

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

Volume 53, Number 1, Page 111-126

Category: Paper

Received date: 8 July 2016

Accepted date: 20 October 2017

J-STAGE Advance publication date: 1 December 2017

Publication date: 5 January 2018

Corresponding author: NaoAki NODA (E-mail address: noda@jmech.kyutech.ac.jp)

DOI: 10.14953/jjsde.2016.2707

Copyright©2018 Japan Society for Design Engineering

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

Design and Performance of Honeycomb Structure for Nanobubbles Generating Apparatus

野田 尚昭*¹, 任 飛*², 山本 弥*³, 上田 鷹彦*⁴, 佐野 義一*⁵, 陳 玳珩*⁶,
 高瀬 康*⁷, 米澤 裕二*⁸

(Nao-Aki NODA) (Fei REN) (Wataru YAMAMOTO) (Takahiko UEDA) (Yoshikazu SANNO)
 (Dai-Hen CHEN) (Yasushi TAKASE) (Yuji YONEZAWA)

Abstract

In recent years, nanobubble technology has drawn great attention due to their wide applications in many fields of science and technology, such as water treatment, biomedical engineering, and nanomaterials. Nanobubble technology is also used for seafood long term storage. The nitrogen nanobubble water circulation can be used to reduce the oxygen in water and slow the progressions of oxidation and spoilage. In previous study, a kind of honeycomb structure for high efficiency nanobubble generation has been investigated. In addition, the small-scale honeycomb structure is designed for the broader applications. Comparing with stainless steel, acrylic resin and titanium have good corrosion resisting property in various liquids including the sea water. Therefore, acrylic resin and titanium are considered in this study. In this paper, the honeycomb structure is optimized and improved. Combining experimental solutions and CFD analyses, the performance of the generator is studied. The strength of the honeycomb structure is also analyzed by FEM. The relationship between nanobubble generation efficiency and structure type is discussed.

Key words

nanobubble, honeycomb, NTA, CFD, FEM

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

- * 2 非会員, 九州工業大学大学院(同上), ren87@outlook.com
- * 3 非会員, 九州工業大学大学院(同上), m104138w@mail.kyutech.jp
- * 4 非会員, 九州工業大学大学院(同上), q344111t@mail.kyutech.jp
- * 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 非会員, 九州工業大学大学院工学研究院(同上), chendh2013@163.com
- * 7 正会員, 九州工業大学戸畑・若松キャンパス技術部(同上), takase@mech.kyutech.ac.jp
- * 8 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

1 緒言

ナノバブルは、一般に直径 $1\mu\text{m}$ 以下の微細なバブルを指し、通常バブルと異なる。ナノバブルは以下のような特性を持つ^{1), 2), 3)}。(i)水中での滞在時間が長く、直径 1mm のバブルは1分間に数 m 上昇するが、直径 $0.2\mu\text{m}$ 以下のナノバブルの場合、1ヶ月以上も溶解状態で水中に存在する。(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。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有する。

ナノバブルのこうした特性を利用し、様々な分野への応用が進んでいる⁵⁾。溶存酸素量 DO(Dissolved Oxygen)の向上や化学的酸素要求量 COD(Chemical Oxygen Demand)、生物化学的酸素要求量 BOD(Biochemical Oxygen Demand)、浮遊物質量の低減性能は、水質向上等に活用できる^{6), 7), 8), 9)}。さらに、最近では医療分野への適用が盛んに研究され、超音波と合わせて用いることで造影剤として利用したり、結石の破壊などに適用されたりしている¹⁰⁾。予防医学の分野においても、ナノバブルを含む液体を飲んだり、液体に浸かることにより、血流増加、体表面の温度の上昇等の効果を期待して、健康維持増進を図ろうとする試みも増えている¹¹⁾。また、オゾンマイクロあるいはナノバブルを使って、飲料水の殺菌の長期間持続を図ったり、浴槽内のレジオネラ菌を含めた病原微生物を除去したりする試みも始まっている。また、上述の医療分野等への応用以外に化学工業や食品工業分野におけるナノバブルの有効性も明らかになってきている。例えば、鮮魚の保存、流通にナノバブル水を使用することにより、酸化や腐敗を伴う劣化の進行を遅らせることができることが報告されている^{11), 12)}。一方ナノバブルの生成技術を見ると、これまでに多くの研究、開発がなされているが^{5), 13), 14), 15), 16)}、用途によってはナノバブル密度や吐出量が十分とは言えず、本格的な応用には能力不足を認めない。

本研究ではナノバブルの生成効率に優れることが報告されているハニカム構造体に着目する^{17), 18)}。これまでの研究¹⁵⁾で、小型移動型ナノバブル発生装置を試作し、ナノバブル生成についての知見を得てきた¹⁵⁾。先行研究では、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、バブルがだんだん細長く変形し分裂する様子が確認された¹⁹⁾。流体解析により、圧力は上流から下流側セルにかけて下降し、せん断応力は上流から下流側セルにかけて上昇している事がわかった。このことから、気泡が下流側セルに移動する間に、気泡周囲圧力が気泡内圧より小さくなり、気泡の変形が起こり易くなり、細長く変形した気泡にせん断応力が作用して気泡の分裂が起こる、との見解が得られた。このように優れたナノバブル生成能力を持つハニカム構造装置であるが、生成能力を増大させた場合のナノバブル生成能力や関係する構造上の要因が明らかでなかった。そこで本研究では、鮮魚の鮮度保持の大幅長期化を目指し、実用可能寸法に試作したナノバブル生成装置を用いて、ナノ粒子解析装置によりナノバブル生成能力を実験的に評価するとともに、流体解析により実験との関連を考察する。そしてこの計測データをもとに、ナノバブル粒径が微細かつ高密度に生成される条件を見出し、従来より大容量かつナノバブル生成効率の高い技術の確立を最終目的とする。

2 ハニカムを用いたナノバブル生成実験

本法の実用化と用途の拡大を進めるにあたって、高いナノバブル生成能力を有した上で、装置の小型軽量化が求められる。海水をはじめとする各種の液体に対する耐久性を考慮して、これまではハニカム部材にステンレス材が主に用いられてきた。本研究では新たにアクリル樹脂とチタンの適用を検討する。そして、ハニカム構造の最適化を進めるにあたり必要な強度解析を、FEM法を用いて行うと共に、ハニカム構造条件とナノバブル生成効率との関連について明らかにする。図1に並列ハニカムユニットを装着したナノバブル発生装置の概略図を示す。この装置はコンテナ内の水に浸漬されている。ポンプによってこの装置に入る水（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ユニットとすると、本研究では12ユニットが箱に装備されたものを標準とする（後述するTable2の①）。また、図2(b)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と解析モデルを示す。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ていく。ナノバブル発生装置を出た水がコンテナ（水1t）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⁾。図3にハニカムセルの各寸法を示す。表1に実験に用いた装置の諸元を示す。表2に実験条件①～④を示す。絶対圧力 p_a はハニカムユニット入口で計測した値とし、ポンプ吐出流量(Flow rate)は大気中に吐き出す条件で計測した。水中ポンプを用い、電源の周波数を変更することでポンプ出力 P_w を設定した。

ナノバブル密度の測定にはナノ粒子解析装置「Nano Sight LM10-HS」を使用する^{20), 21), 22)}。図4(a)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。図4(b)にナノバブル生成実験を開始後、60分経過した時のナノバブル密度の計測例を示す。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安定状態となる30分から1時間の範囲でナノバブル密度の測定を行う。

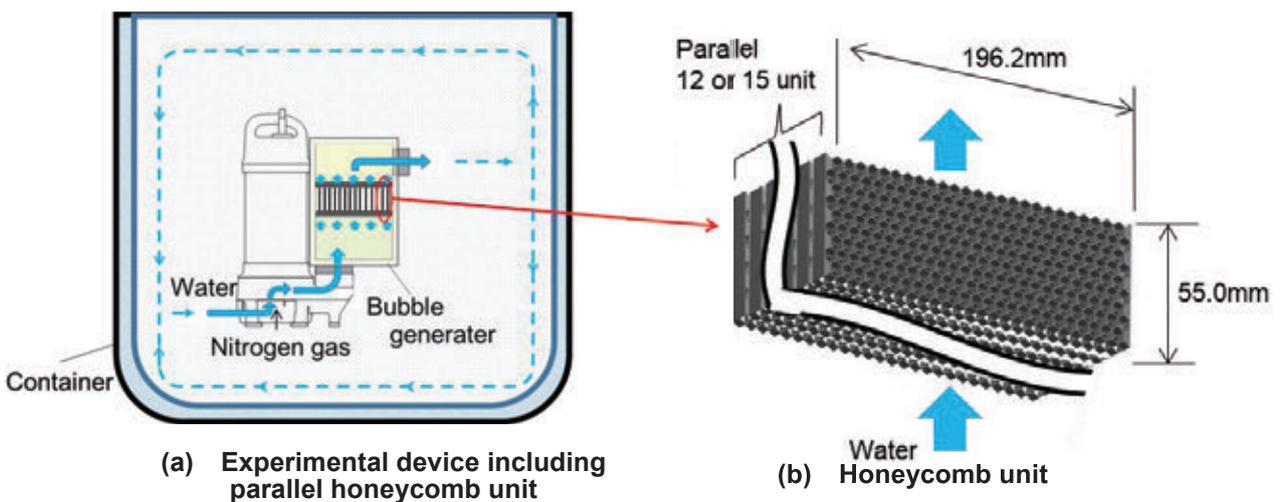


Fig. 1 Nitrogen nanobubbles generating device

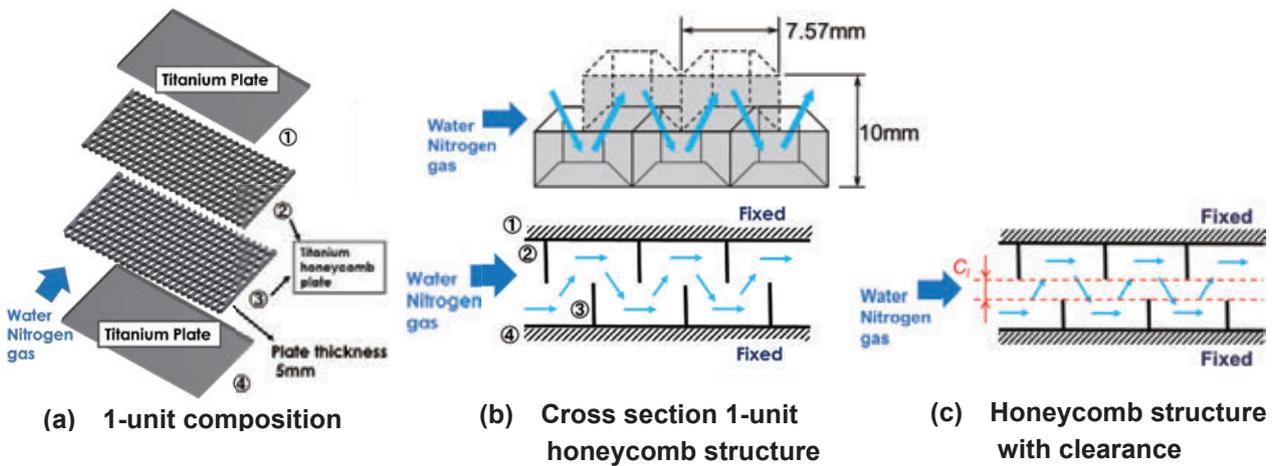


Fig. 2 Honeycomb structure model

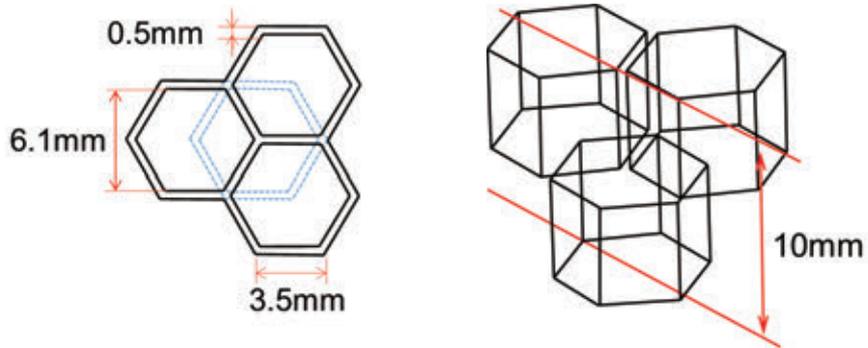


Fig. 3 Dimensions of honeycomb cell

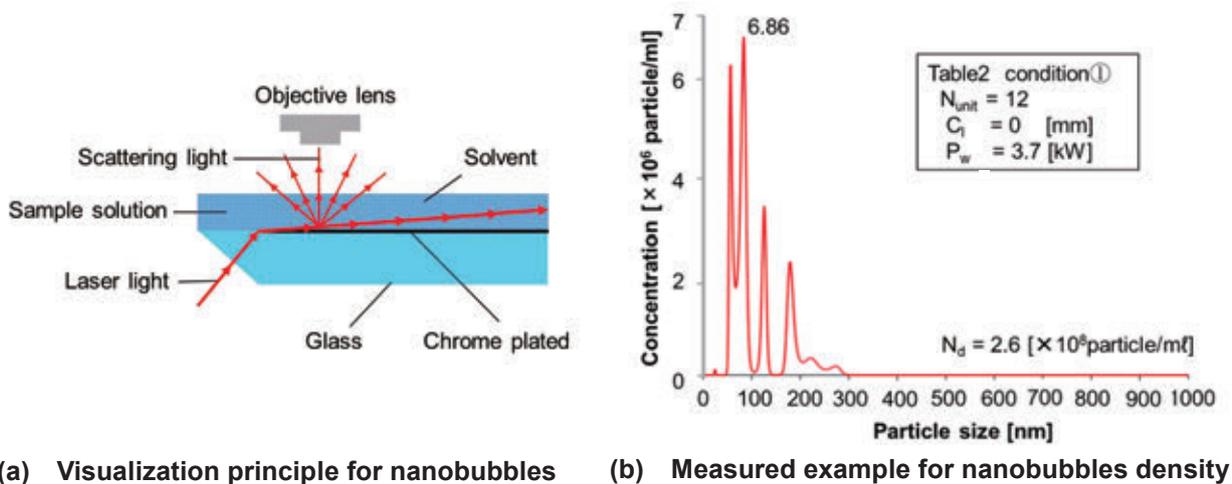


Fig. 4 Visualization principle and measured example for Nano Sight

Table 1 Details of the experimental device

Item	Specification
Pump	Submersible pump (80TM23.7)
Output [kW]	3.7, (60Hz)
Flow rate [ℓ/min]	400
Container [mm]	1580×1100×600
Water and amount [kg]	Tap water, 1000
Gas	Nitrogen
Flow rate [ℓ/min]	5.0
Pressure [MPa]	0.30

Table 2 Experimental conditions ①~④

Experimental conditions	Number of units N_{unit}	Clearance C_l [mm]	Absolute Pressure p_a [MPa]	Flow rate [ℓ/min]	Power P_w [kW]
①*	12	0	0.26	650	3.7
②	12	0	0.11	300	2.0
③	15	0	0.30	550	3.7
④	12	2	0.16	470**	3.7

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

表 2 に示す条件①~④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)に注目して設定した。ナノバブル生成効率は、ナノバブル密度および溶存酸素量 DO の時間変化で評価する。ここでは、直径 10nm~1000nm (Nano sight の測定可能範囲) のバブルをナノバブルとしてナノバブル密度を測定した。また、実験における目標値を、ナノバブル密度 2×10^8 個/ml、DO 1.0mg/l と設定した。これは、実際に魚介類を用いた官能検査や一般生菌数の検査で、DO 1.0mg/l 以下 (出荷テストでナノバブル密度 2×10^8 個/ml 以上に相当) 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たためである。

ポンプ出力の変更によって流量やハニカムユニット入口の圧力が変化し、ナノバブル生成量への影響が考えられる。そこで、図 5(a) にポンプ出力を変えた場合のナノバブル密度、図 5(b) に DO のそれぞれの時間変化を表 2 の条件①、②について示す。ポンプ出力の低減によりナノバブル密度および DO は目標値に大きく及ばなかった。流量や入口圧力の影響はナノバブル生成能力への影響が大きいと言える。

ハニカムセル数の変化によって圧力変化とせん断応力が発生する数が増え、ナノバブル生成量に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、図 6(a) にハニカムユニット数を変えた場合のナノバブル密度、図 6(b) に DO のそれぞれの時間変化を表 2 の条件①、③について示す。これらより、ハニカムユニット数が 12 と 15 ユニットの範囲では、ナノバブル生成効率および DO 低減へ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の発生が想定される。そこで図 2(c) に示すように、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 を設定し実験を行った。すきまの発生によって、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、流速の違いが想定されるため、その生成能力への影響を確認することも目的とする。図 7(a) にすきまの影響によるナノバブル密度、図 7(b) に DO の時間変化を表 2 の条件①、④について示す。60 分後で見ると、すきまのない場合に対してすきま $C_l = 2$ mm のときには生成密度は約 30% に減少する(図 7(a))。これらより、ナノバブル生成効率に及ぼすユニット間のすきまの影響は大きい。

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 3.7kW, ハニカムユニット間すきま 0mm, 12 個以上のハニカムユニット)において、ナノバブル密度と溶存酸素量 DO の目標値を達成できることが明らかになった。

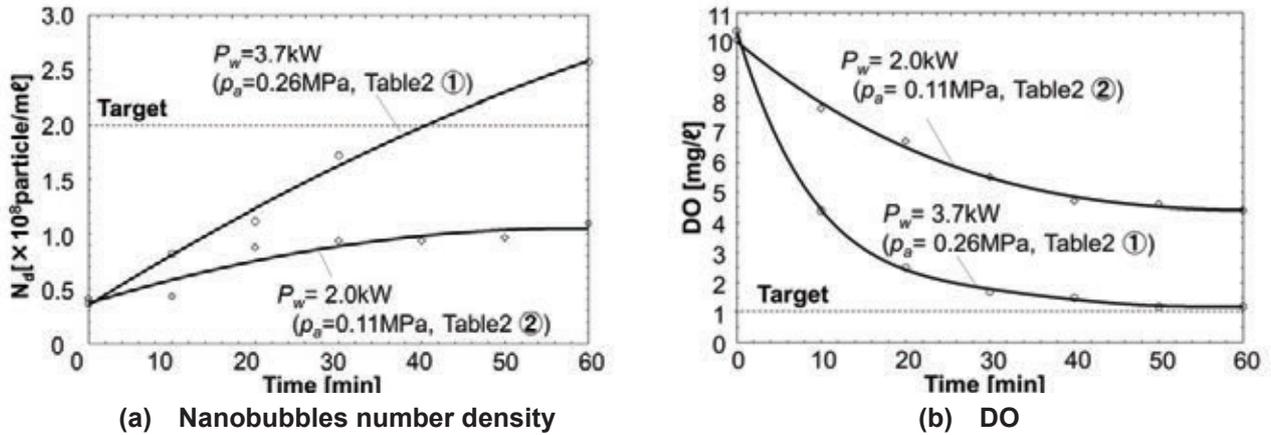


Fig. 5 Time variation of nanobubbles number density and DO when $P_w = 3.7\text{kW}$ and 2.0kW (See Table2 ①, ②)

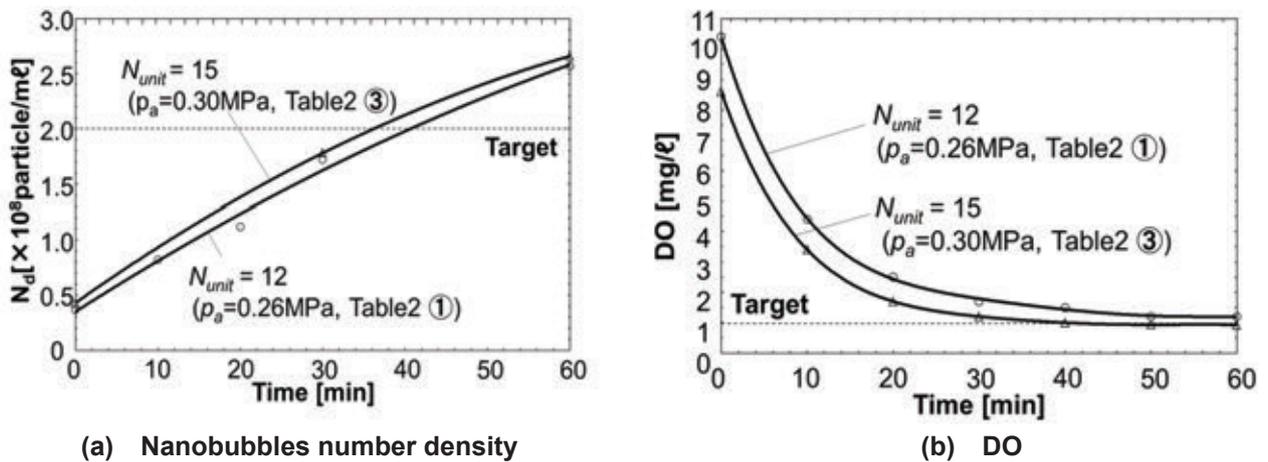


Fig. 6 Time variation of nanobubbles number density and DO when $N_{unit} = 15$ and 12 (See Table2 ①, ③)

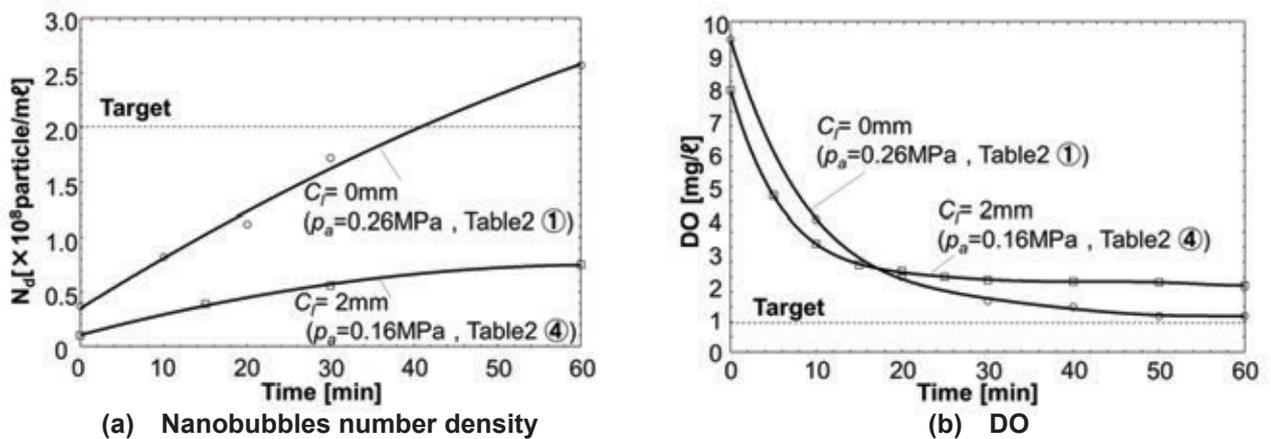


Fig. 7 Time variation of nanobubbles number density and DO when $C_l = 0\text{mm}$ and 2mm (See Table2 ①, ④)

3 ハニカムユニット内の流れの解析

3.1 一列ハニカム構造の過去の数値流体力学 (CFD) 解析結果との比較

これまでに、ハニカム型バブル発生装置におけるナノバブル生成要因を解明するため、ハニカム型バブル発生器の内部構造を模した簡易型一列ハニカム管路に水と空気の気液二相流を流入させる可視化実験が行われた¹⁷⁾。図8に示す簡易型一列ハニカム管路は、厚さ0.3mmのアルミ板で1辺5mm、高さ5mmの1列からなるハニカムセル群を製作し、上下2段に組み合わせた構造となっている。この研究¹⁵⁾では、気泡分裂の要因を解明するために、図8と同じ寸法の簡易ハニカム管路に水を流入させた場合の流れの解析が、ANSYS Fluent 12.0を用いたCFD解析によって行われた。流れは単相流とし、乱流モデル(k-εモデル)が使用されている。また、境界条件は、流入境界を流量境界、流出境界を圧力境界、側面境界を壁境界とされた。表3に与えられた境界条件を示す。流入境界は可視化実験によって得られた値である。乱流粘性比は、流入、流出境界における乱流粘性を決定するための、乱流粘性/粘性で表される割合である。

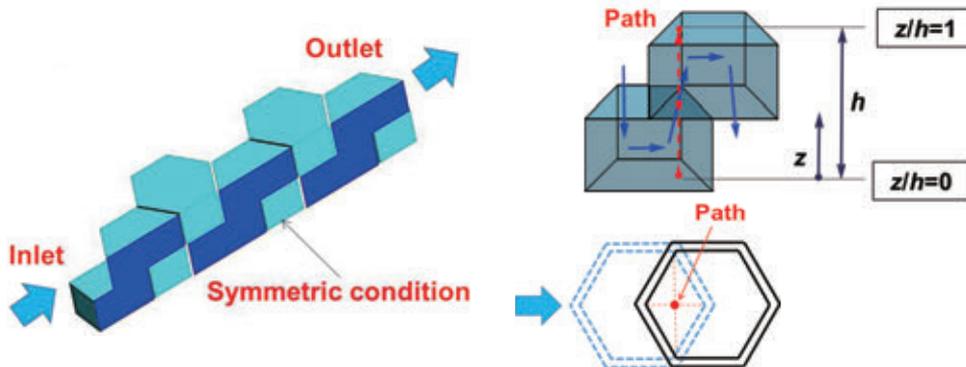


Fig. 8 Computational conduit ($h=10\text{mm}$)

Table 3 Computational conditions in Fig. 8

Item	Specification
Inlet flow rate [ℓ/min]	1.2
Outlet absolute pressure [MPa]	0.10
Turbulent intensity [%]	10
Turbulent viscosity ratio	10

これまでの CFD 解析による結果^(a)と本研究の解析結果^(b)を比較して図9に示す。本研究では、ANSYS Fluent 16.2を用いて同一の寸法と境界条件で CFD 解析を行った。図9では圧力分布とせん断応力分布を比較して示しており、横軸は流れのセル底面からの距離を示す無次元数 z/h で、 h は上下セル高さの合計である。図10の塗りつぶし部分は下流側ハニカムセルを表している。縦軸は流体 Path における圧力およびせん断応力である。ここで流体 Path は、図8に示すようにハニカムセルを1/2ずらして重ね合わせることでできた流路の中心に設定されている。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。せん断ひずみ速度の表現にはスカラー不変量(式(1))を用いている²³⁾。よって、図9のせん断応力は、Path上の各位置におけるせん断応力の大きさをスカラー量で表している。

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

本研究で得られた解析結果 (図 9(b)) は、既報の平木らの結果 (図 9(a)) との誤差が 5%以内で一致している。図 9 によれば、底面から上昇する (下流に移動する) につれて圧力は降下し、せん断応力は変動し大きくなる箇所が見られる。このような変化から、気泡が底面から上昇する (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。このような過程が繰り返されて、バブルの微細化が進むと考えられる。

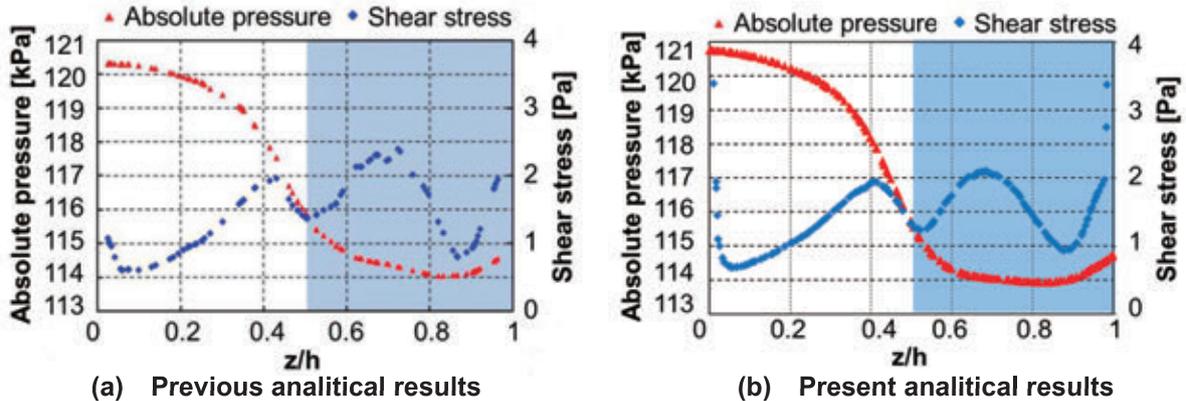
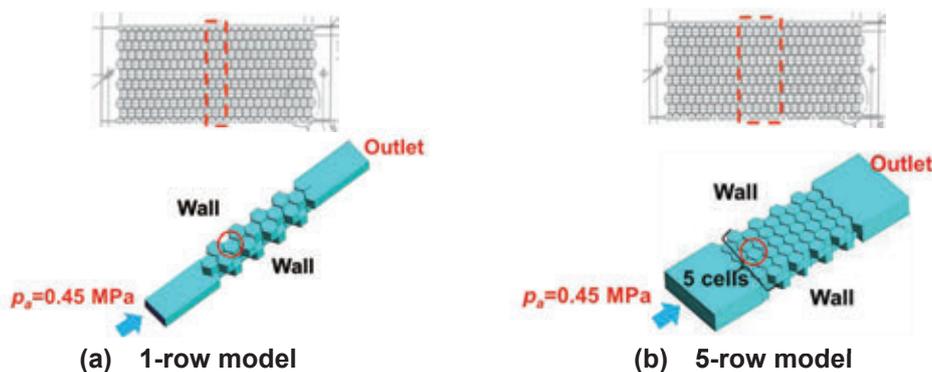
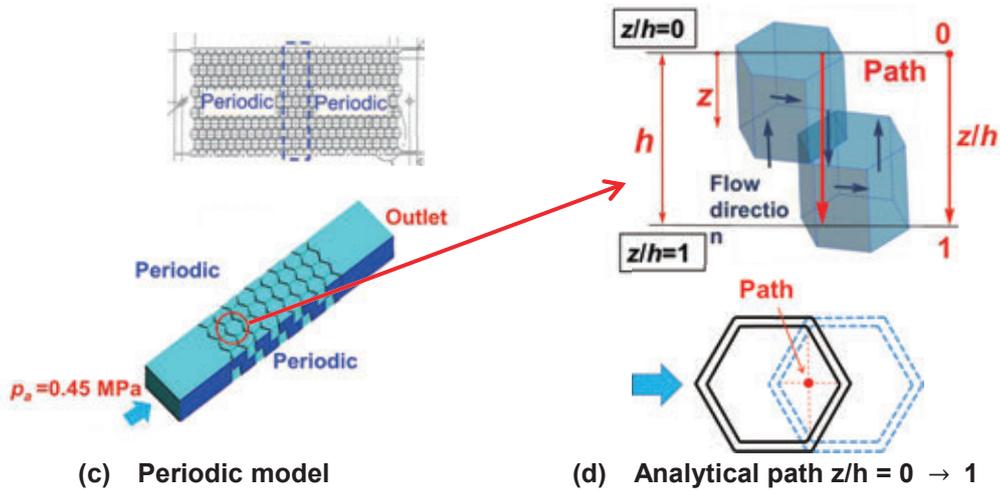


Fig. 9 Absolute pressure and shear stress distribution in honeycomb cells

3.2 実験装置のハニカム構造体における解析モデルの検討

ハニカムユニット内の流れ解析に用いることができる、適切な解析モデルの検討を行う。図 10 に検討に用いた 1 列モデル、5 列モデル、3 列周期モデル並びに流体 Path 概略をそれぞれ示す。解析モデルにおけるハニカムセルの寸法については、図 3 に示した実験時の寸法と同様とした。解析条件を表 4 に示す。流入口、流出口境界は圧力境界に設定した。側面境界は、1 列モデル、5 列モデルについてはハニカム形状に沿った壁境界とし、3 列周期モデルについては周期境界とした。流体 Path は、流路の基本特性を把握するために、ハニカムプレートを 1/2 ずらして重ね合わせることによってできた流路における 2 段目の中心とした。図 11 に 5 列モデルと 3 列周期モデルの $z/h=0.25$ における流速分布を示す。5 列モデルでは側面境界付近では流速が小さくなっていることがわかるが、中心線上ではどちらのモデルでもほぼ同様の流速分布であることがわかる。図 12(a) に 3 つのモデルの圧力、図 12(b) にせん断応力の解析結果を示す。5 列モデルと 3 列周期モデルは圧力、せん断応力共に近い値をとるのに対し、1 列モデルは大きく異なることがわかる。5 列モデルと 3 列周期モデルが近い値をとるため、5 列以上もしくは周期境界とすることで、解析モデルの中心線上には側面境界条件の影響が現れないことがわかる。よって、解析時間短縮の観点からモデルの列数を 5 列より多くすることは不必要で、5 列モデルもしくは 3 列周期モデルを用いることで適切な解析を行うことが可能であることがわかる。

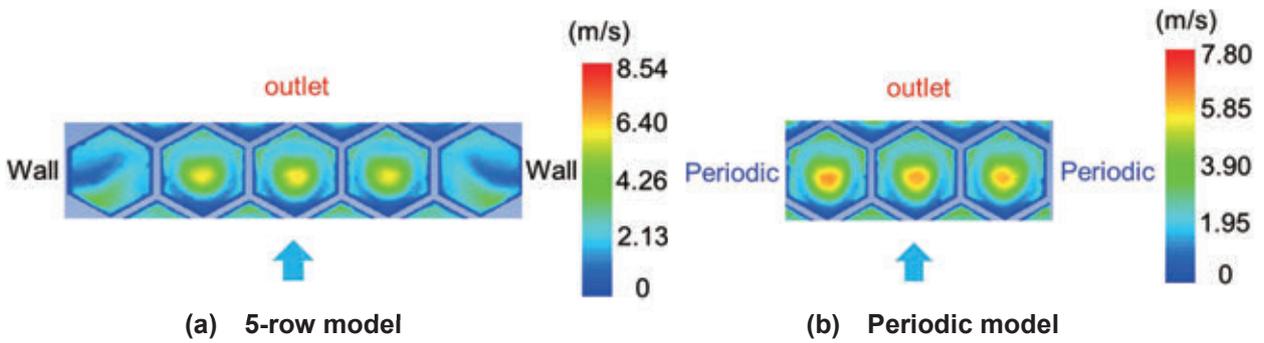




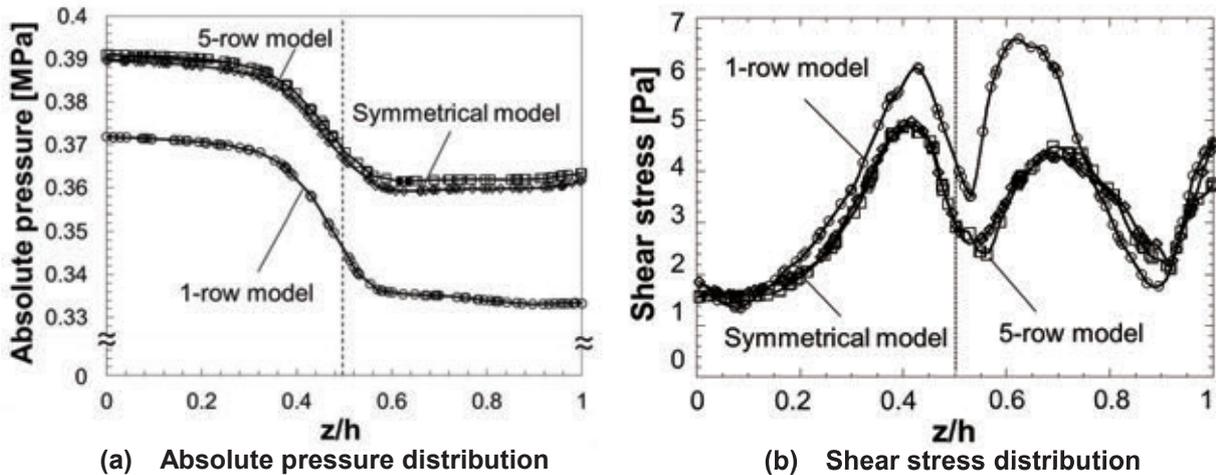
(c) Periodic model (d) Analytical path $z/h = 0 \rightarrow 1$
 Fig. 10 Three models considered (Continued)

Table 4 Computational conditions in Fig. 2 and Fig. 3

Item	Specification
Inlet absolute pressure [MPa]	0.45
Outlet absolute pressure [MPa]	0.10
Turbulent intensity [%]	10
Turbulent viscosity ratio	10



(a) 5-row model (b) Periodic model
 Fig. 11 Velocity distributions of 5-row model and periodic model



(a) Absolute pressure distribution (b) Shear stress distribution
 Fig. 12 Analytical results of three type models

3.3 ハニカムの水流方向位置の影響

図 13 に示すように流れ方向に 9 段から成るハニカムの流れ方向の 4 点 (位置 1, 2, 3, 4) における流体挙動の解析結果を比較検討する. ここでは 3 列周期モデルと等価な 5 列モデルにおける例を示す. 流体 Path は, 上下セルの重ね合わせによってできたそれぞれの流路の中心とした. 図 14 にそれぞれの位置 ($z=0\sim h$) における流体 Path に沿う圧力変化を示す. 上流側の位置 1 での圧力が最も高く, 下流側の位置 4 で最も低くなる. 解析を行った各位置 1~4 において, それぞれの入口出口間の圧力差は 0.03MPa で等しいことがわかる. また, 圧力はハニカム構造の不連続部 ($z/h=0.5$) を境に, その前後で低下している. 図 15 に流体 Path に対するせん断応力の変化を示す. 4 箇所すべてのハニカムセルにおいて, せん断応力変化はほぼ等しく, ハニカム構造の不連続部の前後で極大を示し, 不連続部のやや下流側で極小を示す. また, 最小最大の変動幅は 3 倍以上に達する. 図 16 に流れパスに対する流速変化の様子を示すが, この場合もすべての位置で流速はほぼ等しく, 流れ方向に 1/2 セルずらした位置に相当する $z/h=0.5$ 付近で最大値を示している. これらの流れ解析結果より, 同一構造のハニカムセル内で, 図 14 に示すように圧力低下量はほぼ一致するが圧力の絶対値は上流から下流に移動すると低下している. それにもかかわらず, 図 15, 16 に示すようにせん断応力と流速はほぼ一致することがわかった.

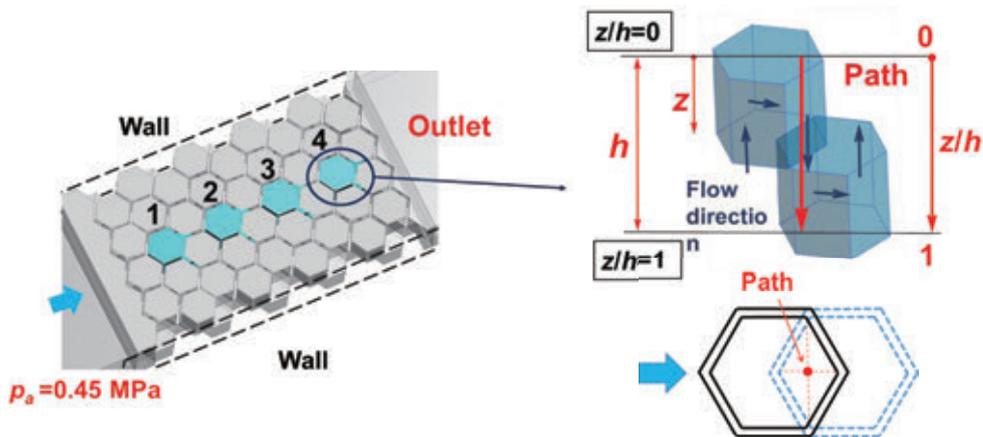


Fig. 13 Analysis model four places

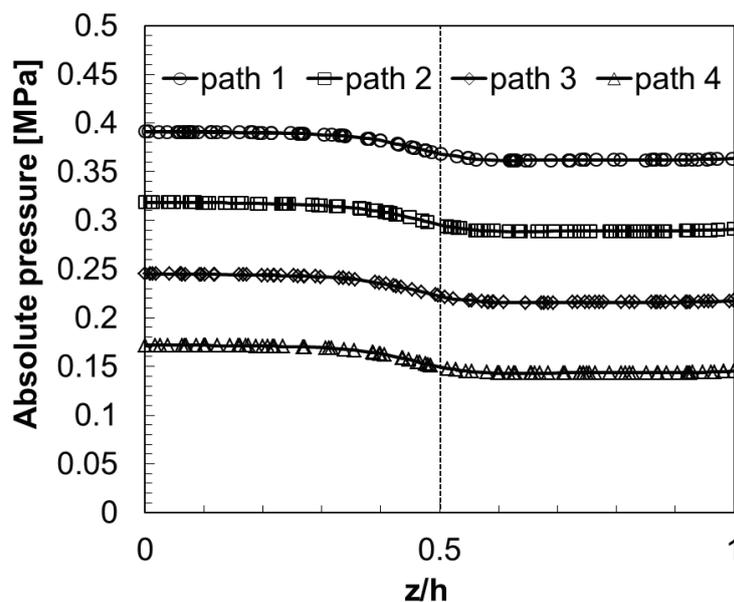


Fig. 14 Analysis results of absolute pressure

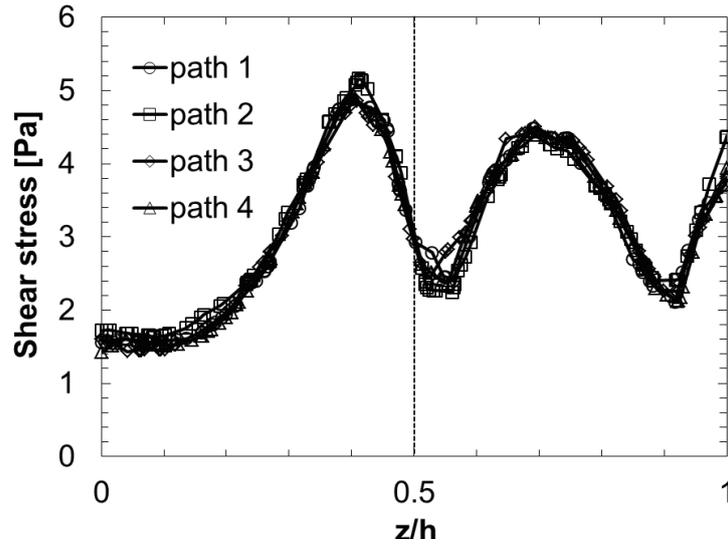


Fig. 15 Analysis results of Shear stress

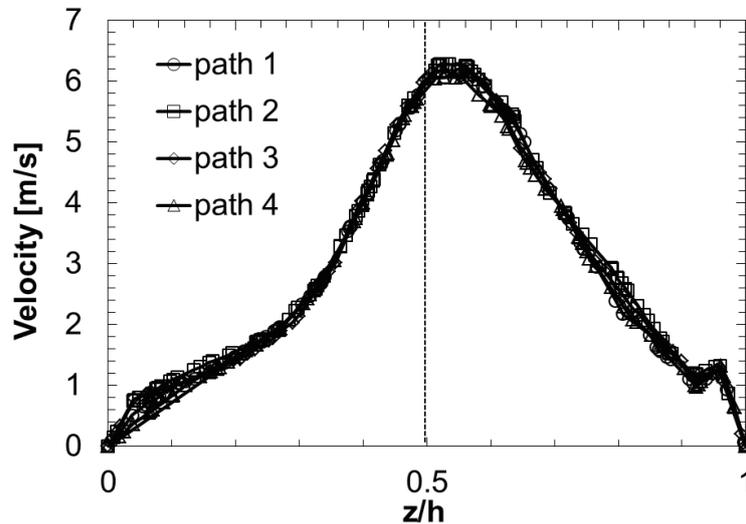


Fig. 16 Analysis results of velocity

3.4 ハニカムユニット間すきまの影響

ハニカムプレート同志の合わせ面には各ハニカム面の形状や組み立て精度、さらには使用中の経時劣化などの要因により、ハニカムユニット間にすきまが生じる懸念がある。また、すきまの発生によって流量の増大や流れの分散が発生し、せん断応力、流速の違いが想定される。そこで、この影響を調べるために、ユニットの合わせ面に予め 1mm のすきまを開けた状態にして、せん断応力を求め 図 17 に示す。流量一定の条件(1.2ℓ/min)で解析を行った結果、ハニカムユニット間にすきまがない $C_l=0\text{mm}$ 条件に対して、すきま $C_l=1\text{mm}$ があると、せん断応力はおおよそ 30%低下した。同様に流速の解析結果を 図 18 に示す。すきまを開けると、最大流速が 50%以上低下することがわかる。このことは、 図 7(a) に示した実験結果とも一致し、せん断応力のナノバブル生成効率の影響の大きさを解析によっても明らかにすることができた。

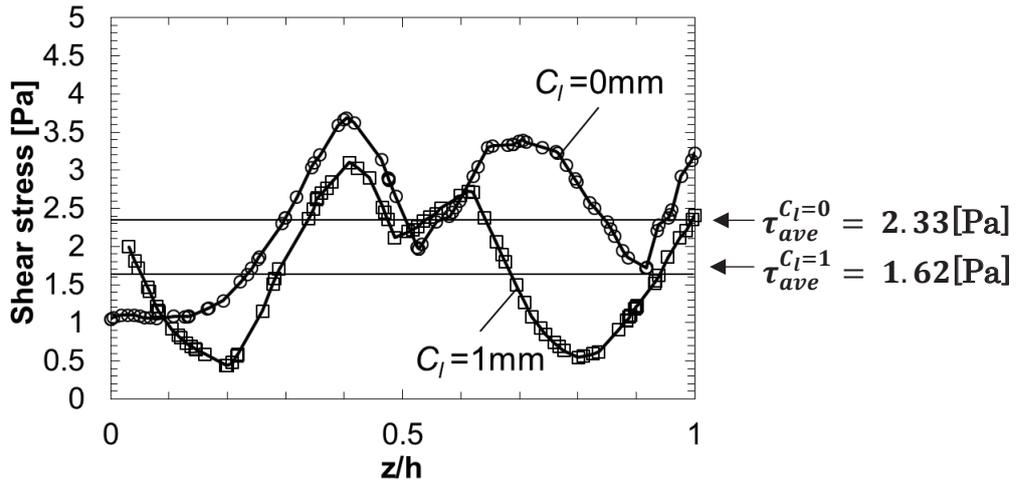


Fig. 17 Shear stress when $C_l=0\text{mm}$ and $C_l=1\text{mm}$

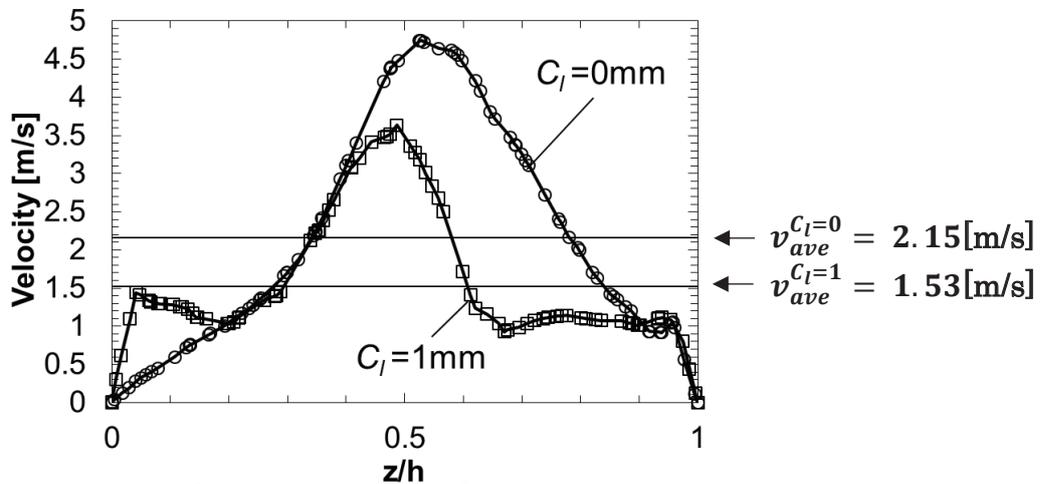


Fig. 18 Velocity when $C_l=0\text{mm}$ and $C_l=1\text{mm}$

4 ハニカム壁の強度評価

ナノバブル生成装置の軽量，コンパクト化を実現するために，構成材の比強度が大きく，海水等の液体に対する耐食性に優れ，かつ経済性にも考慮する必要がある．ここでは，ハニカムユニットのハニカム構造体を対象に，チタンとアクリル樹脂について検討する．表 5 に解析に用いたチタン及びアクリルの機械的性質を示す^{23), 24), 25)}．チタンの疲労限は，引張強さ 270MPa，耐久比を 0.5 として算出し，135MPa とした．表 5 における疲労限には両振りの値を用いている．しかし，実際には片振りの負荷条件下にあるため，両振り条件よりも大きい疲労限を用いることができる．そのため表 5 の強さを用いることにより安全側で評価され，安全率は小さく算定される．FEM 解析では，3.3 節で行った流体解析結果を基にした連成解析を行った．図 19 に，流体解析により得られたハニカムユニットにおける圧力分布を示す．実験での入り口側圧力の測定値は，最大で 0.30MPa であったが，実験より厳しい条件で解析を行うことにより，安全側に評価できることを考慮して，解析に用いる入り口側圧力を実験より高く 0.45MPa に設定した．流れ方向 9 段のハニカムのうちで最も大きい圧力を示すのは入り口側 1 段目であった．したがって，構造解析は入り口側 1 段目のハニカムを対象とする．図 20 に異なるサイズのメッシュ分割を施したハニカムモデルを示す．用いたハニカム材は純チタンとアクリル樹脂で，隔壁厚さを 0.5mm に設定したが，アクリル樹脂では 2mm も含めて解析した．最小メッシュサイズ $e_{min}=0.0625\text{mm}$ である．求める応力は，疲労強度評価に用いる最大主応力 σ_1^{Max} である．

Table 5 Mechanical property

Wall material	Modulus of elasticity E [GPa]	Poisson's ratio	Tensile stress [MPa]	Fatigue limit σ_w [MPa]
Titanium	96	0.36	270	135
Acrylic	3.2	0.4	65	28

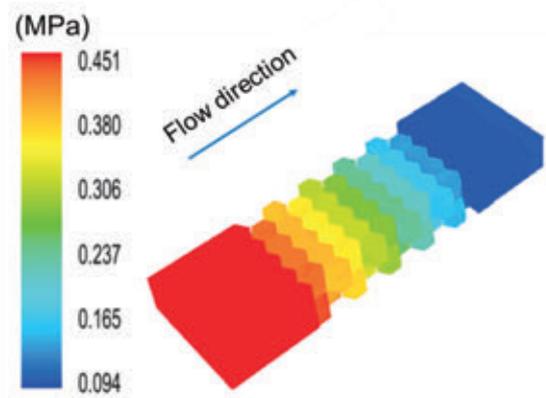


Fig. 19 Absolute pressure distribution

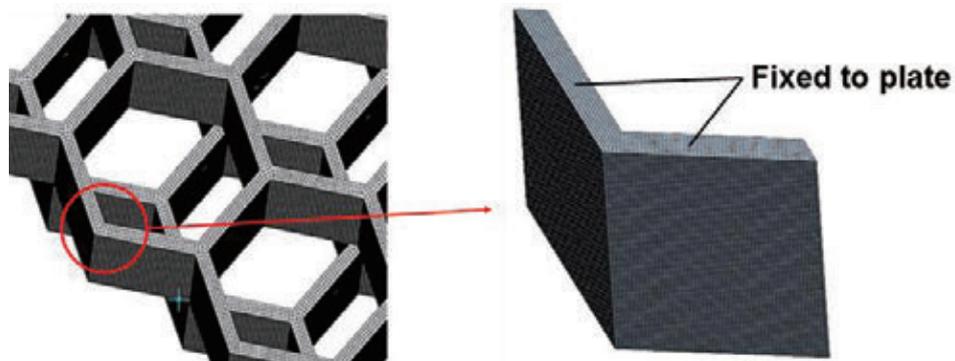
Fig. 20 FEM analysis models (Minimum mesh size $e = 0.0625\text{mm}$)

図 21 に厚さ 0.5mm のチタンにおいて、その疲労強度設計に用いられる最大主応力の分布を示す。最大主応力が最大値を示す部位は、プレートに固定されたハニカム前面突出部 (図 21) で、 $\sigma_1^{Max}=5.6\text{MPa}$ である。疲労限は 135MPa であるため、安全率は 24 となる。

次に、図 22 に示すように、アクリル樹脂隔壁厚さ 0.5mm における最大主応力は、チタンと同程度の $\sigma_1^{Max}=5.7\text{MPa}$ である。疲労限は 28MPa であるため、安全率は 4.9 となる。

以上より、アクリル樹脂隔壁 0.5mm、2mm およびチタン隔壁 0.5mm それぞれにおける最大主応力、疲労強度並びに疲労強度に対する安全率を表 6 に示す。表 6 から、チタンより低強度のアクリル樹脂の場合でも十分な安全性を有することが分かった。

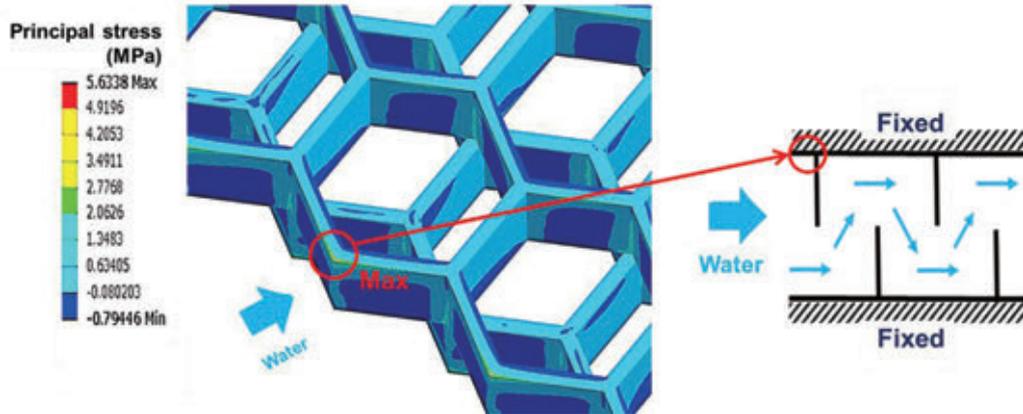


Fig. 21 FEM results of titanium wall thickness 0.5mm

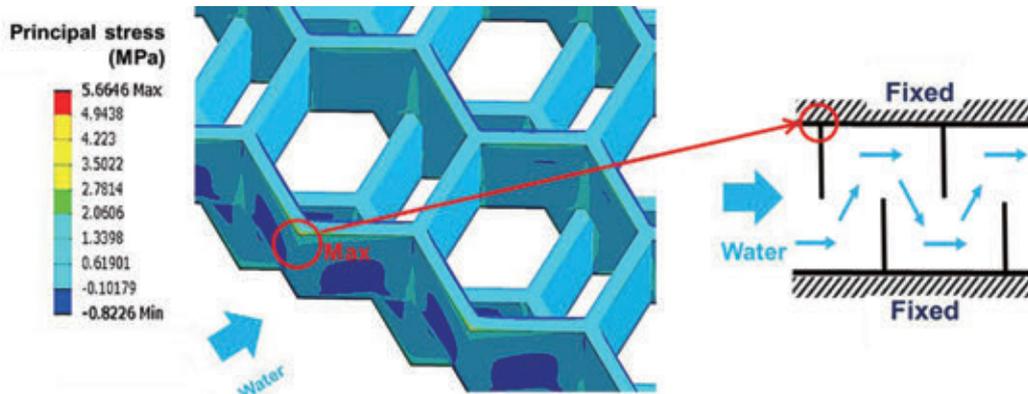


Fig. 22 FEM results of acrylic wall thickness 0.5mm

Table 6 Analysis results of structure

Wall material	Partition wall thickness [mm]	Maximum principal stress σ_1^{Max} [MPa]	Fatigue limit σ_w [MPa]	Safety factor σ_w/σ_1^{Max}
Titanium	0.5	5.6	135	24.1
Acrylic	0.5	5.7	28	4.9
	2	1.9		14.7

5 結言

ハニカム構造体が組み込まれたナノバブル生成装置を試作し、窒素ガスを混入させた水を用いてナノバブル生成実験を行った。併せてその流体挙動の解析とハニカム構造壁の FEM 強度解析を行い、以下に得られた結果をまとめる。

- (1) ナノバブル生成実験において、ポンプ出力 P_w を標準とした条件(3.7kW, 12 ユニット, すきま 0mm)から半減(46%低下)させると、ハニカムユニット入口における流量や圧力が低下するため、目標時間 60 分でナノバブル生成密度は 50%以上低下する(図 5)。すなわち、ポンプ出力の影響は大きい。
- (2) ハニカムユニット数を標準の 12 ユニットから 15 ユニットに変化させた場合、目標時間 60 分でナノバブル生成密度の上昇は 4%程度であり大きな変化は見られなかった(図 6)。すなわち、ユニット数を 25%増加させた実験の範囲では影響は小さい。

- (3) ハニカムユニット間にすきまを設けるとせん断応力や流速が顕著に低下し (図 17, 図 18), ナノバブル生成密度は約 1/4 に低下する (図 7). すなわち, 装置の製作, 組立および使用過程で想定されるすきまの影響は大きい.
- (4) 本研究で用いた装置の流体解析において, 5 列モデルと 3 列周期モデルでは, 解析モデルの中心線上に側面境界条件の影響が現れない. 解析モデルの中心線上について検討するにあたっては, 5 列以上のモデルまたは, 3 列周期モデルを用いることで適切な解析を行うことが可能である.
- (5) 同一構造のハニカムセル内で上流と下流で圧力低下量はほぼ一致するが, 圧力の絶対値は上流から下流にかけて低下する (図 14). しかし, せん断応力 (図 15) と流速 (図 16) はほぼ一致する.
- (6) 流体解析により得られたせん断応力と流速が, ナノバブル生成実験によるナノバブル生成密度に関係する. 例えばハニカムユニット間にすきまを設けると, せん断応力と流速は低下する解析結果が得られ (図 17, 図 18), ナノバブル生成能力も低下する実験結果が得られた (図 7).
- (7) FEM 構造解析により, 疲労設計に対しチタンハニカムでは安全率 24, アクリル樹脂ハニカムでは安全率 4.9 であることより, ハニカム構造体の強度上の高い安全性を明確にできた.

謝辞

この研究の大部分は平成 26 年度経済産業省の戦略的基盤高度化支援事業に採択されて実施したものである. 日本のファインバブル研究と産業界の利用においては世界の最先端であり, そこで採択されたものである. 研究テーマと申請書の作成において, 九州工業大学の産学連携コーディネーターである田中洋征客員教授に主導的にお世話になった. また, 本研究の実験結果と流体解析については多大なるご助言を賜った本学の梅景俊彦博士とともに心から感謝を申しあげる. さらに, 本事業の管理法人である (財)九州産業技術センターの杉本大貴氏には, 事務的部門でご支援を賜った. 記して感謝申しあげる.

参考文献

- 1) Fukushi, K., Matsui, Y., Tambo, N. : Dissolved Air Flotation: Experiments and Kinetic Analysis, J. Water SRT-Aqua, 47 (1998), 76-86.
- 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 (1999), 238-244.
- 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応用, 日本海水学会誌, 3, 60 (2006), 160-163.
- 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 (2010), 4-10.
- 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), 2-19.
- 6) Takada, N. : Research on Generating Mechanism of Microbubbles for Water Quality Purification of Closed Water Area, AIST Report of Fundamental Studies by the Grant in Aid of Special Coordination Funds for Promoting Science and Technology, (2005), 1-14.
- 7) Minagawa, H. : Water Quality Purification and Increment of DO Concentration in Rive4 Lake and Marshes, The 28th Lecture for Multiphase Flow, The Attraction and the Utilization of Microbubbles, (2003), 31-44.
- 8) Michioku, K., Kanda, T., Ohnari, H., Nishikawa, T., Matsuo, K., Kido, T. : A Preliminary Experiment on Reservoir Water Purification by Using a Micro-Bubble Aeration System, Proceedings of

Hydraulics Engineering JSCE, 44 (2000), 1119-1118.

- 9) 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, 721, 72 (2006), 160-166.
- 10) 上山智嗣, 宮元誠 : マイクロバブルの世界, 工業調査会, (2006), 1-203.
- 11) 株式会社ナノクス, (online), available from <<http://www.nano-x.co.jp>>, (accessed 2015-09-18).
- 12) 平木講儒 : 窒素ナノバブルを用いた魚介類の長期保存技術, 微細気泡の最新技術, 2, (2014), 177-183.
- 13) 柘植秀樹 : マイクロバブル・ナノバブルの最新技術Ⅱ, シーエムシー出版, (2010).
- 14) 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, 29 (2005), 615-623.
- 15) 辻 秀康 : ナノバブルの生成及びその検証〔粒度分布測定〕およびナノバブルの用途実証事例, 混相流学会年会講演論文集, (2009), 214-215.
- 16) 前田重雄, 小林秀彰, 徳田潤, 柏雅一, 木村春昭, 石田芳明, 藤田俊弘, 寺坂宏一, 桑畑進 : nanoGALF 技術による直径 100nm のナノバブルの高密度・安定製造, 日本混相流学会年会講演論文集, (2011), 430-431.
- 17) 九州経済産業局, 財団法人九州産業技術センター : ナノバブルの均一化を図るハニカム型混合器の開発と産業への応用, 平成 23 年度地域イノベーション創出研究開発事業成果報告書, (2012), 2-31.
- 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), 26-27.
- 19) 工藤嘉晃, 平木講儒 : ハニカム構造を有する管路内における流体の混合過程の可視化, マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, 2, (2010), 95-96.
- 20) 日本カンタム・デザイン株式会社, (online), available from <<http://www.qd-japan.com/>>, (accessed 2015-09-18).
- 21) Malloy, A., Carr, B. : Nano Particle Tracking Analysis, 23 (2006), 197-204.
- 22) Filipe, V., Hawe, A., Jiskoot, W. : Critical Evaluation of Nanoparticle Tracking Analysis (NTA) by NanoSight for the Measurement of Nanoparticles and Protein Aggregates, Pharmaceutical Research, 27, 5 (2010), 796-810.
- 23) ANSYS® Academic Research, リリース 16.2, ANSYS, Inc.
- 24) 日本塑性加工学会 編 : チタンの基礎と加工, コロナ社, (2008), 9-10.
- 25) 三菱レイヨン株式会社, (online), available from <<http://www.mrc.co.jp/acrylite/spec/>>, (accessed 2016-04-18).