

ステップストレス試験結果に基づく加速モデルの選択

姫路事業所 技術第1部 技術第3課
松岡 敏成、井上 善裕

1. まえがき

電子機器に搭載される電子部品が、ユーザの満足が得られる耐用寿命^(注1)を有しているかどうかを、開発工期の中で調べる必要がある。そのため、実際の使用条件(環境条件や作動条件の組合せ)よりも強いストレスを印加して、市場の使用期間よりも短時間で寿命のばらつき(寿命分布)を調べる加速寿命試験を実施する。

試験条件における寿命分布から実使用における寿命分布を推定するには、ストレスの強さと寿命分布を関数で関連付ける加速モデルが必要になる。加速モデルは、3通り以上の条件に場合分けした加速寿命試験を繰り返し、それぞれの試験で得られた同じ累積故障確率^(注1)に至るまでの試験時間と、ストレス強度の関係を関数化する手順で、試験結果から導き出される。

最近の電子部品は、印加可能なストレス範囲が低下して、極端なストレスを印加できなくなり、故障が顕在化するまでの試験時間が長くなっている。このため、電子部品を使用する立場の機器メーカーで、開発工期の中で3通り以上の条件の試験を繰り返すことができなくなり、加速モデルを調べるのが困難になっている。

このような背景もあり、信頼性試験の目的が、市場の寿命を予測することよりも、試験条件と可否の判断基準を定めた公的な試験規格に適合していることの検査へと変わってきた。そして、故障が顕在化する前に、規定の時間で試験が打ち切られ、寿命を予測したり、加速モデルを検証したりすることなく市場投入される事例も見られるようになってきている。

2. ステップストレス試験の導入

一方、使用用途や使用環境、関連した作動条件が多様化し、用途ごとの品質保証が必要になってきた。このため、限られた試験条件で確認した耐用寿命から、想定される市場の使用用途に応じた耐用寿命を予測することも必要になっている。また、安全上の配慮から、故障が発生した後の挙動を調べる目的で、故障が顕在化するまで試験を継続する必要もでてきている。

これらの課題を解決するために、故障原因から実際に故障が現れるまでの因果関係(故障メカニズム)を変えずに、効率よく故障を顕在化させることができるステップストレス試験が適用されている。ステップストレス試験では、試験時間の開始後、印加するストレスを段階的に強めることで試験の加速性(加速係数)も段階的に高め、一定条件の加速寿命試験を継続するよりも、比較的短時間で、同じメカニズムの故障を顕在化できるようになる。

ステップストレス試験は、ストレスが段階的に強まる試験であることから、試験開始から終了までの一連の試験の中で、いくつかの異なる条件の試験を実現しているといえることができる。このことから、試験結果の解析方法を工夫すれば、加速モデルを調べることができるのではないかと考えられた。そこで、いくつかのステップストレス試験結果から加速モデルを検討したところ、従来の一定条件の加速寿命試験を3条件繰り返して得られる加速モデルと、比較的一致している加速モデルを得ることができた。以下にその内容をまとめる。

第3章において、従来の加速モデルの検討手順を紹介する。第4章では、試験結果から最尤法を使った加速モデルの検討手順を示す。そして第5章で、ステップストレス試験から加速モデルが検討できることの検証結果を示し、第6章において、実際にステップストレス試験から加速モデルを検討した事例を紹介する。

3. 従来の加速モデルの検討手順

表1は、元三菱電機(株)福山製作所の芝野氏から報告

(注1) 耐用寿命、耐用年数 t_{USE}
使用者が期待する使用期間を考慮して、設計段階から作りこむべき寿命。ある時間 t を稼働した時点でも稼働を継続している台数を $N(t)$ として、全出荷台数 $N(0)$ に対する全故障台数 $\{N(0) - N(t)\}$ の割合 $F(t)$ を累積故障確率と呼ぶ。
 $F(t) = \{N(0) - N(t)\} / N(0)$
 $F(t)$ が社会的にも許容される範囲(業界ごとに異なる)の寿命を耐用寿命(または有用寿命)や耐用年数とすることが多い。

された⁽¹⁾セラミックコンデンサのHAST (Highly Accelerated humidity and temperature Stress Test)による寿命分布を調べた結果である。通常の信頼性試験では印加しないであろう素子の限界ギリギリの高い電圧を印加することで、比較的短時間で故障の発生を確認している。

表1. セラミックコンデンサのHAST試験結果

印加電圧 V[V]	故障時間 t[h]	故障数 [個]	累積故障		
			数[個]	確率F(t)	Y(t)
200	1.12	3	3	33.3%	-0.90
	1.52	1	4	44.4%	-0.53
	6.95	3	7	77.8%	0.41
	7.30	1	8	88.9%	0.79
150	7.96	1	1	11.1%	-2.14
	9.59	1	2	22.2%	-1.38
	9.90	1	3	33.3%	-0.90
	11.29	1	4	44.4%	-0.53
	11.69	1	5	55.6%	-0.21
	12.61	1	6	66.7%	0.09
	14.59	1	7	77.8%	0.41
	15.36	1	8	88.9%	0.79
100	9.30	1	1	11.1%	-2.14
	10.53	1	2	22.2%	-1.38
	15.31	1	3	33.3%	-0.90
	16.75	1	4	44.4%	-0.53
	17.10	1	5	55.6%	-0.21
	17.89	1	6	66.7%	0.09
	19.11	1	7	77.8%	0.41
	20.55	1	8	88.9%	0.79
75	14.94	1	1	11.1%	-2.14
	16.69	1	2	22.2%	-1.38
	17.89	1	3	33.3%	-0.90
	19.64	1	4	44.4%	-0.53
	19.78	1	5	55.6%	-0.21
	19.78	1	6	66.7%	0.09
	20.20	1	7	77.8%	0.41
	22.33	1	8	88.9%	0.79

※ F(t)=Σr/{N(0)+1} (平均ランク)

表1の結果をワイブル確率紙^(注2)に打点すると、図1のプロットが得られる。

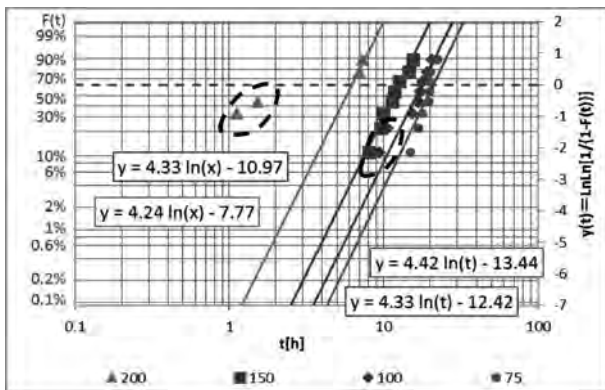


図1. セラミックコンデンサ寿命分布の電圧依存性

図1のプロットにおいて、 $V_B=200[V]$ と $V_B=100[V]$ の打点の中に、他の打点に比べて故障までの時間が短い打点が観られるが(破線の囲み内)、これは試験電圧が過大

となり、瞬間的な過電圧破壊が発生したデータが含まれたためであると考えられる(故障原因と故障現象が他の試料と異なる)。この分析結果から、セラミックコンデンサの寿命分布は、式(1)、式(2)で近似できる。

$$\text{LnLn}[1/\{1-F(t)\}] = m\text{Ln}(t) - mLn\eta \quad (1)$$

$$\eta = \exp\{(mLn\eta)/m\} \quad (2)$$

表2は、式(1)、式(2)と図1の近似式から導かれる特性寿命 η ^(注2)を比較した結果である。

表2. 電極電圧と特性寿命の関係

$V_B[V]$	m	$mLn\eta$	$Ln\eta$	$\eta[h]$
200	4.24	7.77	1.83	6.25
150	4.33	10.97	2.53	12.60
100	4.33	12.42	2.87	17.61
75	4.42	13.44	3.04	20.92

表2の結果から図2が得られる。

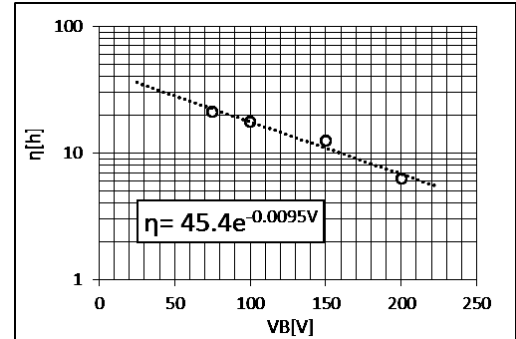


図2. 特性寿命と試験電圧の関係

今回の試験に適用されたセラミックコンデンサの寿命分布は、式(3)で推定することができる。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left\{\frac{t}{45.4\exp(-0.0095V)}\right\}^{4.3}\right] \quad (3)$$

式(3)においては、試験温度や湿度に関して条件の場合分けを行っていないので、印加電圧以外の因子の影響

(注2) ワイブル分布関数 $F(t)=1-\exp[-(t/\eta)^m]$ の両辺の二重対数をとれば、式(1)のような $\text{Ln}(t)$ の一次式に変形できる。横軸が $\text{Ln}(t)$ 、縦軸が $\text{LnLn}[1/\{1-F(t)\}]$ となるように、 t と $F(t)$ の値で打点できる確率紙。 η は $F(t)=1-\exp(-1)$ になる特性寿命を表す尺度パラメータ、 m はプロットの傾きで分布の形を表す形状パラメータ。1より大きい摩耗故障、ちょうど1の偶発故障、1より小さい初期故障を識別できる。

は含んでいない。

4. 最尤推定法による加速モデルの検討手順

ワイブル確率紙を使わずに、表1の試験結果に対して対数尤度を調べて、その値が最大になるように寿命分布や加速モデルのパラメータの最適化を進めることも多くなっている(2,3,4)。

4.1 対数尤度の算出

任意の時間を経過しても故障していない確率は、その時間までの信頼度 $R(t) = 1 - F(t)$ に従う。また、その後の任意の期間 Δt 内で発生する故障は、その期間の故障密度 $f(t)$ の積分値 式(4)に依存している。そのような事象がおきる尤もらしさ(尤度)は式(5)で、対数尤度は式(6)で表される。

$$\Delta F(t) = \int_t^{t+\Delta t} f(t) dt = F(t + \Delta t) - F(t) \quad (4)$$

$$\prod L(t) = \prod [IF(r=0) \text{ then } \{1 - F(t)\} \text{ else } \{\Delta F^r\}] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Ln}[\prod L(t)] &= \sum [\text{Ln}\{L(t)\}] \\ &= \sum [IF(r=0) \text{ then } \{\text{Ln}\{1 - F(t)\}\} \text{ else } \{r \text{Ln}(\Delta F)\}] \end{aligned} \quad (6)$$

4.2 加速モデルの検討

ワイブル確率紙を使った寿命分布の検討結果も参考に、寿命分布として式(7)で表されるワイブル分布を仮定し、加速モデルとして特性寿命が式(8)で表される指数関数モデルを仮定して、それぞれのパラメータ m (形状パラメータ)、 η (尺度パラメータ、特性寿命)、 β (試験結果から得られる印加電圧の比例定数)を最適化することを検討する。

$$F = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\} \quad (7)$$

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp(-\beta \cdot V) \quad (8)$$

表3は、ExcelのSOLVER機能を使って、 m 、 η_0 、 β に仮の値を設定して対数尤度 $\sum \text{Ln}L(t)$ を算出し、その値が最大になるように、それぞれのパラメータを調整して得られる、寿命分布と加速モデルの関係を調べた結果である。この時、過電圧破壊(故障メカニズムが異なる)データの対

数尤度を計算に含めない方が良い。表3の結果をワイブル確率紙に打点すれば、図3の白抜きのプロットが得られる。その寿命分布は式(9)で表される。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left\{\frac{t}{32.7 \exp(-0.0084 \cdot V)}\right\}^{4.4}\right] \quad (9)$$

表3. パラメータの最尤推定結果

N(t) = 8								
					$m =$	4.42		
					$\eta_0 =$	3.27E+01		
					$\beta =$	-0.00838		
					$\sum \text{Ln}L(t) =$	-345.14		
印加電圧 [V]	故障時間 [h]	故障数 [個]	累積故障 [個]	η^{\wedge}	$F^{\wedge}(t)$	$\Delta F(t)$	$\text{Ln}L(t)$	
200	1.12	3	3	7.54	0.02%	0.02%	-25.26	
200	1.52	1	4	7.54	0.06%	0.06%	-29.49	
200	6.95	3	7	7.54	50.27%	50.18%	-4.83	
200	7.90	1	8	7.54	58.01%	7.74%	-20.47	
150	7.96	1	1	11.46	18.08%	18.09%	-1.71	
150	9.59	1	2	11.46	36.60%	18.51%	-3.37	
150	9.90	1	3	11.46	40.73%	4.12%	-9.57	
150	11.29	1	4	11.46	60.74%	20.02%	-6.43	
150	11.69	1	5	11.46	66.36%	5.62%	-14.39	
150	12.61	1	6	11.46	78.24%	11.88%	-12.78	
150	14.59	1	7	11.46	84.49%	16.25%	-12.72	
150	15.36	1	8	11.46	97.39%	2.90%	-28.33	
100	9.30	1	1	17.43	6.05%	6.05%	-2.80	
100	10.53	1	2	17.43	10.26%	4.21%	-6.34	
100	16.31	1	3	17.43	43.14%	32.88%	-3.34	
100	16.75	1	4	17.43	56.83%	13.70%	-7.95	
100	17.10	1	5	17.43	60.18%	3.35%	-16.98	
100	17.89	1	6	17.43	67.48%	7.30%	-15.70	
100	19.11	1	7	17.43	77.73%	10.25%	-15.94	
100	20.55	1	8	17.43	87.39%	9.66%	-18.70	
75	14.94	1	1	21.49	18.22%	18.22%	-1.70	
75	16.69	1	2	21.49	27.97%	9.75%	-4.66	
75	17.89	1	3	21.49	35.94%	7.98%	-7.59	
75	19.64	1	4	21.49	48.98%	13.04%	-8.15	
75	19.78	2	6	21.49	50.04%	1.06%	-27.31	
75	20.20	1	7	21.49	53.26%	3.22%	-24.05	
75	22.33	1	8	21.49	69.43%	16.17%	-14.58	

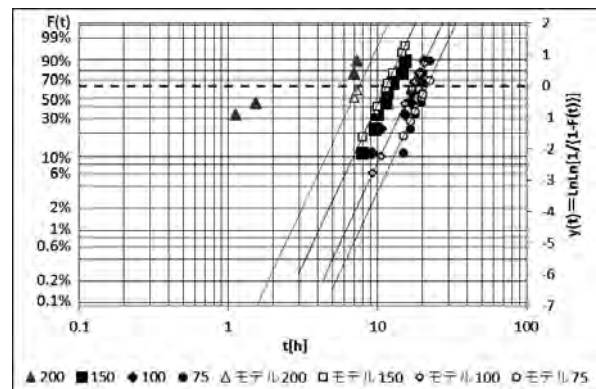


図3. 最尤法による寿命分布モデルの最適化

5. ステップストレス試験

試験の開始から、試験時間の一定のインターバルタイム t_i を経過するごとに、印加するストレスの強さを一定量 ΔV ずつ強めていくステップストレス試験を適用すれば、一定の強さのストレスを印加し続ける加速寿命試験よりも、短時間で故障を顕在化させることができる。ただし、試験時間の

短い領域と長い領域で加速係数 α_i が異なるので、それぞれのインターバルタイムごとに α_i を導き出し、想定する実使用条件における動作時間に換算して、その累積和から実使用における寿命分布を調べる必要がある。この試験条件と実使用時の寿命換算の関係を、図4と図5で示している⁽⁵⁾。

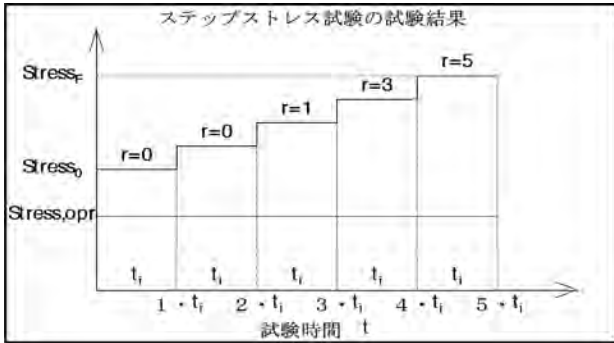


図4. ステップストレス試験の進め方

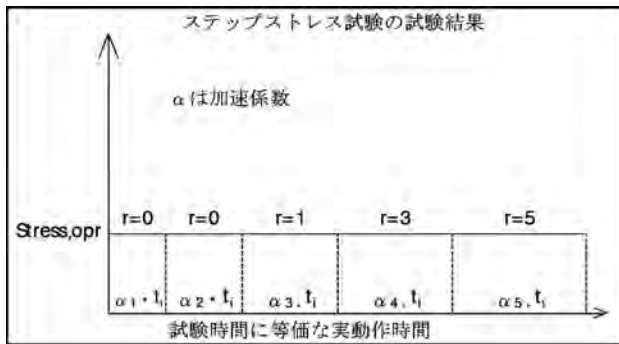


図5. ステップストレス試験結果の実動作換算

表3の結果に対して、スタート電圧 $V_0=25[V]$ 、ステップ電圧 $\Delta V=25[V]$ 、インターバルタイム $t_i=3[h]$ の条件で、ステップストレス試験を実行した場合の試験結果は、式(9)のモデルを適用して換算することで、表4のような試験結果が得られると推定できる。表4の N_s は試験完了ステップサイクル数、 t_f はステップストレス試験における故障までの時間、 t_{end} は最終ステップにおける故障までの時間である。

実際に表4のような試験結果が得られたと仮定して、仮の加速モデルと寿命分布を適用し、対数尤度 $\sum \{ \ln L(t) \}$ を調べ、 $\sum \{ \ln L(t) \}$ が最大になるパラメータを見つけ出すと、表5の結果が得られる。表5の $t_{25}[h]$ は、表4のステップストレスに対して、通電電圧 $V_B=25[V]$ 一定とした場合の表4の t_i の換算時間である。 i は t_{25} を昇順に並べたときの順序を表している。 F^{\wedge} は、各 t_{25} における累積故障確率の推定値 $F(t_{25})$ 。 j は F^{\wedge} を昇順に並べ替えるための番号で、 F_j^{\wedge} は $F(t_{25})$ を昇順に並べ変えた値となっている。 r_j は j 番目のデータの故障数、 ΔF は $F_{j+1}^{\wedge} - F_j^{\wedge}$ で算出できる。 J 番目のデータが現れる尤度 L_j は、 r_j が0ならば $1 - F_j^{\wedge}$ で表され、 r_j が0でないならば $(\Delta F)^{r_j}$ で表される。加速モデルは通電電圧 V_B に依存する特性寿命 η に対するパラメータ β を含む指数関数モデルで、寿命分布は形状パラメータ m を含むワイブル分布で表されることを仮定してパラメータの調整を行っている。

のデータの故障数、 ΔF は $F_{j+1}^{\wedge} - F_j^{\wedge}$ で算出できる。 J 番目のデータが現れる尤度 L_j は、 r_j が0ならば $1 - F_j^{\wedge}$ で表され、 r_j が0でないならば $(\Delta F)^{r_j}$ で表される。加速モデルは通電電圧 V_B に依存する特性寿命 η に対するパラメータ β を含む指数関数モデルで、寿命分布は形状パラメータ m を含むワイブル分布で表されることを仮定してパラメータの調整を行っている。

表4. 表3から推定したステップストレス試験結果

V[stap]	StepStress試験結果						StepStress試験結果				
	50	75	100	125	150	175	200	N_s	t_f	t_{end}	
3.00	1.17							2	3	4.17	1.17
3.00	2.46							2	3	5.46	2.46
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	1.63			6	3	16.63	1.63
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.15			6	3	17.15	2.15
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.15			5	3	14.15	2.15
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.94			6	3	15.94	0.94
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	1.24			6	3	16.24	1.24
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.63			6	3	17.63	2.63
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.03		7	3	18.03	0.03
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.79		7	3	18.79	0.79
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.41		7	3	20.41	2.41
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.04	8	3	21.04	0.04
3.00	3.00	3.00	3.00	0.11				5	3	12.11	0.11
3.00	3.00	3.00	3.00	1.13				5	3	13.13	1.13
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	1.69			6	3	16.69	1.69
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.66			6	3	17.66	2.66
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.90			6	3	17.90	2.90
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.36		7	3	18.36	0.36
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	1.03		7	3	19.03	1.03
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	1.83		7	3	19.83	1.83
3.00	3.00	3.00	3.00	2.57				5	3	14.57	2.57
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.62			6	3	15.62	0.62
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	1.28			6	3	16.28	1.28
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.26			6	3	17.26	2.26
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.33			6	3	17.33	2.33
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.56			6	3	17.56	2.56
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.61		7	3	18.61	0.61

表5. ステップストレス試験に基づく加速モデル

$m=6.19$
 $\eta_0=45.73$
 $\beta=-0.0096$
 $V_0=25$
 $\sum \ln L(t) = -89.307$

$t_{25}[h]$	r_i	η	i	F^{\wedge}	j	F_j^{\wedge}	r_j	ΔF	$\ln L(t)$
4.48	3	35.96	1	0.0002%	1	0.0002%	3	0.0%	-38.700
6.13	1	35.96	2	0.0017%	2	0.0017%	1	0.0%	-11.114
31.10	3	35.96	11	33.4274%	3	1.4281%	1	1.4%	-4.250
32.83	1	35.96	13	43.3409%	4	3.2955%	1	1.9%	-3.981
23.46	1	35.96	5	6.8449%	5	6.8449%	1	3.5%	-3.338
28.80	1	35.96	8	22.3133%	6	8.9580%	1	2.1%	-3.857
29.81	1	35.96	9	26.8423%	7	18.0994%	1	9.1%	-2.392
34.43	1	35.96	17	53.4199%	8	22.3133%	1	4.2%	-3.167
35.76	1	35.96	20	61.9262%	9	26.8423%	1	4.5%	-3.095
38.97	1	35.96	23	80.7116%	10	27.4630%	1	0.6%	-5.082
45.83	1	35.96	26	98.8803%	11	33.4274%	3	6.0%	-8.458
48.54	1	35.96	27	99.8359%	12	34.4574%	1	1.0%	-4.576
18.13	1	35.96	3	1.4281%	13	43.3409%	1	8.9%	-2.421
20.79	1	35.96	4	3.2955%	14	45.4722%	1	2.1%	-3.848
31.29	1	35.96	12	34.4574%	15	47.0366%	2	1.6%	-8.315
34.53	1	35.96	18	54.0513%	16	51.8774%	1	4.8%	-3.028
35.32	1	35.96	19	59.1222%	17	53.4199%	1	1.5%	-4.172
37.16	1	35.96	21	70.5953%	18	54.0513%	1	0.6%	-5.065
40.01	1	35.96	24	85.5787%	19	59.1222%	1	5.1%	2.982
43.39	1	35.96	25	95.9304%	20	61.9262%	1	2.8%	-3.574
24.55	1	35.96	6	8.9580%	21	70.5953%	1	8.7%	-2.445
27.73	1	35.96	7	18.0994%	22	76.8543%	1	6.3%	-2.771
29.94	1	35.96	10	27.4630%	23	80.7116%	1	3.9%	-3.255
33.17	1	35.96	14	45.4722%	24	85.5787%	1	4.9%	-3.023
33.43	2	35.96	15	47.0366%	25	95.9304%	1	10.4%	-2.268
34.19	1	35.96	16	51.8774%	26	98.8803%	1	2.9%	-3.523
38.24	1	35.96	22	76.8543%	27	99.8359%	1	1.0%	-4.651

表5の結果から、印加電圧 $V[V]$ における寿命分布は、式(10)として得られる。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left\{\frac{t}{45.7 \exp(-0.0096 \cdot V)}\right\}^{6.2}\right] \quad (10)$$

表6. 試験電圧ごとの寿命分布の推定値

m= 6.19
η₀= 45.73
β= 0.0096
V₀= 25

Vtest	故障数 [個]	F(t)	Y(t)	i	Γ ^Λ	η ^Λ [h]	t ^Λ [h]
200	3	33.3%	-0.90	1	0.0002%	6.691	5.784
200	1	44.4%	-0.53	2	0.0017%	6.691	6.141
200	3	77.8%	0.41	11	33.4274%	6.691	7.147
200	1	88.9%	0.79	13	43.3409%	6.691	7.598
150	1	11.1%	-2.14	5	6.8449%	10.818	7.660
150	1	22.2%	-1.38	8	22.3133%	10.818	8.657
150	1	33.3%	-0.90	9	26.8423%	10.818	9.351
150	1	44.4%	-0.53	17	53.4199%	10.818	9.929
150	1	55.6%	-0.21	20	61.9262%	10.818	10.459
150	1	66.7%	0.09	23	80.7116%	10.818	10.984
150	1	77.8%	0.41	26	98.8803%	10.818	11.555
150	1	88.9%	0.79	27	99.8359%	10.818	12.284
100	1	11.1%	-2.14	3	1.4281%	17.492	12.385
100	1	22.2%	-1.38	4	3.2955%	17.492	13.996
100	1	33.3%	-0.90	12	34.4574%	17.492	15.120
100	1	44.4%	-0.53	18	54.0513%	17.492	16.054
100	1	55.6%	-0.21	19	59.1222%	17.492	16.910
100	1	66.7%	0.09	21	70.5953%	17.492	17.760
100	1	77.8%	0.41	24	85.5787%	17.492	18.683
100	1	88.9%	0.79	25	95.9304%	17.492	19.862
75	1	11.1%	-2.14	6	8.9580%	22.242	15.748
75	1	22.2%	-1.38	7	18.0994%	22.242	17.797
75	1	33.3%	-0.90	10	27.4630%	22.242	19.226
75	1	44.4%	-0.53	14	45.4722%	22.242	20.414
75	2	66.7%	0.09	15	47.0366%	22.242	22.582
75	1	77.8%	0.41	16	51.8774%	22.242	23.757
75	1	88.9%	0.79	22	76.8543%	22.242	25.256

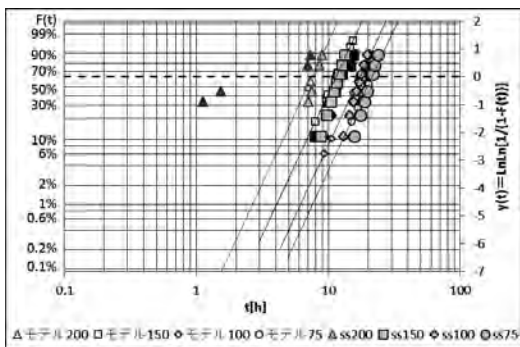


図6. ステップストレス試験結果

式(10)で得られた試験電圧と寿命分布の関係から、表3の試験電圧200[V]、150[V]、100[V]、75[V]で得られたF(t)に相当する故障までの時間t^Λを調べると表6の結果が得られる。t^Λは式(11)に従って算出している。

$$t^{\Lambda} = \exp\left\{\frac{Y(t) + m \ln \eta^{\Lambda}}{m}\right\} \quad (11)$$

$$Y(t) = \ln \ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] \quad (12)$$

もし、今回検討しているステップストレス試験結果から加

速モデルを検討する手順が妥当であれば、表6の結果と表3の結果はほぼ一致しているはずである。図6は図3に表6の結果を重ねてそのことを確認したもので、図1の試験結果や図3の推定モデルにも比較的一致したプロットが得られることが確認できる。

6. パワーデバイスの電圧加速モデル

パワーデバイスの高電圧スクリーニング^(注3)を適用する際に、実使用の何年相当のストレスが印加されているかを検討するために、印加電圧と印加時間に対してステップストレス試験を実施し、印加電圧の寿命分布に対する加速モデルを検討した。

スタート電圧45[V]から55[V]までは5[V]ステップで、55[V]以上は1[V]ステップで通電電圧を段階的に高め、電源端子やI/O端子の電気的特性を測定して故障判定を行っている。表7がステップストレス試験結果である。

表7. パワーデバイスの高電圧試験結果

t _i [msec]	Vstart	Ntest	step	Vstop1	step	Ntest	Vstop2	Nend
50	45	4	5	55				2
50	50	4	5	55	1	4	56	1
50	45	4	5	55	1	4	56	1
50	45	4	5	55	1	4	56	2
50	45	4	5	55	1	4	57	1
50	45	4	5	55	1	4	57	1
50	45	4	5	55	1	4	58	1
50	45	4	5	55	1	4	59	4
50	45	4	5	55	1	4	60	4

表7の結果に対して加速モデルとしてηに式(13)のモデルを仮定し、パラメータのη₀とβを、対数尤度が最大になるように調整した結果が表8と表9である。通電電圧が実動作電圧で一定であることを想定した場合の故障までの時間に換算している。

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp(-\beta \cdot V) \quad (13)$$

(注3) IC素子内部のゲート酸化膜や配線層間の絶縁膜に実使用よりも大きめの電圧ストレスを印加して、製造欠陥などにより絶縁強度が低下した初期故障品を、出荷前に取り除くための処置。時間依存性のある酸化膜破壊などの故障メカニズムに特化することになるが、完成品バーンインよりも、短時間で効率よく初期故障を検出することができる。

表8. 高電圧試験結果の実動作寿命換算

t _{2σ} [h]	上段: Vstep(印加電圧)							
	下段: V ₀ =26[V]に対する加速係数							
	45	50	55	56	57	58	59	60
5.9E+06	4.0E+08	2.7E+10	6.2E+10	1.4E+11	3.3E+11	7.7E+11	1.8E+12	
7.6E+05	3.3E+02	2.2E+04	7.4E+05					
2.4E+06	3.3E+02	2.2E+04	1.5E+06	8.6E+05				
2.4E+06	3.3E+02	2.2E+04	1.5E+06	8.6E+05				
3.2E+06	3.3E+02	2.2E+04	1.5E+06	1.7E+06				
6.9E+06	3.3E+02	2.2E+04	1.5E+06	3.4E+06	2.0E+06			
6.9E+06	3.3E+02	2.2E+04	1.5E+06	3.4E+06	2.0E+06			
6.9E+06	3.3E+02	2.2E+04	1.5E+06	3.4E+06	2.0E+06			
1.7E+07	3.3E+02	2.2E+04	1.5E+06	3.4E+06	7.9E+06	4.6E+06		
7.4E+07	3.3E+02	2.2E+04	1.5E+06	3.4E+06	7.9E+06	1.8E+07	4.3E+07	
1.7E+08	3.3E+02	2.2E+04	1.5E+06	3.4E+06	7.9E+06	1.8E+07	4.3E+07	9.9E+07

表9. 高電圧試験のパラメータ推定結果

m = 0.627
 η₀ = 1.00E+17
 β = -0.841
 V₀ = 26 ΣLnL(t) = -16.152

t _{2σ} [h]	η _{Vo}	F ^α	ΔF	LnL(t)
7.6E+05	2.13E+07	11.65%	11.65%	-2.150
2.4E+06	2.13E+07	22.24%	10.59%	-2.245
2.4E+06	2.13E+07	22.24%	0.00%	-0.251
3.2E+06	2.13E+07	26.32%	4.09%	-3.198
6.9E+06	2.13E+07	38.97%	12.65%	-2.068
6.9E+06	2.13E+07	38.97%	0.00%	-0.494
6.9E+06	2.13E+07	38.97%	0.00%	-0.494
1.7E+07	2.13E+07	58.66%	19.69%	-1.625
7.4E+07	2.13E+07	88.74%	30.08%	-1.201
1.7E+08	2.13E+07	97.58%	8.84%	-2.426

表9の結果から、この高電圧試験の加速モデルとして、式(14)が得られた。

$$\alpha_V = \exp \{0.841 \cdot (V_S - V_0)\} \quad (14)$$

表8の加速係数が非常に大きな値になっている。この式(14)のモデルが適切なのか疑われるところであるが、別ロットで実施したステップストレス試験結果を同様に解析して得られたβの値が0.758であったことから、決して大きくを外した解析結果とは言えないと考えている。

7. むすび

従来、故障を顕在化させることも困難であった一定条件の信頼性試験に対して、ステップストレス試験を適用することで、比較的短時間で同じモードの故障を顕在化させることができるようになる。故障が顕在化して故障データが得られることで、ストレスのステップアップの仕方やインターバル時間のとり方も考慮して、加速モデルを調べることもできた。加速モデルが得られれば、試験結果から各使用環境

ごとの寿命推定も可能になる。

加速モデルを検討するために、尤度の大きさを比較する最尤法で、最適なモデルであることを数値的に判断できるようになる。また、既知のモデルに従うことが自明で、そのモデルに含まれるパラメータを推定する場合でも、一組のステップストレス試験結果が採取できればよいので、大幅な試験効率の改善が期待できる。

ただし、過剰なストレスとなって、故障メカニズムの異なる故障データが混在することで、推定値を誤ることにつながる。故障品の物理解析を通して、同じ故障メカニズムであることを確認しておくことも必要になる。

参考文献

- (1) 芝野照夫, “チップ型セラミックコンデンサの耐湿性能の実力値評価”, 第44回信頼性保全性シンポジウム, Session1-2 (2014)
- (2) 貝瀬徹, “確率過程モデルに基づく劣化データの信頼性解析”, 電子情報通信学会技術研究報告, IEICE Technical Report, 21~24 (2010)
- (3) 松岡敏成, “最尤推定法に基づくセラミックコンデンサの電圧加速モデルの選択”, 電子情報通信学会技術研究報告, IEICE Technical Report, pp.7~14 (2014)
- (4) 松岡敏成, “最尤推定法を使った製造条件範囲の最適化”, 電子情報通信学会技術研究報告, IEICE Technical Report (2016)
- (5) Luis A. Escobar and William Q. Meeker, “A Review of Accelerated Test Models, Statistical Science”, Vol. 21, No. 4, 552~577 (2006)

執筆者紹介



松岡 敏成 マツオカ トシナリ
 1985年入社。主に品質管理や信頼性管理のための統計的データ解析の応用技術開発に従事。現在、姫路事業所技術第1部技術第3課。



井上 善裕 イノウエ ヨシヒロ
 1992年入社。主に半導体デバイスの信頼性試験技術開発に従事。現在、姫路事業所技術第1部技術第3課。