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（その 2）

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

滝口 浩司 [1)]　土屋 敏章 [1)]　石田 真 [1)]　岡本 元秀 [1)]
Koji TAKIGUCHI　Toshiaki TSUCHIYA　Shin ISHIDA　Motohide OKAMOTO
浅野 等 [2)]　田中 光晴 [2)]　小林 建太 [2)]
Hitoshi ASANO　Mitsuharu TANAKA　Kenta KOBAYASHI
丸山 直樹 [3)]　廣田 真史 [3)]　鈴木 敏雄 [3)]　小川 翔 [3)]　飯倉 寛 [4)]
Naoki MARUYAMA　Masafumi HIROTA　Toshio SUZUKI　Sho OGAWA　Hiroshi IIKURA
[1)]富士電機リテイルシステムズ　[2)]神戸大学　[3)]三重大学　[4)]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、沸騰開始点を特定するとともに沸騰後の蒸気-液二相流の流動特性に及ぼすチューブ形状の影響を明らかにすることができた。

キーワード：気液二相流、中性子ラジオグラフィ、ボイド率、簡易CT計測、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って減圧され、液温に対する飽和圧力を下回ることで減圧沸騰し、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と沸騰後の気液二相流の流動特性の把握が要求される。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、沸騰開始点の特定、沸騰後の気液二相流の流動特性の解明を目的とする。2008 年度の実験（課題番号 2008B-A04：実験日 2009 年 1 月 26 日, 27 日）では、銅製キャピラリーチューブ（外径 3mm, 内径 1.5mm）内の冷媒（HFC134a）流れを可視化し、沸騰開始点を特定できることが示された。今年度は、実用に近い、より細いキャピラリーチューブを対象とし、実験条件に加え、チューブの配置形状の影響について実験を行った。

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 3mm, 内径 1～1.5mm）内の流れを中性子ラジオグラフィで可視化した。冷媒には実機で使用されるフロン系冷媒HFC134a を用いた。この冷媒は塩素を含まず、オゾン層破壊係数ODPは 0 である。実験装置概略を図 1 に示す。圧縮機から吐出された冷媒の過熱蒸気は凝縮器において水との熱交換で凝縮し、サブクール液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し、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可視像を冷却型CCDカメラ（輝度 16bit, 画素数 1024×1024)で撮影した。視野はチューブ全体像を見る場合は 55 mmレンズを、観察部を限定し拡大する場合は 105mmを用いることで変更した。広い視野の場合、露光時間は 2.5 秒、画素寸法は 195μm、一方、拡大視した場合の露光時間は 6 秒、画素寸法は 92 μmであった。

実験で使用したキャピラリーチューブの仕様を表 1 に示す。いずれも銅製であり、管外径は 3.0 mm である。試験部 A, B, C は管内径 1.0mm であり、A, B は実機での使用環境を想定してコイル状に巻かれたものを用いた。コイルの巻き径は、試験部 A は 29 mm 、試験部 B は 20mm である。試験部 C はらせんによる遠心力の影響を極力排除するよう、水平部を基本とした蛇行管である。試験部 D は内径 1.5 mm のコイルである。

可視化結果の一例を図 2 に示す。内径に対する画素数は、試験部 A, B で約 11 画素、試験部 C で約 5 画素、試験部 D で約 8 画素となる。

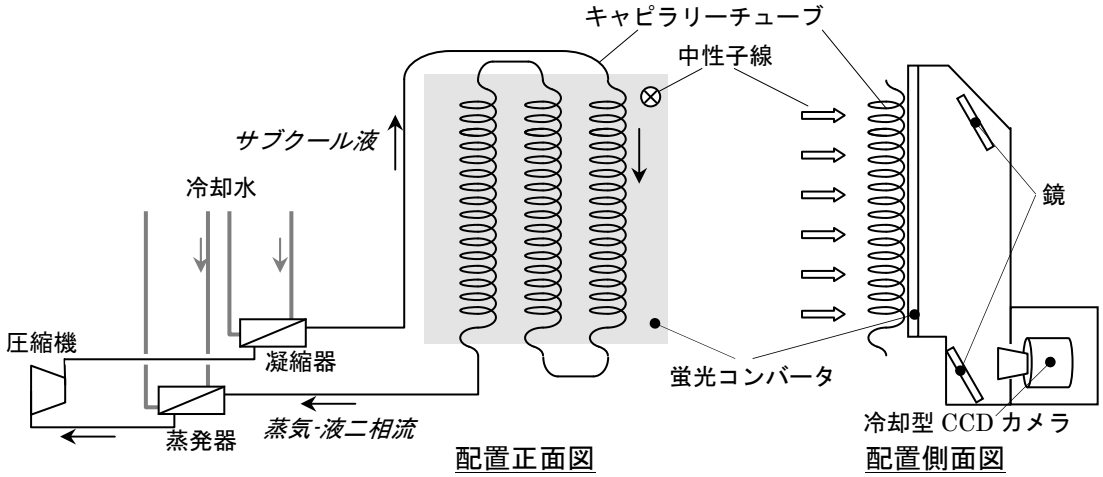
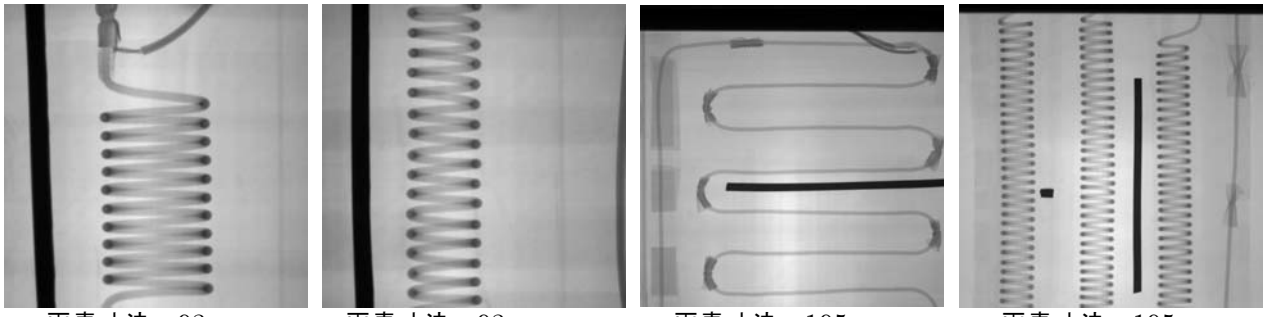


図１　実験装置概略

表１　キャピラリーチューブ仕様

	A	B	C	D
外径［mm］	3.0			
内径［mm］	1.0			1.5
形状	コイル		水平蛇行	コイル
コイル径［mm］	29	20	ー	19
全長［mm］	1700	1750	1800	8900



画素寸法：92 μm　(a) 試験部 A
画素寸法：92 μm　(b) 試験部 B
画素寸法：195 μm　(c) 試験部 C
画素寸法：195 μm　(d) 試験部 D

図２　中性子ラジオグラフィによる可視化画像

３．研究成果

ａ．一次元ボイド率分布　　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。チューブ内が蒸気のみの画像、液で満たされたときの画像をあらかじめ取得しておき，流動実験中の画像との比較演算によって平均ボイド率分布を計測した。計測結果の一例を図 3 に示す。らせん管（試験部 A, B, D）の場合、コイル 1 ピッチ分の体積平均ボイド率がプロットされている。一方、水平蛇行管（試験部 C）の場合、らせんコイルの 1 ピッチ分と同等の長さで移動平均をとった。ここでは、沸騰開始後の気液二相流でのボイド率変化に及ぼす管形状の影響を評価するため、同一の入口条件における結果に対し、沸騰開始点からの相対距離を横軸にとりプロットした。沸騰開始点はボイド率分布より推定した。試験部 C においてプロットがない部分は蛇行のターン部に相当する。これより、試験部 D, B, A, C の順にボイド率の上昇割合が大きくなっているのがわかる。試験部 D は、他の試験部に対し内径が 1.5 倍であるため、同一質量流量の場合、質量流束は 4/9 倍であり摩擦損失が小さく、圧力低下が小さいためである。一方、試験部 B, A, C では、質量流束はほぼ同等であり単相流として考える場合、らせんに巻かれたほうが摩擦損失は大きくなると推定される。しかし、ボイド率の増大割合は、水平蛇行管が最も大きく、らせん管においても巻き径が大きいもののほうが増大割合が大きかった。この傾向は単相流基準で想定した摩擦損失の傾向と逆の傾向を示している。その理由として、2 点が推定される。

①　気液二相流部の圧力損失特性が、単相流の場合とは逆の傾向を示す。らせん管の場合、強い遠

心力が作用するため分離流となりやすく圧力損失は小さくなる。一方、水平管の場合、低ボイド率では均質流となり、体積流量が高くなり圧力損失が大きい。

② 沸騰遅れが異なる。巻き径の小さいらせん管ほど二次流れの影響が大きく、沸騰核を形成しやすい。水平蛇行管の場合、沸騰遅れが大きくなるため、沸騰開始時の熱非平衡が大きく、沸騰開始直後の相変化量が大きくなる。

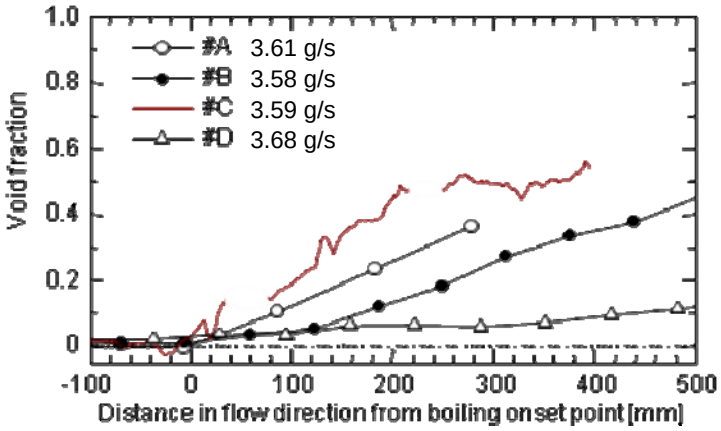
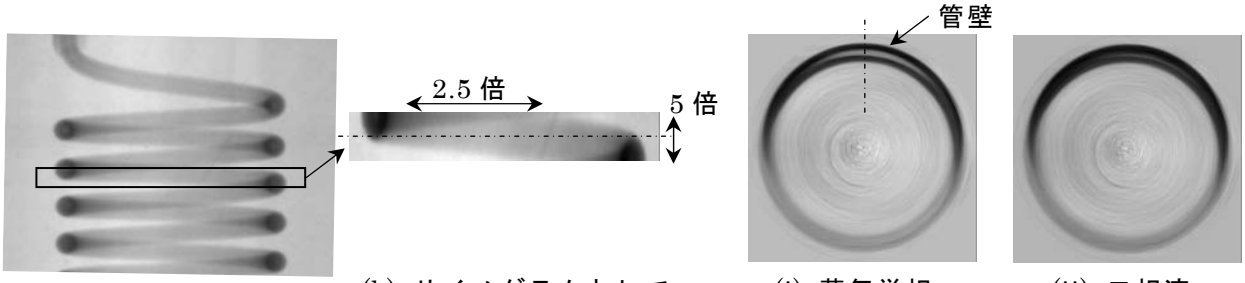


図３　平均ボイド率分布

ｂ. 管断面ボイド率分布　　キャピラリーチューブ内の相分布に及ぼす遠心力の影響を評価することが重要である。中性子ラジオグラフィでは、ビーム照射方向の透過像をもとにボイド率を算出しており、管断面の情報を得ることはできない。断面情報を得るには、多方向からの透過像を取得する必要がある。しかし、この実験で対象とするキャピラリーチューブはらせん状に巻かれており、視点を任意の方向に固定した場合，らせん軸の方向に対し流路形状が一定の回転角で回転していると考えることができる。計測対象区間において、気液各相の流路形状に対する相対的な相分布の変化を無視すれば、相分布も流路形状と同様に一定の回転角で回転していることになる。つまり、ある方向から投影された 2 次元画像が､任意の断面に対し被写体を回転させて得た投影像を積み重ねたものと等価であると評価できる。これは、CT による断層撮影法での多方向からの投影像を積み重ねたサイノグラムに相当する。ここでは、らせんの半ピッチを計測対象とし、サイノグラムとして扱い、CT 再構成を施し断面分布を得る方法を試みた．試験部 A に対する計測結果の一例を図 4 に示す。サイノグラムとして切り出した画像の縦の画素数は、180°の回転に対する投影数であるが、この場合、30 画素程度と少なく CT 再構成に不十分であったため、縦方向に画素数を 5 倍に拡大し、輝度を内挿によって与えた。水平方向にも同様、画素数を 2.5 倍に拡大した。なお，試験部#C については，水平直管であり管軸に対して垂直の方向に重力が作用しているため，相分布は軸対称でなく，CT 法は適用できない．また，ここでは遠心力は作用せず重力の影響を評価するので管軸に垂直方向の減衰分布を計測した．



(a) 原画像　(b) サイノグラムとして利用した抽出画像　(i) 蒸気単相　(ii) 二相流　(c) CT 再構成結果

図４　簡易 CT による断面分布

図 4(c) が CT 再構成結果である。ビーム照射方向に対する水平断面（図(b)中の水平一点鎖線）上の中性子線の減衰分布が表わされている。黒い部分が､減衰が大きいことを示す。管のらせん構造が、図(c)において大きな円として出力されている。らせん径と管径の比は、正しく計算されていた。らせんピッチが小さく、また、図(c)の下部においても薄く管があるように見えるが、これは中性子線

の L/D による画像のボケのためである。図(b)からわかるように、水平断面であるので CT 再構成で得られた断面像は歪んだ形となる。しかし、円の中心線（図(c), (i)中の垂直一点鎖線）での分布は管断面水平軸上の減衰分布と捉える事ができる。一方、二相流の場合（図(c), (ii)）、三日月状の薄い部分が管内部に見られ、蒸気の存在が確認できる。その位置はらせん径に対し内側に偏っているようである。内径 1.0mm と細い管であっても、表面張力が低い冷媒が高速で流動する場合、遠心力の影響が大きく、密度が大きい液相が外側を流動しやすくなったためと考えられる。

各試験部に対する管断面水平軸上の減衰分布を図 5 に示す。試験部#C （図(c)）は，前述の通り中性子線照射方向の積分情報の管軸に垂直方向の分布である．実験条件は図 3 での条件と同じとし、ボイド率が約 0.15 の地点について CT 再構成を施した。水平管の場合、管軸を含む水平面に対する相分布の対称性は仮定出来ないため、CT 再構成を施すことはできず、試験部がない画像との演算によって得た減衰分布をプロットした。これより、水平管（試験部 C）の場合、管の上部と下部で分布に大きな差異は見られず、らせん管の場合は、らせん内側に蒸気が偏っていることがわかる。キャピラリーチューブでは、流速が高く慣性力支配となり、重力の影響は小さく、蒸気がほぼ均一に流動しているものと考えられる。一方、らせん管の場合は、大きな遠心力が作用するため蒸気が内側に沿って流動したものである。試験部 B ではらせん外側に蒸気がほとんど見られず、遠心力が強く作用していることがわかる。液単相流部の平均流速 u_L [m/s] とらせん半径 r [m] から算出した遠心力による加速度は、試験部 A, B, D に対して、それぞれ 1170, 1620, 380 m/s^2 であった。

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。らせん管試験部に対し、簡易CT法を適用することで半径方向の相分布を計測することができた。計測結果から、内径 1.0mm であっても、強い遠心力が作用するらせん管では、気液が分離しやすく、蒸気がらせん内側に沿って流動することが確認された。

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).

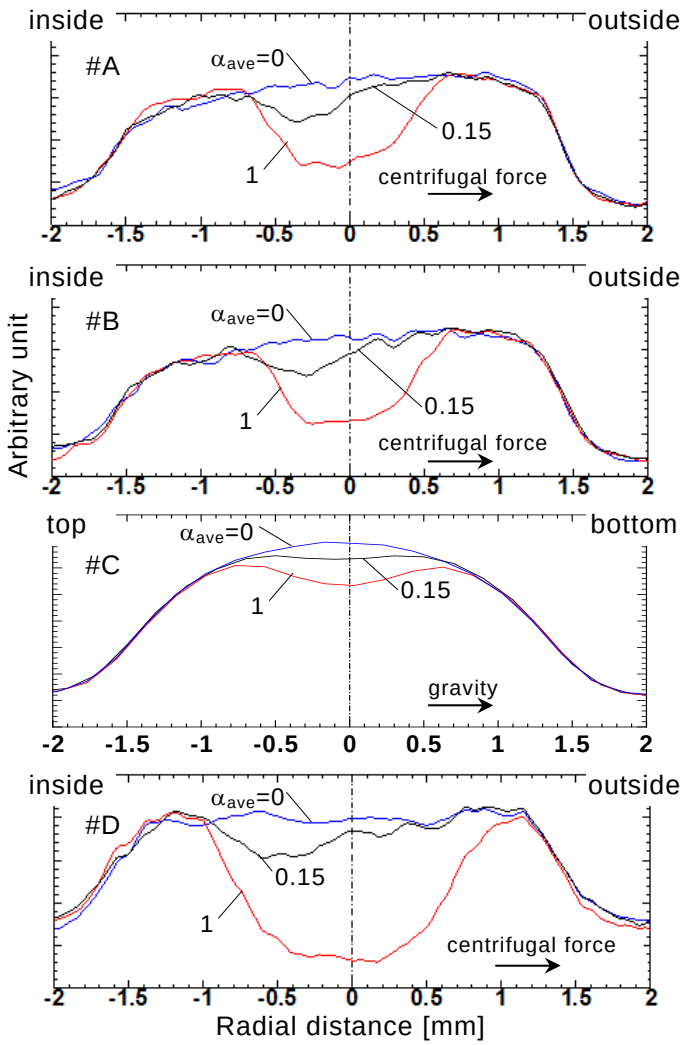


図５　管断面水平中心軸上における半径方向分布