

# エポキシモールド機器の最適設計に向けた残留応力解析の検証

■ 滝澤 明広  
Akihiro Takizawa

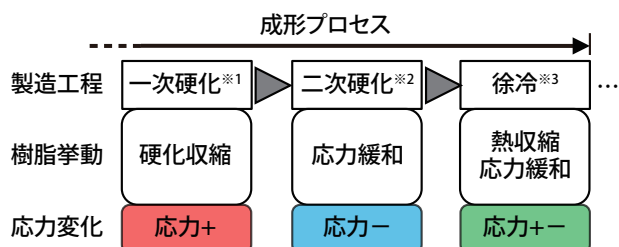
■ 森 佑介  
Yusuke Mori

## 1 はじめに

エポキシ樹脂は電気絶縁特性や機械強度に優れており、電力機器の固体絶縁材料として広く用いられている。近年、防災や環境負荷低減のため、油やSF<sub>6</sub>ガスといった絶縁方式に代わり、エポキシモールドによる固体絶縁に対するニーズが高まっている。そのニーズに迅速に responding 開発品を早期に市場投入するには、開発初期段階の試作前に最適な形状設計や成形プロセス条件を求め、開発の手戻りを抑制することが必要となる。最適な成形プロセス条件とは、ボイドなどの欠陥を防止するだけでなく、樹脂の硬化収縮に起因する残留応力・ひずみの抑制、モールド表面のヒケ<sup>注1)</sup>などの外観不良の抑制も含まれる。

これまで筆者らは、試作前に最適な成形プロセス条件を導出できるよう、製造時における樹脂流動、硬化収縮および残留応力・ひずみの解析技術の研究開発に取り組んできた。はじめに、樹脂ボリュームが大きい製品に対して、自己発熱を考慮した硬化収縮挙動の解析に取り組み、ヒケなどの外観不良を抑制できるようになってきた<sup>(1)~(6)</sup>。さらに近年、応力緩和現象を解析できるようになり、**図1**に示す成形プロセス完了時の残留応力を把握することができるようになってきている<sup>(7)</sup>。これにより、成形プロセス完了時の残留応力を設計段階で把握でき、成形プロセスを踏まえた適切な形状設計や金型設計に活かすことができる。しかし、解析で得られる残留応力は、実測との比較が十分ではなく、解析結果の妥当性の検証が十分ではなかった。

今回、成形プロセスでの応力の振る舞いおよび成形完了時の残留応力を測定し、解析結果と比較することで解析の妥当性を確認したので報告する。



※1 一次硬化：離型できる程度まで硬化を進める工程。  
 ※2 二次硬化：残りの硬化を進めつつ、内部応力を緩和する工程。  
 ※3 徐冷：内部応力を緩和しつつ、温度を下げる工程。

図1 モールド製造工程と応力変化の関係

## 2 残留応力の検証実験

### 2.1 測定方法

残留応力の検証実験の目的は、「成形プロセスの時間経過とともに変化する樹脂の応力を把握すること」である。そのため、解析で得られる時刻歴の応力変化と比較して妥当性を確認するには、下記の測定要件が必須と考えた。

- 1) 樹脂の応力変化を測定
- 2) 成形プロセス全体のデータを時系列に測定
- 3) 成形プロセス全体をカバーする温度範囲での測定
- 4) 樹脂注型～硬化～徐冷まで一貫測定
- 5) 樹脂周囲に金型があっても測定可能

残留応力の測定方法としては、ひずみ検出法、X線回折法、分光法、センサー包埋法などが挙げられる<sup>(8)</sup>。これらの方法の中で要件を満たさないものを除外すると、ひずみ検出法、もしくはセンサー包埋法が残る。この検証実験では、すべての要件を満たす具体的な方法として文献<sup>(9)</sup>のひずみ検出法を選定した(**図2**)。この方法は、樹脂の応力変化を直接測定するのではなく、金属パイプのひずみを測定し、樹脂の応力変化を間接的に把握するものである。

ここで、樹脂の応力を間接的に測定することについて

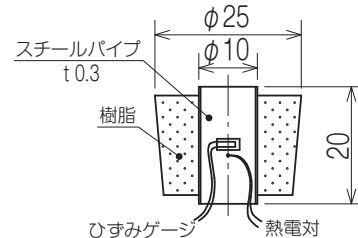


図2 文献(9)モデル

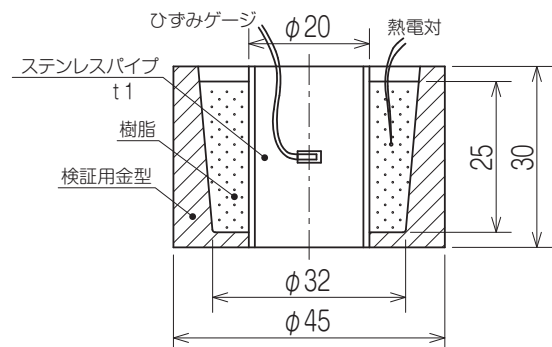


図3 アレンジした検証モデル

考える。応力緩和の定義において、樹脂のひずみが一定で緩和弾性率が低下することで表現される。ここから、ひずみ検出法を用いる場合、樹脂のひずみを直接測定するのではなく、パイプを測定することの方が適している。

ここで文献のモデルを見ると、パイプ内径がφ10以下である。ひずみゲージの貼付作業での取り扱いやすさや貼付面の曲率の影響などを考慮すると太い方が扱いやすい。そこで、パイプの太さや樹脂厚などを変えて事前に解析を行い、パイプのひずみ量を把握し、さらに測定系の測定レンジを勘案して図3に示す検証モデルとした。

この検証実験ではパイプ内径面の円周方向に一軸のひずみゲージを貼り付けて計測している。樹脂による硬化収縮、熱収縮を受けると、パイプは圧縮されて圧縮方向(負)のひずみが生じる。検出されるひずみから、パイプの熱ひずみ分を差し引くことで、計測したい樹脂の応力挙動によるひずみが得られることになる。

### 2.2 測定結果

注型～二次硬化までのパイプのひずみの測定結果(熱ひずみ補正後)を図4に示す。注型後にパイプのひずみに上下の変動が見られるが、樹脂が硬化する前の液体状態であり、ひずみは生じないはずである。これは熱ひずみの補正の際、同時計測での補正ではなく、温度とパイプひずみとの関係式による事後補正であるために注型樹脂温度、金型温度の急激な温度変化に追従できなかった

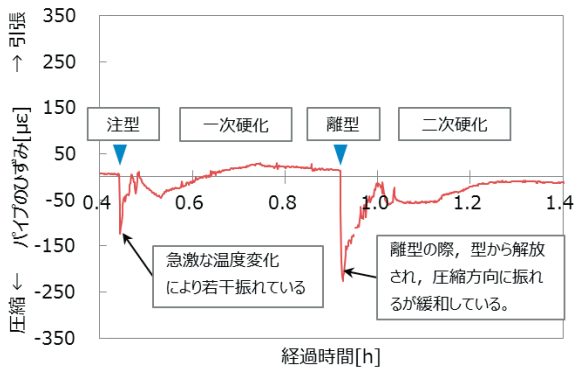


図4 ひずみ測定結果(注型～二次硬化)

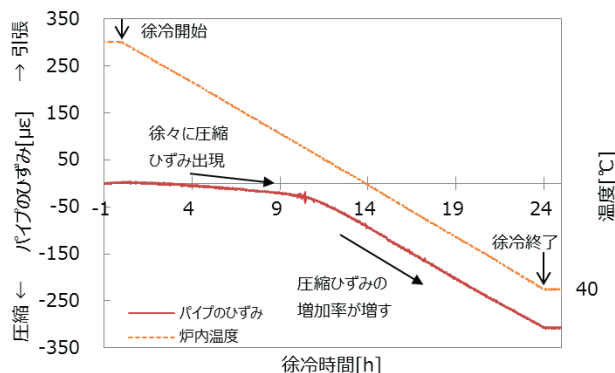


図5 ひずみ測定結果(徐冷)

た影響であると考えられる。一次硬化では、若干引張方向(正)にひずみが増えている。これは硬化発熱による樹脂の熱膨張と推察できる。反対に樹脂の収縮として硬化収縮による影響もあるが、樹脂は金型とパイプに拘束され、収縮の影響が小さくなっているものと推察できる。また離型では、圧縮ひずみが生じている。これは樹脂が金型の拘束から開放されて収縮することでパイプを圧縮している様相と考えることができる。二次硬化では離型時に生じた圧縮ひずみが時間経過とともにひずみ0に向かっていく様相を示している。

この結果は、過去に実施した解析<sup>(7)</sup>や文献<sup>(8)</sup>の報告と一致する。以上のことから、二次硬化プロセスを適切な条件(温度、時間)で取り扱えば、応力緩和効果により樹脂の応力はほぼ0となる。その場合、徐冷で生じる応力が残留応力ということになる。徐冷におけるパイプのひずみの測定結果を図5に示す。徐冷開始の温度の高い状態ではひずみはほぼ0であり、温度が下がるにつれ、徐々に圧縮ひずみが生じ、ある時点から圧縮ひずみの増加率が増し、徐冷終了にて約300 μεの圧縮ひずみとなることを確認した。これが、樹脂の残留応力によってパイプが変形した量となる。このようにパイプのひずみを測定することで樹脂の応力変化を的確に把握できているものとする。

## 3 残留応力解析の妥当性

### 3.1 解析モデル

前出の検証実験と同様の図6に示す解析モデルにて、注型～一次硬化～二次硬化～徐冷の全成形プロセスを網羅した一連の解析を実施した。これらの解析における主な計算式を式(1)～式(7)に示す。式を見ると分かるように、樹脂温度が密接に関係しており、これらの解析では、経過時間に対する樹脂温度の再現性が解析上重要となる。

この樹脂温度と経過時間の関係を確認するために、一次硬化における経過時間に対する樹脂の温度変化を図7に示す。なお、実験での樹脂の初期温度を基準として正

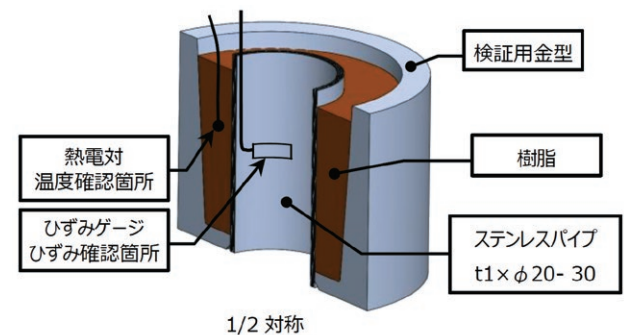


図6 解析モデル

【樹脂硬化反応】

●硬化反応速度式 (Kamal モデル)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \left[ A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{T(t)}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{T(t)}\right) \alpha^m \right] (1 - \alpha)^n \dots (1)$$

$\alpha$ : 硬化反応率,  $t$ : 経過時間,  $T$ : 樹脂温度

$A_1, A_2, E_1, E_2, m, n$ : 硬化反応速度定数

●エネルギー保存式

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T + \rho Q_{tot} \frac{\partial \alpha}{\partial t} \dots (2)$$

$\rho$ : 樹脂質量密度,  $C_p$ : 樹脂定圧比熱,  $T$ : 樹脂温度

$t$ : 経過時間,  $k$ : 樹脂熱伝導率,  $x, y, z$ : 三次元座標

$Q_{tot}$ : 樹脂の総発熱量,  $\alpha$ : 硬化反応率

【硬化ひずみ】

●硬化ひずみ計算式

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_c + \varepsilon_T \dots (3)$$

$$\varepsilon_c = 1 - \sqrt[3]{1 - S_v} \dots (4)$$

$$\varepsilon_T = \beta(T_E - T_{R.T.}) \dots (5)$$

$$S_v(p, T_E, \alpha) = \frac{v_2(p, T_E, \alpha) - v_1(p, T_{gel}, \alpha_{gel})}{v_1(p, T_{gel}, \alpha_{gel})} \dots (6)$$

$\varepsilon_{Total}$ : 硬化ひずみ,  $\varepsilon_c$ : 硬化収縮ひずみ,  $\varepsilon_T$ : 熱ひずみ

$\beta$ : 線膨張係数,  $S_v$ : 体積変化率,  $T_E$ : 離型時樹脂温度

$p$ : 圧力,  $\alpha$ : 硬化反応率, 添え字  $_{gel}$  はゲル化時

【応力緩和】

●一般化 Maxwell モデル

$$G(t) = G_\infty + \sum_{i=1}^n G_i \exp\left(-\frac{t}{a_T(T) \tau_i}\right) \dots (7)$$

$G(t)$ : 緩和弾性率,  $t$ : 緩和時間,  $G_i$ : 各項の弾性率

$\tau_i$ : 各項の緩和時間,  $a_T$ : シフトファクター

$T$ : 樹脂温度,  $n$ : Maxwell モデルの項数

規化した。一次硬化において、樹脂温度は硬化炉による加熱だけではなく、樹脂の化学的な硬化反応による発熱の組み合わせによって決定される。この複雑な温度変化にて、実験と解析がよく一致している。

次に、前章での実験結果を踏まえ、残留応力が顕著に生ずる徐冷における実験結果と解析結果を図8に示す。実験結果と同様、解析においても徐冷開始後に圧縮ひずみが徐々に現れ、途中から増加率が増す様相を示している。また、徐冷終了時点でのパイプのひずみは、同等の約  $300 \mu\epsilon$  となっている。

ここで、徐冷開始温度～徐冷終了温度での単純な熱応力計算をした場合と比較すると、徐冷終了時点のパイプのひずみは約  $750 \mu\epsilon$  となり、その差は大きい。この単純な熱応力計算では、応力緩和効果をいっさい考慮していない結果であることから考えると、徐冷中の応力緩和効果の大きさがよく分かる。本件の残留応力解析は、効果の大きい応力緩和を的確に表現し、実際の樹脂の挙動を解析できていると言える。

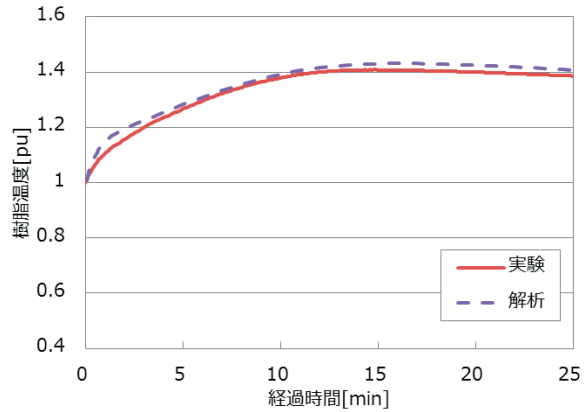


図7 一次硬化における樹脂温度の変化

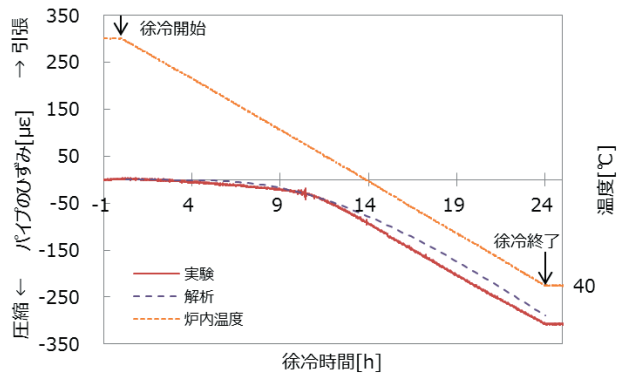


図8 徐冷におけるパイプのひずみの変化

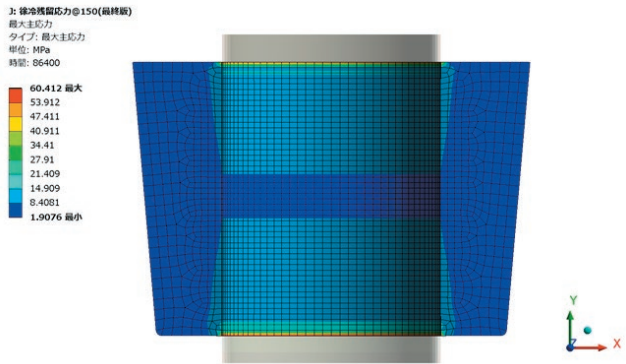


図9 樹脂の応力分布 (徐冷後)

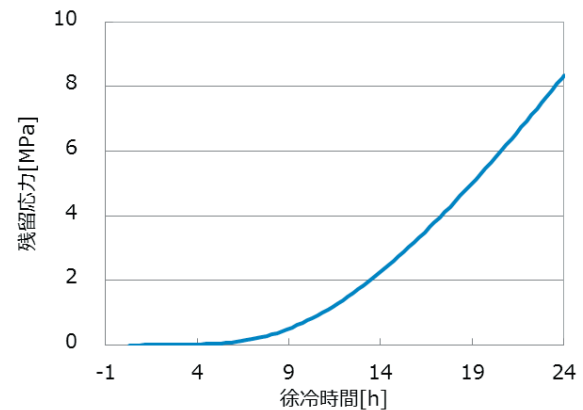


図10 徐冷における樹脂の応力変化 (解析結果)

ここまで、残留応力によって生ずるパイプのひずみに注目して、実験と解析を比較して確認してきた。この実験では樹脂の残留応力を直接測定できないが、図9に示すように解析では任意の箇所でもひずみ、応力に拘らず確認できる利点がある。ここで、ひずみゲージを貼り付けた箇所の近傍の樹脂（パイプ上下中央の外径面に接触している樹脂）の応力を確認した結果を図10に示す。パイプのひずみと同様に、徐冷開始からしばらくは応力が現れず、中盤付近から徐々に現れ、増加率が増していることが確認できる。時間経過の最終点である徐冷終了時点の応力が成形プロセスで生じる残留応力となる。

ここで得られた残留応力分布に対して、既報の樹脂の機械的強度の評価方法<sup>(10)</sup>を適用することで、残留応力の影響評価が可能となる。

## 4 おわりに

本稿では、これまで取り組んできたモールド製品の製造プロセスを考慮した解析技術に対して、実験結果との整合確認により、解析の妥当性を確認した。実験と解析を比較すると、時間経過に対する温度変化および応力変化ともによく合っていることが確認できた。この解析技術によって、成形プロセスにおける樹脂の温度や応力の挙動を的確に表現することができ、プロセス終了時に生じる残留応力を正確に把握できるようになった。

この解析技術は製品開発の初期段階で運用できるものであり、試作前に解析することで、適切な形状設計や金型設計に活かすとともに適切な成形プロセス条件の導出にも活かすことができる。その結果、モールド製品の開発における手戻りを抑制でき、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できるものとする。

### ■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, 山下太郎, 吉谷彰倫:「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) 滝澤明広, 森佑介, 大竹美佳:「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」, 東光高岳技報, No.1 (2014)

(6) 森佑介, 滝澤明広, 吉谷彰倫:「エポキシモールド機器における硬化条件の最適化」, 東光高岳技報, No.2 (2015)

(7) 滝澤明広, 森佑介:「エポキシモールド機器の最適設計に向けた応力緩和解析」, 東光高岳技報, No.3 (2016)

(8) 西野孝:「残留応力の測定法」, 日本接着学会誌, Vol.39, No.1 (2003)

(9) 尾形正次, 宝蔵寺裕之, 沼田俊一, 金城徳幸, 堀江修:「低線膨張性エポキシ樹脂系成形材料」, 高分子論文集, Vol.46, No.2 (1989)

(10) 森佑介, 滝澤明広:「エポキシモールド機器の構造最適設計に向けた機械的強度の評価方法」, 東光高岳技報, No.4 (2017)

### ■語句説明

注1) ヒケ:樹脂の硬化収縮によって主に樹脂表面に生ずるへこみ。



#### 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