

設計段階で製品寿命を簡易的に推定する手法

Easy methods for estimating product life at the design stage

○戸水 晴夫 (正, SDI Japan)

1. はじめに

家電などコンシューマー製品の構想設計において、製品が正常に機能する期間を早期に設定することは設計者が行うべき重要な作業の一つとなっている。しかし、冷蔵庫などは購入してから寿命が尽きるまで電源が入ったまま 10 年以上継続して稼働しなければならない。このような製品の寿命試験は難しい。さらに、現状で設計者が製品システムや部品の寿命を簡易的に推定できる仕組みがないことが、製品の寿命を推定することを困難にしていると筆者は考えている。事故を予測する FTA や FMEA の活用だけでは防げない初期不良によるシステム損傷が確率的に存在するからである。具体的には、外部調達した部品の寿命から組立製品の寿命を推定するという構想設計手法などが確立されない限り、家電製品のリコールはなくなると考える。

製品や部品メーカーが、自社の製造物に対して事故責任を負わなければならない期間は、製造物責任法によって 10 年間で定められている。製造物責任法、いわゆる PL (Product liability) 法が 1995 年に施行されて以来、製品に重大な欠陥があった場合には、実際に故障した部品の製造に携わった製造者だけではなく、製品を提供した側の開発者も製造物責任を負うことが求められるようになった。そのため、設計者といえども事故責任を免れることはできない。

また、製品メーカーは、販売した製品に通常 1 年間の無償保証期間を設定することが一般的である。その理由は、制御基板に使われる電子部品の初期不良の発生確率が 1 年以内と高いためである。新製品などでは、実際に市場に出さないとわからない使用環境による不具合が多いことも理由となっている。そのため、モノを作る前の設計段階においても、1 年以内に故障が起きないことを確認する必要がある。¹⁾

さらに、設計者としては製品の仕様を確定するために、どのような寿命試験を計画すれば良いのかを考えておかなければならない。指定の寿命を全うできる製品とするために、何セットの製品で、何時間の試験を、何回繰り返し返せば良いか。あるいは信頼度をいくらにしておけば、コスト的に見合うのかを検討しなければならない。本報では、構想設計段階で製品寿命の推定作業を行ってから詳細設計を行うことを推奨している。そのための論理的な設計プロセスを提案し、後述する弊社ホームページで寿命試験用の試験計画ツールを無償提供している。

2. 故障が発生するパターン

製品に故障が発生するパターンを説明するために、**図 1** に示したバスタブカーブと称される図が一般的に使用される。故障率を時間の関数として捉え、リリース段階、安定運用段階、廃棄段階に分けて考える。そして、製品有効寿命は 安定的に運用される期間と定義する。通常、こういった現象を確率分布で説明するために、ワイブル分布が用いられている。²⁾ ワイブル分布は、寿命が最も短い部品が故障することによって製品全体が故障するような現象を記述するために用いられる確率分布である。図中のワイブル係数 m とは、故障発生時の現象をグラフに記述するために定義された形状パラメータのことである。

m の値が 1 であるときの製品の信頼度関数 $R(t)$ は指数分布となり、式(1)で表せる。

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

λ : 故障率=(1/MTTF)

t : 故障までの時間

ここで、MTTF: Mean Time To Failure 平均故障寿命。 m の値が 1 以外であるときの製品の信頼度関数 $R(t)$ はワイブル分布となり、式(2)で表せる。

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^m} \quad (2)$$

η : 尺度パラメータ

t : 故障までの時間

ここで、尺度パラメータとは、全体の 63%が故障する時間を示している。その故障する比率は、不信頼度関数 $F(t) = 1 - R(t)$ として表現される。式(3)に、尺度パラメータの時間に到達した時の不信頼度関数 $F(t)$ を示す。式(2)に $t = \eta$ を代入すれば、 m の値に関係なく求められる。

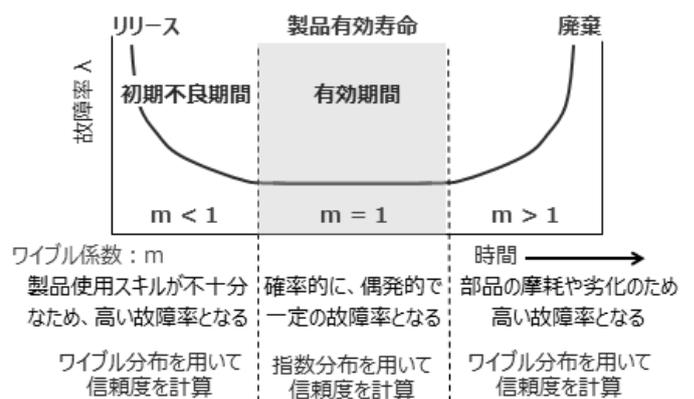


図 1 信頼性のバスタブカーブ

$$F(\eta) = 1 - e^{(-1)} \cong 0.63 \quad (3)$$

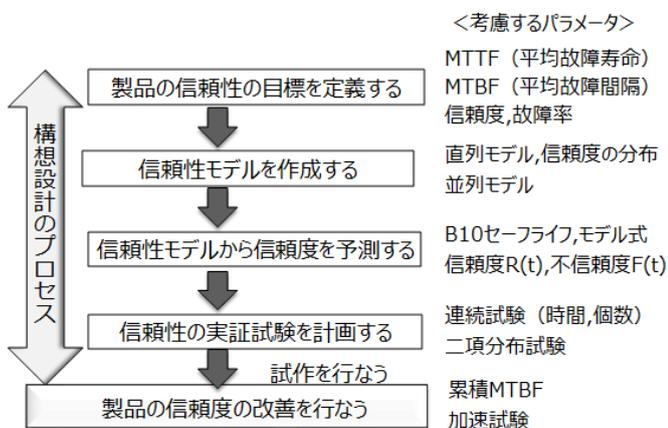
つぎに製品の信頼度関数 $R(t)$ をもとにバスタブカーブを描くには、故障率を求める必要があり、故障率は式(4)で表される。

$$\lambda = F(t)/R(t) \quad (4)$$

ワイブル分布を用いて製品寿命を推定する方法は、企業において品質保証の担当部門で最も利用されている。そして、実際はもっと複雑な数式で解析される場合が多い。一方で、設計者が構想設計時点で使うためには、難解では使うことができない。従って、設計者には、より簡便な寿命算出方法を提供し、製品の寿命を簡易的に算出できれば良いと考えている。

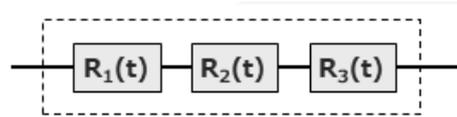
3. 製品の信頼性を検討する

信頼性を検討する手順を図2に示す。始めに製品システムに関する寿命と故障率の目標値を定義する。目標値となるパラメータには、MTTF（平均故障寿命）、MTBF（平均故障間隔）、信頼度、故障率がある。次に、製品を信頼性のモデルに置き換える。信頼性のモデルでは、製品を最上位のシステムと捉え、部品を個々のサブシステムと考える。サブシステムをどのように構成するかによって製品としての信頼度が計算できる。このような信頼性を検討するモデルは、通常、ブロック図として記述される。製品機能が直列的に連続するサブシステムの機能として表現される場合は、ひとつの部品が故障しただけで、全体システムの故障につながる。図3に直列モデルの例を示す。あるいは、並列のサブシステムを持つような構成では、全ての部品が故障した時のみ、全体のシステムが故障するという相関関係を持つものになる。図4に並列モデルの例を示す。そして、信頼度のパラメータを求め、数式化する。これらのモデル式から信頼度 $R(t)$ を計算し、不信度 $F(t)$ を求める。最後にどのような実証試験を行えばよいかを計画する。ここまでが、構想設計のプロセスに含まれるといつてよい。³⁾



ここで、B10セーフライフとは、 $F(t)$ が10%となる時間を指標とするもの。加速試験とは、使用環境でのストレス条件を厳しく設定し、故障率を短時間で推定する寿命試験の方法。

図2 信頼性検討のプロセス

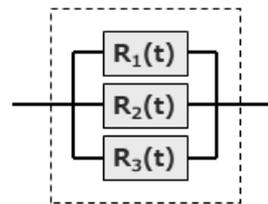


$$R_s = R_1(t) * R_2(t) * R_3(t)$$

図3 直列モデルの例

直列モデルの一般式は、式(5)で表される。

$$R_s = \prod_{k=1}^N R_k(t) \quad (5)$$



$$R_p = 1 - [(1 - R_1(t)) * (1 - R_2(t)) * (1 - R_3(t))]$$

図4 並列モデルの例

並列モデルの一般式は、式(6)で表される。

$$R_p = 1 - \prod_{k=1}^N (1 - R_k(t)) \quad (6)$$

4. 経年変化を伴う信頼性を検討する

製品システムの信頼性は、構成要素の信頼度のブロック図から求めることができた。信頼度を定数にしてしまうと時間が考慮されることはない。しかし、実際の製品は経年変化するため、信頼度は時間を考慮した確率関数でなければならない。そのため、次はその各ブロックの信頼度を定数ではなく、時間の関数で置き換えることにする。そうすれば、製品システムの任意時間における信頼度を計算することが可能となる。

例としてWebサーバーのサブシステムの信頼性を表す解析式を作成してみよう。部品としては、パワーサプライ、ハードディスク2個、ネットワークカードがあり、それらが信頼性を考慮すべきキー部品となっている。部品メーカーの仕様書から分布とパラメータ値が分かっているので、表1に記載した。

表1 Webサーバーのサブシステムの信頼性

部品	信頼性分布	パラメータ
パワーサプライ	指数分布	MTTF = 625 日
ハードディスク 1	ワイブル分布	$m=4.0$ $\eta=300$ 日
ハードディスク 2	ワイブル分布	$m=2.1$ $\eta=500$ 日
ネットワークカード	指数分布	MTTF = 2000 日



ここで、PS: パワーサプライ
 HD1, HD2: ハードディスク 1, 2
 NC: ネットワークカード

図5 Webサーバーのサブシステムのブロック図

Webサーバーのサブシステムの信頼性のブロック構成は、ハードディスク2がハードディスク1のミラーリングになっているので、HD1とHD2が並列となる。あとは直列なので、サブシステムの信頼性に関する解析式は次の式(7)で表すことができる。

$$R_{sys} = R_{PS} * [1 - (1 - R_{HD1}) * (1 - R_{HD2})] * R_{NC} \quad (7)$$

パワーサプライとネットワークカードは指数分布であり、ハードディスク1と2がワイブル分布なので、表1のパラメータ値を代入し、それぞれを式(8)から式(11)のように表すことができる。

$$R_{PS} = e^{(-t/625)} \quad (8)$$

$$R_{NC} = e^{(-t/2000)} \quad (9)$$

$$R_{HD1} = e^{-(t/300)^{4.0}} \quad (10)$$

$$R_{HD2} = e^{-(t/500)^{2.1}} \quad (11)$$

個々の部品の信頼度の式とサブシステムの信頼度の式をもとに、時間経過による各信頼度の変化をグラフに表すことができる。このようなグラフを描くには、まず Microsoft Excel®の各セルに時間を変数として、EXP関数を定義すればよい。通常の散布図の描き方で、グラフの散布図(平滑線)を選択する。リボンバーにデータの選択アイコンが現れるので、系列ごとにデータソース行を選択する。全系列を追加すると、図6のようなグラフが描画される。ここで、Rsysの信頼度が時間の経過によって下がっていくことが分かる。RHD1に着目すると無償の保証期間とした1年間は問題なく稼働するが、400日目以降でRHD1の信頼度がほぼ無くなることが分かる。この時点でミラーリングされているRHD2がシステムの寿命を左右するということが想定できる。

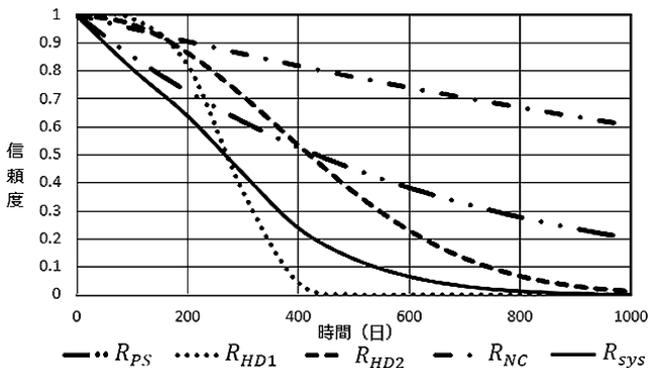


図6 Webサーバー部品の信頼性の時間変化

5. 信頼性の重要度から部品を改善する

信頼度は時間の経過とともに下がっていくが、どの部品を改善すれば、最も効果的に寿命を長く保てるだろうか? その答えを知るために、はじめに個々の部品のサブシステムにおける重要度を算出する。これらの重要度は各部品がお互いに独立しているとする場合、サブシステムに対する偏微分で求めることができる。信頼性の重要度とは1次の偏導関数である。信頼性の重要度を知ることによって、どの部品の信頼性を最初に改善すれば良いかを分析できる。あるいは、保証や予防保全期間を予測し、計画することができるようになる。

Webサーバーのサブシステム各部品の信頼性の重要度の解析式は、サブシステムの信頼度の解析式(7)において、重要度を求めたい直列部品の信頼度を1、並列部品の不信頼度が1の定数であるとした場合の偏微分式で表すことができる。つまり、対象とする部品をのぞいた部分の信頼度を求めて、重要度を比較することになる。サブシステム全体の信頼度がある時間で一定とすると、対象部品以外の信頼度が大きい場合は、対象部品の信頼度がより小さいということになり、信頼度が小さければサブシステムへの影響がより大きいことを意味する。各部品の重要度を表す解析式を式(12)から式(15)に示す。

$$\frac{\partial R_{sys}}{\partial R_{PS}} = [1 - (1 - R_{HD1}) * (1 - R_{HD2})] * R_{NC} \quad (12)$$

$$\frac{\partial R_{sys}}{\partial R_{HD1}} = R_{PS} * [1 - (1 - R_{HD2})] * R_{NC} \quad (13)$$

$$\frac{\partial R_{sys}}{\partial R_{HD2}} = R_{PS} * [1 - (1 - R_{HD1})] * R_{NC} \quad (14)$$

$$\frac{\partial R_{sys}}{\partial R_{NC}} = R_{PS} * [1 - (1 - R_{HD1}) * (1 - R_{HD2})] \quad (15)$$

Microsoft Excel®の各セルに式(12)から式(15)の信頼性の重要度の関数を定義し、それらの計算結果をデータとして散布図のグラフに取り込んでグラフを作成すると、図7のようなグラフが描画される。ここで、グラフから400日目を超えるあたりまでは、パワーサプライの信頼性への重要度が最大となることが分かる。一方で、400日目以降は、ハードディ

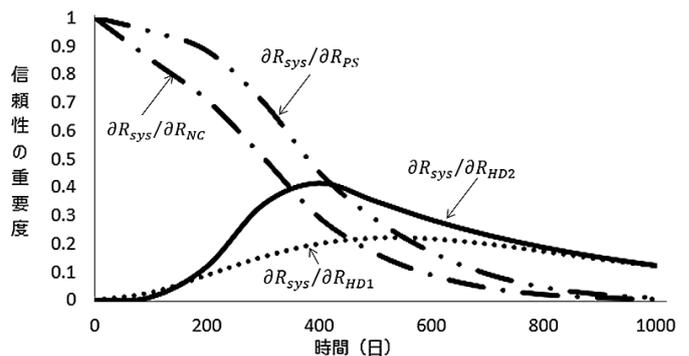


図7 Webサーバー部品の重要度の時間変化

スク 2 の信頼性の重要度が最大となる。ハードディスク 1 と 2 の信頼性の重要度が、時間経過につれて上がる理由は、それらの尺度パラメータが 300 日と 500 日だったからである。従って、400 日目以降の信頼性を改善する場合は、ハードディスク 2 の改善を優先すべきと判断できる。

6. 製品の寿命試験を計画する

弊社で開発した Reliability Test Design ツールを使用すれば、既定の信頼性を満足させるために行うべき単一ユニットの寿命試験の必要試験時間、必要試験個数、許容故障数などを容易に算出できる。このツールについては、以下の弊社ホームページから無償でダウンロードできる。図 8、図 9、図 10 は、ツールの利用例を示している。⁴⁾

<http://www.statdesign-j.com/service.html>

図 8 の例は、信頼性の目標値として MTBF が 365 日で、信頼性レベルは 75% であり、ワイブル係数 m が 2.43 でワイブル分布するとして試験個数が 5 個あった場合、故障数が 0 から 4 になったときの各必要試験時間を求めた例である。

MTBF=365日
CL=75%
ワイブル係数=2.43
が求められるときに
試験個数が5の場合
単一ユニットに
必要とされる
試験時間は

故障数が0なら
243時間
故障数が1なら
335時間
故障数が2なら
416時間
故障数が4なら
637時間

図 8 故障数から試験時間を求める例

試験時間=1000で
信頼度=90%
CL=50%
ワイブル係数=0.86
が求められるときに
単一ユニットを
200時間で試験する
場合に必要とされる
総試験個数は

故障数が0なら
27個
故障数が1なら
65個
故障数が2なら
103個
故障数が4なら
179個

図 9 一定試験時間の故障数による試験個数の例

図 9 の例は、目標値は 1000 時間の試験で信頼度関数の値が 90% となり、ワイブル係数 m が 0.86 でワイブル分布する。信頼性レベル 50% で 200 時間の寿命試験を行い、故障数が 0 から 4 になったときの必要最小限の試験個数を求めた例である。

図 10 の例は、目標は 20,000 時間で信頼性レベル 90% として 20% の故障を許容でき、ワイブル係数 m が 0.43 でワイブル分布する。単一ユニットの試験時間は 2,000 時間であり、試験個数を 10, 50, 100, 500 としたときのそれぞれの許容故障数を求めた例である。ここで、Beta 値はワイブル係数 m に等しい。

20,000時間で20%
の故障を許容し
CL=90%
ワイブル係数=0.43
が求められるときに
単一ユニットを
2000時間で試験する
場合に試験個数ごとの
許容故障数は

試験個数10なら
許容故障数: 0個
試験個数50なら
許容故障数: 2個
試験個数100なら
許容故障数: 5個
試験個数500なら
許容故障数: 32個

図 10 一定時間内の試験個数での許容故障数の例

7. おわりに

近年、世界中の様々な規格の部品の調達が可能になった一方で、故障の発生を防止するために、どのような品質の部品を採用すれば良いか見極めることが、より困難になってきた。さらに、設計者が個々の調達部品に対して、明確な寿命に関する調達仕様を提示できない場合には、製品の信頼性が確保できない結果となる可能性がある。製造業の国際的分業化が進むなかで、設計が製品をコントロールできる範囲はより狭くなったといえる。一方で、設計段階で製品寿命を検証することは、設計者が消費者に対して責任を持つという点において、より重要性を増したといえるだろう。設計者向けの製品寿命の設定方法や計算ツールが、将来的に役に立つものと期待している。

参考文献

- 1) 斎藤嘉博：電子装置と部品の信頼度，自動制御，8，6 (1961)，37
- 2) Kececioglu, D. B. : Reliability and Life Testing Handbook Vol. 1 and 2, DEStech Publications Inc., (2002)
- 3) 榊原 哲：よくわかる最新信頼性手法の基本，秀和システム (2009) ,59,157
- 4) 戸水晴夫：製品寿命を考慮した設計手法と試験計画ツールの紹介，日本設計工学会 九州支部平成 27 年度研究発表講演会，(2015)，1