

爆発性物質の衝撃波感度試験

第1報 ギャップ・テストに関する基礎的実験

飯田 稔*, 藤原 修三*, 日下部正夫*

欧米諸国で盛んに実用されているギャップ・テストと呼ばれる新しい感度試験法の確立を目指してその基礎的実験を行なった。

ドナーに用いた可塑性爆薬 E-25 の爆ごう衝撃波をメタアクリル板を通してアクセプター爆薬に入射させるときの最小起爆衝撃波圧力は流しカメラまたはカウンターを用いてショックの通過所要時間を測定し、対応関係を求めて表示することができた。

得られた結果は諸外国の文献値とよく一致し、信頼性が高いことがわかった。

1. 緒言

爆薬を爆ごう (Detonation) させ、発生する衝撃波を中間に介在させた不活性物質を通して火薬類その他の爆発性危険物質試料に入射させ、爆ごうが発生するために必要な最低衝撃波圧力¹⁾²⁾ (以後 P_i と記す) を求めて感度の定量的尺度とし、この値の大小によって危険度を級別するギャップ・テスト (Gap Test) と呼ばれる新しい感度試験法について基礎実験を行なった。

この方法で得られる P_i の値は爆薬について種類および物理的条件によって特有なものであることが知られており、理論的取扱も可能なため、戦後欧米で盛んに研究され、実用化されているが、わが国でのこの種の開発研究は全く行なわれていないと見えるのが現状である。この試験で得られる情報は爆発性物質の起爆の難易だけでなく、起爆後の爆ごうの伝播の可否についても、得られる極めて有用なものであるが、低速爆ごうの判定等についてなお工夫の余地が残されている。

われわれは独自の Gap Test 法を考案し、この方法により代表的爆薬の P_i を求め、他の方法で求められた諸外国の文献値と比較検討した結果、よく一致することが確かめられたので実用試験として信頼できることが判った。

2. 衝撃波圧力校正曲線

2-1 Donor Explosive と Gap

Fig. 1 に Gap Test 方法の簡単な説明図を示す。超高压発生源として Donor Explosive の爆発 (Detonation) を利用する。Fig. 1 において、Donor ex-

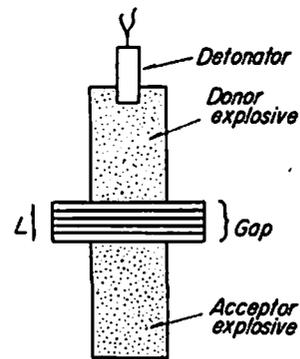


Fig. 1 Schematic of Gap Test

plosive の Detonation は衝撃波媒体 (Gap) に衝撃波を誘起し、この衝撃波は Gap 内を減衰しながら図の下方へ進行し、試料爆薬 (Acceptor explosive) へと入射して行く。ギャップ長: l が短くて、Acceptor に十分強い衝撃波が入射すると、Acceptor は感応して Detonation する。しかし、 l が長くなり、Acceptor に入射する衝撃波が弱くなると Detonation しない。Acceptor が Detonation しなくなる限界ギャップ長 (以後これを l_{ig} と記す) を繰り返しの実験により求め、 l_{ig} の大小をもとに Acceptor 試料の衝撃波感度を定量化するのが Gap Test である。

われわれは Donor に用いる薬種として、E-25* を選んだ。E-25 は、比重、 $\rho = 1.265 \pm 0.005$ で、 7.23 ± 0.05 km/sec の爆ごう速度と、推定 165 Kbar の爆ごう圧力を呈すもので、これを内径 32 mm、外径 35 mm、長さ 60 mm の塩化ビニルパイプに (薬量: 60 g) 装填したものを Donor explosive とした。次に、

昭和47年6月29日受理
* 東京工業試験所第七部

* PETN を含むプラスチック状高性能爆薬。

Gap として Plexiglass* 板を用いた。Plexiglass 板は 50 mm×50 mm の面積を有すもので、厚さが、1 mm, 2 mm, 5 mm の三種類のを適宜、重ね合わせて、任意の長さのギャップを作った。Gap の材質として Plexiglass を選んだ理由は、透明であるため衝撃波速度の光学的測定上、好ましいこと、機械加工が容易にできること、衝撃波特性がよく調べられていること、その衝撃波抵抗が通常の有機物体と類似していること³⁾、等の優れた利点をもつからである。

2-2 衝撃波のギャップ通過所要時間の測定

2-2-1 光学的測定法

Acceptor に入射する衝撃波圧力は Plexiglass Gap 内の衝撃波速度を測定することにより、衝撃圧力を算出してこれを求めることができる。このためわれわれは、ギャップ長： l を種々変えて、その各々の場合において Donor から Gap へ入射した衝撃波が、長さ l の Gap を通過するに要した時間： t を光学的方法、または電気的方法で測定した。

Fig. 2 に図示するように、Donor (E-25: 60 g) と長さ可変の Plexiglass Gap を設け、Gap の右端 (Fig. 2 の B 点) に 0.5 mm 厚の空隙を作りここにアルゴンガスを流入しておく。

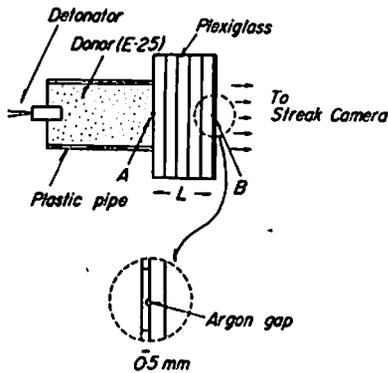


Fig. 2 Schematic of optical method for measuring shock passing time

6号電気電管により、Donor の E-25 が起爆され、その Detonation が Gap との界面 (Fig. 2 の A 点) に到達すると透明な Plexiglass Gap を介して爆発光が見える。Donor の Detonation は Gap との界面に到着すると、Gap 内へ衝撃波を誘起し、この衝撃波は右方向 (Fig. 2) へ進行し、B 点のアルゴン空隙に到達すると、アルゴンガスを圧縮加熱し、このため

* polymethyl metacrylate には組成、加工方法により異なった性質のものができるが、われわれの用いたものは、英語名、plexiglass に相当する。

アルゴンは強く発光する。A 点での爆発光*と B 点でのアルゴン光を高速度流しカメラで撮影すれば、フィルムの流し速度より、衝撃波が Plexiglass Gap を通過するのに要した時間： t を求めることができる。日立光機製 SP-1 高速度流しカメラを用いて、各ギャップ部における t を測定した。測定の一例を Fig. 3 に示す。 t のこの方法による測定誤差は、 l が短いとき大きく、最大 1~2% 程度である。

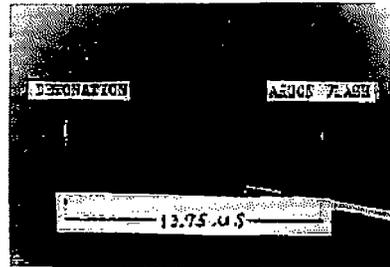


Fig. 3 Streak camera record of Detonation and Argon flush

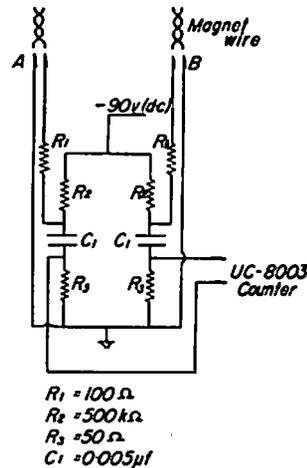


Fig. 4 Pulse forming circuit

2-2-2 電気的測定法

Plexiglass Gap の長さ： l が 60 mm を越えるとギャップ内の衝撃波の減衰が著しく、アルゴンガスの発光が微弱となり、流しカメラでの測定は困難である。よってわれわれは、 $l > 60$ mm では、Fig. 4 のような回路を有す電気パルス発生装置と、UC 8003 カウンターを用いて t の測定を行なった。 $\phi = 0.1$ mm の二本のエナメル線を絶縁状態にしてよりあわせ、これを

* E-25 が不透明であること、かつ植び管に入れているゆえ、Detonation が plexiglass との界面に到達するまで A 点以前の爆発光はカメラの方向には見えない。

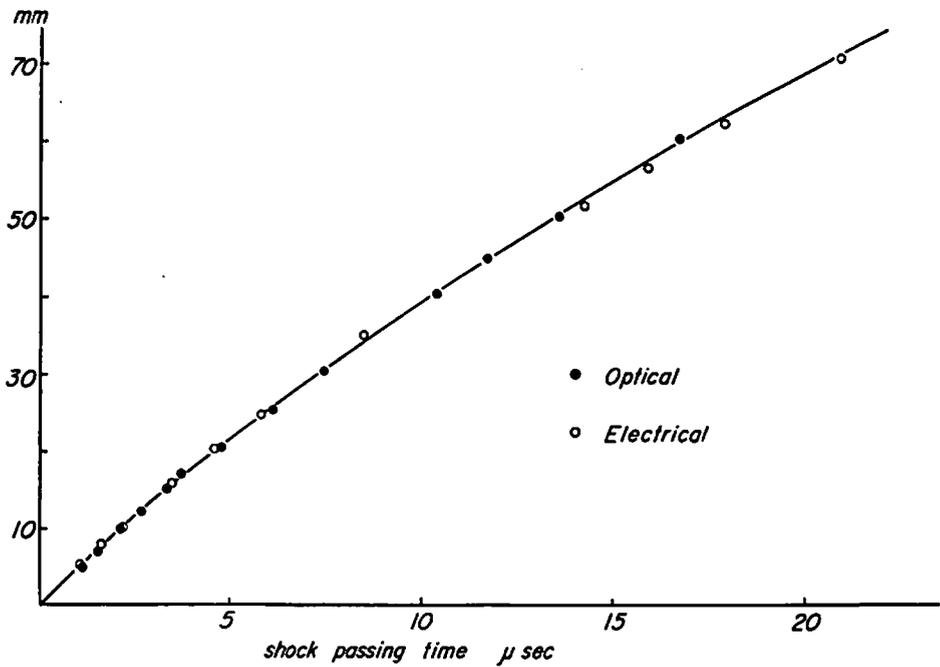


Fig. 5 Plexiglass gap length vs shock passing time

Fig. 2 の A, B 点に差し込み, Fig. 4 に図示した回路の端子につなぐ。A 点に Detonation が, B 点に衝撃波が到達すると, 圧縮により, エナメル絶縁破壊が起こり回路に電流が流れる。A, B 点での絶縁破壊の生じる時間差: t を UC 8003 カウンターで測定した。この方法は, $l \leq 100$ mm まで可能である。

2-3 衝撃波圧力校正曲線の求め方

衝撃波が長さ: l の Plexiglass Gap を通過するのに要した時間: t の光学的, または電気的方法での測定結果を Fig. 5 に示す。 $t-l$ 関係は, $t = \alpha + \beta \cdot l^2 + \gamma \cdot l^3$ の放物線式で近似可能として, 最小二乗法を用い*, α, β, γ を求めると, $t-l$ の関係式(1)が得れる。

$$t = -4.385 \times 10^{-3} + 0.20625 \cdot l + 1.206 \times 10^{-3} \cdot l^2 \quad \dots\dots(1)$$

$$t : \mu\text{sec} = 10^{-6}\text{sec}, \quad l : \text{mm}$$

式(1)の放物線は, Fig. 5 で判るように, 実測値とよい一致をなす。とくに, $l=0$ のとき, $t=0$ とならなければならないが, 式(1)からは $t = -0.004387(\mu\text{sec})$, $l=0$ が与えられ, この値は実験誤差を考慮すれば, $t=0$ とみなせる。

l/t は, Donor Gap 界面から l 点までの平均衝撃波速度を与え, dl/dt は, l 点での瞬間衝撃波速度を

与える。よって, 式(1)を t で微分し, $dl/dt = U_s$ とおくと式(2)が得られ, U_s が l 点での真の衝撃波速度を与える。

$$U_s = dl/dt = \frac{l}{0.2062 + 0.002412l} \quad \dots\dots(2)$$

U_s : shock velocity (km/sec) l : mm

式(2)をプロットしたのが Fig. 6 で, l の増加とともに, 衝撃波が減衰してゆく状態が示されている。

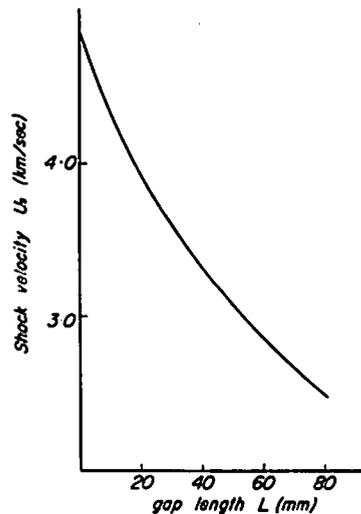


Fig. 6 Shock velocity vs plexiglass gap length

* 光学的方法による測定値 (21組) のみを用いた。

次に、衝撃波圧力を求める式が必要である。plexiglass 内を伝わる衝撃波は、Fig. 3 の写真でも判るように現実には三次元流の球面波である。しかし、「十分狭い範囲において、波面の曲率が無視できて一次元近似が可能である」という第一の仮定を設けると、Liddiard⁹⁾の実測した plexiglass の一次元衝撃波特性式(3)が適用できる。

$$\left. \begin{aligned} U_s &= 2.56 + 1.69U_p & U_s > 3.4 \\ U_s &= 2.95 + 0.85U_p & 3.4 > U_s > 3.1 \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

U_s : shock velocity (km/sec)
 U_p : particle velocity (km/sec)

式(2)、(3)と、一次元衝撃波の運動量保存式(4)を用いて、各式より、 U_s 、 U_p を去消すると式(5)が得られる。

$$P = \rho_0 U_s U_p \dots\dots\dots(4)$$

ρ_0 : plexiglass の密度 = 1.185 g/cm³
 P : 衝撃波圧力

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{3.3105 - 0.04329l}{(0.2062 + 0.002412l)^2} & P > 20(\text{Kbar}) \\ P &= \frac{4.2061 - 0.09920l}{(0.2062 + 0.002412l)^2} & 8 < P < 20(\text{Kbar}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

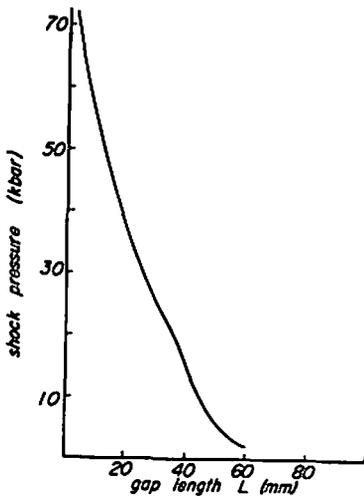


Fig. 7 Shock pressure vs plexiglass gap length

式(5)をプロットとしたのが Fig. 7 である。但し、Fig. 7 において、8 K bar 以下、 $l > 47$ mm の範囲は Evance⁷⁾らの実測値を採用した。Fig. 7 (または式(5))により、Donor に E-25, 60 g, Gap に plexiglass を使用した場合、ギャップ長： l に対応する衝撃波圧力： P を知ることができる。ここでわれわれは Acceptor に入射される衝撃波圧力を求めるにあたり、「Plexiglass Gap と Acceptor explosive の界面におい

て、前者と後者との衝撃波圧力は等しい」という第二の仮定を設ける。第二の仮定は、衝撃波の界面での挙動を論ずる、“shock impedance matching theory”⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾より考えて plexiglass は比重が1程度の通常の有機物体と衝撃波抵抗が類似しているゆえ妥当な仮定と思われる。仮定2より、ギャップ長が判れば、Fig. 7 の図(または式(5))を用いて、ただちに Acceptor へ入射される衝撃波圧力を知ることができる。たとえば、ギャップ長、 $l=20$ mm のとき、Acceptor 試料へ入射される衝撃波圧力は $P=48$ K bar である。

3. 代数的爆薬の爆発限界ギャップ長の測定

前節で求めた衝撃波圧力校正曲線の信頼性を確かめるため、われわれは、shock initiation pressure: P_i 、既知の4種の爆薬を Acceptor として用い、これらの爆発限界ギャップ長 (lig) を実測した。Acceptor としては、液体爆薬の代表として NM (Nitro methane)、鈹造爆薬の代表として TNT (Tri nitro toluene)、圧搾成型した爆薬の代表に Tetryl (Tri nitro phenyl methyl nitramine)、粉状爆薬の代表として PETN

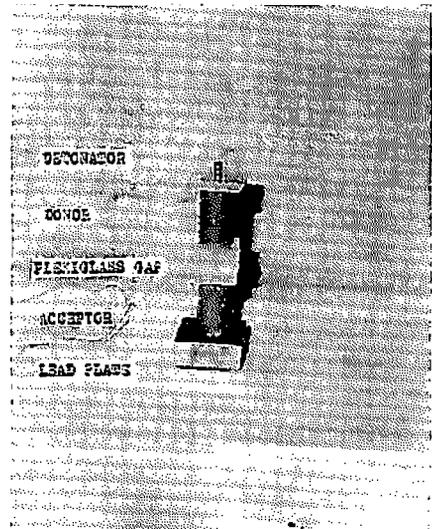


Fig. 8 (a)

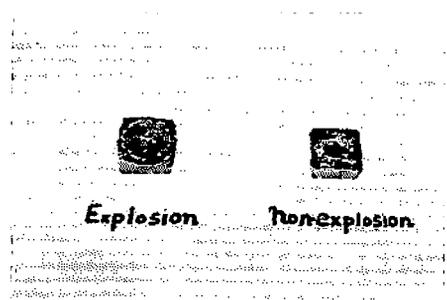


Fig. 8 (b)

Table 1. Acceptor explosives and their critical initiation values

	Type of explosive	Density(ml/g)	Lig (mm)	P_{i0} (K bar)	P_i (K bar)
PETN	Powder	0.9	67.4~78.4	2~3	2.5
Tetryl	Pressed	1.46	42.7~44.8	10~12	7~8
TET	Cast	1.60	14.8~15.0	45~46	37~58
Nitro-methane	Liquid	1.13	1.0~2.0	73~75	80±5

(Penta erythritol tetra nitrate) の4種類を選び、これらが各々爆発しなくなる限界ギャップ長: lig を求めた。NM は内径27 mm, 外径34 mm, 長さ60 mm の鉄管容器に入れて、TNT は内径32 mm, 外径35 mm の塩ビパイプに90°C前後で溶融状態で流し込み、冷却後、長さ約30mm程度に切断したものを、PETN は、内径32 mm, 外径35 mm, 長さ60 mm の塩ビ管に装填したものを Acceptor として用いた。Tetryl は、4~6重量%のステアリン酸を混ぜ、30 kg/cm²の圧搾により、径20 mm, 長さ20 mm のベレットを作り、裸薬のままで用いた。希薄波*の影響を考慮して Acceptor の薬長は薬径より小さくならないように、また、薬径は各々の爆薬の爆ごう伝播限界径より大きくしてある。

実験は Fig. 8 (a) に示すように、Donor の E-25, Plexiglass Gap, Acceptor, 鉛板を設置し、Donor を6号雷管で爆発させ、これに感応して Acceptor が Detonation したかどうかを鉛板の爆痕で判定した (Fig. 8 (b) 参照)。

ギャップ長 l を増大させ、Acceptor が Detonation を起こさなくなるときのギャップ長、つまり限界ギャップ長: lig を求めた。Acceptor explosive の諸性質と、求めた lig の値を Table 1 の第一~第三項に示す。Table 1 の lig は、たとえば PETN の場合、67.4 mm のとき爆発し、78.4 mm のとき不爆であったことを意味し、再現性は良好である。他の爆薬に関しても同様である。

4. 考 察

第3節の実験で求めた4種類の爆薬の爆発限界ギャップ長: lig は第二の仮定に基づいて、Fig. 7 または式(5)より、critical shock initiation pressure, P_i へと転換できる (本法で求めた P_i を P_{i0} と記す)。Table 1 の第五項に本実験方法で求めた、PETN, Tetryl, TNT, NM, の P_{i0} を示す。爆薬類の衝撃波感度の測定には、一般に、爆薬*レンズによる一次

元の衝撃波が使用され、多くの爆薬類についてその P_i が測定されている。われわれの設けた仮定1, 2が正しいならば、本実験で得た4種の爆薬の P_{i0} は、一次元衝撃波圧縮により得られている P_i と一致するはずである。PETN については、Seay¹¹⁾, Stirpe¹²⁾, Tetryl については Lindstrom¹³⁾, TNT については Price¹⁴⁾, NM については Campbell¹⁵⁾, Voskoboinikov¹⁶⁾らが得た P_i の値を Table 1 の第6項に示す**。われわれが用いた Tetryl は、圧搾成型を安全かつ容易にするため4~6%のステアリン酸を添加している。不活性物添加のため純粋の Tetryl ($P_i=7\sim8$ K bar) よりも高い initiation pressure (P_{i0}) が得られたものと考えられ、このことを考慮すれば、本実験で得た各種爆薬の P_{i0} は一次元衝撃波圧縮による P_i とよく一致すると言える。これは、仮定1, 2が妥当なものであることを示すと同時に Fig. 7 の衝撃波圧力校正曲線が正しいことを示すものである。よって、Donor に E-25, ギャップに plexiglass 板を用い、第3節と同様な実験を行なうことにより、任意の爆薬の shock initiation pressure を求めることができる。

衝撃波感度試験はかなりの爆薬量を必要とするが、他の感度試験法、たとえば、着火感度試験の代表的なものである落槌感度試験、摩擦感度試験等と異なり、初期条件を一定にすれば非常に再現性よく、かつ前述したように定量化が容易にできるという特徴を有す。本試験法では2~80 K bar 間の圧力を有す衝撃波が得られるので、きわめて大きな P_i ($P_i \gg 80$ K bar) を有す爆薬には適用できないが、このような場合、E-25 よりも大きな爆発圧力を呈す爆薬を Donor に用いればよい。しかしながら、現在までの報告例より考えると、ほとんどの爆薬が100 K bar 以下の P_i を有すゆえ、本法で一般的には十分であろう。

衝撃波圧縮による起爆機構に関しては、Hubbard¹⁶⁾, Seely¹⁷⁾, Mader¹⁸⁾, Campbell¹⁹⁾らにより論じられ、とくに不均一系の爆薬はその起爆に複雑な要因がからんでいるゆえ、試料の均一性、密度、温度、粒径、等

* Rarefaction Wave. 圧力を減じる波で系の弾性波速度で伝わる。

** plane wave generator と呼ばれ、平面爆ごう波もしくは衝撃波を発生させるものである。

* Price らの実験は純一次元衝撃波によるものではない。

** P_i は薬長を考慮して決めた。

の P_i の値を決定する要因には注意しなければならない。衝撃波感度の点からみると、大きな P_i をもつ爆薬は安全で、逆のものは危険である。本実験結果の示すところによれば、PETN, Tetryl, TNT, NM の順に安全性が増し、とくに PETN は圧力 2 K bar¹⁾*程度の衝撃波で起爆するゆえ取扱上、細心の洋意を必要とする爆薬であり、一方、NM は $P_{ig} \approx 70 \sim 80$ K bar で数値だけからいえば、PETN よりも数十倍安全な爆薬でこれを起爆させるのは容易でない。しかしここに得られた P_{ig} の値は、初期条件が Table 1 の第二、第三項に示されるときのものであり、初期条件を変えると（たとえば密度を変える）また異なった P_{ig} が得られるわけで、前述したように、不均一系爆薬については初期条件（とくに密度）を一定にしなければならない。

5. 要約

Donor として E-25, Gap として Plexiglass を使用する Gap Test 法を確立し、件意のギャップ長に対応する Acceptor 入射衝撃波圧力校正曲線を、実験、二つの仮定、衝撃波理論より得た。四種の爆薬の本法による爆発限界ギャップ長の測定を行ない、これより圧力校正曲線から求めた、shock initiation pressure は、精密な一次元衝撃波圧縮方法より求められている圧力とよく一致することから、圧力校正曲線の信頼性が確かめられた。本法の Gap Test は再現性良好で爆薬の critical shock initiation pressure が測定できるため、爆発性物質の衝撃波感度の理論的研究に利用できるだけでなく、実用試験法としても十分利用価値があるものと確信する。

* この程度の衝撃圧力は容易に発生し得る。

文 献

- 1) A. W. Campbell et al: The Phys. of Fluids 4, 499, 1961
- 2) A. W. Campbell et al: The Phys. of Fluids 4, 571, 1961
- 3) C. H. Johansson and P. A. Persson: in Detonics of High Explosive p. 81~124. Academic Press 1970
- 4) A. Macek: Chem. Rev. 62, 2421, 1961
- 5) W. E. Deal: in 4th Symposium on Detonation p. 321~349. U.S., N.O.L. 1965
- 6) T. P. Liddiard: in 4th Symposium of Detonation p. 214. U.S., N.O.L. 1965
- 7) M. W. Evance and D. N. Schmidt: Nature 206, 1348, 1965
- 8) J. M. Walsh and R. H. Christian: Phys. Rev. 97, 1544, 1955
- 9) M. H. Rice, R. G. McQueen and J. M. Walsh: in Solid State Physics Vol. 6, p. 1~63, Academic Press 1958
- 10) G. E. Duball and G. R. Fowles: in High Pressure Physics and Chemistry Vol. 2, p. 209~292, Academic Press
- 11) G. E. Seay et al: J. A. P. 32, 1092, 1961
- 12) D. Stirpe: J. A. P. 41, 3884, 1970
- 13) I. E. Lindstorm: J. A. P. 41, 337, 1970
- 14) D. Price: 5th Symposium on Detonation Preprints, p. 128, 1970
- 15) I. M. Voskovoïnikov et al: Combustion, Explosion and shock waves. 4, 26, 1968
- 16) H. W. Hubbard and M. H. Johnson: J. A. P. 30, 765, 1959
- 17) L. B. Seely and J. H. Blackburn: Trans. Faraday Soc. 61, 537, 1965
- 18) C. U. Mader: Phys of Fluids, 8, 1811, 1965

Shock sensitivity of Explosive materials
I. Fundamental Experiments on Gap Test

by Minoru Iida, Shuzo Fujiwara and Masao Kusakabe

A plastic bonded high explosive, E-25 as donor explosive and plexiglass plates as a shock attenuator (Gap) were used in our new gap test.

Time for shock passing through plexiglass gap was measured with a streak camera or with an electric counter, and relationship between shock passing time and gap length was transformed into that between shock pressure in acceptor explosives and gap length, in which we assumed that the flow is one dimensional and shock impedance of plexiglass is nearly equal to that of acceptor explosives.

Shock initiation pressure values of NM, cast TNT, pressed Tetryl and granular PETN, obtained by our gap test, coincided with plane shock compression values.

(National Chemical Laboratory for Industry, Hiratsuka, Kanagawa, Japan)