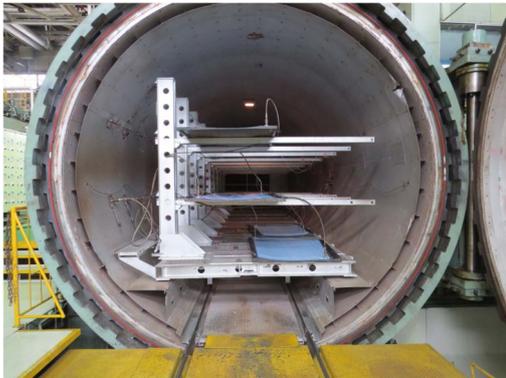


熱硬化性複合材の硬化解析精度向上による 部品開発プロセス改善

Improvement of Development Process for Thermosetting Composites Parts
by Improving Accuracy of Curing Analysis



野間 一希*¹
Kazuki Noma

神谷 昌美*¹
Masami Kamiya

航空機を中心に軽量・高強度である熱硬化性複合材の適用が進んでいるが、複合材硬化時の温度条件が適切でなければ機械特性が低下するため、部品に応じて適切な硬化条件の設定が求められる。一般的に、航空機用複合材部品の場合、5～10 回程度の部品温度計測試験により硬化条件を設定しており、試験費用の削減が課題であった。そこで、複合材部品温度が予測可能な硬化解析を適用し、その精度向上により、硬化条件設定プロセスの改善を図った。

1. はじめに

軽量・高強度である熱硬化性複合材は、航空機をはじめ幅広い用途に適用されている。一般的に、オートクレーブによって高温・高圧下で硬化させるが、硬化時の温度条件によって機械特性が変化するため、部品に応じて適切な硬化条件を設定する必要がある。しかしながら、航空機構造に適用されるような厚物複合材部品の場合、樹脂の硬化時に発生する熱量が多いため、内部の温度が上昇し、要求値を逸脱し易い。図1に示すとおり、部品温度が要求値を満足するために適切な硬化条件の設定が必要であるが、一般的に航空機用複合材部品の場合、5～10 回程度の部品温度計測試験により試行錯誤して条件を設定しているため、費用が膨大である。

この問題を解決するため、オートクレーブ硬化中の部品温度を予測可能な硬化解析の適用により、硬化条件設定費用の削減を推進している。⁽¹⁾ 本報では、航空機用熱硬化性複合材の硬化解析精度向上を目的として、解析用熱物性を高精度に取得し、解析精度を検証した結果について報告する。

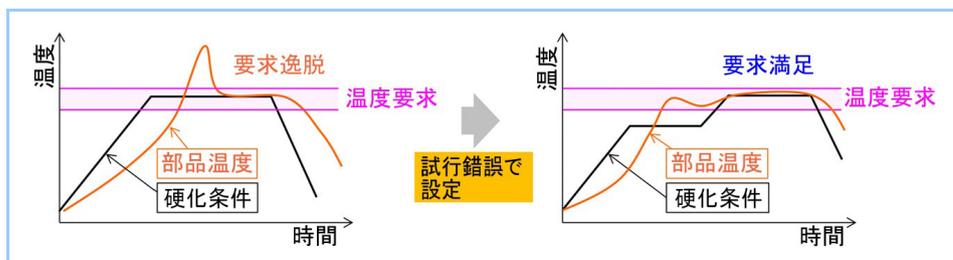


図1 硬化条件の設定

硬化条件の一例を示す。左図の硬化条件では部品温度が要求を逸脱するため、右図のように硬化途中で保持するステップを持たせることで、要求を満足させる必要がある。

*1 総合研究所 製造研究部

2. 熱硬化性複合材の硬化解析

硬化解析には、FEM 解析モデリングソフト COMPRO-2D⁽²⁾ (Convergent Manufacturing Technologies 社製)を使用した。オートクレーブ缶内から複合材部品への熱伝達時、伝熱に加え、複合材の硬化反応挙動を考慮した解析が可能である。

図2に硬化解析のワークフローを示す。まず、材料の熱物性(硬化反応速度式, 比熱, 熱伝導率)を入力した後に、境界条件(オートクレーブ缶内の熱伝達率)を設定し、硬化条件を入力する。解析結果として部品温度が出力され、要求を満足する硬化条件を検討できるため、試験費用削減に有効である。

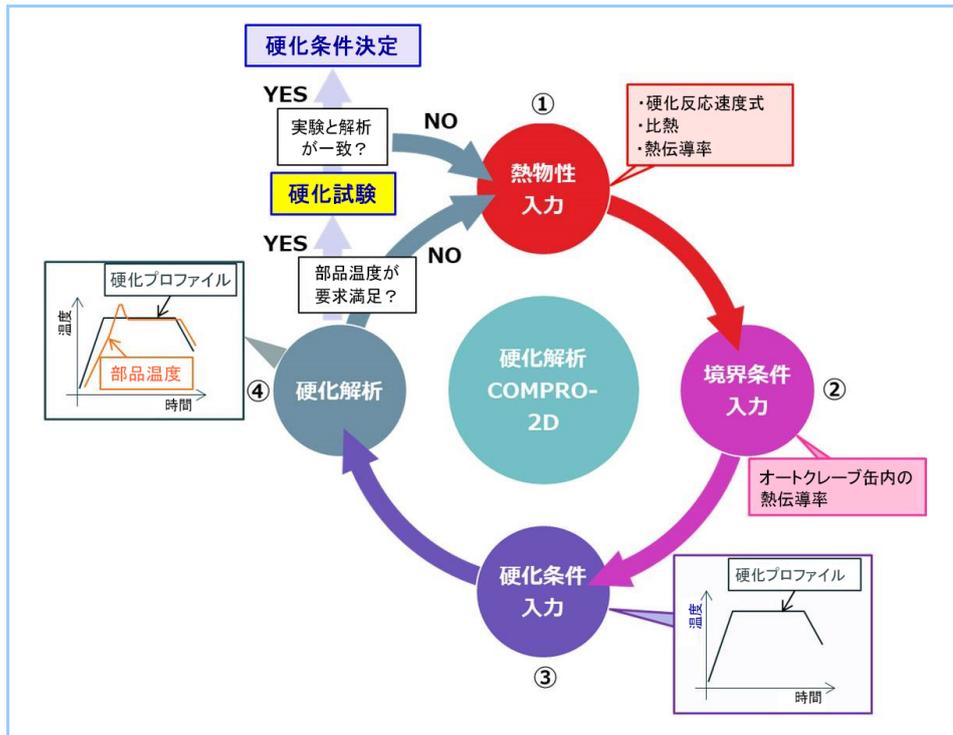


図2 硬化解析のワークフロー

硬化解析のワークフローを示す。熱物性, 境界条件, 硬化条件を入力すると, 部品温度の解析結果が出力される。部品温度が要求を満足していれば適切な硬化条件と判断し, 満たしていなければ再度入力条件の見直しを行う。

3. 熱物性の高精度取得

熱硬化性複合材の硬化解析精度向上を目的として、複合材熱物性を高精度で取得した。複合材硬化時に発生する熱量を発熱成分と比熱成分に分離可能な温度変調タイプの示差走査熱量測定(Differential Scanning Calorimetry :DSC)によって、硬化反応速度式及び比熱を導出した。熱伝導率は厚み方向のみならず、面内方向の物性も取得可能な周期加熱放射測温法によって測定した。測定対象は、炭素繊維織物にエポキシ樹脂を含浸させたプリプレグとした。

3.1 硬化反応速度式・比熱

複合材の硬化反応速度式及び比熱を導出するために、温度変調 DSC を用いた。従来の DSC では発熱成分と比熱成分を含んだ全体熱量のみ出力されるが、温度変調 DSC は通常の DSC の定速昇温に±1℃程度の正弦波の温度変調を重ねることで、全体熱量から周期的温度変調に応答する熱量(比熱成分)を抽出することができる。また、全体熱量から比熱成分を差し引くことで、発熱成分を抽出することが可能である。複合材の比熱成分と発熱成分を精度よく検出でき、解析精度の向上が期待できる。

昇温速度を 1.0, 1.7, 3.5, 6.0℃/min として測定した硬化反応速度のグラフを図3に、比熱のグラフを図4に示す。全体熱量を発熱成分と比熱成分に分離でき、解析への適用が可能となった。

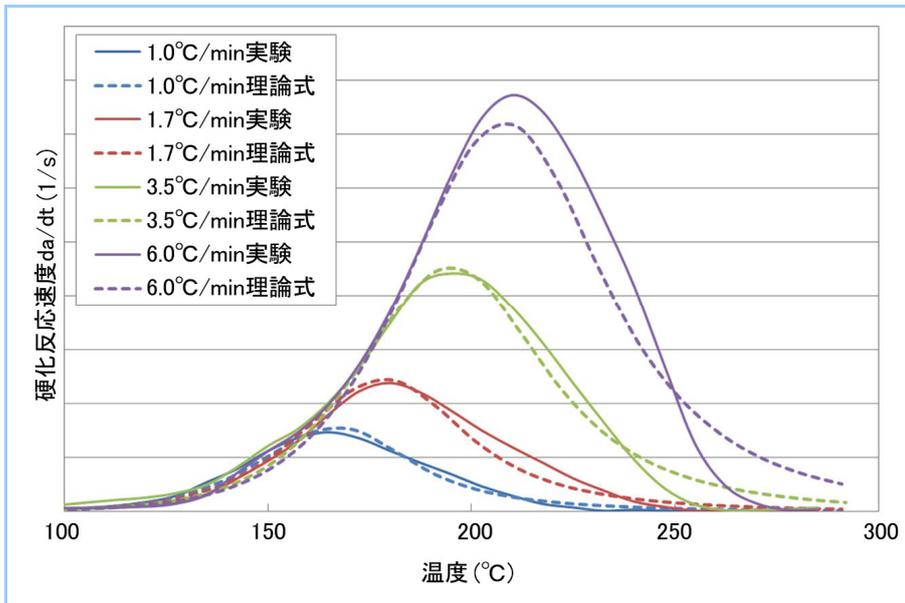


図3 硬化反応速度式の導出

温度変調 DSC によって求めた硬化反応速度(実線)に合うように, 硬化反応速度式の理論式のパラメータをフィッティングさせた結果を示す(破線)。ノミナル昇温速度 1.7°C/min を基準にフィッティングさせた。

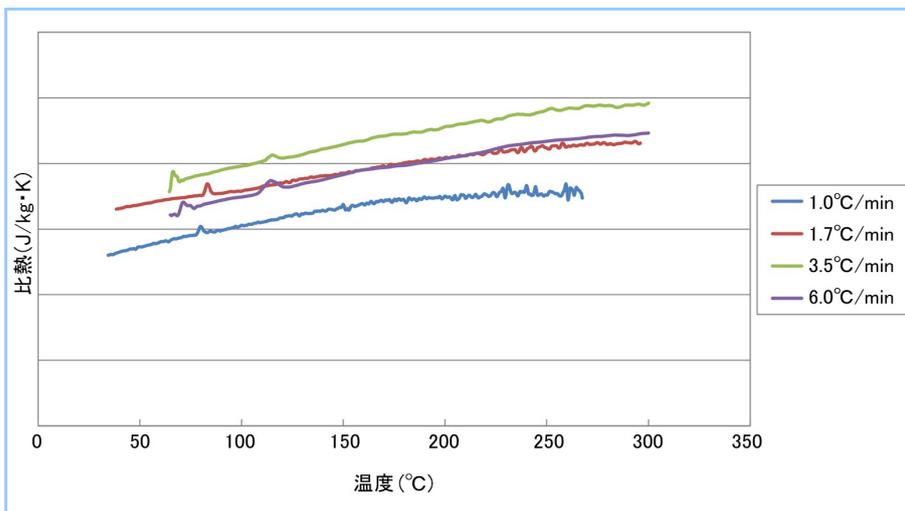


図4 比熱の測定結果

温度変調 DSC によって求めた各昇温速度における比熱の測定結果を示す。比熱は温度依存性を示したため, 温度の関数として解析に適用した。

3.2 熱伝導率

熱伝導率の測定には, 周期加熱放射測温法を用いた。熱伝導率の測定手法として, レーザフラッシュ法が一般的であるが, 測定方向が試料の厚み方向に限定されるため, 熱的異方性を有する複合材料の測定には適していない。そこで, 試料に対してピンポイントに周期加熱を行い, 放射測温位置を移動させることで試料の厚み方向のみならず, 面内方向の熱伝導率も測定可能な周期加熱放射測温法を用いた。

熱伝導率の測定結果を図5に示す。厚み方向 (Z)と比較して, 面内方向 (X)の熱伝導率が高くなり, 温度依存性を示した。複合材の熱的異方性及び温度依存性を考慮した解析が可能となった。

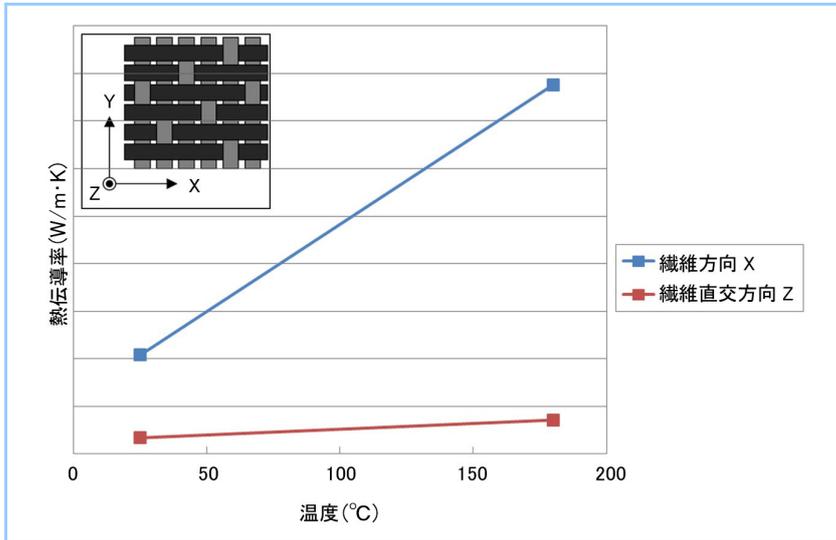


図5 熱伝導率の測定結果

周期加熱放射測温法による熱伝導率の測定結果を示す。
解析は二次元で実施したため、X, Z方向の物性を取得した。
熱伝導率は温度依存性を示したため、温度の関数として解析に入力した。

4. 解析精度検証

4.1 厚物複合材部品の温度計測試験

3章で測定した材料物性の妥当性確認のため、オートクレーブ硬化中の厚物複合材部品内部温度を計測し、解析結果と比較した。図6に示すとおり、厚さ約 18mm (64ply×0.29mm/ply) の積層板の板厚方向3箇所(ツール側, 中央部, バッグ側)に熱電対を設置し、硬化中の温度を計測した。供試体のサイズは 300mm×300mm とした。

複合材部品を板厚 10mm のアルミツール上に配置し、複合材上部に離型フィルムとブリーザ、及びバッグフィルムを適用した。複合材周囲にはシリコンブロックを配置することで断熱し、周囲からの入熱を遮断した。オートクレーブの硬化条件は、昇温速度 1.7°C/min, 保持温度 185°C, 保持時間 120 分とし、圧力は 0.65MPa とした。

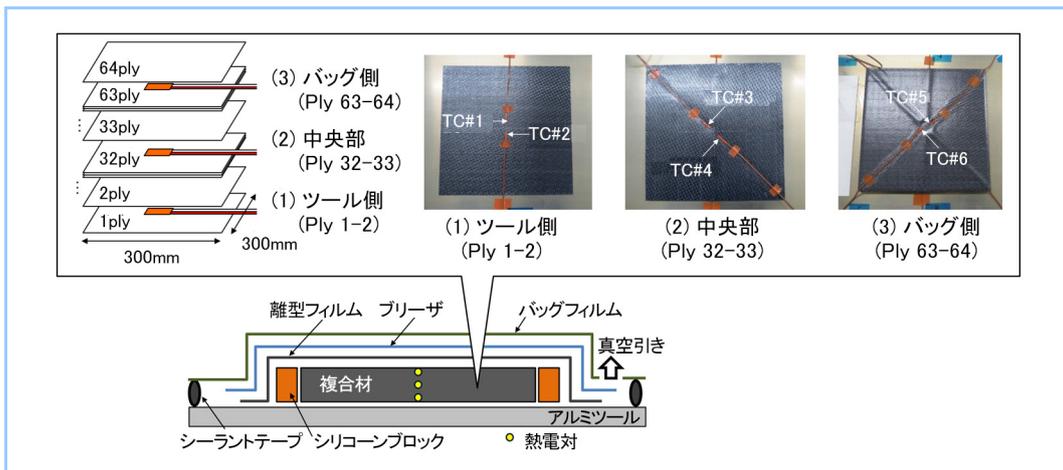


図6 検証試験のバッグ構成模式図

検証試験時のバッグ構成断面図を示す。複合材板厚方向の3箇所に熱電対を各2本ずつ配置し、硬化中の複合材部品温度を計測した。

4.2 解析と実験の比較

硬化解析モデルを図7に示す。解析モデルは二次元断面モデルとし、3章で測定した熱物性を入力した。複合材上部及びツール下部にオートクレーブ缶内からの熱伝達率を設定し、複合材左右端の境界条件は断熱とした。

複合材板厚方向3箇所の温度比較結果を図8に示す。計測した板厚方向3箇所いずれにおいても、硬化発熱ピーク温度の解析と実験の差は5℃以下、ピーク温度の到達時間差は3分以下の予測精度であった。硬化発熱ピーク後の温度低下は実験と比較して解析の方が緩やかになったが、これは、実験では複合材部品より大きいアルミツールを使用している一方で、解析では、複合材と同一幅のアルミツールをモデル化している影響と二次元でモデル化している影響によるものと推察される。今後、モデル化の見直しにより、更なる解析精度向上を図る。

以上の検証試験結果から、解析により実験の硬化発熱ピーク温度とピーク温度到達時間を予測できており、解析の適用により硬化条件の設定費用削減の目途が得られた。

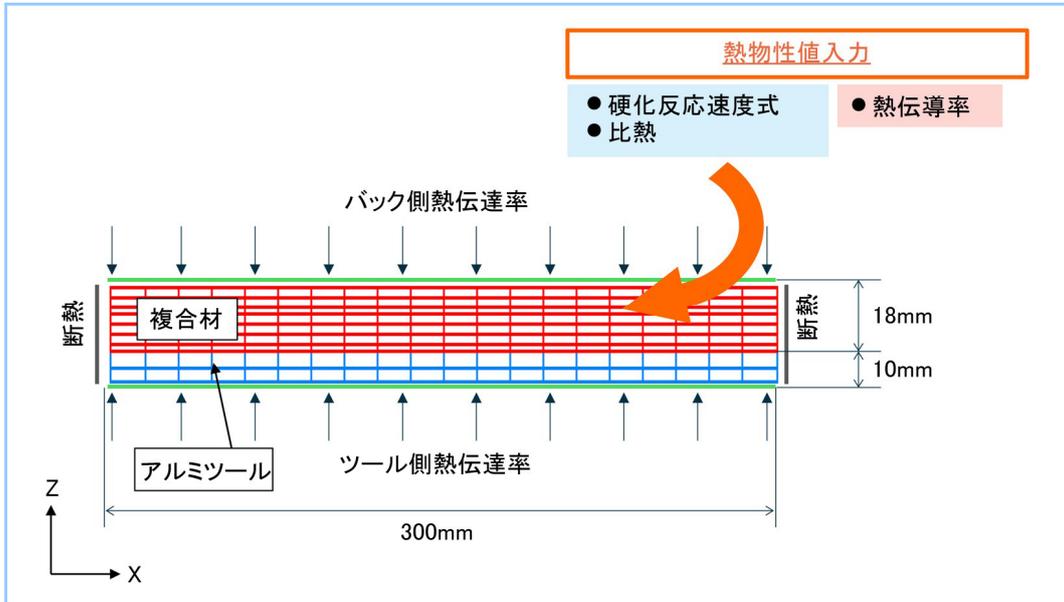


図7 硬化解析モデル

硬化解析に使用したモデル図を示す。図6の検証試験のバッグ構成と同一条件になるよう構成している。実験では複合材と比較して、アルミツールの幅の方が大きい、解析ソフトの機能上同一幅に設定。

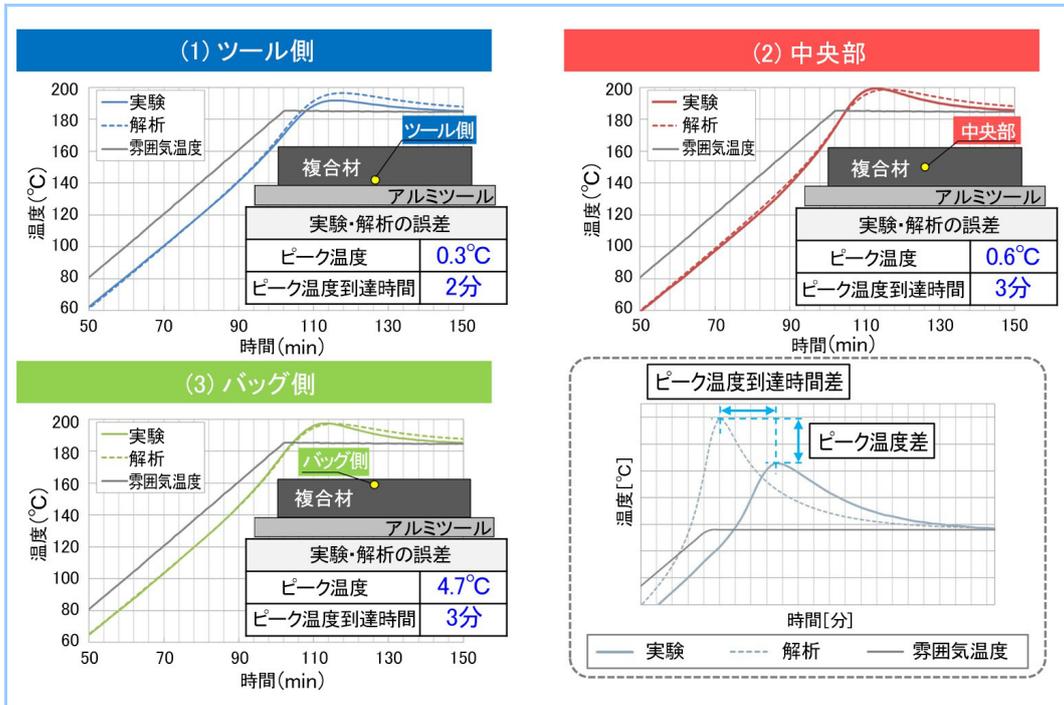


図8 解析精度の検証結果

解析精度検証試験結果を示す。実験(実線)と解析(破線)を比較した結果、各計測点におけるピーク温度差は5℃以下、ピーク温度到達時間差は3分以下となった。

5. まとめ

本報では、複合材熱物性の高精度取得を図り、硬化試験の実測データと解析を比較した結果、解析により実験の発熱挙動が実機適用可能な精度で予測できることを示した。今後、更なる解析精度の向上を図っていく。

本成果により、複合材部品の硬化条件設定時に実施している部品温度計測試験数の削減が見込め、航空機部品の硬化条件設定費用を約6割削減できる見通しを得た。今後、本成果の実用化を推進し、社内複合材製品の硬化条件設定プロセスの改善に貢献していく。

参考文献

- (1) Noma, K., et al., High Accuracy Prediction of Temperature Profiles in Composite Parts During Autoclave Curing, 18th European Conference on Composite Materials, (2018)
- (2) Convergent Manufacturing Technologies, Inc., <https://www.convergent.ca/>