

# 製品寿命を考慮した設計手法と試験計画ツールの紹介

## (電気製品の構想設計における製品寿命設定の方法と試験計画の立て方)

戸水 晴夫 (正, SDI Japan)

### 1. はじめに

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, 製品を設計した開発者も 10 年間の製造物責任を負うことが求められるようになった。その結果, 部品製造を外部に委託し, 製品設計と組立だけを行ってきた多くの FAT (Final Assembly & Testing) 型企業においては, 組み込んだ他社製の部品の不具合に対しても責任を負うことになり, 製品リコールが頻繁に行われるようになった。電気製品だけを見ても, 近年は増加傾向にあり, 昨年度は 35 件ものリコールが報告されている。<sup>1)</sup> 現在, 発煙や発火などの重大な製品欠陥に対しては, 消費生活用製品安全法と PL 法が消費者に対する安心・安全を保障する法制度になっている。

一方で, 電気製品では, 構想設計時に製品寿命を想定して設計がなされる例はいまだ少ない。一部の高額な耐久消費財を除いて, 理論的に検証する仕組みがないのが現状である。このことが, 製品リコールを増加させている一因と筆者は考えている。言い換えれば, 外部調達した部品の寿命から組立製品の寿命を想定するという構想設計手法が確立されない限り, 製品のリコールはなくなると考える。例えば, ホームエレクトロニクスが進んだ現代では, 家庭用の電気製品といえども制御基板を搭載していない製品はほとんどない。そして, 電気製品に内蔵される制御基板には, アルミ電解コンデンサが使用される場合が多い。このアルミ電解コンデンサは, 一般に使用環境温度が 10°C 上がると寿命が半分になるという特性があることが知られている。従って, 製品がどのような環境条件で使用されるのかを想定しておかなければ, 実際の制御基板の寿命が短くなってしまいう可能性がある。これは, 一つの部品の寿命が製品全体の寿命を律速してしまう例である。

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すべきである。本報では, 構想設計段階で製品寿命を少

なくとも PL 法が求める責任年数として設計を行うことを提案している。そのための理論的な設計プロセスを提案し, 弊社ホームページにて無償提供している寿命試験用の計画ツールを紹介する。

### 2. 故障が発生するパターン

一般に, 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使用される。故障率を時間の関数として捉え, 初期段階, 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る。<sup>2)</sup> 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  $m$  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。

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

$\lambda$  : 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。

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

$\eta$  : 尺度パラメータ

$t$  : 故障までの時間

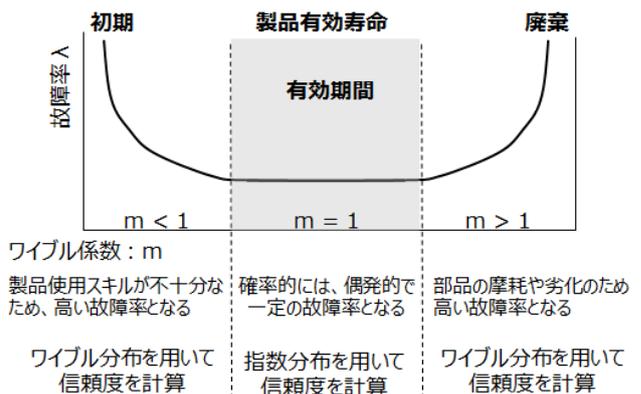


図 1 故障発生時のバスタブカーブ

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。

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

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、製品の寿命が概算できれば良いと考えている。

### 3. 製品の信頼性を検討するプロセス

製品の信頼性を検討する場合は、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。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。製品の寿命を検討する場合、はじめに信頼性のブロック図を作り、それぞれのサブシステムのパラメータ検討を行う。信頼性を検討する手順を図 2 に示す。実証試験の計画を立てるまでが構想設計プロセスとされる。<sup>3)</sup>

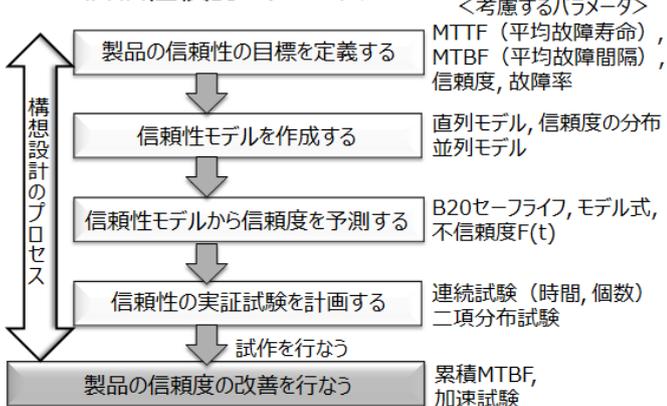
### 3.1 設計で製品の信頼性を検討する事例

電気製品における発熱現象は、製品寿命に影響する大きな要因となっている。ここでは、ラップトップ・コンピュータを例にして、そのマイクロプロセッサの排熱システムの寿命を予測してみよう。課題は、排熱システムを 75°C で連続して動かした場合に 4 年以内に故障する確率を求めることである。この時、ヒートシンクのワイブル分布のパラメータデータは不良データの履歴から求められている。ファン、マイクロプロセッサ、ヒートパイプの寿命データは、部品メーカーの仕様値である。図 3 に示した排熱システムの信頼性のブロック図から、どの部品が不良になってもラップトップ・コンピュータは不具合を生じる。表 1 のデータを使用して、排熱システムの信頼性モデルを分析してみよう。そして、75°C で動かした場合に、4 年で故障する確率を計算してみよう。

表 1 信頼性のデータ

部品名	分布	パラメータ
ファン	指数分布	T=60°C の時 MTTF = 40,000 時間 T=80°C の時 MTTF = 20,000 時間
マイクロプロセッサ	指数分布	T=60°C の時 MTTF = 40,000 時間 T=150°C の時 MTTF = 1,000 時間
ヒートシンク (エポキシ樹脂で固定)	ワイブル分布	m = 2.24 $\eta$ = 25,000 時間
ヒートパイプ	指数分布	MTTF = 10 年

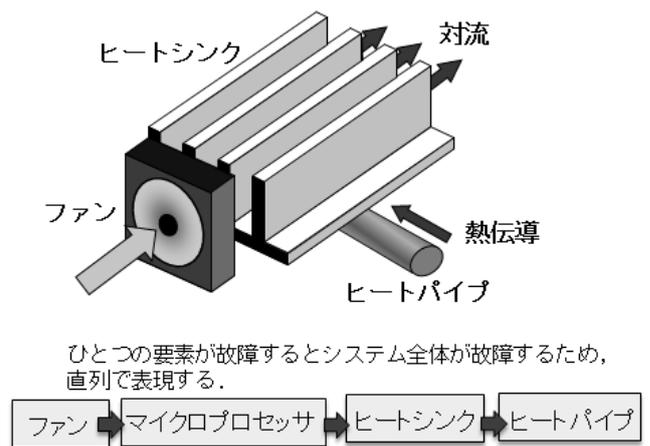
#### 信頼性検討のプロセス



ここで、B20セーフライフとは、 $F(t)$ が20%となる時間のこと。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、実使用状態における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

#### マイクロプロセッサの排熱システム



ひとつの要素が故障するとシステム全体が故障するため、直列で表現する。

図 3 排熱システムの信頼性のブロック図

排熱システムの信頼性のブロック図は、直列となっている。この場合、排熱システム全体の信頼度関数  $R_{SS}(t, T)$  は、式(5)に示すように個々の部品の信頼度関数の積で表される。また、ファンとマイクロプロセッサの信頼度関数は、時間と温度の関数で表される。

$$R_{SS}(t, T) = R_F(t, T) * R_{up}(t, T) * R_{HS}(t) * R_{HP}(t) \quad (5)$$

ヒートシンクとヒートパイプの信頼度関数は温度に独立している。式(1)、式(2)に表1のMTTFデータを代入して、式(6)、式(7)に示す数式を得る。

$$R_{HS}(t) = e^{-(t/25000)^{2.24}} \quad (6)$$

$$R_{HP}(t) = e^{-t/(10*365*24)} = e^{-t/87600} \quad (7)$$

ファンとマイクロプロセッサの信頼性モデルは、温度の関数であり、75°Cの信頼度は直線を補間して求めることができる。計算方法を図4に示す。それぞれの信頼度関数の式は、式(8)、式(9)のようになる。

$$R_F(t, T) = e^{-t/(-1000 \cdot T + 100000)} \quad (8)$$

$$R_{up}(t, T) = e^{-t/(-433.33 \cdot T + 66000)} \quad (9)$$

以上の結果から、排熱システムの信頼度関数の式(5)は、式(10)のように表現できる。

$$R_{SS}(t, T) = e^{-t/(-1000 \cdot T + 100000)} * e^{-t/(-433.33 \cdot T + 66000)} * e^{-(t/25000)^{2.24}} * e^{-t/87600} \quad (10)$$

ここで、75°Cで稼働し、4年以内に故障する確率を求めるために式(10)のTに75°C、tに4年間に相当する35040時間を代入する。

$$R_{SS}(35040, 75) = e^{-1.4} \cdot e^{-1.05} \cdot e^{-2.13} \cdot e^{-0.4}$$

$$R_{SS}(35040, 75) = 0.25 \cdot 0.35 \cdot 0.12 \cdot 0.67$$

$$R_{SS}(35040, 75) = 0.007$$

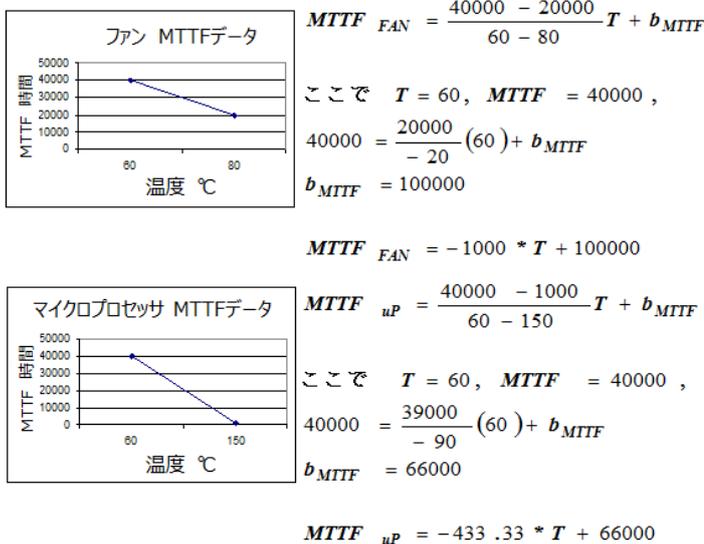


図4 ファンとマイクロプロセッサの信頼度の計算

排熱システムの信頼度関数の値は、0.007 となった。つまり、75°Cで稼働した場合に、0.7%の部品だけが4年以内に故障しないことを意味している。製品としては、4年ではほぼ全てが故障するわけだから、必然的に設計のやり直しが求められることになる。

### 3.2 計算図表を利用してワイブル係数を求める

寿命をもとめるには、実験データからワイブル分布の  $m$  と  $\eta$  を求めればよい。この時、図5に示したワイブル確率紙を用いると、容易に  $m$  と  $\eta$  を求めることができる。  $m$  と  $\eta$  が求まれば、その部品や製品の信頼度関数を得ることができる。結局、前章の計算例で示したように、個々の部品やモジュールの信頼度関数が定義できれば、製品としての信頼性について検証をすることができる。具体的には、信頼性のブロック図を組み替えながら、あるいは仕様の異なる部品に入れ替えて所定の信頼度になるように調整することができるようになる。

### 4. 製品寿命を保証するテスト計画を立てる

製品の寿命試験を実施する場合、故障するまで連続的にチェックすることが物理的に不可能であることが多い。従って、とびとびにチェックする抜き取り検査での判定となる。その場合には、時間を連続変数ではなく、離散変数として扱うことができ、分布もまた離散分布となる。このような少量のサンプルによる可否の判定には、一般に式(11)に示す二項分布を使用した信頼性レベルを併せて表記する。<sup>4)</sup>

$$CL = 1 - \sum_{i=0}^f \frac{n!}{i! \cdot (n-i)!} \cdot (1-R)^i \cdot R^{(n-i)} \quad (11)$$

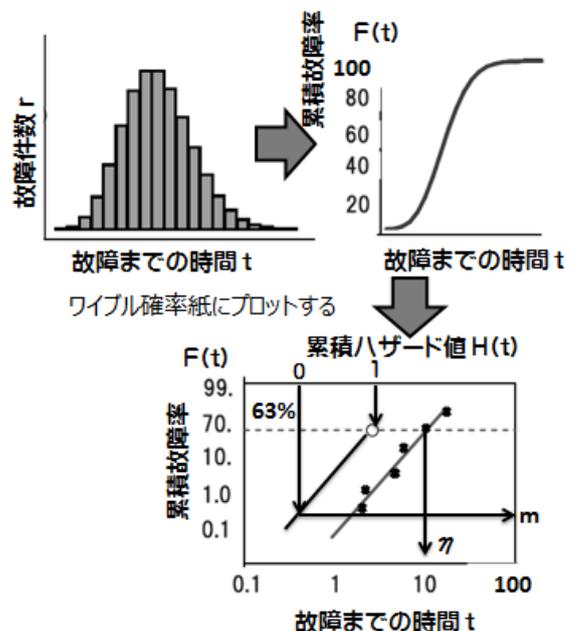


図5 ワイブル確率紙の利用

ここで、CL: Confidence Level 信頼性レベル (0-1)  
 $n$  : 試験個数 ( $n \geq 1$ )  
 $f$  : 許容故障数 ( $0 \leq f < n$ )  
 $R$  : 試験時間  $t$  の信頼度関数 (0-1)

信頼性レベル CL とは、確からしさのことである。信頼度関数  $R$  は、統計的手法により算出した推定値にすぎないので、信頼性レベルが、例えば 60%ならば確からしさが 60%あることを示す。ユニット毎の試験時間  $t$  が限られるため、信頼性のレベルを設定したうえで試験個数  $n$ 、許容故障数  $f$  を推定することが行われる。

#### 4.1 製品の寿命試験を計画するツール

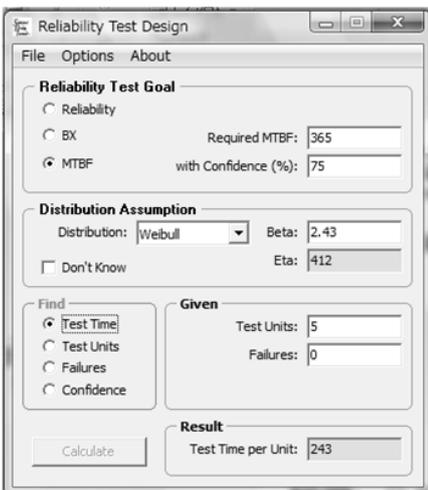
弊社で開発した Reliability Test Design ツールを使用すれば、既定の信頼性を満足させるために行う単一ユニットの寿命試験の必要試験時間、必要試験個数、許容故障数などを容易に算出できる。そして、このツールは、下記の弊社ホームページから無償でダウンロードできる。以下の図 6、図 7、図 8 は、ツールの利用例を示している。

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

図 6 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るものである。

図 7 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るものである。

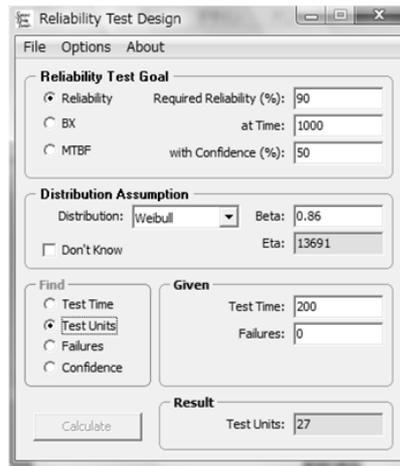
図 8 の例は、目標は 20,000 時間で信頼性レベル 90%として 20%の故障を許容でき、ワイブル係数  $m$  が 0.43 でワイブル分布する。単一ユニットの試験時間は 2,000 時間であり、試験個数を 10,50,100,500 としたときのそれぞれの許容故障数を求めるものである。ここで、ツール上の Beta 値はワイブル係数  $m$  と同じ意味である。



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

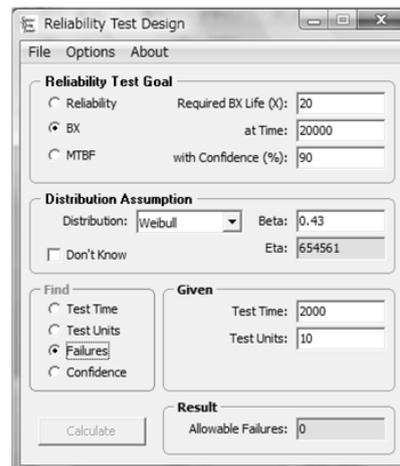
図 6 故障数から試験時間を求める例



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 7 一定試験時間の故障数による試験個数の例



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 8 一定時間内の試験個数での許容故障数の例

## 5. 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、構想設計段階で製品寿命を検証する意味は、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。今後、設計者向けの製品寿命の設定方法や計算ツールが役に立つものと期待している。

### 参考文献

- 1) 経済産業省 消費者庁：「消費生活用製品の重大製品事故に関わる公表について」報道発表資料 (2014),
- 2) Kececioglu, D. B. : Reliability and Life Testing Handbook – Volumes 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) Reliability Engineering eTextbook Library : Life Data Analysis Reference, ReliaSoft Corporation, (1996), 322