

# 衝撃水圧を用いた高ひずみ速度域におけるマグネシウム合金の塑性に関する研究

鹿児島工業高等専門学校 機械工学科

准教授 徳永 仁夫

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017026)

キーワード：水中衝撃波，マグネシウム合金，高ひずみ速度

## 1. 研究の目的と背景

マグネシウム (以下, Mg) 合金は, 実用金属中最軽量で, 比強度やリサイクル性に優れ, 電磁波シールド性, 振動吸収性など優れた機能を有する<sup>1)~4)</sup>. 一方で, Mg 合金の課題はその塑性加工性にある<sup>5),6)</sup>. すなわち, Mg は冷間加工が困難で製造コストが依然として高い. 切削加工は, 歩留まりが悪く本質的な製造コストの低減にはつながらないため, 生産性向上や製造コスト低減を実現するには塑性加工に関する知見の集積と Mg 合金に適した加工プロセスの構築が必須である. また, これまでの Mg 合金の塑性に関する研究は, 低ひずみ速度域の評価にとどまっており, 高ひずみ速度域の塑性に関する知見は未だ不明な点が多い. さらに, 高ひずみ速度域での Mg 合金の塑性の評価に適した実験手法は確立されていない<sup>7)</sup>.

本研究では上記を解決する可能性を有する手法として, 極めて短時間に大きなエネルギーを素材に与え, 高ひずみ速度で塑性加工を施す“高エネルギー速度加工<sup>8)~10)</sup>”に着目する. さらに, 高エネルギー速度加工の中でも高压液体利用する“空気圧により発生させた水中衝撃波による衝撃水圧成形法<sup>11)12)</sup>”を Mg 合金の塑性加工に適用する. この手法は, 火薬や大電流など危険を包含する要素を使用せず, 機械的に生じさせた高水圧を金属ポンチの代わりとしてプレス成形などを行う手法であり, 通常のプレス成形では加工困難な形状, 材質の部品を簡易, 安全, クリーン, 低コストに生産できる.

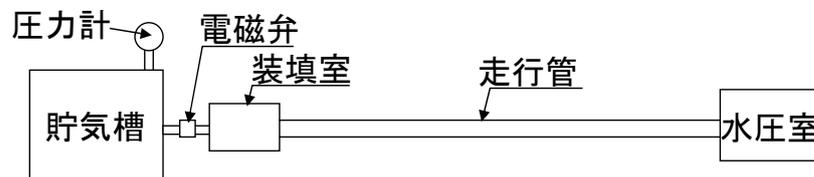
本研究の目的は, 高ひずみ速度域での Mg 合金の塑性加工性を詳細・定量的に分析する実験手法を構築し, Mg 合金を対象とした新しい塑性加工技術を提案することであり, 基礎的知見を集積する. 具体的には, 空気圧による水中衝撃波の強度制御法確立および衝撃水圧成形法による Mg 合金の高ひずみ速度域での塑性加工の可能性の検討に取り組む.

## 2. 実験方法

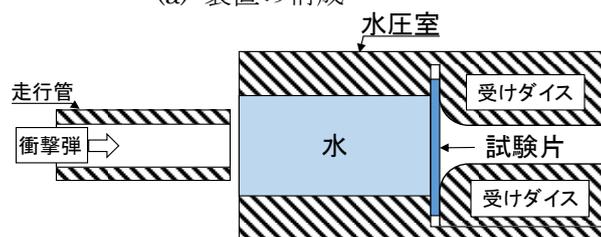
### 2・1 実験装置の概要

本研究で使用する衝撃水圧装置の概要を図 1 に示す. 深絞り加工を例とした衝撃水圧成形の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.
- 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. 発生した衝撃波が深絞り加工におけるポンチの役割を果し, 塑性加工を施す.



(a) 装置の構成



(b) 水圧室の構成

図 1 実験装置概要

## 2・2 水中衝撃波強度の測定

弾丸速度（入力エネルギー）および発生する水中衝撃波ピーク圧力に及ぼす打ち出し圧力の影響を調べた。弾丸速度を測定するために、図2に示すように走行管に発光素子（赤色発光ダイオード）と受光素子（TPS601A(F)）を配置する。弾丸が通過する間、受光素子は光を検出しないため、この弾丸過時間をオシロスコープで測定する。弾丸長さ  $l_p$  を通過時間で除すことで、水圧室に突入する直前の弾丸速度を求める。また、水中衝撃波ピーク圧力を測定するために圧力測定フィルム（富士フィルム、HS-PS, MS-PS）を用いた。図2に示すように水圧室端面に圧力測定フィルムを設置する。実験装置の仕様として、走行管長さ  $l_1 = 3780$  [mm]、水圧室内径  $\phi_1 = 27$  [mm]、水圧室深さ  $l_2 = 103$  [mm]、弾丸材質はナイロン樹脂で弾丸直径  $\phi_p = 27$  [mm]、弾丸長さ  $l_p = 83$  [mm]とした。打ち出し圧力を  $120 \sim 250$  [kPa]の範囲に設定し、弾丸速度と衝撃波ピーク圧力の測定を行った。

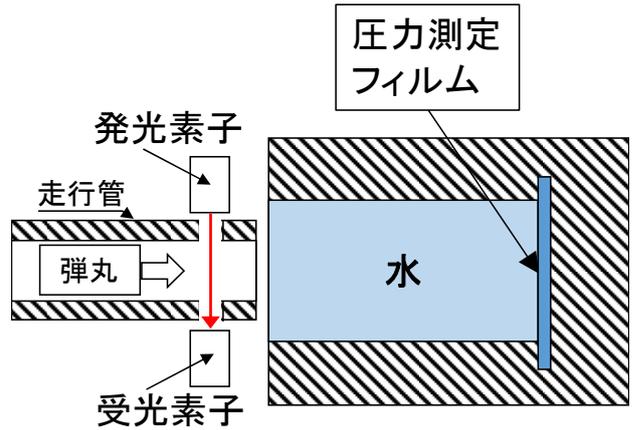


図2 弾丸速度と衝撃波ピーク圧力の測定

## 2・3 衝撃水圧成形法による Mg 合金の塑性加工

Mg 合金の成形加工実験を行った。供試材として市販の AZ31 合金を用いた。この材料から直径 30 [mm]、厚さ 0.6 [mm]の円盤試験片をワイヤ放電加工により作製した。さらに、一部の試験片に対しては、焼なまし処理 (500 [°C] で 1 [hour] 加熱保持後に炉冷) を施した。ここでは、焼なましを施さない試験片を未処理材、施した試験片を焼なまし材と称する。未処理材、焼なまし材それぞれの試験片を、図 1(b)に示す水圧室に設置し成形加工実験を行った。打ち出し圧力は  $120 \sim 250$  [kPa]の範囲に設定し、衝撃水圧成形による Mg 合金の冷間塑性加工の可能性について検討を行った。

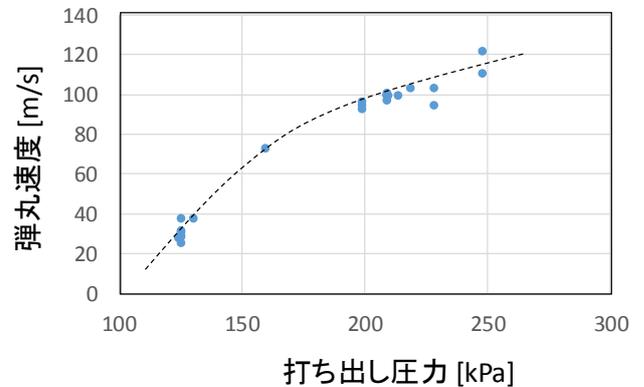


図3 弾丸速度と打ち出し圧力の関係

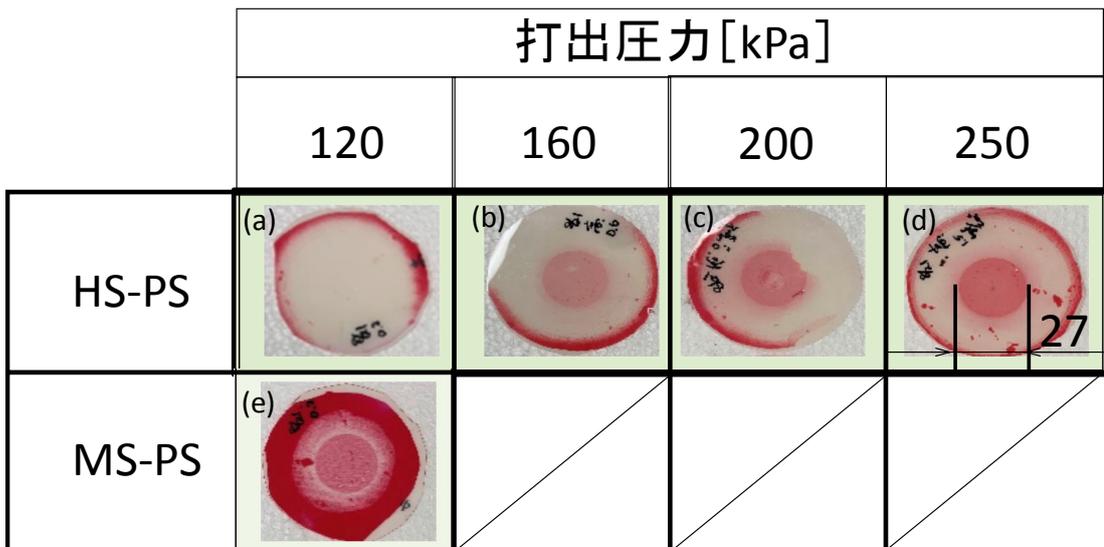


図4 圧力測定フィルムによる衝撃波ピーク圧力の測定

### 3. 実験結果

#### 3・1 水中衝撃波強度と打ち出し圧力の関係

弾丸速度の測定結果を図3に示す。弾丸速度は、打ち出し圧力とともに増加していることが確認された。また、図4は圧力測定フィルムを用いた衝撃波ピーク圧力測定結果である。図4(b)~(e)の圧力測定フィルム中心部の発色部(直径 27[mm])は、衝撃波が作用した痕跡であり発色濃度からピーク圧力を推定することができる。推定したピーク圧を図5に示しており、ピーク圧力が打ち出し圧力の増加に伴い増加していることが分かった。以上に述べたように、本実験によって、打ち出し圧力によって弾丸速度と発生する衝撃波ピーク圧力を制御できることを確認した。

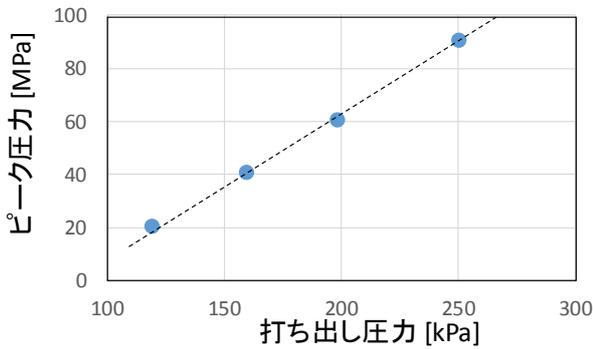


図5 ピーク圧力と打ち出し圧力の関係

#### 3・2 衝撃水圧成形法による Mg 合金の塑性加工

衝撃水圧成形法を AZ31 合金の塑性加工に適用した。加工後の AZ31 合金を図6に示す。まず図6より、AZ31 合金の変形形状は、中央部が張り出した曲線状の形状であり、巨視的にはほぼ左右対称であることが分かる。この傾向は、未処理材、焼なまし材いずれも同様であった。また、未処理材では、打ち出し圧力 120[kPa]の条件では試験片の破壊が生じていないが、打ち出し圧力が 130[kPa]を超えると試験片が破壊する。一方で、焼なまし材では打ち出し圧力 130[kPa]の条件でも試験片の破壊は生じていない。さらに、加工深さを比較すると、打ち出し圧力 120[kPa]の条件において、未処理材では 2.4[mm]、焼なまし材では 3.1[mm]と焼きなまし材のほうが大きな値を示す。さらに、焼きなまし材においては、打ち出し圧力の増加によって加工深さが増加する。以上の傾向から、打ち出し圧力によって AZ31 合金の塑性加工の程度が変化することが確認された。また、衝撃水圧成形を AZ31 合金に適用する場合、焼きなまし塑性変形能の向上に寄与することが分かった。一方で、打ち出し圧力が 140[kPa]に達すると、いずれの試験片でも破壊が生じており、本実験での加工限度を超えていることが分かる。

| 打出圧力    | 未処理材       | 焼なまし材      |
|---------|------------|------------|
| 120 kPa | <br>2.4 mm | <br>3.1 mm |
| 130 kPa |            | <br>4.6 mm |
| 140 kPa |            |            |

図6 衝撃水圧成形による AZ31 合金の塑性加工

次に、加工後の AZ31 合金の板厚変化率とビッカース硬度を調べた。具体的には、エポキシ樹脂に埋め込んだ試験片を中央部で切断し、図 7(a) に示す測定点 9 カ所 (1~9) について試験片断面の板厚を測定した。また、図 7(b) に示す測定点 5 か所 (a~e) についてビッカース硬度を測定した。まず、板厚変化率については、図 8 に示すように未処理材、焼なまし材いずれにおいても板厚が減少することが分かった。この結果は、塑性変形の過程で試験片には主として引張力が作用していることを示している。したがって、本研究で実施した衝撃水圧成形を AZ31 合金に適用した場合、自由張り出し成形が成されることがわかった。また、ビッカース硬度は図 9 に示すように、未処理材、焼なまし材いずれも加工前硬度 (HV55 程度) よりも高硬度であることが分かった。硬度上昇の主因は塑性変形による加工硬化であると考えられる。

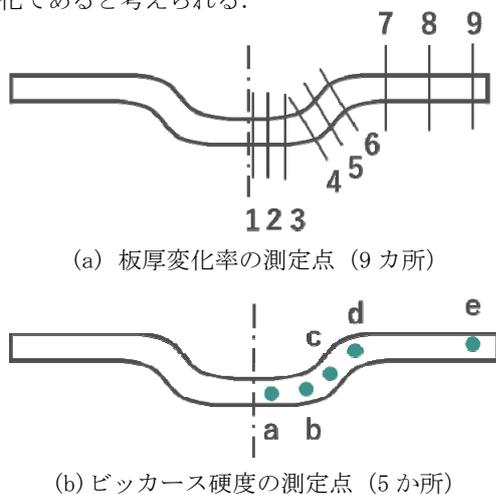


図 7 板厚変化率とビッカース硬度の測定

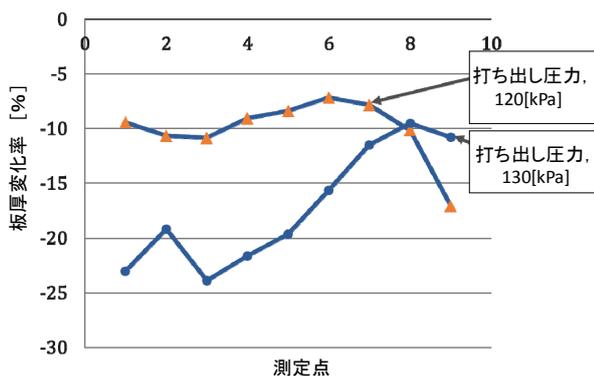


図 8 AZ31 合金 (焼なまし材) の板厚変化率

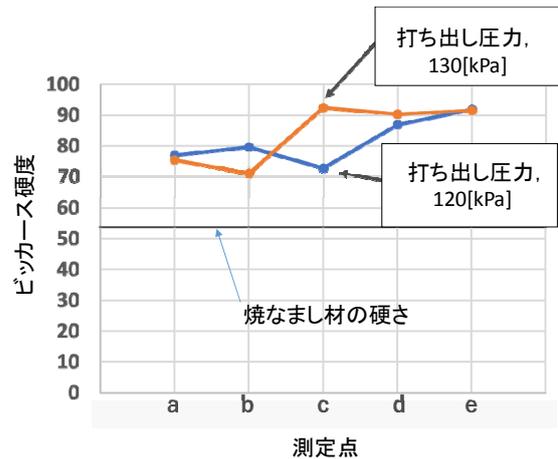


図 9 AZ31 合金 (焼なまし材) のビッカース硬度

#### 4. まとめ

本研究では、高ひずみ速度域での Mg 合金を対象とした新しい塑性加工技術を提案するための基礎的知見の集積に取り組んだ。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 空気圧 (打ち出し圧力) により、水中衝撃波強度ピーク圧力を制御できることを確認した。また、打ち出し圧力 120~250 [kPa] の範囲では、打ち出し圧力とピーク圧力は線形関係にあることが分かった。

(2) 衝撃水圧成形法で AZ31 合金の自由張り出し成形加工が可能である。

#### 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-2017026) 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) 相田収平・田辺寛・須貝裕之・高野格・大貫秀樹・小林勝：軽金属, 50-9 (2000), 456
- 2) 真鍋健一・下村修：軽金属, 56-10 (2006), 521
- 3) 高津正秀：軽金属, 54-11 (2004), 493
- 4) 金子純一・菅又信・沼政弘・西川泰久・高田秀男：日本金属学会誌, 64-2 (2000), 141
- 5) 森謙一郎・辻浩和：塑性と加工, 48-552 (2007), 41
- 6) 大年和徳・永山知史・勝田基嗣：軽金属, 53-6 (2003), 239
- 7) 長谷貴之・川智明・池尾直子・向井敏二：軽金属, 66-5 (2016), 258
- 8) 高松正誠：高圧力, 9-6 (1971), 29.
- 9) 西山卯二郎・井上卓・田中示：精密機械, XX XI, 11 (1960), 669
- 10) 西山卯二郎・井上卓・田中示：精密機械, 27-4 (1960), 199
- 11) 高松正誠：圧力技術, 13-1 (1975), 21
- 12) 山田敏郎・可児弘毅：日本複合材料学会誌, 4-3 (1987), 93