

複合材構造のcompression RTM成形における樹脂含浸 時間予測

矢代, 茂樹
九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門 : 教授

伊藤, 晃
東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 : 修士課程

松宮, 飛翔
東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 : 修士課程

辻, 孝鴻
九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻 : 修士課程

他

<https://hdl.handle.net/2324/4794792>

出版情報 : Journal of the Japan Society for Composite Materials. 46 (3), pp.92-97, 2020-05-15.
Japan Society for Composite Materials
バージョン :
権利関係 : (C)2020 日本複合材料学会



研究論文

複合材構造の compression RTM 成形における樹脂含浸時間予測

矢代 茂樹^{*1}, 伊藤 晃^{*2}, 松宮 飛翔^{*2}, 辻 孝 鴻^{*3},
大矢 豊大^{*4}, 松崎 亮介^{*5}, 岡部 朋永^{*6}

(2019 年 5 月 27 日受付)

Prediction of Fill Time in Compression Resin Transfer Molding of Composite Structures

Shigeki YASHIRO,^{*1} Akira ITO,^{*2} Tsubasa MATSUMIYA,^{*2} Takahiro TSUJI,^{*3}
Yutaka OYA,^{*4} Ryosuke MATSUZAKI^{*5} and Tomonaga OKABE^{*6}

(Received May 27, 2019)

Abstract: During typical compression resin transfer molding (CRTM), resin is first injected into a gap between the mold and fiber preform, and the preform is then impregnated in the out-of-plane direction. CRTM thus has an advantage of reduced molding time because of the short impregnation distance. This study predicts resin flow during CRTM of composite structures by performing a resin impregnation simulation using the finite-element method. In the case of the CRTM of a thin curved plate, resin penetrated the preform beneath the gate by the resin pressure, when the injection of the resin into the gap was finished. Reduction of the molding time cannot be achieved in such a case, because impregnation proceeds over a long distance in the in-plane directions. Furthermore, in CRTM with multiple gates and multi-axial compression for an L-shaped component connecting two plates, impregnation was concentrated near the connecting part, and a non-impregnated area remained after finishing compression of the preform. The molding time by CRTM was always longer than that of vacuum-assisted resin transfer molding even at an increased compression speed. These results indicated that optimization of the molding conditions is necessary to achieve the benefits of CRTM.

Key words: Polymer-matrix composites (PMCs), Process simulation, Resin flow, Resin transfer molding (RTM)

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) をはじめとする複合材料は、高比強度、高比剛性、優れた疲労特性などの利点から、航空機への使用が増加している。CFRP の適用範囲のさらなる拡大には、部材の高機械的特性と高生

産性の両立が必要である。オートクレーブ成形では高品質の複合材を得られる一方で、大規模な設備や低い生産性などの問題点がある。脱オートクレーブ成形の一つとして resin transfer molding (RTM) 成形が注目されている。一般的に、繊維プリフォームの面内方向に樹脂を含浸させるため、含浸に長い時間を要する。RTM の更な

^{*1} 九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門 教授

Professor, Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University

^{*2,*4} 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

Department of Aerospace Engineering, Tohoku University

^{*2} 修士課程 Graduate Student, ^{*4} 助教 Assistant Professor

^{*3} 九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻 修士課程

Graduate Student, Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University

^{*5} 東京理科大学理工学部機械工学科 准教授

Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science

^{*6} 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 教授

Professor, Department of Aerospace Engineering, Tohoku University

ワシントン大学工学部材料工学科 連携教授

Affiliate Professor, Department of Materials Science and Engineering, University of Washington

る生産性の向上, 具体的には成形時間の短縮を目的として, 圧縮 RTM 成形 (compression resin transfer molding, CRTM)^{1,2)} が提案された。典型的な CRTM では, 金型と繊維材の間に設けるギャップに樹脂を注入して面内方向に樹脂を広げた後に, 板厚方向に金型キャビティを圧縮し, 樹脂を含浸させる。含浸が距離の短い板厚方向に進むことから, 成形時間の短縮を期待できる。また, 繊維材を圧縮することで繊維体積含有率を増加させることができ, 高品質部材の成形が可能となる。

CRTM の単純なケースに対して解析解が導出され, RTM に対する潜在的な利点が示されたが³⁾, 成形条件の最適化には樹脂の流動や含浸を予測する解析手法が必要である。これまで, control volume/finite-element method (CV/FEM)^{4~6)} による CRTM シミュレーション^{7~13)} が開発されてきた。CRTM では, 含浸した樹脂の圧力と繊維材の変形が型締力と密接に関係する。そこで, 繊維材圧縮時の型締力のモデル化とその検証がなされた^{14~17)}。また, いくつかの成形パラメータの影響が調査された^{18~20)}。Merotte ら^{21,22)} は, 繊維材変形時の樹脂含浸に関する解析を示した。

非平面状の構造に対する実験とシミュレーションも行われてきた^{10,14,23,24)}。これらの研究では, 金型が一方方向に動くことで繊維材を圧縮している。しかし, 例えば補強板におけるリップのような金型の移動方向に平行な部位では繊維材を圧縮できない。航空機のスキン-ストリング構造を CRTM で一体成形する場合, ストリングにも高い機械的特性が求められることから, 繊維材を多軸に圧縮することが求められる。また, 成形時間の短縮には, 複数の圧縮方向に対して複数のギャップを設けることが欠かせない。しかし, Baskaran ら²⁵⁾ は, 樹脂注入段階で繊維材に含浸する樹脂のフローフロント形状が成形パラメータに依存して変化することを指摘した。多軸圧縮では, 成形条件によって時間を要する面内含浸領域が生じる可能性がある。

そこで本研究では, CV/FEM による CRTM の樹脂含浸シミュレーションを構築し, 実際の構造要素を単純化したモデルにおける成形時間の予測を行った。第 2 節では, CRTM のプロセスと CV/FEM の概要を述べる。第 3 節において, 曲面板に対する単軸 CRTM と, L 字型部材に対する多軸 CRTM の解析を実施し, 樹脂の含浸プロセスと成形時間を考察する。

2. 解析方法

2.1 CRTM 成形のプロセス

Fig. 1 に示すように, 典型的な CRTM には大きく 3

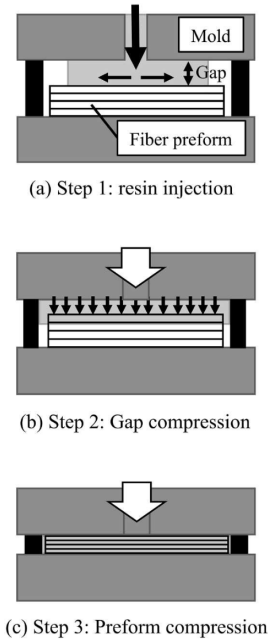


Fig. 1 Schematic diagram of the CRTM process.

つの過程が存在する。Step 1 では, 金型上部と繊維材の間にあらかじめ設けられたギャップに樹脂を注入し, 必要量の樹脂を注入完了後に樹脂注入口 (ゲート) を閉じる。このとき, 樹脂は繊維のない空間に流動するため, 繊維材の面内方向に短時間で広がる。Step 2 では, 金型を厚さ方向に移動させることによって, ギャップの圧縮が行われる。この際, 樹脂は繊維材内を厚さ方向に含浸する。この過程は, ギャップが完全に圧縮されるまで継続する。Step 3 では繊維材の圧縮が行われ, 繊維材が目標厚さとなるまで板厚方向への圧縮が行われる。このとき, 成形品の繊維体積含有率が時々刻々と変化する。

2.2 樹脂含浸解析の概要

CRTM における繊維材内での樹脂の流動は, 次の 2 式で表すことができる。

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla P \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (h\mathbf{v}) = -\dot{h} \quad (2)$$

式(1)は多孔質体中の浸透に関する Darcy 則で, $\mathbf{v}$ は樹脂流速ベクトル, $\mathbf{K}$ は浸透率テンソル, P は圧力, μ は樹脂粘度である。式(2)は連続の式で, 金型の移動による繊維材の圧縮の影響が考慮されている¹¹⁾。 h は金型キャビティの高さ, $\dot{h}$ は圧縮速度である。式(1)と式(2)を組み合わせることで, 次のポアソン方程式を得る。

$$\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla P \right) = \frac{\dot{h}}{h} \quad (3)$$

式(3)を重み付き残差法で離散化し、解析領域を有限要素分割して圧力分布を得る。境界条件は、ゲートが開いているとき (Step 1), 樹脂注入口において圧力一定または流速(流量)一定である。また、フローフロントで $P=0$ 、型壁面において $(\partial P / \partial n)=0$ である。

求めた圧力分布に基づき、CV/FEM および flow analysis network 法⁵⁾を用いて節点間の樹脂流量と樹脂の進展プロセスを解析する。CV/FEM では着目する節点を取り囲む要素の重心と各辺の中点を結んだコントロールボリューム (CV) を考える。周辺の節点と CV 内節点の含浸度 f および着目する CV への樹脂流量から、CV における含浸の進行を予測する。

$$f_i^{t+1} V_i^{t+1} = f_i^t V_i^t + Q_i \Delta t \quad (4)$$

ここで、 V_i^t は時間 t における節点 i の CV 体積、 Q_i は節点 i に関する CV への樹脂流量である。含浸度 f は 0 (未含浸) から 1 (含浸済) までの値をとる。着目する CV の周囲の節点で $f=1$ かつ CV 内の節点で $f<1$ ならば CV 内に樹脂が流入し、節点 i の含浸度を更新する。式(4)には 2 つの未知数 f_i^{t+1} および V_i^{t+1} が存在するため、繰り返し計算で解く必要がある。

2.3 浸透率テンソル

CRTM では、必要量の樹脂を注入した後、繊維材を圧縮する。繊維体積含有率 V_f が変化するため、成形プロセスの進行とともに繊維材の浸透率は変化する。そこで、Gebart のモデル²⁶⁾を適用し、繊維材の浸透率を V_f の関数として次式で表す。

$$K_{\parallel} = \frac{8R^2}{c} \frac{(1-V_f)^3}{V_f^2} \quad (5)$$

$$K_{\perp} = c_1 \left(\sqrt{\frac{V_{f,\max}}{V_f}} - 1 \right)^{\frac{5}{2}} R^2 \quad (6)$$

$K_{\parallel}$ および $K_{\perp}$ は、繊維に平行方向および垂直方向の浸透率である。また、 c および c_1 は繊維配列に関する定数(六方配置の場合 $c=53$, $c_1=16/9\pi\sqrt{6}$)、 R は繊維半径である。 $V_{f,\max}=\pi/2\sqrt{3}$ は六方配列における繊維体積含有率の最大値である。

CRTM の最初のステップはギャップに樹脂が流入する過程である。解析の簡単のため、ギャップ領域に等価浸透率を仮定し、浸透の式(1)–(3)によってギャップ内の樹脂の流動を求める^{11,23,27)}。

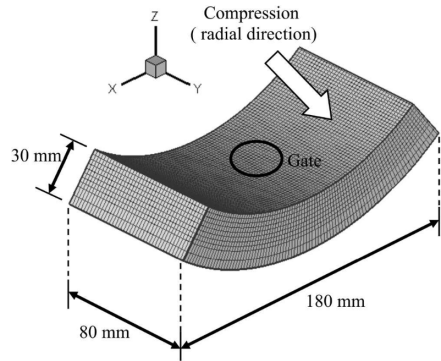


Fig. 2 Analytical model of a curved plate.

$$K_{\text{gap}} = \frac{H^2}{12} \quad (7)$$

ここで H はギャップの高さである。

3. 解析結果および考察

3.1 曲面板のCRTM (単軸圧縮)

Fig. 2 に曲面板の解析モデルを示す。モデルの X および Y 方向長さ、厚さ(半径方向)は 180 mm, 80 mm, 30 mm である。曲面の曲率は 6.67 m^{-1} であり、中心角は約 73° である。半径方向の厚さ 30 mm のうちギャップ厚さが 10 mm、繊維材厚さが 20 mm である。8 節点要素でメッシュ分割し、要素の半径方向上面と下面の重心を結んだ長さを要素の高さと定義した。モデル中央位置の上面に樹脂注入口 (X 方向 15 mm, Y 方向 8 mm) を設けた。解析に使用した定数を Table 1 に示す。Step 1 として一定流量 (流入速度 240 mm/s) で繊維材全体が完全に含浸する必要最小量の樹脂を注入し、その後は一定の速度 0.1 mm/s で半径方向に圧縮する解析を行った。圧縮により V_f は 30% から 46% に上昇する。樹脂の密度と粘度は $1,100 \text{ kg/m}^3$ および $0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ である。なお、実際の成形では半径方向でなく Z 方向に圧縮が行われる。これを厳密に評価するには、節点ごとにキャビティ高さと CV 体積の時間変化率 (式(3)右辺) を求める必要がある。本研究の評価指標である成形時間はグローバルな指標であり、圧縮方向の局所的な違いの影響は小さいと仮定した。

本解析で想定する繊維材は、炭素繊維で一方強化したドライファイバーシートを積層したものである。式(5), (6)による浸透率は、想定する繊維材に近い non-crimp fabric の浸透率の実測値²⁸⁾ より 2 桁程度小さい。そこで、繊維材の面内には等方的な浸透率であると仮定して $K_{\parallel}$ を、板厚方向には $K_{\perp}$ を用いた。また、 V_f に対す

Table 1 Analytical constants used in the CRTM of a curved plate.

Resin injection speed (mm/s)	240
Compression speed (mm/s)	0.1
Initial fiber volume fraction	0.3
Final fiber volume fraction	0.46
Resin density (kg/m ³)	1100
Resin viscosity (Pa·s)	0.2

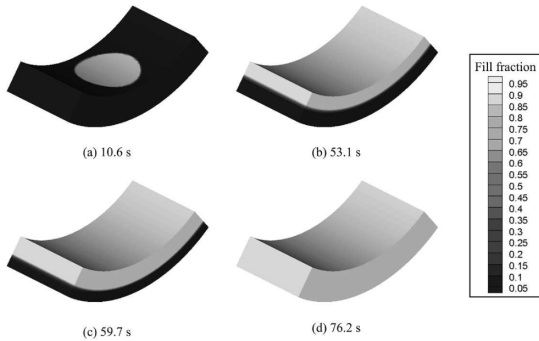


Fig. 3 Resin impregnation process of the curved plate.

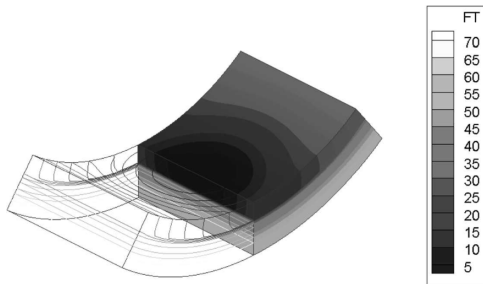
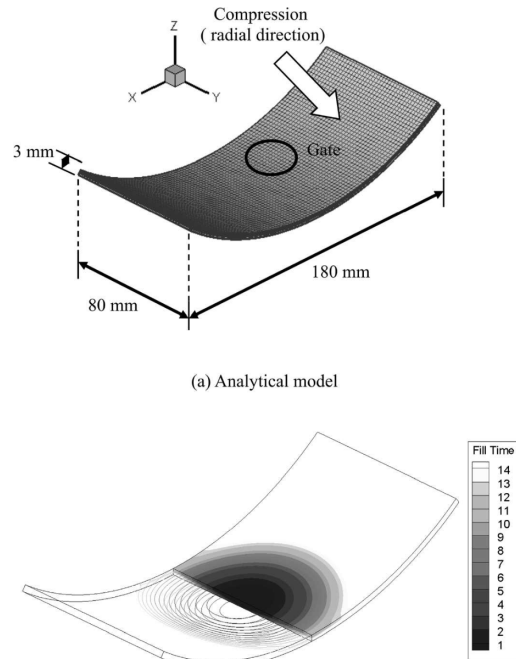


Fig. 4 Fill time distribution for the curved plate.

る浸透率の変化は式(5)および(6)に従うものと仮定し、これらに比例係数をかけ、実験結果²⁸⁾と一致するよう係数を調整した。比例係数は $K_{\parallel}$ に対して 90, $K_{\perp}$ に対して 100 である。また、曲面板では材料主軸と全体座標系が一致しない。そこで、 $K_{\parallel}$ を適用する面の方向余弦を求めて浸透率テンソル $\mathbf{K}$ を座標変換するとともに、全体座標系に換算した浸透率の位置に対する変化率は小さいと仮定した。

樹脂含浸挙動を Fig. 3 に、要素ごとの樹脂含浸が完了した時間の分布を Fig. 4 に示す。モデル中央部に設けた注入口から樹脂が注入され、ギャップへの樹脂注入過程は 10.6 s で完了した。この段階で、繊維材への含浸はほぼなかった。これは必要樹脂量がギャップ体積より小さか



(b) Fill-time distribution after finishing resin injection

Fig. 5 Analysis of a thin curved plate.

ったからである。樹脂の注入完了後、圧縮過程が始まり、53.1 s でギャップの圧縮が、76.2 s で繊維材の圧縮が完了し、成形が完了した。圧縮過程において、厚さ方向に樹脂は含浸し、理想的な CRTM の状況となっていることがわかる。

次に、薄い曲面板の CRTM プロセスを解析した。Fig. 5(a) に解析モデルを示す。このモデルは Fig. 3 に示した曲面板の厚さを 3 mm に変更したものであり、ギャップ高さが 1 mm、繊維材厚さが 2 mm である。中心部に樹脂注入口を設け、必要量の樹脂を注入した。樹脂注入過程が終了した段階での樹脂含浸時間の分布を Fig. 5(b) に示す。必要量の樹脂が注入されたとき、ギャップの端部に樹脂は到達せず、樹脂注入口直下の繊維材に樹脂が含浸した。ギャップ高さが小さいため、ギャップに樹脂は流動しづらい。ギャップの等価浸透率は繊維材の浸透率よりも大きい、その差は小さいため、ギャップの端部に樹脂が到達するよりも前に厚さ方向への樹脂含浸が起こった。これは、ギャップが小さいときに注入口における高い樹脂圧力が繊維材への含浸を引き起こしたと考えることができる。必要最小量の樹脂を注入する場合、樹脂の含浸は面内方向の長距離にわたって進行するため、

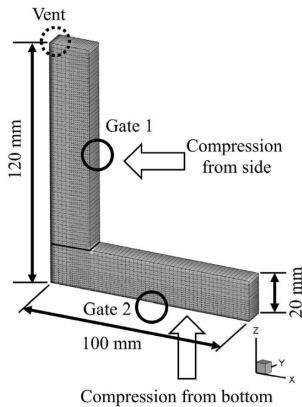


Fig. 6 Analytical model of an L-shaped component. Biaxial compression is applied.

理想的なCRTMの状況にはならず、成形時間の短縮にならないと考えられる。以上の結果から、CRTMの優位性が生じる条件は、ギャップ圧縮前に繊維材への含浸が生じないよう(1)十分なギャップ高さを設け、(2)ある程度の繊維材厚さを有するとともに、(3)広い表面積を有する場合であると言える。

3.2 L字型部材のCRTM (多軸圧縮)

多軸圧縮が必要な例として、Fig. 6に示すL字型部材のCRTM解析を実施した。初期厚さは20 mmであり、5 mmのギャップと15 mmの繊維材で構成されている。樹脂注入後に2軸に圧縮することで繊維材の最終厚さを10 mmとした。また、この圧縮によって V_f が30%から45%に増加することを想定した。ギャップが不連続な複数の場所にある場合の例として、モデルの右横側からと下側から一定圧力100 Paにて樹脂を注入し、それぞれの面に垂直な方向に圧縮を行った。右横側のゲート1はZ方向に立つリブのYZ面の中心に位置し、Y方向に全幅(2 mm)、Z方向に2.5 mmである。下側のゲート2はフランジのXY面の中心に位置し、Y方向に全幅、X方向に2.5 mmである。また、Y方向全幅、Z方向に2.5 mmのペントを最終含浸位置であるリブ最上部に設けた。ペントでは圧力をゼロとした。なお、本解析ではTrevinoら²⁹⁾の結果に基づいて浸透率を設定した。面内方向と板厚方向の浸透率に第3.1節より大きな差があるケースを想定し、含浸プロセスの傾向を際立たせた。樹脂の密度と粘度は $1,100 \text{ kg/m}^3$ および $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ である。解析に使用した定数をTable 2にまとめる。

圧縮速度 0.1 mm/s における樹脂含浸挙動をFig. 7に示す。樹脂注入は29.7 s、ギャップ圧縮は113.0 s、繊維材

Table 2 Analytical constants used in the CRTM of an L-shaped component.

Resin injection pressure (Pa)	100
Initial fiber volume fraction	0.3
Final fiber volume fraction	0.45
Resin density (kg/m^3)	1100
Resin viscosity ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	0.1

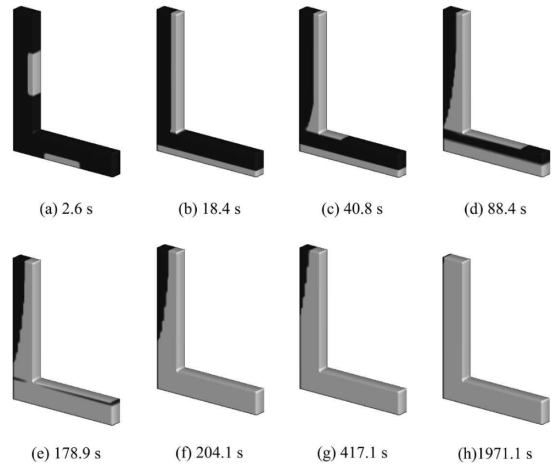


Fig. 7 Resin impregnation process of the L-shaped component under the compression speed of 0.1 mm/s .

の圧縮は196.3 sで終了した。樹脂注入段階(a)において樹脂はギャップに流入し、ギャップ圧縮過程(b)-(d)ではゲート1から流れた樹脂の一部が下側繊維材に含浸した。これは、繊維材の平面内浸透率が厚さ方向よりも高いためである。この樹脂は繊維材圧縮段階(e)において下側から含浸する樹脂と合流するため、下板の含浸がリブより早く終了した。繊維材の圧縮が終了した後も上側に未含浸領域が存在し、(f)-(h)に示すように樹脂含浸が継続された。結果として、圧縮に要する時間よりも樹脂の含浸に要する時間の方が数十倍程度長くなった。圧縮速度を変化させた際の全体の含浸が完了する時間の変化をFig. 8に示す。成形時間は圧縮速度に依存し、特に圧縮速度が小さいと含浸に要する時間が長い。圧縮速度を大きくすると成形時間は単調に短くなるが、圧縮過程のないVaRTMの成形時間より短くはならなかった。なお、VaRTMの結果は、CRTM解析においてギャップ高さがゼロで解析開始から最終板厚とすることで得た。このように、繊維材圧縮が完了した時点で未含浸領域が残る限り追加の樹脂含浸の時間が発生するため、成形時間の点ではVaRTMの方が優位であることがわかる。なお、

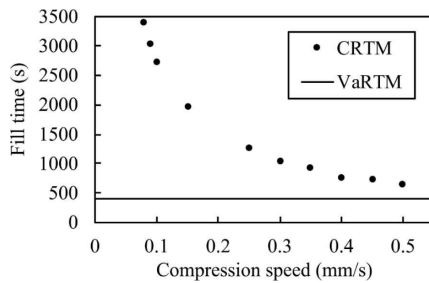


Fig. 8 Relationship between the fill time and compression speed.

CRTM は V_f を高めることができるので、成形部材の強度を向上させたい場合に、VaRTM に対する CRTM の優位性があるだろう。

4. 結 言

本研究では、有限要素法を用いた CRTM 法の樹脂含浸シミュレーションを構築し、単純化した構造として曲面板ならびに L 字型部材の CRTM プロセスを解析した。薄板では、ギャップへの樹脂の注入が完了した段階で注入口直下の繊維材に樹脂が含浸するケースを示した。したがって、CRTM の優位性が生じる条件として、十分なギャップ高さとなる程度の繊維材厚さ、広い表面積を有することが示唆された。複数ゲートを設けて 2 軸圧縮を行う L 字型部材の CRTM では、樹脂注入およびギャップ圧縮の完了時点で繊維材への樹脂含浸が生じたため、繊維材の圧縮完了時点で未含浸領域が発生した。最終的に面内含浸の時間を要し、成形時間は VaRTM より長くなる結果が得られた。以上より、CRTM として理想的な板厚方向含浸を実現するため、ゲート設置位置やギャップ高さなど成形条件の最適化が必要であることを示した。

本研究は、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的構造材料」によって実施された。

参 考 文 献

- 1) S. Wirth & R. Gauvin : *J. Reinf. Plast. Compos.*, **17** (1998), 1414-1430.
- 2) C.-Y. Chang : *J. Reinf. Plast. Compos.*, **31** (2012), 1630-1637.
- 3) S. Bickerton & M.Z. Abdullah : *Compos. Sci. Technol.*, **63** (2003), 1359-1375.
- 4) M.V. Bruschke & S.G. Advani : *Polym. Compos.*, **11** (1990), 398-405.
- 5) F.R. Phelan Jr. : *Polym. Compos.*, **18** (1997), 460-476.
- 6) V.R. Voller : *Basic Control Volume Finite Element Methods for Fluids and Solids*, World Scientific Publishing, Singapore (2009).
- 7) K. Han, J. Ni, J. Toth & L.J. Lee : *Polym. Compos.*, **19** (1998), 487-496.
- 8) X.-T. Pham, F. Trochu & R. Gauvin : *J. Reinf. Plast. Compos.*, **17** (1998), 1525-1556.
- 9) X.-T. Pham & F. Trochu : *Polym. Compos.*, **20** (1999), 436-459.
- 10) M.K. Kang & W.I. Lee : *Polym. Compos.*, **20** (1999), 293-304.
- 11) A. Shojaei : *Composites Part A*, **37** (2006), 1434-1450.
- 12) B. Yang, T. Jin, J. Li & F. Bi : *J. Reinf. Plast. Compos.*, **33** (2014), 1316-1331.
- 13) B. Yang, T. Jin, J. Li & F. Bi : *Appl. Compos. Mater.*, **22** (2015), 209-230.
- 14) K.M. Pillai, C.L. Tucker & F.R. Phelan : *Composites Part A*, **32** (2001), 207-220.
- 15) M.J. Buntain & S. Bickerton : *Composites Part A*, **38** (2007), 1729-1741.
- 16) S. Bickerton & M.J. Buntain : *Composites Part A*, **38** (2007), 1742-1754.
- 17) W.A. Walbran, S. Bickerton & P.A. Kelly : *Composites Part A*, **40** (2009), 1119-1133.
- 18) C.-Y. Chang, L.-W. Hourng & T.-Y. Chou : *J. Reinf. Plast. Compos.*, **25** (2006), 1027-1037.
- 19) P. Bhat, J. Merotte, P. Simacek & S.G. Advani : *Composites Part A*, **40** (2009), 431-441.
- 20) A. Mamoune, A. Saouab, T. Ouahbi & C.H. Park : *J. Reinf. Plast. Compos.*, **30** (2011), 1629-1648.
- 21) J. Merotte, P. Simacek & S.G. Advani : *Composites Part A*, **41** (2010), 881-887.
- 22) J. Merotte, P. Simacek & S.G. Advani : *Compos. Sci. Technol.*, **70** (2010), 725-733.
- 23) P. Simacek, S.G. Advani & S.A. Iobst : *J. Compos. Mater.*, **42** (2008), 2523-2545.
- 24) W.A. Walbran, S. Bickerton & P.A. Kelly : *Polym. Compos.*, **36** (2015), 591-603.
- 25) M. Baskaran, L. Aretxabaleta, M. Mateos & J. Aurrekoetxea : *Polym. Compos.*, **39** (2018), 4333-4340.
- 26) B.R. Gebart : *J. Compos. Mater.*, **26** (1992), 1100-1133.
- 27) S.G. Advani & E.M. Sozer : *Process Modeling in Composites Manufacturing* (2nd Ed.), CRC Press, Boca Raton (2010).
- 28) T.S. Lundström : *Composites Part A*, **31** (2000), 1345-1353.
- 29) L. Trevino, K. Rupel, W.B. Young, M.J. Liou & L. J. Lee : *Polym. Compos.*, **12** (1991), 20-29.