

## 湿度加速試験とモデル式一考察 (間違っではいけないモデル式の選択)

### A Study for Accelerated Humidity Stress Test and Model

伊藤 貞則\*

Sadanori ITOU

#### 概要

日本で使用される電子機器にとって湿度ストレスはその信頼性を劣化させる大きな要因である。そのため湿度ストレスによる加速評価は非常に重要なものである。

したがって加速式としていろいろなモデルが提案されていて活用されている。しかしモデル式があるから使うという感覚で選択していると失敗することがある。

本報告は多くの説のある半導体の耐湿性加速モデルを取上げ、それぞれの妥当性を考察した結果である。

#### 1. はじめに

電子機器が受ける湿度ストレスに対する評価は大きくつぎの三つの種類に分けられる。

一つは吸湿による経時劣化である。評価方法としては、温湿度一定の環境に放置し外観や特性の変化を評価する。

二つ目は自然環境として日常受ける昼夜の温湿度サイクル環境による劣化である。製品に結露や呼吸作用が発生する。規格<sup>1)</sup>や試験法<sup>2)</sup>の事例がある。

三つ目は屋内外を移動する携帯品や機器の動作開始/終了時の急激温湿度変化によって発生する結露による劣化である。携帯品の屋内外移動事例<sup>3)</sup>や冬季乗用車停車時の事例<sup>4)</sup>がある。

二つ目、三つ目の結露による劣化は温度変化率や製品の熱容量で変わるのでモデル化は進んでいないが、一つ目の吸湿劣化は一定温湿度下での劣化なので取組み易いためいろいろな方法が検討されて実用化されている。本報告ではこのモデルについて考察した。

#### 2. 温湿度加速モデル例

半導体の耐湿性加速モデルは、温度加速ならアレニウス則であるというように明確になっているものがなく、樹脂封止内部の劣化加速評価が重要となったICの発達とともにいろいろなモデルが多数提案<sup>5)6)</sup>されている。そのモデルは大きく分けるとつぎのような三つの種類になる。一つは水蒸気圧モデルである。

$$L = A V_p^{-n} \quad (1)$$

L:寿命  $V_p$ :水蒸気圧 n:べき乗指数 A:定数  
寿命は水蒸気圧のべき乗に比例するとしてFloodらによって提案された。

二つ目は温度関数と湿度関数の組合せモデルで、温度変数としてアレニウス関数を用いて湿度関数は相対湿度を変数としたものを組合せている。

$$L = A \exp \frac{E_a}{kT} \cdot f(RH) \quad (2)$$

$f(RH)$ :  $\exp(RH)$ ,  $\exp \frac{1}{RH}$ ,  $(RH)^{-4}$  etc

$E_a$ :活性化エネルギー k:ボルツマン乗数 T:絶対温度  
RH:相対湿度

三つ目はアレニウスモデルである。

$$L = A \exp \frac{E_a}{kT} \quad (3)$$

湿度加速の課題でありながら温度加速のアレニウスモデルは湿度加速でも結果がよく合うので加速モデルの検討が始まった頃から比較的よく使われている。モデルに湿度因子がないが相対湿度85%一定で温度を変えて試験を行い、加速性が評価されている。

\* イトケン事務所

〒610-0101 京都府城陽市平川室木 28-2 e-mail:s.itou@sepia.plala.or.jp

本報文は審査を受けていない技術報告であり、将来、著者により拡張・修正等されたものが、学術雑誌等に掲載される可能性があります。  
This article is a technical report without peer review, and its polished or extended version may be published elsewhere.

### 3. 試験方法考察 1 (温度関数の作り方)

温湿度加速試験なので加速試験は高温高湿条件になろうから(2)式で示すように温度関数と湿度関数の組合せが説得力のあるモデルに思える。また半導体以外でも使える。このためまずこの方法について考察する。

この加速モデルの作成は相対湿度一定(多くは85%一定)で温度を変えて得られた結果から温度関数を作り、つぎに温度一定で相対湿度を変えて得られた結果から湿度関数を作って両者を組合せている場合が多い。

しかしこれで加速モデルができるのかの疑問点がある。両者のストレスの片方を一定にしてもう一方を変化させて両者の関数を得て、その結果を組合せるという方法は理にかなっているが、片方のストレスを相対湿度としている点である。相対湿度はその温度での飽和水蒸気圧に対する%を表しているに過ぎず、その温度での飽和水蒸気圧を掛けることでストレス値となるものである。すなわち相対湿度は単独では湿度ストレスとはならない。湿度ストレスは相対湿度でなく水蒸気圧なのでこれを軸に考えなければならない。相対湿度一定なら湿度ストレス一定と考えているとつぎのような矛盾を生じる。

下の図1の温度と相対湿度を座標軸とした水蒸気圧表からわかるように、例えば相対湿度を85%一定で温度を70℃から80℃に10℃変えた場合、温度ストレスは3%しか変わらないのに水蒸気圧は50%変わることになる。25℃と85℃と比べてみると温度ストレスは1.2倍の変化であるが、水蒸気圧の変化は18倍にも達する。

いや温度の方が現象に効くんだから結果からは温度関数を作るのだと云えばそれまでだが、それではもう一方の湿度関数を作るときには相対湿度の変化で作っているのだから、RH10%の変化を考えると水蒸気圧の変化はどの%域でも10%で、10%の変化を頼りにしている

JIS Z 8806 水蒸気圧表 (hPa)

°C \ RH	100	90	85	80	70
100	1014	913	862	811	710
90	702	631	597	562	491
85	579	521	492	463	405
80	474	427	403	379	332
70	312	281	265	250	218
60	199	179	169	159	139
50	123	111	105	98	86
40	74	67	63	59	52
30	42	38	36	34	29
25	32	29	27	26	22
20	23	21	20	18	16
10	12	11	10	10	8

図1は上記の表に、RH85%の列とRH80%の列の間の差を10%と示し、RH80%の列とRH70%の列の間の差を50%と示し、RH70%の列とRH60%の列の間の差を3%と示しています。

図1 水蒸気圧表から見たストレスの変化量例

ことになる。すなわち50%の変化を無視して10%の変化でモデル式を作っていることになり適切なものができるのか疑問である。

さらに相対湿度を変化させて湿度関数を作るという手順を考えれば、湿度ストレスは温度で変わる値なのに相対湿度ならその温度の飽和水蒸気圧の何%かということなので単にその温度での変化しか捉えられていないことになる。

ではどうすれば温湿度関係のモデルを作れるか考えてみる。

まず温度関数を求める場合は相対湿度一定ではなく、水蒸気圧(あるいは絶対湿度)一定で温度を変える条件での試験が必要ではないかと考える。すなわち温度幅が狭くなるが、図2に示すように水蒸気圧160(hPa)一定とか70(hPa)一定とかで温度を変えて試験を行い、湿度関数を作るべきと考える。当然モデルがアレニウス反応論モデルになることもあろう。

JIS Z 8806 水蒸気圧表 (hPa)

°C \ RH	100	90	85	80	70	60	50	40	30
100	1014	913	862	811	710	609	507	406	304
90	702	631	597	562	491	421	351	281	211
85	579	521	492	463	405	347	290	232	174
80	474	427	403	379	332	284	237	190	142
70	312	281	265	250	218	187	156	125	94
60	199	179	169	159	139	119	100	80	60
50	123	111	105	98	86	74	62	49	37
40	74	67	63	59	52	44	37	30	22
30	42	38	36	34	29	25	21	17	13
25	32	29	27	26	22	19	16	13	10
20	23	21	20	18	16	14	12	9	7
10	12	11	10	10	8	7	6	5	4

図2 水蒸気圧表における湿度ストレス一定とは

また湿度関数の作成は温度一定で相対湿度の変化ではなく水蒸気圧の変化による関数を求めるべきであろう。すなわち図3のように温度値、相対湿度値で明確になっている○印の値でもよし、面倒な計算が伴うが塗り潰しの400 300 200 (hPa)とか100 80 60 (hPa)とか区切りのよい値の結果を求めるもよいのではないかと。

JIS Z 8806 水蒸気圧表 (hPa)

°C \ RH	100	90	85	80	70	60	50	40	30
100	1014	913	862	811	710	609	507	406	304
90	702	631	597	562	491	421	351	281	211
85	579	521	492	463	405	347	290	232	174
80	474	427	403	379	332	284	237	190	142
70	312	281	265	250	218	187	156	125	94
60	199	179	169	159	139	119	100	80	60
50	123	111	105	98	86	74	62	49	37
40	74	67	63	59	52	44	37	30	22
30	42	38	36	34	29	25	21	17	13
25	32	29	27	26	22	19	16	13	10
20	23	21	20	18	16	14	12	9	7
10	12	11	10	10	8	7	6	5	4

図3 水蒸気圧表における温度一定での湿度変化例

### 4. 試験方法の考察 2 水蒸気圧法とアレニウス法の一致

(1)式の水蒸気圧モデルが試験結果としてよく合うのが主流となっているが、また(3)式のアレニウスモデルもよく合うとされている。

高温高湿条件の結果なのに温度因子のない水蒸気圧法と湿度因子のないアレニウスモデルの試験結果がよく合うのは不思議である。今一度試験方法と結果の整理を比較する。

(1)式の水蒸気圧モデルでは試験条件としていろいろな温度/相対湿度条件で試験を行うが、結果は温度/相対湿度試験条件の値に関係なく、図4に示す例のように寿命との関係を水蒸気圧スケールにプロットしている。そして n は 2 ということになっている。

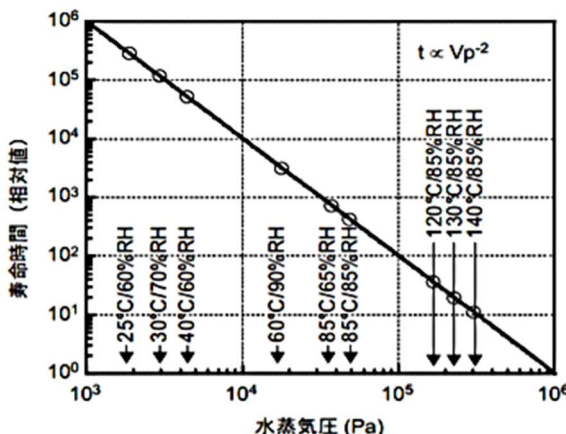


図4 加速性の一例<sup>7)</sup>

一方の(3)式のアレニウス法では相対湿度一定で温度を変えて行い、図5の例に示すように相対湿度一定という表記で寿命との関係を(1/絶対温度)スケールにプロットしている。またアレニウス反応論モデルの活性化エネルギー  $E_a$  は 0.9eV がよく合うとされている。

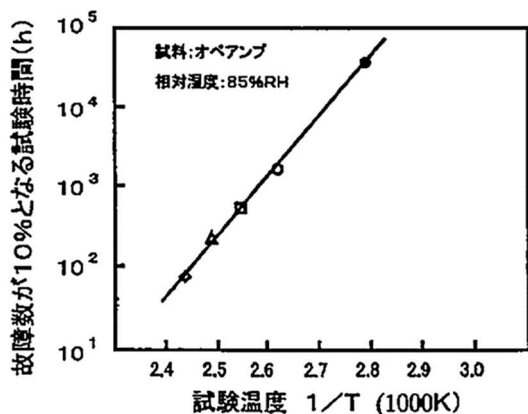


図5 試験の加速性(アレニウスプロット)<sup>8)</sup>

前項で説明したように、相対湿度一定で温度を変えるストレスというのは湿度ストレスの方が大きく変化しているのに温度ストレスだけで予測できるというのは、何か隠れているということになる。

そこで考えられるのが水蒸気圧と温度との関係である。一般にこの関係は曲線の[水蒸気圧の対数-温度]で表されているが、プレッシャークッカ(HAST)の飽和タイプで不飽和を作るときの複雑な温度計算を簡単に図から読み取れるようにした図6がある。これは温度軸を(1/絶対温度)にすると概略直線になるというものである。

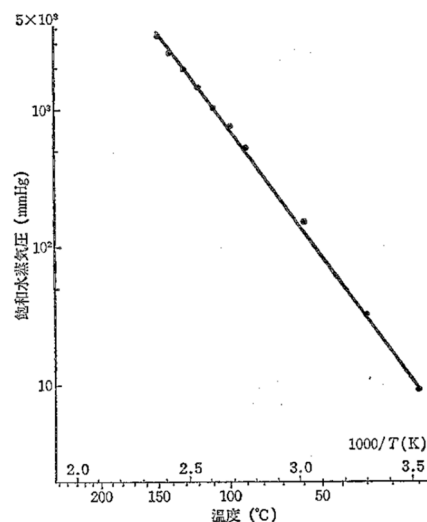


図6 温度と飽和水蒸気圧の関係<sup>9)</sup>

この関係  $\text{Log}Vp \propto -1/T$  を Dを比例定数としてアレニウスモデルに代入してみると

$$\exp \frac{E_a}{kT} \rightarrow \exp \left( -\frac{E_a}{k} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{1}{2.3} \text{Log}Vp \right) \rightarrow Vp^{-n} \quad (4)$$

$$\text{ただし } n = \frac{E_a}{k} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{1}{2.3}$$

というようにアレニウスモデルは水蒸気圧モデルに変身することが分かる。さらに n は

活性化エネルギー  $E_a$ : 0.9eV

ボルツマン定数  $k$ :  $8.6 \times 10^{-5} \text{eV/K}$

傾き D は表1から 1/0.00045

表1 図6をkg/cm<sup>2</sup>単位で書き直した傾き

水蒸気圧	0.1kg/cm <sup>2</sup>	1kg/cm <sup>2</sup>
°C	45	100
K	318	373
1/K	0.00314	0.00268
傾きD	1/0.00045	

を代入すると n:2.03 が算出される。

すなわち アレニウス法で活性化エネルギー 0.9eV は水蒸気圧モデルの n=2 に相当するのである。

## 5. 試験方法の考察3 水蒸気圧法

半導体各社の資料ではこの水蒸気圧法が試験結果によく合うとされている。これは樹脂封止内の劣化を早期に判断するため、湿度に関係するいろいろな故障メカニズムの基となる封止樹脂を透湿する時間を加速するという現象を表現するのに適していること、また寿命が水蒸気圧の-2乗がよく合うというのは下式のように透湿が時間のルートに比例して進行する<sup>10)</sup>というFickの法則に概略則っているからであろう。

$$\cdot \text{水分の到達量 } W \propto Vp\sqrt{t} \quad (5)$$

$$\cdot \text{一定量の到達時間 } t_1 \propto W^2Vp^{-2} \quad (6)$$

種々の温湿度条件結果なのに水蒸気圧だけの変数で寿命を表せるのは反応論的な劣化メカニズムは少なく、透湿という一つの劣化メカニズムが主流になっていると考えられる。

このようにこのモデルは IC の封止樹脂の透湿現象に適っているからうまく推定できるのであり、湿度試験のモデルは何でも水蒸気圧の-2乗でよいというように考えるてはいけない。

## 6. 考察

温湿度加速モデルとしてアレニウスモデルと相対湿度関数の組合せモデルでアレニウスモデルの係数を相対湿度一定の温度変化で求めた場合は、湿度ストレスが一定の値でないため学習済モデルは一般化性に欠けると云える。相対湿度を湿度ストレスとして考える場合は温度とセット表示するか相対湿度でなく

$$L = A \exp \frac{E_a}{kT} \cdot f(Vp) \quad L = A \exp \frac{E_a}{kT} \cdot f(Vw) \quad (7)$$

$Vp$ : 水蒸気圧  $Vw$ : 絶対湿度

のようなモデルが必要ではないかと考える。

また水蒸気圧法とアレニウスモデル法の両方が同じ試験結果でありながら良く合うのは温度と水蒸気圧の関係が両者の関数表現を工夫すると近似的直線関係であることからだが、高温高湿試験であること、劣化メカニズムに反応論的要素のないことからアレニウス法という呼び方はそぐわないと云える。

温度と湿度を変えた試験でありながら片方のストレス表現になっているのは温度因子と湿度因子は完全には切り分けできていなく、ある種の共線性が考えられるので、水蒸気圧法が実験結果とよく合うと云っても温度因子が何割かは関係していると判断すべきと思われる。

## 7. まとめ

半導体における加速モデルは樹脂封止内の劣化を早期に判断するためにバイアスも交えて多数提案されてきた。それらを①水蒸気圧法、②温湿度組合せ法、③アレニウス法の三つに分けて考察した。

その結果つぎのことが分かった。

- (1) 温度ファクタと相対湿度ファクタを掛け合わせたモデルは その係数を求める段階での相対湿度一定によって温度ファクタの定数を定める作業は湿度ストレスの実態に合っていないと云える。
- (2) IC の温湿度加速試験結果が水蒸気圧法とアレニウス法という片方のストレス表現であるモデルに合うのは温度値と水蒸気圧値の関数表現を工夫すれば近似的に直線関係によるものである。
- (3) (2) の関係から温度と湿度のストレスの加え方において工夫しないと実験結果の値からだけのモデル係数作成では温度と湿度ファクタを分けることが難しいと云える。

## 参考文献

- [1] MIL-STD-202-106 MOISTURE RESISTANCE
- [2] 梶山 藤田 鷲山: 家庭用表面処理鋼板の新耐食試験方法[ACTE] JFE技報No.12 pp36-41(2006-5)
- [3] 田中 青木 山本 木幡: 結露の影響によるイオンマイグレーション現象の検討 第26回日科技連R&Mシンポ pp.175-180(1996)
- [4] 堤 安田: センサ用ガラス封止サーミスタの故障解析・評価方法の開発と信頼性改善 第18回R&Mシンポ. 日科技連 pp.227-232(1988)
- [5] KEC信頼性分科会: プレッシャークッカーに関する文献調査報告書 関西電子工業振興センター pp.35,36(1983)
- [6] 瀬戸屋: 故障物理と寿命予測 日科技連(2003)p p.179
- [7] ルネサス信頼性ハンドブック pp.3-30
- [8] 安藤: 電子機器の信頼性と寿命予測 pp.14(2001)
- [9] 安食監修: 電子デバイスの信頼性技術 日科技連出版社 pp.238(1988)
- [10] 樋口 熊田 杉本 安食: 熱損失のある集積回路におけるT.H.B.試験法の開発 電子情報通信学会 R78-25 pp.1-7(1978)

(いとう さだのり/イトケン事務所)