

ナノバブルの生成に及ぼすガスの透過圧力 および水相の流速の影響

久木崎 雅人*¹, 鳥越 清*¹

Effects of transmembrane pressure and water-phase velocity on nanobubble formation

Masato KUKIZAKI and Kiyoshi TORIGOE

ナノサイズの均一な細孔を有する SPG 膜を用いた単分散ナノバブル生成に及ぼすガスの透過圧力および水相の流速の影響を調べた。バブルポイント圧を超える一定の圧力域で単分散ナノバブルが生成した。これを超える圧力域ではガスが細孔から連続的に流出する。その結果、多分散状の粗大な気泡が生成した。一方、生成したナノバブルの気泡径は、乱流域において水相の流速の影響を受けなかった。単分散ナノバブルが生成する水相の流速域は、水相流れに基づく膜面でのせん断力が 1.4~47.2 Pa の範囲に相当した。このことから、膜面で形成されたナノバブルは極めて小さいせん断力で細孔から脱離することが明らかになった。

キーワード：ナノバブル, シラス多孔質ガラス (SPG) 膜, 単分散, 透過圧力, 水相流速

1 はじめに

気泡径が 1 μm 以下の微細気泡 (ナノバブル) は、①単位体積あたりの気液界面積の増大、②ブラウン運動の効果による液相中での気泡の滞留時間の増長、③ラプラス圧の効果に基づく気泡内のガス加圧効果が期待される。これらを利用してガス溶解や泡沫分離プロセスなどへの応用、例えば、晶析反応などの気液反応プロセス、微生物培養や細胞培養などのバイオ生産プロセスや有価物回収プロセスなどが検討されている。

ナノバブルを生成する方法としては、超音波を液体に照射してキャビテーションを発生させる方法¹⁾が報告されている。しかしながら、この方法では均一な気泡径のナノバブルを生成することはできず、ナノバブルのサイズを制御することも不可能である。

工業技術センターでは、ナノサイズの均一な細孔を有するシラス多孔質ガラス (SPG) 膜から、特定の条件下で単分散ナノバブルが生成できることを明らかにした²⁾。本研究では、単分散ナノバブ

ルを生成するための最も重要な操作パラメータであるガスの透過圧力および水相の流速の影響を検討した。

2 実験方法

2-1 供試 SPG 膜

SPG 膜の形状は外径 5 mm, 厚さ 0.3 mm, 長さ 100 mm の管状で、膜の平均細孔径は 55 nm のものを使用した。膜の気孔率は 0.56 であった。

2-2 気泡の生成実験とその評価

気泡生成および気泡径分布測定の実験装置を図 1 に示す。高純度の合成空気 (純空気 G1, ジャパンファインプロダクト株) を気相に使用した。水相には、純水にアニオン性界面活性剤のドデシル硫酸ナトリウム (和光純薬株製) を 10 mM の濃度になるように添加した。気泡生成実験は、SPG 膜を介して水相側に空気を圧入分散することにより気泡を生成させた。次にレーザー回折/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。気泡径分布の算出には、空気の屈折率 1.0 を用い、気泡の平均直径 D_b は体積基準のメディアン径で表した。また、気泡の単分散性を示す粒径分

*1 材料開発部

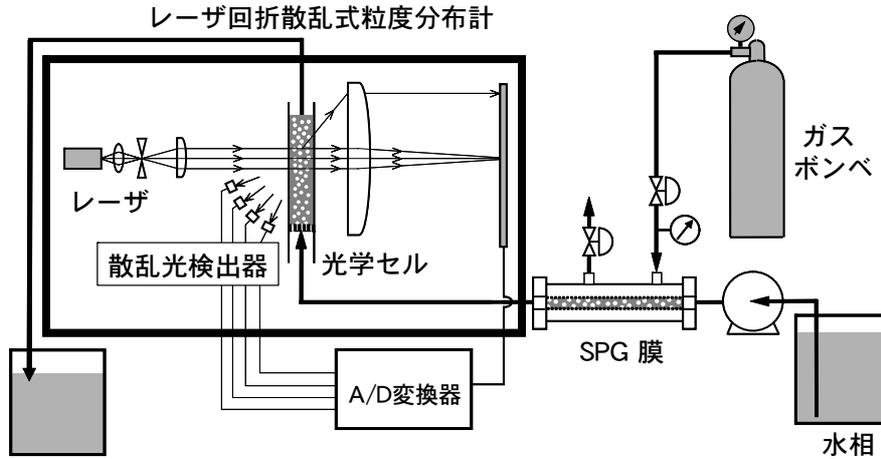


図1 ナノバブル生成と気泡径分布測定装置

散係数 δ は、下記の式により求めた。

$$\delta = ({}^{90}D_b - {}^{10}D_b) / {}^{50}D_b \quad (1)$$

ここで、 ${}^{90}D_b$ 、 ${}^{50}D_b$ 、および ${}^{10}D_b$ は、累積気泡径分布曲線において積算の気泡体積量が90%、50%、および10%を占めるときのそれぞれの気泡径である。ガス透過圧力は、2.8~8.0MPaの範囲で実験を行い、水相流速は $0.5 \sim 3.7 \text{ m s}^{-1}$ に設定した。この流速の範囲はレイノルズ数2800~21000に相当し、乱流域である。また、この流速域は、膜面における水相流れに基づくせん断力

1.4~47.2Paに相当する。

3 結果および考察

3-1 ガス透過圧力の影響

水相流速が 0.7 m s^{-1} の条件で、ガスの透過圧力、 ΔP と生成した気泡のサイズと分布に及ぼす影響を調べた。図2にその結果を示す。図3には、生成したナノバブルの気泡径分布を示す。バブルポイント圧、 P_{BP} が 2.8 MPa をこえたとき単分散ナノバブルが生成した。バブルポイント圧をこえ

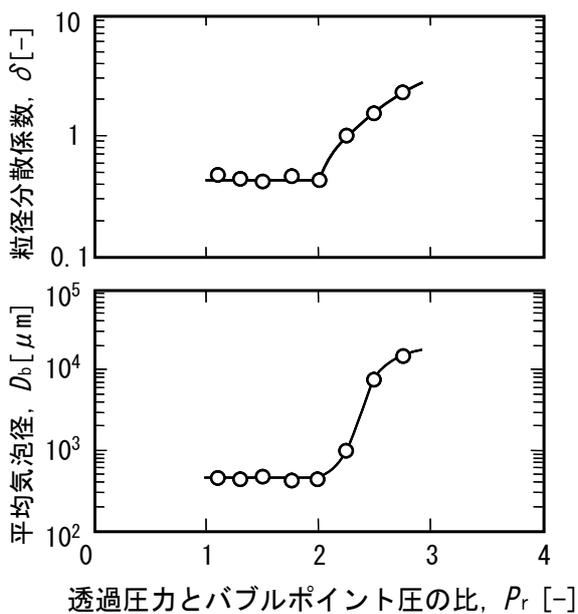


図2 ガス透過圧力の影響

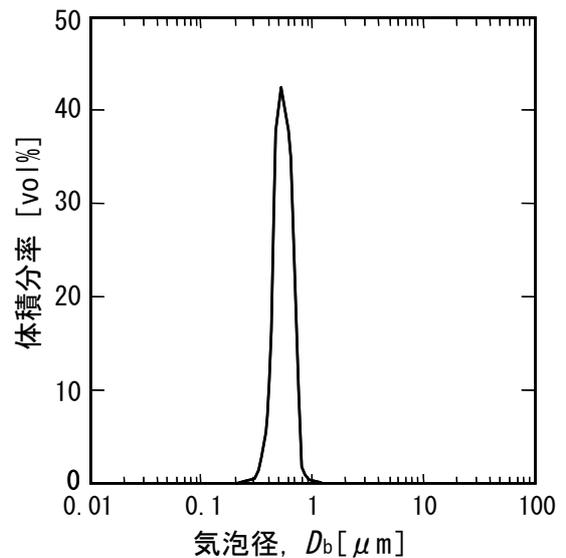


図3 ナノバブルの気泡径分布

る一定の圧力域 ($1 \leq P_r = \Delta P / P_{BP} \leq 2$) では、透過圧力によらず、単分散ナノバブルが生成した。これに対して、 $P_r > 2$ では多分散状の粗大な気泡が生成した。これは、細孔のガスの流れに基づく慣性力の影響を無視できず、ガスが細孔内を連続的に流出するためと考えられる。

3-2 水相流速の影響

ガス透過圧力とバブルポイント圧の比 $P_r = 1.1$ の条件下で、水相流速が $0.5 \sim 3.7 \text{ m s}^{-1}$ の範囲で水相流速の影響を調べた。図4にその結果を示す。図の横軸は水相の流れに基づくせん断力で示した。水相の流れを変えても生成した気泡のサイズに変化は認められなかった。膜の管内の流れは乱流であるが、膜の表面近傍、すなわち境界層内では層流と考えられる。ナノバブルのサイズが境界層の厚みに比較して相対的に小さく、膜の管内の乱流の影響を受けないためと推察される。このことから、膜面で形成されたナノバブルは極めて小さいせん断力で脱離することが明らかになった。

4 まとめ

SPG 膜を用いる単分散ナノバブルの生成に及ぼすガス透過圧力と水相の流速の影響を調べた。バブルポイント圧を超える一定の圧力域で単分散ナノバブルが生成し、水相の流速の影響を受けなかった。

5 参考文献

- 1) Kim, J.-Y., M.-G. Song, J.-D. Kim, *J. Colloid Interf. Sci.*, 223, 285(2000)
- 2) 久木崎, 中島, 宋, 小濱, 化学工学論文集, 30, 654 (2004).