

管内水中爆発によるガス柱の脈動

田中一三*, 生沼仙三*, 中山良男*

微小量の爆薬を用い、水中の細長い管内にできる爆発生成ガスの脈動現象を観察した。この場合のガスの脈動周期は、同一薬量を自由水中で爆発させたときに比べ、非常に長くなることを知った。自由水中での式に習って、水中管内のガス柱膨張・収縮に関する運動方程式を作り、その解を実験結果と比較してよい一致を得た。

1. 緒言

水中で火薬類を爆発させると、爆発生成ガスはきれいな球状に拡がり、そのあとで膨張と収縮を繰り返す、いわゆる脈動が起こる。この現象はR. H. Coleの著書¹⁾に指摘されて以来、爆発エネルギーの測定などにも利用されている。この場合、膨張と収縮のバランスを支配するのは、ガスと周りの水との間のエネルギー保存関係であり、脈動周期はその運動方程式を解くことによって求められる。

われわれは水中衝撃波の利用の研究において、細い管の中で爆薬を爆発させたときの現象を、高速度カメラを用いて撮影したが、そこでもやはり爆発ガスの脈動が観察された²⁾。ただし管の中での脈動は、同一薬量の爆発の自由水中での脈動に比べて、はるかに周期の長いことが注目された。そこで管の中でのガスの一次元の膨張収縮に関する運動方程式を導き、それを解いて脈動周期を計算してみたところ、実験値とのよい一致が得られた。その後実験条件をいろいろ変化させて、測定値と計算値の比較を行ってみたので、その結果を報告する。

2. 水中での一次元ガス柱の脈動

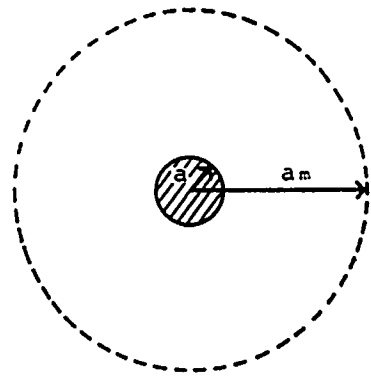
はじめに水中での一次元ガス柱の脈動に関する運動方程式を考察しておく。これは通常の自由水中での三次元ガス球を扱う手法を、ほとんどそのまま一次元の問題に移すような形で得られる。つぎに三次元と一次元の場合を、比較しながら書いてみる。

三次元ガス球の問題は、内部エネルギーを無視して考えるとつぎのようになる。Fig. 1(a)のように静水圧 p_0 、密度 ρ_0 水中で、半径 a のガス球が速度 $u = da/dt$ で膨張している場合、それによってまわりの水に生ず

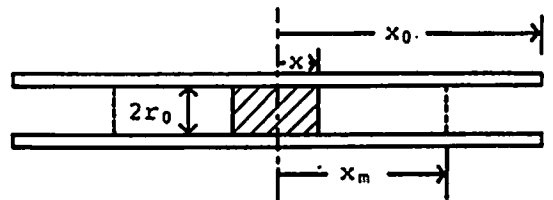
る運動エネルギー E_k と、ガス球が水を排除することによるポテンシャルエネルギー E_p の間には、

$$E_k + E_p = \text{const.} \quad (1)$$

のエネルギー保存則が成り立つであろう。半径 a のガス球の表面が速度 u_0 で動くとき、非圧縮性の水は距離 r の点では速度 $u(r) = (a/r)^2 u_0$ で動くことになり、したがってガス球のまわりの水の運動エネルギー E_k は、 $(1/2)\rho[u(r)]^2$ を半径 a から ∞ まで積分することにより、 $E_k = 2\pi\rho_0 a^3 u_0^2 = (3/2)\rho_0 V u_0^2$ となる。ここに $V = (4/3)\pi a^3$ はガス球の体積である。一方容積 V のガスが圧力 p_0 の水を排除するためのポテンシャルエネ



(a) Three-dimensional gas sphere



(b) One-dimentional gas column

Fig. 1 Geometry of gas bubble

昭和62年12月2日受理

*化学技術研究所保安環境化学部
茨城県つくば市東 1-1
TEL 0298-54-4792

ルギーは $E_p = \rho_0 V$ であり、これから(1)式は、

$$\frac{3}{2} \rho_0 V u^2 + \rho_0 V = \rho_0 V_m \quad (2)$$

となる。ここに V_m はガス球の最大体積で、そのときのガス球の半径を a_m とすれば、 $V_m = (4/3)\pi a_m^3$ である。(2)式を書き直して半径 a を使って表せば、

$$\frac{da}{dt} = \sqrt{\frac{2\rho_0}{3\rho_0} \sqrt{\left(\frac{a_m}{a}\right)^3 - 1}} \quad (3)$$

が得られる。

(3)式を積分して、半径 a が 0 から a_m に達するまでの時間(これは水中に発生した半径 a_m の球形空洞が潰れるまでの時間と同じで、Rayleighの問題³⁾として知られている) t_m を求めると、

$$\sqrt{\frac{2\rho_0}{3\rho_0}} \frac{t_m}{a_m} = \frac{\beta}{3} \quad (4)$$

が得られる。ここに β はベータ関数から計算される定数 (= 2.2405) である。(2)式が u_x に関して 2 次の項を含むだけで、 u の正負に対して全く対称であるところから、膨張と収縮と同じ時間がかかるとみなし、脈動周期は近似的に t_m の 2 倍と考えられている。

これと同じことを一次元のガス柱について行ってみると、つぎのようになる。

Fig. 1 (b) のように、水中に内径 $2r_0$ 、長さ $2x_0$ の管の中心で、ガス柱が膨張しているとする。ガス柱の長さを $2x$ とする。現象は左右対称とみなし、ガスの先端の膨張速度を $u = dx/dt$ とすると、水を非圧縮性とみなせば、管の中の水は x から x_0 まですべて同じ速度 u で動いていることになる。これによって生ずる水の運動エネルギーは、管の中の部分は $(1/2)\rho_0(V_0 - V)u^2$ となる。ここに $V_0 = 2\pi r_0^2 x_0$ 、 $V = 2\pi r_0^2 x$ である。このほか管の端から速度 u の水が流れ出ることによって動く、外の水の運動エネルギーを評価しなければならない。ここではそれを簡単に、半径 r_0 の球の表面で外向きに速度 u の流れがあるときと同一とみなした。この場合の運動エネルギーは、3次元ガス球で得た式から $(3/2)\rho_0 \pi u^2$ となる。ここに $v = (4/3)\pi r_0^3$ である。ポテンシャルエネルギーは、三次元のときと同様 $E_p = \rho_0 V$ と書けるので、(1)式は

$$\rho_0(V_0 - V)u^2 + \frac{3}{2}\rho_0 \pi u^2 + \rho_0 V = \rho_0 V_m \quad (5)$$

となる。ここに V_m は、ガス柱が最大の長さに達したときの容積で、 $V_m = 2\pi r_0^2 x_m$ である。(5)式を整理すると、

$$\frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{2\rho_0}{\rho_0} \sqrt{\frac{x_m - x}{x_0 + 2r_0 - x}}} \quad (6)$$

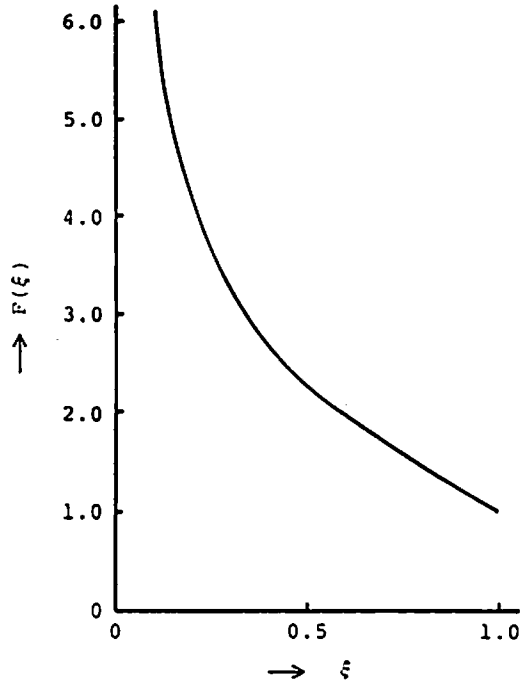


Fig. 2 Curve of $F(\xi)$, a function of the maximum volume ratio, ξ .

が得られる。

(6)式を積分して $x=0$ から x_m に至る時間 t_m を求めると、

$$\sqrt{\frac{2\rho_0}{\rho_0}} \frac{t_m}{x_m} = F(\xi) \quad (7)$$

が得られる。上式右辺の関数は、

$$F(\xi) = \sqrt{\frac{1}{\xi} + \frac{1-\xi}{2\xi} \ln\left(\frac{1+\sqrt{\xi}}{1-\sqrt{\xi}}\right)} \quad (8)$$

で ξ は、

$$\xi = x_m / (x_0 + 2r_0) \quad (9)$$

で定義される量である。 ξ は管の全長に対して、最大長に達したガスの占める割合 (r_0 は一種の補正項である) にあたるもので、以下にこれを「最大容積比」と呼ぶ。

三次元ガス球の問題では、 a_m は t_m に比例して、(7)式右辺にあたる量はコンスタント (= 0.747) であったが、一次元ガス柱の場合は、 ξ の大小によって 1 から ∞ まで変化する。Fig. 2 に示したのは、(7)式右辺の $F(\xi)$ の曲線である。

一次元と三次元では、同じガスの脈動でも、途中の経過にかなり差がある。ガス球の場合は、現象の初期



Fig. 3 An example of the pulsation of gas column. Upper to lower, 5 msec interval.

に速度が急激に減少するが、ガス柱の場合はほとんど等速の期間がある。一次元ガス柱の膨張曲線については、後に実験結果と計算結果を比較する。

3. 実験と結果

一次元爆発ガス柱の脈動現象を見るため、水槽中の透明なポリカーボネート管の中で少量の起爆薬を爆発させ、高速ビデオによる撮影解析を行った。爆薬はDDNPおよびアジ化鉛の数十ミリグラムで、管には内径9mm, 14mm, 25mm, 長さ300mm, 600mm, 800mmの各種のものを用いた。ビデオ装置はNAC社のHSV-200である。撮影速度は、毎秒200コマ(5msec間隔)であった。

Fig. 3はアジ化鉛20mgを、内径14mm, 長さ600mmの中央で爆発させたときのビデオ写真の例である。爆薬は内径2mmの中硬質塩ビ管に詰めたものを、極微量(0.5mg以下)のトリシネート点火玉で起爆している。このようなコマ撮り写真から、ガス柱の膨張収縮の時間変化をプロットすると、Fig. 4のようなグラフが得られる。なお一次元ガス柱といっても、ガスの先端と水との接触面は必ずしも平らではない。特に脈動の後期にはガス柱の表面に凹凸を生じ、長さを正確に求めるのが困難な場合があった(そのような場合、ここでは長さの平均値をとった)。

図からこの場合の脈動周期は、50—60msecのオーダーとなっているが、この値は自由水中のガス球の脈動に比べて非常に長いことは注意すべきであろう。図は起爆薬20—40mgの爆発であるが、自由水中でこの程度の脈動周期を得るには約500倍(10g程度)の爆薬を要する。

実験の条件および得られた結果をTable 1にまとめた。表中の x_m , t_m は、ともに実験(ビデオの画面)から求めたものである。時間測定の方は、コマ間隔が5msecと、比較的粗いために、あまり精度のよい測定はできない。しかし実験値をプロットしたFig. 4を見てわかるように、全体の脈動の様子をカーブを引いて外挿すれば、ほぼ1msec前後の精度で t_m を推定することが可能である。Table 1の t_m の欄には、こうして求めた値が書き込まれている。

4. 考察

最初に第2節で述べた理論式が、実験とどの程度一致するかを調べてみた。計算の一例として、Fig. 4の一番上のグラフに相当する条件、長さ $2x_0=300\text{mm}$, 内径 $2r_0=14\text{mm}$ の管で、最大ガス長が $2x_m=194\text{mm}$ となるような場合を想定して、(6)式を解いてみた。微分方程式の初期条件は、 $t=0$ のとき $x=0$ とした。その結果得られた x と t の関係を、Fig. 5に示した。

Fig. 4の実験から得た膨脹・収縮のグラフは、Fig. 5のように運動方程式を実際に解いたものと、よく似た挙動を示すことがわかる。ガス柱が最大長さに達する時間 t_m も、実験値が22.5msecであったのに対し、式の解では21.4msecを与え、一致は良好である。このことから第2節で考察した(6)式の導出過程に、大きな誤りのなかったことがわかる。他の条件については、いちいち方程式を解いて運動軌跡を比較するのは煩雑なので、Table 1のデータを使って、先の理論的考察から予見された(7)式が、実験とどの程度合致するかを調べた。

(7)式左辺は、実験で得られた t_m と x_m から計算することができる。Table 1の $F(\xi)$ の欄の左の値は、その結果である。一方最大容積比 ξ は、 x_m さえわかれば(9)式から算出できる。実験を行ったものについては、 x_m はビデオ撮影の結果から求められるので、(8)式を使って関数 $F(\xi)$ を計算することができる。表の最右欄にはその結果を示した。(7)式の右辺、左辺をこうして別々に求めた結果は、表に見られるように、かなりよい一致が見られた。したがって、水中爆発のガス柱が、(6)式で記述されるような運動をするものとみなすことに、大きな誤りはないと思われる。一方さきの(7)ないし(9)式を用いて、 t_m から x_m を求める式を作ってみると、 x_m の大きいところでは精度が悪くなる。それゆえ正確な測定には、最大容積比 ξ を0.5以下にするような条件(できるだけ長い管を使う等)が望ましい。

実験の大部分は、ポリカーボネート管を用いたが、高速度写真で見ると、爆発時の衝撃で、管の側面がいくらか膨らんで見えることがあった。そこで側面膨脹の効果は、ガス柱脈動に及ぼす影響をみるために、一

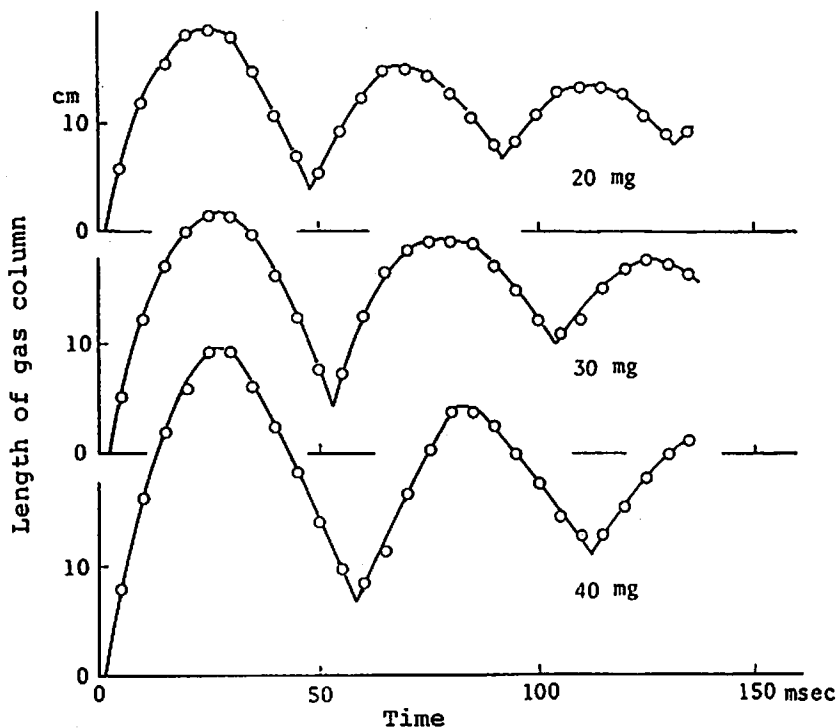


Fig. 4 Experimental results of the pulsation of gas column.

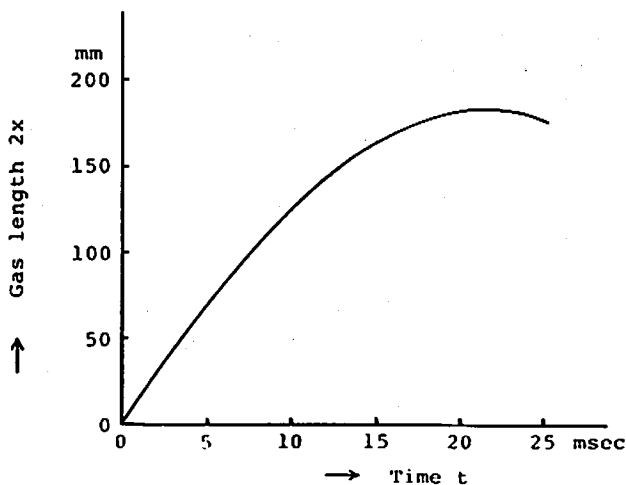


Fig. 5 A solution of the Eq. (6)

部の実験では、ポリカーボネート管の中央の爆源部分を金属で置き変えてみた。結果はTable 1にあるが、両者はほとんど同じ結果を与え、この現象が管の材質にあまり左右されないことを知った。

このようにして、爆発ガスの一次元の脈動運動の方程式が得られ、実験もこうした考え方を支持する結果を与えてくれた。したがってこの現象を、三次元ガス球の脈動と同じように、爆発エネルギーの評価に使う

ことが考えられる。実際、水中の管の中の爆発は、自由水中の爆発より爆発音は小さく、また水槽中で行ったとしても発生する地震動も小さい。特にガス爆発のエネルギー測定を考えたような場合、自由水中の試験ではガスが爆発時に球状に広がるような容器を工夫する必要があるが、この場合は長い管に一部にガス室を作ればよいので、試験が容易であろうと思われる。

ただ、この現象をエネルギー測定に応用するには、まだ検討すべきことがいくつか残っている。例えば脈動周期の測定法である。ここで行ったように、ビデオまたは高速度カメラで直接撮影を行えば、周期を求めることは可能であるが、測定法としてスマートではない。自由水中の場合は、この

目的のためにビエゾゲージによる水中衝撃波の検出を行っている。しかし管内のガスにこれが使えらるかどうかは問題である。管内爆発では、衝撃波が外に出にくいからである。本文中に述べたように脈動周期が非常に長くなるので、むつかしい高速測定の技術を要しない。もっと簡単な方法が生まれることを期待したい。

5. 結論

- (1) 一次元的な管内での、水中爆発の生成ガスの膨

Table 1 Results of Experiments

Explosive	Charge weight (mg)	$2x_0$ (mm)	$2r_0$ (mm)	x_m (mm)	t_m (ms)	ξ	$F(\xi)^*$ by Eq. (7)	
							left	right
DDNP	30	600	14	200	28.5	0.637	2.02	1.88
	30	600**	14	233	30	0.742	1.82	1.61
	30	600**	14	219	29.5	0.698	1.91	1.72
	40	600	14	225	28	0.812	1.55	1.45
	30	800	14	222	38	0.536	2.42	2.17
	40	800	14	252	40	0.609	2.24	1.95
	50	800	14	307	41	0.742	1.89	1.61
	30	300	25	50	10.5	0.286	2.97	3.36
	50	300	25	95	15	0.543	2.23	2.15
	30	600	25	66	18	0.203	3.86	4.13
Lead azide	5	285	9	60	11.5	0.396	2.71	2.72
	5	285	9	63	11.5	0.416	2.58	2.63
	10	600	14	45	15	0.143	4.71	5.03
	10	600	14	70	18.5	0.223	3.37	3.91
	20	600	14	92	22.5	0.293	3.46	3.31
	30	600	14	108	26	0.344	3.40	2.99
	40	600	14	148	28	0.471	2.68	2.40
	30	300	25	44	10	0.251	3.37	3.64
	40	300	25	48	10.5	0.275	3.09	3.44

*Comparison of left hand and right hand side of Eq. (7)

**Middle part of the tube has been replaced by a stainless steel of 5cm long, instead of polycarbonate tube, to eliminate the effect of side expansion.

張運動を考察し、ガス柱の長さの時間変化を表す方程式を得た。これからガス柱の脈動周期と最大ガス柱の長さに関する関係式を導いた。

- (2) 10mg オーダーの起爆薬について、水中での透明な管内での実験から、爆発生成ガス柱の長さの時間的変化を高速ビデオで撮影した。ガス柱膨張の時間的経過は、上記方程式の解とよく一致した。
- (3) 使用する管の長さや径を変えて行った実験結果に、上に得た脈動周期とガス柱最大長さの関係式をあてはめてみたところ、よい一致が得られた。
- (4) 水中における爆発生成ガスの管内での脈動は同

一薬量の自由水中での脈動に比べて、周期が非常に長いのが特徴である。この現象は、ガス球の脈動と同じく、爆発物のエネルギー測定に利用することができよう。

文 献

- 1) R. H. Cole : "Underwater Explosions", Princeton University Press (1948)
- 2) 生沼仙三, 田中一三, 中山良男 : 工業火薬, 48, 253(1987)
- 3) 例えばランダウ=リフシツ : 「流体力学(1)」, 竹内均訳, p. 29, 東京図書(1971)

Pulsation of Explosion Gas in Underwater Tube

by Kazumi TANAKA*, Senzo OINUMA* and Yoshio NAKAYAMA*

Pulsation of gas bubble in underwater tube has been observed, on the explosion of small amount of explosive charge. It was noticed that the period of the pulsation was much longer than the case of ordinary spherical gas bubble in free water. An equation of the expansion of gas column in underwater tube has been developed. Observed pulsation of gas column was agreed well with the solution of the above mentioned equation. This phenomenon may furnish a technique to evaluate the explosion energy, like the pulsation of gas sphere in free water.

(*National Chemical Laboratory for Industry. 1-1, Higashi, Tsukuba city, Japan, 305. Tel 0298-54-4792)
