

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14071

研究課題名（和文）高忠実度な圧縮性混相流シミュレーションに向けた粒子間干渉効果の解明とモデル化

研究課題名（英文）Elucidation and modeling of interparticle interference effect for high fidelity compressible multiphase flow simulation

研究代表者

永田 貴之（Nagata, Takayuki）

東北大学・工学研究科・特任助教

研究者番号：30898276

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：数値計算と実験で圧縮性低Reynolds数流れでの粒子間の流体力学的干渉の効果を明らかにした。数値計算では、近接して配置した一様流中の固定二粒子周り流れの解析を行い、流れ場や流体力における干渉の効果に対するマッハ数効果を明らかにした。また、衝撃波との干渉を粒子の運動を考慮して解析し、粒子の密度や位置関係が衝撃波と干渉した後のそれぞれの粒子の運動に与える影響を明らかにした。また、過去に行った数値計算の結果を用いて既存の単体粒子の抵抗モデルを改良した。実験では、衝撃波管及び低密度風洞において、球や角柱、円柱など様々な物体において物体間の流体力学的干渉を圧縮性低Reynolds数条件で調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粒子を含む流れは、大気や生体、内燃機関など様々な場所で現れる。そのような流れでは、粒子の影響で乱流の大規模構造など流れ場全体の構造が変化する。ガスタービンエンジン内の噴霧燃焼など、流れが高速流の場合は圧縮性混相流となり、現象はより複雑化するが、数値計算による実現象の再現には、粒子の影響を忠実に反映した混相流計算が必要である。しかし、微粒子周り流れが圧縮性低Reynolds数条件のため、実験計測の困難さから粒子周り流れの基礎特性が明らかでない。本研究により圧縮性混相流における粒子間の流体力学的干渉の効果が明らかとなり、圧縮性混相流の高精度モデリングに向けた基礎的知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：The effects of aerodynamic interference between particles in compressible low-Reynolds-number flows were investigated numerically and experimentally. Numerical simulations were performed to analyze the flow around two fixed particles in a uniform flow, and the Mach number effect on the flow field and the effect of interference on the aerodynamic forces were clarified. The interaction process with the shock wave was also analyzed considering the motion of the particles, and the effects of particle density and positional relationship on the motion of each particle after interaction with the shock wave are clarified. In addition, the existing particle drag model for a single particle was improved based on the results of numerical simulations. In experiments, aerodynamic interference between multiple objects was investigated in a shock wave tube and a low-density wind tunnel under compressible low Reynolds number conditions for various objects such as spheres, prisms, and cylinders.

研究分野：流体力学

キーワード：固気混相流 粒子間干渉 圧縮性低レイノルズ数流れ 直接数値解析 シュリーレン可視化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

粒子を含む流れは、大気や生体、内燃機関など様々な場所で現れる。そのような流れでは、粒子の影響で乱流の大規模構造など流れ場全体の構造が変化する。ガスタービンエンジン内の噴霧燃焼など、流れが高速流の場合は圧縮性混相流となり、現象はより複雑化するが、数値計算による実現象の再現には、粒子の影響を忠実に反映した混相流計算が必要である。例えばロケットエンジンの燃焼器内や排気ジェットの高速度流には燃料由来のアルミナ粒子や散水由来の水滴が含まれ、粒子が乱流や衝撃波を通過しながら流れ場やそこから発生する音響波を変化させる。音響波は人工衛星に有害だが、圧縮性混相流の計算精度が限定的なため、詳細な現象理解やそれに基づく音響波の低減、マージンを切り詰めた設計は実現されていない。これは、微粒子周り流れが圧縮性低 Reynolds 数条件のため、1) 実験計測の困難さから粒子周り流れの基礎特性が明らかでなく、2) 粘性流れ・渦流れ・衝撃波が干渉する複雑な流れ場であり、故に 3) 条件によっては圧縮性混相流現象を忠実に記述したモデルが存在せず、信頼性の高い数値計算が行えない場合があるためである。

2. 研究の目的

申請者はこれまでに、単体粒子周りの圧縮性低 Reynolds 数流れの特性を研究してきたが、実際の混相流では粒子数密度が小さい場合を除き、粒子間の流体力学的干渉により粒子の分布や局所的な流体现象、ひいては流れ場全体の構造が変化する。圧縮性流れでの粒子間の流体力学的干渉はどのようにして起こるのかを解明することで、高忠実な混相流モデルの構築の基盤となる知見を得る。

3. 研究の方法

粒子間の流体力学的干渉を調べるために、数値計算と低圧・高速流条件下での実験計測を中心に研究を進めた。

(1) 数値計算に関しては三次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式の直接数値計算を行った。問題設定は近接する固定された二粒子と運動する二粒子周り流れを扱い、それぞれ高次精度スキームと境界適合格子を用いた計算と埋め込み境界法を用いた計算により調べた。固定粒子については一様流中での流体现象を Reynolds 数 150 と 200, Mach 数 0.3-1.2 の間で調べた。基準粒子ともう一方の粒子の位置関係を変化させた際に起こる粒子間の流体力学的干渉による流れ場や流体力係数の変化が Mach 数によりどのように変化するか調べた。また、二粒子の流体力の差から、粒子間に働く見かけ上の引力・斥力を算出し、流体力学的干渉に対する Mach 数効果について議論した。運動する粒子については、近接する二粒子と垂直衝撃波の干渉の過程を埋め込み境界法による粒子解像計算で調べた。衝撃波 Mach 数を 1.22, 粒子 Reynolds 数を 49 とし、粒子の密度や粒子の位置関係が流体力や粒子の運動に与える影響を調べた。

(2) 実験に関しては、衝撃波管と低密度風洞で可視化実験などを行った。衝撃波管での実験では、直径 1.0 mm の複数粒子を衝撃波管上壁部に電磁石で固定しておき、衝撃波管の作動タイミングに合わせて自由落下させることで、支持干渉のない状態で複数粒子が干渉する流れ場の実験を行った。シュリーレン法により流れ場を可視化し、粒子の位置の時間変化から空力係数を推定した。低密度風洞での実験では、球体よりも流れ場の可視化計測の難易度が低い準二次元物体の干渉現象を調べた。Mach 数 0.7 以下の条件で、Reynolds 数 2000 では角柱を、Reynolds 数 250-1000 で円柱周り流れを対象にシュリーレン可視化、力計測などにより、単体の場合と二物体の場合について、実験技術の確立と干渉による流れ場や流体力の変化に対する圧縮性効果を調べた。

(3) モデル化に関しては、これまでに Navier-Stokes 方程式の直接数値計算や direct simulation Monte Carlo で行ってきた単体粒子周り流れの解析で得られた抵抗係数を整理し、過去に提案された粒子抵抗モデルを修正した。特に実験データが存在しなかった領域での抵抗係数データを数値計算の結果で補いモデルを構築し直すことで、単体粒子向けの粒子抵抗モデルを改良した。

4. 研究成果

(1) 数値計算による一様流中および垂直衝撃波による誘起流中での干渉効果の研究

数値計算による研究では、一様流中および垂直衝撃波による誘起流中で干渉する粒子周り流れの解析を行った。

一様流の場合では、境界適合格子と高次精度スキームによる三次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式の直接数値計算により、一様流中に近接して固定された二粒子回り流れの解析を行い、粒子間の流体力学的干渉における Mach 効果と位置関係の効果を解析した。並列、斜め、直列配置において干渉する二粒子周りの流れ場(図1)および揚力係数、抗力係数を算出し、流体力学的干渉により流れ場や空力係数がどのように変化するか、また、その影響が Mach 数によりどのように変化するかを調べた。また、二粒子の空力係数から二粒子間に働く見かけ上の引力・斥力方向の空力係数を算出した。今回調査を行った条件では、並列配置の場合のみ斥力方向の見かけ上の

力が働き、直列及び斜め配置では引力方向の力が働くことが分かった（図2）。また、この引力及び斥力は低 Mach 数の場合と比較して高 Mach 数において大きい。このことは、圧縮性混相流においては粒子分布に対して、粒子間干渉による影響が非圧縮性流れと比較して強い可能性が示唆する。

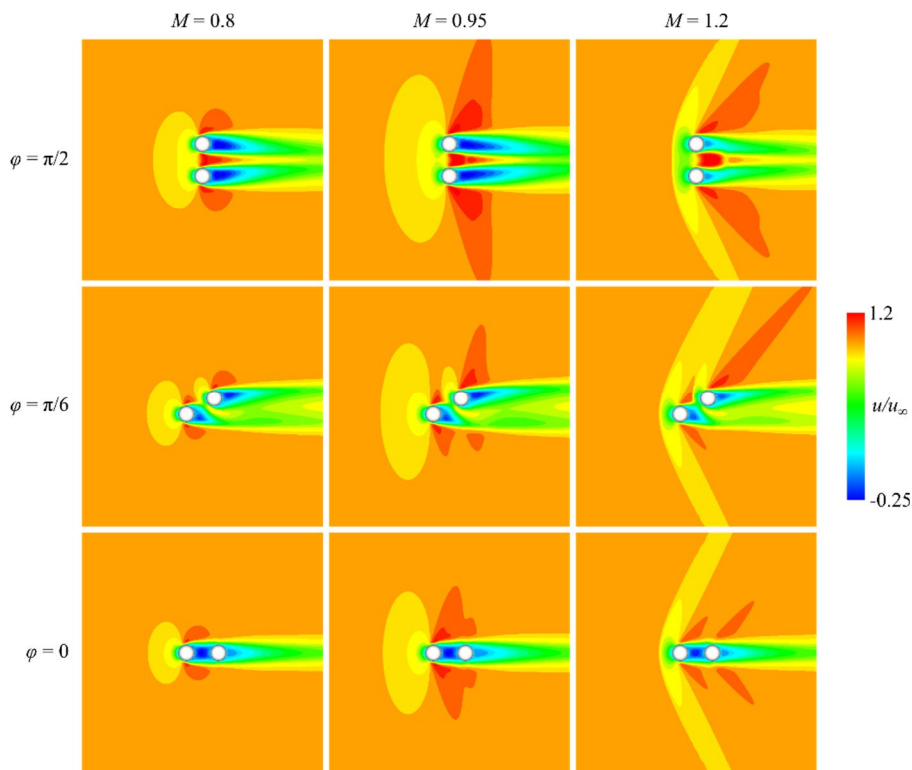


図1 主流方向速度分布に対する Mach 数と位置関係の影響。

垂直衝撃波による誘起流の場合は、埋め込み境界法を用いた粒子解像計算を行った。自由運動する複数粒子周り流れの解析を実施可能な圧縮性流体解析ソルバの整備を共同研究者とともにに行い（図3）、それを用いて衝撃波との干渉時の複数粒子の運動に対する粒子間の位置関係や粒子の密度の影響を調べた。粒子が固定されている場合や粒子の密度が大きい場合と比較して、粒子の密度が小さい場合は衝撃波との干渉時に生じる非定常抵抗が減少し、その時間履歴が粒子間距離によって異なることが分かった。並列配置の場合は、衝撃波通過後の粒子間に非定常的に非常に大きな見かけ上の斥力が働き、その後引力方向の流体力が作用することも分かった。

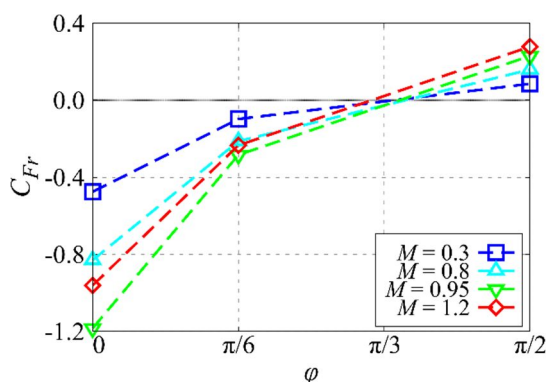


図2 見かけ上の引力・斥力に対する Mach 数と位置関係の影響。

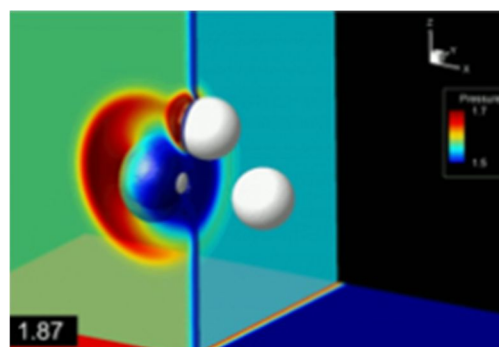
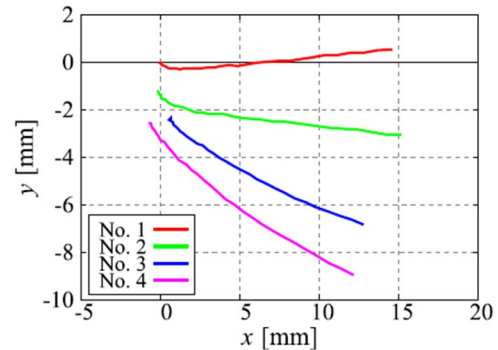
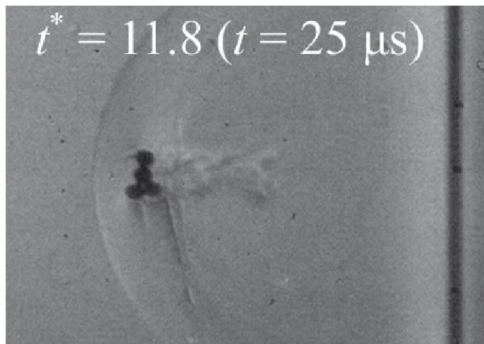


図3 垂直衝撃波と干渉する自由運動する3つの粒子。

(2) 衝撃波管と低密度風洞による実験的研究

衝撃波管による実験では、自由落下する粒子と垂直衝撃波の干渉実験を行い、その過程をシュリーレン法で可視化した。衝撃波後流と粒子の相対速度が亜音速の条件では粒子後流にヘアピン渦が形成され、それが成長する様子を捉えたが、密度変動が小さいため精細な可視化画像を得るには更に光学系の感度を更にする必要があると分かった。遷音速の条件では再圧縮波や後流渦が明瞭に可視化できた。一方、衝撃波通過後一定時間経過後は可視化窓上に形成された境界層の密度変動のために、後流渦の可視化が困難であった。そのため、粒子周り流れが十分に発達

した状態で後流渦の瞬時画像を得るためには、画像処理により後流渦だけを分離する技術が必要である。また、数個の粒子で構成される粒子クラスターについても実験系を確立し、流れ場のシュリーレン可視化(図4a)と各粒子の軌道の抽出(図4b)を行った。可視化画像および粒子の軌道から、粒子クラスターは垂直衝撃波との干渉後に急速に崩壊し、粒子間距離が増大する様子を捉えた。限られた条件ではあるが粒子間の流体力学的干渉を実験で計測した。



(a) 垂直衝撃波と干渉した粒子クラスター周りの瞬時シュリーレン可視化画像。(b) 垂直衝撃波と干渉した粒子クラスターの各粒子の軌道。

図4 垂直衝撃波と干渉した粒子クラスター周りの可視化画像と画像解析により抽出された粒子の軌跡。

低密度風洞での実験では、球よりも計測が行いやすい角柱や円柱など準二次元物体において、実験技術の確立と流体力学的干渉に対する圧縮性効果の調査を行った。角柱については、Reynolds 数 2000, Mach 数 0.1-0.7 において正方形断面をもつ直列に配置された二角柱周り流れのシュリーレン可視化計測、抗力計測、および圧力計測を実施した。非圧縮性流れでは角柱間距離が一定以下になると、下流側および上流側角柱の抵抗係数が不連続的に変化する現象が報告されているが、本研究では Mach 数 0.4 以上においては抵抗係数の変化が非常に緩やかであると分かった。また、シュリーレン可視化の結果から、この現象の背景には圧縮性流れに特有の後流構造が関連していることが示唆された。

加えて、より圧縮性混相流中の粒子周り流れに近い条件で実験を行うため、直径 3 mm の円柱周り流れを数 kPa 程度の総圧で Mach 数 0.7 までの条件でシュリーレン可視化と力計測試験により調べた(図6)。今後複数の円柱を配置することで準二次元物体ではあるが、圧縮性低 Reynolds 数流れにおける物体間の流体力学的干渉を風洞試験により調べることができる見込みである。

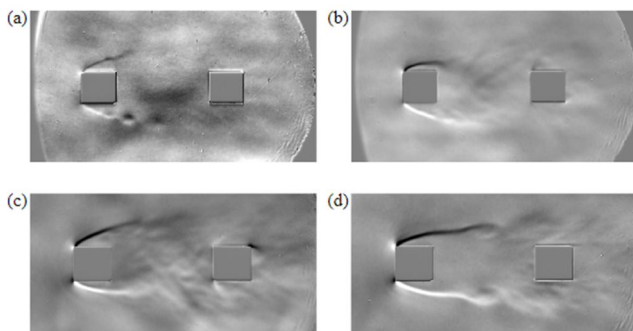


図5 流体力学的に干渉する二角柱周り流れの瞬時シュリーレン可視化画像。(a) $M = 0.2$; (b) $M = 0.4$; (c) $M = 0.6$; (d) $M = 0.7$ 。

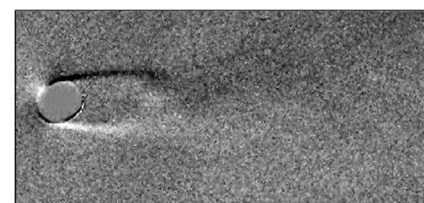


図6 Reynolds 数 250, Mach 数 0.4 の円柱周り流れの瞬時シュリーレン可視化画像。

(3) 粒子抵抗モデルの改良

粒子抵抗モデルの改良については当初計画では粒子間の流体力学的干渉効果を含んだモデルの構築まで実施する予定であったが、単体粒子抵抗モデルの改良にとどまった。これまでに実施してきた Navier-Stokes 方程式の直接数値計算や direct simulation Monte Carlo による単体粒子周り流れの解析で得られた抵抗係数の整理および過去に行われた実験で得られた抵抗係数の再レビューを行い、既存の粒子抵抗モデルを修正した。特に、既存のモデルではデータの不足のために設定されていた、Reynolds 数 45 のすべての Mach 数で抵抗係数がおよそ 1.63 になるという仮定妥当でないことが数値計算の結果から分かり、実験データが存在しなかった領域での抵抗係数データを数値計算の結果で補い、単体粒子向けの粒子抵抗モデルを改良した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nagata, T., Nonomura, T., Ohtani, K. and Asai, K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Schlieren visualization and motion analysis of an isolated and clustered particles after interacting with planar shock	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Loth, E., Daspit, J. T., Hanrahan, G., Jeong, M., Nagata, T., and Nonomura, T.	4. 巻 59
2. 論文標題 Supersonic and hypersonic drag coefficients for a sphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 3261-3274
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J060153	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 Takahashi, S., Nagata, T., Mizuno, Y., and Nonomura, T., and Obayashi, S.	4. 巻 34
2. 論文標題 Effect of particle arrangement and density on aerodynamic interference between twin particles interacting with a plane shock wave	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 113301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0101365	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9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 永田貴之, 高橋俊, 水野裕介, 野々村拓
2. 発表標題 並列に固定された2粒子間の流体力学的干渉に対する圧縮性効果の評価
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永田貴之, 高橋俊, 水野裕介, 野々村拓
2. 発表標題 直接数値シミュレーションによる二粒子間の流体力学的干渉に対するマッハ数効果および粒子の相対位置効果の解析
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 高橋俊, 永田貴之, 水野裕介, 野々村拓, 大林茂
2. 発表標題 衝撃波負荷により移動する2球体に生じる非定常抵抗低減効果
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永田貴之, 野々村拓
2. 発表標題 圧縮性低レイノルズ数流れにおける平板上の層流剥離泡および乱流遷移に対するマッハ数効果の数値的研究
3. 学会等名 第54回流体力学講演会 / 第40回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永田貴之, 笠井美玖, 草間健介, 浅井圭介, 野々村拓
2. 発表標題 レイノルズ数 $O(10^3)$ の正方角柱周り流れにおける臨界マッハ数について
3. 学会等名 流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笠井美玖, 永田貴之, 小澤雄太, 浅井圭介, 野々村拓
2. 発表標題 実験的研究に基づくレイノルズ数 $0 (10^3)$ における直列2角柱の臨界間隔に対する圧縮性効果の解明
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笠井美玖, 永田貴之, 小澤雄太, 浅井圭介, 野々村拓
2. 発表標題 低圧環境下におけるPoly(TMSP)を用いた感圧塗料による直列二角柱上の圧力計測
3. 学会等名 第18回 学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nagata, T., Takahashi, S., Mizuno, Y., and Nonomura, T.
2. 発表標題 Investigation of Mach number and relative position effects on aerodynamic interference between two particles by direct numerical simulation
3. 学会等名 75th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nagata, T. and Nonomura, T.
2. 発表標題 Implicit large-eddy simulation of subsonic compressible low Reynolds number flow over a flat plate at $Re = 20,000$
3. 学会等名 75th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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		
米国	The University of Virginia		