

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420100

研究課題名(和文) 異種音響インピーダンスの模擬物質による生体中衝撃波伝播現象の解明

研究課題名(英文) Understanding of shock wave propagation phenomena in human body by using the simulated biomedical 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・助教

研究者番号：80536748

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、生体中の衝撃波作用による影響(損傷)に関わる衝撃波医療応用研究、衝撃波殺菌技術等のバイオエンジニアリング分野応用研究へ展開するための研究基盤を確立することを目的として、音響インピーダンスに着目し、その値が種々異なる生体模擬物質中を伝播する衝撃波現象解明を行った。音響インピーダンス差のある媒体界面での衝撃波挙動解明に関して、種々音響インピーダンス材料界面および界面形状での衝撃波干渉現象に関して、高精度の光学可視化計測および圧力計測による実験を行った。また生体模擬物質を用いた衝撃波伝播挙動に関して数値解析を行い、媒体界面での衝撃波伝播挙動のメカニズムの解明への実証になる結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this study, an experiment and numerical simulation on interaction of underwater shock wave at the interface of materials with different acoustic impedance was performed, for an establishment of the fundamental research base for the development to the shock wave medical and biomedical application related to human tissue damage by shock wave interacting human body, and the shock wave bioengineering application about a shock wave sterilization technology. Shock wave interaction phenomena with the interface impedance was visualized by the shadowgraph method and recorded by an ultra-high-speed camera at high spatiotemporal resolution. The shock wave pressure history near the interface was measured simultaneously by a pressure sensor with high spatiotemporal resolution. The process of shock wave interaction with the interface was numerically simulated. The experimental and numerical results obtained is useful for understanding shock wave interaction phenomena with the interface.

研究分野：流体工学、衝撃波工学

キーワード：生体衝撃波干渉 水中衝撃波 水中膨張波 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

衝撃波医療応用として 1980 年代に体外衝撃波結石破砕術(ESWL)の確立のための研究が始まり、現在では血管新生や骨成長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、不均質な密度の場所で複雑な伝播挙動をすることが指摘され、特に気泡発生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、衝撃波が生体内で反射、回折を起こした時に発生する膨張波(負圧波)で負圧になった領域で気泡が発生するものと考えられるが、その発生メカニズムや閾値を含め、現在でも明確な説明が行われていない。また、近年、紛争地域において、爆発による外傷性脳損傷(Blast-induced traumatic Brain Injury)患者の多発により、頭部(脳)と衝撃波の干渉挙動説明が緊急な研究課題になっている。一方、水中膨張波を用いた、医療、バイオ応用研究が始まっている。音響インピーダンスを考慮した媒体界面での衝撃波反射によって発生させた膨張波を制御し、高負圧領域を発生させる検討がなされている。

これら生体内を伝播する衝撃波現象で重要な要素として音響インピーダンス(Acoustic Impedance,  $Z = \rho(\text{密度}) \times c(\text{音速})$ )が考えられる。異なる媒体で 1)音響インピーダンスが同じ場合は、入射衝撃波は全て圧縮波として透過するが、2)音響インピーダンスが大きい媒体へ入射した場合は、一部は圧縮波として透過し、入射衝撃波より高い圧力の反射圧縮波として反射する。3)音響インピーダンスが小さい媒体へ入射した場合は、同様に一部は圧縮波として透過するが大半は膨張波として反射する性質を持っている(図 1)。

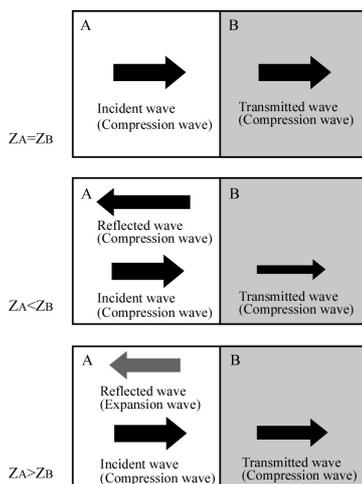


図 1 音響インピーダンスの異なる媒体界面での衝撃波挙動

### 2. 研究の目的

本研究は、音響インピーダンス(密度と音速の積)の異なる生体模擬物質中を伝播する衝撃波現象を高時間・空間分解能光学可視化計測および圧力測定によって明らかにし、生

体に作用する衝撃波の影響つまり衝撃波医療分野応用研究、衝撃波殺菌技術等のバイオエンジニアリング分野応用研究へ展開するための研究基盤を確立することが目的である。計画している具体的な研究項目は、生体模擬物質中の衝撃波伝播挙動の解明、音響インピーダンス差のある媒体界面での衝撃波挙動の解明、膨張波作用による気泡発生の理論化と膨張波、気泡発生制御、更に、これらの生体中を伝播する衝撃波現象の数値解析との比較と検証の 4 つである。

### 3. 研究の方法

本実験研究における衝撃波発生法は、微小爆薬のアジ化銀( $\text{AgN}_3$ )ペレット起爆による衝撃波を用いる。アジ化銀ペレットは、質量 10mg、直径約 1.5mm の小さな爆薬であり、室内実験が可能で実験再現性が良い。起爆のための着火はナノパルスのレーザー光を照射し起爆させるため、計測装置と数ナノ秒オーダーの精度良い同期が行える。

本実験の計測方法は、主に、高速度光学可視化計測と圧力測定である。シャドウグラフ法で可視化した映像を高速度カメラによって記録する。高速度カメラは、拡大した微小領域の水中衝撃波現象に対応できる高速度カメラ(IMACON200)を使用する。圧力測定には、ニードルタイプの水中衝撃波用圧力センサを用いる。また、生体模擬物質中の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。

本実験では、生体模擬物質として、音響インピーダンス値が近い、水、アクリル、また比較のため音響インピーダンス値が高い、アルミニウム、ステンレスを用いた。

### 4. 研究成果

音響インピーダンスが異なる媒体界面での衝撃波反射挙動の解明のため、水面-空気界面に設置した固体材料の薄板(厚さ 1mm)に水中微小爆薬起爆による衝撃波を作用させる実験をおこなった。図 2~5 に水中衝撃波の界面(薄板)での反射挙動のシャドウグラフ連続写真を示す。図には、起爆(衝撃波発生)を基準とした経過時間を示す。撮影速度は 500ns/フレーム(2Mfps)、露光時間を 10ns とした。上方より挿入した圧力センサ先端が確認できる。

図 2 は、水-空気界面での衝撃波挙動である。水中で微小爆薬を起爆したことによって発生した衝撃波ははじめのフレームで水-空気界面の直前まで到達している。その後、水面で膨張波として反射する。膨張波の下方への伝播によって水面下の領域の圧力は低下し、膨張波背後ではキャビテーション気泡が発生している。

図 3 は、水-アクリル薄板-空気界面での衝撃波挙動である。水中衝撃波はアクリル薄板で反射して、複数の波をともなう反射波とな

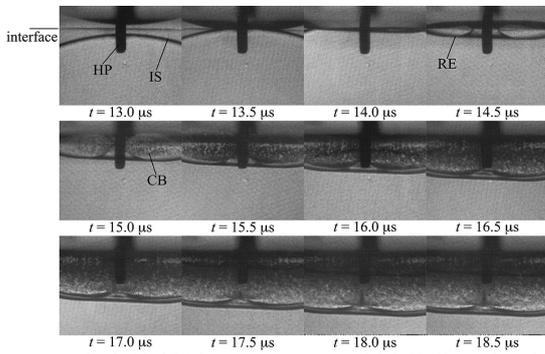


図 2 水中衝撃波の界面での反射挙動（水-空気界面）

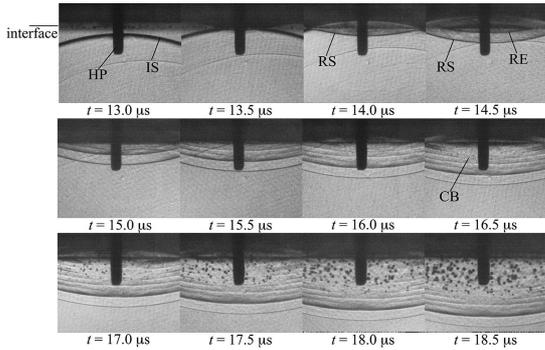


図 3 水中衝撃波の界面での反射挙動（水-アクリル板-空気界面）

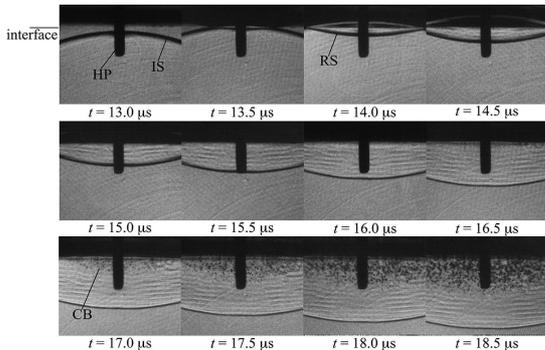


図 4 水中衝撃波の界面での反射挙動（水-アルミニウム板-空気界面）

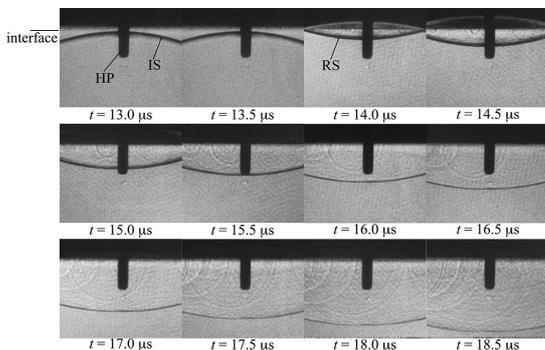


図 5 水中衝撃波の界面での反射挙動（水-ステンレス板-空気界面）

っている。第 1 の反射波は圧縮波であるが、第 2 の反射波は膨張波である、これは、第 2 波の背後でキャビテーション気泡が発生しているからである。第 1 波は、アクリル薄板で反射した波である。そして第 2 波は、アクリル

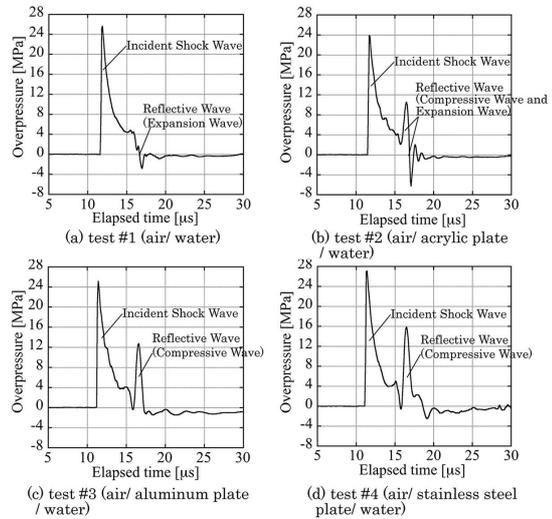


図 6 水中衝撃波の界面での反射挙動（水-ステンレス板（厚さ 1mm）-空気界面）

ル内に透過した圧縮波が、アクリル板-空気界面で反射した反射膨張波である。この膨張波とその背後に続く複数の波は、板内に透過した圧縮波が板内で繰り返し伝播、反射を行うため、複数の波になっている。第 1、第 2 の反射波頭の間隔を連続画像から読み込むと約 1.09mm であり、透過した圧縮波がアクリル板内をアクリル音速で伝播、往復するのにかかる時間で、水中を伝播する距離に等しい。

図 4 は、水-アルミニウム薄板-空気界面での衝撃波挙動である。アルミニウムはアクリルに比べ音響インピーダンス値が高い材料である。アクリルの場合と同様に、水中衝撃波が界面で反射し、複数の反射波を伴った反射波となっている。同様に、第 1 波が圧縮波で第 2 波が膨張波であり、これら波の間隔は、アクリルの場合に比べ短くなっている。この場合、作用した衝撃波の大半の部分が、圧縮波として反射する。しかし、残りわずか板内へ透過する圧縮波が空気界面で反射し発生する膨張波によって、界面付近ではキャビテーション気泡が発生している。

図 5 は、水-ステンレス薄板-空気界面での衝撃波挙動である。水中衝撃波が界面で反射し、複数の反射波を伴った反射波となっている。しかし第 2 は以降の波は不鮮明であり、キャビテーション気泡は発生していない。つまり、作用した衝撃波のほぼステンレス薄板で反射しており、膨張波は非常に弱い状態である。

図 6 は、図 2~5 の高速度光学可視化計測と同時計測した界面近傍の水中の圧力時間履歴である。センサの先端は界面より約 3mm の位置である。全ての条件で、起爆後約 12μs でセンサ先端に衝撃波が到達し、圧力が急峻に立ち上がっている。図 6(a)の水-空気界面の場合には、その後約 16μs で反射波、つまり膨張波が到達し圧力が約-2.8MPa まで低下している。図 6(b)の水-アクリル板-空気界面の場合には、反射圧縮波と反射膨張波の 2 つの反射波が到達している。反射膨張波によって圧力

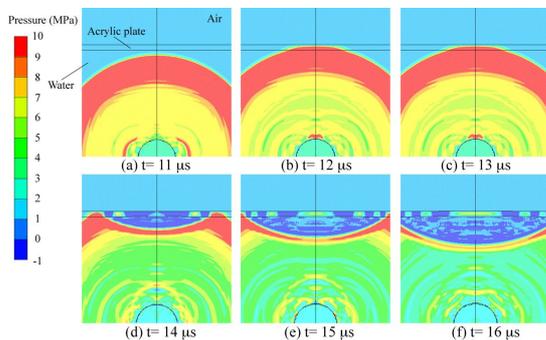


図7 水中衝撃波の界面での反射挙動の数値解析結果(水-アクリル板-空気界面、圧力分布)

が約-6.3MPaまで低下し、水-空気界面の場合よりも低くなる結果となった。図6(c)、(d)のアルミニウム、ステンレスの場合も同様に反射波は圧縮波に続き膨張波が到達するが、膨張波は、音響インピーダンス差が大きくなるこれら条件では、膨張波による負圧のピーク圧は小さくなる結果となった。薄板を設置した場合の反射圧縮波のピーク過剰圧を比較すると、音響インピーダンス差が大きくなるにしがたい、ピーク過剰圧は大きくなる結果となった。

図7に水面衝撃波の界面での反射挙動の数値解析結果を示す。条件は、図3の場合と同じ、水-アクリル板(厚さ1mm)-空気界面の場合である。結果は圧力分布を示している。発生した水中衝撃波がアクリル板へ干渉し、一部はアクリル板内へ透過し、空気界面で反射して、膨張波を伴う圧縮波が下方へ伝播する、実験結果と同様の結果が得られた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

- K.Ohtani, T.Ogawa, Underwater expansion wave focusing by reflection at the air interface, Proc. SPIE 10328, Selected papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, 査読有, 2017年  
<http://dx.doi.org/10.1117/12.2268514>
- K.Ohtani, T.Ogawa, Expansion wave and cavitation bubble generation by underwater shock wave reflection from the interface, JSME Mechanical Engineering Journal, 査読有, vol.3(6), 2016年, 16-00298  
<http://doi.org/10.1299/mej.16-00298>
- K.Ohtani, T.Ogawa, Micro-explosive-induced underwater shock wave propagation and reflection at the interface, Science and Technology of Energetic Materials, 査読有, vol.76(6), 2015年, 139-143  
<http://www.jes.or.jp/mag/stem/Vol.76/No.6.03.html>

[学会発表](計29件)

- K.Ohtani, T.Ogawa, Underwater expansion wave focusing by reflecting at the air interface, 31st International Congress on High-speed Imaging and Photonics (ICHSP-31), 2016年11月8日, ホテル阪急エキスポパーク(大阪)
- 大谷清伸, 小川俊広, 水中膨張波の収束挙動に関する研究, 平成27年度衝撃波シンポジウム, 2016年3月9日, 熊本大(熊本)
- 大谷清伸, 中川敦寛, 中川桂一, 生体模擬物質中の衝撃波伝播挙動, 火薬学会2015年度秋季研究発表会, 2015年12月10日, 豊泉荘(別府)
- 大谷清伸, 小川俊広, 水中衝撃波の界面反射膨張波作用による気泡生成, 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2015, 2015年11月5日, アイーナ(盛岡)
- K.Ohtani, T.Ogawa, Expansion wave and bubble generation by underwater shock wave reflected from the interface, The International Congress on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM15), 2015年10月6日, ロジワールホテル豊橋(豊橋)
- 大谷清伸, 小川俊広, 種々音響インピーダンス材料中の水中衝撃波反射に関する研究, 平成26年度衝撃波シンポジウム, 2015年3月10日, ホテル天坊(伊香保)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大谷 清伸 (OHTANI, KIYONOBU)  
 東北大学・流体科学研究所・助教  
 研究者番号: 80536748

### (2) 研究分担者

小川 俊広 (OGAWA, TOSHIHIRO)  
 東北大学・流体科学研究所・技術専門員  
 研究者番号: 30375133

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

中川 敦寛 (NAKAGAWA, ATSUSHIRO)  
 東北大学・大学院・院内講師

阿部 淳 (ABE, ATSUSHI)  
 伊藤忠テクノソリューションズ・科学システム事業部・工学博士