

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

高解像かつ安定な流体計算法を開発

衝撃波、密度界面など複雑な現象を伴う圧縮性流体の新解法

本研究のポイント

- 圧縮性流体向けの高解像、安定、低コストな数値解法を開発
- 様々な強度の衝撃波を単一の手法で高解像かつ安定に計算
- 汎用性の高さから、今後の航空宇宙工学や流体工学への応用に期待

【研究概要】

横浜国立大学の福嶋岳特任研究員（現 Université de Sherbrooke）、北村圭一准教授は、圧縮性流体と呼ばれる衝撃波を始めとした不連続現象が現れる流体を、高解像・安定・低コストで解析できる流体計算法を開発しました。今後、本提案手法の利用により、流体力学現象の解明や航空宇宙分野での応用につながると期待されます。

本研究成果は、流体力学を扱う国際科学雑誌 *Physics of Fluids* に掲載されました（2024年4月10日付：日本時間4月11日）。

本研究は科学研究費助成事業（科研費）の基盤研究(B) (JP23H01601)、特別研究員奨励費 (JP23KJ0981)、基盤研究(A) (JP21H04589)の支援を受けて実施されました。

【社会的な背景】

航空宇宙工学や流体工学では、近年の技術の向上に伴い、複雑な流体现象を正しくシミュレーションする必要性が高まっています。ロケットや航空機、タービンなどで現れる圧縮性流体と呼ばれる流れでは、衝撃波と呼ばれる現象が発生し、流れに広く影響を与えます。数値解析において衝撃波はその不連続な特性から特異点となるため、扱いに注意しなければ、深刻な散逸誤差や計算の破綻を引き起こし、シミュレーションの信頼性を損なうという問題があります。この問題に対し、衝撃波を散逸誤差少なく解像しつつ、かつ安定的に解く数値解析手法の開発は、長年にわたり重要な研究課題となっています。

【研究成果】

圧縮性流体の数値解析において、有限体積法と呼ばれる計算方法の枠組みで、様々な強度の衝撃波を高解像かつ安定に解く数値解法を開発しました。提案手法は、定常計算（一定時間経過後の最終状態に着目する計算形態）と非定常計算（時間経過に伴って変化する遷移状態に着目する計算形態）両方に対応しています。また、広く使われている空間二次精度形式と呼ばれる形式で計算手法を構築したため、計算にかかるコストが小さく汎用性が高い特徴があり、ユーザーが比較的手軽に本手法を利用できます。このような比較的簡

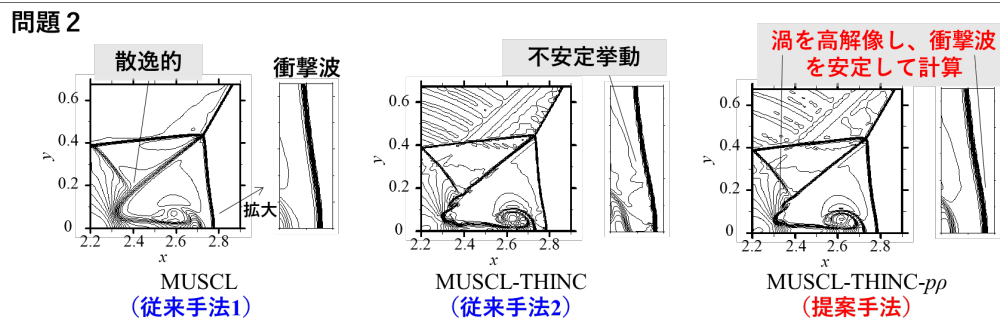
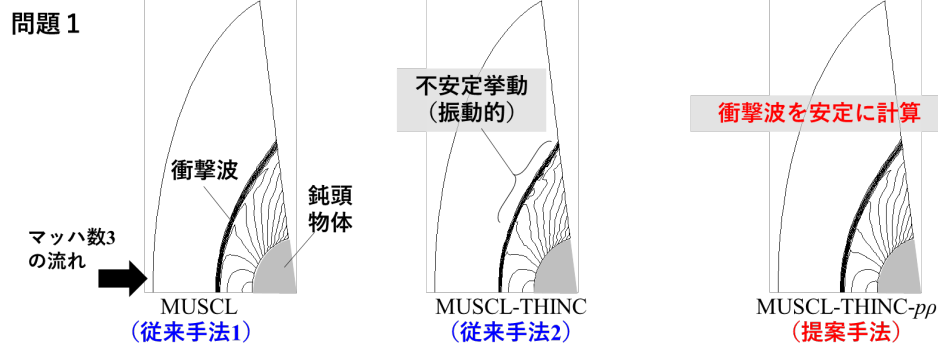
易な形式でありながら、密度の境界面で発生する流れの渦構造を、高次精度手法と呼ばれる高級な手法以上に解像する結果も得られました。

【実験手法】

我々は、1) 広く使用されている空間二次精度と呼ばれる方法 (図中、従来手法 1: MUSCL) では、弱い衝撃波を過剰に散逸して解いてしまうこと、2) これに対処するために不連続的な部分に対して不連続性を保つ処理を行う手法 (図中、従来手法 2: MUSCL-THINC) では、強い衝撃波で数値振動と呼ばれる誤差を示すこと、の 2 点を新たに明らかにした上で、これらの手法をバランスよく組み合わせました。具体的には、弱い衝撃波は積極的に不連続性を保つ処理を行い、強い衝撃波には特別な処理を行わないよう、計算手法を設計しました。これは、従来の数値流体力学研究では見られなかった、本研究独自の発想です。提案手法はベンチマークテストと呼ばれる計算手法の性能を比較する基準となる問題で検証され、多岐にわたる問題で本提案手法の有効性が確認されました。計算例は以下に示す図に示されています。

【今後の展開】

本研究で提案された計算手法の応用先として、航空機を例にすると、主翼上で流れが加速され衝撃波が発生し、その後不安定振動を行う遷音速バフエット現象と呼ばれる現象への応用が挙げられます。この現象は航行効率の悪化や主翼への構造負荷を引き起こすため、数値解析による適切な予測が求められています。現象の複雑さから数値解析が困難であるという課題があります。そこで様々な衝撃波を高解像かつ安定に解くことが可能な提案手法を使用することで、実現象の再現と理解が深まることが期待されます。そのほかにも、衝撃波が現われる流体现象に対して、高い計算性能に加えてユーザーが使用しやすい特徴から、多くの場面での利用が期待されます。



図：従来手法と提案手法によるベンチマークテスト（計算手法の性能検証のための問題）の計算結果を示しています。問題 1 は、超音速流れに置かれた鈍頭物体前方に発生する衝撃波を定常計算する問題です。提案手法は衝撃波の発生に対して安定した解を示しました。問題 2 は、衝撃波が壁で反射する現象を非定常計算する問題です。提案手法は 2 つの従来手法と比較し、衝撃波を安定して計算し、かつ渦を高解像することに成功しています。このように提案手法は、複数の問題に対して高解像・安定に計算することが示されました。

【謝辞】

本研究は科学研究費助成事業（科研費）の基盤研究(B) (JP23H01601)、特別研究員奨励費 (JP23KJ0981)、基盤研究(A) (JP21H04589)の支援を受けて実施されました。

【発表雑誌】

雑誌名： *Physics of Fluids*, 2024 年 4 月 10 日オンライン公開

DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0198163> (オープンアクセス)

論文題目： Improved hybrid approach of monotonic upstream-centered scheme for conservation laws and discontinuity sharpening technique for steady and unsteady flows

論文著者： Gaku Fukushima, Keiichi Kitamura

(福嶋岳、北村圭一)

本件に関するお問い合わせ先

横浜国立大学 大学院工学研究院 システムの創生部門

准教授 北村圭一

kitamura@ynu.ac.jp