1213 中性子ラジオグラフィ熱流動可視化・計測技術

Neutron Radiography Flow Visualization and Measurement Technique

正 ○呉田 昌俊 (原研) , 正 秋本 肇 (原研)

Masatoshi KURETA, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki
Hajime AKIMOTO, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki

In this manuscript, neutron radiography (NR) flow measurement techniques, which can measure the void fraction of boiling flow in narrow metal channels, were described. These techniques, high-frame-rate NR (HFR-NR) and NR3DCT, have been developed to study the void fraction and critical heat flux models. Measurement systems are consist of water-circulating loop with a NR test section, pre-heater, separator, condenser and DC power supply to generate the vapor, neutron-visible light converter, camera system which is automatically controlled by the computer and CT system in case of NR3DCT. NR images are processed on the parallel super computer system. Exclusive image processing and visualization software calculates the void fraction and crops the data. Instantaneous void fraction can be measured by HFR-NR with time-resolution of 1ms. Spatial void fraction distribution can be measure by NR3DCT with spatial-resolution of $100\ \mu\text{m}$. These two NR techniques make up the loss mutually, and we can obtain the spatial void fraction with high time resolution.

Key Words: Flow Measurement, Neutron Radiography, Void Fraction, Multi-phase Flow, Forced Convection

1. はじめに

日本原子力研究所 (原研) が設計開発を進めている加速器ターゲットや革新的軽水炉の炉心¹⁾の熱設計では、限界出力の評価が極めて重要である。しかしながら、従来の限界熱流束 (CHF) 相関式やモデルの計算精度は低下し、特に CHF モデルではボイド率計算に問題があった。ボイド率データが解析の検証に必要であるが、流れを乱す探針法等は適用できず、また X (γ) 線法は金属流路内の僅かな水の識別が困難であった。一方、中性子線は鉄などの金属を透過しやすく水に対して感度が高い特徴を有し、金属流路内のボイド率を2次元で同時計測できる。中性子線を用いた計測では、散乱中性子線に対する考慮が必要であり、多くの流動パラメータ毎に記録した大量のデータを正確かつ高速に処理するシステムの開発が不可欠であった。

本報では、著者が独自に開発した中性子ラジオグラフィ (NR) によるボイド率計測法に関して記し、ボイド率データの流体力学的考察は別の機会に譲る。本報では、中性子ラジオグラフィ高速撮像法 (High-Frame-Rate NR; HFR-NR) と中性子ラジオグラフィ3次元 CT法 (NR3DCT) の2種類のボイド率計測技術を記す。

Fig. 1 Schematic view of the HFR-NR system.
(Air-water two-phase flow experiment)

2. NR ボイド率計測システム

本システムは、中性子源 (原研の研究炉 JRR-3M の中性子照射室) に設置した実験装置と定量化処理・可視化を行う計算機で構成される。

2.1 HFR-NR HFR-NR は、NR 画像を高速度ビデオを用いて約 1ms の時間分解能で 2 次元の瞬時ボイド率を連続的に計測できる²⁾。空間分解能は約 $300\sim1000\ \mu\text{m}$ であり、計測誤差は 18% 以下である。図 1 に HFR-NR の概略を示す。試験体を透過した中性子線は蛍光コンバータで可視光に変換され、その強度から透過量を計測する。HFR-NR では、高速度ビデオカメラとレンズの間に 2 段のイメージ・インテンシファイア (II) を挟み光の強度を増幅させる。記録速度は、 $500\sim2250$ フレーム/秒に設定した。NR 画像は 256×256 ピクセルで 256 階調のグレースケールのデジタル画像として連続的に記録した。これを並列計算機に転送し、計算機内で輝度補正・位置補正・定量化処理等を行うことにより、連続した瞬時ボイド率分布を得た。連続 2 次元データは、アニメーション表示により気泡や液膜の挙動を詳細に観察した。なお、図 1 は空気-水二相流のボイド率計測の設定を示している。

Fig. 2 Schematic flow of the NR3DCT system.
(Boiling two-phase flow experiment)

Fig. 3 Dependence of liquid-layer thickness on superficial momentum flux.

Fig. 4 Consecutive images of the instantaneous void fraction at the annular flow condition measured by HFR-NR.

2.2 NR3DCT NR3DCTは、図2に示すように試験体を上下・回転させ、投影NR画像のCT再構成によりボイド率の3次元分布を計測する技術である。NR画像は冷却型CCDカメラ（バックグラウンドノイズを低減するためCCD素子を -30°C に冷却したデジタルカメラで高感度撮影が可能）を用いて約 $100\mu\text{m}$ ボクセルの空間分解能でボイド率を計測した。カメラとCT装置を連動させ画像を自動で記録した。試験体の位置 (θ, z) が異なる画像をデジタル画像の形で計算機に転送した。計算機上では、 γ 線ノイズの除去、位置補正、輝度補正、定量化CT再構成、可視化のための処理等をMPIを用いて複数のCPUに分散処理し3次元のボイド率分布を得た。CT再構成は、Shepp-Loganフィルタ³⁾で補正したコンボリューション逆投影法を採用した。

データ処理ソフトは、基幹ソフトが並列処理に対応したCUIソフトであり、データの可視化はHFR-NRでは2DデータをMotif+C言語で開発したGUIソフトで、NR3DCTでは2D+3DデータをAVS+C言語を用いて開発したGUIソフトで行った。

3. 実験結果

試験体の1例を図3に示す。本試験体は将来型原子炉の炉心を模擬しており、稠密バンドル流路内の空気-水二相流や沸騰流のボイド率をHFR-NR及びNR3DCTを用いて計測することを目的として製作した。図4に、HFR-NRを用いて空気-水二相流の瞬時ボイド率分布の時間変化を計測した例を示す。ボイド率の定量化により試験体の構成部材は画像から消えボイド率の変化のみが観察できる。本HFR-NRの結果から、ボイド率が0.8以下では周辺部やスペーサ下部に水が滞りやすいことが分かり、ドリフト・

(a) Test section data (Stainless steel tubes)

(b) Air-water two-phase flow data

Fig. 5 3D void fraction distribution measured by NR3DCT.

フラクスマodelによるボイド率相関式が開発できた。図5にNR3DCTで計測した空気-水二相流のボイド率分布の1例を示す。図5(a)は、ステンレス製円管の可視化例を、図5(b)は、二相流のボイド率分布を示している。現在、計測結果を専用ソフトやVRMLで表示したり、立体視(VR)したりすることで現象の理解を行っている。また、計測したボイド率の3次元データは詳細熱流動解析コードやサブチャンネル解析コードの検証用データに役立てられる。

4. 今後の課題

HFR-NRの基本技術は確立したが、NR3DCTは高精度化・高速化の余地がある。高精度化では、散乱中性子線やCT再構成アルゴリズムに起因する精度低下の改善が課題である。

5. まとめ

中性子ラジオグラフィ高速度撮像法および中性子ラジオグラフィ3次元CT法の研究開発を行い、これらの計測技術がボイド率計測の新技术として有効であることを示した。

参考文献

- (1) 大久保他2名, JAERI-Research, 2001-21(2001).
- (2) 呉田他3名, 機論(B), 67-653, 179-188(2001).
- (3) Shepp他1名, IEEE Trans. on Nuclear Science, 21(6), 21-43(1974).