

## 学 位 論 文 題 名

## 非ニュートン流体の流動解析とその応用に関する研究

## 学位論文内容の要旨

代表的な非ニュートン流体である熔融樹脂を用いる射出成形の分野では、高分子材料の進歩により従来の欠点であった強度や寸法精度が大幅に改善され、元々プラスチック成形品の持つ軽量・成形性の良さという特徴と相まって、家電・情報通信機器、自動車、玩具など適用分野が飛躍的に増大している。非ニュートン流体は、水・空気などのニュートン流体と著しく異なる非線形なレオロジー的挙動を示すため、ニュートン流体の解析手法をそのまま適用することはできない。したがって、非ニュートン流体の熱流動的特性をより正確に把握できる汎用性の優れた解析法の研究は、学術的にもまた工業的には製品の信頼性・生産性の向上、およびコスト低減のためにきわめて重要である。

非ニュートン流体の非線形なレオロジー的挙動を特徴つける構成方程式として、在来、指数則型、Maxwell型、Oldroyd型、積分型など各種のモデルが提案されている。これらを用いた解析の多くは2次元定常解析である。非定常解析ではNewton-Raphson法などの収束解法が用いられているが、計算時間が短縮できる陽的解法は見当らない。また非圧縮性ニュートン流体で主流となりつつある準陰的なMarker and Cell法の非ニュートン流体の移動境界問題への適用例もない。現在、射出成形シミュレーションの分野で広く用いられている手法は、物性データ数が多い指数則流体を対象とした薄肉平板流れ(Hele-Shaw流れ)の有限要素法解析が主流である。すなわち、加速度項を無視した圧力に関するPoisson方程式により定常薄肉流れを解析する手法であるが、Hele-Shaw近似が成立しない狭路や肉厚部の流れに対しては圧力損失を過小評価する結果となる。以上を踏まえ、熔融樹脂の射出成形過程のシミュレーションを目的に以下の点から新たな手法を開発することが本論文の主題である。

(1) 従来のHele-Shaw近似に基づく解析は薄いシール内の定常平板流れに限定される。そのため厚肉部の流れを扱える3次元解析手法が必要である。

(2) 強い非線形性を持つ高粘性の非ニュートン流体の非定常流れでは、数値不安定による制約が大きく通常の陽解法が適用できない。このため時間ステップを大きく取れる陰解法が従来の主流であった。しかし3次元の複雑な流路内の流れを解く場合陰解法では計算容量が膨大になり、新たに実用的な解法が必要である。

(3) 実際のシール内の流れに対応して流動する自由境界の位置を精度よく、しかも計算時間、計算容量を低減できる解析法が必要である。

(4) 成形品では強度を増すために熔融樹脂中に強化繊維を入れることが多い。この場合流動中の繊維の挙動を予測できることが望ましい。また、成形品の変形予測も必要で

ある。

以上の要請に対して本論文は、高粘性非ニュートン流体を対象として、移動自由境界をもつ非定常3次元流れの数値解析手法、および溶融樹脂中の繊維の配向と流動後の変形の解析手法を研究した結果をまとめたものであり、全7章で構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第1章では、非ニュートン流体の数値解析とその応用としての射出成形の解析に関する従来の研究および問題点を述べ、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第2章では、指数則モデルで表される高粘性の溶融樹脂に対して著者が開発した非定常3次元解析法を提案している。また高ベクレ数の特徴を利用しエネルギー式の拡散項と移流項を分離する解法を提案し、具体例としてシエル構造物用の3次元シエルに適用し、さらに矩形平板流れの解析解と比較し、著者の手法の妥当性を明らかにしている。

第3章では、射出成形で重要な移動自由境界の解析手法として、オイラー型のSOLA-VOF法を改良したマーカー粒子法とラグランジュ型解法を改良した部分メッシュ生成法を提案している。さらにこれらと第2章の手法を組合せ、L型および凸レンズ型流路の自由境界流れを解析し、計算結果の妥当性、手法の有効性を示している。

第4章では、以上の新しい解析法の検証のため、指数則に従う疑似流体による流れの可視化実験と実工程のショートショット実験を行い、流速分布、自由境界の位置を解析結果と比較し計算の妥当性を確認している。

第5章では、樹脂中に混入させた強化繊維の配向を計算するために、局所的な速度勾配による繊維の回転と上流の配向を考慮した繊維重点率の輸送方程式の風上解法を提案している。また提案した手法で正方形板の非定常流れを解析し物理的に妥当な繊維配向の解を得ている。

第6章では、第5章で求めた繊維配向による異方性を考慮した成形品の熱変形を、直交異方性の弾性マトリックスにより解析する方法を提案している。また平行平板の曲げ問題に適用し有用性を確認している。

最後に第7章は本研究で得られた成果を総括すると共に関連する分野の今後課題を述べている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 粥 川 尚 之

副 査 教 授 阿 部 寛

副 査 教 授 木 谷 勝

副 査 教 授 井 上 良 紀

副 査 講 師 中 村 邦 男 (本学大学院理学研究科)

学 位 論 文 題 名

## 非ニュートン流体の流動解析とその応用に関する研究

近年、各種工業製品への高分子材料の利用が飛躍的に増えるに伴い、その射出成形時の熱流力過程を精度よく解析する必要性が増している。この場合、溶融樹脂は高粘性で非線形なレオロジー的挙動を示すため、水・空気など通常のニュートン流体の解析手法をそのまま適用することはできない。したがって、複雑な流路形状にも適応できる非ニュートン流体に関する汎用性の優れた解析法の研究開発は、学術的にもまた製品の信頼性・生産性の向上、およびコスト低減の観点から工業的にもきわめて重要である。

非ニュートン流体のレオロジー的挙動を特徴つける構成方程式として、在来、指数則型、Maxwell型、Oldroyd型、積分型など各種のモデルが提案されている。これらの内、射出成形シミュレーションで広く用いられている手法は、物性データ数が多い指数則型であり、流れ場としては、Hele-Shaw近似による薄肉平板間の2次元定常流れの解析が主流である。すなわち、加速度項を無視した圧力に関するPoisson方程式を解析する手法であるが、Hele-Shaw近似が成立しない峽路や肉厚部を持つ流れでは圧力損失を過小評価する結果となる。また、非定常問題では、強い非線形性に起因する数値不安定の制約から、通常の陽解法が適用できず、これまではNewton-Raphson法など陰的収束解法が用いられている。しかし複雑な流路の3次元流れに従来の陰解法を用いると計算容量が膨大となり新たな解析法を必要としている。さらに射出成形では、流動する自由境界の位置を精度よく予測することと、強度を増すために溶融樹脂に混入する強化繊維の配向と挙動を知ることが重要であるが、従来これらの問題を限られた計算容量と計算時間で効率よく解く方法は提案されていなかった。

当該分野における以上の現状を踏まえ、本論文は、指数則に従う高粘性の溶融樹脂を対象として、移動自由境界を持つ非ニュートン流体の3次元非定常流れ問題を効率よくかつ実用上十分な精度で解析することを目的に、従来の手法の拡張と新しい手法の考案、および強化繊維の配向に関する解析手法、ならびにそれらの検証実験を行ったものであり、以下5点の新たな知見を得ている。

①運動方程式の解法として、流速修正法と有理ルンゲークッタ法を組み合わせた新たな時間離散化法を提案し、計算時間の大幅な短縮とその数値的安定性の条件を明らかにした。

またこれを3次元問題に適応する場合、境界層速度分布に層流厳密解を用いる擬3次元処理が精度よい解を与えることを示した。

②非ニュートン流体が高ペクレ数であることに着目し、エネルギー式を拡散方程式と移流方程式に分離し、前者を有理ルンゲクッタ法で解き、後者を数値不安定を伴わずに解くために特性曲線法を改良した流積積分法を考案した。

③移動自由境界を持つ非定常問題の解法として、境界メッシュ上の流体の体積占有率に関する移流方程式をマーカー法で解く方法を開発した。

④樹脂中の強化繊維の分布と配向を予測する新しい解析法を提案した。

⑤指数則に従う疑似流体により、流れの可視化実験と実工程のショートショット実験を行い以上の解析法による数値結果の妥当性を検証した。

これを要するに、著者は、熔融樹脂の鑄型内の流れに関する従来の解析法を改良すると共に、独自の方法により実用上十分な精度で非ニュートン流体の非定常3次元自由境界問題を解くことを可能としたもので、数値流体力学、高分子工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。