

## 電子デバイス・モジュールの最新評価技術

## The latest evaluation technology of electronic devices and modules

今井 康雄

Yasuo IMAI

## 概 要

電子デバイスは微細化と高機能化により評価・解析が困難になる一方、故障による社会への影響は益々、増加している。本稿では、当社の解析実績から故障原因としてESD (Electro-Static Discharge:静電気放電) 故障が多くなっていることから、デバイス組立工程内での静電気管理を確立することでESD 障害を低減させる「組立工程のESD対策」技術を紹介し、またデバイス選定の手段として、電子デバイス製造者が良品として市場に出荷した試料をきめ細かく解析し、当社の35年間以上に蓄積されたデータベースと対比することによって、将来起こる恐れのある故障を未然に防ぐ数値化された良品構造解析を紹介する。このデバイス診断技術は人間に例えれば、外見が健康者でも血糖値や血圧などが高い人を数値によって診断し、アラームを鳴らす方法と同じである。さらに、最近話題のLED (Light Emitting Diode) 照明の過渡熱特性評価を実施し、放熱特性に各社の特長が有ることを報告する。

## 1. はじめに

OKIエンジニアリングでは毎年3,000件以上の故障解析・評価を第三者の立場 (IECQ独立試験所) で実施している。ここ数年、LED・パワーデバイス・センサー・MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) など車載用電子デバイスの解析が多くなり、特にこの分野に強みのある外国製品の故障解析依頼が増加している。電子デバイスは技術の進歩により微細化と高集積化が急速に進み、ESD (Electro-Static Discharge:静電気放電) 障害が多くなる傾向にある(図1参照)

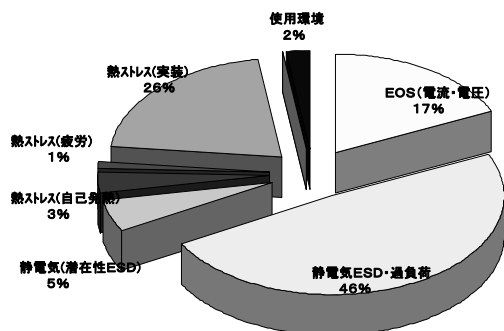


図1 集積回路の外的要因故障の内訳 (2009年)

また一概にESD障害といっても微細化領域で生じる故障現象はチップ表面を観察しただけでは故障部位を特定することが困難となっている。したがって本稿では、電子デバイスの組立工程における管理手法と電子デバイス製造会社が良品と云って市場に出荷した試料をきめ細かく解析し、数値化することによって将来起こるであろう障害を未然に防ぐ技術を紹介する。さらに、最近話題のLED照明について過渡熱特性評価による放熱特性について紹介する。

## 2. ESD 障害対策

半導体デバイスでは、ESDサージの流入により、直接損傷あるいは搭載システムの誤動作発生から二次的破壊を生じるため、ESD障害は開発当初より問題となっていた。デバイス性能、実装密度、組立生産性を飛躍的に向上させるためデバイス構造、組立工程が改良されるのに伴いESD保護回路、保護構造も改良されてきたが、素子自体のESD耐性脆弱化によりESD障害を撲滅できず、今日に至っている。古くて新しい障害である。当社は、電子デバイス、電子機器組立工程でのESD障害対策お

よびモジュール、電子機器のESD耐性改善対策の技術支援を提供しており、ここでは対策支援の基礎となる再現実験を紹介する。

## 2.1 電子デバイス組立工程ESD損傷防止対策

表1は、電子デバイスにおけるESD障害の分類である。組立工程でのESD損傷は、①外部帯電物体からのESD損傷、②帯電デバイスからのESD損傷が想定される。IEC、JEDEC、JEITA等公的試験規格として規定されているコンポーネントレベルESD試験の方法は、①に対応するHBM ( Human Body Model) 試験、MM (Machine Model) 試験、②に対応する直接帯電あるいは誘導帯電でのCDM (Charged Device Model) 試験である。

表1 電子デバイスのESD障害分類

①	外部静電気帯電物体からの ESD 損傷 HBM (Human Body Model) / MM (Machine Model)
②	帯電デバイスからの ESD 損傷 CDM (Charged Device Model)
③	電子機器搭載デバイスへの ESD 損傷、誤動作 System Level ESD Model

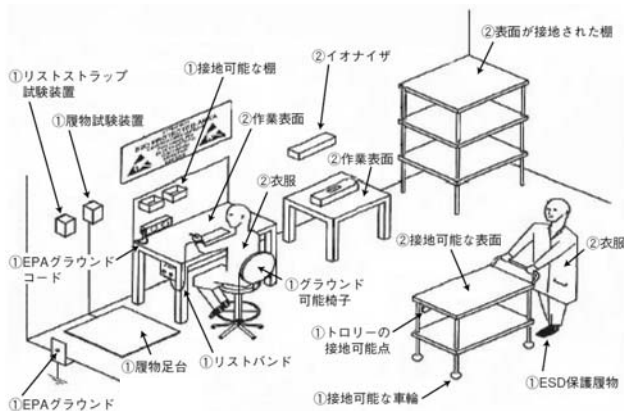


図2 ESDSを取扱うEPA設定

開発されたデバイスは、通常これらのESD試験にて量産の可否が判断される。したがって、量産製品は各耐性クラスに合致するよう保護回路が設計、搭載され、ESD耐性が確認されている。またこれら静電気敏感性電子デバイス (ESDS: Electrostatic Discharge Sensitive Devices) は IEC61340-5-1にて規定されているEPA (Electrostatic Protect Area: 静電気保護区域) の中で取り扱うこ

とが普及してきている。図2に示される対策の中で、①に対しては接地対策、②に対しては放電防止、除電対策の例が記載されている<sup>1)</sup>。

しかし、電子デバイス組立工程では、近年になってもESD故障が多数を占めている。当社では、組立工程ESD障害防止対策を支援する目的で、工程発生故障の損傷部位がどの種類のESDによって発生するものか、あらゆる方法を用いて再現実験を行う。工程発生故障と同じ部位を損傷させるESDサージを特定できれば、その種のESDサージが工程内でデバイスに流入している箇所があるはずで、工程対策およびデバイス保護回路対策を提案できることになる。図3は組立工程において発生していたフィールド酸化膜の損傷をESD試験により再現したものである。

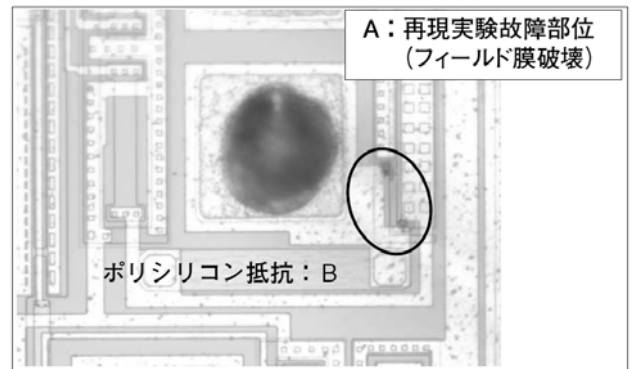


図3 組立工程ESD損傷を再現した損傷箇所

HBM試験、MM試験での損傷はポリシリコン抵抗溶断、CDM試験での損傷はポリシリコン抵抗下酸化膜破壊であった。再現されたESD放電波形は、立上時間がCDM試験のように速く、放電時間はHBM試験の半分程度とCDM試験よりも遥かに長いことが確認された。組立工程を調査した結果、半導体デバイス等、電子部品を搭載したプリント基板が保護プラスチックケースに帯電している静電気によって誘導され、ケーブルをプリント基板に差し込むと、同様なESDサージが流れ込み、同じ損傷が発生することを見出した。実際の組立工程では、典型的なHBM現象でもCDM現象でもないESD障害が発生している場合があり、一般的な静電気工程対策を実施しても完全にESD障害を防止できないこともある。

## 2.2 システムレベルESD試験でのデバイス損傷

一般の電子機器ESD試験はIEC61000-4-2、車載搭載電子機器ESD試験はISO-10605/JASO D010-00に規定され、システムレベルESD試験と呼ばれて

いる。コンポーネントレベルESD試験とは、被試験機器（システム）の状態、放電電流波形、試験電圧値等で相違がある。しかし近年、システムに搭載される部品点数が急速に減少したため、基板、モジュールにてシステムレベルESD試験による耐性確認が要求され、搭載電子デバイスの損傷が問題となってきた。

図4はESDガンを用いてLCDパネルのシステムレベルESD試験（IEC61000-4-2）と障害メカニズムを示す。シャーシへESD放電すると、シャーシから電子デバイス搭載プリント基板へ二次放電が発生、電子デバイスの電源ラインにノイズが流入し、ラッチアップが発生、デバイス（ドライバIC）が損傷したものである（表1 ③参照）。

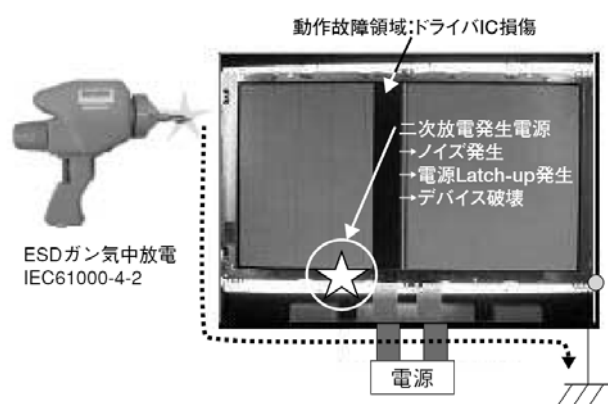


図4 LCDパネルモジュールへのシステムレベルESD試験（IEC610004-2）の適用

このようにモジュール等へのシステムレベルESD試験による損傷は、搭載電子デバイスがESD起因の電源ノイズ等によりラッチアップを引き起こすことが主な原因と考えられる<sup>2)</sup>。このシステムレベルESD耐性は、二次放電を起こし難くすることにより改善されるが、この他にも搭載される電子デバイスの電源ノイズによるラッチアップ耐性値を向上させることによって、ある程度改善できる（図5、図6）。

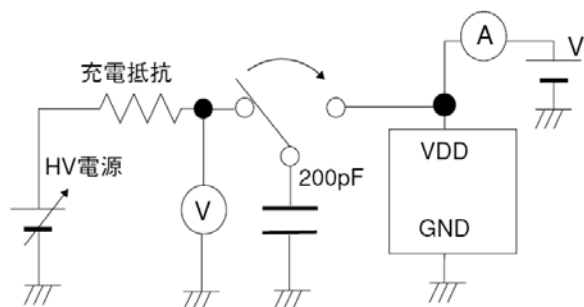


図5電子デバイスにおける電源ノイズラッチアップ評価回路

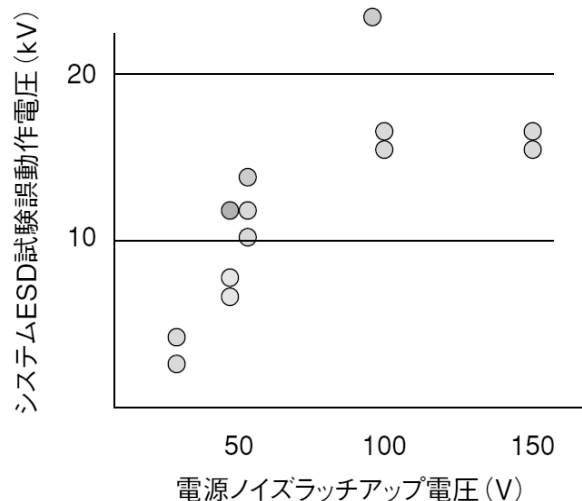


図6 システムレベルESD試験誤動作動作電圧と電源ノイズラッチアップ電圧との関係

当社では、電子デバイス組立工程におけるESD損傷防止の工程改善提案、電子デバイス耐性改善技術支援を実施している。一方、システムレベルESD損傷改良に対しては、電源のノイズラッチアップ耐性評価手法等を用いたデバイス、モジュールESD耐性改善を提案している。

### 3. 良品構造解析(LSIプロセス診断)

高信頼性が要求されるシステムでは、高信頼性電子デバイスを更に選別して使用する必要がある。当社は、新たなデバイスの選別法としてLSIプロセス診断を提案している。ここではLSIプロセス診断と、それを応用したMEMS、太陽電池の評価手法を紹介する。LSIプロセス診断システム<sup>3) 4)</sup>はデバイスの品質を評価するための5つの検査項目とその観察技術、観察手順を用い、それにより得られたデータを40の評価項目とその診断基準に照らして診断、採点を行い、ランク付けすることにより電子デバイスの選別を行うための診断システムであり、取得した大量のデータを効率的に診断、管理、運用を可能とするためのデータベースシステムも用意されている。

#### 3.1 LSIプロセス診断の検査項目と解析手順

LSIプロセス診断の検査項目は表2に示すとおり、5項目ある。この検査項目により電子デバイスのウェハプロセスからアセンブリプロセスまで、一通りの品質確認が実施できるように、各検査項目には検査条件、検査ポイントが細かく定義されている。LSIプロセス診断は微細構造の検査を行うため、サ

ンプリング条件等により異なった結果とならないように、定量的な診断を行うことが重要なポイントである。これらの条件設定は、過去に行ってきた故障解析、構造解析のノウハウの蓄積によるところが大きい。更に約100品種のデバイスについてLSIプロセス診断を行い決定している。また、解析は、積層構造、設計ルールの不明なデバイスについても適正な検査が可能となるように、図7に示す解析手順に従い進められる。

表2 LSIプロセス診断の検査項目

Nb.	検査項目	検査設備	検査対象	検出される欠陥要因
1	開封処理検査	光学顕微鏡	パッケージ状態	変色、クラック、ボイド 異物の存在など
		X-ray	アソビリ工程異常	
2	表面検査	光学顕微鏡	パッシベーション メタライゼーション	変色、クラック、ボイド、 異物の存在など
3	界面解析検査	光学顕微鏡 走査型電子顕微鏡	PV膜、層間絶縁膜 メタライゼーション、基板	ボイド、異物、マスク不良、 精密な膜厚制御、互層ビッチ、 ゲートサイズ制御
4	断面SEM検査	走査型電子顕微鏡	積層構造 配線、ゲート電極、コンタクト等	ボイド、異物、パレ- 構造不良(膜厚、ゲート長、 コンタクト径)
5	断面TEM検査	透過型電子顕微鏡	積層構造、組成 ゲート酸化膜、コンタクトなど	ボイド、異物、析出、構造不良 (ゲート酸化膜厚)

### 3.3 検出欠陥の分類とデバイスのランク付け

検出された欠陥は、欠陥の種類、位置、大きさにより電子デバイスの故障を引き起こす危険性が異なるため、表3のような減点区分により採点を行っている。この減点区分は我々独自の基準であるが、評価項目と同様に我々が過去に行った電子デバイスの故障解析、良品解析の事例等約5,000件および各種文献例等から導きだしている。

表3 検出欠陥の分類と減点区分

欠陥の分類	状態	減点	備考
重度欠陥	致命的	-1000	故障を誘発する可能性大
中度欠陥	限定的	-300~-100	故障を誘発する可能性中
軽度欠陥	保留	-30~-10	故障を誘発する可能性小

電子デバイスのランク付けと採点結果は、持ち点1000点からの減点法で、減点区分に規定された欠陥の種類、検出部位、大きさごとにそれぞれ減点されることで決定され、6段階の品質ランク付けと合否判定結果で示される。

### 3.4 LSIプロセス診断の実例

図8は断面TEM(透過型電子顕微鏡—Transmission Electron Microscope)検査により検出されたコンタクトプラグ接続の欠陥でルーズコンタクトとなっている。このデバイスは、デバイスメーカーから良品として出荷されたものであるが、実使用時にオープン故障を引き起こす可能性が極めて高いものと判断され、減点区分では重度欠陥となり-1,000点の減点でFailure判定となる。LSIプロセス診断を行うことでこのようなデバイスを事前に検出し、排除することが可能となる<sup>4)</sup>。

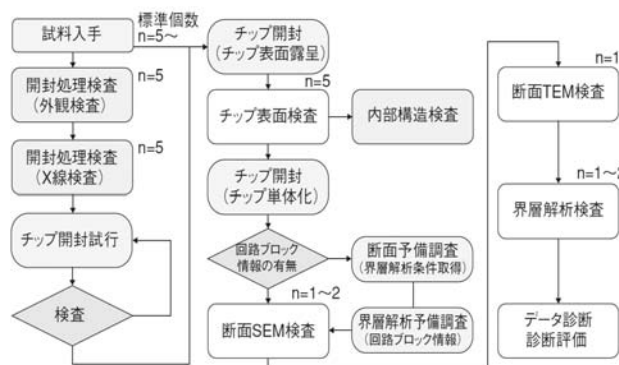


図7 LSIプロセス診断解析手順

### 3.2 LSIプロセス診断の評価項目

5項目の検査により得られたデータは、40のプロセス診断評価項目と各項目ごとに設けられた詳細な解説書の診断基準に従い、診断と採点が行われる。評価項目には各工程別に具体的な欠陥が記述され、検査により検出された不具合な構造と照合することにより定量的な評価、採点が可能となる。LSIプロセス診断のポイントとなるこの診断基準は我々独自の基準だが、当社が過去36年間に亘る電子デバイス故障解析、良品解析の事例等約5,000件および各種文献の事例等から導きだしている。

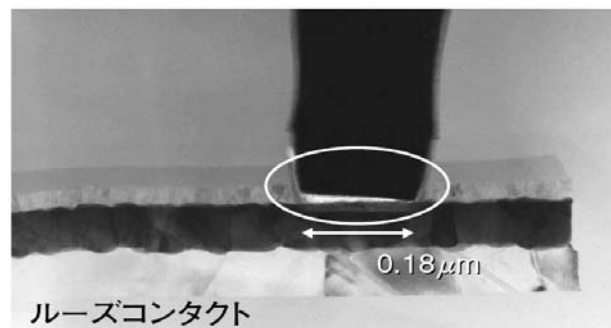


図8コンタクトプラグ接続の欠陥

### 3.5 MEMSでの実例

近年、自動車関連のシステムにMEMSが多く採用されている。MEMSデバイスは、特有の機械的構造や故障モードがあり、半導体デバイスの信頼性評価手法をそのまま活用することはできず、MEMSデバイスの信頼性を評価する有効な手法の確立が期待されている。そこで当社はLSIプロセス診断を拡張した評価方法を提案している<sup>5)</sup>。以下に、現在、市場に広く浸透している汎用の3軸加速度センサ（図9参照）について実例を示す。

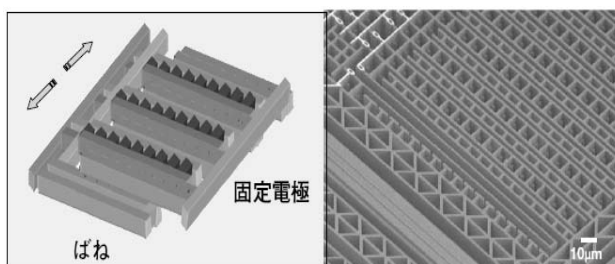


図9 3軸加速度センサの鳥瞰SEM像と動作概略図

3軸加速度センサは可動電極がバネで支持されており、バネの支持部に最も応力が集中すると考えられ、この部分の構造上の検査が重要となる。当然、検査項目に、バネ支持部の欠陥が効率的に検出可能となる検査項目として、平面TEM検査等を追加している。

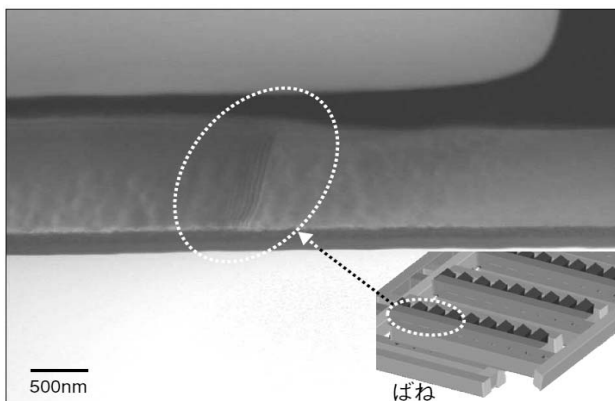


図10 平面TEM検査で見られた結晶欠陥

実際の検査で検出されたバネの支持部に見られた欠陥を図10に示す。3軸加速度センサの重要な可動部でこのような結晶欠陥が存在する場合、実使用時に故障を誘発する可能性が高くなり、自動車等の高信頼性を必要とするシステムには採用しがたくなる。この場合も、事前にLSIプロセス診断を拡張した診断システムで評価し、問題を内在したデバイスを排除することでシステムの信頼性を高めることが可能となる。

### 3.6 太陽電池での実例

世界的なCO2削減の動きにより大きな注目を浴びている太陽電池であるが、パネル製造社が乱立、パネルの品質もまちまちである。環境に優しいはずの太陽電池でもすぐに故障し交換するのでは、環境負荷の増大を招くばかりである。太陽電池についてもLSIプロセス診断を応用し、太陽電池の評価方法を確立している。太陽電池モジュールは長期にわたって大きな温度ストレスにさらされるため、インターコネクタと呼ばれる内部のはんだ接続性が経年劣化する可能性が高く、ウィークポイントとなる。実際の検査で検出されたインターコネクタ部に見られた欠陥を図10に示す。インターコネクタ部のはんだ量が少なく接続性が悪い。初期状態の接続性が悪いと経時劣化などで長期信頼性に影響を与えるため、このようなパネルの採用は控えるべきである。このようにシステムの信頼性向上を図るにはLSIプロセス診断による評価が効果的である。

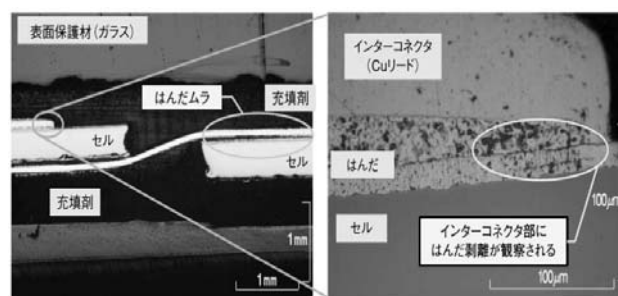


図11 インターコネクタ部に見られた欠陥

## 4. LED 電球の過渡熱特性評価

近年、急速に市場を拡大しているLEDに関して、当社ではかねてより故障解析、良品構造解析を行っている。LED照明が家庭用照明器具をはじめとして、高パワー化するにつれて顕在化し、いまや最大の問題点のひとつとなっているのが発熱である。白熱電球60W相当として市場に普及している一般的なLED電球でも、6~8Wの消費電力があり、十分な放熱特性を確保していなければ、接合温度は容易に半導体特性や信頼性に影響を与える温度まで上昇する。

当社では、これまでの良品解析に加えて、過渡熱特性評価技術を提供している。今回、市場に流通している汎用LED照明の過渡熱評価を実施し、各社の放熱特性を比較し、問題点を指摘した。

図12は、4社の異なるLED電球の熱過渡評価を行った結果である。このグラフは構造関数と呼ば

れ、X軸が熱抵抗、Y軸が熱容量を示しており、グラフ右端の急激に熱容量が大きくなるところが大気、左端がチップを示している。すなわち熱流に沿った熱的構造を示している。途中の傾きが変わるところが材質的な構造の変化点を示す。C社製を除き大体10K/W程度の熱抵抗を示している。C社は放熱フィンの軽量化を図っており、実際に他社製品に比較して格段に軽量化が図られているものの、放熱フィンとその接続領域の熱抵抗値が高く、結果として他の製品の1.5倍程度の熱抵抗を持っていることがわかる。構造解析からは、フィンの取り付け部に改良の余地があると考えられる。

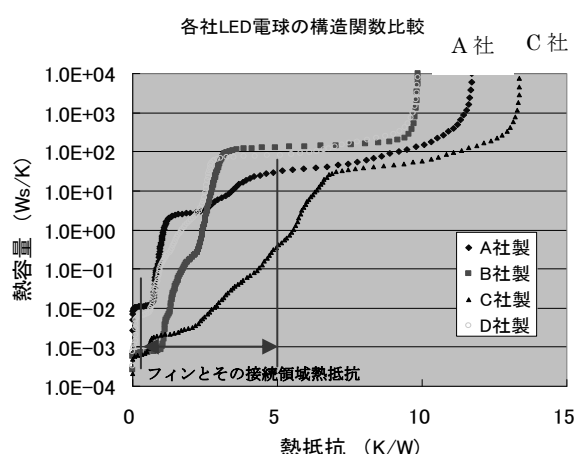


図.12 LED電球の熱過渡評価(4社比較)

ただし、C社のLEDは若干パワーが低めであるため、熱抵抗は高いものの、接合温度の上昇 ( $\Delta T_j$ ) に関しては、安定状態で約50°Cと他社の  $\Delta T_j$  と同程度のとなっており、実使用上、信頼性上の問題はない。また、LED電球に関しては、EMC【Electro-Magnetic Compatibility】(電磁両立性) 評価も実施している。電球一つ一つが電源回路を有しており、この電源回路から出る電磁波は特に電球を多く使う家庭内照明、街路灯など、今後さらに注意を払っていかねばならない問題である。当社保有の暗室を使用したEMC評価では、いくつかの会社の市場流通しているLED電球は一般的な規格を満足していないことがわかっている。今後、LEDのEMCに関する規格の制定と運用、電磁波の放出の少ない電源回路あるいは構造の開発が望まれる。

## まとめ

電子デバイスは微細化・高度化・車載用および温暖化対策に代表されるようにアプリケーション分野の急拡大等のマーケット要因により今後益々、故障を未然に防ぐ解析技術の高度化が重要となっている。しかし、100%完全に故障発生の事前予想は不可能なので、製品設計には最適なマージンを取らざるを得ない。やはりアプリケーションが拡大する中、諸々のデータの蓄積が重要となっている。

## 参考文献

- 1) 福田保裕：半導体デバイスの静電気対策， 静電気学会誌， vol29 (2005)
- 2) 福迫真一他：表示用高耐圧ドライバLSIにおけるシステムノイズ破壊解析と耐性評価方法の提案， 第12回RCJ信頼性シンポジウム (2002)
- 3) 矢部一博他：LSIプロセス診断システムと信頼性試験による相互検証， 第14回RCJ信頼性シンポジウム (2004)
- 4) 今井康雄他：電子部品の故障解析および良品解析—車載用電子部品の信頼性向上のための取り組み—， 電子情報通信学会 (2007)
- 5) 村原大介他：LSIプロセス診断法によるMEMSデバイスの評価試行， 第39回信頼性・保全性シンポジウム (2009)

(いまい やすお/沖エンジニアリング株)



今井 康雄

1978年沖エンジニアリング株入社，2000年同社信頼性技術部実装評価担当課長，2002年 同上信頼性技術第一部実装技術課長，2003年 信頼性ソリューション事業部信頼性技術第1部長，2004年 信頼性技術事業部長，2008年 執行役員，2009年 取締役 信頼性技術事業部長，その間、一貫して部品・製品の信頼性評価・解析に従事，RCJ(財)日本電子部品信頼性センター 理事】，(社団法人)エレクトロニクス実装学会会員