

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：32644

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656522

研究課題名(和文) DNS解析に基づく高マッハ数混相乱流 LESモデルの構築

研究課題名(英文) Construction of LES Model based on DNS Analysis of High Mach Number Multiphase Flow

研究代表者

福田 紘大 (Kota, Fukuda)

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) 3,100,000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考慮したラージエディシミュレーションを構築するため、1つの球周りの直接解析(Direct Numerical Simulation: DNS)が可能な曲線座標高精度圧縮性流体ソルバーの開発と複数の球周りの流体解析を行うための物体埋め込み法ベースの圧縮性流体ソルバーの開発を行い、低レイノルズ数・高マッハ数流れにおいて、Mach数・Re数・一様流と球の温度比等の諸条件が流れ場や抗力係数、Nusselt数に与える影響を明らかにし、LESモデル構築に向けた流れ場特性を明らかにした。

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, for the construction of the the large-eddy simulation model. Two schemes based on boundary fitted coordinate system and Immersed Boundary Method were newly developed. 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 that are required for the construction of the LES model.

研究分野：流体工学、音響工学、渦流れ

キーワード：高マッハ数混相乱流 音響 DNS LES

1. 研究開始当初の背景

ロケットエンジンの排気ジェットからは強い音響波が発生することが知られている。この音響波は打ち上げ時に地面や発射設備などで反射して、ロケット先端に搭載された人工衛星などのペイロードを強く加振するため、打ち上げ時の音響環境を高精度に予測することは人工衛星などの設計において重要な課題となる。そこで、研究代表者らは CFD による音響環境予測手法の開発を進めてきており、超音速ジェットから発生する音響波の解析や地上燃焼試験による検証、さらには、射座や煙道など射点の形状を考慮した解析によるロケット実機の射場設計などを行ってきた。一方で、固体ロケットの排気ジェットに含まれるアルミナ粒子や、大型液体ロケットの打ち上げ時に行われる散水による液滴などのジェット中を漂う微粒子は、音響波を減衰させることが実験などにより明らかとなっているが、研究代表者らの研究によって粒子による単純な音の散乱効果では説明が難しいことが示されており、音響波減衰の具体的なメカニズムについてはよく分かっていない。これらの影響を考慮し解析を実施出来れば、音響予測の精度を現在よりもさらに向上させることができる可能性がある。

2. 研究の目的

研究代表者らのこれまでの研究成果から、固体ロケットの排気ジェットに含まれるアルミナ粒子や液滴の音響減衰効果に関しては、時間平均場を予測する RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) モデルでは予測が十分ではないこと、高精度の予測のためには、非定常流れ場を予測する LES (Large Eddy Simulation) が必要となることが明らかとなっている。固体ロケットの排気ジェットの LES を行うためには、SGS (Sub Grid Scale) モデルの構築が必要と考えられる。高マッハ数混相流れの物理的メカニズムに基づく粒子運動および流れ場のモデル化が必要となるが、これらは十分には議論されていない。また、これらのモデル化および実験データとの比較・検証は高マッハ数混相乱流の現象を理解するために非常に重要となる。

そこで本研究では、微粒子の影響を考慮した LES による音響予測に向けて、SGS モデル作成のための球周りの DNS を行った。固体ロケットモータの排気ジェットに含まれるアルミナ粒子は、直径が数 μm オーダーと非常に小さく、排気ジェットの速度は超音速流れである。したがって、微粒子の直径とジェットの速度を基準とすると微粒子周りの流れ場は高 Mach 数・低 Reynolds 数という特徴的な流れ場となる。このような流れ場はこれまであまり研究対象とされてこなかったため、流れ場の特性など理解が十分に進んでいなかった。そこで本研究では、1 つの球周

りの DNS が可能な曲線座標高精度圧縮性流体ソルバーの開発を行い、高 Mach 数・低 Reynolds 数流れにおいて、Mach 数・Re 数・一様流と球の温度比等の諸条件が流れ場や抗力係数、Nusselt 数に与える影響を明らかにするとともに、複数の球周りの流体解析を行うための物体埋め込み法ベースの圧縮性流体ソルバーの開発を行い、複数粒子と衝撃波との相互作用を明らかにすることを狙った。これらの結果を活かし、LES モデルの構築に資する知見を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

まず初めに 1 つの球周りの直接解析 DNS が可能な曲線座標高精度圧縮性流体ソルバーの開発を行った。支配方程式は一様流の密度と音速、球の直径で無次元化した 3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式とし、有限体積法で離散化した。対流項は WENO-CU6-FP 法、粘性項は 6 次精度中心差分法でそれぞれ評価し、時間積分は 3 次精度 TVD Runge-Kutta 法で行った。WENO-CU6-FP は Nonomura et al. によって提案された一般座標系でも GCL (幾何学保存則) を満たす WENO 法で、曲線座標系でも一様流保持が可能である。ただし本解析では計算の更なる安定性を求め、同スキームの中心差分の項は Pirozzoli によって提案された混合型に置き換えた。このように開発を行った手法を用いて、低レイノルズ数・高マッハ数における一つの球周りの流れ解析を行い、その結果に基づき、Mach 数・Re 数・温度比等の諸条件が流れ場や抗力係数、Nusselt 数に与える影響を検討した。

複数の球周りの流体解析を行うための物体埋め込み法ベースの圧縮性流体ソルバーに関しては、支配方程式を 3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式とし、方程式は等間隔直交格子上で離散化した。非粘性流束は衝撃波と乱流場の干渉場を解くために 3 次精度 MUSCL スキームと 2 次精度 Skew-symmetric スキームから構築されるハイブリットスキームによって計算を行った。物体境界はレベルセット法とゴーストセル法を利用した埋め込み境界で取り扱った。さらに、粒子同士の衝突判定や運動方程式の導入を行うことで、粒子が衝撃波を通過する流れ場に対して直接解析 DNS を行い、粒子同士の干渉と粒子と衝撃波との干渉について検討を行った。

4. 研究成果

Fig. 1 に 1 つの球周りの解析結果を示す。瞬間場において可視化した圧力係数分布を示しており左側が上流側である。亜音速の条件では、温度比が小さいケースでは圧力分布に非対称性があり、ヘアピン渦の放出によって球後流において乱れがあることが確認できる。一方で、温度比が大きいケースでは非対称性は現れず、ヘアピン渦の放出も起こらないが、後流において乱流化する現象が確認できる。

超音速のケースでは温度比が大きい場合も小さい場合も後流に乱れが生じないことが確認できる。

Fig. 2 に Mach 数, 温度比ごとに流れ場の様相を分類したプロットを示す. 橙色は乱流, 赤色は周期性非定常流れ, 青色は定常・対称流れを示す. ここで, 乱流は物体力に関しては定常だが後流において乱流化する場合を指し, 周期性非定常流れはヘアピン渦の放出が起こる場合を指す. 図より, 温度比が小さい条件において周期的な非定常流れとなる Mach 数でのみ, 温度比が高い場合に乱流になると考えられる. 一方で, 超音速の場合では解析を行った全ての温度比において定常対称流れであり, 圧縮性によって非定常性が抑えられることが確認できる.

Fig. 3, 4 に本研究での計算結果と既往の研究で報告された抵抗モデルとの比較を示す. 高 Mach 数・低 Reynolds 数の条件で適用できる抵抗モデルは, 実験によって抗力を直接測定することが困難なため, 非圧縮や分子流の式に新しい項の追加や実験による定数を加えたものや, 物体力を直接計測するのではなく別な量を測定して抗力係数を推定しその結果に基づいて構築されている. 本研究の結果から, 一様流と球の温度比は抗力係数に影響を与えると分かったが, 抵抗モデルの予測結果は温度比を変化させた場合でも超音速での Henderson のモデル以外のほぼすべてのモデルでほぼ一定値となる. このことから, 低 Reynolds 数条件において温度比が抗力係数に与える影響について, 再検討する必要があることを示した.

複数粒子の影響解析に関しては, まず初めに, 物体埋め込み法ベースの圧縮性流体ソルバーの精度を検証するため, 静止している一つの粒子に対して曲線座標高精度圧縮性流体ソルバーの結果と比較を行い, 十分な精度があることを確認した上で複数粒子の解析を実施した. 衝撃波固定座標系の流れ場に粒子を低圧側から高圧側へ通過させ, 衝撃波通過後の流れの様相, 抗力係数, 粒子速度を検証した. Fig.5 に粒子を 3 個配置して, 計算したケースの条件を示す. Reynolds 数は 300 とし, 粒子速度は衝撃波前の流体速度と同じとした.

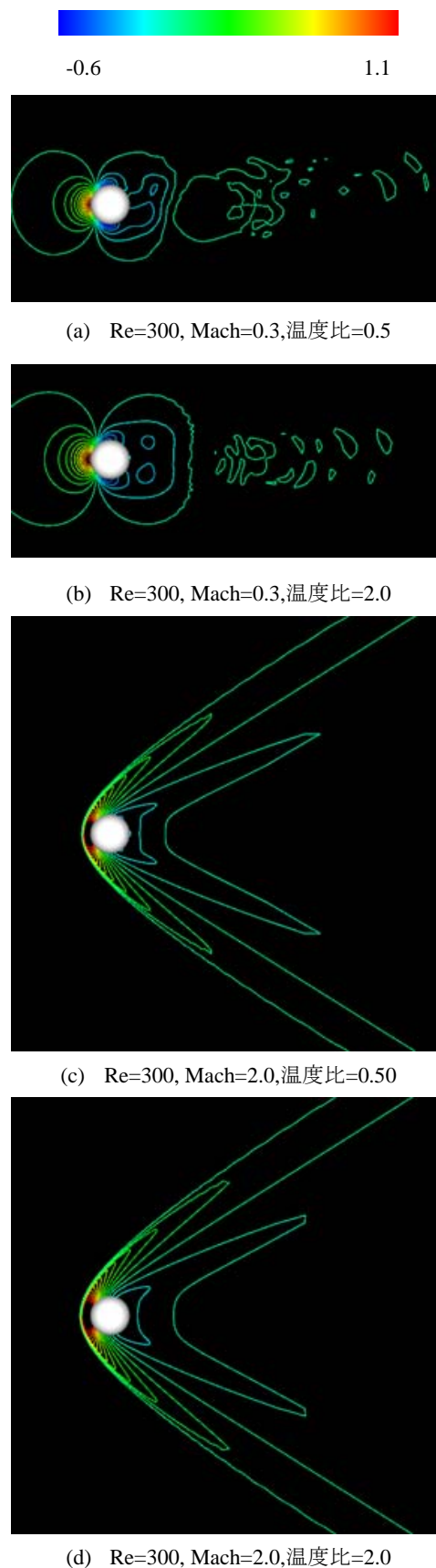


Fig. 1 Pressure coefficient distributions

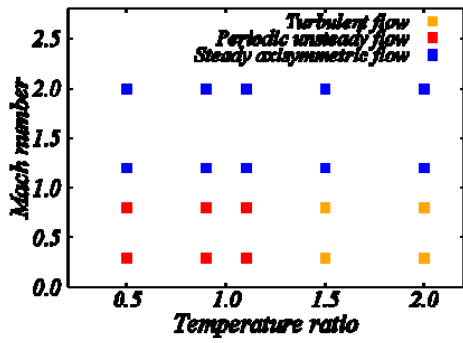


Fig. 2 Flow regime

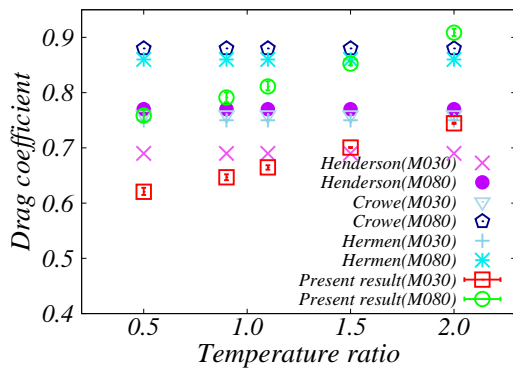


Fig. 3 Comparison of drag coefficient

(Subsonic condition)

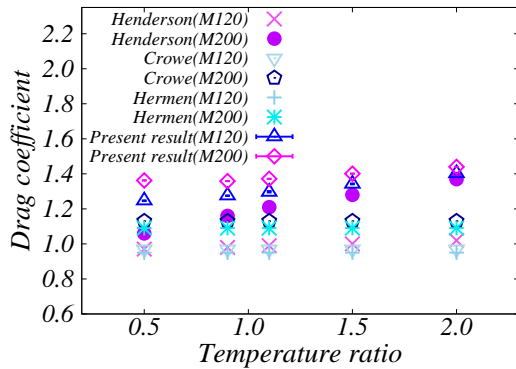


Fig. 4 Comparison of drag coefficient

(Supersonic condition)

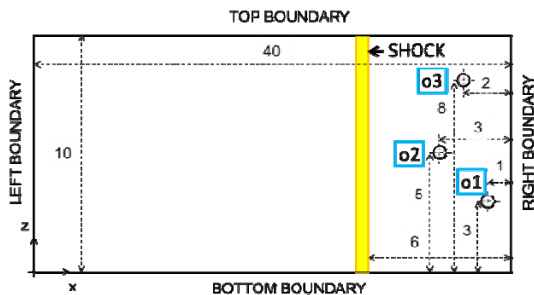
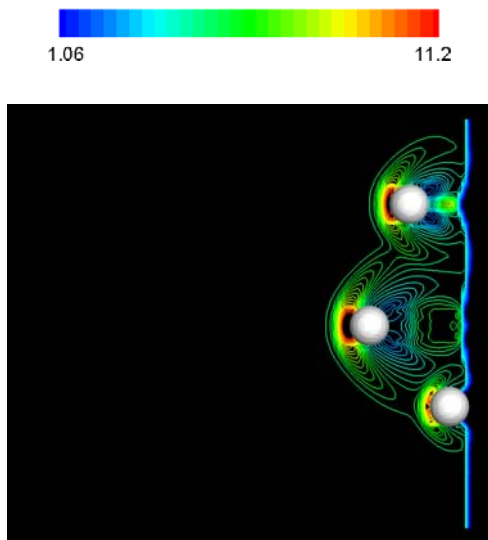


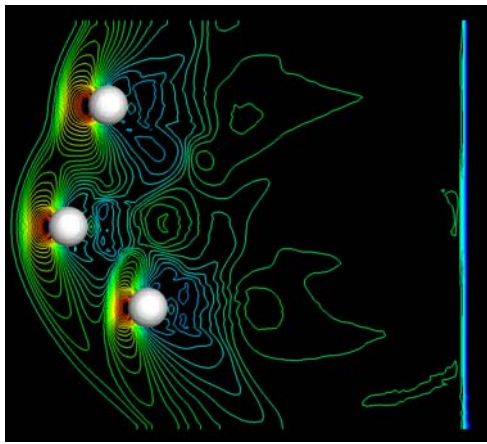
Fig. 5 Computational domain

Fig. 6にある断面における圧力分布の等高線の分布を示す. $t = 5.7$ で粒子は衝撃波を通過し終える. $t = 9.5$ で全ての粒子が衝撃波を通過し, 粒子前方の離脱衝撃波同士が干渉し合い, 流れ場が干渉する. Fig. 7に各粒子の抗力係数の値のグラフを示す. 衝撃波通過時間を基準とし, 単体粒子における結果を黒の点線で示し比較している. 衝撃波通過後における抗力係数の変動は, o1 (赤)は3の粒子で一番後方にあるため, 他の粒子からの影響が少なく, 単体粒子における結果と似た傾向を示した. さらに o2 (青)は3つの粒子の真ん中に位置しているため両側にある粒子の影響を受けて, 抗力係数の値が他の粒子に比べて小さい. また o3 (橙)は外部境界との距離が近い, o1よりも大きな値を示す. Fig. 8に各粒子の粒子速度のグラフを示す. 衝撃波を通過後, 各粒子速度は同じ傾きで変化する. しかし時間が経過すると o2は他の粒子の影響を受けて, 傾きが変動する. 単体粒子と比較すると衝撃波通過後に各粒子が干渉し合うことで速度が急激に減速する. これらのことから本解析コードでは粒子同士の影響を考慮した解析ができることが確認された.

Fig. 9は, 複数の粒子が繰り返し衝撃波を通過する流れ場の解析の瞬時場であり, 衝撃波を通過した粒子の後流に渦構造が生成している様子が捉えられている. このように, 本研究で開発を行った物体埋め込み法ベースの圧縮性流体ソルバーを用いることで, 超音速流中を複数球が飛び交うような流れ場を非定常に低コストで解析が可能となり, 球同士の衝突や後流との相互干渉, 複数の球が衝撃波を通過した際の影響など, 複数球周りの流れ解析を行って粒子が複数存在することで生じる物理現象の理解を深めた. これらの知見を LES モデル構築に繋げていきたい.



(a) $t = 5.7$



(b) $t = 9.5$

Fig. 6 Pressure coefficient distributions

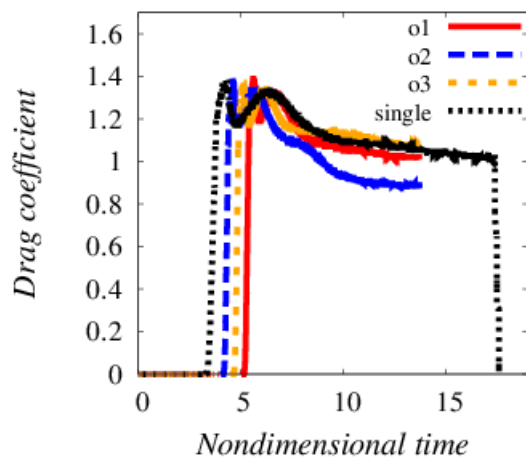


Fig. 7 Drag coefficient

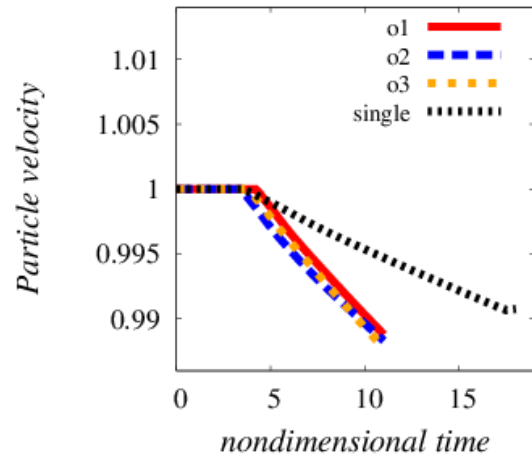


Fig. 8 Particle velocity

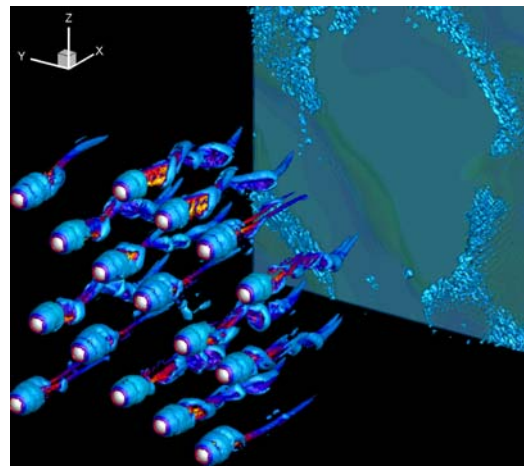


Fig. 9 Vortex structure from shock-particle interaction

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- ① Taku Nonomura, Daiki Terakado, Yoshiaki Abe and Kozo Fujii, “A New Technique for Freestream Preservation of Finite-difference WENO on Curvilinear Grid”, *Computers and Fluids*, Vol. 107, pp. 242–255 (2015). (査読有)
- ② Shun Takahashi, Taku Nonomura, and Kota Fukuda, “High-resolution Immersed Boundary Method for Compressible Turbulent Flows with Shocks: Application to Two-dimensional Flows around Cylinders”, *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2014, Article ID 252478, (2014). (査読有)

- ③ Taku Nonomura, Keiichi Kitamura, and Kozo Fujii, “A Simple Interface Sharpening Technique with a Hyperbolic Tangent Function Applied to Compressible Two-fluid Modeling”, *Journal of Computational Physics*, Vol.258, pp.95-117, (2014). (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 水野裕介, 高橋俊, 野々村拓, 永田貴之, 福田紘大, “固気混相衝撃波流れ解析に向けた衝撃波を通過する粒子周りの流れ場の数値解析”, 平成 26 年度衝撃波シンポジウム, 伊香保温泉ホテル天坊, 群馬県渋川市 (2015).
- ② 永田貴之, 野々村拓, 高橋俊, 水野裕介, 福田紘大, “高 Mach 数・低 Reynolds 数・等温条件下における衝撃波を含む球周りの直接数値解析(Re=300)”, 平成 26 年度衝撃波シンポジウム, 伊香保温泉ホテル天坊, 群馬県渋川市 (2015).
- ③ 水野裕介, 高橋俊, 野々村拓, 福田紘大, “複数粒子が高マッハ数・低レイノルズ数で移動する流れ解析コードの構築と評価”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, タワーホール船堀, 東京都江戸川区 (2014).
- ④ 永田貴之, 野々村拓, 福田紘大, 高橋俊, “高マッハ数・低レイノルズ数・断熱条件下での球周り流れ解析”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, タワーホール船堀, 東京都江戸川区 (2014).
- ⑤ Yuki Nagata, Taku Nonomura, Makoto Asahara, Kozo Fujii and Makoto Tamamoto, “A High-Order Upwind Method for Gas-Particle Flow toward the Analysis of Acoustic Waves from a Rocket Plume including Solid Particle”, The 8th International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD8), the Dorsett Grand Chengdu, Chengdu, China (2014).
- ⑥ 長田裕樹, 野々村拓, 朝原誠, 藤井孝藏, 山本誠, “超音速固気混相流の高解像度数値解析”, 日本機械学会第 92 期流体工学部門講演会, 富山大学五福キャンパス, 富山県富山市 (2014).
- ⑦ 長田裕樹, 野々村拓, 朝原誠, 藤井孝藏, 山本誠, “固体粒子を含むロケットプルーム音響解析に向けた固気二相流の高次精度解析手法の提案”, 平成 25 年衝撃波シンポジウム, 青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川県相模原市 (2014).
- ⑧ 高橋俊, 野々村拓, 福田紘大, “衝撃波・乱流干渉流れ解析のための埋め込み境界法を用いた数値解析法”, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学東山キャンパス, 愛知県名古屋市 (2013).

- ⑨ 野々村拓, 大西順也, 藤井孝藏, “Immersed Boundary 法における簡便な流体力算出方法について”, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学東山キャンパス, 愛知県名古屋市 (2013).
- ⑩ 野々村拓, 阿部圭晃, 藤井孝藏, “差分 WENO 法で幾何学的保存則を満たす新手法”, 日本機械学会・第 25 回計算力学講演会, ポートアイランド南地区, 兵庫県神戸市 (2013).
- ⑪ Taku Nonomura, Keiichi Kitamura and Kozo Fujii, “Simple Interface Sharpening Technique with Hyperbolic Tangent Function Applied to Compressible Two-Fluid Modeling”, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Conference on Computational Science and Engineering, The Westin Boston Waterfront, Massachusetts, USA (2013).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 紘大 (Kota Fukuda)
東海大学・工学部・准教授
研究者番号: 60401684

(2) 研究分担者

野々村 拓 (Taku Nonomura)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教
研究者番号: 60547967

高橋 俊 (Shun Takahashi)
東海大学・工学部・講師
研究者番号: 60553930

(3) 連携研究者
なし