

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01366

研究課題名（和文）BVD原理に基づく圧縮性自由界面多相流の高性能数値解法の確立と展開

研究課題名（英文）Development of high-fidelity numerical model for compressible free-interface multiphase flows based on BVD principle

研究代表者

肖鋒 (Xiao, Feng)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：50280912

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000 円

研究成果の概要（和文）：不連続解が卓越する圧縮性自由界面多相流に対する数値解法及び実用に十分対応できる数値モデルの開発は数値流体力学分野の難問である。本研究は、既存手法を根本的に見直し、研究代表者らが独自に考案した高解像度数値解法の設計指針である新しい原理、いわゆる格子セル境界不連続性最小化原理（BVD原理）、に基いて連続解と不連続解をともに高精度で計算できる空間再構築法を提案した。さらに、BVD法が数値散逸を最大限に抑える特徴を利用して自由界面がぼやける従来手法の問題点を根本的に解決した。これらの斬新かつ独創的な解法を基盤とし、実用性の高い圧縮性自由界面多相流の高性能数値フレームワークの開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、数値流体力学分野の長年未解決の重要課題を研究ターゲットとし、独自かつ創造的な発想から、圧縮性自由界面多相流数値モデル開発の新しい方向性を示すものである。本研究企画によって得られた成果は圧縮性自由界面多相流数値解法開発研究の現状を打破する大きなブレイクスルーであり、関連分野において画期的な影響をもたらすだけでなく、実用性に優れた新型数値フレームワークの創出にも繋がる。圧縮性自由界面多相流の高性能数値モデルの確立に向けて、世界各国の研究グループが精力的に研究開発を進めている中、本企画の研究成果は関連研究において国際的に注目されており、今後世界をリードすることが期待できると思われる。

研究成果の概要（英文）：Interfacial compressible multiphase flows are discontinuity-dominant and impose a very challenging task for the computational fluid dynamics community to develop accurate and reliable numerical schemes and models for practical use. This research, aiming at a breakthrough in such a field, has developed some high-fidelity numerical schemes by making use of the BVD (Boundary Variation Diminishing) principle. These schemes can compute both continuous and discontinuous solutions with high accuracy. Particularly, the problem of the conventional methods which blur the moving interface is thoroughly resolved by the BVD method that suppresses the numerical dissipation to the maximum extent. Based on these novel and innovative schemes, we succeeded in developing a highly practical high-performance numerical model on an unstructured grid for compressible multiphase flows with moving interfaces. Numerical results verify the superiority of the present model in comparison to other existing ones.

研究分野：数値流体力学

キーワード：数値解法 圧縮性流れ 自由界面多相流 衝撃波 不連続解 移動境界 非構造格子 高解像度スキーム

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自由界面多相流の数値解法に関する基礎研究及び実用に向けた数値モデルの開発において、難しい課題が多く、また実応用からの要請も強いいため、数値流体力学 (CFD) 分野において最も活発な研究領域の一つである。これまでに非圧縮性自由界面多相流の数値解法は多数確立され、実用向けの計算ソフトウェアも成熟しつつある一方、圧縮性自由界面多相流においては、自由界面に限らず、各相の内部にも非線形性の強い衝撃波などの不連続が存在し、計算領域全体にわたって流体の物理状態 (密度、圧力、速度など) が大きく変動するため、このような複雑な流れに対する数値解析は極めて困難である。

研究開始当初は、単相圧縮性流体の数値解析に広く使用される TVD (Total Variation Diminishing) 法や WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) のような衝撃波捕獲法を圧縮性自由界面多相流のシミュレーションに広く使われていた。これらの手法は過剰な数値散逸誤差があり、故に自由界面をぼやけてしまう致命的な問題点がある。それを防ぐために、人工圧縮法や逆拡散法などの後処理手法を用いられる。これによって多相流の状態変数間の整合性を保つことができず、計算不安定性や疑似擾乱を引き起こす問題が生じる。圧縮性自由界面多相流の高性能数値解法は、まだ確立されておらず、実用に十分対応できる数値解析モデルやソフトウェアの実現はまだ程遠い状態であった。

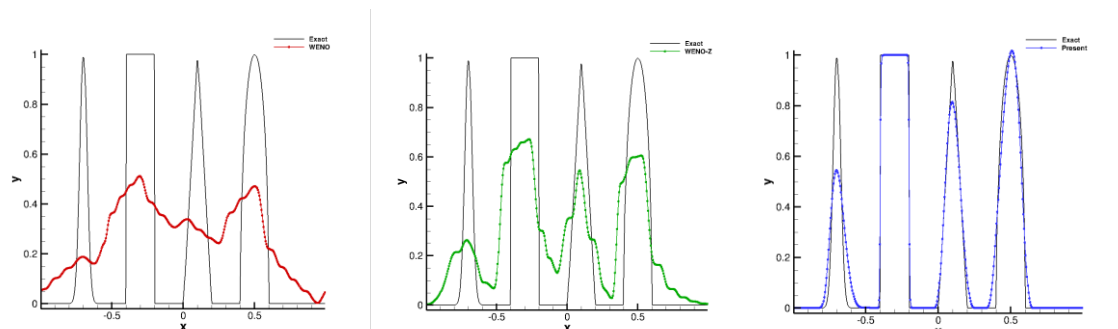


Fig.1 Long-time advection test for spatial reconstruction schemes. Numerical results after one million time steps of WENO-JS scheme(left), WENO-Z(middle) scheme and BVD scheme(right).

2. 研究の目的

上述のような状況を打破するために、本研究企画を提案した。我々が独自に考案した空間再構築に関する基礎原理 (Boundary Variation Diminishing : BVD 原理) を数値解法の設計指針とし、散逸誤差を根本的に解消できる数値解法を創出することで連続解と不連続解とともに高精度で計算できる自由界面圧縮性流れの数値基盤技術を構築する。本研究は、CFD 分野の重要課題を解決することを目標に、既存手法を根本的に見直し、独自かつ創造的な発想から、関連分野において大きなブレイクスルーを狙う。

当初の研究目標は、具体的に次の目標を掲げた。

- (1) 圧縮性自由界面多相流に適した BVD 枠組みと許容補間法を創出する。
- (2) 自由界面における整合性を有する数値定式化を確立する。
- (3) 非構造格子における高性能自由界面圧縮性数値モデルを構築する。

本研究計画を実施することにより、上記の研究目標を達成したうえ、さらに新しい課題にも取り組み、研究を展開した。

3. 研究の方法

3.1 圧縮性自由界面多相流に適した BVD 枠組みと許容補間法の開発

不連続性が卓越する多相流の計算において、広範囲のステンシルが必要となる WENO 法は界面付近に疑似振動が生じる問題がある。さらに非構造格子への適用は困難であることを考慮し、WENO 法以外の BVD 許容補間法を中心に検討を行う。さらに、自由界面多相流を対象とした数値シミュレーションにおいて実用性の高い補間関数である MUSCL (Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws) 法と THINC 法に絞る。また、THINC 関数の勾配パラメータを調整することで adaptive THINC 補間法も考案する。これらの補間関数を候補とする BVD 法、いわゆる MUSCL-THINC-BVD 法および Adaptive THINC-BVD 法、を自由界面多相流の数値解法として開発する。

3.2 自由界面における整合性を有する数値定式化の開発

Fig.1 に示すように、前項で提案した BVD 空間再構築法を用いれば、長期間計算においても数値散逸による移動境界がぼやけることがなく、従来手法を使う場合に必要となる人工圧縮法や逆拡散法などの後処理手法が不要となる。MUSCL-THINC-BVD 法と Adaptive THINC-BVD 法を使えば、相識別関数としての体積率を含むすべての物理変数に対して統一かつ整合性を満たす空間再構築法を考案する。スティッフガスにおいて空間再構築の対象変数を、プリミティブ変数、保存変数、特性変数に適用する場合の自由界面多相流数値解法の計算精度および整合性について

て検討を行う。さらに、一般的な流体物質にも適用できるように、プリミティブ変数に基づく定式化を開発し、Mie-Grüneisen 系の状態方程式に限らず、他の非線形状態方程式における数値モ

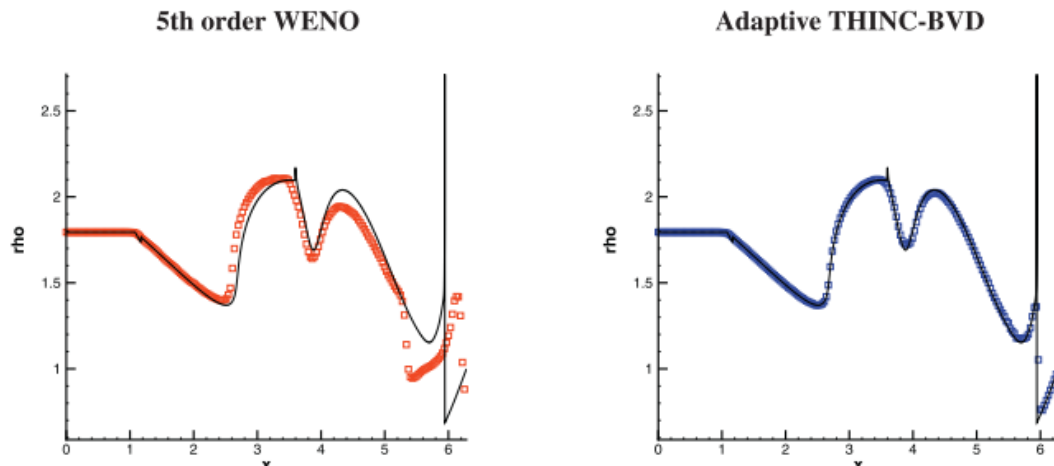


Fig.2 Numerical results (density) of C-J detonation wave with the Heaviside chemical reaction model for the interaction between a detonation wave and an oscillatory profile. Left: 5th-order WENO scheme; Right: BVD scheme.

デルの構築へ展開する。

3.3 非構造格子における高性能圧縮性数値モデルの開発

非構造格子における有限体積法の空間再構築には MUSCL 法を広く用いられるが、その数値散逸誤差が大きいため、自由界面多相流に適用できない。それを解決する手段として THINC 法と BVD 原理の導入が有力である。THINC/QQ 法は任意形状要素や混合要素を含む非構造格子に適用できる高精度自由界面捕獲法として高い関心が集まっている。本研究では、THINC/QQ 法を単なる自由界面捕獲法として用いるだけではなく、MUSCL 法との組み合わせで非構造格子における MUSCL-THINC-BVD 法と Adaptive THINC-BVD 法を開発する。非構造格子の自由界面捕獲法の更なる展開として VOF (Volume of Fluid) 法と level set 法を完全に統一した THINC-scaling 法を提案する。

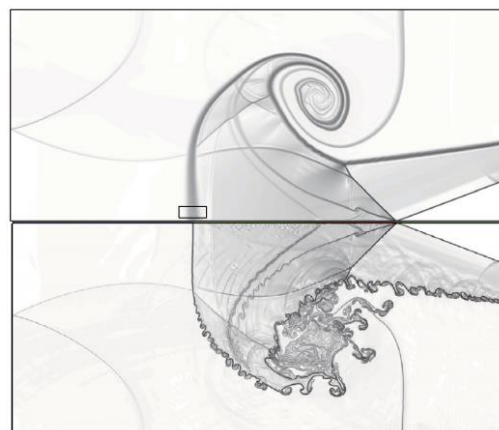


Fig.3 Numerical results of two material compressible triple point problem (density gradient). Top: MUSCL scheme; Bottom: BVD scheme.

4. 研究成果

4.1 圧縮性自由界面多相流に適した BVD 解法の確立

圧縮性自由界面多相流の数値シミュレーションに適した数値解法として、計算精度と堅牢性がともに優れた BVD 解法を開発した。これらの手法は、MUSCL 法と勾配可変型の THINC 法を許容補間関数とし、各セルすべての境界における変分値の総和 TBV (Total Boundary Variation) を最小化する BVD アルゴリズムを用いる。Fig. 2 に示すように、連続解と不連続解をともに高精度で計算することができる。とりわけ、界面の数値拡散を完全に解消できることから、界面における物理過程の定式化を正しく行える。WENO 法に代表される既存の高解像度衝撃波捕獲法に比べ、計算結果を飛躍的に改善した。

4.2 自由界面における高性能数値定式化の確立

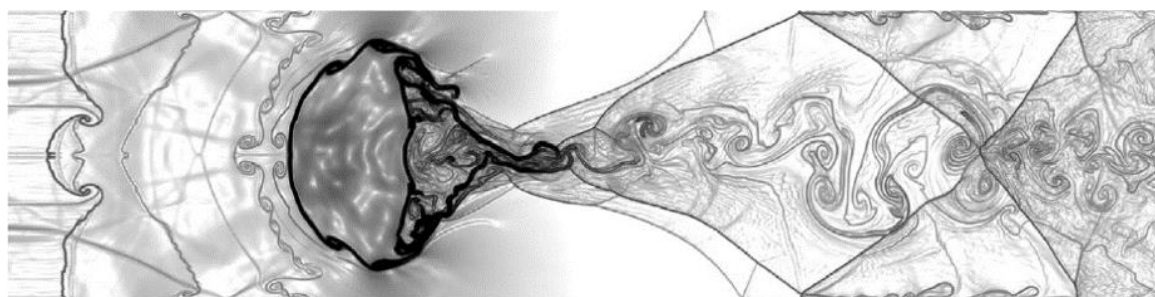


Fig.4 Schlieren images of density fields for the Mach 6.0 shock-water interaction benchmark test solved by the MUSCL-THINC-BVD scheme on a 2000×500 Cartesian grid.

本研究計画で提案した BVD 空間再構築法を用い、圧縮性自由界面多相流の“5-equation”および“6-equation”モデルに基づく数値モデルを構築した。その検証例として、三相点 (triple

point) を含む二相圧縮性ガスを計算した。Fig. 3 に示すように MUSCL 法は過剰な数値散逸誤差によって界面が拡散され、流体不安定性による擾乱の発達が押さえられた。一方、BVD 法は詳細な流体構造を鮮明に捉えた。もう一例として、気体中の Mach-6 の衝撃波と液滴の干渉問題のシミュレーション結果を Fig. 4 に表す。BVD 原理を用いたため、数値散逸誤差を大きく抑えられ、従来手法の気液界面がぼやけてしまう問題点を防げただけでなく、衝撃波、渦、せん断不安定性現象も鮮明に捉えた。本手法の計算結果は、WENO を含む既存の他の手法に比べ、大変優れたことを示している。プリミティブ変数を再構築変数とするため、Mie-Grüneisen 系の状態方程式に限

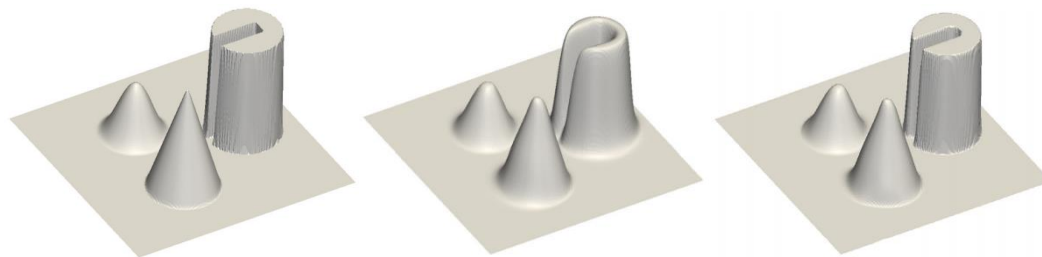


Fig.5 Rotating advection test for spatial reconstruction schemes on unstructured grid. Left: exact solution; Middle: MUSCL scheme; Right: BVD scheme.

らず、他の非線形状態方程式における整合性を満たす数値モデルの構築にも展開できる。

4.3 非構造格子における高性能圧縮性数値モデルの確立

MUSCL 法との組み合わせで圧縮性自由界面多相流に適した非構造格子における実用性の高い BVD 解法の開発に成功した。Fig. 5 に連続解と不連続解が含まれる分布の移流テストの計算結果を表す。MUSCL 法など従来手法の数値散逸問題を根本的に改善し、連続解と不連続解をともに高精度で捉えた。単相圧縮性流れのダブル・マッハ反射ベンチマークテストの計算結果を Fig. 6 に示す。同じ格子解像度において MUSCL、WENO などの既存解法より衝撃法と渦に対する計算精度を大幅に改善した。

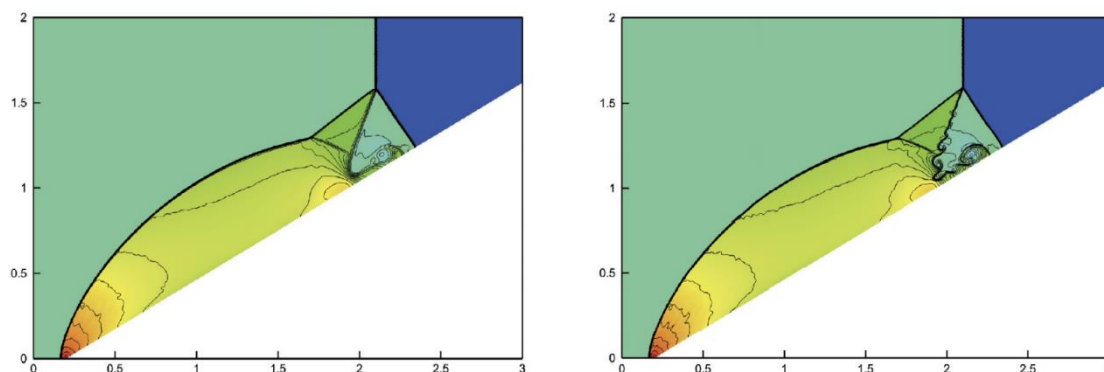


Fig.6 Numerical results (density) of double Mach reflection benchmark test on unstructured grid computed by the MUSCL scheme (left) and the BVD scheme (right).

非構造格子において二流体を含む衝撃波と気泡相互作用のシミュレーション結果を Fig. 7 に示す。MUSCL 法に比べ、BVD 法は界面の数値拡散を有効に防げた。また、界面不安定性や波の微細構造を高い解像度で再現できたことを確認できる。

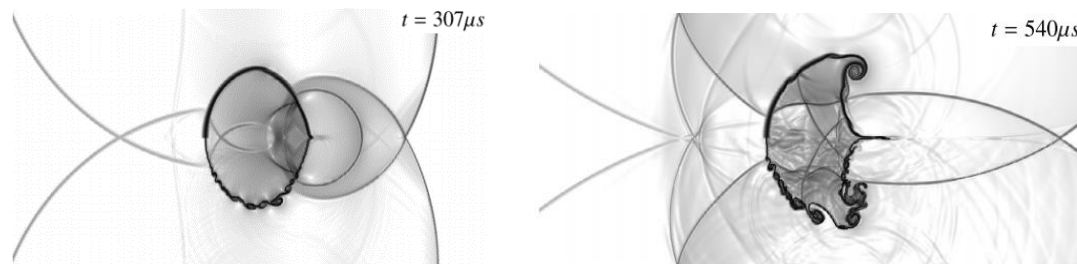


Fig.7 Numerical Schlierens for results of interaction between air shock and R22 cylinder. The results of the MUSCL scheme are shown in the upper half and that of the BVD scheme are in the lower half.

拡大流路内の Richtmyer-Meshkov 不安定性は衝撃波に駆動された二流体界面に発生する不安定性として変形する流路の影響を強く受ける。このような現象は直交格子を用いると流路形状を正確に表現するのが困難である。そこで非構造格子の BVD 法を用いて計算した。Fig. 8 に示す

ように MUSCL 法を用いる場合、数値散逸によって自由界面がぼやけてしまう。この問題点は BVD 法を使えば完全に回避できる。また、BVD 法の計算結果は実験結果とよく一致することを確認できた。

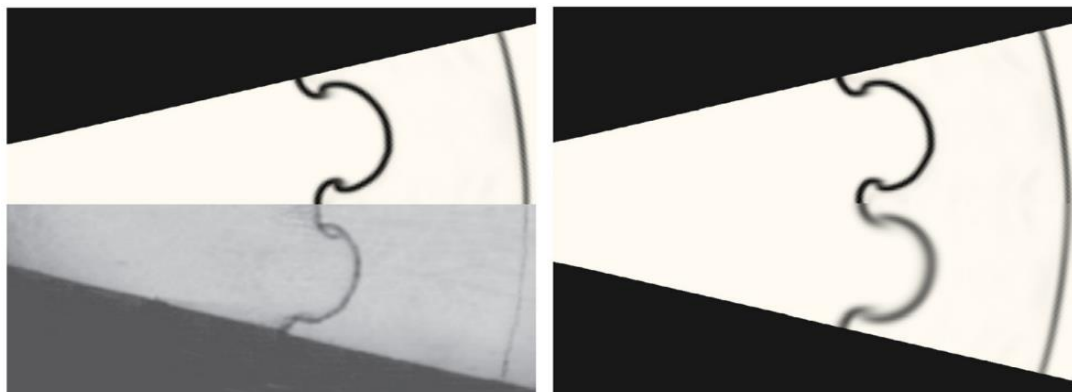


Fig.8 Density gradient of divergent Richtmyer-Meshkov instability. Left: numerical results of the BVD scheme (upper half) vs experimental image (lower half); Right: numerical results of the BVD scheme (upper half) vs the MUSCL scheme (lower half).

4.4 VOF 法と level set 法を完全に統一した自由界面捕獲法の提案

本研究期間において自由界面捕獲法の新展開として THINC scaling 法を提案した。THINC 関数を通して VOF 場と level set 場の中に成り立つスケーリング関係に着目し、VOF 関数と level set 関数は THINC 関数の異なる側面を表す関数として見直すことができる。よって、THINC scaling 法は VOF 法と level set 法両方の長所を取り入れ、高精度な界面形状記述と保存性を確保することができる。従来の幾何再構築型 VOF である PLIC(Piecewise Linear Interface Reconstruction)の平面近似に対し、THINC scaling 法が高次多項式を用いて界面を表現することを可能にした。この手法を用いれば、非構造格子においても任意の高次多項式による界面再構築を簡単に行える。Fig. 9 に示すように、高次多項式を用いると、より高精度で移動境界を計算できる。さらに、同じ格子セル内に 2 つ以上の界面、いわゆるサブグリッド界面構造、を表すことを実現できる。

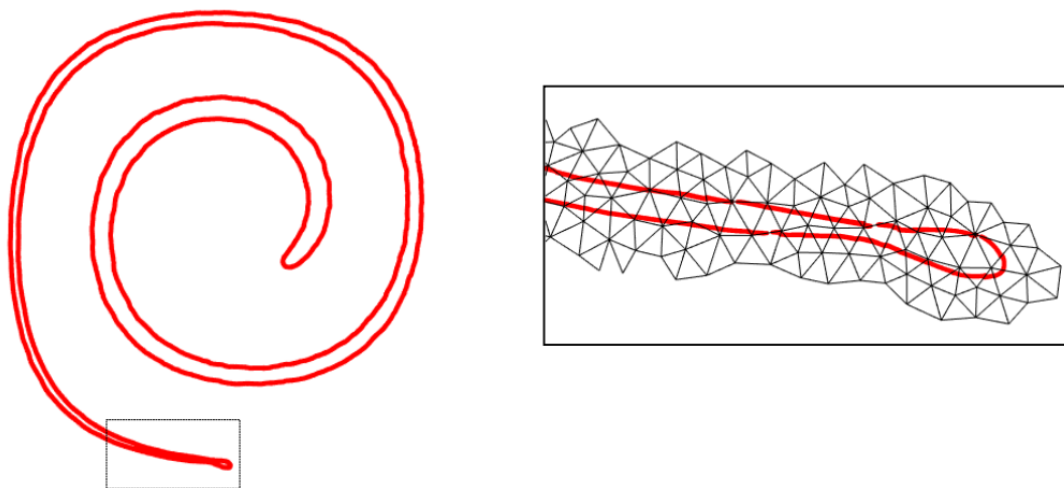


Fig.9 Deformational advection test for moving interface computed by THINC scaling scheme.

本研究は、我々が独自に提案した BVD 原理及び THINC 法に基づく整合性を有する圧縮性自由界面多相流の新しい数値解法を開発するとともに、非構造格子における実用性の高い新型数値モデルの構築に成功した。長年解決できなかった数値散逸による自由界面拡散の難問を根本的に解決し、不連続解が卓越する圧縮性自由界面多相流における計算精度と堅牢性がともに優れた数値的フレームワークを確立する目標を達成した。本研究で得られた成果と知見は、数値流体力学の研究分野に画期的な影響をもたらすだけでなく、各応用分野にも大きく資するものであろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 29件 / うち国際共著 18件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kumar Ronit, Cheng Lidong, Xiong Yunong, Xie Bin, Abgrall Remi, Xiao Feng	4. 巻 436
2. 論文標題 THINC scaling method that bridges VOF and level set schemes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110323 ~ 110323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2021.110323	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 Cheng Lidong, Deng Xi, Xie Bin, Jiang Yi, Xiao Feng	4. 巻 428
2. 論文標題 Low-dissipation BVD schemes for single and multi-phase compressible flows on unstructured grids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110088 ~ 110088
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2020.110088	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 ZHANG Chunwei, GAO Qian, HU Yingxue, YUAN Zhengyi, SUEKANE Tetsuya, XIAO Feng	4. 巻 137
2. 論文標題 Pore-scale Simulations of Haines Jump and Capillary Filling in Randomly Distributed Pore Structures with Implications for CO ₂ Geological Storage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of MMIJ	6. 最初と最後の頁 56 ~ 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2473/journalofmmij.137.56	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 Wakimura Hiro, Deng Xi, Abe Yoshiaki, Xiao Feng	4. 巻 69
2. 論文標題 Shock Capturing Scheme Using -Variable THINC Scheme Based on BVD Principle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 113 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.69.113	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 Zhang Chunwei, Yuan Zhengyi, Matsushita Shintaro, Xiao Feng, Suekane Tetsuya	4. 巻 33
2. 論文標題 Interpreting dynamics of snap-off in a constricted capillary from the energy dissipation principle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 032112 ~ 032112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0044756	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 Xie Bin, Deng Xi, Liao ShiJun, Xiao Feng	4. 巻 424
2. 論文標題 Arbitrary high-order non-oscillatory scheme on hybrid unstructured grids based on multi-moment finite volume method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 109841 ~ 109841
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2020.109841	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 Jiang Zhen-Hua	4. 巻 28
2. 論文標題 A Higher Order Interpolation Scheme of Finite Volume Method for Compressible Flow on Curvilinear Grids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications in Computational Physics	6. 最初と最後の頁 1609 ~ 1638
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4208/CICP.0A-2019-0091	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 Salazar A., Xiao F.	4. 巻 36
2. 論文標題 Design of Hybrid Reconstruction Scheme for Compressible Flow Using Data-Driven Methods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics	6. 最初と最後の頁 675 ~ 689
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jmech.2020.33	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 Abe Yoshiaki, Sun Ziyao, Xiao Feng	4. 巻 93
2. 論文標題 Boundary variation diminishing algorithm for high order local polynomial based schemes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Fluids	6. 最初と最後の頁 892 ~ 907
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/flid.4899	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 Tann Siengdy, Deng Xi, Loubere Raphael, Xiao Feng	4. 巻 206
2. 論文標題 Solution property preserving reconstruction BVD+MOOD scheme for compressible euler equations with source terms and detonations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 104594 ~ 104594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2020.104594	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 Deng Xi, Shimizu Yuya, Xie Bin, Xiao Feng	4. 巻 200
2. 論文標題 Constructing higher order discontinuity-capturing schemes with upwind-biased interpolations and boundary variation diminishing algorithm	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 104433 ~ 104433
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2020.104433	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 Xie Bin, Jin Peng, Nakayama Hiroki, Liao ShiJun, Xiao Feng	4. 巻 401
2. 論文標題 A conservative solver for surface-tension-driven multiphase flows on collocated unstructured grids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 109025 ~ 109025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2019.109025	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 Deng Xi, Jiang Zhen-Hua, Xiao Feng, Yan Chao	4. 巻 77
2. 論文標題 Implicit large eddy simulation of compressible turbulence flow with PnTm?BVD scheme	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Mathematical Modelling	6. 最初と最後の頁 17 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apm.2019.07.022	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 Tann Siengdy, Deng Xi, Shimizu Yuya, Loubere Raphael, Xiao Feng	4. 巻 92
2. 論文標題 Solution property preserving reconstruction for finite volume scheme: a boundary variation diminishing+multidimensional optimal order detection framework	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Fluids	6. 最初と最後の頁 603 ~ 634
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/flid.4798	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 Jin, J., Deng, X., Abe, Y., Xiao, F.	4. 巻 29
2. 論文標題 Uncertainty quantification of shock-bubble interaction simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Shock Waves	6. 最初と最後の頁 1191 ~ -1204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00193-019-00893-4	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 Niu, Y.-Y., Chen, Y.-C., Yang, T.-Y., Xiao, F.	4. 巻 29
2. 論文標題 Development of a less-dissipative hybrid AUSMD scheme for multi-component flow simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Shock Waves	6. 最初と最後の頁 691 ~ 704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00193-018-0872-7	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 Xie Bin, Deng Xi, Liao ShiJun, Xiao Feng	4. 巻 394
2. 論文標題 High-order multi-moment finite volume method with smoothness adaptive fitting reconstruction for compressible viscous flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 559 ~ 593
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2019.06.002	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 Jin Peng, Xie Bin, Xiao Feng	4. 巻 221
2. 論文標題 Multi-moment finite volume method for incompressible flows on unstructured moving grids and its application to fluid-rigid body interactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computers & Structures	6. 最初と最後の頁 91 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compstruc.2019.05.014	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 Deng Xi, Shimizu Yuya, Xiao Feng	4. 巻 386
2. 論文標題 A fifth-order shock capturing scheme with two-stage boundary variation diminishing algorithm	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 323 ~ 349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2019.02.024	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 清水友哉, Xi Deng, 肖鋒	4. 巻 38
2. 論文標題 BVD原理に基づいた高精度衝撃波捕獲スキームの開発 (第32回数値流体力学シンポジウム特集) -- (特集 注目研究 in CFD32)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ながれ: 日本流体力学会誌	6. 最初と最後の頁 101 ~ 104
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 無
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 Deng Xi, Boivin Pierre, Xiao Feng	4. 巻 31
2. 論文標題 A new formulation for two-wave Riemann solver accurate at contact interfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 046102 ~ 046102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5083888	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 Deng Xi, Xie Bin, Teng Honghui, Xiao Feng	4. 巻 66
2. 論文標題 High resolution multi-moment finite volume method for supersonic combustion on unstructured grids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Mathematical Modelling	6. 最初と最後の頁 404 ~ 423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apm.2018.08.010	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 Jin Peng, Deng Xi, Xiao Feng	4. 巻 12
2. 論文標題 An ALE formulation for compressible flows based on multi-moment finite volume method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 791 ~ 809
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/19942060.2018.1527726	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 Deng Xi, Xie Bin, Xiao Feng, Teng Honghui	4. 巻 56
2. 論文標題 New Accurate and Efficient Method for Stiff Detonation Capturing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 4024 ~ 4038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J056632	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 Deng Xi, Xie Bin, Loubere Raphael, Shimizu Yuya, Xiao Feng	4. 巻 171
2. 論文標題 Limiter-free discontinuity-capturing scheme for compressible gas dynamics with reactive fronts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 1~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2018.05.015	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 Deng Xi, Inaba Satoshi, Xie Bin, Shyue Keh-Ming, Xiao Feng	4. 巻 371
2. 論文標題 High fidelity discontinuity-resolving reconstruction for compressible multiphase flows with moving interfaces	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 945~966
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2018.03.036	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 池端 昭夫、清水 友哉、肖 鋒	4. 巻 2018
2. 論文標題 保存型 CIP 法による多相流の効率的な非構造格子数値計算モデル	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20180001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jsces.2018.20180001	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 Jin Peng, Deng Xi, Xiao Feng	4. 巻 24
2. 論文標題 A Direct ALE Multi-Moment Finite Volume Scheme for the Compressible Euler Equations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Communications in Computational Physics	6. 最初と最後の頁 1300-1325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4208/cicp.OA-2017-0189	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 Qian Longgen, Wei Yanhong, Xiao Feng	4. 巻 373
2. 論文標題 Coupled THINC and level set method: A conservative interface capturing scheme with high-order surface representations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 284 ~ 303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2018.06.074	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 YAMASHITA Susumu, TADA Kenichi, YOSHIDA Hiroyuki, SUYAMA Kenya	4. 巻 17
2. 論文標題 Coupled Analysis of Fuel Debris Distribution and Recriticality by both Multiphase/Multicomponent Flow and Continuous Energy Neutron Transport Monte Carlo Simulations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transactions of the Atomic Energy Society of Japan	6. 最初と最後の頁 99 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3327/taesj.J17.026	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26件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 18件)

1. 発表者名 F. Xiao
2. 発表標題 Design New Fidelity Numerical Schemes by BVD Principle
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on Novel Computational and Experimental Methods for Complicated Fluid-Structure Interactions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Xiao, X. Deng
2. 発表標題 A New Paradigm to Design High-Fidelity Finite Volume Method for Resolving Both Smooth and Discontinuous Flow Structures
3. 学会等名 14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XIV) and ECCOMAS Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Loubere, S. Tann, F. Xiao
2. 発表標題 Towards a genuinely non-linear accurate Finite Volume scheme with a posteriori stabilization
3. 学会等名 14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XIV) and ECCOMAS Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 F.Xiao
2. 発表標題 A new approach to highly accurate spatial reconstructions
3. 学会等名 Trends of High Order Numerical Methods for Computational Fluid Dynamics and Their Applications (HOM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木 真一, 脇村 尋, Fu Lin, 肖 鋒
2. 発表標題 TENO法とTHINC法による新しい高解像度 衝撃波捕獲解法
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 脇村 尋, Deng Xi, 阿部 圭晃, 肖 鋒
2. 発表標題 BVD原理に基づく 可変THINC法による衝撃波捕獲スキーム
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 真島 祐介, 脇村 尋, 肖 鋒
2. 発表標題 BVD原理に基づくTVD勾配リミタに関する新しい計算手法
3. 学会等名 第34回数值流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 F.Xiao
2. 発表標題 New Formulations to Construct Structure-Preserving Schemes for Moving Interface and Compressible Fluid Dynamics
3. 学会等名 Structure Preserving Numerical Methods for Hyperbolic PDEs (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Kumar, L.G Qian, F. Xiao
2. 発表標題 High-order interface representation in THINC method
3. 学会等名 9th international conference on Numerical methods for multi-material fluid flow (MultiMat 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Xiao
2. 発表標題 A robust and interface preserving formulation for compressible multiphase flows
3. 学会等名 9th international conference on Numerical methods for multi-material fluid flow (MultiMat 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Loubere, S. Tann, F. Xiao
2. 発表標題 Solution Property Preserving Reconstruction for Finite Volume schemes
3. 学会等名 9th international conference on Numerical methods for multi-material fluid flow (MultiMat 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Tann, X. Deng, Y. Shimizu, R. Loubere, F. Xiao
2. 発表標題 Solution property preserving method for Euler equations: a BVD/MOOD approach
3. 学会等名 SHARK-FV 2019 conference (Sharing Higher-order Advanced Know-how on Finite Volume) conferences (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Salazar Andres, 肖 鋒
2. 発表標題 データドリブンに基づく空間再構築法の開発
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F.Xiao
2. 発表標題 Solution-structure preserving reconstruction of finite volume method for compressible flow
3. 学会等名 Workshop on Numerical Compressible Flow, Institute for Mathematical Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F.Xiao
2. 発表標題 A new paradigm to design high-fidelity Godunov schemes for both smooth and discontinuous solutions in complex flow simulations
3. 学会等名 International workshop on High Order Structure-Preserving Numerical Methods Algorithms, Analysis and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Kumar, L.G Qian, F. Xiao
2. 発表標題 A THINC scaling method for interface capturing
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Mechanics (2018) / The 12th Asian Computational Fluid Dynamics Conference (2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Tann, X. Deng, R. Loubere, F. Xiao
2. 発表標題 High-Order Finite Volume Method for Hyperbolic Systems: MOOD and THINC Method
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Mechanics (2018) / The 12th Asian Computational Fluid Dynamics Conference (2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. Xiao, X. Deng, Y. Shimizu
2. 発表標題 Boundary Variation Diminishing (BVD) Principle: A New Guideline to Design High-Fidelity Numerical Schemes for Complex Flow Simulations
3. 学会等名 Taiwan-Japan Workshop on Mechanical and Aerospace Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Jin, X. Deng, Y. Abe, F. Xiao
2. 発表標題 Effects of uncertainty in bubble density on flow structures in shock-bubble interaction
3. 学会等名 The 9th International Conference on Computational Methods (ICCM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 X. Deng, B. Xie, R. Loubere, F. Xiao
2. 発表標題 Limiting-Free Discontinuity Capturing Schemes for Compressible Multi-components Flow
3. 学会等名 SHARK-FV 2018 conference (Sharing Higher-order Advanced Know-how on Finite Volume) conferences (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水友哉, Deng Xi, 肖 鋒
2. 発表標題 BVD原理に基づいた高精度衝撃波捕獲スキームの開発
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 宮川直, ジン ジョンファン, 肖 鋒
2. 発表標題 CUDAとMPIによる自由界面圧縮性多相流の数値シミュレーション
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 遠藤悠輔, 肖鋒, 高原弘樹
2. 発表標題 直方体容器内多液面の非線形挙動に関する数値シミュレーション
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 ジン ジョンフン, 宮川直, 肖 鋒
2. 発表標題 多相流界面でのRegular reflectionとIrregular reflectionの遷移における不確かさの影響評価
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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 肖 鋒、長崎 孝夫	4. 発行年 2020年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 256
3. 書名 数値流体解析の基礎	

〔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	山下 晋 (Yamashita Susumu Yamashita Susumu) (80586272)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研 究職 (82110)	

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			
フランス	CNRS	Aix Marseille Universite		
中国	Shanghai Jiao Tong University	Beihang University		
スイス	University of Zurich			