

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04834

研究課題名(和文) 画像処理と流体力学の融合による衝撃波検知と64倍解像度流体計算

研究課題名(英文) Shock Wave Detection and 64 Times Resolution Flow Simulation based on Image-Processing/Fluid-Dynamics

研究代表者

北村 圭一 (Kitamura, Keiichi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20402547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：画像処理から着想を得た新しい衝撃波検知法『CEDRIC』を提案した。これにより従来法に比べて滑らかで誤差の少ない衝撃波検知を実現した。

そしてこれを数値流束関数『SLAU2』と組み合わせて新たな流体計算法『C-SLAU2』を構築した。ただし数値実験によれば、衝撃波に対する安定性に大幅な改善は見られなかった。この事は、例えば衝撃波内部における数値粘性制御について再考の余地がある事を示唆した。

また将来的な応用性を考え、『SLAU2』を理想気体「以外」の「混相流」ならびに「MHD(電磁流体)」へと拡張した。いずれも数値粘性の与え方や、支配方程式の扱い方を工夫する事で従来法の課題を解決した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、衝撃波の滑らかかつ誤差の少ない自動検知に成功した。自動で衝撃波位置を正確に検知できれば人間では探せない衝撃波も精度良く発見できる。また非専門家や初心者も安心して衝撃波を特定できる。またこれにより「真に衝撃波でのみ安定」に計算できれば、それ以外の場所では高い精度を保ち、起きている流体現象をより良く解像できる。

これらは超新星爆発や太陽内部流れなど宇宙物理の解明、新しい航空宇宙機的设计、結石治療など理・工・医学の様々な分野に貢献する。

研究成果の概要(英文)：A new method for detecting shockwaves has been developed, named "CEDRIC (Canny-Edge-Detection / Rankine-hugoniot-Conditions unified shock sensor)." This method successfully captured the shockwave continuously with much smaller errors compared with the existing method. Then, it was combined with our base flux function "SLAU2," resulting in "C-SLAU2." Although "C-SLAU2" did not show a significant improvement over "SLAU2" against anomalous solutions at shockwaves, it offered a deeper insight into further algorithm developments in the future. We also tried to extend "SLAU2" to multiphase flows and MHD (Magnetohydrodynamics) with success.

研究分野：流体力学，数値流体力学

キーワード：衝撃波 画像処理 画像認識 圧縮性流体力学 数値流体力学

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水面を船やカモが航行する際には、前方に波が集まり不連続面が形成される。同様の現象は空気中を飛行するロケットや航空機、また超新星爆発、爆轟、隕石衝突等でも起こり、その不連続面は「衝撃波」と呼ばれる(図1)。衝撃波の前後では圧力や温度が大幅に変化し、航空宇宙機の抵抗や高い空力加熱、周囲への騒音が発生する。一方で衝撃波は医療分野の結石破碎など積極的に活用される例もある。衝撃波による害を減らし、これを有効利用するためには衝撃波の正確な検知や数値シミュレーション技術が求められる。

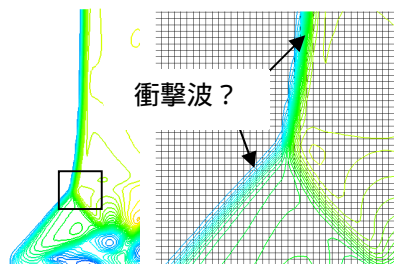


図1 可視化結果からの衝撃波同定: (左)密度等高線, (右)拡大図と計算要素(セル)

・【衝撃波の可視化(ポスト処理)】 従来は「可視化した物理量の等高線が密であれば衝撃波」としていた(図1)。しかしこれは、例えばレントゲン写真から医師が肉眼で異常を見つける場合と同様、高度な専門知識や経験を必要とする上に、見落としの可能性もあった。これに対し、もし自動で衝撃波位置を正確に検知できれば人間では探せない衝撃波も精度良く発見できる。また非専門家や初心者も安心して衝撃波を特定できる。

・【流体の数値計算法】 従来の圧縮性流体の数値計算(CFD)では、衝撃波を安定に捉えるために精度を犠牲にしていた。具体的には、「衝撃波(らしき箇所)では安定だが精度の低い方法」に切り替えていた(天体物理のHLLD/HLL法[Miyoshi-Kusano, JCP2005], 乱流ジェット計算の中心差分/風上差分ハイブリッド法等[Leeら, AIAAJ2018])。ただしこの衝撃波の判定には曖昧さがあった。

もし「真に衝撃波でのみ安定」に計算できれば、それ以外の場所では高い精度を保ち、起きている流体現象をより良く解像できる(図2: 提案した手法ポストリミタ[Kitamura-Hashimoto, JCP2017]の例。1次元400セルで1,600セル相当(4倍)の解像度)。つまり未だ解像できていない流体物理を高精度で再現・解明できると期待される。

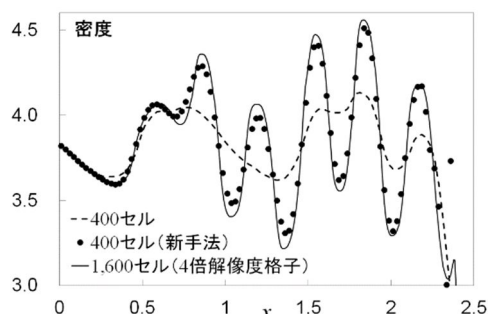


図2 ポストリミタによる高解像度計算

2. 研究の目的

(1) 本研究では、衝撃波を正確(高精度)かつ簡単(高効率)に検知する。

(2) また、これを組み入れた新たな高解像度の流体計算法を構築する。

これらにより超新星爆発や太陽内部流れなど宇宙物理の解明、新しい航空宇宙機の設計、結石治療など理・工・医学の様々な分野に貢献する事を目的とした(図3)。

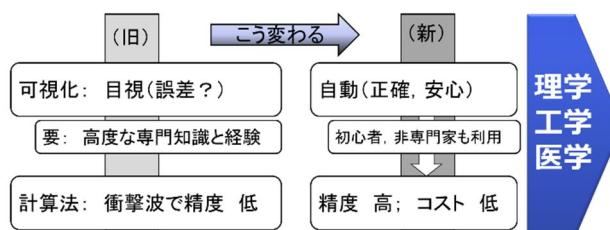


図3 本研究のインパクト

3. 研究の方法

(1) 本研究ではまず2段階で衝撃波を自動・正確・簡単に検知する。

計算結果を画像として扱い、画像処理(エッジ検出)に用いられる『Canny法』[Canny, IEEE1986]を応用して不連続面(=衝撃波候補)を検出する。このようにすれば厚さを持ち、理論が成立しない「数値的な衝撃波の内部(図4, 図5)」もひとまず検知される。

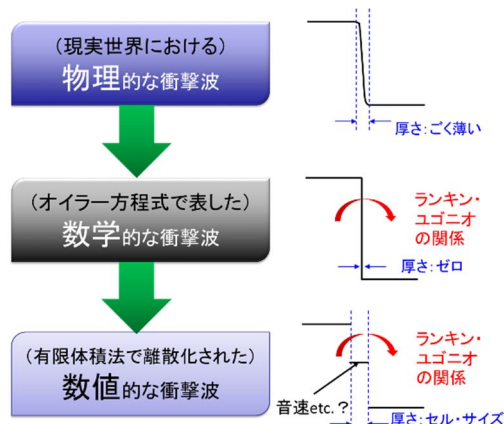


図4 物理的・数学的・数値的な衝撃波

そして次にランキン・ユゴニオ条件を衝撃波候補の前後について調べ、これが成立すれば真に衝撃波と判定する。このとき、衝撃波内部のセルが衝撃波候補とされていた場合でも正しく検知されるよう、(図5に示された通り、例えば40%程度の誤差を考慮する必要性から)あえてランキン・ユゴニオ条件からの差異50%までは許容する。

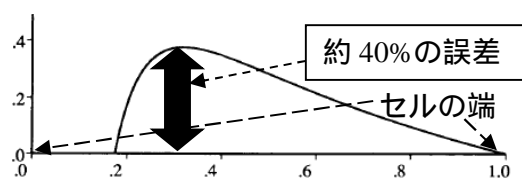


図5 衝撃波内部の数値誤差[Barth 1989]

(2) 更にこれを用いて「衝撃波では安定、それ以外では高精度な新しい流体計算法」を構築する。具体的には、報告者らが過去に提案し広く利用されている数値流束関数『SLAU2』[Kitamura-Shima, JCP2013]をベースに、衝撃波「以外」の場所で数値散逸を下げる(注:通常は、これを衝撃波で行うと計算が不安定になる)(『C-SLAU2』)。これにより、更なる解像度向上を目指す。

(3) 並行して、将来的に提案手法の適用先を拡大するために、まずはベース手法である『SLAU2』で扱える対象を理想気体「以外」へと拡張する。またベンチマークだけでなく実際の複雑な流体にも適用する。



図6 図1の例の衝撃波検知結果(白色部分): (左)従来法, (右)本研究

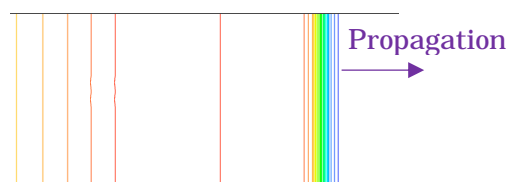
4. 研究成果

(1) まずはCanny法をそのまま(輝度を圧力に置き換えて)流体計算結果に適用した。すると改善すべき点もいくつか見つかったものの、衝撃波が飛び飛び(図6左)でなく滑らかに捉えられ(図6右)、誤差も少なく概ね良好な検知結果が得られた(『CEDRIC』, JCP2019)。

(2) 「衝撃波を含む流体計算法」と「画像処理を応用した衝撃波検知法」の組み合わせである『C-SLAU2』について、数値実験を行ない、一定の効果を確認した。ただし当初期待していた程の有効性は確認できなかった(図7, 2021年度衝撃波シンポジウム)。原因としては以下が考えられる。

(a) C-SLAU2 (提案手法)

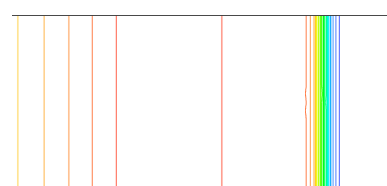
ベース手法『SLAU2』が既に適切な数値粘性を生み出しており、改良の余地が少なかった。



『CEDRIC』で衝撃波を検知したものの、「そこでどのように数値粘性を制御するか」については再考の余地がある。

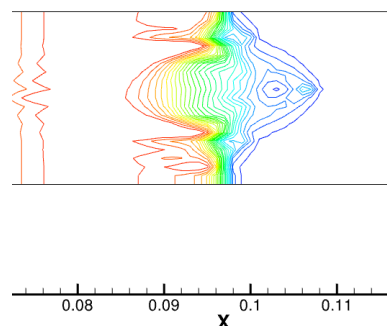
今回は『CEDRIC』により衝撃波の「位置」と「方向」を特定した。しかしながら、例えば「衝撃波と計算格子線の相対的な位置関係(Kitamura-Shima, AIAAJ2019)」については考慮していなかった。

(b) SLAU2 (ベース手法)



今後はこれを考慮し、機械学習などと組み合わせ「流体計算法」と「衝撃波検知法」のより強固な連携を図る予定である。これは次の研究課題と位置付けている。

(c) Roe (E-Fix) (従来手法: 衝撃波が崩壊)



(3) 「混相流」「MHD(電磁流体)」へと提案手法の適用範囲を拡大した。特に混相流計算では、従来のSLAU2単体では不可能だった大幅な密度比、圧力比を伴う水中衝撃波・気泡干渉ベンチマークの計算を数値散逸の改良のみにより可能にした(図8, Aono-Kitamura, JCP2022)。

また流体部分とMaxwell方程式部分を個別に扱う事で、SLAU2によるMHD計算を可能にした(図9, Kitamura-Mamashita-Ryu, CaF2020)。SLAU2は、簡便な定式化に定評のあるAUSM族と呼ば

図7 二次元ダクト内を伝播する衝撃波の数値解(マッハ6, 400ステップ, 密度等高線)

れる手法の一つである。AUSM 族は航空宇宙工学分野では広く利用される一方で、その(固有値を要しないなど)ある種の曖昧さからか、MHD への拡張は 20 年ほど積極的に行われていなかった。本成果はこの状況を一転させ、その後の AUSM 族の MHD 計算手法研究を進展させるトリガーとなった (Mamashita ら, CaF2021; Minoshima ら, ApJS2020)。

更には衝撃波・バブル干渉 (Kitamura ら, PoF2020) や飛翔体周りの衝撃波干渉流れ (筒井ら, JSR2022) などの実際の複雑な流体現象も取り扱った。そして 2020 年度時点までの知見を書籍にまとめた (Kitamura, Springer2020)。



図 8 数値散逸修正版 SLAU2 を用いた混相流計算：水中衝撃波・気泡干渉

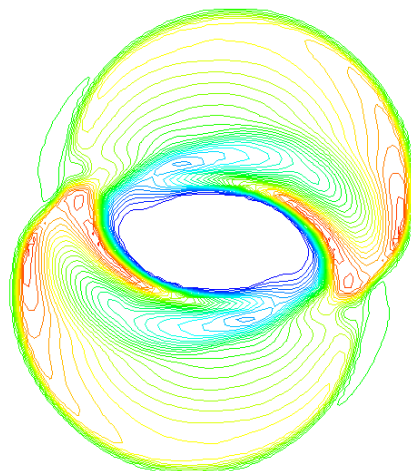


図 9 MHD 版 SLAU2 を用いたベンチマーク計算例 (MHD Rotor)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tsutsui Fumiya, Takagi Yuya, Takimoto Hiroyuki, Kitamura Keiichi, Nonaka Satoshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Side Force Characteristics of Slender-Bodied Supersonic Vehicle with Two Protuberances	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Spacecraft and Rockets	6. 最初と最後の頁 1697 ~ 1712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.A35319	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Aono Junya, Kitamura Keiichi	4. 巻 462
2. 論文標題 An appropriate numerical dissipation for SLAU2 towards shock-stable compressible multiphase flow simulations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 111256 ~ 111256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2022.111256	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Mamashita Tomohiro, Kitamura Keiichi, Minoshima Takashi	4. 巻 231
2. 論文標題 SLAU2-HLLD numerical flux with wiggle-sensor for stable low mach Magnetohydrodynamics simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 105165 ~ 105165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2021.105165	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kitamura K., Yue Z., Fujimoto T., Asai H., Kubota A., Myokan M., Ichihara D., Sasoh A.	4. 巻 34
2. 論文標題 Numerical and experimental study on the behavior of vortex rings generated by shock?bubble interaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 046105 ~ 046105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0083596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KITAMURA Keiichi、HASE Naoya、TAGUCHI Masato、MORI Koichi	4. 巻 19
2. 論文標題 Three-Dimensional Hypersonic Aeroheating Computations Associated with Cross-Flow Jet Interactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 141 ~ 150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.JSASS-D-20-00015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kitamura Keiichi、Mamashita Tomohiro、Ryu Dongsu	4. 巻 209
2. 論文標題 SLAU2 applied to two-dimensional, ideal magnetohydrodynamics simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 104635 ~ 104635
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2020.104635	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Minoshima Takashi、Kitamura Keiichi、Miyoshi Takahiro	4. 巻 248
2. 論文標題 A Multistate Low-dissipation Advection Upstream Splitting Method for Ideal Magnetohydrodynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 12 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ab8aee	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Keiichi Kitamura and Eiji Shima	4. 巻 57
2. 論文標題 Numerical Experiments on Anomalies from Stationary, Slowly Moving, and Fast-Moving Shocks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1763-1772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J057366	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Mamashita, T., Kitamura, K., and Minoshima, T..
2. 発表標題 SLAU2-MHD for Low Mach Magnetohydrodynamics (MHD) Simulations.
3. 学会等名 AIAA AVIATION 2021 FORUM (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北村圭一
2. 発表標題 画像処理を応用した多次元衝撃波検知型 CFD 手法の検討
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsutsui, F., Takagi, Y., Takimoto, H., Kitamura, K., and Nonaka, S.
2. 発表標題 Numerical Analysis on Aerodynamic Characteristics of Slender Body with Asymmetric Double Protuberance
3. 学会等名 AIAA SciTech Forum 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岳釗庚, 藤本剛史, 北村圭一, 浅井宏樹, 久保田祥矢, 明官学, 市原大輔, 佐宗章弘
2. 発表標題 衝撃波とバブルの干渉により生成された渦輪拳動の数値解析
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Aono, J. and Kitamura, K.
2. 発表標題 Multiphase Viscous Flow Simulations using Two-Fluid Modeled SLAU2
3. 学会等名 WCCM-ECCOMAS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kitamura, K., and Shima, E.
2. 発表標題 Numerical Survey on Shock Anomalies from Moving Shocks
3. 学会等名 32nd International Symposium on Shock Waves (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Keiichi Kitamura	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 136
3. 書名 Advancement of Shock Capturing Computational Fluid Dynamics Methods	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関