

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630405

研究課題名(和文)水中衝撃波を活用した新しい船底付着生物除去技術の確立

研究課題名(英文) Study on a new removal technique of creatures stuck to the bottom of a ship using underwater shock waves

研究代表者

阿部 晃久 (Abe, Akihisa)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・教授

研究者番号：50221726

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、船底付着生物除去のための新しい基盤技術の確立のため、低コストで水中に強い圧力波(衝撃波)を連続生成する方法について検討された。高圧ガス駆動の無隔膜衝撃波生成装置を用いてゴム膜やシリコンチューブを水面に衝突させることで、水中衝撃波の発生が確認された。この結果は、水中衝撃波の低コスト生成の実現可能性を示唆すると考えられたが、十分な強さの圧力を得ることができなかった。一方、ノズルから噴射させた高圧水流で生成された微小気泡群の自己崩壊現象により、断続的に水中衝撃波の発生が確認された。衝撃波が連続的に自然発生するため、効率的な衝撃波生成が可能で、船底付着生物除去等への応用可能性を得た。

研究成果の概要(英文)：In the present study, methods of continuous producing of strong pressure waves in water are examined to develop a fundamental technology for removing marine creatures from hull. Underwater shock waves can be generated by collision of silicone film against water surface using a shock wave discharged from a high-pressure gas driven generator. The results suggest that there is a possibility of economic shock wave production, however it is hard to get strong pressures. On the other hand, underwater shock waves are obtained from self-collapse of small cavitation bubbles generated using a cavitation nozzle. It is found that this method can make up underwater shock waves easily and effectively, so there is an applicable possibility of removing marine creatures from hull.

研究分野：衝撃工学

キーワード：水中衝撃波 微小気泡 キャピテーション 船底付着生物

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 発展途上国における人口増加や経済の急速な発達に伴い、地球規模の人と物の往来がより盛んになってきており、海上輸送の果たす役割はますます重要性を増している。資源・エネルギーの自給率が低く、それらの大部分を輸入に依存する日本は、四面環海のため、貿易のほぼ全てを船舶が担っている。したがってより効率的かつ安定的な船舶の運航が強く求められており、そのためには運航費の50%弱を占める燃料費の削減が重要となる。船舶の低燃費化を妨げる主な要因として船体が海水から受ける流体抵抗が挙げられるが、これは船体にフジツボなどの海洋生物が付着することでさらに増加し燃料消費量を増大させる。また海洋生物を付着させたまま航行することは生態系の攪乱にもつながっている。現在これらの海洋付着生物の被害を防ぐために船底防汚塗料を用いることが一般的であるが、これらの船底防汚塗料に含まれている銅やスズなどの成分が海洋に流出することによって起こる海洋生態系への影響が問題になっている。また、既に固着してしまった海洋付着生物の除去には、乾ドック時において砂を用いるサンドブラストで除去する方法が一般的であるが、ケイ肺などの人体への悪影響が危惧される。

(2) 近年国際的に問題視されている船舶バラスト水問題において、研究代表者らは、水中衝撃波と微小気泡を用いた衝撃波作用による殺菌効果を確認し、技術開発研究を推進している。同様の衝撃波作用が、フジツボを代表とする船底付着生物の成長初期段階の幼生に対して除去効果を見いだすことができれば、新たな船底付着生物除去技術に繋がると考えられる。ところで、本技術創出のためには、水中衝撃波の発生方法について再検討する必要がある。一般的に、幅広く医療や材料加工分野で応用されている水中衝撃波の生成方法は、爆薬や高圧放電などの高エネルギーの解放によって得られるが、海事分野への技術応用を検討するためには、経済性が重要となるため、従来の発生方法の活用は現実的に困難と考えられる。

(3) 本研究では、将来の船上での使用や経済性の観点から高圧ガス駆動源として船舶熱機関の排気を活用した水中衝撃波生成技術の確立が重要と考えられた。そのため、高圧気体駆動の磁力補助型無隔膜衝撃波管と弾性材料を利用して弾性体の高速変形による水中衝撃波生成が期待された。加えて、容易な水中衝撃波生成の可能性から、キャビテーション噴流の活用についても検討の必要性が浮上した。ウォータージェットの水中における作用は、空気中とは異なり、水の運動エネルギーを有効に活用できないが、生成されるキャビテーション気泡群の気泡運動に

よる衝撃波の発生が期待できる。このような水中衝撃波による船底付着生物への効果は未だ十分に明らかにされていない。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、船底付着生物除去に寄与する新たな海事分野での活用技術創出のため、従来とは異なる簡易で低コストの水中衝撃波生成法の確立を目的とした。本研究では主に2つの力学的方法について試行実験を実施し、効果的に水中衝撃波を生成するための条件について検討を行う。

(2) 第一の方法は、弾性体と高圧ガス駆動衝撃波の干渉現象を利用する力学的水中衝撃波生成法である。第二の方法は、キャビテーション噴流の水中挙動に伴う衝撃波生成法の活用である。それぞれについて、実験的検討を行い、水中衝撃波の発生可否や生成条件等について検討を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 弾性体と高圧ガス駆動衝撃波生成装置を用いた水中衝撃波の生成

本研究で開発した磁力補助機構を有する高圧ガス駆動の無隔膜型衝撃波生成装置を用いて、長さ500 mmの衝撃波管を水槽内へ導入し、管出口にシリコンチューブを接続し、さらに長さ300 mmの排気管を介して大気へ開口された。水槽内に注水し、シリコンチューブを水に浸した状態で、管内に衝撃波を打ち込むことでシリコンチューブ内に衝撃波を伝播させ、衝撃波の不連続的圧力変動がシリコンチューブに伝わり水中に圧縮波を伝播させると共に、水圧によって収縮しているシリコンチューブが急膨張し、周囲の水を圧縮することで水中衝撃波が生成されると考えた。図1にシリコンチューブと衝撃波管の組み合わせによる水中衝撃波生成機構について示した。加えて、本実験では、水の圧縮率が低いことから、管内に剛体棒を挿入し、反射衝撃波の利用と流路の縮小による圧力増大も試みた。

図2は、無隔膜衝撃波管とシリコン膜を用いた水中衝撃波生成実験の試験部の模式図である。長さ200 mmのアクリルパイプの側面に長さ80 mm×幅16 mmの長形状の窓を設け、厚さ1 mmのシリコン膜をテープで固定した。パイプは、衝撃波管出口に接続され、排気側が塞がれた。管内を伝播する入射衝撃波背後の過剰圧により、膜が変形して水面に衝突するように、膜面は水面の僅か上方に設置された。

高速度カメラ(MEMRECAM HX-3、株式会社ナックイメージテクノロジー)とメタルハライドランプ(LS-M350、SUMITA Optical glass Inc.)を用いて、シュリーレン法による可視化

観測を実施した。無隔膜衝撃波管の高圧室の初期圧力は 0.5 MPa に設定された。この圧力条件で安定的に得られるマッハ数は約 1.38 であった。

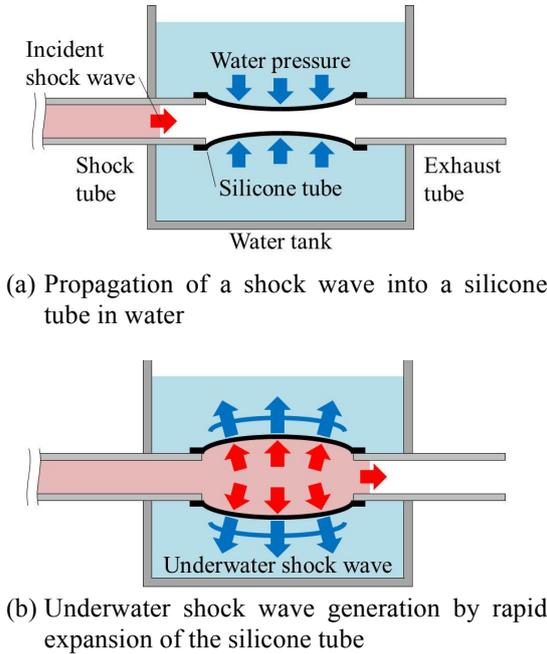


Fig.1 Schematic diagram of an underwater shock wave generation using a silicone tube

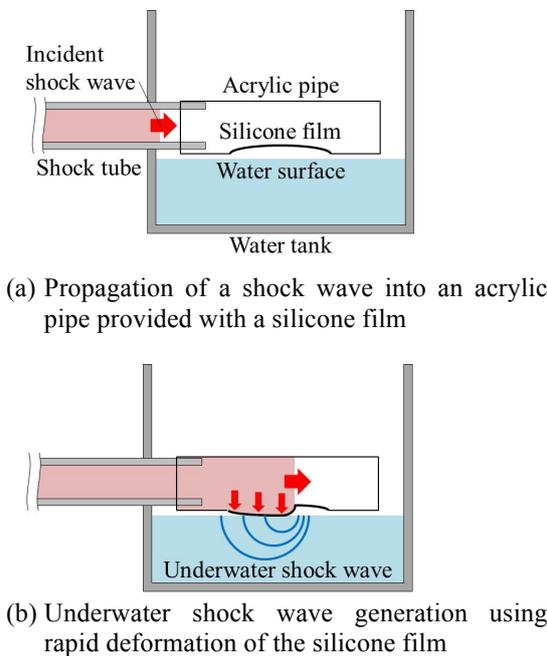


Fig.2 Conceptual diagram of a shock wave converter using a silicone film

(2) キャビテーション噴流による水中衝撃波の生成

図 3 にキャビテーション噴流による衝撃波生成実験の実験装置の概略を示す。43 × 43 ×

63 cm の水槽に水を満たし、上方から下方へ向けてノズルを設置した。水中に固体壁を設置し、ノズル出口と固体壁間の距離を変えてキャビテーション噴流の挙動観察を行った。実験に使用したポンプは、市販の高圧洗浄機に組み込まれている三連プランジャーポンプ (AJP-1700VGQ、リョービ(株)) である。ポンプの最大吐出圧力は 7.5 MPa であった。

小型で簡易な微小気泡の生成と高圧水流を同時に実現するため、高圧ポンプに真鍮製のキャビテーションノズルを接続した。キャビテーションノズル内には、直径 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm の穴が開けられた直径 15 mm、板厚 2 mm の真鍮製オリフィス円板が挟み込まれた。高圧ポンプからの高圧水流がオリフィス板を通過する際に生じる負圧によって、キャビテーション気泡が生成されキャビテーション噴流が得られる。

キャビテーション噴流の挙動の観測にはシュリーレン法を用いた。光源にメタルハライドランプ (LS-M350) を使用し、高速度カメラ (HX-3、株式会社 nac) で 10 万 fps の撮影を行った。

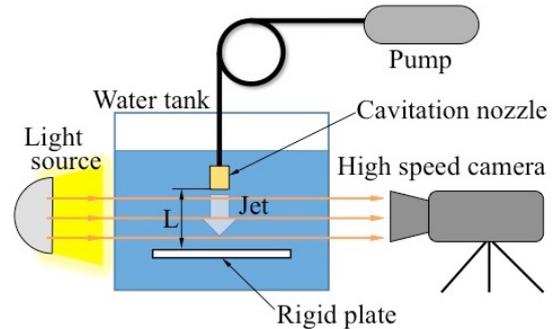


Fig.3 Schematic diagram of experimental setup for cavitation jet observation

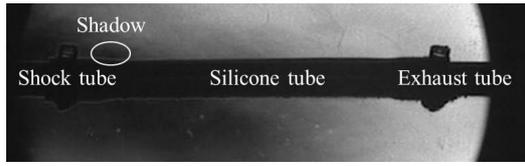
#### 4. 研究成果

(1) 弾性体コンバータによる水中衝撃波発生実験

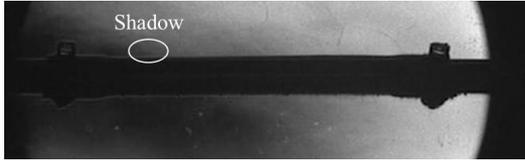
図 4 に、シリコンチューブ周囲の観測結果を示す。撮影速度は 30,000 fps、露光時間は 0.5  $\mu$ s である。図中の左側に衝撃波管、右側に排気管が接続されている。静止画像から識別することは難しいが、動画では管に沿って左から右へ移動する弱い影が観測された。移動速度は 480 m/s と見積もられ、無隔膜衝撃波管から放出された衝撃波の伝播速度に相当した。しかしながら、チューブ周辺には明確な圧力波の伝播を確認することはできなかった。

図 5 は、シリコンチューブ内に排気管出口側からアルミニウム丸棒を挿入した場合の観測結果を示す。アルミニウム丸棒先端の位置は、衝撃波管出口から 20 mm 離れている。撮影速度は 30,000 fps、露光時間は 0.5  $\mu$ s である。チューブ内圧の増大が期待され、弱い影

の伝播が以前に増して観測されたが、明確な水中衝撃波の生成には至らなかった。

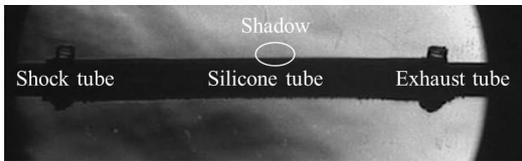


(a)

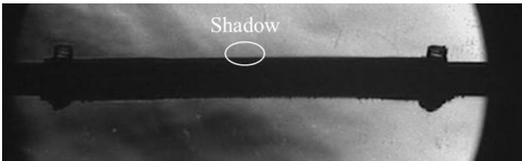


(b)

Fig.4 Schlieren images of a moving shadow along the outer surface of the silicone tube



(a)

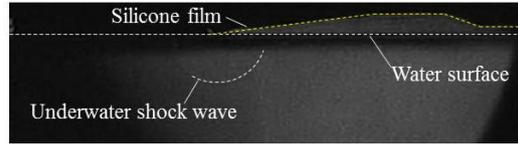


(b)

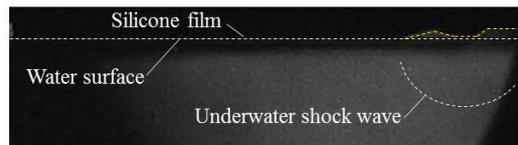
Fig.5 Schlieren images of a moving shadow along the outer surface of the silicone tube into which an aluminum bar is inserted

図 6 に、シリコン膜による水面衝突実験の観測結果を示す。撮影速度は 100,000 fps、露光時間は 0.5  $\mu$ s である。図 6 (a) では、左から約 1/3 の位置までシリコン膜が水面と衝突し、衝突箇所の先端から半球状の水中衝撃波面が発生・伝播している様子が確認できた。図 6 (b) では、下流側においても半球状水中衝撃波の発生が確認できた。静止画像では波面が不鮮明で識別が困難であるが、動画では膜の水面衝突箇所の移動に伴い、多数の半球状水中衝撃波が確認された。シリコン膜の水面衝突箇所の右方向移動速度は、水中衝撃波伝播速度の 1/3 以下であると予測されることから、生成される水中衝撃波は、多数の半球状の波面の重なりとして観測されると予想された。しかしながら、単一の半球状衝撃波面が逐次生成されたことから、シリコン膜の水面への衝突は連続的に起こっていないと推定された。すなわち、衝撃波の伝播に伴うシリコン膜面の変形は、一様で均一な変形ではなく複雑な変形挙動となっている可能性や、膜面の変形速度と水面波の伝播速度の

関係によって衝突時のシリコン膜と水面の衝突面形状が互いに变形している可能性が考えられ、シリコン膜と水面の衝突が面ではなく点で生じている可能性が疑われた。なお、水中衝撃波が生成されるシリコン膜の水面衝突直前の変形速度は、本条件において、20 m/s 以上必要であると推定された。



(a)



(b)

Fig.6 Schlieren images of underwater shock waves generated by impingement of a silicone film on water surface

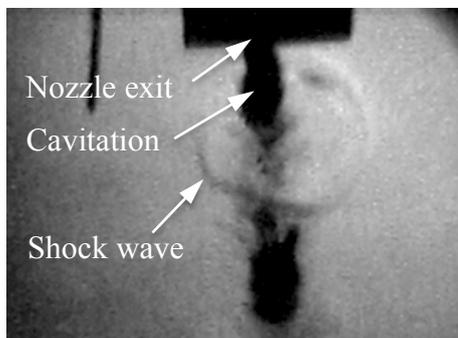
## (2) キャビテーション噴流による水中衝撃波の生成実験

図 7 は、オリフィス板穴径 1.0 mm、ノズル先端から固体壁までの距離  $L=315$  mm の条件でのキャビテーション噴流の画像である。画面上の四角形の影は、直径 20 mm のキャビテーションノズル先端である。先端から噴射されたキャビテーションバブルは、ノズル先端中央部から下に伸びる黒い影として確認できる。図 7 (a) で、ノズル出口から約 10 mm の位置でバブルの影が途切れ、ゆがんだ円形の薄い影が現れている。これはキャビテーション気泡の運動によって生成されたリバウンド衝撃波の影である。また、(b) および (c) では、ノズル出口近くで発生したリバウンド衝撃波が拡大伝播する様子を確認できる。流れの様子を動画で確認すると、ノズル出口から下方に比較的広い範囲で、断続的に噴流の影が途絶えると同時にリバウンド衝撃波が発生する現象が発生していることがわかった。このような衝撃波は、 $L=107$  mm および 35 mm においても同様に観察されたが、発生頻度や発生位置について差異が見られた。そこで複数の画像データを用いて、ノズル出口から下方の 40 mm の区間に注目して衝撃波の発生頻度を計測し、発生位置と 1 秒間当たりの衝撃波発生回数の関係を調べた。

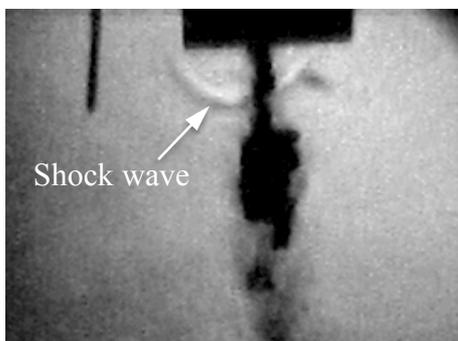
ノズル先端から固定壁までの距離  $L=107$  mm と 35 mm に対して 5 mm 間隔、 $L=315$  mm に対して 10 mm 間隔で計測した衝撃波発生頻度分布を図 8 に示す。 $L=107$  mm および 35 mm では、ノズル出口から 20 mm までの領域で衝

衝撃波発生頻度に明確な差は見られないが、 $L=35\text{ mm}$ では固体壁付近で衝撃波の発生回数が急増していることがわかる。固体壁面がノズル先端部に近づくほど、その周囲の圧力変動が顕著となるためキャビテーション気泡の崩壊が誘起され易くなったと考えられる。

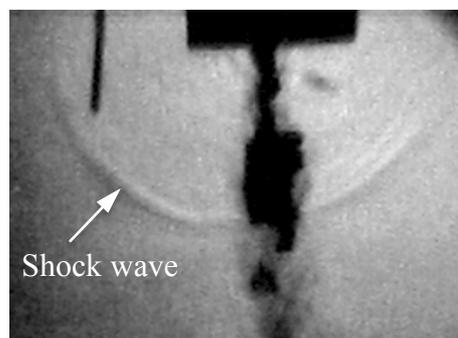
$L=315\text{ mm}$ ではノズル出口直後から盛んな衝撃波の発生が確認できる。これは出口付近に障害物が無いためノズルからの流れが加速されやすく、それに伴って出口圧が低下することで、キャビテーションが増大するためと考えられる。一方で25 mm付近で衝撃波の発生回数が増加傾向を示すのは $L=107\text{ mm}$ と類似である。ノズルから放出されたキャビテーションの多くが、流れの中で収縮運動を行い、25 mm 辺りで崩壊のタイミングを迎えたと考えられる。



(a)



(b)



(c)

Fig.7 Schlieren images of cavitation jet and rebound underwater shock waves

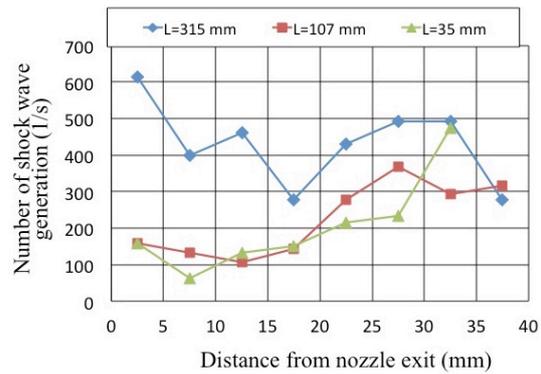


Fig.8 Relationship between number of shock wave generation and distance from the nozzle exit: nozzle diameter is 1.0 mm

オリフィス板の穴径 1.5 mm の場合、 $L=315$  と  $290\text{ mm}$  における衝撃波発生頻度を図 9 に示す。 $L=315\text{ mm}$  に注目すると、オリフィス板穴径を大きくしたことで発生するキャビテーションの数が減少し、それに伴い衝撃波発生頻度もノズル直径 1.0 mm の場合と比較して 1/10 以下に減少していることがわかる。また  $L=290\text{ mm}$  との比較においてもノズル出口から 20 mm 以上の領域で、衝撃波発生頻度の減少が見られる。これは、 $L=315\text{ mm}$  では固体壁との距離が広がるためノズル出口付近の周囲圧力が低下しキャビテーション崩壊が誘起され難くなったと考えられる。固体壁がノズル出口に近づくほど衝撃波発生頻度が増加するノズル径 1.0 mm の場合と逆の結果であるが、噴流速度が遅く、キャビテーション発生数が低下することが原因として上げられる。また、キャビテーションの数密度の低下による気泡同士の相互作用が生じにくくなることから、 $L=315\text{ mm}$ 、 $290\text{ mm}$  ともに衝撃波発生頻度のピークが 20 mm 周辺に集中する山形分布を示したと考えられた。したがって、ノズル径 1.0 mm での流れではキャビテーション同士の干渉や結合現象が生じていると思われる。

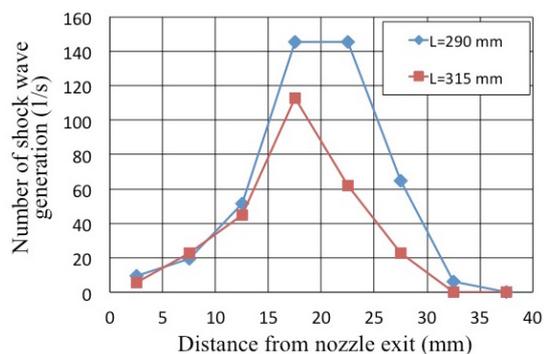


Fig.9 Relationship between number of shock wave generation and distance from the nozzle exit: nozzle diameter is 1.5 mm

ノズル径 2.0 mmの場合についても計測実験が実施された。キャビテーション気泡の生成は確認できたが、水中衝撃波の発生は確認されなかった。出口流速の低下に伴う圧力差の低下とキャビテーション数密度の低下が原因と考えられた。

以上より、本研究では、船底付着生物除去に関する新たな海事技術の創出に向けて、簡易で低コストの水中衝撃波発生法について実験的に検討された。排気利用を想定した高圧ガス駆動衝撃波生成装置と弾性体を組み合わせた水中衝撃波生成法では、弾性薄膜の水面衝突作用による実験において水中衝撃波の生成が確認された。この結果は、高エネルギーが必要とされる水中衝撃波も低コストで生成できる可能性を強く示唆する成果であると考えられたが、十分な強さの圧力を得ることができなかった。一方、キャビテーションノズルを用いたキャビテーション噴流では、キャビテーション気泡の自己崩壊現象が高い頻度で観測され、自然に衝撃波が連続発生するため、非常に効率的に微小気泡と衝撃圧を利用出来ることを見出された。さらに噴流照射対象物に対するノズルの位置関係と衝撃波の発生周期や頻度の変化について検討し、単純な構造かつ低コストで船底付着生物の除去等への応用可能性が得られた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Experimental Verification of Shock Sterilization for Marine *Vibrio* sp. using Microbubbles Interacting with Underwater Shock Waves, *Journal of Marine Science and Technology*, 査読有, DOI:10.1007/s00773-016-0384-z, 2016
- ② Jingzhu Wang, Akihisa Abe, A Hybrid Analytical Model of Sterilization Effect on Marine Bacteria using Microbubbles Interacting with Shock Wave, *Journal of Marine Science and Technology*, 査読有, DOI: 10.1007/s00773-015-0360-z, 2015
- ③ Akihisa ABE, Jingzhu WANG, Minoru SHIODA, Shiro MAENO, Observation and Analysis of Interactive Phenomena between Microbubbles and Underwater Shock Wave, *Journal of Visualization*, 査読有, DOI:10.1007/s12650-014-0257-7, 2014

[学会発表] (計 12 件)

- ① Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Pressure Measurement on Rebound Shock Wave of a Vapor Bubble using Background Oriented Schlieren Method, 平成 27 年度衝撃波シンポジウム, 2016.3.7, 熊本大学工学部(熊本県)
- ② Jingzhu Wang, Toshiya Gonai, Akihisa Abe, Mingyu Sun, Taketoshi Koita, Study on Improvement in Sterilization Effect of Shock Wave for Marine Bacteria, the 15th International Symposium on Advanced Fluid Information

&ICFD2015, 2015.10.27, 仙台国際センター(宮城県)

- ③ Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Estimation of sterilization effect on marine bacteria using microbubble flow and shock wave, 第 85 回マリンエンジニアリング学術講演会, 2015.10.26, 富山国際会館(富山県)
- ④ 山田洋平, 阿部晃久, 高圧気体駆動の無隔膜衝撃波管を用いた水中衝撃波生成に関する研究, 日本機械学会全国大会 2015 年度年次大会, 2015.9.16, 北大工学部(北海道)
- ⑤ 山田洋平, 阿部晃久, 無隔膜衝撃波管を用いた水中衝撃波生成に関する研究, 平成 26 年度衝撃波シンポジウム, 2015.3.1, 渋川市(群馬県)
- ⑥ Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Mingyu Sun, Taketoshi Koita, Study on the benefits of microbubbles applied to shock sterilization of marine bacteria, 第 84 回マリンエンジニアリング学術講演会, 2014.11.19, 海峡メッセ下関(山口県)
- ⑦ Jingzhu WANG, Osamu TAKEDA, Akihisa ABE, The generation of an underwater shock wave using elastic material connected to a diaphragmless shock wave generator, 2014.7.24, 16th International Symposium on Flow Visualization, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県)
- ⑧ Minoru SHIODA, Shiro MAENO, Jingzhu WANG, Akihisa ABE, Observation and analysis of interactional phenomena between microbubbles and underwater shock wave, 2014.7.24, 16th International Symposium on Flow Visualization, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県)
- ⑨ Jingzhu WANG, Akihisa ABE, Estimation of Sterilizing Potential using Rebound Shock Waves of Microbubbles for Ship Ballast Water Treatment, 平成 25 年度衝撃波シンポジウム, 2014.3.5, 青山学院大学(神奈川県)
- ⑩ Akihisa Abe, Kazuya Sugahara, Yohei Yamada, Rapid Opening Valve Assisted by Magnetic Force for a Diaphragmless Shock Tube, 2013.7.16, 29th International Symposium on Shock Waves, Madison (USA)
- ⑪ Shiro Maeno, Jingzhu Wang, Shinya Fukuda, Akihisa Abe, Observation and Analysis of Microbubble Motion Induced by An Underwater Shock Wave, 2013.7.16, 29th International Symposium on Shock Waves, Madison (USA)
- ⑫ Hiroki Ueda, Akihisa Abe, Study on Excessive Pressure of Underwater Shock Wave Generated in Confined Space, 2013.7.16, 29th International Symposium on Shock Waves, Madison (USA)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

阿部 晃久 (ABE AKIHISA)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授  
研究者番号：50221726