

[22035]

定常中性子を用いた混相流ダイナミクスの革新的計測法の開発 Development of Innovative Measurement Method for Multiphase Flow Dynamics using Steady Neutron Source

齊藤泰司#, 伊藤大介, 大平直也, 伊藤啓
Yasushi Saito #, Daisuke Ito, Naoya Odaira, Kei Ito
Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

Abstract

An innovative neutron imaging has been developed to measure multiphase flow dynamics. A high-speed neutron imaging system that consists of a high-speed camera and an optical image intensifier was developed to measure two-phase flow dynamics at TNRF in JRR-3. The system was applied to measure the particle motion in a gas-solid spouted bed. Cd particles were added in the stainless-steel particle bed as the tracer particles to obtain the velocity field in the bed materials. By performing the particle tracking velocimetry, the void fraction and the velocity field were measured. In addition, the nitrogen-liquid lead-bismuth eutectic two-phase flow in a tank was observed by neutron imaging. To obtain liquid metal flow, AuCd₃ particles were mixed into the tank as a tracer. As a result, the velocity distribution of liquid metal flow driven by the bubbles was obtained by the particle tracking method.

Keyword: neutron imaging, multiphase flow, flow dynamics, fluidized bed, liquid metal flow

1. はじめに

混相流現象は非常に複雑であり、そのダイナミクスを正確に計測することは困難である。中性子イメージングは、混相流の可視化において有効な計測手法であることから、多くの応用研究が行われてきている。本研究では、中性子イメージングの高度化によって、さらなる適用性の拡大および定量性の向上を目指している。前年度は、JRR-3 TNRF での中性子イメージングのための高速度撮像システムを構築し、狭間隙内気液二相流および液体金属二相流への適用を行った。2022 度は、流動層内流れ場の可視化計測および液体金属二相流における流動評価を行った。

2. 流動層の可視化

原子炉のシビアアクシデントに関連して、デブリベッドの再配置に関する研究が行われてきている。その多くは光学的な可視化[1, 2]による特性把握であり、金属粒子の挙動や内部の蒸発挙動といった現象の解明は困難である。本研究では、中性子イメージングを流動層内の計測に適用することを目的とし、トレーサー粒子の検討および可視化計測を行った。

Fig. 1 に試験部の概略図を示す。本流動層実験装置は、アルミ製矩形ダクト、3つのガス注入口、ガス排出口、マスフローメーター、コンプレッサーで構成されている。矩形ダクト内には直径 1 mm のステンレス粒子が一定の高さで充填されている。実験では、ガス注入口から流量制御した空気を供給する。本研究では、トレーサー粒子として Cd 粒子をステンレス粒子に混入させた。中性子イメージング実験は、JRR-3 TNRF で行った。Fig. 2 に用いた中性子イメージングシステムを示す。本システムは、暗箱、シンチレータ、ミラー、レンズ、光イメージンシファイア、高速度カメラからなり、TNRF において 10,000fps 以上での撮像が可能である。

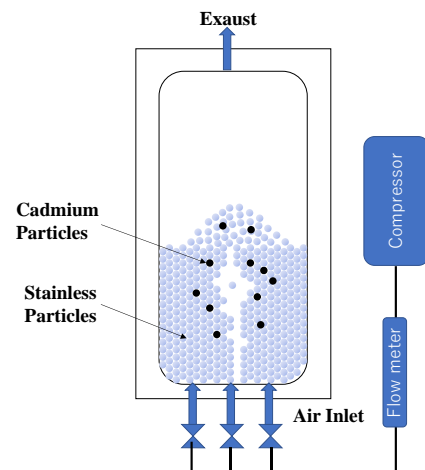


Figure 1. Schematic of experimental apparatus.

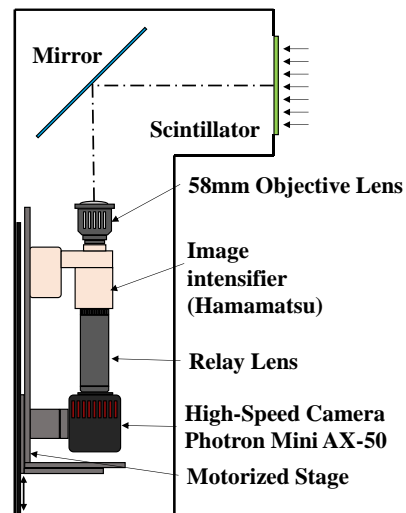


Figure 2. Schematic of the neutron imaging system.

[22035]

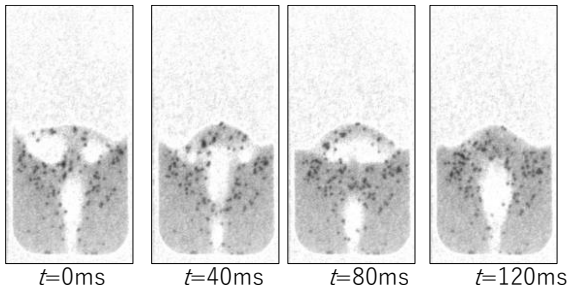
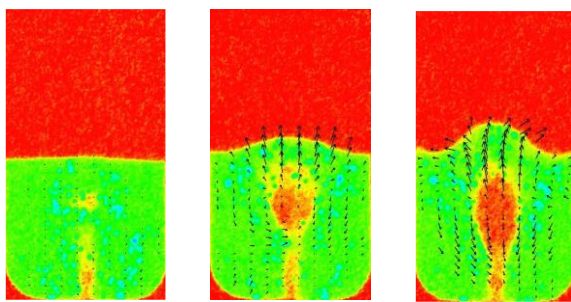


Figure 3. Successive images of flow behavior in the fluidized bed.



$j_g = 1.25 \text{ m/s}$ $j_g = 1.67 \text{ m/s}$ $j_g = 2.03 \text{ m/s}$
Figure 4. Velocity field estimated by PTV analysis.

Fig. 3 に流動層における中性子透過画像を示す。これらの画像から気相、ベッド粒子、Cd トレーサー粒子を判別することができる。また、流動層内に存在する Cd 粒子を追跡することで、Fig. 4 に示すように粒子追跡流速測定法 (PTV) を用いることで速度計測も可能である。しかしながら、本研究で用いたステンレス粒子の密度は Cd よりも小さいため、追跡性を向上させるためには、トレーサー粒子の粒子径や密度の調整など、さらなる改良が必要である。

3. 液体金属二相流

鉛ビスマス二相流におけるボイド率および液相速度の計測のための実験装置図を Fig. 5 に示す。試験部は、幅 100 mm、厚み 10 mm のステンレス製矩形容器であり、下部にガス注入用のノズルを設置してある。容器は周囲に取り付けたマイクロヒータによって加熱され、内部の鉛ビスマスを液体状態に保持した。液相速度計測のためのトレーサー粒子には、鉛ビスマスと密度の近い AuCd₃ の球形粒子を用いた (AuCd₃ (室温): 10.9 g/cm³、鉛ビスマス (150 °C): 10.5 g/cm³)。撮影速度は 250 fps とした。中性子透過画像において、トレーサー粒子は粒子マスク法を用いて識別を行った。ガウシアンカーネルを粒子マスクとし、テンプレートマッチングを行って相関係数を求めた。これにより、粒子位置を精密に算出し、4 時刻法によって速度を求めた。

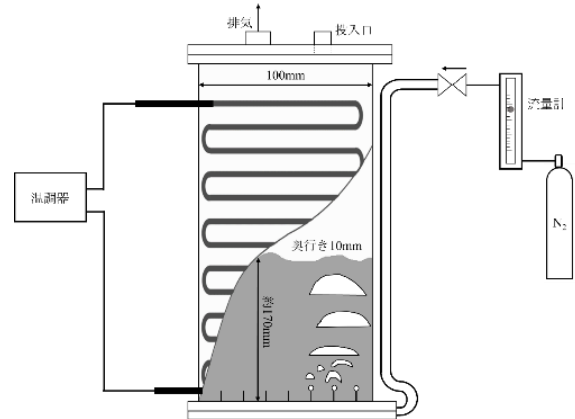


Figure 5. Schematic of tank-type experimental apparatus for nitrogen-LBE two-phase flow observation.

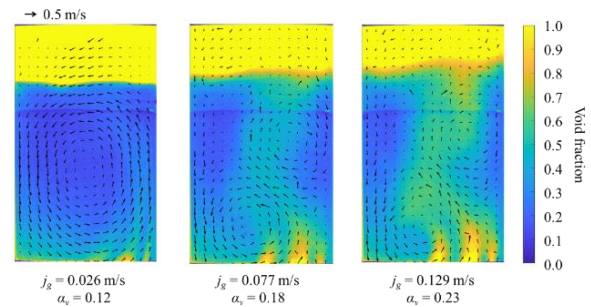


Figure 6. Void fraction and circulation velocity distributions.

Fig. 6 に異なる気相見かけ速度条件におけるボイド率および液体速度の時間平均分布を示す。気相見かけ速度の上昇に伴って、流動が大きく変化した。 $j_g = 0.026 \text{ m/s}$ において、1 つの渦が見られるのに対して、それ以外の条件では j_g の増加によって 2 つの渦が形成されており、流動のパターンが変化していることが分かる。

4. おわりに

本研究では、中性子イメージングの高度化によるさらなる適用性の拡大および定量性の向上を目的とし、2022 年度は流動層および液体金属二相流の可視化計測への適用性について調べた。

参考文献

- [1] S. Thakre, et al., Annals of Nuclear Energy, 174, (2022) 109165.
- [2] J. Werther, Powder Technology, 102-1 (1999) pp. 15-36.