

称号及び氏名 博士（工学） 神保 佳典

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 31 日

論文名 「境界要素法ならびに Ghost Fluid 法を用いた
非球形気泡崩壊に関する研究」

論文審査委員 主査 高比良 裕之

副査 須賀 一彦

副査 瀬川 大資

論文要旨

液体中における気泡の崩壊現象では、慣性の大きな液相により気相が急激に圧縮される際に、局所的・瞬間的に超高温高压が発生する。また、気泡はその崩壊時に、周囲圧力場の影響により容易に非球状に変形する。その結果、気泡崩壊時には、その速度が液体の音速のオーダーにも達する液体ジェットが形成される。また、気泡が高速に圧縮され、収縮から膨張に転じる際には、液中に高压の衝撃波が発生する。このパルス的に生じる高エネルギーを有効活用することができれば、化学物質の生成法や材料の加工法、さらには医療技術に至るまで、様々な分野において技術変革が生じ得るとして、本現象は注目されている。例えば、医療分野では、治療性分子を注入したナノ・マイクロバブルを超音波等により病巣患部近傍で崩壊させ、その際生じる液体ジェットや衝撃波を用いて、治療性分子を細胞質・核まで輸送することにより、局所的・選択的な患部を治療する方法が期待されている。一方で、気泡崩壊現象は、その高エネルギーにより、機器の損傷の原因にもなり得る。この現象は流体機械におけるキャビテーションエロージョンとして良く知られている。また、水中爆発現象においてもこの現象は重要であり、爆発により生じた気泡の崩壊が船体等の損傷を引き起こす。こうした気泡崩壊の医療応用技術や水中爆発を考慮した船体の設計手法等の確立には、気泡崩壊時に生じる高压や流れ場を定量的に評価する必要がある、気泡崩壊現象の予測手法を構築することが不可欠である。

気泡崩壊の予測において重要となる課題が二つある。一つは、気泡崩壊と周囲境界との関係である。気泡崩壊現象は、気泡を取り巻く周囲環境の影響を強く受け、非常に複雑な挙動を示す。

そのため、複雑な系において多数の気泡が三次元的な配置で存在するような現実の状況における気泡崩壊を予測することは大変困難となる。もう一つは、気泡崩壊時の詳細な物理現象の解明である。気泡崩壊現象は、複雑な界面変形を伴い局所的・瞬間的に生じる高速現象であるため、実験による定量的な評価が困難であり、気泡崩壊時に形成される温度場や圧力場が未だ明確に理解されていない。

本研究の目的は、気泡崩壊現象の予測手法となり得る数値解析手法を確立することである。上述した二つの課題に対して、数値解析手法の特性を考慮し、三次元境界要素法と Ghost Fluid 法という二つの異なる手法を用いた解析手法を構築した。

三次元境界要素法を用いた解析では、移動または変形する三次元形状の壁面と三次元空間に配置された気泡群との連成挙動を扱い得る解析手法を構築した。これまでにも、生体壁を想定したような変形する壁面と気泡との干渉を扱った数値解析が行われているが、それらは、単純な壁面形状や軸対称条件に限られていた。気泡崩壊現象は、近傍の壁面や周囲に存在する他の気泡の影響を強く受けるため、気泡と境界との相互干渉の機構を詳細に把握するには、三次元解析が必要である。本研究で構築した境界要素法による解析手法には、以下のような特長がある。(1) 繰り返し計算等を用いずに、三次元境界要素法のみを用いて壁面と流体との連成問題を解析できるため、高速な三次元解析が可能である。(2) 解析未知数を解析領域境界にのみ設定すればよいため、三次元計算する際にも解析コストが低く、加えて、無限遠方を含んだ系を適切に扱うことができる。(3) 境界要素法と有限要素法の繰り返し計算による流体-構造体の連成解析に見られるような壁面の変形に伴う解析要素の歪みやそれに伴う解析精度の低下、その対処としての煩雑な要素再構成のプロセスが軽減される。(4) 流体の速度場・圧力場と壁面の速度・加速度とを連成して解くため、質量、運動量、エネルギーの保存性を満たす整合性のある解析が可能である。

上述の境界要素法では、液体の圧縮性を考慮する際に計算が煩雑になり、また、界面の合体・分裂といったトポロジが変化するような解析を扱う場合には特別な取り扱いが必要となる。そのため、境界要素法は、衝撃波の発生や気液界面の複雑な変形を伴う気泡崩壊時の極限状態における物理現象を解明するための解析には適さない。そこで、このような気泡崩壊時の詳細な物理現象の解析に対しては Ghost Fluid 法を用いて解析手法を構築した。Ghost Fluid 法を用いた本手法では、界面の位置ならびに境界条件を陰的に扱うため界面のトポロジが変化する解析を容易に扱うことができる。一般に、気泡崩壊の解析では、気泡崩壊過程を通して多様な界面スケールを扱う必要があり、空間解像度を適切に確保することが困難となるため、界面を陰的に捕獲する解析手法では、気液界面のように密度比が大きな界面において数値的な散逸が大きくなるという問題がある。本研究で考案した手法には、相変化を扱い得るように改良した Ghost Fluid 法に適合多重格子を適用することにより、気泡崩壊時の気液界面の微細構造まで数値的に散逸させることなく捕らえた上で、その界面において生じる非平衡相変化を取り扱うことができるという優位性がある。

以上、本研究は、非球形気泡の崩壊現象を予測するために、三次元境界要素法と Ghost Fluid 法による二種類の解析手法を構築するものであり、本論文は以下のように構成される。

第1章では、気泡崩壊現象について概説し、気泡崩壊現象を応用するための課題を述べ、本研究で扱う問題ならびに手法を説明し、本研究の位置づけと意義を述べた。

第2章では、壁面の運動と気泡挙動との連成解析手法を、三次元境界要素法を用いて構築した。本手法の特長は繰り返し計算などを必要とせずに強連成可能な高速な三次元解析手法という点である。この手法を以下の二つの問題に適用した。一つは船体下方における水中爆発現象である。船体の水中爆発に対する安全設計ツールとして利用可能となる高速な解析手法を構築し、浮体の並進・回転運動ならびに水面の自由運動、気泡の三次元変形挙動を扱うことが可能となった。解析の結果、気泡の初期位置や船体の特性（質量・慣性テンソル）によっては、気泡が崩壊時に船体に向かって液体ジェットを形成する条件が存在すること、ならびに、船体に向かう液体ジェットを形成する際に船底に高圧が作用することが示され、水中爆発に対する安全設計には、船体の質量や慣性テンソルに応じた気泡崩壊特性の把握が不可欠であるという知見が得られた。

次に三次元境界要素法を用いて血管内における気泡挙動を解析した。バネー質量系で模擬した弾性管と三次元変形する気泡挙動との強連成解析手法を構築した。弾性管の特性（硬さ、質量）に対する気泡挙動を調べた結果、内部に流体を含んだ管の固有振動数と系に作用させる超音波の周波数が近い条件では、管が大きく変位することにより、気泡がその崩壊時に管側壁に向かって大きく移動することとなり、壁に向かう液体ジェットが形成され、管壁損傷の原因となる可能性が示された。

第2章で構築した解析手法では、液体ジェットの形成に至る気泡の三次元変形まで考慮することができ、要素の再構成などの煩雑なプロセスが解析コストを増加させることや界面のトポロジが変化するには特別な取り扱いが必要となることから、多数の気泡の集団的な振る舞いを扱う解析には適していない。そこで、第3章では、気泡群の挙動を扱い得る高速解析手法として、気泡モデルと三次元境界要素法との強連成解析手法を提案した。単一の気泡挙動を吹出しと二重吹出しとを用いてモデル化し、その気泡モデルと周囲流体の流れ場とを三次元境界要素法を用いて連成することにより、現象を高速に解析し得る手法を構築した。この手法を船体下方における水中爆発問題に適用し、第2章で示した結果と比較することにより、手法の妥当性が示された。また、第2章の手法に比べて6倍高速な解析が可能となった。

第4章では、Ghost Fluid法を改良し、気液界面の微細構造まで解像できる解析手法を構築した。空間解像度の異なる複数の計算領域を多重に配置し、現象の複雑さに応じて格子解像度を変化させる適合細分化格子とGhost Fluid法を融合した改良Ghost Fluid法を提案し、界面を効率的にかつ高精度に解析し得る手法を構築した。この手法を、気泡径や気液界面位置を格子細分化の指標に用いて、衝撃波と気泡との干渉問題に適用した解析を行い、気泡崩壊時に発生する衝撃波の集束により、液体中に局所的な高圧場が形成されること等を示した。また、本手法を、生体壁面を想定した種々の壁面近傍における気泡崩壊問題に適用し、壁面特性（音響インピーダンスや壁面張力）が気泡崩壊に及ぼす影響を解析した。その結果、壁面の張力の増加により気泡の変形に伴うジェットの発生方向が変化する等の知見を得た。

第5章において、気泡崩壊時の気液界面で生じる非平衡相変化現象を扱い得るGhost Fluid法を構築した。本手法による結果は、Akhatovらの実験結果と良好に一致し、本手法の妥当性が示された。また、数値的な熱・質量散逸が支配的となることにより既存の解析手法では解像できなかった気液界面の微細構造を捕らえた上で、非平衡相変化を扱い得ることが示された。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。

第6章では、本研究により得られた結果を総括するとともに、それぞれの解析手法の今後の課題と発展性について述べた。

審査結果の要旨

本論文は、気泡崩壊を利用した技術の確立を視野に、境界要素法および Ghost Fluid 法という二種類の手法を応用した非球形気泡の崩壊現象の予測手法を構築し、気泡崩壊に伴う詳細な物理現象ならびに気泡崩壊が壁面に及ぼす影響等を解析したものである。得られた主な結果は、以下の項目に要約できる。

- (1) 気泡の三次元変形と壁面の移動および変形等を考慮して、壁面と気泡との連成問題を解析する手法を、三次元境界要素法を用いて構築した。本手法を、船体下方における水中爆発問題に適用し、気泡の初期位置や船体の特性によっては、気泡崩壊時に船体に向かって液体ジェットが発生し船底に高圧が作用すること等を明らかにした。また、本手法を用いて、血管を模擬した弾性管内における気泡の挙動を解析し、弾性管の特性と気泡崩壊との関連を明らかにした。
- (2) 吹出しと二重吹出しにより表現された気泡モデルを用いて、壁面と気泡との連成問題を解析する手法を構築した。本手法を船体下方における水中爆発問題に適用し、本手法が、上記(1)の気泡の三次元変形を考慮した手法に比べて、約6倍高速であることを示した。
- (3) 空間解像度の異なる複数の計算領域を多重に配置し、現象の複雑さに応じて格子解像度を変化させる適合細分化格子と Ghost Fluid 法を融合した改良 Ghost Fluid 法を構築した。本手法により、界面を効率的かつ高精度に解析することが可能となった。本手法を、生体壁面を想定した種々の壁面近傍における気泡崩壊問題に適用し、壁面の張力の増加により気泡の変形に伴う液体ジェットの発生方向が変化すること等を明らかにした。
- (4) 気泡崩壊時の気液界面で生じる非平衡相変化現象を扱い得る Ghost Fluid 法を構築した。本手法により、既存の解析手法では解像できなかった気液界面の微細構造を捕らえた上で、非平衡相変化を扱うことが可能となった。また、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を明らかにした。

以上の研究成果は、非球形気泡の崩壊現象の予測ならびに解明に重要な知見を与えるものであり、気泡崩壊を利用した医療応用技術や水中爆発を考慮した構造解析手法の発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士(工学)の学位を授与することを適当と認める。