

爆発成形における制御された水中圧力波の影響

芋阪浩男*, 藤田昌大**, 花崎絃一***, 藤中雄三****

一般に、爆発成形法は精密な型成形が可能と言われているが、その実現には作用圧力波形状を含む適切な型設計が必要である。実用的な見地からも、型寿命および製品の板厚変動の点から、加工力としての水中圧力波の制御は必要である。水中圧力波の分布形状が製品の出来具合におよぼす影響を知るために、基本的な形状の水圧室と金型を組み合わせ、実験および数値解析によるシミュレーションが行なわれた。その結果、精密な型成形の実現には、被成形材が最適な状態で型表面に馴染んでいくことが重要な要因であることが、爆発成形においても例外ではないことが分かった。そして、本法のように被成形材が高速変形する加工法で有益な、この“馴染み方”を工程設計できる、コンピュータシミュレーションの手法が提案された。

1. 緒 言

爆発成形などで実現される被成形材の高ひずみ速度および型への高速衝突などの結果が、通常法で得られる以上のレベルで型形状の正確な転写と形状凍結性をもたらすと簡単な二次元形状の成形実験において報告されている¹⁾²⁾。基本的には爆発成形は精密成形が可能と見なされている。ところで、複雑な形状の薄板精密成形品を得る場合、通常プレス成形では多段工程の型設計を行なわねばならず、凹凸の対型の精度と型寿命の確保に苦勞する。本法では、水が一方の型となるため凹または凸の型のみでよく型精度の確保が容易となり、被成形材および型間の摩擦すべりがほとんど生じない為、型寿命に関しても良い結果が期待できる。この利点は液圧プレス成形についても言えることであるが、これは液圧の分布状態が静水圧であるうえ、たかだか数百気圧程度のため局部的に小さな凹凸の精密な転写を実現できないのでここで言う精密成形に向いていない。簡単な形状の型成形に留らず、現実的な複

雑な形状の部品に対し、その型形状の正確な転写と張り剛性を得るために、爆発成形法においても以下のことが重要と考える。

1. 被成形材に作用する水中圧力波に強弱の分布を生ぜしめ、被成形材の高速変形姿勢および型への高速衝突姿勢が制御されることで、複雑な形状の製品の各部分が最適な条件で加工されなければならない。

2. 被成形材自体の高速変形姿勢が可変となれば、被成形材が型に衝突するまでの高速変形の初期間中に初段工程の成形がなされ、型に衝突して本成形がなされる事態となる。その後の水の動圧による鍛圧作用(コイニング効果)と合わせれば、本加工法の1工程は通常の3工程分の内容をもつ可能性がある。多段工程設計については、本加工法では通常のプレス成形で行なうよりも少ない分割ですむことになる。1, 2の結果は型寿命(もしくは局部的板厚減少の発生)に関しても良い結果をもたらす。したがって、本加工法は生産能率が高い既存法に対して、経済的にも十分競合出来ると考える。

既報³⁾⁴⁾において、被成形材に作用する水中圧力波に強弱の分布を生ぜしめ、被成形材の高速変形姿勢が制御できることを報告した。

本論文では、基本的な形状の型成形実験を行ない、被成形材の高速変形姿勢および型への高速衝突姿勢が、製品の形状凍結性に与える影響とそれらの型成形のシミュレーションを行なった結果を述べる。

2. 研究の方法

2.1 水圧室の形状に関する実験と計算

Fig. 1は試作された爆発成形装置の概略図である。

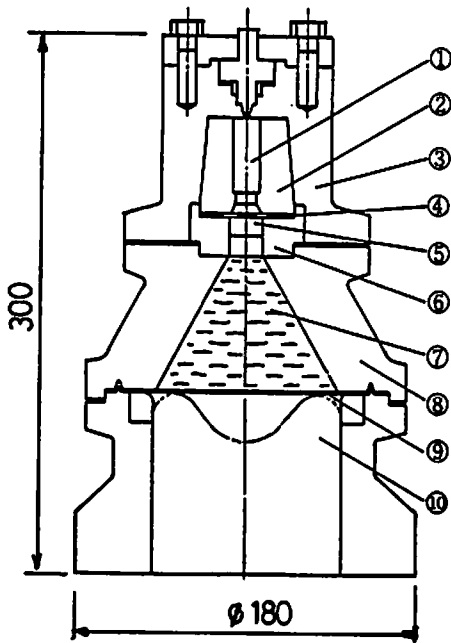
1990年6月20受理

*熊本工業大学機械工学科
〒860 熊本市池田 4-22-1
TEL 096-326-3111

**熊本大学機械工学科
〒860 熊本市黒髪 2-39-1
TEL 096-344-2111

***京都大学資源工学科
〒606 京都市左京区吉田本町
TEL 075-751-2111

****福井工業大学建設工学科
〒910 福井市学園 3-6-1
TEL 0776-22-8111



①: Blank cartridge, ②: Cartridge case, ③: Retainer, ④: Shearing plate, ⑤: Nylon bar, ⑥: Adapter ring, ⑦: Water, ⑧: Water chamber, ⑨: Blank, ⑩: Die

Fig. 1 Experimental explosive forming machine with closed vessel.

被成形材の受圧部直径(変形範囲)は100mmで、水圧室の頂上部に爆発源として6号電気雷管が設置される。水圧室の寸法形状はFig. 3に示されている3種の形状が用いられた。水中圧力波の測定は、被成形材の位置に直径5mm長さ1mmのリン青銅棒の一端を同一面上に設置して、それに貼られたゲージ長0.2mmのひずみゲージを用い、広帯域アンプおよびデジタルメモリスコープ(10ns/word—100MHz clock)で行なわれた。圧力測定位置(半径方向)を10mmピッチで移動して、同時に4CHづつ測定することで、各測定点の時間軸が統一された。

被成形材の高速変形状は板厚0.5mm、直径150mmの銅板を用い、水圧室下部直径100mm部分の自由張り出し成形とし、その張り出し高さごとに特別な方法によるピンコンタクト法⁶⁾を用いて精密に測定された。同時に、その高速変形状のコンピュータシミュレーションがなされた。その際、銅板は直径100mmの部分において板厚方向に4分割、半径方向に50分割の格子要素に細分し、表1に示す諸量が用いられ、弾完全塑性体とし、その判別はVon-Misesの条件によった。なお計算に用いた圧力波形は次式によるが、式中 P_m および t は実測値より求められたものがそれぞれの場

表1 計算に用いられた諸量

| | | |
|--------|----------|---------------------|
| 密度 | 8.5 | (t/m ³) |
| 縦波伝播速度 | 3750 | (m/s) |
| 横波伝播速度 | 2270 | (m/s) |
| 相当降伏応力 | 300 | (MPa) |
| 板厚 | 0.5(1.0) | (mm) |
| 受圧部半径 | 50 | (mm) |

合に対して与えられる。

$$P = \frac{1}{2} [P_m (1 - \cos \frac{2\pi}{T} t)]$$

これらの数値解析の詳細は既報⁵⁾に述べられている。

2.2 3種類の金型による型成形のシミュレーションおよび型成形実験

型成形においては、最適な工程設計が重要な要因であることは言うまでもない。しかし現実には、時間的、費用的制約から、最適な工程設計を実験的に求めることは困難である。そこでコンピュータシミュレーションが有用となる。それゆえ、金型形状を決定するに際し、ここでは多段工程の型成形ではないが、前節のシミュレーションが以下の手順で行なわれた。前節で用いた3種の水圧室のもとで、型に対する被成形材の馴染み方に明確な違いが生じるように、3種類の金型形状が決定された。それらはFig. 6の上部に示されている、(A)コーン型、(B)ハット型、(C)ヒル型である。

ここでの計算条件などはすべて前節の自由張り出し成形の場合と同一である。型成形において付加される条件としては銅板が型に衝突したときの境界条件であるが、型の弾性はないものとして、また銅板も跳ね返らないものとし、かつ銅板の運動エネルギーは衝突によって消滅するとした。

一方、型成形実験は板厚0.5mm、直径150mmの銅板が用いられた。銅板の外周フランジ部が三角断面形のリング溝で固定され、銅板の受圧部直径(変形範囲)は100mmでその円板部分の完全な張り出し型成形となる。金型と被成形材の間の空間は減圧される必要があるが、約0.1mm Hg程度になれば実用上の不都合はない。この程度の真空度を得るためには型と被成形材の間にOリングを一周させる程度の密封で十分である。

3. 結果および考察

3.1 作用圧力波の分布形状と変形過程の関係

水圧室の形状の違いによらず、被成形材に作用する圧力波形はすべてFig. 2に示される基本形状をしている³⁾。すなわち、Fig. 2(b)は、1回の爆発による全圧力

波形の一例であるが、立ち上がりの急峻な水中衝撃波(第1波)とそれに続くガスの膨張に伴う水の動圧(第2波)で構成されており、第1波と第2波が分離して被成形材に作用し、第1波の持続時間は $10\mu\text{s}$ ~ $30\mu\text{s}$ であり、第2波の持続時間は約 $500\mu\text{s}$ 程度である。

一方、被成形材の各部分は第1波の作用直後に最高飛しょう速度に達することが分かっている。したがって、第1波は衝撃的な作用を被成形材に与えるので力積で整理するのが妥当であり、第2波は変形状に与える効果(後述)を考えると、静水圧的作用とみなすのが妥当である。また、Fig.2(a)は第1波を時間軸拡大により詳しく表示したものであるが、爆発源から放射する直接波と、水圧室壁面で反射した反射波が記録されている。そして、水圧室の形状の違いによって、被成形材の各部分に作用する反射波のピーク圧力値と作用時刻が変化する。Fig.3は、それぞれ、(a):回転

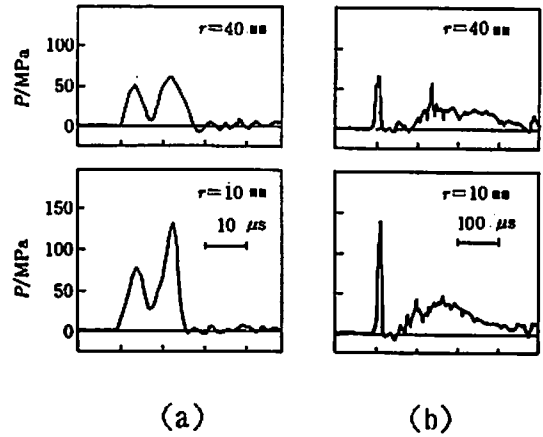


Fig. 2 (a) Example of two pulses in the first peak wave.
(b) Example of the pressure wave under the chamber.

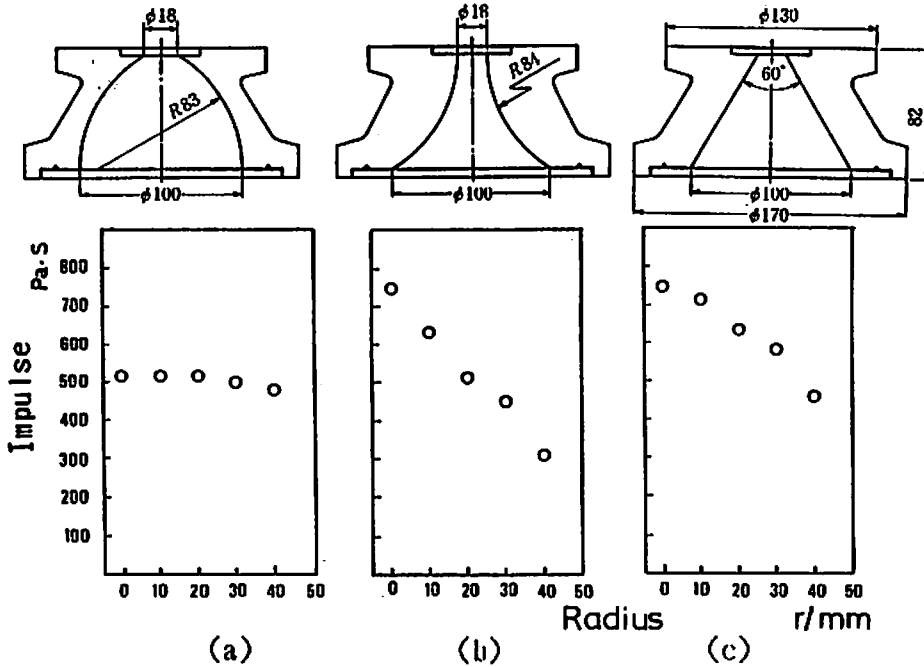


Fig. 3 Three profiles of water chamber in the pressure vessel and distribution of impulse in three types of water chamber.

(a) Paraboloid (b) Hyperboloid (c) Cone

放物面状, (b):回転双曲面状, (c):円錐状の水圧室の場合について、半径方向各位置(r)における第1波の力積の変化を示している。Fig.3(a)の場合が、これまで一般的に述べられている爆発成形における作用力積の分布形態と同じである。これに対し、Fig.3(b)と(c)の場合には、作用力積が被成形材の中心から周辺部へと

減少している状態が得られている。これらの効果を確認するために、銅板の自由張り出し成形実験が行われた。Fig.4に示される実線のグラフは、ピンコンタクト法で被成形材の各部を測定して求めた実験結果であり、破線のグラフは、Fig.3(a)(b)(c)に示される第1波の力積を初期条件として、コンピュータシミュレー

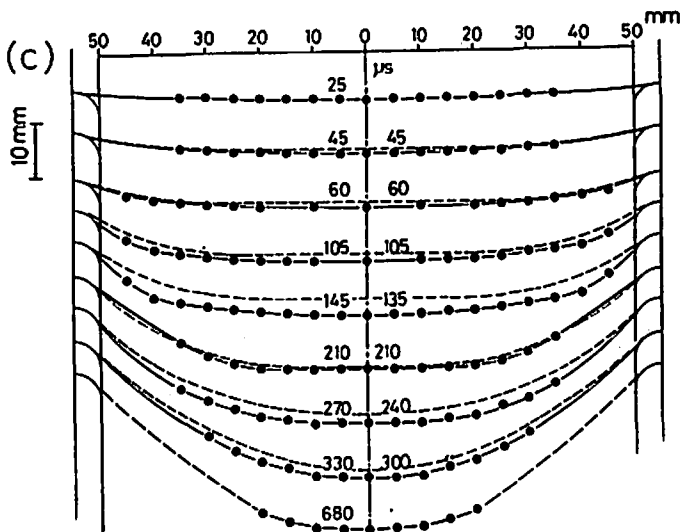
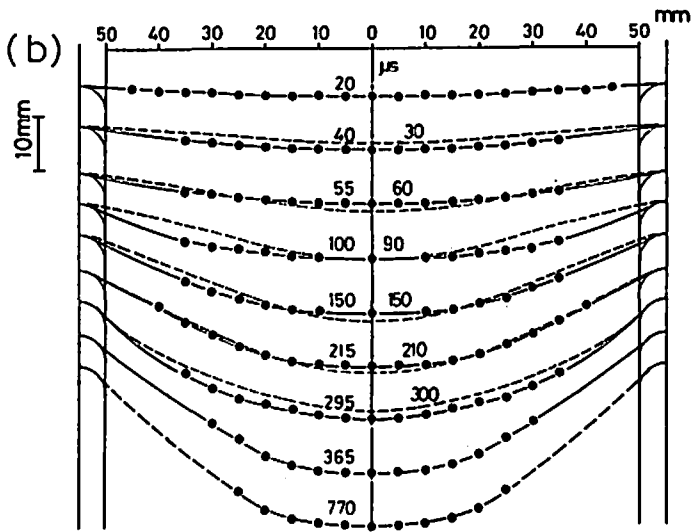
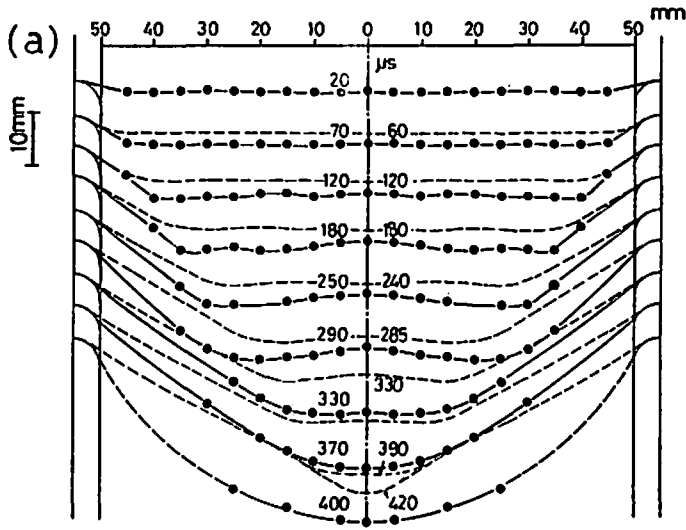


Fig. 4 Deformation process of a blank.
upper: (a) Paraboloid. middle: (b) Hyperboloid. lower: (c) Cone.

シミュレーションで求めた解析結果である。図上、両グラフを見分けにくいので、ピンコンタクト法で測定した形状(実線)とシミュレーションで求めた形状(破線)とはわざと時間的に少しずらして表記している。シミュレーションでは静水圧的作用の第2波が入力されていないことを考慮すれば、変形過程の初期段階における実験結果とシミュレーションは非常に良く一致している。

Fig. 4(a)の回転放物面状水圧室における被成形材の変形過程のシミュレーションは、台形断面状に変形し、最終的には円錐状の形状となっている。300 μ s経過ぐらいのところ、被成形材の上底面が急速にそれまでの凹状から凸状に張り出している。一方、ピンコンタクト法で測定された変形形状では、第1波が作用してから200~300 μ s経過してから徐々に台形断面状から球殻状に移行し、最終的にはドーム状の形状となる変形過程を辿っている。これは、第1波が作用して変形開始度200~300 μ sくらいから、第2波が静水圧的に作用しつつあることを示している。そして、この場合も約300 μ s経過のところから、被成形材の上底面がそれまでの凹状から凸状に急速に張り出し始める。この時の上底面中央の変形速度は非常に高い。さらに、注目しておきたいことは、変形過程初期の台形断面状の上底面が弾性振動しつつ張り出し変形している事実である。以上の事実が後に述べる型成形実験における形状凍結性に顕著な影響をおよぼすことになる。これはまた3次元弾塑性問題として数値解析されなければ、シミュレーションが実用的でないことを示している。Fig. 4(b)の回転双曲面状および、(c)の円錐状の水圧室の場合には、シミュレーション結果および実験結果のいずれの変形過程も球殻状に張り出し、(a)のように弾性振動する部分が生ぜず、ちょうど静的な液圧成形の場合のような変形過程を辿っている。ただし、被成形材の張り出し時の膨らみ形は、作用力積の分布状態と相関していて、(b)の場合には主に周辺部で曲げ変形がなされているのに対し、(c)の場合には他の2つの水圧室の場合における変形状態の両方の特徴を有する中間的な形である。そして、Fig. 5(a)にそれらの製品の断面形状が示されているように、結局のところいずれも最終的にはほぼ同程度の張り出し量を有するドーム形状となる。しかし、Fig. 5(b)にこれら3種の水圧室における製品の板厚ひずみ(ϵ_r)と円周方向(ϵ_θ)ひずみの分布が示しているように、左の回転放物面状水圧室の場合には、Fig. 4(a)の示すように製品中央部の変形量が高いので板厚減少の程度が大きい。以下、Fig. 4(b)(c)の変形過程に準ずる傾向で板厚減少の程度に差が生じている。これらのひずみ量の相違結果もまた、型成形において製品の成形度に影響を与える。

3.2 形成形のシミュレーションおよび実験

Fig. 6のグラフは3種の型形状に対し3種の水圧室を用いた場合の型成形過程のシミュレーション結果を示している。銅板の変形が中心軸に対して軸対称であるから左半断面のみを示す。(A)コーン型、(B)ハット型、(C)ヒル型の各型形状におけるシミュレーションは、上から(a):回転放物面状、(b):回転双曲面状、(c):円錐状の水圧室の場合である。Fig. 7は型成形された製品写真とその形状凍結性を説明するためのスケッチである。Fig. 6(A)の(a)の場合では、コーンの斜面の側壁部の外周部から銅板が型になじんでいき、頂上部が最後に充填されるのであるが、その時、銅板の中心部が急速に凹状から凸状に張り出していく時に当たる。Fig. 7の左上写真および、スケッチで左上はこの場合の実験結果であるが、上述の変形過程のゆえに頂上部では材料が余り座屈して、銅板の中心部の凸形状が十分に張り出し得ず潰れている。しかし、(b)の場合には、先ずコーンの斜面の側壁部の約半分が型になじんでその後、銅板の中心部付近および先端の凸形状が、素直に張り出すので、Fig. 7の左中写真および、スケッチで左中で分かるように実に見事に成形されている。このような先鋭端部は通常の液圧成形では当然のこと、ポンチによるプレス成形でもこの例のように破断せず成形されづらい。最後に(c)の場合には、コーンの斜面の側壁部の外周部から銅板が型になじんでいくのであるが、銅板の先端が凹状からでなく、凸形状が素直に張り出すので、Fig. 7の左下写真および、スケッチで左下で分かるようにきれいに成形されている。しかし同製品を裏から観察すると、(b)の場合に較べて、凸部先端の板厚が薄くなっていることが分かる。次に、Fig. 6(B)の(a)の場合では、水平面であるハット型の底部に、銅板の中央部分が弾性振動しつつ全面的に同時衝突する。それゆえ、Fig. 7の中上写真および、スケッチで中上はこの場合の実験結果であるが、上述の弾性振動を伴う水平面衝突のゆえに波打ち模様のようなたるんだしわが生じる。たとえ、製品にしわが生じなくてもこの部分の張り剛性が殆どない結果になる。これに対し、(b)の場合で、銅板の中央部分が弾性振動しないよう、銅板の中心からハット型の底部に馴染んでいる。したがって、Fig. 7の中央写真および、スケッチの中央で分かるように、水平面であるハット型の底部は平らにきちんと成形されるが、最後に充填されることになるハット型の外縁部のコーナーが鋭利に成形されない。これは、この部分の作用力積が足りないため、十分な充填がなされ得ないためである。この事実はシミュレーションでも現われている。ところが、(c)の場合の実験では、ハット型外縁部のコーナーに当たる部分の

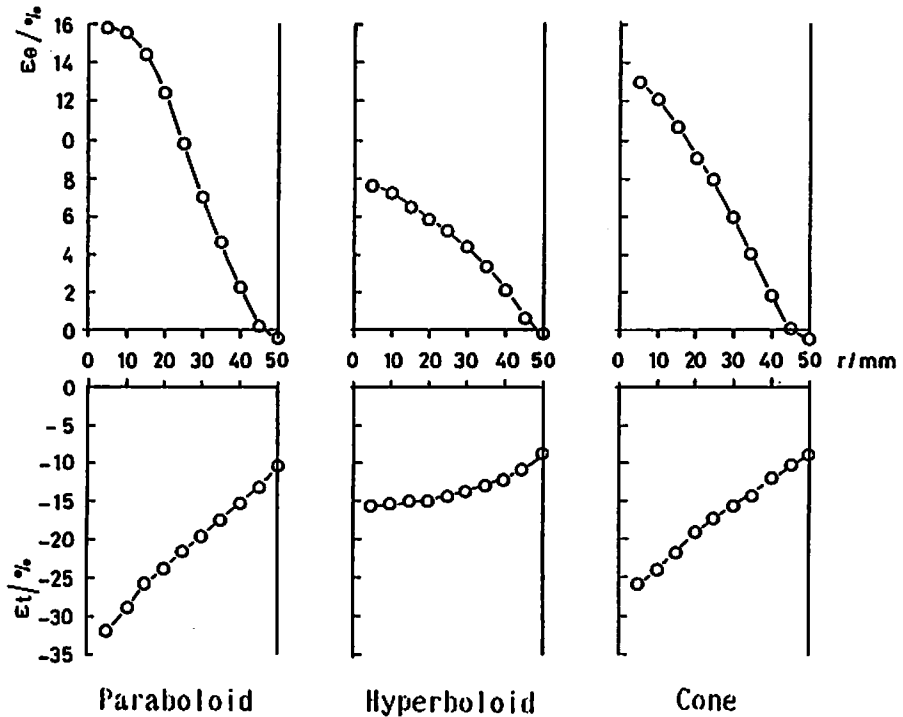
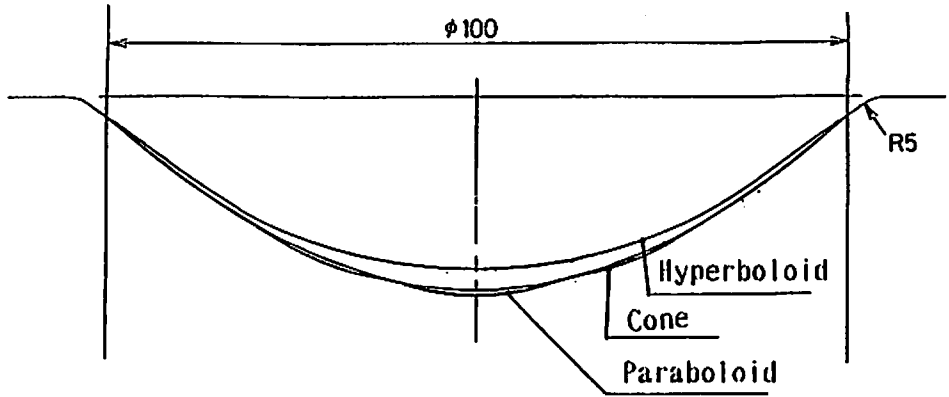


Fig. 5 upper ; (a) Deformation profiles in three types water chamber.
 lower ; (b) Strain distribution of deformed bulge shell.
 a hoop strain (ϵ_{θ}) and a thickness strain (ϵ_t).

作用力積が前の(b)の場合よりも大きいので、ハット型の外縁部のコーナーが鋭利に成形されている。以上、回転双曲面状の水圧室および円錐状の水圧室によれば、製品の底面の張り剛性は十分に確保された物が得られた。

最後に、Fig. 6(C)(a)の場合では、銅板はその中央部分が弾性振動しつつ張り出す過程を迎えるにしても、型は型中心を凸にしてなだらかな丘状を呈しているのので、まずヒル型の型中央に銅板の中央部分が衝突する。しかる後そこから外周部へ向かって型に馴染んでいく。

その時点で弾性振動が大幅に抑制されるため、Fig. 7の右上写真およびそのスケッチの右上で示されている実験結果では、弾性振動による悪影響つまり“しわ”が現われない。むしろ型に対するなじみ順序が適切とも言え、ヒル型の外縁部のコーナーが鋭利に成形されており、作用力積のエネルギー分布的には過不足の無い状況と云える。また、(b)の場合には、ハット型の例で予想されることであるが、シミュレーションでも認められているとおり、ヒル型の外縁部のコーナーの十分な形状充填がなされ得ない製品が得られている。こ

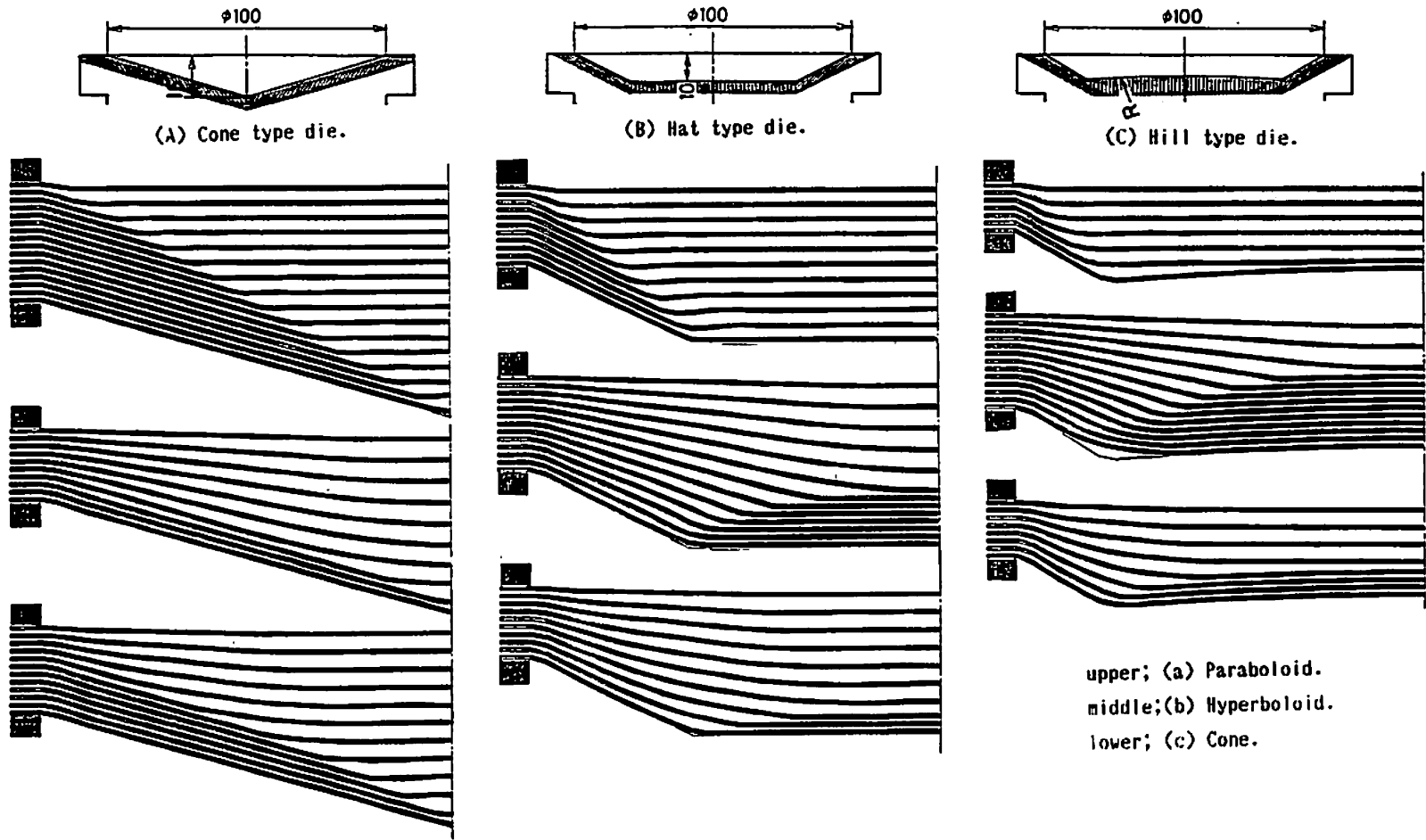


Fig. 6 Deformation process under the three types of water chamber obtained by the numerical simulation of the die forming. time interval : $15\mu s$.

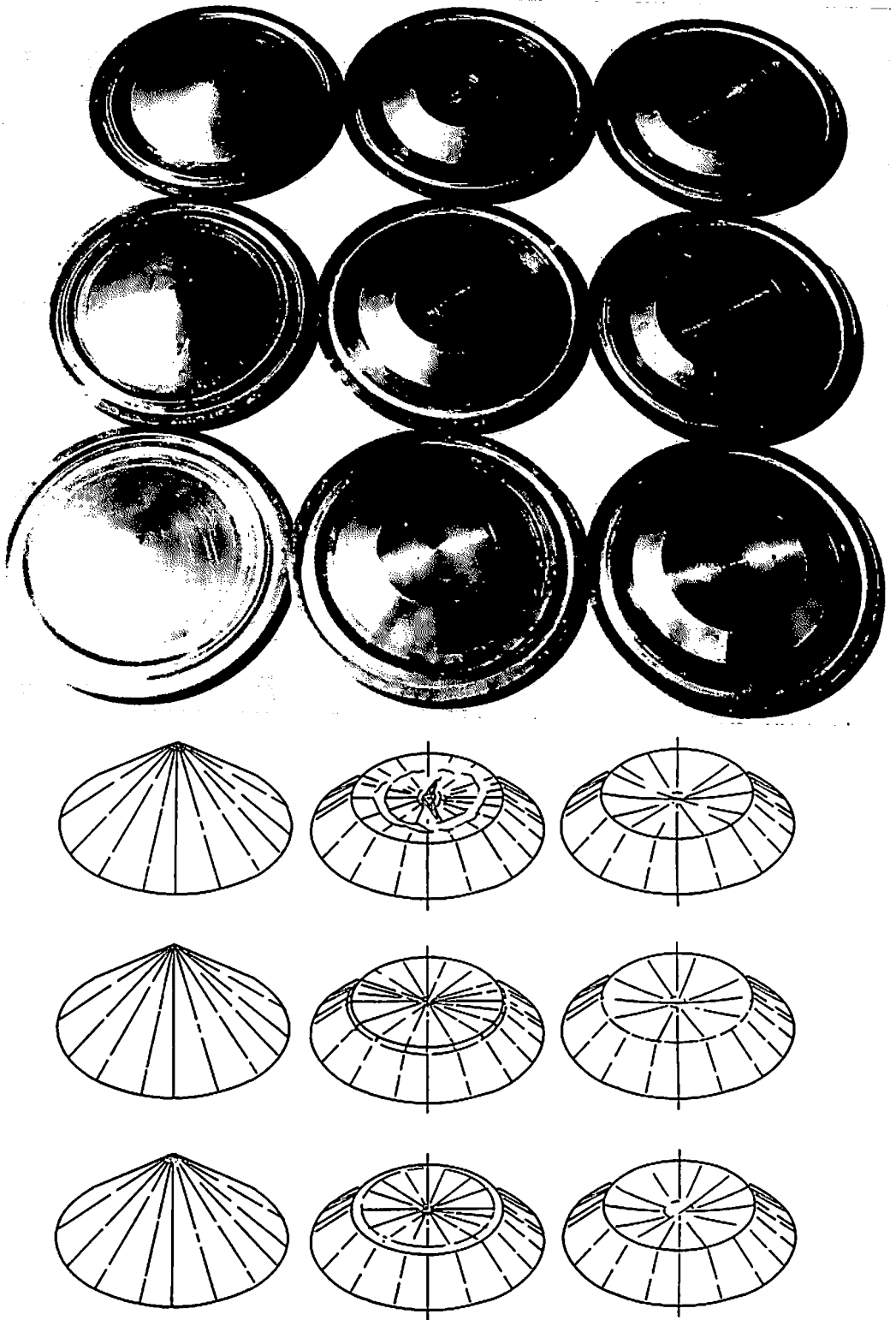


Fig. 7 Samples of die formed products and its sketch. location : same as in Fig. 6.

れに対し、(c)の場合は、(b)より少し良好で、シミュレーションで認められる程度に、ヒル型の外縁部のコーナーに銅板が充填するので、実験結果はFig. 7で認められる程度まで(a)の場合に近くまで成形される事象となる。

以上のように、型成形のシミュレーションは、型形状に充填するために最適な圧力分布と作用力積は、どのような形状が一番過不足のない状況となるかを、明確に示すことが分かった。シミュレーションの手法は、基本的に3次元プログラムであるので、今後より実際的な例に対し適用していくつもりである。

4. 結 言

一般に、爆発成形法はその高圧力による成形加工ゆえに、精密なレリーフが得られると言われていたが、その実現のためには水圧室形状を含む適切な型設計が必要であると考えている。実用的な見地からも、型寿命および板厚変動の点からボンチである水中圧力波の分布の制御は必要である。今回、基本的な金型形状を選んで、被成形材の変形過程つまり水中圧力波の分布形状と製品の成形度および形状凍結性の関連性について調査した。結果は以下のようである。

1. 被成形材に作用する水中圧力波の時間的变化は、水中衝撃波(第1波)とそれに続くガスの膨張に伴う水の動圧(第2波)であり、第1波と第2波は完全に分離した形で作用する。

2. 被成形材の変形過程は第1波によって決まる。また第1波は水圧室形状によっていろんな分布形状を呈する。第2波の分布形状は水圧室形状に依存しない。

3. 自由張り出し成形における製品形状に対して、第2波の作用が支配的で同程度のドーム形状になるが、

板厚変化の分布は被成形材の変形過程に依存し、水圧室によってかなりの違いを呈する。

4. 型成形においては、被成形材の変形過程が粗形材形状の違いを意味するので、第1波が製品の成形度に直接的に影響し、形状凍結性にも弾性波の影響がかなり認められる。

5. 本文中で述べられたシミュレーションは、型成形における型設計のための有効な資料として用いることが出来る。

6. 本加工法によると、通常の薄板プレス成形で加工困難な加工に属する、鋭利な突起を有する凸形状や、張り剛性を保たせた平面部分の張り出しを有する凸形状の成形が可能である。

おわりに

本研究を行なうに当たって、旭化成工業株式会社より爆薬の提供を受け、熊本大学の月俣教官の実験協力を得た。ここに深甚な謝意を表する。

文 献

- 1) 井上, 葉山, 尾関, 熊谷; 日本機械学会論文集(第3部) 29-205(昭38-9), 1499
- 2) 山田, 可见, 佐久間, 指吸; 日本機械学会論文集(C編) 45-397(昭54-9), 1046
- 3) 芋阪, 藤田, 済木, 長野, 馬場; 塑性と加工, 26-290(昭60-3), 316
- 4) 芋阪, 藤田, 藤中, 花崎; 塑性と加工, 27-303(昭61-4), 487
- 5) 芋阪, 藤田, 藤中, 花崎; 塑性と加工, 27-301(昭61-2), 288
- 6) 芋阪, 藤田, 藤中, 今井, 真鍋; 工業火薬, 46-3(昭60-6), 861

The effect of pressure wave control in the underwater explosive forming.

by Hiroo OSAKA*, Masahiro FUJITA, Koichi HANASAKI***
and Yuzo FUJINAKA******

To form a metal sheet precisely by explosive forming, a suitable deformed blank must collide with a forming die. The pressure wave generated by explosion in the closed vessel is reflected from the wall of the water chamber. Such reflected pressure waves are effective for deforming the blank as direct pressure waves.

In the specially designed closed vessel of the underwater explosive forming, an experiment of the die forming of the thin metal sheet is carried out, and it is found that the forming level of products depends on the shape of the water chamber. Elastic-plastic finite difference calculations are carried out to analyze the die forming process. The method proposed here provides a good model to simulate the underwater explosive die forming.

(*Department of Mechanical Engineering, Kumamoto Institute of Technology,
Kumamoto, Japan.

**Department of Mechanical Engineering, Kumamoto University Kumamoto,
Japan.

***Department of Mineral Science and Technology, Kyoto University kyoto,
Japan.

****Department of Architecture Fukui Institute of Technology, Fukui, Japan.)
