



Title	繊維強化複合材料の射出成形における粒子法に基づく樹脂・繊維流動評価と複雑金型モデルへの適用
Author(s)	井上, 直生
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/101683
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

繊維強化複合材料の射出成形における
粒子法に基づく樹脂・繊維流動評価と
複雑金型モデルへの適用

井上 直生

2025 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科
ビジネスエンジニアリング専攻

目次

1 章 緒章.....	1
1.1 世界のエネルギー使用量と繊維強化複合材料	1
1.2 短繊維強化複合材料の成形方法と実験における課題	6
1.3 射出成形を対象とした数値解析の先行研究	9
1.4 粒子法および粒子法を用いた先行研究	11
1.5 本研究の目的	15
1.6 本論文の構成	16
2 章 MPS 法を用いた解析手法による樹脂特性による影響評価および解析スキームの 改良.....	18
2.1 緒言	18
2.2 全体解析による樹脂特性が樹脂流動へ与える影響評価.....	18
2.2.1 解析概要および解析条件	18
2.2.2 解析結果	19
2.3 局所領域における樹脂特性および繊維アスペクト比による繊維流動への影響評価	22
2.3.1 解析概要および解析条件	22

2.3.2 解析結果	24
2.4 解析スキームの問題点およびプログラムの改良	29
2.4.1 解析スキームの問題点およびその要因の解決策の実施	29
2.4.2 解析プログラム修正後の全体解析結果の比較	32
2.5 結言	37
3 章 射出口に着目した樹脂・繊維流動評価と射出口形状による繊維配向変化への影響評価	38
3.1 緒言	38
3.2 通常モデルを用いた樹脂・繊維流動解析	38
3.2.1 解析条件	38
3.2.2 樹脂流動に関する解析結果	39
3.2.3 繊維流動に関する解析結果	41
3.2.4 射出速度による影響評価	43
3.3 射出口形状の変更による繊維流動への影響評価	44
3.3.1 解析概要	44
3.3.2 解析結果	46

3.4 結言	52
4 章 局所領域連結解析の提案およびせん断流動下における繊維流動評価	53
4.1 緒言	53
4.2 局所領域連結解析	54
4.2.1 局所領域連結解析の概要および解析条件	54
4.2.2 解析結果	55
4.3 金型厚さによるせん断流動下での繊維流動への影響評価	61
4.3.1 解析概要	61
4.3.2 解析結果	61
4.4 結言	64
5 章 複雑形状モデルによるフローフロント合流・分岐での 樹脂・繊維流動評価 ...	66
5.1 緒言	66
5.2 T 字金型モデルを使用した解析によるフローフロント合流時の樹脂・繊維流動評 価	67
5.2.1 解析条件	67
5.2.2 解析結果	68

5.3 解析条件の変更による樹脂・繊維流動への影響評価の実施.....	75
5.3.1 流入速度による解析結果への影響評価	75
5.3.2 繊維配向固定による繊維流動評価の実施.....	79
5.3.3 射出位置の変更による繊維流動への影響評価の実施	83
5.4 結言	92
6 章 結章.....	94
6.1 本論文で得られた知見	94
6.2 今後の展望.....	96
6.2.1 解析手法に関して	96
6.2.2 解析の対象に関して.....	97
謝辞.....	98
参考文献	99
Appendix 射出成形解析における解析手法.....	106
A1 MPS 法.....	106
A2 SFRP の射出成形における樹脂流動の計算方法	109
A2.1 陰解法の導入.....	109

A2.2 壁関数の導入.....	109
A2.3 せん断速度と温度による粘度変化.....	110
A2.4 剛体運動の計算.....	111

1 章 緒章

1.1 世界のエネルギー使用量と繊維強化複合材料

近年、環境に配慮した省エネルギー化の動きが活発になってきている。Fig. 1.1 は、世界全体で消費されているエネルギーの推移である¹⁾。使用されるエネルギーは年々増加しており、今後もそれが続いていくことが予想されている。その中でも、石油の使用量が大きいことがわかる。Fig. 1.2 は石油の使用用途の推移であり、2021 年には 62%もの石油が輸送関係で使用されている²⁾。どちらも 2020 年に一度減少しているが、これはコロナウイルスの発生により、世界の消費が減少したためであり、生産エネルギー量は 2021 年以降の消費はコロナ前よりも増加していることから、この消費量は今後も増加していくと考えられる。そのため、CO2 排出量の削減が世界的に求められており、様々な取り組みがなされている。

そのような中、日本国内に着目すると、Fig. 1.3 に示すように輸送部門は日本国内での全 CO2 排出量のうち 18.5%を占めている^{a)}。輸送機器の中でも、自家用車が輸送部門における CO2 排出量の 44.9%を占めている。また、自動車の CO2 排出量は輸送部門の 85.8%，日本全体においては 15.9%の CO2 と大きな割合を占めている。

上記の通り、輸送機器において CO2 排出量が多いことから、現在自動車を中心に輸送機器の省エネルギー化を求める動きが強まっている。Fig. 1.4 は自動車の重量と燃費の関係³⁾を示した図である。この図から輸送機器の省エネルギー化には車両の軽量化が効果があるということが言える。

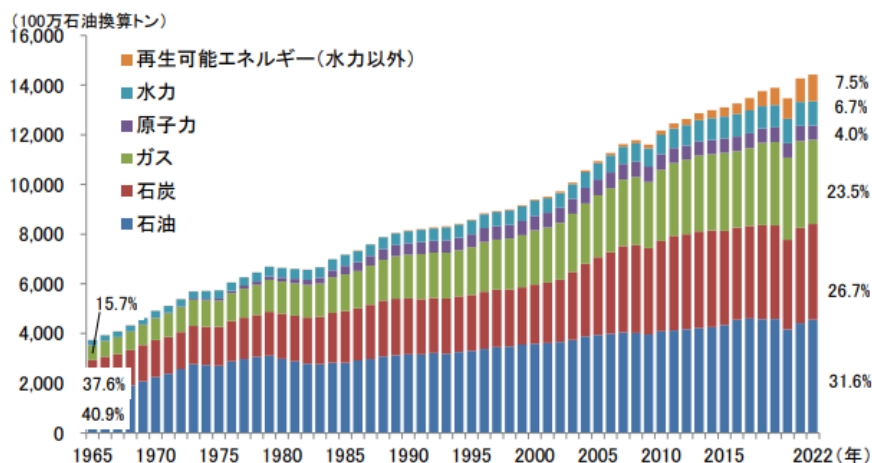


Fig. 1.1 Energy consumption of the whole world¹⁾

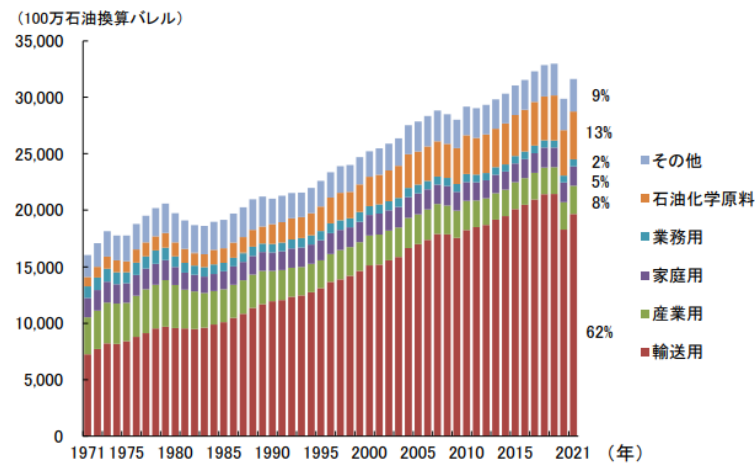


Fig. 1.2 Sectoral percentage in oil consumption and oil consumption of the whole world ²⁾

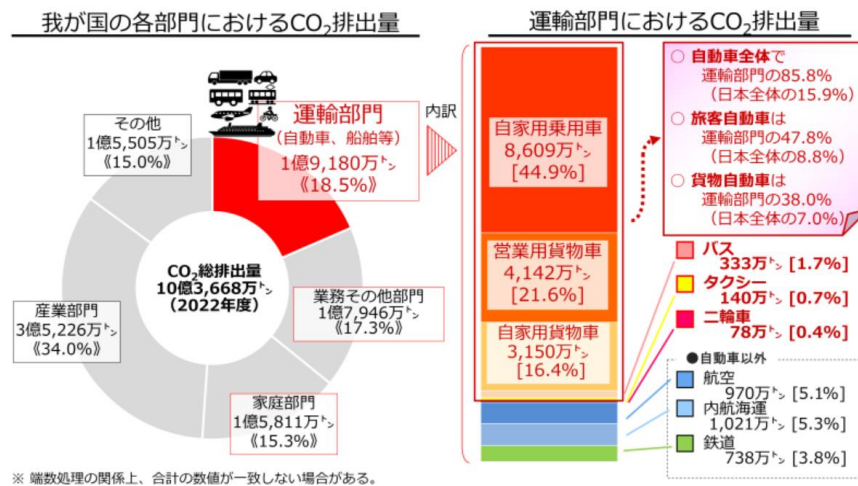


Fig. 1.3 CO₂ emissions in Japan and their composition ^{a)}

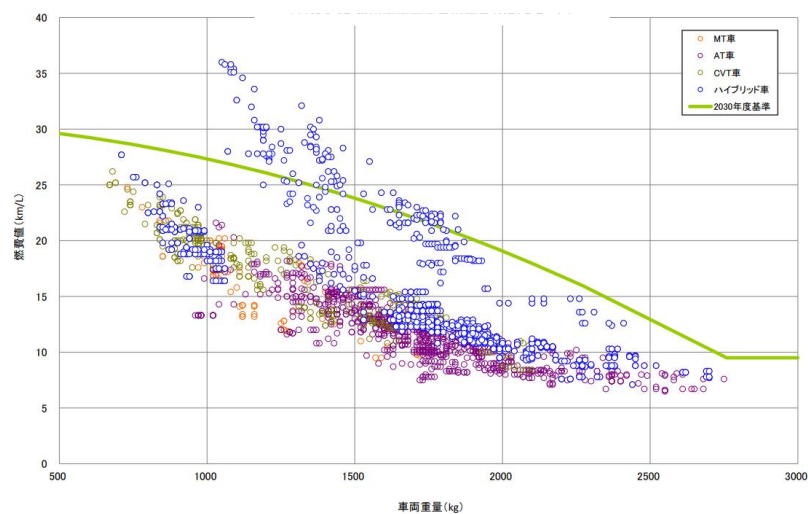


Fig. 1.4 Relationship between Fuel Consumption and weight of vehicle ³⁾

以上のことから、車両に使用されている鋼材を軽量かつ高強度な材料へ転換することが進められている。ここで注目されているのが、複合材料の 1 種の繊維強化プラスチック (FRP:Fiber Reinforced Plastics)である。この FRP は合成樹脂の中に弾性率の高い繊維状の材料を分散させて作られたものであり、Fig. 1.5 に各種構造用材料の比強度・比曲げ剛性を比較したグラフを示すように、一般的な鉄鋼と比較し FRP は軽量で強度が高い材料である。現在鉄鋼が使用されている部品を FRP に置換することで、必要な強度を保ちつつ車両の軽量化が可能であるといえる。

FRP に使用される樹脂は、熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂の 2 種類に分類することができる。熱可塑性樹脂とは、熱を加えると軟化し冷却すると硬化するものであり、熱硬化性樹脂は熱を加えると不可逆的に硬化するものである。熱硬化性樹脂は、熱可塑性樹脂と比べ耐熱性や機械的特性の点では優れているが、その不可逆性からリサイクル性は低く環境に良いとは言えない。一方で、熱可塑性樹脂はリサイクル可能で加工性も良いが熱硬化性樹脂に比べて強度など機械的特性が劣る。

繊維の種類はいくつかあり、ガラス繊維を用いる GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)や炭素繊維を用いる CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)などが存在している。GFRP は FRP の中で最も安価である。CFRP は GFRP よりも高価ではあるが、鉄やアルミニウムと同等の強度を持ちながら軽量である。

繊維の混入方法は 2 種類あり、繊維に方向性を持たせたまま樹脂を含浸させる方法と、樹脂中に細かく切断した繊維を均一に混入させる方法がある。繊維に一方向性を持たせた材料は UD (Uni Directional) 材と呼ばれており(Fig.1.6)、繊維方向の引張や圧縮強度・弾性率が高いというメリットがあることから航空機などに使用されているが、繊維と直行する方向に対しては強度・剛性ともに極端に低下するというデメリットがある。繊維を交互に編んだクロス材も存在している(Fig.1.7)。これは、UD 材のデメリットは解消されるが、生産性の課題などコストの面の問題がある。短繊維を用いた FRP は短繊維強化プラスチック (SFRP:Short-Fiber-Reinforced-Plastics)と呼ばれている(Fig.1.8)。SFRP は繊維を均一に分散させることができれば、UD 材のデメリットを解消することが可能となるが、繊維密度や繊維配向の制御が課題となっている。

主に使用されている樹脂は熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂であり、熱硬化性樹脂と炭素繊維を組み合わせたものが一般的に CFRP や CFRTS (Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Plastic) と呼ばれている。CFRTS は現在飛行機で使用されている金属の一部と置き換わっており、機体や車両の軽量化に成功している。熱可塑性樹脂と炭素繊維を組み合わせた複合材料は CFRTP(Carbon-Fiber-Reinforced-Thermo-Plastics)と呼ばれている。使用している母材が熱可塑性樹脂であり、熱硬化性樹脂よりも強度が低い、再利用が可能なためリサイクル性が高い材料であるといえる。

a) 国土交通省, “運輸部門における二酸化炭素排出量”(2024)
(https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosci_environment_tk_000007.html) (2024.7.8 閲覧)

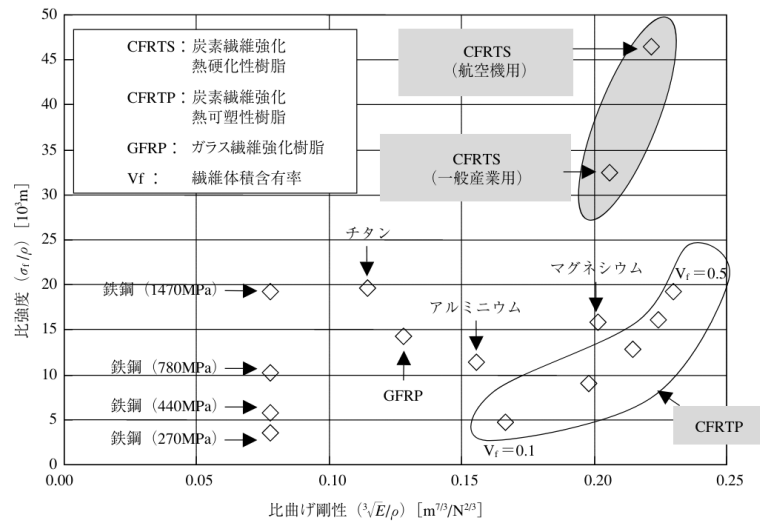


Fig.1.5 Relationship between specific strength and specific flexural rigidity of each material ⁴⁾

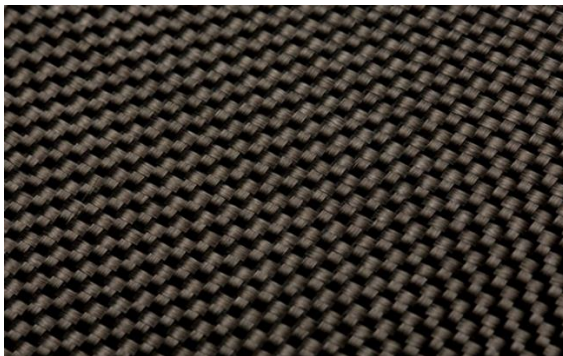


Fig.1.7 Cloth material using carbon fiber ^{c)}

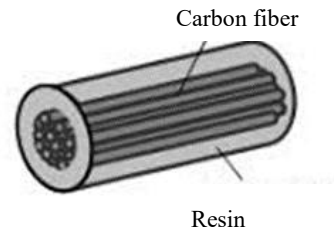


Fig.1.6 CFRP with UD material ^{b)}

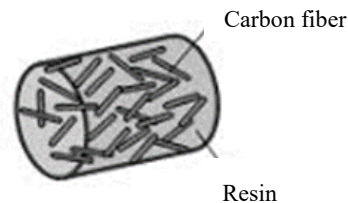


Fig.1.8 Short-Fiber-Reinforced-Plastics ^{b)}

ここで、CFRP の適用例をいくつか挙げる．2019 年の 5 月に、アメリカのゼネラルモーターズがピックアップトラックのピックアップボックスに日本の帝人が開発した「Serrebo」を適用し、世界で初めて量産車に CFRTTP が適用された．上記でも述べたように、CFRTTP は熱可塑性樹脂を用いていることからリサイクルが可能であることや、軽量化に大きな役割を果たすことから、今後量産車への適用が増加していくと考えられる．また、輸送機器以外にも医療機器や風力タービン・スポーツ用品への使用量も増加しており、2021 年には帝人がスポーツ用品へ展開する新たなブランドとして「TENAX BM」や「TENAX PW」を立ち

b) 東レプラスチック HP (<https://www.toray.jp/plastics/torayca/index.html>) (2024.11.07 閲覧)

c) 東レ株式会社 HP (https://www.toray.co.jp/products/carbon/car_0030.html) (2024.11.07 閲覧)

上げた⁵⁾。また、2023年にはZEBRAコンソーシアムがリサイクルに対応した風力タービンブレードの検証試験の完了などを報告した⁴⁾。この様に、現在もCFRTPの利用用途は拡大しており、その使用量は年々増加している。したがって今後もその市場規模は拡大していくことが予想される。

次に、Fig. 1.9にリサイクル前後での各部品の1kgに必要な製造エネルギー原単位を示す。ここから、炭素繊維の製造には大きなエネルギーが必要となることが示されている。軽量化のためにCFRPを使用することは、材料の生成時に多くのエネルギーを使用する結果となるが、リサイクルされた材料では、炭素繊維の製造コストが必要なく、必要なエネルギー量も少ない。また、CFRPの比重は鉄鋼の約1/4である⁴⁾ため、数回のリサイクルによって、鉄鋼の必要な製造エネルギーと同程度まで抑えることが可能である。よって、リサイクル方法なども考慮することが省エネルギー化の観点においては重要であるといえる。

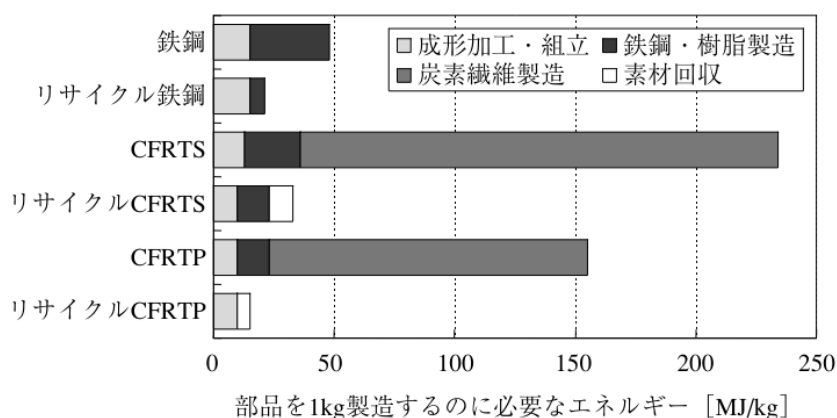


Fig. 1.9 Manufacturing energy intensity for each material⁴⁾

Fig. 1.10は複合材料の成形法と力学的特性・成形性などをまとめたものである。複合材料には様々な成形法がある。FW(Filament Winding)法とは繊維の束を樹脂に含浸させた後に、マンドレルに巻き付けて成形する方法であり、パイプ状製品の成形に適している。オートクレーブ成形とは、繊維に樹脂を含浸させシート状に作成されたプリプレグを圧力容器によって加熱などを行い成形する方法である。成形時間は少し長くなるものの、設計の自由度は高い点が特徴である。RTM(Resin Transfer Molding)法とは、繊維の基材を金型内に設置し、樹脂を注入し成形する方法である。金型を用いて成形するため、品質を比較的安定させることができ、量産に適している。プレス成形は、プリプレグや基材をプレス機によって加圧し成形する方法であり、オートクレーブ成形と比較し、成形サイクルを短縮することが可能であるが、成形品の形状が制約となり、成形可能な形状に制限がある。以上の成形法が主に熱硬化性樹脂を使用した成形法である。一方で、熱可塑性樹脂を対象とした成形法に射出成形がある。射出成形とは、短い繊維と熱可塑性樹脂を混合し金型内に射出し成形する方法であ

d) 栗本鐵工所 HP(<https://www.kurimoto.co.jp/product/item/j10/frpmscreen..php>) (2024.11.22 閲覧)

る。繊維長が短いことから、ほかの成形法と比べ強度などは劣るが、成形性がよく大量生産に適した成形法である。また、母材に熱可塑性樹脂を使用するため、リサイクル性の高い成形方向であるといえる。

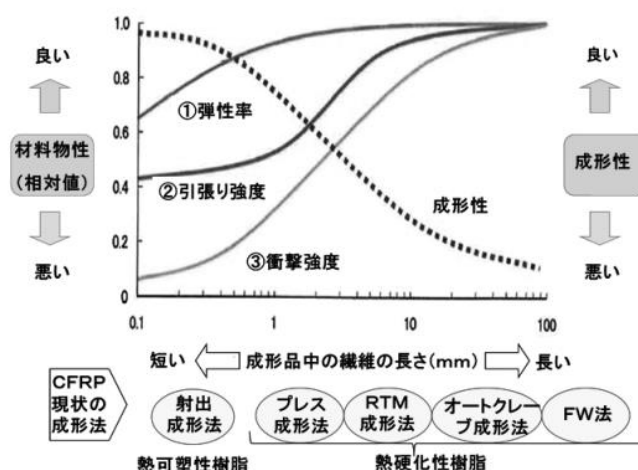


Fig.1.10 Relationship between productivity and mechanical properties of composite materials by molding method ⁶⁾

このように繊維強化複合材料には多くの成形法があるが、今後より適用分野の拡大や使用量の増加が予想されるため、リサイクル性があり、成形性の良いCFRTPを対象とした射出成形の力学的特性の向上が求められる。

1.2 短繊維強化複合材料の成形方法と実験における課題

エネルギー問題などを踏まえて、射出成形におけるSFRPの品質の向上が必要である。射出成形を示した模式図がFig.1.11である。SFRPの射出成形とは、熔融させ短繊維を混入させた樹脂を用意した金型に注入し樹脂を硬化させてから金型から取り出すことで目的のものを成形する方法である。射出成形は、加工度が高く生産性が良いことが特徴である。一方で、問題点として、成形時にボイド(空隙)の発生や、繊維配向・繊維密度の偏りによって、成形したSFRPの力学的特性が低下することが挙げられる。この力学的特性の低下を抑制するためには、金型形状や物性値などの種々のパラメータの影響の評価による射出成形条件の最適化が必要である。

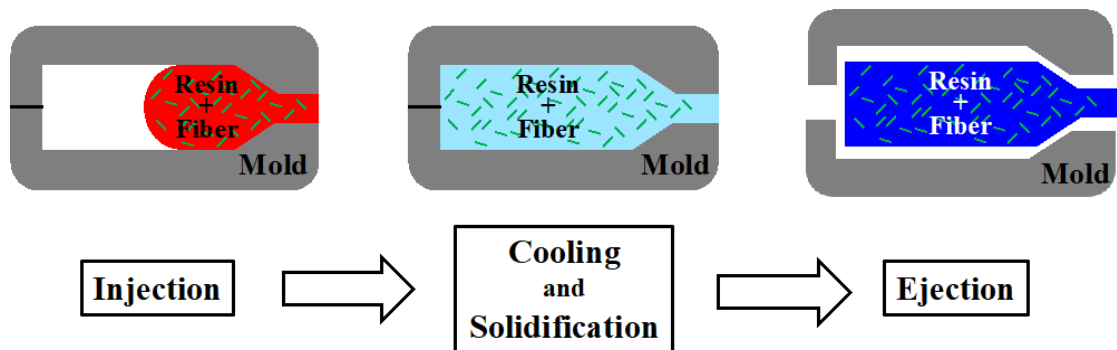


Fig.1.11 The process of injection molding

そのため、これまで射出成形を対象とした実験の報告は多く行われている。高次ら⁷⁾は、樹脂の射出量の安定化手法に関して検討しており、スクリュウの回転および前進によって、樹脂射出量の安定性の向上が確認されている。Jiら⁸⁾は、超音波フェーズドアレイを用いて、射出成形中のフローフロントを可視化し、流速を計測するシステムを提案している。また、このシステムによって、射出速度とフローフロントの流動速度に高い線形相関が確認されている。Krantzら⁹⁾は、圧力制御の射出成形を使用しリサイクルされた高密度ポリエチレンの成形に関して、射出速度や充填圧力を変化させ、機械的特性などを評価している。Panら¹⁰⁾は、射出成形の新たな加熱方法である遠赤外線加熱の制御精度と加熱効率を向上させるための制御手法を提案しており、射出成形の生産効率の向上が期待されている。Muazら¹¹⁾は、充填圧力などの成形パラメータと重量などの完成品の品質特性のリンクを確立した新たな品質特性予測のモデルを提案している。Jakobら¹²⁾は、金型内に射出されたプラスチックの重量に着目し、充填時と保圧時の最適な制御システムを提案している。これらは樹脂充填に着目した研究であり、繊維などを混合することは考慮されていない。

樹脂と繊維を同時に扱っている研究も多く行われている。Maら¹³⁾は、可視化解析によりフルフライトスクリュウの圧縮比がガラス繊維強化樹脂の可塑化過程に及ぼす影響を明らかにした。鈴木ら¹⁴⁾は、X線CT画像から繊維配向および繊維長の抽出を行うアルゴリズムを開発し、繊維長分布の実測データと比較し精度検証を行っている。小倉ら^{15),16)}は、T字や十字形状の金型を作成し、可視化実験を行うことで、フローフロント合流部における速度分布の定量評価や、rib部において発生している5層の繊維配向分布の配向メカニズムの検討を行っている (Fig. 1.12)。小澤ら¹⁷⁾は、繊維配向角を調査し、配向角分布を統一した試験片を用いて、衝突引張試験により機械的特性などを評価している。また、破面観察や繊維長調査によって、破壊メカニズムについて調査している。さらに、強度予測式を用いて強化繊維の繊維径が衝撃特性に与える影響について考察している。瀬戸ら¹⁸⁾は、金型内の樹脂流動に関する可視化観察とX線CTによる成形品の3次元繊維配向の定量評価手法の提案、さらに射出発泡成形品の表面不良現象の発生メカニズムの解明を行っている。加藤ら¹⁹⁾は、板厚を30mmまで厚くした射出成形の可視化実験を行い、ゲート位置や金型温度による重

力の影響を評価した。その中で、ある一定以上の板厚になると樹脂充填時の挙動が変化し、複雑な充填形態をもたらすことが確認された。田中ら²⁰⁾は、射出成形とプレス成形を組み合わせたハイブリッド成形部材の機械的特性の評価や射出体積などの接合部への影響評価を行っている。白木ら²¹⁾は、GF/PAの射出成形品におけるひずみ速度と繊維の細線化による強度変化を評価し、強度予測も実施している。Feldmannら²²⁾は、セルロース繊維を使用した繊維強化複合材料を対象に、熔融温度の変化による機械的特性への影響の評価を行っている。Shokriら²³⁾は、射出成形の充填圧力が繊維配向に与える影響を評価している。Patricら²⁴⁾は、画像処理を用いた射出成形プロセスの制御システムの提案をしている。このシステムは、金型内の充填状況を記録し、ニューラルネットワークを用いて処理した情報を射出ノズルの制御に使用するものであり、繊維強化複合材料の射出成形プロセスの再現性が向上している。Dahrmannら²⁵⁾は、リサイクル時の影響に関して、スクリー速度を変化させ、機械的特性や繊維長分布の調査などによって評価し、リサイクルのための処理サイクルの影響が材料の劣化などによる特性変化の重要な因子であると示している。Chiouら²⁶⁾は、繊維の割合を0~50wt%間で変化させSFRPを作成し、その機械的特性や材料特性などを評価している。この中で、純粋ポリマーよりも耐熱性などが向上したことなども示されており、複合材料の潜在的な用途（家庭用電化製品など）に関しても言及している。

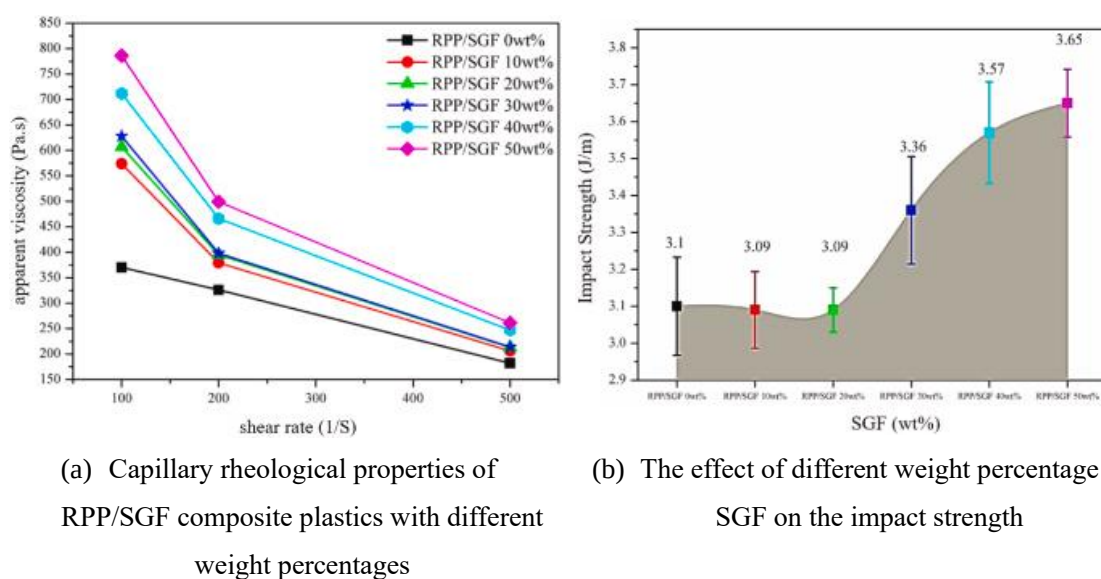


Fig. 1.12 The effect of different weight percentages on capillary rheological properties and impact strength²⁶⁾

このように、これまで多くの実験をもとにした研究によって、様々な成形パラメータの評価や射出成形プロセスの精度向上が国内外問わず行われており、多くの成形パラメータ(射出速度、金型形状、充填圧力など)が存在していることが示されている。一方で、これらの必要な設計パラメータが膨大であるため、実験で全てを評価し最適な成形条件を決定する

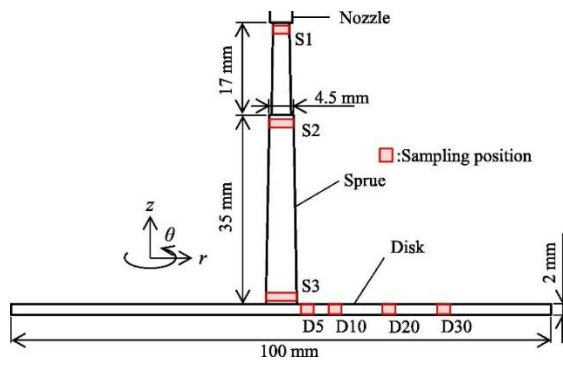
ことは、経済的にも時間的にも非効率であるといえる。また、流動中の金型内の状況を実験で観察することには制限があり、使用する樹脂や金型形状などの変更に制限が発生する。例えば、繊維の含有量である。低含有率であれば金型内の状況の観察が可能であるが、高含有率では射出成形中の観察が測定機器の特性上困難である。また、成形条件の最適化などに関する研究も行われているが、これらは樹脂のみを対象としたものであり、そのモデルに繊維が考慮されているものも少なく、実験での繊維も同時に考慮した成形条件の最適化に関しては現状困難であるといえる。上記のように、実験での評価には限界が存在していることから、短繊維強化複合材料の射出成形に関しては、数値解析による評価が有効であるといえる。

1.3 射出成形を対象とした数値解析の先行研究

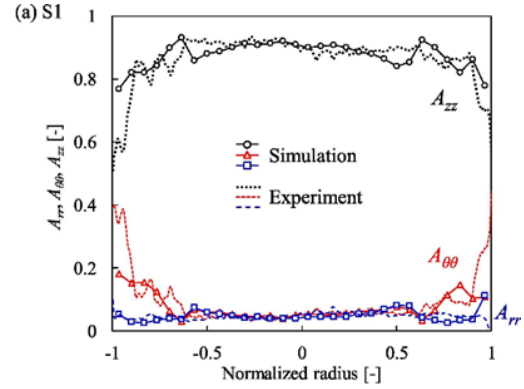
前節で述べたように、射出成形に対しての数値解析による再現・評価は重要であり、射出成形を対象とした数値解析の研究も多く行われている。杉田ら²⁷⁾は LCP 薄肉射出成形における固化挙動に対して、実験による計測と流動解析を組み合わせた実験解析を行い、実測と解析での固化挙動を比較し、金型内の樹脂の流動固化挙動の可視化方法を検討している。小郷ら²⁸⁾は、実験によりガラス繊維の含有量・配向状況による機械的特性への影響評価を行った。また、これを数値解析で再現し、解析上でも繊維含有率による繊維配向の違いに伴う非線形性を含む反力挙動の予測を可能としている。河村ら²⁹⁾は、板厚方向の繊維配向の不均一性を考慮した成形解析と構造解析を連成した解析手法を検討しており、連成解析手法により従来まで発生していた 20~30%の解析誤差が 5%以下となり、解析精度の向上を確認している。笹山ら^{30),31)}は、1 本の繊維を球の連結体としてモデル化したシミュレーションによって、成形プロセス中の流れ場の時系列データを取得し、そのデータを用いて繊維流動を解析している。その中で、繊維配向テンソルを用いて実験結果と比較し、定性的な一致を確認している (Fig. 1.13)。また、単純せん断流れ場における繊維破断挙動の解析を実施し、せん断速度や繊維含有率の変化による初期の繊維破断率の変化を確認しており、既存の基礎研究との定性的な一致を確認している。Liu ら³²⁾は、射出成形シミュレーションで使用する熱伝達係数である HTC (Heat Transfer Coefficient) に着目し、実験及び解析から成形条件が HTC に及ぼす影響を調査している。Tseng ら³³⁾は、iARD-RPR モデルと Moldex3D を用いて、繊維長と繊維の種類による繊維配向への影響評価を実施している。Stampone ら³⁴⁾は、マイクロ射出成形に対して、FEM 解析によって樹脂インサート材の熱挙動を銅インサート材との結果と比較し評価している。Wittmann ら³⁵⁾は、4 次の粘度テンソルを導入し、樹脂の粘度のモデル化を行った。この粘度モデルに用いて OpenFOAM によって金型全体の樹脂流動解析を実施し、繊維長分布などの結果を実験と比較している。Mazahir ら³⁶⁾は、射出口を中心部に設定した円盤の射出成形において、複数の繊維配向モデルを使用し配向予測を行っており、実験との定性的な一致を確認している。Lizama-Camara ら³⁷⁾は、Fig. 1.14 に示すように、射出成形で製造された 50wt%の SFRP を用いて疲労寿命への繊維配向分布の影響を評価するために、疲労寿命予測の多段階のモデリング手法を提案しており、実験と予測

の良好な一致を確認している。

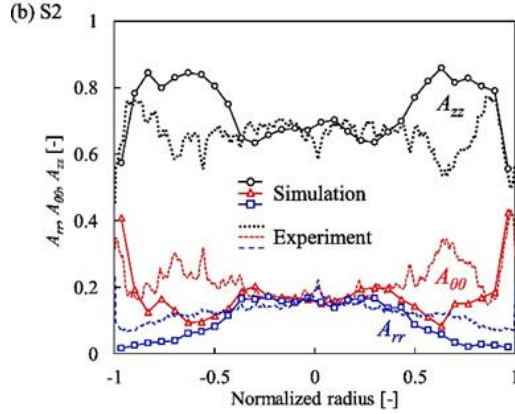
このように射出成形の数値解析に関しても、多くの研究が国内外問わず行われている。しかし、ここで示した研究の多くは FEM 解析で実施されているため、樹脂流動解析が主軸となっており、繊維挙動に着目した研究は少ない。また、Lizama-Camara らのように繊維配向を評価している研究もあるが、これらの多くは FEM 解析の樹脂流動の結果を用いて、繊維配向の予測式を使用して評価している。よって、繊維の挙動を樹脂と同時に数値解析している研究も少ない。



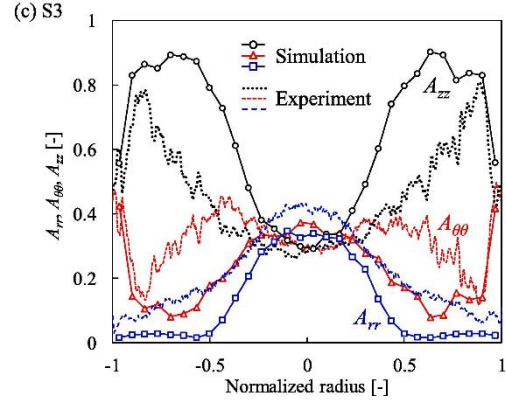
(a) Numerical analysis model



(b) profile of the orientation tensor components along the radius at S1

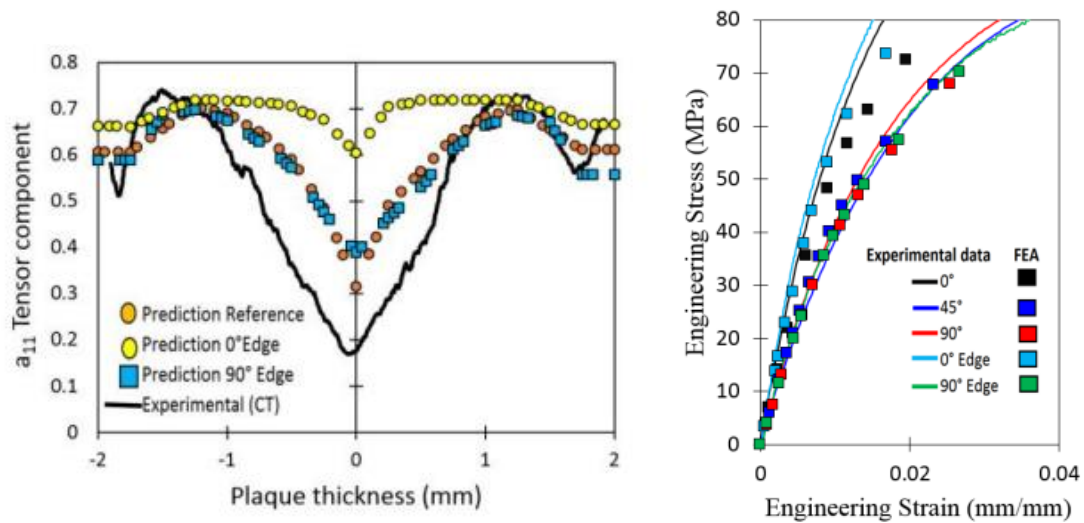


(c) profile of the orientation tensor components along the radius at S2



(d) profile of the orientation tensor components along the radius at S3

Fig. 1.13 Numerical analysis model and profile of the orientation tensor components along the radius at (a) S1, (b) S2, and (c) S3 in the sprue obtained from the experiment and the simulation.³⁰⁾



(a) Orientation tensor comparison between Moldflow prediction and computed tomography (CT) measurements. (b) Stress-Strain curves comparison between experimentation and prediction (FEA). Material model calibrated using Reference 0°, 90° and 45° specimens.

Fig. 1.14 Orientation tensor comparison and Stress-Strain curves comparison³⁷⁾

1.4 粒子法および粒子法を用いた先行研究

前節で示したように、FEM 解析などでの射出成形の評価は不十分であるといえる。そこで、本研究では新たな解析手法として粒子法^{38) 39)}に着目する。粒子法とは、計算対象を粒子で表現し、その粒子の挙動を計算することで流体の挙動を評価する手法であり、FEM 解析のような格子法では必要である計算空間のメッシュを切る作業が必要ではない。この粒子法が、射出成形の解析に適している理由として、解析対象の大変形が発生する現象に他の解析手法と比較して容易に適用可能であることや、計算対象を粒子の集まりとして表現しているため各粒子の挙動を追跡することで物体内部の流動過程を可視化しやすいことが挙げられる。以上のことから、射出成形を模擬するシミュレーションでは、計算格子を用いず樹脂と繊維を粒子の集合体とみなす粒子法が適していると考ええる。

解析手法の詳細は Appendix に記述し、以下に概要を示す。粒子法の中でも非圧縮性流れを対象とする MPS 法 (Moving Particle Semi-Implicit method) では、式(1.1)の連続の式と、式(1.2)のナビエーストークスの方程式を支配方程式として計算する。ここで、 ρ は密度、 t は時間、 $\mathbf{u}$ は速度、 P は圧力、 ν は動粘性係数、 $\mathbf{g}$ は重力加速度を表している。式(1.2)の右辺第 1 項は圧力勾配項、第 2 項は粘性項、第 3 項は重力項である。

また、粒子法では粒子間相互作用モデルを利用して支配方程式を離散化して計算を行う。これは、影響半径を設定しその内側の粒子同士の相互作用を考慮するというものである。粒

子間相互作用モデルの考慮として式(1.3)に示すように重み関数 $\omega(r)$ を定義する．ここで， r_e は影響半径， r は粒子間距離を表している．

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2 u + g \quad (1.2)$$

$$\omega(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (r < r_e) \\ 0 & (r \geq r_e) \end{cases} \quad (1.3)$$

MPS 法などの粒子法はほかの解析手法と比べ比較的新しいシミュレーション方法であるが，粒子法を用いた射出成形に関する研究や取り組みは多く進められている．矢代ら^{40),41)}は，MPS 法を用いて樹脂と繊維を別々にモデル化することで2次元での射出成形における繊維配向を評価し，射出成形への粒子法の解析手法の有用性を示している (Fig. 1.15)．また，岡部ら⁴²⁾は粒子ごとに物質を変えられるという利点を生かし，MPS 法を用いて RTM 中のボイド発生シミュレーションを行っている．松谷ら⁴³⁾は，スタンパブルシートのプレス成形を対象に，繊維流動に関して MPS 法に基づく解析結果と実験結果との比較を行っている．関谷ら⁴⁴⁾は，微視的な流れ場の解析が MPS 法では可能であることに着目し，粒子法を用いた繊維束への樹脂含浸プロセスの解析を実施している．また，志野ら⁴⁵⁾は，LSMPS 法 (Least Squares MPS) を用いた異方性高粘度解析手法を提案し，プリプレグを模擬したモデルにおいて，粘性比による圧力分布への影響などから，提案手法の妥当性を検証している．Xu ら⁴⁶⁾は，圧縮性流体を扱う SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) を用いて射出成形における樹脂流動解析を実施し，SPH 法の射出成形プロセスへの解析手法の適用の有効性を示している．He ら⁴⁷⁾は，SPH 法を用いた3次元射出成形流れ場の解析によって，繊維配向挙動の評価を実施し，実現象と同様な繊維配向状態を確認している (Fig. 1.16)．Wu ら⁴⁸⁾は，SPH 法と DEM (Distinct Element Method) を組み合わせた解析アプローチを提案しており，繊維を変形と破壊の両方を考慮する非剛体として扱った解析によって，繊維と樹脂の流動挙動の評価を行っている．

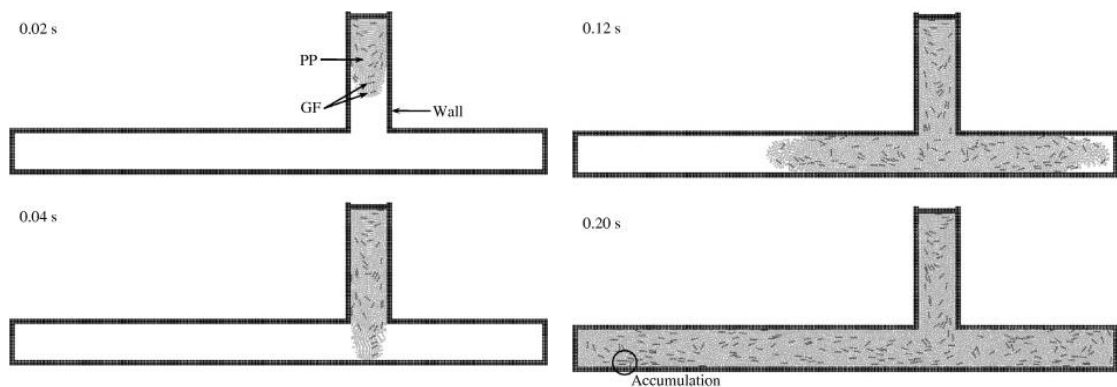


Fig. 1.15 Snapshots of the mold-filling⁴⁰⁾

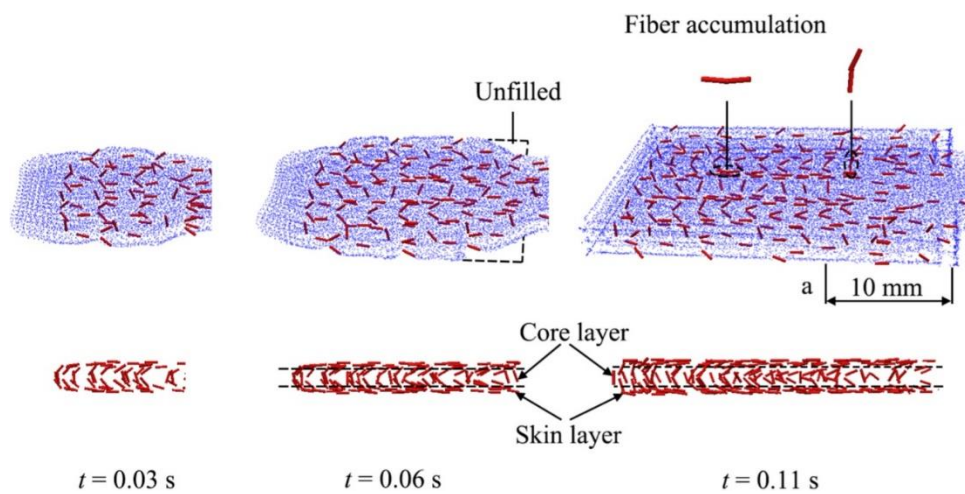


Fig. 1.16 Filling patterns and fiber distribution of the injection molding of SFRP melt at different times⁴⁷⁾

SPH 法と MPS 法に関しては、計算対象によって適切な方法を選択することが求められており、他分野においては、MPS 法と SPH 法の比較に関する研究も行われているが、解析対象や解析手法によって、優位性がみられない場合⁴⁹⁾があることや、MPS 法の解析精度が高いこと⁵⁰⁾なども報告されている。一方で、射出成形に関しては、現在 SPH 法を用いた研究が多く行われており、MPS 法を用いた報告は SPH 法に比べ少ない。しかし、射出成形解析では非圧縮性の流体を解析対象とするため、筆者はこの SFRP の射出成形解析に関しては非圧縮性流体を扱う MPS 法による解析が適していると考ええる。

また、MPS 法に関しては、既往研究では着目されている観点がマクロ解析あるいはミクロ解析のいずれかである。ミクロ流動解析において、解析領域全体で繊維流動を予測する場合、粒子間距離を繊維径に合わせて解析する必要があるが、計算コストが膨大となってしまう。また、マクロ解析だけでは、より細かな固化挙動や繊維挙動の評価が困難であり、金型全体を模擬しつつ繊維流動を行っている解析でも、実物と比べ小さいモデルとなっている。さらに、計算コストの低減のため 2 次元での解析が実施されることもあるが、繊維配向は 3 次

元的に配向しているため、3次元での解析が必要である。よって、実際の金型を想定した解析を実施するためには、ミクロとマクロの両方から解析できるマルチスケール解析手法を導入することができれば計算コストの低減が期待される。

このような背景から筆者が所属する研究室では、MPS法を用いたマルチスケール解析手法の研究を進めている。また、本研究室での解析手法では、繊維と樹脂をそれぞれモデル化して繊維と樹脂、樹脂同士および繊維同士の相互作用を自動的に考慮できるため、樹脂流動と繊維流動の解析が可能であることも利点および本研究のオリジナリティーの一つである。その中で、このMPS法を用いた射出成形シミュレーションおよびズーム解析 (Fig. 1.17(a)) を提案しており、局所的な繊維配向の予測が可能となる解析手法の提案を行っている。例として、加藤⁵¹⁾は、Fig. 1.17の(b)に示すように、これまで固定していた局所領域を移動させて計算する局所領域移動解析手法を提案し、フローフロントでの繊維の連続的な挙動の追跡を可能としている。また、局所領域移動解析によって局所領域で見られていた速度低下が解消されている (Fig. 1.18)。さらに射出成形実験での速度分布および固化層成長挙動と比較することで提案手法の妥当性の検証を行っている。具体的には、Fig. 1.19の(a)に示すように射出方向であるy方向速度分布を全体解析と実験と比較し、金型中央部の分布の定性的な一致を確認している。また、Fig. 1.19の(b)に示す固化層成長挙動に関して、射出量が 3cm^3 以降では解析と実験との定性的な一致が確認されている。

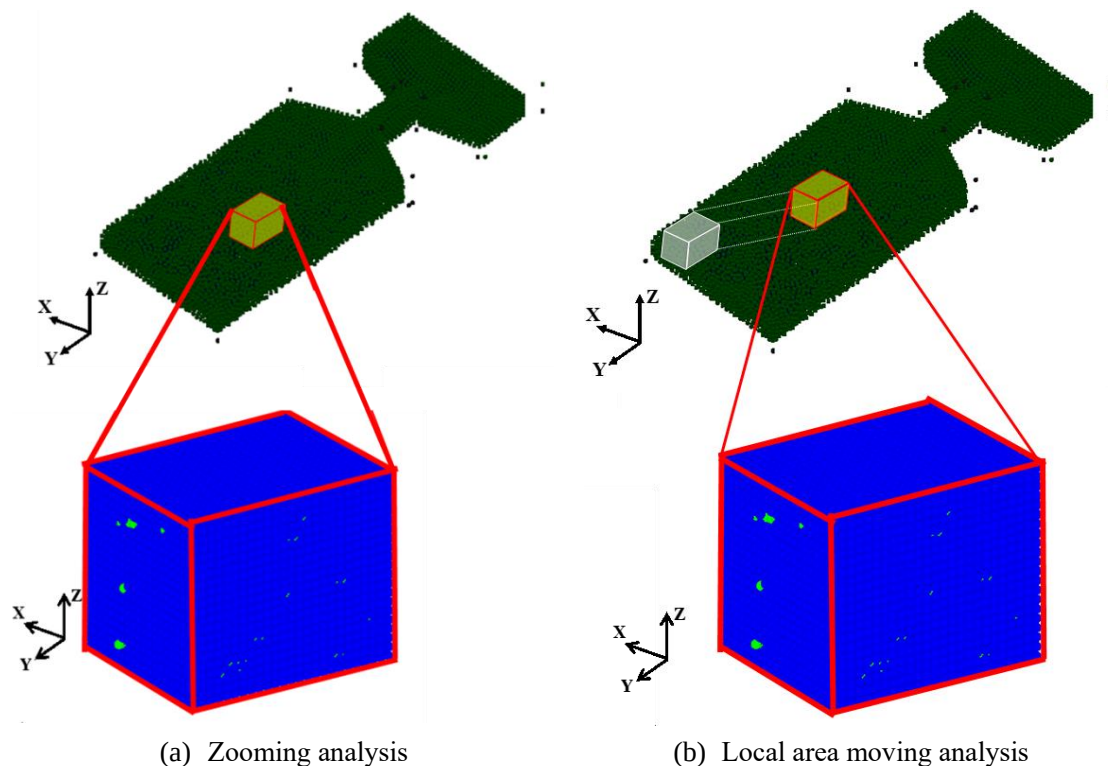


Fig. 1.17 Proposed analysis method⁵¹⁾

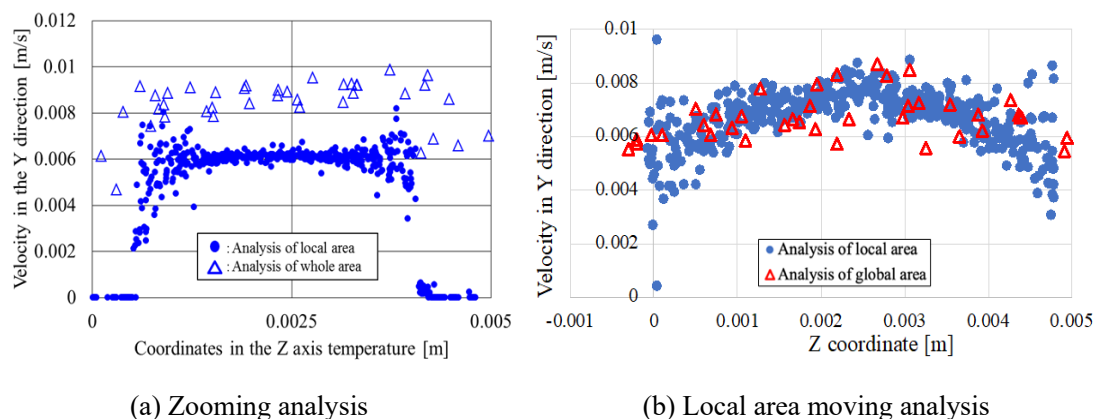


Fig. 1.18 Comparison of Y velocity distribution in global and local analysis ⁵¹⁾

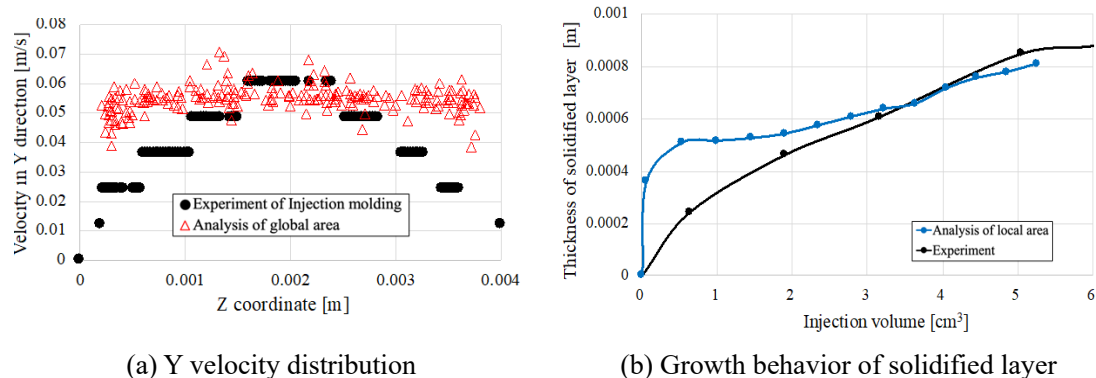


Fig. 1.19 Validation of local flow model ⁵¹⁾

1.5 本研究の目的

以上のように、今後 SFRP の使用量は増加していくと予想される。SFRP の成形方法として射出成形が挙げられる。射出成形において力学的特性の高い品質の良い SFRP を獲得するうえで膨大にある成形パラメータを解析で評価することが必要である。その解析手法として、MPS 法に基づく解析手法を適用することが望ましいが、その手法はまだ確立されていない。そこで本研究では、MPS 法に基づく解析手法を用いて、短繊維強化複合材料の射出成形時のミクロな繊維-樹脂の相互作用を考慮した流動時の繊維挙動の評価を行い、種々のパラメータが樹脂・繊維の流動に及ぼす影響の評価と複雑金型モデルへの適用を目的とする。

本論文の新規性として、以下の点を挙げる

1. 粒子法に基づく解析手法による樹脂物性値による樹脂・繊維流動の影響評価の実施。

これまで示したように、実験や解析などで様々な側面からの評価が行われてきたが、樹脂特性の変化による影響評価はいまだに行われていない。一方で、繊維を混入させることによって空間内の粘度が上昇し、それを考慮する式も提案されている ^{52) 53)}。さらに、流入温度によっても、粘度の値が変化する。そこで、今回樹脂特性を変化させることによって、疑

似的に繊維混入による粘度上昇や温度による粘度変化を考慮した解析を実施し、粘度変化による樹脂・繊維流動への影響評価を実施する点に新規性を有する。

2. 射出成形における 2 つの特徴的な流れ場である伸長流動下とせん断流動下での繊維流動評価の実施.

射出成形においては、2 つの流れが発生する。伸長流動とせん断流動である。伸長流動は、流路が広がる射出口付近で支配的な流れであり、せん断流動は、金型厚さ方向に発生する流れであり、射出口から離れるほどその影響度は大きくなる。しかし、これまで繊維流動評価に関しては、樹脂流動の結果を用いた繊維配向予測式からの評価が多く、それぞれの流動下における繊維挙動解析や挙動追跡をした研究は少ない。そこで、今回、伸長流動下での流動評価に関しては、射出口モデルを作成し繊維流動評価などを実施する。また、せん断流動下での解析においては、通常の局所解析では、十分な解像度と流動距離の確保には解析コストが膨大となり、解析が困難である。そこで、今回、局所領域連結解析を新たに提案し、解析コストを抑制しつつ、流動距離と解像度を十分に確保した解析によって、せん断流動下での繊維の連続的な追跡を含む繊維流動評価を実施する。以上のように、粒子法の特徴の一つである繊維の追跡が可能である点を活かし、それぞれの流動下での繊維挙動を追跡し、繊維流動および繊維配向評価を実施する点に新規性を有する。

3. T 字金型モデルを用いた解析による、複雑形状下での樹脂・繊維流動評価の実施

射出成形実験においてフローフロント合流部では、繊維配向分布が平板形状では見られなかった特徴的な分布を示すことが報告されているが、解析での評価は行われていない。しかし、フローフロントの合流が発生する際には、複雑な流動形態をとっていると考えられ、その中での繊維配向を評価するためには、樹脂流動結果を用いた繊維配向予測式を用いた評価よりも、繊維流動解析および繊維挙動の追跡が必要であると考えられる。さらに、T 字や十字で存在している交差部での角では計算上の非連続点が存在しており、計算が不安定になる。フローフロントの合流による複雑な流動形態に加え、計算上の不安定な箇所が存在しているため、本解析モデルでの評価が有効であれば、他の金型形状への適用も期待できる。以上のことから、フローフロント合流部を有する T 字や十字の複雑形状の解析モデルを作成し、粒子法に基づく解析によって、繊維挙動の追跡から配向メカニズムを検討する点に新規性を有する。

1.6 本論文の構成

本論文の構成を Fig. 1.20 に示す。まず、1 章にて短繊維強化複合材料およびその成形法の 1 つである射出成形に関する現状と、射出成形に関する既往研究に関して、射出成形実験と有限要素解析・粒子法の 3 つの視点から述べ、粒子法での解析の重要性を述べた。2 章では、繊維の混入や温度変化による粘度変化を樹脂特性の変化によって表現し、金型全体の樹脂

流動および局所解析による繊維流動への影響評価を実施する。また、解析手法における改善点がみられたため、解析プログラムの修正を実施し、それによる解析結果への影響の比較を実施した結果を述べる。3章では、射出口付近に着目し、伸長流動下における樹脂・繊維流動評価を金型形状・射出速度の2つを変更させることによって、それらによる解析結果への影響に関して述べる。4章では、解析コストを抑えつつ、流動距離や解像度を確保するために新たに局所領域連結解析を提案する。また、せん断流動下における繊維流動への影響評価に関して、流入速度および金型厚さを変更した解析の実施によって得られた結果を用いて述べる。5章では、T字および十字の金型モデルを作成し、フローフロントの合流・分岐が発生する状況での樹脂・繊維配向評価を実施する。ここで得られた結果を実験結果と比較することによって、本解析の妥当性を示し、合流後に5層に分布する繊維配向のメカニズムに関して検討する。最後に、6章にて結章として今回得られた成果と今後の展望について述べる。

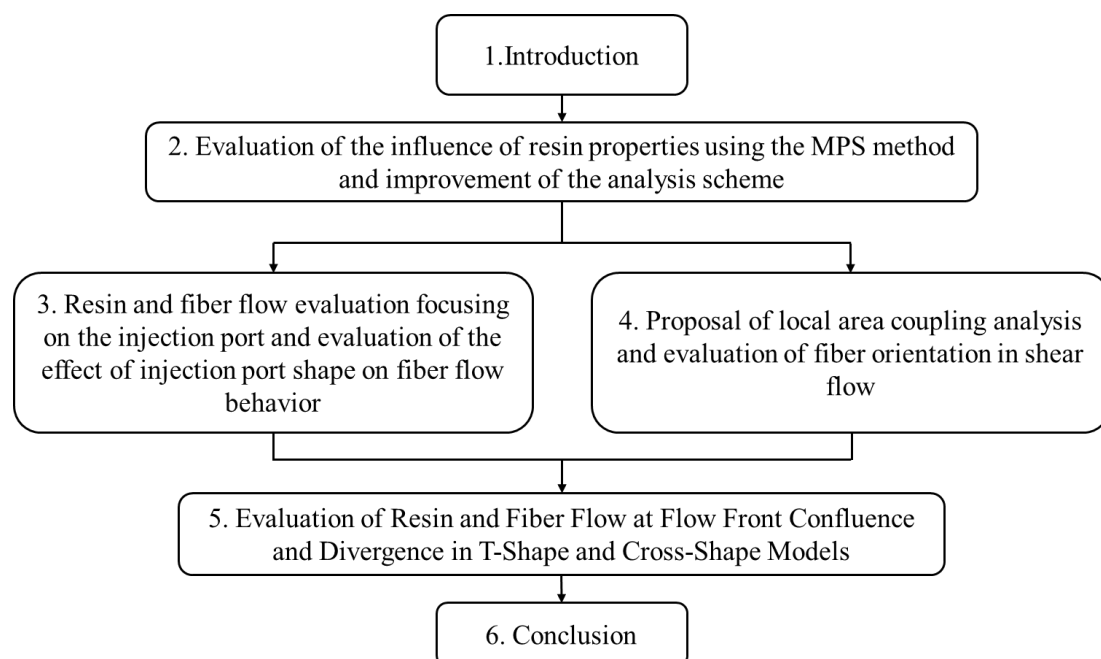


Fig. 1.20 Flow chart of this research

2 章 MPS 法を用いた解析手法による樹脂特性による影響評価

および解析スキームの改良

2.1 緒言

樹脂特性の変化による影響評価はこれまで行われていない。一方で、繊維混入によって空間内の粘度は上昇するが、金型全体を模擬する全体解析において、繊維を考慮することは解析コストの観点から困難である。また、繊維混入による粘度上昇だけでなく、流入温度によっても樹脂特性は変化する。そこで、今回、これらの影響を疑似的に再現するために粘度を変化させた感度解析を実施する。まず、2.2 節にて筆者が所属する研究室で作成された解析スキームを用いて、射出成形解析を行い樹脂特性が樹脂流動に与える影響の評価を試み、2.3 節にて、局所解析を行い、樹脂特性の変化による繊維流動評価を実施する。また、これらの解析を行うことで本解析スキームの改良点が見られるため、2.4 節にて解析スキームの改良を行い、解析の高精度化を試みる。

2.2 全体解析による樹脂特性が樹脂流動へ与える影響評価

2.2.1 解析概要および解析条件

先行研究⁵¹⁾での全体解析では樹脂のみの流動解析による評価をしていたが、実際の解析対象は短繊維強化複合材料であり繊維を考慮する必要がある。全体解析とは、金型全体を模擬した解析モデルを使用して解析を実施するものであるが、解析コストなどを考慮し流体を表現する粒子の径を mm オーダーに設定していることに対して、実際に用いられている繊維径は μm から nm オーダーであり、金型全体を模擬している全体解析では繊維を表現することは困難である。また、樹脂中に繊維が混入することによって粘度が高くなることが知られており、その粘度上昇を考慮した粘度算出式も多く提案されている^{52) 53)}。さらに、流入させる樹脂温度によっても空間内の粘度が変化する。そこで、今回全体解析にてゼロせん断粘度を変化させた感度解析によって、繊維の混入や温度変化による粘度変化の樹脂流動への影響評価を実施する。樹脂のゼロせん断粘度は 2000, 2800, 5600, 10000, 15000, 20000 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) の 6 種類とした。なお、本研究では appendix に示すように粘度の値はせん断速度と温度依存性を考慮した値を付与している。

Fig. 2.1 に解析モデルを示す。図中下部から粒子を上部方向に射出することで射出成形を表現している。また、Table 2.1 に解析に使用したパラメータを示す。解析の解像度を表す粒子径は 0.5mm とし金型厚さ方向には 8 粒子存在しているモデルとなっている。本章での樹脂粒子の物性値に関してはポリプロピレンを想定している。各面における境界条件に関しては基本的には金型面との速度境界条件は固着条件を付与している。一方で、射出口である狭小部での速度境界条件は逆流を防ぐために Free-slip 条件を付与しており、金型面との温

度もやり取りを行っていない。樹脂粒子の固化に関しては、樹脂粒子の温度が固化温度に到達した場合に粒子の速度をすべて 0 として解析上では固化を表現している。また、評価点として金型中央部を流れる部分を **center line**（図中オレンジ線）、金型側面部を流れる部分を **side line**（図中青線）と設定している。

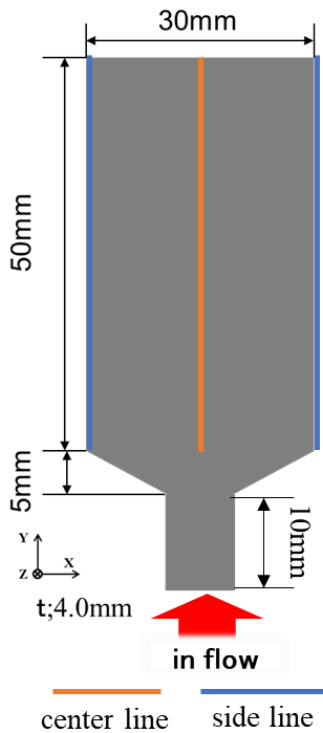


Table 2.1 Numerical parameters

Particle size [mm]	0.5
Injection speed [m/s]	0.5
Thermal conductivity [W/m·K]	0.12
Mold temperature [°C]	40
Resin temperature [°C]	220
Time step [s]	1.0×10^{-4}
Resin specific heat [J/(kg·K)]	1920
Resin density [kg/m ³]	900

Fig.2.1 Numerical analysis model.

2.2.2 解析結果

Fig. 2.2 および Fig. 2.3 に樹脂の粘性の違いが移動速度に与える影響を示す。Fig. 2.2 は 0.25 秒における流樹脂入位置から樹脂の金型内到達距離を示している。また、Fig. 2.3 は 0.5 秒における同様の距離を示している。center line, side line は Fig. 2.1 に示す位置における到達距離を表している。Fig. 2.4 に低粘度(2800Pa・s)と高粘度(20000Pa・s)での各時間ステップにおける温度分布を示す。

Fig. 2.2 および Fig. 2.3 より、低粘度では center line, side line とともに高粘度と比べてより進展していることがわかる。一方でゼロせん断粘度が上昇するにつれ、粘度間の到達地点の差は center line と side line とともに小さくなっており、15000Pa・s 以降の粘度では大きな差がみられない。

Fig. 2.4 より、低粘度と高粘度においてフローフロントの形状だけでなく温度分布にも差がみられ、低粘度では流動先端付近に温度の高い粒子がより多く存在している。これは、粘度が小さくなると金型面付近の樹脂に引っ張られづらくなり流動先端部が金型に接せず中央部を流れやすくなった結果、低粘度時にファウンテンフローの特徴がより顕著に表れた

と考える．一方で，高粘度時にはファウンテンフローの特徴が顕著でないが金型面付近における温度に着目すると，高粘度時のほうが固化温度に達する青色の粒子の数が多いことがわかる．これは，低粘度時に見られた現象とは違い，高粘度時には金型面付近の樹脂粒子の引っ張られやすくなり金型面により多くの粒子が引っ張られるため，金型面と温度のやり取りをする粒子が多くなり温度のやり取りをする時間も増加するため金型面での固化温度に達する粒子数の増加につながっていると考ええる．

また，Fig. 2.2 および Fig. 2.3，center line と side line の差がそれぞれ約 6mm と，約 2～3mm でありその差が小さくなっており，さらにその差が粘度によって変化しその変化は Fig. 2.4 からの形状変化からもみられることから，流入初期は弧を描いていたフローフロント形状が時間経過とともに傾斜が緩やかになっていき最終的には直線状になり，その弧の形状や時間変化は樹脂の粘性によって変化することが示された．

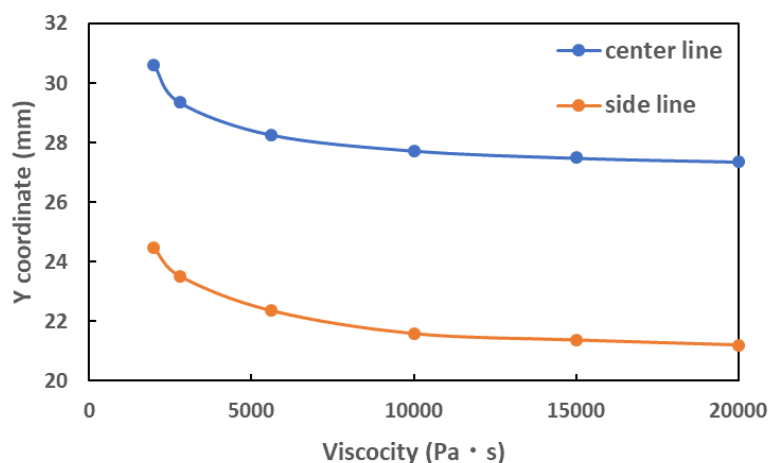


Fig. 2.2 Arrival Y coordinates at 0.25 s.

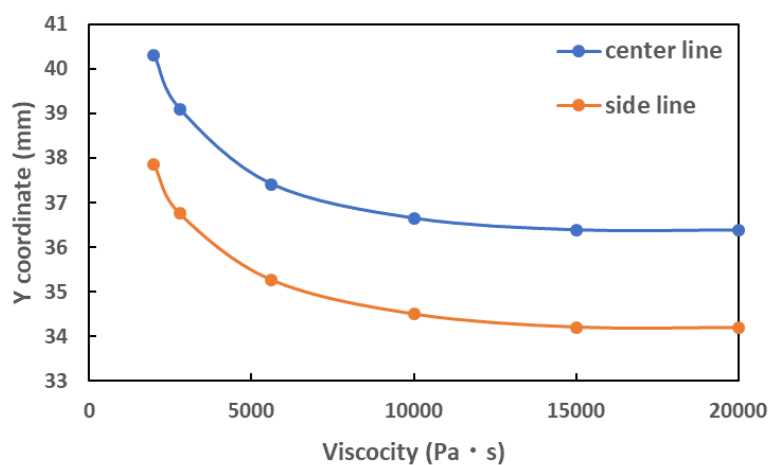


Fig. 2.3 Arrival Y coordinates at 0.5s.

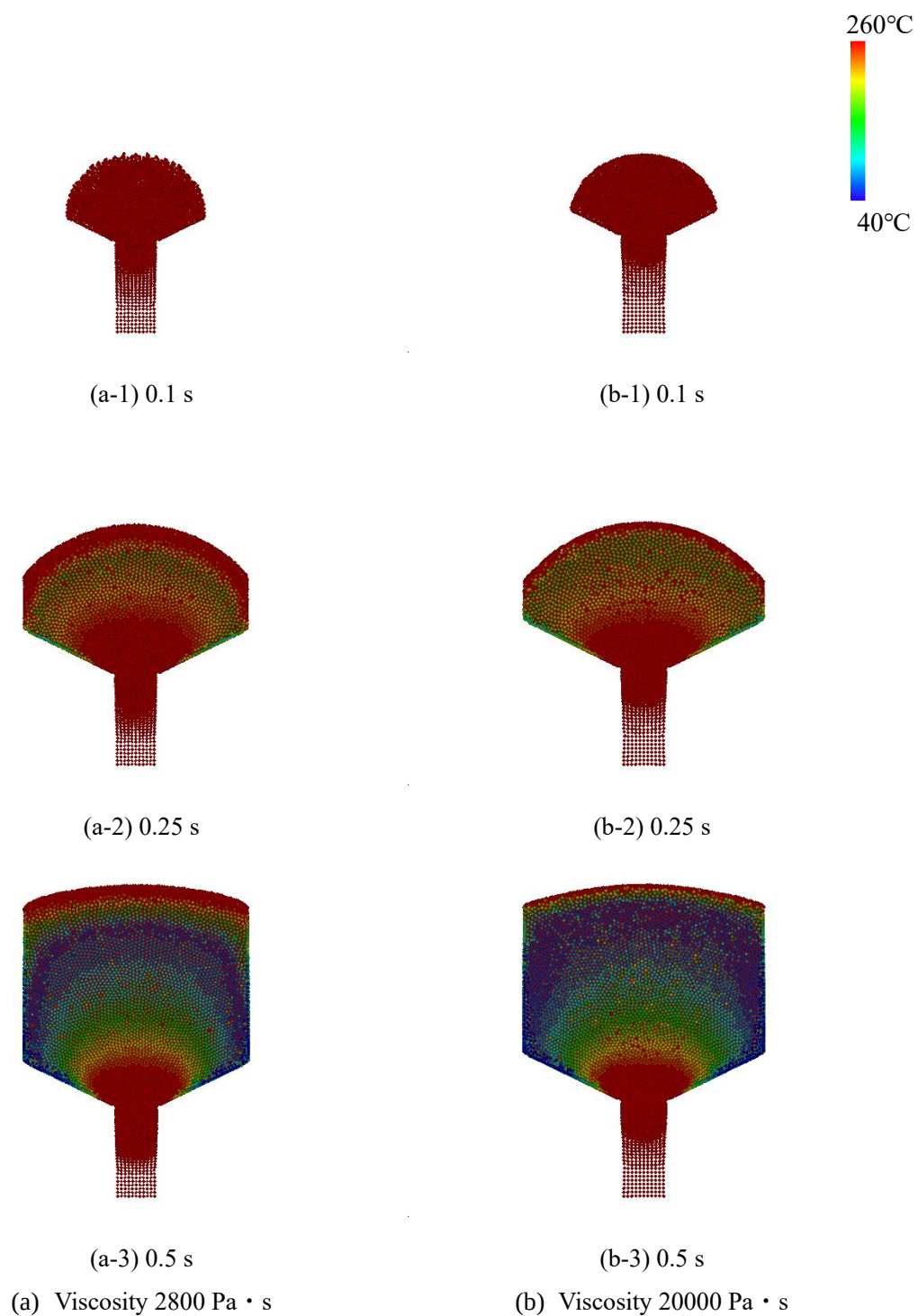


Fig. 2.4 The temperature distribution of particle resin.

2.3 局所領域における樹脂特性および繊維アスペクト比による繊維流動への影響評価

2.3.1 解析概要および解析条件

SFRP の射出成形において、繊維の分散状況が成形品の強度に影響を与えるため、樹脂流動中の繊維流動評価が必要になる。また、射出成形において樹脂および繊維流動に影響する因子が多く存在する。どの因子がどの程度流動に影響を及ぼすのかを検討するために、空間内の温度を一定とし、繊維 1 本のみ配置し局所領域での繊維流動評価および粘度による影響の評価を行った。なお、本研究において繊維は粒子を複数個つなぎ合わせて繊維を模擬しており剛体とし計算している。繊維粒子の計算の流れとしては、まず樹脂粒子と同様に流動計算を行う。それによって、発生する繊維粒子間や重心のずれによって発生するトルクなどから、繊維が剛体状態を保つように繊維粒子の位置を修正することによって繊維粒子の移動を計算している⁴⁾。また、評価軸として繊維配向角度を y-z 面における y 軸とのなす角度と定義する。

解析モデルとしては、Fig. 2.5 に示すように金型の一部を拡大した局所領域を設定し、粒子の挙動が安定している解析空間中央部を繊維流動範囲とした。また、樹脂の流動速度条件として Fig. 2.6 に示すような金型厚さ方向 (z 軸方向) に速度分布 (z = 2.0mm 地点を 0.06 m/s, z=0mm,4.0mm 地点を 0.03 m/s) とする 2 次曲線) を付与した。

繊維の初期配向は z 軸方向とし繊維中心の z 座標を 2.0 mm, 1.5 mm, 1.0 mm の 3 条件とした。以降では各条件(z = 2.0~1.0 mm)を position 1~3 と称する。position 1 では繊維の両端に発生する速度差がなく、position 2,3 になるにつれ繊維の両端に発生する速度差が大きく回転しやすい条件となる。加えて、この局所領域で繊維を連続的に追跡するために繊維流動範囲の端に到達した繊維を空間の反対側へと折り返す操作を行っている。

また、各解析条件は Table 2.2 を使用しており、十分な解像度の確保のため粒子径は 0.125mm としている。樹脂粘度による影響を評価するためにゼロせん断粘度 μ_0 を 1400 Pa · s, 2800 Pa · s, 5600 Pa · s の 3 種類の解析も実施した。ただし、せん断速度による粘度変化は考慮している。また、繊維のアスペクト比による影響を評価するため 2 条件 (アスペクト比 7, 11) を設定した。

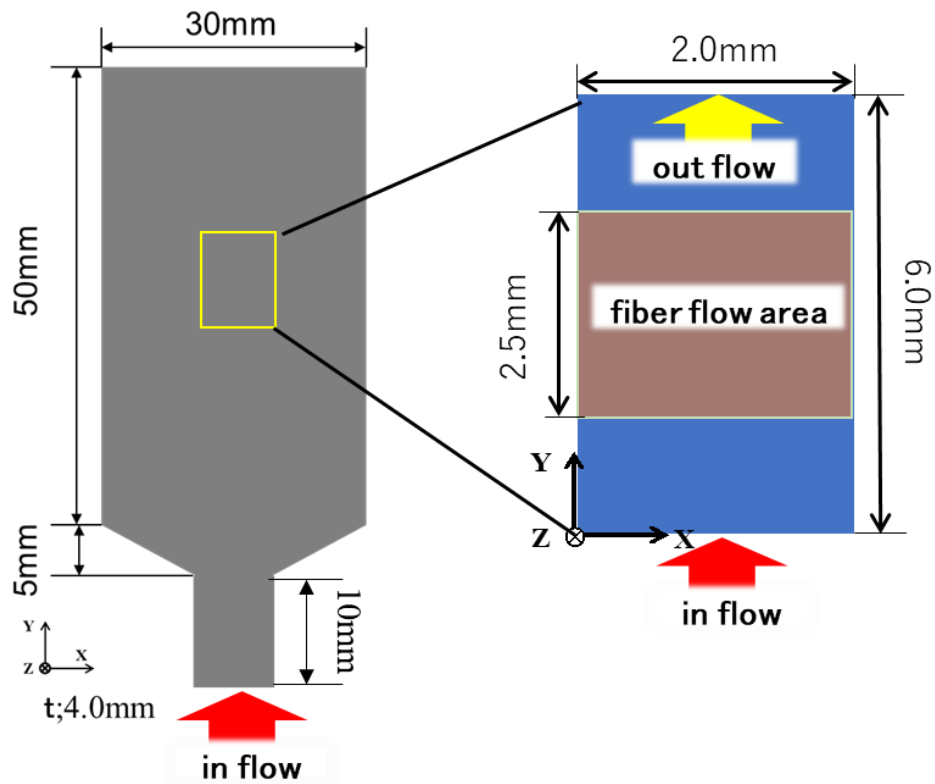


Fig.2.5 Numerical analysis model.

Table 2.2 Numerical parameters

Particle size[mm]	0.125		
Resin temperature [°C]	250		
Mold temperature [°C]	250		
Max time step [s]	1.0×10^{-4}		
Resin density [kg/m ³]	900		
Fiber density [kg/m ³]	1600		
Resin zero shear viscosity [Pa · s]	1400	2800	5600
Fiber viscosity [Pa · s]	2800×10^4		
Fiber aspect ratio	7	11	

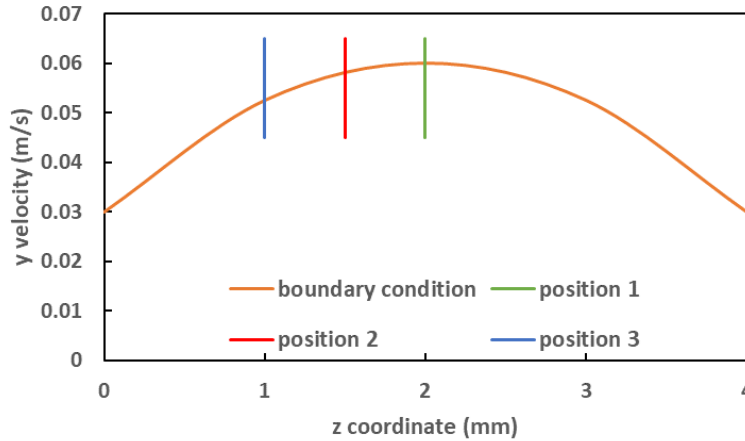


Fig. 2.6 Velocity boundary condition and fiber position.

2.3.2 解析結果

Fig. 2.7 に局所解析における樹脂粒子の速度分布を示す．Fig. 2.7 から，空間に速度条件を与えているため概ね狙い通りの速度を空間内に与えることができている．

Fig. 2.8 にアスペクト比 7 での各解析ステップにおける繊維の状態を重ね合わせた図を示す．これより，position 2 および position 3 は繊維配向角が初期値の 90° から流動方向の 0° に向けて回転しつつ剛体状態を保ちながら流動していることから，粒子法において繊維流動挙動をよく模擬できているといえる．

次に，Fig. 2.9 ,2.10 に各アスペクト比の繊維配向の時間推移を，Fig. 2.11 ,2.12 に各アスペクト比の繊維方向の繊維中心位置の時間推移をそれぞれ示す．

Fig. 2.9 よりアスペクト比 7 において繊維の両端に発生する速度がほとんどない position 1 では，1.0 秒までは繊維は回転せずに流動しているが，その後回転が発生している．他の条件では繊維が回転しながら流動する挙動が確認できる．また，Fig. 2.10 よりアスペクト比 11 においては position 1 において回転は発生していない．また，Fig. 2.11 から position 1 における繊維中心位置はアスペクト比が 7 では，0.75 秒から繊維方向である z 方向に約 1 粒子分移動しているが，Fig. 2.12 からアスペクト比 11 ではほとんど移動していない．これは，繊維を構成する粒子数が少ないため，アスペクト比 7 のモデルで繊維粒子 1 つの位置のずれによって繊維中心位置が中央部からずれたと考える．また，繊維の中心位置がずれることによって繊維の両端に速度差が発生したため，解析中盤から繊維が回転したと考える．

速度差が発生する他の条件においては，回転しながら繊維が流動する挙動が確認できる．その回転速度は position 3 が一番大きい，これは空間に発生している速度差が position 3 が一番大きいためである．

また，Fig. 2.11 ,2.12 において position 2,3 での繊維中心座標の時間変化に着目すると，ある一定の場所に移動しながら流動していることが見られ，速度差の大きい position 3 の方が position 2 と比べ中央への移動量は増加しているが，アスペクト比の影響は見られない．こ

の結果から、一定の速度条件の下では一定の場所に移動しながら流動していることが示唆された。実際の射出成形において繊維の凝集の発生によって成形品の強度が低下することが一般的に知られており、本解析結果はその繊維凝集の過程を示すものとする。

一方で、本解析は 2.0 秒まで解析を実行しているが、現実の射出成形ではコンマ数秒で樹脂の射出が完了する。本解析では、繊維配向や繊維位置がどのように推移するのかを観察するために実際の成形時間よりも長く解析時間を設定しており、その点に注意が必要である。

次に、繊維アスペクト比による影響を評価するために Fig. 2.13 に position 2 と 3 における繊維配向変化の推移を重ねて示す。Fig. 2.13 より、position 2 ではアスペクト比が大きいモデルが最大で約 10° 繊維配向角度に差が生じているが、position 3 では position 2 ほど大きな差は見られない。アスペクト比の増加による影響は、繊維の両端に発生する速度差の増加と繊維長の変化による繊維端の移動量の増加の 2 種類が考えられるが、本条件においては position 2 では後者による影響は大きい、position 3 では 2 つの影響が相殺されたと考える。以上の結果から、繊維アスペクト比と速度場の関係によって、それぞれの影響度が変化することが示唆された。

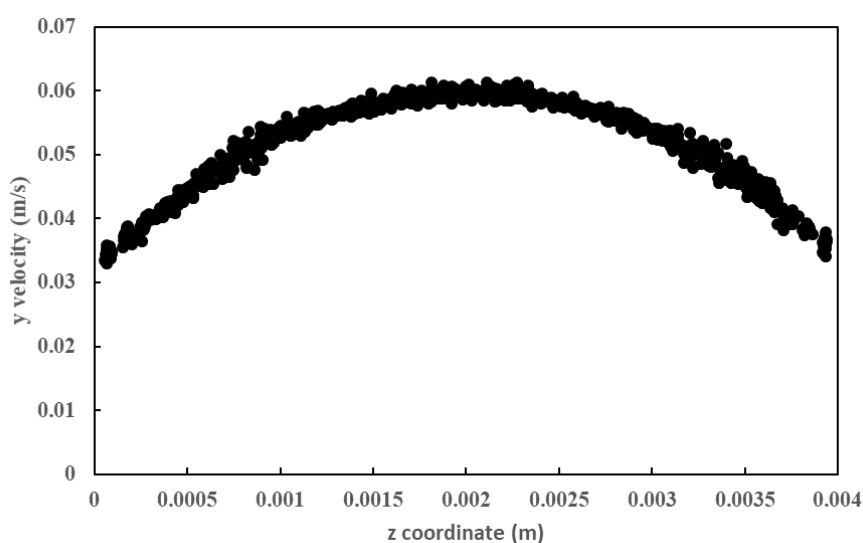


Fig. 2.7 Y velocity distribution.

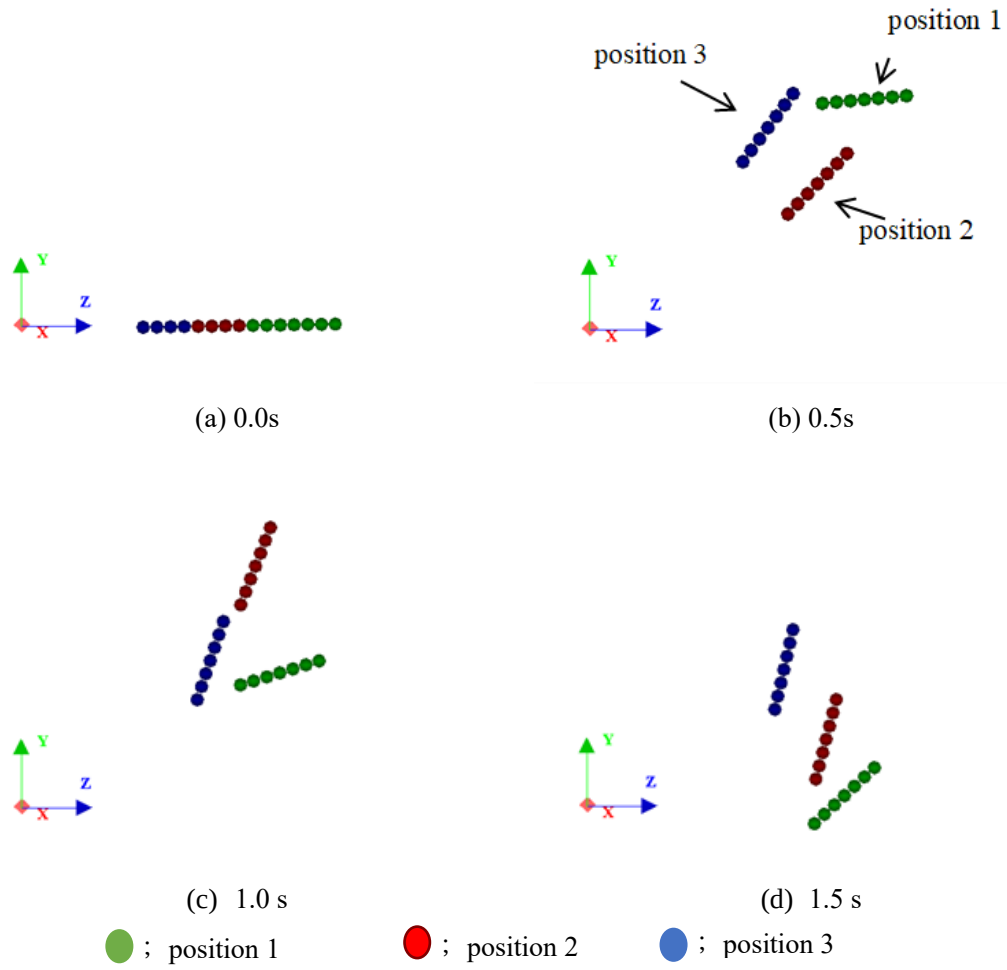


Fig. 2.8 Flow behavior of fiber of aspect ratio 7.

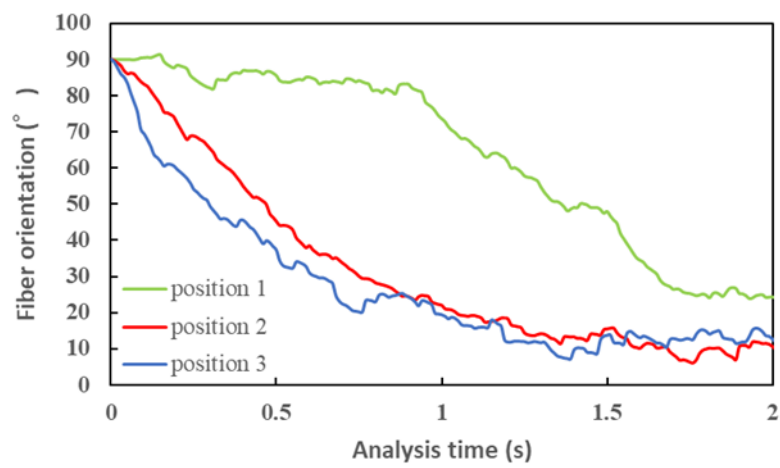


Fig. 2.9 Transitions of fiber orientation of aspect ratio 7.

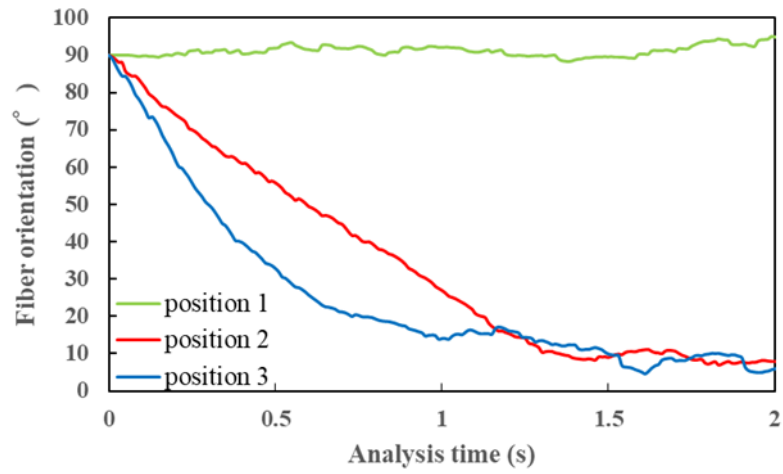


Fig. 2.10 Transitions of fiber orientation of aspect ratio 11.

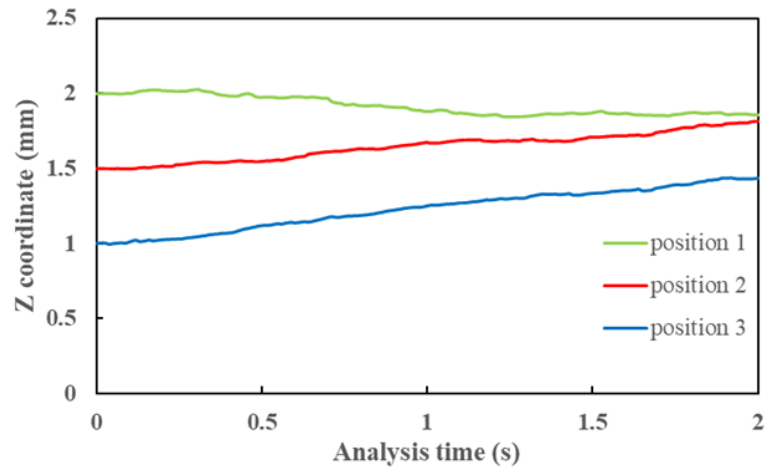


Fig. 2.11 Transition of z coordinate of fiber center of aspect ratio 7.

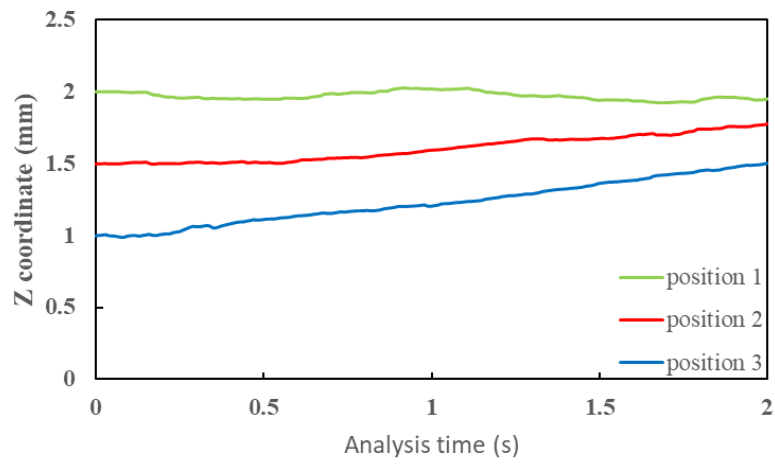


Fig. 2.12 Transition of z coordinate of fiber center of aspect ratio 11.

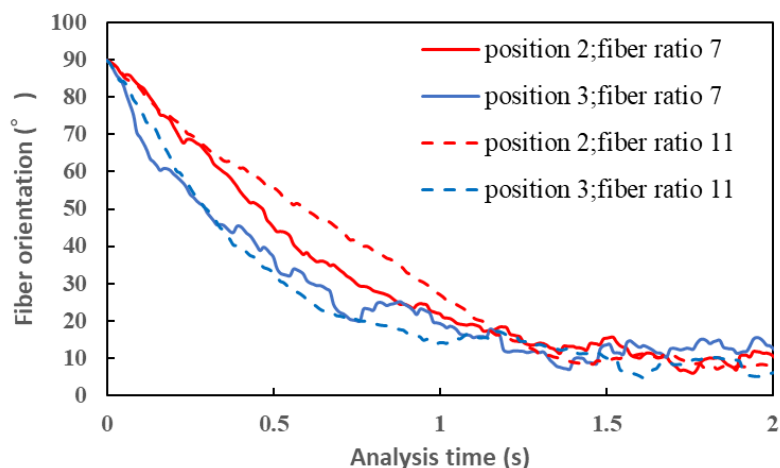


Fig. 2.13 Comparison of impact of 7 and 11.

Fig. 2.14 および Fig. 2.15 にそれぞれの position における粘度を変更した解析の繊維配向角度の推移を示す．繊維は繊維アスペクト比 11 の条件を用いている．Fig. 2.14 より，速度差の小さい position 2 では低粘度時に繊維配向が大幅に変化している．一方で Fig. 2.15 より，速度差の大きい position 3 では position 2 ほど大きな影響は見られない．また，粘度が高くなると繊維配向の変化が緩やかになる傾向がみられ，各時間での繊維配向角度の差が最大で 15°程度であった．最終的な繊維配向角度は同じ角度に収束している．速度差が大きければ，粘度による繊維配向への影響が小さくなっていることから，速度差の大きい金型表面付近では粘度による影響は小さく，速度差が小さい金型中央部付近では粘度による影響は大きくなることが示唆された．

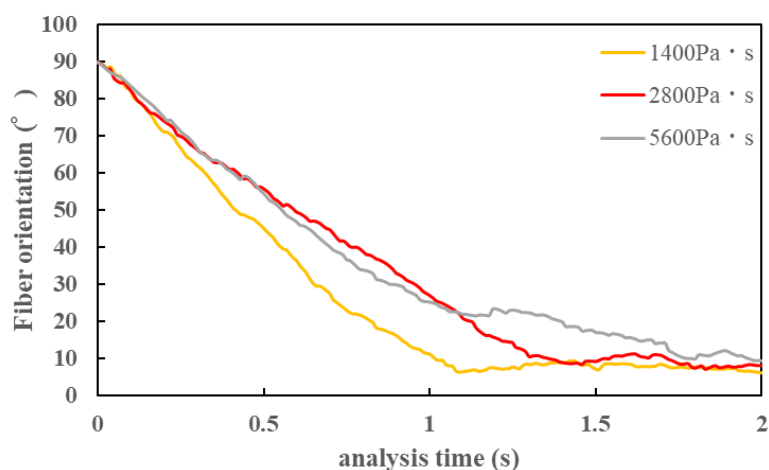


Fig. 2.14 Transition of fiber orientation of aspect ratio 11 at position 2.

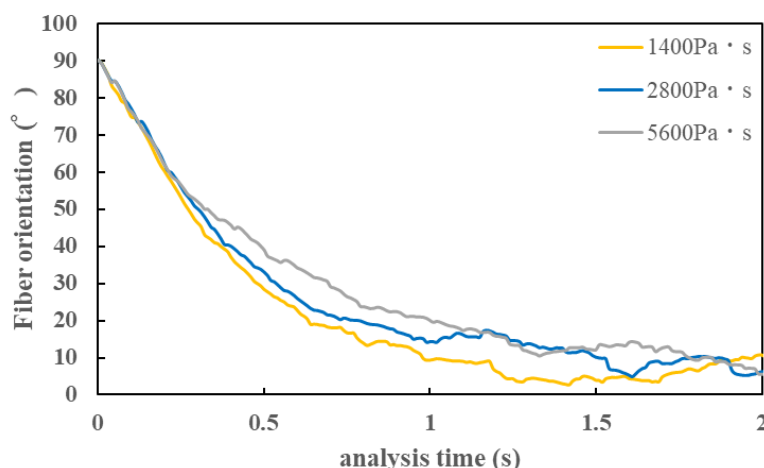


Fig. 2.15 Transition of fiber orientation of aspect ratio 11 at position 3.

2.4 解析スキームの問題点およびプログラムの改良

2.4.1 解析スキームの問題点およびその要因の解決策の実施

Fig. 2.16 に 2.1 節で行った全体解析における center line 付近での粒子数密度の平均と最大値、最小値を各地点にて算出した結果を示す。粒子数密度とは、式 (2.1) に示すように重み関数の合計値である。初期粒子数密度は、格子状にきれいに配置されたときの粒子数密度のことであり、本解析では影響半径を 2.1 粒子分としているため、初期粒子数密度は 14.41 程度である。しかし、全体解析の結果では射出口付近である $y=0.01$ 付近において粒子数密度が最大で 3 倍程度である 40 付近まで上昇している箇所が発生している。また、そのほかの箇所でも最小値を確認しても初期粒子数密度よりも小さい値をとる粒子は流動の先端部分と流入時だけであり、そのほかの粒子の粒子数密度は上昇している。格子状が崩れ最密充填に移行するなど粗密になる箇所が発生する可能性があるため、粒子数密度の増加および減少は発生するが、最密充填時の粒子数密度は 30 程度である。つまり、この増加量は最密充填の値を超えており、粒子同士の重なりが発生し本来発生しない流体の圧縮が発生していることを示している。これは、圧力による粒子の重なり抑制が機能していないと考える。ここで示している結果は全体解析の結果であるが、局所解析においても、この粒子数密度の上昇が発生しているため、流入させる速度よりも空間内の流動速度が小さくなってしまい、逆流する粒子の発生も確認している。そのため、前節では速度境界条件を付与することによって圧縮の発生を抑制し流動速度を保つように設定している。しかし、これでは空間内の速度が境界条件によって固定されてしまい、本来の樹脂流動を模擬しているとは言えない。また、実現象においては固化成長による流路の狭まりによる速度上昇の発生が想定されるが、流動粒子の圧縮が発生すると、この速度上昇が発生しない可能性も考えられる。そのため、本来発生し得ない圧縮が発生しないように計算プログラムの修正が必要であることから、原因となっている圧力項の計算において計算方法の変更を試みる。

$$n_i = \sum_{i \neq j} \omega(|r_j - r_i|) \quad (2.1)$$

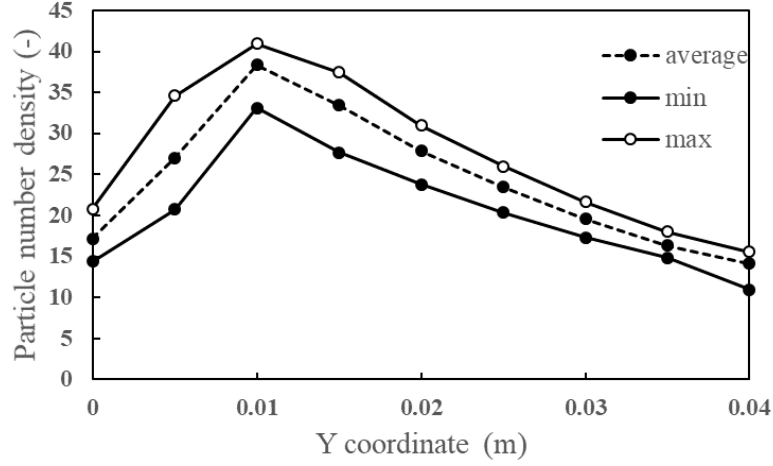


Fig. 2.16 Average, maximum, and minimum particle number density at each position in global analysis.

これまで使用していた圧力計算および圧力勾配による速度計算をそれぞれ式 (2.2)~(2.4) に示す. この計算方法では, 圧力の算出はポアソン方程式をヤコビ法の反復 2 回で止めて導出された式⁴³⁾を用いており, 収束計算を行わず計算されている. これは, 計算コストの抑制や境界面の不安定性による境界条件付与の問題などが存在したため, これらの式を用いていた. しかし, この圧力計算を用いても圧縮が発生していることや, 式 (2.2)でも初期の格子状を前提とした λ を使用していることなどの問題点が発生している. また, 圧力勾配の式に関しては, SPH 法の考えから考案された式⁵⁴⁾であるが, 結果として勾配モデルにも関わらず, 各粒子の圧力の足し合わせによって勾配モデルが計算されており, 勾配モデルの精度に関しても考慮の余地があると考え. 以上の背景から, これまで使用していた解析手法の改良を試みる. 現状の課題として, 粒子数密度が増加しているのにも関わらず圧力項による速度上昇が十分発生していないことである.

$$P_i = \frac{1}{n_{pi}^k} \frac{2d\rho_i}{\lambda n^0} \left\{ \frac{\rho_{sum}}{\Delta t^2} - \frac{\rho_i}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \right\} \quad (2.2)$$

$$\rho_{sum} = \frac{1}{n_0} \left\{ \frac{1}{n_{pi}^k} \sum_{i \neq j}^{p-p} [\rho_i(n_j^k - n_0)w(|\mathbf{r}_j^k - \mathbf{r}_i^k|)] + \rho_i(n_i^k - n_0) \right\} \quad (2.3)$$

$$\nabla \mathbf{u} = -\frac{\Delta t}{\rho} \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left(\frac{P_j + P_i}{r_{ij}^2} \mathbf{x}_{ij} \omega_{ij} \right) \quad (2.4)$$

そこで、圧力計算および圧力項の2点の修正を実施する。まずボアソン方程式による圧力計算においては、式 (2.5), (2.6) に示すように、HS 法による生成項⁵⁵⁾に補正項を加えた式に示す動的 ECS 法⁵⁶⁾を用い圧力の算出を行う。また、ラプラシアン離散化時に使用するラプラシアンモデルを式 (2.7) に示す HL 法⁵⁷⁾を用いて計算を実施する。動的 ECS は粒子数密度の時間変化率に基づく項と粒子数密度の時間変化率と基準となる初期粒子数密度との差と依存し変化する項を組み合わせたものであり、粒子数密度が低く粒子数密度の変化が小さくなる方向であれば圧力は小さく、逆であれば大きくなるモデルとなっている。また、HL 法によってラプラシアンモデルにおいて λ が必要なくなり、離散化モデルとして高精度になっている。また、収束計算する際には自由表面粒子による境界条件の付与が必要となる。これまで、基準粒子数密度 (初期粒子数密度の 0.95~0.97) との差によって付与していたが、これでは流体内に自由表面判定の粒子が発生することがある。発生しても計算が破綻することはないが、圧力擾乱の一因となり計算が不安定になる。そこで、式 (2.8) の自由表面判定³⁹⁾を追加することで誤判定を抑制し計算の安定化を試みる。

$$\nabla^2 p_i^{k+1} = -\frac{\rho_0}{n_0 \Delta t} \sum_{j \neq i} \frac{r_e}{|\mathbf{r}_{ij}^*|^3} \mathbf{r}_{ij}^* \mathbf{u}_{ij}^* \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 p_i^{k+1} = \begin{cases} \frac{\rho_0}{n_0 \Delta t} \left(\frac{Dn}{Dt} \right)_i^* - \frac{n_i^k - n_0}{n_0 \Delta t^2} \left\{ \frac{2}{n_0} \left(\frac{Dn}{Dt} \right)_i^k \right\} \\ \left[\frac{n_i^k - n_0}{n_0} > 0 \text{ and } \left(\frac{Dn}{Dt} \right)_i^k > 0 \right] \\ \frac{\rho_0}{n_0 \Delta t} \left(\frac{Dn}{Dt} \right)_i^* + \frac{n_i^k - n_0}{n_0 \Delta t^2} \left\{ \frac{2}{n_0} \left(\frac{Dn}{Dt} \right)_i^k \right\} \\ \left[\frac{n_i^k - n_0}{n_0} < 0 \text{ and } \left(\frac{Dn}{Dt} \right)_i^k < 0 \right] \\ \frac{\rho_0}{n_0 \Delta t} \left(\frac{Dn}{Dt} \right)_i^* \quad \left[\frac{n_i^k - n_0}{n_0} \left(\frac{Dn}{Dt} \right)_i^k \leq 0 \right] \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{5 - D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{r_e}{r_{ij}^3} \phi_{ij} \quad (2.7)$$

$$\left| \sum_{j \neq i} x_{ij} \right| > \alpha_l \quad \text{or} \quad \left| \sum_{j \neq i} y_{ij} \right| > \alpha_l \quad \text{or} \quad \left| \sum_{j \neq i} z_{ij} \right| > \alpha_l \quad ; \alpha_l \approx d_0 \quad (2.8)$$

圧力項に関しては、式 (2.9),(2.10)に示す勾配モデルの高精度化に着目した GC 法⁵⁶⁾に、式(2.11) ,(2.12)に示す粒子の重なりが発生したときに必要最低限の人口斥力を付与する DS 法⁵⁸⁾を組み合わせた GC-DS 法の導入を試みる。GC 法によって負圧の計算が可能となり、DS 法によって粒子の重なりが発生しないため、これまで流動中に発生していた圧縮がなくなることが期待できる。

$$C_i = \frac{1}{D_s} \left(\frac{1}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{\mathbf{r}_{ij} \otimes \mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \omega_{ij} \right)^{-1} \quad (2.9)$$

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{\phi_j - \phi_i}{|\mathbf{r}_{ij}|} \frac{C_i \mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} \omega_{ij} \quad (2.10)$$

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{p_j - p_i}{|\mathbf{r}_{ij}|} \frac{C_i \mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} \omega_{ij} + \frac{1}{n_0} \sum_{j \neq i} \mathbf{F}^{DS}_{ij} \omega_{ij} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{F}^{DS}_{ij} = \begin{cases} 0 & (|\mathbf{r}^*_{ij}| \geq d_{ij}) \\ \rho_i \Pi_{ij} \mathbf{e}_{ij\parallel} & (|\mathbf{r}^*_{ij}| < d_{ij}) \end{cases} \quad (2.12)$$

2.4.2 解析プログラム修正後の全体解析結果の比較

解析プログラム修正による解析結果への影響の確認として、2.1 節にて行った全体解析と同様の解析を実施した。変更した点は解析プログラムの変更のみであり、解析条件などに関しては変更を行っていない。また、解析プログラム変更前では解析が実行できていなかった粘度 2000Pa・s 以下でもプログラム修正後では解析の実行が可能になったため、粘度の条件を 500, 1000Pa・s の 2 種類を追加して解析を実施した。

Fig. 2.17 に解析プログラム修正後の粒子数密度分布を示す。粒子数密度の最大値が 20 程度で推移しており粒子の圧縮が抑制されてつつ、最小値が 14 付近で推移していることから、初期粒子数密度が守られながら流動していることが示されている。また、Fig. 2.18, 2.19 に 2 地点における到達地点をまとめたグラフを示す。プログラム変更によって粒子の圧縮が抑制されたため、プログラム修正後の方が樹脂流動がより進展している。粘度による影響に関してはプログラム変更前では粘度 10000 Pa・s 以下ではその差がみられていたが、プログラムの変更後では 2800 Pa・s 程度から粘度による影響は小さくなっている。また、両グラフを比較すると 0.5 秒時では高粘度での center line と side line の差がほとんどなくなっており、フローフロントの形状がほぼ平坦になっていることが示されている。

Fig. 2.20 に粘度 2800 Pa・s でのプログラム変更前後の各時間ステップにおける温度分布を、Fig. 2.21 にプログラム修正後の低粘度時と高粘度時の温度分布を示す。Fig. 2.20 より、温度分布に関してはプログラム修正後のほうが金型面に接している粒子の温度が高くなっている。これは、プログラム修正前では粒子の圧縮が発生しており、金型からの冷却を受け

る粒子が多くなっていたため温度の低下がみられたが、プログラムの修正によって金型面の周辺に存在する粒子が少なくなり、金型に冷却される粒子が減少したため温度分布に変化が発生したと考える。樹脂粘度による影響に関しては樹脂粘度の値に違いがあるが、ある一定の粘度以上になるとフローフロントの形状の変化は見られなくなるなどとはプログラム修正前後ともに同じ傾向が見られている。フローフロントの形状に関しては、プログラム変更前では基本的にきれいな弧を描いていたが、Fig. 2.21 に示す図よりプログラム変更後では高粘度時に金型側面付近 (side line 付近) において、プログラム変更前では見られなかった弧の形状に沿わない形状に変化していることがみられる。これは、射出口から射出された粒子が中央部付近から側面付近に移動する粒子と初期から側面部を流動していく粒子が衝突し行き場がなくなった結果、側面部で弧の形状が崩れている状態がみられたと考える。

また、Table 2.3 に解析に必要な時間を示すが、0.25 秒と 0.5 秒ともにプログラム修正後のほうが必要時間は増加しており、増加率は 0.5 秒時のほうが高くなっている。これは、プログラム修正時に圧力計算に収束計算を取り入れたため、解析が進み計算に使用する粒子数が増えたことによって必要な解析時間が増加したと考える。しかし、修正前に見られた圧縮が抑制されていることから、今回導入を試みた MPS-HS-HL-ECS-CG-DS 法は有効であることが示された。以降の実施する解析に関しては、本節で述べた修正後の解析プログラムを使用する。

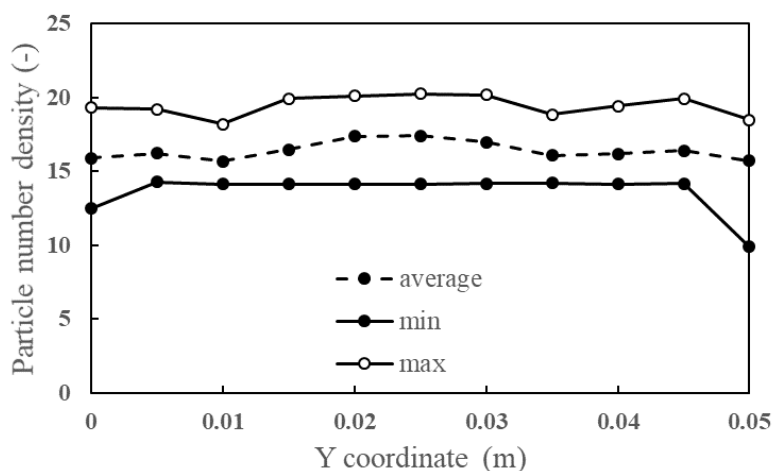


Fig . 2.17 Average, maximum, and minimum particle number density at each position in global analysis.

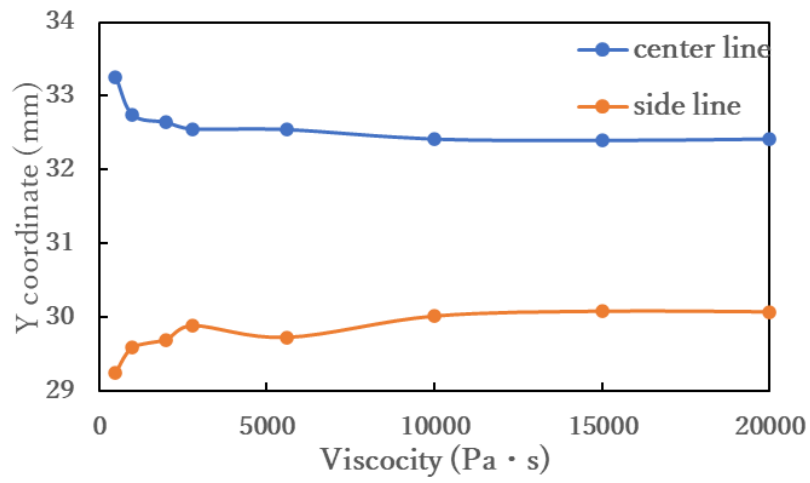


Fig. 2.18 Arrival Y coordinates at 0.25 s.

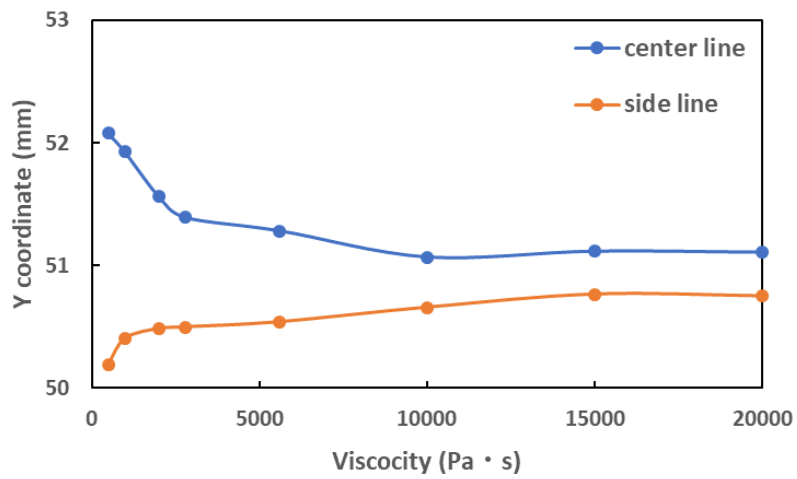


Fig. 2.19 Arrival Y coordinates at 0.5 s.

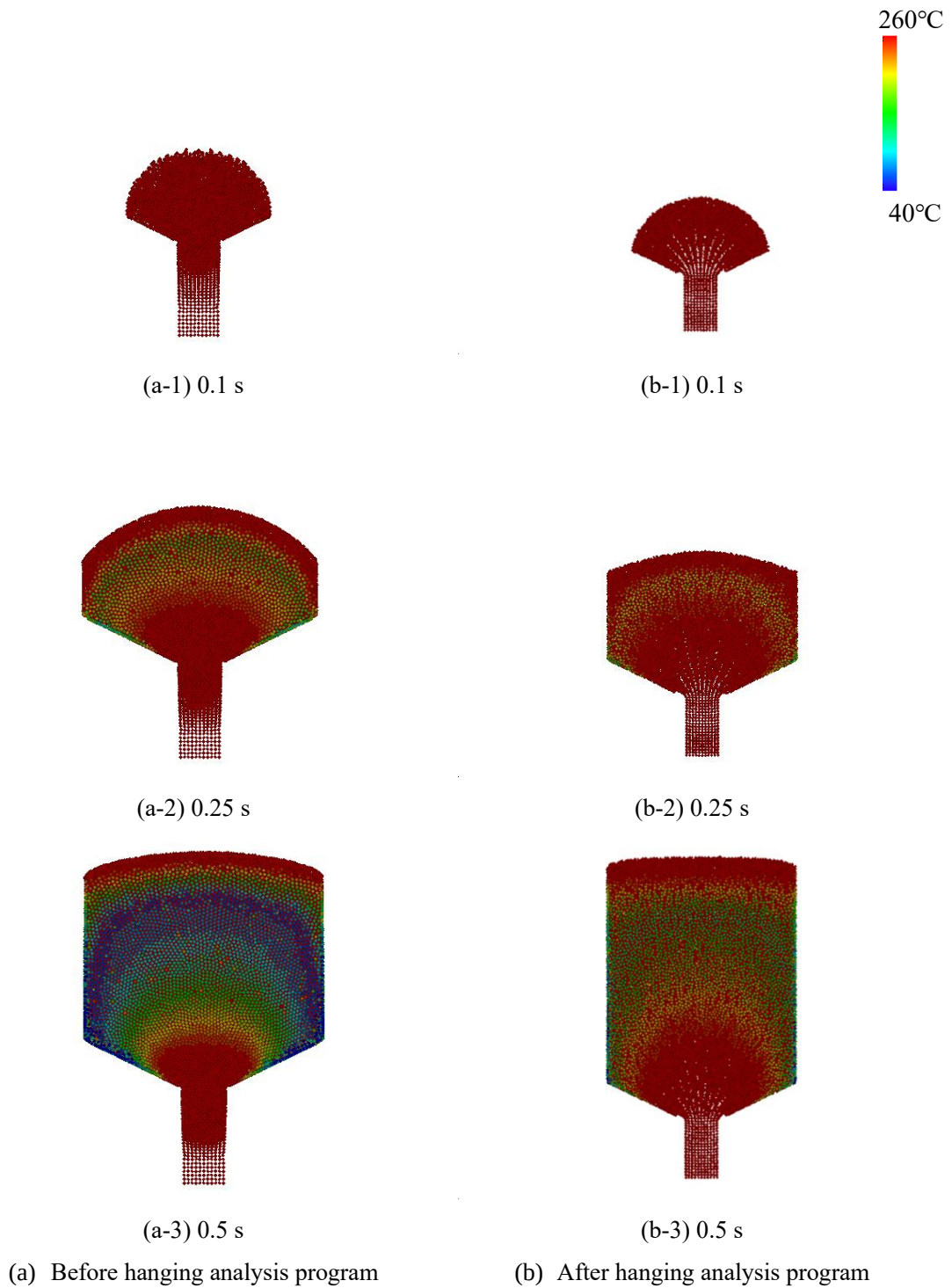


Fig. 2.20 Comparison of temperature distribution by changing analysis program
(viscosity 2800 Pa · s)

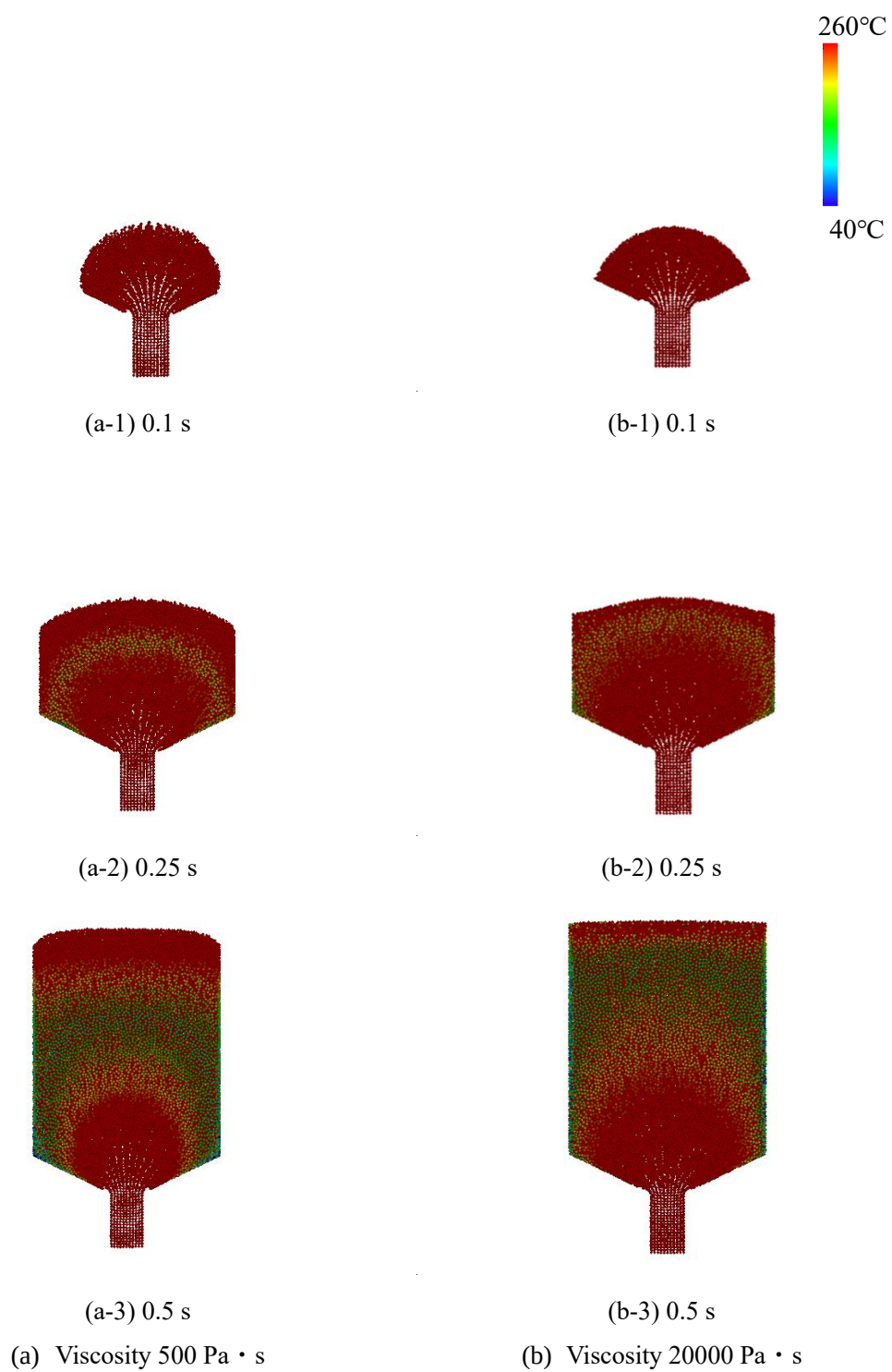


Fig. 2.21 The temperature distribution of particle resin.

Table 2.3 Time required for analysis

	Before program changed	After program changed	Rate of increase
analysis time for 0.25 s	14702 s	17543 s	119 %
analysis time for 0.5 s	70410 s	126076 s	179 %

2.5 結言

本章で得られた知見に関して以下にまとめる。

- 全体解析より，低粘度ではフローフロントの到達時間や温度分布に大きな影響を与える．一方，粘度が高くなるにつれ，その変化量は減少していき高粘度では粘度の影響はほとんど見られないことから高粘度では繊維による樹脂流動への影響は小さい．
- 局所解析によって繊維を粒子の連結によって表現する本解析手法により繊維挙動の表現・追跡が可能であり，繊維流動時の凝集に関連する可能性のある流動がみられた．
- 繊維流動において，繊維アスペクト比による影響は繊維の両端に発生する速度差によって繊維配向の推移が変化したことから，繊維の周辺の樹脂流動の速度分布との関係性によって繊維配向への影響の割合が大幅に変化することが示唆された．
- 射出成形における繊維配向への粘度の影響として，繊維の発生位置によって繊維配向変化の推移が変化していることから，速度差の小さい金型中央付近では粘度による影響は大きく速度差の大きい金型表面付近では粘度による影響は小さいことが示唆された．
- 解析プログラムの変更によって不自然な粒子の圧縮の抑制に成功した．また，解析プログラム変更による解析結果の変化として，この圧縮がなくなったことによって温度分布に大きな変化が見られた．一方で，粘度による影響は粘度の値に違いはあるものの粘度が高くなるほど，その影響度は小さくなっていき最終的には粘度による影響はほとんど見られなくなるというこれまでと同様の傾向が得られた．

3 章 射出口に着目した樹脂・繊維流動評価と射出口形状による

繊維配向変化への影響評価

3.1 緒言

樹脂流動において、特徴的な流れとして伸長流動とせん断流動の 2 種類が存在しており、複合材料の射出成形においては、この流動形態によって繊維配向が大幅に変化する。そこで、本章では伸長流動の影響が大きい射出口付近に着目し樹脂・繊維流動評価を実施する。また、これらの結果を用いて射出口付近で支配的な伸長流動による影響を射出速度や射出口形状などの成形条件の変更による解析を実施することで評価する。

3.2 通常モデルを用いた樹脂・繊維流動解析

3.2.1 解析条件

Fig. 3.1 に本解析で使用する解析モデルを、Table 3.1 に解析で使用する各パラメータを示す。本モデルは平板形状を想定しており、オレンジ色で示している射出口から 5.5mm 地点までを解析空間としている。以降本章では Fig. 3.1 をモデル 1 と称する。また、Fig. 3.1 で示している一点鎖線は各座標の 0 地点を示しており、射出口である空間 A において繊維を一定時間ごとに位置と繊維配向をランダムに発生させている。その空間 A では速度境界条件として free-slip 条件を、その他では no-slip 条件を付与している。温度計算においても空間 A では温度のやり取りを行っていない。使用する粒子径は 0.1mm である。これは通常の平板モデルでは 3 層の繊維配向の構造をとることが知られていること¹⁶⁾、解析においては 1 層あたり 5 粒子程度の解像度が必要であること、この 2 点を踏まえ粒子径は 0.1mm としている。また、本章での樹脂粒子の物性値に関してはポリスチレンを想定しており、比熱や熱伝導率は温度依存性を考慮した値を付与している。また、流入速度を変化させることによって射出口付近における射出速度による繊維流動への影響評価も実施する。

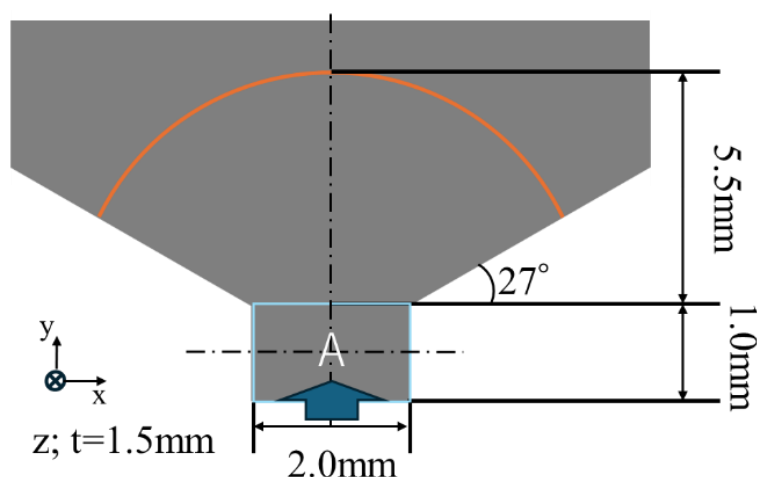


Fig. 3.1 Numerical analysis model

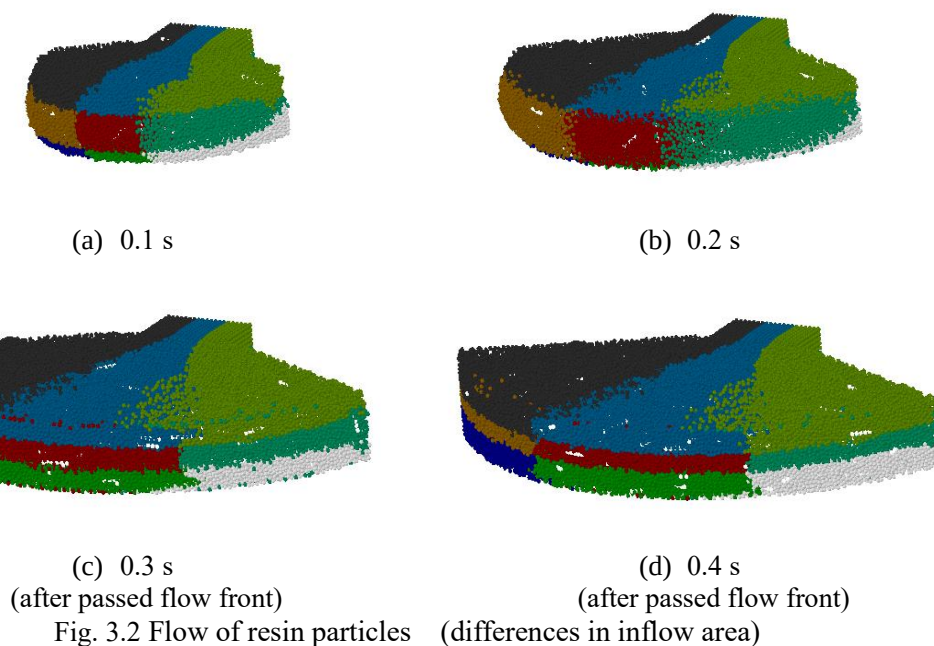
Table 3.1 Numerical parameters

Particle size[mm]	0.1	
Inflow speed [m/s]	0.1	0.5
Mold temperature [°C]	30	
Resin temperature [°C]	250	
Resin freeze temperature [°C]	100	
Max time step [s]	0.5×10^{-4}	0.25×10^{-4}
Resin density [kg/m ³]	980	
Fiber density [kg/m ³]	1600	
Resin thermal conductivity [W/(m · °C)]	0.164 (30°C) 0.228 (250°C)	
Fiber thermal conductivity [W/(m · °C)]	10	
Resin specific heat [J/(kg · °C)]	1180 (30°C) 2260 (250°C)	
Fiber specific heat [J/(kg · °C)]	750	

3.2.2 樹脂流動に関する解析結果

Fig. 3.2 に各時間における樹脂流動の挙動を示す。Fig. 3.2 での粒子の色は流入場所を X-Z 面において 3×3 で分割し、その場所によって粒子の色分けをしている。0.1 秒時では射出開始時であるため空間が明瞭に分割されているが、0.2 秒になると中央部に存在している粒子が、表面に多く存在しておりファウンテンフローを形成して流動していることが示されている。しかし、フローフロントが解析空間を流出部を通過した後の 0.3 秒と 0.4 秒では空間ごとに明瞭に分けられており境界面が明瞭に存在している。また、0.3 秒時に流出部付近の金型面付近に残っている流入時に金型の中央に存在していた粒子（赤色など）が、0.4 秒時にはほとんど残っていない。このことから、ファウンテンフローによって金型面付近に存在していた粒子は後から来る初期に金型面付近に存在していた粒子によって押し出される挙動が発生しているといえる。

次に、Fig. 3.3 に色分けを流入時間に変更した解析結果を示す。色分けは粒子が流入した時間に対し 0.05 秒ごとに変更しており、図は 0.2 秒時および 0.4 秒時の図である。また、図の左側が金型面である $z = 0 \text{ mm}$ を、図の右側が金型中央である $z = 0.75 \text{ mm}$ を見た図である。Fig. 3.3 から金型中央部付近に関して、解析初期の粒子は存在せず明瞭に分かれている。一方で、金型表面においては 0.2 秒時において解析初期に流入した粒子は多く残っている。また、この赤色の粒子は 0.4 秒時においても多く残存していることがわかる。Fig. 3.2 ではファウンテンフローによって金型面に移動した粒子は後から来た粒子に追い出される結果になっていたが、これは最初から金型面付近に存在していた粒子が金型によって冷却され固化温度まで到達したため、金型面付近に解析初期に流入した粒子が多く残存している結果となっている。また、0.4 秒時の中央付近において金型の斜め面に少しオレンジから黄色の粒子が残っている。赤色の粒子はないことから、これは固化しているのではなく開口部の形状によって流動方向の速度が低下したため、解析初期に流入した粒子が依然残っていると考えられる。しかし、これらは固化していないため解析が進むにつれ少しずつ押し出されていく粒子となっている。以上から、射出口付近での樹脂流動に関しては金型面付近では一定以上進むと固化が発生し流動に変化が発生するが、それ以前ではフローフロントが通過して以降、本解析条件では金型面付近に関しては射出口から 2 mm 付近まで、その他の箇所に関して空間全体において成形時間の樹脂流動への影響はほとんどないことが示された。またこれらの結果は金型形状や射出速度などによって変化することが考えられるため、今後様々な射出成形パラメータを変更し評価する必要がある。



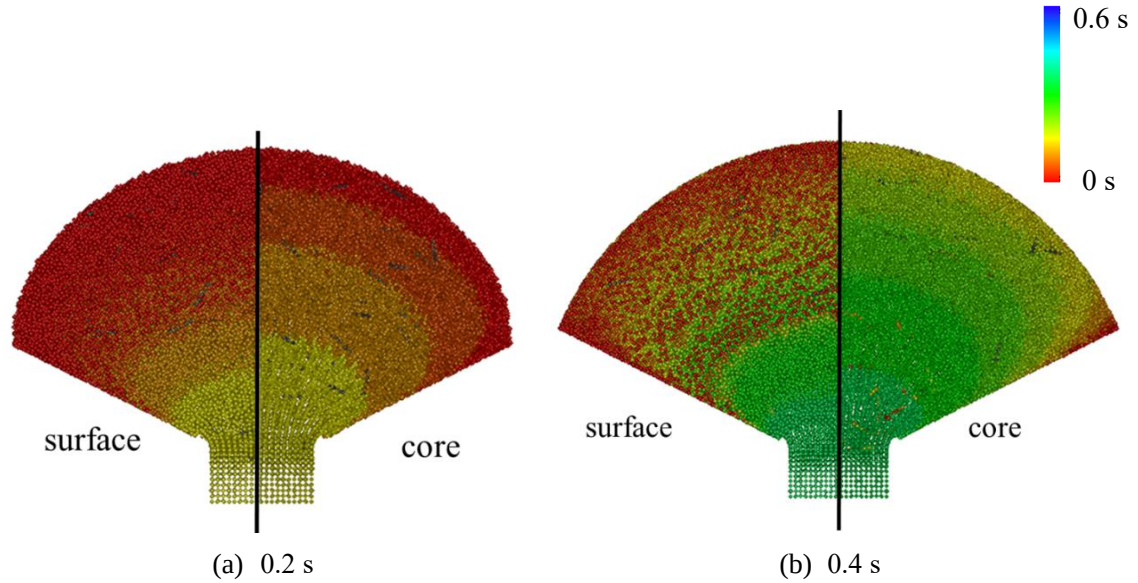


Fig. 3.3 Flow of resin particles (differences in inflow time)

3.2.3 繊維流動に関する解析結果

Fig. 3.4 に 0.4 秒時の X-Y 面から見た繊維のみを表示させた結果を示す．ここでの繊維の色は Fig. 3.2 での樹脂粒子の色分けと同様である．また，Fig. 3.5 に繊維生成場所が $0.5 \text{ mm} < Z < 1.0 \text{ mm}$ の金型厚さ方向の中央付近であるコア層において生成された繊維の流出時における XY 面に投影された繊維長分布を示す．この空間を空間 B とする．ここでの繊維長とは繊維の両端の繊維粒子の座標の差から算出されており，繊維が 5 つの粒子で構成されていることから 4 粒子分の長さであれば，ほぼ完全に XY 面方向に配向しているといえる．さらに，Fig. 3.6 に空間 B において生成時と流出した繊維の配向分布をまとめて示す．ここでの繊維配向角度は，それぞれ Y 軸とのなす角度としており， 0° が Y 方向を向いていることを示している．流入時の分布に着目すると，流入時には繊維配向および繊維長がまばらに分布していることから繊維の状態をランダムに決定できていることがわかる．その配向が流出時には X 座標において円形の分布を示すようになっている．流出部は射出口からの距離で決定しており円弧となっているため，この配向分布は流動方向に対し垂直に配向しているといえ，この傾向は Fig. 3.4 の繊維流動の挙動より射出口から射出されたときから見られる．また，繊維長に関してもほとんどの繊維が 0.4 mm (4 粒子分)となっており完全に XY 面に向いていることがわかる．これらの結果は，繊維が狭い射出口から開口部に到達したときに流動方向の先端の繊維粒子の流動速度が急激に低下し，繊維の後方に存在している粒子が押し込まれた結果，繊維が樹脂の伸長方向に配向しやすくなり流動方向に対し垂直に配向したと考えられ，伸長流動による影響を大きく受けた結果であるといえ，実験でも同様の傾向を示している⁵⁹⁾．

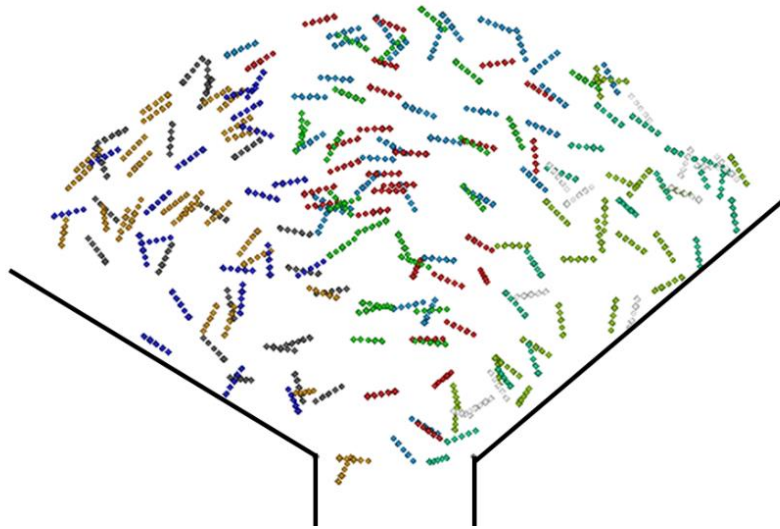


Fig. 3.4 Distribution of fiber particles

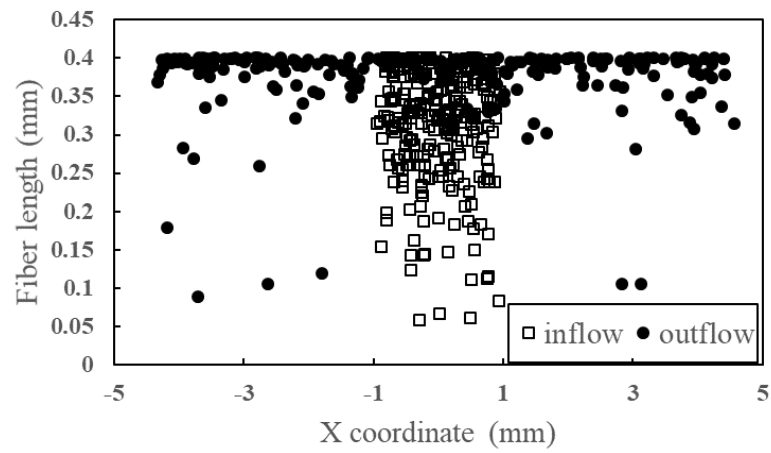


Fig. 3.5 Fiber length distribution in XY plane

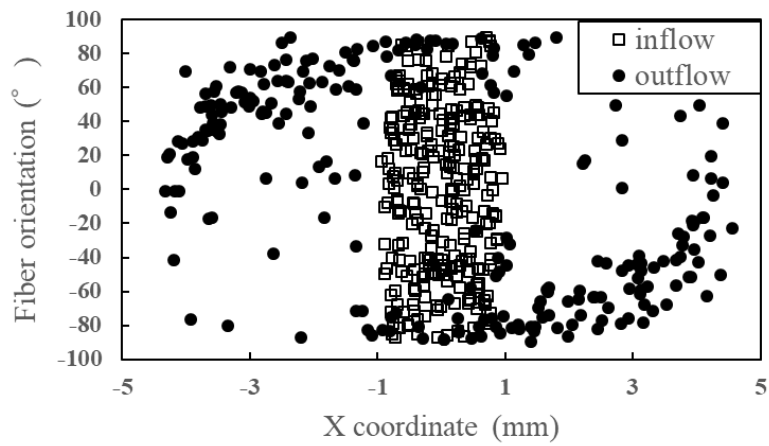


Fig. 3.6 Distribution of X-Y fiber orientation

3.2.4 射出速度による影響評価

まず、樹脂流動に関する結果を示す。Fig. 3.7 に各時間における樹脂流動の挙動を示す。これらの図から、流入速度が 0.1 m/s ときには中央付近に存在していた粒子が金型面付近に存在していた粒子を追い越すファウンテンフローがみられたが、流入速度が上昇することで、そのファウンテンフローがみられずに流動している。これは、流入速度が増加し金型面による速度低下が十分に発揮されず厚さ方向に速度差が発生しなかったためであると考えられる。このことから、射出口付近においてある一定以上の速度での流入によって射出口付近での初期の流動の挙動に大きな変化が発生することが示唆された。また、速度が高く保たれており円弧状のフローフロントの形状になっていないことから、伸長流動による影響がより遠い範囲まで発生する可能性が考えられる。一方で、フローフロントの通過後においては樹脂粒子の流動範囲から大きな違いは見られないことから、一定時間経過することで高速で流入させた場合でも流動自体は安定することが示された。

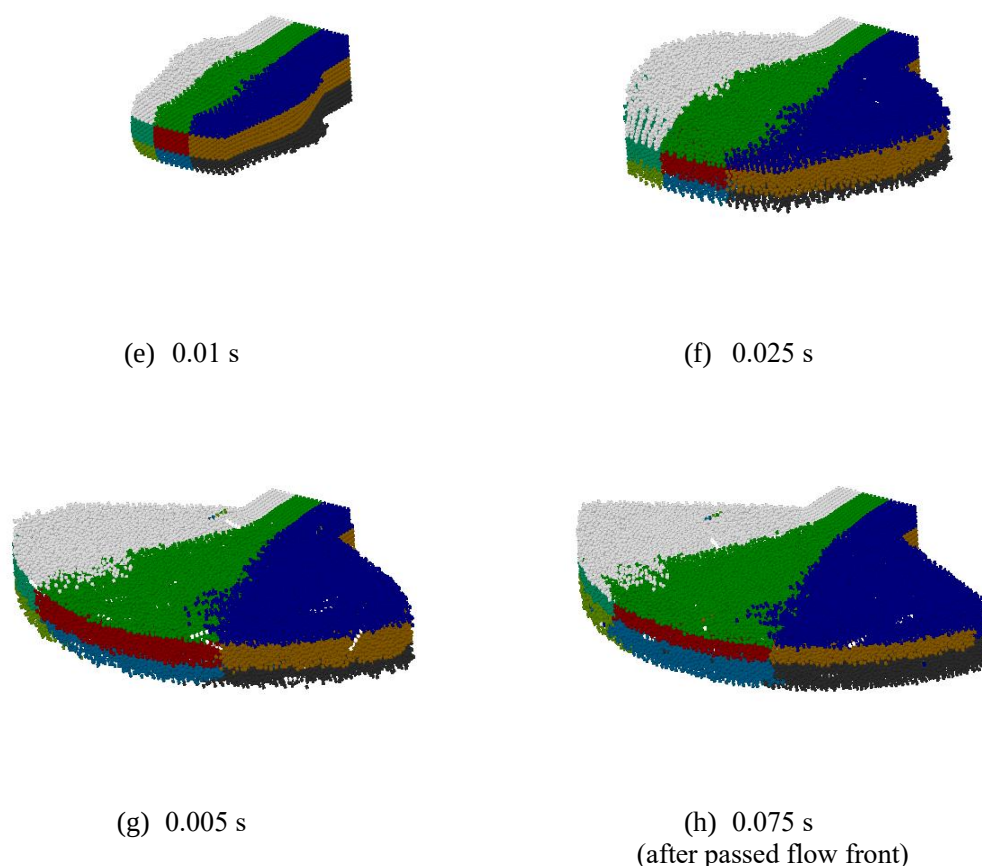


Fig. 3.7 Flow of resin particles at inflow velocity 0.5 m/s (differences in inflow area)

次に、繊維流動に関する結果を示す。Fig. 3.8 に空間 B における流出時における XY 面での繊維配向分布を示す。また、Table 3.2 に空間 B における流速ごとの各方向および XY 面での繊維長の平均をそれぞれ示す。Fig. 3.8 より、速度上昇によって XY 面における繊維配向分布に大きな差は見られない。一方で、各方向の繊維長では X および Y 方向においては平均の繊維長が増加しているが、Z 方向においては減少していることから XY 面方向に配向する繊維がより多くなっているといえる。以上のことから、射出速度を増加させることで伸長流動による影響をより大きくさせることができ、射出口付近における繊維配向分布を流動方向に対し垂直方向により強く配向させることが可能であることが示された。一方で、繊維配向分布に大きな差がみられなかった原因としては、すでに低速流入時において十分な伸長流動による影響が発生しているためであると考えられる。

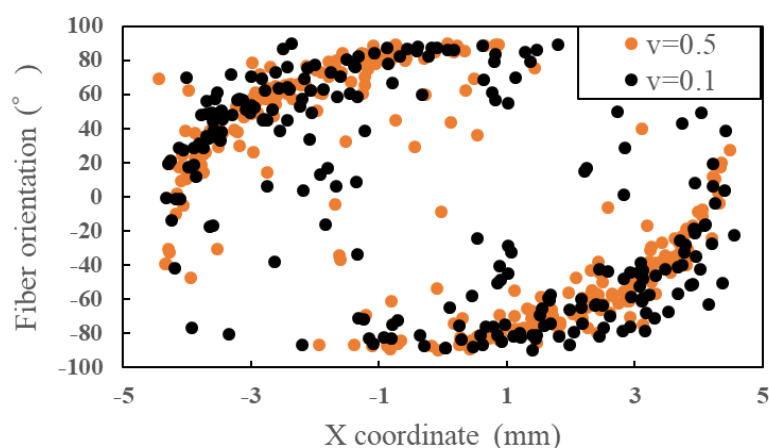


Fig. 3.8 Distribution of X-Y fiber orientation (Effect of Injection velocity)

Table 3.2 Average of fiber length in each direction

	X	Y	Z
0.1 m/s	0.284 mm	0.192 mm	0.097 mm
0.5 m/s	0.291 mm	0.197 mm	0.074 mm

3.3 射出口形状の変更による繊維流動への影響評価

3.3.1 解析概要

前節で、モデル 1 での解析を行い射出口付近における樹脂・繊維流動の解析が可能であることが示された。また、射出口での伸長流動によって繊維配向が変化したことから、射出口の形状を変化させることで繊維流動に変化が生じると考えられる。そこで、射出口の形状を変化させることによって、伸長流動下における繊維流動への影響の評価を実施する。まず、射出口の角度を変更した解析を実施した。Fig. 3.9 に作成した解析モデルを示す。モデル 1

設定していた 27° の射出口角度を 63° と変更することで射出口を狭くし、伸長流動の影響が小さくなるモデルとなる。この解析モデルをモデル 2 とする。

次に、金型厚さ方向に関しても変化させたモデルを作成する。今回、Fig.3.10 に示す金型厚さ一定のモデルを厚さ方向にも変化させたモデルと厚さ方向のみ変化するモデル 3 種類の解析モデルを作成した。以降、射出口が 27° のものをモデル 3、 63° のものをモデル 4、 90° のものをモデル 5 とする。また、厚さ方向に変化しないモデルをモデル A、厚さ方向に変化するモデルをモデル B と呼称する。なお、金型厚さが変化する解析モデルの空間 B の範囲は流入箇所が $0.3\text{ mm} < Z < 0.6\text{ mm}$ の範囲に変更している。流入速度は 0.1 m/s とし、その他の解析条件は table 3.1 に示すものを使用する。

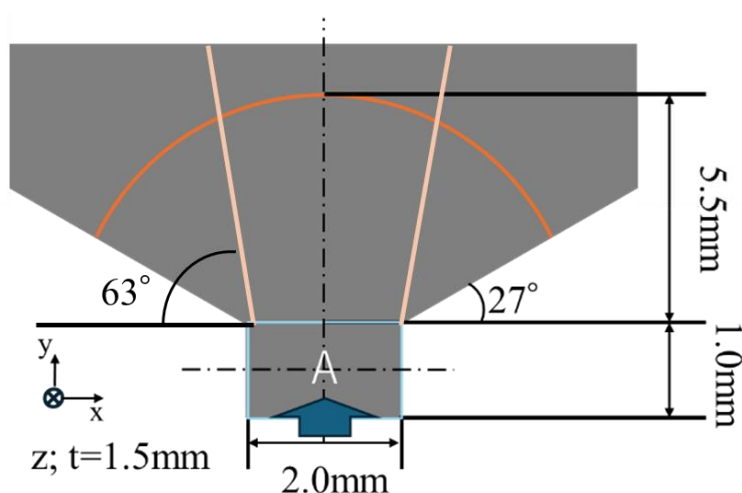


Fig. 3.9 Numerical analysis model with different injection angle (model A)

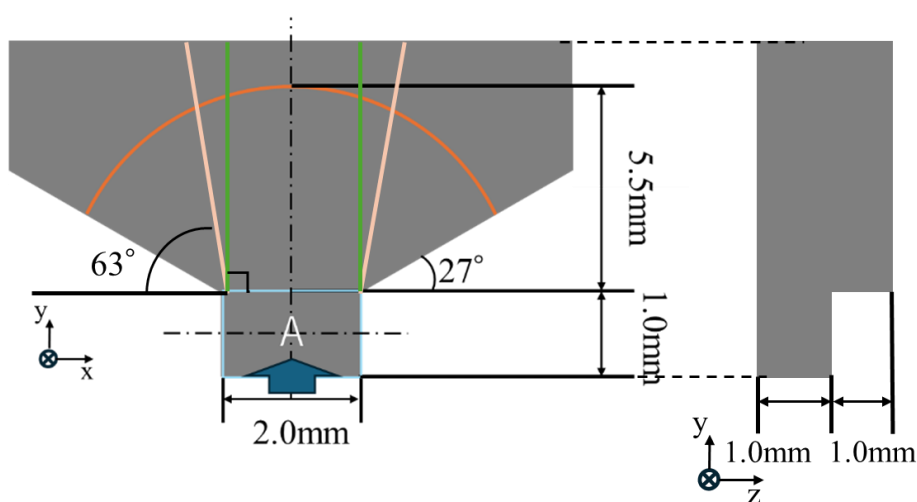


Fig. 3.10 Numerical analysis model with different injection angle and mold thickness (model B)

3.3.2 解析結果

まず, Fig. 3.9 に示した射出口角度のみを変更した解析結果として, Fig. 3.11 および Fig. 3.12 に空間 B における XY 面の繊維長分布と繊維配向分布を示す. 繊維長分布から, 射出口角度変更前と比べその傾向は弱くなっているが, 0.4 mm 付近に存在している繊維は多くあり射出口の角度を狭くした場合でも幅方向への伸長流動による影響は見られる. また, 繊維配向分布においては流動方向と垂直方向である $\pm 90^\circ$ 付近に集まる傾向は見られるが, その傾向は弱くなっていることがわかる. さらに, $X > \pm 2$ mm に存在している繊維の配向角度に着目すると急激に変化していることが示されている. これは, 金型面によって金型付近の繊維粒子が引っ張られた結果, 流動方向に配向しやすくなったため流動方向である 0° 方向に配向する傾向が強まったと考える. 一方で, 射出口角度を変更する前にこの傾向が見られなかった要因としては射出口がより広くなっており, 金型内の流速が小さく大きな速度差が発生せず, 伸長流動による影響がより大きいためであると考えられる. 以上の結果から, 射出口を変更することで伸長流動による影響の緩和は可能であるが, XY 方向に配向することを防ぐことは困難であることが示唆された. 一方で, 本解析モデルでは流動距離が統一されている. そのため, 射出口の角度を変化させた場合, 伸長流動による影響は小さくなっているが, 流動距離を長くすることで伸長流動による影響が保たれる可能性があることは注意が必要である.

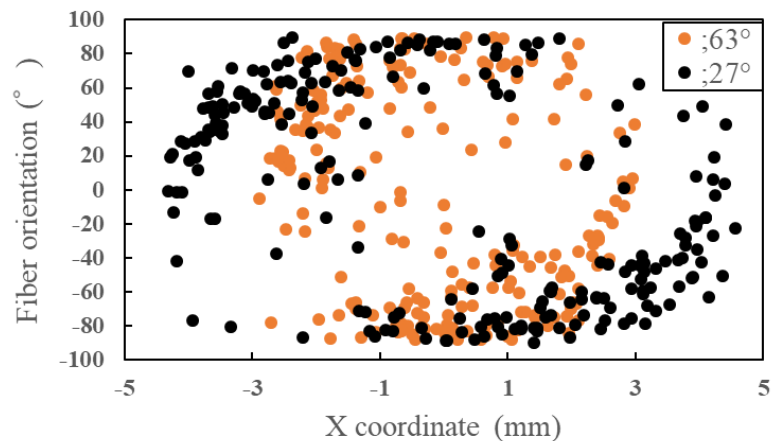


Fig. 3.11 Distribution of X-Y fiber orientation (Effect of Injection Gate Angle)

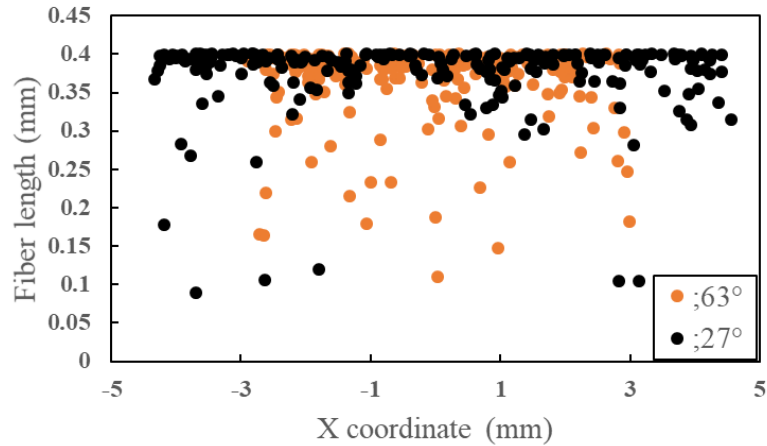


Fig. 3.12 Fiber length distribution in XY plane (Effect of Injection Gate Angle)

次に、Fig. 3.10 に示した厚さ方向を変化させた解析に関して、射出口角度が 27° と 63° の 2 つのモデルに関する結果を示す。まず、Fig. 3.13 と Fig. 3.14 に射出口角度が 27° の場合の XY 面での繊維配向分布および繊維長分布を示す。繊維配向分布より、金型厚さの変更の有無によって傾向に大きな違いは見られなかった。一方で、XY 方向長さに関しては厚さ方向が変化するモデルのほうが 0.3 mm ほどの繊維も存在していることから、 0.4 mm となる傾向が弱くなっており Z 方向に配向しやすくなっているが、その影響は小さいといえる。

次に、Fig. 3.15 と Fig. 3.16 に射出口角度が 63° の場合の XY 面での繊維配向分布および繊維長分布をそれぞれ示す。繊維配向分布に関しては、射出口角度が 27° の場合と同様に、金型厚さが変化した場合でも大きな傾向の変化は見られない。一方で、XY 面の繊維長に関しては金型厚さを変化させることで 0.3 mm 以下となる繊維も多く存在していることから、より多くの繊維が Z 方向に配向しやすくなっていることがわかる。

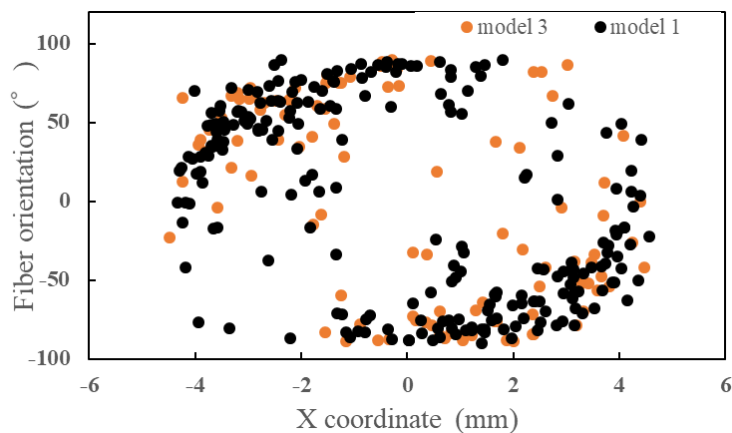


Fig. 3.13 Distribution of X-Y fiber orientation
(Effect of thickness change of injection gate angle 27°)

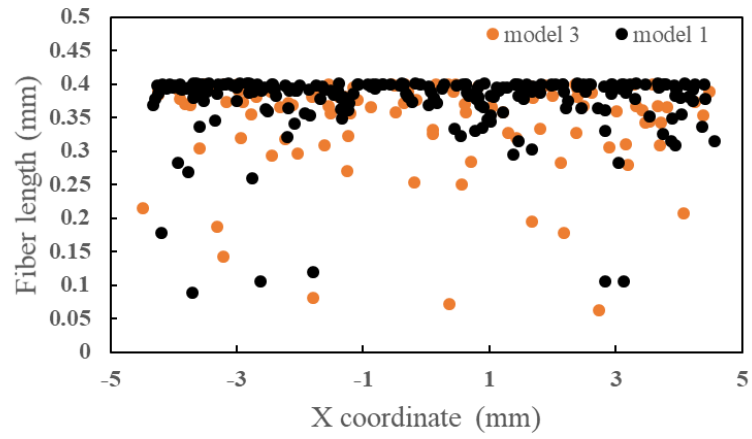


Fig. 3.14 Fiber length distribution in XY plane
(Effect of thickness change of injection gate angle 27°)

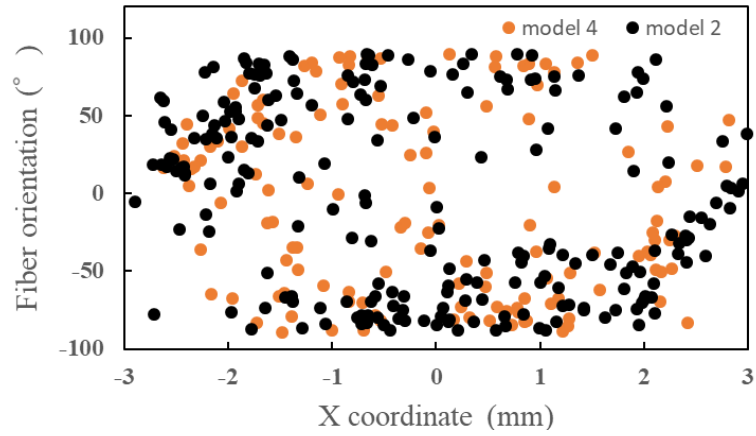


Fig. 3.15 Distribution of X-Y fiber orientation
(Effect of thickness change of injection gate angle 63°)

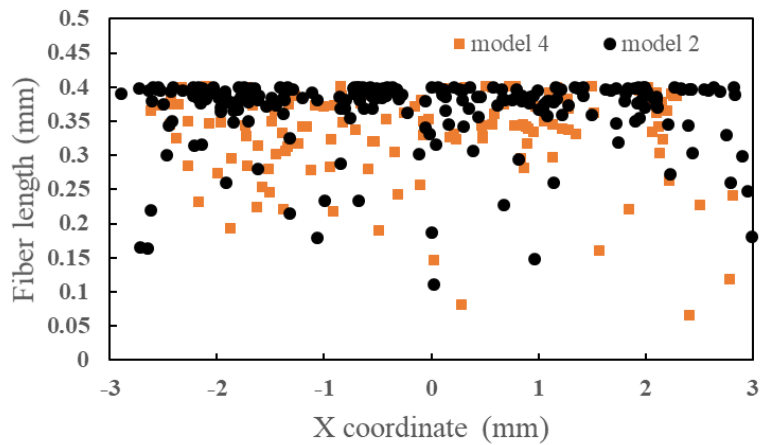


Fig. 3.16 Fiber length distribution in XY plane
(Effect of thickness change of injection gate angle 63°)

また、Table 3.3 に各金型モデルにおける空間 B での各方向に投影された繊維長の平均値を示す。この表から、厚さ方向に変化が発生することで Z 方向の繊維長が増加しており、Y 方向と X 方向の長さが減少していることから、射出口の角度によって幅方向の伸長流動の影響を抑制することができることが示唆された。一方で、すべてのモデルにおいて X 方向が最大値をとっていることから、幅方向の伸長流動の影響が支配的であることには変化がないことが示された。

以上の結果から、幅方向の伸長流動と金型厚さの変化が同時に発生する場合、射出口の角度によって金型中央を流動する繊維の 3 次元の配向が変化することが示されたが、射出口の角度が大きく幅方向の伸長流動による影響が高い場合は、厚さ方向の変化がほとんど見られなかったことから、厚さ方向の変化による影響を射出口を広くすることで抑制することが可能であることが示唆された。

Table 3.3 Average of fiber length in each direction from area B inflow

		X	Y	Z
Model A (1.5mm)	27°;model 1	0.284 mm	0.192 mm	0.097 mm
	63°;model 2	0.274 mm	0.186 mm	0.122 mm
Model B (1.0mm~2.0mm)	27°;model 3	0.271 mm	0.157 mm	0.166 mm
	63°;model 4	0.238 mm	0.178 mm	0.194 mm

最後に金型厚さのみを変化させた場合の結果を示す。なお、ここでの評価する繊維の流入位置は空間 B ではなく、 $-0.75 \text{ mm} < x < 0.75 \text{ mm}$ とした。これは、厚さ方向にのみ変化するため XY 面ではなく YZ 面での評価が適していると考えためである。この空間を空間 C とする。他の解析モデルでの空間 C は射出口の上部付近を流動する箇所となっており、スキン層とコア層両方を含む範囲である。

まず、これまでの解析も含む空間 C で流入した繊維の各方向の繊維長を Table 3.4 に示す。Table 3.4 より、モデル 1~4 に着目すると射出口の角度の変化や厚さ方向の変化の発生によって、X 方向の繊維長が減少し他方向の繊維長が増加していることから、X 方向の伸長流動の影響は小さくなっていることが示されている。一方で、X 方向の値が最大値をとっていることから、X 方向の伸長流動による影響が支配的にあることが示されており、こうした傾向は空間 B にて評価した場合と同様の傾向を示している。一方で、射出口が幅方向 (X 方向) に広がっておらず厚さ方向 (Z 方向) のみ変化するモデル 5 では、Y 方向 (流動方向) が支配的であることが示されている。このことから、幅方向の伸長流動が存在しない場合、金型厚さ方向の変化によって流動形態が変化することが示唆された。ここで、モデル 5 での YZ 面に投影された繊維の繊維配向分布と Y 方向と Z 方向の繊維長分布を Fig. 3.17 および Fig. 3.18 に示す。繊維配向分布のグラフから、金型面付近では 0° 付近に存在していることから流動方向である Y 方向に配向している。一方で、金型中央付近では $\pm 90^\circ$ 方向に配向して

いる。また、繊維長分布からも多くの繊維のZ方向の繊維長が増加していることから、Z方向に配向する傾向があるといえる。これは、伸長流動がZY面において発生し射出口の開口部にてZ方向に配向しやすくなり、金型厚さ方向において発生している速度差によって金型面付近は流動方向に配向しやすくなった結果、ZY面において 0° 方向に配向する傾向が強くなったと考える。以上の結果から、射出口の形状などを変化させ幅方向の伸長流動が発生しない環境において厚さ方向への変化が発生した場合、射出口付近から流動方向への配向を発生させることが可能であることが示唆された。

Table 3.4 Average of fiber length in each direction from area C inflow

		X	Y	Z
Model A (1.5mm)	27°;model 1	0.318 mm	0.166 mm	0.068 mm
	63°;model 2	0.280 mm	0.200 mm	0.089 mm
Model B (1.0mm~2.0mm)	27°;model 3	0.298 mm	0.149 mm	0.136 mm
	63°;model 4	0.261 mm	0.181 mm	0.145 mm
	90° ;model 5	0.128 mm	0.301 mm	0.120 mm

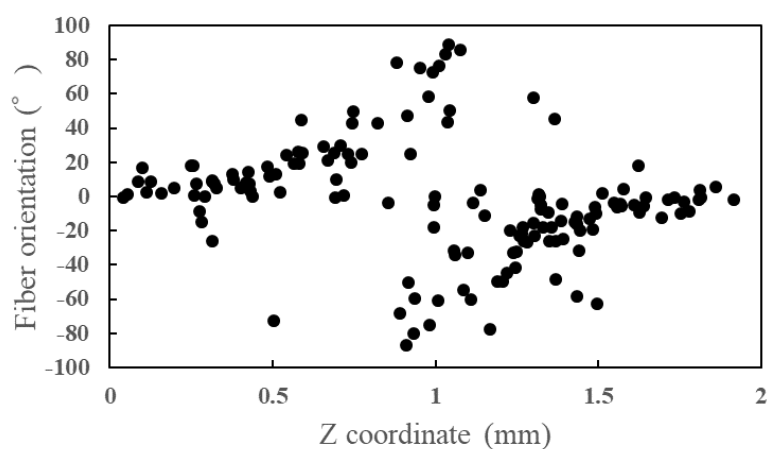


Fig. 3.17 Distribution of Z-Y fiber orientation (Only thickness change)

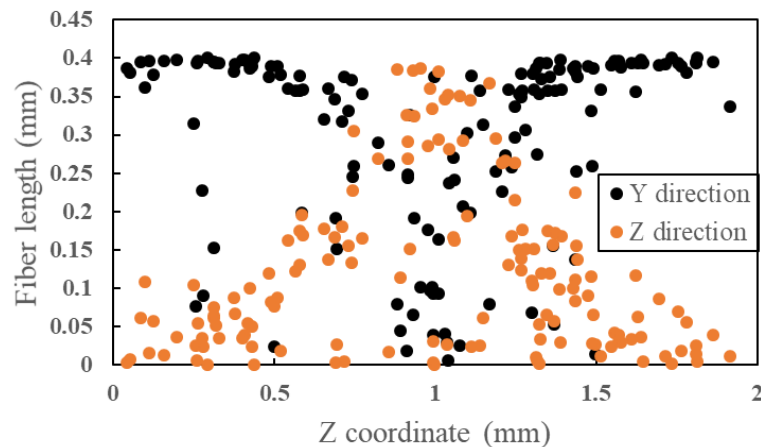


Fig. 3.18 Fiber length distribution (Only thickness change)

ここで、射出速度に関する考察を行う．厚さの変化のないモデル 1 での射出速度を 5 倍にした解析において、樹脂流動の形状から伸長流動による影響が大きくなり、その範囲も広くなる可能性が示唆された．また、現在主に使用されている平板の金型は射出口が広がっており、目的の金型幅（X 方向）まで到達した地点で厚さ方向（Z 方向）にも変化する形状となっている．つまり、伸長流動が支配的なモデル 1 や 2 の後に厚さ方向に変化するモデル 3.4.5 となる．しかし、金型厚さが変わるときに空間に伸長流動の有無によって繊維配向の傾向に大きな差が発生することが本解析にて示唆された．よって、ある一定の射出速度のラインによって平板へ流動する際の繊維配向の傾向が変化することが考えられる．また、モデル 5 における流動方向に配向する傾向は実物におけるスキン層と同じ傾向¹⁵⁾³⁷⁾である．よって、射出口付近における伸長流動による影響がない場合に厚さ方向への変化が発生する条件では、平板全体のスキン層が流動方向に配向することになり強度の差が発生しにくいといえる．一方で、伸長流動下において厚さ方向への変化が発生する際は厚さ方向の変化による影響は小さく流動方向に対し垂直方向に配向することになり、射出口付近において流動方向に配向するスキン層の繊維配向がみられなくなることから、射出口からの距離によって平板の強度に差が発生することが考えられる．以上のことから、より均一な強度を持つ平板を作成するためには射出口の形状や射出速度、開口から平板までの流動距離が重要なパラメータになることが示された．

3.4 結言

本章では、伸長流動による影響が大きいと考えられる射出口付近に着目し、射出速度や金型形状が繊維配向分布に与える影響の評価を実施した。以下に得られた知見を記述する。

1. 幅方向の伸長流動によって射出方向に対し垂直に配向する傾向があることが本解析においても示されたことから、粒子法を用いた本解析手法によって伸長流動による影響が考慮された繊維挙動の解析および評価が可能であることが示された。
2. 射出速度を上昇させることで樹脂流動において射出速度上昇前では見られなかったファウンテンフローの形態をとらず流動する挙動が確認されたことから、ある一定の射出速度を超えると樹脂流動の形態の変化が発生することが示唆された。また、繊維流動に関しては XY 方向の繊維長が増加したことなどから、射出速度を上昇させることで伸長流動による影響をより大きくすることができることが示された。
3. 幅方向の伸長流動下（射出口の角度あり）であれば、射出口角度の変化や厚さ方向の変化の発生によって幅方向の伸長流動の影響を緩和させることができるが、幅方向の伸長流動が支配的であることには変化がなく、幅方向の伸長流動が発生する中での厚さ方向の変化の影響は小さくなることが示唆された。
4. 金型厚さのみの変化の場合、Y 方向（流動方向）の繊維長が最大値となり流動方向に配向する繊維が増加したことから、幅方向の伸長流動が発生しない場合では射出口から射出された瞬間から金型面付近に流動方向の配向であるスキン層配向の繊維が発生し、より均一な繊維配向分布の平板を得ることができることが示唆された。
5. 射出速度の上昇によって伸長流動下の範囲が増加する可能性が示唆されたこと、幅方向の伸長流動の有無によって射出口付近の繊維配向の傾向が変化したことから、射出速度や射出口の形状、平板までの流動距離などが重要な因子であり、これらを調整することで射出口から同じ傾向を持つ繊維配向分布の平板を獲得することが可能であることが示唆された。

4 章 局所領域連結解析の提案およびせん断流動下における

繊維流動評価

4.1 緒言

前章では、伸長流動による影響が大きい射出口付近に着目し、射出口付近を拡大した解析モデルを用いて樹脂流動・繊維流動評価を実施した。一方で、射出成形においては射出口から離れた部分ではせん断流動による影響が支配的になる。しかし、繊維を模擬しつつ金型全体を考慮した解析を実施することは解析コストが膨大になり困難であるといえる。その中で、加藤ら⁵¹⁾はフローフロントに着目し局所領域移動解析を提案し、フローフロントの追跡およびフローフロント付近での繊維配向評価を実施した。しかし、局所領域移動解析ではフローフロント通過後の空間での繊維配向評価などを実施することができない。また、通常の局所解析では解析コストなどの問題によって流動方向の長さを十分に確保することが困難であり、せん断流動の影響を十分に評価することは難しい。また、2 章で実施した繊維位置を流入・流出部で折り返す局所解析は空間内の速度が変化しないモデルである。また、速度分布は 2 次関数で仮に設定している。そのため、流速分布の精度は高くない上に、流動中に流動速度が変化する現象を踏まえると不十分な解析モデルであるといえる。

以上の課題を解決するために、本章では新たに局所領域連結解析を提案する。局所領域連結解析とは、Fig. 4.1 のように局所領域を複数個つなぎ合わせてそれぞれ順番に解析を実施する手法である。

局所領域連結解析の解析手順としては、まず、Fig. 4.1 に示す空間 1 において解析し流出部付近の速度分布などを取得する。空間 1 の解析を実施した後に空間 2 を解析する。その時に空間 1 の流出部で取得していた速度分布を空間 2 の流入条件として付与する。速度分布を取得する場合には、速度分布が発生する金型厚さ方向に分割し、速度を取得するラインに存在している粒子の速度の平均値を流入速度 v_{ND} (N ; 空間数, D ; 分割数) とし計算する。今回のモデルではこの流入部の分割数は 11 であり、流動速度の差が大きいと考えられる金型面付近はより細かく分割している。これを空間ごとに実施し繊維配向などを評価する。これによって、局所領域のサイズが大きなものであっても、それを 1 つの局所領域として解析するよりも解析コストを抑えることが可能である。

以上のように局所領域連結解析によって、解析コストを抑えつつ十分な繊維の流動区間を確保することが可能となる。本章では、この局所領域連結解析を用いて、せん断流動の影響が大きい射出口から離れた箇所の局所解析を実施し、せん断流動下における繊維流動評価などを実施する。

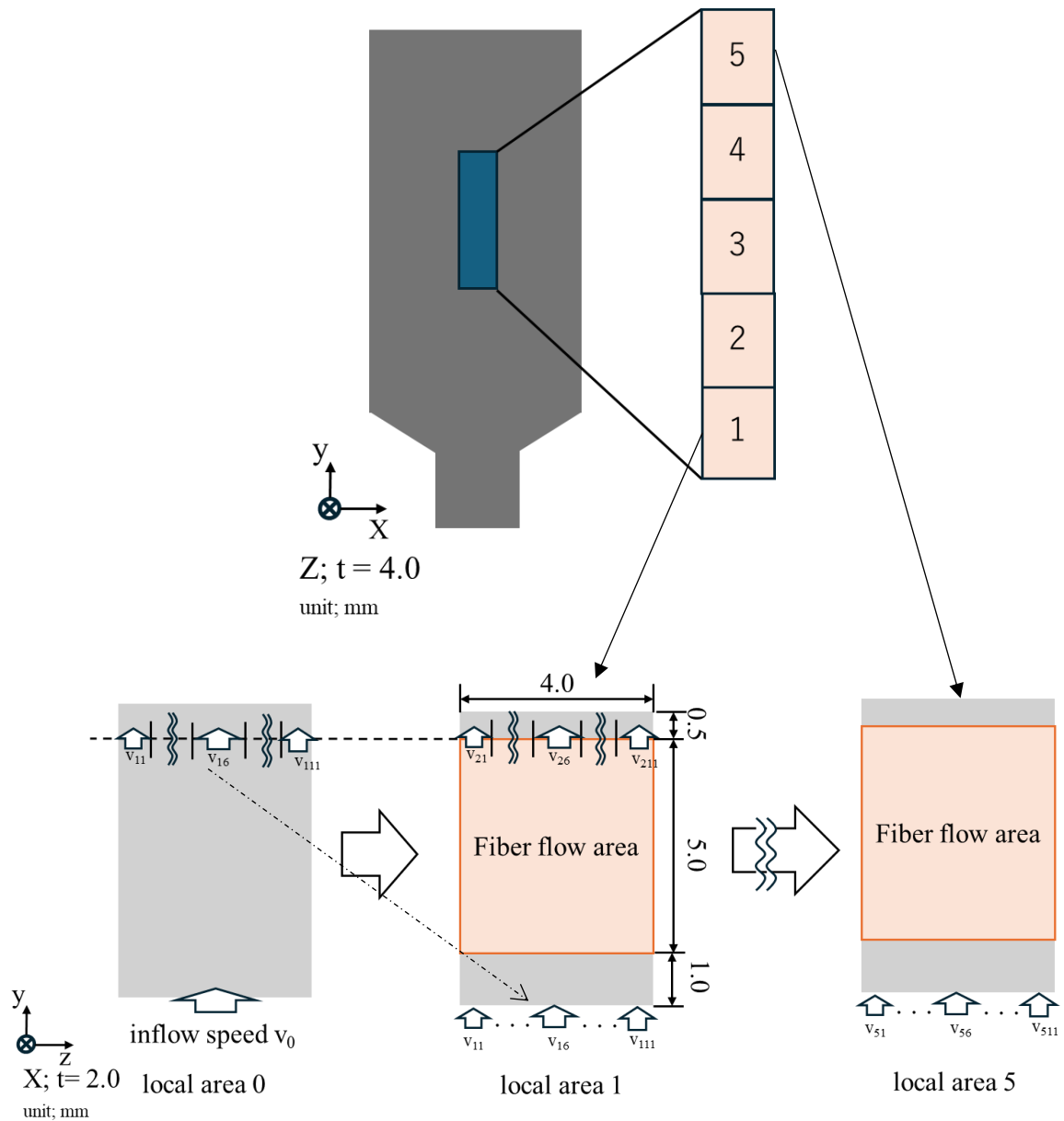


Fig. 4.1 Overview of analysis of connected local area

4.2 局所領域連結解析

4.2.1 局所領域連結解析の概要および解析条件

今回引き継ぐ条件としては、流入速度以外には繊維粒子の位置を引き継いでいる。繊維粒子の位置に関しては、空間から樹脂が流出した時間と繊維流動空間の端にきた時の時間との差と、その時の繊維の座標をそれぞれ保存しておき、次空間時にそれらの値を使用し流入時間とその時の繊維位置を指定している。一方で、温度分布に関しては各局所領域への流入時の温度分布はほとんど変わらないものとして同じ温度分布を付与している。また、Fig. 4.1に局所領域連結解析のモデルを示すが、繊維流動範囲は図に示すように空間における流入

位置と流出位置から少し離れた位置としている。これは、樹脂流動が安定している箇所を選択しているためである。なお、今回解析条件の取得のため空間 0 の解析を実施している。これは、空間 1 の速度分布を人工的なものではなく、粒子法の計算から取得するために流入速度を v_0 の一定として解析を実施しており、それぞれの空間と同じ場所で速度分布を取得している。そのほかの解析条件は Table 4.1 に示すものを使用して解析を実施する。本章では、金型厚さ方向に十分な粒子数の確保ができるため使用する粒子径は 0.125mm としている。本章での樹脂粒子の物性値に関しては、前章と同様のポリスチレンを想定している。付与する初期速度として 0.08 m/s および 0.02 m/s の 2 条件としており、本章ではそれぞれを高速流入時と低速流入時と定義し、流動速度による影響の評価も実施する。

Table 4.1 Numerical parameters

Particle size[mm]	0.125	
Inflow speed v_0 [m/s]	0.08	0.02
Mold temperature [°C]	30	
Resin temperature [°C]	200-250	
Resin freeze temperature [°C]	100	
Max time step [s]	1.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Analysis time of 1 local area [s]	0.3	1.2
Resin density [kg/m ³]	980	
Fiber density [kg/m ³]	1600	
Resin thermal conductivity [W/(m · °C)]	0.164 (30°C) 0.228 (250°C)	
Fiber thermal conductivity [W/(m · °C)]	10	
Resin specific heat [J/(kg · °C)]	1180 (30°C) 2260 (250°C)	
Fiber specific heat [J/(kg · °C)]	750	

4.2.2 解析結果

空間 1 における解析中央部での金型厚さ方向の速度分布と次空間で付与する流入速度分布を Fig.4.2 と Fig.4.3 に示す。空間内の樹脂粒子の速度に関して、高速流入時では中央の速度が流入時と比べ増加しているが、空間 0 にて金型面にて速度が大幅に低下し、その分中央付近の速度が上昇したためである。一方で、低速流入時では金型面による速度の低下が高速流入時と比べ小さいため大きな中央付近の速度上昇は発生していないが、全体的に不安定な速度分布となっている。これは、低速で流入しているために、せん断速度が小さく全体の粘度の差が小さくなり、粘性項によって発生する速度が小さく圧力項による速度が支配的になったためであると考え。粒子法において低速の方が、計算が不安定になることが経験的に知られており、今回の結果はその粒子法特有の影響が発生していると考え。

次に、空間 1 での流動速度 (●) と空間 2 での流入速度 (□) を比較する。流入速度に関しては、流入部を分割し設定しているため、平均値を取得した場所によって段々に変化する

ものとなっているが、空間 1 での流動速度と空間 2 の流入速度が概ね同じ速度になっていることから、空間 2 では空間 1 の速度を保存できているといえる。また、これは低速流入時も同様である。

また、Fig. 4.4 に空間 2 と空間 5 の流入速度を示す。Fig. 4.4 より、高速流入時には空間が進んでいくことで全体的な流入速度が低下していることがわかる。これは、高速流入時には金型面付近での速度が大きく、金型面による no-slip 条件の影響を受けやすい状況が続いており空間が移動するごとに速度の低下が発生したためであると考ええる。一方で、低速時には速度の低下は発生せず少しの速度の上昇がみられる。これは、高速流入時よりも金型面付近の樹脂温度が低下し金型中央と金型面付近の粘度差が大きくなったことによって、より大きな速度差が発生するように解析が進行したと考えるが、この速度の引き継ぎの点に関しては今後より詳細な検討が必要であると考ええる。以上の結果から、検討すべき点は存在するが、局所領域連結解析によって移動距離による流動速度の変化を考慮した局所解析が可能になったといえる。

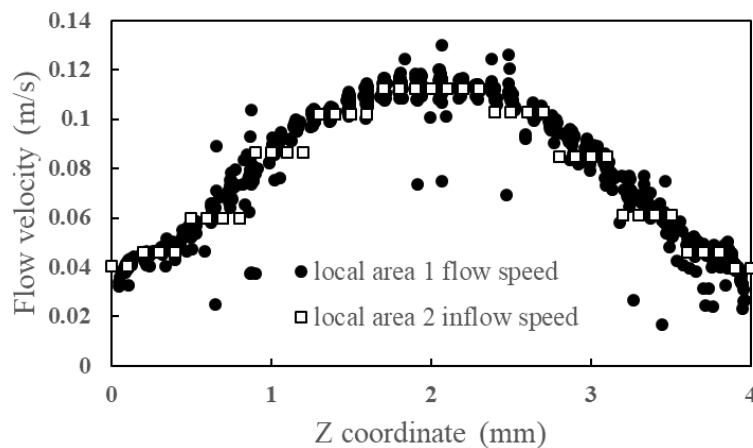


Fig. 4.2 Resin flow speed in local area 1 and inflow speed in local area 2 of high velocity inflow

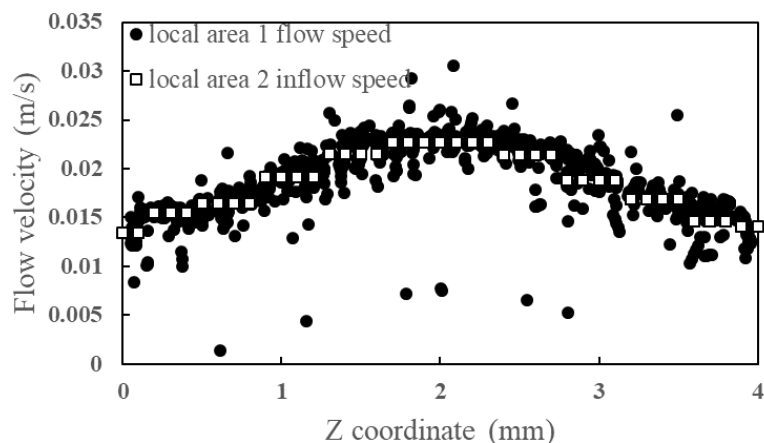


Fig. 4.3 Resin flow speed in local area 1 and inflow speed in local area 2 of low velocity inflow

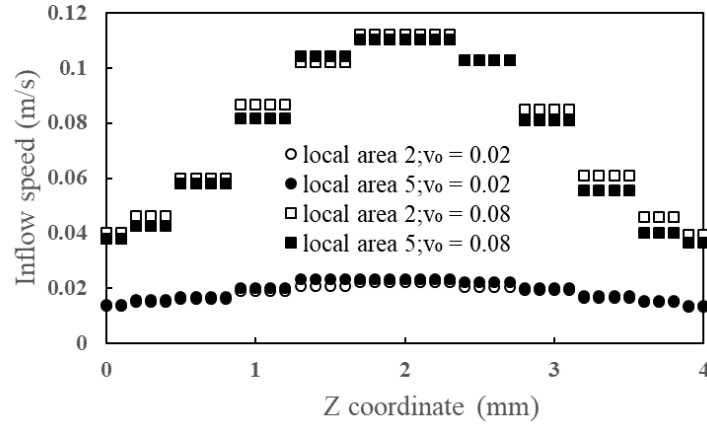


Fig. 4.4 Comparison of inflow velocity

次に Fig. 4.5 に高速流入時における空間 1 と空間 5 における繊維流動の挙動を示す．繊維の初期流入条件として，空間 1 において流入させる繊維の配向角度および位置はランダムに決定している．また，Fig. 4.6 に空間 5 における YZ 面に投影された繊維の配向分布を示しており， 0° で流動方向である Y 方向に配向していることを示している．Fig. 4.5 より，空間 1 においてはランダムに配向している一方で，空間 5 になれば流動方向に配向するスキン層とそうではないコア層に分かれていることが確認できる．また，Fig. 4.6 より高速流入時には Z 座標での繊維配向角の分布は空間の中央付近 ($Z = 1.5 \text{ mm} \sim 2.5 \text{ mm}$) においては規則的な配向ではないが，空間中央付近以外の場所では YZ 面ともに 0° 方向に配向していることから，流動方向に配向する傾向が強くなっているといえる．一方で，低速流入時には金型面付近においては $\pm 20^\circ$ 付近での流動挙動となっている．これは，流入速度からせん断流動による影響が高速流入時と比べ小さくなった結果，完全に流動方向に配向せず流動していると考えられる．以上の結果から，ランダムに配向している流入条件の場合，流動速度を増加させることで流動方向に配向しやすくなることが示された．

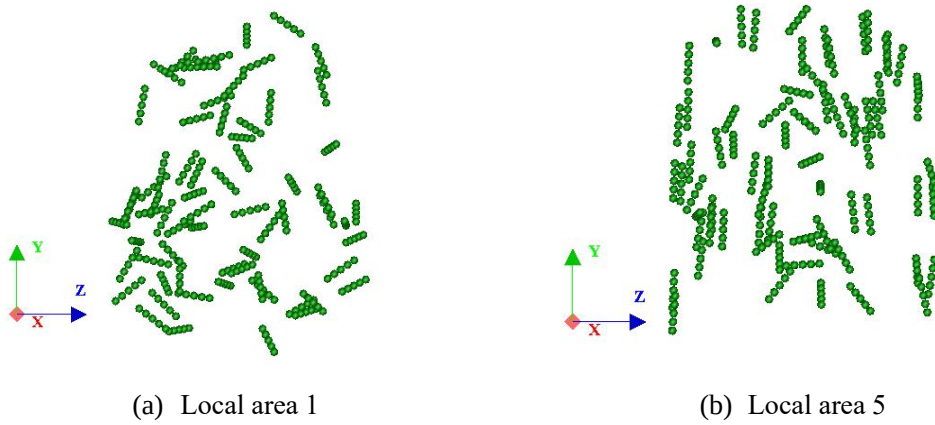


Fig. 4.5 Y-Z distribution of fiber particles in high velocity inflow.

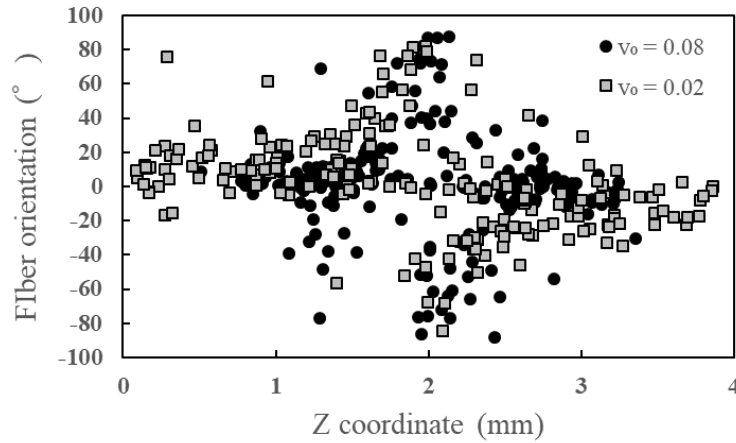
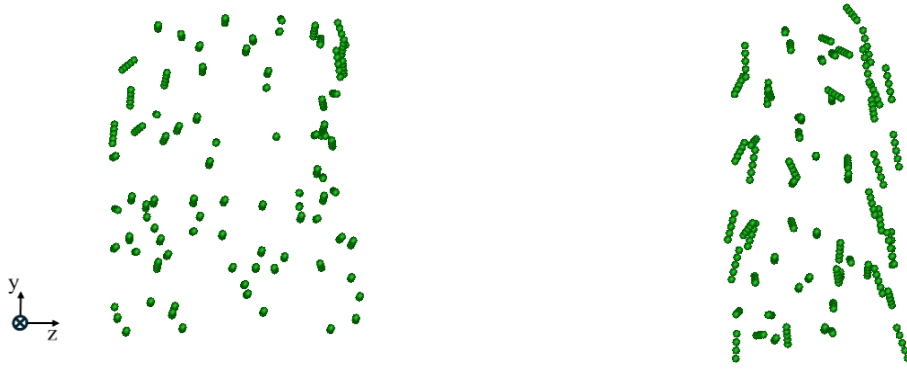


Fig. 4.6 Fiber orientation distribution in YZ plane

次に、流入させる繊維の配向を X 方向に固定した条件での解析結果を示す。これは、3 章において射出口の形状による伸長流動によって、金型の幅方向である X 方向に配向する傾向が強くなるという結果を踏まえて X 方向に固定した解析を実施する。なお、繊維位置に関してはランダムに決定している。また、ここでは各方向に投影された繊維長での比較を実施する。本章での粒子径は 0.125 mm であるため繊維長は 0.5 mm (粒子 4 つ分) 程度となれば完全にその方向を向いていることを示している。

Fig. 4.7 に高速流入時における繊維流動の挙動を示す。ここから空間 1 では X 方向に配向していた繊維が、空間 5 では金型面付近では流動方向に配向している繊維が多い一方で、空間中央付近においては X 方向に配向しており繊維の回転が発生していない繊維が多く存在していることが確認できる。

Fig. 4.8 および Fig. 4.9 に高速・低速流入時での金型厚さ方向の X 方向および Y 方向繊維長を示す。これらのグラフは 0.5mm 付近に存在していれば、その方向に配向していることを示している。高速流入時では、空間中央付近 ($Z = 1 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$) では多くの繊維が X 方向の繊維長が 0.5 mm であることから X 方向に向いており、その他の範囲ではほとんどの繊維が 0.5mm から大幅に変化しており Y 方向に向いていることがわかる。これは、Fig. 4.2 の樹脂の流動速度分布から空間中央付近の空間の流動速度の差が小さく、せん断流動の影響をほとんど受けなかったためであると考ええる。一方で、低速流入時での中央部付近以外の空間では、せん断流動の影響が小さいため繊維の回転が発生したとしても十分な回転が発生していないため、様々な X 方向・Y 方向長さが存在しており配向状態がランダムである。



(c) Local area 1

(d) Local area 5

Fig. 4.7 Y-Z distribution of fiber particles in high velocity inflow.

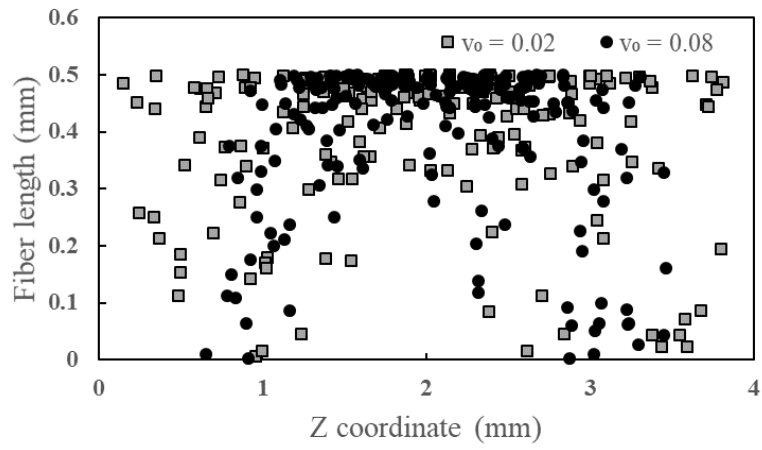


Fig. 4.8 Distribution of length in X direction

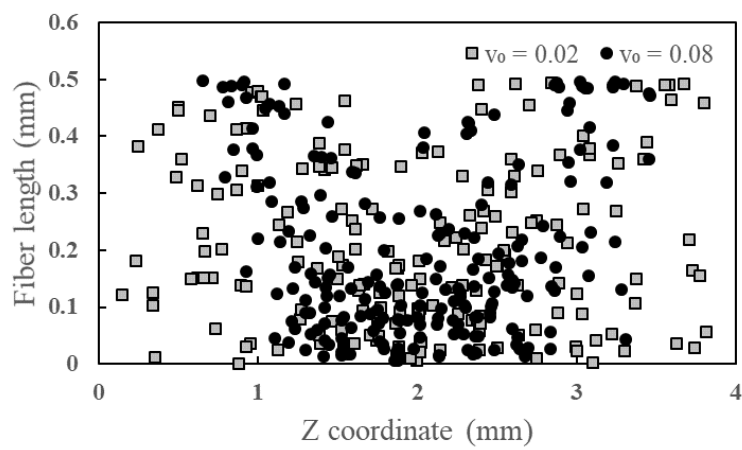


Fig. 4.9 Distribution of length in Y direction

また、Fig. 4.10 に各地点における X 方向に支配的に配向している繊維の割合のグラフを示す。ここでの X 方向に支配的な配向とは、X 方向に 0.4 mm 以上の長さがある繊維のこととする。このグラフから、金型中央部 ($Z=2.0$ mm) 付近において高速流入時では X 方向に支配的な配向をしている繊維の割合が 8 割以上存在しており、低速流入時では 7 割程度である。よって、高速流入時の方が X 方向に支配的に配向している繊維が多く存在していることがわかる。一方で、金型面 ($Z=0$ mm, 4.0 mm) 付近では高速流入時ではほとんどの繊維が X 方向には配向しておらず、低速流入時の方が X 方向に支配的な繊維が多く存在していることが示されている。ただし、低速流入時の繊維に関しては 4~5 割程度の繊維が X 方向に配向していることから、半分程度の繊維は回転が始まっていることも示されている。

この結果から、X 方向に配向していた繊維は、せん断速度の大きい場合、もしくは流動自体の速度が小さい場合に、繊維の回転が発生しやすくなることが示唆された。せん断速度が大きい場合は、空間内の速度差が大きい場合であり繊維の両端の位置関係のずれが発生しやすいといえる。また、せん断速度が大きい場合少しのずれが発生した場合、せん断流動によってその回転が進行し流動方向に向きやすくなるため繊維の回転が発生しやすいと考える。一方で、空間内の流動速度が小さい場合に関しては空間内の速度が小さいため、高速流入時には見られない小さな速度変化による影響を強く受け、繊維の回転が始まりやすくなる。しかし、高速流入時と比べせん断速度が小さいため高速流入時に見られた繊維の回転運動の促進が弱い。そのため、低速流入時には繊維の回転は発生するが、流動方向に向く繊維の割合は高速流入時と比べ小さくなっていると考えられる。よって、より流動距離を確保することで流動方向により強く配向すると考える。また、小倉らによる実験での先行研究¹⁶⁾では、低速では流動方向に配向する繊維割合が多く高速では幅方向 (X 方向) に配向している繊維が多くなっており、本解析で見られた繊維配向の傾向と定性的に一致している。また、空間としては繊維の流動距離は 2.5 cm であり、短い流動区間でこのような回転がすでに発生しているといえる。よって、せん断流動の影響が支配的な空間では短い区間で X 方向に配向している場合でも回転が発生することが示唆された。

ここで、2.2 節で示した center line と side line の到達地点の差に着目する。2 地点の差が発生している場合、幅方向の広がりも発生しているため幅方向の伸長流動の影響も存在しているといえる。一方で、2 地点の差がない場合幅方向の広がりも発生しておらず、せん断流動の影響が支配的な空間であるといえる。よって、この 2 地点の到達地点が同程度になる地点から、流動方向への配向変化が発生していると考えられる。また、この 2 地点の到達地点は樹脂粘度や射出速度によって変化することが本論文にて示されたことから、繊維の含有量や樹脂温度といった粘度に影響を与えるパラメータや射出速度などフローフロントの形状に影響を与えるパラメータが重要な設計因子であり、流動方向の配向の発生地点の制御が可能であることが示唆された。

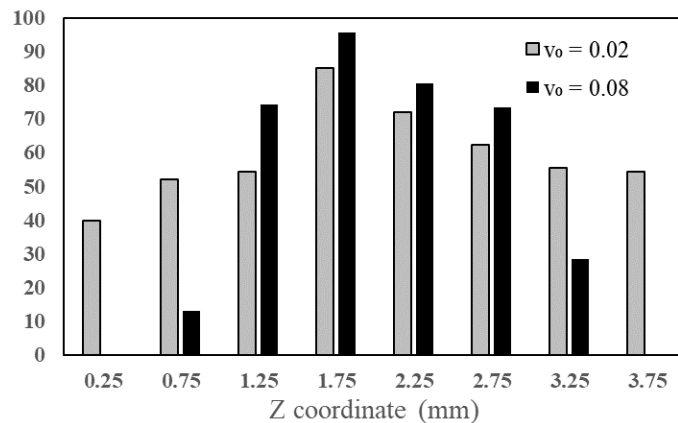


Fig. 4.10 Percentage dominant in X direction

4.3 金型厚さによるせん断流動下での繊維流動への影響評価

4.3.1 解析概要

前節では、局所領域連結解析の提案によって、せん断流動下での繊維流動評価を実施した。その結果、空間内の速度の大きさやせん断速度の大きさによって繊維の回転量が変化することが示された。よって、金型の厚さを変更した場合も解析結果に変化が発生することが予想される。そこで、本節ではこの局所領域連結解析を用いて、せん断流動が主となる流動における金型厚さの影響の評価を行う。今回は金型厚さ 4 mm を 3 mm へと解析モデルを変更し解析を実施した。金型厚さ以外の変更する条件としては、流入部の分割数であり分割する長さが変化したことから 11 個から 9 個に変更している。そのほかの初期流動速度などの解析条件は変更していない。

4.3.2 解析結果

Fig. 4.11 と Fig. 4.12 に高速流入時・低速流入時それぞれの空間 2 と空間 5 における流入速度を示す。両グラフともに、基本的に空間が移動することによって、中央付近の速度は上昇し金型付近の速度が低下していることがわかる。これは、金型の厚さが薄くなったことによって、金型面の境界条件による速度低下の影響をより受けやすくなり、質量保存則の観点から、中央付近の速度が上昇したと考える。よって、金型厚さが薄くなれば金型面による影響をより強くなり、せん断流動の影響がより大きくなると考える。

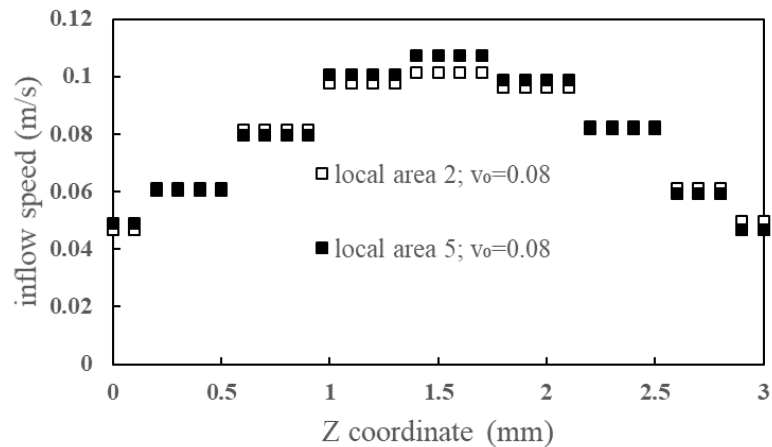


Fig. 4.11 Comparison of inflow velocity in of high velocity inflow

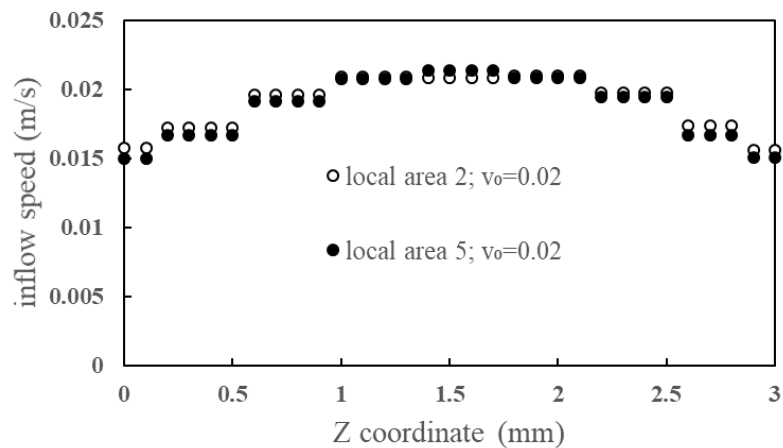


Fig. 4.12 Comparison of inflow velocity in of low velocity inflow

次に繊維挙動の結果を示す。まず、流入時の配向をランダムで設定した場合の結果を示す。Fig. 4.13 に YZ 面での繊維配向分布を示す。このグラフでは、前節と同様に 0° で流動方向である Y 方向に配向していることを示している。高速流入時・低速流入時ともに中央付近以外の繊維は 0° 方向および $\pm 20^\circ$ 程度に配向しており、金型厚さ変更前と同様の傾向を示しているが、金型厚さが小さくなったことによる中央付近のせん断速度の増加によって中央付近の配向が変化しない範囲が小さくなっている。金型厚さが薄くなれば、せん断流動の影響が大きくなる。特に高速流入時に関しては、その影響はより大きくなる。そのため、中央付近に存在する繊維の回転が発生しない範囲が小さくなったと考える。

次に、初期配向を X 方向に配向固定した場合の結果を示す。Fig. 4.14 に X 方向長さ、Fig. 4.15 に X 方向に支配的に配向している繊維の割合のグラフを示す。X 方向長さに関しては、高速流入時においてはあまり変化していないが、低速流入時には中央付近の X 方向長さは小さいものが多いとあり、回転が発生している繊維が多いといえる。また、Fig. 4.15 に

着目すると、高速流入時には中央付近の値が金型厚さ変更によって小さくなっている。これは、中央付近のせん断速度が金型厚さを薄くしたことで増加し金型厚さ変更前と比べ回転しやすくなったためであると考えられる。また、低速流入時に関しても高速流入時と同様に中央付近の値が小さくなっているため、高速流入時と同様の結果が得られている。一方で、低速流入時の金型面付近に関しては4割程度の繊維がX方向に配向していることから、金型厚さが変化した場合でも、その傾向は大きく変化していないことが示されている。これは、金型面付近では金型面の速度境界条件の影響によって金型面周辺のせん断流動に大きな変化が見られないためであると考えられる。以上のことから、流動速度が大きければ繊維の回転が発生する割合が増加したため、金型厚さによる影響は空間全体で発生しているといえる。一方で、流動速度が小さければ金型内の場所によって繊維の回転が発生する割合に変化が発生したため、金型厚さによる影響度は金型内の場所によって変化することが示唆された。

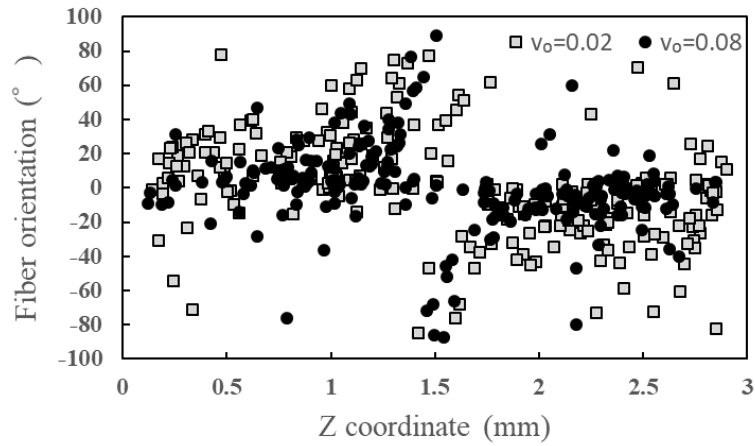


Fig. 4.13 Fiber orientation distribution in YZ plane

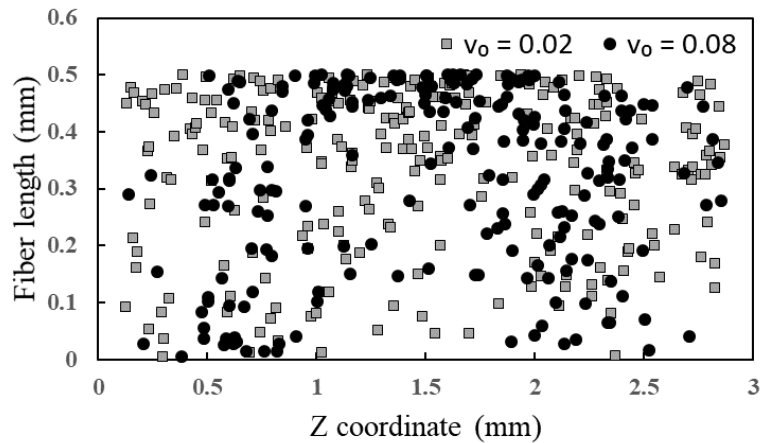


Fig. 4.14 Distribution of length in X direction

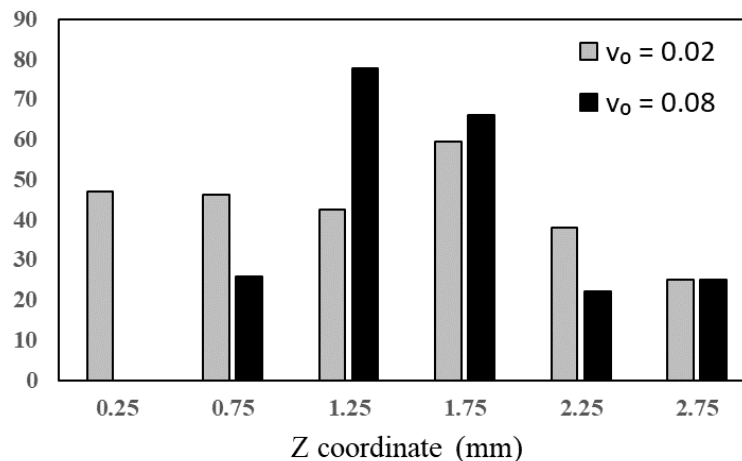


Fig. 4.15 Percentage dominant in X direction

4.4 結言

本章では，局所領域連結解析を提案し，速度変化の伴うせん断流動が支配的な空間における繊維流動評価を実施した．以下に得られ知見を記述する

- 本章で提案した局所領域連結解析によって，解析コストを抑えつつ流動距離を確保し速度変化の考慮も可能な解析の実行が可能となった．
- 金型内の中央部付近はせん断流動の影響が小さく，繊維配向に大きな変化が見られない．一方で，金型面付近においてはせん断流動の影響が大きく，流動方向に配向しやすいことが示された．また，高速流入時ではYZ 配向角が 0° まで変化していたものが低速流入時では $\pm 20^\circ$ 程度の繊維も多く存在していたことから，流動速度が小さければせん断流動の影響が小さくなり，流動方向への配向強度は小さくなることが示唆された．
- 伸長流動による影響を考慮し，初期配向を X 方向配向にした繊維を流入させた結果，せん断速度が大きい箇所と流動速度の小さい箇所が繊維の回転が発生しやすいことが示唆された．また，せん断速度が高い箇所の方が繊維の回転がより強くなり，流動方向に配向しやすくなることが示唆された．
- 流動距離が数 cm で幅方向に配向していた繊維に回転が発生したことから，せん断流動の影響が支配的な空間に到達した場合，幅方向に配向している繊維でも短区間で回転が発生することが示唆された．また，せん断流動が支配的な空間（幅方向の伸長流動がなくフローフロントが直線的）の発生には樹脂粘度や射出速度が重要であることから，繊維の含有量や樹脂温度といった粘度に影響を与えるパラメータや，射出速度などフローフロントの形状に影響を与えるパラメータが重要であり，これらのパラメータを変更することで流動方向の配向の発生地点の制御が可能であることが示唆された．
- 金型厚さを 25% 薄く変更した結果，中央付近の繊維配向が変化しない範囲が小さくなったことから，せん断流動による影響範囲が広くなり流動方向に配向しやすく，その

範囲も広くなることが示唆された。また、初期配向を幅方向に固定した結果、流動速度が大きければ全体的に繊維の回転が発生する割合が増加したことから、金型厚さによる影響は空間全体で発生することが示唆された。一方で、流動速度が小さければ金型内の場所によって、繊維の回転が発生する割合に変化が発生したことから、金型厚さによる影響度は金型内の場所によって変化することが示唆された。

5 章 複雑形状モデルによるフローフロント合流・分岐での

樹脂・繊維流動評価

5.1 緒言

本章では、複雑形状モデルとして局所領域の形状をフローフロントの合流が発生する T 字・十字状の金型モデルを作成し解析を実行する。背景として、最初に Fig. 5.1 に実験で得られたフローフロント合流前と合流後の繊維配向分布を示す。MD が流動方向，TD が金型の幅方向，ND が厚さ方向を示している図であり，フローフロントの合流後である rib 部で繊維配向が平板などの単純形状では見られない MD-TD-MD-TD-MD の 5 層の分布が発生することが報告されている^{15) 16)} が，解析での再現に関しては報告されていない。一方で，フローフロントの合流が発生する際には，複雑な流動形態をとっていると考えられ，その中で繊維配向を評価するためには，樹脂流動結果を用いた繊維配向予測よりも繊維挙動の追跡による流動評価が必要であると考えられる。そこで，今回粒子法を用いた解析によってフローフロント合流部やその前後で発生している現象を検討する。その中で，流動速度による影響や流入位置の変更による繊維配向分布への影響評価を実施する。

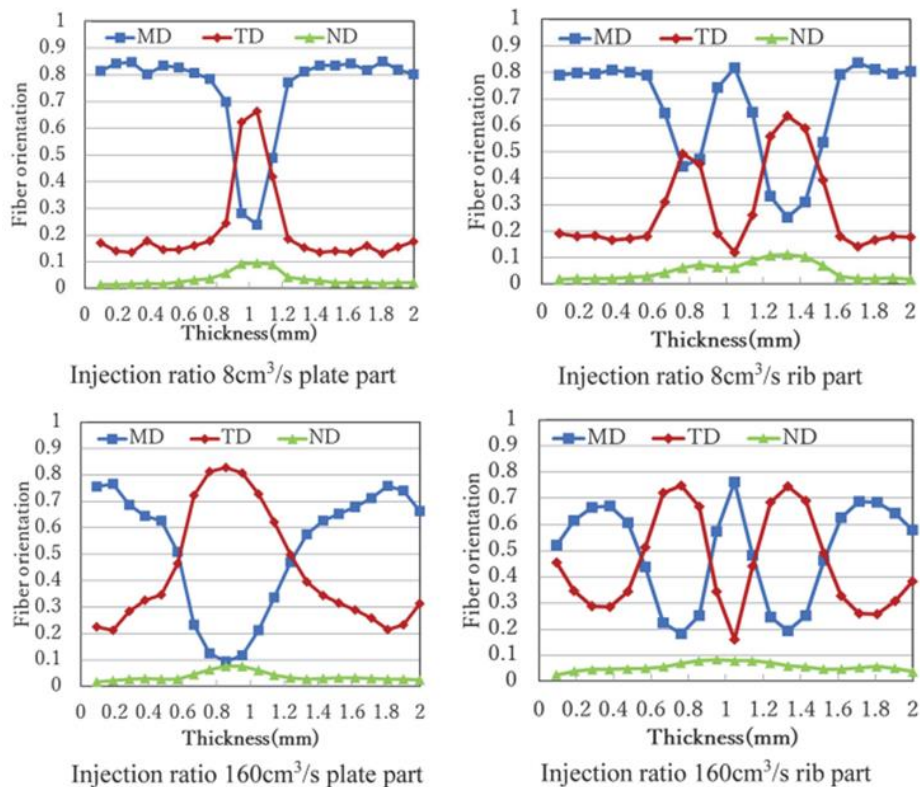


Fig. 5.1 Fiber orientation observation result¹⁶⁾

5.2 T字金型モデルを使用した解析によるフローフロント合流時の樹脂・繊維流動評価

5.2.1 解析条件

Fig. 5.2 に解析で使用する金型モデルを示す．左右の x 方向から plate 部（図中①）に樹脂粒子を流し，中央部で合流し rib 部（図中②）である上方向に流れていくモデルになっている．今回の解析では，plate 部底面を $y=0$ ，rib 部における厚さ方向の中心を $x=0$ とし， $y=0$ の plate 部の金型面を下面， $y=3.0\text{mm}$ の plate 部の金型面を上面と本論文では定義する．また，図中③の空間においては，一定時間ごとに位置と繊維配向をランダムに決定した繊維を発生させている．粒子同士が重なり合うと圧力が局所的に上昇し解析が停止するため，繊維発生時には繊維同士が重なり合わないよう条件を設定し，繊維粒子周辺の樹脂粒子は計算から除外している．z 方向は樹脂面であり境界速度条件として free-slip 条件を，そのほかは金型面と想定しており基本的には no-slip 条件を付与するが，解析の安定性を考慮し繊維を発生させる場所（図中③）では free-slip 条件を付与している．

また，解析で使用する物性値などを Table 5.1 に示す．使用する粒子径は 0.1mm としている．これは，実験において rib 部において 5 層の繊維配向分布が発生しており，本解析において 1 層あたり 5 粒子程度は必要であると考えたため粒子径は 0.1mm とした．本章での樹脂粒子の物性値に関しては，前章と同様のポリスチレンを想定している．流入温度に関しては，金型厚さの中央を 250°C ，金型面を 200°C とする 2 次関数で作成される温度分布を流入粒子に付与する．金型温度に関しては，繊維を発生させる場所（図中③）においては，金型面との温度のやり取りを行っていない．

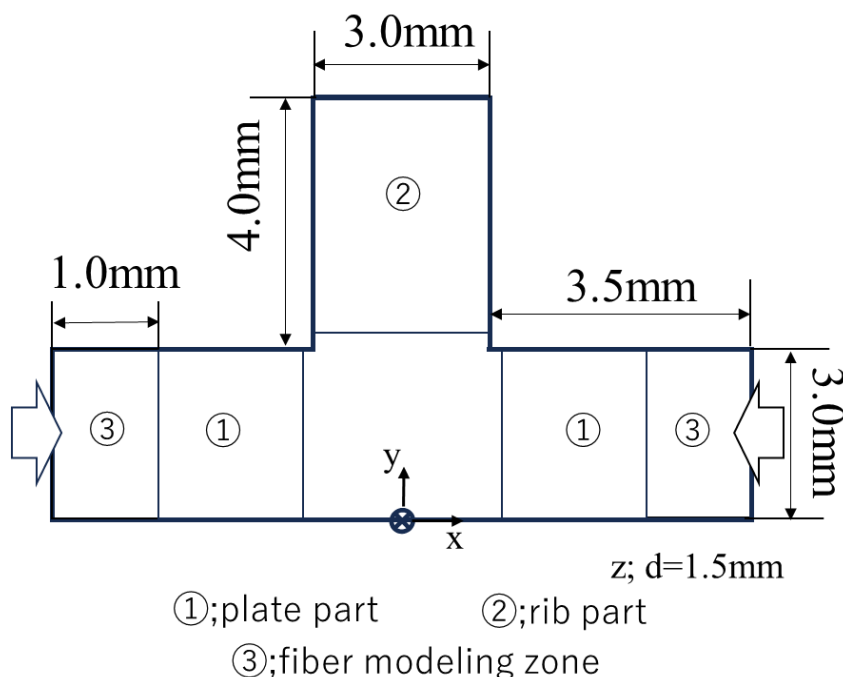


Fig. 5.2 Numerical analysis model.

Table 5.1 Numerical parameters

Particle size[mm]	0.1	Fiber density [kg/m ³]	1600
Inflow speed [m/s]	0.02	Resin thermal conductivity [W/(m · °C)]	0.164 (30°C) 0.228 (250°C)
Mold temperature [°C]	30	Fiber thermal conductivity [W/(m · °C)]	10
Resin temperature [°C]	250~200	Resin specific heat [J/(kg · °C)]	1180 (30°C) 2260 (250°C)
Resin freeze temperature [°C]	100	Fiber specific heat [J/(kg · °C)]	750
Max time step [s]	0.5×10^{-4}	Zero shear viscosity [Pa · s]	2800
Resin density [kg/m ³]	980	Fiber length (mm)	0.5

5.2.2 解析結果

Fig. 5.3, Fig. 5.4 に 0.2 秒時の plate 部 ($x=-0.03 \pm 0.001$) と rib 部 ($y=0.045 \pm 0.001$) での金型厚さ方向に対する樹脂粒子の速度分布を示す. plate 部の速度に着目すると, 金型中央部付近は流入速度よりも速く金型面付近の速度は 0 m/s まで低下しており, この短い区間においても十分に金型厚さ方向に速度分布が発生している. 金型面付近の速度が流入時と比較して低下していることから, 質量保存則から金型中央部付近の速度が流入速度よりも上昇したと考える. また, plate 部上面付近 ($y = 3 \text{ mm}$ 付近) において速度が乱れており, plate 部下面と比べ全体的に少し大きいことが示されている. これは, T 字金型に存在している角において解析上の不連続点に起因する圧力勾配の変化による速度上昇を確認しており, それによる影響で金型上面と下面で粒子の挙動に違いが発生したと考える. また, plate 部での中央部($y=1.5 \text{ mm}$)付近では速度分布の少し幅が発生している. これは, 合流部の発生による解析空間全体の圧力の乱れによって速度の振動が発生していると考ええる.

次に, rib 部と plate 部の速度を比較すると, rib 部の速度が最大で plate 部の速度の 2 倍程度の速度になっていることが示されている. これは, plate 部と rib 部の厚さが同じであることから 2 倍程度であることは妥当な結果だといえる.

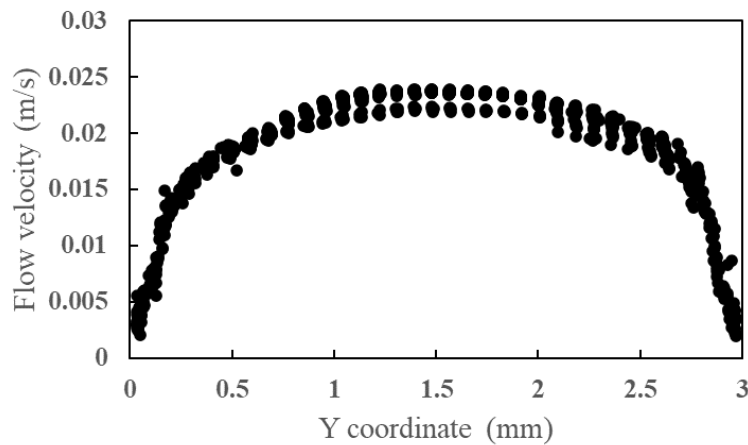


Fig. 5.3 Resin flow velocity of plate part.

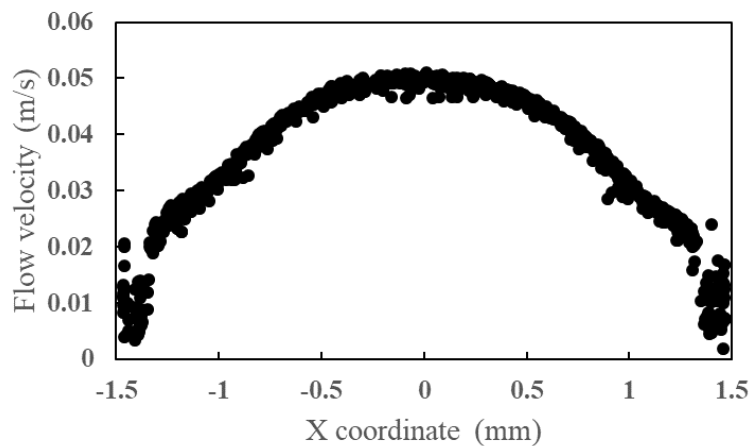


Fig. 5.4 Resin flow velocity of rib part.

また、Fig. 5.5 (a)に plate 部右側における合流部付近の粒子の位置の推移を示す。今回、任意の時間に x 座標が 2 mm 付近に存在していた粒子の一部を取り出し、グラフを作成した。各粒子の軌跡を線で表現している。プロット時間は一定 (0.01 秒) であるため、プロット間が速度を示している。速度変化の傾向によってプロット点の形状を揃えている。また、Fig. 5.5 (b)~(d)に粒子の流動速度の推移をグラフ化し、それぞれの特徴ごとにグラフ分けを行ったものを示す。ここでの速度は各ステップ間の移動距離を出力ステップ時間で割ったものを示している。フローフロントの合流付近において金型下面から中央部付近までに存在している粒子の速度は、大きさに差はあるものの流動速度の減少がみられる。特に、金型下面付近の粒子に関してはその減少量も大きくほとんど動いていない粒子も存在している。また、その速度低下がみられた粒子はその後 rib 部に移動するにつれ速度が上昇している。一方で、金型中央部付近から上面に存在している粒子は速度の減少は見られず、rib 部に向かうにつれ速度が上昇している。金型下面から中央部付近までの速度変化の傾向は実験¹⁶⁾で

も見られた現象である。一方、実験において金型上面から T 字金型の角を通過する樹脂は、速度は小さくその値も大きく変化しないが、本解析は速度が一度上昇し rib 部では減速する挙動を示している。解析ステップが 3~4 であることからこの速度上昇は plate 部と rib 部の変化点である金型の角付近で発生していることがわかる。これは、角付近で発生している圧力勾配の急激な変化によって一度速度が上昇するが、rib 部では圧力勾配の急激な変化もないため金型面の no-slip 条件の影響も受け速度が低下し流動していると考えられる。以上より、本解析では plate 部上面から rib 部の金型面付近では実験とのずれが存在しているが、それ以外の樹脂流動はよく再現できているといえる。

Fig. 5.6 に粒子の流入位置による粒子位置の推移を示す。黒い粒子ほど流入時の位置が金型面に近いことを示している。0.15 秒時のフローフロント合流前では、ファウンテンフローを形成しながら plate 部を流動している。また、plate 部下面（図中 A）に着目すると、0.3 秒時には金型面から少し離れた位置に存在していた粒子がファウンテンフロー現象によって金型下面付近に移動しており、その一部の粒子が固化温度に達し流動できなくなり残留している結果が示された。しかし、固化せずに流動している粒子は後ろから来る粒子に押し出された結果、plate 下面において赤色やオレンジ色の粒子が残る一方で、その上部には灰色の粒子が存在する結果となっている。次に、0.3 秒時において rib 部（図中 B）に着目すると、plate 部では金型上面付近に存在した粒子が rib 部においてフローフロントを形成していることが示されている。単純な平板では金型中央部を流動する粒子がフローフロントを形成しているが、フローフロントが合流した後の流れに関しては異なる傾向を示している。これらの樹脂粒子の位置関係は繊維配向への影響も大きいと考える。また、流出部に到達した 0.45 秒と 0.6 秒時の図を比較すると、rib 部中央を流れる粒子が流入時 plate 部中央付近に存在していた粒子から流入時金型下面に存在していた粒子へと変化していることが示された。以上より、フローフロント合流後から一定時間の間、空間を流れる樹脂の特性などが変化する可能性があることが示唆された。

ここで、Fig. 5.7 に 0.6 秒時における rib 部 ($y=0.045 \pm 0.001$) での金型厚さ方向に対する樹脂粒子の温度分布を示す。このグラフより rib 部の中央部の温度が低下していることが示されている。これは、平板のような単純形状の金型では見られない温度分布である。Fig.5.6 の結果も踏まえると、plate 部において金型下面によって冷却された粒子が rib 部の中央部を流動しているため、このような温度分布になったと考える。本解析では金型温度も一定であるため実現象よりも冷却が進んでいる可能性はあるが、plate 部下面付近を流動する樹脂は金型による冷却は起こっており実現象でもこのような rib 部での温度分布は発生していると考えられる。また、樹脂温度は樹脂特性に影響を与え樹脂特性は樹脂流動や繊維配向に対して影響を与えるため、この結果は rib 部と plate 部での流動の違いに関する一因であることが示唆された。

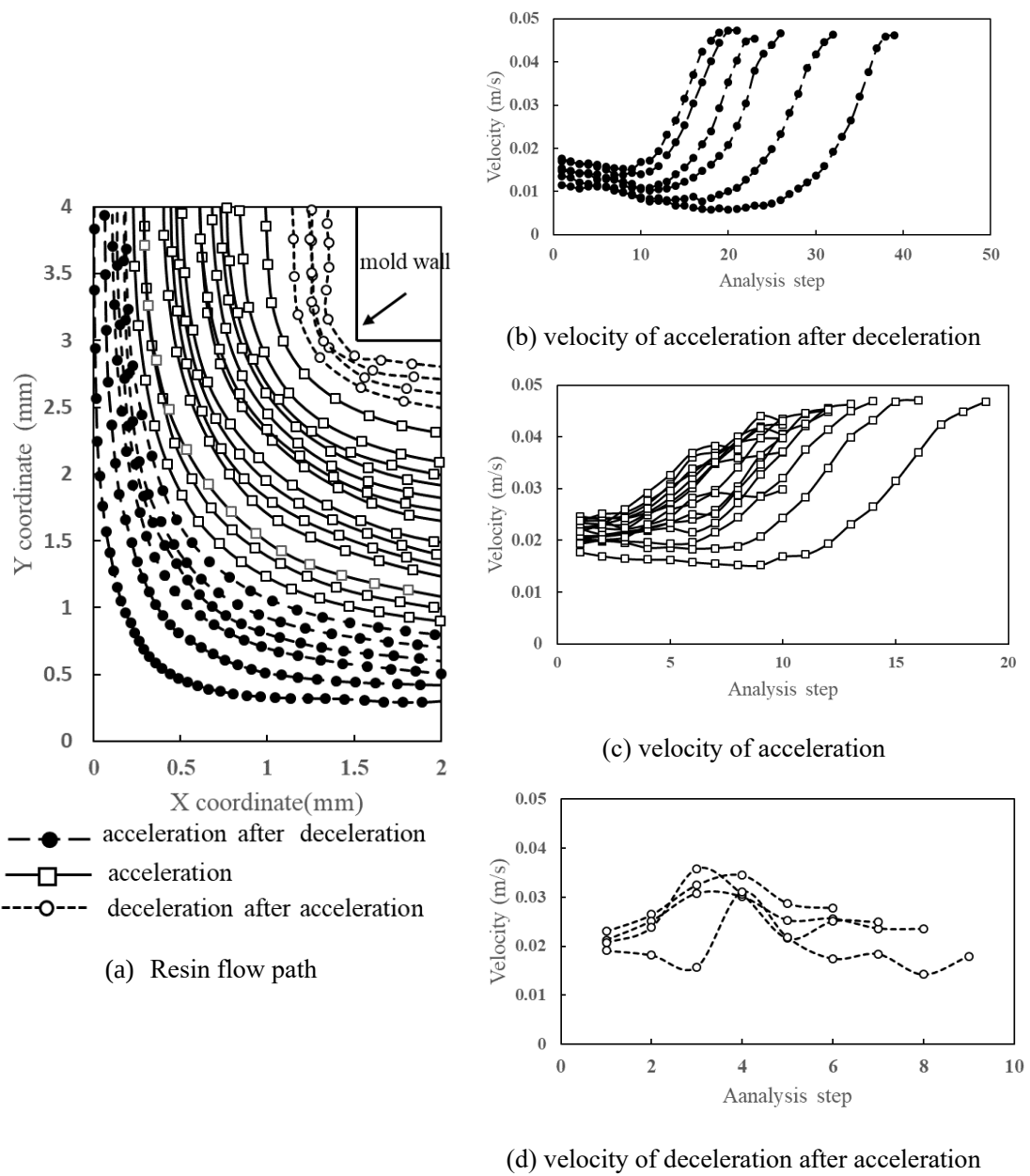


Fig. 5.5 Resin flow path and resin velocity

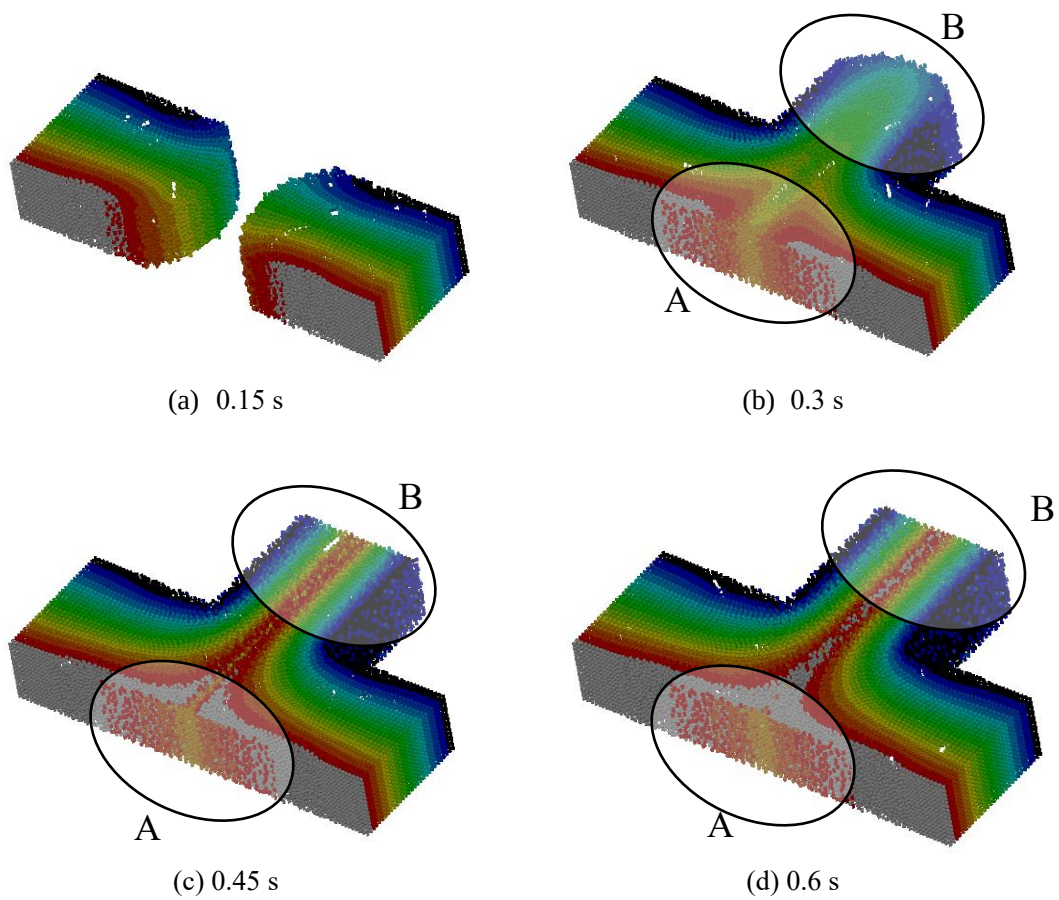


Fig. 5.6 Resin position according to inflow position

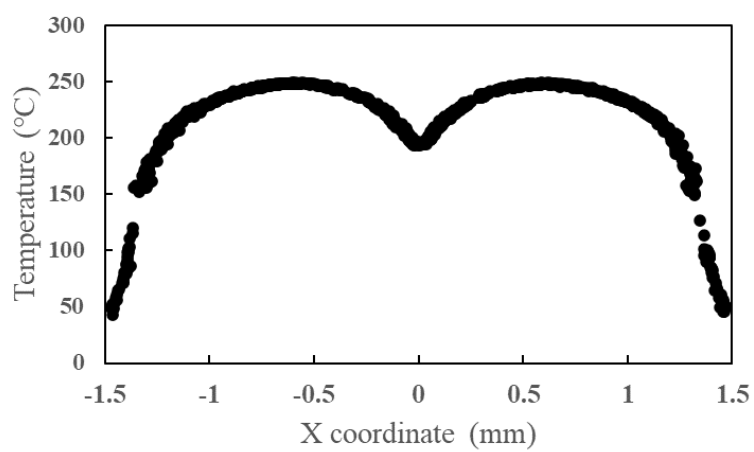


Fig. 5.7 Resin temperature of rib part.

ここから、繊維流動に着目する。Fig. 5.8 に各時間ステップにおける繊維のみを表示した図を示す。Plate 部では各時間ステップにおいてランダムに配向しているが、rib 部では多くの繊維が流動方向に向いている。また、Fig. 5.9~5.12 に plate 部での繊維生成時と rib 部での流出時の 2 か所における繊維中心位置と Y-X 面および Y-Z 面の 2 面における繊維配向の分布をそれぞれ示す。Y-X 面での繊維配向は流動方向を 0° とし、流動方向と金型厚さ方向の角度を、Y-Z 面での繊維配向は Y-Z 面における Y 軸とのなす角度を繊維配向角度としている。Fig. 5.9, 5.10 より、繊維生成時はランダムに配向させて繊維を生成しているため繊維配向に偏りがなく存在していることが示されている。Fig. 5.11, 5.12 より、rib 部での繊維配向に関しては多くの繊維は流動方向 (MD) である 0° 付近の角度を向いていることが示されている。Y-X 面での繊維配向のみならず Y-Z 面でも多くの繊維が MD 方向に向いていることから、特に減速から加速している rib 部の中央付近はその影響が顕著に出ているといえる。一方で、rib 部において $x=\pm 0.5 \text{ mm} \sim \pm 1.0 \text{ mm}$ 付近であるコア層とスキン層の間付近の繊維配向分布が乱れており、MD 方向に対し垂直方向 (TD) を向いている繊維が一部存在していることも示されている。これは、rib 部に流入する際の繊維に発生する加速や流動方向の変化によって多くの繊維が MD 方向に向いていると考える。しかし、流動距離や流入時の繊維配向によって、その回転の力が不十分となる繊維が存在し MD 方向に向かず TD 方向よりの繊維が発生したと考える。また、rib 部において流動方向に配向している繊維は満遍なく存在していることから、rib 部の繊維配向は plate 部での位置とその時の繊維配向が大きな決定因子になることが示唆された。実現象においては、Fig.5.1 に示したように rib 部の繊維配向が金型厚さ方向に MD-TD-MD-TD-MD と 5 層に配向することが示されており、今回の解析結果はこの現象の一部をとらえていると考える。

以上より、解析では繊維径が 0.1 mm 、繊維長が 0.5 mm と実際の繊維のアスペクト比よりも小さいためその点にも注意が必要であるが、今後繊維生成時の繊維配向や樹脂流動の速度などが改善されれば、rib 部で発生している 5 層の配向メカニズムが解析上で可視化および追跡が可能になっているといえる。

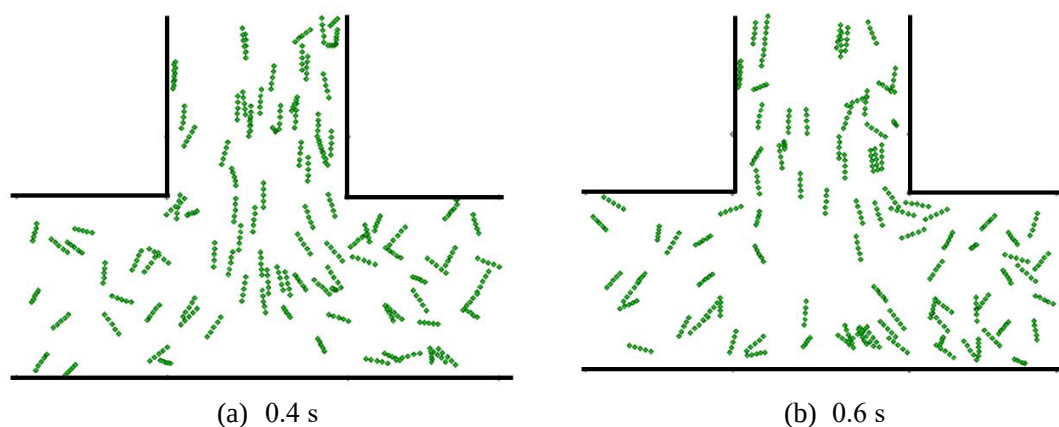


Fig. 5.8 X-Y distribution of fiber particles.

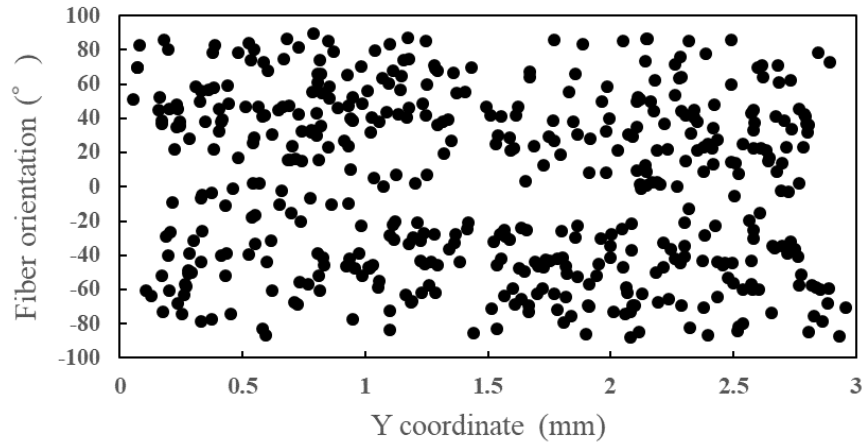


Fig. 5.9 Y-X fiber orientation of plate part in Y-X plane

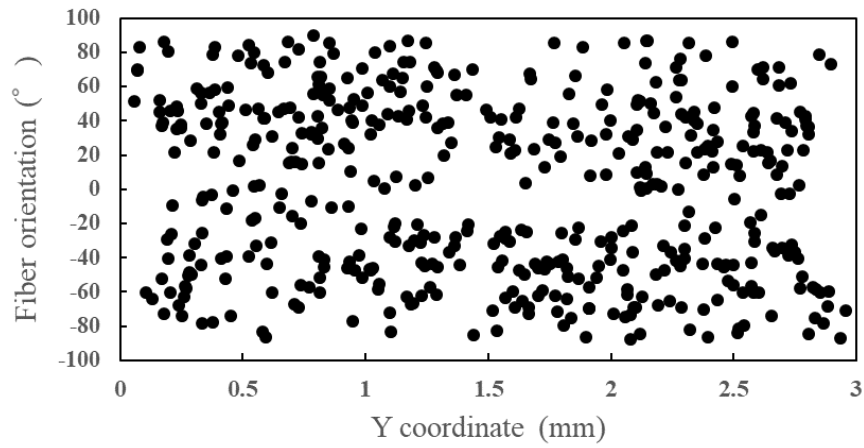


Fig. 5.10 Y-Z fiber orientation of plate part in Y-Z plane

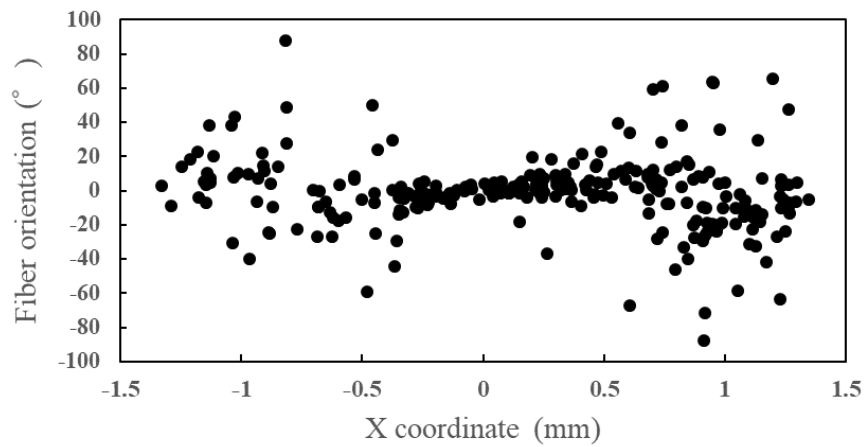


Fig. 5.11 Y-X fiber orientation of rib part in Y-X plane

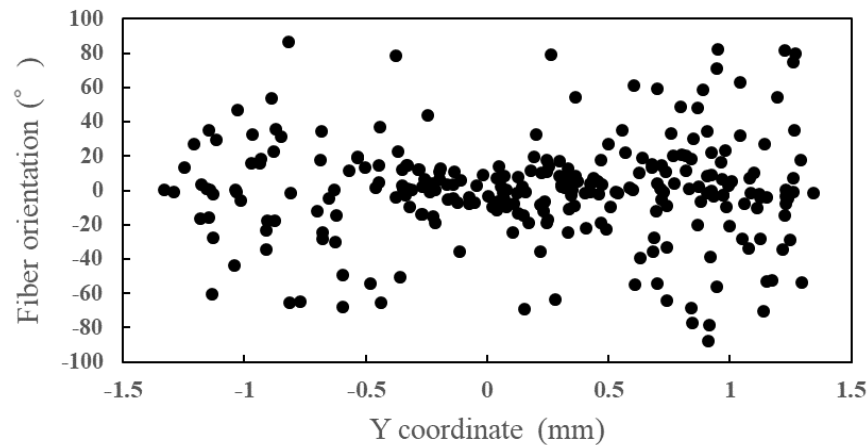


Fig. 5.12 Y-Z fiber orientation of rib part in Y-Z plane

5.3 解析条件の変更による樹脂・繊維流動への影響評価の実施

前節において、複雑形状である T 字型モデルを用いた解析を行った。その中で、樹脂流動に関して実験と同様の結果が得られ、繊維流動に関して実験で見られた繊維配向の 5 層分布の傾向が見られた。そこで、この解析モデルを用いて解析条件を変更することによって、各解析条件による樹脂・繊維流動への影響評価および繊維配向の 5 層分布に対して配向メカニズムを検討する。

5.3.1 流入速度による解析結果への影響評価

前節では、流入速度を 0.02 m/s とした解析を実施したが、先行研究では射出速度によって繊維配向分布に変化が発生していることが報告されている。しかし、先行研究においては射出量が 20 倍となっており解析コストの関係上、20 倍の速度で実施することは難しい。そこで、解析が安定している範囲において流入速度を上昇させ速度変化による繊維配向分布への影響を確認する。

解析条件は、流入速度以外は前項と同様のものを使用し流入速度 5 倍の 0.1 m/s とし解析を実施した。そのほかの解析条件は変化させておらず Table 5.1 のものを使用している。Fig. 5.13 および Fig. 5.14 に 0.2 秒時の plate 部と rib 部での流動方向の速度分布を示す。5.2 節の結果と比較すると、中央部の速度は 5 倍以上となっているが、流入を一定の速度で設定しているため金型面付近の減少量が大きくなり、その減速によって中央部の速度が変化したため 0.14 m/s 付近まで上昇している。しかし、plate 部での中央付近 ($y=1.5$ mm) の速度の乱れや、plate 部上面 ($y=3$ mm 付近) での速度上昇など全体的な流速の分布の形状自体は大きな変化は見られない。

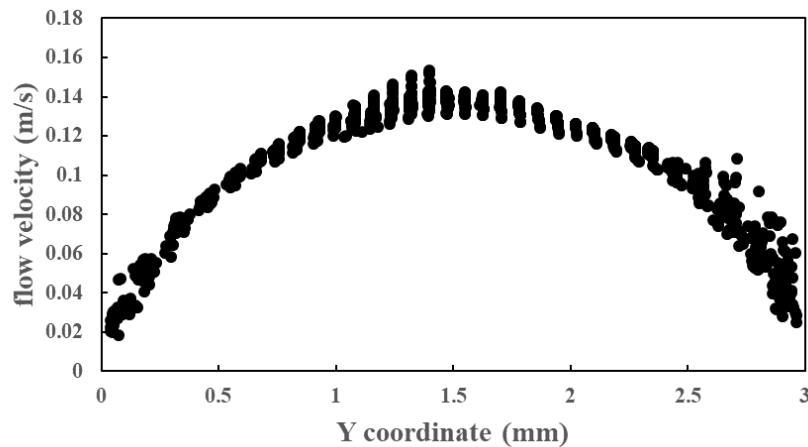


Fig. 5.13 Resin flow velocity of plate part.

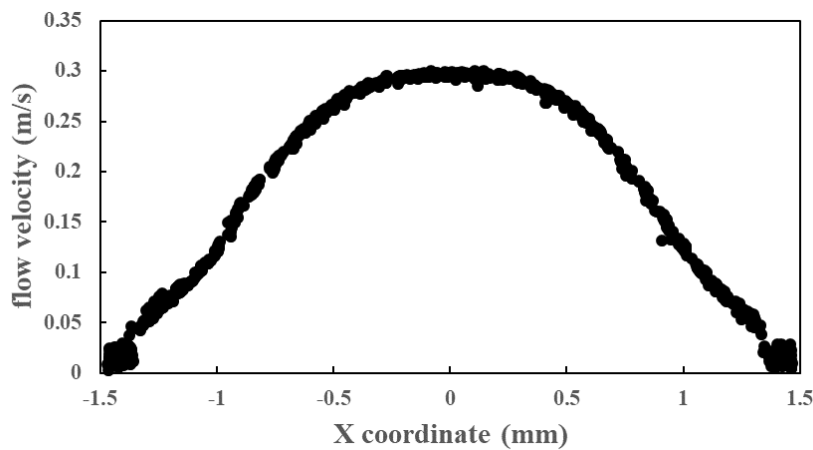


Fig. 5.14 Resin flow velocity of rib part.

次に、Fig. 5.15 (a)に粒子の軌跡を示す。今回は両サイドの軌跡を取得した。このグラフでのプロットや線の形状は各粒子によって変更している。プロット間の時間は速度上昇前と同様の 0.01 s である。また、Fig. 5.15 (b), (c)に plate 部の左右で分けた粒子の速度変化を示す。空間の速度を上昇させた結果、金型上面を流動する粒子は大きな速度変化はなく流動していく実験と同様の傾向を示す粒子がみられた。これは、低速度時には見られなかった粒子だが、金型内の全体の速度が上昇したため圧力勾配による影響が小さくなった結果、全体で見ても大きな速度変化が発生しない粒子が発生したと考える。一方で、plate 部中央および下面を流れる粒子に関しては、「加速する粒子」と「減速した後に加速する粒子」の 2 種類が低速時と同様にみられており、高速流入時がより実験と同じ速度推移の傾向を示している。

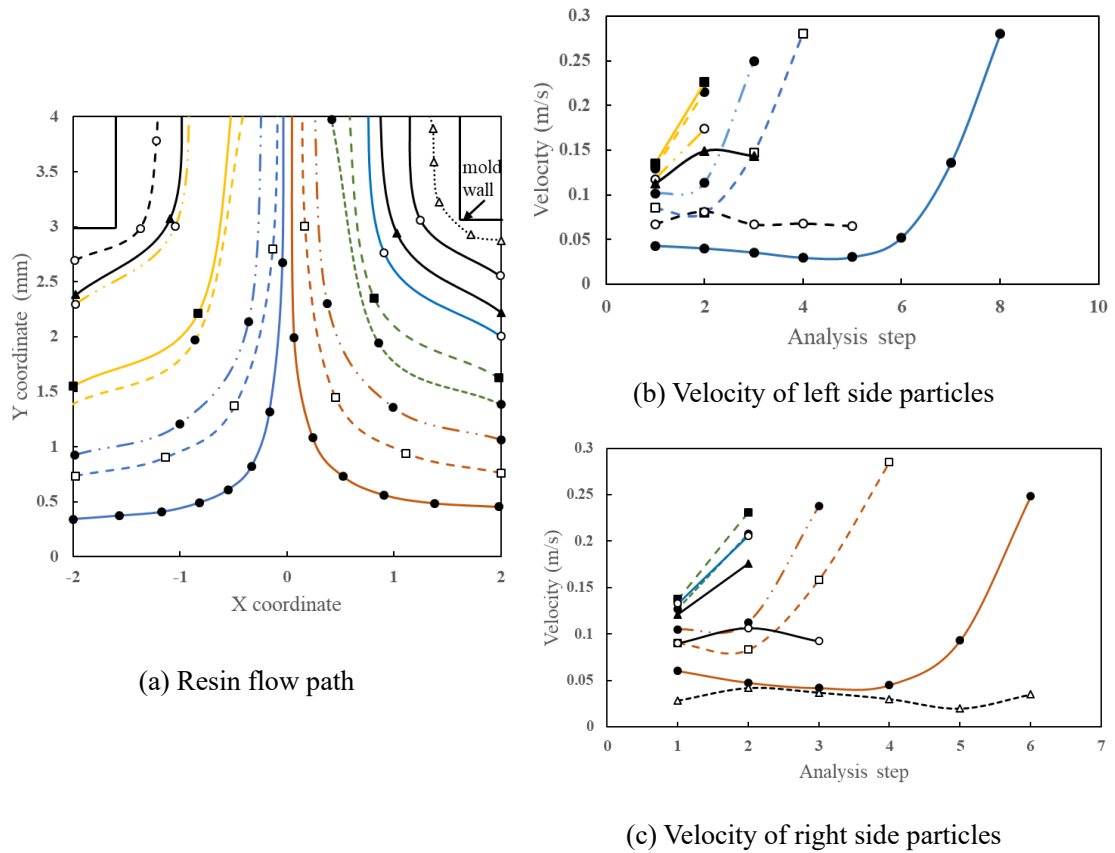


Fig. 5.15 Resin flow path and resin velocity

次に繊維配向分布の変化に着目する．ここでの繊維配向は前節と同様に，Y-X 面での繊維配向は樹脂の流動方向を 0° とし流動方向と金型厚さ方向の角度を，Y-Z 面での繊維配向は Y-Z 面における Y 軸とのなす角度を繊維配向角度としている．plate 部での繊維配向は，5.2 節同様にランダムに繊維配向を決定しているため大きな違いはなくまばらに分布している，しかし，rib 部では中央部付近の流動方向である 0° 方向に強い繊維配向の傾向がみられることには変化はないが，金型面付近では 0° 方向に向く繊維が増加している．これは，流速が上昇したことによって金型面付近に発生するせん断流動による影響が大きくなり，流動方向に向きやすくなった結果であると考ええる．しかし，依然 $x = \pm 0.5\text{mm}$ 付近では流動方向に向かず流動している繊維が存在していることがわかる．Fig. 5.1 で示したように，実験では射出速度によって rib 部の繊維配向分布の傾向が変化することが報告されているが，金型面付近以外においてそこまで大きな違いは解析では見られなかったことから，流動速度による影響はフローフロント合流部周辺においては小さいことが示唆された．また，実験では plate 部での繊維配向分布も流動速度によって変化していることも報告されている．以上のことから，rib 部での繊維配向分布は plate 部を流動する繊維状態など流速以外の要因による影響が強い可能性が示唆された．

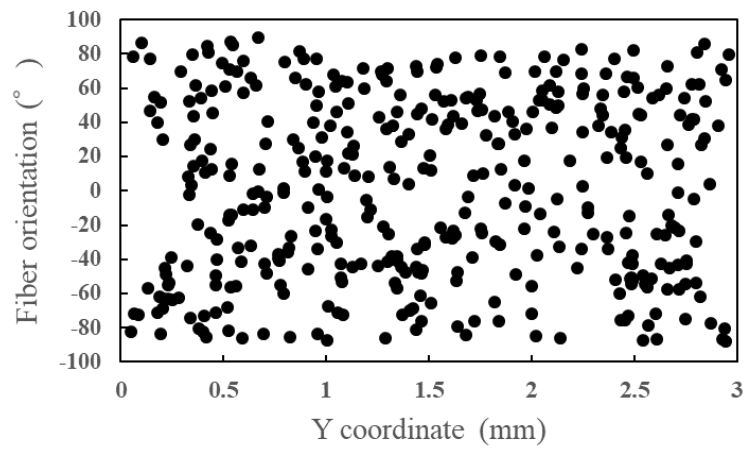


Fig. 5.16 Y-X fiber orientation of plate part in Y-X plane

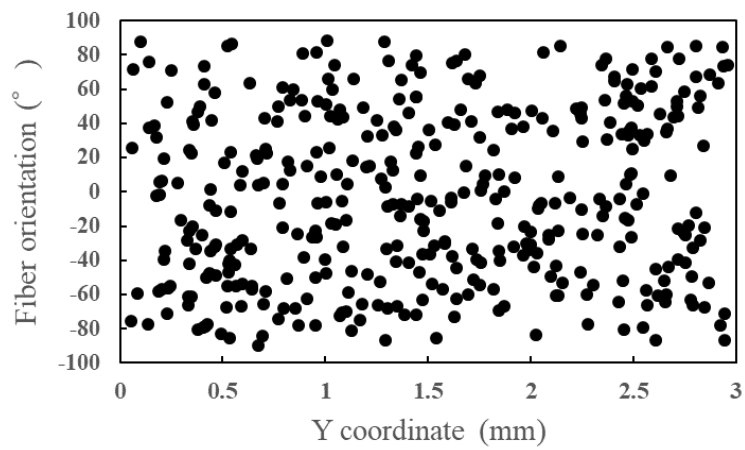


Fig. 5.17 Y-Z fiber orientation of plate part in Y-Z plane

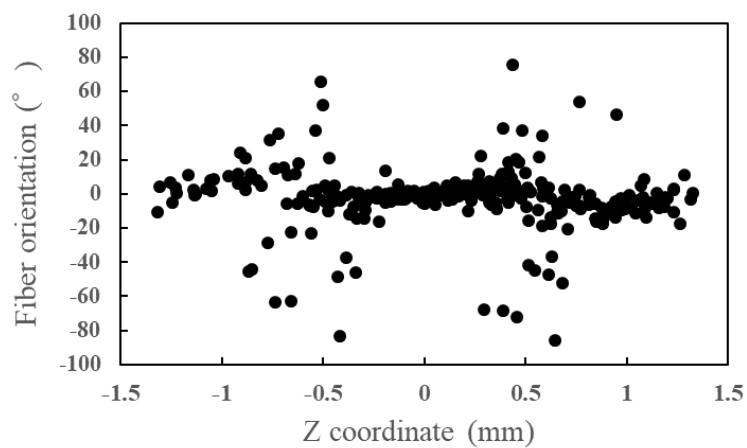


Fig. 5.18 Y-X fiber orientation of rib part in Y-X plane

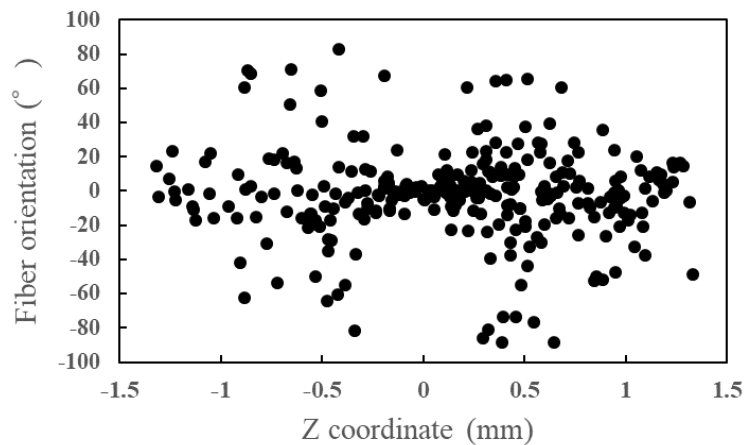


Fig. 5.19 Y-Z fiber orientation of rib part in Y-Z plane

5.3.2 繊維配向固定による繊維流動評価の実施

前項までは、流入させる繊維の配向角をランダムで決定し流入させていたが実際はある程度分布をもっている。金型面付近のスキン層では流動方向に配向しやすく中央付近のコア層では金型の幅方向に配向しやすいことが Fig. 5.1 に示しように実験でも確認されており、3～4 章でも同様の傾向を確認している。しかし、このスキン層とコア層の層厚比率は樹脂の特性や金型温度・射出速度など様々な要因によって変化する。また、前項ではフローフロント合流付近における流動速度による影響はそこまで見られず、plate 部の繊維配向状態が rib 部での繊維配向分布の決定の一因になっている可能性が示唆された。

以上のことから、本項では解析条件として流入させる繊維の配向角をスキン層・コア層のそれぞれの繊維配向に固定し繊維位置も厚さ方向の解像度の最大である 30 条件設定し、一定時間ごとに同時に流入させることで、それぞれの地点における繊維流動の評価を実施する。なお、繊維の生成時に Z 方向に各繊維でずらして配置することで繊維が隣り合わないよう設定している。

生成された繊維の配置などを示すために、Fig. 5.20 にフローフロントが合流する前の解析初期 (0.02 秒) におけるコア層想定時の繊維流動の様子 XY 面から見たものと、斜めから見たものをそれぞれ(a),(b)として示す。これらの図から、繊維の初期状態として Y 座標としては、各繊維が隙間なく配列されているが、Z 方向においてずらして流入させているため各繊維は隣り合っておらず、フローフロント合流前では繊維同士の接触などは発生せずに流動していることがわかる。

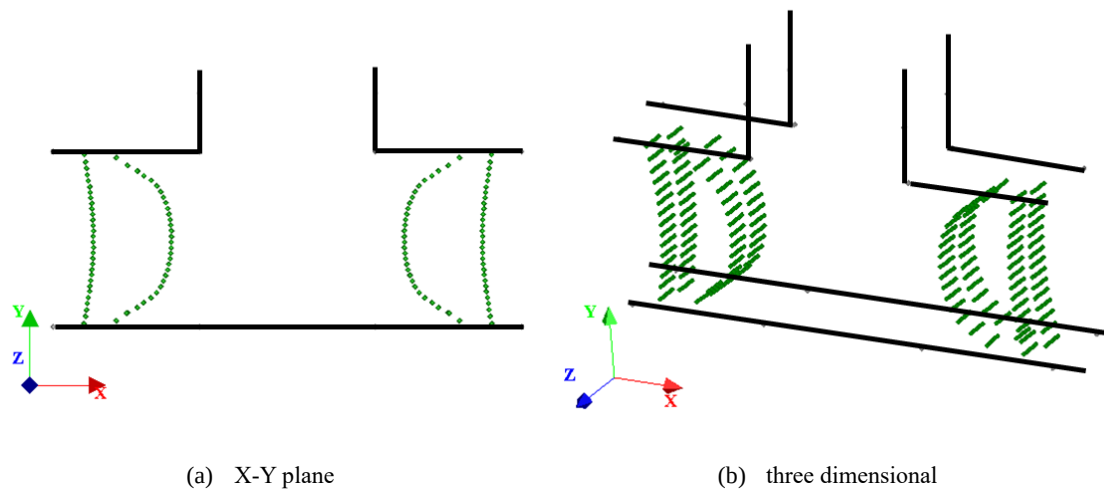


Fig. 5.20 Flow of fibers in the skin layer assumption at 0.02 s

次に、Fig. 5.21 および Fig. 5.22 にそれぞれ繊維の初期配置をスキン層想定である流動方向に向く繊維のみとコア層想定である金型の幅方向（本解析では z 方向）に向く繊維のみの条件での繊維流動の様子を示す。これらの図は 0.25 秒時の図であり、フローフロントが合流し空間内からの流出が発生し流動が安定し、流れ場としては定常状態となっている図である。黄色で示している箇所が初期配向から大きく変化した繊維層を示している。Fig. 5.21 よりスキン層想定の場合では、rib 部での繊維配向はほぼすべての繊維が流動方向に向いている。これは、流動方向に向いている場合、流動方向が変化しても流動先端が先に移動し流動方向に進んでいくため、流動方向の変化の影響を受けず流動するためであると考えられる。よって、plate 部においてスキン層の傾向を示す箇所を通過する繊維は rib 部では流動方向に向く傾向が強いといえる。

また、Fig. 5.22 よりコア層想定の場合では rib 部での繊維配向は金型面付近と rib 部中央では流動方向に配向する繊維が発生している。また、それらの間に配向方向が変化しない繊維が存在しており、5 層の繊維配向分布が発生しているといえる。

ここで、コア層想定の場合での rib 部における流動方向に投影された繊維の繊維長さ分布を Fig. 5.23 に示す。このグラフは、各繊維の両端に存在している粒子の座標の差を取得し表示している。このグラフから、rib 部では金型面付近 ($X = \pm 1.5\text{mm}$) と金型厚さ中央部付近 ($X = 0\text{mm}$) において、流動方向の長さが 4mm と付近まで到達している繊維が存在しており、流動方向に向き流動している繊維が存在しているが、そうでない繊維も同時に存在していることを示している。以上のことから、コア層想定の場合での繊維配向の繊維が存在していれば rib 部において繊維配向分布が 5 層に分布する可能性が高いことが示唆された。これらの傾向は、実験で見られていた低速度時での plate 部でスキン層が多く rib 部では流動方向強度が高い一方、高速度時でコア層分布が多くなった結果、rib 部でも流動方向の繊維配向強度が低くなっている結果と同じ傾向を示していると考えられる。

ここで、rib 部中央に存在している流動方向に向いている繊維とそうでない繊維の 2 つを取り出し繊維流動を追跡した。その結果を Fig. 5.24 に示す。また、それぞれの繊維に関して X 座標と 3 方向の繊維長の推移を Fig. 5.25 と Fig. 5.26 に示す。なお、流入した繊維位置が A と B で違い、X 座標はそれぞれ 0 地点に向かって流入しているため、Fig. 5.25 では左から右に流動し、Fig. 5.26 では右から左に流動している。繊維長は 0.4mm であるため各方向 0.4mm 付近に存在していればその方向に完全に配向していることを示している。Fig. 5.25 から、流動方向に向く繊維はフローフロント合流付近において流動速度の減少が発生した後、rib 部に移動するにつれて速度が上昇する経路をたどっていることがわかる。また、 $X = -1.5 \text{ mm}$ 付近において少し繊維が回転を始めているが、ここは流動方向の速度が低下し始めた時であるといえる。よって、繊維の流動速度の低下が原因で Z 方向に向いていた繊維が少し X, Y 方向に向き始めていることが示されている。その後、rib 部方向に移動する際に流動方向である Y 方向に向き流動している。一方で、Fig. 5.26 より rib 部において流動方向を向かない繊維はフローフロント合流部付近において大きな速度の減少は起こっておらず、そのまま rib 部に移動し流動している。また、各方向の繊維長さに関しても大きな変化は発生していないため、繊維の回転は起こらずに流動していることが示されている。

以上より、コア層想定繊維が存在していれば 5 層の配向分布が発生し、スキン層想定繊維はほとんど rib 部ではその配向方向が変化しないことから、スキン層想定繊維が多く存在した場合 rib 部での流動方向に配向する繊維量や層の厚さは増加し、スキン層想定繊維が存在しなくても rib 部では 5 層の繊維配向分布が発生することが示された。

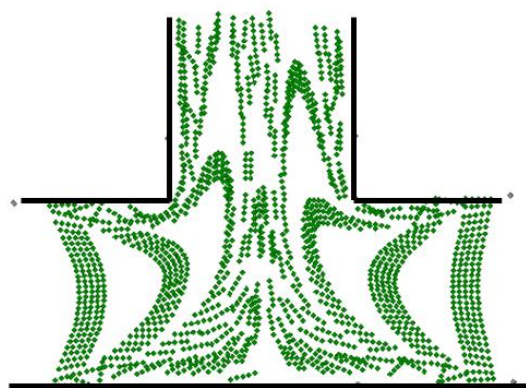


Fig. 5.21 Flow of fibers in the skin layer assumption

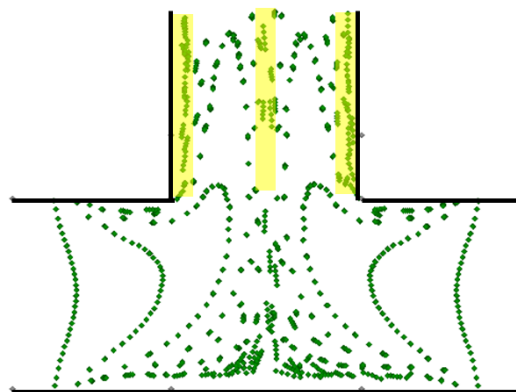


Fig. 5.22 Flow of fibers in the core layer assumption

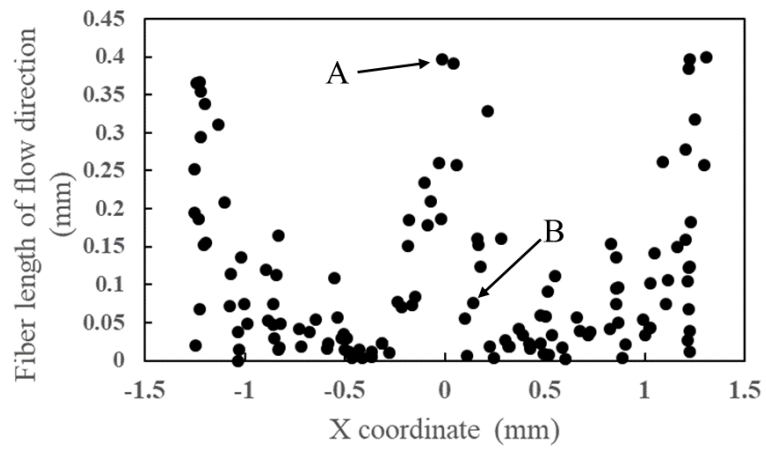


Fig. 5.23 Fiber length of flow direction of rib part

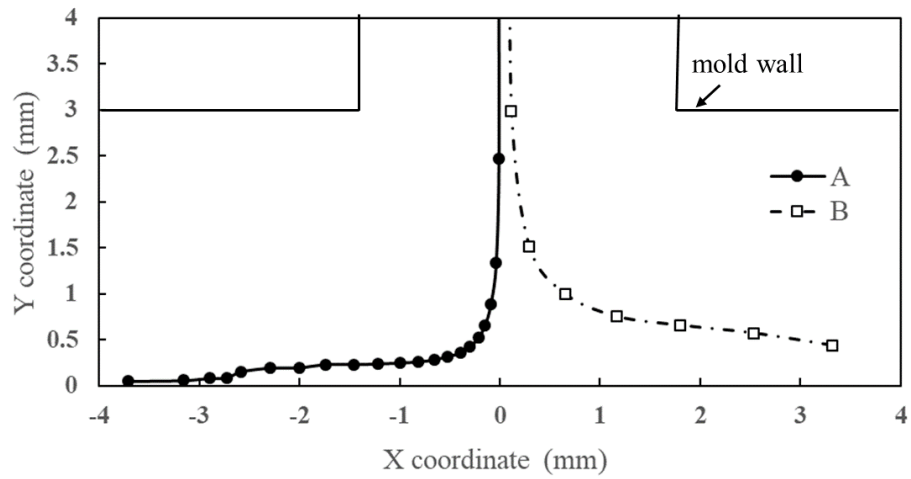


Fig. 5.24 Flow path of fiber particles

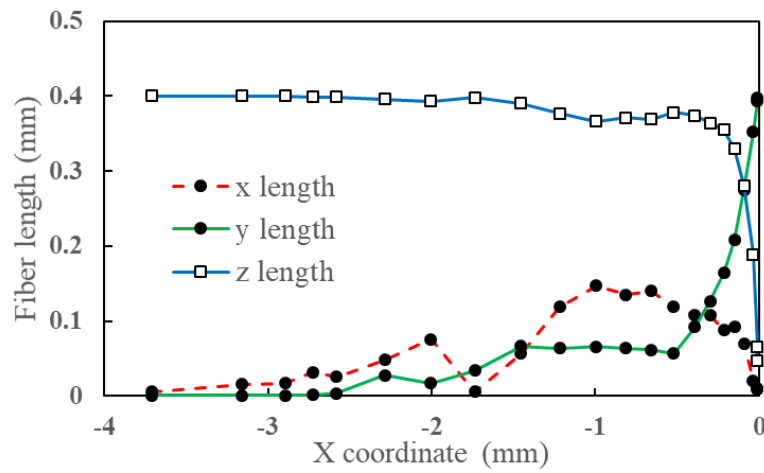


Fig. 5.25 Changes in fiber length and coordinates of fiber A

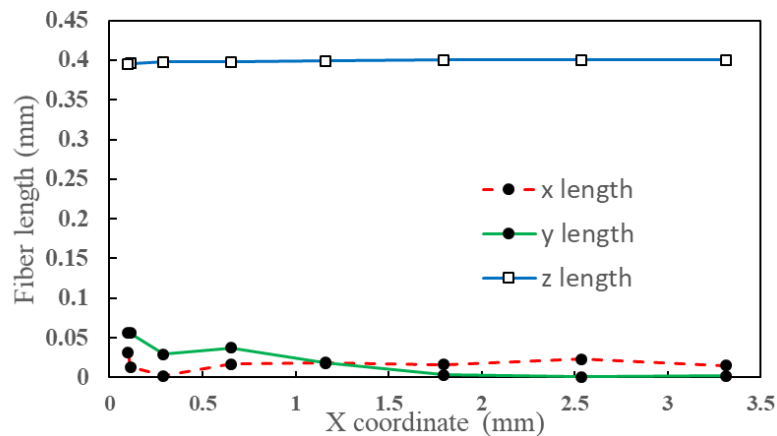


Fig. 5.26 Changes in fiber length and coordinates of fiber B

5.3.3 流入位置の変更による繊維流動への影響評価の実施

今回複雑形状の1つとして、T字型の金型モデルを作成した。これまでの解析では、左右のplate部からの流入を模擬したが、流入方向を変化させることで結果に変化が発生すると予想される。そこで、流入位置をrib部から、plate部左から、rib部とplate部左からの3種類の流入、金型形状を十字型にしたモデルの合計4種類の条件で解析を実施し、流入させる繊維配向はこれまで行ってきた3条件（ランダム配向、スキン層配向、コア層配向）で実施した。そのほかの解析条件はTable 5.1と同じものを使用している。

まず、ランダム配向で繊維を流入させた結果を示す。これらの図は、フローフロントの分岐後である0.4秒時の図である。Fig. 5.27に示すモデル上部から流入させたものと、Fig. 5.28に示すモデル左部から流入させた場合では、金型面付近では流動方向に向いている繊維が多く存在しているが、金型中央付近においては金型面付近ほど強くないが流動方向に向く繊維が多くみられる。これらの繊維の各箇所から流出した繊維を抽出しグラフ化すると、金型面付近で流動方向（Fig. 5.29では $\pm 90^\circ$ 、Fig. 5.30では 0° が流動方向）に向いており、その間は連続的に変化していることがわかる。これは、フローフロントの分岐によって伸長流動が発生し流動の分岐地点から見て垂直方向に向きやすくなっているため、このような連続的な配向角度の変化が発生していると考えられる。

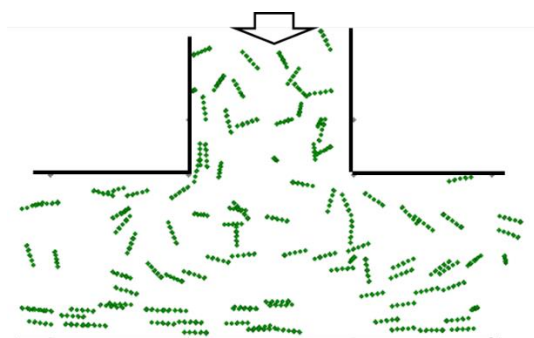


Fig. 5.27 Flow of fibers in upper inflow

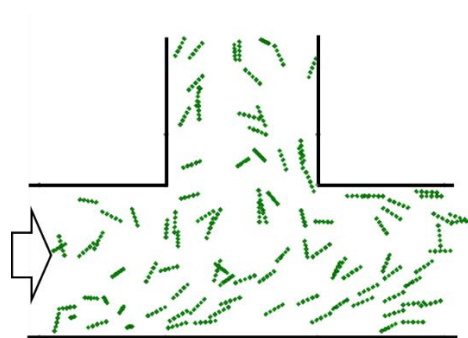


Fig. 5.28 Flow of fibers in left inflow

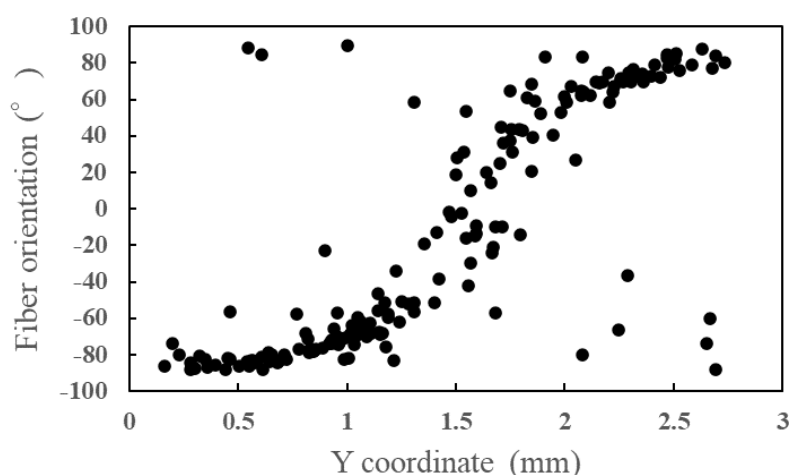


Fig. 5.29 Y-X fiber orientation at left plate part in upper inflow

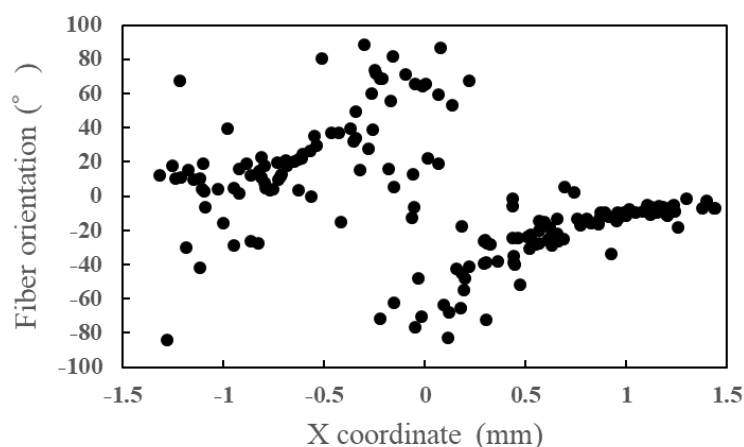


Fig. 5.30 Y-X fiber orientation at rib part in left inflow

一方で、Fig. 5.31 に流入箇所を上左部にした条件での繊維流動の様子を、Fig. 5.32 に十字金型モデルにおける繊維流動の様子を、Fig. 5.33, 5.34 にそれぞれの流出部での繊維配向分布を示す。Fig. 5.31 においては 0.25 秒時、Fig. 5.32 においては、0.4 秒時の図となっている。これらの結果から、フローフロント合流後の多くの繊維が流動方向に向いていることが示されている。特に、Fig.5.31 での上左部から流入させた条件では、その傾向が強くなっている。これらは、フローフロントの合流によって速度が減速せずに流動方向が変化し多くの繊維が流動方向に引っ張られるように流動するため流動方向に配向する繊維が多くなっていると考えられる。一方で、十字金型においては $X = \pm 0.5\text{mm}$ 付近において、流動方向に向いていない繊維が多く存在している。この傾向は、T 字金型でも見られているが十字金型のモデルでの結果においてその傾向が強く表れている。ここで Fig. 5.35 に十字金型における流動速度のコンター図を示す。T 字金型では、合計の流路が半分となり全体的な速度は 2 倍に上昇しているが、十字金型では plate 部と rib 部においての速度差はほとんどない。よって、T

字金型では流動箇所が移るにつれ速度の上昇が発生すると、その方向に引っ張られる力が強くなり rib 部でより流動方向に向く傾向が強くなっているが、十字金型では速度の大きな上昇は発生していない $X=\pm 0.5\text{mm}$ 付近では流動方向に向く傾向が弱まったと考える。しかし、金型中央部の流動方向に向く傾向は変化していないため、十字形状に変更しても rib 部では 5 層構造の繊維配向が発生する。これは、前項で示したフローフロントの合流によって発生した低速域を通過した繊維が流動方向に向いたように、十字金型でも低速域が発生しており、この部分を通過した繊維が流動方向に向いていると考える。十字金型でのこれらの傾向も実験¹⁵⁾と同様の傾向が得られており定性的な一致を確認している。以上のことから、T 字金型においても plate 部と rib 部の厚さの比を変更した場合でも、フローフロントの合流後には 5 層の繊維配向分布が発生することが示唆された

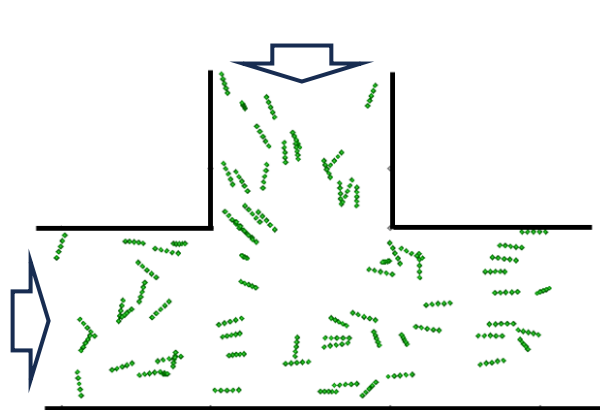


Fig. 5.31 Flow of fibers in upper and left inflow

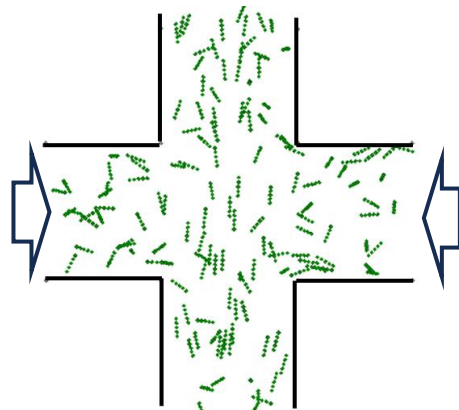


Fig.5.32 Flow of fibers in a cross-shaped mold

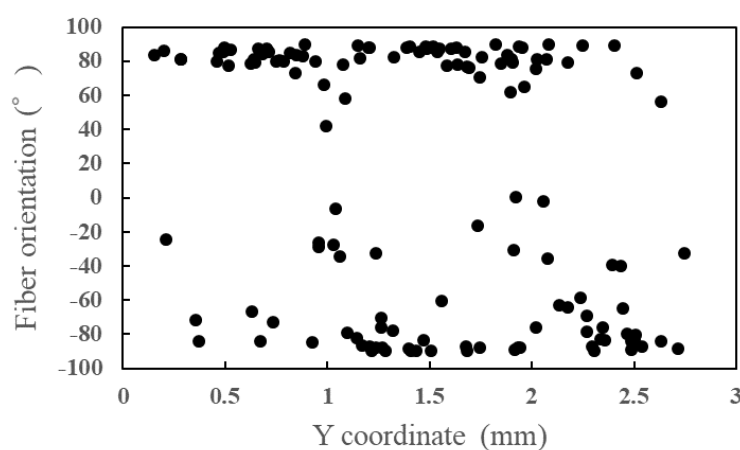


Fig. 5.33 Y-X fiber orientation at right plate part in upper and left inflow

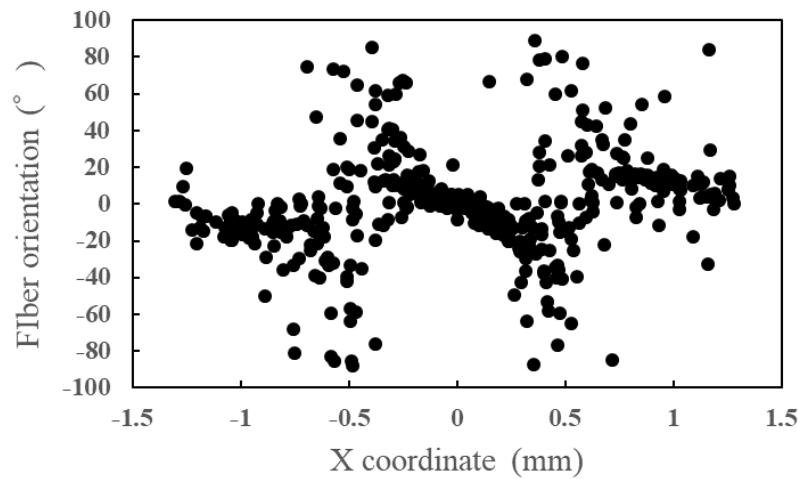


Fig. 5.34 Y-X fiber orientation at upper rib part in a cross-shaped mold

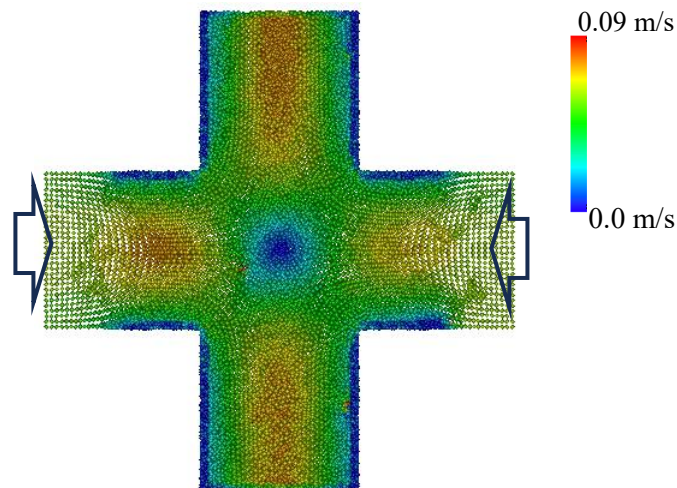


Fig. 5.35 Flow velocity distribution at 0.4 s

次に繊維配向を固定した解析結果を示す。前項と同様に、黄色で囲まれている箇所が初期配向から大きく変化した繊維層を示しており、初期繊維位置も厚さ方向の解像度の最大である 30 条件設定し、繊維の生成時に Z 方向に各繊維でずらして配置することで繊維が隣り合わないよう設定している。

まず、フローフロントの分岐が発生する 2 つの流入条件での結果を示す。これらの図は、Fig. 5.27 などと同様にフローフロントの分岐後である 0.4 秒時の図である。基本的に 3 層に分布していることが示されている。コア層想定である Fig. 5.36 と Fig. 5.37 では、分岐後に多少の乱れは発生しているが、スキン層→コア層→スキン層の 3 層構造をとっていることがわかる。これは、中央部では流動方向とは関係のない方向に向いているため大きな変化はないが、金型付近ではせん断流動による影響が強く繊維に回転が発生し、それが伸長流動によって、より大きな回転に進展したと考える。一方で、スキン層想定である Fig. 5.38 と Fig.

5.39 では、基本的にランダム配向で流入させた場合と同様の連続的に配向角度が変化する傾向を示していることがわかる。これは、流動方向に配向していれば分岐部での伸長流動による影響を受けやすいため、分岐地点から垂直方向に配向しやすくなると考える。また、Fig. 5.38 では rib 部の右面、Fig. 5.39 では、plate 部下面において流動方向に配向しており、大きな繊維配向の変化が発生していない。これは、分岐部での伸長流動による配向方向と各場所での流動方向が一致しているため大きな変化が発生していない。しかし、Fig. 5.38 での plate 右部では中央部の繊維が流動方向に配向している。ランダム配向の場合、plate 右部のコア層では流動方向に配向せず、フローフロントの弧に沿うように配向している結果であった。このことから、完全に流動方向に配向していれば流動速度が低下するだけでは繊維配向の変化は発生しない一方で、流動方向の変化も加わる場合、伸長流動による影響を強く受けるように繊維が配向することが示された。

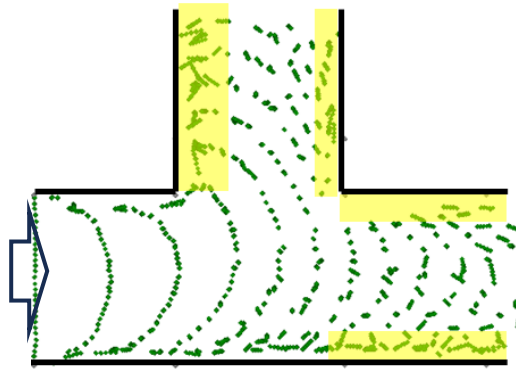


Fig. 5.36 Flow of fibers in the core layer
assumption in left inflow

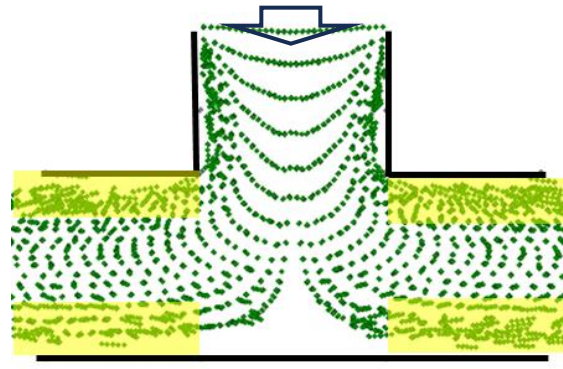


Fig. 5.37 Flow of fibers in the core layer
assumption in upper inflow

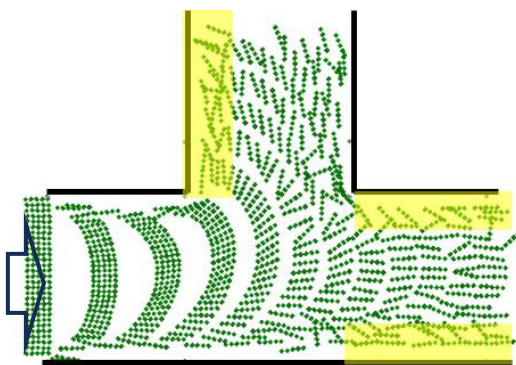


Fig. 5.38 Flow of fibers in the skin layer
assumption in left inflow

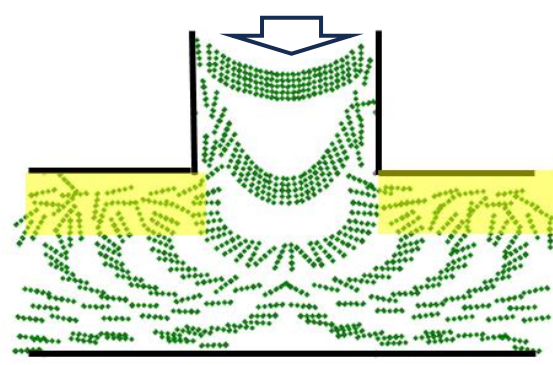


Fig. 5.39 Flow of fibers in the skin layer
assumption in upper inflow

次にフローフロント合流が発生する条件での繊維流動の挙動を Fig. 5.40～Fig. 5.43 に示す。上左部流入の Fig. 5.40 と Fig. 5.41 は 0.25 秒時の、十字形状である Fig. 5.42 および Fig. 5.43 は 0.4 秒時の図である。これらの結果から、スキン層想定では流動方向を向き、コア層想定では 5 層の配向分布を示すという前節で実施したフローフロントの合流が発生する条件である左右流入時の解析結果と同様の傾向を示している。ここで、Fig. 5.41 に示した上左部流入時におけるコア層想定繊維配向の条件での流出部付近での流動方向の繊維長分布を Fig. 5.44 に示す。ここでも同様に、金型付近と金型中央部で繊維長が増加しており流動方向を向いていることがわかる。ここで、図中に示す 5 点に着目し繊維流動の軌跡および各方向の繊維長の推移を Fig. 5.45～Fig. 5.50 示す。まず、上部から流入してきた繊維に着目すると、Fig. 5.46 に示す 1 の繊維は回転せずに流動しているが、経路としては大きな速度の変化は発生していない。一方で、Fig. 5.47 に示す 2 の繊維は金型上部の金型面で大きな速度の低下が発生しせん断流動の影響によって、フローフロントの合流前に繊維の回転が発生している。また、その後の流動速度の増加および流動方向の変化によって繊維の回転がより大きいものとなり流動方向に配向している。次に左から流動してくる繊維に着目すると、Fig. 5.48 に示す 3 の回転が発生していない繊維は流入箇所が金型面から少し離れた箇所を流動している。また、Fig. 5.49 に示す 4 の少し回転している繊維は回転していない繊維よりも金型面に近い箇所を流動していることがわかる。Fig. 5.50 に示す 5 の完全に流動方向を向いている繊維は上部を流動し流動方向に配向した繊維と同様に、金型面の近くを流動しその時に繊維の回転が少し発生しており、その後流動速度の上昇によって流動方向に向いていることがわかる。また、途中で Y 方向長さが増加しているが、これはフローフロントの合流箇所であり金型上部から流動してきた樹脂に押されているために流動方向が少し Y 方向に向いているところである。よって、その後流動が進んでいき流動方向が完全に X 方向になるため、最終的に繊維長も X 方向に完全に向いている結果となっている。

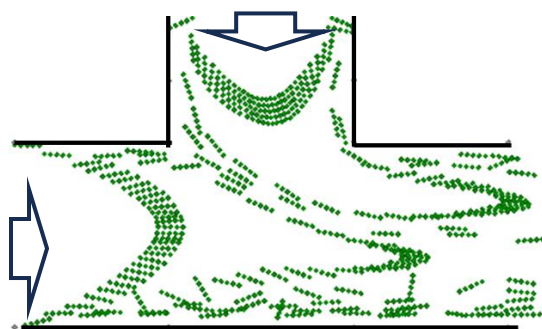


Fig. 5.40 Flow of fibers in the skin layer assumption in upper and left inflow

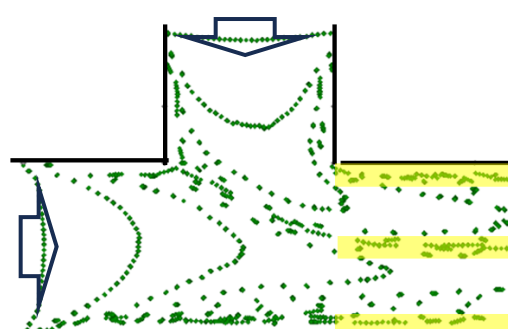


Fig. 5.41 Flow of fibers in the core layer assumption in upper and left inflow

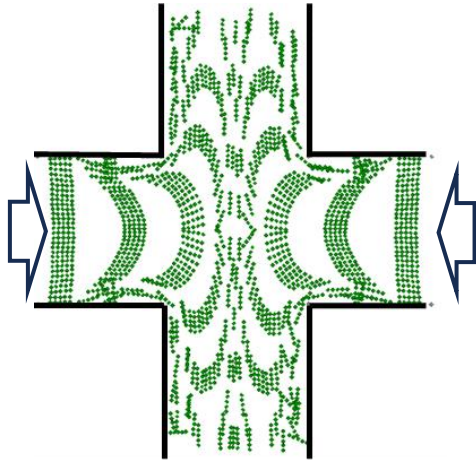


Fig. 5.42 Flow of fibers in the skin layer assumption in a cross-shaped mold

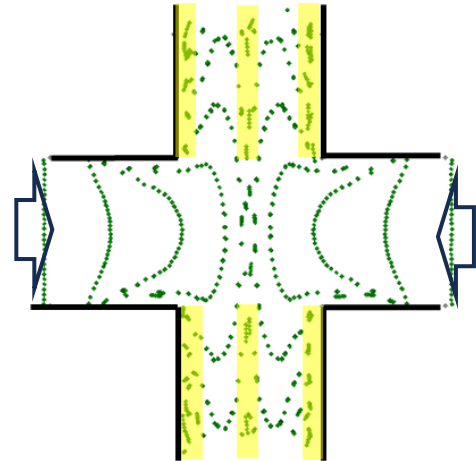


Fig. 5.43 Flow of fibers in the core layer assumption in a cross-shaped mold

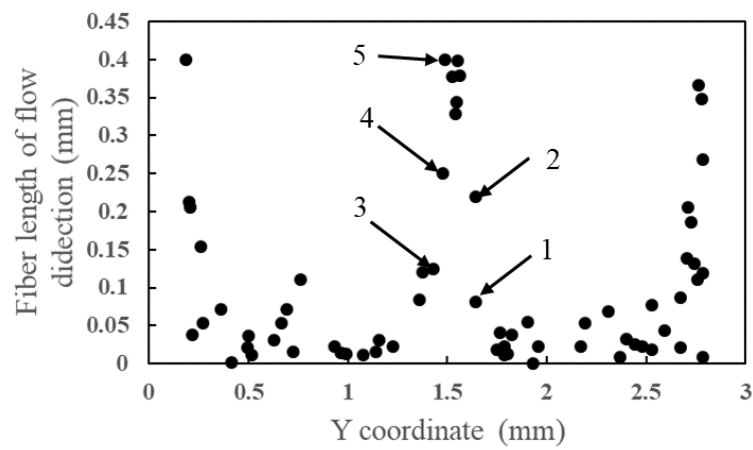


Fig. 5.44 Fiber length of flow direction of right plate part

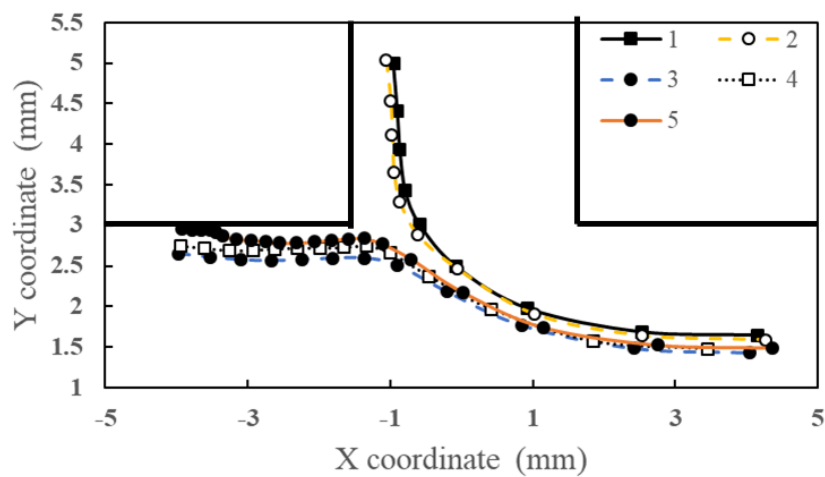


Fig. 5.45 Flow path of fiber particles

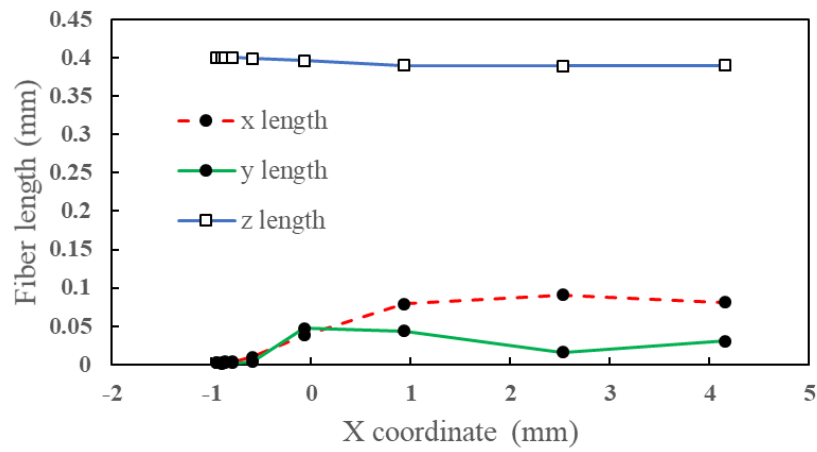


Fig. 5.46 Changes in fiber length and coordinates of fiber 1

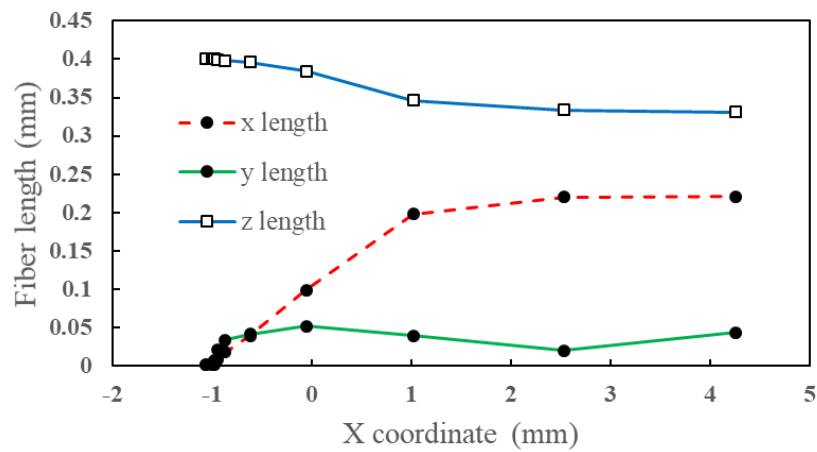


Fig. 5.47 changes in fiber length and coordinates of fiber 2

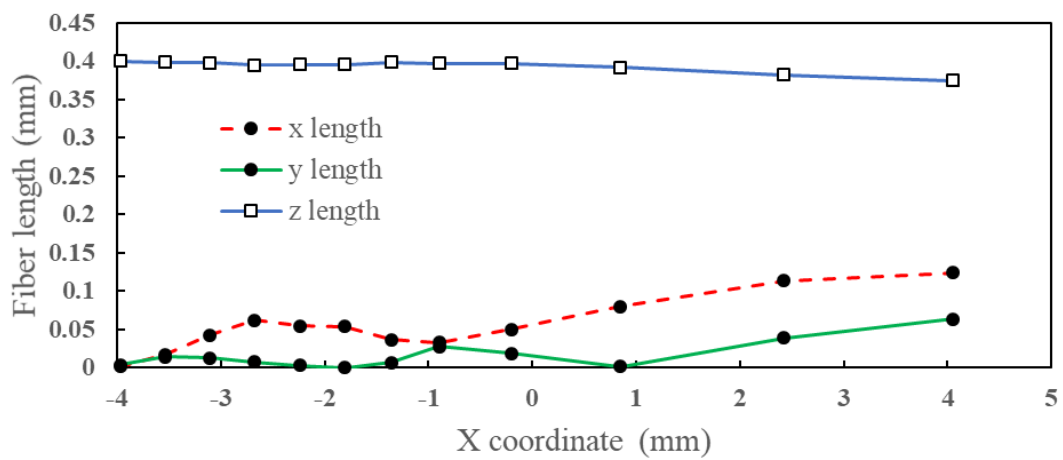


Fig. 5.48 Changes in fiber length and coordinates of fiber 3

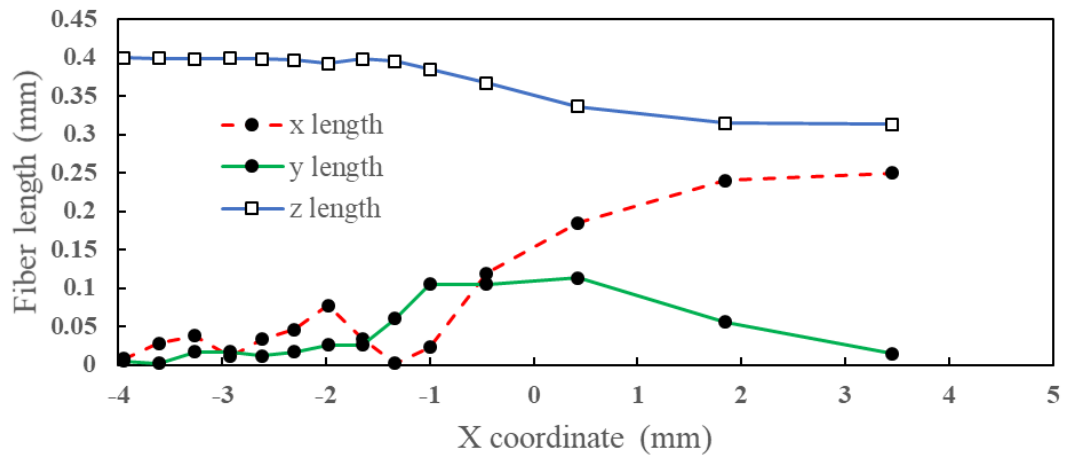


Fig. 5.49 Changes in fiber length and coordinates of fiber 4

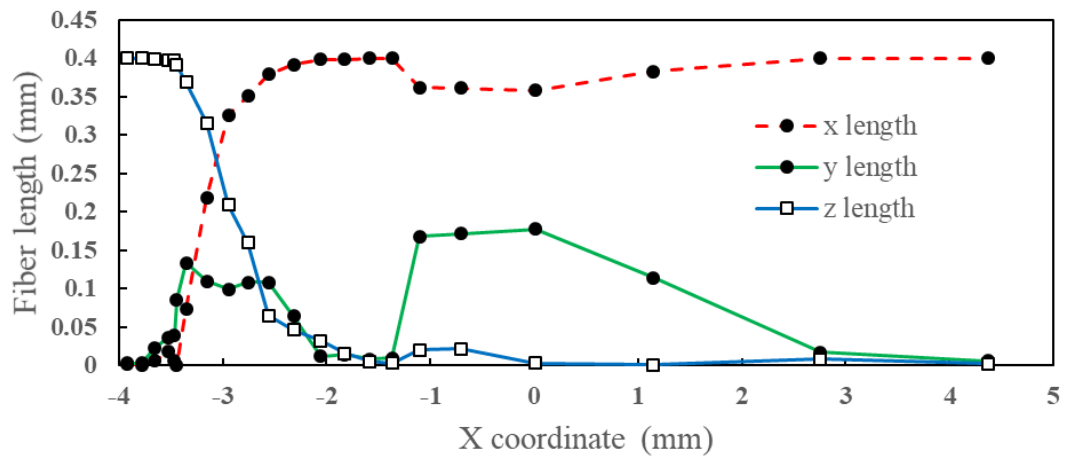


Fig. 5.50 Changes in fiber length and coordinates of fiber 5

以上の結果から、フローフロント合流時に発生している 5 層の配向分布の発生要因を考察する。まず、繊維配向をランダムで流入させた場合ほとんどの繊維が流動方向に向いている結果となった。また、スキン層想定繊維配向でも流動方向に配向するように流動した。しかし、コア層想定繊維配向では流動方向に配向する繊維とコア層想定繊維配向が継続する繊維の 2 種類の繊維が存在しており、それらによって 5 層の繊維配向分布が発生した。フローフロント合流後に流動方向に向いている繊維は合流によって発生する低速域を通過した後の流動速度の上昇および流動方向の変化によって、流動方向への配向へと変化したことが示された。以上のことから、rib 部で発生している 5 層の繊維配向分布は、流動方向および幅方向に配向しており、その配向状態が継続した繊維とフローフロント合流部で発生する低速領域の通過によって幅方向に配向していた繊維が流動方向へと配向方向が変化した繊維の 3 種類の繊維挙動によって発生していることが示された。

5.4 結言

本章では、T 字および十字形状の金型に対して粒子法を用いた解析手法を適用することによって、フローフロント合流部やその前後で発生している現象の検討を行った。以下に得られた結果および考察を示す。

- **plate** 部および **rib** 部の速度に関して、低速条件での T 字の角付近においては依然課題はあるものの、**plate** 部でのコア層から下面までの区間においては加速する粒子と減速から加速する粒子といった実験でも確認されている挙動が本解析でも確認されたことから実験との良い傾向を得られており、実現象と同様の樹脂流動を表現できている解析モデルである。
- **rib** 部でのコア層において周辺よりも低い温度を示す結果が得られた。これは粒子の軌跡から、**plate** 部下面を流動し金型によって冷却された樹脂が **rib** 部ではコア層を流動しているためである。これによって空間の粘度分布などにも影響が発生するため、繊維配向の決定要因の一因である可能性がある。
- 得られた **rib** 部での繊維配向結果では、ほとんどの繊維が流動方向を向いていることが示された。これは、**rib** 部に流動していく過程で **rib** 部方向に速度上昇が発生し流動方向に引っ張られるような挙動によるものと考ええる。一方で、コア層とスキン層間において繊維配向分布の乱れが生じており TD 方向に向いている繊維も存在している。実験では 5 層構造に繊維配向が分布していることが示されており今回の解析結果がこの現象の一部をとらえていると考える。
- 実験では射出速度によって **rib** 部の繊維配向傾向が変化しているが、本解析においては流動速度の変更によって繊維配向分布への大きな変化は見られなかった。また、繊維配向を固定した条件ではスキン層想定繊維配向では、**rib** 部の繊維配向はほとんど流動方向に向く結果が得られたが、コア層想定繊維配向では **rib** 部では 5 層に分布する結果が得られた。また、それはフローフロント合流部で発生する低速領域を通過した繊維が **rib** 部中央で流動方向に向き流動する軌跡が確認された。
- 流入箇所を変更した解析を行った結果、フローフロントの合流が発生する場合では合流後の繊維配向は 5 層に分布し、フローフロントの分岐が発生する場合では伸長流動が支配的になる繊維配向分布の傾向が得られ、5 層の繊維配向分布は見られなかった。以上から、フローフロントの合流・分岐で繊維配向が変化することから、T 字形状などのフローフロントの合流・分岐が発生する複雑形状においては、進入位置によって繊維配向の傾向が大きく変化するため重要な成形パラメータであるといえる。

以上の結果から、T字金型・十字金型のフローフロント合流および分岐が発生する複雑形状において得られた知見をまとめる。

フローフロントの合流が発生する条件での5層の繊維配向分布に関して、

- A) 金型面付近でのせん断流動による流動方向への配向（スキン層配向継続）
- B) 金型の幅方向に配向していた繊維の流動速度変化による影響がほとんどないため、幅方向の配向が継続した配向（コア層配向継続）
- C) 合流によって発生する低速域を通過した後の流動速度の上昇および流動方向の変化による流動方向への配向（コア層配向からスキン層配向へ変化）

以上の3種類の繊維流動によって、フローフロント合流による5層の繊維配向分布が発生していることが示された。よって、フローフロントの合流が発生するのであれば、繊維配向は5層の配向分布が発生する。その5層の配向分布の割合は流入時のスキン層・コア層の層厚比が重要であり、コア層の割合が大きければ5層に配向するうちの流動方向に配向する割合が小さくなる。一方で、金型中央で発生している流動方向への配向はスキン層の配向でもコア層での配向でもどちらでも発生しており、フローフロント合流部で発生している低速域の通過および通過後の速度上昇が大きな要因であるが、低速域が発生しないようにすることは困難である。よって、金型中央部での流動方向の配向をほかの配向角へと変化させることは困難であるといえる。以上のことより、このT字もしくは十字形状において5層の繊維配向分布を発生させないようにするには、フローフロントの合流が発生せず分岐のみ発生するような射出位置などの流入条件を設定する必要があるといえる。

6 章 結章

6.1 本論文で得られた知見

本論文では、短繊維強化複合材料の射出成形を対象に、粒子法の 1 種である MPS 法に基づいた解析を行い、樹脂・繊維流動評価を実施した。以下に各章にて得られた知見をまとめる。

2 章において、樹脂特性による樹脂及び繊維流動への影響評価を実施した。具体的には、樹脂特性を変化させることによって、疑似的に繊維混入による粘度上昇を考慮した解析を実施し、樹脂流動および繊維流動への影響評価を実施しており、本研究の新規性の一つである。全体解析による樹脂流動解析において、低粘度ではフローフロントの到達時間や温度分布に大きな影響を与えるが、粘度が高くなるにつれ、その変化量は減少していき、高粘度では粘度の影響はほとんど見られないことから、高粘度では繊維による樹脂流動への影響は小さく、ある一定以上の粘度では樹脂流動への影響は見られなくなることが示唆された。また、局所解析による繊維流動解析において、繊維アスペクト比による影響は繊維の周辺の樹脂流動の速度分布との関係性によって繊維配向への影響の割合が大幅に変化する。また、樹脂粘度による繊維配向への影響に関しては、繊維の発生位置によって繊維配向変化の推移が変化していることから、金型中央の速度差が小さい環境では粘度による影響が大きく、金型表面付近の速度差の大きい環境では粘度による影響が小さいことが示唆された。

3 章において、射出口付近に着目した解析モデルによって伸長流動が支配的な空間において、繊維流動評価を実施した。特に、粒子法の特徴の一つである繊維の追跡が可能である点を活かし、伸長流動下での繊維挙動を追跡し、繊維流動および繊維配向評価を実施しており、本研究の新規性の一つである。伸長流動によって、射出方向に対し垂直に配向する傾向があることが本解析においても示されたことから、粒子法を用いた本解析手法によって、伸長流動による影響が考慮された繊維挙動の解析および評価が可能であることが示された。また、樹脂流動に関しては、射出速度を上昇させると、ファウンテンフローの形態をとらず流動したことから、ある一定の射出速度を超えると樹脂流動の形態が変化し、伸長流動による影響が発生する距離が増加することが示唆された。繊維流動に関しては、幅方向の繊維長が増加したことなどから、射出速度を上昇させることで伸長流動による影響をより大きくすることが可能であることが示された。射出口の形状に関して、金型の厚さ方向と幅方向が同時に変化する場合、幅方向の伸長流動の影響が支配的であった。一方で、金型厚さのみの変化の場合、流動方向に配向する繊維が増加し流動形態が異なることが示された。このことから、金型幅方向の伸長流動が発生する中での厚さ方向の変化の影響は小さくなる。一方で、幅方向の伸長流動が発生しない場合では金型面付近に流動方向の繊維配向が発生したことから、射出口形状の変更によって、より均一な繊維配向分布の平板の成形が可能であることが示唆された。最後に、射出速度の上昇によって伸長流動下の範囲が増加する可能性が示唆され

たこと、幅方向の伸長流動の有無によって繊維配向の傾向が変化したことから、射出速度や射出口の形状、平板までの流動距離などが、射出口から同じ傾向を持つ繊維配向分布の平板を獲得することに重要な因子になることが示唆された。

4章では、局所解析によってせん断流動による繊維流動への影響を評価するために局所領域連結解析を新たに提案した点が本研究の新規性の一つであり、解析コストを抑えつつ流動距離を確保し、せん断流動下での速度変化の考慮も可能な解析の実行が可能となった。この局所領域連結解析によって、解析空間中央部付近はせん断流動の影響が小さく繊維配向に大きな変化が見られないが、金型面付近においてはせん断流動の影響が大きく流動方向に配向しやすいことが示された。また、流速による影響を検討した結果、流動速度が小さければ完全に流動方向に配向する繊維が少なく流動方向への配向強度は弱くなることが示された。さらに、射出時の伸長流動による影響を考慮し初期配向を金型幅方向に配向を固定した繊維を流入させた結果、せん断速度が大きい箇所と流動速度の小さい箇所に存在している繊維が回転しやすいことが示された。また、その中でもせん断速度が高い箇所のほうが繊維の回転がより強くなり流動方向に配向しやすくなることも示された。さらに、短区間の流動で繊維の回転が発生したこと、せん断流動下の発生には樹脂粘度や射出速度などが重要な因子であることから、これらの因子の制御によって流動方向の配向の発生地点を意図的に変化させることが可能であることが示唆された。最後に、金型厚さを変更した結果、せん断流動による影響範囲が拡大し流動方向により配向しやすくなることが示唆された。また、初期配向を幅方向に固定した結果、流動速度が大きければ全体的に繊維の回転が発生する割合が増加したことから、金型厚さによる影響は空間全体で発生することが示唆された。一方で、流動速度が小さければ金型内の場所によって繊維の回転が発生する割合に変化が発生したことから、流動速度によって金型厚さによる影響度は金型内の場所ごとに変わることが示唆された。

5章では、フローフロントの合流が発生する金型として、複雑形状であるT字および十字金型モデルを作成した点が本研究の新規性の一つであり、両モデルにおいて樹脂・繊維流動評価を実施した。樹脂流動に関して、樹脂粒子の軌跡において実験でも見られた3つの特徴的な流速変化が確認されたことから、実現象を再現できていることが示された。また、rib部の温度分布に関してplate部下面で冷却された樹脂がrib部中央を流動することで、上に凸の温度分布が2つ発生し平板などの単純な金型形状では見られない温度分布が発生した。繊維流動に関しては、スキン層想定である流動方向に配向させた流入条件ではrib部での繊維配向は流動方向に配向した。一方で、コア層想定である金型幅方向に配向させた流入条件ではrib部では配向が変化しない箇所と流動方向に変化する箇所が交互に発生し5層の繊維配向層を形成した。また、rib部中央での流動方向に配向した繊維を追跡すると合流部で発生している低速領域を通過しており、低速領域通過時に繊維配向角が変化し流動方向の変化と流動速度の上昇によって、その配向角の変化がより強いものとなり、流動方向に配向することが示された。また、フローフロントの合流が発生する十字形状での同様の結果となっ

た．以上の結果から，5 層の繊維配向分布の発生メカニズムが明らかとなり，フローフロントの合流が発生する条件では rib 部での 5 層配向は防ぐことはできず，5 層の配向層厚さは plate 部での繊維配向分布に依存することが示された．一方で，流入箇所を変更しフローフロントの分岐が発生する条件では 5 層の繊維配向分布は発生せず，伸長流動による影響が支配的な配向分布となった．以上の結果から，rib 部での 5 層の繊維配向分布を防ぐためにはフローフロントの合流が発生しない流入場所の選択が必要となることが示された．

以上より，本論文では射出成形における 2 つの主要な流動における樹脂・繊維の挙動追跡を含む樹脂・繊維流動評価が可能であることが示され，物性値や金型形状などの成形パラメータの変更による樹脂・繊維流動への影響評価の結果が示された．粒子法に基づく本解析手法によるこれらの成果は，実験に先立った成形パラメータの選定や，金型形状の設計等に貢献するものとする．

6.2 今後の展望

6.2.1 解析手法に関して

本論文で使用している温度計算においては改善の必要がある．金型面による冷却に関して現在固定の温度を付与して解析している．そのため，樹脂による金型面における温度変化や金型の物性値の考慮ができていない．また，現状実現象と比べ固化層の成長がうまく表現できていない．一方で，金型面を考慮するために金型粒子を設定すると解析コストが大幅に増加する．流動中の固化層の成長は固化層にとらえられる繊維の発生や流路の狭小化による速度の変化など繊維流動にも大きな影響を与えるため，この温度計算の部分においては改善する必要があり今後の課題として挙げる．

また，解像度に関しても検討する必要がある．本論文では解析の解像度である粒子径は 0.1 mm であり繊維を模擬するためには最低でも 5 粒子をつなぐ必要がある．そのため，最低でも繊維長は 0.5 mm，繊維径が 0.1mm，アスペクト比が 5 となる．一方で，実際の繊維の繊維長は様々存在するが，繊維径は 1 オーダー以上小さくアスペクト比はより大きいいため，解析上で表現されている繊維は実際のものよりも太くなっている．そのため，解析コストなどに留意しつつ解像度を上げていく必要があるが，粒子法において解析可能な粒子径には限度が存在する．解析コストや粒子径の限度などの課題が存在するため，粒子法のみでは完璧に繊維の挙動を表現することは現状困難であるといえる．以上のことから，粒子法と別の解析を組み合わせ粒子法による樹脂・繊維の混合流動の解析と細かな繊維の挙動を別で解析することができればこの課題を解決することが可能となるため，粒子法と別の解析の連成を今後の展望とする．

さらに，繊維挙動に関しても改善の余地がある．現在，繊維は剛体として処理しており流動中の曲げや破断などは考慮されていない．一方で，実際の繊維は非剛体であり固化層に繊維の端がとらえられ曲がった状態で止まることや流動中の破断が発生する可能性もある．

以上のことから、より正確な解析の実行のためには繊維の非剛体として扱うようにする必要があると考え、繊維の非剛体化を今後の課題として挙げる。

6.2.2 解析の対象に関して

今回、解析対象として射出口付近やT字金型モデルを作成し解析を実施した。一方で、射出口付近において厚さ方向に狭くなりながら金型幅方向に広がっていく形状もあり、すべての形状を解析できていない。また、フローフロント合流後の rib 部においても合流後 3 mm 程度しか解析できておらず、その先における解析も必要であると考え。さらに、今回 T 字金型において射出位置やフローフロントの合流の有無によって繊維配向の傾向が大幅に変化したため射出位置などに関しても検討が必要である。例えば、円形に広がっていくような厚さ方向への金型モデルでの 2 か所からの射出位置によるフローフロントの合流が発生するような解析モデルである。一方で、今回解析の不安定な箇所である非連続点を含む T 字や十字形状の金型モデルでの解析が可能であることが示されたことから、今後ほかの様々な金型形状への適用が可能である。以上のように、依然様々な金型形状や解析場所が考えられるため、射出位置の変更や開口・狭小を有する金型形状などのモデルを作成し解析を実行していくことが必要である。

謝辞

本研究は、大阪大学大学院工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻、教授 倉敷哲生 博士のご指導・ご教示のもとに遂行したものであります。倉敷教授には研究活動全般にわたり、有益なご指導とご助言を賜りましたこと心より感謝の意を表します。

大阪大学大学院工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻教授 中川貴 博士には、博士前期課程から本研究に関して、大変有益なご助言・ご討論を賜りました。厚く御礼申し上げます。

大阪大学大学院工学系研究科マテリアル生産科学専攻准教授 宮坂史和 博士には、アルゴリズムなどの粒子法に関する解析手法など本研究全般にわたり、多くの有益なご助言・ご指摘を賜りました。厚く御礼申し上げます。

金沢工業大学工学部機械工学科教授 瀬戸雅宏 博士、教授 山部昌 博士には研究を進めるにあたり、射出成形に関する多大な有益なご助言・ご討論をいただきましたこと厚く御礼申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻特任教授 石丸裕 博士、大阪大学大学院工学系研究科マテリアル生産科学専攻招へい准教授 花木宏修 博士、特任研究員 向山和孝 博士には研究報告会などを通じて、研究を進めていく中で、有益なご指摘・ご助言をいただきましたこと厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、研究室生活にて公私にわたり多大なご支援いただいた倉敷研究室諸氏に感謝いたします。特に、研究を進行するにあたり、有益なご指摘やご助言をいただいた倉敷研究室卒業生 加藤紘基氏、久守大地氏、博士前期課程 2 年の米倉真大氏には厚く御礼申し上げます。

最後に、学生生活を送るにあたり、生活全般を支えていただいた家族に感謝します。

参考文献

- 1) エネルギー資源庁”令和 5 年度エネルギーに関する年次報告書”, p127, (2023)
- 2) エネルギー資源庁”令和 5 年度エネルギーに関する年次報告書”, p130, (2023)
- 3) 国土交通省, “自動車燃費一覧,乗用車の燃費 CO2 排出量”, p.1 (2023)
- 4) 高橋 淳, ”脱石油技術としての自動車軽量化の方向性”, 成形加工, Vol. 20, No. 6, pp. 318-323, (2008)
<https://doi.org/10.4325/seikeikakou.20.318>
- 5) 帝人株式会社, ”炭素繊維中間材料の新ブランドを展開”, (2021)
- 6) 井沢 省吾, ”自動車をより軽くするプラスチック複合材料”, 科学と教育, Vol. 69, No. 9, pp. 364-369, (2021)
https://doi.org/10.20665/kakyoshi.69.9_364
- 7) 高次 聡, 内山 辰宏, 丸山 淳平, 石黒 俊夫, 藤岡 修, 大森 瑛, ”射出成形機における射出量安定化手法の開発”, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 6, pp. 613-618, (2017)
<https://doi.org/10.2493/jjspe.83.613>
- 8) Kaipeng Ji, Ruoxiang Gao, Hao Chen, Jianzhong Fu, Peng Zhao, "Visualization and monitoring of the injection molding process using ultrasonic phased array", Journal of Materials Processing Technology, Vol.326,118322,(2024)
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118322>
- 9) Joshua Krantz, Zarek Nieduzak, Elizabeth Kazmer, Juliana Licata, Olivia Ferki, Peng Gao, Margaret J. Sobkowitz, Davide Masato, "Investigation of pressure-controlled injection molding on the mechanical properties and embodied energy of recycled high-density polyethylene", Sustainable Materials and Technologies, Vol. 36, e00651, (2023)
<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00651>
- 10) Yifeng Pan, Jun Xie, Chengqian Zhang, Xiacong Zhu, Peng Zhao, "High efficiency far-infrared barrel heating control with excess heat prediction based on generalized predictive control in injection molding", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 218, 124756, (2024)
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124756>
- 11) Muhammad Muaz, Hanxin Yu, Wai Lam Sung, Chang Liu, Benny Drescher, "A multitask encoder–decoder model for quality prediction in injection moulding", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 103, pp. 238-247, (2023)
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.030>
- 12) Jakob Maderthaner, Andreas Kugi, Wolfgang Kemmetmüller, "Optimal control of the part mass for the injection molding process", Journal of Process Control, Vol. 129, 103027, (2023)
<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2023.103027>

- 13)馬 賽, 柴田 和之, 横井 秀俊, "可視化加熱シリンダによるガラス短繊維強化樹脂の可塑化過程の解析", 成形加工, Vol. 30, No.1, pp.37-44, (2018)
<https://doi.org/10.4325/seikeikakou.30.37>
- 14)鈴木 亨, 杉田 寿夫, 瀬戸 雅宏, 柿島 浩徳, 田中 宏明, 山部 昌, "X 線マイクロ CT を用いた薄肉射出成形品のガラス繊維配向解析 (第一報: 円柱フィッティングによるガラス繊維抽出および定量化", 成形加工, Vol. 28, No. 6, pp. 239-246, (2016)
<https://doi.org/10.4325/seikeikakou.28.239>
- 15)小倉 翔吾, 瀬戸 雅宏, 上垣内 雅人, 山部 昌, "フローフロント合流部の樹脂流動挙動が繊維配向に与える影響", 成形加工, Vol. 33, No. 8, pp. 289-293, (2021)
<https://doi.org/10.4325/seikeikakou.33.289>
- 16)小倉 翔吾, 瀬戸 雅宏, 山部 昌, "フローフロント合流部の樹脂流動挙動による繊維配向メカニズムの検証", 成形加工, Vol. 34, No. 11, pp. 428-433, (2022)
<https://doi.org/10.4325/seikeikakou.34.428>
- 17)小澤 憲人, 金 太成, 角田 大地, 荒尾 与史彦, 谷口 憲彦, 西脇 剛史, 細井 厚志, 川田 宏之, "射出成形ガラス長繊維強化ポリアミドの衝撃引張特性に及ぼす繊維径の影響", 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 839, p. 15-00657, (2016)
<https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00657>
- 18)瀬戸 雅宏, 山部 昌, "繊維強化射出成形品および射出発泡成形品の可視化解析", 成形加工, Vol. 29, No. 6, pp. 183-187, (2019)
<https://doi.org/10.4325/seikeikakou.29.183>
- 19)加藤 秀昭, 横井 秀俊, "超厚肉射出成形におけるキャビティ充填挙動の可視化解析", 生産研究, Vol. 75, No. 4, pp. 329-332, (2023)
<https://doi.org/10.11188/seisankenkyu.75.329>
- 20)田中 和人, 野口 隆一, 片山 傳生, "GF/PP プレス射出ハイブリッド成形品の機械的特性評価", 材料, Vol. 67. No. 1, pp. 107-113, (2018)
- 21)白木 伶治, 岡本 彪, 小澤 憲人, 金 太成, 平山 紀夫, 谷口 憲彦, 西脇 剛史, 細井 厚志, 川田 宏之, "強化繊維径および界面特性を考慮した GF/PA 射出成形材の引張強度予測", 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 860, p. 17-00582, (2018)
<https://doi.org/10.1299/transjsme.17-00582>
- 22)M. Feldmann, "The effects of the injection moulding temperature on the mechanical properties and morphology of polypropylene man-made cellulose fibre composites", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 87, pp. 013-152. (2016)
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.04.022>
- 23)Parvin Shokri, Naresh Bhatnagar, "Effect of the Post-Filling Stage on Fiber Orientation at the Mid-Plane in Injection Molding of Reinforced Thermoplastics", Physics Procedia, Vol. 25, pp. 79-85, (2012)

<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.053>

24)Patrick Moll, Junjie Xu, Sven Coutandin, Jürgen Fleischer, "Image based control system for improving fiber injection molding process", *Procedia CIRP*, Vol. 112, pp. 430-435, (2022)

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.032>

25)Lisa Dahrmann, Robert Kupfer, Maik Gude, "Influence of the material history on the properties of recycled glass fiber reinforced polypropylene - impact of screw speed during injection molding", *Procedia CIRP*, Vol. 122, pp. 97-102, (2024)

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.02.006>

26)Ai-Huei Chiou, Chia-Hua Lin, "Material and mechanical characterization of recycled polypropylene reinforced with different weight percentages of short glass fiber developed by injection molding", *Heliyon*, Vol. 9, Issue 9, e19403, (2023)

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19403>

27)杉田 寿夫, 瀬戸 雅宏, 山部 昌, "LCP 薄肉射出成形における固化挙動の実験解析", *成形加工*, Vol. 29, No. 7, pp. 265-271, (2017)

28)小郷 正勝, 末富 夕貴, 村田 満男, 足立 昌之, 下釜 聖司, 宮原 崇匡, "繊維強化樹脂射出成形品の衝撃解析における繊維配向および材料非線形性考慮方法の検討", *成形加工*, Vol. 35, No. 6, pp. 204-207, (2023)

<https://doi.org/10.4325/seikeikakou.35.204>

29)河村 力, 森田 泰博, 深堀 貢, 本田 正徳, 荒川 仁太, 曙 紘之, 菅田 淳, "射出成形複合材の板厚方向の繊維配向不均質性を考慮した成形-構造連成解析手法の検討", *材料*, Vol. 72, No. 9, pp. 675-682, (2023)

<https://doi.org/10.2472/jsms.72.675>

30)Toshiki Sasayama, Norikazu Sato, Yoshihide Katagiri, Yuko Murayama, "Particle-level simulation for the prediction of short fiber orientation in injection molding", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 139, 106115, (2020)

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106115>

31)笹山 俊貴, 稲垣 昌英, 佐藤 範和, "繊維強化熱可塑性樹脂成形における繊維破断の直接シミュレーション技術", *成形加工*, Vol. 33, No. 9, pp. 316-318, (2021)

<https://doi.org/10.4325/seikeikakou.33.316>

32)Yao Liu, Michael Gehde, "Evaluation of heat transfer coefficient between polymer and cavity wall for improving cooling and crystallinity results in injection molding simulation", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 80, No. 5, pp. 238-246, (2015)

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.064>

33)Huan-Chang Tseng, Rong-Yeu Chang, Chia-Hsiang Hsu, "Numerical prediction of fiber orientation and mechanical performance for short/long glass and carbon fiber-reinforced composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 144, 26, pp. 51-56, (2017)

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.02.020>

34)B. Stampone, M. Ravelli, L. Giorleo, G. Trotta, "Thermal behaviour of resin inserts for micro injection moulding: a FEM analysis", *Procedia Computer Science*, Vol. 217, pp. 1360-1369, (2023)

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.334>

35)Florian Wittemann, Luise Kärger, Frank Henning, "Influence of fiber breakage on flow behavior in fiber length- and orientation-dependent injection molding simulations", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol.310, 104950, (2022)

<https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2022.104950>

36)S.M. Mazahir, G.M. Vélez-García, P. Wapperom, D. Baird, "Fiber orientation in the frontal region of a center-gated disk: Experiments and simulation", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 216, pp. 31-44, (2015)

<https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2014.12.008>

37)Y.A. Lizama-Camara, C. Pinna, Z. Lu, M. Blagdon, "Effect of the injection moulding fibre orientation distribution on the fatigue life of short glass fibre reinforced plastics for automotive applications", *Procedia CIRP*, Vol. 85, pp. 255-260, (2019)

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.09.010>

38)越塚 誠一, 柴田 和也, 室谷 浩平, "粒子法入門", 丸善出版, (2014)

39 後藤 仁志, "粒子法", 森北出版, 2018

40)矢代 茂樹, 岡部 朋永, 松島 紀佐, "粒子法を用いた短繊維強化プラスチックの射出成形解析", *日本複合材料学会誌*, Vol. 36, No. 1, pp. 11-18, (2010)

<https://doi.org/10.6089/jscm.36.11>

41)Shigeki Yashiro, Hideaki Sasaki, Yoshihisa Sakaida, "Particle simulation for predicting fiber motion in injection molding of short-fiber-reinforced composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, Issue 10, pp. 1754-1764, (2012)

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.05.002>

42)Tomonaga Okabe, Hiroaki Matsutani, Takashi Honda, Shigeki Yashiro, "Numerical simulation of microscopic flow in a fiber bundle using the moving particle semi-implicit method", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No.10, pp. 1765-1774, (2012)

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.05.003>

43)松谷 浩明, 武田 一郎, 橋本 雅弘, 平野 啓之, 岡部 朋永, "粒子法を用いた熱可塑性スタンパブルシートの流動シミュレーション", *日本複合材料学会誌*, Vol. 40. No. 5, pp. 227-237, (2014)

<https://doi.org/10.6089/jscm.40.227>

44)関谷 輝, 荒井 政大, 吉村 彰記, 後藤 圭太, "MPS法を用いた炭素繊維束への樹脂含浸解析", *計算数理工学論文集*, Vol. 18, No. 16-18, 201, (2018)

- 45)志野 亮作, 玉井 裕, 越塚 誠一, 真木 昌, 石川 健, "炭素繊維強化熱可塑性プラスチックのプレス成形のための粒子法を用いた異方性高粘度流体解析", 日本計算工学会論文集, Vol. 2016, p. 20160015, (2016)
<https://doi.org/10.11421/jscs.2016.20160015>
- 46)Xiaoyang Xu, Lingyun Tian, Sai Peng, Peng Yu, "Development of SPH for simulation of non-isothermal viscoelastic free surface flows with application to injection molding", Applied Mathematical Modelling, Vol. 104, pp. 782-805, (2022)
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.12.015>
- 47)Liping He, Gang Lu, Dachuan Chen, Wenjun Li, Chunsheng Lu, "Three-dimensional smoothed particle hydrodynamics simulation for injection molding flow of short fiber-reinforced polymer composites", Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol. 25, 05507, (2017)
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-651X/aa6dc9>
- 48)Ke Wu, Lei Wan, Hao Zhang & Dongmin Yang, "Numerical simulation of the injection molding process of short fiber composites by an integrated particle approach", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 97, pp. 3479-3491, (2018)
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-018-2204-6>
- 49)Hirotada Hashimoto, Nicolas Grenier, Makoto Sueyoshi, David Le Touzé, "Comparison of MPS and SPH methods for solving forced motion ship flooding problems", Applied Ocean Research, Vol. 118, 103001, (2022)
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.103001>
- 50)Zhisong Xu, Zhuguo Li, Fei Jiang, "The applicability of SPH and MPS methods to numerical flow simulation of fresh cementitious materials", Construction and Building Materials, Vol. 274, No. 8, 121736, (2021)
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121736>
- 51)加藤 紘基, 倉敷 哲生, 向山 和孝, 宮坂 史和, 光藤 健太, 瀬戸 雅宏, 山部 昌, "粒子法に基づく繊維強化複合材料の射出成形解析による局所流動評価", 日本複合材料学会誌, Vol. 47, No. 3, pp. 89-96, (2021)
<https://doi.org/10.6089/jscm.47.89>
- 52) 山崎 昶 “法則の辞典”, 朝倉書店, p.148
- 53) Kitano T., Kataoka T., Shirota T. "An empirical equation of the relative viscosity of polymer melts filled with various inorganic fillers", Rheologica Acta, Vol. 20, No.2, pp. 207-209, (1981)
- 54)田中 正幸, 益永 孝幸, “疑似圧縮性効果による MPS 法の安定化と圧力の平滑化”, 日本計算工学会論文集, Vol. 2008, p. 20080025, (2008)
<https://doi.org/10.11421/jscs.2008.20080025>
- 55)Abbas Khayyer, Hitoshi Gotoh, "粒子法における圧力擾乱低減のための CMPS-HS 法の提案”, 海岸工学論文集, Vol. 55, pp. 16-20, (2008)

<https://doi.org/10.2208/proce1989.55.16>

56) Abbas Khayyer, Hitoshi Gotoh, “Enhancement of stability and accuracy of the moving particle semi-implicit method”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 230, Issue 8, pp. 3093-3118, (2011)

<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2011.01.009>

57) Abbas Khayyer, Hitoshi Gotoh, “A higher order Laplacian model for enhancement and stabilization of pressure calculation by the MPS method”, *Applied Ocean Research*, Vol. 32, Issue 1, pp.124-131, (2010)

<https://doi.org/10.1016/j.apor.2010.01.001>

58) Naoki Tsuruta, A. Khayyer, Hitoshi Gotoh, “A short note on Dynamic Stabilization of Moving Particle Semi-implicit method”, *Computers & Fluids*, Vol. 85, No. 15, pp.158-164, (2013)

<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.05.001>

59) 村田 泰彦, 大谷 和也, 梁 昊, 上羽 文人, “高濃度ガラス繊維充填ポリアミド成形品における樹脂流動挙動がガラス繊維配向と強度に及ぼす影響”, *成形加工*, Vol. 33, No. 7, pp. 250-257 (2021)

<https://doi.org/10.4325/seikeikakou.33.250>

研究業績

1.本論文に関連した投稿論文（査読付き）

- 1) 井上 直生, 宮坂 史和, 倉敷 哲生, 向山 和孝, 米倉 真大, ” 繊維強化複合材料の射出成形における粒子法に基づく流動解析(樹脂特性が繊維流動に及ぼす影響の評価)”, 構造物の安全性および信頼性, 土木学会, 構造工学委員会, pp. 243-249, (2023)
https://doi.org/10.60316/jcossar.10.0_243
- 2) 井上 直生, 米倉 真大, 宮坂 史和, 向山 和孝, 倉敷 哲生, 瀬戸 雅宏, 山部 昌, ”粒子法を用いた射出成形における射出口付近の樹脂流動および繊維配向評価”, *Journal of Textile Engineering*, Vol. 70, No. 5, pp.77-80, (2024)
<https://doi.org/10.4188/jte.240408a>
- 3) 井上 直生, 宮坂 史和, 倉敷 哲生, 向山 和孝, 米倉 真大, 瀬戸 雅宏, 山部 昌, ” 射出成形における T 字金型に対する MPS 法を用いた解析手法の適用”, *スマートプロセス学会誌*, Vol. 13, No. 4, pp. 211-217, (2024)
<https://doi.org/10.7791/jspmee.13.211>

2.学会発表

- 1) 井上 直生, 向山 和孝 , 宮坂 史和, 倉敷哲生, “粒子法を用いた繊維強化複合材料の射出成形解析に関する研究”, 日本繊維機械学会第 74 回年次大会, (2021)
- 2) 井上 直生, 向山 和孝 , 宮坂 史和, 倉敷哲生, “繊維強化複合材料の射出成形における粒子法に基づく繊維流動評価”, 日本繊維機械学会第 75 回年次大会, (2022)
- 3) 井上 直生, 向山 和孝 , 宮坂 史和, 倉敷哲生, “繊維強化複合材料のマルチスケール射出成形シミュレーションに関する研究”, 第 13 回日本複合材料会議 (JCCM-13), (2023)
- 4) 井上 直生, 宮坂 史和, 倉敷 哲生, 向山 和孝, 米倉 真大, ” 繊維強化複合材料の射出成形における粒子法に基づく流動解析(樹脂特性が繊維流動に及ぼす影響の評価)”, 第 10 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(2023)
- 5) 井上 直生, 米倉 真大, 宮坂 史和, 向山 和孝, 倉敷 哲生, 瀬戸 雅宏, 山部 昌, ”粒子法を用いた射出成形における射出口付近の樹脂流動および繊維配向評価”, 日本繊維機械学会第 77 回年次大会, (2024)

Appendix 射出成形解析における解析手法

本章では、本解析で使用している非圧縮性流れを対象とする MPS 法の計算方法及び、樹脂及び繊維流動時の計算に必要な計算アルゴリズムについて説明する。

A1 MPS 法

まず、MPS 法で使用される支粒子数密度及び配方程式の離散化について説明する (A1)(A2). 数値解析では、四則演算しか計算できないため、式にある勾配やラプラシアンを四則演算に近似する操作の離散化を行う必要がある。MPS 法では粒子間相互モデルを使用し、微分方程式を離散化する。そのために必要なものが粒子数密度である。粒子数密度とはある粒子の周りにある粒子によってどのくらい影響を受けるかを示したものであり、粒子 i の粒子数密度 n_i を表したものが式(A1)である。

$$n_i = \sum_{j \neq i} \omega(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (\text{A1})$$

ここで、 $\mathbf{r}_i$ は位置 i の位置ベクトル、 $\mathbf{r}_j$ は位置 j の位置ベクトルを表している。また、 $\omega(r)$ は重み関数である。

ここでの r_e は影響半径と呼ばれており、粒子間距離の約 2 倍から 4 倍としており、本研究では 2.1 倍を採用している。2 倍としない理由は、2 倍にすると半径の 2 倍の位置にある粒子が計算されなくなるためである。式(A.1)より、粒子数密度は重み関数の和であり、重み関数は影響半径内の粒子しか考慮せず粒子間距離が近いほど大きい値を示している。また、粒子の質量が一定とすると、非圧縮性流れでは粒子数密度は一定となる。この粒子数密度には基準となる値が必要となるが、それは粒子の初期位置によって決定され、それを n^0 とする。

次に MPS 法での支配方程式の離散化についてである。各計算において MPS 法ではそれぞれのモデルを作成し計算を行っていく。まず、グラディエントモデルを式(A.2)に示す。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \omega(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (\text{A2})$$

ここで、 d は次元数、 ϕ は任意のスカラー量である。Fig. A1 はグラディエントモデルの模式図である。

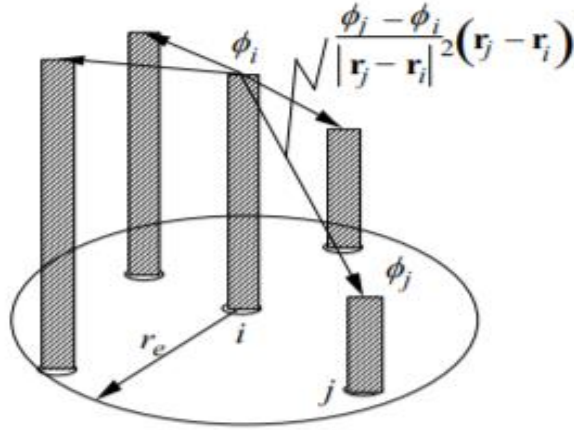


Fig.A1 勾配モデル

次に MPS 法のラプラシアンモデルを式(A3)に示す.

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda^0 n^0} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) \omega(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (\text{A3})$$

ここで λ^0 とは,

$$\lambda^0 = \frac{\sum_{j \neq i} |\mathbf{r}_j^0 - \mathbf{r}_i^0|^2 \omega(|\mathbf{r}_j^0 - \mathbf{r}_i^0|)}{\sum_{j \neq i} \omega(|\mathbf{r}_j^0 - \mathbf{r}_i^0|)} \quad (\text{A4})$$

を表している. Fig. A2 はラプラシアンモデルの模式図である.

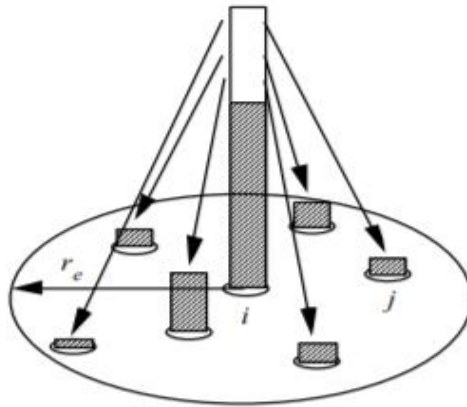


Fig.A2 ラプラシアンモデル

この 2 つのモデルを使用し支配方程式を離散化していく. D/Dt はラグランジュ微分であるから, 近似できナビエーストークスの方程式は式(A5)と置くことができる.

$$\frac{\mathbf{u}_i^{k+1} - \mathbf{u}_i^k}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \langle \nabla P \rangle_i^{k+1} + \nu \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i^k + \mathbf{g} \quad (\text{A5})$$

ここで、 P^{k+1} は未知数であるから圧力項は一度無視して仮の速度 $\mathbf{u}^*$ を求める．そのために式(A5)の $\mathbf{u}_i^{k+1}$ を $\mathbf{u}_i^*$ に置き換え変形する．その結果が式(A6)であり，式(A7)はそれを整理したものである．

$$\frac{\mathbf{u}_i^* - \mathbf{u}_i^k}{\Delta t} = \nu \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i^k + \mathbf{g} \quad (\text{A6})$$

$$\mathbf{u}_i^* = \mathbf{u}_i^k + (\nu \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i^k + \mathbf{g}) \Delta t \quad (\text{A7})$$

式(A7)にラプラシアンモデルを適用させると式(A8)となる．

$$\mathbf{u}_i^* = \mathbf{u}_i^k + [\nu \frac{2d}{\lambda^0 n^0} \sum_{j \neq i} (\mathbf{u}_j^k - \mathbf{u}_i^k) \omega(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) + \mathbf{g}] \Delta t \quad (\text{A8})$$

次に，この仮の速度を用いて粒子を仮の場所に移動させる．仮に移動させた位置を $\mathbf{r}_i^*$ とすると式(A9)となる．

$$\mathbf{r}_i^* = \mathbf{r}_i^k + \mathbf{u}_i^* \Delta t \quad (\text{A9})$$

次に，仮に移動させた位置での圧力を計算する．これは式(A10)のポアソン方程式により求める．

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{k+1} = -\rho \frac{1}{(\Delta t)^2} \frac{n_i^* - n^0}{n^0} \quad (\text{A10})$$

この式をラプラシアンモデルによって離散化することで P^{k+1} を求め，この圧力と仮の速度を用いて真の速度を式(A11)で求める．

$$\mathbf{u}_i^{k+1} = \mathbf{u}_i^* - \frac{1}{\rho} \langle \nabla P \rangle_i^{k+1} \Delta t \quad (\text{A11})$$

右辺第 2 項に勾配モデルを適用させすべての離散化は終了する．最後にこの真の速度を用いて粒子の座標を式(A12)で修正することで一連の計算は終了する．

$$\mathbf{r}_i^{k+1} = \mathbf{r}_i^* + (\mathbf{u}_i^{k+1} - \mathbf{u}_i^*)\Delta t \quad (\text{A12})$$

A2 SFRP の射出成形における樹脂流動の計算方法

A2.1 陰解法の導入

本研究は高粘度の流体を対象としている．そのときに問題になるのは中間速度の計算である式(A7)である．この計算はそれを陽解法で解くと式(A13)を満たす必要があり，高粘性を対象とすると時間ステップ Δt を微小にしなければならず計算コストが膨大になってしまう．そこで，この計算を陰解法にすることで時間ステップの制限をなくすことができ，計算時間を短縮することができ，高粘性流体の解析を可能としている^{A3)}．なお，この条件を満たす最大値での計算では，時間ステップが粗すぎる可能性が発生するために，各解析において，1 ステップ当たりの最大の時間ステップを設定している．

$$d = k \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{2} \quad (\text{A13})$$

d は拡散項， Δt は時間ステップ， Δx は粒子間距離， k はナビエストークスの方程式の粘性項の計算で使用する動粘度の ν である．

A2.2 壁関数の導入

MPS 法では流体や繊維だけでなく壁も粒子で構成し，影響半径の 2～4 粒子分の粒子を必要とする．そのため壁粒子もその粒子分必要となる．しかし，金型の大きさや粒子径によっては壁粒子の数が膨大となってしまう．そこで，本研究では壁粒子を壁関数を用いて仮想粒子を用いて計算を行う．以下に，3 次元での壁関数の計算方法と仮想粒子の設定方法を説明する^{A4)}．

壁関数では 3 つの頂点と内側向きの法線ベクトルで壁を決定する．3 つの頂点を $\mathbf{w1}, \mathbf{w2}, \mathbf{w3}$ ，法線ベクトルを $\mathbf{n}$ ，流体や繊維の粒子の座標を $\mathbf{p}$ とする．この時，式(A14)を満たす a, b, c を決定する．

$$\mathbf{p} - \mathbf{w1} = a(\mathbf{w2} - \mathbf{w1}) + b(\mathbf{w3} - \mathbf{w1}) + c\mathbf{n} \quad (\text{A14})$$

$0 < a < 1, 0 < b < 1, 0 < c < r_e$ を満たす流体粒子に対して仮想粒子を設定する．その後，流体粒子に対する仮想粒子の重み関数を計算することで壁粒子を表現する．これによって，解析における全体の粒子数を大幅に減らすことができる．

A2.3 セン断速度と温度による粘度変化

本解析では，対象が非ニュートン流体であり，せん断速度によりせん断粘度が低下する，また，樹脂は温度により粘度が変化する．よってせん断速度と温度による粘度変化も重要な要素の一つである．以下にせん断速度の算出方法とせん断速度と温度による粘度変化の計算方法について説明する^{A3)A5)}．

まず，速度勾配から変形速度テンソル $\mathbf{D}$ を式(A15)によって計算する．

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} \{ \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \} \quad (\text{A15})$$

この変形速度テンソル $\mathbf{D}$ の内積によってせん断速度 $\dot{\gamma}$ を計算する．

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\mathbf{D} \cdot \mathbf{D}} \quad (\text{A16})$$

このせん断速度で式(A17)を用いてせん断速度を考慮した粘度 μ を変更する．

$$\mu = \mu_0 \dot{\gamma}^{1-n} \quad (\text{A17})$$

ここで， μ_0 はせん断速度が 0 m/s の時の粘度， n はべき乗数である．これは非ニュートン流体として，Power-law モデルを使用している．

次に温度場の計算方法を示す^{A6)}．この計算は，ナビエストークスの方程式の計算後に行う．式(A18)のエネルギー方程式を離散化して式(A19)を得る．ここでも陽的に離散化した場合，拡散数の安定条件のため時間刻み幅を小さくする必要があり計算コストが膨大になる．そこで，式(A20)を陰的に離散化する．

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \mu \dot{\gamma}^2 \quad (\text{A18})$$

$$\frac{T^{m+1} - T^m}{\Delta t} = \frac{1}{\rho C_p} \{ k \nabla^2 T + \mu \dot{\gamma}^2 \} \quad (\text{A19})$$

T は温度， ρ は密度， C_p は定圧比熱， m はステップ数を示している．また，式(A19)の右辺の第一項のラプラシアンは式(A3)によって離散化する．

ここで計算した温度を用いて温度による粘度変化を考慮する．温度場とせん断速度を考慮した粘度 μ の計算を式(A20)，(A21)に示す．

$$\mu = a_T \mu_0 \dot{\gamma}^{1-n} \quad (\text{A20})$$

$$a_T = \exp \left\{ -\frac{C_1(T - T_s)}{C_2 + T - T_s} \right\} \quad (\text{A21})$$

ここで a_T はW.L.F 則に基づくシフトファクターであり， $C_1=8.86$ ， $C_2=101.6$ ， T_s は基準温度であり，ポリプロピレンでは 50 を使用する．

A2.4 剛体運動の計算

本研究では，3次元における繊維の流動を扱う．対象とする短繊維強化複合材料中の短繊維を剛体として扱い，平行運動と回転運動を考慮する^{A4)}．

剛体粒子の処理は，まず非圧縮性のニュートン流体の計算アルゴリズムによって，流体粒子と同様に時刻 $k+1$ における位置 $\hat{\mathbf{r}}_i^{k+1}$ と速度 $\hat{\mathbf{u}}_i^{k+1}$ を算出する．その後，繊維形状を保つように剛体粒子の位置，速度を修正する．

はじめに， N 個の粒子で表された剛体の重心の座標 $\mathbf{r}_g$ と慣性モーメント I を計算する．この慣性モーメントの計算において，実際は密度をかける必要があるが，次で示すトルクと打ち消しあうため，今回は省略している．

$$\mathbf{r}_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_i \quad (\text{A22})$$

$$I = \sum_{i=1}^N |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_g|^2 \quad (\text{A23})$$

次に，繊維の重心の座標変化量 $\mathbf{r}_g'$ と，各繊維粒子の移動量の差，および各繊維粒子の重心の相対ベクトルの外積から，繊維に働いたトルク $\mathbf{M}$ を計算する．前述のようにこのトルク計算でも密度の項が必要だが慣性モーメントでの密度と打ち消すため省略している．

$$\mathbf{r}_g' = \frac{1}{N} (\hat{\mathbf{r}}_i^{k+1} - \mathbf{r}_i^k) \quad (\text{A24})$$

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^N (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_g) \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_g') \quad (\text{A25})$$

繊維軸方向の単位ベクトルを $\boldsymbol{\tau}^k$ とし，トルクベクトルと繊維軸ベクトルが成す角から，回転軸周りの慣性モーメント I_{eff} を計算する．

$$I_{\text{eff}} = I \left[1 - \left(\boldsymbol{\tau}^k \cdot \frac{\mathbf{M}^2}{|\mathbf{M}|} \right) \right] \quad (\text{A26})$$

トルクの絶対値と，回転軸周りの慣性モーメントから，回転角 θ を算出する．

$$\theta = \frac{|\mathbf{M}|}{I_{\text{eff}}} \quad (\text{A27})$$

$(k+1)$ ステップの繊維軸ベクトル $\boldsymbol{\tau}^{k+1}$ を求める．

$$0 + \boldsymbol{\tau}^{k+1} = \left(\cos \frac{\theta}{2} + \frac{\mathbf{M}}{|\mathbf{M}|} \sin \frac{\theta}{2} \right) (0 + \boldsymbol{\tau}^k) \times \left(\cos \frac{\theta}{2} - \frac{\mathbf{M}}{|\mathbf{M}|} \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (\text{A28})$$

最後に， $(k+1)$ ステップにおける重心座標 $\mathbf{r}_g^{k+1}$ と繊維軸ベクトル $\boldsymbol{\tau}^{k+1}$ を用いて，剛体形状を保つように繊維粒子を配置し直し， $(k+1)$ ステップにおける繊維粒子の座標と速度を算出する．

参考文献

- A1) 越塚 誠一，柴田 和也，室谷 浩平，”粒子法入門”，丸善出版，(2014)
- A2) 後藤 仁志，”粒子法”，森北出版，2018
- A3) 福澤 洋平，富山 秀樹，柴田 和也，越塚 誠一，”MPS 法による高粘性非ニュートン流体の流動解析”，日本計算工学会論文集，Vol.2014，p.20140007，(2014)
<https://doi.org/10.11421/jscs.2014.20140007>
- A4) 松谷 浩明，武田 一朗，橋本 雅弘，平野 啓之，岡部 朋永，”粒子法を用いた熱可塑性スタンパブルシートの流動シミュレーション”，日本複合材料学会誌， Vol.40.No.5,pp.227-237,(2014)
<https://doi.org/10.6089/jscm.40.227>
- A5) Malcolm L. Williams Robert F. Landel John D. Ferry, "The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids", Journal of the American Chemical Society, Vol.77, Issue 14, pp.3701-3707, (1995)
- A6) 越塚 誠一，”粒子法”，丸善，(2005)