

爆薬猛度の実験的研究

第XI報 固体内衝撃波の物質速度

(昭和31年12月17日受理)

桜井 武 尚

(日本油脂株式会社 武豊工場)

1 緒 言

一般に、固体が数〜数十 m/s の低速度衝撃を受けた時、衝撃圧力が比例限界以下にあれば弾性波が発生する。また、比例限界をこえた領域では、一般に変形率が低下するので、弾性波よりは低速な塑性波が発生する。この時は、圧力が比使限界をこえる条件のみならず、変形量が充分大きい条件が満たされることが必要である。もし、衝撃速度が大となり、高圧になるに従って圧縮しにくくなる傾向が材料にあれば、波面は切り立つて来て、高速度で伝播する衝撃波が発生する。この衝撃波の発生とは、「物質が静的に圧縮し易い状態で圧力を受ける場合と異つて、動的に一そう圧縮し難い状態で圧力を受ける様相の発生」ということができる。

さらに固体が烈しい衝撃下にさらされると、衝撃に対して固体はあまりにも弱い状態となつて、再び塑性流動を起す。この現象については次報で述べるが、とにかく、これらの色々な応力波形は、波の速度と物質速度、ならびに、これから演繹された波形から定めることができる。従来は、このうち、波の伝播速度を主な対象としてきたが、本報告では物質速度の測定についてのべる。なお、物質速度の評価上重要とおもわれる、試料の自由面の運動性を直接に観察する写真的研究は、破壊現象などとも関連するので後につづり、ここでは、電気的な測定に重点をおく。

2 固体内衝撃波の物質速度測定法

2.1 衝撃波の自由面における反射について

物質速度は、波の伝播過程でとらえるのは困難であるから、自由面における波の反射現象を利用して測定する。そこで、このときの様相を説明する。

A, B 二種の媒体が一つの境界面で接しているとき、この面における波の反射は両物質のインピーダンス $\rho \cdot c$ (ρ : 密度, c : 波の伝播速度) に支配される。

いま、波がAからBに進むとき、BのインピーダンスがAにくれて大であれば、(すなわち、Bがきわめて重く、かつ、硬いとき) A内を進行してきた波は、Bとの境界面に来たとき、急に、波内の物質移動を止められる状態となるであろう。従つて、Aの境界面では入射波の物質移動と逆むきの物質移動が生ずる結果、理想的には、反射波は入射波と同符号の2倍の圧力振巾となつてひきかえす。

逆に、Aに対してBが充分に軽く、また、物質移動になんら抵抗を与えないならば、A内の波が自由面に達したとき、表面圧力は零とならざるを得ない。ゆえに、自由面では入射圧縮波の応力をうち消すだけの張力が発生し、反射張力波(稀薄波)内の物質速度 v_r の方向は、入射波の物質速度 v_p と同方向であるから、実際の自由面の運動速度 v_f は重つて両者の和となる。

$$v_f = v_p + v_r$$

もし、 $v_p = v_r$ とすれば、 $v_f = 2v_p$ となるので、 v_f を求めて2したものが v_p となる。この v_p と v_r の差については本報の最後で吟味する。

2.2 物質速度測定法

このような現象を利用して行う物質速度測定法は二つに分類できる。一つは、自由面の運動を直接測定するもので、これを直接法とすれば、他は、円板によつて波頭から所要の距離における波内の物質速度を分離して測定する円板法である。

直接法としては、次のような手段がある。人名は行つた研究者である。

(1) 電気的コンタクトによる自由面速度の直接測定

(R. E. Duff, E. Houston 1954¹⁾)

または、コンデンサーユニットによる方法

(R. M. Davies 1946²⁾)

(2) 自由面に光をあてて、その光学系の変化を観察する。

(W. A. Allen 1953³⁾)(J. M. Walsh, R. H. Cristian 1955⁴⁾)

- (3) 自由面から空中に投げられた衝撃波速度を知り、その源となつた自由面速度を求める。

円板法とは、試料と同材質の円板を自由面にはりつけ、波の反射による円板の飛しょう速度を測定するものである。(J. S. Rinehart 1955⁵⁾) 直接法の原理はいづれも 2.1 のべた通りであるが、ここで、円板法について説明しておく。

いま、同一材質からなる円板が試料の自由面に接着されていて、接着剤は引張りには材料にくらべ充分弱い、圧縮には強くて、圧縮波は形を変えずに通過すると考える。波はなんら変化なく円板に入り、円板の表面から張力波(稀薄波)として引きかえし、円板の厚さが波長の λ より大であれば、円板は波内の平均物質速度の2倍の速度でとび出すであろう。この点は 2.1 の原理と同じである。このとき、円板の保有する運動量は波のもつ全運動量に当たり、これは、波の圧力 p ～時間曲線内の全積分で示される。従つて、円板の厚みが波長の λ より小であれば、これには波の運動量の一部が与えられ、この量は次のようになる。

$$M_B = \int_0^T p(t) dt$$

T は波が厚さ l の円板を往復するのに要した時間で $2l/c$ である。ゆえに、 l にの小さなものほど波面に近い部分の運動量を与えることになる。このときの円板速度は波面から $2l$ までの平均物質速度 $\bar{v}$ の2倍で、圧力 p は次式で求められる。

$$p = \rho_0 \cdot c \cdot v$$

ρ_0 : 媒体の密度, c : 波の伝播速度

この円板法は、従来の Hopkinson 法との関連性を考えると一そう明らかな概念がえられる。円板を弾道振子にうけて、円板が振子に与えた運動量を振子のふれから測定すれば、そのまま Hopkinson の方法となる。

いま、円板の厚さと断面積を夫々 l, s とし、波の圧力曲線を $p=f(t)$ とすれば、振子の運ぶ運動量は

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_1} F dt &= \int_{t_0}^{t_1} p \cdot s \cdot dt = s \int_{x_0}^{x_1} p \frac{dx}{c} \\ &= s P_M \frac{2l}{c} \end{aligned}$$

ここに $P_M (= \rho_0 \cdot c \cdot \bar{v})$ は波面から $2l$ の長さまでの波内圧力～距離曲線の平均圧力であるから、上式は

$$2s \cdot \rho_0 \cdot l \cdot \bar{v} = m \cdot 2v \quad (m: \text{円板の質量})$$

となる。すなわち、Hopkinson の方法で、振子のふれから運動量を直接求めることと、円板の飛しょう速度と運動量の式から求めるのとは全く同一の意義であり、円板速度は $2v$ になることがわかる。

ここでは、以上の色々な方法のうち、次のような方法をとつた。直接法として、試料の自由面の下にピンコンタクトをおき、自由面の運動によつて起つた接触の信号をブラウン管オシロに受ける方法。

直接法の第2として、第Ⅴ報の $\tau-d$ 曲線の傾斜を吟味する。

円板法として、円板速度を直接法の第1と同様の手段で至近距離で求め、前に行つた、測定距離が大で、電磁オシロを用いた結果(第Ⅴ報⁶⁾)と比較する。

2.3 実験法のくわしい説明

使用したピンコンタクトは次のようなものである。厚さ 10mm、直径 25mm のゴム板に、0.5mm 径の針をさしこむ。この針は接触すべき円板、または自由面の運動をさまたげないように楽に沈下するが、ゴムとのまさつによつて定められた高さは充分保持できる状態にしておく。また、一本の針が沈下するとき、他の針に影響を及ぼしてはならないので、各針の間かくは 2~3mm にする。図1はこのピンコンタクトを含む装置を示したもので、最も長い針は共通線に通じており、他の針が目的物を介してこの共通線と連絡することによつて信号が発生する。この針の高さの差(d)は測微鏡で測る。このときの精度は 1% 程度である。次で、この針つきゴム板を 10×50×50mm の鉄板にはりつけ、微分回路を内蔵したアンピルの上におき、さらに、中央に直径 35mm の孔をあけた 20×70×70mm の鉄板をかぶせる。この上に試料及び爆薬を置く。これでピンコンタクトの空間はガス防衛は出来るが、なお、まわりに砂を盛つておく。円板、または自由面から共通線までの距離の精密測定はできないが、0.5~2mm 程度となるように各針のゴム板への進入深さを調節しておく。

時間計のブラウン管オシロは、最高捕引速度 1cm/ μ -sec の単捕引で 500c/s~2Mc/s の広帯域増幅装置を内蔵し、信号は微分回路と前置増幅器をへてパルス化されて送られることは第Ⅴ報⁷⁾と同一である。捕引は爆薬内のイオン探針によつて、イオン電流回路をへて開始される。

ただ、従来は二つの信号のみであつたが、今度は五つの信号まで可能にした点が異つている。この時の前置増幅器は組み変えたのでその回路を図2に示しておく。

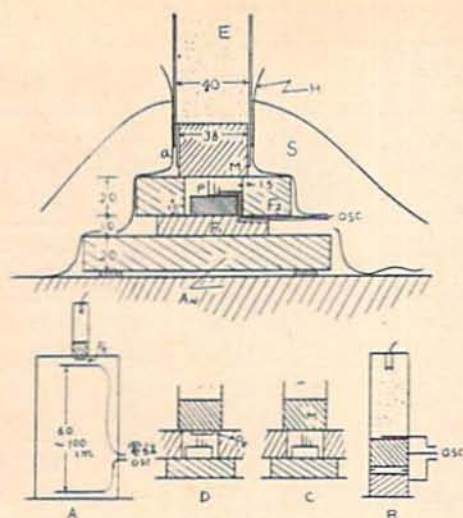


図1 装置説明図

E 爆薬
M 金属試料
P ピンコンタクト
F1 同上をはつた鉄板
F2 試料保持鉄板
AN アンビル
S 防壁
H 砂と装置のくくりのためのクラフト紙
Pe ベレツト

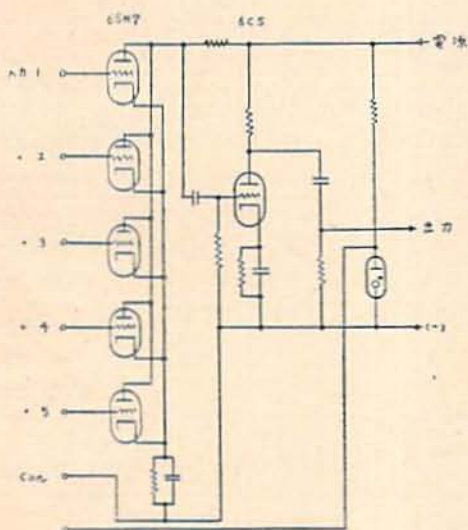


図2 前置増幅器回路

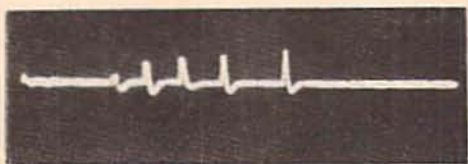


写真1 爆引状態

TNT (Δ 0.95g/cc) 300g, Pb=99.70%,
 $a=60$ mm, $d_1=1.79$ mm, $d_2=0.82$ mm,
 $d_3=1.41$ mm, $d_4=2.78$ mm.

爆薬は42メッシュ通過の TNT (Δ 0.95g/cc) 300g, 直径 40mm ボール紙被ふくのもので, 試料の直径は 38mm である。試料の種類は, 鉛, 鉄, 銅, アルミニウムの四種類であるが, 鉛については純度の影響もしらべた。従来の鉛は分析純度 99.6~99.8% であるが, 低純度品の例として, 99.18% の場合も行つた。これらの結果は物性論的にも注目すべきものがあるので, さらに, Sb 2.5, 及び 5% 含有させた例を加えて次報でくわしくのべる。

3 物質速度測定結果

上記の方法による結果をまとめると表1のようになる。方法がいくつかあるため, 説明が錯綜するので, 表の各欄の方法を次のように記号で示しておく。(図1下参照)

欄	方 法
A	円板~電磁オシロ法, 鉛と銅はV報より再録*
B	$\tau \sim d$ 曲線の傾斜をとる方法
C	自由面速度の直接測定
D	円板~ブラウン管オシロ

* 第V報⁶⁾では実測値を反してない。

A, D欄の () は円板厚さ mm, B欄の () は既報⁶⁾で採つた値。

表1 各種金属内の物質速度, m/s

(1) 鉛 (Pb=99.7%)

試料長 mm	A	B	C	D
100	(0.5) 19.9 (1.0) 16.4 (1.9) 8.2	—	—	(1.1) 22.0 (1.9) 12.3 (4.2) 8.9
80	(1.0) 27.6 (1.2) 26.9 (2.0) 22.0 (3.0) 15.8 (3.8) 12.3	—	—	(0.4) 45.8 (1.2) 33.3 (1.9) 29.4
60	(0.5) 37.5 (1.6) 34.8 (1.8) 38.6 (3.0) 31.9 (3.7) 25.4	(64) 67, 26, 38, 52	53.5	(1.1) 61.5 (1.9) 44.5

試料長 mm	A	B	C	D
45	—	(80)	47, 49, 127	(0.4) 139.0 (1.1) 105.0 (1.9) 102.0
30	—	(150)	155~160 134, 122, 171 107, 90, 185 175, 106, 106	(0.4) 215.0 (1.1) 213.0 (1.9) 125.0
20	—	(222)	199	(0.4) 215.0 (1.1) 213.0 (1.9) 125.0
10	—	—	—	(0.4) 265.0

(2) 鉛 (Pb 99.18%)

試料長 mm	B	C	D
140	—	—	(1.0) 8.9 (2.0) 8.0
120	—	—	(1.0) 14.3 (2.0) 12.2
100	—	8.7	(1.0) 23.3 (2.0) 19.1 (4.4) 14.9
80	47	23.0~27.8 26.5, 21.1, 22.5 13.5, 23.0	(0.5) 49.3 (1.0) 34.9 (1.8) 26.6 (3.8) 30.5
60	—	57.0	(0.5) 62.8 (1.0) 55.8 (1.9) 46.8
45	107	110 103 117 91 123	(0.5) 128.0 (1.0) 118.0 (1.9) 74.0
30	150	118~180 129, 193, 162, 152	(0.5) 197.0 (1.9) 92.0
20	—	—	(0.5) 252.0 (1.0) 209.0
10	600~800	—	(0.5) 292.0

(3) 鉄

試料長 mm	A	B	C	D
40	(2.0) 16.7 (4.0) 22.5 (8.0) 31.4	(36)	25.3 32.3 20.5	(0.4) 49.0 (1.0) 56.5 (2.0) 55.0
30	—	(91)	80.0	(0.4) 74.0 (1.0) 104.0
20	(2.0) 54.8 —	(278) —	119.0 105.0 134.0 139.0	(0.9) 132.0 (1.0) 155.0
10	—	—	—	(0.4) 160.0 (0.9) 177.0 (1.0) 243.0
5	—	—	—	(0.4) 422.0 (0.9) 505.0

(4) 銅

試料長 mm	A	B	D
40	(2.0) 36.8 (4.0) 21.6	107	(1.0) 110 (1.8) 101 (2.5) 93
30	—	209	(0.4) 215 (0.9) 140 (1.8) 88
20	(2.0) 62.0	250	(0.4) 240 (0.9) 158 (1.8) 123
10	—	—	(0.4) 268 (1.0) 260
5	—	—	(0.4) 317

(5) アルミニウム

試料長 mm	B	D
40	120	(0.4) 180 (1.8) 111
30	—	(0.4) 282 (1.8) 234

試料長 mm	B	D
20	—	(0.4) 423 (1.6) 413
10	—	(0.4) 525
5	—	(0.4) 900

表1を総合すると、次のようなことがわかる。まず、鉛について、A、D欄を比較すると、試料長が長く、円板速度が低いときにはほぼ両者は一致するが、高速となるに従って測定距離の長いAの値は、至近距離で求めたDの値よりも低い値となる。爆源に近づくと、鉄、銅ともにAはDの5%以下になる。この点からみると、円板法は至近距離で行うのが妥当であり、測定距離を大にするときは、円板速度の減衰性と、使用した標的の作動機構に充分注意を払う必要がある。

C欄の自由面速度の値は、個々の値を比べると、きわめてばらつきが大きい。その誤差をD欄の方法と比べると表2のようになり、Dよりもはるかに大きい。この結果は異常であり、何か本質的な原因があると思われ。

表2 方法による信頼限定の比較
信頼度 $t=95\%$, Pb 99.16%, $a=30\text{mm}$

方法	回数 n	平均値 m/s	$\beta \pm m/s$
C	11	144	25.3
D	4	197	2.4

これは、自由面速度の変化を多数のピンコンタクトでとらえた、C欄の太字の結果をみると明らかである。前述のように、C、D法とともに自由面から第1針までの距離はわからないが、一連の値から、または、同一試料長で行った結果を組合せて考えてみると、自由面の運動は初め速く、次で遅く、再び速くなつて、また減衰する過程をとっている。(多数のピンコンタクトを使用するときの全測定距離は2~5mmである。)そして、この過程中のほぼ最高値をD欄の最高値が示すことが注目され、これは一面、円板法の純粋さを裏証するものといえる。W. A. Allen も自由面の運動性をしらべて、同様の現象を説明している²⁾。Allen はこのとき、衝撃波につづいた塑性波* のため

と推定している。しかし、むしろ、自由面の移動に破壊(波の反射距離)の様相が含まれてくるためと見る方が適切であると思われる。

結局、自由面の運動は単純なものでなく、 $\tau \sim d$ 曲線は本質的に図3のようになり、この点の知識なしに傾斜をとるときは、一般に低くみつかりがちになる。

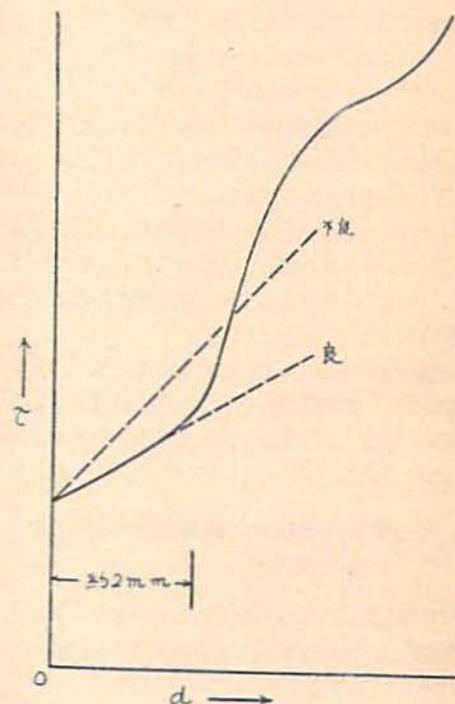


図3 $\tau \sim d$ 曲線の一般的形状と、その傾斜のとりかた

従つて、傾斜は曲線の初期の部分に限定して計るべきである。このようにすれば、C・D欄の最高値と一致する。ただし、きわめて爆源に近づくと、Bの方が大となる傾向が生じ、表1(2)の $a=15\text{mm}$ ではこの差が顕著にあらわれている。これは、円板速度が急速になると、飛しよう中の抵抗が急に増大するためと思われる。この場合、Bは自由面の運動に先行する空中の衝撃波がコンタクトに作用した値ではないかという疑問が生ずる。これは、爆薬末端から生じた空中の衝撃波をコンタクトに当てた別の実験から、600m/s程度の弱い空中の衝撃波は我々の装置では全く感じないことが確かである。

以上から、物質速度測定法としては、自由面から至近距離で行う円板法が良く、特に、爆源に近いときは、 $\tau \sim d$ 曲線の初期の傾斜をとるのが良いことがわかる。

* これは次報の塑性流動波と異り、衝撃波より低次の塑性波である。

後者は、全般的に行つて良い方法であるが、現象後期にわたる波形をしらべる目的には適しない。

試料による差は、一般にアルミニウムが最高値を示し、比重の小さなものは高速の物質速度となる可能性を示している。

鉛の純度による差は、一般に、高純度物がやや低速である。 $a=60\text{mm}$ 以上ではほとんど差がなくなるが、爆源に近づくほど差が出てくることが注目される。この点は、波の伝播速度の変化とともに考察すべきであるのでまとめて次報にのべる。

一般に、この実験範囲では、薄い円板ほど高速で、波面は切り立つていていることを示しているが、鉄では逆であり、波面は丸みを帯びていることがわかる。すなわち、鉄内の波は非衝撃的で、弾性波の性格をもっており、この形は銅の減衰した形にもあわわれている。また、鉛においても減衰した波頭が丸くなることは第Ⅱ報⁹⁾ 図5に示した通りである。

以上、固体内衝撃波の物質速度の測定法と、数種の金属についての実験結果をのべたが、最後に、物質速度測定の方法となる衝撃波と稀薄波内の物質速度の差をしらべておく。

4 固体内衝撃波と稀薄波の物質速度の差について

本報告の最初にのべた物質速度の測定法の基礎となった概念は、入射衝撃波と反射稀薄波の物質速度 v_p , v_r は等しいとおくことによつて与えられたものであつた。そこでこの差を吟味する。ただし、計算は次報でのべる、高次塑性流動波等の問題のない10万気圧以下に限定する。

先づ、 (v_r/v_p) 最大の可能性を考える。いま、最初の圧力 P_0 、比容 V_0 の状態から、Hugoniot 曲線にそつて $P_1 V_1$ までもたらされ、次に、断熱線にそつて P_0/V_0' に解放されたとする。(図3)

このとき、断熱線にそつた稀薄波内の物質速度は次式で示される。

$$u_r = \int_{P_1}^{P_0} \left[\left(-\frac{dV}{dp} \right) dp \right]_{\text{adi}} \dots\dots (1)$$

また、衝撃によつて与えられた内部エネルギーの変化は、

$$E - E_0 = \frac{1}{2} (p_1 + p_0) (V_0 - V_1) \dots (2)$$

となる。これに断熱線にそつた断熱膨脹による損失が

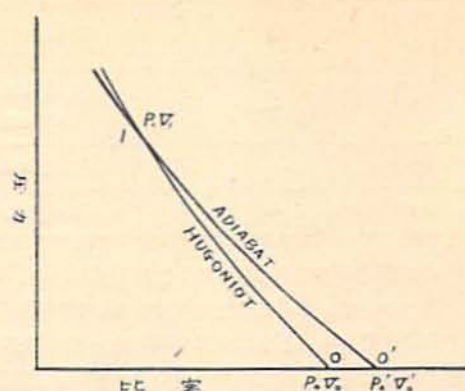


図 3

あるから、結局、最終的な内部エネルギーの差は

$$E' - E_0 = \frac{1}{2} (p_1 + p_0) (V_1 - V_0)$$

$$- \int_{V_1}^{V_0'} (p dv)_{\text{adi}} = C_p (T_0' - T_0)$$

$$- T_0 = \left(\frac{C_p}{\alpha V_0} \right) (V_0' - V_0) \dots\dots (3)$$

となる。一方、 $V_0', \int (p \cdot dv)_{\text{adi}}$ は熱力学的に各々

$$V_0' - V_1 = \int_{P_1}^{P_0} \left[\frac{dV}{dp} \cdot dp \right]_{\text{adi}}$$

$$\int_{V_1}^{V_0'} [p dv]_{\text{adi}} = \int_{P_1}^{P_0} [V \cdot dp]_{\text{adi}} - p_1 V_1$$

とおくことができるから、(3) 式により結局次の関係が得られる。

$$\int_{P_1}^{P_0} \left[V - \beta \frac{dV}{dp} \cdot dp \right]_{\text{adi}} = \frac{1}{2} P_1 (V_0 + V_1) + \beta (V_0 - V_1) \dots (4)$$

$$\text{但 } \beta = \frac{C_p}{\alpha V_0} \quad \alpha: \text{熱膨脹率}$$

この式は、図3の $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0' \rightarrow 0$ の1サイクルでは内部エネルギーの変化は零になることを表しているわけである。

そこで、問題は、式(1)の極大をもたらす、また、式(4)を満足して、 $P_1 V_1$ から $p=0$ までの変化を与える $p-V$ 曲線を定めることに帰することとなる。その結果は、双曲線

$$(P+B)(V-V_1)$$

$$+ \frac{p-p_1}{p_1+\beta} \frac{(V_0-V_1) \left(\beta + \frac{1}{2} p_1 \right)}{\ln \left[\frac{p_1+\beta}{\beta} \right]} = 0$$

となつて、これに於ける v_r は、

$$(v_r)_{\max} = \left[(V_0-V_1) \left(\frac{P_1}{2} + \beta \right) \ln \frac{p_1+\beta}{\beta} \right]^{\frac{1}{2}}$$

となる。従つて、 $\left(\frac{v_r}{v_p} \right)_{\max}$ は $v_p = [(p_1-p_0)$

$(V_0-V_1)]^{\frac{1}{2}}$ で割つて、

$$\left(\frac{v_r}{v_p} \right)_{\max} = \left[\left(\frac{p_1+2\beta}{2p_1} \right) \ln \left(\frac{p_1+\beta}{\beta} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \dots (5)$$

となる。

また、両物質速度比の最小値に於ける断熱曲線は次の条件に於てよく、これらの制限に於ける v_r の最小値は、Hugoniot 曲線と一致する断熱線によつて与えられる。

$$\frac{dV}{dp} < 0$$

$$\frac{d^2V}{dp^2} > 0$$

$$V(p) \leq V_H(p)$$

最後の条件は $\partial V(P, S) / \partial S < 0$ 並びにエントロピー S は Hugoniot 曲線に於て圧力とともに増大する事実から来たものである。従つて、結果は式 (1) によつて直ちに

$$\left(\frac{v_r}{v_p} \right)_{\min} = \frac{\int_0^{p_1} \left[\left(-\frac{dV}{dp} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot dp \right]_{HVO}}{[p_1(V_1-V_0)]^{\frac{1}{2}}} \dots (6)$$

となる。

このようにして $P_1 = 10 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ で計算した結果は表3のようになった。

計算に使用した Hugoniot 曲線は、実験から求めた既報²⁾に示したものをを用い、 C_p と α は T_1 まで一定と考えたが、その理由は、固体内衝撃波面の温度はあまり高くないと考えていることによる。表3の結果は、衝撃波が反射するときの自由面速度 v_f 、また

表3 衝撃波と稀薄波の物質速度比

	鉛	銅	鉄
$C_p, \text{ cal/g}^\circ\text{C}$	0.032	0.093	0.127
$\alpha, ^\circ\text{C}$	66×10^{-6}	53×10^{-6}	35×10^{-6}
$V_0, \text{ cc/g}$	0.088	0.112	0.127
$\left(\frac{v_r}{v_p} \right)_{\max}$	1.10	1.00	1.01
$\left(\frac{v_r}{v_p} \right)_{\min}$	0.89	0.96	0.99

は円板の速度は、前に仮定したように v_p の2倍としても極端な誤りはないことを示している。

5 総 括

本報は主に、金属の衝撃波内の物質速度を測定し、従来の波の伝播速度の実験結果とともに現象解析の糸口にすることを目的としたものである。本報告を総括すれば次の如くである。

(1) 物質速度測定の基礎的概念となる衝撃波の自由面における反射機構を説明し、具体的な手段を分類して説明した。これらのうち、行つた方法は4種類で、その得失を実験値から吟味した。

(2) 試料の自由面運動はかなり複雑で、一般に、初め速く、次でおそく、再び速くなつて減衰する過程をとり、これは現象のなかに、波の反射による破壊が入つてくるためと考えられる。この内、初期の最高速度は至近距離で求めた薄い円板速度に一致する。

(3) きわめて爆源に近いときは、至近距離で求めた自由面速度が最大の結果を示す。

(4) 一般に、薄い円板ほど高速で、波面は切り立っていることを示しているが、鉄、及び減衰した銅では逆に波頭は丸味をおびている。

(5) 鉛は純度によつて、物質速度に差異を与え、純度が低下すると、爆源近傍に物質速度が急激に上昇する領域が顕著にあらわれる。

(6) J. M. Walsh の衝撃波と稀薄波の物質速度に関する考察を紹介し、筆者の実験結果を用いて吟味した。

たえず、温情をもつて指導鞭撻される村田勉博士、ならびに、東京大学工学部山本祐徳、足田源阿教授、同理学部平田森三教授に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) R. E. Duff: J. Chem. Phys. **23**, 1268, (1955).
- 2) H. Kolsky: Stress waves in Solids p. 93 Oxford (1953).

as particle velocities in any case.

The result in various metals by the above four methods are shown in the fo-

llowing table 1. The explosive used was TNT ($\Delta 0.95\text{g/cc}$) 300g and the diameter of specimen was 38mm.

Table 1. Particle velocities v m/s
Figure in parenthesis shows thickness of pellet.

LEAD

Length of specimen (mm)	Method			
	I	II	III	IV
100	—	—	(0.5) 19.9 (1.0) 16.4 (1.9) 8.2	(1.1) 22.0 (1.9) 12.3 (4.2) 8.9
80	—	—	(1.0) 27.6 (2.0) 22.0 (3.8) 12.3	(0.4) 45.8 (1.2) 33.3 (1.9) 29.4
60	67.2~52	64	(0.5) 37.5 (1.6) 34.8 (3.0) 31.9	(1.1) 61.5 (1.9) 44.5
45	127.0~47	78	—	(0.4) 139.0 (1.1) 105.0 (1.9) 102.0
30	185.0~90	150	—	(0.4) 182.0 (1.1) 117.0
20	199	222	—	(0.4) 215.0 (1.1) 213.0 (1.9) 125.0
10	—	—	—	(0.4) 265.0

IRON

Length of specimen (mm)	Method			
	I	II	III	IV
40	32.3—20.5	38	(2.0) 16.7 (4.0) 22.5 (8.0) 31.4	(0.4) 49.0 (1.0) 56.5 (2.0) 55.0
30	80	91	—	(0.4) 74.0 (1.0) 104.0
20	139.0—105.0	—	(2.0) 54.8	(0.9) 132.0 (1.0) 155.0
10	—	—	—	(0.4) 160.0 (0.9) 177.0 (1.0) 243.0
5	—	—	—	(0.4) 422.0 (0.9) 505.0

The distance for measuring the pellet velocity was 60~100cm at III, and 0.1~0.2 at IV.

From the fact that a thin pellet has a higher velocity than that of a thicker one, it is recognized that the front of shock wave rises very rapidly, on the

other hand iron shows the reverse aspect with the same explosive TNT ($\Delta 0.95\text{g/cc}$), therefore it is thought that the wave front is of round form. In order to discuss the fracture of materials by impact, we should consider the particle velocity.

(Nihon Yushi Co., Taketoyo Plant.)