Measurement of Detonation Velocity by means of a Resistance Probe

by Koichi Sassa* and G. Larocque**

A specially designed resistance probe which was made of several 1/2W resistors located 1″ apart each other forming a chain along the axis of the probe was used to measure the detonation velocity of an exolosive. As the laboratory experiments indicated that the probe produced "noisy" records, the probe was seathed in a 2 mill brass foil tube. As the result, the probe produced a clear step wave form. It was pointed out that, in the use of a resi stance probe, the effect of cable capacitance on the wave form must be attentioned.

The measurements of the detonation velocities of relatively high explosives loaded in 50 mmϕ and 100 mmϕ bore holes were performed by means of the resistance probe, and significant increase in detonation velocity due to confinement was not observed

* Department of Mineral Science and Technology, Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto.

** Mines Branch, Department of Mines and Technical Surveys, Ottawa, Canada.

水中衝撃波法による爆轟圧の測定

佐々宏一・伊藤一郎*

1. 緒言

爆薬の爆轟圧力すなわち C-J 面における圧力の測定はかなり困難な問題であるが，近年種々の測定器および測定法の急速な発達にともなつて，200 K Bar から 300K Bar にもおよぶ強大な爆轟圧の測定が可能となつたことは周知の事実である。この爆轟圧の測定方法としては種々の方法が発表されており[1)~4)]，それらは順次より高い精度の測定法へ，またより簡単な測定方法へと移行しつつあるのが現状のようである。

さて爆薬を水中で爆轟させること，水中へ投射された高圧衝撃波によつて水がイオン化し，そのために水の電気伝導度が急激に変化する。そこで本研究においては，この現象を利用して水中衝撃波の伝播速度を爆薬端面の近傍において測定し，この測定結果を用いて爆薬と水との接触面上における圧力を求め，この値を結合計算式に適用して爆轟圧を算出するという方法を用いて数種の爆薬の爆轟圧を測定したので，その測定方法および測定結果について報告する。

2. 測定原理

Fig. 1 に示すように，爆薬で水を衝撃すると水中に衝撃波が生成される。この水中衝撃波の伝播速度と

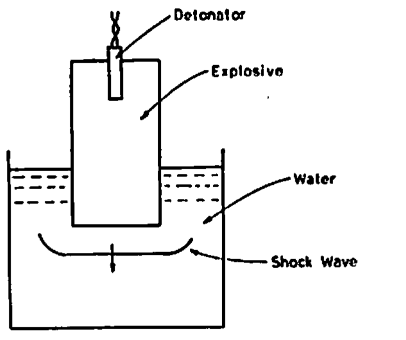


Fig. 1 Principle of Aquarium Technique

昭和41年5月23日受理

* 京都大学工学部資源工学教室 京都市左京区吉田本

波頭圧力との間には (1) 式で示されるように一定の関係が存在するので，水中衝撃波の伝播速度を測定することによつてその波頭圧力を求めることが可能となる。

$$C=V_0\{(P-P_0)/(V_0-V)\}^{1/2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

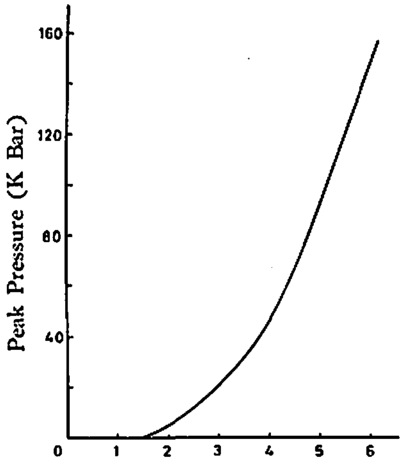
C ：衝撃波伝播速度
P_0, P：波面前後の圧力
V_0, V：波面前後の比容

また，この水中衝撃波の伝播速度と波頭圧力との関係は，つぎのようにしても求めることができる。すなわち，衝撃波内の粒子速度を v とし，媒質の密度を ρ とすると，それらと衝撃波の波頭圧力 P との間には周知の (2) 式の関係が存在する。

$$P=\rho\cdot C\cdot v \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

したがつて，水中衝撃波の波頭圧力は上記の ρ, C, v^* の値を測定すれば求めることができ，その結果より水中衝撃波の波頭圧力と伝播速度との関係を求めることができる。

さて，この水中衝撃波の波頭圧力と伝播速度との関係はすでに M. A. Cook などによつて求められており[4]，その実測資料を用いて両者の関係を滑らかな曲線として示したのが Fig. 2 である。



Propagation Velocity of Shock Wave (×10³m/s)

Fig. 2 Smoothed Shock Parameter Results for Water (20°C±5°C)[4]

したがつて，比較的簡単に測定できる伝播速度のみを測定し，Fig. 2 に示した関係を用いれば，水中衝撃波の波頭圧力を求めることができる。

* これは衝撃波の入射角が 0° の位置における自由面の初期の最大移動速度の 1/2 として求めることができる。

以上のようにして爆轟波が水を衝撃した面上における水中衝撃波の波頭圧力を求めることができるが，これと爆轟圧力との間には近似的に (3) 式で示される関係が存在すると考えられるから[2)~4)]，(3) 式を用いることによつて爆轟圧を算出することができる。

$$P_d=\frac{\rho_w\cdot C_w+\rho_e\cdot D}{2\rho_w\cdot C_w}P_w \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

P_d ：爆薬の爆轟圧
D ：爆　速
ρ_e, ρ_w ：爆薬および水の密度
P_w ：爆轟波が水を衝撃した面における水中衝撃波の波頭圧力
C_w ：その圧力値に対応する水中衝撃波の伝播速度，すなわち，爆轟波によつて衝撃された面から水中へ伝播して行く衝撃波の初期の伝播速度。

以上に示したように，爆薬の密度と爆速，およびその爆薬の爆轟によつて水中に発生した水中衝撃波の初期の伝播速度を測定して爆轟圧を求める方法が一般に Aquarium Technique と呼ばれている方法である。

さて，従来は水中衝撃波の伝播速度を測定するのに高速度カメラが用いられていたが，本研究においては高圧衝撃波によつて水の電気伝導度が急激に変化するのを電気的に検出するという方法を採用して水中衝撃波の伝播速度を測定した。すなわち，高圧衝撃圧力下においては水の電気伝導度は Table 1 に示すように非常に良好となるから，水中に電極を設置してその間の電気伝導度が測定できるようにしておけば，その位置に水中衝撃波が到達した瞬間に電極間の電気伝導度

Table 1 The Electrical Conductivity of Water[5)]

Distance of top of electrodes from explosives (mm)	Shock Velocity (mm·μsec⁻¹)	Pressure (atm)	Density (g·cm⁻³)	Specific Conductance (Ω^{-1} cm^{-1})
3	5.50	127,000	1.717	0.83
4	5.37	116,000	1.693	0.46
5	5.20	108,000	1.668	0.24
6	5.03	98,000	1.644	0.19
7	4.87	90,000	1.622	0.12
7	4.87	90,000	1.622	0.082
8	4.70	82,000	1.599	0.056
10	4.38	68,000	1.554	0.019
∞	1.51	1	0.997	0.000001

が急激に変化する。したがつて，この種の電極を一定間隔で配置することによつてそれぞれの電極の位置に衝撃波が到達した瞬間を検知することができ，その結果から水中衝撃波の伝播速度を求めることができる。

3. 爆薬および実験方法

今回の実験においては，4種の爆薬を使用した。それらの密度，爆速などを一括して示したのが Table 2 である。今回はこれらの爆薬を8号電気雷管を用いて起爆したが，60% PETN・40% TNT の場合のみは薬長が比較的短かかつたので，雷管を挿入するくぼみのある 15g の円柱状の Tetryl を併用した。

Table 2 Explosive Properties

Type of Explosive	Size and weight	Density (g/cm^3)	Detonation Velocity (m/s)
Mixture of 60 % PETN and 40% TNT	38mmφ×38mm 74g	1.7	7,200
Belite A 60% (ammonia dynamite)	57mmφ×200mm 566g	1.1	3,300
Cilgel B 70% (ammonia Semi-gelatine dynamite)	47mmφ×160mm 340g	1.2	4,000
Geogel 60% (Straight gelatine dynamite)	47mmφ×130mm 340g	1.5	6,200

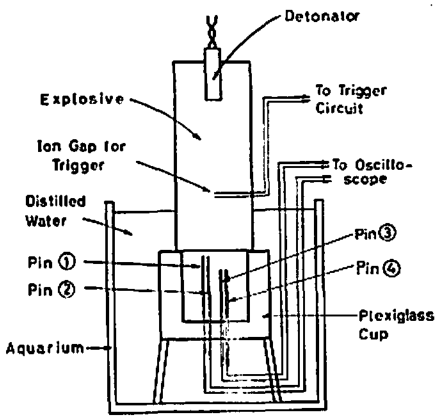


Fig. 3 Experimental Arrangement for Modified Aquarium Technique

Fig. 3 は実験装置の配置状態を示したものである。実験に際しては，60% PETN・40% TNT 以外の爆薬は，水が爆薬内へ浸入することによつて生じる爆薬の性状の変化を防ぐために，水中に入る部分を薄いポリエチレン袋で覆つた。水中衝撃波の伝播速度を測定

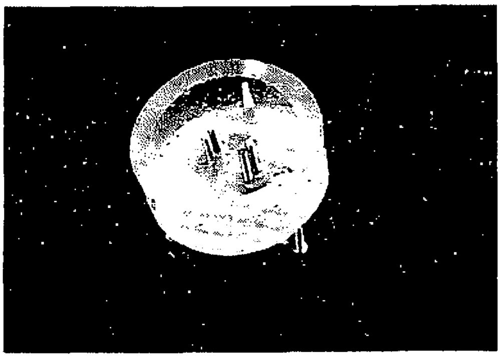


Fig. 4 Photograph of Cup and Pins

する主要部は，Fig. 4 の写真（口絵参照）に示すような数本の電極が取り付けられているアクリライト製の浅いコップ状のものであつて，その底部には2mmφのねじが切つてあり，電極は 2mmφ のビスで作られている。したがつて電極をねじることによつてその先端が上下するから，電極の位置，すなわちピンの先端の位置を正確に定めることができる。実験に際しては最小目盛が 1/1000″ のダイヤルゲージを用いて電極の先端の位置を設定し，それを Fig. 3 に示すように蒸留水を満たした直径約 10cm，深さ約 10cm の容器内に置き，その上部に爆薬を設置した。今回は，8本のピンを用いて4対の電極を作り，3区間の伝播速度を測定する方法と，Fig. 3 に示したように，4本のピンを用いて2対の電極を作り，1区間の伝播速度を測定する方法とを採用した。4対の電極を用いる場合には各電極からの信号をパルス化してシンクロスコープで記録し，2対の電極を用いる場合には2要素シンクロスコープを用いてそれぞれの電極間の電気伝導度の変化を直接記録するという方式を採用した。しかし，2対の電極を用いる方法の方が測定精度が良いことがわかつたので，今回はほとんどの実験を2対の電極を用いる方法で行なつた。すなわち，測定に際しては，爆薬の下端面近傍に設置したイオン探針を用いて2要素シンクロスコープ（TEXTRONIX-555）の掃引を起動し，爆薬の下端面へ爆轟波が到達すると同時に水中へ投射される水中衝撃波が，ピン ①-②（この両電極の先端の爆薬端面からの距離は同じである）の位置に到達することによつて生じるピン ①-②間の電気伝導度の変化を2要素シンクロスコープの1要素に記録し，さらに衝撃波が進んで，ピン ③-④ の位置に到達することによつて生じるピン③-④間の電気伝導度の変化を他の要素で記録するという方式を採用した。今回の実験では衝撃波の到達時間のみを測定すればよいので，ピン間の電気伝導度の変化の検出には，Fig. 5 に示すような電池と固定抵抗とからなる簡単

な回路を使用し，ピンへは約 6 V の電圧を加えた。なお，ピンへの電圧の印加は水の電解* による電気伝導度の変化の影響を少なくするために，起爆する直前に行なつた。

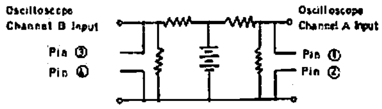
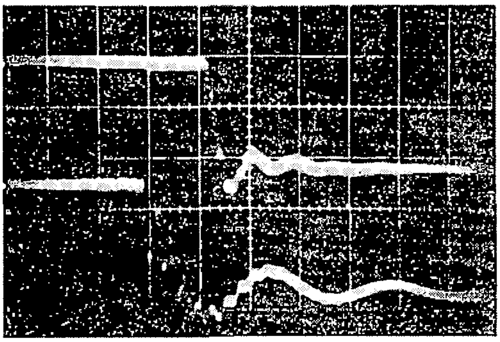


Fig. 5 Electric Connection to measure the Change in Conductivity across the Pins

4. 実験結果および考察

Fig. 6 (口絵参照) は 2 対の電極を用いて 1 区間の伝播速度を記録した 1 例を示したものであつて，使用爆薬は Geogel 60% であり，下の掃引は爆薬端面上における電気伝導度の変化を記録したものであり，上の掃引は爆薬の端面から 3 mm の位置におけるそれを記録したものである。なお，この記録の掃引速度は 0.5 μs/div. である。したがつて下の掃引に電気伝導度の変化が現われた瞬間から，上の掃引に電気伝導度の変化が現われるまでの時間が，上記の位置における 3 mm 区間の衝撃波の伝播時間となる。Fig. 7 および Fig. 8 は，60% PETN・40% TNT および Belite A 60% を用いて水を衝撃した場合に得られた水中衝撃波の伝播速度と距離との関係を示したものである。なお，本実験においては，上記のように 2 対の電極の



Sweep velocity: 0.5 μs/div.
Exlosive: Geogel 60%.
Location of the tips of pins:
Pins ① and ②; Interface between explosive and water,
Pins ③ and ④; 3mm from the interface.

Fig. 6 An Example of Oscillograms

* 蒸留水を使用したが，微量の混入物のために，電圧を長く加えておくとピン間の電気伝導度が良好となる場合が認められた。

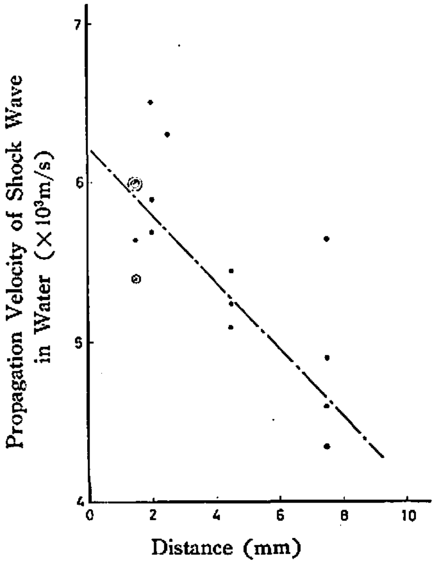


Fig. 7 Propagation Velocity of Shock Wave generated by 60% PETN. 40% TNT vs. Distance

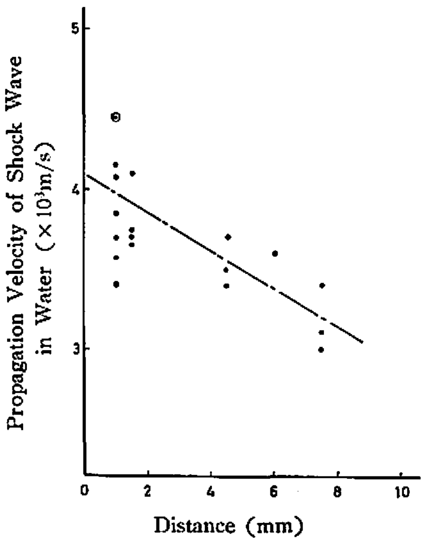


Fig. 8 Propagation Velocity of Shock Wave generated by Belite A 60% vs Distance

間の伝播速度を測定したので，これらの図に示されている伝播速度は測定した区間の平均伝播速度である。たとえば，端面から 4.5 mm の位置に図示した伝播速度は，3 mm の位置に設置した電極と 6 mm の位置に設置した電極とを用いて，3 mm から 6 mm の間の 3 mm 区間で測定した平均伝播速度である。なお，今回の実験では，区間の長さとして 2 mm および 3 mm を採用した。さて，Fig. 7 および Fig. 8

に示すように，爆薬の平端面から 10 mm 以内においては，水中衝撃波の伝播速度と平端面からの距離との間には，その傾斜は異なるが近似的に直線的な関係が存在するものとみなしうるので，上記の範囲内の任意の区間でその区間内の平均伝播速度を測定すれば，その伝播速度をその区間の中央における伝播速度とみなすことができる。たとえば，爆薬の平端面から 2 mm の点と 8 mm の点とに電極を設置してその間の衝撃波伝播時間を測定して上記の 6 mm 区間の平均伝播速度を求めれば，その伝播速度を平端面から 5 mm の位置における伝播速度とみなすことができる。

つぎに，Fig. 2 を用いてそれぞれの伝播速度に対応する波頭圧力の値を求め，これらの値と爆薬の平端面からの距離との関係を示すと Fig. 9 のようになる。

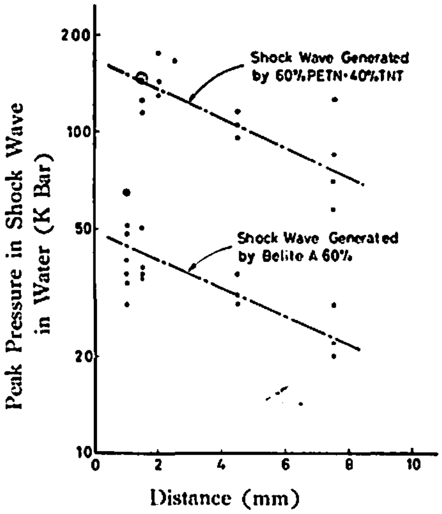


Fig. 9 Semilogarithmic Plot of Peak Shock Wave Pressure in Water vs Distance

Fig. 9 より，爆薬の平端面から水中へ投射された水中衝撃波の爆薬端面近傍における波頭圧力の減衰は，その波頭圧力値に関係なく近似的に (4) 式の関係を満たしていることがわかる。

$$P=P_w \cdot e^{-d} \qquad (4)$$

d：爆薬の平端面からの距離 (cm)，$(0<d<1)$.

したがつて，前に述べたように，爆薬の平端面から 1 cm 以内の任意の 1 区間でその区間内での水中衝撃波の平均伝播速度を測定すれば，その伝播速度はその区間の中点における伝播速度とみなすことができ，またこの区間の中点と爆薬の平端面との間の距離が (4) 式の d となるわけである。ついで，Fig. 2 に示した関係を用いて，その伝播速度に対応する波頭圧力を求めれば，それが (4) 式の P となるから，(4) 式を用いて (3) 式に必要な P_w の値を求めることができる。そこで再び Fig. 2 に示した関係を用いて P_w に対応する C_w の値を求め，これらの値と爆薬の密度および爆速の測定結果とを (3) 式に代入することによつて爆轟圧力 P_d を算出することができる。

以上のようにして求めたそれぞれの爆薬の爆轟圧の値を Table 3 にまとめて示した。

Table 3 Detonation Pressure of Explosives

Type of Explosives	Density (g/cm³)	Detonation Velocity (m/s)	Detonation Pressure (K Bar)
60% PETN·40% TNT	1.7	7,200	240
Belite A 60%	1.1	3,300	46
Cilgel B 70%	1.2	4,000	87
Geogel 60%	1.5	6,200	170

60% PETN·40% TNT 以外の爆薬はその組成が不明であるため，得られた爆轟圧の値と理論的な計算値とを対比することができないが，60% PETN·40% TNT に関しては，木原，疋田による計算結果[6] を用いてこの爆薬の爆轟圧を求めてみると 250K Bar という値が得られ，他方 M. A. Cook による計算結果[7] を用いて求めた値は 220K Bar となつた。

以上のように，今回の 4 種の爆薬についての爆轟圧の実測値は，60% PETN·40% TNT に関しては理論計算の結果と非常に良く一致しており，また他の爆薬に関しても，その爆速，密度の値などから考えて一応妥当な値であると考えられる。

5. 結　言

本研究においては，高圧衝撃波による水の電気伝導度の変化を電気的に検出するという方法を用いて水中衝撃波の伝播速度を測定し，この値とあらかじめ求められている水中衝撃波の伝播速度と波頭圧力との関係とを用いて水中衝撃波の圧力最高値を求め，この値を結合計算式に適用して爆轟圧を求めるという方法を用いて，4 種の爆薬の爆轟圧を求めた。その結果，60% PETN·40% TNT については，実測結果より求めた爆轟圧の値が，理論的計算結果と非常に良く一致していることを示した。また，他の爆薬の爆轟圧についての実測結果も，実測した爆薬の密度および爆速から考えて妥当な値であると考えることができる。さらに，爆薬の平端面から水中へ投射された衝撃波については，爆薬近傍における波頭圧力の減衰が近似的に $P=P_w e^{-d}$ という指数函数で示しうることを示し，最後に爆薬の平端面から 1 cm 以内の任意の 1 区間におい

て水中衝撃波の伝播速度を測定することによつて，爆薬の爆轟圧を求めうることを示した。

なお，この研究の大部分は佐々がカナダの Department of Mines and Technical Surveys に出張中に行なつた研究の一部で，その後著者らが若干の検討と考察とを加えてとりまとめたものである。ここに記して種々の援助を与えられたカナダ政府機関の方々に感謝する次第である。

文　献

1) I. Ito and K. Sassa: Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto Uninersity, Vol. 23, part 1, p. 70, 1961.

2) R. E. Duff and E. Houston: J. Chem. Phys., Vol. 23, p. 1268, 1957.

3) W. E. Deal: J. Chem. Phys., Vol. 27, p. 796, 1957.

4) M. A. Cook, R. I. Keys and W. D. Ursenbach: U. S. Govermment Research Report, April 28, 1961.

5) H. G. David and S. D. Hamann: Trans. Faraday Soci., Vol. 55, p. 72, 1959.

6) 木原，疋田：工業火薬協会誌，第 13 巻，106頁，昭和27年.

7) M. A. Cook: J. Chem. Phys., Vol. 15, p. 518, 1947.

Measurement of Detonation Pressures of Explosives by means of a Modified Aquarium Technique

by Koichi Sassa and Ichiro Ito*

This report describes the method and the results of experiments to measure the detonation pressures of explosives using a modified aquarium technique. The velocity of the shock wave passing through water was obtained by measuring the time interval between changes in electrical conductivity across pairs of pins at known distances from the interface between explosive and water. This velocity can be used to estimate the peak pressure of the shock wave in water: assuming the acoustic coupling relation the detonation pressure can be calculated. Four kinds of explosives were used that is, 60 % PETN-40% TNT, Belite A 60%, Cilgel B 70% and Geogel 60%. Values of 240 KB, 46KB, 87KB and 170KB were obtained for the detonation pressures of the respective explosives. As the value of the detonation pressure of 60% PETN-40% TNT obtained is in fairly good agreement with the result of the theoretical calculation, the values for three other explosives also seem to be reasonable.

It was also observed that the peak pressure of the shock wave in water seems to attenuate exponentially in the vicinity of the flat end surface of an explosive.

* Department of Mineral Science and Technology, Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto.