

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：58001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12393

研究課題名(和文) 不発弾海中爆破処理の影響評価と積極的環境負荷低減手法の構築

研究課題名(英文) Impact assessment of unexploded ordnance disposal at the seafloor and the construction of aggressive environmental load reduction techniques

研究代表者

比嘉 吉一 (HIGA, Yoshikazu)

沖縄工業高等専門学校・機械システム工学科・教授

研究者番号：20335368

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：不発弾海中爆破処理問題における影響評価を実験力学ならびに計算力学的視点により明らかにした。研究期間中に実施した成果は以下のとおりである：(1)海中不発弾爆破処理条件となる炸薬量、海底土壌および処理水深に依存した海中衝撃波伝ば挙動及び弾殻/炸薬/土壌等の一次破片の飛散挙動について明らかにした。(2)与圧負荷制御可能な小型可視化水槽を設計製作し、処理水深を模擬した環境下での海中衝撃波伝ば挙動の直接観察ならびに圧力-時間履歴の計測を可能とした。(3)以上の成果をベースに、海中不発弾処理時の避難半径縮小化を目指した施工方法について実験力学および計算力学的視点から検討可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験力学および計算力学的視点により海中での不発弾爆破処理問題を明らかにすることで、理論的根拠に基づき避難区域が設定され、さらに当該避難区域を積極的に縮小化できる可能性を検討するための方法論を明らかにした。避難海域内の活動を制限することに起因する経済活動の停止および損失を最小限に抑えることができることは極めて有用な知見となる。一方、金属・土壌動特性を律速する固体力学分野に爆発的な燃焼を記述した熱力学+反応場と海水を律速する流体力学分野を含め、複層的かつ複雑に関連したマルチフィジックス現象を取り扱う問題であることから、学術的意義は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the environmental impact assessment of underwater unexploded ordnance disposal from the perspectives of experimental mechanics and computational mechanics. The results of the investigation during the study period are as follows:1)The propagation behavior of underwater shock waves and the behavior of fragments such as shells, explosives, and soil were revealed in response to the conditions of UXO detonation (explosive amounts, seabed soil and processing water depth, etc.). 2)A small visualization tank that can control the internal pressure of the container was designed and manufactured, making it possible to directly observe the propagation of underwater shock waves in an environment that simulates the water depth and measure the pressure-time history. 3)Based on the above results, it was shown that it is possible to consider a method to reduce the evacuation area during underwater UXO detonation from the perspectives of experimental and computational mechanics.

研究分野：計算固体力学，マルチフィジックス

キーワード：海中不発弾処理 数値シミュレーション 避難海域 可視化水槽 水中衝撃波 一次飛散物

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

沖縄県においては、戦後70余年を過ぎた今日に至っても、約2000トンの不発弾が残存することが報告されている。平成29年度は処理件数558件、総重量21.9トンの処理実績があるものの、このペースで処理したと仮定すると、80～100年はかかることが試算される。このような状況に鑑み、申請者らは不発弾処理の安全化処理技術に貢献するため、平成28年度～30年度の3カ年で「計算力学的視点に立脚した不発弾安全化処理のための避難マップの作成」と題して、陸上での不発弾処理時の理論的「避難半径」の算定と、積極的な「避難半径縮小化」を目指した処理壕の提案を行っている。申請課題で注目する海中で発見される不発弾は、年間処理実績の10%強を占めており、その多くが港湾内の航路確保、消波ブロック施工に際しての浚渫作業において海底面・海底下で発見されている。これらの多くは陸上へ移送され、保管庫での厳重な管理ののち、処理上にて処理されるが、不発弾の損傷度が大きく移動時の起爆が予測される場合には陸上への移送・処理ができないため、その場での処理となる。この際の避難半径については、爆発にともなう衝撃波伝ば速度が空気中の約4倍強となることから、処理現場を中心とした半径より、概ね「航行禁止区域300m」「入水禁止区域3000m」と広範囲に規制をしている。したがって、その経済的損失は極めて大きいものとなる。海中での処理については、海水そのものの抵抗により空気中に比して一次飛散物の脅威は軽減されるものの、海中における衝撃波伝ば速度に依存して広範囲に影響が及ぶため、これら衝撃波による1)未発見不発弾・機雷の起爆の脅威、2)周辺航路、港湾構造物への損傷および3)周辺海洋生物を含めた生態系への影響が懸念されている。しかしながら、水産資源管理の側面から3)に関する学術報告があるものの、海中での不発弾処理に起因した当該影響評価の報告事例は皆無である。

### 2. 研究の目的

不発弾海中爆破処理における影響評価を実験力学ならびに計算力学的な視点の両面から明らかにすることで、対象海域へ及ぼす環境への影響を積極的に低減化する処理技術の提案を通して当該問題への貢献を行うものである。具体的には、海中における不発弾爆破処理条件である処理炸薬量、周辺海域/海底地形の違いが、一次飛散物および水中衝撃波伝ば挙動に及ぼす影響について、申請課題に記載のスケールモデル用小型実験水槽を設計制作し、これを用いた可視化実験により詳細な観察を実施する。あわせて、処理炸薬量、周辺海域/海底地形の違いといった種々の影響因子を導入した計算機実験により明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究の遂行のために必要とされる課題は、次の2つの大項目：1.計算力学的視点に基づく不発弾海中爆破処理現象の解明、2.実験力学的視点に基づく不発弾爆発処理問題の解明であり、それぞれの大項目に以下に示す細目を設定し、それぞれの課題解決を実施した

1(a)海中衝撃波伝ば問題のモデル化と数値シミュレーション：不発弾爆破処理によって海水中に誘起される「衝撃波伝ば挙動」および弾殻破片などの「一次飛散物挙動」について検討する目的から、沖縄高専に既設の汎用数値シミュレーションソフトウェアにより海中衝撃波伝ば問題のモデル化を行い、1)炸薬量、2)処理水深に依存した海中での不発弾爆発現象について詳細な検討を行う。

1(b)海底面爆発問題のモデル化と数値シミュレーション：仮想港湾モデルの数値シミュレーションモデルを作成し、計算機実験により海中衝撃波伝ば挙動を明らかにする。ここでは、1)炸薬量、2)処理海底の水深ならびに3)海底地形に依存した衝撃波伝ば挙動を明らかにする。数値シミュレーション結果の詳細な観察より、効果的な環境影響低減化施工手法について検討を実施する。

2(a)可視化用小型実験水槽の設計製作：不発弾爆破処理によって海水中に生ずる「衝撃波伝ば挙動」を超高速度カメラによる可視化実験により明らかにする目的から、衝撃波伝ばによる瞬間的な高圧力に対する耐圧とカメラ観察に資する観察窓を具備した「可視化用小型実験水槽」を設計製作する。初年度は、作成した実験水槽でのスケールモデルによる可視化実験の試行を行い、次年度に向けた実験データの収集を進める。

2(b)海中爆発問題の可視化実験：実験水槽内に、「海底地形」「水深」「周辺構造物」を模した仮想港湾モデルを作成し、モデル内での海中衝撃波伝ば挙動の可視化を行う。以上の観測結果は、海底面爆発問題のモデル化と数値シミュレーションの初期値データとして利用される。

### 4. 研究成果

#### (1) 海底面・海中爆発現象の数値シミュレーションによる検討

課題1)「計算力学的視点に基づく不発弾海中爆破処理現象の解明」では、不発弾爆破処理時の海水中に誘起される「衝撃波伝ば挙動」および弾殻破片、海底面土壌などの「一次飛散物挙動」について明らかにする目的から、海中衝撃波伝ば問題の数値シミュレーションモデルを作成し、これらの数値シミュレーションを通して、1)炸薬量、2)処理水深に依存した海中での不発弾爆発現象について詳細な検討を実施した。

\* 海底面・海中における不発弾爆発現象のモデル化と数値シミュレーション

不発弾および不発弾直下の海底土壌、不発弾上部の海水領域の離散化について、可変ピッチ SPH 要素を導入することで、計算機資源を確保しながら、観察すべき弾殻、炸薬、海底土壌および海水の高速変形挙動について計算機実験による観察を行った。図 4-1 に作成した数値シミュレーションモデルを示す。モデルは、(1)爆薬(不発弾)、(2)弾殻、(3)海底土壌、(4)海水を解析対象とし、図のように配置する。図中単位は cm である。ここで、問題の対称性から、xy 平面ならびに yz 平面に平面对称性を有する半径 300cm 円柱の 1/4 領域を解析対象とした。ここでは水深を 10m、炸薬量を 50kg 通常爆弾のみの海底爆発問題を取り扱うこととし、爆弾形状については球形形状として単純化している。また、不発弾直下に配した土壌および直上の海水箇所については、段階的に離散化精度を粗とする可変ピッチ SPH 要素で離散化を実施した。離散化は炸薬、弾殻を 10mm ピッチ、海水、海底土壌は 20~80mm ピッチであり、SPH 要素は炸薬で 2,641,244 粒子、弾殻が 3,426 粒子、海底土壌および海水の要素数はそれぞれ 8,886,099 粒子および 4,445,758 粒子である。

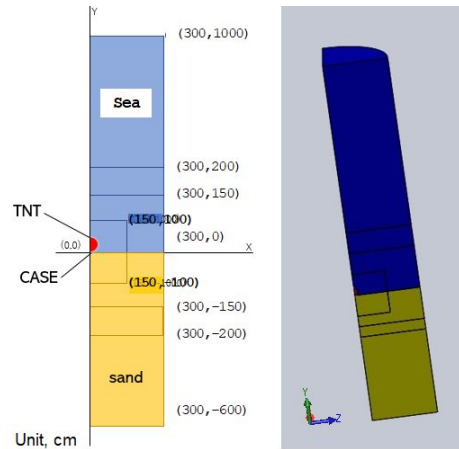


図 4-1 海中衝撃波伝ば挙動解析モデル

図 4-2 に海底土壌を島尻マージとした際に観察された数値シミュレーション結果として、粒子密度分布の時間履歴を示す。不発弾の爆発とともに海水中および海底土壌内を高速の圧力波が伝ばし、低粒子密度領域が形成されていることが確認できる。これは不発弾爆発時に生成されるクレーターを示しており、時間経過とともに、クレーター形状が拡大していることが観察される。一方、粒子速度データは海底土壌を島尻マージとした場合が 2100m/s に対して、ジャーガルとした場合には 1821m/s となることを確認した。前節の表 4-1 に比して、ジャーガルについては約 10% 程度減じた数値シミュレーション結果となっているが、可変ピッチ SPH 要素による離散化をすることで、高精度で弾殻・炸薬・海底土壌および海水の高速変形場の解析が可能となることを確認した。これらをベースに、弾殻・炸薬および海底土壌といった一次飛散物の挙動を捕捉することで、避難半径を縮小化する海底面・海中不発弾処理の施工方法について、計算機実験により検討可能となることが示唆される。

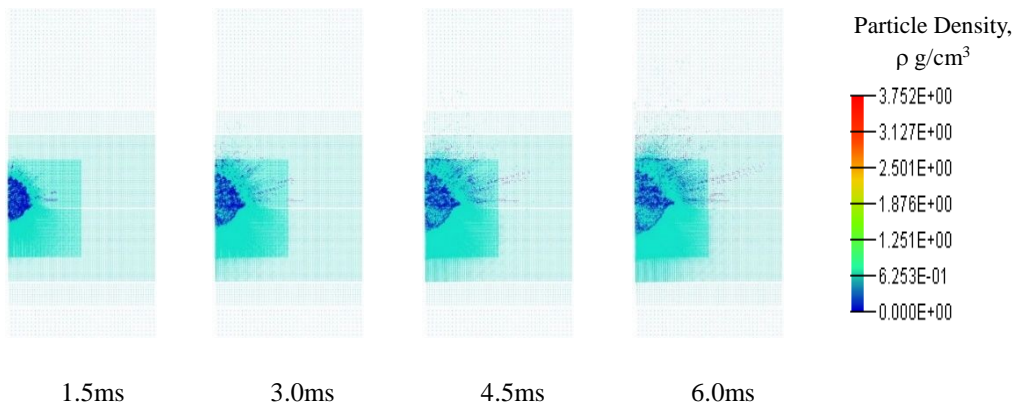


図 4-2 粒子密度分布の時間履歴, 50kg 通常爆弾, 水深 10m, 島尻マージ

(2) 海中爆発問題の可視化実験槽の設計製作および与圧負荷による海中衝撃波伝ば現象の可視化

課題 2) 「実験力学的視点に基づく不発弾爆発処理問題の解明」では、海洋物質の小規模モデル中の衝撃特性評価を行う目的から、衝撃波伝ばによる瞬間的な高圧力に対する耐圧と高速度カメラによる可視化に必要な観測窓を具備した「可視化用小型実験水槽」の設計製作を行う。ここでは、可視化用小型実験水槽に具備する観察窓、フランジおよび締結ボルト等の設計に数値シミュレーションを用いることで実験水槽の形状を決定する。つづいて、形状決定された「可視化用小型実験水槽」における実験条件を決定するため、実験水槽内に水深を模擬できるよう与圧を導入することで、水深に依存する静水圧導入時の海水中の衝撃波伝ば特性について、圧力センサーによる時間履歴を計測する。

「可視化用小型実験水槽」の設計製作にかかる数値シミュレーション

図 4-3 に実験水槽の数値シミュレーションモデルを示す。対象とする小型実験水槽は円筒形状とするため、不発弾を模した爆薬からの同一距離での圧力は一樣であると予測される。したがっ

て、解析の対称性から、同図に示すような軸対称モデルを作成した。寸法の単位は mm とする。実験水槽を構成するフランジ、締結ボルトおよび観察窓の耐久性や安全性を評価する目的から、実際の可視化実験で供する爆薬量よりも多い爆薬量で解析を行うこととした。なお、同図中の中心円の寸法  $R$  を変更することで、表 4-1 に示すように爆薬量調整している。水槽の素材は一般用工具鋼、爆薬は高性能可塑性爆薬 (SEP6) として解析を行う。

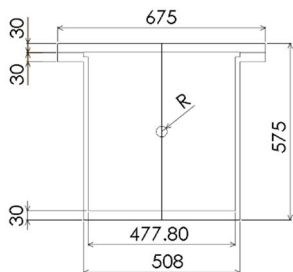


表 4-1 爆薬量とその寸法

爆薬量 [g]	半径 $R$ [mm]
30	17.6
60	22.2
100	26.3

図 4-3 数値シミュレーションモデル

爆薬量を変化させた場合の可視化小型実験水槽内に作用する圧力分布を図 4-4 に示す。いずれの図も、それぞれの爆薬量で実験水槽に作用する圧力が最大となった時点のスナップショットにより比較することとした。可視化実験に供する爆薬量の増加にともない、実験水槽に作用する圧力は大きくなっていることが観察される。フランジ形状の容器上面(蓋)と下面では回転対称軸である中央部分に圧力が集中しているのに対して、側面に生ずる圧力分布は極めて小さいことが確認できる。これは、容器側面に比して、上面・下面の板厚が厚く質量が重くなり、その結果、高速度で伝ばする圧力波の反射波が大きくなることに起因している。なお、容器周囲は大気圧中の空気となっているため、透過圧力波はただちに減衰するため、これらの影響は極めて小さいことも確認できた。

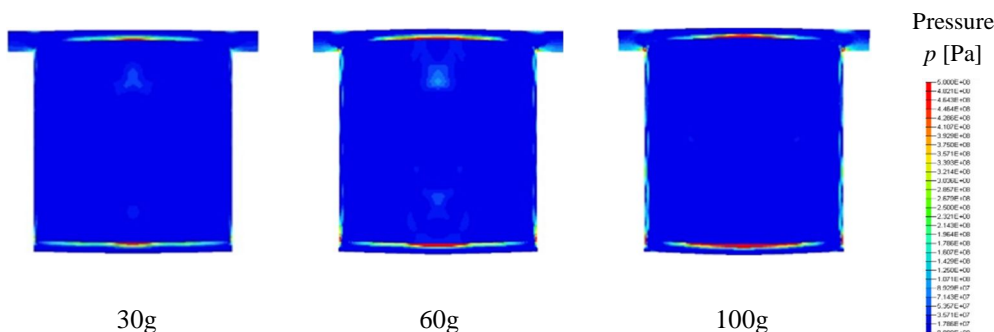


図 4-4 爆薬量の違いが可視化水槽内圧力に及ぼす影響

以上の数値シミュレーション結果を受け、所要の可視化実験に供する実験水槽の諸元を決定し、図 4-5 に示すような実機を設計製作した。実験水槽の大きさは図 4-5(a)中に示す概略寸法の通りであり、観察用窓は 1 辺 200mm の正方形で板厚 10mm のアクリル板とした。実験水槽の材料には加工性の良い一般構造用圧延鋼材 (SS400) を選択し、呼び系 500A (外径 508 mm) の圧



図 4-5 可視化用小型観察水槽の概略寸法, CAD ソフトウェアによるアセンブリモデルおよび実機写真

力配管用鋼管および SOP 形フランジ（上面蓋）・BL 形フランジ（側面観察窓）を使用する。また，圧力配管用鋼管と SOP 形フランジの接合には溶接接合を用いている。作成した可視化用小型実験水槽は，総重量が約 300kg，容積 92.7L である。

#### 与圧環境下での海中衝撃波伝ば挙動の観察

前項で設計製作を行った「可視化用小型実験水槽」を用いて，海底面を模した環境下での衝撃波伝ば挙動および一次破片の飛散挙動を観察する。可視化実験は，熊本大学産業ナノマテリアル研究所内爆発実験施設爆発ピット A にて実施した。図 4-6 に示す模式図のように海砂 50kg を敷き詰めた後，塩分濃度 4% とした疑似海水を 90L 投入する。外部コンプレッサーにより容器内を静的に 1atm (0.1MPa) 加圧することで，水深 10m の海底面を模擬した。不発弾モデルには銅雷管を使用し，雷管位置より 167mm 直上位置に配した圧力センサー（PCB 社製 M109C11）によりその時間履歴を取得した。

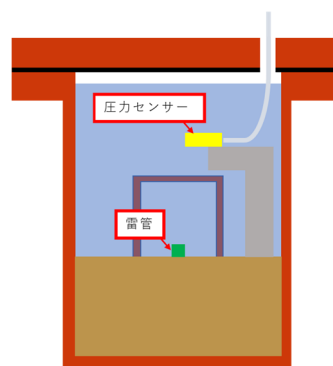
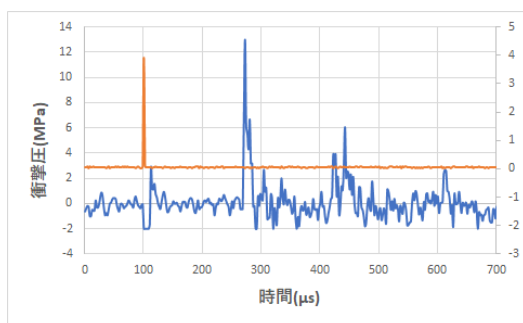


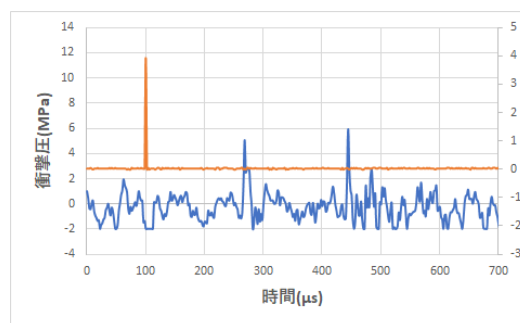
図 4-6 与圧環境下での海中衝撃波伝ば挙動観察実験の模式図

図 4-7 に(a)水槽内へ水深 10m を模した 0.1MPa 与圧した場合および(b)与圧なし(大気圧)の圧力 - 時間履歴を青色波形で示す。なお，図中の橙色は雷管起爆時のパルス波形を示している。雷管起爆から約 160 $\mu$ s 後にピーク圧力を示しており，これが雷管起爆により生じた高圧力であることを示している。(a)与圧ありのピーク圧力が約 13MPa であるのに対し，(b)与圧なし(大気圧)のピーク圧力は約 5MPa となっており，雷管起爆の中心より同心円状に伝ばする高圧力波(海中衝撃波)は与圧に依存したピーク圧力を生ずることが確認できた。また，第 1 ピーク圧力より約 200 $\mu$ s 後に現れる第 2 ピーク圧力は，いずれも実験水槽壁面からの反射圧力波であることが確認できる。

以上の成果より，「可視化用小型実験水槽」内に仮想海底面を模擬した上で，所定の海中不発弾処理水深を模擬した水压を负荷した環境下において，一次破片の飛散状況ならびに衝撃波伝ば挙動の直接観察が可能であることを確認した。合わせて，海中衝撃波伝ば挙動ならびに一次飛散物を抑制する施工方法についても，当該実験水槽内でモデル実験を実施することで，その効果について検討できることが確認できた。



(a)与圧あり



(b)与圧なし

図 4-7 雷管起爆時の圧力 - 時間履歴

## 5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Hirofumi IYAMA, Hayato YAMAGUCHI, Masatoshi NISHI and Yoshikazu HIGA	4. 巻 12(11)
2. 論文標題 Study on High-Strain-Rate Deformation of Magnesium Alloy Using Underwater Shock Waves Generated by High-Voltage Electric Discharge of Thin Wire	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 1939
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/met12111939	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Higa Yoshikazu, Shimojima Ken, Higa Osamu, Iyama Hirofumi and Itoh Shigeru	4. 巻 Vol.6, No.1
2. 論文標題 Computational Simulation for the Evaluation of a Food Softening Process Using Underwater Shockwaves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ETP International Journal of Food Engineering	6. 最初と最後の頁 24～29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18178/ijfe.6.1.24-29	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yoshikazu HIGA, Hirofumi IYAMA and Shigeru ITOH	4. 巻 17(2)-2
2. 論文標題 Computational modeling and simulation for unexploded ordnance disposal problem at the seabed	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The International Organization of Scientific Research Journal of Mechanical and Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 40-44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9790/1684-1702024044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yoshikazu HIGA, Hirofumi IYAMA, Ken SHIMOJIMA, Osamu HIGA and Shigeru ITOH	4. 巻 13(3)
2. 論文標題 Experimental observation for dynamic characteristics of “Shimajiri Mahji” and its evaluation using computational simulation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The International Journal of Multiphysics	6. 最初と最後の頁 241-251
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21152/1750-9548.13.3.241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hirofumi IYAMA, Yoshikazu HIGA, Masatoshi NISHI and Shigeru ITOH	4. 巻 13(3)
2. 論文標題 Magnesium Alloy Forming using Underwater Shock Wave by Wire Electric Discharge	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The International Journal of Multiphysics	6. 最初と最後の頁 269-282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21152/1750-9548.13.3.269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計12件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 比嘉 吉一, 井山 裕文, 下嶋 賢
2. 発表標題 不発弾海中爆破処理問題の影響評価～数値シミュレーションによる検討～
3. 学会等名 2022年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上原 達也, 比嘉 吉一, 井山 裕文
2. 発表標題 実弾殻形状を考慮した地表面爆発問題のモデル化と数値シミュレーション
3. 学会等名 2022年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 比嘉吉一・井山裕文
2. 発表標題 計算力学的アプローチによる不発弾安全化処理技術への貢献
3. 学会等名 熊本高専メガミーティング2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 比嘉吉一
2. 発表標題 海中爆発問題の数値シミュレーション - 水深の違いが一次飛散物の運動に及ぼす影響について -
3. 学会等名 第4回衝撃波応用技術研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上原達也・比嘉吉一
2. 発表標題 地表面爆発問題の大規模数値シミュレーション
3. 学会等名 令和3年度琉大工学部・沖縄高専学生研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内間零斗・比嘉吉一
2. 発表標題 弾殻破片形状を考慮した一次飛散物の弾道シミュレーション
3. 学会等名 令和3年度琉大工学部・沖縄高専学生研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 稲嶺奏人・比嘉吉一
2. 発表標題 不発弾海中爆破問題のモデル化と数値シミュレーション
3. 学会等名 令和3年度琉大工学部・沖縄高専学生研究発表会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Yoshikazu HIGA, Hirofumi IYAMA, Ken SHIMOJIMA and Shigeru ITOH
2. 発表標題 Computational Modeling and Simulation for Undersea Explosive Ordnance Disposal Problem
3. 学会等名 Yellow Sea Rim Workshop on Explosion, Combustion and other Energetic Phenomena for Various Environmental Issues (YSR2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takafumi NISHIBASHI, Hirofumi IYAMA and Yoshikazu HIGA
2. 発表標題 Design of Small Experimental Vessel for Visualizing of Underwater Shock Wave
3. 学会等名 Yellow Sea Rim Workshop on Explosion, Combustion and other Energetic Phenomena for Various Environmental Issues (YSR2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshikazu HIGA, Hirofumi IYAMA, Ken SHIMOJIMA, Osamu HIGA and Shigeru ITOH
2. 発表標題 SPH computation for soil surface explosion problem - the effect of different soil characteristics on a fragment behavior -
3. 学会等名 2019 International Conference on Design, Mechanical and Electrical Engineering (DMEE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 比嘉 吉一, 井山 裕文, 下嶋 賢
2. 発表標題 海中不発弾処理問題に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第73期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 比嘉 吉一, 井山 裕文, 下嶋 賢, 伊東 繁
2. 発表標題 海中爆破処理問題のモデル化と数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会九州支部沖縄講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

受賞: 2019 International Conference on Design, Mechanical and Electrical Engineering (DMEE2019) Best Presentation Award, 2019年9月8日受賞,  
(Yoshikazu HIGA, Hirofumi IYAMA, Ken SHIMOJIMA, Osamu HIGA and Shigeru ITOH; SPH computation for soil surface explosion problem -the effect of  
different soil characteristics on a fragment behavior-)

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
研究 分 担 者	井山 裕文  (IYAMA Hirofumi)  (40300660)	熊本高等専門学校・生産システム工学系MIグループ・教授    (57403)	

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
---------	---------