

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03921

研究課題名(和文)種々音響インピーダンス材料閉空間を用いた新規衝撃波発生手法の開発

研究課題名(英文) Development of a new controlled shock wave pressure generation method by using a closed space made of materials with different 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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、新たな衝撃波圧力の制御方法の確立のため、音響インピーダンスの違いによる衝撃波干渉挙動に注目した材料構成による単純形状の閉空間内での発生衝撃波挙動の現象解明を行った。金属円管から発生する衝撃波発生挙動をシャドウグラフ法による高速度光学可視化計測、発生圧力の同時計測を行った。また、金属円管の閉空間内の水中衝撃波伝播挙動を数値模擬し、実験結果との比較を行った。実験および数値解析より、金属円管による閉空間内で発生させた衝撃波は、圧力増幅し、また、音響インピーダンスの異なる材料を用いることでより効果的に圧力増幅が可能ある等の制御された衝撃波圧力発生方法の確立が可能となる結果が得られた。

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、円管のような単純な形状の閉空間を用いた衝撃波圧力の制御が可能になるデータおよび知見が得られたことで、今後実施検討されている衝撃波作用による生体損傷の機序解明研究など衝撃波医療応用分野において用いられる有用な衝撃波圧力制御手法として期待できるだけでなく、衝撃波圧力を利用した殺菌、加工、洗浄等の様々な衝撃波産業応用分野での発展に大きく寄与できることが期待できると考える。

研究成果の概要(英文)： In this study, an experiment and numerical simulation on underwater shock wave generation phenomena by an explosion in a closed space for establishment of a new controlled shock wave pressure generation method related to the shock wave medical and biomedical application. Underwater shock wave was generated in a metal tube as a closed space made of material with different acoustic impedance. The process of underwater shock wave generation phenomena from a metal tube was visualized by the shadowgraph method. The pressure history of generated shock wave was measured simultaneously by a pressure sensor. The process of underwater shock wave interaction phenomena with a metal tube inside wall was simulated.

The peak overpressure of induced underwater shock wave from a metal tube was larger than that of shock wave by detonating in water open space. The peak overpressure of shock wave in a stainless-steel tube was higher than in an aluminum tube due to difference in acoustic impedance.

研究分野：流体工学、衝撃波工学

キーワード：衝撃波圧力制御 水中衝撃波 水中膨張波 圧力増幅 閉空間 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

国内の衝撃波医療応用研究として 1980 年代に東北大学において体外衝撃波結石破碎術 (ESWL) のための研究開発が始まり、現在では血管新生や骨成長、不整脈治療に関わる研究が行われている。生体内を衝撃波が伝播する際、生体内の様々な部位の不均一な密度が存在する場所において複雑な伝播挙動をすることが指摘され、その中で特にキャビテーション気泡発生とその崩壊が生体損傷につながる大きな影響を及ぼすことが報告されている。これは、生体内で反射、回折等を起こした時に発生する膨張波 (負圧波) の伝播によってその背後で圧力低下し負圧になった領域でキャビテーション気泡が発生しているためと考えられている。

体外衝撃波結石破碎術で用いられている衝撃波制御方法は、体外の半切楕円体内の焦点において発生させた衝撃波を半切回転楕円体壁面で反射させて、体内の第 2 焦点に収束させる方法である。第 2 焦点位置に結石等の高圧を作用させたい部分になるよう調整して用いている。本手法では、衝撃波による高圧を作用させたい生体内に局所的に作用させることが可能だが、一方、収束衝撃波背後に膨張波が追隨してくるため、その膨張波および膨張波通過によるキャビテーション気泡発生によって生体損傷に至ることが問題となっている。

一方、衝撃波干渉挙動において、媒体の密度と音速 c の積で表される音響インピーダンス (Acoustic Impedance、 $Z = \rho c$) の値の差によって、透過、反射挙動が異なることが知られている。衝撃波は音響インピーダンスが大きな媒体との界面での干渉の場合、ほんの一部は圧縮波として透過し、残りは入射衝撃波よりも高い圧力の反射衝撃波として反射する。2) 音響インピーダンスが小さな媒体との界面での干渉の場合は、同様に一部は圧縮波として透過するが、大半が膨張波として (負圧の音波) として反射する性質を持っている。この衝撃波干渉の音響インピーダンスの特性に着目した衝撃波圧力の制御について検討している研究は少ない。

2. 研究の目的

本研究では、衝撃波医療応用において重要な研究課題である衝撃波生体損傷に関して、その重要な要素である衝撃波および膨張波の生体との干渉における衝撃波生体損傷の機序解明のための生体模擬物質等を対象とした生体衝撃波干渉挙動に関わる工学的実験に用いる制御された圧力波形を持つ新規衝撃波発生方法を確立するのが目的である。音響インピーダンスの違いによる衝撃波干渉挙動に注目した材料構成による単純形状の閉空間内で衝撃波を発生させ、衝撃波圧力の正・負 (膨張波) 最大過剰圧、パルス幅等を制御する方法の確立を行うものである。その現象の把握のため長時間・空間分解能の光学可視化計測および圧力測定によって明らかにしていく。計画している具体的な研究項目は、閉空間内衝撃波干渉挙動の解明、最大過剰圧の増加方法の確立、衝撃波のみの圧力波発生方法の確立に関して、実験的に解明、方法を確立していくとともに、閉空間内の現象の数値解析と実験結果との比較、検証を行う 4 項目である。

3. 研究の方法

本実験研究における衝撃波発生は、微小爆薬のアジ化銀ペレット起爆衝撃波および短パルス放電装置による放電衝撃波を用いて実験を行う。微小爆薬アジ化銀ペレットは、薬量 10mg、直径 1.5mm 小さな爆薬であり、発生衝撃波圧力は 1m 程伝播すれば音速近くまで減衰してしまうため、特別な設備が必要ない実験室内での実験が可能で、また、実験再現性が良く、数値解析における再現で実績があるため、様々な条件で比較的少ない繰り返し回数の実験で理論的な考察が行い易い。アジ化銀ペレットがもつエネルギー量は約 12J/ペレットである。また、起爆はナノパルスのレーザー光を照射して起爆させるため、計測装置と数ナノ秒オーダーの精度良い同期が行えるのは利点である。放電装置は、短パルス放電装置 MSWG に直径 0.1mm タングステン細線 2 本を用いて電極間距離 1.0mm で放電を行い発生させる。放電は放電電圧 2kV から 5kV で可能であり、最大出力は 1.25J/パルスと微小爆薬に比べて衝撃波発生エネルギー量は少ないが、繰り返し発生できるため、繰り返しによる衝撃波挙動の検証とデータ生産性が良い利点がある。また、両撃破発生源ともに 1.5mm 以下と比較的小さいため、小さな閉空間内で衝撃波を発生することができる。

本研究における実験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。シャドウグラフ法で水中の衝撃波現象による密度変化を可視化した映像を高速度カメラによって記録する。拡大した微小領域の水中衝撃波現象に対応できる、超高速度フレーミングカメラ IMACON200 (最高撮影速度 200Mfps、撮影コマ数 12 コマ) と高速度ビデオカメラ HPV-X (最高撮影速度 10Mfps、撮影コマ数 256 コマ) を使用する。圧力測定には、水中用衝撃波圧力計測で実績のあるニードル水中衝撃波センサ (圧力レンジ-10~200MPa、受圧面直径 0.5mm) を用

いる。

また、金属円管の閉空間内を含む水中衝撃波伝播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1、2に金属円管閉空間内微小爆薬起爆による発生衝撃波挙動の高速度シャドウグラフ連続写真を示す。金属円管は順にアルミニウム (AL5052)、ステンレス (SUS304) 製であり、外径 15mm、内径 4mm (肉厚 5.5mm)、長さ 30mm である。円管は垂直にして円管先端が水面下約 20mm の位置に設置して、円管下端より 5mm の円管内に微小爆薬を設置してある。撮影速度は 1 μ s/frame (1Mfps) であり、露光時間は 20ns である。各画像は微小爆薬の起爆からの経過時間を示している。また画像の下部には圧力センサの先端が確認できる。

図1のアルミニウム (AL5052) 製の円管の場合、金属円管下端より複数の衝撃波が発生している。まず円管壁内を伝播してきた波によって誘起した衝撃波が円管外側より発生している。これは金属円管内内部で微小爆薬の起爆によって発生した衝撃波が円管内壁と干渉し、一部が管壁内部へ透過して、その波が円管外側まで伝播し水中へ透過した波であると推察される。この衝撃波は、音速が速い壁内で水中を伝播する衝撃波に先行して伝播するため、円管内部の水中を伝播する衝撃波より先に伝播してきている。その後、円管内部を伝播してきた波が下端より半球状に発生する。その後、円管内壁との反射衝撃波と膨張波が発生し、円管外側縁部での回折等によって複数の波が重なった状態になっている。膨張波伝播での水中の圧力低下による気泡発生も確認できる。

図2のステンレス (SUS304) 製の円管の場合、アルミニウム製円管の場合と同様に管壁内を伝播してきた波によって誘起した衝撃波が発生し、続いて管内部を伝播してきた衝撃波等、複数の波が同様に発生している。アルミニウム製の円管に比べて、円管壁内を伝播してきた波によって誘起された衝撃波波面は薄く、管内部を伝播してきた衝撃波波面は濃く写っており、つまり管壁内伝播波の誘起衝撃波圧力は低く、内部伝播衝撃波圧力は高くなっていることを示している。これは、円管内で発生した衝撃波が管壁で透過、反射する際に、音響インピーダンスの違いによって透過、反射率が異なるために、アルミニウム製円管に比べ透過しづらく、反射し易くなったためであり、円管に用いる材料の音響インピーダンスを考慮して選択することで発生する衝撃波圧力強さを制御できることを示す結果となった。

図3に高速度シャドウグラフ連続写真と同時計測した金属円管から発生した水中衝撃波圧力の時間履歴を示す。金属円管先端より約 15mm の位置での圧力値である。アルミニウム製円管の場合を黒線、ステンレス製円管の場合を赤線で示している。図より、アルミニウム製円管の場合には、先頭衝撃波が微小爆薬起爆約 11.6 μ s 後に圧力センサ先端に到着し、ピーク過剰圧は約 28.3MPa に達している。その後、圧力は負圧まで低下後に約 17.7 μ s でもう一度圧力のピークを計測している。一方、ステンレス製円管の場合、先頭衝撃波が約 10.3 μ s で到達しており、アルミニウム製円管の場合よりも早く到達している。また、ピーク過剰圧は 31.8MPa と高い圧力の衝撃波が発生している。光学可視化結果での考察と同様に、圧力計測結果からもステンレス製円管の場合には媒体の音響インピーダンス違いによって管内での反射衝撃波が強くなることで発生する衝撃波圧力が強くなることを示す結果となった。

図4に金属円管閉空間内微小爆薬起爆による水中衝撃波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 (圧力分布) を示す。金属円管の材質はアルミニウム (AL5052) の場合である。図より、金属円管内で微小爆薬の起爆によって球状の衝撃波が発生し、管内壁面まで伝播する。その後、一部は金属円管と干渉して、一部は管軸方向水中を伝播する。金属円管と干渉した波は円管壁内へ透過する波と反射する波となる。金属円管壁内へ透過した波は壁内で半球状に拡がりながら、円管の上下方向に壁内を伝播する。金属円管壁内を伝播する波はアルミニウムの縦波音速で伝播する。管内水中を伝播する衝撃波に比べ、音速速いアルミニウム中のため先行して伝播し、衝撃波先頭部より水中へ斜め衝撃波を誘起させている。その後、金属円管下端まで伝播した波が水中へ透過し、下方へ伝播していく。このことは、先の実験における光学可視化計測結果の考察と一致する結果となっている。一方、金属円管内の衝撃波は管壁面での反射衝撃波を伴って、円管内で上下方向へ伝播する。この際、反射衝撃波によって先頭衝撃波背後がより高圧になることで、伝播速度が上昇している。その後、円管下端まで到達した円管内部伝播衝撃波は、円管壁内から誘起した衝撃波に追従して下方へ伝播する。ここで注目すべき点は、微小爆薬起爆によって衝撃波が伝播した背後に負圧領域が発生し、爆発生成ガス気泡が発生していることである。管内壁面からの反射衝撃波とこの気泡とが干渉することで、膨張波が発生しており、管先端で発生した衝撃波に追従している。体外衝撃波結石破碎術においても同様の衝撃波挙動によって膨張波が発生しており、このことが本衝撃波医療応用手法において問題となっている原因であることが示唆された。

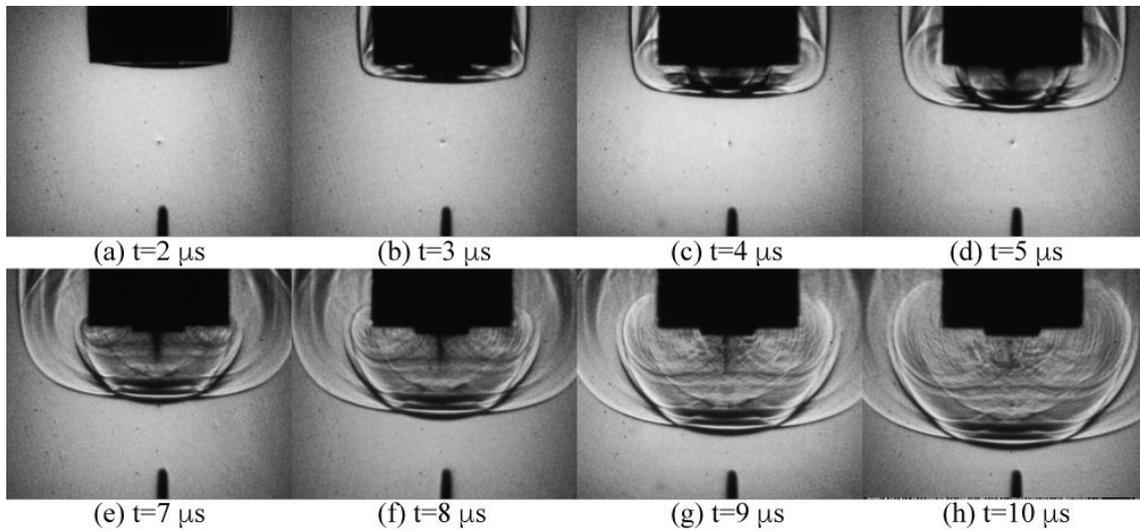


図1 金属円管内微小爆薬起爆による発生水中衝撃波挙動（アルミニウム）

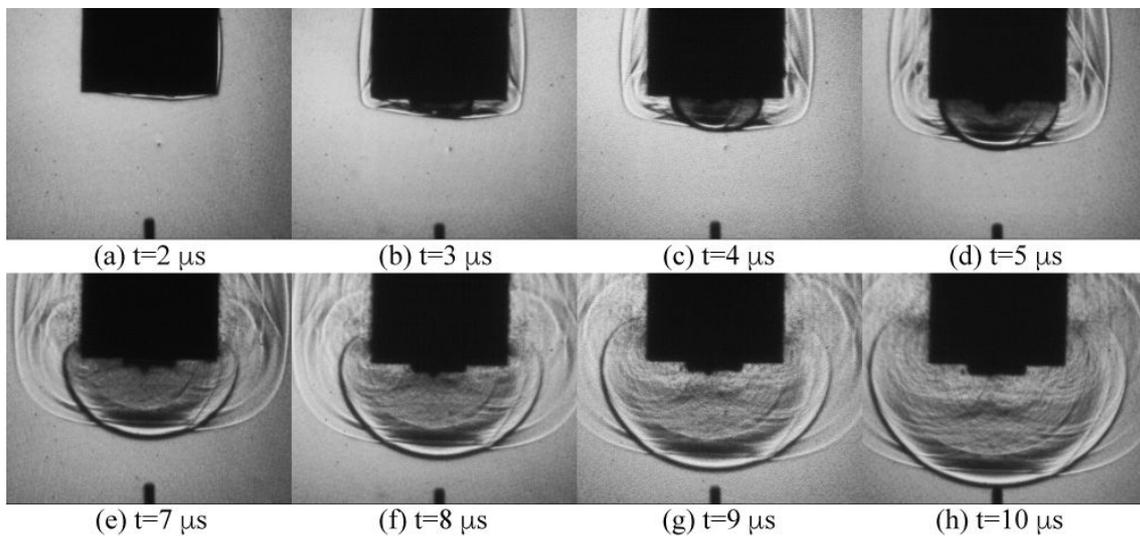


図2 金属円管内微小爆薬起爆による発生水中衝撃波挙動（ステンレス鋼）

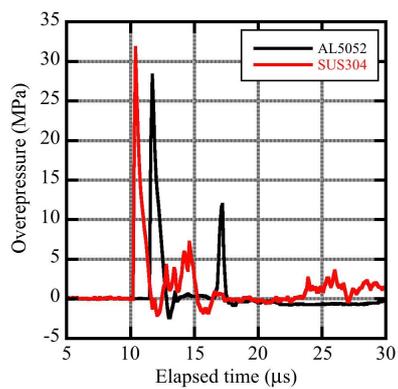


図3 金属円管内微小爆薬起爆による発生水中衝撃波圧力の時間履歴

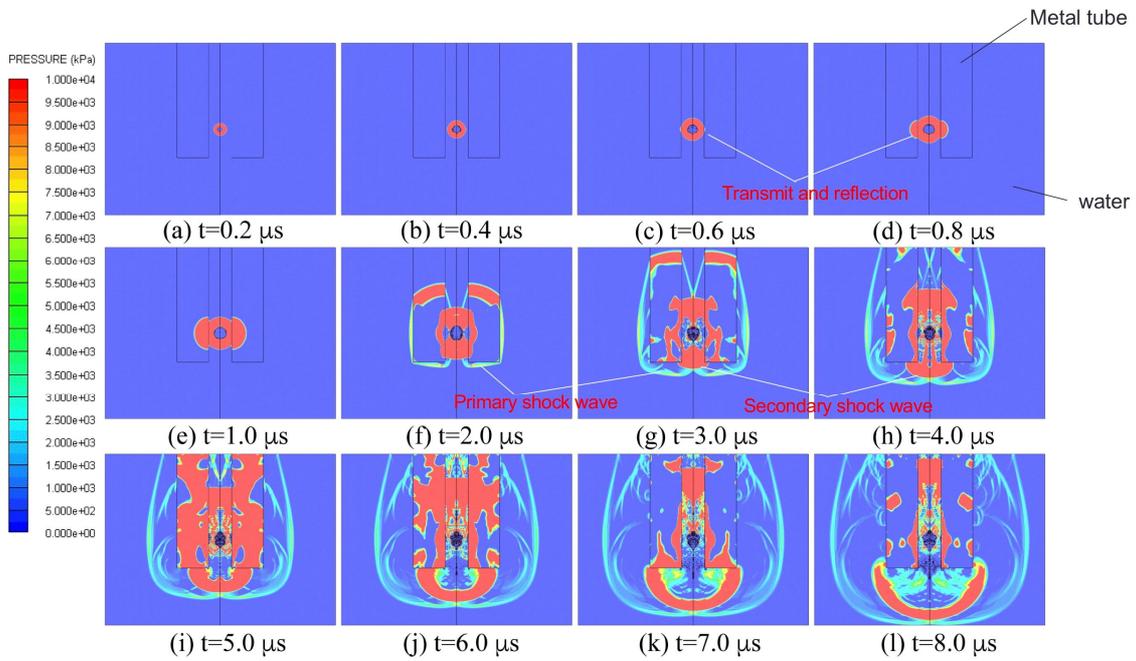


図4 金属円管内微小爆薬起爆による発生水中衝撃波挙動の数値解析結果
 (圧力分布、アルミニウム (AL5052) 製円管)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 K. Ohtani, T. Ogawa, A. Abe, A. Nakagawa
2. 発表標題 Numerical study on micro-explosive induced shock wave propagation in a closed space
3. 学会等名 32nd International Symposium on Shock Waves (ISSW32) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kitagawa, K. Ohtani
2. 発表標題 Experimental study on washing effect for textile using the underwater explosion
3. 学会等名 32nd International Symposium on Shock Waves (ISSW32) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 中川敦寛, 阿部淳
2. 発表標題 音響インピーダンスの異なる材料を用いた円管内発生水中衝撃波挙動に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kitagawa, K. Ohtani, Y. Konishi
2. 発表標題 Study on Washing Effect for Textile using the Underwater Explosion
3. 学会等名 The 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019), OS19: The 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019) IFS Collaborative Research Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 中川敦寛, 阿部淳
2. 発表標題 水中放電を用いた衝撃波伝播挙動の光学可視化計測
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大谷清伸
2. 発表標題 東北大学における爆傷に関わる衝撃波研究
3. 学会等名 爆傷フォーラム2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 中川敦寛, 阿部淳
2. 発表標題 金属円管内発生水中衝撃波挙動の管形状の影響
3. 学会等名 火薬学会2019年度秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 中川敦寛, 阿部淳
2. 発表標題 爆風に伴う衝撃波圧力からの防御方法に関する基礎研究
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kitagawa, K. Ohtani
2. 発表標題 Visualization of flow field around the underwater explosion
3. 学会等名 The 18th International Symposium on Flow Visualization (ISFV 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広
2. 発表標題 水中閉空間内微小爆薬による衝撃波挙動の数値模擬
3. 学会等名 火薬学会2018年度春季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kitagawa, K. Ohtani, Y. Konishi, A. Abe
2. 発表標題 Attenuation and reduction effect of underwater explosion by porous materials
3. 学会等名 The 15th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018), OS19: The 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018) IFS Collaborative Research Forum (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広
2. 発表標題 金属円管内発生水中衝撃波の管厚の影響
3. 学会等名 火薬学会2018年度秋季研究発表会
4. 発表年 2018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 金属管内発生水中衝撃波挙動に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018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 金属円管内微小爆薬起爆による発生衝撃波の数値模擬
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大谷清伸, 小川俊広, 中川敦寛, 阿部淳
2. 発表標題 円管内形状の異なる閉空間内発生水中衝撃波挙動に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020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 多層網媒体との干渉による衝撃波低減に関する研究
3. 学会等名 火薬学会2020年度秋季研究発表会
4. 発表年 2020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研究
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kitagawa, H. Ueda, K. Ohtani, Y. Konishi
2. 発表標題 Study on improvement of washing effect for textile using the underwater explosion
3. 学会等名 The 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020), OS19: The 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020) IFS Collaborative Research Forum(国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2020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 分担 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
---------	---------