

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	圧縮性単相及び気液二相流れにおけるBVD原理に基づくハイブリッド型高解像度数値解法の研究
Title(English)	
著者(和文)	脇村 尋
Author(English)	Hiro Wakimura
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第264号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:青木 尊之,肖 鋒,大西 領,伊井 仁志,門永 雅史
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第264号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	脇村 尋	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	青木 尊之	教授	伊井 仁志	教授
	審査員	肖 鋒	教授	門永 雅史	特任教授
		大西 領	教授		

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「圧縮性単相及び気液二相流れにおける BVD 原理に基づくハイブリッド型高解像度数値解法の研究」と題し、圧縮性流体の数値計算において、数値振動および過度な数値散逸の両方を抑制する高解像度の数値解法である BVD (Boundary Variation Diminishing) 法の発展および気液二相流への適用に関する研究成果をまとめたもので、全 8 章で構成されている。

第 1 章「序論」では、衝撃波や接触不連続面、気液界面といった空間的に不連続な物理量分布に対する既存の数値解法を概観し、数値振動および数値散逸の両方を抑制可能な高解像度数値解法の必要性について述べている。BVD 法による高解像度数値解法を発展させ、多様な圧縮性流体問題への適用性を示すことが本研究の目的であると述べている。

第 2 章「圧縮性流れの支配方程式」では、まず単相の非粘性圧縮性流体の支配方程式が双曲型であることを示した後、気液二相流の支配方程式について、二相間の速度、圧力、温度が非平衡状態の 7 方程式モデルから、完全平衡状態を仮定した 4 方程式モデルまでを紹介し、これらのモデルもすべて双曲型であることを述べている。これらのモデルに基づき、気液界面の挙動や相変化現象を数値的に再現するためのアプローチを整理している。

第 3 章「圧縮性流れの数値解法」では、本研究に関連する既存の数値解法を概観し、有限体積法に基づいた流束の再構築法、Riemann 解法、および時間積分法について詳述し、提案手法の理論的背景を明確にしている。

第 4 章「ハイブリッド型高解像度数値解法」では、BVD 原理に基づく新しいハイブリッド型数値解法を提案している。従来の BVD 法では固定値であった THINC (Tangent of Hyperbola for Interface Capturing) 補間法の勾配パラメータ  $\beta$  を可変とし、解の滑らかさに応じて動的に値を変更する手法を導入することで、解の形状により忠実な補間関数を構築することができる P4T6v-BVD 法および PnT6v5c-BVD 法を開発している。これらの手法は、接触不連続やケルビン・ヘルムホルツ不安定性に伴う細かい渦構造を鮮明に再現でき、計算コストも 30~50%削減できることを示している。

第 5 章「対称性保存数値解法」では、高解像度数値解法における丸め誤差が原因で、本来対称であるべき数値解が非対称になる原因を特定し、それを排除するための計算順序を提案している。この手法を用いたレイリー・テイラー不安定性などのベンチマークテストでは、数値解が完全に対称となることを明らかにし、成長速度や乱れの高精度な解析が可能となることを示している。

第 6 章「気液二相圧縮性流れへの展開」では、これまでの高解像度数値解法を気液二相圧縮性流体に適用している。表面張力と相変化を含み、5 方程式モデルおよび 6 方程式モデルを用いて解析を実施し、MUSCL-THINC-BVD 法および Adaptive THINC-BVD 法を適用した結果を示している。これらのハイブリッド型 BVD 法は、既存解法と比較して接触不連続および相変化に伴う気液界面を高解像度で捉えることができ、数値散逸を抑制することができることを明らかにしている。

第 7 章「非構造格子への展開」では、これまでの手法を非構造格子に適用し、MLP リミタと THINC/QQ 補間を組み合わせた MUSCL-THINC/QQ-BVD 法を開発し、接触不連続や相変化に伴う気液界面を高精度に再現できることを示している。ロケットエンジン内部の燃焼流れや水中プロペラのキャビテーション解析といった複雑な形状を持つ実問題への適用の可能性についても述べている。

第 8 章「結論」では、本研究で得られた成果をまとめるとともに今後の課題について述べている。以上を要するに、本論文は高解像度ハイブリッド型数値解法を開発し、圧縮性の単相流および相変化に伴う気液多相流に対する高精度な数値解を求めることができることを実証したもので、工学上貢献するところが大きい。よって本論文は博士 (工学) 論文として十分な価値を有すると認められる。

注意: 「論文審査の要旨及び審査員」は、東京科学大学リサーチポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。