

令和元年9月2日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14512

研究課題名(和文) 船用技術展開のための水中衝撃波コンバーターの開発

研究課題名(英文) Development of an underwater shock wave generation method as maritime technology

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：衝撃波現象を海事分野へ応用するために、船舶機関の排気を利用する省エネルギーかつ簡易な水中衝撃波生成技術の確立を目指した研究が行われた。排気を活用する観点から、高圧ガス駆動型で小型の無隔膜衝撃波発生装置が設計された。2ピストン方式で磁力支援機構を有する独自の衝撃波発生装置が製作され、マッハ数1.5の気中衝撃波の生成に成功した。また、本装置による水中衝撃波生成が試られ、飛翔体の水中貫入によって水中衝撃波生成に成功すると共に、7 MPaを超える衝撃圧力変動が得られた。以上から、従来の爆薬や放電方法に代わり、高圧ガス駆動による強い水中衝撃波を安全かつ省エネルギーで容易に再現できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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、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は、これまで衝撃波現象を活用した技術開発事例は見られない。本研究では、衝撃波現象を活用する新たな船用技術の創出を目的として、船舶上で実現するために機関の排気利用を前提とした省エネルギーかつ簡易な水中衝撃波生成と制御技術開発に取り組み、従来の爆薬や放電方法に代わり、高圧ガス駆動の装置によって、強い水中衝撃波を安全かつ省エネルギーで容易に再現可能であることを示した。これは、海事産業における水中衝撃波を活用する新技術の創出に繋げられる成果である。

研究成果の概要(英文)：In order to apply the shock wave phenomena to the maritime field, the research aimed at establishing energy saving and simple underwater shock wave generation technology using exhaust of ship engine was conducted. From the viewpoint of utilizing the exhaust, we designed a compact diaphragm-less shock wave generator driven by high-pressure gas. We have manufactured a unique shockwave generator with the magnetic force support mechanism and double piston system, and succeeded in generating strong shock waves about Mach 1.5 in air. In addition, we tried to generate underwater shock waves using our device, and succeeded in generating underwater shock waves by water penetration of a projectile, and obtained shock pressure fluctuations exceeding 7 MPa. From the above results, it has been shown that a strong underwater shock wave driven by high-pressure gas can be safely and easily reproduced with energy saving, instead of the conventional explosive and electric discharge methods.

研究分野：圧縮性流体力学

キーワード：衝撃波管 磁力支援方式 高圧ガス駆動 水中衝撃波 気泡運動

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

- (1) 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、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。
- (2) 従来型的水中衝撃波生成は、爆薬や放電による方法が主であり、船舶への応用において安全面や経済面に困難さを伴った。水中衝撃波を活用する新たな船用技術の創出を図るためには、船舶上で実現できる省エネルギーかつ簡易な水中衝撃波生成法の確立が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、高圧ガス圧力作用を利用した水中衝撃波生成を行い、気泡運動を誘起できる強さの水中衝撃波を生成できる方法を見出し、その生成条件を明らかにする。基本的な水中衝撃波の生成は、水面を打撃する方法が効果的であると考えられ、高圧ガスの閉ループ管内で、高分子材料や金属材料などの弾性を利用する高速打撃メカニズムによる方法を実験室レベルで見出し、海事分野へ活用できる新たな水中衝撃波生成基盤技術を確立する。

3. 研究の方法

- (1) 圧縮ガスにより連続駆動可能な無隔膜衝撃波生成装置を作製する。
- (2) 可視化実験及び圧力計測実験の実施および数値シミュレーションにより、作製した衝撃波生成装置の性能評価を行う。
- (3) 高圧ガス駆動無隔膜衝撃波生成装置による衝撃波を伴う高速気流を用いて水中衝撃波の生成方法について弾性体や高分子材料などを用いた実験的検討を行う。
- (4) 水中衝撃波の生成は可視化実験で、また、その強さは圧力計測実験により確認する。過去の研究から、生成衝撃圧力は3MPa以上を得ることを目標とした。

4. 研究成果

(1) 高圧ガス駆動の無隔膜衝撃波生成装置の開発

本研究で開発作製した実験装置は、高圧力ガス駆動の2ピストン型無隔膜式衝撃波管である。製作した装置の断面図を図1に示す。本装置は、高圧室、真空室、高圧ガスを供給するためのボール弁、ピストン弁（高圧室側、真空室側）、管内の直径が10mm、長さが500mmの衝撃波管、永久磁石（ネオジウム磁石、直径3mm、長さ10mmの円柱形のもの8個）、排気室、排気用の電磁弁で構成されている。本装置は、高圧室側ピストン弁の高速開口運動を実現するために真空室を設けた2ピストン方式を採用したこと、および、高圧室側ピストン弁に独自の永久磁石を用いた磁力支援機構⁽¹⁾を組み込んでいる点に特徴がある。

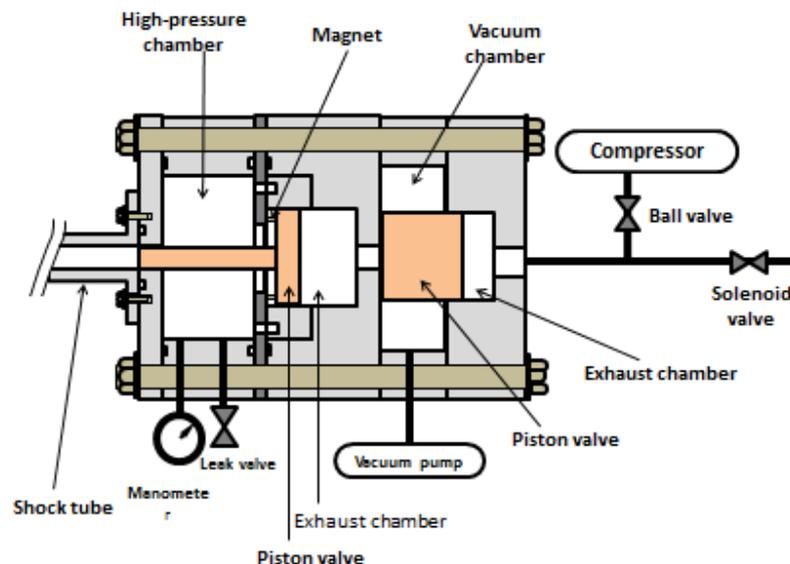


Fig.1 Diaphragm-less shock tube

無隔膜式衝撃波管の駆動原理は以下の通りである。

- 1) 電磁弁を閉じ、コンプレッサーから高圧空気を装置内部へ供給することによって、両ピストン弁が衝撃波管入口および高圧室-真空室間の通気口を塞ぐ。
- 2) コンプレッサーから注入される高圧空気はピストン弁に設けられている通気孔を通して流れ、高圧室に流入される。
- 3) 高圧室の昇圧の間に、真空室内部を真空ポンプにより真空排気する。

- 4) 高圧室が所定の圧力に達し、真空室圧力が安定した後、コンプレッサーに繋がるボールバルブを閉鎖する。
- 5) 電磁弁を開口することによって、真空室側ピストン弁背後の圧力が減圧され、真空室側ピストン弁が移動を開始し、高圧室-真空室間の通気によって高圧室側ピストン弁背後の圧力が真空近くへ減圧される。
- 6) 高圧側ピストン背後の減圧が開始された直後は、ピストン弁に設置されている永久磁石の吸着作用によってピストン弁の位置が保持されるが、圧力作用が磁力を上回った時、衝撃波間入口が開閉される。
- 7) 高圧室内の高圧ガスが衝撃波管内に流れ込み、衝撃波管内の空気を圧縮することで管内に衝撃波を発生させる。また、衝撃波管を飛行体の加速管として利用する際には、高圧の高密度空気が飛行体を押出す作用によって衝撃波管出口から飛行体が射出される。

図2に本実験装置によって生成された衝撃波による圧力変動データおよび可視化画像を示す。高圧室の初期圧力は約7気圧であり、理論的に予測された圧力変動値と同等の値が得られ、可視化実験においても、衝撃波管出口から明確な球状衝撃波の放出が確認され、本実験装置が設計通りの性能を有することが確認された。

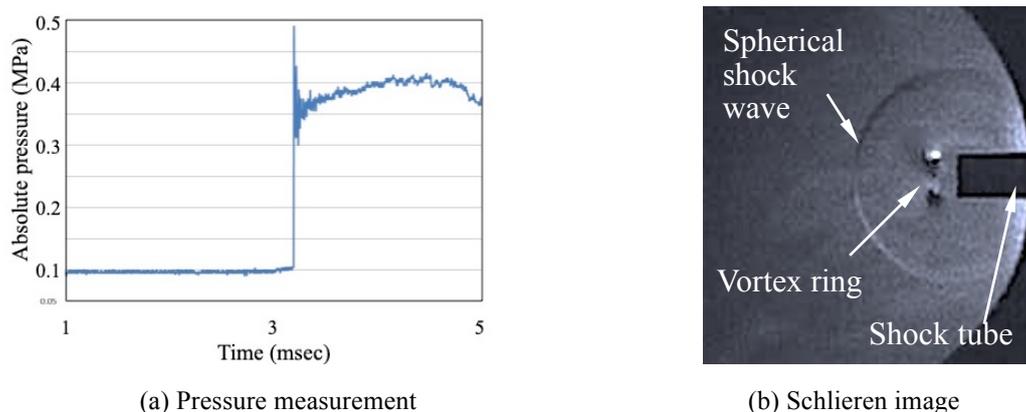


Fig.2 Pressure measurement and optical observation of a shock wave discharged from shock tube exit

(2) キャビテーションノズルによる水中衝撃波生成の試み

キャビテーションの気泡崩壊運動を利用した水中衝撃波生成の可能性を探るため、上記の衝撃波生成装置に接続して使用できるキャビテーション生成管を試作し、実験を行なった。作製したキャビテーション生成管の断面図を図3に示す。管の先端部には、管軸に対して垂直に直径1mmの2つの細孔が設けられており、少量の水を水槽内へ衝撃波管の圧力によって噴出させることによって、管外にキャビテーションを発生させることを想定した。

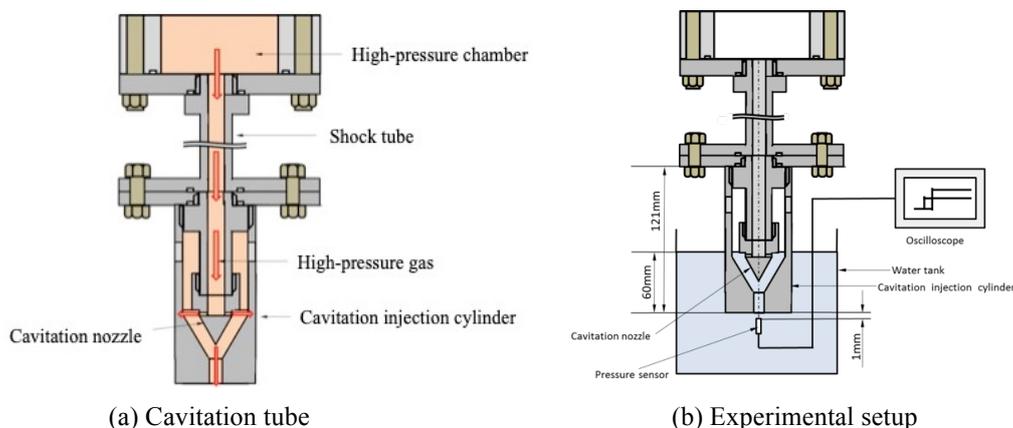


Fig.3 Schematic of cavitation tube

図4にキャビテーション管から噴射された水の様子を捉えたシュリーレン画像を示す。噴射自体には成功したものの、水および高圧ガスの噴出のみの観測に留まり、噴射された気泡群の運動が起こらないことから、キャビテーション気泡の生成に至っていないと判断された。その最大の原因は、噴射圧力値が低過ぎることであると考えられた。

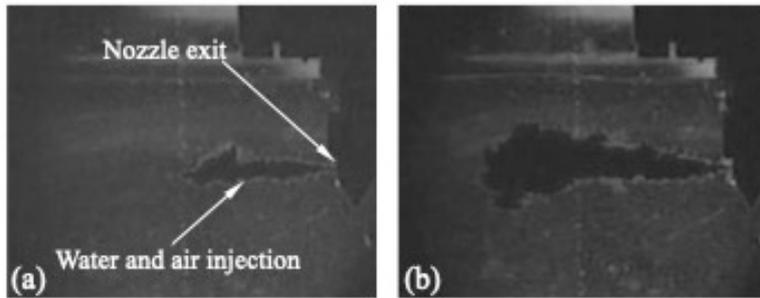


Fig.4 Schlieren images of water injection from cavitation tube

(2) 飛翔体の水中貫入による水中衝撃波生成の試み

高圧ガス駆動の無角膜衝撃波生成装置を用いて、シリコンチューブ等の弾性体や弾性膜の水面衝突およびキャビテーション管の接続によるキャビテーション気泡生成と気泡崩壊運動による水中衝撃波生成が試みられたが、いずれも十分な強さの水中衝撃波を確認することができなかった。以上から、抜本的な手法の見直しが図られ、本衝撃波生成装置を用いて水に対して最も強い衝撃を与える方法として飛翔体の撃ち込みが試みられた。実験構成を図5に示す。水槽は、幅400 mm×奥行260 mm×高さ300 mmである。水槽に水を満たし、衝撃波管の射出管出口を水槽の中央、水面から20 mm離れた位置に設置した。飛翔体(直径10 mm、長さ30 mmの円柱形状)は、重力方向(水面に対し垂直下向き)に発射される。水中衝撃波の圧力計測には、ピエゾ素子(PVDF)のニードルプローブ圧力変換器を使用した。

図6は、衝撃波管から射出された飛翔体が、約100 m/sの速度で水中に貫入した際の高速度ビデオ画像である。貫入した飛翔体は、スーパーキャビテーションに覆われた状態で水中を進む様子が観察された。一方、水中衝撃波の発生を確認するためにシュリーレン撮影を行った結果を図7に示す。図7は、飛翔体が水中に入射した直後の様子であり、球状に広がる複数の衝撃波面が形成されていることがわかる。また、生成された水中衝撃波の圧力変動を計測した結果が図8の波形であり、最大圧力は、当初目標としていた3 MPaを優に超える7 MPa(70気圧)以上の値が得られた。7 MPaは水中気泡の崩壊運動を誘起するに十分な圧力であり、応用可能な強さの水中衝撃波を容易に発生させられることが明らかとなった。

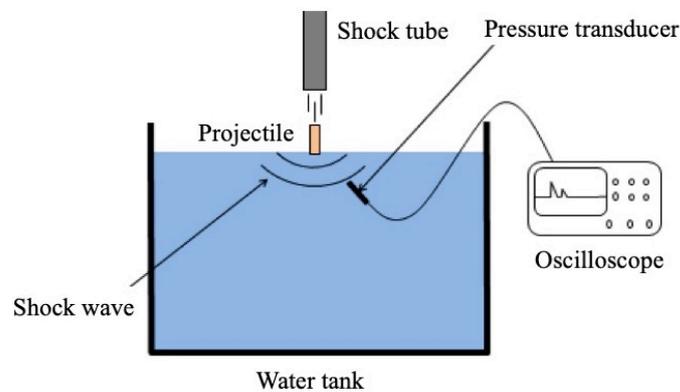


Fig.5 Pressure measurement of underwater shock waves

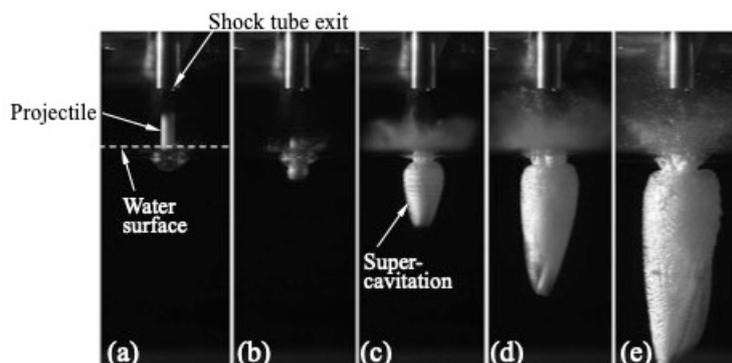


Fig.6 High-speed images of underwater penetration of a projectile

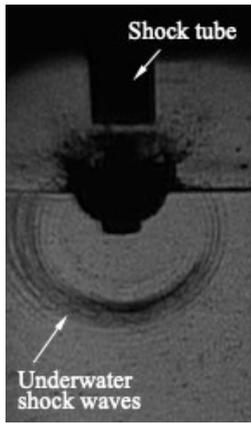


Fig.7 Schlieren image of shock waves

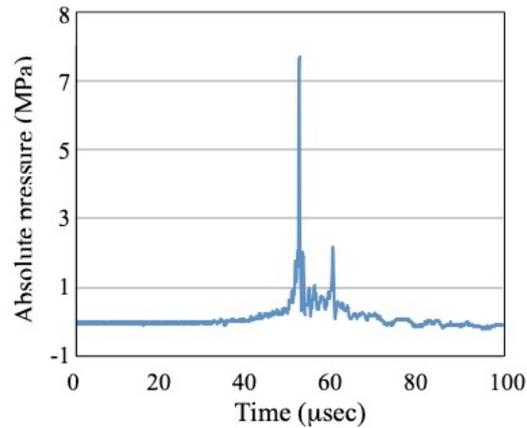


Fig.8 Pressure records of underwater shock waves

以上から、無隔膜衝撃波生成装置を活用した飛翔体の高速水面衝突方式であれば、安全かつ省エネルギーで強い水中衝撃波が実験室レベルで容易に生成できることが示された。本研究成果によって、従来の爆薬や放電方法に代わる新たな水中衝撃波の実験装置の構築が可能となり、今後の水中衝撃波利用技術の発展に貢献できると考える。

<引用文献>

- (1) 阿部晃久, 菅原和也, 山田洋平, 磁力支援型高速開口弁を有する無隔膜衝撃波管の性能評価, 日本機械学会論文集 (B編), 第79巻, 806号, 2013, pp.1973-1984

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- (1) Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Fundamental Study on Sterilization Effect of Underwater Shock Waves with Cavitation Bubbles on Marine Bacteria, Proceedings of 7th PAAMES and AMEC2016, AMEC 2016-4D3-072, 2016, pp.1-6, 査読有
- (2) Kota Nishibayashi, Jingzhu Wang and Akihisa Abe, Experimental Observation on Generation Frequency of Shock Waves in Cavitation Flow, Proceedings of 7th PAAMES and AMEC2016, AMEC 2016-3C2-075, 2016, pp.1-4, 査読有
- (3) Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Yiwei Wang, Chenguang Huang, Fundamental Study of Sterilization Effects on Marine *Vibrio* sp. in a Cylindrical Water Chamber with Supply of Only Underwater Shock Waves, Received 27 October 2017; Received in revised form 28 November 2017; Accepted 30 November 2017, Ultrasonics-Sonochemistry, Vol.42, issue, 2018, pp.541-550, 査読有
DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.11.047
- (4) Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Sterilization Effects on a Marine Bacterium using Underwater Shock Waves with Induced Bubbles in a Cylindrical Water Chamber, Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering (ISME), B09-216, 2017, pp.341-346, 査読有
- (5) Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Nobuyuki Ito, Kota Nishibayashi, Strength and Frequency of Underwater Shock Waves Related to Sterilization Effects on a Marine Bacterium, 31th International Symposium on Shock Waves, Nagoya, 2017, ISSW31 full paper package in a USB memory, Paper No. SBM000302, pp.1-6, 査読有
- (6) Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Taketoshi Koita, Mingyu Sun, Contribution of Cavitation Generation to Shock Wave Sterilization Effects in a Narrow Water Chamber, 2017/ 7/9-14, 31th International Symposium on Shock Waves, Nagoya, 2017, ISSW31 full paper package in a USB memory, Paper No. SBM000165, pp.1-6, 査読有
- (7) Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Taketoshi Koita, Mingyu Sun, Yiwei Wang, Chenguang Huang, Study of Sterilization Effects on Marine *Vibrio* sp. using Interaction of Cavitation with Shock Wave in a Narrow Water Chamber, Journal of Applied Physics 124, 213301, 2018, pp.1-11, 査読有, 国際共著
DOI: 10.1063/1.5052521
- (8) Y. Huang, J. Wang, A. Abe, Y. Wang, T. Du, C. Huang, A Theoretical Model to Estimate Inactivation Effects of OH radicals on Marine *Vibrio* sp. in Bubble-Shock Interaction, Ultrasonics -Sonochemistry, S1350-4177 (18) 30880-0, 2018, 査読有, 国際共著
DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.10.001
- (9) Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Yiwei Wang, Experimental Study on Interaction of Multiple Cylindrical Bubbles with Underwater shock wave, Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018), 2018, Paper ID5-0109, pp.1-4, 査読有, 国際共著

(10) Jingzhu Wang, Akihisa Abe, Shigeru Nishio, Yiwei Wang, Chenguang Huang, Sequential observation of rebound shock wave generated by collapse of vapor bubble in BOS system, Journal of Visualization, Vol.21, Issue 5, 2018, pp.695-710, 査読有, 国際共著
DOI: 10.1007/s12650-018-0488-0

〔学会発表〕 (計 10 件)

- (1) 石川貴大, 藤本岳洋, 傾斜衝突下の予き裂三点曲げ破壊試験片のき裂進展挙動解析, 日本機械学会, M&M2016 材料力学カンファレンス, 神戸大学六甲台第二キャンパス, 2016 年 10 月
- (2) 石橋正晃, 松山靖典, 藤本岳洋, 衝撃試験と数値解析を用いた破壊じん性評価法に関する研究, 日本機械学会, M&M2016材料力学カンファレンス, 神戸大学六甲台第二キャンパス, 2016年10月
- (3) 石川貴大, 小椋隆寛, 藤本岳洋, 衝突体中の動的破壊における打撃端形状依存性に関する研究, 日本機械学会, 第29回計算力学講演会(CMD2016), No. 086, 名古屋大学東山キャンパス, 2016年9月
- (4) 三石 学, 藤本岳洋, き裂進展経路予測理論によるぜい性材破壊挙動の評価, 日本計算工学会, 第 21 回計算工学講演会, No. 100211, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月
- (5) Jingzhu Wang, Yuka Nakatani, Akihisa Abe, Sterilization Effects on Marine *Vibrio* sp. under Different Conditions of Underwater Electric Discharges in a Cylindrical Water Chamber, 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, 1D1-4, pp.1-5, ヴェルクよこすか(横須賀市立勤労福祉会館), 2017 年 3 月
- (6) 玉木雄祐, 阿部晃久, 下川朋之, キャビテーション噴流の壊食に及ぼす水中衝撃波の効果に関する研究, 第 88 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp.77-78, 岡山コンベンションセンター(岡山), 2018 年 10 月
- (7) 玉木雄祐, 阿部晃久, 下川朋之, キャビテーション噴流中のリバウンド衝撃波の船底付着物除去効果に関する研究, 平成 30 年度衝撃波シンポジウム, P-03, pp.1-4, 横国大(横浜), 2019 年 3 月
- (8) 中村峻登, 西尾 茂, 宋 明良, 燃料インジェクター内におけるストリングキャビテーションの発生と 3 次元流場構造の分析, 可視化情報学会誌, Vol.38, Suppl. No.1, 東京, 2018 年 9 月
- (9) 宗村宏晃, 西尾 茂, 宋 明良, 側方気流を受ける液体噴流の流場構造変化, 可視化情報学会誌, Vol.38, Suppl. No.1, 東京, 2018 年 9 月
- (10) 岸田強志, 藤本岳洋, 複雑な混合モード下の破壊力学パラメータ評価に関する研究, 日本機械学会第31回計算力学講演会講演論文集, 048, 徳島大学, 2018年11月

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名 : 西尾 茂
ローマ字氏名 : NISHIO, Shigeru
所属研究機関名 : 神戸大学
部 局 名 : 大学院海事科学研究科
職 名 : 教授
研究者番号(8 桁) : 30208136

研究分担者氏名 : 藤本 岳洋
ローマ字氏名 : FUJIMOTO, Takehiro
所属研究機関名 : 神戸大学
部 局 名 : 大学院海事科学研究科
職 名 : 教授
研究者番号(8 桁) : 60314514