

## 工業爆薬の爆速のマイクロ波による測定

(第3報 岩層内の爆速の測定について)

日野熊雄・野村 宏・長谷川清一\*

### I. 序

工業爆薬の爆速測定にマイクロ波が使用出来ることを実験的に確かめたこと、及び爆轟により反射マイクロ波を得る若干の手段について実験を行ない比較検討した結果同軸管法の爆薬の寸度形状種類に拘らず測定が容易になることについて既に報告した<sup>2)</sup>。

実際の発破条件のもとで、岩層の穿孔内では爆速はどのような値を示すか、又爆轟中にその値がどのような変化を示すかは、火薬学上興味があり、発破の立場からも重要な問題であるが、従来それを測つた例は少ない。吾々はマイクロ波による爆速の測定法を岩層内爆速の測定に応用する実験を行なつた。

実験の結果は必ずしも充分満足出来るものではないが、岩層内の爆速の測定結果が得られ、マイクロ波による爆速測定法を前述したような火薬学、発破学の問題の観測手段として利用し得る見通しを得たのでここに報告する。

### II. 測定法

図1(a)は本実験に使用した測定器の構成である。発振器はクライストロン発振器であつて、発振周波数は4,000Mc, 出力は約1wattである。発振器出力は

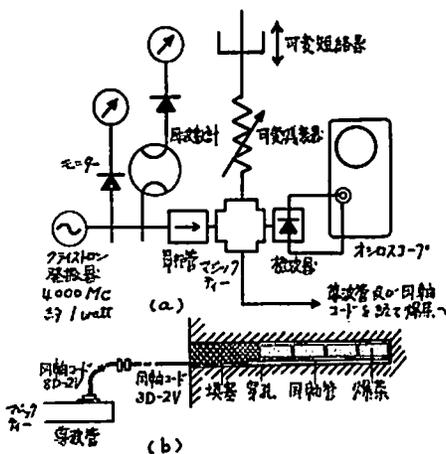


図1 マイクロ波による爆速測定装置の配列

昭和38年3月8日受理

\* 日本化薬(株) 爆薬研究所 山口県山陽町

周波数計によつてその周波数を測定される。モニターは発振器の出力を監視するためのものである。単行管(ユニガイド)は負荷よりの反射電波がクライストロンに入らないように反射波を減衰させるための非可逆回路である。発振器の出力は単行管を経てマジックティーで比較端と測定端に二分して送りこまれる。測定端に送られた電波は導波管及び同軸コードで構成された伝送回路を経て爆薬に沿わせられた同軸管に至る。図1(b)は同軸管を爆薬に沿わせて岩層の穿孔中に装填した状況を示すものである。

爆薬の爆轟によつて反射マイクロ波を得る方法は前報で述べた如く種々の方法があるけれども、岩層の穿孔に装填した爆薬で爆速を測定する場合には同軸管法が簡単に使用し易い、同軸管が測定原理上持つ欠点は爆轟波面より直接マイクロ波の反射を得る方法ではなく、爆轟の進行により同軸管が破壊し或は変形し、その点でマイクロ波を反射するので、その反射波によつて爆速を測定する謂はば間接的方法である所である。

爆速は次式で与えられる。

$$D = \frac{\lambda_g}{2} f_b = \frac{\lambda_g}{2} / \tau \quad (1)$$

D: 爆速

$\lambda_g$ : マイクロ波の管内波長

$f_b$ : 観測ビートの周波数

$\tau$ : 観測ビート1サイクルの周期

オシロスコープで観測されるビート信号は爆轟が進むごとに1サイクルの波形を生ずるとも見做されるから、オシログラムより、波長爆轟が  $\lambda_g/2$  進行するごとの時間が観測され、従つて爆轟進行の時間と進行距離の関係が得られ、又半波長毎の区間の爆速を求めることが出来る。

### III. ピックアップ

図2(a)は爆轟によりマイクロ波の反射信号を得るための同軸管の構造を示すものである。同軸管を爆速のピックアップとして使用すれば、一様で規則正しい波形が得られる。その理由は、(1) 中空であるために爆轟の進行に伴つて容易に破壊或は変形が進行す

る事、(2) 外管の変形によつて芯線との短路が完全に行なわれること、(3) 破壊後も管の密閉状態が完全に保たれるのでマイクロ波が管の外に洩れて出ることがなく従つて破壊点に於ける反射係数が一定であると考えられることなどである。

同軸管を使用する上の欠点は製作が多少めんどうであることであつて、細い芯線を管の中心に支持するために隔板を製作し挿入する事、芯線を管内で直線の状態に保持すること、マイクロ波伝送用コードとの接続の工事が簡単でないことなどである。ピックアップの長さが1mを越えるような長いもの場合には芯線が管と接触しマイクロ波の伝送に支障を生ずるケースもあつた。これらは必ずしも大きい欠点ではないが、坑内の発破現場等で実験環境のあまりよくない所で多量の実験を処理する場合には不便であると考えられた。

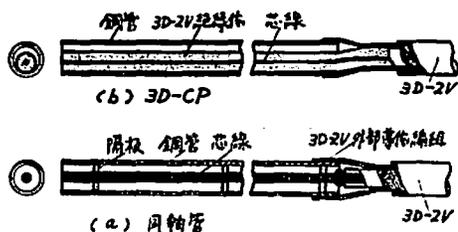


図2 マイクロ波による爆速測定用ピックアップ

そこで現場使用の面から製作が簡単であつて、且つ爆轟によつて破壊変形した後も同軸管のように電波を密閉するものとの考えより、図2(b)に示すピックアップを製作使用した。

図2(b)でポリエチレン絶縁体及び芯線の部分は高周波コード3D-2Vの外外部導体を取り去つたものである。管は市販の銅管で外径約6mm、肉厚約0.8mmである。製作法は伝送に用いる3D-2Vコードの一部をその外部導体を取り去り銅管に挿入し、3D-2Vの外被導体と銅管とはハンダ等で適当に接続することによつて完成する。これを3D-CPと仮りに呼ぶことにする。

同軸管の管内波長は空間波長と等しいから、その値を求めることは極めて簡単であるが、3D-CPは管内の一部がポリエチレンであるので波長が短縮する。波長短縮率は、管と芯線とが同心であると近似すれば、次式によつて計算される。(図3参照)

$$r = \frac{\lambda_g}{\lambda_a}$$

$$= \sqrt{\frac{\log \frac{d_2}{d_1}}{\log \frac{d_2}{d_p} + \frac{1}{\epsilon_s} \log \frac{d_p}{d_1}}} \quad (2)$$

$r$ : 波長短縮率

$d_1$ : 芯線径

$d_2$ : 外部導体内径

$d_p$ : ポリエチレン絶縁体径

$\epsilon_s$ : ポリエチレン絶縁体比誘電率

$\lambda_g$ : 管内波長

$\lambda_a$ : 空間波長

3D-CPをピックアップとした場合に得られる信号波形について開放状態で予備実験を行なつた。

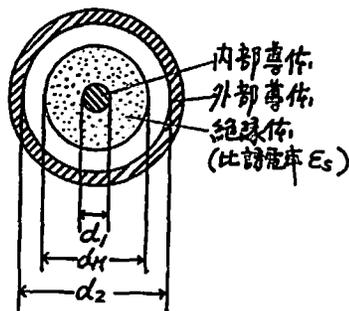
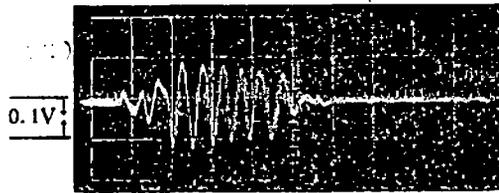


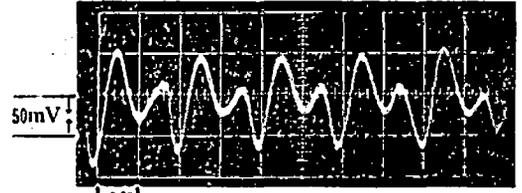
図3

写真1(a)は等径35mmの新桐について得られた信号波形の例で強い爆薬では整つた信号波形が得られる。このオシログラムより計算される爆速は5,800m/sである。写真1(b)は等径20mmをとした場合の例で1サイクルの波に1/2周期の波が乗つた特徴のある信号が見られる。この写真より計算した爆速は2,860m/sである。この信号波形は弱い爆轟の特徴を示す信号であると考えられる。写真1(c)は薬径28mmの新桐で、弱い爆轟の信号から強い爆轟の信号へ変化して行く状態が見られる。爆速は最初3,200m/sで3,700m/sに変化し最後に5,800m/sに上昇していることが計算される。写真1(d), (e), (f)はそれぞれ硝ダイ(35φ, 視測爆速1,900m/s), あかつき爆薬(硝爆薬)(等径20mm及び30mm, 視測爆速は夫々3,000m/s及び3,400m/s)のオシログラムを示す。

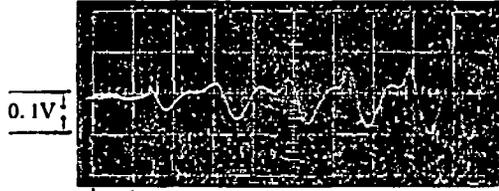
これらの結果より3D-CPは爆薬の強弱によつて波形が異なり、弱い爆轟の場合には信号波形の1つの波に更にも1つの波が乗つたように特徴のある波形が得られるので、同軸管のように爆薬の如何に拘らず理想的に整つた波形が得られない点が不都合であるが、一応爆速の測定には使用出来るものと考え、これによる岩層内の穿孔の爆速の測定を行なうこととした。



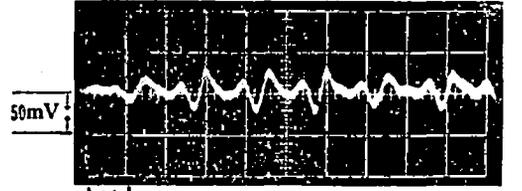
(a) 新樹 (薬径 35mm),  
爆速 5,800m/s



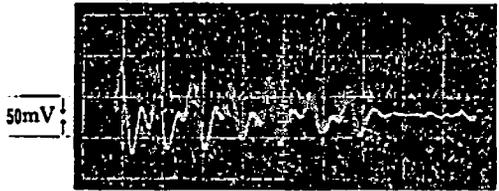
(b) 新樹 (薬径 20mm),  
爆速 2,900m/s



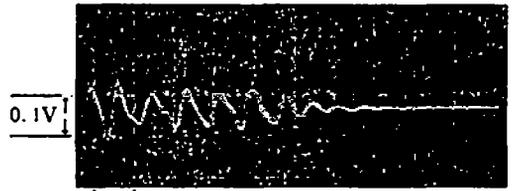
(c) 新桐 (薬径 28mm)



(d) 硝ダイ (薬径 35mm),  
爆速 1,900m/s



(e) あかつき爆薬 (薬径 20mm),  
爆速 3,000m/s



(f) あかつき薬径 (爆薬 30mm),  
爆速 3,500m/s

写真 1. 3D-CP による爆速信号の例

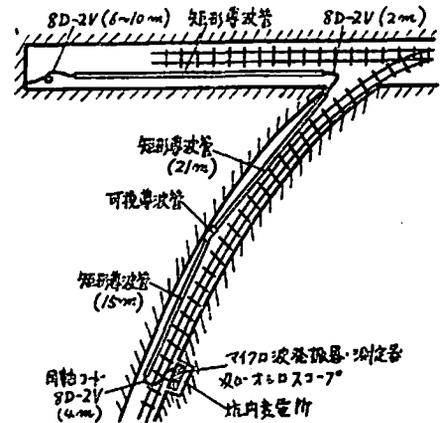
#### IV. 実験場所及びその状況

岩窟内の爆速の測定実験を行なった場所は小野田セメント重安探鉱所の風進坑道の切羽で現場の状況を図 4 (a) に示す。切羽は坑道の分岐点より約 35m の距離である。測定器を設置した坑内変電所より切羽までのマイクロ波伝送回路は導波管を主として設置し、導波管の総長 63m、高周波コード 8D-2V の合計長 12m 乃至 16m で、伝送回路の総長約 80m となっている。導波管は坑内に於ける仮設置であるので接続など十分に完全であるとは言えなかつたが、クライストロンの出力約 1watt で十分な反射信号が得られ、オシロスコープは 50mV/cm 乃至 100mV/cm のゲインでピート信号の観測が可能であつた。オシロスコープのトリガーは別に爆薬よりトリガー信号を取ることをせず、爆速信号によってトリガーせしめた。

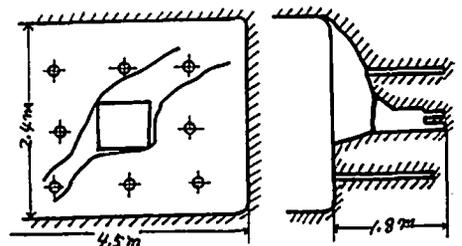
坑道の断面は幅 4.5m、高さ 2.4m で図 4 (b) に示すようにその中心付近に深さ約 180cm の心抜きを予め行ない、長装薬による払い発破を実施しこれの爆速測定を行なった。

#### V. 観測結果の実例

試験に供した爆薬はあかつき爆薬が主で、その他新桐、新D硝爆等について実験を行なった。その代表的

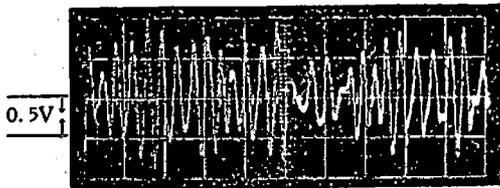


(a) 坑道内の伝送回路

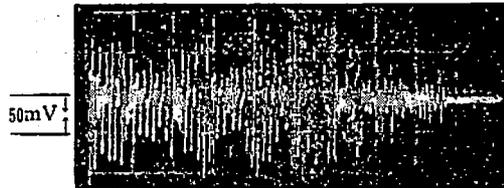


(b) 風進の状況

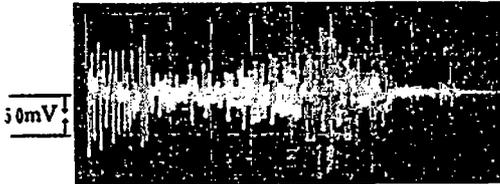
図 4 実験を行なった坑道の状況



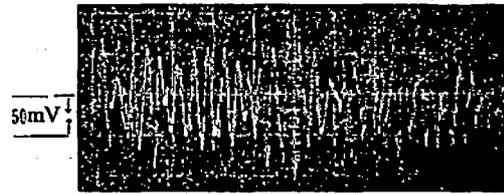
(a) 薬径 25mm 開放



(b) 薬径 25mm, ビットゲージ 38mm



(c) 薬径25mm, ビットゲージ 33mm



(d) ビットゲージ 33mm 密充填

写真2 あかつき爆薬のオシログラムの例

例を次に示す。

写真2 (a) はあかつき爆薬の薬径 25mm, 100g の薬包を 5本連結したもののオシログラムである。ゲイン 50mV/cm, 掃引は 20μs/cm である。これの爆轟距離対時間を示したものが図5 (a) である。爆薬の局所の爆速の状況を合せ示してある。

写真2 (b) はあかつき爆薬の薬径 25mm, 100g の薬包を 5本連結したものをビットゲージ 38mm の穿孔に挿入したものの爆速のオシログラムである。発破条件は穿孔長 112cm, 荷重 40cm であつた。オシログラムのゲインは 50mV/cm, 掃引は 50μs/cm である。爆轟距離対時間のプロット及び爆轟距離対局所爆速のプロットを図5 (b) に示す。距離対時間の曲線の傾斜が (a) > (b) となっていることは (b) の方の爆速が大きいことを示す。

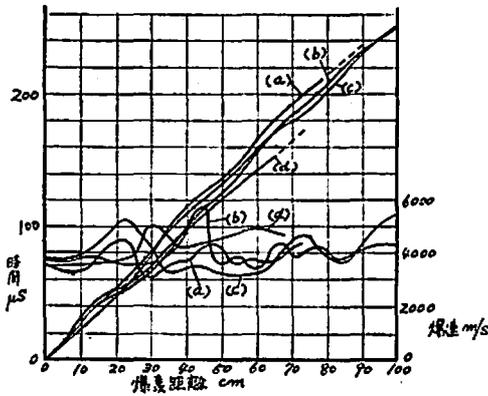


図5 あかつき爆薬の爆轟の距離と時間、距離と爆速との関係の例

表1 あかつき爆薬 (薬径 25mm) の岩内爆速, 観測値

No.	1包薬量 ×薬包数 (g)	装薬長 (cm)	ビット ゲージ (mm)	穿孔長 (cm)	装薬密度 (g/cm <sup>3</sup> )	装薬状況	荷重 (cm)	ピック・ アップ長 (cm)	観測爆速 (m/s)
1	100×5	110	33	170	0.55	疎 充 填	65	100	4,350
2	"	110	"	163	0.55	"	50	"	3,670
3	"	111	"	165	0.54	"	50	"	3,870
4	"	110	"	213	0.54	"	50	"	3,960
5	"	(106)	"	151	0.57	"	35	"	4,670
6	"	(112)	"	133	0.54	"	20	"	4,660
7	100×4	(88)	"	159	0.55	"	45	70	4,300
8	"	(63)	"	131	0.77	密 充 填	30	"	4,770
9	"	(69)	"	148	0.70	"	50	"	4,720
10	100×5	(93)	"	213	0.65	"	50	"	4,420
11	"	111	38	97	0.41	疎 充 填	30	100	4,090
12	"	(110)	"	204	0.41	"	25	"	4,230
13	"	111	"	"	"	砂上開放状態	"	"	3,620
14	"	"	"	"	"	"	"	"	3,520
15	"	"	"	"	"	"	"	"	3,700

写真 2 (c) 及び (d) はそれぞれあかつき爆薬の薬径 25mm, 100g 薬包 5本連続したものをビットゲージ 33mm の穿孔に挿入したもの、及びビットゲージ 33mm の穿孔に密充填したもののオシログラムの例である。夫々発破条件は穿孔長 213cm, 荷重 50cm で、爆轟距離時間の曲線、爆速の曲線等は図 5 (c) 及び (d) に示す如くである。

このようなあかつき爆薬の装填条件を変えて行なった実験結果の一覽表をに示す。表に於て装填密度とは爆薬装填部の穿孔容積に対する装填爆薬密度のことであつて即ち装薬量と (装薬長×穿孔断面積) の比のことである。装薬長のうち括弧を付したものは、穿孔長より填塞長を引いたもので実際の装薬長と異なる場合があると考えられる。発破荷重は長装薬と考えた場合の大凡の値である。

装薬状況のうち疎充填とは薬包をそのまま挿入したもので従つて穿孔と装薬の間に間隙のある状態のことである。密充填とは薬包の腹部に切目を入れ、填塞棒で強く圧入したものであり、従つて穿孔と爆薬の間隙は一応ないと考えたいのであるが、装填密度より推定されるように完全な密充填とは言い難いようである。

爆速は観測された爆速の平均爆速であるが、爆速に顕著な変化のあるものは、ほぼ定常に爆轟が進行していると見做される点の爆速を示した。

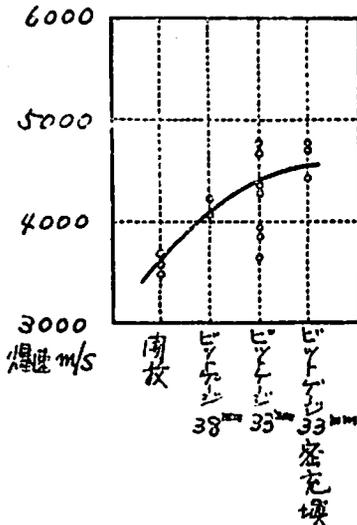


図 6 あかつき爆薬の岩層内燃速

図 6 はこれらの結果のプロットを示すものであかつき爆薬の径 25mm のものについて開放における爆速、ビットゲージ 38mm の穿孔及びビットゲージ 33mm の穿孔に装填した時の爆速、及びビットゲージ 33mm

の穿孔に密装填したものの爆速の比較を示すものである。ビットゲージ 33mm の孔に密装填したものは直径は 25mm とは言えないから、同列に並べて比較することに無理があるけれども、これらを並べて見ると confinement の増加と共に爆速が大きくなる傾向が見られる。

図 7 及び写真 3 は新 D 硝爆の例であつて、薬包径 25mm, ビットゲージ 33mm である。図の曲線より起爆後約 3,000m/s の爆速で進行して急に爆速が上昇し以後振動的に爆速が上昇下降を行ないながら、最初の爆速に漸近することが見られる。これは開放状態での観測 (例えば流し写真) では見られないことである。

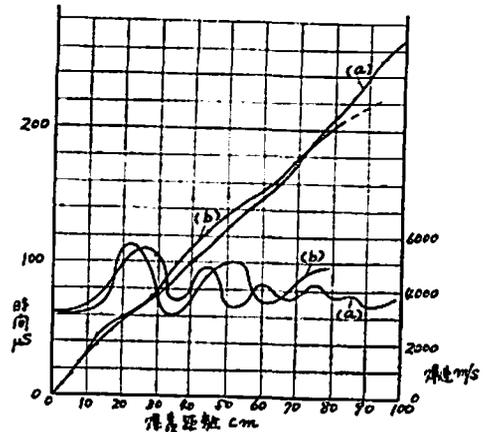


図 7 新 D 硝爆の爆轟の距離と時間、距離と爆速の関係の例

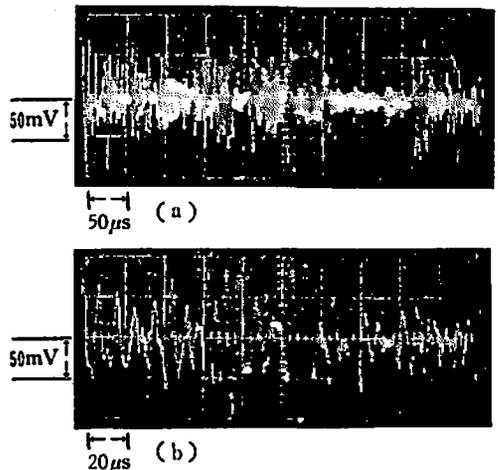


写真 3 新 D 硝爆薬 (薬径 25mm, ビットゲージ 33mm) のオシログラムの例

図 8 及び写真 4 に新 D の例で反射信号が大きい。これは爆轟が強いので破壊点の反射係数が大きいものと考えられる。薬径 25mm のものがビットゲージ 33mm の穿孔中で 5,000m/s 以上の爆速を研しており、他の

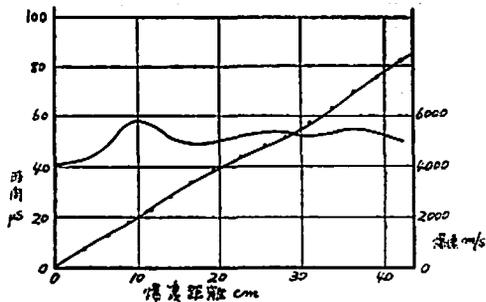


図 8 新桐の爆轟の距離と時間、距離と爆速の例

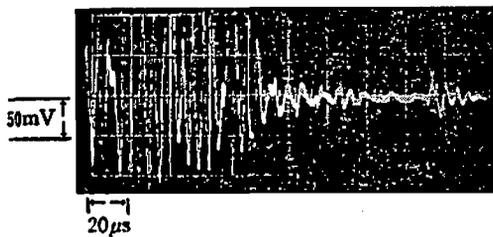


写真 4 新桐 (薬径 25mm, ビットゲージ 33mm) のオシログラムの例

例でも同様の結果を得ている。流し写真等で観測された薬径 25mm で開放の場合の爆速より大きく、これは穿孔中の爆轟であるため confinement の影響であると考えられる。

#### VI. 波形の振巾の変動及び波形の不規則について

以上のオシログラムでは見られる如く波形に振幅の変動があり、又波に不規則な形の変化があり、1 サイクルの周期の変動の異様な変化を認める点もある。

これらの変動は開放で行なった実験の爆速信号にも多少の差はあれ現われているので、岩層内の爆速のオシログラムの特徴であるとは言えないが、岩層内の実験ではこの点が甚だしくなっている。この原因は測定法に由来するものと、岩層内の爆轟現象の双方にあると考えられる。

測定法に原因があると考えられるのは、(1) 爆薬とピックアップの接触状態が岩層内では必ずしも一定であることが保証されていないことである。穿孔内に、3D-CP を設置するには、3D-CP に爆薬を粘着テープで固定して穿孔内に挿入したものと、先に 3D-CP を穿孔内におき後から爆薬を押し込んだ場合とがあるが、後者の場合には 3D-CP と爆薬との接触状態は確認されない。又前者の場合にも穿孔中に爆薬と 3D-CP とを一緒にして挿入するに際して穿孔内の荒れ等によって相当抗抵を感じる場合があったので、そのような時には爆薬と 3D-CP の接触状態が変化したものもあると考えられる。これら接触状態の不均一が原因の一つ

であったと考えられる。(2) 3D-CP の不完全短絡によるもの、発破後ずりの中に使用した 3D-CP の破壊変形したものを見出すことがあったが、それらの状況は外側の鋼管が周囲より圧迫変形された形で絶縁体のポリエチレンは芯線と共に芯となつて残っている。この様に外部導体に変形しても芯線がポリエチレンで外部導体から絶縁された状態では、マイクロ波がこの中を伝播して行くことが考えられるから、爆轟に伴う破壊(変形)は完全な反射面でない、破壊変形した部分が何かの理由で繰返し変形を受ければそれによって反射面の反射係数は変動する。破壊変形した部分が繰返し変形を受けることは、爆轟による岩石の破壊変動があるから可能性がある。これに基づいて信号波形に不規則な変動を生ずると考えられるものである。

この不完全反射を防ぐためにはピックアップとして同軸管を用いればよい。この点では 3D-CP は爆速のピックアップとしては不完全であった。このことは今回の実験を行なつてはじめて明らかとなつたので、将来このような試験を行なう時は同軸管を用いるべきであると考えている。同軸管を用いた岩層内の実験例を写真 5 に示す。

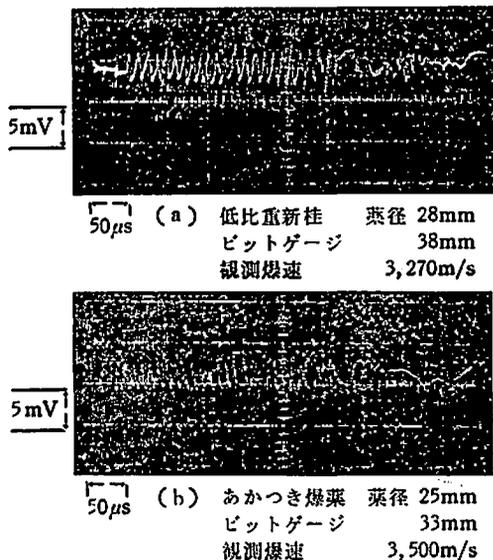


写真 5 同軸管による岩層内爆速のオシログラムの例

このオシログラムはマイクロ波伝送回路に高周波コード 20D-2V を 50m, 他に 8D-2V を 10m 程度用いた実験であったので、伝送回路の損失が非常に大きく、オシログラムのゲインは 5mV/cm で辛うじて爆速信号を捉えたものである。然し、波形、波高はほぼ一様で見易い波形となつている。同軸管では管内波長は空間波長と等しく、4,000Mc では半波長 3.75cm

となつているので、このオシログラムの波形のピッチは前述の 3D-CP による爆速信号に比べて粗くなつてゐる。数 m にも及ぶ長装薬では波の数が非常に多くなるので、管内波長の長い方が都合のよいこともある。

波形の不規則が爆轟現象に原因があると考えられるのは次の点である。岩層内の爆轟では爆轟に伴つて岩石が破壊するから、爆轟生成ガスの状態が一様でない。爆轟の進行は爆轟の波面の後の生成ガスの状態で決まると考えられるから、岩石が不規則な破壊移動を起す場合には爆轟の進行は開放状態で爆轟する場合のように一様でない事が考えられる。この事は長装薬で荷重が軽い場合には爆轟がある距離進行してから生ずる可能性がある。又、その他爆薬包のつぎ目の不連続も不均一な爆轟の原因となり得るがこのことはオシログラムには必ずしも明らかではない。

#### Ⅶ. 結 び

以上 3D-CP を爆速のピックアップとしマイクロ波によつて岩層中の爆速を測定する実験結果について述べた。3D-CP によつて観測した爆速のオシログラムは振幅と波形に不規則があるが、岩層内の穿孔中に装

填した爆薬の爆速を測定する事が出来た。前述したように、3D-CP の代りに同軸管を用いれば更によい結果を得ることも明らかになつたので、将来は同軸管を用いるべきである。

この方法は火薬及び発破の諸問題、例えば開放では完全に爆轟する爆薬が穿孔中では爆轟を中断するような現象の観測の手段として有用であろうと考えてゐる。

本実験について坑道の使用の許可を与えられ、試験のために多くの便宜を与えられた小野田セメント重安採鉱所に感謝する。

本研究を指導された九州大学工学部大野克郎教授、同安浦亀之助教授、同板倉徳也氏に感謝する。

又、本実験を担当し協力を得た金田徹、山根誠一、古谷芳雄君に感謝する。

#### 文 献

- 1) 日野、長谷川、大野、安浦、小田：工火協誌、20 卷 (1959)、2 冊、113 頁
- 2) 日野、野村長谷川：工火協誌 24 卷 (1963) 3 冊、129 頁 (昭和 36 年 4 月、昭和 36 年工業火薬協会春季大会で発表)

### Measurement of the Detonation Velocity of Industrial Explosives by Microwave

(3rd report: On the measurement of detonation velocity)  
of an explosive charge within a borehole

by Kumao Hino, Hiroshi Nomura and Seiichi Hasegawa

We have measured the detonation velocity of an explosive charged within a borehole by use of a microwave method using a coaxial metal tube, which was reported in our previous paper, and a pick-up device of another type, which was modulated from the coaxial cable. The arrangement was shown in Fig. 2.

The apparatus and the frequency of the microwave remained the same with those described in our previous paper.

We carried out our experiments in a drift of the Sigeyasu quarry of Onoda Cement Company, and the length of the transmission line of microwave from the measuring apparatus to pick-up in the borehole was 70 m and it was composed mainly of the wave

guides, which were shown in Fig. 4-(a).

The bit gage of boreholes was varied from 33mm to 48mm, the diameters of explosives were 25mm and 30mm, and the length of the charges was varied from 50cm to 100cm.

Under these conditions we have obtained the oscillographs of detonation beat signals such as shown in the photographs and from them we could calculate the detonation velocity of explosives within a borehole under condition of actual rock blasting.

Figs. 5, 7 and 8 show the relations between the distance of detonation travel and time, and the detonation velocity calculated from them.