

高速度写真による爆発成形機構の解析¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

植村 恒義・山本 芳孝

近来、脚光をあびてきた、高エネルギー加工法のうち、フリーフォーミングでの爆発成形について各種の高速度カメラ装置を用いて、その成形機構を解析した。その結果、静的な成形方式に比べいくつかの点で差異が認められた。今回は実験の方法および結果について述べる。

1. ま え が き

ソ連の人工衛星スプートニクの成功以来その部品加工に用いられた爆発成形法が脚光をあび、従来まで普通の加工法では成形困難なステンレス鋼やチタン合金等の加工が可能なること、加工精度の良好なることなどその特異な成形能力を有すること注目され、わが国でも次第に研究が行なわれるようになってきた。爆発成形法のように瞬間的に大きなエネルギーを放出して金属材料の加工を行なう方法としては、ここに述べる爆発成形法のほかに圧縮された高圧ガスを急激に放出してその圧力を利用して加工を行なう方法や蓄電器に蓄えた電気的エネルギーを急激に放出して加工を行なう Hydro-Spark forming 等がある。これらはすべて急激な大きなエネルギーの放出によって加工を行なうものでありその特長とするところは、(1)従来までの加工法に比べ材料の伸びが増加する。(2)スプリングバックがまったくなく、精度良く加工される。(3)従来までの加工法のように雄雌両ダイスを必要とせず、雌型ダイスのみで良い。(4)ダイス材料は特に硬度の高いものを必要とせず、プラスチック系統のものでも十分である。(5)加工時間が短くてすむ。(6)費用も低くてすむ。しかし、その反面、(1)加工に爆薬や高電圧を使用するため取り扱いにくい。

(2)多量に加工を行なう場合には適当でない、等の欠点がある。

爆発成形について、その実用化に対する実験報告は、いままで数多く発表されているが、その成形機構自体を解析した報告をみることはできなかった。また爆発成形にともなった現象についても報告はまちまちであり、成形速度についても速い方では、1,000~8,000 m/sec の爆発波の速度で変形すると報告されているものから、遅い方では 25 m/sec 程度の高速自動車ぐらゐの速度で変形するという説も紹介されている。また変形過程についても爆源を中心として球状に変形するという説もあり、伸びについては多いもので 100~600% も増加するともいわれている。

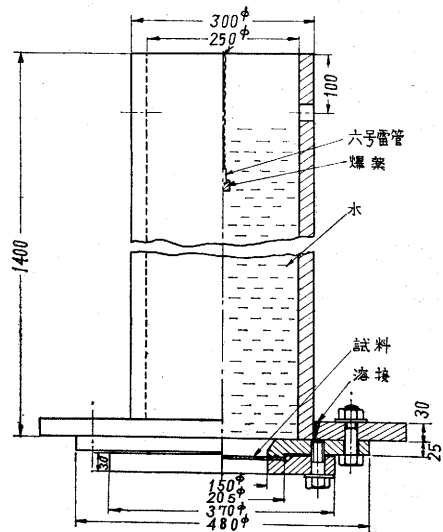
われわれは各種の高速度写真装置を用いて爆発成形における変形機構を解析する研究を重ねてきた。現在までの実験は爆発成形方式と静的な油圧による成形方法を比較してその差異を指摘すると共に爆発成形の特異性を調

べることを行なっている。爆発成形装置は研究室で設計製作したものを使用し、静的油圧成形試験は、本所第 1 部山田研究室の薄板バルジ試験装置によって行なった。

2. 爆発成形装置と油圧成形装置

a) 爆発成形装置

爆発成形装置の外観を第 1 図(巻頭口絵)にまた構造図を第 2 図に示す。われわれは撮影を行なう目的のため爆発成形装置としてオープンダイスを用いたフリーフォーミングでの実験を行なうこととした。爆発成形装置を製作するに当たりわれわれはダイス寸法、ダイス径、試料の寸法等を静的油圧成形で使用する薄板バルジ試験機と同一のものとした。爆発成形装置は、第 1 図(口絵)および第 2 図で見られるとおりに水を蓄え、その中で爆薬を



第 2 図

爆発させる鋼製円筒と試料を取り付ける 2 枚の案内用鋼板とから成り立っている。円筒は底なしのものにフランジを取り付けたものであり、2 枚の鋼板は 1" ボルト 4 本を用いて試料を中にはさみ互いにしっかりと固定されると同時にこれら 2 枚の鋼板は 1" ボルト 6 本で円筒下端のフランジ部に取り付けられる。装置全体は撮影に便利のように、5 寸角の木材で組み立てられた高さ約 2 m の台に取り付けられている。この木製の台は、コンクリート製の基礎にしっかりと取り付けられ爆発時の衝撃に耐

第 1 表

水を蓄える円筒	高さ	1.4 m
	外径	300 mm
	内径	250 mm
	肉厚	25 mm
	材質	半硬鋼
円筒下端のフランジ	径	500 mm×600 mm
	肉厚	30 mm
	材質	半硬鋼
ダイス取付け板	外径	480 mm
	内径	150 mm
	肉厚	25 mm
	材質	半硬鋼
オープン型ダイス	外径	370 mm
	内径	150 mm
	肉厚	25 mm
	材質	半硬鋼

えるようにした。爆発成形装置の寸法を第 1 表に示す。

b) 静的油圧成形装置

爆発成形と比較検討するために油圧成形装置として薄板バルジ試験装置を使用した。

3. 試験材料および爆薬

a) 試験材料

実験に用いた試料は日本冶金製ステンレス鋼板 (NAS 8S-JIS SUS 27 相当) で、この材料の化学的成分、機械的、物理的性質を第 2 表に示す。試料は爆発成形、油圧成形とも同一寸法 (外径 205 mm, 厚さ 0.8 mm) のものを使用し、その表面には加工後の変形を調べる目的で放射状ならびに同心円の基準線を写真印刷した。

第 2 表

化学的成分	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
	0.08以下	1.0以下	2.0以下	8~11.0	18~20.0	2.0~3.0
物理的性質	融点	1,400~1,450°C				
	平均熱膨張係数	(-100~0°C) 17.0×10 ⁻⁶ /°C				
		(0~300°C) 17.8× "				
	熱伝導度	(100°C) 0.039 cal/cm/sec/°C				
	比重	7.93				
	比熱	cal/g°C 0.12				
	電気比抵抗	72				
機械的性質	導磁率	1.02				
	弾性係数	縦	19,700 kg/mm ²			
		横	8,800 "			
	引張強さ	52 kg/mm ² 以上				
	耐力	21 " "				
伸び	50% 以上					
硬度	200 以下					

b) 爆薬

エネルギー源となる爆薬には T.N.T. およびテトリルを使用した。爆薬の形状はいずれも錠剤型で 5g, 10g のものを 6号電気雷管で点火させた。T.N.T. 5g 程度では不完爆の恐れのあることが心配され、事実電気雷

管との結合状態が不良場合には完爆しないことが判った。われわれは錠剤型の T.N.T. に電気雷管を浅く埋め込む方法を用い、すべて一様な爆発状態であることを確認して使用した。テトリルは T.N.T. に比べると強力でしかも不完爆の危険は少ないものである。これら錠剤型の爆薬のほかには導爆線も良好なエネルギー源として使用できる。

4. 撮影装置

爆発成形を撮影し解析するため、最近筆者らの研究室において製作した植村式 MLD-2 型超高速カメラ撮りカメラのほかに 16 mm プリズム式高速カメラ、および閃光放電管装置による瞬間撮影を行なった。MLD-2 型超高速カメラ⁵⁾は最大撮影速度 24 万駒/秒で連続 200 駒撮影可能、また 16 mm プリズム式高速カメラは最近筆者の研究室の指導により国産化された日立製 16H 高速カメラで最高 1 万駒/秒の撮影速度で 4,000 駒連続撮影が可能なるものである。閃光放電管装置は、露出時間約 5 μsec 程度で高輝度の閃光を得る装置である。これら各種高速カメラの性能を第 3 表に示す。

第 3 表

植村式 MLD-2 型カメラ		16 mm 日立 16H 高速カメラ
最高撮影速度	24 万駒/秒以上	1 万駒/秒以上
連続撮影駒数	200 駒	4000 駒
総合明るさ	f : 9	f : 1.8
解像力	40 本/mm 以上	50 本/mm 以上
1 駒の露出時間	0.5 μ 秒	20 μ 秒
瞬間撮影用閃光放電管装置		
露出時間	0.5 μ 秒	
閃光放電管	GE製FT-220	
コンデンサ容量	1 μF	
電圧	15 kV	

5. 実験結果

a) 16 mm プリズム式高速カメラによる撮影

MLD-2 型超高速カメラでの撮影に先立って 16 mm プリズム式高速カメラを用いて爆発成形を撮影した。撮影目的は爆発成形での変形速度と変形過程の大略の状態を知ることにあつた。撮影速度は 1 万駒/秒前後とし、やや下側から試料をのぞき、照明として 1 kW 特殊スポットライト 6 個を用いた。第 3 図 (口絵) に 16 mm プリズム式高速カメラによる撮影結果を示す。実測された撮影速度は 9,600 駒/秒でわずかに 3 駒で変形が終了していた。この際の変形高さは約 50 mm でこのことから大略の変形時間は $T=3(f)/9,600 (f/s) \approx 0.3 (msec)$ また平均変形速度は、 $V=50(mm)/0.3(msec) \approx 170 (m/sec)$ 程度であつた。

b) MLD-2 型超高速カメラによる撮影

16mm プリズム式超高速カメラによる撮影結果からその変形機構の大略を知ることができ、次に MLD-2 型での本格的撮影を行なった。撮影位置は爆発成形装置の真横から行ない、影写真法により変形過程を浮かださせた。MLD-2 型超高速カメラの特長の一つである。現象とカメラの同期の不必要なことから、この場合には現象と光源の同期のみを行なえばよいことになる。このため照明装置としては、G. E. 製 FT-403 閃光放電管を使用し、電圧 2kV、コンデンサ容量 40 μ F、輪線インダクタンス 4mH を加えた。この装置を、ブラウン管オシロスコープで観測し露出時間が 1/2 peak で 0.8 msec あることを確かめて使用した。撮影結果は二重露出にはならなかったがフィルムの後半は次第に光量が減少する様子がみられた。撮影結果を第 4 図・第 5 図・第 6 図(口絵)に示す。

c) 閃光放電管による瞬間撮影

極めて閃光時間の短い閃光放電管装置を使用して撮影を行なえば変形途中での任意の状態を解像力良く撮影することができる。われわれは閃光放電管として G. E. の FT-220 を使用し、電圧 15kV、コンデンサ容量 1 μ F の装置を試作して使用した。ブラウン管オシログラフでの観察による閃光時間 5 μ sec 以下であった。撮影結果を第 7 図・第 8 図・第 9 図(口絵)に示す。

d) 油圧による静的成形

油圧によって試料に加わる圧力を次第に増加させ途中の状態をつぎつぎに取り出して破壊までの変形過程を調べた。もちろん試験材料は爆発成形で使用したのと同じのものである。変形過程を第 10 図(口絵)に示す。

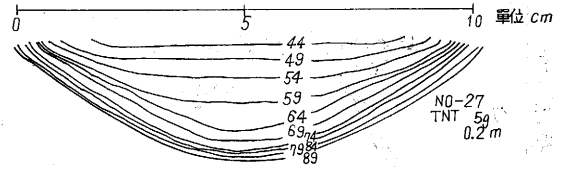
6. 実験結果の解析

a) 変形過程

(1) 爆発成形における変形過程

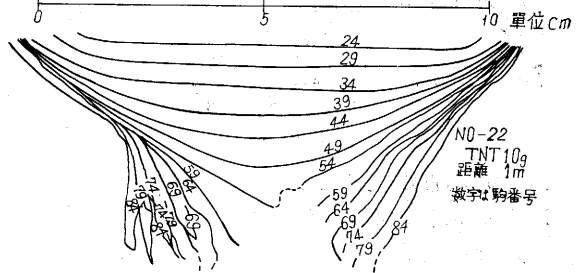
爆発成形での変形過程を第 11 図に示す。第 11 図 a は、T. N. T. 5g を試料より 1m の距離で点火した場合で成形された場合である。図中の数字は駒数を示している。すなわち約 3 万分の 1 秒ごとの変形状態を示している。変形の初期(静止状態から 25mm まで)はダイスにさえぎられて見えないがそれ以後の所は頭をきった円錐形となって変形が進行している。次第に平面の部分が少なくなって円錐状となりついで側面がふくらみ丸味を増す。さらに頭部と側面からふくらんで次第に変形速度が低下して遂には終了する。この変形過程は試料と爆薬距離を 25cm~1m まで変化させても同じ過程で成形されている。第 11 図 b は、T. N. T. 10g を試料より 1m 離れた所で点火した場合で破壊した。初めは截頭円錐状で進み、ついで頭部が出て円錐状となり側面が膨らむと同時に頭部も一層大きく変形して遂に亀裂が入って

爆発成形変形過程



(a)

爆発成形変形過程



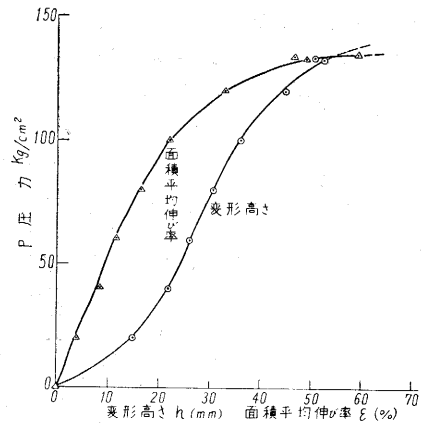
(b)

第 11 図

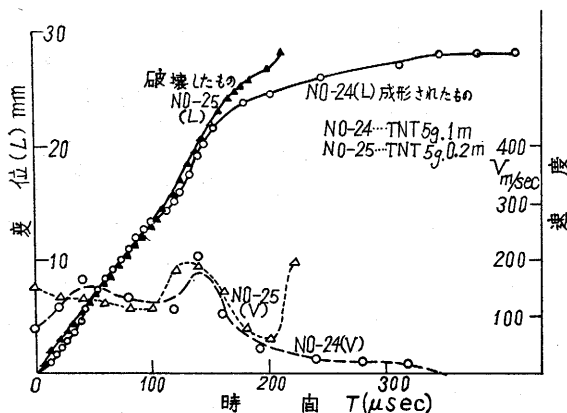
破断している。このように爆発成形の変形初期は截頭円錐形状で変形が始まっている。これらの変形過程は、筆者がさきに行なった爆発による薄い鉛板の塑性変形機構と同様であることがわかった。この様子を第 3 図のプリズム式超高速カメラでの撮影結果で見ると 2 駒目で明らかに円錐頭部は平面状、もしくは内凹みになっている様子がみられた。この様子は閃光放電管装置による写真第 7・8・9 図で一層はっきり分かった。第 7 図は爆薬と試料との距離 1m の場合であり、第 8 図は 20cm の場合、第 9 図は 10cm の場合であるがいずれも内凹みであることがはっきり確認された。

(2) 油圧成形における変形過程

薄板バルジ試験機による変形過程は第 10 図で分かるようにはほぼ完全な球形の一部として変形が進行する。油圧成形における圧力と試料の高さの関係を第 12 図に示す。第 12 図には高さから計算によって出した平均面積伸び率をも示してある。



第 12 図 油圧変形特性



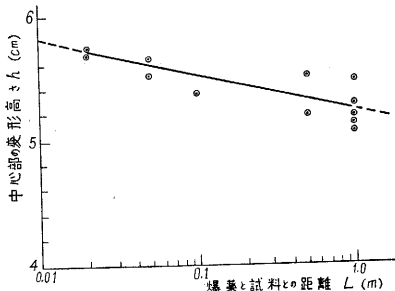
第 13 図

b. 爆発成形での変形速度

MLD-2型超高速カメラによる撮影結果(第11図の画面)から変形高さを測定し、変形速度を算出した。第13図にその結果を示す。爆薬としてT.N.T. 5gを使用した場合は試料との距離を20cmから1mまで変化させても曲線はまったく変化せず第14図に見られるような曲線上にある。また爆薬としてT.N.T. 10gを使用した場合には頭部に亀裂を生じて破壊してしまう。曲線は途中で一度凹んでおり、その時期には側面が横へ広がっているのが見られる。成形に要する時間は変形が見えてから約300μsecで、プリズム式高速カメラでの結果とよく一致している。成形された場合の最高変形速度は約170m/secである。第1回目の極大値に相当する所は截頭部の平面状の部分次第に少なくなり頭部がとがってはほぼ円錐状になった所で、第2の極大値は側面がふくらんで後再び頭部が伸びだした時期に当たる。亀裂を生じて破壊した場合には破壊前後が最大速度であり約200m/secになっており、平均速度でも170m/sec程度の速度となっている。また破壊した場合でも曲線に極大、極少の所が存在することが確認された。

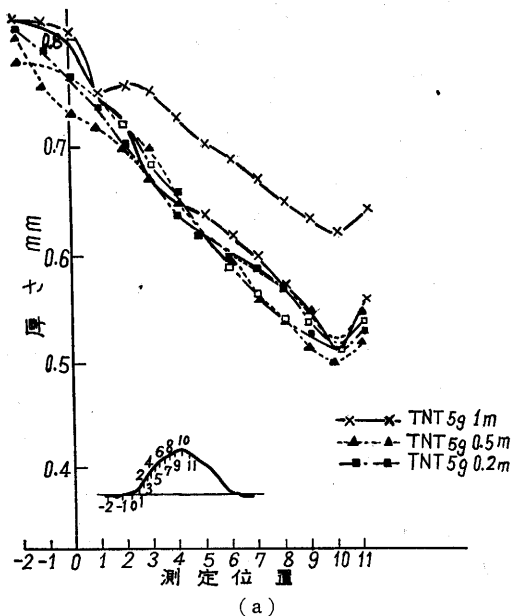
c. 爆薬位置と変形量

爆薬として、T.N.T. 5gを使用した場合、試料は破壊せず成形された。その際爆薬と試料との距離は2cmから1mまで変化させて行なったがいずれも破壊せず成形された。T.N.T. 10gおよびテトリル 10gではいずれも完全に破壊した。T.N.T. 5gを使用し、試料を変化させて変形高さを測定した結果を第14図に示す。第14図で判るように

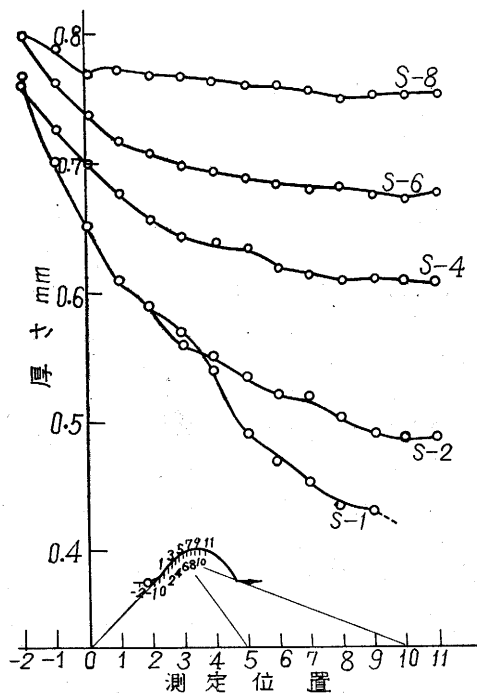


第 14 図

距離と変形高さの関係は対数関係を有しているようにみられた。しかし変形高さの変化はわずかであった。しかしこの結果は一般に行なわれている爆発成形に当てはまるものとは考えられない。われわれの実験は試料からの水深が一定であり、爆薬位置を変化させることは同時に爆薬と水面との位置をも変化させることとなる。またわれわれは直径30cmの円筒内で行なったものであり池のような場所での結果と同等に扱うことはできない



(a)



(b)

第 15 図

い. T.N.T. 10 g を使用した場合には爆薬と試料の距離を 1 m に離しても試料は破壊してしまい 10 g での爆薬距離と変形高さとの関係を調べることはできなかった.

D) 厚さの変化

爆発成形と静的油圧成形における試料の厚さの変化を調べた結果を第 15 図に示す. 第 15 図 a は爆発成形における厚さの変化で試料はいずれも成形された T.N.T. 5 g の場合のみを示す. 第 15 図 a でみられるように爆薬と試料間の距離の変化はほとんど影響せず, はほぼ等しい特性となっている. 爆発成形では中心部と端部では厚さの変化が大きく, しかも直線状に変化している. また変形の開始点はほぼダイス位置である. 第 15 図 b は油圧による結果で圧力が大きく変形量が大きくなるに従って, 試料全体にわたり薄くなっている. また変形開始位置はクランプ爪付近である.

E) 半径方向の伸び

第 16 図に半径方向の伸びを示す. 爆発成形ではあらかじめ中心部で多く, 周辺にゆくに従って減少しているのが見られる. また最大値がわずかに中心をそれているのは偏心して成形が行なわれたことを示している. 油圧成形では圧力の変化に従って伸びが増加しており, しかも測定位置にかかわらず一様に伸びている様子が見られる.

F) 円周方向の伸び

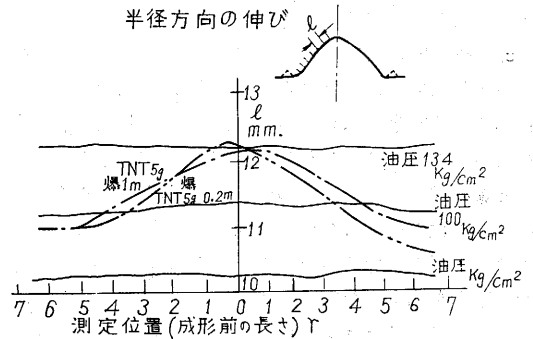
第 17 図に円周方向の伸びを示す. 爆発成形では中心から約 6 cm 離れた所を境として中心部は正の値をまた周辺部では負の値 (縮小) となっている. このように爆発成形では円周方向の伸びに負の値すなわち縮みを示す部分があり, これは爆発成形により試料がしぼり込まれていることを示している. 油圧成形ではクランプ位置まで伸びは正の値となっており, クランプの外周部にわずかに負の部分がある.

G) 高さ方向の伸び

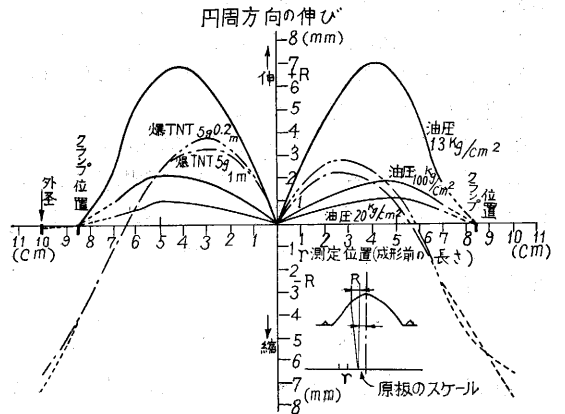
第 18 図に高さ方向の伸びを示す. 爆発成形, 油圧成形とも周辺にゆくに従って高さ方向の変化が多くなっているが爆発成形では中心部で急激な伸びを示しているのに対し, 油圧成形ではほぼ直線的な変化となっている.

7. 検 討

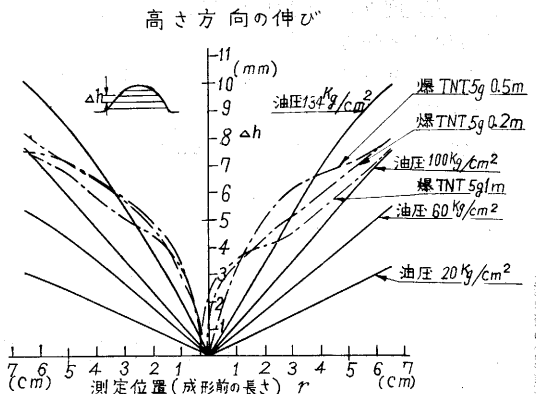
a) われわれの実験はすべてフリー・フォーミングでの実験であり, そのため実際にダイスを用い, 真空に引いて行なう場合とではダイスによる変形の制限や気圧の影響等が考えられる. しかしダイスの存在はあくまでもフリー・フォーミングでの自由成形の途中で変形を停止させて希望の型を作るものであり, また気圧の影響は開放の大気中での秒速 150m 前後の変形であるのでほとんど影響しないものと思われる. ただしダイスを用いる場合にはわずかも気体が残っておれば圧縮されて大き



第 16 図



第 17 図



第 18 図

な影響を与えることになるのでこれを取り除く必要がある.

b) 使用した装置の寸法も成形に影響を与えるものと予想され, 特に水を蓄え爆薬を爆発させてエネルギーを試料に与える円筒の寸法が問題となる. われわれは費用の点からもわずかに種類の装置を用いただけで試料と爆薬との距離を大きくすると爆薬と水面との距離が短くなる欠点があった. 爆薬と水面との距離が短くなれば爆発力は低下こそすれ強くなることはないものと想像されるにもかかわらず, 20 cm~1 m までは変形量にさほどの

変化がなかった点は注目された。

c) 爆発成形では一般の加工法に比べ伸びが増加するといわれていた。それにもかかわらず近頃、各所で行なわれている実験では普通の加工に比べて伸びが悪い場合もあることを聞く。われわれの実験した範囲でも油圧成形と爆発成形との装置についてダイス径、曲率等を一致させて実験を行なった結果やはり油圧成形に比べ爆発成形の方が平均の伸びが悪いようにみられた。しかし成形後の厚みを測定した第 15 図で油圧成形がダイス位置からの変化でなくクランプ位置から変形が始まっているのに対し爆発成形ではほぼダイス周辺から変形が始まっている。また厚み変化の曲線が爆発成形の場合急激であることなどから考え、両者は同一寸法での加工を行なって比較したことにならず、したがって外見上から伸びの多少を速断することは危険である。

d) 爆発成形用爆薬としては T.N.T. のみを使用した。T.N.T. は爆発成形に最適という意味ではない。種類や装置が変わったり、爆薬や装置が変わった場合にはわれわれの実験で得た変形過程や速度と変わったものとなる可能性がある。

8. 結 論

爆発成形と静的油圧成形とを比較実験し、超高速カメラを用いて撮影解析を行なった。そして爆発成形について幾つかの興味ある事実が判った。

- ① 超高速カメラを用いた結果、爆発成形での変形過程を良く知ることができた。
- ② 成形された場合および破壊される場合の差がはっきり判った。
- ③ 変形過程での速度を知ることができた。

- ④ 変形過程で円錐頭部は平面状で内側に凹んでいる場合のあることが判明した。
- ⑤ 油圧による静的変形機構とはまったく異なった過程をたどっている。
- ⑥ 爆発成形での半径方向、円周方向などの伸びの特性が分かり、油圧成形のそれと比較することができた。
- ⑦ 油圧成形と同一寸法の装置を用いただけでは実質上の同一寸法での実験比較を行なったことにはならない。

9. あとがき

実験はまだ途中であって爆発成形について完全な結論を下す段階ではなく、したがってできるだけ実験結果のみを記述した。今後は試料や爆薬の種類を変えて実験を行ない、変形途中での伸びの特性を高速度ステレオ写真で測定し、また爆発成形のほかにハイドロスパーク法による成形もあわせ行ってみる予定である。

終わりに際し種々有益なご助言をいただき薄板バルジ試験機を使用させていただいた当所第 1 部山田嘉昭助教授、ならびに資料で協力をいただいた昭和火薬、日本火薬および実験に協力いただいた植村研究室の諸氏に深く謝意を表する。

(1961 年 10 月 24 日受理)

文 献

- 1) 植村, 山本 第 8 応用物理学会予稿
- 2) " 昭和 36 年度工業火薬協会研究発表会講演要旨
- 3) " 第 5 回材料試験連合講演会前刷
- 4) " 金属 36 年 7 月 1 日号
- 5) 植村 SMPTE. 61 年 4 月号
- 6) " " 8 月号
- 6) 植村 東京大学理工学研究所報告第 6 巻第 6 号 (1952 年 12 月号)

東京大学生産技術研究所報告刊行

第 11 巻 第 5 号

山田嘉昭著：「金属板材の成形性に関する研究」

本研究は、板材の各種の軸対称成形加工を理論的に取り扱い、著者が試作した試験機による実験結果とあわせ板材の成形加工に関する諸問題を解明したものである。

微分解析機と電子計算機で得た数値解および新しい試みである級数解を用い、理論の応用例として、深絞りにおけるポンチ力の評価、ポンチの形状と摩擦の条件が深絞り試験結果に及ぼす影響の数値的な検討、および摩擦係数推定法の提案などに重点がおかれている。

コニカル・カップ試験、液圧バルジ試験、および孔拡げ試験の級数解による取扱い、試験機の試作研究の成果と二三の実験結果が報告の後半を占める。

(1961 年 12 月発行)