

令和元年9月13日現在

機関番号：58001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01305

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Development of evacuation area map for unexploded bomb safety disposal processing based on computational mechanics perspective

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：計算力学的視点による不発弾の安全化処理技術に貢献する目的から、不発弾炸薬量、弾頭形状および土壌動特性の違いが、一次破片の飛散挙動に及ぼす影響について数値シミュレーションにより詳細に検討を行った。数多くの数値実験結果より、以下の成果を得た：(1) 沖縄県固有土壌「島尻マージ」の動特性を明らかにした。(2) 防護壁出口直径を2/3に減らすことで、約30～50%の一次飛散物を抑制できることを明らかにした。(3) 防護壁出口の制御により、積極的な避難半径の縮小化が可能であることを示した。(4) 得られた一次飛散物の予測到達距離を地理情報システムへ導入することで、仮想避難マップの作成が可能となることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

計算力学的視点に立脚した理論的根拠に基づく避難区域の設定ならびに避難区域の積極的な縮小化を目指した処理壕の設計を可能とすることで、区域内の活動を制限することで生ずる経済活動の停止とこれにともなう損失を最小限に抑えることが可能となる。

また、金属・土壌動特性を律速する固体力学分野へ爆発的な燃焼を記述する熱力学+反応場が複層的かつ複雑に絡まる問題を対象としたマルチフィジックス現象を取り扱うため、学術的意義は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of contributing to the safety processing technology of unexploded bombs from the computational mechanics perspective, we have investigated in detail by numerical simulation about the effect of the different explosive amounts, bombing shapes and dynamic characteristics of soils on the fragment behaviors. From a series of computational simulation, we have clarified as follows: (1) Dynamic characteristics of Okinawa's unique soil "Shimajiri Maaji" were clarified. (2) It was revealed that about 30 to 50% of fragments associated with soil surface explosion can be suppressed by reducing exit diameter of the liner plate application to 2/3. (3) It was shown that it is possible to reduce positively the radius of evacuation area by controlling the liner plate application. (4) It was shown that it is possible to create an evacuation map by introducing the estimated reachable distance of the fragments into the geographic information system.

研究分野：計算固体力学，マルチフィジックス

キーワード：不発弾処理 レート 数値シミュレーション ジャーガル 島尻マージ 土壌動特性 避難マップ ライナープレート

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

先の大戦において唯一の地上戦が行われたここ沖縄においては、戦後 70 年を迎えた現在においても、約 2000 トンの不発弾が埋没していると推測されており、過去の年間処理実績から平均値として算出されるペースで処理を行うと仮定しても、全ての不発弾処理に約 70 年も掛かることが試算される。したがって、一日も早い不発弾の安全化処理が要請される沖縄県内事情に鑑み、「不発弾発見技術の向上」、「安全化処理技術の発展」が喫緊の課題となっている。

一方、不発弾処理時の避難区域の設定および処理壕の設計は、その物理現象の理解をベースに行われるのではなく、処理現場で培われた経験則に立脚して行われているのが現状である。毎年数百件にも及ぶ不発弾処理を行うここ沖縄では、これら経験則に基づく避難区域内の活動制限によって、社会活動を含め公共交通機関等はストップし、各種経済活動に大きな損失を与えているのが現状である。

したがって、理論的根拠に基づいた避難区域の設定ならびに避難区域の積極的な縮小化を目指した処理壕の設計が可能となれば、区域内の活動を制限することで生ずる経済活動の停止とこれともなう損失を最小限に抑えることが可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、計算機シミュレーションにより得られた定量的な結果をベースに、不発弾処理時の避難半径を決定することを目的としており、不発弾の大きさ(炸薬量)、弾頭形状および土壌強度の違いを精緻にモデル化し、これらを導入した数値シミュレーションモデルによる計算機実験により、計算力学的視点に立脚した避難半径を決定する。さらに、不発弾爆発時に飛散する土砂、爆弾ケース金属片といった一次破片の飛散抑制効果と空気中を伝ばする衝撃波の広範囲の拡散防止が期待できる防護壁(ライナープレート)について、その形状・寸法を変化させた数値シミュレーションを実施し、防護壁の設計・施工法により積極的な避難半径の縮小化が可能であることを示す。

### 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.不発弾爆発問題シミュレーションによる一次破片飛散距離の推定、2.不発弾安全化処理に資する避難マップの構築であり、それぞれ、実験力学的および計算力学的視点による検討を行った。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)実験による島尻マージ土壌動特性の評価：沖縄県の固有土壌である島尻マージの土壌動特性評価は、国内共同利用施設である熊本大学パルスパワー科学研究所内・爆ごうピットにて、火薬誘起の衝撃波伝ば挙動の光学観察実験により行う。未知土壌へ入射/透過/反射する衝撃波挙動を数百 ns ~ 数  $\mu$ s オーダーで観察する目的から、超高速ビデオカメラ(最高 500 万コマ/s)により詳細なデータ取得を行う。これらのデータをもとに、土壌数値モデルに導入される各種パラメータの同定を行う。

1-(b)土壌数値モデルの精緻化：得られた土壌動特性を導入した数値シミュレーションを実施する。ここでは、不発弾種に関連した「炸薬量」「弾頭形状」をパラメトリックに変更することで、数十例に及ぶ計算機内での仮想爆発実験を行う。さらに、得られた膨大な計算データから作成した「粒子速度ベクトル」「粒子密度分布」の動画データより、島尻マージに特徴的な一次飛散挙動について詳細な検討を行うことで、導入した土壌数値モデルの精緻化を実施する。

2-(a) 1-(b)を導入した数値シミュレーションおよび 2-(b) 2-(a)に基づく避難マップの構築：粒子速度ベクトルの情報から土壌特性に依存する一次破片飛散距離を推定する。ついで、得られた数値シミュレーション結果から、一次破片の飛散距離を推定することで、避難半径の設定(避難マップの生成)を行う。

2-(c)防護壁施工による避難範囲縮小化の検討：防護壁(ライナープレート)を設置した数値シミュレーションモデルを作成し、ライナープレート形状、直径および出口面積に依存する一次破片の飛散挙動を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 島尻マージの動特性評価

沖縄県本島南部(糸満市真栄里地内)にて、機械ボーリングにより対象となる島尻マージのサンプリングを実施し、試料を乱さないよう、地表面から深度 0.50 m の地点よりシンウォールサンプルを入手した。同サンプルより厚さ 5 mm、50 mm 正方の土壌試料を切り出し、島尻マージ動特性評価の試料とした。図 1 に示すように、準備した試料をアクリル樹脂ブロック(PMMA:Polymethyl methacrylate)の間に挟み、上部に PV 管(Polyvinyl Chloride Pipe)で固定された SEP(爆ごう圧力 15.9 GPa、爆ごう速度 6970 m/s)と HABW(爆ごう圧力 12.4 GPa、爆ごう速度 4750 m/s)からなる爆縮レンズを設置した後、電気雷管により発破することで、爆ごう誘起の平面衝撃波を対象物に入射させる。この間、図面上部より PMMA と対象物との界面ならびに対象物と PMMA との界面においては、それぞれ入射波/反射波および反射波/透過波を生ずる。PMMA の中を通過する衝撃波の撮影は、シュリーレンの光学観測法を用いて行った。実験では、上部 PMMA の板厚を  $t=20, 30, 40$  mm とパラメトリックに変化させることにより、島尻マージ内へ入射する衝撃波速度を制御した。

入射衝撃波速度の違いに依存した透過衝撃波速度の違いを、観察した動画から衝撃波前縁の時間 - 移動距離を画像解析により衝撃波の速度を算出する。未知量である入射直前および透過直後の衝撃波伝ば速度については、既知量であるPMMAの衝撃波伝ば速度より Nonlinear Curve Fitting 法 (Berventon et al., 1969) を用いて決定した。つづいて、得られた速度データより、島尻マーゼの衝撃波速度  $U_s$ 、粒子速度  $u_p$  をインピーダンスマッチング法 (Hornberg et al., 1986) により算出し、 $U_s-u_p$  プロットを作成することで、島尻マーゼに固有の動特性である衝撃波伝ば速度  $C_0$  および Hugoniot 係数  $s$  を得る。既報の実験データと同様に、今回の実験データについても一次直線で近似できることを確認し、島尻マーゼに固有の動特性である速度  $C_0$  および Hugoniot 係数  $s$  のそれぞれが  $C_0=2.57 \text{ km/s}$ 、 $s=1.73$  となることを明らかにした。

つづいて、実験データから算出した動特性値の妥当性を検証するため、実験系と同様の数値シミュレーションモデルに上記の動特性を導入した計算機実験を行った。解析モデルはポリ塩化ビニル(PVC)、高速爆薬(SEP)、低速爆薬(HABW)からなる爆ごうレンズとアクリル樹脂(PMMA)、島尻マーゼで構成されており、図2に示すような寸法で配置する。なお、表示単位は mm としている。問題の対称性より、解析対象は 1/4 モデルであり、PVC、SEP、HABW、PMMA および島尻マーゼの全てを Tetrahedral element にて離散化した。計算モデルは汎用有限要素解析ソフトウェア HyperWorks-RADIOSS(Altair®)を用いて各要素に物性値を入力し計算を行う。

数値シミュレーション結果の一例として、PMMA - 島尻マーゼ界面および島尻マーゼ - PMMA 界面に対応する図中 A、B 点での圧力の時間履歴を図3に示す。A 点での入射圧力は計算結果が 2.71GPa、実験結果が 2.60GPa となっているのに対し、B 点での透過圧力は計算結果が 1.84GPa となり、実験結果である 2.24GPa に比べて小さく見積もられているものの、おおむね良い結果となっている。以上の結果から、光学観察により得られた島尻マーゼの動特性は妥当であると結論付けた。

## (2) 土壌動特性の違いが一次破片の飛散挙動に及ぼす影響

沖縄県固有の土壌であるジャーガル (Higa et al., 2017) ならびに今回の研究成果で明らかにした島尻マーゼに加え、乾燥土 (Luccioni et al., 2009) の以上3種類の「土壌動特性」の違いが、不発弾弾殻 (金属)、炸薬および土壌で構成される一次破片の飛散挙動に及ぼす影響について、数値シミュレーションによる計算機実験により検討を行った。表1は数値シミュレーションに導入した3種の土壌動特性である。計算モデルは SPH 要素で離散化し、sand (土壌)、TNT (炸薬)、case (金属ケース) の3つで構成されており、図4に示すような寸法で配置する。図中の、表示単位は mm である。ここ

表1 土壌動特性

	密度[kg/m <sup>3</sup> ]	音速[km/s]	S	$\Gamma_0$
島尻マーゼ	1740	2.570	1.730	0.11
ジャーガル	1876	0.701	2.919	0.11
乾燥土	2200	1.614	1.500	0.11

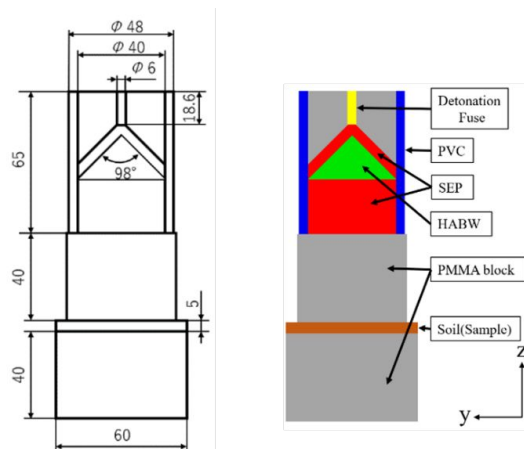


図1 実験系の模式図および寸法

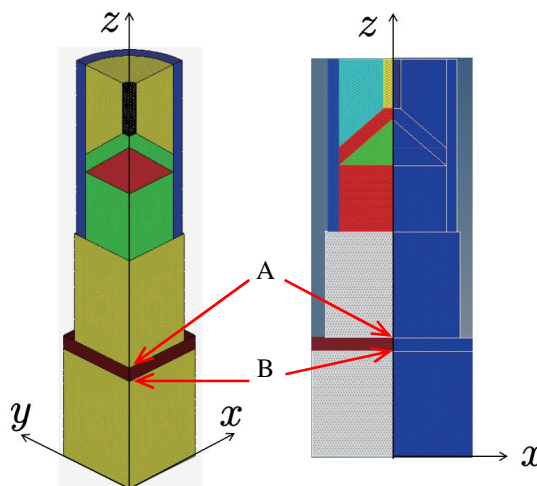


図2 数値シミュレーションモデル

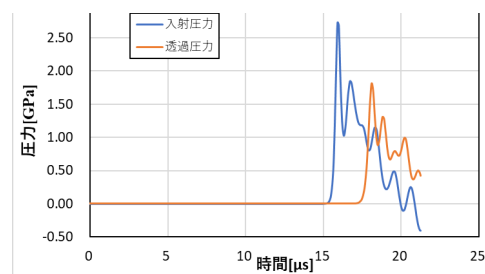


図3 入射 / 透過圧力の時間履歴

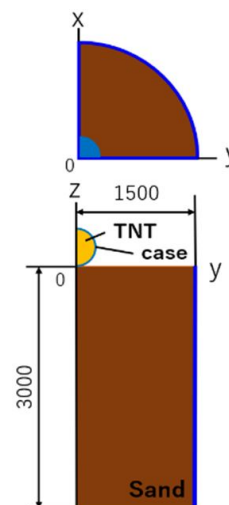


図4 地表面爆発問題の数値シミュレーションモデル

で、問題の対称性から  $yz$  平面と  $zx$  平面に対称性を有する  $1/4$  領域を解析対象とする。なお、解析領域上部にある空気の領域は特別な離散化は行わない。

表 1 に示す土壌動特性に依存して、地表面の土壌に対応する粒子の飛散状況が確認できる。密度と音速の積で表される音響インピーダンスの差異に依存して、地表面の粒子描象が記述され、保水率が大きく、粒度の細かいジャーガルに比して、粒度の粗い島尻マーヅの方が、同一時間における一次飛散物の飛散距離ならびに粒子速度も大きく評価されることが図 5 から確認できる。

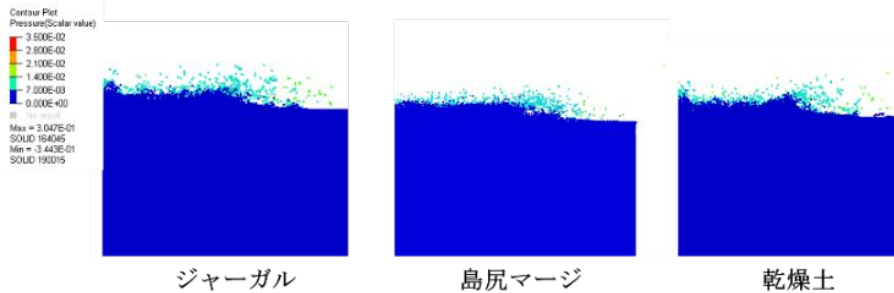


図 5 粒子速度の分布図 ( $t=1000\mu s$ )

### (3) 防護壁による一次飛散物抑制効果に関する検討

防護壁（ライナープレート）を設置した数値シミュレーションモデルを図 6 のように作成した。解析モデルの対象物は①炸薬、②金属ケース（弾殻）、沖縄県固有土壌およびライナープレート（鋼板）であり、同図に示す寸法で配置する。ここで図中の単位は cm である。問題の対称性から、 $yz$  平面对称性を有する  $1/2$  領域を解析対象とした。なお、図中の  $z=-200$  は空気と土との境界面（地表面）であり、実際の施工現場と同様に、地表面より深掘した面で処理することを想定している。この地表面より下の  $-300 < z < -200$  に土を配置する。 $z$  軸に平行な  $x^2+y^2=150^2$  ( $-300 < z < -200$ ) の面については、解析粒子の反射を起こさない無反射境界とする。なお、解析の特性上、空気部分は離散化を行わないこととした。 $z$  軸に平行な回転対称体としてライナープレートを表現しており、解析コストの削減目的から剛体壁としてモデル化する。これ以外の解析領域については、全て SPH 要素にて離散化を実施した。

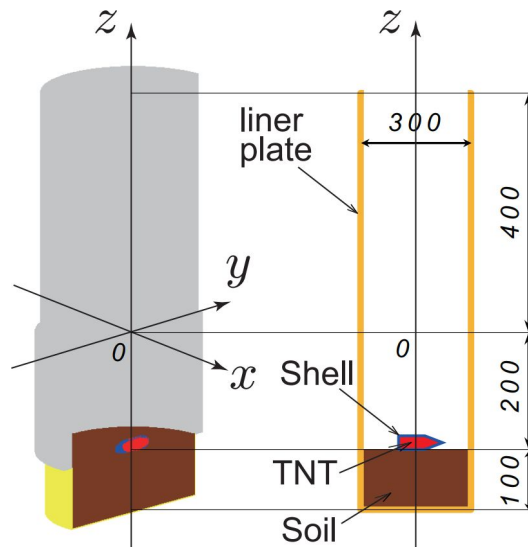


図 6 ライナープレート施工の数値シミュレーションモデル

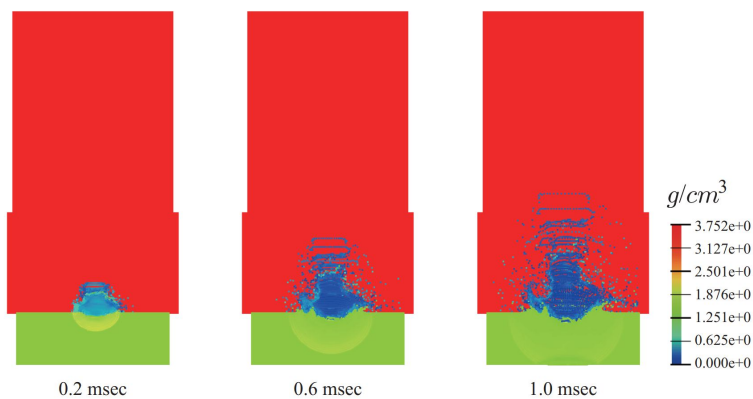


図 7 50kg 通常弾の地表面爆発と粒子密度分布

図 7 は 50kg 通常爆弾（100lb 通常弾）が地表面で爆発した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している。爆ごうにより、爆弾直下には初期土壌密度より高い密度領域が分布していることから、正の土圧として衝撃波が土中を伝ばしていることが確認できる。一方、TNT の爆ごうにより、金属ケース、TNT および土粒子が飛散し、極短時間でクレーターに成長していることも確認できる。 $t=1.0ms$  における粒子速度について、実験結果（DDESB, 2012）と比較したところ、ほぼ同程度の速度分布となっていることを確認した。以上の結果は、数値シミュレーションモデルと導入パラメータの妥当性を保証するものである。

つづいて、ライナープレート施工時の出口形状を変更した場合の、一次飛散物の抑制効果について検討するため、図8に示す数値シミュレーションを実施した。同図右は図7の出口形状に対して2/3の直径としている。以下、同図左を'straight'、右を'narrow'モデルと呼ぶ。表2はライナープレート上方より外部に飛散する粒子数について、炸薬量と出口形状の違いで整理したものである。これらの結果から、出口形状を減ずることによって、約33~53%もの一次飛散物を抑制可能であることを示している。以上の結果は、適切なライナープレート施工によって、積極的な避難半径の縮小化が可能であることを示唆している。一方で、これら粒子速度ベクトルデータより簡易飛行シミュレーションを実施し、得られた一次飛散物の予測到達距離を地理情報システムへ導入することで、仮想避難マップとして可視化できることを確認した。

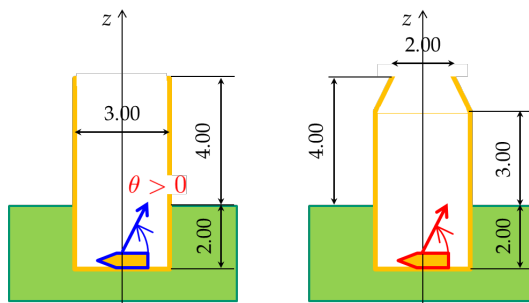


図8 ライナープレート施工時の出口形状を変更した数値シミュレーションモデル

表2 出口形状の違いによる一次飛散物抑制効果

	Num. Particle	Straight	Narrow	Decreasing Rate	Max. Particle Velocity, [km/s]
50kg	1763	66	33	0.500	1.427
125kg	5832	188	126	0.329	1.503
250kg	7337	265	142	0.464	1.636
500kg	14821	844	396	0.531	1.850

以上の研究成果により、計算力学的視点により不発弾の安全化処理技術における「理論的根拠に基づく避難区域の設定」ならびに「避難区域の積極的な縮小化」へ貢献することができた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

比嘉吉一, 井山裕文, 計算力学的視点による不発弾の安全化処理 - 地中・地表面爆発問題の数値シミュレーション -, 設計工学, 査読有, Vol.54, No.2, 2019, pp.91-97

Yoshikazu HIGA, Hirofumi IYAMA, Ken SHIMOJIMA, Osamu HIGA and Shigeru ITOH, Numerical Simulation for Soil Surface Explosion Problem, - A study of fragments controlling effect using liner plate application -, 査読有, Vol.1, 2018, pp.1-4

DOI: <https://doi.org/10.1109/ESIT.2018.8665029>

Ryo HENZAN, Yoshikazu HIGA, Osamu HIGA, Ken SHIMOJIMA and Shigeru ITOH, Numerical Simulation of Electrical Discharge Characteristics Induced by Underwater Wire Explosion, Materials Science Forum, 査読有, Vol.910, pp.72-77

DOI: <https://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.910.72>

Yoshikazu HIGA, Hirofumi IYAMA, Ken SHIMOJIMA, Masatoshi NISHI and Shigeru ITOH, Experimental Study and Computational Simulation for Shock Characteristics Estimation of Okinawa's Soils "Jahgaru", The International Journal of Multiphysics, 査読有, Vol.11, No.3, 2017, pp.245-253

DOI: <https://dx.doi.org/10.21152/1750-9548.11.3.245>

[学会発表](計11件)

Hirofumi IYAMA, Yoshikazu HIGA, Masatoshi NISHI and Shigeru ITOH, Numerical Simulation of Shock Wave Propagation for Shock Parameter Calculation, International Symposium on Explosion, Shock wave and High-energy reaction Phenomena 2019 (ESHP2019), (2019.03), pp.44, Puducherry, India

Yoshikazu HIGA, Shotaro UEHARA, Hirofumi IYAMA, Ken SHIMOJIMA, Osamu HIGA and Shigeru ITOH, Experimental Observation for Dynamic Characteristics of "Shimajiri Maaji" and its Evaluation using Computational Simulation, International Symposium on Explosion, Shock wave and High-energy reaction Phenomena 2019 (ESHP2019), (2019.03), pp.39, Puducherry, India

上原 彰太郎, 比嘉 吉一, 井山 裕文, 沖縄県固有土壌の動特性評価と土中爆発問題の数値シミュレーション, 日本機械学会第31回計算力学講演会CD-ROM論文集, No.18-8 (2018.11), 186, 徳島市・徳島大学

Yoshikazu HIGA, Hirofumi IYAMA, Ken SHIMOJIMA and Osamu HIGA, Computational simulation for contribute to unexploded bomb disposal problem using SPH scheme, The International Conference on Engineering and Applied Sciences (2018 TICEAS), (2018.02), pp.164, Bangkok, Thailand

Ryo HENZAN, Yoshikazu HIGA, Ken SHIMOJIMA, Osamu HIGA and Shigeru ITOH, Computational Prediction of Electrical Discharge Characteristics and Shockwave Propagation Behavior induced by Underwater Wire Explosion, Yellow Sea Rim Workshop on Explosion, Combustion and other Energetic Phenomena for Various Environmental Issues (YSR2018), (2018.02), pp.33, KAIST, Daejeon, Korea

Reina HIRATA, Yoshikazu HIGA, Ken SHIMOJIMA, Hirofumi IYAMA and Shigeru ITOH , Computational Simulation of Underwater Shockwave Behavior at the Interface for Various Acoustic Impedance Materials, Yellow Sea Rim Workshop on Explosion, Combustion and other Energetic Phenomena for Various Environmental Issues (YSR2018), (2018.02), pp.32, KAIST, Daejeon, Korea

Yoshikazu HIGA, Ken SHIMOJIMA, Hirofumi IYAMA, Osamu HIGA and Shigeru ITOH , SPH simulation of Fragment Behavior Prediction for Soil Surface Explosion, Yellow Sea Rim Workshop on Explosion, Combustion and other Energetic Phenomena for Various Environmental Issues (YSR2018), (2018.02), pp.30, KAIST, Daejeon, Korea

Yoshikazu HIGA, Hirofumi IYAMA, Ken SHIMOJIMA, Osamu HIGA and Shigeru ITOH , Numerical Simulation for Soil Surface Explosion Problem by SPH method, MULTIPHYSICS 2017, (2017.12), pp.30, Beijing, China

比嘉 吉一, 上原 彰太郎, 井山 裕文, 比嘉 修, 下嶋 賢, 島尻マージの実験による動特性評価と数値シミュレーション, 日本材料学会 第 12 回 材料の衝撃問題シンポジウム, (2017.10), pp.88-90, 京都市・京都テルサ

上原 彰太郎, 比嘉 吉一, 井山 裕文, 島尻マージの動特性評価と数値シミュレーション, 日本機械学会 九州学生会 第 48 回学生員卒業研究発表講演会, No.178-2, 633, (2017.03), 西原町・琉球大学

Yoshikazu HIGA, Hirofumi IYAMA, Ken SHIMOJIMA and Shigeru ITOH , Computational Prediction of Underwater Shock Wave Propagation and Reflection Behavior at the Interface for Various Acoustic Impedance Materials, Yellow Sea Rim Workshop on Explosion, Combustion and other Energetic Phenomena for Various Environmental Issues (YSR2016), Kumamoto Meeting, (2016.07), Kumamoto Univ., Kumamoto (Invited talk)

〔その他〕(計1件)

受賞

The 3rd International Conference on Engineering Science and Innovative Technology (ESIT2018) Best Paper Award, 2018年4月21日受賞。(Yoshikazu HIGA, Hirofumi IYAMA, Ken SHIMOJIMA, Osamu HIGA and Shigeru ITOH; Numerical Simulation for Soil Surface Explosion Problem, - A study of fragments controlling effect using liner plate application -)

## 6. 研究組織

### (1)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

### (2)研究分担者

井山 裕文 (IYAMA, Hirofumi)  
熊本高等専門学校・  
機械知能システム工学科・教授  
研究者番号: 40300660