

CO/CO<sub>2</sub>の比が0.09~0.05 という点と比較すれば余り問題ではないと考えられる。

次に後ガス捕集坑道に於ける濃度と坑道容積とから算出した炭酸ガス及び一酸化炭素の発生量と比較するため爆薬中の炭素が炭酸ガスと一酸化炭素になると仮定して爆薬の配合成分とCO/CO<sub>2</sub>の平均値から計算した炭酸ガス及び一酸化炭素の発生量を表4に掲げる。

表 4 爆薬1kg当りの発生量

	桐		新桐		二号新桐		藤		桂	
	CO <sub>2</sub>	COCO <sub>2</sub>	COCO <sub>2</sub>	COCO <sub>2</sub>	COCO <sub>2</sub>	COCO <sub>2</sub>	COCO <sub>2</sub>	CO	CO	
1. 濃度と容積より	146	13	138	10	133	11	127	11	127	13
2. 配合と比より	162	15	152	11	141	12	118	10	129	13
3. 配合と比より	167	10	155	8	143	10	121	7	129	13

註：表中1, 2は後ガス捕集坑道の値で3は鉦山に於ける試験結果による値である。単位はl/kg

4表の結果によれば後ガス捕集坑道に於ける結果と鉦山に於ける結果とは大体一致している。ガス捕集坑道に於ける試験では幾分潤滑することはさげられないのに一酸化炭素の発生量が多くであるのは試験条件の差異によるものと考えられる。

前報には外国文献に見られる古い実験結果を引用して後ガス捕集坑道の結果を判定した。然し上述の試験結果より、試験した範囲の爆薬に対しては坑内で使用される際の一酸化炭素の発生量の基準として後ガス捕集坑道に於て現在の試験条件で試験した結果を利用し得ることが明かとなった。故に極端な場合を除けば他の爆薬の試験に対しても後ガス捕集坑道は有効な結果を与えるものと考えられる。

## V 結 語

各種金属鉦山用爆薬の発破後ガス試験を鉦山及び後ガス捕集坑道で実施した。

鉦山に於ける発破直後の坑気中の爆発生成ガスの濃度は試験の都度相当変る。そして有毒ガスの含有量は危険な程度になることが多い。

後ガス捕集坑道に於ける試験の結果と鉦山試験の結果とは大体一致している。

御礼：本試験の実施に当り種々御配慮と応援を下さった各鉦山の関係各位に深く感謝致します。

参考文献 1) 仁多, 岩崎, 阿坂, 本誌13, 97, 昭27年(1925).

## 爆薬猛度の実験的研究

(昭和29年1月16日受理)

核 井 武 尙

(日本油脂式農工場)

### 第Ⅲ報 固体(鉛)内の衝撃波の形成について

#### I 緒 言

爆薬によつて種々の物体を破壊するとき、その物質の物性によつて、破壊機構はかなり異なることが予想されるが、これらの効果に及ぼす爆薬の性能の差に関する知識は、爆破論の根底をなすべきものである。この問題は、「爆源と隣接する媒体の物性に結びついた破壊の問題」と要約して言うことが出来るが、この組合せはずいぶん複雑である。

この報告は、媒体として鉛をえらんだとき、爆薬によつて発生した応力波は、鉛の弾性波よりも速く、衝

撃波が形成されることがあることを論じ、次の実験の糸口としている。

波の伝はん速度は、爆源から4~8cmの距離に於て2400~3000m/sの値を示し、明らかに鉛の平面弾性波速度 $V_1$ よりも大なる領域がある。

また、衝撃波の減衰の様相から、この実験条件に於ける音速を推定したが、ほぼ $V_1$ に一致し、細長い棒中のそれよりもはるかに大であつた。

この固体中の応力波速度の筆者による新しい測定法の実験例は主に T. N. T. ( $\Delta$  0.95g/cc) について示したが、最初従来の諸文献を整理して衝撃によつて発生



する波の種々相のあらましを説明しておく。

## II 衝撃波の形成とその伝ばん速度

非常に急激に、強大な衝撃を受けて、固体の媒体例えば金属、岩石等に発生した応力波の伝ばんは、重要な問題であるが、比較的新しい分野であつて、根本的な見地からはあまり研究されていない。然し爆破論の立場からも、爆薬で猛衝撃を受けた固体内のきわめて強力な波の性質をはつきりさせることは必要である。この様な波の性質は、同一爆源のもとでも、媒体の種類によつて差を示すであろうし、また同じ媒体に於ても、それが経験する変形の型によつても左右される。また衝撃源として、重要な爆源は、物理化学的に複雑であつて、ハンマーによる衝撃等とはかなり趣を異にするけれども、これは一連の実験結果の蓄積後に説明すべき問題であらう。

そのためには、Kármánらその他の人々によつて行われた衝撃理論、並びに塑性理論は、Bridgmanの高圧実験<sup>2)</sup>と共に有力な手がかりを与えると思われる。そこで、実験を進める前に、固体内で実測される可能性のある種々の波の存在と、その性質をふりかえつてみることは有益である。

### (1) 固体内を伝ばんする弾性波について

今、固体の一点に衝撃が加えられ、物質の運動が全く波の進行方向に一致して居り、且、波の応力が媒質の弾性限界にあつて、弾性的な物質変移しかともなわない波は plane elastic wave と呼ばれ、その速度は次式で示される。

$$V_1 = \sqrt{3K(1-\nu)/\rho(1+\nu)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $K$ は体積の弾力率で、 $\rho$ は密度、 $\nu$ はポアソン比である。この弾性波は、実験的には、十分な拡がりをもつ物体内へ伝ばんするもので、媒体の横運動にともなう運動エネルギーと、前断応力が無視された形で成立するものである。

もしも、条件が細長い棒の中を伝ばんすることを規定する様な場合には、当然横方向の変移が自由となり純粋な一次元的応力のみは作用せず、この速度  $V_2$  は次式となり、 $E$ はヤング率である。

$$V_2 = \sqrt{E/\rho} \quad \dots\dots\dots(2)$$

また、このとき横方向への速度  $V_3$  は次式で、 $G$ は剛性率である。

$$V_3 = \sqrt{G/\rho} \quad \dots\dots\dots(3)$$

以上の三つの波は、波内応力による媒体物質の覆乱が弾性限界内で起る時の伝ばん速度を示すものであるが、応力が媒体の降伏点にあれば、弾性波に対する性

質と同じ様に、塑性波 (plastic wave) が速度  $V_4$  で伝ばんする。

$$V_4 = \sqrt{K/\rho} \quad \dots\dots\dots(4)$$

(1) 式と (4) 式とを比べれば異なる所は、ポアソン比の項だけであり、 $\nu$  は  $1/2$  を超えることがないから、直ちに、 $V_4 \leq V_1$  とおくことが出来、明かに塑性波は弾性波よりも低速であることが理解される。

これらの波の速度を鉄と鉛について表示しておく。

表1 鉄と鉛の弾性波及び塑性波<sup>3)</sup>

	$1/K$ (dyne/cm <sup>2</sup> )	$\rho$ (g/cc)	$\nu$	$V_1$	$V_2$ (m/s)	$V_3$	$V_4$
鉄	$0.61 \cdot 10^{-12}$	7.8	0.28	5950	5000~ 5500	3240	4600
鉛	$2.20 \cdot 10^{-12}$	11.4	0.45	2150	1200	700	2000

### (2) 衝撃波の形成の可能性

以上の様に、応力が降伏点にあるとき塑性波  $V_4$  はあきらかに平面弾性波  $V_1$  より低速であるが、もしも波動中の応力が非常に高い振巾をとるならば、塑性波は非常に高速となり得、その速度は遂には弾性波の速度を凌駕するに至るが、その間の消息を更に説明しよう。

衝撃にともなう弾性的歪の伝ばんについては、すでに Thomas Young によつて解析され (1807) 弾性歪と衝撃速度の比例関係が確立された。弾性歪  $\epsilon$  はこの場合次式で与えられる。

$$v_1 = C_0 \epsilon \quad \dots\dots\dots(4)$$

但し、 $v_1$  は衝撃速度、 $C_0$  は弾性変形の伝ばん速度である。Young はもしも衝撃速度が上式の或る臨界値であるとき、弾性歪が衝撃点で発生することを指摘したが、それ以上の弾性限界を超えた衝撃問題については、更に系統立つた努力は払わなかつた。

けれども、第二次大戦の勃発に及んで、弾性限界を超えた衝撃荷重に対する構造物の抵抗の問題は、耐爆弾構造物の設計上、この衝撃問題に一つの焦点を与え始めた。

ここに、V. Bush<sup>4)</sup>によつて、衝撃により吸収されたエネルギーの理論的計算の方法を得るため、塑性波の存在を仮定する着想が生れた。即ち、弾性波の伝ばん理論はかなりの知られて居り、この理論から弾性限界に於いて破壊される様な本質的にもろい物質については、破壊は先づ衝撃の加えられた点に起り始め、破壊面以外は何らエネルギーの吸収にあづかる機会が無く、この様な破壊をもたらし臨界速度が存在することは明かであるが、更に降伏値を超えた荷重に対して一つの臨界衝撃速度が存在すると想像するのは当然であ



る。

そこで、Kármán<sup>7)</sup>は1941年末、この問題に関する理論的考察の結果を発表し、次で pol Duwez<sup>8)</sup>によつて、この理論を裏づける実験が発表された。

一方 G. I. Taylor<sup>9)</sup>による衝撃によるワイヤー内の塑性波の伝はんが論ぜられ、また一次元的衝撃による棒中の永久歪に關し、M. P. White 等が研究した<sup>10)</sup>。これらの諸研究を通じ、高压に於ける圧縮実験によつて考察の根拠を与えた P. W. Bridgman の努力は1931~1940年の著作にのみならず、さらに近く1949年の報文がある<sup>11)</sup>。

以上の Kármán その他の人々によつて行われた問題の対照は、細長い棒中の歪波についてであつたが、棒がより太い場合についてもより厳密な理論体系をととのえたのは D. S. Wood である<sup>12)</sup>。

この報告で横に拡くひろがつた物体の一次元的平面波の伝はんが理論的に研究され、波の性質を決定するのに大切なことは、静的な圧縮率であることを明確に示して居り、ここに前記 Bridgman の仕事の真価が発揮されて来る。そして、その理論的説明の結果をアルミニウム合金について、圧力パルスの振巾と伝はん速度を実験計算に示し、さらに圧力が圧縮率に及ぼす効果と、圧縮中の温度変化、また、材料の機械的性質に關する効果等に言及して居るが、ここにその論議の骨子を紹介して、衝撃波——弾性波速度よりも速い圧縮応力波(塑性変形波)——の形成の可能性を説明する。

今、無限に横に拡がつて居る媒体内の縦方向の平面波をとらなう運動を考えると、それは厳密には一次元的でなければならない。従つて、媒質の変移 $u$ は常に波の進行方向をむいている管であり、それを Lagrange 座標 $x$ で示せば、運動方程式は次の様に書ける。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \quad (6)$$

ここに $\sigma_x$ は $x$ 方向の応力成分であり $\epsilon_x$ は歪の $x$ 成分、 $\rho$ は媒質密度、 $t$ は時間である。

また

$$\epsilon_x = \partial u / \partial x \quad (7)$$

は通常の歪のタイプを示すもので長さの変化を最初の媒質素片の長さで割つたものである。(6)式は、先の Kármán が細長い棒の中の波を説明するのに用いたものと同一であるが、細長い棒のときには、媒質の横運動にともなう運動エネルギーと剪断応力が無視されているわけである。この場合はその様な近似はない。

さて、この解は次式で与えられ、波の速度は一般に

塑性変形に於いても弾性変形に於いても歪 $\epsilon_x$ の函数であることが示される。

$$C = \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_x}{\partial \epsilon_x} \right)^{1/2} \quad (8)$$

(8)式によつて、波の速度を決定するためには、応力と歪の関係、即ち、 $\sigma_x \sim \epsilon_x$ の関係を知る必要がある。この関係は直接実験から求めることは、誠に困難であるが、適当な塑性理論を使つて半間接的な実験データ(例えば Bridgman の実験)から得ることが可能である。

かくして $\sigma_x \sim \epsilon_x$ の関係が図1の如く得られたとする。

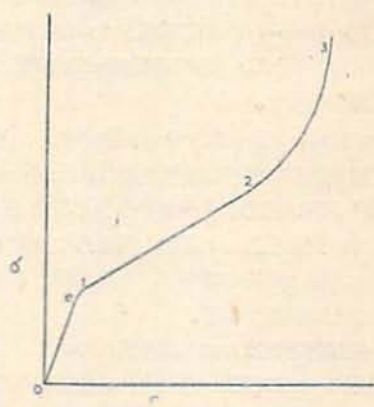


図1  $\sigma \sim \epsilon$  関係図

図で $e$ が降伏点を示し、 $\sigma \sim e$ は弾性領域であり、次に1~2の塑性変形の領域が続き、両者は近似的に、ほとんど2本の直線として示され、ほぼ弾性限界に近い点1が両直線の交点となつて居る。

(8)式の $\partial \sigma_x / \partial \epsilon_x$ は、 $\sigma_x \sim \epsilon_x$  関係図の傾斜を示すが、弾性限界内の傾斜は1~2の傾斜よりも大で、塑性波 $V_1$ は弾性波速度 $V_1$ より少なくなることを示している。そして、1~2の線図が直線的であることは、少くもこの応力範囲までは、歪の増分に対する応力の増分は変化が無いことを示しているが、もしも圧力の増大と共に、 $\partial \sigma_x / \partial \epsilon_x$ が大となること、即ち、圧力による圧縮率の減少が起り得るならば、図は更に2~3の如くになる管である。このとき歪の増大とともに、それに応ずべき応力は益々大となり、曲線の傾斜は遂には0~1の弾性限界内の傾斜よりも大となり、弾性波より高速な塑性変形波、即ち衝撃波の形成が見られる様になるであろう。

従つて衝撃波が形成するか否かは、波の応力の振巾に於ける材料の圧縮率の変化如何にかかつており、如



何なる物質に於いても衝撃波が発生し得ると言うわけではなく、事実 D. C. Pack<sup>9)</sup> 及びその共同者は鉄と鉛について爆発実験を行い、鉛に於いては明かに平面的弾性波  $V_1$  よりも高速な塑性変形波、即ち衝撃波が認められるが、鉄に於いては衝撃面に於いてすら  $V_1$  よりも低速であつて、衝撃波は形成しないことを示したのは注目すべき事実と言えよう。

さらに、応力波の諸性質を研究するための種々の実験としては、Rinehart<sup>9)</sup> が爆薬で猛衝撃を受けた金属の剝離について行つた報告で、このような型の固体内のきわめて強力な波の性質を一層明らかにすることの必要を要望しており、彼のとつた波内応力測定のための改良ホプキンソン法は、伝ばん速度の問題とともに有用な手法を与えている。

また、圧力パルスの問題のみならず、そのエネルギーの吸収と、直接破壊効果に関し、動的な衝撃破壊のそれを静的な場合と比較することは重要であると思われる。即ちこれらの吟味とともに、多くのより静的な実験結果に注意を払つておく事が必要であらう<sup>10)</sup>。

### III 爆薬が固体に与えた応力波頭速度の簡単な測定法

#### (1) 爆薬による破壊効果の一般的様相

以上の如く、波の伝ばん速度は、波の性質をきらかにする上にめわめて重要であるが、この報告は Pack の行つた様な電気的装置を必要とせず、簡便に波頭速度を求める方法の発見と、その実例についての説明を行う。

爆薬で起つた空中又は水中の衝撃波については、かなり明かとなつてゐるが、固体内のそれとなると、大むね上記の諸文献に見られる様に割合少く、又実験方法も、空気や液体を相手とした場合を固体にあてはめてみても、とまどいすることが多い。従つて、両者に対する現象の差をよりよく観察することにより、固体に対してはそれにふさわしい方法が見出されるべきである。

即ち、流体については、一般に透明で内部空間の観察に便利であり、色々の光学的観察が容易であるが、現象の過程を保存するには非常に不安定で、それをとらえるには、瞬間的な「眼」を必要とし、そのための実験方法が必要である。それに反し、いま我々が対照とする固体物質には不透明なものが多く、E.M. Pugh 等が行つたガラスの爆発実験<sup>11)</sup>の様には、光学的に研究しようとするれば、その材質にかなりの制限を受け易い。また、X線的方法もあるが複雑な実験技術を必要

とする。然し、弾性限界を超えた力に対しては、歪や破壊効果を一種の時間の化石として観察することが出来ることは大きな利点である。

そこで、次に各々特長ある形態を示す二種の爆薬について、破壊変形効果を大まかに比較観察してみる。現在我国に存在する岩石用工業爆薬の内、新桐ダイナマイトと紫カーリットとは、各々特徴的な破壊効果の特性を持つて居るようであり、之を比較することは破壊機構を考える上に有益と思われる。

中央に径 38mm、長さ 200mm の鉛柱を封じた鉄管の両端から、爆薬 300g づつを装填し、8号管付導爆線で斉発せしめる。この鉛柱の周壁には、爆破後の破壊変形の観察を便ならしめるため、10mm おきに刻印をほどこしておく。爆破後、鉛柱を縦に切断し内部の変化をもしらべ、破壊変形の様相を簡素に表現すれば図 2 の様になる。

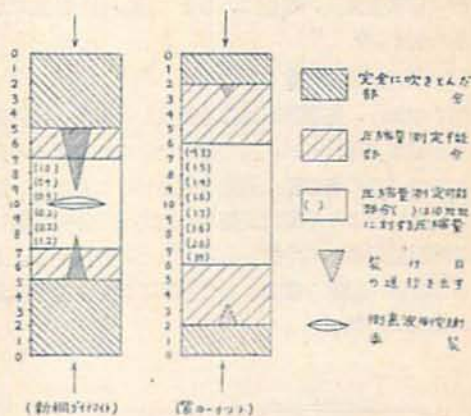


図 2 形態的な二つの爆薬による破壊変形効果

即ち、(1)爆薬によつて熔融膨散し去つた部分、(2)軸にほぼ平行な裂け目の進行している部分、(3)圧縮の測定可能な部分、(4)中央の特異な亀裂、に大別出来る。図より明かな様に、新桐ダイナマイトは (1) (2) (4) の効果が顕著であるが、紫カーリットは (3) に大なる効果を示す。

また、破壊と一口に言つても、その起つた因子によつて再現性にかなりの差があり、(2)の割れ目の発生などは烈しさの度合は統計的に論じ得るが、鉛柱端面のどの点から発生するかは、あらかじめ予言することは出来ず、むしろこの非再現性こそ本質的なもので、不均一系に対する考察のもとに、臨率的に研究すべきものと思われる。然し、膨散した量(この中には時にちぎれて飛んだものを含まれるが、それは別として)とか、圧縮量は、少くとも金属材料についてはかなり



の再現性が期待出来、これは考察を流体力学的に、ある連続性をもつて行い得る理由と思われる。但し第I報<sup>13)</sup>に行つた如く、破壊前後の全長の差で求める方法は、破壊端面の不規則性によつて、かなりの誤差をまぬかれ得ないであろう。(4)の亀裂の発生<sup>13)</sup>は実験条件を正しい状態におくならば、最も正しい位置と形状を与える。図2の実験は、媒体の両端から左右対称に攻撃した場合であるが、一方これを片側からのみ行つた場合もほぼ同様の諸効果を示す。この場合に、(4)の亀裂に相当するものは、Hopkinson破壊であるが、波頭の圧力振巾にむらがないければその位置はかなり良好な再現性がある。

即ち、この亀裂は、応力波々頭の衝突によつて起るのであるから、もしも一つの媒体の両面から、同一時刻に同一のパルスが進行すれば、その衝突点は媒体の中央に一致すべきである。この現象を利用すれば、媒体内の波頭速度を、簡便に、しかも爆源から任意の点で求め得る。<sup>14)</sup>

## (2) 測定法の実験

図3の如く、爆薬及び媒体を装置し、同長、同爆速の導爆線で点爆すれば、応力波の衝突点は媒体の中央となるが、この導爆線に長短の差をつけておけば、短い方の系は他より早期に発生し、応力波の衝突亀裂はこの時間差 $T'$ のため中央から $Z$ だけずれて生ずる。即ち時間を縦に距離を横軸にして波頭の迎る曲線を図示すれば図3の如く

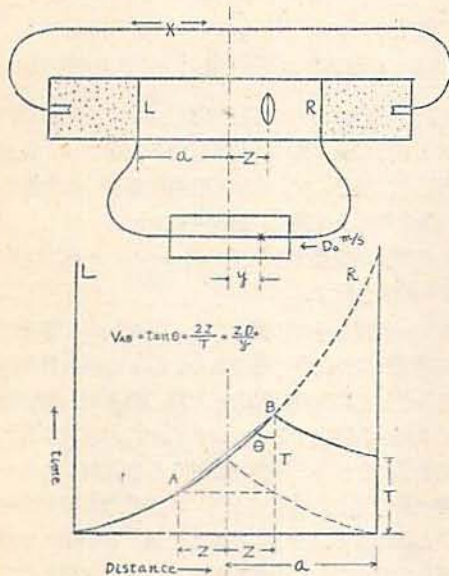


図3 爆薬によつて発生した応力波速度の測定法

## 2Z/T

は $\tan \theta$  即ちA.B間の平均速度となる。同図で $T'$ を段々大にして実験し、左からの応力波頭と右爆薬の爆轟波頭とが、丁度媒体右端面で衝突したとすれば、 $Z$ は柱長の $1/2$  即ち、 $A$ となり、 $2a/T'$ は2点間をあるものが走るに要した時間を求めて除す通常の方法に一致する。時間差 $T'$ は、Dautricheの爆速測定と同一の手段で、物体の両端面に導爆線を差し込んでおいて求める方が直接的である。 $Z$ は爆破後切断して求めるが、中央部の塑性変形のため、圧縮を受け、キャリパーで求めた距離を $Z$ とすれば、 $Z$ は真の値より小なるから、あらかじめ柱壁に等間隔に刻印をほどこしておき、 $Z$ の補正を行う。

この圧縮は、図2で見られる様に10mmに対し0.2~2mm程度である。尚、左右の爆薬は同一の爆速であるべきことから、十分定常状態に達する様な工夫が必要である。従つて、薬量はなるべく大量であることが望ましく、この実験では300g×2とした。

## IV 主としてT.N.T. ( $\Delta=0.95\text{g/cc}$ )による実験例並びに他の実験値との比較

### (1) T. N. T. の実験例

30×ツシで篩粉したT.N.T. 300gを、42mmの紙筒につめ、ボール紙筒に納めた後、径36mm、長さ $2a$ なる鉛柱の両端に装置する。使用導爆線は錫被覆ピクリン酸導爆線である。実測値は、表1にまとめておく。

測定の信頼性は、信頼度 $t$ を95%として計算すれば、 $a=7\text{cm}$ の測定値(11回)からは、信頼限界 $\pm 80\text{m/s}$ を得、 $6\text{cm}$ では(4回) $\pm 150\text{m/s}$ を得た。 $a$ が爆源に近い値をとるほど信頼性に乏しくなることがうかがわれるが、この値は満足すべき結果と思われる。参考のために、Dautricheの爆速測定の信頼限界を $a=7\text{cm}$ の結果(21回)から求めてみると $\pm 50\text{m/s}$ であつた。従つて、この応力波速度測定法は、爆速測定よりやや誤差が大きい程度である。

然し、 $a=6\text{cm}$ 以下では、鉛柱全体を破壊し去るから測定不能である。また14cm以上では通常のずれ時間の4~5倍を以てしても亀裂は発生せず、完全に音速となる。

実験結果を図示すれば、具体的に波の減衰の有様が分る。

波頭速度は、10~14cmで一定の値をとる様になり12cmで求めた速度は2100~2200m/sである。一方、鉛の平面的弾性波速度 $V_1$ は、前述の如く2150m/s、細



表2 T. N. T. による測定結果  
( $\Delta=0.95\text{g/cc}$ ,  $300\text{g}\times 2$ )

爆源からの距離 $\alpha\text{cm}$	中央からの亀裂ずれ $Z\text{mm}$	衝撃時間 $T\text{sec}$	応力波速度 $V\text{m/s}$	爆速 $D\text{m/s}$		
				L側	R側	平均
6.0	23.8	$7.74 \times 10^{-6}$	3080	4510	4600	4555
	9.5	3.14	3030	4330	4070	4200
	12.4	4.63	3080	4420	4410	4410
	13.5	5.01	2700	-	-	-
			平均3000			
7.0	19.5	$8.36 \times 10^{-6}$	2330	4540	4300	4420*
	16.1	7.01	2300	4380	4380	4380*
	16.9	7.62	2220	4460	4410	4440*
	18.2	8.02	2260	4440	4300	4370
	9.6	3.66	2630	4470	3540	4000*
	15.8	7.03	2250	4040	4230	4140*
	11.7	4.98	2350	4240	4300	4270*
	17.0	6.99	2440	4240	4320	4280
	16.3	7.10	2300	4000	4400	4200
	18.9	7.70	2450	4540	4370	4410
			平均2370			
8.0	14.3	$5.4 \times 10^{-6}$	2100	4690	4690	4690
	17.8	8.3	2150	-	-	-
			平均2130			
10.0	20.0	$9.87 \times 10^{-6}$	2030	-	-	-
12.0	30.8	$1.5 \times 10^{-5}$	2050	-	-	-*
	31.8	$1.45 \times 10^{-5}$	2200	-	-	-*
			平均2120			
14.0	発生せず	$3.65 \times 10^{-5}$	-	4420	4120	4270*
	T. N. T. 45g ( $\Delta=0.95\text{g/cc}$ ) の場合					
3.0	14.9	$4.7 \times 10^{-6}$	3170	-	-	-
	13.9	4.6	3050	-	-	-
7.0	発生せず	$7.5 \times 10^{-6}$	-	-	-	-
	T. N. T. 100g ( $\Delta=0.95\text{g/cc}$ ) の場合					
6.0	15.1	$5.3 \times 10^{-6}$	2850	4020	4020	4020

(註) \*は二体の鉛をグリースで接続したもの

長い棒の  $V_2$  は  $1200\text{m/s}$  であった。即ち、この実験は  $38\text{mm}$  径鉛柱で、ほぼ爆薬直径に等しい条件であったが、このときの音速はむしろ  $V_1$  に一致し、 $V_2$  よりはるかに大である(註1)。この直径と音速の関係は後の実験系列でより明確な知見が得られるであろう。更に実験結果の内でも最も重要なことは、 $\alpha=8\text{cm}$  以下では、明かに  $V_1$  より大なる領域が存在することで、鉛内に於ける衝撃波の形成が認められたことである。

次に、実際の操作上重要なことは、長い鉛柱を作る場合、注意深く鈍込んで、中部に「す」の発生することがあり、「す」のあるものは、そこで波が反射するため、実験結果が非常に乱れるものである。今の所、我々の技術では、長さ  $14\text{cm}$  までは殆ど良好な鉛柱が得られるが、 $20\text{cm}$  では間々「す」を生じ、 $25\text{cm}$  では非常に不良が多い。故に  $\alpha=7\text{cm}$  以上の場合は、所要の長さのものを接続して行うと良い。即ち、接続する面を注意深く研磨し、グリース、又はセメダイン等で接着する。このとき、接着剤の内部に空隙が生ずると、「す」がある時と同じく、波形を変化させるから注意が必要である。続いて第IV報で報告する様に、この接着剤の強度は問題にならないから、溶剤が揮発する様な一般接着剤よりも、グリース等が良い様である。セメダイン等も接着後直ちに実験するなら問題ない。表2の\*印は、この様な方法で、二体の鉛柱を合せて接続したもので、実験結果に本質的な差は見られず、又、先に波が出発したL側の接合断面では波が反射した形跡は無く、良好な波の通過を示している。この条件(鉛柱7cm片側衝撃)に於いては、波が反射すれば、強度の反射影響を引き起すものである。

## (2) 他の実験者による結果との比較

他方、前述の D. C. Pack の実験は、薬種は明かでないが、薬量  $45\text{g}$  で、陰極線オツシログラフを用い爆源から  $2\text{cm}$  の平均速度として  $3020\text{m/s}$  を得て居り、 $5\text{cm}$  附近から音速の  $2100\text{m/s}$  になることを示した。鉛柱の直径は  $75\text{mm}$  である。

そこで T. N. T.  $45\text{g}\times 2$  について、我々の方法の実験を行ったところ  $3\text{cm}$  の距離で、 $3000\sim 3200\text{m/s}$  の値を得、 $7\text{cm}$  では亀裂が発生せず完全な音速となつて居ることが推定された。両実験をくらべれば一方の薬種は不明であるが、良好に一致した結果と言えらる。

薬量は、 $100\text{g}\times 2$  にすると殆ど  $300\text{g}\times 2$  に近い結果となり、 $45\text{g}$  と  $100\text{g}$  の間にはかなりの差があるが、 $100\text{g}$  と  $300\text{g}$  では極度の差は示さないようである。

更に応力波の速度についてはこのほかに Rinehart が測つて居る。この方法はシリンダー状の物体内に爆薬を装填し、爆発せしめたときに起る応力波の側面からの反射波と、底面に於ける反射波との干渉を利用したもので、自由底面と、円錐状にはがれた亀裂面のなす角度を  $\alpha$  とすれば、爆薬の爆速  $D$  のもとに波の速度  $V$  は、

(註1) Kámán らの行った試験片直径は  $0.071\sim 0.375\text{in}$  である。



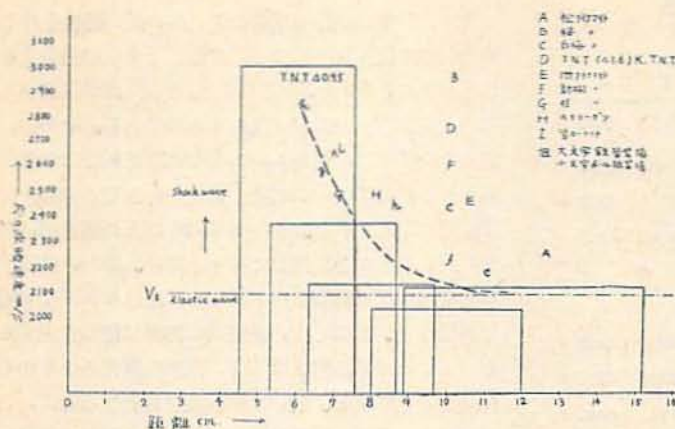


図4 爆源からの距離と応力波速度

$$V = D \cos \alpha$$

となる(図5)。爆薬は $C_0$ を用い、外径75mm、内径25mmの鉛柱について、2400~2200m/sの値を得ている。この値も、この報告の実験値にくらべて妥当である。そして、以上の三者共、鉛内では音速より高速の応力波の存在、即ち衝撃波の形成をとらえていることは興味深い。

### V 種々の爆薬による実験例

#### RINEHARI の行った方法

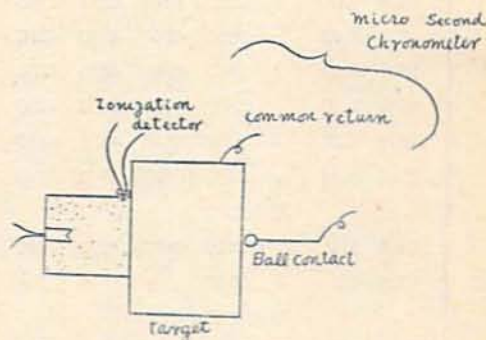
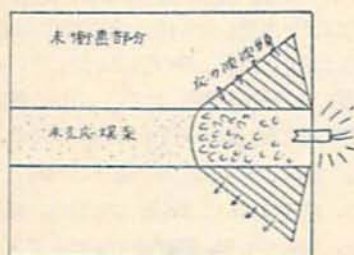


図5 B Pack の方法

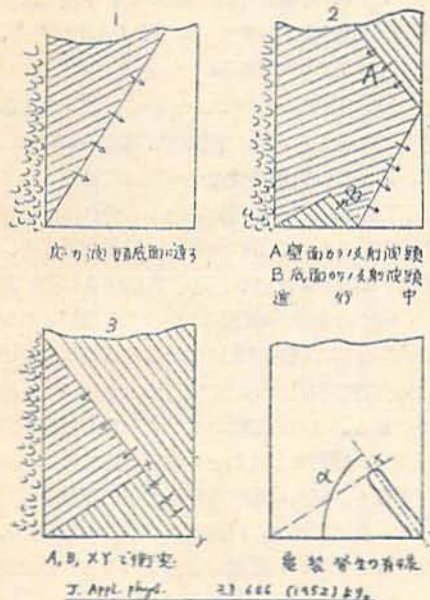


図5 A

以上は主として T. N. T. についての測定を例示したものであるが、数発づつ各種の爆薬について測定してみた結果を附記しておく。これらの実測値は、後に圧力パルスの定量に当り、一層厳密な検斗が加えられるであろう。求めた衝撃波速度は、之を図4の上に図示すれば薬種によつて、ほぼ妥当と思われる点に分布する。またいずれの値も 2100m/s 以上で、衝撃波の領域に属する。

鉄管内に装填して大なる爆速を示す新桐ダイナマイトの例は、ボール紙被覆にくらべ大なる衝撃波速度を与え、それに反して、あまり爆速の上昇を期待し得ない桂ダイナマイト、T.N.T. ( $\Delta 0.95$ ) 等はその位置に大差はない。

松、新桐、桂ダイナマイト、T. N. T. ( $\Delta 1.6$ ) 等は高い所に位し、大きな衝撃効果を物語っている。

### VI 総括

以上、爆薬の爆轟によつて生ずる、応力波の性質を明らかにするために、最近の諸文献の研究をまとめて、特に衝撃波(弾性波より高速な塑性変形波)の発生



表3 各種爆薬による実験例

薬種	a cm	Z mm	T/2 sec	V m/s	D m/s		
ボール紙筒装填	新桐ダイナマイト	9.25	17.0	$7.04 \times 10^{-6}$	2420	4430	
	◇	10.0	15.0	7.04	◇	2230 4630	
	桂ダイナマイト	6.5	14.4	5.57	◇	2580 3520	
	紫カーリット	6.5	15.8	6.85	◇	2310 4015	
	◇	7.0	22.5	8.41	◇	2670 3505	
	ヘキソゲン(Δ0.95)	3.5	16.1	6.61	◇	2440 5555	
	鉄管(内厚4耗)装填	新桐ダイナマイト	10.0	25.3	9.71	◇	2600 5530
		◇	11.25	21.9	$1.02 \times 10^{-5}$	2140	6375
		松ダイナマイト	11.5	18.5	$8.71 \times 10^{-6}$	2120	7910
		◇	12.5	15.8	6.71	◇	2350 8150
桜ダイナマイト		10.0	11.2	3.79	◇	2960 6025	
◇		10.5	18.0	8.01	◇	2240 5600	
白梅ダイナマイト		10.0	13.5	5.56	◇	2430 4740	
◇		11.0	15.8	7.27	◇	2170 4180	
T.N.T(Δ1.6)		10.0	17.2	6.26	◇	2750 7750	
T.N.T(Δ0.95)		7.25	13.1	4.93	◇	2660 4930	
ヘキソゲン(Δ0.95)	8.0	18.3	7.40	◇	2480 6890		
桂ダイナマイト	7.0	18.5	7.74	◇	2400 3450		
1号竹ダイナマイト	10.5	16.6	6.52	◇	2460 5860		
◇	10.0	16.1	6.10	◇	2640 6020		

可能性について論じた後、二種の形態的な爆薬による破壊変形効果の一般的観察を行い、簡便に波頭速度を求める方法を案出して、その解説とともに、多少の実験例について報告した。ここに、本報告を総括すれば次の如くである。

(1) 二種類の代表的形態の爆薬について破壊効果の大きな観察を行い、それらの効果の再現性について論じた。

(2) その効果のなかで、特に応力波の衝突効果に着目し、これを利用して行う簡便な波頭速度測定法を編み出した。

(3) 方法は、媒体(この実験では鉛)を中央に置き、その両端から同一種の爆薬を所定の時間差で点爆する。かくすれば、発火のとき媒体中央に発生すべき衝突亀裂が、その時間差のためずれて生ずる故、その距離の2倍を時間差で割って求める。衝撃の時間差は媒体の両端面に導爆線をさしこみ、Dautricheの方法に準じて求める。

(4) T. N. T. ( $\Delta 0.95\text{g/cc}$ ) 300g 一つの実験例について述べ、その信頼限界を求めた。測定が爆源に近づくにつれて信頼性に乏しくなるが、 $\pm 80 \sim 150\text{m/s}$  の信頼限界を与え、Dautricheの爆速測定( $\pm 50\text{m/s}$ )よりやや劣るが、方法の簡便さとともに満足すべき結果を示した。

(5) この方法を爆源から種々の距離について行い8cm以下の領域では明らかに音速 $V_1$ より高速な波の存在すること、即ち衝撃波の発現を認めた。

(6) その誠実性と、測定結果からこの実験条件に於ける音速を推定した。それは2100m/sで、ほとんど $V_1$ に一致した。

(7) 実験結果を、他の実験者の結果と比較し、それらとの間に大差が見られぬことを示した。

(8) さらに、実験例として、数種の爆薬についてボール紙被覆と鉄管装填の別を比較した。各種爆薬とも妥当な結果を示す。

討論に応ぜられた田中一三君に感謝し、又、終始温情を以て本研究を指導される村田博士、並びに、鞭撻して戴く東大正田教授に感謝する。

文 献

- 1) Theodore von Kármán. and pol Duwez; J. Appl. Phys 21 987(1950)
- 2) P. W. Bridgman; Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences. 77 187 (1947)
- 3) D. C. Pack, W. M. Evans and H. J. James; Proc. phys. Soc. 60 1(1948)
- 4) Theodore von Kármán. NDRC Report A-29 (1942)
- 5) Pol Duwez; NDRC Report A-33
- 6) G. I. Taylor; British Official Report RC 329 (1942)
- 7) M. P. White and Le van Griffis; J. Appl. Mech. Trans ASME 69 A-337(1947)
- 8) D. S. Wood; J. Appl. Mech 19 521(1952)
- 9) J. S. Rinehart.; J. Appl. phys 22 555(1951)
- 10) 例えば(物理学論文選集46日本物理学会より)  
“ガラスやもろい固体の破壊機構” N. W. Taylor; J. Appl. phys 18 943 (1947)  
“ガラスに対する Rate-Process の応用(破壊の強さ)” F. B. Hodgdon; J. Appl. phys. 21 1156 (1943)  
“破壊問題の静的な考え” B. Epstein; J. Appl



- phys. 19 140 (1948)  
 “鋼の破壊応力” C. Zener; Rev. Mod. Phys. 17  
 20 (1945)  
 „破壊の跡の説明” J. A. Kies; J. Appl. Phys. 21  
 216 (1950)  
 “ゴム及び合成弾性体の超スピードの張力”  
 D. S. Villars; J. Appl. Phys. 21 565 (1950)  
 11) E. M. Pugh; J. Appl. Phys. 23 48 (1952)  
 12) 桜井武尙; 火協誌 13 138 (昭27)  
 13) 桜井武尙; 火協誌 13 272 (昭27)  
 桜井武尙; 火協誌 14 167 (昭28)  
 Taylor; Research, 5 502 (1952) (鋼について)  
 14) 桜井武尙; 火協誌 14 58 (昭28)  
 桜井武尙; 科学 23 473 (1953)  
 15) J. S. Rinehart, and J. Pearson; J. Appl  
 Phys. 23 685 (1952)

## 第IV報 爆発によつて固体内に発生した衝撃波形測定法

### I. 緒 言

先に、爆薬の爆発によつて、鉛柱内に発生した応力波は、爆源近くに於いては弾性波よりも速く、衝撃波が形成されることを明らかにしたが、波の速度のみならず、衝撃波の波形をしらべることは、爆薬の性能吟味上重要な問題である。

この測定法としては、圧電気的方法も考えられるが、少くも十気圧以上の爆薬の猛衝撃を受けて耐え得る様な、強力な圧電気片の見当らぬ現在、直接媒体の挙動の種々相を測定して求めるのも一法である。この方法の一つとして、最近 Rinehart の報告があり、これを試みたのが本報である。

測定例は、Ⅲ報と条件を一にする T. N. T. (40.95 g/cc) について行い、特に実験実施上の要点を述べる。後記のペレット速度測定そのものには、色々な方法が考えられるであろう。

### II. 衝撃波形を求める RINEHART の方法<sup>(1)</sup>

この一連の研究に使用する鉛については、衝撃波が成形されることは明らかであるから、以下圧縮応力波を衝撃波と称して進む。

R氏が行った方法は、Hopkinson 法と似ているが本質的には波形曲線(応力~時間)内の運動量を実験的に決定することである。

ここに、同じ材料から成る2つの物体 A, B が、ある断面 MN で接着されているとしよう(図1) この接着剤は、引張りには弱い、圧縮波は形を変えることなく通過せしめるものとする。いま、圧縮波が A を通つて右に進行しているとすれば、波は MN 面を何ら

の影響無しに通過して B に入り、その自由端面で反射して張力波と変じ、もとに引きかえす。この時、B の厚さが波長入の  $\frac{1}{2}$  より大きければ、反射波が MN 面に到着したとき、B は波内の総運動量を以て右にとび出すであろう。この B の保有する運動量は、波の応力~時間曲線内の全面積である。

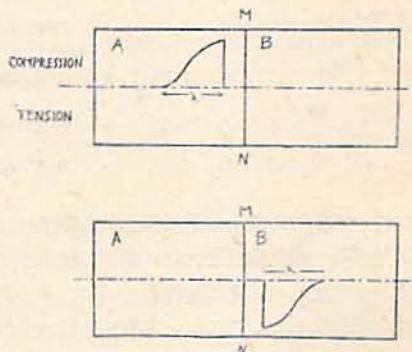


図 1

そこで、もしも B の厚さが波長の  $\frac{1}{2}$  より小さい時は、この波の運動量の一部分だけが B に与えられ、この量  $M$  は次の如くなるであろう。

$$M_B = \int_0^T \sigma(t) dt \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $T$  は波が B の厚みを往復するに要した時間であり、 $\sigma(t)$  は時間の函数としての応力を示すものである。従つて、実験的には、B の厚みが薄ければそれだけ波頭から近くの部分の運動量を与え、順次厚みを大にして行けば、遂には一定の総運動量となるわけである。この間の消息を更に詳しく説明しよう。

今、静止している媒体の中を、物質速度  $v$  をともない、速度  $v$  なる衝撃波が進行するものとすれば、応力



$\sigma$  は次式であらわされる。

$$\sigma = \rho_0 c v \dots \dots \dots (2)$$

但し、 $\rho_0$  は媒体の最初の密度である。従つて、実験的に求めるものは、 $c$  及び  $v$  である。 $c$  は波内で一定と考え、また、その簡便な求め方を第Ⅲ報に示したが、問題となるのは  $v$  である。

ここに、 $B$  (下記のペレット) の飛ぶ速度が  $v$  に等しいと考える一つの素朴な着想がある。即ち、「 $B$  の保

さの2倍に対して目盛れば図3の線になる。

(必ずしも、ペレット厚さを2倍にして目盛る必要はないが、続いて波の作用時間を求めるのに便。)

ところで、この実測値  $v_1' \sim v_2'$  は、あくまでもペレット厚さの平均速度であるから、そのままで波形は求められない。例えば、 $L_2$  の厚さで求めた  $v_2'$  は  $L_0 \sim L_2$  の平均速であつて、 $L_2 \sim L_1$  間の速度を与えるものではない。即ち、 $L_2 \sim L_1$  間に示すべき速度は、 $L_2 \times v_2'$

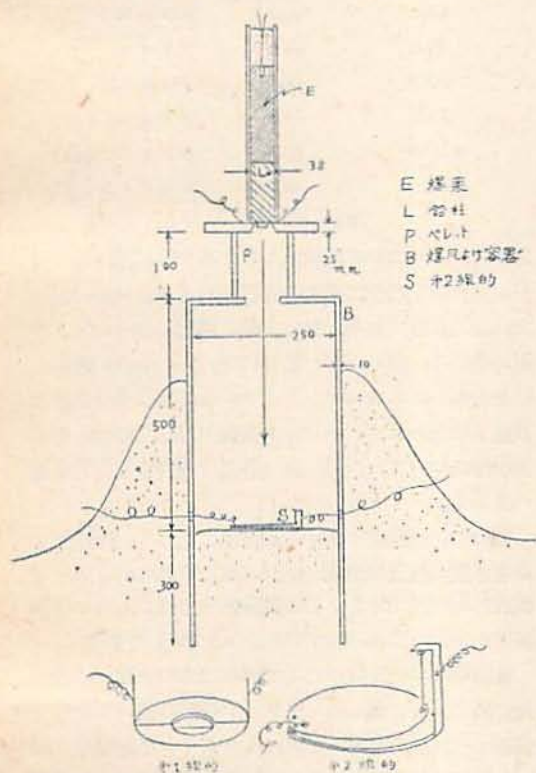


図2 実験装置図

有する運動量を求める」と述べたが、これは  $B$  の速度  $v$  を求め、(2)式右項の積から  $\sigma$  を算出し、それを  $\sigma \sim t$  図に画いたとき、その面積  $\sigma \times t$  が波の運動量となる意味である。

実際の手段は次の様になる。図2の如く、一端に爆薬を接した媒体の他端面に、同質材料で作つたペレット (Pellet) をはりつける。図1で、鉛柱は  $A$  に、ペレットは  $B$  に当る。この時、接着剤は、媒体の抗張力に比して十分弱いものである事と、空隙の存在しないが必要である。ペレットは、0.5~10mmの種々の厚さのものを準備し、之を同一長さの媒体にはりつけた後、爆薬を装置して点爆し、何らかの方法で  $v$  を測定する。この操作をくりかえし、求めた速度  $v$  をペレット厚

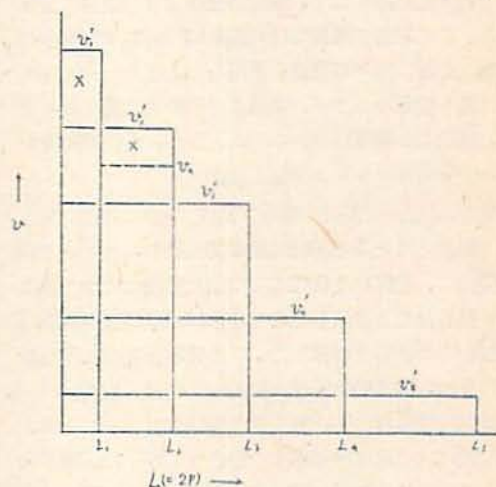


図3 ペレット速度  $v'$  と原さの関係説明図

から、図3の  $X$  だけ差し引いて考えるべきである。従つて、一般に次式によつて求めるべきである。

$$v_i = \frac{v_i' L_i - v_{i-1}' L_{i-1}}{L_i - L_{i-1}} \quad i=1,2,3,4,5, \dots (3)$$

この様にして、 $L_i \sim L_{i-1}$  間の速度  $v_i$  が求められれば (2)式によつて、直ちにこの間の応力レベルを求め得る。

一方、波がペレットに与えた作用時間  $t$  は、波頭が  $c$  なる速度を以てペレット厚さを往復したのであるから、

$$t = L_i / c \quad (\text{但し、} L_i \text{ はペレット厚さの2倍}) \text{ と}$$

なる。かくして順次  $\sigma \sim t$  図を画くことが出来る。

### Ⅲ. 実験の要領

実験の要領を順を追つて列記する。

#### (1) ペレットの作製

この実験では鉛柱を用いるから、ペレットも鉛製とする。色々な厚みの鉛板を準備し、厚さの一定な、平らなペレットを作製する。厚みにむらのあることと、面に凹凸があることは禁物である。

#### (2) 鉛柱の作製



径38mmの鉛柱を所要の長さに切断し、面を研磨して平らに仕上げる。

### (3) ペレットの接着

接着剤は、数種類用いてみた結果、グリースが最も良好である。こみ、又は空気の存在しない様注意する。

### (4) 爆薬及び実験装置

所要量の爆薬をボール紙筒又は鉄管に装填し、ペレット付き鉛柱をそえて、鉄製の爆風よけ容器上に装置する。この報告の実験では、爆薬はT.N.T(Δ0.95g/cc) 300g、点爆には8号雷管を使用した。また、ペレット部に第1線的をもうけ、爆風よけ容器内に第2的を置く、同的間の距離は50~70cmとした。の低速性から、十分電磁オッシュロが使えらる。

最初、爆薬及び鉛柱を空中に垂直に吊して行つた所、第1線的のほとんど同時に第2的が切れ、ペレットの衝突前に、空气中を伝はんで来た波動によつて第2的が感じたことを示したので、図2の様な容器を作り、外部からの影響を排除した。この容器は底部を深く砂地にうめ、第2的は容器に接触しない様に置く。

線的は図の様にし、第1的の線は糸ヒューズ1本、第1的にはこれを2~3本より合わせて用いた。第2的はこの他に色々な形が工夫されよう。

この様に装置された第2的は、的間距離60cmに於いて、ペレット無しの場合5回の試験に耐え、外部からの影響は全く排除された事を示した。ヒューズの切断時間のひらば、ペレットの低速性から問題にならない。また、ペレットの自由落下速度の補正も行うが、速度の大きな領域では殆ど問題にならない。

## IV. ペレット速度の減衰性と接着剤の吟味

瞬間写真、または活動写真法の様には、ペレットの運動を直接記録する方法ならば、最も厳正な初速が得られるが、ここに行う方法は、二的間の平均速度を述べることになるので、速度の減衰性を実験範囲についてしらべておくことが必要である。

実験条件は、T.N.T. ボール紙装填、鉛柱長さ8cm、ペレット厚さ1.9mm、同直径30mmである。同時に接着剤を吟味するために、実験中数種類用いてみた。実験結果は表1の如くである。

セメダイン(生)とは、ペレットの接着直後に実験したもので、(乾)とは2日放置乾燥後のものである。14cmでは径15cmの小さな爆風より容器を使用し、20~30cmでは20cmのものを使った。14cmでも数発行つたが、2的の防御十分でなく、成功したのは1発のみで

表1 ペレットの減衰性に関する実験  
的間距離(cm) 速度(m/s) 接着剤

的間距離(cm)	速度(m/s)	接着剤
14.4	46.0	グリース
21.6	46.8	セメダイン(生)
28.6	46.0	グリース
28.7	44.2	グリース
68.5	45.4	セメダイン(生)
68.5	44.8	そくい(生)
68.6	46.7	グリース
69.5	44.5	グリース
70.3	44.7	グリース
71.0	44.1	グリース
*71.5	37.2	セメダイン(乾)
68.6	45.7	セメダイン(乾)
平均 45.3		

あつた。20~30cmに於てもやや不十分の感があつたが、これは2的を工夫すれば救われよう。60~70cmでは全く良好である。故に本報の実験値中ペレットの径が小さく、厚さの薄い場合には、径の小さい爆風よけを使用したのでオッシュログラフの写真は十分良好な状態とは思われず、ペレット直径10及び20mm等の実験値については次報に更に詳細に報告することを述べておく。

従つて、短距離に於ける測定値に乏しく、距離による有意差の検定は出来ないが、表より見るに、大きな減衰はない様である。この実験値を全部まとめて信頼限界を求めるに、 $t=95\%$ のもとに $\pm 2m/s$ であつた。

接着剤については、ここで試みたものの中には蓋が無い様である。然し、セメダイン(乾)に於いてかなり低速の一例が出たが、これはセメダインの乾燥中に起つた空隙の爲と思われる。これらの接着剤で2枚の透明ガラス板をはりつけ、その変化を観察するに、セメダインは乾燥に従つて周囲から空隙が進行する有機が間々見られたが、接着剤としては、この様な変化が無いグリース等が良いと思う。

この接着剤の存在が波形を変化させるか否かについて、さらに、次の様な実験を行つてみた。即ち、鉛柱を2分し、接着剤ではりつけたものと、然らざるもの

表2 柱鉛内に於ける接着剤の存在とペレット速度変化(実験条件表1に同)

接着剤	速度(m/s)
A 接着剤付	45.5
B 接着剤付	35.8
C 鉛柱一本	45.3



について、ペレット速度を比較してみた。

接着剤のあるものは、一体のものと変わらないが、元の鉛柱間に接着剤のないものは低速で、断面で波形の変化が起る事を示して居る。尚、Ⅲ報に於ける波頭速度の測定例に於いても、鉛を2分した時、良好な状態の接着剤があれば、波頭速度に変化がなかつたことを想起そう。

### V. T.N.T. についての実験例

(1) 鉛柱長さ、ペレット厚さ、及び直径を変化させた時の $\sigma$ 実測結果。

Ⅳと同一の条件で行つて見た一連の実験結果は表3の通りである。

表3 T.N.T. (40.95g/cc)による $\sigma$ 実測結果  
鉛柱長さ

$a$ (cm)	ペレット直径 $\phi$ (mm)					
	10		20		29	
	ペレット 原 $P$ (mm)	速 度 $v$ (m/s)	$P$	$v'$	$P$	$v'$
6.0	0.5	168	0.5	134	0.5	110
	1.0	122	1.2	102	1.0	90.6
	1.9	107	1.9	72.5	1.3	77.2
	-	-	-	-	3.0	63.6
	-	-	-	-	5.7	51.3
8.0	0.5	92.7	0.5	73.5	0.6	64.3
	1.2	69.6	1.2	55.6	1.4	53.7
	1.9	51.8	1.9	51.3	2.0	49.3
	-	-	-	-	3.0	31.6
	-	-	-	-	3.8	24.6
10.0	0.5	55.2	0.5	49.4	0.5	47.0
	-	-	1.2	41.2	0.8	34.3
	1.9	43.1	1.9	39.1	1.9	21.0
	-	-	4.2	19.1	5.2	9.7
12.0	-	-	-	-	0.5	20.1
	1.9	21.4	1.9	16.7	1.9	12.2

之を(3)式に従つて、速度とペレット厚さの2倍の図に示せば図4となる。

この各々の $\sigma$ を用いて行う $\sigma$ の実験計算例を次に示す。

$a=6$ cm, ペレット厚さ  $P=0.5$ mm, 同直径  $\phi=10$ mmに於いて,  $v=168$ m/sを得た。鉛の密度  $\rho_0=11.4$ g/cc衝撃波速度はⅢ報に於いて $c=3000$ m/sを得た。依て(2)式から直ちに,

$$\sigma = 11400(\text{kg/m}^2) \times 3000(\text{m/sec}) \times 168(\text{m/sec}) / 9.8$$

$$(\text{m/sec}^2)$$

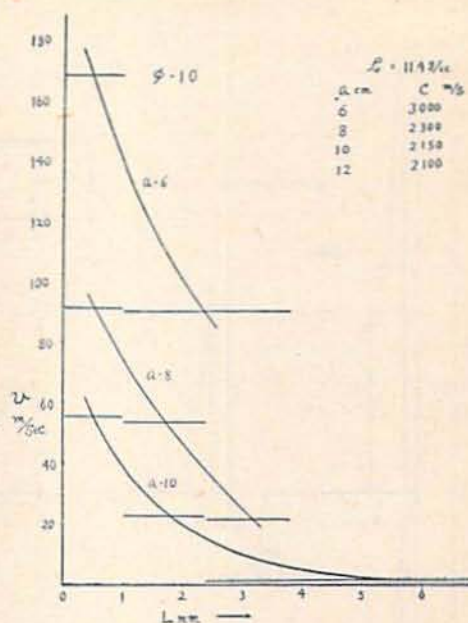


図4 ペレット厚さと速度の関係

$$= 5.67 \times 10^8 (\text{kg/m}^2) = 5.67 \times 10^4 (\text{kg/cm}^2)$$

また、波頭が  $L=2P=0.5 \times 2$ (mm) を通過するに要する時間  $t$  は,

$$t = 0.001(\text{m}) / 3000(\text{m/sec}) = 0.33 \mu\text{sec.}$$

となる。これを  $\sigma-t$  図に図示すれば、この矩形面積が波頭から1mmの間の波の運動量となる。この様にして求めた波形が図5である。

そこで、この衝撃波の波形図を基礎にして、二、三の考察を行つて、次の実験の参考とする。

#### (1) 物質速度のオーダーについて

この実験では、前述の様に、ペレット速度が $v$ に等しいと仮定してある。そこで全く異つた方法で行つた実験結果と比べる事は重要な意味がある。この点について William A. Allen<sup>(2)</sup> が「鋼の中の衝撃波によつて起つた自由面の運動」と題して、興味ある実験結果を発表している。矢張り、爆薬を以て鋼柱を攻撃し、鋼柱自由端面の運動を Sweeping image camera で観察したものであるが、 $v$ として50~120m/secを与え、これはR氏や我々の実測値のオーダーと一致して居る。

#### (2) 波の減衰性について

衝撃波は、初め非常に切り立つた勾配を示すが、波頭応力の減衰につれて、なだらかな傾斜となつて行くことが分る。図6は、波頭応力(0~0.33 $\mu$ sec)が距離と共に減衰する様を示したものであるが、之を爆薬に



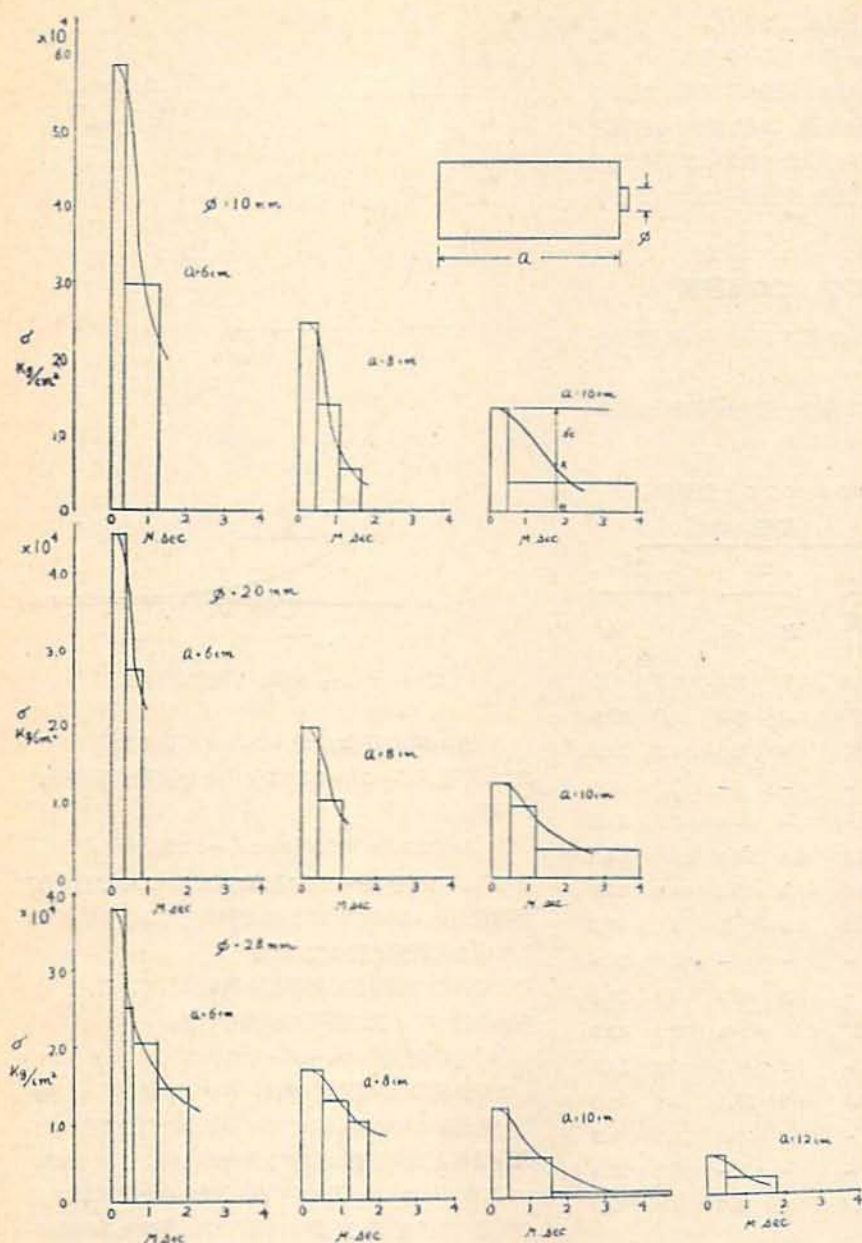


図5 T.N.T.(J0.95)による鉛柱内の衝撃波形図

内挿すれば、14~20万気圧位で、上に凹の形で減衰し、6~10cm 間に変曲点が存在する。12cm に於いてはかなり減衰するが、尚5,000気圧を示している。然し、次項で求める様に、鉛の限界張力は8,000気圧であり、すでに端面の剝離は起り得ない事が分る。

これらの実測値を爆源にまでさかのほれば爆轟圧力の推定が可能となるが、古い Becker の計算値は過小であり、最近の Blinkley-Wilson 又は木原定田氏の

点の味は爆破の考求に当り、かなり重要な問題点である。

### (3) 動的抗張力 $\sigma$ の決定

動的な破壊と、静的な破壊との、特徴的な差として、破壊に対する抵抗の差がある。この動的抗張力  $\sigma$  は図5の波形と第報の鉛柱実験によって決定出来る。先に、同一実験条件で  $a=11\text{cm}$  のとき、鉛柱厚

等の計算は良好に一致する様である。この点は更に第V報で述べる予定である。

Rinehart は、(2)式の計算に当つて、波頭速度を全金属共音速で行つたが、この仮定が成立するか否かによつて、多少実際の値と異なることが考えられる。然し、Composition C<sub>3</sub> についての、銅鉄等の実験結果は、図6に表すと、我々の鉛の実験より下に位するが、全般に急傾斜であり、T.N.T.(J0.95)より高い爆轟圧を示しているのは当然であろう。

又、注目すべき事は爆薬は、同一であつても、媒体の質によつて、減衰曲線の位置と形が異なる点である。これは、過去に残したエネルギーの吸収が、材料の破壊変形と何らかの関係があることを暗示するものであろう。即ち、図5の衝撃波形(応力~時間曲線)の面積の減少と、破壊変形によるエネルギーの吸収とはかなり直接的な関係があると思われ、この



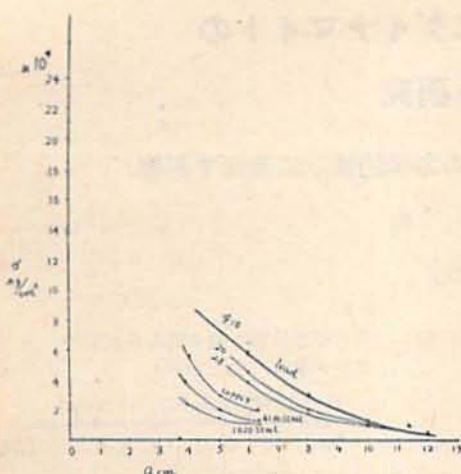


図6 波頭圧力の減衰曲線

さ  $Z=3\text{mm}$  を得ている。けれども、本報告では  $a=11\text{cm}$  の波形は求めてないから、 $a=10\text{cm}$   $Z=2.6\text{mm}$  の値を採用する。 $a=12\text{cm}$  では距離足りない。

即ち、第1報の解説の如く、 $a=10\text{cm}$  の波形で  $t=2Z/C=1.73\mu\text{sec}$  に於ける波内応力  $\sigma_{1.73}$  を、波頭応力  $\sigma_0$  から差し引けば、

$$\sigma_0 = (1.37 - 0.56) \times 10^4 = 8 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$$

を得る。これは鉛の静的抗張力  $2 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$  の約40倍に相当する。

## VI. 総括

第III報の衝撃波の波頭速度測定法に続いて、波内の物質速度の測定と応力の算出に関し、主に Rinehart の行った方法を紹介して、T.N.T. と鉛について行った実例を示した。

この報告を総括すれば次の如くである。

(1) R氏の改良ホプキンソン法を紹介した。

先ず、媒体に同質材料の小さなペレットをはりつけ爆源から進行して来た衝撃波の反射張力によって飛ば

される速度を突測し、之を波頭からペレット厚さの2倍の距離までの波内の物質速度  $v$  と見る。別に衝撃速度  $C$ 、及び媒体密度  $\rho_0$  を求め、応力  $\sigma$  は三者の積として算定する。波がペレットに作用した時間  $t$  は、ペレット厚さの2倍を  $C$  で除して求める。かくして、 $\sigma-t$  図を画けば、その面積が波の運動量となる。

(2) この実験では、ペレット部に第1線のを、また、適当距離に第2線のを置いて、電磁オシロによって  $v$  を求めた。ペレット速度の減衰性をしらべたが、14~70cm間には大なる減衰は認められない。同時に、ペレットの接着剤についても吟味し、グリースが良好なことを知った。

(3) T.N.T. ( $d=0.95\text{g/cc}$ ) 300g、ボール紙筒被覆下で一連の実験を行い、爆源から種々の距離に於ける衝撃波形を求めた。衝撃波は、初め非常に切り立っているが、波頭応力の減衰と共になだらかな形となる。

(4) R氏の実験結果 (Composition  $C_3$ ) と比べれば T.N.T. ( $d=0.95$ ) より  $C_3$  の方が大きな爆轟圧力を示す如くである。然し、波頭の減衰性は、同一の爆薬に於いても媒体に依つて異り、波形面積の減少性と、媒体の受けた破壊変形とは、かなり直接的な関係があることを直感する。

(5) 鉛の動的抗張力を求めて、静的な場合に比較した。 $\sigma_0$  は約  $8,000\text{kg/cm}^2$  で、静的な場合の40倍に相当する。

(6) ペレット速度が、物質速度  $v$  に等しい言ひ考えは、突測値の大きさからみて正しいと信ぜられる。

終始温情を以て指導される村田博士に感謝する。

## 文 献

- (1) J. S. Rinehart; J. Appl. phys. 22 555 (1951)
- (2) William A. Allen; J. Appl. phys. 24 1180 (1953)
- (3) 「爆轟理論の進歩」 元田: 工火協 13 77 (昭27)