

電子部品の寿命推定に関する要素技術の確立

婦木慎一郎^{*1}, 佐分主税^{*1}, 山田寛之^{*1}

佐藤 真^{*1}, 伊藤 修^{*1}

Elemental Technology Establishment for Life Expectancy of Electronic Component

Shinichiro Fuki^{*1}, Chikara Saburi^{*1}, Hiroyuki Yamada^{*1}, Makoto Sato^{*1}, Osamu Ito^{*1}

要旨

近年、低コスト化技術開発の必要性は高まるばかりであるが、低コスト化と品質保証の両立は固有技術として課題が多い。今回それらの相反するニーズを満足する電子部品の寿命推定に関する要素技術を開発したので以下に報告する。

Abstract

The need for low cost technical development keeps increasing in recent years, but there are many challenges in inherent technology to combine cost reduction and quality assurance.

We report an elemental technology developed to estimate life expectancy of electronic components that satisfy these competing needs.

1. はじめに

電子部品の低コスト化について我々は、

- 1) 流通量によるコスト低減
- 2) 複数の電子部品メーカーの選定
- 3) 複数の製造工場の選定
- 4) 設計上の部品点数削減

など1)～4)を中心に活動推進してきた。今回、昨今の更なる低コスト化要求に 대응していくため、使用する電子部品の性能・寿命とコストの適正化を図ることに着手したので、その概要について報告する。実施したことは、オーバースペックの部品を抽出し、安価な適正スペックの部品に変更することである。

2. 問題の明確化

低コスト化と品質保証を両立した技術を確立するために部品寿命末期の磨耗故障寿命に着目した。オーバースペックの製品が存在する理由は母集団の磨耗故障寿命推定手法を確立していない電子部品メーカーにとっては極端なオーバースペックとすることで車載の磨耗故障寿命を確保する手

法が定着している事に起因する。

そこで本技術の着眼点として母集団の故障分布型から磨耗寿命推定し、お客様の期待寿命との関係を定量化する事により、明らかに過剰と思われる電子部品の寿命を最適化する事で低コスト化の効果を得ようと考えた。

寿命推定の前提条件として、可能な限り母集団の累積故障率の低い範囲を予測する事が必要である。しかし既存技術（ワイブル）などで区間推定を包含した予測可能範囲はせいぜい累積故障率10%以上の範囲であり、今回の前提条件である極めて低い累積故障率の予測範囲との乖離は少なく見積もっても10%以上の乖離がある事がわかった。

3. 既存技術の問題点

既存技術のワイブル解析における課題点について整理した。

図-1の解析は電子部品電解コンデンサCにおける解析例である。(N=200) 累積故障率5.0%以下から区間推定ラインは大幅に開き始めFt0.5%以下では推定不可能な領域である事がわかる。この区間推定ラインは「不完全ベータ関数」により算出されたものであり、その理論解析を実

*1 商品開発部 電子技術室

施したのでその参考文献を図-2に示す。ここから分かった事は不完全ベータ関数はノンパラメトリック理論により構築されているため厳密な故障分布型は考慮されていない事、また順序統計量によるノンパラメトリック解析では①時間の推定に対する当てはまりが悪いのは区間推定が時間tに対する累積故障率範囲を推定していることに起因する、②あらゆる条件に適合させる事の背反としてデータ数の少ない低故障率範囲では解が得られないという二つの仮説を結論付けた。

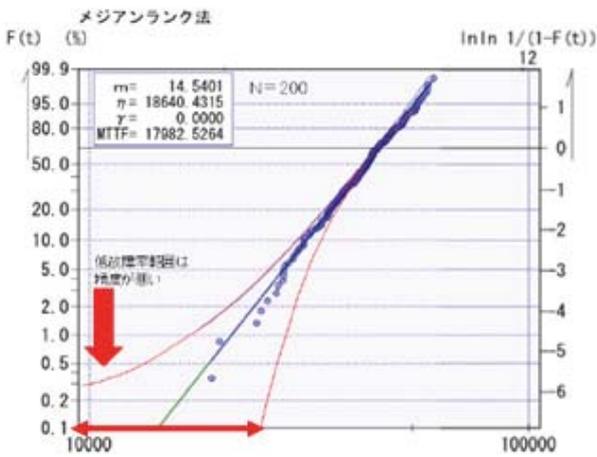


図-1 ワイブル解析 (電子部品 C N = 200)

ノンパラメトリック統計技法

母集団の型に関する情報がなく、しかもそれほどデータ数が大きくない場合、ある特定の母集団分布に依存しない手法が望まれる。このような場合に用いられる手法が、ノンパラメトリック手法であり、母集団の型によらない手法である。

1. ノンパラメトリック手法における不完全ベータ関数

n個の標本を大きさの順に並べる。

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n$$

このとき x_i に対する分布関数の値 $F(x_i)$ を考察する。

そこで、いま確率密度関数 $f(x)$ 、分布関数 $F(x)$ の母集団から、n個の独立な標本 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ を得たとする。小さいほうから第i番目の標本を x_i とする。確率要素は図1から $f(x_i)dx_i$ であり、 x_i はn個から1つ選ばれるのでn通りの選び方がある。そして x_i 以外は $(n-1)$ 個あるが、そのうち x_i 以下のものが $(i-1)$ 個、 x_i 以上のものが $(n-i)$ 個とられる組合せは全部で

$${}^{n-1}C_{i-1} = \frac{(n-1)!}{(i-1)!(n-i)!}$$

である。

以上の考察から、 x_i が区間 $(x_i, x_i + dx_i)$ にはいる確率は、

$$n \cdot \binom{n-1}{i-1} [F(x_i)]^{i-1} \cdot [1-F(x_i)]^{n-i} \cdot f(x_i) dx_i$$

である。

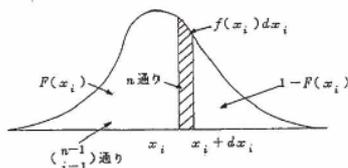


図-2 不完全ベータ関数理論の抜粋¹⁾
(著書「信頼性の分布と統計」より抜粋)

①, ②の仮説から特に低故障率範囲における寿命推定の解をワイブル解析から得ることは不可能と結論付けた。別の切り口としてサンプルサイズを増すことで区間推定範囲をある程度収束させる事が可能であるが、シミュレーションから得られた故障データをワイブル解析した結果、その必要N数は1000以上という結論に至った。(形状パラメータ $m = 14$ 以上)

実使用上 $N = 1000$ 以上の解析は非現実的であることからN増による収束には限界があると判断した。以上の現状把握より開発現場や量産現場で適用できる寿命推定技術を確立するための条件としてN数を少量かつ低故障率範囲推定出来る手法が必要であるとの結論に至った。

4. 開発した技術の概要

以下に開発した技術の概要を示す。

- ・寿命推定に必要なN数 200個
- ・評価期間 4ヶ月以内
- ・目標推定精度 $\pm 30\%$ 以内

従来の技術では困難であった、低故障率範囲 ($F(t) < 1.0\%$) に対してN数少量かつ高精度な推定技術を確立した。

なお寿命推定に必要なN数設定の根拠は量産対応における品質評価数量を逸脱しない範囲の上限を設定した。評価期間も同様の考え方である。

5. 技術開発の説明

5-1. 考え方

電子部品の寿命を評価する場合、一般的には劣化を加速させる試験を実施し、1つ目のサンプルが壊れる時間を寿命と捉える。ただし、得られた結果の解釈には以下の点に注意する必要がある。

- ①サンプル数によって結果が異なる
- ②抜き取りデータであるため、真の寿命とは差異がある。まず、サンプル数によって結果が異なる点を考慮し、寿命の定義を「試験サンプル中の1つ目が壊れる時間」ではなく、「累積故障率が0.1%となる時間」とした。

次に、抜取データであるため真の寿命とは差異がある点については、図-3のように故障時間データのヒストグラムから母集団の故障時間分布を推定することで、寿命の推定値を算出した。

上記の考察を前提に推定式を立案した。なお推定対象となる故障分布系は正規分布とワイブル分布を想定した。今n個の電子部品の耐久試験を

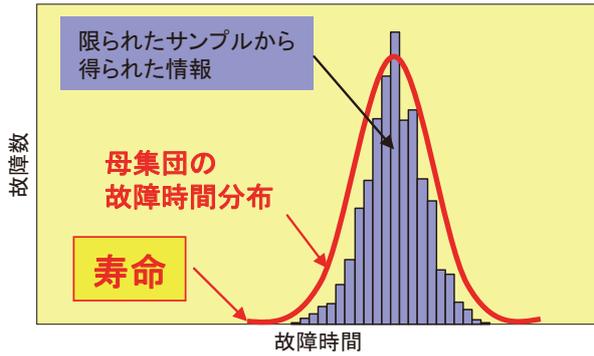


図-3 故障時間データのヒストグラム

実施し、故障時間データ $\{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ が得られたとすると、標本平均、標本分散、不偏分散が定義される。不偏分散式、母集団の区間推定をベースに寿命推定を構築した。
(詳細な導出過程は割愛する)

$$t = \bar{x} - 3.09 E(\sigma_x) \sqrt{\frac{n}{n-1}} - \frac{E(\sigma_x)}{\sqrt{n-1}}$$

5-2. 実施結果

構築した寿命推定式を評価するため、アルミ電解コンデンサで実証検証を行った。検証条件を表-1に示す。サンプル数が1000個であるため、1つ目のサンプルが壊れた時が累積故障率0.1%であり、その時間が寿命の実測値となる。

また、寿命推定値の算出条件を表-2に示す。ここに示すように、ランダムサンプリングによる標本データを用いた寿命推定値の算出を100回繰り返し、その統計量と寿命の実測値から推定誤差を評価した。推定に用いるサンプル数は200個以下、推定誤差は±30%以内を目標値とした。

実証検証での試験項目と測定項目は、測定値が経年劣化するものを選定する必要がある。そこであらかじめ対象部品の故障メカニズムを解析し、壊れ方とその要因を把握する必要がある。

表-1 実証検証条件の抜粋

供試品	アルミ電解コンデンサ ELXZ250ETD101MFB5D 日本ケミコン製
試験項目	105°C 2000時間品
測定パラメータ	静電容量(C) (故障判定基準: 初期値の±20%以上) 損失角の正接(tan δ) (故障判定基準: 初期値の±200%以上)
サンプル数	1000個
測定器	LCRメーター HIOKI 3532-50
測定ケーブル	4端子プローブ 9140
測定信号レベル	0.5Vrms
測定周波数	120Hz
測定者	電子技術室 佐藤

表-2 水準条件

サンプル数	5水準(10、30、50、100、200個)
サンプリング方法	ランダム
サンプリング回数	100回

表-3 にアルミ電解コンデンサの故障メカニズム一覧表を示す。これより静電容量及び tan δ が指数的に経年劣化し、且つ劣化が熱により促進されることが分かったため、高温放置試験にて静電容量・tan δ を測定するよう実験を計画した。

アルミ電解コンデンサの実証実験において、静電容量の変化を図-4に、tan δ の変化を図-5に示す。tan δ 変化率が静電容量変化率よりも先に故障判定基準に到達したことから、今回の実証実験においては tan δ 変化率を寿命推定の対象とした。

表-3 アルミ電解コンデンサの故障メカニズム⁴⁾
(ニチコン(株)アルミ電解コンデンサテクニカルノートから抜粋)

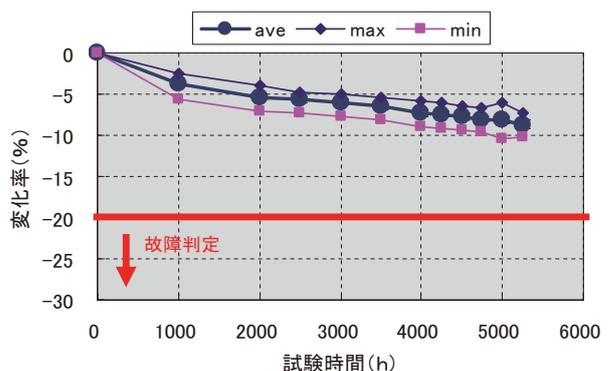
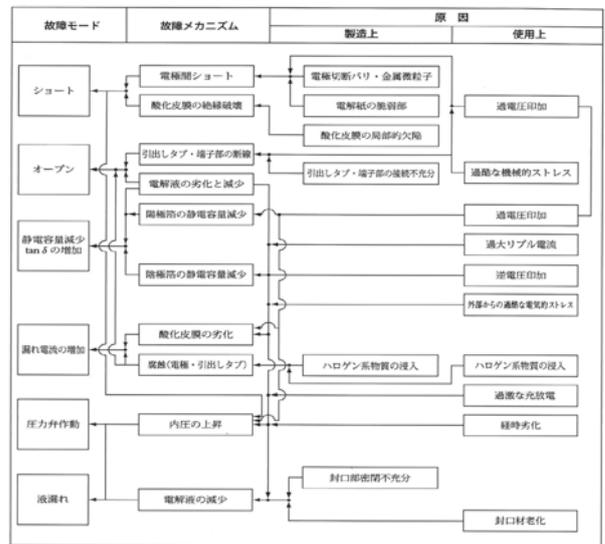


図-4 試験時間と静電容量変化率の関係

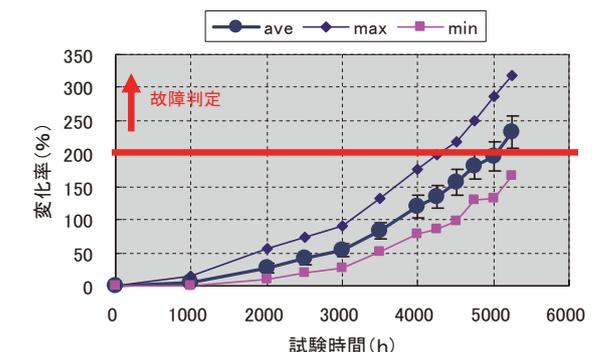


図-5 試験時間と tan δ 変化率の関係

電解コンデンサの故障時間分布を図-6に示す。故障の判定はtan δ変化率が200%となる時間とした。実証実験の結果、寿命は4391hであることがわかった。

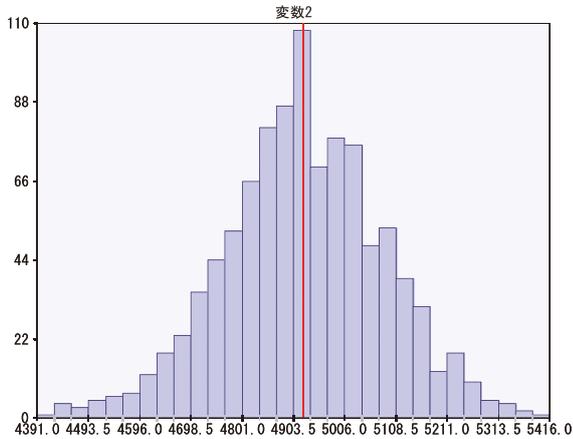


図-6 電解 C の故障分布

表-4 実測結果

項目	値	単位
データ数	1000	個
最小値	4391	h
最大値	5416	h
平均値	4922	h
標準偏差	161	h

確立した寿命推定式に N = 200 個で評価したデータを代入し、得られた推定値と実証実験値を比較した結果、十分目標精度 ± 30% を十分満足する結果を得た。またこの試行を大規模に 32 回繰り返し、予測値と実証値との相関係数を確認したところ 0.89 の係数を得たため、結果は有意であったと判断した。

推定誤差の評価結果を図-7に示す。サンプル数 200 個以下、推定誤差 ± 30% 以内でアルミ電解コンデンサの寿命を推定することができた。

但しこの試行には以下の前提条件に基づくことに注意が必要。

- 電子部品の故障分布がワイブル或いは正規分布、対数正規分布のいずれかであること。

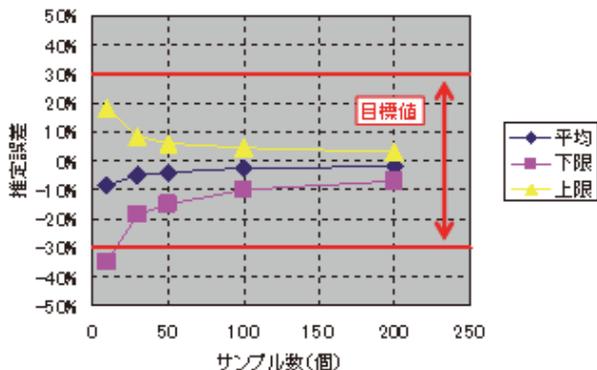


図-7 サンプル数と推定精度

- 寿命評価のデータ種類は完全データを想定した事。
- 寿命評価はロットばらつきを考慮したものであること。

これまでの過程を総括すると低故障率範囲の推定において、お客様の期待寿命に最適な部品を選定すれば、過剰スペックを回避できコストを最適化できると考える (図-8 参照)。

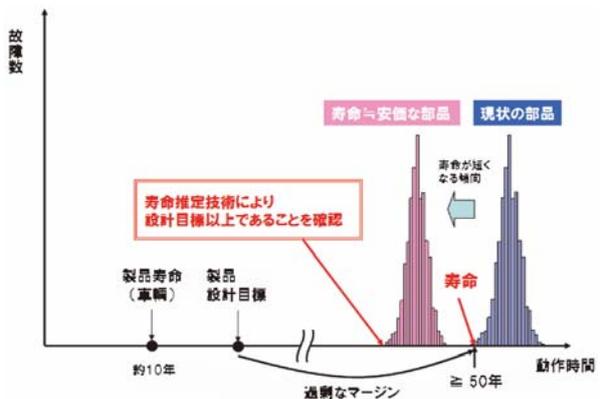


図-8 低コスト化モデル

6. 故障メカニズム解析

6-1. はんだ接合部

以下に電子部品の代表的な故障メカニズムを説明する。

表-5にはんだ接合部の故障メカニズム一覧表を示す。これよりオープン故障の寿命を把握するためには、はんだ熱衝撃試験にて静的繰り返し応力を印加し、クラックを発生させればよい。

表-5 はんだ接合部の故障モード一覧表

故障モード (結果)	故障メカニズム (原因)	発生頻度	故障時期	加速試験										
				初期	備用	廃耗	高温作動	高温放置	高温高湿作動	温度サイクル	はんだ熱衝撃	結露サイクル	振動耐久	落下衝撃
オープン	クラック	繰り返し応力	静的	◎							○◎			
		応力	動的	○									○	
		瞬時応力		△		○								◎
		クリープ		○		○	△	△						
		その他 (助長因子)	ボイド	○	○									
		リフトオフ	△	○										
		ウィッキング	△	○										
不濡れ	過剰加熱	擬似接触 (チップ立ち)		△	○									
		めっき相性		○	○									
		基板吸湿		△	○									
		部品破壊	過剰加熱 (調食われ)		△	○								
		めっき相性		○	○						◎			
ショート	マイグレーション	フラックス残渣+吸湿		◎					◎	○			○	
		ウイスカ	内部応力	△	○				◎	○			○	
		はんだボール	Sn 潤滑	△	○								○	

繰り返し応力の測定はSn-Ag-Cuはんだの場合、応力と温度によって粗大化、分散していくAg3Sn (金属間化合物) 密度が適している。図-9に熱衝撃試験のサイクル数毎のはんだ断面写真を示す。これより応力集中箇所のAg3Sn密度が変化している事が確認できる。

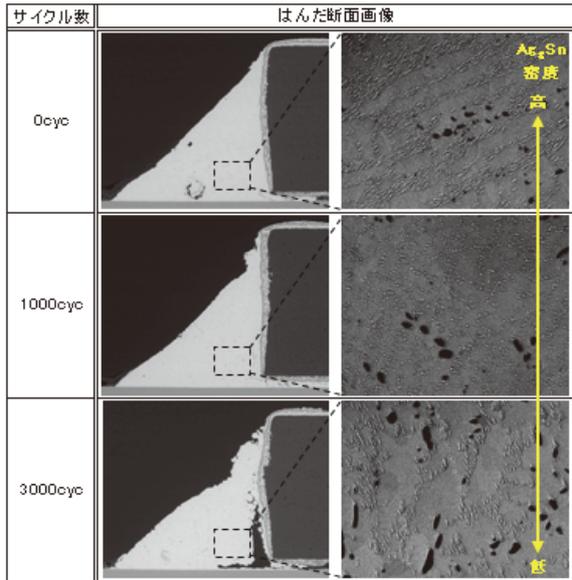


図-9 熱衝撃試験中のはんだ断面写真

6-2. プリント基板

表-6にプリント基板の故障メカニズム一覧表を示す。これよりオープン故障の寿命を把握するためには、はんだ熱衝撃試験にて繰り返し応力を印加し、スルーホール内壁にバレルクラックを発生させればよい。

表-6 プリント基板の故障モード一覧表

故障モード (結果)	故障メカニズム (原因)	発生頻度	故障時期	加速試験									
				初期	進展	最終	高温作動	高温高湿作動	温度サイクル	はんだ熱衝撃	結露サイクル	動的落下衝撃	
オープン	コーナークラック	繰り返し応力	○	○						○	◎		
	その他	スミア懸留		○									
	バレルクラック	繰り返し応力	◎	○							◎		
	基板破壊	瞬時応力	△	○						○			○
	パターン断線	膨れ・ボイド	△	○							○	◎	
ショート	マイグレーション (デンドライト)	レジスト中の有機物	◎	○						◎	○		○
	レジスト剥離 (腐蝕)	レジスト剥離 (腐蝕)	△	○									○
	リーク	吸水	○	○						◎	○		○
	ウイスカ	内部応力	△	○						◎	○		○
腐食	外部応力	コネクタ	△	○						◎	○		○
	塩化・緑化	塩化・緑化	△	○						◎	○		○

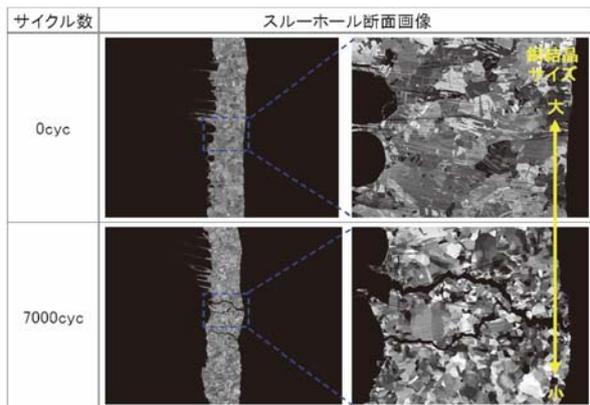


図-10 熱衝撃試験中のスルーホール断面写真

繰り返し応力の測定は、応力と温度によって粗大化していく銅結晶サイズが適している。図-10に熱衝撃試験でのバレルクラック発生前後の銅結晶サイズを示す。これより応力集中箇所の銅結晶サイズが変化している事が確認できる。

7. 今後の進め方

今後低故障率範囲の寿命推定は早期に寿命末期を予測することが可能となるため、今後は開発期間の短縮を視野に入れた技術開発を継続する。

8. まとめ

今回構築した寿命推定技術は前提条件があるものの、低故障率範囲を推定するための新たな切り口になったと考える。今後十分なばらつき検証やN増し検証を重ね推定技術に対する信頼性評価を継続する。

謝辞

本技術開発に関わって頂いた多くの関係者の皆様に深謝致します。

参考文献

- 1) 市田嵩, 鈴木和幸, 信頼性の分布と統計 (1984)
- 2) 立林和夫, 長谷川良子, 手島昌一, 入門 MT システム (2011)
- 3) 鹿沼陽次, 信頼性加速試験の効率的な進め方とその実際 (2006)
- 4) ニチコン(株), アルミ電解コンデンサテクニカルノート (2014)

著者



婦木慎一郎

佐分主税

山田寛之



佐藤 真

伊藤 修