



新しい船舶バラスト水処理技術開発のための基礎研究 : 水中衝撃波の生成・収束実験と微小気泡運動の数値解析

万, 碧玉
辻井, 宣人
福田, 真也
阿部, 晃久

(Citation)

神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 07<商船・理工論篇>:81-86

(Issue Date)

2010-07

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCOI)

<https://doi.org/10.24546/81002405>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81002405>



新しい船舶バラスト水処理技術開発のための基礎研究： 水中衝撃波の生成・収束実験と微小気泡運動の数値解析

Fundamental Study on A New Technology of Ship Ballast Water Treatment: Generation and Focusing of An Underwater Shock Wave and Numerical Analysis of Microbubble Motion

万碧玉、辻井宣人、福田真也、阿部晃久

Biyu WAN, Nobuhito TSUJII, Shinya FUKUDA and Akihisa ABE

(平成 22 年 4 月 9 日受付)

Abstract

This paper reports the fundamental study on generation and focusing of an underwater shock wave by electric discharge in a two-dimensional ellipsoidal chamber and analytical prediction of rebound pressure of a microbubble driven by an experimental pressure profile of an incident underwater shock wave. In the experiment, the optimum condition for produce of higher pressure in the chamber is explored with optical observation of shock wave propagation by using a high-speed video camera and pressure measurement by an optical pressure transducer. It is found that the shape for a tip of electrode, the distance between electrodes and their position for arrangement are important to produce a clear cylindrical shock wave. The rebound pressure generated by collapse of a microbubble is estimated analytically by solving Herring's bubble motion equation with experimental pressure profile of an underwater shock wave. The analytical results provide that the rebound of a microbubble can produce high pressure enough to inactivate marine bacteria.

Key Words: Shock Wave, Microbubbles, Pulsed Discharge, Pressure Measurement, Ship Ballast Water

1. はじめに

本研究は、神戸大学海事科学研究科で進められている「輸送の三原則を統合した国際海上輸送システム創出」の研究プロジェクトにおける海洋環境保全研究部門の一研究テーマであり、水中衝撃波を利用する新しいバラスト水殺菌処理技術の提案とその確立を目指している。

現在、船舶バラスト水に含まれた微生物の越境移動が原因となっている地球規模の海洋生態系破壊が国際的に問題視されており、バラスト水処理装置の技術開発に、世界各国のメーカーや研究機関が鎗を削っている。国際海事機関（IMO）が定めた厳しい船舶バラスト水の水質基準に関する規制⁽¹⁾が、早ければ 2012 年から新造船全てに対して開始される見込みであり、IMO 承認を得るための企業の装置開発競争は、ますます加速している。しかしながら、IMO 基準におけるコレラ菌や大腸菌などの細菌類に対する規制値は非常に厳しく、多くの装置で薬剤による化学的殺菌処理が施されている。したがって、薬剤使用に伴う海洋環境へのリスクがあることやランニングコスト／管理コストに関する問題が残ることから、さらに効率的で環境に対して安全・安心な装置の開発が望まれている。

著者等は、海洋細菌の処理技術開発に集中し、薬剤を用いない方法を検討している。その一つが、微小気泡と衝撃波を利用する衝撃圧殺菌技術である。ガス銃の弾丸衝突によるアルミ容器封入菌体浮遊液への衝撃圧作用実験では、海洋ビブリオ属細菌が 200 MPa 以上の衝撃圧で不活性化する結果が得られており⁽²⁾、衝撃圧殺菌の可能性が示された。しかしながら、大量の船舶バラスト水処理への応用は難しいため、新たに微小気泡の崩壊時に発生する衝撃圧の利用を提案し、微小爆薬誘起の水中衝撃波と微小気泡群の干渉実験では、200MPa 以上の気泡崩壊衝撃圧の発生を確認している⁽³⁻⁶⁾。現在、菌体を用いた実証実験を行う段階であるが、爆薬を用いた実験方法は、気泡運動を駆動するための衝撃波の連続照射ができないなど、菌体実験の実施に際して不都合な点が多い。そのため、本研究では、菌体実験実施に必要な気泡運動を駆動する衝撃波生成装置の作製を行い、その性能の確認と改善、および微小気泡との干渉で発生する気泡崩壊衝撃圧の理論予測を試みた。駆動衝撃波の発生方法は、連続的な衝撃波生成を可能とするために、水中放電による方法を選んだ。水中放電衝撃波は、規模の違いはあるものの、工

学、医学分野等で一般的に用いられている⁽⁷⁻⁹⁾。本研究では、放電衝撃波の圧力不足を補うため、反射衝撃波の収束現象による高圧化を図った。また、衝撃波発生装置の最適条件を探るために、電極形状、電極間距離、電極設置方向について検討し、衝撃波の発生、伝播、収束衝撃波の形成過程の様子等を観測した。一方、実験から得られた圧力波形データを用いて、微小気泡の運動を単純な一次元理論で解析し、発生する再膨張圧力のピーク値を予測した。それらの結果から、殺菌実証実験に用いるための本装置の有効性について検討した。

2. 実験および気泡運動解析の概要

2-1 実験装置

装置全体の略図を図1に示す。実験装置は、最大出力 20kV のパルス放電用高圧電源装置 HPS18K-A（玉置電子工業株式会社製）およびアクリル製の放電部水槽および菌体用水槽から構成される。衝撃波を収束させるため、放電部の水槽は、長軸 100mm×短軸 60mm×幅 15mm の二次元的な楕円形状であり、焦点間距離は 80mm である。菌体試験実施時には、放電で生じる紫外線や電極の溶解による化学物質が菌体用水槽側へ流れ込まない様に、隔膜等により遮断する計画である。

本装置の衝撃圧生成過程は以下の通りである。

- (1) アーク放電により円筒衝撃波を発生
- (2) 円筒衝撃波が上部の楕円形状固体壁で反射
- (3) 反射衝撃波が水槽下部の第二焦点で収束

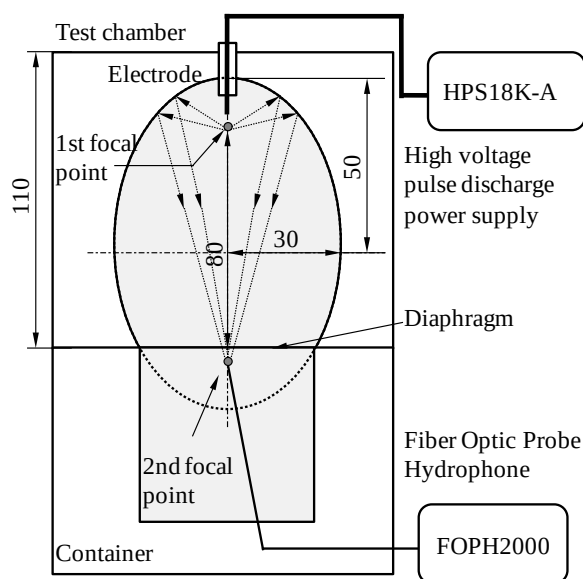


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

- (4) 直接波および収束衝撃波が下部の菌体用水槽内へ伝播し、気泡群と干渉、気泡の崩壊衝撃圧を生成

2-2 圧力計測

衝撃波による発生圧力を計測するため、光ファイバー圧力変換器 FOPH2000（Fiber Optic Probe Hydrophone, RP acoustics）を用いた。FOPH2000 は、直径 0.1mm の光ファイバー先端に接する水の屈折率変化を利用して光学的に圧力計測を行うため、水中の電流や磁界による影響を受けず、高い時間精度および空間解像度を有する。水中衝撃波面の速い圧力変動や微小気泡の崩壊衝撃圧を高精度で計測できることから、本実験において有効である。本圧力計測システムの略図を図2に示す。

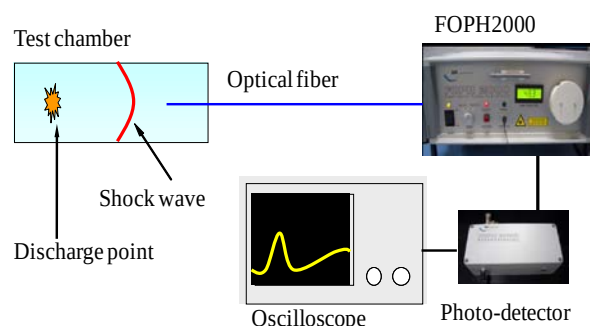
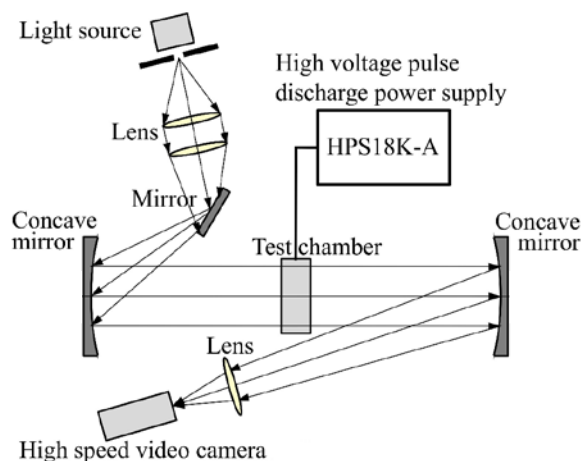


Fig.2 Pressure measurement system

2-3 可視化観測

衝撃波の発生・伝播過程や収束の様子を観測するために、高速度ビデオカメラを用いたシャドウグラフ法による可視化実験を実施した。用いた高速度ビデオカメラは、（株）島津製作所製の Hyper Vision HPV2 および（株）フotron製の FASTCAM SA5 である。図3に光学系の配置を示す。



2-4 単一気泡モデルによる理論解析

一次元球対称の単一気泡モデルを用いた解析には、液体の圧縮性を考慮した Herring の式を使用した⁽¹⁰⁾。運動方程式を以下に示す。

$$\left\{ R \left(1 - \frac{2\dot{R}}{C_\infty} \right) + \frac{4\mu}{\rho_\infty C_\infty} \right\} \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \left(1 - \frac{4\dot{R}}{3C_\infty} \right) - \frac{1}{\rho_\infty} \left\{ -P_\infty + P_{in0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \left(1 - \frac{3\gamma\dot{R}}{C_\infty} \right) + \frac{2\sigma + 4\mu\dot{R}}{R} \left(\frac{\dot{R}}{C_\infty} - 1 \right) \right\} = 0 \quad (1)$$

ここで、 R は気泡半径、 R_0 は初期気泡半径、 C_∞ は無限遠方液体中音速、 ρ_∞ は無限遠方での液体密度、 μ は液体の粘性係数、 σ は液体の表面張力、 γ は気泡内部気体の比熱比、 P_∞ は無限遠方での圧力、 P_{in0} は気泡内部初期圧力である。(1) 式を差分化し、4 次の Runge-Kutta-Gill 法を用いて計算を行った。

3. 結果と考察

FOPH2000 は、光学的に測定を行うため、放電に伴う発光の影響を受ける。図 4 に発光の影響を受けた際の異常な出力例を示す。圧力変換器出力変動は、放電の光を感知すると、瞬間的に負圧方向に大きく振れるが、光の影響が弱ければ、その直後に圧力値がゼロへ戻る。しかし、光の影響が強すぎる場合、図 4 に示す様に、圧力値がゼロ付近に戻らず、異常な高圧力値を示すことがある。この異常な出力は、その後に記録される衝撃波による過剰圧力値の信頼性を著しく低下させるため、放電光の影響を極力弱める必要がある。そこで、放電光が圧力変換器に及ぼす影響を確かめるために、電極に対する光ファイバーの設置角度を図 5 中の模式図に示す様に、 $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ に変化させて、圧力値の確認を行った。それぞれの角度において、20 回の圧力計測を実施し、衝撃波が到達する直前の $10\mu\text{s}$ 間の平均圧力値をベース圧として比較した結果が、図 5 である。この結果から、設置角度 $\theta = 0^\circ$ においてベース圧が著しく高くなり、放電光の影響を強く受けたことが明らかである。 $\theta = 0^\circ$ 以外の設置角度の場合、いずれの角度でもベース圧はほぼゼロとなり、放電光の影響による異常な圧力上昇は見られなかった。FOPH2000 の光ファイバースローブの感度は、衝撃波面に対して垂直に設置するとき最も高くなるため、傾斜配置による出力低下が懸念されたが、本実験では、 30° 程度の傾きまで出力値に違いはなかった。

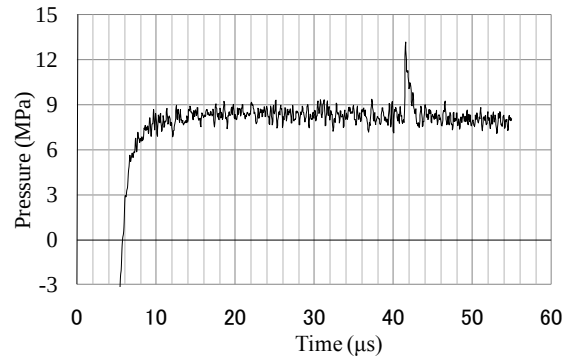


Fig.4 Pressure record affected strongly by flash of electric discharge

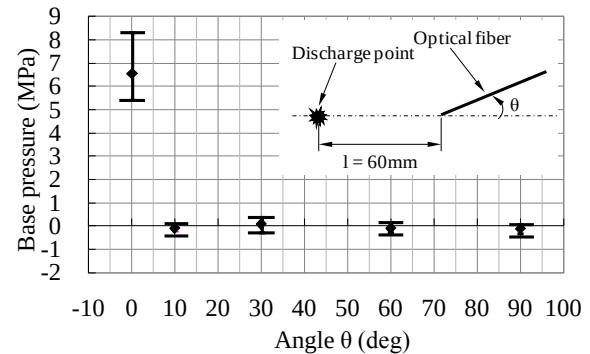


Fig.5 Base pressure vs. setting angles of the fiber probe of FOPH2000

3-2 電極形状と電極間距離

放電電極は、当初、直径 0.9mm のステンレス製の針金を軸に対して垂直に切断して使用した。その際に得られた衝撃波のピーク圧力値は、約 1~2MPa 程度の低い値であった。一般的に、放電電極の浸水表面積を小さくすると、放電による水中衝撃波の圧力は上昇する。そのため、針金の先端を鋭く加工し、水性プロト（ゴム状塗料）を用いて、絶縁被覆した。また、放電の状態は、電極間距離によっても大きく変化すると考えられることから、図 6 に示すような簡易水槽（縦 180mm×横 250mm×奥行 180mm）を用いて、電極間距離 δ を $\delta = 4, 6, 8, 10, 12\text{mm}$ と変化させた圧力計測実験を行った。その結果、 $\delta = 6, 8, 10\text{mm}$ で得られたピーク圧の平均値はほぼ同様であったが、 $\delta = 4\text{mm}$ と 12mm では、圧力の低下や出力の乱れが生じ、不安定となった。これらから、本実験装置における最適な電極間距離は 8mm 程度であると判断した。図 7 は、上述した電極と電極間距離の最適な条件の下で、簡易水槽内において放電部から 60mm 離れた位置で計測された圧力変動の一例である。急峻な圧力の立ち上りと背後の圧力減少が得られ、良好な衝撃波形が示されている。

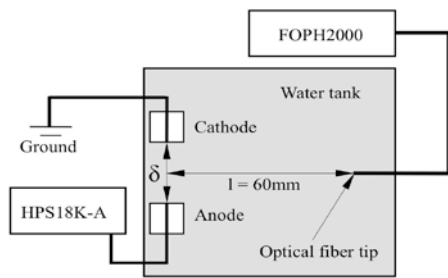


Fig.6 Schematic diagram of pressure measurement for exploring the optimum distance between the electrodes

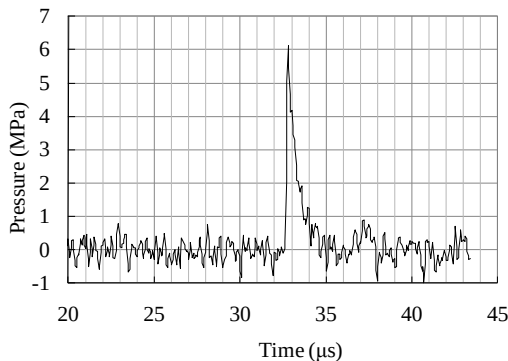


Fig.7 Pressure profile of a spherical underwater shock wave obtained under the optimum conditions on the electrodes

3-3 放電部水槽内での電極設置方向による衝撃波発生・収束への影響

図1の放電部水槽内に発生、伝播、収束する衝撃波の状態が、電極設置方向によって異なるか否かを確認するために、高速度ビデオカメラによる可視化実験を行った。電極の設置方向は、観測窓面に対して平行と垂直の二通りである。

図8(a)～(f)は、電極を窓面に対して平行に設置した場合のビデオ映像から抽出した画像である。撮影条件は、解像度 312×260pixel、撮影速度 500kfps、露光時間 250ns である。(a)で、強い閃光とともに爆発的に放電エネルギーが放出され、(b)では電極周辺に円筒状に広がるいくつかの衝撃波面(1st SW)の発生が観察出来る。発生する衝撃波面の形状は、理想的な同心円にならず、やや楕円状に変形しており、波面の圧力状態も均一ではないことが伺える。(c)では、電極上方の壁面に設けられている空気抜き孔あるいは同軸電極の挿入孔(Slot)付近での擾乱の発生が伺える。また、電極部から下向きに拡大伝播する第一衝撃波面と、上壁面で反射し収束を始める第二衝撃波面(RSW or 2nd SW)の形成の様子が観察出来る。尚、PWはアクリル窓材中を伝播する弾性応力波である。(d)では、放電後の電極間での気泡発生がわかる。また、(d)中の破線で囲まれた流れ場には、多

数の反射衝撃波面が収束して第二衝撃波を形成する様子が観察出来る。本来、楕円形状水槽の第一焦点位置で円筒衝撃波が発生し、滑らかな壁面で理想的な反射が起これば、反射衝撃波面が楕円の長軸上で完全に重なる明確な収束衝撃波面が生じるはずであるが、本実験では、先に述べた様に、第一衝撃波の発生と壁面反射が良好に実現出来ていなかったため、収束状態が良くなく、反射波群に乱れが生じたと考えられる。(e)において、放電水槽の左下部からの反射衝撃波(RSW)が見られるが、これは、当初アースとして埋め込んだアルミ板による壁面の凹凸で生じた擾乱である。また、(e)中にCBで示す点線で囲んだ領域には、細かな気泡群の影が観察される。これらは、収束する第二衝撃波背後に生じる負圧によって生じたキャビテーション気泡群である。このことから、第二衝撃波面における圧力波の収束状態は良好ではないものの、比較的大きな圧力変動が発生していると考えられる。(f)では、放電水槽下部に接続している菌体用水槽の底面で反射してきた第一および第二衝撃波が観察され、これらの波の通過直後にキャビテーション気泡群が消滅する様子も捉えられている。

図9(a)～(f)は、電極を窓面に対して垂直に設置した場合の抽出画像であり、撮影条件は、解像度 128×104pixel、撮影速度 300kfps、露光時間 370ns である。(b)では、同心円状の明確な円筒衝撃波(1st SW)が観察出来る。その後、衝撃波の伝播、反射、収束の様子が、(c)～(f)においても鮮明に捉えられている。図8の画像と比較して、解像度が劣っているものの、衝撃波面の形状に乱れがなく、収束状態も良好に見える。

図10と図11は、それぞれ、図8と9の電極設置条件の下、水槽の第二焦点位置で計測された圧力変動を示している。第二焦点の位置は、放電部から 80mm 離れており、水中衝撃波の伝播速度を 1500m/s と仮定すると、放電後に第一衝撃波が第二焦点に到達する時刻は約 53μs、収束衝撃波が到達する時刻は約 67μs と見積もられる。図10の第一波のピーク圧力値は約 2.7MPa、収束した第二波のピーク圧力値は、1.8MPa 程度である。一方、図11では、第一波が図10と同様に約 2.7MPa であるのに対して、第二波は約 4.5MPa が得られ、収束性が著しく向上していることがわかる。したがって、電極を窓面に対して平行に設置するよりも垂直に設置する方が、水中衝撃波の形成や収束において有利であると考えられる。また、反射壁面上の気泡付着や電極等の挿入孔の存在のために、理

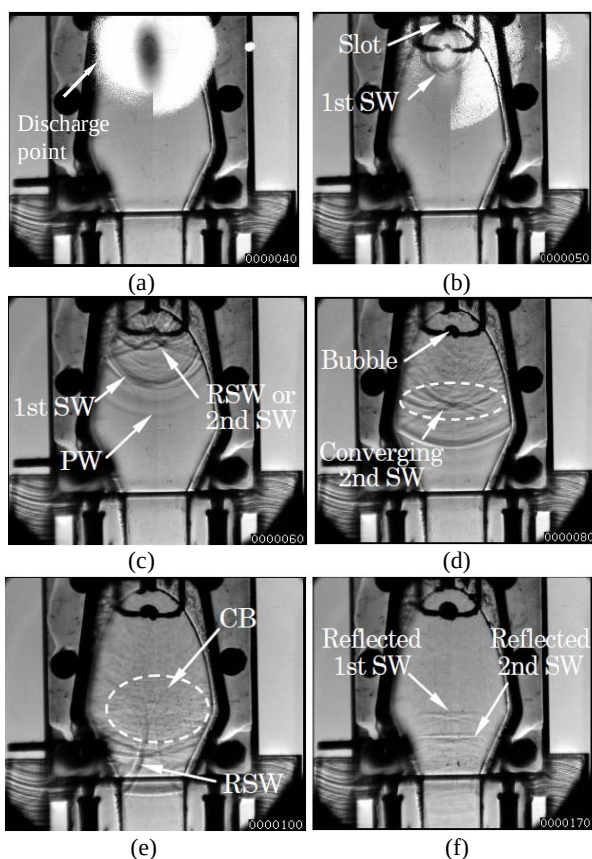


Fig.8 Sequential photographs of shock wave generation and focusing with the electrodes setting in parallel to the window: a high-speed video camera is HPV2 (SHIMADZU Co.), the resolution is 312×260 pixels, the framing speed is 500kfps, and the exposure time is 250ns

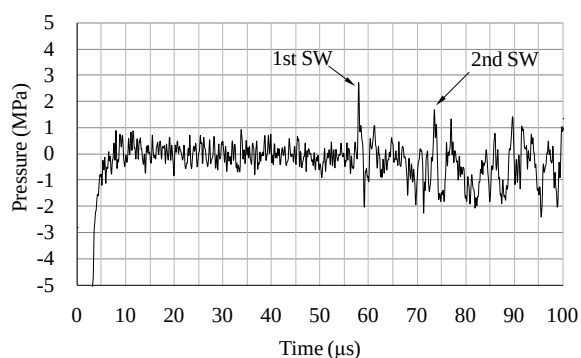


Fig.10 Pressure record at the second focal point on electrodes setting in parallel to the window

想的な衝撃波の反射が実現できてないことから、反射壁面の状態を改善する事で、さらに高い収束圧が得られると考えられる。

3-4 理論解析による気泡崩壊衝撃圧の推定

本実験装置で得られる衝撃波と微小気泡の干渉により、殺菌に有効と考えられる 200MPa の再膨張圧が得られるか否かについて、微小気泡

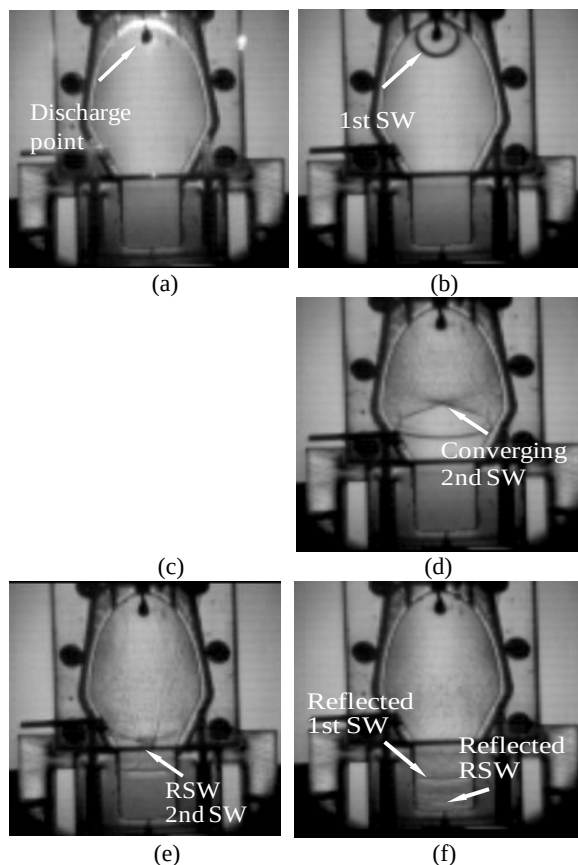


Fig.9 Sequential photographs of shock wave generation and focusing with the electrodes setting in vertical to the window: a high-speed video camera is FASTCAM SA5 (PHOTRON Co.), the resolution is 128×104 pixels, the framing speed is 300kfps, and the exposure time is 370ns

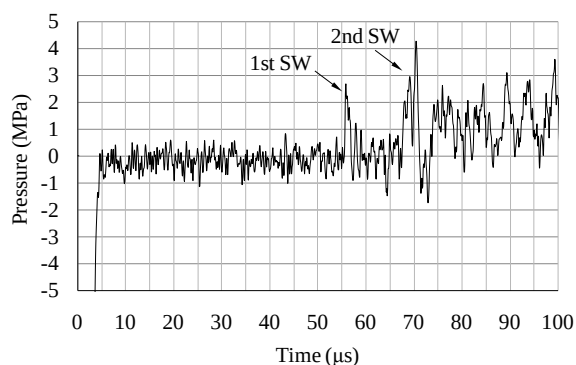


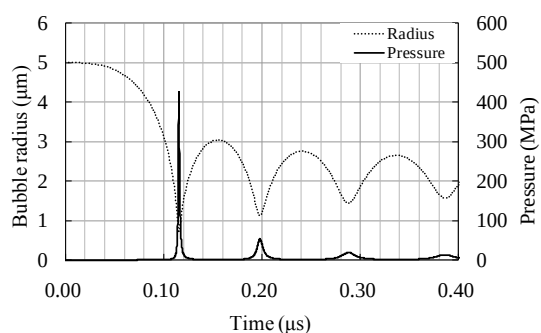
Fig.11 Pressure record at the second focal point on electrodes setting in vertical to the window

運動の単純な一次元理論を用いて検討した。本解析には、図 7 に示した実験波形を用いた。微小気泡の初期直径が 10μm と 50μm の場合について気泡内部圧力、気泡半径の時間変化を求めた。結果を図 12 (a)、(b)に示す。

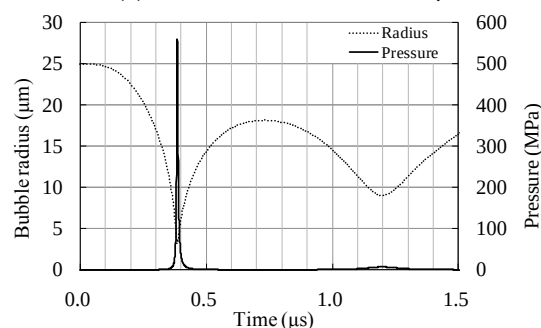
(a) の気泡直径 10μm の場合、一回目の再膨張が、衝撃圧作用後、約 120ns で生じ、最大圧力が約 420MPa に達する結果が得られた。一方、

(b) の気泡直径 $50\mu\text{m}$ の場合には、一回目の再膨張が約 400ns で生じ、その時の最大圧力は約 550MPa に達していることがわかる。気泡直径 $10\mu\text{m}$ の気泡の発生圧力が $50\mu\text{m}$ の気泡の場合よりも小さくなった原因は、気泡半径が小さいために、十分な圧力に曝される前に再膨張が生じてしまったためであると考えられる。一方、気泡径が大きすぎる場合には、と十分な収縮状態に達する前に周囲圧力が低下してしまうために、気泡内圧力は高くない。したがって、微小気泡の運動によって発生する衝撃圧は、気泡直径と入射衝撃波の圧力値および波面での圧力勾配と密接に関係しており、本実験装置の発生衝撃波に対する最適な気泡径を決定する事が、重要となる。また、本解析で使用した図 7 の圧力波形に対して最も高い再膨張圧力を発生する気泡径は、約 $25\mu\text{m}$ 程度と推定された。以上の解析結果は、いずれの場合においても 200MPa 以上の圧力発生を予測しており、バラスト水処理対象の菌体の不活性化には十分な効果が期待できる。

本研究では、水中放電による衝撃波発生装置を作製し、その性能評価を行った。可視化実験



(a) Initial bubble radius is $5\mu\text{m}$



(b) Initial bubble radius is $25\mu\text{m}$

Fig.12 Analytical solutions of microbubble motion calculated by using experimental pressure profile in Fig.7

により、水中衝撃波の発生、伝播、収束過程を観測すると共に、焦点位置における圧力計測を実施した。その結果、本実験装置における最適な電極形状、電極間距離を見出し、試験水槽内の電極を窓面に対して垂直方向に設置することで良好な衝撃波収束が得られることがわかった。また、さらに水槽壁面を滑らかにすることで、さらなる圧力増加の可能性が示された。一方、実験で得られた圧力波形を一次元球対称気泡の運動方程式に組み入れ、微小気泡の再膨張圧力の推定を試みた。その結果、海洋細菌の殺菌に効果的と考えられる 200MPa 以上の衝撃圧発生が予測された。以上より、今後の殺菌実証実験のための重要な知見が得られた。

謝 辞

本研究は、神戸大学海事科学研究科研究推進プロジェクト「輸送の三原則を統合した国際海上輸送システムの創出」(文科省)の助成を受けた。また、可視化実験では、(株)島津製作所の草野英昭氏と(株)フォトロンの高山勝博氏の協力を得た。ここに付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 福代康夫, 他: バラスト水規制とバラスト水処理装置の開発事例, NTS, 2008.
- (2) Abe, A., et al.: The effect of shock pressures on the inactivation of a marine *Vibrio* sp. *Shock Waves* Vol.17, No.1-2, pp.143-151, 2007.
- (3) 阿部晃久, 他: 衝撃波作用による微小気泡群の崩壊と衝撃圧生成, 日本機械学会論文集 B 編, 75 巻 752 号, pp. 668-675, 2009.
- (4) Abe, A., et al.: Application of Shock Pressures Generated by Collapsing Microbubbles to Inactivation Treatment of Marine Bacteria in Ship Ballast Water, *International Symposium on Marine Engineering* 2009, DT-1, No.16, 2009.
- (5) 阿部晃久, 他: 水中衝撃波の収束と微小気泡群を用いたバラスト水処理技術の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, pp.35-37, 2009.
- (6) 万碧玉, 他: 水中収束衝撃波の船舶バラスト水処理への応用に関する研究, 平成 21 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, No.19-B-1-13, pp.371-374, 2010.
- (7) 伊東繁: 水中衝撃波の食品加工への応用, 第 56 回応用物理学関連連合講演会, No.31, p-ZV-4, 2009.
- (8) Loske, A. M., et al.: Repeated application of shock waves as a possible method for food preservation. *J. Shock Waves*, No.9, pp.49-55, 1999.
- (9) Loske, A. M., et al.: Tandem shock wave cavitations enhancement for extracorporeal lithotripsy. *Phys. Med. Biol.* No.47, pp.3945-3957, 2002.
- (10) 加藤洋治, 新版 キャビテーション—基礎と最近の進化—, p.34, 1999.