

信頼性理論とオペレーションズ・リサーチ

—その有用性をめぐって—

真 壁 肇

1. 信頼性の理論の必要性

今から、約17年ほど前、つまり、昭和40年頃のことであった。米国の品質管理(QC)界の指導者ジュラン氏(Dr. J. M. Juran)が日本で多くの経営者と管理者を前にして、品質管理の講演を行なった。そのときのことである。最後の質疑応答の時間になって、1人の聴講者が立って質問をした。「ジュラン先生、最近、私は信頼性という言葉をしばしば耳にしますが、信頼性についてどのようなお考えを持っていますか、意見をお願いします」と。すると、この瞬間にジュラン氏の顔からは今までの笑みがさっと消え、きびしい顔になり、彼はしばらくの間、押しだまってしまった。そして、ややたって、一言だけ答えた。「諸君、紙と鉛筆だけで、どうしてよい品質の製品を作れると思うのか?」と。

聞いていた人の大部分は、これが何のことか、さっぱり意味がわからなかったようである。

もう、昔話になったと思うが、だいぶ以前に信頼性を学ぶには数学の予備知識が十分ないと困る、という話をよく耳にした。しかし、現実には、信頼性のある自動車やテレビを作っている企業の人たちは、決して信頼性の理論の細部についての深い造詣を、特に持っているとは限らないと思う。高度な数式を用いた理論を用いなくても、現に、

高い信頼性をもった自動車、テレビや電子部品などのシステムや製品は、どんどんと、社会に送り出されているのである。

では、信頼性の理論やORを用いた信頼性の追究は無用なのだろうか。このことを議論することは無益であろう。複雑なシステムになると、普通の直観や経験では到底把握しきれない性質や特性を発揮するようになることは当然である。このために、複雑なシステムを正しくモデル化し、これをOR的に分析して、正確な実態を科学的にとらえておく必要がある。

古い話ではあるが、1950年前後にATT(American Telegrams and Telephone)において電話局の保全要員による2週間にわたる大ストライキが発生したが、実は、この期間中における電話・交換システムの故障発生件数は最低を記録したという。そしてその理由は、(後の調査によって判明したのであるが)保全を行なうことは、かえって初期故障を発生せしめる誘因となっており、このために、保全の頻度を増すことは、初期故障によるトラブルの増加を招いていたことにあったという(図1)。このことは、あらかじめ理論的に故障率関数 $\lambda(t)$ を推測し、システムをモデル化し、これを分析することができていれば、当然予測ができていたはずである。

ジュラン氏がいうように、紙と鉛筆だけでは確かに、高い信頼性の製品を作ることはできないであろう。しかし、紙と鉛筆と有用な理論(これを

まかべ はじめ 東京工業大学

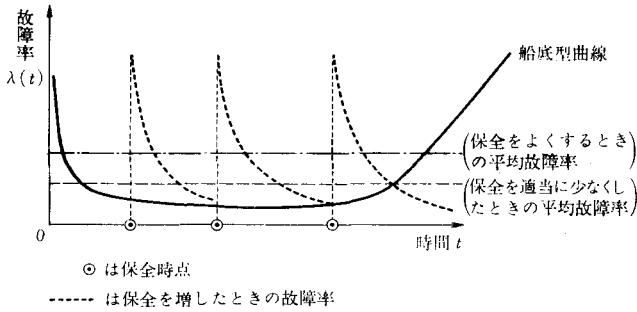


図 1 初期故障と保全

頭脳といってもよいだろう)を、企画と設計の局面または、ソフトウェアの中に盛り込んでこそ、信頼性のある製品を生み出すことができるのである。さきに述べた「紙と鉛筆だけ」とは有用な理論につながらない，“紙”の上でのみ考えた現実的でない空想モデルの“鉛筆”にだけ頼って作った数式とその解析を指していたのであろう。

ここで、現実的という言葉によって研究の対象となるモデルをあまりにも限定してしまうことは、どうかと思う。現実的モデルとは、現存するシステムのモデルをのみ考えるのではなく、将来に当然考えられる自然の理にかなったモデルをも含めると考えるのが妥当であろう。このように広く解したモデルに対してOR的なアプローチによって作り上げられた信頼性の理論が信頼性ないしは信頼性工学にとってきわめて重大な役割をもつことはいままでもない。

2. 信頼性理論とその手法

信頼性の理論と手法をひとまとめにして考えてみると、理論的、つまり、数学的ないしはOR的なアプローチの部分と工学的または管理技術的なアプローチの面とに大別されよう。また統計的な手法は、この両者の中間に位置するものと考えて、全体をまとめて見る

ことにし、これらを表としたものを表1としてまとめてみた。この分類には多少無理もあり、したがって異論もあるに違いないのであるが、今までは、この種のものが見当たらないので、あえてかかしておくこととする。この表においては、(I)は数学的またはOR的な理論とし、丸印をつけて①から⑥までとし、一方、(III)は工学的または管理技術的手法とし

て、四角印をつけて、ⅠからⅢまでとしたが、中間にある(II)統計的部分は理論と手法の両面をあわせ持っているところで、これもOR的な考え方によって律せられるものとしてもよい。

ところで、前節において、現実的に高い信頼性をもった製品を作り出している信頼性の理論と手法は、主として、表1の(II)と(III)の部分に依存しているといつてさしつかえないであろう。そしてこれらは主として、品質管理(quality control, QCと略称)または品質保証(quality assurance, QAと略称)の中において論ぜられ活用されている。事実、品質保証においては、品質とは、

品質…… { (狭義)の品質
 信頼性

となっていると解し、この両者を総合したものを

表 1 信頼性の大綱

(I) 理論	① システムの構造(冗長系, コヒーレント系など)
	② 修理系のあるシステムおよび待機冗長系(セミマルコフ過程による)の解析
	③ 劣化状態に対して保全是正を行なう系(マルコフ決定過程による)の解析
	④ 再生点考えた保全モデル(Barlow-Hunter型の方策, 再生過程による解析モデルを含む)
	⑤ コスト, 重量などを考えた最適化問題
(II) 統計	⑥ または(1)故障パターンと寿命分布の特徴づけ(ポリヤ型関数, ショックモデルなど)
	(2) 競合モデルなど信頼性に特有な統計解析
(III) 管理技術	(3) または(Ⅰ)信頼性データ解析(ワイブル解析, MTBFの推定など)
	② 故障解析, 信頼性試験技術
	③ 設計審査, FMEA, FTAなどによる手法

表 2 品質保証と信頼性

品質保証のステップ		信頼性手法	
市場情報	}	A	
企画			設計審査
研究開発			FMEA
設計	}	B	
プロトタイプによるテスト			故障解析
生産準備	}	C	
生産			信頼性試験技術
市場における使用段階			保全技術
		データ解析	
		故障情報収集	

(広義の)品質と考え、これを保証することをその目的としている。筆者は、品質保証の体系において、信頼性手法を表2のようにA、BおよびCのタイプに分類し、Aは、システムや製品を作る段階の源流部において活用されるもの、つづいて、B、Cの順に流れの下方に至ると考えている(表2の対比を参照)。ここでAのタイプに属する手法は、相当に固有技術に依存し、過去の技術に関する知見などを基礎に実行されるもので、企画や研究開発、設計の段階でよく用いられる(本誌牧野氏の稿を見よ)。また、Bのタイプのものには、故障のメカニズムをその真の原因に至るまで追究し、同じ故障が再発することを防止する故障解析(failure analysis)や、試作または本生産された部品やシステムについて、その機能や耐久性を確認し、また、発生のあるトラブルを事前にさぐり出す信頼性試験(reliability test)の技術、などが含まれる。前者には、その解析を進めるのに故障物理や再現実験など、固有技術的な技法を必要とするもので、人工衛星の開発に始まって、現在では一般の耐久消費財の開発に至るまで、広く活用されている。

3. 信頼性における理論と手法との関係

信頼性の理論は、高い信頼性の製品やシステム

を生み出すのに、どのように役立つかについて考えてみよう。このことを頭に入れて、表1を見ると、この表の上の部分に理論が、中ほどから下のほうに手法が並んでいることに気づくので、上の部分と下の関係について考察すると、両者の関係を見ることができよう。

まずドレニック(R. F. Drenick)の定理を考えてみよう。この定理はいくつかのそれぞれ異なった寿命分布にしたがうサブシステムの直列系は比較的広い条件の下において、指数分布にしたがう寿命分布を持っていることを主張している。ここで考えているサブシステムは、阿部氏の研究(本誌658ページ)によって……多少、難解な数式を用いるが……、もっと広い修理系のある期待冗長系に拡大してもよいことが判明している。したがって、一般に、複雑なシステムの故障の発生間隔は指数分布にしたがい、その確率関数 $f(t)$ は、

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; (x \geq 0), 0; (x < 0) \quad (1)$$

となる。ここで、 λ は故障率(failure rate, FRと略称)、その逆数はMTBF= λ^{-1} 、(MTBFはmean time between failuresの略)となる。われわれは、比較的、部品またはユニットレベルの系の寿命分布に対してはワイブル分布を仮定し、初期、摩耗型の故障パターンを取り扱う(図2)がそれらの組合せによるシステムに対しては、偶発型の故障パターンのみをあてはめることが多い。したがって、故障率は時間に関して、一定値 λ となるので、その逆数をMTBFと呼んで、これによってシステムを評価することになるのである。多くの信頼性の入門書には、信頼性特性としてMTBFに重点をおいて、論議を進めているという背景には、システムの寿命分布の漸近的な性質についての、このような知見が重要な役割を果たしているものといえよう。

次に、FTA (fault tree analysis)を考えてみよう(本誌鳩山氏と牧野氏の稿を参照。特に、680ページでは牧野氏によるユニークな解説がある)。これは、故障の木を683ページのように作って

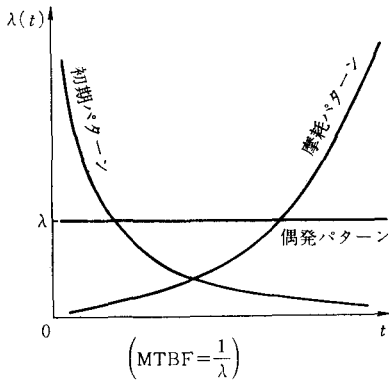


図2 故障のパターン

(ここまでは、実務上よく活用されているが)、この木の最上部のトップ事象(top event)の生起確率を計算するが、この確率は各基本事象の生起確率 p_i ($i=1, 2, \dots, n$) によって、

$$h(p_1, p_2, \dots, p_n) = E\{\phi(x_1, x_2, \dots, x_n)\} \quad (2)$$

と図3の故障の木に対応して作られた直並列系、もっと一般的に言えば、単調系の構造関数 $\phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (これについては本誌西田、大鑄氏の稿を参照) を求めて計算しなければならない。また単調系についての理論においては、最小カットや最小パスの組合せによって構造関数を表現することができる(単調系における表現定理 I および II) ので、トップ事象の発生に最も関係のある事象群を指摘することも容易である。さらに、上のトップ事象の生起確率に対しては、

$$I_i = \frac{\partial}{\partial p_i} h(p_1, p_2, \dots, p_n)$$

として、重要度(importance)を求めることが可能となる。

一般に、FTAはあまり“or”と“and”のゲートに関係なく、品質管理でよく用いる特性要因図的な利用によっても、その効果が評価されているが、これは、あくまで定性的な利用である。このFTAを定量的に活用する段になると、単調系についての理論を十分に理解して援用しなければならない。

この項では、2つの例について、信頼性におけ

る理論と手法の間には密接な関係があり、理論の裏づけなくして手法は成り立ちえず、したがって理論は間接的ではあるが、高い信頼性のシステムや製品を評価し、生み出すために重要な役割を担っていることを考察した。さらに、同じような信頼性理論の有用性を物語る例を考えれば、保全モデルの解析による最適点検周期の決定や最弱リンクモデルによるワイブル分布の特徴づけなど枚挙にいとまがないほどであろう。

4. 信頼性の3大要素とオペレーションズ・リサーチの役割

信頼性とは何かについて述べよう。簡単にいえば、耐久性、保全性および設計信頼性の3つよりなるといえよう。これを、しばしば、信頼性の3大要素という。

耐久性は、長寿命であり、かつ、故障の少ないことを意味する。前者は寿命分布、または、その特性値MTTF (mean time to failureの略。平均寿命ともいえる)によって示されるが、後者は故障率 λ または MTBF によって表わせる。この耐久性については、信頼性理論の最も基本的なものとして、前者に関するものとしては分布の特徴づけや分布の特性値の推定方法など詳細な研究が多く行なわれており、後者についても同様のことがいえ、事実、前項においては、ドレニクの定理を引用することにより、その MTBF などの位置づけが明らかとなったのである。

保全性は、平均修復時間(mean time to repair, MTTRと略称)が短いことによって定量的に評価されるが、これと MTBF とによって表わされるアベイラビリティ(availability), すなわち、

$$A = \frac{(\text{MTBF})}{(\text{MTBF}) + (\text{MTTR})} \quad (3)$$

も保全モデルとして理論的研究の対象となっている。ここでは、MTTR それ自身を小さくすることは部品の補給システムを整備したり、部品の交換性(exchangeability)と故障個所への接近性

(accessibility)を高めるという管理ないしは固有技術の問題であるが、システムを全体として評価し、改善の手がかりを見出すときには、待ち行列論を用いたOR的なシステム解析が必要となる。また、保全性を高めるために予知保全を容易にすることが考えられねばならないが、これには技術的に故障を事前に感知しやすくなるよう設計を行なう…たとえば、ジェットエンジンの中をボアスコープで覗きやすくするなど…ことにより固有技術的に問題が解決されているが、理論的、OR的にはモニターシステムを本体にとりつけ、このモニターの状態によって本体の劣化状態を推測しながら、システムへの処置をマルコフ決定過程によって最適にするという考え方も、実用的には十分ではあるが、研究されている。

ハードはいかにその信頼性が高くても、これを操作する人にミスがあっては、マン・マシンの信頼性は低下する。TMI(米国のスリーマイルアイランド原子力発電所)の事故がこの例といわれているが、人と機械のインターフェースが十分に考慮されねばならないという観点より、設計信頼性も最近は大変重視されている。また、一部に故障があっても、システムは安全であるとするフェールセーフの構造も設計信頼性の尺度によって評価されねばならない。一方、“2 out of 3 fail”…3つのコンポーネントのうち、2つが故障すれば、システムは故障となるの意…というシステムも、冗長設計によって信頼性をおり込んでいることになる。

信頼性の理論は、上に述べた信頼性の3大要素を考えたときに、これらをどのくらいカバーしているであろうか？ このことを考えてみると、たぶん、第1の耐久性については詳細なところまでに理論は立ち入っているが、第2の要素である保全性に関しては、たとえば、MTTR などについては、待ち行列論を援用し、また、予知保全については予防保全のORができてはいるが、まだ十分とはいえないように思う。さらに、設計信頼性に

ついては、冗長設計については、システム構造の研究があるが、それ以外は固有技術に頼る点が、だいぶ多いようである。簡単にいえば、第1、第2および第3の要素となるにつれて、ORによってカバーされる面が少なくなっているといえよう。今後ORに期待されるのは、この後半の固有技術によっている部分をいかにモデル化するかにあると考えるのは、筆者の勝手な考察であろうか？

5. ま と め

今まで、4項にわたって、OR的な基礎に立った信頼性理論の有用性について考察を行なってみたが、この理論は基本的な部分に、具体的には目立ってはいないが、大きな影響をおよぼしていると考えてよいと思う。しかし、信頼性を高めるためには、固有技術にのみ頼っている点が少なくなく、これらの点の所在している対象をモデル化しこれをOR的に解析しなければならない面についてはOR学ぶ人に、今後ぜひ積極的に参画されることが期待されるものと考えている。この小文が、solution oriented でなく、problem oriented なOR研究が今後ますます盛んとなることに役立てば幸いである。

●ミニミニ●

●OR●

ミス ヒーロー

ミス ヒーロー。女性向け雑誌の名称である。ハテナ。hero の女性形なら heroin のはずだが、米語流に語尾変化を簡略化しようという主張なのか、それとも女性化した昨今の男どもに対するつら当てのつもりか。もし単純ミスだとしたら、まさにミスのヒーローだ。もうひとつ若い女性向けの雑誌ノンノ(nonno)。nonno とはイタリア語でお爺さんの意であることを知ったら、若い娘たちは果たして買うだろうか。

同心会。これは趣味の会としてある雑誌に紹介されていた会の名称である。同心とは昔の忍者の意だが、会の趣味とはどうも関連なさそうである。名前をつけるときはもうチョイと神経を使ったほうがよいのではなかろうか。(小野勝章)