

# 動的液圧バルジ試験の提案と マグネシウム合金の冷間加工に関する考察

鹿児島工業高等専門学校 機械工学科  
教授 徳永 仁夫

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021027-B3)

キーワード：高ひずみ速度，水中衝撃波，冷間塑性加工，マグネシウム合金

## 1. 研究の目的と背景

マグネシウム（以下，Mg）合金は，環境・エネルギー問題解決につながる新材料として期待されているが，冷間塑性変形能が他の機械・構造用材料に著しく劣る．例えば，西村ら<sup>1)</sup>は液圧バルジ試験（金属円板の片側から液圧を付与し，張出変形を生じさせる試験）を用いて，汎用 Mg 合金(AZ31)の張出成形性に及ぼす試験温度の影響を調査し，試験温度 150℃以下では張出成形ができないことを報告している．

一方，申請者らは，高エネルギー速度加工の一種である衝撃水圧法（詳細は後述）によって Mg 合金の冷間塑性変形能が向上する可能性を見出している．この結果から，申請者は衝撃水圧法を応用した以下 2 つの実現を目指している．まず 1 つは，汎用 Mg 合金にも適用可能な冷間塑性加工技術の構築である．現在，汎用 Mg 合金においては熱間塑性加工や切削加工が広く使用されている．省資源や省エネルギー，加工コスト低減等の観点において冷間塑性加工の実現は重要な技術課題である．もう 1 つは，高ひずみ速度域（動的ひずみ速度域）における金属板のプレス成形性や変形挙動に関する試験方法の提案である．ひずみ速度が材料の機械的性質に及ぼす影響について，これまでも種々の検討がなされている．一般に準静的ひずみ速度域

( $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{s}^{-1}$ )では，ひずみ速度の増加に伴って金属の延性は低下する．一方で，衝撃水圧法の変形速度は動的ひずみ速度域( $10^2 \sim 10^4 \text{s}^{-1}$ )に達している可能性がある．動的ひずみ速度域での AZ31 合金の変形挙動は，準静的ひずみ速度域とは全く異なるひずみ速度依存性を示すと予想しているが，ひずみ速度等について詳細な検討はできていない．本研究の目的は，Mg 合金に適用可能な新しい冷間塑性加工プロセスを構築することである．特に本研究では，高速変形する金属板材の機械的性質や張出成形性を定量評価する手法の提案を行う．

## 2. 実験方法

### 2・1 動的液圧バルジ試験の概要

本研究で提案する衝撃水圧法を応用した動的液圧バルジ試験の概要を図 1 示す．実験手順は以下の通りである．

- ①貯気槽に高压空気を充填する．
- ②貯気槽内圧力が所定の圧力（打ち出し圧力）に達した後，電磁弁を開放し高压空気を装填室に送る．
- ③高压空気によって，装填室に設置した弾丸が走行管内に発射される．
- ④発射された弾丸は走行管内を通り，水圧室内の水を打撃し，圧力波（衝撃波）が発生する．

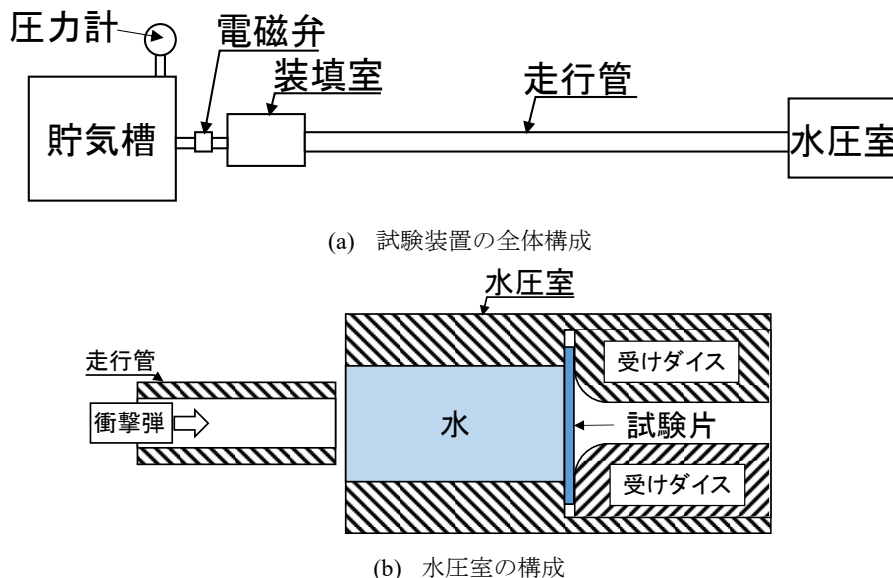
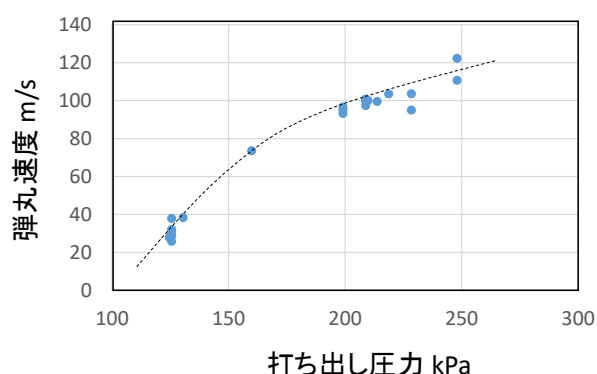
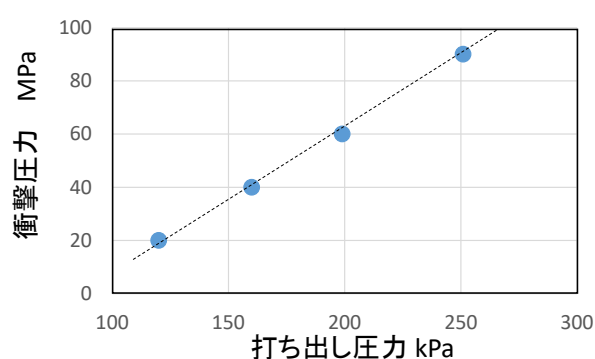


図 1 衝撃水圧法を用いた動的液圧バルジ試験の試験装置概要



(a) 打ち出し圧力と弾丸速度の関係



(b) 打ち出し圧力と衝撃圧力の関係

図2 衝撃水圧法における打ち出し圧力と弾丸速度, 衝撃圧力ピーク値の関係<sup>2)</sup>.

⑤水圧室内には, 図 1(b)に示すように水と試験片, 受けダイスを配置する. 発生した衝撃波が液圧バルジ試験における液圧の役割を果たし, 試験片は張出変形が生じる.

なお, これまでの研究によって, 打ち出し圧力によって弾丸速度や衝撃圧力のピーク値をコントロールできることが明らかとなっている. 図2は, これまでの研究で得られた打ち出し圧力と弾丸速度, 衝撃圧力ピーク値の関係<sup>2)</sup>である.

## 2・2 動的液圧バルジ試験によるマグネシウム合金の張出特性評価

動的液圧バルジ試験をマグネシウム合金板の張出成形評価に適用した. 材料は市販の AZ31 合金板(厚さ 0.6 mm)であり, この板材から直径 30 mm, 厚さ 0.6 mm の円盤状試験片は, ワイヤ放電加工を用いて作製した. さらに, 円盤状試験片に対して電気炉での焼なまし処理を施した. 焼なまし条件は, 大気中, 500℃で1時間保持とした. 動的液圧バルジ試験条件として, 走行管長さ 3780 mm, 水圧室内径 27 mm, 水圧室深 103 mm, 弾丸材質はナイロン樹脂で弾丸直径 27 mm, 弾丸長さ 83 mm, 打ち出し圧力 120 kPa,

室温での試験実施とした. なお, この実験条件における弾丸速度は, 40 m/s 程度と推定している.

本研究では, 張出特性として張出成形の程度と張出高さ(バルジ高さ)を調べた. さらに, 本研究で得られた動ひずみ速度下での張出特性を, 先行研究事例(準静的ひずみ速度下での張出特性)と比較し, マグネシウム合金の冷間加工について検討した.

## 2・3 金属板の高速変形挙動観察とひずみ速度の推定

動的液圧バルジ試験において, 高速で変形する試験片の変形挙動を調べるために, 光学的手法の適用を試みた. 具体的には, 図3に示すように, 試験片後方にレーザー変位計を設置し, 張出変形挙動を連続的に観察する. これにより, 張出変形の様子, 変形開始から終了までに要する時間, 試験片におけるひずみ分布やひずみ速度を調査する.

本研究では, レーザー変位計として, keyence LJ-V7080を使用した. 測定範囲は  $y$  軸方向 32 mm,  $z$  軸方向  $80 \pm 23$  mm である. サンプルング速度を  $62.5 \mu\text{sec}$  とした.

本研究では, レーザー変位計を用いて測定した試験片のプロファイルデータから曲率  $R$  と曲げひずみ  $\varepsilon$  を求めた.

図3において, 測定した試験片のプロファイルから近似関数  $f(y)$  を求め, 次式より曲率半径を求めた.

$$R = \frac{(1 + f'(y)^2)^{3/2}}{|f''(y)|} \quad (1)$$

また, 曲げひずみを次式より求めた.

$$\varepsilon = \frac{h/2}{R} \quad (2)$$

なお,  $h$  は試験片厚さ(0.6 mm)である.

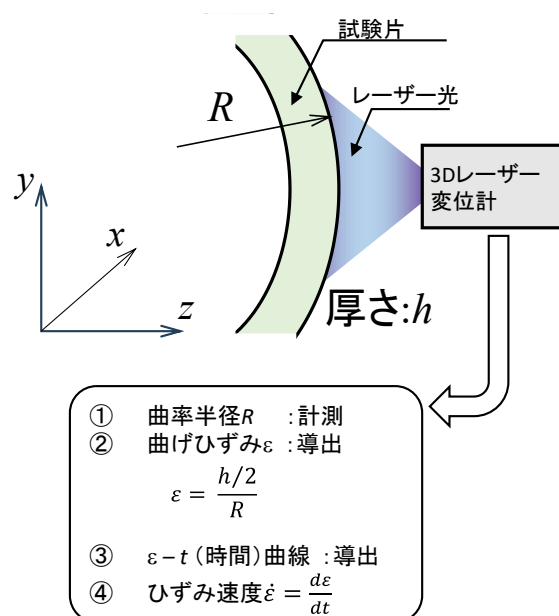
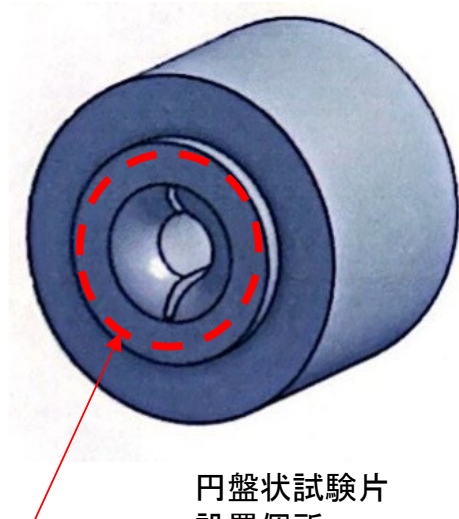


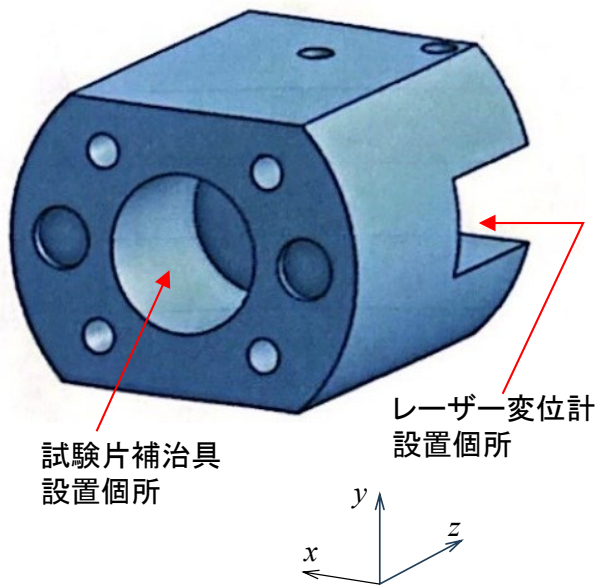
図3 レーザー変位計を用いた試験片の変形挙動の観察

次に、本研究で設計、作製した水圧室、試験片補治具の概形と主要寸法を説明する。図4は、試験片補治具および水圧室の概形である。水圧室内に試験片補治具を設置し、その後方にレーザー変位計を設置する。張出成形が生じる試験片中央部にライン上にレーザー光が照射される構造になっている。次に、図5は試験片補治具の主要寸法である。図5(a)に示すように、衝撃水圧が作用する穴径は15 mmとした。また、図5(b)に示すように試験片受けダイスには直径30 mmの貫通穴とR8のR面取りを施した。また、水圧室の主要部寸法を図6に示す。



円盤状試験片  
設置箇所

(a) 試験片補治具（受けダイス）の概形

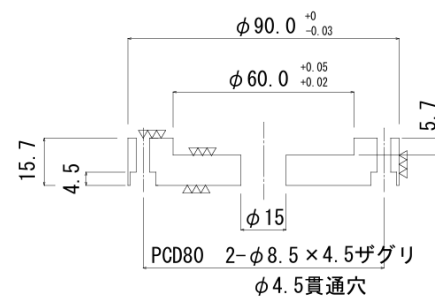
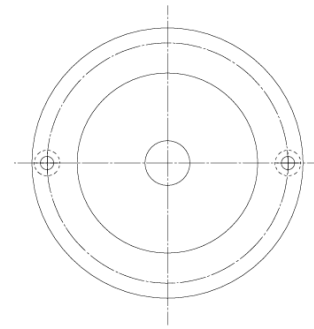


レーザー変位計  
設置箇所

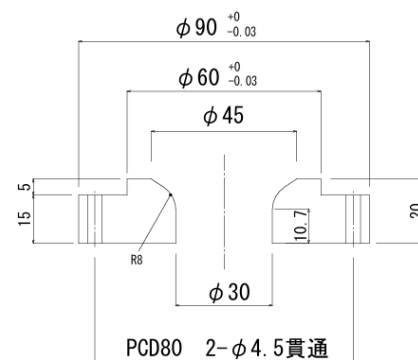
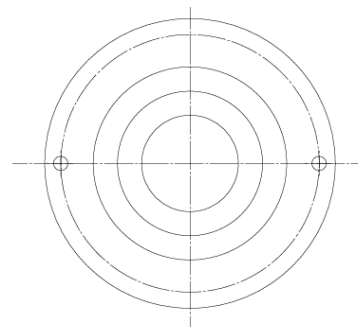
試験片補治具  
設置箇所

(b) 水圧室の概形

図4 設計、作製した試験片補治具と水圧室の概形



(a) 試験片抑え部



(b) 試験片受けダイス

図5 試験片補治具の主要部寸法

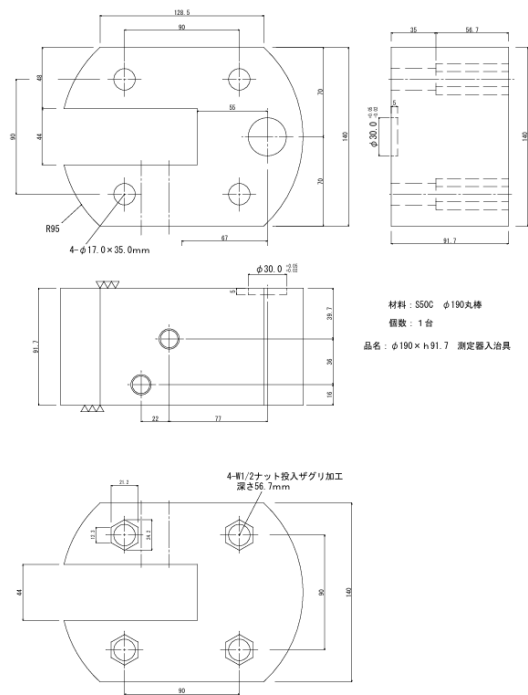


図6 水圧室の主要部（レーザー変位計設置部）寸法

### 3. 実験結果

#### 3・1 動的液圧バルジ試験によるマグネシウム合金の張出成形性

動的液圧バルジ試験によって AZ31 合金板（円盤状試験片）の張出成形性を調べた。図7は、AZ31 合金試験片の試験片後の変形の様子である。張出高さ（バルジ高さ） $h_B$  = 3.1 mm, 試験片直径  $D$  との比  $h_B/D = 0.14$  という結果が得られた。ここでは、 $h_B/D$  値に注目して、動的液圧バルジ試験と一般的な液圧バルジ試験の変形挙動の相違を調べた。図8は、 $h_B/D$  値に関する文献値との比較である。文献値の  $h_B/D$  値は一般的な液圧バルジ試験による値であり、室温では張出成形ができないこと、試験温度が高いほど  $h_B/D$  値が上昇することを示している。本実験で得られた動的液圧バルジ試験（室温）での  $h_B/D$  値は、200℃下の液圧バルジ試験で得られた  $h_B/D$  値と同程度であることが分かった。この結果は極めて重要であり、衝撃水圧成型技術の適用による、AZ31 合金の冷間塑性変形能向上あるいは冷間プレス成型の実現を示唆するものである。

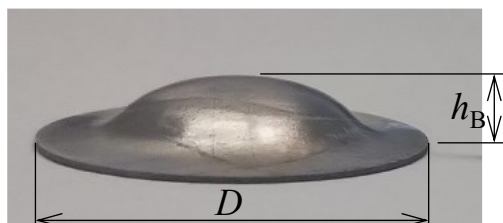


図7 動的液圧バルジ試験による Mg 合金の変形

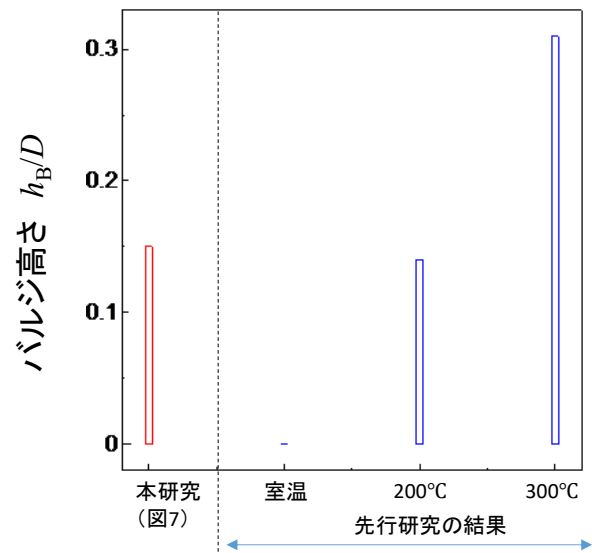
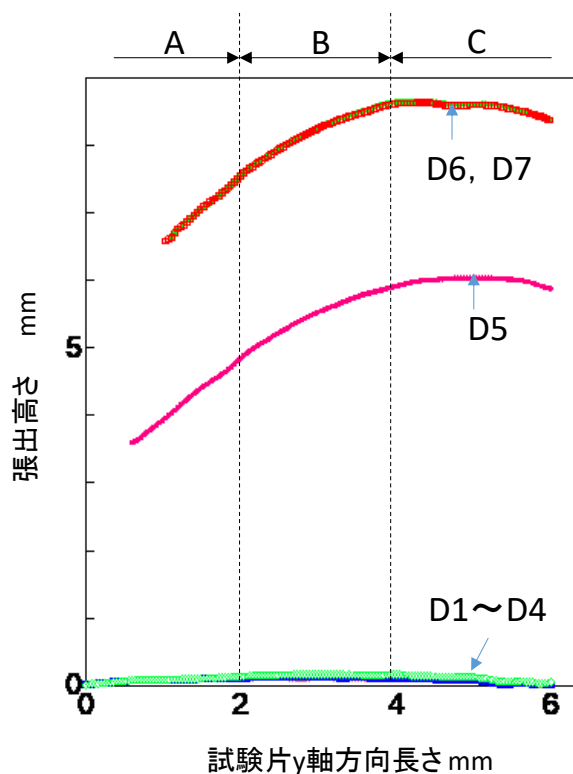


図8  $h_B/D$  値に関する先行研究<sup>1)</sup>（液圧バルジ試験）との比較

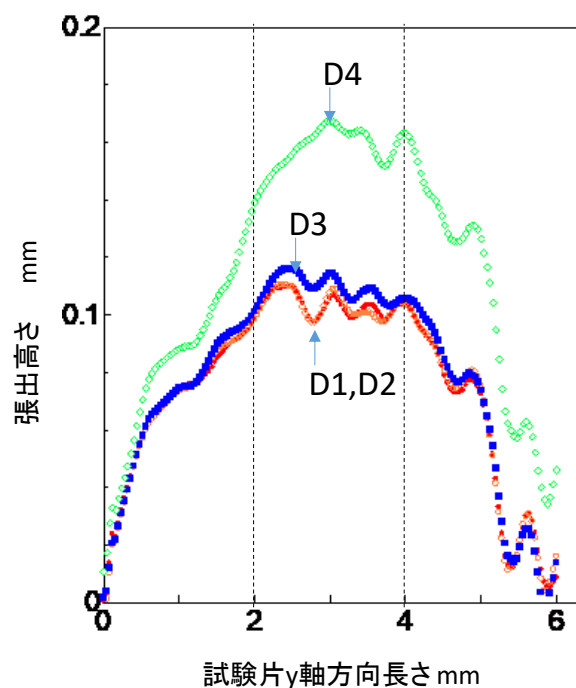
#### 3・2 金属板の高速変形挙動観察とひずみ速度の推定

動的液圧バルジ試験における試験片の変形挙動は、レーザー変位計を用いて観察した。図9(a)は、サンプリング間隔 62.5  $\mu\text{sec}$  での試験片の張出変形挙動であり、サンプリングデータ D1（測定開始、0  $\mu\text{sec}$ ）から D7(375  $\mu\text{sec}$ )までの測定結果を示している。また図9(b)に、D1 から D4 における試験片の変形挙動を拡大表示した。図9より、D1～D3 にかけては試験片の張出変形は生じておらず、D3～D6 にかけて張出変形が進行・終了することが分かる。したがって、本実験での張出変形時間間隔は 187.5  $\mu\text{sec}$  程度であることが分かった。また D6 以降の測定データは一致していることから、変形終了後のスプリングバックは、ほとんど生じていないことが分かった。

次に、試験片のひずみ分布を調べた。具体的には、図9に示す A から C の3区間に分け、それぞれの区間の測定データから試験片の曲率半径および曲げひずみを測定した。図10に変形時間と曲げひずみの関係を示す。変形初期(D3, 187.5 $\mu\text{sec}$ )においては、頂点付近である C 部の曲げひずみが最も大きい。変形中期(D4, 250  $\mu\text{sec}$ )においては、頂点の周辺領域である B 部が最も大きな曲げひずみを示すことが分かった。さらに変形後期においては、いずれの領域においても、曲げひずみが減少する傾向がみられた。これらの曲げひずみ挙動から曲げひずみ速度を算出した結果、曲げひずみ速度は最大で  $5 \times 10^3/\text{s}$  程度であり、動的ひずみ速度域に達していることが明らかとなった。



(a) 時間 0 $\mu$ sec (D1)から時間 437.5  $\mu$ sec (D7)までの変形挙動



(b) 時間 0 $\mu$ sec (D1) から時間 250  $\mu$ sec (D4)までの変形挙動

図9 動的液圧パルジ試験における試験片の張出変形挙動観察結果

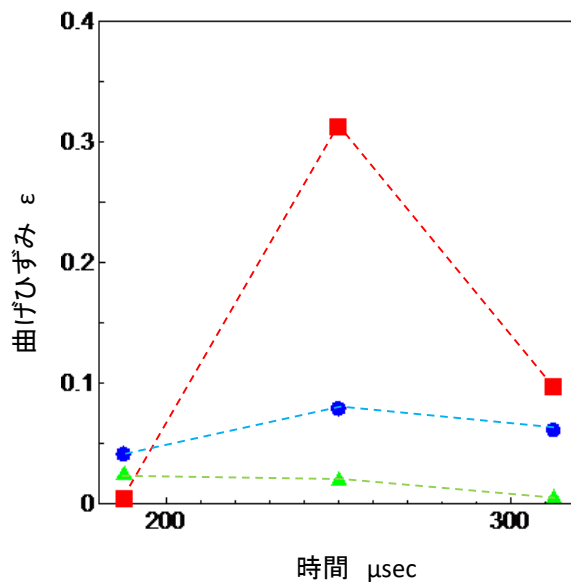


図10 曲げひずみの経時変化

#### 4. まとめ

本研究では、Mg 合金に適用可能な新しい冷間塑性加工プロセスを構築および高速変形する金属板の張出成形性を評価する手法の提案を行った。得られた結果として、衝撃水圧法を適用することで、汎用 Mg 合金板材の冷間プレス成型の可能性が示された。また、同手法での冷間張出成形ではスプリングバックが生じないことが分かった。さらに、提案した動的液圧パルジ試験によって、ひずみ速度  $10^3/s$  程度の高ひずみ速度域での金属板の変形挙動の観察ができることが分かった。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2021027-B3)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) 西村 尚・長谷川収・小磯 宣久・松本幸司: 軽金属, 53-7 (2003), 302-308.
- 2) 徳永仁夫: 天田財団 助成研究成果報告書, 33 (2020).