Multi-Phase Flow Dynamics Visualization by Using a Fast X-ray CT Scanner

Masaki MISAWA, Naoki ICHIKAWA and Makoto AKAI

ABSTRACT

Multi-dimensional interface structure in air-water two-phase flow was visualized by using a fast X-ray CT scanner, which is able to scan a cross section approximately 100 times faster than conventional systems. To simulate flow channels in heat exchangers, locations and pitches of 3 rods were varied in a vertical tube. Gas-phase distribution in the cross section was reconstructed for analysis of the void fraction and the interface area concentration. The same facility was then used to visualize the water jet interface while penetrating through a Fluorinart pool. Due to relatively large density difference between the two immiscible fluids(1.7), the deformed interface structure was successfully detected. For visualization of overall jet interface, the jet nozzle was lifted upward at a constant velocity while scanning the cross section. In both two-phase flow and water jet interface visualizations, quantitative measurements of the phase distribution and the interface area concentration were made from reconstructed cross section images.

Keywords: Visualization, Fast X-ray CT, Two-phase Flow, FCI, Interface Area

1. 緒 論

気体、液体、固体が混合して流れる混相流は、家庭内のエアコンから原子力プラントや化学プラントに至る様々な機器に見られる流動形態だが、分散相の分布によって圧力損失や伝熱効率が変化するため、混相流機器の特性が大きく変化する。また、単相流における Re 数のような無次元数で予測できるスケール則が確立されていないため、提案されるモデルは圧力や流量などの実験条件に依存している場合が多い。混相流を特徴づけるパラメータの中で、界面積濃度 (単位: m^2/m^3 、単位体積あたりの界面面積) は、相間の質量、運動量、エネルギーの輸送に直接関係するので、高精度の実験式が要求されている¹⁾。しかし、界面面積は複雑に変化する気泡などの形状を多次的に求める必要があるため、変形の著しい大気泡や、気泡の密度が高く可視光による計測が妨げられる状況では、正確な計測が困難であった²⁾。高速X線CTは、これらの問題を解決するため、透過率の高いX線を使い、画像再構成によって流路断面内の分布を二次元的に可視化する装置である。さらに、医療用とは異なり、気泡のような移動する変形体の界面を検出するため、スキャン時間を通常のCT装置の約1/100に短縮している点に特徴がある。本報告では、この装置を使って可視化した気液二相流の気泡分布計測と、液体ジェットの界面構造計測の2つの例を紹介する。

2. 高速X線CTの仕様と測定精度

2.1 高速X線CTの構成

高速X線CTの概要をFig.1に示す。この装置では、18個のX線源と122個のシンチレータ検出器が測定部のまわりに固定配置されており、X線の照射を電氣的に制御することで、機械的な回転動作と等価な動きを実現

Fig.1 Schematic Diagram of a Fast X-ray CT Scanner

している。機械的な駆動部分がないので、スキャン速度の高速化が可能になっている。撮影時は 100kV、5mA の管電流で 100μ 秒の X 線照射を行い、一回の X 線ファンビームで照射される 32 個の検出素子で投影データを収集する。これを 18 方向から照射して得られたデータセットを用いて、 129×129 ピクセルのフォーマットで、256 階調のグレースケール断層像として再構成される。照射速度は X 線源の切り替え速度と、データの蓄積時間によって制限される。データの蓄積時間に対する制限は、時間分解能を追求するうえで新たに課せられた制約条件である。

2.2 測定精度の評価

本装置では、検出器ピッチおよび X 線源ピッチから決まる測定領域の空間分解能は約 2.5mm だが、移動速度によって軸方向の分解能が影響を受けるため、直径 5mm の球形気泡でも移動速度が 1 m/s を超えると再現性が低下する。そこで、混相流の計測で重要となる断面積や表面積の測定精度を評価するため、寸法が既知の円筒および球を重ねて連結したアクリル製モデルを作製し、これらを一定速度で移動させて、高速 X 線 CT で断層撮影を行った。適切なしきい値を設定して断層像を二値化し、移動速度から断面間の距離を算出して、3 次元表示したものを Fig. 2 に示す。移動速度が 1.0m/s を超えると、形状の歪みが大きくなること、移動方向に対して断面形状の変化が大きい球の方が変形の程度が大きいことがわかる。CT 計測から求められたモデルの体積と表面積を、既知の値と比較した結果、寸法が小さいほど、また移動速度が大きくなるほど、計測誤差が大きくなるが、寸法が 10mm 以上のモデルに対しては約 20% の測定精度で体積や表面積が測定できることがわかった。実際の二相流計測では、モデルで用いたような単純な形状ではないが、他に検証の方法もないため、このアクリルモデル計測で得られた結果から実際の混相流の計測精度を推定している。

V=0.2m/s 0.6m/s 1.0m/s 1.6m/s
Fig. 2 Reconstructed Acrylic Models

3. 気液二相流の界面計測

3.1 流体ループおよび流動条件

垂直管内を流れる水-空気二相流のボイド率および界面面積を計測するため、内径 46mm の垂直管を含む流体ループを高速 X 線 CT 装置内に設置し、気液流速をそれぞれ変化させた条件のもとで、断層撮影を行った。また、熱交換器の管群を模擬するため、垂直管内に外径 8mm のロッドを 3 本配置して、気泡分布に対する影響を調べた。ガス流量および液流量は、それぞれ 0.19m/s および 0.61m/s の範囲で変化させた。この条件では、流動様式は、気泡流からスラグ流までをカバーしている。測定位置は気液混合部から約 0.93m 下流で、 $L/D=22.6$ に相当する。液流量計、ガス流量計、圧力計からの出力はパソコンに取り込み、流動条件を解析した。

3.2 流路断面内の気泡分布計測

ロッドを中心部に配置した場合 (Case A) とロッドを配置しない垂直流路内 (Case D) の気液分布計測の一例を Fig. 3 に示す。この図では流量が比較的大きいとき、

(a) Case A (3 rods in a 50mm diameter tube)

(b) Case D (No rods in a 50mm diameter tube)

Fig. 3 Phase Distribution in a Cross Section

管内にスラグ気泡が形成され、高速 X 線 CT の測定断面を通過している様子を表している。局所プローブを用いて断面内のある点のみを計測する従来の方法では、非均質に断面内に分布する界面形状を捉えることはできなかったが、高速 X 線 CT によって気泡断面を可視化することにより、スラグ気泡の変形度を定量的に捉える事ができる。また、ロッドが流路内にあるような複雑な流路形状でも、同じ手法で計測できることは非破壊計測の利点である。得られた断層像から、ボイド率や界面面積を求めるには、しきい値を設定して二値化する必要がある (Fig. 3)。画像処理によって気泡部分 (図中、黒い部分) のピクセル数をカウントして断面平均ボイド率を算出すると同時に、気泡部分の輪郭長さを求めて断面平均界面面積を算出した。これらの時間変化をプロットしたものが、Fig. 4 である。流路断面形状の異なる二つの流路内の界面面積濃度を比較するため、界面長さは流路の固体壁長

Fig. 4 Void Fraction and Interface Area Concentration Averaged in a Cross Section
 さいで規格化した。図中の大きなピークはスラグ気泡の通過に相当し、小さいピークは小気泡の通過に対応している。また、界面輸送は主としてスラグ気泡が担っているため、界面面積とボイド率のピークはほぼ一致している。

3.3 スラグ気泡の変形係数

高速 X 線 CT による断面計測の利点のひとつは、気泡の全体像を捉え、その変形度を可視化できる点である。界面の変形は実効的な界面面積を求める際に重要となるが、実験的な裏付けが不足していたため、適切なモデル化はなされていなかった。ここでは、界面の変形度として、気泡断面積と等価な円の円周に対する輪郭長さの比として定義している。ここで対象としているスラグ流では、スラグ気泡とそれ以外の小気泡に対し、二つの代表的なスケールがあるので、気泡流-スラグ流の遷移条件となるボイド率 0.2 に相当する気泡径を基準として、スラグ気泡と小気泡それぞれについて平均的な変形係数を求めた。断層像の画像処理から求めた変形係数を、体積流量に対してプロットした図が Fig. 5 である。等価気泡径が増加するにつれて液の乱れによる変形が顕著になるため、スラグ気泡の変形係数 $C_{d,S}$ は増加するが、気泡径が流路径に近づくとも流路壁により変形が抑制される。

Fig. 5 Deformation Factor for Total Superficial Velocity, $jg+jl$

また、ロッドの配置によって変形係数の分布が異なることがわかる。二流体モデルの代表的な計算コードである RELAP-MOD3 でも、スラグ流の変形係数として 2.0 を提案しているが³⁾、本実験でもこれに近い値が得られている。

4. 液体ジェットの界面構造計測

原子力施設における安全解析の一環として、シビアアクシデントにおける熱流動解析技術の高度化があげられる⁴⁾。溶融物の落下と冷却材の相互作用 (FCI, Fuel - Coolant Interaction) は、蒸気爆発の物理現象を理解する上で重要なプロセスとなる。これまで、X 線ラジオグラフィによる溶融ジェットの破碎過程の撮影例はあるが⁵⁾、ジェットの多次元的な分布や界面面積に関する定量的な情報は得られていない。そこで、本実験では液体ジェットの液体プール侵入時における基礎的な流体力学特性を調べるため、高速 X 線 CT 装置を用いて、ジェット界面構造の可視化を行った。

4.1 実験装置および実験条件

実験ではジェットの液体として水、プールの液体としてフロリナート (PF-5060, 3M 社、沸点 56.7°C@1atm) の非混合二成分流体の組み合わせを用いた。水ジェットは、タンクから電磁弁を介して静水圧でフロリナートのプール中に注入される。ジェット速度は、静水圧とジェットノズルを変える事によって、1.1~3.4m/s の範囲で制御した。ノズル径としては、0.8, 2.3, 4.0mm の 3 種類を用いた。また、水ジェットの侵入に対する蒸気発生の影響を調べるため、水ジェットをタンク内で加熱し、ジェット界面でフロリナートを沸騰させた場合のジェット形状を計測した。各流体の物性および実験条件を Table 2 に示す。

4.2 ジェットの界面形状計測

高速 X 線 CT 計測を行う前に、ジェットの様子を高速ビデオで撮影したものを Fig. 6 に示す。ジェットの侵入に伴い、界面の不安定性から液体塊が剥離し、浮力によって上昇している。また、水ジェットを加熱した場合はジェットの界面でフロリナートの沸騰が起こり、気泡

Table 2 Physical Properties and Test Conditions

Water Temp.	22.0 – 91.1°C
Fluorinart Temp.	16.5 – 23.4°C
Water/Fluorinart Density	956/1680kg/m ³
Interfacial Contact Temp.	68.1 – 79.0°C
Nozzle Diameter	0.8, 2.3, 4.0mm
Inlet Jet Velocity	1.1 – 3.4m/s
Jet/Pool Volume	1.2 – 16.0/900.0x10 ⁻⁴ m ³
Jet Froude Number	32.0 – 1450
No Air Entrainment

(a) Unheated Jet (b) Heated Jet

Fig.6 Water Jet Penetration through Fluorinart Pool

が形成されている。また、ジェットと気泡の浮力が働くため、ジェットの侵入深さは加熱ジェットの方が短い。

界面の解析では、ジェット形状の全体像を把握する必要があるため、ジェットノズルを一定速度で上昇させながらCT撮影を行った。このときの上昇速度は0.022m/sであり、ジェット速度の2%以下なので、ジェット形状に対するノズルの上昇は無視できると仮定した。これによって得られたジェットの断面積と界面長さの変化をプロットした図がFig.7である。ジェット断面積と界面長さは、それぞれジェットノズルの断面積と内径で規格化している。ジェットの断面積は最大でノズル断面積の約10倍に拡大している。ここで円形の断面積を仮定すると、この円の円周はノズル出口での輪郭長さの $10^{0.5}=3.2$ 倍となるはずである。ところが、画像処理から求めた界

Fig.7 Jet Cross-section Area and Interface Length normalized with Nozzle Dimensions

Fig.8 3D Representation of Overall Jet Interface Structure

面長さは約6倍となっており、断面積から換算した界面長さの1.9倍となっている。これは、ジェット界面形状が大きく変形していることを示しており、界面面積の計測にはX線CTのような多次元計測が不可欠であることを示唆している。

ノズルの上昇速度をもとに、断層像間の距離を求め、3次元表示したものがFig.8である。プール中に侵入したジェットコアは、ブレイクアップするまではほぼ垂直に侵入し、剥離した液体がジェットコアの周囲を浮力によって上昇している。加熱ジェットの実験では、水ジェット(956kg/m^3)とフロリナート蒸気(14kg/m^3)の密度は共にフロリナート液体密度(1680kg/m^3)よりも小さいため、これらを分離して識別することはできないので、両方の界面が可視化されている。今後、これらを識別する計測手法の検討を進めていく予定である。

5. まとめ

高速X線CTを気液二相流および液体ジェット実験に適用し、界面構造を多次元的に可視化すると同時に、ボイド率や界面積濃度を定量的に求めた。今後、データベースの蓄積を図ると同時に、装置の高分解能化を進めていく考えである。

参考文献

- 1) Ishii, M. and Mishima, K., NUREG/CR-1873 (1980)
- 2) 原子炉における熱流動数値解析の現状(II)、日本原子力学会(1987)pp.47-54
- 3) RELAP5/MOD3.2 Code Manual, Vol. 4, NUREG/CR-5535 (1995)
- 4) シビアクシデントと新型軽水炉の熱流動挙動研究の現状、日本原子力学会(1994)pp.27-42
- 5) Ciccarelli, G. and Frost, D., "Fragmentation mechanisms based on single drop steam explosion experiments using flash X-ray radiography", Nucl. Eng. Design, Vol.146 (1994) pp.109-132