

報 文

爆薬猛度の実験的研究

第Ⅱ報 柱状爆薬の周壁に接触する固体内に伝播する応力波

(昭和29年9月18日受理)

桜井 武 尙

(日本油脂式豊工場)

I. 緒 言

爆薬の威力に関する従来の実験は、言わばある円柱状の物体の一端をたたく衝撃試験に相応する様な、柱状薬包の端面から発する力を観察するものが多かった。勿論この様な試験の型式も重要であるが、実際に岩石等にさく孔し、その孔に柱状薬包を装填して行う爆破に当つては、爆発の進行に従つて、薬包の側面が媒体に如何なる型の衝撃を与え得るかが重要な問題となる。

そこで、この報告は従来の実験に続いて、主に T. N. T. (1.0.95g/cc) について、この薬包がその側面に隣接する固体に如何なる効果をもたらすかを実験観察した結果をのべる。

先づ薬包の側面に種々の傾きでとりつけられた鉛柱の Hopkinson 効果をしらべる事によつて、T. N. T. が鉛の中に投射する応力波には一定の方向性があることを知り、次で同様の条件で対称に衝撃する事によつて、中央に起つた応力波の衝突亀裂の角度を調べて、この様な応力波面はその進行方向に対して直角に形作られることを認め、応力波がある一定の方向性を有して波面が形成されるにはある有限の半頂角を有する円錐内に圧力変化が限られることから、この応力波の速度をその半頂角(又は応力波の進行方向)と爆速から求め得ることを確認し、それが音速を凌駕して衝撃波を形成するための条件を論じた。その間若干の J. S. Rinehart の実験¹⁾の追試を試み、又第Ⅰ報の手法を本報の実験条件に應用して、薬包側面から投ぜられる応力波の圧力パルスを測定した結果を示す。

II. 柱状薬包の側面が有する Hopkinson 効果

従来の実験はいづれも爆薬の端面、即ち衝撃因子と

応力波の進行方向とが一致したものであつた。然し側面においては、衝撃因子たる爆発擾乱は爆発の進行に従つて移動する点異なる。この衝撃の因子が爆発しつつある爆薬の何であるかは問題であるが、それが何であるにせよ、安定した爆発状態にあつては爆轟波面の進行、即ち爆速を目標に置いて考えてよい筈である。

この爆発の進行に従つて波が発散するか、或いは有限の角度を以て投射されるかの条件の差は、先づ明らかにすべき問題である。そこで種々の端面角度を持つ鉛柱を薬包の側面にとりつけてその Hopkinson 効果を観察した。

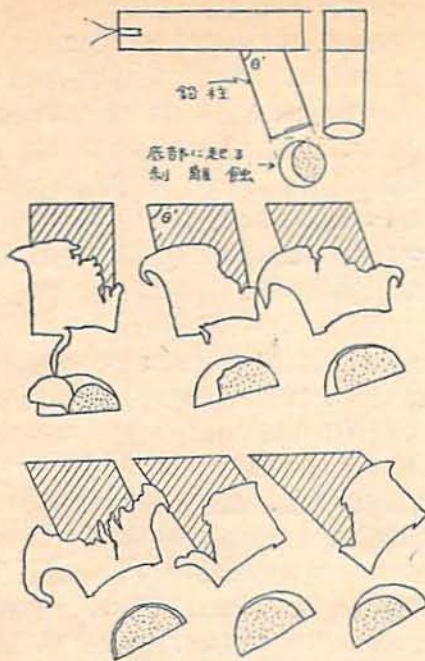
即ち、径 38mm 鉛柱の一端を柱軸と取る角度を持つ様に切り落し、更に他の一端を軸に直角に切つて平均柱長が 6cm になる鉛柱を準備する。薬包は T. N. T. 300g をボール紙筒に収め、角柱状薬包にする。この時の比重は 0.95/cc、正方断面の一辺は 40mm である。この薬包の末端に近く上記鉛柱の傾斜面を添え、テープで緊密に接合せしめて順次実験に供する。

第1図はその一連の結果を示したものであるが、鉛柱軸が薬軸と直角なもの、即ち $\theta' = 90^\circ$ のものは底面に起つた剝離部が爆発の進行方向に片よつて生じ、その様はあたかも「日蝕」を見る趣きがある。この蝕は θ' が 90° より小となるにつれて増大し、 $\theta' = 65^\circ$ に至りほぼ「皆既蝕」を想わしめ、更に θ' が小となれば、今までと逆に爆源の方向に片よつて生じ始める。

この現象は明らかに取る条件においては柱状薬包の側面が媒体に投ぜる応力波には一定の方向があることを示すものである。

尙、 $\theta' = 65^\circ$ に於いて、柱長を変化させて行つた剝離の観察結果は第1表の如くである。

之を縦方向の実験(Ⅰ報)と比べれば、この効果の発生限界柱長はあまり差がない。この理由は後記の波頭圧力の減衰曲線を得るに及んで理解される。



第1図 柱状薬包側面が鉛柱に与えた剝離

第1表 薬包側面の剝離能

鉛柱長 mm	剝離の巾 mm	剝離厚さ mm
60	30	飛散不明
80	29	22~24
100	24	25
120	痕	跡

Ⅲ. 応力波の進行方向及びその波面のなす角度

以上の実験によつて、T. N. T. (20.95g/cc) 対鉛については応力波の進行方向は大むね 65° であることを知つたが、同様な條件で更に対称的な衝撃実験を行つてみる。

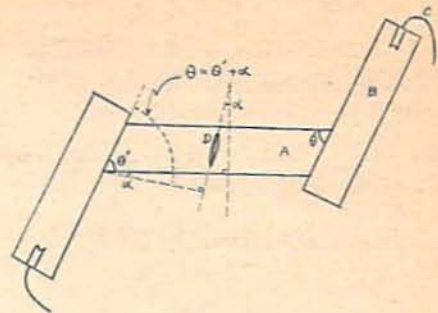
両端面を同一角度に切り落した鉛柱(長さ16cm)を二本の同一種薬包でさしはさみ、木わくの上に緊縛し導爆線で斉発せしめる。端面角度は小は $56^\circ 40'$ 、大は $68^\circ 25'$ までの四種とした。

結果は第2図の様に、中央の応力波の衝突亀裂が軸と直角断面となす角度 α は θ' に応じて変化し、 θ' と α との間には一つの規則性、即ち

$$\theta' + \alpha = \text{const} = 64 \sim 66^\circ$$

なる関係が見られる。

即ち、 θ' が $65^\circ 50'$ のときは α はほぼ柱軸に直角に



A: 鉛柱, B: 爆薬
O: 導爆線, D: 応力波衝突部
 α : 応力波の衝突亀裂角度
 θ' : 鉛柱の端面角度
 $\theta' \pm \alpha$: 応力波の進行角

第2図 薬包側面からそれに接する鉛柱内に投射される応力波の方向を決定する方法

第2表 鉛柱の端面角度 θ' と、対称衝撃による応力波の衝突亀裂角度 α との関係

θ'	$56^\circ 40'$	$62^\circ 10'$	$65^\circ 50'$	$68^\circ 25'$
α	$8^\circ 30'$	$3^\circ 45'$	0	$-3^\circ 45'$
$\theta' + \alpha$	$65^\circ 10'$	$65^\circ 55'$	$65^\circ 50'$	$64^\circ 15'$

生じ、それより大きな θ' 、小さな θ' に対して夫々の α を前者では差引き、後者では加えた θ を最初から鉛柱に与えておけば、亀裂は柱軸に直角に生じ得る事を意味する。換言すればこの様な条件においては、応力波の波面はその固有の進行方向に対して必ず直角に形作られることを示す。(第2図)

同様の條件で柱長を変えて行つた結果は第3表の如くである。

第3表 爆源からの距離を変化させた場合の α の変化

距離 a cm	θ'	α	θ	O m/s
5	$60^\circ 30'$	$1^\circ 30'$	$62^\circ 00'$	2,250
	$59^\circ 20'$	$3^\circ 45'$	$63^\circ 05'$	2,170
6	$60^\circ 30'$	$3^\circ 00'$	$63^\circ 30'$	2,140
	$63^\circ 10'$	$2^\circ 50'$	$65^\circ 15'$	2,010
	$63^\circ 15'$	$3^\circ 00'$	$66^\circ 15'$	1,930
7	$58^\circ 50'$	$4^\circ 50'$	$63^\circ 40'$	2,110
	$62^\circ 20'$	$3^\circ 45'$	$66^\circ 05'$	1,950
8	$62^\circ 20'$	$4^\circ 00'$	$66^\circ 20'$	1,920
9	$62^\circ 20'$	$3^\circ 40'$	$66^\circ 00'$	1,950

端面角度は必ずしも一定にとつていないが、 $\theta' + \alpha$ ($=\theta$) は距離の増加に応じて、ほぼ一連の減衰性を示す如くであり、之より後記に従つて求めた波の速度より見るに衝撃波領域は爆源から 5cm 以内であると推

定される。

但し、この亀裂角度 α はあくまでも衝突部におけるもので爆源から波の進行方向の変化と共に変化し、結果としてある値を示したものと云うべく、このことは実際の応力波面は直線的でなく波の減衰性に依りて彎曲しているものと想像される。

IV. 強力な応力波面が形作られるための条件

以上の如く、柱状爆薬の側面からそれに接する固体媒体内に投射される応力波はある一定の傾きを持ち、又、その波面は進行方向に直角に形作られることを述べたが、更にこの間の消息を Huyghens 流の解釈で説明してみよう。

今或る固体媒体を側面に接触させている柱状爆薬が左から右に爆速 D_0 で爆発しているものとする。そして仮にその媒体内を伝播する最高速度の応力波は弾性波と考え、その速度を C とする。(第3図)

D_0 が C より大きいとき、等しいとき、及び小さいときの3つの場合についての解説を試みる。

1) $D_0 > C$ の場合 ($M_0 > 1$)

1点 O から爆発が出發し、単位時間後に爆発が D_1 に到るものとする。その時、応力波は O から媒体内を球面状に拡がりその波の先端は C_1 なる球面と考えて良い筈である。更に次の単位時間後には爆発は D_2 に進み、 C_1 は C_2 に拡がり加えて新たに D_1 の点から發した波の先端 C_1' の半円が見られる。こうして次々に爆発が O の速度を凌駕して進めば、媒体内の圧力変化は爆発の先端を頂点とするある有限の半頂角 θ ($= \sin^{-1} D_0/C$) の円錐の中に限られ、この円錐の表面は各応力球の圧力の変化が助け合つて著しく効果を見

し、このことは一定の波の方向性(角度 θ)が存在し、 D_0 と C とは $C = D_0 \cos \theta$ なる関係⁽¹⁾に結ばれることと同一の意義を持つ。このことは空気中を音速以上で飛ぶロケットや弾丸の先端から出る Mach 円錐の形成と同じことで、弾速と音速の比、即ち Mach 数に比せられる爆速と固体の音速の比、 M_0 が円錐の條件を規定する一つの量となることを示す。

従つてもしも弾性波より高速な衝撃波(速度 S) が或る有限の半頂角で形成されるなら明らかに

$$D_0 > S > C$$

なる事が必要である事が理解される。但し、実際にはこの条件を満たして且波頭圧力附近の圧力下で圧力の増加に伴う媒体の圧縮率が低下する傾向が必要であることは第II報に論じた通りである。

又この点は、空気の音速を凌駕する高速ロケットが音速を中心として扇状な衝撃領域を形成しなければならぬ様に、更に高速となつてロケット外殻金属の弾性波速度を突破するに到る時は、更に材料に対する非常な考慮を払わなければならないことを意味する。但し真空中なら問題はない。

2) $D_0 = C$ の場合 ($M_0 = 1$)

この時は第3図bの如く、爆発が到達した点から出發して拡がる各時間毎の応力球は必ず爆発の先端の一点に集中し、 θ は零、即ち円錐の半頂角は 90° で、(1)の様な円錐は形成されず、当然弾性波速度より高速な衝撃波円錐の存在は許されない。

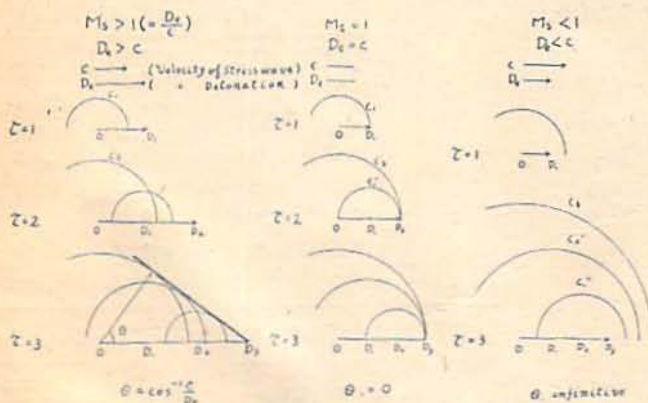
3) $D_0 < C$ の場合 ($M_0 < 1$)

この時の応力球はほとんど爆発に先行して進み、応力波の方向性は全くみられず、 θ は不定であつて(1)の様な波面の存在は許されない。これは音速より低速で飛ぶ従来の飛行機と規を一にする。

V. J. S. Rinehart の実験⁽¹⁾の追試

Rinehart は円筒状の金属に爆薬C3を装填して爆発試験を行い、応力波頭が円筒の外壁に反射した波と底面から反射した波との衝突亀裂から θ を求め、 C を計算した事は第II報に紹介したが、R. 氏の原文はその原理の説明が簡単に過ぎるので、ここに多少その説明をのべておく。

今、第4図で $ABCD$ なる断面をもつ媒体の中へ応力波がある角度 θ で投



第3図 応力波の円錐出来方説明図

射され、反射律を光学系と同じく考えれば、側面から反射する波面は側面と $90^\circ - \theta$ の角度をもって進行し、又底面から反射する波面は底面に対して θ の角度を以て進む事になる。従つて、両波面の衝突亀裂角度には変化ない筈である。

又この亀裂は必ず四角断面の角 O を通ることは、同図で O 点で側面から反射した波面が O を通る時の波面を PO とすれば、それまでに要した時間 $\tau_{A \rightarrow O \rightarrow P}$ と、爆発が A から D に移り、更に O から PO に下した垂直距離 DS の間を応力波が通過するに要した時間 $\tau_{A \rightarrow D \rightarrow S}$ とが等しければ良い。今、爆速 D_e 、応力波の速度 $D_e \times \cos \theta$ 、 $DO = x$ 、 $AD = y$ とすれば、

$$\tau_{A \rightarrow O \rightarrow P} = 1/D_e \left(y + x \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right) = \tau_{A \rightarrow D \rightarrow S}$$

となる事が分る。

又、R. 氏は媒体を円筒状にしたのであるが、必ずしも円筒状にする必要なく、適当な大きさと形状をもつ金属ブロックで事足りる筈である。以下筆者が試みた結果を述べる。

(1) T. N. T. ($\Delta 0.95g/cc$) 対鉛 ($M_s = 2.3$)

第4図の様に厚さ 3cm, 正方断面の一边 7cm の鉛ブロックを四角葉包にそえて行えば、その角に R. 氏の亀裂が生じ、その角 θ は $61^\circ 25'$ で前述の θ と殆ど同じ値を示す。之より O は $2,180m/s$ を数えるが R は C3 対鉛で $\theta 72 \sim 74^\circ$, $O 2,200 \sim 2,400m/s$ を得ている。

(2) T.N.T. 対鉄 ($M_s = 0.81$)

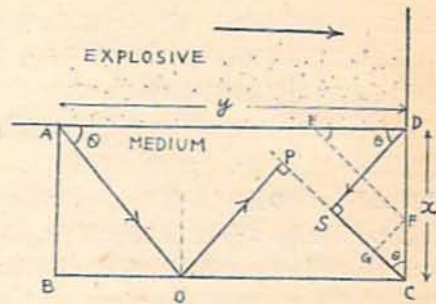
これは材料の厚さを順次薄くして 5mm までにも至つたが亀裂の存在は全く認められず、この時の M_s は 1 より小で波には定方向が存在しないことを示す。R 氏は C3 対鉄でも亀裂を認めたが C3 の爆速は鉄の音速より高速である為と思われる。

(3) T.N.T. 対銅 ($M_s = 1.23$)

明らかに定方向波面の存在と R 氏の亀裂が予想される。径 34mm 厚さ 2cm の円板をはりつけて、 $\theta 37^\circ 30'$, $O 3,800 \sim 3,900m/s$ を示す (2回) 又、ブロックの形を幾何学的に変形したのも同様である。即ち第4図の様な諸元で行うとき、起つた R 氏の亀裂 ϕ から角 β を差引けば波の進方角 θ になる筈である。 $\beta = 27^\circ 50'$ のもとに $\phi = 62^\circ 85'$ を得たから θ としては $35^\circ 35'$ を得る。この結果も前と変りない。R 氏は対銅で $C 3\theta = 62 \sim 64^\circ$, $O = 3920m/s$ を得ている。

即ち、以上を総合すれば、T.N.T. ($\Delta 0.95g/cc$) においては、その爆速より低い音速を示す鉛、及び銅は確かな円錐の存在が認められるが、これらは爆源から或

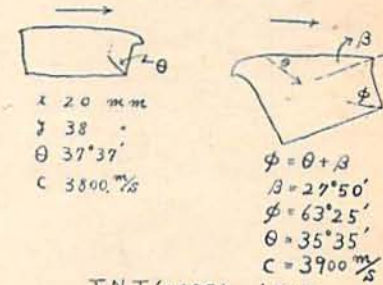
る距離で求めた速度が殆ど音速に一致する所から、衝撃波の形成はあつても急速に減衰するものと思われる。鉛については、衝撃波の形成は爆源から 5cm 以内と推定されるが、爆薬の端面から投射される条件に比べるるとかなりその領域はせばめられている。鉄においては全く定方向の波面の存在は認められない。



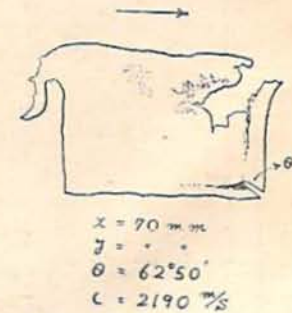
T.N.T. ($\Delta 0.95g/cc$) ~ IRON



T.N.T. ($\Delta 0.95$) ~ COPPER



T.N.T. ($\Delta 0.95$) ~ LEAD



第4図 J. S. RINEHART の実験の追試 (スケッチはいづれも断面)

Ⅶ 薬包の側面から固体内に投射される応力波の圧力パルス

先に爆薬の端面が爆発の進行方向に固体を衝撃する型の圧力パルスを求める方法を述べたが、もしも薬包の側面からの応力波の進行方向が明らかであれば、それに依じて一端面を傾けた柱を用いて圧力パルスを求め得る。T. N. T. (40.95g/cc) 対鉛については、 θ は 65° と見てよいから、柱軸と 65° をなす端面を有する種々の長さの鉛柱を準備し(径38mm)、それを薬包の側面にそえてV報²⁾と同じ方法をとればよい。

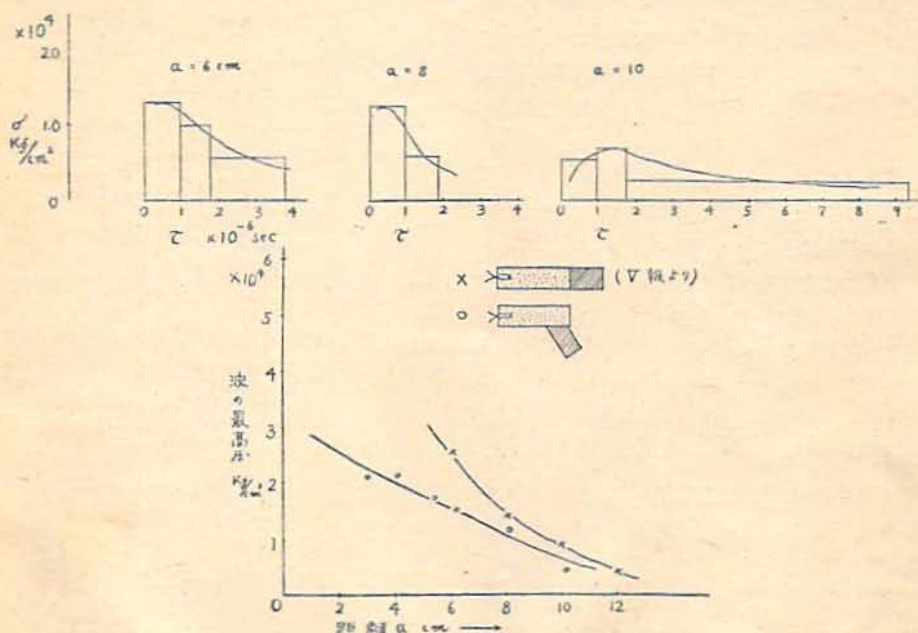
実験に際しては、爆薬は傾いて置かれ第2軌的を取めた爆風防護筒には片よつた力をつける事になるので、中央に径30mmの孔あき鉄板(1×1m, 厚さ5mm)で防護筒の上面を覆つて爆発による攪乱防止の完全を期した。この側面からの破壊効果は薬包の縦方向に比べて弱いで、3cmまで爆源にさがのぼることが出来た。然し、この爆源に近い部分ではハレットが1mm以上厚いとそれ自体に破壊を起すので、きわめて波頭に近い部分の圧力しか求められない。Oとしては音速を用いた。実験結果は次の如くである。

第5表 薬包側面から固体内に投射される応力波の圧力パルス測定結果

鉛柱長さ a cm	ハレット厚さ p mm	実測速度 v' m/s	波内粒子速度 v m/s	波内応力 σ kg/cm ²	時間 $\tau = 2p/v$ Osec.
3	1.0	87	87	2.17×10^{-4}	0.93×10^{-6}
4	1.0	89.1	89.1	2.23	0.93
5	1.0	70	70	1.75	0.93
6	1.0	53.6	53.6	1.34	0.93
6	1.9	48.0	41.7	1.02	1.77
6	4.0	34.7	22.6	0.57	3.72
8	1.0	49.8	49.8	1.25	0.93
8	1.8	36.9	23.4	0.59	1.83
10	1.0	23.4	23.4	0.58	0.93
10	1.9	25.2	27.6	0.69	1.76
10	10.0	12.1	9.0	0.23	9.36

これを図示すれば第5図の様になる。

波形に興味あることは、爆源から10cmに到れば応力波の波面は切りたらず、なだらかな立ち上りを示すことと、波頭圧力の減衰性は薬包の端面からの波は高い処から出発するが、減衰はかなり烈しく、側面では出発点が低い代りに減衰はなだらかである。そして



第5図 柱状薬包の側面から鉛柱に投げられた応力波形

12cm位においては両者の圧力には殆ど差がなくなり、先の鉛柱発生限界を求めた実験でも差がなかったことは、この点を物語るものと言える。

尚、Rinehart は薬包の側面が固体に投射する波の

速度を求めるのに、第Ⅲ報及び本報で紹介した方法を用いそれが殆ど音速に一致する処から、薬包の端面からの圧力パルス測定²⁾に当つて音速値をそのままあてはめた。然し、薬包の縦と横では明らかに衝撃波領域

の大きさを異にするから、薬包の縦方向の実験に音速値をそのまま用いるのは値を過小に見積ることになる。縦には縦の実験条件で求めた値を採用すべきである。

次に、R氏が行った薬包側面からの応力波速度測定は波が一旦反射した者同志の衝突を利用しているが、その根拠にはかかる応力波の反射においては光学的な考えが成立するという仮定が含まれている。

即ち、固体内の弾性波の光学的類似はすでに知られた所であるが、これが高圧となった場合にも適応し得るや否やが一つの問題である。この問題は入射波、反射波の波頭における固体媒体の温度効果による歪～歪力関係の変化、或いは反射前後の波の速度変化如何にかかっていると思われるが、この点についての論議は今の所全く無い⁴⁾。

従って、波がまだどこにも反射しない処女波同志の衝突と、一旦、反射した波同志の衝突と、この二つの効果が如何なる差を有するかは、この点を解明する一つの鍵となるものと考えられる。この報告は未だこの点の精密な考察には不十分と思うので結論は差しひかえるが、今までの筆者の実験及び Rinehart の実験範囲では、光学的反射をあてはめて良い様に見える。

又反射による圧力振幅の変化についても同様であり、特に爆源に近い強い衝撃波では考えるべきことであり、今まで求めた波頭圧力の減衰曲線は、真実より若干低い値をとっているかも知れないが、その補正法は不明で今後の問題である。

VII. 総 括

実際の爆波に当って、柱状薬包の側面から周囲の固体媒体に投射される応力波が如何なる挙動をとるかと言うことは重要である。この報告は前報に続き主として T.N.T. (40.95g/cc) について、鉛、銅、鉄の金属についてその効果を実験したものである。これを要約すれば次の如くである。

(1) 四角柱状薬包にそえた種々の端面角度を有する鉛柱の Hopkinson 効果を観察して、この場合には応力波には一定の方向性があることを認め、その角度は大むね 65° であることを知った。

(2) 同様の条件で鉛柱の両面対称衝撃を行い、鉛柱中央に発生する応力波の衝突亀裂角度 α を求め、鉛柱両端面の傾斜 θ' との間には $\theta' + \alpha = \text{一定}$ (波の進行角度) なる関係があることを知り、この時の応力波の波面は波の進行方向に対して直角に形作られることを

認め得た。

(3) 爆速 D_0 が固体の応力波速度 C より大であれば、媒体内の圧力変化はある有限の半頂角 $\epsilon (= \sin D_0/C)$ を持つ円錐の中に限られ、丁度空气中を音速以上で飛ぶ弾丸などの先端から発する Mach 円錐の生成と視を一にし、その場合の Mach 数に比せらるべき量が爆薬と固体についても考えられることを述べた。この事は又波の進行方向を θ とすれば、 $C = D_0 \cos \theta$ なる関係を意味する。もしも、 $M_S (= D_0/C) = 1$ ならば波の方向性は零で上記円錐は爆発の先端に集中し、 $M_S < 1$ ならば波の方向は不定であつて、応力の円錐は出来ない。従って固体の弾性波より速い衝撃波面が一定の方向を以て進むためには $D_0 > S > C$ なる条件を満たさなければならない。

(4) Rinehart が行った爆薬の側面からの応力波の速度測定法の具体的な説明と追試を行った。その結果 T.N.T. (40.95g/cc) の爆速より低い音速値を有する鉛、銅においては確かな応力波の方向性を認め、それより求めた速度は殆どこれらの音速値に一致する。この場合の M_S は 1 より大であり、R 氏の結果と一致する。然し爆速より高速の音速を持つ鉄においては波の定方向性は検出し得なかつた。

(5) 第 V 報の実験法を本報の実験条件に応用し、薬包の側面が隣接する鉛に投射する圧力パルス求めた。それを爆薬の縦方向の実験と比較するに、縦にくらべ爆源の初圧は約 1/2 であるが減衰性はゆるやかであり、ほぼ 12cm に到れば両者は同一の波頭圧力を示す事を知った。このことは薬包の縦と横で比較した Hopkinson 効果の発生限界鉛柱長に殆ど差がないことの理由である。

終始温情を以て本研究を指導される当社の村田勉博士と東京大学石田強教授、並びに本稿を閲読して頂き種々御教示を得た京都大学伊藤一郎教授に深く感謝する。

文 献

- (1) J. S. Rinehart; J. Appl. Phys. 23 686 (1952)
- (2) 桜井武尚; 火薬誌 15 8 (1954)
- (3) J. S. Rinehart; J. Appl. Phys. 22 555 (1951)
- (4) D. S. Wood; J. Appl. Mech. 19 525 (1952)
- (5) Eyring, Powell, Duffey, Parlin; Chem. Rev 45 (1949)