

平成 28 年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「生鮮魚介類を長期保存するハニカム構造体を用いたナノバブル生成装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成 29 年 5 月

担当局 九州経済産業局
補助事業者 一般財団法人 九州産業技術センター

目 次

第 1 章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	3
1-3 成果概要	7
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	8

第 2 章 本論（1） [研究項目：1-1、1-2]

研究開発項目：機能向上への具体的対応

2-1 ハニカム構造体のチタン材における最適化設計（1-1）	9
2-2 ハニカム構造体のアクリル樹脂における最適化設計（1-2）	12

第 3 章 本論（2） [研究項目：2-1、2-2]

研究開発項目：試作機の製作

3-1 ハニカム構造体の開発（2-1）	24
3-2 ナノバブル生成装置本体の試作（2-2）	25

第 4 章 本論（3） [研究項目：3]

研究開発項目：ナノバブル生成装置の評価（3）	32
------------------------	----

第 5 章 本論（4） [研究項目：4-1、4-2]

研究開発項目：ナノバブル水の有効性の検証

5-1 超高酸素ナノバブル水及び超低酸素窒素ナノバブル水、空気ナノバブル水、 炭酸ナノバブル水の抗菌性の検証（4-1）	42
5-2 鮮魚の鮮度保持における超低酸素窒素ナノバブル水の長期にわたる有効性 の検証（4-2）	42

最終章 全体総括

第 1 章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(背景、当該分野における研究開発)

中小企業の特定制品のづくり基盤技術の高度化に関する指針より抜粋

(三) 製造環境に係る技術に関する事項

1. 製造環境に係る技術において達成すべき高度化目標

(4) 川下分野特有の事項

4) その他の川下分野に関する事項

a. 食品分野に関する事項

① 川下製造業者等の特有の課題及びニーズ

イ. 最適な保存方法の確立

ウ. 高品質・高付加価値の付与

② 高度化目標

ア. 生産から販売に至る当該技術の向上

2. 製造環境に係る技術における高度化目標の達成に資する特定研究開発等の実施方法

(3) 生産性・コスト・効率化に対応した技術開発の方向性

③ 環境制御装置の小型化

⑥ 製造装置の最適化

日本は生で食する文化を持っており、生食用生鮮食品の安全性確保は極めて重要な課題である。特に生鮮魚介類は酸化防止剤等薬品添加物の使用ができない（使用すると「生鮮」表示不可→「加工品」となる）ため、捕獲から流通・販売までの間、酸化や腐敗を防止する鮮度保持技術の向上が強く求められている。

鮮度劣化による格下げロスや廃棄ロスの発生を抑制し、あるいは、大漁時に鮮度を保持しつつ一時保管する出荷調整ができれば、魚価の暴落を防ぎ、生産者・販売者が安定した収入を得ることや資源の有効利用が可能となる。

通常、生（冷凍ではない）で流通する生鮮魚介類は、冷却手段は氷や海水氷に負うところが大きい。氷や海水氷を用いて保存しても、魚体（特に油脂分）の酸化・腐敗が進行するため、水揚げ時には鮮度劣化による悪臭の発生、変色、軟化等により水揚げ相場が低くなる場合がある。また、水揚げ以降の流通過程においても、鮮魚の鮮度を維持する方法は、氷或いは冷蔵庫（トラックの保冷库）内での保存しか方法がないため、水揚げ港、魚市場、百貨店・量販店の鮮魚売り場、飲食店・ホテルのレストラン等外食産業など、全ての鮮魚流通過程において鮮度劣化による格下げロスや廃棄ロス、常態化した値引き販売が収益を大きく圧迫する要因となっている。

例えば、丸福水産グループの量販水産テナント 40 店舗に対して行った統計調査では、格下げロス・廃棄ロスが売上高の約 5%であり、金額に換算すると年間 1 億 5 千万円にのぼる。これを、日本スーパーマーケット協会の統計調査による、全国の総店舗数 7,312 店舗、水産部門の売り上げ 680 億円/月に当てはめれば、格下げロス・廃棄ロスは年間 2,434 億円となる。さらに、全国百貨店協会統計調査による 2012 年の総店舗数が 249 店舗、日本料理店・寿司店が全国に 7 万軒あることを鑑みれば、鮮度劣化抑制により現状のロスが半減した場合の経済効果が莫大であることがわかる。

このように生鮮魚介類が捕獲時と同じ鮮度を長期間維持できれば、付加価値向上による売上増加、ロス削減による収益増加、漁業資源の有効利用が可能であり、薬品等に頼らない、消費者の安心・安全を確保した鮮度保持技術開発の必要性が喫緊の課題として顕在化している。

(具体的な高度化目標)

本事業の当初目的は、鮮魚の捕獲、保管・流通・販売における長期鮮度保持を図る最適な保存方法の確立及び輝陰湿・高付加価値の付与である。

従来、冷蔵庫等の冷蔵設備及び氷により低温管理を中心に行われている鮮度保持方法に加え、新技術である窒素ナノバブルの効果により、水中の溶存酸素量を極限まで低減させた超低酸素ナノバブル冷海水（塩水）を用い、酸化の抑制・好気性細菌の増殖抑制により、生鮮魚介類の鮮度維持向上を実現し、近海まぐろ延縄船捕獲魚においては 1 ヶ月間以上（通常は 2 週間以上経過した捕獲魚は酸化・腐敗により強烈な悪臭が発生）、水揚げ以降市場～小売においては、5～7 日間以上（通常は 1～2 日）の刺身用鮮度維持を実現することを目標とした。

上記鮮度保持期間伸長目標を達成するために、従来のハニカム構造の形状及び材質の改良・最適化を図るとともに、この装置をさらに軽量高度化して、ナノバブル気泡数密度につき 1ml あたり最大で 2 億個以上を生成し、吐出量の増大を図ることで、実用に足る生成能力を有する装置を開発する。

具体的な最終目標値と達成状況は下表の通りである。

本事業の最終目標（黒字）と達成状況（赤太字）

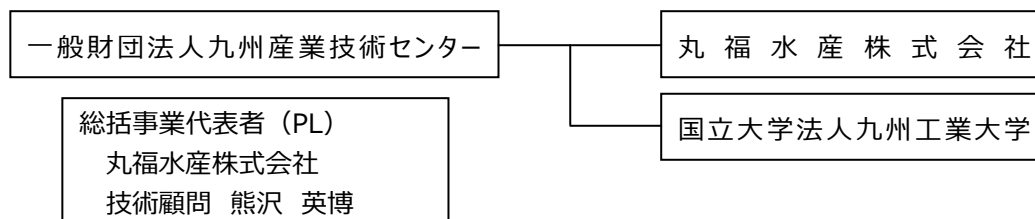
タイプ	ハニカム材質	ハニカム隔壁 薄肉化目標値	性能目標値		用途	鮮度保持目標
			吐出量	ナノバブル 数密度		
大型	チタン 樹脂 チタンはコスト面から断念、樹脂で対応	従来 2.0mm 目標 0.5mm 安全性確認 試作完成	従来 12t/h 目標 18t/h 42t/h 達成	目標 2.0 億 個/ml 安定的に 2.0 億個 /ml 以上を 達成	マグロ 漁船	1 か月以上 達成し相場に 反映
					漁港 市場	5～7 日間 官能検査の結果達成
小型	チタン 樹脂 チタンはコスト面から断念 SUS 及び樹脂で対応	従来 2.0mm 目標 1.0mm 安全性確認 試作完成	従来 2t 目標 3t 4.2t/h 達成	目標 2.0 億 個/ml 安定的に 2.0 億個 /ml 以上を 達成	飲食店 小売店	5～7 日間 官能検査の結果達成

- (1) 材料に関しては、チタン材は切削コストが高くなるため、SUS 及び樹脂材での対応とした。
- (2) ハニカム隔壁に関しては、チタン材がウォータージェット工法により 0.5mm、樹脂材がレーザー工法により 1mm をともに達成したが、チタン材に関しては、材料コストよりもウォータージェットによる切削コストが高過ぎ、ハニカム材への適用を断念した。一方、樹脂材による隔壁 0.5mm の安全性を確認できたことから、大型装置についても、樹脂材の適用が可能であることがわかった。
- (3) 吐出量に関しては、大型・小型ともに目標値を上回って達成した。

1-2 研究体制

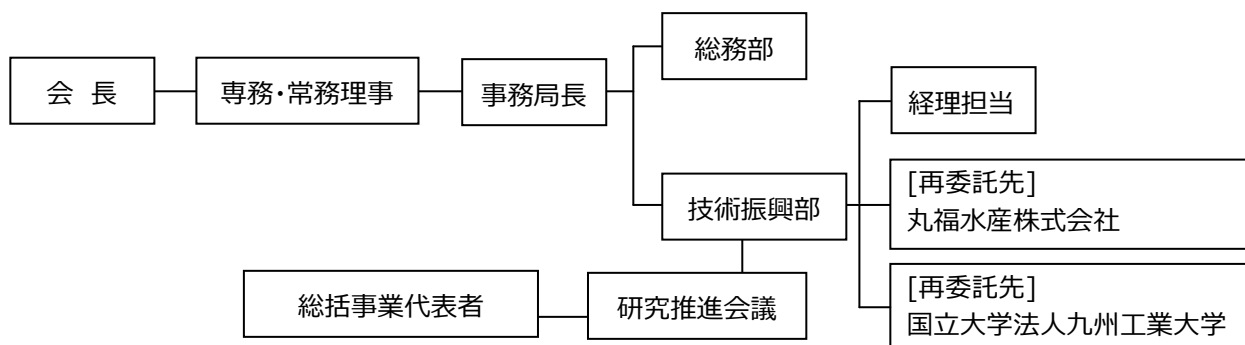
(1) 研究組織及び研究体制

1) 研究組織（全体）



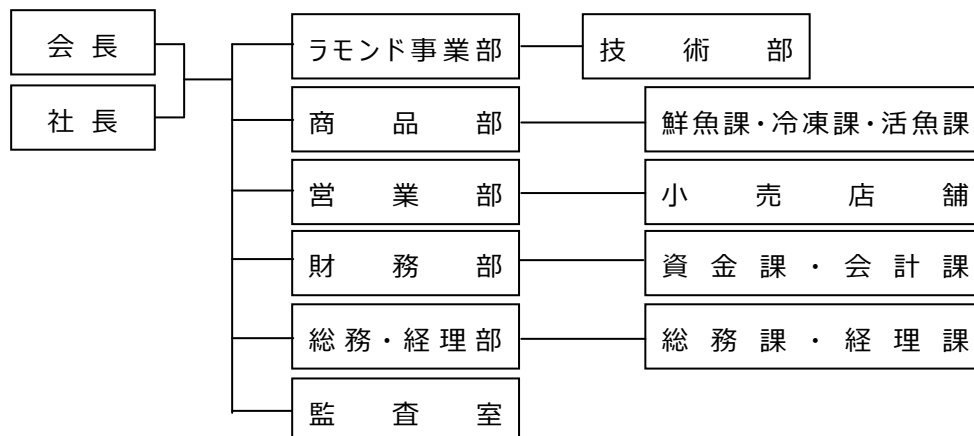
2) 管理体制

① 管理法人 [一般財団法人 九州産業技術センター]

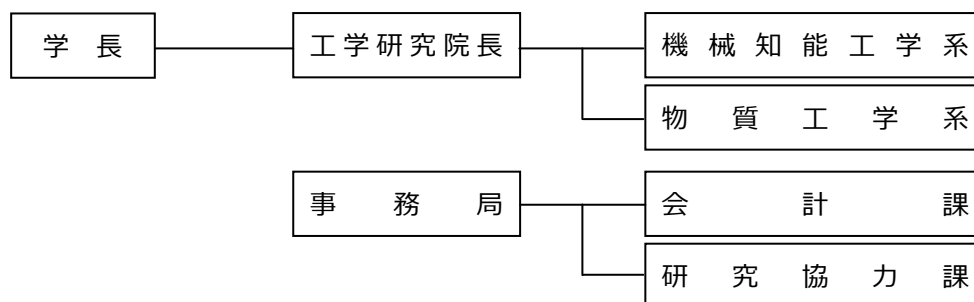


② 再委託先

[丸福水産株式会社]



[国立大学法人 九州工業大学]



(2) 研究員及びプロジェクト管理員（役職・実施内容別担当）

【総括事業代表者（PL）】（プロジェクト管理者）

氏名	所属・役職
熊沢 英博	丸福水産株式会社 技術顧問（工学博士）

【管理法人】一般財団法人 九州産業技術センター

管理員

氏名	所属・役職	実施内容
米田 毅彦	技術振興部 次長	事業全体管理
杉本 大貴	技術振興部	事業全体管理

【再委託先（研究員）】

丸福水産株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
米澤 裕二	ラモンド事業部長	1-1、1-2
中田 俊明	技術部長	2-1、2-2、3
		4-1、4-2

国立大学法人 九州工業大学

氏名	所属・役職	実施内容
野田 尚昭	大学院工学研究院 機械知能工学研究系 教授	1-1、1-2
陳 玳珩	大学院工学研究院 機械知能工学研究系	
王 澤鋒	大学院工学研究院 機械知能工学研究系	

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属・氏名

【管理法人】

一般財団法人 九州産業技術センター

（経理担当者）	技術振興部	課長代理	小屋町 智代美
（業務管理者）	技術振興部	次長	米田 毅彦

【再委託先】

丸福水産株式会社

（経理担当者）	監査室	室長	三浦 敬公
（業務管理者）	ラモンド事業部	部長	米澤 裕二

国立大学法人 九州工業大学

（経理担当者）	会計課	課長補佐	高岩 峰雄
（業務管理者）	大学院工学研究院	院長	芹川 聖一

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

【研究推進会議 委員】

氏名	所属・役職	備考
熊沢 英博	丸福水産株式会社 技術顧問（工学博士）	PL
米澤 裕二	丸福水産株式会社 ラモンド事業部長	SL
野田 尚昭	九州工業大学大学院工学研究院 機械知能工学研究系 教授	委
田中 洋征	九州工業大学 産学連携センター 技術移転アソシエイト	アドバイザー
高塩 仁愛	株式会社ゼンショーホールディングス 基盤技術研究所長	アドバイザー
前田 俊道	水産大学校 食品科学科 教授	アドバイザー
佐野 義一	丸栄化工株式会社 技術顧問	アドバイザー
氷室 昭三	米子工業高等専門学校 校長	アドバイザー
米田 毅彦	一般財団法人 九州産業技術センター 技術振興部 次長	事務局
杉本 大貴	一般財団法人 九州産業技術センター 技術振興部	事務局

【アドバイザー】

氏名	主な指導・協力事項
田中 洋征	ナノバブル生成に係る工学的見地に関する指導。
高塩 仁愛	川下企業の観点からのアドバイス。試作機の評価。
前田 俊道	鮮魚の鮮度保持評価方法及び抗菌性評価に関する指導。
佐野 義一	流体解析、安全性評価に関する技術指導。
氷室 昭三	ファインバブル全般に関する評価・指導。

1-3 成果概要

本事業のテーマは、「生鮮魚介類を長期保存するハニカム構造体を用いたナノバブル生成装置の開発」であり、平成 26 年度より 28 年度の 3 年間で、4 つの研究開発項目に取り組んだ。

軽量・高度化および大容量化を達成するために、まずハニカム構造体内の流れを良くし圧力損失を低減するハニカム構造体の隔壁を薄く加工する技術を開発した。現在のハニカム構造体の隔壁厚さは 2mm であり、流れが悪く圧力損失の大きな要因となっている。また、現在のステンレス材では、海水使用時に電蝕を起こすことから、耐蝕と軽量化を同時に実現するため、チタン材で製作する。さらに軽量化と腐食対策から強度、靱性及び耐水性がある樹脂材でも製作する。隔壁厚さをチタン材で 0.5mm に、樹脂材で 1.0mm にすることで、ハニカム構造体内部の有効容積を増大し、流量（吐出量）で 50%以上増加を実現する。

各項目の成果概要を下記に記載し、詳細については第 2 章以下に記載する。

1. 機能向上への具体的対応（H26-28）

1-1 ハニカム構造体のチタン材における最適化設計（H26-27）

H26 年度から H27 年度にかけ、チタン製ハニカムの隔壁を従来の 2.0mm から 0.5mm に変更するにあたり、九州工業大学と丸福水産との共同作業で、まずはハニカム構造体の破損危険部を、九州工業大学に設置した構造流体連成解析装置を用いて、最も信頼性の高い有限要素法（FEM）解析により定量評価し、ハニカム構造体（正六角形）における、加圧時の壊れやすい部位の定量的解析を行った結果、隔壁 0.5mm において安全であることを確認した。この結果に基づき、チタン製ハニカム構造体の設計を確定した。

1-2 ハニカム構造体のアクリル樹脂における最適化設計（H27-28）

H27 年度から H28 年度にかけ、樹脂製ハニカムの隔壁を従来の 2.0mm から 1.0mm に変更するにあたり、チタン製ハニカムと同様に、FEM 解析により、アクリル樹脂製ハニカム構造体の安全度を定量評価した結果、隔壁 1.0mm で安全であることを確認した。この結果に基づき、アクリル樹脂製ハニカム構造体の設計を確定した。

2. 試作機の製作（H26-28）

2-1 ハニカム構造体の開発

H26 年度は、丸福水産において、項目 1 で検証したモデルの解析情報に基づき、チタン製ハニカム構造体を試作するための設計図を製図した。当初、チタンの切削にはレーザー加工を用いる計画であったが、レーザー加工の際に生じる熱変形を回避することができなかったため、対象物に与えるひずみが少なく、マイクロクラックがほとんど発生しないウォータージェット工法により試作した。しかしながら、難削材であるチタン材のウォータージェット切削は、1 枚のハニカムの切削にほぼ 12 時間を要するため加工費が想定をはるかに超え、実用化に向けては、今後、切削方法に関しては他の工法を検討しなければならないという課題が残った。

H27 年度は、試作したチタン製ハニカムを実機レベルで使用を想定する 3.7kW 水中ポンプに装着し、実際の使用において安全性を検証したところ、項目 1 による解析通り、破壊等がなく安全であることを確認した。また、吐出量については、当初目標であった 18t/h を大幅に上回る 42t/h（700L/min）を確認し、ナノバブル数密度については、丸福水産に設置したナノ粒子解析装置 Nano Sight LM-10HVT により解析を行った結果、安定的に 2.0 億個/ml 以上生成していることを確認した。

同年、アクリル樹脂製ハニカム構造体を試作するための設計図を製図し、隔壁 1.0mm のハニカムをレーザー加工により試作した。アクリル樹脂製ハニカムの開発は、装置の軽量・高度化に資す

る目的であったため、試作したハニカムを 0.4W ポンプに装着し、実際の使用において安全性を検証したところ、こちらも破壊等がなく安全であることを確認した。また、吐出量については、当初目標であった 3t/h を上回る 4.2t/h (70L/min) を確認し、ナノバブル数密度についても安定的に 2.0 億個/ml 以上生成していることを確認した。

樹脂材料に関しては、当初はエポキシ樹脂を計画していたが、研究にあたり、透過性の低いエポキシ樹脂の場合、ハニカムセルの重なりが目視できないことと、アクリル樹脂が対候性・耐汚染性に優れていることから、本研究ではアクリル樹脂を使用することとした。

2-2 ナノバブル生成装置本体の試作

装置本体の軽量・高度化は既存の装置に新規に開発したハニカム構造体を適用することで実現し、大容量化は最適化されたハニカムユニットを並列に積層して流路を拡大し、それに対応する能力のポンプを使用する計画とした。

H27 年度前半は、項目 2-1 で試作したチタン製ハニカムの性能評価に基づき、仕様の確認・検討を行い、仕様を確定し、隔壁 0.5mm チタン製ハニカム搭載のナノバブル生成装置試作機を製作した。

H27 年度後半から、項目 2-1 で試作したアクリル樹脂製ハニカムの性能評価に基づき、仕様の確認・検討を行い、仕様を確定し、既存装置のハニカム部を載せ替える形で隔壁 1.0mm アクリル樹脂製ハニカム搭載のナノバブル生成装置試作機を製作した。

3. ナノバブル生成装置の評価 (H26-28)

項目 2-2 で試作したナノバブル生成装置の評価としては、チタン製ハニカム搭載モデルについては、同一ポンプを用いて従来装置 (隔壁 2.0mm ハニカム搭載) との性能比較を行った結果、吐出量は 700L/min で従来比約 2.8 倍となり、ナノバブル数密度は 2〜3 億個/ml の従来レベルを維持する結果を得た。

アクリル樹脂ハニカム搭載モデルの性能評価は、既存装置のハニカム部を載せ替える形で性能比較を行った結果、吐出量は 70L/min で従来比約 2.3 倍となり、ナノバブル数密度は 2〜3 億個/ml の従来レベルを維持する結果を得た。

H28 年度は、川下ユーザーによる実地検証を行うため、アクリル樹脂ハニカム搭載の小型デモ機 5 台を製作し、水産関係業者に貸し出しを実施し、現場における評価、改善要望等の情報を収集した。

4. ナノバブル水の有効性の検証 (H26-28)

4-1 超高酸素ナノバブル水及び超低酸素窒素ナノバブル水、炭酸ナノバブル水の抗菌性の検証

丸福水産において、試作装置で生成した窒素ナノバブル水の 1 週間の抗菌性を鮮魚を用いて自主検査した。一般生細菌数に対する抗菌性につき、初発 10^4 個/g の検体につき、1 週間後も 10^4 個/g を維持した。これは、生食 (刺身) 用一般生細菌数基準 10^5 個/g 以下の状態を 1 週間保持したこととなる。

H27・H28 年度は、気体種と菌種別の抗菌試験を行い、グラム陽性菌とグラム陰性菌では、殻が薄く、物理的作用に弱いとされるグラム陰性菌に対する抗菌効果が高いことが判った。これにより、ナノバブルの抗菌効果のメカニズムが、気体の種類よりも、バブル自体が破壊する際に生じる衝撃が強く作用していると推察する足掛かりを得た。

4-2 鮮魚の鮮度保持における超低酸素ナノバブル水の長期にわたる有効性の検証

試作機を試用したマグロはえ縄漁船では、漁獲直後にエラと内臓を除去したメバチマグロを窒素ナノバブル海水に浸漬し、23 日間浸漬したままの状態の水揚げしたが、悪臭の発生や皮目の劣化がなく、市場で高く評価された（高値で売れた）。そのマグロを仕入れた仲買によると、身質がモチモチして包丁にねばりつくようであったと言い、一般的なマグロの身質より良いとの評価であった。

また、水産大学校・食品科学科 前田教授（アドバイザー）の監修で、鮮魚（マサバ）を用いた官能検査を実施した。

窒素ナノバブル水により鮮度保持処理を施したマサバと、未処理のマサバを同条件の冷蔵庫で 4 日間保蔵し刺身にしたものに対し、15 名のパネリストにより 6 項目の 2 点比較法（片側検定）官能検査を行った結果、15 名全員が「見た目（皮の光沢）」以外で窒素ナノバブル処理検体に対して鮮度が良いと判断し正解した。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

[研究代表者]

丸福水産株式会社 ラモンド事業部長 米澤 裕二
〒803-0801 福岡県北九州市小倉北区西港町 94 番地の 9
電話：093-592-0500 FAX:093-571-9364
E-mail：y-yonezawa@malufuku.com

[管理法人]

財団法人九州産業技術センター 技術振興部 次長 米田 毅彦
〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東 2 丁目 13 番 24 号
電話：092-411-7394 FAX:092-472-6688
E-mail：yoneda@kitec.or.jp

第2章 本論

1. 機能向上への具体的対応（九州工業大学・丸福水産株式会社）

1-1 ハニカム構造体のチタン材における最適化設計

1-2 ハニカム構造体のアクリル樹脂における最適化設計

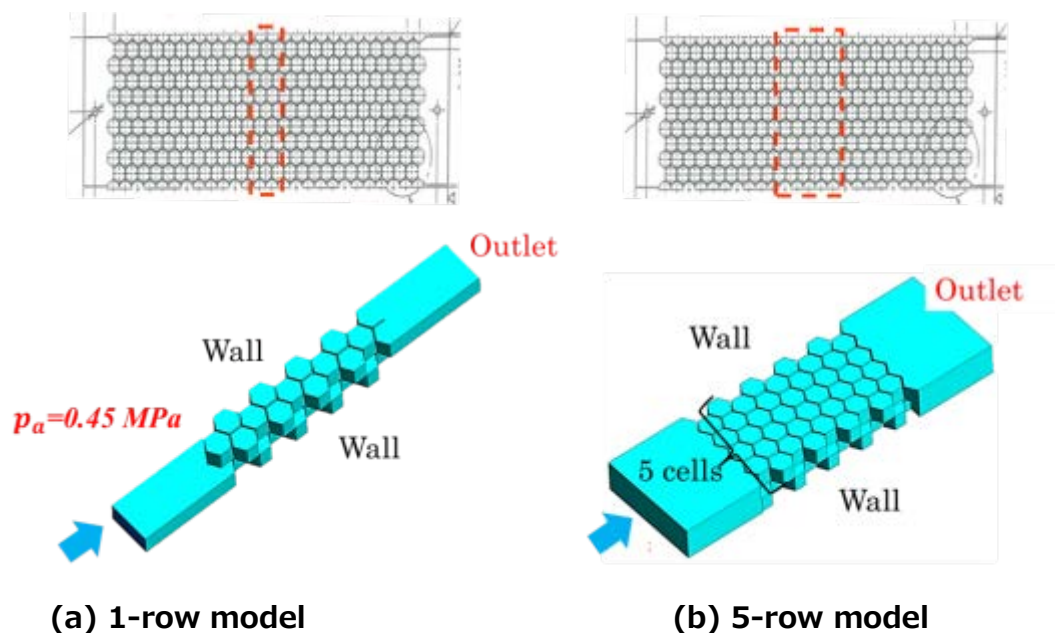
(1) 従来モデルを参考に流れの最大化を目指すハニカム構造体モデルの設定

(1)-1 ハニカムユニット内の流れの解析

(1)-1-① 解析モデルの検討（チタン材、アクリル樹脂材共通）

本研究成果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が、新たにチタンとアクリル樹脂の適用を検討した。本研究では、九州工業大学において、大型装置と持ち運び可能を目的とした小型装置の、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した。

チタン材ハニカム構造体を使用する大型装置について、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った。ナノバブル生成の要因とされる圧力、せん断力、流速を用いて評価を行った。流れは単相流とし、乱流モデル（ $k-\epsilon$ モデル）を使用した。また境界条件は、流入口境界を流入口、流出口境界を圧力出口、壁面境界は断熱壁とした。流体の熱エネルギー保存則の計算は行われていない。図1に検討に用いた1列モデル、5列モデル、対称モデルをそれぞれ示す。対称モデルは、9列モデルから端部条件を対称とした3列を切り取ったモデルと等価である。表1に与えられた境界条件を示す。流入流量は可視化実験時の最大値、乱流強度、粘性比は入口、出口で逆流が生じるときに適用される条件である。図2(a)に3つのモデルの圧力、図2(b)にせん断応力の解析結果を示す。5列モデルと対称モデルは圧力、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分かる。9列モデルと等価な対称モデルと5列モデルが近い値をとるため、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、対称モデルが解析を行うモデルとして最適であることがわかった。



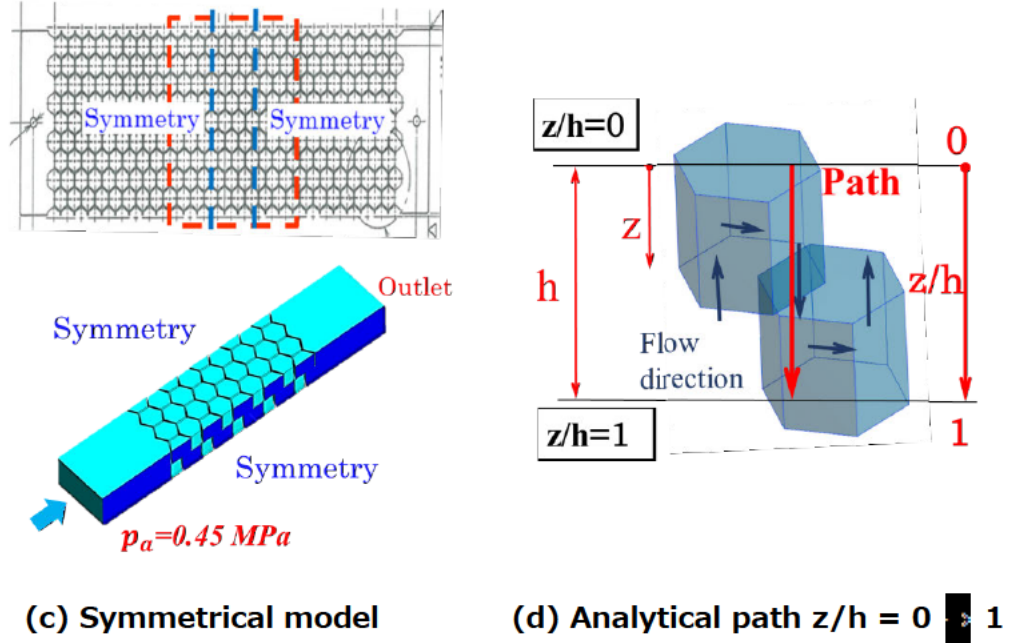


Fig. 1 Three models considered

Table 1 Experimental condition (Large device)

Item	Specification
Absolute pressure (inlet) [MPa]	0.45
Absolute pressure (outlet) [MPa]	0.10
Turbulent intensity [%]	10
Turbulent viscosity ratio	10

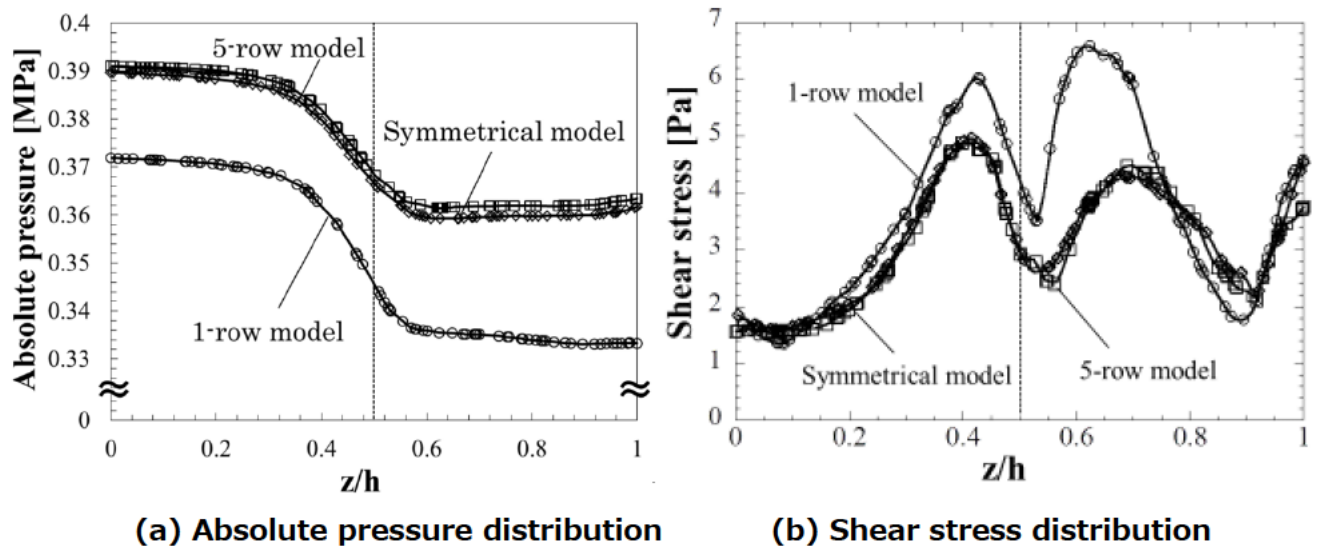


Fig.2 Analytical results of three type models

(1)-1-② ハニカム位置の影響

図 3 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した。ここでは対称モデルと等価な 5 列モデルにおける例を示す。図 4 にそれぞれの位置（ $z=0\sim h$ ）における流れパスに沿った圧力変化を示す。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 5 に流れパス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 6 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、流れ方向位置の異なるハニカムセル内の圧力、せん断応力および流速は、流れ方向位置によらずほぼ等しいことがわかった。

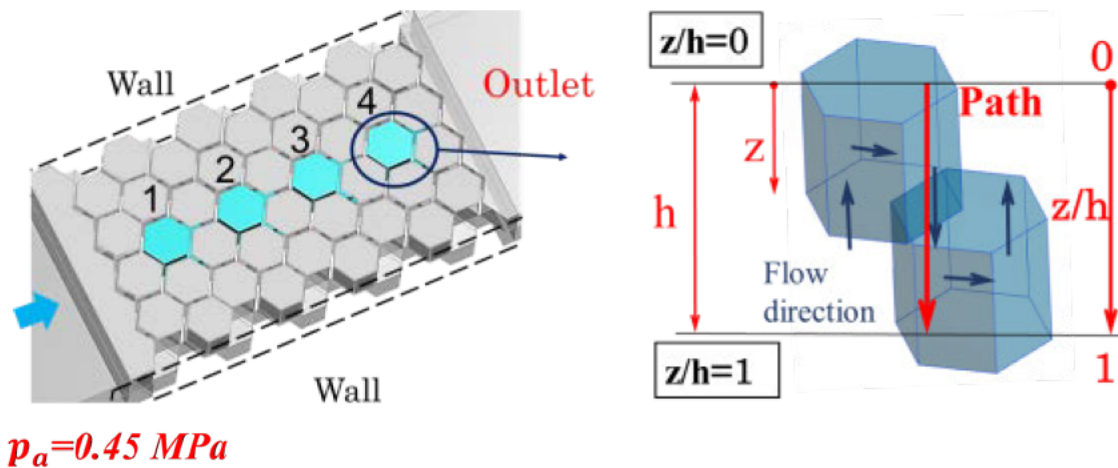


Fig.3 Analysis model four places

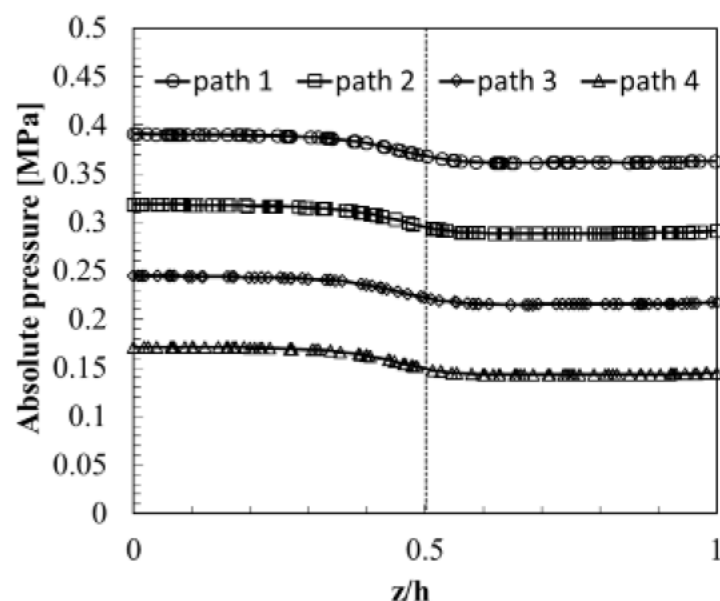


Fig.4 Analysis results of absolute pressure

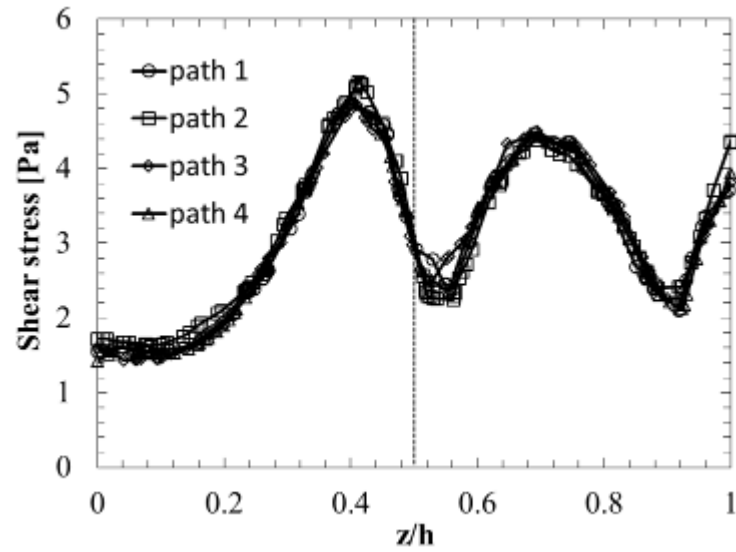


Fig.5 Analysis results of Shear stress

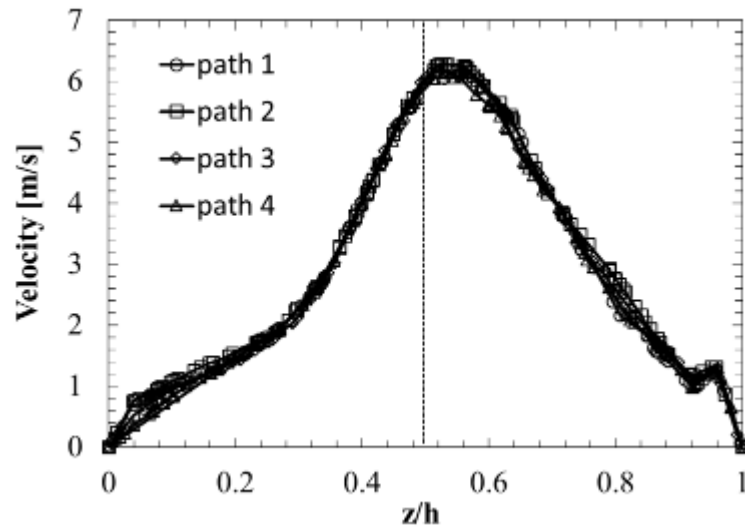


Fig.6 Analysis results of velocity

(1)-1-③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。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 7 に示す。ハニカムユニット間にすきまがない $Cl=0\text{mm}$ 条件に対して、すきま $Cl=1\text{mm}$ 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 17 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 6 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。

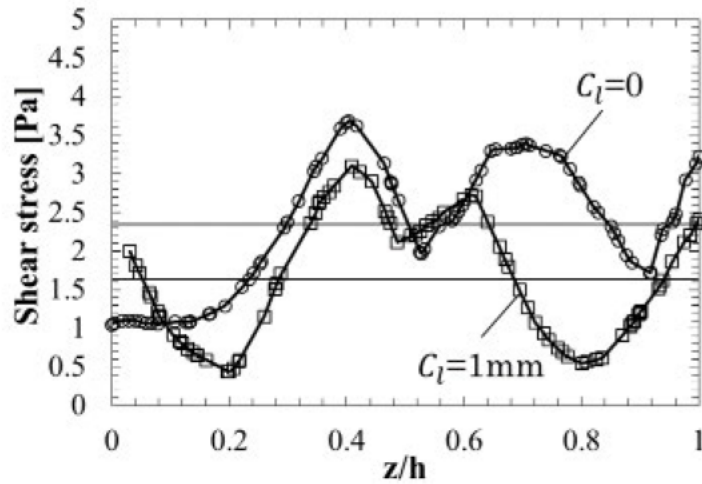


Fig.7 Shear stress when $C_l=0\text{mm}$ and

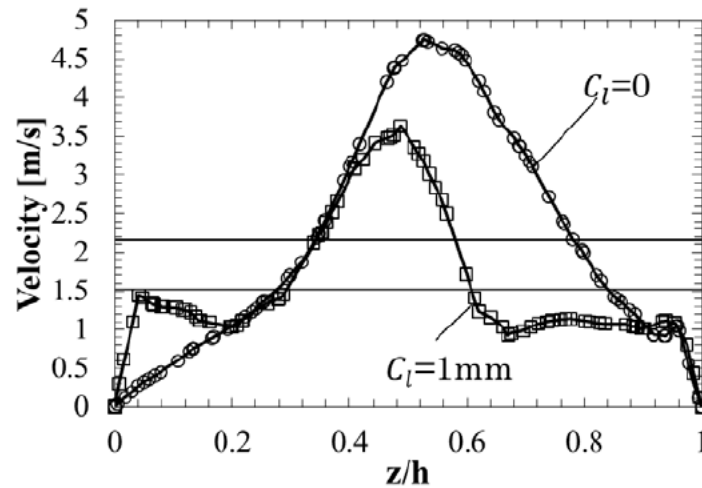


Fig.8 Velocity when $C_l=0\text{mm}$ and $C_l=1\text{mm}$

(1)-1-④ 大型、小型装置におけるセル内の流動方向、位置の影響

大型装置（チタン材ハニカム構造体搭載機）

図 9 に大型装置のハニカムセル内部の流速分布を示す。ハニカムセル上段と下段の重なる部分で流路面積が小さくなるため、流速は最大値を示す。図 10 にハニカムセル内において、解析を行う Path の概要図を示す。縦方向については、Path1 はハニカムセルの中心とし、Path2 と Path3 はセル内の壁に近い位置に設定した。横方向については、上から順に Path 4、Path 5、Path 6 と設定した。図 11(a)～(c)に縦方向の Path1、Path2、Path3、図 11(d)～(f)に横方向の Path 4、Path 5、Path 6 における圧力とせん断応力分布を示す。縦方向 Path の圧力に注目すると、すべての解析 Path において、圧力が減少しその後上昇する傾向が見られる。また、値は $P_a=0.03\text{MPa}$ でほぼ一致していることがわかる。一方、せん断応力に注目すると、Path2 と Path3 の最大値は Path1 の最大値の約 2 倍の値を示し、 $z/h=0.5$ 付近で約 $\tau_{\text{max}}=10\text{MPa}$ を示している。また、横方向 Path については、圧力は縦方向 Path 同様、減少しその後上昇する傾向が見られる。せん断力は、壁近傍の影響がある部分に最大値が表れる傾向がみられた。

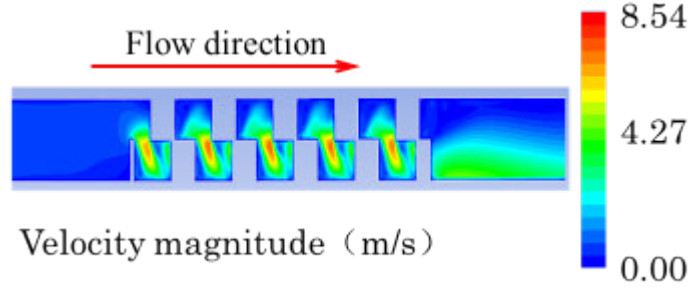


Fig.9 Flow velocity distribution (Large device)

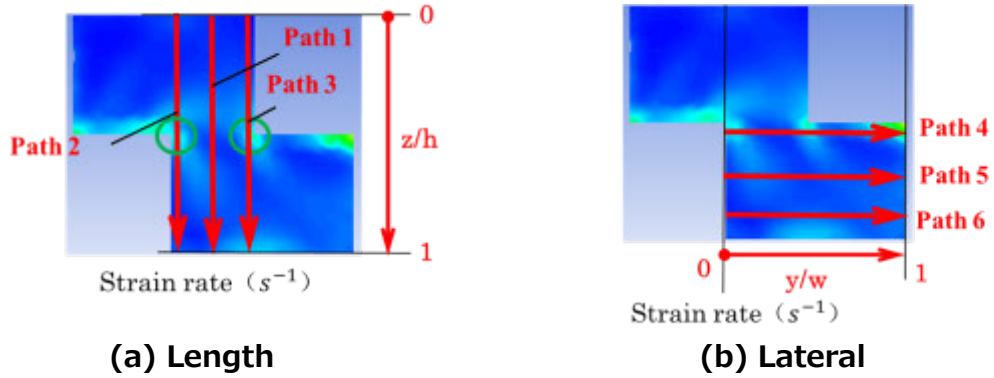


Fig.10 Analysis path (large device)

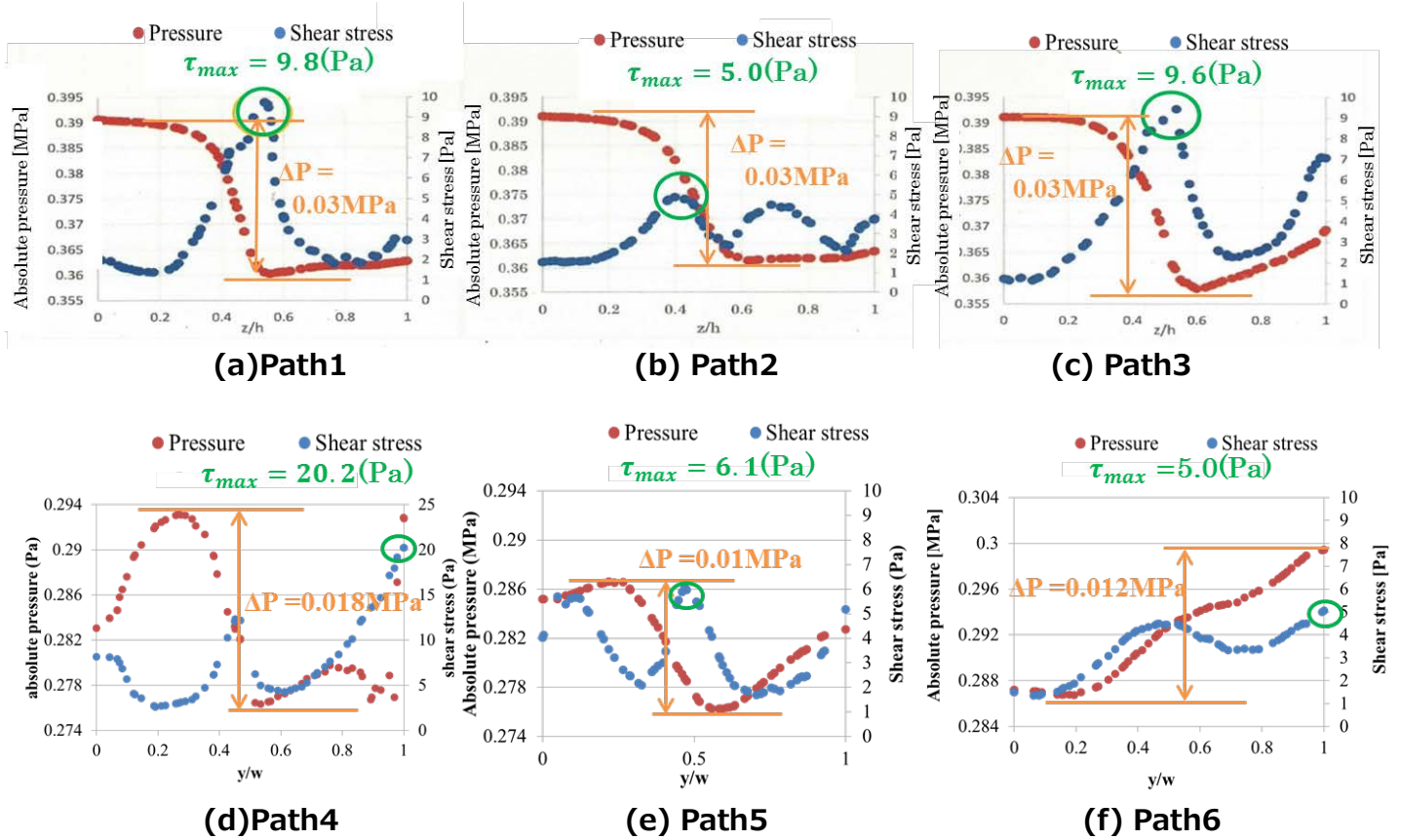


Fig.11 Absolute pressure and shear stress distribution (Large device)

小型装置（アクリル樹脂材ハニカム構造体搭載機）

小型装置についても大型装置と同様の流体解析を行った。表 2 に与えられた境界条件を示す。流入流量は可視化実験時の最大値、乱流強度、粘性比は入口、出口で逆流が生じるときに適用される条件である。図 12 に小型装置のハニカムセル内部の流速分布を示す。小型装置のハニカムセル内における解析を行う Path を図 13 に示す。図 14(a)～(c)に Path1、Path2、Path3、図 14(d)～(f)に横方向の Path 4、Path 5、Path 6 における圧力とせん断応力分布を示す。縦方向 Path の圧力は、大型装置と同様に減少しその後上昇する傾向が見られる。値は $P_a=0.04$ MPa でほぼ一致し、大型装置より 0.01 MPa 大きいことがわかる。縦方向 Path のせん断応力についても大型装置と同様に、Path2 と Path3 の最大値は $z/h=0.5$ 付近で最大値を示した、最大値は約 $\tau_{\max}=30$ MPa を示し大型装置の 3 倍を示していることがわかる。また、横方向 Path については、大型装置と同様に、圧力は縦方向 Path 同様、減少しその後上昇する傾向が見られる。せん断力は、壁近傍の影響がある部分に最大値が表れる傾向がみられた。

Table 2 Experimental condition (Small device)

Item	Specification
Absolute pressure (inlet) [MPa]	0.06
Absolute pressure (outlet) [MPa]	0.10
Turbulent intensity [%]	10
Turbulent viscosity ratio	10

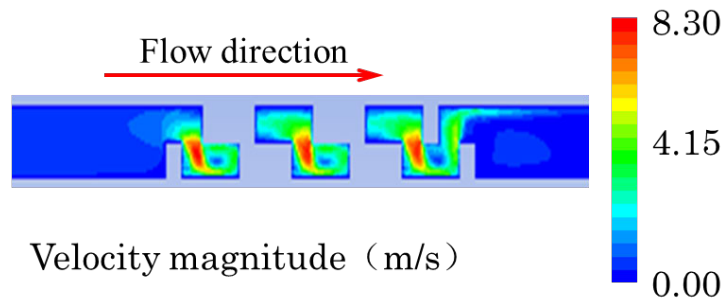


Fig.12 Flow velocity distribution (Small device)

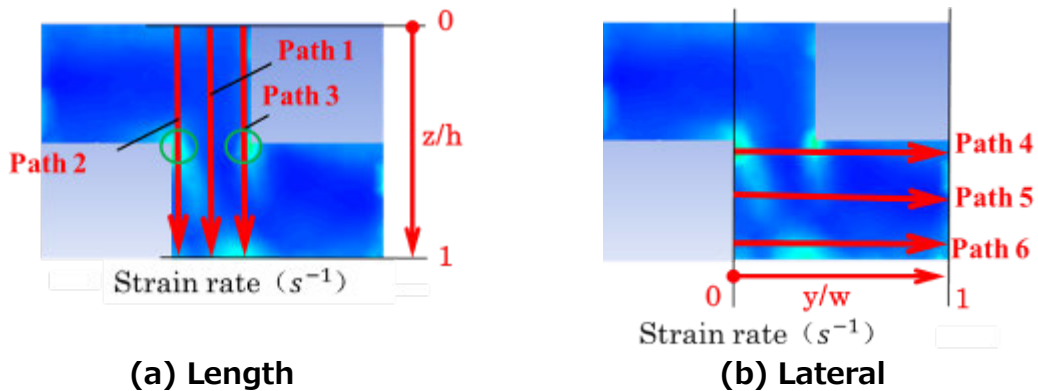


Fig.13 Analysis path (Small path)

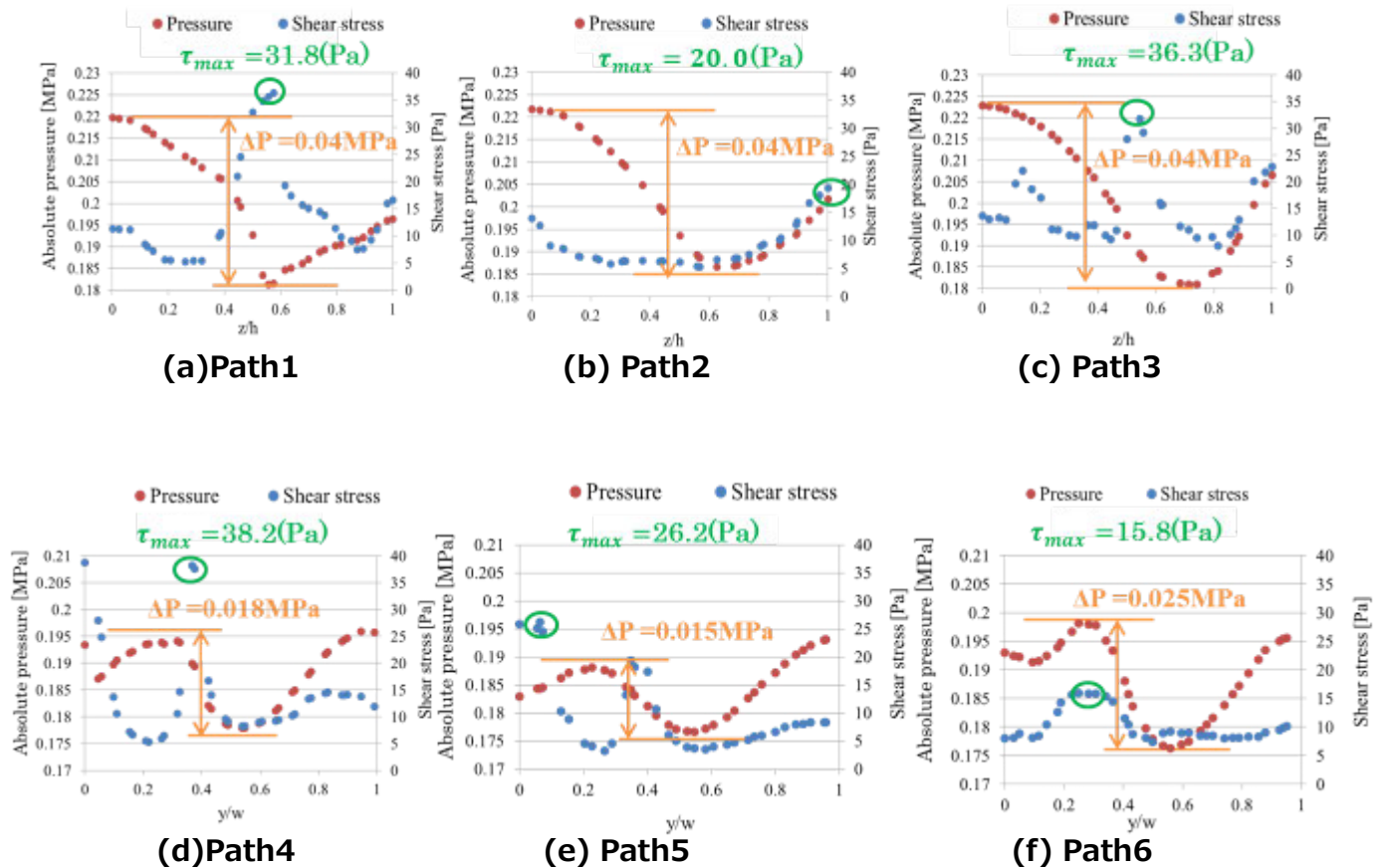


Fig.14 Absolute pressure and shear stress distribution (Large device)

以上より、表 3 にハニカムセル内における解析 Path の、圧力変化量とせん断力の値を示す。圧力変化量とせん断力ともに小型装置の方が大きい値を示しており、ハニカム装置のナノバブル生成能力は高いと考えられる。また、せん断応力は壁に近いほど、また、角部で高い値を示すことがわかった。

Table 3 Comparison of large and small devices

	Device	Path1	Path2	Path3	Path4	Path5	Path6
Absolute pressure[MPa]	Large	0.03			0.018	0.01	0.012
	Small	0.04			0.018	0.015	0.025
shear stress[Pa]	Large	9.8	5.0	9.6	20.2	6.1	5.0
	Small	31.8	20.0	36.3	38.2	26.2	15.8

(2) ハニカム構造体モデルの FEM 解析による隔壁厚さの安全性評価

(2)-1 ハニカム壁の強度評価

(2)-1-① 大型装置のハニカム壁の強度評価（チタン材、アクリル樹脂材）

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 4 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。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 4 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 2 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。図 15 に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。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。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。

図 16 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 25)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 24.1 となる。

次に、図 17 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 5 に示す。表 5 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。

Table 4 Mechanical property

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

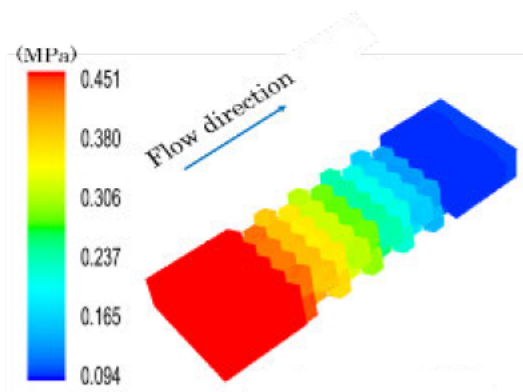


Fig.15 Absolute pressure distribution

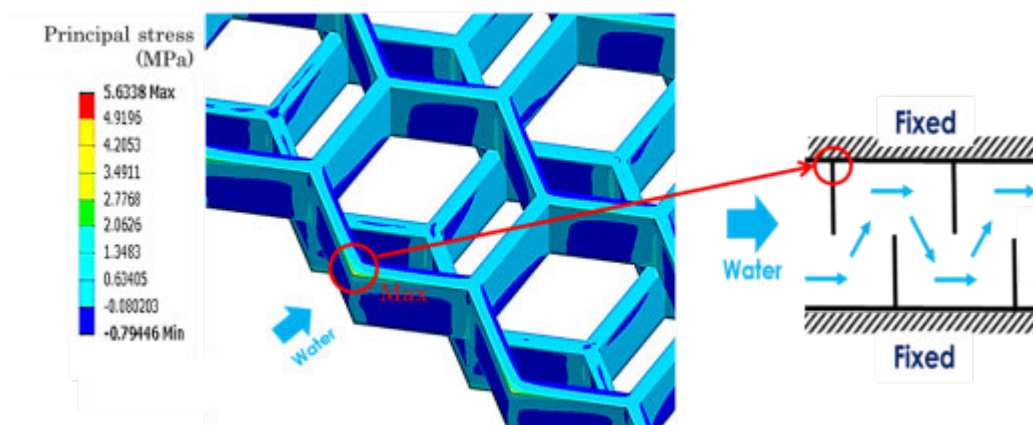


Fig.16 FEM results of titanium wall thickness 0.5mm

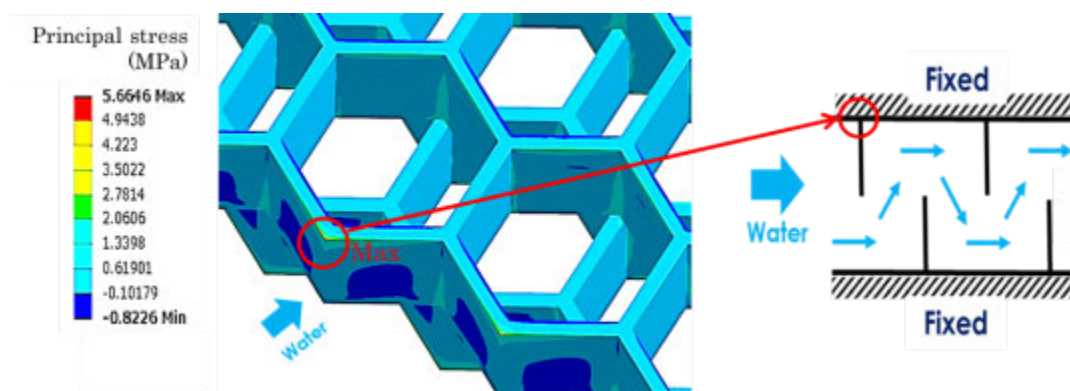


Fig. 17 FEM results of acrylic wall thickness = 0.5mm

Table 5 Analysis results of structure (Large device)

Wall material	Partition wall thickness [mm]	Maximum principal stress σ_1^{Max} [MPa]	Fatigue limit σ_W [MPa]	Safety factor $\sigma_W / \sigma_1^{Max}$
Titanium	0.5	5.6	135	24.1
Acrylic	0.5	5.7	28	4.9
	2	1.9		14.7

(2)-2 小型装置のハニカム壁の強度評価（アクリル樹脂材）

大型装置の構造解析でチタンとアクリル樹脂のどちらの場合でも強度は十分であったため、小型装置では加工性、経済性に優れるアクリル樹脂のみについて検討を行った。アクリル樹脂の機械的性質は表 6 と同じものを用いた。大型装置ではハニカムユニットにおける圧力分布をもとに構造解析を行ったが、小型装置ではより厳しい条件を想定して、ハニカムユニットの上下の面をプレートに固定し、入口側 1 段目の前面にのみ圧力 0.06MPa が加わっているとして解析を行った（大型装置では 1 段目後面にも圧力がある（図 24 参照））。図 27 に厚さ 1 mm のアクリル樹脂における最大主応

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 18)で、 $\sigma_1^{Max}=0.78\text{MPa}$ であった。疲労限は 28MPa であるため、安全率は 36 となった。また、小型装置について、ハニカムプレート同士の合わせ面は接着されているが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の接着が剥がれてしまう懸念がある。そこで、接着が剥がれた場合の強度評価を行うために、より一層厳しい条件を想定して、プレートが未接着であると仮定し、プレート 1 枚のみについて構造解析を行った。図 19 に最大主応力の分布を示す、出口側 1 段目の端部を固定し、境界条件は接着した場合と同様とした。最大主応力が最大値を示す部位は、出口側 1 段目の図 19 に赤丸で示す部分で $\sigma_1^{Max}=2.0\text{MPa}$ である。疲労限は 28MPa であるため、安全率は 14 となった。以上より、アクリル樹脂隔壁 1mm における接着及び未接着時の最大主応力、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、最も厳しい条件を想定した未接着の場合でも十分な安全性を有することが分かった。

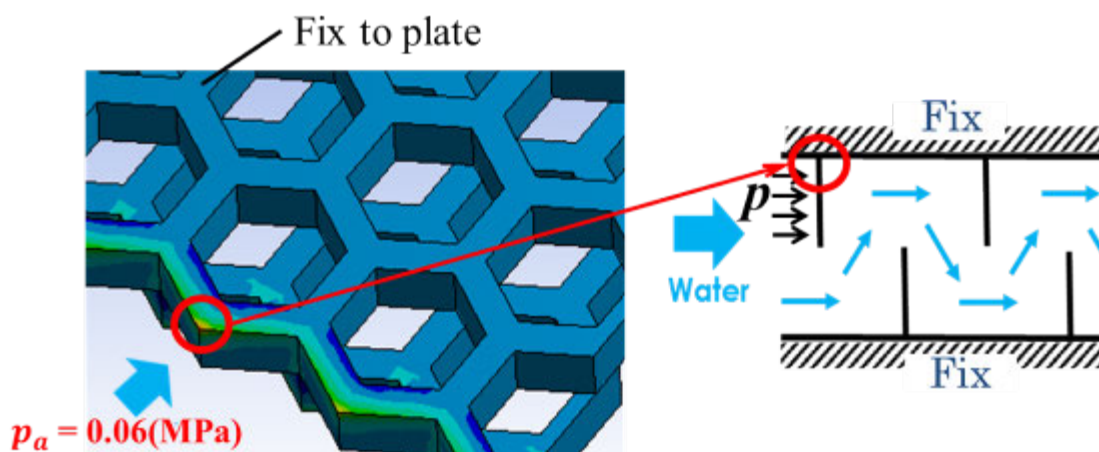


Fig.18 FEM results of acrylic wall thickness 1mm (Small device-Fix)

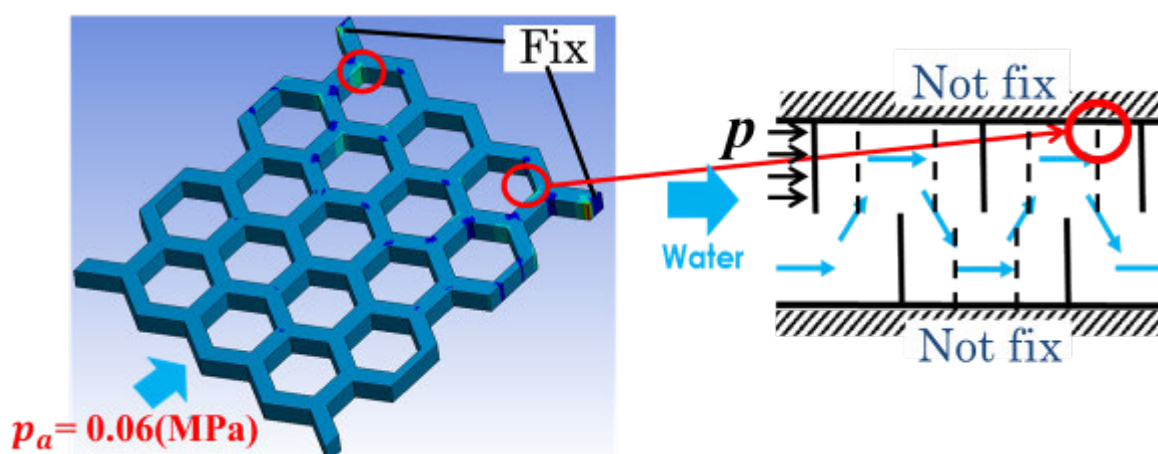


Fig.19 FEM results of acrylic wall thickness 1mm (Small device-Not fix)

Table 6 Analysis results of structure (Small device)

Wall material	Partition wall thickness [mm]	Maximum principal stress σ_1^{Max} [MPa]	Fatigue limit σ_w [MPa]	Safety factor $\sigma_w / \sigma_1^{Max}$
Acrylic(Fix)	1	0.78	28	36
Acrylic(Not fix)		2.0		14

(3) ハニカム構造体の試作と実験による検証

これまで解析した結果に基づき、丸福水産においてチタン材及びアクリル樹脂材によりハニカム構造体を試作した。これを使用し、丸福水産と九州工業大学と共同でナノバブルの生成実験を行い、性能評価を行った。

(3)-1 大型装置（チタン製ハニカム構造体搭載装置）のナノバブル生成実験

図 20 に並列ハニカムユニットを装着した大型ナノバブル発生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 20 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とを 1 ユニットとすると、本研究では 15 ユニット箱に装備されたものを標準とする。また、図 21(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 1 t）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)。表 7 に実験に用いた装置の諸元を示す。ポンプ吐出流量(Flow rate)は大気中に吐き出す条件で求めた。また、表 8 に実験条件を示す。

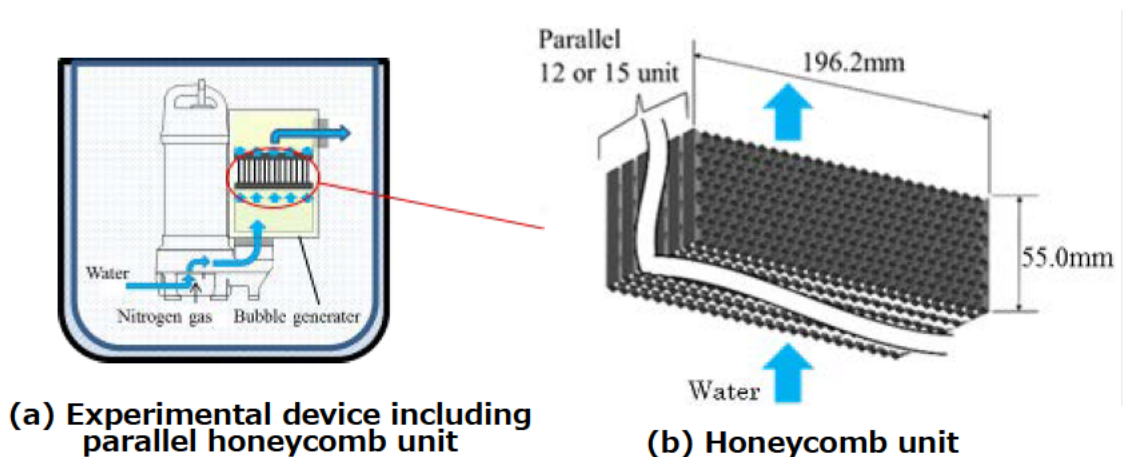
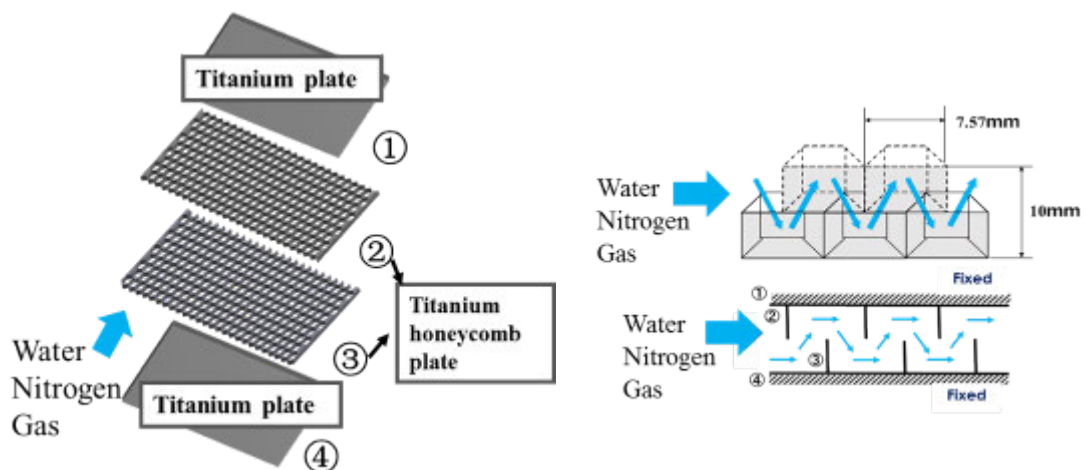


Fig.20 Large nitrogen nanobubbles generating device



(a) 1-unit composition (b) Cross section 1-unit honeycomb structure

Fig.21 Honeycomb structure model

Table 7 Details of the experimental device (Large 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
Apparatus weight (kg)	50.51
Unit number	15 or 12

Table 8 Experimental condition (Large device)

	Number of units N_{unit}	Clearance C_I [mm]	Absolute Pressure P_a [MPa]	Flow rate [ℓ /min]	Power P_w [Hz]
①	15	0	0.30	550	3.7
②	12	2	0.16	—	3.7
③	12	0	0.26	650	3.7
④	12	0	0.11	300	2.0

ナノバブル密度の測定にはナノ粒子解析装置「Nano Sight LM10-HSVT」を使用する。図 22 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。

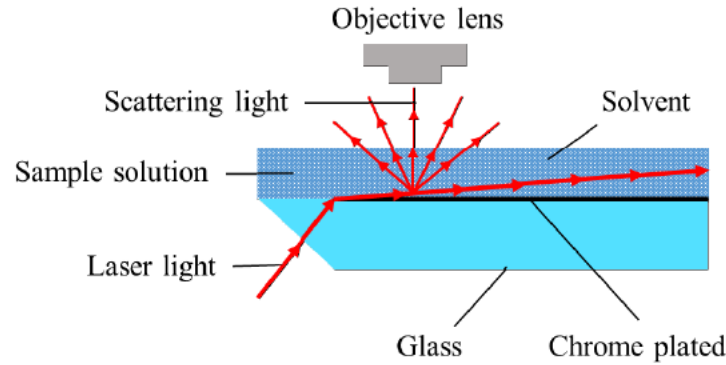


Fig.22 Schematic view of visualization for bubbles

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(Nunit)、およびハニカムユニット間のすきま(CI)に着目した。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。これまでの試作品の研究に基づき、60 分後のナノバブル密度 2 億個/ml、DO1.0mg/l を目標値に設定した。図 23 にポンプ出力を変えた場合のナノバブル密度、DO のそれぞれの時間変化を示す。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。図 24 にはハニカムユニット数を変えた場合のナノバブル密度、DO のそれぞれの時間変化を示す。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、すきまの影響によるナノバブル密度、DO の時間変化を図 6 に示す。60 分後で見ると、すきまのない場合に対してすきま $CI=2\text{mm}$ のときには生成密度は約 30%に減少する(図 25)。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、ナノバブル生成効率の指標に用いたナノバブル密度と溶解酸素量 DO は、用いた実験システムにおいて、ポンプ能力の最大出力 3.7kW でハニカムユニット間すきま 0mm にした 12 個以上のハニカムユニットを用いて、目標性能を達成できることを明らかにした。また、ポンプ出力を低減させた場合と、ユニット間に隙間が生じた場合のナノバブル生成効率への影響は大きいことがわかった。

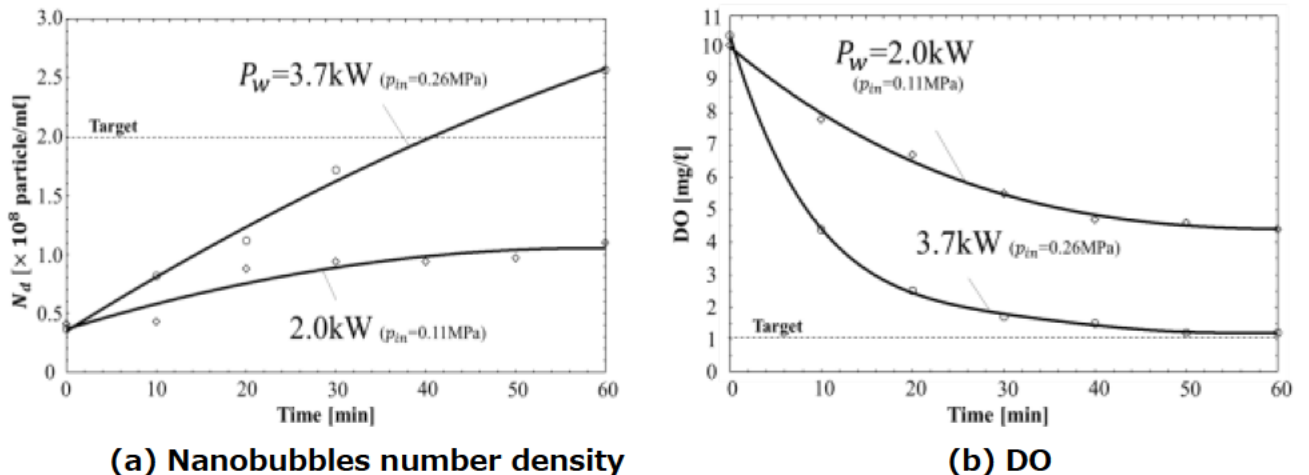


Fig.23 Time variation of nanobubbles number density and DO

when $P_w = 3.7\text{kW}$ and 1.96kW (Large device)

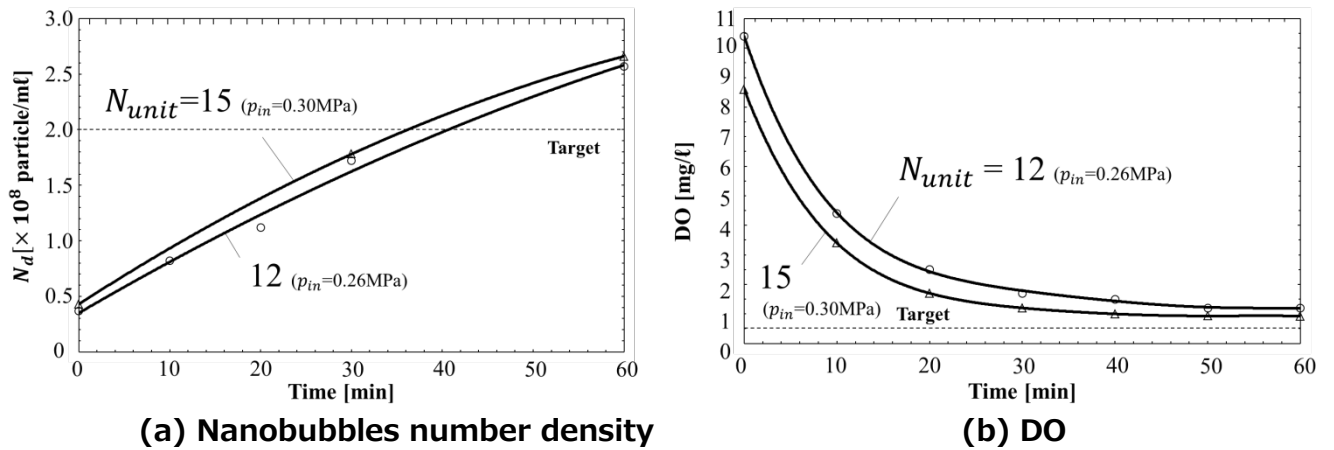


Fig.24 Time variation of nanobubbles number density and DO
when $N_{unit} = 15$ and 12 (Large device)

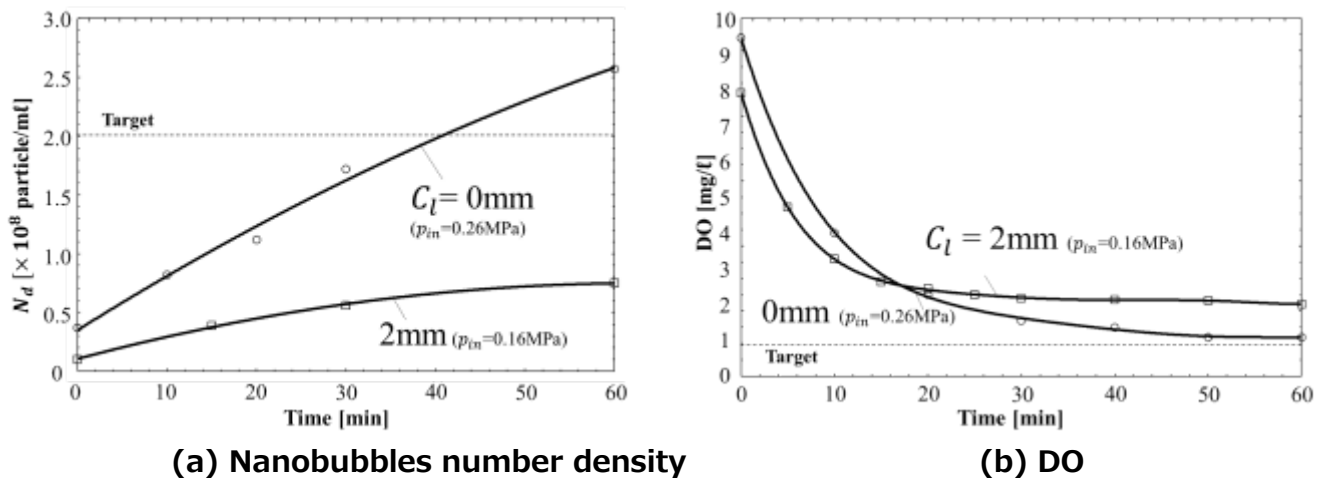


Fig.25 Time variation of nanobubbles number density and DO
when $C_l = 0 \text{ mm}$ and 2 mm (Large device)

(3)-2 小型装置（アクリル樹脂製ハニカム構造体搭載装置）のナノバブル生成実験

図 26 にハニカムユニットを装着したバブル発生装置の概略図を示す。大型装置と同様に図 21 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、合計 16 ユニットとした。表 9 に実験に用いた装置の諸元を示す。また、表 10 に実験条件を示す。小型装置では、小型化のために装置の大きさに制限があるため、ハニカムのポンプ出力(P_w)、隔壁厚さ(w)に着目した。ナノバブル生成効率、大型装置同様ナノバブル密度および溶存酸素量 DO の時間変化で評価し、30 分後のナノバブル密度 2 億個/ml、DO 1.0mg/l を目標値に設定した。図 27 にポンプ出力を変えた場合のナノバブル密度、DO のそれぞれの時間変化を示す。ナノバブル密度および DO とともに目標値に達した。しかし、ポンプ出力の低減により 30 分後のナノバブル密度は低下したが、DO には大きな変化は見られなかった。図 28 に隔壁厚さを変えた場合のナノバブル密度、DO のそれぞれの時間変化を示す。ポンプ出力の低減と同様に 30 分後のナノバブル密度は低下したが、DO には大きな変化は見られなかった。

以上の実験結果を総括すると、ナノバブル生成効率の指標に用いたナノバブル密度と溶解酸素量 DO は、用いた小型の実験装置において、十分目標性能を達成できることを明らかにした。また、ポンプ出力と隔壁厚さを変更した場合、流量の変化によるナノバブル生成能力への影響はあるが、小型装置では目標値を十分達成可能であることがわかった。

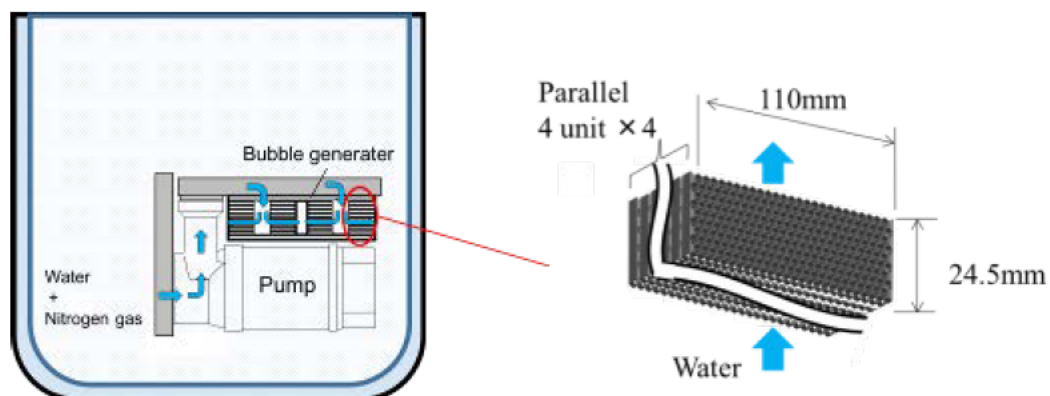


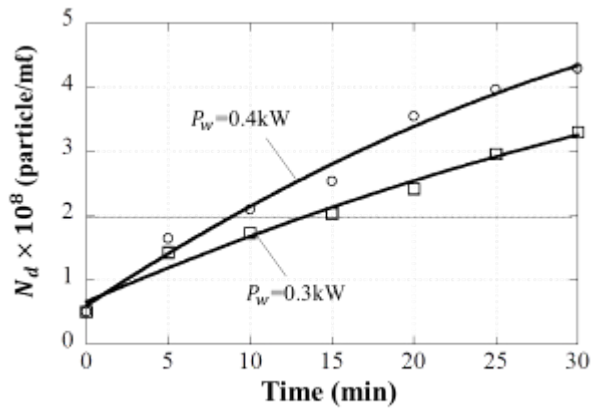
Fig.26 Small nitrogen nanobubbles generating device

Table 9 Details of the experimental device (Small device)

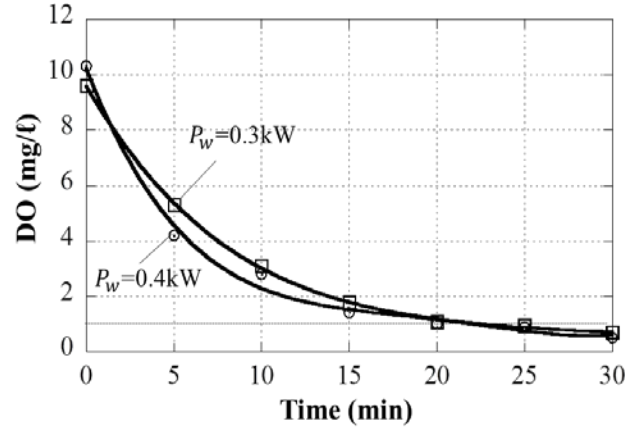
Item	Specification
Pump	Submersible pump(50TMLS2.25S)
Output [kW]	0.4, (60Hz)
Flow rate [ℓ /min]	220
Container [mm]	840×600×500
Water and amount [kg]	Tap water, 100
Gas	Nitrogen
Flow rate [ℓ /min]	1.0
Pressure [MPa]	0.20
Apparatus weight (kg)	14.45
Unit number	4×4 = 16

Table 10 Experimental condition (Small device)

	Wall Thickness w [mm]	Absolute Pressure p_a [MPa]	Flow rate [ℓ /min]	Power P_w [kW]
①	1	0.060	103	0.4
②	2	—	—	0.4
③	1	0.045	80	0.3

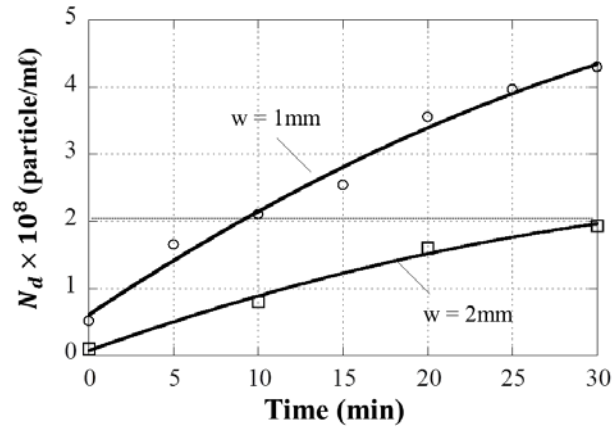


(a) Nanobubbles number density

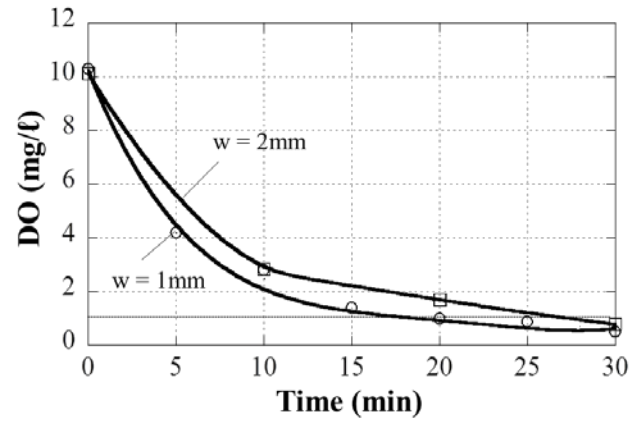


(b) DO

Fig.27 Time variation of nanobubbles number density and DO when $P_w = 0.4kW$ and $0.3kW$ (Small device)



(a) Nanobubbles number density



(b) DO

Fig.28 Time variation of nanobubbles number density and DO when $w = 1mm$ and $2mm$ (Small device)

2. 試作機の製作（丸福水産株式会社）

2-1 ハニカム構造体の開発

(1) チタン及び樹脂製ハニカム形状の開発

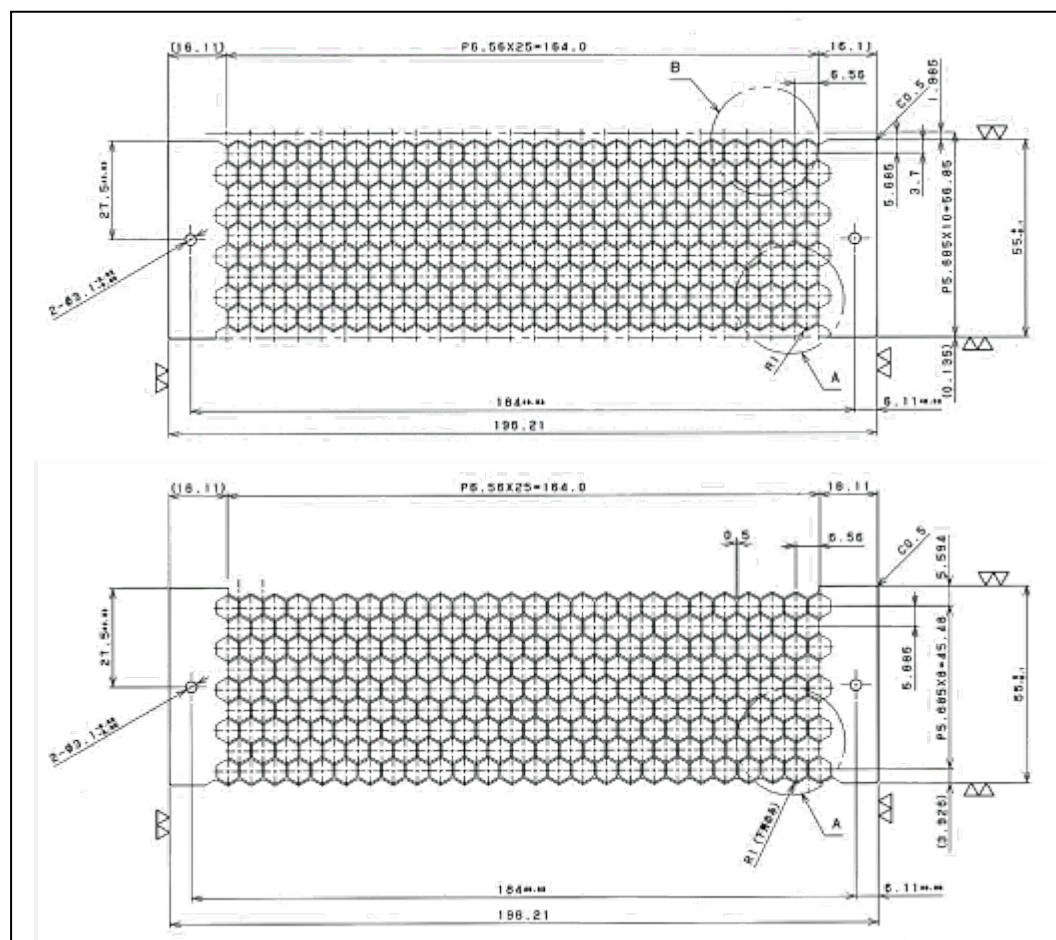
九州工業大学との共同研究により、構造的な当初目標であった、チタン製ハニカム隔壁厚さ 0.5mm 及びアクリル樹脂製ハニカム隔壁厚さ 1.0mm の安全性が確認できたため、機能向上を目指す構造設計を行い、試作モデルを製作した。

ハニカム構造体によるナノバブル生成メカニズムは、ハニカム内部を通過する際の圧力変動に伴うせん断であるので、単にハニカムセル個体の容積を大きくするよりも、同じスペースにおけるハニカム通過回数を増やす（せん断機会が増す）ことにより、ナノバブルの生成効率を高める狙いであった。

また、ハニカム構造体内部を循環させてナノバブル数密度を高めるという性質上、ハニカム構造体内部の容積を増やし、流量を増加させることは、同じ時間における通過回数（循環量）を増やすため、よりナノバブル生成効率を高めると考えた。

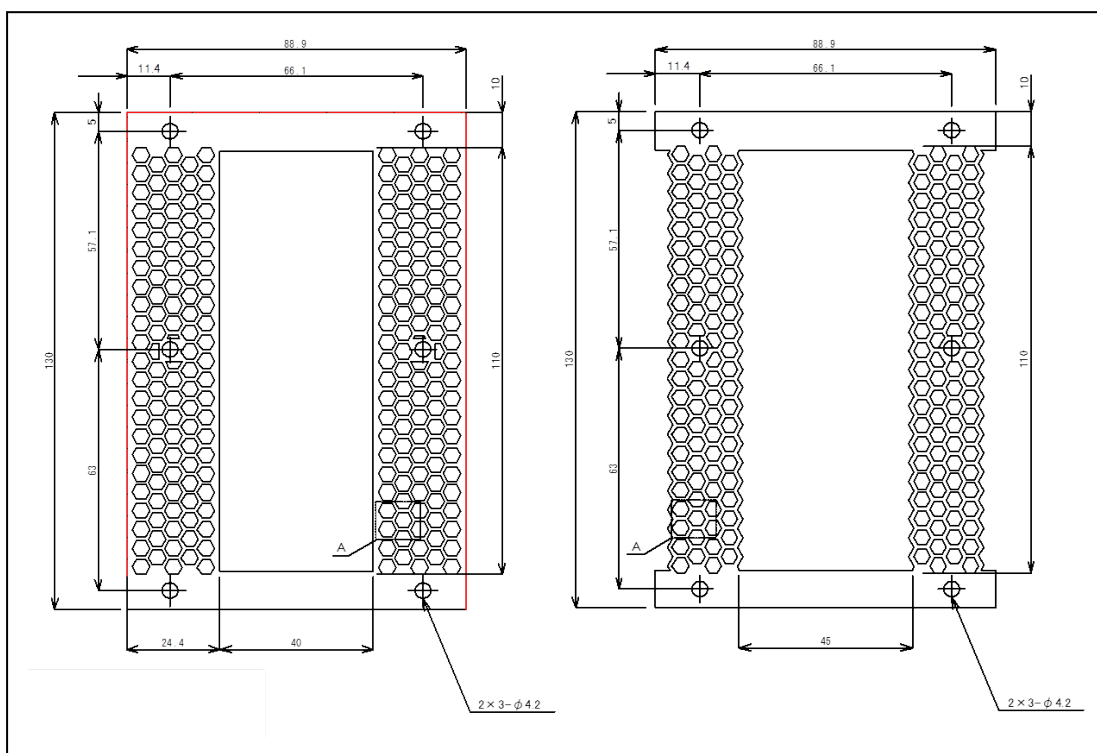
チタン製ハニカム構造に関しては、ハニカム構造体倍部でのせん断回数を増やす目的で、基本的には1枚のハニカムに対するハニカムセル個体の寸法は同一とし、隔壁厚さのみを従来の2mmから0.5mmとした結果、55mm×196.21mmのプレートに229個のハニカムセルを配置することができた。隔壁2mmの場合、同寸法のプレートに配置できるハニカムセルが163個であるのと比べ、1.4倍となり、ハニカムセルの深さが5mmであるので、体積比で $36,428.175\text{ mm}^3$: $25,929.225\text{ mm}^3$ となった。

Fig.29 チタン製ハニカム構造体の設計図



アクリル樹脂製ハニカム構造に関しても同様に、せん断回数を増やすため、ハニカムセル個体の寸法は変更せずに隔壁厚さのみを変更したところ、「口の字型」のプレートに 220 個のハニカムセルを配置することができた。隔壁 2mm の場合は 142 個であるので、個数が 1.55 倍、深さ 2mm での体積比は $5,782.92\text{mm}^3 : 3,732.612\text{mm}^3$ となった。

Fig.30 アクリル樹脂製ハニカム構造体の設計図



チタン材の切削について、当初はレーザー加工を予定していたが、0.5mm の薄肉に加工するにあたり、加工の際の発熱による歪曲等熱変形が発生した。

そのため、チタンの切削方法として、加工時における発熱、対象物に与えるひずみが少なく、マイクロクラックが発生し難いウォータージェット工法を検討した。ウォータージェット工法は、高速水流により加工するが、加工応力が少なく、内部応力の蓄積もないため、軟質材、薄材、脆弱材の加工に適している。しかしながら、難削材であるチタン材のウォータージェット切削は、1 枚のハニカムの切削にほぼ 12 時間を要するため加工費が想定をはるかに超え、実用化に向けては、今後、切削方法に関しては更に他の工法を検討しなければならないという課題が残った。

アクリル樹脂製ハニカムに関しては、計画通りレーザー加工により製作した。

ハニカム構造体は、チタン・樹脂共に、材料となる板材を設計図に基づいて、ウォータージェット及びレーザー加工により切抜き、片側のハニカムセルを別の一方のハニカムセルが三分割に仕切るように組合せ（図 31）、重ね合わせたハニカムプレートをフラットなプレートで挟み込み接着する方式とした（図 32）。

使用するポンプの能力に応じてハニカムユニットの積層段数を変更し、流量と圧力を調整することでハニカム構造体の性能が決まり、ナノバブル生成装置の能力が決まることとなる。

Fig.31 ハニカムの重なりと流れ

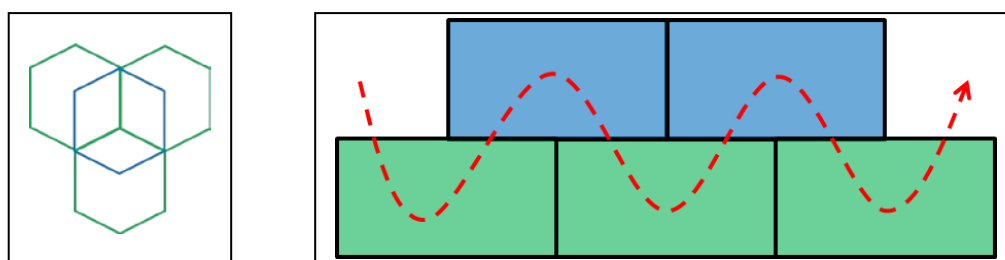
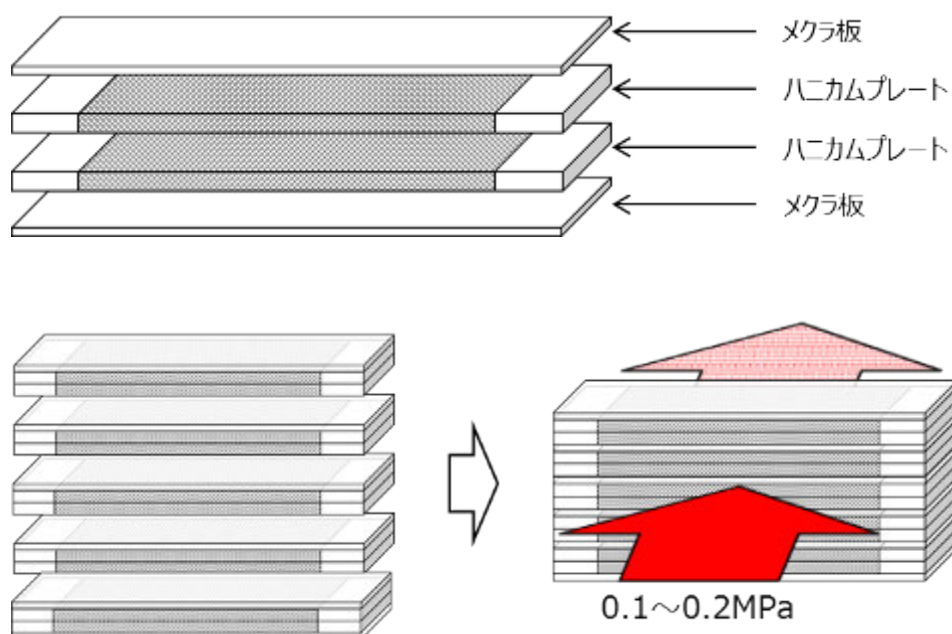


Fig.32 ハニカムユニットの積層



2-2 ナノバブル生成装置本体の試作

試作したハニカム構造体は、九州工業大学と共に行った、前項（3）ハニカム構造体の試作と実験による検証により目標性能が確認されたため、実際に現場で使用するレベルの試作機の製作に取り掛かった。

チタン製ハニカム構造体を用いる大型装置については、海水用水中チタンポンプの 1.5kW、22kW、3.7kW を選定し、それぞれ積層段数は 1.5kW : 10 段、2.2kW : 12 段、3.7kW : 15 段とした。水中ポンプを選定した理由は、試作機を川下ユーザーの現場で使用するにあたり、水中ポンプであれば貯水した水槽に装置を投入するだけでナノバブル水の生成ができることによる。陸置き型ポンプは、固定式となり、配管接続等の工事が必要で、特に漁船での試用ができないことを考慮した。

小型装置についても、同様の理由で海水用水中チタンポンプを使用した。デモや貸出時の持ち運びや小規模での試用における簡便性を重視し、ポンプは 0.4kW（電源：100V 単相）、装置重量 15kg 以下を条件として製作した。小型装置にはコストと軽量化を考慮し、アクリル樹脂製ハニカム構造体を搭載した。

窒素ガスの供給については、使用現場においてガスポンプの手配が困難な場合があるため、窒素発生装置をセットで使用する事とした。窒素発生装置は、大気を取り込み、活性炭の吸着筒で酸素を取り除き窒素を濃縮して 99.9%濃度で吐出する装置である。

3. ナノバブル生成装置の評価（丸福水産株式会社）

（1）チタン製ハニカム搭載大型装置の性能評価

試作した装置の性能評価試験を行った。図 33 はチタン製ハニカム搭載の大型装置（3.7kW）で、SUS ケーシング取り付け前の状態で運転した結果を表 11、ナノ粒子解析結果を図 34 に示す。

Fig.33 チタン製ハニカム搭載大型装置

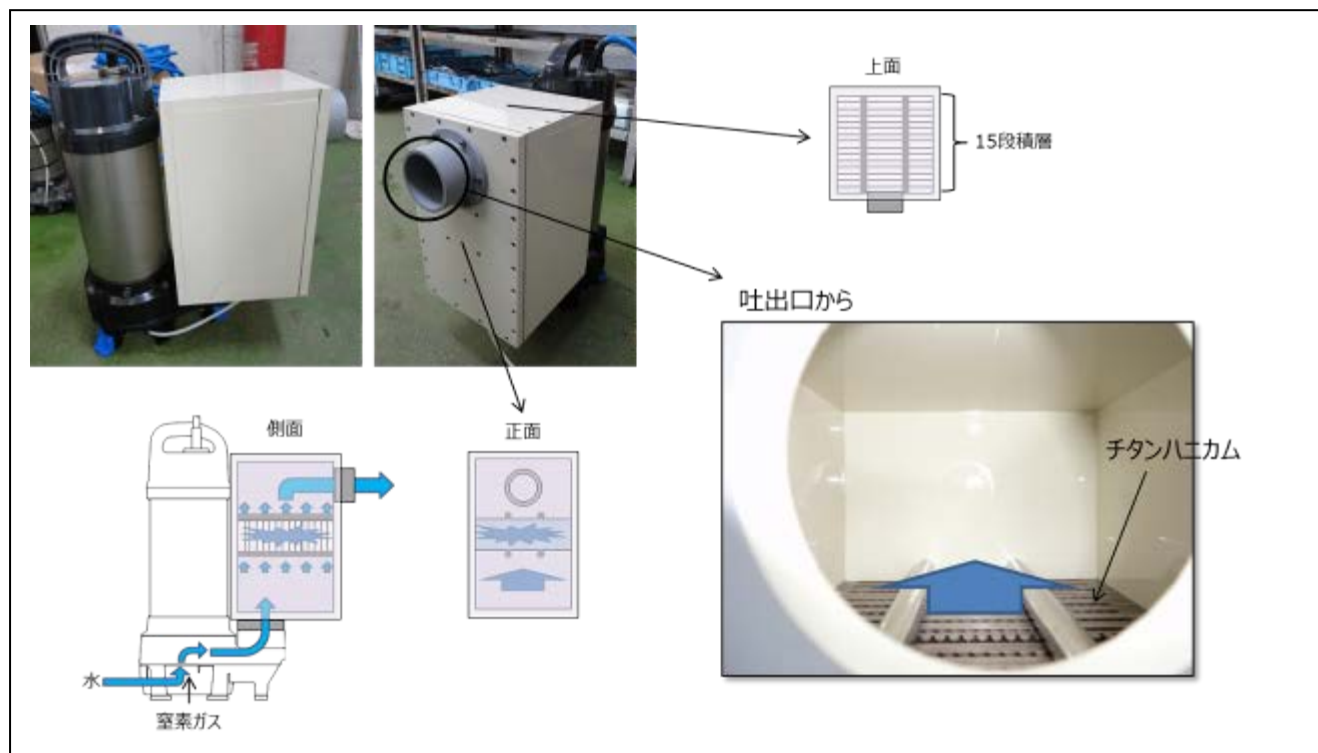


Table.11 大型装置の清水 1 t に対する DO とナノバブル数密度の推移

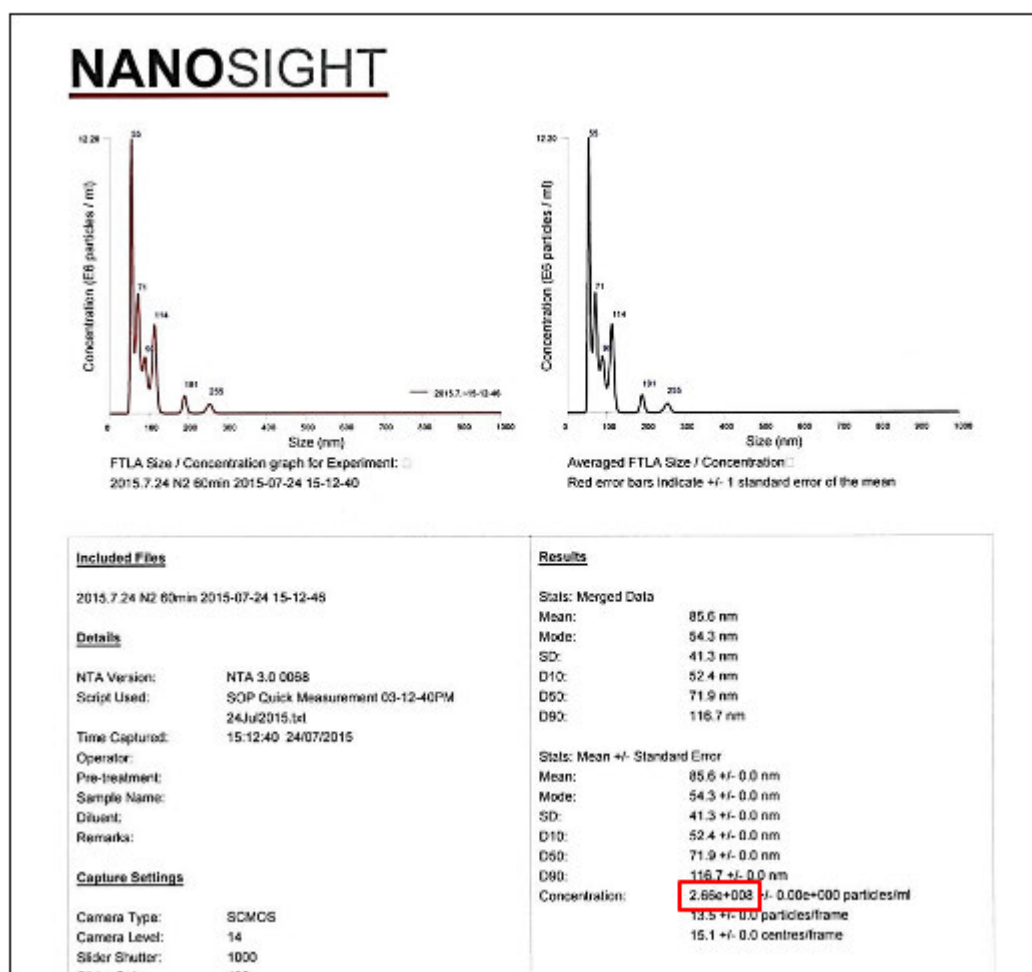
チタン製ハニカム（隔壁 0.5mm）15 段・ポンプ 3.7kW（60Hz）

ポンプ 2 次側圧力：0.16Mpa

経過時間	計測時刻	D O 値 (mg/L)	水温(℃)	Par 密度 (E8par/mL)	装置流量 (L/min)
水道水	13:40	8.7	22.0	0.31	700
経過時間	計測時刻	D O 値 (mg/L)	水温(℃)	NB 密度 (E8par/mL)	
10 min	13:50	2.6	22.7	1.72	
20 min	14:00	1.2	23.1		
30 min	14:10	1.1	23.7		
40 min	14:20	1.1	24.1		
50 min	14:30	1.1	24.7		
60 min	14:40	1.1	25.2	2.66	

※窒素ガス供給量：5L/min（循環中常時供給）

Fig.34 ナノ粒子解析データ (60min)



本機で生成したナノバブルの数密度は、60 分循環後の値で 2.66 億個/ml であり、従来装置（隔壁 2mm）のそれ（1.83 億個/ml）と比較し、約 1.45 倍となり、目標値である 2 億個/ml を上回った。また、ナノ粒子解析装置が利用できない使用現場で簡易的に性能を確認する方法として、DO（溶存酸素量）の低減推移を指標とするが、こちらについても、DO1.2mg/L 以下の基準値は循環開始 20 分で達成している。しかしながら、循環開始 30 分後のナノ粒子解析では、ナノバブル数密度が 1.72 億個/ml であり、その後 30 分間の継続運転において数密度が上昇していることから、1 t に対する運転時間指標は 60 分と設定することとした。吐出流量に関しては、目標値の 18t/h を大きく上回り、700L/min=42t/h を達成した。

ナノ粒子解析に使用した解析装置は、NANO SIGHT LM10-HSVT（Malvern 社）。

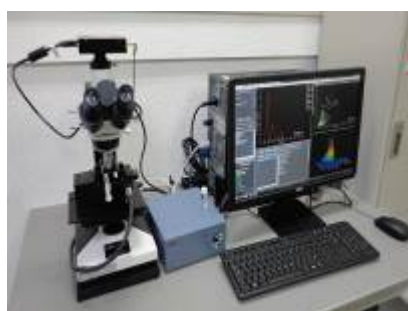


Fig.35 ナノ粒子解析装置

Nano Sight LM10-HSVT

レーザー光：青色（波長：405nm）

計測レンジ：30nm～1000nm

(2) アクリル樹脂製ハニカム搭載小型装置の性能評価

アクリル樹脂製ハニカム搭載の小型装置（図 35）の性能評価試験結果を表 12 に示す。

Fig.35 アクリル樹脂ハニカム搭載小型装置



Table.12 小型装置の清水 100L に対する DO とナノバブル数密度の推移

アクリル製フラットハニカム（隔壁 1.0mm）

経過時間	計測時刻	D O値 (mg/L)	水温(℃)	Pa 密度 (E8par/mL)	装置流量 (L/min)
水道水	10:00	8.30	23.9	0.54	70
経過時間	計測時刻	D O値 (mg/L)	水温(℃)	NB 密度 (E8par/mL)	
10 min	10:10	2.20	24.0	2.10	
20 min	10:20	1.00	24.5		
30 min	10:30	0.66	24.9		

※窒素ガス供給量：1L/min（循環中常時供給）

本機で生成したナノバブルの数密度は、30 分循環後の値で 2.1 億個/ml であり、従来装置（隔壁 2mm）のそれ（1.89 億個/ml）と比較し、約 1.1 倍となり、目標値である 2 億個/ml を上回った。また、DO 低減に関しては、循環開始 20 分で 1.0mg/L、30 分で 0.66mg/L を達成している。この結果より、100L に対する運転時間指標は 30 分と設定することとした。吐出流量に関しては、目標値の 3t/h を上回り、70L/min=4.2t/h を達成した。

(3) 川下ユーザーにおけるデモ機試用

川下ユーザーとして想定している業界としては、生産者（漁船・漁協）、魚市場（荷受・仲卸）、水産加工業者、水産小売店、飲食店がある。それぞれの分野において現場に対するヒアリングを行った結果、本装置の効果に期待することは下記の通りであった。本事業では、各業界に協力を求め、製作したデモ機を貸出し、実際の現場において試用した際の評価のフィードバックを受けた。

【導入の目的】

- 漁獲から水揚げまでの鮮度保持（生産者、特に離島）
- 大漁時・不漁時の仕入・出荷調整（生産者、魚市場、加工業者）
- 「ナノバブル仕込み」など高鮮度の訴求、地域ブランドの構築（生産者）

- 地方から都市部・遠隔地への出荷（生産者、荷受、仲卸）
- 海外への冷凍輸出の際の変色防止、鮮度保持（生産者、加工業者）
- 空輸を陸送へ変更することによる輸送コストの削減（生産者、魚市場）
- 加工原料の冷蔵ストック（加工業者）
- 薬剤に替わる食材の殺菌手段（加工業者、飲食店）
- 商品陳列時の鮮度感向上、鮮度劣化によるロスの削減（小売店、飲食店）

【試用評価実施先】

- 生産者
 - ・ 近海マグロはえ縄漁船、近海旋網船（大分県、沖縄県）
 - ・ 漁業協同組合（北九州市、鹿児島県、宮崎県）
- 魚市場
 - ・ 荷受（広島県）
 - ・ 仲卸（北九州市、宮崎県）
- 水産加工業者（大分県、愛媛県）
- 水産小売店（北九州市）
- 飲食店（東京都）

【主なフィードバック情報】

- 1～2 日では、未処理と差がないが、3 日 4 日目くらいから劇的に違いが出る。
- 出荷時はあまり差がないが、出荷先（客先）での評価が高い。
- 身質が良くなる。（硬さ、モチモチ感、変色遅延、ドリップが出にくい）
- 漁船・漁協では、水揚げ相場が向上した。
- 鮮度が良いことが地域ブランド化の後押しになる。

△ 鮮度保持伸長については概ね効果が分かったが、魚の個体差により効果がないときもある。
※生き物である以上、個体差による差は回避できないことを認識してもらう。

- × 価格が高いと欲しくても購入できない。（100 万円未満希望）
- × 手間がかかる。朝の忙しいときに間に合わない。
- × 生成時間をもっと短くしてほしい。
- × 魚を入れたまま使えないので便利が悪い。（装置の目詰まりの問題）
- × 冷凍解凍後は効果が小さい、または効果がない。（変色）

鮮魚に対する鮮度保持効果に関しては、ほぼ効果を体験できたとの評価であったが、装置としての評価としては、課題を残す結果となった。課題に対する今後の取り組みは以下の通りとする。

- 販売価格
 - ・ 装置の構造、使用部品の選定や省略による製造コストの切り下げを早急に検討し、水量 1t 用装置の販売価格を 50 万円程度に抑える装置開発に取り組む。
- 作業の手間、生成時間の短縮
 - ・ 生成時間の短縮に関しては、更にハニカム構造体の改良が必要となる。ナノバブルは生成した後の寿命が長いことから、前日に生成しておき、忙しい時間帯にすぐに使用できる方法を提案する。また、更なる大容量化（大容量ポンプにハニカム構造体を

並列接続するなど）を検討する。

■ 使用環境（魚をいれた水槽内での使用）

- ・ ハニカム構造体の構造上、魚のウロコや藻屑などがハニカム内部に侵入すると入り口で目詰まりを起こすことは防ぎようがない。フィルターなどを付属しても予防困難であるため、使用前日生成によって、水揚からナノバブル水浸漬までのタイムラグを極力短くすることを提案する。

4. ナノバブル水の有効性の検証（丸福水産株式会社）

4-1 超高酸素、超低酸素窒素、炭酸ナノバブル水及び空気ナノバブル水の抗菌性の検証

ナノバブルの抗菌性を検証するにあたり、本事業において試作した小型装置を用いて、酸素・窒素・炭酸ガス・空気の各種ナノバブル水を、本事業で製作したアクリル樹脂製ハニカム構造体搭載の小型試作機によって生成し、枯草菌・黄色ブドウ球菌・大腸菌・サルモネラ・腸炎ビブリオに対する効果を検証した。

比較対象は水道水（蛇口から直接採取）とし、同様の試験を 4 回に亘り実施し、各種細菌の生存率の平均値により評価した。試験は、北九州生活科学センターに委託した。試験実施要領を表 13 に示す。

ナノバブル水の生成条件

使用した原水：水道水（北九州市）・常温（腸炎ビブリオのみ 3%塩水とした）

循環時間及び気体供給量：気体供給後 30 分間循環・気体供給量 1L/min

試験操作

検体及び対照水それぞれに菌数が概ね 10^5 CFU/ml となるように菌液を添加し、添加直後及び 5℃の恒温槽で 24 ± 1 時間保管後について、それぞれ下表の条件で培養し菌数を測定した。

Table.13 試験実施要領

使用菌株	添加菌液の調整	培地・培養液温度・培養時間	接種量
枯草菌 生菌数測定内部精度管理用枯草菌 芽胞液 (<i>Bacillus subtilis</i>)	枯草菌芽胞液を菌液とした	トリプトソイ寒天培地・ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 24 ± 1 時間	100μL 塗抹
大腸菌 (<i>Escherichia coli</i> ATCC 11246)	菌株は液体培地（トリプトソイブ イオン）にて純培養後、菌液を 調整	トリプトソイ寒天培地・ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 24 ± 1 時間	100μL 塗抹
黄色ブドウ球菌 (<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538P)	菌株は液体培地（トリプトソイブ イオン）にて純培養後、菌液を 調整	トリプトソイ寒天培地・ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 24 ± 1 時間	100μL 塗抹
サルモネラ (<i>Salmonella Enteritidis</i> ATCC 13311)	菌株は液体培地（トリプトソイブ イオン）にて純培養後、菌液を 調整	トリプトソイ寒天培地・ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 24 ± 1 時間	100μL 塗抹
腸炎ビブリオ (<i>Vibrio parahaemolyticus</i> ATCC 17082)	菌株は液体培地（3%食塩加 トリプトソイブイオン）にて純培養 後、菌液を調整	1%食塩加トリプトソイ寒天培 地・ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ ・ 24 ± 1 時間	100μL 塗抹

細菌別・気体種別の細菌の生存率と試験に用いた各種ナノバブル水のナノバブル解析値を表 14 及び図 36、37、38 に示す。

Table.14 菌種別・気体種別 細菌の生存率とナノバブル解析値の総括表 (n=4 平均)

菌種 (菌の属性等)	項目		〔「平均」欄の値が小さいほど生存率が低い＝殺菌効果が高い〕				
			空気	酸素	窒素	炭酸	対照
枯草菌 (グラム陽性) (好気性)	生存率	平均 (%)	88.2	89.6	62.7	60.1	41.6
		標準偏差 (%)	16.9	24.5	21.6	43.6	34.1
	ナノバブル解析 (平均)	密度 (億個/ml)	3.25	3.01	3.92	1.23	－
		最大頻出粒径 (nm)	79.2	81.2	85.4	92.4	－
黄色ブドウ球菌 (グラム陽性) (通性嫌気性)	生存率	平均 (%)	31.5	37.7	39.5	36.3	18.4
		標準偏差 (%)	31.9	39.6	33.3	29.6	30.8
	ナノバブル解析 (平均)	密度 (億個/ml)	3.25	3.01	3.92	1.23	－
		最大頻出粒径 (nm)	79.2	81.2	85.4	92.4	－
大腸菌 (グラム陰性) (通性嫌気性)	生存率	平均 (%)	26.3	37.4	38.6	40.0	38.9
		標準偏差 (%)	25.0	27.4	16.4	28.4	13.3
	ナノバブル解析 (平均)	密度 (億個/ml)	3.25	3.01	3.92	1.23	－
		最大頻出粒径 (nm)	79.2	81.2	85.4	92.4	－
サルモネラ (グラム陰性) (通性嫌気性)	生存率	平均 (%)	0.4	5.7	16.5	9.9	49.0
		標準偏差 (%)	0.5	4.7	8.2	14.8	81.4
	ナノバブル解析 (平均)	密度 (億個/ml)	3.25	3.01	3.92	1.23	－
		最大頻出粒径 (nm)	79.2	81.2	85.4	92.4	－
腸炎ビブリオ (グラム陰性) (通性嫌気性)	生存率	平均 (%)	2.1	3.2	9.2	5.7	16.4
		標準偏差 (%)	2.9	2.2	17.6	10.7	16.6
	ナノバブル解析 (平均)	密度 (億個/ml)	3.25	3.01	3.92	1.23	－
		最大頻出粒径 (nm)	79.2	81.2	85.4	92.4	－

Fig.36 気体種別効果比較グラフ

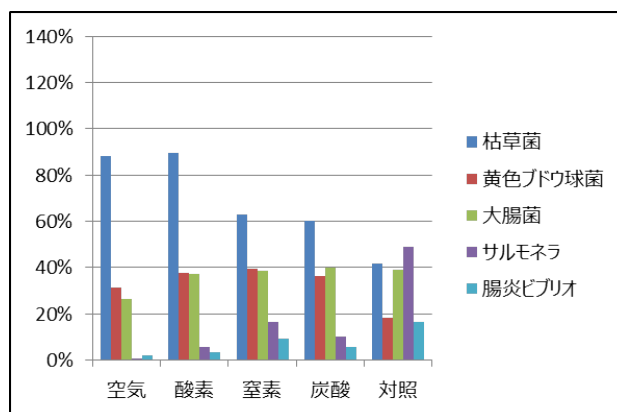


Fig.37 菌種別効果比較グラフ

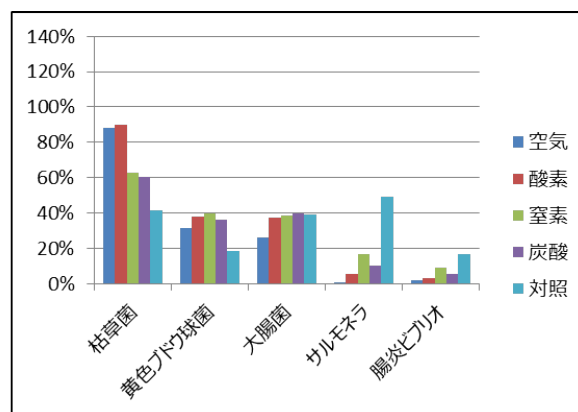
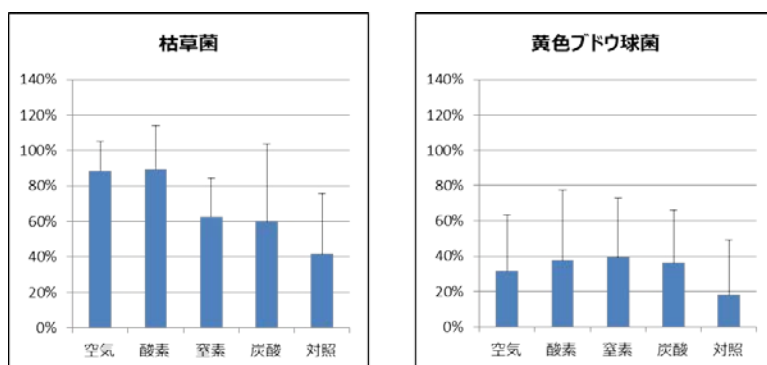
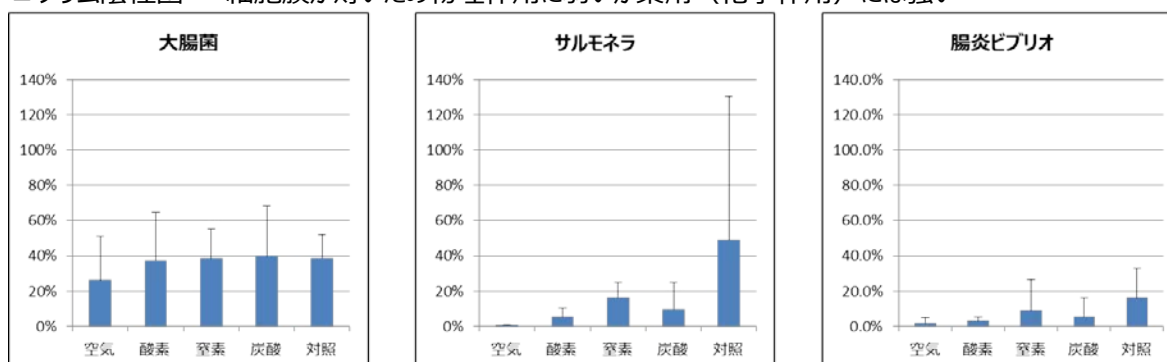


Fig.38 菌種ごとの抗菌効果

■ グラム陽性菌・・・固い殻（細胞壁）を持つため物理作用には強いが薬剤（化学作用）に弱い



■ グラム陰性菌・・・細胞膜が薄いため物理作用に弱いが薬剤（化学作用）には強い



- 枯草菌 : グラム陽性桿菌・好気性（厚い細胞壁を持つ孢子を形成）
 黄色ブドウ球菌 : グラム陽性球菌・通性嫌気性
 大腸菌 : グラム陰性桿菌-通性嫌気性
 サルモネラ : グラム陰性桿菌-通性嫌気性
 腸炎ビブリオ : グラム陰性桿菌-通性嫌気性（海水中に生息・真水中では生息できない）

グラム陽性菌の特徴

- 細胞膜の外側がペプチドグリカン層（厚さ 80nm）の細胞壁で覆われている。
- 「ペプチドグリカン層」= 多糖とペプチドからなる網目状になった高分子で構成されるしっかりとした構造・・・物理的に菌の形をがっちりさせる（この他に細胞壁はタイコ酸や多糖体層で構成されている。また細胞壁の脂質の量も少ない。）
- 菌細胞内に内生孢子を形成。内生孢子は菌細胞の中に厚い細胞壁を持つ孢子として形成される。
- 厚いペプチドグリカン層で覆われているため物理的要因や温湿度要因には強く、乾燥した所や寒い所、暑い所、高塩分の所でも存在できる。
- グラム陽性菌の細胞壁は薬剤を通過させやすいため、物理学的な作用には強くても化学的な作用には弱い。

グラム陰性菌の特徴

- たんぱく質やリン脂質から出来た細胞膜(7nm)の外側に薄いペプチドグリカンの層を持ち、その外側にはリポ多糖類で構成された外膜(7nm)で覆われている。
- ペプチドグリカンと外膜・内膜の隙間にはペリプラズムと呼ばれる隙間があり、形状はほとんどが桿状。孢子を形成しない。
- 薄いペプチドグリカン層と外膜で覆われているため細胞には柔軟性があるが、物理的要因や温湿度

要因には弱い。

- 外膜が外部からの化学物質（薬剤）を通過させにくいため、化学的な作用には強いが、ペプチドグリカン層が薄いため、物理学的な作用には弱い。

本試験の結果、全てのナノバブル水において、程度の差はあるものの、細菌の増殖を抑制し、殺菌効果があることが伺えた。

今回は、原水に水道水を使用したため、対照水（水道の蛇口から採取して密閉）には微量の塩素が含まれていたと考えられる。一方、ナノバブル水は生成の過程で気体を供給しながら 30 分間循環運転をするため、水中の塩素が放出されていたと考えられる。

枯草菌・黄色ブドウ球菌等、化学的作用に弱いとされるグラム陽性菌に対して、各種ナノバブル水よりも対照水（水道水）の生残率が低い結果が出ているのは、水中に含まれる塩素が影響している可能性がある。（アドバイザー/水産大学校・前田俊道教授）

また、各種ナノバブル水についてグラム陽性菌に対して効果が低い結果については、ナノバブルが破裂する際に生じると考えられている衝撃が、厚い細胞壁によって防御され、殺菌効果が発現し難いと考えられる。

特に枯草菌は芽胞を形成し、硬い殻に守られて、物理作用耐性・耐熱性・耐薬品性が増すため、最も効果が低く出たと考えられるが、その中でも、枯草菌は好気性菌であるため、空気・酸素ナノバブル水よりも、低酸素環境を形成する窒素・炭酸ナノバブル水の効果がそれなりに高く出たと考えられる。

一方、大腸菌・サルモネラ・腸炎ビブリオ等、物理的作用に弱く、化学的作用に強いとされるグラム陰性菌に対しては、ナノバブルの破裂による物理的作用が奏功し、特にサルモネラと腸炎ビブリオについては対照水と比較しても明らかな殺菌効果が発現したと考えられる。

枯草菌以外は全て通性嫌気性本試験の結果だけでは、気体種と殺菌効果の因果関係を判断することは困難であるが、今回の試験結果を踏まえると、特に空気ナノバブル水がサルモネラ、腸炎ビブリオに対して殺菌効果を発現している結果となった。

これらの結果は、本事業のアドバイザーである、米子高専・氷室昭三校長が過去に論文「微生物に及ぼすマイクロバブルの効果」（混相流研究の進展 4,95-102(2009)）において発表している内容と類似しており、傾向としては信ぴょう性の高いものであると考える。

今後の補完研究の一環として、残留塩素要素を完全に排除した方式の試験を実施し、更にデーターの再現と蓄積を図る。

4-2 鮮魚の鮮度保持における超低酸素ナノバブル水の長期にわたる有効性の検証

鮮魚の鮮度保持評価は、基本的に人の感覚によるものである。過去に、一般生細菌数や K 値の計測による評価は行い、対照区との差は確認しているが、本事業では、アドバイザー/水産大学校・前田俊道教授の監修により、統計学に基づいた 2 点比較法（片側検定）による官能検査を実施した。検査要領は以下の通りとした。

【官能検査実施要領】

- パネリストは 15 名とし、年代別に男性 8 名、女性 7 名とした。
- 試料にはマサバの刺身を用い、A：未処理品、B：窒素ナノバブル水浸漬処理品とした。
- A・B いずれが窒素ナノバブル水浸漬処理品かを告げずに、一人につき同じ部位一切れずつを検査した。
- 官能検査 6 項目につき、該当する方に 2 点、該当しない方に 0 点、差がないと感じた場合は双方に 1 点を付す。

パネリストが 15 名の場合、有意水準は表 15 となる。

Table.15 官能検査検定表

パネリスト数\有意水準	5%	1%	0.1%
15 名	12 名	13 名	14 名

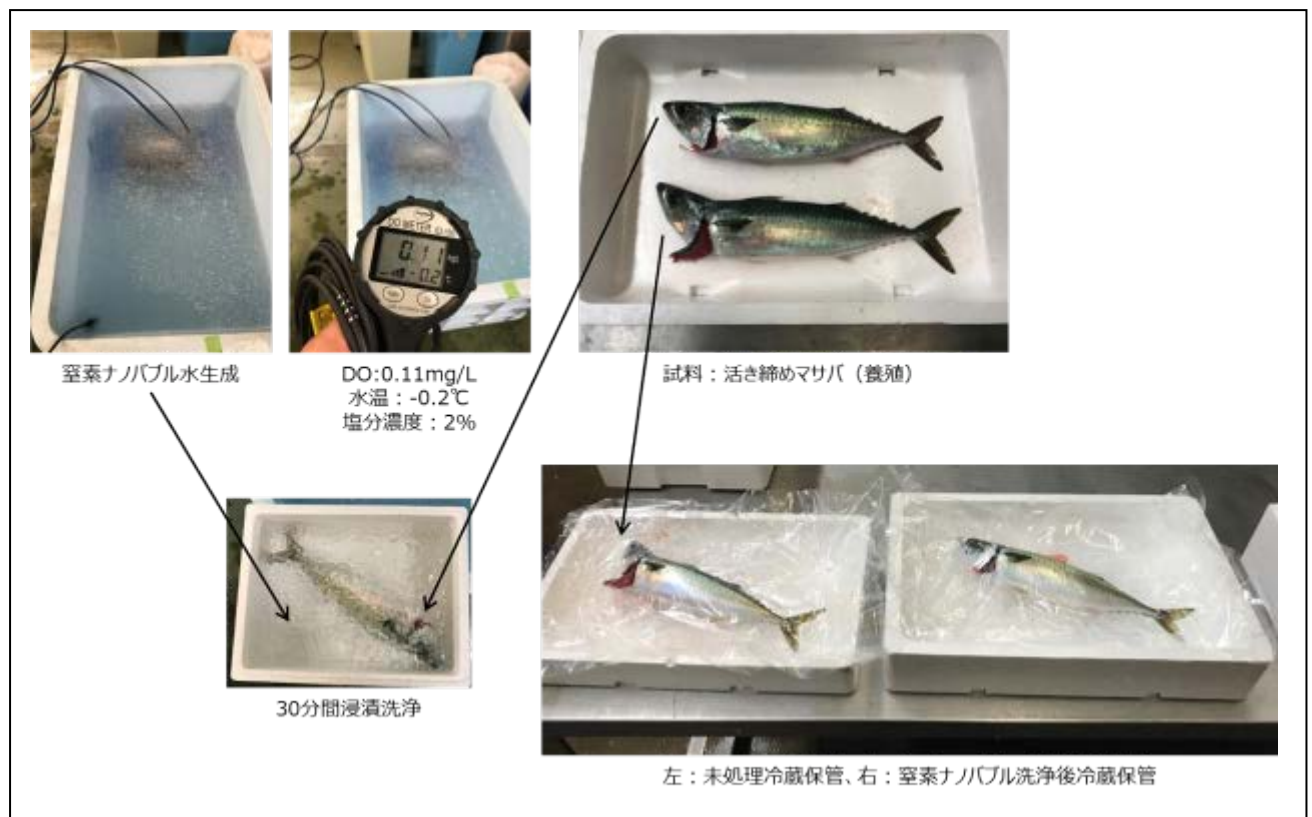
上表は、パネリスト数に対し、偶発的に同じ回答となる可能性の割合を表すものであり、正解数が上表中の値であれば、帰無仮説を棄却し対立仮説が採用され、有意性があると評価される。

帰無仮説・対立仮説とは、統計的検定の際に立てる仮説であり、帰無仮説は、〇〇に差がない、識別できないという形の仮説、対立仮説は、〇〇に差がある、識別できるという形の仮説である。よって、帰無仮説が測定を基に棄却されれば、対立仮説が正しいと採用される。

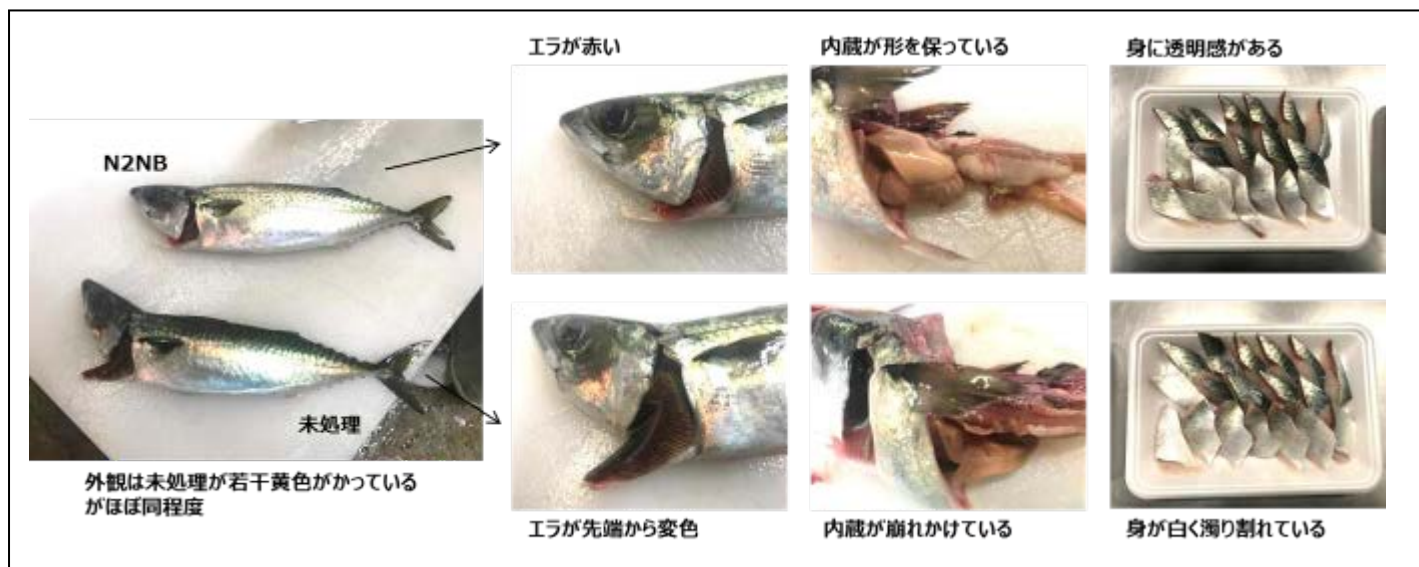
今回の官能検査では、個体差を小さくするため、養殖のマサバを用いた。試料の作成容量は以下の通りとした。

- 養殖マサバを 2 尾活き締めにする。
- アクリル樹脂製ハニカム構造体搭載小型試作機により、窒素ナノバブル 2% 塩水を作成する。
- 1 尾を生成した窒素ナノバブル 2% 塩水に 30 分間浸漬する。
- 発泡スチロールに氷を敷きつめたものを 2 個用意し、処理品・未処理品それぞれ 1 尾を入れて冷蔵庫内で 4 日間保蔵する。

【試料作成要領】



【試料の解体、刺身の作成】



【検査実施】



官能検査の結果を表 16 に示す。

Table.16 官能検査結果（A:未処理品、B：窒素ナノバブル 2%塩水浸漬品）

項目	定義	A	B	A に対するコメント	B に対するコメント
①見た目（身の色）	透明感がある	0	30	白濁し身が割れている	透明感がある、血合が赤い
②見た目（皮の色）	光沢がある	15	15	15 名全員が「差がない」とコメント、2 名は強いて言えば A が少し黄色がっているとコメント	
③臭い	異臭がない	0	30	生臭い、青物臭がでている	異臭はない
④食感	ぷりぷり感がある	0	30	8 名は試食拒否、柔らかい	歯ごたえが残っている
⑤旨味	旨味がある	0	30	8 名は試食拒否、水っぽい、まずい	美味しい、サバの味がする
⑥総合的な評価	総合的な鮮度感がある	0	30	鮮度が悪い、刺身で食べる気がしない	鮮度感がある、刺身でも十分いける
評点合計		15	165		

結果としては、パネリスト 15 名中 15 名が正解となり、官能的な評価においても、窒素ナノバブル水による鮮度保持効果があることが確認された。

最終章 全体総括

本事業のテーマは「生鮮魚介類を長期保存するハニカム構造体を用いたナノバブル生成装置の開発」であり、「ハニカム構造体を用いたナノバブル生成装置の開発」は Hard-oriented な開発研究である。また「生鮮魚介類を長期保存する」という Soft-oriented な面もある。

以下、平成 26 年度から 28 年度にわたり実施した本研究開発における成果および将来的な課題を、ハード面とソフト面とに切り分けて考察する。

1. ハード面

本事業において、ハニカム構造体の機能向上を目標とする改良に際し、既存のハニカムセルの隔壁が 2mm であるところ、ハニカム構造体内部の容積を増加させる目的で、チタン材で 0.5mm、アクリル樹脂材で 1mm とし、ハニカム構造体の最適化設計を研究した。

まずは、構造解析により、チタン製及びアクリル樹脂製ハニカムの想定隔壁厚さにおける安全性につき、疲労限界 (fatigue limit) / 最大主応力 (max principal stress) による評価で、その安全を確認した。

安全性評価により安全が確認されたことから、機能向上のための隔壁 0.5mm チタン製ハニカム構造体搭載機の試作は計画通りに実施し、圧力損失を低減することで吐出流量 42t/h を達成し、隔壁 0.5mm によるハニカムセル増加によってナノバブル数密度 2 億個/mL の目標は達成したが、切削工法として採用したウォータージェットでは、加工費が非常に高くなるため現実的ではない。そのため、今後の課題として、製造コスト削減可能な切削工法の開発または、切削以外の製造方法の開発などの努力を要する。

事業化に関しては、異物混入、素材溶出などの観点から樹脂材を好まない業界（食品製造業界など）への用途開発を継続する。

アクリル樹脂製ハニカム構造体搭載機については、本事業では小型装置を計画通りに試作した。圧力損失を低減することで吐出流量 4.2t/h を達成し、隔壁 1mm によるハニカムセル増加によってナノバブル数密度 2 億個/mL の目標は達成した。今後は、長期間使用に対する耐久性の確認と、小型装置に特に求められる廉価販売に向け、更なる構造改良検討を含めたコスト削減の努力を要する。

技術的な課題としては、本事業で断念したオゾンガスの使用であるが、基本的に水中ポンプでは腐食性が非常に強いオゾンに対する耐性をもつ機種がないため、耐オゾンポンプのスペックに合わせたハニカム構造体の開発・設計が必要となる。試作機の製作と試験法について、ポンプ・付属部品・周辺機器の選定に関し、材料等の特殊性・オゾンの自己分解等に関する研究開発を並行して行う。

また、ナノバブル生成に要する時間短縮の要求に関しては、循環運転から 1 パスまたは数パス程度の通過でナノバブルを生成可能とするメカニズムの解析を要する。これは、かなり難度が高い課題である。しかしながら、求められる効果の発現に必要なナノバブル数密度に関しては、未だ解明されていないのが現実であるため、ナノバブル生成装置の機能向上と、効果の発現とナノバブル数密度の相関関係の解明を並行して進めることで道が開けると考えられる。現状、ナノバブル数密度が数億から数十億個/ml という高いレベルを目指すことは勿論重要であるが、1 パス運転における数千万個/ml における効果の検証を行うことも、今後の装置開発の発展に寄与すると考える。

技術的観点からの今後の事業化に関しては、ハニカム構造体搭載実用機のナノバブル生成装置としての販売価格と、それを使用することでユーザーが享受する便益 (Cost-Performance) 面からの評価を行い、業界ごとの装置スペック、製造コスト、販売価格を綿密に検討・設定する必要があると考える。

2. ソフト面

本事業の装置開発目的は、ナノバブル水による生鮮魚介類を長期保存することにある。鮮魚の鮮度劣化は、主に「酸化」と「腐敗」にあり、それは保存環境に存在する「酸素」が密接に関係している。鮮魚に限ら

ず、食品は「酸化」を防止するために、真空包装や脱酸素剤、窒素充填などの手法を用いるが、鮮魚の流通過程において、それらの手法は導入不可能であるため、一度に大量処理が可能且つ効果が高い技術として、窒素ナノバブルによる鮮度保持技術を開発した。

本事業実施中に、試作デモ機を試用した川下ユーザーからは、一様に鮮度保持の効果を確認した評価のフィードバックを受けており、鮮魚の鮮度保持技術としては、従来の冷蔵保存プラスアルファの効果は確認できた。鮮魚の流通過程において、使われるシーンにより装置に求められるスペックも変わってくるため、漁船・水揚げ港・魚市場・加工場・小売店・飲食店それぞれに見合ったスペック・価格のアイテム開発が求められる。

水産生産者は、漁獲量の減少や市場相場の下落により、厳しい環境に置かれているが、その中でも特に、離島の生産者は、せっかく鮮度の良い状態で漁獲しても、本島の市場に水揚げするまで 2～3 日かかるため、すでに鮮度がある程度劣化した状態での評価（先入観もある）を受けている。生産者にとっては死活問題である。本事業では、鹿児島県の離島や沖縄県の漁協・漁船にデモ機の貸し出しを行い、窒素ナノバブル水による鮮度保持処理を施した商品を本島の市場や納品先スーパーに出荷したところ、従来の評価よりも高い評価を得て、相場（競り値）や販売価格が高かったケースが多くあった。

今後の事業化については、まずは離島を含め、都市部から離れ、鮮度保持を死活問題と捉えている産地の漁協をターゲットとして販売拡大を図る。実際に使用している生産者の声は何よりの営業トークとなるのは言うまでもなく、導入先を増やすことで、検討中のユーザーを導入先見学に誘導する。

また、本事業で開発した装置は、供給するガスを変更することにより、超低酸素ナノバブル水、超高酸素ナノバブル水など、用途に応じたナノバブル水を生成することができることから、水産業においても、窒素を使う鮮度保持以外に、酸素を使う活魚輸送・活魚備蓄に対する可能性もある。一般的に、水産品の価値としては、鮮魚＜活魚であり、漁獲時に活きた状態の魚は、活きたまま水揚することで価値が増す。そこで、酸素ナノバブル水が役に立つということである。

水産業以外でも、農業や食品製造では導入の可能性が高く、そのほか、医療・医薬、工業洗浄、排水処理など、様々な分野への導入が期待できるため、本事業におけるナノバブル生成装置開発は、多くの分野に寄与する技術となる可能性が非常に高い。

上記を踏まえ、表 17 に、主に想定される導入先ごとの装置スペックと目標価格を示す。

Table.17 導入先ごとの装置スペックと目標価格

導入先	スペック	目標価格	用途	NB 種
漁船 19t 未満	1～3t 用・水中ポンプ・樹脂・小型	@50 万円以下	鮮度保持・活魚輸送	N2・O2
漁船 19t 以上	5t 用・水中ポンプ・樹脂・中型	@100 万円以下	鮮度保持・活魚輸送	N2・O2
漁港・魚市場・加工場	10t 以上・陸置ポンプ・樹脂・大型	@300 万円以下	鮮度保持・活魚備蓄	N2・O2
小売店・飲食店	100～500L・陸置き/水中ポンプ 樹脂・小型	@50 万円以下	鮮度保持	N2
水産陸上養殖場	100～500t（閉鎖循環想定） 陸置きポンプ・樹脂・超大型	@200 万円程度 複数台設置	魚介類飼育 出荷時の鮮度保持	O2 N2
農業(水耕栽培)	100～500L・陸置き/水中ポンプ 樹脂・小型	@50 万円以下	成長促進	O2
農業(露地栽培)	500L～2t・置き/水中ポンプ 樹脂・小型/大型	小型@50 万円以下 @200 万円程度	成長促進	O2
食品製造	1～10t・陸置きポンプ・チタン/SUS 大型	@300～500 万円	殺菌・洗浄	空気・N2

また、ナノバブルの殺菌効果に関しても、幅広い分野への応用が期待される。

本事業において実施した、細菌種・気体種別抗菌試験では、物理作用に弱いとされるグラム陰性菌に対して高い殺菌効果が確認されており、ナノバブルによる殺菌メカニズムの解明において、ナノバブルの破壊が殺菌効果を発現しているという、一定の傾向が取得できたと考える。

現在、食品加工等においては、次亜塩素酸ナトリウムやオゾンが主に殺菌手法として取り入れられているが、本事業のアドバイザーであり、川下企業でもある(株)ゼンショーホールディングスでは、中央基盤研究所においてナノバブル水による食材殺菌の検証を行った結果、一定の効果を得て、更に規模を拡大した導入に先立つ試験を実施する。

これまで述べてきたように、本事業では、ハニカム構造体搭載のナノバブル生成装置により生成したナノバブル水が関与する新規な現象の発見があった。学問発展の流れは「現象 → もの（実体） → 本質（理由）」であると言われるが、現在は「現象」発見の段階であり、「ナノバブル現象の利用が大切」と考え、新たなナノバブル水の機能とそのメカニズム解明への努力の継続とナノバブル水の新規な現象の予測を今後も継続し、その新規性の実体はナノバブルにあるとの認識に基づき、本事業終了後も更なる研究開発と、現時点で最大の能力を発する装置開発に努め、事業化を粛々と進める所存である。

最後に、本事業の遂行のため、当該研究グループを 3 年間支えていただいたアドバイザーの先生方々、九州経済産業局ご担当方々に深い感謝を申し上げます。