

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760151

研究課題名（和文） 光複合計測によるマイクロスケール三相流のマルチスケール解析

研究課題名（英文） Multiscale analysis of microscale three-phase flow by combined PIV

研究代表者

北川 石英 (KITAGAWA ATSUHIDE)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号：80379065

研究成果の概要（和文）：

本研究では、微細粒子の比重をパラメータとして、マイクロバブルと微細粒子によって誘起される、マイクロスケール三相流の可視化計測を行った。その結果、三相流の場合の気相平均運動エネルギーが、二相流の場合のそれに比して低くなることがわかった。これは、粒子による気泡プルーム同士の干渉の顕著な抑制に起因する。また、三相流の気相平均運動エネルギーが、粒子の比重に強く依存することが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

We use visualization to investigate the structure of the microscale three-phase flow induced by microbubbles and small particles. In particular, we study the effect of small particles with different specific gravities on the gas-phase flow. The mean kinetic energy of the gas-phase is significantly lower in the three-phase flow than in the flow with only microbubbles. This results from significant suppression of the interaction of bubble plumes by the small particles. Moreover, the mean kinetic energy of the gas-phase in the three-phase flow is strongly dependent on the specific gravity of the small particles.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：熱流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：(1) 熱工学 (2) 混相流 (3) マイクロバブル

1. 研究開始当初の背景

近年、マイクロバブル（超微細気泡）は、機械、化学、船舶、そして医療など、非常に幅広い分野において盛んに利用されている。このため、現在までに、マイクロバブルの利用技術に関する数多くの研究が行われてきた。例えば、Madavanら、ShenらおよびHara

らは、チャンネル内水乱流のマサツ抵抗に対するマイクロバブル注入の影響を調査した。Yoshidaらは、水質浄化に影響を与えるマイクロバブルの物理的パラメータに関する調査を行った。Ozatoらは、自然対流熱伝達に対するマイクロバブル注入の影響を調査した。これらの研究では、いずれにおいても、

有益かつ興味深い結果が得られている。しかし、マイクロバブルを利用する対象が海・湖・川などの場合や、作動液体として汚染水・下水・工場排水などが利用される場合には、マイクロバブルに加え、微細粒子がその流れ場に含まれる。

現在までに、液体中に数百マイクロメートル以上のサイズを有する分散体（気泡および粒子）が存在する場合の研究は数多く行われている（例えば、Sakaguchi ら、Iwata ら）。そのような流れ場では、異なる分散体の体積力が、巨視的には相殺し、微視的には増強する（例えば、Kitagawa ら）。しかしながら、液体中にマイクロバブルと数百マイクロメートル以下のサイズを有する粒子が存在する場合では、個々の分散体の周りの流れが近似的にストークス流れとなるため、分散体の体積力が広範囲にわたって強く影響を及ぼし合うことが予想される。その結果、両者では、異なる流動機構を呈する可能性がある。しかし、これまでにマイクロバブルと微細粒子が共存するマイクロスケール三相流について、その特徴的な挙動を実験的に見出した研究は見当たらない。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロバブルと微細粒子によって誘起されるマイクロスケール三相流の流動メカニズムを可視化計測によって調査する。特に、異なる比重を有する微細粒子が気相流れに与える影響を詳細に調べる。また、三相流における複雑な流動現象をスケールごとに分解し、各スケールで得られた結果を照合・再構築することにより、スケール間の相互干渉機構を十分に考慮しながら、マイクロスケール三相流の流動機構を総合的に理解する。

3. 研究の方法

(1) 実験装置および実験方法

① 実験装置

実験装置の概略図を図 1 に示す。装置は、透明アクリル製鉛直チャンネル、粒子注入装置および気泡発生装置から構成された。鉛直チャンネルは、比較的狭い隙間を有し、その寸法は、全長 240 mm、幅 120 mm、奥行き 5 mm である。このチャンネル内では、三相流の運動が二つの鉛直平行平板によって拘束されるため、 z 方向速度が x 方向および y 方向のそれらに比して十分に小さくなり、近似的に二次元の流動場（例えば、Miyagishima ら、Sato ら）となる。作動液体には 22 °C の水道水を用いた。座標軸は、鉛直上向きを x ($x=0$: チャンネル下端)、壁垂直方向を y ($y=0$: チャンネル左内壁)、奥行き方向を z ($z=0$: チャンネル中央) とした。

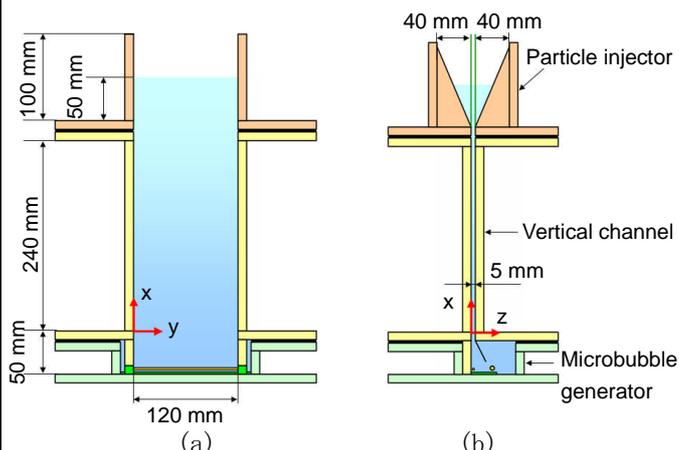


図 1 実験装置 (a) 正面図 (b) 側面図

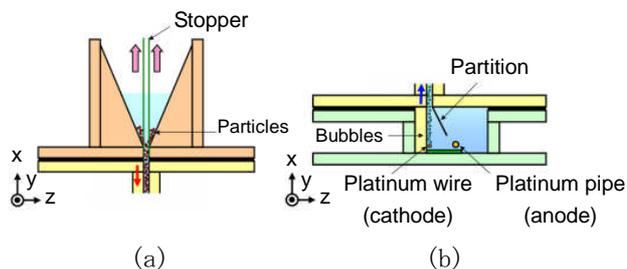


図 2 (a) 粒子注入装置 (b) 気泡発生装置

② 粒子注入装置および気泡発生装置

粒子注入装置の概略図を図 2(a) に示す。粒子注入装置はチャンネル上部に設置した。装置内には、ストッパーを設け、ストッパーと壁との間の水中にマイクロ粒子を沈殿させた。その後、ストッパーを鉛直上向きに引き上げることで、粒子を容器内へ注入した。マイクロ粒子には、比重が $\gamma=1.02$ の多孔質粒子 A（三菱化学：DIAION HP20SS）および比重が $\gamma=1.18$ の多孔質粒子 B（三菱化学：DIAION SP207SS）の 2 種類を用いた。いずれの粒子においても、重量濃度を 1000 ppm とした。以降では、便宜的に、粒子 A に対する比重を $\gamma=1.0$ 、粒子 B に対するそれを $\gamma=1.2$ として表記する。可視化のために粒子 A には Rhodamine B 染料を、粒子 B には Acid red を吸着させた。

本実験では、水の電気分解により発生する水素気泡をマイクロバブルとして利用する。電気分解を行うために、電解質として少量の食塩（塩化ナトリウム含有率 99% 以上）を水に加えた。マイクロバブル発生装置の概略図を図 2(b) に示す。マイクロバブル発生のための電極には白金線（カソード：直径 0.1 mm、長さ 120 mm）、白金管（アノード：外径 1 mm、長さ 100 mm）を用いた。電源には可変直流安定化電源（高砂：ZX-400L）を使用した。カソードより発生する水素気泡は、計測領域へ向かって流れる。気泡流量はファラデーの法則と気体の状態方程式より見積もられ、7.3 mm³/s であった。一方、アノードより発生す

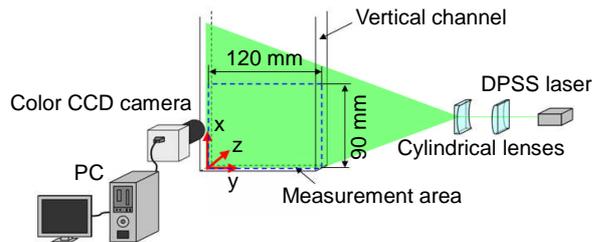


図3 気相速度計測システム

る塩素は、電極間の仕切り板を用いて計測領域への進入を防いだ。

(2) 計測手法

① 分散体径計測

分散体（気泡および粒子）のサイズの計測には、カラーCCDカメラ（東芝：IK-TF7C）、LED光源（シーシーエス：TH-51×51SW）およびPCを用いた。分散体を撮影するために、LED光源を容器の後方に設置し、カメラの対面から照射した。これにより、分散体は投影像として取得される。カメラにより撮影された画像は直接PCに送信され、640×480 pixelで256階調のデジタル画像として保存された。計測面をx-y断面とし、計測領域は1.4×1.1 mm²であった。分散体径は、二値化画像の分散体像の構成ピクセル数をもとに等価直径として算出した。

② 気相速度計測

気相速度計測システムの概略図を図3に示す。気相の速度を計測するために、カラーCCDカメラ（Imperx：VGA210-LC）、半導体レーザー（Laser QUANTUM：excel mpc 6000）、シリンダリカルレンズおよびPCを用いた。レーザーシート光はチャネル側面から照射された。カメラにより撮影された画像は、直接PCに送信され、サイズ640×480 pixels、256階調のデジタル画像として保存された。計測面をx-y断面とし、計測領域は90×120 mm²であった。マイクロバブル界面での散乱光はGreen画像にて撮像される。一方、染料が吸着したマイクロ粒子表面からの蛍光発光は赤色域であるものの、カラーカメラの分光感度特性に依存して、染料が吸着したマイクロ粒子表面からの蛍光発光も僅かにGreen画像に撮像される。そこで、Red成分の輝度値に比してGreen成分のそれが高い画素の輝度値のみをGreen画像より抽出し、気相画像を作成した。その後、作成した気相画像に対して階層型PIVを施し、気相速度を算出した。

4. 研究成果

(1) 気泡の時系列画像

t=35, 40, 50 sにおける気泡の時系列画像を図4に示す。図中のHは、計測領域の幅である。気泡の生成開始時刻はt=0 sである。

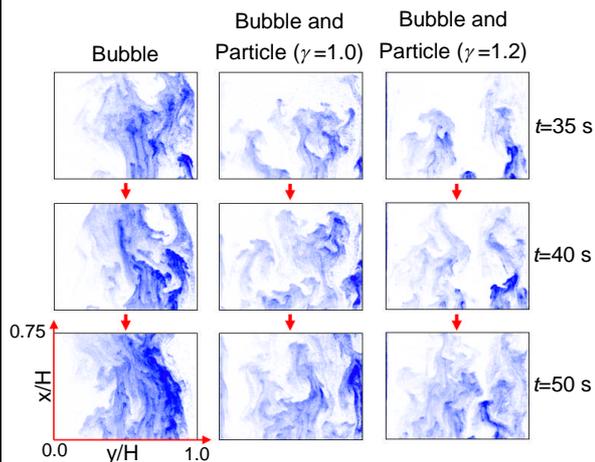


図4 気泡の時系列画像

気泡と粒子が計測領域へ同時に進入するように、t=0 sにおける粒子A ($\gamma=1.0$) の場合のみかけの固相・液相界面位置を $x=90$ mm ($x/H=0.75$)、粒子B ($\gamma=1.2$) のそれを $x=120$ mm ($x/H=1.0$) と固定した。その結果、両条件ともに、おおよそ $t=30-33$ s 付近で、気泡と粒子の干渉が始まる。まず、気泡を含む流れの結果に着目すると、 $t=35$ sでは、初期に発生した複数の気泡ブルーム同士の干渉・合体が顕著に生じていることがわかる。その後、 $t=50$ sでは、容器のほぼ中央において一つの大規模な気泡クラウドが形成されている。一方、気泡と粒子を含む流れの結果に着目すると、 $t=35$ sでは、いずれの粒子に対しても、気泡ブルーム同士の干渉・合体は顕著に生じない。また、その後の時刻にもおいても、大規模な気泡クラウドの発生は確認できない。以上の結果から、微細粒子が液相中に存在することにより、気泡ブルーム同士の干渉が著しく抑制されていると言える。

(2) 気相速度ベクトルマップ

PIVによって得られた、気相の速度ベクトルマップを図5に示す。カラーバーは、ベクトルの大きさを意味する。まず、気泡を含む流れの結果に着目すると、いずれの時刻においても、容器のほぼ中央付近において極めて高い上昇速度が発生していることがわかる。これは、大規模気泡群の発生に起因している。一方、気泡と粒子を含む流れの結果に着目すると、いずれの時間においても、気泡を含む流れの場合に比して、気相上昇速度の高い領域が減少していることがわかる。宮城島らの研究結果によれば、気泡ブルーム同士の干渉は、最も成長した気泡ブルームが周囲液体に強い循環流を誘起し、他の気泡ブルームを取り込むことによって生じる。つまり、気泡ブルーム同士の干渉には、循環流を生み出した

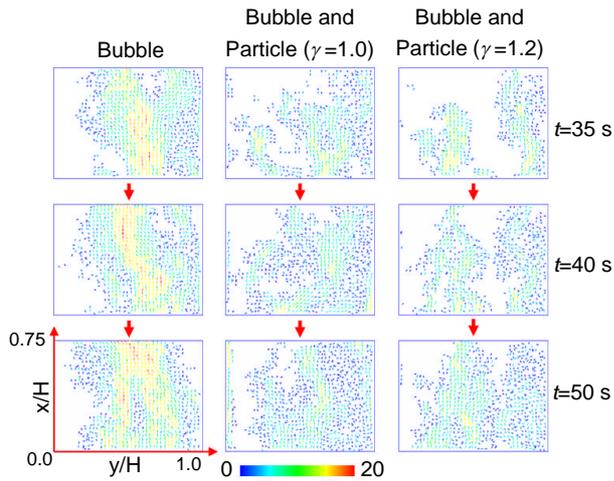


図5 気相の速度ベクトルマップ

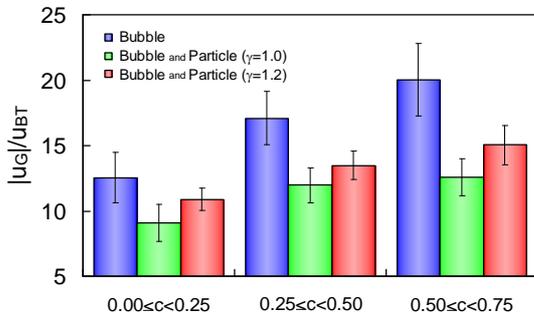


図6 c vs $|u_g|/u_{BT}$

めの局所的に高速の液相流れが必要である。このことを踏まえると、気泡と粒子を含む流れでは、粒子の存在により、局所的高速液相流れの発生が抑制されていると考えられる。この局所的高速液相流れ発生抑制は、おそらく、気相上昇速度の高い領域の減少に関係する。

(3) 気泡数密度と気相速度の関係

気泡画像から得られた局所領域における平均輝度値 c と $|u_g|/u_{BT}$ の関係を図6に示す。 u_g は x 方向の気相速度であり、 u_{BT} は気泡の終端速度である。ここで、気泡画像における輝度値は、気泡界面でのレーザーの反射光強度に対応することから、輝度値は概ね気泡数密度に比例する。このため、本節では、 c を便宜的に気泡数密度として取り扱う。図より、いずれの条件においても、 $|u_g|/u_{BT}$ が9を超えることがわかる。気泡終端速度が、概ね、気泡・液体間相対速度として見積もることができることを考慮すると、この結果は、気相速度が近似的に液相速度と見なせることを意味する。また、図より、いずれの流れにおいても、 c とともに $|u_g|/u_{BT}$ が増加することがわかる。つまり、気泡数密度の増加とともに、

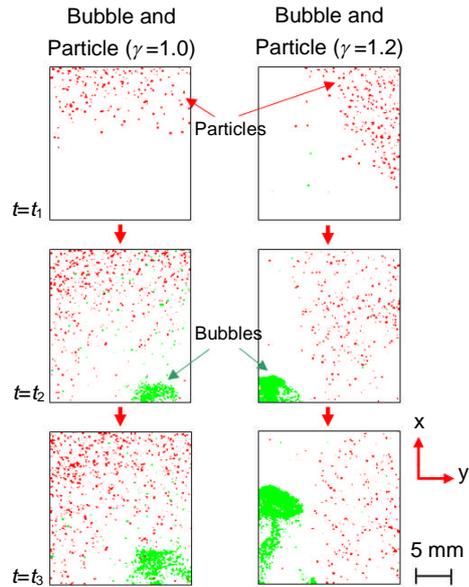


図7 分散体分布

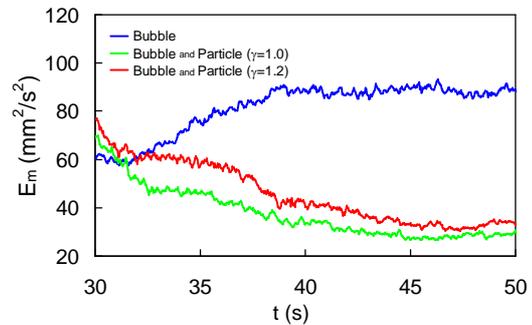


図8 気相平均運動エネルギーの時間変化

液相速度が増加する。しかし、いずれの c の範囲においても、気泡を含む流れの場合の $|u_g|/u_{BT}$ よりも、気泡と粒子を含む流れの場合のそれが低い。この結果は、気泡数密度が同じ場合、気泡を含む流れよりも気泡と粒子を含む流れの方が、高速の液相流れが誘起されにくいことを意味する。

(4) 固相・液相界面付近における分散体の分布

計測領域上部に存在する固相・液相間のみかけの界面付近における分散体の分布の典型的な画像を図7に示す。図中の赤色の点は粒子を、緑色の点は気泡を示している。粒子A ($\gamma=1.0$) の場合では、粒子と液相との密度差がほぼ無視できるため、初期状態 ($t=t_1$) では、粒子が計測領域上部にてほぼ一様に分布する。その後、気泡の上昇に伴い誘起された液相流れの影響を受け、粒子は一様性を保持した状態で移動する。このため、粒子Aの場合では、気泡と粒子は常に干渉している。一方、粒子B ($\gamma=1.2$) の場合、初期状態 ($t=t_1$)

では、密度が高い固相が液相上部に存在する。このため、固相・液相間のみかけの界面にはレイリー・テラー不安定（例えば、Haradaら）が生じる。このレイリー・テラー不安定の発生は、図 7 において示されるように、非一様な粒子分布をもたらす。気泡は、粒子分布の疎な領域、つまり、抵抗の低い領域を選択的に上昇することができる。これにより、粒子 A の場合に比して、粒子 B の場合の方が、気泡と粒子との干渉頻度が低下する。

(5) 気相平均運動エネルギーの時間変化

気相の単位質量あたりの平均運動エネルギー E_m の時間変化を図 8 に示す。

まず、図 8 より、 $t > 35$ s では、気泡と粒子を含む流れの場合の気相平均運動エネルギーが、気泡を含む流れの場合のそれに比して極端に低いことがわかる。気泡と粒子を含む流れにおける極端な運動エネルギーの低下は、上述した、気泡ブルーム同士の顕著な干渉の抑制に深く関連する。これまでの結果を踏まえ、気泡ブルーム同士の顕著な干渉・合体の抑制の要因を以下に示す。本実験条件では、終端速度に基づく気泡レイノルズ数が 1 よりも十分に低い。このため、気液間相対座標系では、気泡周りの流れがストークス流れに近似できる。ストークス流れでは、液相の運動量拡散スケールが非常に長いことから、個々の気泡の浮力によるエントレインメントが互いに強く影響を及ぼし合う。一方、気泡と粒子を含む流れの場合では、気泡群中に粒子が存在するため、液相の運動量拡散が抑制される。これは、気泡群の有する浮力分布の連続性の欠如をもたらす。その結果、浮力源が減少し、気泡を含む流れの場合よりも液相速度が低下する。液相速度が低下すると、強い循環流が発生しないため、気泡ブルーム同士の干渉がほとんど生じない。

また、図 8 より、粒子 B ($\gamma=1.2$) の場合の E_m が粒子 A ($\gamma=1.0$) の場合のそれよりも高くなることがわかる。しかし、 $t=45-50$ s における粒子 B ($\gamma=1.2$) の場合の E_m と粒子 A ($\gamma=1.0$) の場合のそれとの差は、 $t=33-38$ s でのその差よりも小さくなる。 $t=33-38$ s では、固相・液相のみかけの界面付近において、粒子 B ($\gamma=1.2$) が非一様に分布することから、気泡と粒子との干渉頻度が低い。つまり、気泡群の有する浮力分布の連続性の欠如が緩和されている。しかし、気泡が誘起する流れ場の影響により、時間の経過とともに、粒子分布の非一様性が徐々に低下する。その結果、 $t=45-50$ s では、粒子 B ($\gamma=1.2$) の場合の気泡と粒子との干渉頻度が増強し、両者の差が小さくなる。

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 0 件)

[学会発表] (計 7 件)

①三村拓也, マイクロスケール三相流の可視化画像計測, 第 62 回理論応用力学講演会, 2013 年 03 月 06 日, 東京工業大学

②三村拓也, マイクロスケール三相流中の粒子と気泡挙動の可視化, 第 90 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012 年 11 月 18 日, 同志社大学

③三村拓也, 鉛直チャンネル内マイクロスケール三相流の速度計測, 熱工学コンファレンス 2011, 2011 年 10 月 29 日, 静岡大学

④三村拓也, 鉛直チャンネル内マイクロスケール三相流の流動特性, 日本混相流学会年会講演会 2011, 2011 年 8 月 8 日, 京都工芸繊維大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北川 石英 (KITAGAWA ATSUSHIDE)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授
研究者番号: 80379065

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: