

水中爆発ガス球の高速度撮影

中山 良男*, 生沼 仙三*, 田中 一三*

圧填したテトリル10グラムの中爆発によるガス球の脈動現象の高速度写真撮影を行い、ガス球半径の時間変化を検討した。実験値は、水の圧縮性と生成ガスの内部エネルギーを考慮した数値解と比較した。その結果、ガス球の脈動周期、最大半径は、実験値とよく一致した。しかしガス球半径と時間の関係については、ガス球の膨張半径が最大になった後、計算値と実験値の差が大きくなった。これは、爆薬の形状、水深等の影響によるものと思われる。また、ガス球の最大膨張半径から算出した脈動周期は、ピエゾ圧力ゲージから求めた脈動周期に良く一致した。

1. はじめに

爆発エネルギーの測定法として、近年水中爆発を利用した方法が注目されている。この方法はピエゾゲージにより水中衝撃波の圧力波形を測定し、発生した最初のバブルパルスの時間間隔を求めて爆発生成ガスのエネルギーを評価する。この時間間隔 T_b とガスのバブルエネルギー Y は以下の関係式で表される。^{1,2)}

$$a_{\max} = (3/2) \sqrt{(2\rho_0/3\rho_w)} T_b/\beta \quad (1)$$

$$Y = \rho_0 V_m = \rho_0 (4/3) \pi a_{\max}^3 \quad (2)$$

が困難なので、(1)式の T_b から a_{\max} を求めている。ガス球の最大半径も含めて、その時間変化を検討する方法としては、電導プローブ法や超音波の伝播、水中電流の変化を調べる方法および放射線撮影法などが考えられる³⁾。ここでは最も一般的な方法である高速度写真撮影法によりガス球の脈動を検討した。高速度写真撮影については、Coleの著書¹⁾に雷管や水深90メートルでのテトリル250gの中爆発の実測値が紹介されている。

Table 1 Experimental conditions

No.	Explosives	Charge Weight g	Depth of Explosion m	Gauge Distance m	Camera Distance m	Camera Speed frames/s
1-1	Tetryl*	10.1	1.50	1.3	4	955
1-2	Tetryl*	10.0	1.49	1.3	4	939
1-3	Tetryl*	10.0	1.30	1.3	4	1836
2-1	Detonator	0.6	0.69	0.85	2	2781
2-2	Detonator	0.6	0.69	0.85	2	2733

*Tetryl/stearic acid = 94/6, density = 1.55g/cc

ここに a_{\max} = ガス球の最大半径, ρ_0 = 静水圧, ρ_w = 水の密度, V_m = ガス球の最大体積, $\beta = 2.2405$ である。これらの式から、爆発生成ガスのエネルギーを評価する直接的な方法として(2)式におけるガス球の最大半径 a_{\max} を実測することが考えられる。通常はそれ

本報告では、Coleの実験よりも比較的浅い水深(1~1.5メートル)における10グラム程度の薬量の中爆発を行い、ガス球の高速度写真撮影の結果から、ガス球半径の時間変化および脈動周期をガス球の最大膨張半径から算出した結果について検討する。

2. 実験方法

実験条件をTable 1に示す。使用した水槽は直径が8m、深さ5mの円筒形である。水中での写真撮影に際しては水の透明度が問題になる。本実験では、実験

昭和63年5月2日受理

*化学技術研究所 安全化学部

〒305 茨城県つくば市東 1-1

TEL 0298-54-4793

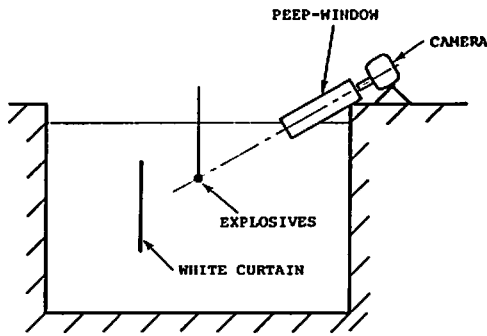
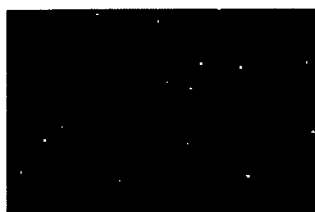


Fig. 1 Schematic diagram of the set-up

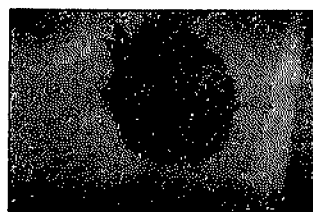
の前日に水槽の水(約250 m^3)を全部いれ換えて透明な状態で行った。爆薬は高さ20.5mm, 直径20mm, 密度1.55 g/ccの圧填したテトリル(テトリル/ステアリン酸=94/6)であり, その起爆には6号電気雷管(日本油

脂社製)を使用した。また6号雷管単体の撮影も行った。使用したカメラは

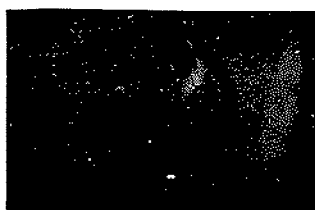
Photec N 164-8-115, 使用したフィルムは高感度16ミリ・カラーネガフィルムASA500(富士フィルム社製)である。撮影用光源については, 1kwのパワーライト3灯と補助フラッシュライト2灯(持続時間20msec)を爆薬の真上近傍に設置した。撮影に際しては, 透明アクリル窓を持つ筒を水面に沈めてその窓から現象を撮影した。長さの基準には, 10cm毎に白と黒で塗り分けた長さ1メートルの棒を沈めてその静止像を撮影した。以上の実験構成をFig. 1に示す。同図中に白い垂れ幕を水中に吊り下げているが, これは背景を白くしてガス球の大きさを読み取りやすくするためである。この白い垂れ幕の無い状態での撮影も行ったが, 垂れ幕の脈動周期等への影響は特に認められなかった。撮影の際には, 被写体をできる限り近づけて光



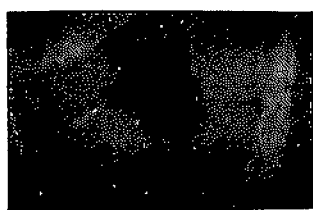
$t = 1.0 \text{ msec}$



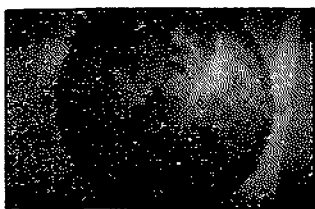
$t = 52.5 \text{ msec}$



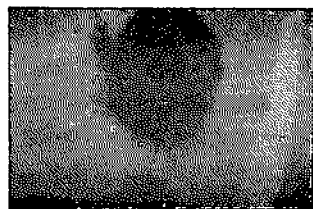
$t = 4.8 \text{ msec}$



$t = 57.3 \text{ msec}$

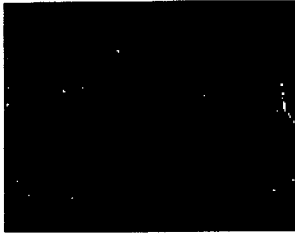


$t = 28.7 \text{ msec}$

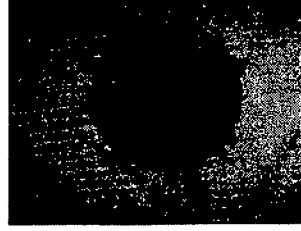


$t = 62.1 \text{ msec}$

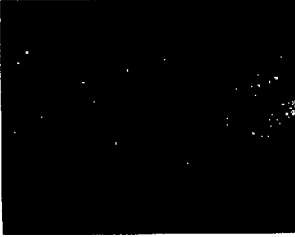
Fig. 2 Dynamics of a spherical gas bubble produced by the underwater explosion of pressed Tetry 10 grams (1.55g/cc).



t=0.62 msec



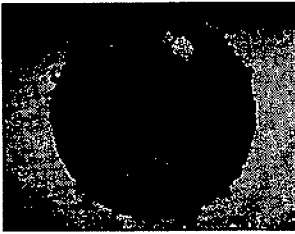
t=19.8 msec



t= 1.9 msec



t=22.9 msec



t=12.1 msec



t=25.6 msec

Fig. 3 Dynamics of a spherical gas bubble produced by the underwater explosion of No.6 detonator 0.6 grams.

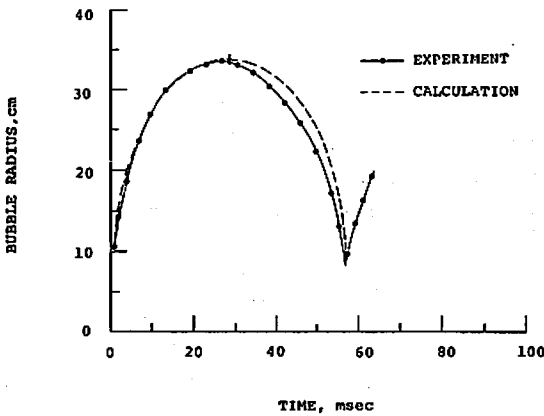


Fig. 4 A comparison of experimentally determined bubble radius with the calculated curve based on the Rayleigh equation. The explosive charge is pressed Tetryl 10 grams.

量をかせぎまた大きく写して空間分解能を上げるようにした。また、ビエソ圧力ゲージによる脈動周期の測定も行った。

3. 実験結果

上記の方法により脈動するガス球の高速度撮影を行った。Fig. 2にテトリル10グラム(密度1.55 g/cc)の水中爆発ガス球を撮影速度約1000コマ毎秒で撮影した結果を示す。爆薬の爆発後、ガス球は球状に膨張していく。ガス球と水の境界は最大膨張からある程度収縮するまではかなりはっきりしている。収縮時は球形とはいえない形状である。最も収縮したガス球の形状および再膨張時のガス球の形状は球形から著しく異なっている。Fig. 3に6号雷管の水中爆発ガス球を撮影速度約3000コマ毎秒で撮影した結果を示す。カメラと爆源の距離が近く水深も浅いため光量が十分となり、テ

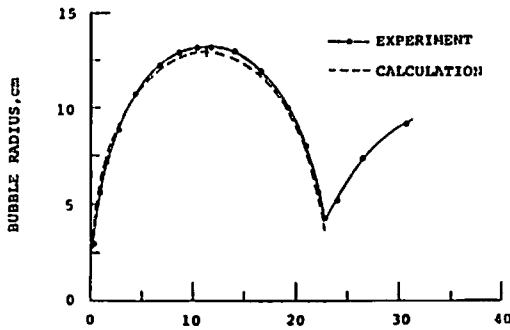


Fig. 5 A comparison of experimentally determined bubble radius with the calculated curve based on the Rayleigh equation. The explosive charge is No.6 detonator 0.6 grams.

リル10グラムの場合よりガス球はかなりはっきり写っている。ガス球は球状に膨張していくが、その表面には突起があり、あまりきれいではない。ガス球の収縮がかなり進むとガス体に含まれていたと思われる固体成分の一部が放射状に見えてくる。最も収縮した時および再膨張時のガス球の形状は、比較的球形に近い。これらの撮影フィルムを映写機で拡大投影してガス球の半径を求めた。ガス球を大きく撮影するためフィルムの上方向の一部が欠けたので、真円度の検討は行っていないが、観測した範囲内ではガス球はほぼ球形であった。そのため、ガス球半径の測定はやむを得ず画面の横方向に限定した。時間の基準にはフィルム上に記録されているタイムマーカーを利用した。ガス球半径の時間変化をFig. 4およびFig. 5に示す。また、

ガス球の最大半径、ガス球の膨張時間(起爆から最大ガス半径に膨張するまでの時間)および3種類の方法で求めた脈動周期の結果をTable 2に示す。

4. 考察

4.1 ガス球半径の時間変化

水中のガス球の運動方程式として、非圧縮性流体力学式に基づいたRayleighの式(文献1の第8章(8.5)式を参照)

$$(3/2) \cdot (4\pi/3) \cdot \rho_w \cdot a^3 (da/dt)^2 + (4\pi/3) \cdot \rho_0 \cdot a^3 + E(a) = Y \quad (3)$$

を考える。内部エネルギー $E(a)$ は

$$E(a) = \int_{V_0}^{\infty} P \cdot dV \quad (4)$$

で表される。ここに、 a =ガス球の半径、 V_0 =半径 a のガス球の体積、 P =体積 V_0 に対するガスの圧力である。(3)式は水の圧縮性を考慮していないので、爆発の初期には適用できない。そのためKHT計算コード⁵⁾により密度1.55 g/ccのテトリル/ステアリン酸の爆発膨張特性を解析し、その結果を用いてMaderの1次元ラグランジュコードSIN⁶⁾により水中衝撃波の解析を行った。SINによる解析はガス球が初期半径の約10倍膨張するまで解析した。テトリル/ステアリン酸では、KHTコードによるガス球の膨張エネルギーは1243cal/gであり、ガス球が初期半径の10倍まで膨張すると、(3)式の $E(a)$ はテトリルの膨張エネルギーの4%まで減少する。SINの結果では、950 μ sで $a=10.95$ cm、 $da/dt=4.70 \times 10^{-3}$ cm/ μ sとなった。これを初期半径としてテトリル/ステアリン酸の場合の(3)式を解いた。

Fig. 4にガス球の時間変化の計算結果を破線で示す。(3)式によるガス球の脈動周期は、57.6msecで実験値

Table 2 Experimental results

No.	Explosives	Weight g	Maximum Bubble Radius cm	Expansion Time msec	Pulsation period		
					T _A * msec	T _B ** msec	T _C *** msec
1-1	Tetryl	10.1	33.5	26.0	57.2	57.3	56.0
1-2	Tetryl	10.0	33.2	26.3	57.3	57.3	56.3
1-3	Tetryl	10.0	34.4	25.3	57.5	57.4	59.1
2-1	Detonator	0.6	13.2	11.5	22.8	222.9	23.2
2-2	Detonator	0.6	13.2	11.8	22.9	23.0	23.2

*recorded by piezo pressure gauge

**measured from frame speed of camera

***estimated from maximum bubble radius

の平均値57.3msecとよく一致する。最大半径についても、計算値33.9cm、実験値の平均値33.7cmとよく一致している。しかし膨張時間については、計算値28.75msec、実験値26msecとなり、実験値が小さくなった。ガス球半径と時間の関係についても、ガス球の膨張半径が最大になった後、計算値と実験値の差が大きくなった。これらの計算値と実験値の不一致の原因としては、爆薬が球形でないこと、中心起爆でないこと、水面からの希薄波の影響や水槽の形状効果があること等によるものと思われる。

一方、雷管については点火薬、起爆薬そして管体等があるので、上述の解析は行わなかった。そのかわりに、(3)式で内部エネルギーを無視し、脈動周期が実験結果と一致するような条件で数値計算を行った。その計算結果をFig. 5に破線で示す。比較的よい一致を示している。

4.2 ガス球の最大膨張半径から算出した脈動周期について

ガス球の高速度写真撮影の結果からガス球の最大膨張半径を求めたので、(1)式より脈動周期を算出した。Table 2に、ピエゾ圧力ゲージから求めた脈動周期(T_A)、撮影速度から推定した脈動周期(T_B)および実測したガス球の最大半径 a_{max} から算出した脈動周期(T_C)の結果を示す。水中圧力波を爆心から離れた点で測定する際には T_A と T_B は必ずしも同じ値にはならず、一般には $T_B > T_A$ となる。しかしながら、今回の実験ではほぼ等しくなった。

最大膨張半径の測定誤差は、テトリルの場合には、画面の水平方向の長さは約1メートル、長さの基準尺は10cm単位なので、読み取り誤差は1cm以下であろうと考えている。読み取り誤差1cmという値は、最大膨張の前後においてガス球半径の時間変化が小さく生成ガスと水との境界面もはっきりしていることを考慮するとやや大きめの設定である。1cmの読み取り誤差は時間に換算して約1ミリ秒である。同様に、6号雷管の場合、測定誤差は約0.5ミリ秒程度であろう。これらの誤差を含めて考えればTable 1の T_C の結果はほぼ T_A に等しい。

以上のことより、高速度写真撮影によりガス球の最大半径からガス球の脈動周期を算出する方法は、圧力

ゲージによる測定方法に等しいことがわかった。今回の実験では爆源が円筒形であったが、生成ガスはほぼ球状になった。したがって、上述の結果は、当然成立すべき関係である。しかし、線状爆薬のような爆源の場合、爆発生成ガスは球形とは著しく異なることが予想できるので、そのような場合のバブルエネルギーを評価する方法として、直接生成ガスの体積を求める方法は有用であろう。

5. まとめ

圧填したテトリル10グラムの中爆発によるガス球の脈動現象の高速度写真撮影を行い、ガス球半径の時間変化を検討した。実験値は、水の圧縮性と生成ガスの内部エネルギーを考慮したRayleighの式の数値解と比較した。その結果、ガス球の脈動周期、最大半径は、実験値とよく一致した。しかしガス球半径と時間の関係については、ガス球の膨張半径が最大になった後、計算値と実験値の差が大きくなった。これについては、爆薬の形状、起爆方法、水深等の影響を検討することが必要であろう。また、ピエゾ圧力ゲージから求めた脈動周期とガス球の最大膨張半径から算出した脈動周期は、実験誤差の範囲内で良く一致した。したがって、ガス球のエネルギーを評価する方法として脈動周期から算出する方法はガス球の最大体積を求めることと同等であることがわかった。

付 記

高速度カメラの撮影にあたっては、銻サンピコ 浜田 豊氏の協力を得た。また、KHTおよびSINコードによる数値計算のさいには、当研究所の田中克己氏に協力を仰いだ。心から感謝の意を表する。

文 献

- 1) R.H.Cole, "Underwater Explosions", Princeton University Press(1948).
- 2) 田中一三, 工業火薬, 36, 11(1975).
- 3) National Marine Consultants, NMC-OR-62(1963).
- 4) 田中一三, 工業火薬, 40, 306(1979).
- 5) K.Tanaka, 8th Symp. (International) on Detonation, 548(1985).
- 6) C.L.Mader and W.R.Gage, Los Alamos Scientific Laboratory report LA-3720(1967).

High-speed Photography of Gas Bubble in Underwater Explosions.

by Yoshio Nakayama*, Senzo Oinuma* and Kazumi Tanaka*

By means of high-speed photography, underwater explosions of a pressed Tetryl (Tetryl/stearic acid=94/6) 10grams are recorded and experimental data of a bubble radius time relation are obtained. The experimental results are compared with the calculated results including the effects of both the compressibility of water and the internal energy of gas. Concerning the bubble period and the maximum bubble radius, a comparison shows good agreement. But concerning the time bubble radius relation, the differences become large after the time when the first maximum radius is attained. This will be due to the effects of the charge shape and the depth of explosion. A comparison between pulsation periods of piezo-gauge with periods calculated from maximum radius of gas bubble shows good agreement.

(*National Chemical Laboratory for Industry, Higashi 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-Ken, Japan)
