

無給気型キャビテーション制御装置による微細気泡の安定生成と混合性能に関する研究

A Study on Stable Generation of Fine Bubble and Mixing Performance with a Gas-Free Cavitation Control Device

今井裕里* 湯地 実*

Yuri Imai

Makoto Yuji

近年、水中に微細気泡を発生させることで得られる界面活性作用や物理的作用を応用した製品が数多く開発・販売されており、その応用範囲は家庭用製品から産業分野にまで広がっている。当社では、長年培ってきたキャビテーション制御技術を基盤として、外部からのガスの供給を必要としない無給気型の微細気泡生成装置を開発した。本キャビテーション制御装置は特殊な流路構造を有し、低圧条件下においてもナノサイズの微細気泡を高濃度かつ安定的に生成可能である。また、キャビテーションの発生と崩壊時に生じるエネルギーを洗浄、水質改善、混合促進など応用できる点が大きな特長である。装置性能の評価として、気泡濃度の定量測定や油水混合試験を実施した。その結果、低圧条件下でも安定してキャビテーションを生成させ、微細気泡を高濃度かつ安定して生成できること、さらに従来の攪拌による方法と比較して優れた混合性能と長期安定性を有することが明らかになったので報告する。

In recent years, a wide range of products that leverage the interfacial and physical effects of fine bubbles generated in water have been developed and commercialized in various areas from household devices to industrial fields. Drawing on our extensive experience in cavitation control technology, we have developed a fine bubble generator that operates without the need for an external gas supply. This cavitation control device features a specially designed flow-path structure that enables the stable generation of fine bubbles with high-concentration even under low-pressure conditions.

Furthermore, the energy released during the formation and collapse of cavitation bubbles can also be effectively harnessed for applications such as cleaning, water quality improvement, and enhanced mixing. To evaluate the device, quantitative measurements of bubble concentrations and oil-water mixing tests were conducted. The results show that the device can stably generate cavitation and produce high-concentration fine bubbles even under low-pressure conditions, and also offers superior mixing performance and long-term stability compared to conventional stirring methods. The findings are presented in this report.

1 はじめに

近年、微細気泡生成技術はテレビコマーシャルや展示会などで紹介される機会が増加しており、一般家庭のシャワーヘッドや浴槽、洗濯機などの製品にとどまらず、インフラ設備の洗浄や産業機械の分野にも用途が広がっている。特に洗浄や環境浄化に関する技術開発が先進的に進められている¹⁾。

従来の微細気泡生成装置では、外部からのガス供給を必要とする方法や、水道圧程度の圧力条件下で微細気泡を生成する方法が一般的に用いられている。これに対し、当社では外部からのガス供給を必要とせず、低圧条件下でも安定してキャビテーションにより微細気泡を生成可能なうえ、従来の製品にはない分散混合作用を有するキャビテーション制御装置を開発した。本稿では、本装置の技術的特長に加え、微細気泡の生成性能の評価および油水混合試験による分散混合作用の評価について報告する。

2 微細気泡生成技術の概要

2.1 微細気泡の定義と応用

微細気泡に関する国内の研究は比較的新しい分野であり、評価方法や分類の体系化は近年になって本格化した。特に経済産業省が推進したファインバブル^{*}基盤技術研究開発事業により、微細気泡の定義や発生・評価手法が整備され、国際標準（ISO）としての分類も進められた。（※ファインバブルとは、直径約1～60 μm のマイクロバブルと、直径1 μm 以下のウルトラファインバブルの総称である¹⁾。当社では微細気泡と表記する。）

この事業により気泡の安定化技術、微細気泡の発生および計測技術、さらには洗浄・殺菌・水処理といった応用技術の基盤整備が図られた²⁾。これらの要素技術の確立によって、微細気泡の産業応用が加速し、多様な分野への展開が可能となっている。

*技術開発室 開発本部 開発三部

2.2 微細気泡の生成方法とその用途

微細気泡を生成する方法には複数の種類が存在する³⁾。代表的な方法としては、図1に示すように、加圧溶解析出式、エゼクター式、ベンチュリー式、超音波キャビテーション式がある。加圧溶解析出式では、水に高压でガスを溶解させた後、急激に減圧することで気泡を生成する。エゼクター式は、高速で流れる液体にガスを自吸させ、せん断力で気泡化する方法である。ベンチュリー式は、流体が狭窄部を通過する際の圧力差を利用して気泡を生成する方法である。また、超音波キャビテーション式では、流体の局所的な圧力低下により気体が気泡として析出し、それが崩壊する過程で微細気泡が生成される。これらの技術は、医療用洗浄、食品の殺菌、農業用の散水、下水処理など、さまざまな分野で活用されている³⁾。

3 当社開発キャビテーション制御装置

3.1 キャビテーション制御技術の背景

キャビテーションとは、液体中に圧力変動が生じ、局所的に液体の飽和蒸気圧以下になることで液体の沸騰などにより気泡が発生し、その後崩壊する現象である。この現象は、配水管やダムの水門において、構造物の損傷を引き起こす原因となる⁴⁾ため、長年にわたり抑制技術が開発されてきた。当社もこれまで、キャビテーション抑制型の流量調整弁や放流弁の研究と開発を通じて、

多くの実績と技術的ノウハウを蓄積してきた。

従来、キャビテーションは「防ぐべき現象」として扱われてきたが、当社ではこれを逆転の発想で捉え、キャビテーションを積極的に発生・制御し、微細気泡生成のための有効な手段として活用する技術開発に取り組んでいる。従来の破壊的エネルギーを利用することで、洗浄や処理性能の向上が期待される。

3.2 微細気泡とキャビテーションの関係

キャビテーションの生成時には、液中の溶存気体が急激な圧力変化により気泡化し、崩壊後には極小サイズの気泡が残存することが知られている。ファインバブル基盤技術研究開発事業においても、これにより界面活性および物理的作用を伴う微細気泡が生成されることが確認されており、洗浄効果や水質浄化効果の向上が報告されている²⁾。当社では、こうした微細気泡の効果に加えて、キャビテーションの崩壊時に発生する局所的な高エネルギーをも積極的に利用することで、従来以上の洗浄力や応用効果の向上を目指している。

3.3 キャビテーション制御装置の構造と仕様

図2に今回の試験に使用したキャビテーション制御装置を示す。(a)は装置全体写真、(b)はベンチュリー部の拡大写真である。ベンチュリー管内部の流路は内径φ20mm、狭窄部の内径はその半分以下、狭窄部上流および下流側には鋭角なテーパ形状を有する。また、本

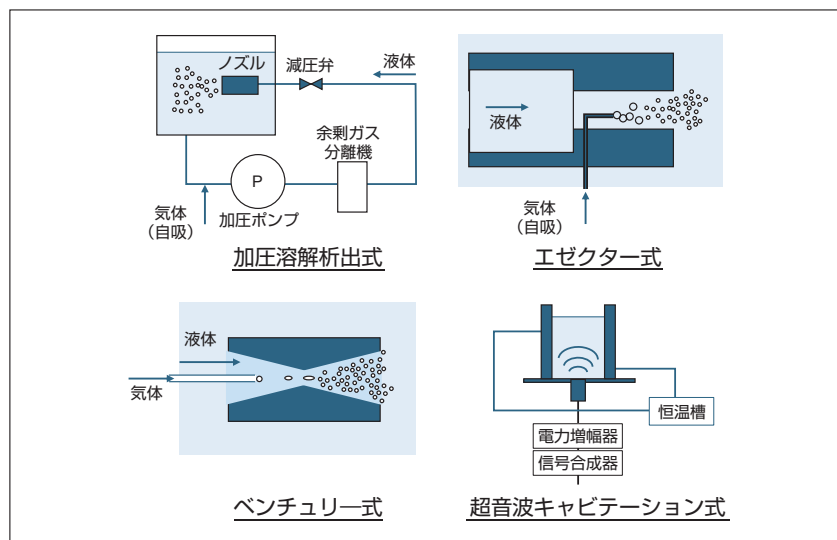


図1 微細気泡生成方法の代表例



(a) 装置全体写真

(b) ベンチュリー部

図2 キャビテーション制御装置

装置のベンチュリー部には流れを拡散する円錐部とくびれ部を有する内部部材が取り付けられている。ベンチュリー部と円錐部の隙間の流路断面積が縮小されることおよびくびれ部で旋回流が発生することによってキャビテーションが生成される。装置本体にはアクリル製の透明素材を用い、観察可能な構造となっている。内部部材の材質はステンレス製である。このように本装置は、内部流路に特殊な構造を採用しており、外部からの給気を必要としない「無給気型」の設計となっている。これにより、装置全体の構成も簡素化できるため、設置の自由度が高まる。また、使用される材質や構造サイズ、流体条件に応じて柔軟な設計が可能であり、多様な運用環境に適応できる仕様を備えている。

3.4 キャビテーション制御装置の技術的優位性

a) 低圧条件下におけるキャビテーション生成技術

本装置の特長は、外部からのガスの供給を必要とせず、無給気状態でも高効率に微細気泡を生成できる点にある。さらに比較的低い圧力条件下においてもキャビテーションを安定して生成させることが可能である。詳細については4章にて報告する。また、本装置は有害なキャビテーションへと成長する前に装置内部で適切に崩壊させることで、装置下流側の配管や機器に対する損傷を防ぎ、異常な騒音や振動の発生を抑制することができる。これにより、キャビテーションの発生と崩壊という動的現象を安定的かつ安全に活用でき、従来の微細気泡の生成だけでは得られなかった新たな作用を得ることができた。

b) 分散混合作用

図3に当社製キャビテーション制御装置の作用を示す。

本装置では、従来から知られている界面活性作用に加え、衝撃作用、水再生作用さらに当社独自の分散混合作用

用がある。界面活性作用とは、液中に残存する微細気泡が汚れの表面に吸着し、それを剥離させる作用を示す。衝撃作用とは、気泡同士あるいは気泡と物体との衝突により局所的なエネルギーが発生し、これが洗浄効果を向上させることを示す。水再生作用とは、キャビテーションの崩壊時に生じるエネルギーによって液中の有機物や微生物が粉碎され、結果として水質の浄化を促進させることを示す⁵⁾。分散混合作用とは、気液二相流を微細化して分散を促進することで、混合性を向上させることを示す。微細気泡の生成により得られる界面活性作用に関する洗浄効果については数々の報告がすでになされている^{1), 2), 3)}。したがって本稿では、当社独自の技術的特長である分散混合作用に着目し、その試験内容および評価結果を5章にて報告する。

4 キャビテーション制御装置の性能評価

3.4 a) 項で述べた低圧下において安定的かつ安全にキャビテーションによる微細気泡を生成することができるとかの検証を行った。

4.1 実験方法

表1に実験条件を、図4に実験装置の概略図を示す。本実験では、キャビテーション制御装置を循環配管に設置し、微細気泡含有水を繰り返し同装置内に循環させる装置となっている。キャビテーション制御装置の上流側の圧力条件を、0.15 MPa（水道の蛇口圧程度、以下「標準圧」とする）および0.02 MPa（低圧）とした。圧力条件によるキャビテーション生成の有無については、後述の4.2項にて目視により評価を行った。また、4.3項においては循環回数に応じた微細気泡の生成濃度を評価するため、本装置を用いて循環回数1回、10回、100回

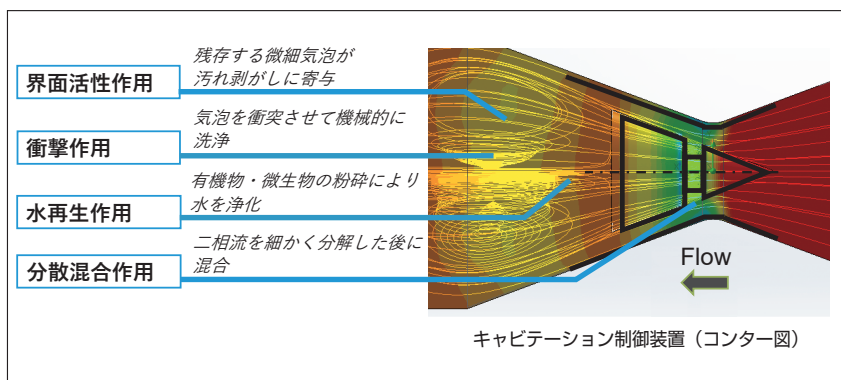


図3 当社製キャビテーション制御装置の作用

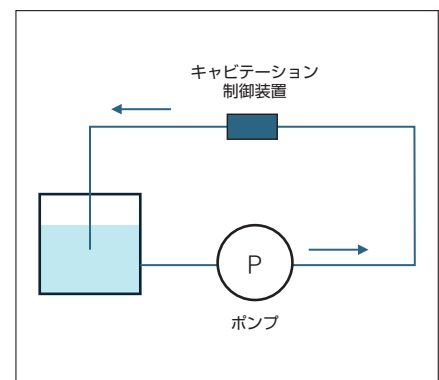


図4 実験装置

表1 実験条件

上流側の圧力	標準圧：0.15 MPa
	低圧：0.02 MPa
循環回数	1回、10回、100回
評価方法	キャビテーションの生成：目視
	粒子個数濃度、粒子径：NanoSight NS300

における試験液を採取し、NanoSight NS300 (Malvern Panalytical 社製) を用いて、各条件下における粒子個数濃度および粒子径を測定し、評価を行った。なお、粒子個数濃度および粒子径の測定結果は、各試験液につき 10 回行い、その平均値を用いた。

4.2 圧力条件によるキャビテーション生成の評価

図 5(a) に標準圧 0.15 MPa、(b) に低圧 0.02 MPa におけるキャビテーション生成の様子を示す。図 5 より、両条件においてキャビテーションの発生が確認された。また、実験において制御装置下流側を観察した結果、キャビテーションが適切に崩壊していることが確認され、配管などに悪影響を及ぼさないキャビテーションの生成が可能であることが示された。標準圧では、図 5(a) の X 部において、狭窄部の下流側にキャビテーションが生成され、水の白濁が確認された。一方、低圧では図 5(b) の Y 部にリング状の白濁が確認でき、初生キャビテーションが生成していることが確認された。

以上により、0.02 MPa という低い圧力条件下においても、本装置が安定してキャビテーションを生成する能力を有することが確認された。

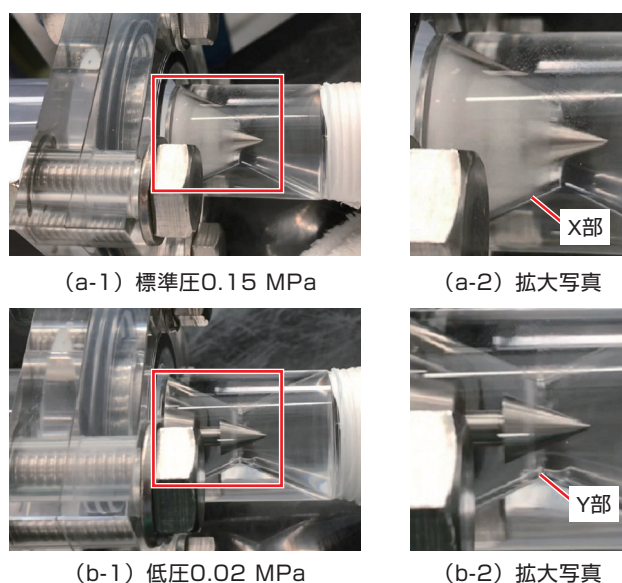


図5 キャビテーション生成の様子

4.3 循環回数による微細気泡発生濃度の評価

図 6 に循環回数と粒子個数濃度の増加量の関係を示す。図 6 より、標準圧 0.15 MPa においては循環回数 1 回の時に約 2,260 万個/mL であった粒子個数濃度つまり微細気泡濃度が、100 回では約 2 億 8,700 万個/mL に増幅した。同様に低圧 0.02 MPa では約 750 万個/mL から約 1 億 1,300 万個/mL へと増幅しており、いずれの条件においても循環回数の増加に伴い微細気泡濃度が大きく増幅されることが確認された。

図 7(a) 標準圧 0.15 MPa および (b) 低圧 0.02 MPa における粒子径と粒子個数濃度の関係を示す。いずれの条件においても粒子径 50 ~ 100 nm 程度の微細気泡が多く生成されており、この範囲に分布のピークが集中している。また、循環回数を増加させても、粒子径分布に大きな変化は見られず、ピーク位置も変化がないことから、50 ~ 100 nm 程度の微細気泡を安定して生成できていることがわかる。特に 50 ~ 100 nm 程度の微細気泡に着目すると、標準圧 0.15 MPa においては、循環回数 1 回で 1,300 万個/mL、100 回で約 1 億 3,700 万個/mL の微細気泡が生成された。低圧 0.02 MPa においても、約 480 万個/mL から約 6,400 万個/mL の微細気泡が生

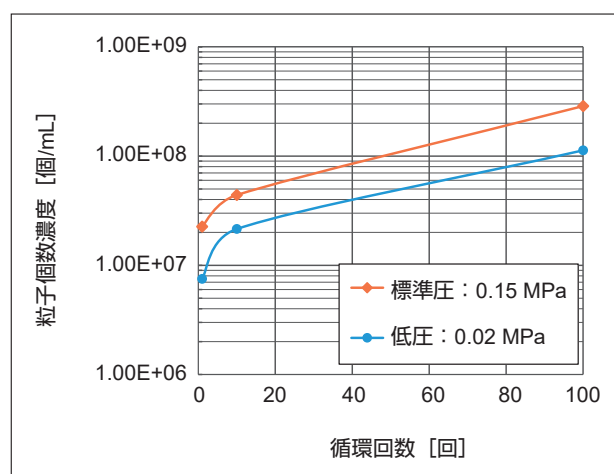


図6 循環回数と粒子個数濃度の増加量の関係

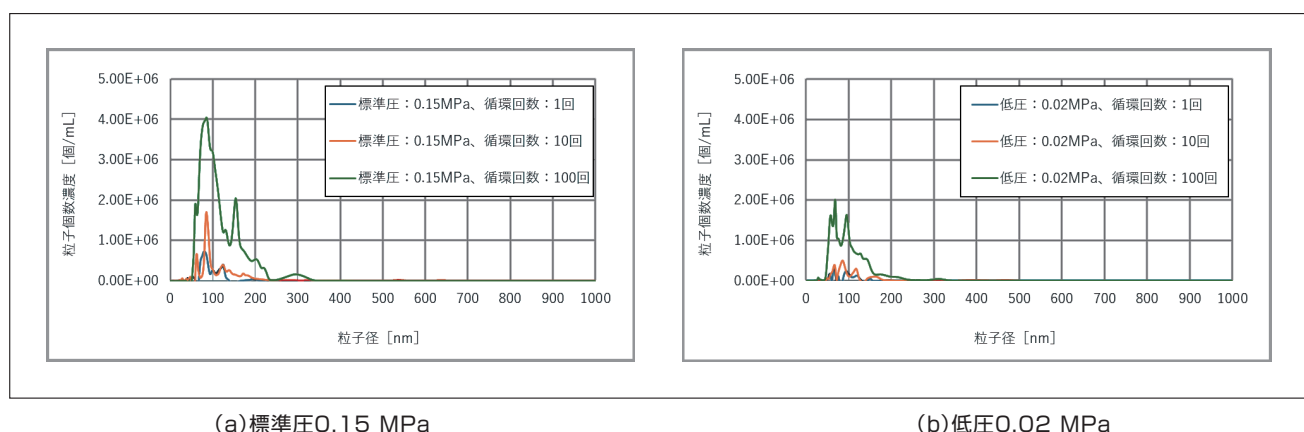


図7 粒子径と粒子個数濃度の関係

成された。これらの生成量は、従来の微細気泡生成装置と同等もしくはそれ以上であることを示す。

以上より、本装置は従来の微細気泡生成装置と同等もしくはそれ以上の生成量を有し、また循環回数の増加に伴い、微細気泡を安定かつ高濃度に生成できることが確認された。

5 分散混合作用の評価

3.4 b) 項で示した4つの作用のうち、分散混合作用を検証するため、油水混合の実験を行った。

5.1 実験方法

本実験に使用した装置は、4項で使用したものと同様である。表2に実験条件を示す。試験に使用した油は不溶性油であり、これは攪拌などでは加熱や乳化剤の使用なしに水と混合することが困難な油である。水にはpH11～12のアルカリイオン水（以下「AI水」とする）を使用した。試験液は、油と水を所定の希釈倍率（10倍、30倍、50倍）で混合し、各条件に対して3回ずつ試験を行った。混合後、異なる経過時間において摩擦係数および表面張力の測定を行った。ここでの希釈倍率とは、油を一定量のAI水で薄めた際に得られる溶液全体の体積が、元の油の体積に対して何倍かを示す比率であり、産業用途で一般的に使用されている10～50倍の範囲で設定した。

混合性能の評価には、従来手法であるスターラー（攪拌）による混合とキャビテーション制御装置による混合とを比較し、油水の分離状態を目視で確認した。次に油

水混合の安定性を評価するため、油脂類と比較して物性値（摩擦係数および表面張力）が同等であるか、さらに経過時間による変化が生じないかを検証した。なお、本章では、油とAI水という液体同士の混合であることから、分散ではなく乳化という用語を使用する。

5.2 油水混合性能の評価

図8に希釈倍率10倍におけるスターラーによる混合とキャビテーション制御装置による混合を行い、12時間経過後の試験液の状態を示す。図8(a)のスターラーによる混合では、一部乳化が確認されるものの、油とAI水は明瞭に二層に分離しており、混合が不十分である。一方、図8(b)のキャビテーション制御装置による混合では明瞭な分離は見られず、全体が白濁していることから、油が均一に乳化されており、高い混合性能が示唆される。

表3および図9、図10に各希釈倍率における経過時間と摩擦係数、表面張力の関係を示す。なお、これらの物性値の測定には、シェル式四球試験機およびウィルヘルミー法を用いた自動表面張力計を使用した。

図9および図10より、いずれの条件においても摩擦係数は0.11～0.13、表面張力は31～33 mN/mの範囲で安定していた。産業用途で一般的に使用される油脂類の物性値（摩擦係数は0.1～0.2、表面張力は約30 mN/m）と比較しても、同等の値が得られていることがわかる。

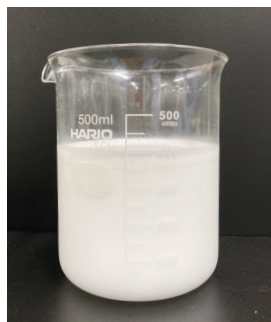
次に経過時間による物性値の変化に着目すると、いずれの条件において、摩擦係数および表面張力に大きな変化は見られなかった。つまり約1週間経過後も油水の分

表2 実験条件

		スターラー（攪拌）による混合	キャビテーション制御装置による混合	
配合液	油	非水溶性油	非水溶性油	
	水	アルカリイオン水	アルカリイオン水	
条件		回転子：クロス型 回転数：350 rpm 混合時間：30 分	上流圧：約 0.1 MPa 流量：約 20 L/min 混合時間：30 分	
希釈倍率		10 倍	試験液：A-1 ～ A-3	10 倍
			試験液：B-1 ～ B-3	30 倍
			試験液：C-1 ～ C-3	50 倍
経過時間	混合後から目視観察まで	約 12 時間	約 12 時間	
	混合後から物性値測定まで	－	3 ～ 192 時間	



(a) スターラー



(b) キャビテーション制御装置

図8 12時間経過後の試験液

表3 各種試験液の条件と物性値の測定結果

試験液	希釈倍率 [倍]	経過時間 [時間]	摩擦係数 μ [-]	表面張力 [mN/m]
A-1	10	5	0.12	32
A-2	10	68	0.13	33
A-3	10	166	0.13	32
B-1	30	6	0.12	32
B-2	30	73	0.12	32
B-3	30	192	0.11	31
C-1	50	3	0.13	32
C-2	50	68	0.13	32
C-3	50	162	0.12	31

離による測定値の変化は確認されず、乳化状態が安定して維持されていることが示された。なお、スターラーによる混合液は乳化せず分離したため、物性値の測定は行っていない。

以上より、当社独自の技術であるキャビテーション制御装置を用いた油水混合では油の乳化性(分散性)が高く、長期的にも高い安定性を示すことから、優れた分散混合作用を有することが確認された。

6 まとめ

当社が開発したキャビテーション制御装置の技術的特長および性能評価結果について報告した。本装置は、ガスの供給を必要としない無給気型でありながら低圧条件下でも安定してキャビテーションを生成し、微細気泡を高濃度かつ安定して生成できる能力を有することが確認された。また、油水混合試験では、従来の攪拌などの混合と比較して高い混合性能と長期的な乳化(分散)の安定性を示し、分散混合作用における優位性が確認された。さらに、装置の構造上、外部ガスの供給を必要としない点や、比較的簡素な構成で幅広い運用環境に対応可能な設計となっていることから、多様な応用展開が期待される。今後は、水質浄化をはじめとした各種応用分野において、キャビテーションの作用を活用し、実用化に向けたフィールド試験を進めていく。

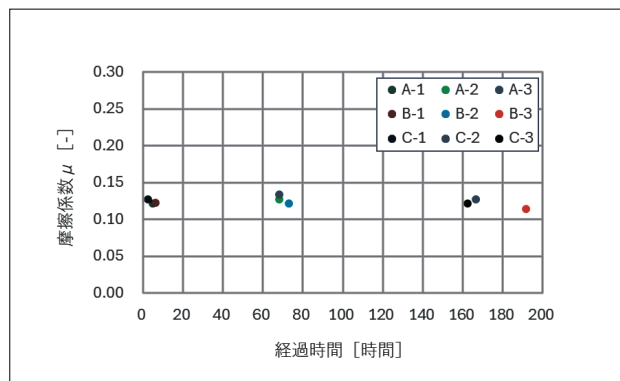


図9 経過時間と摩擦係数の関係

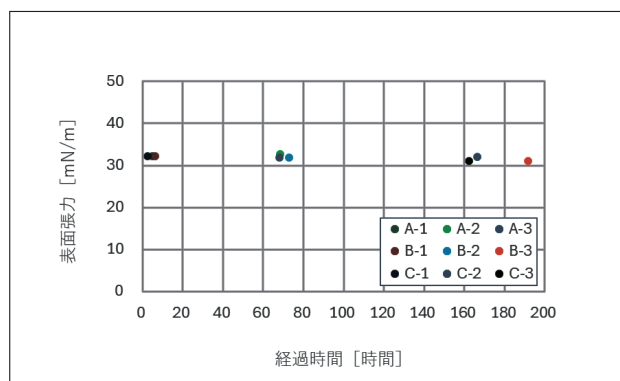


図10 経過時間と表面張力の関係

7 おわりに

キャビテーション制御装置の開発背景、技術的特長、性能評価およびその応用の可能性について報告した。キャビテーションを単に抑制すべき現象と捉えるのではなく、微細気泡の生成や新たな物理効果を積極的に活用する技術として展開する当社の試みは、新たな技術的価値の創出を示唆している。

また、本稿では割愛した洗浄効果に関する評価についても、引き続き研究を進めていく。

微細気泡技術は、今後もインフラ設備や産業分野において需要が拡大することが見込まれる。当社としても、キャビテーション制御技術の研究開発を推進し、環境と産業の両立に資する製品開発を進めていく所存である。

参考文献：

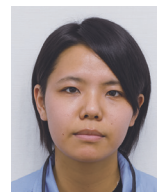
- 1) 秦 隆志・西内悠祐・田中克也・岡村祐里子・榊原 靖・寺坂宏一：
ファインバブルを用いた洗浄・浄化に関する研究、日本混相流学会、Vol.32、No.1 (2018)、pp.4～11
- 2) 研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ：
ファインバブル基盤技術研究開発事業 事後評価報告書、産業構造審議会産業技術環境分科会 (2016)、pp.10～17
- 3) 一般社団法人ファインバブル産業会：
ファインバブルの知識、効果と原理、<https://fbia.or.jp/fine-bubble/> (2025年6月10日閲覧)
- 4) 今村健二・重永憲明・明田敏郎・前川 伸：
分岐部の流体励振力・キャビテーション防止策の研究、一般社団法人ダム工学会、Vol.4、No.15 (1994)、pp.14～24
- 5) 菊池武晃：処理法の開発ースペシャルパイプ法、(社)日本海難防止協会、https://www.plankton.jp/sub08_15_09.pdf (2025年9月16日閲覧)

執筆者：

今井裕里

2019 年入社

流体機器関連の開発に従事



湯地 実

2020 年入社

流体機器関連の開発に従事

