

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01250

研究課題名（和文）高速超音波トモグラフィを用いた磁場印加時の液体金属二相流の流動評価とモデリング

研究課題名（英文）Evaluation and modeling of two-phase flows in a liquid metal under a magnetic field using a high-speed ultrasonic tomography

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） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：液体金属中を上昇する気泡挙動に与える水平磁場の影響を実験的に評価するため、高速超音波トモグラフィ法を用い、内径50mmの円管内を上昇する気泡を対象に、瞬時ポイド分布を500フレーム毎秒で計測した。試験部を電磁石内に設置することで、磁場強度、磁場印加方向および気泡の生成頻度の変化に伴う気泡通過位置分布の変化を評価した。磁場を印加していない条件では、気泡の通過位置分布が広く分布したが、スチュワート数が1以上では試験部中心付近の一定の場所を、気泡が通過することを示した。気泡生成頻度を増加させると先行気泡の後流の影響により、磁場と直交する方向に、気泡通過位置分布が僅かに広がることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁場印加時の液体金属中の気泡挙動を実験的に評価することは、連続鋳造における製品品質の向上に寄与する。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困難であり、十分な実験データが無かった。本研究では、超音波トモグラフィ法を用いることで内径50mmの円筒容器内を上昇する気泡を対象に、気泡分布に与える磁場の影響を実験的に解明した。これらの結果は、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、気泡の合体や分裂といった複雑な二相流の解明に貢献し、数値解析に必要とされる構成方程式の精度向上に寄与する。

研究成果の概要（英文）：The study experimentally investigated the effects of a horizontal magnetic field (MF) on the behavior of bubble chains in a gallium alloy. High-speed ultrasonic tomography was used to measure the instantaneous bubble crossing positions in a cylindrical column with an inner diameter of 50 mm. With an increase in the MF strength, the oscillations of the bubbles were suppressed, resulting in the crossing position being concentrated in a certain area of the cross-section. The fluctuations in the time intervals of the chain bubbles decreased. These effects were more pronounced when the Stuart number was greater than 1. The distribution of bubbles in the direction perpendicular to the MF was widespread slightly compared to that in the direction parallel to the MF; this was noticeable at higher flow rates.

研究分野：熱流体

キーワード：液体金属 水平磁場 気泡 ポイド分布 超音波トモグラフィ

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

連続鋳造では、タンディッシュから鋳型に溶鋼が注入され、鋳型を通過した溶鋼が冷却に伴い徐々に硬化する。近年では、溶鋼流出量の制御や、鋳型内の溶鋼の均質化を目的とし、鋳型外部から磁場を印加する流動制御が行われている。また、タンディッシュ内にアルゴンガスを注入することで、介在物の浮遊促進や溶鋼の均質化が行われているが、アルゴンガスが鋳型内に流入すると、鉄鋼内に中空が生じ欠陥となることから、溶鋼内を流動する気泡流動の把握と適切な予測が重要となる。

液体金属二相流は、水-蒸気二相流に比べ気液密度比および表面張力が大きく、既存の二相流動モデルの適用性評価については、気泡流動に関わる様々な無次元数を考慮した実験的研究が求められている。従来の研究では、主に気泡上昇速度やボイド分布に関する研究が行われてきた。しかしながら、磁場印加時の液体金属二相流に関する研究は少なく、特に、連続気泡の流動評価はほとんど行われていない。この主な原因は不透明流体であること、磁場印加を必要とすること、といった実験的困難さに起因する。そのため、磁場印加時に液体金属中を上昇する気泡挙動を実験的に計測可能とする手法を構築し、それらの物理現象を解明することが求められている。

2. 研究の目的

著者らが開発してきた高速超音波トモグラフィ (UT) を応用し、流体中を上昇する気泡挙動を定量的に評価する手法を開発する。開発した手法を用いて、内径 50mm の円筒容器中の静止ガリウム合金中を連続して上昇する気泡を対象として、水平磁場印加時の流動計測を実施し、水平磁場の強度、磁場印加方向の違いによる、気泡挙動の変化を実験的に評価する。これにより、液体金属中を上昇する気泡と、気泡によって生じる後流渦との相関などを評価することを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、UT を用いた気泡挙動の定量評価手法として、UT 再構成画像から算出した時系列信号強度の変化から、測定体積中を通過する気泡の代表画像を取得した。代表画像に対して画像処理を適用することで、気泡の重心座標分布を取得した。内径 50mm の円筒容器内にガリウム合金を入れ、底部からアルゴンガスを注入することで一定の間隔で上昇する気泡を連続的に生成し、底面から一定の位置に設置した UT 計測部において、気泡の断面分布を 500 フレーム毎秒にて計測した。試験部を電磁石の電極間に設置することで水平磁場を印加し、磁場強度の変化、水平磁場の印加方向の違い、および気泡の生成頻度の変化による、気泡の断面通過位置の変化を実験的に評価した。

4. 研究成果

(1) 超音波トモグラフィ法

超音波トモグラフィ法は、複数のセンサ間の超音波の透過や、気液界面での反射信号に基づき、気泡分布を再構成する手法である。この時、送信センサでの超音波の発信間隔 T_p は、超音波の伝播時間を考慮して決定する必要がある。すなわち、音速 c と、センサから計測対象までの距離を l とした場合、

$$T_p > l/c \quad (1)$$

を満たす必要がある。複数の超音波センサで順番に送信する場合も同様であることから、UCT 計測に使用する送信センサ数を N_{tdx} とすると、一断面の超音波信号の取得に要する時間、すなわち時間分解能 Δt は、

$$\Delta t = T_p \times N_{\text{tdx}} \quad (2)$$

となる。 T_p は計測領域で決定することから、時間分解能の向上には、 N_{tdx} を少なくすることが有効である。

そこで著者らは、時間分解能の向上を目的に、少ないセンサ数で気泡分布の再構成が可能な反射法によるリニアバックプロジェクション法を導入した。図 1 に、反射法による再構成手法の模式図を示す。計測断面に反射体となる気泡が存在する条件を仮定する。送信センサ i ($i=1\sim 8$)から超音波パルスを送信し、受信センサ j ($j=1\sim 8$)において反射波を計測する。この時、送信センサからは広角に超音波パルスが送信される。ここで、超音波パルスが点音源から送信されると見なし、 i 番目センサによる点音源位置を (x_i, y_i) 、計測断面内の座標を (x, y) とする。 c が媒質中で一定と仮定すると、反射波の伝播時間 t は以下の式を満たす。

$$t \cdot c = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} + \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad (3)$$

すなわち、気液界面からの反射信号によって、送信センサおよび受信センサを焦点とする楕円弧となる。気相と液相では音響インピーダンスが大きく異なるため、界面からの反射信号強度が大

きくなる。そのため、センサ i で超音波を送信し、センサ j で受信したときの受信波形を $S_{ij}(t)$ とすると、送受信センサを焦点とする楕円弧において強度分布が高くなり、この楕円弧上の何処かに気液界面が存在することになる。センサから送信されたパルスの反射信号は、送信センサを含むすべてのセンサによって受信する。8 個のセンサを用いた計測では、一断面の計測において $8 \times 8 = 64$ の信号強度を重ね合わせることで、気泡形状の可視化を実現した。図 2(a) に、水で満たした内径 50 mm の円筒容器中に金属製パイプを設置した場合の、UCT 計測による再構成画像の一例を示す。この例のように、信号強度の重ね合わせだけでは、界面位置以外の楕円弧（アーチファクト）が生じてしまう。そこで、各反射信号から気泡分布の重み関数を計算し、信号強度分布に乗じることで、再構成画像を取得した。これにより、図 2(b) に示すようにアーチファクトが低減し、界面位置の同定が容易となる。

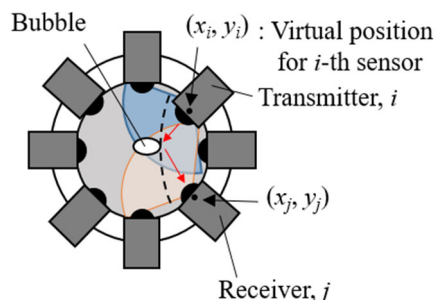


図 1 反射法による UT の概念図

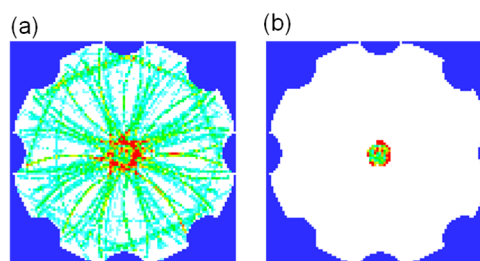


図 2 UT 再構成画像の例

(2) 試験部

図 3 に試験部の概要を示す。試験部は内径 50 mm のアクリル製円筒容器とした。容器底部から高さ 210 mm の位置までガリウム合金（GaInSn 合金）で満たした。さらに表面には、ガリウム合金の酸化を低減する目的で、水酸化カリウム水溶液を少量入れている。流路底部から、アルゴンガスを内径 1 mm のノズルから注入した。この時の流量 Q は、マスフローコントローラを用いて、30~240 cc/min (1 気圧, 20°C 換算) の範囲で設定した。流量を変化させることで、ノズルから注入される気泡の生成頻度を変化させた。超音波トモグラフィ用の広角超音波センサを試験部底部から 140 mm の位置に、容器周囲に等間隔で設置した。センサ先端部は約 3 mm 試験部に入っており、ガリウム合金に接液されている。UT では、各センサの送受信を 8kHz で切り替えることで、一段面の取得に要する時間（時間分解能に相当）を 1ms とした。この計測を 500 フレームで実施することで、時系列の UT 再構成画像を取得した。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。電極間にはほぼ様な磁場が形成されており、電磁石への電流を制御することで、磁場強度 $B = 0 \sim 430$ mT で変化させた。

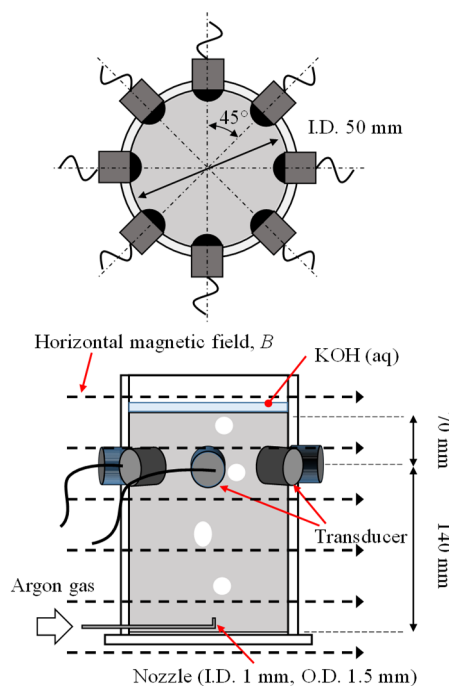


図 3 試験部の概要図

(3) 実験結果

図 4 に $Q = 30, 90$ cc/min の条件において、磁場強度を変化させて計測した、連続気泡の疑似三次元分布を示す。縦軸は 0 から 1 秒までの時間を示している。UT では気泡の速度情報が得られないことから、気泡高さは評価できないことに注意が必要である。疑似三次元分布から、磁場を印加しない条件では、気泡毎に計測断面を通過する位置がバラついているが、磁場強度が増大するにつれて気泡の通過位置が揃ってくることを確認できる。再構成画像から、1 秒間に計測面を通過する気泡数を確認することができる。さらに気泡の通過間隔を詳細に評価するため、UT 再構成画像から断面輝度の平均値を算出し、輝度の時系列変化を得た。図 5 に示すように、気泡が計測体積内を通過する際、平均輝度が高くなっていることが分かる。そこで、この時間間隔を平均することで、気泡の平均通過間隔を求めた。その結果 $Q = 30$ cc/min では約 110 ms、 $Q = 90$ cc/min では約 50 ms であり、磁場強度を変化させた各条件での平均通過間隔の違いは 10% 以内であった。生成される気泡直径が均一であると仮定し、体積流量と平均通過間隔から算出した気泡の球体積等価直径 d_e は、 $Q = 30$ cc/min で約 4.6 mm、 $Q = 90$ cc/min で約 5.1 mm であった。

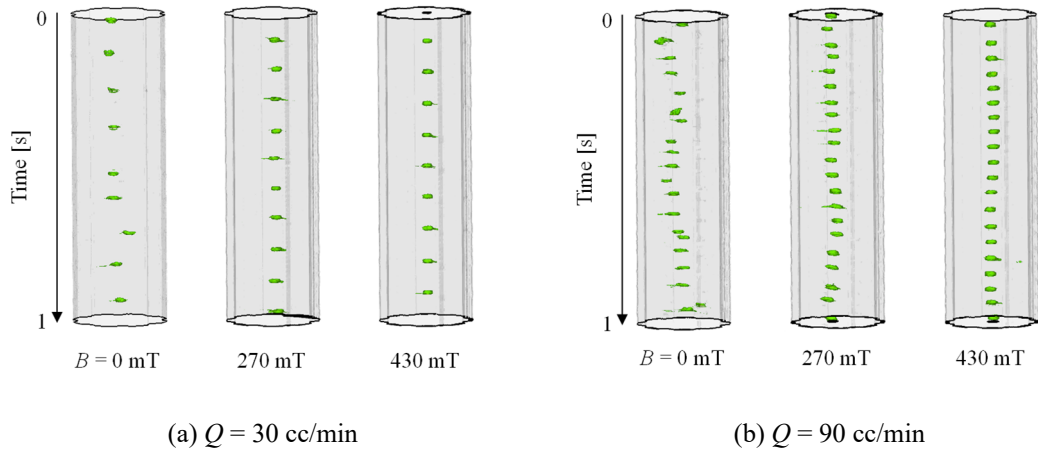


図4 磁場印加時の UT 再構成による気泡の疑似三次元分布

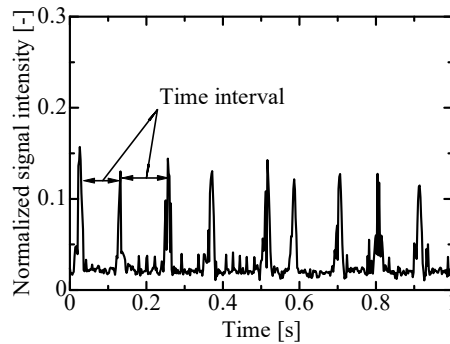


図5 UT 再構成画像から算出した時系列の断面平均輝度 ($Q = 30 \text{ cc/min}$, $B = 0 \text{ mT}$).

磁場を印加させていない条件 ($B = 0 \text{ mT}$) では、 $Q = 30, 90 \text{ cc/min}$ ともに、気泡の断面通過位置が変化していることが確認できる。一部の気泡では、計測断面に対して斜めに上昇するような形状を示している。このことから、気泡が揺動して液体金属中を上昇していると考えられる。さらに気泡間の距離、すなわち断面の通過時間間隔が気泡間で変化していることが確認できる。先行気泡の後流により、後続気泡の加速・減速が生じ、気泡間の距離が変化したために通過間隔が一定とならなかったものと考えられる。水平磁場を印加することで、連続する気泡の断面通過位置のばらつきが小さくなった。これは磁場強度が大きくなるほど顕著である。さらに気泡の通過間隔の変化も小さくなり、ほぼ一定の間隔で気泡が上昇していることが分かる。

各気泡の断面通過位置を詳細に解析するため、計測断面を通過する気泡の重心位置の算出を行った。図6に算出方法の概略図を示す。連続して計測された同一の気泡による再構成画像において、断面の平均輝度が最も高い画像を、その気泡を代表する再構成画像であるものとした。再構成画像に対し、画像処理によって気泡形状を楕円近似し、重心位置を求めた。

磁場印加時の液体金属中を気泡が上昇することで誘導電流が生じ、液体金属の流れにローレンツ力の影響が生じる。これらの定常磁場による影響を評価する無次元数として、以下に示すシュアート数 N がある。

$$N = \frac{\sigma_{el} B^2 d_e}{\rho_l u_T} \quad (4)$$

ここで u_T は気泡の終端速度である。磁場を印加した条件では、 N によって u_T が変化すると報告^①があるが、本研究では以下の Mendelson の式^②を用いた。

$$u_T = \sqrt{\frac{2\sigma_l}{\rho d_e} + \frac{g d_e}{2}} \quad (5)$$

図7に、図4で示した条件における、気泡通過時の重心位置の分布を示す。磁場印加方向は図の横方向であり、 $B = 270 \text{ mT}$ では $N = 0.7-0.8$ 、 $B = 430 \text{ mT}$ では $N = 1.8-2.0$ であった。磁場を印加していない条件では、測定断面において気泡が広い範囲で分布していることが確認することができる。しかしながら磁場強度が強くなるにつれて、気泡分布のばらつきが小さくなっている。さらに $B = 270 \text{ mT}$ の条件において、 $Q = 30$ と 90 cc/min の結果を比較すると、 $Q = 30 \text{ cc/min}$ の方

が、より狭い領域に分布して気泡が上昇していることが分かる。流量が増加すると気泡離脱間隔が短くなり、先行気泡による後流の影響を強く受けるようになる。その結果、 $Q=90\text{ cc/min}$ の方が気泡分布のばらつきが大きくなったと考えられる。

$B=430\text{ mT}$ 、 $Q=30\text{ cc/min}$ の条件では、ほぼ同一の位置を気泡が上昇している。それに対して $Q=90\text{ cc/min}$ では、磁場印加方向と直交する方向（図の上下方向）に、わずかに気泡分布が広がっている。ここに示した以外の複数回の実験結果においても、同様の結果が得られている。すなわち、磁場印加方向が気泡分布に影響することを示している。先行気泡によって生じた後流渦にローレンツ力が生じる。そのため、後流渦の三次元構造には磁場に対して直交および平行な方向に非対称性が生じる。流量が高くなるほど気泡間距離が狭くなるため、先行気泡による後流渦の影響が強くなり、後続する気泡の挙動や分布が変化し、と考えられる。

本研究では、水平磁場と平行および直交する方向で気泡の挙動が異なることを実験的に示し、液相の三次元構造の非対称性を示唆するものである。本結果は、数値解析との比較を可能とする実験データであると考えられる。

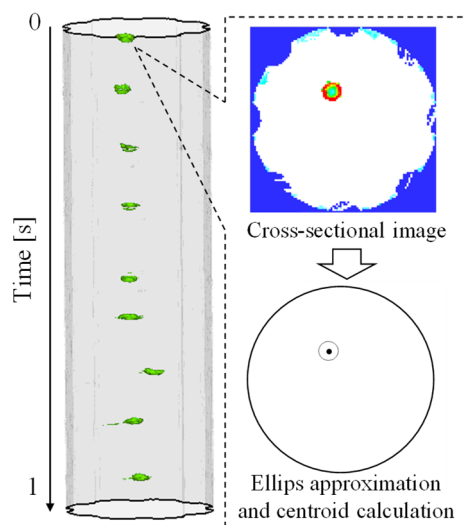


図6 気泡通過位置の重心分布計算方法の概念図

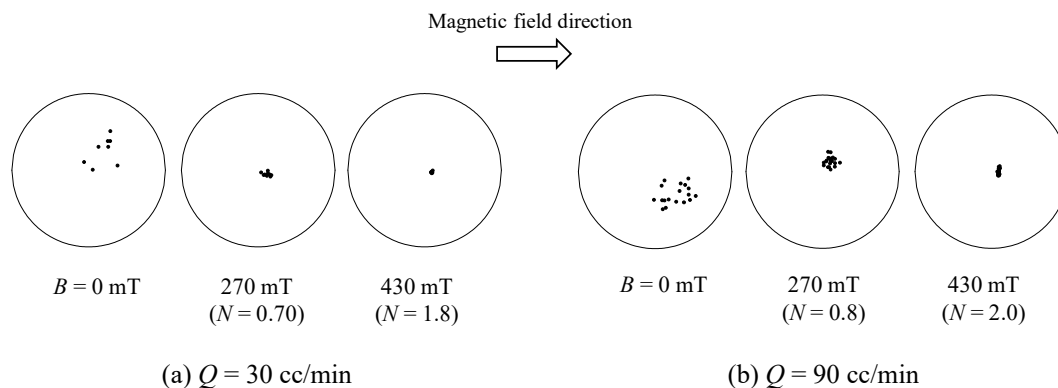


図7 水平磁場印加による気泡通過位置の重心分布の変化

<引用文献>

- ① Z.H. Wang, S.D. Wang, X. Meng, M.J. Ni, UDV measurements of single bubble rising in a liquid metal galinstan with a transverse magnetic field, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 94, 2017, 201–208.
- ② H.D. Mendelson, The prediction of bubble terminal velocities from wave theory, AIChE J., Vol.13, 1967, 250–253.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	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

1. 著者名 Murakawa Hideki, Maeda Sana, Eckert Sven	4. 巻 170
2. 論文標題 Effects of a horizontal magnetic field on the cross-sectional distribution of gas bubbles chain rising in a gallium alloy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 104649 ~ 104649
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104649	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17件（うち招待講演 1件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 村川 英樹, 中根 介生, 前田 紗奈, 杉本 勝美
2. 発表標題 超音波トモグラフィ法による水平磁場印加時のガリウム合金中を上昇する気泡挙動の評価
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第187回春季講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中根 介生, 前田 紗奈, 村川 英樹, 杉本 勝美
2. 発表標題 水平磁場印加時のガリウム合金中を上昇する気泡の三次元挙動の評価
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2023年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tasuki Nakane, Sana Maeda, Hideki Murakawa, Katsumi Sugimoto
2. 発表標題 Development of an evaluation method for bubbles behavior in a liquid metal using ultrasonic computed tomography
3. 学会等名 International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow (ISMTMF 2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideki Murakawa, Yudai Kubo, Sana Maeda, Katsumi Sugimoto
2. 発表標題 Measurements of Bubble Rising Velocity using Ultrasonic Tomography
3. 学会等名 International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sana Maeda, Hideki Murakawa, Katsumi Sugimoto, Sven Eckert
2. 発表標題 Effect of Transverse Magnetic Field on Rising Bubble Behavior in Gallium Eutectic Alloy
3. 学会等名 International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideki Murakawa, Yudai Kubo, Sana Maeda, Katsumi Sugimoto
2. 発表標題 Development of Measurement Method of Bubble Behavior using High-speed Ultrasonic Tomography
3. 学会等名 ASME JSME KSME Fluids Engineering Division (AJKFED 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sana Maeda, Yudai Kubo, Hideki Murakawa, Katsumi Sugimoto
2. 発表標題 Visualization of continuously rising bubbles in gallium alloy
3. 学会等名 The 11th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村川 英樹
2. 発表標題 高速超音波トモグラフィ法を用いた液体金属中を上昇する気泡挙動計測
3. 学会等名 粉体工学会 第58回夏季シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村川 英樹, 前田 紗奈, 杉本 勝美
2. 発表標題 ガリウム合金中を上昇する気泡挙動に及ぼす水平磁場の影響
3. 学会等名 混相流シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村川 英樹, 前田 紗奈, 杉本 勝美
2. 発表標題 超音波トモグラフィによる気泡の三次元挙動の可視化
3. 学会等名 第51回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2023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, 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)
4. 発表年 2022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 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 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 足立 和司, 符 昕, 村川 英樹, 杉本 勝美, 伊藤 大介, 大平 直也, 齊藤 泰司
2. 発表標題 ガリウム合金中を上昇する連続気泡の気泡挙動に及ぼす気泡生成頻度の影響に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関西支部 関西学生会2021年度学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022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>

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
研究分担者	齊藤 泰司 (Saito Yasushi) (40283684)	京都大学・複合原子力科学研究所・教授 (14301)	
研究分担者	杉本 勝美 (Sugimoto Katsumi) (40420468)	神戸大学・工学研究科・助教 (14501)	

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	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf		