

熱硬化性樹脂成形品の残留応力分布・接着界面強度解析

Residual Stress Distribution and Adhesive Interface Strength Analysis of Thermosetting Resin Molding

雁部 竜也 GANBE, Tatsuya

浅井 竜彦 ASAI, Tatsuhiko

岡本 健次 OKAMOTO, Kenji

半導体製品をはじめ、製品の高耐熱化、高耐圧化、小型化に伴い熱硬化性樹脂で封止する製品が増えている。樹脂封止後の製品の信頼性を確保するため、現在はCAE解析による応力解析を用い、製品の構造設計を行っている。しかし、不具合の原因となる樹脂のクラックや、樹脂と構成部材の界面剥離の予測まではできていない。そこで、熱硬化性樹脂の硬化挙動の把握、硬化後の残留応力分布の解析技術、および接着端部の距離に着目した接着界面強度の評価技術を確立した。これにより、熱硬化性樹脂による封止に対応した構造設計システムが構築でき、製品の信頼性を向上できる。

The number of products sealed with a thermosetting resin such as semiconductor products has been increasing as the heat resistance and withstand voltage are improved and the size is miniaturized. Currently, structural design for products is being implemented using stress analysis based on CAE analysis in order to ensure reliability in products sealed with a resin. However, this type of analysis cannot predict resin cracks and interfacial peeling between the resin and component materials that cause failure. We have thus established a method for grasping curing behavior of thermosetting resin, a residual stress distribution analysis technology that can be utilized after curing has completed, and an evaluating technology for adhesive interface strength considering the adhering end distance. As a result, we can now construct structural design systems compatible with thermosetting resin sealing, thus enabling us to improve the reliability of products.

1 まえがき

パワーエレクトロニクス（パワエレ）は、モータコントロール分野では従来の産業機器、鉄道車両から、近年ではハイブリッド自動車や電気自動車などへの適用拡大が、また電力変換分野では太陽光発電や風力発電などの新エネルギーへの適用拡大が進んでいる。このため、パワエレシステムの高効率化や使用環境の多様化が進んでいる⁽¹⁾。

一方、世界人口の増加に伴って電力消費量は2013年の約20兆kWhから2030年には約45兆kWhと大幅に増大することが予測されており、今後よりいっそうの電力削減、エネルギーの高効率利用が必要である⁽²⁾。このような背景から、高効率のSiCパワー半導体を用いたパワーモジュールの開発と実用化が推進されている。このSiCチップを実装したパワーモジュールは、さまざまな使用環境における信頼性を確保するため、熱硬化性樹脂で封止する構造を採用している（図1）。パワーモジュールの回路部は複雑な形状とさまざまな部材で構成されており、熱硬化性樹脂には回路部を隙間なく埋めることと、各部材と密着していることが要求される。

しかしながら、熱硬化性樹脂は、加熱すると反応が進ん

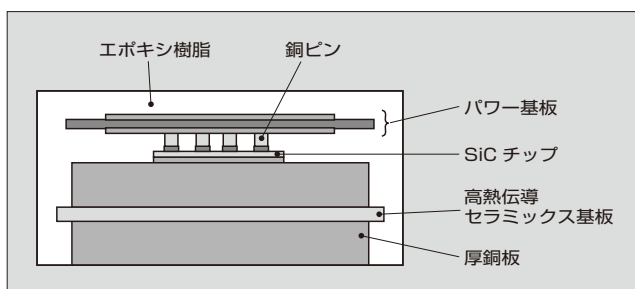


図1 パワーモジュールの断面構造

で粘度が上昇するため、適切でない成形条件では未充填や気泡の巻き込みが生じる。また、樹脂クラックや界面剥離などが生じると信頼性が大きく低下する。したがって、熱硬化性樹脂で封止する製品では、信頼性を確保する上で構造設計と材料設計が重要となる。

熱硬化性樹脂で封止する製品の構造設計を精度よく行うには、熱応力解析と樹脂の硬化挙動を反映する三次元熱流体解析との連成解析技術を確立することが必要である。本稿では、この連成解析技術に必要な残留応力分布と接着界面強度の評価技術について述べる。

2 熱硬化性樹脂

熱硬化性樹脂について、パワーモジュールの封止材として使用されるエポキシ樹脂を例に述べる。エポキシ樹脂は分子構造中にエポキシ基を持つモノマーであり、アミン系または酸無水物系の硬化剤を用いて加熱することにより、エポキシ基を開環し重合（架橋）する。重合の進行に伴って高分子量化することにより、液体からゲル状、固体へと不可逆に変化する樹脂である。

熱硬化性樹脂による封止構造を採用した製品は、次に示す理由により多くなっている。

- (a) パワー半導体：SiチップやSiCチップを搭載するための高耐熱化、高耐圧化の確保
- (b) パワエレ製品：車載用インバータやモータの小型化、および耐振動性や放熱性の確保
- (c) 電源装置：小型化やそれに対応した絶縁性の確保

図2に、熱硬化性樹脂による封止構造を採用した富士電機の代表的な製品を示す。

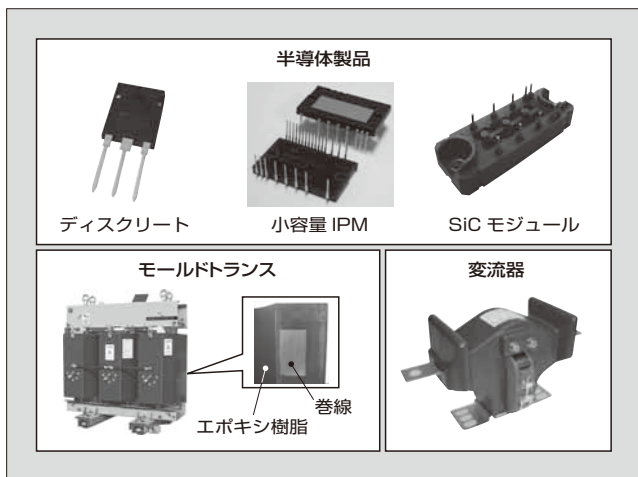


図2 熱硬化性樹脂による封止構造を採用した製品

3 熱硬化性樹脂封止製品の構造設計における課題

熱硬化性樹脂の一般的な成形方法には、トランスファ成形や、液体の樹脂を用いる液状射出成形、注型などがある。それぞれに共通した成形プロセスは、樹脂を流動させることにより所定の型枠に充填し、その後、加熱することにより樹脂を硬化させ、所定の形状に成形することである。これらの成形プロセスにおいては、選択した熱硬化性樹脂に合わせて成形条件を最適化する必要があり、加熱に伴い経時的に変化する挙動を把握することが重要である。

ここでは、主にパワー半導体の封止材として用いられるエポキシ樹脂を例に、製品構造を設計する際に考慮すべき課題である熱硬化性樹脂の硬化挙動と接着界面強度の評価技術について述べる。

3.1 成形プロセスにおける熱硬化性樹脂の硬化挙動

図3に、一定温度によるエポキシ樹脂の粘度の経時変化を示す。エポキシ樹脂は加熱により徐々に硬化が進行し、一定時間経過後に粘度が急激に上昇する。図に示すとおり、粘度上昇時の傾きから外挿した時間をゲル化時間と呼び、これを硬化時間の指標にしている。また、型枠に樹脂が充

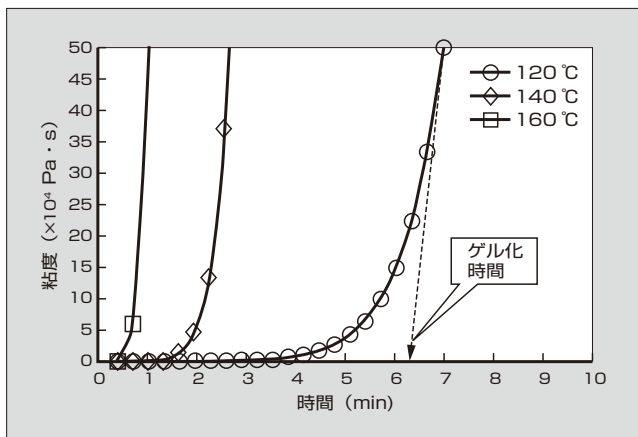


図3 一定温度によるエポキシ樹脂の粘度の経時変化

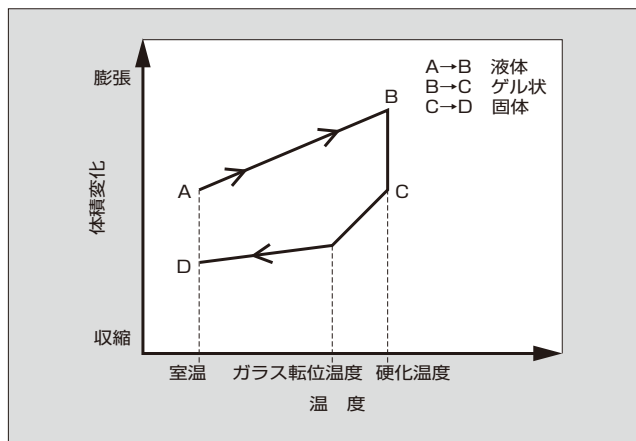


図4 エポキシ樹脂の硬化時の挙動

填可能な粘度の上限に達するまでの時間を、その温度での作業可能時間としている。温度を高くするとゲル化時間が短くなるため、温度と作業可能時間の関係を考慮した樹脂充填プロセス条件の最適化が必要である。

さらに、エポキシ樹脂は硬化時の分子の重合により、体積が収縮する(図4)。硬化時には、成形部材の構造(形状)や加熱方法により樹脂に熱分布が生じる。この熱分布により生じるエポキシ樹脂の硬化反応の速度差が樹脂内部の体積収縮差となる。これにより、エポキシ樹脂に残留応力の分布が発生することが一般的に知られている。

加熱による粘度変化と液体から固体に変化する際の体積収縮は、エポキシ樹脂をはじめとする熱硬化性樹脂の成形プロセスにおいて考慮すべき主な挙動である。

3.2 従来の構造設計方法と接着界面強度評価方法

従来の半導体モジュールの構造設計では、樹脂硬化後の状態をモデルとし、CAE (Computer Aided Engineering) 解析を行っている。したがって、硬化物の物性を弾性体として扱うなど、熱硬化性樹脂の硬化挙動を簡易的に取扱い、設計している。

また、成形した製品の樹脂と構成部材の界面が剥離しないようにする接着界面強度の設計は、ラップジョイント試験片^(注1)を用いて得られた接着界面強度を用いて行っている。

このように、成形時の樹脂の挙動を考慮せず、接着界面強度も正確な見積りができないため、構造設計時に剥離の発生の有無を予想することができない。そのため、信頼性を確保するための試作を繰り返す必要がある。

3.3 構造設計の課題

熱硬化性樹脂が関係する製品の主な不具合には、樹脂のクラックおよび樹脂と構成部材の界面の剥離がある。構造設計では、これらの不具合が発生しない材料の選択と構造を決定することが求められる。そのためには、樹脂の硬化挙動および硬化収縮に伴う残留応力分布を正確に把握した

<注1> ラップジョイント試験片：被着材の重ね合わせ部を熱硬化性樹脂で接着した単純重ね合せ試験片をいう。

上で、実動作時の発生応力を推定し、剝離のしきい値以下であることを評価できるようにすることが必要である。

したがって、構造設計において、樹脂硬化に伴う残留応力分布の解析結果の反映と接着界面強度の評価技術を確立することが課題である。

4 残留応力分布の解析

硬化した樹脂内部の残留応力分布を直接測定することや観察することは難しい。一般的には、ひずみゲージを貼り付けてひずみを測定し、応力に換算することで残留応力を評価する。ただし、ひずみゲージは貼り付けた箇所のみでの測定であることと貼り付ける平面の確保が必要となる。そこで、残留応力分布を把握するため、三次元熱流体解析ソフトウェア^(注2)(FLOW-3D^(注3))を用いたCAE解析による残留応力分布の可視化を行った。

三次元熱流体解析ソフトウェアは、樹脂の材料物性として密度や弾性率、さらには粘度の温度やせん断速度に対する依存性などの実験値から、粘度を温度、せん断速度、硬化反応率の関数として表現するMacoskoモデルを使用する(図5)。また、樹脂の硬化反応に伴う反応速度、反応熱、エネルギーなどの実験値を用いて、反応速度を表現するKAMALモデルを使用する(図6)。この二つのモデルにより、樹脂が液体から固体まで変化する不可逆な変化を

反応速度モデルとして、多種の反応パターンに適用可能なモデル

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2 \cdot \alpha^M)(1 - \alpha)^N$$

$$K_1 = K_a \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{T}\right)$$

$$K_2 = K_b \cdot \exp\left(-\frac{E_b}{T}\right)$$

$$\alpha = \frac{Q}{Q_0}$$

$$\frac{dQ}{dt} = Q_0(K_1 + K_2 \cdot \alpha^M)(1 - \alpha)^N$$

$$\frac{d\alpha}{dt} : \text{反応速度 (s}^{-1}\text{)}$$

α : 反応率

t : 時間 (s)

K_1, K_2 : 温度の関数となる係数

M, N, K_a, E_a, K_b, E_b : 材料固有の係数
(反応速度パラメータ)

T : 樹脂温度 (K)

Q : 任意時刻までの発熱量 (J/kg)

Q_0 : 反応終了時までの総発熱量 (反応速度パラメータ)

$$\frac{dQ}{dt} : \text{発熱速度 (J/kg} \cdot \text{s)}$$

反応速度パラメータ	M	N	K_a	E_a	K_b	E_b	Q_0
単位	-	-	s ⁻¹	K	s ⁻¹	K	J/kg

図6 KAMALモデル

表現し、複雑な形状を伴う製品においても、その熱分布から残留応力分布を計算によって可視化できる。

図7は、厚銅板を樹脂で封止し、樹脂硬化温度から室温まで温度を変化させた際の樹脂内部の応力分布の解析結果である。これは、三次元熱流体解析と、従来の応力解析である樹脂の弾性率と線膨張係数だけを考慮した三次元有限要素法構造解析を比較したものである。従来の応力解析では線膨張係数の異なる部分(樹脂と厚銅板の界面)に応力の高い部分があり、その他の樹脂部分には応力の分布が見られない。三次元熱流体解析を用いた場合は、その熱伝達

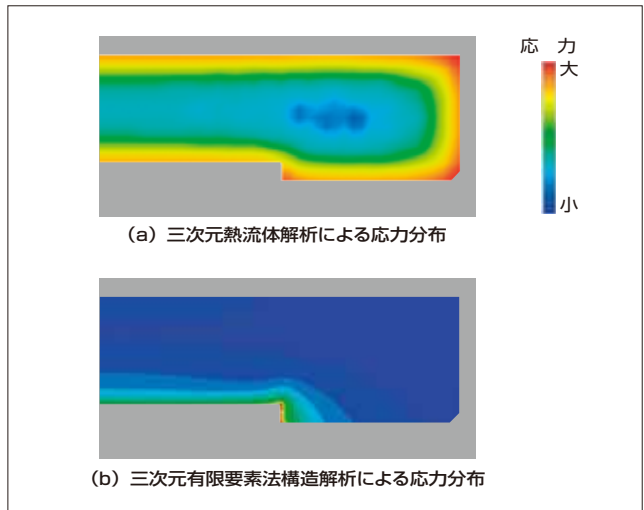


図7 硬化時における樹脂内部の応力分布の解析結果

粘度が温度、せん断速度および反応率の関数として表される最も精緻な粘度式モデル

$$\eta = \eta' \left(\frac{\alpha_{gel}}{\alpha_{gel} - \alpha} \right)^{D+E\alpha}$$

$$\eta' = \frac{\eta_0}{\left[1 + \left(\frac{\eta_0 \gamma}{\tau^*} \right)^{1-n} \right]}$$

$$\eta_0 = F \cdot \exp\left(\frac{G}{T}\right)$$

η : 粘度 (Pa · s)

η' : 温度およびせん断速度依存粘度 (Pa · s)

α_{gel} : ゲル化時の反応率 (粘度パラメータ)

α : 反応率

τ^*, D, E, F, G : 樹脂固有の定数 (粘度パラメータ)

η_0 : せん断速度ゼロ時の粘度 (Pa · s)

γ : せん断速度 (s⁻¹)

n : 構造粘度指数

T : 樹脂温度 (K)

粘度パラメータ	α_{gel}	τ^*	D	E	F	G
単位	-	Pa	-	-	Pa · s	K

図5 Macoskoモデル

〈注2〉 三次元熱流体解析ソフトウェア：コントロールボリュームによるFDM (Finite Difference Method：有限差分法) に基づいて非定常流れを解く汎用3次元CFD (Computational Fluid Dynamics：数値流体力学) ソフトウェア

〈注3〉 FLOW-3D：米国Flow Science Inc.の商標または登録商標

による熱分布から樹脂内部よりも樹脂外周部に応力の高い部分が存在することが分かる。樹脂硬化後の残留応力分布において、三次元有限要素法構造解析との差は明らかである。また、これとは別に樹脂および厚銅板の界面のひずみ量や、樹脂収縮量分布において解析と実験を比較し、三次元熱流体解析の結果は妥当であることを確認している。

5 接着界面強度評価技術の確立

ラップジョイント試験片を使った実測とCAE解析を行い、接着界面強度について考察した。

まず、接着界面強度（破断荷重／接着面積）のラップ長に対する依存性を調べるため、ラップ長を標準的な10mmから、より短い2mmまで変化させて試験を行った。その結果を図8に示す。接着界面強度は接着面積（ラップ幅×ラップ長）に依存しないと考えられるので、破断荷重はラップ長に比例することになる。しかし、実際は破断荷重にはラップ長の依存性がほとんどなく、一定であった。このことから、ラップ長に依存しない特定の部分で接着界面強度が決まっているものと推察される。

次に、ラップジョイント試験片の1/2対称モデルを使用してCAE解析を行ったところ、破断時の荷重を与えたときの応力分布は図9のようになった。幅1mm以下の接着端部に大きな応力が集中しており、ラップ長が長くなっても破断荷重に大きく寄与しない、応力の低い中央部分が多くなるだけであることが分かった。なお、この応力集中は、せん断力だけではなく、引張り力も混在した強度となっていると考えられる。そこで、CAE解析から得られたミーゼス応力^(注4)と実験で得られた接着界面強度を比較したところ、よく一致していることが分かった（図10）。このように、製品不具合である界面剥離に至る接着界面強度がCAE解析で推定できるようになった。

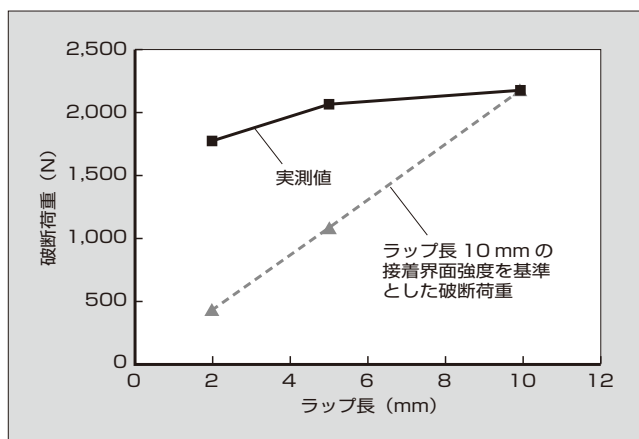


図8 破断荷重のラップ長に対する依存性

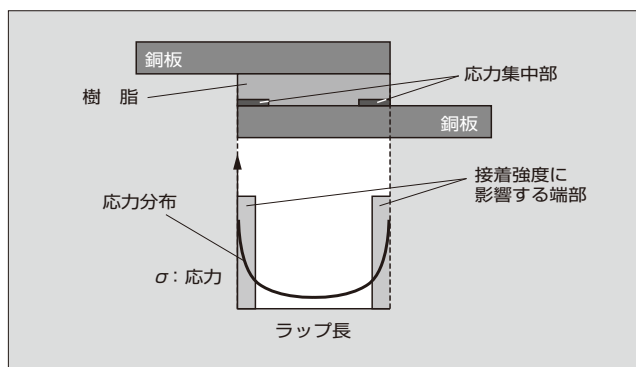


図9 ラップジョイント試験片の接着部の応力分布

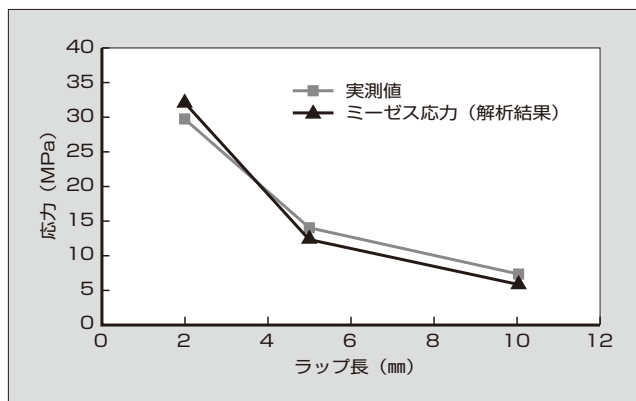


図10 ラップ長を変更した接着界面強度の評価結果

6 今後の課題

熱硬化性樹脂による封止では、実際の樹脂挙動を把握することが重要であるため、残留応力分布を三次元熱流体解析により把握する技術を構築した。また、樹脂剥離についてもその判定値となる接着界面強度を求める評価技術確立した。

今後は、残留応力を考慮した熱応力解析のツール化を推進するとともに、熱硬化性樹脂の物性および熱硬化性樹脂と各種構成部材との接着界面強度についてデータベースを拡充していく。

7 あとがき

熱硬化性樹脂成形品の残留応力分布および接着界面強度解析について述べた。新製品開発や系列拡大、機器の小型化に伴う製品構造の複雑化など、熱硬化性樹脂による封止が必要な製品が多い。熱硬化樹脂による封止に対応した構造設計システムの構築により、半導体製品などのタイムリーな供給と信頼性向上に貢献していく所存である。

〈注4〉ミーゼス応力：せん断ひずみエネルギー説に基づく相当応力である。この応力が降伏応力を超えると塑性変形が起きる。1900年代に科学者フォン・ミーゼスによって提唱された。

参考文献

- (1) 渡邊裕彦ほか. 電子部品と実装技術における現状および今後の展望. エレクトロニクス実装学会誌. 2016, vol.19, no.1, p.22-26.
- (2) 西村芳孝. パワーエレクトロニクスにおける実装技術の展望と現状. エレクトロニクス実装学会誌. 2016, vol.19, no.1, p.72-75.



雁部 竜也

半導体製品の封止材や絶縁材の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所基礎技術研究センター材料基盤技術研究部。



浅井 竜彦

パワー半導体など電子機器に関する実装技術開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所基礎技術研究センター材料基盤技術研究部主査。エレクトロニクス実装学会会員。



岡本 健次

樹脂材料および絶縁技術の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所基礎技術研究センター材料基盤技術研究部マネージャー。博士(工学)。電気学会会員, エレクトロニクス実装学会会員。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。