

ナノバブルの生成と気泡径の制御

久木崎 雅人*¹・中島 忠夫*²

Nano-bubbles generation and Bubble Size Control

Masato KUKIZAKI, Tadao NAKASHIMA

ナノサイズのSPG膜から、ナノスケールの気泡径を有する単分散状の微細気泡（ナノバブル）の生成法を見出した。また、膜の細孔径を変えることにより、生成した気泡の気泡径を制御できることを明らかにした。管状の多孔質ガラス膜の内側に水相を循環し、膜の外側から膜の細孔を介して空気を圧入分散したとき、バブルポイント圧を超える一定の圧力域において単分散状の気泡が生成した。この条件下で、平均細孔径84nmの膜から、平均気泡径720nmのナノバブルが生成した。また、使用した膜の平均細孔径と平均気泡径の間には、良好な比例関係が存在した。一方、膜の表面を疎水化した場合は、バブルポイント圧は観測されず、多分散状の気泡が生成した。

キーワード：ナノバブル、単分散、気泡径制御、多孔質ガラス膜、バブルポイント圧

1 はじめに

気泡を微細化することにより気液界面積が増大し、気泡の滞留時間が増長するため、気液溶解過程が促進されるばかりでなく、粒子などの界面に気泡が付着する効果も向上すると考えられる。このため、微細気泡は、気液反応操作、バイオ生産プロセス、排ガス・排水処理などの分野への応用が期待されている。一方、気泡の特性は、気泡径や分散状態に大きく依存するため、気泡径を制御し、均一な気泡を生成することができれば、用途に応じて、気液溶解速度や気泡の上昇速度の調整が容易になると考えられる。また、気泡径を制御する技術は、気泡の基礎的な特性を解明する上でも有用である。

微細気泡を生成する方法としては、超音波などを用いたキャビテーションを利用する方法¹⁾、流体の剪断力を利用した方法²⁾、及び加圧下で気体を液体に溶解させた後、減圧して過飽和状態の溶解気体から気泡を生成する加圧浮上法などが知られている。また、液相中に多孔板を介して気体を

送入し、気泡を生成する方法については、これまでいくつかの報告があるが、孔径が数十ミクロンから数ミリメートルの範囲にある多孔板を使用しているため、気泡径がサブミリメートルからミリメートルの範囲にある気泡を研究の対象としており、微細気泡に関する研究は見あたらない。これらの従来の方法では、ナノバブルを大量に生成することが困難であるばかりでなく、気泡径の制御方法も確立されていない。

本報では、数十ナノメートルから数十ミクロンの広い範囲で細孔径を均一に制御できるSPG膜を気液分散素子に応用して、気泡径の均一なナノバブルの生成方法を調べるとともに、微細気泡の気泡径制御について検討した。実験では、安定剤を加えた純水に、SPG膜を介して、空気を圧入分散し、単分散状のナノバブルが生成する条件を検討した。次に、SPG膜の細孔径を変えて気泡の生成実験を行い、使用した膜の細孔径と気泡径の関係を調べた。その結果、水相に安定剤を加えたときに、単分散状のナノバブルが生成することを見出した。また、SPG膜の細孔径を変えることにより微細気泡の気泡径を制御できることが明らかになった。

*1 材料開発部

*2 現 宮崎県産業支援財団

2 実験方法

2-1 供試SPG膜

SPG膜の形状は外径が5mmで、厚さが0.5mmの管状であり、膜の有効長さは、気泡生成条件に応じて50~200mmの範囲に調整した。膜の平均細孔径は、 $\bar{D}_m=0.084\sim6.23\ \mu m$ の範囲にある5種類を使用した。

2-2 気泡の生成実験とその評価

気泡生成の概念図を図1に、実験装置を図2に示す。高純度の合成空気（純空気 G1、ジャパンフイニプロダクト株）を分散気相に使用した。

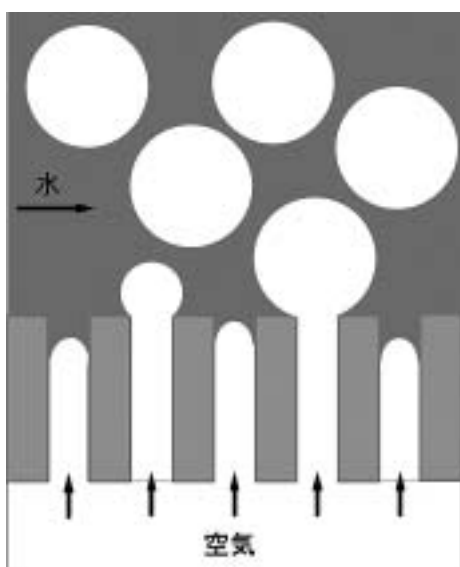


図1 気泡生成の概念図

連続水相は、純水に、安定剤を所定量、溶解した水溶液を使用した。SPG膜を介して水相側に圧入分散して気泡を生成させた後、レーザー回折/散乱式粒度分布計（SALD 2100、島津製作所株）の光学セルに直接導入し、気泡径分布を求めた。気泡径分布の計算には、空気の屈折率1.0を用い、気泡の平均直径 \bar{D}_b はメディアン径で表した。気泡の単分散性を示す粒径分散係数 δ は、下記の式により求めた。

$$\delta = ({}^{90}D_b - {}^{10}D_b) / \bar{D}_b \quad (1)$$

ここで、 ${}^{90}D_b$ と ${}^{10}D_b$ は、累積気泡径分布曲線において積算量が90vol%と10vol%を占めるときのそれぞれの気泡径である。

3 結果及び考察

3-1 ナノバブル生成と膜の表面及び水相中の安定剤の関係

細孔径 $\bar{D}_m=84\text{nm}$ のSPG膜を介して、水相に空気を圧入したとき、透過圧力が2.87MPaにおいてバブルポイント圧 P_b が観測された。これを超えると気泡が生成し、以後、透過圧力の増加に伴って気泡の生成量が漸次増加した。水相の流速が $4.08\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ で、空気の透過圧力が3.15MPaのときに生成した気泡の光学顕微鏡写真を図3に、気泡径分布を図4(a)に示す。この条件では、SPG膜の均一な細孔を反映して、気泡径 $D_b=720\text{nm}$ の単

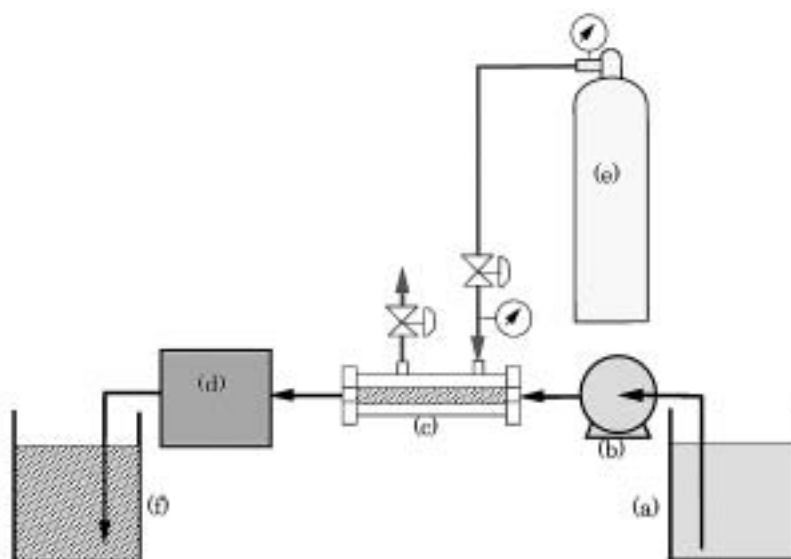


図2 気泡生成の実験装置

(a)原液タンク、(b)ポンプ、(c)膜モジュール
(d)粒度分布計、(e)ガスボンベ、(f)気泡生成タンク

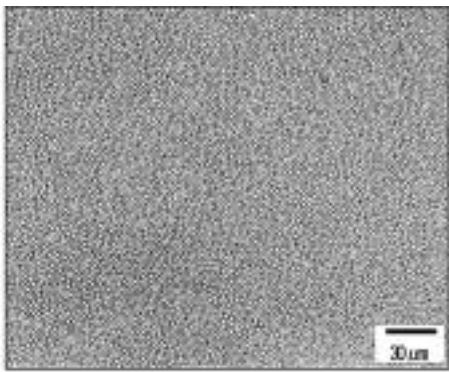


図3 ナノバブルの光学顕微鏡写真

分散性に優れたナノバブルが生成した。一方、膜の表面を疎水化したときは、バブルポイント圧は観測されず、図4 (b)に示すような多分散状の気泡が生成した。また、空気を純水に圧入したとき、 $P_b=3.33\text{MPa}$ のバブルポイント圧が観測され、これを超えると図4 (c)に示すように粗大な気泡が生成した。これらの結果から、ナノバブルを生成するためには、膜が水相に濡れやすく、水相に適量の安定剤を添加することが不可欠である。

3-2 膜の細孔径とバブルポイント圧及び気泡径の関係

単分散状の気泡が生成する条件下で、細孔径 \bar{D}_m の異なる5種類のSPG膜を用いて気泡を生成した。バブルポイント圧 P_b と使用した膜の細孔径

\bar{D}_m の関係を図5に示す。図から膜の細孔径が小さくなるほど臨界圧力は大きく上昇した。

次に、膜の細孔径 \bar{D}_m と気泡径 \bar{D}_b の関係を調べた結果を図6に示す。図から、 \bar{D}_m と \bar{D}_b の間には、比例関係が存在し、次の実験式で表されることが明らかになった。

$$\bar{D}_b = 8.8\bar{D}_m \quad (2)$$

3-3 空気の透過圧力と気泡径の関係

空気の透過圧力 ΔP と生成した気泡径 D_b の関係を調べた結果を図7に示す。バブルポイント圧を超える一定の圧力域では単分散状の気泡が生成した。一方、透過圧力が上昇すると粗大な気泡が生成し、多分散化した。

4 まとめ

管状のSPG膜を介して、気液十字流により空気を水に圧入分散し、単分散状のナノバブルが生成できる条件を明らかにした。また、使用した膜の細孔径と気泡径の間には比例関係が存在し、膜の細孔径を変えることにより気泡径の制御を可能にした。

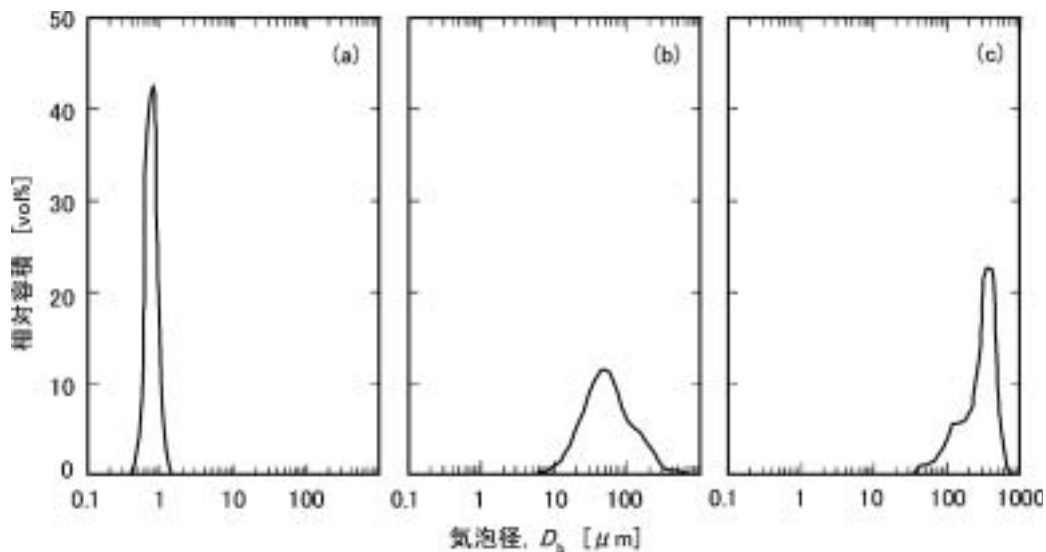


図4 SPG膜から生成した微細気泡の気泡径分布

- (a) 水相に安定剤を加え、親水膜を用いたとき
- (b) 水相に安定剤を加え、疎水化膜を用いたとき
- (c) 水相に純水を使用し、親水膜を用いたとき

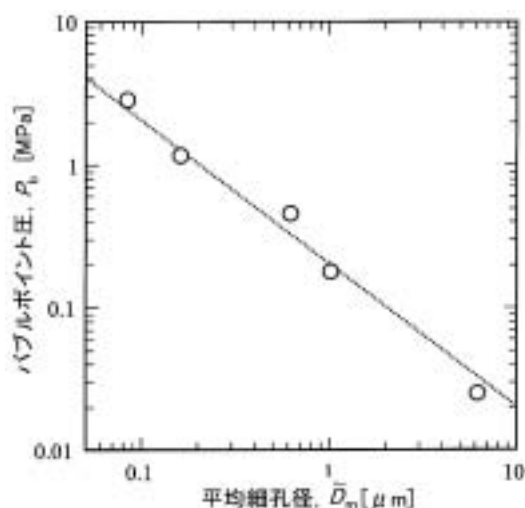


図5 バブルポイント圧と膜の平均細孔径の関係

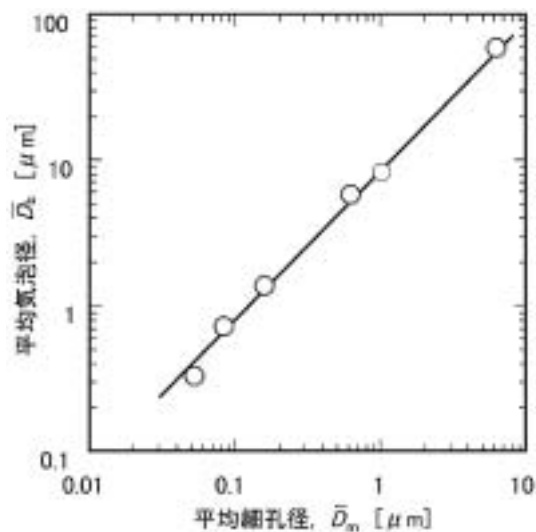


図6 SPG膜の平均細孔径と生成した気泡の平均気泡径の関係

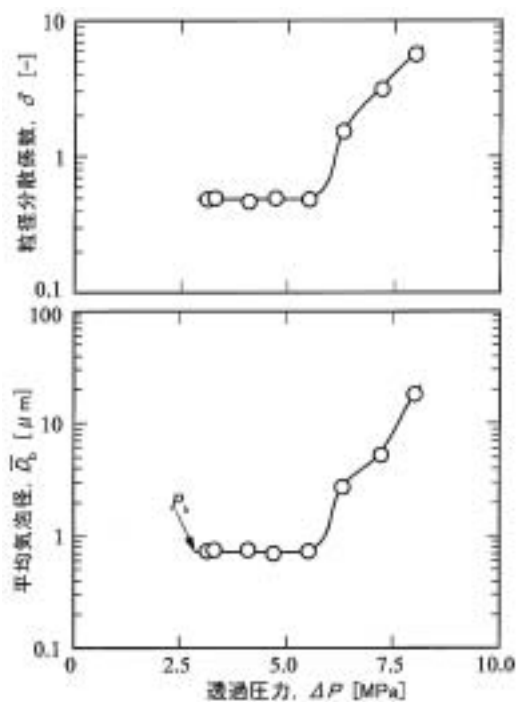


図7 透過圧力と生成した気泡径および粒径分散係数の関係

5 参考文献

- 1) Terakado, S., F. Takemura, H. Maki and A. Yabe; "Fundamental Study on the Existence and the Generation Method of Nano-bubbles," Preprints of the 39th Heat Transfer Symposium of Japan, pp.379-380, Sapporo, Japan (2002)
- 2) Onari, H., T. Saga, K. Watanabe, K. Maeda and K. Matsuo; "High Functional Characteristic of Micro-bubbles and Water Purification," *Resource Treatment Tech.*, 46, 238-244 (1999)