高温高湿環境下における銅 / エポキシ樹脂界面の劣化寿命評価

Evaluation of Deterioration Life of Interface of Copper and Epoxy Resin under High Temperature and High Humidity Conditions

戸野塚 悠*・小林 竜也*・荘 司 郁夫*
 外 園 洋 昭**・高 橋 邦 明***・江 連 徳****
 Yu TONOUZUKA, Tatsuya KOBAYASHI, Ikuo SHOHJI,
 Hiroaki HOKAZONO, Kuniaki TAKAHASHI and Toku EZURE

(Received March 30, 2018)

The aim of this study is to investigate degradation behaviors of the adhesion strength of the Cu/resin (bisphenol F-type epoxy resin) interface in soaking under high humidity and high temperature conditions. Thermal humidity tests and highly-accelerated temperature and humidity stress tests (HAST) were conducted and the adhesion strength was investigated by a tensile test. An air-HAST was also conducted for a comparison. The fracture surface was analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) to investigate the degradation mechanism of the adhesion strength. As a result, it was found that the adhesion strength decreases according to soaking and its degradation increases with increasing soaking temperature. Also, the degradation in the HAST is larger than that in the air-HAST. Degree of water absorption in the Cu/resin interface (D_w), which was defined by the results of FT-IR analysis, tends to rapidly increase in early period of soaking and saturate afterwards. Even after absorbing water in the resin by soaking saturated, water infiltrating in the Cu/resin interface induced the formation of copper oxide and caused a further degradation of the adhesion strength. From the Arrhenius plot of the deterioration life of the adhesion strength which was determined by D_w , different tendencies were found in the regions before and after the glass transition temperature of the resin. Thus it was suggested that the life prediction equation for each region is required.

Key Words: Epoxy Resin, Cu, Adhesion, Thermal Humidity Test, HAST, Water Absorption

1. 緒言

近年、電気自動車や産業用機器への適用のため SiC や GaN 等のワイドバンドギャップ半導体の開発が進展している。ワイドバンドギャップ半導体はバンドギャップが広く、熱伝導に優れることから耐電圧に優れ、高温動作が可能である¹⁾。それらの半導体を用いるパワーモジュールは様々な分野への応用が期待されており、使用環境の拡大に向け小型化、高機能化の研究が行われている²⁾。しかし、製品の小型化に伴う高密度化および高電圧化により、今後パワーモジュール用の半導体素子はパワーサイクル負荷時の最高温度が 200℃を超えることが予想されている^{3),4)}。また、さらなる過酷な環境での使用には、温度変化や外部衝撃に耐えられる構造にする必要がある。そのため、モジュールのパッケージには高耐熱性、放熱性、耐衝撃性といった機能が求められる^{5),6)}。これらの問題を解決すべく、モジュールに対

して樹脂封止によるパッケージが施される⁷⁾。しかし、パワーモジュールは使用時に高温になり、かつ長期にわたり使用されるため、基板と封止樹脂の接着界面の劣化が懸念される。また、金属 / 樹脂界面は熱や湿度による影響を受けやすいため、樹脂同士、金属同士の接合強度よりも非常に弱くなる。そのため、基板に用いられる金属と樹脂の接着強度と高温高湿での劣化挙動の検討が、パワーモジュールの高信頼性化には極めて重要となる。

そこで本研究では、銅と封止樹脂に使用されるビスフェノール F 型エポキシ樹脂の接着部を研究対象として、高温高湿時効による銅 / 樹脂界面の劣化挙動を引張試験にて調査し、界面の寿命評価を試みた。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究で使用した樹脂材 (ガラス転移温度 T_g : 106.2℃)

*群馬大学大学院理工学府知能機械創製部門 (〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)
 Division of Mechanical Science and Technology, Gunma University (1-5-1, Tenjin-cho, Kiryu, Gunma 376-8515, Japan)

**富士電機株式会社 (〒 191-8502 東京都日野市富士町 1 番地)
 Fuji Electric Co., Ltd. (1, Fuji-machi, Hino 191-8502, Japan)

***株式会社産業分析センター (〒 340-0028 埼玉県草加市谷塚二丁目 11 番 7 号)
 The Industrial Analysis Service Ltd. (2-11-7, Yatsuka, Soka, Saitama 340-0028, Japan)

****エスペック株式会社 (〒 321-3231 栃木県宇都宮市清原工業団地 23-1)
 ESPEC Corp. (23-1, Kiyohara Kogyodanchi, Utsunomiya, Tochigi 321-3231, Japan)

Table 1 Specification of resin material.

Structural components	[wt ratio]
Bisphenol F diglycidyl ether	100
Bis (4-amino-3-ethylphenyl) methane	40

Table 2 Chemical compositions of Cu rivet.

Chemical compositions [mass%]						
As	Sb	Bi	Pb	S	Fe	Cu
<0.0002	<0.0001	0.00002	0.0004	<0.0010	0.0003	Bal.

の仕様を **Table 1** に示す。ビスフェノール F ジグリシジルエーテルおよびビス (-4- アミノ -3- エチルフェニル) メタンをそれぞれマトリクス樹脂および硬化剤として使用し、それらを混練した後、室温で減圧 70 Pa、2 h の脱泡処理を施した。銅材にはリベット (シャフト部径、ヘッド部径、リベット高さがそれぞれ 2.0、4.0、3.0 mm) を用いた。その組成を **Table 2** に示す。銅材に対し、樹脂の塗布面を #1000 の耐水研磨紙で研磨した後、150℃、60 min + 60℃、60 min の条件で酸化処理を施した。

2.2 試料作製方法および実験方法

銅 / 樹脂接合体の作製は、ステージ温度を 150℃ に設定した継手強度試験機 (レスカ製 STR-1000) を用いて行った。2 つの銅リベット (接着部径: ϕ 2.0 mm) を向かい合わせてリベット間の間隙を 0.1 mm に固定し、間隙部に樹脂を塗布した。その後、ステージ上で 150℃ にて 2 h 加熱することで樹脂を仮硬化させ、加熱炉内にて更に 150℃ にて 2 h 加熱することで完全硬化させた。作製した銅 / 樹脂接合体の外観を **Fig. 1** に示す。

作製した試験片に対して時効処理を 4 条件: 85℃、85% R.H. での Thermal Humidity Test (THT)、110℃、85% R.H. での Highly-Accelerated Temperature and Humidity Stress Test (HAST)、130℃、85% R.H. での HAST、110℃、85% R.H. での Air-HAST を実施した。HAST は、電子機器関連の加速性を伴う耐湿性評価法として、JIS C 60068-2-66⁸⁾ で規定されている。該当規格は IEC 60068-2-66, Environmental testing – Part2: Test methods – Test Cx: Damp heat, steady state (unsaturated pressurized vapour) の翻訳版であり、相対湿度は 85% R.H.、温度は 110℃、120℃ および 130℃ の 3 条件に規定される。本研究では、銅 / 樹脂界面の劣化挙動に及ぼす温度の影響を調査するために、THT の 85℃ も考慮し、HAST の温度は 110℃ および 130℃ の条件とした。処理時間は 100、250、500、750、1000 h とし、時効処理を施さないものについても評価した。**Table 3** に試験条件および試験時の試験槽内の絶対圧の関係を示す。Air-HAST は、槽内に空気を残留させた状態で試験が実施される⁹⁾。本研究

Fig. 1 General view of Cu/Cu joint with resin.

Table 3 Test conditions and absolute pressures.

High Humidity and High Temperature Conditions	Absolute Pressure [MPa]
85℃, 85%R.H. THT	0.1013
110℃, 85%R.H. HAST	0.1218
130℃, 85%R.H. HAST	0.2296
110℃, 85%R.H. Air-HAST	0.2498

Fig. 2 Image of measurement area for IR spectrum.

では、界面に対する空気と水の混合気体の影響を調査し、HAST と Air-HAST の比較を行った。なお、本研究で使用した HAST 試験機の試験室容積は 0.046 m³ であり、Air-HAST 試験開始時にはその容積に相当する空気が入っていた。

時効処理後、引張試験を引張速度 0.1 mm/s にて行い、CCD スコープによる破面観察と Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) による樹脂材の化学構造解析を行った。解析は、破断部の樹脂付着面を、Attenuated Total Reflection (ATR) 法にて、分解能: 8 cm⁻¹ の条件で実施した。IR スペクトルの測定領域を **Fig. 2** に示す。高温高湿の影響は接合部の外周から発生することが予想されるため、測定を破面外周部に限定した。本研究では、引張試験後の破面の端部にて凝集破壊が顕著に確認された。そのため、界面破壊した領域を評価対象とするために、凝集破壊の発生しやすかった破面端部での測定を避けた。測定に使用したアパーチャーサイズが 0.1 × 0.1 mm² であったため、**Fig. 2** の斜線で示した測定領域において界面破壊が生じた領域の残

存樹脂部に対して、任意の3点について測定範囲：0.1×0.1 mm²で測定を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 銅/樹脂接合体の引張強度に及ぼす高温高湿環境の影響

銅/樹脂接合体の引張試験により得られた引張強度と時効時間の関係について、Fig. 3およびFig. 4に示す。なお、図中には測定点より求めた近似曲線も併記している。全ての時効条件において時効時間の増加に伴い、引張強度の低下が確認された。また、Fig. 3より温度上昇に伴い引張強度の低下が大きくなることがわかる。さらに、Fig. 4より110℃、85% R.H. の条件ではAir-HASTよりもHASTの方が引張強度の低下が大きいことがわかる。

3.2 破面観察結果

Fig. 5に各時効条件における引張試験後の破面観察結果を示す。図より、全ての時効条件において接合体の破壊は、ほとんどが銅/樹脂の界面で発生しており、界面破壊の領域では、一方の破面に樹脂が残り、もう一方の破面には銅が露出することが確認された。モノクロモードで示したFig. 5においては銅と樹脂の識別は難しいが、元図であ

るカラーモードのCCDスコープ像より、図の“Resin side”では、図中に付記したように変色等は見られるもののすべての領域で樹脂の残存が見られた。本研究では、破断部の両方のリベットに樹脂が残存した領域の面積をリベットの面積で除した値を凝集破壊率として評価した。凝集破壊率と時効時間の関係を、Fig. 6およびFig. 7に示す。両図より、凝集破壊率は全ての条件において15%以下となることが確認された。このことから、銅/樹脂接合体の引張強度は銅/樹脂界面の接着強度に強く依存することが明らかとなった。さらに、Fig. 5の破面観察結果から、時効時間が増加すると銅の外周部が変色し、時効温度が高いほど1000 h時効後の接合面の銅の変色領域が大きくなることが確認された。以上より、銅/樹脂接着界面の劣化は、高温高湿に曝される外周から発生することが示唆された。また、Fig. 5よりHASTとAir-HASTの樹脂側破面を比較すると、Air-HASTでは樹脂の外周部の変色が確認された。Fig. 5(b)のAir-HASTにおいて銅側の変色域に相対する樹脂側破面の樹脂が黒色に変化していた。よって、Air-HAST条件では熱分解による樹脂自身の劣化も進行していることが考えられる¹⁰⁾。

Fig. 3 Effect of aging temperature on tensile strength of Cu/Cu joint with resin.

Fig. 4 Comparison of HAST and Air-HAST in tensile strength of Cu/Cu joint with resin.

(a)

(b)

Fig. 5 General views of fractured specimens after tensile test by CCD scope. (a) before aging. (b) after aging.

Fig. 6 Effect of aging temperature on cohesive fracture ratio of Cu/Cu joint with resin.

Fig. 7 Comparison of HAST and Air-HAST in cohesive fracture ratio of Cu/Cu joint with resin.

3.3 FT-IR 解析結果

樹脂側破面のFT-IRの解析結果について、条件110℃、85% R.H. HASTを例に測定範囲1500 - 1250 cm^{-1} の結果をFig. 8に示す。時効時間の増加に伴いアミン基の変角振動由来のピーク強度(N-H: 1296 cm^{-1})の減少が全ての条件において確認された。樹脂は高温高湿環境下に曝されることで吸水を引き起こす。この吸水反応により水と反応するアミン基のピーク強度の減少が発生したと推察される。本研究では、銅/樹脂界面での吸水反応によって結合の脆弱化が生じ、Fig. 3及びFig. 4に示したような時効に伴う強度低下が発生したものと考えられる。一般に、樹脂は機械的結合や化学的結合により金属と接着する。機械的結合は樹脂が金属の微細な凹凸に入り込んで硬化し、アンカー効果を引き起こすことで得られ、化学的結合は樹脂が金属表面の酸化被膜と界面で水素結合を形成することで得られる。吸水反応により樹脂が膨張すると、銅との熱膨張差によって接着界面に局所的剥離が生じ、接着力が低下すると考えられる。また、水素結合には界面での水分子の存在が必要不可欠となるが、吸水反応により銅/樹脂接着界面に水分

Fig. 8 Effect of aging treatment of Cu/Cu joint with resin on IR spectrum from 1500 cm^{-1} to 1250 cm^{-1} (110°C, 85% R.H. HAST).

が多量に入り込むと、水素結合の脆弱化が生じることが示唆された。以上より、機械的および化学的結合に吸水反応が作用することで接着強度が低下したと考えられる。

芳香族の伸縮振動に由来するピーク強度($\text{C}=\text{C}$: 1454 cm^{-1})は非常に強固な結合であるため、高温高湿の影響を受けにくい。そこで本研究では、芳香族とアミン基のピーク強度比を算出することでアミン基のピーク強度を定量化し、時効後のピーク強度比と時効前のピーク強度比の差を求めることで(1)式に示す吸水度合い D_w を定義した。ここで、ピーク強度比の差に着目したのは、構造用エポキシ系接着剤における先行研究^{(11),(12)}において、同様の劣化指標の有効性が示唆されたことによる。

$$D_w = \frac{I_b}{I_a} - \frac{I_{b0}}{I_{a0}} \quad (1)$$

D_w : 吸水度合い

I_a : 時効後のアミン基のピーク強度

I_b : 時効後の芳香族のピーク強度

I_{a0} : 時効前のアミン基のピーク強度

I_{b0} : 時効前の芳香族のピーク強度

吸水度合いと時効時間の関係をFig. 9およびFig. 10に示す。図中の曲線は、後述するように、強度劣化寿命の指標として D_w を使用するために、良好なフィッティングが見られたsigmoid曲線で表している。Fig. 9およびFig. 10より、吸水度合いは、時効初期段階では急激に増加し、その後、時効時間750 h以降はAir-HASTを除く全ての条件で、飽和する傾向が見られた。この結果は、樹脂の界面における水の拡散に関するFickの第二法則に基づく吸水時間と濃度の関係に類似している⁽¹³⁾。高温環境下におけるエポキシ樹脂の吸水率は、限定領域ではFick則に一致することが報告されているが^{(14),(15)}、厳密には、Fick則に従う水分子の物理的空間への移動とその後の化学結合による体積変化の2段階の解析が必要となる⁽¹³⁾。本研究の樹脂材に関しては、単

Fig. 9 Change in degree of water absorption of Cu/Cu joint with resin.

Fig. 11 Relationship between tensile strength and degree of water absorption under different aging conditions.

Fig. 10 Comparison of HAST and Air-HAST in degree of water absorption.

Fig. 12 Relationship between tensile strength and degree of water absorption in HAST and Air-HAST.

純な吸水率の評価結果がないため、同様の解析は今後の検討課題である。

Fig. 9 より時効温度が高いほど、時効初期段階の吸水度合いの増加量が大きくなることがわかる。本研究に用いた樹脂は T_g が 106.2°C であり、試験温度域が T_g を跨ぐため、 T_g 以上の温度となる 130°C では樹脂の分子運動の活発化により吸水が促進されたと考えられる。また、Fig. 10 より Air-HAST は HAST と比較して吸水の進行が緩やかであることが確認された。Air-HAST 槽内に充填された空気により、HAST 試験に比べ吸水反応が阻害されたものと考えられる。

Fig. 11 および Fig. 12 に吸水度合いと引張強度の関係を示す。図中には、 130°C 、85% R.H. での HAST を除き、各試験のデータより得られた回帰直線も示した。Fig. 11 より、 85°C 、85% R.H. での THT および 110°C 、85% R.H. での HAST、 110°C 、85% R.H. での Air-HAST では、吸水度合いの増加に伴い引張強度が直線的に減少することが確認された。一方、 130°C 、85% R.H. での HAST では、吸水度合いの飽和後も更なる引張強度の低下が確認された。Fig. 5 の破面観察結果から、樹脂の吸水が飽和状態になった後も銅表面の劣化等から、さらに強度低下が発生したと推察される。銅表面の劣化要因として、酸化膜の成長、粗化が考

えられる。樹脂の吸水による体積膨張に伴い、銅/樹脂界面には水が浸入するのに十分な空間が発生すると考えられる。銅が水と酸化反応を引き起こすために、 130°C 、85% R.H. での HAST における時効時間 1000 h 条件においては、Fig. 5 に示したように、銅表面が局部的に黒色へ変化したと考えられる。銅に形成される黒色酸化物は、層構造が密ではなく機械的性質が弱いためエポキシ樹脂等の有機材料と接着不良を引き起こすことが知られている¹⁶⁾。そのため、高温条件において接合体の強度が急激に低下したと考えられる。

4. 銅/樹脂界面の寿命評価

Dakin が化学反応速度の立場から提案した寿命予測方法を基に、銅/樹脂接合体の劣化寿命について評価した¹⁷⁾。一般に化学反応速度は反応物質の時間による濃度変化によって式 (2) のように表される。

$$-\frac{dc}{dt} = kc^n \quad (2)$$

$$k = A' \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

c : 反応物質の濃度 t : 時間 k : 反応速度定数
 n : 反応次数 A' : 頻度因子
 E : みかけの活性化エネルギー
 R : 気体定数 ($8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) T : 絶対温度 (K)

ここで、強度等の特性値の低下は化学反応の結果であると考えて、特性値 p を濃度 c と同様に扱えると仮定して $c=p$ とおく。化学反応を 1 次反応 ($n=1$) として $\ln p$ を解き、(3) 式を用いて $\ln t$ を解くと式 (4) が求まる。

$$\ln t = \ln \left(\frac{1}{A'} \cdot \ln \frac{p_0}{p} \right) + \frac{E}{RT} \quad (4)$$

P_0 : 反応前の P

故に、 p がある一定値 p' に低下するまでの時間 t を寿命 L とすると式 (5) が得られる。

$$\ln L = \ln A + \frac{E}{RT} \quad (5)$$

A : 頻度因子 L : 寿命

したがって、 $\ln L$ と $1/T$ の直線関係を利用すれば、時効試験結果を外挿して、使用温度における寿命を推定することが可能となる。

本研究では、FT-IR 解析で得られた結果から、吸水度合い $D_w \div 0.1$ を飽和吸水度合いと定義し、飽和吸水度合いの 50% に相当する、 $D_w = 0.05$ に達した際の時間を銅 / 樹脂界面の強度劣化寿命 L と定義することで接合体の劣化寿命を評価した。本研究では、 L と D_w の関係は Fig. 9 および Fig. 10 の各試験におけるデータより導出される回帰曲線によって求められる。本研究では、それらの回帰曲線を (6) 式に示す Boltzmann 関数により sigmoid 曲線として導出した。

$$D_w = \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp\left(\frac{t - t_0}{dt}\right)} + A_2 \quad (6)$$

A_1 : 初期値

A_2 : 最終値

t_0 : センター値

A_1 、 A_2 、 t_0 に関して、Fig. 9 および Fig. 10 に示した吸水度合いの傾向と限りなく一致するよう入力値を求めた。Table 4 に各条件における入力値と寄与率 R^2 を示す。寄与率が全ての条件において 98% 以上であることから曲線式の一致性が確認され、 L と D_w の関係を求める際に、導出した回帰曲線が有用となることが示された。

Fig. 13 に $\ln L$ のアレニウスプロット結果を示す。Fig. 13 より、アレニウスプロットは T_g 付近を境にして多少異なる傾向を示すため、一つの直線で回帰することは困難であることが確認された。これは 3.3 で述べた吸水現象での

考察と同様に、試験温度が T_g (106.2°C) を超えると分子運動が活発化し、吸水反応速度に影響を及ぼすためと考えられる。 T_g 以上の高温域である 130°C 、85% R.H. HAST では接合体界面の吸水による劣化が速いため、寿命が低温域と比較して短い。また、 T_g 前後の温度域でみかけの活性化エネルギーの評価を試みたところ、85-110 $^\circ\text{C}$ 、85% R.H. および 110-130 $^\circ\text{C}$ 、85% R.H. の試験条件において、それぞれ 41.07 および 75.63 kJ/mol となった。測定点が少なく、今後継続して、両領域におけるデータを追加して評価を行う必要があるが、 T_g 前後の温度領域において、それぞれに有効な寿命評価式を構築する必要があると示唆された。

Table 5 に $D_w = 0.05$ の場合の各条件における引張強度 T_D と、時効前の引張強度を 100% とした場合の相対強度比を示す。Table 5 より試験温度の増加に伴い、 T_D が減少することがわかる。Fig. 9 に示したように、吸水度合いは時効初期に急激な増加を示し、その後飽和する傾向がみられる。その傾向は温度が高いほど大きくなるため、時効初期に吸水度合いが急増する 130°C 、85% R.H. HAST では、相対強度は著しく低くなった。Fig. 13 に示したように、本研究の銅 / 樹脂界面の吸水による強度劣化寿命の温度依存性は、 T_g 付近の温度を境に変化することが明らかになった。本研究では、時効時間と吸水度合いの関係を Boltzmann 関数によって導出したが、時効初期段階に発生する高速拡散相および時効終期に発生する低速拡散相をより正確に捉えるには更なる研究が必要と考える。本研究では、飽和吸水度合いの 50% に相当する、 $D_w = 0.05$ を銅 / 樹脂界面の強度劣化

Table 4 Parameters of Boltzmann function in data shown in Figs. 9 and 10.

High Humidity and High Temperature Conditions	A_1	A_2	t_0 [h]	R^2
85 $^\circ\text{C}$, 85%R.H. THT	-0.36048	0.05718	-454.26	0.9919
110 $^\circ\text{C}$, 85%R.H. HAST	-0.01248	0.09227	196.49	0.9995
130 $^\circ\text{C}$, 85%R.H. HAST	-0.05470	0.09687	25.269	0.9957
110 $^\circ\text{C}$, 85%R.H. Air-HAST	-0.06692	0.07109	11.026	0.9834

Fig. 13 Arrhenius plot of $\ln L$.

Table 5 Tensile strength at lifetime (T_D) and relative strength ratio.

High Humidity and High Temperature Conditions	T_D [MPa]	Relative Strength Ratio [%]
85°C, 85%R.H. THT	9.74	85.4
110°C, 85%R.H. HAST	9.29	81.4
130°C, 85%R.H. HAST	6.50	57.0

寿命と定義することで接合体の劣化寿命を評価した。しかしながら、**Table 5**にみられるように界面強度の低下率は14.6～43%と幅が広く、寿命の定義として高精度な検討には至らなかった。樹脂中の水の拡散は前述したようにFickの第二法則に基づく吸水現象を示す。そのため、銅/樹脂界面での吸水を加味した拡散のモデルの構築が必要であり、界面強度と樹脂中の水の拡散係数との関係性や銅界面の劣化に関する調査が今後の課題として挙げられる。

5. 結論

本研究では銅とエポキシ樹脂の接着部を研究対象として、高温高湿時効による銅/樹脂界面の強度低下について調査した。さらに、強度劣化寿命の温度依存性を調査するために、強度劣化の要因となる吸水度合いパラメーターを導入して、アレニウスモデルにて検討を行った。得られた成果を以下に示す。

- 1) 高温高湿時効により、銅/樹脂接合体の引張強度は低下する。また、時効温度の増加に伴い、引張強度の低下が大きくなり、Air-HAST条件よりもHAST条件の方が引張強度の低下が大きい。
- 2) FT-IR解析より定義した銅/樹脂界面における樹脂の吸水度合いは、時効初期において急激に増加し、その後飽和する傾向を示す。
- 3) 時効により樹脂の吸水が飽和した後も銅/樹脂界面に水が浸入することで銅が黒色酸化物を形成し、接着強度の更なる低下を引き起こす。
- 4) 銅/樹脂界面の強度劣化寿命を樹脂の吸水度合いより定義しアレニウスプロットしたところ、 T_g 前後の領域において異なる傾向が見られ、それぞれの領域における寿命予測式の必要性が示唆された。

謝 辞

本研究の成果の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業の補助を受けた。関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高橋良和、藤平龍彦、宝泉徹：“パワー半導体の現状と展望”、

富士電機技報、**87** (2014) 234-239.

- 2) 春日亮：“パッケージ技術動向”、エレクトロニクス実装学会誌、**10** (2007) 353-357.
- 3) 菅沼克昭 監修、中西政隆：“次世代パワー半導体実装の要素技術と信頼性”、シーエムシー出版、(2016) 94-102.
- 4) 平塚大祐、佐々木陽光、井口知洋：“パワー半導体の高温動作を可能にするダイボンド材料及び焼結接合技術”、東芝レビュー、**70** (2015) 46-49.
- 5) S. G. Hong, T. C. Wang: “Effect of copper oxides on the thermal oxidative degradation of the epoxy resin”, Journal of Applied Polymer Science, **52** (1994) 1339-1351.
- 6) N. Y. A. Shammass: “Present problems of power module packaging technology”, Microelectronics Reliability, **43** (2003) 519-527.
- 7) 梨子田典弘、日向裕一郎、堀尾真史：“All-SiC モジュール技術”、富士電機技報、**85** (2012) 403-407.
- 8) JIS C 60068-2-66:2001 環境試験方法－電気・電子－高温高湿、定常（不飽和加圧水蒸気）(2001)
- 9) 鈴木棚、棚橋紀悟、土井卓也、増田淳：“結晶Si太陽電池モジュールにおける高温高湿試験の加速方法の検討”、エレクトロニクス実装学会誌、**18** (2015) 226-234.
- 10) Y. Tonozuka, I. Shohji, S. Koyama and H. Hokazono: “Degradation behavior of adhesion strength between epoxy resin and copper under aging at high temperature”, Procedia Engineering, **184** (2017) 648-654.
- 11) 氷室雄也、定井麻子、松井恵子、住田弘祐、山本研一：“ウェルドボンド用接着剤の市場劣化推定技術の開発”、マツダ技報、**30** (2012) 219-223.
- 12) Y. Tomita, I. Shohji, S. Koyama and S. Shimizu: “Degradation behaviors of adhesion strength of structural adhesive for weld-bonding under high temperature and humidity conditions”, Procedia Engineering, **184** (2017) 231-237.
- 13) M. D. Placet, X. Fan, J.-H. Zhao and D. Edwards: “Dual stage modeling of moisture absorption and desorption in epoxy mold compounds”, Microelectronics Reliability, **52** (2016) 1401-1408.
- 14) H. Shirangi, J. Auersperg, M. Koyuncu, H. Walter, W. H. Muller and B. Michel: “Characterization of dual-stage moisture diffusion, residual moisture content and hygroscopic swelling of epoxy molding compounds”, Proc. of International conference on thermal, mechanical and multiphysics simulation and experiments in microelectronics and micro-systems (EuroSimE 2008), (2008) 1-8.
- 15) H. Shirangi, X. J. Fan and B. Michel: “Mechanism of moisture diffusion, hygroscopic swelling and adhesion degradation in epoxy mold compounds”, Proc. of 41st International symposium on microelectronics packaging (IMAPS), (2008) 917-923.
- 16) H. K. Yun, K. Cho, J. H. An and C. E. Park: “Adhesion improvement of copper/epoxy joints”, Journal of Materials Science, **27** (1992) 5811-5817.
- 17) 栗原福：“プラスチックの劣化”、日刊工業新聞社、(1970) 76.

代表者メールアドレス

荘司郁夫 shohji@gunma-u.ac.jp