

---

# 劣化データによるリユース対象部品の信頼性試験法

## A Method of Parts Reliability Tests Based on Degradation Data for Reuse Objective Products

太田 周一\*  
Shuuichi OHTA

亀川 幸雄\*\*  
Yukio KAMEGAWA

坂津 務\*\*\*  
Tsutomu SAKATSU

渡辺 英生\*\*\*\*  
Hideo WATANABE

廣野 元久\*\*\*\*\*  
Motohisa Hirono

---

### 要 旨

一般的に、信頼性試験は加速環境下において故障・非故障を判定基準として間欠的観測によって行われている。しかし短期間かつ限定されたサンプル数では十分な信頼性データを得ることは困難である。さらに、リユース対象製品の場合、製品寿命（耐用期間）が従来製品よりも長期にわたり、従来の信頼性試験法ではほとんど有効な信頼性データは得られない。筆者らはかかる事情に鑑み、劣化データを有効活用し、パスモデル、混合効果モデルを適用することにより従来の信頼性試験と同等の期間、サンプル数でリユース部品の信頼性データを得る手法を試みている。本論文は事例を引きそれらの手法の概要とその有効性を示す。

### Abstract

A common reliability data is provided through accelerated tests, and evaluated by GO-NOGO judgement at every interval observations. Then it is hard to acquire a sufficient reliability data under limited test time and specimens. Moreover, A reuse objective product is required longer life time, so it is almost impossible to get a good data according to the traditional method. Therefore, we research to get a reuse reliability information from the degradation data using Path-model and Mixed-effects model within traditional test time and specimens. This paper introduces about its procedures and effectiveness including the example.

---

\* 電装ユニットカンパニー QM推進室  
Quality Management Promotion Department, PC Unit Products Company

\*\* 電子デバイスカンパニー 品質保証部  
Quality Assurance Department, Electronic Device Company

\*\*\* 品質本部 信頼性技術室  
Reliability Engineering office, Quality Management Division

\*\*\*\* 電装ユニットカンパニー 技術統括センター  
Technical Center, PC Unit Products Company

\*\*\*\*\* 品質本部 RICOH Quality推進室  
RICOH Quality Manegement Office, Quality Management Division,

## 1. 背景と目的

### 1-1 背景

#### 1-1-1 リユース製品の信頼性試験の課題

リユース製品評価において寿命予測とその確認は重要なアイテムであり<sup>1)</sup>、Fig.1に示すように耐用期間において所定内の故障率を保持することが求められている<sup>2)</sup>。

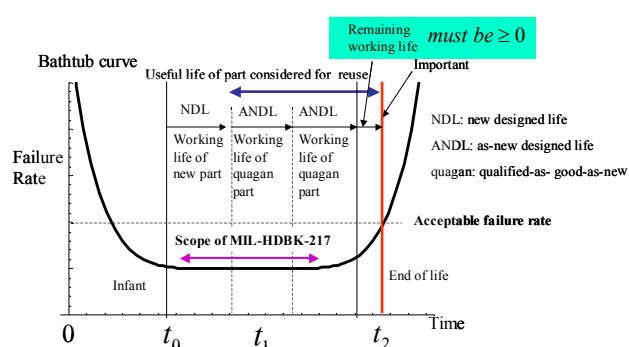


Fig.1 Bathtub curve and reuse.

一方、製品は多くの部品から構成されており、個々の部品の信頼性を把握し、製品に要求される信頼性と調和させる必要がある。リユース製品に使われる部品は高信頼性である場合が多いが、リユース終了までの長い期間について正確な故障率を求めることは困難である場合が多い。以下にそれらの問題点を示す。

- ・ リユース製品に使われる高信頼性部品は寿命が長いので、試験期間中に故障に至らない「打ち切り」データが多数発生し、寿命推定精度を低下させる。
- ・ 試験サンプル数を増やすことによって寿命推定精度を向上させることが可能であるが、費用、試験工数、試験設備の関係から十分な試験時間と試験サンプル数を確保するのは困難である場合が多い。
- ・ 故障の確認は一般にある時間間隔で行われるので故障時間は区間推定値となってしまう。

- ・ 加速試験によって、試験時間短縮が可能であるが、過度なストレス（過度の高温・低温や過度な電圧・電流）を加えた場合、故障モードが変化する恐れがあり、加速試験による時間短縮にも限界がある。

#### 1-1-2 目的

本論文は、前節で述べたリユース製品に使用する部品の信頼性試験の課題を克服する方法として、劣化データに基づく寿命解析法を、事例としてLED光出力劣化解析を用い、その手順を紹介しかつ明確化することを目的としている。

## 2. 技術

### 2-1 従来技術

通常よく行われる信頼性試験は加速試験およびワイブル回帰分析である。Nelson<sup>3)</sup>は電力ケーブルの加速（高）温度における絶縁破壊電圧データにアレニウスモデルを適用し最尤法により絶縁破壊電圧回帰式を求め、任意の条件における寿命を求めている。廣野<sup>4)</sup>は「微細ピッチAl（アルミ）ワイヤの加速寿命試験データの解析」において、アレニウスモデルに主効果と推定されるパラメータ（ワイヤ下断面積）を追加した複合加速モデルを設定し、加速寿命試験データに非線形重回帰分析を使って要因解析および寿命予測を行い、追加パラメータの寿命への影響および実使用環境での寿命を外挿により推定している。

### 2-2 劣化データに基く信頼性解析

従来技術で述べた方法は試験環境および故障が発生した時間情報を用いて解析しているのに対し、着目する特性値の時間的変化（劣化データ）を用いる方法がある<sup>5),6)</sup>。この方法は以下に述べる特徴を有する。

- ・ 予め故障レベル（閾値）を設定しておけば、劣化データを外挿することにより、故障が実際に起こる前のデータから寿命推定が可能である。

- ・ 試験温度条件を2水準以上に設定しておけば活性化エネルギーから加速係数を求めることが可能であり、故障モードが変化しない範囲で任意の使用条件下への寿命換算が可能である。
- ・ 試験時間が同じであれば、故障、非故障から得られた寿命データよりも高精度の寿命推定が可能である。
- ・ 部品メーカーではJISまたは各部品メーカーが規定する条件における信頼性試験を実施しているが、それらの劣化データを活性化エネルギー値とともに入手することにより、製品における該部品の寿命を推定することが可能である。

しかしながら劣化データに基づく信頼性解析は次のような欠点も有する。

- ・ 信頼性試験において特性値の測定を必要とする。
- ・ ワイブル回帰分析のような整備された解析法やデータ解析のためのソフトウェアが少ない。

しかしながら製品レベルの最終信頼性試験においてはエラー発生の有無を確認するのみのGO-NOGO判定試験であるが、ユニットレベルの信頼性試験においては文献<sup>4),7)</sup>に示すように、故障判定のために特性値をモニタリングしており、その情報はすでに存在している。かかる背景により本論文では劣化データによる信頼性解析法の優位性を利用したリユース寿命予測手法を述べるとともに、その具体的手順を紹介する。

## 2-3 劣化モデル

信頼性試験は一般に複数のユニットを用い加速試験環境下で、ある間隔の時間において観察される。得られたデータを表すモデルとして次式で示されるパスモデルがある。パスモデルとは、複数のサンプルについて繰り返し測定を行いながら実験観察を行い、その結果をサンプルごとの時系列線図（パス）によって表す方法であり、ユニット $i$ の時間 $t_j$ における観察されたサンプル劣化 $y_{ij}$ は式(1)で表される<sup>5)</sup>。

$$y_{ij} = D_{ij} + \varepsilon_{ij}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m_i \quad (1)$$

ここで $D_{ij} = D(t_{ij}, \beta_{1i}, \dots, \beta_{ki})$ はユニット $i$ の時間 $t_{ij}$ における実際のパスである。 $\varepsilon_{ij}$ は平均値0、標準偏差 $\sigma_e$ の正規分布関数でありランダム誤差を表す。 $\beta_{1i}, \dots, \beta_{ki}$ は未知パラメータであり、 $i$ 番目のユニットは $k$ 個のパラメータを持つが通常試験される各ユニットは同質であるので共通パラメータ $\beta_1, \dots, \beta_k$ としても大きな誤差は生じない。 $\beta_1, \dots, \beta_k$ の母数 $\Theta_\beta$ は母平均ベクトル $\mu_\beta$ 、分散・共分散行列 $\Sigma_\beta$ 、およびランダム誤差 $\sigma_e$ で表すことができる。これらのパラメータについての尤度関数は式(2)で与えられる。

$$L(\Theta_\beta, \sigma_e | DATA) = \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \prod_{j=1}^{m_i} \frac{1}{\sigma_e} \phi_{nor}(\xi_{ij}) \right] \cdot f_\beta(\beta_{1i}, \dots, \beta_{ki}) d\beta_{1i}, \dots, d\beta_{ki} \quad (2)$$

ここで、 $DATA$ は観測された値、 $\phi_{nor}(\cdot)$ は標準正規分布関数、 $\xi_{ij} = [y_{ij} - D(t_{ij}, \beta_{1i}, \dots, \beta_{ki})] / \sigma_e$ 、

$f(\beta_{1i}, \dots, \beta_{ki} : \Theta_\beta)$ は多変量正規分布の確率密度関数を表す。この尤度関数を最大にするパラメータ値を求め、回帰式を決定し<sup>8)</sup>、さらに得られた回帰式を外挿することによってリユース寿命を推定する。

## 2-4 事例

近年、光源として省エネルギーで寿命が長い発光ダイオード(LED)が広く用いられている。しかしながら従来の白熱灯や蛍光灯に比べ長寿命ではあるがLEDも有限の寿命を持ち、リユースのように長期使用が予想される場合、劣化による光出力の低下が問題となる。本事例ではまだ故障レベルまで至っていないLED信頼性試験の劣化データからその故障時間を推定する。

### 2-4-1 LED光量測定回路および条件

Fig.2にLED信頼性試験を行った回路および条件を示す。加速条件として常温ではあるが定格よりも大きな電流を流すことによって加速係数「3」を得ている。LEDから出射された光は対向するホトダイオードにより光電流に変換され電流・電圧変換回路に接続された電圧計により光出力として計測される。

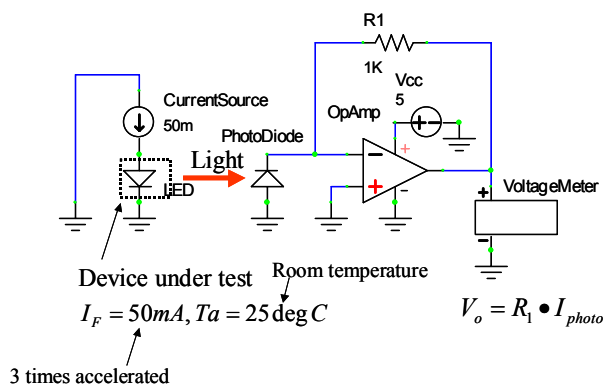


Fig.2 Block Diagram of LED light measurement.

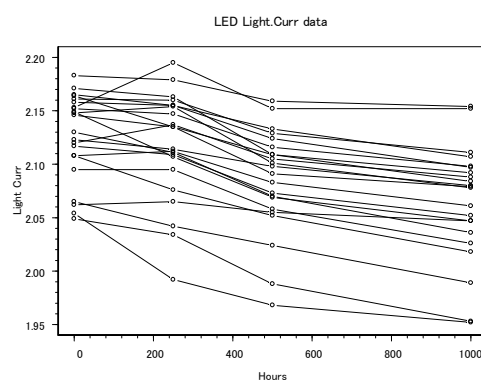


Fig.3 Path model for light current.

## 2-4-2 LED光量測定データ

Table 1にLED光量測定結果を示す。試験は1000時間まで行っている。通常、寿命は光出力が半減する時間で表されるので、これらのサンプルはすべて未故障ということになる。

Table 1 LED light current data.

	0hr	250hr	500hr	1000hr
SampleNo.1	2.065	2.042	2.024	1.989
No.2	2.148	2.154	2.101	2.078
No.3	2.183	2.179	2.159	2.154
No.4	2.146	2.135	2.091	2.079
No.5	2.049	2.034	1.988	1.953
No.6	2.164	2.135	2.109	2.084
No.7	2.108	2.112	2.083	2.061
No.8	2.123	2.114	2.098	2.080
No.9	2.054	1.992	1.968	1.952
No.10	2.120	2.137	2.105	2.088
No.11	2.130	2.111	2.070	2.036
No.12	2.153	2.195	2.152	2.152
No.13	2.095	2.095	2.058	2.026
No.14	2.158	2.155	2.124	2.097
No.15	2.149	2.107	2.069	2.047
No.16	2.165	2.155	2.133	2.107
No.17	2.062	2.065	2.055	2.047
No.18	2.117	2.109	2.073	2.052
No.19	2.161	2.160	2.129	2.111
No.20	2.171	2.163	2.109	2.092
No.21	2.152	2.147	2.116	2.098
No.22	2.108	2.076	2.052	2.018

Unit:mA

## 2-4-3 LED光量測定データのパスモデル表示

Fig.3に得られたデータをパスモデルで表示した結果を示す。時間とともに光量は低下しているがユニットによって若干差があることがわかる。

## 2-4-4 光量測定データのチェック

本手法では劣化データを外挿して寿命推定を行うので、測定データのぶれが影響しやすい。得られたデータの約10%低下に閾値を設定し、劣化データのチェックを行った (Fig.4)。その結果、2本のパスが他のパスに比べてぶれが大きいと判断されることから、この2本のパスデータははずれ値として寿命推定から除外した。

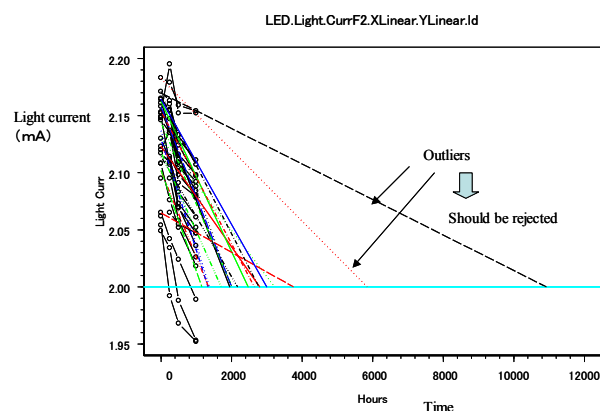


Fig.4 Data check on Path model.

## 2-4-5 パス外挿による寿命時間推定

光電流値が初期値の50%まで低下した時間を寿命としてパスを外挿して閾値と交差する時間を求める。Fig.5にその状態を示す。またTable 2に得られた寿命推定値を示す。

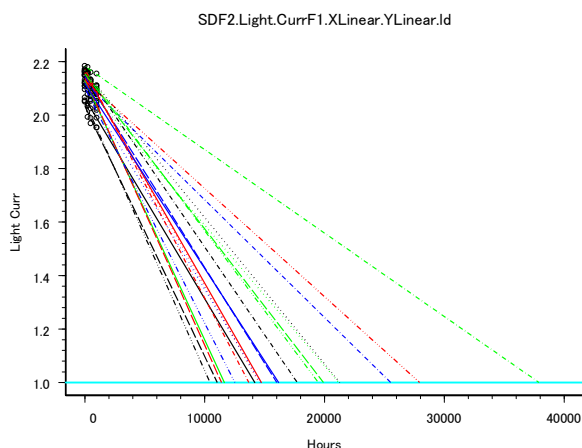


Fig.5 LED life estimation.

Table 2 LED estimated life.

Accelerated(Hours)	at 25deg C(Hours)
14176	42528
14541	43623
37897	113691
16016	48048
10440	31320
14720	44160
21190	63570
25523	76569
11043	33129
27936	83808
11638	34914
14646	43938
17716	53148
11405	34215
19474	58422
16169	48507
21267	63801
13682	41046
19909	59727
12523	37569

これらの推定値 (Accelerated) をヒストグラムに表した結果をFig.6に、各パスと各回帰式との残差をFig.7に示す。

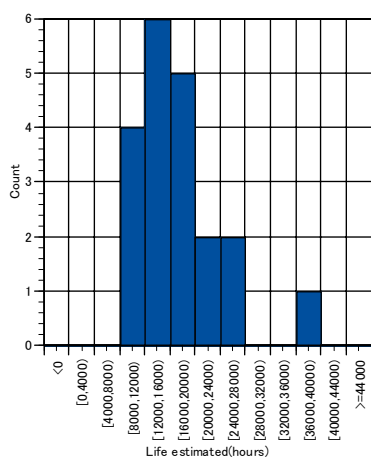


Fig.6 Histogram of estimated life data.

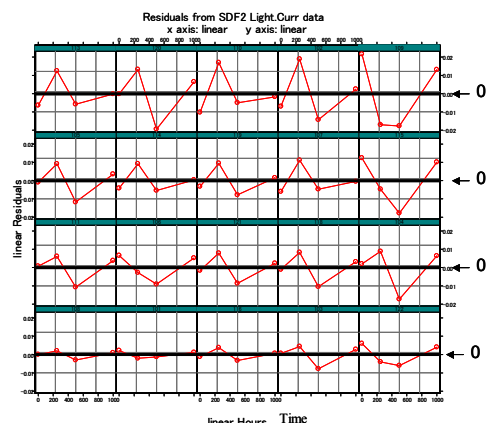


Fig.7 Residuals for each path.

各パスについての残差は振幅の大きさにはばらつきがあるがゼロを中心に分布しており回帰式の傾き、切片が適切に求められていることがわかる。

#### 2-4-6 寿命推定値についての分布形の当てはめ

寿命推定値についてフレッシュ分布、対数正規分布、ワイブル分布を当てはめ、どの分布に近いかを判定した。Table 3にそれらの赤池情報量基準 (A I C) , 最大対数尤度, パラメータの平均 $\mu$ , 標準偏差 $\sigma$ を示す。当てはめを行った3つの分布のうち、フレッシュ分布のA I Cが最も小さくなっており、えられた寿命推定値の分布をもっともよく表す分布と判断される。

Table 3 Fitting for appropriate distributions.

分布形	A I C	最大対数尤度	$\mu$	$\mu$ の標準偏差	$\sigma$	$\sigma$ の標準偏差
フレッシュ	402.2	-199.1	9.565	0.06112	0.2595	0.04635
対数正規	405.0	-200.5	9.717	0.07350	0.3287	0.05197
ワイブル	411.6	-203.8	9.892	0.08714	0.3661	0.05711

Fig.8にフレッシュ分布、Fig.9に対数正規分布およびFig.10にワイブル分布の確率プロットを示す。これらの図からもフレッシュ分布が得られた寿命推定値に最も適合していることを読み取ることができる。

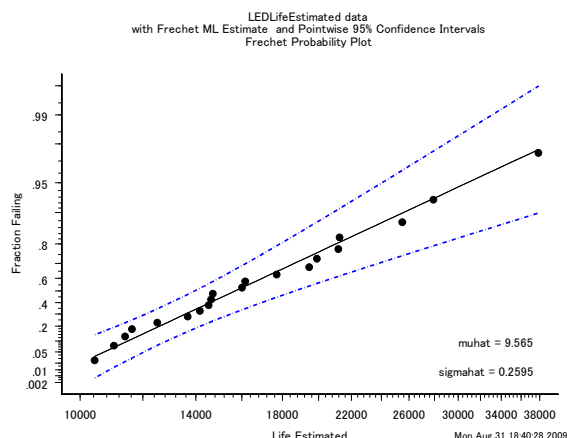


Fig.8 Probability plot for Frechet distribution.

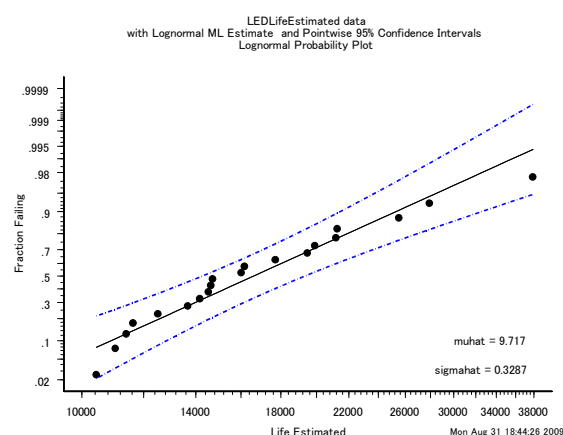


Fig.9 Probability plot for lognormal distribution.

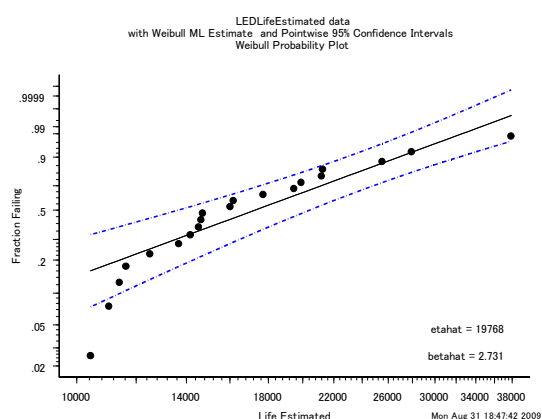


Fig.10 Probability plot for Weibull distribution.

### 3. 成果

劣化データをもとに、それらをパスモデルで表し、混合効果モデルに従ってパラメータ、回帰式を求め、それらを外挿することにより、リユースに必要な長期寿命を推定する手順を、LED光量寿命解析事例に沿って示すことができた。得られた寿命データは閾値を持つ劣化データ分布を表すとされているフレッシュ分布に最も適合していた。

### 4. 今後の展開

今後、劣化データ解析手順、解析ソフトを整備するとともに、ワイブル回帰分析の寿命予測と本論文で示す劣化データによる寿命予測との予測精度、試験期間、試験費用などについて比較事例を蓄積し、それらの優劣を検証すると同時に、さらに効率的なリユース寿命予測手法を探索していきたい。

### 謝辞

本活動を進めるに当たりご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 太田周一，その他：電子回路基板における設計情報を用いた統計的信頼性評価，Ricoh Technical Report No.32, (2006), pp.117-123.
- 2) JIS C 5750-4-1：デペンダビリティ管理—第4部—1部，適用の指針—リユース部品を含む製品のデペンダビリティ，機能性及び試験にかんする要求事項，(2008).
- 3) Nelson W.：Analysis of Performance-Degradation Data from Accelerated Tests, IEEE Transactions on Reliability, Vol.R-30, No.2 (1981).
- 4) 廣野元久：微細ピッチ Al（アルミ）ワイヤの加速寿命試験データの解析，多変量解析実例ハンドブック，朝倉書店，(2002)，pp.51-60.

- 5) Meeker W. Q., L. A. Escobar : Statistical Methods for Reliability Data, John Wiley & Sons, Inc., (1998), pp.316-342, pp.563-581.
- 6) 鈴木和幸, 真木浩司, 横川慎二 : 劣化データを用いた寿命推定法に関する一考察～拡散の故障メカニズムに基づく場合～, 日本信頼性学会誌, Vol.15, No.2, (1993), pp.6-13.
- 7) 坂津務, 高橋昭治, 磯田昌志 : ハンダ接合信頼性評価技術, Ricoh Technical Report No.31, (2005), pp.75-81.
- 8) Pinheiro J. C., D. M. Bates : Mixed-Effects Models in S and S-PLUS, Springer Verlag NewYork, (2000), pp.62-66.