

水中衝撃波を利用した金属板の自由張出し成形に関する研究

八代工業高等専門学校 機械電気工学科

助手 井山 裕文

(平成 13 年度奨励研究助成 AF-2001027)

キーワード: 爆発成形法、自由張出し成形、水中衝撃波、有限差分法

1. 研究の目的と背景

近年、多品種少量生産の製品が益々多くなってきている。例えば、年間数千台しか生産しない自動車や、サニタリー製品でも年間 500~1000 個だけしか生産しない個性的なデザインの洗面台などがある。これらの部品にも多くの金属板の成形部品が用いられており、プレス成形や液圧パルジ成形などの金型を用いた加工法によって製造されている。しかし、金型は高価であり、また製造工程で用いられる装置のメンテナンス代なども無視できない。そのため、少量生産において従来の方法では単価が高くなる。そこで、新しい提案として、これらの部品を成形するために、爆薬の水中爆ごうにより生じる水中衝撃波を利用した爆発成形法を利用する。ここでは、比較的簡単・安価な装置および中央の底がない金型を用いる自由張出し成形法により金属板を所定の形状に成形する方法である。本研究ではこの手法の確立を目的とする。ここで提案する方法では、金属板に作用する圧力状態を爆薬の初期配置を変えることによりコントロールを行う。

本報告では、爆発成形法における金属板の自由張出しにおいて、爆薬の配置を変えることにより板の変形形状がどのようになるか、まず実験を行った。また、変形機構の解明のため、有限差分法による数値シミュレーションを行った。これらの結果について報告する。これまでこの種の金属板の高速変形解析は、藤田ら¹⁾²⁾が行っており、仮定した衝撃荷重により金属板がどのように変形するかその変形メカニズムについて、自由張出し成形および型成形のモデルで説明が行われた。本研究で用いる解析方法は更にその方法を改良し、爆薬の水中爆ごう、水中衝撃波の伝播過程、金属板の変形過程まで一連の行程のシミュレーションが可能なるものである。

2. 実験方法

図1に実験装置の概略図を示す。図のように装置は鋼管にフランジをつけた2つの容器からなっており、その間に板厚 2mm の銅板を挟み、ボルトで締結する。これら装置全体を水槽に沈めて実験を行う。上部の容器内部は水槽の水で満たされている。下部の容器の内縁は半径 10mm の丸みを有し、この容器内部には水が入らないようになっている。また、銅板が

高速変形し下部の容器内部の空気が圧縮されて変形に影響を及ぼさないように排気口を設けてあり、水槽の外側に空気が逃げるようホースが接続されている。使用した爆薬は、旭化成(株)製の SEP(爆速 6970m/s、爆轟圧 15.9GPa、充填密度 1310kg/m³)である。今回は爆薬を上部容器の壁際に設置し、銅板からの高さを変えて実験を行った。爆薬の配置は水平方向にも変えることができるが、本実験は、上容器壁面に水平方向の位置を固定することで、銅板を偏心形状に成形し、爆薬と銅板との鉛直方向の距離が変形量にどのように影響するかを調査するものである。ここで、実験結果との対応をとるために x-y座標を図のように定義する。

表1に実験条件を示す。ここで、高さhは爆薬先端部から銅板までの距離である。実験 No.1 は上部容器に蓋を被せて、密閉容器として行った。実験は熊本大学の衝撃・極限環境研究センターの協力を得て行った。

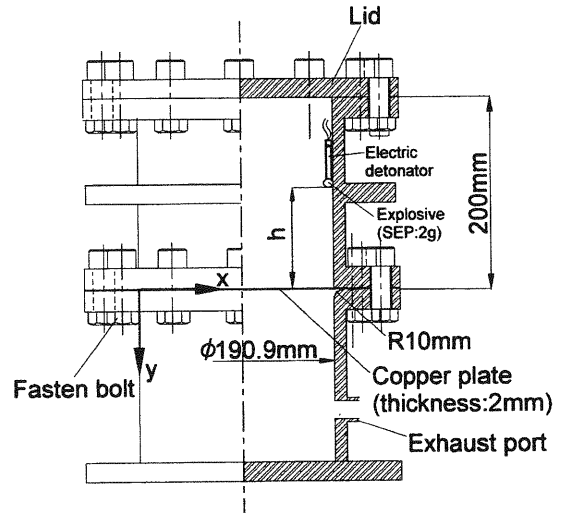


図1 実験装置概略図

表1 実験条件

No.	Height: h (mm)	Upper vessel (open or close)
1	200	Close
2	150	Open
3	100	Open
4	75	Open
5	50	Open

3. 実験結果

図2はNo.4(h=75mm)の実験で得られた銅板の変形形状である。図ではy方向が上向きとなっており、図1の方向とは逆向きになっている。図より銅板の左側と右側とで明らかに形状が非対称であることがわかる。またここで興味深いのは、爆薬設置位置の反対側の銅板が、爆薬側よりも大きく膨らんでいることである。

図3はNo.1~5 全ての条件における銅板外側の表面形状を3次元形状測定機((株)ミトヨ製のLEGEX910)で計測した結果である。No.1の場合、容器の蓋で密閉されているために、銅板と爆薬の距離が離れていても銅板の変形量が大きく、容器に蓋がないNo.2の場合と比較して中心より

左側の変形量大きい。また蓋がある場合、左右対称の変形になっている。爆発成形法においては、水中衝撃波の作用の後、第2波、第3波と水撃作用と爆発生成ガス³⁾の膨張による作用がある。このガス圧による作用が一樣に金属板に作用するために板全体が膨らむように変形し、軸対称的な形状が得られるものと考えられる。よって、蓋がない場合においては、偏心形状となる。

No.2~5の結果を見ると、銅板と爆薬との距離について爆薬側の変形量にはあまり差異が見られないが、その反対側では爆薬と銅板との距離に近いほどその変形量大きい。

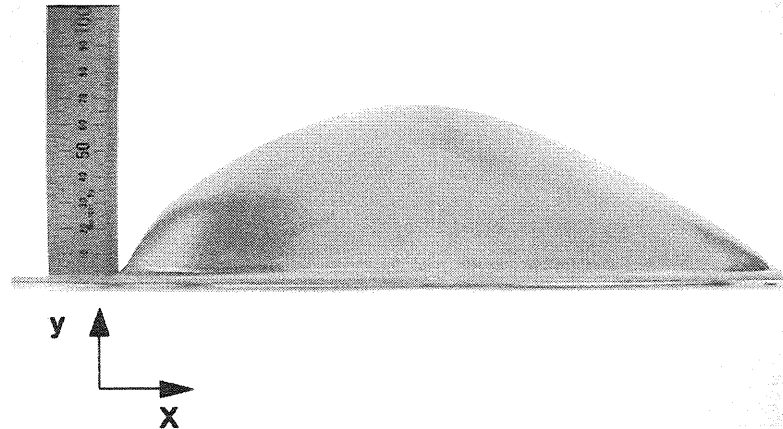


図2 No.4(h=75mm)の場合の銅板の変形形状

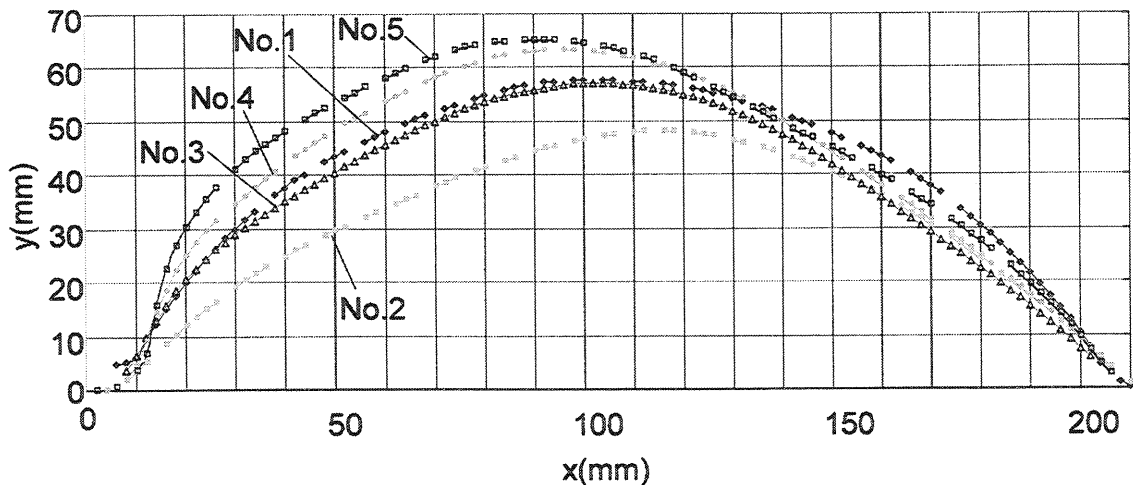


図3 各実験条件における銅板の成形形状の計測結果

4. 解析方法

4.1 解析モデル

密閉容器を用いた爆発成形法では、その内部形状により金属板に作用する圧力分布が違って来る。しかし、このような密閉容器を用いる場合、容器内部で複雑に衝撃圧が反射し、更に衝撃圧の後のガス圧が金属板に一樣に作用するために、爆薬の配置による変形形状の相違が生じない可能性がある。これについては、前節でも述べた。そこで、図

4に示すような解析モデルを取り上げる。このモデルでは、上部の容器は両側に垂直な壁を有するだけであり、密閉した容器になっていない。そこに水を充滿させておいて、この中で爆薬の配置を変える。この解析モデルは二次元の平面問題として、奥行き方向は無限に長いものと仮定している。水部、爆薬部および銅板部を正方形の格子要素で分割した。ここで用いた解析方法はラグランジュ座標を用いた有限差分法⁴⁾であり、時間増分一定の陽解法である。爆薬

は SEP とし、初期に爆薬部全体に SEP の爆ごう圧を与えた。爆薬の寸法は図中に示すとおりである。x-y 座標を図のように配置する。ここで、両側の壁間の距離を 200mm とした。また、金属板は厚さ 2mm、幅 260mm の銅板とし、その両端は固定され、型の内方には移動しないと仮定した。型の角の曲率半径は 10mm である。主な境界条件として、両側の壁と型は剛体であり、壁は上方へ無限に高いものとして、壁に接する水は上下方向にしか移動しないと仮定した。ここで、水は銅板から上方 250mm まで満たされている。水と銅板との境界はすべり境界⁵⁾として計算した。解析条件は爆薬の配置を左側の壁からの距離を変える場合と左側の壁面に接するようにして金属板からの高さ方向の距離を変えた場合について解析した。その条件は、左壁から爆薬の中心までの距離を w、金属板から爆薬上部までの距離を h として、h=150mm 一定で w=3、50、100mm と変化させた場合および w=3mm 一定で h=50、150、200mm と変化させた場合の計 5 つの条件設定について計算した。

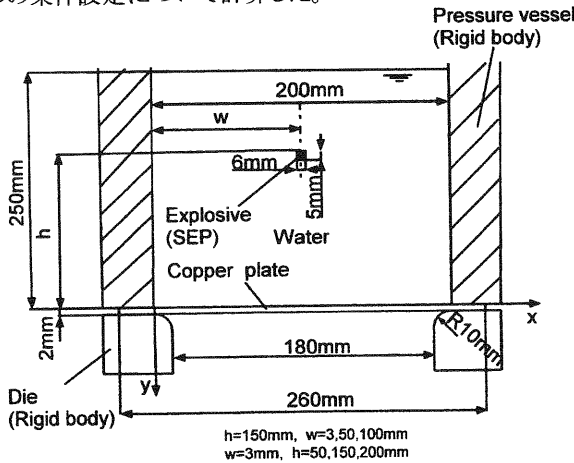


図4 解析モデル

4.2 圧力計算

爆薬部の圧力計算は次式の JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状態式⁹⁾を用いた。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

ここで、 P は格子要素の圧力、 A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω は JWL パラメータであり、 V 、 E はそれぞれ格子要素の比体積、内部エネルギーである。爆薬 SEP の JWL パラメータを表 2 に示す。

表2 爆薬 SEP の JWL パラメータ

A(GPa)	B(GPa)	R_1	R_2	ω
365	2.31	4.30	1.10	0.28

水の圧力計算には次式の Mie-Grüneisen 状態式⁷⁾を用いた。

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s \eta)^2} \left[1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (2)$$

ここで、 P は圧力、 ρ_0 は初期密度、 e は比内部エネルギー、 Γ_0 は Grüneisen パラメータ、 $\eta = 1 - \rho_0 / \rho$ である。また、 c_0 と s は材料定数である。水の各定数を表 3 に示す。

表3 Mie-Grüneisen 状態式における水の定数

	ρ_0 (kg/m ³)	C_0 (m/s)	S	Γ_0
Water	1000	1490	1.79	1.65

4.3 構成式

銅板の応力計算は次式の構成式⁸⁾を基に行った。銅板の変形速度は高速となるため、粘弾塑性体としてひずみ速度効果まで考慮されている。

$$\sigma_p = 20 + 430 \varepsilon_p^{0.445} + 2.9 \times 10^{-3} \dot{\varepsilon}_p + 3.291 \ln(\dot{\varepsilon}_p / 5.0 \times 10^{-4}) \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

ここで、 σ_p は相当応力、 ε_p は相当ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_p$ は相当ひずみ速度である。

5. 解析結果

5.1 圧力等値分布

図 5、6、7 にそれぞれ $h=150$ mm 一定で $w=3$ 、50、100mm と爆薬の配置を横方向に変えた場合の圧力等値分布を示す。壁面に接して爆薬を配置した場合(図 5)、水中衝撃波が半円形状に広がりながら伝播する。やがて、およそ 80 μ s 付近で銅板に到達し、銅板からの反射波が発生する。また 120 μ s では、反対側の壁面に到達した衝撃波の反射が見られる。爆薬を容器中央と壁の間地点に配置した場合(図 6)、20 μ s では一旦円形状に衝撃波が発生するが、40 μ s において左側の壁に到達して反射波が生じ、それと初期に伝播していた衝撃波の二つが次第に容器右側方向へ移動する。やがて 80 から 100 μ s の間に銅板に到達する。爆薬を容器中央部に配置した場合(図 7)では、初期に円形状に伝播していた衝撃波がその対称性から同時刻に両側壁面に反射し、双曲面状の圧力分布となる一方、上記二つの条件と同時刻に銅板に到達する。これらの圧力分布はその後容器内部で複雑に反射および干渉し合うが、密閉容器ではないため、容器上方から圧力が減衰する。

次に、左側の壁に爆薬が接しており、その高さを変えた場合について述べる。図 8 および図 9 はそれぞれ $h=50$ mm および 200mm における圧力容器内部の圧力等値分布を示している。また、この条件は軸対称ではないが、第 2 節の実験と同様に壁面上に爆薬が配置されており、詳細な内容を調査する。そこで、銅板表面上の $x=0$ 、50、100、150、200mm における水要素の圧力履歴をそれぞれ図 10(a)(b)に示す。

$h=50$ mm では、爆薬から銅板まで比較的近いために衝撃波は左壁近傍において、およそ 18 μ s で銅板に到達する。このとき左壁と銅板の角の水要素圧力は 1GPa にも達して

いる。それ以降はこの銅板からの反射波と初期に発生した二つの円形状の衝撃波が上方向へ伝播していき、次第に右方へと銅板への圧力の作用が生じる。このため、既に40 μs 付近から銅板は変形が始まり、その後、次第に左下方向へ傾斜した変形形状となる。一方、 $h=200\text{mm}$ では、爆

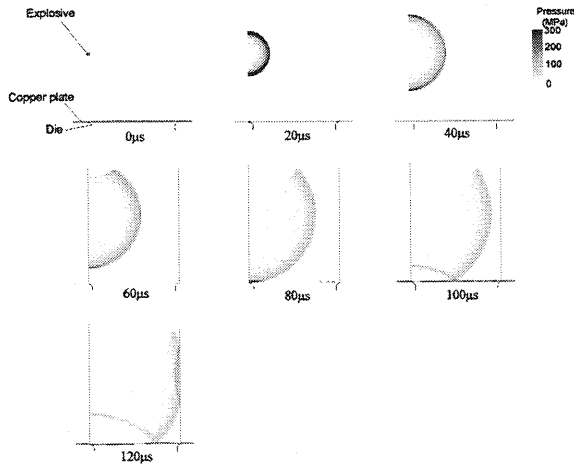


図5 $h=150\text{mm}, w=3\text{mm}$ における容器内部の圧力等値分布

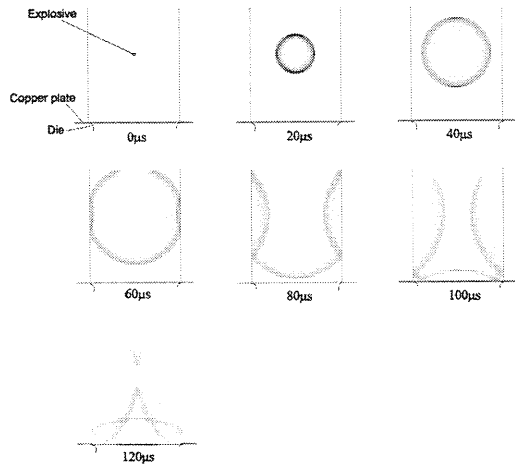


図7 $h=150\text{mm}, w=100\text{mm}$ における容器内部の圧力等値分布

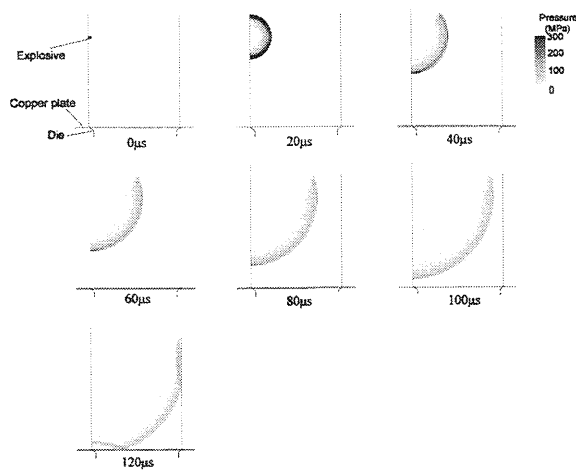


図9 $w=3\text{mm}, h=200\text{mm}$ における容器内部の圧力等値分布

薬から銅板までの距離が大きいため、衝撃波が左壁近傍でおよそ107 μs で銅板に到達し、図9において120 μs では、爆薬から銅板までの距離と右側の壁までの距離が同じであるので、両者においてほぼ同時に反射波が発生していることがわかる。

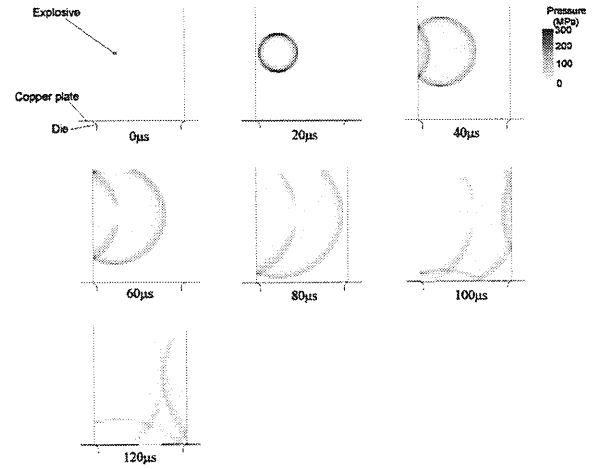


図6 $h=150\text{mm}, w=50\text{mm}$ における容器内部の圧力等値分布

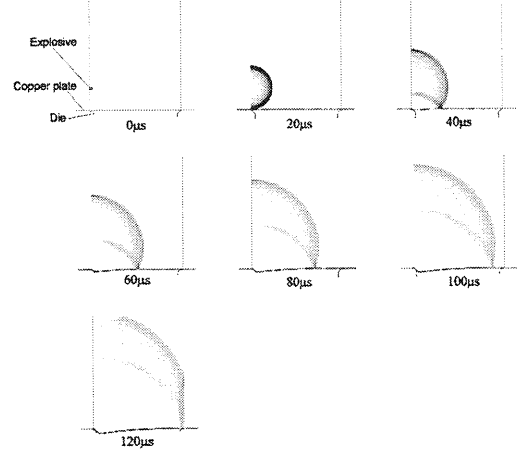
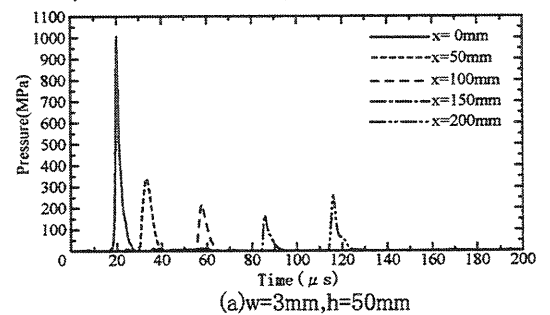
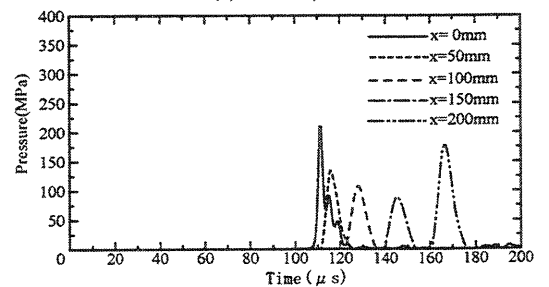


図8 $w=3\text{mm}, h=50\text{mm}$ における容器内部の圧力等値分布



(a) $w=3\text{mm}, h=50\text{mm}$



(b) $w=3\text{mm}, h=200\text{mm}$

図10 銅板面上の水要素の圧力履歴

- 6) Lee et al.: Lawrence Livermore National Laboratory report, UCID-16189, (1973).
 7) McQueen et al.: High-Velocity-Impact Phenomena,

- (1970), 230.
 8) Tanimura, S.: Proceedings of International symposium on Impact Engineering, 1(1992), 17.

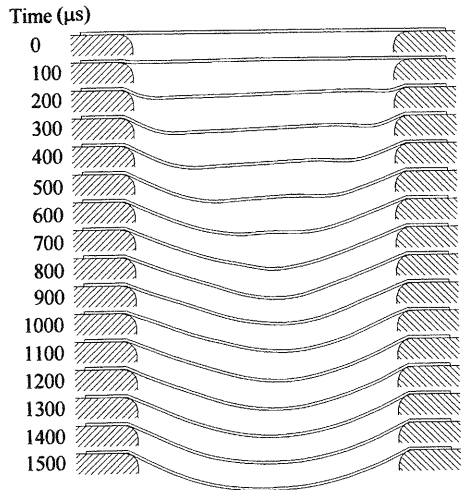


図 11 $h=150\text{mm}, w=3\text{mm}$ の変形過程

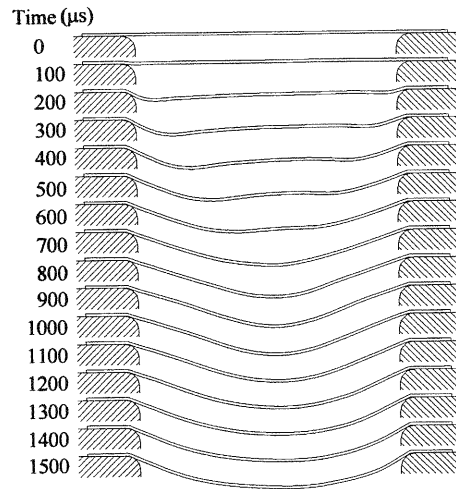


図 12 $h=150\text{mm}, w=50\text{mm}$ の変形過程

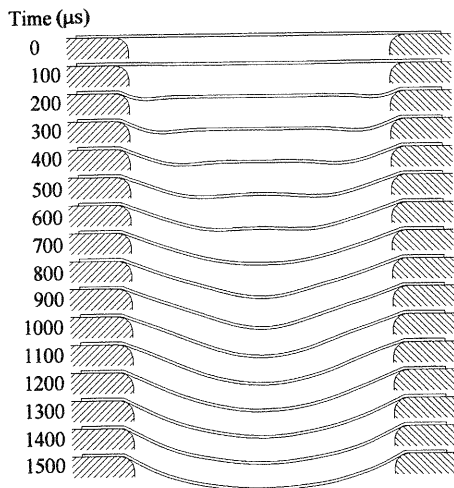


図 13 $h=150\text{mm}, w=100\text{mm}$ の変形過程

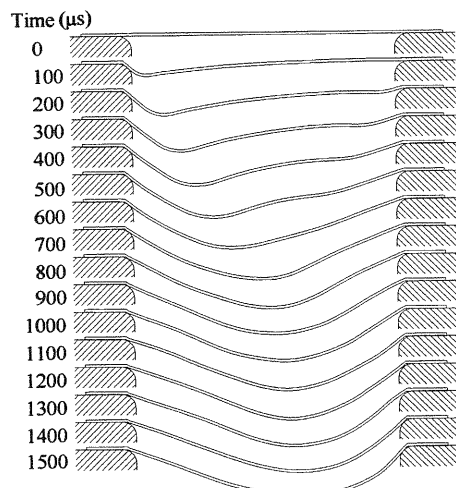


図 14 $w=3\text{mm}, h=50\text{mm}$ の変形過程

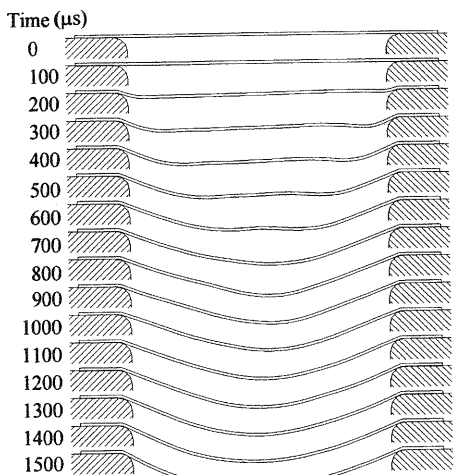


図 15 $w=3\text{mm}, h=200\text{mm}$ の変形過程

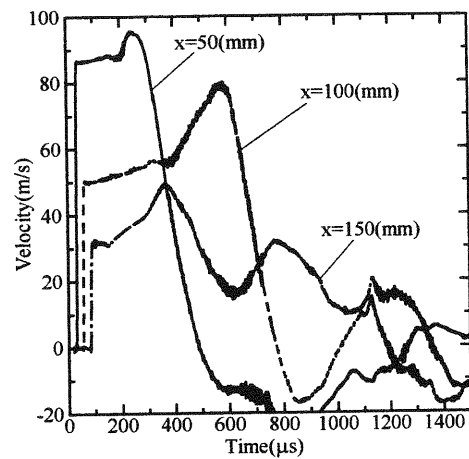


図 16 銅板下表面のy方向速度履歴 ($w=3\text{mm}, h=50\text{mm}$)

5.2 変形過程

図 11 から 15 において、各条件における銅板の変形過程を示している。図 11 において、変形の初期段階の 100 μ s では、爆薬側の型角部近傍に僅かに下に凸の曲げ変形が見られる。200 μ s でもその反対側の角部近傍に同様の曲げ変形が見られるが、その変形量は爆薬側の方が大きく、全体的に若干左下方向に傾斜した形状となっている。この曲げ変形の曲率が次第に増大しながら変形が進行するが、およそ 400 から 600 μ s にかけて中央部は上方に沿った形状となり、それが次第に下方へと張出す。最終的には中央部もやや丸みを帯びた形状となっている。全体的に爆薬の反対側の変形量が若干大きくなっている。最終形状は中央部が丸みを帯びた形状となる。

図 12 の初期の変形過程では、図 11 と同様に爆薬側の型角部近傍の変形量が大きくなっている。また、その変形過程も類似している。最終形状は図 11 の場合と比較してほぼ同様の形状となり、この場合も爆薬の反対側の変形量が大きい。

図 13 の場合では、圧力分布も左右対称であるため、変形形状もそれと相似に左右対称の形状となる。両側の型の角部近傍で下に凸の曲げ変形が生じ、それが次第に中央部へと移動しながら変形が進行し、500 μ s あたりから中央部が突出し始め、最終形状で全体が丸みを帯びた形状となる。

図 14 の $w=3\text{mm}$ 、 $h=50\text{mm}$ の場合において、銅板の左側は爆薬に最も近いので、早い時期から圧力が作用するため、100 μ s では左側の型角部の内側で急激な下に凸の曲げ変形を伴い、その傾斜角も他の条件と比較して深い。全体が左下がりに傾斜している形状となっている。200 μ s において、右側にも下に凸の曲げ変形が見られるが、その変形量は小さい。この爆薬側の下に凸の曲げ変形は次第に変形量が大きくなりながら右方へ移動し、且つ中央部の張出し変形も伴い、最終的には爆薬の反対側の変形量が大きくなっている。また、図 16 にこの条件における $x=50, 100, 150\text{mm}$ の位置における銅板下表面の y 方向速度履歴を示す。 $x=50\text{mm}$ の位置での変形速度が非常に大きく、一旦約 87 m/s まで急激に加速され、およそ 230 μ s で張出し変形が生じている。その後急激に減速される。爆薬からの距離が遠ざかるにつれて変形が生じているが、 $x=150\text{mm}$ では中央の銅板が減速した後も下方向への変形速度を維持しており、このため爆薬反対側の銅板の変形量が大きくなる。

図 15 の $w=3\text{mm}$ 、 $h=200\text{mm}$ の場合では、爆薬から銅板まで距離が離れているために、100 μ s ではまだ変形が生じていない。左右の型の角部よりすぐ内側において下に凸の曲げ変形がほぼ同時に生じるが、右側の下に凸の曲げ変形のすぐ内側に上に凸の曲げ変形が生じており、左右の変形傾斜部を比較すると右側の方が若干傾斜角が深い変形となっている。400 μ s 付近では右側の変形量が若干大きくなり、

その変形傾斜角も深くなることからわかる。600 μ s 付近から上方へ沿った中央部の板が、次第に下方へ張出す。およそ 900 μ s では、中央より右側の銅板の変形量が若干大きい、次第にその最大変形量の位置が左方へ移動し、最終的に変形形状は中央より左側の方が膨らんでいる。

6. 結言

金型を用いずに金属板を所定の形状に成形する方法として、爆発成形法による金属板の自由張出し変形について実験を行った。また、容器内部での爆薬の配置が変わることにより金属板がどのように変形するか、数値シミュレーションによって明らかにした。これらの結果について以下にまとめる。

- (1) 実験結果より、水圧容器を開放すると、容器壁面に貼付けた爆薬側よりもその反対側の変形量が大きくなり、銅板は偏心球状に成形された。また、爆薬が銅板に近いほどその変形量は大きい。
- (2) 密閉容器にした場合、中心軸に対し対称的な形状が得られた。
- (3) 爆薬の位置を $w=3, 50, 100\text{mm}$ と水平方向に変え、 $w=3\text{mm}$ の場合、金属板の変形過程は変形量の最大位置が若干左寄りになり、 $w=50\text{mm}$ の場合、逆に若干右寄りの変形となった。 $w=100\text{mm}$ の場合は圧力分布も左右対称になるため、変形形状も左右対称の形状となった。
- (4) 爆薬の位置を容器壁面に接して $h=50, 200\text{mm}$ と鉛直方向に変化させた場合において、 $h=50\text{mm}$ と銅板に近くなると、銅板の初期の変形量は爆薬側が大きいが、最終的には最大変形量の位置が右方へ移動しながら進行し、最終的には爆薬の反対側で極端に膨らんだ形状となった。これは実験で得られた結果と類似している。また、 $h=200\text{mm}$ の場合、爆薬配置の偏りの影響がほとんどなく、中央部より左側の方が若干膨らんだ形状となった。

7. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、天田金属加工機械技術振興財団の平成 13 年度奨励研究助成を頂いて実施したものであることを記し、同財団に深く感謝の意を表します。

8. 参考文献

- 1) M. Fujita, et. al. : The Deformation Feature of a Metal Plate in the Explosive Forming Process, Proceedings of Plasticity '95, (1995), 155.
- 2) 藤田ら: 塑性と加工, 38-435(1997), 331.
- 3) R. H. Cole: Underwater Explosion, (1948), 10.
- 4) A. A. Amsden et al.: Computer Program for Fluid Flow at All Speeds, LA-8095, UC-32 (1980).
- 5) M. L. Wilkins, Calculation of Elastic-Plastic Flow, Methods in Computational Physics, vol.3 (1964).