

イオンギャップによる爆速測定

田 中 一 三*

1. 緒 言

爆速の測定法には、従来ドートリッシュ法、流し写真法があり、最近では電子工学の発達に伴って、転像管を用いるもの¹⁾、マイクロウェーブを利用するもの²⁾等も開発されてきた。爆速測定の原理には、ドートリッシュ法およびここに述べるイオンギャップ法のように、爆薬中に爆轟波の到来を検知する素子を配して、それからくる到来信号の時間差を測定する型（このとき得られる爆速は素子間の平均値となる）と、前述のドートリッシュ法以外の三者のように、光学的あるいは電気的に、爆速の連続測定を行なう型とがある。前者は測定値が不連続になる代りに、素子の配置さへ可能であれば、測定される爆薬の量、装薬条件には制限を受けず、いわば現場的であるが、後者は測定系の性質上、爆薬量や装薬条件に制限があり、どちらかといえば研究的である。イオンギャップ法の長所は、爆轟波の検知素子として、直径1mm以下のイオンギャップを用いる点で、測定精度が高いこと、および測定点をいくつでも増すことができる点で、連続測定に似た性格を持っていることである。

イオンギャップによる爆速測定は、原理的には時間測定である。イオンギャップの構造は後に述べるように、先端で絶縁された一種の電極で、これが爆轟波中に入るとイオン化した爆発ガスを通して急激に導通状態になる。従って爆薬中に挿入したイオンギャップを電気的なスイッチとみなし、これが閉じたときに信号を出すような回路（以下信号回路と呼ぶ）を作つて、出てくる信号をオシロスコープで観察すれば、爆速測定が可能になる。この場合、イオンギャップと信号回路の組をいくつも作るにより、測定点を数多くとることができる。

実はこの種の原理による爆速測定は、イオンギャップ以外のものを使つても考えられる。例えば爆薬中に細い導線を通し、これの爆轟波による切断をスイッチとするもの等である。しかしこれは本報で後の実験が明らかにするように、導線の切断には若干の時間遅れとばらつきがあつて、高い精度を期待し難い。爆轟波

の検知素子は、当然測定のために破壊されるので、何よりも安価なことが望まれる。その点でイオンギャップは、安価な上に優れた性能を持ったものと言える。

本研究では信号パルスの記録装置としては、単挿引ブラウン管オシロスコープを用いた。これは基礎実験の性格上、信号パルスの波形を観測する必要からである。単に爆速測定の目的からは、パルス間隔だけがわかればよく、例えば円形挿引させたオシロスコープのビームを、信号パルスで輝度変調する方式、パルス間隔を直接エレクトロニック・カウンターで読み取る方式、などが考えられる。

この報告では、はじめに爆速測定用信号回路の設計ならびに動作特性の解析を行ない、ついで爆薬中に挿入されたイオンギャップのスイッチ作用、およびそれに伴う現象を実験的に解明し、最後に爆速測定の实例を挙げた。内容の一部は、先に本誌に寄書として発表したことがあるが³⁾ここに基礎的な検討を加えて報文にまとめあげた。

2. 信号回路

爆速測定用の信号回路とは、イオンギャップによるスイッチが導通状態になつたときに信号を出すような回路であるが、その設計には二三の条件がある。まず出力信号は、イオンギャップの数だけつきつぎにオシロスコープに送り込まれるので、個々の信号ははつきり区別されること、すなわち継続時間の短いパルスであることが望ましい。さらにイオンギャップの形成するスイッチは、爆轟波の到来で一度は導通状態になるが、後の実験で明らかにするように、数 μsec 後にはふたたび遮断されるし、その後も配線の乱れによつて、導通と遮断をくり返す可能性がある。そのため信号回路としては、最初の導通時のみ作動して、以後の経過には無関係であることが必要である。そのほか回路はできるだけ簡単でかつ頑丈なこと、爆薬を対象とする点から、回路の電圧はなるべく低いこと等が要求される。

以上の条件の中で最も面倒なのは、イオンギャップの最初の導通時のみに作動するという点である。ふつうこの種の回路としては、サイラトロンを用いるか、真空管やトランジスターのフリップ・フロップ形式が

昭和39年1月14日受理

* 東京工業試験所第7部 平塚市新宿

考えられるが、測定点を多くとりたいときには回路が非常に複雑になる。つぎに述べる信号回路は、コンデンサーと抵抗の組み合わせだけで、この条件をたくみに実現したものである。

Fig. 1 は 1 個の信号回路をわかりやすく示したものである。図中のスイッチ I は実際はイオンギャップにあたり、その直列抵抗は、実在の抵抗 R_1 のほかに爆轟波中のイオンギャップ間に現われる抵抗を含んでいる。爆轟波の到達する前はスイッチ I は開いており、コンデンサー C_1 は、高抵抗 R_0 を通して電池の電圧 E_0 に充電されている。爆轟波の到来によってスイッチ I が閉じると、 C_1 の電荷は低抵抗 R_1 を通して急激に放電し、その電位変化がコンデンサー C_2 を通って出力端子 OP にパルスとして観測される。ここで必要なことは、イオンギャップのスイッチ I の閉じている時間が数 μsec の短時間であるため、この間にコンデンサーが完全に放電しつくすよう回路定数を選ぶことである。これは時定数 $\tau_1 = R_1 C_1$ を小さくすることである。また a 点の電位は、この放電によって一たんゼロになると、その後は $\tau_0 = R_0(C_1 + C_2)$ の時定数をもつて上昇する。ふつうの爆速測定では、オシロスコープでの現象測定時間は $20\mu\text{sec}$ 以下であるから、時定数 τ_0 はこの数倍でいどに大きくとる。こうすれば一たん放電したコンデンサーの電位はなかなか上らないので、その後イオンギャップの導通に変化が起きても、測定時間中は目ざわりなパルスを出すおそれはない。

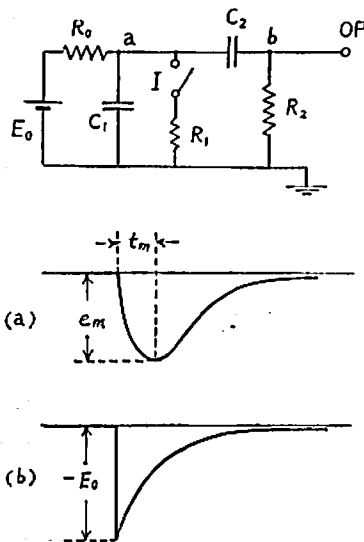


Fig. 1 Signal forming circuit. Switch I is replaced by an ion gap.
 (a) Pulse derived by the signal former.
 (b) Ultimate pulse in a case of $t_m=0$.

図の OP 端子から出るパルス波形、すなわち b 点の電位変化は、スイッチが入った瞬間を $t=0$ として、つぎの式で表わされる。ただし実際回路の条件から、 $R_0 \gg R_1$, $C_1 \gg C_2$ とする。

$$e_b(t) = -\frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} (e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1}) E_0 \quad (1)$$

ここに

$$\tau_1 = R_1 C_1, \quad \tau_2 = R_2 C_2$$

である。

(1) 式の波形は、Fig. 1 (a) のような負のパルスで、 $e_b(t)$ が極小になる時刻 t_m およびそのときの電位 e_m は、次式で表わされる。

$$t_m = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \ln \frac{\tau_2}{\tau_1}$$

$$e_m = -\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1}} E_0$$

上式を変形すると

$$e_m = -e^{-t_m/\tau_1} E_0$$

となるから、 $t_m=0$ の極限では、Fig. 1 (b) のような急峻なパルス波形が得られる。この $t_m=0$ の条件は、 $R_1=0$ によって実現される。後に 3.2 で示すように、イオンギャップ間の抵抗は爆轟波の到達直後は事実上ゼロになるので、この条件は簡単に満たされる。単に急峻なパルスを得るだけなら、Fig. 1 のコンデンサー C_1 を除いてしまってもよい。しかし後に 4 で述べるように、実際のパルスは図のような理想的な形にはならない。

実際に使った回路と測定時における配置を Fig. 2 に示す。ここで点線内の部分はそれぞれ Fig. 1 の信号回路にあたり、これはイオンギャップの数だけ設けられる。ただし R_1 と R_2 は、これらの信号回路に共

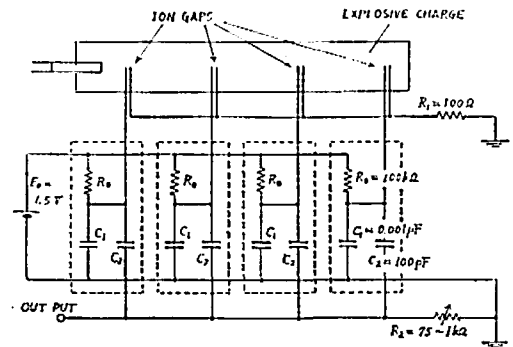


Fig. 2 Assembled signal formers for multi-points measurement.

通になっている。図中 R_2 を可変にしたのは、測定の対象に伴ってパルスの形を変えられるようにとの意図である。例えばイオンギャップ間の間隔が小さいときは、 R_2 を小さくしてパルス幅を狭くし、間隔の大きいときは、 R_2 も大きくしてパルス幅を拡げるようにする。この回路の使用例は4で説明する。

3. 基礎実験

3.1 試料と装置

3.1.1 イオンギャップ

実験に使用したイオンギャップは、直径 0.3mm のエナメル被覆銅線 Fig. 3 をのようにより合わせ、先端をベンチで切断したものである。先端部分は微小な

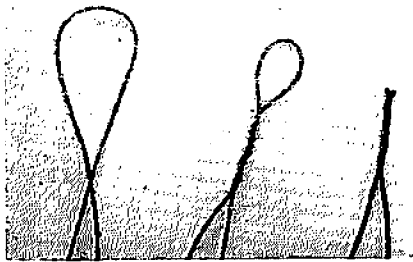


Fig. 3 Preparation of an ion gap. A thin enameled wire is bent, twisted and cut off at the tip (left to right).

電極となつて、これが爆薬に挿入される。イオンギャップの動作を完全にするためには、未反応爆薬は絶縁体であることが望ましく、電気伝導性の爆薬に使用するときには、イオンギャップの先端を TNT など被覆する。しかし通常のダイナマイトいどの低い伝導性は問題にならないので、以下の実験では TNT 被覆は行なっていない。

3.1.2 爆薬

使用した導爆線は第二種ベンスリット導爆線（日本カーリット製）である。また爆薬は、新2号硝安爆薬（30mmφ, 80g, 比重 1.0, 旭化成製）および新桐ダイナマイト（25mmφ, 75g, 比重 1.45, 日本化薬製）で、特に断つたもの以外は市販の紙巻のまま使用している。起爆はすべて6号工業雷管による。電気雷管を用いないのは、オシロスコープのトリガー動作を安定にするためである。

3.1.3 オシロスコープ

測定用オシロスコープは、Tektronix 517A である。このオシロスコープは加速電圧が高いので高速現象の測定に適しており、単掃引専用である。爆発点はオシロスコープから約 30m 離れたところの深さ約 80cm の壁孔の中で、測定信号は近くの地表に置かれた回路から、特性インピーダンス 75Ω の同軸ケ

ーブル(5C-2V)でオシロスコープに運ばれる。

3.1.4 トリガー回路

オシロスコープの掃引トリガーは、爆薬中の測定点に先行して別のイオンギャップを挿入し、それをスイッチとしてトリガーパルスを発生させる方式をとつた。トリガー用信号回路には、Fig. 1 の回路がそのまま使用できる（従つてイオンギャップを多数用いる爆速測定では、最初の信号パルスをトリガー用に流用することもできる）。その際トリガーの時刻を正確にするには、回路の R_2 は 75Ω とし、同軸ケーブルとの整合をとる必要がある。こうすると回路の電源に数ボルトいどの電池を用いたのでは、出力信号パルスが低いため、オシロスコープのトリガー端子に導く前に、一度増幅器を通すことになる。

信号回路と増幅器の組み合わせは、トリガー回路として簡単かつ十分実用的なものである。この実験でも初期にはこの方式をとつていたが、附近に強力な電波源があると回路からイオンギャップまでの導線がアンテナとなつて、捕えられた電波がそのまま増幅されるので不測のトリガーを起こすことがある。従つて後には、Fig. 4 の回路を使用した。この回路は外来電波に対して安定であり、また Tektronix 517A に関しては増幅器なしで作動する。図で点線内の部分はやはり Fig. 1 の信号回路であるが、ここで発生したパルスにより単安定マルチバイブレータを働かせる。

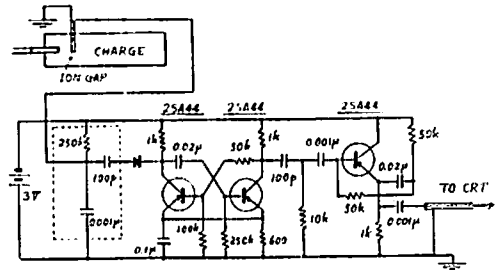


Fig. 4 Circuit for triggering. A signal forming circuit (shown inside the broken line) drives the flip-flop.

最終段は整合用のエミッタ・フォロワーである。これでイオンギャップ間の抵抗値が $5k\Omega$ 以下になると、出力側に $0.5V$ の負のパルスを生ずる。マルチバイブレータにより、この後 $300\mu\text{sec}$ たつてもう一度正のパルスを発生するが、もちろん前者をトリガーパルスとする。

3.1.4 オシログラムの撮影

オシロスコープのブラウン管上に得られた信号波形は、別のカメラで撮影する。起爆に導火線と工業雷管を用いるのでオシロスコープは暗室内に置き、導

火線の燃焼秒時からはかつて点爆のり〜10sec 前にカメラのシャッターを開き、開放のまま撮影する。

3.2 イオンギャップ間の抵抗変化

まずイオンギャップのスイッチとしての作用、すなわち爆轟波到来時の、イオンギャップ間の電気抵抗の変化を測定した。測定に用いた回路を Fig. 5 に示す。ここでオツシロスコープへの出力電圧は、イオンギャップが絶縁されているときはゼロであるが、導通状態になると急激に上昇する。いまイオンギャップ間の抵抗を r 、回路の電池電圧を E_0 、それに対してオツシログラムに現われた電圧を E とすれば、 r (単位は Ω) は

$$r = \frac{75}{2} \left(\frac{E_0}{E} - 1 \right)$$

で求められる。

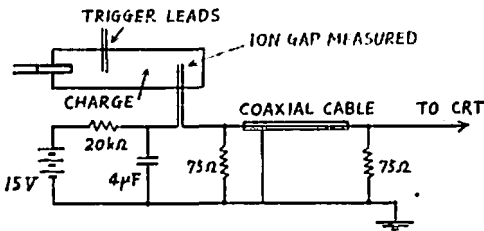


Fig. 5 Measurement of electrical conduction of the ion gap during detonation wave passage.

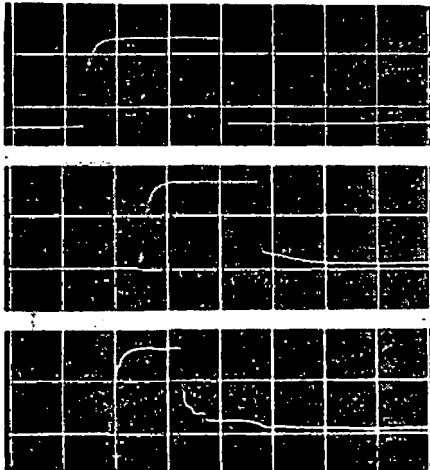


Fig. 6 Oscillograms showing electrical conduction appeared on the ion gaps (by means of Fig. 5). Voltage scale: 10V/div., time scale: 2μsec/div. Upper: PETN fuse. Middle: Ammon explosive (Shoan bakuyaku). Lower: Ammon gelatine dynamite (Shinkiri).

二三の爆薬につき、こうして得られたオツシログラムを Fig. 6 に示した。このときトリガー用イオンギャップは、いずれも測定点の20mm 前方に置かれている。これから明らかなように、イオンギャップは爆轟波に到来によつて直ちに導通状態に入り、これがしばらく持続したあとでまたもとの絶縁状態にもどる。このことは爆薬の種類にはよらない。しかし導通の持続時間は、同種の爆薬についてもあるていどのばらつきがあり、導爆線と硝安爆薬では 5~9μsec、新荷ダイナマイトで 3~5μsec であった。また導通時の抵抗値を (2) 式から計算すると、いずれもゼロ (少くとも 15Ω に比して) となる。

爆轟波中でのイオンギャップ間の抵抗が、単に先端の電極部分のみできまるとすると、このような完全な導通状態は説明しにくい。事實は爆轟波の到来によつて、イオンギャップ全体のエナメル被覆がはがれてしまうことで説明される。このことはつぎの実験からたしかめられた。

イオンギャップを爆薬に挿入というより貫通させて先端を向こう側へ露出させてしまう。こうすると電極としての機能は失つてしまうはずであるが、得られたオツシログラムは Fig. 6 と全く同じであった。これはイオンギャップ間の導通が、先端の電極部分のみによるものではないことを明らかにしている。

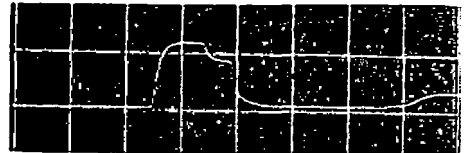
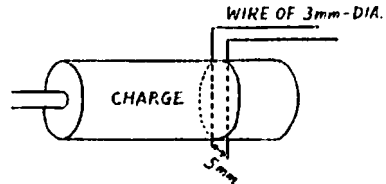


Fig. 7 Measurement of electrical conductivity of explosion gas between a pair of electrodes made by two parallel wires. Oscillogram shown above is obtained by same circuit as Fig. 5 providing the electrode above in the place of ion gap (Ammon gelatine bynamite in 2cm diameter charge, voltage scale: 10V/div., time scale: 2μs/div.)

また Fig. 7 のように、イオンギャップの代りに爆薬中に 2本の平行導線を張つた場合は、同図下のよう

な波形が得られる。このとき導線にエナメル線を使つた実験では、エナメル被覆をはがしてもはがさなくても結果に変わりなく、やはり爆轟波による被覆の剥脱が証明される。(Fig. 7 は爆轟ガスの電気伝導度を求める実験で、図のオツシログラムは新桐ダイナマイトに0.3mm エナメル線を5mm 間隔に挿入し、前述のFig. 5 と同じ形の回路で測定したものである。爆轟ガスの電気伝導度については別報にゆずる。)

なおイオンギャップの導通時間は、測定のために多少変化することから、爆轟波固有の性質ではないことが予想される。これはイオンギャップの導線が、爆轟波の機械的衝撃で切断し、導通を遮断するものであつて、その点をつぎに検討した。

3.3 爆轟波による導線の切断

爆薬中に配置された素子から引き出される導線は、爆轟波の通過後どのくらい経つて切断するものであろうか。この問題は爆速測定に限らず、爆発現象の電気的測定には、得られる結果の信頼性にかかわる重要なものである。

Fig. 8 は導爆線中に2本の導線を張り、その切断時間をそれぞれ測定した回路である。図のように導線が2本ともつながっているとき、オツシロスコープにかかる電圧を E とすれば、1本が切れたあとではこれが $E/2$ に下り、2本とも切れたあとではゼロになる。この回路を用いて0.3mm 銅線について得られたオツシログラムを同図下に示した。

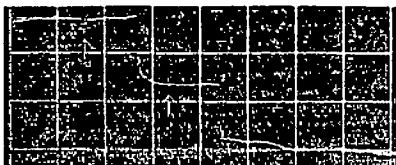
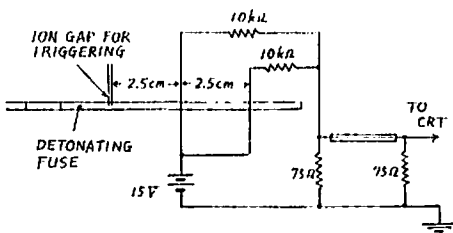


Fig. 8 Measurement of breakdown time lags of wires passed through the detonating fuse. Arrival of detonation front at each wire gives rise slight vibration to the beam trace on oscillogram (shown by arrows). Time scale: $2\mu\text{sec}/\text{div}$.

この場合導線の切断時間は、導線が爆轟波にさらされてから切断するまでの時間であるから、まず第1、第2の各導線の位置に爆轟波の到達した時刻を知らなければならない。これはトリガー用イオンギャップから各導線までの距離を、爆速で割つて決めることになるが、Fig. 8 のオツシログラムを見ると、ちょうどその時刻にあたる点で、測定電圧が微小振動をしていることがわかる(矢印で示した)。これは爆轟ガスの電気伝導性によつて、回路定数が一時的に変化するために起こると思われる(導線を爆薬の外に巻いたときはほとんど認められない)。従つてこれから、切断時間がかなり正確に決められる。Table 1 は、このようにして導爆線に挿入された各種導線の切断時間を測定した結果である。測定は数回行なつたが、現象の性質上かなりばらつきが認められた。

Table 1 The breakdown time lags of wires placed in the PETN detonating fuse.

Situation	Wire		Breakdown time lag*
	Diameter	Material	
Passed through the fuse	0.1mm	Copper	0.5~0.7 μsec
Ditto	0.3	Copper	2.2~2.3
Ditto	0.7	Copper	6.2~7.3
Ditto	0.7	Iron	2.7~ ∞ **
Bound around the fuse	0.3	Copper	4.5~5.0

* Although the same measurement was repeated twice or more, slight deviations were seen.
** Breakdown did not occur.

工業爆薬についての結果はに Table 2 示す。ここでは導線の切断が導爆線ほどシャープに行なわれないので、測定は一回ずつにとめた。従つて精度もそれだけ低く見積らなければならない。

Table 1, 2 の結果は、導線の細いものはほど切断時間は短くなるという、ふつうの常識と合致している。また爆速が大きく、薬径の細い爆薬ほど、切断時間は短くなる傾向がある。なお3.2でイオンギャップの導通持続時間のことを述べたが、これはイオンギャップが0.3mm 銅線を2本より合わせたものであることを考えると、これらの表から、ほぼ切断時間に見合うのが明らかである。

爆薬内部に置かれた物体は、爆薬と外部との境界面で、最も大きな変形を受けることが知られている⁹⁾。従つて爆薬中に挿入された導線の切断箇所も、爆薬の表面近くであろうと推察される。そこで Fig. 9 のように、導線を折り曲げて爆薬からの出口を故意に変え

Table 2 The breakdown time lags of wires passed through explosive charges.

Charge		Wire (copper) Diameter	Breakdown time lag*
Explosive	Cartridge		
Shoan bakuyaku†	Paper	0.3mm	3.5μsec
Ditto	Ditto	0.7	6
Ditto	Polyvinyl chloride**	0.1	4
Ditto	Ditto	0.3	5.8
Ditto	Ditto	0.7	12
Shinkiri‡	Paper	0.1	2
Ditto	Ditto	0.3	3
Ditto	Ditto	0.7	3.5
Ditto	Ditto	1.7	not broken

* Approximate value.

**Tube, 5mm thick and 35mm in diameter.

† Ammon explosive

‡ Ammon gelatine dynamite.

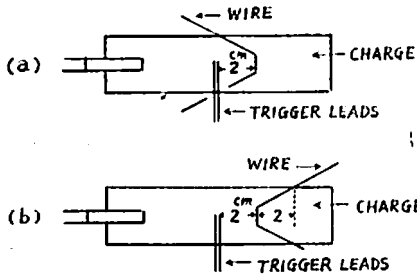


Fig. 9 Detection of the place where the breakdown of wire occurs.

Results derived from different wire situation reveal that the breakdown takes place near the surface of charge.

たものについて、切断のはじまる時刻をしらべてみた。その結果、新桐ダイナマイトに 0.3mm の銅線を使ったとき、(a) の状態では抽引開始後 1μsec、(b) では 10μsec 後に切断がはじまり、導線の引き出し位置が、切断時間に大きく影響することがわかった。

4. 爆速測定の実例

以上の実験結果から、イオンギャップ間の抵抗変化およびそれに伴う現象の説明がなされた。Fig. 2 に示した爆速測定用信号回路は、これらの基礎実験を基礎にして設計されたものである。つぎにその使用例を述べる。

Fig. 2 の信号回路は、イオンギャップのスイッチが閉じたとき、理論上は (1) 式に従って Fig. 1 の

ようなパルスを放出するはずである。ところが実際にこの回路による爆速測定では、住々にして振動を含んだパルスが得られる。爆速測定の目的だけから言えば爆轟波の到達時刻はパルスの立上り点さえわかればよく、振動の有無は問題にならない。しかしここで、一応その原因と対策を述べておく。

パルスに含まれる振動には、Mc 以上の高周波のものと、Mc 以下の低周波のものがある。このうち高周波振動は、信号が同軸ケーブル中で反射するために起こるもので、信号回路の終端抵抗 R_2 が、同軸ケーブルの特性インピーダンス 75Ω に整合していないときに生ずる。Fig. 2 で R_2 の可変抵抗は、パルスの形を変えるためのものであつたが、これをあまり大きくすると (実際には $k\Omega$ のオーダーにすると)、この振動が目ざわりになる。これを避けるには、信号回路の後にインピーダンス変換器を置けばよい。実際には Fig. 10 のようなインピーダンス変換器を使って良い結果を得たが、極端に大きな R_2 を選ぶとき以外は、ほとんど不要である。この回路は初段で極性が逆転するので、入力が負のパルスするとき、出力は正のパルスとなる。

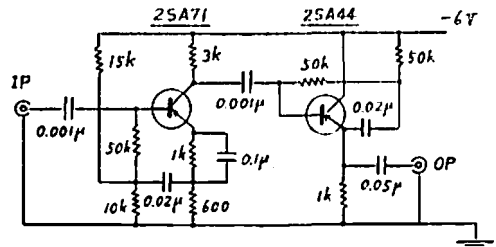


Fig. 10 Impedance transformer, which is joined to the signal former.

つぎに第 2 の型の振動は、配線のインダクタンスによるものである。この実験では、深さ約 80cm の堅孔の底の爆薬から、地表の信号回路まで約 1m の配線に 0.7mm の導線を用いた。この間の配線のインダクタンスは約 $2\mu\text{H}$ である。

一般的に Fig. 1 の信号回路で、イオンギャップに直列にインダクタンス L が入ったとき、 b 点の電位 $e_b(t)$ は、ラプラス変換して演算子 p の函数 $E_b(p)$ で表わすと

$$E_b(p) = \frac{R_2 C_2 p}{LC_1 p^2 + R_1 C_1 p + R_2 C_2} \cdot \left(\frac{1}{LC_1 p^2 + R_1 C_1 p + 1} - \frac{1}{R_2 C_2 p + 1} \right) E_0$$

となる。これが振動しないための条件は、括弧内第 1

項の分母が虚根を持たないことで、書き変えると

$$R_1^2 \geq 4L/C_1$$

の条件になる。実際回路の定数 $C_1=0.001\mu\text{F}$, $L=2\mu\text{H}$ を代入すれば, $R_1 \geq 90\Omega$ が得られる。先に2で述べたところでは, R_1 はできるだけ小さい方が鋭い信号パルスになるのであつたが, 配線のインダクタンスを考慮に入れると, あまり小さな R_1 は振動パルスを与えることになる。Fig. 2 で $R_1=100\Omega$ を挿入したのはこのためである。

この間の事情は Fig. 11 で明らかにされる。図は導爆線中に 2cm 間隔で4個のイオンギャップを挿入して, 爆速測定を行なつたオシログラムである。ここで $R_1=0$ のときは (a) のように振動しているが,

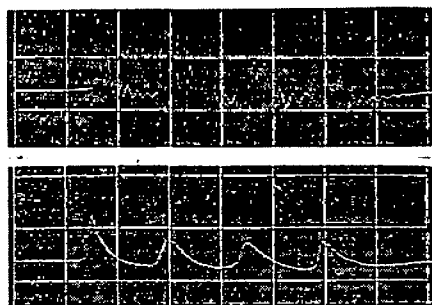


Fig. 11 Measurement of detonation velocity of PETN detonating fuse by 4 ion gaps with 2cm intervals. Oscillograms show the effect of damping resistor R_1 (see Fig. 2)

Upper : $R_1=0$. Lower : $R_1=150\Omega$.

$R_1=150\Omega$ の振動抑制抵抗の挿入で (b) のパルスに変わり, 上に述べた考え方の妥当性を証明している。しかしこのような抵抗の挿入は, それだけ波形をゆるやかにし, 立上り点をあいまいにするおそれがある。従つて測定精度の上からはできるだけ小さめにとるか, あるいはパルス間隔の広いときには, 振動波形のままの方が立上り点は見やすくなる。

Fig. 12 は各種爆薬について, 4個のイオンギャップを用いて爆速測定を行なつた結果である。図ではイオンギャップの位置と爆轟波の到達時刻を, 「距離対時間」のグラフにプロットしたものである。時間軸の原点は, 見やすいように少しずつずらしてあるが, 爆速は各点を結ぶ直線の傾斜から求められる。この図から, 導爆線および硝安爆薬については, 爆速は最初から (雷管の位置より 4cm) 一定値をとつているが, 新桐ダイナマイトでは爆速は徐々に上昇して, すぐには一定値にならないことがわかる。

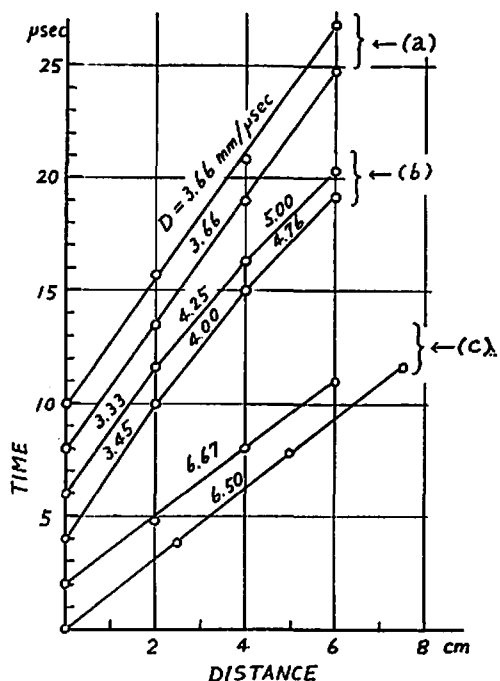


Fig. 12 Distance vs. time curves of detonation fronts, each derived on four ion gaps in commercial charge. Figures show detonation velocities D , obtained from the respective slopes of curves. (a) Ammon explosive (Shoan bakuyaku), (b) Ammon gelatine dynamite (Shinkiri), (c) PETN detonating fuse.

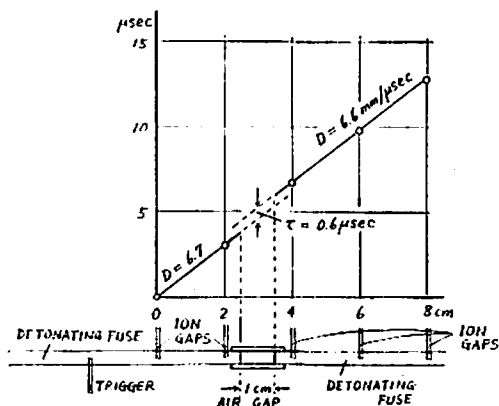


Fig. 13 Time lag of initiation appeared on a sympathetic detonation. Two PETN fuses are connected by plastic tube holding an air gap. Distance vs. time curve obtained by a shot with 5 ion gaps, shows clear discontinuity and reveals the time lag τ of around $0.6\mu\text{sec}$.

また Fig. 13 は、2本の導爆線を図のように 1cm 離して置き、殉爆の時間おくれを測定したものである。「距離対時間」グラフにプロットされた測定点から、殉爆のおくれ、約 0.6 μ sec が明らかになっている。

5. 考 察

この方式による爆速測定の長所としては、第一に測定精度の高いことを挙げなくてはならない。イオンギャップは爆轟波の検知素子として非常に小容積であるから、導爆線を検知素子とするドートリッシュ法などにくらべると、測定精度ははるかに高い。

いま隣り合ったイオンギャップ間の間隔を l 、挿入位置の誤差を Δl とし、オシログラム上のパルス間隔を D 、その読み取り誤差を ΔD とすれば、爆速 D の誤差 ΔD は

$$\Delta D/D = \Delta l/l + \Delta D/D$$

で表わされる。上式右辺は通常第1項の方が大きい。イオンギャップ間の間隔を 2cm として、挿入位置の誤差は ± 1 mm ていどであるから、 D の測定誤差は 5% 以下に押さえられる。またこの測定法の特長である多点測定と組み合わせれば、得られた結果を「距離対時間」のグラフ上にプロットして、挿入位置の狂いがこのグラフ上で訂正されることもある。(例えば前出の Fig. 12 で、測定点が直線上からずれているものは、前後の関係からイオンギャップの位置のずれと考えられる。このずれはいずれも 1mm 以下である。) この意味から言えば、定常爆速になっているものに多点測定を行えば、測定精度は最も遠いイオンギャップ間の間隔できるので、優に 1% ていどまで精度を上げることができる。

薬径の大きな爆薬では、イオンギャップを中心に置くか、表面近くに置くかも問題となろう(この実験では、すべてイオンギャップの先端が薬軸上にくるようにした)。これは爆轟波面がある曲率を持つているため、特に爆轟が定常状態に達せず曲率が変化して行くような過程で問題となる。その場合にこの測定法は、爆速測定以外に爆轟波面の曲率測定にも役立たせることができる。

この測定法で不満な点があるとすれば、4で述べた配線のインダクタンスによるパルス波形の振動であろう。測定回路を爆発の衝撃から保護するためにはある長さの配線は必要であり、必然的にインダクタンスを生ずることも避けられない。そしてこの値は実験場での回路の配置によつてきまるので、本文に述べた 100 Ω の振動抑制抵抗がいつの場合も有効とは限らない。この方式でオシロスコープの代りにエレクトロニッ

ク・カウンターを用いれば、爆速測定が手軽にできるが、その場合パルスの立上りが悪いと測定精度が下るので、前以てオシロスコープによる波形観測するのが望ましい。

イオンギャップ間の抵抗値が、爆轟波中でほとんどゼロになることは、この種測定回路の設計を容易にしている。これがあるていどの抵抗値を持ち、しかも爆薬の種類によつて違ふような場合には、この測定法は成り立たなかつたかもしれない。イオンギャップの抵抗がゼロになる事実は相当に弱い爆薬でも変りなく、例えば AN-FO を弱いブースターで起爆させ、爆轟中絶の寸前(爆速が 0.8mm/ μ sec)で測定しても、同様であつたことをつけ加えておく。

イオンギャップの導通機能が、先端の電極部分ではなく爆薬中に入った導線の全体で行なわれていることは興味深い。従つてイオンギャップの先端を切ることは、この部分に電極を作るのではなく、単に導線を 2本に絶縁するのに過ぎないわけである。

6. 総 括

(1) 爆轟波の検知素子としてイオンギャップを用いる爆速測定法を研究した。この方法の特長は、素子が小容積であるため測定精度の高いこと、および多点測定によつて、装薬内の爆速変化を追跡できることである。

(2) イオンギャップの動作を明らかにするため、爆轟波到達時のイオンギャップ間の、抵抗変化を測定した。その結果、イオンギャップは爆轟波の到来によつて急激に導通状態に入り、電気抵抗は事実上ゼロとなる。これが数 μ sec 持続したあと、ふたたび最初の絶縁状態にもどる。導通の持続時間は、導爆線および硝安爆薬で 5~9 μ sec、新制ダイナマイトで 3~5 μ sec で、測定のために多少変化する。

(3) 爆薬中に挿入された導線が、爆轟波の通過後切断するまでの時間を測定した。直径 1mm 以下の導線ではこの値は 10 μ sec 以下で、細い導線ほど時間も短くなる。また前記イオンギャップの導通持続時間は、ほぼ導線自身の切断時間に見合うことが明らかとなつた。また導線の切断箇所は、爆薬の表面近くであることを実験から推定した。

(4) 本測定法により、実際の爆薬の裏包内での爆速変化、殉爆の時間遅れを測定した。

付 記

本研究を行なうにあたり、ご指導をいただいた東工試第七部水島第一課長および課員の方々に深謝する。

またかつての共同研究者であつた故村田旺仁氏に対し、謹んでこの報告を捧げる。

文 献

- 1) 木島, 広川, 工火誌, 12, 171 (1960)
- 2) M. A. Cook, R. L. Doran, J. Appl. Phys., 26, 426 (1955)
- 3) 田中, 村田, 工火誌, 20, 150 (1959)
- 4) 田中, 工火誌, 15, 72 (1954)
- 山本, 須藤, 清田, 工火誌, 19, 49 (1958)
- 日野, 野村, 長谷川, 工火誌, 24, 180 (1963)

Measurement of Detonation Velocity by Ion Gaps

by Kazumi Tanaka

A practical method for determining the detonation velocity is presented. The ion gap, a kind of double probes prepared from a pair of insulated wires having the tips bared, is used as the detector of ionized detonation front. In this method, the ion gaps are inserted in the explosive charge with known intervals. When the charge is fired, a pulse train, which is derived from signal forming circuits connected to the gaps respectively, is recorded by a cathode ray oscilloscope and a camera.

Precedently, the change of the electrical conduction between the gap probes during the passage of the detonation wave is pursued. Thus it is found that the gap becomes completely conductive just when the wave

front arrives, and after a few microseconds the initial insulation comes back again. Furthermore the breakdown time lags of wires inserted in charges are measured. The time required for cutting off the wire from arrival of the detonation front is found to be less than ten microseconds, when a thin wire of less than 1 mm in diameter is set in the commercial charge. And the recovery of the insulation of the ion gap can be attributed to the breakdown of the leads.

Results of measurements of detonation velocities on various commercial charges are presented. This method makes a multi-points measurement easy and gives accurate results owing to the minuteness of the wave front detector.