

氏 名	佐 藤 光 太 郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 3 年 3 月 28 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	気泡の非球状運動に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 嶋 章
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 嶋 章 東北大学教授 小林 陵二 東北大学教授 橋本 弘之 東北大学教授 高山 和喜

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

気泡の運動に関する研究は1917年, Lord Rayleigh によって, 気泡の運動方程式が解かれて以来, 船舶工学や流体機械設計等の方面で, 耐キャビテーション損傷という見地から盛んに行われ, その意味では目ざましい進展を遂げてきたが, ミクロな流動機構には, 未だに不明な点が多く残されている。さらに, 今日では航空宇宙工学や医学, 化学の分野において, 衝撃波, 超音波あるいはレーザ技術が応用されるようになり, それに伴う液体内の空洞現象の解明はますます重要になってきた。従って, 気泡の問題も改めて別の角度から見直すことが必要となってきており, このような気泡を取り巻く環境の多様化の中では, 個々の状況, 目的に応じてその対応が異なるため, より具体的な状況の再現が必要不可欠となってきている。

実際に気泡の運動が問題となり, 重要視される状況を考えれば, 流れ場が非球対称である場合が圧倒的に多く, したがって, それに起因する気泡の非球状運動の解明が現実問題の解決のために最も急がなければならない。従来, 流れ場の典型的非球対称要因として, 境界面の存在が考えられ, その最も単純なモデルに平面剛体壁近傍での気泡に関する研究が挙げられる。実験的研究により現在では, 非球状運動の結果である液体マイクロジェットこそがキャビテーションによる壁面損傷の主たる原因の一つであることが広く知られている。

一方, 理論的研究は, 近年におけるコンピュータの目ざましい発達から, 解析解中心の理論研究から数値シミュレーション主体の研究へとその内容を変えつつある。剛体壁近傍での気泡の非球状運動の最初の本格的数値シミュレーションは差分法を用いてなされ, その後, 変分法や有限要素法

などを用いて多くの研究者がその数値解析を試みている。これらの研究において、気泡が崩壊する際、固体壁に引き寄せられ、壁に向かって高速の流体マイクロジェットを形成する様子などがシミュレートされている。

その他、気泡の非球状運動に関する研究例として自由表面あるいは複合壁近傍での気泡や流れ場における気泡の研究、さらに、衝撃波と気泡の干渉あるいは複数気泡や振動壁近傍での気泡の研究等が挙げられるが、気泡の非球状運動に着目した体系的研究はあまりなされていない。

本論文では、以上の現状を踏まえた上で、いくつかの現実在即した状況を実験的並びに理論的に再現することにより、気泡の非球状運動とその要因との関係の究明を主たる目的としている。実験におけるモデル気泡には周囲の流れ場にじょう乱を与えることの少ないレーザ生成気泡が用いられ、その挙動はイメコン超高速カメラによって撮影された。ところで最近、気泡の持つ運動エネルギーを利用したインクジェット式プリンターが実用化された。熱エネルギー等を用いて生成される気泡の運動の時間特性は瞬間的な運動エネルギーの供給に適しているのである。さらに、光ファイバーの開発が、光を媒体とした新しいエネルギー輸送システムを提起し、エネルギー輸送の効率化、高速化を可能にしたことから、将来的には瞬間的なエネルギー変換方法が課題になると思われる。したがって、レーザによる気泡生成は単なるモデル気泡の生成手段のみならず、マイクロ領域への瞬間的な運動エネルギー供給方法としての側面も有している。また、数値解析には、従来、広く用いられてきた鏡像理論に加えて、境界積分法を適用し、気泡の非球状運動をシミュレートした。

第2章 平面剛体壁近傍での気泡の挙動

剛体壁近傍でのキャビテーションが壁面損傷を引き起こすことは周知の事実であり、これまでキャビテーション損傷の軽減が工学上の大きな課題であった。しかし、最近ではこのキャビテーション気泡の物理・化学作用を積極的に利用して材料の掘削促進、洗浄効果の向上、化学合成および新素材の開発などを行おうとする試みが注目されている。気泡崩壊時に形成される液体マイクロジェットと衝撃波が壁面損傷の主な原因であるとされていることから、ここではその基礎研究として、流れ場が非球対称になる場合の典型例である平面剛体壁近傍での気泡の挙動を実験並びに数値解析を通して明らかにした。剛体壁近傍での気泡は液体マイクロジェットを形成し、ジェット速度は壁面から離れる程、大きくなることを定量的に示した。また、並進移動特性も気泡から壁面までの相対距離に依存していること、それに関する実験値と理論値はほぼ一致していることがわかった。さらに、境界積分法によって得られた気泡形状の時間的変化に関する計算結果を実験値と比較検討し、本研究で用いた条件の下では良好な結果であることを示した。

第3章 振動壁近傍でのキャビテーション気泡の挙動

振動壁近傍でのキャビテーション気泡の挙動を境界積分法を用いて解析した。実際の流体機械では気泡を取り囲む壁面自身が絶えず振動している場合が多く、振動壁近傍での気泡の非球状運動に関する研究は重要であるにもかかわらず、状況設定が複雑であることから、これまであまりなされず、未だに不明な点が多く残されている。この状況では気泡は自らが有するエネルギーに加えて外力

を受け複雑な運動をする。静止剛体壁近傍の単一気泡は崩壊過程で必ず壁面へ向かう液体マイクロジェットを形成するのに対して、振動壁近傍ではこのようなジェットを形成しない場合があり、気泡の表面形状はその振動形態や相対距離により様々に変化することがわかった。また、ジェットを形成する場合についても、検討がなされた範囲のジェット速度は静止剛体壁の場合よりも全体的に小さくなっており、さらに壁面の振動形態にも依存することを示した。なお、気泡貫通時期も壁面の振動形態に依存するという結果を得た。すなわち、気泡が壁面へ加える衝撃力も壁面の振動形態に依存していることから、これを用いてキャビテーション損傷を制御することへの可能性を示した。

第4章 振動圧力場における剛体壁近傍でのガス気泡の挙動

振動圧力場におけるガス気泡の問題は流れ場あるいは超音波場における気泡核の成長問題、あるいは液体中の気泡の除去等に関連する最も重要な基礎的課題の一つであり、これ迄も多くの研究者らによってその解析が試みられてきた。このときに気泡内部のガスは断熱変化あるいは等温変化するものと仮定して計算されている。また、最近では、熱的效果を考慮した解析結果が報告された。しかしながら、これ迄の研究のほとんどが、問題を一次元として取り扱っていることから、境界面の存在等に起因する気泡の非球状運動についての言及はほとんどなされていない。一方、固体あるいは自由境界面近傍のキャビテーション気泡の非球状運動に関する数値解析は盛んに行われているが、振動圧力場におけるガス気泡の運動に関して、これらの計算方法を応用した例を著者は知見しない。ここではガス気泡の運動は境界面の存在により非球状運動になること、特に条件次第では液体マイクロジェットを形成する場合があることを明らかにした。一般にキャビテーション気泡は収縮過程でジェットが気泡を貫通するのに対して、ガス気泡の場合は収縮に伴い気泡内部の気体の圧力が上昇することからジェット貫通時期が遅れて、再膨張過程で貫通が完了することもあり得る。また、気泡の非線形振動は周囲圧力の振動特性並びに壁面との相対距離に依存し、気泡の非球状運動に及ぼす壁面存在の影響の強さは相対距離のみならず、周囲振動圧力の振動数にも依存することがわかった。さらに、ガス気泡の並進運動についてもキャビテーション気泡同様、膨張過程で壁面から遠ざかり、収縮過程で壁側へ引き寄せられる傾向にあり、その移動量は気泡が壁面に近い程、また、振動数が小さい程大きいことを定量的に示した。これらのことから、ガス気泡の運動に及ぼす剛体壁の影響は計算した範囲において気泡が壁面に近い程、また、振動数が小さい程大きいものと思われる。

第5章 水中における2個の気泡の挙動に関する実験的研究

位相と大きさの等しい2個の気泡の運動は剛体壁近傍での気泡の運動と等価であるという鏡像原理からも示されるように気泡が非球状運動をする原因の一つにその近傍に他の気泡が存在する場合が挙げられる。この状況は流体機械等で気泡が単独で存在することよりも複数で存在する場合が多いことから、工学的にも重要である。隣接して存在する液中の2個の気泡の挙動に関する研究は気泡群の挙動、特に衝撃圧の減衰あるいは増幅作用を解明する上で重要な基礎的課題であることから、これ迄理論的並びに実験的研究がなされてきたが、統一的な知見を得るには至っていない。

一方、局所的な高圧発生の重要なメカニズムの一つとして最近注目されている気泡と衝撃波との相互干渉問題に関する研究から、複数気泡の相互作用や連鎖的崩壊過程が明らかにされつつある。この場合、気泡に作用する衝撃波は隣接気泡が発するその実験的シミュレーションであると見ることができる。相互干渉問題で利用された複数気泡の多くは、静止に近いガス気泡であるが、個々の気泡の運動に起因する相互作用を明らかにするためにはそれ自身がキャビテーション気泡としての特性を有する気泡の生成が必要である。それに加えて、2個の気泡の運動を問題にする場合には位相の違いにより、運動特性が大きく異なることから、生成時期の異なる気泡の挙動観察が重要である。

ここでは、隣接して存在する2個の気泡は衝撃波と流れによって互いに影響を及ぼし合うことから、その運動は非球状運動となり、気泡の表面形状は気泡間の距離、サイズ比、位相等によって大きく異なることを示した。同時に生成された場合、極端に半径の異なる時を除いて、隣接気泡へ向かって液体マイクロジェットが形成され、気泡は互いに引き合うように並進移動する。特に大きさの等しい2個の気泡の挙動は剛体壁近傍での単一気泡の挙動とほぼ一致していることを示した。また、生成時期の異なる場合には隣接気泡から発せられる衝撃波と流れによって互いの気泡とは逆向きにジェットを形成し、膨張・収縮運動が反転することから気泡同士が遠ざかる場合が多い。さらに、位相が 180° 異なる場合は自由表面近傍の気泡と類似の性質を示すことがわかった。したがって、これらのことから鏡像原理の妥当性に対する実験的な確認がなされたといえることができる。

第6章 結 論

最終章では本論文における結論を述べている。

審 査 結 果 の 要 旨

気泡の運動に関する研究は、流体力学や船舶工学などの分野で、耐キャビテーション損傷という見地から盛んに行われ、目ざましい進展を遂げてきたが、ミクロな流動機構については未だ不明な点が多い。特に、実際に流体機械などで見られる流れ場での気泡は複雑な非球状運動をするため、その詳細は殆ど明らかにされておらない。

本研究では、最新のレーザ技術を利用して気泡生成を行い、その挙動を超高速度カメラを用いて観測すると共に、境界積分法を用いた数値解析によって得られた結果との比較検討を行ったもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、平面剛体壁近傍での気泡の挙動に関する実験値と計算値との比較検討により、気泡の液体マイクロジェット形成並びに並進移動に及ぼす剛体壁の影響について考察を行い、気泡の最大並進移動速度は気泡が壁面に近いほど減少するという新しい知見を得ている。

第3章では、振動壁近傍での気泡の運動を境界積分法を用いて数値的に解析し、振動壁の振動特性が気泡形状の時間的変化や液体マイクロジェット速度に及ぼす影響について考察している。その結果、振動壁近傍での気泡は、静止剛体壁近傍の場合と異なり、剛体壁からある一定距離で常に液体マイクロジェットを形成するとは限らず、極めて複雑な形状変化をすることを明らかにしている。

第4章では、これまで理論的には全く明らかにされておらなかった振動圧力場における剛体壁近傍でのガス気泡の挙動を数値的に求めると共に、得たる結果について検討を行い気泡運動に及ぼす圧力振動や剛体壁の影響を明らかにしている。すなわち、気泡の非線形振動は周期、振幅共に圧力の振動特性のみならず、壁面との相対位置にも依存することなどを明らかにしている。

第5章では、レーザビームの水中フォーカスによって発生時期が同時および異なる2個の気泡を剛体壁近傍並びに剛体壁のない液中に発生させ、それらの挙動を超高速度カメラによって観測し、その非球状性に及ぼす気泡の大きさと位相の影響が大きいことを明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、気泡を取り巻く種々なる環境場での微細気泡の挙動をレーザ生成気泡によって実験的に調べると共に、気泡の比較的大変形まで計算可能な境界積分法を用いて、気泡挙動の数値解析を行い、両者の比較検討によって、気泡の非球状運動を総合的に究明したもので、流体力学並びにキャビテーション工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。