

K2-93

ナノバブルおよびマイクロバブル生成の数値シミュレーション

Numerical simulation of nanobubble and microbubble generation

○中野真里江¹, 広澤拓也², 山田宏典², 齊藤允教², 田辺光昭³*M. Nakano¹, T. Hirose², H. Yamada², M. Saito², M. Tanabe³

Abstract: Microbubble and nanobubble technologies have recently been paid attention due to their potential application in many fields, such as water treatment, fishing industry, and environment problem. However, conventional injector is seen as a problem that the diameter is too large to generate nanobubbles efficiently, and it's difficult to observe nanobubbles motion in experiment. This study discusses numerical simulation of those bubble generation in order to develop a practical nanoinjector. We find out the best injector design condition by varying boundary condition such as contact angle, injection velocity and surface tension. It succeeded in generating the bubbles, at small contact angle.

1. 緒言

マイクロバブルは直径が 50 μm 以下^[1]の微小気泡であり、水中では水の表面張力が高いため通常の気泡生成方法のように水中で強力に気体をせん断するのでは不可能である^[1]。一般に利用されているマイクロバブルの生成方法には、水流を起こして渦を発生させ、渦内に気体(大きな気泡)を巻き込み、この渦を崩壊させたときに気泡がバラバラに細分化する現象を利用するなどがある。ナノバブルは直径が 1 μm 以下の超微小気泡で、マイクロバブルが瞬時に縮小する圧壊の過程において生成するものであるとされている^[1]。表面張力の作用による自己加圧で溶解するが表面帯電による静電反発力で気泡の寿命が長くなる。生物の細胞レベルへの直接的な働きかけが起こり、淡水における海棲魚の長期間生育や貝・牡蠣の生育促進・水質浄化・殺菌などの漁業・環境分野への応用が行われている^[1]。水と高圧空気(圧力: 0.15 MPa, 流量: 20 L/min)を直径 3mm・空気取り入れ溝: 500 μm のノズルから高速で回転させ、回転気体空洞部を速度差で切断することによりマイクロバブルを発生するといわれているが^[1]、マイクロメートルオーダーの気泡は顕微鏡下で確認できている^[1]がナノバブルの存在は確認が困難であり、大口径からのノズルから効率的にナノバブルが発生しているかについて問題視されている^[1]。

本研究ではナノバブルおよびマイクロバブルを生成するナノメートルオーダーの直径をもつナノインジェクターを開発するため、実験の基礎データとなるパラメータ取得を目的とするナノバブルおよびマイクロバブル生成の数値シミュレーションを行う。

2. 理論

2.1 マイクロバブルの内部圧力上昇

気泡は気液界面により取り囲まれた存在であり、その界面には水の表面張力が作用する。表面張力はその面積を小さくするように作用するため、球形の界面を持つ気泡にとって、表面張力はその内部の気体を圧縮する力として機能する。環境圧に対しての気泡内部の圧力上昇は理論的に Young-Laplace^[1]の式により次式で求められる。

$$\Delta P = \frac{4\sigma}{D} \quad (1)$$

ここで ΔP は圧力の上昇であり、 σ は表面張力、 D は気泡直径である。直径が 0.1 mm 以上あるような気泡においては考慮に値しない効果であるが、直径が 10 μm の微小気泡では約 0.3 気圧、直径が 1 μm では約 3 気圧の圧力上昇となる。

3. 計算体系および境界条件

本実験では、VOF 法^[2]を用いて水中におけるナノバブル・マイクロバブル生成シミュレーションを行った。その計算体系を Figure 1. に示す。座標系はデカルト座標系とし、ナノインジェクターの形状は円管で直径は 1 μm 、管の長さを 30 μm とした。ナノインジェクターおよびナノインジェクター出口付近の空間刻み幅を小さくし、インジェクター入口から空気を右方に向けて一様速度 V_{air} を流入させ、下部境界から水を上方に向けて一様速度 V_{water} で流入させた。上方の出口境界では静圧とした。表面張力を 71.9404 dyn/cm とした。

また、壁面境界条件として接触角は流体と境界面の材質により物理的に決まるが、本計算ではインジェクター壁面とインジェクターまわりの壁面の接触角 θ が

45° (親水性), 90° (中立), 110° (撥水性)のときで行い, ぬれ性による気泡生成への影響を調べた.

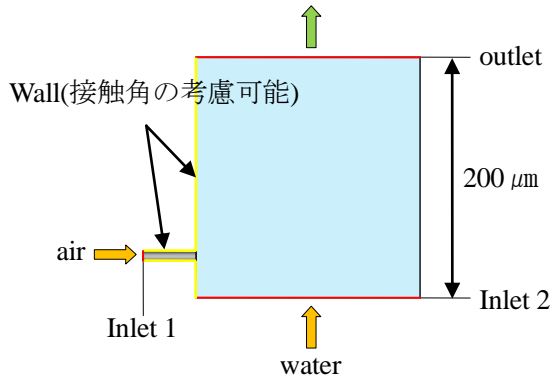


Figure 1. Calculation system

4. 計算結果および考察

計算は 1 ステップ間の時間刻みを $\Delta t = 1.0 \times 10^{-7}$ [sec]とし, 500 ステップ行った.

図 2(a), (b)は前述の 2つの接触角での流体の挙動を表したものである. 図 2の(a)より $\theta = 45^\circ$ のとき, 直径が約 10 μm 程度の球形気泡が一定の間隔で生成するのが見られた. 図 2の(b)より $\theta = 90^\circ$ のとき流体は球形にならず, 様々な形状の気泡や不規則に気体が流れているようであった. また, インジェクター出口付近で最大圧力が約 10^5 Pa となり, 気泡内部の圧力は約 10^4 Pa であった. ナノバブルなどの小さい気泡ができるのは, 気泡が表面積を小さくしようとする表面張力の作用によるものだと考えられる.

Inlet 1 での最大圧力は最大約 10^5 Pa オーダーまで上昇した. また, インジェクター内部では気液相が圧力勾配によって駆動され, ぬれ性が小さいとき気相と液相が交互に流れ, ぬれ性が大きい時気相が壁面から離れて気泡になると考えられる.

インジェクター径より大きい気泡の生成時にはインジェクター出口の下方の壁面付近で圧力上昇がみられた.

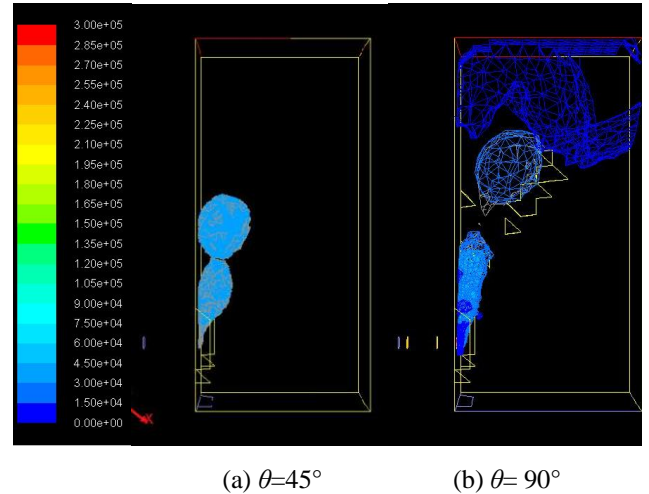


Figure 2. Distribution of contours of static pressure each angle of contact

5. 結言

ナノインジェクターにおける濡れ性の影響は, 接触角が小さい, すなわちぬれやすい状態のとき球形気泡を形成した. 気泡内部圧力上昇は接触角が大きい, つまりぬれにくい状態の方が大きくなる.

6. 謝辞

本研究は日本大学理工学部プロジェクト研究「ナノ・マイクロバブルの発生と応用に関する研究」により実施されたものである.

7. 参考文献

[1] 高橋 正好:「マイクロバブルおよびナノバブルに関する研究」