

# Corrosion Resistance of Metals Welded by Explosives

by Kouroku Hoshi & Yu Takizawa.

It had been reported by some early investigators in this field that corrosion resistance of some metals may be reduced by explosive working operations. This report discusses causes for these effects and presents some possible remedies.

Then we have concluded that corrosion resistance of explosive welded metals, when it was produced by specific welding conditions, are so excellent as its of solid metals. But, in some instances, decreases took place, when welding is made under unsuitable explosive conditions for each metals. With our present knowledge, we are inclined to believe that it is due to residual tensile stress.

(Asahi Chemical Industry Co., Ltd. Sakanoichi Plant)

研究論文

## 爆発成形の機構について

桜井武尚・金本光郎\*

### 1. はしがき

ここ数年来、にわかに火薬類の各種金属加工面への関心が高まって来ている。その工法も、成形、圧接、硬化、圧縮、拡管等、まことに多彩なものがある。ここでは、とくに爆発成形について、実際的規模の実験を行い、その技術の本質を考え、今後の方向について論じたい。

爆発加工法が活発に研究されはじめたいきさつは、大きく分けると、つぎの三点があげられよう。

- 1) 機械工学の立場から
- 2) 金属材料の立場から
- 3) 火薬技術の立場から

近時、ロケットや人工衛星等の飛しよう体の製作問題に刺げきされて爆発成形がとり上げられた事は初期の多くの文献に見られるところであるが、たしかに、通常、雄型、雌型の両者を要する従来の工法にくらべいづれか一方だけで足りる爆発成形は、小致多種生産に有利であることはいうまでもない。加えて、宇宙時代の各種要求にこたえて開発された種々の新合金、新金属の加工においても、火薬類を使用する事は変形を高速にし、その結果として生ずる、有利、不利の現象

に対して応変のエネルギー分布を行なう工夫も容易である。このような観点から爆発成形が試みられたのは、1957年頃と考えられるが、1959年にはかなり大部の文献が出まわっている。

爆発成形は火薬類の各種媒体内の爆発現象を利用するため、成形速度は夫々の条件で種々の差はあるにせよ、従来の工法にくらべたしかに高速で行われる。したがって、金属材料が高速度荷重下におかれたときの挙動は重要な問題である。この最初のきつかけは軍事的問題もあつて、Kármán から Duwetz につづく一連の基礎的研究がつづいたが、(1948~1953)、至速度に及ぼす金属の性質は具体的な工学的立場からも、Watts (1959)、Austin (1960)、桜井、塚田 (1960)<sup>1)</sup> が実験した。初期のこの実験はさらに、福井、河田、清野 (1961~ )<sup>2)</sup>、によりなお意欲的な研究が行なわれている。

一方、火薬技術の立場からは、岩石爆破以外の目的にその用途を開発する事は、今後の一つの課題であり、成形に火薬類を使用する事は着想としては古くからあつたし、金属の圧着、硬化等の現象も火薬技術者の体験の中に潜在していた。したがって、上記の時代的な背景を得るに至つて、爆発成形法は、火薬技術の立場からも関心が大きくなって来ている。そこで、な

昭和42年1月9日受理

\* 日本油脂株式会社武豊工場 桜井武尚

るべく実際の規模のもとで平面円板の成形性を実験し、その機構を考察したのが本報告である。

## 2. 爆発成形の要因と実験条件

爆発成形を行なうには、爆薬、素材、媒体、型の四つの要因が必要である。すなわち、図1に示すように、爆薬 E が媒体 M (通常は水) 内で爆発し、その圧力が素材 B に及び型 D 内に成形される。このとき、素材と型の間の空間は減圧しておく必要がある。

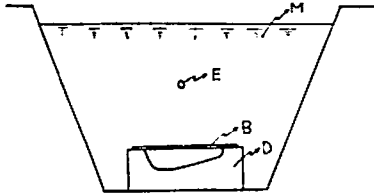


図1 爆発成形の方法説明図

又、型の上部のフランジ部分には、成形過程において発生するしわを防止するためのしわ押え装置がほどこされる。このしわ押えが適当でないとき、強すぎれば素材の中央部の伸びは大となつて時には破断し、弱すぎれば素材のふちに放射状のしわが発生する。

爆発成形を律する要因は、まとめてみると図2のようである。

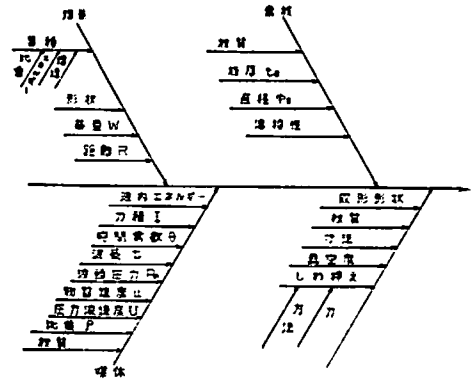


図2 爆発成形の要因図

### 2-1 爆薬

現存する爆薬の種類はまことに多岐にわたつていますが、取扱い感度、比重、火薬力、爆速等が問題となることは通常と変りはなく、要は使い易く、少量で爆発性の良好なものに主眼をおいてえらぶべきである。ここで使用したものの特性値を示せば表1の如くである。

表1 使用爆薬諸元

薬種	比重 g/cc	爆速 m/s	火薬力 f. l. kg/cm <sup>2</sup>	爆発ガス積 V <sub>c</sub> l	発熱量 Q. Ccal	爆発温度 T. °K
A	1.1	6,000	9,400	800	1,060	2,980
B	0.97	3,500	7,500	780	940	2,550
C	0.8	4,000	8,900	920	921	2,570

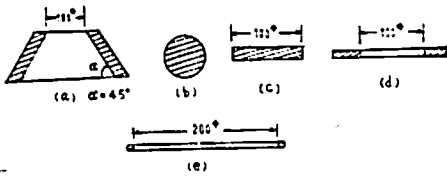


図3 爆薬の形状

また、爆薬の形状は図3のような各種形状のものを試みた。

### 2-2 素材

素材の材質、諸元は当然、重要な条件である。ここではさし当つて表2に示す鋼材を使用した。

表2 成形素材の特性値

C	P	S	降伏点 kg/cm <sup>2</sup>	引張り強さ kg/cm <sup>2</sup>	のび %	硬さ HV
%	%	%				
0.39	0.02	0.027	30	45	55.4	160

### 2-3 型

型の構造、諸元は図4に示す。しわ押えは、爆発成形の場合も特に大切であり、薬種、薬量の要因もさることながら、しわ押えの条件を誤れば適正な成形はきわ

めて困難となる。然し、静的な場合でも、しわ押え力と、発生するしわの関係を測することは難解な問題である。従つて、通常の工法でも試行錯誤によつて得た体験が設計と施工の基準となつている現状である。

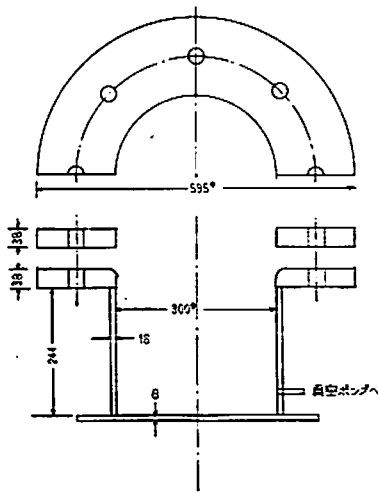


図 4 型

もつとも、このしわは、素材の大きさ、(例えば直径  $\phi_B$ ) に対して、板厚 ( $t_B$ ) が大となれば発生しにくくなる傾向があり、その領域では、ある程度のしわ押え力があれば成形結果に大差を与えないようになる。従つて、ここでは、しわ押え力が結果に大差を与えない  $\phi_B$  と  $t_B$  の比を採用した。事前にしわ押え力を検討した結果は表 3 のとおりであつた。しわ押え力はトルクレンチで管理し、本報の実験では以後 3,000 kg-cm で行なつた。

表 3 しわ押え力の検討

しわ押え力 kg-m	成形深さ cm	成形容積 cc
0	9.7	4,750
1,000	9.4	4,650
3,000	9.5	4,650
5,000	9.5	4,650

A : 0.1 kg    R : 10 cm  
 $\phi_B$  : 450 mm     $t_B$  : 6 mm

素材と型の間空間は減圧して行なうが、この実験では 10 mm Hg とした。この値は精密な成形ほど小さすべきである。

#### 2-4 媒体

媒体としては、粉体、気体、液体、いづれでも良いわけであるが、実効と経済性の両面から水が最も費用されている。又、水に対しては爆発圧力の挙動はかなり研究されているので都合である。例えば、Cole の著書によれば<sup>2)</sup>、爆発によつて生じた水中圧力波の波頭圧力  $P_m$  は

$$P_m = k \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^n \quad (1)$$

で示され、波内の圧力  $P$  は波面からの時間  $t$  に対して、

$$P = P_m e^{-t/\theta} \quad (2)$$

この  $\theta$ 、圧力波のインパルス  $I = \int P dt$  およびエネルギーはそれぞれ次の式で示される。

$$\theta = A W^{\frac{1}{3}} \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^p \quad (3)$$

$$I = B W^{\frac{1}{3}} \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^r \quad (4)$$

$$E = C W^{\frac{1}{3}} \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^c \quad (5)$$

(1)~(5) 式を通じて、 $W$  は薬量、 $R$  は爆薬から素材までの距離である。また、圧力波面の温度上昇は  $P_m = 7000 \text{ kg/cm}^2$  でも、ただか 25°C で、素材に熱影響を与える事は全く考えられない<sup>3)</sup>。

水深は、浅い時にはエネルギー効率が不良となり、又、水そうは小さいと波の種々の干渉が生じる。本実験では直径 8m、深さ 6m の水そうを使用した。

尚、爆発ガスの膨張速度は空中では非常に高速で、燃源近傍では衝撃波の波面に追いついているが、水中ではおそくて、このガス球の膨張速度は、例えば、雷管程度の場合、最大 10 cm の半径に広がるまで 4~6 m/s 程度である。この膨張ガス球は充分に膨張し切つた所から再び収縮し、また膨張する振動的運動をくりかえし、全体として小さくなりながら水面上昇して行く。このガス球の膨張は水深  $d$  と、薬量  $W$  に関係し、その最大半径  $a_m$  と、周期  $\tau$  とは

$$d_m = W^{\frac{1}{3}} / (d + 3.3)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\tau = K W^{\frac{1}{3}} / (d + 3.3)^{\frac{5}{6}} \quad (7)$$

で示される。

#### 3. 種々の条件下の成形実験

本報の実験で行なつた成形性はつぎの各項で評価する。

- (1) 成形品中央部の深さ  $h$  (cm)
- (2) 成形品内容積  $V$  (cc)
- (3) 同上の比  $V/h$
- (4) 素材のフランジ部の引き込み量  $S$  (cm)
- (5) 断面各部の曲度  $r$  (cm)

#### 3-1 爆薬の形状

爆薬の形状と成形性を検討したときの成形品は写真 1、のようであり、その対称性は本実験を通じて良好であつた。成形深さは図 5 に示すように、力を分散させる形状のものよりも球状の方がこの場合では大であり、同一薬量、同一距離でも形状によつて 50% 程度

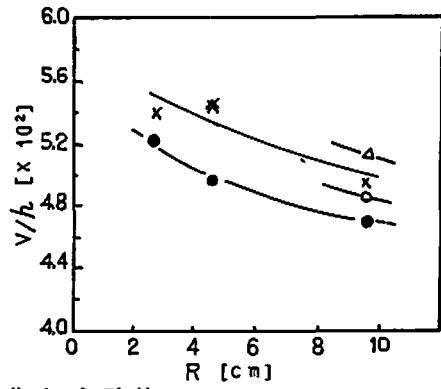
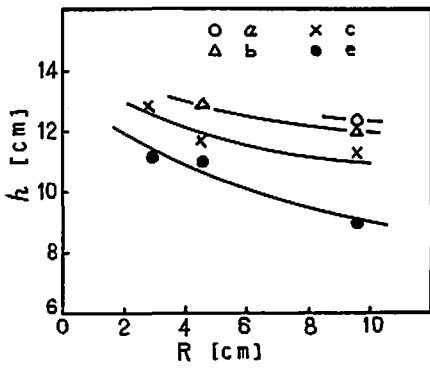


図5 爆薬の形状と成形性

薬量  $W$  を 0.05 kg 一定とし、距離  $R$  を変化させたときの爆発成形品の例を示すと写真2のようである。

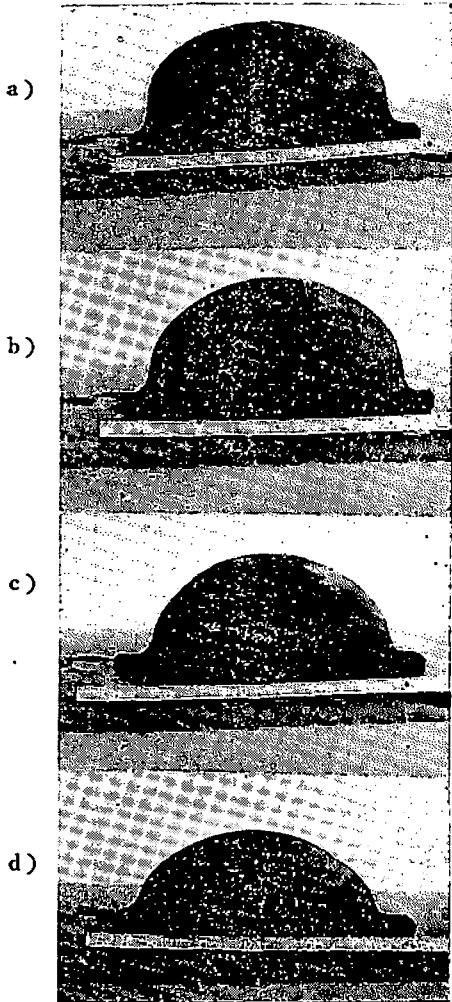


写真1 爆薬の形状による成形品の形状の変化  
a)~d) は図3の爆薬形状

の相異は生ずることが分る。写真1の実験条件は爆薬A,  $W: 0.15$  kg,  $R: 10$  cm である。

### 3-2 薬量、距離と成形性

前節から、球状の爆薬が成形性も良好で、又考察にも便利である事から、以下、爆薬はAの球状とする。

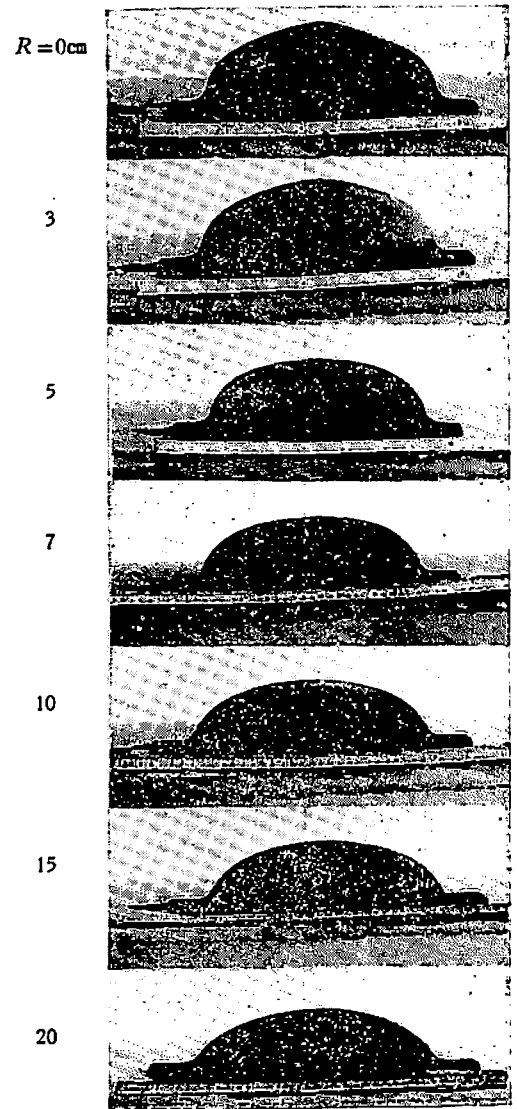


写真2 距離の変化と成形性

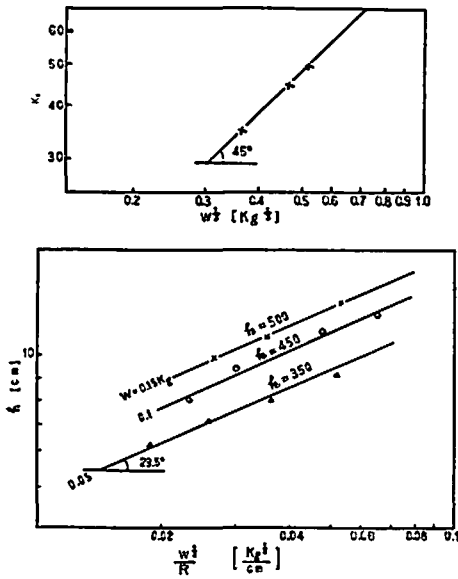


図6  $h$  と  $W^{1/3}/R$  の関係

このときの  $V/h$  と  $R$  との関係を示すと図5(右)となる。爆薬が素材に近づきすぎると  $V/h$  は急に低下して先がとがった傾向が生ずるのは写真(2)に示す通りである。また、この結果を  $h \sim W^{1/3}/R$  の両対数グラフに表わすと、図(6)となる。図6は  $W$  による平行な直線群で示され、それぞれ、

$$h = K_1 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{0.485} \quad (8)$$

となり、加えて、 $K_1$  と  $W^{1/3}$  の関係は図6(上)のように両対数グラフで明確な直線性がみられる。したがって、(8)式は

$$h = 95 \left( W^{1/3} \right) \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{0.485} \quad (9)$$

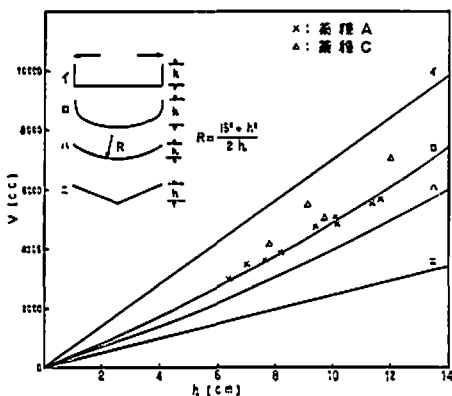


図7 薬種による  $V \sim h$  の相異

となる。もしも、 $h$  が水中圧力波の波頭圧力  $P_m$  によって律せられるならば、図6は(1)式にしたがつて、 $W$  には無関係に各点は同一の直線上に分布すべきである。それに反して(9)式の形となるのは、(3)~(5)式に照して明らかなように  $h$  は、 $\theta$ 、 $I$ 、又は  $E$  に直接的な関係があることを示している。

### 3-3 爆薬の種類の影響

つぎに、爆薬の種類について検討してみる。図7は横軸に成形深さ  $h$ 、縦軸に成形容積  $V$  を目盛つたもので、イは円筒状、ロは断面が  $1/2$  だ円、ハは欠球、ニは円すい状の、それぞれの  $h \sim V$  関係を示す線である。すなわち、もしも実験値がニの線上に分布すれば形状は円すい状であることを物語り、実験値が上の線となるほど深い箱状になって行くことを意味する。

表1の爆薬のうち、A はロ線上に近く分布し、形は  $1/2$  だ円状であることは、写真からもうかがえるところであるが、C はその上に位し、一そう角がついていけば箱形に深く成形される傾向が見られる。

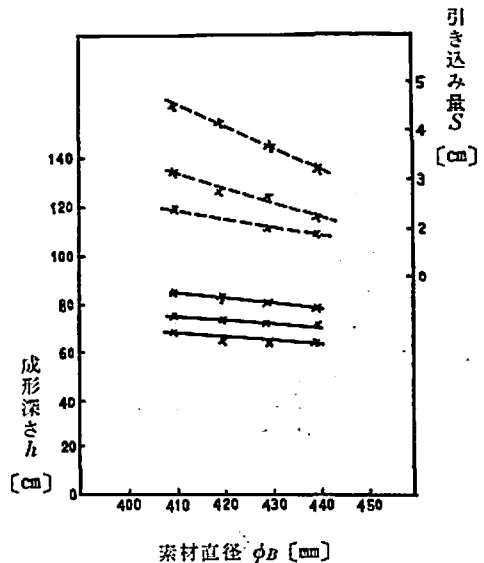


図8 素材直径と成形性

### 3-4 素材の大きさの影響

素材の直径  $\phi_B$  は、その成形深さに及ぼす影響は直線的である。(図8)

### 3-5 板厚ならびに硬さの変化

成形品の板厚の変化は、一般に少いほど良しとされるが、その許容度は当然、仕様によつて異なる。板厚と硬さの変化を第表4に示す3例について調べた結果を示すと、図9のようであった。

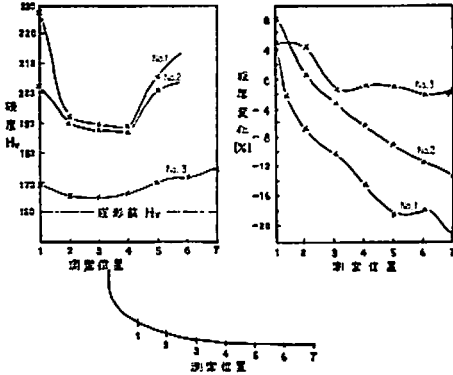


図9 成形品の板厚と硬さの変化

表4 板厚、硬さの測定試料の条件

番号 No.	素材直径 $\phi B$ mm	板厚 $t_B$ mm	$W$ $A$ , kg	$R$ cm	$h$ mm
1	450	6	0.20	10	18
2	450	6	0.15	10	14
3	450	6	0.05	20	6

3-6 成形の再現性

以上は図2に示す型について自由成形せしめたものであるが、 $W$ と $R$ をかえて行なつた55の実験条件のうち、40例については2回ずつ行なっている。そこで、おのおのの差から再現性を調べてみよう。第10図は横軸に同一条件で求めた2つの $h$ の平均値をとり、縦軸を2つの $h$ の差 $\Delta h$ としたものである。これから、 $h$ の差、 $\Delta h$ の度数分布を求めると図10のようであり、全数の74%が20mm以下の差となっている。その誤差は $h=6$ cmで3%、13cmで4%程度と考えると良く、成形深 $h$ の再現性はかなり良好である。

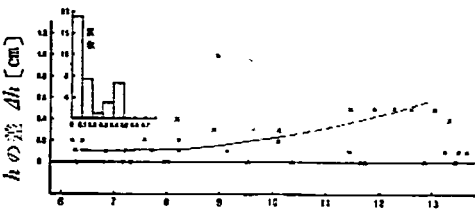


図10  $h$ の平均[cm]

4. 水中圧力の測定

水中圧力の測定は大別して、円板、円柱などの変形から求める力学的方法と、圧電気片やストレングージ

などによる電気的方法がある。ここでは力学的方法の一つである。平田式検圧器を使用した結果についてのべる。この検圧器は捕鯨砲腔圧測定のために平田森三教授が工夫されたもので、その機構は図11のように、鋼柱①が加圧によって同質の材料からなる②に押しつけられ、①の先端の圧潰面積 $D$ から圧力 $P$ を求める。 $(P_H = KD^2)$ 。1ロットは約100個から成り、ロット毎に $K$ を検定しておく。ここではこの方法による測定値を $P_H$ で示し、他の方法による値と区別しておくことにする。

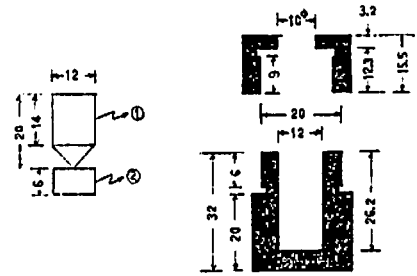


図11 平田式検圧器

4-1 測定値の信頼限界

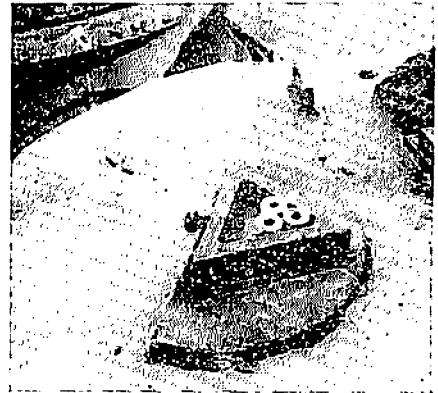


写真3 検圧器固定状況

同一の条件下の成形にはむらが少ないことは前記の通りであるが、念のため検圧器は3本束にして写真3のように、直径85cm、高さ45cm(重量約2ton)の鋼材上にとりつけられた固定わくに設置した。このようにして、爆薬A、 $W=0.1$ kg、 $R=30$ cm、水深 $d$ 、3.2mで行なつた $N=21$ の結果から求めた、95%の信頼度下の信頼限界は

$$1714 \pm 49.3 [\text{kg/cm}^2]$$

であつた。なお、 $4,000 \text{ kg/cm}^2$ 以上では、鋼柱先端の圧潰ははげしすぎて、測定はむりである。

#### 4-2 水中圧力測定結果

以上の方法による種々の  $W \sim R$  の実測結果を  $P_H \sim W^{1/3}/R$  の両対数グラフに目盛ると、図12となる。やはり、図6のように  $W$  によつて位置を異にする直線群に分れ、夫々の傾斜  $K_2$  と  $W^{1/3}$  の関係は第12図上の如くであり、けつきよく、

$$P_H = 1.7 \times 10^3 (W^{1/3})^{0.772} \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.191} \quad (10)$$

( $P_H$ : kg/cm<sup>2</sup>,  $W$ : kg,  $R$ : cm)

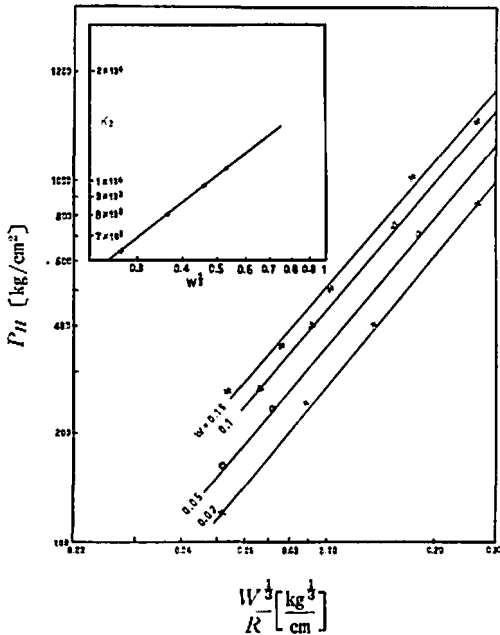


図12  $P_H \sim W^{1/3}/R$  の関係

となつて、この検圧器は純然たる波頭圧力  $P_m$  によるものでなく、むしろ、力積、又はエホルギーに依存した性質の数値を示すことを示している。しかし、このことはいささかも、本検圧器の真価をそこねるものでなく、むしろ、実際の爆発成形が  $P_m$  のみに律せられない事と本質的に規を一にする以上、成形の尺度を求める方法としてはむしろ適当であるといえる。さらに図12は成形機構の興味ある姿を暗示しているが、そのまゝに、他の研究者の測定値と比較してみよう。

#### 4-3 他の測定値との比較

水中圧力の様相は、従来も多く研究者にいつて探求されて来た。本邦では清水氏の研究があり、海外では Cole の実験がある。ここで両者の実測値と比較してみよう。

図13に示すビニゾ片による Cole の値は、各点共異なる  $W$  であるが、いずれも同一直線上にのり、

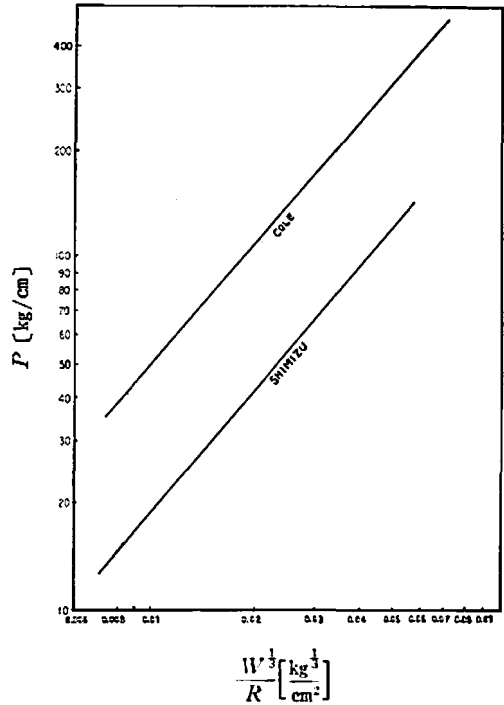


図13 水中圧力の他の研究者の実験値

$$P = 1 \times 10^4 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.15} \quad (11)$$

( $P$ : kg/cm<sup>2</sup>,  $W$ : kg,  $R$ : cm)

となる<sup>1)</sup>。清水氏の実験は、銅板によるもので、若干薬量の差はみられるが、ほぼ直線と見てよく、

$$P = 4.4 \times 10^3 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.15} \quad (12)$$

( $P$ : kg/cm<sup>2</sup>,  $W$ : kg,  $R$ : cm)

となる。けつきよく、三者を比較すると、

- 1) 傾斜はほとんど一致する
- 2) 平田式の  $W$  が大のとき ( $W=0.15$ kg) は Cole の値にほとんど一致する
- 3)  $W$  による相異は、Cole では認められていないが、平田式では  $W$  が小になるほど相異が生じて来る。

尚、Cole の使用爆薬は TNT である。本実験の A は若干強い。

#### 5. 考 察

以上で、実際の爆発成形と、その条件下の  $P_H$  の値があくできたので、 $P_H$  と成形深さとの関係を考察してみよう。

##### 5-1 成形深さと $P_H$ との関係

$W$  が小なるとき、 $P_H$  は  $h$  に対して指数関数的に

増大する。しかし、 $P_H=1,000 \text{ kg/cm}^2$  程度から、 $W$  の影響が生じ始め、同じ  $P_H$  を生ずる条件であつても、 $W$  が大であるほど、よけいに成形する結果を示している。

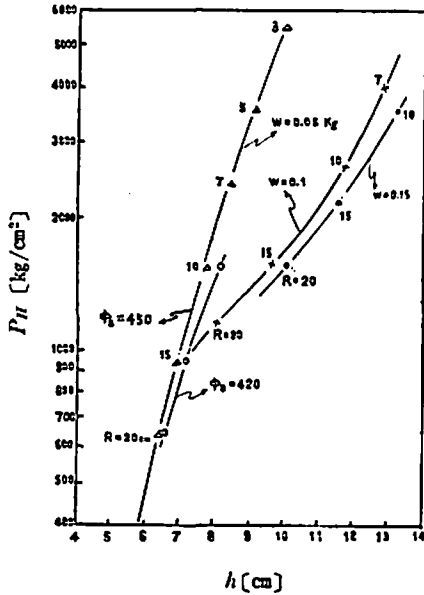


図14  $P_H/P_s$  関係

ここで  $P_H=1,000 \text{ kg/cm}^2$  以下の領域で、 $W$  が  $0.1 \text{ kg}$  以上の線が交つて  $W=0.05 \text{ kg}$  の線の左にのびる事は、同一の  $P_H$  の条件で薬量が多いのに  $h$  が

小さいこととなつて不合理であるから考えられない。したがつて、 $P_H=1,000 \text{ kg/cm}^2$  以下の領域では、ほとんど  $W$  に影響なく、両者は

$$P_H = 11e^{3 \cdot 23h} \quad (13)$$

( $P_H$ :  $\text{kg/cm}^2$ ,  $h$ :  $\text{cm}$ )

の關係に結ばれ、常數  $11 (\text{kg/cm}^2)$  は  $h=0$ , すなわち、板が降伏するときの内圧を示す。いま、本実験における素材、(成形直徑  $300 \text{ mm}$ , 板厚  $6 \text{ mm}$ ) が  $11 \text{ kg/cm}^2$  の内圧を受けたときの最大内応力は材料力学の教える所によれば  $9,000 \text{ kg/cm}^2$  となる<sup>4)</sup>。これは材料の降伏応力  $4,100 \text{ kg/cm}^2$  の  $2.2$  倍に當つている。これは次節の考察結果と対比してきわめて興味深い。

### 5-2 成形に要する静的圧力 $P_s$ と動的圧力 $P_H$ との差異について

ある平面円板に、内圧  $P_s$  をかけ、その結果、 $h$  の成形深さが得られたとき、 $P_s$ 、 $h$  の間には、Hill による次の解がある<sup>5)</sup>。

$$\frac{P_H}{Y} = \frac{4ht}{a^2} \left[ 1 + \frac{1}{2}(3H-3) \frac{h^2}{a^2} \right] \quad (14)$$

$Y$ : 降伏応力,  $H$ : 塑性係數

$a$ : 成形半径,  $t$ : 板厚

$h$ : 成形深さ,  $P_s$ : 内圧

そこで、本実験の条件の種々の  $h$  における (14) 式の  $P_s$  を求め、また、その  $h$  を得るのに必要な  $P_H$  を図14から求めて比較してみる。

表 5  $P_H/P_s$

$h$ cm	$P_s$ kg/cm <sup>2</sup>	$W$ 0.05 kg		0, 10 kg		0.15 kg	
		$P_H$ kg/cm <sup>2</sup>	$P_H/P_s$	$P_H$ kg/cm <sup>2</sup>	$P_H/P_s$	$P_H$ kg/cm <sup>2</sup>	$P_H/P_s$
6	260	550	2.1	550	2.1	550	2.1
7	300	1,000	3.3	1,000	3.3	1,000	3.3
8	345	1,800	5.2	1,150	3.3	1,150	3.3
9	390	3,400	8.7	1,400	3.6	1,300	3.3
10	432	5,500	12.7	1,700	3.9	1,550	3.6
11	476			2,200	4.6	1,900	4.0
12	520			3,000	5.8	2,500	4.8
13	562			4,200	7.5	3,400	6.1

$P_H$  は  $P_s$  より例外なく大であり、材料を動的に降伏させるには静的な圧力よりも大である事を必要とし、 $P_H/P_s$  の最小値は  $2.1$  であつて、前節の結果と一致する。

高圧の領域では、明らかに、 $P_H/P_s$  には  $W$  に対する依存性があるが、ある範囲まではほとんど一定とみてよい。その状況を図示すると、図15のようになる。 $P_s=300 \text{ kg/cm}^2$  以上では、同じ  $P_s$  のとき、 $W$



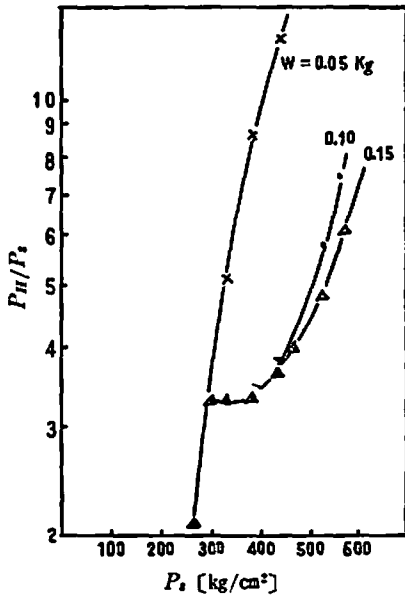


図15  $P_H/P_S \sim P_S$  の関係

が大であれば  $P_H/P_S$  小さくて良い。小さくてよいということは、 $W$  が小さいときにくらべて  $P_H$  の値が小さくてすむという事である。例えば、 $W_1, R_1$  の条件で成形したときと同じ  $P_H$  を示す条が  $W_2, R_2$  であり、

$$\begin{aligned} (1) \quad & W_1 < W_2 \\ (2) \quad & R_1 < R_2 \\ & P_{H1} = P_{H2} \end{aligned}$$

とすると、(2) の方がよけいに成形する。これは、ここで行なった爆発成形の条件内ではインパルスの要素が強いことを物語っている。 $P_H/P_S$  を  $k$  (爆発成形常数) とすれば、 $k$  は  $P_S=300 \text{ kg/cm}^2$  までは 3, それ以上にれば  $P_S$  の増大に応じて大きくなるべきである。この評価が適正であれば事前に、静的な計算から爆発成形条件を了知することができる。 $k$  は材質、諸元、形状、所望の成形量等によつて変化することはいうまでもない。これには、材料の降伏応力の、その歪速度下の動、静両条件の差、その条件下の機構の相異、たとえばフランジ部のまさつ、素材の引き込みの程度の差異等が含まれかなり複雑な内容の数値であるが、実用上の条件を定める目安としてきわめて重要な数値である。

### 5-3 爆発成形の機構について

今までの考察で爆発成形を律する要因子の中には、波頭圧力だけでなく、水中圧力波の瞬間的要素が強く含まれていると解しても良い。この点は平田式検圧

器についても同様であつて、この時は、明確に、薬量 が十分に大となつたときは、その  $P_H$  値は波頭圧力  $P_m$  と一致する事が、他の実験値と比較して知られた。そこで、これらの結果から、波頭圧力  $P_m$  とエネルギー  $E$  との成形機構に及ぼす関連を總括的に考えてみよう。

まず、ここで浮ぶ第1の考えは、ある成形品を深さ  $h$  に成形したとき、現象には動的な因子と、静的な因子の加成性が成り立ち、

$$\begin{aligned} h &= \alpha f_1(P_m) + \beta f_2(E) \\ \alpha + \beta &= 1 \end{aligned} \quad (15)$$

と考える事である。 $\alpha$  と  $\beta$  とは、波頭圧力  $P_m$  (又は媒体の物質速度の関数とみて速度をとつてもよい) を含む動的因子と、エネルギーが成形にあずかる静的因子と、夫々、現象に関与する割合であつて、 $\alpha \rightarrow 0$  のときは完全な静的成形となり、 $\beta \rightarrow 0$  のときは成形は  $P_m$  のみに律せられる完全に動的なものとなる。このように考えると、ここまではよいが、図12に明らかなように  $W$  が増大して行くと、遂には  $P_H$  は  $P_m$  そのものの値を示すので、 $W$  の増大に応じて  $\alpha$  は増大すると考える。一方、 $W$  が増加すればそれに比例して、エネルギーの絶対値は増加している筈であり、 $\beta$  が  $\alpha$  とのシーソーゲームを行なうと単純に決める事はいささか冒険にすぎよう。

ところで、圧力といい、インパルスといい、エネルギーといい、要は、水中圧力波の圧力と時間、又は波の圧力と波面からの距離の問題である。したがつて、ひるがえつて考えると、水中圧力波の構造と、その荷重状態における素材の降伏条件に係る成形速度又は成形時間を論ずることにほかならない。故に、観点を新たにして、現象は速くて動的であつても、あるいは静的であつても、成形は本質的にインパルスに律せられるとすれば、

$$h = K \int P dt$$

そこで、同一距離  $R$  のもつて、薬量を増して行なつた  $W_1 \sim W_4$  の水中圧力波の波形は、 $W$  の増加とともに  $P$  と  $t$  とを増す事は明らかで、図16のようにならう。一方、成形時間  $\tau$  が  $t$  よりも大きい領域では、成形には水中圧力波の全インパルスがあますと

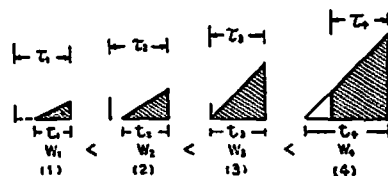


図16 爆発成形機構説明図

ころなく消費され、図16(1)、(2)  $h$  は  $\tau$  にかかわらず、

$$h = K \int_0^{\tau} P dt \quad (\tau < t)$$

となる。ところが  $\tau$  にくらべて  $t$  の増大した領域では成形インパルスは時間  $\tau$  で圧力波をカットした部分のインパルスとなる筈である。

そこで、図16(2) 第までは  $h$  は波の全インパルスの大小に関係するが、(3) 以降は  $P$  の変化に対して  $\tau$  の変化を無視すれば、

$$h = K \int_0^{\tau} P dt = K \cdot \tau \cdot P_m, \quad (\tau \leq t)$$

となつて、以後、 $h$  は単に  $P_m$  に比例する事となり、大へんうまく本報の実験結果を説明する。

ここで、水中波の速度  $C$  が、爆源からかなり離れていて、音速に近く、一定値であると考えられるときは、時間  $t$  は  $cx$  で距離に変かんされるから、近似的に、インパルスをエネルギーに変かんして考える事もできる。

#### 6. あとがき

以上、爆発成形の成形機構を明らかにすべく、実用的規模の実験を行なつたが、結局、動的因子と静的因

子とは別ものであつて、その加成性で現象を現解する考え方は不合理である。やはり、あくまでも、基本的にインパルスの立場に立ち、水中圧力波の構造と、その荷重状態における材料の降伏条件に応ずる成形時間との関連において問題を論ずべき事が結論づけられる。このような事は、工業爆破においても同様であつて、特殊な条件下の現象から演えきしてそれがそのまますべてのプロセスにあてはまるとする事は禁物であることを物語っている。従つて、今後、爆発成形の色々な実験を行う場合にも、この点を良く念頭に置いておく必要がある。特に、成形時間  $t$  が波長  $\tau$  にくらべて短かすぎる場合、注意が必要である。

#### 文 献

- 1) 塚田・井上・桜井：塑性と加工 2 (1951) 123.
- 2) 福井・河田・清野：航空研究所集報 3 (1961) 361
- 3) Cole R. H: Under Water Explosions (Princeton University Press. (1948)
- 4) 小栗富士雄：機械設計便覧 (共立社)
- 5) 山田嘉昭：塑性学 (日本機械学会)

## O- Explosive Forming

by T. Sakurai and M. Kanamoto

This paper presents an experimental study on formability and its mechanism.

The metal blanks of steel plate, 450-460 mm in diameter and 6 mm in thickness were explosively formed by use of die of diameter 300 mm, under various conditions of charge weight  $W$  and stand-off  $R$ , and their depth after forming was strictly measured.

Plotting  $\log h$  versus  $\log W^{1/3}/R$ , a straight line was obtained as Fig. 1-A. Therefore, it was found that  $h$  is subject to

$$h = k(W^{1/3}/R)^n \quad (1)$$

This is similar to the formula for peak pressure  $P_m$  in pressure wave in water.

The depth  $h$  increases as  $W$  increases and the curve of  $\log K \cdot \log W^{1/3}$  becomes straight, so the forming depth  $h$  is subject to

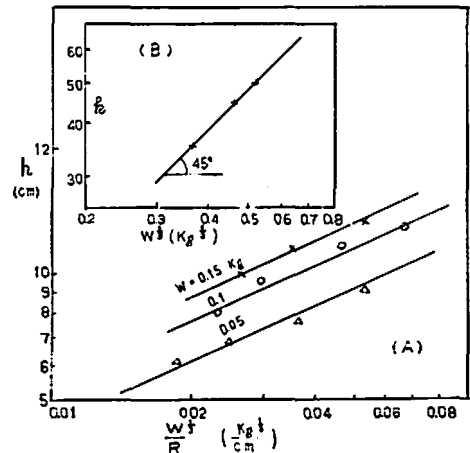


Fig. 1 Relation between  $h$  and  $W^{1/3}/R$

$$h = KW^{\frac{1}{3}}(W^{\frac{1}{3}}/R)^n \quad (2)$$

which is similar to the formula for the forimpulse of pressure wave.

In the second place, pressure  $P_H$  was measured by Hirata's pressure gauge, and the straight line was obtained when plotting  $\log P_H$  versus  $\log W^{\frac{1}{3}}$  as shown by Fig. 2.

When  $W$  is over 0.15 kg,  $P_H$  entirely coincides with the formula (1) and equals to peak pressure  $P_m$ . When  $W$  is smaller than the above limited value,  $P_H$  is controlled by the formula for impulse as (2).

From this fact, it was found that the impulse is essentially important for formability, and if forming time  $\tau$  is larger than time interval  $t$ , all wave impulse  $I$ , that is, an area of pressure-time curve of wave,

must be consumed for forming. Therefore when we assumed for simplification that  $h$  is merely proportional to impulse, the following formula was obtained,

$$h = K \int_0^t p dt \quad (\tau > t) \quad (3)$$

On the contrary, when  $t$  becomes larger than  $\tau$  as  $W$  increases, only a part of impulse of wave must be consumed for forming, so  $h$  is subject to

$$h = K \int_0^{\tau} p dt = k' P_m \quad (\tau \leq t), \quad (4)$$

Here, as  $\tau$  is assumed to be negligible, formability is proportional to peak pressure  $P_m$ .

In conclusion, impulse is the most important factor in explosive forming mechanism.

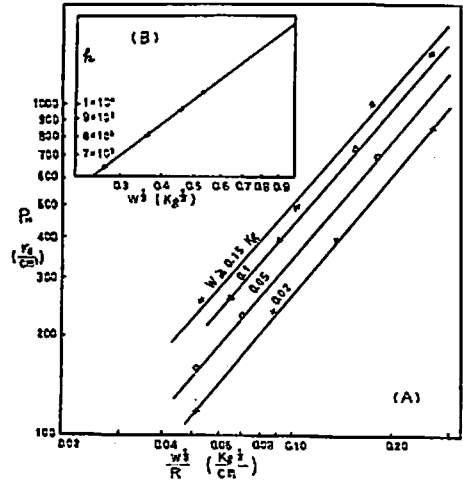


Fig. 2 Relation between  $P_H$  and  $W^{\frac{1}{3}}/R$

## ニュース

### 不純物を加えて爆薬や推進薬の燃焼速度調整

アメリカのマーチン社 Research Institute for Advanced Studies では固体物質の燃焼速度を左右するものは、そのピエゾ電気的性質であることを発見し、この性質を加減すれば強すぎる爆薬を弱めたり、ゆつくり燃焼する爆薬を急燃性にしたたり、またロケットの推進薬の燃焼速度を調節したりすることができるといっている。

このピエゾ電気的性質は、半導体の電気的性質を変えるのと同じ要領で、固体物質の結晶に百万分の十部くらいの不純物を混合する方法で変えることができる。これまで爆薬の爆発は熱点に起因するといわれているが、爆発現象の完全な説明はなかつた。

同研究所はアメリカ陸軍から純度 98% の HMX を入手し、それをアセトンで再結晶させて大きな単結晶をつくり、その電気的性質、光学のおよび熱的研究をしたのである。

その結果の一つとして、この結晶に力を加えると強いピエゾ電気が現われ、その強さは水晶の 10 倍もあること、そして不純物の点火によって加減できることを発見した。この強いピエゾ電気によって結晶の内部に電子ナダレが起き、それで熱点が発生して爆発が起きるわけである。そしてピエゾ電気的性質を変えてやると、熱点生成速度または燃焼速度が変わるのである。

日刊工業新聞

(エービエーション, ウィーク 11月21日1996)

(木村清茂)