

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14172

研究課題名(和文)可燃性マイクロバブル爆轟による液体殺菌技術の開発

研究課題名(英文)Liquid Sterilization Using Collapse of Explosive Bubbles

研究代表者

石井 一洋(Ishii, Kazuhiro)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：20251754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：水中のエチレン-酸素量論混合気の単一気泡に衝撃波を作用させて、気泡挙動および気泡が生成する衝撃波について調べた。また、水中に導入した多数の空気マイクロバブルに対して水中衝撃波を作用させる実験を行った。その結果、以下の事項がわかった。水中衝撃波背後の可燃性気泡は収縮して最小半径に到達する付近で燃焼する。気泡の近傍の衝撃波最大圧力は気泡からの距離に反比例して減衰し、衝撃波最大圧力は可燃性気泡では空気気泡の約2倍となる。マイクロバブルの存在により水中衝撃波の波形が鋭くなり、ピーク圧力は減衰するが、水中衝撃波の強度を高めるとマイクロバブル添加によりピーク圧力が最大で76%高くなる。

研究成果の概要(英文)：An underwater shock wave was driven in water containing a stoichiometric ethylene-oxygen bubbles to study collapse of an explosive bubble and the subsequent shock wave generation. In addition, an underwater shock wave was driven in water containing air-microbubbles to study pressure gain. The following results have been obtained. 1) After passage of the underwater shock wave, the bubble starts to shrink, resulting in explosion just before reaching the minimum radius. In the bubble rebound phase a shock wave is generated whose strength is about twice that for the air bubble. 2) The maximum pressure of the shock is inversely proportional to the distance. 3) The microbubbles generally weaken the incident underwater shock wave, whose waveform changes into a sharp one. However, it is demonstrated that the microbubble addition makes the peak shock pressure 1.76 times higher than in the case without addition of microbubbles.

研究分野：燃焼工学

キーワード：燃焼 デトネーション 衝撃波 バブル

1. 研究開始当初の背景

近年、船舶バラスト水に取り込まれた海洋生物が船舶の移動とともに他の海域へ放出され、海洋生態系を破壊していることが問題となっている。国際海事機関(IMO)はバラスト水管理条約(Ballast water management, BWM)を2004年に採択し、2017年9月にBWMは発効されている。これに伴い、国内でもバラスト水処理システムが開発されており、次亜塩素酸等の薬品、紫外線、フィルターを用いた方法がIMOの承認を得ている。しかしながら、薬品等の活性物質を使用した方法にはバラスト水放出後の環境負荷を減らすため厳しい基準が設けられており、低コストで環境負荷の少ないバラスト水処理システムが求められている。

そこで水中衝撃波とマイクロバブル添加の相乗効果の利用が提唱されている。これまでに、マイクロバブルを含んだ水中に衝撃波が伝播すると、マイクロバブルが収縮・膨張する過程で非常に高い圧力が発生することが知られている。例えば、神戸大の阿部らは、海洋ビブリオ属を含む水中へ200 MPaを超える衝撃圧を作用させて、海洋ビブリオ属への死滅効果を示している。東邦大の宇多川らは、死滅に必要とされる衝撃圧が生物の種類により異なること、衝撃波を作用させる回数を増やすことで死滅率を高められることを示している。

ところで、マイクロバブルが衝撃圧縮されるとバブル内の気体は瞬間的に高温・高圧となるので、可燃性混合気でマイクロバブルを構成して気相爆轟を起こせば、更なる超高压の生成が可能と考えられる。名大の長谷川らの研究では、可燃性気泡を含む液体中で気泡燃焼に支持された高压の衝撃波伝播が示されている。彼らは直径20 mm程度の水素-酸素-アルゴン混合気の気泡が一行に並んで浮上するグリセリン中へ衝撃波を透過させ、気泡の可視化と壁面での圧力計測を行った。その結果、燃焼を示す自発光が確認され、燃焼の有無により気泡の膨張過程に違いが見られた。また、燃焼が生ずる場合には壁面圧力が高く計測された。Sychevらは、液体・気体の組成、ポイド率を変化させて実験を行い、圧力波形を保ちながら減衰なく伝播する自己維持波の存在を実験的に示した。Mitropetrosらは衝撃波の影響を受けた可燃性気泡を可視化することにより、可燃性気泡が球状衝撃波を生成する様子を示した。以上から、前述の自己維持波は多数の可燃性気泡が生成する衝撃波によって支持されていると考えられる。しかしながら、この自己維持波の構成要素と考えられる単一の可燃性気泡が生成した衝撃波に関する圧力計測は、報告者の知る限り行われていない。

2. 研究の目的

可燃性気泡に衝撃波を作用させる既往の

研究では、殺菌対象の液体中に可燃性気泡を導入することで、容易に高压の衝撃波を得られることを示唆している。そこで本研究では、可燃性気泡を用いた衝撃波による液体殺菌に関する基礎研究として、水中衝撃波通過後の可燃性気泡の挙動と、水中衝撃波とマイクロバブル群との干渉について調べた。

可燃性気泡については、シャドウグラフ法により衝撃波を可視化することで、単一気泡が生成する衝撃波の挙動を詳細に調べるとともに、不活性気泡との比較を行うことで、気泡内における燃焼現象が、気泡が生成する衝撃波へ与える影響の定量化を行った。また、気泡界面および気泡周囲の液体流動に関する数値計算を行い、気泡挙動と気泡が生成する衝撃波の解析結果と実験結果との比較を行った。

マイクロバブル群については、マイクロバブル発生器で生じた空気マイクロバブル群に対して水中衝撃波を作用させ、マイクロバブル群の存在が水中衝撃波の伝播に与える影響について実験的に調べた。

3. 研究の方法

(1) 水中衝撃波による単一可燃性気泡の崩壊実験

本実験では、水中衝撃波は気相デトネーションで駆動した。図1に実験装置の概略図を示す。実験装置はデトネーション管、収束部、試験部の3つの部分から構成される。デトネーション管は直径100 mm長さ1032 mmの円筒管である。収束部は長さ68 mmで、直径100 mmから直径50 mmまで断面積が縮小し、試験部と接続する。試験部は35 mm×35 mmの矩形断面を有し、長さ250 mmである。デトネーション管と収束部には

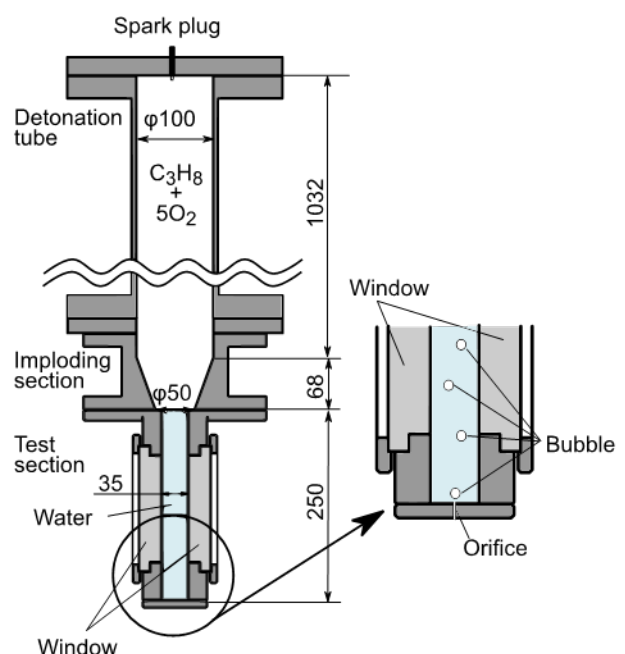


図1 実験装置概略図

プロパン - 酸素量論混合気を充填し、デトネーション管上端のスパークプラグで点火する。試験部側面のうち対向する2面に可視化窓を設置し、気泡や衝撃波の可視化を行った。試験部側面の残りの2面には、2種類の圧力変換器 (A: Müller Instruments 社製 Müller-Platte Needle Probe, B: PCB Piezotronics 社製 M109B01) が設置されている。圧力変換器 A は、感度に圧力波入射方向の角度依存性があるものの、時間・空間分解能が高い。一方、圧力変換器 B は壁面に面一で設置できる。試験部底面にはオリフィスが設けられ、これを通じて試験部に気泡を導入する。可燃性気泡はエチレン - 酸素量論混合気とし、比較のために用いた不活性気泡は空気で構成した。

図2にシャドウグラフ法による可視化用光学系の配置を示す。気泡は水中を浮上する際に螺旋やジグザグの軌道を描き、試験部中心を垂直に浮上するわけではない。そこで圧力変換器 A の軸上に2本のレーザー光を交差させ、一定間隔で放出される気泡がこの交点に到達したことをトリガーとしてデトネーション管内の混合気を点火した。DDT 過程を経てデトネーションは下方向へ伝播し、水面に到達する。水中には衝撃波が透過し、気泡に作用することとなる。なお、気泡の浮上速度はデトネーション速度、水中衝撃波速度に比べて十分に遅く、気泡がレーザー光の交点に到達してから気泡に水中衝撃波が作用するまで気泡はほとんど移動しない。

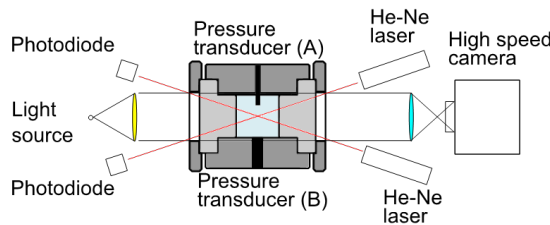


図2 シャドウグラフ光学系

気泡界面挙動と周囲液体圧力について数値計算を行った。ここで気泡は単一で球対称とし、気泡内部の圧力、温度、密度は均一とした。また気泡壁面を通じての熱および物質移動は無視し、気泡内の気体は理想気体を仮定した。気泡挙動の計算には液体の圧縮性を考慮した以下の Herring の式を用いた。

$$R\ddot{R}\left(1 - \frac{2\dot{R}}{c_{l\infty}}\right) + \frac{3}{2}\dot{R}^2\left(1 - \frac{4\dot{R}}{3c_{l\infty}}\right) + \frac{P_{l\infty} - P_{l,R}}{\rho_{l\infty}} - \frac{R\dot{P}_{l,R}}{\rho_{l\infty}c_{l\infty}} = 0$$

$$P_{l,R} = P_g - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R}\dot{R}$$

ここで、 R 、 $c_{l\infty}$ 、 $\rho_{l\infty}$ 、 $P_{l\infty}$ 、 $P_{l,R}$ 、 P_g 、 σ 、 μ は、それぞれ気泡半径、無限遠方での液体音速、密度、圧力、気泡壁面での液体圧力、気泡内

の圧力、表面張力、粘性係数を表す。また、気泡近傍の液体圧力は Fujikawa らの方法により、運動量保存則から求まる次式で求めた。

$$P_l(r,t) = -B \left[1 - \frac{P_{l\infty} + B}{B} \left\{ 1 - \frac{n-1}{c_{l\infty}^2} \left[\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial\Phi}{\partial r} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{n}{n-1}} \right]$$

$$\Phi(r,\eta) = -\frac{1}{r} \left\{ R^2\dot{R} - \frac{R^2}{c_{l\infty}} (2\dot{R}^2 + R\ddot{R}) \right\}$$

$$\eta = t - \frac{r-R}{c_{l\infty}}$$

ここで r 、 t 、 Φ 、 η は気泡中心からの距離、時刻、速度ポテンシャル、特性時間を表す。また B 、 n は Tait の状態方程式に関連する定数で $B = 304.7$ MPa、 $n = 7.15$ である。Herring の式は 4 次のルンゲクッタ法で数値積分し、気泡内部の化学反応は時間ステップ毎に気泡内温度・圧力を取得して、Cantera で素反応計算を行った。化学反応モデルには USC_Mech2 を用いた。

(2) 水中衝撃波とマクロバブル群との干渉

本実験では、気相デトネーションで駆動した水中衝撃波をマイクロバブルを含んだ水に入射させて水中衝撃波の挙動を調べた。図3に実験装置の概略図を示す。基本的には、(1)で用いた実験装置と同様であり、デトネーション管、収束部、試験部の3つの部分から構成されている。デトネーション管は直径 50 mm、長さ 1002 mm の円筒管で、収束部ではいったん直径 100 mm に拡大させてからからすり鉢状に断面積を縮小して収束させている。試験部は直径 6 mm、長さ 107 mm であり、収束部とは径 6 mm のオリフィス孔

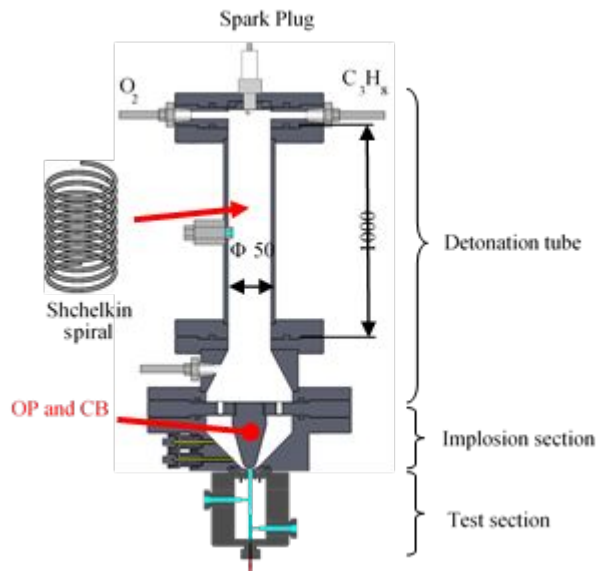


図3 実験装置概略図

を通じて収束中心の圧力が印可できるようになっている。デトネーション管と収束部にはプロパン - 酸素量論混合気を充填し、デトネーション遷移促進のために点火端にはシェルキン・スパイラルを挿入している。収束部には、デトネーション波面の収束性を高めるためにオリフィスプレート(OP)およびセンターボディ(CB)を設置している。試験部での水中衝撃波圧力は、Müller-Platte Needle Probe を用いて計測を行った。

4. 研究成果

(1) 水中衝撃波による単一可燃性気泡の崩壊実験

図4に水中衝撃波が作用した後の可燃性気泡の代表的なシャドウグラフ写真を示す。撮影速度は 1×10^6 fps、露光時間は 100 ns である。気泡の初期等価半径 R_0 は 2.4 mm、気泡に作用する水中衝撃波圧力 P は約 10 MPa であった。時間原点は気泡に衝撃波が作用する直前の画像が撮影された時刻とした。 $t = 0 \mu\text{s}$ で上方に見える横線が水中衝撃波を示し、下方向に伝播している。画像中央の偏平な黒い影が浮上中の気泡であり、中央右端に見える影が圧力変換器 A の先端である。気泡は水中衝撃波作用後に収縮し、ほぼ最小半径に到達する $t = 22 \mu\text{s}$ で燃焼による自発光が見られる。このとき発光する気泡の周囲に黒い影が見られ、気泡の輪郭がはっきりとしていない。この気泡周囲の黒い影は液体中の高圧領域を示すと考えられる。 $t = 24 \mu\text{s}$ で気泡は膨張に転じ、気泡を中心とした円形の影が見られ、これは気泡が生成した球状衝撃波である。

気泡の等価半径履歴を図5に示す。図中の白丸はシャドウグラフ写真から得られた実験値を示す。また、実線は半径 2.4 mm の可燃性気泡に 10 MPa のステップ状圧力が作用したときの気泡半径の時間履歴の計算結果である。図5より、気泡の収縮は実験結果が数 μs 早い、挙動はおおよそ一致している。実験において膨張後の気泡形状は非常に複雑であり、気泡等価半径は過大評価されていると考えられる。

図4、図5と同じ実験における圧力変換器 A で計測した圧力履歴を図6に示す。気泡中心から圧力変換器 A 先端までの距離 r は 5.8 mm であった。 $t = 0.5 \mu\text{s}$ で水中衝撃波入射による圧力上昇が見られ、 $t = 24.5 \mu\text{s}$ で最大圧力 22.4 MPa を示している。図4との比較より、この時刻に気泡の生成した衝撃波が圧力変換器 A に到達したと考えられる。また、比較のため空気気泡を用いた場合の圧力履歴を図6の下図に示す。空気気泡の初期等価半径 R_0 は 2.3 mm、水中衝撃波圧力 P は約 9 MPa であった。気泡中心から圧力変換器 A 先端までの距離 r は 5.8 mm であり、可燃性気泡の実験条件と等しい。このときの気泡が生成した衝撃波の最大圧力は $t = 27.3 \mu\text{s}$ における 9.4 MPa であった。

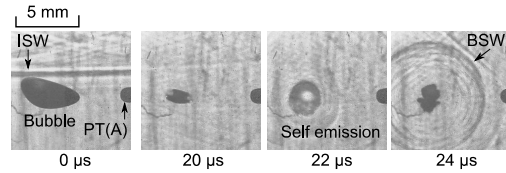


図4 可燃性気泡のシャドウグラフ画像と衝撃波生成

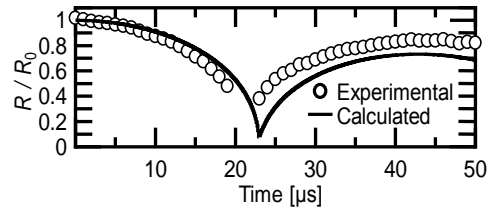


図5 気泡等価半径の時間履歴

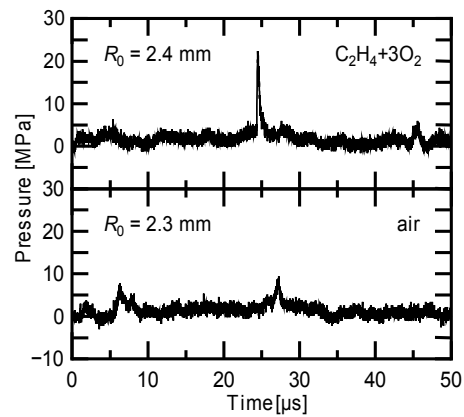


図6 圧力変換器 A による圧力履歴

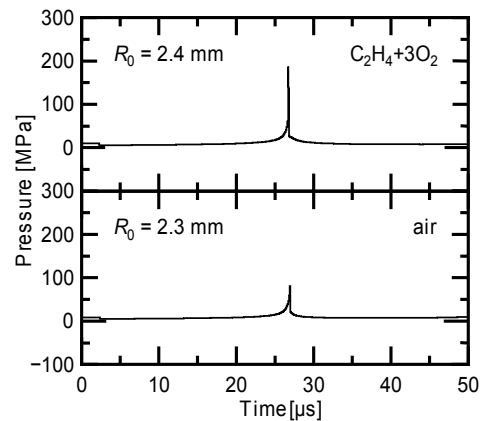


図7 半径位置 5.8 mm における圧力履歴の計算結果

図7に気泡からの距離 $r = 5.8 \text{ mm}$ における圧力履歴の計算結果を示す。最大圧力は可燃性気泡で 187 MPa、空気の気泡で 81 MPa であり、数値計算の最大圧力は実験結果の約 10 倍となった。計算において気泡は球形を仮定しているが、実験において気泡は浮上中に抗力を受けて偏平となるとともに、衝撃波による等方的でない力を受ける。そこで気泡の

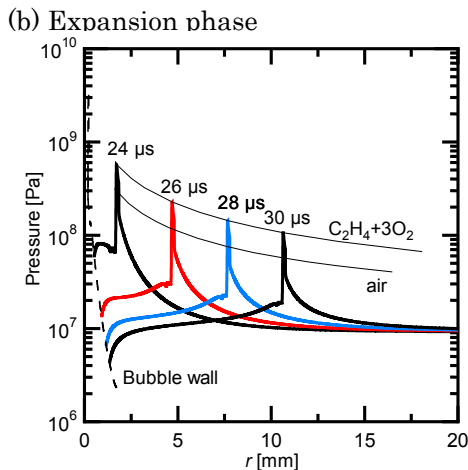
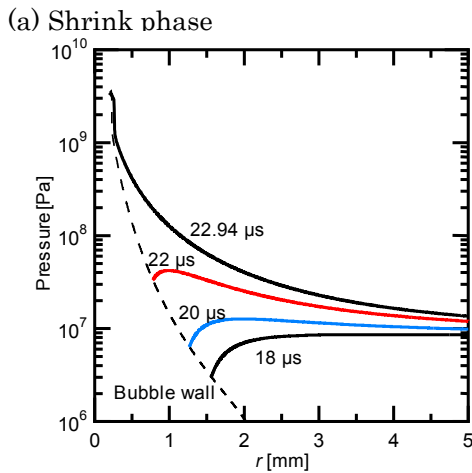


図8 気泡周囲の液体圧力分布の計算結果

非球形性により生成される衝撃波は弱いと考えられる。

図8に可燃性気泡の(a)収縮過程と(b)膨張過程での気泡周囲の液体圧力分布の計算結果を示す。同図において破線は気泡壁の位置を示す。収縮過程では、 $t = 22 \mu\text{s}$ から $22.94 \mu\text{s}$ にかけて気泡のごく近傍で気泡に作用する衝撃波圧力 P_i よりも高圧の領域が形成され、数 GPa まで到達している。この高圧領域は図4において気泡近傍に見られる黒い影と対応していると考えられる。膨張過程では切り立った衝撃波が外側に伝播し、気泡近傍の圧力は低下している。また図8(b)の上側の細い実線は、可燃性気泡周囲の各時刻での最大圧力を結んだものである。衝撃波は気泡からの距離に反比例して減衰している。図8(b)の下側の細い実線は、空気気泡で同様の計算を行ったときの最大圧力を示している。これら上下の細い実線は一定の幅をっており、気泡からの距離によらず、可燃性気泡が生成する衝撃波は空気気泡が生成した衝撃波の約2倍強いことがわかる。気泡が生成した衝撃波が距離に反比例して減衰するという結果は、Hicklingらの結果と一致している。

図9に気泡近傍で計測された最大圧力と気泡からの距離の関係を示す。縦軸には最大圧

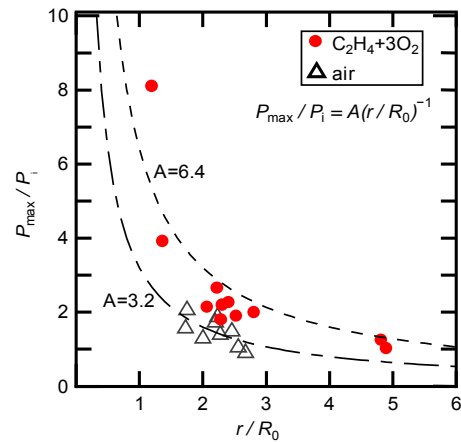


図9 最大圧力と気泡からの距離の関係

力 P_{max} を気泡に作用する水中衝撃波圧力 P_i で除した無次元最大圧力を取り、横軸には気泡からの距離 r を気泡の初期等価半径 R_0 で除した無次元距離をとった。赤丸が可燃性気泡を示し、白三角が空気気泡を示す。図9より、気泡から離れるほど最大圧力は低くなっている。また無次元距離 r/R_0 が2付近のところを見ると、可燃性気泡の方が空気気泡よりも無次元最大圧力が高いことがわかる。前述のように、気泡が生成した衝撃波圧力は気泡からの距離に反比例して減衰することから、図9のプロットに次式をフィッティングさせて、係数 A を求めた。

$$\frac{P_p}{P_i} = \frac{A}{r/R_0}$$

その結果、 A の値は可燃性気泡で6.4、空気気泡で3.2となった。このことから、可燃性気泡の崩壊により不活性気泡の約2倍の最大圧力を得られることがわかる。また、この可燃性気泡と空気気泡が生成する衝撃波の圧力比は、図7の計算結果と一致している。

(2) 水中衝撃波とマイクロバブル群との干涉

図10にマイクロバブルを添加していない場合の試験部における圧力波形を示す。このときの水中衝撃波の最高圧力は $9.12 \pm 0.41 \text{ MPa}$ であった。一方、マイクロバブルを添加した場合には、図11からわかるように、圧力ピークの波形が鋭くなっている。このようなマイクロバブル添加による圧力波形の変化は、気体と液体の圧縮性の違いによるものと考えられる。水中衝撃波通過後にマイクロバブルは収縮を開始するが、周囲液体は圧縮性がほとんど無い。そのためマイクロバブルから生ずる膨脹波が水中衝撃波に追いつき、その波形を変化させてゆくと考えられる。マイクロバブル添加時の水中衝撃波圧力は $7.89 \pm 2.81 \text{ MPa}$ とマイクロバブルを添加していない場合よりも平均値では低くなる。しかしながら、図11のように最大で 17.2 MPa のピーク圧力を得られており、これはマイク

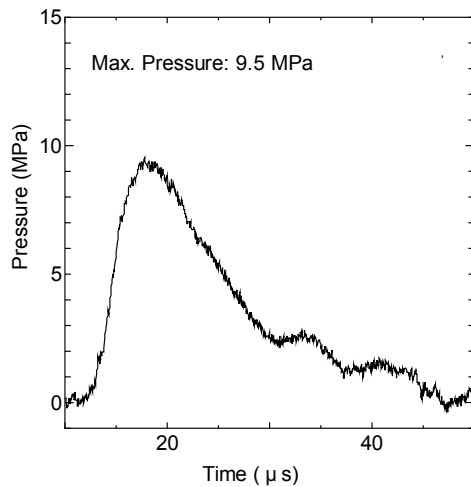


図 10 マイクロバブルを添加していない場合の水中衝撃波の圧力波形

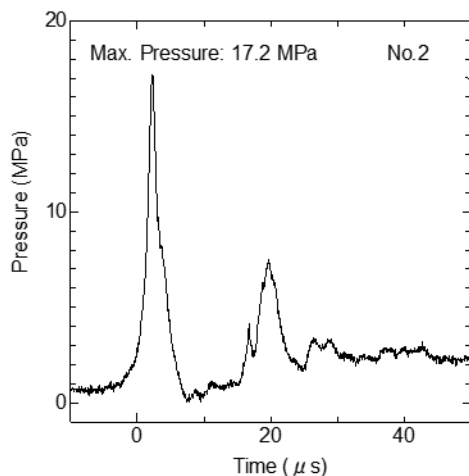


図 11 マイクロバブル添加時の水中衝撃波の圧力波形

ロバブルにより 76%の圧力利得を得られたことになる。現段階では、マイクロバブル添加時には水中衝撃波の最大圧力のばらつきが大きく、その要因は今後の研究課題であるが、本実験結果は、マイクロバブルの崩壊時に生ずる衝撃波によって、水中衝撃波が強まる可能性があることを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

K. Ishii, N. Watanabe, Shock wave generation by collapse of an explosive bubble in water, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, Vol.37, 掲載決定

渡辺菜月、石井一洋、水中衝撃波背後の可燃性気泡の挙動、日本燃焼学会誌、査読有、掲載決定

〔学会発表〕(計 5 件)

K. Ishii, N. Watanabe, Shock wave generation by collapse of an explosive bubble in water, 37th International Symposium on Combustion, August 3, 2018, Dublin

渡辺菜月、石井一洋、水中衝撃波による可燃性気泡崩壊時の衝撃波生成、平成 29 年度衝撃波シンポジウム、2018 年 3 月 8 日、仙台

渡辺菜月、石井一洋、水中衝撃波背後における可燃性気泡の自発点火と衝撃波生成、第 55 回燃焼シンポジウム、2017 年 11 月 15 日、富山

N. Watanabe, K. Ishii, Behavior of explosive bubbles behind an underwater shock wave, 26th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, August 3, 2017, Boston

渡辺菜月、伊藤響平、石井一洋、デトネーション駆動による水中衝撃波が可燃性気泡に及ぼす影響、第 54 回燃焼シンポジウム、2016 年 11 月 25 日、仙台

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ishii-lab.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井一洋 (ISHII, Kazuhiro)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：20251754

(2) 研究分担者

片岡秀文 (KATAOKA, Hidefumi)

大阪府立大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10548241