

加圧溶解法で発生したマイクロバブルの基礎特性

Basic characteristic of micro-bubble generated by pressurized dissolution method

青木 繁¹⁾, 平井 聖児²⁾, 香村 誠²⁾, Vichai Saechout²⁾, 菅谷 諭²⁾,
堀内 勉²⁾, 佐久田 茂²⁾, 栗田 勝実¹⁾, 池田 宏³⁾

Shigeru AOKI¹⁾, Seiji HIRAI²⁾, Makoto KOMURA²⁾, Vichai SAECHOUT²⁾, Satoshi SUGAYA²⁾,
Tsutomu HORIUCHI²⁾, Shigeru SAKUTA²⁾, Katsumi KURITA¹⁾, Hiroshi IKEDA³⁾

Abstract : Especially, remarkable characteristics of micro-bubble are high solubility in liquid, self pressurized effect, resolution into liquid by pressure and crush, electrification. Micro-bubble is used in engineering field as well as wide range fields, such as agricultural, fishery and medical field. On the other hand, nowadays industrial cleaning generally depends on cleaning solvents. In this method, however, effluent from factories often causes environmental degradation or human health hazard. Therefore, it is considered that environmentally friendly micro-bubble becomes a key technology for industrial cleaning, for instance, mechanical part and semiconductor device etc. This paper focuses on the effect of fluid properties on the distribution of diameters of micro-bubbles and the disappearance time. For fluid properties, the kinematic viscosity and the boundary tension force are focused on. The distribution of diameters of micro-bubbles is measured experimentally. Number of micro-bubbles increases with the increase of the kinematic viscosity and the boundary tension force in all diameters. Next, the disappearance time of micro-bubbles is measured. The disappearance time is longer when the kinematic viscosity and the boundary tension force increase. A theoretical equation for the disappearance time is derived. Theoretical solutions agree well with experimental results.

Key Words : Micro-bubble, Surface Treatment, Kinematic Viscosity, Boundary Tension Force, Cleaning

1. 緒言

マイクロバブルは液中に存在する泡の中でも特に小さい(数十 μm 以下)ものをいい、その特徴は、①遅い上昇速度②自己加圧効果と優れた気体溶解能力③反応性の高いフリーラジカルの発生を伴う圧壊④汚染物質や金属イオンなどを表面に引きつける効果がある帯電性などである。現在、環境負荷低減の観点から、これらの特性を利用した応用技術が工学分野をはじめ、農林水産分野、医療分野など、多岐にわたる分野で研究されている[1-4]。精密部品の製造において、加工中に切削油などを使うために洗浄が必要となる。洗浄には有機溶剤による吹付けが用いられている[5]。この洗浄法は環境に悪影響を及ぼす。環境負荷低減の観点から、マイクロバブルの洗浄への応用が重要な技術として注目されている[6-7]。従来からマイクロバブルを発生させる方法に関しては、気泡を微細化すると気体の溶解能力を高めることができる[8]ため、微細な気泡を作るための試みが進められてきた。しかし、水は非常に表面張力の高い物質であるため、気体を微細な孔を通して供給しても、機械的なせん断力で気泡を砕いても、100 μm 以下の気泡を作ることは容易ではなかった。そこで近年では、極微細な気泡を作り出す方法とし

て、渦流を作って、この中に気体を巻き込みながら最後に拡散させる流体力学的な手法[9]、高圧下で気体を大量に溶解させ、減圧により再気泡化する加圧溶解法などが知られている。この中で、加圧溶解法を用いたマイクロバブル発生装置の性能については物質移動の観点からの研究[10]、キャビテーションの観点からの研究[11]、透明度の推定法の観点からの研究[12]などがなされているが、いまだ体系的な実験による評価は行われておらず、さらに発生したバブルの挙動についても不明である。

本研究では上記の観点から、加圧溶解法を用いたマイクロバブル発生装置の性能およびマイクロバブルの挙動について明らかにする。マイクロバブルを発生させる流体物性が変化すれば、生じるマイクロバブルの粒径にも影響が現れると考えられる。そこで、これまで明らかにされていなかった流体物性と発生するマイクロバブルの粒径分布の関係を実験的に明らかにすることを第一の目的とした。流体物性として、マイクロバブルの粒径分布に大きな影響を及ぼす動粘度と界面張力に着目した。一方で、マイクロバブル発生装置を停止するとわずかな数分後にはマイクロバブルの縮小・消滅によって粒径分布は全く異なる様相を呈する。マイクロバブルの縮小に関しては、粒径と縮小速度や消滅時間の関係[13]、上昇しなが

1)東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 機械システム工学コース

2)ものづくり大学 製造学科

3)東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 一般科目

ら溶解するマイクロバブルの収縮過程についての数値計算[14]に関する研究がなされている。しかし、流体物性に注目して消滅時間との関係を明らかにしたものは見当たらない。そこで、流体物性（動粘度と界面張力係数）がマイクロバブルの消滅時間に与える影響を実験的に明らかにし、数値計算でその妥当性を検証した。

2. マイクロバブルの粒径分布

流体物性と発生するマイクロバブルの粒径分布の関係を実験的に明らかにする。まず、純水中でマイクロバブルを発生させて粒径分布を計測する（計測条件：185/254 nm UV ランプで有機物を分解、比抵抗値 $18.2\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ ）。

次に、流体物性を变化させた水中でもマイクロバブルを発生させ、粒径分布を計測する。動粘度および界面張力を变化させた場合それぞれについて純水の場合と比較し、流体物性の变化が粒径分布に及ぼす影響について検討した。

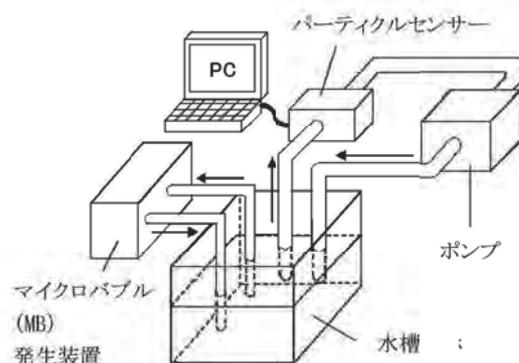
2.1 実験方法

粒径分布の計測のための装置の概要図を図 1(a)に、写真を図 1(b)に示す。マイクロバブル発生装置(株式会社資源開発研究所製, 特許番号 4384650)は加圧溶解方式のものを用いた。この装置ではマイクロバブルの吐出口であるノズルによって圧力解放を行い、マイクロバブルを発生させる。加圧溶解方式で発生するマイクロバブルは他の発生方法によるものに比べ比較的小さい粒径のものを大量に発生させる特徴がある。実験水槽の内寸法は $238\times 365\times 283\text{mm}$ である。純水で満たされた水槽内にマイクロバブル発生装置の吸入口とノズルが配置されており、吸入口から吸い込まれた純水をノズルからマイクロバブルと共に吐出している。この時の発生装置の設定は流量 $11.6\text{L}/\text{min}$ 、配送圧力 0.4MPa であるが、これは本実験で用いた発生装置が最も多くのマイクロバブルを発生させることのできる条件である[6]。これに純水を 10L 満たして実験を行った。発生させたマイクロバブルの粒径分布はレーザー微粒子計測器(シスメックス株式会社製パーティクルカウンター)によって計測した。測定原理は光遮断式であり、測定可能な粒径の大きさは $2\mu\text{m}$ 以上である。水槽からはポンプを用いて発生したマイクロバブル水をパーティクルカウンターに送り込み、粒径分布を計測する仕組みになっている。図1(c)にマイクロバブル発生の様子を示す。ノズル出口からセンサー吸い込み測定点 A までの距離は 0.12m である。センサー吸い込み測定点 A からパーティクルセンサーまでの距離は 0.6m である。計測したマイクロバブル水は再び水槽に戻される。

2.2 流体物性変化

本実験では初めに純水で実験を行い、その後流体物性を变化させた水でも同様に実験を行う。流体物性（動粘度と界面張力）を以下の方法で变化させた。

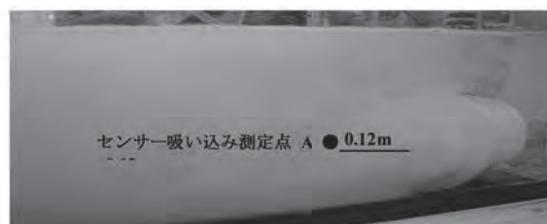
動粘度はグリセリンを混入することで増大を図った。25°C における純水の動粘度は $0.87\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ であったが、これに混



(a)概念図



(b)写真



(c)マイクロバブル発生の様子

図 1 実験装置

入するグリセリンの純水に対する割合を順次増やし、 $3.41\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ まで増加させた。界面張力は界面活性剤を用いて減少させ、塩化ナトリウムを混入させることで増大させた。界面活性剤には中性非イオン界面活性剤である Triton X、陰イオン系界面活性剤の SDS(ラウリル硫酸ナトリウム)を用いた。界面活性剤固有の性質が粒径分布に与える影響を検討するために、これらの 2 種類の界面活性剤を用いる。25°C における純水の界面張力は $72.8\times 10^{-3}\text{N}/\text{m}$ であったが、界面活性剤によって $45\times 10^{-3}\text{N}/\text{m}$ まで下げ、塩化ナトリウムで $80\times 10^{-3}\text{N}/\text{m}$ まで上げた。本実験では動粘度の測定にはウベローデ管を、界面張力の測定にはデュヌイ氏型表面張力計を用いた。

2.3 実験条件

本実験においてマイクロバブル発生に用いる気体は空気とする。空気の溶解度は水温の変化によって変化するので、25°C に保った。ただし、1~2°C の温度変化であれば溶解度の

変化量はごくわずかで、その影響は無視できる[15]。マイクロバブルの粒径は $2\mu\text{m}\sim 56\mu\text{m}$ の範囲で測定した。このことは、マイクロバブルの代表的な性質の一つ自己加圧効果と高い気体溶解能力があるが、この効果を発揮するために必要なマイクロバブルの縮小が、純水中においては約 $60\mu\text{m}$ 以下の粒径から起こり始めることを根拠にしている[16]。

2.4 実験結果

2.4.1 純水における粒径分布

純水における粒径分布測定の結果を図2に示す。図中には、マイクロバブル発生装置を停止して5分後の粒径部分布も示すが、このことについては3章で述べる。これを見ると粒径が小さいマイクロバブルほど発生数が多くなっている。後に示す動粘度を変化させた場合と界面張力を変化させた場合の粒径分布も同様の傾向にある。よってこの粒径分布の傾向は本実験で用いた発生装置の特徴と考えられる。

2.4.2 動粘度の変化による粒径分布および個数の変化

次にグリセリン混入によって動粘度を $0.87\sim 3.41\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ の間で変化させた。図3(a)および(b)にそれぞれ $1.69\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ および $3.41\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ の場合の粒径分布を示す。動粘度の増加と共にマイクロバブル発生量が全粒径にわたって増加している。一般に液体の蒸気圧は動粘度に反比例する[17]ため、動粘度が上昇すればマイクロバブル内への水の蒸発量は減少し、それだけ空気分圧は増加する。この結果、見かけの空気溶解度は上がるため、減圧時に析出するマイクロバブル数が増えたと考えられる。また、グリセリン混入による界面張力の変化は小さいので、その影響は無視できる(純水に混入するグリセリンの割合が最も多い動粘度 $3.41\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ の場合で純水の $72.8\times 10^{-3}\text{N/m}$ に対して $69.2\times 10^{-3}\text{N/m}$ である)。

いくつかの代表的な粒径の動粘度の変化に伴うマイクロバブル数の変化を図4に示す。図3で見られたように、どの粒径に対しても動粘度が大きくなるとマイクロバブル数が大きくなる。また、粒径が小さいほどマイクロバブル数が多くなる。

動粘度の変化が発生するマイクロバブルの粒径分布に与

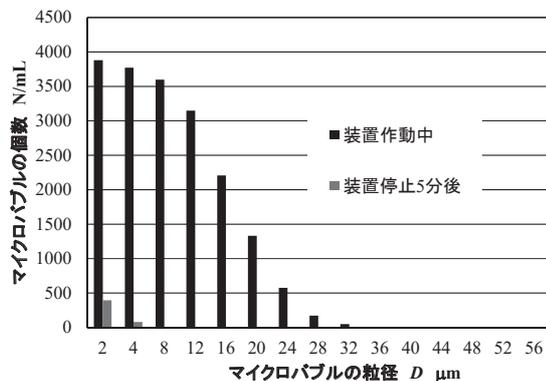
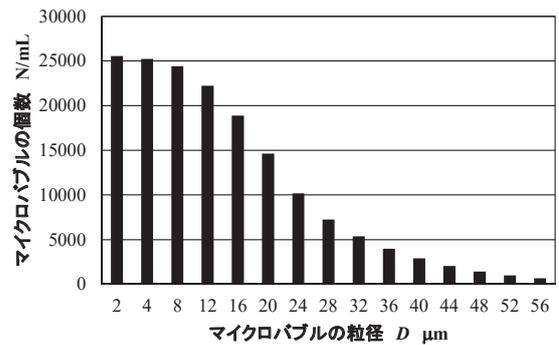
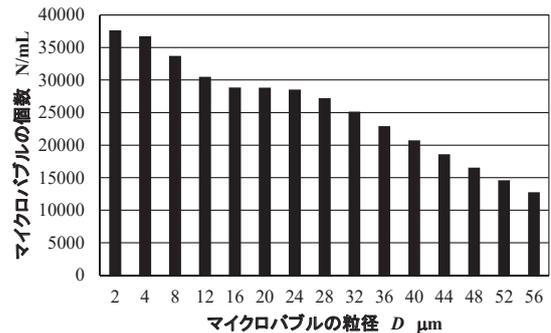


図2 マイクロバブルの粒径分布



(a) $1.69\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$



(b) $3.41\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$

図3 マイクロバブルの粒径分布

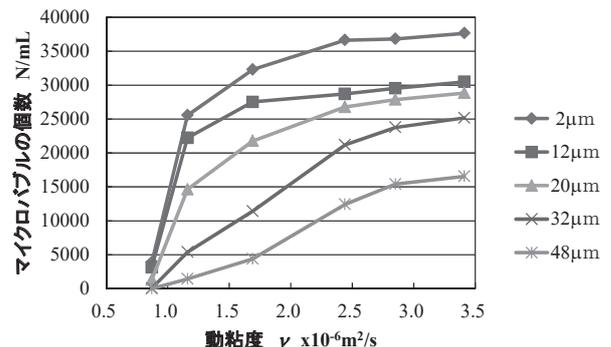


図4 動粘度とマイクロバブルの個数の関係

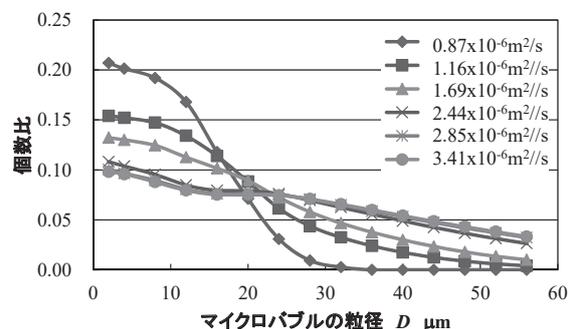


図5 全体のマイクロバブルの個数に対する個数比

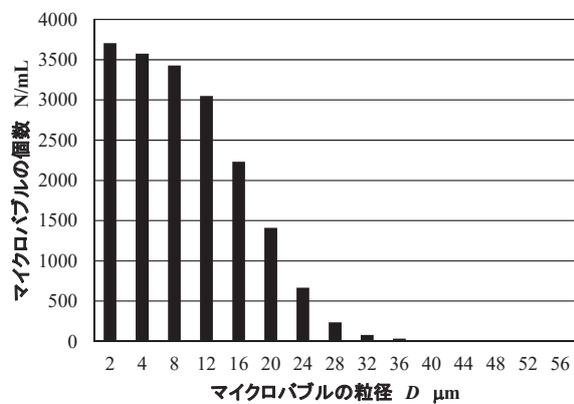
える影響を検討するために、発生した全バブル数に対する各粒径ごとのマイクロバブルの個数比を図5に示す。動粘度が増加すると $20\mu\text{m}$ 程度の粒径を境にこれより大きな粒径のマイクロバブルの全マイクロバブル数に対する個数比が増えている。逆にこれより小さい粒径の個数比は減っている。

20 μm 程度の粒径に関しては動粘度の増加に関わらず、全マイクロバブル数に対する個数比はほぼ一定である。また、図 5 は一方で動粘度の増加がマイクロバブル発生量に与える影響は、マイクロバブルの粒径によって異なることを示している。この現象のメカニズムについては今後検討したい。

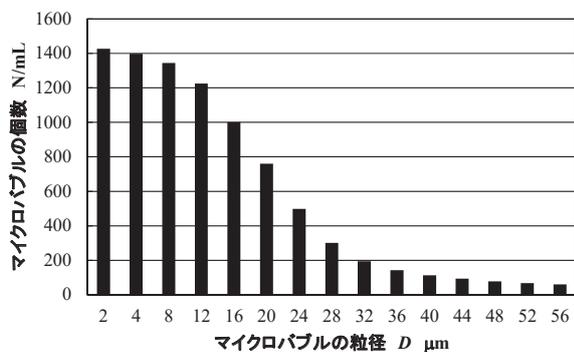
2.4.3 界面張力の変化による粒径分布および個数の変化

図 6(a)および(b)にそれぞれ界面活性剤として SDS および Triton X を用いて界面張力を $60 \times 10^{-3} \text{N/m}$ とした場合の粒径分布測定の結果を示す。図 2 の純水 ($72.8 \times 10^{-3} \text{N/m}$) の場合と比較すると、界面張力の減少によってすべての粒径に対して、マイクロバブルの発生数が減少している。同じ界面張力でも Triton X の方がマイクロバブルの発生数の減少する度合いが大きいことから、表面張力の影響以外にも例えば化学的な要因などが作用していることが推察される。図 7(a)および(b)には界面張力を $51 \times 10^{-3} \text{N/m}$ とさらに減少させた場合の粒径分布を示す。図 6 と比較すると、すべての粒径に対してマイクロバブルの発生数が減少している。これは気体の溶解度が下がり、その結果減圧時に析出するマイクロバブル数が減少し、界面張力の減少により大きい粒径のマイクロバブルを形成するのが困難になったと考えられる。

純水から界面張力を増加させた場合の結果を図 8 に示す。純水の粒径分布である図 2 と比較すると、界面張力の増加に伴って、マイクロバブルの発生量が増加している。これは

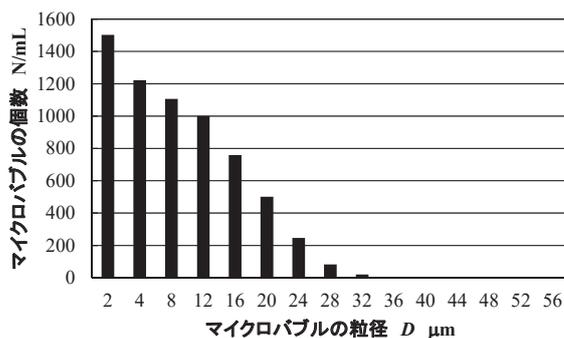


(a) SDS

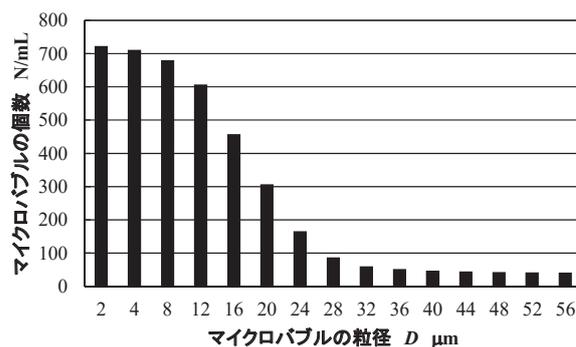


(a) Triton X

図 6 マイクロバブルの粒径分布($60 \times 10^{-3} \text{N/m}$)



(a) SDS



(b) Triton X

図 7 マイクロバブルの粒径分布($51 \times 10^{-3} \text{N/m}$)

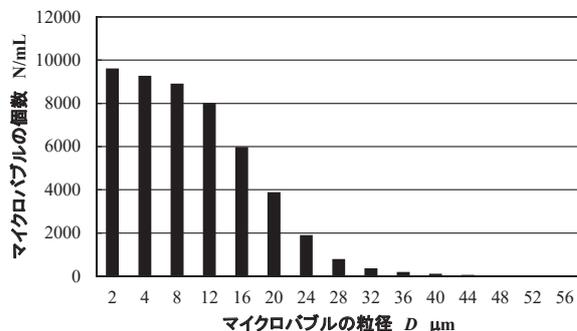


図 8 マイクロバブルの粒径分布(NaCl , $75 \times 10^{-3} \text{N/m}$)

気体の溶解度の変化によるものと考えられる。いくつかの代表的な粒径の界面張力の変化に伴うマイクロバブル数の変化を図 9 に示す。純水より界面張力が小さい領域では SDS を、大きい領域では食塩を添加している。図 6 から図 8 で見られたように、どの粒径に対しても界面張力が大きくなるとマイクロバブル数が大きくなる。また、粒径が小さいほどマイクロバブル数が多くなる。一方、図 9 から異なる薬液によって粒径の変化の様子が異なるという結果が得られた。界面張力の影響を確認することはできたが、それ以外の要因もあると考えられる。この点については今後検討したい。

図 10 にマイクロバブル総発生個数に対する各粒径のマイクロバブル個数比を示す。全体的に、界面張力によるマイ

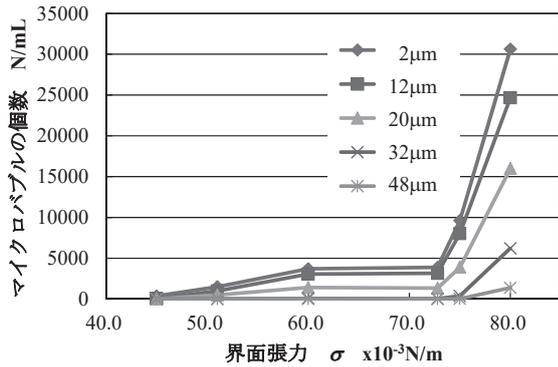


図9 界面張力とマイクロバブルの個数の関係

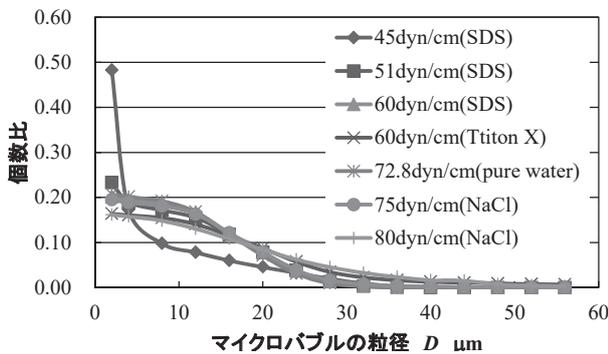


図10 全体のマイクロバブルの個数に対する個数比

マイクロバブル個数比のばらつきは小さくなっている。界面活性剤に関しては SDS と Triton X でバブル数は異なるものの、個数比はほぼ同じ傾向が現れた。

3. マイクロバブルの消滅時間

図2は前章で計測した純水中でマイクロバブルを発生させ、直後に粒径分布を計測したものと、マイクロバブル発生装置を停止してから5分後の粒径分布を計測したものを合わせて表示している。ほぼ全て径のマイクロバブルが装置を停止してから5分で消滅していることがわかる。このように粒径分布は時間経過で大きくその様相を変える。直径60μm程度からそれ以下の粒径のマイクロバブルは水中で縮小していく。この過程で気体は周囲の液体に溶解していくために、マイクロバブルの高い気体溶解能力が発揮される。前章では発生した直後のマイクロバブルの粒径分布を計測していたが、マイクロバブルの縮小・消滅によって時間の経過と共に粒径分布は変化する。そこでマイクロバブルの縮小過程に注目した。この章ではマイクロバブルが水中で縮小・消滅するまでの時間と流体物性の関係を明らかにする。

3.1 マイクロバブル内部の圧力

マイクロバブルは完全な球形に近いので、球として扱うことができる。マイクロバブルは界面張力によって縮

小し、この過程で内部の気体を周囲流体に溶解させ、最終的には消滅する。マイクロバブル内部の圧力 P_b は周囲流体よりも高くなっており、以下のラプラスの式で表すことができる[18]。

$$P_b = P_f + \frac{4\sigma}{D} \quad (1)$$

ここで、 P_f は周囲流体圧力[Pa]、 σ は界面張力[N/m]、 D はマイクロバブルの直径[m]を表す。この式から、マイクロバブルの直径が小さくなるほど、または界面張力が高くなるほど、マイクロバブル内部の圧力は高くなることがわかる。ただし、マイクロバブルの縮小に伴い内部の気体は周囲の流体に溶解していくので、ボイル・シャルルの法則は成り立たない。ヘンリーの法則[19]によれば圧力と気体の溶解度は比例するので、マイクロバブルは縮小して粒径が小さくなる程、気体の溶解能力が上がると考えられる。

3.2 マイクロバブル内部の粒径の時間変化

マイクロバブルの縮小に伴い、内部の温度が急激に上昇するとの報告は多い[14]。しかしこの時ヘンリーの法則によれば、バブルの内包する気体の溶解度は著しく下がり、マイクロバブルの体積減少率は時間と共に変化するはずである。そこで、実際にマイクロバブル内の温度の変化の程度を熱伝導方程式のオーダー評価によって見積もってみる。マイクロバブルはほぼ球形をしているので球座標系軸対称熱伝導方程式(2)を用いる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} \quad (2)$$

ここで、 T は温度[K]、 t は時間[s]、 ρ は気体密度[kg/m³]、 c は比熱[J/(kg・K)]、 k は熱伝導率[W/(m・K)]、 r はマイクロバブル半径[m]を表す。式(2)より、マイクロバブル内に ΔT の温度差が時間 Δt の間に伝わったとすれば、概ね次式が成立する。

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \approx \frac{k}{\rho c} \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{1}{r} \left(r^2 \frac{\Delta T}{r} \right) \right\} \quad (3)$$

この式から、

$$\Delta t \approx \frac{r^2}{k/\rho c} \quad (4)$$

マイクロバブルの直径が20μmの場合を想定し、式(4)を用いてバブル内部の温度が周囲流体の温度に近づく時間を計算すると $\Delta t \approx 4.6 \times 10^{-6}$ (s) となり、ほぼ瞬時にバブル内部の温度は周囲流体の温度に近づくことがわかる。上式を解くと以下の解が得られる。

$$T(t, r) = \frac{1}{2\sqrt{ck}} \frac{1}{r} \left(A e^{-\sqrt{\frac{c}{k}} r} + B e^{+\sqrt{\frac{c}{k}} r} \right) \quad (5)$$

ここで、 $\kappa (\rho c/k)$ は熱拡散率[m²/s]である。また、 A 、 B 、 C は任意定数である。得られた解からバブル内の温度が周りの水温に近づく時間を見積もると十分に短いので、マ

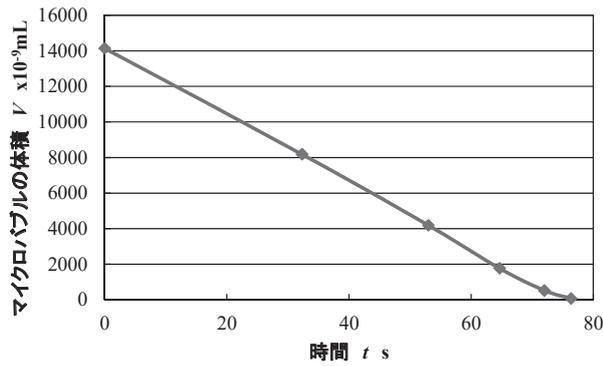


図 11 純粋中のマイクロバブルの体積の時間変化

マイクロバブルの温度は縮小過程において殆ど変わらないと言える。よってマイクロバブル内部の圧力と溶解度は比例しているというヘンリーの法則が成立する可能性が示された。粒径分布を求め、ある粒径の体積にその粒径のマイクロバブルの個数を乗じ、その総和を求めることによって体積率を求めると、図 11 のような結果になり体積減少率が一定であることを確認できた。図 11 は純水中のマイクロバブルの体積減少率であるが、物性を変化させた場合も同様に体積減少率はほぼ一定であった。

上記のように体積減少率が一定であることから、以下のように粒径の時間変化の準理論式を導出することができる。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\pi D^3}{6} \right) = \frac{\pi D^2}{2} \frac{dD}{dt} = Const \quad (6)$$

この式からマイクロバブルの直径を求めると[20],

$$D = \sqrt[3]{\frac{dV}{dt} \frac{6}{\pi} (t - t_v)} \quad (7)$$

ここで、 V はマイクロバブルの体積[m³]、 t は時間[s]、 t_v はマイクロバブルの消滅時間[s]を表す。上式の体積減少率と消滅時間は実験によって求める。この式によって、体積減少率 dV/dt がわかれば与えられたマイクロバブル径に対する消滅時間を知ることができる。 dV/dt の理論的な求め方については今後の課題とする。

3.2 実験方法

マイクロバブルを発生させ、縮小による粒径の時間変化および消滅時間を計測する。純水で実験を行った後に、流体物性を変化させた実験を行う。発生したマイクロバブルの観測には、マイクロスコープ（株式会社 KEYENCE 製デジタルマイクロスコープ、最大倍率 5000 倍、分解能 0.01 μ m）を用いた。専用モニターの画面を通して 0.1 μ m 単位でマイクロバブルの粒径を測定することができる。マイクロバブルは中心部にへこみがあり、マイクロバブル水を溜められるプレパラートに移し、観察する。

本実験では粒径が 30 μ m のマイクロバブルが縮小し、消滅するまでの過程を観測する。この範囲で実験を行う

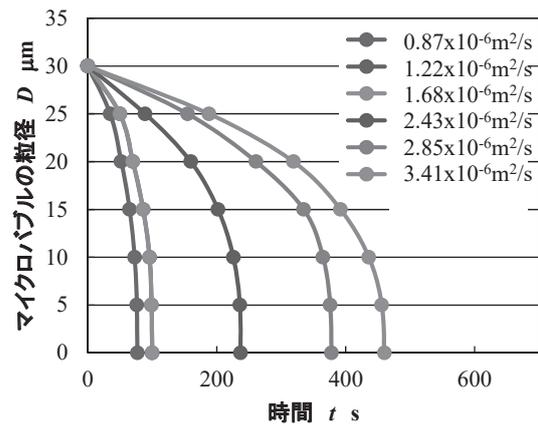


図 12 種々の動粘度に対するマイクロバブルの粒径の変化

のは、純水におけるマイクロバブルの縮小過程を観測すると、縮小速度が大きく増加し始めるのが 30 μ m 程度の粒径であったからである。本実験ではマイクロスコープを用いてマイクロバブルの縮小による粒径の時間変化を 5 μ m 毎に計測する。

3.3.1 動粘度の変化による粒径の変化

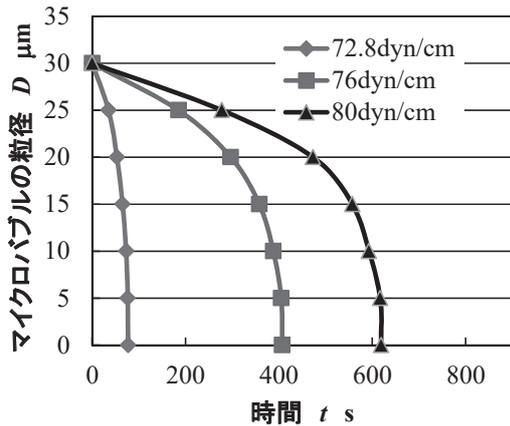
動粘度が変化した場合の粒径の時間変化のグラフを図 12 に示す。粒径の時間変化の実験値を各点で、式(7)から得られた値を実線で示す。本実験で行った全ての動粘度の範囲でよく一致している。これは導出した準理論式が妥当であることを示すものであると言える。動粘度の増加に伴いマイクロバブルの消滅時間は伸びている。したがって、純水中においては 1 分程度で消滅してしまうマイクロバブルを動粘度を増加させることによってより長い時間水中に滞留させられるといえる。

3.3.2 界面張力の変化による粒径の変化

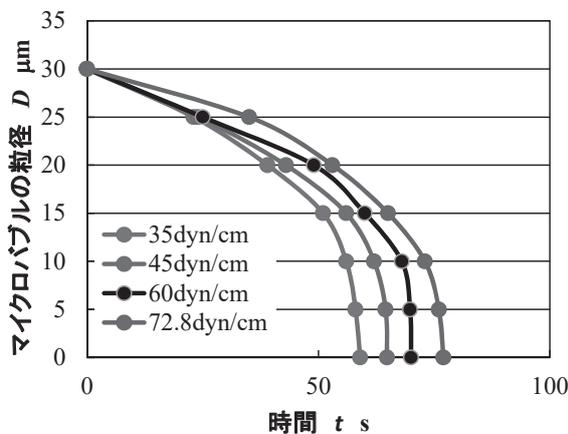
界面張力が変化した場合の粒径の時間変化のグラフを図 13 に示す。粒径の時間変化の実験値を各点で、式(7)から得られた値を実線で示す。図 13(a)は純水(72.8x10⁻³N/m)よりも低い界面張力の場合で、界面活性剤として Triton X を用いている。SDS を使用した場合でも傾向は同じである。図 13(b)は純水(72.8x10⁻³N/m)よりも高い界面張力の場合で、塩化ナトリウムを用いている。これらの図から、界面張力の増加に伴いマイクロバブルの消滅時間が伸びている。また、動粘度の結果と同様に、実験値と準理論曲線は良く一致している。

4. 結言

マイクロバブルと流体物性の関係について、発生時の粒径分布、その後の縮小過程に注目して実験を行った。その結果、動粘度および界面張力の変化がマイクロバブルの粒径分布や消滅時間に影響を与えることがわかった。



(a) Triton X



(b) NaCl

図 13 種々の界面張力に対するマイクロバブルの粒径の変化

これらに関して考察を行い、得られた結論を以下にまとめる。

1. 動粘度および界面張力が大きくなると、どの粒径に対してもマイクロバブル数が大きくなる。また、粒径が小さいほどマイクロバブル数が多くなる。
2. 粒径 20 μm 程度を境にこれより大きい粒径と小さい粒径のマイクロバブルの全マイクロバブル数に対する個数比が動粘度の増加に伴いそれぞれ減少、増加することがわかった。
3. 界面張力が変化した場合に、特定の粒径のマイクロバブルの全マイクロバブル数に対する個数比の変化が小さい。
4. 粒径 30 μm 程度以下の微細なバブルは純水もしくはそれ以下の動粘度、界面張力の環境下では高々1分程度で消滅し、長時間は存在できない。
5. 流体物性(動粘度、界面張力)を変化させることにより、微細な粒径を持つバブルの消滅時間を制御することが可能となる。このことに対し定量的な指針を与えた。

6. 粒径を時間の関数として準理論的に計算する方法を示した。この関数を用いた計算結果は実験結果と良く一致した。

参考文献

- [1] 大成博文:マイクロバブルのすべて, 日本実業出版社, pp.23-32, 2005.
- [2] 小澤右京, 伊藤伸英, 山本寛之, 大森整, 長谷川勇治: マイクロバブルを援用した ELID 研削, 日本機械学会山梨講演会講演論文集, pp.80-81, 2013.
- [3] 長谷川勇治, 西野彰馬, 伊藤伸英, 大森整, 加藤照子, 根本昭彦, 松澤隆: ラバーボンド砥石の加工特性: 第 2 報導電性ラバーボンド砥石におけるマイクロバブルの効果, 精密工学会学術講演会講演論文集 2010S(0), pp.277-278, 2010.
- [4] 平井聖児, 香村誠: マイクロバブルの挙動と環境にやさしい洗浄技術, 砥粒加工学会誌, 53, 9, pp.544-547, 2009.
- [5] 日本産業洗浄協議会: よくわかる洗浄のすべて, 日刊工業新聞社, pp.135-145, 1999.
- [6] 平井聖児, 香村誠: 高濃度マイクロバブル発生装置とその応用, 素形材, 49, 3, pp.44-47, 2008.
- [7] 青木繁, 栗田勝実, 池田宏, 平井聖児: マイクロバブルと超音波振動を併用した金属板表面における洗浄効果の基礎的研究, 日本機械学会論文集 (C 編), 80, 813, DSM0134, 2014.
- [8] 穴戸道明, 佐藤司, 成田洗社: マイクロバブルの基礎特性と応用分野, 鶴岡工業高等専門学校研究紀要, 49, pp.62-64.
- [9] 佐藤要: 旋回流によるマイクロバブル発生装置の基礎的研究, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会-2009 前橋-講演論文集 No.090-3, pp.65-66, 2009.
- [10] 山田哲史, 吉見裕子, 寺田隆史, 大野健一, 南川久人, 加圧溶解法により発生したマイクロバブルの水中への酸素供給効果に関する研究, 混相流, Vol.21, No.1, pp.84-90, 2007.
- [11] 前田康成, 細川茂雄, 田谷千尋, 富山明男, 山口重行, 伊藤良泰: 加圧溶解法により生成した微細気泡の気泡径・数密度, 混相流, 24, 4, pp.462-469, 2010.
- [12] 田谷千尋, 前田康成, 細川茂雄, 富山明男, 伊藤良泰, 柴田尚紀: 加圧溶解法により生成したマイクロバブルの気泡径分布, 混相流, 25, pp.407-414, 2012.
- [13] 中武靖仁, 渡邊孝司, 江口俊彦: エジェクタ式マイクロバブル混入燃料によるディーゼル機関の燃焼改善, 日本機械学会論文集 (B 編), 73, 735, pp.2368-2374, 2007.
- [14] 北川石英, 小菅桂太, 内田健司, 萩原良道: 微細気泡注入による層流自然対流場の伝熱促進, 日本機械学

会論文集（B編），73, 732, pp.1687-1695, 2007.

- [15] 川村隆文，児玉良明：マイクロバブルによる船体抵抗低減，エコインダストリー，シーエムシー出版，11, 3, 2006, 42-47, 2006.
- [16] 鈴木佳那子，青木一司，菱田公一，児玉良明：マイクロバブルチャンネル流の抵抗低減流動構造の強拡大PTV計測，日本機械学会論文集機論（B編），74, 742, pp.1247-1256, 2008.
- [17] 小林駿：高精度ガスメータ標準器の研究開発，早稲田大学博士論文，p.175, 2003.
- [18] 鈴木忍，山田豊，河野浩三：給湯用銅管の浸食現象に及ぼす気泡挙動の影響，Zairyo-to-kankyuu, 58, pp.99-104, 2009.
- [19] 笠原英司：例題演習水力学，産業図書，pp.6-7, 1960.
- [20] 三谷拓，箕浦豪，香村誠，平井聖児：マイクロバブルの粒径および消滅時間に流体特性が与える影響，日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集(2)，09-1, pp.11-12, 2009.