

近接水中爆発を受ける円筒浮体の応答

正員 今北 明彦*

安田 章宏*

Response of Cylindrical Floating Structure Subjected to an Underwater Explosion

by Akihiko Imakita, *Member* Akihiro Yasuda

Summary

This paper describes numerical simulations and experimental results of dynamic response of a cylindrical floating structure subjected to an underwater explosion. An explosion was generated by wire explosion method under the center of bottom plate. Responses of the cylinder were recorded in the experiments with three different offset conditions. Nonlinear explicit finite element method and finite volume method were used for the structural analysis and the fluid analysis respectively. Compressibility of fluid and fluid structure interaction were taken into account in the numerical simulation. Explosion bubble shape was observed with a high speed camera and were compared with the numerical simulation results. Experimental results of time histories of bottom surface pressures and displacement of the bottom plate were also compared with the numerical simulation results. Numerical simulation results regarding to dynamic response of the cylinder corresponded well with experimental results. Discussions are given to boundary effects on behavior of explosion bubble and offset distance effects on response of the cylinder.

1. 緒 言

近年、爆発物を用いたテロ行為が発生し、爆発の構造物に対する影響に関心が高まってきている。水中並びに水上の構造物に対しての爆発の影響も、これまで艦艇関連を中心に研究が行われてきた^{1),2)}。民間における研究として日本では、橋梁の基礎工事で使用する水中発破に関する研究が行われた。³⁾

爆薬が水中で爆発すると圧力波と爆発バブルが発生し、構造物は周囲流体を介してそれらの影響を受け応答する。圧力波には爆発時に発生する衝撃波(初期衝撃波)とバブルが最小径から再膨張する時に発生するバブルパルスがある。水中爆発を遠距離爆発、近接爆発、接触爆発の3つに大別すると、遠距離爆発は爆発位置が構造物から遠く、主に圧力波が構造物に与える影響が問題となる。近接爆発は、爆発位置が構造物に比較的近く、圧力波と爆発バブルが構造物に与える影響を考える必要がある。接触爆発は爆発位置が構造物表面の場合であり、爆発時の高温高压ガス、圧力波、爆発バブルを考慮する必要がある。

これまでの研究では、爆発バブルを球形と仮定した場合に誘起される船体2節振動(ホイッピング)の研究⁴⁾、ポテンシャル流中における大変形を伴う爆発バブルが構造物に与える

影響を考察した研究⁵⁾などがある。さらに近年では計算環境の向上に従い大規模な数値解析によって爆発とその近傍にある構造物の応答も解析されるようになってきている。しかし、近接爆発について、流体の圧縮性に起因する衝撃波に加えてバブルの膨張、収縮過程までを考慮して構造物の応答を検討した研究はほとんど見られない。

そこで本論文では、近接爆発が構造物に与える影響を実験と数値解析により検討する。構造物の近くでバブルが収縮する際には、構造物と反対側のバブル表面が凹み、この凹みが短時間に進展する。そして、ついには高速な水流(ジェット)となり構造物に向かってバブル中心を貫通する。この現象はキャビテーションの分野でも研究されており、船舶などのプロペラに発生する損傷の原因の一つと考えられている。⁶⁾ よって、近接爆発における構造物の応答を検討する際には、バブルパルスとバブルの収縮時に発生するジェットによる圧力(本論文ではこの両者を合わせた圧力をバブル崩壊圧と呼ぶ)を考慮することが重要となる。

船体に対する近接水中爆発においては、バブルの発生、膨張から収縮にいたる周期がホイッピング周期に近い場合、共振現象が起り、船体が全体崩壊に至る可能性がある。一方、初期衝撃波とバブル崩壊圧によって、爆発に近い構造物は破壊される可能性があり、そのような損傷が発生すると縦曲げ強度は減少する。このような場合には外力の空間的分布だけでなく時間変化と構造物との関係が重要となる。よって、爆発からジェットまでの水中爆発現象が周囲構造物に与える影

* 三井造船株式会社

原稿受理 平成19年9月6日

響を解析によって把握するためには、一連の現象を構造流体の連成問題として解析することが必要となる。そこで筆者らは実験と数値解析を実施し、流体構造連成問題として水中爆発が構造物に与える影響を検討してきた。本論文では基礎現象を把握する目的で、近接水中爆発を受ける円筒浮体の挙動について検討を行った結果を述べる。

2. 実験方法と実験結果

本実験では水中爆発を発生させるために細線爆発装置を用いた。装置の電気回路概略を Fig.1 に示す。この装置では、銅線を取り付けた電極を水中に沈め、コンデンサに蓄えられた電気エネルギーを電極において瞬間的に放電させることにより、爆発を生じさせる。本装置を使う利点は、実験室レベルで比較的簡単に爆発現象を実現できること、実験のセットアップが比較的容易なため短期間に実験回数が重ねられること、及び爆発の規模を容易に調整できることである。

Fig.2 に本実験で用いた装置模式図、Fig.3 に細線爆発電極を示す。水槽のサイズは長さ 3.0m、巾 2.0m、深さ 2.0m である。水槽の側面にはアクリル製窓が取り付けられており、その窓を通して爆発の様子を、高速撮影カメラを用いて記録(1000 コマ毎秒)した。実験中の水深は 1.6m であった。

実験体は Fig.4 に示すように円筒形状とした。材料は軟鋼、寸法は外径 0.4064m、深さ 0.35m、底板厚 18mm、側面板厚 8mm である。円筒底面中心には圧力計(共和 PS-300KSA32)を設置し、底面中央の変位をレーザ式変位計(キーエンス LB-300)で計測した。レーザ変位計は水槽の壁に固定した梁に設置した。円筒は水槽の中心に浮かべ、その時の喫水は 0.285m である。円筒底面の他に爆発中心と同一水深位置において、爆発中心から 0.3m 離れた位置にトルマリンゲージ(PCB138A10)を設置し流体中圧力を計測した。計測サンプリングは圧力計 1 μ sec 毎、変位計は 900Hz とした。

Table 1 に実験ケースを示す。CASE 1 は円筒浮体の無い水中で爆発させ、圧力とバブル挙動を観察した。CASE 2 は円筒を治具により固定し、底面圧力を計測した。CASE 3 から CASE 5 では円筒浮体は拘束せず、爆発中心と円筒浮体底面からの距離(オフセット)を 0.1m、0.12m、0.14m と変化させ、オフセットが円筒浮体の応答に与える影響を観察した。ただし、細線爆発の充電エネルギーは全てのケースにおいて 2.5KJ とした。

Fig.5 に CASE 1 の圧力時刻歴(計測点距離 0.3m)を示す。また、Fig.6 にバブル挙動の高速写真を示す。図中左側が実験、右側が 3 章に示す数値解析法による解析結果である。なお、本章の図に示される数値解析結果については後述する。Fig.7 にバブルの半径の時刻歴を示す。この半径は高速写真から読み取った値である。Fig.5 において 18.7msec 時点にあ

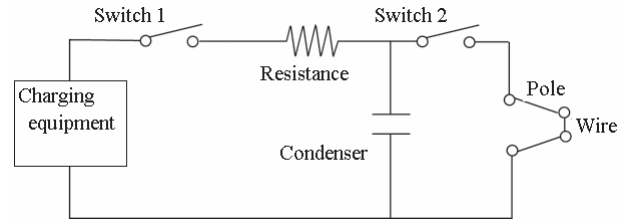


Fig.1 Wire explosion circuit

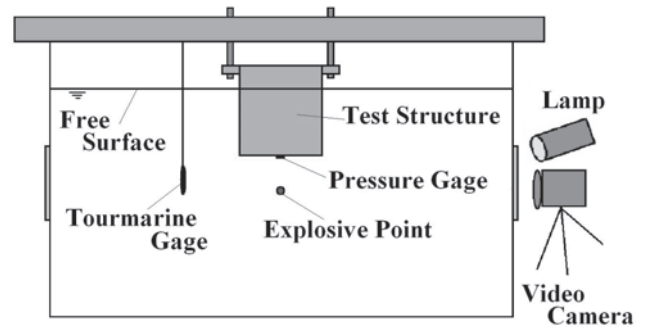


Fig.2 Schematic view of test apparatus

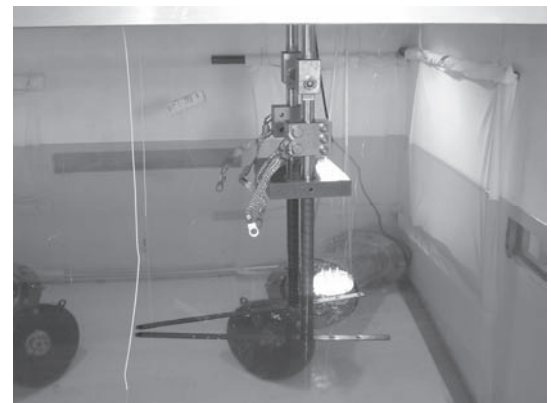


Fig.3 Wire explosion setup



Fig. 4 Test structure

る圧力ピークはバブル崩壊圧のピークである。これらの図から、バブルの膨張から収縮にいたるバブル第1周期は、初期衝撃波が到達した時刻(0.22msec)をバブル崩壊圧ピークが到達した時刻(18.7msec)から差し引き、18.5msec となる。ここで、初期衝撃波の発生から最初のバブル崩壊圧ピークまでの時間をバブル第1周期、最初のバブル崩壊圧ピークから次の

バブル崩壊圧ピークまでの時間をバブル第2周期と呼ぶ。なお、高速写真を観察した結果、バブル最大半径は0.115mとなった。

CASE 2における底面中心圧力時刻歴を Fig.8 に示す。また、その時のバブル挙動を Fig.9 に示す。初期衝撃波到達時刻前後にノイズが大きく圧力時刻歴では初期衝撃波を計測することはできなかった。水中音速からすると、0.07msecに衝撃波が到達していると考えられ、バブル崩壊圧の最初

Table 1 Test condition

cond. No.	offset distance (m)	cylinder
CASE 1	depth 0.3	none
CASE 2	0.1	fix
CASE 3	0.1	free
CASE 4	0.12	free
CASE 5	0.14	free

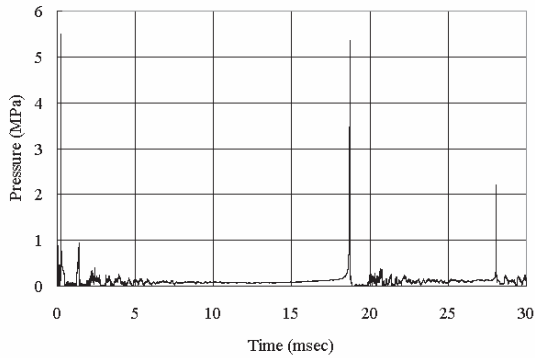
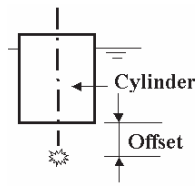


Fig.5 Experimental result of pressure time history (0.3m from explosion center, CASE 1)

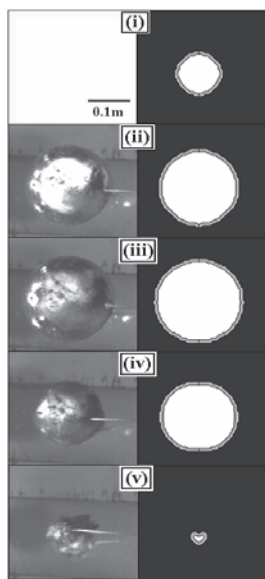


Fig.6 Bubble shape (CASE 1)
(Left side : experiment, Right side : numerical simulation)
(i):1msec,(ii):5msec,(iii):10msec,(iv):15msec,(v):20msec

のピークが21.3msecであるので、バブル第1周期は21.2msecであると推定される。これはCASE 1の18.5msecと比較すると長くなっており、周囲に構造物が存在するとバブル周期がその影響を受けることがわかる。

CASE 3からCASE 5の底面中心変位時刻歴を Fig.10から Fig.12にそれぞれ示す。ただし、上方向変位を正としている。Fig.10(オフセット0.1m)を見ると円筒浮体底面変位はバブル

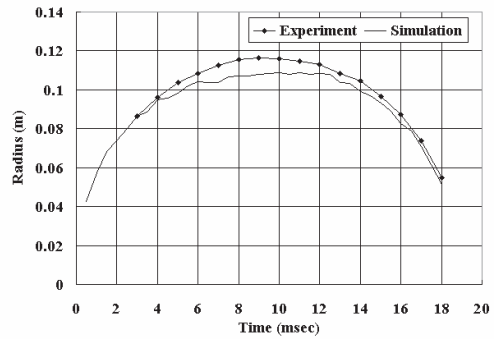


Fig.7 Time history of bubble radius (CASE 1)

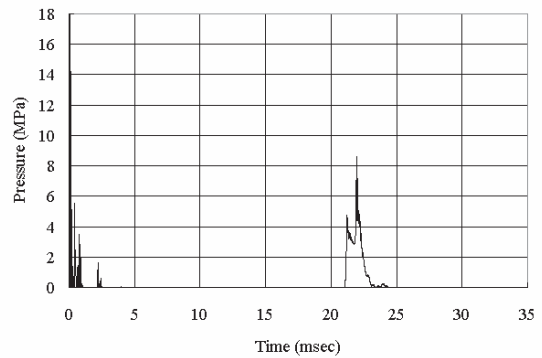


Fig.8 Experimental result of pressure time history at the bottom plate center (CASE 2)

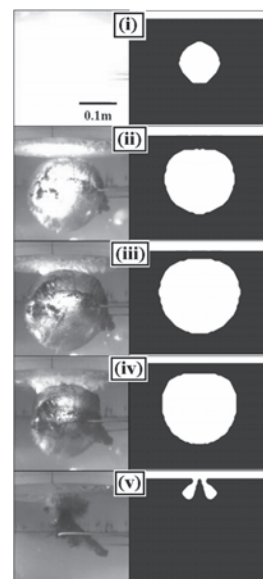


Fig.9 Bubble shape (CASE 2)
(Left side : experiment, Right side : numerical simulation)
(i):1msec,(ii):5msec,(iii):10msec,(iv):15msec,(v):21msec

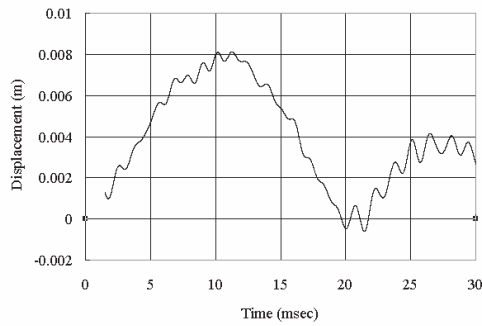


Fig. 10 Experimental result of displacement time history (CASE 3)

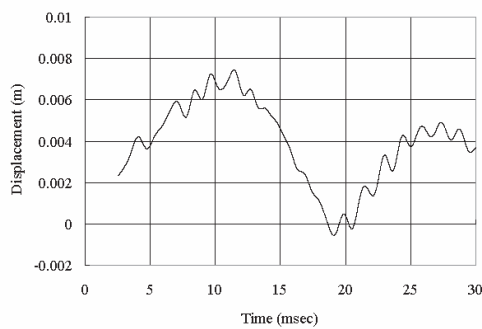


Fig. 11 Experimental result of displacement time history (CASE 4)

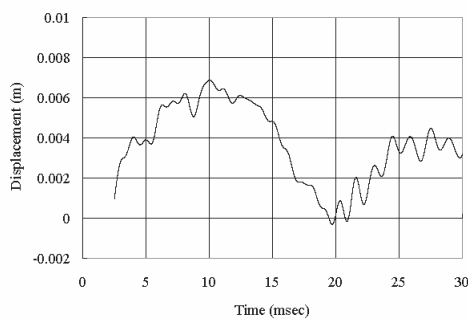


Fig. 12 Experimental result of displacement time history (CASE 5)

の第1周期に一致した変化を示しているが、局部振動の影響も見られる。局部振動の影響を除くと、CASE 3で最大変位約0.0079m、CASE 4で最大変位約0.0070m、CASE 5で最大変位約0.0064mである。爆発初期に非常に大きい変位が記録されたが、それは電気的なノイズであり、図では示していない。このノイズは一時的な現象であり、爆発の初期で影響は無くなると考えている。

なお、実験終了後の円筒浮体底面には残留変形は見られず、実験を通して材料は塑性域には達していないと考えられる。

3. 数値解析モデル

数値解析は以下を考慮して実施した。

- 1) 流体は圧縮性、非粘性流体
- 2) 爆発バブルは非凝縮性気体、空気は理想気体
- 3) 重力影響
- 4) 流体構造連成
- 5) 構造大撓み（幾何学的非線形）

流体は密度、エネルギーと圧力の関係を状態方程式で表しオイラー要素を用いてモデル化した。水の状態方程式は次式を用いた。

$$P = a_1 \eta \tag{1}$$

$$\eta = \left(\frac{\rho_w}{\rho_{w,0}} \right) - 1$$

P は圧力(Pa)、 ρ_w は水密度(kg/m³)、 $\rho_{w,0}$ は初期密度(1000kg/m³)、 a_1 は体積弾性率(=2.1×10⁹Pa)である。空気の状態方程式は γ 形式を用いた。

$$P = (\gamma - 1) \rho_{air} E_{air} \tag{2}$$

γ は比熱比(=1.4)、 E_{air} は比内部エネルギー(J/kg)である。バブル内部気体の状態方程式は次式のJWL(Jones-Wilkins-Lee)形式を用いた。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega \eta \rho_{gas,0} E_{gas} \tag{3}$$

係数は $A = 3.712 \times 10^{11}$ Pa、 $B = 0.321 \times 10^{11}$ Pa、 $R_1 = 4.15$ 、 $R_2 = 0.95$ 、 $\omega = 0.3$ 、 $\eta = \rho_{gas} / \rho_{gas,0}$ 、 $\rho_{gas,0} = 1630 \text{ kg/m}^3$ 、 $E_{gas} = 4.29 \times 10^6 \text{ J/kg}$ を使用した。⁷⁾

ここで細線爆発現象を爆薬の状態方程式であるJWLを適用するには、炸薬等価質量を求める必要がある。等価質量を求めるには、文献⁸⁾で得られる次式を用いた。

$$R_{max} = 12.67 \frac{W^{1/3}}{(D + 33)^{1/3}} \tag{4}$$

R_{max} は最大バブル半径(ft)、Wは爆薬量(lb)、Dは水深(ft)であるが単位系に注意を要する。

4)式の係数は一般的爆薬であるTNTに対して決められている。そこで、円筒浮体のないCASE 1の実験結果から最大半径0.115mとなるTNT質量を4)式から求めると $4.05 \times 10^4 \text{ kg}$ となる。解析にはこの等価質量を初期条件として使用した。

Fig.13に流体と構造の要素分割を示す。流体モデルは角度15度の扇型を上下に伸ばした領域とし、扇型の半径は水槽の半巾である1mとした。要素の上方部分は空気層で初期条件は1気圧(0.1013MPa)として、空気層の上面は圧力1気圧一定の境界条件とし、その他の境界は剛壁条件とした。構造

は流体と同様に 15 度の扇型を底面として、その底面に垂直に側壁を立て、要素はシェル要素を用いた。弾性率は 2.1×10^{11} Pa、ポアソン比は 0.3 とした。

解析には MSC-DYTRAN⁹⁾ を使用した。流体は有限体積法、構造は有限要素法を用いて解き、その連成は GENERAL COUPLING 機能を用いた。この機能は流体要素の中で構造の内側が占める体積を判断し、構造と流体の境界に働く圧力を算出する機能である。

以上に述べたモデルを使用して自由表面下における爆発と円筒浮体直下での爆発現象を解析した。

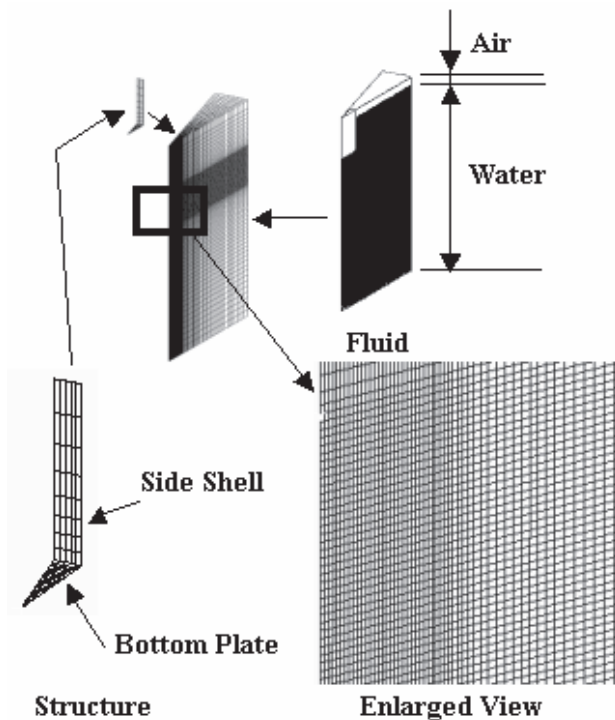


Fig. 13 Simulation model

4. 実験結果と数値解析結果の比較と考察

Fig.14 と Fig.15 に CASE 1 の爆発中心から 0.3m 離れた位置における圧力時刻歴をそれぞれ示す。Fig.14 は初期衝撃波、Fig.15 はバブル崩壊圧である。数値解析は実験結果と比較するとピークが低く、また Fig.14 の数値解析結果に振動が見られる。これは、0.3m 離れた位置では要素サイズが若干大きくなっているためと考えられる。しかし、構造応答を検討する際には、構造の応答周期よりも衝撃波の周期が短い場合、衝撃波の圧力のピークよりも力積が問題となる。¹⁰⁾ 初期衝撃波、バブル崩壊圧とも持続時間は構造応答に比べ非常に短く、構造に対するその影響を検討するには力積が重要である。初期衝撃波の力積値は実験 178.8Pa・s、解析 167.6Pa・s、バブル崩壊圧については実験 229.1Pa・s、解析 201.2Pa・s となり、差は衝撃波について 6.3%、バブル崩壊圧について

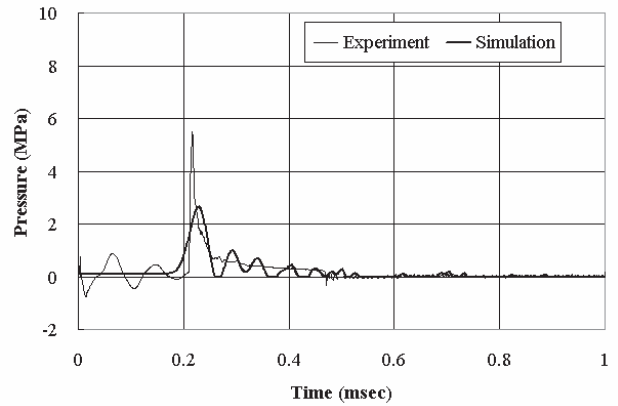


Fig.14 Pressure time history at 0.3m (CASE 1)

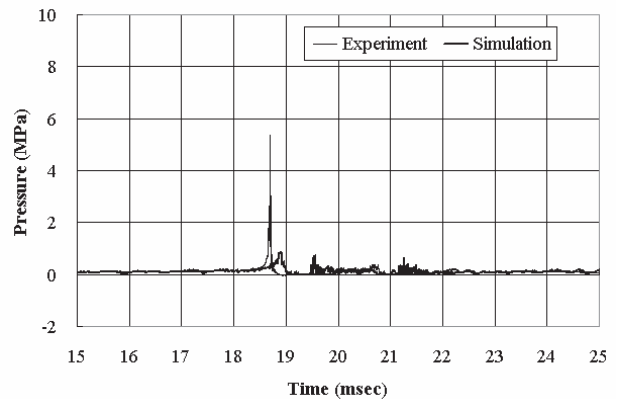


Fig.15 Pressure time history at 0.3m (CASE 1)

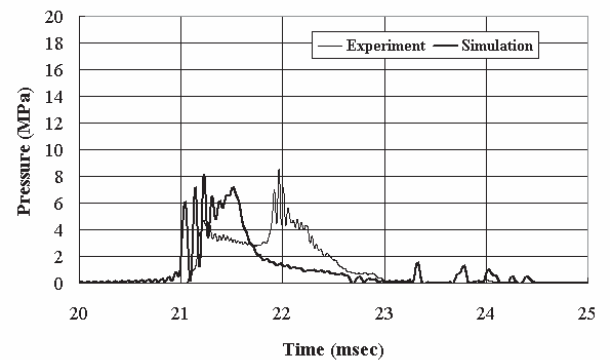


Fig.16 Pressure time history at bottom plate center (CASE 2)

12.2%である。これらより、数値解析における圧力のピークは実験よりも低い、圧力の時間積分(力積)はよく一致しており、数値解析は圧力変化の特徴をよく表していると考えられる。なお、バブル第1周期は実験では 18.5msec、解析は 18.7msec となっており両者の差は 1.1%である。

Fig.6 に示した実験と数値解析のバブル形状の比較では、両者は良好に一致しており、また、Fig.7 に示すバブルの半径変化については、最大半径に関して数値解析結果は実験結果と比較して若干小さいが全体の挙動は良好に一致している。

Fig.16にCASE2における底面中心の圧力時刻歴について実験と解析結果の比較を示す。本図ではバブル崩壊圧の時刻歴を示す。実験結果にはピークが2つ見られるが、数値解析では2つの圧力ピークは明確には現われていない。実験で2つのピークが見られる原因は、バブル最小径時刻とジェットがバブルを貫通する時刻にずれがあるためと考えられる。一方、解析において圧力のピークをより正確に再現するにはバブル最小径時のバブル形状を正確に表現することが必要となり、それにはより細かい要素分割が必要となる。しかし、20msec から 25msec までの力積値を比較すると実験では $5306\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、解析では $5204\text{Pa}\cdot\text{s}$ となり差は2%である。バブル崩壊圧の力積値は良好に対応しており、数値解析は構造応答を検討するには十分な精度をもっていると考えられる。

解析における21msec時点の流速ベクトル分布をFig.17に示す。本図は1/2断面を示している。バブルはドーナツ形状(トロイダル)になって、中心をジェットが貫通し、円筒浮体底面に当たっている様子がわかる。流速は時刻21msecでは最大90m/sである。

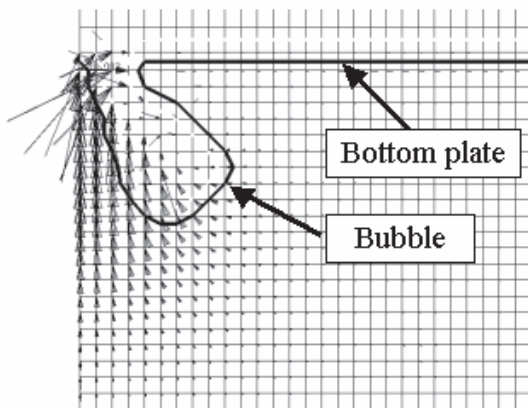


Fig.17 Numerical result of velocity vector distribution at 21msec (CASE 2)

バブル第1周期は解析では21.4msecとなっており、CASE1に比べバブル第1周期は構造物の影響を受け大きくなる傾向は解析結果にも現われている。

Fig.9に示したバブル形状の比較では、バブルは円筒浮体底面に向かって移動しながら収縮しており、自由表面下のCASE1とは異なる挙動を示す。数値解析結果は実験結果に良く対応している。

Fig6とFig.9を見ると、上方に構造物が無い場合は、バブルは爆発中心位置にとどまり膨張、収縮をしているが、構造物が存在すると、バブルは収縮時に構造物に近づいていく。一般に流体中でのバブルは重力影響で上昇するが、自由表面が存在すると、自由表面とバブルの距離によっては下降する場合がある⁶⁾ CASE1の水深は0.3mであるが、バブルが爆

発位置にほぼ留まっていることから、自由表面影響を受けていると思われる。

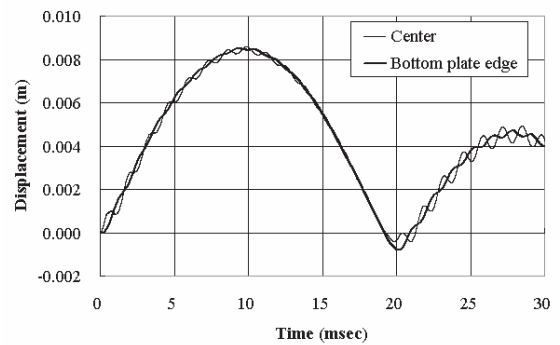


Fig.18 Numerical result of displacement time History (offset 0.1m, CASE 3)

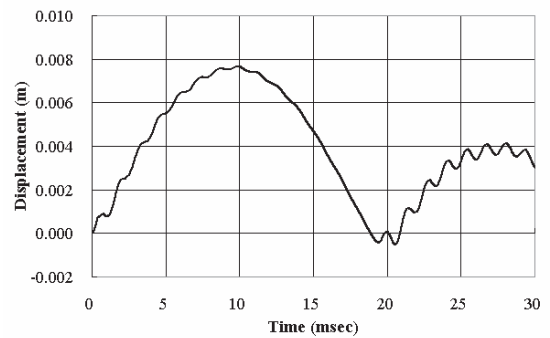


Fig.19 Numerical result of displacement time History (offset 0.12m, CASE 4)

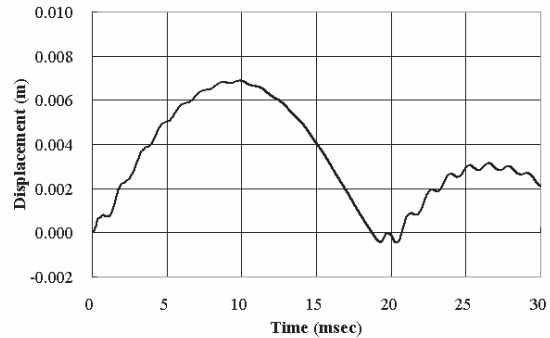


Fig.20 Numerical result of displacement time history (offset 0.14m, CASE 5)

円筒浮体底面中心の数値解析による変位時刻歴を Fig.18 から Fig.20 に示す。どのケースでも実験と解析は良好な対応をしており、初期衝撃波、バブルの膨張と収縮およびバブル崩壊圧の影響を受けて運動する円筒浮体の特徴を数値解析は良好に再現している。Fig.18には数値解析における底面端部の変位時刻歴も示すが、底面端部の変位は底面中心の変位と一致しており、円筒浮体全体が上下に剛体運動していることがわかる。特異点分布法を用いて円筒の接水振動解析を実施した結果、円筒上下運動の固有周期は1.45s(周波数

0.690Hz)、底面パネルの局部振動固有周期は 1.66msec(周波数 604.2Hz)となった。変位の時刻歴(Fig.18 から Fig.20)に見られる高い周波数の振動は底面パネルの局部振動であることがわかる。

Fig.10 と Fig.18 を比較して、バブル第2周期に見られる円筒浮体の最大変位に注目すると、数値解析結果は実験結果よりも若干大きな値となっている。局部振動を除いた平均的な値で最大変位を比較した結果を Table 2 に示す。バブル第1周期における最大変位の差は6.0%、バブル第2周期では20%である。バブル第2周期において差が大きいのは、爆発気体に JWL 状態方程式を用いるとバブル内部の気体の組成、温度の影響などが細線爆発の爆発気体とは異なるためと考えられる。構造の応答をバブル第2周期まで検討する際には注意を要するが、概ねバブル第2周期まで数値解析は実験を再現していると考えられる。

Table 2 Max. displacement (CASE 3)

	max. displacement (m)	
	1st period	2nd period
experiment	0.0079	0.0037
simulation	0.0084	0.0046

次に、数値解析によりオフセットの影響を検討する。オフセットを 0.06m にした場合の変位の時刻歴をオフセット 0.1m、0.12m、0.14m の結果とあわせて Fig.21 に示す。本図からわかるように、バブル第1周期において最大変位を与えるオフセットは0.06m であるが、バブル第2周期で最大変位を与えるのはオフセット 0.1m である。円筒浮体の運動にジェットなどのバブル挙動が影響しているためにバブル第1周期の円筒浮体応答からバブル第2周期の円筒浮体応答を予測することは困難である。

Fig.22 と Fig.23 に数値解析で得られた力積値の構造底面半径方向分布を示す。Fig.22 は初期衝撃波、Fig.23 はバブル崩壊圧の力積値である。これらの図を比較するとバブル崩壊圧の力積値は初期衝撃波による力積値よりも大きいことが

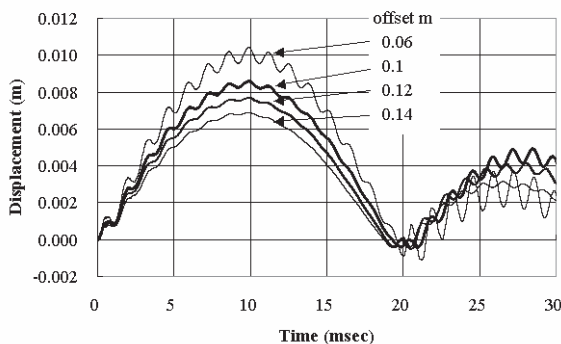


Fig.21 Offset effect on displacement (numerical result)

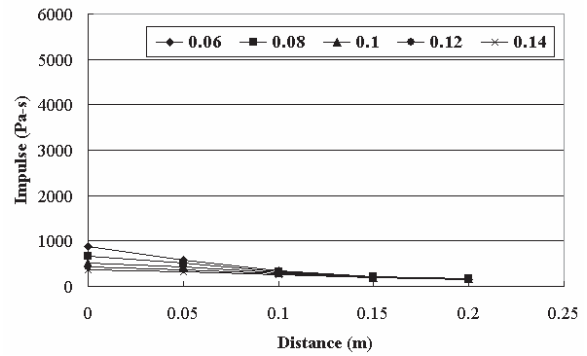


Fig.22 Offset effect on distribution of impulse due to incident shockwave (numerical result)

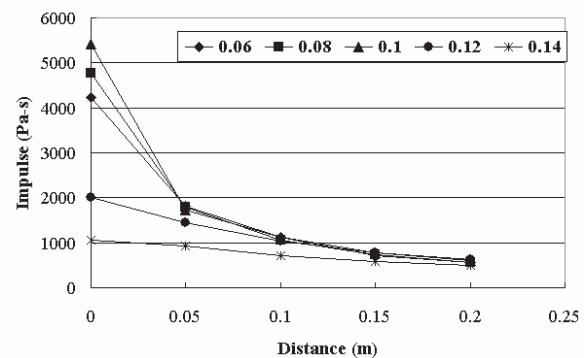


Fig.23 Offset effect on distribution of impulse due to bubble collapse (numerical result)

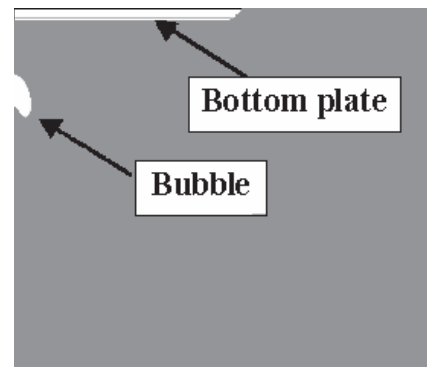


Fig.24 Numerical result of bubble shape at 19msec (offset 0.12m, CASE 4)

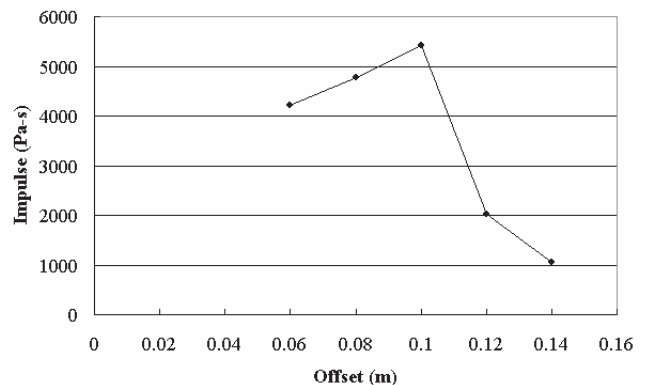


Fig.25 Offset effect on impulse due to bubble collapse (numerical result)

わかる。オフセット 0.1m の場合にはバブル崩壊圧の力積値は初期衝撃波による力積値の 10.5 倍となっている。

Fig.23 では、円筒浮体底面における力積値の分布はオフセットがバブル最大径前後になると円筒浮体底面の中心に集中する傾向が見られる。この傾向は底面の変位時刻歴に現われており、オフセットが小さくなるとバブル第 2 周期における局部振動の振幅が大きくなっている。バブル崩壊によるこの圧力分布の特徴はバブル収縮時の位置と関係していると考えられる。Fig.24 にオフセット 0.14m でのバブル最小径の形状を示す。この図から最小径時には構造表面から離れた位置にバブルが存在することがわかる。一方、オフセット 0.1m ではバブルは構造表面に接しており(Fig.9 および Fig.17 参照)バブル崩壊の位置が構造表面近傍にある。この結果から、底面中心に高い力積値が分布するのは、底面のごく近傍においてバブルが最小径になるためと考えられる。

Fig.25 にオフセットと円筒浮体底面中心におけるバブル崩壊圧の力積値との関係を示す。この図から近接爆発の場合、オフセットがバブル最大半径前後の場合に力積値が最大になると考えられる。

以上から、近接水中爆発が構造に与える影響は爆薬量をパラメータとした爆発規模だけでなくオフセットも重要なパラメータであることがわかる。

5. 結言

本論文では、近接水中爆発を受ける円筒浮体の応答を実験と数値解析によって検討した。数値解析では流体構造連成と流体の圧縮性を考慮し、爆発バブルの内部気体は JWL 式を用いてモデル化した。実験では細線爆発装置で水中爆発を発生させ、円筒浮体直下でオフセットを 3 種類変えた。また、数値解析においてはオフセットの影響を検討するために、実験条件とは異なるオフセットの解析も実施した。実験結果と数値解析結果を比較検討した結果、以下のような知見を得た。

- 1) 細線爆発を JWL 式でモデル化し等価爆薬量を用いた数値解析では、初期衝撃波、バブルパルス、ジェットによる圧力変化について最大圧力には差が見られるが、構造応答に影響を与える力積については妥当な値が得られる。
- 2) 円筒の上下方向運動の周期は爆発バブル周期に一致し、その大きさは爆発規模が一定の時には爆発位置に影響される。
- 3) バブル第 2 周期における構造応答はバブル第 1 周期における構造応答の大きさからその大小を判断できず、初期衝撃波、バブル挙動、バブル崩壊圧、構造の運動などを考慮した解析を実施して検討を行う必要がある。
- 4) バブル崩壊圧による円筒浮体底面での力積は初期衝撃波の力積よりも大きく、その分布はオフセットがバブル最

大半径よりも小さいときには中心に集中する傾向がある。また、バブル崩壊圧の最大力積値はオフセットがおおよそバブル最大半径と等しい場合に得られる。

謝 辞

実験を実施するにあたり、防衛省技術研究本部艦艇装備研究所航走技術研究部構造強度研究室金子博文室長、村松修技官並びに防衛省関係各位に多大なご協力をいただきました。また横浜国立大学荒井誠教授には論文執筆に際し貴重なご助言をいただきました。ここに関係各位に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 齊藤年正、小川義孝、八尾英男、村田修二 : 衝撃荷重を受ける船体の過渡応答 (第 1 報、衝撃荷重の適用法と船体振動)、関西造船協会誌、第 225 号、pp.167-174、(1996)
- 2) 梅本勝弥 : 衝撃圧力荷重を受ける水中円筒殻の衝撃応答に関する研究、博士論文、大阪大学、(2000)
- 3) 水中発破、総合安全工学研究所編、昭和 60 年、山海堂
- 4) Hicks, A. N. : Explosion Induced Hull Whipping, *Advances in Marine Structure*, (1986), p.390
- 5) Hung, K. C. et al. : Modeling and Simulation of Bubble Dynamics and Its Effects on submerged Structure, *Proceedings of 74th Shock and Vibration Symposium*, (2003)
- 6) 新版キャビテーションー基礎と最近の進歩ー、加藤洋治編、槇書店、(1999)
- 7) Shin, Y. S. and Chisum, J. E. : Modeling and Simulation of Underwater Shock Problems Using a Coupled Lagrangian-Eulerian Analysis Approach, *Shock and Vibration*, Vol. 4, No.1, pp.1-10, 1997.
- 8) Cole, R. H. : Underwater Explosion, Princeton University Press, (1948)
- 9) DYTRAN Theory Manual, MSC Software, (2007)
- 10) 渋江唯司、伊藤章雄、中山英治 : 水面衝撃を受ける円筒殻の構造応答解析、日本造船学会論文集、第 174 号、pp.479-484、(1993)