree”, proceeding of the first China-Japan international symposium on industrial management, pp.96~101

[5] 亀山, 佐山, 鈴木, 大島, 中山(1990), “フォールトツリーにおける主観的クリティシティ重要度解析について”, システム制御情報学会論文誌, Vol.3, No.6, pp.185~193
 [6] United States Nuclear Regulatory Commission (1975), 「*Reactor Safety Study, Main Report WASH-1400*」, National Technical Information Service, Springfield, Virginia
 [7] 亀山, 倉重, 大倉, 林, 佐山, 宮崎(1998), “複数のフォールトツリーを考慮した主観的総合クリティシティ重要度解析”, 計測自動制御学会論文誌, Vol.34, No.5, pp.422~429
 [8] 辻村, 玄(1993), “ファジィ理論に基づいたFTA法”, 第9回ファジィシステム・シンポジウム講演論文集, pp.821~824