

水中爆発ガス球脈動周期のマイクロフォンによる測定

田中一三*, 生沼仙三*

水中爆発試験では、ガス球脈動周期を測定するために、ピエゾゲージによる水中衝撃波の検出を行う。ここでは、空中に置いたマイクロフォンによる水中衝撃波の検出と脈動周期の測定を試みた。この方法では、ピエゾゲージに比して測定器の設定は容易になるが、測定点が爆源から遠ざかるので、信号の質は悪くなることが予想される。実験によれば、マイクロフォンの位置が良ければ、ピエゾゲージ並の精度での時間測定が可能であった。そしてマイクロフォンの設置条件が悪くて波形に歪みが生じたときも、自己相関を求める等のデータ処理技術を使うことで、脈動周期の評価は十分であることを知った。

1. 緒言

爆発エネルギーの測定手段として、近年水中爆発を利用した方法が注目されている。従来の同系統の試験法である弾道白砲試験や鉛錘試験が、定められた小薬量の試験しか許されなかったのに対し、この方法は実験場の設備とまわりの状況さえ許せば、いくらでも大量の試験が可能である点で際立っている。

水中爆発によるエネルギー測定（以下「水中爆力試験」と呼ぶ）では、ピエゾゲージを使って水中衝撃波の圧力波形を記録する。この波形をもとにした計算から、衝撃波として放散されたエネルギーがわかる。また最初の衝撃波と、二度目に放出された衝撃波の時間間隔から、爆発生成ガスのエネルギーがわかる¹⁾²⁾。火薬類の性能試験としては、前者は破壊等に費される動的効果で、後者は物を押し移動させる静的効果にあたる³⁾。試験では同一ピエゾゲージからの信号を、両方の測定に兼用することができるが、波のエネルギーの方が、測定精度の高いデータが必要になる。ガスエネルギーの方は、遅れ現象を問題にするので、測定ははるかに容易である。そのためもあって、Paterson等は、水中爆力試験はガスエネルギーの測定のみに使っても十分有用であると述べている³⁾。

水中爆力試験でガスエネルギーの測定を行う場合、必要なものはピエゾゲージ設置位置への水中衝撃波の到達時間である。その際、測定位置は爆源に近ければ近いほど良いが、精度的には離れた点で測っても問題は無い⁴⁾。距離が離れると、波の到達時間は同じように遅れ、測定された二つの波の時間間隔は変わらないと

みなされるからである。この考えを進めると、遅れ時間さえ一定なら、水中衝撃波よりもっと遅れた二次的な現象に着目してもよいことになる。例えば空気中に出る爆発音や、地面を伝わる振動等がそれである。

この報告は、空気中のマイクロフォンを使って、ガス球脈動周期の測定を試みた結果について述べたものである。

2. 原理

水中爆力試験による爆発エネルギーの測定は、理論的にはColeの水中爆発の研究にまでさかのぼる⁵⁾。水中で爆薬が爆発するとまず衝撃波が発生し、そのあとで爆発生成ガスが大きな泡となって膨張する。このガス球はある容積まで広がったところで、今度は逆に収縮をはじめ、それが最後に潰れた時に二度目の衝撃波を発生する。この現象は、条件さえ良ければさらに膨張と収縮を繰り返して何度も観測されるので、ガス球の脈動とも呼ばれる。水中爆発試験では、単に脈動周期と言うと、最初の衝撃波と二度目の波の時間間隔を指す。

水中に出来たガス球が最も広がったとき、その容積は運動方程式によって爆発生成ガスのエネルギーと関係づけられる。水中に出来た球状の空洞が、周囲の静水圧によって潰れるまでの時間は、Rayleighの古典的な論文の中で算出されており⁶⁾、それによれば、この収縮に要する時間はガス球の半径に比例する。従ってガス球の半径を知るには、収縮時間がわかればよく、一般的にはガス球の運動方程式では膨張と収縮の時間が等しくなることから、先に述べた脈動周期の半分をとって、それをガス球の収縮時間とみなしている。脈動周期からガスエネルギーの導出については、ここでは省略する。

水中爆発で生じた衝撃波は、水辺の近くに立つと、

昭和60年11月11日受理

*化学技術研究所 保安環境化学部
〒305 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1
TEL 0298-54-4792

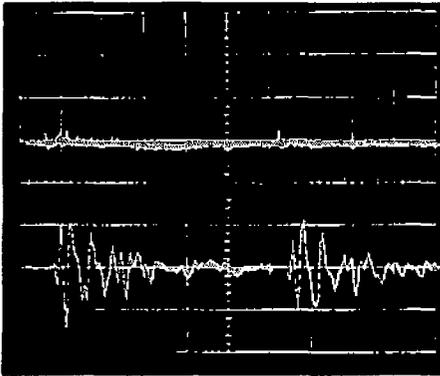


Fig. 1 Pressure wave in water (upper trace) and stimulated ground vibration (lower trace), by slurry explosive 30g. Time scale: 10msec/div.

音として聞くことができる。その音は、空中での爆発のように鈍く尾を引くのではなく、短く乾いた音である。従ってガス球の脈動の波のように、100msec オーダーの断続音であれば、マイクロフォンによる捕捉分離は可能であろうと思われた。

水中衝撃波は、水の表面から空中に伝わるだけでなく、隣接した地面の中にも伝えられる。それを地表に置いた振動計で捕えることは可能である⁷⁾。ただし条件が悪いと、二つの衝撃波による二度の地振動を時間的に分離できないことがある。Fig. 1は、われわれが試みた地振動による脈動周期の実験記録で、ここには同時に行ったピエゾゲージによる波形と並べて示している。この場合は振動計が実験水槽のすぐ近くで爆源に近かったので、二度の波ははっきり分離されている。測定点が爆源から遠くなるにつれ、波の時間幅は急速に拡がり、二つの波の分離が困難になる。マイクロフォンによる音の測定でも同様のことが起こる。

波形が正確に分離できない場合には、自己相関をとる方法を試みる価値がある。これは次の原理による。

もし時間 t とともに変化する関数 $F(t)$ が、ある波形 $f(t)$ と、それを時間的に t_1 だけずらした波形 $f(t+t_1)$ との重ね合わせ。

$$F(t) = f(t) + f(t+t_1) \quad (1)$$

であるときには、期間 T の間の積分。

$$c(\tau) = \frac{1}{T} \int_{T/2}^{T/2+\tau} F(t) F(t+\tau) dt \quad (2)$$

で定義される自己相関を計算してみると、 $c(\tau)$ は $\tau = t_1$ のところで大きなピークを持つはずである⁸⁾。従って、測定波形が目視によって二つの波に分離し難いとき、波形の自己相関関数を計算してある時間 t_1 にピークが得られれば、それはもとの波形が時間間隔 t_1

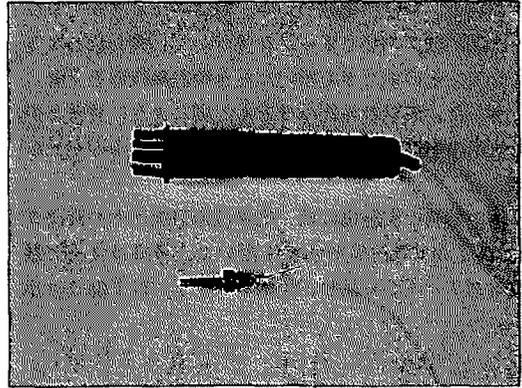


Fig. 2 Microphones used in this study. Simple type-S (upper) and measurement type-M (lower)

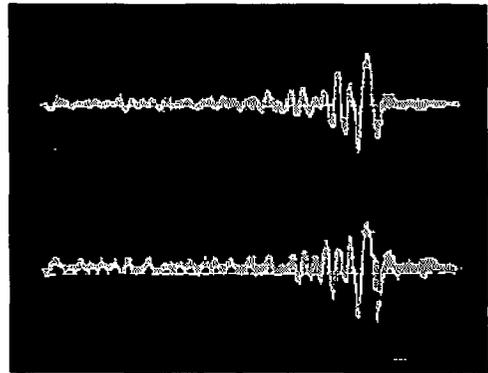


Fig. 3 Recording characteristics of microphones for a noise of hands clapping. Type-M (upper trace) and type-S (lower trace). Time scale: 10 msec/div.

の二つの波の重ね合わせであり、 t_1 をすなわち脈動周期と考えることができる。

自己相関の計算には、直接(2)式の積分をする代りに、Fourier変換で得たパワースペクトルに、もう一度Fourier変換を行う方法が知られている。変換には、マイクロコンピューター用の高速Fourier変換(FFT)プログラムを使うことにすれば⁹⁾、測定手順としては、得られたデータにA/D変換をほどこしてマイクロコンピューターに取り込むことができればよい。この研究もそのような方法をとった。

3. 実験

3.1 測定器

実験に使用したマイクロフォンは、Kulite社の計測用MIC-062と、Sony社の一般用(テープレコーダ付属の音声用)である。以下前者を計測用、後者を一般用と呼んで区別する。外観をFig. 2に示した。

計測用マイクロフォンは、共振周波数250kHz、ダ

イナミックレンジ 130~194dB, 一般用の方は特性不明である。特性の比較のため、両方のマイクロフォンの感度がほぼ等しくオシロスコープに表われるようにして、その前で手を叩いたときの記録波形を Fig. 3 に示した。波形の外観はほとんど同じように見えるが、計測用の方が細かな変化まで捕えられているのがわかる。

水中爆発の実験場には、化学技術研究所内の直径 8 m, 深さ 5m の円筒形水槽を用いた。爆薬は水槽に懸かるブリッジから吊し、マイクロフォンは Fig. 4 に示

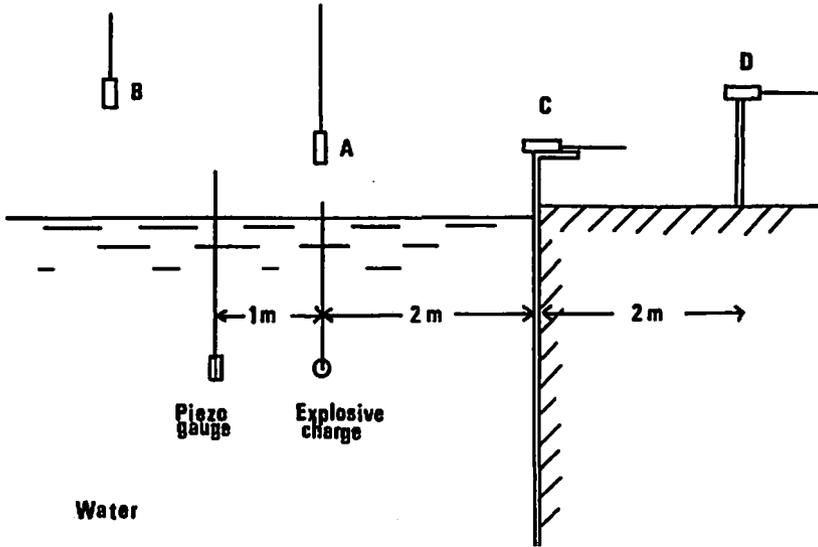


Fig. 4 Positions for setting microphones.

および 30g で、計測系のテストのために、6号電気雷管のみの爆発も行った。

3.3 計測系

マイクロフォンおよびピエゾゲージに得られた電気信号は、発破器の通電信号とともに、Ampex 社データレコーダ FR2300 に記録された。データレコーダは FM 記録で、周波数特性は DC - 80 kHz で平坦である。

データレコーダに記録した信号は、再生後デジタル化して、マイクロコンピュータ Apple II を用いたデータ処理システムに導入した。A/D 変換とデジタルデータのメモリには、オートニクス社製オートデジタイザー S210 を用いた。この機種は最高サンプリング速度 $1\mu\text{sec}$ で、12bit のデータを 16k ワードのメモリに貯えることができる。本実験ではサンプリング速度を $2\mu\text{sec}$, または $5\mu\text{sec}$ で、得られた 16k ワードのデータのうちから 1024 ワードを選んで Apple II で処理した。データ数を 1024 個としたのは、計算に使った FFT プログラムの大きさとの関係である。

すいろいろな場所に置いた。A は爆源の真上, B は水面上で斜め位置, C は水槽の縁, D は地表の杭の上である。

比較のためにピエゾゲージの測定も記録した。アメリカ Naval Ordnance の電気石ゲージを、Kistler 社のチャージアンプと組合せたもので、爆薬と同じ水深 1m, 爆源からの距離 1m (雷管のみの予備実験ではどちらも 0.5m) の水中に設置した。

3.2 爆薬

実験に使用した爆薬は、3号桐ダイナマイト 20g,

3.4 測定結果

ダイナマイト 20g の爆発を、水中のピエゾゲージと、位置 A の計測用マイクロフォンで記録した結果を Fig. 5 に示す。図は発破器の通電開始を時間軸の原点にとったが、2種類のセンサーの位置の違いから、波の到達時間はピエゾゲージの方が早い。しかし第 1 波と第 2 波の時間間隔については、どちらのセンサーで測っても、全く同じ 72 msec を与えている。

マイクロフォンも音圧を感じる圧力センサーであるから、ピエゾゲージと似たような信号波形が得られても不思議ではない。マイクロフォンを水面に近く置いた Fig. 5 ではピエゾゲージと同様二つの衝撃波が分離して記録されている。

Fig. 6 は、ダイナマイト 20g の爆発を、位置 C および D で、計測用マイクロフォンで捕えたものである。位置 D の波形では、微小振動が先に到達しており、マイクロフォンへの音波の到達に、一種のマルチパスが出来ていることがわかる。これは、D 点では爆源への

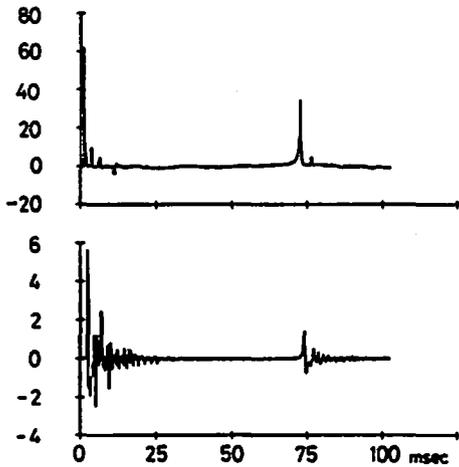


Fig. 5 Simultaneous recording of signals of piezogaugage (upper) and microphone-M (lower) at position A, by explosion of 3-kiri dynamite 20g.

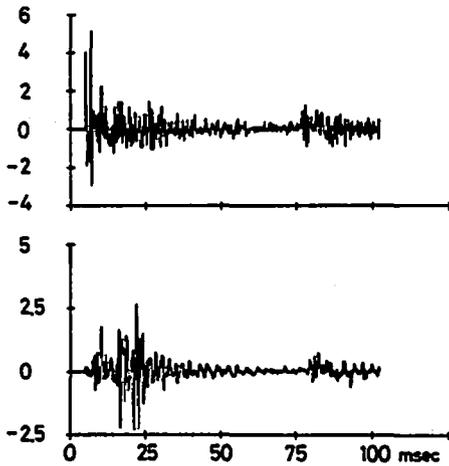


Fig. 6 Signals of microphone-M at position C (upper) and D (lower), by dynamite 20g.

直接の見通しがきかず、地中を通して弱められた波の方が、時間的には先行するためである。図からわかるように、マイクロフォンが遠くなるに従い、二つの波の時間間隔を精度よく求めることが困難になる。

実験はいろいろな条件でおこなったが、ここでは代表的なもののみを挙げた。一般用マイクロフォンによる測定例を、Fig. 7に示す。爆薬は同じ3号桐ダイナマイト20g、マイクロフォン位置は、見通しのよいBで、水面からの高さ1.2m、爆源からの水平距離は1mと2mである。

3.5 解析

ピエゾゲージで得られる二つの衝撃波形からガス球脈動周期を求めるときの基準は、第1波の立ち上がりから第2波のピークまでをとるのが普通である⁴⁾。再現

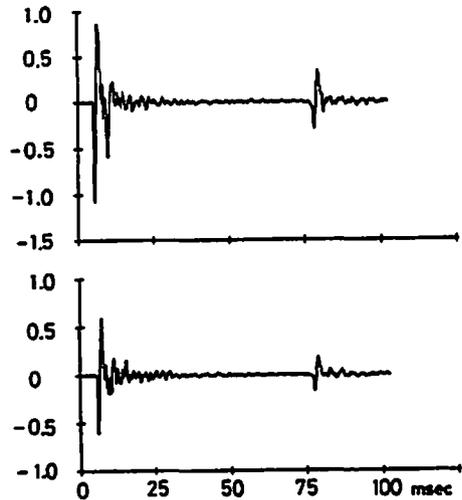


Fig. 7 Signals of microphone-S at position B by dynamite 20g. Horizontal distance from explosive to microphone was 1m (upper) or 2m (lower) with same height of 1.2m above water surface.

性を見るために、3号桐ダイナマイト20gを、水深1mで爆発させたときの脈動周期を、4回の実験でピエゾゲージの波形から求めてみると、71.6、71.9、72.0、72.3msecという値が得られた。これは平均値の71.95msecに対して $\pm 0.5\%$ の範囲に入っている。

マイクロフォンで得られた波形が、Fig. 5やFig. 7のようであれば、二つの波は分離しているのだから脈動周期を求めることができそうである。しかしピエゾゲージで得られる第1波は、垂直に立ち上っており、従って立ち上りの点とピークの点とは完全に一致している。それに対し、マイクロフォンで得られる第1波には、僅ながら傾きがあって、立ち上がりからピークまで約0.5msecの時間差が認められた。そのため脈動周期の算定に、立ち上がりとピークのどちらを基準にとるかに迷ったが、実験結果は常にピークからピークまでをとった方が、ピエゾゲージの値との一致が良かった。

上の例では、それぞれの波の形がすっきりしているのだから、ピークからピークまでという基準で脈動周期を求めることができた。しかしFig. 6のような波形では、波が広がっているのだから、どこを基準にとってよいかわからなくなる。そしてマイクロフォンによる測定では、水中のピエゾ測定と違って、このようなあいまいな(単独ピークを持たぬ)波形になる場合が多いと思わなければならない。しかしこのような場合も、(2)式の自己相関関数を計算してみると、すっきり確定データの得られることがわかった。

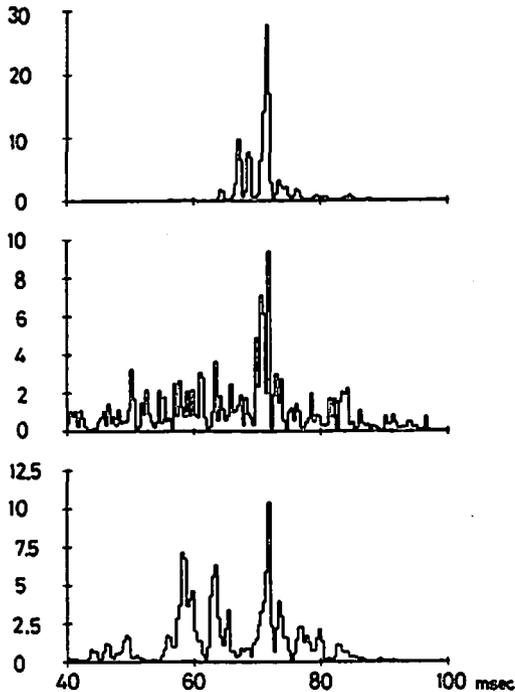


Fig. 8 Self-correlation of microphone signals analyzed from Fig. 5-micro (upper), Fig. 6-C (middle) and Fig. 6-D (lower).

Fig. 8は、この目的のために算出した自己相関関数の例で、上からそれぞれ Fig. 5と、Fig. 6のC、Dの計測用マイクロフォンの波形に基づくものである。横軸 t の範囲は、必要な部分 (40msec 以上) のみを拡大した。どのグラフも $t=72$ msec に相関の最大値を持っている。言うまでもなく、これは3号桐ダイナマイト20gの脈動周期と一致している。一番上は、原波形がもともと目視で脈動周期が分かる場合であったが、下の二つのように、原波形がノイズ性の場合にも、この方法で脈動周期が確定的に求められることは注目に値する。

自己相関を使った脈動周期の測定は、マイクロフォンに限らず、任意のセンサーに対して適用可能である。ただし二つのピークがはっきり分離している場合の時間測定と比較すると、精度は若干悪くなる。

測定データを A/D 変換するときのサンプリング間

隔の読みとり精度を Δt とすると、直接二つのピーク間隔を読みとるときに時間分解能も Δt である。それに対してここで行った自己相関の計算法では、Fourier変換で得られるパワースペクトルをもう一度 Fourier変換するので、データ数は最初の1/4に減少し、従って時間分解能は Δt の4倍になる。本実験を例にとれば、最初のデータ数は1024であったのが、Fourier変換を経た Fig. 8の自己相関関数のデータでは、横軸 (時間軸) 上の点は256に減少している。原波形のサンプリング間隔は0.1msecなので、自己相関を求めたときの時間分解能は0.4msecとなり、精度も4倍に粗くなっている。

4. 結論

水中爆発におけるガス球脈動周期を測定する場合、水中にピエゾゲージを設置する代わりに、空中にマイクロフォンを置く方法で、次のような結果が得られた。

- (1) マイクロフォンの設置位置が良く、爆源が見通せるならば、二度の衝撃波は分離してマイクロフォンにも記録され、その時間間隔から水中での脈動周期を精度良く求めることが可能であった。
- (2) マイクロフォンの設置位置が悪いと、衝撃波は必ずしもピーク性の波形にならず、二度の波の時間間隔は波形の直読からだけでは得られぬことがある。しかしその際も、データ解析により波形の自己相関が最大値をとる時間を求めれば、脈動周期と完全に一致することが確かめられた。

文 献

- 1) G. Bjarnholt: Propellants and Explosives, 5, 67 (1980)
- 2) 田中一三: 化学工業資料, 18, 45 (1983)
- 3) S. Paterson, A. H. Begg: Propellants and Explosives, 3, 63 (1978)
- 4) 田中一三: 工火誌, 40, 306 (1979)
- 5) R. H. Cole: "Underwater Explosions", Univ. Press (1948)
- 6) Lord Rayleigh: Phil. Mag., 34, 94 (1917)
- 7) Fossé: Propellants and Explosives, 3, 61 (1978)
- 8) 日野幹雄: 「スペクトル解析」, P. 194, 朝倉書店 (昭和52年)

Measurement of Pulsation Period of Gas Bubble in Underwater Explosion by the Microphone

by Kazumi TANAKA* and Senzo OINUMA*

To measure the pulsation period of gas bubble in underwater explosion, we use generally piezo-electric gauge to detect pressure waves in water. Here we have tried to use microphone in air instead of piezo-electric gauge in water for the same purpose. Setting microphone in air is easier than setting piezo gauge in water. And our interest concerned to the fact if the signal of microphone was enough clear to reveal the repetition interval of pressure waves in water.

Results were as follows. When the microphone was set near the explosion source we obtained distinctly separated signals of repeated pressure waves. When the microphone was set far from the source, obtained signal was not clear. In the latter case, we tried to evaluate the pulsation period by the self-correlation of recorded signal, and found that the calculated value agreed well to that derived from the direct measurement by piezo gauge in water.

(*National Chemical Laboratory for Industry, 1-1 Yatabe-cho, Ibaraki-ken, Japan)

ニュース

第18回1987国際会議（ブラウンホーヘル推進爆薬研）申込募集

300字以内の抄録を1986年11月30日までに、審査は翌年2月、予稿は3月31日までに送るよう、毎年の例で、募集しています。講演は20分、主催は同研、場所は市内の国際会議場です。開催日は6月1～3日

で今回の首題は製造技術、保安、製品の性能評価で、対象は固体推進薬、砲用火薬、高性能爆薬、起爆薬、点火薬等であります。同研の宛名は次の通りです。

Fraunhofer-Institut für Treib- und Explosivstoffe, D-7507 Pfinztal-Berghausen, F. R. G.

(水島容二郎)