

平成23年5月13日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560133

研究課題名(和文) 単一マイクロバブルの長寿命化の研究

研究課題名(英文) Study of long existence of single micro-bubble in liquid by the suppression of gas diffusion

研究代表者

高橋 智 (TAKAHASHI SATOSHI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：20236277

研究成果の概要(和文)：

本研究は、幅広い分野での応用が期待される単一マイクロバブルの拡散による消滅を抑えるため、気泡表面での拡散現象の実験・数値計算による解明および気泡表面への付着物の添加による拡散抑制効果について実験的に調べたものである。この研究によって、レーザー照射による単一気泡発生方法の有効性、狭い領域での気体拡散の数値計算結果による複数気泡が長時間滞在する可能性の考察、および付着物の添加による拡散の抑制など、気泡の長寿命化に関する有益なデータが得られている。

研究成果の概要(英文)：

The purpose of this study is to control the disappearance interval of bubble caused by gas diffusion out to bubble. The effectiveness of single bubble generation by laser, long existence of multi-bubbles in closed area, and the suppression of gas diffusion with additives on the surface of bubble were confirmed in this study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：マイクロバブル，沸騰，拡散現象，単一気泡，長寿命化，レーザー，ファイバ，顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

一般にマイクロバブルと呼ばれる直径数十 μm 以下の微小気泡は、工学の分野では液体への気体の溶解促進、摩擦抵抗の低減等の用途に、環境、医学においては超音波画像診断における造影剤としても用いられている。これは、マイクロバブルのもつ浮上速度が遅く液体中に滞在しやすいという特徴を利用したものであり、さらに液体への気体溶解を目指した用途で気体の拡散促進が、逆に気泡の存在そのものが重要な用途で気体の拡散抑制が重要となる。

気泡表面の飽和溶解濃度は、表面張力による気泡内圧力の上昇によって増加するため、特に気泡径が小さいほど表面を通過する気体のモル流速が増加し短時間で溶解・消滅する。拡散による単一気泡の成長・収縮は、Epstein-Plesset らの研究以降多く行われている。これまで多く報告されているせん断流れ場や乱流場を用いて作り出されたマイクロバブルは、気泡群として通常存在し、液体が過飽和状態となることによって気泡が長時間存在し続けていると考えられる。気泡の含有割合であるボイド率の値が低い液体中では、やはり気泡が消滅することを考えると、単一のマイクロバブルを長時間安定して存在させるためには、表面での気体拡散を何らかの手段で抑える必要がある。

さらに油のキャビテーション初生を顕微鏡を用いて詳細に観察した結果、キャビテーションの始まりは固液界面で現れ、液体中からはほとんど発生しないことがわかっている。これは通常言われている液体中に常在する気泡核が、実は油の中にはほとんど存在せず、液体中の気泡は表面に浮上して消滅するか拡散によって収縮・消滅することを意味し

ている。

単一気泡を対象とした研究を行うにあたり、そもそもこれまで直径数十 μm 以下の気泡を1個だけ安定して作り出す技術が確立されていなかった。しかし研究分担者の出口により、レーザを用いた単一気泡の発生が実現できたことをきっかけに、顕微鏡下で種々の条件における単一気泡の観察の可能性が明らかとなった。この方法を用いて単一気泡を発生させ、拡散現象について精密な実験を行うことによって、表面に付着する物質の拡散に与える影響についても詳しく調べることができると期待される。

2. 研究の目的

本研究では、単一のマイクロバブルの拡散現象に着目し、種々の条件において、気泡が拡散によって収縮・消滅する過程を詳しく調べ、気泡の長寿命化を目指して、気泡表面に付着した物質の拡散に与える影響について調べ、その結果を社会に役立てることを目的とする。この研究を行うにあたり、はじめにレーザを用いた任意の直径の単一気泡の発生条件について調べ、液体中の気泡内気体の拡散による径変化を詳しく調べる。拡散には気泡の表面状態が重要であることから、次に液体中に混在する微小粒子の付着や気泡発生時に意図的に付着させた分子と気泡消滅プロセスとの関係を調べる。

3. 研究の方法

本研究は、(1)単一気泡発生方法の確立、(2)気泡表面の気体拡散現象、(3)気泡の長寿命化、(4)気泡を用いた物質輸送、の4テーマに分けられる。(1)において任意の気泡を作り出す条件を調べ、純水溶液中にある気泡内気体の拡散現象について(2)で調べ、数値計算結果と比較し、マイクロバブルの拡散現象を詳しく調

べる。次に(3)のテーマで、気泡表面の分子付着による拡散抑制について確かめ、(4)で物質輸送の可能性について調べる。

各研究テーマの詳細は、下記のとおりである。

(1) 単一気泡発生方法の確立

① 顕微鏡下における気泡観察装置の製作
マイクロバブルの拡散による消滅までのプロセスを詳しく調べるための観察装置を製作する。

② 単一気泡発生条件の検討
任意の直径の気泡を確実に発生させるために、レーザー強度、レーザー照射時間等を変えたときの気泡の発生条件と気泡径との関係について調べる。

(2) 気泡表面の気体拡散現象

① 拡散による気泡径変化の測定および数値計算との比較
図1に示す顕微鏡下に取り付けた観察装置内で、単一気泡の拡散による径変化を連続して撮影し、既存の画像処理システムを用いて解析し、径変化を測定する。また拡散による気泡の径変化について数値計算を行い、実験結果と比較する。さらに気泡保持板による拡散抑制効果についても、FEM解析を行い、壁面の影響について検討する。

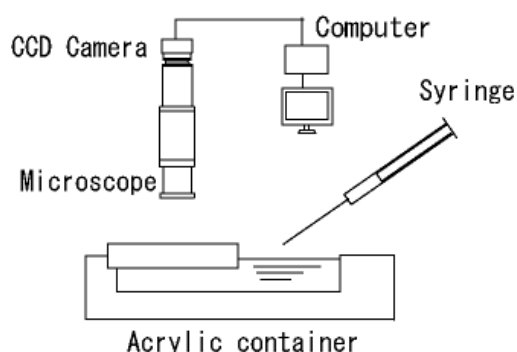


図1 単一気泡観察装置の概要

② 気泡表面分子・近接気泡による拡散抑制効果の数値解析
気泡表面に付着した分子

による拡散抑制について、数値計算を行う。また気泡から析出した気体が近接した気泡に与える影響について数値計算し、気泡径、気泡間距離と拡散現象との関係について調べる。

③ 拡散による気泡消滅の検証
拡散によって気泡が収縮・消滅した後、真空ポンプを用いて装置内を短時間で減圧し、気泡が完全に消滅しているかを確認する。

(3) 気泡の長寿命化

① 付着物による拡散抑制
純水中に少量の溶液を混入し、気泡表面に膜を形成し、拡散に与える影響について調べる。

(4) 気泡を用いた物質輸送

① 固体分子と液体の間のぬれ性
気泡内に混入させた固体粒子は、必ず気泡内面で液体と接する。固体と液体とのぬれ性によって接触角の形状が大きく変化し、気泡の安定性にも影響する。そこで固液界面の接触角を顕微鏡を用いて観察し、ぬれ性について調べる。

4. 研究成果

(1) 単一気泡発生方法の確立

購入した顕微鏡下で、気泡観察が可能な容器を製作した。次にレーザー照射による気泡発生条件を明らかにするために、焦点距離の異なるレンズを用いてレーザーの最小スポット径を代え、さらに既存の連続発振 Ar レーザを用いて、レーザー強度などを変え、ターゲットとして太さの異なるファイバを用いて実験を行った。その結果、照射物体がレーザースポット径程度であるならば、最小レーザー強度はどのレーザースポット径でもほぼ同じであることがわかった。これはレーザー照射によって照射物体表面が上昇し、その結果表面で液体が沸騰することによって気泡が作られることが原因として考えられる。極微小領域のファイバ表面の温度上昇を調べるために、レーザー照射後のファイバ、液体の温度変化を、

数値計算によって調べた。その結果、照射後のファイバ、液体中の温度上昇を定性的には確かめることができたが、到達温度、時間には測定結果と大きな差が生じた。数値計算によると、レーザ光入射場所の温度上昇は、レーザ光径がファイバ直径の 1/2 以上であるならば、温度上昇はほとんど同じであるという傾向が得られた。

またレーザ照射によって生じた気泡の発生後の気泡径を調べたところ、脱気水中と飽和水中では大きく異なる結果が得られた。これは、レーザ照射部で発生した気泡の表面では、溶液の相変化(蒸発、液化)だけでなく、溶解気体の拡散(析出、溶解)も起こっているからであり、気泡の発生・成長には、液体の沸騰だけでなく、溶解気体の拡散現象も大きく影響し、任意の気泡を作り出すために、液体の溶存気体量や気泡径との関係を明らかにする必要があることがわかった。

(2)気泡表面の気体拡散現象

溶存気体量を調整した液体を製作した容器内に入れ、顕微鏡を用いて単一気泡の拡散による径変化を連続して撮影し解析を行った。実験時に顕微鏡光源による熱の影響や実験中の溶存気体量の変化を受けやすく、測定結果にばらつきが生じるが、おおむね気泡の径変化はほぼ理論解析結果と同じであることがわかった。また水、油中の気泡の拡散による径変化を比較した結果、溶液による気泡の径変化の違いはあまりないことがわかった。

気泡保持板による上面への拡散抑制効果について FEM 解析を行ったところ、消滅時間が約 1.2 倍となる結果となった。さらに近接気泡の影響について調べるため、狭い空間内での気泡内気体の拡散による径変化を計算した結果は図 2 のようであった。横軸 G_w は初期気泡径に対する壁面位置、縦軸は気泡

消滅までの時間の無次元量 X をとっている。図の結果より、気泡径の約 4 倍の大きさの空間内に複数の気泡がある場合、相互に影響し合い、消滅時間が長くなることがわかった。水の場合、完全に脱気していても気泡径の約 3.5 倍の範囲の水を飽和溶解させてしまうことから、静的な状態であるならば、狭い空間に複数の気泡が存在する気泡群においては、気泡が安定して存在することもわかった。

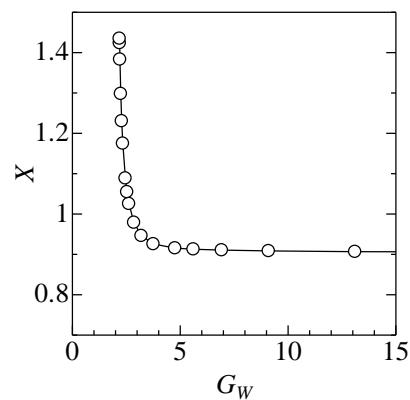


図 2 気泡径に対する壁面距離 G_w と消滅時間 X の関係

(3)気泡の長寿命化

気泡表面に付着した分子による拡散抑制効果について調べるため、気泡表面に高分子や煙粒子を付着させて実験を行った。この結果は図 3 のようであった。横軸は気泡の初期気泡直径 d_0 、縦軸は気泡消滅時間 t_e であり、実験条件ごとに記号を変えて描いている。表面に特別な操作を行わない気泡の水中、油中における消滅までの時間はほぼ同じであるが、気泡表面に油膜を形成した気泡の拡散による径変化は、若干長くなる傾向が見られた。また牛乳分子や煙分子を付着させた気泡の消滅時間は数倍程度と、長くなる傾向が見られた。しかしドラッグデリバリシステムなどに適用するためには、さらに工夫が必要である。表面に付着物を有する気泡の拡散による

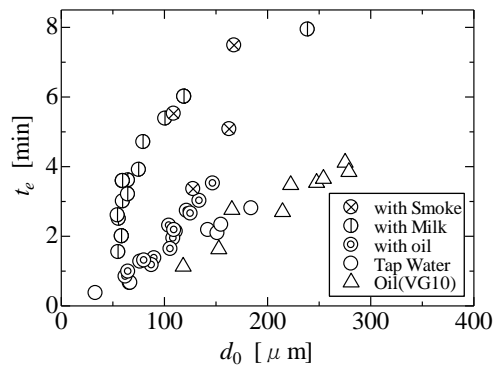


図3 各条件における初期気泡径と気泡消滅時間との関係

径変化の数値計算も試みたが、実験時の付着物の総量の測定ができず、定量的な比較が困難であるとの判断から、実験結果を評価するまでには至っていない。

またキャビテーション発生時の初生気泡の挙動を詳しく観察したところ、流れのはく離点で発生した気泡は、下流部で見えなくなるまで収縮するか、そのまま核として下流部に流れ拡大する。このことから気泡発生時に空洞部へ液体中に溶解している気体が短時間で析出し、気泡を形作ることがわかった。

(4)気泡を用いた物質輸送

アクリル、真鍮、ジュラルミン、鉄と油とのメニスカス面の測定より、接触角と表面張力の値を求めた。材料によって差はあるものの、接触角と表面張力に大きな差はなく、ほぼ同じ値が得られた。また常温付近では、温度傾向はほとんど見られなかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

① Seiichi Washio, So Fujiyoshi and Satoshi Takahashi, Observation of cavitation inception in separating water flows through constricted channels, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,

Vol.223, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, 査読有, 2009, pp.2071-2080.

[学会発表] (計2件)

① 高橋智, 藤本和裕, 膜を有する液中気泡の拡散による径変化の測定, 日本機械学会関西支部第89期定時総会講演会, 2011.3.19, 京都工芸繊維大学.

② 向井健, 鷺尾誠一, 高橋智, キャビテーションを利用した水の脱気・注気技術の開発, 日本機械学会中国四国支部第47期総会・講演会, 2009.3.6, 山口大学.

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 智 (TAKAHASHI SATOSHI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 20236277

(2)研究分担者

出口 真次 (DEGUCHI SHINJI)

東北大学・大学院医工学研究科・准教授

研究者番号: 30379717