B309

オプティカルフロー法計測による 逆チャーン気液二相流の基本流動特性

安部 和也[○], 于 笑然 (海洋大院), 波津久 達也, 大島 正毅, 賞雅 寛而 (海洋大)

Basic Flow Characteristic of Inverted Churn Gas-liquid Two-phase Flow Obtained by Optical Flow Method

Kazuya ABE, Xiaoran YU, Tatsuya HAZUKU, Masaki OSHIMA and Tomoji TAKAMASA

ABSTRACT

In thermohydraulic safety analysis for heating pipe in boilers and nuclear reactors, inverted-churn flow is commonly formulated due to high-temperature wall. In such flow, liquid ligaments fly upward and downward in the gas core flow and the cooling liquid cannot contact with the wall so that severe wall damage might occur by its low heat transfer. In this study, an inverted-churn flow was formulated in vertical 20-mm diameter pipe coated with water-shedding material. The basic flow characteristics of ligaments in the flow were measured and discussed using the stereo image-processing method and the optical flow method.

Keywords: Inverted-churn flow, Image-processing method, Optical flow method

1. はじめに

ボイラや原子炉などの加熱管における安全解析事象に、伝熱壁面の急激な上昇によって液相が壁面に接触できずに管中心付近を流動する逆チャーン流がある。逆チャーン流は、沸騰伝熱管内の低クオリティ域において過渡的な熱負荷が加わる条件において出現する流動であり、その伝熱・流動特性を詳細に知ることは、軽水炉の事故時における燃料被覆管温度の予測や炉心冷却特性を評価する上で極めて重要となる。しかしながら、この流動域を対象にした従前の研究のほとんどは、限られた体系での熱伝達予測に関するものであり、実験での流動の模擬が困難である等の理由から、二相流動の水力学的特性まで立入って詳細に検討した報告は非常に限られている。近年では、ポスト CHF 領域における熱伝達流動機構に関する様々な研究結果が整理され報告されている¹⁾。また、著者らは、超撥水管を使用した空気-水系二相流断熱系実験によって、逆チャーン流の模擬を可能としており、逆チャーン流動様式の遷移基準、形成領域の平均ボイド率および摩擦圧力損失等のパラメータを取得し整理している²⁾。

しかしながら、逆チャーン流の流動特性に関する詳細な流動物理特性を評価した報告は非常に限られており、それらの知見を考慮に入れた新しいモデルや相関式を開発するための、より定量的なデータを整理していく必要がある。本研究では、ステレオ画像撮影およびオプティカルフロー法³⁾を用いて、逆チャーン流にて形成されるリガメントの流動特性を評価した結果を報告する。

2. 実験方法

Fig. 1 に本実験で使用した二相流ループの概略図を示す。気相には空気を使用し、液相には温度 20 °C、電気伝導度 0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下に調節されたイオン交換清浄水を使用した。気液混合部において形成された二相流は、内

Fig. 1 Test loop.

径20 mm長さ1000 mmの助走部を経て、長さ1800 mmのテスト管に流入する。

本実験では、アクリル管に超撥水性塗料である合成樹脂 HIREC1550 が塗布された撥水管を使用した。塗布量から算出された塗布膜厚さは10 μm 以下であり、塗布による管径の変化は無視できるものとした。撥水管と同様の塗料を塗布した平板試験片の接触角は146°であり、通常管（アクリル管）では45°であった（Fig. 2）。本実験は、逆チャーン流の形成条件である気相見掛け速度 $j_g = 2.3 \sim 7.0 \text{ m/s}$ 、液相見掛け速度 $j_l = 0.050 \sim 0.70 \text{ m/s}$ の範囲で行った。管内の流動は、ハイスピードビデオカメラを用いて透過光にてステレオ画像撮影された（Fig. 3）。撮影された流動画像から、画像処理によってリガメントの管断面積分布および径の時間的变化、擾乱波の通過頻度特性を評価し、前報³⁾のオブティカルフロー法によってリガメントの上昇速度特性を整理した。

Fig. 2 Contact angles between liquid and wall surfaces.

Fig. 3 Apparatus of stereo images.

3. 実験結果及び考察

3.1 逆チャーン流の流動様式

逆チャーン流は、スラグ流とチャーン流領域において薄液膜の破断が生じてリガメントを形成し、気相流量の増加に伴って、それが壁面から完全に離脱して、気相流中を上昇・下降する流動であり、リガメントと擾乱波が周期的に交互に形成される。Fig. 4には撥水管内における流動様式を整理しており、図中の破線は通常管における気泡流－スラグ流、スラグ流－チャーン流およびチャーン流－環状流の遷移基準をそれぞれ示している。この図から、逆チャーン流は通常管のチャーン流領域に相当する気液条件において形成することがわかる⁴⁾。

Fig. 5に代表的な逆チャーン流において形成されるリガメントおよび擾乱波の流動画像を示す。逆チャーン流において発生したリガメントは、管壁面に接触せずに流動していることがわかる。

3.2 リガメントの流動特性

逆チャーン流において形成されるリガメントの管断面積率分布の結果をFig. 6に示す。いずれの結果もそれぞれ1本のリガメントから計測されている。この結果より、リガメントが管中心部に集中して流動しており、液相流量の増加に伴いリガメント体積率が管中心部に増大していることがわかる。気相流量に対する液相流量の割合が増加すると、気相からの影響が減少することによりリガメントが安定して流れるようになるためと考えられる。従って、液相流量が増加するとリガメントの崩壊が起こりにくくなり、管中心部を安定して流れやすくなると言える。

Fig. 7に、リガメント中心の管断面位置およびリガメ

Fig. 4 Flow regime map in water-shedding coating pipe.

ントの径の時間的変化を示す。液相流速に対する気相流速の増加に伴い、リガメントの径が細くなり、単位時間当たりのリガメントの変位量が大きくなっているのがわかる。このような現象から液相流速の減少に伴いリガメントが不安定になるということ、すなわち、液滴流に移移しやすくなると考えられる。

Fig. 8に、前報³⁾のオプティカルフロー法によって計測された代表的なリガメント上昇速度の時間的変化を示す。図中のそれぞれの線形は、1本のリガメント中における各特徴点の上昇速度を示している。図より、リガメント中における複数の特徴点は、それぞれ異なる速度成分を有しており、リガメントの上昇速度には細かい乱れが生じていることを確認した。また、Fig. 9には、上昇速度の乱れ強度を整理した結果を示す。これより、気相流速の増大、または流動中の気相流量割合の増加により、リガメント上昇速度の乱れが大きくなることを明らかにした。

Fig. 5 Typical images of ligament and disturbance wave.

3.3 擾乱波の通過頻度特性

次に、逆チャーン流において形成される擾乱波の通過頻度特性を評価した。本研究では、画像処理によって測定された擾乱波通過頻度をストローハル数、液相レイノルズ数およびフルード数の無次元パラメータで整理し、最小二乗法を用いて(1)式を導出した。

$$Sr = 0.0223 \ln(Re^{0.220} Fr^{-0.646}) \quad (1)$$

Fig. 6 Volumetric distribution of ligaments.

Fig. 7 Radial position and diameter of ligament.

$$Sr = \frac{f_D D}{j_g + j_f}, \quad Re_f = \frac{j_f D}{\nu_f}, \quad Fr = \frac{j_g}{\sqrt{gD}}$$

ここで、(1)式は気相見掛け速度 $j_g = 2.3 \sim 7.0$ m/s、液相見掛け速度 $j_f = 0.050 \sim 0.70$ m/s の範囲、すなわち逆チャーン流形成領域にて適用される。実測値と実験式による値の比較結果を Fig. 10 に示す。図に示すように、(1)式は、本実験の範囲において、擾乱波の通過頻度を標準偏差 12 % 以内で相関付けられることを確認した。

4. 結論

本報では、逆チャーン流の流動特性に関する詳細な流動特性を評価するため、ハイスピードビデオカメラを用いて撮影し、ステレオ画像処理法およびオプティカルフロー法を用いて、逆チャーン流において形成されるリガ

Fig. 8 Axial velocity of ligament by the optical flow method.

Fig. 9 Standard deviation of ligament velocity by the optical flow method.

メントの流動特性を整理した。

逆チャーン流にて形成されるリガメントは、管中心部に集中して流動しており、液相流量が増加するとリガメントの崩壊が起こりにくくなり、管中心部を安定して流れやすくなること、液相流速の減少に伴いリガメントが不安定になり、液滴流に遷移しやすくなること、気相流速の増大、または流動中の気相流量割合の増加により、リガメント上昇速度の乱れが大きくなることを確認した。

一方、擾乱波は、画像処理によって測定された擾乱波通過頻度を無次元パラメータで整理し、最小二乗法を用いて(1)式を導出することにより、擾乱波の通過頻度を標準偏差 12 % 以内で相関付けられることを確認した。

Fig. 10 Comparison between measured and calculated frequency of disturbance wave.

参考文献

- 1) Ishii, M., De Jarlais, G.: Flow Regime Transition and Interfacial Characteristics of Inverted Annular Flow, Nuclear Engineering and Design 95 (1986) 171-184.
- 2) 廣瀬由典, 他 3 名: 垂直管気液二相流のボイド率と摩擦損失に及ぼす壁面濡れ性の影響, 日本混相流学会年会講演会 2005 公演論文集, C124, pp91-92.
- 3) 于笑然, 他 4 名: オプティカルフロー法と動態マッチング法を用いた逆チャーン気液二相流の解析, 第 34 回可視化情報シンポジウム講演論文集, P10-002
- 4) 中村大輔, 他 3 名: 垂直管気液二相流の流動様式遷移に及ぼす壁面濡れ性の影響, 日本混相流学会年会講演会 2005 公演論文集, C123, pp87-90.
- 5) 芝康裕, 他 2 名: 自然循環系における逆環状流の伝熱・流動特性, 日本機化学会 1997 講演論文集, 1509