

編み込み繊維束内含浸過程における粘性流体流動様相とマクロ・ミクロボイド形成に関する数値解析

稲川 昌樹

東京理科大学大学院 創域理工学研究科 機械航空宇宙工学専攻

1 はじめに

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）をはじめとする繊維強化複合材料は、軽量かつ高強度であることから、航空宇宙、自動車をはじめとする幅広い産業分野で利用されている。その代表的な成形法の一つに、金型内に配置した繊維基材へ液状樹脂を注入する Resin Transfer Molding (RTM) がある。RTM は複雑形状の部材を比較的低コストで成形できる一方、樹脂の含浸が不十分な場合には繊維基材内に気体が残留し、ボイドが形成される。ボイドは複合材料内部の応力集中源となり、機械的特性を低下させるため、その形成機構を理解し抑制することが重要である。

編み込み繊維基材は、繊維束内部の微細な空隙と繊維束間の比較的大きな空隙を併せ持つデュアルスケールの多孔質構造を有する。このため含浸時には、繊維束内部と繊維束間で液体の進展速度が異なり、複雑な気液界面挙動が生じる。一般に、繊維束間に残留する比較的大きな気泡はマクロボイド、繊維束内部に残留する微小な気泡はミクロボイドと呼ばれる [1]。

これらの形成を支配する重要な無次元数として、粘性力と毛管力の比を表すキャピラリー数

$$Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \quad (1)$$

が挙げられる。ここで、 μ は液体の粘性係数、 U は代表流速、 σ は表面張力である。従来研究では、 Ca や繊維表面の濡れ性によってボイド形成量が大きく変化することが示されている [1, 2]。一方、実際の繊維構造内部では気液界面が局所的かつ非定常に変形するため、ボイドが形成される瞬間の流動機構については十分に理解されていない。特に、狭い流路に

おいて気相が分断される snap-off と呼ばれる現象は、多孔質体内における気体捕捉を理解する上で重要である [3]。

そこで本研究では、単層編み込み繊維束を対象とした三次元気液二相流数値解析を実施し、液体含浸時の流動前線の進展および気相の排出過程を解析した。特にキャピラリー数および繊維・金型壁面の濡れ性に着目し、snap-off の発生とマクロボイド形成との関係を明らかにすることを目的とした [4]。

2 数値解析手法

解析対象として、経糸 (warp) と緯糸 (weft) が交差する単層編み込み繊維束を平行平板間に配置した三次元計算領域を構築した。計算領域は、繊維束が存在しない束間領域 (inter-bundle region)、一方の繊維束と金型壁面との間に狭い流路が形成される領域 (apparent intra-bundle region)、および経糸と緯糸が重なる束内領域 (intra-bundle region) から構成される。

計算領域の寸法を $(L_x, L_y, L_z) = (9500, 700, 4600) \mu\text{m}$ 、計算格子数を $(N_x, N_y, N_z) = (190, 14, 92)$ とした。計算負荷を低減しつつ編み込み構造に起因する主要な界面挙動を再現するため、束内部の繊維形状を拡大してモデル化した一方、マクロボイド形成を支配する束間距離および金型壁面との間隔については実験系に対応させた。

液相および気相を非圧縮 Newton 流体として扱い、連続の式および Navier-Stokes 方程式を支配方程式とした。気液界面の捕捉には Volume of Fluid (VoF) 法、表面張力の評価には Continuum Surface Force (CSF) 法を用い、OpenFOAM 9.0 の interFoam によって解析した。含浸液として 350-cSt シリコーン

オイル、気相として空気を想定し、入口流速を変化させることでキャピラリー数 Ca を変化させた。また、繊維および金型壁面に対する静的接触角 θ_f , θ_w を与えることで濡れ性の影響を評価した。

3 解析結果および考察

数値解析の結果、編み込み繊維束内におけるマクロポイド形成には、繊維束と金型壁面との間に形成される狭い流路で生じる snap-off が重要な役割を果たすことが明らかとなった。本研究では、この snap-off が異なる壁面近傍で連続して生じることで、束間領域の気体が周囲から孤立し、マクロポイドとして捕捉されることを確認した。

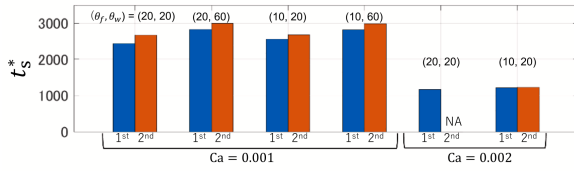


図 1: キャピラリー数 Ca および接触角 θ_f , θ_w が 1 回目および 2 回目の snap-off 発生時刻に及ぼす影響。

図 1 に、異なる Ca および接触角条件における 1 回目と 2 回目の snap-off 発生時刻を示す。 $Ca = 0.001$ では、検討したすべての条件において連続した 2 回の snap-off が発生した。また、同一の θ_f について比較すると、壁面接触角 θ_w の増加に伴って 1 回目および 2 回目の snap-off はいずれも遅れて発生した。これは壁面における濡れ性の低下によって、壁面近傍を進展する流動前線が抑制されたためである。

一方、 $Ca = 0.002$, $(\theta_f, \theta_w) = (20^\circ, 20^\circ)$ では、1 回目の snap-off は発生したものの、2 回目の snap-off は生じなかった。1 回目の snap-off 後に束間領域へ残された気体は、浸透液の流れによって下流へ排出され、最終的に束間領域は液体で満たされた。この結果は、単一の snap-off の発生のみでは必ずしもマクロポイド形成には至らず、連続した 2 回の snap-off による気相の孤立化がマクロポイド形成を決定することを示している。

さらに、snap-off と最終的なポイド形成量との関係を定量的に評価した。本解析では、金型ギャップ内に存在する気体体積の初期気体体積に対する割合をマクロポイド率として定義した。したがって、本

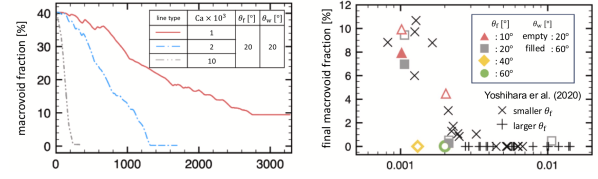


図 2: マクロポイド率の時間変化 (左) および修正キャピラリー数 Ca' と最終マクロポイド率の関係 (右)。

指標は繊維束内部に形成されるミクロポイドを含まない。

図 2 左に、 $(\theta_f, \theta_w) = (20^\circ, 20^\circ)$ におけるマクロポイド率の時間変化を示す。 $Ca = 0.001$ では含浸の進行とともにマクロポイド率が減少するものの、2 回の snap-off によって気体が束間領域に捕捉されるため、含浸終了後にも有限のマクロポイド率が残った。これに対して Ca を増加させると、液体の粘性力が毛管力に対して相対的に大きくなり、残留気体が排出されやすくなるため、マクロポイド率はより急速に減少した。さらに高い Ca では snap-off 自体が抑制され、最終マクロポイド率はほぼゼロとなった。

図 2 右には、繊維表面の濡れ性を考慮した修正キャピラリー数

$$Ca' = \frac{\mu U_{in}}{\sigma \cos \theta_f} \quad (2)$$

と最終マクロポイド率の関係を示す。 Ca' の増加に伴い最終マクロポイド率は急激に低下した。また低 Ca' 領域では、繊維接触角 θ_f および壁面接触角 θ_w の増加によってもマクロポイド形成が抑制された。特に θ_f の影響が大きく、濡れ性によって流動前線の進展と snap-off の発生条件が大きく変化することが示された。

以上より、編み込み繊維束内におけるマクロポイド形成は、単に流速によって決定されるのではなく、粘性力と毛管力の競合、繊維および壁面の濡れ性、さらにそれらによって生じる局所的な snap-off の発生過程に強く支配されることが明らかとなった。

4 まとめ

本研究では、単層編み込み繊維束への粘性液体の含浸過程を対象として、三次元気液二相流数値解析を実施し、キャピラリー数および濡れ性が snap-off とマクロポイド形成に及ぼす影響を検討した。

その結果、低キャピラリー数条件では繊維束周辺における非一様な流動前線の進展によって連続した2回の snap-off が発生し、マクロボイドが形成されることを明らかにした。一方、キャピラリー数の増加に伴って snap-off 後の残留気体の排出が促進され、さらに高いキャピラリー数では snap-off そのものが抑制されることで、マクロボイド形成が抑えられた。また、繊維および金型壁面の濡れ性が snap-off の発生時刻および最終マクロボイド率に大きな影響を及ぼすことを示した。

参考文献

- [1] N. Patel, V. Rohatgi and L. J. Lee, “Micro scale flow behavior and void formation mechanism during impregnation through a unidirectional stitched fiberglass mat,” *Polymer Engineering & Science*, Vol. 35, No. 10 (1995), pp. 837–851. doi:10.1002/pen.760351006.
- [2] K. Yoshihara, Y. Kamei, A. Mizuno, H. Ohgaki, T. Hori and I. Ueno, “Effect of wettability on viscous fluid impregnation in single-layer woven-fibre bundles driven by pressure difference,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 138 (2020), 106049. doi:10.1016/j.compositesa.2020.106049.
- [3] K. Singh, T. Bultreys, A. Q. Raeini, M. Shams and M. J. Blunt, “New type of pore-snap-off and displacement correlations in imbibition,” *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 609 (2022), pp. 384–392. doi:10.1016/j.jcis.2021.11.109.
- [4] M. Inagawa, T. Ito and I. Ueno, “Capillary-driven displacement of immiscible fluid within woven fibrous porous media by permeating liquid,” *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 717 (2026), 140389. doi:10.1016/j.jcis.2026.140389.