衝撃波作用による微小気泡群の崩壊と衝撃圧生成*

阿部 晃久^{*1}, 大谷 清伸^{*2}, 高山 和喜^{*3}
西尾 茂^{*1}, 三村 治夫^{*4}, 武田 実^{*4}

Pressure Generation from Micro-Bubble Collapse at Shock Wave Loading

Akihisa ABE^{*5}, Kiyonobu OHTANI, Kazuyoshi TAKAYAMA,
Shigeru NISHIO, Haruo MIMURA and Minoru TAKEDA^{*5} Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University,
5-1-1 Fukaeminami-machi, Higashinada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 658-0022 Japan

To explore a reliable technology possibly applicable to the inactivation of micro-creatures in ship ballast water, this paper reports a result of a primary experimental and analytical study. We obtained 10 μm bubbles in averaged diameter by using a swirling flow type micro-bubble generator. We exposed a shock wave generated by a micro-explosion of a 10 mg silver azide pellet to the water containing micro-bubbles filled in a 10 mm wide parallel test section. Observations were carried out with a high-speed camera, and the corresponding rebound pressures of bubbles were measured with a fiber optic probe pressure transducer. We confirmed micro-bubble motion with higher temporal resolution and found that micro-bubble collapse arose in several hundred nano-seconds after the shock loading. The peak pressure generated by bubble collapse was over 200 MPa at the distance of 20 mm from the explosion center. These experimental results were consistent with those analyzed on the basis of the measured pressure data. The presence of such high impulsive pressures upon bubble collapse clearly indicated that the rebound pressure would be effectively applicable to the inactivation of micro-creatures in ship ballast water.

Key Words: Micro-Bubble, Shock Wave, Flow Visualization, Compressible Flow, Gas-Liquid Two-Phase Flow, Rebound Pressure, Pressure Measurement, Ship Ballast Water

1. は じ め に

近年, 海事科学の分野では, 船舶の安定制御に不可欠なバラスト水が, 海洋微生物の越境移動を招き, 海洋生態系破壊をもたらしているとして, 国際的に問題視されている^{(1)~(3)}. 国際海事機関 (IMO) は, 2004 年に船舶バラスト水の水質に厳しい基準を設定し, 船舶排水量に対応した段階的な条約の実施を進め, 各国に条約の順守を求めている⁽⁴⁾. そのため, 世界各国では, IMO 基準を満たす様々なバラスト水処理システムを提案・開発している. 主な処理方法として, 光触媒殺菌, キャビテーション作用と脱酸素殺菌の併用, キャビテーション作用とオゾン殺菌の併用, 電磁力による菌体の吸着除去などが挙げられる^{(5) (6)}. これらに

は, すでに IMO 承認を得たものや, 航海実験段階のものがあるが, 導入経費や維持管理費などの経済性, 化学物質使用による環境汚染など, 未だ改善すべき課題を多く残している.

著者らは, バラスト水中の細菌処理に適する安全な技術開発を目指し, 衝撃圧を利用する処理方法を提案している^{(7) (8)}. 先の研究では, アルミニウム容器で封入した海洋ビブリオ属細菌浮游溶液に, ガス銃で 200 MPa 超の衝撃圧を作用させた結果, 細菌の完全な不活性化を確認し, その殺菌効果には, 純粋な衝撃圧作用だけでなく, フリーラジカルによる化学作用の寄与が示唆された^{(9)~(11)}. 現在, 著者らは, 水中衝撃圧作用による菌体不活性化を大量のバラスト水処理へ利用するために, 気泡崩壊時に発生する衝撃圧に着目し, その応用可能性を検討している⁽¹²⁾. 特に, 微小気泡は, 水中に長時間残存する性質を有するだけでなく, 自然圧壊でフリーラジカルを生成するとの報告^{(13) (14)}もあることから, 微小気泡の崩壊をバラスト水処理に援用

* 原稿受付 2008 年 9 月 26 日.

^{*1} 正員, 神戸大学海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1).^{*2} 正員, 東北大学流体科学研究所・衝撃波学際応用研究部門 (〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1).^{*3} 正員, 名誉員, 東北大学流体科学研究所・衝撃波学際応用研究部門.^{*4} 神戸大学海事科学研究科.

E-mail: a-abe@maritime.kobe-u.ac.jp

することは有効であると考えられる。しかし、微小気泡の性質は未だ十分解明されておらず、現存の殺菌装置では、オゾン、二酸化炭素、窒素など、気体の毒性や脱酸素効果による方法が主であり、微小気泡の運動や特性を主に利用した方法はない。

本研究では、微小空気泡生成直後や外圧作用を受けた気泡の挙動観察、再膨張時に発生する衝撃圧の定量的評価のため、可視化と圧力計測を実施し、また、一次元的ではあるが気泡運動の解析を行った。これらの結果から、外圧負荷による微小気泡群の収縮・膨張運動で菌体不活性化効果を発現できる高い再膨張圧を誘起できることを確認し、バラスト水処理への応用について検討した。

2. 微小気泡

2.1 発生方法と特徴 実験では、旋回流式微小気泡発生器 (M2-LM/SCS, (株) ナノプラネット) を用いた。発生器は、外付けのポンプにより器内に旋回流を生成し、その旋回流中心部に生じる圧力低下により外部空気を自然吸引する。発生器内部に吸引された空気は、空気渦柱を形成し、この気柱が、発生器出口部で旋回流の速度変化に伴うせん断力作用を受けて微細化され、微小空気泡が生成される。本装置の経験的な最適作動条件は、ポンプ吐出量 17 L/min, 空気供給量 1 L/min である。

図 1 (a), (b) に、発生装置の構成と濃度約 3% の塩水 (約 27 L) の水槽内で発生した微小気泡の様子をそれぞれ示す。微小気泡発生器をマグネットポンプ (MD-30RZ, (株) イワキ, 最大吐出流量 17 L/min) に接続し、空気はレギュレーターを介して供給した。塩水の場合、装置起動後約 30 秒で図 1 (b) に示すように水槽内全体が白濁する。装置の構成は、水槽内の塩水をポンプで吸い込み、発生器を通して気泡と共に水槽へ吐出する循環方式であるため、水槽内のポンプ吸入口付近に浮遊する気泡は、再びポンプに吸い込まれる。したがって、発生器に供給される正確な空気量は明らかでない。また、装置作動中は発生器出口からの水流によって水槽内に流れが生じるため、水槽内のボイド率分布は均一ではない。なお、水槽内の数箇所から試料水を採取して計測した結果、平均ボイド率 1.1% を得た。

微小気泡発生装置で得られた気泡の直径分布は、気泡にレーザー光を照射したときの散乱光のドップラー信号や回折パターン信号を利用した粒径計測装置 (PDA: Phase Doppler Anemometry, DANTEC DYNAMICS) で計測した。結果を図 2 に示す。計測結果は、10 μm

Fig. 1 Schematic diagram of micro-bubble generation system: (a) micro-bubble generator, and (b) bubbly 3 % salt water

Fig. 2 Bubble size distributions measured by using a PDA system

程度の気泡直径が分布の極値であること、全体の約 85% が直径 20 μm 以下の範囲に分布していることを示し、ほぼ均一直径の気泡生成が認められた。

2.2 微小気泡の観察 プレパラート 2 枚で作製した 300 μm 間隙に微小空気泡を閉じ込め、正立型顕微鏡 (CX41, OLIMPUS) により気泡直径の変化を観察した。図 3 は、初期直径 50 μm 気泡の観察結果であり、最小 3 μm の気泡直径まで確認できた。初期直径 50 μm の微小気泡が、直径 3 μm まで収縮するのに要した時間は約 650 秒であった。また、このとき気泡の再膨張現象は確認されなかった。

図 4 は、微小気泡の直径の時間変化を示している。縦軸は気泡直径 (μm)、横軸は時間 (s) で、縦軸上の値は初期直径である。黒丸は計測値、実線は気泡消滅の

Fig. 3 Contraction of a 50 μm micro-bubble

Fig. 4 Microscopic observation of variation of micro-bubble diameter: filled circles designate measured data, and solid lines solutions of Rayleigh-Plesset equation

実測時間から初期気泡内外圧力差を理論的に見積り、それが常に一定であるとした仮定の下で、圧縮性、粘性および表面張力を無視した Rayleigh-Plesset の単一球状気泡方程式から得た解析解である⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。計測限界直径に達する時間は、当然のことながら初期直径が大きいほど長く、初期直径 65 μm の気泡が限界直径に達するまでに約 1300 秒を要した。一方、解析解の曲線の傾きの変化は、気泡半径の減少に伴う単位体積当たりの気泡表面積増加に起因した気泡表面速度の増加を示している。気泡は完全に潰れ、再膨張は生じない。実験計測結果は、解析解とほぼ一致しており、再膨張現象が生じないことから、熱平衡を保ちながら気液界面で生じる拡散現象により収縮したと判断される。高橋ら⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾は、このようにゆっくりとした気泡の収縮が微小気泡独特の圧壊現象であり、スピントラップ剤を使用した電子スピン共鳴法 (ESR) による実験から、外圧作用なしで消失した微小気泡でもフリーラジカルを発生すると報告している。しかし、微小気泡の自然圧壊で発生するフリーラジカルの量は不明で、著者らが過去に実施した海洋ビブリオ属細菌に対する微小気泡のみの細菌不活性化効果の確認実験では、10 L の海水に 12 時間微小気泡を供給した場合、菌体不活性化効果は高々 70 % 程度であった⁽¹²⁾。これは、微小気泡

Fig. 5 Experimental setup

Fig. 6 Pressure measurement by using FOPH2000

の自然圧壊のみによる殺菌処理効果が極めて低いことを意味し、微小気泡で実用可能な不活性化効果を発現させるためには、外圧負荷等による積極的な気泡再膨張の促進が必要である。

2.3 可視化と圧力計測 外圧作用で積極的に微小気泡群の再膨張運動を誘起し、細菌不活性化効果を顕著に発現できる高圧発生を確認するためには、高速度撮影と高精度の圧力計測が必須である。微小気泡群のそれぞれの気泡運動を誘起するため、アジ化銀 10 mg を水中爆発させて得られる球状衝撃波を作用させた。アジ化銀ペレットは、直径 0.6 mm の光ファイバー先端に接着され、Qスイッチ Nd:YAG レーザー光 (20 mJ/パルス, パルス幅 7 ns) を導光して起爆した。なお、アジ化銀の総エネルギーの約 1/3 が球状衝撃波の駆動に費やされ、衝撃波発生の再現性と時間制御は良好である⁽¹⁷⁾。

可視化の光学系配置の略図を図 5 に示す。視野幅を拡大し、気泡群の存在による光透過性の悪化を避け、崩壊過程を十分な精度で解像するために、縦 110 mm

×横 110 mm ×奥行き幅 10 mm の薄型水槽を使用した。観測窓はアクリル樹脂製である。

試験水槽中心にアジ化銀を配置し、水中衝撃波を発生させた。水中衝撃波の圧力減衰特性については、過去の予備実験で検定されている。起爆直後、球状衝撃波が形成されるが、直ちにアクリル樹脂の窓面で反射し、円筒衝撃波となる。また、微小気泡は、別の水槽で発生させ、必要に応じて試験水槽へ移送した。水循環で水槽内に誘起された水流の影響を除去するため、微小気泡の注入後、直ちにポンプを停止させ、10～20 秒放置して流れの静止を目視確認した後、アジ化銀を起爆した。画像の記録には、最高 2 億コマ/秒の撮影が可能なイメージコンバーターカメラ IMACON200 (DRS Hadland) を用いた。可視化の視野幅は 56 mm、拡大視野幅は 10 mm であった。

圧力計測には、光ファイバー圧力変換器 (FOPH2000: Fiber Optic Probe Hydrophone, RP acoustics) を使用した。圧力変換器の受圧部は、直径 0.1 mm の光ファイバーである。レーザー光を測定部に導光し、水の密度変化に伴う屈折率の変化によって変調された光信号を検知し、それを参照光と比較して屈折率変化を求め、密度を推定して圧力を求める原理である。ピエゾ素子の圧力変換器と比較して計測圧力範囲が広く、電磁的雑音に影響されないなどの特徴を有する。また、立ち上がり時間 3 ns の高速応答が可能であり、微小気泡群の再膨張過程の圧力変動にも追従できる。機器構成を図 6 に示す。水槽内に起爆用ファイバーと FOPH2000 ファイバープローブを同軸上に配置し、起爆点からの距離を変化させて計測を繰り返した。

3. 結果と考察

3.1 気泡運動の解析 著者らは過去に、10 mg アジ化銀の水中爆発により生成した水中球状衝撃波と直径 1.7 mm の気泡との干渉現象を二重露光ホログラフィ干渉計法で可視化観測すると共に、その干渉縞分布の画像解析から衝撃波背後の圧力分布を得ている⁽¹⁸⁾。それらの結果は、衝撃波面が気泡を通過した直後、気泡界面で反射膨張波が発生し、気泡周囲に波頭が拡大伝播すると共に、気泡の収縮運動に伴う局所的な圧力上昇を誘起し、その高圧部を中心とした再膨張衝撃波の発生と、マイクロジェット生成を示した。基本的に、微小気泡と衝撃波の干渉時においても、同様の現象が生じると考えられるが、気泡群との干渉の場合、個々の気泡運動に伴う圧力波が相互に干渉し、現象はさらに複雑な様相を呈すると推測される。しかしながら、このような波動現象が関与する複雑な三次元微小気泡運

Fig. 7 Analytical solutions of the bubble dynamic equations at different conditions on ambient pressure: (a) bubble radius vs. time, and (b) pressure inside a bubble vs. time

動を解析することは容易でないことから、まず、簡易的に一次元の気泡運動方程式による単一微小気泡の解析を行い、気泡崩壊条件および発生する再膨張衝撃圧の大きな見積もりを行った。

熱的效果と拡散効果を無視した圧縮性流体中の球状気泡運動方程式⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾を解いて、無限境界液体中に存在する単一気泡に、不連続的な圧力上昇を負荷する場合の気泡の直径と内圧の時間変動を求めた。初期直径 50 μm の気泡に、1～5 MPa の圧力を不連続的に負荷した場合の解析結果を図 7(a), (b) に示す。先に述べたように、実際には単一気泡に平面衝撃波が作用するのに対し、解析モデルは一次元的であり、必ずしも現実と一致しないが、気泡運動を推定するには十分であると考えた。図 7(a) より、1 MPa 以上の不連続的圧力

Fig. 8 Rebound peak pressure vs. ambient gauge pressure

負荷に対し、再膨張は、圧力作用後 $1 \mu\text{s}$ 以内に生じ、周期は作用圧力の増加に伴って短くなる。また、一回目の気泡収縮時の気泡内圧が最も高く、その最大圧は周囲作用圧力が高いほど増加し、 2 MPa 以上の作用圧力で数百 MPa に達する。

図8は、初期直径 $10, 30, 50 \mu\text{m}$ の気泡の周囲液体圧と一回目の収縮で得られる極値との関係である。初期気泡直径の違いによる極値の顕著な差は認められない。先のアルミニウム容器に封入された海洋細菌の不活性化実験^{(9)~(11)}で完全不活性化効果が得られた衝撃圧力 200 MPa に相当する再膨張圧を得るためには、約 3 MPa の不連続的過剰圧を負荷しなければならない。

3.2 微小気泡群と円筒衝撃波の干渉 図9に視野幅 56 mm 、撮影速度 50 万コマ/秒 (コマ間隔 $2 \mu\text{s}$)、露光時間 50 ns で撮影した画像を示す。気泡群の光吸収で全体的に画像が暗く、また、直接画像から確認できる気泡直径は $600 \sim 800 \mu\text{m}$ であった。起爆により発生する球状衝撃波は、窓面で反射して円筒衝撃波 (CS) に移行する。図9から、爆発生成気体、円筒衝撃波面およびアクリル樹脂窓材中の弾性応力波 (ES) の影を確認することができる。各波面の到達位置から見積もられる伝播速度は、円筒衝撃波が約 1500 m/s 、窓材料中応力波が約 2100 m/s であった。爆点から約 12 mm 右の位置に確認される直径約 $700 \mu\text{m}$ の気泡 (B) に注目すると、衝撃波通過直後に収縮を開始し、図9 (f), (g) で、再膨張衝撃波 (RS) を発生する様子が認められた。しかし、図9から直径 $100 \mu\text{m}$ 以下の微小気泡は判別し難いので、微小気泡の再膨張運動は、画像診断できなかった。

図10に拡大視野での撮影結果を示す。撮影速度は

100 万コマ/秒 (コマ間隔 $1 \mu\text{s}$)、露光時間は 50 ns である。図10(b)~(i)には、左から右に伝播する水中衝撃波面が認められ、衝撃波の右側に、粒子状の影として多数の微小気泡が認められる。図10(d), (e)では、これらの影が衝撃波面通過直後に消滅し、同時にその領域において屈折率変化を示す明るい揺らぎが認められる。図10(f)以降では、気泡再膨張のため、画像は左から暗くなる。また、図10(j)~(l)では、気泡の影が拡大してより明確になる。これらの可視化結果は、微小気泡群が水中衝撃波通過直後に収縮を開始し、最小体積に達した後、膨張に転じる一連の過程を示している。本可視化結果から、気泡が衝撃波作用を受けた後に再膨張に到る時間は $1 \mu\text{s}$ 以下の短い時間であると見なせる。また、衝撃波照射で気泡は連鎖反動的に崩壊するため、再膨張衝撃波の発生とそれらの相互干渉により複雑さを増すが、衝撃波の運動に支配されたコヒーレントな反応が生じていると推定できる。これらを定量的に明らかにするためには、さらなる拡大撮影と高速画像記録が必要である。

3.3 再膨張圧力の計測 図11にFOPH2000により起爆点から 20 mm の位置で得られた円筒衝撃波の圧力変動を示す。図11(a)は、微小気泡なしの結果である。水中衝撃波の圧力変動は明確に判断でき、最大過剰圧は約 50 MPa である。円筒衝撃波背後の圧力値は、測定部窓面での反射の影響により、自由空間を伝播する場合より高く、圧力減少は緩やかになる。一方、入射衝撃波直前には、約 5 MPa の圧力変動が 200 ns 間程度認められ、アクリル窓中を先行伝播する応力波により水中に生じた斜め衝撃波の影響が現れている。

図11(b)は、微小気泡を注入した場合の結果で、圧力波形は、気泡なしとは全く異なる。まず、先行斜め衝撃波による $20 \sim 30 \text{ MPa}$ の圧力変動が生じ、その約 $1 \mu\text{s}$ 後に、入射衝撃波と引続く反射波の到達による約 60 MPa と 100 MPa の過剰圧が発生したと考えられる。さらに約 $4 \mu\text{s}$ 後、圧力は 200 MPa に上昇し、約 150 MPa の値を中心とした振動が数十マイクロ秒間にわたり持続する。図11(a)と比較して、発生圧力値は著しく高く、微小気泡群の再膨張衝撃波による過剰圧が原因であると判断できる。また、波形には 200 MPa を超える極大値が周期的に現れる傾向が認められる。

図11(c)に、周波数解析の結果を示す。縦軸は頻度、横軸は周波数である。約 164 kHz にスペクトルの極値が現れている。水中衝撃波の伝播速度を 1500 m/s と仮定すると、測定部幅 10 mm の距離を衝撃波が繰り返し反射する周期は、 150 kHz となり、解析結果の値とほぼ一致する。また、微小気泡の再膨張応答時間はナノ

Fig. 9 Micro-explosion of 10 mg AgN_3 in the bubbly test chamber. A 700 μm diameter bubble B, a cylindrical shock wave CS, elastic stress waves in PMMA windows ES, and a rebound shock wave RS are observed.

Fig. 10 Close-up visualization of interaction between micro-bubbles and a cylindrical shock wave

秒オーダーであることから、衝撃波作用で気泡は直ちに崩壊して再膨張衝撃波を発生し、それが同位相で測

定部を繰り返し伝播した結果として、高周波数の極値が多数現れたと考えられる。さらに、気泡群は、一回

Fig. 11 Measured pressure with FOPH2000 at the distance of 20 mm from the ignition point: (a) over-pressure in water, (b) with the presence of micro-bubbles, and (c) FFT diagram of (b)

Fig. 12 Analytical solution of bubble motion calculated using pressure data measured with FOPH2000: (a) bubble radius vs. time, and (b) pressure inside bubble vs. time

の崩壊で完全に消滅することなく、繰り返し励起されて完全に消滅するまで応答を持続したと考えられる。

以上の知見は、再膨張衝撃波の効果を利用する殺菌装置の設計指針として、気泡群を広い空間に分布させて外圧負荷するよりも、狭い空間に分布させて外圧負荷する方が、比較的長い時間、高圧を繰り返し発現できることを示唆する。

初期直径 10, 30 μm の単一気泡に、図 11(a) の過剰圧を作用させた場合の気泡運動方程式の解析結果を図 12 に示す。横軸は、円筒衝撃波の圧力上昇の瞬間を原点とした時間である。最初の再膨張には、直径 10 μm の気泡で約 100 ns, 30 μm の気泡で約 250 ns を要し、再膨張圧は、共に約 400 MPa である。以上の解析結果

は、微小気泡の最初の再膨張が、外圧負荷後数百ナノ秒の短い時間内に生じ、最大数百 MPa の過剰圧が発生することを示し、得られた実験事実とほぼ一致した。

4. お わ り に

微小空気泡の再膨張圧を船舶バラスト水処理の一方法として応用できれば、海洋環境破壊の危惧の無い、安心・安全な処理技術に結びつく。しかし、その実現には、微小気泡群を瞬間的に崩壊させて再膨張現象を誘起し、高圧を発生する機序を詳細に解明し、その制御法を確立することが重要である。

本研究は、光学可視化と高速撮影法および微小空間の圧力変動を高い時間分解能で計測することにより、限局された狭空間の気泡群に衝撃波圧力作用を与えた結果、気泡なしの場合で得られる入射衝撃波過剰圧の数倍に相当する 200 MPa を超える再膨張衝撃圧を数十マイクロ秒の比較的長い時間、繰り返して発生できることを示した。これらは、微小気泡を利用する殺菌技術の開発において重要な知見となる。今後、気泡群の再膨張衝撃圧を援用した海洋菌体不活性効果の確認、および、装置諸元の最適化を目指して、気泡封入の最適ボイド率あるいは最適管直径、微小気泡運動を誘起するための実用設計に耐え得る水中衝撃波の発生方法等について詳細な検討が必要である。

謝 辞

微小気泡の粒子直径計測において、神戸大学海事科学研究科の藤田浩嗣教授のご協力を得た。また、本研究の一部は、文部科学省中核研究拠点形成計画 12COE2003 の助成を得て実施された。ここに附記し、謝意を表する。

文 献

- (1) Fukuyo, Y., Harmful Transfer of Organisms by Ballast Water, *Science of Ship and the Sea*, Vol. 7, (2004), pp.30-33.
- (2) Kikuchi, T., What is the Issue of Ship's Ballast Water?, *Sea and Safety*(in Japanese), No.67, (2001), pp.2-9.
- (3) Ruiz, G. M., Rawlings, T. K., Dobbs, F. C., Drake, L. A., Mullady, T., Huq, A., Colwell, R. R., Global Spread of Microorganisms by Ships, *Nature*, Vol. 408, (2000), pp.49-50.
- (4) International Maritime Organization. "International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments adopted in 2004". Ballast water management. (online), available from<<http://www.imo.org/home.asp>>, (accessed 2008-4-1).
- (5) Kikuchi, T., Yoshida, K., Kino, S., Fukuyo, Y., Progress Report on the 'Special Pipe System' as a Potential Mechanical Treatment for Ballast Water, *2nd International Ballast Water Treatment R&D Symposium*, IMO London, (2003), pp.19-25.
- (6) Saho, N., Isogami, H., Mizumori, T., Nishijima, N., Superconduction magnetic separator for ballast-water treatment, *2nd International Ballast Water Treatment R&D Symposium*, IMO London, (2003), pp.125-134.
- (7) Abe, A., Mimura, H., Ikeda, T., Katakura, R., Shock Compression of Marine Bacterial Cells Enclosed in Aluminum Container, *Journal of the JIME*, Vol.40, No. 2, (2005), pp.110-115.
- (8) Abe, A., Kawasaki, H., Study on Shock Wave Propagation under Saltwater Sealed in Aluminum Containers, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.722, (2006), pp.2418-2424.
- (9) Abe, A., Mimura, H., Ishida, H., Yoshida, K., The effect of the shock pressures on the inactivation of a marine *Vibrio* sp., *Shock Waves*, Vol.17, No.1-2, (2007), pp.143-151.
- (10) Mimura, H., Abe, A., Yoshida, K., Ishida, H., Changes in the Number of Colony-Forming Marine *Vibrio* sp. Cells After Exposure to Shock Pressures in the Presence of Sodium Ascorbate, *Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn*, Vol.61, No.2, (2007), pp.132-133.
- (11) Mimura, H., Abe, A., Ishida, H., Changes of marine bacterial populations in a ship's ballast water and sediment, and application of shock pressures to complete killing of *Vibrio* sp. cells isolated from ballast water, *Environmental Microbiology Research Trends* edited by G. V. Kurladze, (2007), pp.191-212.
- (12) Abe, A., Kanai, H., Mimura, H., Nishio, S., Ishida, H., Study on application of shock waves generated by micro bubbles to the treatment of ships' ballast water, *Proc. 26th International Symposium on Shock Waves*, (2007), A4890.
- (13) Takahashi, M., Chiba, K., Li, P., Free-Radical Generation from Collapsing Microbubbles in the Absence of a Dynamic Stimulus, *J. Phys. Chem. B*, Vol.111, No.6, (2007), pp.1343-1347.
- (14) Takahashi, M., Chiba, K., Li, P., Formation of Hydroxyl Radicals by Collapsing Ozone Microbubbles under Strongly Acidic Conditions, *J. Phys. Chem. B*, Vol.111, No.39, (2007), pp.11443-11446.
- (15) Rayleigh, Lord., On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity, *Phil. Mag.*, Vol.34, (1917), pp.94-98.
- (16) Plesset, M. S., The Dynamics of Cavitation Bubbles, *J. Appl. Mech.*, Vol.16, (1949), pp.277-282.
- (17) Takayama, K., Holographic interferometric study of shock wave propagation in two-phase media, *Proc. 16th Int. Symp. Shock Tubes Waves*, (1991), pp.51-62.
- (18) Abe, A., Shock wave refraction and flow from an open-ended shock tube (in Japanese), *Doctoral thesis, Graduate School of Tohoku University*, (1991), pp.42-44.
- (19) Tomita, Y., Shima, A., Mechanisms of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubble collapse, *J. Fluid Mech.*, Vol.169, (1986), pp.535-564.
- (20) Shima, A., Studies on bubble dynamics, *Shock Waves*, Vol.7, (1997), pp.33-42.