

高速度撮影による爆発成形の研究

井上 卓・西山卯二郎*

1. 緒言

爆発成形法は、既に国内外において実用化され、特殊成形加工の分野において、他に追随を許さない独得の地位を占めるに至つた。しかしながら、本成形法は、歴史も浅く、未だ完成された技術には達していない。

筆者らは、本成形法の基礎研究として、諸種の実験を行なつて来たが、それらの結果と、従来の本成形法に関する概念との間に、多くの矛盾する点が見出された。今回は、それらのうち、最も顕著に矛盾を示すところの水深効果の問題に焦点を絞リ、この効果の起因について、高速度撮影法により調べることにした。これらの撮影により、爆発成形時におけるエネルギー変換機構ならびに加圧-変形機構も明らかにされたが、以下にこれらの実験結果とその考察について述べる。

2. 水深効果に関する成形実験

2-1 実験方法 広い水そう（直径110cm、高さ220cm）内において、図1に示すとき成形用型を用いて、円形薄板を自由成形させる場合、図2に示す状態図において、爆薬距離（ R ）を一定とし、爆薬水深を（ D ）変化させて成形して行く場合の変形量（張り出し高さ）の変化について調べる。使用する爆薬は、6号電気雷管である。

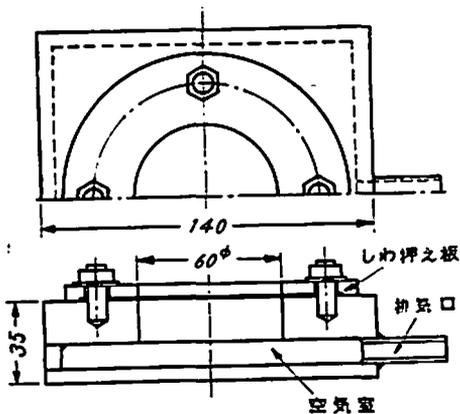


図1 成形用型

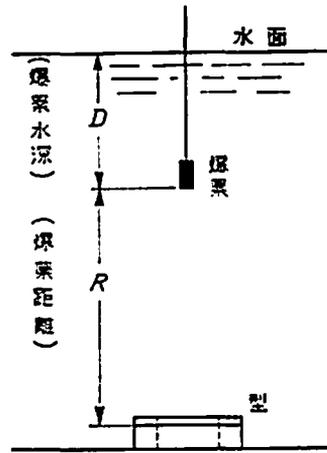


図2 状態図

2-2 実験結果 上記の方法により、実験を行つた結果を図3(a), (b) 図4, 図5に示す。それぞれの場合の成形条件は、図中に示す。これらの結果より、いずれの場合においても、ある水深点において、変形量の上に極大点があるという顕著な特性が見出される。

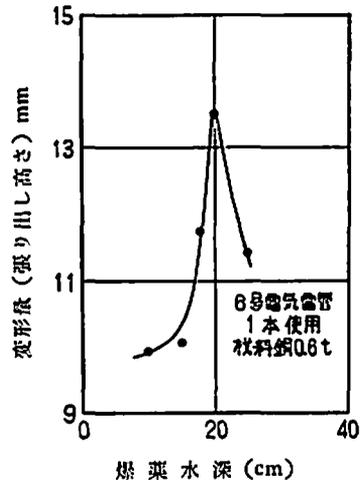


図3(a) 水深効果 ($R=10\text{cm}$ の場合)

昭和42年1月5日受理
* 大阪府立大学工学部 堺市百舌鳥梅町

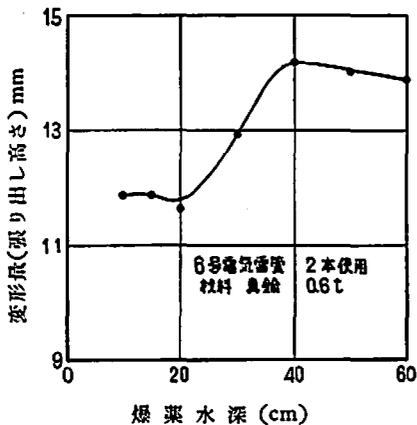


図 3 (b) 水深効果 ($R=10\text{cm}$ の場合)

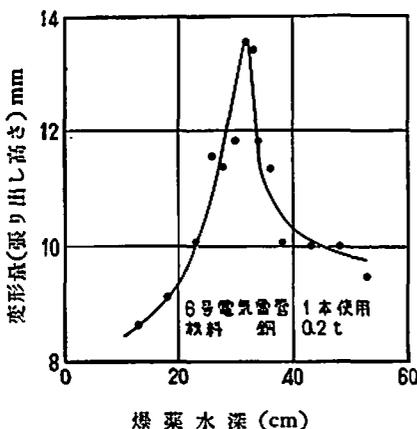


図 4 水深効果の場合 ($R=22\text{cm}$)

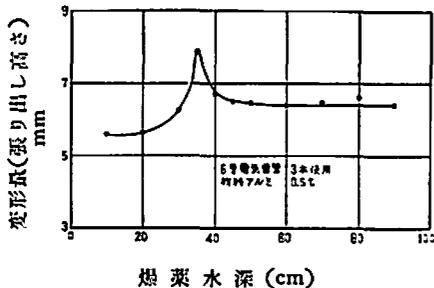


図 5 水深効果 ($R=30\text{cm}$ の場合)

2-3 極大点の生ずる位置 (水深) 極大点の生ずる位置 (水深) は、以上の実験結果およびその他の実験資料より、表1のごとく示される。すなわち、極大点の生ずる位置は、爆薬距離、爆薬量によっても変化することがわかる。

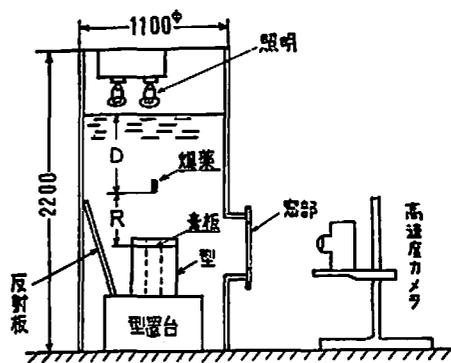
表 1 変形量に極大点を生ずる爆薬水深

爆薬距離 (R)	爆薬量 (6号電気雷管)	極大点の生ずる爆薬水深
10 cm	1 本	20 cm
	2 本	40 cm
22 cm	1 本	32 cm
30 cm	1 本	30 cm
	3 本	35 cm

以上のように爆薬水深の変化によって、変形量の上に極大点を生ずる現象は、爆発成形法における作用力が、単に衝撃波圧力のみであると考えて来た従来の概念では、到底説明の出来ない現象である。この現象は、生成ガスの挙動と深い関係を持つものと考えられるので、まず次章に、生成ガスの挙動について述べる。

3. 生成ガスの挙動

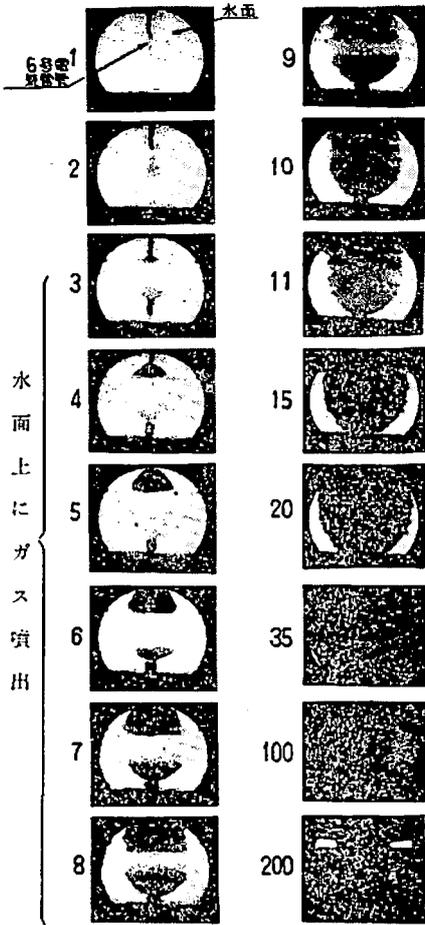
3-1 ガス挙動の撮影 6号電気雷管が爆発した場合の生成ガスの挙動を撮影する。この場合の撮影装置ならびに方法は、図6に示す通りである。照明は、1,000Wのアイランプを水面上方に4個配置している。高速度カメラは、島津製作所製 (最高撮影速度 9,000コマ/秒) である。



(ガス挙動を撮影する際には) 爆薬を窓部の正面に配置する

図 6 撮影装置

3-2 撮影結果 爆薬水深を浅域、中間域、深域と三区区分し、撮影を行なう。図7, 図8, 図9は、それぞれ、爆薬水深が、5 cm (浅域)、15 cm (中間域)、30 cm (深域) におけるガス挙動を示す写真である。また、図10は、爆薬水深が 35 cm の場合の撮影結果であるが、この図より、雷管の爆ごう時の状態が観察されるとともに、ガスの最大膨張半径を測定することが出来る。



爆薬水深 5 cm の場合
撮影速度 6,960コマ/秒

図 7 ガスの挙動 (その 1)

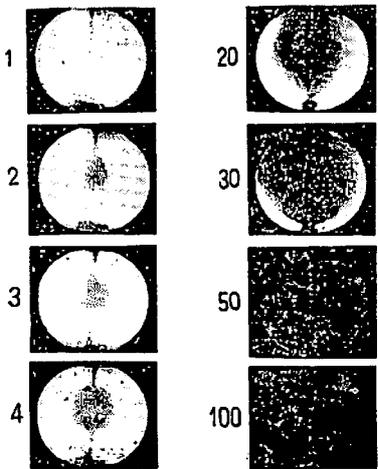
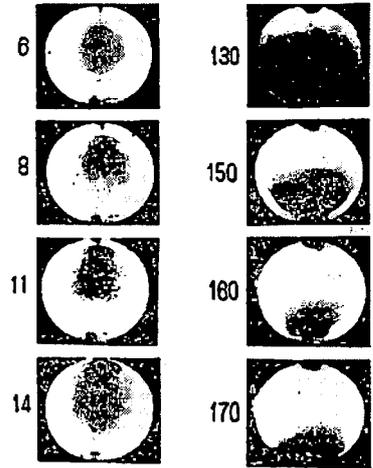
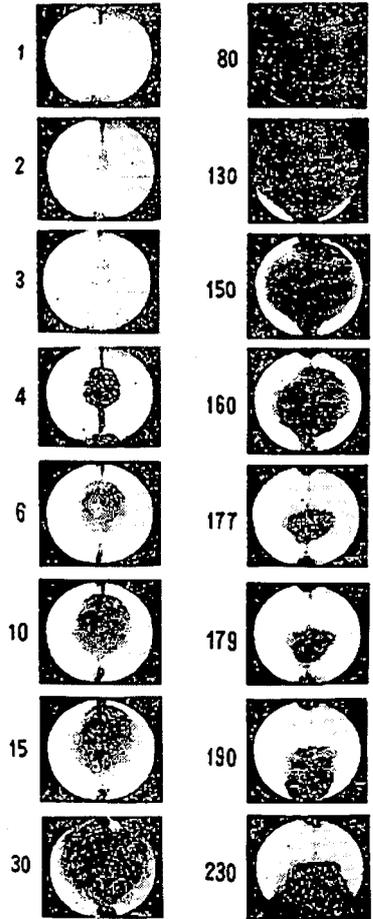


図 8 (a)



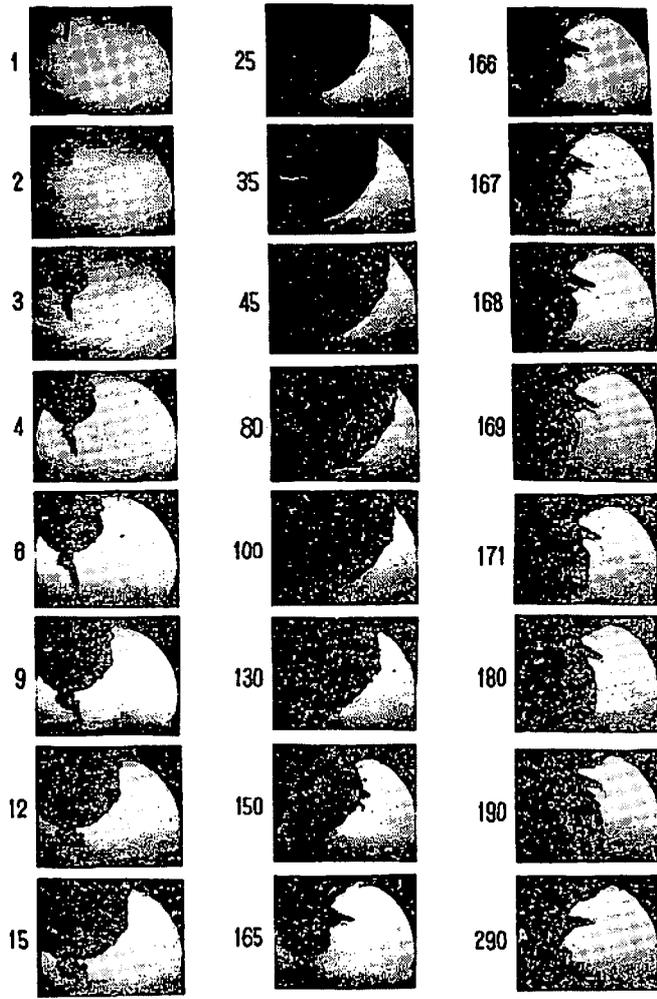
爆薬水深 15 cm の場合
撮影速度 6,930コマ/秒

図 8 (b) ガスの挙動 (その 2)



爆薬水深 30 cm の場合
撮影速度 7,200コマ/秒

図 9 ガスの挙動 (その 3)



爆薬水深 33 cm の場合
撮影速度 6,600コマ/秒

図 10 ガスの挙動 (その4)

3-3 ガス挙動の特性 以上の撮影結果より、ガス挙動に関し、次のような特性が観察される。

3-3-1 ガス体の振動 爆薬水深が深く、生成ガスが水面上に散逸しない場合、次のようなエネルギーの変換を繰り返しながら、ガスエネルギーは、水中に保存される。

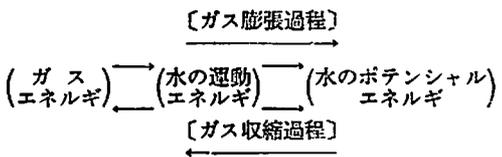


図11は、6号電気雷管が爆発した場合のガス半径の時間的変化を示すものである。この図において、ガスの収縮から再膨張に転ずる際、いわゆる gas bubble pulse が発射される。

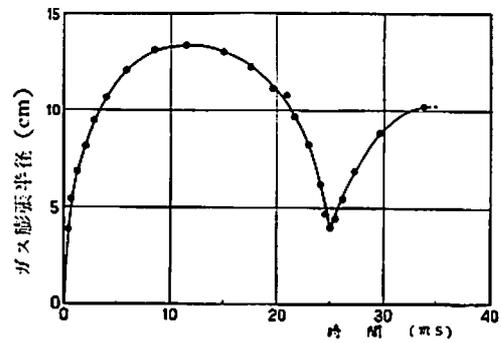


図 11 ガス半径の時間的変化 (6号電気雷管の場合)

3-3-2 ガス体の降下現象 ガス体が最小収縮の直前から直後にかけて、降下する現象が認められる。これ

は、今日までの通説であるガス体上昇説に反するものである。かかる降下現象の起因は、ガス体収縮時における周囲からの水の流入速度が、各方向によつて、差異を生じ、特に、上方よりの流入速度が、下方よりの流入速度よりも大となるために、ガス体の最小収縮の前後において、ガス体中央部を下方に貫く噴流が生じているものと推定され、この流動が原因となつて、ガス体が降下するものと考えられる。したがつて、もし、ガス体の収縮時、その下部に素板が存在すれば、この噴流による流動圧と、gas bubble pulse による圧力を受けることになる。

3-3-3 爆ごう時の状態 6号電気雷管が爆ごうする

際の状態が、図10の2こま目に示されているが、この場合、爆ごうが完了しているにもかかわらず、銅製管体は破壊されていない。しかして、この時点においては、爆ごうに伴う衝撃波は発射されているものと考えべきである。ところが、これ以後（3こま目にかけて）、ガス体は管体を破壊して急速に膨張する。この場合の半径方向への膨張速度が急速であるため、ここにおいても、圧縮波が生起されることになる。

3-3-4 爆発後のエネルギー分類 以上のガス挙動の観察結果より、爆発後のエネルギーは、表2のごとく分類される。ただし、水深の浅い所で爆発が起つた場合は、同表中の E_{g3} エネルギーは、早期に消失する。

表 2 爆発後のエネルギー分類とその後の変換経路

爆ごう直後の変換		その後の変換											
爆薬の エネルギー (化学エネルギー)	衝撃波エネルギー (爆ごう面に発生する衝撃波エネルギー)	E_s	水中伝播中に減衰										
	ガスエネルギー (爆ごう面の背後にある未膨張のガスの内部エネルギー)	圧縮波エネルギー	E_{g1} 水中伝播中に減衰										
		熱輻射エネルギー	E_{g2} 水中に放散										
		水の排斥仕事をなすガスエネルギー	<table border="1"> <tr> <td>E_{g3}</td> <td>E_k</td> <td>E_p</td> </tr> <tr> <td></td> <td>(膨張過程)</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>(収縮過程)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>水の運動エネルギー</td> <td>水のポテンシャルエネルギー</td> <td></td> </tr> </table>	E_{g3}	E_k	E_p		(膨張過程)			(収縮過程)		水の運動エネルギー
E_{g3}	E_k	E_p											
	(膨張過程)												
	(収縮過程)												
水の運動エネルギー	水のポテンシャルエネルギー												
		この場合、ガスに對向する水は、非圧縮性と考へる。											

4. 水深効果に関する高速度撮影

爆薬水深の変化によつて、変形量の上に極大点が生ずる現象が存在することは、前述の通りであるが、この起因について、高速度カメラにより、成形時の水中状態を撮影して調べる。

4-1 撮影装置 図12はアクリル酸樹脂製の自由成形用型の寸法とその写真を示したものである。成形用素板は、板厚 0.4 mm で直径 80 mm の銅板である。水そうその他の装置は、前述のガス挙動の撮影に使用したものと同一である。(使用爆薬は 6号電気雷管)

4-2 撮影結果 図13, 図14, 図15は、それぞれ爆薬水深が 5 cm (浅域), 15 cm (中域), 30 cm (深域) における自由成形時の変形過程を撮影したものである。これらの図

より、爆薬水深がある程度深くなつてくると、変形が2段階に分かれて行なわれることがわかる。この第1期変形と第2期変形の時間々隔は、爆薬水深によつて、ガスの挙動が変化するので、或程度変動するが、おおむねガスの第1期振動周期に一致する。図16は、爆薬水深の変化による第1期変形量と第2期変形量の

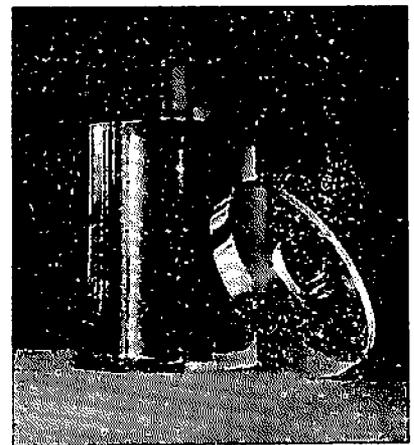
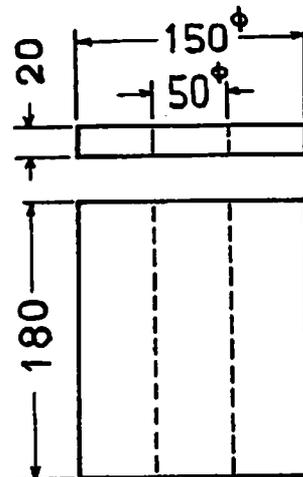


図 12 アクリル酸樹脂製型

変化の状態を高速度撮影により調べた結果を示すものである。すなわち、図に示す第1期変形量（張り出し高さ）の上に、第2期変形が積み重なり、最終変形量（張り出し高さ）が示されている。同図より、第1期変形量は、爆薬水深のいかんにかかわらず、ほぼ一定

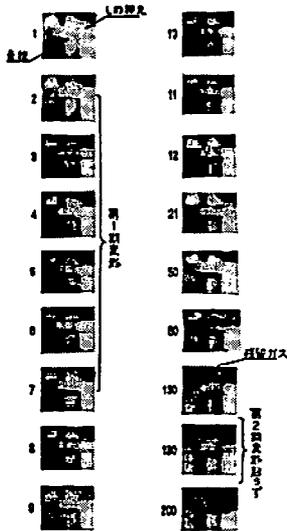


図 13 変形過程(その1)

爆薬水深 5 cm, 爆薬距離 15 cm, 6号電気雷管1本使用, 撮影速度 7,200 コマ/秒

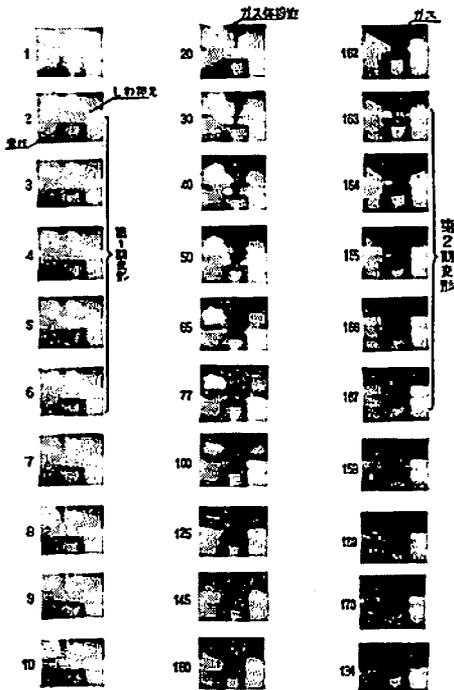


図 14 変形過程(その2)

爆薬水深 15 cm, 爆薬距離 15 cm, 6号電気雷管1本使用, 撮影速度 7,200 コマ/秒

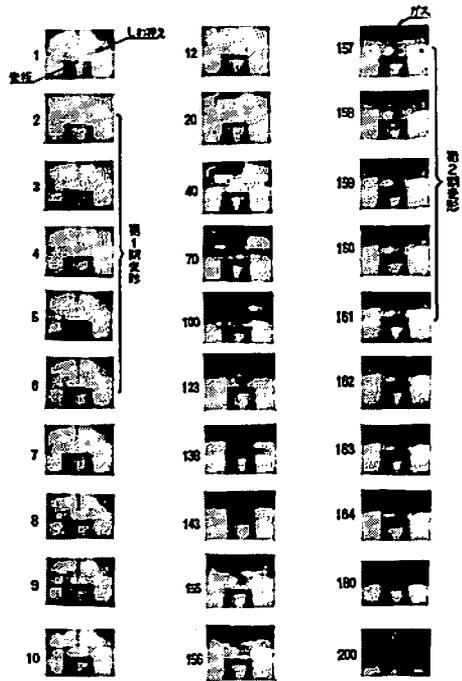


図 15 変形過程(その3)

爆薬水深 30 cm, 爆薬距離 15 cm, 6号電気雷管1本使用, 撮影速度 7,080 コマ/秒

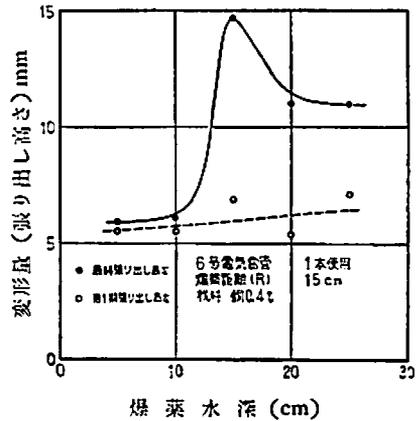


図 16 水深効果(高速度撮影による測定)

していることがわかる。

4-3 ガス挙動と変形の関係 以上の撮影結果を総合すると、一般に変形は、ガスの挙動と密接に関係し、両者は図17に示すごとく関係となる。しかし、第2期変形量は、ガス挙動によつて、大きく左右されるものであり、この変形量の大小が直接前述の水深効果となつてあらわれるものである。したがつて、第2期変形の加圧機構を調べるのが、水深効果解明の鍵となる。

4-4 第2期変形における作用力 第2期変形の時期におけるガス挙動と変形の関係をモデル化して図示す

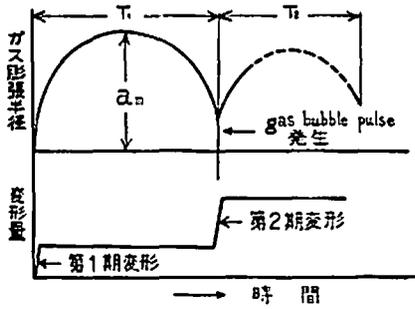


図 17 ガス挙動と変形の関係

れば、図18のごとくなる。すなわち、ガスの収縮から、再膨張に転ずる時期には、gas bubble pulse と噴流の流動圧が複合して素板に作用することになる。したがって、両者の加圧作用の総合効果が、ある状態において、最大となる場合が起り得るはずであり、この場合が水深効果の上に極大点を生ずることになるものと考えられる。

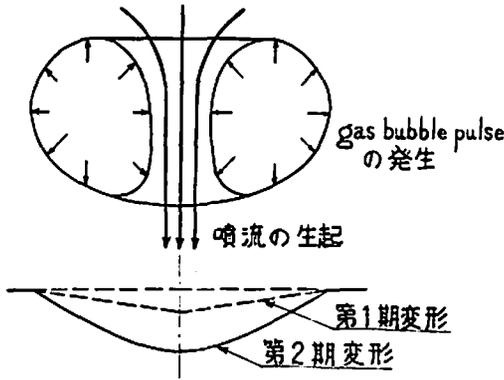


図 18 第2期変形におけるガス挙動と変形の関係

4-5 一般成形法における作用力とそのエネルギー源 前述のエネルギー分類表に従い、一般成形法における作

表 3 一般成形法における作用力とそのエネルギー源

	作用力	エネルギー源
第1期変形	(1) 衝撃波圧力	E_s
	(2) ガス膨張による圧縮波圧力	E_{g1}
	(3) 素板の急速変位によって素板上に空洞が生じ、これに対して水流が起こるが、この水流による水撃力。(この水流は、ガスの膨張力を力源として起こる。)	E_{g3} の一部消費
第2期変形	(1) gas bubble pulse	E_{g3} の残留エネルギー
	(2) 噴流による衝撃流動圧力	エネルギー

用力と、そのエネルギー源について表示すれば、表3のごとくなる。このように分類して示せば、いわゆる衝撃波により成形される割合は、非常に少ないものであることが理解される。

5. 高速度撮影結果と圧力測定結果の矛盾

高速度撮影による第1期変形量と第2期変形量の量的割合が、測圧結果の上にも同様な割合であられるかどうかを検討するため、撮影時と同一の爆発条件の下で、圧力波形を測定したところ、撮影結果と測圧結果の間に矛盾のあることが見出された。すなわち一例として、爆薬距離 25 cm、爆薬水深 33 cm として成形する場合の高速度撮影を行ない、張り出し高さより、概算法により、第1期変形仕事量と、第2期変形仕事量との比を求めてみると、1:4 となるのに対し、圧力波形の上で両者を比較すれば、図19のごとくなる。(この場合の検圧器には、チタン酸鉛ジルコン酸鉛の圧電素子を用いた。この図によれば、第1波が主たる成形力であるとの判断が下される。すなわち、第2波の出方が不十分である。したがって、この圧力波形は、真に素板に作用する圧力を正確に捉えていない。しかして、今日まで、R. H. Cole¹⁾その他により測定されて来た圧力波形のほとんどは、図19に類似したものである。現在、爆発成形に関する多くの研究者は、これらの測圧結果を参考にして、第2波を無視することにより、第1波のみによつて、成形されるものと考えている。衝撃波のみによる成形説が、現在なお主張されている根拠は、これらの圧力波形にあるのであるが、本研究による高速度撮影結果より、測圧結果のみによる判断では、非常な危険を伴うことが判明した。

現在の圧力測定法に共通した欠陥は、検圧器の受圧部が固定された状態におかれていることである。実際には、素板は、変形しながら圧力を受けているものであり、検圧器と素板の受圧状態が一致しないのであ

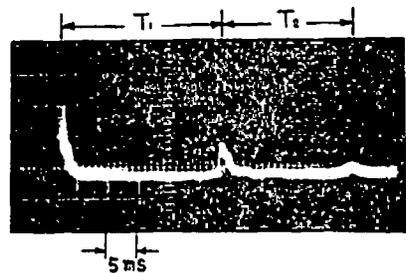


図 19 圧力波形

6号電気雷管1本
爆薬距離 25 cm
爆薬水深 33 cm

る。これが、撮影結果と、測圧結果の間に矛盾を起す主たる原因であると考えられる。

6. ガスエネルギー (E_{g3}) の測定

爆発成形においては、ガスエネルギー (E_{g3}) が変形に大きく寄与する。そこで、爆発後、 E_{g3} エネルギーとして配分されるエネルギー量を求めることにする。

前述の図10の撮影結果において、雷管長を尺度として、ガスの最大膨張半径 a_m が求められる。したがって、 E_{g3} は、静水圧 P_0 に対抗しながら、 $\frac{4}{3}\pi a_m^3$ の体積の水を排斥する仕事量として求められる。すなわち

$$E_{g3} = \frac{4}{3}\pi a_m^3 P_0$$

ただし、 P_0 は爆薬水深における静水圧

以上の方法により、6号電気雷管の E_{g3} を求めると、その値は、257 cal となる。これは全化学エネルギーの約 40% に当る。

7. 結 言

以上の実験結果を総合すると、次のような結論が得られる。

(1) 一般に板の自由成形においては、変形は大きく2段階に分かれる。

(2) 一般に衝撃波による変形効果は少い。

(3) ガスエネルギー (E_{g3}) は、かなり長時間、水中に保存されるものであり、これが、gas bubble pulse、噴流のエネルギーに変換され、これらが成形上に有効に利用される。

(4) 第1期変形量は、爆薬水深のいかにかわらず、ほぼ一定しているが、第2期変形量は、爆薬水深によつて大きく変化する。

(5) 第2期変形における作用力は、gas bubble pulse と噴流の流動圧であり、両者の複合作用による変形効果が最大に達する点(水深点)がある。これが水深効果における極大点である。

(6) 現行の検圧器固定式圧力測定法では、真に素板に作用する圧力を捕捉することは困難である。したがって、測圧結果のみによつて、変形を論ずることは危険性を伴う。現段階においては、撮影による直接観察の方が、事実を正確に捉えることができる。

文 献

- 1) R. H. Cole, Underwater Explosion, (1948), 380, Princeton Univ. Press.
(工業火薬協会41年度秋季研究発表会にて発表)

Research on Explosive Forming by High Speed Photography

by Takashi Inoue and Ujiro Nishiyama

One of the variables in underwater explosive forming is the charge depth at which the operation takes place. On the free forming, when the stand off distance and charge weight are maintained constantly, the polar deflection varies with head of water. In this paper, both the results of the experiment about the effects of hydrostatic head, and the mechanism of energy transformation on the explosive forming are described. In these experiments, high speed photography method was adopted. The major articles in this paper are as follows;

(1) In an ordinary forming, the deformation process is divided into two stages. The deformed volume on the 2nd stage is larger than that of the 1st stage.

(2) The deformed volume of the 2nd stage varies remarkably with head of water, but that of the 1st stage is always constant.

(3) In a general way, the effect of shock wave energy is insignificant.

(4) On the other hand, the energy of gas bubble is transformed into the kinetic energy of water and the energy of gas bubble pulse. When the combined effects of the both parties are maximum, the peak point appears on the curve of polar deflection versus hydrostatic head.

(5) On the loading of the explosive forming, the impulsive hydrodynamic pressure is more suitable than the shock wave pressure.

(Faculty of Engineering, Univ. of Osaka Prefecture)