

マイクロバブルのサイズコントロールと評価技術

高橋 志郎、村田 政隆、下野 功、松村 一弘、伊藤 雅章*

Size Control and Evaluation on Microbubble

Shiro Takahashi, Masataka Murata, Isao
Shimono, Kazuhiro Matsumura
and Masaaki Ito*

要 旨

マイクロバブルは、その発生方式や発生条件などによって様々なバブルの発生量やサイズとなることが知られている。このマイクロバブルの基本特性とも言える発生量やサイズを任意にコントロールすることは、マイクロバブルの特徴を科学的に検証し、その特徴を活かした応用へと発展させる上で極めて重要であると考えられる。本研究では、マイクロバブルの特徴や発生方法について調査するとともに、応用分野拡大への基礎データの蓄積や今後の製品開発の足がかりとなるマイクロバブルの発生量やそのサイズ測定などの基礎的評価方法を確立し、さらにマイクロバブルサイズおよび発生量を任意にコントロールすることを目的とした研究を行った。

その結果、マイクロバブルのサイズや粒度分布を連続的に測定することが可能となり、系統的に発生量やサイズをコントロールすることが可能となった。

1. はじめに

近年、直径が $1\mu\text{m}$ ～数十 μm のマイクロバブルと呼ばれる微細な気泡に関する研究開発が盛んに行われている¹⁾。これは、マイクロバブルが、通常の気泡にはない洗浄効果や浄化作用などの特徴を有しているため、食品産業や機械産業へ応用可能な基盤技術として有望であり、当地域にとっても重要な技術開発テーマと考えられる。

マイクロバブルには、長時間気泡として液体中にとどまる、帯電し物体へ吸着しやすい等のいくつかの効果が謳われているが^{2),3)}、その発生方式や発生条件が異なる等の理由から、研究者によって評価が分かれている。即ち、マイクロバブルの効果は、バブルサイズや粒度の分布状況によって変化する物性に強く依存すると考えられる。従って、バブルサイズの平均値や分布状況の制御技術は、

マイクロバブルを応用する上で極めて重要な基礎技術と考えられることから、マイクロバブルのサイズコントロールを目的とした装置の試作および改良を行った。また、測定方法が確立していないマイクロバブルのサイズ測定や粒度分布測定についても検討を行った。

2. 実験方法

2-1 マイクロバブル発生装置

マイクロバブルの発生にはいくつかの方式がある。マイクロバブルの発生方式と簡単な特徴の調査結果を表1に示す。本研究では、①ポンプ内に気液混合体を送り、キャビテーションを利用して気泡を発生させるキャビテーション方式、②気液混合体を加圧することでより多くの気体を液体中に溶解させる加圧溶解方式、③気液混合体を経路

* 函館酸素株式会社

表1 マイクロバブルの発生方法

発生方式	発生方式の説明
エアレーション	微細な気孔から気泡を発生させる。 エアストーンなど
ベンチュリー管	ベンチュリー管の圧力差によって気泡を発生させる
キャビテーション	ポンプ内に気液混合体を送り、キャビテーションを利用して気泡を発生させる
旋回流	経路内で気液混合体を旋回運動させ、剪断力によって気泡を微細化
複合型	上記の組み合わせによって気泡を発生させる

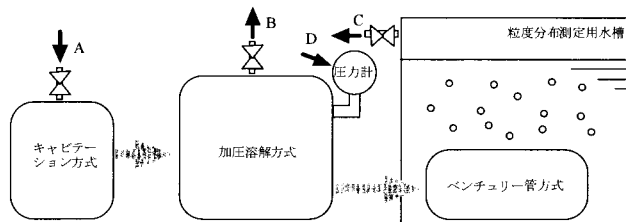


図1 試作したマイクロバブル発生装置の模式図

の一部が狭まったベンチュリー管を用いて、その圧力差により微細気泡を発生するベンチュリー管方式を複合して用いる発生装置を試作した。その模式図を図1に示す。空気の供給は、ポンプの吸い込み差圧による自給方式とした。吸気口、加圧容器、後述の粒度分布測定用水槽に空気流量計(図1矢印A、矢印B、矢印C)、ポンプ吐出口に圧力計(図1矢印D)を設置した。

2-2 マイクロバブルの評価

マイクロバブルの基礎的評価として、その発生量とサイズの粒度分布の測定を行った。

発生量は、

$$\text{発生量} = \frac{\text{気体吸入量：矢印A} - \text{余剰気体排出量：矢印B} - \text{大気解放量：矢印C}}{\text{時間}}$$

として算出した。

マイクロバブルの粒度分布測定は、光学顕微鏡およびマイクロトラック社製の粒度分布測定装置HRAを用いた。光学顕微鏡による観察は、図2に示す観察用の治具を作製し、マイクロバブルを含んだ液体を採取、観察し、得られた顕微鏡写真より画像解析ソフトを用いて粒度分布を測定することで行った。

粒度分布測定装置による測定では、粒度分布測定用水槽を作製して連続的に計測を行った。なお、

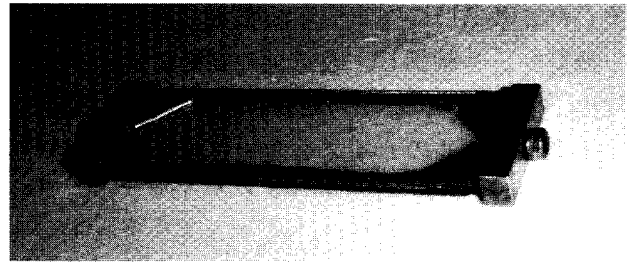


図2 光学顕微鏡観察用マイクロバブル捕集治具

溶媒となる液体は水、マイクロバブルとなる気体は空気とした。気体吸入量の制御によるポンプ吐出圧力制御、余剰気体排出量の制御による加圧容器の加圧力制御を行い、バブルサイズの平均値や分布測定を行った。

2-3 洗浄および浄化試験

本装置により発生したマイクロバブルを用いて、アルミ板に塗布した鉱物油の洗浄試験および水中に分散した墨汁の墨粒子の除去試験を行った。

洗浄試験では、#1200のエメリー紙を用いて表面を荒らしたアルミ板に潤滑用の機械鉱物油を塗布し、マイクロバブルを発生させた水槽内に3分間保持した後観察を行った。このとき、マイクロバブル発生時の溶媒は水のみとし、界面活性剤や洗剤は用いなかった。また、比較実験として、マイクロバブル発生槽内と同等の流速となるようにした流水による洗浄、および静水中にて超音波を用いた各3分間の洗浄試験も併せて行い、マイクロバブルによる洗浄と比較した。

次に、マイクロバブルによる液体浄化の効果を検証するために、水80リットルに対して市販の墨汁(濃度約5%、墨汁中の炭粒子の平均粒径3.2 μm) 200ccを加えた水槽内にてマイクロバブルを発生させ、マイクロバブルの泡沫によって浮上した炭粒子を除去しながら12時間の浄化試験を行った。このとき、溶媒は水とした。浮上した炭粒子は、マイクロバブルの泡沫が水面上で破裂すると再度水槽内に拡散してしまうため、水面上で泡沫を長時間維持させるために市販の食器用洗剤を約10分毎に1滴添加し、炭粒子の除去を行った。

3. 結果および考察

3-1 マイクロバブルの平均粒径及び粒度分布の測定

本研究で試作したマイクロバブル発生装置に設置した、吸気口の空気流量調整弁、ポンプ吐出口の調整弁、を制御し、吸気量の制御によるポンプ吐出圧力（以下、加圧力と表記する）制御を行い、マイクロバブルのサイズを変化させたときのサイズ測定を行い、そのときのマイクロバブルの発生量を測定した。

マイクロバブルのサイズ測定は、光学顕微鏡および粒度分布測定装置にて行った。図3に、加圧力(a)P=0.3MPaおよび(b)P=0.4MPaのときの光学顕微鏡写真および図4に、加圧力(a)P=0.3MPaおよび(b)P=0.4MPaのときの粒度分布測定結果を示す。図4には、光学顕微鏡観察により得られた粒度分布測定結果を青線で併記した。光学顕微鏡観察お

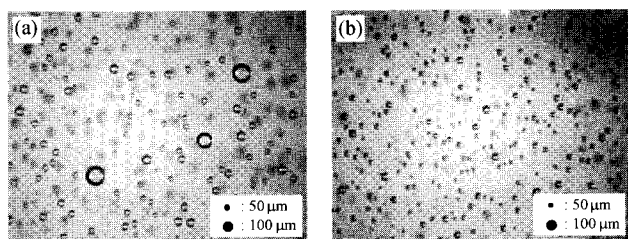


図3 加圧力(a)P=0.3MPaおよび(b)P=0.4MPaのときの光学顕微鏡写真

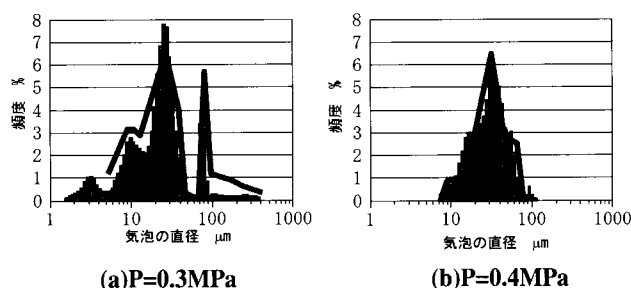


図4 加圧力(a)P=0.3MPaおよび(b)P=0.4MPaのときの粒度分布測定結果

よび粒度分布測定の結果より、平均粒径 (d_{50}) は P=0.3MPaのとき約21 μm 、P=0.4MPaのとき約37 μm であった。P=0.3MPaのときのマイクロバブルには、光学顕微鏡写真からもわかるとおり、50 μm 以下の微細な気泡と100 μm 以上の粗大な気泡が混在していた。

一方、P=0.4MPaのマイクロバブルは、P=0.4MPaに比べて平均粒径も小さく比較的サイズのばらつきが少ないことがわかった。

また、光学顕微鏡写真による粒度分布測定結果と粒度分布測定装置による粒度分布測定結果は、比較的よく一致し、極めて手間のかかる光学顕微鏡観察を行わずに、粒度分布測定が可能となったことを示唆した。

3-2 マイクロバブルサイズのコントロール

本研究で試作したマイクロバブル発生装置は、ベンチュリー管のオリフィス前後の圧力差によって最終のマイクロバブルを得ている。そこで、オリフィスの厚さ(1.8mm~8mm)を変化させ、さらに加圧溶解のための圧力（以下加圧力と表記する）を変化させたときのマイクロバブルのサイズと発生量を測定した。

図5に、加圧力P=0.5MPaとしたときの、オリフィスの径を変化させたときのマイクロバブルのサイズ（粒度分布および平均粒径）測定結果を示す。図5(a)は、オリフィス厚さ $t=1.8\text{mm}$ 、(b)は、オリフィス厚さ $t=4\text{mm}$ 、(c)はオリフィス厚さ $t=8\text{mm}$ のときの粒度分布測定結果である。粒度分布の幅は、(c)では狭く、最も均一なサイズのマイクロバブルが得られており、(b)で粒度分布がやや広がり、(a)ではかなり広い分布を示している。平均粒径 (d_{50}) は(a)のとき約23 μm 、(b)のとき約11.2 μm 、(c)のとき約5.3 μm であった。

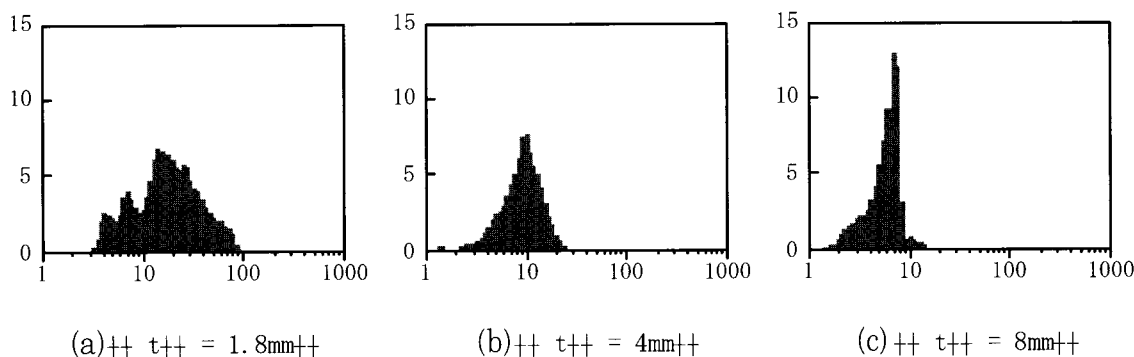


図5 加圧力P=0.5MPaのときの、マイクロバブル粒度分布測定結果

次に、(a)~(c)を含む各条件での粒度分布測定から得られたマイクロバブルの平均粒径 (d_{50}) を図 6 に示す。本装置では、加圧力が低い ($P=0.3\text{MPa}$) 場合、マイクロバブルの平均粒径の制御は困難で、オリフィスの厚さが4mm以上となったときマイクロバブルは発生せず、通常の大きな気泡のみが発生した。一方、加圧力が高い ($P=0.4\text{MPa}$ 、 0.5MPa) 場合には、オリフィスが厚いほど微細なマイクロバブルが得られる傾向を示した。

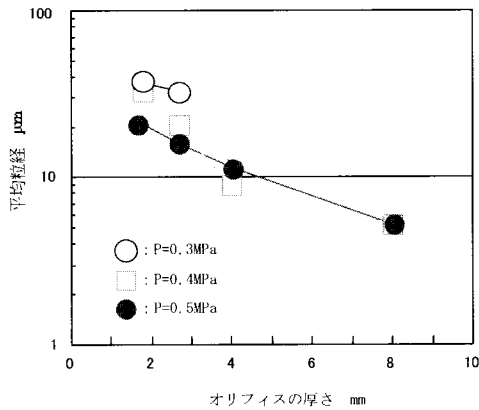


図 6 マイクロバブルの平均粒径に及ぼす加圧力およびオリフィス厚さの影響

また、オリフィスの径を変化させた実験も行ったが、この場合、制御が困難で系統だった粒度分布の測定にいたらなかったものの、オリフィスの径が小さいほど微細なマイクロバブルが得られる可能性があった。

また、マイクロバブルの発生量は、マイクロバブル発生条件により200~500ml/L/minで、酸素溶解度 (約20ml/L:水) の約10~20倍であった。

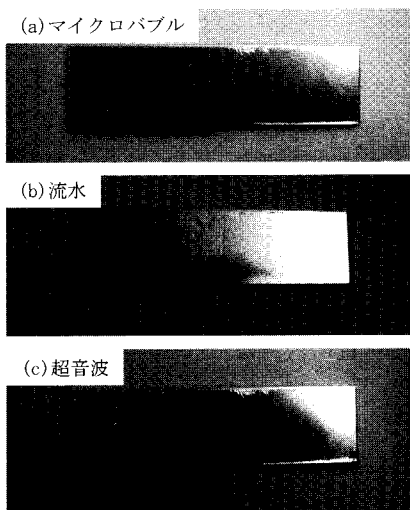


図 7 鉱物油洗浄試験の結果

3-3 洗浄および浄化の実証試験

マイクロバブルの洗浄効果、浄化効果は、各マイクロバブルメーカーでもその効果を大きく謳っている。道南地域において、マイクロバブルを産業化用途とするときに、もっともその需要が見込まれるのが洗浄・浄化用途であると考え、その実証試験一つとして、本装置により発生したマイクロバブルを用いて、アルミ板に塗布した鉱物油の洗浄試験を行った結果を図 7 に示す。マイクロバブルによる洗浄では、洗剤等の界面活性剤を用いていないにもかかわらず、わずかに残留した油分に泡沫が付着した様子が観察されるのみで、試験片上の鉱物油はほとんど観察されず、洗浄効果が認められた。比較として行った流水による洗浄では、油分はほとんど落ちておらず洗浄効果は認められなかった。さらに、静水中での超音波洗浄では、油分と水分がエマルジョン化し、こちらも流水の場合と同様にほとんど洗浄効果が認められなかった。

次に、浄化試験として行った水に添加した墨汁中の炭粒子除去試験の結果を図 8 に示す。(a)は開始前、(b)は3時間後、(c)は12時間後のマイクロバブル発生槽の水をくみ上げた透明容器の写真である。観察方向からみた透明容器の裏側には、透明度を判別しやすくするために、マーカーとしてスマイルマークを貼り付けた。この結果からわかるように、3時間、12時間と浄化作業を行うに従って、透明度が増しマーカーが鮮明に観察可能となり、炭粒子が除去されることが示唆された。

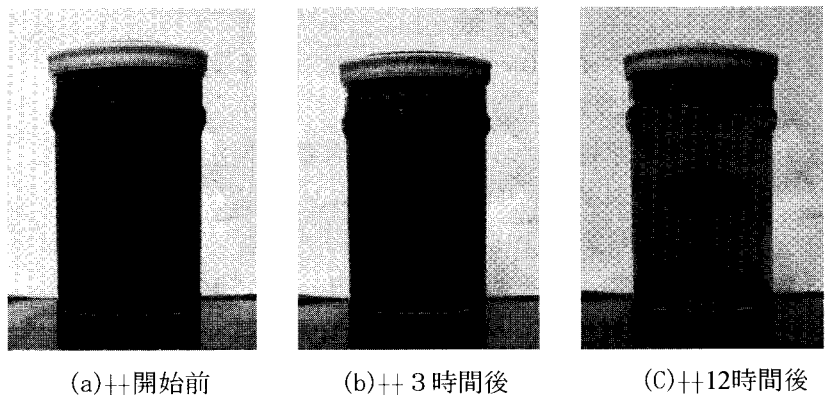


図 8 墨汁炭粒子除去試験の結果

4. まとめ

マイクロバブル発生装置の開発は、マイクロバブルの効果を検証することで行われなければならないが、のサイズや発生量が正確に評価できていないことから、研究者や開発者によってマイクロバブル自体の評価が異なっている。本研究では、粒度分布測定技術などの評価技術を確立することを目的の一つとした研究を行った。さらに、マイクロバブル発生装置の試作と改良を行い、マイクロバブルのサイズや発生量のコントロールを目的とした研究を行い、以下の成果を得た。

(1) マイクロバブル発生装置を試作、改良することで安定的なマイクロバブルの発生が可能となった。

(2) マイクロバブルサイズの評価手法として、精密な測定が困難で時間的余裕のない光学顕微鏡観察ではなく、粒度分布装置を用いた機器分析用のマイクロバブル測定用水槽を開発することで、マイクロバブルの連続的かつ精密な粒度分布測定が可能となった。

(3) 気体吸気量や加圧力の制御およびベンチュリー管のオリフィスサイズを変化させることで、発生するマイクロバブルのサイズ制御がある程度可能なことがわかった。

(4) マイクロバブルの特性の一つである、洗浄効果および水浄化の効果が確認された。

現在、マイクロバブルの持つ特徴を活かした応用をいくつか考えているが、マイクロバブルによる洗浄・浄化は、洗剤を全く使わない、あるいは使用量を大幅に減少できる等の利点が認められるため、今後は、食品分野を主とした産業応用技術の研究開発へと発展させていく予定である。

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）、(2006)
- 2) 藤原暁子：水処理における微細気泡発生手法、月刊エコインダストリー（シーエムシー出版）、Vol.11, No.3, (2006), P15-18
- 3) 柘植秀樹編集：マイクロバブル・ナノバブルの最新技術（シーエムシー出版）、(新材料・新素材シリーズ)