液状エポキシ樹脂の硬化過程における収縮に起因する応力の解析*

西村 哲郎^{*1}, 中川 泰忠^{*1}Analysis of Stress due to Shrinkage in Hardening Process
for Liquid Epoxy ResinTetsuro NISHIMURA^{*2} and Yasutada NAKAGAWA^{*2} Toshiba Corp., Corporate Manufacturing Engineering Center,
Shinisogo-cho 33, Isogo-ku, Yokohama, 235-0017 Japan

These days, epoxy resin is applied to manufacturing of more compact and thinner components for package of electronic devices and others. Epoxy resin has superior properties for heat resistance, insulation and strength, however, defects such as deformations and cracks often occur because of stress concentrations. It is important to know inner stress for resin solidification in molding processes. By combination of numerical analyses of heat rises due to chemical reactions with the experiments of shrinkage and strain measurements for hardening epoxy resin, it becomes possible to analyze hardening shrinkage stress. The developed analysis method contributes to realizations of high reliability for components made of epoxy resin.

Key Words: Chemical Reaction, Solidification, Heat Transfer, Epoxy Resin, Shrinkage, Stress

1. 緒 言

エポキシ樹脂は、耐熱性、電気絶縁性、強度に優れているために、絶縁・構造部材として広く用いられている。しかし近年、エポキシ樹脂を用いて微細な形状を成形するニーズが拡大している。例えば、半導体素子をフリップチップ実装する時のアンダーフィル工程では、素子と基板の間に存在する $100 \times 10^{-6} \text{m}$ レベル以下の非常に薄い間隙に樹脂を流し込む⁽¹⁾。この薄肉成形においては、同時に電気信号を入出力する数多くの金属パンプをインサート成形することが要求される。このような微細な形状の成形では、樹脂の収縮応力によって応力集中が生じやすくなり、局所的な変形やクラックが発生しやすいという問題がある。

一般に、エポキシ樹脂成形品に発生する収縮応力の要因として、熱収縮と硬化収縮を挙げることができる。これらの要因のなかで、硬化した樹脂が常温にまで冷却される過程で生じる熱収縮応力は、硬化した樹脂の

熱膨張係数に着目して解析することができる。また成形品の残留応力は、この熱収縮応力により論じられることが多い。

一方硬化収縮は、可塑化状態にある樹脂が加熱されて、反応しながら硬化していく時に生じる。しかし、化学反応と硬化収縮との関係を理論的に定量化することが困難であり、硬化収縮応力の解析法は、ほとんど確立されていない。

そこで筆者らは、硬化収縮過程で発生する応力の解析法を開発するとともに、成形過程における応力発生 の要因を解析的に明らかにした。樹脂は金型内へ流動する時にはすでに硬化が始まっている。さらに硬化は樹脂流動と密接に絡み合って複雑に進行すると考えられる。しかしここでは、樹脂流れの硬化に与える要因を除き、あわせて硬化により発生する応力を詳細に調べるために次のように解析をすすめた。

(1)まず、液状エポキシ樹脂が十分に大きな金型に充填され、その後、成形品全体が十分に長い時間を費やして硬化していく系を対象とした。そして、樹脂に生じる硬化収縮応力を、ひずみゲージを応用して評

原稿受付 2000年1月11日。

^{*1} 正員、(株)東芝、(〒235-0017 横浜市磯子区新磯子町33)。

E-mail: tetsuro2.nishimura@toshiba.co.jp

価した。

(2)硬化収縮については、実験により体積収縮率を評価し、硬化反応率との関係を示す実験式を導出して定量化した。

ここでは、以上のような実験的手法を取り入れて開発した硬化収縮応力の離散的解析法とその有用性について報告する。

2. 主な記号

A:頻度因子

B:樹脂が反応を開始してから完了するまでに発生する全反応熱量

E:活性化エネルギー

k:速度定数

N:反応次数

Q:単位時間あたりに発生する樹脂の反応熱量

R:気体定数

T:樹脂の温度

t:時刻

α : 反応率

3. 解析対象

3.1 成形品および金型の設計 成形品形状を図1に示す。また図2は金型の形状を示している。ここでは、xy面内における硬化収縮応力を解析することとし、成形品と金型を次のように設計した。

- (1)図2に示すように、金型の上部にゲートを設け、液状エポキシ樹脂は、ゲートから供給するようにした。
- (2)図1に示すように、成形品は円板形状である。ひずみゲージを用いて収縮応力の分布を評価するために、十分に大きな形状とした。すなわち、直径は $510 \times 10^{-3} \text{m}$ 、平均肉厚は $50 \times 10^{-3} \text{m}$ である。
- (3)図2に示すように、金型内の P1～P6 にひずみゲージを配置し、両矢印で示したように、半径方向のひずみを成形品の中立面で計測するようにした。
- (4)ここで、ひずみゲージを金型内に位置させるために、金属インサートを3個設置した。そして、図2に示すように、相異なる金属インサートの間およびインサートと金型との間にエポキシ樹脂で製作した板を橋渡しし、ゲージを樹脂板の上に固定した。なお、中心軸に対して樹脂が対称に収縮するように、3個の金属インサートは、中心軸に対して対称に配置した。
- (5)成形過程で収縮応力によるひずみが顕著に生じるように、収縮によって発生する変位を xy 面内で部分的に拘束した。変位の拘束は、金型の外周凹凸

Fig.1 Component for analysis

Fig.2 Mold design and location of strain gauges

Table 1 Material properties for aluminum

Temperature(K)	293	373	573
Conductivity (W/(m · K))	2.04×10^2	2.06×10^2	2.30×10^2
Specific Heat(J/(kg · K))	9.00×10^2	9.41×10^2	1.04×10^3
Density(kg/m ³)	2.70×10^3		

Table 2 Hardening reaction constants for resin

N	A(1/s)	E(J/mol)	B(J/kg)
2.0	5.44×10^3	5.85×10^4	5.7×10^4

溝部および金属インサートによって行った。

(6)樹脂を均一に加熱するために、金型と金属インサートの材料には、熱伝導率の良好なアルミニウムを用いた。アルミニウムの材料定数を表1に示す。

3.2 材料定数

3.2.1 液状エポキシ樹脂の硬化反応に関する定数⁽²⁾

反応次数、頻度因子、活性化エネルギーおよび全反応熱量を表2に示す。

3.2.2 熱伝導解析に関する定数⁽²⁾ 表3に、樹脂の液体の状態および固体の状態における比熱の温度依存性データおよび密度を示す。表4には樹脂の熱伝導率の温度依存性に関するデータを示す。上段が、液体状態、下段が硬化後の固体状態における値である。

3.2.3 応力解析に関する定数 液状エポキシ樹脂の硬化収縮応力を解析する定数を表5に示す。ポアソン比は0.35とした。表6は樹脂の固体状態における定数である。

4. 解析方法

4.1 樹脂の反応熱量の算定⁽²⁾ エポキシ樹脂は硬化する時に反応により発熱する。次に硬化発熱量の数学モデルを示す。

4.1.1 反応熱量 反応速度と反応率との関係が式(1)で示すことができるとした。

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1-\alpha)^N \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで k は、Arrhenius の法則にしたがい、式(2)で表される。

$$k = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

単位時間あたりに発生する反応熱量は、反応速度に比例すると仮定すると、反応速度と全反応熱量との積によってあらわされ、式(3)に示す関係がえられる。

$$Q = \left(\frac{d\alpha}{dt}\right) B \quad \dots\dots\dots (3)$$

4.1.2 等温状態における反応率と反応熱量の変化

反応率の変化は、式(1)および式(2)において、温度が一定であるとして積分した式(4)により表現される。すなわち、

$N \neq 1$ とすると、

$$\alpha(t)_{T=\text{const.}} = 1 - \{(N-1)kt + 1\}^{1/(1-N)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

反応熱量の変化は、式(1)から式(4)を用いることにより、明らかにすることができる。

4.1.3 非等温状態における反応率と反応熱量の変化

時刻 t_{n-1} までの反応率履歴と、この時刻における樹脂温度 T_{n-1} 、反応率 α_{n-1} は既知とする。また、 t_{n-1} から t_n までに経過する時間を Δt とする。 Δt が十分に小さければ、 t_{n-1} から t_n までの樹脂温度の変化は小さく等温状態にあると考えることができる。この区間における反応率は、式(4)に T_{n-1} を代入してえられる反応率と時刻との関係において、反応率が α_{n-1} に到達した後の変化と同様に変化すると仮定した。

以上の数学モデルを適用すると、 t_n における α_n は、温度を T_{n-1} として式(1)を t_{n-1} から $t_{n-1} + \Delta t$ まで積分

Table 3 Specific heat and density of epoxy resin

Liquid state					
Temperature (K)	363	373	383	393	403
Specific heat(J/kg· K)	1.28 × 10 ³	1.31 × 10 ³	1.32 × 10 ³	1.34 × 10 ³	1.35 × 10 ³
Density (kg/m ³)	2.20 × 10 ³				
Solidified state					
Temperature (K)	363	373	383	393	403
Specific heat(J/kg· K)	1.23 × 10 ³	1.25 × 10 ³	1.27 × 10 ³	1.28 × 10 ³	1.30 × 10 ³
Density (kg/m ³)	2.20 × 10 ³				

Table 4 Thermal conductivity of epoxy resin

Liquid state			
Temperature (K)	368	383	398
Conductivity (W/(m·K))	5.99×10^{-1}	5.95×10^{-1}	5.86×10^{-1}
Solidified state			
Temperature (K)	369	382	398
Conductivity (W/(m·K))	1.00	9.55×10^{-1}	8.29×10^{-1}

Table 5 Mechanical properties of epoxy resin for hardening processes

Reaction Rate(%)	Temperature (K)	Young's modulus(MPa)
70.6	373	1050
78.9	373	1200
78.9	388	1200
78.9	403	1200
85.1	373	2300
85.1	388	1950
85.1	403	1200
91.3	373	3900
91.3	388	2500

Table 6 Mechanical properties of epoxy resin for solidified state

Temperature (K)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Heat Extension Coefficiency (10 ⁻⁵ /K)
297	10910	0.308	2.88
343	9180	0.314	3.41
363	8360	0.319	3.76
383	7140	0.320	4.91
403	510	0.463	10.57

することにより求めることができる。すなわち、

$$\int_{\alpha_{n-1}}^{\alpha_n} \frac{d\alpha}{(1-\alpha)^N} = k \int_{t_{n-1}}^{t_{n-1}+\Delta t} dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

さらに式(5)から式(6)をえることができる。

$$\alpha_n = 1 - \left\{ (1 - \alpha_{n-1})^{1-N} + (N-1)k\Delta t \right\}^{1/(1-N)} \quad \dots\dots (6)$$

また、 t_n における反応熱量は、式(6)によってえることのできる α_n を用いて式(3)から算出することができる。

4.2 樹脂の体積収縮率の評価 硬化過程における体積収縮は反応率に支配される。そこで、等温状態において体積収縮率と反応率との関係を調べ、この特性を表現する実験式を求めることとした。

4.2.1 実験装置の概要 図3に示すように、温度 T_s に保った金属容器の中には温度 T_s の液状エポキシ樹脂が入っている。また樹脂の上には、より比重の小さなシリコンオイルが、温度 T_s に保たれて満たしてある。透明なガラス管は、その先端がシリコンオイルに到達するように挿入されている。さらに金属容器は温度 T_s に保持した不燃性油を満たしたオイルバスに入れられている。

4.2.2 体積収縮率と時刻との関係の評価 時刻 t_0 におけるエポキシ樹脂の体積を V_0 とし、時刻 t_n における体積を V_n とすると、体積収縮率 VS_n は式(7)により表される。

$$VS_n = \frac{V_0 - V_n}{V_0} \quad \dots\dots\dots (7)$$

等温状態に設定する温度 T_s は378K、388K、398Kの3種類とした。そして各時刻における $V_0 - V_n$ を、ガラス管のシリコンオイル液面高さが低下する量を読み取って評価した。

4.2.3 反応率と体積収縮率との関係の評価 等温状態における反応率と時刻との関係は式(4)により与えられる。そこで、4.2.2項の実験結果と式(4)から体積収縮率 VS_n を反応率 α_n の関数として式(8)の形で与えた。

$$VS_n = f(\alpha_n) \quad \dots\dots\dots (8)$$

4.3 金型内の樹脂に発生するひずみの計測 ひずみゲージの仕様は、ゲージ長 $1.0 \times 10^{-3} \text{m}$ 、見掛けのヤング率 $3.5 \times 10^4 \text{MPa}$ 、最高使用温度423Kである。液状エポキシ樹脂の硬化過程における弾性率は、ひずみゲージ自体の弾性率よりも十分に小さいために、通常の方法では正確なひずみを求めることは困難である。そこで、次の方法を採用した。すなわち、

- (1) ひずみゲージでは、硬化していく樹脂の見掛けのひずみ ε_n を検出する。
- (2) 真のひずみ ε_t は実測した体積収縮率から式(9)を用いて算出する。

$$\varepsilon_t = 1 - (1 - VS_n)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Fig.3 Measurement of volume shrinkage for hardening liquid epoxy resin

Fig.4 Measurement of strain for hardening liquid epoxy resin

Fig.5 Analysis of stress due to hardening shrinkage for liquid epoxy resin

図4は見掛けのひずみ ε_n と体積収縮率 VS_n との関係を求める装置である。温度 T_s に保った一方の金キシ樹脂およびシリコンオイルが入っており、シリコンオイル中にはガラス管が挿入されている。もうひとつの容器には温度 T_s に保った液状エポキシ樹脂を入れ、その中にひずみゲージを投入する。この2つの容

器を温度 T_s に保持したオイルバスに入れ、硬化反応による体積収縮率に対する見掛けのひずみを検出する。

4.4 硬化収縮応力の解析 図1に示した成形品を成形する過程で発生する硬化収縮応力を解析した。解析の概要を図5に示す。すなわち、この解析は5つのフェーズに分けられる。

- (1) 加熱を開始してから所定の時間増分ごとに反応熱量を算出した。さらに、この反応熱量を入力条件とし、樹脂、インサート材料および金型材料の材料定数については、それぞれ温度依存性を考慮し、樹脂温度 T_n と時刻 t_n との関係を有限要素法により非定常解析した。次に式(6)を使用して、時刻 t_n に対する反応率 α_n を求め、反応率 α_n と樹脂温度 T_n との関係を求めた。
- (2) 表5を線形補間し、 α_n 、 T_n からヤング率 E_n を求めた。
- (3) 実験式(8)から、反応率 α_n における体積収縮率 VS_n を求めた。
- (4) VS_n 、 E_n 、 ν_n より α_n に対するひずみ ε_n を求めた。
- (5) 有限要素法により、 ε_n 、 E_n および ν_n から応力 σ_n を求めた。

5. 解析

5.1 概要 解析の対象とした系を図6に示す。ここで、金型および金属インサートの剛性は樹脂に対して十分に高いと考え、金型とインサートは剛体とみなした。

まず第1ステージとして、樹脂を充填した金型を雰囲気温度 388K に設定した十分に大きな加熱炉に入れ、樹脂を金型内部で反応率 70%まで硬化させる場合の応力を解析した。さらに解析結果を、ひずみの計測結果から算出した応力値と比較検証した。材料定数の中で、表3および表4については樹脂の液体状態における値を用いた。

第2ステージでは、境界条件を変更して解析することとした。すなわち、第1ステージで硬化させた成形品を金型から取り出し、雰囲気温度 388K のもとで加熱を続け、反応率を 70%から 90%まで硬化させる場合を解析した。この解析に必要な樹脂の材料定数は、表3および表4の中の固体状態における値を用いた。

5.2 境界条件

樹脂と金型との境界には、次のような境界条件を与えた。すなわち、

- (1) 樹脂と金型との間にはすべりが発生している。このすべりにおいて摩擦力は作用していない。
- (2) 樹脂は硬化収縮しても、金型に食い込みこむように

Fig.6 Outline of processing for analysis

Fig.7 Relation between time and reaction rate for isothermal heating

Fig.8 Volume shrinkage for isothermal heating

は変位しない。

5.2.1 第1ステージ 熱解析では金型表面はアルミニウムの酸化面であり、輻射率を0.15⁽³⁾とした。また、金型表面と炉内雰囲気との間に強制対流熱伝達係数を定義した。そして、 h の算出には、西川ら⁽³⁾の平板に沿う大気圧の空気に対する式を用いた。SI単位に換算して式(10)および式(11)に示す。すなわち、 $u' \leq 5m/s$ で

ある時,

$$h = 4.3 \times 10^3 + 2.9 \times 10^3 u' \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$u' = u_{\infty} \times 293 / T_a \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで, h : 強制対流熱伝達係数($W/(m^2 \cdot K)$), T_a : 空気の温度(K), u_{∞} : 主流の速度(m/s), u' : 293K における換算流速(m/s)である. なお, 主流の速度 u_{∞} は実測値の平均値より 1.0 m/s を与えた.

解析する形状の対称性より, 図 1 における中心軸を含む yz 面を断熱面と定義した. 応力解析では, 解析形状の対称性より, 図 1 における中心軸を含む yz 面において, x 方向の変位を 0 とした. また, この面に存在する節点の回転も 0 とした. 外周凹凸溝部においては, 樹脂が半径方向に変位する成分を拘束した.

5.2.2 第 2 ステージ 応力解析において, 第 1 ステージで設定した外周凹凸溝部における変位の拘束を除いた.

6. 結 果

6.1 液状エポキシ樹脂の反応率履歴 硬化温度 378K, 388K, 398K に対し, 式(4)を計算した結果を図 7 に示す. 等温状態に保つと, 反応率は初めは著しく上昇するが, 時間の経過とともにゆるやかに上昇するようになり, 反応率は 100% に近づく. また, 早い時刻においては, 設定した硬化温度が高いほど反応率の上昇は著しい.

6.2 樹脂の体積収縮率の評価 等温状態における樹脂の体積収縮率と時刻との関係を図 8 に示す. プロットした点は硬化温度 378K, 388K, 398K に対する実験値であり, 図 3 に示す装置を用いて計測した. 加熱を開始すると体積収縮率は著しく増大し, その後収縮率の増加は次第にゆるやかになる. また, 硬化温度が高いほど, 加熱初期において体積収縮率は顕著に増大する. この実験値と式(4)を用いて, ゲル化後における体積収縮率と反応率を関係づける実験式を求めた.

まず図 8 より, 時刻 t_n における体積収縮率 VS_n を, 最も高い硬化温度 398K について求めた. 一方, 式(4)より, 硬化温度 398K に対する時刻 t_n における反応率 α_n を求めた. この時, 時刻 t_n において体積収縮率 VS_n と反応率 α_n との関係は式(12)で与えられる.

$$VS_n = 3.39 \times 10^{-2} \alpha_n - 1.45 \times 10^{-2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

次に, 式(12)および式(4)を用いて体積収縮率と時刻との関係を求めた. 図 8 に示した曲線が結果である. ここで, 硬化温度 398K はもとより 388K, 378K に関する曲線も, プロットした実験値と良好に一致して

Fig.9 Calibration of strain gauge

Fig.10 Comparison of analyzed stress with measured ones at neutral plane

Fig.11 Stress distribution of surface due to hardening shrinkage

いることがわかる. また, 等温状態において反応率の時間変化を式(4)により与えることが妥当であることが確認できる. さらに式(12)を用いると, 各硬化温度に対して, 反応率から体積収縮率を算出することが可能であることも明らかになった.

6.3 金型内の樹脂に発生する応力の評価

6.3.1 ひずみの評価 図 4 の装置を用いて体積収縮率 VS_n と見掛けのひずみ ε_n との関係を求めた. 図

9の実線は、式(9)を用いて体積収縮率より算出した真のひずみ ε_t と見掛けのひずみ ε_n との関係を示している。この実線を近似する2次曲線を破線で示す。この破線は式(13)で表現される。

$$\varepsilon_t = 2.334 \times 10^{-1} \varepsilon_n^2 + 3.871 \times 10^1 \varepsilon_n - 2.670 \times 10^3 \quad \dots\dots\dots(13)$$

そこで、この式を用いてひずみゲージによるひずみの検出結果から真のひずみを求めた。

6.3.2 硬化収縮応力の検証

図2に示す実験金型の中で硬化していく樹脂の硬化収縮応力に関し、解析結果と計測結果を比較した。結果を図10に示す。この図において、解析した応力とは、硬化収縮応力を3次元解析し、P1～P6における応力の半径方向成分を算出した値である。また、計測した応力とは、P1～P6における見掛けのひずみ ε_n から、式(13)により真のひずみ ε_t を算出し、さらにヤング率を乗じた値である。

両者の差異は10%以内で良好に一致している。

7. 考 察

実際の樹脂成形品の機械的特性には異方性がある。また、ウェルドラインのように、局部的に強度が低下する部位も存在する。したがって、検討対象とする成形の課題により、評価する応力の種類は異なると考えられる。そこで、ここでは代表的な応力成分である最大主応力により、インサート部近傍および外周凹凸溝部に着目して応力現象を考察した。

7.1 硬化収縮応力を支配する要因

7.1.1 第1ステージ 成形品の中立面では、解析結果および計測結果いずれも外周部に近いP1～P3のほうが、より中心部に近いP4～P6よりも大きな引張り応力がみとめられている。

一方、図11は反応率70%における成形品表面の最大主応力分布である。インサートに接している樹脂のP7に発生する最大主応力は、7.3MPaと算出された。また、本成形品の最も大きな最大主応力はP8において12.0MPaと算出された。しかし同時に、P8を含む丸印で示した狭い領域において、最大主応力の最小値は-4.1MPaであった。このように、外周凹凸溝部では、狭い領域に複雑に応力が分布していることがわかる。

以上の応力分布より、次の3点を考察することができる。

(1) 金型の外周凹凸溝部に充填されている樹脂が、成形品全体の中心方向への収縮挙動を妨げ、成形品には半径方向に引張り力が発生している。P1～P6にお

Table 7 Stress estimation as maximum principal stress through two stages

Reaction rate (%)		Maximum principal stress(MPa)	
Settled atmosphere temperature(K)		P7 near insert	P8 at outer area
Initial condition	0 293	None	None
First stage	70 388	7.3	12.0
Second stage	90 388	9.3	Nearly 0.0

Fig.12 Concept of stress analysis for heat shrinkage

Table 8 Residual stress estimation as maximum principal stress

Reaction rate (%)		Maximum principal stress(MPa)	
Settled atmosphere temperature(K)		P7 near insert	P8 at outer area
Case 1			
Initial condition (Second stage)	90 388	9.3	Nearly 0.0
After heat shrinkage	90 293	65.9	Nearly -20.0
Case 2			
Initial condition	None (388)	None	None
After heat shrinkage	None 293	32.9	Nearly 0.0

いてみとめられた半径方向の引張り応力は、この引張り力が要因である。

(2) 外周凹凸溝部における複雑な応力分布は、引張り力の反力によって生じている。

(3) 図8および図7により、樹脂が著しく収縮するのは、反応があまり進行していない時点である。すなわち、外周凹凸溝部の複雑な応力分布は、樹脂の変形抵抗が十分に小さい時点で形成されと考えられる。

第1ステージのように金型内部で硬化収縮現象が発生する過程においては、樹脂の収縮を拘束する部位で収縮力に対する反力が発生し、特にその部位が微細な形状である場合には、変形が生じる可能性がある。

7.1.2 第2ステージ 第2ステージを完了した成形品の最大主応力を、第1ステージと比較して表7に示す。第2ステージを完了すると、外周凹凸溝部全域において最大主応力はほとんどみとめられなかった。最も大きな最大主応力はP7において算出され、その値は9.3MPaであった。すなわち、第2ステージを完了すると、第1ステージと比べて応力は著しく変化する。

外周凹凸溝部の応力が著しく減少した理由は、成形品が金型から取り出されたために、外周凹凸溝部における収縮力の反力がなくなったためである。また、インサート部に接している樹脂で応力が增大しているのは、外周凹凸溝部における反力がなくなったことに加えて、反応率の増加にともない収縮が進んだためであると考えられる。

7.1.3 まとめ 反応は硬化温度、硬化時間と関係し、応力の発生に影響を与える。したがって、成形品や金型の設計は、このような成形プロセスと関連づけて論じることが重要である。提示した解析法は、硬化過程という樹脂の変形抵抗が小さな領域における応力の分布を成形プロセスと関係づけて検討し、応力の偏りがより小さくなる成形品・金型設計に反映させることができると思われる。

7.2 硬化収縮応力が成形品の残留応力に与える影響

残留応力は熱収縮応力解析により検討されることが多い。しかし、硬化収縮現象が残留応力に与える影響はほとんど知られていない。

そこで、硬化収縮応力解析により求めたひずみが残留応力に与える影響を考察した。なお、以下に記述した熱収縮応力解析では、温度依存性を考慮した材料定数を用いている。各温度に対するヤング率、ポアソン比、熱膨張係数を表6に示す。

解析は次の2つのケースについて行った。

ケース1：図12に示すように、第2ステージまでを完了した樹脂が、常温にまで冷却される場合を検討した。すなわち、硬化収縮応力解析によって算出したひずみ分布および温度分布を初期条件とし、293Kまで冷却される成形品の熱収縮応力を解析した。

ケース2：硬化収縮によるひずみは考慮せず、初期条件としてステージ2を完了した成形品の温度分布のみを与え、293Kまで冷却される時の熱収縮応力を求めた。

表8には、2つのケースに関する解析結果を比較して示す。結果の要点は次の通りである。

- (1) ケース1では、インサート近傍のP7においては65.9MPa、外周凹凸溝部のP8では-20.0MPaの最大主応力が算出された。
- (2) ケース2では、P7における応力は32.9MPaであるが、インサート近傍以外の部位では最大主応力はほとんどみとめられていない。

すなわち、硬化収縮によるひずみを与えて熱収縮応力を解析する場合と、ひずみを与えないで解析する場合とでは、結果に著しい差異が生じた。本解析では、硬化収縮を考慮すると、特にインサート近傍で2倍程度の大きな応力が算出された。

以上の結果は、硬化収縮は、成形品の残留応力に大きな影響を与えうる可能性を示唆している。熱収縮応力解析と連携させることにより、これまで以上に正確に残留応力を推定することができると考えられる。

8. む す び

液状エポキシ樹脂を対象とし、硬化収縮応力の解析が可能であることを示した。また提示した解析法は次の3点において、工業的に有用であると考えられる。

- (1) 硬化過程で発生する成形不良の要因を防止し、成形品の信頼性向上に寄与させることができる。
- (2) 提示した解析法を熱収縮応力解析と併用することにより、成形品の残留応力をより正確に解析し、成形品の構造設計に反映させることができる。
- (3) 特に、電子デバイスおよび実装の構造はますます薄型化、微細化するものと予測される。樹脂に発生する応力やひずみを低減する成形法の開発が急務であり、本研究で示した数学モデルおよび解析・実験ツールは、高付加価値化する電子部品の信頼性向上に活用していくことができる。

本研究では、面内における応力現象について論じたが、成形品が薄肉化すると反りや捩れも発生しやすくなる。今後は、硬化収縮の面外変形に与える影響についても検討を加える。

文 献

- (1) 例えば、Masunaga, T., ほか2名, Proceeding of the Pacific Rim/ASME International Intersociety Electronic & Photonic Packaging Conference INTERpack'97, 1059, 1064(1997)
- (2) 青木, 西村, 武井, 機論, 62-593, B(1996)312.
- (3) 西川, 藤田, 伝熱学, (1982), 20, 173.