

エポキシモールド機器の構造および成形プロセスの最適化に向けた解析評価技術

■ 森 佑介
Yusuke Mori

■ 滝澤 明広
Akihiro Takizawa

エポキシモールド機器は導体やコイル、ボルト座などさまざまな部品がモールドされている。通常、内部にモールドされた部品付近には残留応力が発生し、弱点部となることが多い。そのため、内部部品付近に発生する残留応力の把握とその残留応力を考慮した機械的強度の評価が必要となる。本稿では、ボルト座をモールドしたモデルを作成し、一連の成形プロセスを加味した残留応力の解析を実施した。さらに、残留応力を考慮した状態で、外力を加えた際に発生する応力分布を解析し、対象の機械的強度を評価した。

1 はじめに

エポキシ樹脂は電気絶縁特性や機械的強度が優れており、電力機器の固体絶縁材料として広く用いられている。東光高岳においても、モールド変成器などの電力機器の絶縁媒体にエポキシ樹脂を適用している。エポキシ樹脂のような固体絶縁材料を使用する場合、電気絶縁特性だけでなく、大電流通電時の電磁力や温度変化による熱応力、そのほかの外力に対して十分な機械的強度を有することを確認する必要がある。したがって、品質の確保と効率的な製品開発を実現するためには、電気絶縁特性や機械的強度などを解析できるようにする必要がある。しかし、エポキシ樹脂を使用した成形品の機械的強度に関しては、以下のような課題から解析による把握が容易ではない。

- (1) エポキシ樹脂の成形プロセスにおいて、残留応力が発生する。しかし、一般的に利用される線形応力解析では、残留応力を正しく把握することはできない。
- (2) 解析結果の評価に利用される引張強度や曲げ強度などは材料固有の値ではなく、実際には寸法効果^{注1)}の影響等がある。

これらの課題がエポキシモールド機器の機械的強度の予測を難しいものにしてしまうと考えられる。これまで筆者らは、課題(1)に対して、成形プロセスにおける残留応力の変化を解析できるようにしてきた^{(1)~(4)}。また、課題(2)に対して、エポキシ樹脂に発生する応力分布を考慮し、精度良く機械的強度を評価する方法を検討してきた⁽⁵⁾。

本稿では、上記二つの技術を統合し、エポキシ樹脂を使用した成形品に発生する残留応力を考慮し、機械的強度を予測した事例について紹介する。(以降、「機械的強度」を「強度」と記載する。)

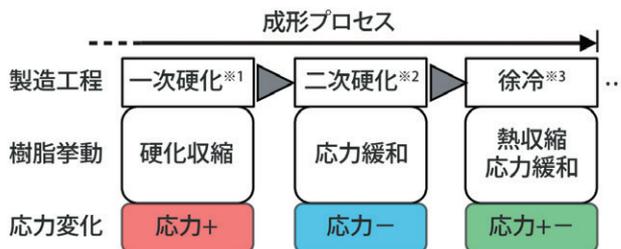
2 解析方法

2.1 成形プロセスにおける樹脂の挙動と応力の変化

残留応力を解析するためには、成形プロセスにおける樹脂の挙動を考慮する必要がある。**図1**は一般的なエポキシモールド機器の成形プロセスと各プロセスでの残留応力の変動要因を示したものである。一次硬化から徐冷のプロセスにおいて、硬化収縮や応力緩和、熱収縮といった現象が生じ、時々刻々と残留応力が変化する。硬化収縮はエポキシ樹脂の硬化反応に伴い発生するため、樹脂の硬化反応と体積変化の関係を把握しておく必要がある。応力緩和は樹脂の粘弾性特性に起因するが、本特性はさきわめて強い温度依存性を示す。したがって、各成形プロセスの温度変化を考慮した粘弾性特性が必要となる。熱収縮を決定するエポキシ樹脂の線膨張係数についても温度依存性がある。本解析では、これらの非線形性を考慮した解析を実施することで、残留応力を正しく把握することができる。

2.2 解析モデルおよび強度評価手順

残留応力はエポキシ樹脂の硬化収縮や内部にモールドされた部品との熱膨張収縮の差によって発生するため、内部部品の微小な曲面部分に集中することが多い。そのような状況を模擬するため、**図2**のように、ボルト座をエポキシ樹脂でモールドした解析モデルを作成した。同モデルを用いて、**図3**に示す手順で強度評価を実施



※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 エポキシモールド機器の成形プロセスと応力変化

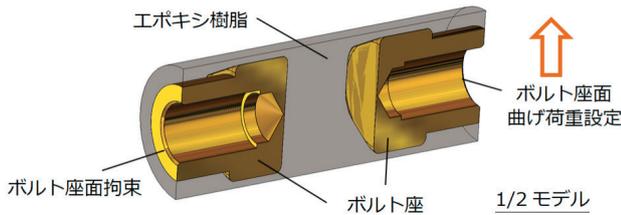


図2 解析モデルおよび境界条件

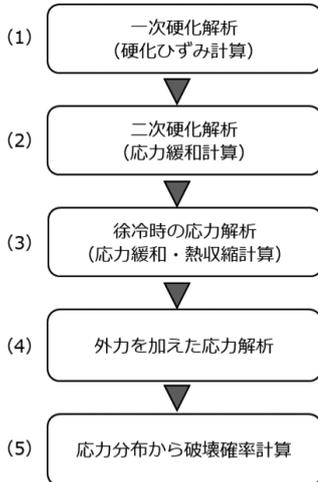


図3 解析モデルの強度評価手順

した。なお、一次硬化解析においては、樹脂への熱の伝わり方が特に重要となるため、一次硬化における伝熱を適切に解析できるように金型もモデリングしている。

2.3 各項目の解析内容

図3に示した各項目の具体的な解析方法について記載する。なお、解析方法のさらに詳しい内容については、文献^{(1)~(5)}を参照されたい。

(1) 一次硬化解析

一次硬化解析では、樹脂の硬化反応を計算する式(1)と温度分布を計算する式(2)を連成して解析しており、樹脂の硬化反応に伴う発熱と温度分布は双方に影響を及ぼしあう。硬化ひずみは、硬化反応率と硬化収縮特性から式(3)~(6)で計算する。

●硬化反応速度式 (Kamal モデル)

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

α : 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

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \Delta T + \rho Q_{tot} \frac{\partial \alpha}{\partial t} \dots (2)$$

ρ : 質量密度, C_p : 定圧比熱, T : 温度, t : 経過時間, k : 熱伝導率, Q_{tot} : 樹脂の総発熱量, α : 硬化反応率

●硬化ひずみ計算式

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

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

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

$$S_v(p, T_E, \alpha) = \frac{\nu_2(p, T_E, \alpha) - \nu_1(p, T_{gel}, \alpha_{gel})}{\nu_1(p, T_{gel}, \alpha_{gel})} \dots (6)$$

ε_{Total} : 硬化ひずみ, ε_c : 硬化収縮ひずみ, ε_T : 熱ひずみ, β : 線膨張係数, S_v : 体積変化率, T_E : 離型時樹脂温度, $T_{R.T.}$: 室温, ν_1 : ゲル化時の体積, ν_2 : 離型時の体積, p : 圧力, α : 硬化反応率, 添え字 $_{gel}$ はゲル化時

(2) 二次硬化解析

二次硬化プロセスで生じる応力緩和は、一般化 Maxwell モデルとよばれる式(7)で計算する^{(6), (7)}。一般化 Maxwell モデルは粘弾性を表すモデルであり、時間の経過とともに緩和弾性率 $G(t)$ が低下することで応力緩和を生じる。緩和弾性率の変化は、 $G_\infty, G_i, \tau_i, a_T(T)$ の各係数によって決まる。本解析では、動的粘弾性測定^{注2)}より得られた結果から各係数を求めている。

●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_∞ : $t = \infty$ における弾性率, G_i : 各項の弾性率, τ_i : 各項の緩和時間, a_T : シフトファクタ, T : 樹脂温度, n : Maxwell モデルの項数

(3) 徐冷時の応力解析

成形品の温度低下による収縮と応力の変化を計算する。その際、樹脂の線膨張係数の温度依存性も考慮している。また、徐冷時においても式(7)により応力緩和を計算している。ここで得られた応力が成形品の残留応力となる。

(4) 外力を加えた応力解析

(1)~(3)項で求めた残留応力を考慮した状態で、任意の荷重を設定した応力解析を実施する。境界条件は図2に示したとおり、一方のボルト座面を拘束し、もう一方のボルト座面に上方向の荷重を設定した。ここで得られた応力分布から、任意の荷重に対する破壊確率を計算し、強度を評価することとなる。

(5) 応力分布から破壊確率計算

解析結果として得られた最大主応力分布から、最弱リンクモデル^{(8)~(10)}にもとづき破壊確率を計算し、強度を評価する。最弱リンクモデルとは、複数の輪で構成される鎖の強度は、最も強度の低い輪が決定づけるという考え方であり、輪の数が多いほど鎖の破壊確率は高くなる。脆性材料の破壊を表現するモデルとして知られており、ワイブル分布にしたがう。本稿では、輪の数を対象の体積に置き換え、寸法効果を考慮した強度評価を行っている。具体的な強度評価手順を以下に示す。

- (i) 最大主応力分布から、各要素を代表する応力値 σ_i を求める。下添え字の i は要素番号を表す。
- (ii) 各要素の信頼度 R_i を次式より求める。

$$R_i(\sigma_i, V_i) = \begin{cases} \exp\left\{\frac{V_i}{V_0}\left(\frac{\sigma_i - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right\}, & (\sigma_i - \sigma_u > 0) \\ 1, & (\sigma_i - \sigma_u \leq 0) \end{cases} \dots\dots(8)$$

ここで、 V_i は各要素の体積、 V_0 は基準体積、 m 、 σ_u 、 σ_0 はワイブルパラメータとよばれ、それぞれ形状パラメータ、位置パラメータ、尺度パラメータである。

- (iii) すべての要素が健全である確率 R_{tot} から、解析対象の累積破壊確率 F を求める。

$$F = 1 - R_{tot} = 1 - \prod_i^n R_i \dots\dots\dots(9)$$

前記 (1)～(5) の手順を実施することで、成形プロセスで生じる残留応力を把握し、残留応力を考慮した状態で成形品の強度を評価することができる。

3 解析結果

3.1 成形品の残留応力

図4に徐冷後における残留応力分布（最大主応力表示）を示す。樹脂の応力がわかるように、ボルト座は非表示にしている。同図より、ボルト座の微小な曲面に残留応力が発生していることがわかる。この段階で過大な応力が発生している場合、周囲の温度変化や外力により破壊する可能性が高く、構造や成形プロセス条件を見直す必要がある。

2.1節に記載したとおり、残留応力は各成形プロセスで時々刻々と変化するが、適切な二次硬化プロセスを経た直後の残留応力は非常に小さくなる。また、徐冷速度によっても残留応力は変化する。さらに残留応力の発生様相は、製品構造や樹脂の種類によっても異なるため、残留応力を抑制する適切な成形プロセスも製品ごとに異なってくる。そのため、従来は適切な成形プロセスを把握するために多くの試作が必要であったが、本解析を利用することで試作回数を削減し、開発期間を短縮できる。

3.2 成形品の強度評価結果

成形品に外力を加えたときの応力分布を図5に示す。得られた応力分布から、2.3節(5)に記載した方法で破壊確率を計算することで、成形品の強度を評価する。図6は、荷重をパラメータとして、応力と破壊確率の変化を解析した結果である。なお、同図の縦軸は対象材料の引張強度（JIS K7161による）で基準化している。荷重が大きくなるにしたがって、応力値も高くなり、破壊する確率も高くなる。ただし、応力値と異なり、破壊確率はある荷重から急激に上昇する。同図より、本モデ

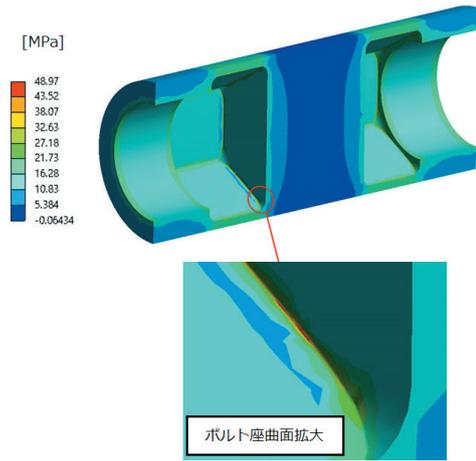


図4 残留応力分布（最大主応力表示）

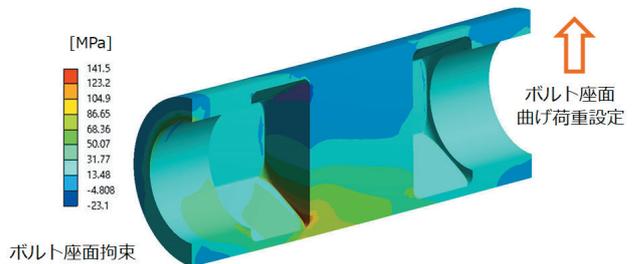


図5 残留応力と外力による最大主応力分布

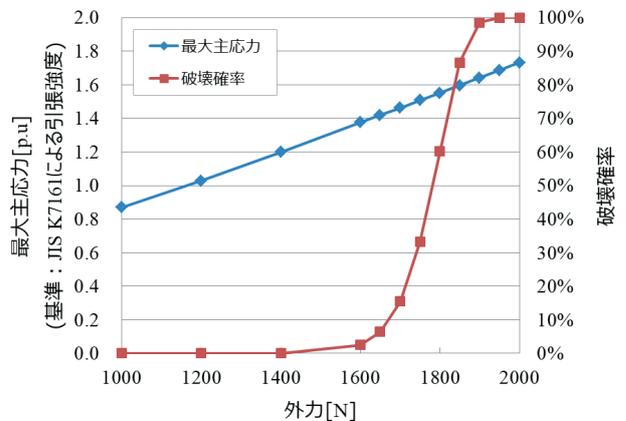


図6 成形品の強度評価結果

ルの場合、1,400～2,000 Nの間で破壊する可能性が高いことがわかる。また、非常に狭い範囲でのみ強い応力が発生するため、材料の引張強度と同等の応力が発生する荷重で破壊する確率はきわめて低く、さらに大きな荷重まで高確率で耐えることが示されている。

4 おわりに

本稿では、エポキシモールド製品の成形プロセスで生じるさまざまな現象を考慮して、成形品に生じる残留応力を解析した。さらに、残留応力のある成形品の強度を解析・評価した。本稿に記載した残留応力解析と強度の

評価方法については、それぞれ文献⁽⁴⁾、⁽⁵⁾にて実測との比較により検証し、その妥当性を確認している。本稿ではそれぞれの技術を組み合わせた解析を行うことで、成形品の使用環境における強度を精度良く把握することができ、強度分布も予測することができる。以上のことから、本解析技術を製品開発の初期段階から利用することで、適切な構造設計や金型設計、成形プロセス条件の導出などに活かすことができる。これにより、開発期間の短縮や試作回数の低減などに繋がると考えている。

■参考文献

- (1) 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)
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 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残留応力解析の検証」, 東光高岳技報 No.5 (2018)
- (5) 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)
- (6) 株式会社メカニカルデザイン:「粘弾性解析における諸問題 その1 Maxwell モデルの基本的な性質」, Mech D&A News vol.2005-2 (2005)

(7) 株式会社メカニカルデザイン:「粘弾性解析における諸問題 その3 一般化 Maxwell モデルの同定」, Mech D&A News vol.2005-4 (2005)

(8) W. Weibull:「A Statistical Distribution Function of Wide Applicability」J. Appl. Mech. Vol.18 (1951)

(9) 坂田勝:「ぜい性材料の破壊の統計的扱い」, 精機学会誌, Vol.39, No.11 (1973)

(10) 泉聡志, 酒井信介:「実践有限要素法シミュレーション」, 森北出版 (2010)

■語句説明

注1) 寸法効果: 材料の大きさにより、その機械的強度などが変わってしまう現象。

注2) 動的粘弾性測定: 試料に正弦波を与えた際の応答の遅れを測定するもの。



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



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