

# 液中細線放電による衝撃成形法を用いた マグネシウム合金板の成形性評価

熊本高等専門学校 機械知能システム工学科  
教授 井山 裕文  
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016027)

キーワード：水中衝撃波，マグネシウム合金，張出し成形

## 1. 研究の目的と背景

近年、マグネシウム合金は構造用金属材料として、その比重の低さがゆえに自動車や航空、宇宙技術分野への利用からスマートフォンやタブレット PC の筐体などポータブル機器類まで幅広く活用されており、さらにその利用範囲は拡大している。マグネシウム合金を利用する利点として、強度と比重の比が大きい、切削性が良い、振動吸収に優れている、電磁波シールド性能がよい、マグネシウム資源が豊富にあるなどの理由が挙げられる。しかし、マグネシウム合金の板材の塑性変形や押出し加工が難しい<sup>1)</sup>。その理由としてマグネシウムの成形加工の難点は最密六方晶であるため、その結晶構造上、変形に必要な臨界分解せん断応力に異方性があり、常温ではすべり系において底面すべりと柱面すべりしかおこらないことである<sup>1)</sup>。この解決策として鋳造や高温領域での加工が行われているが、装置開発や消費エネルギーのコストが高くなるため、発展途上の状態である。しかしマグネシウム合金の利用拡大を達成させるためには、一般的な金属加工で行なわれている高品質化とコストを低減するための塑性加工が必要であり、マグネシウム合金の板材の成形加工技術の発展が望まれる。

一方、これまで異種材料の接合や難加工材の成形性向上の技術開発に貢献してきた、高エネルギー速度加工において、マグネシウム合金の板材成形の研究はほとんど行われていない。本課題では同加工分野のひとつである、放電成形法<sup>2)</sup>を用いたマグネシウム合金の板材加工について、その成形性を見出すことを目的とする。

## 2. 実験方法

### 2・1 高速材料引張試験の概要

マグネシウム合金の材料特性を評価するために、高速引張試験を行った。使用した引張試験機は島津製作所 HITS-T10 である。この装置では最大引張荷重 10 kN で、最速で 20m/s で引張試験を行うことが可能である。図 1 にその装置を示す。このときの試料として板厚 1mm の AZ31 材を使用した。試験片形状を図 2 に示す。

### 2・2 実験装置の概要

図 3 に衝撃成形法の概略図を示す。圧力容器内部に水を

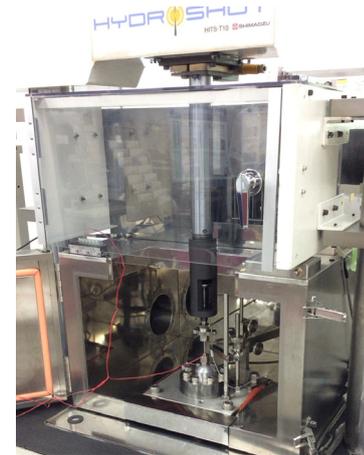


図 1 高速引張試験機

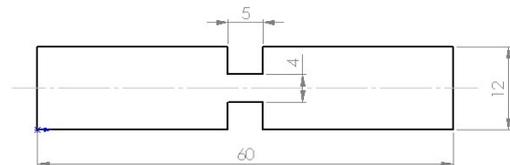


図 2 引張試験片形状

充滿させ、衝撃波の発生源を頂上部に設置し、その下方に対象とする金属板を置く。このとき、衝撃波の発生源にはいくつかあるが、代表的な方法として爆薬を用いる爆発成形法がある。加工時のひずみ速度は、爆薬からの距離や薬量にもよるが、 $10^2 \sim 10^5$  ( $s^{-1}$ ) まで達し十分な塑性変形を得ることができる。しかし爆薬を用いるので法的な制限や爆薬の管理コストもあり、工場生産に応用されている例は国内では希である。

そこで、ここで用いる衝撃成形法は衝撃波の発生源に電気エネルギーの放電現象を利用する「放電成形法」を用いる<sup>3)</sup>。放電にはコンデンサに蓄えられた大電荷を一瞬に金属細線に放電させる方法を用いる。図 4 はコンデンサに蓄えた電荷を一瞬で放電することが可能である電気回路（コッククロフト・ウォルトン回路<sup>4)</sup>）を示す。この電源回路を図 5 に示す電極部に接続し、電極間に巻いてある金属（銅）細線に通電させる。このとき金属細線は熔融酸化し金属細線近傍の水を一瞬にして蒸気化、膨張し、水中衝撃波が発生する。その衝撃圧により金属板が高速で成形される。電極部は図 3 の圧力容器の頂上部にセットする。

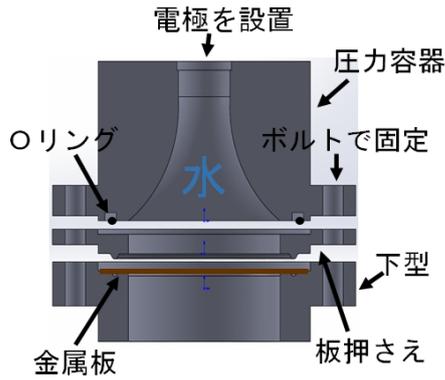


図3 実験装置概略図

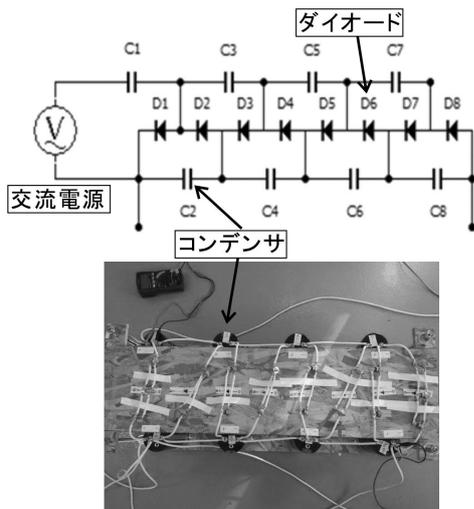


図4 電源回路

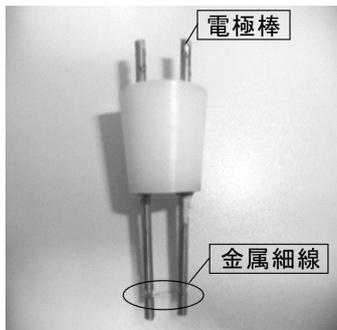
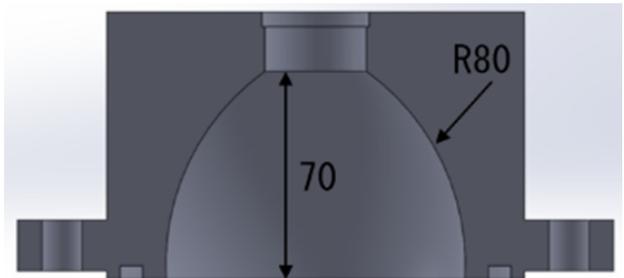


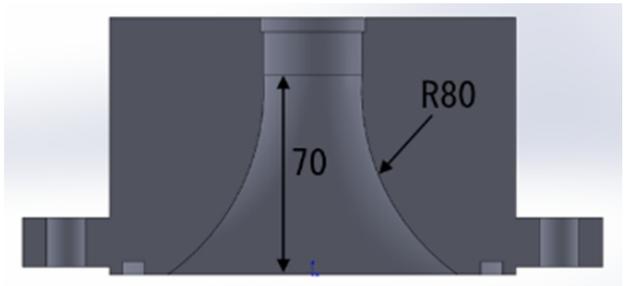
図5 電極部

金属細線はアルミニウム合金の直径0.5mmを使用した。また、電極棒直径は2mm、電極棒間の距離は20mmである。図3に示す、圧力容器、板押さえ部と中央部が空洞となっている下型の間にはマグネシウム合金板を挟み、これら装置の周囲をボルトで固定した。このとき金属細線からマグネシウム合金板の上表面までの距離は70mmとなる。また、圧力容器は図6に示されるような、容器の内面形状が放物曲線状のものと、双曲線状のものふたつを使用した。これは、過去の爆発成形の研究において、容器形状の違いにより、金属板に作用する圧力分布が異なり、金属板の変形メカニズムへの影響<sup>4)</sup>が考えられるためである。本研究

で対象とするマグネシウム合金板の材質はAZ31としている。



(a)放物状圧力容器



(b)双曲状圧力容器

図6 圧力容器形状

### 2・3 高速度ビデオカメラ撮影実験の概要

マグネシウム合金板の変形過程が実際の成形実験ではどのようなものになるのか、高速度ビデオカメラによる撮影実験を行った。図7は装置のセットアップを示す。圧力容器とマグネシウム合金板を板押さえで挟み、周囲をボルトで固定し、水で圧力容器内を充満させたあとに、電極をセットする。これらを固定台にセットした。これらの装置前方にはアクリル板をセットし、前方からフラッシュライトで照らし、高速ビデオカメラで撮影する。使用された高速度ビデオカメラはハイブリッド $\mu$ CMOSセンサーを用いたSpecialised Imaging社のKiranaを使用した。このカメラでは、924×768の画素数で1 $\mu$ s毎に、180フレームの撮影が可能である。



図7 高速度ビデオカメラによる撮影実験ためのセットアップ写真

## 2・4 数値解析法の概要

マグネシウム合金板の衝撃成形を行うために、その変形過程を説明するにあたり、数値シミュレーションを試みた。数値解析法は ALE 法<sup>5)</sup>を用いた有限要素解析である。解析用の CAE ソフトとしてアルテエンジニアリング社の HyperWorks を使用した。この場合、ソルバーは Radioss となる。図 8 に放物状の圧力容器を用いた場合の解析モデルを示す。解析計算場は軸対称性を利用して中心軸より半部を行った。また、水中放電現象の数値モデルが確立されていないため、水中放電による同等の衝撃圧が得られる、高性能可塑性爆薬 SEP<sup>6)</sup>を用いた解析とした。圧力容器と下型の材料は工具鋼とした。水および爆薬部の計算は ALE 法により行った。マグネシウム合金および圧力容器と金型部はラングランジュ解析を適用し、さらに爆薬 SEP の圧力計算は JWL 状態式<sup>7)</sup>、水の圧力計算には Mie-Gruneisen 状態式<sup>8)</sup>を用いた。爆薬 SEP の JWL パラメータは伊東ら<sup>6)</sup>によって求められたものを使用した。マグネシウム合金板 AZ31 および工具鋼の応力-ひずみ関係を示す構成式には、Johnson-Cook の構成モデル<sup>9)10)</sup>を用いた。

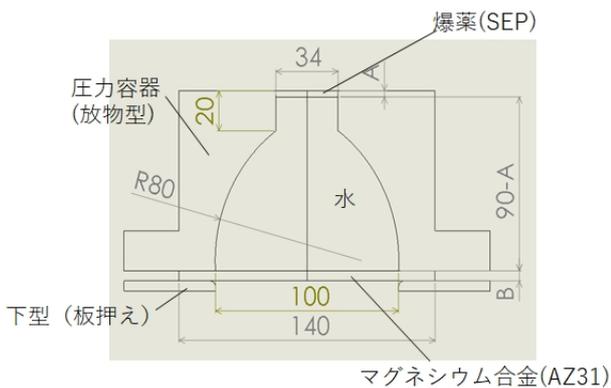


図 8 解析モデル

## 3. 結果

### 3・1 高速引張試験結果

図 9 に室温において、ひずみ速度が 1000/s となるように設定した高速引張試験の実験結果を実線で示す。初期のころに細かい振動が見られる。実験はいくつかの試験片でひずみゲージを使用してデータを得たものである。大きい振動があったものもあり、フィルタをかけてある。おおよそひずみが 0.13 あたりで破断しているが、これにはバラツキがあり、大きいもので 0.14 あたりで破断している。今回の実験では、簡易的に実施したもので、詳細を追求するものではない。これらの実験についての詳細はいくつかの文献を参考にすると良いという結論に至った。よって、Ulacia ら<sup>11)</sup>の実験で求められた、Johnson-Cook の構成式パラメータとの比較を試みた。その結果を破線で示している。最大応力の値が近い結果となっていることがわかる。そこで、数値シミュレーションで使用する AZ31 の材料モデルは、Ulacia らが算出した Johnson-Cook 構成式のパラメータを用いた。

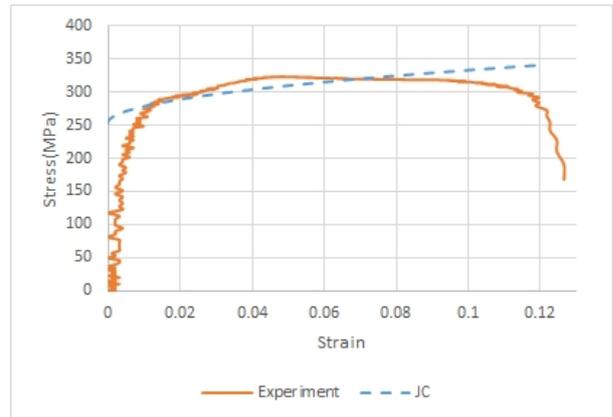


図 9 室温でのひずみ速度  $10^3\text{s}^{-1}$  における AZ31 材引張試験結果

### 3・2 高速度ビデオカメラによる成形実験の結果

直径 140mm、板厚 1mm の AZ31 板を試料として、電極部のアルミニウム細線直径が 0.5mm、充電エネルギーが 2.5 kJ における高速度ビデオカメラによる観測実験を行った。その際、フラッシュライトの光が AZ31 板に反射するとハレーションを起こすので、予め AZ31 に黒色塗料を塗布した。この結果を図 10 に示す。それぞれ、圧力容器形状が異なり、同図(a)は放物状の圧力容器と同図(b)は双曲状の圧力容器を使用したものである。また観測時刻は放電開始より  $500\mu\text{s}$ 、 $1000\mu\text{s}$ 、 $1500\mu\text{s}$  のものである。放物状の圧力容器を使用した場合、AZ31 の外周部より中央に向けて下方への変形が進行している。このとき、AZ31 表面から飛翔しているのは塗装粉である。また、このときの AZ31 板底面からの中央部の最大成形量は 13.5mm であった。アルミニウム細線径を 0.7mm にして、同条件の充電エネルギー 2.5 kJ とした場合には、最大成形量は 14.9mm であった。

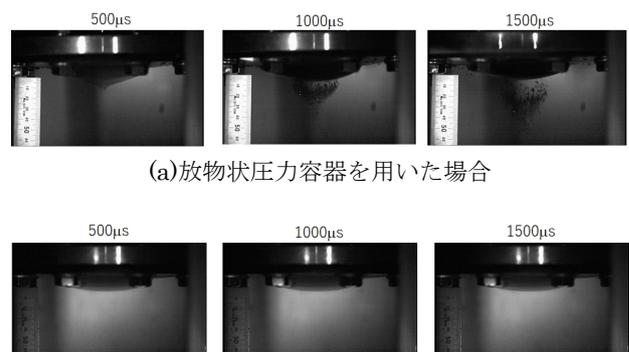
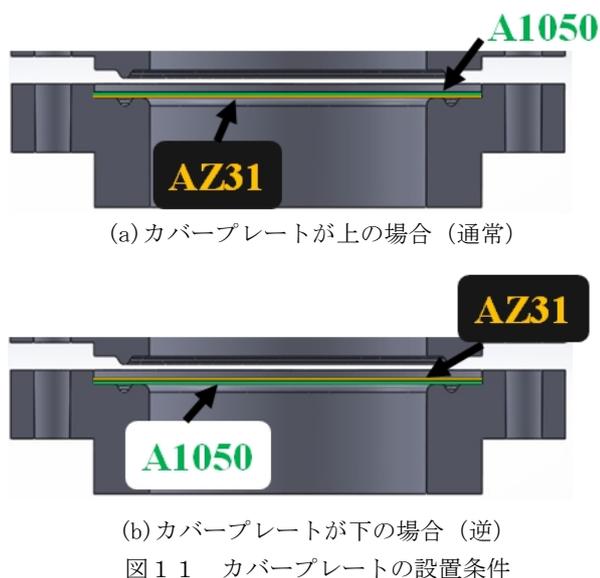


図 10 高速度ビデオカメラによる観測実験結果

### 3・3 各条件における成形実験結果

実験条件において、圧力容器形状、充電電圧の相違、カパープレートの有無について実験を行った。ここでは、直径 140mm、板厚 0.5mm の AZ31 板を試料とした。それぞれの条件において AZ31 の成形後、3 次元形状測定システム

NAZCA-3D で形状測定を行った。ここでカバープレートとは、AZ31 板の変形をより効果的に支援するものであり、爆発成形においては、藤田がその手法を提案し<sup>11)</sup>、効果を確認している。ここでは、図 1 1 に示すように、カバープレートを板厚 0.5mm の A1050 純アルミニウム板とし、これを同図 (a) のように AZ31 板の上に置いて実施するか、(b) 下に置いて実施するかの両方の条件で行った。



カバープレート無しで、充電電圧を 1000V, 1200V, 1400V の場合において、圧力容器形状を変えて行った成形形状を図 1 2 に示す。充電エネルギーは電圧が 1000V, 1200V, 1400V のとき、それぞれ 5 kJ, 7.2 kJ, 9.8 kJ となる。

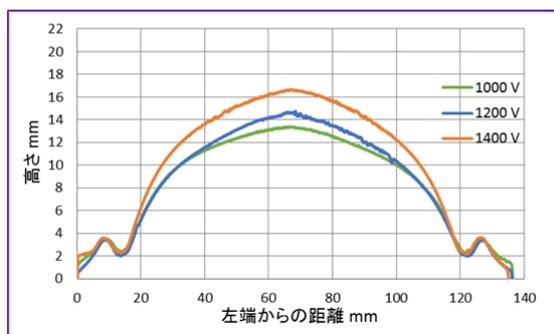
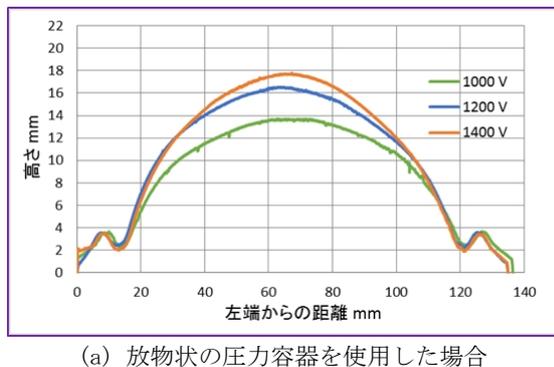


図 1 2 圧力容器および充電電圧の成形形状への影響

同図において、充電エネルギーが大きいほど成形量が多いのはすぐに理解できるが、放物状容器を使用した場合の方が成形量が大きく、AZ13 板の周辺部からの高さではあるが、約 18mm まで到達している。板押さえ部からの深さでは、約 16mm となっている。

次に、カバープレートの成形量への影響について調査した。図 1 3 にその成形形状の結果を示す。充電エネルギーはいずれも 9.8 kJ であり、圧力容器を (a) 放物状のもの、(b) 双曲状のものに変えて行った。カバープレートの有無による影響は図 1 2 と比較すれば理解できる。放物状の圧力容器を使用した場合、若干ではあるが、成形量が大きくなり、中央部ばかりではなく、周辺部が広がる傾向が見られた。また、双曲状の圧力容器の条件でも、AZ31 板の下にカバープレートを置いた方が成形量は大きくなった。

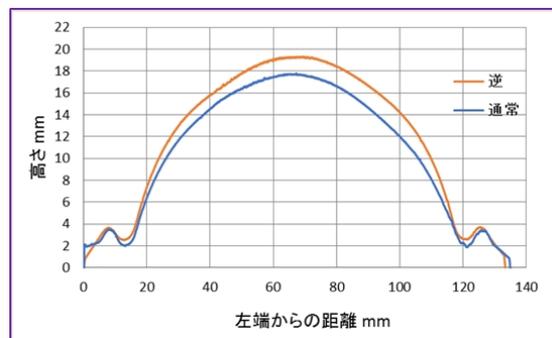
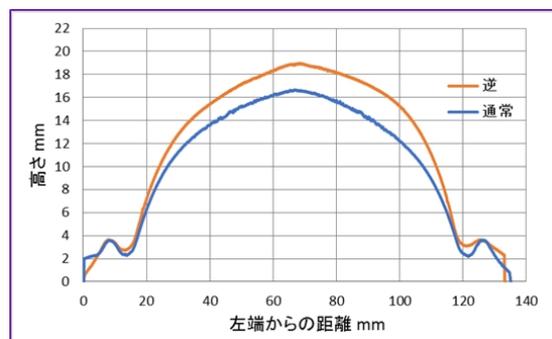


図 1 3 カバープレートの成形形状への影響

図 1 4 は充電電圧 1400V (充電エネルギー 9.8 kJ) における成形後の板厚ひずみ分布である。成形板の中央部で板押さえ部を除いた部分を板形状に沿って板厚を測定し、算出した。圧力容器形状に関係なく、周辺部より中央部につれ、板厚が薄くなっていることがわかる。最大でも板厚ひずみがおよそ 0.096 となっている。

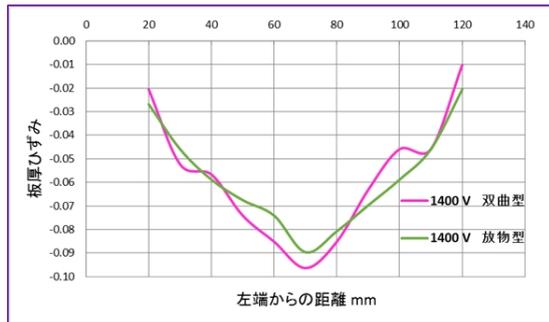


図 1 4 充電電圧 1400V の場合の板厚ひずみ分布

### 3・4 数値シミュレーション結果

AZ31 板の変形過程を調査するために数値シミュレーションを行った。ここでは、水中放電現象の数理モデルが確立されていないので、爆薬 SEP1g を用いての衝撃成形シミュレーションとなっている。

図 1 5 および図 1 6 に放物および双曲状の压力容器を用いた場合の圧力コンター図を示す。放物型压力容器において、初期のうち中央部の圧力が高くなっており、圧力波がマグネシウム合金に到達する前後では压力容器壁面での水の圧力が高くなっている。これは、双曲型压力容器に比べて衝撃波の拡散領域が広く中央部の圧力が減衰しているためである。双曲型压力容器では衝撃波が AZ31 板に到達するまで、容器中央部の圧力が高くなっている。これは初期の压力容器壁面での反射圧力波が影響し、容器中央部での圧力が減衰しないためである。AZ31 板に作用する圧力の最大値は、放物状の压力容器において、中央部で最大 350MPa の圧力値となっている。

図 1 7 および図 1 8 に放物状および双曲状の压力容器を用いた場合の変形過程を示す。また、同時に鉛直方向の速度コンター図を示している。放物型压力容器を用いた場合、双曲型压力容器の場合に比べて、変形終了までの時間が早い。放物型压力容器を用いた場合、マグネシウム合金板の外周部から中央部に向かって変形が進行している。衝撃波の圧力が压力容器壁面に集中していることが要因であると考えられる。双曲型压力容器の場合では、中央部から端部へ向かって変形が進行している。

マグネシウム合金板の水中細線放電による実験測定データとの比較を図 1 9 に示す。実験条件は放物型压力容器を用いた場合の充電電圧 2500V、充電エネルギー 2.5kJ、アルミニウム細線直径 0.7mm の条件で行ったものである。この実験データと成形量が一番近い板厚 1.0mm、爆薬量 1.0g のシミュレーション結果を比較した。シミュレーションと実験のデータを比較した結果、実験データの方が中央部から外周部への間の膨らみが大きくなっている。これは、実験では AZ31 の成形時において、その外周部から中央部へと引き込みが発生しているが、シミュレーションでは引き込みがないため、変形量が大きくなっていないと考えられる。今後シミュレーションの境界条件を見直す必要がある。

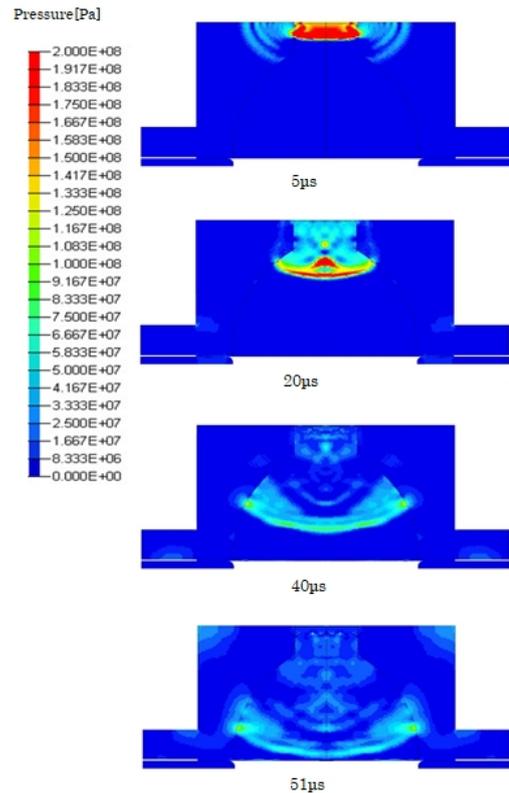


図 1 5 放物状压力容器内の衝撃波伝播過程

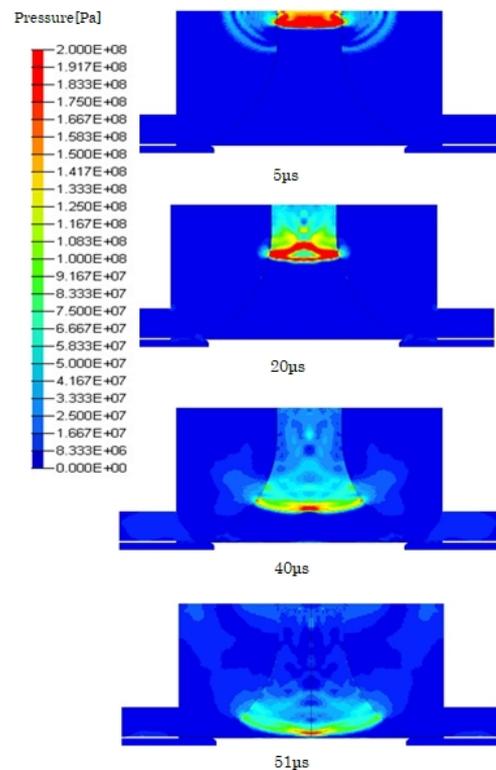


図 1 6 双曲状压力容器内の衝撃波伝播過程

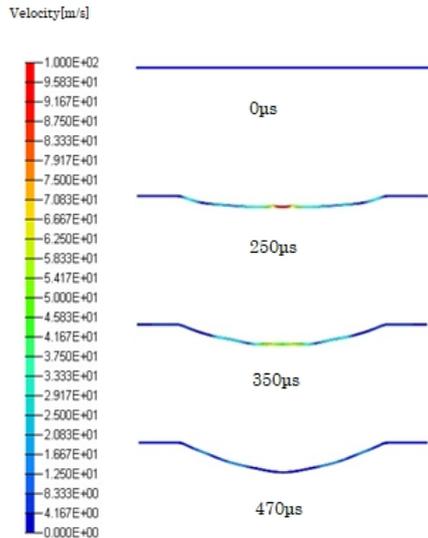


図 1 7 放物状圧力容器を使用した場合の AZ31 板の変形過程

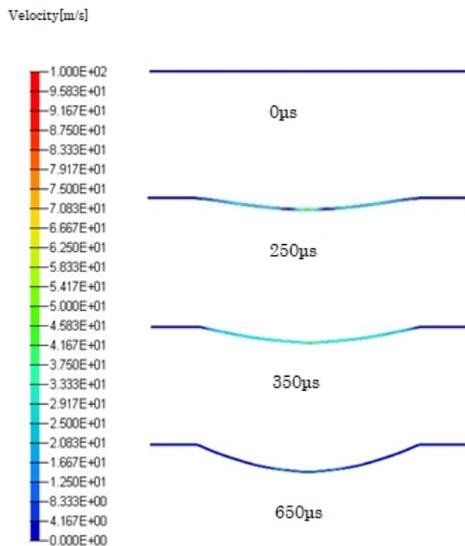


図 1 8 双曲状圧力容器を使用した場合の AZ31 板の変形過程

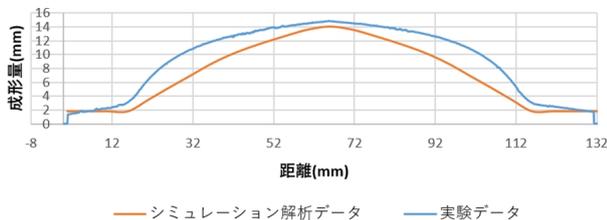


図 1 9 実験結果との比較

#### 4. まとめ

水中細線放電による水中衝撃波を利用した AZ31 マグネシウム合金板の張出し成形について、実験結果と数値シミュレーション結果を下記にまとめる。

(1) 成形過程の映像より、放物状圧力容器では中心部

の成形量が最大となった。

- (2) 放物状圧力容器と双曲状圧力容器の 2 種類の圧力容器を用いて成形を行い、成形後の最大変形量を測定した。その結果、最大成形量は双曲状圧力容器を用いた場合の方が大きくなった。
- (3) アルミニウム細線の直径を 0.5 mm と 0.7 mm の 2 種類で実験を行った。その結果、金属細線の直径と金属板の最大成形量には規則的な関係が見られなかった。そのため、実験条件に最適な細線直径を見出すことが必要である。
- (4) 放物状の圧力容器より双曲状圧力容器を用いた場合の方が中央部で高い圧力となるが、変形量は放物状の方が大きい。
- (5) 双曲状圧力容器より放物状圧力容器の方が変形に要する時間が短い。
- (6) 放物状圧力容器ではマグネシウム合金板が外周部から中央部へ向かって変形しているが、双曲状圧力容器では中央部から外周部の方向へ変形が進行する。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成金により実施されたものであり、心より深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 塑性加工学会：マグネシウム加工技術, (2004), 21, コロナ社.
- 2) 塑性加工学会:高エネルギー速度加工, (1993), 133, コロナ社.
- 3) 中西俊貴・大向優・石飛学・細田健一・伊東毅：パワーエレクトロニクス学会誌, 35(2012), 208.
- 4) 藤田昌大・石水泰夫・持原稔・苧阪浩男・伊東繁：塑性と加工, 36 (1995), 541.
- 5) Aquelet, N., Souli, M. and Olovsson, L.: Computer methods in applied mechanics and engineering, 195, (2006), 110-132.
- 6) 伊東繁・吉良章夫・長野司郎・藤田昌大：火薬学会誌, 56-5, (1995), 188-194.
- 7) Lee, E., Finger, M., Collins, W.: Lawrence Livermore National Laboratory report, UCID-16189(1973).
- 8) McQueen, G., Marsh, S. P. Taylor J. W., Fritz, J. N., Carter, W. J.,: High Velocity Impact Phenomena(1970), 230.
- 9) M. Meyers: Dynamic Behavior of Materials(1994), 325.
- 10) I. Ulacia, C. P. Salisbury, I. Hurtado, M. J. Worswick: Journal of Materials Processing Technology, 221(2011), 830-839.
- 11) 藤田昌大:水中衝撃波の作用によって行う爆発圧着・成形法, 東京大学博士論文 (1980) .