

平成 30 年 5 月 3 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05691

研究課題名(和文) 確率論的シミュレーションと電気計測のデータ同化によるLCM含浸推定と制御への展開

研究課題名(英文) Estimation of resin impregnation during LCM using data assimilation of stochastic simulation and electrical measurements and development of impregnation control

研究代表者

松崎 亮介 (Matsuzaki, Ryosuke)

東京理科大学・理工学部機械工学科・准教授

研究者番号：20452013

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：複合材料の樹脂注入成形において、計測や数値シミュレーション単独では樹脂含浸と浸透係数分布の高精度な推定が困難である課題があった。本研究では、データ同化により、計測データに数理モデルを用いた3次元樹脂含浸シミュレーションを統合することで、計測データの情報不足を補償し、3次元樹脂含浸の合理的な推定とシミュレーションモデルの改良を同時に達成する方法を提案した。さらに、平板と曲面モデルに対して適用し有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：In the resin transfer molding of composite materials, the estimation of resin impregnation and permeability is difficult using only observation of the flow front or numerical simulation. This study proposed the integration of stochastic numerical simulation of three-dimensional resin impregnation and flow front observation. The integration was performed using data assimilation techniques to compensate for the lack of measurement data and identify the permeability field, which is a key simulation model parameter for resin impregnation. The developed method was applied to the flat and curved panels, verifying that the impregnation state and permeability field can be simultaneously estimated.

研究分野：複合材料

キーワード：複合材料 データ同化

1. 研究開始当初の背景

繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics: FRP)は優れた比強度、比剛性を有する材料であるため、航空機・自動車用途への適用が進められている。FRP 成形法の一つである LCM (Liquid Composite Molding) は、成形型に強化繊維材を積層し、液体樹脂を繊維に含浸・硬化させ FRP を成形する手法であり、低コスト成形や複雑形状成形に適性を有する成形法として期待されている。しかしながら LCM には、成形条件のわずかな変動による樹脂流動経路の変化に起因して、樹脂未含浸領域(ポイド)が発生するという課題がある。このポイド発生による品質の不安定性は、高信頼性が要求される航空宇宙や自動車構造部材を成形する際に大きな障害となっている。したがって、LCM におけるポイド発生を成形中に抑制し、品質の高い FRP を成形可能とすることは、FRP 適用範囲を拡大する上で重要な技術課題として位置づけられる。

ポイド抑制のためのアプローチとして、成形時の樹脂含浸挙動を監視する研究が各種行われている。これまでに光ファイバや TDR センサなどを利用したフローモニタリング手法が研究されているが、構造内部にセンサを埋め込むことによる強度低下の問題や、計測がセンサ近傍に限られるためポイド発生を見逃す問題があり、特に 3 次元的な樹脂含浸分布を推定するフローモニタリング技術は未解決課題である。3 次元的な樹脂含浸計測を達成するためには、構造内部へセンサを埋め込むことができないという制約の下で、限られた計測情報から 3 次元的に含浸する樹脂の空間分布をモニタリングするという困難な要求を満たす必要がある。

2. 研究の目的

上記の背景から本研究では、計測データに加えて、数理モデルを用いた 3 次元樹脂含浸シミュレーションを統合することで計測データの情報不足を補償し、3 次元樹脂含浸の合理的な推定とシミュレーションモデルの改良を同時に達成する方針を採用する。

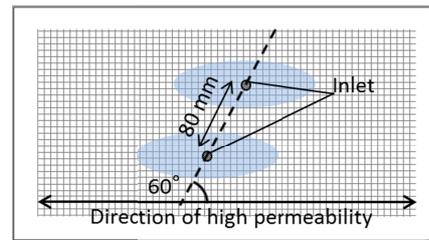
具体的な方法として、成形プロセスパラメータの不確かさを考慮した確率論的シミュレーションによる樹脂含浸予測と樹脂含浸観測結果から、データ同化手法の一つである Ensemble Kalman Filter (EnKF)を用いて組み合わせることによって、3 次元フローモニタリングと同時にプロセスの支配的パラメータである浸透係数の空間分布を推定するシステムを提案する。

3. 研究の方法

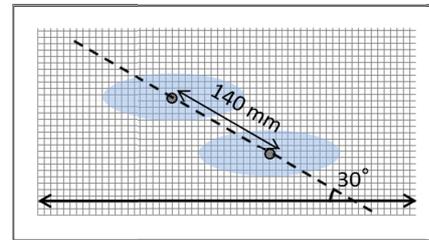
まず、樹脂注入成形時における数値シミュレーションと実験との間に生じる差異を明らかにするため、2 点注入 VaRTM 実験と数値シミュレーションの比較を行った。図 1 に VaRTM 実験のモデルを示す。繊維材の高浸透係数方向と注入点の配置方向とのなす角を

60°とした 60°モデルと、なす角を 30°とした 30°モデルの 2 種類を実験した。繊維材には異方性繊維材を一層用いて、赤色と青色の 2 つの着色剤を混入した不飽和ポリエステル樹脂を注入点より注入した。注入圧は大気圧であり、真空ポンプで吸引圧を負圧 30 kPa で制御した。

さらに、ダルシー則と連続の式に基づく数値シミュレーションを上記の条件と同じモデルに適用し、含浸挙動にどのような違いが出るかを検証した。



(a) 60° model



(b) 30° model

図 1 2 点注入 VaRTM 実験

さらに平板と曲面形状を有するモデルを用いて EnKF によるデータ同化の有効性を検証する。測定はガラスモールド上で VaRTM を行い、図 2(a)のように樹脂含浸の様子をカメラで撮影し、樹脂質量減少量 Δm_t を測定する。得られた画像から、注入点からのフローフロントまでの距離 r_t^i を測定する(図 2(b))。これにより、時刻 t における観測ベクトル y_t を得る。

$$y_t = \left(r_t^1 \quad \dots \quad r_t^M \quad \Delta m_t \right)^T \quad (1)$$

ここで、 M はフローフロント観測数である。

測定面が曲面形状を有する場合、図 3 に示すように実際の距離 r_t^i と画像データからの測定値 $r_t^{i, image}$ との間に差異が生じる。そこで、次式に基づき測定値を変化し、フローモニタリングにおいて利用する。

$$r_t^i = \begin{cases} R \sin^{-1} \frac{r_t^{i, image}}{R} & \text{if } \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ R \left(\frac{\pi}{2} + \sin^{-1} \frac{r_t^{i, image}}{R} \right) + r_{in} & \text{if } \theta > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 R は曲率半径、 r_{in} は注入点とフローフロントのなす角 r_{in} は成形品の内径を示す。

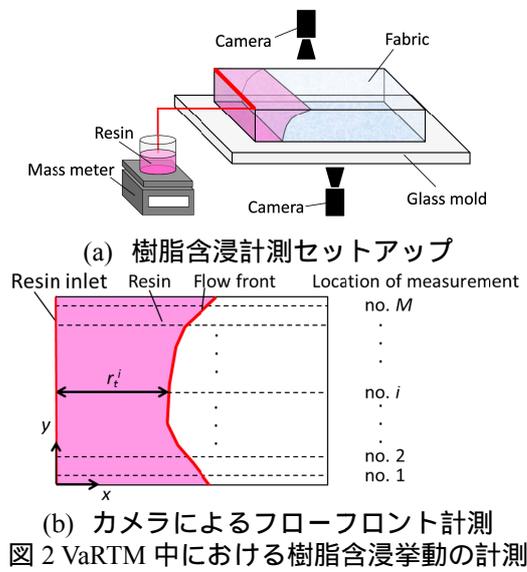


図2 VaRTM 中における樹脂含浸挙動の計測

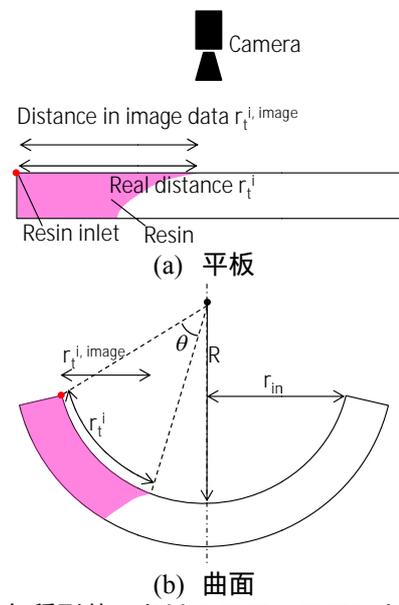
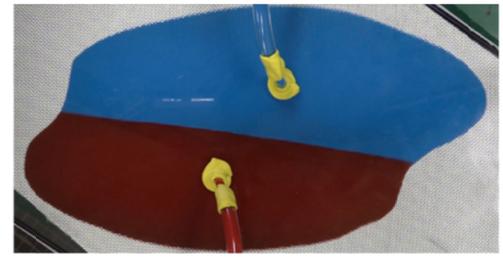


図3 各種形状におけるフローフロント計測

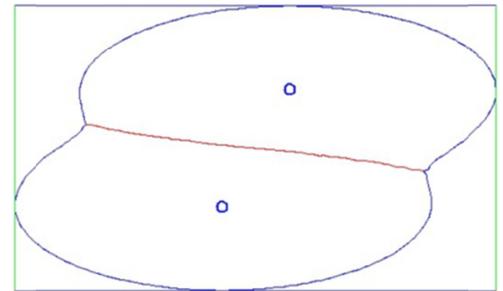
4. 研究成果

図4(a)~(d)はそれぞれ60°モデル, 30°モデルにおける含浸形状の実験結果と解析結果を示しており, (a)~(b)は注入後720s経過後の含浸形状, (c)~(d)は注入後1080s経過後の含浸形状である。

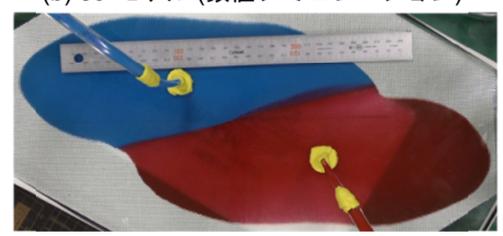
ウェルドラインの形状は60°モデル((a)と(b))では直線状に形成しており, 実験と解析で類似した傾向を示し, ウェルドライン端部のフローフロント形状についても一致している。一方, 30°モデル((c)と(d))ではウェルドラインの湾曲形状が実験と解析でやや異なり, ウェルドライン端部のフローフロント形状は実験と解析で大きく異なった。多点注入VaRTM 実験では, 繊維材の微細なよれや, 樹脂結合後の樹脂流動の変化などから, フローフロントが歪やすいこと要因と考える。これは数値シミュレーションには反映されておらず, 実験における浸透係数に空間的なばらつきが生じているためと考えることができる。



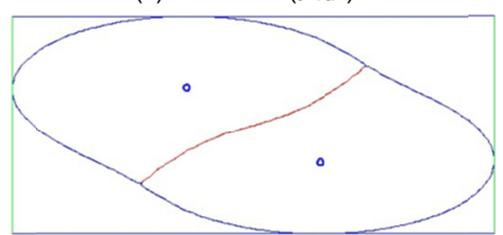
(a) 60°モデル (実験)



(b) 60°モデル (数値シミュレーション)



(c) 30°モデル (実験)



(d) 30°モデル (数値シミュレーション)

図4 VaRTM 成形における数値シミュレーションと実験の比較

含浸挙動推定にデータ同化を適用するために, 含浸度と観測値の関係の定式化を行う。ここでは, Flow Analysis Network 法において含浸度が担当領域における樹脂含浸量の割合で表現されることから, 定式化を行う。

含浸挙動の測定は注入点からフローフロントまでの距離を測定するため, 計算の簡略化のために測定方向に広がる観測担当領域を仮定する。成形品の形状ごとに観測担当領域は図5のように設定する。

この観測格子内の含浸度を重み付平均により次式のように求める。

$$f_t^o = Wf_t \tag{3}$$

ここで, f_t^o は時刻 t における観測担当領域の含浸度ベクトル, f_t は時刻 t における数値シミュレーションの含浸度ベクトル, W は距離に依存した重み行列を表す。このとき繊維材への樹脂の流入量 Δm_t は次式である。

$$\Delta m_i = \rho g \sum_{i=1}^{N_o} q_i^{(o)} = \rho g \sum_{i=1}^{N_o} V_i^{(o)} f_i^{(o)} \quad (4)$$

ここで、 N_o は観測担当領域数、 $q_i^{(o)}$ は観測担当領域の樹脂含浸量、 $V_i^{(o)}$ は観測担当領域体積である。

また、フローフロントの観測位置 i に沿って、樹脂の含浸方向に観測担当領域を結合した連結観測領域 i の含浸量 $\bar{q}_i^{(o)}$ は次式で表される。

$$\bar{q}_i^{(o)} = \sum_{i=1}^{N_s} q_i^{(o)} = \sum_{i=1}^{N_s} V_i^{(o)} f_i^{(o)} \quad (5)$$

また、観測担当領域が十分小さく、含浸方向に垂直な断面に対し一様に樹脂が含浸するとき、連結担当領域の樹脂含浸量は断面積 $A_i^{(o)}$ を用いて次式のように表される。

$$\bar{q}_i^{(o)} = A_i^{(o)} r_i^i \quad (6)$$

ここで、 r_i^i は観測位置 i における注入点からフローフロントまでの距離である。よって、フローフロントの観測値は観測担当領域の含浸度を用いて次式で表される。

$$r_i^i = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} V_i^{(o)} f_i^{(o)}}{A_i^{(o)}} \quad (7)$$

以上のようにして数値シミュレーションで定義される含浸度から観測値を求めることができる。また、この方法では樹脂注入条件や成形品の形状を変化に対して、観測担当領域の構成のみを変化させるだけで対応が可能となる。

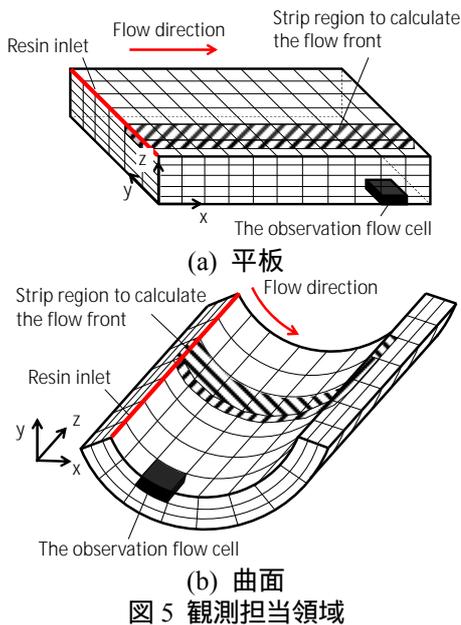


図5 観測担当領域

提案手法による樹脂含浸推定手法の有効性を検証する。まず、任意に設定した浸透係数場に対し、数値シミュレーションを行ったものを真値とする。次に、真値に対してフロー

フロント位置の測定を行い、その観測値を基に樹脂含浸推定を行う。なお、初期値をランダムに生成することによる変動を考慮して解析は3回行った。

図6に曲面モデル形状を示す。また、Cubature ruleの適用条件を満たすようにアンサンブルメンバー L をベクトル β の次元 Q を用いて、 $L=Q+1$ とした。なお、 Q は図7から浸透係数分布の寄与率が0.8以上となるように139とした。

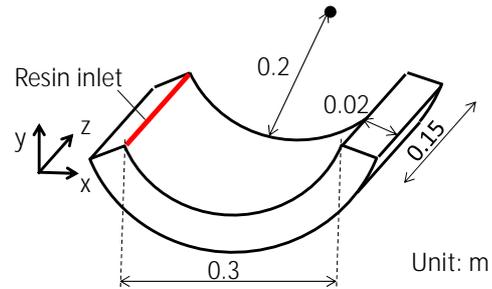


図6 曲面モデル形状

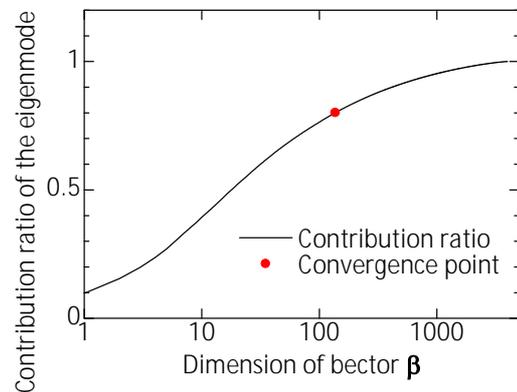
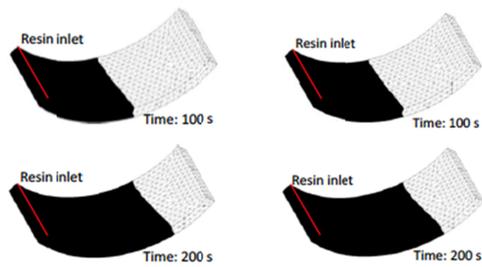


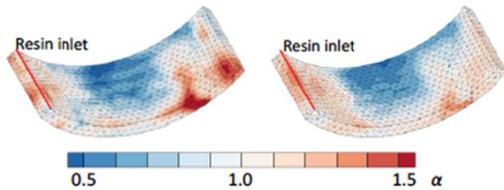
図7 ベクトル β の次元の浸透係数分布への寄与率

図8に樹脂含浸挙動の推定結果、図9に浸透係数分布の推定結果を示す。樹脂含浸挙動と浸透係数分布で共に真値を推定していることが確認される。したがって、曲面形状においても提案手法が適用できることが示された。

図10に誤差の時間平均を示す。なお、比較のために平板 ($0.3 \times 0.15 \times 0.02$ m) を用いた際の誤差を示している。含浸度挙動では、平板と比較し推定性能が低下したものの曲面形状を有するモデルにおいても推定可能であることが示されている。また、浸透係数分布においては平板と同程度の推定が行えることを示した。



(a) 真値 (b) データ同化
図 8 樹脂含浸推定結果



(a) 真値 (b) データ同化
図 9 浸透係数分布推定結果

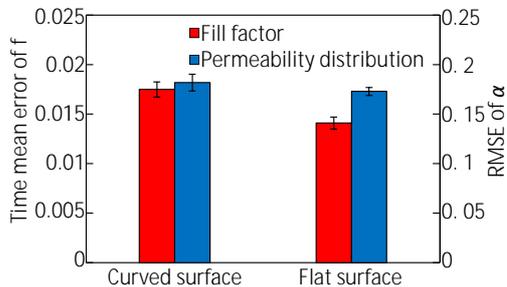


図 10 曲面と平板における推定結果

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Ryosuke Matsuzaki, Masaya Shiota, Data assimilation for three-dimensional flow monitoring in non-flat composite structures during vacuum-assisted resin transfer molding: A numerical study, Composite Structures, 172 (2017), pp.155-165. 査読あり DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.03.089

〔学会発表〕(計 5 件)

Ryosuke Matsuzaki, Data assimilation for integration of electrical measurements and stochastic flow simulation during liquid composite molding, Next Generation Transport Aircraft Workshop 2016, (2016).

松崎亮介, データ同化を利用した CFRP 成形の状態推定, 未踏科学技術協会 未踏科学サマー道場 高性能 FRP としなやかタフポリマーによる材料革命, (2016).

松崎亮介, データ同化による VaRTM の三次元樹脂含浸再構成, 日本機械学会機械材料・材料加工部門 第 1 回 高分子基複合材料の成形加工に関する研究会, (2016).

松崎亮介, データ同化による複合材料樹脂注入成形における 3 次元樹脂含浸再構

成, 日本機械学会計算力学部門第 3 回設計に活かすデータ同化研究会, (2016).
松崎亮介, 樹脂含浸成形のための浸透係数計測ベンチマークテストの紹介, 日本機械学会 機械材料・材料加工部門 第 3 回 高分子基複合材料の成形加工に関する研究会, (2017).

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

松崎 亮介 (MATSUZAKI, Ryosuke)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号: 20452013