

3 inches and 3.6 inches	0.0561	0.0517
4.8 inches	0.0349	0.0295
6 inches and 7 inches	0.0259	0.0237

K_1 and K_2 mean the average constants calculated by data of ascending and of descending trajectories respectively. It is found that these agree fairly well with ones obtained by experiments of wind tunnels. We have calculated V from the formulae (1)~(6), using the observed values of H , T_1 , and T_2 and the value of K in Table 1.

Thus from the velocity equation of interior ballistics:

$$V = \frac{\sigma}{A\mu} \cdot \frac{1}{G} [W],$$

which was described in my previous paper {J. of the Ind. Exp. Society, Japan 15, 269, (1953)} we obtain interior ballistic constants of the propellant (black powder) as

$$Af=17200, AG=0.256.$$

Now we can calculate the pressure in a mortar, by using these constants. The calculated values of pressure of 4.3 inch mortar are rather higher than those observed by lead plate gage.

(Hosoya Fireworks Co., Ltd.)

爆薬猛度の実験的研究 (第Ⅺ報)

高速度衝撃下の固体の塑性流動波について

(昭和32年3月11日受理)

桜井 武 尙

(日本油脂株式会社武豊工場)

1. 緒 言

先報において、爆薬の衝撃を受けた低純度鉛の爆源近くに、異常な物質速度の高速度があることを指摘したが、さらに、種々の純度の鉛、及び数種の金属についてしらべた。その結果、爆源近傍には、低速度で伝播し、高速で物質が移動する特異な応力波の形式が存在することが明らかになったので、その経過を報告する。

この現象は、加えられた衝撃がきわめて烈しく、固体は動的に硬化する衝撃波の現象をもはや維持することができなくなった状態と見るべきで、言わば固体が液体的に流動性をおび始めた状態と考えることができ、この応力波は後記のごとく、高次塑性波、または塑性流動波と称すべきものである。

きわめて高速度の衝撃下では、このように、固体は固体に特有である強い凝聚力から解放されて、塑性的性質をおびるであろうと言うことは、すでにWHITE及

び GRIFFIS らによつて予言されていたことであるが¹⁾、(1948)、本報においては特に金属を対照とした実験結果を報告する。岩石、高分子化合物等の物質については、つづいて報告する予定である。

ここにとりあつた金属のうち、鉛とアルミニウムでは明らかに塑性流動波が認められたが、鉄では認められなかつた。鉛では、この現象の発生する限界圧力は約10万気圧である。

2. 衝撃速度に依ずる応力波の形態の変化

2.1. 低速度衝撃下の応力波 (弾性波と塑性波)

一般に、数m/s程度の低速度衝撃下では弾性波が発生する。従来、この弾性波伝播問題はかなり整然とした理論が形成されているが、さらに衝撃が高速度になると、ある限界から塑性的性質が現象に介入してくればそのままでは無力である。

この塑性問題の研究は古くは COULOMB が降伏条件

を土田計算に利用したことにはさかのぼる(1773), その後, 多くの場合, 金属を対照として塑性加工や, 構造物の強度計算等の応力解析的分野について行われてきた。しかし, 今次大戦中に砲身の応力計算や装甲板の貫通問題等に刺激され, 急速に発展している。この1945年以降の取り扱いはいわゆる動的な問題にも注意が向けられて来たことが第1の特徴である。第2には従来の塑性論では微視的尺度における不均一性にもとづく問題は第2義的なものとして無視されてきたが, この点が物性論的見地から注目されてきたことも見逃せぬ一面である。

この塑性問題の動的な概念の導入は, 塑性波に関する KÁRMÁN らの理論的考察と, DUWEL らの実験によつて確立された。

いま, 棒状試料の末端に衝撃を加え, 距離を衝撃点から X , 時間 t における変位を u , ρ_0, σ を夫々試料の密度と応力, ε を du/dx で示される歪とすれば, Lagrange の座標による運動式をとけば

$$\rho_0 X^2/t^2 = \frac{1}{\rho_0} \frac{du}{dx} \quad (1)$$

となつて, 波の速度 $c (=X/t)$ は $\sigma \sim \varepsilon$ 曲線の傾斜で定まることを示し, また衝撃速度 V_i は

$$V_i = - \int_0^{\varepsilon_1} c d\varepsilon \quad (2)$$

で示され, 材料の降伏値 ε_1 に応ずる一定の限界速度が存在し, それ以上の領域では塑性波が(1)式に従つて伝播する。この解は Euler の方法によつても同一の結果を導くことができる。

2.2. 衝撃波の発生

上記の低速度衝撃による正振の弾性波, または塑性波は, その解析の基礎として静的な歪力~歪曲線を用いることができる。しかし, 動的条件下で材料が高圧になるに従つて圧縮し難くなる性質があれば, (1)式に従う波の伝播速度は高速となり, 波面が切り立つた大きな圧力勾配を示す衝撃波が発生する。同様のことは, ガスの力学でも起るが, 固体の場合には理論的に材料の動的な性質を予言することはできないので, むしろ動的な歪力~歪関係を導く実験結果に期待がかけられている現状である。

2.3. 高次塑性波の発生

衝撃が十分に高速度で起るときは, 固体は液体の性質を示して塑性流れを起すことが可能である。

この一つのモデルとして, シリンダーが理想的に硬い目的物に投射される場合を考えるとよい。低速度で

はシリンダーは平らになるが, 尚結合力を残している。しかし, 十分に高速になれば標的にそつて横にとび散つてしまうであろう。この場合標的が静止していて, 塑性物質のシリンダーが初速 V_i で衝突するので衝撃末端を原点にとると, シリンダーの中を伝播する波の速度は, 物質速度と座標の収縮に関係するから, 波の絶対速度 c' は

$$c' = c(1 - \varepsilon) + \int_0^{\varepsilon} c d\varepsilon - V_i \quad (3)$$

となる。 c は(1)式で示される相対速度である

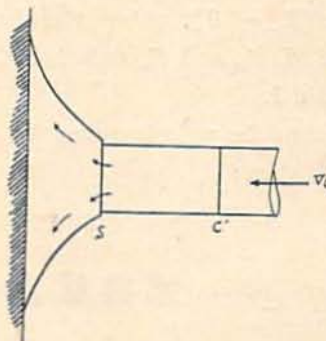


図 1

そして, ある瞬間のありさまを示す図1において, 波頭と標的の間に, 我々の観測中停止した状態に見えるある断面 S' が存在し, 各時間の絶対速度 c' はこの断面に近づくほど少なくなる。

この断面と標的の間には物質の定常的な流動が起っている。従つて, もしも $\sigma \sim \varepsilon$ 関係がわかつていれば塑性流動の開始点 S では式(3)を零とおくによつて

$$V_i = c(1 - \varepsilon_1) + \int_0^{\varepsilon_1} c d\varepsilon \quad (4)$$

を得る。すなわち, 有限の ε_1 に相当する限界衝撃速度がここにも見出される。 ε_1 は固体が液化し始める応力に相当する歪(ここでは工業歪)である。逆にシリンダーが静止して, 標的が V_i で衝撃した時にも同じ性質の発生が考えられる。

2.4. 超音速衝撃下の状態

弾性波以上の衝撃速度になると, 今までのような考察はもはや成り立たないが, 性質の形式は前記の塑性流動と同様であると考えられる。衝撃力は衝撃帯の運動量の変化だけで決定され, 応力は

$$\sigma = \rho_0 V_i^2 (V_i > c_0)$$

となつて, 媒体の密度と衝撃速度のみで決定される。

3. 鉛の純度の変化による波の伝播速度の異状性

先に TNT (40.95g/cc) 300g の衝撃条件では、鉛の純度が低下すると爆源近くで急に物質速度の上昇が起り、この性質は高純度の鉛にくらべて異常に烈しいことをのべた。従来使用して来た鉛は概ね分析純度は 99.7% 以上のものであるが、この物質速度の異常性を見出したものは 99.18% であった。この第Ⅺ報でとりあつかった二種の鉛のほか、別のロットの高純度品を二種、それに Sb を 2.5、及び 5% 含有せしめた試料について、 $a=30\text{mm}$ の伝播速度を測定すると表 1 のようになった。 c の測定は第Ⅺ報の方法で、コンタクト間かく d を 0.025mm にとつた値である。表 1 に示した物質速度 v の値は 0.4mm 厚さの円板法によるものである。このうち、99.18%、及び 99.70% の二種は第Ⅺ報でくわしく物質速度の測定を行つたものである。

このほか、実験した各金属試料の純度、不純物の分析結果はまとめて本報最後の表 6 に示しておく。鉛、銅、鉄の直径は 38mm、アルミニウムは 40mm である。

表 1 鉛の純度と波の伝播速度
 $a=30\text{mm}$, $d=0.025\text{mm}$
爆薬 TNT (40.95g/cc) 300g

純度 (%)	c 測定回数	c m/s	v m/s	備 考
99.79	—	4,500	—	第Ⅺ報実験結果 ②
99.69	2	4,540	—	
99.70	2	4,530	182	第Ⅺ報の鉛
99.70	1	4,100	187	同上鉛を水焼入れ
99.18	2	2,630	197	第Ⅺ報の不純鉛
99.20	3	2,330	190	第Ⅺ報の鉛に Sb 2.5%
94.70	2	2,780	201	同上 Sb 5%

純度が約 99.7% 以上あれば高速であるが、これに焼き入れをするとやや低下する。そして、純度が 99.18% になると急速に低下して 2,630 m/s となる。この距離 $a=30\text{mm}$ における物質速度には大差ないが、純度の低下とともにやや上昇気味である。しかし、これだけではなお本質の説明に乏しいが、それはさらに高純度品と低純度品の各距離における c と v の全面的な様相の差をしらべることによつて与えられる。

そこで、このような異常性を強く現わし始める純度 99.18% の鉛について、 $\tau-d$ 曲線を示すと図 2 とな

る。本報の $\tau-d$ 曲線は、コンタクト部をテープでおいガスタイトにして行つたものである。

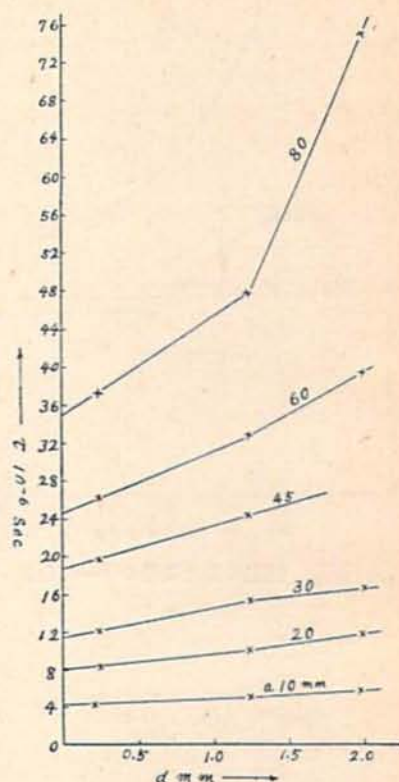


図 2 低純度鉛の $\tau-d$ 曲線

これから求めた c は表 2 のようになり、これをもとにして画いた波の伝播速度—距離曲線は図 3 となる。

各距離 a_n における局部速度 c_n を平均速度 c_n' から求める方法は次の如くである。

$$c_n = \frac{c_n' a_n - c_{n-1}' a_{n-1}}{a_n - a_{n-1}}, \quad n=1, 2, 3, \dots$$

表 2 低純度鉛の各距離における平均伝播速度 c' (Pb=99.18%)

距 a mm	平均伝播速度 c' m/s
80	2,320
45	2,400
30	2,630
20	2,500
10	2,180

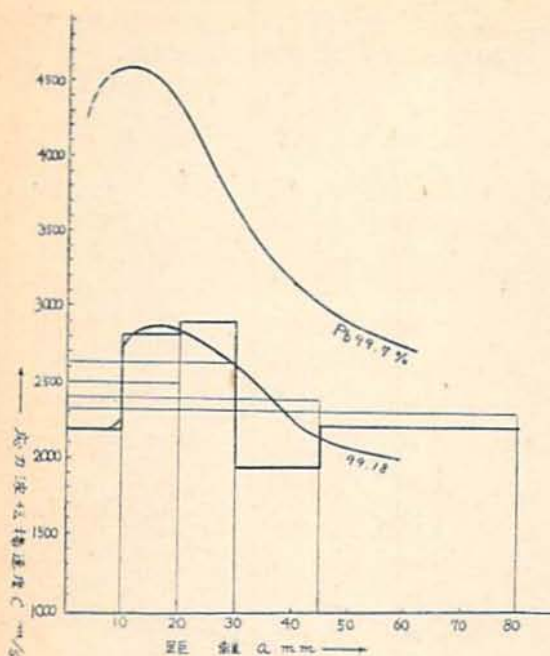
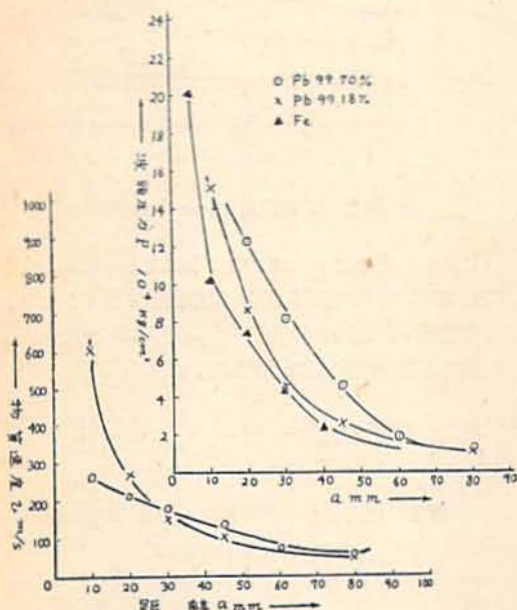
図3 純度の異なる鉛の $c \sim a$ 曲線

図4 高低純度鉛の物質速度、及び圧力減衰曲線

図3からわかるように、爆源部には低速度で応力が伝播する領域が存在していて、高純度鉛ではこの領域はせまく、低純度鉛は—そう長い領域にわたっている。そして、この領域の終点で急激な c の上昇が起

る。

一方、この領域の長い低純度鉛の物質速度は、 $a=20\text{mm}$ では 270m/s にすぎないのに、この低速度伝播領域に入つた $a=10\text{mm}$ では 600m/s 以上になることが注目される。この c と a の変化から、爆源附近には衝撃に対して固体があまりにも弱い状態となつて、流体的様相を呈する。衝撃波にくらべ低速で伝播し、高速で物質が移動する塑性流動波の存在をみとめざるをえない。

この二種の鉛について物質速度と圧力の減衰曲線を比較しておく。(図4)爆源部で塑性流動を強く起した低純度鉛は減衰が急激である。しかし、爆源近傍の圧力は様相の差にかかわらず大差ないようにみえる。図には比較のために鉄の場合も示しておく。鉄は鉛のような状態すなわち、衝撃波の発生すら未だに起つていない金属である。

図4から、低純度鉛は約9万気圧以上の圧力下では衝撃波は発生せず、それ以上の圧力では現象は再び弾性的になるという臨界速度があることがわかる。高純度鉛ではこの臨界圧力はやや高いところにあると思われ、このようなことを考慮すれば、動的に衝撃したときの固体の状態は一般に図

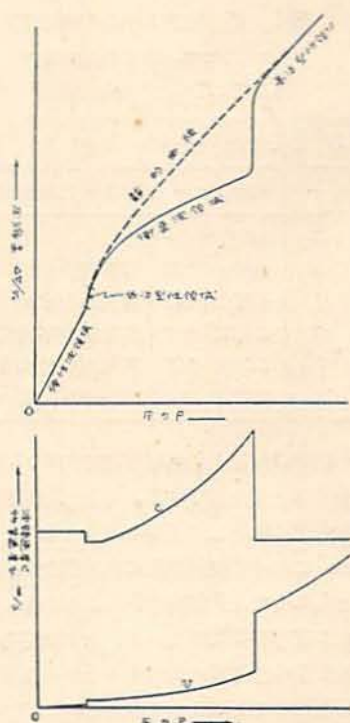


図5 高圧下の固体の動的状態想像図

5 になるであろう。すなわち、衝撃速度の増大にともない前述2のごとく、

弾性波→低次塑性波→衝撃波→高次塑性波となる。このときの α と β の変化は図5下段のように変化するであろうが、もちろん、これらの領域の位置と広さは材料によって変化するの当然である。

3.2. 試料の結晶性の相異と現象との関連性

この実験に使用した鉛の硬度は純度によって次のように変化している。硬度は角度30度のステンレス製円錐をペネトロメーターを用いて4cmの高高で試料面に押し、円錐の進入深さをもつて示した。従つて、硬いほど小さな値を示す。

表3 鉛の純度による硬度変化

純度%	硬度mm
99.70	1.18
同上水焼入れ	0.916
99.18	0.879
97.20	0.668
94.70	0.520

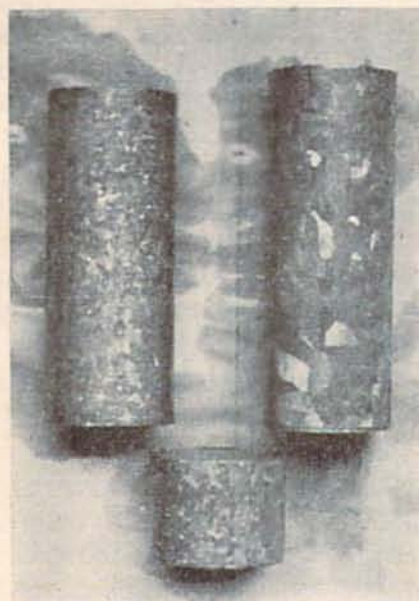


写真 1

写真1 鉛の純度、又は水焼き入れによる結晶の変化、右99.70%、左99.18%、中央99.70%に水焼き入れ。

結晶性は表面処理液*で洗滌して観察した。その結

* 氷醋酸 3, 9% 過酸化水素 1

果を写真1に示す。右は純度99.70%、左は99.18%、中央はの水焼き入れ後のものである。結晶は水焼き入れまたは不純物の存在によつて微粒化したことがわかる。

このような変化は、物性論の見地からも大きな意義をもっており、実際の工業爆破における爆源部の問題、あるいは広く、破壊現象の根本とも深い関係があると思われる。もちろん、現在のところでは、これらの機構の立ち入った説明はできないが、定性的には次のようなことも考えられよう。

たとえば、亀裂速度の理解には、平田教授の α 、 β 亀裂速度⁴⁾、J. J. GILMANの二種類の亀裂速度**の制限⁵⁾、或いは筆者の c_1 及び c_2 ⁶⁾等、いずれも二元的であることが共通している。いずれの場合も、単一結晶内の転移論にもとづいて理解されるときと、結晶粒子間の界面性を無視しては成り立たぬときは実際の機構は自ら異なる筈であり、これらの二元性はひとめでかからなければならないと思う。

このとき、衝撃波と塑性流動波の間の臨界現象が不純物又は結晶粒子の大きさに支配されることは、衝撃波の物理的意義（動的硬化）をあわせ考え、この臨界点においてその固体のもろい性質の極限が発生することを物語ると考えることができ、衝撃波伝播による破壊は考えられる亀裂速度のうち、いずれか、最ももろい要素を含む機構によつて行われることが理解される。不純物が介在したり、結晶が小になると、見かけは硬くても動的にもろくなり、より低速度の衝撃速度で“もろさの極限”に達することができるので、衝撃波と塑性流動波の臨界圧力は低下する。

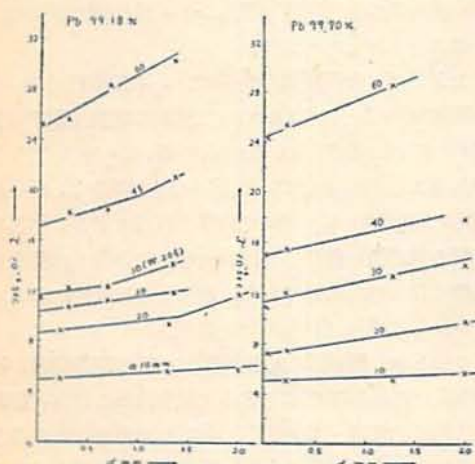
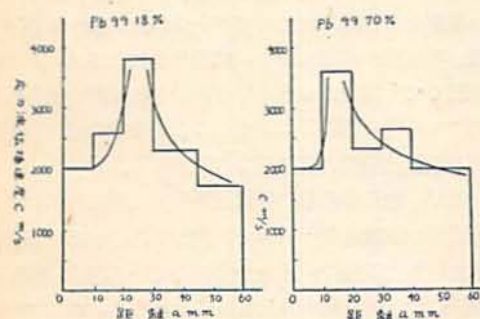
ただ、物質が非常に強固な結合力で結ばれており、物質内の衝撃を受けるバネが強力で、きわめて高圧に耐え、また圧縮の余地を充分持つている時は、衝撃波の域にすら達し難いこともあるであろう。これは鉄のような場合である。従つて、金属のなかでも鉛やアルミニウムなどは中級程度の威力の爆薬で様相の変化を観察することができる好材料である。

** 一つは単一結晶を貫くもの、他は多結晶粒子の存在に影響されるもの。これは既報の c_1 、 c_2 に各々通ずるものがあるが、筆者は c_2 （巨視的亀裂速度）の力には限界速度性は与えていない。GILMANの論説は弾性波論の成立する範囲に於て正しいと思われるが、さらに高次の現象はあつて良い筈である。平田教授の見出した2mmがガラス板の α 亀裂速度（これは比較的表から浅い所を伝播した）は6,000m/sにも達している。 β はそれにくらべて低速で1,860m/s。

4. 衝撃力の変化による様相の差(鉛)

4.1. RDX による実験

従来使用した TNT (40.95g/cc) の爆速は 4,800m/s であるが, RDX (41.0g/cc) では 5,300m/s で一層強力である。この RDX 300g による二種の鉛 (99.70, 99.18%) の τ - d 曲線は図6となり, これから c の距離による変化を求めると図7となる。

図6 RDX (40.95/cc) による鉛の τ - d 曲線図7 RDX による鉛の c の距離的变化

矢張り, 爆源附近には低速度伝播領域が存在し, これは TNT の場合より長く, また低純度品に強くあらわれている。物質速度は TNT の場合よりも高速で2倍以上に達している。従って, たとえば $a=30$ mm では c は TNT の約7割にすぎないが, τ は2倍であるため圧力は矢張り高圧となっている。

このように, TNT よりも強力な RDX によると爆源部に衝撃波の形式でなく, むしろ塑性的な領域が一層強く現われる。そこで故意に RDX 薬包の末端* に砂の層をつけ, 鉛に与える衝撃力を弱めると, 表

表4 RDX 末端に砂をつけた実験

 $a=30$ mm Pb=99.7%

砂層厚さ mm	波の伝播速度 m/s
0	2,850
5	3,250
10	3,500

4のように, むしろ, 砂の層があれば c は高速となる。もちろん, 砂の量が適量以上になると再び低下する。この現象は TNT, または RDX を基剤として, 薬勢を変化させて行つた次の実験で一層明らかな概念が与えられる。

4.2. TNT, 及び RDX を基剤とした薬勢変化による c の変化

$a=30$ mm で, $c=4,500$ m/s を示した TNT に, 不活性物質のタルクを混合して, $a=30$ mm の伝播速度を測定すると, 10% で 2,070m/s, 20% では不発爆のため測定できなかった。一方, TNT にニトログリセリンを 10% 含有させると 2,600m/s, 20% ではさらに低下して 2,290m/s となった。このありさまを図示すると図8となる。TNT 単味が最高で, 薬勢の強いほど, また弱いほど c は低下する。タルク20%では不発爆であるから, この場合に試料を伝播する波は弱い弾性波であろう。従って, この曲線が音速値を示す水平線と交つた点の右は正規弾性波の領域である。それより薬勢が強くなると, 衝撃波が発生しはじめ, TNT 単味の附近が最も理想的に衝撃波が発生させ, それよりも衝撃力が増大すると, 爆源部に低速度で波が伝播する高次の塑性領域が発生するようになって, 爆源からの平均速度は低下するのである。

RDX を基剤としたときの様相も全く同様であるが, TNT より強力であるため曲線が全体に右にずれているのは当然である。

この曲線の左右の領域の本質的な差異, すなわち, 一方は塑性現象を含み, 一方は正規の衝撃波であることを示すため, 強力な爆薬の例として RDX90 ニトログリセリン10% の場合, 弱い例として, RDX80 タルク20% の場合の両者について, 爆源から30mm以内の伝播速度が変化するありさまを図8の左右にかかげておく。前者は低速度領域からの立ち上りを見せ, 後者は減衰の一途を辿っている。

* 原則として, 薬包末端は粘着テープ一枚でおおわれている。すなわち, 紙筒に爆薬を装てん後末端の紙筒の折り代を切りとって粘着テープで止める。

Fig. 8. The Strength of Explosives and the resulted Wave Velocities

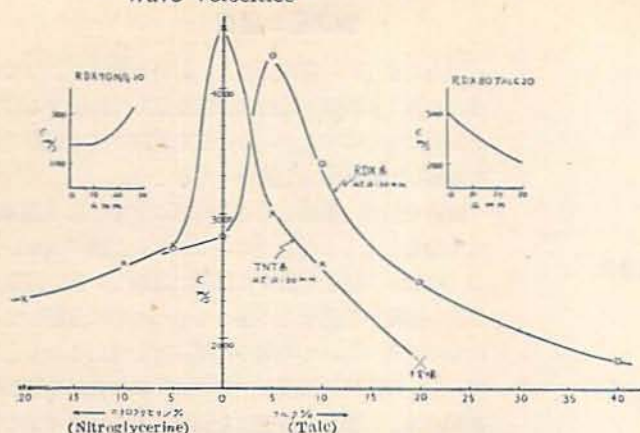


図8 TNT, 及び RDX を基剤とした薬勢変化による鉛 (Pb 99.7%), $a=30\text{mm}$ 内の波の平均伝播速度 c の変化, ならびに RDX90N/G10, RDX80, TALC20% の c の距離的变化の相異。

因みに, これらの爆薬の性能は表5のようであった。

表5 使用爆薬の爆発性能

T: TNT, R: RDX

N! ニトログリセリン, C: タルク

組	成	爆速 m/s	弾道白砲のふれ 度一分
T 100		4,800	14-15
T 95	C 5	4,100	13-40
T 90	C 10	3,600	12-55
T 80	C 20	不完爆	11-15
T 95	N 5	5,200	14-20
T 90	N 10	5,600	14-30
T 80	N 20	6,100	15-10
R 100		5,300	17-40
R 95	C 5	5,000	17-00
R 90	C 10	4,600	16-30
R 80	C 20	4,200	14-40
R 60	C 40	3,600	10-50
R 95	N 5	6,800	18-00
R 90	N 10	7,100	18-30

爆薬の静的エネルギーを比較する弾道白砲のふれをみると, TNT と RDX の差は大であり, RDX を弱めて, TNT に一致させるには少くも20%のタルクを必要としている。それに対して, 爆速の差は比較的小でこれらの点を考えると, このような一次元的条件下においては爆薬の静的威力よりも,むしろ, 爆速の因子の方が一そう強く作用していることがわかる。

5. アルミニウム, 銅鉄の実験

以上の現象はアルミニウムについても見出すことができる。直径 40 mm のアルミニウム柱について, TNT (40.95g/cc) 300g による爆源から各距離までの波の平均速度を, 矢張り第Ⅰ報²⁾の方法で求めると表6となる。これをもとにして c の距

表6 アルミニウム内の波の伝播速度

d mm	c m/s
20	5,570
30	6,000
40	5,360

離による変化曲線を描くと図9となる。

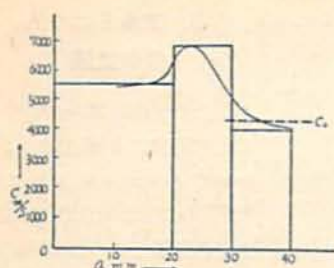
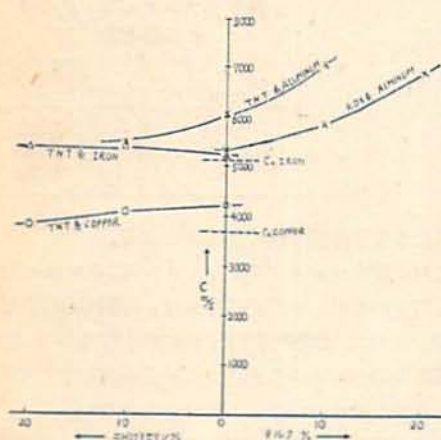
この測定もコンタクト間かく d を 0.025mm にとつたものであるが, a が小になれば, 試料の自由面速度は大となつて, 接触時間おくれは小となるから, 波の伝播時間が小になるため不当に誤差が大となつて見かけ上低速を示すということは考えられない。

次で, TNT, RDX を基剤とした $a=30\text{mm}$ の薬勢変化の実験を行うと図10となる。(図9では, $a=30\text{mm}$ は低速と高速の両領域を含んでいる。) 図10の実験範囲では薬勢の劣化に従つて高速となり, 高次塑性波領域が次第に減じて行くことがわかる。この臨界圧力は鉛よりも低いことがわかる。矢張り, 強力な RDX 系は TNT 系の右方に位している。

次に, 鉄と銅について, TNT 系について $a=20\text{mm}$ で薬勢変化の実験を行った(図10)。鉄はニトログリセリン40%にいたればやや低下するが, この測定法の誤差²⁾は 4,500m/s で $\pm 190\text{m/s}$ であるから, この程度の変化では何んともいえない。銅もそうであるが, ニトログリセリン20%の場合と, TNT 単味の場合との差は約 400m/s あり, 銅は爆源のごく近くに低速度領域があるかも知れない。なお, 今回の鉄, 銅の値は第Ⅰ報の値*と一致した値である。

なお, 試料の弾性縦波速度は表6のごとくである。測定方法は, テタン酸バリウムの圧電気効果を利用し

* アルミニウム $a=30\text{mm}$ の第Ⅰ報の値は高すぎている。その原因としては前同 $d=0.025\text{mm}$ の c を求めた爆薬包末端の包装紙の折り代 (タラフ紙約10枚分) をたまたま残した薬包を使用したか, 試料の異状の二つが考えられる。

図9 アルミニウムの c の距離的变化曲線図10 アルミニウム、鉄、銅の薬勢
による変化

て、試料の一端に与えられた衝撃による試料末端の振動を検出し、その振動状態から共振点を見出して固有振動数を求め、振動様式と固有振動数の関係から弾性縦波を計算する様式をとった。この測定は伊藤一郎教授の御厚意によるものである。

表7 実験試料の弾性波速度 C_0
(10~15°C)

金 属	C_0 m/s
鉛 (Pb99.18%)	1,210
銅	3,647
鉄	5,073
アルミニウム	4,380

図9のアルミニウムの c の距離的变化曲線の右すそは、ほとんど表7の C_0 と一致している。また、鉄は相当強力な衝撃条件でもほとんど C_0 と変らない。TNT 単体による銅の c は C_0 より 550 m/s 高く、様相は若干衝撃波的になつていとも見られるが、鉛、及びアルミニウムにくらべて軽微である。

6. 爆破後の試料に現われた塑性流動の観察

以上のように、衝撃強さと、材料の物性によつては爆源の近くに固体が塑性の様相を呈して流動する現象があることをのべたが、この点を材料の破壊変形効果を観察した結果からも裏付けておこう。

爆薬で鉛柱を衝撃したときの破壊変形効果は既報でも報告したことがあつた。これは、直径38mm、長さ140mmの鉛柱を種々の爆薬で衝撃し、弱い爆薬から強い爆薬へ変化するに従つて七つの形に分類してみたものであつた。この個々の相異はしばらくおとして、弱い爆薬では端面が“きのこ”状に拉がる塑性変形を示し、強力な爆薬になれば、もろいタイプの破壊を示すようになることが知られていた。また、これらの爆破後の試料の重量減少は強力な爆薬によるほど大で、いわば、これらの既報の観察は吹きとばすものは吹きとばした後の状態をしらべたものである。

しかし、本報で問題とする現象は、このような爆破後に残留した試料の様相ではなく、爆源部のことであるから、試料が短い場合や、長い試料の飛散破片について調査すべきである。

そこで、RDX (41.0g/cc) 300g、ボール紙被ふく、直径40mmの爆薬を用いて、純度99.18%の鉛柱 ($\phi=38$ mm) について破壊変形効果を吟味した。

先づ種々の長さの鉛柱について、一連の破壊効果の変化を観察すると、概ね5cmまでの部分は吹きとばされており、5cmの柱長から破壊後の端面のありさまを試料に残して観察できる。この試料に残留した破壊面の状態はほとんど柱長には関係なく、径0.3mm程度の粒子状の起伏をもつ、もろい破壊面であつて、この粒子の大きさは鉛のもろい破壊の核間距離に相当するものと思われる。破壊はこの粒子状の起伏をぬつて枝分れしながら進行したものである。

一方、飛散した破片を採集してみると、明らかにこのようなもろい破壊のために生じた破片がある。この形は矢張り粒子状の集りから成る鋭角的なもので、しかも、大小とりどりであることから、当然、随分的性格を帯びた、もろいタイプの破壊の結果生じたものであるにちがいない。

次に、もう一つの異なつたタイプの破片が見出される。それは一般に形は大形で平たく、丸味をおびて、肌は滑らかであつて、前記の破片のような大きさの不ぞろいはなく、また、数はより少ない。従つて、これは随分的性質に乏しく、規則的であり、爆源で生じた

前述の塑性流動の結果生じたものと思われる。この二つの破片の差を示したのが写真2である。これは、左に大形の塑性流動片、右にもろい数多くの破壊片、右上端に残留した破壊面を示している。これらの破片は $a=80\text{mm}$ の場合に採取したものの中から並べたものである。



写真2 RDXによる鉛柱(Pb 99.18%)の破壊片の様相

次に、破片の飛散状態を観察するため、 $a=120\text{mm}$ 鉛柱を鉄板の上に立てて RDX で衝撃した。端面で流動して飛散する破片は、ある投射角をもつていれば、下の鉄板に打ちつけられて破片の跡を残す。写真3の右下はこのようにして行つたもので、この破片の跡には矢張り2種類あつて、一つは大形で数が少なく、こん跡の形は花瓣状で、試料を中心に放射状に並べたように分布している。これに反して、他は数が多くて細かく、形は鋭角的で別に分布上の規則性はない。

興味あることは、この花瓣の跡はほぼ一定の半径 r 以内には全く分布しないことである。しかも、試料長 a の増大によつて r は図11のようにほぼ直線的に増大し、この直線は原点を指すことから、このこん跡の源は爆源にあつたことが明白である。このときの投射角は 53° となつている。これに反して細かなタイプのこん跡はこのような規則性に乏しく、現象に確率的性格が含まれていることがわかる。以上から、花瓣状の跡は爆源部の塑性流動片の残したものであることがわかる。

一方 RDX の威力をタルク20%で劣化させたときは(Pb 99.70%) この花瓣状の跡は全く見られないことは写真3左上に示す通りである。従つて、この場合には爆源では塑性流動を起しておらず、これは図8の結果を裏付けているものといえる。ただ、試料の根もとに大きなこん跡が見られるが、これは形と分布の不規則さからみて、むしろ、RDX 単味の強力な場合よりも破壊は一そう確率的になつたことを物語っている。こ

のように、写真3は、条件によつては爆源部に高次の塑性流動を起すことを良く示している。さらに、爆薬の威力が低下すれば試料の端面は低次の塑性を示す“きのこ”状の様相を示すようになる。



写真3 RDX 単味、並びにタルク20%含有のRDXによる破片飛散状態の差

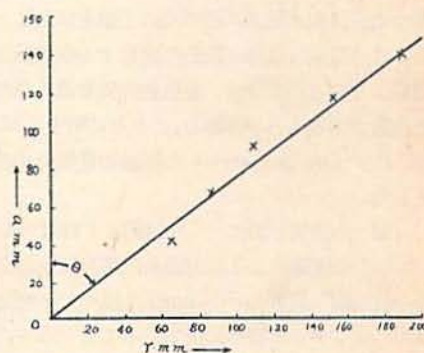


図11 $a \sim r$ 図

ただ、このような開放条件下においても、爆薬生成ガスの静圧力がどの程度に試料に影響するかという問題があるわけであるが、現象をこのような一次元的条件に限った議論では、時間範囲の短い現象のみが破壊変形の因子として強く作用するものと思われる。爆薬が密閉された場合や、規模的效果については別途に研究する必要がある。

さて、これらの諸現象の解析に当り、正規衝撃波の領域では波面の現象はきわめて動的であるため、かえって取り扱いが簡単である。一方、この高次塑性流動波現象は、今までの説明のように、正規衝撃波の概念すなわち、高速度伝播性から離れて、低速で伝播し、物質速度は逆に高速となつて波の伝播速度に近づくと

いう流動的性質を帯びたものである。従つて、その解析には種々の未解明の問題を蔵しているが、2でのべたように、衝撃速度の臨界性が存在することはきわめて注目すべきものがある。これは、高次塑性波領域が

終了して、伝播速度が衝撃波への立ち上りを見せる時の波面の物質速度に相当すると見て、今までの実験結果得られた各金属の臨界速度を示すと次のことである。

表8 金属の高次塑性波発生臨界速度 v_c 及び圧力 P_c

金 属	純度(%)	不 純 物 (%)	v_c (m/s)	P_c (kg/cm ²)
鉛	99.70	Fe0.004 Ni0.002 As0.024 Sn0.001 Sb0.004 Bi, Ca, 微少	300以上	10×10^4
鉛	99.18	Fe0.004 Ni0.001 As0.028 Sn0.006 Sb0.003 Bi, Ca, 微少	207	9.1×10^4
アルミニウム	99.75	Fe0.048 Pb0.010 Zn0.004 Si0.075 Cu0.024	420	6.4×10^4
銅	99.94	Fe0.013 Pb0.001 As0.002 Bi0.005 Sb+Sn0.007	320以上	12×10^4 以上
鉄			500	20×10^4 以上

7. 総 括

以上のように、衝撃によつて固体内に発生した応力波の形式は、いく段かの限界速度に律せられて変化することが明らかになったが、本報告の実験結果を要約すれば次のことである。

(1) 前報告における、高低両純度の鉛内における応力波の物質速度が爆源に近づくほど差を示すことを指摘し、この現象は固体が動的に硬化する衝撃波的現象を維持することができず、塑性的性質を強く現わし始めた状態であることを推論し、この点に関するM.P. WHITE, 及び Le van GRIFFIS の理論的見解を要約して説明した。

(2) 種々の純度の鉛について爆薬(TNT 40.95 g/cc, 300g)の衝撃による応力波の伝播速度を測定し爆源から近距離の範囲($a=30$ mm)に限った平均速度は、純度が低下するに従つて低下することを知り、試料の結晶性を観察してその関連性を調べた。

(3) TNT よりも強力な爆薬 RDX の衝撃による高低両純度の鉛内の伝播速度を測定し、強力な爆薬では純度の差にかかわらず、この低速度領域は長くなるが、矢張り、低純度鉛の方が長領域になることを認めた。

(4) TNT, 及び RDX を基剤として、タルク, 又はニトログリセリンで動的威力を劣化, 又は強化させた爆薬を用い、距離30mm内の波の伝播速度 v を測定した結果、薬勢の強化に従つて次第に高速になつて行き、ある限界から再び低速となる結果を得た。変勢を横軸に、 v を縦軸にとつたこの山形曲線の右左、すなわち弱い薬勢の方では v は距離とともに減衰の一途を辿り逆に強い薬勢の方は爆源には低速度領域が存在するので曲線はこのような山形となる。TNT, 及び RDX を

基剤とした薬勢 v の曲線を比べると、薬勢に応じて左右にずれ、また形はかなり良く似ている。

TNT より強力な RDX 単味の薬包に適度の砂の層を置くと(厚さ5mm以内)かえつて v は高速となることから上記の山形曲線の形状が理解される。

(5) アルミニウムについて同様の実験を行い、波の低速度伝播、高速度物質移動領域が爆源に存在することを明らかにした。

(6) 鉄は薬勢による変化がほとんど見られず、衝撃波の発生すら起つていない。銅では爆源のごく近くに低速度伝播領域が存在するかも知れない。TNT 単味の場合よりも、ニトログリセリン20%含有の方が C は400m/s 低下している。

(7) 爆源部におけるこの異常現象は衝撃波よりも高次の塑性流動現象であることを爆破後の試料を観察して明らかにした。

異常現象を強く起す条件、RDX~低純度鉛(99.18%)の破片をしらべると、二種類に分類でき、一つは数が多く形が不規則で確率的な破壊の跡を示し、他は数が少なく、形が大きく偏平で滑らかな表面を持ち、確率的性格に乏しく、塑性変形の跡を示している。

この条件で、試料の長さを変えて鉄板に垂直に立てて実験すると、鉄板に打ちつけられた破片の跡には矢張り上記二種類の型が区別される。そして、後者の大形の破片は試料長に応じて一定半径以内には分布せずこの半径は試料長の増大とともに直線的に増大し、この形の破片は爆源で発生したものであることがわかる。投射角は53度である。

異常現象を起さない条件、RDX 80TALC20 の爆薬では、この大型の塑性流動片は全く発生せず、破壊片は一層不規則な確率的性質の強い破片のみである。

結局、固体はある限界以上の強力な衝撃条件にさら

されると、液体的な様相を示すようになることがわかるが、このことは、波面で動的に硬化する衝撃波現象と異なつて、試料の大きさや、現象範囲の側面膨脹の影響が一層強く現象を支配することが考えられる。従つて、衝撃波現象よりも複雑な問題が多いと考えられる。もちろん、密閉下の条件でもこのような形式の現象は考えられるが、これは又規模の効果とも関連があると思われる。いづれにせよ、現象に速度の臨界性が存在することは我々に大きな手かかりを与えている。

たえず温情をもつて指導鞭撻される村田勉博士、並びに東京大学工学部、山本祐徳、疋田 強両教授、同理学部、平田森三教授に感謝する。また、試料の弾性波速度測定に御援助頂き、有益な御教示を頂いた京都大学、伊藤一郎教授に深謝する。

On Brisance of Explosives (XII)

On high-order plastic deformation of solid produced by detonation of explosives.

By T. Sakurai

For most solid materials, the modulus of deformation $d\sigma/d\varepsilon$ is constant in stress σ and strain ε up to the elastic limit and then decreases. Therefore, plastic wave propagates with a velocity which is lower than that of elastic wave.

If $d\sigma/d\varepsilon$ increases at the condition of high pressure, the wave front becomes to rise steeply and propagates with a higher velocity than the elastic wave until the shock wave is formed.

When an impact occurs at sufficiently high velocity, the high-order plastic deformation begins to start, because the material can not maintain its cohesion.

From the point of this view, M.P. White and Le van Griffis¹⁾ illustrated theoretically this phenomenon, but experimental proof has not been done. Therefore the author attended to make sure of its validity. First, he measured the velocities of propagation of stress waves in lead plates of 30mm thickness and of various purities.

In conclusion it was found that the

- 文 献
- 1) M. P. WHITE & Le van GRIFFIS: J. Appl. Mech 19, 256 (1948).
 - 2) 桜井武尚：火協誌 17 35 (1956).
 - 3) 桜井武尚：火協誌 18 41 (1957).
 - 4) 平田森三：科学測器 2 11.
 - 5) J. J. GILMAN: J. Appl. phys. 27 1,262 (1956).
 - 6) 桜井武尚：火協誌 17 116 (1956).
 - 7) 桜井武尚：火協誌 13 138 (1952).

velocities of waves decrease remarkably with decrease of the purity of specimen, as shown in the table 1.

Table 1. Velocity of wave in lead versus the purity of lead.

purity %	velocity of wave m/s
99.79	4,500
99.69	4,500
99.18	2,630
97.19	2,330
94.69	2,780

The reason why is ascribed to the existence of a region in which the wave propagates with a low velocity of about 2,000 m/s. On the contrary, particle velocities rather increase in the region of relatively low velocity of propagation.

From these results the author concludes that such a high-order plastic wave may be more easily occurred in lead according to the decrease of the purity by detonation of the explosive (TNT used here is ranked to middle strength).

Secondly, since it was thought that the high-order plastic wave may not occur

by detonation of a weaker explosive, we made the explosives of various strength by mixing talc or nitroglycerine. TNT or RDX was chosen as a standard.

The results showed that high-order plastic waves were formed when an explosive of a relatively high strength was used, e. g., in the case of explosives containing nitroglycerine, the waves propagate with low velocities as shown in Fig. 8. (p 231).

In Fig. 8 the right domain contains shock wave, low order plastic and elastic wave, and the left one high order plastic wave.

Fig. 8 shows also that wave velocities change with the distance travelled when RDX contains nitroglycerine of 10% or talc of 20% respectively.

In the case of the higher explosive

containing nitroglycerine a region of low velocity of wave exists as far as 1~2 cm from impact surface, however the lower explosive containing talc shows a higher wave velocity than the above case. But the particle velocity of the former may be higher than the latter.

After all, since the types of stress waves change according to condition of impact, we must not evaluate their character only by their wave velocities.

The same phenomenon is found in the case of aluminum, but the wave in iron is still elastic, and in iron shock wave does not occur even by the highest explosive of all used here.

- 1) M. P. White and Le van Griffis J. Appl. Mech. 19 256 (1948)

(Nihon Yushi Co., Taketoyo Plant.)

桜井武尙：爆薬猛度の実験的研究 第Ⅱ報，固体内衝撃波の物質速度

正 誤 表 (工業火薬協会誌 18巻第1冊)

	誤	正
p. 41 右17行	$u_f = u_p + u_r$	$v_f = v_p + v_r$
p. 41 右19行	v_q	v_p
p. 44 左上表	試料長 mm D	試料長 mm D
	30 (0.4)215	30 (0.4)182
	(1.1)213	(1.1)117
	(1.9)125	
p. 46 左下1行	$(P+B)(V-V_1)$	$(P+\beta)(V-V_1)$
p. 48 左3行	桜井: 26	科学 26