

氏 名	小 玉 哲 也		
授 与 学 位	博 士 (工 学)		
学位授与年月日	平成 4 年 3 月 27 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	変形壁近傍でのキャビテーション気泡の挙動に 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 谷 順二	東北大学教授 高山 和喜	
	東北大学助教授 坪田 誠		

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

キャビテーション気泡力学の研究は主に流体工学の分野におけるキャビテーション損傷, 振動・騒音問題の基礎研究として展開されてきたが, 最近では, ウォータージェットによる壊食機構問題, 応用数学分野における移動境界値問題ならびに医学分野における生体組織損傷問題と関連して注目されている。中でも, 材料損傷をもたらすキャビテーション損傷は, 各種高速流体機械の運転生命に直接関わる重大な問題であり, その軽減あるいは解消が強く要求されている。現在では, キャビテーション損傷の主要な発生原因として, 気泡崩壊末期に発生する液体マイクロジェットならびに衝撃波による衝撃圧が考えられている。

一般に気泡運動は境界面の性質に依存し, 自由表面近傍の気泡は境界面から離れ, 剛体壁近傍の場合には境界面に近づく。この衝撃圧の発生源である気泡が境界面の性質に依存して移動する事実は, 気泡運動の人為的コントロールの可能性を示唆する結果となり, 壁面コーティングによる衝撃圧緩和の概念を生み出すことになった。したがって, 気泡の移動特性と境界面とのダイナミック応答問題, すなわち, 変形壁近傍での気泡挙動を明らかにすることは, キャビテーション損傷を効果的に軽減する上で最も基本的かつ重要な課題であると言える。このような観点から, 気泡運動と変

形壁との相互干渉問題について理論的ならびに実験的研究が行われており、衝撃圧の低減を意図したいくつかの重要な提案がなされてきた。

気泡移動の直接的原因は、境界面の存在に起因する気泡周囲流体場の非対称性と関係している。しかしながら、従来の研究では、境界面の物理性質と気泡移動との関連性が明確ではなく、変形壁近傍での気泡運動の系統的な研究が行われているとは言いがたい。また、コーティング材の開発研究についても経験的な実験データを基礎にしたものが多いのが現状である。

本論文は以上の現状を踏まえた上で、各種の変形壁近傍での気泡運動を時間的・空間的に高い分解能で観察し、変形壁の動的特性と気泡運動との関係を詳細に明らかにすることによって、変形壁近傍の気泡運動を統一的に究明することを試みた。さらに、先に述べた衝撃圧発生源となる気泡運動を効果的に境界面から遠ざける複合材料の開発に有益な基礎資料を提供して、これらに関連した工業技術や医療技術の発展に寄与することを目的とする。

第2章 壁面性質と気泡の移動特性

キャビテーション損傷の原因は気泡崩壊時に発生する液体マイクロジェットあるいは衝撃波による機械的衝撃圧である。これまでこの衝撃圧の緩和を目指し実験的ならびに数値的研究が行われてきたが効果的な損傷軽減法はいまだに確立していない。一般に、気泡の移動は気泡運動と境界面との相互干渉で誘起される流体場の運動に依存する。したがって、変形壁近傍での気泡運動を論じるには気泡運動と壁面性質、言い換えれば、気泡運動と壁面の動特性との関連性を明らかにする必要がある。本章では、まず、変形壁近傍での気泡の移動特性を明らかにするために、従来気泡の移動特性の指針を与えると考えられているケルビンインパルスについて概括し、この概念が壁面性質の慣性項のみを考慮したものであり本質的な気泡運動を評価するためには境界面の動特性を考慮する必要があることを明らかにする。さらに、気泡の移動特性と壁面の動特性との関連性を具体的に示すために、境界面性質のパラメータの定義を行うとともに、変形壁としてゼラチン壁ならびに複合壁の試作を行い、これらの動特性計測を曲線適合を利用して実施し、各試験片の動特性を精度よく検出することに成功した。

壁面の動特性の計測結果は、変形壁と気泡運動との相互干渉に関する実験研究を進める上で、有用な知見を与えている。

第3章 自由表面近傍でのキャビテーション気泡の挙動

変形壁近傍での気泡の移動特性は境界面性質に密接に関係している。したがって、気泡移動特性を詳細に解明するには、気泡運動と境界面との相互干渉問題を系統的に究明することが必要である。

本章では、変形壁近傍での気泡挙動を統一的に解明するために、変形壁のなかでも最も基本的な境界面であり、また重要な境界面でもある自由表面を取り上げる。これまで自由表面近傍での気泡運動の研究は大規模な水中爆発や爆発成型問題と関連して展開されており、比較的大きなキャビテーションを対象に進められてきた。しかし、この場合、微小気泡で無視できる浮力効果が顕著に現れ、気泡崩壊時の衝撃圧の減少や気泡の移動特性が変化すること、また、爆薬をエネルギー源とする場

合には気泡内部に爆発生成物や密度の大きい蒸気分子が生じ、これが爆発によって気泡内部から気泡表面を突き抜けるために、気泡界面の不安定性を引き起こして微小な気泡運動とは本質的に異なった挙動を示すことが知られている。本章で扱う気泡はレーザービームの水中フォーカスによって生成される、気泡サイズの小さい蒸気泡である。

はじめに、単一気泡と自由表面との相互干渉問題を実験的に調べ、気泡の運動周期および移動特性が境界面との相対距離に依存して変化することを明らかにするとともに、得たる結果を鏡像理論と比較検討し、近似解の有効性を示した。さらに、気泡が比較的自由表面に近い位置で運動するとき、気泡の再膨張直後、隆起する自由表面と気泡との間の領域に2次キャビテーションが発生することを明らかにし、この発生原因が動圧零の領域と、気泡から放射され自由表面で反射した膨張波との相互干渉に起因する負圧であることを示した。次に、自由表面と気泡運動との相互干渉問題をさらに展開するために、自由表面に垂直同時生成された2個の気泡と自由表面との相互干渉問題を取り上げ、これらの気泡の様相は気泡サイズ、気泡間の相互作用、気泡と自由表面との相互作用に依存することを明らかにした。特に、上側の気泡と自由表面との相対距離が小さい場合には、上側の気泡の移動特性は自由表面近傍での単一気泡の移動特性に類似しており、この場合、下側の気泡の影響が僅少であることを示した。また、上側の気泡の運動周期は無限媒質中の気泡のものに類似することを明らかにするとともに、その運動周期は2個の気泡間の相対距離が短くなるにしたがって長くなることを示した。

第4章 複合壁近傍でのキャビテーション気泡の挙動

キャビテーション気泡の挙動は壁面性質に依存する。剛体壁近傍での気泡は境界面に近づき、液体マイクロジェットを境界面に向かって生成させる。反対に、自由表面近傍にある気泡は境界面から離れ、液体マイクロジェットを反境界面方向に形成する。この挙動の差は、気泡の衝撃圧を受ける壁面の力学特性が気泡周囲圧力場に非対称性を生み出した結果であると判断できる。これまで、気泡運動と壁面の力学特性との関連性を明らかにするために、変形壁近傍での気泡運動の研究が実験的ならびに数值的に行われている。一般に、キャビテーション気泡による高圧発生はマイクロな衝撃現象であり、その作用時間はマイクロ秒のオーダーである。したがって、この衝撃圧に対する壁面の動特性が気泡運動を支配することになる。しかしながら、これまでの研究では壁面の運動を静的な力-変位で定まる壁面質量と壁面こわさで表現しているにすぎず、気泡と壁面との動的応答特性を正しく評価するには至っていない現状である。本章では、気泡と壁面との相互干渉問題を統一的に解明することを目的として、第2章で動特性測定を行った複合壁を使用し、気泡運動の実験的研究を行う。はじめに、広範囲な力学特性を示す各種壁面近傍での気泡の運動運動の観察を行い、気泡の移動特性が、境界面の質量、粘性減衰係数、ばね定数、気泡と境界面との相対距離に密接に依存することを明らかにするとともに、ある条件のときには、気泡が見かけ上移動せず、ほぼ同位置で球状に崩壊する中立気泡崩壊ならびにほぼ同位置で等しい分裂割合で崩壊する中立気泡分裂現象が発生することを示す。次に、気泡の移動特性は、第2章で定義した無次元パラメータの組み合わせからなる無次元減衰固有角振動数ならびに無次元減衰比で整理されることを明らかにすると

もに、無次元減衰比が、気泡中立崩壊を発生させる条件になっていることを究明した。

第5章 気泡とゼラチン層との相互干渉

本章では、変形壁近傍の気泡運動問題の応用を目的に、最近医学分野で注目されているキャビテーション気泡による生体組織損傷機構に着目し、その発生機構の究明を試みた。壁面材料には、第2章で取り上げたゼラチン壁を取り上げている。これは、ゼラチンの音響インピーダンスが生体組織のものとはほぼ等しく、生体模擬材料としてしばしば利用されているためである。まず、ゼラチン壁近傍での気泡運動を詳細に観察した。気泡はゼラチンの重量パーセントに依存することなく、境界面から離れる挙動を示し、その傾向は気泡がゼラチンと接する度合いが強くなるほど大きくなること、さらに、その崩壊時間は無限媒質のものよりもわずかに長くなることを明らかにした。このことから、気泡による生体損傷は、単一気泡によってのみ発生するとは考えにくく、気泡間の相互運動ならびに気泡と衝撃波によって誘起される液体マイクロジェットの挙動と密接に関係していることを示した。これを受けて、ゼラチン壁に付着した空気泡と衝撃波との相互干渉問題を取り上げ、ゼラチン層内に侵入する液体マイクロジェットを可視化することによって、このジェットの侵入深さ、侵入速度、ならびに、移動方向が境界面性質に密接に依存することを明らかにした。

第6章 結 論

本章では、以上の各章の要点をまとめて結論とした。

審査結果の要旨

キャビテーション気泡の挙動に関する研究は、キャビテーション現象やキャビテーション損傷解明のための最も重要な研究課題とされ、これまで盛んに行われてきたが、最近ではさらに、キャビテーション発生に基づく高エネルギーの医学応用と関連して、生体組織近傍での気泡に関する研究が注目されている。しかし、気泡の運動は、生体組織など境界面の性質によって強く左右され、複雑な運動をするため、その詳細は殆ど明らかにされておらない。

本論文は、変形壁近傍での気泡の運動を統一的に解明するために行った研究の成果をとりまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、気泡運動と後述の各種境界面の動特性を関連づけるパラメータを定義するとともに、各種壁面の動特性を測定するための実験方法を提示して、その計測値の有効性を示している。

第3章では、自由表面近傍での気泡運動に対し、鏡像理論を用いて数値解析を行うとともに、実験的研究を行い、これらの比較を通して気泡の運動周期や移動特性が境界面との相対距離に依存して大きく変化すること、並びにある条件では2次キャビテーションが発生することを明らかにしている。さらに、自由表面近傍での2個の気泡についても考察を行い、多くの有用な知見を得ている。

第4章では、種々なる複合壁近傍での移動特性を実験的に究明し、ある条件では、気泡が見かけ上移動しない中立気泡崩壊や中立気泡分裂が発生することを実証するとともに、これらが第2章で定義したパラメータに大きく依存することを明らかにしている。これは有用な成果である。

第5章では、ゼラチン壁近傍での気泡運動を実験的に詳細に観測し、気泡崩壊による生体組織損傷は、気泡間の相互作用や気泡と衝撃波との相互干渉で発生する液体マイクロジェットに基づく衝撃圧が主因となることを示している。また、液体マイクロジェットを可視化することによって、この挙動の壁面性質の依存性を明らかにしている。これらは重要な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、各種変形壁近傍でのレーザ生成気泡の運動を光学的に観察するとともに、変形壁の動的特性を計測し、この壁面動特性と気泡運動との関係を詳細に調べることによって、変形壁近傍における気泡の運動を統一的に究明したもので、流体工学、キャビテーション工学並びに生体工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。