

故障を発生させないための 信頼性技術と加速試験

伊藤 貞則 著

SAMPLE

はじめに

If Something Can Go Wrong - It will …… Murphy's 1st Law

(なにか悪くなる可能性があれば、必ずそうなる)

信頼性は「うそ」をつかない。「信頼性は商品とお客様との対話結果」であります。従って信頼性は市場評価の尺度であるとともに顧客の満足度を評価する尺度といえます。お客様の立場になるとあの会社ならいろいろやっているだろうからという安心感がブランドであるはずです。

問題が発生すれば口コミで不評が広がり、ワンパターンの映像が司会者やコメントータの意見とハロー効果になって一日に何回も流れ、土、日になるとまたそれが繰り返されます。このインパクトは極めて大きいものです。

商品は信頼性を売っていること、結果は経営をも左右することを改めて認識しないとけません。

信頼性に関する優れた本はたくさんありますが、設計者が主体的に故障をなくす立場で勉強できる信頼性の本が少なすぎるとの考えで筆者らは1990年に『故障をゼロにする信頼性技術』（日科技連出版社）を世に出しました。その後も筆者は「故障解析と故障物理」「信頼性試験・加速試験」「故障物理特論」などの冊子をまとめてストレスと故障の関係を設計や生産、品質保証に携わっておられる方に説明してきました。それとともに新たな問題と向き合い、解決できた内容を学会で報告してきました。そして今回はこれらを本書にまとめることにした次第です。

本書ではストレスと故障の関連性という立場から、故障の発生を抜本的に防止する方法を説明することになりました。しかし、ストレスと故障の関連性については、なるべく実際の故障事例を中心に説明していますので、本書を読めば現実に困っておられる問題の解決が直ちに得られるとは限りません。その理由は過去の事例とは異なる因子が常に介在しており、同じ局面に遭遇することは少ないためです。しかし本書の内容を十分に理解され、考え方を会得されて、部品や機器の評価に取り入れていただければ、故障の発生防止、信頼性の向上に大いに役立つと信じています。

なお、次の語句は使い分けつつもですが適切でない箇所があるかも知れません。ご容赦をお願いしたいと思います。

商品/製品 高分子/樹脂 銅（日本語）/Cu（化学記号）

また同じ写真や図を何回も使っているところがありますが、説明に必要と考えた次第です。これについてもご容赦をお願いしたいと思います。

目次

はじめに	3
第1章 故障を発生させないための信頼性技術の考え方	13
1 信頼性工学と信頼性保証～使う立場と作る立場の信頼性～	13
2 バスタブカーブと故障率	14
2.1 バスタブカーブと故障の種類	14
2.2 品質の要求レベルのアップと故障率評価の課題	16
3 信頼性は常に脅かされている	18
3.1 製品の軽薄短小化密閉化への課題	18
3.2 商品を取り巻く環境の変化への課題	19
3.3 課題を解決するためには	20
4 故障メカニズム	22
4.1 故障メカニズムと故障の芽	22
4.2 故障/故障モード/故障メカニズム	23
4.3 故障メカニズムの分類と対応	24
4.4 故障メカニズムの各分野共通性	26
4.5 信頼性解析は故障メカニズムを知らないといけない	26
4.6 故障メカニズムは難しいか	26
4.7 故障メカニズムが信頼性保証活動の中心	28
4.8 開発/設変/新規部品採用は故障メカニズムとの戦い	29
5 信頼性保証加速試験と故障の芽解析の進め方	30
第2章 故障メカニズム	35
1 熱ストレス	35
1.1 拘束応力	35
1.2 拡散、変態、軟化	40
1.3 状態変化（融解、蒸発、沸騰、凝縮、凝固）	48
2 湿気ストレス	54
2.1 水の三態	54
2.2 空気中の水分量	56
2.3 結露	57
2.4 水の極性と吸湿/透湿	64

2.5	水溶性	69
3	応力ストレス	74
3.1	不均一応力、応力集中	74
3.2	持続的応力	74
3.3	繰り返し応力	76
3.4	クリープと疲労の組み合わせ	77
3.5	微摺動摩耗	80
4	ガスストレス	83
4.1	製品の外部環境と内部環境	83
4.2	樹脂とガス	84
4.3	高分子の加水分解	91
4.3.1	高温で起こる加水分解	91
4.3.2	常温で発生する加水分解	93
4.4	環境応力割れ	95
4.5	ブリード性	98
4.6	腐食	101
4.6.1	(電気)化学腐食——酸化剤による腐食	101
4.6.2	異種金属接触腐食 (ガルバニック腐食)	103
4.6.3	濃淡電池	105
4.6.4	選択腐食	105
4.6.5	孔食	107
4.7	応力腐食割れ (応力ストレスとガスストレスの組み合わせ。 SCC : Stress Corrsion Cracking)	107
4.8	水素脆性 (応力ストレスとガスストレスの組み合わせ。 HE : Hydrogen Embrittlement)	110
4.9	銀 (Ag) と硫化	113
5	電気ストレス	118
5.1	ジュール熱	118
5.2	耐圧劣化	123
5.3	絶縁劣化	125
5.3.1	電解腐食	126
5.3.2	陰極腐食	128
5.4	電界拡散	130
6	エレクトロケミカルマイグレーションの伸長メカニズムと対策 (Electro-Chemical Migration : ECM)	134
6.1	はじめに	134
6.2	Ag、Cu、SnのECM例	134

6.3	-極からの伸長、+極からの伸長の基本原理	136
6.4	金属イオンの溶出に必要な水分とペア	139
6.5	ECMの伸長形態の電流による変化	144
6.6	ペースト溶剤中で発生する高温ECM	145
7	ウイスカ (Whisker) の伸長メカニズムと対策	149
7.1	はじめに	149
7.2	ウイスカはなぜSnとZnだけか	150
7.3	ウイスカを理解するためのSnの特性	151
7.4	Snウイスカの各種伸長メカニズム	155
7.4.1	粒界に下地金属浸入によるウイスカ	155
7.4.2	腐食(酸化)によるウイスカ	158
7.4.3	温度サイクルウイスカ	158
7.4.4	押圧によるウイスカ	163
7.4.5	Inによるウイスカ伸長メカニズム	163
7.5	亜鉛めっきウイスカ	169
7.5.1	亜鉛めっきはめっき時に圧縮応力が発生する	169
7.5.2	ウイスカ発生の温度依存性	171
7.5.3	めっき時の圧縮応力原因と対策	171
8	無機りん(赤りん)系難燃剤による故障メカニズム	174
8.1	はじめに	174
8.2	赤りんによる難燃剤とは	174
8.3	赤りん難燃剤による故障事例	175
8.4	発生する故障メカニズムの基	176
8.5	成形と無機りん系難燃剤の粒	178
8.6	絶縁劣化から起きる故障メカニズム	178
8.7	ホスフィンガスから起きる故障メカニズム	182
第3章 信頼性保証加速試験		187
1	試験を加速させる考え方	187
1.1	部品材料の寿命判定には機能寿命と特性寿命がある	187
1.2	試験を実施する前に	188
1.3	早く結果を出すことと加速試験	188
1.4	加速させ方の基本の5つ	190
1.5	加速試験で通常使用時を推定するときの組み立て	191
2	加速を決めるストレスと故障メカニズム進展の関係	193
2.1	α 型(増加型)のモデル式を活用した加速評価	194

2.2	β型（最適値型）のモデル式を活用した加速評価	210
2.3	γ型（減少型）のモデル式を活用した加速評価	213
3	試験結果はストレスの組み合わせ方や順序で変わる	216
3.1	加速させるための要素を選ぶ	216
3.2	加速させるため律速過程を選ぶ	217
3.2.1	故障メカニズムをフローで描く	217
3.2.2	律速過程を選ぶ	218
3.3	多種類同時ストレス	219
3.4	多種類順次ストレス	220
3.5	ストレスは全行程を考えること	222
3.6	熱/湿気/振動ストレスの加える順序は	227
3.7	複数の要素のある製品の加速試験	228
3.8	ステップストレス試験	228
4	わからない故障は市場ストレスを参考に決める	231
4.1	市場のストレスを把握すると再現できた例	231
4.2	市場のストレスを無視したため失敗した例	236
5	故障メカニズムのフローを工夫する加速方法	238
5.1	小さいストレスをカットする方法	238
5.2	ストレングスを弱くする方法	238
5.3	ある程度劣化させた試料で試験をする方法	239
5.4	劣化要因を明確にして強化する方法	240
5.5	試験環境を特化させる方法	241
5.6	故障判定を厳しいところに設定	241
5.7	要素による加速	243
6	湿気加速試験	245
6.1	金属の腐食	245
6.2	樹脂と85℃85%環境の意味	246
6.3	樹脂の透湿は蒸気圧法	247
6.4	85℃85%試験のデータが温度試験データによく間違われている例	249
6.5	湿気加速試験の注意事項まとめ	253
6.6	線形累積損傷則の湿気ストレスへの応用	255
6.7	高温高湿試験が加速試験か、耐力試験か、参考試験かの見分け方	256
7	環境変化とサイクル試験	261
7.1	高温通電試験	261
7.2	温度サイクル試験のストレス源には種類がある	261
7.3	温度サイクル試験と熱容量	263
7.4	温湿度サイクル試験	263

7.5 温湿度サイクル試験と熱容量	265
7.6 頻度を高くする方法の注意点	267
7.7 低サイクル疲労	268
おわりに —アイリングモデルが泣いている—	273
著者経歴	275

SAMPLE

第1章 故障を発生させないための信頼性技術の考え方

1 信頼性工学と信頼性保証～使う立場と作る立場の信頼性～

信頼性という言葉は市場品質と考えればよい。生産現場で出来栄を測る「良品率」という言葉がある。その市場版は時間軸を持っている。それを装置の開発段階で数学的に求めようとして始まったのが信頼性工学である。

1950年代に米国が第二次世界大戦の総括をして戦力の向上を検討していたAGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment) 委員会の提唱である。部品を東南アジアに移送すると1/3が壊れた。倉庫で保管して置いたらまた1/3が壊れていた。使えたのは残りの1/3であったという話題があった。当時は電子機器が戦争の道具に使われ出したころで手動からボタン制御に変わり、壊れ方が見えないので問題になっていた。戦争道具は相手より、より多くの台数の稼働が必要なので、事業開始の開発段階でそれを見積もる仕組みを作ることが必要であった。このため信頼性部署を開発部門に設置することを求めている。これを見積もるのには数学的に推定する手段が用いられ、部品を使っているときに壊れる確率である時間関数の故障率の概念が示された。そして信頼性試験と称してそれを求めることや評価することも始まった。一方発注者側の米軍も部品故障の実績の集計から故障率を集大成し、それぞれの部品の故障率に使用負荷や環境負荷などのレベルを加味して足すことで装置の故障率を予測する「MIL-STD-217」を作り納入業者に使用を義務付けた。筆者もこの訳本を全国に届けるために、翻訳作業を改訂版Bからnotice版を含めて最終のF版まで関西電子工業振興センタの信頼性分科会で担当したひとりである。このように装置の必要台数や保守人員の確保など効率良く運営する立場から開発段階で装置の故障率を数学的に求める信頼性工学という仕組みが出来上がった。この信頼性工学については次のようなどりがある。

「……ただし信頼性工学は信頼、不信頼が生じる原因そのものについてはなんら考察することはしない。例えばトランジスタが故障したとき、なぜトランジスタが故障したかとか、故障の原因はどのようなメカニズムであったかとかいうことについてはなんら考察を行わない。これらの問題はその他の学問に任せ、信頼性工学では故障が発生する確率を出発点にして、さらに今後部品なりシステムなりの信頼性の向上を目指すためにはどうすればよいかについて考えていくのである。」

電子部品/機器メーカーの方は異様に思われるだろう。わたしもそうであった。しかし皆さんがトラック50台を使う運送会社の社長だったら同じような発想になるでしょう。すなわち信頼性工学は使う立場での発想であるという認識で理解していただきたい。

この考え方の勉強会は当時の日本でも始まった。関西ではアングルを広げて3つの分科会が設けられた。

第1章 故障を発生させないための信頼性技術の考え方

- ①信頼性の理念、基準、設計法の確立
- ②フィールドデータの収集、解析
- ③試験測定の基準の確立

本来の目的である①の分科会には識者しか集まらず、多くの企業に人気があったのは②③の分科会であった。これは米国から伝わった、「信頼性工学は国家事業的で国がお金を払うのでお金の糸目を付けず高価な部品（例えば金）を使ってでも、また部品メーカーにはスクリーニングをさせてでも、あるいは部品はディレーティングによる使用やデバック、あるいは冗長使用を求めてでも、装置の故障率を減らすこと」を目的とした使う立場の考え方だったのに対し、関西では作る立場の家電メーカーや部品メーカーが多く、「信頼性の体系は理解してても、安い部品（例えば錫）を使って企業利益を得る目的の中でお客様での故障の発生を減らす」ことに注力する必要があったためと考えられる。故障率が半分に下がったがコストは倍というのでは目的を達成できないのである。お客様での故障情報はつかめている。出荷前に工夫して故障要因を潰して、出荷時点でお客様の使用中に故障を発生させないという信頼性を保証しようとする考え方があった。会社のセクションの名称を信頼性保証部と変更された会社もあった。

このように米国で装置を使う立場から考え出された製品の故障率を測る信頼性工学という学問（活動？）は、国家事業と関係ない日本の一般企業の中では信頼性が大切という趣旨を受け継ぎ、ものづくり経営の立場から故障をなくすという信頼性保証活動として根付いていったと考えている。

しかし使う立場と作る立場で故障率に対する考え方は違っても、作る立場側は自社製品の故障率の実績値を常に把握することの大切さと使う立場側に示す必要があることが、基本的なルールであることを忘れてはいけない。

筆者が一企業で故障をなくす立場で励んできた経験談からの持論をここでは記すので、この本は信頼性でも信頼性工学ではなく信頼性保証のための一端の考え方を説明している。

2 バスタブカーブと故障率

2.1 バスタブカーブと故障の種類

信頼性が良いということは故障しないということなので、まず「故障の種類」から入る。信頼性の基本として説明されてきた故障の種類を、大きく3つに分類できる図1のバスタブカーブについて考える。

まず製造不良品が出荷された結果、使用環境で見つかる故障のことを、「Infant Mortality（もともと駄目なもの）」と呼ぶ。とくに電子部品や半導体は出荷検査で不良品の検出ができない項目があったため多く発生するようになり、出荷前のスクリーニングとかデバックでこの不具合品を取り除くことが推奨された。

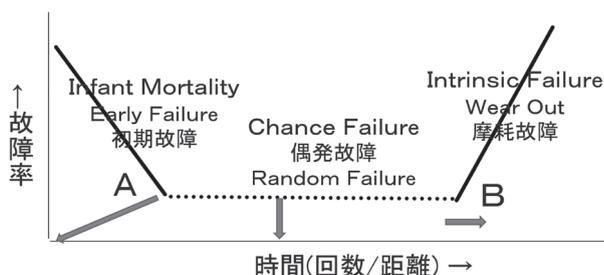


図1 バスタブカーブ

そして図1の右側の、使い続けていると正常品でも発生する機械装置時代からあった寿命を示す「Intrinsic Failure (本来の故障)」。多くはこれら2つに分けられる。

この2つの領域の間が3つ目の区域で、故障の少ない安定期と考えて製品としてはこの間を使うとよいとなっている。しかし電子機器では安定期でも「Chance Failure (偶然の巡り合わせで発生する故障、思いがけず発生する故障)」が発生しますよとなっている。使う立場の信頼性工学としてはこの区域を数学的表現する必要がある。そこで傾向がないのなら全体をグロスのある値と考えて、その区域の平均値として仮定の横線が引かれている。そしてその高さを故障率としている。また、故障率は一定なので、信頼度は数学的に指数関数と仮定して、部品の故障率を足すことによって装置の故障率が計算できることになっている。

「Chance Failure」を訳された方はご苦労されたと思われる。「偶然の巡り合わせで発生する故障」だから熟語にして「偶発故障」となっている。しかし故障は原因があって発生するもので偶発(ぐうはつ)と読むと誤解を招くので「偶(たま)に発生する」と読んだらよい。過去に「偶発した故障なので申し訳ないです」という回答書を受けとったことがある。とんでもない話である。「原因なしに発生することはない。原因と対策を明確に示してほしい」とお願いしたのを覚えている。

また散発的に発生するのではなく、この域で同じ原因による故障が3個以上発生したら数学的な確率の問題ではないとして「流行性故障 (epidemic failure)」と呼び、ペナルティを課す取引もある。

これら3つの故障域はその後わかりやすく「Early Failure」「Random Failure」「Wear Out」と表現されている。これを訳しても「偶発」の語源はないので、もう偶発故障という名称は使わない方がよいと考える。またこの図はアメリカで示されたもので、西洋の風呂底の形をしていることからバスタブカーブ (bath-tub curve) と呼ばれている。

以上で説明したように、故障率を意味するバスタブカーブの底線は使う立場で数学的に処理するために考え出された仮想線なので、作る立場で考えるときは不良品の流出は全部出荷検査で除けているか、気が付いていない劣化メカニズムはないかという認識でデータをチェックすることが大切と思われる。

第1章 故障を発生させないための信頼性技術の考え方

すなわち作る立場の信頼性は、故障は原因があって発生しているのでバスタブカーブの形態に捉われず、寿命までに発生している全ての故障について発生実態を顕在化して、その故障メカニズムをつかんで潰すことが必要である。

日本はもともと檜風呂なので図1のA点をX軸Y軸交点に、A-Bラインを下軸に、風呂を大きくするためにB点を右にと図2のようにすることが大切といわれてきた。まったくその通りで信頼性保証的改善はそうあるべきだ。その合言葉通り、材料の安定と製造技術の革新、設計技術の進歩で初期故障、ランダム故障の減少や寿命の延びなど信頼性指標は大きく改善された。これは部品メーカはじめ多くの企業が作る立場で故障率を確率論で処理するのではなく、原因論で改善することで成し遂げた成果である。この成果から故障は原因論で予防することができるかと考えるのが本書の趣旨である。

2.2 品質の要求レベルのアップと故障率評価の課題

1970年代にRCJが、JIS C 5003（電子部品の故障率試験通則）を用いて試験で故障率がある値以下であることを証明すると認証品に証明するラベルを貼る方法を提案。電子部品の認証制度を全国に広めた結果、信頼性が大切というコンセプトが全国に広がり、各企業が積極的に試験を実施して前述したように自社製品の欠点改善に努めたことから、品質の要求レベルと信頼性レベルは1970年代の3 σ 時代から図3のように加速度的にアップした。

この結果、現在はJIS C 5003による試験で信頼性レベルを証明できなくなっている。例えば1000FIT（Failure Unit, Failure In Time 10^{-9} /時間）の部品を信頼度水準90%で保証するために、総動作時間は 2.3×10^6 個・時間必要なことになる。このことは試験個数2300個・試験時間1000時間、あるいは1000個・2300時間試験して故障が0でなければならない。それで10回の試験を行ったら9回は故障0だということになる。実際はもっともっと低いFIT値が要求されるので試験個数と時間を掛け合わせた数字はもっともっと大きな値となり、故障率の試験による評価は数と時間の壁に遮られてしまっている。

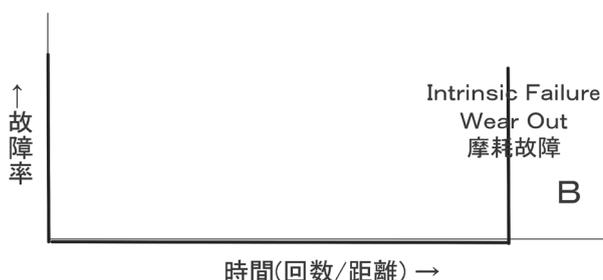


図2 目指すバスタブカーブ