

# 信頼性の考え方

セミナー

工業技術院電子技術総合研究所信頼性研究室長

塩見 弘

HIROSHI SHIOMI

序 信頼性工学 (reliability engineering) とよばれる分野は一体何であろうか。人間 (生物) の受胎から死亡までのライフサイクルをとりあつかうのが、医学や薬学であるとすれば、信頼性は、設備、装置、部品、システムといったハードウェアやソフトウェアを対象にして、その開発、設計から廃棄までの寿命保証、保健というような仕事を行う分野といえよう。人間は人間の体の設計は出来ないが、機械設計は出来る、しかし、反面機械に呑ませる薬などという便利なものはない。ここでは、読者の参考のために、信頼性の考え方を要約してのべる。

## 1. 信頼性とはなにか

あなたが自動車やテレビを購入する時、一体どれくらい故障するのか、寿命があるのかを問題にするであろう。しかし、反面、無限の寿命があり、絶対故障しないとは信じないだろう。勿論、この場合、コストを無視して寿命や故障を論ずるわけにはいかない。

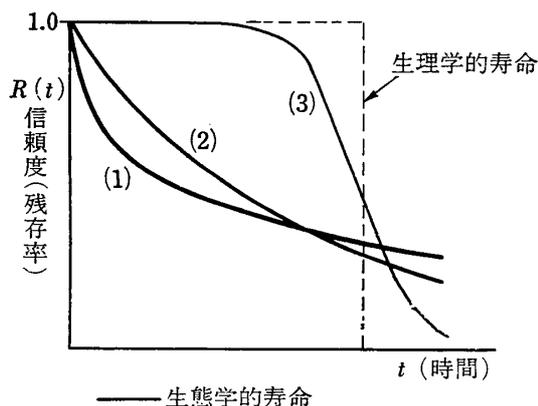
メーカーの立場からいえば、限られたコストで造られた装置を絶対無故障にすることは不可能である。まして使用部品数が非常に多い大きな装置やシステムでは、その複雑性が増すほど故障発生のチャンスは増大し、関連する人間エラーも増大してくる。問題は、発生する故障の影響力がどれくらいかという点である。人間でいえば故障即死亡につながるようでは困るが、ちょっと風邪をひいた程度の故障ならまあまあ許容出来ると考えねばならない。発生しても簡単に直せるものなら、ある程度は仕方がない。しかし、故障が人間の人命にかかわったり社会的損失を招くようであれば、メーカー、ユーザいずれにとっても望ましいことではない。

信頼性 (reliability) とは「対象の時間的安定性」であり、これを客観的に測る場合には信頼度 (同じく reliability という英語が対応する) というよび方になる。信頼度は、「対象 (システム、装置、部品など、人間の関与する時は人間の機能も含まれる) が、ある規定の条件で、意図する期間、規定の機能を失うことなく働く確率」として定義されている。

この定義は、信頼度が、対象の使用、保全、環境などで変わること、また、期間を指定する必要があることを示している。意図する期間として、その製品を使い出してから一年間とすれば、一年たった時点で全体の何%がまだ故障なくうごいているかを示すものが信頼度である。

この定義のなかの「機能を失っている」状態を故障 (failure) とよぶ。人間でいえば死亡、病気などで働けなくなっている状態に対応している。突然心臓が止まるといような故障を破局故障 (catastrophic failure)、だんだん体がおとろえるという故障を劣化故障 (degradation failure) とよんでいる。このほか、間けつ故障もあれば、装置のどこか別のところの具合がわるくなったためにひきおこされる波及故障もある。勿論、故障はもの自体が破壊したり、腐食したりする物理化学的、機械的な故障もあれば、もの自体は少しもおかしくないのに人間エラーにより誤操作をしてしまうという種類の故障もある。コンピュータなどのプログラムがまちがっているとか、図面に誤りがある、文書をよみちがえるというように、もの (ハードウェア) に直結しないソフトウェアや人間要素に起因する故障も無視出来ないのである。

信頼度を時間の関数として考えると、通常、どの装置や製品でも、はじめから機能を失っているものはないから、はじめは信頼度 100% であるが、やがて故障するものが出て来て、時間と共に 0% になってしまう。いわば信頼度  $R(t)$  は残存率であり、一方  $1-R(t)=F(t)$  は不信頼度とよべれまでの故障累積%である。(図1) 製品の場合も、生物の場合も、もっとも理想的な場合には、天寿を全うして (いわゆる生理学的寿命に達したら) すべてが一度に死亡 (故障) してしまうというケースが考えられる。しかし、実際には、その先天的、後天的要素、環境などがきいてきて、若くして死亡するものもあれば、長生きするものも出てくるのである (これは生態学的寿命である)。



(1)DFR, (2)CFR, (3)IFR型 (本文3章参照)

図1. 信頼度関数の形

### 2. 修理を行う機械の場合と治癒

電池や蛍光灯のような消耗品は、寿命が過ぎたらそれでおしまいである。人間も今のところ寿命が過ぎたらそれでおしまいであるから、消耗品と同じである。ところが、自動車、新幹線、コンピュータなどは、故障してもよっぽどその被害が大きくめっちゃめっちゃにならないかぎり、修理、保全を行って正常にひきもどし、使いつづける。そして、いよいよ老化して、修理費がかさむようになると廃棄ということになる。人間の場合、もし、死亡を考えないで病気をとりあげるかぎり、やはり、病気を修復しながら使っている装置と区別出来ない。では、こういう修理や治療の能力を客観的に表わす尺度として何がよいであろうか。信頼度  $R(t)$  は、人間でいえば元気な状態から病気の状態にうつる確率に相当するが、修復の場合は逆の確率である。この確率は保全度（ある時間  $\tau$  までに正常状態にひきもどす、すなわち修復完了している確率、maintainability あるいは repairability）とよばれる。（図2、3）図2では上側の矢印が信頼度  $R(t)$  に関係し、下側の矢印が保全度  $M(\tau)$  に対応する。

薬の信頼度や保全度は考えられるだろうか、薬の機能の定義を薬効の維持とすれば、薬がつくられた時点 ( $t=$

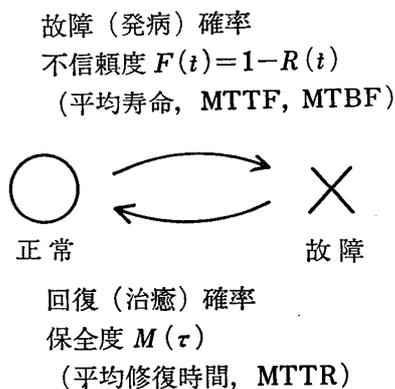


図2. 信頼度と保全度

0) から時間  $t$  まで薬効が維持している確率、あるいは投与して薬効があらわれた時点 ( $t=0$ ) から  $t$  まで薬効がひきつづきあらわれている確率が信頼度である。一方保全度の場合、対象として人間、機能として病気からの回復を考えると、人間の保全度（治癒度）というものを考えることが出来る。この保全度のなかには、薬の選択、投与の効果を含めて医者診断、処置能力、治療システム（病院）などがすべて含まれる。薬だけに注目すると薬を投与した瞬間 ( $\tau=0$ ) から規定の時間  $\tau$  までに薬効があらわれる確率が、右上りの保全度の形に対応することになる（図3）。

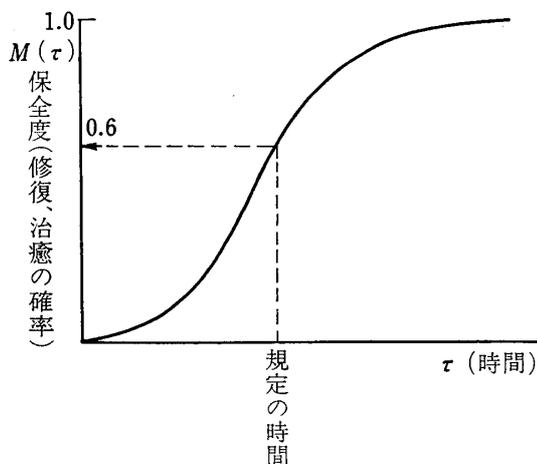


図3. 保全度関数の形

### 3. 故障率と死亡率

信頼度とは、100人の人間が、何才で何人生存しているかという。全体としての確率でとらえた尺度である。しかし微細にながめてみると100人中20人死亡すなわち、 $R(t)=0.8$  であっても、一度に集中して死亡する場合もあれば、バラバラと死亡している場合もある。

そこで、単位時間あたりの死亡、相対頻度を測るのにその時点での信頼度  $R(t)$  に対して、そのうちどれくらいの割合で信頼度が低下して（すなわち死亡して）行くかという尺度が必要になる。これはいわゆる死亡率であり、ものの世界に対しては、死亡率のかわりに故障率（failure rate）とか事故率が使われる。この表現には信頼度の時間的微分すなわち時間あたり減少スピード  $-dR(t)/dt$  が使われている。

$$\text{故障率, 死亡率 } \lambda(t) = \frac{-dR(t)}{dt} / R(t) \quad \dots(1)$$

逆に  $\lambda(t)$  の形が与えられていれば、信頼度  $R(t)$  は、 $\lambda(t)$  の時間積分について指数関数の形になる。

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad \dots(2)$$

ところでこの故障率（死亡率）のパターンは、ものの寿命、取替などを論ずるうえで非常に重要な意味をもっている（図4）。故障率のパターンは大別すると3つの型になる。

- DFR (decreasing failure rate), 減少型 (幼児期)
- CFR (constant failure rate), 一定型 (青少年期)
- IFR (increasing failure rate), 増加型 (老人期)

この3つの型は図1の(1), (2), (3)にそれぞれ対応している。DFRは、時間の初めに死亡の多い幼児死亡型、CFRは、全くランダムに偶発的な死亡のおこる型で、信頼度は  $R(t) = e^{-\lambda t}$  という指数関数になる。IFRは、集中的に寿命のつきる型である。実際の人間の寿命は、これらの3つの型が複合してあらわれ、形が洋式の浴槽に似ているので bath-tub curve とよばれている。日本流に言えば“棺おけ曲線”である（図5）。この曲線は人間の文明、環境の因子に左右され、先進国では、幼児死亡率（DFR期）はひくく、3つのパターンが分離されているのに、後進国ではDFRの値が大きく、CFRとIFRの区別がつかなくなってしまう（極端に書くと図5の上方のカーブ）。

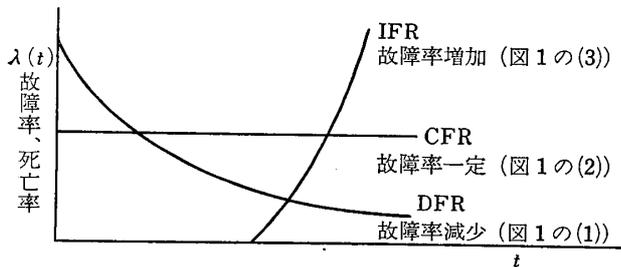


図4. 故障率のパターン

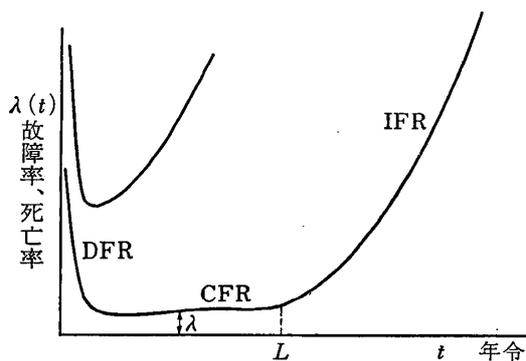


図5. 死亡率曲線

製品・装置の寿命からいうと、なるべく初期故障の少ないものを造り、もし初期故障部分があればその原因を調べて早くとりさる必要がある。また、寿命がつきて集中的なIFR型に入る直前に、新しい製品に取替えてしまえば、原理的に故障率をゼロにすることが出来、寿命

ファルマシア

延長が可能になる。人間の場合には、人工臓器の開発に関係する部分である。

修理、回復に関係する保全度関数  $M(\tau)$  の場合には、故障率のかわりに修復率  $\frac{dM(\tau)}{d\tau} / (1 - M(\tau))$  という尺度が使われる。

#### 4. 平均寿命

信頼度という確率のかわりに、信頼度の時間的減少をあらわす尺度が故障率（死亡率）であったが、死亡するまでの時間（いわゆる寿命）で信頼度の大小を論ずることが出来る。平均寿命は、製品が取替を前提にする自動車、テレビのような修理製品の場合と、消耗品（電球のようなもの）の場合とではよび方を区別している。すなわち

MTBF (mean time between failures): 平均故障間隔

MTTF (mean time to failure): 故障までの平均時間 (平均寿命)

と略称する。MTBFは故障しても修復する場合であるから、人間でいえば病気になって回復し、次にまた病気になるまでの平均期間である。健康な人ほどMTBFは長くなり、病気がちの人は短くなる。MTTFは文字通り平均寿命で、人間でいえば死亡年齢の平均である。

一方、保全度  $M(\tau)$  については、修理（治療）完了までの平均時間MTTR (mean time to repair) が使われている。

修理しながら使っている装置（自動車、テレビ、人間など）では、故障（病気）しにくいこと、すなわちMTBFが長いほどよく、修理時間（治療期間）はなるべく短い方がよい。したがって、その装置の可動率 (availability) は  $MTBF / (MTBF + MTTR)$  という時間比率であらわすことが出来る。いわば人間の総合的健康度をあらわしている。

#### 5. 機械のライフサイクルを設計する

機械の寿命という表現は、ちょっと俗な言い方であるすでのべたように厳密にいうと、たとえばその装置が「一年後に信頼度90%で動作していること」を保証せよということである。薬でいえば3年間なら3年間特定の薬効（機能）を維持していなければならない。アポロ宇宙船でいえば、「打上げてから月面に着陸し、再び地上に帰るまでのすべての機能」を保証することになる。

ある意図した信頼度になるように、装置の設計を行うには、まず何が信頼度にとって問題になっているかを知らねばならない。現在の技術レベルからみて、故障を皆無にすることは出来なくても、それをごく短期間で検出、修復することが出来れば、全体の機能にはあまり影響しないかもしれない。新幹線が止まっても、ダウンタ

イムが短かければダイヤルに影響したりお客に迷惑をかけたくないでもすむ。人間でいえば、致命的な外部ストレスや疾病がおこらなければ死亡しないですむし、仮りに病気にしても、すぐれた治療法を採用すれば、再び元気になる。

いくつかの問題点をあげると、

- ・装置に要求されている機能は一体何かを明らかにする
  - ・故障をひきおこしている原因、メカニズムの追求（たとえば工程管理、原材料管理、環境やストレスの過大など設計の不備、無理な使い方、人間のエラーなど。故障がどのようなプロセスでおこるかという研究や仕事は故障（事故）解析（failure analysis）とか故障物理（failure physics）とよばれる、いわば病理学とか疫学に対応するものであろう。）
  - ・故障しにくい材料、部品の実現化とその環境、ストレスのコントロール
  - ・故障しても大事に至らない機構（たとえば冗長方式、フェイル、セーフ、警報回避など）の研究
  - ・故障の影響力の解析的調査、不信頼、不安全要素の予測
  - ・欠陥や不良品のスクリーニング、環境試験、耐久試験の実施
  - ・故障がおきた時にいち早く検出、診断するシステムの開発、修復技術の開発
  - ・故障の原因を追求したり、除去したり、信頼性の高い装置、システムを開発して行く場合に、きれぎれの技術ではなく、これを系統的に総合し、確実に保証して行くための組織、管理のやり方
- などをあげることが出来る。

## 6. システム設計

万年筆の信頼性を論ずる場合には、万年筆の機能を明らかにし、それを構成している機能要素ごとに設計をすすめねばならない。万年筆の機能は、ペン先、インク供給部、ホルダ部分（構造部分）、キャップ（保護部分）というような主要部分にわかれるだろう。これらのいずれが欠けても製品としての機能は失われてしまう。

自動車の場合は、サスペンション、エンジン、ブレーキ、燃料系、電気系統などの主要機能から構成されている。人間の場合にも、神経系、循環器系、消化器系、排泄系、骨格部分、筋肉部分などの必要不可欠な主要サブシステムから構成されている。

薬の場合はどうだろうか。もっとも本質的な薬効のあらわれる部分（時間的経過を考えて）、のみやすくなる部分（糖衣など）、包装部分（経時変化、貯蔵、商品価値などに関連する）などの機能に分割しうるであろう。

このようなサブシステムに全機能が分割出来る時に、全システム（装置）の信頼度は、これらサブシステムのどれか一つでも機能が失われてる時に、失われると考え、次の基本式で計算出来る。このようにいくつかの機能から出来上ったシステムを直列システムと呼んでいる。（図6）

$$R_{\text{直列}}(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times \dots \times R_n(t) \quad \dots(3)$$

またこの場合の故障率は(2)からわかるように積ではなく和の型になる。

$$\lambda_{\text{直列}}(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \dots + \lambda_n(t) \quad \dots(4)$$

もし、装置が3つのサブシステムから構成されていてそれぞれの信頼度が90%であったとすると全システムの信頼度は $0.9 \times 0.9 \times 0.9 = 0.729$ にすぎない。アポロ宇宙船では、710万の部品がつかわれているが、もしその部品の一つでも故障すると何らかの支障を生じるというのであれば、一つの部品の平均信頼度 $R$ を710万回かけたものがアポロの信頼度になるわけである。実際には、逆に一つの部品がいかにしても支障ないように設計するから、こうはならないが、もしアポロの機能にきく部品が $10^5$ 個あり、アポロの要求信頼度が0.9であったとすると $0.9 = (R_{\text{部品}})^{10^5}$ という式を満足する部品を使わねばならない、すなわち $R_{\text{部品}} = 0.99999$ となる。故障率でいえば $\lambda_{\text{アポロ}} = 10^5 \lambda_{\text{部品}}$ という式になる。これからわかるように装置が複雑なほど、それを構成している部品の信頼度をあげねばならないことがわかる。

信頼性設計においては、上の式を満足するようにサブシステム、構成部品の信頼度あるいは故障率 $\lambda_1, \lambda_2$ などを保証するという仕事が必要になってくる。

ところで、信頼性や安全性を高める方法として冗長（redundancy）という考え方がある。たとえば主ブレーキ（油圧）がきかなければ、電気式ブレーキを使い、それでもだめなら手動ブレーキを働かせて止めるという考え方である。薬の場合、あまり多量にのんでは害になるから適量以上に投与出来ないであろうが、外用薬、内服薬の併用というような概念に近い方法である。これをモデルとして書くと図6 B) のようになる。これは、一つのルートがとぎされていても、もう一つのルート（手段）

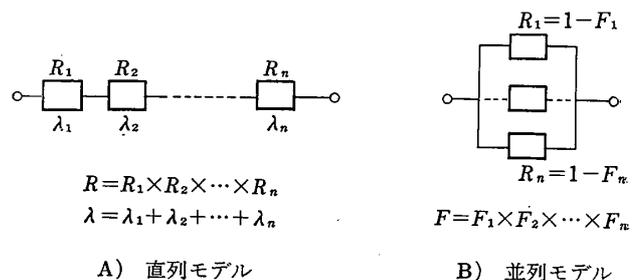


図6. 直列、並列モデル

により目的を達しようという考え方をあらわしており、並列モデルと呼ばれる。航空機は単発よりもエンジンが多いほど（荷重という問題を別にすれば）冗長設計になっているのである。建物の柱が多いほど安全という考え方にもつながっている。並列の場合の信頼度の求め方は  $1-R=F$  すなわち信頼度に着目すると信頼度のかげ算で計算出来る（図6B）

### 7. 環境と故障し易さ

装置や部品などは、その使用環境がきびしいほど、それに加わるストレスが大きいほど故障し易くなる。図5でいうときびしい環境下では老化をはじめの寿命  $L$  が短縮され、また故障率(死亡率)  $\lambda$  が増大する。

設計する立場からは、式(4)にしたがって  $\lambda_1, \lambda_2$  などの値をあらかじめ装置に要求される  $\lambda$  値列の値になるように選ばねばならない。部品は故障しにくいものを選ぶとか安全係数を見込んでひかえ目に使うなどの注意がある。使う環境によって、どれほど装置が故障し易くなるかという係数の例を次に示しておく。この表では実験室の故障率を1と考えている。設計の立場からは、このような基礎データが必要なのである。一方、事前に製品の寿命を評価する側からは、加速寿命試験、促進寿命試験と称して、ストレスを高目にしたり、その頻度を増して短時間に試験を終らせようとするのである。

表1. 使用環境による故障率の相対値の例（電子装置）

実験室	1	航空機	6.0
地上	1.8	ミサイル	80
車輻	3.0	人工衛星(軌道上)	0.2~1.8

### 8. 予測の重要性

装置が複雑になり、環境、使用・保全方法などが多岐

にわたると、思わぬ原因で故障し、場合によれば一企業、一個人にとどまらぬ社会的損失、不安全をひきおこしてしまう。このような事が発生しないように注意して設計するのであるが、さらにこれは、環境試験、耐久試験などで確認、保証されねばならない。また、実使用データがあれば病理学的ならびに統計的解析により原因を明らかにする。

このような経験の蓄積こそ、信頼性保証のかぎとなる。さらに、もしどこかに欠陥が発生したらどのような結果がひきおこされ、どういう致命的事故になるかという予測的解析法（最近のテクノロジー・アセスメントの一つ）も重視されている。その装置が使われて事故が発生してしまってからでは遅すぎるからである。その一つの方法に FMECA (failure mode, effect and criticality analysis) と FTA (fault tree analysis) がある。前者は部品や人間エラーを出発点にそれが全体にどう影響があらわれるかを評価する合成的方法であり、後者は、全体にとって致命的な事故(故障)を出発点にして、その原因にまで枝わかれ状に分解する方法である。

### 9. むすび

信頼性は、安全性、品質保証という立場から、単にハードウェアの機能の維持にかぎらず、検査、診断、予知保全（危険防止）などの面で他の分野と密接に関係している。残念ながら紙数の関係で十分のべられないが、保証科学としての信頼性の一端を簡単に紹介した。

- 1) 塩見 弘, “信頼性入門”, 日科技連出版社, 東京, 1968, pp.1-262.
- 2) 塩見 弘, “故障物理入門”, 日科技連出版社, 東京, 1970, pp.1-285.

## ファルマシア (Vol. 12, No. 4, No. 5) 正誤表

頁	行など	正	誤
303	左↓13	1930年代中葉に	1930年代中頃
304	右↑6	では、まだ一般に	では一般に
306	右↑16	強化されることになった。	強化され、
398	右↓22	ホルモン	ホルヒン