研究論文

RTM 成形における成形欠陥形成シミュレーション

島田 康弘^{*1}, 松崎 亮介^{*2}, 高橋 昭如^{*3}

(2015 年 6 月 23 日受付)

Numerical Simulation of Molding-Defect Formation during Resin Transfer Molding

Yasuhiro SHIMADA,^{*1} Ryosuke MATSUZAKI^{*2} and Akiyuki TAKAHASHI^{*3}

(Received June 23, 2015)

Abstract: The present study investigated a numerical simulation of molding-defect formation during resin transfer molding using boundary element method and line dynamics. The proposed method enables to simulate small molding defects by increasing the node for required position during time evolution; thereby, the method computes high-resolution flow front without being affected by the initial mesh geometry. The method was applied to the radial injection RTM with single inlet, and it was confirmed by comparison with theoretical value based on Darcy's law that the flow advancement was computed with high accuracy. In addition, the method was also applied to the flow advancement for inclusion problem with cylinder, and four-point injection problem. The simulated void formation and shrinkage, and weld line agreed with the results in references. Finally, the method was compared with experiments by using two-point injection problem. The computed configuration of the flow front and weld line agreed well with the experimental results.

Key words: Resin transfer molding, Numerical simulation, Boundary element method, Resin flow, Darcy's law

1. 緒 言

Resin transfer molding (RTM) 成形は低コストかつ高い生産性を有するため、航空宇宙や自動車産業を中心に適用が拡大している。しかし、RTM 成形は成形中に空気がトラップされボイドとして残留することで、成形品の力学特性が著しく低下する問題があり、ボイド発生原因の解明が必要となっている^{1,2)}。ボイドは、繊維材織り構造によって微視的樹脂流速に差異が生じることで発生することが知られており、巨視的含浸速度によってスケールや残留形態の異なるボイドが形成される^{3~9)}。

近年では、さらなる自動車産業への適用のため、構造物の複雑化や短時間成形に対応した RTM 成形が求められており、複数注入点による多点注入 RTM 成形に関

する研究が行われている^{10,11)}。構造物の複雑化や多点注入 RTM 成形によって成形中に含浸樹脂先端の結合が発生する場合、結合部であるウェルドライン付近ではフローフロント形状が顕著に変化し、結合形状によってボイドが発生しやすくなる場合がある^{12~14)}。このようなボイドの発生予測には RTM 成形シミュレーションが有効な手法であり、シミュレーションによって最適な成形条件を選定することが重要である。

従来、RTM 成形シミュレーションには control volume/finite element method (CV/FEM) が主に用いられており、成形時の圧力支配方程式を解き含浸度を計算することで、樹脂含浸を高精度に予測している^{15~18)}。また、樹脂流速とボイド発生に関係に基づいたボイド含有率予測も行われている^{19~21)}。しかし、CV/FEM では要素分割したモデルを用意し数値解析を行うため、分解能が予め用意した要素の大きさに制限される問題がある。Béchet ら^{22,23)} や Soukane ら²⁴⁾ はシミュレーション中にフローフロント近傍の要素を細分化する手法を提案しているが、要素形状最適化には計算コストの増加が懸念され

^{*1~*3} 東京理科大学理工学部機械工学科 (278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science

^{*1} 大学院生 Graduate Student, ^{*2} 講師 Junior Associate Professor, ^{*3} 准教授 Associate Professor

Fig. 1 Schematic of comparison between BEM/LD and CV/FEM for RTM flow simulation.

る。また、ウェルドラインは注入圧力の条件によって移動や変形する可能性があるため、含浸度を計算する CV/FEM では正確な位置の予測が困難である。そのため、内部の要素分割をしない手法として boundary element method (BEM) による圧力場の計算が行われ、Umら Schmidt らはさらに marker particle 法を用いて、一点注入 RTM 成形における樹脂含浸数値解析手法を提案している²⁵⁻²⁷⁾。Soukane ら Gantois らは level set 法を用いて、複雑形状の構造物に対して多点注入 RTM 成形数値解析を行い、実験との良好な一致を示している^{28,29)}。また、Venegas らは不均質領域に対して BEM を適用するために dual reciprocity 法³⁰⁾を用いた手法を提案し実験と比較し定量的評価を行っている³¹⁾。BEM を用いた成形欠陥形成シミュレーションとしては、Soukane らが壁面付近でのボイドの形成数値解析を実施しているが、樹脂の結合によるボイド形成シミュレーションはされておらず、ボイドが発生しやすい領域であるウェルドラインに着目した数値解析手法は提案されていない。以上より初期要素形状に依存せずに高分解能に成形欠陥形成をシミュレーションする手法が求められている。

本研究では、フローフロントでの成形欠陥を高分解能でシミュレーションすることを目的として BEM と line dynamics (LD) を応用した成形欠陥形成シミュレーション手法を提案する。まず、一点注入 RTM において樹脂含浸速度の理論解と比較を行い、樹脂含浸速度計算の妥当性を検証する。さらに、介在物周りの流れによるウェ

ルドラインの形成と、複数点注入によるボイド発生・収縮やウェルドラインの形成をシミュレーションし、VaRTM 実験や文献と比較することで成形欠陥シミュレーションの妥当性を検証する。

2. BEM/LD 樹脂流動数値解析手法

2.1 概要

Fig. 1 に BEM/LD 樹脂流動数値解析手法の概念図を従来の CV/FEM と比較して示す。CV/FEM ではコントロールボリュームの含浸度によってフローフロント形状を表現するため、初期要素分割形状の影響を受け、スムーズなフローフロントを表現できない。内挿近似によってスムーズなフローフロントを表現することはできるが、正確な位置を定められない問題がある。一方で、BEM/LD では樹脂境界に節点を配置し、節点を直接進展させることで樹脂含浸シミュレーションを行う。CV/FEM のように初期メッシュ形状の影響が無く、節点の増減操作がシミュレーション中であっても容易であるため、2 節点間の距離や 3 節点間のなす角に応じて節点数を増減させることで、巨視的な含浸形状に対して微細な成形欠陥のみを高分解能でシミュレーションできる。これにより、計算コストの増加を抑制し、大型構造物への適用も期待できる。節点操作は離散転位動力学³²⁾を参考にした LD を用いる。LD は高分解化や樹脂結合を節点間距離の条件で行い、樹脂結合の有無によって、一つ一つの節点をボイドやウェルドラインと判定する。また、

判定された節点はそれぞれの境界条件に変更して支配方程式を解くことで、成形欠陥の形成時から最終的な位置と形状に至るまで予測が可能となる。

2.2 BEMによる樹脂流速計算

RTM成形において、繊維材への樹脂含浸は式(1)に示す多孔質媒体への流れの式である Darcy 則に従うことが知られている¹⁶⁾。また、樹脂を非圧縮性流体とみなすと式(2)に示す連続の式を得る。

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

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ は流速ベクトル、 $\mathbf{K}$ は浸透係数テンソル、 μ は樹脂粘度、 ϕ は空孔率、 P は圧力である。2次元直交座標系(x - y)において、材料主軸が座標系と一致し、 $\mathbf{K}$ は x 、 y の位置によらず一定であるとき、樹脂の直交異方性流れ場の圧力支配方程式は式(1)、(2)から式(3)となる。

$$K_1 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + K_2 \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

ここで、 K_1 、 K_2 は主軸方向の浸透係数である。

式(3)に示す異方性 Laplace 方程式は擬似等方化することによって BEM により解くことができる。擬似等方化によって x 、 y は式(4)、(5)に変換され、式(3)は式(6)となる。

$$\bar{x} = \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{1/4} x \quad (4)$$

$$\bar{y} = \left(\frac{K_1}{K_2}\right)^{1/4} y \quad (5)$$

$$\sqrt{K_1 K_2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial \bar{y}^2} \right) = \nabla^2 P = 0 \quad (6)$$

式(6)の圧力支配方程式を解くには、2階の導関数まで連続な重み関数 p^* (Green関数)を掛け、体積積分を行う。

$$\int_{\Omega} \nabla^2 P p^* d\Omega = 0 \quad (7)$$

ここで、 Ω は樹脂内部領域である。式(7)に対し Green の定理、Gauss の発散定理を用いて式変換を行うと、式(8)に示す境界積分方程式を得る。

$$P(\xi) \int_{\Gamma} q^* d\Gamma = \int_{\Gamma} p^* Q d\Gamma - \int_{\Gamma} P q^* d\Gamma \quad (8)$$

ここで、 $P(\xi)$ は特異点における圧力、 Q は圧力勾配、 q^* は重み関数 p^* の勾配、 Γ は樹脂境界である。また、重み関数 p^* は式(9)の基本解を満足する。

$$\nabla^2 p^* + \delta(\xi) = 0 \quad (9)$$

ここで、 δ は Dirac デルタ関数である。これによって p^*

は式(10)となる。

$$p^* = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{r_s} \right) \quad (10)$$

ここで、 r_s は特異点から樹脂境界までの距離である。この r_s について擬似等方化の逆変換をすることで直交異方性場における圧力・圧力勾配が求まる。樹脂境界を N 個の節点に離散化すると、各節点において式(8)の積分計算は式(11)に変換できる。

$$P^j c^j = \sum_{i=1}^N [g_{ij}^1 g_{ij}^2] \begin{Bmatrix} Q_i^1 \\ Q_i^2 \end{Bmatrix} - \sum_{i=1}^N [h_{ij}^1 h_{ij}^2] \begin{Bmatrix} P_i^1 \\ P_i^2 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 c^j は各節点で計算される h の総和、 N は要素の数、 j は特異点の節点、 i は樹脂境界節点である。また、 g 、 h はそれぞれ式(12)～(15)から得られる。

$$g_{ij}^k = \int_{\Delta s} \varphi_k(u) p^* ds \quad (12)$$

$$h_{ij}^k = \int_{\Delta s} \varphi_k(u) q^* ds \quad (13)$$

$$\varphi_1(u) = \frac{1}{2} (1-u) \quad (14)$$

$$\varphi_2(u) = \frac{1}{2} (1+u) \quad (15)$$

ここで、 u は $[1:-1]$ の無次元数、 Δs は節点間線分、 φ_i は節点間を補間する関数である。式(11)を N 個の節点数分行い、マトリックス形式にまとめると式(16)となる。

$$[\mathbf{c}][\mathbf{P}] = [\mathbf{G}][\mathbf{Q}] - [\mathbf{H}][\mathbf{P}] \quad (16)$$

ここで、 $[\mathbf{c}]$ 、 $[\mathbf{G}]$ 、 $[\mathbf{H}]$ は g 、 h によって求められる行列、 $\{\mathbf{P}\}$ と $\{\mathbf{Q}\}$ はそれぞれ圧力と圧力勾配ベクトル行列である。注入圧力を P_{in} 、吸引圧力を P_{out} とすると境界条件は、注入点では $P = P_{in}$ 、樹脂境界で $P = P_{out}$ となり、この境界条件を式(16)に考慮すると式(17)となる。

$$[\mathbf{A}][\mathbf{X}] = \{\mathbf{B}\} \quad (17)$$

ここで、 $\{\mathbf{X}\}$ は未知の圧力・圧力勾配ベクトル、 $\{\mathbf{B}\}$ は既知の圧力・圧力勾配ベクトル、 $[\mathbf{A}]$ は変換行列である。式(17)の行列計算を解くことによって各節点の圧力 P 、含浸方向の圧力勾配ノルム Q が求まる。

計算された圧力勾配から樹脂含浸速度を求める。Darcy 則に基づき、含浸速度は式(18)となる。

$$\mathbf{u} = -\frac{\mathbf{K}}{\phi\mu} Q \mathbf{n} \quad (18)$$

ここで、 $\mathbf{n}$ は含浸方向単位ベクトルである。

2.3 Line dynamics による節点操作

2.3.1 節点更新

成形欠陥のスケールに対応して節点更新が可能となるように、進展距離を任意に設定し数値解析を行う。得られた樹脂流速から時間ステップを式(19)によって計算し、節点位置を式(20)によって更新することで樹脂含浸のシミュレーションを行う。

$$dt^n = \min_i \left(\frac{l}{u_i} \right) \quad (19)$$

$$\mathbf{X}^{n+1} = \mathbf{X}^n + \mathbf{u} dt^n \quad (20)$$

ここで、 dt^n は n ステップ目の時間ステップ、 u_i は i 番目の節点の含浸方向樹脂流速、 l は微小進展距離、 $\mathbf{X}^n$ は n ステップ目の節点座標である。

2.3.2 分解能・樹脂結合操作

離散化した節点を線分で結びフローフロントラインを表現し、以下に示す条件に従いラインを合体・再編成することで、ボイドやウェルドラインの挙動をシミュレーションする。Fig. 2 は4つの注入点から樹脂を注入した含浸の模式図であり、任意の時間 t におけるフローフロントから時間ステップごとに進展している様子を示している。シミュレーションでは樹脂含浸の進展により節点間距離が広がったり、樹脂の結合などによって鋭角なラインが形成されることで、フローフロントの表現が悪化する。そのため、2節点間の距離や3節点間のなす角に応じて節点を配置することで、巨視的な含浸形状に対して微細な成形欠陥のみを高分解能でシミュレーションできる。節点間の距離に応じた条件は式(21)である (Fig. 2 中の A)。

$$L > a \quad (21)$$

ここで、 L は節点間距離、 a は定数とする。 a の値は以下で述べる樹脂の合体の条件に干渉しないような微小な距離を設定した。また、3節点のなす角度に応じた条件は式(22)である (Fig. 2 中の B)。

$$\alpha < b \quad (22)$$

ここで、 α は3つの隣り合う節点のなす角、 b は定数である。節点の増加は式(21)、(22)のどちらかが満たされたとき、節点間の中心に新たな節点を配置して、分解能を維持する。また、Fig. 2 中の C に示すような異なる樹脂が合体する際には隣接する樹脂の節点の内、式(23)を満たした節点を結合し、フローフロントラインを再編成する。

Fig. 2 Schematic of flow front advancement and formation of void and weld lines using BEM/LD.

$$L < c \quad (23)$$

ここで、 c は実流体の合体と類似するような微小距離とする。結合した節点はウェルドラインとして線形に結び、ウェルドラインの節点は樹脂内部の節点となるため圧力と圧力勾配が未知数となる。そのため同位置に節点を作成し、結合した樹脂のそれぞれの境界要素計算(式(17))を重ね合わせることで、ウェルドライン節点にかかる圧力勾配を計算し、形成後の進展をシミュレーションする。また、Fig. 2 の中央部で見られるような樹脂結合後にトラップされたボイドは、以下に示す式よりボイド面積を求めて内圧を計算し、内圧と注入圧を考慮して収縮させる²⁸⁾。

$$A_{\text{void}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_v} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (24)$$

$$A_{\text{void}}^0 P_{\text{int}}^0 = A_{\text{void}}^n P_{\text{int}}^n \quad (25)$$

ここで、 A_{void} はボイド面積、 N_v はボイド周りの節点数、 x, y は節点の座標である。また、 P_{int} は内圧であり、上付き 0 はボイド形成時、 n はステップ数を示している。

3. 1点注入 RTM シミュレーション

3.1 理論解との比較

提案手法の妥当性を検証するために、1点注入 RTM シミュレーションを行う。まず、等方性浸透係数場にお

ける理論解の導出を行うために式(6)に示す Laplace 方程式を極座標変換式(26)を得る.

$$\frac{d^2 P}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dP}{dr} = 0 \quad (26)$$

ここで, r は注入点からの距離である. 式(26)を r について積分し, $r=r_0$ で $P=P_0$, $r=r_f$ で $P=P_f$ となるように境界条件を代入すると, Darcy 則による含浸時間と含浸距離との理論式は式(27)となる.

$$\frac{1}{2} r_f^2 \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right) - \frac{1}{4} (r_f^2 - r_0^2) = \frac{K_{rr}}{\phi\mu} (P_0 - P_f) t \quad (27)$$

ここで, K_{rr} は含浸方向の浸透係数である.

次に数値解析と理論解との比較を行う. モデルは壁面の無い2次元平板に樹脂を100 kPaで注入するものとし, 吸引圧を0 Paとした. その他の条件は Table 1 に示す. Fig. 3 は BEM/LD より求めたフローフロントの位置と含浸時間の関係について, Darcy 則理論解とその理論解との誤差と合わせて示している. 含浸直後では10%程度の誤差が存在するが, その後は1~3%程度の誤差に収まっており, 数値解析結果は理論解と良く一致している. 含浸直後に誤差が大きくなった要因は, 注入点とフ

Table 1 Simulation conditions of isotropic RTM by single injection.

Inlet radius [m]	1.0×10^{-2}
Displacement of each step l [m]	1.0×10^{-3}
Number of node on inlet [-]	10
Permeability K_x, K_y [m^2]	1.0×10^{-9}
Viscosity μ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	0.067
Porosity ϕ [-]	0.705
a [m]	5.0×10^{-3}
b [rad]	$\pi/2$
c [m]	1.0×10^{-3}

Fig. 3 Comparison between simulated flow-front position and theoretical flow-front position.

ローフロントが近く, 圧力と比較し圧力勾配の値が極端に大きくなったことにより, 式(16)における変換行列の計算で誤差が大きくなったためと考えられる. しかし, 含浸時間が1秒未満の領域であるため, 絶対値としての誤差としては微小である. 以上より, 等方性浸透係数場において本数値解析手法による樹脂含浸速度計算の妥当性を示した.

3.2 円柱周りの樹脂含浸シミュレーション

本数値解析手法の複雑形状 RTM への適用可能性を検証するために, 介在物周りの樹脂含浸シミュレーションを行った. 介在物には円柱を用いて, 注入点から x 方向に 0.1 m, y 方向に 0.1 m 離れた位置に直径 0.05 m の円柱を配置しシミュレーションを行う. 円柱の領域には節点を配置せず, フローフロントが円柱縁に到達した際に円柱半径方向圧力勾配が0となる壁面境界条件を設定した. 注入圧, 吸引圧等の解析条件は, 3.1 節と同じである.

各時刻における含浸形状の数値解析結果を Fig. 4 に示す. 含浸時刻 $T=37$ s では樹脂が円柱に到達し, 円柱

Fig. 4 Flow advancement around a cylinder inclusion and formation of weld line.

Fig. 5 Simulation result of flow front and formation of void injected from four gates.

Fig. 6 Relationship between impregnation time and area of void for four-point injection of RTM.

Fig. 7 Relationship between impregnation time and pressure of void for four-point injection of RTM.

周りに流れており、円柱縁で樹脂が速く流れていることも確認できる。円柱縁で樹脂が速く流れる現象は、円柱縁の境界条件によって円柱縁に到達した節点の円柱半径方向圧力勾配が0になり、樹脂流れが円柱円周方向のみになることによって発生すると考えられる。また、 $T = 42$ sでは、周り込んだ樹脂が結合しウェルドラインの形成を確認した。円柱周りの樹脂含浸数値解析はBruschkeら¹⁶⁾ Trochuら¹⁷⁾によってCV/FEMを用いて行われており、結合前の円柱縁で樹脂が速く流れている形状や、結合後のウェルドライン付近でのフローフロント形状に一致が見られることからBEM/LDによる円柱周りの樹脂含浸数値解析は妥当であり、複雑構造物への適用可能性を示した。

4. 4点注入RTMシミュレーション

多点注入RTM成形におけるボイド・ウェルドラインの形成挙動のシミュレーションを行う。モデルはFig. 5に示すように4つの注入点を配置した。注入圧は100 kPaとし、ボイドの形成から収縮をシミュレーションするために吸引圧は1 kPaとした。その他の解析条件はTable 1と同様である。

Fig. 5は含浸時刻 $T = 54$ sにおけるフローフロント形状である。4つの注入点から注入された樹脂はそれぞれ結合し、中央部にボイドが形成されていることがわかる。式(24)によってボイドは収縮し、最終的に残留した。Fig. 6に含浸時間におけるボイドの面積の関係を示す。また、ボイド面積の収縮に対応したボイドの内圧と含浸時間の関係をFig. 7に示す。Fig. 6より50 s付近で形成したボイドは一定の割合で収縮を始め、55 s付近で収束し、その後一定値となっている。一方Fig. 7では、ボイドの内圧は緩やかに上昇し、ボイド面積が収束した55 s付近で一気に上昇していることがわかる。また、ボイドの内圧は面積が収束した後、緩やかに一定になっている。Kangら³³⁾はCV/FEMを用いた多点注入RTM数値解析において、ボイドの内圧計算を行っており、内圧の上昇が類似した傾向を示していることから妥当であると考えられる。

5. ウェルドライン形成シミュレーション

5.1 2点注入RTMシミュレーション

提案手法におけるウェルドライン形成を定量的に評価するために、2点注入RTMにおけるシミュレーションを行い、同条件のVaRTM実験と比較を行う。数値解析条件は、0.08 m離れた2つの注入点から樹脂を注入し、

Table 2 Conditions of anisotropic RTM simulation by two-point injections.

Inlet radius [m]	3.0×10^{-3}
Displacement of each step l [m]	5.0×10^{-4}
Number of node on inlet [-]	10
K_x/ϕ [m ²]	5.39×10^{-10}
K_y/ϕ [m ²]	5.01×10^{-11}
μ [Pa·s]	0.230
a [m]	5.0×10^{-3}
b [rad]	$\pi/2$
c [m]	1.0×10^{-3}

Fig. 8 Schematic of VaRTM experiment injected from two gates.

注入圧を 100 kPa, 吸引圧を 50 kPa とする. その他の数値解析条件を Table 2 に示す. なお樹脂の粘度は粘度計を用いて計測し, 繊維材の浸透係数と空孔率の比は事前に 1 次元注入 VaRTM 実験を行い計測した.

5.2 2点注入 VaRTM 実験

Fig. 8 にウェルドラインの形成を評価するための 2 点注入 VaRTM 実験の概略を示す. 厚さ 6 mm のガラス製のモールド 2 枚の間に, 異方性繊維材 (M155 K104, ユニチカガラスクロス) を一層と, 隙間調節用の GFRP 製治具を挟み万力で固定する. モールドの外周をシーラントテープで密封し, 予め上側モールドの中央部に設けた直径 6 mm の 2 点の穴から不飽和ポリエステル樹脂 (Sundhoma PC184-C, DH material) を同時に注入し, モールド端部に設けた穴から吸引する. 注入圧力は大気圧であり, 吸引には真空ポンプを用い, パイロット式真空レギュレータ (NVR200-01, Koganei) を用いて負圧 50 kPa で制御する. ウェルドラインの形成位置を正確に求めるため, それぞれの樹脂に赤色, 青色の着色剤 (FRP-ZONE ポリトナー) を混入した. なお粘度計 (TVC-7, 東機産業) で樹脂の粘度を計測し, 2 つの樹脂粘度が同一となるように着色剤混入量を調節した. また, 樹脂に対

Fig. 9 Simulation result of flow front and formation of weld line injected from two gates.

Fig. 10 Impregnation of VaRTM experiment and formation of weld line injected from two gates.

して 1 PHR の硬化剤 (Epoch PN) を添加した. 実験中は動画撮影し, 含浸開始からの時間とウェルドラインの長さを随時測定した.

5.3 結果と考察

Fig. 9, 10 に, 含浸 120 秒後における BEM/LD 数値解析と VaRTM 実験の含浸形状を示す. 全体的な含浸形状と樹脂の結合によるウェルドラインの形状は, 数値解析と実験でおおよそ一致した. また, Fig. 11 に縦糸方向, 横糸方向それぞれにおける含浸距離と含浸時間の関係を示す. 含浸初期から含浸終了時にかけて, 数値解析と実験は良く一致した. また, Fig. 12 にウェルドラインが形成してからのウェルドライン長さの推移を示す. 100 s 付近でウェルドラインが形成し, その後長さが増加している. 実験と比較し, 数値解析では形成してからの立ち上がりやや早く終盤に遅れが見られるが, 全体的に良い一致が見られた. 以上より, 異方性繊維材の多点含浸とウェルドラインの形成において, 本数値解析手法は実験を良く再現できることを示した.

6. 結 言

本研究では BEM/LD を用いて, 樹脂含浸に加えてポ

Fig. 11 Relationship between flow front position and impregnation time during RTM.

Fig. 12 Relationship between weld line length and impregnation time during two-gate RTM.

イドやウェルドラインなどの成形欠陥の形成と挙動を数値解析する手法を提案した。また、提案手法を用いて、1点または複数点の注入点を設けたモデルや、介在物を設けたモデルに対してシミュレーションを実施した。その結果、等方性浸透係数場における1点注入RTMにおいて、樹脂含浸計算が理論解と一致し、円柱周りの樹脂含浸では、円柱縁で含浸が速く、樹脂結合後のフローフロント形状がBruschkeら¹⁶⁾、Trochuら¹⁷⁾の数値解析結果と一致した。また、4点注入RTMにおいてポイド形成シミュレーションを行い、ポイドの内圧計算や面積計算が良好に行えたことを示した。さらに、直交異方性浸透係数場における2点注入RTMにおいて数値解析と実験の比較を行い、数値解析はウェルドライン形成時間やウェルドラインの長さの推移について実験を良く再現可能であることを示した。

参考文献

- 1) H.J. Barraza, Y.K. Hamidib, L. Aktasb, E.A. O'Rear & M.C. Altan : *J. Compos. Mater.*, **38**, 3 (2004), 195-226.
- 2) J. Varna, R. Joffe & L.A. Berglund : *Compos. Sci. Technol.*, **53**, 2 (1995), 241-249.
- 3) B. Yang, T. Jin, F. Bi, Y. Wei & J. Li : *Composites Part A*, **68** (2015), 10-18.
- 4) J.S.U. Schell, M. Deleglise, C. Binetruy, P. Krawczak & P. Ermanni : *Composites Part A*, **38**, 12 (2007), 2460-2470.
- 5) J.S. Leclerc & E. Ruiz : *Composites Part A*, **39**, 12 (2008), 1859-1868.
- 6) C.-Y. Chang & L.-W. Hourng : *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 5 (1998), 809-818.
- 7) R. Matuzaki, D. Seto, M. Naito, A. Todoroki & Y. Mizutani : *Compos. Sci. Technol.*, **107**, 11 (2015), 154-161.
- 8) R. Matsuzaki, D. Seto, A. Todoroki & Y. Mizutani : *Adv. Compos. Mater.*, **22**, 4 (2013), 239-254.
- 9) R. Matsuzaki, D. Seto, A. Todoroki & Y. Mizutani : *Adv. Compos. Mater.*, **23**, 2 (2014), 99-114.
- 10) M. Deléglise, P. Le Grogne, C. Binetruy, P. Krawczak & B. Claude : *Composites Part A*, **42**, 10 (2011), 1390-1397.
- 11) M. Yamasaki, I. Taketa, K. Yamaguchi, E. Wadahara, T. Kamae, S. Iwasawa, T. Sekido & A. Kitano : *Proc. the 16th ICCM* (2007).
- 12) N. Pearce, F. Guild & J. Summerscales : *Composites Part A*, **29**, 1-2 (1998), 141-152.
- 13) R.K. Cullen, S.M. Grove, J. Summerscales & H.N. Dhakal : *Proc. the 9th FPCM* (2008).
- 14) G.A. Barandun & P. Ermanni : *Proc. the 8th FPCM* (2006).
- 15) R. Frederick & J.R. Phelan : *Polym. Compos.*, **18**, 4 (1997), 460-476.
- 16) M.V. Bruschke & S.G. Advani : *Polym. Compos.*, **11**, 6 (1990), 398-405.
- 17) F. Trochu, R. Gauvin & D.-M. Gao : *Adv. Polym. Tech.*, **12**, 4 (1993), 329-342.
- 18) A. Shojaei, S.R. Ghaffarian & S.M.H. Karimian : *Compos. Sci. Technol.*, **62**, 6 (2002), 861-879.
- 19) F. Trochu, E. Ruiz, V. Achim & S. Soukane : *Composites Part A*, **37**, 6 (2006), 890-902.
- 20) C.H. Park, A. Lebel, A. Saouab, J. Bréard & W.I. Lee : *Composites Part A*, **42**, 6 (2011), 658-668.
- 21) E. Ruiz, V. Achim, S. Soukane, F. Trochu & J. Bréard : *Compos. Sci. Technol.*, **66**, 3-4 (2006), 475-486.
- 22) E. Béchet, E. Ruiz, F. Trochu & J.-C. Cuillière : *Composites Part A*, **34**, 9 (2003), 813-834.
- 23) E. Béchet, E. Ruiz, F. Trochu & J.-C. Cuillière : *J.*

- Reinf. Plast. Compos.*, **23**, 1 (2004), 17-36.
- 24) S. Soukane & F. Trochu : *J. Reinf. Plast. Compos.*, **24**, 15 (2005), 1629-1653.
- 25) M.-K. Um & W.I. Lee : *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 11 (1991), 765-771.
- 26) F.M. Schmidt, P. Lafleur, F. Berthet & P. Devos : *Polym. Compos.*, **20**, 6 (1999), 725-732.
- 27) Y.-E. Yoo & W.I. Lee : *Polym. Compos.*, **17**, 3 (1996), 368-374.
- 28) S. Soukane & F. Trochu : *Compos. Sci. Technol.*, **66**, 7-8 (2006), 1067-1080.
- 29) R. Gantois, A. Cantarel, G. Dusserre, J.-N. Félices & F. Schmidt : *App. Mech. Mater.*, **62** (2011), 57-65.
- 30) M. Tanaka, T. Matsumoto & Y. Suda : *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **662**, 67 (2001), 1589-1594.
- 31) J.D. Vanegas, I.D. Patino & C.A. Vargas : *J. Compos. Mater.*, **48**, 21 (2014), 2603-2629.
- 32) N.M. Ghoniem, S.-H. Tong & L.Z. Sun : *Phys. Rev. B: Condens. Matter.*, **60**, 2 (2000), 913-927.
- 33) M.K. Kang, W.I. Lee & H.T. Hahn : *Composites Part A*, **32**, 11 (2001), 1553-1560.