

一般セッション | III. 核分裂工学：305-1 計算科学技術

2025年3月14日(金) 14:45 ~ 16:30 C会場(Zoomルーム3)

[3C09-14] シミュレーション2

座長:多田 健一(JAEA)

14:45 ~ 15:00

[3C09]

CFDシミュレーション制御のための遠隔VR in-situ 可視化

*下村 和也¹、河村 拓馬¹、井戸村 泰宏¹、尾崎 司 (1. 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)

15:00 ~ 15:15

[3C10]

DEM-CFD法の伝熱モデルの妥当性確認と縮約モデルの開発

*今井 宏樹¹、今谷 俊貴¹、酒井 幹夫¹ (1. 東大)

15:15 ~ 15:30

[3C11]

マルチフェーズフィールド法を用いた気泡流動解析へのPID制御の適用

*杉原 健太¹、シトンプル ヨス¹、井戸村 泰宏¹、山下 晋¹ (1. JAEA)

15:30 ~ 15:45

[3C12]

Validation of a Two-Phase Lattice Boltzmann Method with Local Mesh Refinement for Gas Entrainment Simulation in Fast Reactors

*Yos Panagaman Sitompul¹, Kenta Sugihara¹, Seiya Watanabe², Yasuhiro Idomura¹ (1. JAEA, 2. Kyushu Univ.)

15:45 ~ 16:00

[3C13]

Development of a Two-Way Weak Coupling Code for Fluid-Structure Interaction Analysis of the Beam Window in Accelerator-Driven Systems

*Ilham Muhammad¹, Susumu Yamashita¹ (1. JAEA)

16:00 ~ 16:15

[3C14]

マルチカノニカル法によるレアイベント発見手法の開発

*板倉 充洋¹ (1. JAEA)

16:15 ~ 16:30

座長持ち時間

CFD シミュレーション制御のための遠隔 VR in-situ 可視化

Remote VR in-situ Visualization for steering CFD simulations

*下村 和也¹, 河村 拓馬¹, 井戸村 泰宏¹, 尾崎 司¹

¹国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

大規模シミュレーションを設計最適化や逆問題解析に活用するため、VR 空間での In-situ 制御が重視されている。本研究では、VR による In-situ 可視化が可能な粒子ベースの可視化技術 PBVR を In-situ 制御向けに拡張し、スーパーコンピュータ上の流体シミュレーションに適用して有効性を検証した。

キーワード：可視化, VR, In-situ, ステアリング

1. 背景

In-situ 制御では、シミュレーションと同時に (In-situ) 可視化して、ユーザが観察し、計算条件の変更にフィードバックする。しかし既存の可視化アプリを利用して In-situ 制御を構築することは、大規模データの転送や可視化処理のコストがボトルネックとなり困難である。本研究では計算データを可視化用粒子に圧縮することで対話的な可視化が可能な IS-PBVR を In-situ 制御向けに拡張する手法を開発した。

2. 粒子ベースの In-situ 制御技術

IS-PBVR[1][2]は、計算ノードで可視化用粒子を生成する「粒子生成プログラム」、ログインノードで可視化用粒子と可視化パラメータを送受信する「通信プログラム」、そしてユーザ PC 上で可視化用 UI を提供する「In-situ クライアント」で構成される。通信プログラムが In-situ クライアントからの受信内容をストレージ上にファイル出力し、粒子生成プログラムがストレージを定期的にチェックすることで対話処理を実現する。また、VR ライブラリ OpenXR を用いた実装により汎用ヘッドマウントディスプレイ (HMD) による VR 可視化が可能である。本研究では IS-PBVR の対話処理機構を拡張して In-situ 制御を実現する。また全体を俯瞰するための 3 次元の可視化 (科学可視化) だけでなく、定量的な値を把握するための情報可視化機能を追加する。In-situ 制御および情報可視化のために、In-situ クライアントから計算条件や観測点、観測量を指定し、粒子生成プログラムへ送信する。粒子生成プログラムは可視化処理と同時に観測データを取得し、In-situ クライアントへ送信する。図 1 に概要を示す。計算条件や観測点/量を指定するための UI は 2 次元ディスプレイ向けに開発する。そして

VR 空間では HMD のバーチャルデスクトップの機能を利用して UI を表示し、VR コントローラーで値を設定する。

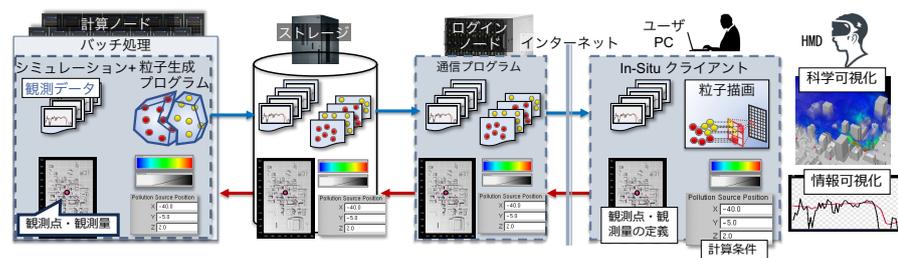


図 1 IS-PBVR の In-situ 制御機構

3. 実験と結論

HMD として Meta

Quest3 を利用し、開発した技術を JAEA のスパコン SGI8600 上の流体計算に適用した。そして、VR 空間で In-situ 可視化による時系列アニメーションと対話的な計算パラメータの変更が可能であることを確認した。講演では、大規模風況解析コード CityLBM を利用した In-situ 制御のデモを紹介する。

参考文献

[1] Takuma Kawamura, and Yasuhiro Idomura. Journal of Visualization, 2023.

[2] Takuma Kawamura, Naohisa Sakamoto, et. al.. Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, 2023

*Kazuya Shimomura¹, Takuma Kawamura¹, Yasuhiro Idomura and Tsukasa Ozaki¹

¹Japan Atomic Energy Agency

DEM-CFD 法の伝熱モデルの妥当性確認と縮約モデルの開発

Validation of the heat transfer model in DEM-CFD method and development of the reduced-order model

今井 宏樹^{*1}, 今谷 俊貴¹, 酒井 幹夫¹

¹ 東京大学

原子力分野において粉体による熱輸送は極めて重要な研究テーマである。原子力分野では過酷環境が対象となるためシミュレーションによる伝熱現象の評価が求められている。他方、既存の計算手法では計算コストが本質的な問題となる。そこで、著者のグループでは粉体の伝熱現象を模擬するための縮約モデルを開発し、妥当性確認を実施した。

キーワード：熱伝導、DEM-CFD、オイラー的解法、固定層、縮約モデル

1. 緒言

近年では高温ガス炉、廃止措置、シビアアクシデント現象など、原子力工学において粉体による熱輸送が研究されている^[1]。それに伴い、シミュレーションによる伝熱現象の評価や理解が求められているが、既存手法では複雑なモデルの導入に伴う計算コストの増大などの問題を抱えている。そこで、著者のグループでは従来よりも簡便な設定により粉体の伝熱現象を模擬する計算手法を開発した。

2. 数値計算

2-1. 妥当性確認

本研究では、著者らのグループで開発した FELMI コードを用いて、DEM-CFD 法による伝熱シミュレーションを実行した。本研究で対象とした体系として高温の鉄球がパッキングされた固定層に低温空気を流入させ、固体粒子の温度が低下する過程を模擬した。その結果、計算から得られた流れ方向の固体温度分布および出口気体温度の時間変化が共に実験結果^[2]と一致した。

2-2. 縮約モデル

前述の計算結果を低次元化し縮約モデルを構築することで伝熱現象の高速な計算が可能となる。本研究では得られた温度分布について固有直交分解を行い、固有値と固有ベクトルを求めた。さらに、その固有ベクトルを基底とし、放射基底関数を用いることで縮約モデルを構築した。少ないモードを用いることによって、構築した縮約モデルが DEM-CFD 法から得られる結果を正しく再現できることを示した。

3. 結論

本研究では著者らのグループが開発した FELMI コードを用いて固定層内の伝熱現象を解析し、その妥当性確認を行った。さらに、計算結果に基づき固有直交分解を行って縮約モデルを構築し、DEM-CFD 法の解析結果を正しく再現できることを示した。

謝辞

本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118067246 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] R. Li et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* **61**, 285–306 (2024).
- [2] J. Yang et al., *Chem. Eng. Sci.* **71**, 126–137 (2012).

^{*}Hiroki Imai¹, Toshiki Imatani¹ and Mikio Sakai¹

¹ Univ. of Tokyo

マルチフェーズフィールド法を用いた気泡流動解析へのPID制御の適用

Application of PID control to bubble flow analysis using multi-phase field method

*杉原 健太¹, シトンプル ヨス¹, 井戸村 泰宏¹, 山下 晋¹

¹ 日本原子力研究開発機構発機構

周期境界条件を用いた円管内の気泡流計算において、流れは領域全体に働く外力によって駆動される。境界における流速を固定することができないため、指定流量の計算を実施するためには外力を調節する必要がある。そこで制御理論で広く利用されているPID制御を用いることにより指定流量の解析を可能とした。

キーワード：気液二相流、周期境界、Multi-Phase Field 法、PID 制御

1. 緒言

気泡同士の合体を抑制することが可能な界面捕獲手法であるマルチフェーズフィールド法(以降MPF法)の基礎検証問題として円管内気泡流解析を実施し、実験結果との比較を進めている。実験における直径40mm、長さ3.17mの領域をそのまま解析領域とするのは非効率的であるため、本計算では周期境界条件を用いて定常解を求める。周期境界条件を適用すると計算領域の入口と出口が繋がりに、外部からの流入出がないため、時間がたつにつれて全体の流量が変動してしまい実験条件を再現できない。そこで、制御理論で広く用いられているPID制御^[1]を利用した圧力勾配の動的制御により、指定流量の流れを再現した。

2. 円管内気泡流解析に対するPID制御の適用

図1のように流路方向を周期境界条件とし、重力を鉛直下方向に定義した。参考文献[2]と同様に、基礎方程式のNavier-Stokes方程式の外力項を $\mathbf{F}_b = -\beta \mathbf{z} + (\rho - \rho_{ave}) \mathbf{g}$ のように系全体に一樣に働く力 β (平均圧力勾配と重力加速度の合算)と浮力項で定義した。Colin等による実験論文[3]の下降気泡流条件”D3”と同様に、ボイド率7.5%、気泡径4.2mm、体積流束0.823m/sを設定した。図1の計算領域に対して直交格子(256x256x384)を用いた。計算の各ステップで計測した体積流束 j と目標値 j_{target} との差を制御偏差 $e = j - j_{target}$ 、操作量を β と定義して e が減少するようにフィードバック制御を行なった。図2に示すように体積流束はほぼ一定値を保ち、約0.5sで定常状態となった。また、本解析のボイド率と平均流速を実験結果[3]と比較した結果、良い一致が確認された。

3. 結論

本稿ではMPF法を用いた気泡流解析の流量設定に対してPID制御を適用した。円管内の下降気泡流問題に適用し、Colin(2012)らの実験結果と比較した結果、妥当なボイド率分布が得られた。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費(24K14973)および学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(jh240071)より支援を頂いた。計算の一部は日本原子力研究開発機構の大型計算機「HPE SG18600」を使用した。記して謝意を示す。

参考文献 [1] 須田信英, 環境システム計測制御学会誌, 第8巻4号, 2004.

[2] J.Lu and G.Tryggvason, *J.Fluid Mech.*, Vol.732, pp.166-189, 2013.

[3] C.Colin et al., *J.Fluid Mech.*, Vol.711, pp.469-515, 2012.

*Kenta Sugihara¹, Yos Sitompul¹, Yasuhiro Idomura¹ and Susumu Yamashita¹

¹Japan Atomic Energy Agency.

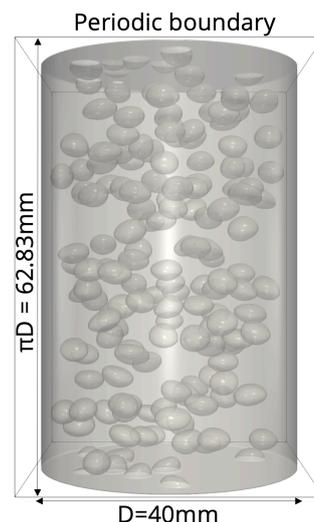


図1 気泡流解析領域

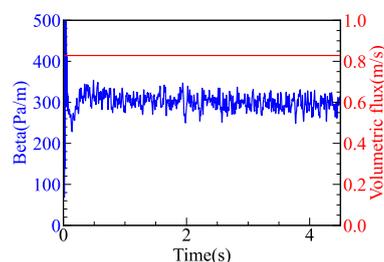


図2 β と体積流束の時間変化

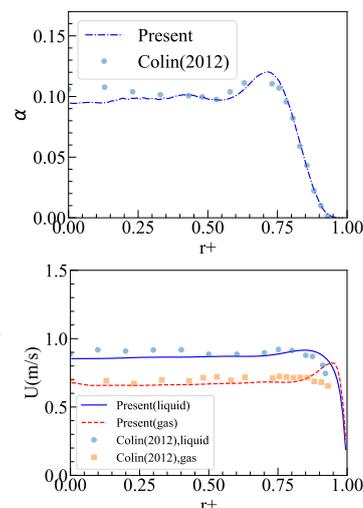


図3 半径方向のボイド率(上)と平均流速分布(下)

Validation of a Two-Phase Lattice Boltzmann Method with Local Mesh Refinement for Gas Entrainment Simulation in Fast Reactors

*Yos Sitompul¹, Kenta Sugihara¹, Seiya Watanabe², and Yasuhiro Idomura¹

¹Japan Atomic Research Agency, ²Kyushu University

This study addresses gas entrainment (GE) simulation in fast reactor using a two-phase Lattice Boltzmann Method (LBM) with Local Mesh Refinement (LMR). The approach enhances simulation accuracy and reduces computational time. It demonstrates LBM-LMR's potential for efficient and reliable analysis of complex flow phenomena in reactor systems.

Keywords: validation, two-phase LBM, local mesh refinement, gas entrainment, fast reactors

1. Introduction

Argon cover GE prevention is crucial for safe sodium-cooled fast reactor operation. At JAEA, we simulated a benchmark GE experiment using a two-phase LBM, accurately predicting velocity profiles and GE depths with a uniform grid [1]. To improve efficiency, LMR is being developed. This study focuses on validating, optimizing, and evaluating the LBM-LMR approach.

2. Two-phase LBM-LMR Validation

We implemented a two-phase LBM for gas-liquid interface simulation and validated it with Moriya et al.'s experiment [2] (Fig. 1). It accurately reproduced flow profiles and GE depths using a grid spacing $\Delta x < 0.625$ mm. Efficiency was improved with multi-GPU and LMR algorithms using an octree-based data structure and Morton curve domain decomposition [3]. A multi-time-step approach and rescaling of distribution functions were employed to enhance accuracy and efficiency. Using two-phase LBM-LMR with three refinement levels, we could reduce computational cells by 50% and achieved a $1.5\times$ speedup, solving the problem in about 20 hours, and obtained good agreement of the vortex center location, velocity profiles, and GE depths with the uniform grid calculation.

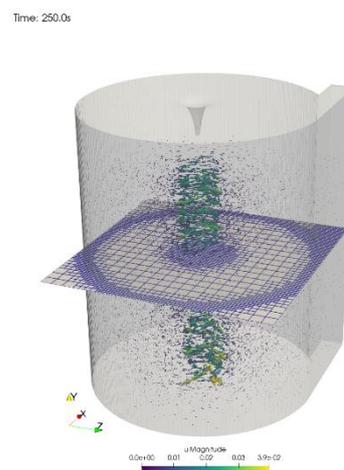


Fig. 1. LBM-LMR calculation of Moriya et al.'s experiment.

3. Conclusion

We developed a two-phase LBM-LMR method for simulating gas entrainment in fast reactors. It achieves accurate results and reduces computational costs.

Acknowledgements: We express our gratitude for the following support: Part of this research was supported by the JHPCN Exploratory Project (EX24308). Part of the calculations were performed using the Japan Atomic Energy Agency's supercomputer "HPE SGI8600."

References

- [1] Y. Sitompul, K. Sugihara, N. Onodera, and Y. Idomura, *EPJ Web of Conferences*, Vol. 302, 2024, pp. 05004
- [2] S. Moriya, *Denryoku Chuo Kenkyusho Hokoku*, 1998.
- [3] S. Watanabe, and T. Aoki. *Computer Physics Communications*, Vol. 264, 2021, pp. 107871.

Development of a Two-Way Weak Coupling Code for Fluid-Structure Interaction Analysis of the Beam Window in Accelerator-Driven Systems

*Muhammad Ilham¹ and Susumu Yamashita¹

¹JAEA

The two-way weak coupling code was developed between JUPITER for thermal-hydraulic and FrontISTR for structural analysis to perform fluid-structural analysis of the accelerator-driven system beam windows.

Keywords: Computational fluid dynamics; Fluid-structure interaction; Accelerator-driven system; Beam window; Two-way coupling; Numerical simulation

1. Introduction

In designing the ADS beam window (BW), the vibration and deformation of the BW due to the influence of fluid flow around it needs to be investigated since it may lead to the degradation of the beam window's integrity. Therefore, JAEA developed a platform to analyze fluid dynamics and structural mechanics in fluid-structure interaction (FSI) phenomena. This platform utilizes the in-house code JUPITER [1] to analyze the thermal-hydraulic field, and the open-source finite element code FrontISTR [2] to perform structural analysis. The results from the coupling of JUPITER and FrontISTR, which examined the influence of thermal fluid around the BW, were presented in previous work [3]. The one-way method was used, where fluid force was applied to the structure, but the deformation did not affect the fluid flow. The results showed deformation of the BW, but it is not sufficient for a comprehensive analysis of the FSI phenomenon. The two-way method exchanges information between fluid flow and structural deformation, making it better suited for capturing the full complexity of FSI. Therefore, in this work, the two-way method is implemented. In the presentation, the preliminary analysis of the BW deformation will be presented.

2. FSI method

The JUPITER code uses a linear orthogonal grid to calculate the pressure field due to flow. The resulting pressure distribution on the BW surface is then applied to the unstructured grid of FrontISTR to compute BW deformation. The conversion of the pressure field from JUPITER output to FrontISTR input is performed using a tool code based on VTK [4]. After FrontISTR completes the calculation, the newly deformed BW geometry is converted to an STL file and send back to JUPITER for the next step. Here, we successfully developed the converter to enable the two-way coupling. For the preliminary analysis, the two-way method is applied to the ADS BW case. The computational domain and geometry (Fig. 1) were based on the ADS BW experiment conducted at Tsukuba University [5]. We are confirming the applicability of the two-way method using the experimental conditions.

3. Conclusion

The two-way weak coupling code of JUPITER and FrontISTR was developed to investigate the FSI for ADS BW. The preliminary results obtained using the two-way method will be shown in the presentation.

References

- [1] S. Yamashita, et al., Nucl. Eng. and Design, vol. 322, pp. 301-312 (2017). [2] <https://www.frontistr.com>. [3] S. Yamashita, et al., AESJ 2024 Spring. [4] <https://vtk.org>. [5] H. Monji, et al., <https://doi.org/10.1299/jsmekanto.2023.29.17H18>

*Muhammad Ilham¹, Susumu Yamashita¹ - ¹JAEA

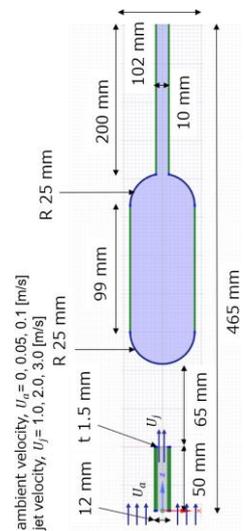


Fig.1 Computational domain and geometry.

マルチカノニカル法によるレアイベント発見手法の開発

Development of methodology for the detection of rare events using multi-canonical method

*板倉 充洋¹¹JAEA

再生可能エネルギーの変動に対応するために、原子力プラントの運転状況を頻繁に変更した場合、操作ミスが連続するようなレアイベントによるリスク事象が考えられるが、それをシミュレーション等で発見するには膨大なケースの計算が必要になる。本講演では単純化したテスト問題として、10次元以上の探索空間において、多数の極値をもつ関数である $\sin(r)/r$ の相互作用を持つ多粒子系を考え、マルチカノニカル法の一つである Wang-Landau アルゴリズムによりレアイベントに対応する極値を求める手法について報告する。

キーワード：モンテカルロ法、リスク評価、マルチカノニカル

1. 緒言

JAEA では長野大学、日揮グローバルと連携し、原子力システム事業課題「再エネ調和型次世代原子力プラント実現のための DX」において、DX 技術を活用し、安全上問題となるような禁止プラント操作を自動で探索する技術の開発を行っている。プラント状態をシミュレーションする各種コードを用い、様々な操作に対する炉心温度等の変化を計算していくことになるが、計算コストが高いため多数のケースに対応することは困難である。そこで機械学習技術を用いて計算コストの低い代替モデルを構築するとともに、探索空間を徐々に広げ段階的に学習していく手法を開発する予定である。一般的に、一連の操作手順が安全上問題となるような場合は確率的には希少な事象であり、数学的には数十の次元をもつ探索空間において限られた領域に対応すると考えられる。本課題では機械学習手法と希少事象（レアイベント）発見手法の二つを開発していくが、本講演では後者について Toy モデルを用いた試行の結果を示す。

2. 研究手法

解析対象として、計算コストが低く、かつ通常的手法では容易に最小値が求められない多次元の関数を構築した。基本となるのは一次元の関数 $F(r)=\sin(r)/r$ で、図1に示すように多数の極値を持っている。二次元空間に N 個の粒子を配置し、各粒子間に距離に応じたエネルギー $F(R)$ を与えることで、 $2N$ 次元空間で多数の極値を持つ関数を構築することができる。この関数に対して Wang-Landau アルゴリズムを適用し、レアイベントに対応した低エネルギー状態の探索を行った。

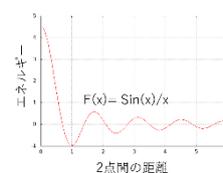


図1：関数 $\sin(r)/r$ 、最小値-1を $r=1$ で持つよう規格化したもの。

3. 結果・結言

Wang-Landau アルゴリズムは一度エネルギーの高い(評価の低い)状態にリセットしてからエネルギーの低い(高い評価値を持つ)値を探索することを自動的に繰り返し、徐々に評価最高値を更新していく手法である。最終的に図2のような粒子が等間隔で配列した配置が得られた。今後はより現実の希少事象に則したモデルを開発していく予定である。

※本発表には、原子力システム事業課題「再エネ調和型次世代原子力プラント実現のための DX」の成果の一部を使用している。

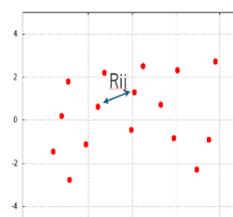


図2：関数 $F(R)$ のエネルギーで相互作用する二次元空間中の粒子 16 個の配置。

* Mitsuhiro Itakura¹¹JAEA