

令和元年6月20日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06959

研究課題名（和文）鉛ビスマス流れにおよぼす壁面濡れ性の影響

研究課題名（英文）Effect of Wall Wettability on LBE Two-Phase Flow

研究代表者

齊藤 泰司 (Saito, Yasushi)

京都大学・複合原子力科学研究所・教授

研究者番号：40283684

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：気泡塔試験部および強制対流ループを用いて、窒素ガス-鉛ビスマス気液二相流の実験と解析を行った。気泡塔試験部では、相分布と速度分布から分布定数を算出し、実験値と比較した結果、環状流路条件では、内壁側にボイド率分布のピーク位置を仮定した解析を行う必要があることを示した。さらに、気泡誘起乱流を考慮した半径方向運動量輸送モデルを用いた数値解析を行ない、壁面におけるスリップ速度を考慮すれば、実験結果を再現できることがわかった。これは、濡れ性の悪い壁面上では気泡によって濡れと乾きが繰り返すにより、スリップと同等の効果が生じていることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、特に高レベル核廃棄物の減容を目的とした加速器駆動システム（ADS）の安全解析の高度化に必要な基礎的研究であり、特に壁面濡れ性が流動特性に与える影響は、材料腐食とともにシステムの安全性に重要な役割を果たす。この研究により、高温液体金属の詳細な流動構造を取得することが可能となり、さらに、理論的な予測法も開発できており、今後、ADSのみならず、液体金属を用いるシステムの高度化に極めて重要な知見を与えた。

研究成果の概要（英文）：Experimental and theoretical studies have been conducted on lead bismuth eutectic (LBE) - Nitrogen gas two-phase flow, by varying the wall wettability. To study the wall wettability, the wall wettability was changed by using soldering flux for the bubble column test sections. From measurement results, the wall wettability affected the two-phase flow behavior and its phase distributions. The distribution parameters C_0 in the two-phase flow analytical model was estimated from experimental results, and compared to the theoretical analysis. The comparison shows that the wall wettability might affect especially the bubble behavior near the wall region. For the forced convection experiments, "wall peak" distribution was observed for the void fraction and liquid velocity distributions. Such wall-peak distribution could be reproduced by theoretical model if the slip velocity on the wall surface is assumed for poor wettability conditions.

研究分野：原子力工学

キーワード：液体重金属 加速器駆動システム 鉛ビスマス共晶合金 気液二相流 速度計測法 ボイド率計測法 シビアアクシデント解析 電磁流速計

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鉛ビスマスは、低融点で沸点が高く、熱伝導性に優れており、加速器駆動システム (Accelerator Driven System: ADS) の核破砕ターゲットおよび冷却材として、有望視されている。ADS への応用においては、鉛ビスマスの詳細な熱流動シミュレーションを実施する必要があるが、その单相および二相流の流動挙動については、十分な実験データベースが存在しなかった。その原因は、通常の水と比較して、鉛ビスマスが高温であり、可視光による計測が不可能なことに起因している。これまで、超音波を用いた計測も実施された例もあるが、鉛ビスマスが構造材 (試験部壁) に濡れがたいこともあり、十分なデータは取得できておらず、計測法の開発とデータの取得が急務の課題であった。

2. 研究の目的

ADS の実現のためには、想定される苛酷事故の解析を十分な精度で行うことが必須であるが、蒸気発生器破断時には、蒸気が炉内に射出され、鉛ビスマス蒸気の気液二相流が形成される。この気液二相流は、気液の密度比が高く、さらに鉛ビスマスが構造材に濡れがたいことから、壁面の濡れ性が二相流特性に与える影響を明らかにする必要がある。本研究では、電気伝導式 4 センサープローブおよび、小型電磁流速計を独自に開発し、計測精度の確認と、二相流特性の把握、および壁面濡れ性が二相流特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

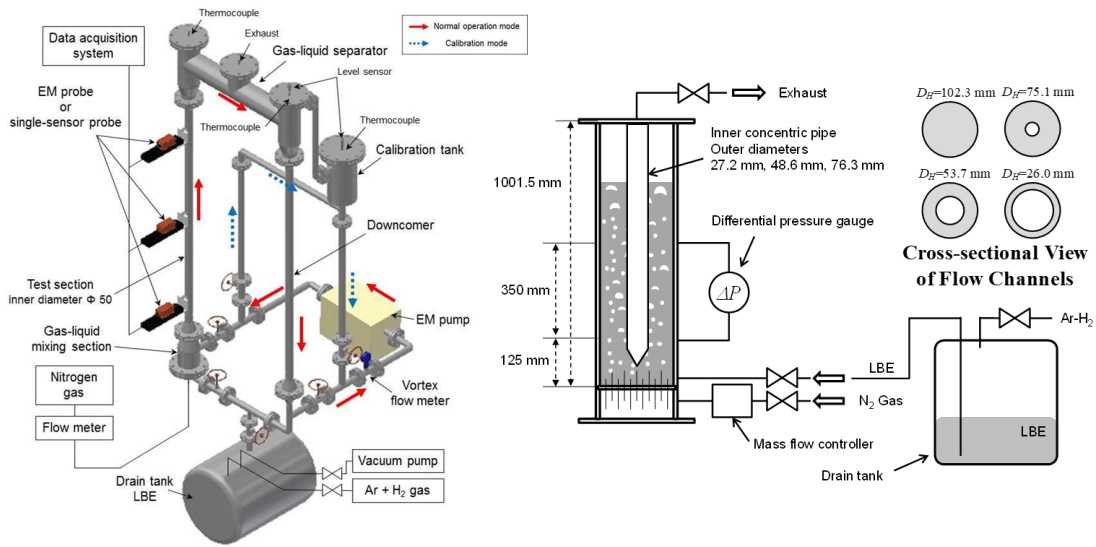
3. 研究の方法

実験は、強制流動ループと自然循環 (気泡塔) ループの二つの試験部を用いて行った。強制流動ループの概要を Fig.1(a) に示す。ループは、気液混合部、垂直円管試験部、気液分離器、電磁ポンプ、渦流量計からなり、ループ内には、流量計校正のためのキャリブレーションタンクが取り付けられている。

実験は、ループ内に 200 に昇温した鉛ビスマスを満たし、気液混合部に高純度窒素ガスを導入し、垂直円管部に気液二相流が形成される。試験部には、鉛直方向に 3 か所、センサー取付ポートが用意されており、ここに電気抵抗式 4 センサープローブあるいは、小型電磁流速計を挿入し、ボイド率や液相速度分布などを計測した。

自然循環ループの概要を Fig.1(b) に示す。試験部は、直径 100 mm のステンレス円管で、試験部下部にガス噴射ノズルが設置されており、ここに窒素ガスを導入することにより、気液二相流を形成させた。この円管試験部に、同心円状に内円筒を挿入することにより、環状流路を形成し、合計 4 種類水力相当直径を変更することができる。半田用フラックスを用いて、試験部内壁の濡れ性を変えて実験を行い、試験部に取り付けた差圧計を用いて、体積平均ボイド率を測定した。

以上の計測結果に対して、二相流解析を実施し、気液界面における抵抗、壁面における速度境界条件について、考察を行った。



(a) Force convection loop.

(b) Bubble column apparatus.

Fig.1 Schematic of forced convection loop for LBE two-phase flow.

4. 研究成果

Fig.2 に開発した電磁流速計の外観と計測回路の概要を示す。電磁流速計は、2 つの電極とサマリウムコバルト磁石からなり、全体をステンレス円管でサポートしている。Fig.3 に单相流における液相流速の校正結果の例を示すが、十分な精度で鉛ビスマスの流速を計測できることが明らかとなった。さらに、二相流中における流速信号の一例を Fig.4 に示す。信号中のスパイク状の変動は気泡通過の影響を示しており、信号処理で液相速度のみを抽出して、時間平均速度を求めた。

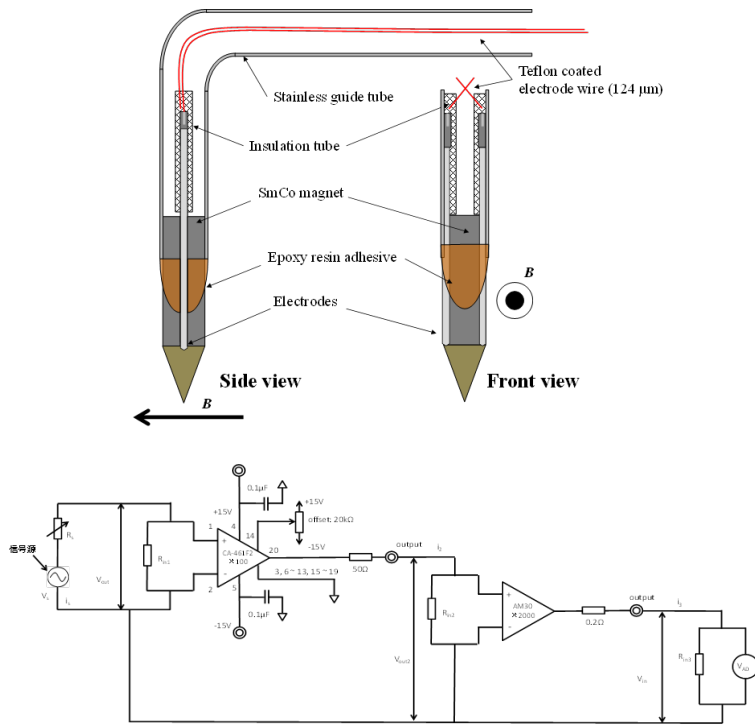


Fig.2 Schematic of Electrical magnetic probe and its amplifier system.

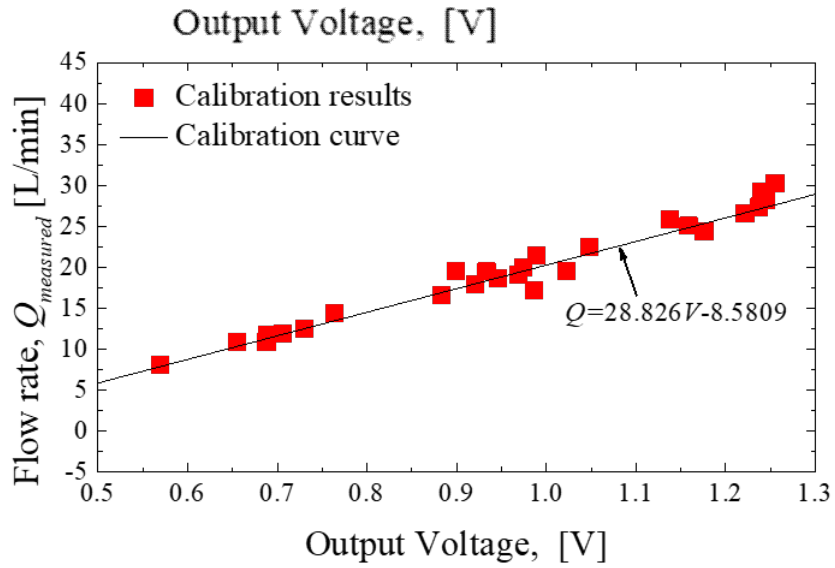


Fig.3 Calibration results of electrical magnetic probe.

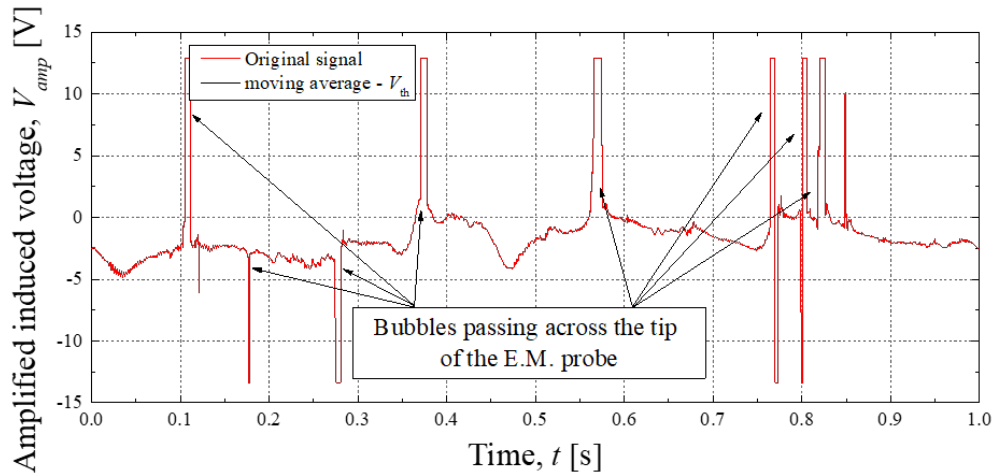


Fig.4 Measured voltage of EM probe in LBE two-phase flow.

Fig.5(a),(b)に強制流動ループを用いた際の、ボイド率分布と液相速度分布の実験データの例を示す。横軸は、無次元半径を表し、 $r/R=±1$ が試験部内壁、 $r/R=0$ が円管中心を示す。図からわかるように、気相流速が大きい場合には、ボイド率も液相速度も円管中心部において最大値をとるが、気相流速が小さい場合には、ボイド率と液相速度分布は、試験部中心部で極小値をもち、壁近傍で、極大値をとることがわかる。このような速度分布は、従来、高液相流速、低ボイド率で観察された例はあるが、本実験のように、低液相流速条件で観察されたことはなかった。

半径方向の二相乱流の運動量輸送を考慮して、力のつり合いと計測されたボイド率分布から、液相速度分布を計算した結果を Fig.7 に示す。結果から、気泡誘起乱流を考慮し、かつ、壁面でのスリップを仮定すると、実験値を再現できることがわかった。これは、鉛ビスマスが壁面に対して濡れにくく、壁面に到達した気泡が壁面上に広がるため、濡れ面積が少なくなり、流体と壁面の間に気相が介在することにより、見かけのスリップが生じていることが明らかになった。

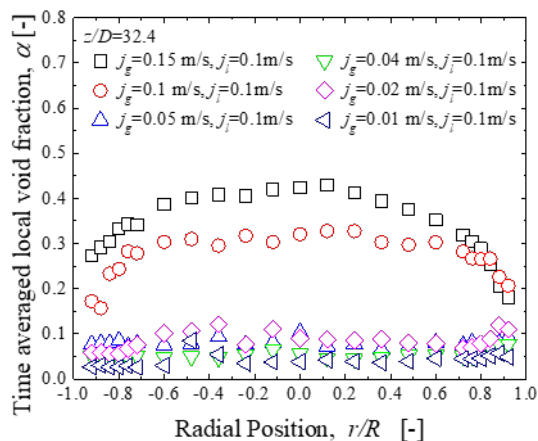


Fig.5(a) Void fraction.

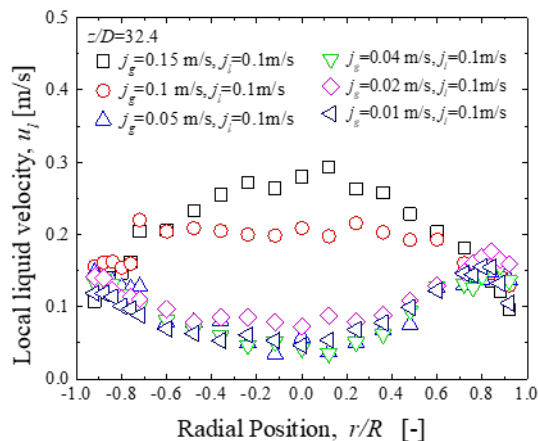


Fig.5(b) Liquid velocity.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1) G. Ariyoshi, R. Inatomi, D. Ito, Y. Saito, Effect of wall wettability condition on drift-flux parameters in lead-bismuth two-phase flow in circular and annular bubble columns. J. Nucl. Sci.Technol.; Vol.55, 239-253 (2017).

2) Daisuke Ito, Yasushi Saito, Hiroataka Sato and Takenao Shinohara, Visualization of solidification process in lead-bismuth eutectic, Physics Procedia, 88,58-63 (2017)

〔学会発表〕(計 22 件)

1) G. Ariyoshi, D. Ito, Y. Saito, K. Mishima, Turbulent structures in lead-bismuth flows measured by using intrusive probe methods. ICMF – 2016 – 9th International Conference on Multiphase Flow; (2016).

2) Y. Saito, G. Ariyoshi, D. Ito, Development of measurement technique for bubble velocity vector in gas-liquid two-phase flow by using 4-sensor probe. ICMF – 2016 – 9th International Conference on Multiphase Flow; (2016).

3) G. Ariyoshi, D. Ito, Y. Saito, K. Mishima, Turbulent characteristics in lead-bismuth flows flowing in poor and good wettability pipes. 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE24); (2016).

4) G. Ariyoshi, D. Ito, Y. Saito, K. Mishima, Turbulent LBE flow in vertical circular pipes with different wall surface condition. NTHAS10 The tenth Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety; (2016).

5) R. Inatomi, G. Ariyoshi, Y. Saito, D. Ito, Effect of wall surface wettability on two-phase flow characteristics in a lead-bismuth bubble column. NTHAS10 The tenth Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety; (2016).

- 6) G. Ariyoshi, R. Inatomi, D. Ito, Y. Saito, K. Mishima, Turbulent LBE flow in vertical circular pipes with different wall surface condition. 6th Japan-Korea Joint Seminar on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety for Students and Young Researchers; (2016).
- 7) R. Inatomi, G. Ariyoshi, Y. Saito, D. Ito, Effect of wall surface wettability on two-phase flow characteristics in a lead-bismuth bubble column. 6th Japan-Korea Joint Seminar on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety for Students and Young Researchers; (2016).
- 8) G. Ariyoshi, D. Ito, K. Ito, Y. Saito, Measurement of liquid velocity and void fraction in vertical upward LBE two-phase flow under poor wettability conditions. NTHAS11 The eleventh Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety; (2018).
- 9) G. Ariyoshi, D. Ito, K. Ito, Y. Saito, Measurement of liquid velocity and void fraction in vertical upward LBE two-phase flow under poor wettability conditions. 7th Japan-Korea Joint Seminar on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety for Students and Young Researchers; (2018).
- 10) 有吉 玄、稲富 良太、伊藤 大介、齊藤 泰司、三島 嘉一郎、鉛ビスマス流れにおよぼす壁面濡れ性の影響 - 接触式プローブ法を用いた局所速度変動および相分布計測 - 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2016, (2016).
- 11) 稲富 良太、有吉 玄、齊藤 泰司、伊藤 大介、鉛ビスマス流れにおよぼす壁面濡れ性の影響 - プール体系におけるボイド率計測 - 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2016, (2016).
- 12) 有吉 玄、稲富 良太、伊藤 大介、齊藤 泰司、三島 嘉一郎、鉛ビスマス流れにおよぼす壁面濡れ性の影響 - 接触式プローブ法を用いた局所速度変動および相分布計測 - 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2016 ベストプレゼンテーションアワード, (2016).
- 13) 稲富 良太、有吉 玄、齊藤 泰司、伊藤 大介、鉛ビスマス流れにおよぼす壁面濡れ性の影響 - プール体系におけるボイド率計測 - 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2016 ベストプレゼンテーションアワード, (2016).
- 14) 有吉 玄、稲富 良太、伊藤 大介、齊藤 泰司、三島 嘉一郎、鉛ビスマス気液二相流におよぼす壁面濡れ性の影響 - 強制対流体系におけるボイド率計測 - 京都大学原子炉実験所 第 51 回学術講演会, (2017).
- 15) 稲富 良太、有吉 玄、伊藤 大介、齊藤 泰司、鉛ビスマス気液二相流におよぼす壁面濡れ性の影響 - プール体系におけるボイド率計測 - 京都大学原子炉実験所 第 51 回学術講演会, (2017).
- 16) 有吉 玄、伊藤 大介、齊藤 泰司、三島 嘉一郎、鉛ビスマス気泡塔内流動におよぼす流路壁面濡れ性の影響 日本原子力学会 春の大会 熱流動部会 若手交流フォーラム, (2017).
- 17) 有吉 玄、稲富 良太、伊藤 大介、齊藤 泰司、鉛ビスマス気泡塔内流動のボイド率計測(壁面濡れ性の影響) 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2017, (2017).
- 18) 前田 啓介、有吉 玄、伊藤 大介、齊藤 泰司、一次元二流体モデルを用いた鉛ビスマス気液二相流の流動特性の予測 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2017, (2017).
- 19) 有吉 玄、鉛ビスマス気泡塔内流動のボイド率計測(壁面濡れ性の影響) 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2017 ベストプレゼンテーションアワード, (2017).
- 20) 前田 啓介、有吉 玄、伊藤 大介、齊藤 泰司、一次元二流体モデルを用いた鉛ビスマス気液二相流の流動特性の予測 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2017 ベストプレゼンテーションアワード, (2017).
- 21) 有吉 玄、稲富 良太、伊藤 大介、齊藤 泰司、鉛ビスマス気泡塔内のボイド率計測および乱流モデルを用いた数値解析に関する研究 京都大学原子炉実験所 第 52 回学術講演会, (2018).
- 22) 前田啓介、有吉 玄、伊藤 大介、伊藤 啓、齊藤 泰司、二流体モデルによる鉛ビスマス気液二相流動特性の予測 京都大学原子炉実験所 第 52 回学術講演会, (2018).

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：伊藤 大介
ローマ字氏名： ITO, Daisuke
所属研究機関名：京都大学
部局名：複合原子力科学研究所
職名：助教
研究者番号（8桁）：30630024

(2)研究協力者

研究協力者氏名：有吉 玄
ローマ字氏名：ARIYOSHI, Gen

研究協力者氏名：稲富 良太
ローマ字氏名：INATOMI, Ryota

研究協力者氏名：前田 啓介
ローマ字氏名：MAEDA, Keisuke

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。