

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)	論文要旨
Type(English)	Summary

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	( 工学 )
学生氏名： Student's Name	脇村 尋		審査員主査： Chief Examiner	青木 尊之 教授

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

単相及び気液二相圧縮性流れは、航空機周りの空力解析やロケットエンジン内部の燃料流れなど、航空宇宙分野を中心として様々な工学的場面で観測される。圧縮性流れの特徴として、衝撃波や接触不連続、気液界面といった不連続的な物理量分布を持つ流れ構造が発生する。圧縮性流れにおける数値解法は、このような不連続解を安定的に計算するために人工的に粘性を加える手法が主流である。しかし、既存の数値解法は人工粘性を過剰に含んでいるため、時間発展に伴い接触不連続や気液界面が拡散し、細かい渦構造や界面現象がぼやけて見えなくなってしまう。計算の安定性を保ちながら不連続解の非物理的な拡散を回避するために、数値振動誤差と数値散逸誤差の両方を抑制する高解像度数値解法が必要とされている。高解像度数値解法によって細かい渦構造を捉えることができれば、乱流現象の高精度な解析が可能となり、航空機の揚力係数を正しく評価することに繋がる。また、気液界面を高解像度で捉えることができれば、表面張力や相変化といった界面現象の高精度な再現が期待される。したがって高解像度数値解法の開発および研究は、工学的意義の大きい課題であると言える。

近年、高解像度数値解法の設計指針として、セル境界値の変動(Boundary Variation)を小さくする BVD(Boundary Variation Diminishing)原理という考え方が提案され、BVD 原理に基づくハイブリッド型解法の研究が進められている。本研究では、新規ハイブリッド型 BVD 法の開発および BVD 法による表面張力および相変化を考慮する気液二相圧縮性流れの計算を行う。

単相圧縮性流れにおいて、BVD 原理に基づくハイブリッド型解法を開発した。従来の BVD 法では THINC(Tangent of Hyperbola for Interface Capturing)補間法の勾配パラメータ  $\beta$  の値を固定値としていた。本研究では  $\beta$  の値を変え、解の滑らかさに応じて値を決める事で、解の形状に忠実な補間関数の構築に取り組んだ。単相圧縮性流れにおける典型的なベンチマークテストを解き、既存解法と性能を比較した。提案手法である  $P_n T_{\beta, v}$ -BVD(Polynomial of  $n$ th-degree and  $\beta$ -variable THINC function reconstruction based on BVD algorithm)法および  $P_n T_{\beta, v, c}$ -BVD(Polynomial of  $n$ th-degree and  $\beta$ -variable 5-cell THINC function reconstruction based on BVD algorithm)法は、接触不連続を 2~4 セル程度の幅で捕獲し、ケルビンヘルムホルツ不安定性等により発生する細かい渦構造を代表的な既存解法の一つである WENO(Weighted Essentially Non-Oscillatory)-Z 法より鮮明に捉えた。また、既存のハイブリッド型 BVD 法と比べて、候補補間関数の数を減らしたことで、計算コストを 28%~51%抑制した。

高解像度数値解法では、浮動小数点演算の丸め誤差によって流れの空間対称性が崩れることが知られている。本研究では 3 次元空間における高解像度数値解法の計算手順の中で空間対称性を破る原因を全て特定し、対称性誤差を生じない計算手順を提案した。空間対称性を持つベンチマークテストを解き、対称性保存解法では数値解の対称性が完全に保たれることが示された。対称性保存解法は、レイリーテイラー不安定性の成長速度の解析や、乱流特性量のより正しい評価などが可能になると期待される。

高解像度数値解法を用いて、表面張力および相変化を考慮する気液二相圧縮性流れを計算した。気液界面は拡散領域として扱い、支配方程式には Allaire らの 5 方程式モデルと Pelanti と Shyue の 6 方程式モデルを採用した。気液二相流では計算安定性の観点から 2 次精度の MUSCL(Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Law)-THINC-BVD 法および Adaptive THINC-BVD 法を用いて、ベンチマークテストを解いた。これらのハイブリッド型 BVD 法は、代表的な 2 次精度既存解法の MUSCL 法と比べて、接触不連続と気液界面を高解像度で捉えた。その結果、ハイブリッド型 BVD 法は表面張力および相変化の効果をより忠実に再現することに成功した。界面特有の現象を再現するためには、高解像度数値解法を用いて気液界面における数値散逸誤差を抑制することが重要であることを明らかにした。

相変化を考慮する気液二相圧縮性流れを非構造格子における高解像度数値解法で計算した。MLP(Multi-dimension Limiting Process)リミタを用いた MUSCL 補間と界面を 2 次多項式で表現する THINC/QQ(THINC method with quadratic surface representation and Gaussian quadrature)補間を BVD 原理に基づき組み合わせた MUSCL-THINC/QQ-BVD 法により、ベンチマークテストを解いた。MUSCL-THINC/QQ-BVD 法は接触不連続と気液界面を 3~4 セル程度の幅で捉え、相変化により動的に生じる気液界面を再現した。非構造格子上で高解像度数値解法を用いて界面現象の再現に成功したことで、例えばロケットエンジン内部の燃焼流れや水中プロペラ表面のキャビテーション解析など、複雑形状の計算領域を持つ実問題に対応できる可能性を示した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(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。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

# 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース :

Department of Graduate major in

学生氏名 :

Student's Name

機械

機械

系

コース

脇村 尋

申請学位 (専攻分野) : 博士

Academic Degree Requested

審査員主査 :

Chief Examiner

Doctor of

Doctor of

( 工学 )

青木 尊之 教授

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

In the numerical analysis of compressible single-phase and gas-liquid two-phase flows, high-resolution numerical method is required to capture discontinuous solutions such as shock waves, contact discontinuities, and gas-liquid interfaces.

The BVD (Boundary Variation Diminishing) principle was recently proposed as a guideline to construct high-resolution methods, and hybrid-type methods which combine multiple reconstruction functions based on the BVD principle are currently studied. In this work, new hybrid-type BVD methods are proposed and the BVD methods are extended to simulate interfacial phenomena.

Formulations of determining value of  $\beta$ , which indicates gradient parameter in the THINC (Tangent of Hyperbola for INterface Capturing) interpolation, are developed. Combining the linear polynomial interpolation and the  $\beta$ -variable THINC interpolation, the  $P_4T_{\beta v}$ -BVD (Polynomial of 4th-degree and  $\beta$ -variable THINC function reconstruction based on BVD algorithm) method and  $P_nT_{\beta v5c}$ -BVD (Polynomial of nth-degree and  $\beta$ -variable 5-cell THINC function reconstruction based on BVD algorithm) method are proposed as new high-resolution numerical methods. These methods capture contact discontinuities and small vortex structures better than the existing method. Additionally, the proposed BVD methods reduce the number of candidate reconstruction functions, resulting in 28% to 51% reduction of computational costs compared with existing hybrid-type BVD methods.

The high-resolution methods are known to suffer from symmetry error in the symmetric flow simulations due to asymmetric rounding errors in floating-point arithmetic. In this work all factors breaking symmetry in the computation are revealed and symmetry-preserving solutions are studied. It is demonstrated the symmetry-preserving method completely preserves symmetry in numerical solution. Using the second-order high-resolution methods, the gas-liquid two-phase compressible flows with surface tension or phase change are solved. The MUSCL (Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Law) -THINC-BVD and Adaptive THINC-BVD methods capture contact discontinuities and gas-liquid interfaces better than the existing method. Especially, the surface tension and phase change effects are reproduced with high-fidelity in the results of the hybrid-type BVD methods, because of the low-dissipation errors in the interfaces.

The gas-liquid two-phase compressible flows are calculated with high-resolution methods on unstructured grids. The MUSCL reconstruction with the MLP (Multi-dimension limiting process) limiter and the THINC/QQ (THINC method with quadratic surface representation and Gaussian quadrature) reconstruction are combined based on the BVD principle. The MUSCL-THINC/qq-BVD method captures contact discontinuities and gas-liquid interfaces, and reproduces the interfaces dynamically created by phase change better than the existing method.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(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。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).