人間-機械系の信頼性評価*

寺野寿郎**

1. 緒 言

プラントや航空機などの事故にはなんらかのかたちで人間が関係している。これは事故を技術側だけからみていたのでは真の解決は得られないことを示している。しかし、安全問題をマン-マシンシステムとして取り扱うのは非常にむずかしい。これにはいろいろな理由があるが、第一に機械に比べて人間の機能や行動は非常に複雑、かつ流動的で、これを定量的に扱えるような方法論は存在しない。したがって、人間の信頼性に関するデータもほとんどないのである。第二に安全の評価が多目的・多属性で、価値観の問題を含めて安全の哲学が確立されていない。第三には人間の過失に対して科学的に対処する社会的習慣がなく、真実が秘とくされがちである。第四に安全問題より経済性が重視されることなどによる。

本文ではマン-マシン系の評価手法の現状を簡単に述べ、さらに新しい提案を1つ述べてみたい。

2. 機械システムの信頼性評価

機械の信頼性は故障の統計的データによって表される。大規模なシステムでは全体の実験は困難なので、要素の信頼性データからシステム全体の信頼性を導く方法が発達した。これが信頼性工学¹⁾である。大規模なプラントなどは全体の信頼性をアップするというよりも、重要な事故状態だけを重点的に防御するほうが実際であるので、FTA (Fault Tree Analysis) や ETA (Event Tree Analysis) の手法が発達した。

これらの手法は機械システムの信頼性評価に非常に有効で、実際に広く用いられているが、いくつかの問題点も残っている。第一にシステムの状態 (event) をどのように選ぶかという問題がある。ふつうは要素機器の個々の正常・異常とに対応させるが、状態数が多いと解析

に非常な労力を要する。しかし、これをあまり少なくすると、状態どうしの推移関係が論理的にはつきりしくなる。第二には、状態は故障の初期には正常・異常の区分が明白でないこと。第三に構成機器の故障確率が数量的なデータとして与えられていることが必要であること。第四に人間を扱うのは困難であることなどである。

上記のような信頼性工学のほかに、最近では多変量解析を用いて事故の因子を抽出すること²⁾や、オペレータの経験に基づいて安全の問題構造を把握する³⁾など、システム技法の応用も試みられている。

3. 人間の信頼性評価⁴⁻⁷⁾

人間の信頼性研究は、米国において軍のシステムの利用率を高める目的で始められた。現在ではもっと広い意味でシステムの安全度を高める有効な手段として研究がすすめられている。しかし、人間の複雑さのために、現在までに確立している方法論はない。複雑な点をいくつか示すと、人間は機械要素のように1要素1機能でなく、いろいろに異なる機能を1人で果たし、また多くの情報を同時に受けて多くの仕事をすることができる。その対応も弾力的に変わる。人間の行動には反射運動的なもの (skill based) と、与えられた規則に従うもの (rule based)、そして自己の判断に基づくもの (knowledge based) などがあり、後者になるほどモデル化しにくい。人間信頼性を機械と同様にミス率で表しても、大きなあいまいさを伴う。

人間の信頼性の研究は大きく2つの分野に分かれる。ひとつは心理学的な人間行動の分析で、事例における人間行動の分析、あるいはシミュレータや実験室で特殊環境下の人間のふるまいを調べる。そのほか面接やアンケートによって感覚的な安全・信頼の因子をつかみ、それを数量化すること、また人間行動の基本的構造をモデル化することなどが試みられている。図1はそのようなモデルの一例である。

心理学的な研究は人間の本質に迫ろうとするものであるから、事例も限られており、定性的な研究にならざるをえない。もうひとつの方向は工学的な手法を利用し

* 昭和57年9月10日受付

** 法政大学 工学部
School of Engineering, Hosei Univ.

て、人間信頼性を数量的に捉えようとするものである。たとえば、機械システムの信頼性評価に用いられた統計・確率の手法をそのまま利用することも行われている。実データの不足を補う実験研究も多い。そのほか作業の分析 (task analysis) や、人間の動的行動の伝達関数の同定なども行われている。工学的研究は量的な正確さはあるが、心理学的研究とのギャップが大きく、両者の開きを縮めることが必要である。

ここで、現在最も広く使われている確率的なモデルについて簡単に述べよう。まず、運転中における常時あるいは異常時に人間がなすべき業務を明確にし、それを分解して比較的単純な作業の列にする。そして各作業の特徴を明らかにする。これを task analysis と呼ぶ。分解された個々の作業は単純なものであるから、類似のケースの信頼性データを探して利用することができるはずだというのが、確率モデルの基礎的な考え方である。

分解された作業の信頼性が既知ならば、その業務遂行の信頼性は図2のように確率樹 (Probability Tree) で表現することができる。これは業務が2つの作業〔A〕、および〔B〕から成る最も簡単な例であるが、より複雑な場合でも同様なツリーグラフが描ける。

この図が機械システムの event tree と異なる点は、作業〔B〕の信頼性が先行作業〔A〕の成否によって影響されている点である。たとえば、近接した2カ所の弁を閉じる作業などにおいては、一方を忘れれば他方も閉じ忘れるのがふつうである。また、業務によっては〔A〕に失敗したことに気づくと、次の作業は慎重になり、〔B〕の失敗率が減少するなどということも考えられ

a = probability of successful performance of Task "A"
 A = probability of unsuccessful performance of Task "A"
 $b|a$ = probability of successful performance of Task "B" given a
 $B|a$ = probability of unsuccessful performance of Task "B" given a
 $b|A$ = probability of successful performance of Task "B" given A
 $B|A$ = probability of unsuccessful performance of Task "B" given A
 $\Pr(S) = a(b|a)$
 $\Pr(F) = 1 - a(b|a) = a(B|a) + A(b|A) + A(B|A)$

図2 確率樹による人間モデル

る。したがって、〔B〕の信頼度は〔A〕の結果による条件付確率となる。これを作業〔B〕の従属性と呼び、問題を非常に面倒なものにする。機械システムでは信頼性はほとんど独立で従属性はない。A.D. Swain は条件付確率を直接求めるのは困難なので、作業どうしの従属性を直感的に決めておき、それで独立信頼性を修正する方法を薦めている。

4. Fuzzy Model による人間-機械系評価⁸⁾

前節で述べたように、人間の信頼性を確率で表現して

図1 人間の情報処理と過失

も、その値は内外の因子によって大きく影響を受け、すこぶる不確実なものである。また、task analysisによって業務のほうを細かく分解しても、実際には1人の人間が複数の作業を行うので、人間-機械系として考えるときは分解した作業を再び総合的にまとめる必要があり、それは単純な論理では表現できない。

これらの困難は人間を無理に割りきってモデル化しようとするに基づくので、むしろ、人間の信頼度とはあいまいなものだということを認識したうえでモデル化することが望ましい。それには Fuzzy 集合論が適していると思う。しかも、確率論は Fuzzy 集合論の一部分として含まれているという解釈もできるので、機械システムの信頼度は確率で、人間の信頼度は Fuzzy 集合で表現することによって、両者を統一的に扱えるという利点がある。

Fuzzy 集合（以下F集合と略記する）を用いると、自然言語でしか表現できないようなあいまいな因果関係も表せる。たとえば、“道路が混雑(A)しているとき、車の速度を下げる(B)”ということは、**ほとんど全部の運転者(R)**が実行している”。という安全運転の表現は、(A)、(B)、(R)をそれぞれ（車の密度）、（速度）、（人数割合）を元とするF集合の命題として次のように示せる。

“if A then B” is R.

Rは命題のF真理値である⁹⁾。具体的に人間の信頼性をA、B、Rのどれで表すのがよいかは議論のあるところだが、2節で述べたFTAなどと組み合わせて人間と機械とを同時に表すには、Rを人間のモデルと考えるのが便利である。この場合、A、Bはそれぞれあいまいな原因症状と結果状態を示すことになる。

図3はドライバーの信頼性をこのようなあいまいな Fault Tree で表したものである。原因症状Aはマクロな event を表しており、いくつかの項目の集合である。人間の検知できる症状はF集合で表し、そうでないものは生起確率で表現するのが適当であろう。結果状況Bもマクロな表現であり、当然F集合で表されるべきである。

Rは因果関係の確実さを表現しており、機械系では1とする。人間は多種類の行動をしているが、それぞれを独立なあいまい集合で表す。たとえば、人間は自分の車の周囲の状況に応じて事故を避けるようにハンドルとブレーキを操作するが、ブレーキ操作を誤ることはまれで、信頼性はかなり高い。ハンドル操作はそれに比べるとやや失敗が多い。また、故障があったときにそれに気づくドライバーはあまり多くなく、そのためにブレーキが十分利かないケースは時々あることなどである。

この図におけるもうひとつの特徴は、2つの event の結合論理である。機械系では、ふつう and と or の2種のロジックを組み合わせる Fault Tree を表すが、人間系ではそのように簡単には割りきれない。2つの event が同時に生起した場合でも、それによって強く反応したり、弱かったりする。いわば、and と or を混合したような反応を示すことが多い。そこで次のような式で結合を表すことにする。

$$R = \alpha R_{or} + (1 - \alpha) R_{and} \quad (\alpha = 0 \sim 1)$$

別な実験でも、2人の人間に協同作業をやらせて信頼性を調べると、環境や性格によってαの値が変わることがわかっている。

さて、Fuzzy Fault Tree を実際に用いる際、A、B、Rなどを直接にF集合で表すよりも、それらを規格化し、

図3 Fuzzy Fault Tree.

図 4 Fuzzy 数の演算例

0～1の F. Number で表示するほうが便利である。F. Number とは 0 から 1 までの実数の F 集合であって、そのメンバーシップ関数は、たとえば図 4 のような形をしている。

F. Number どうしの演算には、メンバーシップ関数値が等しい元を両集合から選び、そのあらゆる組み合わせに対してふつうの演算を行えばよい。図 4 にその例を示す。ここで注意することは、 $A+B=C$ において C を求めてから、 $C-B=A$ という演算で A を求めても、それは元の A にならないことである。これは集合演算に拡張原理⁹⁾を用いているからである。

図 5 は図 3 の例について、人間の信頼性を(a)のように仮定し、そこに(b)で表されるような周囲状況が生じた場合、事故の起こりやすさを F 数で示したのが(c)である。ただし、ここで車体の異常は人間が検知できるものも、できないものも絶対に生起しないものとし、他車の突発現象の影響を 0.01 と仮定した。また、and/or ロジックの α は 0.5 と仮定してある。

5. むすび

人間-機械系の設計では人間をシステム内でどのよう

(a) Human Reliability

(b) Jamming Condition

(c) Car Accident

図 5 Numerical example of fuzzy fault tree.

に位置づけるかということが非常に重要である。しかし、人間は複雑な存在であるから一義的に決めつけるのは好ましくない。きめ細かく、かつ余裕をもったシステム設計でなければならない。そのために手法としては Fuzzy 集合論の発展が、また実験データとしては人間信頼性に関する地道な研究の積み重ねが待望される。

参考文献

- 1) 坪内和夫：信頼性設計，丸善，1971.
- 2) 大規模プラントの異常検知と故障予測，日本機械学会，研究分科会報告，1980.
- 3) プラントの破局状態の防止と制御，同上，1982.
- 4) A.D. Swain, H.E. Guttman: Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR 1278, 1980.
- 5) 原子力発電所における操作自動化とヒューマンファクターに関する調査，政策科学研究所報告，1982.
- 6) 特集 マン・マシン系における安全性，計測と制御，19(9)，1980.
- 7) 林 喜男：人間-機械系の安全設計，安全，28(8)，1975.
- 8) T. Terano, et al.: Human Reliability and Safety Evaluation of Man-Machine Systems, IFAC Conf. of Man-Machine Systems, Baden-Baden, 1982.
- 9) L.A. Zadeh: The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning, Information Science, 8, 199~249, 8, 301~357, 9, 43~80, 1975.
- 10) 津村泰弘：あいまいな故障の樹解析（東工大修士論文），システム科学，1982.