

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24日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21360086

研究課題名（和文）気泡崩壊現象における極限物理の解明

研究課題名（英文）Study on the physics during the final stage of bubble collapse

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（和文）：

非球形気泡の崩壊現象を解明するため、界面での非平衡相変化等を考慮した新しい計算手法(改良 Ghost Fluid 法)を開発した。本手法では、気泡の体積変化と並進運動に応じて、格子解像度を変化させる Adaptive Zonal Grids の利用により、気泡崩壊時の界面の微細構造を精度良く捕えることができ、仮想流体の利用により相変化に伴う界面での圧力・温度の不連続を鋭く捕えることができる。本手法を用いた衝撃波と気泡との干渉やチャンネル内での気泡群の崩壊に関する数値計算、ならびに、ベンチュリ管内における気液二相流中での気泡崩壊や圧力波の伝播に関する実験を通して、非平衡相変化が気泡崩壊に及ぼす影響や気泡振動に起因する圧力波の特性等を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

An improved ghost fluid method has been developed for understanding nonspherical bubble collapse with nonequilibrium phase transition. We have succeeded in capturing the fine interfacial structure by using adaptive zonal grids in which the grid resolution is changed according to the volume change and translational motion of a bubble. The pressure and temperature discontinuity at the bubble interface has been captured sharply with ghost fluids. The method has been applied to the bubble collapse by shock-bubble interactions and to the collapse of a bubble cloud in a channel, and so on. The bubble collapse and the propagation of pressure waves in gas-liquid two-phase Venturi flows have also been investigated, experimentally. The influence of nonequilibrium phase transition on bubble collapse and the characteristic of pressure waves with bubble oscillations in bubble mixtures have been clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2010年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

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：流体工学，気泡，気液二相流，衝撃波，液体ジェット，Ghost Fluid 法，非平衡相変化，熱移動

1. 研究開始当初の背景

近年、「気泡崩壊」が関連した物理・化学現象は、流体機械中でのキャビテーションエロージョンなどの工学的な問題に留まらず、医療・生体工学や核融合など様々な学際領域において重要な問題を提起している。例えば、遺伝子治療においては、ナノバブルの崩壊を利用した生体細胞内への治療性分子の導入が検討されている。また、高出力の核破砕中性子源の開発計画においては、超高強度パルス陽子ビームを水銀ターゲットに照射する際の熱膨張に起因する圧力波により生成される気泡の崩壊が、容器壁面の損傷を引き起こすことから、壁面損傷の抑制技術が求められている。また、気泡崩壊時にはその内部の気体が高速に圧縮されるため、気泡周囲には局所的に超高温・高圧の場が形成される。この特異な場は、物質分解や新素材の開発に応用されてきている。こうした気泡の崩壊過程は、多くの場合、各種境界、気泡同士の相互干渉、流れ場の圧力勾配等の影響下で行われるため、気泡表面は大きく変形し、液体ジェット形成を経て、崩壊末期には、気泡はトロイダル状になる。このように、気泡崩壊現象は変形や相変化を伴う超高速現象であり、気泡崩壊時の最大温度、最大圧力の予測など、未解決の重要な問題が残されている。

2. 研究の目的

本研究では、気泡崩壊末期の界面の微細構造、粘性・熱伝導および界面での相変化現象を扱う新しい計算手法(改良 Ghost Fluid 法)を開発する。そして、改良 Ghost Fluid 法による数値解析、分子気体力学解析、ベンチュリ管内における気液二相流中での気泡の崩壊実験、流路内での気泡崩壊と圧力波の伝播に関する解析等を通して、気泡崩壊時の極限物理現象の解明に取り組むものである。

3. 研究の方法

(1) 数値解析手法の構築

① Adaptive Zonal Grids を用いた Ghost Fluid 法の開発

Adaptive Zonal Grids を用いた Ghost Fluid 法を開発し、気泡崩壊時の界面の微細構造を解析する。

② 粘性と表面張力を考慮した気泡崩壊解析

流体の粘性、表面張力を考慮した Ghost Fluid 法を開発し、気泡崩壊問題に適用する。

③ 界面での熱移動を考慮した気泡崩壊解析

Adaptive Zonal Grids を採用した Ghost Fluid 法を用いて界面での熱移動を扱う手法を開発し、気泡崩壊問題に適用する。

④ 非平衡相変化を考慮した気泡崩壊解析

(a) 分子気体論解析

気泡内部気体に Gaussian-BGK Boltzmann

方程式を適用することによる、気液界面での相変化を考慮した数値計算を行う。

(b) Ghost Fluid 解析

気液界面での境界条件を、仮想流体を用いて満足させることにより、界面での非平衡熱物質移動を解析し得る Ghost Fluid 法に基づく新しい数値計算手法を開発する。

(2) 実験解析とシミュレーション

① ベンチュリ管内での気泡の崩壊

ベンチュリ管内における気液二相流中での気泡の崩壊挙動を高速度ビデオカメラで観測する。また、実験に対応する数値シミュレーションを行い、液体ジェット生成の機構を明らかにする。

② 流路内での気泡崩壊と圧力波の伝播

狭い流路内に微小気泡群が分散している気泡流中に、高強度 Nd:YAG パルスレーザーを集束させることにより、レーザー誘起気泡を生成する。生成の際に発生する衝撃波による気泡群の崩壊と圧力波の伝播を高速度ビデオカメラで観測する。また、Ghost Fluid 法を用いて気泡群と衝撃波との干渉を解析し、気泡流中を伝播する圧力波の特性を調べる。

4. 研究成果

(1) 数値解析手法の構築

① Adaptive Zonal Grids を用いた Ghost Fluid 法の開発

気泡が崩壊する場合には、気泡の体積が急速に減少することから、気泡界面を捕獲するための格子解像度を適切に設定する必要がある。そこで、Adaptive Zonal Grids を用いることにより、界面周辺の格子解像度を気泡の体積変化ならびに並進運動に応じて変化させて、効率的に精度良く界面を捕える手法を考案した。その際、Ghost Fluid の考え方を応用することにより、界面近傍の多重格子のセル間の物理量を補間する際の数値振動を抑制する方法も考案した。

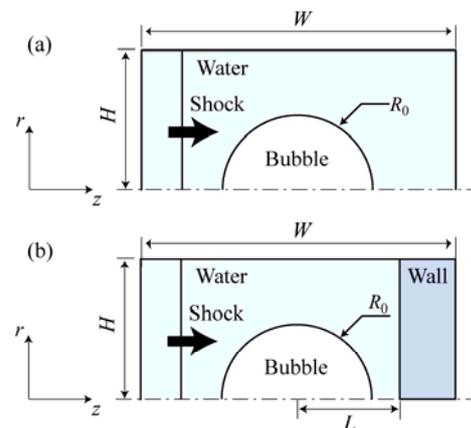


図1 気泡崩壊問題の設定

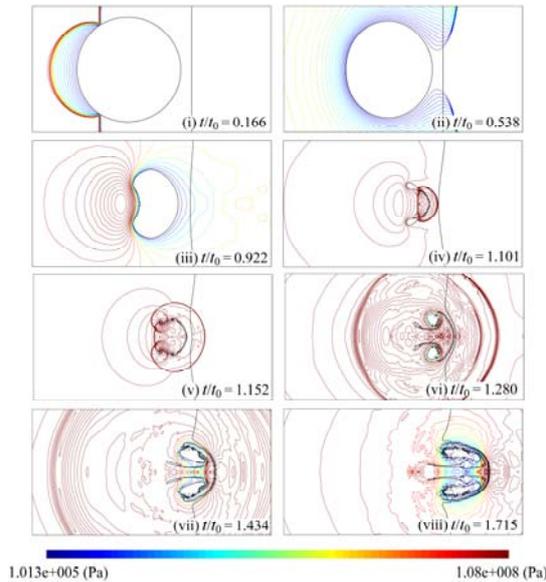


図2 ゼラチン壁近傍での気泡崩壊
(圧力分布)

図1(a)のように、左から入射する衝撃波と気泡との干渉問題に対して、Adaptive Zonal Grids で用いる計算レイヤーの格子解像度が気泡形状の捕獲に及ぼす影響を検討した。その結果、本手法により、液体ジェット貫通後の循環流れによる複雑な界面変形を精度良く捕らえられることが示された。また、三層の多重格子を用いた本手法による計算時間は、計算領域全体を単一の格子幅で計算した時の計算時間の約 1/16 に短縮された。

次に本手法を図1(b)のように壁面近傍での衝撃波と気泡との干渉問題に適用した結果の一例を図2に示す。本解析では、壁面の材料を固い流体で表現することにより、壁面の変形を考慮して、気体、液体、壁面の三相の流体の運動を改良 Ghost Fluid 法を用いて解いた。なお、壁面の材質はゼラチンを想定した。図2より、衝撃波が入射する側の気泡表面に形成される液体ジェットが、ゼラチン壁面側の気泡表面に衝突・貫通する際に衝撃波が発生すること、その後気泡が再膨張する際にも衝撃波が発生すること、これら気泡崩壊時に形成される二種類の衝撃波により壁面がくぼみ、その中に気泡が進入していくことがわかる。以上、本手法により、界面の微細変形を精度良く捕えつつ、壁面近傍の気泡崩壊現象をシミュレート可能であることが示された。

また、複数気泡と衝撃波との干渉問題を解析し、気泡間相互作用が気泡崩壊を助長する条件を明らかにした。さらに、気泡崩壊と治療性分子の輸送との関連を解明するために、生体壁近傍での気泡崩壊を解析した。その結果、生体内への治療性分子の輸送が、壁の音響インピーダンスと気泡崩壊時の界面形状に依存し、柔らかい壁の方が生体内への輸送

量が増加することが明らかとなった。

② 粘性と表面張力を考慮した気泡崩壊解析

Adaptive Zonal Grids を採用した Ghost Fluid 法を用いて、粘性と表面張力を扱う手法を構築した。衝撃波と気泡との干渉ならびに壁面近傍での気泡崩壊を解析し、手法の妥当性を示すとともに、液体ジェットによる壁面せん断応力について検討した。

③ 界面での熱移動を考慮した気泡崩壊解析

Adaptive Zonal Grids を採用した Ghost Fluid 法を用いて、熱伝導を扱う手法を構築した。本手法を軸対称気泡と衝撃波との干渉問題に適用し、本手法により気液界面に発達する温度境界層を精度良く捕えることができることを示すとともに、界面での熱移動が気泡崩壊に及ぼす効果を検討した。

④ 非平衡相変化を考慮した気泡崩壊解析

(a) 分子気体論解析

気泡内部気体に対して Gaussian-BGK Boltzmann 方程式を用いて、気液界面での相変化を考慮した球形気泡の崩壊に関して数値計算を行った結果、気液界面での凝縮係数の値が 0.005 の場合には、気泡内の最大圧力は、相変化を無視した場合の最大圧力の約 2 倍になることが示された。

(b) Ghost Fluid 解析

気液界面での境界条件を、仮想流体を用いて満足させることにより、界面での非平衡熱物質移動を解析し得る Ghost Fluid 法に基づく新しい数値計算手法を構築した。本手法は、現象の複雑さに応じて格子解像度を变化させる Adaptive Zonal Grids の利用により、界面を効率的かつ高精度に捕えることができる。

本手法による計算結果の一例を図3に示す。本解析手法では、非平衡相変化に伴う界面での質量流束を決定する方法は任意であるが、図3では古典的な Hertz-Knudsen-Langmuir モデルを用いた。図3の解析から、本手法により既存の手法では解像できなかった界面の微細構造を捕えた上で、非球形気泡の崩壊における非平衡相変化(蒸発・凝縮)を解析し得ることが示された。また、界面における蒸気の凝縮により、界面近傍の蒸気温度が局所的に上昇する場合があることが明らかとなった。さらに、蒸気相が急激に圧縮される液体ジェットの衝突時や気泡の再膨張時において気泡内から周囲液体に向かう大量の熱拡散が生じること、気泡崩壊時に微細な界面構造が形成されることにより、界面における相変化量が増大すること等の知見を得た。

本手法に表面張力を考慮した上で、壁面近傍での蒸気泡の崩壊現象を解析した。非平衡相変化により気泡崩壊が助長されること、壁面と気泡中心との距離が短いほど気泡の崩壊周期が長くなり、気泡内の最高圧力と最高温度が低下すること、気泡収縮時の凝縮によ

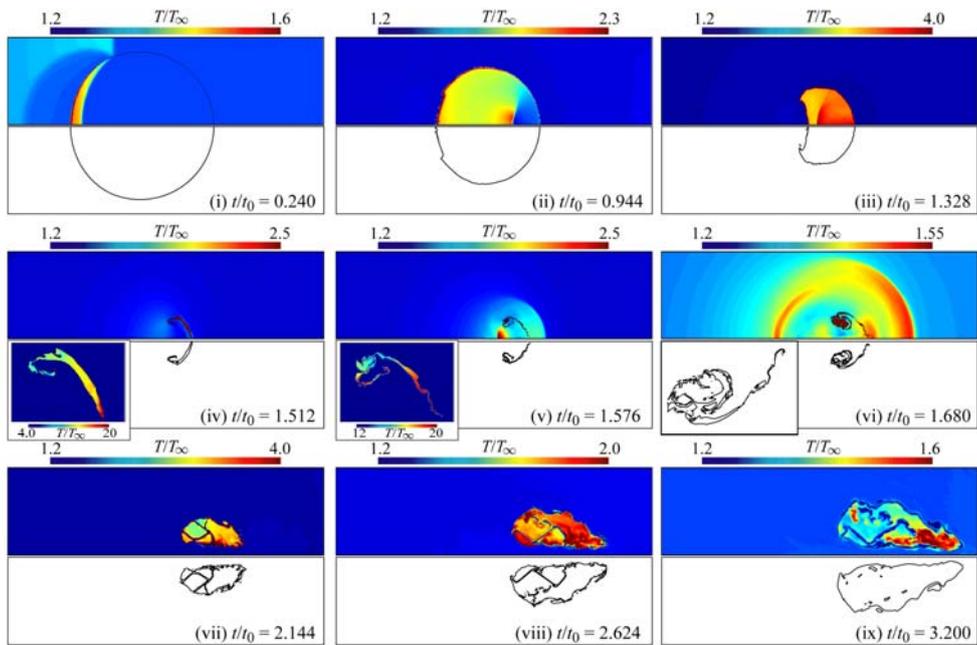


図3 非平衡相変化を考慮した時の気泡崩壊（温度分布と気泡形状）

る質量減少の変化率は、気泡と壁面との距離が短いほど低下することが示された。また、衝撃波と蒸気泡との干渉を気液界面において生じる非平衡相変化を考慮して解析した。その結果、気泡から放射される衝撃波の強度や気泡中心の初期位置からの並進移動量が実験と良く一致すること、気泡が収縮している過程で入射衝撃波が作用する場合、気泡崩壊時に強い衝撃波が発生する条件が、入射衝撃波が作用する気泡収縮過程の位相に依存することなどの知見を得た。

(2) 実験解析とシミュレーション

① ベンチュリ管内での気泡の崩壊

ベンチュリ管または縮小管のスロート部を通過する数ミリ程度の微小気泡の変形挙動および圧力回復部での気泡の崩壊挙動を、高速度ビデオカメラを用いて観測した。その結果、図4のように、複数の気泡が連続的にスロート部を通過する際には、通常見られる後方気泡界面に形成される進行方向の液体ジェット(順方向ジェット)のほかに、前方気泡界面に形成される進行方向と逆向き液体ジェット(逆方向ジェット)が発生すること、また、順方向ジェットの速度はスロート部に流入する気泡間の距離が短くなるほど遅くなるのに対して、逆方向ジェットの速度

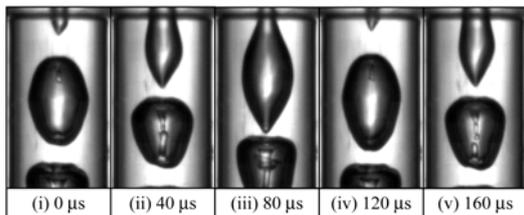


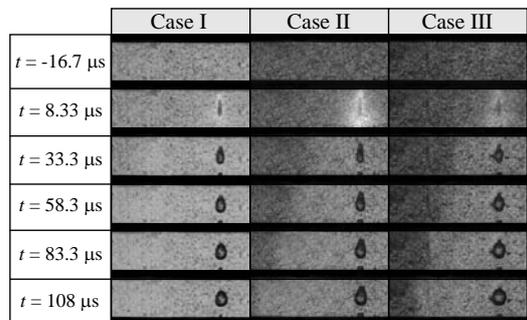
図4 管スロート部での液体ジェットの形成

は、気泡間距離が短くなるほど速くなること等が示された。また、数値解析により、逆方向ジェットの主要因は、二個の気泡間に形成される圧力勾配であることが示された。

② 流路内での気泡崩壊と圧力波の伝播

Ghost Fluid 法を用いて、チャンネル内に分布する円筒気泡群と衝撃波との干渉問題を数値計算した。様々なボイド率に対して、数値計算で得られた圧力波の伝播速度を、等温均質気液二相媒体において定義される圧力波の伝播速度と比較した。その結果、いずれのボイド率においても、数値計算で得られた圧力波の伝播速度は、等温均質気液二相媒体を仮定して得られた伝播速度と 10%以内の誤差で一致した。

図5のように、狭い流路内に微小気泡群が分散している気泡流中に、高強度 Nd:YAG パルスレーザーを集束させることにより、レーザー誘起気泡を生成した。レーザー誘起気泡生成時に発生する球面衝撃波が管内の気泡群と干渉する様子を高速度ビデオカメラにより観



Scale : 10 mm

図5 気泡流中での圧力波の伝播

測(図 5)するとともに、圧力履歴の測定により、気泡流中の圧力波の伝播を解析した。その結果、高速度ビデオカメラによる観測画像の輝度値を空間平均することにより、気泡の体積振動に起因する圧力波の伝播速度を算出でき、その速度からボイド率が推定可能であることが示された。また、狭い流路内およびU型壁面近傍でのレーザ誘起気泡の崩壊挙動を観測し、流路幅および壁面形状が気泡崩壊に及ぼす影響を調査した。

以上、本研究により開発された改良 Ghost Fluid 法に基づく解析手法は、独自性と新規性を有する手法であると考えられる、今後、本手法を用いた数値解析と実験を通して、気泡崩壊現象のさらなる解明が期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 41 件)

1. 松熊修平, 西亘, 小笠原紀行, 高比良裕之, 気泡流中におけるレーザ誘起気泡の生成に伴う圧力波の伝播に関する実験的検討, 混相流 -混相流研究の進展-, Vol. 26, 2013, pp. 577-585. 査読あり.
2. 板谷翔平, 神保佳典, 高比良裕之, Ghost Fluid 法を用いた剛体壁面近傍におけるキャビテーション気泡の崩壊に関する数値的検討, 第 26 回数値流体力学シンポジウム講演予稿集, USB-flash (No. C02-1), 2012, 全 5 ページ. 査読なし.
3. 神保佳典, 板谷翔平, 高比良裕之, 衝撃波と蒸気泡との干渉に及ぼす非平衡相変化の影響, キャビテーションに関するシンポジウム(第 16 回)講演論文集, USB-flash (No. A1-6), 2012, 全 5 ページ. 査読なし.
4. Y. Jinbo, T. Ogasawara and H. Takahira, Numerical Investigations of Nonspherical Bubble Collapse near Boundaries by the Improved Ghost Fluid Method, Proceedings of the Eighth International Symposium on Cavitation (CAV 2012), USB-flash, 2012, pp. 643-648, DOI: 10.3850/978-981-07-2826-7_202. 査読あり.
5. Y. Jinbo and H. Takahira, Direct Numerical Simulations of Nonspherical Bubble Collapse with Nonequilibrium Phase Transition by the Improved Ghost Fluid Method, AIP Conference Proceedings (Nonlinear Acoustics), Vol. 147, 2012, pp. 139-142, DOI: 10.1063/1.4749315. 査読なし.
6. 神保佳典, 高比良裕之, Ghost Fluid 法を用いた非平衡相変化を伴う気泡崩壊に関する数値解析, 日本機械学会論文集 B 編, 78 巻, 2012, pp. 1302-1317. 査読あり.
7. 二木和宏, 神保佳典, 高比良裕之, Ghost Fluid 法を用いた気液二相流での圧力波の伝播に関する二次元直接数値計算, 混相流 -混相流研究の進展-, Vol. 25, 2012, pp. 459-467. 査読あり.
8. T. Ogasawara, M. Morimoto, Y. Jinbo and H. Takahira, Numerical Investigation of Viscous Effect on the Bubble Collapse in a Compressible Liquid with the Ghost Fluid Method, Proceedings of the Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, USB-flash (No. GSF32-003), 2012, Total 4 pages. 査読なし.
9. Y. Jinbo and H. Takahira, Numerical Investigations of Thermal Effects on the Interaction of Shock Waves with Bubbles, Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011 (AJK2011), USB-flash (No. AJK2011-33022), 2011, Total 11 pages. 査読あり.
10. W. Nishi, M. Nogami and H. Takahira, Bubble Dynamics Observed in a Gas-Liquid Venturi Flow, Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011 (AJK2011), USB-flash (No. AJK2011-33009), 2011, Total 7 pages. 査読あり.
11. H. Takahira and Y. Jinbo, Application of an Improved Ghost Fluid Method to the Collapse of Non-Spherical Bubbles in a Compressible Liquid, Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011 (AJK2011), USB-flash (No. AJK2011-04027), 2011, Total 12 pages. 査読あり.
12. 小林一道, 神保佳典, 高比良裕之, 液体中での衝撃波と気泡との干渉問題へのマルチグリッド Ghost Fluid 法の適用, 日本機械学会論文集 B 編, 77 巻, 2011, pp. 20-32. 査読あり.
13. 野上雅教, 西亘, 神保佳典, 高比良裕之, 縮小管内での気泡に生じる液体ジェットに関する解析, キャビテーションに関するシンポジウム(第 15 回)講演論文集, CD-ROM (No. A3-4), 2010, 全 4 ページ. 査読なし.
14. 神保佳典, 高比良裕之, 気液界面での熱拡散を考慮した Ghost Fluid 法に関する検討, キャビテーションに関するシンポジウム(第 15 回)講演論文集, CD-ROM (No. A2-4), 2010, 全 4 ページ. 査読なし.
15. K. Kobayashi, Y. Jinbo and H. Takahira, Influence of Shock-Bubble and

Bubble-Bubble Interactions on the Collapse of a Cluster of Bubbles, Proceedings of the 7th International Symposium of Cavitation, USB-flash (No. 53), 2009, Total 11 pages. 査読あり.

〔学会発表〕(計 37 件)

1. 板谷翔平, Ghost Fluid 法を用いた剛体壁面近傍におけるキャビテーション気泡の崩壊に関する数値的検討, 第26回数値流体力学シンポジウム, 2012年12月18日, 東京都, 国立オリンピック記念青少年総合センター.
 2. 神保佳典, 衝撃波と蒸気泡との干渉に及ぼす非平衡相変化の影響, キャビテーションに関するシンポジウム(第16回), 2012年11月23日, 金沢市, 金沢工業大学.
 3. Y. Jinbo, Numerical Investigations of Nonspherical Bubble Collapse near Boundaries by the Improved Ghost Fluid Method, The Eighth International Symposium on Cavitation (CAV 2012), 2012年8月14日, Novotel Clarke Quay, Singapore.
 4. Y. Jinbo, Direct Numerical Simulations of Nonspherical Bubble Collapse with Nonequilibrium Phase Transition by the Improved Ghost Fluid Method, The 19th International Symposium on Nonlinear Acoustics, 2012年5月22日, 東京都, 早稲田大学.
 5. T. Ogasawara, Numerical Investigation of Viscous Effect on the Bubble Collapse in a Compressible Liquid with the Ghost Fluid Method, The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012年3月20日, Songdo Conversia Center, Incheon, Korea.
 6. 神保佳典, Ghost Fluid 法を用いた気液界面における相変化を伴う気泡崩壊に関する数値解析, 第25回数値流体力学シンポジウム, 2011年12月20日, 吹田市, 大阪大学.
 7. Y. Jinbo, Numerical Investigations of Thermal Effects on the Interaction of Shock Waves with Bubbles, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011 (AJK2011), 2011年7月28日, 浜松市, アクトシティ浜松.
 8. W. Nishi, Bubble Dynamics Observed in a Gas-Liquid Venturi Flow, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011 (AJK2011), 2011年7月28日, 浜松市, アクトシティ浜松.
 9. H. Takahira, Application of an Improved Ghost Fluid Method to the Collapse of Non-Spherical Bubbles in a Compressible Liquid, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011 (AJK2011), 2011年7月28日, 浜松市, アクトシティ浜松.
 10. 野上雅教, 縮小管内での気泡に生じる液体ジェットに関する解析, キャビテーションに関するシンポジウム(第15回), 2010年11月23日, 堺市, 大阪府立大学.
 11. 神保佳典, 気液界面での熱拡散を考慮した Ghost Fluid 法に関する検討, キャビテーションに関するシンポジウム(第15回), 2010年11月22日, 堺市, 大阪府立大学.
 12. K. Kobayashi, Numerical Simulations of Bubble Collapse Based on Molecular Gas Dynamics, The 8th Japan-UK Seminar on Multiphase Flow, 2010年9月13日, 小樽市, ホテルノルド小樽.
 13. H. Takahira, Numerical Aspect of the Collapse of Non-spherical Bubbles, 7th International Symposium of Cavitation (Cav2009), 2009年8月18日, University of Michigan, Michigan, USA.
 14. K. Kobayashi, Influence of Shock-Bubble and Bubble-Bubble Interactions on the Collapse of a Cluster of Bubbles, 7th International Symposium of Cavitation (Cav2009), 2009年8月17日, University of Michigan, Michigan, USA.
 15. H. Takahira, Direct Numerical Simulations of Bubble Collapse near a Tissue Surface with the Ghost Fluid Method, 157th Meeting of Acoustic Society of America, 2009年5月21日, Hilton Portland & Executive Tower, Portland, USA.
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
研究者番号: 80206870
 - (2) 研究分担者
小笠原 紀行 (OGASAWARA TOSHIYUKI)
大阪府立大学・工学研究科・助教
研究者番号: 00552184
 - (3) 連携研究者
小林 一道 (KOBAYASHI KAZUMICHI)
北海道大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 80453140