

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03175

研究課題名（和文）混相流超音波トモグラフィ法の開発による溶融鉛ビスマス二相流の流動計測とモデル化

研究課題名（英文）Development of ultrasonic tomography and measurement and modeling of two-phase flow in lead bismuth eutectic

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） 13,700,000円

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計測システムの開発を行った。広角超音波センサの開発及び評価、計測システムの構築、反射法による再構成手法の確立を行った。それにより、50mmの配管内を上昇する気泡を対象として、8本のセンサを用いて反射法により計測することで、計測の時間分解能1ミリ秒にて、最大1000フレーム毎秒での連続CTを実現した。開発したトモグラフィを用いて水-アルゴン、GaInSn合金-アルゴン二相流において流動計測実験を実施し、水および液体金属中を上昇する気泡形状、x気泡拳動および合体頻度の違いを明らかとした。

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、気泡流動の物理的解明を可能とする超音波トモグラフィ法の確立に成功した。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。

研究成果の概要（英文）：Liquid-metal is opaque fluids and is difficult to measure the flow field. Therefore, ultrasonic was utilized for measuring instantaneous bubbles motion in the liquid-metal using a tomography technique. Wide-angle transducer, system development and the reconstruction algorithms using a reflection method were established. Measurement target was bubbles motion in a pipe with inner diameter of 50 mm. The system was achieved the temporal resolution of 1 ms and the frame rate of 1000 fps in the continuous tomography. The system was applied for measuring water-argon and GaInSn-argon two-phase flows. Differences of the bubbles shape, motion and the coalescence frequency of the bubbles in between liquid-metal and water were clarified.

研究分野：熱流体

キーワード：液体金属 二相流 流体計測 ボイド分布 超音波トモグラフィ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

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 비해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、光に対して不透明な液体金属二相流の実験的解明に使用可能な計測手法は極めて限定されており、液体金属中の気泡流動の評価は十分に行われてこなかった。

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。特に二次元のボイド率分布の計測には、管周りに複数センサを配置したトモグラフィ計測手法が不可欠であり、従来からボイド率分布の取得に関する研究が行われてきた。しかしながら、二相流の過渡的なボイド分布を計測するためには、一断面の計測に要する時間分解能の向上が求められている。超音波の伝播時間は比較的遅いため、時間分解能の向上には、計測に使用する超音波トランスデューサの数を低減することが必要である。しかしながら使用するセンサ数の減少は、計測結果の解像度の低下につながることから、瞬時のボイド分布の計測において課題があり、液体金属でのボイド分布へ適用例はこれまで無かった。

2. 研究の目的

本研究では、二次元ボイド率分布を数十ミリ秒の時間分解能で計測可能な、混相流超音波トモグラフィ計測システムの開発し、混相流動解析手法の確立を目的とした。使用するセンサ数の低減を実現するための新たなセンサ開発と再構成手法の構築を行い、過渡的なボイド分布の計測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、混相流超音波トモグラフィ計測システムの開発にあたり、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を用いて、固定した棒、落下する固体球において計測精度および時間分解能の評価を行い、計測手法の確立を行った。さらに、水-アルゴン、GaInSn 合金-アルゴン二相流において流動計測実験を実施し、液体金属内の気泡流動挙動の評価を行った。

4. 研究成果

(1) 超音波トモグラフィ法の開発

より少ないセンサ数にて超音波波形を取得し、断面内のボイド分布を再構築するためには、超音波波形からより多くの情報を取得する必要がある。計測手法には、主に透過法および反射法があるが、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 SN 比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。

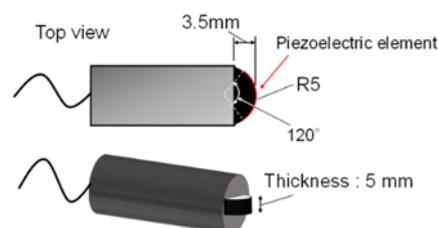


図 1 広角超音波センサ

開発した超音波センサの音場特性を把握するため、ニードルマイクロフォンによる音場計測を行った。その結果を図 2 に示す。センサの仮想的な音場中心から 55 mm の位置において、センサ中心軸からの各角度において超音波信号を受信し、得られた信号振幅を強度としてプロットした。厚さ方向の中心からの距離 z を変化させて計測を行った。これにより、 $\pm 55^\circ$ の領域においてほぼ均一な強度の音圧分布が得られていることが確認できた。さらに $z = \pm 2$ mm の領域までは、計測に必要な音圧強度となっており、それよりもセンサ中心軸から離れることで、急激に音圧が低下することが確認された。これにより、広がり角 100°、厚さ 4 mm 程度の範囲が計測に使用することが可能となっており、気泡通過時のボイド分布計測に適した音場特性となっていることが確認された。

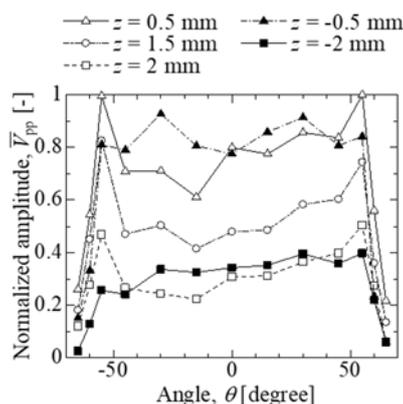


図 2 広がり角の評価

図 3 に反射法による再構成手法を示す。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 、受信センサ R とする。受信センサによって得られた信号は、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、 $N_{tdx} \times N_{tdx}$ 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。

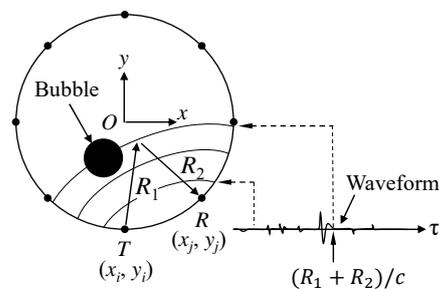


図3 反射法による再構成手法

しかしながら、気液界面のような反射強度が高い界面が計測断面にある場合、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、図4に示す重み関数 $F(x, y)$ 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 $F_{ij}(x, y) = 1$ 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とすることで、アーチファクトの低減を行った。

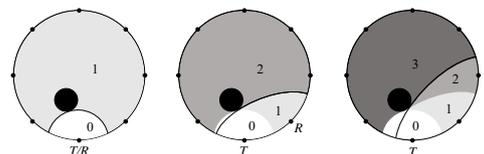


図4 重み関数の導入

図5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化 (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。そのため、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。

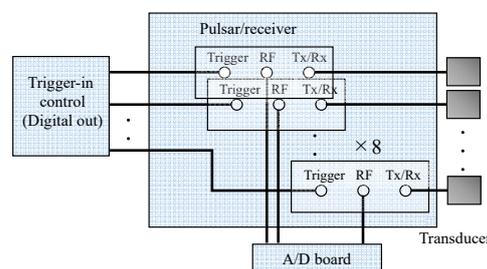


図5 計測システム

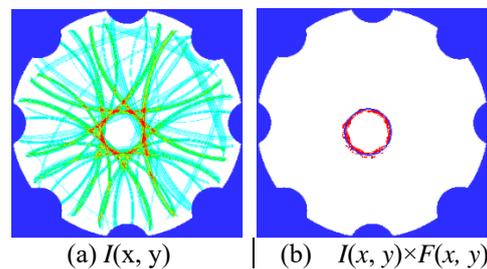


図6 固定棒による評価

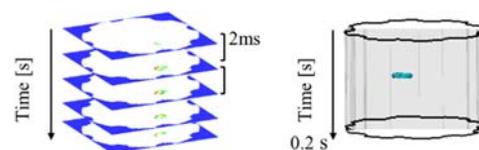


図7 落下球計測結果(疑似三次元表示)

図6に固定棒による計測例を示す。中心に近い位置に外径 10 mm の金属棒を設置し、トモグラフィ計測を行った結果である。図6(a)より、反射信号の逆投影 $I(x, y)$ において金属棒の位置を把握することが出来るが、反射強度の高い界面における反射に起因して、楕円状の多くのアーチファクトが有ることが確認できる。これに対して、重み関数 $F(x, y)$ の積を計算することで、計測対象である金属棒の界面位置が明確となっていること分かる。なお、 $F(x, y)$ には閾値を設定し、最大値の 0.93 以上の値のみを使用した。

気泡のように、移動する計測対象に対する適用性を評価するため、ステンレス球および亚克力球において連続 CT 計測を 500 fps で行った。図7に直径 6 mm のステンレス球における連続 CT 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) 水-アルゴン、GaInSn 合金-アルゴン二相流における流動計測

内径 50 mm、高さ 150 mm の円筒容器に水または GaInSn 合金を満たし、下部に設置した細管からアルゴンガスを注入した。流路底面から 110 mm の位置に設置したトモグラフィセンサによって気泡の連続計測を実施した。計測結果の比較のため、高速度カメラを用いて同時計測を実施した。その結果を図 8 に示す。連続的に 488 断面の波形データを取得し、再構成した結果を 0.976 秒までの疑似三次元表示したものである。連続気泡の計測では、一部のノイズがアートファクトとして生じていることが分かる。そこで新たに、時系列の断面情報をもとに、ノイズと考えられる情報を削除する時間フィルタを導入した。その結果、同一断面に気泡が 2~3 個存在する条件を計測限界として、良好に CT 計測が可能であることが示された。

液体金属内の気泡流動を評価するため、常温で液体である GaInSn 合金を用いて、気泡流動を評価した。60 および 120 cc/min で気泡を注入した条件における水-アルゴン、GaInSn 合金-アルゴン二相流の流動比較結果の例を図 9 に示す。計測断面は一定の位置に存在するため、時間的な変化を示している。60 cc/min において、水中を上昇する気泡は大きく揺動していることが分かる。更に気泡流量が 120 cc/min の条件では、一部の気泡が合体することで大きな気泡が形成されていることが分かる。さらに、これは高速度カメラによる観察結果と同じ流動であることが分かる。一方、GaInSn 合金中を上昇する気泡は、水中に比べて気泡の揺動が小さいことが分かる。更に気泡の断面形状は球形に近く、時間方向に平坦となっている。落下球の実験結果を考慮すると、界面張力が水より大きな液体金属中では、水中に比べて気泡形状が球形に近くなったと考えられる。更に、気泡によって誘起される後流渦が低減し、気泡の上昇間隔が水に比べて一定の間隔に近づくことが分かり、気泡形状や気泡合体の流動評価が可能である。

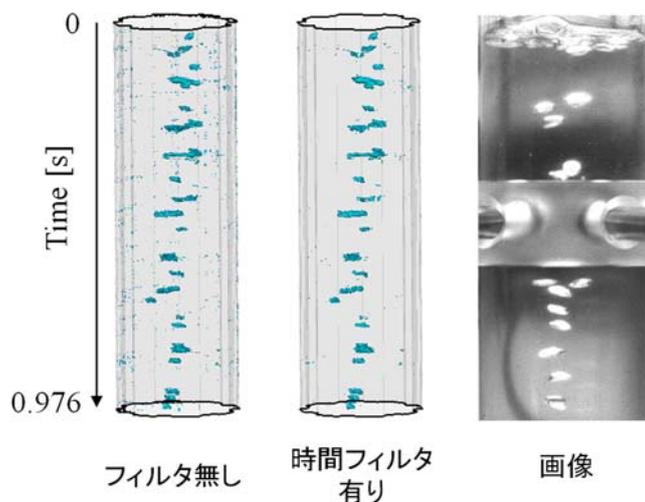


図 8 時間フィルタの導入

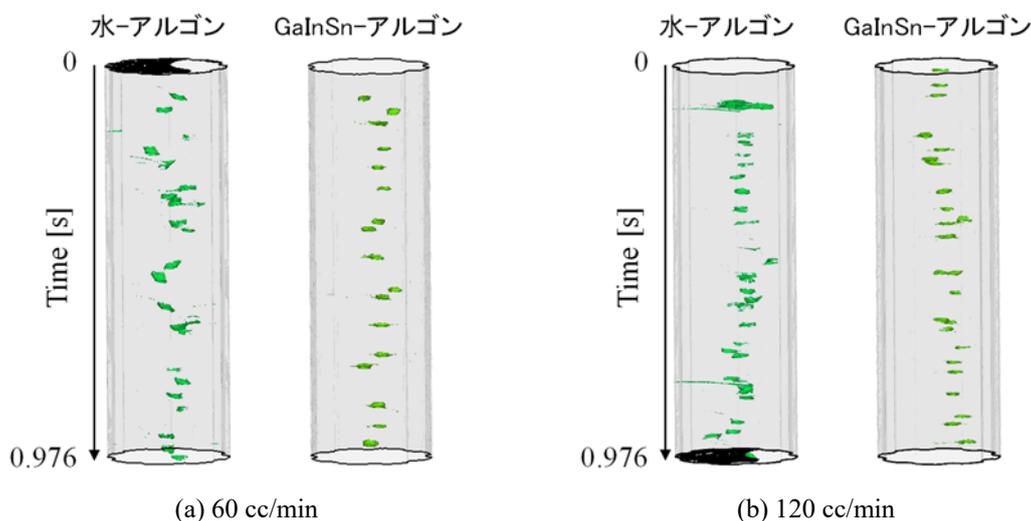


図 9 水-アルゴン、GaInSn-アルゴン気泡流の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|--|
| 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ボイド分布計測 |
| 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 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 村松 瑛、村川 英樹、浅野 等、Sven Eckert |
| 2. 発表標題 超音波による液体金属気液二相流の気液速度分布計測手法の開発 |
| 3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2017 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ei Muramatsu, Hideki Murakawa, Hitoshi Asano, Sven Eckert |
| 2. 発表標題 Development of an ultrasonic technique for measuring phase velocities in liquid-metal two-phase flow |
| 3. 学会等名 The Ninthe JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 村川 英樹、秋月 大二郎、村松 瑛、杉本 勝美、浅野 等 |
| 2. 発表標題 超音波を用いた気液二相流におけるボイド率分布計測法の検討 |
| 3. 学会等名 可視化情報全国講演会 (室蘭2017) |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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) | |