マイクロバブルの収縮パターンと電位特性

SHRINKING PATTERN AND ELECTRIC POTENTIAL OF MICRO BUBBLES

大成博文¹・徳重研介²・都並結依²・大成博音³・山本孝子⁴ Hirofumi OHNARI, Kensuke TOKUSHIGE, Yui TUNAMI, Hiroto OHNARI and Takako YAMAMOTO

¹正会員 工学博士 徳山高専教授 土木建築工学科(〒745-8585 山口県周南市学園台)
²学生会員 徳山高専専攻科 環境建設専攻(〒745-8585 山口県周南市学園台)
³学生会員 博士課程 山口大医院(〒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 山口県周南市学園台)

The shrinking pattern from micro bubble to micro-nano bubble was investigated by a flow visualization system using micro-scope photography. A measuring system of an electric potential of micro bubbles was developed and the value of the electric potential of micro bubbles were measured by using the system. The shrinking motion of micro bubbles is 3 kinematical patterns which associate with jet motion from inside the bubbles. The magnitude of the electric potential value of the micro bubbles is $-40 \sim -100$ mw from 20 to 30μ m in diameter. The potential values of the bubbles which diameters are larger 40μ m decrease rapidly.

Key Words : Micro bubble, micro-nano bubble, bubble shrinkage, shrinking pattern, electric potential

1.緒論

最近,日本社会の多くの分野においてマイクロバブ ル技術の大規模な浸透が始まっている.その理由は, マイクロバブルの優れた「革新的機能性」にあり,こ れまで従来技術に用いられてきたミリバブルとは本質 的に異なる固有の物理化学的性質と生物的作用を生み 出す,いわゆる気泡の「サイズ効果」が注目されてい る^{1),2)}.

しかし,そのサイズ効果の詳細については不明な点 が少なくなく,前報³⁾では,マイクロバブルの発生機構 と収縮特性について考察し,マイクロバブルが気液二 相流体を毎秒数百回転という超高速旋回によって発生 することを明らかにした.また,発生後のマイクロバ ブルのほとんどが収縮して「マイクロナノバブル」へ と変化し,その過程で気泡内の気体が噴出することを 示した.

そこで本研究では,その収縮過程をより詳しく解明 するために,マイクロバブルの収縮パターンと気体噴 出現象に着目し,その考察を行うとともに,新たにマ



図-1 マイクロバブルの発生(水道水)



図-2 M2 - L,LM,MS型マイクロバブル発生装置

イクロバブルの電位計測システムを開発し,その計測 結果について考察する.

2.マイクロバブルの定義と発生方法

マイクロバブルとは、「その発生時において10~数 +µmの気泡径を有する気泡」のことであり、また 「10µm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」と定義する¹⁾.マイクロバブルは、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となる.また、 水深が数十cmにおいてマイクロバブルが収縮を開始す る限界気泡径は約65µmであることが報告されている³⁾.

図-1に,水道水中でマイクロバブルを発生させた様 子を示す.光を当てると,微細なマイクロバブルが白 く浮かび上がって見える.この場合,マイクロバブル の発生を停止させた直後の写真であり,ほとんど均一 サイズのマイクロバブルがゆっくりと上昇しながら消 滅して行く様子が示されている.とくに,写真下部の 黒い部分は,マイクロバブルが上昇しながら,消滅す ることで外部が透けて見えた部分として注目される. また,マイクロバブル同士は合体や合一をせず,かつ 狭い空間に大量に存在することができることから,こ れを「非合一凝集現象」と呼んでいる⁴.

この発生は,装置内で気液二相流体の超高速旋回速 度差を利用することを基本としている.装置内へは液 体をポンプで圧送し,装置内の負圧部分から気体を自 吸する.本実験にはナノプラネット研究所社製のM2-L, LM,MS型(流量20,15,7ℓ/min,空気自吸量1ℓ/min)を 使用した(図-2).マイクロバブルの発生方法につい ては,前報³⁾で詳しく説明しているので,ここでは省略 する.

3.マイクロバブルの可視化と電位計測の方法

図-3に,マイクロバブルの可視化および電位計測シ ステムを示す.また,図-4に電位計測用マイクロチャ ンネルを示す.

まず,水槽内で大量にマイクロバブルを発生させ, これを側面がすべて透明なマイクロチャネル内に導き, その静水流体中をゆるやかに上昇させる.

マイクロスコープによる撮影方向と反対の方向から 冷熱光を照射させ,気泡のシルエット撮影を行った. 照明には,液晶プロジェクターを用い,計測水槽から 2.7m離れた地点から照射し,また,ビデオ信号と同期 させた照明(SUGAWARA社製ナノパルスライト)も併用 することで,照明による温度上昇に伴う対流の発生を 防止するとともに,鮮明画像の撮影を可能にした.



図-3 マイクロバブルの可視化計測システム



図-4 電位計測用マイクロチャンネル



図-5 可視化されたマイクロバブル(直径は30µm程度)

次に,マイクロチャンネルの両端に銀電極板を挿入し,その電位計測を行った.

これらのマイクロバブルの可視化および電位計測法 の特徴は,マイクロチャンネル内で上昇する単一のマ イクロバブルを連続的に追尾しながら,その挙動や電 位を計測することを可能にしたことにある.

図-5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.マイクロバブルを画像解析した解像度は約0.1µmであった.

4.結果と考察

(1) 収縮パターン

前報³⁾において,マイクロバブルが自ら収縮してマ イクロナノバブルへと変化することを示すとともに収 縮する気泡径と上昇速度を示した.そこで,それらの 時間的減少における変化率を図-6に示す.この場合, その直径が20µm程度の気泡を計測しているが,気泡径 とその上昇速度の変化は,約9秒間一定値を示し,その 後急激に増大している.これは,気泡が急激に収縮す るとともに,極端な上昇速度の低下をもたらしている ことを意味しており,これらの相違がマイクロバブル とマイクロナノバブルの区別の必要性を示唆している.

そこで,時間的に連続追尾されたマイクロバブルの 上昇挙動を詳しく観察した.その結果,マイクロバブ ルは収縮を開始すると,しばらくして,その内部から 気体を噴出させることが明らかとなった.これは,収 縮に伴う過程において,周囲水からの加圧を受け,気 泡内の圧力上昇に起因した現象と考えられる.

図-7(a)~(i) に,マイクロバブルの収縮過程におけ る代表的なパターンを3つに分けて示す.左側に可視化



図-6 経過時間に伴う気泡径と上昇速度の変化

計測システムで撮影した動画を静止画にしたもの,真 中にそれらの静止画に画像処理を行い,特徴を分かり やすくしたもの,右側にそれらのスケッチを示す.

最初のパターン(a)~(c)では,気泡は約20µmであり, わずかに気泡の右下下部に気泡を取り囲む膜状のもの が形成されているが,これではマイクロバブルに有機 物系の不純物が付着した可能性は低いと考えられる. 第2のパターン(d)~(f)では,気泡は収縮し,気泡の右 下方向に気体の噴出を開始した様子が示されるが,こ の噴出範囲は比較的広い.第3のパターン(g)~(i)は,



収縮の最終段階に入り,気体の噴出が細長い筋状で出 ている様子が示されている.また,気泡の形状にも変 化が現れ,半球状のものもあった.

しかし,これらは,気泡が収縮していく画像を時間 的に追跡して観察した結果を踏まえて考察しているが, マイクロバブルが収縮する過程で気体を噴出している かどうかに関する決定的な証拠を踏まえたものではな いと考えられた.

そこで,この噴出現象をより詳しく確かめるために, 多数の気泡の収縮過程を連続的により詳しく観察した. その結果,図-8(a)~(c)に示す3つの収縮運動パター ンが存在することを見出した.これらの画像は,収縮 途中の気泡の静止画像を重ね合わせて,実際の収縮プ ロセスを分かりやすく示したものである.まずパター ン1の(a)では,マイクロバブルは上昇しながら収縮し, そのまま消滅している. この場合,収縮に伴う加圧効果が比較的弱く,内部 からの気体噴出もゆるやかで,その消滅に至る最終過 程においても水平方向には,ほとんど揺動していない. また,このパターンの発生頻度が最も高いことも観察 された.

パターン2の(b)では,上昇しながら最終段階で,水 平方向に激しく揺動しながら,それを2,3回繰り返し て最後に消滅している.

またパターン3の(c)では,マイクロバブルがやや斜 めに(実際は正面から見て上側に)傾きながら上昇し, その最終過程において円を描くように回転し,その後 に消滅していることが示されている.

これらのパターン2,3の事例は、いずれも、マイク ロナノバブル発生装置がマイクロナノバブルへと変化 する過程で特徴的な変動を示していることから、この 非定常的な運動が注目される.



(a) パターン 1



(b) パターン 2



(c) パターン 3 図-8 マイクロバブルの収縮運動パターン



図-9 マイクロバブルの鉛直および水平方向速度

また,これらの3つのパターンおよび前述のマイクロ バブルの可視化画像などを踏まえると,マイクロバブ ルおよびマイクロナノバブル内から気泡が噴出してい ることが明らかであるといえる.さらに,この非定常 運動の原因となる一連の噴出現象は,気泡内の圧力変 動や温度変動,さらには期待の溶解現象とも重要な関 係を有していることが推察される.

図-9に、収縮過程における上昇速度の変化を示す.縦 軸に上昇速度、横軸に経過時間をとるが、経過時間にお いては、パターン別の違いを分かりやすくするために、 気泡が消滅する点を0秒とし、時間的に遡って示してい る.また、上昇速度は、気泡の上昇方向と水平方向の2つ の成分に分けて算出した.ここでいう水平方向とは、上 昇方向に対して垂直な、水平方向における動きのことを 指す.

まず,上昇方向の変化を見てみると,パターン2の方が, パターン1よりも激しく変動している様子が明らかで ある.また,鉛直方向についても同じことが言える.

パターン2は、上昇しながら水平方向にゆらゆら動き ながら収縮していくパターンである.このゆらゆら動 くという現象は、気泡からの気体の噴出による影響と考 えられるので、パターン2は、パターン1に比べて噴出が 激しい分、上昇速度も激しく変動している.

図-10は、図-9で算出した上昇方向の上昇速度の移動 平均操作を行ったものである.これより、上昇速度の平 均的な変化がより明瞭となり、パターン2の方がパター ン1に比べて、全体的に上昇速度が速いことが明らかで ある.また、同じ気泡径の両者における上昇速度を比較 すると、パターン2のマイクロバブルの上昇速度が速く、 このことから、同じ気泡径でも、気体の噴出の違いに よって上昇速度に変化が現れることが認められた.こ れは、このサイズの気泡においてはストークスの法則 が厳密には成立しないことを示唆している.

(2) 電位特性

液体中に分散された粒子は,多くの場合に荷電を有 している.この粒子の分散状態の安定性は,この荷電



状態によって左右され,この荷電状態の指標として 「ゼータ電位」が用いられている.この値が増加すれ ば微粒子は分散,逆にゼロに近づくと凝集しやすくなる.

荷電特性は,気泡においても同様と考えられることから,そのゼータ電位を計測する装置を開発した.電 位計測システムは,図-3で示した可視化計測システム において,水槽内に銀電極を設置したものである.

まず,水槽に水道水を入れマイクロバブルを大量に 発生させ,次にそれを計測水槽に導き,マイクロス コープ(キーエンス社製,VH-5000)倍率300,400,600 倍の各倍率でマイクロバブルを撮影する.このとき, 計測水槽の両サイドに広さ20mm×200mm,厚さ0.95mm, 間隔46.2mmで銀電極を差し込み,200V,5mAの直流電 流を約0.5秒間隔で流した.電流を流すと,マイクロバ ブルは負に帯電しているので,水槽内に設置された正 極に向かって移動する.また,これらの電極への荷電 を時間的に制御する回路を設計し,一定時間間隔にお いて電位を計測できるように工夫した.

また,その荷電画像をVHX-5000に録画,画像処理し, 泳動速度を導き,単一気泡に対する気泡径ごとのゼー 夕電位をSmoluchowski式より算出した.

$$U=u/E$$
 (1)

$$= \cdot U/_{0} \cdot r$$
 (2)

ここに,U:電気移動度(m²/V·s),u:泳動速度(m/s),E: 電場(V/m), :溶媒の粘性率(kg/m·s), ₀:真空中の誘電 率, ,:水の比誘電率(s⁴·A²/kg·m³), :ゼータ電位(V)で ある.

図-11には,発生後のマイクロバブルの電位計測の一 例が示されている.この場合,液体は水道水(水温 20),気体は空気である.これは,上述のマイクロ バブル可視化チャネル内において上昇する単一のマイ クロバブルを連続的に追跡しながら,その電位を約1秒 間隔で計測した結果である.

これより,約40µmのマイクロバブルが10µmまで収縮



図-11 単一マイクロバブルの電位変化

していく過程における電位が示されており,その電位 の値がマイナス40~100mVの範囲にあることが明らか である.

次に,より大きいサイズのマイクロバブルの電位計 測例を図-12に示す.この値は,前図に示したような単 一の気泡を追跡計測した事例ではなく,瞬間的に計測 画面に現れた気泡のみを集めて,その電位の値を求め たものである.これより,気泡径が40µmよりも大きく なると急激に電位が減少し,ゼロ電位に接近している ことが明らかである.

以上の電位計測の結果を踏まえると,20~30µm前後の気泡径を有するマイクロバブルの電位と50~60µm前後の直径を有するマイクロバブルのそれとでは,約6~ 8倍の電位差が生まれていることが注目される.

今後は,マイクロバブルの電位計測例を増やして, その特徴をより詳しく検討することが重要であるが, それとともに,もうひとつの重要な注目点は,マイク ロバブルの負電位が何をもたらすかを詳しく解明する ことである.

そのモデルを図-13に示す.ここに,正電位の物質に 付着することが示されている.有機汚濁物質や動物の 皮膚表面は正電位を有することから,負電位を有する マイクロバブルが付着しやすい.また,この付着にお いては,マイクロバブルは有機物等に付着はするが, マイクロバブル同士は付着しないことから,その有機 物等の表面においては液体と接することができること も重要な特徴といえる.

工学的な実用面の問題については,前者では,付着 浮上や洗浄問題への寄与,後者では,皮膚表面におけ る「知覚神経刺激」という重要な生物的作用が考えら れる.

以上を踏まえると,マイクロバブルの気泡径が小さ くなることによって,その高電位化が実現されており, それは,上述のマイクロバブルの収縮運動とも重要な 関係を有していることが推察される.また,その高電 位化は多くの実用的課題と結びつく課題といえる.



図-12 比較的大きいマイクロバブルの電位



図-13 マイクロバブルの付着概念

マイクロバブルがマイクロナノバブルへと収縮する 過程を詳しく観察し,マイクロバブルの収縮には3つの 収縮パターンがあり,その収縮とパターン形成には, マイクロバブルからの気泡噴出現象が関係しているこ とを明らかにした.

また,マイクロバブルの電位計測装置を開発し,その電位計測を行った結果,マイクロバブルの直径が20~30µmでは,それが-40~-100mvであるが,そのサイズよりも大きくなると急激に電位が減少することが明らかとなった.

これらについては,マイクロバブルの発生機構やマ イクロバブル水の化学的性質との密接な関連性がある と思われることから,今後,その詳細な解明が必要で ある.

参考文献

- 1) 大成博文他:混相流におけるマイクロバブル技術の役割, 混相流, Vol.16,2, 130-137, 2002.
- 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) 大成博文他:マイクロバブルの発生技術と収縮特性,水工 学論文集,第50巻,1345-1350,2006.
- 4) 大成博文:マイクロ・ナノバブルが切り拓く新技術の扉, 第1回マイクロ・ナノバブル技術シンポジウム講演論文集, 1,39-48,2006.

(2006.9.30受付)

5.結論