

工業爆薬の爆速のマイクロ波による測定

(第2報 測定法の検討)

日野熊雄・野村 宏・長谷川清一*

I. 緒言

爆薬の爆轟により生ずるイオン層にマイクロ波を投射してその反射により爆速を測定することはすでに報告したが¹⁾、今回はその各種の測定法について検討を行なったので、以下その結果を報告する。

II. 実験装置

実験に使用した装置の配列は図1に示すごとくである。各装置のうち重要なものの特性は次のとおりである。

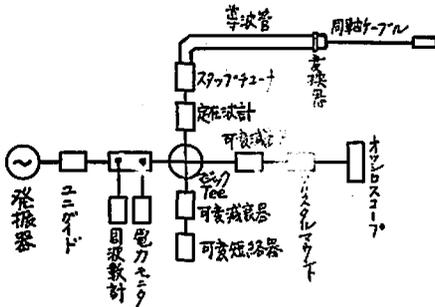


図1 マイクロ波による爆速測定装置の配列

- 発振器：発振周波数 4,000Mc, 出力 1watt
- ユニガイド：順方向損失 1.5db 以下, 逆方向損失 30db
- 空周波数計：測定精度 3×10^{-4}
- 可変減衰器：減衰量 30db
- オシロスコープ：Tektronix Type 545
- 導波管：WRJ-4型
- 同軸ケーブル：8D-2V

III. 検出波形

オシロスコープで観測されるビート波の周波数を f_1 、測定端におけるマイクロ波の波長を λ_0 とすると爆速は

$$D = f_1 \lambda_0 / 2 \quad (1)$$

で表わされることは前報告に述べたとおりである。

観測されるビート波の波形は回路の条件により変化

するが、その状態は次のとおりである。

1. 線路に固定反射のない場合

測定端よりの入力波 E_B はドップラー効果からあるいはインピーダンスの変化から求めることが出来る。

ドップラー効果による反射周波数を f_1 、測定端におけるマイクロ波の位相速度を v_p とすると、ドップラー効果を表わす式は

$$f_1 = \frac{v_p + D}{v_p - D} f_0$$

であるから、反射波の角周波数は $\omega_0 + \Delta\omega$ で

$$\begin{aligned} \omega_0 + \Delta\omega &= \omega_0 \frac{v_p + D}{v_p - D} \\ &= \omega_0 \left(1 + \frac{2D}{v_p} + \frac{2D^2}{v_p^2} + \dots \right) \end{aligned}$$

$D/v_p \ll 1$ であるから2乗以上の項を無視すれば

$$\omega_0 + \Delta\omega = \omega_0 + 2\omega_0 \frac{D}{v_p} = \omega_0 + 2\beta D$$

従つて

$$E_B = B \sin(\omega_0 t + 2\beta D t + \phi_B) \quad (2)$$

また、終末端短終の入力インピーダンスを z とすると

$$z = iz_0 \tan \beta x$$

但し、 z_0 は線路の特性インピーダンス、 x は線路の長さ、反射係数を Γ とすると

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{z - z_0}{z + z_0} = \frac{iz_0 \tan \beta x - z_0}{iz_0 \tan \beta x + z_0} \\ &= \frac{\tan^2 \beta x - 1 + i2 \tan \beta x}{1 + \tan^2 \beta x} = e^{-i2\beta x} \end{aligned}$$

爆轟前の測定端線路長を L とすると

$$x = L - Dt$$

$$\begin{aligned} E_B &= B \sin(\omega_0 t - 2\beta x) \\ &= B \sin(\omega_0 t + 2\beta Dt - 2\beta L) \end{aligned}$$

$\phi_B = -2\beta L$ とおくと (2) 式と同じ式を得る。

比較端よりの入力波 E_A は

昭和38年3月8日受理

* 日本化薬(株)厚狭作業所 山口県山陽町

$$E_A = A \sin(\omega_0 t + \phi_A) \quad (3)$$

従つて検出端の入力波 E は (1) と (2) の和で表わされる。

$$E = A \sin(\omega_0 t + \phi_A) + B \sin(\omega_0 t + 2\beta D t + \phi_B) \quad (4)$$

検波特性を理想的に 2 乗検波と仮定すると検波出力 I は

$$I = KE^2 \quad (5)$$

但し K は比例常数, (4) を (5) に代入すると,

$$\begin{aligned} I &= K \{ A \sin(\omega_0 t + \phi_A) \\ &\quad + B \sin(\omega_0 t + 2\beta D t + \phi_B) \}^2 \\ &= K \left\{ \frac{1}{2} A^2 - \frac{1}{2} A^2 \cos 2(\omega_0 t + \phi_A) \right. \\ &\quad + AB \cos(2\beta D t + \phi_B - \phi_A) \\ &\quad - AB \cos(2\omega_0 t + 2\beta D t + \phi_A + \phi_B) \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} B^2 - \frac{1}{2} B^2 \cos 2(\omega_0 t + 2\beta D t + \phi_B) \right\} \end{aligned}$$

上式中 $\omega_0 t$, $2\omega_0 t$ を含む項は検波器出力に現われないから (ω_0 , $2\omega_0$ なる角周波数に対して検波器は容量性短絡となつてゐる) 観測波形 I_0 は

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{2} K (A^2 + B^2) \\ &\quad + ABK \cos(2\beta D t + \phi_B - \phi_A) \quad (6) \end{aligned}$$

故に観測される波形は正弦波である。

2. 線路に固定反射及び多重反射がある場合

図 2 に於て

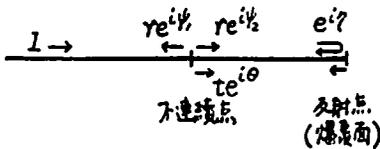


図 2 固定反射のある線路

$$\begin{aligned} E^2 &= \left(\cos \phi_3 + \frac{2r \cos \phi_1 - \cos \phi_2 - r^2 \cos \phi_4}{1 + r^2 - 2r \cos \phi_3} \right)^2 \\ &\quad + \frac{2r \{ \cos(\phi_3 - \phi_1) + \cos(\phi_3 + \phi_1) \} - \{ r^2 \cos(\phi_3 - \phi_4) - \cos(\phi_3 + \phi_4) \} - \{ \cos(\phi_2 - \phi_3) + \cos(\phi_2 + \phi_3) \}}{1 + r^2 - 2r \cos \phi_3} \\ &\quad + \left[2r^2 (1 + \cos 2\phi_1) - 2r \{ \cos(\phi_2 - \phi_1) + \cos(\phi_2 + \phi_1) \} - r^2 \{ \cos(\phi_4 - \phi_1) + \cos(\phi_4 + \phi_1) \} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} (1 + \cos 2\phi_1) + r^2 \{ \cos(\phi_2 - \phi_1) + \cos(\phi_2 + \phi_1) \} + \frac{1}{2} r^4 (1 + \cos 2\phi_4) \right] \\ &\quad \times (1 + r^2 - 2r \cos \phi_3)^{-2} \end{aligned}$$

1 : 入力波を 1 とする。

$re^{i\psi}$: 不連続的に於ける反射係数 (入力側)

$re^{i\psi_2}$: 不連続点における反射係数 (反対側)

$Te^{i\theta}$: 不連続点における透過係数

$e^{i\eta}$: 焼表面による反射係数 (不連続点, 反射点間の往復線路による位相角も含む)。

不連続点における反射係数と透過係数との間には次の関係がある。

$$r^2 + t^2 = 1$$

$$2\theta = \psi_1 + \psi_2 \pm \pi$$

よつて多重反射による不連続点の電源側に現れわたる反射波は次の如くなる。

$$\begin{aligned} &re^{i\psi_1} + t^2 e^{i(2\theta + \psi_1)} + rt^2 e^{i(2\theta + 2\psi_1)} \\ &\quad + r^2 t^2 e^{i(2\theta + 3\psi_1 + 2\psi_2)} + \dots \\ &= re^{i\psi_1} + (1 - r^2) e^{i(\psi_1 \pm \pi)} \{ e^{i(\psi_1 + \psi_2)} \\ &\quad + re^{i2(\psi_1 + \psi_2)} + r^2 e^{i3(\psi_1 + \psi_2)} + \dots \} \\ &= re^{i\psi_1} + (1 - r^2) e^{i(\psi_1 \pm \pi)} \frac{e^{i(\psi_1 + \psi_2)}}{1 - re^{i(\psi_1 + \psi_2)}} \\ &= e^{i\psi_1} \frac{r - e^{i(\psi_1 + \psi_2)}}{1 - re^{i(\psi_1 + \psi_2)}} \quad (7) \end{aligned}$$

(7) 式に時間函数 $e^{i\omega t}$ を乗じ実数部を取れば

$$\begin{aligned} &R e^{i(\omega t + \psi_1)} \frac{r - e^{i(\psi_1 + \psi_2)}}{1 - re^{i(\psi_1 + \psi_2)}} \\ &= \frac{2r \cos \phi_1 - \cos \phi_2 - r^2 \cos \phi_4}{1 + r^2 - 2r \cos \phi_3} \quad (8) \end{aligned}$$

但し

$$\phi_1 = \omega t + \psi_1, \quad \phi_2 = \omega t + \eta + \psi_1 + \psi_2$$

$$\phi_3 = \eta + \psi_2, \quad \phi_4 = \omega t - \eta + \psi_1 - \psi_2$$

比較端よりの反射波を

$$\cos(\omega t + \phi) \equiv \cos \phi_3 \quad (9)$$

検波器への入力波 E は (8) 及び (9) の和で, 検波電流は入力波の 2 乗に比例するから,

上式において $(\phi_3 + \phi_1)$, $(\phi_3 + \phi_2)$, $(\phi_2 + \phi_3)$, $(\phi_2 + \phi_1)$, $(\phi_1 + \phi_2)$, $(\phi_1 + \phi_3)$, $2\phi_3$, $2\phi_1$, $2\phi_2$ 及び $2\phi_4$ はそれ

ぞれ ωt 或いは $2\omega t$ を含む項であるから、検波特性によつて消去される。依つて

$$E^2 = 1 + \frac{2r \cos(\phi - \psi_1) - r^2 \cos(\eta + \psi_2 + \phi - \psi_1) - \cos(\eta + \psi_2 - \phi + \psi_1)}{1 + r^2 - 2r \cos(\eta + \psi_2)} \quad (10)$$

この波形はもはや正弦波ではない。以下の実験で求めたオシログラムの波形が正弦波でないのは多重反射が行なわれていることを示すものである。

IV. 実験結果

マイクロ波を爆薬面に投射する方法として次のものを採用した。即ち、(1) 円形導波管に爆薬を装填する法(円形導波管法)、(2) 表面波による法(表面波伝送法)、(3) 同軸ケーブルによる法(同軸ケーブル法)、(4) スリットの入った同軸ケーブルによる法(スリット入同軸ケーブル法)、(5) 中空同軸管による法(中空同軸管法)。これらの方法は図3のとおりである。

各種の方法による爆速測定値の一例をあげれば次のとおりである。

表1 各種測定法による測定値

形導波管法円		同軸ケーブル法	
観測ビート	爆速	観測ビート	爆速
64.1kc	3,210m/s	143kc	3,590m/s
65.0	3,250	140	3,510
68.2	3,410	149	3,740
76.0	3,800	137	3,440
68.8	3,440	—	—

スリット入同軸ケーブル法		中空同軸管法	
観測ビート	爆速	観測ビート	爆速
126kc	3,380m/s	90.9kc	3,410m/s
127	3,400	86.2	3,230
124	3,320	87.7	3,290
—	—	86.2	3,230
—	—	100	3,750

試料爆薬：新D硝爆 30mm×250mm

(但し円形導波管法では 28mm×250mm)

投射波周波数：4,000Mc

測定端におけるマイクロ波の波長

円形導波管法：9.99cm

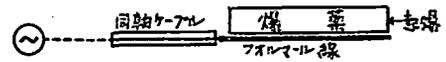
同軸ケーブル法：5.03cm

スリット入同軸ケーブル法：5.36cm

中空同軸管法：7.50cm



(1) 円形導波管法



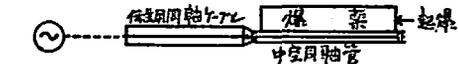
(2) 表面波伝送法



(3) 同軸ケーブル法



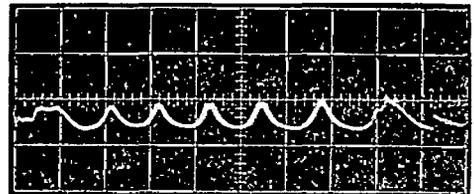
(4) スリット入同軸ケーブル法



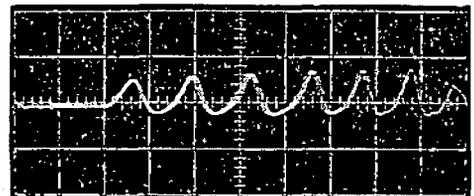
(5) 中空同軸管法

図3 爆薬によりマイクロ波反射信号を得るための方法

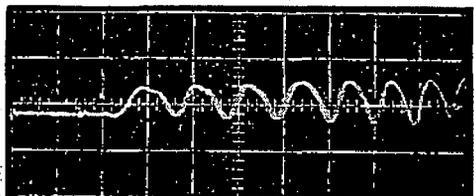
写真1 円形導波管法



新D硝爆

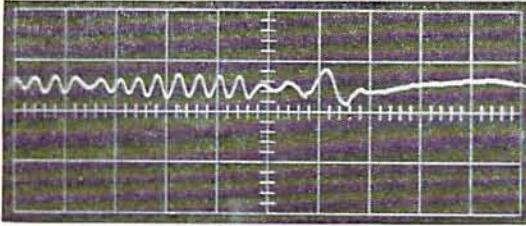


新D硝爆 錫箔使用

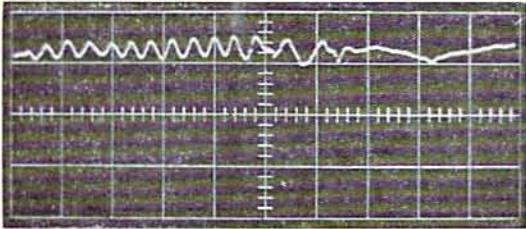


新D硝爆 錫箔使用 ピン挿入

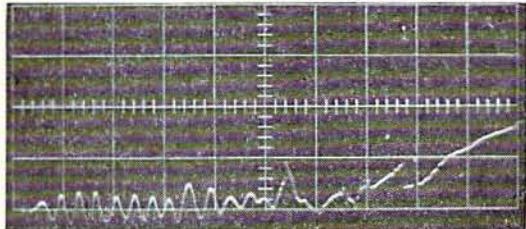
写真2 表面波伝送法



新D硝爆 32mm 90gr 3本

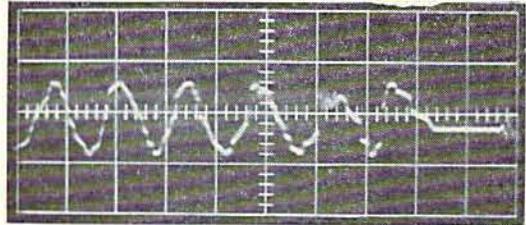


同上

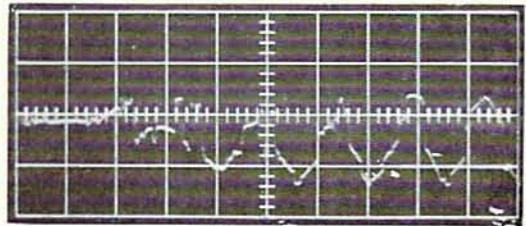


同上

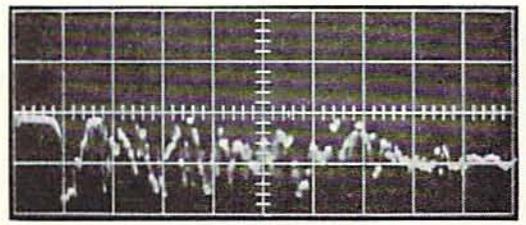
写真3 同軸ケーブル法



新D硝爆 径40mm

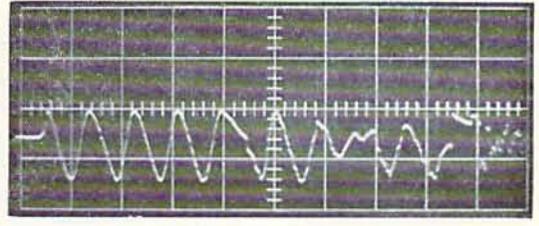


同上 径32mm

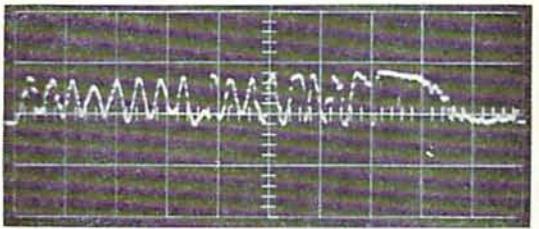


同上 径20mm

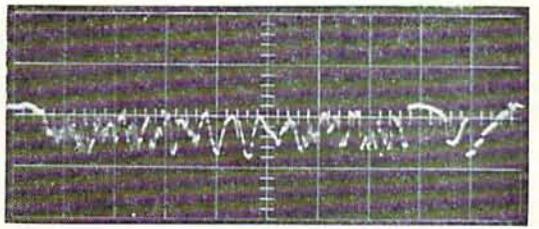
写真4 スリット入同軸ケーブル法



新D硝爆 径32mm

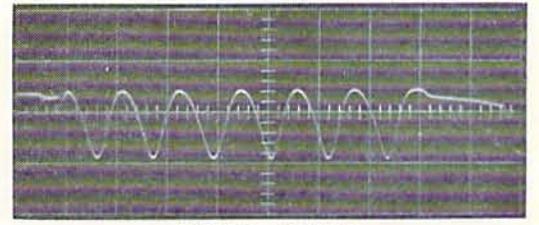


同上 径20mm

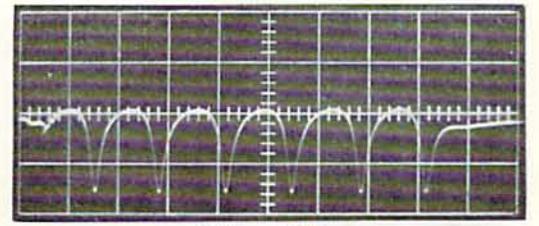


同上 径14mm

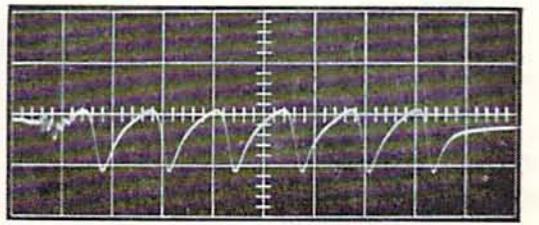
写真5 中空同軸管法



新D硝爆 径32mm



同上 径16mm



同上 径14mm

表 2. 薬径を変化させたときの測定

	40mm	32mm	20mm	16mm	14mm
同軸ケーブル法	m/s 3,610 3,530	3,400 3,230	測定不能	測定不能	
スリット入同軸ケーブル法		3,400 3,540	3,080 3,100		2,650 測定不能
中空同軸管法			3,260 3,320	2,880 2,860	2,740 2,910

試料爆薬：新D硝爆

各種の方法で得られたオッシログラムは写真1~5に示すとおりである。

V. 各種測定法の検討

1. 円形導波管法

マイクロ波が円形導波管内を伝播し得る最低の周波数(遮断周波数) f_c は

$$f_c = \frac{c}{3.413rn}$$

C: 光速度

r: 導波管の半径

n: 爆薬の屈折率

基本モードの次のモードは次式の f_c' で起る。

$$f_c' = \frac{c}{2.613rn}$$

従つて基本モードで実験を行なうためには、

$$\frac{c}{3.413rn} \leq f \leq \frac{c}{2.613rn}$$

即ち

$$\frac{c}{3.413fn} \leq r \leq \frac{c}{2.613fn}$$

本実験では 4,000Mc のマイクロ波を使用したので新D硝爆 ($n=1.74$) では

$$1.31\text{cm} \leq r \leq 1.71\text{cm}$$

爆速は

$$D = \lambda_b \lambda_g / 2$$

λ_g は測定端におけるマイクロ波の波長で

$$\lambda_g = \frac{\lambda/n}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda/n}{\lambda_c}\right)^2}}$$

λ : 空間波長

λ_c : 遮断波長 = 3.413r

(1) 円形導波管法では写真1で示すように円滑なビート波形を視測することが出来る。従つて正確な f_b 値を得ることが出来る。

(2) λ_g は n 上式に示すように屈折率 n の函数であるから、導波管法では n を測定する必要がある。この測定については前報告に述べたが、正確な値を得ることは比較的困難である。また n は装填比重により変化するから、装填比重を十分均一にする必要がある。

(3) 上記の理由で円形導波管法では爆速の正確な測定は比較困難である。

また基本モード以外のモードで実験を行なうことは困難であるから、試料爆薬の形状に制限を受ける欠点がある。

2. 表面波伝送法

(1) 表面波伝送法では導波管法と同様円滑なビート波形を視測することが出来、正確な f_b 値を得ることが出来る。

(2) この方法では、 λ_g は爆薬の屈折率、形状及び爆薬とフォルマール線の位置の関係により決定されるが、これは理論的にも実験的にもその決定が困難である。本報告では λ_g の検討は省略する。

(3) 上記のとおりこの方法では f_b を正確に視測出来るが λ_g を正確に知ることが困難であるから、正確な爆速値を得がたい欠点がある。

3. 同軸ケーブル法

(1) 同軸ケーブル法では測定端におけるマイクロ波の波長 λ_g が正確に一定の値を示すから、この点は導波管法、表面波法より有利である。

(2) 然しこの方法では、同軸ケーブルを爆薬面で破壊し短絡を行なうので、内外導体の間にある絶縁体が充分破壊されないため、得られる信号は写真3に示すように不規則である。従つて正確な f_b 値を得ることは出来ず、得られる爆速値も正確とはいえない。

(3) さらに薬径が小さくなると破壊が不充分となり測定不能となる。

4. スリット入同軸ケーブル法

(1) 同軸ケーブル法では爆薬波面で絶縁体を破壊し短絡を行なうことが困難であるから、絶縁体にスリットを入れ短絡じやすくしたのがこの方法である。

(2) この方法は同軸ケーブル法に比較してビート波を得易いが、その波形はやはり不規則であり、薬径が小さくなるとビート波は得られない。

(3) 導波管法、表面波法に比べて正確な λ_g 値が

得られる。(但し厳密には同軸ケーブル法に比べて波長短縮率の均一性を欠くおそれがある)。

(4) この方法は同軸ケーブル法に比較して若干有利であるが、依然同様の欠陥を持つ。

5. 中空同軸管法

(1) 内外導体の間を中空とし短絡を容易にすることによつて同軸ケーブル法、スリット入同軸ケーブル法の欠陥を除いたのがこの方法である。

(2) この方法では薬径が小さい場合にも常に円滑なビート波形を得ることが出来従つて正確な f_0 値を知ることが出来る。

(3) λ_g は常に一定値を示す。

(4) 従つてこの方法によれば上記各種方法における欠点はあられわれず、正確な爆速値を得ることが出来る。

VI. マイクロ波法と流し写真法による測定値の比較

同一試料爆薬について同時にマイクロ波法(中空同軸管法)と流し写真法によつて爆速を測定しその値を比較した結果は表3及び図4に示す如くである。

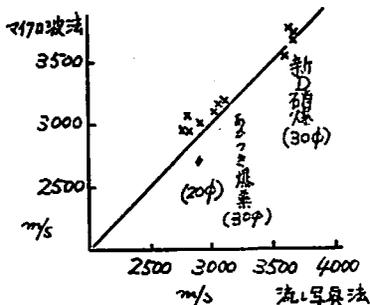


図4 マイクロ波法(中空同軸管法)と流し写真法による爆速測定値の比較

表及び図に示す如くマイクロ波法と流し写真法による爆速測定値は比較的よく一致する。ただ試製爆薬(あかつき爆薬)で特に薬径が小さくなつた場合は、

表 3

試料	新D硝薬 30 mm×250mm		試製爆薬 30 mm×250mm		試製爆薬 25 mm×230mm	
	マイクロ波法	流し写真法	マイクロ波法	流し写真法	マイクロ波法	流し写真法
測定値	3,710	3,660	3,210	3,100	2,950	2,760
	3,510	3,590	3,150	3,050	2,930	2,810
	3,710	3,620	3,100	3,020	3,080	2,790
m/s	3,660	3,660	—	—	3,020	2,900

マイクロ波法による測定値がやや大となつた。この原因については、統計的な実験誤差によるものか或いは爆轟現象の本質的な性質によるものか不明であり、今後の検討が必要であると考えらる。

VII. 結 論

マイクロ波によつて爆薬の爆速を測定するについての各種測定法を検討した結果、中空同軸管を使用することによつて迅速に且つ正確に測定出来ることが明らかとなつた。この方法によれば、爆速の平均値だけでなく、その変化も知ることが出来、さらに開放状態・密閉状態(特に岩層内の)における爆速を測定することが出来る。

この方法による測定値と流し写真法による測定値を比較したところ、両者がよく一致することが明らかとなつた。

本研究の実施には九州大学工学部大野克郎教授、同安浦亀之助助教授、同坂倉徳也氏の指導と援助を頂いた。ここに附記して感謝の意を表す。

又、本実験を担当し協力を得た西村満登、古谷芳雄の両君に感謝する。

文 献

- 1) 日野, 長谷川, 大野, 安浦, 小田, 工火協誌 20巻(1959), 2冊112頁
(昭和35年4月24日, 昭 35年工業火薬協会春季大会で発表)

Measurement of the Detonation Velocity of Industrial Explosives by Microwave

(2nd report: On the devices of picking up detonation signal)

by Kumao Hino, Hiroshi Nomura, and Seiichi Hasegawa

In a previous paper, we reported the principle and the experimental method of measuring the detonation velocity of industrial explosives by microwave.

In the present paper, we discussed the

several methods to pick up the detonation signal by microwave.

The arrangement of the apparatus was shown in Fig. 1 and the frequency of microwave was 4000 Mc.

We tried the following methods for pick-up.

- (1) Filling an explosive in a circular wave guide (circular wave guide method, Fig. 3-1).
- (2) Launching microwave in an explosive by a surface wave transmission line placed along it (surface wave transmission line method, Fig. 3-2).
- (3) Placing a coaxial cable along an explosive (coaxial cable method, Fig. 3-3).
- (4) An insulator of a coaxial cable was slitted in the above method (slitted coaxial cable method, Fig. 3-4).
- (5) Placing a coaxial metal tube along

an explosive (coaxial tube method, Fig. 3-5).

The examples of oscillographs of signal beats picked up by methods described above were shown in Photographs 1, 2, 3, 4 and 5.

We have found the coaxial tube method was the most simple one and was applicable to measure the detonation velocity of an explosive because we could calculate the wave length of microwave in the tube and measure the frequency of signal beats from the oscillogram accurately in the method, and the method could be applied to any diameter of an explosive.

雷管底上げの効果はあるか

井 田 一 夫*

I. 緒 言

雷管管体には平底型と底上型とがあり、我が国の雷管はすべて底上型であるが、欧米諸国の雷管には表 1 の如く種々の型があり¹⁾、平底型も相当多い。我が国に於ても平底型を検討する段階にあると思われるので、雷管底上げの効果について述べ参考に供したい。

一般に底上げがあると所謂ノイマン効果によつて雷管の威力が一点に集中するといわれ²⁾、底上型の方が雷管が爆発したときの管体の破片速度が大きいという報告もある³⁾。

平底型雷管の長所としては

- ① 薬高が低くなるので管長も短くなる
- ② 装薬を填圧するとき臼の摩耗が少ない
- ③ 管底にマークなどを刻印することが出来る(管体製作の際)

などが考えられるが、平底型は底上型に比べて威力(起爆力)が弱くなるとすれば、それは雷管にとっては致命的な欠点である。従つて、底上型が有利か平底型が有利かは一般に考えられているように底上げによつて雷管の威力が強くなるかどうかによつて判断され

るべきであると考えるので、以下主としてこの点について述べる。

雷管威力に及ぼす底上げの影響を論じた報告を概括すると、先ず坂巻氏等の実験⁴⁾では、雷管の爆発による(爆薬は使用せず雷管のみの爆発)底方向の穿孔力は底上げが深ければ深いほど明らかに大きくなり、山田氏等の報告⁵⁾でも、底上げの内傾頂角が 60 度までの範囲では底上げの深さが深いほど鉛板孔径は大きいといわれる。即ち雷管のみの試験では底上げによつて雷管底方向の穿孔力は大きくなると考えられる。

然しながら、雷管と爆薬とを組み合わせる場合に、底上げによつて雷管の起爆力が大きくなるかどうかは疑問の余地がある。即ち前記坂巻氏等の報告によれば、吸湿硝煙ヘス試験に於ける圧潰値が底上げの有無によつて変わらず、雷管と爆薬との相互列爆距離も変わらないという。広瀬氏等の報告⁶⁾でもハイド試験による鈍性爆薬の起爆力は底上げの有無によつて変わらないとの事である。

結局従来の報告を総合すれば、底上げによつて雷管の威力が強くなるかどうかは明確な結論を出すことは困難である。

昭和38年2月27日受理

* 日本北研株式会社 東京都千代田区丸の内