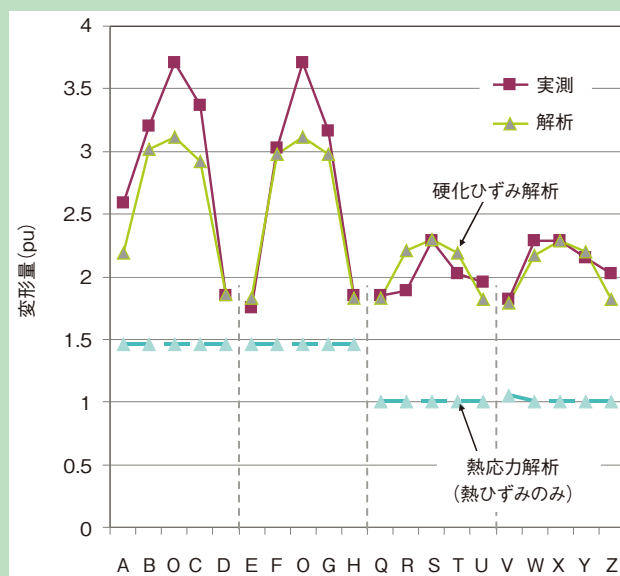


エポキシモールド機器の最適設計に向けた硬化ひずみ解析

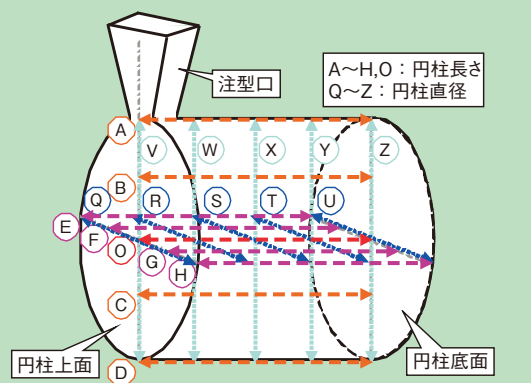
滝澤 明広
Akihiro Takizawa

森 佑介
Yusuke Mori

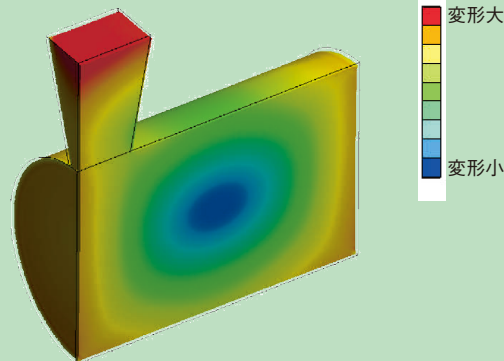
大竹 美佳
Mika Ohtake



＜変形量の実験と解析の比較＞



＜硬化実験の変形測定箇所＞



＜硬化ひずみ解析の変形図＞

エポキシモールドの硬化ひずみ解析

これまでエポキシモールド機器の変形量の解析は、従来の熱応力解析だけでは表現できなかった。成形プロセスにおいて生じる樹脂の収縮を加味する硬化ひずみ解析を適用することで、変形を表現できることを示した。この硬化ひずみ解析を利用して内部部品を含めた場合の残留応力やさらに温度変化などの使用環境の影響を組み合わせた応力状態を予測できる。

電力機器においてエポキシモールドによる固体絶縁は、防災や環境負荷低減の観点からニーズが高まっている。モールド機器の開発を迅速にかつ的確に進めるために、適切な構造や成形プロセス条件を事前に予測できることが重要と考え、筆者らは、硬化に関する解析技術の研究を進めている。モールド機器の設計に、より有用な情報を提供する目的で、エポキシモールド機器の硬化時の残留応力に加え、機器の使用環境を考慮した応力状態を予測することに取り組んでいる。

使用環境を想定した温度変化に対する製品の変形や応力を予測する場合、熱応力解析を実施することが多い。しかし、モールド機器では実験と解析との整合に課題が

多い。これはモールド機器に使用している熱硬化性樹脂の成形プロセスで生じる収縮を考慮していないことが要因と考え、硬化ひずみ¹⁾解析に取り組んだ。

本稿では、硬化収縮による変形を実測し、従来の熱応力解析だけの結果と比較して、硬化ひずみ解析が有効であることを示した。硬化ひずみ解析は、内部部品を含めた解析をすることで残留応力を求めることができる。さらに温度変化や外力を付加することで、使用環境での応力状態を予測できる。これらを利用してエポキシモールド機器の適切な構造設計に活かす。

1) 硬化ひずみ：熱硬化性樹脂の硬化反応に伴う収縮＋熱収縮

1. はじめに

エポキシ樹脂は電気絶縁特性や機械強度が優れており、電力機器の固体絶縁材料として広く用いられてきている。近年では防災や環境負荷低減の目的で、油やSF₆ガスといった絶縁方式に代わり、エポキシモールドの固体絶縁に対するニーズが高まっている。お客さまの多様なニーズに応えるためには、エポキシモールド機器をタイムリーに製品化することが重要である。モールド機器の設計・開発段階においては、成形プロセス条件を迅速に最適化することで開発期間の短縮が図れる。そこで当社では、成形時のエポキシ樹脂の流動、硬化反応および残留応力等の解析技術の研究開発を進めてきた。

これまで筆者らは、樹脂ボリュームが大きく、自己発熱の影響が無視できない硬化挙動に対する解析に取り組んできた^{(1)~(4)}。これらの取組を踏まえてさらに使用環境を想定した構造評価を製品開発の初期段階で実施することが、タイムリーに製品化する手段の一つと考えている。そこで本稿では、エポキシモールド製品の使用状態までを想定した構造解析への取組として、成形プロセスを考慮した硬化ひずみ解析に関して紹介する。

2. モールド機器の開発支援への取り組み

エポキシ樹脂のような熱硬化性樹脂は硬化反応によって体積収縮し、内部部品との熱収縮差により、成形時に機器内部に残留応力が発生する。残留応力が大きいと、使用環境での外的な荷重や温度変化などとの組合せにより、場合によっては、樹脂の割れなどを引き起こす。実際の成形プロセスでは、一次硬化プロセスで硬化収縮による残留応力が生じ、二次硬化プロセスにて応力緩和する。通常、製造工程では硬化後の残留応力を極力抑えるように成形プロセス条件などを管理している。そのための成形プロセス条件導出や製品形状の設計工程では、試行錯誤および数多くの検証を要する。それに対して、筆者らの取組は、硬化ひずみ解析を用いて残留応力を定量的に求め、残留応力を低減できる適切な成形プロセス条件や設計形状を見出すものである。これにより、開発期間を短縮しつつ、信頼性の高い安定した品質を実現する。さらに成形時の残留応力を考慮した上で使用環境を想定した外力や環境変化によるストレスを重畳して解析することで、製造から使用状態まで考慮したモールド機器の応力状態を予測し開発工程における手戻りを抑制する。

3. 硬化ひずみの解析方法

3.1 硬化ひずみ発生メカニズム

エポキシ樹脂は硬化反応時に体積収縮するが、この体積収縮は2種類の収縮の組み合わせによって生じる⁽⁵⁾。一つは硬化反応の分子結合による硬化収縮であり、もう一つは温度変化による熱収縮である。

これら収縮の影響は、モールド製品の外觀形状にソリやヒケなどの変形として現れる。また、残留応力としてモールド内部の部品にストレスを与える。反対に、反力として樹脂に対してもストレスが生じる。そのため、硬化ひずみは極力低減することが望ましい。

二次硬化プロセスで緩和しきれないひずみが製品の残留応力となる。そのため使用状態まで考慮した製品の応力状態を予測するには、ベースとなる一次硬化の硬化ひずみを把握することが必要である。

3.2 硬化ひずみの計算方法

硬化プロセスにおける樹脂の体積変化は図1のように硬化収縮と熱収縮がある。これらは、樹脂のゲル化点を起点としており、合算したものが全体の収縮を示す。

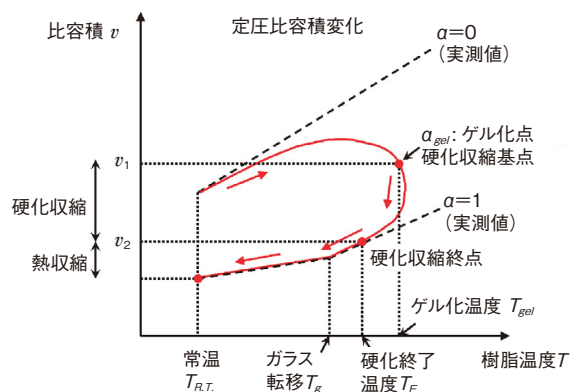


図1 硬化収縮と熱収縮の模式図

具体的な硬化ひずみの計算式を式(1)~(4)に示す。

(1) PVT特性（圧力・体積・温度の関係）から硬化反応率 α の変化を補間した比容積 v を算出する。比容積 v の変化から硬化収縮による体積変化率 S_v を求める。

(2) 体積変化率 S_v から硬化収縮ひずみ ε_c を求める。

(3) 熱収縮ひずみ ε_T は線膨張係数 β を用いて算出する。

(4) それらを合わせたひずみ ε_{Total} が硬化ひずみを示す。

$$S_v(p, T_E, \alpha) = \frac{v_2(p, T_E, \alpha) - v_1(p, T_{gel}, \alpha_{gel})}{v_1(p, T_{gel}, \alpha_{gel})} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\varepsilon_c = 1 - \sqrt[3]{1 - S_v} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\varepsilon_T = \beta(T_E - T_{R.T.}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_c + \varepsilon_T \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで得られる硬化ひずみを解析対象全体で累積するとヒケやソリとして定量的に表現できる⁽⁶⁾。また、樹脂の硬化によって生じるひずみと内部部品の熱変形を加味して構造解析を行うことで、硬化による残留応力⁽⁷⁾を求めることができる。

4. 硬化ひずみ解析による変形量

4.1 硬化ひずみの実験方法と評価方法

硬化ひずみ解析の妥当性および有用性を検証する目的で図2に示す円柱形状（ ϕ 80-117）の供試器を用いて硬化実験を行った。実験では一次硬化を行い、その後急冷し、一次硬化プロセスで発生した硬化ひずみを強制的に保持した。温度変化は図2に示す3点にて測定し、その変形は図3に示す箇所の外形寸法を測定して変形量を求めた。

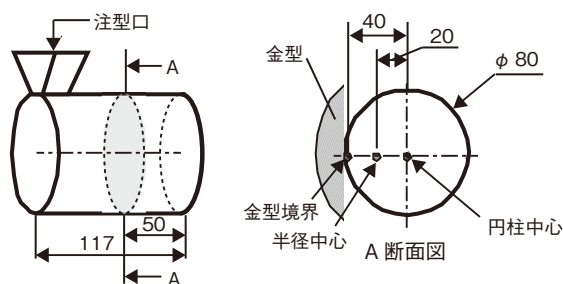


図2 円柱モデルの形状と温度測定箇所

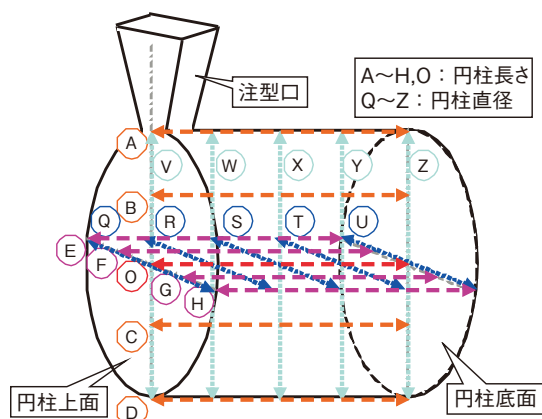


図3 変形の寸法測定箇所

4.2 硬化プロセスにおける温度変化

式（1）、（3）に示すように硬化ひずみは硬化中の樹脂温度の変化に影響を受ける。そこで、温度変化を図4にて確認する。なお、樹脂の初期温度を基準として正規化した。実測と解析では、部分的に多少の誤差は見られるものの、硬化によって樹脂が自己発熱して中心部の温度が高くなる様相および最高温度および最高温度に到達するタイミングなどよく一致している。

硬化ひずみは、樹脂が硬化によって移動しなくなるゲル化点以降に生じる。硬化反応率の解析結果からゲル化時間を求め、グラフ上にプロットすると、温度上昇の大きい円柱の内部から硬化していることが分かる。

4.3 硬化ひずみの解析と実測の比較

硬化反応に伴う収縮の影響を含めない熱収縮ひずみのみを計算する熱応力解析の結果を図5に示す。なお、

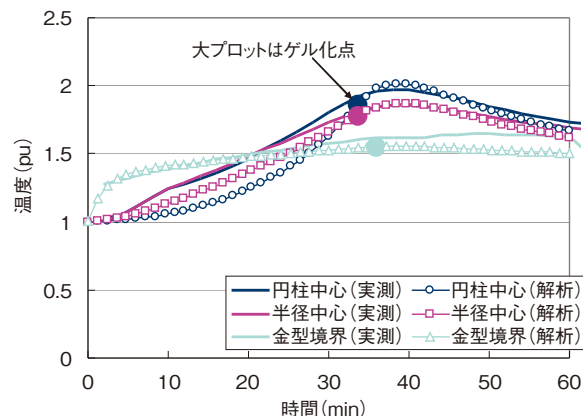


図4 硬化における樹脂の温度変化

変形量は熱収縮ひずみのみの解析結果Q～Uの平均値を基準として正規化した。以降の図においても同様に表記する。熱収縮ひずみのみの解析は、実測と比較して変形量および変形形状の傾向ともに大きな乖離がある。

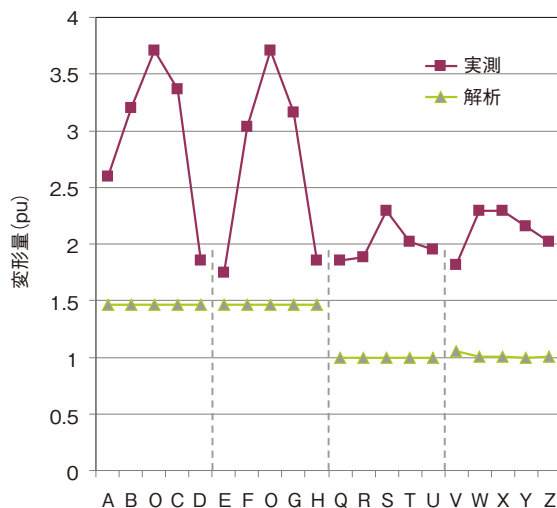


図5 熱応力解析と実測の変形量

硬化反応に伴う収縮を考慮した解析の結果を図6に示す。熱収縮ひずみのみの結果と比べ、2倍以上の変形量となり、実測に近い結果が得られた。またグラフが山なりとなる変形様相もよく表現できている。この変形の様相は、樹脂が硬化するときに化学反応により発熱するため、樹脂の中心部の温度が高くなり（図4）、中心部の硬化が先行し、樹脂表面中央部の変形量が大きくなったものと考えられる。このように樹脂の変形量を解析的に導出することができる本手法を用いて、内部部品を含めた解析を行うことで、成形時に発生する残留応力を定量的に予測できる見込みを得た。

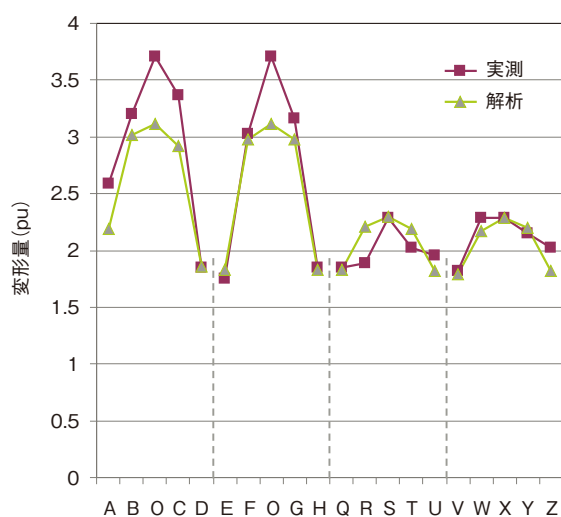


図6 硬化ひずみ解析と実測の変形量

5. まとめ

本稿では、構造設計や成形プロセスの両面を考慮したエポキシモールド機器の最適設計に向けた取組として、成形プロセスで生じる樹脂の硬化反応に伴う収縮を考慮した硬化ひずみ解析について紹介した。

従来の熱応力解析に対して、硬化ひずみ解析を実施することで、エポキシモールドの変形を表現できることを示した。この硬化ひずみ解析を製品開発の初期段階に実施することで、成形時に発生する変形や応力を抑制するための有用な情報を得ることができ、製品の開発期間を短縮しつつ、信頼性の高い製品づくりに寄与できると考えている。

今後、ここで得られた硬化ひずみにさらに二次硬化時の応力緩和を考慮する予定である。硬化後の残留応力に使用環境を想定した外力や温度変化などのストレスを加味して解析することで、製造から使用状態まで考慮した応力予測へと発展させ、開発の手戻りを抑制することで、よりよい製品づくりに役立てていく所存である。

参考文献

(1) 滝澤明広・山下太郎：「エポキシ樹脂モールド製

造プロセスにおける硬化反応時の発熱挙動の解析」, 東光電気技報No.14 (2009)

(2) 滝澤明広・山下太郎：「エポキシ樹脂モールド製造プロセスにおける温度依存物性を用いた発熱挙動解析と製品への適用」, 東光電気技報No.15 (2010)

(3) 滝澤明広・森佑介・山下太郎：「エポキシモールド変成器の硬化発熱挙動の解析」, 東光電気技報No.17 (2012)

(4) 滝澤明広・大竹美佳・森佑介他：「エポキシ樹脂の硬化解析によるモールド機器の成形プロセス条件の最適化」, 東光電気技報No.18 (2013)

(5) 伊奈治・石川智則・杉浦昭夫・成田量一：「熱硬化型樹脂注型品の硬化プロセス解析技術の開発」, デンソーテクニカルレビュー Vol.7 No.2 (2002)

(6) 林垣 新・山本晃司・渡邊綾子・多田和美：「プラメディア技術報告書 (1999)」, 成形加工, 12, 103 (2012)

(7) 寺田賢二郎・濱名康彰・平山紀夫：「繊維強化プラスチックの粘弾性マルチスケール解析手法」, 日本機械学会論文集 A 編, 75 (760), 1674-1683, 2009-12-25



滝澤 明広
技術開発本部
技術研究所
解析・試験技術グループ 所属
電力機器の開発・設計, および解析技術の研究に従事



森 佑介
技術開発本部
技術研究所
解析・試験技術グループ 所属
解析技術の研究に従事



大竹 美佳
技術開発本部
技術研究所
材料技術グループ 所属
エポキシモールド樹脂の研究, および解析技術の研究に従事