

Oral presentation | III. Fission Energy Engineering : 305-1 Computational Science and Engineering

📅 Wed. Mar 16, 2022 9:30 AM - 10:55 AM JST | Wed. Mar 16, 2022 12:30 AM - 1:55 AM UTC | 🏠 Room B

[1B01-05] Advanced Simulation

Chair: Yoritaka Iwata (Kansai Univ.)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[1B01] Prediction of Flow Behavior with Machine Learning Using LSTM

Application to Unsteady Backward-facing Step Flow

*Aya Kitoh¹, Kei Maeshima², Kenya Takiwaki², Hideki Horie² (1. TOSHIBA, 2. TOSHIBA ESS)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[1B02] Implementation of Ensemble Data Assimilation for Turbulent Flow Simulation based on Lattice Boltzmann Method

*Yuta Hasegawa¹, Naoyuki Onodera¹, Yuuichi Asahi¹, Yasuhiro Idomura¹ (1. JAEA)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[1B03] Development of Advanced Neutronics/Thermal-Hydraulics Coupling Simulation System

(4)Neutronics/Thermal-Hydraulics Coupling Simulation Using MVP and NASCA

*Hiroshi Akie¹, Kenichi Tada¹, Tomohiro Kamiya¹, Ayako Ono¹, Yasunobu Nagaya¹, Hiroyuki Yoshida¹, Tomohiro Kawanishi (1. JAEA)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[1B04] A study of appropriate Phase-Field variables for gas-liquid two-phase flow simulations

*Kenta Sugihara¹, Naoyuki Onodera¹, Yasuhiro Idomura¹, Susumu Yamashita¹ (1. JAEA)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[1B05] A stable free-surface-detection method for consistent high-order MPS method

*Guangtao Duan¹, Mikio Sakai¹ (1. Univ. of Tokyo)

10:45 AM - 10:55 AM JST | 1:45 AM - 1:55 AM UTC

Time reserved for Chair

LSTM による流動挙動の予測 非定常バックステップ流れへの適用

Prediction of Flow Behavior with Machine Learning Using LSTM

Application to Unsteady Backward-Facing Step Flow

*鬼頭 理¹, 前島 啓², 滝脇 賢也², 堀江 英樹²

¹株式会社東芝, ²東芝エネルギーシステムズ株式会社

近年、機械学習の流体解析への適用手法は著しい発展を遂げており、本研究では原子力関連機器の流体設計・開発支援のために機械学習の流体解析への適用性を検討している。今回、CNN-AE（畳み込み型オートエンコーダー）と LSTM (Long short-term memory) を非定常流動の予測に適用し、その有用性を評価した。

キーワード：機械学習、数値解析、CNN、LSTM、バックステップ、流体、非定常

1. 緒言

本研究では機械学習の流体解析への適用性検討の一環として、これまでにオートエンコーダーや Convolutional LSTM を定常・非定常バックステップ流れに適用した評価を行い、良好な結果を報告した^{[1][2]}。本報告では、非定常バックステップ流れの数値流体解析（CFD）結果に対して、CNN-AE により次元圧縮したデータに LSTM を適用し、流れの時間発展を予測した。

2. 流動挙動予測

2-1. 学習・予測

渦放出領域を切り出した CFD の時系列速度場データを教師データとした。まず、CNN-AE の学習を行い、次に CNN-AE の中間層を用いて LSTM の学習を行い、時間発展速度場を予測するネットワークを構築した。

2-2. 結果

図 1 に示すように、機械学習によって渦生成に伴う流れの諸現象が明瞭に予測されている。図 2 に示すように、 $t = t_1 + 24\Delta t$ においても CFD と機械学習による予測の差はほぼ 6%未満であり、Convolutional LSTM^[2]より予測精度が大幅に向上した。

3. 結論

流路内における渦の放出・拡散などを伴う非定常流れを対象に、CNN-AE で次元圧縮したデータに対して LSTM を適用した結果、有用な予測性能が得られた。

参考文献

[1] 鬼頭ら、「畳み込みニューラルネットワークによる流動挙動の予測」、原子力学会 2021 年春の年会、2G02

[2] 鬼頭ら、「Convolutional LSTM による流動挙動の予測」、原子力学会 2021 年秋の大会、3G03

*Aya Kitoh¹, Kei Maeshima², Kenya Takiwaki² and Hideki Horie²

¹TOSHIBA CORPORATION, ²TOSHIBA ENERGY SYSTEMS & SOLUTIONS CORPORATION

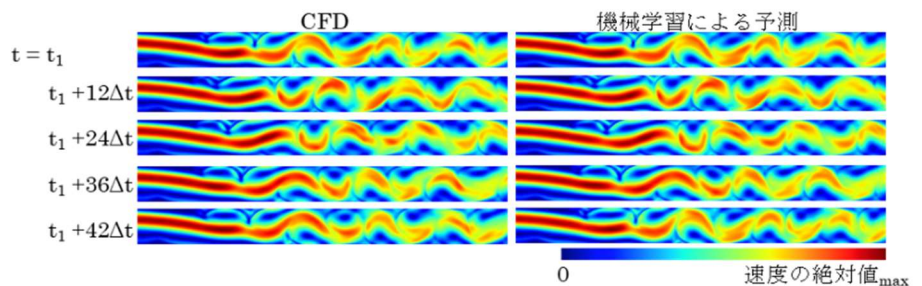


図 1 任意の時刻 t_1 からの CFD と機械学習による予測の比較

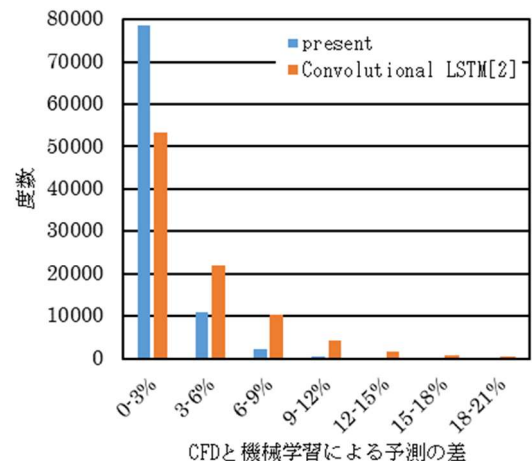


図 2 $t = t_1 + 24\Delta t$ における CFD と機械学習による予測の差のヒストグラム

格子ボルツマン法に基づく乱流計算に対するアンサンブルデータ同化の実装

Implementation of Ensemble Data Assimilation for Turbulent Flow Simulation

based on Lattice Boltzmann Method

*長谷川 雄太¹, 小野寺 直幸¹, 朝比 祐一¹, 井戸村 泰宏¹

¹ 日本原子力研究開発機構

格子ボルツマン法に基づく乱流計算に対して、アンサンブルデータ同化の一手法である局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) を実装した。二次元等方性乱流を対象としたデータ同化実験を行い、LETKF がより単純なデータ同化モデルであるナッジングに比べて高い精度を示すことを確認した。

キーワード：アンサンブルデータ同化, 格子ボルツマン法, 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ

1. 緒言

筆者らは、汚染物質拡散解析の即時予測を実現するため、GPU で高速に計算できる格子ボルツマン法に基づく風況解析コード『CityLBM』の開発を進めている^[1]。観測と連携した予測精度の向上に向けて、気象分野で発展してきたアンサンブルデータ同化の導入を検討しているが、微気象的な乱流を対象としたラージエディシミュレーション (LES) に対するアンサンブルデータ同化の既往研究は少ない。そこで本稿では、乱流データ同化の基礎的な検討として、二次元等方乱流にアンサンブルデータ同化を実装し、精度検証を行った。

2. 二次元等方性乱流に対するデータ同化実験

アンサンブルデータ同化の精度検証のため、格子ボルツマン法を用いて二次元等方乱流を実装した。データ同化手法として、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF)^[2] を実装した。計算条件として、 128×128 の計算格子に対し、 2×2 に間引いた観測点を設定した。計算結果を図 1 に示す。(b) データ同化なし、(c) ナッジングでは正解値と全く異なる結果となるのに対し、(d) LETKF は正解値に近い結果を再現し、その計算誤差は、(b) RMSE=0.328、(c) RMSE=0.231 に対して (d) RMSE=0.171 に抑制されている。

3. 結論

本稿では、二次元格子ボルツマン法に局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) を実装し、精度検証を行なった。LETKF は、ナッジングデータ同化よりも高い精度を示し、 128×128 格子に対して 2×2 と極めて少ない観測点しか得られない場合であっても良好なデータ同化を行うことが可能であることを示した。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費若手研究 (21K17755) および学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (jh210003, jh210049) より支援を頂いた。記して謝意を示す。

参考文献

[1] N. Onodera, et al., *Boundary Layer Meteorology*, **179**, 187–208 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00594-x>

[2] B. R. Hunt, et al., *Physica D*, **230**, 112–126 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.physd.2006.11.008>

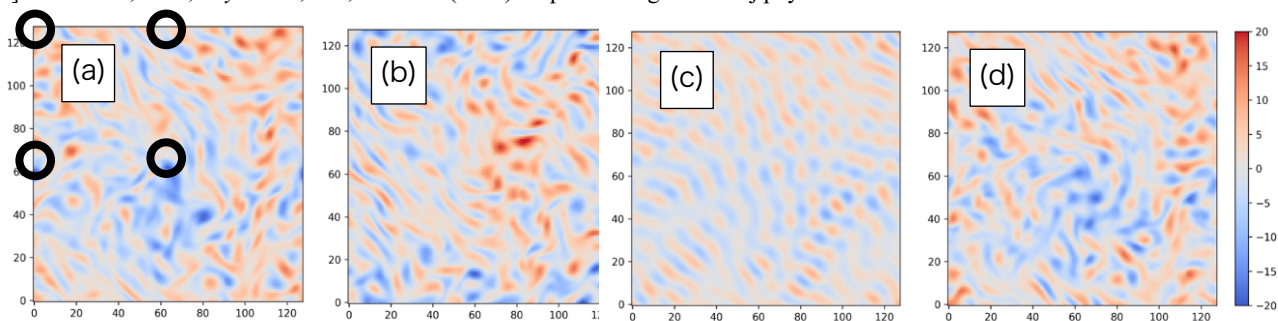


図 1 二次元等方乱流のデータ同化実験における渦度分布の瞬時値、(a) 正解値 (Nature run)、(b) データ同化なしの計算、(c) ナッジングデータ同化、(d) LETKF。ただし、(a) 中の丸印は観測点位置を表す。

*Yuta Hasegawa¹, Naoyuki Onodera¹, Yuuichi Asahi¹, and Yasuhiro Idomura¹

¹Japan Atomic Energy Agency

先進的核熱連成シミュレーションシステムの開発

(4) MVP/NASCA による核熱連成

Development of Advanced Neutronics/Thermal-Hydraulics Coupling Simulation System

(4) Neutronics/Thermal-Hydraulics Coupling Simulation Using MVP and NASCA

*秋江 拓志¹, 多田 健一¹, 神谷 朋宏¹, 小野 綾子¹, 長家 康展¹, 吉田 啓之¹, 川西 智弘¹

¹JAEA

JAEA では、軽水炉の設計高度化、安全性の向上を目的として、先進的核熱連成シミュレーションシステムの開発を進めている。本報告では、連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP¹⁾とサブチャンネル解析コード NASCA²⁾を用いた核熱連成シミュレーションシステムについて報告する。

キーワード：核熱連成シミュレーション, MVP, NASCA, 数値解析

1. 目的

先進的核熱連成シミュレーションシステムでは、様々な核計算コード、熱流動計算コードを自由に組み合わせた核熱連成シミュレーションの実現を目指している。これにより、単一集合体体系においては JUPITER や TPFIT などの機構論的熱流動解析コードを、全炉心体系においては NASCA や ACE-3D などのサブチャンネルコードを用いるなど、計算体系によって最適な計算コードを選択することが可能となる。

炉心体系での詳細な核熱連成を現実的な計算時間で実現するためには、NASCA のようなサブチャンネル解析コードとの連成が望ましい。そこで、MVP/NASCA を用いた核熱連成における課題を洗い出すため、プロトタイプシミュレーションシステム³⁾に MVP/NASCA の核熱連成機能を実装した。

2. MVP/NASCA を用いた核熱連成シミュレーションシステムの概要

開発したシステムは、BWR の 8×8 STEP-II、9×9 STEP-IIIA、STEP-IIIB の単一集合体体系の解析を対象としている。幾何形状や濃縮度分布については、OECD/NEA の燃焼クレジットベンチマーク Phase III-B⁴⁾や Phase III-C⁵⁾など、公開文献を参考に作成した。図 1 に 8×8 STEP-II 燃料の計算体系の例を示す。なお、燃料棒内やサブチャンネル内の詳細分割については、MVP/JUPITER や MVP/TPFIT の結果により検討する。

本システムでは、MVP の出力として与えられる燃料棒毎の核分裂率から燃料棒出力分布を NASCA に、NASCA の出力として与えられるサブチャンネル毎の水密度から ¹H や ¹⁶O の原子数密度を計算し MVP に入力することで核熱連成解析を行う。本システムを用いて、核熱結合計算の反復回数や、

定常とみなせるまでの熱流動計算の時間などの最適化などに取り組む予定である。発表では、開発したシステムの概要に加え、連成解析結果についても紹介する。

参考文献

- 1) 長家 康展ら、「MVP/GMVP Version 3」、JAEA/Data-Code 2016-018 (2017).
- 2) 堀田 亮年ら、「サブチャンネルコード NASCA による BWR 燃料熱的性能評価の現状」、日本機械学会論文集(B 編)、76 巻 763 号 (2010).
- 3) 多田 健一ら、「先進的核熱連成シミュレーションシステムの開発 (3)プロトタイプシミュレーションシステムの開発」、日本原子力学会 2021 年秋の大会 3G05 (2021).
- 4) H. Okuno, et al., “OECD/NEA burnup credit criticality benchmarks phase III-B,” JAERI-Research 2022-001 (2002).
- 5) K. Suyama, et al., “Burn-up credit criticality safety benchmark phase III-C,” NEA/NSC/R(2015)6 (2016).

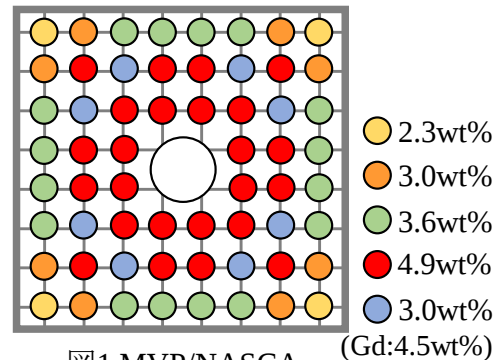


図1 MVP/NASCA
連成計算体系の例⁴⁾
(8×8 STEP-II)

* Hiroshi Akie¹, Kenichi Tada¹, Tomohiro Kamiya¹, Ayako Ono¹, Yasunobu Nagaya¹, Hiroyuki Yoshida¹ and Tomohiro Kawanishi¹ ¹JAEA

気液二相流計算における適切な Phase-Field 変数の検討

A study of appropriate Phase-Field variables for gas-liquid two-phase flow simulations

*杉原 健太¹, 小野寺 直幸¹, 井戸村 泰宏¹, 山下 晋¹

¹ 日本原子力研究開発機構

多相多成分熱流動解析コード JUPITER[1]の界面追跡手法に Phase-Field 法[2]を適用し、従来手法の THINC/WLIC 法[3]を用いた結果で発生していた流体率剥がれ問題を解決した。液滴振動問題の理論解と比較することにより適切な Phase-Field 変数を調査して界面幅およびモビリティの値が概ね明らかになった。

キーワード：気液二相流体、界面追跡法、Phase-Field 法

1. 緒言： JUPITER コードでは界面追跡手法として THINC/WLIC 法を用いており、過酷事故解析における炉内熔融物の界面の移動を数値散逸が少なく高精度に計算することを可能にしている。しかし、気液二相流のような界面の合体分離を伴うような激しい流れでは流体率（VOF 値）が界面から剥がれ小さな VOF 値が浮遊してしまう。この問題を解決するために Phase-Field 法を JUPITER に導入し、VOF 値の非物理的な剥がれを抑制することに成功した。本研究では、さらに液滴振動の理論解との比較により、界面幅を一定に保ちつつ表面張力計算を精度よく行う上で適切な Phase-Field 変数を調査した。

2. 液滴振動の周波数および減衰率解析： JUPITER に保存型 Phase-Field 法（保存型 Allen-Cahn 方程式）

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \phi) = \bar{\gamma} \left(\varepsilon \nabla \cdot (\nabla \phi) - \nabla \cdot \left(\phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right), \quad \bar{\gamma} = M \sigma, \quad \varepsilon = \frac{\delta}{2b}, \quad b = 2 \tanh^{-1}(1 - 2\lambda).$$

を適用し、適切な界面幅 δ およびモビリティ M を調査するために液滴振動解析を実施した。計算領域 4mm×4mm×4mm の中央に配置した長径約 2mm の楕円体の水の振動履歴を理論解と比較した。計算格子は液滴直径に対して 64 格子割り当て、時刻 200msec（約 24 周期）まで計算した。格子幅 Δx に対する界面幅 δ の依存性を調べた結果(Fig.1(A))、 $\delta / \Delta x=3,4,5$ のケースでは理論解に概ね一致した減衰振動の結果が得られ、界面幅を広げすぎると数値粘性により減衰しやすくなることが分かった。上式右辺の強さを調整する M 依存性を調べた結果（Fig.1(B)）、3~5 程度が適当であり大きすぎると減衰しにくくなることが明らかになった。

3. 結論： JUPITER コードに新たに導入した Phase-Field 法の適切なパラメータを調査した。気液界面に働く表面張力を正しく計算するためには 3 格子以上の界面幅を用いる必要があり、界面幅を一定に保つためには 3~5 程度のモビリティを用いる必要があることが明らかになった。従来発生していた VOF 値の剥がれを解決したため、気液各領域の体積評価が重要となる気泡流れの解析精度向上が期待できる。

	Interface width	Frequency	Damping rate		Mobility	Frequency	Damping rate
	$\delta/\Delta x$	$\omega[rad/s]$	$\lambda[s^{-1}]$		M	$\omega[rad/s]$	$\lambda[s^{-1}]$
(A)	2.0	-	-	(B)	1	752.13	-
	3.0	746.41	4.576		3	747.25	5.137
	4.0	750.98	5.278		5	746.41	4.576
	5.0	749.63	5.497		10	746.08	4.002
	Theoretical solution	764.37	5.021		Theoretical solution	764.37	5.021

Figure 1: Oscillating frequency and damping rate. Dependency of (A) Interface width, (B) Mobility.

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究（C）19K11992、21K11911 から支援を頂いた。

参考文献 [1] S.Yamashita, T.Ina, Y.Idomura and H.Yoshida. *Nuc. Eng. Des.*, Vol.322, pp.301-312, 2017.

[2] P.H.Chiu and Y.T.Lin. *J. Comp. Phys.*, Vol.230, No.1, pp. 185-204, 2011.

[3] K.Yokoi. *J. Comp. Phys.*, Vol. 226, No.2, pp. 1985-2002, 2007.

*Kenta Sugihara¹, Naoyuki Onodera¹, Yasuhiro Idomura¹ and Susumu Yamashita¹

¹Japan Atomic Energy Agency.

A stable free-surface-detection method for consistent high-order MPS method

*Guangtao Duan and Mikio Sakai

Univ. of Tokyo

Abstract

The high-order schemes in MPS method can enhance accuracy but easily suffer from numerical instability at free surfaces. In this study, a new free-surface-detection method based on the stability analysis is proposed to solve this problem. Numerical examples demonstrated that the new method detected fewer free-surface particles but enhanced the stability.

Keywords: Particle method, MPS, Free surface, Stability, Accuracy

1. Introduction

The high-order schemes in particle methods can greatly suppress pressure fluctuations [1], improve boundary accuracy [2,3], and enhance reliability. The high-order particle method has great potential but suffers from instability easily at free surfaces. This paper aims to develop a novel free-surface-detection approach to suppress the instability.

2. Numerical methods

The high-order schemes presented in our previous study [3] are employed here. After careful investigation, it is found that the instability is closely related with the free-surface-detection method. Namely, when an internal particle is subjected to seriously biased neighbor support, the biased error will accumulate rapidly, triggering instability. After this internal particle is detected as a free-surface particle, the boundary condition imposition at free surfaces can break the error-accumulation loop and suppress the instability. The coefficients of discretization models can effectively measure the bias of neighbor supports. Therefore, the model coefficients are used to detect the required free surface particles.

3. Simulations and discussion

Four typical test cases were performed to contrast the stability between the existing and proposed approaches. It was found that the proposed approach detected fewer free-surface particles but produced more stable simulations than the existing ones. Meanwhile, the simulated results were in good agreement with the benchmark results in literatures.

4. Conclusion

A new free-surface-detection approach based on stability analysis is proposed for the high-order MPS method. The biased neighbor support is the main reason for error accumulation and instability. The proposed approach can detect fewer free-surface particles but produce more stable results than the existing approach. Based on the new technology, the high-order schemes can greatly enhance the accuracy and stability of particle methods.

5. Acknowledgements

This research was partially supported by the MEXT Quantum Leap Flagship Program (MEXT Q-LEAP) under Grant No. JPMXS0118067246 and JSPS KAKENHI under Grant No. 19K15478.

References

- [1] Tamai T, Koshizuka S., Least squares moving particle semi-implicit method. *Computational Particle Mechanics* 2014; 1(4):441.
- [2] Matsunaga T, et al., Improved treatment of wall boundary conditions for a particle method with consistent spatial discretization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 2020; 358:112–624.
- [3] Duan G, et al., Imposing accurate wall boundary conditions in corrective-matrix-based moving particle semi-implicit method for free surface flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 2021; 93(1):148–175.