437

中性子ラジオグラフィによる液体金属－ガス二相流の 液相速度計測

齊藤 泰司[○] (京大炉), 日引 俊, 三島 嘉一郎

飛田 吉春(サイクル機構), 鈴木 徹, 松林 政仁(原研)

Visualization and Measurement of Liquid Velocity Field of Gas-Liquid Metal Two-Phase Flow using Neutron Radiography

Yasushi SAITO, Takashi HIBIKI, Kaichiro MISHIMA, Yoshiharu TOBITA,
Tohru SUZUKI, and Masahito MATSUBAYASHI

ABSTRACT

In a core melt accident of a fast breeder reactor, a possibility of re-criticality is anticipated in the molten fuel-steel mixture pool. One of the mechanisms to suppress the re-criticality is the boiling of steel in the molten fuel-steel mixture pool because of the negative void reactivity effect. To evaluate the reactivity change due to boiling, it is necessary to know the characteristics of gas-liquid two-phase flow in the molten fuel-steel mixture pool. For this purpose, boiling bubbles in a molten fuel-steel mixture pool were simulated by adiabatic gas bubbles in a liquid metal pool to study the basic characteristics of gas-liquid metal two-phase mixture. Visualization of the two-phase mixture and measurements of liquid phase velocity and void fraction were conducted by using neutron radiography and image processing techniques. From these measurements, the basic characteristics of gas-liquid metal two-phase mixture were clarified.

Keywords: FBR, Neutron Radiography, SIMMER-III, Two-phase flow, Liquid metal flow, PIV

1. 緒言

SIMMER-III^{5,8)}に代表される高速炉の安全解析コードの高度化には、高速炉内に生じる熱流動現象を正確に予測することが必要である。炉心崩壊事故時に形成される溶融炉心内の燃料－スチール混合物沸騰プールは、高密度比気液二相流となるため、通常密度比の気液二相流とは特性が異なる可能性がある⁹⁾。そこで、本研究では高密度比気液二相流の基礎研究として、液体金属二相流の可視化・計測を行うことを目的としている。著者らはすでに中性子ラジオグラフィを用いた液体金属二相流のボイド率を計測し、相関式の提案及びSIMMER-IIIコードの検証を行った^{2,7)}。しかし、SIMMER-IIIのさらなる高度化と液体金属二相流の現象理解には、プール内における循環流の影響を定量的に調べる必要があり、液相速度分布を計測することが重要な課題となっている。

計測方法にはこれまでと同様に中性子ラジオグラフィを用いるが、中性子はX線と異なり、一般に金属をよく透過する。したがって、中性子に対して不透明な材質をトレーサとして用いることができれば、中性子を用いて金属管内の流動や液体金属流の速度計測が可能となる。

具体的な応用例としては、液体金属流や流動層内の粒子の速度場計測に中性子ラジオグラフィが適用されている。Takenakaらは、鉛ビスマス溶融金属流れに金カドミウムトレーサを適用し、速度場を計測しており^{10,11)}、Umekawaらは、炭化ホウ素と粘土との混合粒子を用いて、流動層内の粒子の速度分布を計測している¹²⁾。

本研究では、窒素ガス－鉛ビスマス二相流に金カドミウムトレーサを分散させて実験を行い、液相速度分布の計測法について検討を行ったので報告する。

2. 実験

Fig.1に試験部の概略を示す。試験部は底部にガス噴出ノズルを備えたアルミ製矩形容器(100×20×400mm)であり、流体として窒素ガスと鉛ビスマス溶融金属を用いた。試験部は電気ヒータによって約200℃に保った。

実験では、精度良くボイド率を計測するために、トレーサの無い状態で、ガス流速を変化させて実験を行ない、その後、金カドミウムトレーサ(平均粒径1～1.5mm)を溶融金属中に分散させて実験を行った。撮影には高速カメラを用い、撮像速度は500fpsとした。なお、実験は、日本原子力研究所JRR-3Mにおいて行った。

Fig. 1 Schematic diagram of test rig.

Fig. 2 Basic concept of neutron radiography dynamic imaging method.

3. 解析方法

3.1 Σ -スケールリング法によるボイド率計測^{1,6)}

Fig.2 に中性子ラジオグラフィ動画撮像システムの概略図を示す。ここで、可視化・計測体系の一例として金属製試験部内気液二相流を考えると、入射中性子束 ϕ_{th} は、試験部を透過する時、次式で表されるようにその行路の物質厚さ δ に応じて減衰することから、透過中性子束 ϕ_p は試験部内の二相流情報を包含している。

$$\phi_p = \phi_{th} \cdot \exp\{-\Sigma_G \delta_G - \Sigma_L \delta_L - \Sigma_M \delta_M\} \quad (1)$$

ここで、式(1)中の Σ は中性子の全巨視的断面積、添字Gは気相、Lは液相、Tは二相流、Mは試験部を表している。

コンバータ面上に到達する中性子は、その中性子束 ϕ に比例して可視光に変換され、カメラにより記録される。記録された画像の輝度は撮像系の γ 値を1とすると次式のようになる。

$$G = C \cdot \phi_p + G_D \quad (2)$$

ここで、 G_D は暗電流である。しかしながら、コンバータ面上に到達する中性子束は透過成分以外に散乱成分が含まれる。 Σ -スケールリング法では散乱中性子と撮像系によるトータルのオフセットを G_0 と定義する。さらに、一部の気体を除いて気相の中性子の全巨視的断面積は試験部及び液相のそれに比べて無視でき、気相で満たされた試験部及び、液相で満たされた試験部の画像輝度は以下の式で与えられる。

$$G_G = C \cdot \phi_{th} \cdot \exp\{-\Sigma_M \delta_M\} + G_0 \quad (3)$$

$$G_L = C \cdot \phi_{th} \cdot \exp\{-\Sigma_L \delta_L - \Sigma_M \delta_M\} + G_0 \quad (4)$$

ここで、添字Lは流路間隙を表している。

式(3),(4)より G_0 は次式で与えられる。

$$G_0 = \frac{G_L - G_G \cdot \exp(-\Sigma_L \delta_L)}{1 - \exp(-\Sigma_L \delta_L)} \quad (5)$$

また、気液二相流の画像輝度は次式で与えられる。

$$G_T = C \cdot \phi_{th} \cdot \exp\{-\Sigma_L \delta_T - \Sigma_M \delta_M\} + G_0 \quad (6)$$

ここで、 δ_T は二相流における局所の液相厚さである。

したがって、ボイド率は次式で表すことができる。

$$\alpha = 1 - \frac{\delta_T}{\delta_L} = - \frac{\ln\left(\frac{G_L - G_0}{G_T - G_0}\right)}{\ln\left(\frac{G_L - G_0}{G_G - G_0}\right)} \quad (7)$$

本実験では、上記の Σ -スケールリング法を用いてボイド率の評価を行った。

3.2 気泡とトレーサの識別

中性子ラジオグラフィによって得られた原画像の一例をFig.3(a)に示す。この画像において、白い部分が気泡、灰色の部分が液相、黒い点がトレーサに対応する。しかし、 Σ -スケールリング法では、中性子は液相（ここでは鉛ビスマス）のみで減衰されるものと考えているため、トレーサを含む画像に同様の方法を用いるとトレーサの周辺のボイド率は負になる。したがって、本研究では、見かけのボイド率を計算し、気泡像とトレーサ像を分離した。得られた気泡画像とトレーサ画像の一例をFig.3(b),(c)に示す。気泡とトレーサが良好に抽出できていることがわかる。

3.2 液相速度分布計測

上記の処理により得られたトレーサ画像から、液相速度計測を行った。速度場の計算には、濃度相関法を採用した。マスクサイズ及びサーチ領域は実験条件に合わせて変化させた。

Fig.3 Example of an original image, tracer image, and void image taken by high-frame rate neutron radiography. (frame rate: 500fps)

Fig.4 Void distribution and liquid velocity vector map ($j_g = 1.0\text{cm/s}$)

4. 実験結果と考察

Fig.4(a)に、気相の見かけ流速 $j_g = 1.0\text{cm/s}$ における瞬時ボイド率分布と液相速度分布の計算例を示す。図からわかる様にボイド周辺で複雑な循環流が生じていることがわかる。しかし、①ラジオグラフィ画像の画質が悪いこと②トレーサ濃度が十分ではないこと③定常的な流れではないこと④気泡周辺では、三次元的な流れの影響が大きくなるために、相当量の誤ベクトルを含んでいるものと考えられる。そのため、平均的な流れ場を調べるために 250 枚 (0.5 秒間) の連続画像を平均化した。Fig.4(b)は時間平均ボイド率分布及びベクトル線図である。この図からわかるようにボイド率の高い部分で上昇流が起り、周辺部で下向きに流れるといった試験部内の二次元的な対流の様子が明瞭にとらえられていること

がわかる。また、本実験はプール体系であるので、各高さにおいて、液相の速度の断面平均では、ゼロとならなければならないが、図から計算結果は、ほぼ妥当と考えられる。

Fig.5(a)(b)に、 $j_g = 2.9, 8.9\text{cm/s}$ における時間平均のボイド率分布及び、ベクトル線図を表す。図から、気相流速が大きくなると、全体に上昇流が目立って現れており、液体の物質収支を考えると妥当な計算結果ではないことがわかる。これは、試験部両端の下降流を捉えきれないことと、ボイド率が大きくなると試験部内の液相が相対的に少なくなるため、トレーサ濃度が低くなることと気泡周辺の非定常かつ三次元的な流れの影響が大きくなるために、液相の速度計測に誤差が生じているためと考えられる。

Fig.5 Time averaged void distribution and liquid velocity vector map .

5. 結論

SIMMER-III コードの検証を目的として、液体金属二相流の可視化・計測を中性子ラジオグラフィによっておこない、以下の結論を得た。

- 1) Σ -スケーリング法を用いて気泡画像とトレーサ画像を分離することができた。
- 2) トレーサ画像から液相速度を気泡画像からボイド率分布を計測し、二次元的な対流の様子を観察することができた。
- 3) ボイド率が大きくなると気泡周辺の非定常な三次元的な流れの影響が大きくなるために計測誤差が大きくなるが、ボイド率が小さい場合には平均的な流れパターンを計測できることがわかった。

謝 辞

計測に使用した金カドミウムトレーサの作製法については、神戸大学工学部 竹中信幸先生に御指導いただきました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Hibiki T., Mishima K., Yoneda K., Fujine S., Tsuruno A., and Matsubayashi M.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 351 (1994) pp.423-435.
- 2) Hibiki T., Saito Y., Mishima K., Tobita Y., Konishi K., and Matsubayashi M.: Nucl. Eng. Des., Vol. 196 (2000) pp. 233-245.
- 3) Ishii M.: Argonne National Laboratory Report, ANL-77-47, (1977).
- 4) Kataoka I., Ishii M.: Int. J. Heat Mass Transf., Vol.30 (1987) pp.1927-1939.
- 5) Kondo S., Tobita Y., Morita K., and Shirakawa N.: Proc. International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plant, IV, 40.5-1-40.5-11, Tokyo, Japan, (1992).
- 6) Mishima K., Hibiki T.: Nucl. Sci. Eng., Vol. 124 (1996) pp. 327-338.
- 7) Mishima K., Hibiki T., Saito Y., Tobita Y., Konishi K., and Matsubayashi M.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol.424 (1999) pp.229-234.
- 8) Nonaka N., Miyake O., and Kondo S.: Proc. International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plant, Tokyo, Japan (1992).
- 9) Saito M., Sawada T., Teraoka Y., and Nezu Y.: Proc. Sixth International Conference of Nuclear Engineering, ICON-6, San Diego, CA, USA (1998).
- 10) Takenaka N., Fujii T., Ono A., Sonoda K., Tazawa S., and Nakanii N.: Neutron Radiography. Vol.4. (ed. Barton J.P.), Gordon and Breach (1993) pp.355-362.
- 11) Takenaka N., Asano H., Fujii T., Motomura Y., Ono A., Matsubayashi M. and Tsuruno A.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 377 (1996) pp.156-160.
- 12) Umekawa, H., Ozawa, M., Takenaka, N., Matsubayashi, M., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 424 (1999) pp. 77-83.