

Fig. 1 Behavior of gas bubble generated from a blaster with lower direction.

コム/秒である。フィルムはイーストマン製、ハイスピード7250を使用した。

ピエゾ圧力計は、キスラー社製、607 A型である。

3. 結果と考察

3.1 破砕器から生ずるガス球の挙動

アジ化鉛 20 mg入り破砕器を水面下7cm のところに下向きに設置して爆発させた時のガス球の動きをFig. 1 に示した。この写真によると、生成したガス球は膨脹収縮をくり返しなが、下向きに移動している。Fig. 2 はこの際のガス球の脈動の様子を示したもので、これは撮影したフィルムを解析して求めた半径と時間との関係である。ガス球は最大半径が3cm に達し、次に収縮するが、その周期は5.3 msecである。

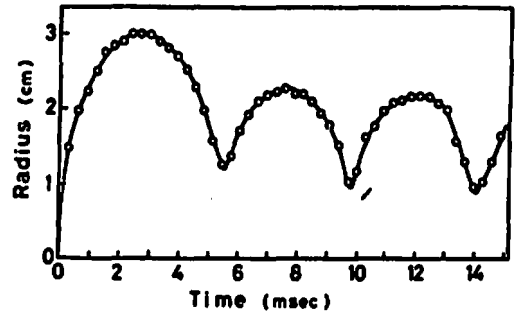


Fig. 2 Bubble radius vs. time

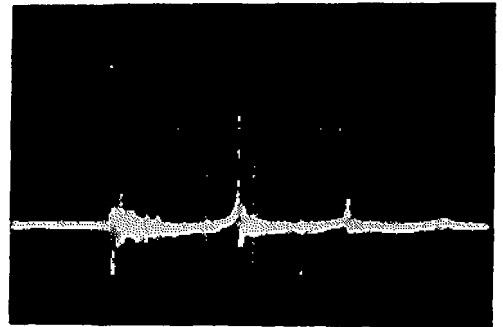


Fig. 3 Signal of bubble oscillation recorded by piezoequake. Time scale : 2 msec/div.

Fig. 3 はガス球の脈動周期をピエゾ圧力計で測定したもので、第1波はアジ化鉛の爆発により生じた衝撃波によるもので、第2波はガス球の第1回目の収縮で生じた信号、第3波は2回目の収縮で生じた信号である。こうして測定されたガス球の脈動周期は、高速度撮影によって得られた結果とよく一致している。

Table 1 には薬量の異なる破砕器から生ずるガス球の最大半径、第1回目の脈動周期、及びその周期から

Table 1 Gas bubble generated from blaster

Amount of lead azide in blaster (mg)	Max. radius of gas bubble (cm)	Period of the first bubble oscillation (msec)	Gas energy (joule)
2	1.2	3.1	2.0
5	2.0	3.7	3.5
10	2.4	4.4	5.8
20	3.0	5.3	10.2

求めたガスエネルギー³⁾の値を示した。

次にガス球移動の様子について観察した結果を述べよう。Fig. 1 で示したように破砕器を水槽中で下向きに設置して爆発させた時生ずるガス球は、かなり速い速度で下向きに移動してゆくが、これは一方が開放されたステンレス鋼管に詰めた爆薬であるため、ガスが一方方向に噴出する、この場合は下方に噴出するからであると考えられる。それで破砕器の向きを変えたらガス球はやはりその軸方向に動くものか確かめてみた。

アジ化鉛 20mg 入りの破砕器を水槽中で上向きおよび横向きに設置した時に生ずるガス球の挙動を写したのが Fig. 4 および Fig. 5 である。常識としては上向きであればガスは急速に水面に向かって上昇するであろうし、横向きなら先ず横方向に動いたのち水面に上ってゆくであろうと考えられる。上向きに破砕器を設置した場合は、その位置は水面下 7cm で、また横向きの場合は水面下 27cm の所に厚さ 7mm の鉄板を水平に置き、水面下 19cm、すなわち鉄板上 8cm の所に破砕器を設置した。実験の結果では写真で明らかのように、上向きの時に発生したガス球はほとんど同じ位置に止まっているが、横向きの時のガス球は、破砕器の軸方向に移動しながら沈下してゆく。丁度ガス球に何か下向きの力が働いているかのように見える。

3.2 アジ化鉛ベレットから生ずるガス球の挙動

上に述べた破砕器のように、爆薬が容器に充填されている場合には、生じたガス球に方向性が与えられるので、今後はベレット状に成型したアジ化鉛を水中で爆発させ、その挙動を観察してみた。

先ずアジ化鉛ベレットを水面下 7cm の所に吊し爆発させて、発生するガス球の動きを観察したところ、破砕器を下向きにした場合ほど激しくはないが、やはり下向きにガス球が移動することが認められた。裸薬を中心から起爆したのであるから、破砕器のように発生したガス球に方向性はないはずである。次に、同じように水中に吊したアジ化鉛ベレットの側面に鉄板、発泡スチロール板、カンテンを置き、実験を行なった。

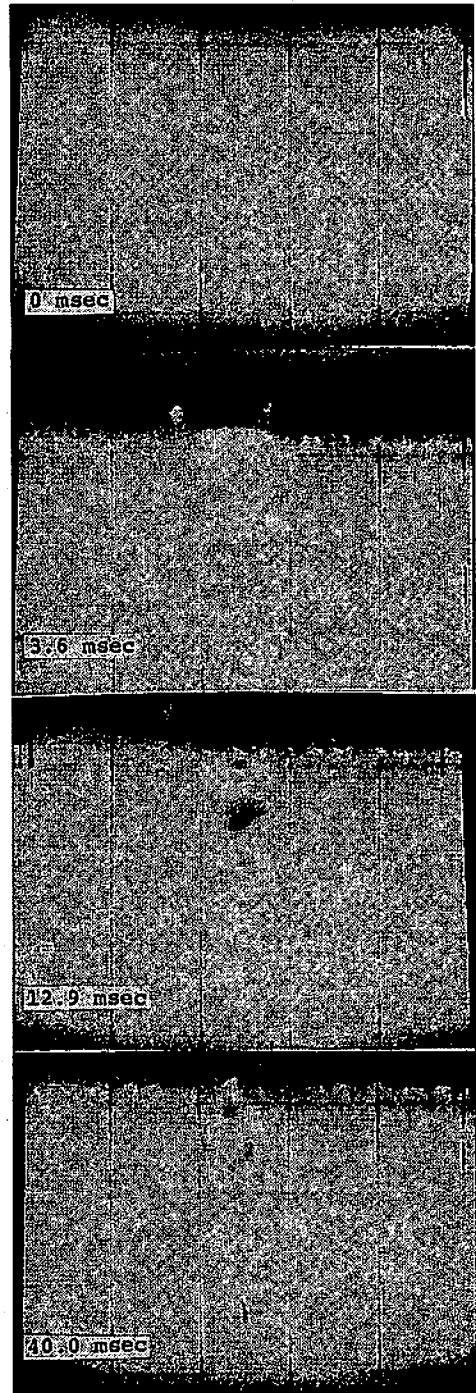


Fig. 4 Behavior of gas bubble generated from a blaster with upper direction.

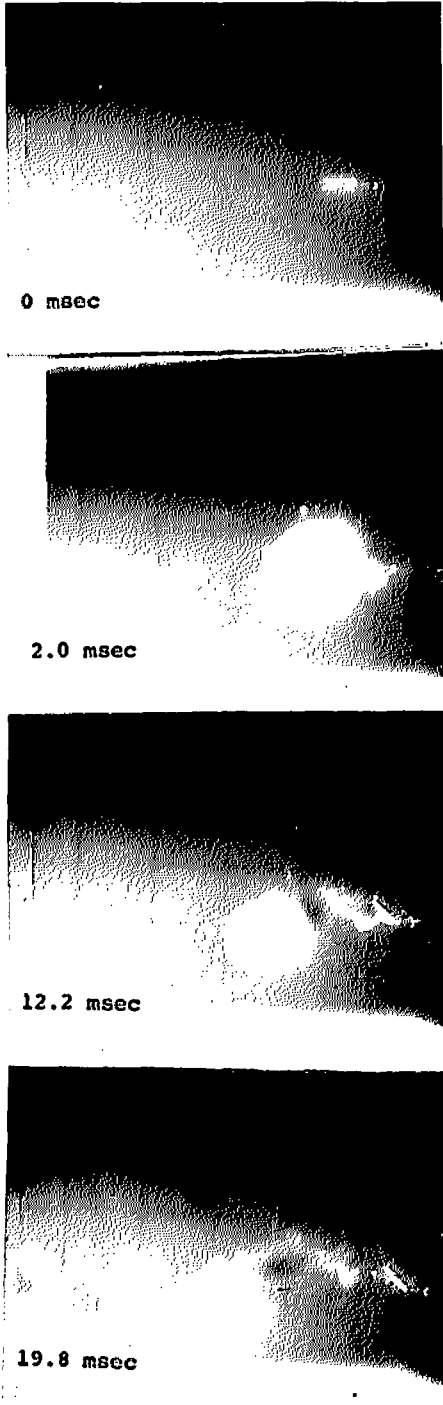


Fig.5 Behavior of gas bubble generated from a blaster with horizontal direction.

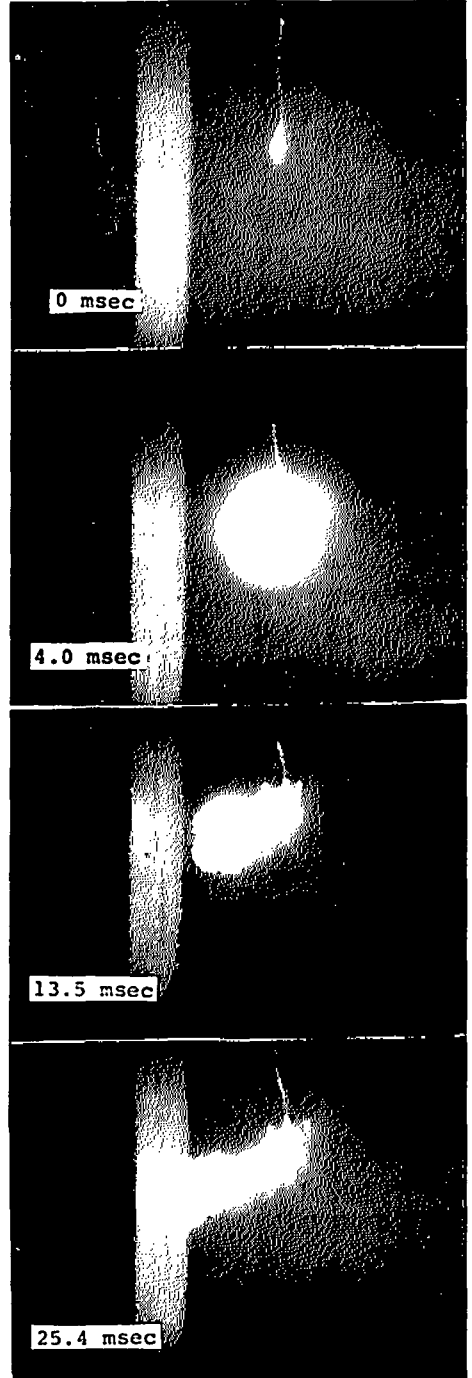


Fig.6 Effect of an iron plate on bubble behavior

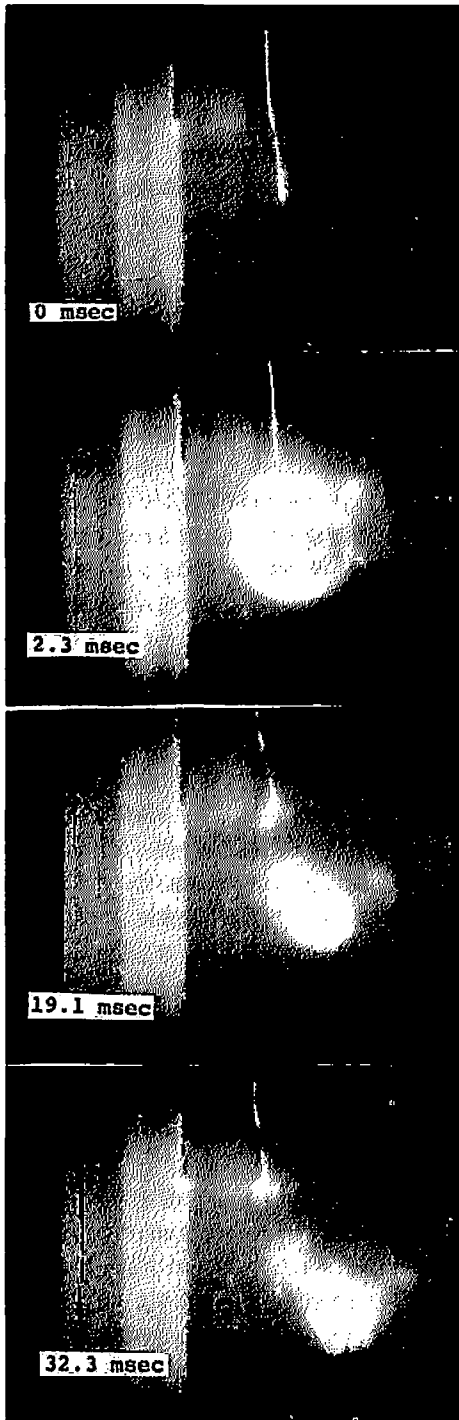


Fig.7 Effect of foamed polystyrene board on bubble behavior.

使用した鉄板は縦 41 cm, 横 31.5 cm, 厚さ 7 mm で, 発泡スチロール板は, 縦 28.8 cm, 横 20 cm, 厚さ 2.3 cm, 密度 2.25×10^{-3} g/ml である。カンテンは市販の角カンテン 1 本を水 360 ml にとかしてつくったもので, 縦 25 cm, 横 20 cm, 厚さ 3 cm の板状にした。アジ化鉛ペレットは板の中心から 5 cm 離して設置した。薬量は, 鉄板の場合 16.8 mg, 発泡スチロール板の場合 24.2 mg, カンテンの場合は 22.0 mg である。

実験の結果を Fig. 6 および Fig. 7 に示したが, ガス球は鉄板に吸い寄せられるように横に移動し, 逆に発泡スチロール板からは遠ざかるように横に移動しながら沈下する。カンテンの場合は, その影響が全く認められず, 単に水中で爆発させた場合と同じようにまっすぐ沈下するだけであった。

3.3 ガス球移動の原因

水槽のようなものの中で爆薬が爆発した時, 生成するガス球が水面から遠ざかる, 即ち沈下する現象はこれまでも観察されている。常識としてはガス球は浮上するように思われるが 実際には沈下するのであって, これはガス球を水面から遠ざけ, あるいは水槽底に引き寄せる何らかの作用があるからであろう。

Cole その他の人々⁹⁾によれば膨脹したガス球が収縮する時, 水は周囲から一様に戻るのでなく, 水面方向からの方が戻りやすいので, その結果として, ガス球は沈下すると説明している。即ち水の流れて動くのであるといわれている。

ところが前述の鉄板, 発泡スチロール, カンテンなどを使った実験の結果をみると, 単なる水の流れてガス球の挙動を説明することは無理のように思える。しかしとにかく実際のガス球の周りに水の流れがあるかどうかを確かめるためにアジ化鉛ペレットを染料を落とした水中で爆発させ, 生じたガス球の周囲の染料のうごきを高速度カメラで撮影し解析してみた。

27.7 mg アジ化鉛ペレットを水面下 15 cm の所に吊し, その下方 8.5 cm に厚さ 7 mm の鉄板を置いた。そしてアジ化鉛の周囲の水中数ヶ所に赤色染料の濃い水溶液を落とし, 適当な時期を見はからってアジ化鉛を爆発させた。

その結果を Fig. 8 に示したが, 右側の壁のように見えるものは, 実験の際に入れた薄いスケールで, 結果には何ら影響を与えるものではない。これによるとガス球だけが沈下し, その周りの水の動きは殆んど認められない。この結果からも上記のような水の流れだけでガス球の動きを説明することは無理で, 他に何らかの原因があるように思われる。

爆薬が水槽中で爆発して生ずるものを考えてみると爆発生成物であるガス球の他に衝撃波がある。そこで

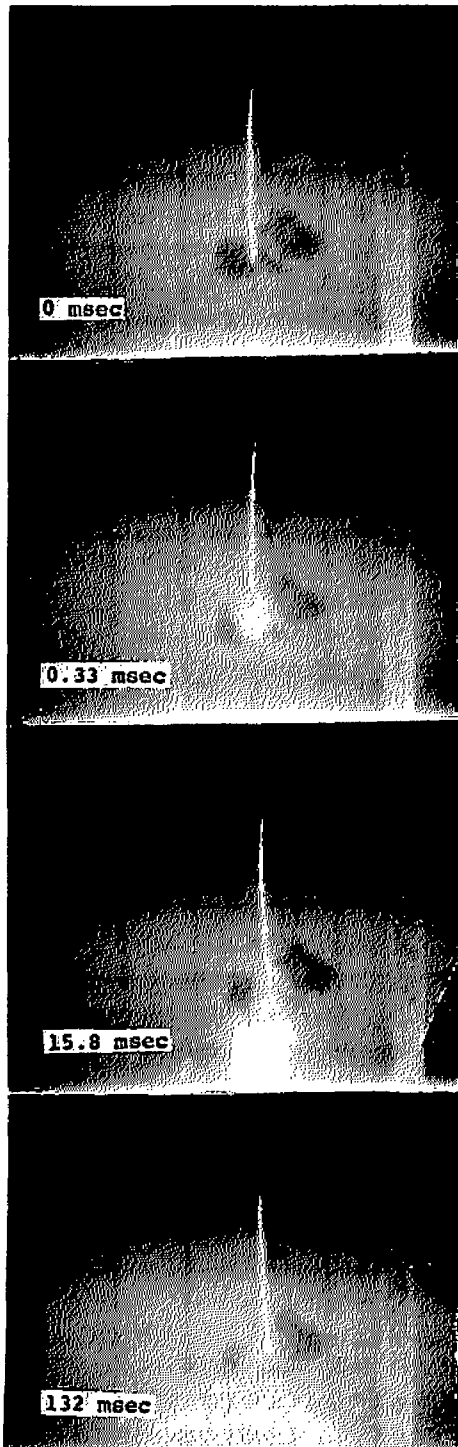


Fig. 8 Behavior of gas bubble and dye.

この衝撃波がガス球の動きに関係あるのではないかと考えてみた。

超音波を液体中に作用させると気泡が生ずる、いわゆるキャビテーション現象であるが、この場合生成した気泡は超音波の進行方向に動くことが観察されている⁶⁾。それで爆発により生ずる衝撃波もガス球の挙動に何らかの影響を与えている可能性があるように思える。

ここで、3.2のアジ化鉛ペレットを使い、側面に鉄板、発泡スチロール板、カンテンを置いた実験の結果を衝撃波を考慮に入れて検討してみよう。

アジ化鉛が爆発して生ずる衝撃波は球状に広がるが障害物に当たると反射する。この障害物が鉄板の場合、そのインピーダンスは水より大きいから衝撃波を反射し、逆に発泡スチロールはそのインピーダンスが水より小さいから稀薄波となって反射される。カンテンの場合は、大部分が水であり、そのインピーダンスも水と等しいと見てよいから、これに当たった衝撃波は反射されることなく透過してしまう。これと実験結果を重ね合せると、ガス球は衝撃波が来る方向に移動し、稀薄波が来る方向とは反対方向に移動していることになる。カンテンの場合は衝撃波にとって障害物とならないから、ガス球の移動に全く影響を与えず、単に水槽底からの衝撃波と水面から返って来る稀薄波の作用で沈下すると考えればよい。破砕器を使った実験でも常にガス球を下方向にひっぱる力が働いているのも、これと同じく水槽底から反射された衝撃波と、水面からの稀薄波の両方の作用によるものと考えられる。

3.4 モデルガス球による観察

このような考え方が正しいとすれば、ガス球と似たものならば衝撃波に対し同じような挙動を示すはずである。そこで、水中に浮べた空気の気泡、ゴム風せん、発泡スチロール球などにアジ化鉛の爆発による衝撃波を作用させる実験を行なった。

空気泡は水槽の底にガラスの細管を入れ、そこから加圧空気を吹き出させて、半径数mmの気泡とし、水面下7cmの所に吊した11.4mgのアジ化鉛ペレットから8cm離れた箇所を浮上させるようにした。ゴム風せんは薄手のゴムに空気を入れて半径2.1cmとしたもので、これもやはり水面下7cmの所に吊した20mgのアジ化鉛ペレットの横7cmの位置に、水槽底に固定した細糸を使い浮かせた。発泡スチロール球は密度 $2.25 \times 10^{-3} \text{g/ml}$ で半径1.4cmのものを28mgのアジ化鉛ペレットから5.5cm離れた位置にゴム風せんと同じように浮かせた。なお、発泡スチロール球から4cm離れた位置に、即ち爆薬から9.5cm離れた所に厚さ7mmの鉄板を側壁として置いた。

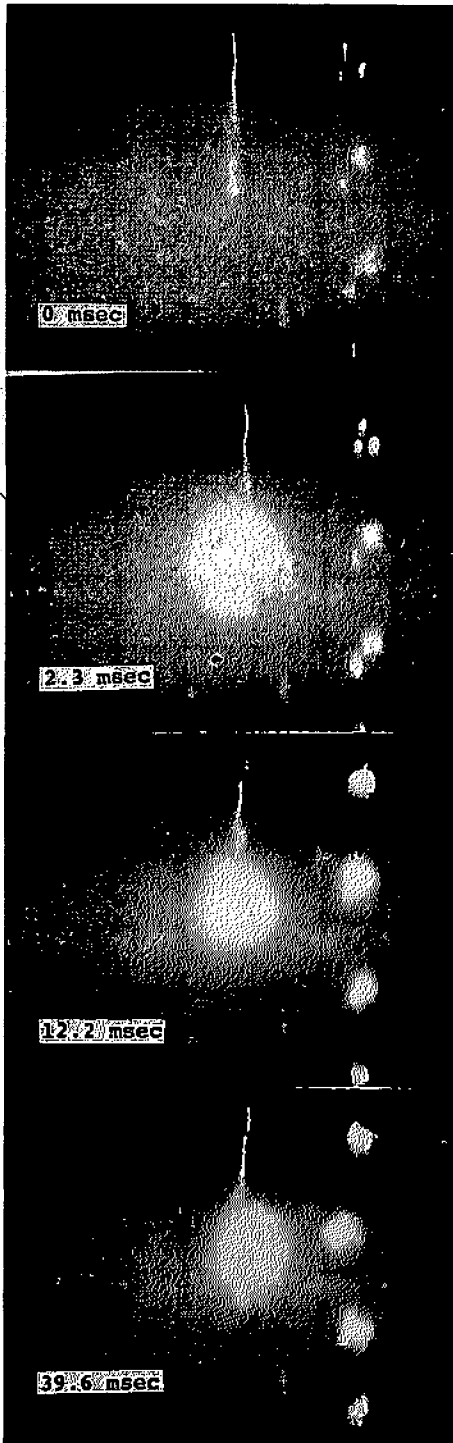


Fig.9 Behavior of air bubbles in underwater explosion

Fig.9は空気泡の実験の写真であるが、気泡は爆薬が爆発すると膨脹し、次いで衝撃波が来た方向に移動している。この膨脹は衝撃波に起因すると思われる。そして、その移動原因は、今のところ憶測の域を出ないが、爆発によって生じた衝撃波が気泡に当たると、反射されてその反射方向に稀薄波が生じ、その部分の水中圧力が下る、即ち稀薄波のために気泡周囲の水中に圧力差ができ、これが原因で気泡は圧力の高い方から低い方に移動する。つまり衝撃波が来た方向に動くものと思われる。3.2の実験でアジ化鉛ペレットから発生したガス球が鉄板壁に移動する現象も鉄板壁で反射された衝撃波がガス球に当たり、稀薄波を生じ、ガス球が鉄板方向、即ち衝撃波が来る方向に移動するのであるとして説明できよう。

空気の泡の動きがこの鉄板を使った実験のガス球の動きよりやや少ないのは、Fig.9の写真で判るように、アジ化鉛の爆発で生じたガス球が泡方向に移動し、その泡の移動をさまたげているためにように思える。

Fig.10はゴム風せんの写真であるが、これは爆源方向、即ち衝撃波が来た方向の中心部にふくらみがみられる。これはやはり衝撃波がゴム球に当ることによって生ずる稀薄波で、その部分の水中圧力が下るためと思われる。また、ゴム風せんの左側にある爆発ガス球が時間の経過と共に左方向に移動しているが、これはゴム球から反射してくる稀薄波が右側から爆発ガス球に当たるためであろう。3.2の発泡スチロール板を側壁としてアジ化鉛を爆発させた時のガス球の動きもこれと同じように解釈できる。即ち、3.3に述べたガス球は稀薄波が来る方向と反対方向に移動するという結果と一致する。

Fig.11は発泡スチロール球の場合で、この場合には爆源方向と、鉄板方向の両方にガスの噴出が見られる。それは爆源からの衝撃波と、それが鉄板に当たって反射された衝撃波が両方から当たったためであり、衝撃波が来た方向にひっぱられるようにして、スチロール中のガスが噴出したものであろう。

3.5 衝撃波が作用する時のガス球の大きさ

これまでに述べた破砕器、あるいはアジ化鉛ペレットを使った一連の実験から、ガス球の挙動には衝撃波が関係していると推測される。しかしそれには衝撃波や稀薄波がガス球に当たる時に、ガス球がある程度の大きさになっていることが必要であろう。

そこで衝撃波が水面や水槽底から反射してガス球に当たる時の、ガス球の大きさを求めてみた。これには3.3の染料を爆薬のまわりに落として水の動きを見た実験のデータを用いた。この実験では、爆薬は水面下15cm、水槽底から8.5cmの位置にあるから、衝撃波

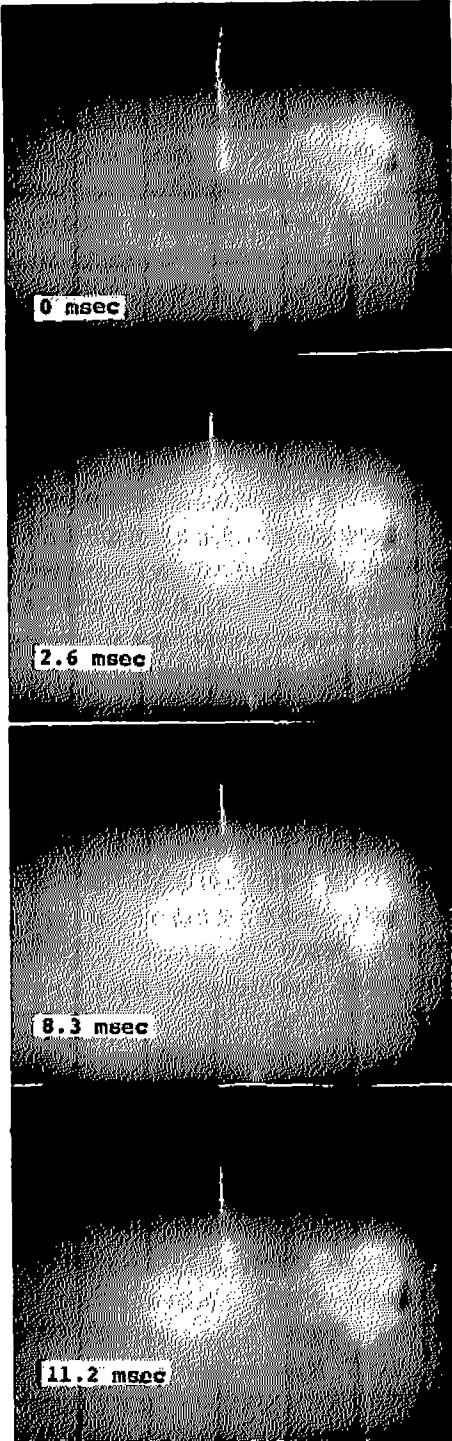


Fig. 10 Behavior of a balloon in underwater explosion

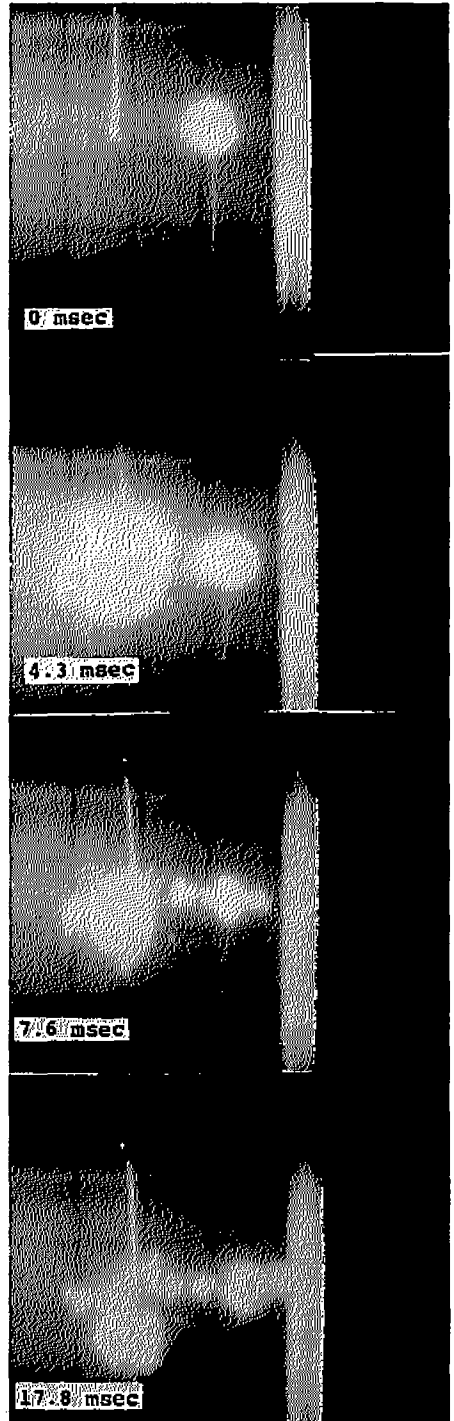


Fig. 11 Behavior of a formed polystyrene ball in underwater explosion.

や稀薄波の伝播速度を 1460m/sec と仮定すると、爆源から水面方向の往復の所要時間は 205 μ sec, 底方向が 116 μ sec となる。この時のガス球の大きさは、フィルムの解析から半径 0.5~1 cm になる。このようにガス球はかなり大きくなっているため、反射されてきた衝撃波や稀薄波の作用を受けるであろうと考えることができる。即ちガス球がある程度の大きさになった時、水面方向から稀薄波が反射して来てガス球に当り、底方向から衝撃波が反射して来てガス球に当るので、ガス球は沈下することになる。

実際には爆発で生ずる衝撃波のほかに、ガス球が脈動する時にも衝撃波を発生するから、これら衝撃波による作用も当然受けるはずである。

4. 結 言

微量の爆薬による膀胱結石の水中爆破実験で、爆発で生ずるガスが水中でかなり大きな球となり、膨脹収縮を繰返すこと、またこのガス球が周囲の状況によっていろいろ異なる動きをすることが観察されたので、破砕器及びアジ化鉛ベレットを使ってガス球の挙動を検討した。

その結果、アジ化鉛 2mg, 5mg, 10mg, 及び 20mg を詰めた破砕器の爆発により水中に生ずるガス球の最大半径は、それぞれ 1.2cm, 2.0cm, 2.4cm, 及び 3.0cm で、膨脹収縮の周期は 3.1~5.3msec であることがわかった。

また生じたガス球は水槽底に向かって沈下する動きが認められたが、その動きには従来水中爆発で言われていたような単なる水の流れでは説明し得ない点があったので、アジ化鉛のベレットを使って実験を行ない、ガス球の挙動には衝撃波が関係を持っていると推測した。即ち、ガス球は衝撃波が進む方向と反対方向に移動し、稀薄波が進む方向と同一方向に進む。

大きなガス球の生成は、ある程度結石破砕の障害になると思われ、特に尿管結石のように細い部分にある結石を破砕する時には、ガスのために尿管が破れたり、尿が腎臓の方に逆流したりすることも起り得る。

従って今後はその対策例えば爆発ガスの出ないような爆薬を用いるというようなことも検討してゆく必要があろう。

一方生成ガスが膨脹収縮を繰返しながら動くこと自体は、結石破砕の際の副作用と関係づけて考慮しなくてもよいであろう。しかしこれまで大薬量の水中爆発ではこのように詳しくガス球の動きを観察した例は見られず、たまたま微量の爆薬を使ったためにうまく写真観察ができ、その挙動を細かく知ることができたのであって、これまで水の流れで説明されていたガス球の動きを衝撃波を考慮に入れると、観察された結果をすべてうまく説明できることが判明した点は大きな収穫であったと考える。

付 記

本研究を行なうに当り、化技研の藤原修三氏、及び細谷火工の大森正義氏には、いろいろ助言をしていただいた。ここに付記して感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) 生沼仙三, 椎野和夫, 田中一三, 大森正義, 工火誌, 41, 98 (1980)
- 2) 生沼仙三, 藤原修三, 工火誌, 37, 237 (1975)
- 3) 田中一三, 工火誌, 36, 11 (1975)
- 4) R. H. Cole, "Underwater Explosion" Dover Publ. Inc., p. 270 (1965)
- 5) 橋口清人, 山本武久, 電学誌, 89, 931 (1969)
- 6) 島飼安生, 藤森聡雄, 李孝雄, 生産研究, 11, 503 (1959)

Study of Lithotripsy by Micro Explosion (III)
Behavior of the Gas Bubble in Water

by Senzo OINUMA*, Kazuo SHIINO*, Kazumi TANAKA*
and Mitsuaki IIDA*

The behavior of gas bubble generated from the specially designed blaster for lithotripsy was studied in underwater explosion of it.

The maximum radius of the gas bubble from blasters with lead azide amounts of 2, 5, 10 and 20mg were 1.2, 2.0, 2.4 and 3.0 cm, respectively. The periods of the first bubble oscillation ranged from 3.1 to 5.3 msec.

It was generally observed by using of a framing camera that the gas bubble generated from underwater explosion moved to the bottom or to the hard material such as the vessel wall, not to the water surface. Some experiments showed that this phenomenon might be due to the effect of shock wave in water.

(*National Chemical Laboratory for Industry, 1-1 Yatabe, Tsukuba-gun, Ibaraki-ken)

新刊紹介

〔書名〕

LASL:EXPLOSIVE PROPERTY DATA.

Editors: Terry R. Gibbs,

Alphonse Popolato.

これは Los Alamos Series on Dynamic Material Properties である。

発行年月: 1981年3月

頁数, 版: P. 481, B 5 版

発行所: University of California Press Ltd.

内容: これは PART. I, PART. II に分けられている。

PART. I は各火薬類名称別に, 一般性能, 製造と取扱い, 化学的性質, 物理的性質, 熱的性質, 爆ごう性質, 衝撃起爆性, 感度(落つい等), 機械的物性等について述べる。

その火薬類名称をあげると; Baratol, Composition B, Cyclotol, DATB, HMX, Nitroguanidine,

Octol, PBX 9011, 9404, 9407, 9501, 9502, PETN, RDX, TATB, Tearyl, TNT, XTX 8003, 8004.

PART. II 性能別各火薬類性能表をあげている。すなわち, 化学的性質(成分, 分子式, 分子量, 比重, 溶融点), 熱的性質(熱容量, 熱伝導率, 熱膨張係数, 反応熱, 活性化エネルギー, 燃焼熱, 生成熱, 示差熱分析, 熱分解試験), 爆ごう性質(薬経効果曲線, シリンダー試験法, 初期反内面速度による爆ごう圧試験, 鉄板凹み試験, 爆ごう中断厚さ試験), 衝撃起爆試験(Wedge 試験データ, 大型・小型ギャップ試験, 最小起爆薬量, 銃げき試験, その他)感度試験(落つい衝撃試験, 斜面衝撃試験, 大型落つい試験, 電気火花試験)。

以上の二つの観点から火薬類(とくに爆薬関係)についての性能を要領よく集めた点が非常に有益であろう。(吉田 正)