

加圧溶解方式による微細気泡の生成メカニズム

Micro-Bubble Generation Mechanism Based on Pressurized Dissolution Method

前田 康成* · 細川 茂雄** · 伊藤 良泰* · 柴田 尚紀*
Yasunari Maeda · Shigeo Hosokawa · Yoshihiro Ito · Naoki Shibata

加圧溶解方式による微細気泡発生装置において、気泡径と気泡数密度を位相ドップラ法（Phase Doppler Anemometry）を用いて測定するとともに、減圧ノズル内の流れを高速度カメラで可視化した結果、以下の3点から微細気泡の直径と数密度はキャビテーション状態と密接に関係していることが明らかになった。①キャビテーションが発生しない条件では、微細気泡がほとんど発生しない。②キャビテーションが発生する条件においては、ザウター平均気泡径がキャビテーションの成長とともに単調に増加する。③気泡数密度は、キャビテーションの発生からシートキャビテーション状態になるまでの過程で急増し、シートキャビテーション状態になると一定値に漸近する。

以上の結果は、加圧溶解方式による微細気泡の直径およびその数密度を効率的に設計するために有用である。

In the micro-bubble generation equipment based on the pressurized dissolution method, the measurement of bubble diameter and bubble number density using a Phase Doppler Anemometry, and visual observation of the flow in the decompression nozzle by using a high-speed camera have revealed that micro-bubble diameter and number density are closely related to cavitation conditions, i.e., [1] Micro-bubbles are rarely generated under no cavitation conditions; [2] under cavitation conditions, the Sauter mean diameter of micro-bubbles increases as cavitation grows; [3] bubble number density shows steep increase from the cavitation-beginning condition to sheet cavitation-beginning condition, and then approaches a constant value under sheet cavitation conditions. These results are useful for effective design of micro-bubble diameter and number density for application of the pressurized dissolution method.

1. ま え が き

気泡径が数 μm から数百 μm の微細気泡は比表面積が大きく、気泡-液相間相対速度が低く滞留時間が長いいため、界面への物質吸着や気泡-液相間の物質移動がミリサイズ気泡に比べて促進される（図1）。このような微細気泡の特徴を利用して、化学プロセス、水処理、水質改善など、種々の装置の効率と性能の向上が進められている¹⁾。また、医療²⁾、入浴³⁾、植物栽培⁴⁾などの分野では、微細気泡が生体や植物に及ぼす効果に関する研究が進められており、今後もその利用分野は広がると期待されている。一方、微細気泡発生装置には、それぞれの用途に応じた気泡径と気泡数密度を実現することが求められている^{5), 6)}。

微細気泡の生成方法には、溶存気体を発泡させる方法（以下、加圧溶解方式と記す）と気泡を流体剪断等で分裂

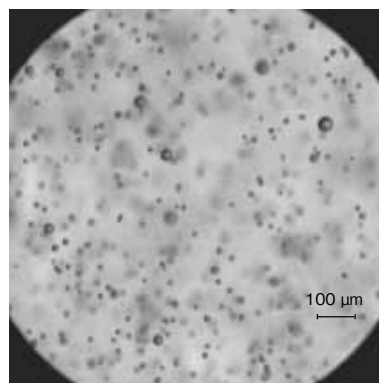


図1 微細気泡

させる方法⁷⁾に大別できる。それぞれの方法において装置が開発され実用化が進んでおり、筆者らも加圧溶解方式を用いた入浴用の気泡発生装置の開発を進めてきた。今後さ

* 住建事業本部 住建総合技術・商品開発センター General Technology & Products Development Center, Building Products Manufacturing Business Unit

** 国立大学法人 神戸大学大学院 工学研究科 Faculty of Engineering, Kobe University

らに微細気泡を応用した製品を幅広く普及させるためには、ポンプ等の給水設備の出力を低減して、低コスト・小型・省エネルギー・静音化等を実現することが求められる。そのためには、微細気泡生成メカニズムの詳細を明らかにし、効率的に微細気泡を発生させるための設計指針の確立が重要である。

筆者らは、加圧溶解方式において、減圧ノズル部の液相体積流束および流動様相が気泡径や気泡数密度に及ぼす影響について調べたので報告する。実験では、減圧ノズル下流における気泡の直径および数密度を位相ドップラ法 (Phase Doppler Anemometry: 以下、PDA と記す) を用いて測定するとともに、減圧ノズル部の流動状態を高速度カメラを用いて可視化している。

2. アプローチ

2.1 実験装置

実験装置の概略を図2に示す。加圧溶解方式の微細気泡発生装置は、主に溶解タンク、減圧ノズル (図3)、気液供給系から成る。液相には水道水、気相には空気を用いる。水と空気は溶解タンクへ供給され、空気は気液界面を通して水に溶解する。ここで、減圧ノズル入口条件の一つである気体溶解量は、溶解タンク内部の円管最上部から水面までの距離 H を変化させることで、接触面積と接触時間を変化させて制御する。空気が溶解した水は減圧ノズルに流入し、急激な圧力低下によって微細気泡が生成される。なお、溶解タンク内で溶けきれない空気は、溶解タンク上部の排

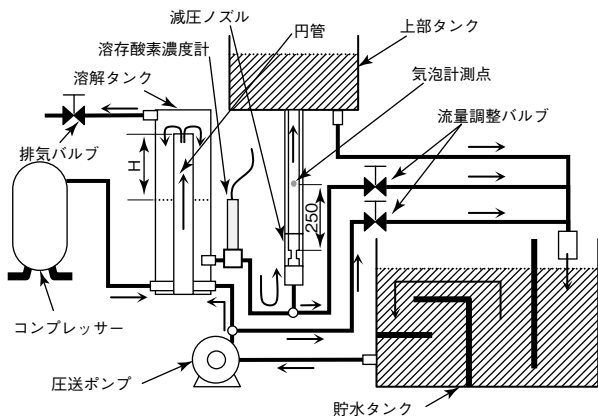


図2 実験装置

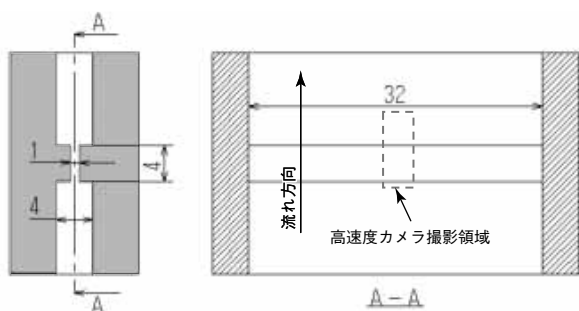


図3 減圧ノズル

気バルブを通して排出される。

2.2 評価方法

実験では、液相体積流束 J_L を $10.5 \sim 14.5 \text{ m/s}$ の範囲で変化させる。また、減圧ノズル内の圧力条件を変えるため、減圧ノズル下流流路長を 350 mm (Low P_N) と 550 mm (High P_N) の2条件で検討する。減圧ノズル下流において発泡可能な溶存気体の質量分率 x_{GD}^* は 1.69×10^{-5} である。ここで、 x_{GD}^* は減圧ノズル上流の溶存酸素濃度 DO から算出した溶存気体濃度 D と大気圧下での飽和気体濃度 D_S から式 (1) によって算出する⁸⁾。

$$x_{GD}^* = \frac{D - D_S}{\rho} \quad (1)$$

ここで、 ρ は水の密度である。なお、水温は実験を通して $25 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ に保つ。また、 DO の測定には蛍光発光時間方式の DO メータ (HACH 製, LDO101-01 HQ30d) を用いるが、その精度は $\pm 0.2 \text{ mg/L}$ である。

気泡径および気泡速度は、流れが十分発達して気泡が流路断面内でほぼ均一に分布する減圧ノズル出口から 250 mm 下流において、PDA (Dantec 製, 60X: 粒子径測定精度 $\sim 4 \%$, 速度測定精度 $\sim 1 \%$) を用いて測定する。PDA による気泡径測定範囲は $1 \sim 150 \mu\text{m}$ である。平均気泡径は、ザウター平均気泡径 d_{32} として式 (2) から求める。

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N d_{Bi}^3}{\sum_{i=1}^N d_{Bi}^2} \quad (2)$$

ここで d_{Bi} は個々の気泡径、 N はサンプル数であり、本実験では 30000 とする。気泡数密度 n_B は、平均液相速度 V_L 、および単位時間に測定体積を通過した気泡数 N_B (データレートをを用いて評価)、および測定断面積 A_{MV} から式 (3) で求める。

$$n_B = \frac{N_B}{A_{MV} V_L} \quad (3)$$

また、減圧ノズル内部における流動状態を高速度カメラ (Red Lake 製, Motion Pro HS-1) で撮影する。撮影時のフレームレートは 5000 Hz 、露光時間は $9 \mu\text{s}$ である。

3. 実験結果および考察

減圧ノズル内部の流動状態と、生成された気泡の直径および数密度から、微細気泡生成の現象について考察する。

3.1 減圧部内流動状態

減圧ノズル内部の流動状態の撮影画像を図4に示す。 J_L

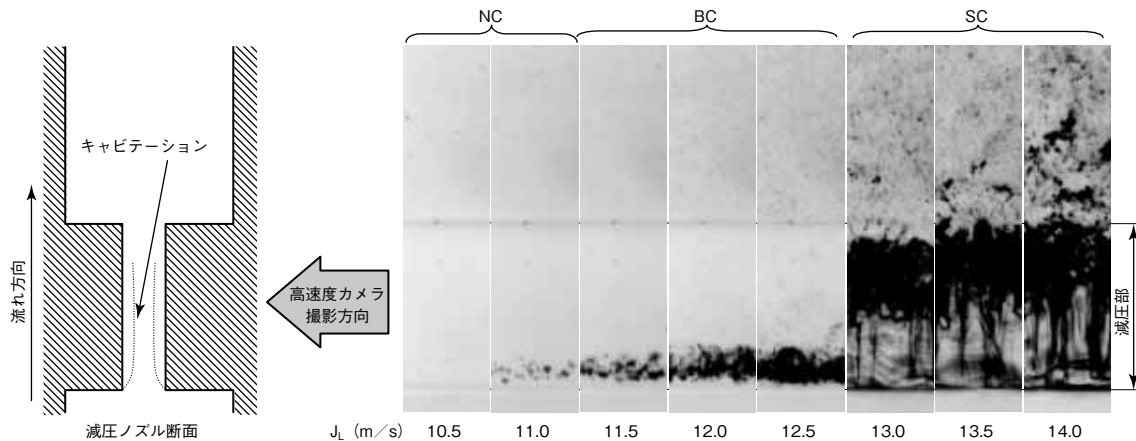
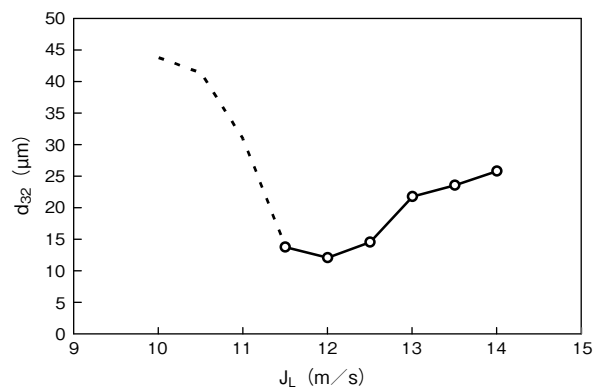


図4 減圧ノズル内部の流動状態 (Low P_N 条件)

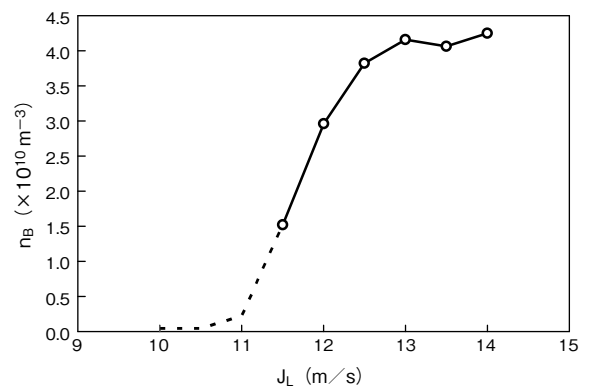
$J_L = 10.5 \text{ m/s}$ では、減圧ノズル内でキャビテーションは発生しておらず (No Cavitation: 以下、NCと記す)、減圧ノズルの下流においても気泡の存在は不明瞭である。 $J_L = 11.0 \text{ m/s}$ で減圧ノズル内にキャビテーションが発生するが、その領域は減圧ノズル入口近傍に限られており、減圧ノズル下流では気泡の存在も明確でない。 $J_L = 11.5 \sim 12.5 \text{ m/s}$ では、 J_L の増加に伴いキャビテーション領域が減圧部下流に拡大し、減圧ノズル下流の気泡も徐々に増加する (Bubble Cavitation: 以下、BCと記す)。 $J_L = 13.0 \text{ m/s}$ では、キャビテーションがシート状 (Sheet Cavitation: 以下、SCと記す) になり、減圧ノズル下流で気泡が明らかに増加している。 $J_L = 13.5 \text{ m/s}$ および 14.0 m/s では、 J_L の増加とともにわずかにキャビテーション領域が減圧部下流へ伸びるが、大きな変化はみられない。減圧部出口直下では J_L の増加に伴いキャビテーションによって放出される気泡塊が増加しているが、下流に行くに従い急激に減少し、画像の最下流部では気泡塊がほとんどみられない。これは減圧ノズル下流では溶存気体が過飽和状態になっていることから、気泡塊に含まれていた蒸気が凝縮して気泡が微細化されているためである。

3.2 ザウター平均気泡径と気泡数密度

ザウター平均気泡径 d_{32} と J_L の関係を図5 (a) に示す。Low P_N 条件において、 d_{32} は $J_L < 11.0 \text{ m/s}$ では J_L の増加に伴い減少し、 $J_L = 11.5 \sim 12.5 \text{ m/s}$ 付近で最小値をとった後、 $J_L > 13.0 \text{ m/s}$ では J_L の増加に伴い増加する。NC 領域となる図中の破線は、発生気泡数が極端に少ないことから、減圧ノズルにごくわずかに混入した空気泡の分裂によって生じた微細気泡と考えられる。気泡数密度 n_B と J_L の関係を図5 (b) に示す。Low P_N 条件において、 n_B は $J_L < 11.0 \text{ m/s}$ では低い値をとるが、 $J_L = 11.5 \sim 12.5 \text{ m/s}$ の間で J_L の増加に伴い急激に増加し、 $J_L > 13.0 \text{ m/s}$ ではほぼ一定値となる。



(a) ザウター平均気泡径



(b) 気泡数密度

図5 液相体積流束による影響 (Low P_N 条件)

3.3 気泡径分布

Low P_N 条件における気泡径分布を確率密度関数 (pdf) で図6に示す。 $J_L = 10.5 \text{ m/s}$ における d_B (気泡径) は $0 \sim 50 \mu\text{m}$ に幅広く分布しており、 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ に最頻値をもつ。一方 $J_L = 11.0 \text{ m/s}$ では、 $d_B < 10 \mu\text{m}$ の気泡割合が急激に高くなる。これは、前述のように $J_L < 11.0 \text{ m/s}$ における n_B はきわめて低く、この範囲ではごくわずかに混入した気泡が分裂して生じた微細気泡の割合が相対的に高いためと考えられる。また、キャビテーションによって生じる気泡の直径は、気泡分裂によって生じる気泡の直径

よりも小さいことがわかっており⁸⁾、 $J_L = 11.0 \text{ m/s}$ では、キャビテーションの発生に伴い n_B が低いながらも、発泡によって生じる気泡が増加したものと考えられる。すなわち、図5(a)に示した $J_L < 11.0 \text{ m/s}$ における J_L 増加に伴う d_{32} の減少は、 d_B の小さいキャビテーションによる発泡気泡の増加によるものである。

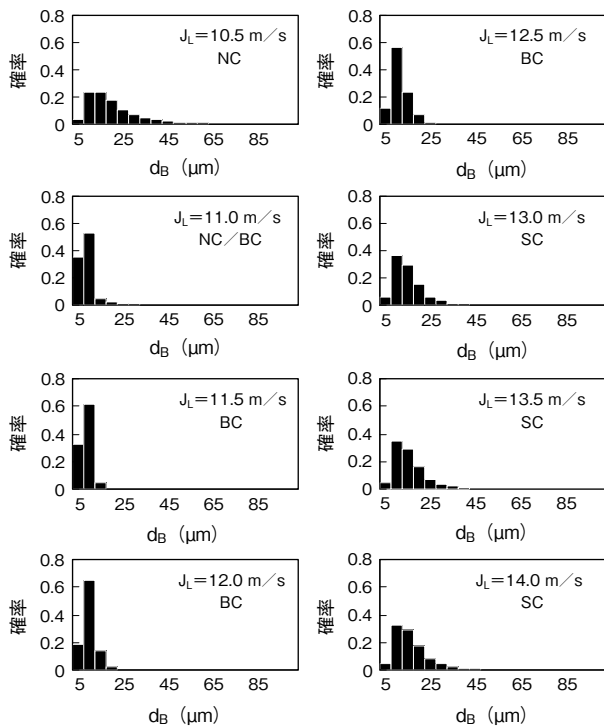


図6 気泡径分布 (Low P_N 条件 (pdf))

$J_L = 11.5 \sim 12.5 \text{ m/s}$ では、 d_B はおおむね $20 \mu\text{m}$ 以下の領域にシャープに分布している。図5(a)に示したように、この J_L の範囲では d_{32} は J_L に依存せず、 n_B は J_L とともに急増している。したがって、この領域では J_L の増加に伴いキャビテーションが発達し、 d_B はほぼ一定のまま n_B のみが増加する。一方 $J_L > 13.0 \text{ m/s}$ では、 $d_B > 20 \mu\text{m}$ の気泡割合が $J_L < 13.0 \text{ m/s}$ に比べて増加しており、 J_L 増加に伴い $d_B < 20 \mu\text{m}$ の気泡割合が減少する傾向がある。この領域ではSCが生じており、図5(a)に示したように J_L の増加に伴い d_{32} は増加するが、 n_B はほぼ一定値となる。このことから、気泡発生時の n_B には上限があり、SCではこの上限値に達するため、 J_L の増加に伴う気相体積の増加は d_B の増加を引き起こしていると考えられる。

以上のように、Low P_N 条件における d_{32} 、 n_B 、および気泡径分布の J_L 依存性は、以下の三つの領域に分けられる。すなわち、

- (1) $J_L < 11.0 \text{ m/s}$: n_B が低く d_{32} が J_L の増加に伴い減少し、気泡径は比較的幅広く分布する領域
- (2) $J_L = 11.5 \sim 12.5 \text{ m/s}$: n_B が J_L の増加に伴い増加し、気泡径はおおむね $20 \mu\text{m}$ 以下の領域にシャープに分布し

て d_{32} の J_L 依存性が低い領域

- (3) $J_L > 13 \text{ m/s}$: n_B の J_L 依存性が低く、気泡径分布がブロードになり、 d_{32} が J_L とともに増加する領域

これらの領域は、減圧ノズル内のキャビテーション状態によく対応している。

3.4 減圧ノズル下流圧力による影響

生成気泡の径および数密度が減圧ノズル内のキャビテーション状態に依存していることが示唆された。そこで、キャビテーションの発達状態の指標として式(4)のキャビテーション数 σ ⁹⁾を用いて実験結果を整理する。

$$\sigma = \frac{(P_N - P_V)}{1/2\rho J_L^2} \quad (4)$$

ここで、 P_N は減圧ノズル出口圧力、 P_V は蒸気圧である。 J_L と σ の関係を図7に示す。

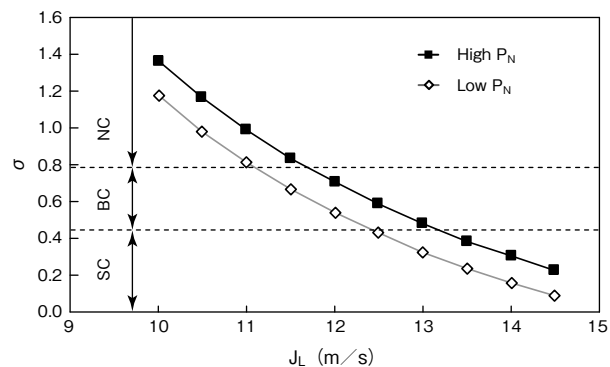


図7 液相体積流速とキャビテーション数の関係 (High P_N とLow P_N の比較)

J_L = 一定の場合、High P_N 条件のほうが σ は大きくなる。言い換えれば、 J_L = 一定では減圧ノズル内圧力の高いほうがキャビテーションの発達が抑制されることから、High P_N 条件でキャビテーションを発生させるためにはLow P_N 条件よりも高い J_L にする必要がある。

σ と減圧ノズル内の流動状態を図8に示す。両条件とも $\sigma = 0.85$ 程度でキャビテーションが発生し、 $\sigma = 0.40$ 程度でSCに遷移しており、式(4)で定義した σ で良好にキャビテーションの発達状態を整理できることがわかる。

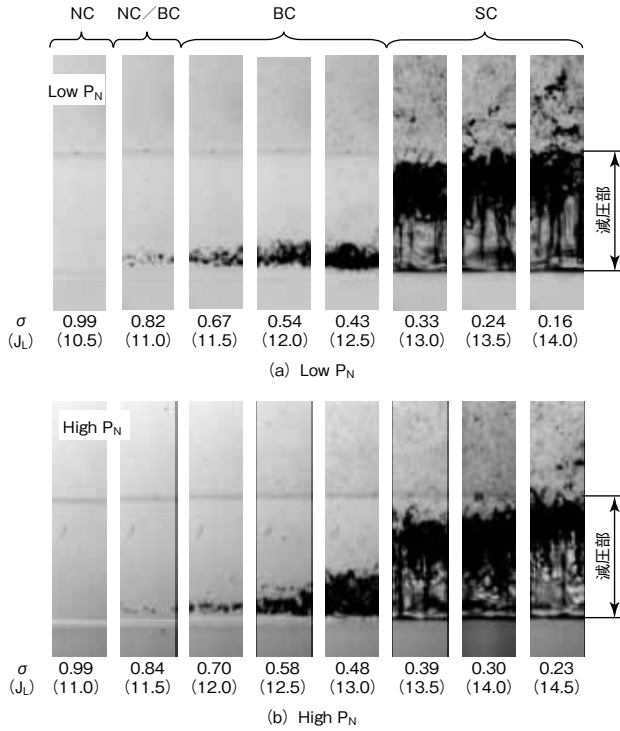


図8 減圧ノズル内流動状態

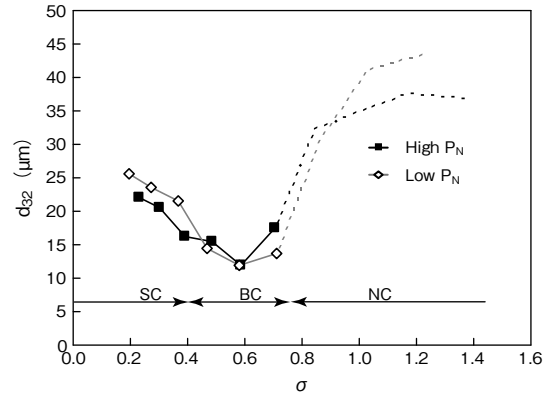
図9 (a) に d_{32} と σ の関係を示す。また、図9 (b) に n_B と σ の関係を示す。キャビテーションが発生する条件において、 d_{32} と n_B は σ の減少とともに増加し、条件間の差異も小さく、 σ によって d_{32} と n_B を良好に整理できることがわかる。

以上のように、いずれの条件においても (1) NC 領域では n_B が低く微細気泡がほとんど発生せず、(2) BC 領域では d_{32} が最小値をとり、 σ の減少に伴い n_B は急増し、(3) SC 領域では σ の減少に伴い d_{32} は増加するが、 n_B はほぼ一定値になることがわかる。

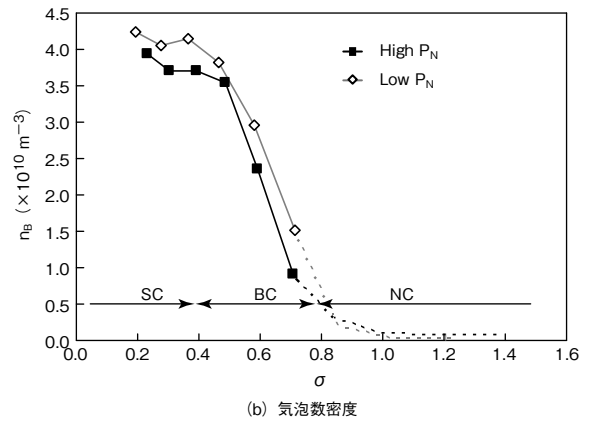
図10に両条件における気泡径分布を σ で整理し、pdf で示す。平均気泡径のみならず気泡径分布も σ で良好に整理でき、 σ が同じであれば最頻値や分布幅等、気泡径分布がほぼ一致している。

3.5 考察

以上の結果は、キャビテーションの発達と気泡生成の促進が密接に関係していることを示している。すなわち、図11に示すようにキャビテーションが発生する条件では、減圧ノズル内圧力が急激に低下して多くの蒸気泡が発生する。この際、水の蒸発と同時に溶存空気分子が蒸気泡内に取り込まれる。減圧ノズル下流で蒸気は凝縮されて水に戻るが、取り込まれた空気はそのまま気泡として下流に流れる。一方、減圧ノズル部での圧力低下が小さい場合には、蒸気泡の発生が少なく、気化する空気量も低下する。なお、本実験条件での溶存空気モル濃度は、溶存空気分子間の衝突による自発的発泡を頻繁に起こすほど高くないため、減



(a) ザウター平均気泡径



(b) 気泡数密度

図9 キャビテーション数による比較

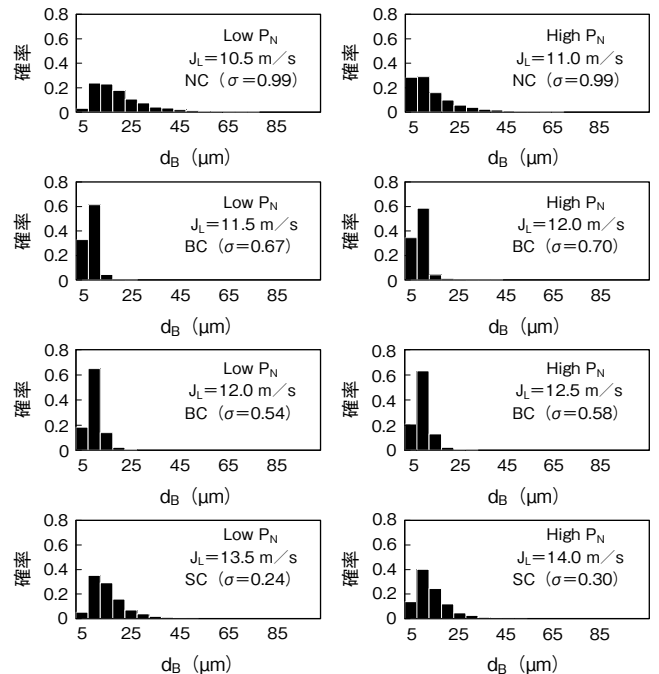


図10 気泡径分布の比較 (pdf)

圧ノズル出口ではキャビテーションによる蒸気泡の発生および凝縮に伴う気泡生成が支配的であると考えられる。

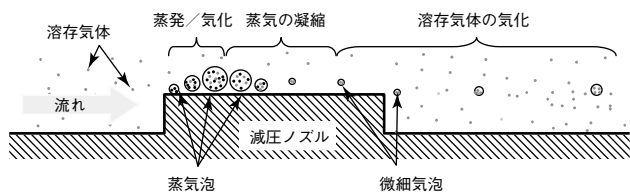


図11 気泡生成メカニズムの模式図

以上の結果は、加圧溶解方式による微細気泡の直径およびその数密度を効率的に設計するために有用である

今後は、微細気泡生成装置の高効率化の技術開発を進めるとともに、応用方法の検討を進めていく予定である。

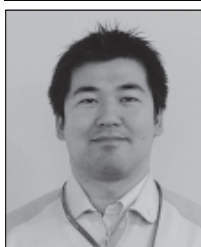
4. あとがき

加圧溶解方式による微細気泡発生装置において、気泡径と気泡数密度をPDAで測定するとともに、減圧ノズル内の流れを高速カメラで可視化した結果、微細気泡の直径と数密度はキャビテーション状態と密接に関係しており、以下のことが明らかになった。①キャビテーションが発生しない条件では、微細気泡がほとんど発生しない。②キャビテーションが発生する条件においては、ザウター平均気泡径がキャビテーションの成長とともに単調に増加する。③気泡数密度は、キャビテーションの発生からSC状態になるまでの過程で急増し、SC状態になると一定値に漸近する。

*参考文献

- 1) 道奥 康治：閉鎖性陸水域における環境負荷軽減のためのマイクロバブル技術，Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn., 64, p. 24-30 (2010)
- 2) Kaneko Y., Maruyama T., Takegami K., Watanabe T., Mitsui H., Hanajiri K., Nagawa, H., Matsumoto Y. : Use of a microbubble agent to increase the effects of high intensity focused ultrasound on liver tissue, European Radiology, 15, p. 1415-1420 (2007)
- 3) Tajima K., Tanaka M., Mizuno K., Okada N., Rokushima K., Watanabe Y. : Effects of bathing in micro-bubbles on recovery from moderate mental fatigue, Ergonomia IJE & HF, Vol. 30, No. 2, p. 137-147 (2008)
- 4) 中野 明正, 大木 浩, 池部 徹男, 宇和川 博, 鈴木 克己, 高市 益行：マイクロバブルによる酸素富加が溶液栽培したネギの生育と養分吸収に与える影響，根の研究, 18 (2), p. 49-54 (2009)
- 5) Serizawa A., Inui T., Yashiro T., Kawara Z. : Laminarization of micro-bubble containing milky bubbly flow in a pipe, 3rd European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, Certosa di Pontignano, p. 21-27 (2003)
- 6) 寺坂 宏一, 斎藤 淳平, 戸田 佑, 小林 大祐：混合蒸気の直接接凝縮を用いたマイクロバブル生成，混相流研究の進展, Vol. 4, p. 87-93 (2009)
- 7) Sadatomi M., Kawahara A., Kano K., Ohtomo A. : Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29, p. 615-623 (2005)
- 8) 細川 茂雄, 田中 健三, 前田 康成, 富山 明男, 山口 重行, 伊藤 良泰：加圧溶解型微細気泡発生法における混入空気泡の発生気泡に及ぼす影響，日本機械学会論文集, B編, Vol. 76, No. 765, p. 53-60 (2010)
- 9) Sou A., Ilham M. M., Isozaki K., Hosokawa S., Tomiyama A. : Effects of nozzle geometry on cavitation in nozzles of pressure atomizers, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 3, No. 5, p. 622-632 (2008)

◆執筆者紹介



前田 康成

住建総合技術・商品開発センター



細川 茂雄

神戸大学大学院工学研究科
工学博士



伊藤 良泰

住建総合技術・商品開発センター



柴田 尚紀

住建総合技術・商品開発センター