

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K22016

研究課題名（和文）水中膜運動による省エネルギー型海水殺菌システムの構築と実証研究

研究課題名（英文）Construction and demonstration study of an energy-saving seawater sterilization system using underwater film motion

研究代表者

阿部 晃久（Abe, Akihisa）

神戸大学・海事科学研究科・教授

研究者番号：50221726

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、衝撃圧力によって誘起する微小気泡運動の有効活用により、酸化作用物質の効率的生成方法および条件を見出し、省エネルギーかつ安全安心な海洋微生物処理技術を確立し、海事産業分野に貢献できる新しい基盤技術創出を目的として実施した。気泡運動におけるOHラジカル生成タイミング、生成量予測、気泡崩壊の連鎖現象、弾性体膜や薄板による気泡生成メカニズム及びキャビテーション生成条件、Arガスの溶解によるOHラジカルの生成濃度上昇効果、放電衝撃負荷による金属板からのキャビテーション気泡生成と気泡運動の誘起を数値的実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、衝撃圧力によって誘起する微小気泡運動の有効活用により、酸化作用物質の効率的生成方法および条件を見出し、省エネルギーかつ安全安心な海洋微生物処理技術を確立し、海事産業分野に貢献できる新しい基盤技術を創出を目指し、海事科学分野において未だ応用例が少ない圧縮性流体力学に基づく取り組みである点で学術的意義があり、また海洋のSDGsや海事技術の発展に貢献が期待できる研究である点で社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this research, by effectively utilizing the microbubble motion induced by shock pressure, we discovered an efficient production method and conditions for oxidizing substances, established an energy-saving, safe and secure marine microorganism treatment technology, and made a new contribution to the maritime industry. It was implemented with the aim of creating basic technology. Some of research works to find producing method of microbubbles were carried out such as timing of generation and prediction of generation amount of OH radicals in bubble movement, chain phenomenon of bubble collapse, bubble generation mechanism and cavitation generation conditions using elastic film and thin plate, effects of increasing concentration of OH radicals generated by water in which Ar gas is dissolved, cavitation bubble generation using metal loaded by electric discharge shock.

研究分野：圧縮性流体力学

キーワード：マイクロバブル 水中衝撃波 フリーラジカル

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

衝撃波現象の研究は、多くの分野に関連し、様々な応用活用技術が確立され、最先端研究が活発に推進されている。一方、我国の経済や産業の基盤を支える海事分野でも、衝撃波現象の利用は、様々な応用技術の発展の可能性を有しているが、これまで衝撃波現象を活用した技術の開発事例は見られない。また、OHラジカル生成は、殺菌効果を向上させる重要な因子であり、マイクロバブルの崩壊によるOHラジカル生成は同時に衝撃圧力も生成されることから、連続的な気泡運動を誘発し、環境に優しい方法と考えられ、船舶上で実現できる省エネルギーかつ簡易なOHラジカル生成法の確立が必要であった①。

2. 研究の目的

海洋環境保全や海上輸送に係る経済活動の活性化のため、船用バラスト水処理及び船底付着生物除去を始めとする様々な海上移動体や海洋構造物への生物付着を防ぐ経済的効率的技術の確立が国際的に求められている(②-④)。本研究では、海事産業分野の発展に貢献できる海事科学分野発の圧縮性流体力学に基づく新しい基盤技術の創出を目的としており、衝撃圧力刺激で誘起される微小気泡の力学的特性の有効活用と制御によって、酸化作用物質（フリーラジカル）の効率的な生成方法及び最適生成条件を探索し、経済的・効果的かつ安全安心な海洋微生物処理技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

本報告では、OHラジカルの濃度を高める具体的な方法として、水中で弾性薄板試験片（金属板）を通して放電し、OHラジカルの生成量を増やす手法に関する結果を示す。水中の金属板に瞬間的に高圧電流を流すことで生じる電極と試験片との間の放電によるジュール熱で、周囲の水の急激な膨張を促し、水中衝撃波を発生させる⑤。放電の衝撃を受けた試験片内部には応力波が伝播し、試験片表面に変形や振動を誘発する。その結果、試験片表面付近に生じる減圧領域によるキャビテーション気泡の発生と、それらと水中放電衝撃波や反射波の著しい干渉が引き起こされると考えられる。本研究では、材料種類やサイズの異なる試験片を用いて実験を行い、現象の可視化観測及び画像解析により検証した。本方法は、放電により容易に効果的に気泡やOHラジカルを発生させることができ、バラスト水処理装置の簡素化や消毒効果の向上に貢献することが期待できる。

(1) 実験装置と観測方法

本研究では、6種類の金属板（銅、アルミニウム、亜鉛、鉄、ニッケル、鉛）を用いて水中放電実験を実施し、金属板およびその周囲の流れ場を観察した。実験装置の概略図を図1(a)に示す。実験装置は、実験水槽（拡大図を図1(b)に示す）と放電システムから構成された。放電システムは、パルス発生器（33220A、Agilent Technologies, Inc.）と放電装置（TE-HPS18K-A、玉置電子株式会社）で構成した。

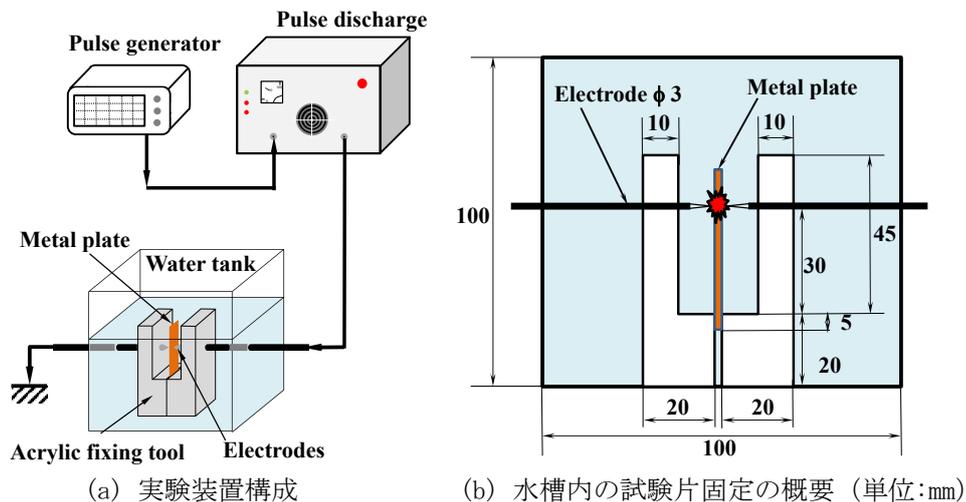


図1 実験装置の概略

表1 試験片の諸量

Material	Size (mm) W×L×T	Conductivity (S/m)	Young's modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Poisson's ratio
Al	15×45×0.5	3.64×10 ⁷	70.3	26.1	0.345
Cu	15×45×0.5	5.81×10 ⁷	129.8	48.3	0.343
Zn	15×45×0.5	1.69×10 ⁷	108.4	43.4	0.249
Fe	15×45×0.5	1.02×10 ⁷	152.0	60.0	0.270
Ni	15×45×0.3	1.39×10 ⁷	199.5	76.0	0.312
Pb	15×45×1.5	4.76×10 ⁶	16.1	5.59	0.440

本実験では、放電装置の入力電圧を 70 V（この時、出力電圧は 30.2 kV）に設定し、試験片表面と電極の距離を 1 mm とした。実験水槽は一辺 100 mm の立方体で、側面には電極を設置するための孔が設けられた。水槽内での試験片の固定には、高さ 65 mm、奥行き 40 mm、幅 20 mm の L 字型の亚克力製固定具 2 個を用いて水槽底部中央に配置し、長さ 45 mm、幅 15 mm の試験片の下 5 mm 部分を亚克力製固定具に挟んで固定した。実験に使用した試験片の仕様を表 1 に示す。各板の幅と長さは同一であるが、厚さは若干異なるものがある。

可視化観測では、衝撃波の発生・伝播、反射・回折現象、水中放電により発生するマイクロバブルの挙動を観察するために、レーザー光源 (CAVILUX Smart、Cavitar Ltd.) と高速カメラ (MEMORICAM ACS-1、Cavitar Ltd.) を使用した。撮影速度は 2×10^5 fps、露光時間 20 ns で撮影を行なった。

(2) 画像解析

図 2 に、放電後 1 ms の時点での試験片画像の例を示す。画像の解像度に制限があるため、画像中の気泡数を直接特定することが困難であったため、二値化処理によって特定の領域内に存在する気泡と判断される陰影面積で評価した。生成気泡量を評価した参照領域は、図 2 の赤枠で囲まれた幅 4.8 mm × 高さ 20 mm の領域とした。本評価では、2 値化画像の輝度値を用いて、斜め衝撃波、球状衝撃波及び試験片の初期陰影面積を特定し、削除した残りの陰影面積を気泡の陰影面積とした。なお、気泡の陰影面積は、参照領域の面積に対する面積率 (%) で評価した。

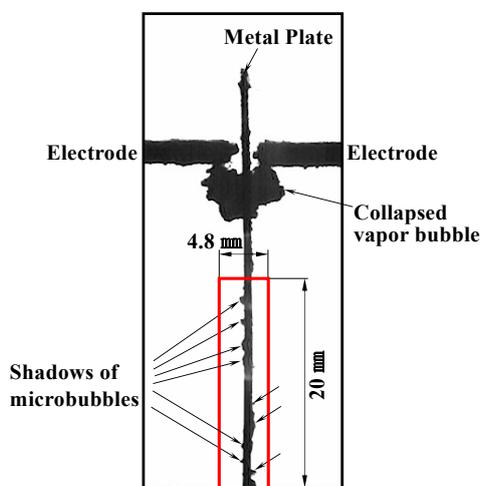


図 2 放電後 1 ms の時点での試験片周辺の二値化画像の例

4. 研究成果

図 3 は、各金属板の放電後 2.1 ms までに発生した気泡の陰影面積の比較である。金属板で 5 回の計測を行い、平均値を示した。また、表 2 に各試験片の弾性波速度、衝撃インピーダンス、気泡陰影面積等に関するデータ一覧を示した。同サイズの金属板を比較した場合、マイクロバブルの影の総面積はアルミニウム板が最も大きく、次いで銅、亜鉛、鉄の順であったが、銅、亜鉛、鉄の間には大きな差はなかった。気泡の陰影面積と縦弾性波およびせん断応力波の速度との相関係数は 0.94 および 0.93 であったことから、縦弾性波およびせん断応力波が気泡の発生に強く寄与していることが示唆されたが、アルミニウムは縦波速度が速く、気泡発生量が多いが、鉄については応力波速度が亜鉛や銅に比べて速いものの、気泡発生量に明確な違いは現れておらず、一概に弾性応力波の速度との関係性は見出せない。一方、ヤング率とポアソン比に注目する場合、アルミニウム板と鉄板に同じ強さの圧縮応力が作用しても、生じる縦ひずみとせん断ひずみはアルミニウムが大きく現れると考えられ、試験片表面の変位に差が生じた可能性がある。一方、図 3 で最も気泡陰影面積が大きいのはニッケル試験片を使用した場合であった。ニッケル板はヤング率が鉄に近いので、縦弾性応力波の伝播速度が近く、その値はアルミニウムに次ぐ速度である。さらに、表 1 よりポアソン比は、鉄に比較してかなり高い数値であることから、鉄よりも多くの気泡の発生が推察された。さらに、本実験で用いたニッケル試験片の厚さが 0.3 mm でアルミニウムよりも薄いため、金属板内に発生伝播する応力波の単位時間当たりの内部反射回数が増大し、金属板表面に高周波振動を生成した可能性があると考えられた。衝撃を受けた金属板全体の急激な曲げ変形に伴う引張応力により、金属板周囲の水に負圧領域が生じてキャビテーション気泡が発生することも報告されているが、本実験の衝撃波や応力波の伝播によって引き起こされる現象は、金属板の曲げ変形による流体挙動によって引き起こされる現象よりもはるかに高速であり、試験片表面が超音波振動子に近い挙動になったと考えるのが妥当と判断される。

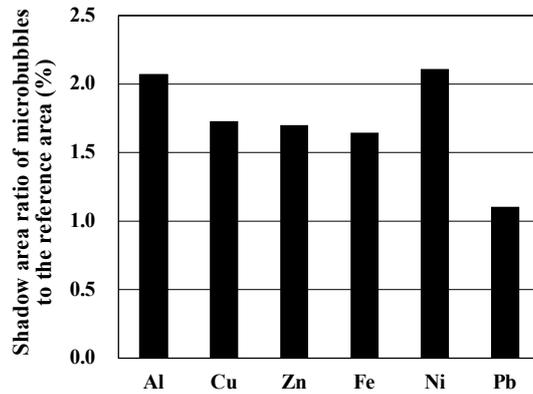


図3 各試験片で生成された気泡陰影面積の比較

表2 試験片の弾性波速度、衝撃インピーダンス、気泡陰影面積等に関するデータ一覧

Material	Elastic wave velocity (theoretical) (m/s)	Shear wave velocity (theoretical) (m/s)	Elastic wave velocity (observed) (m/s)	Shear wave velocity (observed) (m/s)	Elastic wave velocity observed by Ultrasonic Velocity Gauge (m/s)	Average of shadow area ratio of microbubbles (%)	Shock impedance ($10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$)	Dimensionless maximum vapor bubble radius
Al	5103	3111	5406	2598	5531	2.07	13.8	0.76
Cu	3629	2214	3663	1974	3929	1.73	34.1	0.88
Zn	3896	2465	3978	1945	3667	1.70	27.8	0.82
Fe	4440	2700	4577	2665	4690	1.64	33.3	0.45
Ni	4860	2924	4357	2598	4252	2.11	42.1	0.90
Pb	2144	701	2107	—	2060	1.11	13.5	0.40

図4 (a)~(f)は5 μs 間隔のシュリーレン画像であり、ニッケル板への放電によって得られる水中衝撃波の発生、伝播、反射や試験片の状態を示している。電極と試験片 (MP) 間での放電により、周囲の水が急激に膨張し、水中衝撃波が発生・伝播している。図4には、放電によって直接発生する球状の水中衝撃波 (SW) とその反射波 (RSW)、および試験片表面から発生して下方に伝播する角度の異なる斜め衝撃波 (OSW1、OSW2) を捉えた。OSW1 は OSW2 に比べて伝播速度が速く、その角度も鋭いことから、OSW1 は縦弾性応力波により発生した水中斜め衝撃波であり、OSW2 はせん断応力波による衝撃波であると推測される。さらに、OSW2 は OSW1 よりも後方を伝播しており、伝播速度が遅いことがわかる。最終的に、上部水面からの反射膨張波 (EW) も加わり、多くの圧力波の相互作用によって流れ場は複雑になることがわかる。また、放電10 μs 後に、放電部で蒸気泡 (VB) が試験片の左右に発生し、ゆっくりと膨張している様子が確認できる。

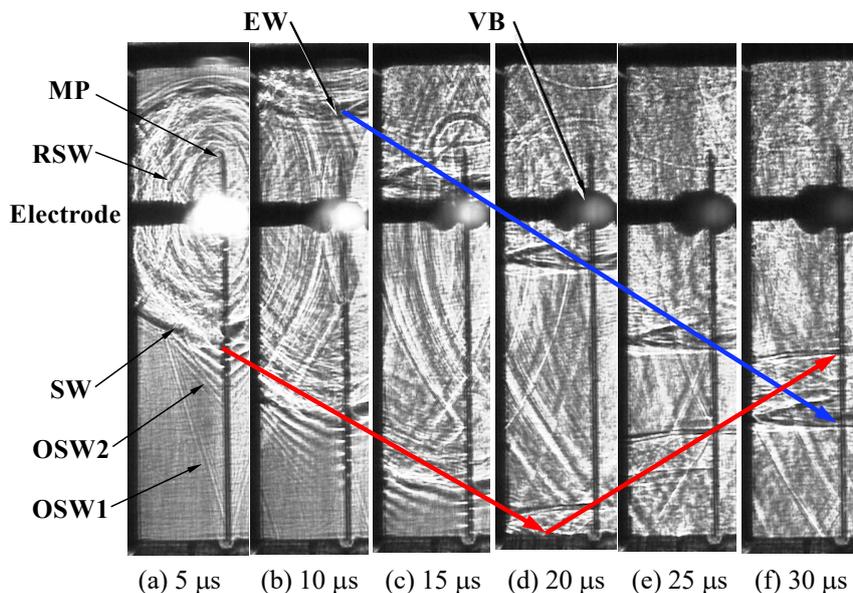


図4 ニッケル試験片に放電した際の水中衝撃波の発生・伝播と試験片周りの様子

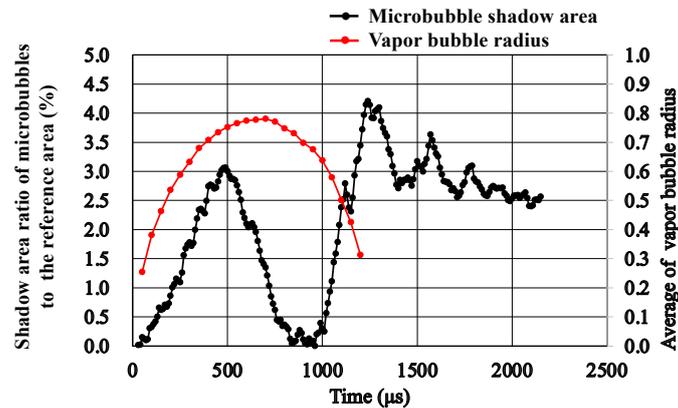


図5 ニッケル試験片に放電した際の蒸気泡の挙動と参照領域内に生じる微小気泡の陰影面積

図5は、ニッケル試験片を用いた際に電極部で生成される蒸気泡の半径と参照領域内の気泡の陰影面積の時間変化を示している。ここで、陰影面積は計測の参照領域の面積に対する比率で評価し、また、蒸気泡の半径は、試験片表面と試験片固定器具内壁面との距離である10 mmを代表長さとして無次元化して示した。図より、電極部の蒸気泡は、放電直後から膨張を開始し、約700 msで最大気泡径に達し（この時の半径比は0.8弱であり、固定器具内壁面とは接触していない）、その後収縮し、約1200 msで最小気泡径に達して崩壊した。気泡陰影面積比は、放電後500 μ sまで比例的に増加し、蒸気泡の収縮よりも早いタイミングで減少に転じ、900 μ s前後でほぼ0となるが、蒸気泡の最終的な収縮運動と共に増加し、蒸気泡の崩壊と同様のタイミングで2回目のピークを迎え、その際の気泡陰影面積比が最大値を示すことがわかる。なお、2回目の気泡陰影面積上昇中に、約1100 μ sで極値が現れているが、その際、試験片の右側の蒸気泡が崩壊し、その後、最大陰影面積比での極値では、試験片左側の蒸気泡が崩壊するタイミングに一致した。その後も、蒸気泡のリバウンド崩壊に合わせて極値を繰り返しながら緩やかに陰影面積が減少する様子が得られた。

以上の可視化観測及び画像解析によって、最初の気泡陰影面積のピークは、放電による衝撃波生成がトリガとなって生じ、2回目のピークは、試験片右側の蒸気泡の急激な収縮運動と崩壊衝撃波生成時、3回目のピークは試験片左側の蒸気泡の収縮運動と崩壊時に一致するタイミングで現れることが明らかとなった。以上のことから、衝撃波の生成と微小気泡数の増大は関係していることが示唆される。すなわち、衝撃波の生成は弾性試験片中に応力波を発生させ、応力波の伝播に伴うひずみ変動も引き起こし、結果的に材料表面の振動を引き起こすと考えられる。特に、応力波の強さや材料のサイズによって材料内部の応力波の伝播や反射現象が高速の表面変位を伴う高周波数振動を誘起する可能性があるため、超音波振動子と同様に微小気泡を生成することになると考えられる。

以上より、可視化観測により、弾性体（金属板）を介した放電により発生する球状衝撃波と水中で金属板を伝播する縦弾性応力波やせん断波により発生する斜め衝撃波が観察されたことで、試験片の材料特性の条件によって、試験片表面に高周波振動が発生することにより気泡生成が活性化されると考えられた。本実験から、金属試験片を介した放電による衝撃波生成や電極での蒸気泡の崩壊運動による衝撃波の生成と気泡数の増加の傾向は密接に関与する結果が得られ、本研究結果から、金属板に放電を加えて衝撃波と水蒸気泡を繰り返し発生させることで、効果的に微小気泡数を増加させることができると結論づけた。また、発生したマイクロバブルに衝撃波が作用して崩壊運動を促進するため、OHラジカルの発生量が増加し、殺菌効果も十分に期待できると考えられる。

<引用文献>

- ① J. Hanotu, H.H. Bandulasena, W.B. Zimmerman, *Microflotation performance for algal separation*, *Biotechnol. Bioeng.* **109**, pp. 1663–1673 (2012)
- ② Abe A, Mimura H, *Sterilization of ships' ballast water, Chapter 11 of bubble dynamics and shock waves*. In: Delale CF (ed), *Shock wave science and technology reference library*. Vol 8. Springer, New York, pp. 339-362 (2013)
- ③ IMO, International Maritime Organization. *Implementing the Ballast Water Management Convention – What are the ballast water management standards?* (2019) <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Implementing-the-BWM-Convention.aspx>
- ④ J. Wang, A. Abe, Y. Wang, C. Huang, *Fundamental study of sterilization effects on marine Vibrio sp. in a cylindrical water chamber with supply of only underwater shock waves*, *Ultrasonics Sonochemistry.* **42**, pp. 541-550 (2018)
- ⑤ T. Sato, *Generation and Application of Pressure Wave by Discharge in Water*, *J. Plasma Fusion Res.* **97(5)**, pp.255-260 (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 阿部晃久、大西智士	4. 巻 36
2. 論文標題 画像の輝度変化に着目したキャビテーション噴流中の衝撃波生成の観測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 172,179
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 下川 朋之、阿部 晃久、玉木 雄祐、石居 梓	4. 巻 -
2. 論文標題 付着粒子状物質に対するキャビテーション噴流の除去効果に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第89回マリンエンジニアリング学術講演会論文集	6. 最初と最後の頁 1, 2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 下川朋之、丸山泉輝、阿部晃久	4. 巻 -
2. 論文標題 キャビテーション噴流の入射角度による衝撃波生成と壊食効果に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2019年度衝撃波シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 1, 3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 猪井裕貴、富永泰斗、阿部晃久	4. 巻 -
2. 論文標題 無隔膜式衝撃波管を用いた水中衝撃波生成に関する基礎研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2019年度衝撃波シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 1, 3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 韓 コウ天、野口真依、阿部晃久	4. 巻 -
2. 論文標題 衝撃波による微小気泡の崩壊運動に伴うOHラジカル生成量の数値予測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2019年度衝撃波シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 1, 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 下川朋之, 大西智士, 阿部晃久
2. 発表標題 異なる噴流形態のキャビテーション噴流の衝撃波生成と壊食に関する研究
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 猪井裕貴, 石居梓, 平井龍志, 阿部晃久
2. 発表標題 飛翔体の水中貫入による水中衝撃波生成に関する実験的研究
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口真依, 山下理央, 阿部晃久
2. 発表標題 水中衝撃波と微小気泡の干渉に伴うOHラジカル生成の数値予測
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下川 朋之、阿部 晃久、玉木 雄祐、石居 梓
2. 発表標題 付着粒子状物質に対するキャピテーション噴流の除去効果に関する研究
3. 学会等名 第89回マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下川朋之, 丸山泉輝, 阿部晃久
2. 発表標題 キャピテーション噴流の入射角度による衝撃波生成と壊食効果に関する研究
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 猪井裕貴, 富永泰斗, 阿部晃久
2. 発表標題 無隔膜式衝撃波管を用いた水中衝撃波生成に関する基礎研究
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 韓 コウ天、野口真依、阿部晃久
2. 発表標題 衝撃波による微小気泡の崩壊運動に伴うOHラジカル生成量の数値予測
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------