

マイクロバブルの発生機構と収縮特性

GENERATING MECHANISM AND SHRINKING CHARACTERISTIC OF MICRO BUBBLES

大成博文¹・都並結依²・大成博音³・山本孝子⁴

Hirofumi OHNARI, Yui TSUNAMI, Hiroto OHNARI and Takako YAMAMOTO

¹正会員 工博 徳山高専教授 土木建築工学科 (〒745 - 8585 山口県周南市久米高城3538)

²学生会員 徳山高専専攻科 環境建設工学専攻 (〒745 - 8585 山口県周南市久米高城3538)

³学生会員 山口大医院 博士課程 (〒755 - 8505 山口県宇部市南小串一丁目1番1号)

⁴正会員 徳山高専 技術専門職員 (〒745 - 8585 山口県周南市久米高城3538)

The generating mechanism of the micro-bubble by the high-speed camera photography was investigated. And shrinking process from micro bubble to micro-nano bubble was investigated by a flow visualization system using micro-scope photography. Micro bubbles were generated by the formation of rotating two phases fluid in the device. The rotating velocity at the exit of the generating device was about 400 revolutions per second.

Almost all micro bubbles shrink and change to micro-nano bubbles. Micro-nano bubble is separated from micro bubble on the shrinking rate in time. And it was clear that the critical diameter of micro bubble to start the shrinkage was about 65 μm .

Key Words : Micro bubble, Micro-nano bubble, Generating mechanism, high speed camera, shrinkage, rising velocity

1. 諸論

この数年, 各方面においてマイクロバブル技術に関する関心が徐々に高まっている¹⁾。マイクロバブルとは, 文字通り, マイクロサイズの極小気泡のことをいうが, これには, 従来から良く用いられてきた「ミリバブル」とは異なる固有の物理化学的特性を示す, いわゆる「サイズ効果」の存在が注目されている²⁾。

マイクロバブル技術は, そのサイズ効果を利用して装置や商品をつくる技術である。その特徴の第1は, 適用分野が広く, 農漁業、電力・ガス, 自動車, 電化製品, 排水処理, 食糧, 健康福祉, 医療, 環境など, わが国における主要産業のほとんどの分野に拡大しつつあることにある。第2は, なかでもマイクロバブルの生物活性を基本とする独創的成果が出始めたことであり, たとえばシャープ㈱は, 半導体工場の排水処理において画期的な成果を報告している³⁾。

以上を踏まえ, 本研究では, マイクロバブルの発生機構を考察するとともに, その重要な物理学的特性のひとつである収縮特性について詳しい検討を行った。

2. マイクロバブル

マイクロバブルとは, 「その発生時において10~数十 μm の気泡径を有する気泡」のことであり, 10 μm 前後~数百nmの気泡径を有する気泡を「マイクロナノバブル」, それ以下を「ナノバブル」と定義する。これらの区別と分類を図-1に示す。

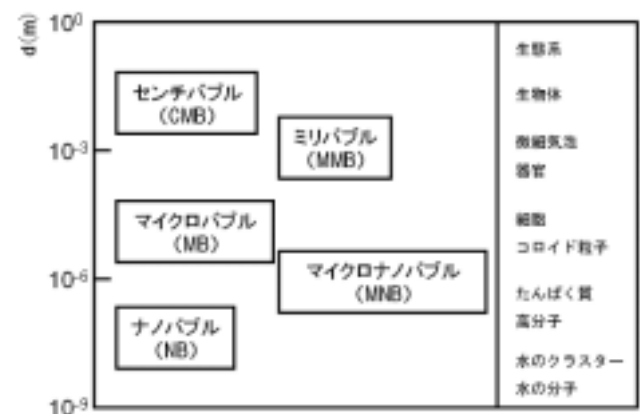


図-1 気泡の分類



図-2 マイクロバブルの発生状況(M1-L型)

図-2は、海水においてマイクロバブルが発生した直後の様子が示されている。白く煙のように見える気泡群がマイクロバブルである。このマイクロバブルには、次の基本的特徴がある⁴⁾。

直径が $10\mu\text{m}$ 前後の均一のマイクロバブルが大量に発生する。

液体中での上昇速度が遅く、液体中への気体吸収効率が低い。

マイナスの電位特性を有し、分散性に優れる。気泡の合一や吸収がほとんど起こらない。

収縮しながら高温高圧化し、溶解効率を高める。

周囲水において化学的特性を示す。

多くの生物に対して生理活性を引き起こす。

3. 実験装置および方法

(1) マイクロバブル発生装置

マイクロバブル発生装置には、M1型とM2型があり、それぞれサイズが異なる種類がある。図-3には、実験で使用したM2型装置が示されている⁵⁾。本装置は、ポンプからの圧力水の流入口、上部の空気吸入口、下部のマイクロバブル噴出口および中央の円筒部で構成されている。この流入口から圧送された液体は装置内部で回転し、下部の穴から噴出する。その際、上部の空気吸入口から空気を吸い込み、装置内でマイクロバブル化が実現される。

(2) 可視化計測システム

マイクロバブルの重要な物理的特性として、収縮運動がある。図-4に、マイクロバブルの可視化計測システムを示す。まず、水槽内で大量に発生したマイクロバブルは、側面がすべて透明な計測水槽にすばやく導かれ、その後、出入り口のバルブを閉めて静水空間が形成される。照明には冷熱光として最適の液晶プロジェクター光を採用し、マイクロスコープレンズの反対方向から照射させ、気泡のシルエット撮影を行った。照明の位置は、計測水槽から2.7m離れた地点とした。

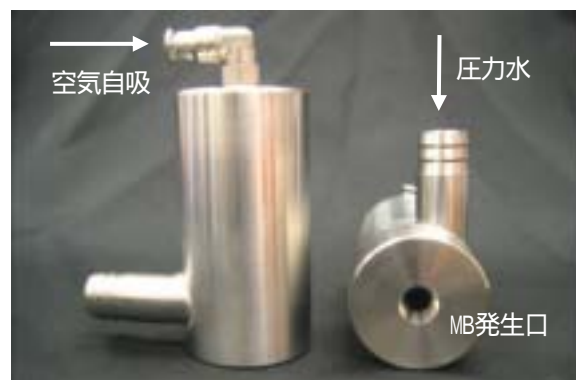


図-3 M2型マイクロバブル発生装置

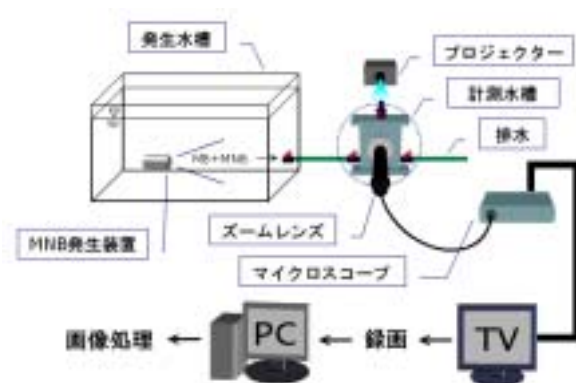


図-4 可視化計測システム



図-5 計測水槽

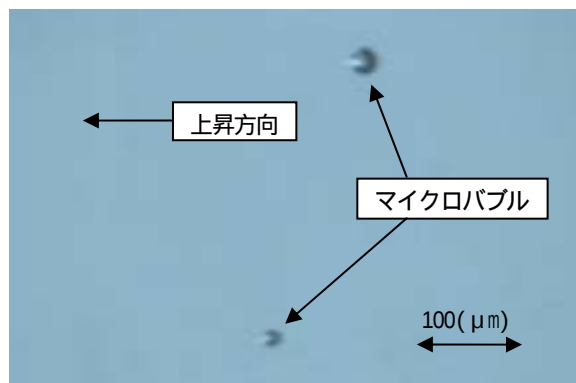


図-6 上昇中のマイクロバブル

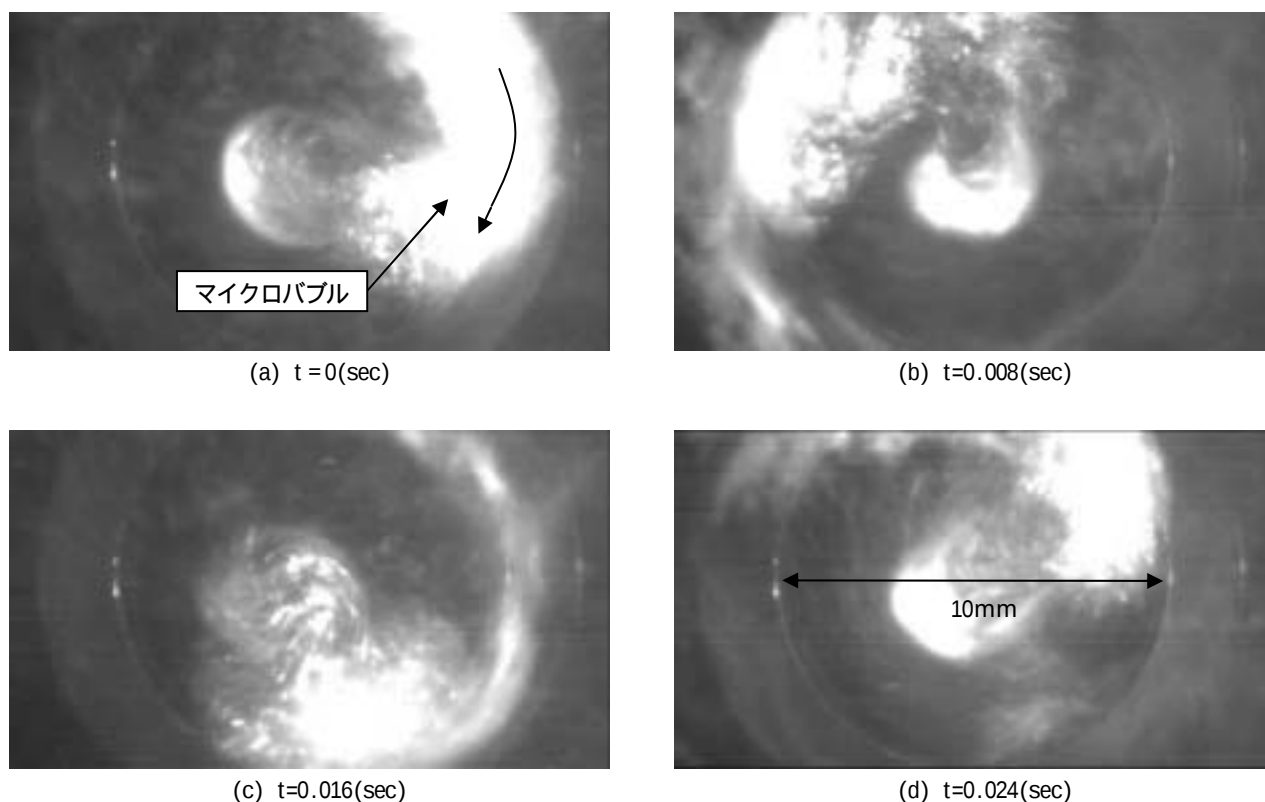


図-7 装置出口付近で発生したマイクロバブル

静水状態を確認し、計測水槽内を上昇するマイクロバブルを逐次追跡しながら撮影した。撮影中においては、マイクロスコープレンズを3軸移動式の台に接続することによって、上昇過程にあるマイクロバブルにピントを常に適切に合わせる作業を行い、可能な限り鮮明な可視化画像が得られるようにした。

また、1つの気泡を連続的に追跡し、それを撮影し続けた。そして、撮影した映像を画像処理し、静止画像として保存した。

図-5に、計測水槽部を示すが、水槽中央部の手前の壁面には強化ガラス板が使用された。また、反対側の壁面には、最小単位が $10\mu\text{m}$ のメモリが入ったマイクロスール板が埋め込まれた。

図-6に、本計測システムによって撮影された気泡の一例を示す。この画像は、シルエット撮影によるものであることからマイクロバブルは黒い部分として撮影されている。気泡径の直径の計測においては、上昇方向ではなく、それと直角方向の径を読み取った。

(3)高速度カメラ

マイクロバブルは、その装置内で気液二相流体の高速旋回によって発生することから、その構造を高速度カメラで撮影した。また、透明な装置を製作し、マイクロバブルが発生する様子を撮影し、その発生機構を考察した。撮影には、高速度カメラ(フォトン社製FASTCAM-PCI)を用い、ストロボにはハロゲンライトHVC-SLを使用した。

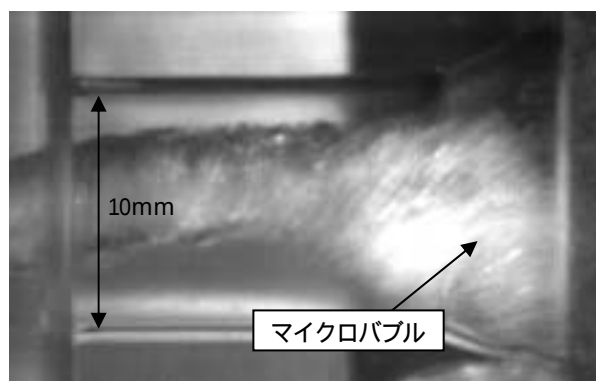


図-8 装置出口付近の側面視

4. 実験結果

(1) 発生機構

図-7(a)～(d)に、高速度カメラで縦断面撮影した水道水におけるマイクロバブルの発生状況を示す。撮影は、撮影速度1/500fps、シャッタースピード1/3000secとした。(a)を $t=0(\text{sec})$ とし、0.008, 0.016, 0.024(sec)後の画像を順に(b)～(d)に示す。これより、発生装置内で旋回している回転渦の様子がはっきりと捉えられている。装置中央のやや薄い部分は旋回している気体空洞部であり、ここからマイクロバブルが発生して濃い白色部分として写されている。この部分は、装置出口付近で、さ

らに、大きく旋回している．また、この時撮影された画像を解析した結果、秒速約410回転という超高速回転により、マイクロバブルが発生している．

図-8に、撮影速度1/500fps、シャッタースピード1/5000secにおけるマイクロバブル発生口付近の横断面撮影画像を示す．これより、出口中央部付近で、回転空洞部が白く写し出されているのが明らかである．また、この空洞部は出口付近に向かって徐々に拡大しながら、上下に変動し旋回している．

図-9に、マイクロバブルが発生装置出口から噴出された直後の画像を示す．装置出口内部と出口後では、その回転半径が大きく異なっている様子が明らかである．この相違によって、出口前後の旋回速度差が発生し、これによって旋回空洞部が超高速で切断され、マイクロバブルの大量発生が可能となる．

図-10に、MB発生装置出口付近の旋回速度と噴出速度の関係を示す．縦軸は、旋回速度、横軸は出口付近の平均流速である．これより、出口流速の増加に伴って、装置内の圧力が高まり、出口速度が増加していることが明らかである．出口速度が増加するにつれて、旋回速度の増加率が減少するのは損失の増大が起因している．この場合、最大流速における旋回速度は400rps程度であり、かなりの高速旋回性を示していることが注目される．なお、装置内における旋回速度が200rps以下では、マイクロバブルが発生しないことも確認された．また、この高速旋回によって、気液二相流体の界面で摩擦が発生し、それがマイクロバブルの基本特性に影響を与えることが推測される．

図-11に、マイクロバブルの発生機構についての概念を示す．図-7～図-9で示したように、稼働中のマイクロバブル発生装置内部では、装置中心部に、回転気体空洞部が形成される．回転気体空洞部は、気液二相流体の超高速旋回により、装置内で液体と気体の遠心分離が実現することで形成される．この空洞部を圧力で竜巻状に細くして、より高速で旋回する回転せん断流を発生させる．この気体空洞部は、出口付近前後における旋回速度差によって切断・粉碎され、その結果として、図中に示されたマイクロバブル発生点において、流体力学的に安定してマイクロバブルの大量発生が可能となる．

(2) マイクロバブルの収縮特性

図-12に、マイクロバブルの収縮概念を示す．一番上の目盛は、気泡径の大きさを示している．この図のように、水中で上昇しながら拡大する気泡と、逆に、上昇しながら収縮する気泡の2種類が存在している．マイクロバブルは、後者に分類され、従来のミリサイズ以上の気泡とは異なり、上昇しながら気泡径を収縮させ、マイクロナノバブルになる．この運動の発端は、マイクロバブルが発生する時に、装置内で負圧が形成されることから、発生後のマイクロバブル内の圧力が周囲よりも低くなる

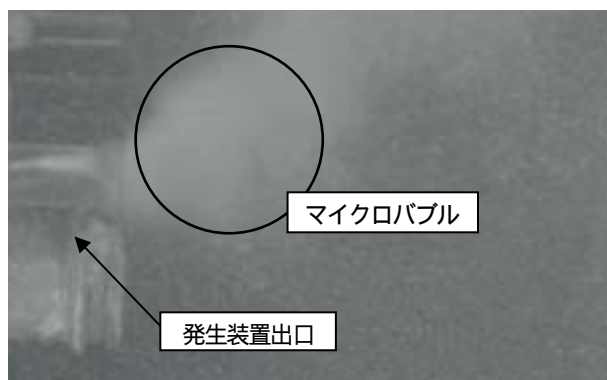


図-9 装置出口付近横断面図

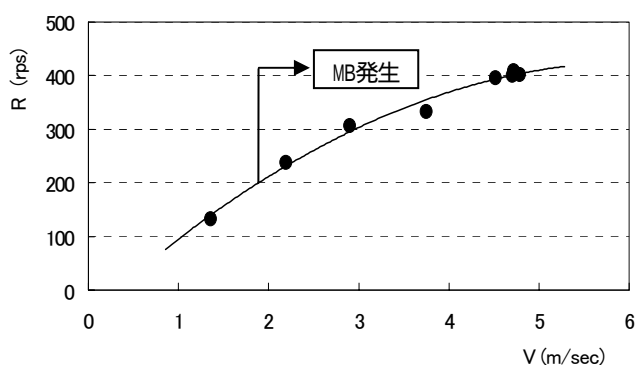


図-10 MB発生装置出口付近の旋回速度と噴出速度

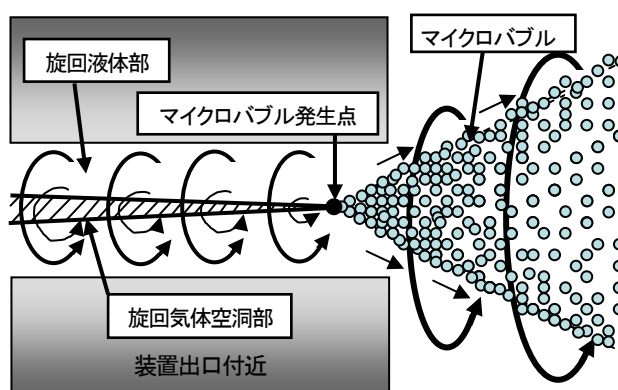


図-11 マイクロバブルの発生機構

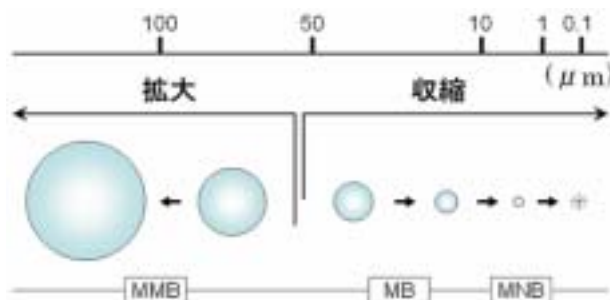


図-12 マイクロバブルの収縮概念

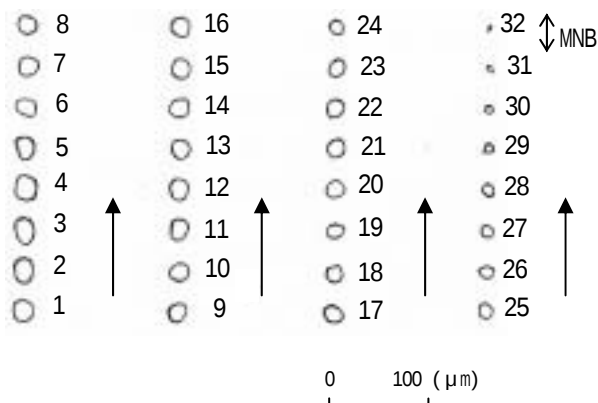


図-13 収縮過程のトレース

ことに起因している。

図-13に、1つの気泡を追跡した場合の収縮過程のトレースを示す。気泡は1から32へと収縮していった。これより、マイクロバブルが上昇しながらマイクロナノバブルへと収縮していく様子が明らかである。また、収縮過程で、気泡形状は刻々と変化しており、しかも、それは非球形状である。この形状変化は、マイクロナノバブルに移行するに従って、著しくなっている。

図-14に、経過時間に伴う気泡径の変化を示す。図-13に記した番号と同じ番号の気泡同士が対応している。この場合、20 μ mの気泡径を有したマイクロバブルが徐々にその径を収縮させながら、約9秒でマイクロナノバブルに変化している。その時、気泡径が7 μ m前後において、その収縮速度に相異が示されており、急激な収縮が始まっている。この収縮率の相違は、マイクロバブルとマイクロナノバブルの区別の必要性を示唆している。

図-15に、経過時間に伴う上昇速度の変化を示す。上昇速度は、移動距離と経過時間から求めた。気泡径が収縮していくにつれ、上昇速度も徐々に遅くなっていき、上述の気泡径が急激な収縮を始めた付近から、上昇速度も急激に低下している。

図-16に、経過時間に伴う気泡径と上昇速度の変化を示す。これは、一つの気泡を追跡したもので、図の縦軸に上昇速度、横軸に気泡径、点線はストークスの法則を示している。気泡径が7 μ mから数十 μ mの範囲において、そのほとんどが、ストークスの法則に従っていることが明らかである。

また図-17には、単一気泡が収縮し、最終的には消滅する気泡を追跡し、その上昇速度を測定した結果が示されている。この場合、気泡case a～dの4種類であるが、いずれも、ストークスの法則に、ほぼ従っているといえる。

図-18に、マイクロバブルの限界気泡径を示す。限界気泡径とは、マイクロバブルの収縮運動を開始する限界値のことである。縦軸に気泡径、横軸に気泡の上昇した距離をその経過時間で割ったものを示している。図中のデータは、ランダムにいくつか選んだ気泡から得た。これより、収縮を開始するマイクロバブルの限界気泡径が

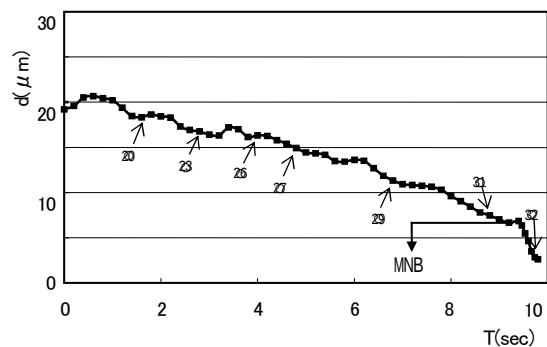


図-14 経過時間に伴う気泡径の変化

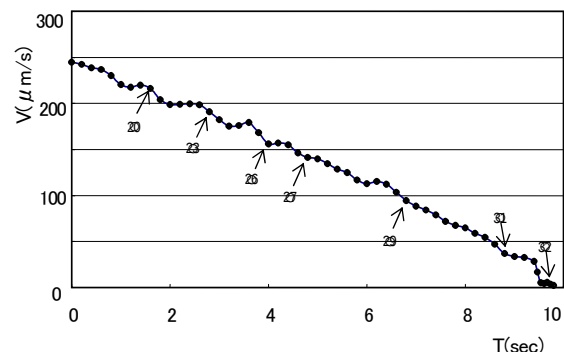


図-15 経過時間に伴う上昇速度の変化

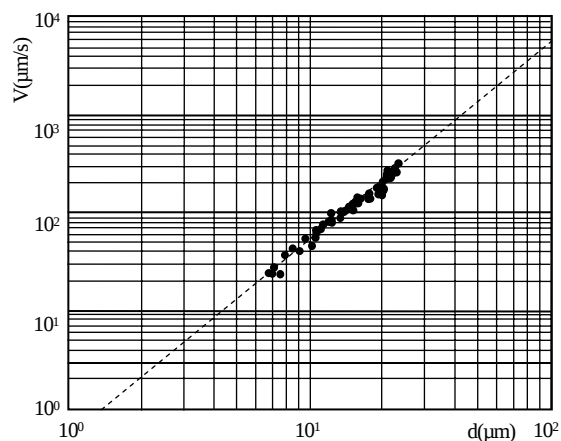


図-16 気泡径と上昇速度

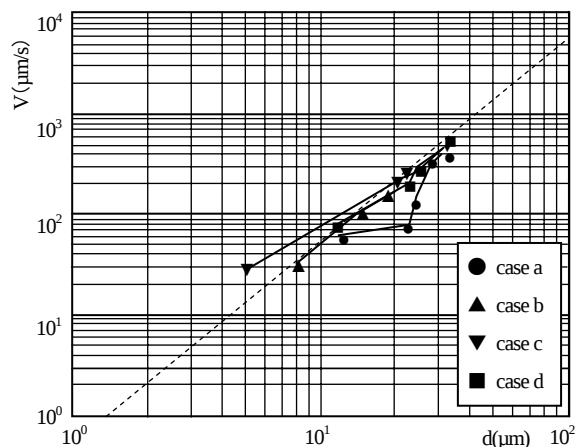


図-17 気泡径と上昇速度（4パターン）

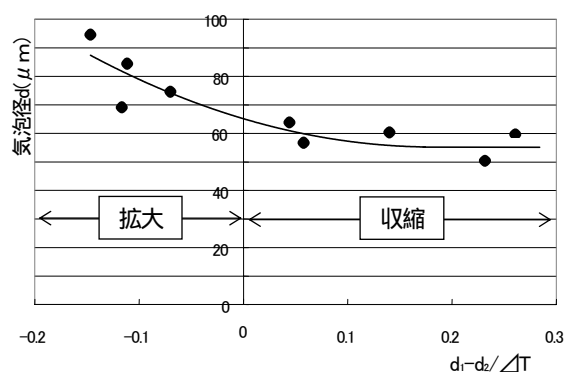


図-18 限界気泡径

約65 μm であることが明らかとなった。また、この限界気泡径の値は、本研究の一連の実験の中で得られたものから求めたものである。水温や水質を変えることで、限界気泡径にも変化があることも明らかになりつつあることから、本気泡径は、およその目安の値として考えられる。

図-19に、マイクロバブルの接写画像の一例を示す。これより、気泡は球形ではなく、右下方に尻尾のような部分があり、そこから気体が噴出しているようにみえる。より収縮すると、単に一方からの噴出のみでない場合も存在していた。この気体の噴出は、常に一定ではなくて、収縮の過程のそれぞれにおいて特徴的なパターンがあるようであり、それらが気泡の溶解現象とも関係していると思われる。

5. 結論

マイクロバブルおよびマイクロナノバブルの可視化装置を用いて、静水中で上昇する気泡の連続撮影を行い、その収縮過程における詳しい挙動を考察した。また、マイクロバブル発生装置の高速度カメラ撮影を行い、その旋回速度とマイクロバブルの発生機構を考察した。

以下に、本論の主要な結論を示す。

- (1) M2型発生装置によるマイクロバブルの発生状況を高速度カメラで撮影した結果、秒速410回転という超高速回転でマイクロバブルが発生していることが確認された。
- (2) マイクロバブルの上昇速度は、気泡径が7 μm から数十 μm の範囲においてストークスの法則に従う。
- (3) マイクロバブルのほとんどは、発生後にマイクロナノバブルへと収縮していく。また、7 μm 以下のマイクロ

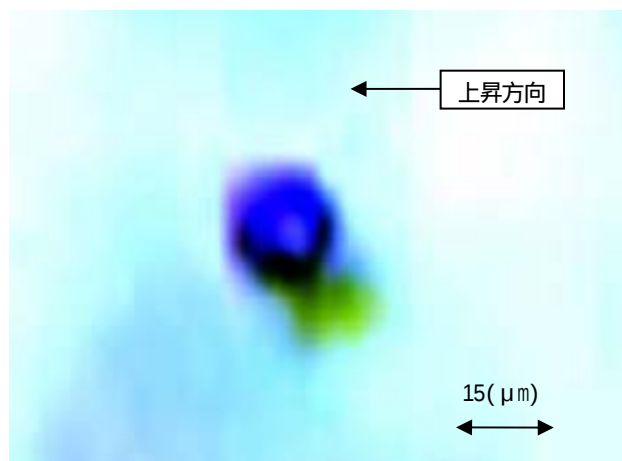


図-19 マイクロバブルの接写画像

ナノバブルでは収縮速度がマイクロバブルに比べて格段に速い。

- (4) 気泡が収縮を開始する限界気泡径は約65 μm である。
- (5) マイクロバブルからマイクロナノバブルへと収縮する過程では、気泡は非球形状で常に時間的に変動しながら形状を変化させる。また、その過程で一部の気体を噴出させ、溶解速度を速める。

謝辞：最後に本研究を進めるに当たり、御協力頂いた徳山工業高等専門学校研究生の中山孝志氏に心から感謝の意を表す。また、本研究は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（A））の支援を受けて遂行されたことを、ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 大成博文：日本機械学会誌，マイクロバブル，Vol.108, pp.694-695, 2005.
- 2) 大成博文：マイクロ・ナノバブル技術による水環境蘇生に関する研究，文部科学省科学研究費補助金研究成果報告書（基盤研究（B）（2）），(2005)。
- 3) シャープ株式会社ホームページ：世界初 半導体工場排水の無希釈窒素処理技術を開発，<http://www.sharp.co.jp/corporate/news/050615-a.html>.
- 4) 大成博文：マイクロバブルの応用，泡のエンジニアリング，423-428, 475-482, 2005.
- 5) 大成博文：米国特許，Swirling fine-bubble generator, US6382601, May7, 2002.

（2005.9.30受付）