

平成21年5月31日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560180

研究課題名（和文） 気液二相噴流における気泡崩壊および洗浄機構の解明

研究課題名（英文） Investigations of Mechanism for Bubble Collapse and Cleaning in Gas-Liquid Two-Phase Jets

研究代表者

高比良 裕之 (TAKAHIRA HIROYUKI)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80206870

研究成果の概要：

気液二相噴流における噴流衝突壁面近傍での気泡崩壊ならびに洗浄の機構を解明するために、ベンチュリ管を用いた気液二相噴流の洗浄実験、管内の流動現象の可視化と圧力測定、ならびに壁面近傍および縮小管内での気泡の崩壊挙動の数値解析を行った。その結果、気液二相流中で間歇的に生じる噴流構造の変化が洗浄効果に大きな影響を及ぼすこと、気泡崩壊時に生じる二種類の衝撃波が、壁面損傷の主要因であること等が示された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流, 気液二相噴流, 気泡, キャビテーション, 衝撃波, 洗浄

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、洗浄、有機化合物の分解、殺菌、材料の表面改質等に、キャビテーション噴流や気液二相噴流を利用する試みがある。比較的低い噴射圧力の気液二相噴流による洗浄効果にも、キャビテーションによる壊食の機構と同様に、噴流衝突面近傍で気泡が崩壊する時に形成される衝撃波または液体ジェットが何らかの形で影響を及ぼしているものと考えられているが、詳細な洗浄のメカニズムは未だ明らかとなっていない。

(2) 気液二相噴流において、できるだけ低い

噴射圧の下で効率的に壁面の洗浄を行うためには、噴流中での気泡、特に噴流の衝突壁面近傍での気泡の力学を理解し、気泡の挙動が洗浄に及ぼす影響を明らかにすることが不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は、実験ならびに理論・数値解析の両面から、気液二相噴流における噴流衝突壁面近傍での気泡崩壊ならびに洗浄のメカニズムの解明を目的とし、以下の達成目標のもとで研究を遂行する。

(1) 噴流中および衝突壁面近傍での気泡の

微視的な挙動の観測を行い、噴流中での気泡崩壊が洗浄に及ぼす効果を実験的に明らかにする。

(2) 気液二相噴流中での気泡の挙動を、気泡変形、衝撃波の伝播、気泡間の相互作用を考慮して数値的に解析し、噴流壁面近傍の気泡から形成される液体ジェットによるせん断流れおよび衝撃波の強さを定量化し、気泡の崩壊機構を明らかにする。

(3) 気液二相噴流の巨視的な流れを予測する手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 実験解析

実験では、ベンチュリ管により生成される気液二相噴流を用いる。空気は、ベンチュリ管スロート部に開けられた穴から自給する方式と水と同時に強制注入する方式の二種類の方式を用いる。噴流ならびに気泡の挙動は、噴流の横方向ならびに下方に設置された高速度ビデオを用いて観測する。以下の実験を遂行する。

① 噴流圧力・速度、空気流入量、気泡径(界面活性剤より気泡径を変化させる)、空気の注入方式等が洗浄に及ぼす効果を系統的に実験し、気液二相噴流の洗浄効果を明らかにする。

② ベンチュリ管内の気泡の変形・崩壊挙動ならびに気泡の微細化を高速度カメラにより観測する。

③ 噴流衝突時の衝撃圧力を計測し、衝撃波の発生の有無を調べる。

④ 洗浄面と管内の圧力測定と、圧力計測と同期した管内気泡の観測を通して、管内での衝撃波の生成のメカニズムと気泡の微細化および洗浄効果との関係を明らかにする。

(2) 数値解析

ベンチュリ管流れを考慮して、気液二相噴流中の気泡の挙動を、改良を施した Ghost Fluid 法を用いて解析する。以下の手順で数値解析を遂行する。

① 壁面の変形および壁面内の圧力波の伝播を考慮して、壁面近傍での気泡と衝撃波との干渉により引き起こされる気泡の崩壊現象をシミュレートする。

② ベンチュリ管の上流から気泡核を流入させ、管内の圧力勾配により成長・崩壊する気泡の挙動を扱い、管内で気泡から放射される衝撃波をシミュレートする。

③ 気液二相流の平均化方程式を用いて、実験条件に対応する気液二相噴流をシミュレートする。

4. 研究成果

(1) 気液二相噴流の洗浄効果

噴流が洗浄面に衝突する際に形成された

洗浄スポットの面積 A (図 1(a)) を計算し、 A の値を洗浄効果の評価に用いた。以下の実験では強制給気式のベンチュリ管を用い、洗浄面と噴流出口との距離 30 mm、洗浄時間を 10 s とした。

① ボイド率と洗浄面積の関係

図 1(b) に、気液総体積流量別に、ボイド率と洗浄面積との関係を示す。空気と水の総流量は 700~900 ml/min としている。水だけの噴流では、 $Q_L=700\sim 900$ ml/min のいずれの場合でも、洗浄効果が認められなかった。一方、同じ総流量のもとでも、空気流量 Q_G を 100 ml/min 以上供給することにより、洗浄効果が確認された。同じ空気流量のもとでは、総流量が大きくなるほど洗浄効果が増加した。また、総流量が等しい場合には、空気流量を増やす(ボイド率を上げる)につれて、洗浄面積は増加した。以上より、気相を混入させることが洗浄効果に寄与することが確認された。

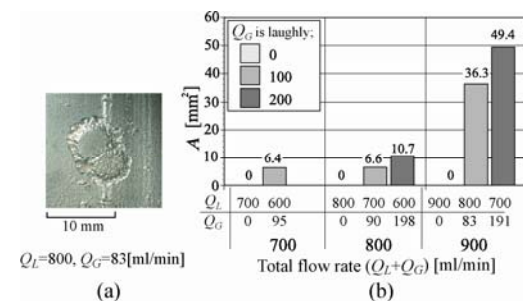


図 1 (a) 洗浄面積, (b) 空気および液流量と洗浄効果との関係

IPA (イソプロピルアルコール) の添加の有無が洗浄効果に及ぼす効果を調べたところ、IPA の添加により噴流内の気泡は微細化されるが、IPA による気泡の微細化が洗浄効果に及ぼす影響は大きくないことがわかった。

空気を自動吸気させた場合の噴流は、20%程度のボイド率となり、環状薄膜構造が連続的に形成されていることが確認された。この時の洗浄効果は、同ボイド率条件下の強制給気による噴流と比較してほぼ同程度となった。

② 噴流構造と洗浄効果

空気を約 100 ml/min (ボイド率 9%) 供給すると、流速が急激に速くなる現象 (以下、

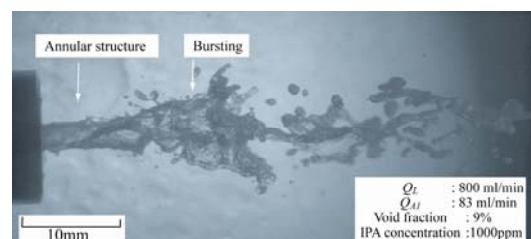


図 2 バースト時の噴流構造

バーストと呼ぶ)が断続的に起こることが観測された。バーストが起こった時の噴流構造の一例を図2に示す。この現象に着目すると、バースト直前の噴流は、内部の微細気泡の割合が少なく流速が遅いことがわかった。これに対してバースト直後は、噴流が高速で噴射され、高ボイド率下で見られるような環状薄膜構造が形成されることが多く、気相が噴流中心に塊となって存在していた。バースト時の噴流速度は、全流量を出口断面積で除した平均流速 V に比べて約4倍に達することが確認された。こうした局所的な噴流速度の増大が、洗浄効果に寄与していると考えられる。バーストの原因の一つとして、スロート部での圧力低下により成長した気泡塊が、ベンチュリ管拡大部にて、完全には微細化されない状態のまま噴出されたことが考えられる。また、高ボイド率(約20%)のもとでは、環状構造が継続的に形成され、それに伴い流速は平均流速 V に比べて速い状態が保たれることがわかった。

(2) ベンチュリ管内での気泡変形挙動と圧力波の伝播

高速度ビデオカメラ撮影および管内の圧力測定を行い、気泡変形挙動と圧力波の伝播について解析した。

① スロート部流入時の気泡変形

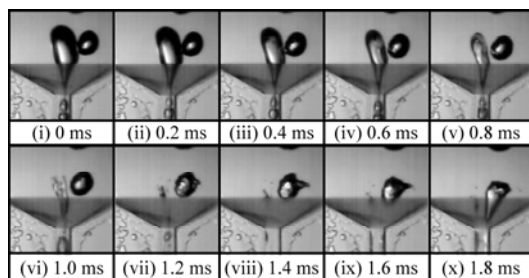


図3 スロート部流入時の気泡変形

吸気部において吸入される空気は、吸気部でせん断されて小気泡となり、その結果、小気泡が連続的にベンチュリ管に供給される。その気泡径はベンチュリ管スロート部の径の数倍程度の半径を有する。こうしたスロート径よりも大きな気泡がスロート部へ流入する際には、図3に見られるように、気泡の先端が引き伸ばされ、その先端が表面不安定によりくびれて、いくつかの微細な気泡に分裂して流入する。また、最初、接触した二個の気泡の一方の気泡がスロート部へと流入するときに、もう一方の気泡の界面にジェット形成が観測された。このジェットの方向は、相対する気泡の反対方向を向いており、通常無限流体中で二個の気泡が崩壊する際に見られるジェットの方向とは逆向きであった。

② スロート部における気泡挙動

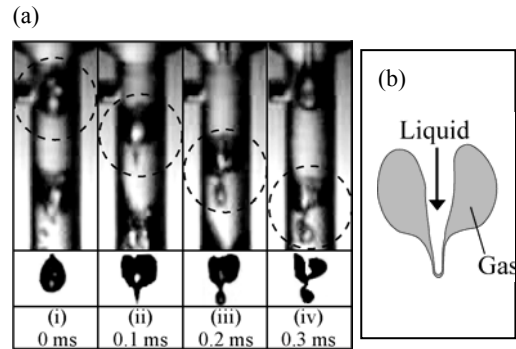


図4 スロート部における気泡変形

図4に、 $Q_L=300$ ml/min, $Q_G=12$ ml/min のときの、気泡の変形の様子を示す。図4の写真の下に描かれた図は、写真の気泡の形状を画像処理したものである。気泡は流入部に入った直後は卵型をしている。その後、気泡が下流へ進行すると、上流側の気泡表面がくぼみ、ジェットが形成される。気泡が下流へ移動するにつれて、ジェット先端が伸びるが、周囲圧力が低いため、先端は膨張していく。そして、先端は変形を伴いながらさらに膨張し、気泡は大きく変形して、ハート型になる。以上の観測結果は、通常「液体ジェット」と呼ばれる気泡崩壊時のジェットが、気泡を貫通した純粋な液体のジェットではなく、図4(b)のようにジェットの先端が気相の薄膜に覆われたジェットであることを示唆している。また、液流量が $Q_L=400$ ml/min 程度では、図3(ii)で見られたジェット先端が伸びていく過程で、ジェットが気泡から分離し、飛び出していく様子が観察された。また、後述するキャビテーション気泡崩壊時の圧力波が上流の気泡に衝突し、図4とは逆に下流側の界面から上流側の界面に向かう液体ジェットも観測された。

③ 管内の圧力波の伝播

ベンチュリ管のスロート部への気泡の流入に伴い、圧力波の発生に起因する気泡の崩壊を示唆する結果が得られた。その様子の一例を図5に示す。このときの流量は、 $Q_L=900$ ml/min, $Q_G=100$ ml/min である。液流量が増加すると、スロート部の静圧の低下に伴い、

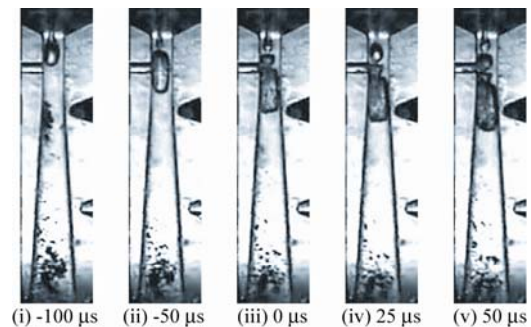


図5 ベンチュリ管内の可視化

キャビテーションが発生する。キャビテーションが発生している状態で、上流からスロート部に気泡が流入すると、気泡の進行に伴いスロート部のキャビテーション気泡群が崩壊し、その際に、強い圧力波が計測された。キャビテーション気泡群の崩壊は、気泡の流入により、スロート部の圧力が上昇したためである。また、気泡が拡大部に達すると、下流に存在していた気泡群が消滅する現象も見られた。これは、スロート部で発生した圧力波が下流方向へと伝播したためと推測される。この圧力波の伝播速度は管内のポイド率依存することが示された。

(3) 気泡崩壊現象の数値解析

① Ghost Fluid 法を用いた壁面近傍での気泡崩壊

気泡内部の気体、気泡周囲の液体、壁面の材料の三相を同時に解析可能な数値計算手法を開発し、気泡崩壊時の衝撃波の形成により壁面損傷および洗浄のメカニズムを検討した。

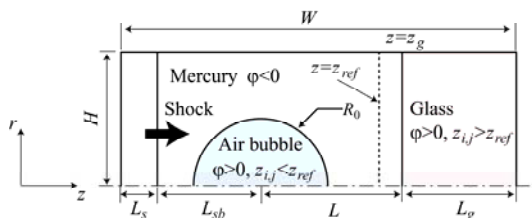


図6 計算領域の設定

本解析では、図6のように、境界壁面から距離 L の位置で静止している初期半径 R_0 に衝撃波が入射し、壁面と干渉しながら崩壊する問題を考える。気液界面、壁面と液体との境界面は、Level Set 関数を用いて捕獲する。界面での境界条件は、Ghost Fluid 法における仮想流体を用いて満足させる。また、質量保存性を改善するために、Hybrid Particle Level Set 法を用いた。さらに、界面での数値振動を抑制するために、Riemann 厳密解を用いて、界面近傍の物理量を補正した。なお、気相、液相、固相の状態方程式には Stiffend Gas 状態方程式を使用した。

図7の計算結果の一例を示す。図7は水銀中でのガラス壁近傍での衝撃波と気泡と干

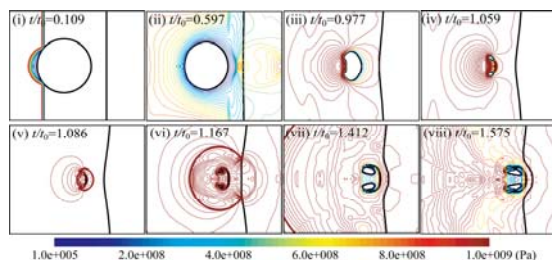


図7 壁面近傍での気泡崩壊

渉の様子である。図7(i)では衝撃波が気泡に衝突し、水銀よりも空気の音響インピーダンスの方が小さいため、後方に膨張波が反射する。水銀とガラスの音響インピーダンスが異なるので、ガラス壁で膨張波が反射する(図7(ii))。気泡は徐々に収縮し、気泡の後方がくぼみ、ジェットが形成される(図7(iii))。ジェットが下流側の気泡壁に衝突する時(図7(iv))と気泡の再膨張時(図7(v))に、非常に強い衝撃波が発生し、周囲に伝播していく。図7(iv), (v)で発生した二種類の衝撃波がガラス壁に衝突し、ガラス壁面がくぼむ(図7(vi)-(viii))。この二種類の衝撃波がガラス壁面の損傷の主要因である。

その他、様々な物性を持つ壁面近傍での気泡崩壊問題を解析した結果、壁面の音響インピーダンスが気泡の崩壊挙動に大きく影響することが示された。すなわち、気泡周囲の液体の音響インピーダンスが、壁面の音響インピーダンスよりも大きい場合には、気泡は弾性境界近傍に類似の挙動を示し、気泡の並進運動が抑制される。また、液体の音響インピーダンスが、壁面の音響インピーダンスよりも小さい場合は、入射衝撃波の反射の影響により気泡はより激しく崩壊する。

② 縮小管内での気泡の変形挙動

(1), (2)で述べた実験をシミュレートする目的で、上述の Ghost Fluid 法を用いた数値解析手法を、縮小管内での気泡の変形挙動の解析に適用した。図8に管内の気泡径上および圧力分布を示す。本計算では、初期半径2.5 mmの気泡が、直径10 mmの管流入部から、直径を2.5 mmのスロート部に流入状況を想定している。気泡は管テーパ部の縮流の影響を受け、軸方向に引き伸ばされながらスロート部へ向かい流されていく。スロート部へ流入した気泡先端は、スロート部の低圧の影響を受け膨張する。その後、気泡先端はさらに膨張し、気泡は流れとともに引き伸ばされていく。図8(d)に気泡がスロート部に流入する際のベンチュリ管を用いた実験結果の一例を示す。実験結果が示すスロート部流入時における気泡形状(特に気泡先端部)と本研究の計算結果は定性的に一致することがわかる。実験では、引き伸ばされた気泡は分裂することが確認されているが、今回の計算では引き伸ばされた気泡の分裂は確認できな

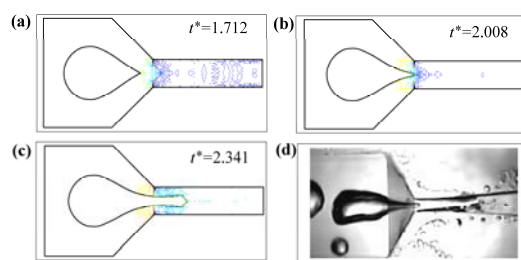


図8 縮小管内での気泡の変形

かった。この違いは、実験で使用されるベンチュリ管の流入部とスロート部の面積比の違いや、表面張力および粘性が考慮されていないこと、本計算の格子解像度が十分でないことによると考えられる。また、スロート部への気泡流入に伴い、スロート部の液体圧力の上昇が確認された。この液体圧力の上昇は、前述の実験におけるスロート部でのキャビテーション気泡群の崩壊を引き起こす。

③ マルチグリッド Ghost Fluid 法の開発

②で示した数値解析において、実験をシミュレートするには、界面近傍の格子解像度を高める必要があることがわかった。しかし、実験における気液界面を、単一微細格子を用いて十分な精度で捕獲するには、長時間の計算が必要であり、非常にコストがかかる。そこで、マルチグリッド法と Ghost Fluid 法を融合した新しい計算手法を開発した。

図9に計算結果の一例を示す。図9は、格子幅 $\Delta r = \Delta z = 0.02R_0$ の正方形格子を用いて計算された気泡形状の時間変化 (Case 1) と、三種類のレイヤーを用いたマルチグリッド Ghost Fluid 法による気泡形状の時間変化 (Case 2) である。Case 2 では、 $\Delta r = \Delta z = 0.01R_0$ (Layer 1), $\Delta r = \Delta z = 0.005R_0$ (Layer 2), $\Delta r = \Delta z = 0.0025R_0$ (Layer 3) のレイヤーを使用した。Layer 3 は気泡近傍に配置されている。気泡が衝撃波の高圧により液体ジェットを形成しながら崩壊し、その後再膨張する様子は、両者とも定性的には同じであるが、液体ジェットの衝突時刻は、格子解像度が高いほど若干早くなる。液体ジェット貫通後、気泡周囲には循環流れが形成され、気泡界面は渦構造を有するが、格子間隔が細くなるほど、複雑な微細構造が見てとれる。また、ジェット衝突後には、気泡前方に気相からなる薄い層が現れるが、格子が細くなるにつれて、その層が薄くなっている。また、マルチグリッド Ghost Fluid 法を用いると、質量保存性が大幅に向上した。マルチグリッド Ghost Fluid 法による計算時間は、単一の微細化格子を用いた時の計算時間に比べて大幅に短縮されることが示された。

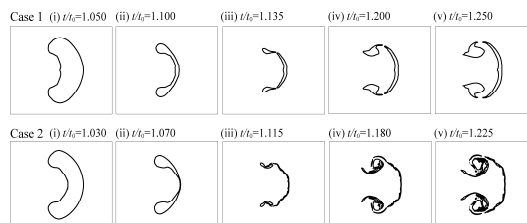


図9 気泡崩壊形状の時間変化

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計14件)

1. H. Takahira, K. Kobayashi, and T. Matsuno, Direct Numerical Simulations of Interaction of Strong Shock Waves with Nonspherical Gas Bubbles near Glass Boundaries in Mercury, International Journal of Emerging Multidisciplinary Fluid Sciences, Vol. 1, 2009, 掲載確定(6月号の予定). 査読あり.

2. 小林一道, 松野孝浩, 高比良裕之, 気泡崩壊問題へのマルチグリッド Ghost Fluid 法の適用, キャビテーションに関するシンポジウム(第14回)講演論文集, CD-ROM, 2009, 全4ページ. 査読なし.

3. 野上雅教, 梅山和也, 小林一道, 高比良裕之, ベンチュリ管内の気液二相流における気泡崩壊と圧力波の伝播に関する実験, 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会講演論文集, No. 094-1, 2009, p. 10/4. 査読なし.

4. 柴原大吉, 小林一道, 高比良裕之, Ghost Fluid 法を用いた縮小管内の気泡の変形挙動に関する数値計算, 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会講演論文集, No. 094-1, 2009, p. 10/3. 査読なし.

5. S. Syu, T. Matsuno, K. Kobayashi, and H. Takahira, Numerical Investigations of Interactions between Shock Waves and Bubbles near Tissue Surface Using the Ghost Fluid Method, Proc. of the 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conf., CD-ROM (No. E322), 2008, Total 2 pages. 査読なし.

6. K. Umeyama, K. Ikema, K. Kobayashi, and H. Takahira, Flow Structure and Bubble Fission of Gas-Liquid Two-Phase Venturi Tube Flows, Proc. of the 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conf., CD-ROM (No. E122), 2008, Total 2 pages. 査読なし.

7. 梅山和也, 小林一道, 高比良裕之, ベンチュリ管内での気泡の変形挙動, 日本混相流学会年会講演会 2008 講演論文集, 1, 2008, pp. 268-269. 査読なし.

8. 松野孝浩, 周正, 小林一道, 高比良裕之, Ghost Fluid法を用いた境界面近傍での衝撃波に誘起される気泡の崩壊に関する数値解析, 日本混相流学会年会講演会 2008 講演論文集, 1, 2008, pp. 262-263. 査読なし.

9. H. Takahira, T. Matsuno, and K. Shuto, Numerical Investigations of Shock-Bubble Interactions in Mercury, Fluid Dynamics Research, Vol. 40, 2008, pp. 510-520. 査

読あり。

10. K. Kobayashi, T. Matsuno, S. Syu, and H. Takahira, Numerical Analysis of Shock-Bubble Interactions near Boundaries Using the Ghost Fluid Method, Proc. Cavitation in Turbo-Machinery & Medical Applications, CD-ROM, 2008, pp. 190-196. 査読なし.

11. 梅山和也, 池間賢吾, 小林一道, 高比良裕之, ベンチュリー管を用いた気液二相流における気泡微細化の機構に関する実験的検討, 日本機械学会関西支部第 83 期定時総会講演会講演論文集, No. 084-1, 2008, p. 4/3. 査読なし.

12. 池間賢吾, 梅山和也, 高比良裕之, ベンチュリー管を用いた気液二相噴流の構造と気泡の微細化に関する一考察, 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会講演論文集, CD-ROM (No. 1114), 2007, 全 4 ページ. 査読なし.

13. 松野孝浩, 首藤圭亮, 高比良裕之, ガラス壁近傍における水銀中での衝撃波と気泡との干渉に関する数値シミュレーション, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, Vol. 2, 2007, pp. 329-330. 査読なし.

14. 池間賢吾, 高比良裕之, ベンチュリー管を用いた気液二相噴流の構造と洗浄効果に関する実験的検討, 日本混相流学会年会講演会 2007 講演論文集, 1, 2007, pp. 68-69. 査読なし.

[学会発表] (計 14 件)

1. 小林一道, 気泡崩壊問題へのマルチグリッド Ghost Fluid 法の適用, キャビテーションに関するシンポジウム(第 14 回), 2009 年 3 月 18 日, 仙台市.

2. 野上雅教, ベンチュリー管内の気液二相流における気泡崩壊と圧力波の伝播に関する実験, 日本機械学会関西支部第 84 期定時総会講演会, 2009 年 3 月 16 日, 東大阪市.

3. 柴原大吉, Ghost Fluid 法を用いた縮小管内の気泡の変形挙動に関する数値計算, 日本機械学会関西支部第 84 期定時総会講演会, 2009 年 3 月 16 日, 東大阪市.

4. S. Syu, Numerical Investigations of Interactions between Shock Waves and Bubbles near Tissue Surface Using the Ghost Fluid Method, The 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2008 年 10 月 16 日, Sapporo, Japan.

5. K. Umeyama, Flow Structure and Bubble Fission of Gas-Liquid Two-Phase Venturi

Tube Flows, The 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2008 年 10 月 14 日, Sapporo, Japan.

6. 梅山和也, ベンチュリー管内での気泡の変形挙動, 日本混相流学会年会講演会 2008, 2008 年 8 月 10 日, 会津市.

7. 松野孝浩, Ghost Fluid 法を用いた境界面近傍での衝撃波に誘起される気泡の崩壊に関する数値解析, 日本混相流学会年会講演会 2008, 2008 年 8 月 10 日, 会津市.

8. K. Kobayashi, Numerical Analysis of Shock-Bubble Interactions near Boundaries Using the Ghost Fluid Method, WIMRC 2nd International Cavitation Forum 2008 (Cavitation in Turbo-Machinery & Medical Applications), 2008 年 7 月 7 日, Coventry, UK.

9. 梅山和也, ベンチュリー管を用いた気液二相流における気泡微細化の機構に関する実験的検討, 日本機械学会関西支部第 83 期定時総会講演会, 2008 年 3 月 14 日, 豊中市.

10. 池間賢吾, ベンチュリー管を用いた気液二相噴流の構造と気泡の微細化に関する一考察, 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会, 2007 年 11 月 18 日, 東広島市.

11. H. Takahira, Numerical Investigations of Shock-Bubble Interactions in Mercury, The 1st Int. Colloq. on Dynamics, Physics and Chemistry of Bubbles and Gas-Liquid Boundaries, 2007 年 9 月 25 日, ニセコ町.

12. 高比良裕之, Ghost Fluid 法による気泡と衝撃波との干渉に関する数値解析, 「非線形波動現象の数理と応用」RIAS 研究集会, 2007 年 9 月 19 日, 京都市.

13. 松野孝浩, ガラス壁近傍における水銀中での衝撃波と気泡との干渉に関する数値シミュレーション, 日本機械学会 2007 年度年次大会, 2007 年 9 月 10 日, 吹田市.

14. 池間賢吾, ベンチュリー管を用いた気液二相噴流の構造と洗浄効果に関する実験的検討, 日本混相流学会年会講演会 2007, 2007 年 6 月 22 日, 札幌市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高比良 裕之 (TAKAHIRA HIROYUKI) ・大阪府立大学 ・工学研究科 ・教授 ・80206870

(3) 連携研究者

彭 國義 (PENG GUOYI) ・日本大学 ・工学部 ・准教授 ・90295527