330 ヘリカルコイル管内気液二相流の可視化画像計測

石川 正明[○] (福井大), 村井 祐一 (福井大), 漁野 嘉昭 (福井大・院, 現 NTN),
酒井 康丞 (福井大・院), 戸田 信一 (サイクル機構), 玉山 清志 (サイクル機構),
山本富士夫 (福井大)

Visualization and Image Processing for Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Helical Coil Tube

Masa-aki ISHIKAWA, Yuichi MURAI, Yoshiaki RYONO, Kosuke SAKAI,
Shin-ichi TODA, Kiyoshi TAMAYAMA and Fujio YAMAMOTO

ABSTRACT

In the steam generator of the fast breeder prototype reactor “Monju”, heat exchange tubes of helical coil type are utilized. Steam-water two-phase flows in the helical coil tube have unique characteristic due to effects of centrifugal acceleration. In this report, we visualized gas-liquid two-phase flows in the helical coil tube for providing the flow pattern map, and suggested the method for reconstructing the interfacial structures of gas-liquid two-phase flows in the cross-section of the tube. The method was applied to artificial images and experimental images, and the applicability was discussed.

Keywords: Visualization, Digital image processing, Gas-liquid Two-phase flow, Helical coil tube

1. 緒 論

高速増殖原型炉「もんじゅ」の蒸気発生器では、ヘリカルコイル形伝熱管が利用されている。このヘリカルコイル形伝熱管は、U形伝熱管に比べて構造がコンパクトで、かつ流動の急曲折部をもたないため、流力振動の発生要因が少ないという利点を持つ。一方、ヘリカルコイル形伝熱管では、その経路によって内部気液二相流に対する定常的な遠心加速度の大きさに分布がある。また、複数の伝熱管ループが曲率半径と距離が異なる経路を通り、それらが同じ圧力差で駆動される点で、並列流路管での動特性に位相差が生じうる。これらの現象について、伝熱および圧力損失の多次元的特性を考慮した詳細な解析を進め、より高い性能安定性を保証するよう検討しなければならない。さらに、現状の高速増殖炉全体の動特性解析コードでは、蒸発器内の動特性を1次元等価現象に代表化している。今後、ヘリカルコイル特有の詳細な多次元熱流動構造がデータベース化されていくことにより、より詳細な蒸発器内部の動特性挙動を把握していくことができる。

本研究の目的は、常温・常圧下でのヘリカルコイル管

内気液二相流の可視化・画像解析システムを構築し、1)ヘリカルコイル管内の気液二相流動構造のデータベース化として、ヘリカルコイル管内気液二相流の流動様式を把握する、2)ヘリカルコイル管内の内部構造を知るために、その管内のボイド率分布を復元する方法を提案する。またその方法を人工画像および実験によって得られたステレオ画像に適用し、その復元性能を検証する。

2. 実験装置および実験方法

本実験に用いた実験装置の概略図をFig.1に示す。水はポンプによって、空気はエアコンプレッサによって供給され、気泡発生装置にて水と空気が混合され、ヘリカルコイル入口で気泡流として発生させる。ヘリカルコイルは内径20mm、外径26mm、曲率半径270mmの1/4円弧の透明アクリル樹脂製を、1ピッチあたり100mm(水平面に対して0.059の傾き)の間隔で、5ピッチ分連結して組み立てた。気液二相流は最下部のヘリカルコイル入口から最上部を通り、その後サージタンクで水と空気に分離される。水流量は0.10・3.5 m³/h、空気流量は0.10・4.0 m³/hの範囲で行った。撮影には、ハイスピードカメラ(Photoron製Fastcam-Net500c, Flame

rate: 500fps, Shutter speed: 1/500s) を利用し、ヘリカルコイル流路の下から3ピッチ目を、 45° に傾けた鏡を設置することで一画面に正面像と上面像を同時撮影した。照明には、メタルハライドライトを利用し、ライトと計測物の間に光拡散紙を挟み、バックライト照明法を用いた。

Fig. 1 Experimental apparatus

3. ヘリカルコイル流路内の流動様式

相変化を伴う蒸発管では、壁面温度が液の飽和温度を超えると壁面上に気泡が発生(核沸騰)し、やがて気泡は壁面から離脱し気泡流となる。流れに含まれる蒸気量は管長に沿って増し、流れが下流に進むにつれ、スラグ流、環状噴霧流という具合に発達する。このように蒸発管内では、上流部から下流部へと進むにしたがい様々な流動現象がみうけられ、流動様式の遷移は原子炉水力解析や安全性評価のうえでも、注視されている。垂直管や水平管内の流動様式についての研究は過去多数行われており、それらの流動様式の判別は線図や式によってまとめられている¹⁾。

これらにならない、本実験装置によるヘリカルコイル管内における気液二相流の流動様式を分類し、パラメータとして気体および液体の体積流束(みかけ速度)により整理する。本実験によって得られた気液二相流の流動様式を Fig. 2 に示す。また、本実験条件では、Fig. 3 の原画像が示すような (a) 気泡流、(b) プラグ流、(c) スラグ流の3種類の流動様式が観察された。これら結果より、本実験は、従来、水平管内気液二相流流動様式線図に類似した傾向を持つ結果が得られた。それはヘリカルコイル管が水平軸に対して勾配 0.059 と緩やかな傾斜のためと考えられる。しかし、ヘリカルコイル管であるために、液相は重力加速度と遠心加速度の効果により、外円側で、かつ管下部を流れ、逆に気相は内円側で、かつ管上部に溜まるように、観察された。さらに水平管内気液二相流の流動様式線図との大きな違いは、液相体積流束 $j_l = 0.1$ (m/s) 以下の領域で、層状流が観察されるが、本実験ではそれは観察されなかった。これは、ヘリカルコイル流路が緩やかに傾斜しており、傾斜管特有の現象で、層状化しにくいことに起因すると考えられる。

Fig. 2 Flow pattern of gas-liquid two-phase flow in helical coil tube

Fig. 3 Original image for several flow patterns

4. ボイド率分布の計測

本研究では、ヘリカルコイル管内気液二相流を流路に対して鏡を 45° 傾け、正面と鏡に映った上面を同一画面内で撮影した。また、気体と液体の分布の差を出すために、青色インクを注入し、光の透過量を調節した。これらによって得られた2方向からの画像を基に、流路断面のボイド率分布を復元する。その処理方法を以下に示す。

4.1 仮想投影輝度分布の作成

管断面内のボイド率分布の復元は、その断面を撮影した画像情報が多ければ、より正確なボイド率分布が得られる。しかし、実際にはカメラの設置台数に限りがある。本実験でも得られる画像は、正面と上面の二方向からの画像情報で、高精度なボイド率の復元を行うには、工夫が必要となる。もし二方向からの画像情報を、あたかも二方向以上の画像情報として扱えられれば、復元されたボイド率分布が改善されると考えられる。そこで、次のような仮想投影輝度分布画像を提案する。

Fig. 3 は、ある管断面での二方向からの投影輝度分布

P_0, P_1 から仮想投影輝度分布 Q を作成する概念図を示している。管断面内は、気液二相が存在する断面で、それぞれ上面と正面に 90° に画像が得られる場合についての投影輝度分布を示している。ここで、投影輝度分布 P_0, P_1 、および仮想投影輝度分布 Q の角度をそれぞれ s_0, s_1, s° と、それら輝度分布の位置座標をそれぞれ i, j, k と、輝度分布の範囲をそれぞれ $[i_{\min}, i_{\max}], [j_{\min}, j_{\max}], [k_{\min}, k_{\max}]$ とおく。このとき、仮想輝度分布 Q_s の $k_{\min}, k_{\max}$ は次のように定義される。

$$\left. \begin{aligned} k_{\min} &= i_{\min} + (j_{\min} - i_{\min}) * ds \\ k_{\max} &= i_{\max} + (j_{\max} - i_{\max}) * ds \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $ds = \frac{s - s_0}{s_1 - s_0}$ である。位置 k が範囲 $[k_{\min}, k_{\max}]$ にある場合、輝度投影画像 P_0, P_1 の位置座標 i, j は次のように与えられ、

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{(k - k_{\min})}{(k_{\max} - k_{\min})} * (i_{\max} - i_{\min}) + i_{\min} \\ j &= \frac{(k - k_{\min})}{(k_{\max} - k_{\min})} * (j_{\max} - j_{\min}) + j_{\min} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

s° に存在する仮想投影輝度分布 Q_s の位置 k における輝度値 $Q(k)$ は次式のように与えられる。

$$Q_s(k) = \frac{(s_1 - s) \cdot P_0(i) + (s - s_0) \cdot P_1(j)}{s_1 - s_0} \quad (3)$$

Fig. 4 Schematic diagram of interpolation method

4.2 論理和、論理積を用いた断面の復元

管断面ボイド率分布の復元法として、論理和もしくは論理積による方法を用いた。Fig. 5 上図に二方向による輝度投影画像による論理和もしくは論理積による方法を、下図には仮想投影輝度分布による論理和もしくは論理積による方法の概念図を示している。まず簡単のために、

Fig. 5 の上図を用いて説明する。右図の二つは投影輝度分布 P_0, P_1 を明暗によって表し、その輝度分布を検査領域へ照射した概念図である。その照射した画像の位置 i, j (本実験では、上面輝度分布を i 列、正面輝度分布を j 行) の交点となる位置 (i, j) は左図のように、論理和もしくは論理積によって濃度として断面内の輝度分布として再構成される。このとき、投影輝度分布は $0 \sim 1$ の範囲を持つように正規化し、計算処理を行う。Fig. 8 の下図はそれを拡張した仮想投影輝度分布を用いた場合の処理を示している。仮想輝度分布の画像はある角度で回転した画像群であるため、回転行列による座標変換によって、検査領域へ照射し、位置 (i, j) を照射する輝度値を用いて、論理和もしくは論理積を取る。この処理は作成された仮想投影輝度分布すべてについて行い、気液分布の濃淡分布として表現する。

Fig. 5 Diagrams of reconstruction with disjunction and conjunction

4.3 二値化による気液の分離

上記処理によって、気液断面の分布が輝度分布として表現されている。しかし、このままでは気液界面の区別ができていないわけではない。そこで、この輝度分布にしきい値を設け、二値化することによって気相と液相に区別する。二値化の方法として、画像処理の分野で、よく知られている判別分析法 (大津の方法)²⁾、および原画像による投影輝度分布と復元画像から構築される投影輝度分布画像の相関を取り、その相関係数が最大となるしきい値から決定する相関の方法の2手法を行った。

4.4 ボイド率分布の復元精度の検証

実際の管内気液二相流の流動様式には、気泡流、プラグ流、プラグ流、層状流、環状流等、様々な形態があり、ここでは、それら気液二相流への適用性について、上節で提案した管断面内の気液二相流のボイド率分布の復元性能について検証する。管内気液二相流の疑似画像の作成に際して、Fig. 6 に示すような、(a)気泡流、(b)プラグ流 (スラグ流) の形状での、正面と上面での投影輝度分布として与える。この正面と上面の投影輝度分布を利用

して、本研究で提案した管断面ポイド率分布の復元方法による結果をFig. 7に示す。今回、断面の復元には、論理和を、気液の二値化には、大津の方法、および相関の方法の二手法を用いた。原画像と復元画像との気液分布の相似性を評価した結果をFig. 8に示す。

Fig. 7, 8(a)の気泡流の結果より、大津の方法では、仮想投影輝度分布の作成によって、小さな気泡が周方向へ輝度分布が引き延ばすため、微小気泡として特定できなくなる。また、両二値化手法とも相関係数が小さく、この方法は微小の気泡流の気液断面を不得手としていることが確認された。

Fig. 7, 8(b)のプラグ流(もしくはスラグ流)の結果より、大津の方法より相関の方法で、オリジナルと似た分布を持つことと、相関係数による比較においても高い性能を示すことがわかる。ここで、大津の方法で精度が下がる理由としては、復元された輝度分布によるヒストグラムが気体と液体を十分に判断するだけの双峰性の分布を持たないためと考えられる。

4.4 実画像への適用

実験によって得られたスラグ流の上面、正面の二方向の画像に対して本手法を適用した結果をFig. 9に示す。上図の四角内の左側が大津の方法、右側が相関の方法によるものである。実画像に適用するに当たり、管内以外の領域は背景除去を課している。この結果から、大津の方法と相関の方法での差はほとんど見られず、管内の気泡塊として復元できることがわかる。しかし、実際のスラグ流の観察結果から、管上面で、かつ内円側で気相が存在しなければいけないが、管壁近傍で多く気相を液相

と判断していることがわかる。これは、ヘリカルコイル管の正面画像の中央にある液面の散乱光により強い輝度分布を持って映ることと、それに伴い全体として、上部の上部気相が暗く映ることが原因として考えられる。一方、液相のみ領域では、大津の方法は広範囲に気相が存在しているが、相関の方法では、僅かに気相を復元したものの良好な復元ができていることがわかる。この原因は、前節で述べたように、大津の方法では復元された輝度分布によるヒストグラムが気体と液体を十分に判断するだけの双峰性の分布を持たないために、この結果が得られたと考えられる。

Fig. 9 Reconstructed phase distribution

5. 結 論

本論文では、ヘリカルコイル管内気液二相流の解明のため、その実験装置を製作し、可視化実験を行った。その可視化画像を基に、ヘリカルコイル管内の流動様式を分類し、かつ管断面ポイド率分布の復元手法を提案し、人工画像および実験画像に適用して管断面ポイド率の復元の検証を行った。それらによって得られた知見を以下に示す。

- ヘリカルコイル管内の流動様式について、本実験条件の範囲では、気泡流、プラグ流、スラグ流の3種類の流動様式が確認された。ヘリカルコイル管内の流動様式線図は、水平管内の流動様式線図に似た傾向がみられたが、緩やかな傾斜を持つため、層状流が現れなかった。
- 管断面のポイド率分布の復元方法として、仮想投影輝度分布を作成し、かつ論理和、相関の方法を、人工画像、および実験画像に適用することでプラグ流(スラグ流)の大気泡塊に対して、良好に復元することがわかった。

参 考 文 献

- 1) 日本機械学会編：気液二相流技術ハンドブック，コロナ社
- 2) 大津：判別および最小2乗基準に基づく自動しきい値選定法，電子通信学会，J63-D, pp. 349-356(1980)