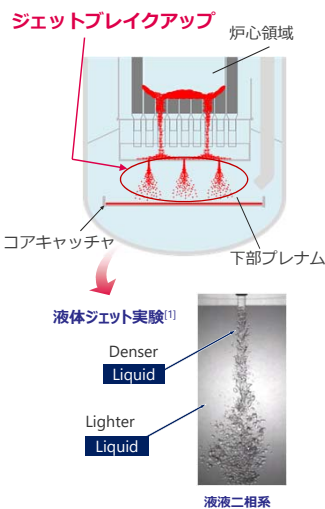


Numerical simulation of a jet in liquid-liquid system using MRT lattice Boltzmann method

齋藤 慎平¹ 阿部 豊² 金子 暁子² 金川 哲也² 岩澤 譲¹ 小山 和也³ ¹筑波大院 ²筑波大 ³三菱FBRシステムズ

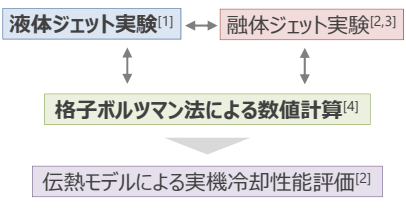
■ 研究背景



ナトリウム冷却高速炉における炉心溶融事故

溶融燃料冷却性の予測・評価

本研究の構成



目的

ジェットブレイクアップ体系に適当な
格子ボルツマンモデルの構築

■ 格子ボルツマンモデル

Liu et al., (2012)^[5] の二成分モデルをベースとした。解くべき式は、 k 相 ($k = r$ (red) or b (blue)) の分布関数 N_i^k の時間発展方程式

$$N_i^k(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \delta t, t + \delta t) - N_i^k(\mathbf{x}, t) = \Omega_i^k(\mathbf{x}, t) \quad (i = 1, \dots, 19)$$

並進過程

衝突演算子

$$\Omega_i^k = (\Omega_i^k)^{(3)} \left[(\Omega_i^k)^{(1)} + (\Omega_i^k)^{(2)} \right]$$

(1) Single-phase collision operator (MRT model^[6])

$$(\Omega_i^k)^{(1)} = |N^k\rangle - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} \mathbf{M} (|N^k\rangle - |N^{k(eq)}\rangle)$$

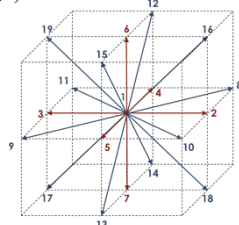
(2) Perturbation operator^[7]

$$(\Omega_i^k)^{(2)} = N_i^k + \frac{A_k}{2} |\nabla \rho^N| \left[w_i \left(\frac{\mathbf{c}_i \cdot \nabla \rho^N}{|\nabla \rho^N|^2} - B_i \right) \right]$$

(3) Recoloring operator^[8]

$$(\Omega_i^r)^{(3)} (N_i^r) = \frac{\rho_r}{\rho} N_i + \beta \frac{\rho_r \rho_b}{\rho^2} \cos(\varphi_i) N_i^{(eq)} \Big|_{u=0}$$

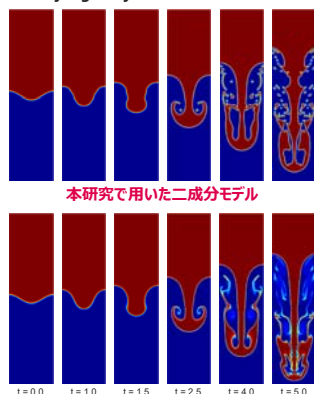
$$(\Omega_i^b)^{(3)} (N_i^b) = \frac{\rho_b}{\rho} N_i - \beta \frac{\rho_r \rho_b}{\rho^2} \cos(\varphi_i) N_i^{(eq)} \Big|_{u=0}$$

 \mathbf{M} : 変換マトリクス, \mathbf{K} : 緩和マトリクス $N^{k(eq)}$: 平衡分布関数 ρ^N : フェーズフィールド, A_k : 界面張力に係る定数 β : 界面厚さに係る定数 $\cos(\varphi_i) = \frac{\mathbf{c}_i \cdot \nabla \rho^N}{|\mathbf{c}_i| |\nabla \rho^N|}$ 

■ 二成分モデル

 $t = (W/g)^{0.5}$
 $Re = 2048$

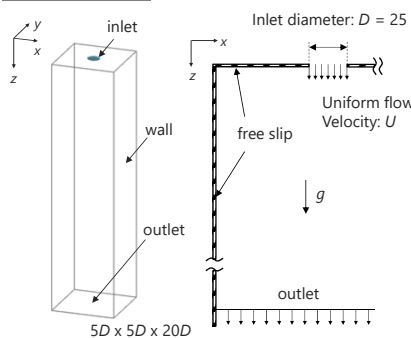
Rayleigh-Taylor 不安定性



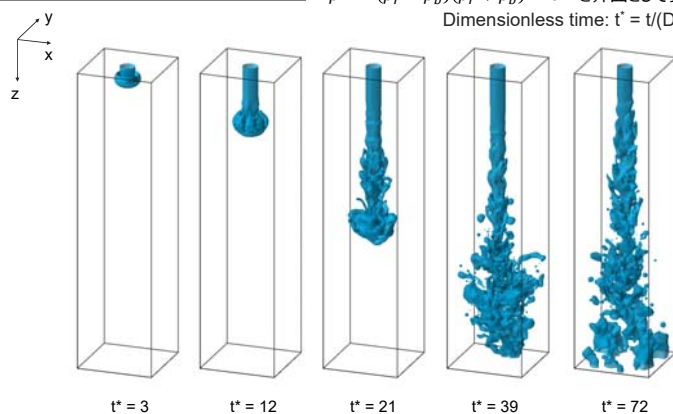
先行研究[4]で用いた一成分モデル[9]

二成分モデルにより微小液滴の散逸を抑制

■ 境界条件

Reynolds number UD/ν_f 3.4×10^3 Weber number $\rho_f U^2 D / \sigma$ 2.2×10^2 Froude number U^2 / gD 8.8Density ratio ρ_f / ρ_c 1.42

■ シミュレーション結果

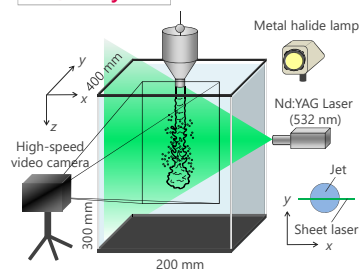
 $\rho^N = (\rho_r - \rho_b)(\rho_r + \rho_b) = 0$ を界面として表示
Dimensionless time: $t^* = t/(D/U)$ 

- ☐ MRT衝突則の導入により、高Re数での安定な計算を達成
- ☐ 界面の不安定化・微粒化の再現

■ ジェット可視化実験

	分散相	連続相
	34 wt% gly. solution	Silicone oil KF-96L-0.65CS
質量密度 [kg/m ³]	1082	760
粘性 [mPa·s]	2.9	0.494
界面張力係数 [N/m]		0.039
屈折率 [-]	≈ 1.375	1.375

PIV / LIF system



試験流体への要求

- 片方の相にのみ蛍光染料が溶解 (for LIF)
- 二相の屈折率が等しい (for PIV)
(Refractive Index Matching technique^[10])

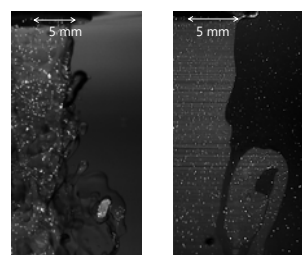
Fluorescence dye (LIF): Rhodamine 6G

⇒ 分散相にのみ溶解

Tracer particles (PIV): Silver-coated hollow glass

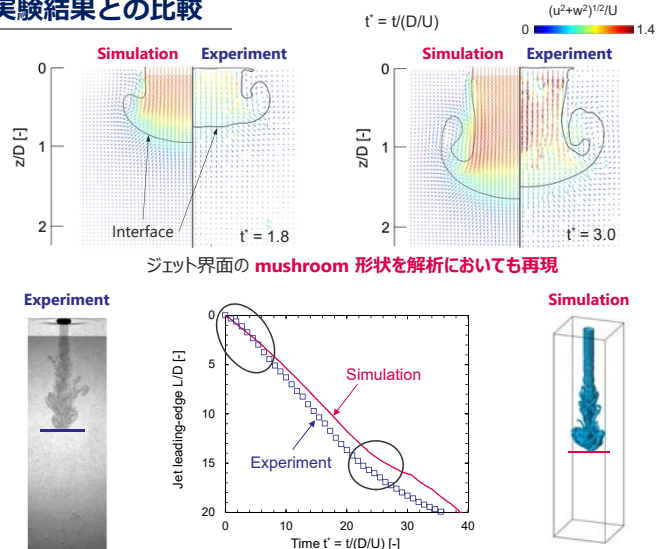
Density: 1400 kg/m³
Diameter: 10 μm

⇒ 両方の相にシード



CLEAR!

■ 実験結果との比較

射出直後や $t^* = 25$ 付近において実験と同様の傾向

■ 結言

□既存の二成分モデルに MRT 衝突則を導入することにより、高Re数のジェット挙動を安定に計算することができた。

□ジェット可視化実験結果と比較し、速度分布およびジェット先端位置の時間変化に対して妥当な結果を得た。

□シミュレーションにおけるジェット界面の時間発展より、界面の不安定化および微粒化挙動が再現可能であることがわかった。

References

- [1] S. Saito et al., Proc. 23rd Int. Conf. Nucl. Eng., 2015.
- [2] Y. Abe et al., Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. B, 2005.
- [3] Y. Iwasawa et al., Trans. JSME (in Japanese), 2015.
- [4] E. Matsuo et al., Trans. JSME (in Japanese), 2015.
- [5] H. Liu et al., Phys. Rev. E, 2012.
- [6] D. D'Humières et al., Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng., 2002.
- [7] T. Reis and T. N. Phillips, J. Phys. A, 2007.
- [8] M. Latva-Kokko and D. Rothman, Phys. Rev. E, 2005.
- [9] X. He et al., J. Comput. Phys., 1999.
- [10] e.g., Milosevic and Longmire, Int. J. Multiphase Flow, 2002.