

令和 6 年 4 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03849

研究課題名(和文)音響インピーダンスを考慮した固気液混相多層媒体干渉を用いる新規衝撃波低減手法開発

研究課題名(英文) Development of a new shock wave attenuation method using solid-gas-liquid multiphase multi-layer media interaction with consideration of acoustic impedance

研究代表者

大谷 清伸(Ohtani, Kiyonobu)

東北大学・流体科学研究所・特任准教授

研究者番号：80536748

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、音響インピーダンスを考慮した固気液の混相媒体との干渉による新たな衝撃波圧力低減方法の確立を目的として、種々干渉媒体干渉による衝撃波圧力低減効果の検証を行った。衝撃波媒体干渉挙動のシャドウグラフ法による高速度光学可視化計測、干渉後の圧力計測を行った。また、干渉媒体との衝撃波干渉挙動を数値模擬し、実験結果との比較を行った。実験および数値解析により、各干渉媒体(水液滴群、多層網媒体、不織布)によって干渉による衝撃波低減現象の物理機序が異なることがわかり、得られた知見、特性を利用して組合せて構成した固気液混相多層の干渉媒体を用いることで効果的な衝撃波低減を行えることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の遂行によって、種々干渉媒体(水液滴群、多層網媒体、難燃性不織布)との干渉による衝撃波圧力低減現象の機序が解明された。この得られた知見を用いて考案した、音響インピーダンスを考慮した固気液混相多層媒体を用いる、新たな衝撃波圧力低減手法はほぼ確立に至ったと考える。この新手法を用いる実際に衝撃波圧力からの被害を低減させるための防御装置、防護具等の将来的な開発は、医療、土木・建築分野に関わる安全工学で大きな寄与が期待できると考える。

研究成果の概要(英文)：In this study, the shock wave pressure attenuation effect of various interaction media is investigated to establish a new method of shock wave pressure attenuation by interference with solid-gas-liquid multiphase media considering acoustic impedance. The shock wave interaction behavior with the interaction media was numerically simulated and compared with the experimental results. Experimental and numerical analyses indicated that the physical mechanism of the shock wave attenuation phenomenon due to the interaction was different for each interaction medium (water droplets, multilayer wire gauze, nonwoven fabric). Furthermore, the results showed that effective shock wave attenuation can be achieved by using a solid-gas-liquid multiphase multi-layer interference medium that is composed of a combination of the obtained knowledge and characteristics.

研究分野：流体工学、衝撃波工学

キーワード：衝撃波圧力 衝撃波圧力低減 固気液混相多層媒体 音響インピーダンス 光学可視化計測

1. 研究開始当初の背景

エネルギー物質の瞬間的なエネルギー解放によって発生する爆風(衝撃波圧力)の低減は、衝撃波圧力による生体損傷、建築構造物への被害等に関連して、医学上、工学上重要な研究課題である。爆風による外傷性損傷では、爆風とそれに伴う現象で引き起こされる外傷性損傷を4つの原因要素によって分類している。その内、先行する衝撃波とそれに引き続く超音速の流れによる圧力変化が生体に作用して損傷を引き起こす一次損傷(Primary Injury)では、衝撃波のピーク過剰圧とパルス幅(衝撃波到達に伴う正圧の持続時間)とその積であるインパルスが重要なパラメーターであり、それらのパラメーターの値によって生体損傷の程度が変わるとされている。

爆風による外傷性損傷、特に一次損傷の回避に重要となる爆風(衝撃波圧力)の低減に関して、衝撃波と固体・液体粒子、多孔質体や網等との干渉による低減効果の機序解明に関する実験的、数値解析的研究が多くなされている。また、衝撃波干渉現象では、干渉媒体の音響インピーダンス(Acoustic Impedance、媒体の密度と音速 c の積、 $Z = \rho c$)によって、衝撃波圧力の透過率、反射率が定まり、衝撃波伝播媒体より大きな音響インピーダンス値の媒体への干渉では、反射波は反射衝撃波として反射し入射衝撃波より高い圧力の波が発生し、逆に小さな値の媒体への干渉では膨張波として反射し、圧力が低下することが知られており、これらの特性は衝撃波干渉における衝撃波圧力低減効果に重要な点であると考えられる。従って、音響インピーダンスを考慮して、各干渉媒体との干渉による衝撃波圧力低減現象の機序の解明によって導かれる知見を利用した多層の媒体との干渉によって、効果的な衝撃波圧力低減の新たな方法の確立が可能ではないかと考える。

2. 研究の目的

本研究は、音響インピーダンスを考慮した固相、液相、気相の三相の混相多層媒体との干渉による新たな衝撃波圧力低減手法を確立することが目的である。固気液混相多層媒体との干渉による衝撃波圧力低減現象の物理機序解明のため、微小爆薬起爆衝撃波と多層干渉媒体との衝撃波干渉実験を実施し、高時間・空間分解能の光学可視化計測および圧力計測によって明らかにしていく。計画された具体的な研究項目は、液粒子群干渉による衝撃波挙動の解明、多孔質体・網状媒体干渉による衝撃波挙動の解明、固気液混相多層媒体干渉による衝撃波挙動の解明で実験的に様々な媒体との衝撃波干渉による衝撃波低減現象の機序解明を行い、効果的な衝撃波低減手法を見いだしていくとともに、媒体干渉による衝撃波挙動の数値解析による比較検証で数値解析的に実験結果との検証を行う4項目である。

3. 研究の方法

本実験研究において、衝撃波は、微小爆薬(アジ化銀ペレット(AgN_3)密度 3.83 g/cm^3 、平均薬量 10 mg 、昭和金属工業)をパルスレーザー光によって起爆して発生させたものを用いた。薬量はマイクロ電子天びん(Supermicro S4、Sartorius)で計測して用いた。実験は各干渉媒体(水液滴群、多層網媒体、不織布)について、水液滴群は上方より複数の金属細管より水液滴を落下させて、金網を複数枚重ねた多層網媒体と不織布は垂直に設置して、衝撃波干渉実験を行った(図1:各種干渉媒体との衝撃波干渉実験概略図)。

本研究における現象の実験的検証のための計測方法は、主に高速度光学可視化計測と圧力計測である。様々な媒体との衝撃波干渉挙動を白色連続光(メタルハライドランプ)を光源として、1組のシュリーレン鏡(焦点距離 $5,000 \text{ mm}$)を用いて構築したシャドウグラフ光学系で光学可視化し、高速度カメラ(HPV-X、島津製作所)で記録した。また、各干渉媒体との干渉後の衝撃波圧力を干渉媒体の背後の起爆位置より約 100 mm 離れた位置に設置した圧力センサ(603B1、Kistler)を用いて圧力の時間変化を計測した。

また、干渉媒体との衝撃波干渉挙動を汎用数値解析ソフトウェア ANSYS AUTODYN を用いて数値模擬し、実験結果との比較を行った。

4. 研究成果

図2に微小爆薬起爆による球状衝撃波の水液滴群干渉挙動の高速度シャドウグラフ連続写真を示す。撮影速度は $2 \mu\text{s/frame}$ (500 kfps)、露光時間は $0.4 \mu\text{s}$ である。撮影画像より数フレーム毎に抽出した画像を配置し、図中に起爆からの経過時間を示した。(高速度カメラ撮影条件は以下図3-5においても同様である。)図より微小爆薬の起爆によって発生した球状の衝撃波は水液滴群と干渉し、その後圧力センサ位置まで伝播する。衝撃波と干渉した水液滴は、図中の破線の円形で囲った起爆点に近い範囲のものは起爆点に対して直角方向に引き延ばされたように大きく変形して、一部が分裂して微細化して周りに分布している。衝撃波背後には爆発生成気体の高温のガスが起爆点付近に確認できる。衝撃波はこの爆発生成気体の急速な膨張によって発生するが、水液滴群との干渉でこのガスが冷却されることによって膨張の勢いが緩和され衝撃波の威力も低下すると考える。同時計測した水液滴群と干渉後の衝撃波の圧力計測結果より、衝撃波は水液滴群と干渉して、伝播速度が低下、ピーク過剰圧が低減することが確認できた。このよ

うに水液滴群との衝撃波干渉では、起爆位置より比較的近い範囲での干渉で水液滴への熱移動と変形・分散による作用で衝撃波が減衰することが示された。

図 3 に微小爆薬の起爆によって発生する衝撃波が多層網媒体と干渉する挙動の高速度シャドウグラフ連続写真を示す。図より微小爆薬の起爆によって発生した衝撃波が球状に伝播して、多層網媒体と干渉し、透過、反射をしている。透過した衝撃波画面は干渉しない側に比べて濃淡が薄く、曲率が小さくなっており、衝撃波圧力が低下していると考えられる。ここで、多層網媒体との干渉によって衝撃波圧力が低減する一方で、反射衝撃波の発生が確認できていることから、起爆点位置付近では反射衝撃波による高圧に晒されていることが示された。多層網媒体との干渉後の圧力計測結果から、金網の目を細かく（メッシュ数を大きく）し、枚数を多く重ねることで、衝撃波の圧力センサ位置までの到達時間が遅延し（伝播速度が低下）、ピーク過剰圧が低下することが示された。

図 4 は多層網媒体に水液滴を付加したものと干渉した場合である。図より微小爆薬の起爆によって発生した衝撃波が球状に伝播して、多層網媒体と干渉する。多層網媒体前面で反射した反射衝撃波が水液滴を付加していない場合と比べて、波面の濃淡が濃くなっており、反射衝撃波圧力が強くなっていることが示唆される。その後、多層網媒体を透過した波が確認でき、多層網媒体内を伝播するのにより時間を要している。透過した衝撃波は不明確で紙面上では認識が難しい程、薄く圧力が低下した波であり、波面も複数あることが確認できる（画像の矢印位置）。圧力計測結果からも、多層干渉媒体に水液滴を付加することで、衝撃波の伝播速度が低下し、ピーク過剰圧も大幅に低下することが示された。

このように多層網媒体に水を付加することで、より効果的に衝撃波を減衰することがわかったが、水液滴への熱移動等による低減効果だけでなく、固気液相の混在した干渉媒体のみかけの音響インピーダンスが上がったことによる反射率の増加（透過率の低下）によって衝撃波が減衰したと考えられる結果となった。

図 5 に微小爆薬の起爆によって発生する衝撃波と難燃性不織布との干渉挙動の高速度シャドウグラフ連続写真を示す。図より微小爆薬の起爆によって発生した衝撃波が球状に伝播し、不織布と干渉する。衝撃波の入射面では反射衝撃波は確認できず、衝撃波がほぼ反射なしに透過している。その後、透過した衝撃波は不織布の裏面より現れて、圧力センサ位置まで伝播していき、センサ前面で反射している。圧力センサ到達前の衝撃波波面は、伝播による減衰と不織布との干渉による減衰によって、衝撃波波頭の濃淡が薄く衝撃波圧力が低減しているように見える。圧力計測結果からも、難燃性不織布と干渉によって、衝撃波の伝播速度が低下し、ピーク過剰圧も低下することが示された。

このように難燃性不織布との干渉では反射衝撃波をほぼ発生せずに衝撃波を減衰する効果があることがわかった。

図 6 に多層網媒体干渉による衝撃波干渉挙動の汎用数値解析ソフトウェア ANSYS AUTODYN による数値解析結果（(a)圧力分布、(b)圧力の時間履歴）を示す。ステンレス製金属網を簡易的に模した金属線を列状にして 4 列の多層にした干渉媒体（#1-2）に、実験と同様に微小爆薬アジ化銀ペレット 10 mg の起爆によって発生する衝撃波を作用させた。多層網媒体前面までの距離を起爆点より 25 mm とした。図(a)より衝撃波が多層網媒体と干渉すると個々の金属線と干渉して複雑な干渉波を発生しながら透過していく。図(b)より起爆点より 50 mm 離れた位置にある圧力計測点（gauge point）における圧力履歴を比較すると、多層網媒体と干渉することで干渉しない場合（w/o）と比較して衝撃波の到達時間が遅延し、ピーク過剰圧が低下していた。多層網媒体の条件を目の細かな（メッシュ数の大きな）金網を重ねた場合（#2-2）にはピーク過剰圧は更に低下する結果となり、多層干渉媒体との衝撃波干渉実験結果と同様の傾向を示す結果となった。

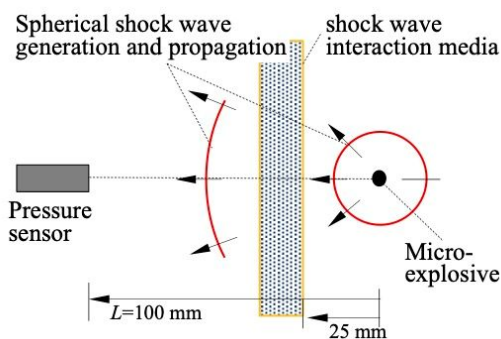


図 1 各種干渉媒体との衝撃波干渉実験概略図

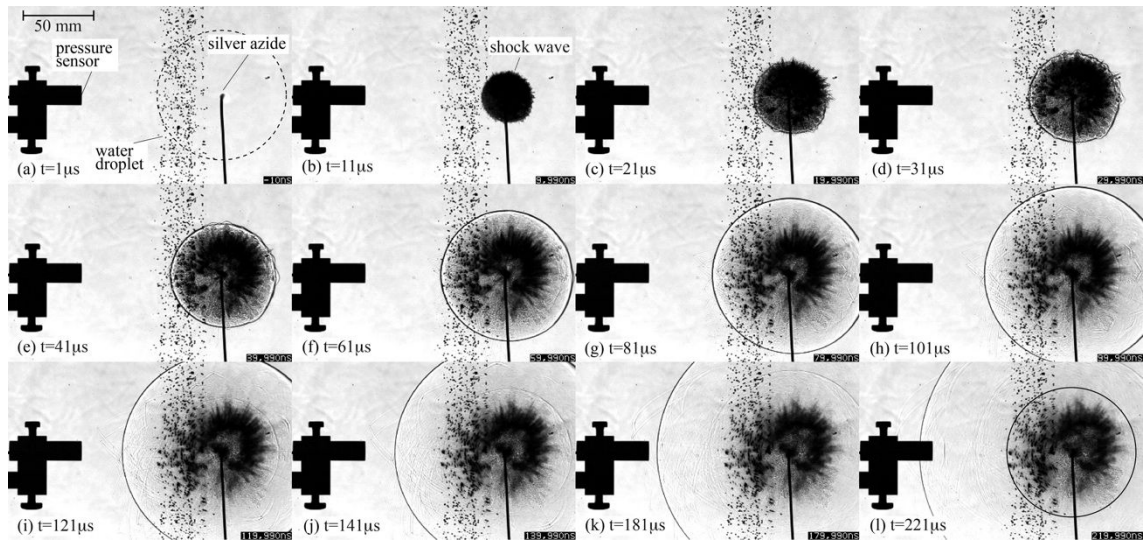


図 2 水液滴群干渉による衝撃波干渉挙動

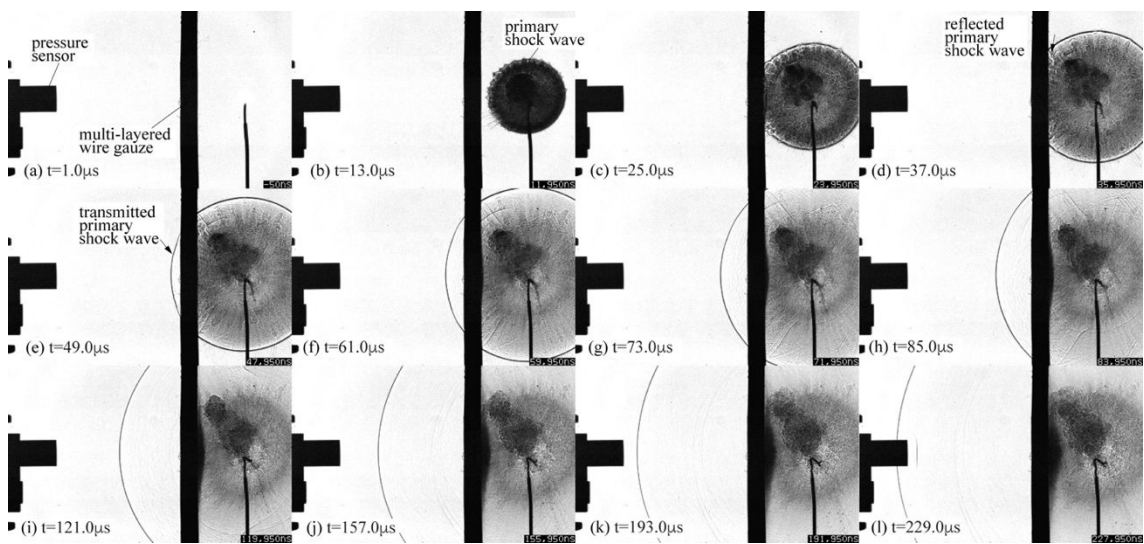


図 3 多層干渉媒体干渉による衝撃波干渉挙動

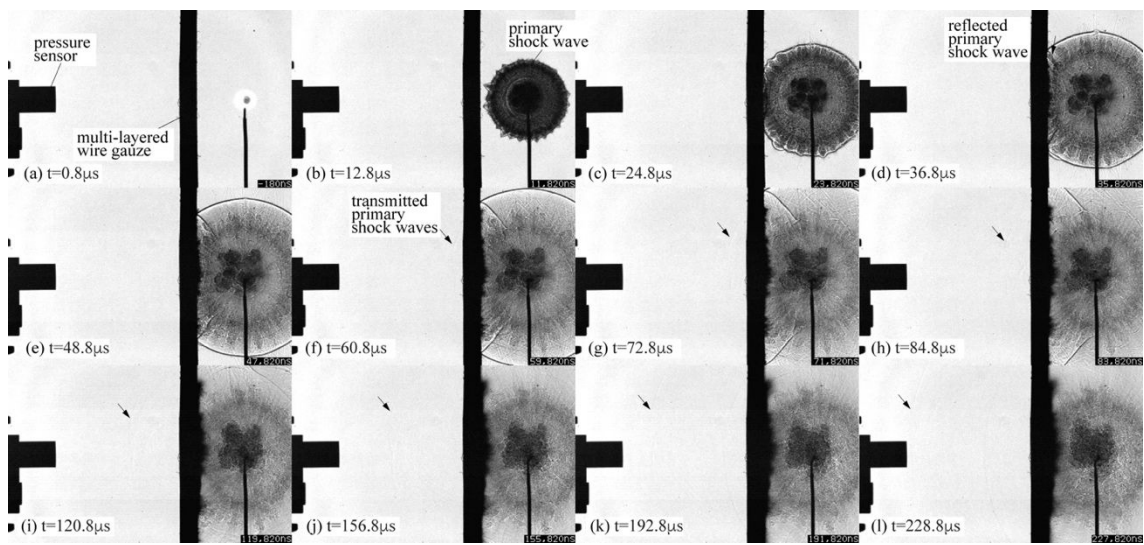


図 4 多層干渉媒体干渉による衝撃波干渉挙動（水液滴を付加）

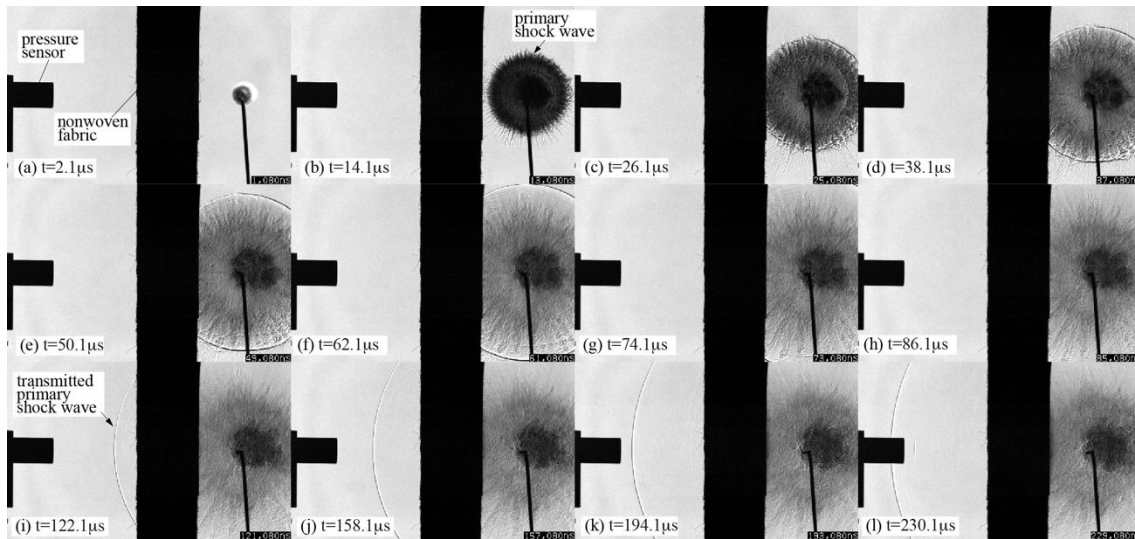
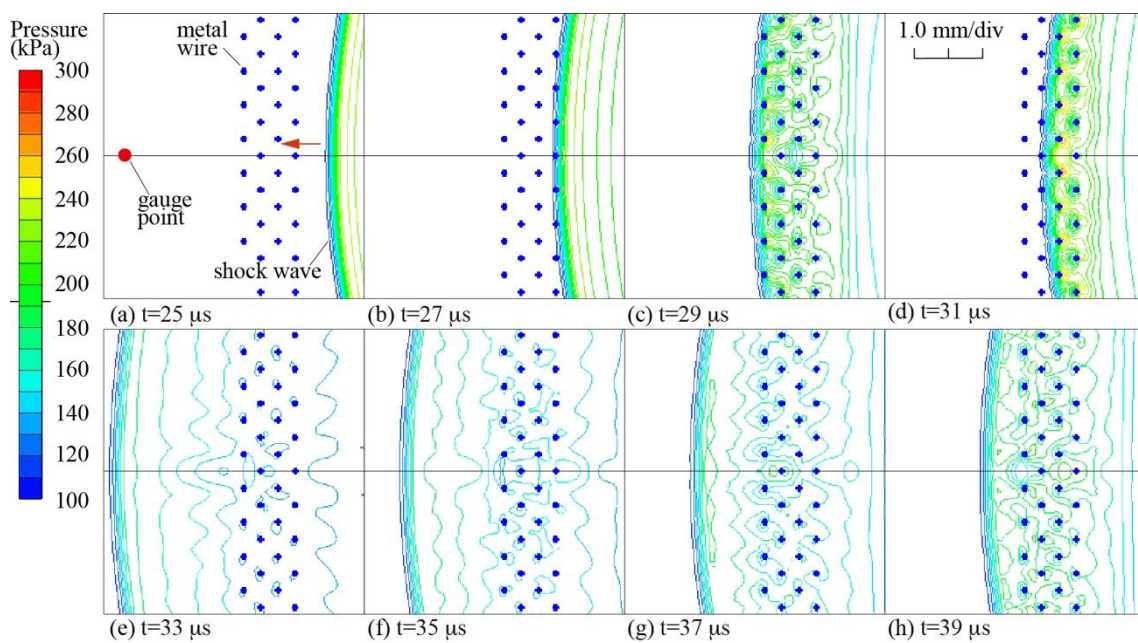
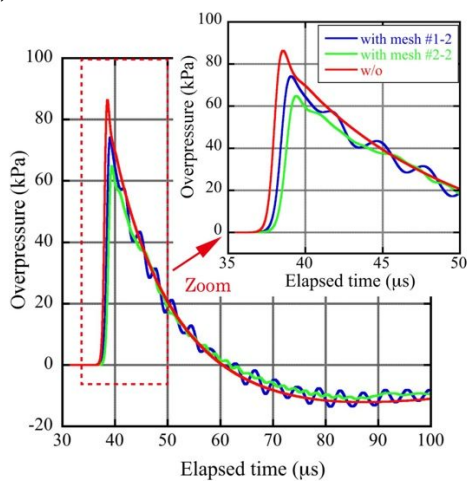


図5 難燃性不織布干渉による衝撃波干渉挙動



(a) 圧力分布図



(b) 圧力の時間履歴

図6 多層網媒体干渉による衝撃波干渉挙動の数値解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 OHTANI Kiyonobu, OGAWA Toshihiro, SUGIYAMA Yuta, TAMBA Takahiro	4. 巻 35
2. 論文標題 Study on Shock Wave Pressure Attenuation by Shock Wave Interaction with Water Droplets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JAPANESE JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW	6. 最初と最後の頁 302 ~ 307
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3811/jjmf.2021.005	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24件（うち招待講演 4件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 大谷清伸
2. 発表標題 爆風による外傷性損傷に関わる生体内衝撃波伝播挙動の機序解明
3. 学会等名 火薬学会第64回爆発安全専門部会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 杉山勇太, 丹波高裕
2. 発表標題 水液滴衝撃波干渉による伝播速度計測の画像解析による検討
3. 学会等名 火薬学会2022年度春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 阿部淳, 中川敦寛
2. 発表標題 多層網媒体干渉による衝撃波圧力低減に関する水液滴付加の影響
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 阿部淳, 中川敦寛
2. 発表標題 難燃性不織布を用いた衝撃波圧力低減に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会M&M2022材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 阿部淳, 中川敦寛
2. 発表標題 多層網媒体干渉による効果的な衝撃波圧力低減の検討
3. 学会等名 火薬学会2022年度秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 阿部淳, 中川敦寛
2. 発表標題 減圧直円管容器を用いた膨張波発生に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小澤哲, 大谷清伸, 小川俊広, 中川敦寛
2. 発表標題 難燃性不織布干渉による衝撃波圧力低減の干渉厚さの影響
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 大谷清伸, 小澤哲, 杉山勇太, 丹波高裕, 小川俊広, 阿部淳, 中川敦寛
2. 発表標題 様々な媒体との干渉による衝撃波圧力低減に関する研究
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 K. Ohtani, T. Ogawa, Y. Sugiyama, T. Tamba
2. 発表標題 Study on shock wave pressure attenuation by shock wave interaction with water droplets layer
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Energetic Materials and their Applications (ISEM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 杉山勇太, 丹波高裕
2. 発表標題 微小爆薬起爆衝撃波による水液滴干渉挙動に関する研究
3. 学会等名 火薬学会2021年度春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 阿部淳, 中川敦寛
2. 発表標題 メッシュの異なる多層網媒体干渉による衝撃波圧力低減に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 阿部淳, 中川敦寛
2. 発表標題 多孔質粒子との干渉による衝撃波圧力低減に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷清伸
2. 発表標題 材料の加工と破壊に関連する衝撃波の伝播挙動
3. 学会等名 第24回火薬学会爆発衝撃加工専門部会 (第56回日本塑性加工学会高エネルギー速度加工分科会) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷清伸
2. 発表標題 微小閉空間における衝撃波圧力の増幅とその制御に関わる実験的・数値解析的研究
3. 学会等名 第3回高精度CAEのための実験技術およびデータ同化に関する研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 阿部淳, 中川敦寛
2. 発表標題 微小爆薬起爆衝撃波の多層網媒体干渉による低減効果に関する研究
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Ohtani, T. Ogawa, T. Ozawa, A. Nakagawa
2. 発表標題 Experimental Study on Shock Wave Attenuation Phenomena by Multi-Layered Wire Gauze Interaction
3. 学会等名 The 34th International Symposium on Shock Waves (ISSW34) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Ohtani, T. Ogawa, D. Numata, T. Ozawa, A. Nakagawa
2. 発表標題 Fundamental Study on the Effects of Shock Wave Interaction on Structures
3. 学会等名 The Advanced Technology in Experimental Mechanics and International DIC Society Joint Conference 2023 (ATEM-iDICs '23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大谷清伸, 小澤哲, 小川俊広, 中川敦寛
2. 発表標題 難燃性不織布干渉による衝撃波圧力低減に関する水液滴付加の影響
3. 学会等名 火薬学会2023年度春季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大谷清伸, 小澤哲, 小川俊広, 中川敦寛
2. 発表標題 水分を含んだ難燃性不織布干渉による衝撃波圧力低減に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大谷清伸, 小澤哲, 沼田大樹, 小川俊広, 中川敦寛
2. 発表標題 衝撃波作用による構造物の影響の関する基礎研究
3. 学会等名 日本機械学会M&M2023材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大谷清伸
2. 発表標題 衝撃波圧力の低減と制御に関する研究
3. 学会等名 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小澤哲, 大谷清伸, 小川俊広, 中川敦寛, 張替秀郎, 遠藤英徳
2. 発表標題 爆風脳損傷低減効果検証のための衝撃波発生方法の検討
3. 学会等名 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 小澤哲, 中川敦寛
2. 発表標題 固気液混相多層媒体干渉による衝撃波低減に関する研究
3. 学会等名 2023年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小澤哲, 大谷清伸, 小川俊広, 中川敦寛, 遠藤英徳
2. 発表標題 爆風脳損傷低減効果検証のための脳模擬モデルを用いた衝撃波挙動に関する検討
3. 学会等名 2023年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2024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
研究協力者	小川 俊広 (OGAWA TOSHIHIRO) (30375133)	東北大学・流体科学研究所・技術専門員 (11301)	

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