

[2024105112]

定常中性子を用いた混相流ダイナミッ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)}, 伊藤啓^{A)}, 大平直也^{A)}

Yasushi Saito^{#,A)}, Daisuke Ito^{A)}, Kei Ito^{A)}, Naoya Odaira^{A)}

^{A)} Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

Abstract

Visualization and measurement of multiphase flow phenomena require both high spatial and high temporal resolutions. An innovative neutron imaging technique using a multi-slit collimator was developed to achieve both high spatial and high temporal resolutions. The multi-slit collimator was tested using TNRF in JRR-3. The obtained images were analyzed, and an improvement of spatial resolution with minimum loss of neutrons was observed. Some partial defects on the images can be found, which are attributed to the geometrical relationship among the multi-slit collimator, specimens, and the detector. A correction method for the defects in the images should be considered. A nitrogen-liquid metal two-phase flow of lead-bismuth eutectic in a U-shaped pipe was observed by the developed high-speed dynamic neutron imaging. Experimental results showed that the effect of liquid flow on void fraction distribution, comparing with that of two-phase flow in a pool experiment.

Keyword: neutron imaging, multi-slit collimator, multiphase flow, liquid metal two-phase flow

1. はじめに

混相流現象の解明には、従来可視光による観察や電気的な計測、超音波やレーザーを用いた計測など様々な手法が用いられてきている。また、複数の手法を使って相補的な情報を同時に取得することで、より詳細な情報を得る方法も開発されている。一方で、水などの水素含有物に感度の高い性質をもつ中性子を利用した可視化手法は、これまでの手法では困難な混相流の可視化・計測に対して応用が行われてきた。例えば、微量な液滴や液膜の検出、さらに、液体金属中の気泡の可視化などにも中性子イメージングは有効な計測手法となりえる。

本研究では、中性子イメージングの高度化によって、分解能の向上、さらなる応用範囲の拡大を目指している。本研究では、JRR-3 TNRF にて空間分解能と時間分解能の両立を目指した新たな撮影手法の開発と液体金属二相流への応用を行った。

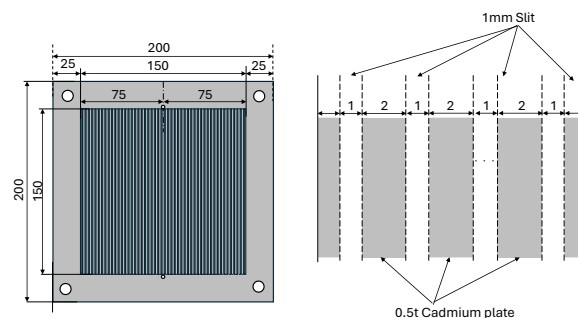
2. マルチスリットコリメータの開発

2.1 はじめに

中性子イメージングを高い空間分解能で実現させるためには、使用する中性子ビームの平行度 (L/D) を向上させる必要がある。したがって、コリメータから撮像面までの距離 (L) が制限されている場合には、コリメータ直径 (D) を小さくさせて平行度を向上させることが可能である。これはピンホールコリメータの原理であるが、一般には L が制限されている場合、撮像面におけるビームサイズが小さくなったり、中性子束が低下するなど、デメリットもある。マルチピンホールコリメータ^[1]を使用すれば、ビームサイズを大きくすることはできるが、中性子束が減衰することは避けられず、高速度撮影などの応用

には不向きである。

そこで本研究では、空間分解能の向上を特定の方向（垂直方向、または水平方向）に限定して空間分解能と時間分解能の両立を目指したマルチスリットコリメータの開発を行うことを目的とした。



(a) Overview of Multi-slit collimator (b) Arrangement of slit collimator

Figure 1 Schematic of Multi-slit collimator

2.2 マルチスリットコリメータの設計

Figure 1 に、本研究で試作したマルチスリットコリメータの概略図を示す。マルチスリットコリメータは厚さ 0.5 mm のカドミウム板に幅 1 mm、ピッチ 3 mm の溝を 50 本加工したものであり、各溝は中性子を通す（透過帯）一方で、溝部以外のカドミウム部は中性子を吸収する（吸収帯）構造になっている。スリット部の大きさ（有効画角）は 150 mm × 150 mm である。単純な幾何学的な考察から、試作したマルチスリットコリメータの中性子透過率は 33 %程度と考えられる。

2.3 実験体系

Figure 2 に実験時におけるマルチスリットコリメータ、試料、カメラシステムの位置関係を示す。実験は JRR-3 7R TNRF で実施した。中性子透過像の撮影には CCD カメラ (iKon-L936, Andor Ltd.)、ミラー、シンチレータ ($^6\text{LiF}/\text{ZnS}$ 型 $t = 200 \mu\text{m}$, Scintacor) で構成される撮像システムを用いた。本研究では試料位置をシンチレータ面から 150 mm 離れた位置で固定し、シンチレータとマルチスリットコリメータとの距離 L_m を変化させて撮影を行った。

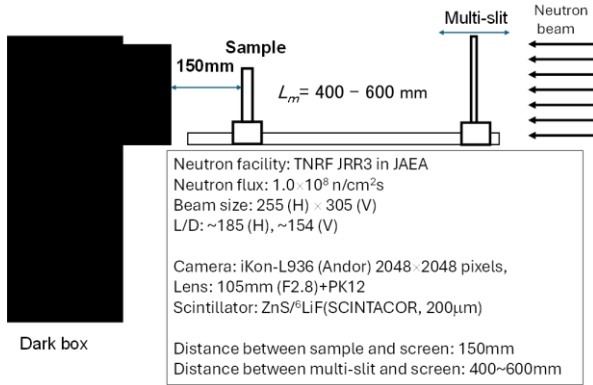


Figure 2 Setup of Multi-slit collimator

2.5 最適距離 L_m の導出

ビーム平行度 L/D は透過帯の大きさ (1 mm) と L_m に依存し、 L_m が大きいほど平行度は高くなる。しかしながら、ある値以上に L_m を大きくすると、隣接する透過帯から拡がる中性子ビーム同士が干渉し、この部分の L/D が低下する。このため、中性子ビームの干渉が起こらない、 L_m の最大値を求める必要がある。この最大値は、使用する中性子ビームの平行度とコリメータの設計に依存する。TNRF のビーム平行度は、Table 1 に示すように、鉛直方向と水平方向で異なる。実験結果から、 L_m の最適値はそれぞれ、 $L_m = 575 \text{ mm}$ (水平スリットの場合)、 $L_m = 475 \text{ mm}$ (鉛直スリットの場合) と求めることができた。したがって、使用したマルチスリットを用いると、水平スリット、鉛直スリットに対して、575 あるいは、475 となった。すなわち、TNRF の初期性能^[2]より 3 倍程度向上することがわかる。

Table 1 Specifications of TNRF in JRR-3^[2]

Neutron flux	$1.5 \times 10^8 \text{ n/cm}^2\text{s}$
Beam size	255 (W) $\times$ 305 (H)
L/D (Original)	185 (Horizontal) 154 (Vertical)

2.6 マルチスリットコリメータによる高分解能化の検証および考察

Figure 3 に得られた中性子透過像を示す。(a), (c), (e) はそれぞれ試料とシンチレータを 150 mm 離して単純撮影したインジケータの中性子透過像であり、(b), (d), (f) はそれぞれ水平スリットの条件で撮影し

た透過像である。(c)と(d)を比較すると、単純撮影の(c)は全体的にエッジがボケているが、マルチスリットコリメータを用いた(d)では、縦線の水平方向のエッジが比較的是っきりしていることがわかる。一方、(e)と(f)を比較すると本来の縞模様とは異なる透過像になっていることがわかる。これは、試料位置と撮像面が異なるため、試料に中性子ビームが当たらない部分が各スリットごとに現れ、部分的に画像が欠損するためと考えられる。今後は、このような画像の部分欠損の補正手法を考慮して、引き続きマルチスリットコリメータの開発を進める。

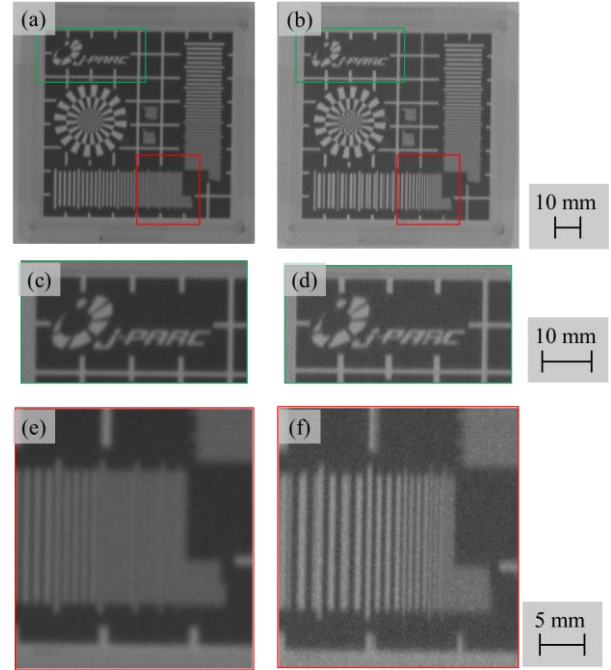


Figure 3 Neutron images with/without Multi-slit collimator. (a) Non-collimated, (b) With Multi-slit collimator, (c) and (e) Magnified image of (a), (d) and (f) Magnified image of (b)

3. 中性子ダイナミックイメージングによる液体金属二相流の計測

3.1 はじめに

中性子イメージングは、静的な試料のみならず、十分な撮像速度があれば、動的な試料の観察に応用することが可能である。このため、当研究グループでは、中性子高速度撮像法を液体金属二相流など混相流計測に応用している。

鉛ビスマス共晶合金は次世代炉の冷却材において主要な候補の一つとして考えられており、その流動特性について研究開発が多く進められてきた。液体金属の二相流は、次世代炉の蒸気発生器が破損した際などに発生する現象であるが、実験的な研究は限られており、数値解析の妥当性等が十分に解明されているとは言い難い。本研究では、液体金属二相流の基礎的な実験研究として、U字管内を流れる二相流の挙動を中性子ダイナミックイメージングで観察および計測を行った。

3.2 実験体系

Figure 4 に実験体系の概略図を示す。装置はアルミ (A5052) 製で、U 字管も外径 30 mm、内径 24 mm のアルミパイプで製作されている。Figure 5 に空の状態と液体金属 (鉛ビスマス共晶合金, LBE) で満たされた状態の中性子透過像を示す。図中の右下に位置するノズルから窒素ガスを注入し、気泡の挙動を観察した。

本実験では、高速度カメラ (SA5, Photron) とイメージンテンシファイア (C9547-01LP46, 浜松ホトニクス) を組み合わせた撮影システムを用いて撮影した。シンチレータには ${}^6\text{LiF/ZnS}$ 型シンチレータ ($t = 200 \mu\text{m}$, Scintacor) を用いた。本実験では撮影速度 250 fps、露光時間 1 ms、撮影時間 4 秒 (画像枚数 1000 枚) で撮影を行った。また、 AuCd_3 トレーサー粒子を液体金属中に分散させた撮影も行い、粒子追跡法 (PTV 法) による液流速の推定も行っている。

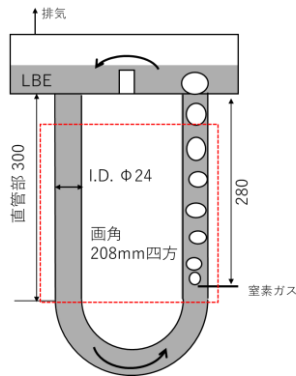


Figure 4 Schematic of experimental apparatus for the present liquid metal bubbling experiment

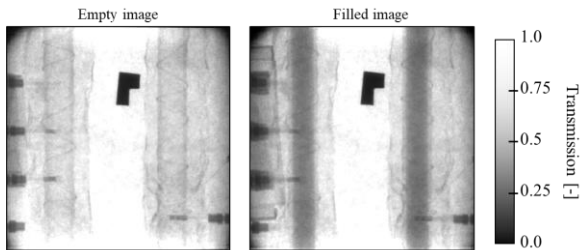


Figure 5 Transmission images of pipes with/without liquid metal

3.3 実験結果

Figure 6 左図に $j_G = 28.5 \text{ cm/s}$ で窒素ガスを注入した際の U 字管の右側上部配管 (ライザー管) における時間平均ボイド率分布を示す。気泡が通過した領域はボイド率が高く (白く) なっており、やや右側に偏っていることがわかる。これは U 字管の流速分布の影響によって、気泡がリフトフォースを受けた結果と推測している。

Figure 6 左図に示すライザー管内の領域のボイド率分布を体積平均し、体積平均ボイド率を求めた。Fig.6 右図には、気相みかけ流速に対するボイド率の変化を示している。本実験結果は、○で示しており、

別途行ったプール体系の実験結果を□で示している。図から明らかなように、本実験で得られたボイド率は、プール体系で得られた計測値より小さいことがわかる。これは、気泡のポンプ効果で液相に流れが生じ、ライザー管内で上昇流を生じて、気泡の上昇速度が増加することに起因すると考えられる。今後はトレーサー粒子を用いた実験を詳細に行い、液流速の評価結果と合わせて、液体金属二相流の挙動を明らかにする。

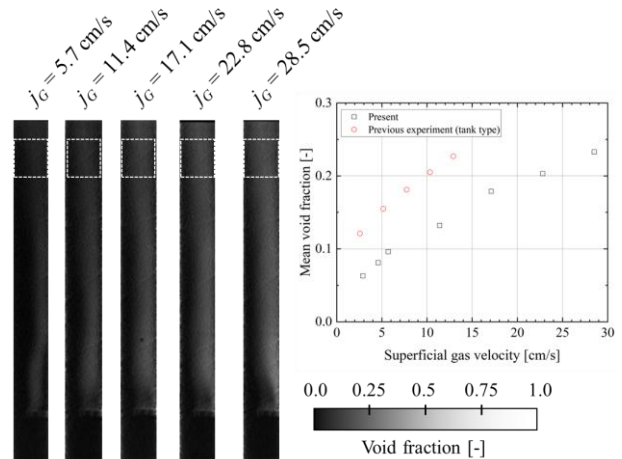


Figure 6 Void fraction image at $j_G = 28.5 \text{ cm/s}$ and volumetric mean void fraction with superficial gas velocity

4. おわりに

本研究では、高空間分解能と高時間分解能の両立を目指した新たな可視化手法としてマルチスリットコリメータの開発を進めている。マルチスリットコリメータによる分解能の向上が認められた一方で、試料の一部に中性子が照射されない領域があり、画像に部分的な欠損が生じることが明らかになった。今後はその補正方法についても検討をしつつ、マルチスリットコリメータを用いた撮影手法の確立を進める。

さらに、中性子ダイナミックイメージングの応用例の一つとして液体金属二相流の観察および計測を行い、ボイド率分布の評価等を行った。今後は液体金属中に分散させたトレーサー粒子の解析を進めて液体金属二相流の挙動を明らかにする。

参考文献

- [1] Hayashida, H., Segawa, M., Yasuda, R., Iikura, H., Sakai, T., Matsubayashi, M. "Development of multipinhole collimator for large imaging area with high spatial resolution", *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 605, 77-80 (2009)
- [2] M. Matsubayashi, H. Kobayashi, T. Hibiki, K. Mishima, "Design and Characteristics of the JRR-3M Thermal Neutron Radiography Facility and Its Imaging Systems", *Nucl. Techn.*, 132(2), 309-324 (2000)