

機関番号：14301

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360418

研究課題名 (和文) 鉛ビスマス二相流の詳細構造に関する研究

研究課題名 (英文)

Fundamental structure of Pb-Bi Two-phase flow

研究代表者

齊藤 泰司 (SAITO YASUSHI)

京都大学・原子炉実験所・准教授

研究者番号：40283684

研究成果の概要 (和文)：液体金属二相流の詳細構造を計測するために、中性子ラジオグラフィとプローブ法の二つの手法の高度化を行った。中性子ラジオグラフィでは高速度撮像法を用いて、気泡の動態を観察するとともに、4 センサー法を用いた計測法を発展させ、気泡速度および気泡径を求めるアルゴリズムを導出し、数値実験および可視化実験から計測誤差を明らかにした。さらに本研究では、界面曲率が計測誤差に与える影響を幾何学的に考察し、曲率による誤差を補正するアルゴリズムを導出し、数値実験を用いた検証を行った。

研究成果の概要 (英文)：Development of measurement method using neutron radiography and conductivity probe, to investigate Pb-Bi two-phase flow. A simple algorithm using 4-sensor probe was derived to measure bubble velocity in a gas-liquid two-phase flow. Measurement error of bubble velocity and shape was estimated numerically and experimentally, assuming spherical and ellipsoidal bubble.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2009 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	7,200,000	2,160,000	9,360,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：熔融金属、混相流、中性子ラジオグラフィ、気液界面積、熱伝達

1. 研究開始当初の背景

安全な核エネルギーシステムの一つとして、加速器駆動未臨界炉 (ADS) が提唱されている。この ADS を消滅処理を目的として用いる場合、液体鉛ビスマスをターゲット兼冷却材として用いる可能性が高い。この時、燃料部およびターゲット部で加熱された鉛ビスマスは熱交換器で冷却されることになる。熱交換器内では高温の鉛ビスマスと水が間接的に接しており、万が一熱交換器壁が破損するようなことがあれば、鉛ビスマス—水

の直接接触が生じる。このような高温融体と冷却材との相互作用は核エネルギー源の安全評価を行うために極めて重要となる。

鉛ビスマス内に水が噴射された場合には、水が鉛ビスマス内で蒸発し、鉛ビスマス—水蒸気の二相流となるが、液相が重金属であるため、気液密度比は通常より一ケタ程度大きくなる。このような高密度比の気液二相流に関する知見は、液体金属冷却型高速増殖炉のシビアアクシデントにも密接に関連し、安全確保の面で極めて重要である。

2. 研究の目的

本研究では、鉛ビスマスと不活性ガス（窒素）の気液二相流を研究対象とし、二相流挙動の詳細計測を目的とした。しかしながら、可視光に対して不透明である液体金属を用いるため、レーザなどを用いた計測が不可能である。中性子ラジオグラフィなどの放射線計測を用いれば、気泡挙動などを詳細に観察することが可能であるが、試験部が大きい場合には計測は極めて難しくなる。したがって、本研究では、中性子ラジオグラフィを計測方法開発の補助ツールと用いつつ、汎用性の高い接触式プローブ計測を採用し、計測の高度化を行うことを目的とした。

二流体モデルを用いて二相流を解析する場合、界面積濃度を正確に予測することが重要であり、解析モデルの高度化のためには、さらなるデータベースの構築が必要である。局所ボイド率や界面積濃度の計測には2センサー法や4センサー法などの探針法が広く用いられているが、接触式計測法であるため、界面変形や信号処理上の仮定によって計測誤差を生じる。4センサー法は2センサー法等と比較して、仮定が少なく応用範囲も広いが、一般的にプローブを通過する界面の曲率を考慮していないため、気泡が小さい場合や衝突角度が大きい場合には計測誤差が大きくなる。

しかしながら、界面積濃度の計測誤差を実験的に評価することは難しく、誤差評価が不十分であるのが現状である。本研究では4センサー法を用いた計測法を発展させ、気泡速度および気泡径を求めるアルゴリズムを導出し、数値実験および可視化実験から計測誤差を明らかにすることを目的とする。また、気泡速度や気泡径を評価できれば、間接的に界面積濃度の誤差評価も可能となる。さらに本研究では、界面曲率が計測誤差に与える影響を幾何学的に考察し、曲率による誤差を補正するアルゴリズムを導出し、数値実験を用いた検証を行った。

3. 研究の方法

局所時間平均の界面積濃度は、次式のようにかける。

$$\bar{a}_i = \frac{1}{T} \sum_j \frac{1}{|\vec{v}_{i,j}| \cos \phi_j} \quad (1)$$

ここで、 T は計測時間を、添え字 j は j 番目の界面をあらわす。Fig.1に示すように \vec{v}_i は界面速度ベクトルを、 ϕ は界面単位法線ベクトル \vec{n} と \vec{v}_i のなす角をあらわす。

Fig.1に示すような4センサープローブを用いた場合、出力信号はFig.2に示す矩形波となり、気泡がプローブを通過する際に信号電圧が上昇する。ここで気泡の通過時間を $\Delta\tau$ とし、プロー

ブ間の信号立ち上りの時刻差を Δt_R 、立ち下りの時刻差を Δt_F とする。添え字 k はセンサー番号をあらわし、 $k=0$ がフロントセンサーをあらわす。

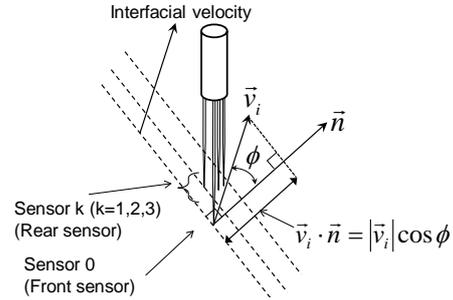


Fig.1 Interfacial velocity vector and normal vector.

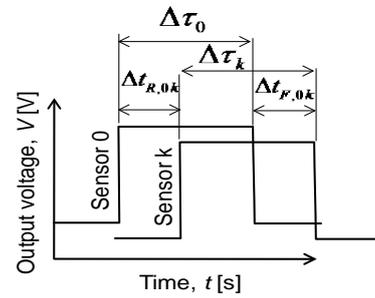


Fig.2 Output signal from 4-sensor probe.

4. 研究成果

Fig.3に示すようにセンサーを通過する気泡が球形であると仮定した場合、フロントセンサーの気泡通過時間を $\Delta\tau_0$ 、界面の単位法線ベクトルを \vec{n} 、法線と \vec{v}_b とのなす角を ϕ とすると、幾何学的な考察より、式(2)が成り立つ。

$$\vec{v}_b \Delta\tau_0 = R(\vec{n}_R + \vec{n}_F) \quad (2)$$

ここで、添え字の R 、 F はそれぞれ衝突時と離脱時をあらわし、式(2)を式(3)(4)のベクトルの内積に代入すると、式(5)を得る。この式により気泡半径を算出することができる。

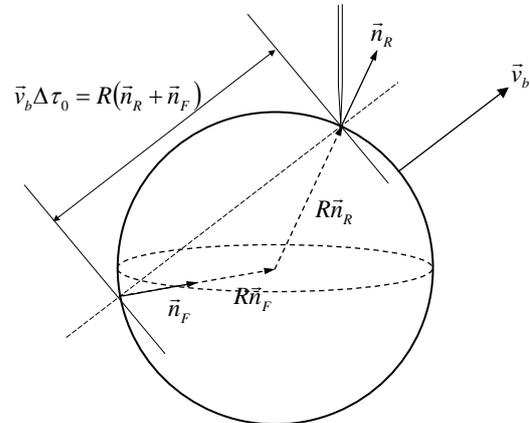


Fig.3 Spherical bubble model.

$$\vec{v}_b \cdot \vec{n}_R = |\vec{v}_b| \cos \phi_R \quad (3)$$

$$\vec{v}_b \cdot \vec{n}_F = |\vec{v}_b| \cos \phi_F \quad (4)$$

$$R = \frac{|\vec{v}_b| \cos \phi_l}{(\vec{n}_R + \vec{n}_F) \cdot \vec{n}_l} \cdot \Delta \tau_0 \quad (l = R, F) \quad (5)$$

ここで、式(3)(4)の値と単位法線ベクトルの値は Kataoka et al.の方法により算出する。さらに式(5)を式(2)に代入すれば、式(6)が得られ、気泡速度ベクトルが算出できる。

$$\vec{v}_b = \frac{|\vec{v}_b| \cos \phi_l (\vec{n}_R + \vec{n}_F)}{(\vec{n}_R + \vec{n}_F) \cdot \vec{n}_l} \quad (l = R, F) \quad (6)$$

楕円気泡についても、同様な記述が可能であり、4センサープローブの信号より気泡速度ベクトルおよび気泡径の計測が可能となる。

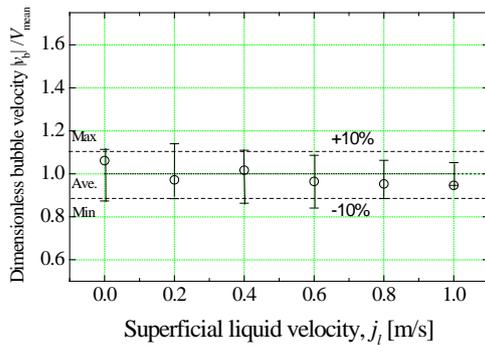


Fig.4 Validation of proposed algorithm .

Fig.4 に空気—水系を用いた検証実験の結果を示すが、本手法により気泡速度が 10%以内の精度で計測できることを示している。

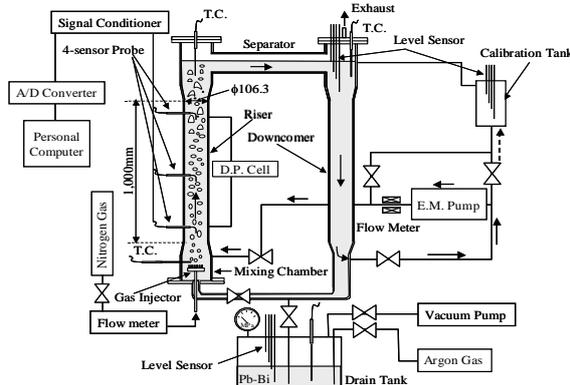


Fig.5 Schematic of Pb-Bi test loop.

Fig.5 に計測に用いた鉛ビスマスループの概略を示す。Fig.1 に実験装置の概略を示す。実験は大気圧下で実施され、実験装置は気液

混合部、試験部、気液セパレータ、ダウンカメラ、及び電磁ポンプより構成される。試験部は内径 25mm、長さ 2m のステンレス円管で高さ方向に 3 か所 4 センサープローブを設置している。流体には鉛ビスマス (Pb:44.5wt%, Bi:55.5wt%) と窒素ガスを用いる。気相流量はマスフローコントローラを用いて測定し、液体金属流量は電磁流量計およびカルマン式渦流量計を用いて計測した。

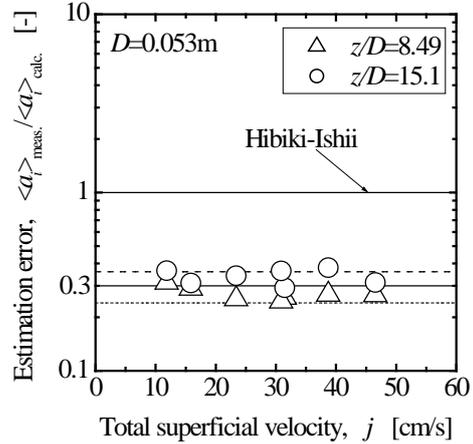


Fig.6 Comparison of measured IAC.

Fig.6 に鉛ビスマス—窒素二相流を用いた計測した界面積濃度と既存の実験式との比較を示す。Hibiki-Ishii の式は空気—水系で得られた式であるが、鉛ビスマス気液二相流では、界面積濃度は実験式に比べて小さいことがわかった。これは気泡径が大きく、高密度比気液二相流中では、気泡の合体確率が大きく、球形気泡よりも楕円気泡や笠状気泡が支配的となることがわかった。

以上、鉛ビスマス二相流に適用可能な 4 センサープローブの開発および、信号処理の高度化を行うとともに、これらの計測法を用いて、鉛ビスマス二相流の基本的な特性が明らかにされた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)
Saito Y., Morimoto T., Mishima K., Development of Bubble Measurements by using 4-Sensor Probe, Progress in multiphase flow research, Vol. 24, No. 5, p. 673-680 (2011).

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 齊藤泰司、森本崇裕、三島嘉一郎、4 センサープローブ法の二相流計測におけ

る誤差評価、混相流学会年会講演会
2009年8月7～9日、熊本.

(2) 齊藤泰司、森本崇裕、三島嘉一郎、
液体金属二相流の気液界面積濃度の計測
(1) 4 センサープローブの計測精度、原子力
学会秋の大会、2009年9月16～18日、
東北大学.

(3) 齊藤泰司、森本崇裕、三島嘉一郎、
液体金属二相流の気液界面積濃度の計測
(2) 強制流動実験、原子力学会秋の大会、
2009年9月16～18日、東北大学.

(4) 齊藤泰司、森本崇裕、三島嘉一郎、
4 センサープローブを用いた気液二相流の
計測の高度化、原子力学会春の大会、2010
年3月26～28日、茨城大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤泰司 (SAITO YASUSHI)
京都大学・原子炉実験所・准教授
研究者番号：40283684

(2) 研究分担者

三島嘉一郎 (MISHIMA KAICHIRO)
京都大学・原子炉実験所・名誉教授
研究者番号：60027472

沈 秀中 (SHEN XIUZHONG)
京都大学・原子炉実験所・助教
研究者番号：20362410