論　文

エポキシ樹脂モールド機器における硬化条件の最適化

～伝熱計算の適正化による硬化解析の適用範囲拡大～

森　佑介 Yusuke Mori
滝澤　明広 Akihiro Takizawa
吉谷　彰倫 Akinori Yoshitani

1 はじめに

熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂は電気絶縁性や機械強度が優れる固体絶縁材料として，以前から広く電力機器に用いられている。防災や環境負荷低減のため，絶縁油やSF6ガスに代わり，エポキシ樹脂モールドによる固体絶縁のニーズが高まっている。その二ーズに応えて迅速に製品開発を行うには，設計段階において最適な樹脂の硬化条件を求めることが有効となる。最適な硬化条件とは，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・ひずみのほか，後述するヒケなどの外観不良の抑制も含まれる。これまで東光高岳は，樹脂硬化プロセスにおける樹脂流動，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組んできた。特に，樹脂の硬化発熱の影響を考慮した硬化収縮挙動の解析に精力的に取り組んできた[(1)~(3)]。これにより，ヒケなどの発生様相を予測することが可能になり，試作開発を効率的に進めることができるようになってきた。

樹脂の残留応力やヒケなどの要因となる硬化収縮を定量的に把握するためには，樹脂のPVT特性[注1)]が必要となる。しかし，熱硬化性樹脂はPVT特性を測定中に硬化が進行するため，PVT特性の測定は容易ではない。そこで筆者らは，PVT特性がなくても簡易的にヒケを予測できる方法を提案してきた[(4)]。ヒケの予測においては，樹脂の硬化が進行する順番を把握することが重要である。硬化順序を把握するためには，金型の温度分布が適切に計算されている必要がある。そのため，金型と雰囲気間の伝熱条件を見直し，現在では，金型の加熱箇所や温度だけでなく，硬化炉の種類や硬化炉外(常温環境下)での硬化についても考慮でき，より適切な硬化条件の導出が可能となっている。本稿では，硬化炉内で硬化させた場合，硬化炉外で硬化させた場合，ともに妥当な伝熱計算，硬化反応計算が可能であることを示し，これを製品に適用した活用事例について紹介する。

2 ヒケのメカニズムと予測方法

2.1 ヒケ発生のメカニズム

外観品質は試作結果の基本的な評価項目である。外観品質を低下させる主な要因の一つとしてヒケがある。ヒケは樹脂の硬化時の収縮によって製品表面に発生するへこみである。一般に樹脂は熱硬化性樹脂，熱可塑性樹脂に関わらず，硬化（固化）の際には収縮を伴う。熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂は，熱可塑性樹脂に比べて硬化時の収縮が小さい。しかし，電力用エポキシ樹脂モールド機器の樹脂肉厚は，熱可塑性樹脂の成型品に比べて厚く，偏肉（部位毎の樹脂厚の偏り）も大きい傾向にあり，結果的に硬化時の収縮が製品形状に影響を及ぼす。

熱硬化性樹脂における硬化時の収縮量は，**図1**に示すように硬化反応の分子結合による硬化収縮と温度変化による熱収縮の和である。また，注型時点では樹脂は液状で流動性があるため，このときの硬化反応や温度による体積変化は硬化後の形状に影響しない。温度上昇に伴い樹脂の硬化反応が進むと，樹脂の粘度も上昇する。硬化反応が進みゲル化すると，急激に粘度が上がり，樹脂の流動性がなくなる。ゲル化した箇所は硬化後の製品形状に影響する収縮が始まる。この収縮分を補填するように未硬化樹脂が供給されればヒケは抑制できる。しかし，硬化順序の遅い箇所に収縮分の未硬化樹脂が供給されなければヒケが生じる。**図2**はヒケ発生のメカニズムを示したものである。この場合，樹脂厚の厚い中央部は硬化発熱に伴って硬化が促進され，最初にゲル化する。これにより，注型口側からの未硬化樹脂の供給経路が遮断され，収縮分を補えなくなってしまう。したがって，硬化順序の遅い角付近にヒケが発生する。

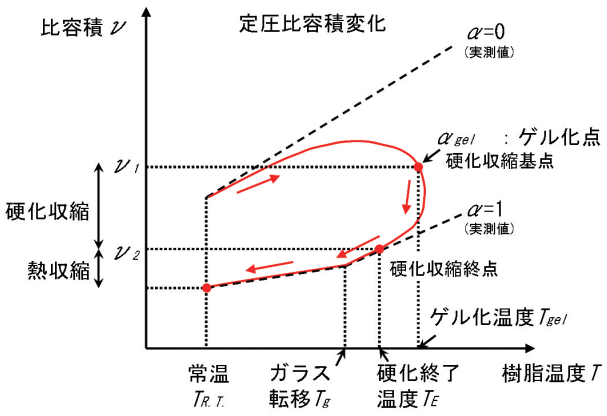

図1　硬化収縮と熱収縮の模式図

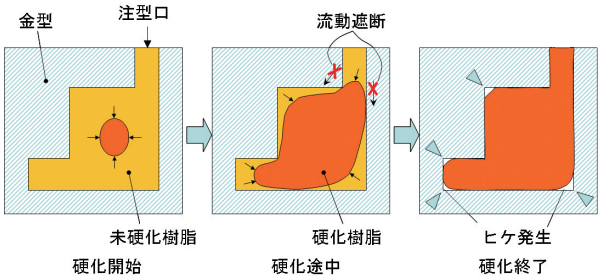

図2　ヒケ発生のメカニズム

2.2　硬化解析によるヒケの予測方法

ヒケの可能性を予測し，事前に対策を講じることができれば，試作回数の低減に繋がる。そのためには，硬化順序を把握する必要がある。硬化順序は，ゲル化した樹脂の分布を見ることで把握する。硬化順序を見て，ゲル化した樹脂が未硬化樹脂の流動を遮断，樹脂収縮分の補填を阻害することがないか検討する。

エポキシ樹脂は，硬化時の化学反応により発熱を生じる。つまり，周囲からの伝熱と樹脂の硬化発熱があいまって硬化反応が進行する。したがって，複雑な製品形状の場合，硬化順序を把握するために硬化解析が必要となる。これまで東光高岳は，**図3**に示すような偏肉の大きいエポキシ樹脂モールド変成器に対して，硬化解析を実施して硬化順序を把握することで，ヒケの予測および対策案の検討が可能であることを示した[4]。**図3**に示した機器の場合，金型上下に温度分布をつけることでヒケを改善した。以上のように，硬化解析を用いることで，最適な硬化条件を試作前に求めることができる。

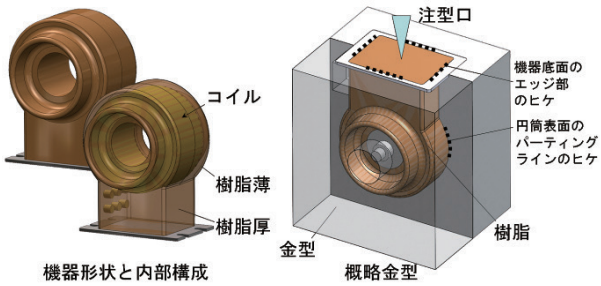

図3　硬化解析によりヒケ対策を実施した機器

3　伝熱計算適正化と硬化解析の適用拡大

3.1　硬化解析における伝熱計算の重要性

エポキシ樹脂の硬化条件を決めるにあたり，以下について検討する必要がある。

(1) 加熱方法（硬化炉で加熱，硬化炉の外（常温環境）でヒーターを用いて加熱など）
(2) 雰囲気の温度
(3) ヒーターの有無
(4) ヒーターの温度（ヒーターを使用する場合）
(5) 金型の加熱箇所（ヒーターを使用する場合）

これら (1) ～ (5) の条件によって，エポキシ樹脂の硬化順序は異なる。これは条件の違いによって，金型の温度分布が変化し，樹脂の硬化反応に影響するためである。したがって，硬化解析を用いて硬化順序を把握するためには，各条件下において，金型の温度分布を正しく得ることが重要である。そのためには，金型と雰囲気間の伝熱が正しく計算されている必要がある。特に，(1) 加熱方法によって金型と雰囲気間の伝熱が大きく異なることが想定される。この伝熱の違いを硬化解析では考慮する必要がある。

3.2　加熱方法による伝熱条件の違い

金型と雰囲気間の伝熱については，雰囲気温度および空気の流れ，対象物の温度，形状および寸法に依存する。流れについては，金型と雰囲気間の伝熱を考慮するにあたり，以下の項目を知っておく必要がある。

(1) 自然対流，強制対流の区別
(2) 層流，乱流の区別
(3) 流速

硬化炉で硬化させた場合（以下，炉内硬化）と硬化炉の外でヒーターを用いて硬化させた場合（以下，炉外硬化）では，雰囲気の温度や流れの状態が異なる。したがって，金型と雰囲気間の伝熱も異なることが想定される。金型と雰囲気間の伝熱量q [W/m^2]は次式で表される。

$$q = h\Delta T \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

ここで，h [W/(m^2･K)] は熱伝達係数であり，硬化解析時の境界条件として使用する。ΔT [K] は金型と雰囲気との温度差である。炉内硬化と炉外硬化では，ΔT が大きく異なるだけでなく，h も異なる。これは h が雰囲気の流れにも依存するためである。h は式（２）で示すようにヌセルト数 Nu，流体の熱伝導率 k [W/(m･K)]，対象の代表長さ L [m] で表される。

$$h = Nu\frac{k}{L} \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

Nuは対象物の形状や流れの状態によって決まる値である。上記の(1)～ (3) を把握するため，東光高岳で使用している硬化炉内外における金型周囲の流速を測定し，Nu およびhを計算した。炉内硬化の場合は流速が大きく，強制対流として取り扱った。炉外硬化の場合は，金型周囲の空気の流れは小さく，自然対流として取り扱った。**図3**に示した機器の場合，炉内硬化は炉外硬化に比べて，熱伝達係数hが6倍程度大きくなる。

3.3　炉内・炉外硬化を模擬した硬化解析の妥当性検証

炉内硬化させる製品と炉外硬化させる製品，それぞれ

に対して雰囲気温度と熱伝達係数hの違いを考慮して硬化解析を実施した。また，それぞれの製品に対して硬化実験を行った。両製品ともヒーターを使用し，金型に温度勾配をつけている。硬化実験の際に金型の温度分布を熱電対で測定し，併せて硬化時間も測定した。硬化時間は一定の間隔で確認し，硬化完了を確認した時間と，その前に確認した時間の間で硬化が完了したと判定した。**表1**は解析結果と実測データを比較し，解析と実測の比でまとめたものである。複数箇所の金型温度を測定しており，解析／実測比の最小値と最大値を示した。同表より，解析と実測は概ね一致しており，炉内硬化・炉外硬化ともに，適切な伝熱計算により，金型の温度分布を把握可能なことがわかる。また，硬化時間も一致しており，金型の温度分布を適切に計算することによって，金型内部の樹脂の硬化も適切に把握できていることがわかる。

表1　金型温度，硬化時間の比較（解析／実測）

	炉内硬化製品	炉外硬化製品
金型下部温度	0.99～1.00	1.00～1.04
金型上部温度	1.00～1.01	1.03
注型口温度	1.00	1.03
硬化時間	0.93～1.04	0.88～1.00

4　硬化条件の最適化実施例

これまで**図3**に示した製品については，ヒケを抑制するため，金型をヒーターで加熱しながら炉内硬化させてきた。しかし，品質および硬化時間を維持しながら，炉外硬化が可能であれば作業性の改善や生産効率の向上などに繋げることができる。そこで，炉内硬化と同様のヒーター条件で炉外硬化させた場合の硬化解析を実施し，炉外硬化にすることで硬化条件の最適化が可能であるか検証した。解析結果を**図4**に示す。図中の色が付いているところは樹脂がゲル化し，流動性がない箇所である。未硬化樹脂の供給が遮らないように，下部からゲル化することが望ましい。同図 (a) はヒーターを使わずに炉内硬化した場合であり，ヒケが生じる条件である。注型口に近い樹脂量が多い箇所から硬化が進行しており，注型口から遠い部分への未硬化樹脂の供給経路を遮断している。同図 (b) および (c) は加熱炉とヒーターを併用した場合であり，ヒケの抑制に効果的な条件である。(b) については，過去に報告[4]した結果であるが，(c) は硬化炉内の流速等を考慮して伝熱条件を見直した結果である。伝熱条件の見直しにより，樹脂量が多い箇所の硬化が速くなっており，(b) よりも未硬化樹脂の供給経路が狭い結果となっている。(d) はヒーターを使用し，炉外硬化（常温環境下）で硬化した条件である。(c)に比べて，注型口に近い箇所の樹脂の硬化が抑制され，下部から硬化が進行している。したがって，より確実にヒケを抑制できると考えられる。

表2 硬化解析条件

	ヒーター有無	硬化炉内・外	解析モデル
(a)	無	炉内	ヒケが発生する硬化条件
(b)	有	炉内	ヒケを抑制する硬化条件
(c)	有	炉内	(b) の伝熱条件を見直し
(d)	有	炉外	炉外硬化の適用可否を検証

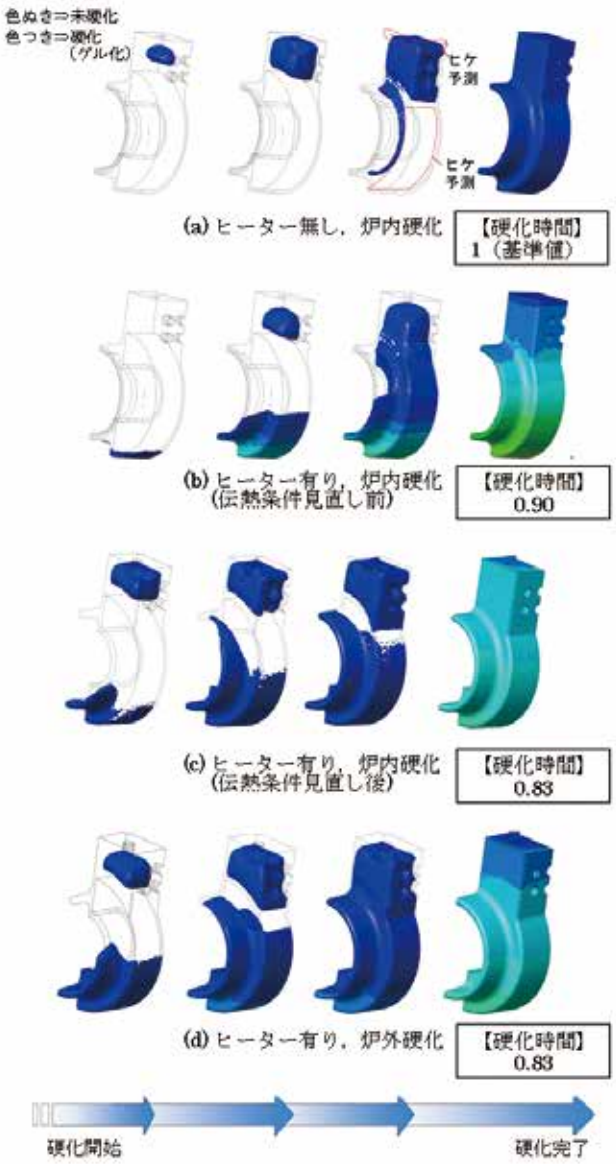

図4　硬化解析による硬化順序の把握

硬化時間についても，（c）ヒーター有り，炉内硬化のときと同等であり，生産性に影響しないことがわかる。

これは炉外硬化の場合，雰囲気温度は低いものの，自然対流下での伝熱となるためである。これにより，金型と雰囲気間の熱伝達係数は小さくなるため，温度が下がりすぎずに，同等な硬化時間になったと考えられる。

以上のことから，本解析対象の場合，ヒケの防止効果，作業性等の観点から，炉外硬化が最適であることを見出した。

当然のことながら，偏肉の大きい製品全てに対して，ヒーターを使用した炉外硬化が最適であるとは限らない。しかし，今後，エポキシ樹脂モールド機器の開発において，金型の温度分布の制御に際し，金型の加熱箇所，加熱温度だけでなく，炉内硬化・炉外硬化を含めて事前検討が可能になったことで，これまで以上に適切な硬化条件の選択が可能になったと考えている。

5 おわりに

偏肉の大きいエポキシ樹脂モールド機器の最適な硬化条件を試作前に求めることができれば，開発工数・コストを削減し，お客さまのニーズにも迅速に応えることができる。硬化解析はそのための有用なツールであるが，樹脂の硬化順序を精度よく解析し，可視化することが重要である。3章にて，硬化順序を決定づける金型の温度分布を正しく把握するためには，金型と雰囲気間の伝熱計算が重要であることを示した。特に，炉内硬化と炉外硬化では，金型と雰囲気間の伝熱条件が大きく異なり，この違いを考慮する必要がある。本検討により，この伝熱条件の違いを考慮し，炉内硬化，炉外硬化ともに金型の温度分布を適切に計算可能となった。したがって，どちらの硬化条件においても，硬化順序を把握し，ヒケの発生を予測可能になった。これにより，これまで以上に適切な硬化条件を求められるようになった。本稿では，すでに製品形状，金型構造が決まったものに対して，硬化条件の最適化を図った事例を述べたが，新たに開発する機器に対して硬化プロセスを考慮した製品形状や金型構造の検討に役立てることができる。

エポキシ樹脂モールド機器の製造においては，ヒケの防止だけでなく，従来以上の残留応力低減などの要求もある。今後，それらの要求に応えられるよう解析技術基盤を構築し，活用していきたい。

■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№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№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№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)

■語句説明

注1) PVT特性：材料の体積収縮の計算に必要となり，P（圧力），V（体積），T（温度）の関係を表す特性である。熱硬化性樹脂の場合，未硬化物と硬化物のPVT特性が必要となる。

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

吉谷　彰倫
電力機器事業本部 モールド変成器製造部
設計グループ　所属
モールド変成器の設計・開発に従事