

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06167

研究課題名(和文) 高速固気混相流の直接数値解析による乱流混合 / 騒音発生のプロセスの解明

研究課題名(英文) Examination on Turbulence Mixing and Sound Generation Phenomena in High Mach Number Multiphase Flows by DNS Analysis

研究代表者

福田 紘大 (Fukuda, Kota)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：60401684

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：

ロケット噴流に含まれるアルミナ粒子や音響波の低減のためにロケット噴流に注入される微小液滴の影響を解明するために、静止および回転する単一球周りの直接解析(Direct Numerical Simulation: DNS)を行い、低レイノルズ数・高マッハ数流れにおけるMach数・Re数・一様流と球の温度比、回転数等の諸条件が与える影響を明らかとした。また、DNSデータベースの構築も行った。

さらに、複数球周りのDNS解析を実施するために、直交格子法を基にした圧縮性流体解析ソルバの構築を行い、3次元大規模固気混相流問題の解析を実施することで、クラスタ現象の解明に向けての多くの知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的であった高マッハ数固気混相乱流の現象解明を行うためには、これまで計算法や計算機資源の問題で実施できなかった粒子を含めたDNSが必要となる。そこで、本研究ではDNS解析を実施し、現象解明に繋がる多くの知見を得た。

本研究で得られた成果は、ロケット音響問題や爆風の予測問題、高速固気混相燃焼問題など実用問題が多い当該分野における詳細な物理現象の理解に大きく貢献すると考えられる。また、これまででは、実験データに基づき経験的なマクロモデルを構築する手法が採用されてきたが、本研究で明らかとなったミクロレベルでの物理現象は、経験的なマクロレベルの物理現象理解を大幅に向上することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：

In this study, high-Mach-number and low-Reynolds-number flow around a sphere was numerically calculated by direct numerical simulation (DNS) of the three-dimensional compressible Navier-Stokes equations in order to examine the effect of small particles in high-Mach-number flows. The effects of Mach number, Reynolds number, and temperature ratio on the flow properties, drag coefficient, and Nusselt number were examined from the calculation results. The flow characteristics were cleared and the DNS database was constructed. Furthermore, flow around multiple small particles was calculated by a newly developed numerical method based on Immersed Boundary method. Large scale calculation was carried out with the method, and various information on clustering behavior in the multiphase flow was obtained.

研究分野：流体工学

キーワード：DNS 混相乱流 高マッハ数 LESモデル

1. 研究開始当初の背景

ロケットの打上げ時にロケット噴流から発生する音響波は非常に強く、ロケットフェアリング内の人工衛星に影響を与える可能性がある。このため音響波の予測・低減はロケット開発において重要であり、実際に音響波の低減を行うためにスペースシャトルや H-IIA, H-IIB ロケットなど各国の大型ロケットの打ち上げでは、大量の水がロケット排気ジェットに散水されている。我々は、最新の技術を用いた数値流体力学 (CFD) により流れ場の解析および現象の解明を進めており国産基盤ロケットの開発に貢献してきた。しかしながら、現状での CFD による音響波の予測精度は 5dB 程度^[1]であり実験等を置き換えるための十分な精度がないことも分かってきた。より精度を向上した CFD で流れ場を解析し、高精度な音響波の予測モデルを構築することで適切な散水量による音響波低減に繋げることができれば、より安価で安心な宇宙機の設計が可能になる。音響波の予測精度が十分でない理由の一つとして噴流に含まれる固体粒子や液滴の影響に対する理解の不足が挙げられる。粒子を含む流れ場をモデル化し粒子に働く流体力を算出する必要がある。粒子は球として近似をすることが可能と考えられるが、非圧縮性流れの場合は球の抵抗係数に関して膨大な実験があり精度の高いモデルが提案されているが、ロケットエンジンの排気ジェットのような高速流れでは抵抗係数が大きく変化する。また、排気ジェット中の粒子の場合は粒子のサイズが非常に小さく、航空機周り流れのような一般的な高速流れとは条件が大きく異なるために基礎的な知見も少ない。そこで、我々のグループでは、これまでに音響低減のための液滴を含むロケット噴流の時間平均 (RANS) 解析を行ってきた^[2]。この研究では、散水時の液滴の効果として、音の散乱・反射等を考慮したが実測ではこれらの効果をはるかに上回る音の減衰が得られており、それは液滴がロケット噴流の音源である高マッハ数の乱流構造を直接変化させた効果と考えている。このことから、高マッハ数固気混相流の中での微小粒子周りの流れ場の特性について理解を進める必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、ロケット噴流のような高速混相乱流における微小粒子の流れ場に与える影響を解明し、モデル化するために高 Mach 数流中の微粒子周り流れの直接解析 (DNS) を行い、世界に先駆けて現象の解明を行うことを目的として、以下の研究を実施した。

- 1) 静止および回転する単一球周り的高 Mach 数流れの DNS による微粒子周り流れのデータベース構築と現象の解明
- 2) 粒子の運動を加味した複数球周り的高 Mach 数流れの DNS による乱流混合、音響現象に対する粒子効果の解明

3. 研究の方法

単体球周り流れの解析に関しては、高解像度衝撃波捕獲法を用いた DNS により現象の把握を行った。抵抗係数や後流場に対する Mach 数や Reynolds 数の影響を調べ、詳細な流れ場および空気力のデータベースを構築した。

粒子の運動を加味した複数固体球周りの解析に関しては、Immersed Boundary 法^[3,4]をベースにした高解像度解析手法による複数の粒子が運動する流れ場の解析を行い、粒子と衝撃波・乱流場の干渉現象を解明した。多数の運動する粒子を捉え、大規模かつ高精度な解析を行う場合はスーパーコンピュータの利用と解析コードの高速化が必須となるため、コードの開発も行った。解析では数千個規模の運動する粒子周りの流れ場を解析するとともに高解像度な条件で粒子間の距離や Mach 数 (亜音速/遷音速/超音速) の影響を検証した。

4. 研究成果

1) 単一球周り流れのデータベース構築と現象理解

これまで流れ場の特性がほとんど調査されていない高 Mach 数の微粒子周り流れの特性を明らかにするために高解像度衝撃波捕獲法を用いた DNS を実施した。この領域の流れ場は我々のグループが継続的に研究を行っており、一連の研究によってその特性が明らかにされつつある。実験が困難な条件であるため、近年まで、流れの特性の把握は弾道飛行試験などで得られた抵抗係数のみに留まっていた。我々のこれまでの研究でも、Mach 数の増加により球周りの流れ場が安定化することは明らかにしていたが、遷音速や超音速流れにおいて流れの安定・不安定が分岐する条件は明らかにできていなかった。そこで、本研究では Reynolds 数 1000 までの亜音速から超音速の単体球周り流れを解析することで、超音速流れにおいても Mach 数によって流れ場の安定性が変化する条件を明らかにし、この領域における流れ場の最も基礎的な知見を世界に先駆けて提示することに成功した。類似の研究で流れ場の安定性のみを調べる手法を用いた研究があるが、本研究では流れ場の時間解像計算を行うことで、非定常特性や渦構造など物理現象を解像したデータを獲得し物理現象の理解を行っている。

また、一様せん断流中の球周り流れの解析を行うことで、流れ場の速度勾配による揚力についても調査を行った。混相流では境界層や剪断層など流れ場に速度勾配が存在する領域で粒子に揚力が働く。非圧縮性流れに対しては、その特性は詳細に調べられており、Reynolds 数が小さい場合は正の揚力(速度が遅い側から速い側)が働き Reynolds 数が 50-100 を超える領域では負の揚力(速度が遅い側から速い側)が働き揚力の方向が反転することが知られている。一方で、圧縮性流れに対しては、速度勾配による揚力に関して研究が行われた例はない。そこで、本研究では、Reynolds 数 50-300, Mach 数 0.3-1.5 を基本流れとする一様せん断流れの解析を行い、流れ場の速度勾配による揚力に対する Mach 数の影響を調べた。その結果、遷音速以上の速度域の Reynolds 数が高い領域においては非圧縮性流れと比較して大きな負の揚力が発生することを明らかにした。また、Reynolds 数が低い領域については非圧縮性流れでは正の揚力が発生するのに対して遷音速以上の速度域では非圧縮性流れと全く異なるメカニズムで非常に大きな負の揚力が発生することを明らかにした。混相流のマイクロスケールの現象においては、境界層や剪断層は重要な場所となることから、流れ場の速度勾配による揚力は粒子の挙動に大きな影響を与えると考えられる。このことから、超音速混相流のモデリングに向けて重要な知見を得ることができたといえる。

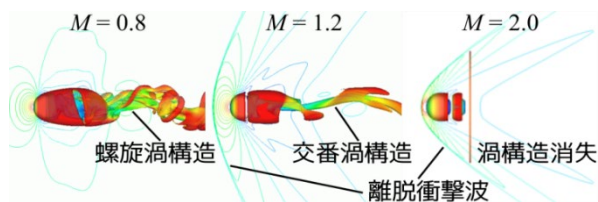


Fig. 1 Reynolds1000 の流れ場における Mach 数の影響

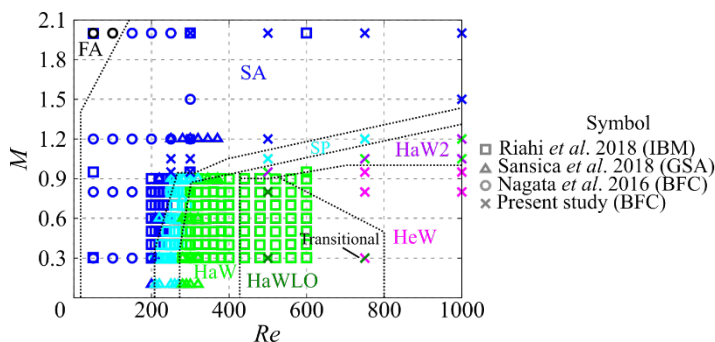


Fig. 2 流れ場の様相マップ (FA : 完全付着流れ, SA : 定常軸対称流れ, SP : 定常非軸対称流れ, HaW, HaWLO : 交番渦構造, HeW : 螺旋渦構造)

2) 粒子の運動方程式を加味した複数固体/液滴周りの高マッハ数流れの DNS の実施

解析コードの高速化によって、様々なスーパーコンピュータに適応した解析が可能となり、大規模解析を行う手段を確立した。Fig.3 は数千個の運動する粒子と流れ場との干渉によって生じた渦構造を示しており、時間経過とともに発達した渦によって粒子がクラスタリングするような領域があることが明らかとなった。流れ場を簡略化した静止/運動する複数粒子周りの流れ場の解析も行い、配置により流れ場の様相が変化することが確認された。Mach 数が小さく粒子間距離が長いと干渉の影響は小さく、Mach 数が大きくなると粒子間距離に関係なく干渉の影響が大きくなることを解析から明らかとなっており、これは粒子間を流れる流体との干渉や粒子前方に生じる衝撃波の影響によるものであることから粒子間距離もマクロモデルの条件を決める際に重要な要素となることを明らかにした。さらに、運動する場合は初期の粒子間距離が近い条件では干渉することで粒子同士が離れていく傾向を確認し、その傾向は Mach 数が大きくなると強くなることも明らかにした。

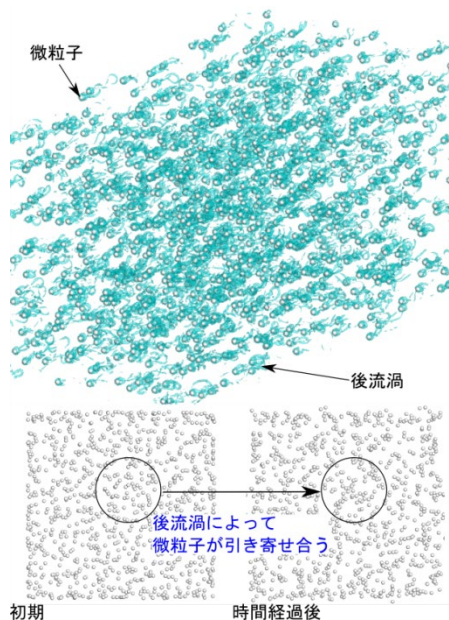


Fig. 3 運動する粒子の挙動と渦

- [1] Nonomura, T. et al., "Computational Prediction of Acoustic Waves from a Subscale Rocket Motor," Transaction of The Japan Society for Aeronautical Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 12, 2014.
- [2] Fukuda K., et al., "Examination of Sound Suppression by Water Injection at Lift-off of Launch Vehicles", 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2011.
- [3] Takahashi, S. et al., "A Numerical Scheme Based on an Immersed Boundary Method for Compressible Turbulent Flows with Shocks: Application to Two-Dimensional Flows around Cylinders," Journal of Applied Mathematics, 2014.
- [4] Mizuno, Y., et al., "A Simple Immersed Boundary, Method for Compressible Flow Simulation around a Stationary and Moving Sphere," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2015, Article ID 438086, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nagata, T., Nonomura, T., Takahashi, S., Mizuno, Y., and Fukuda, K.	4. 巻 857
2. 論文標題 Direct numerical simulation of flow past a transversely rotating sphere up to a Reynolds number of 300 in compressible flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 878-906
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2018.756	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 Takayuki Nagata, Taku Nonomura, Shun Takahashi, Yusuke Mizuno, Kota Fukuda	4. 巻 120
2. 論文標題 Direct numerical simulation of flow around a heated/cooled isolated sphere up to a Reynolds number of 300 under subsonic to supersonic conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 284-299
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.042	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 永田貴之, 野々村拓, 吉田真優, 高橋俊, 福田紘大
2. 発表標題 直接数値解析データベースを用いた粒子Reynolds数50-1000の圧縮性流れにおける微小粒子の空力係数および後流渦の解析
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水野祐介, 高橋俊, 野々村拓, 永田貴之, 福田紘大, 大林茂
2. 発表標題 埋め込み境界法を用いた圧縮性・非圧縮性固気混相流解析の並列性能比較
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Nagata, Taku Nonomura, Shun Takahashi, Yusuke Mizuno, and Kota Fukuda
2. 発表標題 Direct numerical simulation of flow past a sphere at a Reynolds number between 500 and 1000 in compressible flows
3. 学会等名 56th AIAA Aerospace Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永田貴之, 野々村拓, 高橋俊, 水野祐介, 福田紘大
2. 発表標題 圧縮性球周り流れのDNS (500 Re 1000)
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	野々村 拓 (Nonomura Taku) (60547967)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	高橋 俊 (Takahashi Shun) (60553930)	東海大学・工学部・准教授 (32644)	