

ONLINE ISSN: 2188-9023 PRINT ISSN: 0919-2948

Volume 56, Number 3, Page 133-148

Category: Paper

Received date: 22 October 2019

Accepted date: 13 May 2020

J-STAGE Advance publication date: 17 November 2020

Publication date: 5 March 2021

Corresponding author: Nao-Aki NODA(E-mail address:noda.naoaki844@mail.kyutech.jp)

DOI: 10.14953/jjsde.2019.2879

Copyright©2021 Japan Society for Design Engineering

ハニカム構造体を用いるナノバブル生成法における バブル生成密度の考察

Elucidation of Flow Characteristics in Honeycomb Structure for Nanobubble Generating Apparatus

野田 尚昭*¹, 高田 翔*², 川野 凌*³, 翟 洪方*⁴, 佐野 義一*⁵

(Nao-Aki NODA) (Kakeru TAKATA) (Ryo KAWANO) (Hongfang ZHAI) (Yoshikazu SANNO)

高瀬 康*⁶, 米澤 裕二*⁷, 梅景 俊彦*⁸, 田中 洋征*⁹

(Yasushi TAKASE) (Yuji YONEZAWA) (Toshihiko UMEKAGE) (Hiroyuki TANAKA)

Abstract

The previous study revealed that a nanobubble generator using honeycomb structures may produce a large amount of water including large nanobubble density in a short time. In this paper, numerical simulations are performed for bubbly flow in the honeycomb structure by applying a computational fluid dynamics (CFD) coupled with a population balance model (PBM). The numerical model is based on the Eulerian multiphase model and the PBM was used to calculate the gas bubble size distribution considering the bubble coalescence and breakage. The results show that bubble size distributions in the honeycomb structure under different inlet absolute pressure can be predicted by the PBM. It may be concluded that the maximum shear stress is the main controlling factor for the nanobubble generation.

Key words

nanobubble generator, bubbly flow, honeycomb structure, CFD, PBM, bubble breakage

* 1 正会員, 九州工業大学工学研究院(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1),
noda.naoaki844@mail.kyutech.jp

* 2 非会員, 九州工業大学大学院(同上), p104065k@mail.kyutech.jp

- * 3 非会員, 九州工業大学大学院(同上), kawano.ryo621@mail.kyutech.jp
- * 4 非会員, 九州工業大学大学院(同上), honghuangzhai@gmail.com
- * 5 非会員, 九州工業大学大学院工学研究院(同上), sano.yoshikazu029@mail.kyutech.jp
- * 6 正会員, 九州工業大学戸畑・若松キャンパス技術部(同上), takase.yasushi415@mail.kyutech.ac.jp
- * 7 非会員, 株式会社丸福水産(〒803-0801 北九州市小倉北区西港町94-22), y-yonezawa@malufuku.com
- * 8 非会員, 九州工業大学大学院工学研究院(同上), umekage.toshihiko442@mail.kyutech.jp
- * 9 非会員, 九州工業大学大学院工学研究院(同上), hiro-hiro5123@jcom.home.ne.jp

1 緒言

ナノバブルは、通常のパブルと異なり、直径 $1\mu\text{m}$ 以下の微細なバブルを指し、以下のような特性を持つ^{1)~5)}。(i)気泡の状態極めて長時間水中に滞在する。直径 1mm のバブルは1分間に数 m 上昇して、水面で破裂するのに対して、ナノバブルは気泡の上昇速度が遅く、水中で収縮していき完全溶解する。(ii)自己加圧効果があり、直径 $1\mu\text{m}$ で約3気圧、直径 $0.1\mu\text{m}$ では約30気圧に達する。(iii)気体の溶解効果が優れている。すなわち、比表面積が大きく、自己加圧効果を持つため、直径 $10\mu\text{m}$ のマイクロバブルでも、直径 1mm のバブルに比べて約2,000万倍の酸素や窒素などの気体溶解能を長時間保持できる。ナノバブルのこうした特性を利用し、医療分野や食品工業分野などの様々な分野への応用が進んでいる^{6)~8)}。

ナノバブルの生成技術に関して、これまでに多くの報告がある^{9)~11)}。本研究で考察するハニカム構造体は、鮮魚の保存、流通に窒素ガスのナノバブル水を用いることで、酸化や腐敗を伴う劣化の進行を遅らせる装置として商品化がなされている¹²⁾。著者らは先に、流量や入口圧力の増加によるせん断応力の増加がナノバブル生成能力に関与することを示した¹³⁾。この装置は、ナノバブル密度や吐出量に関して優れた生成能力を有するので他分野への応用も期待されている。このような気液二層流に関する研究には Euler-Lagrange(E-L)法^{14),15)}と Euler-Euler(E-E)法^{16),17)}に基づく CFD 解析が多く用いられており¹⁸⁾、気液中のバブル等の分散相のバブルの凝集・分裂のシミュレーションに Population balance model(PBM)が用いられる^{10),11)}。そこで本研究では Euler-Euler(E-E)法^{16),17)}に基づく CFD 解析と PBM 法を組み合わせ、バブルの凝集と分裂を考慮したナノバブル生成を評価する。すなわち本研究では、ハニカム構造体を用いたナノバブル生成装置における、バブルの凝集と分裂を CFD-PBM 解析と実験によって考察する。得られた知見は、ナノバブル生成装置の高性能化に寄与できるものと考えられる。

2 小型ナノバブル装置と実験

前報¹³⁾の大型ナノバブル装置の研究結果を基に、持ち運びに便利な小型ナノバブル装置を試作した。**図 1**にハニカムユニットを装着した 100ℓ 水槽装備の小型ナノバブル生成装置の概略図を示す。ナノバブル生成装置に入る水(ガスを含んだ状態でも、単にこれを水と呼ぶことがある)はハニカムユニット面に対して平行に流入、流出される。**図 2**に示すように、一対のハニカムプレートとその両端を密閉する上下プレートを1ユニットとし、小型装置は合計16ユニット装着している。各ハニカムユニット間で、ハニカムを流れ方向に1/2セルずらして装備させるため、ハニカムの重なりで複雑な流路が構成され、そこへ気液混合流体を通過させることにより気泡が微細化されていく。バブル生成装置を出た水がコンテナ(水100ℓ)内で再び装置内を通る。このような循環を繰り返すたび、微細化効果が進む¹⁸⁾。**表 1**に小型装置の諸元を示す。**図 3**に小型ハニカム構造体(セルともいう)の寸法を示す。

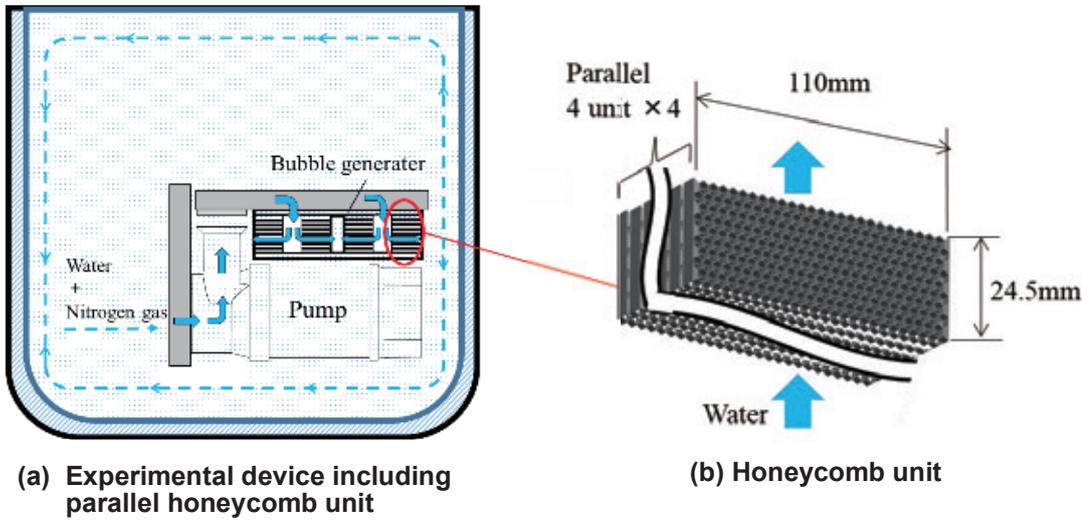


Fig. 1 Small apparatus of nanobubbles generator

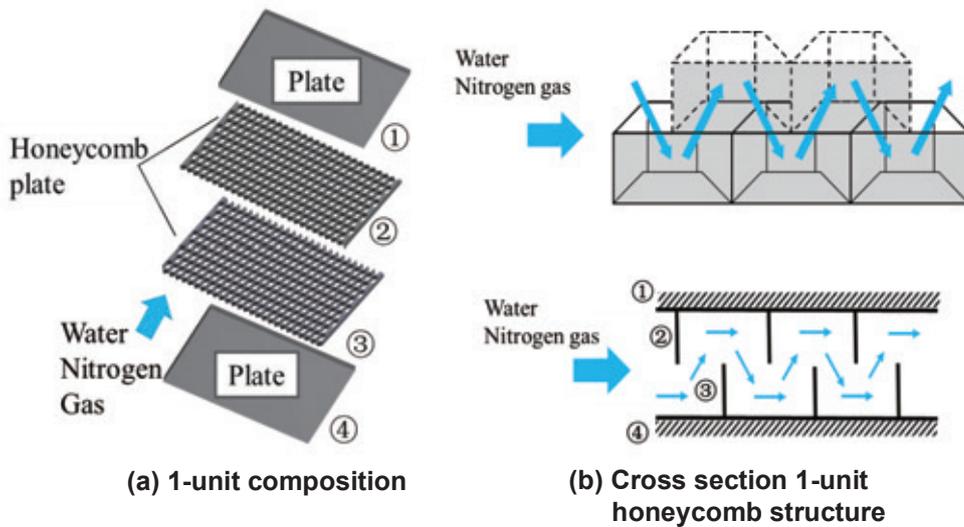


Fig. 2 Honeycomb structure model

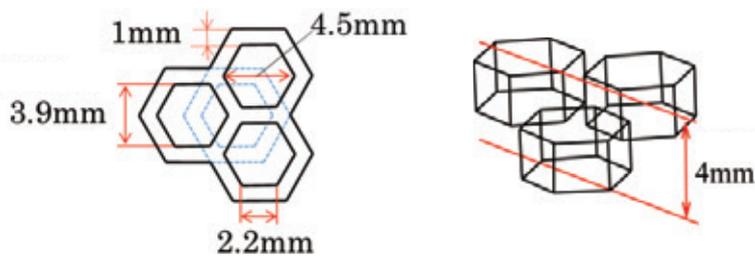


Fig. 3 Dimensions of small honeycomb cell

Table 1 Details of the experimental apparatus

Item	Small apparatus
Pump	Submersible pump (50TMLS2.4S)
Output (kW)	0.4 (60Hz)
Flow rate (ℓ/min)	270
Cell size (mm)	3.9
Cell height (mm)	4
Cell number*	1840
Water amount (ℓ)	Tap water, 100
Gas	Nitrogen
Flow rate (ℓ/min)	1.0
Pressure (MPa)	0.20

*Upper cell + Lower cell

3 ナノバブル密度の解析方法

3.1 記号

本章で使用する記号をまとめて以下に示す.

- P : 圧力(Pa)
 \vec{g} : 重力加速度(m/s²)
 σ : 表面張力(N/m)
 L : 泡の直径(m)
 L_h : 変形可能な泡の長軸(m)
 α_q : q 番目の位相の体積分率
 ρ_q : q 番目の位相の密度(kg/ m³)
 \vec{u}_q : q 番目の位相の速度(m/s)
 μ_q : q 番目の位相のせん断粘度(Pa·s)
 $\bar{\tau}_q$: q 番目の位相の応力-ひずみテンソル
 $\vec{F}_{drag, q}$: q 番目の位相での抗力(N)
 $\vec{F}_{lift, q}$: q 番目の位相での揚力(N)
 $\vec{F}_{VM, q}$: q 番目の位相での仮想質量力(N)
 i, j : バブルサイズ
 n_i : バブルサイズ i の泡の数密度(1/ m³)
 α_i : バブルサイズ i の体積分率
 N_i : バブルサイズ i の体積(m³)
 \vec{u}_{ij} : 異なる直径(L_i, L_j)の泡の固有衝突速度(m/s)
 Φ : バブル体積(m³)
 Ω_{ag} : 凝集カーネル(m³/s)

Ω_{br}	: 分裂カーネル($1/m^3s$)
B_{ag}	: 凝集による体積 V のバブルの発生率
D_{ag}	: 凝集による体積 V のバブルの消滅率
B_{br}	: 分裂による体積 V のバブルの発生率
D_{br}	: 分裂による体積 V のバブルの消滅率
V, V'	: 変化前体積 V , 変化後の体積 V' (m^3)
$g(V)$: 単位時間あたりに分裂する体積 V バブルの割合 (分裂頻度)
$\beta(V/V')$: 体積 V から破裂する確率密度関数
λ	: 分裂前のバブルあたりに生成される破裂後のバブルの数
Re_b	: バブルレイノルズ数
E_o	: エトベス数
E_o'	: 変形可能なバブルの直径 L_b に基づく修正エトベス数
C_D	: 抗力係数
C_l	: 揚力係数

3.2 解析モデルと境界条件

本研究では, Ansys16.2 を用いて CFD-PBM 解析を行った. 本解析で用いたハニカムセルのモデルを **図 4** に示す. このモデルは前報¹³⁾の実験で用いたハニカム構造体の一部を 3 列にモデル化したものである. また, **図 4** に示すようにモデルの出口を延長している. 出口境界条件によっては出口で逆流が起きる可能性があるためこれを設定している. 両側の壁には対称条件を用いる. また, ハニカムセルの寸法を **図 3** に示す. 窒素ガスの体積分率は大型ハニカムセル 0.0091, 小型ハニカムセル 0.0097 となる. 体積分率とバブルのサイズが非常に小さいため, 気相は液相と同じ流速と仮定する.

無限にあるバブルサイズを解析するために, 有限なサイズに区分 (クラス) 分けを行った. **表 2** にバブルの直径を 10 サイズにクラス分けしたものを示す. それぞれのクラスをバブルクラス 1 から 10 と設定する. バブルクラス 1 を最小直径 10nm とし, クラスが増えるごとに直径が 2 倍ずつ増えるようにした. バブルクラス 10 はバブルクラス 1 に対して 512 倍になる. このクラス分けは実験に基づいて設定した. すなわち, 実験に用いたナノ粒子測定装置「Nano Sight LM10-HS」は直径 0~1000nm のバブルの測定ができる. よって, 10 種類のバブルクラスのうち 7 種類が 1000nm 以下のバブルを含むように設定している. このように, 微細サイズ側でバブルクラスを多くしたのは, ナノバブルに着目して実験結果と解析結果との比較精度を上げるためである. 窒素ガスを含んだ水道水の入口における実際のバブルサイズは未知であるが, 初期サイズはガス体積分率によって算定できる. 予備解析から本研究ではバブルクラス 8 を使用した. 実験結果から得た初期条件を **表 3** に示し, 解析に用いた.

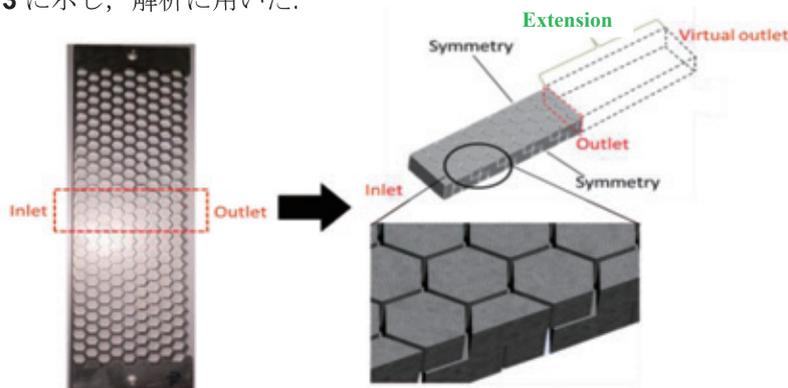


Fig. 4 Simplified honeycomb unit model and the grids of honeycomb cells

Table 2 Diameter of each bubble class

Bubble class number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mean bubble diameter (nm)	10	20	40	80	160	320	640	1280	2560	5120

Table 3 Analysis conditions

	Item	Large apparatus	Small apparatus
Experimental conditions	Inlet absolute pressure [※] p_{in} (MPa)	0.45	0.16
	Outlet absolute pressure [※] p_{out} (MPa)	0.10	0.10
	Velocity (m/s)	0.36	0.20
	Volume fraction	0.0091	0.0097
	Time [※] t (min)	30	30
Analysis condition	Bubble class	8	8

※4.1 章参照

3.3 気液混合流体の数値解析

ハニカムセルの気泡流れについて、Euler–Euler 二相流モデルを用いた。液体は連続した一次相，気体は分散した二次相として扱うこととする。気液相の連続性と運動量保存式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(a_q \rho_q) + \nabla \cdot (a_q \rho_q \vec{u}_q) = 0 \quad (1)$$

ここで q 番目の位相の体積分率は a_q ，密度は ρ_q ，速度は \vec{u}_q とする。 q 番目の運動量バランスは次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(a_q \rho_q \vec{u}_q) + \nabla \cdot (a_q \rho_q \vec{u}_q \vec{u}_q) = -a_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + a_q \rho_q \vec{g} + \vec{F}_{drag, q} + \vec{F}_{lift, q} + \vec{F}_{VM, q} \quad (2)$$

ここで q 番目の位相の応力–ひずみテンソルは $\bar{\tau}_q$ ，圧力は p ，重力加速度は \vec{g} を表す。 q 番目の位相での $\vec{F}_{drag, q}$ は抗力， $\vec{F}_{lift, q}$ は揚力， $\vec{F}_{VM, q}$ は仮想質量力を表す。

本研究では，抗力モデルは Tomiyama 抗力モデル¹⁹⁾を使う。Tomiyama 抗力モデルはバブルが様々な形状に変化する気液流れに適している。抗力係数 C_D は次式で表される。

$$C_D = \max \left[\min \left\{ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{72}{Re} \right\}, \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \quad (3)$$

$$Eo = g (\rho_q - \rho_p) L^2 / \sigma \quad (4)$$

ここで σ は表面張力， L はバブルの直径である。

揚力 $\vec{F}_{lift, q}$ は一次流れによって主に引き起こされる。また仮想質量力 $\vec{F}_{VM, q}$ は他の相の加速によって引き起こされる¹¹⁾。これらは，次式で表される。

$$\vec{F}_{lift, q} = C_l \rho_q \alpha_p (\vec{u}_q - \vec{u}_p) \times (\nabla \times \vec{u}_q) \quad (5)$$

$$\vec{F}_{VM, q} = -0.5 \alpha_p \rho_q \left(\frac{d_q \vec{u}_q}{dt} - \frac{d_p \vec{u}_p}{dt} \right) \quad (6)$$

$$C_l = \begin{cases} \min[0.288 \tanh(0.121 Re_p), f(Eo)] & Eo \leq 4 \\ f(Eo) & 4 < Eo \leq 10 \\ -0.27 & 10 < Eo' \end{cases} \quad (7)$$

$$f(Eo) = 0.00105 Eo^3 - 0.0159 Eo^2 - 0.0204 Eo + 0.474 \quad (8)$$

ここで C_l は揚力係数, d_q/dt は時間微分を表す. $\vec{F}_{lift, q} = -\vec{F}_{lift, p}$, $\vec{F}_{VM, q} = -\vec{F}_{VM, p}$ になる. Re_p はバブルレイノルズ数, Eo は変形可能なバブルの直径 L_h に基づく修正エトベス数を表す.

$$Re_p = \rho_q |\vec{u}_q - \vec{u}_p| L / \mu_q \quad (9)$$

$$Eo' = g (\rho_q - \rho_p) L_h^2 / \sigma \quad (10)$$

$$L_h = L (1 + 0.163 Eo^{0.757})^{1/3} \quad (11)$$

ここで μ_q は q 番目の位相でのせん断粘度を表す.

3.4 バブル密度の数値解析

バブル密度の解析には, 離散的 Population Balance Model (PBM) を用いた. この PBM を用いた位相離散法では, バブルの母集団を有限数のバブル間隔に離散化して解析する. この方法は, バブルのサイズ分布を直接計算するという利点がある. またバブルサイズの範囲が先験的に限定されていて, 3 桁を越えない場合に特に有用であり, 流体力学と結びついたサイズ分布を計算することができる.

気相が直径 L のバブルでできていると仮定すると, 分散相の体積分率は次式で表される.

$$\alpha_p(\vec{x}, t) = \int_0^{+\infty} n(\vec{x}, \Phi, t) \frac{\pi}{6} L^3 dL \quad (12)$$

バブル状態ベクトルはバブルの空間座標を位置づける外部座標 (\vec{x}) によって特徴づけられる. 内部座標 (Φ) はバブルサイズと組成, 温度を含んでいる. $n(\vec{x}, \Phi, t)$ は数密度関数を示す, Φ をバブル体積と仮定すると $n(\vec{x}, \Phi, t)$ の輸送方程式は次式で表される^{11), 12)}.

$$\frac{\partial}{\partial t} [n(V, t)] + \nabla \cdot [\vec{u} n(V, t)] = B_{ag}(V, t) + B_{br}(V, t) - D_{ag}(V, t) - D_{br}(V, t) \quad (13)$$

次にバブルの凝集モデルについて説明する. バブルの凝集はバブルの衝突によって引き起こされる. これらの衝突は液体の乱流やブラウン運動などの様々なメカニズムによって引き起こされる. 気体体積分率は非常に小さく, 1%未満のため本研究ではブラウン体積運動は考慮していない.

凝集による体積 V のバブルの発生率は次式で表される.

$$B_{ag} = \frac{1}{2} \int_0^V \Omega_{ag}(V-V', V) n(V-V', t) n(V', t) dV' \quad (14)$$

ここでバブルの体積 $V-V'$ は体積 V' と体積 V のバブルが凝集して形成される。凝集による体積 V のバブルの消滅率は次式で表される。

$$D_{ag} = \int_0^\infty \Omega_{ag}(V, V') n(V, t) n(V', t) dV' \quad (15)$$

つづいて、バブルの凝集に相対するバブルの分裂モデルについて説明する。バブルの分裂は圧力低下やせん断応力によって引き起こされる。分裂による体積 V のバブルの発生率は次式で表される。

$$B_{br} = \int_{\Omega_V} \lambda g(V) \theta(V|V') n(V', t) dV' \quad (16)$$

ここで $g(V)$ は単位時間あたりに分裂する体積 V バブルの割合（分裂頻度）であり、 $\theta(V|V')$ は体積 V から分裂する確率密度関数であり、詳細は文献¹⁰⁾に示されている。式から体積 V の $g(V) n(V', t) dV'$ 個のバブルは単位時間あたりに分裂し、 $\lambda g(V) n(V', t) dV'$ 個のバブルを生成する。分数 $\theta(V|V') dV'$ は、体積 V のバブルを表す。 λ は、分裂前のバブルあたりに生成される分裂後のバブルの数である。

分裂による体積 V のバブルの消滅率は次式で表される。

$$D_{br} = g(V) n(V, t) \quad (17)$$

PBM はバブルサイズの体積分率 a_i を用いて次式で表される^{16), 21)}。

$$\frac{\partial(\rho_p a_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_p \vec{u}_i a_i) = \rho_p V_i (B_{ag,i} - D_{ag,i} + B_{br,i} - D_{br,i}) \quad (18)$$

ここで a_i バブルサイズ i の体積分率であり、次式で表される。

$$a_i = N_i V_i \quad i=0, 1, \dots, m-1 \quad (19)$$

ここではバブルサイズ i の体積 N_i は次式で表される。

$$N_i(t) = \int_{V_i}^{V_{i+1}} n(V, t) dV \quad (20)$$

本研究では離散法の分裂定式化法に基づき行っており、最小のバブル（ここでは 10nm）で分裂しないと考える。

4 解析結果と実験結果

4.1 記号

本章で使用する記号を以下にまとめる.

t	: 実験時間(min) $t=0\sim 30\text{min}$
p_{in}	: 入口圧力(Pa)
p_{out}	: 出口圧力(Pa)
p	: 圧力(MPa)
Δp	: 圧力低下(MPa)
τ	: セン断応力(Pa)
x	: バブル直径(nm)
$N_d(x)$: バブル直径 x における 30 分間で生成されたナノバブル密度(Particle/ml)
$N_d^{PBM}(x)$: PBM 解析で得られたナノバブル密度(Particle/ml)
N_d^{total}	: $x = 0\sim 5120\text{nm}$ までの総バブル数
$N_d^{exp}(x)$: バブル直径 x における実験 30 分間で生成されたナノバブル密度(Particle/ml)
$N_d^{exp}(x) _t$: バブル直径 x における実験 t 分の時のナノバブル密度(Particle/ml)
V_{tank}	: タンクの容量(ml)
Q	: 流量(ml/min)
z/h	: ハニカムセル内の位置

4.2 PBM 解析結果

PBM 解析で得られた出口でのナノバブル密度を $N_d^{PBM}(x)$ (Particle/ml)とする. ナノバブルの範囲は実験の測定結果を参考に 300nm 以下とする. 本研究では解析装置の能力を考慮して 10 種類のバブルクラスを設定する. このとき, 図 5 のようにプロット点は 10 点となる. 図 6 では, バブル直径 x に対するナノバブル密度の分布を頻度分布で示したものである. 縦軸に用いている $x = 0\sim 5120\text{nm}$ までの総バブル数 N_d^{total} は式(21)から得ることができる.

$$N_d^{total} = \int_0^{5120} N_d^{PBM}(x) dx \quad (21)$$

図 6 (a)に示すバブルクラス 8 の頻度分布ではバブルクラス 7, 8 の中点 $x=960\text{nm}$ からバブルクラス 8, 9 の中点 $x=1920\text{nm}$ までを横幅として示している. 入口のバブルサイズはバブルクラス 8(1280nm)を用いており, バブルクラス 8 が一番多く存在している. ナノバブルの範囲 (300nm 以下) にバブルはほとんど存在していないことがわかる. しかし, 出口ではバブルクラス 8 が減っており, バブルサイズが変化している. また, ナノバブルの範囲 (300nm 以下) のバブルが入口と比べて増加していることがわかる.

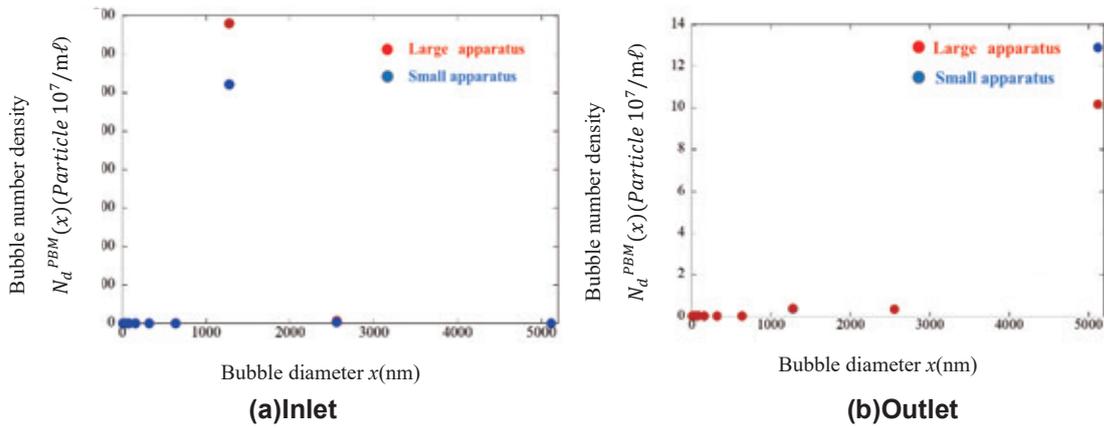


Fig. 5 Bubble number density $N_d^{PBM}(x)$

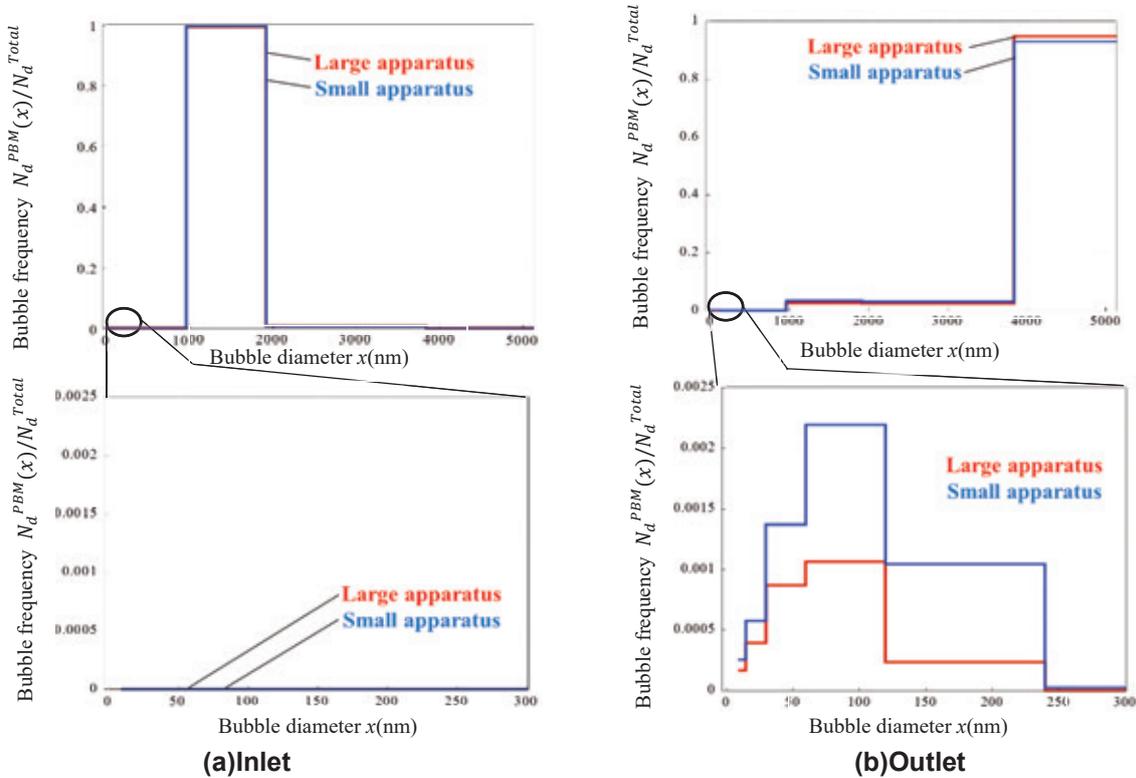


Fig. 6 Bubble frequency $N_d^{PBM}(x)/N_d^{total}$

4.3 実験結果と PBM 解析のナノバブル密度 $N_d(x)$ の比較

図 7 に実験開始前 $t=0\text{min}$ のナノバブル密度 $N_d^{exp}(x)|_{t=0}$ と実験終了後 $t=30\text{min}$ のナノバブル密度 $N_d^{exp}(x)|_{t=30}$ を示す。図 7 に示すように実験開始前にすでにナノバブル密度 $N_d^{exp}(x)|_{t=0}$ が存在している。そのため、実験 30 分間で生成された 1 ml あたりのナノバブル密度を式(22)で定義し、図 8 に $N_d^{exp}(x)$ として示す。

$$N_d^{exp}(x) = N_d^{exp}(x)|_{t=30} - N_d^{exp}(x)|_{t=0} \tag{22}$$

図 8 に示すように大型装置・小型装置ともに生成されたナノバブル密度 $N_d^{exp}(x)$ は、バブル直径 $x = 70\text{nm}$ で最大になっている。

PBM 解析によって、1 ml あたりのナノバブル密度 $N_d(x)$ を求めるには式(23)を用いればよい。ここで、表 1 に示すように、 Q は流量(ml/min)、 t は実験時間 $t=0\sim 30(\text{min})$ 、 V_{tank} はタンクの容量(ml)である。

$$N_d(x) = \frac{N_d^{PBM}(x) \cdot Q \cdot t}{V_{tank}} \tag{23}$$

図 8 に PBM 解析で得られた式(23)のナノバブル密度 $N_d(x)$ を、実験で得られた式(22)の $N_d^{exp}(x)$ と比較して示す。ここで、PBM 解析のナノバブル密度 $N_d(x)$ は、3 次元スプライン関数を用いて、結果を滑らかに近似して表示している。これまでの研究でナノバブルは $x \leq 1\mu\text{m} = 1000\text{nm}$ とされているが、ISO 規格ではナノスケールは $x=1\text{nm}\sim 100\text{nm}$ と定義されている^{10,11)}。この定義に基づき、本研究では $x = 1\text{nm}\sim 100\text{nm}$ の範囲のナノバブル生成を、実験結果で最大値となった $x = 70\text{nm}$ の密度 $N_d(70)$ で代表させる。

表 4 にバブル直径 70nm のナノバブル密度 $N_d(70)$ 、 $N_d^{exp}(70)$ をまとめて示す。表 4 より、大型装置と小型装置の両者の実験結果を、PBM 解析結果は相対誤差 15%以下で近似できており、ナノバブル密度を PBM 解析によって予測できることが示唆される。本研究では解析装置の能力から 10 種類のバブルクラスを設定したが、より多くのバブルクラスを設定することで、精度の高いシミュレーションができるものと考えられる。

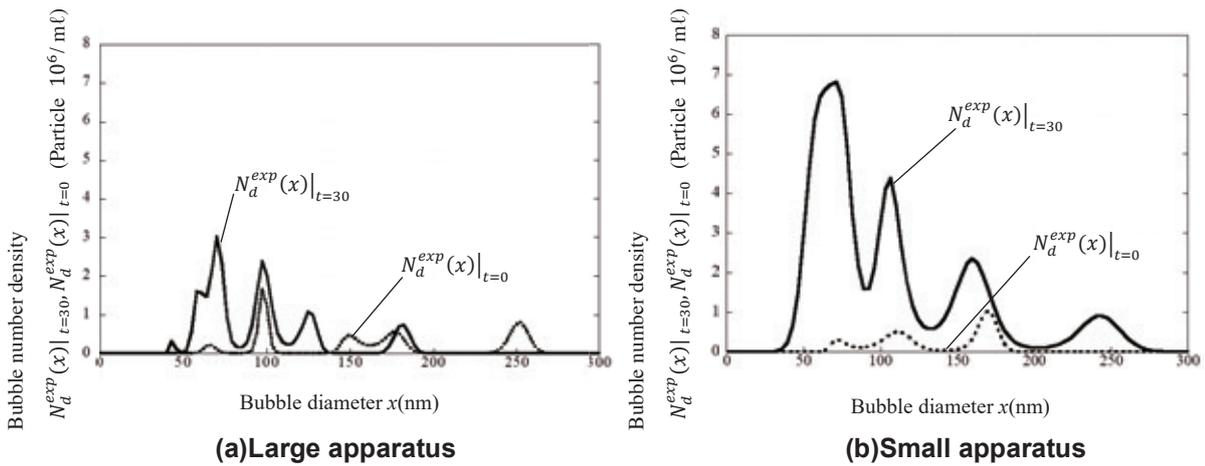


Fig. 7 Bubble number density $N_d^{exp}(x)|_{t=30}$, $N_d^{exp}(x)|_{t=0}$ in the tank

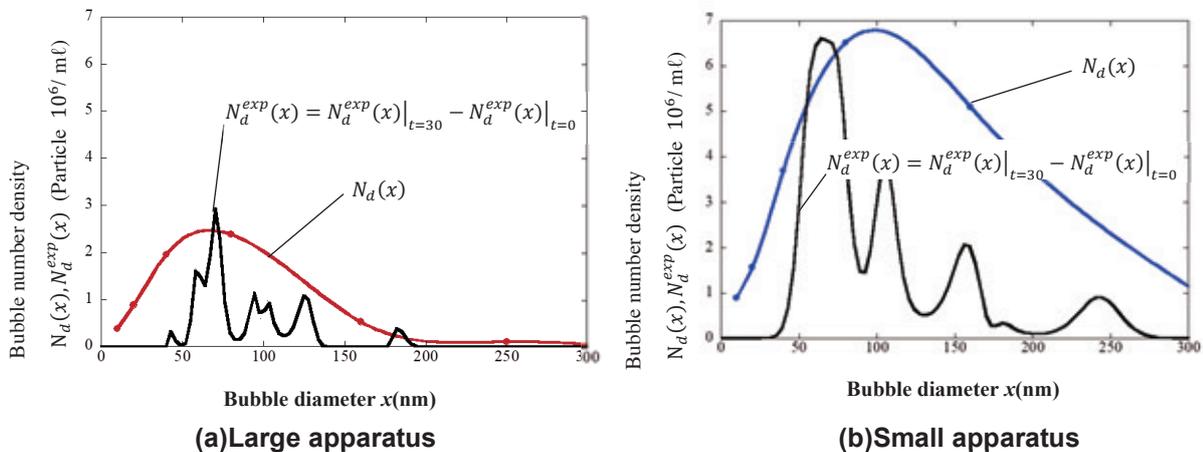


Fig. 8 Bubble number density $N_d(x), N_d^{exp}(x)$ in the tank

Table 4 Comparison between bubble number densities for analysis $N_d(70)$ and experiment $N_d^{exp}(70) = N_d^{exp}(70)|_{t=30} - N_d^{exp}(70)|_{t=0}$

		Large honeycomb cell	Small honeycomb cell
Experimental result	$N_d^{exp}(70)$ (Particle $10^6/\text{ml}$)	3.0	6.5
Analysis result	$N_d(70)$ (Particle $10^6/\text{ml}$)	3.2	5.6
Difference	$(N_d^{exp}(70) - N_d(70)) / N_d^{exp}(70)$ (%)	7	14

4.4 実験結果と CFD 解析の比較

図 9 に CFD 解析で注目する流路を示す. 先の研究²²⁾と同様に壁から 0.1mm 離れた Path3 に注目する. ハニカムセル内の垂直 Path 方向の位置を z/h で表すと, Path3 の範囲は $z/h = 0 \sim 1$ である. 図 10 に Path3 におけるせん断応力と絶対圧力の変化を示す. 表 5 に実験から得たナノバブル密度 $N_d(70)$ と CFD 解析より得た圧力低下 Δp と最大せん断応力 τ_{max} を示す. せん断応力 τ_{max} は大型ハニカムセルで $\tau_{max} = 24\text{MPa}$, 小型ハニカムセルで $\tau_{max} = 30\text{MPa}$ となった. したがって, 小型ハニカムセルは大型ハニカムセルに対して最大せん断応力 τ_{max} は 1.3 倍大きい. しかし, 圧力低下 Δp は小型ハニカムセルでは $\Delta p = 0.01\text{MPa}$, 大型ハニカムセル $\Delta p = 0.03\text{MPa}$, となった. 一方, ナノバブル密度 $N_d(70)$ で比較すると大型ハニカムセルが $N_d(70) = 3.0$ (Particle $10^6/\text{ml}$), 小型ハニカムセルが $N_d(70) = 6.5$ (Particle $10^6/\text{ml}$) となり, 小型ハニカムセルのほうが大きい. このように, 小型ハニカムセルのほうが圧力低下 Δp は小さいが, 最大せん断応力 τ_{max} とナノバブル密度 $N_d(70)$ は大きい. よってせん断応力 τ_{max} がナノバブル生成能力に大きく関係していることを示している.

ナノバブル生成能力に関する研究例を見ると, ベンチュリ管を用いたナノバブルやマイクロバブルの生成も報告されているが, 圧力低下に生成能力が支配されている. そこでの圧力低下の値は本研究と比べ, 10 倍程度である. よって, 本研究では圧力低下のナノバブル生成の影響は小さいと考える²³⁾.

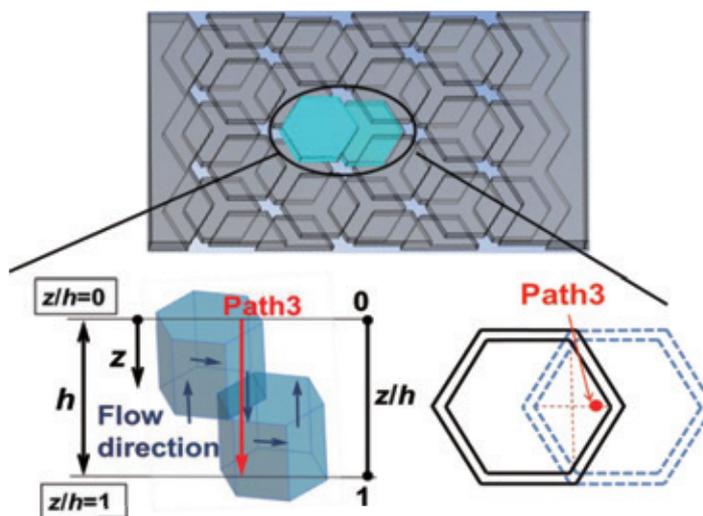


Fig. 9 Analytical path

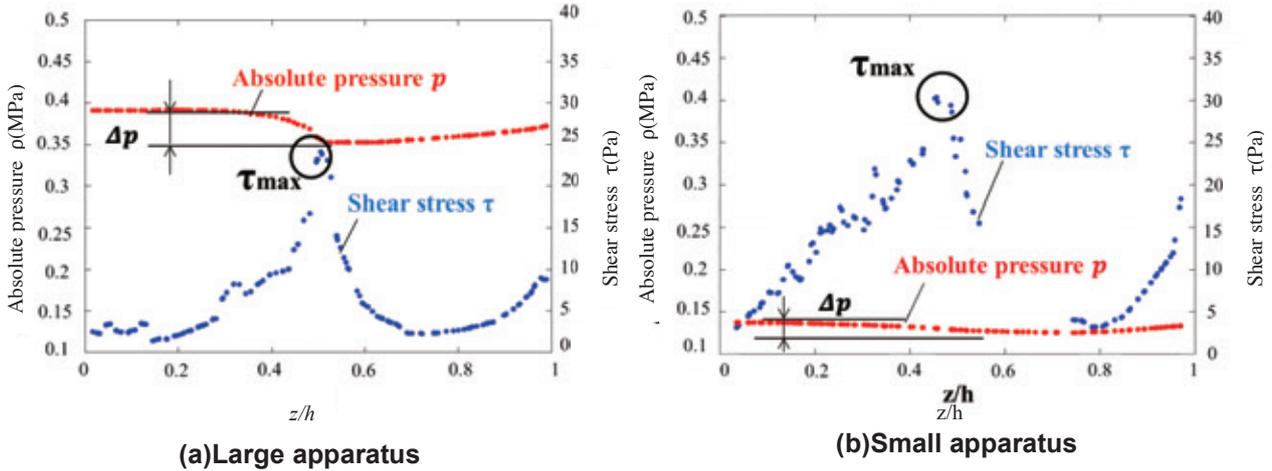


Fig. 10 Absolute pressure and shear stress on Path3

Table 5 Comparison of apparatus abilities

	Item	Large apparatus	Small apparatus
Experimental result	Nanobubble number density after 30min $N_d^{exp}(70)$ (Particle $10^6/l$ ml)	3.0	6.5
Analysis condition	Inlet absolute pressure p_{in} (MPa)	0.45	0.16
Analysis results	Pressure drop Δp (MPa)	0.03	0.01
	Shear stress τ_{max} (Pa)	24	30

4.5 流体条件を変えた PBM 解析と CFD 解析の結果

次にナノバブル生成能力の高い小型ハニカムセルを用いて流体条件を変えて PBM-CFD 解析を行った。図 11 に入口圧力 p_{in} を変化させてナノバブル密度 $N_d(x)$ を示す。ここで分布 $N_d(x)$ は 3 次元スプライン関数を用いて滑らかなピークが得られるように描いている。入口圧力 p_{in} を大きくすると、ナノバブル密度 $N_d(x)$ は大きくなり、最大のナノバブル密度を示すバブル直径 x も大きくなる傾向がある。現有の小型装置ではポンプ性能の制約があり、駆動条件を広く変えて PBM-CFD 解析との一致を実験的に確認することはできないが、ここでは実験の入口圧力 $p_{in}=0.16\text{MPa}$ の条件で最大となる 70nm のナノバブル生成密度 $N_d(70)$ に注目して将来の装置改良の可能性を検討する。

図 12 に入口圧力 p_{in} を大きくしたときの最大せん断応力 τ_{max} とナノバブル密度 $N_d(70)$ を示す。CFD 解析の結果から入口圧力 p_{in} を増加させていくと、最大せん断応力は増加していくが、 $p_{in}=0.4\text{MPa}$ で飽和する。一方で、PBM 解析の結果から入口圧力 p_{in} を増加させていくと、ナノバブル密度 $N_d(70)$ は増加していくが、 $p_{in}=0.5\text{MPa}$ で飽和する。図 13 に CFD 解析から得られた最大せん断応力 τ_{max} と PBM 解析から得られたナノバブル密度 $N_d(70)$ の関係を示す。最大せん断応力 τ_{max} が大きくなると、ナノバブル密度 $N_d(70)$ も増加していく。このことから、最大せん断応力 τ_{max} からナノバブル密度 $N_d(70)$ を予測できることが示唆される。

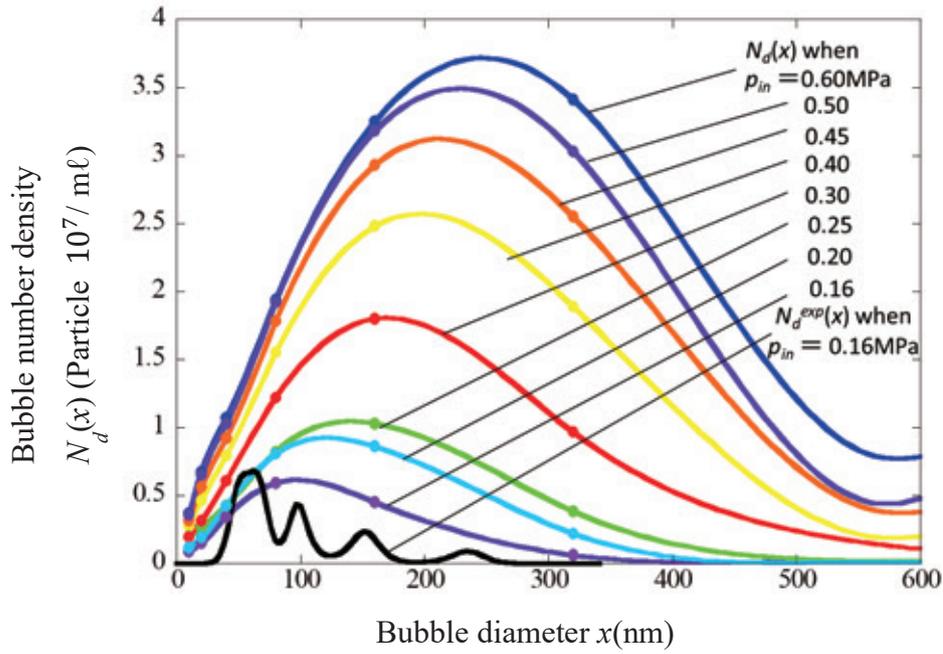


Fig. 11 Bubble number density $N_d(x)$ when absolute inlet pressure

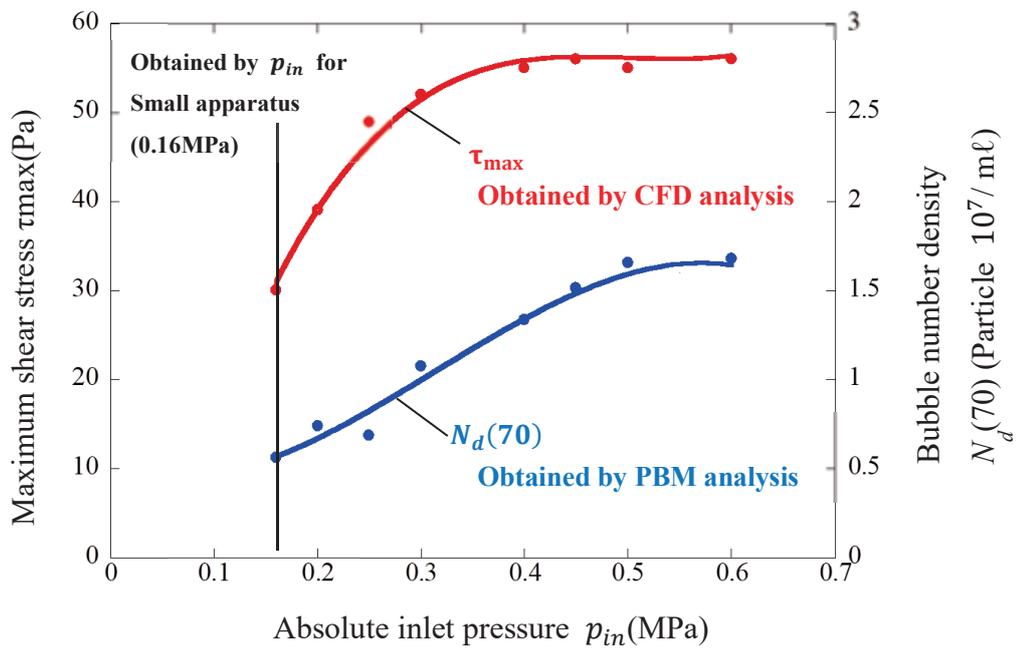


Fig. 12 Maximum shear stress τ_{max} and bubble number density $N_d(70)$ when absolute inlet pressure p_{in} changes

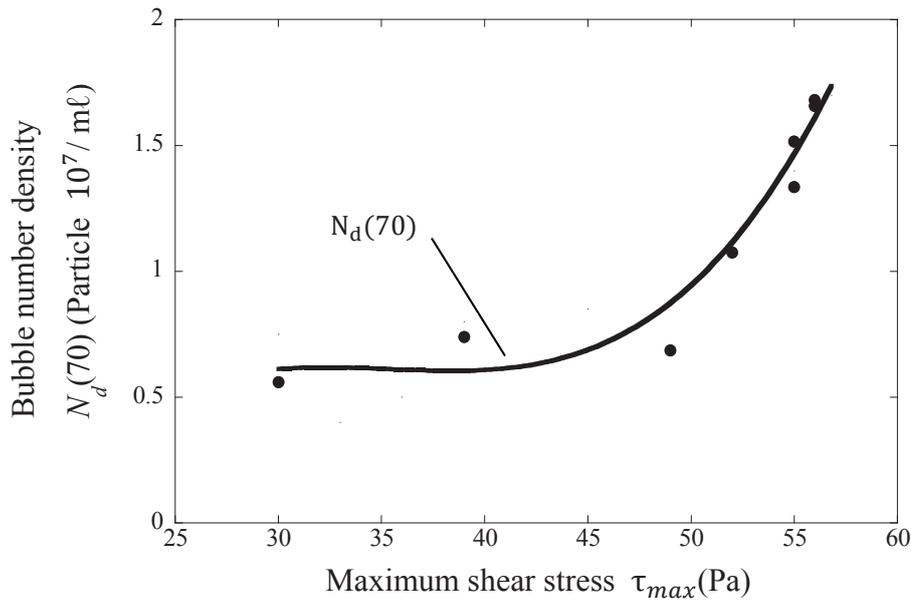


Fig. 13 Bubble number density $N_d(70)$ vs. maximum shear stress τ_{max}

5 結言

本研究ではハニカム構造体を用いたナノバブル生成装置に注目し、そのバブルの凝集と分裂を CFD-PBM 解析と実験によって考察した。ハニカム寸法の異なる大型・小型装置の実験結果より、密度が最大となった直径 $x = 70\text{nm}$ のナノバブル密度 $N_d(70)$ に注目して、ナノバブルの生成 (直径 $x = 1\sim 100\text{nm}$) を代表させて議論した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) CFD-PBM 解析で得られた大型装置と小型装置のナノバブル密度 $N_d(70)$ は、実験のナノバブル密度を相対誤差 15% 以内で近似できた (図 8)。このことから、異なる条件下でのナノバブル生成が CFD-PBM モデルを適用して予測できることが示唆される。
- (2) CFD 解析の結果から、入口圧力 p_{in} を増加させると、最大せん断応力 τ_{max} は増加するが、 $p_{in}=0.4\text{MPa}$ 付近で飽和する。PBM 解析の結果から、入口圧力 p_{in} を増加させると、ナノバブル密度 $N_d(70)$ は増加するが、 $p_{in}=0.5\text{MPa}$ 付近で飽和する (図 12)。
- (3) 最大せん断応力 $\tau_{max}=50\text{Pa}$ 付近を越えると、最大せん断応力 τ_{max} の増加に伴ってナノバブル密度 $N_d(70)$ は比例的に増加する (図 13)。すなわち、CFD 解析で求めた最大せん断応力の値からナノバブル密度が予測できることが示唆される。

参考文献

- 1) Fukushi, K., Matsui, Y. and Tambo, N.: Dissolved Air Flotation: Experiments and Kinetic Analysis, J. Water SRT-Aqua, 47, (1998), 76.
- 2) 大成博文, 佐賀孝徳, 渡辺勝利, 前田邦男, 松尾克美: マイクロバブルの高機能性と水質浄化, 資源処理技術, 46, 4 (1999), 238.
- 3) 角田出: マイクロおよびナノバブルの環境, 生物生産・食品および医療分野への利活用, 日本海水学会誌, 60, 3 (2006), 160.
- 4) 柘植秀樹: マイクロバブル・ナノバブルの基礎, 日本海水学会誌, 64, 1 (2010), 4.

- 5) 高橋正好：マイクロバブルとナノバブルの基礎と工学的応用，マテリアルインテグレーション，22, 5 (2009), 289.
- 6) Michioku, K., Kanda, T., Ohnari, H., Nishikawa, T., Matsuo, K. and Kido, T. : A Preliminary Experiment on Reservoir Water Purification by Using a Micro-Bubble Aeration System, Proceedings of Hydraulics Engineering JSCE, 44, (2000), 1119.
- 7) 長谷川裕晃, 正木康寛, 松内一雄, 吉田勇介：スリットを有する流路によるマイクロバブルの発生，日本機械学会論文集，72, 721 (2006), 2242.
- 8) 上山智嗣, 宮元誠：マイクロバブルの世界，工業調査会，東京，(2006), 24.
- 9) Krishna, R., Urseanu, M. I., Van Baten, J. M. and Ellenberger J. : Influence of Scale on the Hydrodynamics of Bubble Columns Operating in the Churn-Turbulent Regime : Experiments vs. Eulerian Simulations, Chemical Engineering Science, 54, (1999), 4903.
- 10) Wang, T. F., Wang, J. F. and Jin, Y. : Population Balance Model for Gas-Liquid Flows: Influence of Bubble Coalescence and Breakup Models, Industrial and Engineering Chemistry Research, 44, (2005), 7540.
- 11) Li, L. M., Liu, Z. Q., Li, B. K., Matsuura, H. and Tsukihashi, F. : Water Model and CFD-PBM Coupled Model of Gas-Liquid-Slag Three-Phase Flow in Ladle Metallurgy, ISIJ International, 55, (2015), 1337.
- 12) 微細気泡の最新技術：株式会社エヌ・ティー・エス，東京，2, (2014), 177.
- 13) 野田尚昭, 任飛, 山本弥, 上田鷹彦, 佐野義一, 陳玳琦, 高瀬康, 米澤裕二：ハニカム構造体を用いたナノバブル生成装置の設計とその性能，設計工学，53, 1 (2018), 111.
- 14) Delnoij, E., Lammers, F., Kuipers, J. and Van Swaaij, W. : Dynamic Simulation of Dispersed Gas-Liquid Two-Phase Flow Using a Discrete Bubble Model, Chemical Engineering Science, 52, (1997), 1429.
- 15) Sokolichin, A., Eigenberger, G., Lapin, A. and Lübert, A. : Dynamic Numerical Simulation of Gas-Liquid Two-Phase Flows Euler/Euler versus Euler/Lagrange, Chemical Engineering Science, 52, (1997), 611.
- 16) Drew, D. : Mathematical modeling of two-phase flow, Annual Review of Fluid Mechanics, 15, (1983), 261.
- 17) Liang, X. F., Pan, H., Su, Y. H. and Luo, Z. H. : CFD-PBM Approach with Modified Drag Model for the Gas-Liquid Flow in a Bubble Column, Chemical Engineering Research and Design, 112, (2016), 88.
- 18) 工藤嘉晃, 平木講儒：気液混合における混合エネルギーからみたハニカム式混合装置の特性比較，マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集，3 (2011), 26.
- 19) Takamasa, T. and Tomiyama A. : Three-Dimensional Gas-Liquid Two-Phase Bubbly Flow in a C-Shaped Tube, Ninth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9). San Francisco, CA., (1999).
- 20) ANSYS® Academic Research, リリース 16.2, ANSYS, Inc.
- 21) Luo, H. and Svendsen, H.-F.: Theoretical Model for Drop and Bubble Breakup in Turbulent Dispersions, American Institute of Chemical Engineers Journal, 42, (1996), 1225.
- 22) Ueda, T., Zhai, H., Ren, F., Noda, N. A., Sano, Y., Takase, Y., Yonezawa, Y. and Tanaka, H. : Design and Performance of Honeycomb Structure for Nanobubbles Generating Apparatus Having Different Cell Dimensions, 2018 International Conference on Material Strength and Applied Mechanics, (2018), 372.
- 23) 上澤伸一郎, 金子暁子, 野村康通, 阿部豊：ICMF2013に参加して，日本混相流学会，27, 3 (2013), 346.