

照明用 LED デバイスの加速試験と湿度劣化に関する研究 (第 1 報)

宮本 博永・布施 嘉裕・清水 章良・油井 誠志

Research on Humidity Accelerated Life Test for LED Device used by Lighting Equipments (1st Report)

Hironaga MIYAMOTO, Yoshihiro FUSE, Akio SHIMIZU, Seishi YUI

要 約

LED 照明製品に使用される COB 型 LED デバイスの耐湿性を評価する方法を探るため、HAST チャンバーを利用した加速試験に着目し、その実施手順についての検討及び評価試験を行った。

その結果、LED の自己発熱による制約はあるものの、事前に熱設計等を十分に行うことにより、HAST チャンバーを利用した耐湿性の評価が可能であることがわかった。試験において検出した故障モードは、LED 特有の故障として知られる封止樹脂・蛍光体の劣化であり、その加速性についても確認することができた。

本報告を参考に同様の試験を実施する場合、熱設計（試験温度条件、排熱経路の確保、槽内配置方法）、供試体数が少なくなってしまうことによる結果のバラツキ、加速性のない故障モードが発生してしまう可能性があること、などに留意する必要がある。

1. 緒 言

節電・省エネ製品の需要が高まる中、電子機器製造業者の間では、保有する電子機器の設計技術を生かして LED 照明の開発に着手する企業が増えている。山梨県内の企業においても、当センターが把握している中小企業だけで 10 数社が LED 照明の生産・販売を既にっており、現在も増加傾向にある。

LED 照明製品の善し悪しは、低コスト・高出力といった部分だけでなく、高い信頼、すなわち求められる時間稼働し続けられるかが同様に重要とされており、多くの企業が後者に問題を抱えている。LED 自体は、発光デバイスの中では最も発熱するものとして位置づけられているが、その反面、熱に弱いという特性を併せ持つ。そのため熱への耐性は重要な問題とされ、その研究・調査等もよくなされてきた。一方で、その他の劣化要因についての調査は、あまり明らかにされていないというのが現状である。

最近の LED 照明の市場動向をみてみると、COB 型の LED デバイスの搭載が主流になりつつある。これは、アルミ基板に複数個の LED を並べて配置し、ワイヤボンディングで接続後、それら表面を樹脂・蛍光体等により封止したもので、照明機器等の設計開発に関しては放熱対策が比較的容易という利点がある。また、高

出力の LED 照明製品の開発を可能にするものとして今後も期待が大きい。

一方で、このような COB 型 LED は、一般の半導体デバイスと比較して構成に大きな差異がないことから、これまでの砲弾型 LED 素子ではあまりなされなかった耐湿性の考慮がなされるべきである。特に COB 型 LED を LED 照明製品として利用する場合では、屋外等多湿な環境で使用されることも考えられるため、その耐湿特性を知ることは大変重要である。実際に、企業において用いられる LED 素子が、砲弾型 LED から表面実装型 LED、さらに COB 型 LED へと移行していった中で、耐湿面で予期せぬ不具合が発生するとの相談が当センターに持ち込まれるようになった。

本研究では、このような現状を踏まえ、当センターが保有する環境試験設備、特に HAST チャンバーを用いた加速試験に着目し、COB 型 LED の湿度に対する信頼性の評価を実施した。

2. LED デバイス加速試験の実施手法

2-1-1 耐湿性試験に利用する装置等と事前検討事項

耐湿性の加速試験には HAST チャンバーを用いた。

HAST チャンバーとは、High-accelerated Temperature and Humidity Stress Test の略であり、供試体への水分の侵入

を時間的に加速させる試験方法の一つとして利用されている。原理的には、100℃以上の温度領域において1気圧以上の圧力で水蒸気雰囲気（不飽和）を作り出し、試験槽内に設置した供試体内部への水分の侵入を時間的に短縮させようとするものである。

図1に、本研究に利用した HAST チャンバーの写真及び断面の模式図を示す。

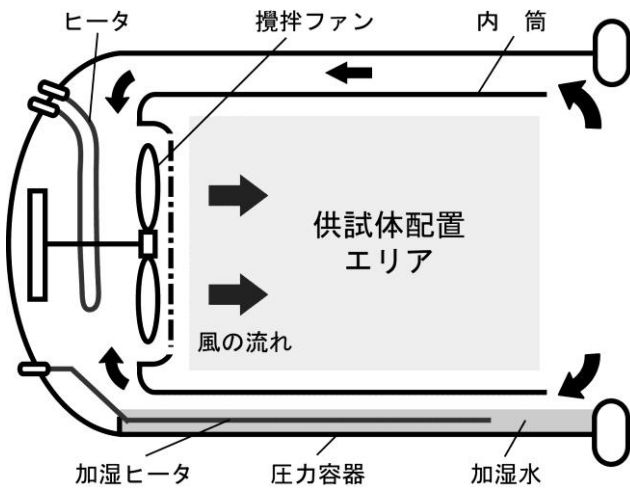


図1 HAST チャンバー写真と断面の模式図

また、HAST チャンバー以外にも、恒温恒湿槽を試験に利用した。最終的には加速モデル式の係数を求めることから、その算出には異なる3つ以上の湿度環境下での試験が必要となり、HAST チャンバーのみでは厳しい湿度ストレス条件でしか試験を実施できないという理由からである。具体的な利用方法としては、3条件の中で、最も厳しい湿度条件（以降、第1条件）及び中間条件（以降、第2条件）での試験を HAST チャンバーで、最も湿度ストレスの少ない条件（以降、第3条件）での試験を恒温恒湿槽により実施した。

次に供試体となる COB 型 LED デバイスについて、試験実施上の注意点を述べる。

一般的に、半導体デバイスの耐湿性寿命を決定する要因として、次の項目¹⁾があげられる。

- ①樹脂の透湿性
- ②樹脂と半導体チップとの密着度
- ③樹脂または半導体チップの不純物含有量
- ④電界強度
- ⑤チップ保護膜質
- ⑥チップ内部の回路構成、配線材料

そして、これら要因が複雑に影響を及ぼし合って故障の原因となるため、HAST 試験の実施においては、JIS 60068-2-66 に代表されるようなバイアス印加（製品規格に適合する電氣的バイアスを印加した動作状況における）試験の実施が必要となる。しかし、一方で LED を動作（発光）させた場合、自己発熱が生じるため、HAST 試験の条件設定においては、温度条件を見積もることが極めて重要となる。

例えば、チャンバー内の温度を高く設定しすぎると、LED は自己発熱の温度上昇分を合わせた温度に曝され、ジャンクション温度の限界値を超えてしまい故障となる。また、チャンバー内の温度を低く設定してしまうと、試験に要する時間が長くなってしまえばかりか、加速性の検証が難しくなってしまうといった問題が生じる。したがって、LED の HAST 試験においては、ヒートシンクの選定やチャンバー内温度条件、そしてチャンバー内への設置方法等を踏まえた供試体の熱設計及び試験条件の設定が必要不可欠となる。

ここまで供試体となる COB 型 LED デバイスの留意点について述べたが、試験を実施するための HAST チャンバー側にもいくつかの制約がある。例えば、チャンバー内に LED を数多く配置しすぎるとその発熱量により温度制御が不安定になってしまうことがあげられる。反対に一度に少数の LED しか配置できない場合は、寿命（耐湿性における）のバラツキの多いロットに対して適切なデータが得られず、複数回の試験の実施を余儀なくされる。また、供試体同士の設置間隔が狭い場合は、ヒートシンクからの排熱の影響を近接する LED が直接受ける形になってしまうため、供試体配置についても十分な事前検討が必要である。

2-1-2 照度の測定に用いた装置

LED の明るさの計測には、JIS C 1609-1993 一般形 AA 級に準拠した照度計（ルクスマーター）を利用した。本来であれば、積分球を用いた全光束（ルーメン）の測定が望ましいが、価格が高いこととそれほどの精度も必要がないことから上記照度計の選択となった。照度計での測定は、センサーと測定対象の位置関係を常に一定に保つ必要があるが、本研究においては、測定対象である LED デバイスを用意した治具上に鉛直上向きに置き、センサーをその上部 75cm 離れた位置に設置

して測定することとした。

なお、LED デバイスとセンサー間の距離は任意に設定できる（設定した距離により得られる照度の値は異なるが、実際の耐湿度性の評価に用いる値は、[湿度負荷後の照度] / [照度の初期値] という比で扱うため）が、具体的に決定するときは、照度計及び LED デバイス双方の仕様から個別に適切な距離を選択する必要がある。

2-2 熱設計の検討

本研究における加速試験に利用する供試体として、図2の COB 型 LED を選定した。仕様は表1のとおりである。全光束は 330[lm]で、出力的にはメーカーにおいて販売しているラインナップの中間程度の製品と言える。

前述したとおり、この供試体について熱設計の検討が必要であり、次の項目について検討することとなる。

- ・加速試験の最大温度条件
- ・LED の放熱設計（ヒートシンク等の選定）
- ・HAST チャンバー内への配置及び投入数

これらは個別に決定するものではなく、それぞれが影響し合うため、同時並行で決定する必要がある。



図2 加速試験に使用した COB 型 LED

表1 加速試験に使用した COB 型 LED の仕様

内部構造	アルミ基板 COB 型
外形寸法	9.5×9.5×1.4[mm]
全光束	300[lm] (320mA)
色温度	5000[K]
定格電圧	9.2[V]
熱抵抗	5.5[°C/W]
許容ジャンクション温度	150[°C]

本節では、試験に用いた供試体の仕様だけでなく、その熱設計の算出例についても紹介することとする。

最初に加速試験における最大温度条件を決定しなければならない。前述のとおり、加速式の定数算出には、

第1～3条件での実施が必要になる。第1条件は加速試験の有用性を判断するうえでも、できるだけ高いストレスでの実施が望ましい。また、第3条件は一番低いストレスでの試験となり、これは恒温恒湿槽で実施可能な範囲における最も厳しい湿度条件（85°C、85%程度）となる。そして中間条件である第2条件は HAST チャンバーの仕様上最も湿度ストレスの低い条件（105°C、85%程度）に設定することが予定される。したがって、第1条件は 120°C（85%）前後かそれ以上に設定して試験を実施することが望ましい。

最大温度条件の目標を定めたら、次は LED の放熱設計を行う。図3は、一般的な COB 型 LED の実装状況と各セクションにおける熱抵抗値を定義したものである。

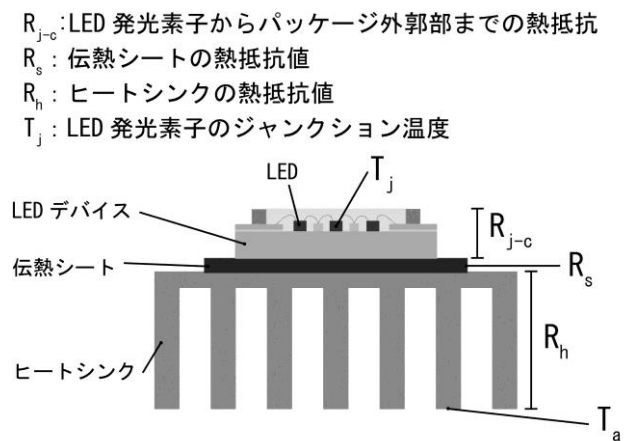


図3 COB 型 LED の一般的な実装状況と各部熱抵抗等

LED デバイスのパッケージ外熱抵抗を R_{c-a} 、投入電力を P_d とすると、LED 発光素子のジャンクション温度 T_j （以降、JKT 温度（文献によっては LED チップ温度とも言う））とチャンパー内温度 T_a の間で式(1)が成り立つ。

$$T_j = (R_{j-c} + R_{c-a}) \cdot P_d + T_a \quad \dots (1)$$

表1より、 $T_j=150[^\circ\text{C}]$ 、 $R_{j-c}=5.5[^\circ\text{C}/\text{W}]$ 、及び $P_d=2.94[\text{W}]$ を式(1)に代入し、変形すると式(2)が得られる。

$$T_a = 113.8 - 2.94 R_{c-a} \quad \dots (2)$$

この式において、第1条件を考慮し、 T_a が 120°C 以上になるよう、 R_{c-a} を選択する。実際に試験で選択するヒートシンク及び伝熱シートはそれぞれ図4及び表2のとおりである。この場合、 $R_s=1.1$ 、 $R_h=1.5$ (at 0.33[m/s]) の和を式(2)の R_{c-a} に代入すると、 $T_a=126.2[^\circ\text{C}]$ が得られる。計算上はチャンパー内温度を 126.2°C まで上げても LED は壊れないことになるが、実際は各材料との接続部で損失が生じるため、ある程度余裕をもって T_a を設定することが必要となる。

表3は、恒温恒湿槽を利用し、槽内をそれぞれ 115°C 、

120℃に保持した状態で、LED の耐熱性に関する試験を実施した結果である。

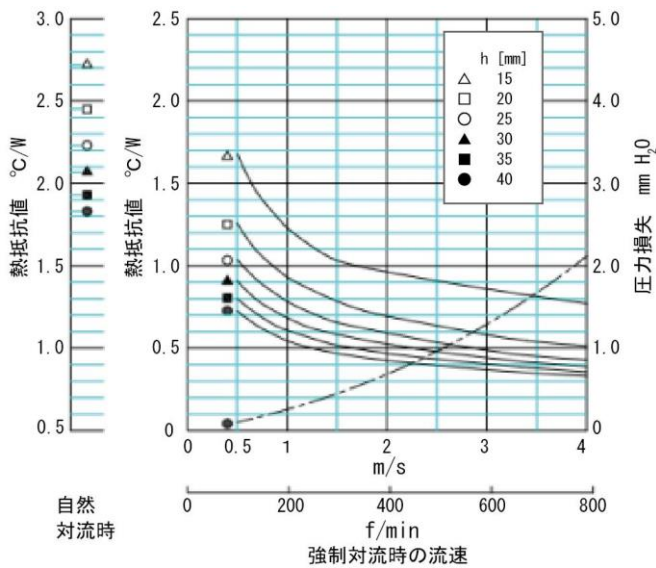
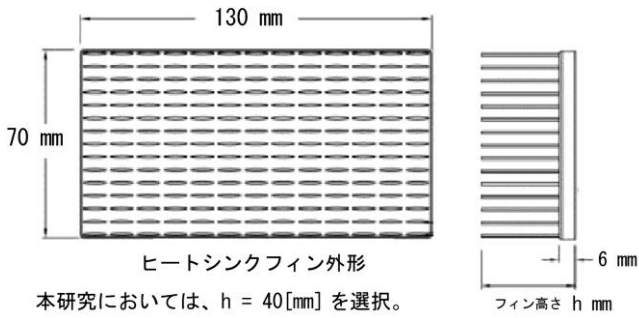


図4 ヒートシンクの仕様

表2 伝熱シートの仕様

大きさ	縦・横・厚：9×9×0.1 [mm]
熱伝導率	1.0 [W/m・K]
熱抵抗値	1.1 [°C/W]

表3 加湿なし条件での加熱試験結果

	加熱温度	加熱時間	照度 加熱後照度/試験前照度
条件1	115℃	750 h	0.97
条件2	120℃	16 h	0 (発光なし)

120℃で試験した場合、開始後わずかな時間で熱暴走により壊れる結果となってしまった。従って、本供試体における温度条件の上限（第1条件）を115℃とする。加速試験実施の第1～3条件をまとめると、表4のとおりである。

表4 加速試験の第1～3条件

	温度及び湿度	水蒸気圧 MPa
第1条件	85℃, 85%	0.0491
第2条件	105℃, 87%	0.1051
第3条件	115℃, 85%	0.1438

2-3 供試体配置方法の検討

最後に HAST チャンバー内への供試体の配置及び投入数を検討する。投入数は多いほどよいが、まず、図5のように、2段に配置する方法を考えるべきである。この場合、下段のヒートシンクから排熱される熱が、上段の LED に与える影響が問題となる。具体的には、上段 LED の曝される温度 (T_{ad}) は、115℃ (HAST チャンバー内温度) + 下段 LED の排熱による温度上昇分となっており、この T_{ad} をある程度予測 (HAST チャンバー内はその構造上、熱電対等で実測することが困難) する必要がある。

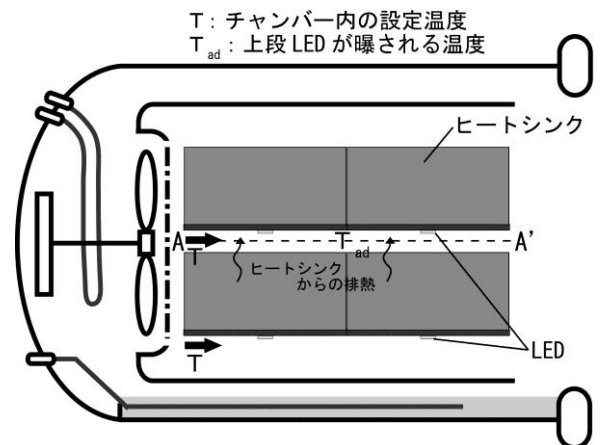


図5 HAST チャンバー内への供試体配置例と排熱温度

本研究においては、物理モデルを作成することによりこの T_{ad} の予測計算を行った。具体的には、図5において、下段 LED デバイスの排熱による温度上昇が、上段 LED デバイスの曝される環境にどの程度影響を与えるかが問題となるため、図中の A-A' 断面に着目し、簡単な伝熱モデルにより解析を行うことで温度状況を把握することとした。モデルを作成するにあたり、LED デバイスを取付けているヒートシンクの面をアルミ平板とみなし、LED デバイスはそのアルミ平板の所定の位置で発熱すると仮定している。また、フィン部での流体との熱交換は、伝熱促進効果として表面積増加割合を考慮したフィンモデル²⁾を利用する。この場合、アルミ平板上の温度を T 、熱伝導率を λ 、流体の温度を T_{air} 、熱伝達率を α とすると、伝熱解析におけ

る定常 2 次元直交座標系の基礎方程式を用いて式 (3) のように表わすことができる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{Q}{\lambda} + \frac{\alpha(T_{air}-T)}{b\lambda} = 0 \quad \dots (3)$$

また、 α は、平行平板放熱フィンの強制対流熱伝達率の計算式³⁾より次の式 (4) を利用した。

$$\alpha = 0.664 \frac{\lambda}{l} Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad \dots (4)$$

その他、計算に利用した所条件を表5のとおりまとめた。

これら条件により、計算した A-A' の温度分布を図6に示す (図5の奥行き方向に3列配置している様子)。

表5 チャンバー内温度状況の計算に用いた諸条件

空気密度 ρ [kg/m ³]	0.88
空気比熱 c [J/kg/K]	1040
空気動粘性係数 [m ² /s]	0.000025
空気熱伝達率 [W/mk]	0.032
アルミ平板伝導率 λ [W/mk]	170
空気速度 (吐出面平均値) [m/s]	0.33
空気流入温度 [°C]	115
空気層厚さ [mm]	70
放熱フィン寸法・形状等	図4のとおり
X, Y 方向分割数	20×20
LED 発熱量 [W]	3.0
差分法	T: 陰解法 T _{air} : 風上法

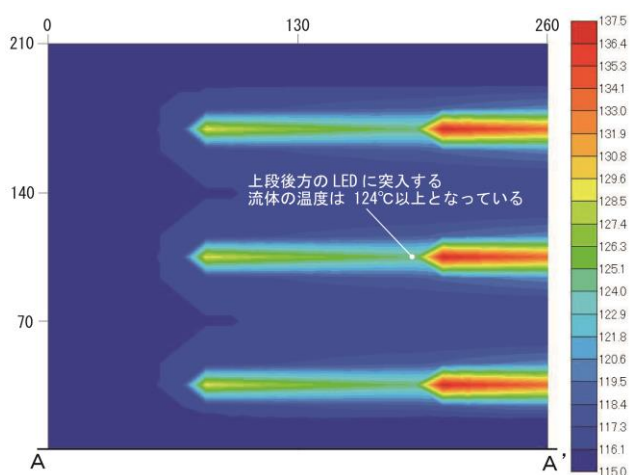


図6 チャンバー内の温度状況計算例 (A-A'断面)

これらの結果から、本供試体の場合は、 T_{ad} が 124°C 前後と大きくなることが予測され、上段 LED に与える影響を無視できないことがわかる。従って、上段のみ

の使用 (サンプル数 6) で試験を実施することとした。一方で、第 3 条件の恒温恒湿槽を用いる試験では、槽内流速が HAST チャンパー内の 5 倍程度となること (強制対流の影響が大きいこと) から、特に LED 排熱の影響も少ないため、投入数を 8 とした。

3. 本加速試験方法の評価及び考察

3-1 湿度加速試験によって得られたデータ

表4の3条件により湿度負荷試験を実施した結果、それぞれの条件に共通して、ある一定の値まで照度が低下することがわかった。第1条件における照度の変化の様子を図7に表した。図中の値は、横軸が時間、縦軸が照度 (湿度負荷後の照度 / 照度の初期値) となっている。また、この照度については、HAST チャンパーから取出し、25°C に保たれた室温に 2 時間放置した後で測定した値である。

どのサンプルにおいても、ある一定の照度までほぼ同じ傾きで減少し、それ以降はほとんど変化が見られなかった。僅か 6 サンプルであったが、最大で 25% 以上の照度が低下しているものもあり、通常 LED の寿命が 20~30% の低下時 (全光束で判断) とされていることから考えると、本質的な寿命を検討する段階にあると言える。なお、これらの傾向は第2, 第3条件においても同様であった。

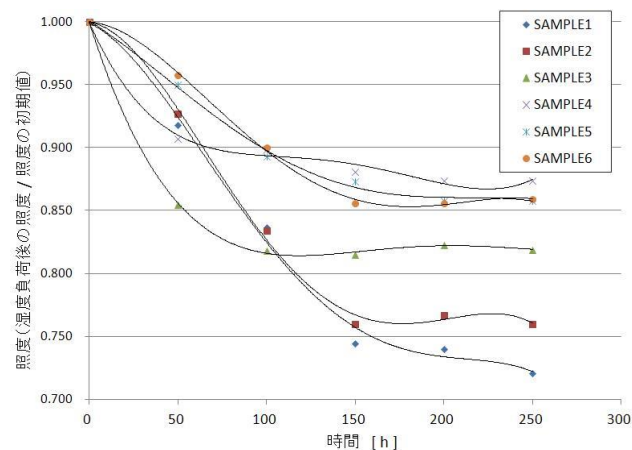
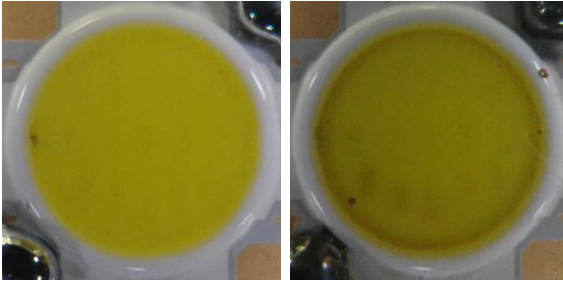


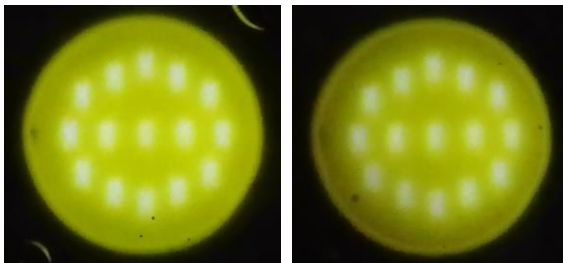
図7 HAST チャンパーによる試験データ (第1条件)

次に、図8に劣化状況の外観写真、図9には LED を発光させたときの写真をそれぞれ示す。図8においては、同じ 115°C の試験にもかかわらず、湿度負荷なしでは損傷は全く見られず、逆に HAST 試験後の LED ではひどく損傷している様子がわかる。特に LED 素子の部分が黒く変色している様子が見てとれる。また、この変色は外枠の円周部から内側に向かって進んでいるように見受けられる。さらに発光状況の差は歴然であっ

た（図9において、素子の発光の減衰と温度の進行状況に相関が見られた）。これらのこと及び表3の試験結果から、照度の低下原因が、湿度ストレスであることが断定される。



115°C-750 時間後 115°C,87%-200 時間後
図8 試験後における劣化状況の概観写真



115°C-750 時間後 115°C,87%-200 時間後
図9 試験後における発光状況の写真

湿度ストレスがどのように作用して照度の低下原因となったかは今後の調査による。しかし、HAST 試験中、供試体に抵抗値の増加等はなく、アルミ基板等サーキットの腐食は考えられない。従って、LED 素子のジャンクションを通過する電子数自体に変化はなく、発光の強度に初期値との差がないと考えれば、封止樹脂・蛍光体の劣化等が原因ではないかと推察される。

3-2 ワイブル解析結果

図10は、試験結果から得られたデータからワイブル解析を行ったものである。解析のデータについては、それぞれの試験条件におけるサンプル数が少ないことや測定の時間間隔もあまり細かく設定できなかったことから、図7のデータに曲線近似を用いて平均化し、照度がほぼ一定の値（変曲点、観測区間で最小値を取るものはその最小値）に達した時刻を利用した（第2、第3条件についても同様）。

故障の型である m 値は、どの条件においても 2 近辺の値を示した。これは、全ての条件において摩耗故障領域 ($m > 1$) に入っていることを表しており、一方では同じ故障原因によって寿命となったことを示唆している。

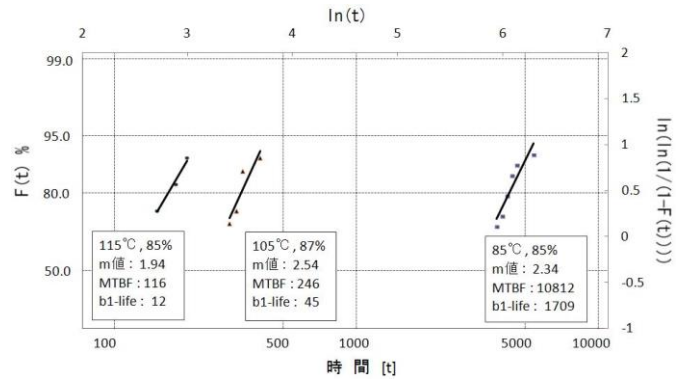


図10 湿度加速試験のワイブル解析結果

3-3 加速モデル式(水蒸気圧モデル)への適用

湿度ストレスによる加速モデル式は、水蒸気圧を利用した水蒸気圧モデル式⁴⁾がよく知られている。本モデル式は、水蒸気圧を V_p とした場合、寿命時間 t を、 A 、 n を定数として、次式によって表すことができる。

$$t = A \cdot (V_p)^{-n} \quad \dots (5)$$

本試験結果に式(5)の適用が可能かどうかは、次の2項目を満たしているかどうかの検討が必要である。

- (i) 故障が摩耗領域において発生していること
- (ii) 各条件の結果に加速性が認められること

(i) については、3-2 により既に確認している。次に (ii) についての検討を行う。ここで式(5)の両辺の対数をとって変形すると、

$$\ln(t) = -n \ln(V_p) + \ln(A) \quad \dots (6)$$

となる。図10の結果を利用して $\ln(t)$ と $\ln(V_p)$ の関係をグラフ上にプロットし、図11（アレニウスプロット）を得る。グラフから各条件の結果について線形性が確認でき、これにより加速性があると認められることができる。(i) (ii) を満たすことから、加速モデル式(5)への適用が可能であるため、最後に定数 A 、 n を求める。

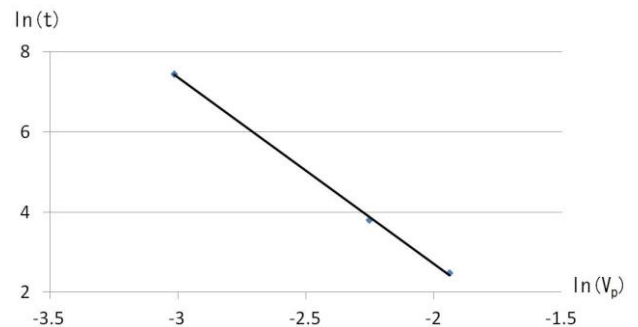


図11 水蒸気圧と時間の関係

図11のプロット上に近似直線を引き、式(6)の切片

と傾きからそれぞれ、 $A=0.00139$ と $n=4.65$ を得ることができる。これらの値を式 (5) に代入して、得られる式 (7) が、本試験に用いた COB 型 LED デバイスの湿度に対する加速モデル式（水蒸気圧モデル）となる。

$$t = 0.00139 (V_p)^{-4.65} \cdots (7)$$

この式を使って、任意の水蒸気圧に対する、本 COB 型 LED デバイスの寿命を算出することができる。例えば、 $40^{\circ}\text{C}85\%$ の環境では $V_p=0.0062[\text{MPa}]$ であり、約 2600 万時間の耐湿寿命があると算出される。しかし、LED デバイスの実際の照明製品における実装状況を考えた場合、LED デバイスが直接外気に触れることはほぼないと言ってよい。通常は何らかのカバーに覆われているため、自己発熱による温度上昇により、曝される環境が外気と大幅に異なる。従って式 (7) の実製品への適用については、使用環境下においてカバー内の温度・湿度を実測し、その値を使用しなければならない。カバーの内部では、数十度分の温度上昇が考えられるため、例として温度・湿度を 75°C 、 75% と仮定して計算すると、 $V_p=0.0289[\text{MPa}]$ で、耐湿寿命は 20,000 時間となる。これは LED の通常寿命 45,000 時間の約半分である。

4. 結 言

COB 型 LED デバイスの耐湿性評価を行うため、HAST チャンバーを利用した湿度加速試験を実施した。その結果、COB 型 LED 特有⁵⁾ の樹脂封止・蛍光体の劣化及びその加速性が認められることについても確認することができた。

なお、本研究の試験において検出した故障モードは樹脂封止・蛍光体の劣化によるもののみであった。このことは、他の製品で試験した場合においても、必ず同様の結果となることを示すものではない。もちろん、他の故障モード、例えばアルミ基板の腐食や接合部の剥離、ボンディングワイヤ切れなども起こり得るであろう。ただし、これらの故障モードの多くは、一般の半導体デバイスに起こるものと本質的な差異はなく、既に多数^{6)・7)} の報告があり、また加速性も認められている。よって、これらの故障モードが検出されとしても、LED の耐湿性の評価が妨げられるものではない。そして、HAST 試験全般に共通する課題として「実使用環境との相関性」があげられる。評価対象が LED デバイスとなっても、この課題については全く同様であるが、これら対象の評価にも積極的に利用する価値はあり、熱設計等に配慮した手順を踏まれば、本研究で示した試験は大変有効であると考えられる。

他方、同様の試験を実施し、結果を製品設計に役立

てる場合は、3-3 で述べたとおり、カバーにより LED デバイスが曝される環境が外環境と異なることを念頭におき、また、純水で加湿する HAST チャンバーよりも製品使用環境が劣悪であることも考慮したい。

最後に、本研究で実施した COB 型 LED に対する HAST チャンバーを用いた耐湿性評価手法の注意点を 3 点列記する。

(1) 自己発熱による影響が大きいため、熱設計（試験温度条件、排熱経路、槽内配置）について事前に十分検討する。

(2) 1 試験に投入できる供試体数が少なくなることから生じる結果のバラツキに注意する。

(3) 必ずしも実使用環境を加速したことにならない故障モードも検出される可能性があることにあらかじめ留意しておく。

参考文献

- 1) ルネサステクノロジーテクニカル・ノート第 3 章 故障モードとメカニズム (http://japan.renesas.com/media/products/common_info/reliability/reliability_handbook/pdf/rjj2710001_03.pdf)
- 2) 国峰尚樹：電子機器の熱流体解析入門,P165-168
- 3) 伊藤謹司, 国峰尚樹：トラブルをさけるための電子機器の熱対策設計, P289
- 4) F.N.Sinnadurai:Microelectronicsand reliability,Vol.13P.23(1974)
- 5) LED 照明推進協議会：LED 照明信頼性ハンドブック,P142-143
- 6) 東芝半導体信頼性ハンドブック：[3]信頼性 加速寿命試験
- 7) 友池 稔, 中原 浩二：COB の耐湿性試験における加速性：FUJITSU DENSO REVIEW Vol.9 No1