

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

■ 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、防災や環境負荷低減のため、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応えるべく開発品を早期に市場投入するためには、開発段階で試作前に最適な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、ポ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求められるように、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。特に、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収縮挙動の解析に精力的に取り組んできた^{(1)~(6)}。これにより、的確な成形プロセス条件を見出すことが可能になり、従来よりも試作回数を低減させることができるようになってきた。しかしながら、これまで取り組んできた残留応力は、**図1**に示す一次硬化の工程にて生じるものであり二次硬化の工程以降を考慮したものではなかった。製品開発に有用な情報を得るには、成形プロセス完了時の残留応力状態を的確に把握することが有効であり、徐冷の工程まで考慮することが必要である。

今回、これまで取り組んできた一次硬化収縮による硬化ひずみ⁽⁵⁾に加え、二次硬化の工程以降で起こる応力緩和と呼ばれる現象を考慮することで成形プロセス完了時の残留応力を求められるようになった。本稿では、単純な形状における計算例とともに残留応力予測のための応力緩和解析について紹介する。

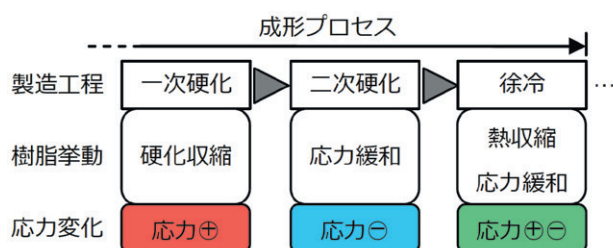


図1 モールド製造工程と応力変化の関係

2 応力緩和現象

2.1 モールド製造工程における応力緩和現象

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⁽⁵⁾。残留応力が強いと、使用環境での外的な荷重や温度変化などとの組み合わせにより、場合によっては樹脂の割れなどを引き起こす。これまで、一次硬化によって生じる残留応力や硬化温度から常温に下げた際に生じる熱応力を計算できるようにしてきた。しかしながら、応力が生じる現象のみを対象としていた。すなわち、**図1**に示した応力が緩和する現象を考慮しておらず、応力を過剰に見積もっていたことになる。

図1に示すように製造工程では、一次硬化の工程で硬化収縮による残留応力が生じ、二次硬化の工程にて長い時間、高い温度をかけることで応力が緩和する。その後、高温状態から徐々に温度を下げる徐冷と呼ばれる工程を経る。徐冷の際には樹脂と内部部品の線膨張率の差から温度が下がることで応力が生じるものの、時間をかけて徐々に温度を下げることで応力発生を抑制（応力緩和）している。したがって、徐冷においても応力緩和を考慮する必要がある。これらを踏まえ、妥当な残留応力を得るために応力緩和を考慮した解析に取り組んだ。

2.2 応力緩和解析の概要^{(7)~(9)}

エポキシ樹脂は粘弾性と呼ばれる特性を持っている。粘弾性とは粘性的な流動をともなう弾性を示すものであり、一般的に**図2**に示すバネとダッシュポットで構成したMaxwellモデルを用いて挙動を表現する。負荷を掛けた際に即応せずにダッシュポットによって遅れた応答となる。エポキシ樹脂で考えた場合、**図3**に示すように、両端を固定した状態で硬化させると硬化収縮によって内向きに応力が発生する。この状態で変位を固定し続けると、時間経過に伴いダッシュポットがゆっくりと伸びて応力が弱くなる。このようにMaxwellモデル

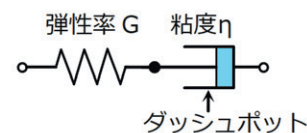


図2 Maxwellモデル

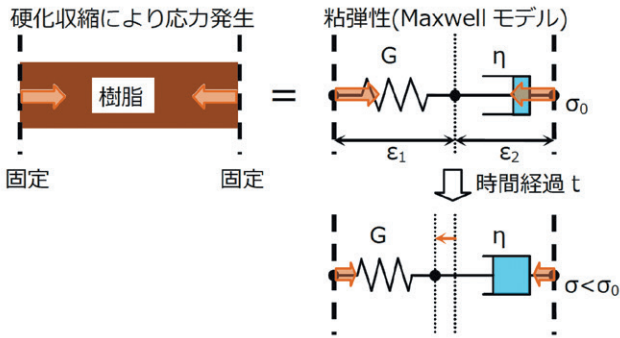


図3 Maxwellモデルによる粘弾性挙動のイメージ

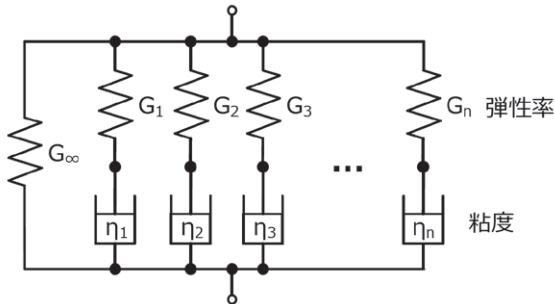


図4 一般化 Maxwell モデル

は応力が緩和するようすを表わすことができる。両端の変位が変わらずに応力が弱くなっていることから弾性率が低下することと等価になり、その弾性率を緩和弾性率とよぶ。

単一の Maxwell モデルであると、ある決まった時間域での応力緩和特性のみの記述となるため、汎用的に粘弾性特性を表わす場合、図4に示すように Maxwell モデルを複数個並列接続した一般化 Maxwell モデルを使用する。

一般化 Maxwell モデルを Prony 級数の形式で表現したものを次式に示す。ここで $G(t)$: 緩和弾性率, t : 緩和時間, G_i : Maxwell モデルの弾性率, τ_i : ダッシュポットの緩和時間, a_T : シフトファクター, T : 温度, n : Maxwell モデルの結合個数である。

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

粘弾性特性の測定から解析適用までの概要を以下に示す。複数の温度条件にて動的粘弾性測定^{注1)}を実施し、周波数に対する動的弾性率^{注2)}の特性を得る。そのデータからある基準温度における時間に対する緩和弾性率の関係が得られる。緩和弾性率は、図5に示すように時間とともに低下していく特性となる。また、この特性は基準温度に対する温度変化に合わせて時間軸方向にスライドできる。この温度変化をシフトファクターと呼ばれる温度の関数を用いて基準温度の特性をシフトして異なる温度も含めた粘弾性挙動を表現する。(1)式のパラメータである τ_i , G_i , G_∞ , $a_T(T)$ を求めることで

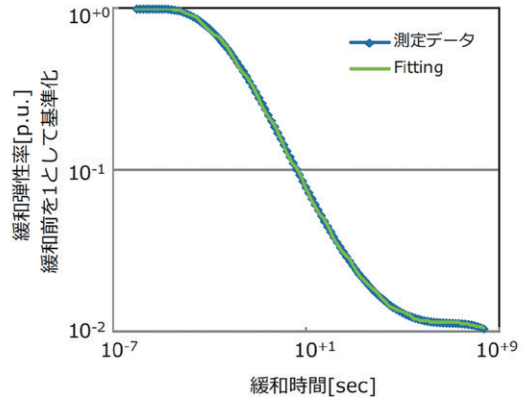


図5 基準温度における粘弾性特性

解析に適用できるようになる。求めた粘弾性特性は、樹脂物性として定義して計算する。これにより温度と時間によって弾性率が低下し応力が緩和する様相が解析できる。

3 応力緩和解析の計算例

3.1 解析モデル

紹介する計算例の解析モデルの形状を図6に示す。外形は円柱形状のモールドであり、内部部品としてモールドの中央部に円柱状の鉄を配置したモデルとなっている。このモデルはある程度樹脂のポリウムがあり、硬化収縮の影響が生じやすくなっている。また内部部品が鉄であるために樹脂と鉄の線膨張率差が大きく、徐冷時に強い熱応力が見込めるものである。

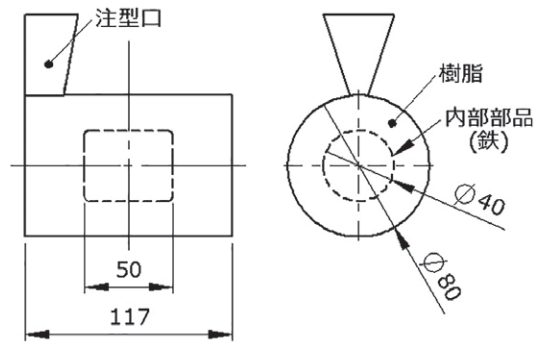


図6 解析モデル

3.2 二次硬化の工程における応力緩和解析

一次硬化後の残留応力と二次硬化後の残留応力の分布を図7に示す。図は円柱形状の断面となっており、樹脂のみの応力分布を示し、内部部品は非表示としている。一次硬化後の状態では、一次硬化の硬化収縮によって生じたひずみにより残留応力が生じている。残留応力は内部部品を中心に樹脂の外表面に向かって弱くなる分布となっている。特に内部部品のコーナー部に接する箇所の樹脂に強い応力が生じていることがわかる。これに対して、二次硬化後の状態は応力緩和によって全体的に

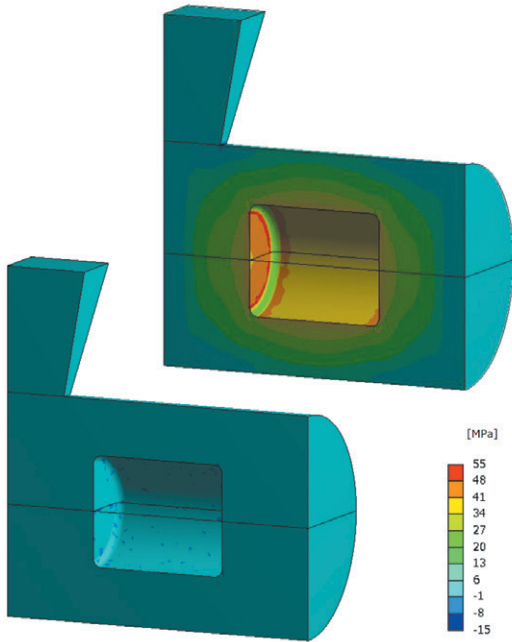


図7 残留応力分布 一次硬化後(上), 二次硬化後(下)

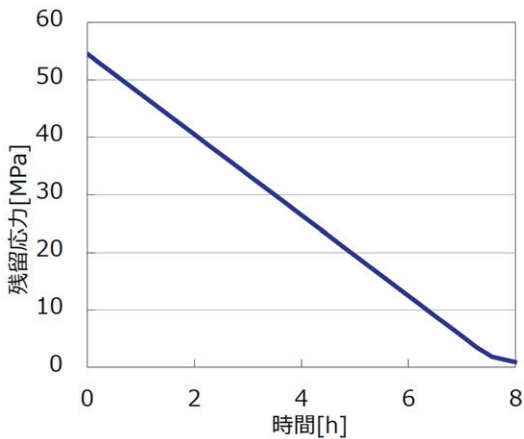


図8 残留応力の時間変化

弱い応力となり、かつほぼ様な分布になっていることがわかる。次に強い応力の生じていた箇所の残留応力の時間変化を図8に示す。この解析モデルの場合、55 MPa程度生じていた残留応力が1 MPa程度まで緩和されている。以上のことから、二次硬化の工程においては高温状態を長時間維持することで応力が大幅に緩和して残留応力を抑制できることがわかる。反対に低温加熱もしくは短時間加熱の場合には、残留応力が強くなることは容易に想像でき、二次硬化の温度・時間の条件は適切に設定しなければならないと言える。

3.3 徐冷の工程における応力緩和解析

応力緩和は主に二次硬化の工程を想定して適用検討を進めてきたが、徐冷の工程でも考慮すべきと考え適用を試みた。

従来の徐冷工程に対する応力解析（以下、従来計算）

では、線膨張率差によって生じる熱応力のみを計算しており、このとき時間によって応力が緩和する要素は含まれない。そのため、徐冷というゆっくり冷やすことの結果を的確に表現することができていなかった。それに対して、今回取り組んだ応力緩和を考慮した計算では温度と時間に応じて応力が緩和する量に変化する。これにより、従来計算よりも的確に徐冷の効果を表現でき、より実際に近い残留応力の状態を示すことができるものと考えた。

従来計算と応力緩和を考慮した計算を比較した結果を図9に示す。この解析モデルの場合、従来計算の熱応力解析結果では残留応力が約40 MPaとなるが、応力緩和を考慮した解析では約24 MPaとなり、応力緩和の効果により4割程度低い残留応力値となった。

次に徐冷の工程に応力緩和効果を考慮した場合の残留

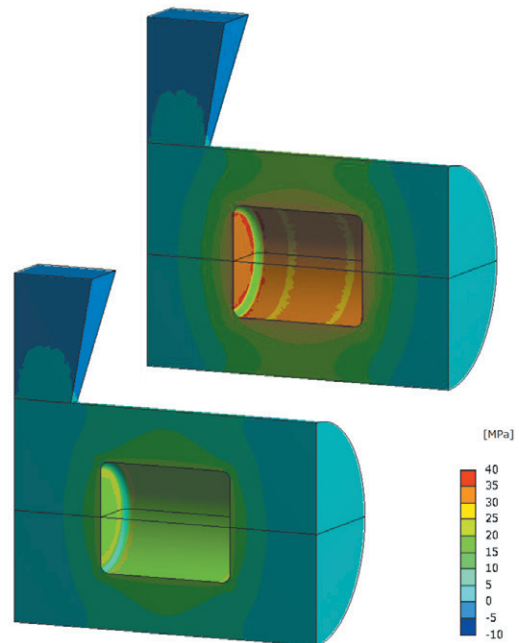


図9 徐冷後の残留応力分布 従来計算(上), 応力緩和考慮(下)

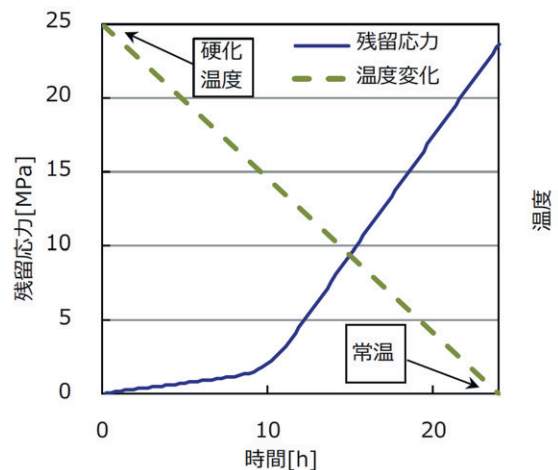


図10 徐冷の工程における残留応力の時間変化

応力の時間変化を図 10 に示す。徐冷はじめの比較的高い温度域では応力緩和の効果が大きく応力は強くないが、温度が下がってくるにしたがって応力緩和の効果が小さくなり、熱収縮による影響が支配的になることで応力が強くなっている様子がわかる。想定通りの変化をしており、実際に近い残留応力状態を示すことができているものとする。

以上のように、応力緩和を考慮した解析に取り組んだことにより、一次硬化の工程から二次硬化、徐冷の工程まで含めた残留応力の挙動を解析できるようになった。各工程を含めた解析としたことで、成形プロセス完了時に生じる残留応力を予測できる解析技術を構築できたものとする。また、徐冷の工程に関しては、従来計算では残留応力を強めに計算しているため、より安全側に機器設計をすることとなり、機器の小型化などの検討に制約を与えることになる。応力緩和を考慮することで実際に近い残留応力となり設計の幅が広がるものと期待できる。

4 おわりに

本稿では、残留応力を求めるための応力緩和現象を考慮した解析について紹介した。これまで取り組んできた硬化収縮によって生じる残留応力に加え、応力緩和を考慮することで二次硬化の工程における残留応力の挙動を把握できるようになった。さらに徐冷の工程に対しても応力緩和を考慮できるようにしたことで、いままで示すことができなかつたゆっくりと冷やすことの効果をよりの確に表現できるようになった。今回の取り組みにより、成形プロセス完了時に生じる残留応力を定量的に予測できるようになった。試作前にこれらを解析することで、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、モールドの製品開発の手戻りを抑制でき、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。

今後、成形プロセス完了時の残留応力を考慮した上で使用環境を想定した機械的な外力や環境温度の変化によるストレスを重畳して解析することを考えている。製造から使用状態まで考慮したモールド製品の応力状態を予測し、より良い製品の開発に貢献できる解析技術の構築を目指していく所存である。

■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, 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) サイバネットシステム株式会社:「アニール解析操作説明書」, PlanetsX 資料 (2015)

(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1 Maxwell モデルの基本的な性質」, Mech D&A News vol.2005-2 (2005)

(9) 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)

■語句説明

注1) 動的粘弾性測定: 試料に正弦振動を与えた際の応答の遅れを測定するもの

注2) 動的弾性率: 通常の静的な弾性率を拡張して応答の位相差を考慮した弾性率



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