



K. Hatsukano

# 多軸プレスによるマグネシウム合金の成型加工

初鹿野 寛一\*

## 1. はじめに

マグネシウム合金は構造用金属のなかで一番軽い金属であり、比強度、形状性、電磁気遮蔽性、リサイクル性などの特性が良い。ふつう、マグネシウム金属の製品はほとんどダイカストで製作されている。鍛造したマグネシウム合金はダイカストしたマグネシウム合金と比べて機械的特性及び溶接性などが優れ、大きな構造用材料等に大いに適すると思われる。鍛造塑性変形を利用してマグネシウム合金をニアネットシェイプ成形すれば材料歩留まりは高く、製造業における環境負荷の低減に寄与し、ひいては製品と関連するエコマテリアルとしての価値を高めると期待できる。マグネシウムの高強度化ならび表面性状の改善および加工精度を向上させるために低温でのネットシェイプ成形技術を確認する必要がある。それに伴いマグネシウム合金の応用範囲の拡大が期待できる。しかし、塑性加工において鍛造を利用したマグネシウムの加工に関する研究は少ない。

本研究では、マグネシウム部材のネットシェイプ成形を行なうことを目的とし、多軸プレスを用いて展伸用マグネシウム合金の加工を行い、十字形の部品を成形して、健全な成形を行なうための加工温度、速度および背圧の影響を調べた。

## 2. 実験方法

### 2.1 据込み試験

実験に使用したマグネシウム合金は市販品のマグネシウム合金 AZ61 で、その化学成分を表 1 に示す。この AZ61 は温度 355℃ で、直径 28mm と 16mm に押し出し加工された丸棒である。直径 28mm の棒は旋盤で直径 16mm、高さ 24mm に、直径 16mm の棒は高さだけを 16mm に加工して試験片とした。据込み試験は無拘束、無潤滑で行った。室温において、正確な変位を計測するため、レーザー変位計と 1/1000 mm まで計測できるデジタル変位計を併用した。また、温度を室温から 300℃ まで変えて、歪が 0.5 になるまで据込み、変形性を調べた。

表 1 マグネシウム合金 (AZ61) の化学成分

Item	Mg	Al	Zn	Si	Cu
AZ61	Bal.	6.0	0.8	0.1	0.05

### 2.2 多軸材料試験機

マグネシウム合金 AZ61 の鍛造性を調べるため、多軸材料試験機<sup>1)</sup>を用いて側方押し出しを行った。多軸材料試験機は、能力が 500 kN で、変位が ±125 mm である 4 基の水平動ラムと、能力が 2500 kN で、変位が 150 mm である上下動ラム 1 基からなる。

### 2.3 金型

図 1 に枝付き部品の金型を示す。左の金型は枝が 2 本で、その直径はピレットの直径と同じ 16mm である。右の金型は枝が 4 本で、直径は 8mm である。いずれも断面積の合計はピレットの断面積の合計と同じである。金型の材質は高速度鋼 (SKH51) で、硬さは 62HRC である。金型は多軸材料試験機の作業面中心に上下動ラムによってクランプされる。ピレットの加熱は上下金型の端面に直接取り付けられている 100V、300W の合計 8 個の板状のヒータにより金型を介して行われる。温度計測はアルメルクロメル熱電対温度計で行った。計測位置は上下金型の合わせ面上で金型中心から約 20mm の位置である。



図 1 枝付き部品用金型

### 2.4 多軸材料試験機による側方押し出し加工

温間側方押し出し加工に用いたピレットは直径 16mm で、長さ 50mm で、外径を加工したものと加工しないものの 2 種類を使用した。潤滑剤は二硫化モリブデンを用いた。

ピレットを金型の溝にセットしてから加工温度まで加熱し、2 本のパンチを使用して側方押し出し加工を行った。押し出し速度は 50mm/min である。

さらに、低い温度での加工を実現するため二つの加工法を試みた。一つは静水圧を高めるため、枝の直径を半分の 8mm した側方押し出し加工、もう一つは背圧を枝の端面に加えながら側方押し出しする方法である。この場合のピレットは直径を加工したものを使用した。

\* 産業技術総合研究所 テクニカルスタッフ

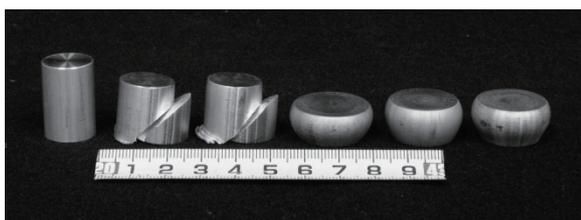
### 3. 結果及び考察

#### 3.1 据込み試験

図2に外径を加工したビレットと加工しないビレットの室温から高温での据込み試験結果を示す。図2の(a)では、室温から160℃まではせん断による割れが発生したが、170℃以上の温度では歪が0.5でも割れずに変形した。(b)では、室温から200℃までビレットはせん断による割れが生じて破壊した。210℃以上の温度になるとビレットは歪みが0.5以上でも割れずに変形した。(a)、(b)いずれも破壊しないビレットは上端が脹らんだマッシュルームのような形状の変形となった。この形状は温度が上昇して300℃になっても変わらず、本試験において、ビレットは樽形には成らなかった。



Billet Room 160 °C 170 °C 250 °C 300 °C  
(a) 外径を加工したビレット



Billet Room 200 °C 210 °C 250 °C 300 °C  
(b) 外径を加工しないビレット

図2 据込み試験結果

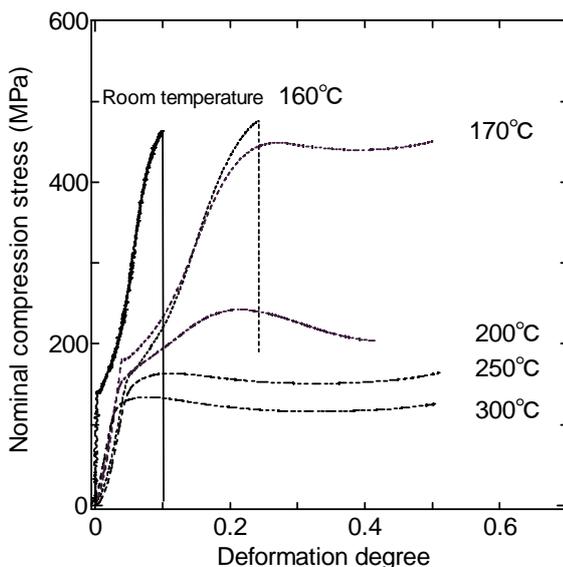


図3 応力-歪図

図3に温度を室温から300℃まで変化させた外径を加工したAZ61の応力-歪の関係を示す。歪速度は室温で

は0.4mm/minでそれ以外では0.5mm/minである。図において、室温の応力は始め急激に上昇し、169MPa付近で降伏してから再び上昇し、最大値の483MPaとなった。最大値到達後、割れが入り、応力は急激に減少して零となった。温度160℃でも割れが入ってビレットは破断したが破断時の歪みは0.25と室温の0.1に比べて大きい。温度170℃において、歪みが0.5以上になってもせん断による破断は起こらずに変形した。応力は最大値到達後、低下しビレットは軟化の傾向を示した。さらに歪みが大きくなると応力は再び上昇した。これは端面が張り出して大きくなり、これに伴って圧縮荷重が大きくなるが、応力計算は元の面積で割って計算しているためである。図示はしないが、外径を加工しないビレットの応力-歪図でも図3と同様な傾向を示し、室温から200℃までビレットはせん断により破壊し、210℃以上になるとビレットは歪が0.5以上になっても破壊せず変形した。また、ピーク後、軟化の傾向も見られた。

#### 3.2 温度の違いによる温間側方押し出し加工

図4に温度を変化させた場合の側方押し出し加工の結果を示す。この図において、(a)は外径を加工したビレットで、180℃の押し出し品は枝の両方に大きな3個の割れが見られる。200℃の押し出し品は枝の両方に1個の大きな割れが見られる。しかし、213℃では大きな割れは観察されず、割れない枝部品を押し出し加工することが出来た。従って200℃と213℃間に、割れを抑制するメタルフローが考えられる。(b)は外径を加工しないビレットで、230℃でも割れが生じているが270℃になると割れない枝付き部品ができた。マグネシウムの鍛造は225℃以上でなければ実現は困難であるという報告<sup>2)</sup>があるが、本研究では、外形を加工したビレットを用い、213℃で枝付き部品を押し出すことが出来た。



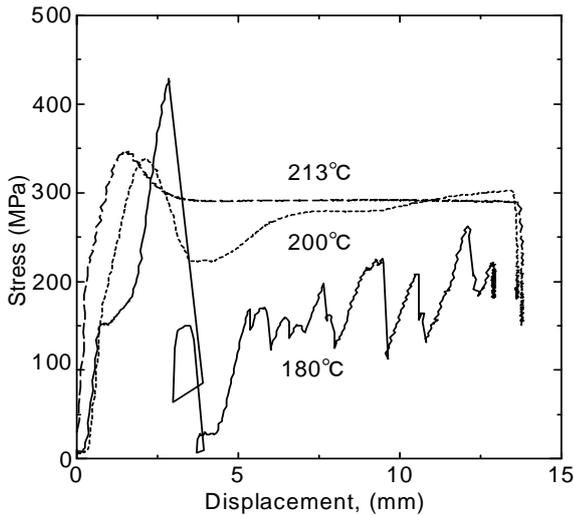
180 °C, 200 °C 213 °C  
(a) 外径を加工したビレット



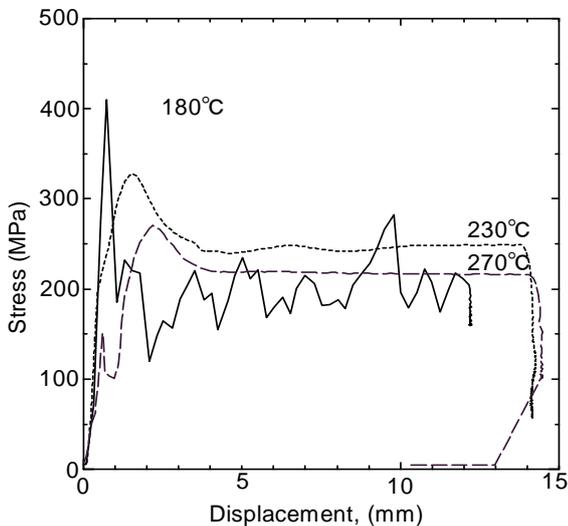
180 °C 230 °C 270 °C  
(b) 外径を加工しないビレット

図4 側方押し出し加工結果

図5に各温度における側方押し出し加工時の応力-変位図を示す。図の(a)において、180℃の押し出し応力は150MPa



(a) 外径を加工したビレット



(b) 外径を加工しないビレット

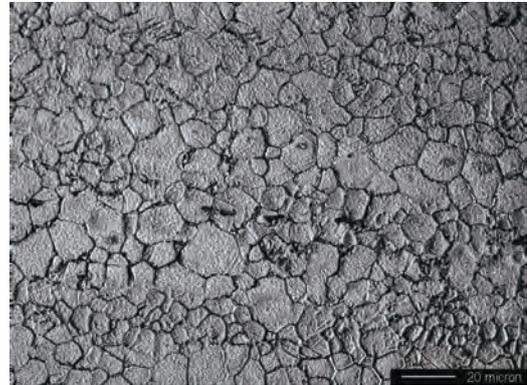
図5 側方押し出し加工時の応力-変位

まで急激に上昇し、息継ぎをしてから再び上昇して最大応力の 430MPa に達する。到達直後、材料内に割れが発生して応力は急激に0付近まで降下する。その後、再び上昇するが第二、第三の割れが発生するため応力曲線は振動する。200℃では、応力は明瞭な降伏点を示さず最大応力まで急激に上昇した後、割れのため、一旦減少するが、その後割れの進行がないので緩やかに上昇する。213℃では応力-変位曲線は最大応力まで 200℃のものと同様の傾向を示すが、割れの発生がないので、最大応力直後の急激な応力の減少はなく、押し出し終了まで約 288MPa の同じ応力となる。これは側方押し出しの特徴である側方向の材料流れが起こるとその後は大きな塑性の材料流れがないことによる。(b)においても温度は異なるが同じ傾向を示し、270℃では、最大応力 274MPa に達した後、230MPa まで荷重の低下があるが加工終了まで一定である。

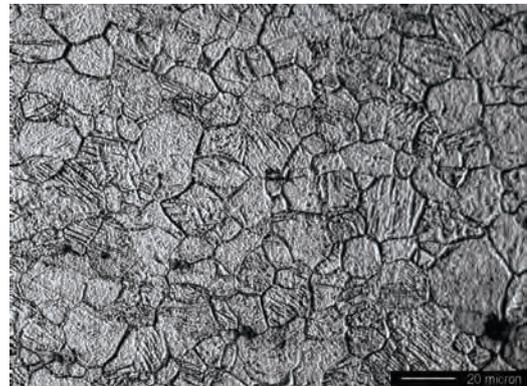
図6に光学顕微鏡による組織写真を示す。(a)において、結晶粒の大きさは  $10\mu\text{m}$  から  $20\mu\text{m}$  であるが、(b)では(a)に比べて結晶粒は大きく  $20\mu\text{m}$  程度であり、双晶も多く観察される。粒界すべりは大きい粒子より小さい粒子

で起こり易いため、外径を加工したビレットは外径を加工しないビレットよりも変形が容易と考えられる。

図7にX線解析結果を示す。解析はビレットの切断面で行った。いずれも 100 および 110 に大きなピークが見られる。これはC面が押し出し方向に平行に配向していることを意味する。また、配向度は外径を加工したビレットの方が外径を加工しないビレットよりやや大きい。

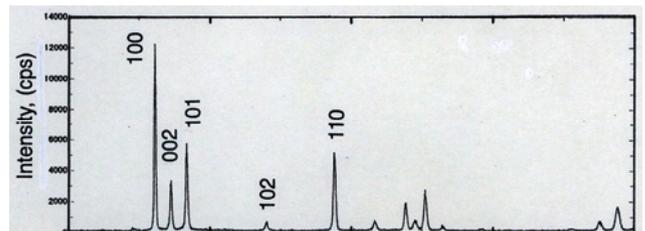


(a) 外径を加工したビレット

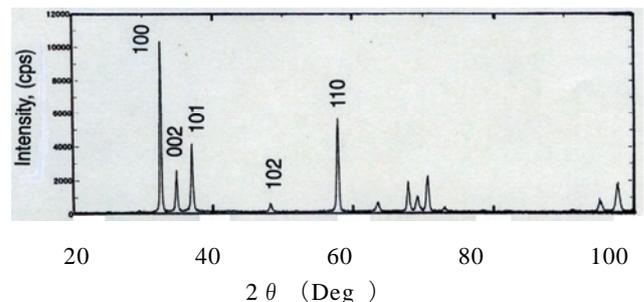


(b) 外径を加工しないビレット

図6 光学顕微鏡による組織写真



(a) 外径を加工したビレット



(b) 外径を加工しないビレット

図7 X線解析結果

### 3.3 ビレットの初期長さの違いによる側方押し加工

外径を加工したビレットの初期長さを 50mm と 60mm にし、加工温度を 213℃にして温間側方押し加工を行った。図 8 にビレットの初期長さの違いによる結果、図 9 に応力-変位の関係を示す。図 8 で示すようにいずれも割れのない製品である。図 9 において、点線の 213℃はビレットの長さが 10mm 長い 60mm のもので、50mm の 213℃とほぼ同じ傾向を示しているが値がわずか高くなっている。これはビレットの長いぶん摩擦力が大きくなるためである。



図 8 ビレットの長さの違いによる 2 枝部品

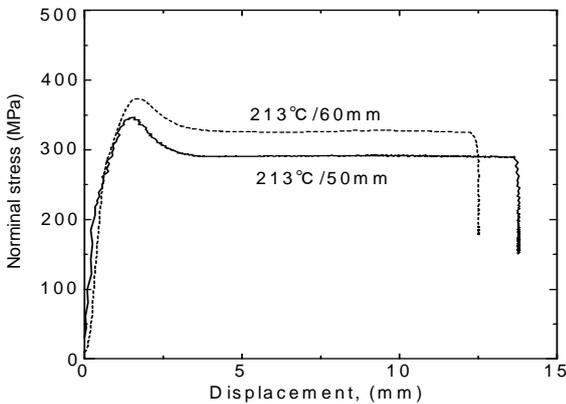
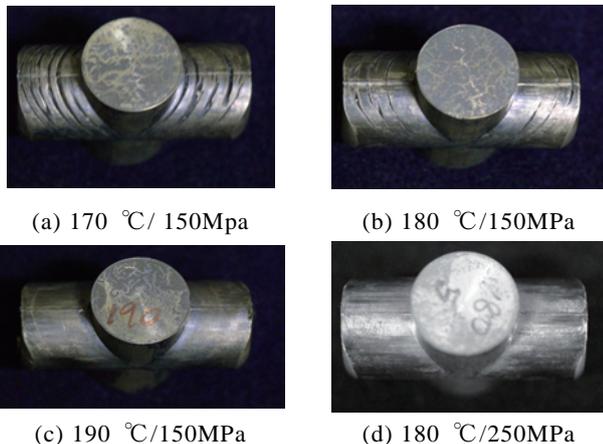


図 9 長さの違いによるビレットの応力-変位図

### 3.4 背圧付加による温間側方押し加工

図 10 に背圧を利用した枝部品を示す。背圧を 150MPa の一定にし、温度を 170℃、180℃、190℃に変化させて押し出しを行ったものと、さらに低い温度での加工を試みるため、背圧を 250MPa、加工温度を 180℃したものの結果である。(a) 170℃では枝に多くの割れによる深い傷が



(a) 170 °C/ 150MPa

(b) 180 °C/150MPa

(c) 190 °C/150MPa

(d) 180 °C/250MPa

図 10 温度変化による背圧付加の 2 枝部品

見られるが、(b) 180℃になると深い割れの数は少なくなり、その深さも浅くなる。(c) 190℃では、傷は見られなく、割れのない製品を得ることが出来た。背圧を 250MPa、温度を 180℃した(d)では枝に割れは観察されず、割れのない部品が加工された。

図 11 に温度変化による背圧付加の応力-変位を示す。図で上の 4 線は押し出し応力で、下の 4 線は背圧の応力である。背圧 150MPa の 170℃では、応力はピークに達した後、割れが発生して降下するが背圧が加わっているため、図 6 (a) の 180℃のように 0 近傍まで降下することはなく、550MPa 付近で止まり、再び上昇する。しかし、第二、第三の割れが発生するため、応力は減少と上昇を繰り返す。その振幅は変位の増加とともに減衰している。150MPa の 180℃では、ピーク直後、割れのため降下するが降下量は 170℃の約半分である。190℃ではピーク後、割れが観察されないがわずかに低下している。また、加工終了時まで振動も観察されるがその振幅は他のものと比較して小さい。この振動は背圧の応力が押し出し応力のピーク直後の変化に対応して変動する。この背圧の応力振動が押し出し応力の振動に影響しているものと考えられる。背圧を 100MPa 増加すると押し出し応力もほぼ 100MPa 上昇している。また、押し出し応力の振動振幅も 150MPa のもののほぼ半分に減少している。

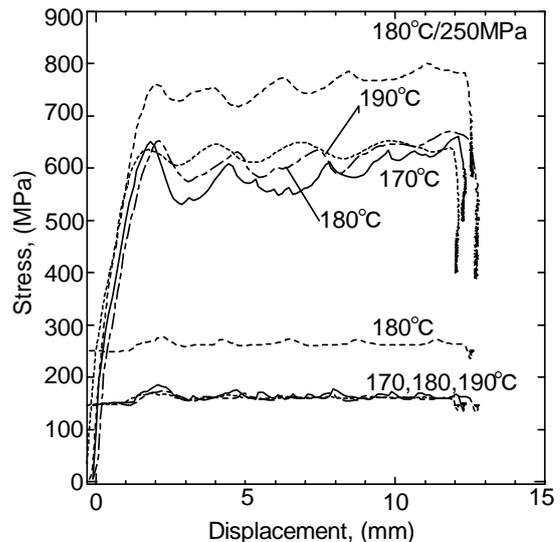


図 11 温度変化による背圧付加の応力-変位図

### 3.5 枝部品の温間側方押し加工

図 12 に、加工温度を 175℃の一定にし、押し込み速度を 5mm/min、10mm/min、50mm/min に変えて側方押し加工<sup>3), 4)</sup>を行った結果を示す。押し込み速度 10mm/min と 50mm/min は枝の先端に割れやくぼみが見られるが、5mm/min では、割れのない 4 枝の製品が得られた。



50mm/min 10mm/min 5mm/min

図 12 押し込み速度変化による 4 枝部品

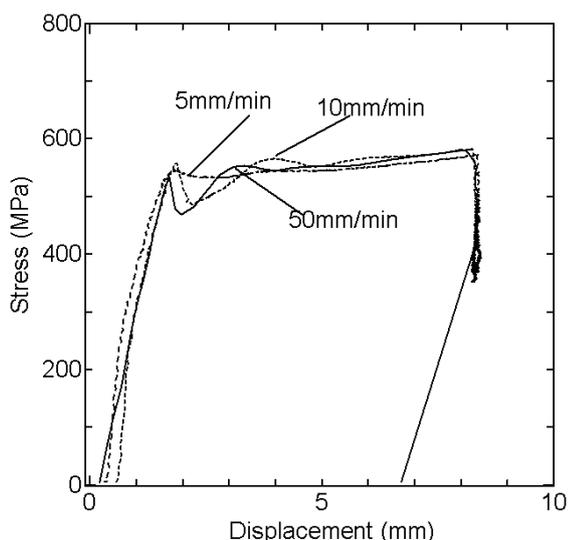


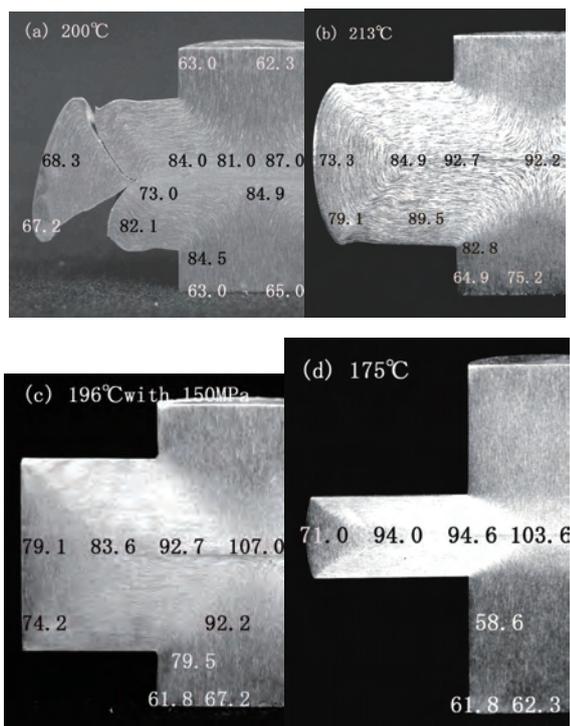
図 13 押込み速度変化による応力-変位図

図 13 にこの応力-変位図を示す。

図において、5mm/min のものは降伏後、応力の減少は見られないが、10mm/min 及び 50mm/min は割れのため急激な応力の低下が見られる。

### 3.6 ビッカース硬さ

図 14 に枝付部品の硬さ分布を示す (a)は 200°C の 2 枝部品、(b)213°C の 2 枝部品、(c)198°C の背圧付加の 2 枝部品、そして(d)は 175°C の 4 枝部品<sup>5)</sup>である。この図において、(a)の全体の硬さ分布は(b)のものより低い温度での加工であるが低い値となっている。これは(a)がせん断による割れが起るため、材料内の圧力が高められなかったのが原因と考えられる。枝の先端部は強加工でないため、幹の部分の硬さより僅かに小さい値である。幹中心部は上



(Unit: HV)

図 14 枝部品のビッカース硬さ

下から押され、左右に流出し難いので硬さが最も高くなっている。枝においては、強加工されている枝元が高い値であり、この根元から離れるにつれて値は低くなっている。(c)、(d)の値は(b)より加工温度は低い硬さ分布の値は高い値になっている。

## 4 まとめ

据込み試験により機械的特性を得た。この結果に基づきマグネシウム合金 AZ61 の温間側方押し出し加工を多軸材料試験機で行い次の結果が得られた。

- (1) 据込み試験において、室温での破壊は歪 0.1 でおこり、170°C 以上で、割れないものの流動応力は減少し、容易に歪 0.5 以上の変形が得られた。
- (2) 加工温度 213°C で、割れない枝部品を側方押し出し加工することが出来た。
- (3) 背圧を付加することで、加工温度を減少することが出来、150MPa では 190°C で、250MPa では 180°C で割れない 2 枝部品を側方押し出しすることが出来た。
- (4) 枝直径を 8mm にして、材料内の静水圧を高めることにより、加工温度を低減することができ、押し出し速度 5mm/min、温度 175°C で 4 枝部品を加工することが出来た。
- (5) 健全な製品を得るためには加工温度を高めるか材料内の静水圧を高めることが不可欠である。

## 謝辞

本研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成によることを付記し、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 篠崎吉太郎, 多ラム機械による冷間複動押し出し加工法の研究, 機械技術研究所報告 148 号, 1987
- 2) E. Doege and St. Janssen, Magnesium precision forming-experimental and numerical approach for magnesium near net-shape processing, P171.
- 3) 初鹿野, 松崎, 篠崎, 温間押し出し加工によるマグネシウム合金の枝付き部品の变形挙動, 平成 15 年度塑性加工春期講演会, P109, 2003
- 4) Hatsukano, Matsuzaki, Deformation Behavior and Forging of Magnesium wrought Alloy, International conference on processing & manufacturing of advanced materials, Part1, P557, 2003.
- 5) 初鹿野, 松崎, 清水, 篠崎, 背圧付加温間押し出し加工によるマグネシウム合金の枝付き部品成形の变形挙動, 第 54 回塑性加工連合講演会, P375, 2003