

[2023105106]

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 (II) Development of Innovative Measurement Method for Multiphase Flow Dynamics using Steady Neutron Source (II)

齊藤泰司^{#,A)}, 伊藤大介^{A)}, 大平直也^{A)}, 伊藤啓^{A)}
Yasushi Saito^{#,A)}, Daisuke Ito^{A)}, Naoya Odaira^{A)}, Kei Ito^{A)}

A) 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, consisting of a high-speed camera and an optical image intensifier, was developed to measure two-phase flow dynamics at TNRF in the JRR-3. The system was applied to conduct experiments for high-speed computed tomography, liquid metal two-phase flow, and liquid distribution in a packed bed. High-speed projection imaging required only 14 seconds which was much faster than conventional method. Obtained high-speed neutron CT projection images were reconstructed with several image filters. The nitrogen-liquid lead-bismuth eutectic two-phase flow in a tank was observed by the developed high-speed dynamic neutron imaging. The dynamic imaging revealed detailed bubble motions in the liquid metal.

Keyword: neutron imaging, multiphase flow, liquid metal flow, high-speed neutron CT

1. はじめに

混相流現象はその複雑さから、既存の計測方法では、そのダイナミクスを十分に明らかにすることはなお困難となっている。非接触計測で2次元あるいは3次元の情報を取得できる中性子イメージングは、混相流の可視化において非常に有効な計測手法であり、これまで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。JRR-3 TNRFにおける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、高速度中性子CT、液体金属二相流への適用を行った。

2. 高速度撮像システム

中性子イメージング実験は、JRR-3 TNRFで行った。Fig. 1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、光イメージインテンシファイア、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。今回は本撮像システムを用いて液体金属二相流に適用し、動的な解析手法の開発を行った。

3. 高速度CT撮像

3.1. はじめに

従来の中性子CTは、高い中性子束を有するTNRFにおいてさえ、一回のCT撮像で10~20分程度は必要であった。CCDなどの撮像系を用いた場合、投影像の撮像1枚あたりの露光時間は数秒であり、100~300枚の画像を回転ステージで試料を回転させながら撮像する必要がある。露光時間に加えてデータの保存、回転ステージの操作などの時間が加わることから、CTには、結果的に露光時間×枚数よりも長い測定時間が必要となる。さらに、TNRFの中性子束は非常に高く、10分程度の中性子照射でも、試料の放

射化のため、照射後試料にアクセスするためには、線量の低下に要するタイムロスが生じる。

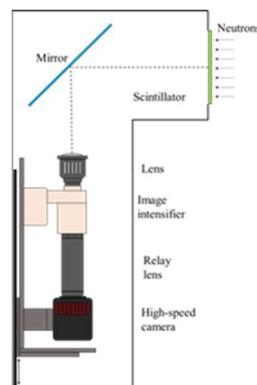


Fig.1 Schematic of the high-speed dynamic neutron imaging system

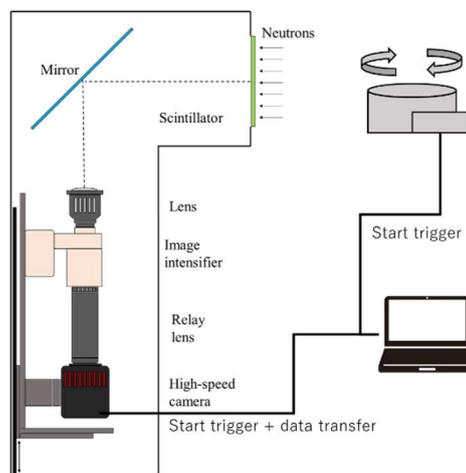


Fig.2 Schematic of the high-speed CT projection imaging system

[2023105106]

したがって、露光時間の短縮化は、撮像時間の短縮のみならず、試料の放射化に伴うタイムロスの低減にもつながる。当研究グループが開発した高速度撮像システムを CT システムに採用すれば、CT 撮像にかかる時間を短縮できることになる。さらに、混相流現象の解明には様々な流量条件や温度条件における計測が必要であり、これまでは中性子 CT を用いた混相流現象の解明は、撮影時間の長さのため、定常状態あるいは時間平均挙動を除いて、ほとんど実施されてこなかった。そこで、Fig.2 に示す新たな中性子 CT 撮像システムを構築し、得られた投影像を用いて CT 再構成し、その分解能を評価した。

3.2. 実験条件および解析手法

撮影対象の画角は約 140 mm 四方で、250~500 fps の範囲で撮像速度を変えて実験を行った。回転操作にかかる時間を低減させるため、回転ステージには KS402-75G(SURUGA)を用い、最大 25 deg/s で回転させた。これにより、試料を 360 度回転させるのに要する時間は、約 14 秒であり、この回転中に 250 fps で撮像を行うと投影像の総数はちょうど 3600 枚となる。すなわち、0.1 度ずつ回転させた試料の透過像を得る。この条件において、厚さ 20 mm、直径 100 mm の、アルミ製の円盤にスリットや穴加工がされた中性子 CT 用の試料を用いて空間分解能の評価を行った。



Fig.3 Single projection image of the aluminum disc

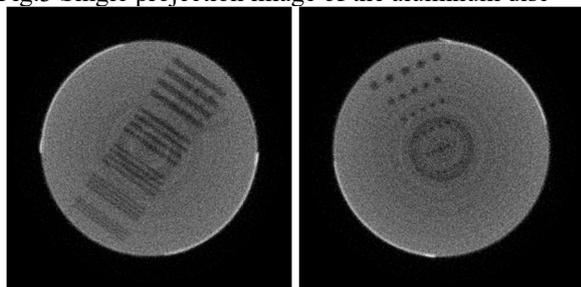


Fig.4 Reconstructed cross-sectional images of aluminum disc with slits (a) and holes (b).

Fig.3 に高速度撮像で得られた投影像の一例を示す。図では明らかではないが、高速度カメラシステムで得られた画像は、主に中性子の統計誤差に起因するノイズのため、CCD カメラなどで数秒かけて撮像した画像と比較すると空間分解能は劣る。また、サイノグラムを作成過程で明らかになったが、画像のピクセルによって若干の感度の差が認められた。

これは、光イメージンシファイアや高速カメラの特性によるものと考えられる。したがって、これらを適正に補正し、最低限の平均化処理を施した後、CT 再構成を行った。

3.3. 再構成の結果およびまとめ

得られた再構成後の断面像を Fig.4 に示す。図の通り、試料であるアルミ円板の断面を良好に再構成できていることがわかる。したがって、本実験で構築した CT 撮像装置を用いれば高速度の投影像の撮像と CT 再構成が可能であることが明らかになった。これらの結果から、ミリオーダー以上の混相流現象であれば、本システムを用いて時間分解能に優れた解析が可能であることがわかった。次年度以降に応用研究を実施し、その精度検証を実施する予定である。

4. 液体金属中における気泡の上昇挙動

4.1. はじめに

液体金属を冷却材とする次世代原子炉では、安全性評価のために様々な事故の解析モデルとその物理的な現象の解明が求められている。特に、蒸気発生器の破損事故 (Steam Generator Tube Rupture: SGTR) により高温高圧の蒸気と液体金属が直接接触して発生する液体金属-蒸気の気液二相流は、炉心損傷につながる重大な事故を引き起こす可能性がある。そのため、液体金属中での気泡挙動を物理的に解明することや、SGTR の発生を踏まえた安全設計手法の確立が必要である。本実験では、液体金属中を上昇する単一気泡の上昇挙動を中性子イメージングによって明らかにすることを目的とした。

4.2. 実験体系

液体金属中に気泡を注入して、気泡の上昇の様子を高速度撮像システムを用いて可視化した。Fig.5 に実験体系を示す。照射室には液体金属用の試験部、ならびに窒素ガスを注入するチューブを設置し、照射室外には窒素ガスを注入するためのチューブポンプ、流量計、バルブシステムを設置した。試験部は内寸 100 mm × 20 mm 高さ 300 mm の SUS304 製で、内部に 8 本のガス噴射ノズルを設置した。液体金属として低融点合金である LBE (鉛ビスマス共晶合金) を試験部に注入し、試験部内を LBE の融点 (124°C) 以上の 150~250 °C に保って実験を行った。当初は、回転可能な半球状の金属製カップを液体金属タンクに挿入し、金属カップ内に気泡を溜めた後、カップを反転させて任意の大きさの気泡を生成し、それらを観察することができると期待し実験を行った。しかしながら、実験中にノズルおよびチューブ内部で液体金属の温度が低下し、チューブが詰まるなどの問題が生じたため、液体金属の内部に金属製気相注入管を直接挿入し、温度の低下による配管の詰まりを防止した。なお、気泡径は噴射ノズルの径に依存するため、複数の異なった径の 8 種類のノズルを用いて、気泡径の調節を行った。1 回目の実験では外径 0.36 ~ 2.4 mm のノズルを用いて流量 5~35 cc/min、

[2023105106]

温度 180°Cの条件で実施した。しかしながら、外径 0.6mm 未満のノズルで実験を行った場合、十分なコントラスト得られず、気泡の判別が困難であったため、2 回目以降の実験ではより太い外径 3~10mm のノズルを用いて、流量 5~15 cc/min、温度 150°Cおよび 250°Cで実験を行った。すべての流量・ノズル条件で、撮像速度 250fps で動画を 4 秒間取得した。

4.3. 解析手法および解析結果

Fig.6 に空の試験部の透過像、液体金属が充填されたときの透過像、これらを用いて計算したボイド率画像を示す。この処理を高速度カメラで得た画像すべてに適用した。

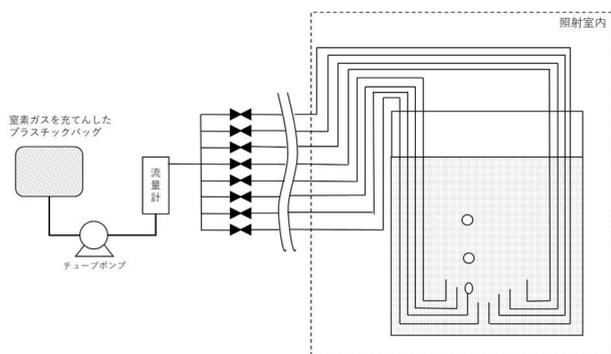
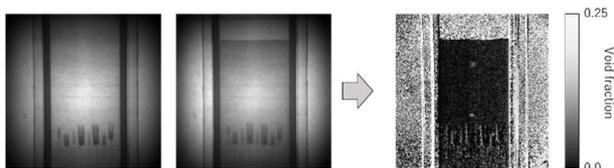


Fig.5 Experimental system for observation of the bubbles in the liquid metal experiment



(a) Empty (b) LM filled (c) Void fraction

Fig.6 Empty (a) and liquid metal filled tank (b) to generate void fraction images (c)

Fig.7 は、ノズル直上における空間平均ボイド率の時間変化を示す。図中の局所的なピークは、検査体積を気泡が通過したことを示しており、これから気泡頻度を算出した。さらに、気相流量と気泡頻度から、球形気泡を仮定して気泡径を算出した。その結果から、今回の実験で相当直径が 3~6 mm の幅広い気泡を検出できていることがわかった。

さらに、詳細な気泡挙動を計測するために、連続画像から気泡速度ベクトルを算出した。ガウシアン型の気泡カーネルを作成し、ボイド率画像に対してパターンマッチングを行ない、気泡の中心位置を検出した。得られた中心位置変化から、四時刻法を用いて、気泡速度ベクトルを算出した。Fig.8 は得られた二次元的な速度ベクトルから求めた鉛直方向速度成分の高さ方向変化を表している。図から、気泡がノズルから離脱後、速度が高さ方向に増加しているが、これは気泡射出直後は気泡形状が不安定で、パ

ターンマッチングによる中心位置計測に誤差が生じているためと考えられる。しかしながら、ノズルの先端から約 1cm 程度を超えると気泡の鉛直方向速度は約 0.2m/s となる。これはノズル離脱の影響が小さくなり、気泡形状が安定しているために、正確な速度評価が可能となっていると考えられる。

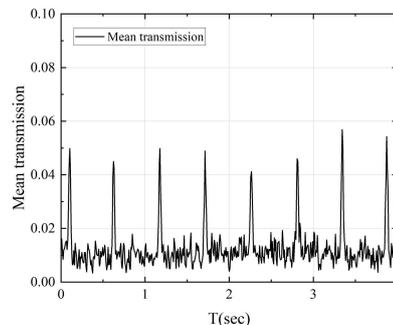


Fig.7 Void fraction signal above the nozzle (nozzle outer diameter $d_n = 7$ mm, flow rate of nitrogen gas $Q_g = 10$ cc/min)

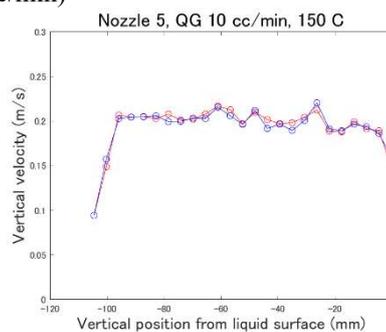


Fig.8 Vertical velocity at each axial position ($d_n = 7$ mm, $Q_g = 10$ cc/min)

おわりに

本研究では、高速度撮像システムの新たな可能性を模索するため、中性子 CT の高速度撮像を実施し、ある程度の分解能で断面を再構成できることを明らかにした。また、中性子イメージングによる混相流挙動の動的観察を目的とし、液体金属内における気泡の観察および上昇挙動の評価を行い、その手法の有効性を明らかにした。

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.