FTAを活用した故障解析精度の 向上による加速試験開発モデルの 研究と半導体センサーへの応用*

堤 伸 豊** 西 田 修 身***

Studies on Methodology for Developing Accelerated Testing by Precise Analysis of Failures Utilizing FTA, and its Application to Semiconductor Sensors

By Nobutoyo Tsutsumi and Osami Nishida

Along with the evolution of electronics, sensors are widely used in vessels and vehicles making operations safe and comfortable. Different from other electronic components, sensors are, however, used in harsh environments and sometimes conventional testing is not sufficient enough to evaluate their reliability.

This report presents a study where FTA and existing information from design, production and fields are effectively used to find factors affecting the failure quickly, effectively and accurately without redundant experiments and analysis. In addition, newly developed FMFC, and comprehensive recurrence experiment methods are proposed to find correct failure mechanism. Through these processes, we expect to develop accelerated testing with smaller yet accurate experiments.

Finally, we verified the effects of the aforementioned method by successfully applying it to the thermistor temperature sensors.

1. はじめに

近年、エレクトロニクスの高度化に伴い、センサーが船舶や車両の安全性及び快適性など広い範囲で使用されている。しかし、これらは一般の電子部品と異なり厳しい環境下で用いられることが多く⁽¹⁾⁽²⁾従来の試験法では十分な信頼性評価ができない場合がある。

この場合適切な加速試験法の開発が必要であるが、的確な故障メカニズムの解明が基本となる。しかし、故障メカニズムの解明には多くの知識と経験を要し分析的な才能と、緻密な性格及び最後まで頑張る忍耐と冷静さを持ち、勘は働かすが事実に忠実であることなどが必要であり、設計や実験担当技術者でも故障解析の経験の少ない人は原因究明の糸

口となる事実を見逃す事があるとも言われている⁽³⁾。

このような観点から本論文ではFTAを中心に故障関連情報を整理し、故障要因の抽出と故障メカニズムの解明に至るプロセスのモデル化と実証、及び故障メカニズムに基づく加速試験開発の方法論を提示する。第2章では故障解析、故障メカニズムの解明から信頼性の改善に到る全プロセスを整理し、第3章ではFTA活用による故障関連情報の有効利用と故障要因の抽出、及び故障のモデル化とモデルの精度向上のためのFMFCの開発、更にそれを確定に近づけるための総合的な再現実験(CRT)について提案する。第4章では前章で得られた故障モデルから経済的に加速試験の設計開発を進める方法を明らかにし、加速係数の求め方のツールとしてのワイブル確率紙の利用と図式による加速式の求め方について説明する。最後に、第5章でこれらの手法を半導体温度センサーの故障解析及び加速試験法の開発に応用し、その有効性を検証した。

*原稿受付 平成13年12月5日
**正会員 松下電器産業株式会社 大阪府門真市松生町1番6号
***正会員 神戸商船大学 神戸市東灘区深江南町五丁目1番1号

2. 故障解析から信頼性の改善に到るプロセスの整理

故障解析から信頼性の改善に到る活動は固有技術に依存する部分が多く、製品固有の具体的な事例の紹介はあるが(図1)⁽⁴⁾、汎用的なプロセスについての説明は少ない。

岩崎⁽⁵⁾は再現実験を強調した図2の手順を提案している。確かに、再現実験は故障メカニズム解明のプロセスの重要な部分ではあるが、再現実験が成功し

ても故障メカニズムの解明に到らぬ事も考えられる。

例えばハイブリッドICで半導体チップがセラミック基板上にダイボンディングされ、チップと基板上の配線がワイヤボンディングにより接続されて樹脂封止された製品を考える。

今、樹脂、金線、セラミック間の熱膨張係数差による熱歪みのために断線故障が発生したとしよう。

X線透視装置で断線を確認した段階で再現実験に移った場合、再現実験が成功したにも拘わらず正しい故障メカニズムの解明に到らない例も含めて3つのケースが考えられる。その模式図を図3に示す。即ち最悪の場合故障の再発を2回繰り返した後に適切な対応がされた事になり、その間の損失は計り知れないものと予測される。このような事態を招かないため、FTAを用いた調査に重点を置いた方法を提案する。

即ち、調査の段階でFTAを実施すればSEMレベルで観察するなどの確認法が考えられ、その状態が、溶断か、破断か、傷かを明確に判断する事が可能になり、従って再現実験以降の対応が適切となり再発の防止が可能になる。また、故障メカニズムの解明から正しい加速試験法の開発ができることがわかる。その関係を図4に示す。

3. FTAの活用による故障関連情報の有効利用、故障要因の抽出及びFMFC・CRTによる故障のモデル化と精度の向上

故障が発生した場合それに関連する情報は既にかなりの数存在している。従ってそれらを有効に活用し、故障メカニズムの解明のために補足しなければならない情報のみを実験や解析調査で入手する事にすれば無駄な重複実験をすることなく短期間で故障メカニズムを解明する事が可能にな

図1 半導体故障解析の手順例

図2 故障解析プロセスの例

故障発生⇒故障解析⇒モデル設定⇒再現実験⇒信頼性改善⇒信頼性評価⇒改善品出荷⇒市場データ追跡

ケース 1	断線市場 故障	X線透視 断線確認	過電流での 熔断と想定	過電圧印 加で再現	Xi+Diの 追加	過電圧印加 断線確認	対策品とし て市場出荷	市場故障発生 推移変わらず
ケース 2	断線市場 故障	X線透視 断線確認	作業中の傷 起因と想定	短時間過 負荷再現	作業管理と 目視検査	無傷品短時間 過負荷故障零	対策品とし て市場出荷	市場故障発生 推移変わらず
ケース 3	断線市場 故障	X線透視 断線確認	熱歪起因の 断線と想定	熱衝撃試 験で再現	バッファコー ーディング	熱衝撃試験 断線確認	対策品とし て市場出荷	市場故障発生 零を追跡確認

⇒信頼性改善完了

図3 故障解析プロセス(故障再発)の例

図4 改善された故障メカニズム解明のモデル

り効率的である。

既存の情報としては表1に示す設計から市場に到る相当数のものが考えられ、それらの有効活用により効率化と精度の向上が図られることは容易に想像できよう。

一方、FTAは対象とする事象について論理記号を用いて、その発生の経過をさかのぼって樹形図に展開し、発生経路及び発生原因、発生確率を解析する技法であり⁽⁶⁾、故障のメカニズムを求めるのに適している。即ち、故障の原因を発生経路に従って論理記号で結合して行き、表1から既存の必要なデータを割付け、不足なデータについては実験、分析調査等により補充し完成させる。その上でトップ事象(対象とする故障)に関係のある経路を太線で明らかにし故障メカニズムを求めて行く。

表1 既存の主な故障関連情報

ステップ	故障関連情報
調査・企画	市場調査データ 顧客要求事項 関連法規
設計・試作	部材仕様書 信頼性試験データ 設計仕様書 故障解析データ FMEA/FTA 技術文献 TGR/TGW 技術規格 DR レポート 専門家の助言
生産・販売	初期流動管理データ 工程 FMEA/FTA、検査データ 管理試験及び故障解析データ 工程不良及び故障解析データ 仕入先品質データ 品質会議資料
流通・市場	流通環境・使用実態調査資料 市場不良の推移 苦情データ 苦情回答書

TGR:Things Gone Right report

TGW:Things Gone Wrong report

例えば第2章で述べたワイヤ断線故障にこの方法を適用すると図5になり、分析の結果

この太線の部分に故障メカニズムが存在する事がわかる。即ち、故障のモデルは製品に、温度サイクルが加わり熱膨張係数差による応力歪みが繰返しワイヤに印加されて、破断を発生させ断線に到る事になる。

一方、モデルの予測精度をあげるためフローの左側に市場で予測されるストレスを、右側に実験・調査で得られた証拠を示したフローチャート(Failure Modeling Flow Chart), FMFCを開発し活用する(5.3項参照)。その上でモデルを立証するための総合的な再現実験(Comprehensive Recurrence Test:以下CRTと略記)で故障のモデルを検証しモデルの精度を上げる事が可能になる(5.4項参照)。

4. 故障モデルに基づく加速試験の設計と加速係数の求め方及び加速式

故障モデルが立証され故障メカニズムが明確になると、それを検出する加速試験の方法が予測され設計される。この場合、設計要因と環境要因を明確に区分する。

前述のワイヤ断線故障に関し、図5で導かれた

図5 ワイヤ断線のF T図

故障モデルを想定した加速試験の設計と加速係数の求め方について説明する。例えばMIL-STD-202Fの熱衝撃試験⁽⁹⁾が試験目的の趣旨から適切な案として考えられる。今、実使用温度範囲を40℃ ~ -10℃とし150℃まで加速可能とする。加速試験の設計としては、マイナス側は加速への影響度が少ないとして高温側のみ25℃間隔でストレスを軽減し実使用状態との加速性を求めるよう設計する。

今、この試験期間中では75℃以下では故障が発生しなかったものとし、その結果が図6のようにワイブル確率紙上に得られたものとする。

その形状パラメータ m と平均故障寿命MTTFを表2に示す。

図6及び表2からは実使用環境でのMTTFは予測出来ないので、加速式を求める工夫をする。即ちどの試験でも $m \approx 1.5$ と同じ値であるので $F(t)$ のどの値であっても加速係数は変わらない。従って寿命関数 $L(T)$ と温度 T の関係を直線で作図する事を検討する。 L の値としてMTTFを選んでも良いので、表2のMTTFを用いる。この場合は図7に示すように $\ln L(T)$ と T に直線関係が得られるので

$$\ln L(T) = a - bT \quad (1)$$

の直線が得られ、実験から定数 a, b を計算する事により加速式

$$L(T) = 1.72 \times 10^6 e^{-0.063T} \quad (2)$$

図6 ワイブルプロット

表2 熱衝撃試験結果

	150℃ ~ -10℃	125℃ ~ -10℃	100℃ ~ -10℃
m	1.48	1.50	1.52
MTTF(時間)	135.5	722.4	3160.5

図7 作図による加速式求め方の事例

が得られる。従って加速係数 α は $\alpha = L(\text{市場}) / L(\text{加速試験})$ により求めることができる。

5. 半導体温度センサーへの適用による加速試験開発モデル有効性の確認と検証

前章までに考察した、FTAの活用による故障関連情報の有効利用による故障のモデル化からFMFCとCRTによるモデルの精度の向上、及びそれらをもとにした加速試験の設計開発に到る迄のプロセスの有効性の検証と効果の確認を半導体温度センサー加速試験の開発で実証した。その内容を以下に示す。

このセンサーは従来65℃95%RHの耐湿性試験で信頼性が確認され出荷されたものであるが、市場で故障が発生したためこの評価方法が適切でない

図8 センサーの構造

表3 FT図の検証(要因の絞り込み)

故障	番号	項目	検証内容	参考図表
抵抗値増加	23	電極剥離	i)抵抗値の増加と電極間容量及びtanδに相関があることから電極剥離が予測される。	図10
	32	素子の化学的劣化	ii) 抵抗値が大幅に増加した素子は材質がもろくなっており剥離しやすい。	写真1,写真2
	42	半田の食われ	iii) 銀がハンダに食われており電極剥離の進行が予測できる。	図11
	47	材料間膨張係数の差	iv) 材料間の熱膨張係数が大きく異なっており電極剥離が予想される。 サーミスタ : $7.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ハンダ : $24.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ⁽¹⁰⁾ エポキシA : $82.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	
	61	呼吸作用による水分の浸入 ⁽¹¹⁾	v) ラジフロテストで水分のパスが認められる。	写真3

図9 センサー抵抗値変化のFTA図

ことが考えられ、新しい加速試験の開発が必要となったものである。

この場合、既に設計から市場に到るまで多くの故障に関連する情報が得られており、前述の研究内容をそのまま適用して成功したもので、その内容を上記考察の手順に従って説明する。

5.1 センサーの構成と故障モード

センサーは $0.5 \times 0.5 \times 0.25\text{mm}$ のサーミスタチップの両面に銀電極を焼き付け、リード線を半田付けし、エポキシ樹脂を塗布した素子に平行ビニール線を半田付けし更にエポキシ樹脂で保護したものであり、構造を図8に示す。

故障モードは抵抗値の初期値に対する変化で抵抗値が減少するものと増加するものがありその幅は変化率が5%~90%と広い範囲で変化していた。

5.2 FTAの実施

センサー抵抗値の変化をトップ事象としてFT図を展開したのが図9である。設計、工程及び市場から得られたデーターをFT図に記入し、追加が必要なものについては実験、分析などにより補った。

FT図のそれぞれの枝について検証し要因を絞り込んで行った内容の事例の一部を表3にまとめた。同様の検証によりトップ事象に関係ある要因系を図9に太線で示した。

5.3 故障のモデル化

FTAで求めた太線部の要因系により故障のモデル化を行った。得られた故障モデルを図12に示す。

図12において、左側の欄は製品にかかるストレス、即ち商品を取り巻く環境であり、右側の欄は故障メカニズムを実証するための実験及び分析を

図10 温湿度サイクル試験による電極剥離現象の確認

写真1 良品の断面図

写真2 $\Delta R > 0$ 故障品の断面図

含む情報である。

これにより故障モデルの確認・立証が可能となる。

これをFMFC(Failure Modeling Flow Chart)と名付け、故障モデル明確化のツールとして活用した。

5.4 モデル確定のための総合的再現実験(CRT)

上述の分析により故障モデルの確度はかなり高

いものと思われるが検証のために第3章で述べた総合的な再現実験を図12にもとづいて実施する。即ち、電極劣化が少なくイオン伝導の影響が大であればセンサー抵抗値が減少し、その逆で抵抗値が増大するわけであるからそれを再現する試料として図13に示すように、サーミスターチップには

図11 XMAスペクトル

写真3 ラジフロテストによる水分のパス

んだ付けを施さないガラス封止サーミスタ温度センサーを用意した。

封止部に隙間が出来るまでヒートショックで強

制劣化させ、温湿度サイクルを加える実験をした。この場合、水分は浸入するが電極部分の接触は保てるので図12より抵抗値は減少するはずである。

図12 故障のモデル化と精度の向上 (FMFC)

表6 分散分析の結果

要 因	S・S	df	ms	Fo
T(温度)	18	1	18	6.7
H(湿度)	578	1	578	214.1**
V(電圧)	8	1	8	3.0
T×H	2654	1	2654	983.0**
e	8	3	2.7	
計	3266	7	—	—

加速係数は「等しい累積百分比に達するまでの時間の比率」⁽⁶⁾と定義されておりF(t)が同じ値に到達する市場と加速試験での時間の比となる。この場合形状パラメータmが両者で等しく2.2であるため、

加速係数 $=t_{\text{field}}/t_{\text{test}}=\eta_{\text{field}}/\eta_{\text{test}}=105$ が得られた。

6 おわりに

本研究で提案した手法を半導体温度センサ、サーミスタの加速試験法の設計開発に適用する事によって次の事が確認できた。

1. FTAと既存のデータの有効活用により、重複実験・解析を避ける事ができ、効率的、経済的しかも短期間に故障メカニズム関連要因の把握ができた。
2. 故障モデルをチャート方式にしセンサーが使われる環境条件を左側に、立証した実験・解析、調査の内容を右側に配置するFMFCの導入で故障モデル推定の精度をあげる事ができた。
3. 故障モデルを確定する総合的な再現実験(CRT)によりモデルを確定する事で加速試験の設計を容易にした。
4. 故障モデルが確定したことで小規模な直交表(L₈)の使用でも精度の良い加速試験の開発を、例えば精度が悪いために(L₁₆)を用いる場合に比べ1/2以下の期間で経済的に達成できた。
5. ワイブル確率紙を効果的に使い、形状パラメータmが等しい事から加速係数 α は、 $\alpha=\eta_{\text{市場}}/\eta_{\text{加速}}$ から105の値が得られた。

今回の実験では温度と湿度の交互作用の影響が大きく両者を分離できないため本研究で提案した

図15 加速試験と市場故障の発生推移

方法で加速式を求める事ができなかった。単一ストレスによる加速式の事例は次の機会に紹介したい。また複合ストレスからの加速式の研究は今後の課題として取組んで行きたい。

参考文献

- (1) W.L.Winterbottom (1994) "The Automotive Environment: An Electronic Packaging Reliability Change", AMD-Vol. 195
- (2) 高橋幸雄"先端技術を支えるセンサー技術の概観(2000)" 日本船用機関学会誌 第35巻第10号
- (3) 信頼性管理便覧編集委員会編(1985)「品質保証のための信頼性管理便覧」、日本規格協会
- (4) 小山健、松本平八(1994)：「信頼性技術入門」、日本規格協会
- (5) 岩崎三郎(1937)：「品質保証と故障解析」「第17回品質管理シンポジウム」
- (6) JIS Z 8115：「信頼性用語」(1981)、日本規格協会
- (7) 大澤直(1983)「電子材料のはんだ付技術」、工業調査会
- (8) 鳥井宗朝、香川裕彦、京谷靖宏(1988)：「VLSI用高信頼性封止材」「松下電工技報」、41-46 [37]
- (9) (社)関西電子工業振興センター規格情報分科会202WG監修(1988)：「MIL-STD-202F電子・電気部品の試験法」、日本規格協会
- (10) 竹本正、佐藤子平(1991)：「高信頼度マイクロソルダリング技術」、工業調査会
- (11) 越川清重(1988)：「電子部品の信頼性試験」、日科技連