

# メッシュフリー法による樹脂混練機内の部分充満状態および相変化を伴う材料挙動の数値解析に関する研究

関山, 和英

<https://hdl.handle.net/2324/5068195>

---

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 関山 和英

論 文 名 : メッシュフリー法による樹脂混練機内の部分充満状態および相変化を伴う材料挙動の数値解析に関する研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

二軸押出機や連続混練機は樹脂製造プラントの混練造粒工程で活用される設備であり、内部での温度や圧力、せん断応力の状態が混練の品質に影響することが知られているため、混練プロセスの最適化には混練機内部での詳細な材料挙動の把握が重要である。応力などの実験的に把握することが難しい物理量の分布については数値解析を用いた検討が必須であるが、定量性が十分とは言えない。この要因として、部分充満領域を含むことや、変形する流路形状、固体から液体への相変化（可塑化）が生じることなどが挙げられる。このような状態での材料挙動を定量的に把握し混練メカニズムの解明と混練プロセスの最適化を行うことは、工学的な価値が高い。

計算点間の接続関係（メッシュ）が不要なメッシュフリー法は、流体の分離や合流、流路形状の変化に対してメッシュに関わる問題が生じないことから、部分充満状態や変形する流路形状の解析に非常に有用である。また、可塑化挙動については、固体粒子の挙動を連続体とみなすことが可能となれば、固体から液体への相変化を含む過程も、流動解析と同様の解法を適用することが可能となる。本論文は、メッシュフリー法による部分充満解析手法の構築、および部分充満状態を考慮した混練機内の熔融混練部、可塑化混練部における材料挙動に関する新たな知見を得ることを目標として行った研究結果をまとめたものであり、以下の6つの章から構成される。

第1章の序論では、混練機内の熔融混練部および可塑化混練部を対象に、材料挙動に関する既往の実験および数値解析による研究を概観し、本研究の課題をまとめた。

第2章では、熔融混練部における部分充満状態を把握可能な数値解析技術を獲得することを目的に、エレメントフリーガラーキン法（Element-Free Galerkin Method: EFGM）を基にした高粘性流体の高精度かつ安定した部分充満解析技術の開発を行った。熔融樹脂のような、速度の補間次数が1以上のEFGMでは、高粘性体の高精度な角運動量保存と回転運動の再現ができることを確認した。ラグランジュ法であるEFGMでは「計算点移動に伴う計算点配置の不均一性が引き起こす計算誤差の拡大」が起こるが、計算点間距離に応じた仮想ばねの反発力を利用した簡便な計算点再配置手法を考案し、速度場および自由表面形状の高精度な再現が可能であることを示した。液体が半充填された共軸二重円筒実験における自由表面形状の非定常変化、また三角形状ロータ実験との自由表面形状や回転軸に加わるトルクの比較を行うことで、提案した手法により定量的な部分充満解析が可能であることを確認した。

第3章では、操作条件やロータ形状によって様々な充満状態となる異方向回転連続混練機の定量的な流動評価を目的に、第2章で開発した解析技術を用いて、熔融混練部の部分充満解析を行い、充満率および滞留時間について検討した。その結果、熔融混練部全体の充満状態の変化を把握することが可能となり、ロータのねじり方向が変化すると操作条件によっては軸方向に断面充満率が変

化することを明らかにした。また滞留時間分布の検討結果から、実験で一般に用いられる平均滞留時間から充填率を推定する方法は、軸方向に断面充填率が変化する場合に過大評価となることなど、異方向回転連続混練機に関する新たな知見を得た。

第4章では、ポリエチレン製造プラントで多く採用される異方向回転連続混練機について、二峰分布の高密度ポリエチレンを対象とした高分子ゲルの分散性能評価を行った。同時に、一般的な樹脂混練機である完全嚙合同方向回転二軸押出機についても同様の評価を行い、両者の差異を明らかにした。高分子ゲルはカーボンブラックで着色されていない領域であるホワイトスポットの大きさで評価し、連続混練機と二軸押出機の機種間および各機種での異なる操作条件において、分散性能と相関する混練指標を検討した結果、平均せん断応力や平均滞留時間といった従来の混練指標では、機種差や混練条件の影響を同時に評価することができないことがわかった。凝集体や二液体の分散メカニズムを元に、ホワイトスポットはせん断応力のしきい値以下では分散が進行しないと考え、“しきい値応力以上の応力領域に滞留する時間”を新たな混練指標である“有効滞留時間”として提案した。異なるしきい値応力の有効滞留時間との比較結果から、機種や混練条件が異なる場合においても一貫した評価が可能なしきい値応力が存在していることを明らかにした。本指標に基づき、連続混練機が二軸押出機に比べ高い分散性能が得られる理由を検討した結果、連続混練機はチップクリアランスが相対的に大きいため、チップクリアランスおよびその周辺でホワイトスポットの分散に必要なしきい値応力以上のせん断応力が存在し、その領域の滞留時間が比較的長いことがわかった。以上のように、提案した部分充填解析技術によって、充填率や応力状態に基づいた混練指標を提案し、混練メカニズムに関する新たな知見を得ることが可能であることを示した。

第5章では、固体粒子群の流動と固液二相を含む可塑化混練部での材料挙動の把握を可能とするために、ペレット状の固体樹脂材料を連続体として捉え、構成則によって固体、固液二相、液体の材料挙動を再現する方法についての検討を行った。固体粒子を加圧した状態でせん断を与えることが可能な共軸二重円筒実験装置を用いて、固相の運動抵抗率を計測した結果、圧力およびせん断速度に対して独立の依存性を示すことを確認し、固体粒子群の連続体構成則を構築した。さらに、溶融を伴う共軸二重円筒実験により固液二相における連続体構成則を構築し、固体から液体までの可塑化連続体構成則が得られた。これらを適用した共軸二重円筒実験の検証解析を実施し、回転軸にかかるトルクや、発熱に伴い拡大する溶融範囲を再現することがわかった。連続体構成則により、通常の流動解析と同程度の計算負荷となり、複雑な処理を必要とせず可塑化状態を再現することが可能であるとわかった。

第6章の結論では、これまで得られた研究成果を総括し、今後の課題と展望について述べた。