

此のことは既に吾国でも外国でも為されているところであるが、吾々は雷汞爆粉雷管に就いて此等の追試を行うと共に、今迄に行はれていない性能変化、特に低温にすることに依る完爆能低下の原因について考察を行い次の結論を得た。

1. 雷管の完爆能は低下する、然し長内管を使用し、爆粉を添装薬中に凸入させた形式にすると、 -183°C 云々の液体酸素の温度に迄雷管を冷却しても半爆の発生を防止し得る。そしてこの型式であれば添装薬の圧搾圧力、薬種(テトリール、PETN、ヘキソゲン)点火方法が本実験の実験範囲内で変動しても半爆の発生を防止し得る。
2. -183°C と云う低温にしても半爆の発生する様な型式のものでは少くとも鉛板孔径は減少するが、半爆の発生しない上記の様な型式にすると起爆能の低下は防止し得る。
3. 雷管の完爆能低下の原因は、爆粉の臨界点火エネルギーが低温程大となり、ひいては至完爆距離も増大するためであると考えらる。

本実験を行うに当っては勝原折尾作業所所長及び日野博士の御指導のあつたことを記して謝意を表す。又直接実験を担当された松尾、勝原両君にも謝意を表

する。尙本報告の要旨は昭和30年春季火薬協会講演会に於いて発表した。

文 献

- 1) 坂本勝一：工業火薬協会誌 11 (1) (1950) 41.
- 2) 須藤秀治，坂口逸夫，太原正：工業火薬協会誌 12 (1) (1951) 18~23.
- 3) 太原正，坂本勝一：工業火薬協会誌 13 (2) (1952) 101.
- 4) A. Stettbacher; Die Schiess-und Sprengstoffe (Zweite Auflage) (1933) 321.
- 5) L. V. Clark; Z. S. S. 28 (1933) 345~348.
- 6) 又木武一：工業火薬協会誌 11 (1) (1950) 3.
- 7) 福山仁：社内報告 (1953).
- 8) 木下四郎，福山仁，細村美義，未発表
- 9) 浜田顕吉郎：火薬読本 (白亜書房) (1950) 161.
- 10) 木下四郎：工業火薬協会誌 15 (1) (1954) 3~4.
- 11) 木下四郎：工業火薬協会誌 15 (3) (1954) 167~168.
- 12) 木下四郎，福山仁，細村美義：工業火薬協会誌 16 (2) (1955) 80~84.

爆薬猛度の実験的研究

第Ⅴ報 爆薬による固体内衝撃波速度の電気的測定

(昭和31年1月25日受理)

桜井武尙

(日本油脂株式会社武豊工場)

I 緒 言

先に、固体のみならず、種々の物質についても同一の方法で行うことが出来、結果の物理的意義もかなり純粋と思われる衝撃波速度測定法を考案、報告した²⁾¹⁾。然し、この方法は一つの爆薬が鉄に与えた応力波の型を正規の弾性波と仮定することによつて組立てられたものであつて、この仮定の妥当性はさらに吟味する必要があつた。本報告は、第1にこの目的から、鉄、鉛、銅、アルミニウムの諸金属について電気的に測定し、第2に、純粋に電気的測定が可能であると思われる空気について上記の補正值の妥当性を調べ、第

3に、衝撃波面又は波内の物質速度測定の基礎を作つておく目的で行つたものである。

II. 爆破の解析に必要な爆源部の 爆相の推察と衝撃破の役割り

実際の岩石爆破に当つて、仲々抽象化した理論がたてにくいのは、爆破の諸現象に不明な点が多く、爆源近くの初期の現象にはマイクロ秒のオーダーで観察しなければならぬ実験的困難があり、さらに進んで、ミリ秒のオーダーでより静的に観察出来る領域に及んだとしても、破壊条件の複雑さには変りないことにある。

ただ、後者では、現在、かなり整然とまとまつた力学的研究から導かれる引張り主応力による破壊説を武器として、一応の理論は成り立たせることは出来る³⁾。然し、これらは爆源から或る距離をへだてた位置での議論であるし、爆源部には或る仮定を置いて出発している。元来、爆破の現象は刻々に変る全履歴が結果を生ずる不可逆過程であるから、初期の爆源で如何なる現象が起つているかを調べる研究も是非必要である。

おそらく、爆薬の爆発によつて投射された強い波動は、その伝播につれて媒体を直ちに粉碎するか、または、粉碎の核をまきちらしながら進行する若干の距離があるであろう。この非常に激しく行われるもういタイプの粉碎層では、応力の集中が均一化して破壊の持つ統計的な性格は見かけ上失われた様な、破壊の様相を見せ、ここで波の保有するエネルギーの相当の割合が失われるであろう。

この不連続的に波によつて与えられた破壊の核の発生と亀裂の成長が粉碎効果にどのような時間的効果を持つているかを調べることは、応力集中が起つた時の塑性変形の量と破壊現象との関係を示す概念の確立にも役立つと思われる。

次で、波が減衰するにつれて、波の持つ破壊効果は次第に統計的な性格を発揮し始め、枝分れのひびの進行層が存在するであろうが、この場合でも上記の概念は重要であり、更に現象後期の膨脹ガスによる引張り又は剪断破壊においても同様なことが言える。この時、俗に爆破技術者が岩石が“しわい”又は“固い”等と言う表現は、爆発によつて与えられた岩石内の物質移動速度が各点で剪断の臨界値に達して応力の集中が起り始めた時、微少な塑性変形が許せるか否かの表現とも思われる。

故に、最初に投ぜられる強い応力波の粉碎及び枝分れの破壊効果は、波の速度、波長、物質速度等の特性の変化につれて一連に推移すると見るのが正しく、言いかえれば、これらの物理量に応じて破壊の統計的性格が変化して行く過程と見るのが正当のようにも思える。そうすれば、実用的にはある限界層を設けて考えることは可能かも知れないが、明確に爆源からどこまでが粉碎層かを断定するのは本質的に無理なことかも知れない。

この爆源部における破壊効果は今の所全く未知の分野であるが、従来の考えによれば衝撃速度が大となるに従つて次の四段の衝撃の型が考えられている⁴⁾。

(1) 低速度衝撃。ここでは低速度の引張りに見られるのと同じ性質が圧縮に於いても期待出来る。

(2) 衝撃波の成立。衝撃は非常に大きな応力～歪の勾配で伝播する。

(3) 流動変形。(2)の衝撃的な速度を持つには、物質はあまりにも弱い状態となり、固体は連続的に液化流動する。

(4) 超音速衝撃。現象は(3)のタイプと同じであるが衝撃速度は媒体に起る可能性がある如何なる攪乱速度をも凌駕し、物質は液体のように挙動する。これは、衝撃源となる爆轟波中の物質速度は一般に材料の音速以下であるから、無視しても良いと思う。

これらの内、(3),(4)のタイプは未だ現実に実証されたものではないが、理論的には合理性があると考えられている。従つて、ごく爆源近くの粉碎は、或いは(3)の液化岩石が応力の解放と共に“凍結”する過程で実現するものかも知れない。もしも、このようなことが起れば、爆源部では前記の概念とはよりどころを異にした薄い不連続的な破壊層を論じ得るかも知れない。

とにかく、一般に爆薬を用いた時、その衝撃速度は上記(1)~(2)の限界速度を突破し、音速以上の衝撃形の波動が見られているから、今の所多くの場合爆源部に衝撃波の存在を認めて進んでも良いと思う。

ただ、衝撃波の速度は、その大小をもつて種々の現象を律することは出来ず、種々の考察に重要な波面の圧力を論ずるにしても、先ず媒体の比重、物質速度等の諸因子をも考える必要があり、現象を支配するものは、種々の熱力学的、力学的諸効果を含めた高圧高速下の固体の性質が根本になると言える。この時、数万～数十万気圧の瞬間高圧力の直接測定は不可能であり、温度、比熱等の熱力学的性質の変化も動的測定はきわめて困難である。然し、波面、又は物質の運動速度は測定不可能ではないから、これが種々の手がかりとなる。但し、物質速度は矢張り純粋な意味のものとは得難く、測定結果の理解には理論の裏付けから得られた知識を必要とする。けれども理論は未だ十分に確立してはいないから、物質速度については当分の間理論と実験が拮抗して進むことになると思われる。これに反して、衝撃波の波頭速度は困難ながらも純粋に直接測定が出来る唯一の量であり、理論の妥当性をはかる大切な尺度となるものである。

以上の効果は、爆破の現象の内、非常に初期的な効果であるから、これを波の持つ一次の破壊効果としておこう。然し、衝撃によつて投射された応力波の効果には現象の後期になれば種々の干渉効果が含まれて来る。これをここでは波の持つ二次の破壊効果としておく。この二次の波の効果は実際にどの程度の効力を持

つかについては、更に波の減衰性と材料の物性の両面から吟味すべき興味ある問題である。

III. 実験方法

衝撃波の速度測定は爆轟波と固体内衝撃波の検知、並びに時間の測定とから成り立つが、衝撃波面は急峻な圧力勾配をもっているから、圧電的方法も良い。然し、爆源近くでは、直接試料に接触させるとビニール片は破壊される。この方法も本質的には波の力学的効果の捕捉によるものであり、他の方法を考えるにしても、矢張り力学的な効果を重視する以外に、手段は簡単になさそうである。また、微小時間の計器としては、従来のように火薬の爆発を利用する以外では、一般に電気的計器が考えられる。

そこで、衝撃源である爆薬中の爆轟波が試料面に到達したことは試料表面に置かれたイオン探針で知り、衝撃波面が試料未済に到達した信号は試料端面の運動によつて生ずる電気的コンタクトによつて行い、時間計器は高速度増引ブラウン管オッシロを用いることにした。

ブラウン管オッシロは二つのやや異つた形式のものについて試みた。一つは時間軸を円形にしたもので、他は単増引のものである。実験は主に単増引によつたが、初めの間は円形増引を行った。

爆薬は、TNT ($d=0.95\text{g/cc}$) 300g、内径 40mm のボール紙被覆のもので、試料の直径は 38~40mm である。鉄は 850°C で 10 時間、銅は 400°C で 2 時間焼鈍後放冷した。

(1) 信号の発生

爆轟波が試料端面に到達した時の信号はイオン探針による。これは直径 0.5mm の二本のエナメル線をよじつて、先端を切析したもので、爆轟波中のイオン探針の電気的特性については、近く田中の研究がある。これは爆轟波の検知には最も簡便で精密である。

次に、試料内の衝撃波が末端に到達したことを示すコンタクトの型や構造は色々考えられる。ここでは、針(N)、ボール(B)、平面(P)について図1に示すものを試みた。また、全体を上方にむけて打ち上げる場合(F)と、下にアンピルを置いて打ち降す場合(A)の両者をためした。これらの実験条件は便宜上、例えば、B、F (ボールコンタクト打ち上げ)、PA (平面コンタクトアンピル使用) のような記号で示すことにする。

針コンタクト。これはコの字形の木製支持部の中央に孔を明け、先端に 2~3mm の木綿針をハンダづけした木ねじをねじ込む。これを図1のように試料に

接着させ、試料端面と針の間隔 d は木ねじの調節による。

ボールコンタクト。構造は針のものと同じ。針の代りに半球の鉛製コンタクトを木ねじ先端にとりつける。

平面コンタクト。試料の末端、及びその被接触体となる鉛柱の平面を平らに仕上げ、その間に所要厚さ d の絶縁物をはさむ。被接触物体は、へス猛度用鉛柱(直径 40mm、厚さ 30mm) である。絶縁物は一定厚さの紙を用いる。この絶縁紙は中央を $\phi=10\sim 20\text{mm}$ の円形に切りぬく。又厚い絶縁紙を使用する時は $5\times 5\text{mm}$ の四角板による三点支持で行つた。これにはボール紙を用いた。鉛柱面を平らに仕上げるには、鉄柱の一面を平らに研磨した打ち形を作り、それを仕上げんとする鉛柱面に当てて槌で打撃し、平らにした後に布で磨く。このようにして、試料長 a の微小な調節と表面研磨とを同時に行つた。

このような電気的コンタクトでは、試料面の運動速度は低速であるから、 d は出来るだけ小さくすること、その条件を精密に保つ必要がある。例えば、試料の端面速度を 100m/s とすれば、 $d=0.2\sim 0.02\text{mm}$ の差ではほぼ $2\mu\text{sec}$ の差を生ずる。従つて、衝撃波速

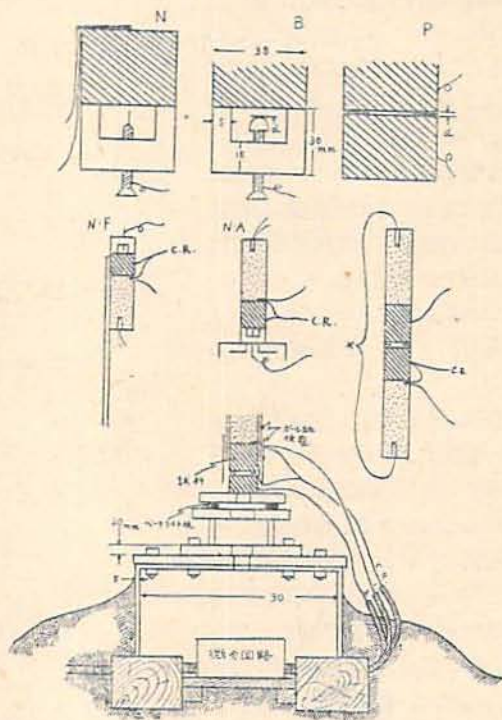


図1 コンタクトの形状及び実験法説明図

度を求めるには d を種々に変えて $d \rightarrow 0$ の時間を求めて行うのが最も合理的であるが、一般に d を 0.02mm 程度に保てば、その誤差は実験誤差範囲に止めることが出来る。この時、針、ボール等のコンタクトでは、直接スケールで測定するのは不可能であり、光学的に行う時、一方は平面であるから顕微鏡の焦点を合わせるに困難し、速かな精密測定は期待出来ない。この d の調節には平面コンタクトが最も簡便に優れている。この場合の誤差は平面仕上げの程度と絶縁紙の厚みの誤差とからなるが、これは厚さ 0.025mm の紙(伝票用薄紙)を用い、1/1000mm 以下に止めることが出来る。又、絶縁性も良好で普通 20M Ω 以上である。尚、平面コンタクトの時には、ほこりの防止のため図1の様に、試料を装置した薬包末端部に更にボール紙を巻いて被接触鉛柱をカバーするようにした。この時、カバー及び鉛柱間には 2~3mm の間隔がある。

(2) 測定回路

時間計測に用いたのは円形掃引及び単掃引のブラウン管オッシロである。

円形掃引は、水晶発振器からブラウン管の X, Y 軸に送る正弦波の位相を 90° 移相せしめ、常時輝点は消しておいて、パルスがグリッドに到達した時、その円周上に輝点を生ぜしめるように構成した。この回路ブロック図は図2の如くである。掃引速度は 1周 20、及び 100 μ sec に切りかえが出来る。この時の輝点パルス巾は 0.2 μ sec 以下である。この円形掃引は図形の歪を観察修正して円形に保てば高精度を保持出来る。

この形式のブラウン管オッシロは単掃引にくらべ次の様な長短がある。

長所。時間軸は円形であるか同一直径ブラウン管の約3倍の掃引長さとなり、時間読みの誤差は原則として小さく、適当な蛍光物質をえらべばその残光性を利用して直読が可能である。又、常時円形リサーチが画かれているから、特に現象と掃引を同調せしめる必要無く、導火線を用いて安全に点火出来る。

短所。掃引は連続の円形であ

るから、求める信号以外のノイズを防止するため、回路に工夫を要する。また、例えば、1周 20 μ sec の時間軸上に 5 μ sec の信号を得たとしても、5, 15, 25 μ sec 等、幾通りの場合も考えられるから、正しくは

$$n \times 20 \pm 5 \mu \text{ sec}$$

と表現すべきで、これを 5 μ sec と決定するには、測

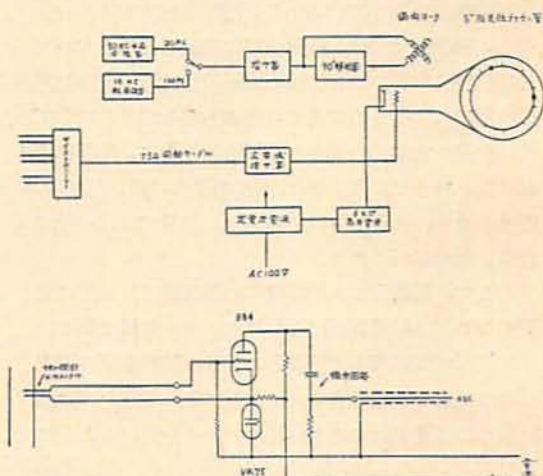


図2 円形掃引法による回路ブロック図

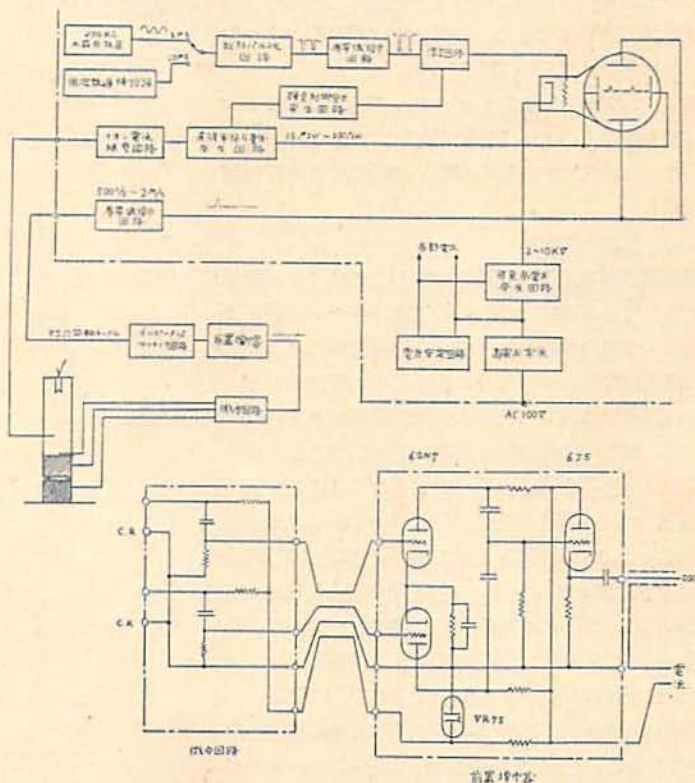


図3 単掃引法による回路ブロック図

定者はあらかじめ求める時間のオーダーを把握している必要がある。勿論、この点が特に問題となるきは、1周 100 μ sec に切りかえて調べる手段はある。

これは以上のように直観出来て簡便であるため、初め実験上の種々の目安を得るのに役立つ。然し、上記の理由と、測定結果を記録写真に残しておくため、実験は主に単掃引によつた。

単掃引による回路ブロック図は3図に示す。水晶発振器から発振した正弦波は矩形パルス化回路によつて 5 μ sec 又は 20 μ sec 毎に鋭い負の電圧を示す矩形波となつてブラウン管のグリッドにかかる。従つて掃引は 5 μ sec、又は 20 μ sec 毎に切れた破線のようになる。現象は、一旦、図3(下)に示す微分回路によつて小さな山形のパルスとなり、前置増巾器をへてオッシロ装置に内蔵された広帯域増巾回路 (500 c/s \sim 2 m/s) に入る。始め、前置増巾器及びインピーダンスマッチング回路を用いず、種々に特性を変えた微分回路を試みたが、結局、図の様な形式に落ち着いた。

尚、掃引波形をきれいにするため微分回路を出来るだけ爆源に近づけるように、これをアンビルに内蔵せしめた。求めた写真の一例を次にかかげておく。

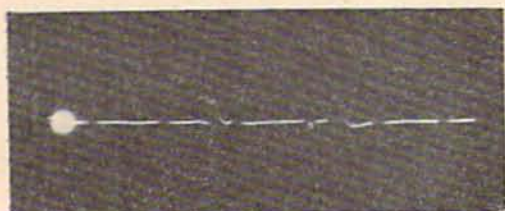


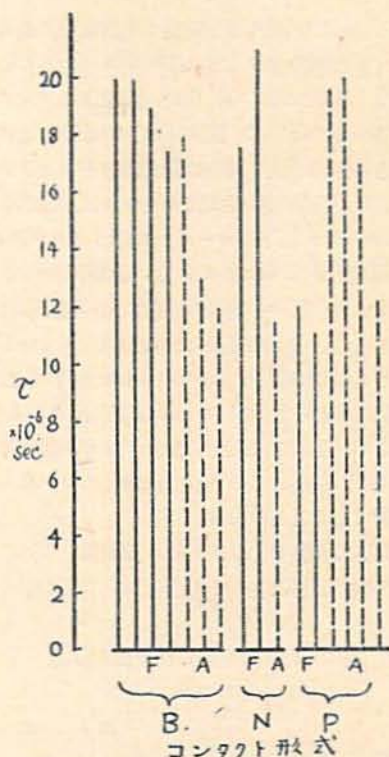
写真1 単掃引オッシロによる測定例
(銅 $a=30$ $d=0.59$ mm)

掃引開始は現象と適宜に同調するように薬包中にさし込まれたイオン探針と、オッシロ装置に内蔵されたイオン電流継電回路及び掃引電圧発生回路によつて行われる。従つて、これも、点火は電氣的に行う要なく安全である。

(3) 方法の探索と調整の主因

実験法の良否について大まかな見当をつけるため円形掃引で鉛柱長 4.5 cm で種々のコンタクト形式について行つた結果を図4に示す。図では打ち上げの場合を実線で、アンビルのあるときを点線で示して比較した。

これより、針、ボール、コンタクト共に、アンビルのない打ち上げ (F) のときは 17 \sim 20 μ sec を要し、下にアンビルを置いた場合では 11 \sim 12 μ sec の短時間で、この間には 6 \sim 8 μ sec の差がある事が分る。こ



4図 種々のコンタクト形式による
鉛 $a=45$ mm の実験結果

の時のアンビルは、針、ボールコンタクト共その形状の必要性から中央に径 10mm の孔のある厚さ 20mm 鉄板を3枚重ねて用いた。

一方、平面コンタクトの場合は逆で、むしろ、アンビルの無い打ち上げの方が短時間である。この時のアンビルは前に直接爆薬の衝撃を受けた跡のあるもので (5 \times 10 \times 20cm) かなり凹凸があるものであつた。従つて、直径 40、厚さ 30mm 程度の鉛柱の重みがあれば不良なアンビルを使用するよりは、むしろ、逆むきにしてのせただけの方が良いことを示している。但し、上向きに発射するのは保安上好ましくない。

そこで、この PA の形式で図1(下)に示すような完全なアンビルを設けた後、故意に被接触鉛柱とアンビルの間にソフトゴム (厚さ 1cm) を置いて行くと、17.8 μ sec (2回)、ゴム無しの場合には 11.3 μ sec であつた。

これらの実験は、 d を 0.025 \sim 0.05mm に保つた実験であるから、後に知るように、この時の端面速度を 160m/s とれば、純粋な接触時間おくれは 0.15 \sim 0.3 μ sec 程度の筈である。それにもかかわらず、コンタクト部の条件、即ち、これが固定されるか否かで異状

を生ずる原因は試料端面が接触する過程に起る被接触体全体の移動のためと考えるほかはない。そこで、このような現象は考えられない、理想的なコンタクトを形成させるためには、図1(中)のように対称に爆薬を置き、条件が全く同一の試料同志をコンタクトさせれば良い。良好な条件で発火させれば、左右の衝撃時間を $0.4\mu\text{sec}$ 以下のオーダーで行うことが出来る。仮に端面速度が 160m/s のとき、試料同志の間隔を 0.06mm にすれば、一方のみが他に全く無関係に接触するとしても、その時間おくれは最大 $0.4\mu\text{sec}$ である。従つて、衝撃時間ずれが $0.4\mu\text{sec}$ 以下であれば、接触時間おくれを最大 $0.4\mu\text{sec}$ 以下に止め得る筈である。この結果は全く上記の完全アンビル使用の場合に一致した。結局、このような測定ではアンビルがかなり重要であることが分る。

同一条件で実験をくりかえし、信頼度を95%として求めた信頼限界は各々の場合について次の如くである。

表2 種々の場合の測定信頼限界

$t=95\%$		\bar{X} m/s	$\pm \beta$ m/s
n			
円形掃引, TNT ($d=0.95\text{g/cc}$) 爆速	7	4,640	110
単掃引, TNT ($d=0.95\text{g/cc}$) 爆速	13	4,690	120
鉄 $a=20\text{mm}$ 内応力波速度	5	5,230	190
鉛 $a=45\text{mm}$ 内応力波速度	5	4,070	150
空気 $a=30\text{mm}$ 内応力波速度	5	6,170	290

これを従来と比較してみると、爆速測定例では、この実験と同一条件で、DAUTRICHE法によれば、 $\beta=\pm 50\text{m/s}$ ²⁾、誤差の大きさからみるとD法はかなり優秀な方法であることが分る。円形掃引と、単掃引とを比べると、直読であるにもかかわらず、円形掃引の方がやや良い結果を示し、前に指摘した円形掃引の長所があらわれている。これらの中では、空気が最も誤差が大である。この主な理由は、ニカ所に位置するイオン探針の間隔(a)が金属ほど厳密に一定に保てなかつたためと思われる。

III. TNT ($d=0.95\text{g/cc}$) による鉛, 鉄, 銅, アルミニウム内の衝撃波速度

以上の結果から、平面コンタクトを採用し、又、完全なアンビルを使用して、試料長 a 、コンタクト間隔 d を種々に変化せしめて、イオン探針の信号から、試料端面の接触までの時間 τ を単掃引で求めた結果は

表2, 及び図5に示す。

表2 TNT ($d=0.95\text{g/cc}$) 300g による各金属の実験結果

a : 試料長 mm d : コンタクト間隔 mm
 τ : 時間 $\times 10^{-6}\text{sec}$ *: 円形掃引による値

	a	τ	d
(1) 鉄	20	3.8	0.025
		4.8	0.61
		5.9	1.20
	30	5.8	1.89
		5.5	0.025
		8.7	0.59
40	8.4	1.27	
	7.0	0.025	
	15.1	0.59	
(2) 銅	20	5.0	0.05
		6.1	0.59
	30	7.3	0.025
		8.4	0.59
		10.4	1.27
	40	10.02	0.025
12.8		0.59	
(3) 鉛	10	4.7	1.20
		4.8	1.90
	20	4.8	0.20
		6.7	0.57
		7.0	1.18
	30	7.9	0.14
		8.2	0.57
		8.2	0.39 *
		11.0	1.00 *
		11.1	3.20
	45	11.3	0.025
		12.3	0.05
13.4		0.60	
23.2		1.89	
23.0		1.90	
60	25.0	2.00 *	
	16.1	0.025*	
	19.7	0.56	
(4) アルミニウム	30	3.64	0.025
		5.93	0.60
		6.4	1.92
		6.5	3.22
		6.5	3.22
		(11.9)	3.22)

これらの図から $\tau \rightarrow 0$ の値、 τ_0 を求め、各々の場合の衝撃波速度($c=a/\tau_0$)を計算すると表3のようになる。

図5の傾斜は試料の端面速度を示すものと言える。この実験範囲では、鉛、220~130、鉄560~40、銅450

表3 各種金属内の衝撃波速度 (m/s)

材質	試料長 mm	衝撃波速度 c m/s
鉛	20	5,000
	30	4,600
	45	4,100
	60	3,750
鉄	20	5,200~5,300
	30	5,200
	40	5,000~5,200
銅	20	4,200
	30	4,200
	40	4,100
アルミニウム	30	8,230

~210, アルミニウム 260m/s 程度である。
試料長 a が大である時は、曲線は上に凹で端面速度の減衰性をうかがうことが出来る。然し a が小の場合、各金属共 $\tau \sim d$ 曲線は、ある点から急激にほぼ平行となる奇異な結果を示している。

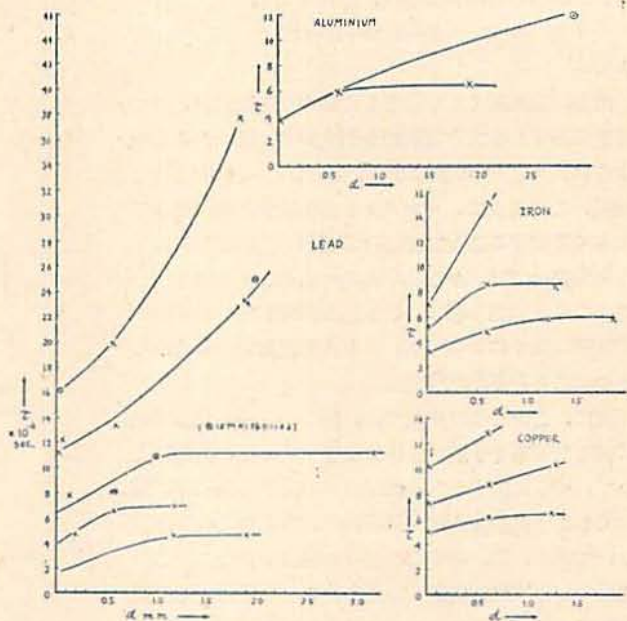


図5 各金属の $\tau \sim d$ 曲線

IV. 異状な現象の考察

今までの結果を整理すると、先づ被接触物体の移動を制限するか否かで非常に異なる結果を示すことがあげられる。そこで、この点について簡単な解析を行う。
図6 (右) は、試料の末端が衝撃波の到達後、その進行方向にふくらんで行つて、針に接触するまでの過程を示した時間距離曲線である。原点を試料端面にとり、針は端面にむいて d の距離にあるものとする。一方、端面の運動は、試料の周壁近くになれば低下することが考えられるから、中心から半径方向の速度分布は図6 (左) のようにならう。

今、端面の速度が v であり、又、周壁近くの端面速度が v' であつたとする。このとき、周壁近くに接している針の支持部が十分軽ければ、それは、矢張り速度 v' で後退するであろうし、それにつれて、支持部に固定されている針も v' で後退するであろう。そのため試料端面中央部の運動は針の運動を追いかける形となり、針に運動が無い場合の接触時間 t を過ぎて t' で接触する。 t' は v から引いた速度 v の線、 v' から引いた速度 v' の線の交点である。これが交るには、 $v > v'$ の条件があることは当然である。

$a=45\text{mm}$ の鉛柱では、 v は図5から 160m/s であつたから、II, (3) の実験で、 $d=0.025\text{mm}$ を正常に接触するために要する時間 $t(=d/v)$ は $0.16\mu\text{sec}$ で

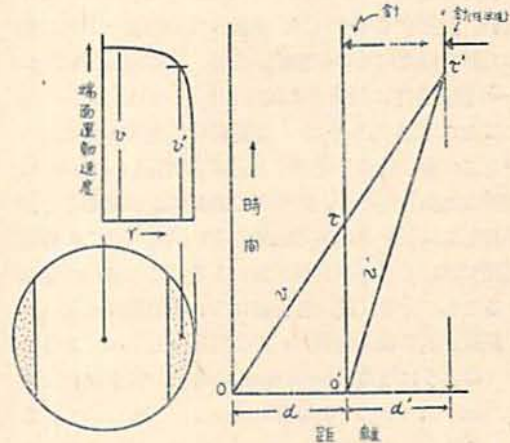


図6 試料端面がコンタクトするまでの説明図

ある。又、条件によつて、長時間かかる時と、短時間の時の時間差はほぼ $7\mu\text{sec}$ であり、これは図6の $t'-t$ に相当する。(図6の τ は図5のそれとまぎらわしいから t する。)

$$t' - t = 7\mu\text{sec}$$

従つて $t' = 7.16\mu\text{sec}$

一方、針が端面と接触する時、もとの位置から後退していた距離 d' は図6から、

$$d' = (t' - t) \times v$$

となるから、 d' は $1.1 \times 10^{-3}\text{m}$ となる。

又、この時の針の移動速度、即ち v' は、

$$v' = d'/t' = 154 \text{ m/s}$$

となる。

即ち、周縁近くと中心部との微小な速度差が、針の移動を許すとき大きな誤差を引き起す。図6から分るように、 v と v' の差は小さい方が、 $t' - t$ は大となる。結局、このように、コンタクト部の固定如何で結果が大きく変動することは、端面に入射した衝撃波面は、この実験条件では、かなり平面的であることを示している。この点は第V報で、物質速度測定に用いたPelletの直径の大小によつても、ほとんど速度差が見られなかつたことを裏付けている。

次に、このような実験では、図5の $\tau \sim d$ 曲線は上に凹となる事を予想するのは自然であるが、実験によれば、 d を大にすると、曲線はある所から急に下に曲つてしまう奇妙な現象が見られる。そこでこの原因について考え、又、若干の裏付けの実験を行った。この端面で起る不純な現象で考えられることには、先ず絶縁物質の圧縮がある。然し、被接触鉛柱は固定されて居り、絶縁物質は端面の運動の抵抗となることはあれ、それを加速し $\tau \sim d$ 曲線を下むきにする説明にはならない。加速するとすれば、接触までの時間 τ 以内に起つた試料柱そのものの移動がある。この考えは確かに $\tau \sim d$ 曲線を下に凹とする理由としては良いが、図の様にほとんど水平近くなつた説明には無力である。

そこで再び図5を見直すと、同じ試料長 a のものは、材質の如何を問わず、大体同じ時間に折れ曲ることを発見する。しかも、ある程度大きい試料ではこの実験範囲では起らず、試料長が短いとそろつた条件で発生することが分る。故に各材料について試料長 a と $\tau \sim d$ 曲線が折れ曲る時間 τ_0 との関係をしらべてみると図7のようになる。' $a=20\text{mm}$ の場合、各金属共ほぼ $6\mu\text{sec}$ で、 30mm の場合にはかなりばらついて居るが、これらの点は原点を通つて上に凹の曲線で結べようである。試みにこの傾斜をとるとほぼ $3,500\text{m/s}$ となつて居る、そこで、金属試料の代りに、末端近くの周囲にみぞをつけて裸銅線を巻き込んだ木柱 $a=20\sim 40\text{mm}$ を用い、下の鉛柱とは全く機械的接触は考えられないような条件で行うと $a=20\text{mm}$ では $6.8\mu\text{sec}$ となつて図7の $\tau_0 \sim a$ 図にほとんど一致する。木の衝撃波速度は約 $2,000\text{m/s}$ であるから²⁾、 $a=20\text{mm}$ でも $10\mu\text{sec}$ までは周囲の銅線がみぞを飛び出して下の鉛に接するおそれはない。更にアルミニウム $a=30\text{mm}$ 、 $d=3.2\text{mm}$ で、試料、絶縁物、被接触鉛柱を一体として、外部をテープで巻き、パラフィンあげを行つて、

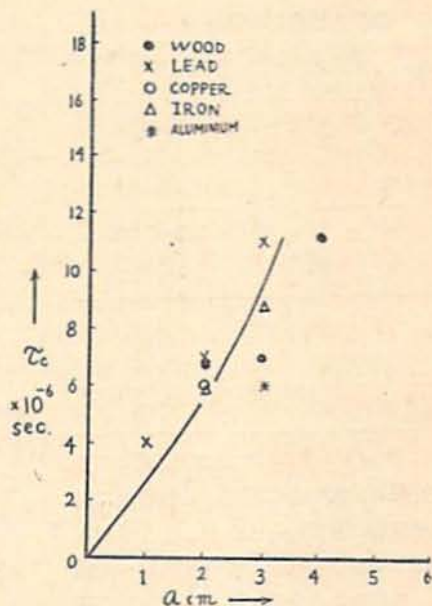


図7 $\tau_0 \sim a$ の関係

外部から何も被接触させない様にする、 $\tau=11.9\mu\text{sec}$ 即ち図5の直線部分の延長に一致する。

結局、空中のショック、又はガスが試料と鉛柱とをショートさせたためと考えられるが、試料の端面は前に述べたように、周縁から数ミリの間隙でボール紙のカバーで覆われている(図1下)従つて、一旦アンビルに反射したショック又はガスがカバーの内側に侵入すると思わなければならない。その時、これらの因子が進行する距離は被接触鉛柱長の2倍を加算しなければならないから、先の図7の傾斜から出した $3,500\text{m/s}$ より高速となる。然し、このような実験条件で、空中の衝撃波やガスがアンビルに反射後どの様な様相となるかは、今の処不明でこれ以上のことは議論出来ない。然し、とにかく、以上の考察と、それを裏付けるために行つた二つの実験結果から、空気中の衝撃波、又はガスによる接触がその後の現象のすべてをカットしてしまう結果になるのは事実と考えられる。電気的な接触を利用する爆発実験では、十分このような現象に注意しなければならない。

V. 空気内の衝撃波速度

従来の方で、鉄 $a=20\text{mm}$ 内の波の速度を $5,900\text{m/s}$ と仮定し、その結果鉛 $a=45\text{mm}$ 内のそれを $4,500\text{m/s}$ と定め、それを基礎にして種々の物質の衝撃波速度を求めた。この中には空気も含まれている。

そこで、この研究の目的とは若干かけ離れるが、空

気の場合について純電氣的な測定を試み、また、今までの方法の様に空気と鉛との組合せの測定を電氣的に再現して従来の研究と対比した。

空気内の衝撃波速度は固体に比べ理論が割合にすつきりし易いので、光学的、電氣的いづれの実験法も可能であり、更に、多くの実用的な要請上から多くの研究が行われている。爆発物以外の領域では高速度流体力学の工学的な応用、又、星の爆発等の天文学的応用の面からも注目され始め、最近では熱核反応の研究に高温度を得るための一つの可能性として、空気中の衝撃波が吟味された。

火薬学の立場からみれば、爆発が空气中に投射した衝撃波の挙動は、直接種々の問題に関連する重要な領域であるが、この場合には、爆轟波から空中の衝撃波へ移行する機構が先づ問題となる。この点について正田強博士による精密な理論的研究が行われている⁹⁾。実験的には、Shock tube による研究が多い。爆薬を用いたものでは J. Savitt 等が新しい¹⁰⁾。ここではそれにならない。先づイオン探針法による測定を試みた。

(1) イオン探針法による測定

図 8 (右上) のように、TNT (40.95g/cc) 300g の末端部をボール紙で囲んだ一次元的な場合について距離 a を変えて行つた。イオン探針は、太さ 0.5mm の二本のエナメル線をよじつて先端を切断したものを薬包端面に置き、他は間隔 2mm、露出長 10mm にしたものである。計器は単抽引ブラウン管オシロで、測定回路は前記と同様である。これらの探針を含む薬包は、微分回路を内蔵したアンピルの上に上向きに懸吊した。

測定結果は表 4 に示すように、爆源から 3cm までの平均速度は 6,160m/s である。

表 4 イオン探針法による空気内の衝撃波速度

距離 a cm	30	50	100
測定時間 $\tau \times 10^{-6}$ sec	4.55	8.65	1.75
	4.91	8.75	17.1
	4.82	8.57	
	4.92		
	5.10		
平均	4.87	8.62	17.3
衝撃波速度 m/s	6,160	5,800	5,780

(2) 鉛との相合せ測定

この方法は空気内の衝撃波を一旦鉛に入射せしめ、鉛内の波を本報 III の方法により電氣的に測定するもので、第 VII 報の空気の場合⁸⁾の再現性をしらべる目的で

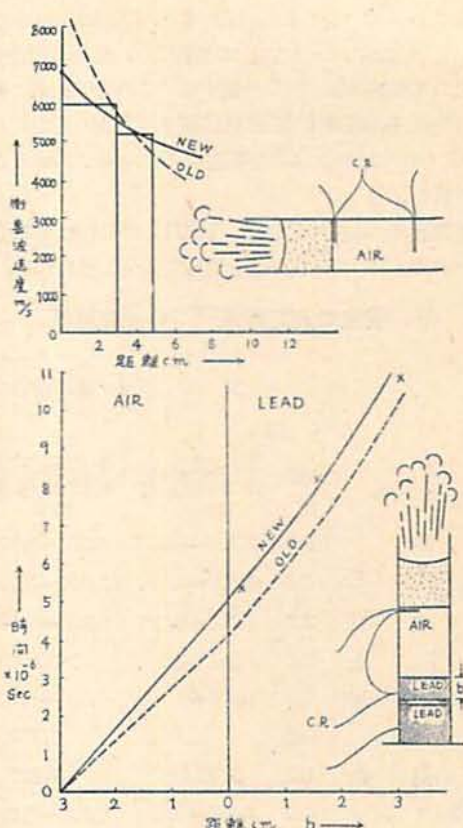


図 8 イオン探針法及び鉛との組合せにする空気内の衝撃波速度測定

行つたものである。

図 8 (下) に示したように距離 30mm の一次元的な空気層の下に厚み b の鉛柱を置き、その下に絶縁紙 ($d=0.025$ mm) を境にして鉛製の平面コンタクトを使用すること等は先の金属の場合と同一である。

$b=1.7, 15.0, 30$ mm の各々に対して、 $\tau=5.30, 8.2, 10.8 \mu$ sec を得。これを時間～距離図に示すと、第 VII 報の結果 (点線) に平行に 1μ sec 上に位する。これから、 $a=30$ mm 内の空気平均衝撃波速度は 6,000m/s となり、(1) のイオン探針の結果に一致する。又、第 VII 報の結果との 1μ sec の差は第 VII 報で測定の基準とした、鉛 $a=45$ mm 内の衝撃波速度と、本報 III 節の実験による 4,100m/s との差に相当している。

(3) 第 VII 報の補正結果との対比、並びに衝撃波の初速と減衰性の評価

第 VII 報の空気の実験結果は $a=30, 50$ mm で各々 7,500 ($\tau=4.0$), 6,600m/s ($\tau=7.6 \mu$ sec) であつた。この時の基準とした鉛内の衝撃波速度を本報の結果に代えれば $a=30$ mm では $\tau=5.0 \mu$ sec、従つて、6,000

m/s に、 $a=50$ では $8.6 \mu \text{ sec}$ 、従つて $5,820 \text{ m/s}$ となり、この値は、イオン探針による (1)、鉛との相合せによる電氣的実験 (2) と一致する。これらの結果、妥当な空気内の衝撃波減衰図は図 8 (左上) となり、TNT (40.95 g/cc) による初速は $6,800 \sim 7,000 \text{ m/s}$ と目される。

疋田教授の研究によれば、PETN 40.8 g/cc の場合は $6,500 \text{ m/s}^{(6)}$ で、この値と比べて妥当と思われる。

Ⅶ. 従来の測定結果⁽⁸⁾⁽⁹⁾の補正結果

表 5 第Ⅶ, Ⅷ, Ⅸ報の補正結果 (爆薬 TNT 40.95 g/cc)

(1) 固 体					(2) 空気及び粉体				
媒 質	距離 cm	前回測定 の衝撃波 速度 m/s	今回補正 の衝撃波 速度 m/s		媒 質	仮比重 g/cc	粒 度 メッシュ	前回測定 の衝撃波 速度 m/s	今回補正 の衝撃波 速度 m/s
銅	2.0	5,500~6,000	4,200~4,600		空 気	-	-	7,500	6,000
コンクリートモ ルタル	2.5	3,800~4,000	3,300~3,500		△ ($a=5.0$)	-	-	6,600	5,700
大 理 石	2.5	7,500~8,000	5,800~6,100		綿	0.03	-	6,000	5,000
粘 土	3.0	>10,000	>7,500		△	0.20	-	4,300	3,800
石 炭	3.0	7,500~7,900	6,000~6,300		砂	1.56	39	2,200	2,100
△	6.0	5,500	5,100		食 塩	1.2	9	1,900	1,800
花 崗 岩	3.2	>10,000	7,800		△	1.2	39	2,400	2,200
パ ラ フ ィ ン	3.0	8,300~8,800	6,500~6,800		△	1.2	80バス	1,800	1,700
△	6.0	5,000	4,600		木 粉	0.3	48残	2,800	2,600
杉	3.0	2,080	1,900		硝 安	0.91	39	3,200	2,900
ぬれた杉 (H33%)	3.0	2,500	2,310		△	0.91	80バス	3,400	3,100
ガ ラ ス	3.2	9,700~11,000	7,500~8,200		硝 石	1.06	80バス	2,100	2,000
△	5.0	9,000~9,400	7,600~7,900		硝安ダイナ マイト	0.95	-	3,900	3,500
ゴ ム	2.5	9,000~9,600	6,600~7,000		△	0.95	-	3,200	2,900
△	4.5	6,000~6,400	5,500~5,600		△	0.95	-	3,000	2,700
鉄	2.0	5,900	5,200		粘土粉末	0.81	-	1,700	1,600
鉛	4.5	4,500	4,100		△	1.50	-	1,500	1,400
					△	1.98	-	1,900	1,800
					粘土(H10)	1.83	-	2,000	1,900
					△ (H20)	1.91	-	8,100	6,400
					△ (H57)	1.51	-	6,500	5,300
								(距離 3.0cm)	
(3) 液 体									
媒 質	比 重 g/cc	距 離 cm	前回測定 の衝撃波 速度 m/s	今回補正 の衝撃波 速度 m/s					
水	1.0	3.0	5,000~5,500	4,300~4,700					
△	1.0	8.0	3,400	3,300					
エチルアルコール	0.79	3.0	5,500~6,000	4,700~5,000					
メチルアルコール	0.79	3.0	5,500~6,000	4,700~5,000					
グリセリン	1.26	3.0	7,500~8,000	6,000~6,300					
グリコール	1.11	3.0	7,500~8,000	6,000~6,300					
発煙硫 酸	1.84	3.0	5,000~6,000	4,300~5,000					
水 銀	13.5	3.0	3,100~3,800	3,100~3,400					

従来の力学的方法による値を本報の結果に従つて、全部 $1 \mu \text{ sec}$ づつ α を増加して補正した値は表 5 のようになる。この差のため、固体、液体の高速なものは大巾に改められたが、それでも、ほとんど固有の音速値より大である。然し、鉄は本報の実験でも明らかのように、この実験条件では衝撃波は形成しておらず、銅も音速値との差が割合少ないが目立つ。ガラス、岩石、粘土等、又はゴム、パラフィン等のような高分子物はかなり発達した衝撃波の存在が認められる。液体も同様であるが、一段と低速の粉体については補正に

よる影響はごく少い。

Ⅶ. 総 括

本報告は主に金属の衝撃波速度を電氣的に測定して、従来の測定値の補正を行い、これらの電氣的測定法から得られる種々の現象を解析して、今後の実験法の指針とするために行つたもので、研究結果を總括すれば次の如くである。

(1) 岩石爆破に於ける理論的統一の困難さを説明し、そのため、先づ明らかにすべき諸因子の内、特に、爆源近くの衝撃波伝播現象の重要性をのべた。

(2) この報告に使用した電氣的回路の説明と、二つの異つたブラウン管の描引形式についての長短を比較した。

(3) 固体内衝撃波速度測定における信号発生法は衝撃開始はイオン探針で知り、他は試料端面の運動による電氣的コンタクトを用い、種々の形式の優劣を比較した。

(4) 最も良好な方法を得るための探索を行い、大きな誤差の主因を明らかにした。一般に、端面の運動は低速度であるため、電氣的接触以前の被接触物の移動が主要な誤差の原因となることを二三の実験で実証した。この現象を解析して、被接触物体の移動距離と試料端面の周壁近くの運動速度を吟味した。

(5) TNT (1.095 g/cc) による。鉄、鉛、銅、アルミニウムの種々の試料長に於ける測定を行い、これらの衝撃波速度を明らかにした。

(6) 特に空気の場合について、i) イオン探針法、

ii) 空気、鉛の組合せ法、iii) 本報の鉄、及び鉛の実験結果を用いた第Ⅷ報の補正值の三者は良く一致することを確めた。TNT (1.095 g/cc) による、爆源から3cm までの平均速度は三者共 6,000~6,200 m/s で、初速は 6,800~7,000 m/s 程度と目せられる。この値を疋田教授の理論値と比べた。

(7) 第Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ報の補正結果をまとめ、新旧の対比を行つた。

絶えず、温情を以て指導鞭撻される村田勉博士、東京大学理学部平田森三教授、同工学部疋田強教授に感謝する。また本報告の研究中、京都大学工学部伊藤一郎教授に親しく実験を見て頂き、種々御教示を得たことを深謝する。尙、大角喜朗氏から装置の作成、使用に当り種々好意ある御援助を得たことを感謝する。

文 献

- 1) 桜井武尙：火協誌 14 212 (1953)。
- 2) 桜井武尙：火協誌 15 257 (1954)。
- 3) 村田勉、田中一三：火協誌 15 294 (1954)。
- 4) M. P. WHITE, & Le van GRIFFIS; J. Appl. Mech. Sept. 256 (1948)。
- 5) 桜井明：日本物理学会誌 10 247 (1955)。
- 6) 疋田強：火協誌 15 250 (1954)。
- 7) J. SAVITT & R. H. STRESAU; J. Appl. phys. 25 89 (1954)。
- 8) 桜井武尙：火協誌 16 90 (1955)。
- 9) 桜井武尙：火協誌 16 144 (1955)。