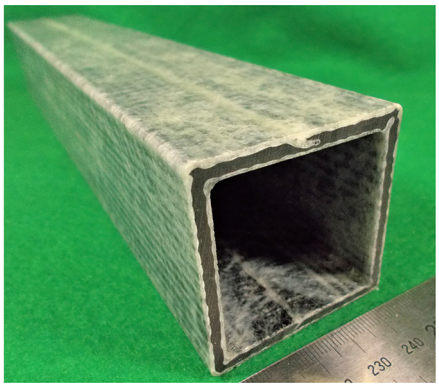
炭素繊維複合材の低コスト・高速成形条件の導出

Derivation of the Low Cost and High-Speed Forming Conditions for a Carbon Fiber Reinforced Plastic



武内 幸生[*1] Yukio Takeuchi
池田 航介[*2] Kosuke Ikeda
西村 渉[*2] Wataru Nishimura
柳瀬 祐丞[*3] Yusuke Yanase
横尾 和俊[*4] Kazutoshi Yokoo

炭素繊維強化プラスチック(CFRP:Carbon Fiber Reinforced Plastics)は，高い比強度が要求される用途に用いられているが，一般的に材料や成形コストが高く，長い成形時間が課題である。本研究では，ガラス繊維強化プラスチック(GFRP:Glass Fiber Reinforced Plastics)に適用されている引抜成形法をCFRPに応用し，低コスト・高速成形を狙った。また，最小回数の試作にて最適成形条件を抽出するために，成形型内の樹脂の粘度分布シミュレーションを行った。この結果，試作2回のみでCFRP角柱パイプを良好に成形することに成功した。

1. はじめに

昨今 CFRP は航空機や自動車への大規模な適用が開始され，数量効果によって以前よりも価格は安価になっているものの，適用は限定的である。一方，等断面形状に限られるが，GFRP の引抜成形は最も安価な複合材料の成形方法の一つであり，波板の成形などに用いられている。この成形方法を適用して CFRP の梁材が成形できれば，従来の成形方法と比較して飛躍的に低コストの成形が可能となり，用途がさらに広がるものと予想できる。

しかし，一般的に繊維径が炭素繊維(CF)は 5～7μm，ガラス繊維(GF)は 10～24μm と CF の方が細く，かつ難燃性付与のために難燃剤を熱硬化性樹脂に添加すると樹脂粘度が上昇するため，CF を樹脂に十分に含侵させるのは一般に困難である。含侵を実現させ，気孔等の欠陥なく成形するためには，成形型内の樹脂の粘度特性を十分に制御する必要がある。GFRP では，これまでは様々な条件の成形試験を試行錯誤にて数多く繰り返し良否を調べることにより，条件の最適化を行ってきた。本報では，従来実施されていなかった樹脂の粘度分布シミュレーションを行うことにより，CFRP 引抜成形の最適条件を抽出したプロセスについて紹介する。

2. 粘度分布シミュレーション

2.1 熱硬化性樹脂を用いた引抜成形法

引抜成形法は，樹脂を含浸させた繊維を加熱した成形型内に導入し，長手方向に等断面な梁状の材料を連続的に成形する方法である。今回のシミュレーションでは，樹脂として安価な熱硬化性樹脂を使った。熱硬化性樹脂は硬化前，加熱すると粘度が低下し，その後に硬化進展によりゲル化と呼ばれる現象が生じ，粘度が急速に上昇するといった，複雑な粘度挙動を示す。図1に成形型内の硬化挙動の様子を模式的に示す。

*1 総合研究所製造研究部 主席研究員
*2 総合研究所製造研究部
*3 民間機セグメント民間機事業部部品工作部 主席チーム統括
*4 三菱重工コンプレッサ(株)技術統括センター 主席技師

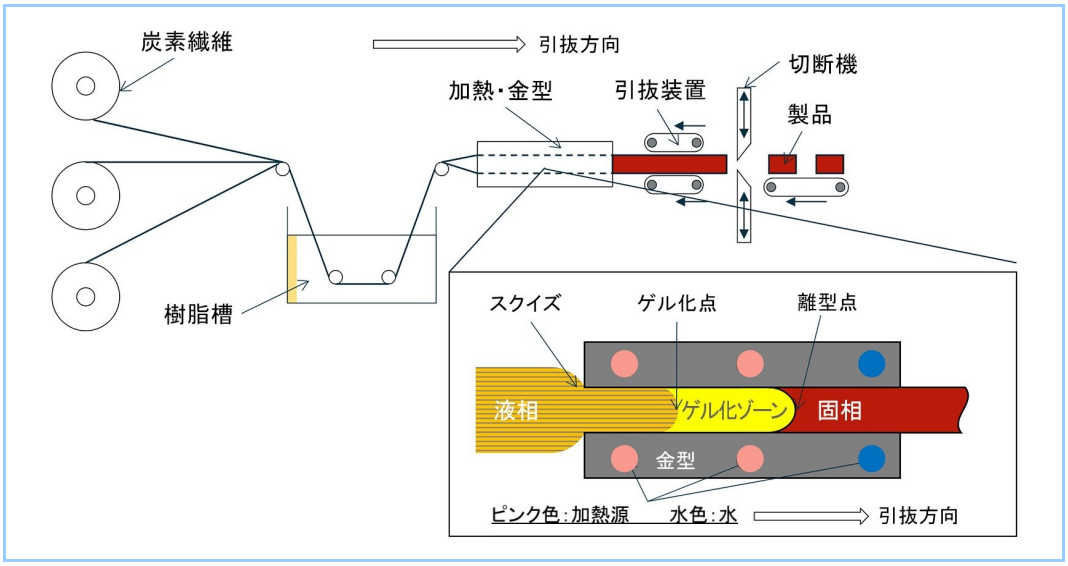


図1　成形型内の硬化挙動の様子

2.2　計算フロー

図2に本報で適用した計算フローチャートを示す。未硬化の熱硬化性樹脂に一定の温度を付与すると，化学反応により発熱現象を生じながら樹脂の粘度が変化する。これらの反応は連続的に生じるため，これらの一連の発熱現象を伴う温度変化とそれに準じた粘度変化について簡易解析法を適用した。

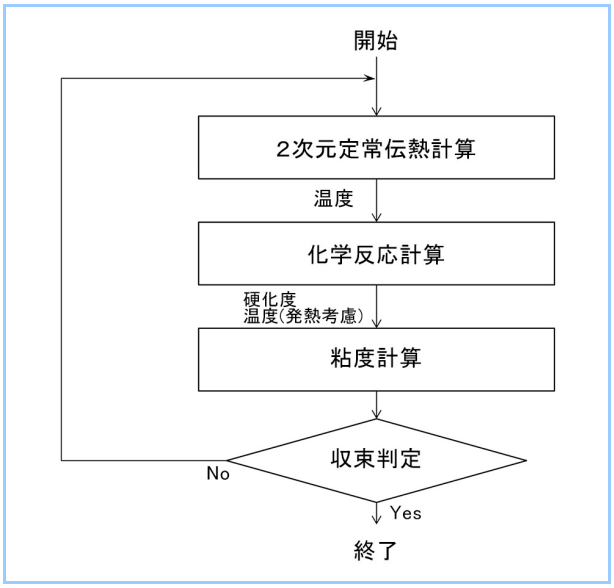


図2　計算フローチャート

はじめに，成形型内の樹脂と繊維の混合物，成形型及び外気を考慮した2次元の定常伝熱計算を実施し，次に，この結果を用いて化学反応計算を行った。

化学反応計算を行うにあたり，樹脂の硬化発熱量から硬化度予測を実施しており，反応式は一般的な Kamal の式[1]を適用した。また，硬化発熱量の測定は示差走査熱量計（DSC；Differential scanning calorimetry）によって計測した。図3に，使用した樹脂の温度と硬化度の関係について，計算と実験結果の比較を示す。

次に，樹脂のせん断速度及び温度に対する粘度の依存性については，動的粘弾性測定装置（DMA；Dynamic Mechanical Analysis）によって計測した。また，硬化反応式と組み合わせた粘度予測式は，Castro-Macosko の式[2]を適用した。図4に，使用した樹脂の温度と粘度の関係について，計算と実験結果の比較を示す。

これらの予測式を用いて粘度分布シミュレーションを実施した。

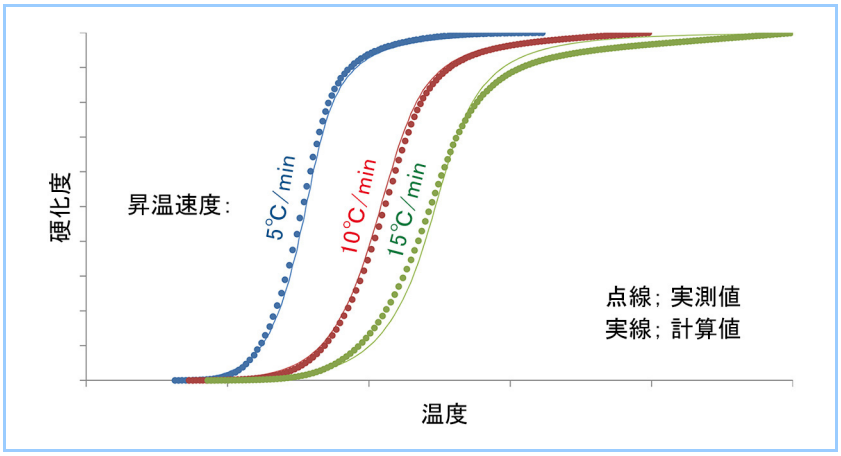


図3 使用した樹脂の温度と硬化度の関係

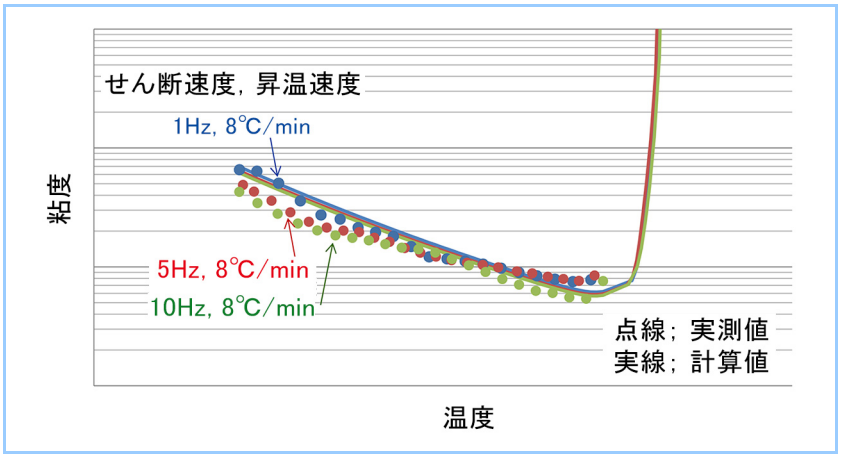


図4 使用した樹脂の温度と粘度の関係

3. 検証試験

外形 50mm 角, 厚さ 4mm のサイズの中空角柱状の引抜成形が可能な成形型を用いた成形試験により, 検証を行った。引抜成形では, ヒータで成形型を温度調整し, 樹脂を硬化させる。しかし, 中子にはそのヒータがない。従って, 成形品の厚み方向の温度の均一性を維持する条件設定が課題となる。図5に成形型の位置と温度, 硬化度, 及び粘度との関係について実測値と計算値の比較を示す。この図では, 上段で求めた成形型の位置と温度との関係に従い, その温度から硬化度と粘度を計算した結果を中段, 下段に示した。これより, 実測値と計算値は高い精度で整合することが分かった。この結果をもとに最適条件を求めた結果をコンター図として図6に示す。図6 (a)は温度分布, 図6(b)は硬化度分布を示す。図6(a)によると, 成形型入口側では紫色と青色の境目が斜めになり, 厚み方向の温度分布が不均一であることが分かる。一方, 硬化度に重要な影響を及ぼす成形型の出口側では赤色とオレンジ色の境目がより垂直に近くなり, 厚み方向の温度分布が均一になることが分かる。これを反映して図6(b)においても色の境目がほぼ垂直になるので, 硬化度も厚み方向の分布はほとんど認められないといった, 良好な条件を算出できていることが確認できた。

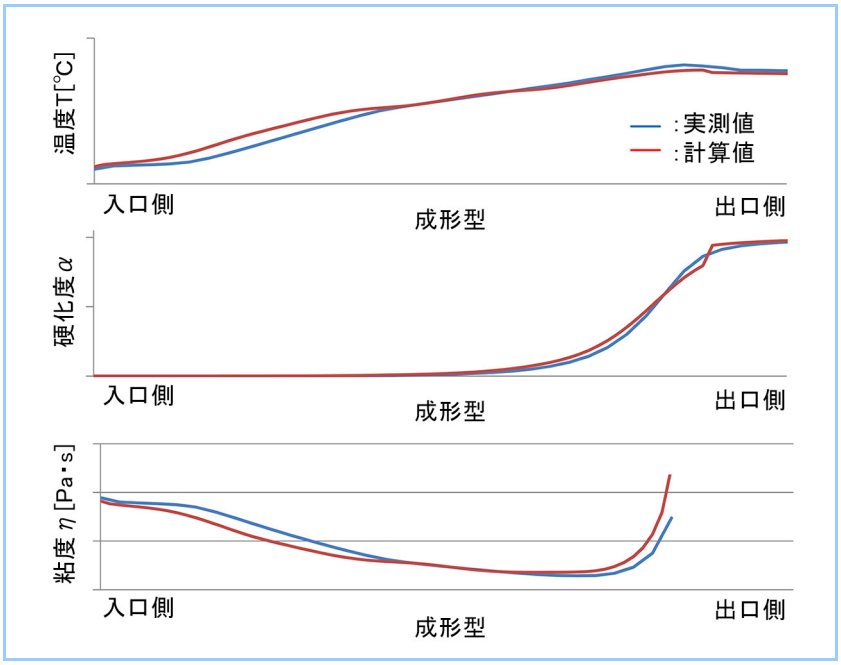


図5 成形型の位置と温度，硬化度，及び粘度との関係

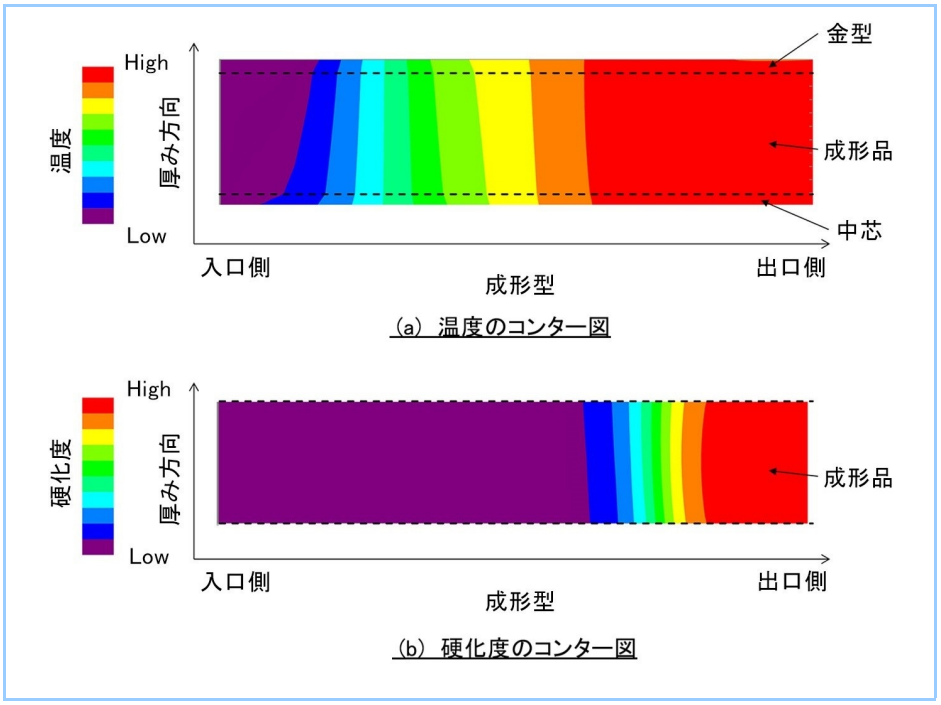


図6 最適条件の結果のコンター図

次に，最適条件で試作した中空角柱状成形品の任意の断面を切断，研磨し，内部の状態を確認した。図7にこの様子を示す。この図の中央部には全体の状態を示し，各部の拡大図を周囲に示している。また，中央図の黒い部分は研磨用の埋込樹脂であり，成形品は外周の白い部分である。この図の右側には代表的な繊維の体積分率(Vf;Volume of fiber)の値を2点示したが，この箇所を含めた全ての計測箇所のVfの平均値は61.0%となった。また，クラックや気孔等の大きな内部欠陥は見当たらず，品質は良好であることが確認できた。

最後に，本試作品から短冊状の試験片を切り出し，強度を確認するために引張試験を行った。図8に，代表的な試験片の荷重-ひずみ線図を示す。一般構造用圧延鋼材(SS400)程度の強度を保持することを確認した。また，荷重とひずみの直線性は高く，樹脂の破損の兆候等は認められなかった。

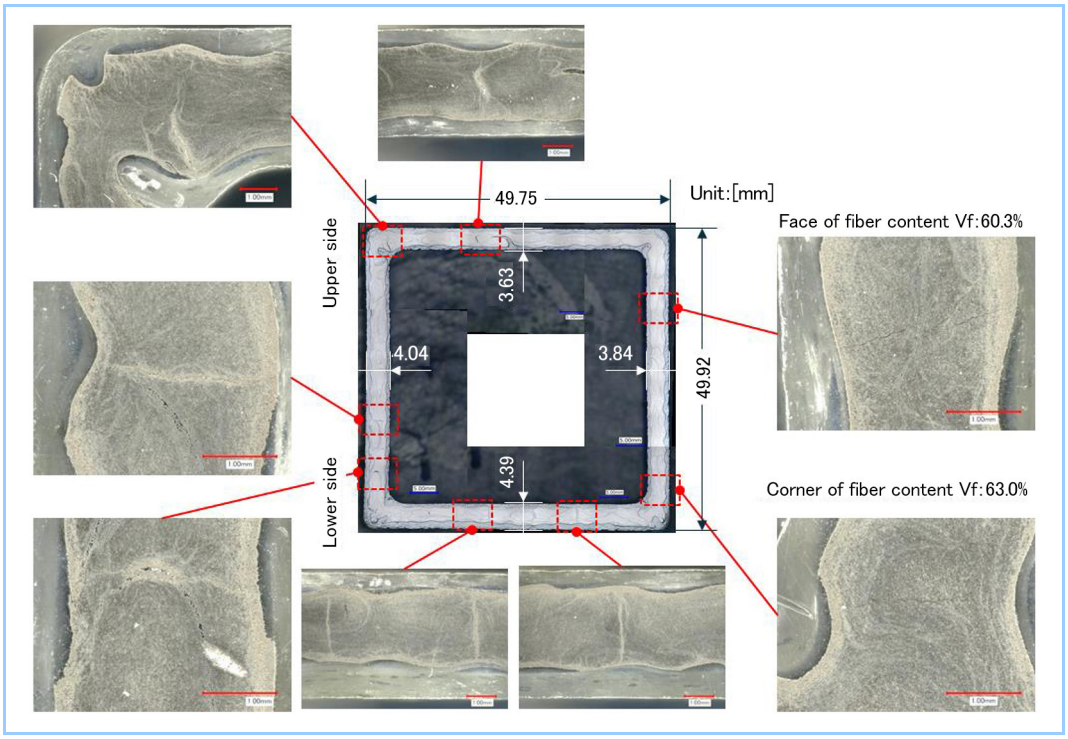


図7　中空角柱状試作成形品の断面観察結果

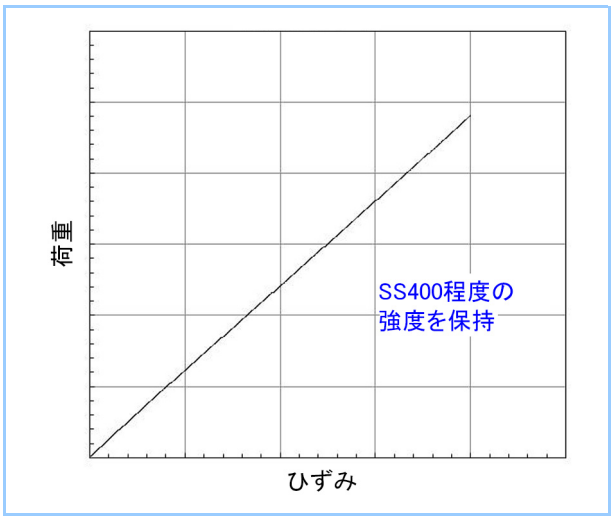


図8　切り出し試験片の荷重-ひずみ線図

4. まとめ

本報では，考案した粘度分布シミュレーションが実際の引抜成形に活用でき，その結果良好な試作品を成形できたことを紹介した。この粘度分布シミュレーション技術や引抜成形技術は，複合材料の部品製造を支える重要な技術である。軽量化が望まれる構造部材は多いので，今後は各種の製品への適用を展開するとともに，これらの技術をより高度化することで複合材製造の高速化，低コスト化に貢献していく所存である。

参考文献

(1)　M.R. Kamal et al., The behavior of thermosetting compounds in injection molding cavities, Polymer Engineering and Science, Vol. 20 (1980), p.859～867
(2)　Castro J. M. et al., SPE Tech. Papers, 26 (1980), p.434