

連載講座



中性子イメージング技術の基礎と応用（応用編第5回）

中性子イメージングの流体力学への応用－1[†]

竹中信幸，浅野 等，梅川尚嗣*，松林政仁**

神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻

657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

*関西大学工学部機械システム工学科

564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

**独立行政法人 日本原子力研究開発機構中性子イメージング分析研究グループ

319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Key Words : neutron, neutron imaging, neutron radiography, industrial application, fluid engineering,
two-phase flow, thermo-fluid machine, fuel cell, fluidized bed

1. はじめに

物体中の中性子線の減衰特性は，その物体を構成する元素により様々であるが，水素や特定の元素に大きく減衰され，多くの金属をよく透過する。水，油，有機液体等の通常の液体は水素を多く含んでおり中性子線を減衰するが，鉄，銅，アルミニウム等の工業的によく使用される金属の減衰係数は通常の液体より小さい。多くの機械は金属製であり，中性子ラジオグラフィ

では機械内部の液体挙動が透視できることから，「機械のレントゲン」としての利用が可能である。中性子ラジオグラフィの流体力学への応用として，他の方法では困難な金属製の管や容器内の流体挙動，特に気液固の各相が入り混じった流れである二相流を可視化・計測することが従来から行われており，近年，特に産業応用が注目されている。本連載では，今回は二相流の可視化・計測についての概説と，個々の機器についての最近の応用例として冷凍・冷却機器を，次回は引き続き応用例として燃料電池，流動層と，日本原子力研究開発機構における産業利用例を，2回に分けて紹介する。

2. 二相流の可視化・計測

機械の中の流体は，気体，液体，固体の相が入り混じって流れることが多く，特にエネルギー機器では，気体と液体が流れる気液二相流が多く見られる。このような二相流では，気液がどのような流動様式で流れているかを可視化することと，気体と液体の体積比を測定することが，機器の設計の上で重要であり，金属製の管や容器内での応用が広く中性子ラジオグラフィで行われている。

[†]Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Applications Part 5).

Application of Neutron Imaging to Fluid Engineering-1.

Nobuyuki TAKENAKA, Hitoshi ASANO, Hisashi UMEKAWA* and Masahito MATSUBAYASHI**: Thermo-Fluid Dynamics, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Kobe University, 1-1, Rokkodai-machi, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo Pref. 657-8501, Japan, *Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Kansai University, 3-3-35, Yamate-cho, Suita-shi, Osaka 564-8680, Japan, **Quantum Beam Science Directorate, Japan Atomic Energy Agency, 2-4, Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki Pref. 319-1195, Japan.

Costigan と Wade¹⁾は、原子炉の安全性研究として、高温の管内に水が流入して沸騰が生じ、管壁近傍を蒸気が、管中央を液体が流れる、逆環状流と呼ばれる特異な二相流の可視化を行っている。本格的な二相流研究としての最初の応用例であり、その後多くの可視化例が報告されている。

このような可視化画像を画像解析して、気体と液体の体積比を計測する試みも多数行われている。その概要を紹介する。

気体体積の気液合計体積への比は、ボイド率 α と呼ばれ、瞬時局所的なボイド率 $\alpha(x, y, z, t)$ の定義は、

$$\alpha(x, y, z, t) = 1; \text{気相}$$

$$\alpha(x, y, z, t) = 0; \text{液相}$$

であり、気液二相流の場の方程式ではデルタ関数で表される。実際の計測では、空間・時間について何らかの平均を施したボイド率の値が計測され、中性子ラジオグラフィでは、ビーム方向に積分された値を計測することになる。中性子線は気液界面の影響を受けず、気体での減衰は一般に無視できる。ビーム方向を z とすると、ある点 (x, y) で、ビーム方向の平均ボイド率を $\alpha(x, y, t)$ 、二相流部の z 方向の厚さを $t(x, y)$ とすれば、

$$\{1 - \alpha(x, y, t)\} t(x, y)$$

により放射線減衰量が決定される。画像の輝度が中性子線量に比例することを仮定すれば、気液二相流の輝度分布 $S_{TP}(x, y, t)$ は、

$$S_{TP}(x, y, t) = G(x, y) \exp[-\rho_w \mu_{mwtw}(x, y) - \{1 - \alpha(x, y, t)\} \rho_\ell \mu_{met}(x, y)] + O_{TP}(x, y, t) \quad (1)$$

気体のみ $\alpha(x, y, z, t) = 1$ の分布 $S_1(x, y, t)$ は、

$$S_1(x, y, t) = G(x, y) \exp[-\rho_w \mu_{mwtw}(x, y)] + O_1(x, y, t) \quad (2)$$

液体のみ $\alpha(x, y, z, t) = 0$ の分布 $S_0(x, y, t)$ は、

$$S_0(x, y, t) = G(x, y) \exp[-\rho_w \mu_{mwtw}(x, y) - \rho_\ell \mu_{met}(x, y)] + O_0(x, y, t) \quad (3)$$

と表される。ここに、 $G(x, y)$ はゲイン、 $O(x, y, t)$ はオフセット、添え字 $TP, 1, 0$ は二相流、気体のみ、液体のみ、密度 ρ と質量減衰係数 μ_m の添え字 w は容器の壁、 ℓ は液体を示す。オフセット項は照射体の影響を受けない項と受ける項に大別でき、前者は撮像系の暗電流、0 点のずれ、電気ノイズ等であり一定であるが、後者は主に散乱中性子線によるもので、画像ごとに評価する必要がある。

式(1)～(3)の画像が得られれば、画像演算により

$$\alpha(x, y, t) = \frac{\ln \{S_{TP}(x, y, t) - O_{TP}(x, y, t)\}}{\ln \{S_1(x, y, t) - O_1(x, y, t)\}} - \frac{\ln \{S_0(x, y, t) - O_0(x, y, t)\}}{-\ln \{S_0(x, y, t) - O_0(x, y, t)\}} \quad (4)$$

となり、容器や液体の密度、減衰係数、厚さがわからなくてもボイド率分布が得られる。

また、式(1)、(2)の画像を用いれば

$$\{1 - \alpha(x, y, t)\} \rho_\ell \mu_{met}(x, y) = \ln \{S_1(x, y, t) - O_1(x, y, t)\} - \ln \{S_{TP}(x, y, t) - O_{TP}(x, y, t)\} \quad (5)$$

で液体による減衰量が画像演算でき、CT 再構成の入力データにできる。また式(5)を x で積分すれば、 (x, z) 断面即ち水平断面平均ボイド率が計算できる³⁾。

このような画像演算において、定量的な計測を行うためには、オフセット項の評価のため中性子散乱による影響の除去や補正を検討する必要があり、基礎編第3回で解説されている。ここでは二相流への適用例について紹介する。

Hibiki ら²⁾は照射体とコンバータの距離を大きくすることで、散乱中性子の画像への影響を低減し、式(1)～(3)のオフセット項を等しいとみなし、減衰のわかっている部分の値を元に補正している。この方法では、ビームの非平行性による画像のボケは大きくなるが、簡便であり、

表1 熱中性子に対する減衰係数

	減衰係数[cm ⁻¹]		
	Parquet らによる計測結果	掛布による計測結果	構成元素からの計算値
R12 [CCl ₂ F ₂]	0.72	0.718	0.718
R22 [CHClF ₂]			0.677
R134a [CH ₂ F-CF ₃]	0.47	0.807	0.464
イソブタン [C ₄ H ₁₀]			1.29
油[～ C ₂₈ H ₅₈]	1.20		

L/D の大きなシステムでは有効な方法である。

竹中ら³⁾は、真影法を応用して角棒状の B₄C 製吸収体を等間隔に並べてグリッドとし、照射体と線源の間に設置して吸収体の真影からオフセット項を計測し、吸収体のない部分のオフセット項を内挿により求めて補正している。この方法では画像情報は半分以下になるが、画像とオフセット項の両方が1枚の画像上で同時に計測されるので、精度のよいボイド率計測が行えることが報告されている。

定量性を必要としない可視化においても、オフセット項を適切に評価すれば画像の解像度を向上することができる。ビームを停止した時の画像や画像中の真影の値をオフセットとした補正が行われている。

3. 冷凍、冷却機器の可視化

冷凍機のコンパクト化・高性能化の進展，冷媒流動音の低減，代替冷媒への転換などの問題から，機器設計において冷媒やコンプレッサ潤滑油の流動挙動の把握が必要とされている。高圧下もしくは熱交換を要するため機器は大抵金属製であり，作動流体や潤滑油には水素が含まれていることが多いことから，中性子ラジオグラフィによる可視化・計測が有効である。ここでは冷凍サイクルやヒートパイプなどの可視化事例を紹介する。

冷媒，潤滑油の中性子線に対する減衰係数の測定結果と構成元素の断面積から算出した値の例を表1に示す。Parquet ら⁴⁾，掛布⁵⁾による計測結果であり，掛布⁵⁾は，冷媒 R134a の計測値

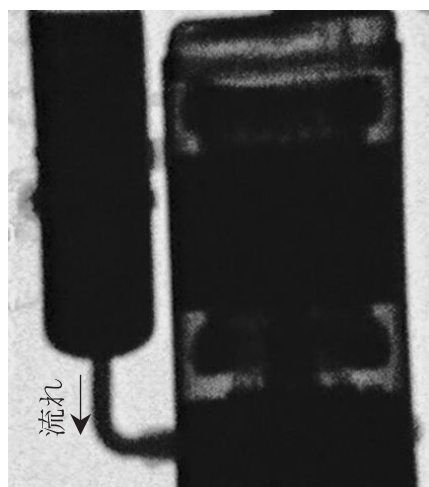
が計算値と異なるのは中性子のエネルギースペクトルとコンバータの違いによるとしているが，定かではない。

Parquet ら⁴⁾は，家庭用冷蔵庫冷凍室に配置されているロールボンド型と呼ばれる熱交換器を可視化し，液冷媒と潤滑油の挙動を観察した。冷媒 R134a に鉱物油を使用した場合，油は液冷媒と分離しているが，エステル油の場合，サイクル運転時には液冷媒と油は分離せず混ざること示している。山下⁶⁾は，車載用の片側斜板式可変容量型と呼ばれるコンプレッサ内部のオイル挙動を可視化し，コンプレッサ傾斜時及び運転時の液面挙動がはっきりと観察できることを示した。Asano ら⁷⁾は空調機用の全密閉型ロータリーコンプレッサとアキュムレータと呼ばれる圧力変動を緩和させるために設置されるタンクを可視化しており，その例を図1(a)，(b)に示す。図1(a)に示す停止時には，アキュムレータ，接続配管，コンプレッサ底部の圧縮機室には液冷媒と潤滑油が蓄えられており，中性子線の減衰が大きいため黒く可視化されているが，モーター部は内部構造を透視できている。

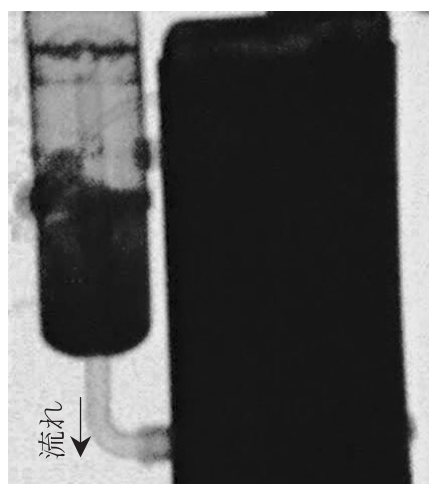
一方，図1(b)に示す運転時には，アキュムレータ内の液が減圧沸騰し，コンプレッサに吸引されるが，接続配管内に液は見られず，アキュムレータで気液分離が達成されていることがわかる。コンプレッサは真っ黒になっているが，これは潤滑油がフォーミングによってコンプレッサ内に広がったためと考えられる。

Balaskó ら⁸⁾は，冷蔵庫用蒸発器内部の冷媒 R134a 挙動を可視化し，起動時には蒸発器内の

アキュムレータ コンプレッサ



(a) 停止条件



(b) 運転条件

図1 冷媒R22を用いたアキュムレータとコンプレッサのラジオグラフィ画像

液だまり気液界面近くに分離存在する潤滑油が、運転開始20分後には均質になっていることを示した。また、蒸発器からの騒音を同時に計測し、流れとの相関を考察した。

掛布^{5),9)}は、カーエアコンで使用されるコルゲートフィン式と呼ばれる熱交換器のアルミニウム製コンデンサーチューブ内の冷媒R134a挙動を可視化した。チューブは厚さ1.7 mmの

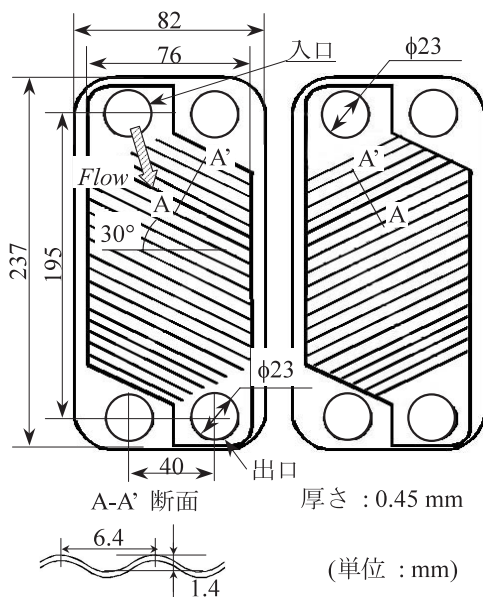
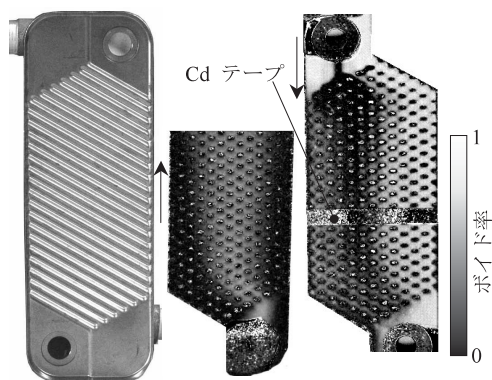


図2 プレート熱交換器の構造

アルミニウム板の中に複数の扁平平行流路を加工したものであり、ビーム照射方向の流路高さを1.1, 0.9, 0.5, 0.3 mmと変化させている。液冷媒のコントラストが小さく、30コマ/秒の動画像では液冷媒の存在を確認できないが、256コマ(8.53秒間)の時間積分、シェーディング補正、コントラスト強調を施すことで液冷媒の分布が可視化されている。

Asanoら^{10),11)}は、冷凍器で使用することを目的として、プレート熱交換器内空気-水二相流を可視化した。図2に示すプレート熱交換器は、板厚0.45 mmのステンレス鋼板(プレート)にプレス加工で波形状を施したものであり、左右対称の波形状をはんだ付けして網状の流路が形成される。作動流体は、2.8 mmの2枚のプレート隙間から網状流路に流入する。通常、プレートは数十枚積層され数十の並行流路が形成されるため、2枚のプレート間での液分布と複数流路への液分配の把握が重要となる。熱交換器が空の状態と、液で満たされた状態での可視化画像を取得しておけば、画像演算によって、容器の減衰を除去して水のみの挙動を可視化することも可能であり、ボイド率分布も計測でき



(a) 外観 (b) 上昇流 (c) 下降流

図3 冷却型 CCD カメラによる静止画像から得られたボイド率分布

る。気相が低流速の条件でのボイド率分布を図3に示す。黒いほど、液が多くボイド率は小さい。図3(b)が垂直上昇流, 図3(c)が垂直下降流での結果であるが, 流れ方向の影響が極めて大きいことがわかる。

図4は Asano ら¹²⁾, Y. Shibata ら¹³⁾による研究で, 冷媒流路を2本の流路に分ける分流器内のフロン冷媒 R22 の流れの可視化結果である。分流器入口の冷媒乾き度が0.3程度でボイド率が高いため, 単相流と同じ発想で, 流路を広げて慣性力を低下させ均一分配を図ったものである。しかし, 可視化結果から, 流路拡大は液のよどみを招き, 分流器内部に液が巻き上げられることが明らかにされた。更に, 入口

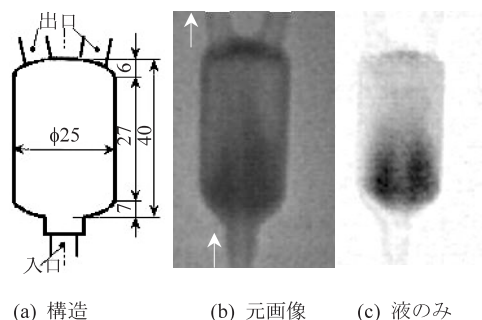


図4 分流器での冷媒挙動

と各出口での管断面平均ボイド率の時間変動の計測結果を, 分流器内部の液面挙動と比較・分析し, 4~5秒間隔に発生する液の巻き上げによって偏流が生じることも明らかにされた。流路を拡大せず, 液のよどみが発生しない構造を設計・試験し, 性能は改善された。

図5(a)は Asano ら¹²⁾による内径2 mm, 長さ1 mのアルミニウム細管内冷媒 R22 流れの可視化結果である。冷媒を高压容器から液体状態で供給し, 冷却型 CCD カメラで露光時間4秒で撮影した。配管の途中で沸騰が開始し(図中C点), 下流部では遠心力によって液相が管曲率の外側に沿って流れる様子が確認できる。単相流に対する圧力損失の計算結果とボイド率分布の計測結果から, 沸騰開始時の沸騰遅れが図5(b)に示すように計測された。図5(a)の条件では, 遠心力で密度が大きい液相が曲率の外側を流れていたが, 気液間の速度差が大きくな

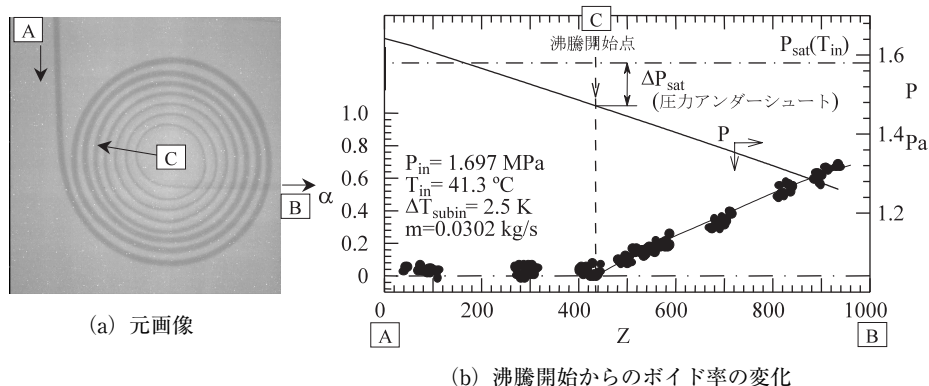


図5 アルミニウム細管 (内径2 mm, 外形3 mm, 長さ1 000 mm) 内の冷媒の沸騰流

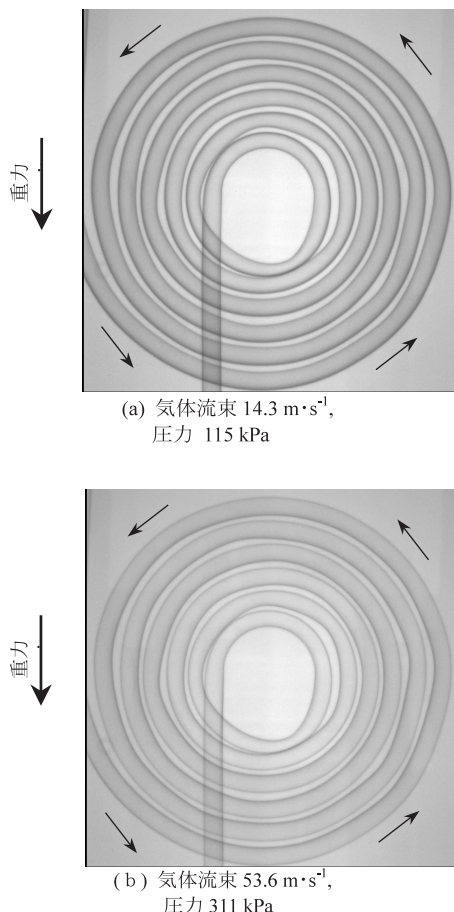


図6 らせん管内気液二相流のラジオグラフィ画像
液体流速 $0.221 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

ればその分布が反転することが予想される。

図6(a), (b)はAsanoら¹⁴⁾による内径8mmのらせん管内空気-水二相流の可視化結果である。気相低流速の条件では曲率の外側が黒く液相が多く流れているが、気相流速が高くなると曲率の内側が黒くなっており、流動様式の反転が確認された。更に、管断面平均ボイド率の計測結果から気液各相の平均流速を算出し、管断面液分布の重心位置が平均流速に基づく遠心力と重力による体積力のバランスで整理できることを示している。

Tamakiら¹⁵⁾は、非凝縮性気体ヘリウムを混入させた熱輸送デバイスであるサーモサイフォン内の作動流体を可視化した。冷媒にはイソオ

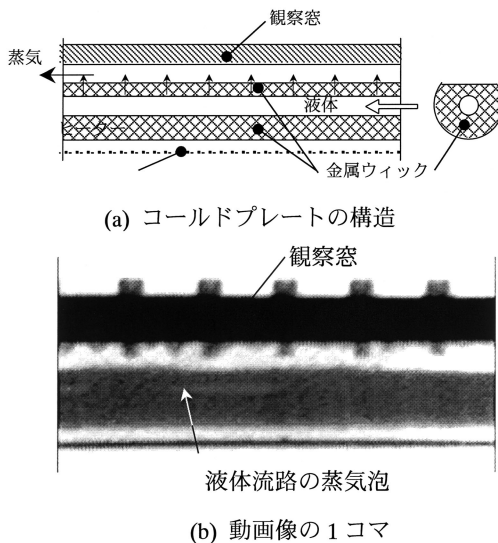


図7 二相流体ループで用いられるコールドプレート

クタンを用いている。作動時には非凝縮性ガスは凝縮器側へ移動し、作動流体蒸気と層状に分離するようになり、作動流体の液、蒸気、そして非凝縮性気体の3層が、中性子線透過率の差異によりはっきりと可視化されている。熱入力が大きいくほど、そのコントラストが強くなっている。

Cimbalaら¹⁶⁾は、蒸発部と凝縮部を分離し、配管で接続したループヒートパイプシステム内の冷媒アンモニアの流動挙動を可視化した。ループヒートパイプでは、蒸発部に設置されたウィックと呼ばれる多孔質体の毛細管力で冷媒を駆動するため、ウィック部での冷媒挙動の把握が重要となる。

中澤¹⁷⁾は、ポンプ駆動で冷媒を循環させる二相流体ループのコールドプレートと呼ばれる蒸発器を可視化した。このシステムは、宇宙環境下での使用を目的としており、ポンプ動力を抑えるため蒸発器には円筒状のウィックが設けられている。ウィック中心の流路に供給された液冷媒がウィック外周からの加熱で気化し、ウィック上部の蒸気流路から排出される(図7(a)参照)。起動時の挙動を30コマ/秒で実時間観察したところ、熱負荷が高くなると液流路内部

で蒸気が生成し, 液供給路が蒸気で満たされドライアウトに至ることを示している。

近年, CPU (central processing unit), MPU (microprocessing unit) など電子機器の高発熱密度化に伴い排熱を分散除去する熱拡散機器が求められている。この要求に対し, 液冷媒の振動でヒートパイプより高い実効熱伝導率が得られる自励振動型ヒートパイプが開発されている。河見ら¹⁸⁾は, 幅 50 mm, 厚さ 2 mm, 長さ 200 mm のアルミニウム製のプレートに, ピッチ 1.25 mm, 幅 1 mm の蛇行流路を 41 本加工したヒートパイプに, イソブタンを封入し, 上部加熱下部冷却, 又は上部冷却下部加熱で熱輸送実験を行い, 液柱の動きを可視化した。30 コマ/秒の撮影では, 激しく振動する液柱の気液界面を捉えることはできなかったが, 1 000 コマ/秒での高速度撮影で液の振動を捉えることに成功した。また, 画像処理で蛇行流路を引き伸ばし, 液の時系列変化の整理結果から, 液冷媒は細かい振動を繰り返しながら 0.25 ~ 0.5 秒程度の周期で大きく振動していることを見だしている。

文 献

- 1) Costigan, G. and Wade, C. D., Int. Workshop on fundamental aspects of post dryout heat transfer, Salt Lake, USA, April (1984)
- 2) Hibiki, T. et al., *J. Nucl. Sci. Tech.*, **30**, 15-22 (1993)
- 3) Takenaka, N. et al., *Nondestr. Test. Eval.*, **16**, 345-354 (2001)
- 4) Parquet, J.D. et al., *Neutron Radiography*, (4), 65-73 (1994)
- 5) 掛布光孝, 山本匡吾, 鳥越栄一, 山本 憲, 第 31 回理工学における同位元素研究発表会要旨集, 95 (1994)
- 6) 山下 彩, 「中性子ラジオグラフィ」専門研究会報告書, KURRI-KR-121, 68-76 (2005)
- 7) Asano, H. et al., *Neutron Radiography*, (5), 623-629 (1997)
- 8) Balaskó, M. et al., *Neutron Radiography*, (5), 617-622 (1997)
- 9) 畔柳 功, 山本 憲, 鳥越栄一, 小林 修, 掛布光孝, 第 35 回日本伝熱シンポジウム講論集, 723-724 (1998)
- 10) Asano, H. et al., *Proc. Int. Conf. on Multiphase Flow*, paper No.172 (2003)
- 11) Asano, H. et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **542**, 154-160 (2005)
- 12) Asano, H. et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **424**, 92-97 (1999)
- 13) Shibata, Y., *Proc. of the 3rd. Int. Conf. on Multiphase Flow on CD-Rom*, paper No.322 (1998)
- 14) Asano, H., Takenaka, N., Fujii, T., Arakawa, T. and Matsubayashi, M., *Nondestr. Test. Eval.*, **16**, 363-375 (2001)
- 15) Tamaki, M. *Proc. 3rd Int. Heat Pipe Symp.*, 120-127 (1988)
- 16) Cimbalá, J. M. et al., *Appl. Radiat. Isot.*, **61**, 701-705 (2004)
- 17) 中澤 武, 宇宙排熱システムにおける気液二相流動特性に関する研究, 神戸大学博士論文 (1995)
- 18) 河見英雄, 杉本勝美, 竹中信幸, 齊藤泰司, 日本混相流学会年会講演会講論集, D333 (2005)