

キャピラリーチューブ内の減圧沸騰を伴う冷媒二相流の可視化と ボイド率分布の計測

Visualization and Void Fraction Measurement of Two-Phase Flashing Flow in a Capillary Tube

滝口 浩司¹⁾ 井下 尚紀¹⁾ 岡本 元秀¹⁾ 土屋 敏章²⁾

Koji TAKIGUCHI Naoki INOSHITA Motohide OKAMOTO Toshiaki TSUCHIYA

浅野 等³⁾ 丸山 直樹⁴⁾ 飯倉 寛⁵⁾

Hitoshi ASANO Naoki MARUYAMA Hiroshi IIKURA

¹⁾富士電機リテイルシステムズ ²⁾富士電機アドバンステクノロジー

³⁾神戸大学 ⁴⁾三重大学 ⁵⁾原子力研究開発機構

冷凍サイクルの減圧素子として用いられるキャピラリーチューブ内の冷媒流れを、中性子ラジオグラフィで可視化した。可視化画像からボイド率分布を計測し、流れ方向のボイド率分布から沸騰開始点を特定することができた。

キーワード： 気液二相流、中性子ラジオグラフィ、ボイド率、キャピラリーチューブ、減圧沸騰

1. 目的 圧縮式冷凍サイクルでは減圧素子としてキャピラリーチューブ（細管）が用いられる。キャピラリーチューブにサブクール液で流入する冷媒は、チューブ内で摩擦損失により減圧し、液温に対する飽和圧力を下回ることによって減圧沸騰し、液-蒸気の二相状態となる。キャピラリーチューブの設計では、圧力差に対する流量予測が必要であるが、流量を予測するには、液単相流から気液二相流となり圧力損失特性が大きく変わる沸騰開始点の特定が要求される。しかし、液体を急減圧する場合、沸騰核生成には遅れが生じ、沸騰開始点での圧力が飽和圧力を下回ることが知られている。この遅れの程度は、流路材質・形状、壁面性状に強く依存するため実用製品での把握が必要である。そこで、本研究は中性子ラジオグラフィで減圧沸騰を伴う流れを可視化し、ボイド率分布の計測結果から、沸騰開始点を特定し、沸騰後のボイド率特性を明らかにすることを目的とする。

2. 方法 実用冷凍サイクルを可視化実験用に改造し、銅製のキャピラリーチューブ（外径 4mm，内径 2mm）内の流れを中性子ラジオグラフィで可視化した。冷媒には塩素を含まないHFC134aを用いた。実験装置概略を図1に示す。キャピラリーチューブをコイル状に巻き、直列接続された3本のコイルを、コイルの軸が鉛直になるようにコンバータ上に設置された。圧縮機から吐出されたガス冷媒は凝縮器において水との熱交換で凝縮し、サブクール状態となってキャピラリーチューブに流入する。チューブ内で冷媒は摩擦損失によって減圧され、液温に対する飽和圧力以下となって沸騰し、気液二相流となり蒸発器に流入する。蒸発器で過熱蒸気となり圧縮機へ戻された。蛍光コンバータ上の

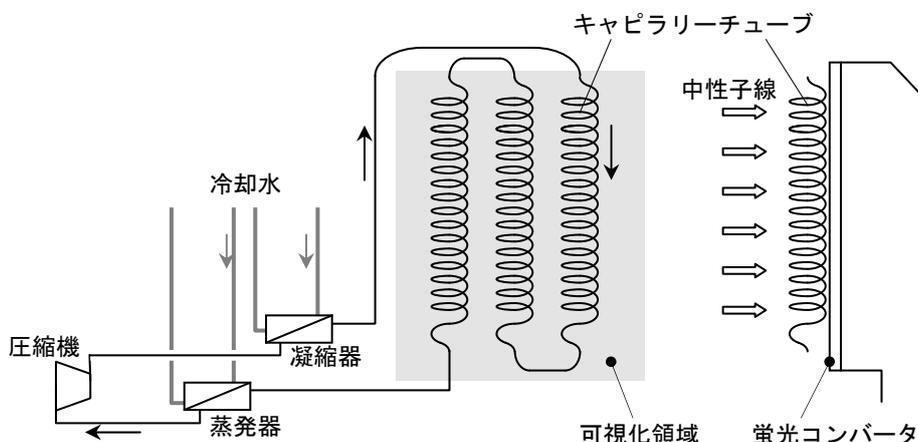


図1 実験装置概略

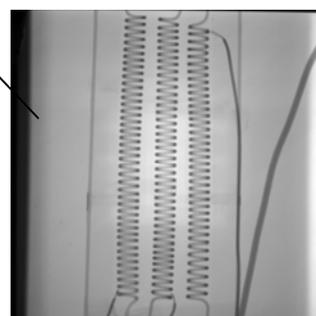


図2 可視化原画像

可視像を冷却型CCDカメラ（輝度 16bit, 画素数 1024×1024, 露光時間 2.5 秒）で連続撮影（10 分間隔）し、コンプレッサー起動後の過渡変化を計測した。視野はチューブ全体像を見る場合（画素寸法：210 μm）、チューブ出口付近の気液二相流部を拡大する場合（画素寸法：102 μm）の 2 通りとした。

3. 研究成果 被写体がない場合の背景画像との比較演算で試験部での減衰量を計測することができる。チューブが蒸気のみ画像、液で満たされたときの画像を取得しておれば減衰量の比較から、気液二相流部での流路に占める蒸気の体積割合であるボイド率を計測することができる。試験部全体を見た場合の可視化原画像を図 2 に、試験部がない場合、試験部が蒸気で満たされている場合、液で満たされている場合、運転中の場合の拡大画像を図 3(a)から(d) に示す。図 4 には試験部がない背景画像との演算で計算された減衰量分布を示す。物質の密度 ρ [kg/m³], 質量減衰係数 μ_m [m²/kg], 中性子線照射方向の厚さ δ [m] の積で求められる減衰量 ($\rho\mu_m\delta$) がグレースケールで表示されており、白くなるほど減衰量が大きいことを示す。流路部では、管材と液冷媒の積算値となる。各画素に対する減衰量演算で中性子線照射方向の平均ボイド率を得ることができるが、ここではコイル 1 ピッチ分の体積平均ボイド率を算出し、流れ方向にプロットした。計測結果の一例を図 5 に示す。ボイド率が 0 (液単相流) から増大する地点 (沸騰開始点)、沸騰開始後、気液二相流部でのボイド率の立ち上がりの分布がよくわかる。気液二相流部では摩擦損失に加え、相変化に伴う加速損失を伴うためボイド率のデータは気液二相流部の数値解析モデルの妥当性を検証する極めて有効なデータである。また、沸騰開始点の特定は沸騰遅れを予測するデータベースとなる。

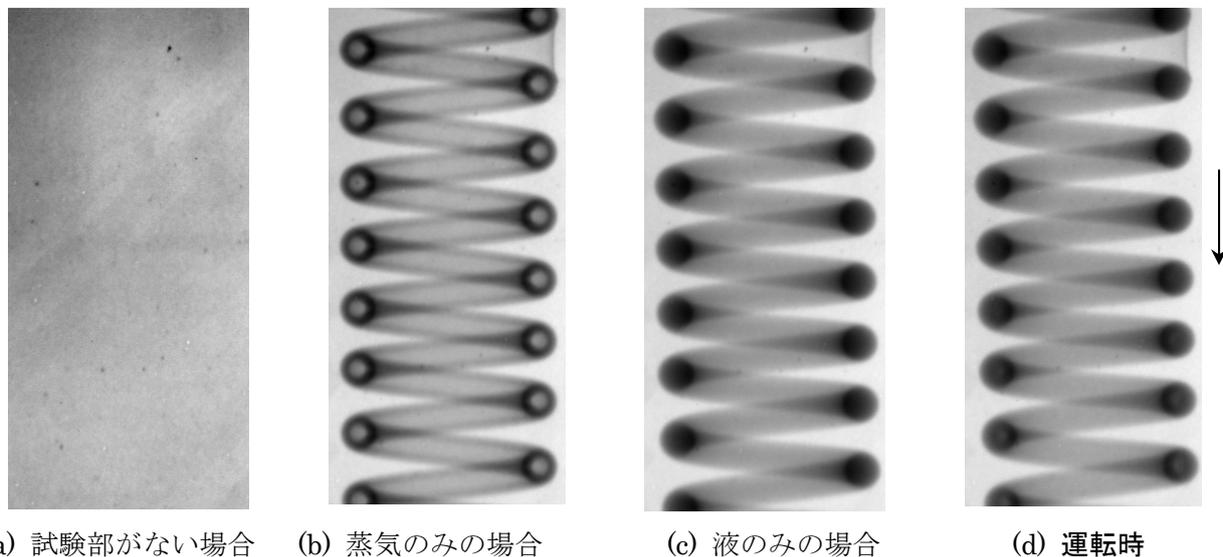


図 3 可視化原画像

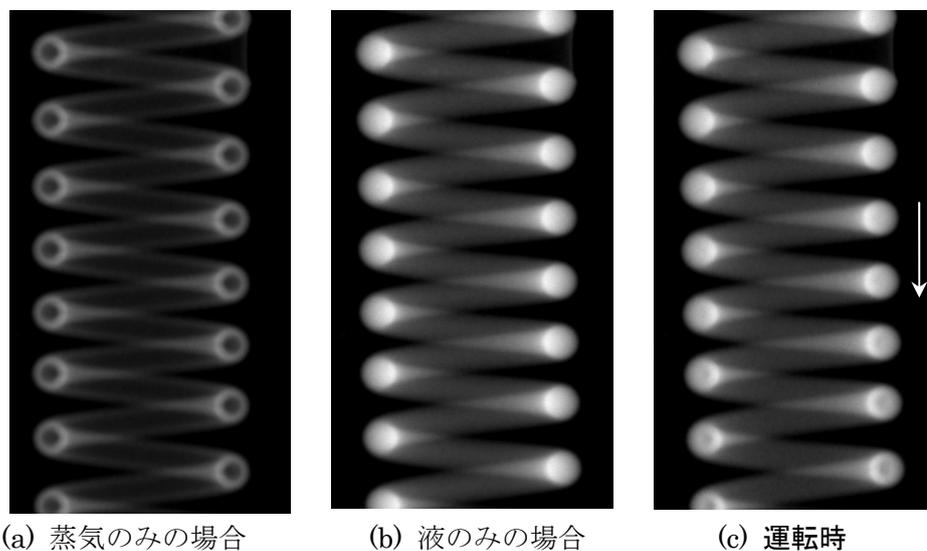


図 4 減衰量分布

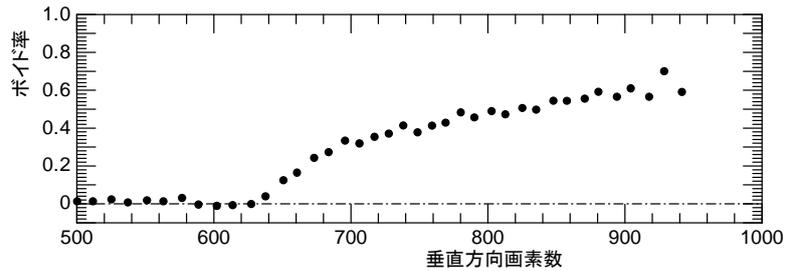


図5 ボイド率分布

4. 結論・考察 中性子ラジオグラフィで銅製キャピラリーチューブ内の気液二相流挙動を可視化でき、ボイド率分布を計測できることが示された。今後、温度、圧力の同時計測を行い、沸騰遅れの指標となる圧力アンダーシュートの計測につなげる。

5. 引用(参照)文献等

H. Asano, et al., Visualization and Measurement of Refrigerant Flow in Compression-type Refrigerator by Neutron Radiography, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research-A, 424(1), pp.92-97 (1999).

H. Asano, et al., Quantitative Measurement of Void Fraction Distribution of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Spiral Tube by Thermal Neutron Radiography, Nondestructive Testing and Evaluation, 16, pp.363-375 (2001).

H. Asano, et al., Image Processing Methods to Obtain Symmetrical Distribution from Projection Image, Applied Radiation and Isotopes, 61, pp.625-630 (2004).