

ハニカム構造体からなるナノバブル生成装置の生成能力に及ぼす異なるセルサイズと流れ特性の影響*

Elucidation of Flow Characteristics in Honeycomb Structure for Nanobubble Generating Apparatus

野田 尚 昭** NODA Nao-Aki	高田 翔** TAKATA Kakeru	川野 凌** KAWANO Ryo
佐野 義一** SANO Yoshikazu	高瀬 康*** TAKASE Yasushi	翟 洪方** ZHAI Hongfang
任 飛**** REN Fei	上田 鷹彦** UEDA Takahiko	米澤 裕二† YONEZAWA Yuji
梅景俊彦** UMEKAGE Toshihiko	田中 洋征** TANAKA Hiroyuki	

Abstract In this study, nanobubble generator using a honeycomb structure is investigated towards producing a large amount of water including large nanobubble density. Our previous study showed that the pressure reduction and shear stress are involved in the honeycomb cell flow. In this study, the nanobubble generating performance is studied experimentally for honeycomb structures by varying the cell size and the flow velocity. Then, the small-scale honeycomb cell structure is studied for the broader industrial applications. Computational Fluid Dynamics analysis is also performed to simulate the experiment to find out the efficient nanobubble generation. The results show that the maximum shear stress is the main controlling factor of the nanobubble generation for small and large apparatuses.

Keywords: Nanobubble, Honeycomb, Computational fluid dynamics (CFD)

1. 緒言

ナノバブルは通常のバブルと異なり、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。(i)水中での滞在時間が長く、直径 $1\ \text{mm}$ のバブルは 1 分間に数 m 上昇するが、ナノバブルは数ヶ月を経ても、浮力の影響を受けず、ナノバブルが液中に安定的に存在する[1–3]。(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[2–4]。(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 $1\ \text{mm}$ 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有する[2–4]。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[5–8]。例えば、機械加工の際に切り屑除去用加工液に用いられ、加工効率を向上させる例がある[9,10]。本研究で考察するハニカム構造

* Received: 28 February 2020 / Accepted: 6 June 2020 / Published online: 5 March 2021

** 九州工業大学大学院工学研究院 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

TEL: (093)884-3124 FAX: (093)8714-8591 E-mail: noda.naoaki844@mail.kyutech.jp

*** 九州工業大学戸畑・若松キャンパス技術部

**** 齊魯工業大学

† 丸福水産㈱

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ことが可能であるため、ナノバブルの効率的な作製技術として注目されている[11]。後述するように、本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ため他分野への応用が期待できる。

バブルの生成技術に関して、これまでにいくつかの報告がある[12–14]。これまでに、ハニカム構造体を用いる技術について研究されてきた[15–16]。ハニカム型混合器の内部を模した管路に、水と空気の気液二相流を流入させる可視化実験により、セル結合部断面を通過するまでに、バブルが徐々に細長く変形し分裂する様子が確認された[15]。流体解析により、圧力は上流から下流側セルにかけて降下し、セル内ではせん断応力は変動し大きくなる箇所があることがわかった。このことから、気泡が下流に移動するにつれて膨張や変形しやすくなり、同時に細長く変形した気泡に強いせん断応力が働くことで気泡の分裂が起こるとの見解が得られている[16]。そこで、著者らもハニカム構造体を用いた技術に着目した。また、Fig. 1 に示す 1000 L 水槽用の大型ナノバブル生成装置を試作し、流量や入口圧力の増加によるせん断応力や流速の増加がナノバブル生成能力に関与することを、実際のナノバブル生成装置で実証した[17]。

本研究では、ハニカム構造諸元とナノバブル生成効率との関連についてより詳細に考察する。この目的のため、大型装置に加えて、新たに 100 L 水槽を対象とした小型ナノバブル生成装置を試作する。そして、実験と流体解析の両面から大型装置と小型装置の比較を行い、それぞれの装置およびハニカム構造の窒素ガスナノバブル生成に関する特性を明らかにする。

2. 大型・小型装置のナノバブル生成実験

2.1 ナノバブル生成装置とナノバブル密度測定法

Fig. 1(a)、Fig. 2(a)にそれぞれハニカムユニットを装着した 1000 L 水槽装備の大型および 100 L 水槽装備の小型ナノバブル生成装置の概略図を示す。Fig. 1(b)、Fig. 2(b)にそれぞれの装置に装着されているハニカムユニットの概略図を示す。ナノバブル生成装置のポンプ入口にチューブを

挿入し、ガスを流入する。水とガスは同時にポンプ内を通過する。ナノバブル生成装置に入る水（ガスを含む）はハニカムユニット面に対して平行に流入・流出する。Fig. 3(a)に示すように、一对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 ユニットとする。大型装置は合計 12 または 15 ユニット、小型装置は合計 16 ユニットの装着している。また、Fig. 3(b)の上部に解析モデルの模式図を、下部に窒素ガスを含む混合流体がハニカム構造を流れる状態の模式図を示す。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る。バブル発生装置を出た水はコンテナ(水 100 L)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[17]。Table 1 に小型装置と前報で用いた大型装置それぞれの諸元を示す。小型装置の水量は大型装置の 0.1 倍と小さいため、小さい出力のポンプを用いた。Fig. 4 に大型装置と小型装置のハニカムセルの各寸法を示す。小型装置のハニカムサイズは大型装置に対して横は 0.64 倍、高さは 0.4 倍である。小型装置は、持ち運びに便利な実用上の観点から設計されており、大型装置に比べ流路内の圧力やせん断応力が増加するため、セルの壁面を厚くしている。

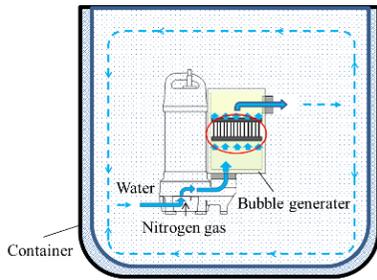
本研究ではナノバブル密度の測定にレーザー回析・散乱法を用いたナノ粒子解析装置「Nano Sight LM10-HS」を使用する[18,19]。Fig. 5 にナノ粒子の可視化原理の概略図を示す。その原理は、サンプル液に紫色のレーザー光を水平方向に照射し、ナノ粒子からの側方散乱光を対物レンズで可視化し、各粒子の移動軌跡を PC 上に表示する。画面上で認識された全粒子のブラウン運動をトラッキングし、ストークス・アインシュタイン式を用いて、粒子の移動速度から粒径を算出する。レーザー回析・散乱法は粒子トラッキング法と比較しナノバブル測定に有効であることが示されている[20]。

Fig. 6 に小型装置 (Table 1, Small apparatus) のナノバブル生成実験の例を示す。実験開始前 ($t = 0$) のナノバブル密度 $N_d^{exp}(x)|_{t=0}$ と実験終了 ($t = 30$ 分) のナノバブル密度 $N_d^{exp}(x)|_{t=30}$ に注目する。本実験では水道水を用いているため、ナノバブル以外の微細な物体も検出されるので Fig. 6 の $t =$

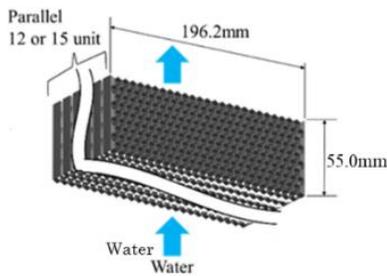
0 と $t = 30$ 分の測定値の差 $N_d^{exp}(x)|_{t=30} - N_d^{exp}(x)|_{t=0}$ が本実験で生成されたナノバブルである。サンプル液を採取後、 $1\ \mu\text{m}$ 以上のマイクロバブル等が消失し、ナノバブルのみの安定状態となる[21]。Fig. 6 から、本装置は $100\ \text{nm}$ 以下のナノバブル領域に最大密度が生じる特性を有することがわかる。なお複数の細かいピークの生じることについては、これまで十分な調査や分析がなされていない。

2.2 大型装置を用いた実験の結果

Table 2 に実験条件①～④を示す。ここではナノバブル生成効率に及ぼす設計要因として、ポンプ出力 P_w 、ハニカムユニット数 N_{unit} 、およびハニカムユニット間のすきま C_l に注目した。絶対圧力 p_{in} は入口からハニカムユニットに流入時に計測した値とし、ポンプ吐出流量 (Flow rate) は、水深 $4\ \text{cm}$ に浸漬しているため非常に浅いので、大気中に吐き出す条件で計測した。

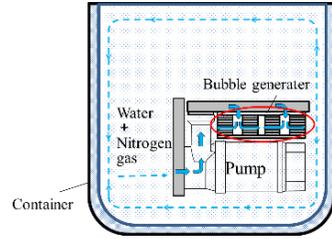


(a) Experimental device including parallel honeycomb units

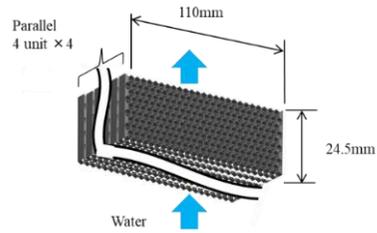


(b) Honeycomb unit

Fig. 1 Large nanobubbles generating apparatus.

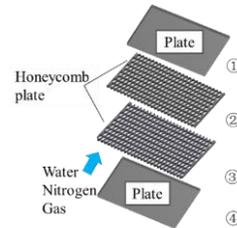


(a) Experimental device including parallel honeycomb units

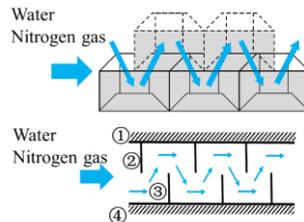


(b) Honeycomb unit

Fig. 2 Small nanobubbles generating apparatus.

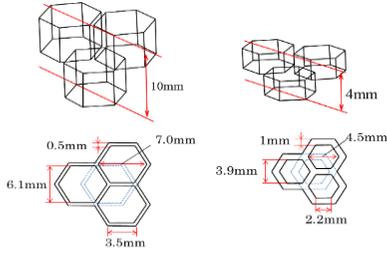


(a) 1-unit composition



(b) Cross section 1-unit honeycomb structure

Fig. 3 Illustration of honeycomb structure to generate nanobubbles.



(a) Large apparatus (b) Small apparatus

Fig. 4 Dimensions of honeycomb cell.

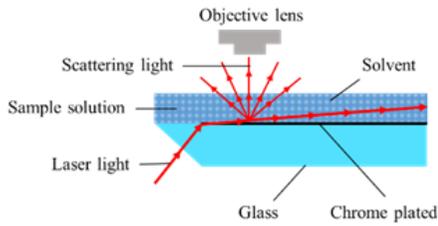


Fig. 5 Visualization principle for nanobubbles.

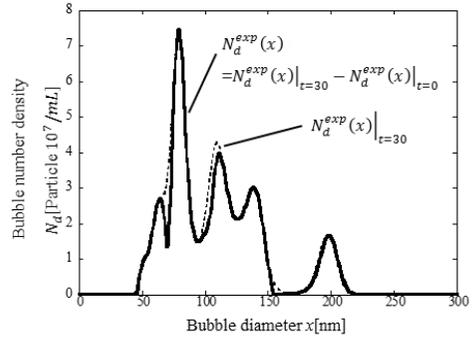


Fig. 6 Number density distribution for small apparatus.

Table 1 Details of nanobubbles generating apparatus using honeycomb cell.

Item	Large apparatus	Small apparatus
Pump	Submersible pump (80TM23.7)	Submersible pump (50TMLS2.4S)
Output [kW]	3.7 (60Hz)	0.4 (60Hz)
Flow rate [L/min]	400	270
Cell size [mm]	6.1	3.9
Cell height [mm]	10	4
Cell number*	3510	1840
Water amount [L]	Tap water, 1000	Tap water, 100
Gas	Nitrogen	Nitrogen
Gas purity [%]	99.9	99.9
Flow rate [L/min]	5.0	1.0
Pressure [MPa]	0.30	0.20

*Upper cell + Lower cell

なお、水温は20°C以下ではナノバブル生成に影響しないことが報告されているので、ナノバブル生成に影響しない (Table 2 参照) [22]。

ナノバブル生成効率、ナノバブル密度の時間変化で評価する。ここでは、直径 10 nm~1000 nm (Nano sight の測定可能範囲) をナノバブルとした。Fig. 7、Fig. 8 に Target(破線)として示すのは、ナノバブル密度 N_d の目標値、すなわち $t = 60$ 分で $N_d \geq 2 \times 10^8$ 個/mL である。この目標値 $N_d \geq 2 \times 10^8$ 個/mL は腐敗防止の判定に用いられている値であり [18]、実際に魚介類を用いた官能検査や一般生菌数の検査で、出荷時にナノバブル密度 $N_d \geq 2 \times 10^8$ 個/mL 以上であれば、ナノバブル処理を行っていない場合に比べ、7 日後に明らかに良い結果が得られる。なお、本研究で測定した他の条件下でのナノバブル分布も Fig. 6 に示すように、複数のナノバブル密度のピークを有するが、直径 70 nm のあたりで最大のナノバブル密度を示すことを確認している。

ポンプ出力 P_w の影響を調べるため、Fig. 7 にナノバブル密度の時間変化を異なるポンプ出力で比較して示す (Table 2 の条件①、②)。ポンプ出力が $P_w = 3.7$ kW から $P_w = 2.0$ kW へ低下したことにより、ナノバブル密度は目標値に大きく及ばなかった。すなわち、ポンプ出力の違いにより、流量や入口圧力が変化し、その結果ナノバブル生成能力へ大きく影響する。

ハニカムユニット数 N_{unit} の影響を調べるため、Fig. 8 にナノバブル密度の時間変化を $N_{unit} = 12$ と $N_{unit} = 15$ で示す (Table 2 の条件①、③)。ここでは装置の寸法上の制約のためハニカムユニット数は $N_{unit} = 12 \sim 15$ で設定する必要がある。ユニット数を変化させると、流量が低下する一方で、圧力の上昇がみられる。しかし、ハ

ニカムユニット数 $N_{unit} = 12 \sim 15$ の範囲では、ナノバブル生成効率の影響はさほど大きいとは言えない。

ハニカムユニットの製作、組み立て精度あるいは使用中の変形に関係して、ハニカムプレート間のすきま C_l の発生が想定される。Fig. 9 に

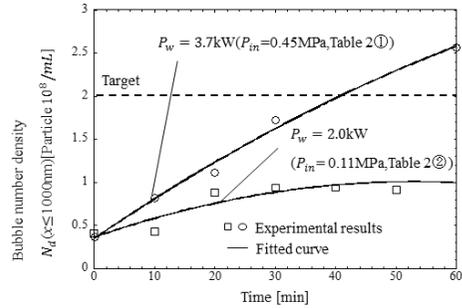


Fig. 7 Variation of nanobubbles number density during $t = 0 \sim 60$ min when $P_w = 3.7$ kW and 2.0 kW (See Table 2 ①, ②).

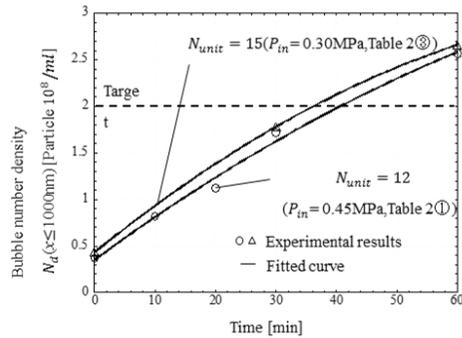


Fig. 8 Variation of nanobubbles number density during $t = 0 \sim 60$ min when $N_{unit} = 15$ and 12 (See Table 2 ①, ③).

Table 2 Experimental conditions of large apparatus.

Experimental conditions	Number of units N_{unit}	Clearance C_l [mm]	Inlet absolute Pressure p_{in} [MPa]	Flow rate [L/min]	Power P_w [kW]	Temperature [°C]
①*	12	0	0.45	650	3.7	17.2
②	12	0	0.11	300	2.0	17.2
③	15	0	0.30	550	3.7	17.3
④	12	2	0.16	470**	3.7	19.3

* Standard condition ** Calculated from the result of ①~③

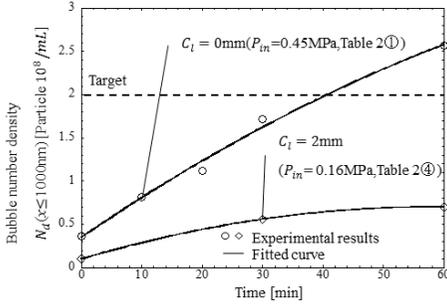


Fig. 9 Variation of nanobubbles number density during $t = 0 \sim 60$ min when $C_l = 0$ mm and 2mm (See Table 2 ①, ④).

すきま C_l の影響によるナノバブル密度の時間変化を $C_l = 0$ と $C_l = 2$ mm について示す (Table 2 の条件①, ④)。2枚のハニカムプレート間の端部に 2mm のスペーサーを挟むことですきま C_l を設定し、その生成能力への影響を確認した。Fig. 9 の $t = 60$ 分に注目すると、すきまのない場合 $C_l = 0$ mm に対してすきま $C_l = 2$ mm のときには生成密度は約 70% に低下している。すきまにより、流量の増大や流れの分散が発生し、圧力変化やせん断応力、流速が変化するため、すきま C_l により生成能力が低下することがわかった。

以上の実験結果を総括すると、用いた実験システムで標準とする条件 (ポンプ出力 $P_w = 3.7$ kW、ハニカムユニット間すきま $C_l = 0$ mm、ハニカムユニット数 $N_{unit} = 12$ 個以上) において、ナノバブル密度の目標値を達成できることが

明らかになった。

2.3 両装置におけるナノバブル生成実験結果の比較

大型装置と小型装置では対象とする水量やハニカムセルサイズ、ポンプ出力に違いがある。よって両者のナノバブル生成効率を、実験による 1セル、1サイクル当たりのナノバブル密度 ($t = 30$ 分) のに注目して比較を行う。Table 3 に大型・小型装置の実験条件を示す。大型装置の実験条件は、Table 2 の条件①を比較に用いる。Fig. 10 に大型装置と小型装置のナノバブル密度の時間変化を、実験開始 $t = 0 \sim 30$ 分の範囲で示す。ナノバブル密度に注目すると、小型装置 10 分後には目標値を達成し、その後さらにナノバブル密度は大きくなっていることがわかる。これまでの研究で得られた大型装置の実験値と比較すると、目標値をより短時間で達成している。なお、水槽の大きさに応じて付着気泡数が増えることも考えられる。しかし、小型装置では水槽の容量に対して表面積が大きいので、ナノバブルが壁面に付着するのであれば、その影響は小型装置の方が大きい。それにもかかわらず、ナノバブル密度は小型装置が勝っているので、今回の結論に付着気泡の影響はないと考えられる。

Fig. 11 に、実験開始前 $t = 0$ のナノバブル密度 $N_d^{exp}(x)|_{t=0}$ と、 $t = 30$ 分のナノバブル密度 $N_d^{exp}(x)|_{t=30}$ のナノバブル分布の差 $N_d^{exp}(x)|_{t=30} - N_d^{exp}(x)|_{t=0}$ を示す。水道水を用いているためナノバブル以外の微細な物体も検出されるの

Table 3 Experimental conditions of large and small apparatus.

Experimental conditions	Large apparatus	Small apparatus
Power P_w [kW]	3.7	0.4
Wall Thickness [mm]	0.5	1
Inlet absolute pressure p_{in} [MPa]	0.45	0.16
Flow rate Q [L/min]	650	103
Water	Tap water	Tap water
Gas	Nitrogen	Nitrogen
Gas flow rate Q_{gas} [L/min]	5.0	1.0
Gas pressure [MPa]	0.30	0.20
Void fraction ($= \frac{Q}{Q_{gas}}$) [-]	0.0091	0.0097
Time for experiment t [min]	0 ~ 30	0 ~ 30

で Fig. 11 の $t=0$ と $t=30$ 分の測定値の差が本実験で生成されたナノバブルである。Fig. 6 と Fig. 11(b) を比較するとナノバブル密度に複数のピークが同様に存在しており、同様の傾向が確認できる。特に最大密度の気泡径はほぼ一致しており、再現性が確認できる。また窒素ガスの流量は、水の流量に対して体積比で 1% になるように設定している。しかし、水の流量の制御に制約があるため、Table 3 の Void fraction に示す程度の誤差が生じる。

次にハニカム構造体のエロージョンについて確認した。未使用のハニカム構造体と 1 日 1 時間の稼働で、週 6 回のペースで 1 年間使用したハニカム構造体 (使用済) を比較した。ハニカム間の幅を比較すると未使用は 1.03 mm、使用済は 1.02 mm で加工誤差 (± 0.05 mm) の範囲内であり、エロージョンは発生してないと考えられる。

3. ナノバブル生成要因の評価

3.1 流体解析の方法

前報[18]で大型装置の性能解析に用いたセル内縦方向流路中心の流路 Path に加え、せん断応力の評価をより明確にするため、壁近傍と凸角部の流れに注目する。そのため、壁からの距離を変えるととも横方向の流路 Path を追加する。Fig. 12 に解析モデルの概略、Table 4 に大型装置と小型装置の解析条件を示す。実験結果から解析では以下の 3 つの条件をすべて満たしているため、単相流として扱う。(i) 第 2 相は気泡なので密度が小さいこと。このため速度差がほとんど無く、両者の速度差による流れへの影

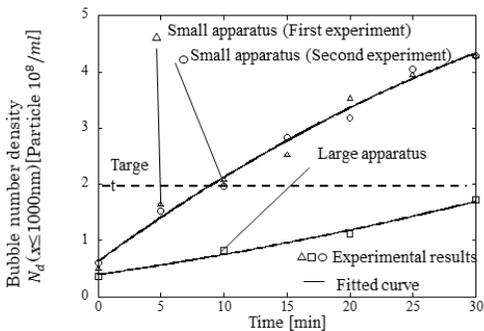


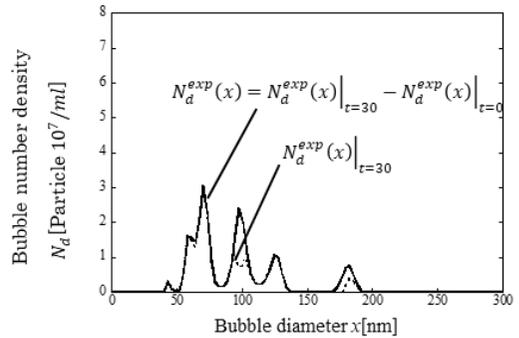
Fig. 10 Variation of nanobubbles number density for large and small apparatus during $t=0 \sim 60$ min.

響がほとんどないこと。(ii) 第 2 相は気泡サイズが小さいこと。微細なナノ・マクロバブルの液体中での上昇速度は流れのスケールに対して無視小で流れへの影響はほとんどないこと。(iii) 第 2 相の体積比が小さいこと。気体の体積比が大きい場合には流れの性質が変化するが、本研究では体積比が 400 万分の 1 であるため、その影響は無視できること。

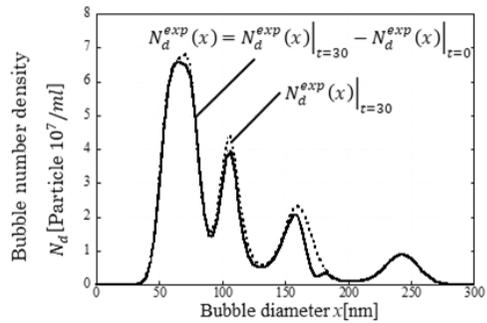
よって本解析では単相流として扱い、水のみ流入させた。解析には ANSYS Fluent 16.2 を用いた。

ここでは、乱流モデル(k- ϵ モデル)を使用し、定常計算とした。境界条件として、流入口、流出口で圧力条件に実験値を設定した (Table 3 参照)。

Fig. 13 に壁近傍の流路における、せん断応力の分布の解析結果を、壁面からの距離 d を変え



(a) Large apparatus



(b) Small apparatus

Fig. 11 Newly created bubble number density $N_d^{exp}(x) |_{t=30} - N_d^{exp}(x) |_{t=0}$ in comparison with bubble number density $N_d^{exp}(x) |_{t=30}$.

で示す。ここでせん断応力は、粘度とせん断ひずみ速度の積で算出している。ひずみテンソル e_{ij} は式(1)で表される[23]。

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

このテンソルは3つのスカラー不変量を持ち、そのうちの1つはせん断ひずみ速度 I は式(2)となる。

$$I = \left[2 \frac{U_i}{\partial x_j} e_{ij} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式(2)に速度成分 U_x, U_y, U_z を用いると、せん断ひずみ速度 I は式(3)のように表現される。

$$I = \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_z}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Fig. 14 に Path 上の各位置におけるせん断応力の大きさを式(3)のスカラー量で表して示す。セル内流路の中心に対して、上部セルと下部セルの角部付近に大きいせん断応力が発生しており、壁からの距離が大きときその最大値は小さくなる。Fig. 14 の z はセル上面からの距離、 h は流路内の高さである。したがって z/h は、セル上面から底面までのどの位置にいるのかを示す。同様に y は Fig. 14 の原点（壁面）から右方向への距離、 w は基準とするセルの横幅の長

さを示す。Fig. 13 に示すように壁面のごく近傍の速度勾配が大きい領域では、渦の発生による速度変動によってせん断応力の計算値がばらつくため、本報では、その影響が比較的小さい $d = 0.1\text{mm}$ 以上を対象として検討を行う。

Fig. 15 に小型装置のハニカムセル内におけるせん断応力分布と流路 Path の概要図を示す。Path はすべて解析モデルの中心線上とし、Path1、5 は流路の中心に、Path2、3、4、6 は壁近傍に設定する。

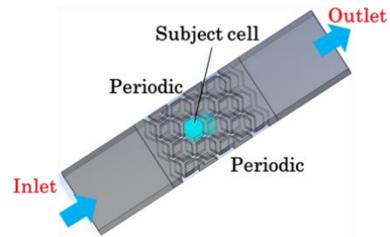


Fig. 12 Analysis model.

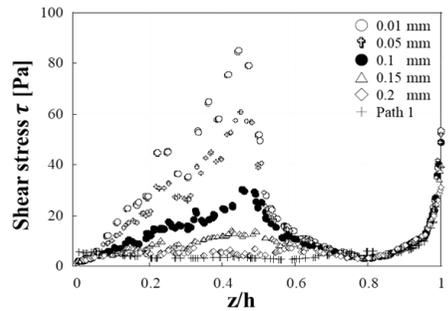


Fig. 13 Shear stress along perpendicular frameby varying the distance d from the wall.

Table 4 Analysis conditions of large and small apparatus.

Item	Large apparatus	Small apparatus
Inlet absolute pressure p_{in} [MPa]	0.45	0.16
Outlet absolute pressure [MPa]	0.10	0.10
Water density [kg/m^3]	998.2	998.2
Water viscosity [$\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$]	0.001003	0.001003

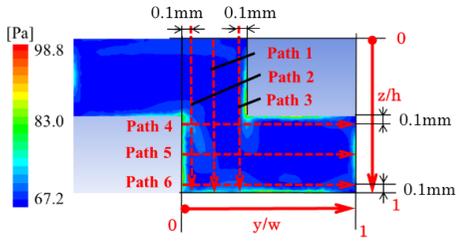


Fig. 14 Shear stress distribution and definition of flow path.

3.2 流体解析の結果

Fig. 14 の縦方向の流路(Path 1、Path 2、Path 3)に沿った結果を Fig. 15(a)~(c)に示す。また、Fig. 14 の横方向の流路(Path 4、Path 5、Path 6)に沿った結果を Fig. 15(d)~(f)に示す。Path 1 は左右の壁の影響を最も受けない流路であり、Path 2、Path 3 は壁の影響を受ける流路である。同様に、Path 4、Path 6 は上面と下面の壁の影響を受ける流路であり、Path 5 は壁の影響を最も受けない流路である。各 Path における圧力とせん断応力分布を示す。横軸は流れのセル底面からの距離を示す無次元数 z/h および壁間距離 y/w である。縦軸は流体 Path における圧力およびせん断応力である。また、Fig. 14 より、壁から 0.1mm 以内のプロットは除いて示す。縦方向 Path 1~3 の圧力に注目すると、流路半ばまでは減少しその後上昇する傾向が見られ、圧力の低下量は $\Delta p = 0.01\text{MPa}$ と Path 1~3 でほぼ一致し

た。せん断応力は、Path 2、Path 3 の角部付近 ($z/h=0.5$) で最大値を示し、その値は約 $\tau_{\max} = 30\text{MPa}$ である。また、横方向 Path については、圧力は縦方向 Path と同様に減少し、その後上昇する傾向が見られ、せん断応力は、角部付近に最大値が表れた。しかし、圧力変化量とせん断応力のいずれも縦方向 Path に比べ値が小さい。

これらより、絶対圧力はどの Path でも下降した後上昇し、せん断応力は壁に近い角部で高い値を示す。このことから、角部付近で多数のナノバブルが生成されているものと考えられる。また、これまで使用してきた大型装置と小型装置の性能比較を行うにあたり最大せん断応力が発生している Path 3 ($d = 0.1\text{mm}$) を代表流路とし、以下で考察する。

4. 実験及び流体解析結果の比較

4.1 両装置の特性比較

実験及び流体解析結果から両装置の性能について比較検討を行う。Table 5 に両装置の実験結果を示す。Table 5 より、両装置の能力をみると、30 分後におけるナノバブル密度は大型装置が $N_d^{\text{large}} = 1.7 \times 10^8$ particle/mL、小型装置は $N_d^{\text{small}} = 4.3 \times 10^8$ particle/mL となり、小型装置のほうが優れていることがわかる。

Table 6 より、両装置のそれぞれの実験条件における解析結果を比較すると、小型装置は流速と圧力低下量はともに小さいにもかかわらず、せん断応力は $\tau_{\max}^{\text{small}} / \tau_{\max}^{\text{large}} \approx 1.3$ になることがわかる。

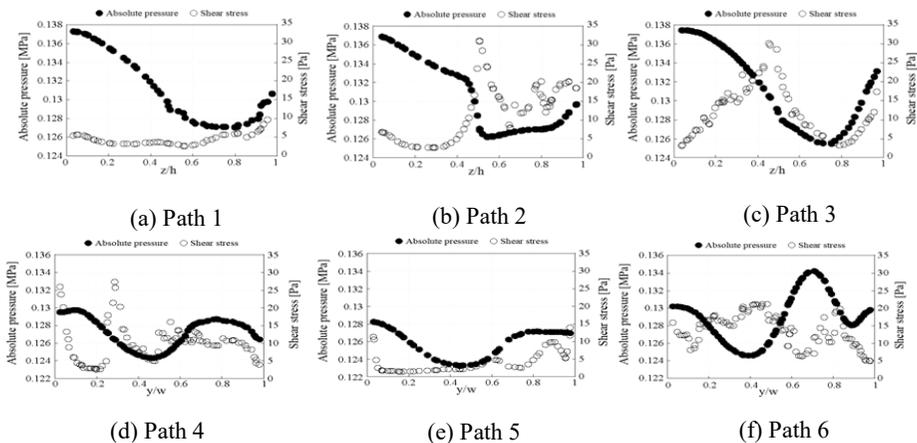


Fig. 15 Absolute pressure and shear stress distribution along the path.

Table 5 Comparison of apparatus ability experimentally obtained.

	Item		Large apparatus	Small apparatus
	Experimental condition	Output	P_w [kW]	3.7 (60Hz)
Flow rate		Q [L/min]	550	103
Water amount		V [L]	1000	100
Experiment time		t [min]	30	30
Experimental results	Nanobubble number density after 30min		$N_d^{large} = 1.7 \times 10^8$ [particle/mL]	$N_d^{small} = 4.3 \times 10^8$ [particle/mL]

Table 6 Comparison of apparatus ability analytically obtained.

	Item		Large apparatus	Small apparatus
	Analysis condition	Inlet absolute pressure	p_{in} [MPa]	0.45
Analysis results	Average velocity		$v_{large}^{0.45} = 0.71$ [m/s]	$v_{small}^{0.16} = 0.40$ [m/s]
	Pressure drop		$\Delta p_{large}^{0.45} = 0.03$ [MPa]	$\Delta p_{small}^{0.16} = 0.01$ [MPa]
	Shear stress		$\tau_{max\ large}^{0.45} = 24$ [Pa]	$\tau_{max\ small}^{0.16} = 30$ [Pa]

Table 7 Comparison of honeycomb cell ability experimental obtained.

	Item		Large model	Small model
	Experimental condition	Cell width	w [mm]	6.1
Cell height		h [mm]	10	4
Number of cells		N_{cell}	3510	1840
Flow rate		Q [L/min]	550	103
Water amount		V [L]	1000	100
Experiment time		t [min]	30	30
Number of cycle		N_{cycle}	33	31
Experimental results	Nanobubble number density per cell per cycle After 30min		$\rho_d^{large} = 3.13 \times 10^3$ [particle/mL]	$\rho_d^{small} = 7.61 \times 10^3$ [particle/mL]

4.2 両装置のハニカムセルの特性比較

実験及び流体解析結果から両セルの性能について比較検討を行う。Table 7 に両セルの実験結果と解析結果を示す。1セル、1サイクル当たりのナノバブル密度 ρ_d は、Table 7 中に示す30分後のナノバブル密度 N_d を水量の循環回数(N_{cycle} , 式(4))とセルの総数で除す方法で算出した(式(5))。

$$N_{cycle} = (Q \cdot t) / V \quad (4)$$

$$\rho_d = N_d / (N_{cell} \cdot N_{cycle}) \quad (5)$$

Table 7 より、セルの能力をみると、1セル1サイクル当たりの生成能力は大型装置では $\rho_d^{large} = 3.13 \times 10^3$ particle/mL、小型装置では $\rho_d^{small} = 7.61 \times 10^3$ particle/mLとなった。小型装置

Table 8 Comparison of cell ability analytically obtained.

Analysis condition	Item		Large cell	Small cell
	Inlet absolute pressure	p_{in} [MPa]		0.45
Analysis results	Average velocity		$v_{large}^{0.45} = 0.71$ [m/s]	$v_{small}^{0.45} = 0.95$ [m/s]
	Pressure drop		$\Delta p_{large}^{0.45} = 0.03$ [MPa]	$\Delta p_{small}^{0.45} = 0.07$ [MPa]
	Shear stress		$\tau_{max\ large}^{0.45} = 24$ [Pa]	$\tau_{max\ small}^{0.45} = 56$ [Pa]

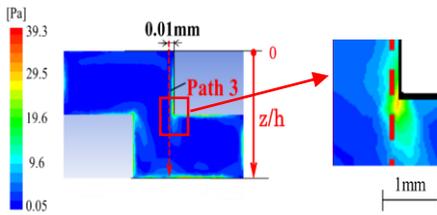


Fig. 16 Shear stress distribution of large apparatus.

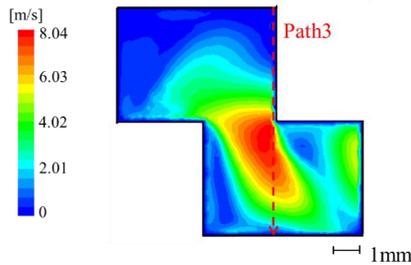


Fig. 17 Velocity distribution of large apparatus.

は大型装置に対して $\rho_d^{small}/\rho_d^{large} = 2.4$ であることがわかる。

次に、両セルにおけるせん断応力の違いを比較するために、入口圧力 p_{in} を等しく、すなわち大型・小型両装置の圧力損失を同一にして解析を行った。Table 8 より、同一入口圧力での小型装置のせん断応力 $\tau_{max}^{0.45}$ は、大型装置に対して $\tau_{max\ small}^{0.45} / \tau_{max\ large}^{0.45} = 2.3$ となる。また、圧力低下 Δp は大型装置では $\Delta p_{large}^{0.45} = 0.03$ MPa、小型装置では $\Delta p_{small}^{0.45} = 0.07$ MPa であり、

$\Delta p_{small}^{0.45} / \Delta p_{large}^{0.45} = 2.3$ であることがわかる。

しかし、これらの圧力変動 $\Delta p_{large}^{0.45} = 0.03$ MPa や $\Delta p_{small}^{0.16} = 0.01$ MPa は、ベンチュリ管等を用いたナノバブルやマイクロバブルの生成装置の圧力の変動の 1/10 程度であり、そのナノバブル生成の影響は小さいと考えられる [24]。Table 6 に示す大型装置と小型装置の性能比較とその考察により、せん断応力がナノバブル生成能力に大きく関係していることがより明確に示された。

次に、最大せん断応力の発生位置について大型装置を対象に考察する。Fig. 16 にせん断応力のコンター図を示す。せん断応力は、壁面から 0.1mm 離れた Path3 に沿う角部付近に最大値が表れていることがわかる。Fig. 17 に示す流速のコンター図から、流速も最大せん断応力が表れる角部付近で大きくなることが示される。気泡が小さくなるほど気泡は液体と同じように流れる。そのため、大きいせん断応力の発生する角部で、気泡の分裂が促進され、ナノバブルを生じやすくなっていることが示唆される。

5. 大型・小型装置及び既存の装置の比較

これまでに公表された既存のナノバブル生成装置とナノバブル生成能力を比較するために、Table 9 に大型・小型装置の実験条件と実験結果を、既存の NanoGALF 装置 (IDEC 社) と比較して示す。NanoGALF 装置は第四世代 [25] まで報告されているが、ここではハニカム型装置と同様に Nano Sight を用いてナノバブル密度を計測している、第三世代の装置 [26] を対象とする。この既存の装置は圧力勾配を用いてナノバブルを生成しており、本報の装置とは生成方法

Table 9 Comparison of experimental results.

	Item		This study		Comparison
			Large apparatus (NANOX)	Small apparatus (NANOX)	NanoGALF (IDEC)
Experimental conditions	Flow rate	Q [L/min]	550	103	16
	Inlet absolute pressure	p_{in} [MPa]	0.45	0.16	0.3
	Experiment time	t [min]	30	30	30
Experimental results (After 30 min)	Nanobubble number density	N_d [particle/mL]	1.7×10^8	4.3×10^8	1.42×10^8

が異なる。ナノバブル密度（30分後）を比較すると大型装置と小型装置ともにハニカム型装置は NanoGALF 装置と同等以上のナノバブル密度を有することを明らかにできた。

6. 結 言

ハニカムセルを用いたナノバブル生成試作装置を使用して、窒素ガス混入水におけるナノバブル生成実験を行った。前報で扱った大型装置に加えて、本研究ではセル寸法の異なる小型装置も対象として、両装置を実験・流体解析の両面から考察した。その結果、最大せん断応力の発生個所を特定するとともに、せん断応力がナノバブル生成に関与していることを明確した。得られた結論をまとめると以下ようになる。

- (1) セル寸法の異なる大型・小型両装置のナノバブル生成実験において、実験開始 30 分後のナノバブル密度に注目すると、小型装置の方が目標達成に要する時間が短い。
- (2) 1セルの生成能力を、1セル1循環当たりのナノバブル密度（30分後）で表すと、小型装置のセルは大型装置のセルの2.4倍である。
- (3) 流体解析の結果、ハニカムセル内流路中の最大せん断応力は、壁の近傍で、かつハニカム角部付近に現れる。壁近傍 0.1mm において、大型装置に対して小型装置の最大

せん断応力は2.3倍である。

- (4) 本装置の圧力変動は他の生成装置の圧力の変動の 1/10 程度であり、ナノバブル生成には圧力よりもせん断応力が大きく関与していると考えられる。

謝 辞

本研究の大部分は、戦略的基盤技術高度化支援事業（平成 26 年、20140910）の援助を得てなされたものである。研究の推進に際して九州産業技術センター杉本大貴氏には種々のご指導とご援助を賜った。記して深く感謝申し上げる。

参考文献

- [1] Nakao, M., Nagayama, G. and Tsuruta, T., Nanobubbles in Ultra Pure Water, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 67, 525 (2014)(doi:https://doi.org/10.1299/jsmekyushu.2014.67_525-1_).
- [2] Kakuta, I., Effective Utilization of Micro-and Nano-bubble Technology on Environmental Improvement, Promotion of Health and Growth rate of Organisms, Food Safety, and Medical Therapy, Vol. 60(3), 160-163 (2006) (doi: https://doi.org/10.11457/swsj1965.60.160).
- [3] Tsuge, H., Fundamentals of Microbubbles and Nanobubbles, Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn, Vol. 64(1), 4-10 (2010) (doi: https://doi.org/10.11457/swsj.64.4).
- [4] Fukushi, K., Matsui, Y. and Tambo, N., Dissolved Air Flotation: Experiments and Kinetic Analysis, J. Water SRT-Aqua, Vol. 47(2), 76-86 (1998) (doi:

- <https://doi.org/10.1046/j.1365-2087.1998.00085.x>.
- [5] Takahashi, M., Base and Technological Application of Micro-Bubble and Nano-Bubble, Materials integration, Vol. 22(5), 2-19 (2009).
- [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, Vol. 44, 1119-1124 (2000) (doi: <https://doi.org/10.2208/prohe.44.1119>).
- [7] Hasegawa, H., Masaki, Y., Matsuuchi, K. and Yoshida, Y., Micro-Bubble Generation by Using Pipe with Slits, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 72(721), 2242-2248 (2006) (doi: <https://doi.org/10.1299/kikaib.72.2242>).
- [8] Ueyama, S. and Miyamoto, M., The world of Microbubble (in Japanese), 24-66, Morikita Publishing, Tokyo (2006).
- [9] Ninomiya, S., Shimizu, T., Iwai, M. and Suzuki, K., Purification Effect of Micro Bubble Coolant., The Japan Society for Abrasive Technology, Vol. 56(7), 465-469 (2012) (doi: <https://doi.org/10.11420/jsat.56.465>).
- [10] Suzuki, K. and Ishida, M., Ninomiya, S., Iwai, M. and Uematsu, T., Machining with a Micro Bubble Coolant Method, 2014 The Japan Society for Abrasive Technology. Autumn Conf., CD-ROM, Paper No. B07 (2014) (doi: <https://doi.org/10.11522/pscjspe.2004A.0.64.0>).
- [11] Mogami, K., Yonezawa, Y. and Mizutani, M., Interview to NANOX co. Ltd. Forefront of precision engineering: From Fisheries industry to Nano Technology (in Japanese), Journal of Japan Society for Precision Engineering, Vol. 83(7), 619-622 (2017) (doi: <https://doi.org/10.2493/jpspe.83.619>).
- [12] Tsuge, H., The latest technology of Microbubble · Nanobubble II (in Japanese), 6-10, CMC, Tokyo (2010).
- [13] Sadatomi, M., Kawahara, A., Kano, K. and Ohtomo, A., Performance of a New Micro-Bubble Generator with a Spherical Body in a Flowing Water Tube t., Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29(5), 615-623 (2005) (doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2004.08.006>).
- [14] Kyushu Bureau of Economy, Trade and Industry, and Kyushu Industrial Technology Center, Development of Honeycomb Type Mixer for Uniformization of Nanobubbles and Application to Industry, Report on Regional Innovation Creation Research and Development Business, 2-31 (2012).
- [15] Kudo, Y. and Hiraki, K., Characteristics Comparison of the Honeycomb Mixing Device By Considering the Mixing Energy in the Gas-Liquid Mixing, Proc. 3th The Japan Society of Mechanical Engineers Micro-Nano Science and Technology Division Conf., Paper No. MP-31 (2011)(doi: <https://doi.org/10.1299/jsmemnm.2011.3.129>).
- [16] Kudo, Y. and Hiraki, K., Visualization of Mixing Process in a Conduit with Honeycomb Structure, Proc. 2th The Japan Society of Mechanical Engineers Micro-Nano Science and Technology Division Conf., Paper No. MNM-P4-6 (2010) (doi: <https://doi.org/10.1299/jsmemnm.2010.2.95>).
- [17] Noda, N., Ren, F., Yamamoto, W., Ueda, T., Sano, Y., Chen, D., Takase, Y. and Yonezawa, Y., Design and Performance of Honeycomb Structure for Nanobubbles Generating Apparatus, Japan Society for Design Engineering, Vol. 53(1), 111-126 (2018)(doi: <https://doi.org/10.14953/jjsde.2016.2707>).
- [18] Malloy, A. and Carr, B., Nano Particle Tracking Analysis, Particle System Characterization, Vol. 23(2), 197-204 (2006) (doi: <https://doi.org/10.1002/ppsc.200601031>).
- [19] Filipe, V., Hawe, A. and Jiskoot, W., Critical Evaluation of Nanoparticle Tracking Analysis (NTA) by NanoSight for the Measurement of Nanoparticles and Protein Aggregates, Pharmaceutical Research, Vol. 27(5), 796-810 (2010) (doi: [10.1007/s11095-010-0073-2](https://doi.org/10.1007/s11095-010-0073-2)).
- [20] Maeda, S., Kobayashi, M., Tokuda, J., Fujita, T., Terasaka, K. and Kuwabara, S., Measurement of Nano-Bubble Generated by NanoGALF Using Three Types of Particle Size Measuring Equipment, The Japanese Society for Multiphase Flow Annual Meeting 2011 (2011).
- [21] Haruki, N., Horibe, A. and Matsuda, K., Thermophysical Properties and Heat Transfer Characteristics of Micro-bubble Water, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 49, 411(2011)(doi: <https://doi.org/10.1299/jsmeecs.2011.49.411>).
- [22] Himuro, S., Development of Microbubble Technology in JSMF., The Japanese Society for Multiphase Flow, Vol. 31(4), 375-381 (2017) (doi: <https://doi.org/10.3811/jjmf.31.375>).
- [23] Sano, O., Continuum Mechanics (in Japanese), 46, Asakura Publishing, Tokyo (2017).
- [24] Uesawa, S., Kaneko, A., Nomura, Y. and Abe, Y., Bubble Behavior and Flow Structure on Bubble Collapse Phenomena in a Venturi Tube., The Japanese Society for Multiphase Flow, Vol. 26(5), 567-575 (2013) (doi: <https://doi.org/10.3811/jjmf.26.567>).
- [25] Kobayashi, M., Maeda, S., Nishihara, I., Fujita, T., Maruyama, M. and Shimaoka, H.,

Development of High-Concentration Ultrafine Bubble Generator and Measurement of Number Concentration by Laser Diffraction Method, The Japanese Society for Multiphase Flow Symposium 2016 (2016).
[26] Maeda, S., Kobayashi, M., Tokuda, J.,

Kashiwa, M., Kimura, H., Ishida, W., Fujita, T., Terasaka, K. and Kuwabara, S., The High-Concentrated Stable Production of ID 100 nm - Nano-Bubbles by NanoGALF Technology, The Japanese Society for Multiphase Flow Annual Meeting 2011 (2011).
