

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：14501

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2022

課題番号：17KK0115

研究課題名（和文）超音波を用いた液体金属気液二相流のボイド率分布と二次元速度場解析法の確立

研究課題名（英文）Development of measuring void fraction distribution and two-dimensional velocity fields of gas-liquid two-phase flow in liquid-metal using ultrasonic techniques

研究代表者

村川 英樹（Murakawa, Hideki）

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40467668

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,700,000円

渡航期間：10ヶ月

研究成果の概要（和文）：流体が不透明な液体金属内の二相流の過渡変化を計測することを目的に、超音波トモグラフィ法によるボイド分布計測とパルスドップラ法を用いた速度分布計測法の開発を行った。構築システムを用いて、内径50mmの円筒容器内のガリウム合金中を一定の時間間隔で生成した、体積等価直径が約8.5mmの気泡鎖を対象に、二相流動の計測を実施した。気泡生成頻度および水平磁場強度の違いによるボイド分布、および気泡速度への影響について評価した。磁場の無い条件では、気泡が揺動して上昇する条件においても、磁場強度が高くなるにつれ、気泡通過位置のばらつきが小さくなり、それに伴い気泡上昇速度が変化することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高発熱密度の冷却において、液体金属の利用は有効な手段の一つである。しかしながら流体が不透明であることから、液体金属中の二相流動の実験的評価は多くの課題がある。本研究では、液体金属中において気泡分布と速度情報を取得可能な超音波計測技術を確立した。さらに、これらの手法が磁場を印加した条件においても有効であることを示した。これにより、気液密度比や表面張力が従来の流体と大きく異なる液体金属において、気泡の合体や分裂、さらには磁場印加による影響といった複雑な二相流の解明に貢献し、安全解析に必要とされる構成方程式の精度向上に寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：To clarify the transient changes in two-phase flow in opaque liquid metal, measurement methods for void distribution and velocity distributions by using ultrasonic tomography and pulse Doppler methods were developed. Using the system, the bubbles' behavior and rising velocity of single chain bubbles at a constant bubble generation frequency in a gallium alloy were investigated. The test section was a pipe with an inner diameter of 50 mm, and the volume-equivalent bubble diameter was about 8.5 mm. The effects of bubble generation frequency and the horizontal magnetic field strength on the flow behavior were evaluated. Bubbles ascended with oscillation motion without a magnetic field. However, the oscillation motion was suppressed under the influence of the magnetic field resulting in the concentration of the bubble's passage position at the measurement cross-section. Furthermore, the bubbles' rising velocity changed with the magnetic field strength.

研究分野：流体計測

キーワード：液体金属 気泡 ボイド分布 速度分布 超音波トモグラフィ 超音波パルスドップラ法

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

次世代型原子炉の候補である加速器駆動型未臨界炉 (ADS) では、低融点 (124°C)、化学的安定性、中性子経済性の高さから、熔融鉛ビスマス (LBE) の使用が想定される。蒸気発生器の配管断裂事故の際は、LBE と蒸気との二相流となることが懸念されることから、LBE 二相流の熱流動特性の理解が必要とされる。液体金属気液二相流は、水-蒸気に比べ気液密度比および表面張力が大きく、既存の流動モデルの適用性について検討する必要がある。しかしながら、液体金属は光に対して不透明であり、二相流の実験的解明に必要なボイド率分布および気液の相速度の計測が可能な手法は、電磁流速計、放射線や超音波など極めて限定される。そのため、液体金属二相流動の実験的評価やモデル化は、世界的にも殆ど進んでおらず、これらを実験的に評価することが求められている。

液体金属に適用可能な流体計測手法として超音波が挙げられる。従来から超音波を用いることで、液体金属内二相流に関して、液相・気相速度の計測が行われてきた。これに加え、ボイド分布や気泡挙動を合わせて評価することが、液体金属中の気泡流動の統合的理解には重要とされる。

2. 研究の目的

本研究では、二次元ボイド率分布を 1 ミリ秒の時間分解能で計測可能な高速超音波トモグラフィ計測システムの開発、および超音波パルスドップラ法を用いた速度計測手法を組み合わせることで、過渡的なボイド分布と気泡速度の相関評価を実現することを目指した。さらに、液体金属中における気泡流動を実験的に取得し、熔融鉛ビスマス二相流の安全性評価に必要な、液体金属中の気泡流動に関する知見を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、超音波トモグラフィ計測システム (UCT) の開発にあたり、必要な超音波センサの仕様を検討し、広角超音波センサの評価を行った。トモグラフィ計測システムを構築し、反射法による再構成手法の確立を行った。構築したトモグラフィシステムおよび超音波パルスドップラ法を用いた気泡速度計測を実施し、円筒容器内を一定の間隔で連続して上昇する単一の気泡鎖に対し、気泡分布と気泡上昇速度との関係の評価した。さらに工学的応用の観点から、試験部に水平磁場を印加させた際の気泡挙動への影響を評価し、磁場強度と気泡周期の違いによる、気泡分布および気泡上昇速度への影響について実験的に評価を行った。

4. 研究成果

(1) 高速超音波トモグラフィ法の開発と実験装置

断面内のボイド分布を精度良く再構築するためには、超音波の信号からより多くの情報を取得する必要がある。UCT の再構成アルゴリズムには、主に透過法および反射法がある。より少ないセンサで再構成を精度良く行うために、反射法による再構成手法の導入を行った。この際、広がり角 100°以上のセンサにて、良好な信号ノイズ比 (S/N) にて計測する必要があることが分かった。更に、計測対象の気泡径が数 mm 程度である場合、流れ方向の測定体積は 10 mm 以下となることが求められる。そこでこれらの音場特性を有するセンサとして、広角超音波センサの開発を行った。図 1 にセンサの仕様図を示す。半径 5 mm の円弧上のうち、120°の範囲に厚さ 5 mm の超音波振動子が設置してある。測定対象は円管とし、周囲に等間隔でセンサを設置している。送信センサ T によって送信された超音波パルスが、気液界面によって反射し、受信センサ R によって超音波信号が得られる。得られた信号は、送信および受信センサを焦点とする楕円弧上からの反射信号の総和として生じ、受信波形の時刻 τ は、超音波の伝播時間に相当する。よって、受信センサによる波形強度を二次元に展開することで、反射信号の強度分布 $I_{ij}(x, y)$ として逆投影することが出来る。この処理を各送受信センサ間において実施する。 $T=R$ である場合も含めると、センサ数 N_{tdx} のとき、 $N_{\text{tdx}} \times N_{\text{tdx}}$ 個の信号強度を重ね合わせることで、強度分布 $I(x, y)$ を得ることが出来る。実際の計測においては、流路内で生じる多重反射が生じ計測する波形に影響する。そこで、気泡等が無い条件を基準とし、基準となる反射強度との差分を計測波形の反射強度とした。しかしながら、気液界面の

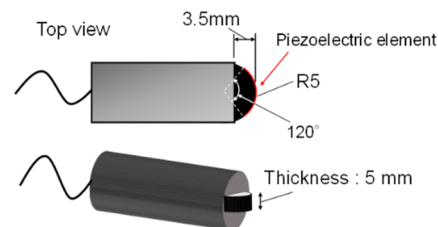


図 1 広角超音波センサ

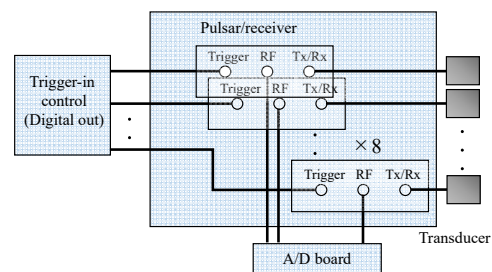


図 2 計測システムのブロック図

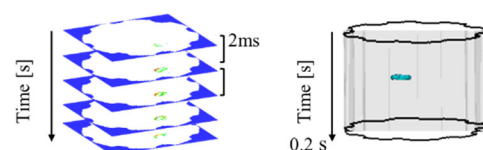


図 3 疑似三次元表示 (固体球の落下)

は、流路内で生じる多重反射が生じ計測する波形に影響する。そこで、気泡等が無い条件を基準とし、基準となる反射強度との差分を計測波形の反射強度とした。しかしながら、気液界面の

ような高い反射強度が生じる場合、界面による反射波が楕円弧として断面に現れるアーチファクトが生じる。そこで重み関数 $F(x, y)$ を導入した。ある送受信センサのペアにおいて波形を受信する。この波形から、反射強度の高い波形閾値を用いて同定し、これを界面によって生じたものとみなす。これにより、波形において最初に生じた界面位置から、センサまでの距離が遠い領域において $F_i(x, y) = 1$ とする。これを全センサにおいて繰り返し、総和を取ったものを $F(x, y)$ とした。 $I(x, y) \times F(x, y)$ を最終的な輝度分布これらの信号を重ね合わせ、二次元断面に展開することで、二次元瞬時ボイド分布を再構成した。実際の計測においては、流路内で生じる多重反射が生じ計測する波形に影響する。そこで、気泡等が無い条件を基準とし、基準となる反射強度との差分を計測波形の反射強度とした。

図2に構築した計測システムの概念図を示す。計測対象を内径 50 mm の円管を想定し、8 個の超音波センサを用いた計測システムを構築した。8 チャンネルによって独立して超音波の送受信が可能な超音波パルサ・レシーバ (JPR-10C-8CH-KB) を用いた。それぞれのチャンネルに広角超音波センサを接続し、一つのセンサで送信し、送信センサも含む全センサによってエコー信号を受信する。得られた波形信号は、8 チャンネルの高速デジタル (PXIE-5105) で 30MS/s にて同時サンプリングを行った。それぞれのセンサによる超音波の送信タイミングは、外部トリガ入力によって制御可能となっている。そこで、デジタル出力ボード (PXIE-6535) を用いてトリガ信号制御を行った。常温での水の音速は約 1500 m/s である。内径 50 mm の配管内が水で満たされているとき、超音波の伝播時間は往復で約 67 μ s となる。この時間が、超音波の送信周期の最低値となる。流路内での反射などを考慮し、各センサの送信間隔を 125 μ s とした。8 個のセンサを用いて断面情報を取得するため、1 断面の計測に要する時間分解能 1 ms を達成した。各断面の計測を連続して計測することで、最大 1000 フレーム毎秒 (fps) での計測を可能とした。

図3に直径 6 mm のステンレス球における連続 UCT 計測結果を示す。同時に計測した高速度カメラの画像より、球の落下速度は約 0.7 m/s であった。得られた連続 CT 画像を時系列に並べ、信号強度の等強度面表示をさせたものが右図である。2 ms 間隔で計測を行い、4 断面において球が計測された。速度から球高さに換算すると 4.2 mm である。反射信号が強く生じた領域のみを計測しているため、実際の 6 mm より小さくなったが、良好に計測できていることが分かる。計測に使用するセンサ数が少ないため、各断面の計測精度は、センサ数が多い場合に比べて低下する。しかしながら、時系列のデータから疑似三次元表示することで、物体の位置を十分に把握可能であることを示した。

(2) ガリウム合金-アルゴン二相流における流動計測

① 実験装置

ガリウム合金中を上昇する連続気泡を対象に、気泡挙動と気泡速度計測を実施した。図4に試験部の概略図を示す。内径 50 mm の円筒容器に、ガリウム合金を高さ 230 mm の位置まで満たし、下部に設置した気泡発生部から窒素ガスを注入した。気泡発生装置には、スピーカを用いて圧力変動を生じさせ、チューブ側面に設けた微小孔から、スピーカの振動周期に合わせて気泡が生成される。振動周期を変化させることで、ほぼ同一の気泡径の気泡を、異なる発生周波数 (f) にて生成可能なものとした。UCT による瞬時ボイド分布は、流路底面から 40 mm (下部) および 160 mm (上部) の位置において、それぞれ別々に計測を実施した。下部での計測は、気泡発生部の直ぐ上方に計測断面が位置していることから、気泡発生周期等の評価に用いた。上方の位置にて気泡分布を計測することで、気泡の上昇に伴う気泡分布の変化について評価した。流路底部に上向きに設置した超音波センサを用い、パルスドップラ法によって気泡の少々速度成分の計測を実施した。流路内を上昇する 10 個の気泡について平均速度を算出した。試験部全体を電磁石の電極間に設置することで、水平磁場を印加した際の気泡挙動と気泡上昇速度に及ぼす磁場の影響についても評価した。磁束密度 B は 0 ~ 430 mT で変化させた。

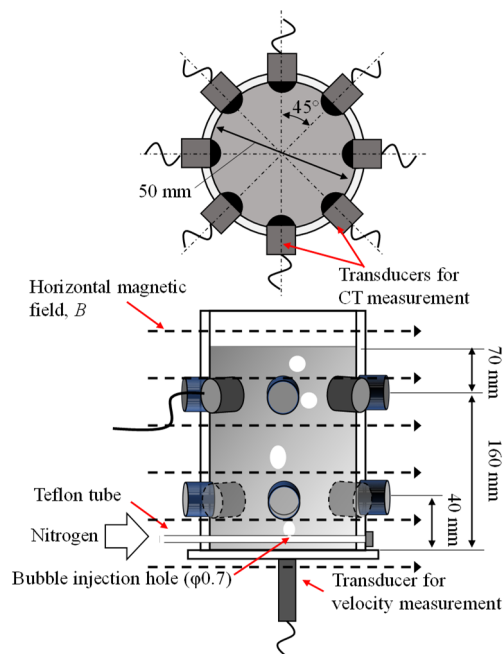


図4 実験装置の概略図

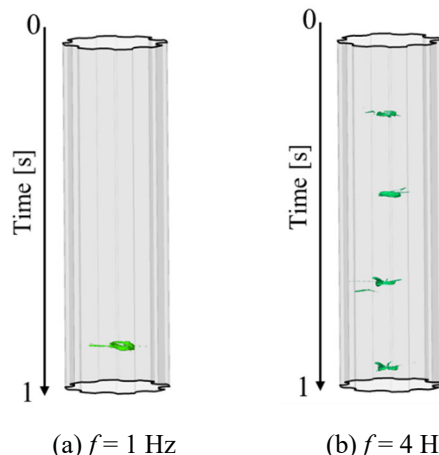


図5 ガリウム合金中を上昇する気泡の疑似三次元分布の計測例 ($B = 0$ mT)

②実験結果

$f = 1, 4 \text{ Hz}$ において、下部にて計測した UCT 計測結果例を図 5 に示す。図の縦軸は計測時間を示し、連続計測した 1 秒間の結果を示している。それぞれ気泡が連続的に計測できていることが確認できる。下部における気泡通過間隔を評価するため、UCT 再構成画像の断面平均の信号強度を算出した。得られた、信号強度の時系列変化を図 6 に示す。UCT では、計測断面を気泡が通過する際、気液界面によって超音波の反射が生じる。超音波の音圧分布は、測定体積内の鉛直方向中央が最も高くなることから、気泡が測定体積中央を通過した時刻において、反射強度が最も高くなると考えられる。そこで、断面平均信号強度の時間変化から、信号強度が極大値となる時間間隔を、気泡の通過間隔と見なした。得られた時間間隔から、スピーカーの周波数と気泡発生頻度が一致していることが確認された。更に、流量と気泡通過頻度の関係から気泡の体積等価直径 d_e を算出した。各結果を図 7 に示す。 f を変化させることで流量が比例して増加している。そのため、 f に関わらず $d_e \approx 8.5 \text{ mm}$ であり、エトベス数 $Eu \approx 6.3$ であることが分かる。

次に、 f および B の異なる各条件における気泡挙動の変化を評価するため、4 個の気泡の再構成画像の重ね合わせた

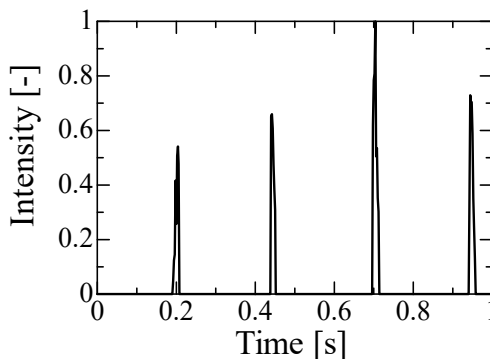


図6 断面平均輝度の時間変化 ($f = 4 \text{ Hz}$, $B = 0 \text{ mT}$)

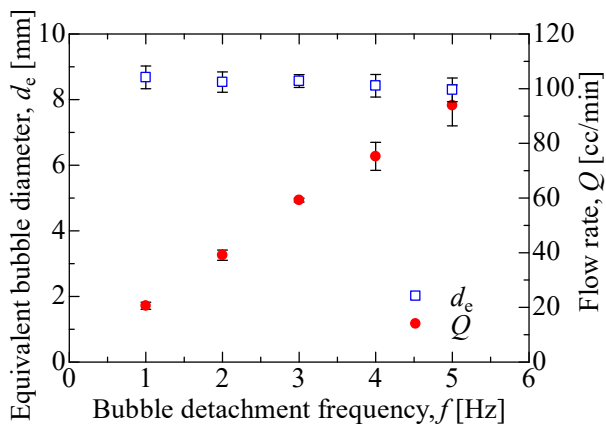


図7 気泡生成頻度と気泡径、流量の関係 ($f = 4 \text{ Hz}$, $B = 0 \text{ mT}$)

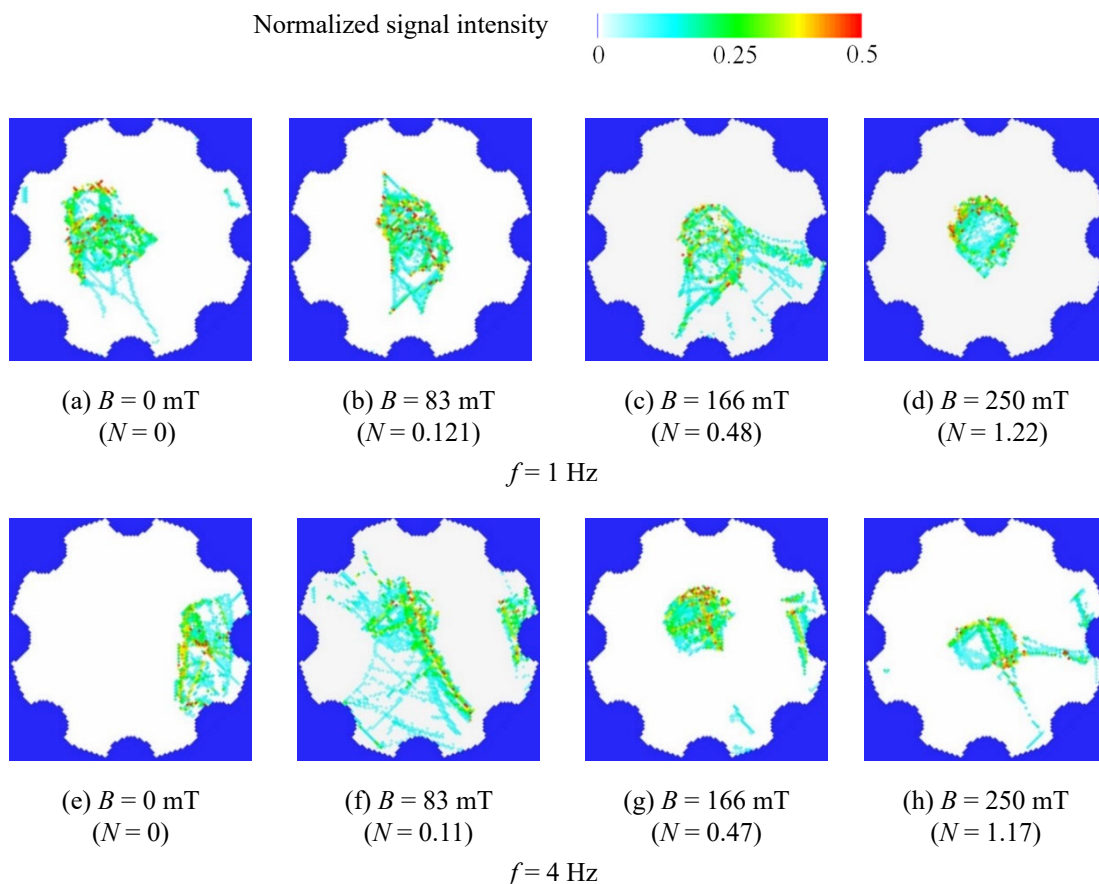


図8 超音波トモグラフィによる再構成画像の重ね合わせ図

画像を図8に示す。ここで N はスチュワート数であり、以下の式で定義される。

$$N = \frac{\sigma_l B^2 d_e}{\rho_l V_T} \quad (1)$$

σ_l は電気伝導率、 ρ_l は液相密度、 V_T は終端速度である。再構成画像には、再構成時に除去できなかったアーチファクトが有るものの、気泡分布の定性的評価が可能である。 $B=0$ mT の条件では $f=1, 4$ Hz とともに気泡の通過位置にバラつきが生じていることが分かる。今回の実験条件における気泡径では、磁場を印加していない条件では気泡が揺動しながら上昇していると考えられる。そのため計測断面の位置によって、断面を通過する気泡位置が変化する。さらに気泡の上昇に伴って生じる後流によって、後続気泡の流動が影響され、結果として気泡毎に気泡の上昇軌跡が変化しと考えられる。そのため上部の計測断面において、各気泡の通過位置にバラつきが生じたと考えられる。このバラつきは f の違いによる影響があまり大きくないことが確認できる。水平磁場を印加した条件では、磁場強度が強くなるにつれて、気泡が通過する位置が一定の場所に収束していくことが分かる。更に、 $N > 1$ の条件では、気泡が試験部のほぼ中心を通過していることが確認できる。気泡の上昇に伴い、導体である液体金属が流動すること電磁力が生じ、気泡によって生じる後流が抑制される。その結果、気泡の揺動も抑制されたものと考えられる。この揺動の抑制は、後続気泡が受ける後流渦の影響を抑制することにもつながり、気泡がほぼ一定の位置を通過したものと考えられる。

図9に、各 f, N の条件において、パルスドップラ法で計測した気泡上昇速度 V_b の結果を示す。磁場を印加していない条件 ($N=0$) では、 f が増加することで僅かに気泡上昇速度が増加していることが分かる。これは、気泡を注入することで容器内の液相に循環流が生じたためであると考えられる。水平磁場を印加した $f=1\sim 3$ Hz の条件では、 $N \approx 0.5$ において速度が最大となり、さらに N を増加させると、 V_b が低下した。それに対して $f=4, 5$ Hz では、 $N=0$ において速度が最大となり、 N の増加に伴って単調に速度が低下する傾向となった。 N の増加に伴い、慣性力に対して電磁力の影響が大きくなる。液相の流動に伴いローレンツ力が生じ、気泡の上昇を妨げる方向に力が働く。それによって気泡上昇速度が低下すると考えられる。しかしながら、磁場強度が $N \approx 0.5$ 程度の低い磁場強度の条件では、電磁力が作用することで気泡の揺動が僅かに抑制され、このことが気泡の上昇速度の増加につながったものと考えられる。図8(c), (g)を比較すると $f=1$ Hzの方が、気泡がより一定の場所を通過している。即ち $N \approx 0.5$ の条件では、気泡の揺動は完全には抑制されておらず、僅かに揺動が生じた条件であることが分かる。このように、電磁力による後流の抑制が気泡の揺動を僅かに低下させ、その結果、気泡の上昇速度が増加する条件が存在することが分かった。このような条件は気泡生成頻度が低く、先行気泡による後続気泡への影響が相対的に小さくなる条件の方が、生じやすいことが分かった。

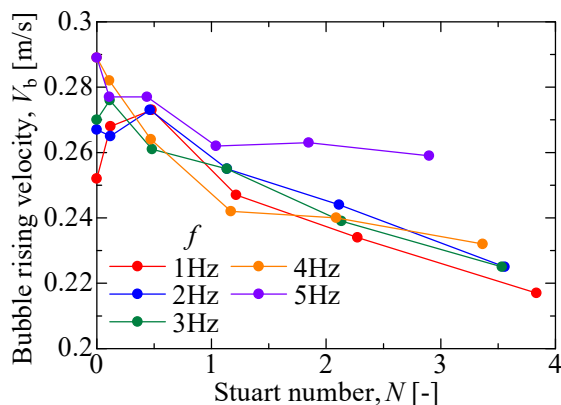


図9 気泡上昇速度 V_b と気泡生成頻度 f 、スチュワート数 N の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 村川 英樹, 前田 紗奈	4. 巻 37
2. 論文標題 高速超音波トモグラフィ法を用いた水平磁場印加時のガリウム合金中を上昇する連続気泡の流動評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 21 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3811/jjmf.2023.T003	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hideki Murakawa, Tomoyuki Shimizu, Sven Eckert	4. 巻 182
2. 論文標題 Development of a high-speed ultrasonic tomography system for measurements of rising bubbles in a horizontal cross-section	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement	6. 最初と最後の頁 109654 ~ 109654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.measurement.2021.109654	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 久保 雄大, 前田 紗奈, 村川 英樹, 杉本 勝美
2. 発表標題 超音波トモグラフィ法を用いた気泡挙動計測手法の開発
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2022年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田 紗奈, 村川 英樹, Fu Xin, 足立 和司
2. 発表標題 ガリウム合金中を上昇する連続気泡の可視化
3. 学会等名 第50回 可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideki Murakawa, Xin Fu, Kazushi Adachi
2. 発表標題 Behavior of bubble chain in gallium eutectic alloy under influence of transverse magnetic field
3. 学会等名 1st European-American-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideki Murakawa, Xin Fu, Kazushi Adachi
2. 発表標題 Behavior of single bubble chain in gallium eutectic alloy under influence of transverse magnetic field
3. 学会等名 2022 Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics ((国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideki Murakawa, Tomonori Shimizu
2. 発表標題 Measurements of continuously released bubbles motion in liquid metal using ultrasonic techniques
3. 学会等名 13th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fu Xin, 清水 知之, 村川 英樹, 杉本 勝美
2. 発表標題 超音波トモグラフィを用いたガリウム合金中を上昇する連続気泡の流動評価
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村川 英樹, 清水 知之, Sven ECKERT
2. 発表標題 超音波トモグラフィによる液体金属中の気泡流動の可視化
3. 学会等名 第48回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水 知之, 村川 英樹, Sven ECKERT
2. 発表標題 高速超音波トモグラフィ手法を用いた気泡流の三次元ポイド分布計測
3. 学会等名 日本機械学会 第98期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideki Murakawa, Sven Eckert
2. 発表標題 Development of an ultrasonic tomography for measuring void distribution in liquid-metal bubble column
3. 学会等名 11th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村川 英樹, 清水 知之, Sven Eckert
2. 発表標題 超音波トモグラフィによる気泡流のポイド分布計測法の開発
3. 学会等名 第47回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水 知之, 村川 英樹, 杉本 勝美, 浅野 等, Sven Eckert
2. 発表標題 超音波トモグラフィによる気泡流の瞬時ボイド分布計測法の開発
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田 隆太郎, 清水 知之, 村川 英樹, 杉本 勝美
2. 発表標題 超音波による気泡流動の評価手法に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会 2019年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋月 大二郎, 村川 英樹, 杉本 勝美, 浅野 等
2. 発表標題 広角超音波センサを用いた気液二相流のボイド分布計測法の検討
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秋月 大二郎, 清水 知之, 村川 英樹, 杉本 勝美, 浅野 等
2. 発表標題 反射法を用いた超音波トモグラフィによる気液二相流のボイド分布計測法の開発
3. 学会等名 日本機械学会 第96期流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水 知之、秋月 大二郎、村川 英樹、杉本 勝美、浅野 等
2. 発表標題 反射法を用いた超音波トモグラフィによる気泡流のポイド分布計測
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会平成30年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

神戸大学大学院工学研究科 機械工学専攻 エネルギー変換工学研究分野 (MH-3) https://www.lab.kobe-u.ac.jp/eng-mh3/index.html 神戸大学大学院工学研究科 機械工学専攻 エネルギー変換工学研究分野 (MH-3) http://www.lab.kobe-u.ac.jp/eng-mh3/index.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	エカート スベン (Eckert Sven)	ロッセンドルフ・ドレスデン研究所・ Magnetohydrodynamics・Head	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ連邦共和国	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf			