

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820409

研究課題名(和文)数値的評価法に基づく高速・低速・混相流統合解析新手法の研究

研究課題名(英文) Numerical-Evaluation-Based Unified Numerical Method for High-speed, Low-speed, and Multiphase Flows

研究代表者

北村 圭一 (Kitamura, Keiichi)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20402547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：まず本研究では、圧縮性流体の計算手法の一つであるSLAU2(Kitamura-Shima, 2013)について、高速流れ(極超音速流れ)において問題となる「衝撃波異常解」の抑制や、空力加熱の予測精度の向上を試みた。その結果、より強力な制限関数(つまり、衝撃波において空間精度をなるべく下げる)を併用する事でこれらの問題の改善が見られた。

またSLAU2は、低速から高速の幅広い速度域を有する混相流においても、「二流体モデル」と呼ばれる手法により問題なく適用できる事が示された。

研究成果の概要(英文)：SLAU2(Kitamura-Shima, 2013), one of numerical methods for compressible flows, has been investigated first in high-speed (hypersonic) flows. It has been discovered that, if SLAU2 is used with a strong limiter function (which degrades spatial accuracy at a shock wave), "shock anomalous solutions" are suppressed, and prediction accuracy of aerodynamic heating is enhanced. Then, with a "two-fluid modeling," SLAU2 were successfully applied to multiphase flows that covers wide-ranging flow speeds from low-speed to high-speed.

研究分野：航空宇宙工学, 流体力学, CFD(数値流体力学)

キーワード：CFD(数値流体力学) 航空宇宙流体力学 極超音速流れ 混相流

1. 研究開始当初の背景

(1) 高速流れの計算における衝撃波異常

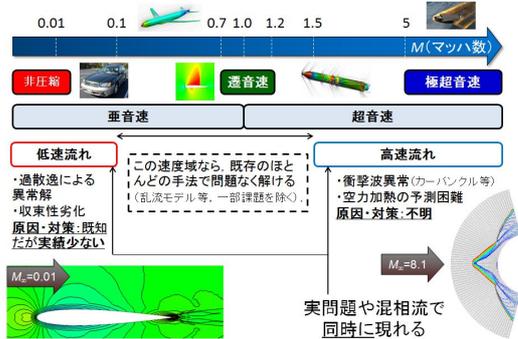


図1 現在の(圧縮性)CFD技術

流体力学はエンジンや航空機などの工学的分野のみならず宇宙や生物などの理学的・医学的对象に対しても重要な分野である。近年のコンピュータの急速な発展もあって、流体力学における数値的方法である数値流体力学(CFD)は理論・実験と並ぶ重要な研究手段となっており、CFDで多くの実現象が再現可能となってきており(図1)、例えば報告者らは、マッハ1.5のロケットの3次元空力解析を行った(図2)。しかしながらより高速の流れの数値計算においては、しばしば“カーバングル現象(図3)”に代表される衝撃波異常が現れる事がある(例えば、Pandolfi & D'Ambrosio, J. Comput. Phys., 2001)。この衝撃波異常解の原因は20年以上議論されているが、現在でもその決定的な対策は存在しない。近年、多次元的散逸項(Gnoffo, AIAA 2010-1271; Kim et al., J. Comput. Phys., 2003など)による対策がいくつか提案されているが、万能ではない。図3のような単純な例では滑らかな円弧状の衝撃波が解である事がよく知られているので、異常の発生は容易に見いだせる。しかし、図2に示されるような現実

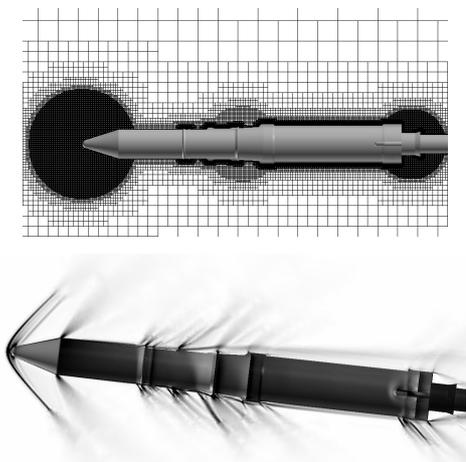


図2 3次元非構造格子を用いた空力解析例 (Kitamura et al., J. Spacecraft. Rockets, 2013)

的な複雑形状のケースでは、計算上の異常と真の複雑な衝撃波との違いを検知することは困難であり、流体解析技術の信頼性を著しく低下させている。よって、衝撃波異常が出にくい事が明確に示されていて、かつ実問題に適用できる手法を構築する事が必要となる。

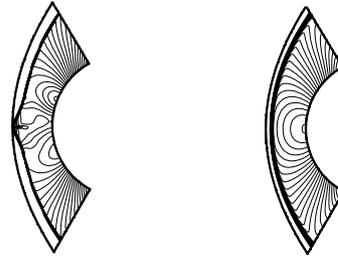


図3 カーバングル現象(左)とその抑制(右)

(2) 衝撃波異常の数値的評価法

衝撃波異常の発生には計算手法(流束関数)の影響が大きいことが分かっているが、これまで「どの手法がどの程度、異常解を発生しやすいか」について明確な指標が無かった。そこで報告者らは独自の数値的評価法を考案し、これを整理した(例えば、Kitamura, Roe, Ismail, AIAA J., 2009)。従来の数学的・物理的アプローチに対し、報告者らの「数値的」評価法が重要となる理由は以下の通りである。流体の支配方程式である Euler 方程式では衝撃波を「厚さゼロの完全な不連続面」とみなす。これに対し、実際の数値解として現れる衝撃波は計算格子幅オーダーの有限の厚さを持ち、この衝撃波内部の構造については数学的・物理的根拠のある記述が存在しない。そこで報告者らは、衝撃波の数値的な振る舞いに純粋に注目する事で、数学的・物理的には辿り着けない結論を導いたのである。

2. 研究の目的

(1) 数値的評価法に基づく高速流れ計算新手法の研究

報告者は、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)嶋(研究協力者)と共に「全速度を高精度で安定に解く方法(以下、SLAU)」の開発を進めている(Shima & Kitamura, AIAA J., 2011など)(学術的な共同研究であるため、予算のやり取り等は無い)。SLAUは様々な分野での適用が始まっており、その有効性が確認されている。

そこで前述の数値的評価法を用い、SLAUの衝撃波異常の発生を調べたところ、数値実験20ケース中、正常な解は13ケースであった。そしてSLAUの散逸項を修正し、マッハ数に応じた散逸量を与えれば(SLAU2と呼ぶ)、衝撃波異常が抑制できる事が分かった(20ケース全てが正常解)。この改良は他の計算手法にも適用可能と考えられ、現在調査

を進めている。この研究への専門家の注目度は高く、既に報告者らはNASA等の研究協力者と議論を進めている。ただしここまでの調査は、主に空間 1 次精度に限定されていた。そこで本研究では、衝撃波において計算を安定化させる「制限関数」を備えた空間 2 次精度計算において SLAU2 を適用し、極超音速空力加熱の正確な予測を目指す。

(2) 低速流れおよび混相流への拡張

ベースとなる手法(SLAU)は既に低速流れへ適用 (Kitamura et al., Comm. Comput. Phys., 2011) され、満足な結果が得られている。また「二流体モデル」と呼ばれる手法を用いた混相流 (低速および高速流れが同時に存在する) への拡張 (Liou et al., AIAA J., 2008) がなされつつあり、ベンチマーク問題で良好な結果が得られている (図 4)。SLAU2 の混相流における適用性をより多くのテストケースで示し、更に計算を効率化させたり、界面をよりシャープに捉える手法も組み合わせれば、幅広い分野での活躍が期待される。

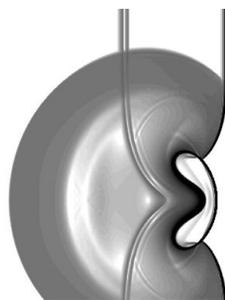


図 4 水中衝撃波と気泡の干渉(二流体 SLAU2)

(3) 実問題への適用

新手法を 3 次元非構造格子へ適用し、複雑形状を有する実問題へ適用できる事を示す (例: 図 2)。空力データの取得やエンジン内部流れの解明は、ロケット等の宇宙機設計において極めて重要である。例えば 2013 年に打上のイプシロンロケットの極超音速空力加熱予測は緊急の課題である。過去にロケット打上失敗の原因となったターボポンプ内のキャビテーションについては、現在でもその予測精度の向上が求められている。現在は膨大な実験から取得しているこれらのデータを数値計算により取得できれば、開発コストの大幅な削減や効率的な設計が可能となる (図 5)。

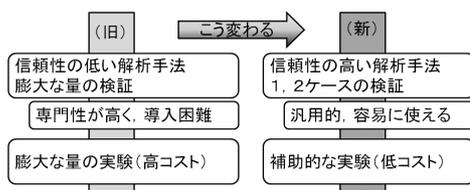


図 5 新手法による実機設計の変革

3. 研究の方法

(1) 効果的に研究を進める上でのアイデア
本研究は、「計算手法にマッハ数に応じた散逸量を与える工夫」からスタートし、こうして得られたベース手法 SLAU2 を様々な制限関数と組み合わせる事で、空間 2 次精度における衝撃波安定性を評価する。このとき、報告者らの数値的評価法を用いる。これは、「従来の数学的・物理的なアプローチにはそもそも衝撃波内部構造への記述が欠落している」という事実から着想に至った独自のアイデアである。次に、具体的な 2 次元極超音速衝撃波干渉流れを扱い、極超音速空力加熱を精度良く予測する事を示す。

そして低速流れ、混相流などへの拡張を行い、最後に 3 次元複雑形状周りの流れ (実問題) などに適用する。こうして、信頼性の高い統合的な流体計算新手法として広く学術的研究や設計等において利用される事を目指す。

(2) 研究協力者からの支援

海外の研究協力者らとの連絡手段はメールを基本とし、年 1 回程度、国際会議や直接訪問により効率良く議論の機会を設ける。国内の協力者とは積極的に直接会って議論する機会を設け、十分な意思疎通を図る。彼らは CFD の世界第一線で活躍しており、今後の手法の研究においても非常に有益な情報や助言が得られる。

(3) 計算環境

本研究では、計算手法の研究はワークステーションを用いて効率的に進め、後半の実問題への適用では 3 次元非構造格子で非定常計算を行う。このとき膨大なデータの蓄積、メモリ、計算時間を要するため、これに見合った環境 (並列計算機やデータ蓄積用の RAID) の整備が必須である。検証用のデータは名古屋大学の風洞設備で取得する。

以上より、研究期間 3 年間を下記のように区切り、計画を立てた (図 6)。

(4) 研究計画

【平成 25 年度】 準備 ~ 新しい流体計算手法の研究 : 高速流れ計算新手法

初年度はまず、制限関数を用いる空間 2 次精度計算においても SLAU2 が衝撃波に対して堅牢な手法である事を複数の事例で実証する。そこで数値的評価法による数値実験を、ジョブ待ち時間の長いスパコンでなく、マルチコアのワークステーションで効率的に実行する。このため、CPU 処理能力が高いワークステーションを購入し、必要となる最速のコンパイラ等をインストールし、この端末を 3 年間一貫して使用する事が合理的である (設備備品費、消耗品費の発生)。なおこのマシンにはメモリも十分に搭載し、後に大規

模非構造格子を作成する際にも使用する（例えば、6,000万点の格子作成に対し、少なくとも約32GBを要する）。

この時点での成果を例年1月にアメリカで開催されるAIAA Aerospace Science Meetingにおいて発表する（海外出張旅費、学会参加費の発生）。海外の研究協力者とは、この会議の場で議論の場を設ける。またNASA Glenn研究所（以下、GRC）のLiouを訪問し、ここでの議論の内容と併せて成果を学術誌に投稿する。

【平成26年度以降】

平成25年度と同様、毎年アメリカのAIAA国際会議にて研究発表を行い、Liouら海外研究協力者と議論を交わしながら、成果を投稿論文にまとめて行く。

・新しい流体計算手法の研究：低速流れ、混相流への拡張（統合手法の提案）

SLAU2で低速流れを問題無く解ける事を確認後、Liouらの助言を得ながら、混相流へ拡張し（二流体SLAU2）、検証する。

・新しい流体計算手法の研究：実問題への適用

SLAU2の実問題への適用を行う。3次元非構造格子コードへ本手法を適用する際には、スパコンを用いて大規模並列計算を行う。3次元非定常計算により蓄積するデータの保存のためにRAIDディスクを購入する（例えば、約6,000万点の解析では可視化用データだけでも1個4.4GBであった。これを1ケース当たり80個とすると、20ケースで約7.0TB必要となる）。もし途中、新手法の提案等で予想外に時間を要した場合には、最後の実問題で扱うケースを減らすなどにより対応する。

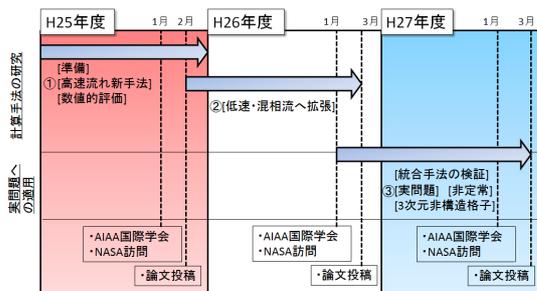


図6 研究計画

(5) 研究体制

報告者は、流体計算手法の世界レベルの研究を進めているJAXA/JEDIの嶋、ミシガン大学のRoe教授、NASA Langley研究所（以下、LaRC）のGnoffo、White、Nishikawaら、同Glenn研究所（GRC）のLiou、アイオワ州立大学のWang教授（現・カンザス大学教授）と研究を行ってきている。そこで本研究では、彼ら研究協力者と連絡を取り議論しながら、新手法の提案および検証、拡張等を進める（図7）。実問題で3次元非構造格子を用いて

大規模計算を行う際には、これらに豊富な経験を持つ嶋、Wangらに必要に応じて相談し、協力を要請する。また極超音速空力加熱の検証データについては、文献値が乏しいため、名古屋大学の衝撃風洞で効率的に取得する。

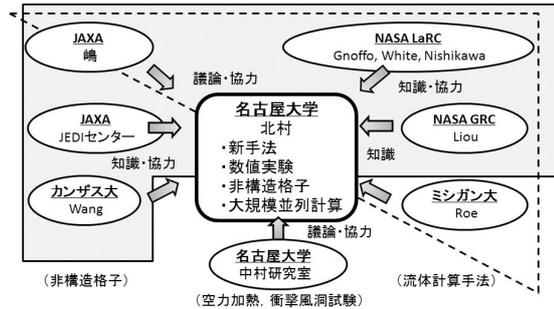


図7 研究体制（申請当時）

4. 研究成果

まず本研究では、圧縮性流体の計算手法の一つであるSLAU2 (Kitamura & Shima, J. Comput. Phys., 2013) について、高速流れ（極超音速流れ）において問題となる「衝撃波異常解」の抑制や、空力加熱の予測精度の向上を試みた。その結果、より強力な制限関数（つまり、衝撃波において空間精度をなるべく1次に下げる）を併用する事でこれらの問題の改善が見られた（図8）[論文1]。更には、遷音速領域付近における数値誤差の低減に成功した[論文2]。

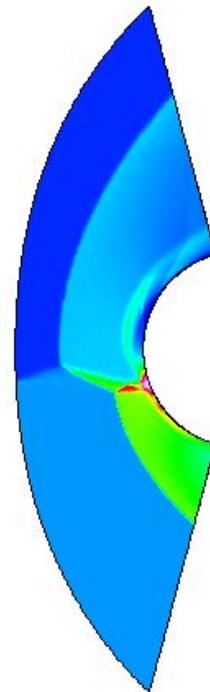


図8 極超音速 Type IV 衝撃波・衝撃波干渉の計算（SLAU2, 基本量のMUSCL再構築 (k=-1), minmod制限関数)

また SLAU2 は、低速から高速の幅広い速度域を有する混相流においても、「二流体モデル」と呼ばれる手法により問題なく適用できる事が示された[論文 4]。[論文 3]では「二流体 SLAU2」の一部を、従来の厳密リーマン解法(Godunov 法)から、より簡便かつ近年使われている近似リーマン解法(HLLC 法)へと変更した。そして[論文 5]では、界面をよりシャープに捉える事に成功した(図 9)。このように当初予定を上回る進展が見られた点が複数あったが、一方で予算の減額と、報告者自身の異動に伴う時間的制約のため、当初計画にあった大規模計算への適用には至らなかった。

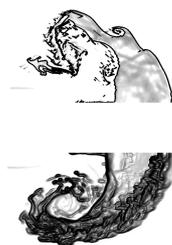


図 9 二流体 SLAU2 による衝撃波・R22 バブル干渉の計算：シャープニング有り(上)とシャープニング無し(下)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- 1) Kitamura, K.: Assessment of SLAU2 and Other Flux Functions with Slope Limiters in Hypersonic Shock-Interaction Heating, *Computers & Fluids*, Vol.129, 2016, pp.134-145 (査読有)
doi:10.1016/j.compfluid.2016.02.006
- 2) Kitamura, K. and Hashimoto, A.: Reduced Dissipation AUSM-Family Fluxes: HR-SLAU2 and HR-AUSM+ for High Resolution Unsteady Flow Simulations, *Computers & Fluids*, Vol.126, 2016, pp. 41-57 (査読有)
doi:10.1016/j.compfluid.2015.11.014
- 3) Kitamura, K. and Nonomura, T.: Simple and Robust HLLC Extensions of Two-Fluid AUSM for Multiphase Flow Computations, *Computers & Fluids*, Vol.100, 2014, pp.321-335 (査読有)
doi:10.1016/j.compfluid.2014.05.019
- 4) Kitamura, K., Liou, M.-S., and Chang, C.-H.: Extension and Comparative Study of AUSM-Family Schemes for Compressible Multiphase Flow Simulations, *Communications in Computational Physics*, Vol.16, No.3, 2014, pp.632-674 (査読有)
doi:10.4208/cicp.020813.190214a
- 5) Nonomura, T., Kitamura, K., and Fujii, K.: A Simple Interface Sharpening Technique with a Hyperbolic Tangent Function Applied to

Compressible Two-Fluid Modeling, *Journal of Computational Physics*, Vol.258, 2014, pp.95-117 (査読有)

doi: 10.1016/j.jcp.2013.10.021

〔学会発表〕(計 12 件)

- 1) 北村圭一, 橋本敦, “A posteriori 制限関数と空間再構築法,”平成 27 年度空力班シンポジウム, 1L8 (鹿児島県指宿市, 2016 年 1 月 22 日).
- 2) 北村圭一, 橋本敦, “高解像度流体計算に向けた a posteriori 制限関数(第 2 報): 2 次元への拡張と再構築法,”第 29 回数値流体力学シンポジウム, B04-5 (福岡県春日市, 2015 年 12 月 15 日).
- 3) Kitamura, K.: A Further Survey of Shock Capturing Methods on Hypersonic Heating Issues, AIAA Paper 2013-2698, 21st AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, San Diego, CA, USA, Jun. 24-27, 2013.

6. 研究組織

(1)研究代表者

北村 圭一 (Keiichi KITAMURA)・横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号：25820409