

Fig. 1 (a) Structure of resistance probe
(b) Principle of measuring system

(Ω/cm) のニクロム合金線 (直径0.08mm) に、ナイロン糸を抵抗線が外部から部分的に見える程度に螺旋状に巻きつけたものを外径0.6mm内径0.52mmのアルミチューブまたは、外径0.55mm内径0.3mmのステンレスチューブに通したものであり、ナイロン糸によって抵抗線が金属管に接触しないようになっており、先端を図のようにハンダづけし、抵抗線の他端と金属管とは各々リード線で定電流電源に結線され、測定に際しては一定電流を流し、そのリード線間の電圧を観測できるようになっている。

今、Fig. 1 (b) に示すように抵抗線プローブの先端 ($x=0$) から距離 x (cm) の増加する方向に衝撃波が伝わるものとする、その波頭圧力によって、プローブの先端から順次抵抗線の螺旋状に巻きつけられたナイロン糸のすきまの部分と金属管とが機械的に短絡されていき、プローブの抵抗値は時間とともに減少していく。プローブに流れる一定電流を i (mA)、プローブの単位長さあたりの抵抗値を r (Ω/cm)、プローブのリード線間の電圧を $V(t)$ (mV)、とすると、

$$v(t) = -\frac{1}{ir} \frac{dV(t)}{dt} \quad (1)$$

となる。すなわち、プローブのリード線間の電圧 $V(t)$ と時間 t との関係測定し、 $V(t)$ を時間 t で微分すると衝撃波の伝播速度 $v(t)$ が連続的に求められることになる⁶⁾⁻¹⁰⁾。

2.2 測定系統

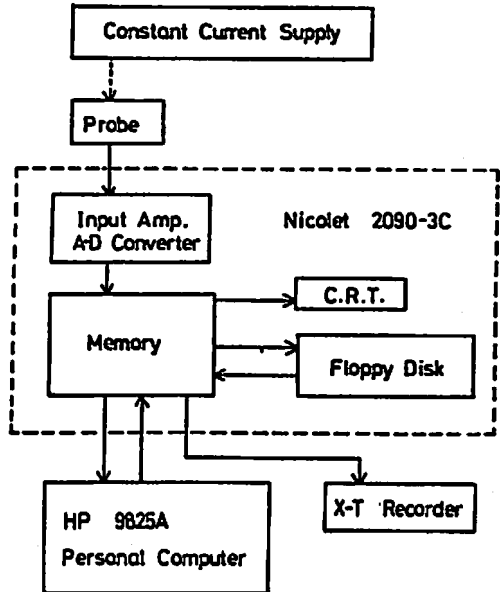


Fig. 2 Block diagram of measuring system

使用した測定系統のブロック図は Fig. 2 のとおりである。米国ニコレ社製 Nicolet 2090-3C に内蔵されている入力アンプの内部同期プリトリガー方式で測定されたプローブの電圧は AD 変換され、メモリー部に記録され、同時にシンクロスコープに写し込まれる。このデジタルアウトプット信号を HP 9825A パーソナルコンピューターに取り込み、カートリッジテープに記録して実験記録の解析に供した。また、メモリー部に記録されたデータは、フロッピーディスクにも記録でき、さらにメモリー部から直接 x-t レコーダにデータを描かせることもできる。

なおこの測定においては定電流の大きさを 20 ~ 30 mA とした。また使用したプローブの抵抗値はせいぜい 270 Ω であり、ここで用いた定電流装置は負荷が 0 ~ 500 Ω まで変化しても電流値に変動がないことが確かめられている。

2.3 試料爆薬

本研究に用いた試料は主にアルミ入りスラリー爆薬 (薬径 25mm または 30mm, 仮比重 1.05) と 2 号極ダイナマイト (薬径 25mm, 仮比重 1.32) である。これらの紙筒爆速はイオン探針法で雷管から約 5 cm 離れた点から 10 cm の間を測定するとそれぞれ 2870 m/s および 4600 m/s である。

3. 実験結果とその考察

3.1 雷管起爆による爆轟の爆速測定

3.1.1 異種爆薬の境界面附近の爆速

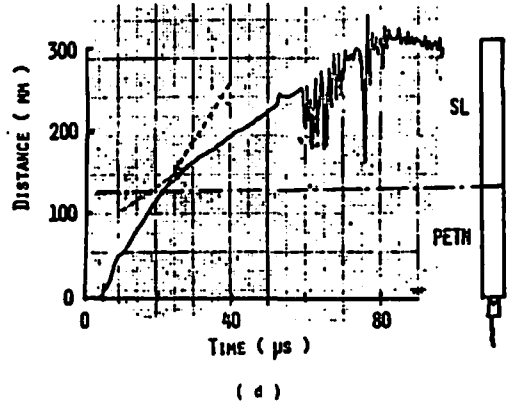
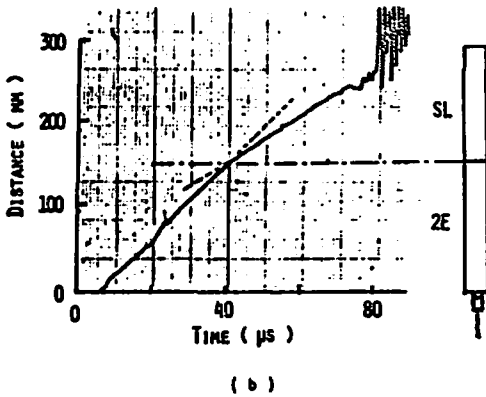
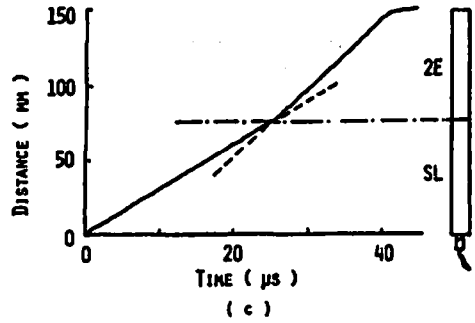
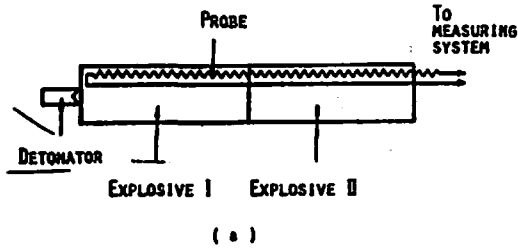


Fig. 3 (a) Measurement of detonation velocity around the interface between two different explosives (SL: Slurry explosive, 2E: Dynamite, PETN: Penthrite)
 (b) $x-t$ curve of detonation front propagating from dynamite to slurry explosive.

Fig. 3 (c) Ditto from slurry explosive to dynamite
 (d) Ditto from penthrite to slurry explosive

まず、抵抗線プローブが爆速や衝撃波速度の不連続変化を正確に測定できるか調べるために次のような実験を行なった。すなわち、Fig. 3(a)に示すように、共に直径 25mm のスラリー爆薬と二号種ダイナマイトとを接触させて同軸上に並び、抵抗線プローブを添わせ、電気雷管で起爆させたときの爆轟波の速度変化を測定した。

Fig. 3(b)は抵抗線プローブの先端からの距離を縦軸に時間を横軸にとってグラフにしたものである。このグラフの傾きからスラリー爆薬と二号ダイナマイトの爆速を求めてみるとつぎのようである。

スラリー爆薬……………2800 m/sec
 二号種ダイナマイト…4570 m/sec

これらの値は前述の爆速とよく一致している。さらに Fig. 3(a)でプローブ先端から2つの爆薬の境界面までの距離が 150mm であることにより Fig. 3(b)で爆薬の境界面に相当するところを求めてみると、図の一点傾線の位置となり、この記録から抵抗線プローブは爆薬の境界面の位置と境界面近くでの爆轟波の伝搬速度の変化の様子をよく捉えているといえる。なお 80 μ s

以後に生じている記録の乱れは、プローブ自身を伝わる弾性波(速度: 5000~6000m/s)がプローブのリード線との接続箇所に着いたとき、その接続が不完全であったため、短路したり(抵抗が零)放れたり(抵抗が無限大)したために生じたものではないかと考える。したがって、この部分の接続に改良を加えればこの種のノイズは除去できるものと思われる。次に Fig. 3(c)はスラリー爆薬から2号種ダイナマイトへの伝爆の記録である。この場合も境界面における伝爆の様相ははっきりとえられており、両爆薬ともそれぞれの本来の爆速で伝爆していることがわかる。

ところが Fig. 3(d)に示す鉤造ペントライト($d=1.58$)からスラリー爆薬への伝爆の場合は、図の傾線で示した両爆薬の境界面位置でははっきりした爆速の変化が認められず、スラリー爆薬の内部に爆轟がかなり進んでからスラリー爆薬本来の爆速になっている。すなわち、境界面からしばらくの間は、正常な爆速より大きな速度で爆轟していることがわかる。なお 60 μ s 以後の記録の乱れは、Fig. 3(b)の場合と同様のものである。

3.1.2 爆薬端面から投射される空中衝撃波

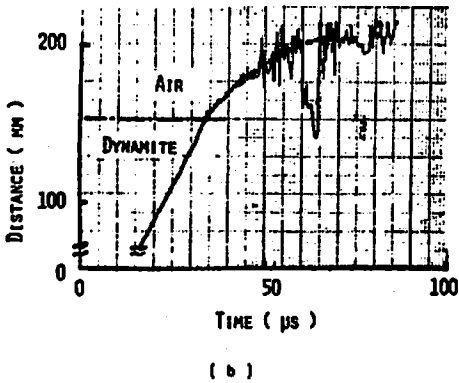
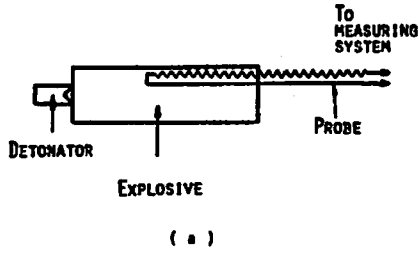


Fig. 4 (a) Measurement of shock wave in the air close to the surface of explosive
(b) $x-t$ curve of detonation front in the explosive and shock front in the air

抵抗線プローブの外管にアルミニウム管を用いれば、空中衝撃波のように比較的弱い圧力によっても、ある程度プローブの外管と内部の抵抗線との接触すなわち短絡が見込まれるので、その伝播速度の測定も可能であると考えられる。そこでアルミ製のプローブを用い、Fig. 4(a)の概念図に示す方法で、爆薬の爆轟が端面に達し空中に放出される衝撃波の伝播速度の測定を試みた。Fig. 4(b)は、薬径25mm, 100gの2号履ダイナマイトの記録の一例であるが、爆薬端面の位置を示す一点鎖線を越えると、伝播距離-時間曲線は徐々に勾配がゆるくなり、時間軸とのなす角度すなわち、伝播速度が小さくなっていくことがわかる。この傾向がよくわかるように、接線勾配を求めやすいようになめらかな曲線で補正したものを点線で表わしてある。また端面からはなれるにつれて記録が乱れているのがわかるが、これは空中衝撃波の伝播につれて圧力が小さくなり、プローブの外管と芯線の抵抗線との短絡が不安定になること、同時にアルミ管を伝播する振動による接触が卓越してくること、および爆轟が爆薬端面に達した時点でプローブ自体の支持が不安定になる等が主な原因であろう。

Fig. 4(b)の記録波形の爆薬端面から5mm毎の接線勾配すなわち伝播速度を Table 1に表わす。この結果から、上述のノイズの原因をよく検討し可能を講じれば、少なくとも端面端面から3cm程度までは伝播速

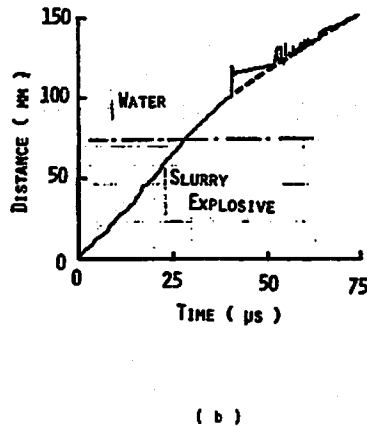
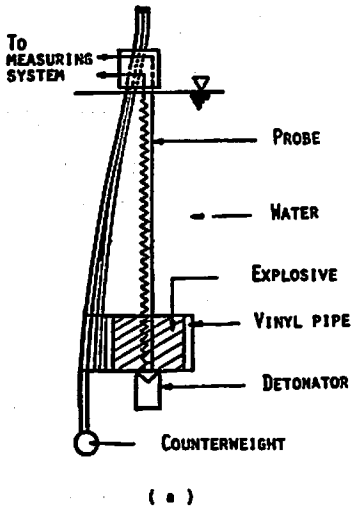


Fig. 5 (a) Measurement of shock wave in the water close to the surface of explosive
(b) $x-t$ curve of detonation front in the explosive and shock front in the water

Table 1 Shock velocities at the close distance from an explosive

Distance from explosive (mm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Shock velocity* in the air (km/s)	2.8	2.6	2.3	2.0	1.7	1.4	1.2	1.0	0.8	0.7
Shock velocity** in the water (km/s)	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4

*Caused by explosion of 100g dynamite with 25mm diameter.

**Caused by explosion of 30g slurry explosive with 25mm diameter.

度の精度のよい測定は充分可能であると思われる。

3.1.3 爆薬端面から投射される水中衝撃波

前節と同様の測定を Fig. 5(a) に示すような方法で水中において行なった結果の一例(スラリー爆薬30g)を Fig. 5(b) に示し、爆薬端面から5mm 毎の伝播速度を Table 1 に示す。この表からもわかるように端面の近くではほぼ爆速(約2800m/s)に近い値を示しており、4~5cm はなれたところで伝播速度が1500m/s前後になっているのを見ても、かなり正確に水中衝撃波の伝播をとらえることができるものと思われる¹⁴⁾。

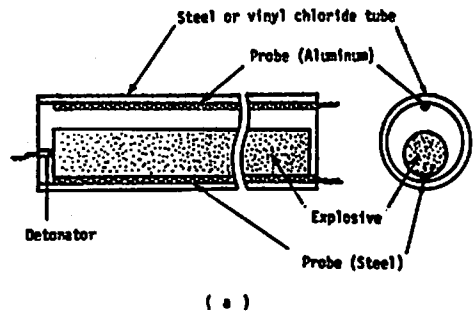
3.2 ポア・ホールを先行する衝撃波

3.1.2 に述べた測定結果の考察から、穿孔発破の場合、ポア・ホール壁面と未反応部分の爆薬の空間を先行する圧力波¹⁵⁾の伝播を測定できる可能性を見出し、Fig. 6(a)に示すような方法で、爆薬の爆速と先行圧力波の速度の同時測定を行なった。その結果の一例(スラリー爆薬、薬径25mm、薬長900mm、孔径67mm)が Fig. 6(b)に示されており、この場合明らかに、空中を伝播する圧力波の速度が爆速より速いことがわかる。一般に薬径と孔径との関係に左右されると言われているいわゆるチャンネル効果現象の解明には有効な計測手段の一つであるものと考えられる。この実験の結果についての詳しい考察などについては編を改めて報告する予定である。

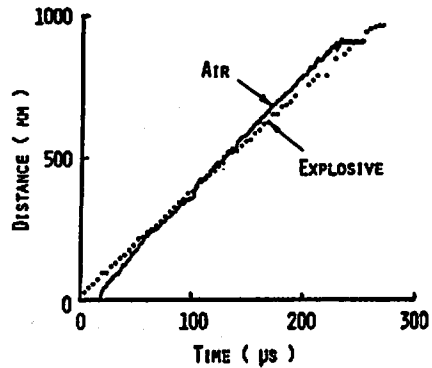
3.3 銃撃試験における爆轟の爆速測定

緒言で述べたように殉爆や死現現象さらにチャンネル効果現象などの問題の解明には、爆薬の起爆機構の究明に取り組まなければならない。本節では感度試験の一つとして知られている銃撃試験において、平頭弾の衝突によって生じた衝撃波から爆轟波への移行の様相を爆速の変化でとらえられないかと考え、試料の爆薬にプローブを設置していくつかの実験を試みた。

Fig. 7(a)に実験装置の概念図を示し、その記録例を Fig. 7(b)~(e) に示す。Fig. 7(b)はダイナマイトを平均弾速170m/sの平頭弾で起爆させたときの記録であり、Fig. 7(c)は270m/sのときのものである。さらに



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Measurement of shock wave propagating in the air between explosive and wall of a bore hole

(b) x-t curve of shock front in the air (with solid line) as well as that of detonation front of explosive (with dotted line)

Fig. 7(d)および(e)はスラリー爆薬の場合の記録で、前者は弾速が430m/s、後者が570m/sのものである。これらの記録波形をみるとスラリー爆薬の場合は、起爆後直ちに定常爆速に達しているが、ダイナマイトの場合は、起爆直後はやや低爆速であり徐々に速度を増し、やがて定常爆速に達することがわかる。この傾向は雷管による起爆の場合 (Fig. 3(b))にもうかがえる

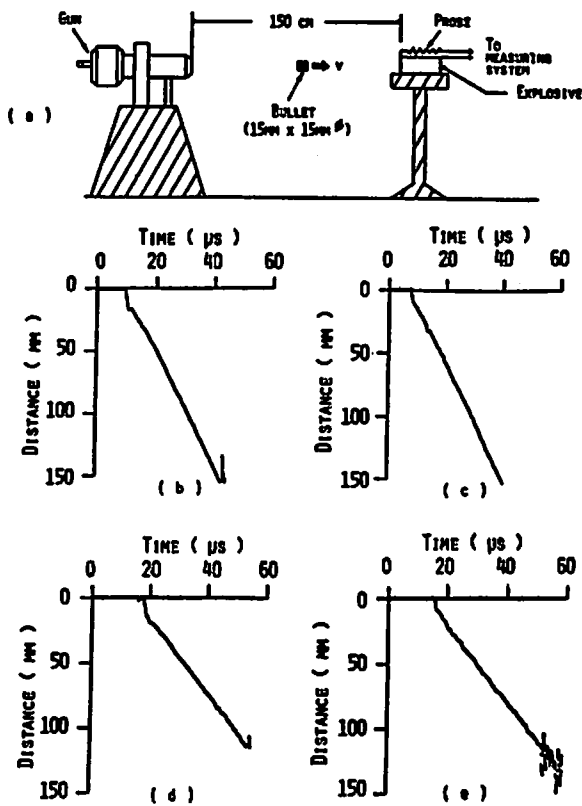


Fig. 7 (a) Measurement of detonation velocity under the impact sensitivity test using a flat-faced bullet
 (b) $x-t$ curve of detonation front of dynamite with bullet speed 170m/s
 (c) That of dynamite with bullet speed 270m/s
 (d) That of slurry explosive with bullet speed 430m/s
 (e) That of slurry explosive with bullet speed 570m/s

が、Fig. 3(c)のように他の爆薬を起爆する場合にはその傾向がみうけられない。これらのことは、ダイナマイトの伝爆機構の解明などに興味深い示唆を与えるものと思われる。

また、いづれの記録波形をみてもわかるように、プローブの先端から短絡が始まっているのではなく、先端から10~20mmのところから急に短絡をしはじめている。これは弾頭の衝突によって生じた衝撃波が爆薬の中を伝播し、10~20mm進んだところで、爆轟波に移行したものと解釈できる。この起爆点と爆薬の先端までの距離と弾速の関係を薬種別にプロットした図がFig. 8である。この図によればいづれの爆薬も弾速が遅ければ起爆点は先端から離れ、速くなるにしたがっ

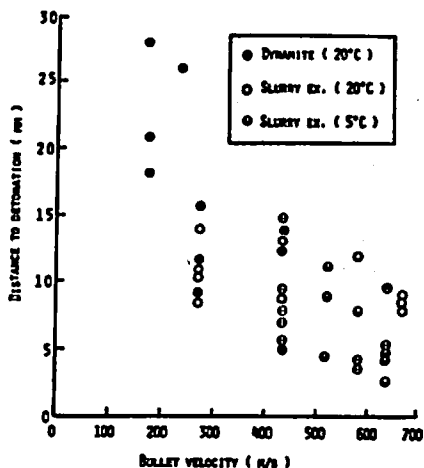


Fig. 8 Effect of bullet speed on the distance to detonation under impact sensitivity test using a flat-faced bullet

て先端に近づく傾向があり、その傾向はダイナマイトの方が著しいことがわかる。なお、今回行なった弾速の種類ではダイナマイトは170m/s、スラリー爆薬は30°Cで270m/s、5°Cで430m/sがそれぞれの爆薬を起爆させるのに必要な最低弾速であり従来から得られている値¹⁷⁾よりも、弾丸の径が大きくなっているため、低い値となっているが妥当な値が得られているものと思われる。

4. 結言

本研究で用いた抵抗線プローブは爆速の精度よい測定が可能であるばかりでなく、衝撃波の伝播の撮相もある程度把握できるものと考えられる。とくに3.2で述べたポアホール内を先行する衝撃波をかなり正確にとらえているものと考えられるので、いわゆるチャンネル効果の解明には充分役に立つのではないと思われる。また3.3で述べた銃撃感度試験における爆速の連続測定の結果からわかるように衝撃波から爆轟に移行する位置すなわち起爆点の位置をも推定できるものと考えるので、今後、殉爆試験やカード・ギャップ試験における爆速の連続測定をも行ないたいと思っている。さらにプローブの改良、計測システムの向上により精度のよい計測が可能となるものと思われ、この抵抗線プローブ法は比較的手軽な計測法でありながら、将来ともに起爆機構や伝爆性などの究明に価値ある情報を提供するものと確信する。

最後に、本研究を行なうに当り助力をいただいた日

本油脂(株)武豊工場森伸生氏および京都大学大学院学生永瀬秀一、藤原浩一両君に厚くお礼を申し上げます。

文 献

- 1) M. J. Ball, R. Watt, Tunnelling' 76, 135, 1976
- 2) 明石善作, 及川隆記, 工業火薬, 31, 75, 1970
- 3) 中野雅司, 森伸生, 工業火薬, 40, 291, 1979
- 4) 日下部正夫, 工業火薬, 31, 49, 1970
- 5) 高井隆雄, 工業火薬, 31, 116, 1970
- 6) 藤原修三, 日下部正夫, 工業火薬, 34, 276, 1973
- 7) W. Maddock and J. A. Darling, Internal report of DEMR Canada, 74/45, 1974
- 8) 佐々宏一, 工業火薬, 27, 223, 1966
- 9) 伊藤一郎, 若園吉一, 佐々宏一, 中野雅司, 小川輝繁, 村上周治, 工業火薬, 32, 35, 1971
- 10) 若園吉一, 佐藤忠五郎, 佐々宏一, 中野雅司, 小川輝繁, 工業火薬, 32, 40, 1971
- 11) 佐々宏一, 工業火薬, 34, 281, 1973
- 12) 黒田英司, 日下部正夫, 工業火薬, 37, 8, 1976
- 13) 黒田英司, 日下部正夫, 工業火薬, 37, 60, 1976
- 14) 佐々宏一, 伊藤一郎, 工業火薬, 27, 228, 1966
- 15) 文献 2
- 16) 田中克己, 工業火薬, 38, 107, 1977
- 17) 南光宜和, 工業火薬, 38, 121, 1974

Studies on Slurry Explosives (II)

Experiments on Measurement of Detonation Velocity and Shock Velocity

Koichi HANASAKI* and Hiroshi SAKAI**

The mechanism of initiation and detonation of explosives should be investigated to improve the efficiency and safety of explosives on their manufacturing, transporting, storing and using. For the investigation, it is important to know the velocity of detonation and shock wave propagating in an explosive.

Authors carried out a lot of measurements of detonation velocity using a resistance probe which is made with a fine metal tube and a resistance wire, to examine the ability of the measurement system for the problem above.

They have obtained satisfactory results that not only detonation velocity in an explosive also shock wave velocity in the air or in the water can be measured to some extent.

(*Department of Mineral Science and Technology, Kyoto University, Kyoto, Japan.

**Taketoyo Plant, Nippon Oil and Fats Co., Ltd., Aichi, Japan.)