特集 信頼性解析・リスク解析へのファジィの応用

ファジィ理論による電子機器の信頼性評価†

村田 忠*

1. まえがき

学会より与えられたテーマにつき解説の記事を書くにあたって、身近にある学術誌、プロシーディング等を調査し、さらに JICST と DIALOG を通じて調べたが、電子機器とファジィ理論(推論)のキーワードで検索してもほとんど論文が見つからないのはあらためて驚いている。外見上、電子機器や電子部品の信頼性の発表論文を読むと、まず故障数が n で、信頼性試験時間が T で与えられると信頼性工学の理論式を適用して、その機器や部品の寿命とか MTBF(平均故障間隔)等が見事に算出されている場合が多い。そこで信頼性研究分野以外の研究者からすれば、信頼性研究のフィールドにはファジィ理論のはいり込む余地は少ないと一般に思われがちである。しかしこれまで長年企業において電子機器の信頼性改善の実務に従事してきた筆者等の経験からすれば、この信頼性研究の中味には、意外なほどファジィな事象が多いのに気付く。例えば、機器の故障一つをみても、再現性の少ない故障、不安定な故障、規定値ぎりぎりの故障等、その故障現象の状態、また故障原因にも多種多様のものがある。そこで、電子機器の信頼性研究の内側より見たあいまい事項について述べ、ファジィ理論との結び付きについて、筆者が日頃考えていること及び関係するいくつかの論文を紹介してみたい。

2. 電子機器の信頼性研究区分

電子機器の信頼性研究区分を述べる前に、まず「信頼性」の定義と主要な信頼性特性値について次に示す。信頼性(度)とは JIS によれば、「アイテムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たすことができる性質(確率)」。すなわち、機器の信頼性とは、機器が使用される空間と時間を決めて、その中で機能を発揮する機器の性質のことである。そして機器の故障率は経過時間を横軸にとった図1の曲線で表される。

図1 故障率の曲線

さらに、機器の信頼性を表す主要な信頼性特性は一般に図2のように与えられる。

図2 信頼性特性の曲線

† Reliability Evaluation on Electronic Equipments with Fuzzy Set Theory

* Tadashi MURATA

琉球大学 工学部 機械工学科

Faculty of Engineering, Univ. of the Ryukyus

ここで； $F(t)$ ：不信頼度関数($=1-R(t)$)

$R(t)$ ：信頼度関数

$f(t)$ ：故障の確率密度関数($=dF(t)/dt$)

$\lambda(t)$ ：故障率($=f(t)/R(t)$)

図1では故障率が時間別に示されている。そこで製品の初期故障期では企業内で故障が取り除かれ、市場では偶発故障期として製品の故障発生は非常に少なくなっている。しかし当然この偶発故障期でも、初期的な故障や摩耗的な故障も混在して発生していると考えられる。また一方、図2で信頼性特性の主要なものが示されているが、そこでの基本値となる故障に関する $f(t)$ をみても、機器の故障をどう判定するかにより大きくその値が変化する。故障の種類には、突発的な故障があれば、変動の緩やかな劣化故障もある。特に外観不良といったものは、その判定基準が定性的であいまいな表現が仕様書に書かれている。したがって、故障と判定するまでの過程にファジィな面があり、ベテラン技術者の経験を必要とする場合が多い。ことに外観不良の基準は外国と日本とでは国民性の違いから判定でもめることがしばしば起きる。

機器信頼性の研究区分は、現在、次のように多岐にわたっている。

- (1) 信頼性(度)の配分問題
- (2) 信頼性設計の向上化問題… FMEA, FTA
- (3) 信頼性試験法と評価問題
- (4) 市場データの収集と解析問題
- (5) 故障診断や故障物理の問題
- (6) 部品の信頼性改善問題
- (7) 保全性の問題(点検期間の最適化等)

その他、ソフトに関する問題もある。

最近、とくに米国で著しく、わが国でも立法化が急がれている製品責任(PL)に関して、製品故障による消費者保護が一層厳しくなっているため、安全性の面から製品の故障防止策は企業にとって一段と重要性を増してきている。

3. ファジィ理論からみた機器信頼性の研究

前述したように機器信頼性研究区分の内、その内容において比較的ファジィな事項を多く含み、ファジィ理論の適用の場が多いものを次に幾つか述べる。

3.1 信頼性(度)の配分問題

電子機器や電子システムを設計・開発する場合、まず、その機器の機能や性能を規定すると同時に機器の信頼度(主としてMTBF)を設定する必要がある。そして図3のように機器を構成するユニット毎に信頼度を配分しなければならない。その際、ユニットに担当させる機能や性能等の重要性を考慮して信頼度の配分が行われるが、そこで、各ユニットの構成部品数、コスト、使用環境等の要因も考慮する。しかし、これらの要因はすべて数値で明白に与えられるとは限らない。とくに新しい部品を採用する時など、その故障データが入手できない場合が多い。したがって、クリスプな数値を用いて機器信頼度の予測値計算ができにくい。ここにファジィ理論の活躍の場面がでてくる。

図3 信頼性ブロック図

3.2 信頼性設計の向上化問題

機器の信頼性設計段階において、過去の技術的失敗の経験事例を集めて作成した設計チェックリスト等¹⁾を活用し、設計時の設計者の思い違いと

かポカミスを防止し、設計の信頼性向上を図る必要がある。一方、設計技術技法としては、FMEA(故障モード影響解析)やFTA(故障の木解析)等の使用が広く行われている。またそれらの技術資料をもとにして数回のDR(設計審査)が社内で実施され設計の改善が図られている。これらの技術資料は、名称からわかるように製品に関する過去の技術的失敗の経験とか技術情報が言語データの形でまとめられており、その企業の固有の技術財産(資料)とも言うべきものである。これらの技術資料作成にあたって、当然エキスパートやベテラン技術者の経験・知識をうまく收集整理し、活用しやすい形でまとめることが重要である。この面でもファジィ理論のコンセプトの活用が望まれる。

3.3 信頼性試験法と評価問題

機器の信頼性工学とは、機器の寿命について、将来を計画・予測するための工学でもある。まず、信頼性設計で目標とした機器の寿命(又はMTBF)を図面中で計画する。それに基づいて製造された機器の寿命等を確認するため、企業で開発機器の信頼性試験を実施し、機器の信頼性が確認された後で市場に製品として出荷される。現在実施されている信頼性試験の種類の区分を表1に示す。

これまでの経験からいえば、市場における製品の寿命等は、初期の頃、一般に設計目標とした値より著しく小さい場合が多い。そのため機器の実際の環境条件に近似した複合環境条件とか試験結果の評価の改善が重要である。また表1にあるように、寿命試験として機器に与える環境条件や負荷試験条件を実際より著しく厳しくして、短期間で試験を終了させる、いわゆる加速寿命試験や強制劣化試験が電子機器や電子部品に多く実施されている。例えば、ICの加速寿命試験では、プレッシャクッカテスト(PCT)として、圧力釜の原理を応用した厳しい試験がある。しかし、これらの加速寿命試験や強制劣化試験のきびしさ係数は、これまでの経験より求められたものが多い。したがって、上記の事情からみて信頼性試験方法と試験結果の評価時における故障判定にもファジィ理論の適用の場が十分考えられる。

3.4 故障診断や故障物理の問題

航空機用の電子機器の場合、機器の故障診断や故障解析は、その機器に故障が発生する以前から図4のような故障解析作業が行われている。

次に機器の故障診断アプローチの手法は、大別して図5のように実施される。

表1 信頼性試験の分類区分

図4 故障解析作業の流れ

図5 故障診断のアプローチ

図5で、3軸とも原点から離れるにつれて診断レベルが高度になっている。機器の診断アプローチの仕方として、1方向(軸)のみでなく、2方向、3方向へと、線から面へ、面から立体へと、その診断をあらゆる角度(方向)から行い、的確な故障原因の究明が必要である。図5の(A)軸に示した故障定義にしても、現在30種類程の故障区分があり、それぞれ故障現象と故障原因が文章で細分化されている。(C)軸の経験的手法に見られるようにベテラン技術者の経験や知識が故障診断作業に大きく影響しており、診断エキスパートシステムとしていろいろの故障診断分野で研究開発が行われている。したがって、これらの面でもファジィ理論の活用が多い。

4. 研究の事例紹介

電子機器の信頼性評価の研究に直接ファジィ理論を適用したものは未だ非常に少ない。そこで対象を広げて、電子機器とかシステムの信頼性に関連した論文もあわせて、そのいくつかを次に紹介する。ここでは各論文の概要のみであり、くわしくは原論文を見て頂きたい。

4.1 機器信頼性のファジィ配分

機器やシステムの信頼性設計を行う場合、よく信頼性配分の方法が問題となる。ここで紹介する論文²⁾はコスト、容積、重さ等の制限条件の中で必要な機器(又はシステム)の信頼度を高めるため、構成する各ユニットの信頼度をどのように配分するかという問題にファジィ理論を用いている。

まず、2ユニット直列形の構成に対して制約条件が予算のみの簡単な信頼性配分を検討し、その後、多数の構成ユニットで、かつ多くの制約条件のある現実性の配分問題に発展させて、配分式を一般化させている。

よく故障が発生するシステムや機器を開発する場合、信頼性技術者はそのシステム等の信頼度を下部構成のユニットレベルとかコンポーネントレベルの信頼度にまで分解して検討する。その際、すべての制約条件のもとでそのシステムの信頼度を最大にすることが要求される。取扱いを容易にするため次の仮説を設ける；(1)ユニット又は部品の故障は相互に独立である、(2)ペナルティ関数は加法的である。そうすれば、次のように表現できる。

$$\begin{aligned} & \text{maximize : } R_s \\ & \quad x_1, \dots, x_n \\ & \text{subject to : } \sum_{i=1}^n g_{ji}(x_i), \quad j=1, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 R_x は機器(又はシステム)の信頼度であり、 x_i はユニット(又は部品)の信頼度である。一般にペナルティ(例、コスト、容積等の制約)関数は非線形である。したがって、この式を解くために

は非線形プログラミングの技法が必要である。このペナルティ関数は常に不正確か、よくてもあいまいな量である。ファジィ理論は、確率論的な技法や決定論的な技法の適用が困難な ill 構造の信頼性問題を解くのに最近活用され出している。ここでの解法は IBM-PC BASIC で解かれ、そのプログラミングの結果が本論文の付録に示されている。次いで、より多くのユニットと多数の制約条件下での問題についても解けるように式を一般化している。すなわち、ユニット数を n とし、制約条件が m である場合；

$$\max_{x'} : y = f(x) \quad (2)$$

$$\text{subject to} : g_j(x) \leq a_j ; \quad j=1, 2, \dots, m$$

$\mu_R(y)$ と $\mu_{C_j}(z_j)$ は与えられており、 y はユニット信頼度 x_i から合成されたシステム信頼度である。 $z_j = g_j(x)$ はユニットのコスト、容積、重量等より決められた制約内容である。一般の信頼性配分問題に対してファジィ理論からみた最適決定は次のようになる。

$$\begin{aligned} x^* &= \max_x \mu_D(x) \\ &= \max_x \left\{ \min \left[\mu_R(f(x)), \min_j \mu_{C_j}(g_j(x)) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

本論文で次の注意点を指摘している。ファジィ理論の観点からみれば、非線形の最適化問題を作るのにフレキシブルな制御と同様にあいまいな信頼性の制約条件を含む典型的な ill 構造の信頼性配分問題を解くことが可能である。しかし、ファ

ジィ非線形の最適化問題は与えられた問題を解く場合、常にすぐれた方法とは必ずしもいえない。ファジィ理論は確率論的な技法や決定論的な技法の適用が困難であったり、不可能であるような問題を解く場合にのみ有効である。

4.2 信頼性設計の改善技法

機器やシステムの信頼性設計段階において設計者の思い違いやポカミスを防止するために設計チェックリストがよく活用される。これらの設計チェックリスト作成にファジィ理論を用いた報告³⁾があり、さらに機器の信頼度予測にファジィ推論を適用した研究⁴⁾もある。また信頼性設計技法の FTA については多くの報告⁵⁾⁶⁾がある。本特集でも FTA は別に取り上げている。そこで同じ活用目的の信頼性技法である FMEA (故障モード影響解析) 法にファジィ理論を応用した論文⁷⁾を次ぎに紹介する。

信頼性設計段階で図面に潜在する不具合や弱点を未然に発見し、改善対策処置を行うための FMEA 表が重視されている。しかしこれまで FMEA 表では故障の厳しさや総合評価の分析には多くの問題が残されていた。本論文では、機器の故障の発生頻度と機器機能の劣化や影響度等の総合評価の過程にファジィ推論を導入している。その結果、各機器や各ユニットについて、故障の総合評価や厳しさの比較が容易にできる可能性を認めている。またファジィ推論を用いる際の若干の問題点も指摘している。まず、FMEA 表の一例

表 2 FMEA 表の一例

システム：ジャイロ装置					FMEA 表 (故障モード影響解析)		日 付： 作成者： 承認者：	
サブシステム：ジャイロヒータ部								
(1) 番号	(2) 対象品目	(3) 機 能	(4) 故障モード	(5) 推定原因	(6) 影 響		(7) 補 償 手 段	(8) 故 障 等 級
					サブシステム	システム		
(例) 3-1	1N645 ダトオード	ヒータパワ ー制御	断続的な断 線	1 KHz 以 上でかつ± 10G の機械 的振動	ジャイロヒ ータ回路の 作動不具合	ジャイロ 装置の作 動不安定	振動吸収 装置を追 加	(II) (3)

を表2に示す。このFMEA表の作成にあたって、故障等級欄に故障の発生頻度と故障の影響度を記号で記入する。それらの記号説明は表3、表4にそれぞれ言語データとして定性的に表現されている。

これらの表3と表4を組み合わせて故障の総合評価を行うが、その技法には文字どおり多くのあいまいさが残る。本論文では、プリント板回路のFMEA表作成時にファジィ推論を適用している。まず、故障発生頻度と影響度に関して図6のようなメンバシップ関数を作る。ここで、前件部と後件部とも同一関数形を採用している。そのメンバシップ関数を用いてプリント板回路の構成部品について表5のようなファジィ表現を行う。

図6 言語変数に対するメンバシップ関数形

表3 故障の発生頻度

等級	基礎
(1)	非常にしばしば発生する
(2)	ごく普通に発生する
(3)	少ないが発生する
(4)	めったに発生しない

表4 故障の影響度

等級	基準	対策
(I) 致命故障	任務放棄, 人命の損失	設計変更が必要
(II) 重大故障	任務の重大な部分の達成不能	設計の再検討が必要
(III) 軽微故障	任務の一部が達成不能	設計変更はほとんど不要
(IV) 微少故障	影響はほとんどない	設計変更は不必要

表5でV1,Vs,M等は部品個数も考慮した値であり、ベテラン技術者の経験や技術情報が取り入れられている。以上の情報に基づいてプリント板回路の故障についてファジィ演算のmin・max合成を行えば、その結果は図7に示される。

図7から故障の厳しさを定量化する方法にはいくつかある、このパターン図形の傾斜角より求めることも可能である。このようにして求められた各プリント板回路の故障の厳しさを総合的に比較する。そして故障の厳しさの程度の大きい順に信頼性設計改善を行うのが望ましい。すなわち、フ

表5 部品故障のファジィ表現

No.	部品名	個数	故障頻度	故障影響度
1	トランジスタ	1	Vs	L
2	SCR	2	M	M
3	ダイオード	5	Vs	M
4	抵抗器	6	Vs	S
5	コンデンサ	2	Vs	L
6	リレー	1	L	V1
7	プリント板	1	Vs	L
8	コネクタ	1	Vs	L

図7 適用回路のメンバシップ関数形

ファジィ推論法により改善処置の優先順序が容易に定まることを本論文は報告している。

4.3 信頼性試験法と評価

信頼性試験の実施法と試験データの評価についてファジィ理論を適用した論文⁸⁾⁹⁾がある。

とくに途中打ち切りデータから機器の寿命の決定に関する研究報告が多い。ここでは機器のMTBF(平均故障間隔)の区間推定にファジィ推論を適用した研究例¹⁰⁾を示す。

電子機器や電子部品の信頼性試験では、一般に供試品の数や試験時間にも制約がある。そのため信頼性試験評価には、過去の技術的経験も参考にして検討する必要がある。本報文では、試験後のデータを故障と準故障データに区分し、過去の経験や技術情報をファジィルールとしてファジィ推論に取り入れ、供試品のMTBFの区間推定を算出している。現在、MTBFは区間推定値で表すことが多く、 χ^2 分布関数と信頼水準をもちいてMTBFの上、下限値を計算している。一方、そのようなやや面倒な計算を省略し、多くは簡便な「区間推定を求めるグラフ」を活用して区間推定値の上、下限値を求めている。本論文は、ファジィ推論法を導入してグラフから機器のMTBFの区間推定を行う場合の新方法を提案している。

ファジィ推論を導入するため、まず次式を設定する。

$$n_1 = (1 + k_1 + k_2) \cdot n_0 \quad (4)$$

ここで；

- n_1 ：ファジィ推論による修正故障数
- n_0 ：試験後の実際の故障数
- k_1 ：主として機能特性的な要因係数
- k_2 ：主として外観的な要因係数

要因係数 k_1, k_2 はファジィ推定値である。次に要因係数 k_1 の前件部の例を表6に示す。さらに k_1 のファジィルールをマトリックスにして示した例が表7である。

表6 要因係数 k_1 の前件部の内容

symbol	contents	label		
		N	Z	P
M_1	output unstable	small	medium	large
M_2	sensitivity degrade	small	medium	large
M_3	insulation resistance degrade	small	medium	large

表7 要因係数 k_1 のファジィルールの例
 $M_3 = Z$ (一定)

K_1		M_2		
		N	Z	P
M_1	N	NM	Z	Z
	Z	Z	Z	PM
	P	Z	PM	P

ファジィ推論演算で求めた要因係数 k_1, k_2 及び(4)式より修正故障数 n_1 は；

$$\begin{aligned} n_1 &= 1.68 n_0 \text{ (入力情報がやや } P \text{ の場合)} \\ &= 1.50 n_0 \text{ (} Z \text{ の場合)} \\ &= 1.34 n_0 \text{ (やや } N \text{ の場合)} \end{aligned}$$

供試品(電子機器や電子部品)のMTBFの区間推定値は、信頼水準 $(1 - \alpha)\%$ を定め、 χ^2 分布関数により理論的に算出される。次にその算出用の区間推定のグラフを図8に示す。

本論文で新しく提案した方法をもちいることにより、信頼性試験で得られた準故障状態の情報と過去の経験とをうまく活用して機器の市場での実際故障に近い修正故障数 n_1 を求めることが可能となった。また、この故障数 n_1 を用いることにより供試品のMTBFの推定区間の幅を同一の信頼水準のままで狭めることも可能である。換言すれば、MTBFの推定区間の精度を高めることができる。

図8 MTBFの区間推定のグラフ

4.4 市場データの収集と解析

フィールドにおける機器の故障データの収集とその整理法にファジィ理論を適用した報告¹¹⁾を次に紹介する。これは米空軍で航空機用電子機器の故障データの信頼性解析で効果をあげた例である。本報告では、コンピュータを用いフィールドデータの収集と管理を行う際にファジィ理論のコンセプトを使い、それらの一連の作業を容易にしたことを述べている。すなわち、航空機の整備員は機器の同一故障徴候のものを故障報告書に記述する際、ときどき異なった用語の組み合わせを行ってきた。コンピュータは同意語である異なった表現の用語を同一の意味のものであると識別するために類語事典インデックスを備えている。本論文は、機器故障のそれらの徴候を合致させるため同意語の組み合わせを容易に行わせるプログラムを試作している。ファジィ理論はこのプログラムをコントロールするのに役だっている。すなわち、機器の故障コードを組み合わせで単一故障を表現するコードを見つけだす場合、従来は「仕様書はずれ」と報告していたが、該当故障コードの選択があいまいである。そこで故障に関する用語を数学上の集合としてとらえ、故障の定性的な表現に

対しても、AND,OR ゲートを使って、ファジィ理論のコンセプトを応用してうまくそれらに該当する故障コードを選択するようにした。その結果、補給整備上、部品補給システムを改善できたことを報告している。

4.5 故障診断ファジィエキスパートシステム

電子部品をマウントしたプリント板回路の故障診断にファジィ理論を適用した論文¹²⁾も報告されている。しかし、ここではファジィ理論を用いて送電線システムの故障部位を診断するエキスパートシステムの論文¹³⁾の概要を紹介する。

送電線システムの中で最も重大な故障は、送電停止に至る電氣的故障である。本論文は、送電線の接地線に埋設された光ファイバを利用した新たな送電線故障区間標定システムにファジィ理論を応用した例である。

光ファイバ複合架空地線(OPGW)利用の標定システムを図9に示す。OPGWの各所に設置した電流センサで線路故障時のGW電流を検出し、この信号を光多重伝送装置でOPGW内の光ファイバを介して変電所等の中央監視所に一括伝送し、故障点をセンサ設置区間毎に求めるものである。

図9 OPGW利用標定システムの構成

しきい値を用いた分散判定方式の問題点は、従来、1つの特徴量(例えば、電流値変化量)がしきい値以上か未満の2通りしか考えていなかったため、しきい値にわずかに足りない場合と大幅に下

回る場合を区別できない。これに対して専門家は、例えば、ある区間内で電流値の変化量 ΔI と電流位相の変化量 $\Delta \phi$ がしきい値より小さい場合でも、両方ともしきい値に近いならば、その区間に故障ありと判断し、 ΔI がしきい値より大幅に小さいとき無故障と判断する。このように専門家はすべての特徴量をそれぞれの大きさの程度まで考えて総合的に判断している。

このような柔軟な判断のやり方をエキスパートシステムに取り入れるため、ファジィ理論を応用して故障の特徴量と専門家の経験を定量化して故障点標定を行っている。本論文では種々のタイプのメンバシップ関係を用いている。

一般に、計測データをオンライン処理して設備診断を行うエキスパートシステムでは、①通常のプログラムのやり取りがスムーズに行える機能、②知識ベース中のルールにあいまいな表現あっても推論できる機能、の2つの機能が必要である。このような要求から本システムでは、(a)知識ベースの中からc言語の関数を呼出して数値処理を行う機能、(b)メンバシップ関数の多値化によるあいまい量を扱う機能、をもたせることにしている。ここではIF-THEN ファジィルールを用いている。また故障区間標定測定に用いる指標の例を表8に示す。

表8 故障区間標定測定に用いる指標の例

指 標	指 標 の 値
評価値	大きい, 中くらい, 小さい
第二評価値	大きい, 中くらい, 小さい
平均電流	大きい, 中くらい, 小さい
電流パタン	平坦, 右下がり, くびれ, 上昇
電流波形	正常, 歪みあり, 歪み大, 異常
第一電流比	大きい, 中くらい, 小さい
過渡電流	大きい, 中くらい, 小さい

本方式のエキスパートシステムは、情報にあいまいさがあっても標定の確度が比較的高く、系統条件の変更が多い2次系統のような複雑な系統でとくに威力を発揮できると、本論文は述べている。

5. あとがき

これまでいくつかの研究事例を紹介してきたが、それぞれの研究論文に見られる共通事項として、ファジィ理論の高度の応用といったものは少なく、未だごく一般的な応用に終わっている感がする。それは機器信頼性研究の分野にファジィ理論の導入が遅く、ファジィ理論に関心をもつ研究者が少ないことによるためと思われる。したがって、それだけに多くの興味ある研究が残されている分野ともいえる。今後の展望を述べれば次のようになるだろう；

- (1) 機器やシステムの故障に関して、ファジィ理論の観点からみた故障の現象と原因の区分及び結び付きの研究。
- (2) 機器等の故障診断法におけるファジィエキスパートシステムの研究。
- (3) 機器等の信頼性設計技法に関するファジィ理論の応用研究。
- (4) 設備等の保全性に関するファジィ理論の応用研究。等

多くの若い研究者がこの分野の研究に参加することにより、わが国の機器信頼性の一層の向上が図られることを期待している。

参 考 文 献

- 1) 村田忠, 他: 信頼性チェックリストの作り方・使い方, 日科技連, pp.106-158, 1988.
- 2) Kyung S.Park: Fuzzy Apportionment of System Reliability, IEEE Trans. on Reliability, Vol.R-36, No.1, pp.129-132, 1987.
- 3) Kyung S. Park: Fuzzy Weighted-Checklist with Linguistic Variables, IEEE Trans. on Reliability, Vol.39, No.3, pp.389-393, 1990.
- 4) 村田忠, 小川幸成: ファジィ推論による電子機器の信頼度予測について, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.4, pp.401-406, 1993.
- 5) Zhang Yabin: The Application of Fuzzy Fault Tree Analysis on the Reliability Assessment of Pumping Rod, Proc. on Rel., Maint. and Safety

- (BICRMS'92 China), pp.272-277, 1992.
- 6) Rasool Kenarangui: Event-Tree Analysis by Fuzzy Probability, IEEE Trans. on Reliability, Vol.40, No.1, pp.120-124, 1991.
 - 7) 村田忠, 島袋英作: Fuzzy 推論を用いた FMEA 表作成法の検討, 電子情報通信学会, 信頼性研究会, R91-25, pp.23-28, 1991.
 - 8) A.Kanagawa, H.Ohta: Fixed-Time Life Tests Based on Fuzzy Life Characteristics, IEEE Trans. on Reliability, Vol.41, No.2, pp.317-320, 1992.
 - 9) Jyh-Hone Wang, John M. Liittschwager, Tzv Raz: Censored Life-Data Analysis Using Linguistic Variables, IEEE Trans. on Reliability, Vol.37, No.1, pp.111-116, 1988.
 - 10) 村田忠, 小川幸成: 信頼性試験評価へのファジィ理論の応用, 日科技連信頼性・保全性シンポジウム, No.2-5, pp.109-114, 1993.
 - 11) Igor Bazovsky Sr., Glen E. Benz: An Application of Fuzzy Logic to Reliability, IEEE Proc. annual Rel. and Maint. Sympos., pp.372-374, 1993.
 - 12) 小川幸成, 柿本真, 村田忠: 電子回路(プリント板)の故障評価法へのファジィ理論の応用, 9th Fuzzy System Sympo. (Sapporo, 1993), TB 4-1, pp.361-364, 1993.
 - 13) 狩野均, 金丸公春: ファジィ集合を用いた送電線の故障区間標定エキスパートシステム, 日立電線, 6号, pp.11-16, 1986.

(1993年8月13日 受付)

[問い合わせ先]

〒903-01 沖縄県中頭郡西原町千原一
琉球大学 工学部 機械工学科
村田 忠
TEL: 098-895-2221 (内) 2719
FAX: 098-895-4377

著者紹介

村田 忠 (むらた ただし)

琉球大学 工学部 機械工学科

昭和32年 大阪大学大学院 工学研究科修士課程(通信工学専攻)修了, 同年 (株)島津製作所 入社, 主として航空機用電子機器の信頼性改善の研究に従事し, TQC 事務局長, 東京研究所を経て, 平成元年 琉球大学工学部教授, 現在に至る。工学博士, 「実務に役立つ信頼性技術」(日刊工業新聞), 「故障解析ガイドブック」(共著)(日科技連), 他の著書, 日本ファジィ学会, 品質管理学会, 信頼性学会, 電子情報通信学会, 機械学会, 等の会員。大学で「計測と制御」, 「信頼性工学」を担当。