

樹脂モールド構造における 機械的強度の解析・評価技術

■ 森 佑介
Yusuke Mori

■ 滝澤 明広
Akihiro Takizawa

エポキシモールド製品は導体やコイル、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するため、想定以上の荷重や衝撃が加わった際に破壊の起点となることが多い。そのため、モールドした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解析・評価を行い、事前に開発品の性能を確認することが望ましい。しかし、一般的な線形応力解析から評価した機械的強度は、実際の機械的強度と大きな乖離が生じるといった課題がある。この課題を解決するために、成形プロセスで生じる残留応力の解析や評価方法の改善を行ってきた。

本稿では、これまで構築した技術を活用して、ボルト座が埋め込まれた実器に対して強度解析・評価を実施し、試験結果と比較検証した。その結果、従来からの課題であったエポキシモールド製品の強度解析・評価精度を改善し、効率的な製品設計・開発に活用できることを確認した。

1 はじめに

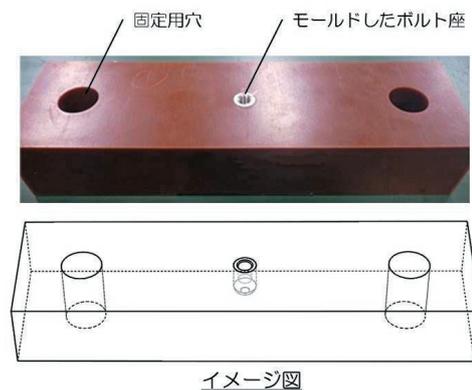
エポキシ樹脂は電気絶縁特性や機械的強度が優れており、電力機器の絶縁材料として広く用いられている。東光高岳においても、エポキシモールド変成器だけでなく、さまざまな製品に使用している。エポキシ樹脂のような固体絶縁材料を使用する場合、絶縁耐力だけでなく、十分な機械的強度（以下、強度）を有することを確認する必要がある。東光高岳が取り扱うエポキシモールド製品は、コイルや導体、接続端子、ボルト締結するためのボルト座など、さまざまなものをモールドしている。このような樹脂モールド構造において、モールドした部品近傍には、成形プロセスで生じる残留応力（詳細は3章に記載）や外気温の変化による熱応力が生じやすい。さらに、残留応力や熱応力だけでなく、大電流通電により電磁力が発生する製品や外部から荷重が加わる可能性のある製品については、エポキシ樹脂が割れないための強度設計が重要となる。

エポキシモールド製品において、形状変更をする場合には金型修正によるコストや期間が相当必要になることから、解析・評価技術による強度設計の妥当性確認、手戻り抑制の効果は非常に大きいと考えられる。しかし、前述の残留応力や寸法効果なども考慮する必要があるため、エポキシモールド製品の強度を予測することは容易ではない。さらに、従来の一般的な線形応力解析や評価方法では、実際の強度と大きな乖離を生じることがあり、製品開発を効率化するうえで課題となっていた。そこで筆者らは、残留応力や寸法効果を考慮した解析技術を構築し、エポキシモールド製品の強度を精度良く評価できるようにしてきた^{(1)~(6)}。本稿では、これまで構築した解析・評価技術を実器に適用し、比較検証した事例を紹介する。

2 実験方法

前述のとおり、エポキシモールド製品はさまざまなものをモールドする。そのなかでもボルト座をモールドした場合、ボルト座周辺は残留応力や熱応力が比較的大きくなりやすいだけでなく、ほかの部品との締結時の締め付け力や衝撃の伝搬などにより応力が集中しやすい。そのため、強度を評価することが特に重要な部位といえる。

図1はボルト座を埋め込んだテストピースの例である。このようなボルト座を埋め込んだ構造のテストピースに対して、図2のようにボルトを挿入し、そのボルトをつかんで破壊するまで引っ張ることで破壊荷重値を把握することができる。しかし、すべての製品に対して同様の試験を行うことは、製品形状やサイズ、試験機などの制約から容易でないこともあり、解析により評価できることが望ましい。このニーズに対応できるように、これまではいくつかのテストピースを用いて、強度解析・評価にかかわる要素技術の基礎検証を進めてきた^{(1)~(6)}。本稿では、これまで検証を進めてきた技術を実器に適用し、強度試験結果と比較することで、本解析・評価技術の有用性を確認した。



イメージ図

図1 ボルト座をモールドしたテストピース

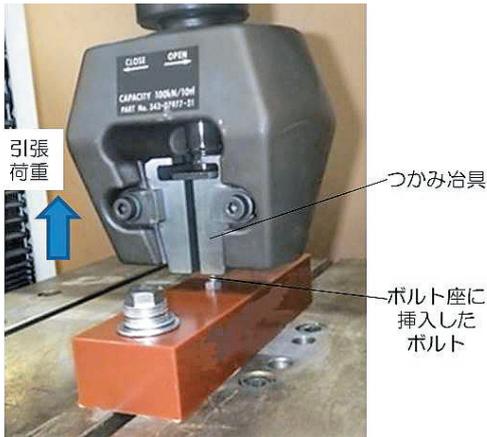


図2 強度試験

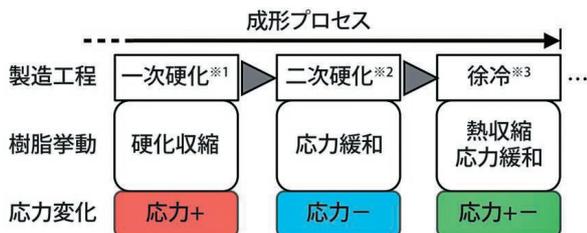
3 解析方法

3.1 成形プロセスにおける樹脂の挙動と応力の変化

前述のとおり、エポキシモールド製品の強度を評価するためには、残留応力を把握する必要がある。残留応力を解析するうえでは、成形プロセスにおける樹脂の挙動を考慮することが重要である。図3は一般的なエポキシモールド製品の成形プロセスと残留応力の変化につながる樹脂挙動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。また、応力緩和は樹脂の粘弾性特性^{注1)}に起因するが、本特性は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。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把握することができる⁽⁵⁾。

3.2 機械的強度の解析・評価手順

本稿で実施した強度の解析・強度評価手順を図4に示す。3.1節に記載したとおり、各成形プロセスにおける残留応力の変化を解析する(図4(1)~(3))。残留応力は各プロセスで時々刻々と変化するが、最終的にエポ



※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3 エポキシモールド機器の成形プロセスと応力変化

キシモールド製品に生じる残留応力のなかでも、「(3) 徐冷時に生じる残留応力」が支配的である⁽⁵⁾。次に、残留応力を考慮した状態で荷重をかけ、応力解析を実施する(図4(4))。このとき、荷重をパラメータとして複数の解析を実施する。最終的に得られた解析結果から強度評価を実施するが、脆性的な破壊を示す対象によく適用される最大主応力説(最も強い最大主応力値と材料強度を比較する方法)では、強度を精度良く評価することは困難である。本稿では、最大主応力説ではなく、強い最大主応力が発生している範囲も考慮して破壊確率を算出し、強度評価を実施する(図4(5))⁽⁴⁾。

3.3 徐冷時の残留応力解析方法、破壊確率計算方法

本節では、強度評価を実施するうえで特に重要となる徐冷時の残留応力解析、応力分布を考慮した破壊確率計算について記載する。これ以外の計算方法については前報⁽⁶⁾を参照されたい。

● 徐冷時の残留応力解析

徐冷時の応力解析は、図3で示したように、成形品の温度低下による熱収縮と応力緩和を考慮する必要がある。

熱収縮量の計算には線膨張係数が必要となるが、徐冷プロセスにおける温度範囲において樹脂の線膨張係数も変化する。本解析では、線膨張係数の温度依存性も考慮している。

応力緩和については、一般化 Maxwell モデル⁽⁷⁾⁽⁸⁾とよばれる次式で計算する。

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

ここで、 $G(t)$: 緩和弾性率、 t : 緩和時間、 G_{∞} : $t = \infty$ に

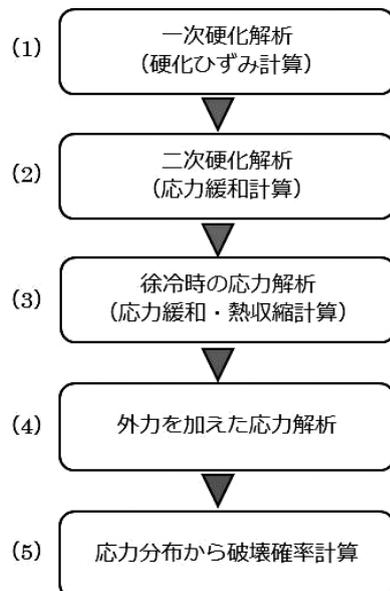


図4 強度の解析・評価手順

における弾性率, G_i : 各項の弾性率, τ_i : 各項の緩和時間, $a_T(T)$: シフトファクター, T : 樹脂温度, n : Maxwell モデルの項数

一般化 Maxwell モデルは高分子材料に顕著にみられる粘弾性特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表現する。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。

● 応力分布から破壊確率計算

最大主応力説とは異なり, ある特定の点における応力値だけで評価するのではなく, 最大主応力の分布から, 最弱リンクモデルにもとづき破壊確率を計算する。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⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾にしたがう。本評価方法では, 輪の数を評価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。

$$R_i(\sigma_i, V_i) = \begin{cases} \exp\left\{-\frac{V_i}{V_0}\left(\frac{\sigma_i - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right\}, & (\sigma_i - \sigma_u > 0) \\ 1, & (\sigma_i - \sigma_u \leq 0) \end{cases} \dots\dots(2)$$

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。

$$F = 1 - R_{tot} = 1 - \prod_i^n R_i \dots\dots(3)$$

ここで, n は解析対象の要素数である。

以上のように, 本解析・評価方法は, エポキシ樹脂の非線形性を考慮して正確な残留応力を求め, 最終的に得られた応力分布から寸法効果を考慮して破壊確率を求める方法である。本解析・評価方法を実器に適用し, 妥当性を検証した結果を次章で紹介する。

4 実器への適用結果

4.1 評価対象および解析モデル

強度評価の対象とする実器のうち, 特に強度評価で重要となる部位を抽出し, 図5のようにモデル化した。な

お, 対称性があるため 1/2 モデルとした。前述のように, 残留応力を解析した後に, ボルト座に引張荷重をかけた応力解析を実施している。また, 引張荷重値をパラメータとして, 各荷重値に対する破壊確率を求めている。

4.2 従来の解析・評価技術の問題点

図5に示したモデルに対して, 従来の解析・評価技術, すなわち, 線形熱応力解析で残留応力を求め, 最大主応力説で評価する方法を用いた場合, 実際の50%破壊荷重値と2倍の相違が生じるという問題があった。

4.3 本解析・評価技術の妥当性および有用性

図6に, 徐冷時における残留応力の解析結果を示す。同図には徐冷時の温度変化を併記しているが, 温度は線形的に低下しているのに対して, エポキシ樹脂の残留応力は線形的には変化しない。これは粘弾性特性に起因する応力緩和が生じるためであり, 徐冷することで6時間程度まで残留応力の増加を抑制している。このような残留応力の挙動は, 一般的な線形熱応力解析で把握することはできない。

図7に, 残留応力を考慮した状態で引張荷重をかけた応力分布の解析例を示す。なお, エポキシ樹脂の応力分布がわかるようにボルト座は非表示にしている。はじめに述べたように, ボルト座近傍に応力集中していることがわかる。各引張荷重値に対して図7のような応力分布

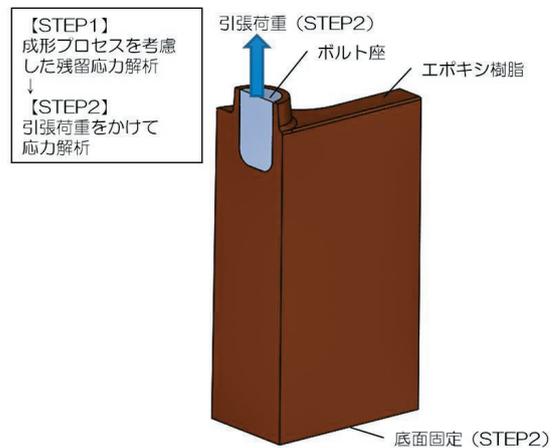


図5 解析モデル (1/2 モデル)

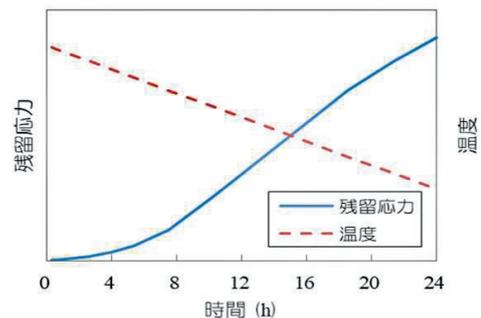


図6 徐冷時における残留応力の変化

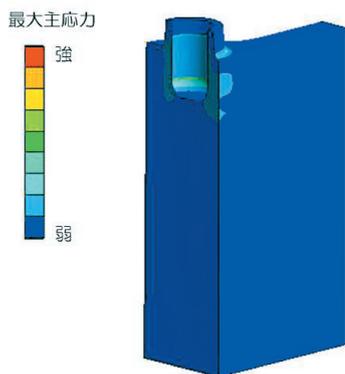


図7 残留応力 + 引張荷重の応力分布

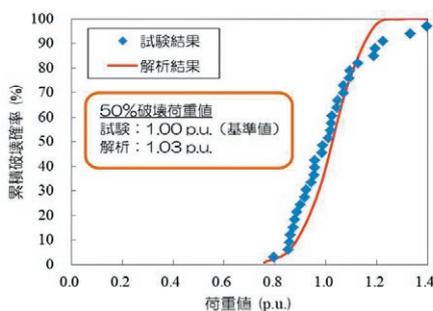


図8 実器の強度評価結果

を求め、その応力分布と体積から破壊確率を計算した結果が図8である。図8には、評価対象である実器の強度試験結果を併記している。同図より、高荷重側の破壊確率分布に多少の相違はあるものの、50%破壊荷重値や大まかな傾きなどは試験結果とよく一致しており、精度の良い解析・評価ができていると判断する。

以上のように、従来の課題であったエポキシモールド製品の機械的強度の解析・評価技術を改善したことで、実器の設計・開発に十分活用できる解析・評価技術を構築できた。

5 おわりに

本解析・評価技術の特長は、エポキシモールド製品の成形プロセスを加味した残留応力を求めていること、残留応力を考慮した状態で外部荷重をかけて、その応力分布から破壊確率を計算しているところにある。これまで、それぞれの要素技術について基礎検証を実施してきたが、本稿では、各要素技術を組み合わせて実器に適用した。また、強度試験結果と比較し、本解析・評価技術の妥当性を検証した。その結果、従来の課題であったエポキシモールド製品の強度評価を精度良く行うことができ、効率的な製品設計に資する技術であることを確認できた。

本技術をエポキシモールド製品開発の初期段階から利用することで、適切なモールド製品形状や製造プロセスの導出に活用できる。これにより、設計変更や試作回数

などが抑制されるのはもちろんのこと、金型修正に要するコストや期間などの抑制にもつながると考えている。

本稿ではエポキシモールド製品の機械的強度に焦点をあてたが、お客様の要求に応える製品をスピーディに提供するためには、開発品に要求されるさまざまな性能を試作前に解析・評価することが重要である。今後も効率的な製品開発に必要な解析・評価技術を構築し、設計・製造プロセスの改善に貢献できるように努めていきたい。

■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) 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)
- (5) 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)
- (6) 森佑介, 滝澤明広:「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」, 東光高岳技報, No.6 (2019)
- (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1 Maxwellモデルの基本的な性質)」, Mech D&A News, vol.2005-2 (2005)
- (8) 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)
- (9) W. Weibull:「A Statistical Distribution Function of Wide Applicability」 J. Appl. Mech., Vol.18 (1951)
- (10) 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)

■語句説明

注1) 粘弾性特性:力を加えると瞬時に変形する弾性体としての性質と時間をかけて変形する粘性体としての性質を合わせた特性

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

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