

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11992

研究課題名（和文）GPUスーパーコンピュータによる原子炉内溶融物の移行挙動解析

研究課題名（英文）Multiphase fluid behavior simulation in a nuclear reactor using a GPU supercomputer

研究代表者

小野寺 直幸（Onodera, Naoyuki）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究職

研究者番号：50614484

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：原子力工学問題で対象とする複雑な構造物を含んだ流れの効率的な解析を実現するために、研究代表者がGPU向けに開発を進めてきたブロック型適合細分化（AMR）格子を、共同研究者がCPU上で開発している直交格子版のJUPITERへと適用すると共に、ブロック型AMR格子向けのPoisson解法を提案することで更なる高速化を実現した。燃料集合体を模擬したバンドル体系に対する気液二相流体解析を実施した結果、直交格子版のJUPITERと比較して、2倍の解像度である0.5mm格子による解析を実現するとともに、気液界面捕獲手法としてフェーズフィールドモデルを適用することで、高精度に実験結果を再現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子力CFD解析は広範な事象を含むため、各物理モデルを表現するのに十分な時空間解像度をカバーするマルチスケール解析が必須となる。しかしながら、数値的な取扱いが最も困難な多相流体解析を高解像度かつ長時間スケールに拡張できる計算性能と計算手法はこれまで未確立であり、これが機構論的なCFD解析を阻害してきた。本研究では、飛躍的に計算性能が向上してきたGPU向けの最適化技術の開発、計算速度のボトルネックとなるPoisson解法の高速度化、ブロック型適合細分化格子の採用により、効率的なマルチスケール解析を実現した。以上の研究成果により、原子力分野、更には幅広い産業応用分野でのCFD解析の発展に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：This research developed a large-scale two-phase flow code JUPITER-AMR on GPU supercomputers. The block-AMR method is essential for high performance GPU computation and efficient solutions of the nuclear reactor which is composed of complicated structures. In addition, we successfully implemented a conjugate gradient method with a state-of-the-art multigrid preconditioner (MG-CG) on the block-AMR framework. We performed gas-liquid two-phase fluid simulations for a bundle system. Compared to the Cartesian grid version of JUPITER, the JUPITER-AMR realized a 0.5 mm grid resolution, which is twice as high as that of JUPITER, and reproduces the experimental results with high accuracy.

研究分野：高性能計算関連

キーワード：気液二相流体解析 Poisson解法 マルチグリッド法 GPU 適合細分化格子

1. 研究開始当初の背景

シビアアクシデント (SA) 時における原子炉内溶融物の移行挙動の解明は、事故後の炉内状況把握および廃炉作業効率化の観点から非常に重要である。しかしながら、既存の SA 解析コードは事象進展シナリオが予め与えられているなど、非常に多くの不確かさが含まれており、複雑な構造物で構成される原子炉内での現象の把握が極めて困難である。一方、数値流体力学 (CFD) 解析による溶融物の移行挙動の機構論的解析には、マルチスケール/マルチフィジクスに対応した高度な物理モデルと膨大な計算機資源が必要であり、当時、実機を対象とした解析は殆ど行われていなかった。

上記課題に対して、日本原子力研究開発機構 (JAEA) では実験、シミュレーション、応用数学および計算機科学の専門家を含む学際的チームにより、多相多成分熱流動解析コード JUPITER [文献 1] の開発を進めていた。JUPITER は多種金属および炉内構造物を含んだ溶融解析が可能であり、JAEA の大型計算機 ICEX や京コンピュータを用いた大規模計算により、原子炉圧力容器および下部ペDESTAL における溶融物の移行挙動の解析に成功した (図 1)。上記解析を更に発展させ、圧力容器内の燃料溶融からペDESTAL 内部のデブリ蓄積に至る SA の全体像を解明するには、解析の更なる高解像度化および長時間解析が必須となっていた。しかしながら、多相流体解析を大規模化する上で多種溶融物の質量・体積等の保存を課すために計算する圧力 Poisson 方程式がボトルネックとなっていた。圧力 Poisson 方程式が与える大規模疎行列は反復行列解法によって計算するが、極端な密度比が行列の条件数を悪化させる多相流体問題では、問題規模の増大による収束特性の悪化および並列数の増大に伴う通信コストの顕在化が計算性能を劣化させて長時間解析を阻害する。この問題に対して、本研究では CPU 向けの省通信型 MG 法を開発し、国内最大規模のメニーコア型大型計算機 Oakforest-PACS (JCAHPC) 全系を用いた 1000 億格子規模の超大規模解析において、収束特性改善と計算性能向上を両立させることに成功していた (図 2) [文献 2]。本研究ではこの反復行列解法を発展させる事で、エクサスケールの多相流体解析を目指した。

近年の機械学習のニーズを背景として GPU の性能が飛躍的に発展しており、演算性能のみならずメモリバンド幅や電力性能比も従来の CPU から一桁以上の性能向上が実現している。この飛躍的性能向上の高性能計算 (HPC) 分野での活用に向けて GPU 型大型計算機が注目されており、国内では TSUBAME3.0 (東工大)、ABCI (産総研)、米国では当時世界最大となっていた SUMMIT (ORNL) といったプリエクサスケールの GPU 型大型計算機が次々と登場していた。しかしながら、GPU 型大型計算機を HPC 向けに有効活用するには①GPU に搭載された数千台の演算コアに対する最適化技術、②演算性能とノード間通信性能のギャップを克服する省通信アルゴリズム、③演算性能と IO 性能のギャップを克服する In-Situ 可視化・解析技術が必須となる。本研究ではこれらの課題を異なる分野の専門家の協業によって克服し、JUPITER によるエクサスケールの原子力 CFD 解析を実現した。

JUPITER は単相流や気液二相流にも適用可能であることから、SA 時の原子炉内溶融物の移行挙動解明はもちろんのこと、沸騰水型原子炉の安全性研究に係る幅広い熱流動解析に応用可能であり、大規模実験を補完してコストを最小化する手段としても期待できる。このような多相流体解析は幅広い工学問題に適用可能であることから、燃料電池内部、電子装置冷却用ヒートパイプの二相流体解析等、産業分野に与える影響も大きい。

文献 1. S.Yamashita, 他 3 名, Nuclear Engineering and Design, vol. 322 (2017), 査読有  
 文献 2. Y.Idomura, 他 5 名, In Proc. 9th Workshop in Scala in SC18, (2018), 査読有

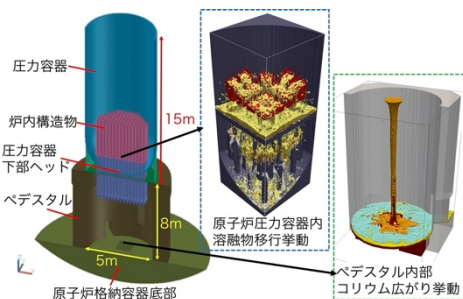


図 1 JUPITER コードによる上部の圧力容器内、下部ペDESTAL 内の溶融物移行挙動解析

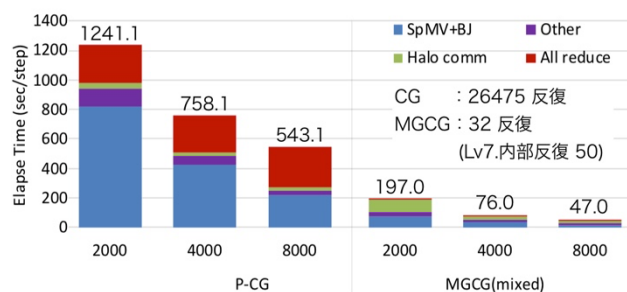


図 2 溶融物移行挙動解析の圧力方程式に対する P-CG 法および省通信マルチグリッド CG 法 (倍精度/単精度の混合精度) による強スケーリング (Oakforest-PACS: 格子点数 3, 200x2, 000x14, 160 ~ 900 億)

2. 研究の目的

原子力 CFD 解析は材料力学、化学反応、流体力学等、広範な事象を含むため、ベースとなる多

相流体解析では各物理モデルを表現するのに十分な時空間解像度をカバーするマルチスケール解析が必須となる。しかしながら、数値的な取扱いが最も困難なシミュレーションの一つである多相流体解析をそのような高解像度かつ長時間スケールに拡張できる計算性能と計算手法はこれまで未確立であり、これが機構論的な CFD 解析を阻害してきた。この長年の重要課題に対して、飛躍的に計算性能が向上してきた GPU とそれを活用できる最先端の計算手法を活用することで原子力分野、更には幅広い産業応用分野でのブレイクスルーが達成可能である。

HPC 分野での独自性として、実現象の物理特性と最先端 GPU 環境のハードウェア特性を考慮した高性能・高効率な反復行列解法の提案が挙げられる。例えば、Oakforest-PACS 向けに開発した省通信型マルチグリッド (MG) 法は省通信型 Lanczos 法による固有値計算および Chebyshev 反復法によるスムーザを含む幾何的 MG 前処理を適用した共役勾配法で構成されるが、JUPITER に含まれる現象の物理的、数学的特性を理解することによって各アルゴリズムに求められる計算精度を最適化した混合精度処理によって演算量と通信量を大幅に削減している。また、省通信型 Lanczos 法のような省通信型の反復固有値計算では省通信化するステップ数を増やすと通信量を削減できるが、演算量が増大し、数値安定性も劣化するという複雑なトレードオフが存在する。これに関しても、ハードウェア特性と問題の数学的特性に最も適合するステップ数を合理的に設定することで対象とする計算環境で最適な省通信アルゴリズムを実現している。このような反復行列解法の提案は異なる分野の専門家の密接な協業によって初めて可能となることから、独自性が高い。

### 3. 研究の方法

エクサスケール計算機を活用した JUPITER の高速化に向けて以下の項目を実施する。

#### (1) JUPITER へのブロック型適合格子細分化 (AMR) 法の導入とマルチプラットフォーム向けのプログラミングモデルの開発

研究代表者の小野寺が GPU 向けに開発を進めてきたブロック型 AMR 法を JUPITER に適用した JUPITER-AMR を開発する。オリジナルの JUPITER は直交座標系の構造格子を用いて開発されてきたが、従来は円筒形状の炉心を解析する上で無駄な計算領域が多く含まれていた。これに対してブロック型 AMR 法を導入して無駄な計算領域を省くことで計算量を削減する。さらに、部分的には直交格子と同様のデータ構造を持つブロックデータ構造を採用することでデータアクセスをメモリアクセスの演算器向けに最適化する。多相流体解析コード JUPITER は、Staggered 格子配置を採用しており、以下の非圧縮性 Poisson 方程式に対して、2 次精度の中心差分を用いて離散化を行っている。

エクサスケール計算機の演算器の候補として GPU・CPU・ARM が挙げられ、これらのプロセッサ間の計算性能の移植性は大きな研究課題となっている。本研究では、ブロック構造データでは連続的なメモリアクセスが可能であり、これは様々な演算器に対して有効であることに着目し、マルチプラットフォームに対応したプログラミングモデルを構築した。具体的には、研究分担者の下川辺(東京大学)が開発しているプログラミングフレームワーク技術[文献 3]を基に、開発を進めることでユーザ側の CUDA 実装の労力を最小限にする。この技術の開発により、将来的には様々なエクサスケール計算機上において自動的に流体計算カーネルが最適化されるため、高い性能移植性を実現することが可能となる。

文献 3. T. Shimokawabe, 他 3 名, In Proc. CLUSTER, pp. 525-529, (2017), 査読有

#### (2) ブロック型データ構造に適したマルチグリッド前処理解法の開発

研究分担者の井戸村、真弓、山田が開発した省通信型反復行列解法を GPU 向けに改良することで、計算速度の更なる向上を図る。前述の省通信型 MG 法において、Chebyshev 反復法は単精度で実装されているが、このアルゴリズムの前処理としてブロック ILU 法が実装されている。このブロック ILU 法は CPU では数十スレッドに分割した部分行列が十分に大きいため疎行列向けの実装を採用しているが、GPU の場合には数万スレッドに細分化されるために部分行列を高並列に処理するアルゴリズムの開発が必須である。また、前処理の部分行列計算はある程度の誤差が許容されることから、最新 GPU の単精度演算を利用することで、高速な逆行列計算を実現する。更に、これまでに開発済みの MG 法をブロック型データ構造向けに発展させることで、非圧縮性モデルにおける圧力 Poisson 方程式の解法の高高速化を目指す。

#### (3) 大規模な原子力 CFD 解析の実施

原子力工学分野の多相流体解析は、構造物に起因した乱流と気液界面を捉えたマルチスケール解析が高コストになるため、これまでは経験則に基づいて混相流をモデル化した流体解析が主であった。本研究では、AMR 格子に基づく Poisson 解法の高高速化により、気液界面を直接捉えた高解像度の非定常解析の実現を目指す。具体的には、[文献 4]で実施したバンドル体系に対する解析を、様々な実験条件にて実施し、実験結果の再現を目指す。このような多相流体解析は幅広い工学問題に適用可能であることから、原子力分野の CFD ソフトウェアの発展だけでなく、実験手段の代替として工学分野に与える影響は大きい。

文献 4. A. Ono, 他 3 名, Mech. Eng. Journal, Vol. 7, No. 3, pp 1-12, (2020), 査読有

#### 4. 研究成果

本課題の推進により、以下のマルチプラットフォーム向けのプログラミングモデルの開発、ブロック型データ構造に適した高速な Poisson 解法の開発、および大規模な原子力 CFD 解析を実現した。以下に具体的な研究成果を示す。

##### (1) マルチプラットフォーム向けのプログラミングモデルの開発と性能測定

直交格子の連続的なメモリアクセスによる高速計算と、非構造格子の複雑物体への適応性を兼ね備えたブロック型データ構造を持つ JUPITER-AMR を新たに開発した。ブロック間の接続情報は八分木 (Octree) に基づいて管理し、ブロック内に対して、 $8^3$  格子を割り当てた。

マルチプラットフォーム向けのプログラミングモデルの開発として、C++言語のテンプレートおよびマクロを活用することで、GPU のスレッド・ブロック並列化および CPU の OpenMP 並列化・SIMD 化等のループ構造を共通化した。具体的には、ブロック型データ構造の再外ループに対しては、GPU のブロック (blockIdx) および CPU の OpenMP 並列 (#pragma omp parallel for) を割り当て、ブロック内格子の 3 重ループに対しては、GPU のスレッド (threadIdx) および CPU の SIMD 最適化 (#pragma ivdep) を割り当てることで、高速化と移植性を両立した。

Poisson 解法の主要な関数に対して、性能測定を実施した。計算機は東工大の TSUBAME3.0 の GPU (NVIDIA P100) と CPU (Intel Broadwell)、名古屋大学の Flow (Fujitsu A64FX) を使用した (表 1)。ここで、AXPY はベクトル和、Inner product はベクトルの内積、SpMV は行列・ベクトル積となる。隣接アクセスの無い AXPY および Inner product においては、全ての演算器においてループラインモデルの理論性能に対する実行性能の比率が 0.5~0.75 と妥当な結果が得られていることが確認できる (1 が理論性能)。7 点の隣接アクセスのある SpMV では、GPU および Intel CPU において、妥当な結果が得られている。一方で、A64FX では、ループラインモデルの理論性能と比較して 0.02 と非常に低い結果となった。その原因をコンパイラが出力する最適化レポートを読んで調査したところ、Fujitsu の ARM コンパイラでは、ループ内に含まれるブロック型 AMR 格子のインデックス計算用の関数が原因となり、内側の 3 重ループの最適化 (SIMD 化、パイプライン化等) が阻止されていることが確認された。以上の問題に対して、手動にて関数のインライン展開およびマスク処理による条件分岐の書き換えを実施したところ、ループラインモデルの理論性能に対して 0.58 と良好な結果が得られた。以上のプログラミングモデルの開発により、将来のエクサスケール計算機上において、原子力 CFD 解析コードの開発を効率的に実施できることを示した。

表 1 Poisson 方程式のカーネル性能：浮動小数点演算数  $f$  [Flop/grid]、メモリアクセス  $b$  [Byte/grid]、計算時間  $t$  [ns/grid]、ループライン性能  $t_{RL} = f / F + b / B$  [ns/grid] (SpMV の\*は最適化後の性能を示す)

PCG kernels	NVIDIA P100		Intel Broadwell (2 sockets)		Fujitsu A64FX (1 CMG)		
	$f / b$	$t$	$t_{RL}/t$	$t$	$t_{RL}/t$	$t$	$t_{RL}/t$
AXPY	3 / 24	0.045	0.75	0.26	0.62	0.13	0.74
Inner product	2 / 16	0.033	0.68	0.22	0.50	0.09	0.72
SpMV	13 / 72	0.141	0.72	1.19	0.41	7.45 *0.51	0.04 *0.58

##### (2) ブロック型データ構造に適したマルチグリッド前処理解法の性能測定

大規模高速計算の実現に向けてブロック型データ構造に適した Poisson 解法に対する MG 前処理解法を開発した。ここで、全ての MG 法の解像度において同じ木構造を共有すると共に、それぞれのブロックデータ内の格子を MG Lv=0 は  $8^3$ 、MG Lv=1 は  $4^3$ 、MG Lv=2 は  $2^3$  と設定した。MG 法と組み合わせる前処理手法として、Red-Black SOR (RB-SOR) 法に加えて、ブロック構造データのキャッシュを再利用した前処理手法 (CR-SOR) を新たに提案した。更に、Poisson 解法の更なる高速化として、前処理手法に混合精度演算手法を適用した。

原子力流体 CFD 問題に対する性能測定として、 $5 \times 5$  バンドル体系の気液多相流体問題に対する解析を実施した。図 3 に (A) 計算条件、(B) 主流方向の速度分布、および (C) スパン方向断面の流体率分布の瞬時値を示す。計算格子として、直交格子の  $384 \times 384 \times 6144$  (Leaf 数は  $48 \times 48 \times 768$ ) 相当を設定した。境界条件として、バンドル下部の領域に水・空気の流入境界を、バンドル上部に流出境界を設定した。

図 4 に上記の解析の収束履歴を示す。Poisson 解法として、P-CG 法および CRMG-CG 法を比較した。CRMG-CG 法の前処理として、倍精度計算 (fp64)、単精度計算 (fp32)、単精度計算・半精度通信 (fp32-fp16) を採用した。(A) の収束履歴より、P-CG 法の 900 回に対して、CRMG-CG 法では 100 回へと収束性を劇的に改善した。また、CRMG-CG 法の混合精度を用いた 2 つの条件では、いずれも倍精度と同様の収束履歴となることを確認した。(B) の計算時間の比較では、P-CG 法に対して倍精度の CRMG-CG 法で約 40%まで計算コストを大きく削減し、さらに前処理に単精度を採用することで、倍精度に対して 75%程度までコストを削減した。一方で、通信に半精度を用い



た条件 (fp32-16) では、単精度の条件とほとんど同じ計算時間となった。以上のブロック型データ構造に適した前処理手法の開発により、従来の P-CG 法の約 3.3 倍の高速化が達成された。

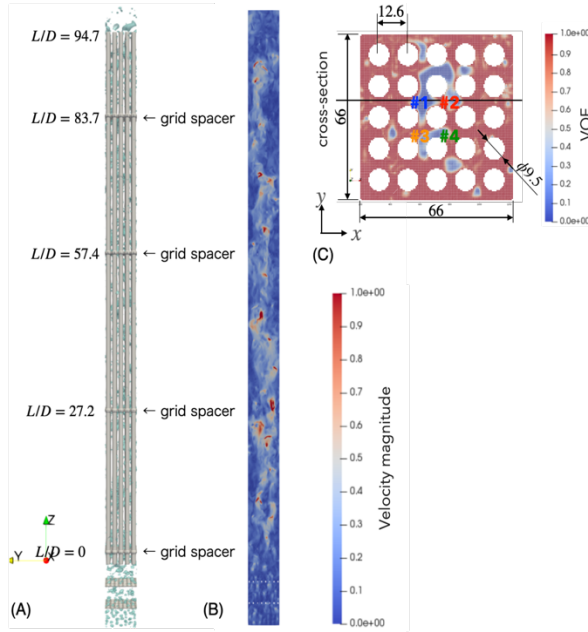
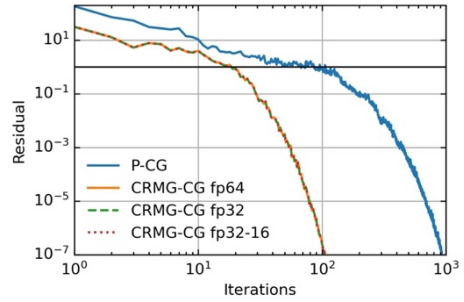
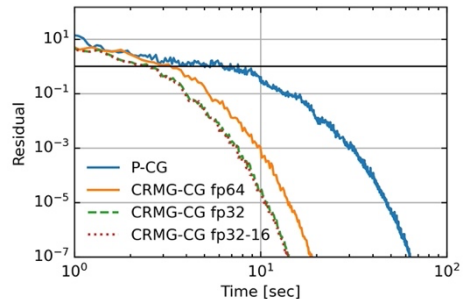


図3 (A) 5×5バンド算体系での気液海面、(B) バンドル間断面の速度分布、(C) スパン方向断面の流体率の可視化



(A) 反復回数-収束残差



(B) 計算時間-収束残差

図4 P-CG法(青線)およびCRMG-CG法(倍精度計算fp64:橙線、単精度計算fp32:緑破線、単精度計算-半精度通信fp32-16:赤点線)の収束履歴

### (3) 大規模な原子力CFD解析の実施

原子力工学分野の気液二相流体問題として、燃料集合体を模擬したバンドル体系に対する大規模気液二相流体解析を実施した(図3)。計算条件として、ブロック構造AMR格子版のJUPITER-AMRに0.58mm解像度(直交格子の $128 \times 128 \times 2,048$ 相当)を設定し、10秒間(約500,000ステップ)の解析を実施した。統計量として、サブチャンネル内のボイド率の確率分布を、直交格子版JUPITER(1mm格子解像度)および実験結果[Ren et al., Meas. Sci. Technol., Vol.29, (2018)]と比較した。解析の流動形式として、ボイド率が0付近の確率分布が最も高い気泡流(bubbly flow)の流入条件を設定した。この流動条件では、上昇する気泡の変形・合体・分離が活発に行われ、それが流れの速度場に大きな影響を与えるため、フェーズフィールドモデルに基づく高精度な気液界面捕獲手法を導入した。計算結果(図5)より、従来のJUPITERによる解析では、確率分布の大半を占めるボイド率が0から0.1の領域において、実験値を過小評価しているのに対して、本科研費課題にて新たに開発したJUPITER-AMRでは、実験結果を良く再現できることが確認された。一方で、ボイド率が0.1以上においては、実験結果を若干過大評価しており、この改善が今後の課題と考えている。以上のGPUに適したブロック型AMR格子に基づく多相流体解析手法JUPITER-AMRの開発により、CPUを用いた直交格子版JUPITERの約2倍の格子解像度の高速な原子力CFD解析が初めて実現された。

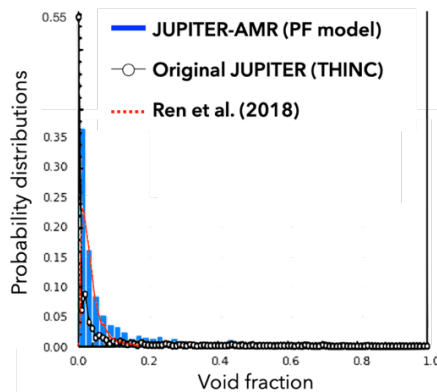


図5 サブチャンネル内のボイド率の確率分布。青線: JUPITER-AMR (0.58mm解像度)、白丸: 直交格子版 JUPITER (1mm解像度)、赤線: 実験結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Naoyuki Onodera, Yasuhiro Idomura, Yuta Hasegawa, Hiromasa Nakayama, Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki	4. 巻 179
2. 論文標題 Real-Time Tracer Dispersion Simulations in Oklahoma City Using the Locally Mesh-Refined Lattice Boltzmann Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Boundary-Layer Meteorology	6. 最初と最後の頁 187-208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10546-020-00594-x	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 Naoyuki Onodera, Yasuhiro Idomura, Yuta Hasegawa, Susumu Yamashita, Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki	4. 巻 -
2. 論文標題 GPU Acceleration of Multigrid Preconditioned Conjugate Gradient Solver on Block-Structured Cartesian Grid	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of HPC Asia 2021: The International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region	6. 最初と最後の頁 120-128
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3432261.3432273	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 N. Onodera, Y. Idomura, Y. Ali, S. Yamashita, T. Shimokawabe, T. Aoki	4. 巻 -
2. 論文標題 GPU-acceleration of locally mesh allocated two phase flow solver for nuclear reactors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2020 (SNA + MC 2020)	6. 最初と最後の頁 210-215
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 Ali Yussuf, Onodera Naoyuki, Idomura Yasuhiro, Ina Takuya, Imamura Toshiyuki	4. 巻 2019
2. 論文標題 GPU Acceleration of Communication Avoiding Chebyshev Basis Conjugate Gradient Solver for Multiphase CFD Simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE/ACM 10th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems (Scala)	6. 最初と最後の頁 1 - 8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/Scala49573.2019.00006	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 N. Onodera, Y. Idomura, Y. Asahi, Y. Hasegawa, S. Yamashita, T. Shimokawabe, T. Aoki
2. 発表標題 Multigrid Poisson Solver for a Block-Structured Adaptive Mesh Refinement Method on CPU and GPU supercomputers
3. 学会等名 Compsafe 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野寺 直幸, 井戸村 泰宏, 長谷川雄太, 山下晋, 下川辺 隆史, 青木 尊之
2. 発表標題 ブロック型適合細分化格子を用いた気液二相流体解析手法の開発
3. 学会等名 原子力学会2021年春の年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野寺 直幸, 井戸村 泰宏, 朝比 祐一, 下川辺 隆史, 青木 尊之
2. 発表標題 ブロック型適合細分化格子でのPoisson解法のGPU・CPU・ARMプロセッサに対する性能測定
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 小野寺 直幸, 井戸村 泰宏, ユスフ アリ, 下川辺 隆史, 青木 尊之
2. 発表標題 ブロック型適合細分化格子でのPoisson解法のGPU高速化
3. 学会等名 計算工学講演会論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野寺 直幸, 井戸村 泰宏, アリ ユスフ, 山下 晋, 伊奈 拓也, 今村 俊幸
2. 発表標題 GPUによる多相流解析コードJUPITERのPoisson方程式の高速化
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

〔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	井戸村 泰宏  (Idomura Yasuhiro)  (00354580)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・室長   (82110)	
研究分担者	真弓 明恵  (Mayumi Akie)  (20791396)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究職   (82110)	
研究分担者	下川辺 隆史  (Shimokawabe Takashi)  (40636049)	東京大学・情報基盤センター・准教授   (12601)	
研究分担者	山田 進  (Yamada Susumu)  (80360436)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究主幹   (82110)	
研究分担者	山下 晋  (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)	



6. 研究組織（つづき）

	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	河村 拓馬  (Kawamura Takuma)  (90718248)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・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