

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20414

研究課題名(和文)キャビテーションクラウドの非定常挙動と衝撃波現象の解明に関する研究

研究課題名(英文)Study of unsteady behavior of cloud cavitation and its induced shock wave

研究代表者

牛奥 隆博(Ushioku, Takahiro)

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：50884673

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、キャビテーション気泡の集合体であるキャビテーションクラウドの非定常挙動とその圧壊に伴う衝撃波の発生・伝播を混相流の流れ場の観点から理解することを目的とし、実験と数値解析の両面からの調査を実施した。具体的には、2次元粒子法を用いた混相流解析による現象の調査、クラウドの非定常挙動の観測と衝撃圧の計測、及びPIV法によるクラウド周辺の2次元流速ベクトル場の計測を行った。その結果、(1)混相流解析による現象の再現と実験データとの比較、(2)混相流解析と実験によるクラウド周囲の双子渦の流れ場の存在の示唆、(3)混相流解析による圧壊時の複数の衝撃波現象の示唆、以上3点が成果として得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

クラウドの圧壊に伴う衝撃波現象は流体機械における壊食や騒音の原因になる一方で、近年では医療や環境の分野での工学的応用が盛んである。ゆえに、クラウドの非定常挙動と衝撃波現象のメカニズムの解明と数学モデルの提案が重要な課題であるが、高速かつ微小な現象であり、さらに相変化を伴う複雑な流れであるため、実験的な観測や数値解析による再現が難しいものとなっている。そうした中で、本研究は実験と数値解析の両面から調査し、得られた研究成果は混相流の流れ場の観点からの現象のモデリングの提案、及びクラウドから放出される強力な衝撃波の形成メカニズムの説明に繋がるものであり、学術的・社会的に意義があると確信している。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this study is to understand how a cloud cavitation performs a collective unsteady motion and how a shock wave is emitted associated with the collapse of the cloud in conjunction with the multiphase flows. The results obtained from the multiphase flow analysis by the two-dimensional Smoothed Particle Hydrodynamics, the experimental observation of the cloud, and the measurement of velocity fields of the cloud by the Particle Image Velocimetry method are as follows: (1) The unsteady behavior of the cloud and its induced shock waves have been observed numerically, and compared with experimental results; (2) The flows of twin vortices around the cloud have been shown by numerical tests and experimental measurements; (3) The multi-shock wave phenomena associated with the collapse of the cloud have been numerically suggested.

研究分野：混相流

キーワード：キャビテーションクラウド 衝撃波 混相流解析 SPH法 PIV計測

1. 研究開始当初の背景

キャビテーションとは、高速で運動する液体の圧力が飽和蒸気圧まで低下することによって無数の気泡が発生する現象である。また、キャビテーションにより発生した気泡の集合体はキャビテーションクラウドと呼ばれ、集団的な成長と圧壊挙動を示すことで知られている。特に、クラウドの圧壊に伴って強力な衝撃波が発生するとされており、流体機械における騒音や壊食の原因になる一方で、近年ではパルスレーザージェットメスや水質改善技術など、医療や環境分野での工学的な応用が進められている。したがって、こうしたクラウドの集団的な非定常挙動と衝撃波現象のメカニズムを明らかにすることは非常に重要な課題となっている。クラウドの非定常挙動と衝撃波の発生・伝播に関する研究は数値解析と実験の両面から非常に盛んに行われているが、次の点が十分に明らかにされていないと考えられる。

(1) **混相流の流れ場の観点からのクラウドの非定常挙動と衝撃波現象の理解** 従来の解析的研究では、クラウドを気泡の集合体として予め規定した上でその圧壊過程に関する数値解析が行われてきたが、クラウドの初生から成長、圧壊、リバウンドするまでの一連の非定常挙動をナビエ・ストークス方程式に基づく混相流解析により再現した例はほとんど見られない。また、実験的研究では、高速かつ微小なクラウドの非定常挙動と衝撃波現象を観測した例は少なく、特にその周辺の流速ベクトル場等の流れ場との関連は調査されていない。すなわち、実験と解析の両面において、混相流の流れ場の観点からクラウドの非定常挙動と衝撃波現象を理解しようとする試みはほとんど行われていないのが現状である。

(2) **クラウドの圧壊と衝撃波の発生・伝播の関係** 従来の解析的研究では、クラウドの圧壊過程において内部へと伝播する衝撃波の発生と伝播に着目した数値解析が盛んに行われてきたが、クラウドの外部へと伝播していく衝撃波の発生と伝播のメカニズムは十分に議論されていない。また、実験的研究では、クラウドの圧壊に伴って発生・外部へと伝播する衝撃波の観測がされた例はあるものの、クラウドの非定常挙動と衝撃波現象の同時観測によりそれらの関係を明らかにしようとする試みはほとんど行われておらず、クラウドの圧壊に伴う衝撃波の形成過程は実験的にも解析的にも十分に解明されたとはいえない。

2. 研究の目的

本研究では、キャビテーションクラウドの非定常挙動と衝撃波の発生・伝播のメカニズムの解明を目的として、実験と解析の両面からの詳細な調査を実施する。具体的には、(1)混相流解析によるクラウドの非定常挙動と圧壊に伴う衝撃波現象の再現、(2)クラウドの非定常挙動の観測と混相流解析との比較・検討、(3)クラウド周囲の流速ベクトル場の計測と観測、以上3つの研究課題を実施し、クラウドの非定常挙動を混相流の流れ場の観点から理解を進めると共に、クラウドの圧壊に伴う衝撃波の発生・伝播のメカニズムを明らかにすることを試みる。

3. 研究の方法

(1) **粒子法によるクラウドの非定常挙動と衝撃波現象の再現** 本研究課題では、静止流体中に気泡を含むパルスウォータージェットを噴射する2次元の混相流解析を実施し、クラウドの初生から成長、圧壊、リバウンドするまでの一連の非定常挙動と圧壊に伴う衝撃波の発生・伝播を再現する。特に、気泡を含むウォータージェットは気液混合体によるモデル化を行い、数値解析方法としてSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法を採用する。SPH法は連続体を粒子の集合として離散化し、粒子間相互作用を計算して各粒子の運動を解くラグランジュ的な解析方法であり、大変形する界面を容易に扱うことが可能である。本解析では、流れの中での相変化により空洞となった領域をクラウドと定義し、その界面を追跡することによってクラウドの非定常挙動を調査すると共に、圧壊時の圧力場から衝撃波が発生・伝播する様子を確認する。

(2) **クラウドの非定常挙動の観測と混相流解析との比較・検討** 本研究課題では、パルスレーザーの照射によるレーザーアブレーションで水中ウォータージェットを噴射し、それに伴って発生するクラウドを対象とした観測実験を実施する。本実験ではシャドウグラフ法によりクラウドを可視化し、高速度ビデオカメラを用いて撮影速度210,000 fpsでその発生から成長、圧壊、リバウンドするまでの様子を撮影する。さらに音圧計を設置し、圧壊時に発生する衝撃圧を測定する。実験結果は(1)の混相流解析の結果と比較を行い、解析の妥当性について検証する。

(3) **PIV法によるクラウド周囲の流速ベクトル場の計測と観測** 本研究課題では、(2)の実験と同様の方法で発生させたクラウドを対象として、その周囲の2次元流速ベクトル場の計測と観測をParticle Image Velocimetry (PIV)法を用いて実施する。ただし、トレーサー粒子を可視化するためのレーザーシートが気泡において激しく反射し、PIV解析が困難になることを防ぐため、レーザーシートとは異なる波長で光を反射する蛍光粒子を用いた蛍光PIV法を採用する。トレーサー粒子はクラウド周辺の流れを追従できると考えられる直径1 μm のものを採用し、PIV解析のための粒子画像は高速度ビデオカメラを用いて100,000 fps撮影する。

4. 研究成果

(1) **粒子法によるクラウドの非定常挙動と衝撃波現象の再現** 2次元 SPH 法による混相流解析では、気泡を含むウォータージェットが静止流体中に噴射されると共に空洞領域として定義されたクラウドが発生し、マッシュルーム状に成長していく様子が見られた。成長し切ったクラウドは収縮運動を開始して最終的に完全に圧壊し、そして小さく分裂しながらリバウンドすることが確認できた。さらに、mm オーダーの大きさのクラウドの圧壊時には MPa オーダーの非常に強力な衝撃波が発生し、媒質の速度で伝播する様子が見られた。したがって、本解析においてクラウドの初生から成長、圧壊、そしてリバウンドするまでの一連の非定常挙動と圧壊に伴う衝撃波現象の再現に成功していることが分かった。さらに、本解析により得られた流速ベクトル場と圧力場を調査することにより、以下の特筆すべき知見が得られた。

(1-A) **双子渦の流れ場とクラウドの非定常挙動との関係** ウォータージェットの噴射に伴って双子渦の流れ場が形成され、クラウドの初生はウォータージェットと双子渦の流れ場の間の領域で起きることが明らかになった。そして、発生した双子渦の流れ場はクラウドの成長と圧壊過程において、クラウドの界面に沿って運動する様子が見られた。また、双子渦の流れ場の運動に伴ってクラウドの界面における流速ベクトル場の向きが変化し、界面の成長と収縮運動が切り替わることが確認された。すなわち、クラウドの成長・圧壊運動と双子渦の流れ場の運動と同期している可能性があることが本数値解析により明らかになった。

(1-B) **クラウドの圧壊に伴う複数の衝撃波の発生** 前述のように、クラウドの圧壊に伴って MPa オーダーの衝撃波が発生・伝播するが、こうした非常に強力な衝撃波が発生する直前に弱い衝撃波が発生することが確認できた。弱い衝撃波はクラウドを構成する個々の空洞が圧壊することにより生じ、全ての空洞が圧壊した瞬間に強力な衝撃波が発生する様子が見られ、クラウドの圧壊に伴って複数の衝撃波が発生する可能性があることが本数値解析により明らかになった。

(2) **クラウドの非定常挙動の観測と混相流解析との比較・検討** 本実験により、クラウドの初生から成長、圧壊、そしてリバウンドするまでの非定常挙動を撮影することに成功した。そして、音圧計による圧力計測では、mm オーダーのクラウドの圧壊直後に MPa オーダーの強力な衝撃圧が発生することが明らかになった。本実験結果と(1)で説明した混相流解析の結果を比較したところ、混相流解析は実験で観測されたクラウドの形状、初生や圧壊時の分裂を含む非定常挙動を再現しており、さらに圧壊時の衝撃圧はオーダーレベルで一致していることが確認でき、数値解析の妥当性を確認することができた。

(3) **PIV 法によるクラウド周囲の流速ベクトル場の計測と観測** 本実験により、クラウド周辺の二次元流速ベクトル場の計測に成功し、特にクラウドの成長過程においてその表面に双子渦の流れ場が形成されることが明らかになった。これは、(1)の混相流解析で見出されたクラウドの非定常挙動と双子渦の流れ場の関係を示唆する結果が実験により得られたことを意味している。

本研究に関連して、1 件の国際会議論文と 4 件の口頭発表、1 件の受賞をしている。本研究成果は、将来的に混相流の流れ場に着目したクラウドの非定常挙動のモデル化、およびクラウドの圧壊による衝撃波の形成メカニズムの解明に繋がると信じている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takahiro Ushioku, Hiroaki Yoshimura	4. 巻 3
2. 論文標題 Numerical Investigation of Cloud Cavitation and Its Induced Shock Waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. ASME 2021 Fluids Engineering Division Summer Meeting	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/FEDSM2021-65731	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 牛奥隆博, 吉村浩明
2. 発表標題 レーザー誘起キャビテーションクラウドのリバウンド挙動に関する実験及び数値解析
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 牛奥隆博, 吉村浩明
2. 発表標題 二次元SPH法によるキャビテーションクラウドの集団的圧壊に伴う衝撃波現象に関する数値解析
3. 学会等名 日本応用数理学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 牛奥隆博, 吉村浩明
2. 発表標題 粒子法によるクラウドキャビテーションの2次元非定常挙動と衝撃波の発生・伝播の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 牛奥隆博, 吉村浩明
2. 発表標題 二相混合体理論に基づくキャピテーションクラウドの非定常挙動に関する数値解析
3. 学会等名 日本応用数理学会 2021年度年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究の成果を発表したASME 2021 Fluids Engineering Division Summer MeetingにてBest Presentation Awardを受賞している。

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関