



アルミニウム容器に封入した海水中の衝撃波動に関する研究(流体力学, 流体機械)

阿部, 晃久
河崎, 英樹

(Citation)

日本機械学会論文集. B編, 72(722):2418-2424

(Issue Date)

2006-10-25

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90001305>



アルミニウム容器に封入した海水中の衝撃波動に関する研究*

阿部 晃 久^{*1}, 河崎 英 樹^{*2}Study on Shock Wave Propagation under Saltwater Sealed
in Aluminum ContainersAkihisa ABE^{*3} and Hideki KAWASAKI^{*3} Graduate School of Science and Technology, Kobe University,
5-1-1 Fukaeminami-machi, Higashinada-ku, Kobe-shi, 658-0022 Japan

The present paper reports the experimental and numerical study of shock wave propagation under saltwater sealed in aluminum containers. This study is the fundamental research on shock sterilization for development of ship's ballast water treatment technique. In the experiment we carried out the impact experiment with a gas gun to generate strong shock waves in saltwater. We confirmed that no leakage of saltwater from the aluminum container was obtained after shock events. The shock pressure fluctuations were measured with piezofilm gauges. Several hundred MPa pressure behind the first shock wave under the saltwater was obtained by the experiments. The FEM simulation, using the Johnson-Cook model for aluminum material and the Tait equation for saltwater, was carried out in order to predict the shock phenomena in both aluminum and saltwater. The computational results showed the states of stress and pressure in the container and indicated good agreements with the experimental results on the first shock pressure profiles at the impact velocities less than 200 m/s qualitatively and quantitatively.

Key Words: Shock Wave, FEM, Compressible Flow, Saltwater, Gas Gun Experiment

1. 結 論

近年, 諸国間の海上輸送に伴う船舶バラスト排水を媒体とする海洋環境破壊が問題視されている⁽¹⁾⁽²⁾. バラスト水は, 航海中や荷役作業時に船体のバランス制御のために船内に取り込まれる海水であり, 一般的に荷役作業を行う港湾で吸排水される. バラスト水吸水口にはスクリーンが設置されているが, 数 cm 以下の小型生物は容易に船内に取り込まれてしまう. この様な小型生物を含むバラスト水の年間移動量は, 世界で 100 億トンに上ると推測されていることから, 大量の海洋外来生物が本来の生息地ではない海域に遺棄され, 環境保全が脅かされている. 大部分の外来生物は, 生息地環境が極端に異なる海域では生存できないが, 環境条件によっては繁殖し, その結果, 現地の生態系を著しく攪乱する危険性がある. ひとたび生態系に大きな乱れが生じるとその影響は長年に渡り続き, 侵入した外来生物を排除することは不可能になる. 国際海事

機関 (IMO) は, 2004 年 2 月に「船舶のバラスト水および沈没物の規制および管理のための国際条約」(バラスト水管理条約) を採択し, 具体的規定の取りまとめ作業を開始した. それに伴い, 世界各国で排出基準を満たすためのバラスト水処理技術開発が盛んに行われてきている. 主な方法として, 化学的, 電気的, 光学的, 力学的方法が試みられているが⁽³⁾⁽⁴⁾, それぞれ一長一短があり, 実用化レベルの技術は未だ確立されていない. しかしながら, それらの中でも, 新たな環境汚染を引き起こす可能性が最も低い力学的処理方法の発展が期待される. そのため我々は, 海洋細菌を対象としたバラスト水処理において, これまで検討されていない衝撃圧力の利用について研究を始めた⁽⁶⁾⁽⁸⁾. 過去の衝撃波を用いた殺菌に関する研究として, 衝撃波管により気体中に発生させた衝撃波をパラフィン溶液中の細菌へ照射する方法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾, 放電エネルギーにより発生させた水中衝撃波をカプセル封入した細菌へ照射する方法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾, などが衝撃工学や食品衛生工学分野などで行われてきている. それらの実験では, 約 10~60 MPa の衝撃圧力を数十から数千発照射し, 殺菌率が数十パーセント程度得られているが, 衝撃波による力学作用と殺菌効果との関係は未だ十分な解明に至って

* 原稿受付 2006 年 3 月 2 日.

^{*1} 正員, 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1).^{*2} 神戸大学自然科学研究科.

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

いない。バラスト水殺菌処理には、より高い殺菌効果が要求されていることから、海洋細菌を対象とした衝撃波圧力とその殺菌効果について解明するためには、より強い衝撃波圧力を作用させ得る実験方法の確立が必要である。

本研究では、海洋細菌の衝撃波殺菌技術開発の基礎的研究として、一段式ガス銃による海水封入容器の衝撃実験および FEM 数値シミュレーションを試みた。本論文では、以上の実験および計算結果から定性的・定量的な検討を行い、本試料海水封入容器内に発生する衝撃波の伝播挙動および衝撃圧力変動について明らかにする。

2. 衝撃実験および計測装置

海水中に強い衝撃圧力を発生させるために海水を封入した金属容器に一段式ガス銃で加速した発射体を衝突させる方法で実験を行った⁽¹³⁾。図1に装置の構成略図を示す。発射管の口径は40mm、長さ2mであり、駆動ガスの最大圧力は2MPaである。発射体はABS樹脂材料で作製し、衝突面には海水封入容器と同様のアルミニウム材料製の衝突体を接着する。実験では3種類の形状の衝突体を用いた。主に使用した衝突体の形状は、厚さ1mm、直径38mmの薄肉円板型である。その他、凸型（凸部直径10mm、凸部厚さ5mm、最大直径36mm、最大厚さ10mm）、および円柱型衝突体（厚さ35mm、直径30mm）も使用した。発射体の衝突速度は、発射体内部に埋め込まれたフェライト磁石（直径10mm、厚さ3mm）が、発射管出口手前に60mm間隔で設置されている二つの電導コイルを通過する際に生じる起電力信号から通過時間を計測し、算出する。

海水封入容器は、加工の容易さおよび衝撃特性が良く知られていることからアルミニウム材料で作製した。図2に示すように、容器の外径は30mmであり、海水部寸法は、直径10mm、深さ5mm、衝撃面側肉厚5mmである。試行錯誤の結果、Oリングを挟み込み、3本のステンレス製ボルト(M3)で締め付ける構造として、容器本体と蓋の隙間からの液体漏れを防いだ。海水封入容器は、図3に示されるように、厚さ10mmのステンレス製リング内にホワイトエポキシ（エポキシ系接着剤+CaCO₃）を流し込み固めた標的ホルダーに固定され、後端に反射引張り波によるボルトの破損を防ぐためのアルミニウム円柱体（モーメントトラップ）を接着し、ガス銃発射管出口に配置される。容器内の試料海水に発生する圧力は、圧電性フィルムゲージ（Dynasen 社製、PVF₂ 11-125-EK、感圧部面積；10.08mm²、立ち上がり時間；約10ns）を封入容器蓋の

内側面に接着し、海水部端面での衝撃圧力変動を計測した。

海水として使用した溶液は、カルキ抜きを施した水道水 10 ℓ に、NaCl (234.9g)、KCl (7.5g)、CaCl₂·2H₂O (14.7g)、MgCl₂·6H₂O (106.8g)、Na₂SO₄ (39.8g) を溶解して作製した細菌培養用の人工塩水である。

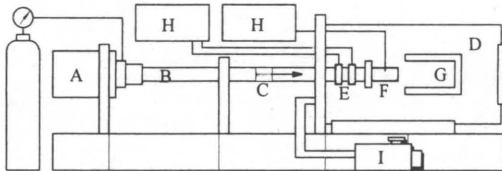


Fig.1 Experimental apparatus: A = High pressure reservoir, B = Launch tube, C = Projectile, D = Impact chamber, E = Coil, F = Target container, G = Catcher, H = Oscilloscope, I = Vacuum pump

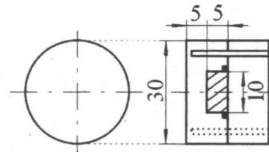


Fig.2 Sectional diagram of the container : the hatching area shows saltwater

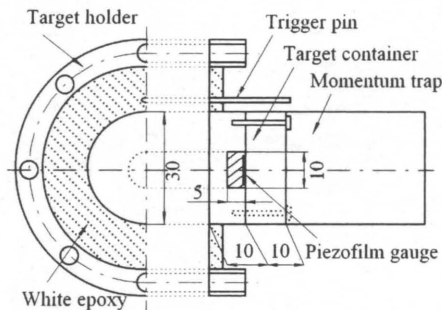


Fig.3 Assembly of the target holder

3. 圧力波伝播シミュレーション

3.1 構成関係式と状態方程式 アルミニウム容器に封入された海水中の衝撃波発生・伝播現象は、容器境界面の存在により、波の反射、回折、干渉が生じ、複雑な波動状態となるため、単純な一次元解析で状態を理解することは難しく、三次元計算が必要となる。また、金属と液体中に生じる動的挙動を同時に扱う必要がある。本研究では、以上の計算が可能な汎用非線形動的構造計算ソフト (LS-DYNA, (株)CRC ソリューションズ) を用いて標的容器内衝撃現象のシミュレー

ションを試みた。本計算では、容器の弾塑性変形も考慮した波動伝播現象を予測するために、海水封入容器に使用したアルミニウム材料に対して Grüneisen 状態方程式と共に Johnson-Cook 弾塑性モデル^{(14),(15)},

$$\sigma = (C_1 + C_2 \varepsilon^N) (1 + C_3 \ln \varepsilon^*) (1 - T^{*M}) \quad (1)$$

を用いた。ここに、 σ は相当降伏応力、 ε は相当塑性ひずみ、 ε^* は単位塑性ひずみ速度によって無次元化された相当塑性ひずみ速度、 T^* は次式で表される無次元温度である。

$$T^* = (T - T_{\text{room}}) / (T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}) \quad (2)$$

ここに、 T_{room} は周囲温度、 T_{melt} は融点温度である。また、 C_1 、 N および M は、材料固有の係数および指数である。計算に使用したアルミニウムの材料定数および式(1)中の各係数を表1にまとめて示す。また、発射体に使用したABS樹脂材料の構成関係は、完全弾性体を仮定した。計算に用いたABS材料の諸量を表2に示す。

Table 1 Material values of aluminum, coefficients and constants for the Johnson-Cook model

Density (kg/m ³)	2785
Young modulus (MPa)	72000
Elastic shear modulus (MPa)	26500
Poisson's ratio	0.32
Grüneisen parameter	2.00
C_1 (MPa)	452.4
C_2 (MPa)	457.1
C_3	1.085×10^{-2}
N	0.3572
M	1.131
T_{melt} (K)	660.37
T_{room} (K)	299.15

Table 2 Material quantities of ABS resin

Density (kg/m ³)	1170
Young modulus (MPa)	2300
Poisson's ratio	0.38

一方、海水の状態方程式には、Tait 式⁽¹⁶⁾を用いた。

$$P = \alpha \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\beta - 1 \right] \quad (3)$$

ここに、 P はゲージ圧力、 ρ は密度、 α と β は定数であり、重量モル濃度 0.7mol/kg の塩水に対する数値として、 $\alpha = 304.7 \text{ MPa}$ 、 $\beta = 7.15$ を用いた⁽¹⁶⁾。添え字の0は、 $P = 0$ 状態を示している。

3.2 計算対象物体と計算条件 本計算では、実験で用いる衝突体と標的体の衝突現象を模擬するため、①発射体、②衝突体、③海水封入容器、④モーメントムトラップ、の4つの計算対象物体を考慮した。各対象物体の配置は、図4に示す通りである。発射体と衝突体、ならびに容器とモーメントムトラップは、それぞれ、接触状態で配置し、発射体と衝突体には任意の衝突速度 V_p を初期条件として与えた。また、全ての計算対象物体形状が、中心軸まわりの回転対称形であることから、実際の計算領域は1/4体積部分としている。図5(a)に発射体と衝突体、(b)に海水封入容器とモーメントムトラップの計算格子を示す。格子分割には8節点要素を用いており、図5(a)、(b)に要した総要素数は、それぞれ54080、117000である。

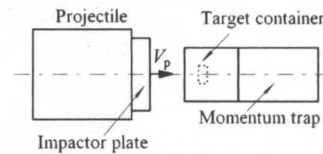


Fig.4 Arrangement of objects for numerical simulation

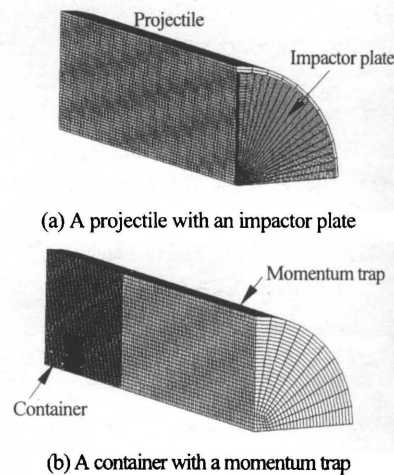


Fig.5 Computational grid models

4. 結果と考察

本章での議論の助けのため、図6に示すように海水封入容器内の各境界面に、(A)入射境界、(B)反射境界、(C)内部境界、(D)外部境界、と呼称を付け

る。実験から得られる圧力時間履歴は、図中Bの反射境界面上で計測され、数値予測は、ゲージ面に対応する範囲で反射境界面に接する全計算要素内の平均圧力値として求めた。

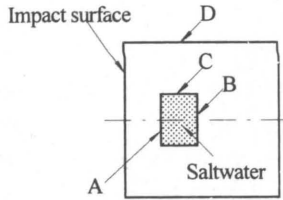


Fig.6 Boundaries of the aluminum container: A = Incident boundary, B = Reflecting boundary, C = Inner boundary, D = Outer boundary

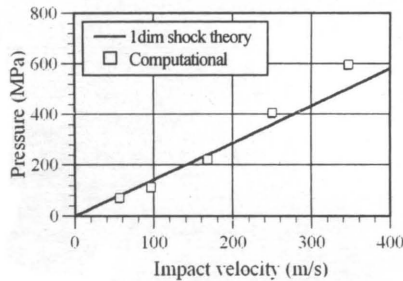


Fig.7 Impact velocity vs. incident pressure at a point in saltwater near the incident boundary

図7は、衝撃波が入射境界面から海水中へ伝播した直後に得られる最大圧力値と衝突速度との関係を示している。入射境界面における圧力の実測が難しいため、数値シミュレーション結果と1次元衝撃波理論から求められる解析解との比較を示した。1次元理論解析に用いた各媒体のユゴニオは以下の通りである^{(16),(17)}。

$$U_A = 5528 + 1.338 u_p \quad (4)$$

$$U_W = 1.465 + 2.077 u_p \quad (5)$$

$$P_A = \rho_{A0} U_A (V_p - u_p) \quad (6)$$

$$P_W = \rho_{W0} U_W u_p \quad (7)$$

上式中の U , u_p , P , ρ は、それぞれ衝撃波速度 (km/s)、粒子速度 (km/s)、圧力、密度であり、添え字の A はアルミニウム、W は試料海水、0 は初期状態を表す。図7より、衝撃波が海水中に入射した直後に発生する圧力値の数値予測は、衝突速度が 200m/s 以下で理論解と比較的良く一致しているが、それ以上の衝突速度の

場合、入射圧力値を過大に見積もることがわかる。以上のことから、本計算では、200m/s 以下の衝突速度に対して比較的良好な結果が得られると判断した。

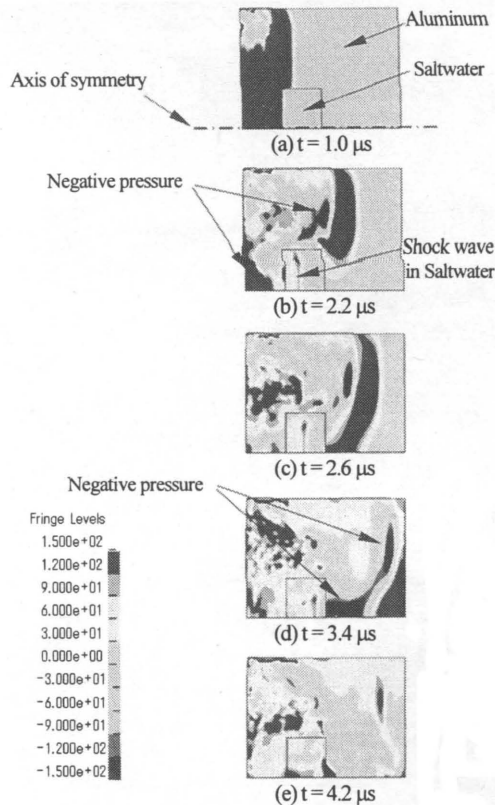


Fig.8 Pressure distributions in the container ($V_p = 96.2$ m/s)

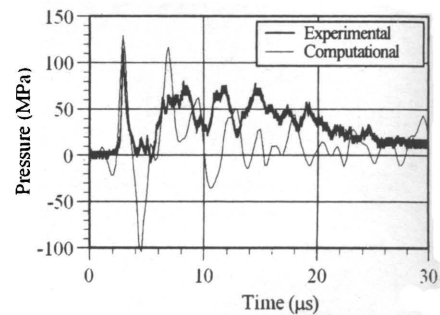
図8(a)～(e)は、衝突速度 96.2m/s の条件で得られた数値シミュレーションによる容器内のアルミニウムおよび海水部における圧力分布の時間変化を示している。図は、容器断面の回転対称軸の上半分を示している。図8(a)で見られるように、衝突面で発生した平面衝撃波は、入射境界面へ向ってアルミニウム材料中を伝播し、入射境界面に達すると、海水側へ平面衝撃波を誘起する。アルミニウムと海水の音速の違いのためアルミニウム中を先行伝播する衝撃波面は、容器外部境界面および内部境界面の変位に伴い発生する引張り波との干渉によって、波面形状に湾曲が生じている。図8(b)では、アルミニウム中の先行衝撃波が反射境界面を回り込み始めている。一方、試料海水中の衝撃波面の平面性は保たれていることがわかる。また、海水中の平面衝撃波面端部において見られるスポット的な圧力上昇は、アルミニウム中の先行波が海水側へ発生させた弱い斜め衝撃波との干渉により生じたものである。

る。図8(c)では、回折衝撃波が反射境界面背後の回転中心軸上で反射しており、このとき、反射境界面のアルミニウム側では比較的強い圧縮状態となり、海水側へ応力作用を与えられると考えられる。また、先行衝撃波面背後や、衝突面から入射境界面の領域では、強い引張り応力が発生している。続く図8(d), (e)では、海水中的の衝撃波面が波面幅を広げつつ、中心軸付近で平面的な形状を保ったまま反射境界面へ到達し、圧力上昇を引き起こすことがわかる。以上より、容器内の試料海中は、取り囲む境界面から圧縮や膨張の波が生じ、複雑な圧力状態となるが、水中衝撃波面が反射境界面に与える初期の圧力変動は、ほぼ一次的な現象に近いことが期待できる。

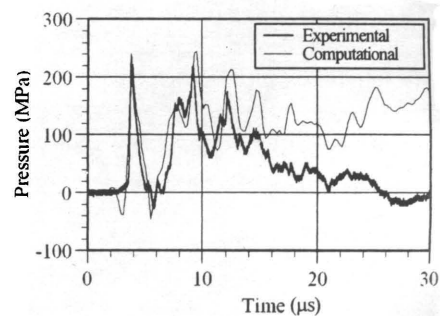
図9(a)は、薄肉円板型衝突体を用いて衝突速度56.1m/sの実験から得られた圧力計測結果と数値計算結果との比較を示している。図中の太線が実験計測結果、細線が数値計算結果であり、両者の第一波ピーク圧力発生時刻を一致させて示している。実験結果では、試料海中を伝播してきた衝撃波面の到達によると考えられる約114MPaの強い第一波圧力上昇が、約3 μ sの時刻で現れている。その後、約15 μ sまで約70MPaを最大とする変動が続いており、これらは容器内での波の反射現象を捉えていると考えられる。実験結果とシミュレーション結果は、ピーク圧力波形のみで良好な一致が得られている。シミュレーション結果において、ピーク圧力波形の前に見られる正負の弱い圧力変動は、図8で述べたように、試料海水部を周囲から回り込んで回折・伝播してきたアルミニウム中の衝撃波が、回転対称軸上で反射した際に生じたものと考えられる。実験では、アルミニウム容器本体と蓋との間に境界面が存在するため、衝撃波がその境界面を過ぎる際に圧力減衰が生じるが、数値計算では容器本体と蓋を一体化して扱っているため、衝撃波は境界面による圧力減衰を生じずにアルミニウム中を反射境界面まで到達できる。さらに、実験では、圧力ゲージがアルミニウム蓋に接着剤によって設置されていることもアルミニウム側からの圧力変動に敏感に反応できない原因と考えられる。ピーク圧力波直後の圧力変動については、著しく大きな負圧力変動が数値計算で予測されているが、実験において生じておらず、明らかな食い違いを示している。この強い負圧力の発生が、その後の実験結果との不一致を招く原因の一つであると考えられる。数値計算結果における負圧力の過大予測の原因は、式(3)に対して負圧力に関する制限や条件等を特に設定していないことに加えて、アルミニウム中の強い衝撃波が、反射境界面背後で発生させる正負の圧力変

動、及びそれに伴う境界面の弾塑性変位運動のためであると考えられる。

図9(b)は、衝突速度96.2m/sの場合の実験結果と数値計算結果の比較である。強い第一波形の最大圧力値は、実験で239MPa、シミュレーションで222MPaと同程度の値が得られている。図9(a)の場合と同様に、実験結果には現れていない第一波到達前の弱い圧力変動が数値計算結果にのみ見られる。第一波に続く負の圧力変動についてみると、本結果の場合、実験結果と数値計算結果との一致が得られており、その後の圧力変動も時刻10 μ sまでの範囲で比較的良好な一致が見られる。また、シミュレーションでは10 μ s以降でも高圧力が維持されているが、実験結果では、時間の経過に伴って圧力値の減少が見られることから、実験において容器からの圧力漏れが疑われる。



(a) $V_p = 56.1$ m/s

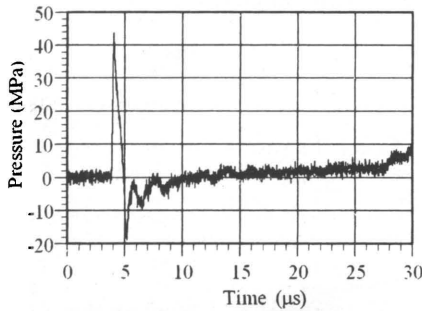


(b) $V_p = 96.2$ m/s

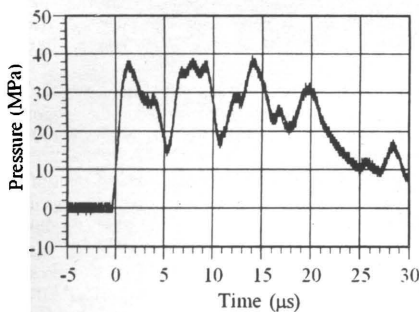
Fig.9 Comparison between experimental and computational pressure fluctuations

以上のことから、本実験で用いた海水封入容器内の圧力変動の数値予測は、強い第一波の波形に関して、定性的・定量的に予測可能であるが、それに続いて生じる負圧力の強さの予測は十分ではなく、衝突速度条件によっては過大に予測される場合があることがわかった。今後、予測精度をさらに向上させるためには、

海水の状態方程式において強い負圧力に対する取り扱いの検討が必要である。



(a) Convex impactor ($V_p = 30.0$ m/s)



(b) 35mm cylindrical impactor ($V_p = 35.4$ m/s)

Fig.10 Experimental pressure fluctuations obtained by using different configuration of impactor

図 10(a), (b)は、凸型および 35mm 円柱型衝突体を用いた実験で得られた代表的な圧力変動データである。図 10(a)の凸型衝突体の場合、第一波の立ち上がりは薄肉円板型衝突体の場合よりも急峻で鋭い変動を示しており、また、第一波以降に生じる比較的大きな正の圧力振幅が現れていない特徴が見られる。一方、図 10(b)の 35mm 円柱型衝突体では、第一波の立ち上がりや下降が緩やかで、それ以降でも圧力値が保たれ、負圧力が生じていないことが特徴である。以上のような試料海水中の特徴的な圧力変動の形成は、衝突体形状が異なることによる衝撃波の発生領域の変化および衝突体裏面や側面からの引張り波の強さや到達時間の変化により、標的容器内に伝播する波の干渉状態に影響を与えるためであると考えられる。

図 11 は、実験計測で得られた衝突速度と試料海水中の第一波最大圧力値の関係を示している。図中の実線は、全データの線形近似曲線である。実験で行った衝突速度範囲において、本標的容器に対して得られる最大圧力値と衝突速度の関係は、衝突体の形状に関わら

ず、ほぼ比例する結果が得られた。本結果から、容器内で実現される圧力のオーダーは、衝突速度に応じて数十～数百 MPa もの幅広い値であることがわかる。以上の計測圧力データは、反射境界面上で反射した波背後の最大圧力値であることから、水中を伝播する衝撃波面背後に生じる圧力の平均値が、単純にそれらの 1/2 で換算できると考えた場合、水中衝撃波背後に生じる平均圧力値と衝突速度の関係は、図 11 中の破線で示される。すなわち、例えば 200m/s の衝突速度で実験を行った場合、衝撃波伝播に伴って容器内試料海水全体に約 185MPa もの圧縮圧力が作用すると推測できる。

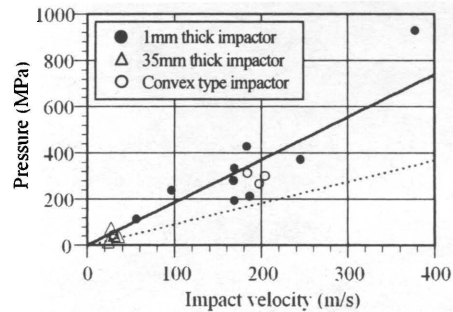


Fig.11 Impact velocity vs. peak pressure of the first shock wave in saltwater

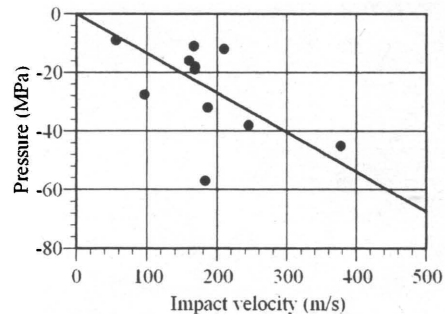


Fig.12 Negative pressure behind the first shock wave vs. the impact velocity

図 12 に、試料海水中の第一衝撃波面背後に発生する負圧力と衝突速度との関係を示す。本圧力計測実験から得られた負圧力は、衝突速度の増加に伴って増大する傾向がある。図 9 で述べたように、数値計算は理想的な完全密閉アルミニウム容器内の形状変化を伴う波動現象によって発生する負圧力を予測した。一方、本実験における負圧力の主な発生原因は、図 12 の結果を考慮すると、アルミニウム中の衝撃波や容器内圧力上昇が引き起こす容器蓋の変位による可能性が高いと考えられる。容器内試料海水部における負圧力の発生状

態を把握するために、図8の数値シミュレーション結果を用いて、試料海水部における負圧力の発生箇所と発生頻度の関係を図13に示す。図より、海水部での負圧力発生頻度が高い領域は、回転中心軸周辺と反射境界面近傍に集中しており、試料海水全ての領域にわたり強い負圧力が作用するわけではないことがわかる。

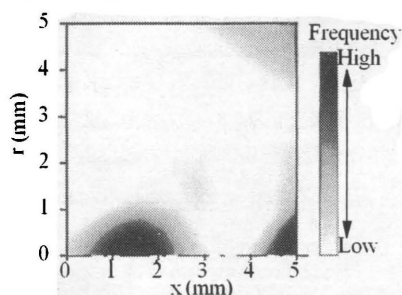


Fig.13 Frequency of occurrence of negative pressures in the saltwater area obtained from the numerical calculation

5. 結 論

海洋細菌の衝撃殺菌技術開発の基礎的研究として、アルミニウム容器に封入された海水中の衝撃波動現象を明らかにするために、一段式ガス銃を用いた実験とFEM数値シミュレーションによる解析を行った。その結果、以下の結論が得られた。

1. 一段式ガス銃を用いた本実験方法により、アルミニウム容器内の試料海水中に数十～数百 MPa の幅広い衝撃圧力波を発生させることができ、さらに、容器の破壊や海水漏れを引き起こさずに海水封入容器を回収することができた。
2. 本海水封入容器に関して、衝突速度と第一波ピーク圧力値、および第一波背後に発生する負圧力との関係を得た。
3. 形状の異なる3種類の衝突体を用いた実験を行い、試料海水中に異なる波形の第一衝撃圧力変動を発生させることができた。
4. アルミニウム材料に対してJohnson-Cook弾塑性モデル、試料海水に対してTait状態方程式を導入した数値シミュレーションを試み、衝撃圧力の第一波変動に関して、実験結果との定性的・定量的一致が得られた。一方、第一波背後の負圧力の数値予測に関しては、実験結果との食い違いが見られた。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費（基盤研究C-18560768）による支援を受けた。また、船舶バラスト水に関して神戸大学海事科学部の石田廣史教授

より有益な情報を頂き、数値シミュレーションに関して株式会社CRCソリューションズの津田徹氏のご協力を得た。ここに付記し謝意を表する。

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? (in Japanese), *Sea and Safety*, No.6・7, (2001), pp. 2-9.
- (3) Waite, T. D. et al., Removal of Natural Populations of Marine Plankton by a Large-scale Ballast Water Treatment System, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 258, (2003), pp. 51-63.
- (4) Kikuchi, T. et al., 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.
- (5) Saho, N. et al., Superconducting Magnetic Separator for Ballast-Water Treatment, *2nd International Ballast Water Treatment R&D Symposium, IMO London*, (2003), pp. 125-134.
- (6) Abe, A. et al., Shock Compression of Marine Bacterial Cells Enclosed in Aluminum Container, *Journal of the JIME*, Vol.40, No. 2, (2005), pp. 110-115.
- (7) Ikeda, T. et al., Study on the Lethal Effect of Shock Wave Induced with a Gas Gun on a Marine *Vibrio* sp., *Symposium on Shock Waves in Japan*, (2004), pp. 365-368.
- (8) Kawasaki, H. et al., Study on Shock Compression of a Marine *Vibrio* sp., *Symposium on Shock Waves in Japan*, (2005), pp. 393-396.
- (9) Teshima, K., High-Frequency Generation of High-Pressure Pulse Using a Diaphragmless Shock Tube, *Proc. 19th International Symposium on Shock Waves*, (1993), pp. 221-226.
- (10) Teshima, K. et al., Biomechanical Effects of Shock Waves on *Escherichia coli* and Phage DNA, *Shock Waves*, Vol. 4, (1995), pp. 293-297.
- (11) Loske, M. et al., Repeated Application of Shock Waves as a Possible Method for Food Preservation, *Shock Waves*, Vol. 9, (1999), pp. 49-55.
- (12) Loske, M. et al., Bactericidal Effect of Underwater Shock Waves on *Escherichia coli* ATCC 10536 Suspensions, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 3, (2002), pp. 321-327.
- (13) Abe, A. and Kohara, K., Planar Impact Experiment of 6061-T6 Aluminum and Measurement of Particle Velocity Generated by Elastic-Plastic Shock Waves, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 69, No.682, (2003), pp. 1028-1032.
- (14) Johnson, G. R. et al., Response of Various Metals to Large Torsional Strains Over a Large Range of Strain Rates - Part 2: Less Ductile Metals, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 105, (1983), pp. 48-53.
- (15) Rule, W. K. and Jones, S. E., A Revised Form for the Johnson-Cook Strength Model, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, No. 8, (1998), pp. 609-624.
- (16) Cole, R. H., *Underwater Explosions*, (1948), pp. 36-45, Princeton University Press.
- (17) McQueen, R. G. et al., The Equation of State of Solids from Shock Wave Studies, in *High-Velocity Impact Phenomena*, edited by R. Kinslow, Academic Press, (1970), pp. 293-417.