

# 難加工軽金属の多軸鍛造による組織制御と変形特性向上

熊本大学大学院 先端科学研究部  
教授 丸茂 康男  
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016020)

キーワード：軽金属，多軸鍛造，機械的特性，温熱間加工

## 1. 研究の目的と背景

近年，地球環境の維持のために二酸化炭素の排出削減やエネルギー消費の削減などが緊急の課題となっており，軽量材料としてアルミニウム合金，マグネシウム合金，チタン合金などの適用範囲が広がっている．一方，これらの成形加工においては課題も多く，これらの解決が求められている．アルミニウム合金の中では，Zn と Mg を含む 7000 系アルミニウム合金は高い強度を有する．このため，自動車，航空機，船舶などの輸送機械製造業では，構造材として利用が望まれている．しかしながら，この合金は室温での成形性は低く難加工材とされている．したがって高温域での成形が必要となる．7000 系アルミニウム合金の使用を拡大するためには，高温域での変形特性の把握が急がれるが，これらに関する報告は少ない<sup>1)~4)</sup>．また，マグネシウム合金も，冷間加工性が悪いいため，大きな変形を与えるためには温熱間域での加工が必要となり，高温での変形特性の把握が重要となる．このようなことを踏まえ，本研究では，アルミニウム合金とマグネシウム合金を対象として，これらの温熱間多軸鍛造試験を行い，課題解決に有用となる温熱間域における変形特性と機械的特性の基礎的知見を得ることを目的とする．

## 2. 多軸鍛造試験装置の設計製作

Fig. 1 に設計製作した多軸鍛造試験装置の概要図を示す．Fig. 2 には実験装置の近影を示す．試験装置主要部を万能試験機に組み込み多軸鍛造を行う．万能試験機への熱の放射を極力抑えるため水冷可能な流路を備えた冷却プレートを設置し，その上に断熱材 2 枚を重ねる．さらに，その上部に，カートリッジヒーターを内蔵した金型加熱用の加熱プレートを設置する．金型は位置決めプレートによって位置決めを行い固定する．金型の加熱温度は，温度制御ユニットによって所定温度に制御される．試験片は金型内ではほぼ均一に加熱されるので，所定温度での多軸鍛造試験が可能である．角柱ポンチ上部に熱を遮断するための水流路を設け，万能試験機上部への熱の流れを遮断するようにしている．試験片を Fig.1 の正方形横断面を有する試験片設置部に挿入し，角柱ポンチによって圧縮を行う．圧縮が終了するごとに試験片を取り出し試験片を 90 度回転し，再設置し圧縮を繰り返す．圧縮を行った際の荷重はクロスヘッドに取り付けられたロードセルによって計測し，圧縮ストロークはクロスヘッドの移動量として計測する．これらの計測値は専用のパーソナルコンピュータに取り込まれる．試験中の安全確保のため，装置前面および側面には

アクリルプレートを設置した．加工後の試験片は，専用ハンドプレスで金型から取り出す．

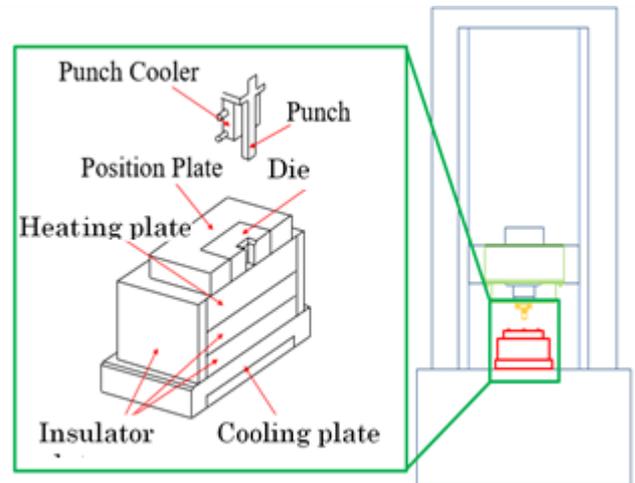


Fig. 1. Experimental setup

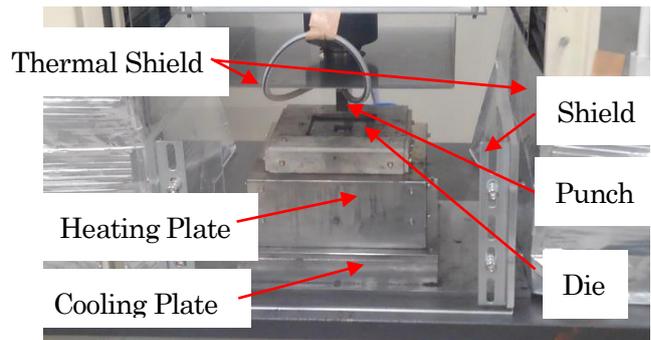


Fig. 2. Photograph of main part of setup

## 3. 端面拘束圧縮試験

多軸鍛造試験において使用する試験材料の機械的特性を調べるために端面拘束圧縮試験<sup>5), 6)</sup>を行った．試験片寸法は，直径 15mm，高さ 22.5mm とし，直径と高さの比が 2:3 になるようにした．試験片は，所定の温度の電気炉に 20 分間入れて加熱し，すぐに圧縮試験を行った．加工温度は 300°C，350°C，400°C，450°C の 4 つの温度で行い，ひずみ速度一定条件の下，試験片高さの 50% 圧縮である 11.25mm まで圧縮した．Fig. 3 に平均相当応力-平均相当ひずみ線図を示す．この線図をもとにして，各温度における等温変形抵抗曲線を求めた．

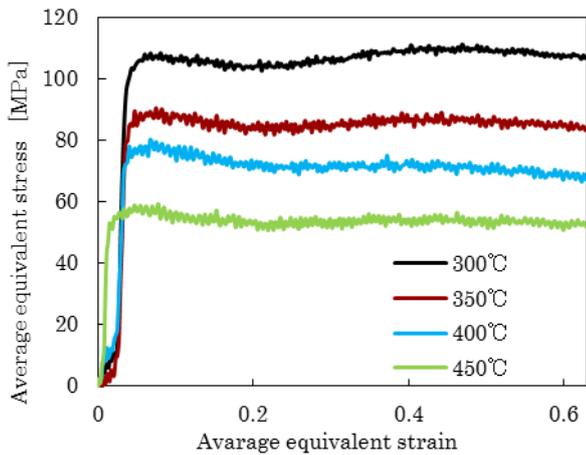


Fig. 3 Average equivalent stress – average equivalent strain relationships

#### 4. 数値シミュレーション解析

ここでは、多軸鍛造後の試験片の特性を評価する際に必要となる試験片のひずみ蓄積状態や加工中の試験片の温度履歴を調べる。加工温度を 300°C, 350°C, 400°C, 450°C と変更し、また、加工速度は 0.1mm/s, 0.5mm/s, 1.0mm/s と変更して、多軸鍛造の数値シミュレーション解析を Deform-3D を用いて行った。数値シミュレーションでは、各温度での材料の変形抵抗として、端面拘束圧縮試験で求めた等温変形抵抗曲線を用いた。解析では、直方体試験片に対して x, y, z 軸方向から順に圧縮を行う。Table 1 に解析条件を示す。

Table 1 Simulation conditions

Workpiece	A7075
Die material	SKD61
Temperature [°C]	300, 350, 400, 450
Punch velocity [mm/s]	0.1, 0.5, 1.0

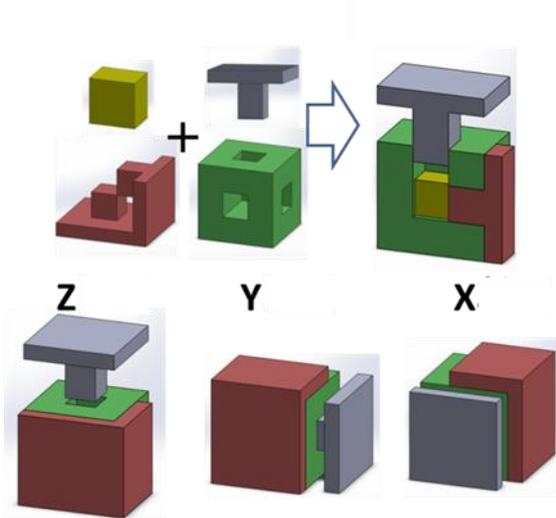


Fig. 4 Simulation model for multi-axial forging

Fig. 4 には、数値シミュレーションモデルと試験片の圧縮手順を示す。数値シミュレーションモデルでは 4 つの工具を製作し、試験片の圧縮毎にこれらを組み替えることで各方向からの圧縮を再現した。試験片寸法は、20mm×15mm×20mm の直方体の試験片とし、圧縮方向に 25% 圧縮した。

Fig. 5 に加工温度 300°C における、圧縮回数にともなう試験片の最大温度変化を示す。加工速度が上昇するにつれ試験片の温度が上昇している。加工速度 0.1mm/s 場合、5°C 程度の上昇で、1.0mm/s の場合は 30°C 程度の上昇である。Fig. 6 には、加工温度 400°C の場合の最高温度の変化を示す。加工速度 0.1mm/s 場合、3°C 程度の上昇で、1.0mm/s の場合は 15°C 程度の上昇である。加工後の試験片の特性を評価する際には、必要に応じてこれらの温度変化を考慮する。

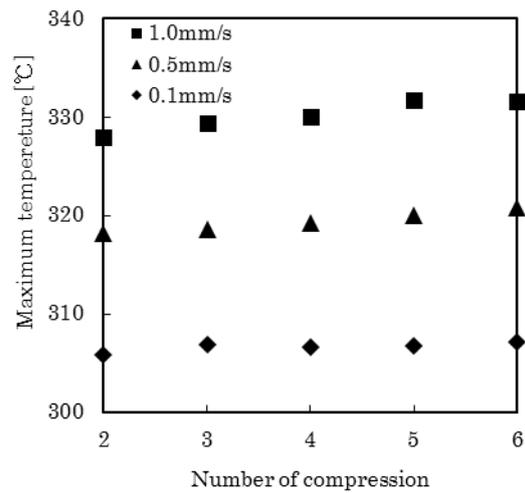


Fig. 5 Variation in maximum temperature with the number of compression (300°C)

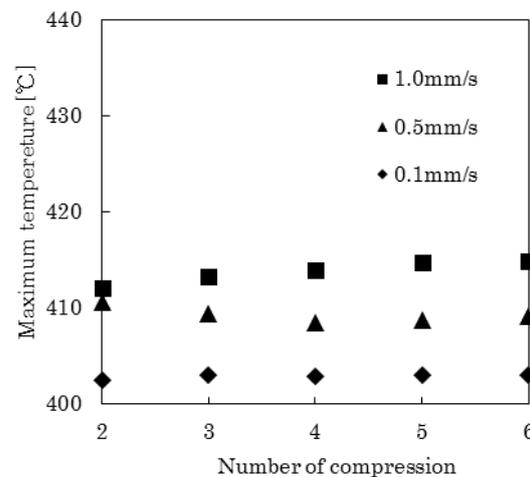


Fig. 6 Variation in maximum temperature with the number of compression (400°C)

次に、多軸鍛造後の試験片の相当ひずみ分布を調べた。Fig. 7 に、圧縮速度 0.1mm/s および 1mm/s の場合における試験片

断面の相当ひずみ分布を示す。この場合の加工温度は 300°C である。圧縮速度の違いにより材料流動にも違いが見られる。圧縮速度 0.1mm/s および 1mm/s の場合において、加工中の温度上昇が異なり、両者の間には最大温度で約 20°C の差が生じており、これが影響していると考えられる。加工後の試験片の特性を評価する際には、ひずみ分布の影響を考慮する必要がある。

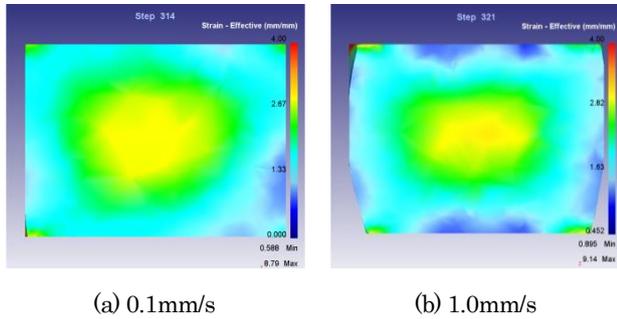


Fig. 7 Sectional view of yz plane (300°C, 6 path)

### 5. 多軸鍛造試験

多軸鍛造試験の実験条件を Table 2 に示す。実験には、A7075 および AZ31 の直方体試験片 (20mm × 15mm × 20mm) を用いた。ダイス穴 (深さ 34mm, 幅 20mm, 奥行き 20mm) に、試験片を入れ角柱ポンチで圧縮した。潤滑には黒鉛とシリコン油または水の混合物を用いた。圧縮回数は x, y, z 各方向 1 回の圧縮、すなわち合計 3 回の圧縮を 1 パスとして規定パス数を行った。よって圧縮回数はパス数の 3 倍となる。圧縮前後の試験片外観を Fig. 8 に示す。

Table 2 Experimental conditions	
Material	A7075, AZ31
Width [mm]	20
Depth [mm]	15
Height [mm]	20
Temperature (A7075) [°C]	300, 350, 400, 435
Temperature (AZ31) [°C]	250, 300, 350, 400
Pass (A7075)	1, 3, 6
Pass (AZ31)	1, 3
Velocity [mm/s]	0.5

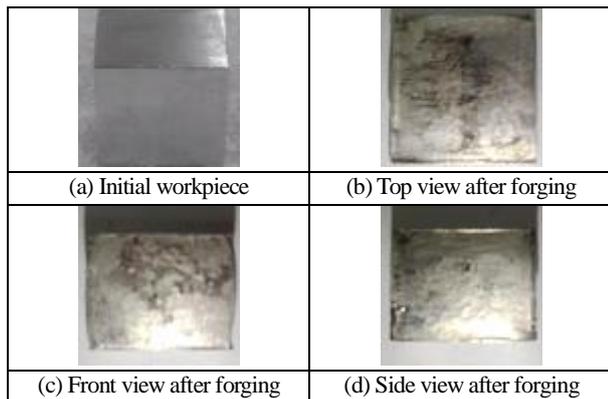


Fig. 8 Forged specimens

表面の凹凸や底面の縁に黒鉛の密集による充填不良がわずかに見られるが、所定の加工ができていることが確認できる。

Fig. 9 に A7075 試験片の 1 パス, 300°C の条件での圧縮時の応力とひずみの関係を示す。圧縮開始直後の弾性域とひずみ 0.05 以降の塑性域、ひずみ 0.33 以降の応力の急上昇が認められる。この応力の急上昇は充填が完了したことを示している。

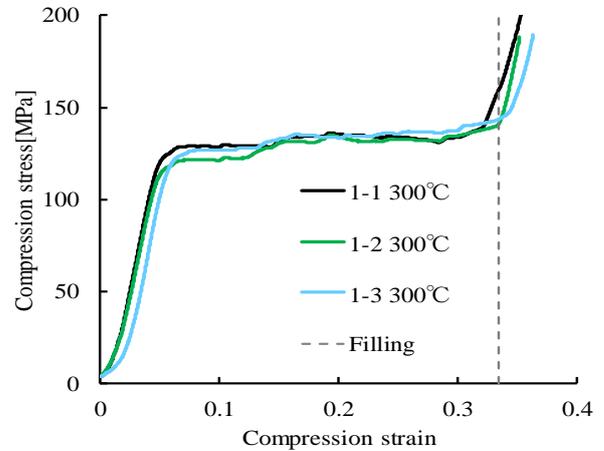


Fig. 9 Compression stress-compression strain curve (A7075, 1 path, 300°C)

多軸鍛造後の機械的性質はビッカース硬度試験により評価した。試験には島津微小硬度計 HMV-G20 を用いた。試験力は表面層の影響を排除するために試験機の最大の試験力である 19.61N に設定した。

硬度試験は試験片表面と内部に対して行った。圧縮試験後の試験片表面は表面間の平行が得られていないため、明瞭な圧痕が得られなかった場合は再度の打痕を行った。よって表面の硬度は参考値である。計測は一面に対して中央部 1 点と周辺部 1 点の 2 点に行い、一個の試験片に対して合計 12 点において行った。

試験片内部の硬度測定は Fig. 10 に示すように一方向に対して精密砥石切断機で切断し平滑な面を得た。この切断で得られた 5mm 厚の試験片を別の一方向に対して二回切断した。計測は一面に対し 3 点を 4 面に行い計 12 点の計測を行った。図中の矢印は測定箇所を示す。

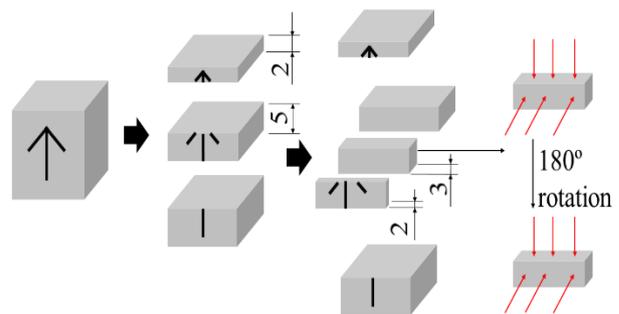


Fig. 10 Measurement points of Vickers hardness

Fig. 11にA7075試験片の3パス鍛造時のビッカース硬度変化を示す。いずれのパス数でも温度が上昇すると共に硬度が上昇している。Fig. 12にパス数のビッカース硬度に及ぼす影響を示す。ここでは、パス数のビッカース硬度に及ぼす影響ははっきり表れていない。いずれのパス数においても、300°Cの場合より400°Cの場合のほうがビッカース硬度は高くなっている。

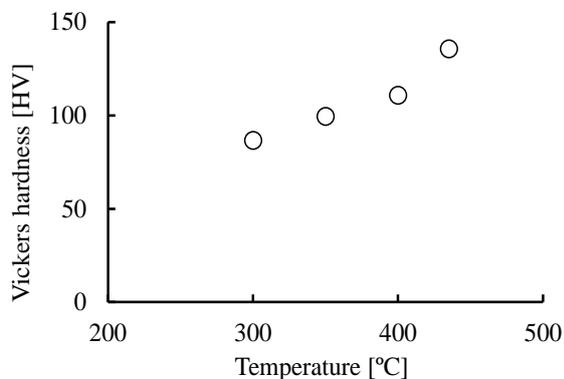


Fig. 11 Variation in Vickers hardness with temperature for A7075 (3 paths)

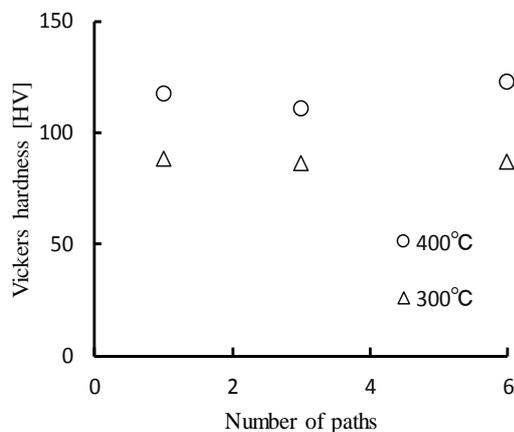


Fig. 12 Variation in Vickers hardness with the number of compression paths for A7075

Fig. 13にAZ31におけるビッカース硬度に及ぼす温度とパス数の影響を示す。パス数の増加によりビッカース硬度の上昇が見られ、温度が300°Cの条件においてビッカース硬度が最も大きくなっている。

## 6. 結言

温熱間での多軸鍛造試験ができる装置を設計製作し、A7075材とAZ31材の多軸鍛造試験を実施した。多軸鍛造後の試験片の機械的特性はビッカース硬度試験により評価した。A7075材の場合、鍛造温度が上昇するとビッカース硬度も高くなった。各鍛造温度において、多軸鍛造パス数のビッカ-

ース硬度への明確な影響は認められなかった。AZ31材の場合、加工温度300°Cと400°Cにおいて、多軸鍛造パス数の増加によりビッカース硬度の上昇がみられた。

端面拘束圧縮試験を行い、各試験温度における等温変形抵抗曲線を求めた。この結果をもとに、多軸鍛造の数値シミュレーション解析を行い、加工中の試験片の温度上昇やひずみ分布を評価した。

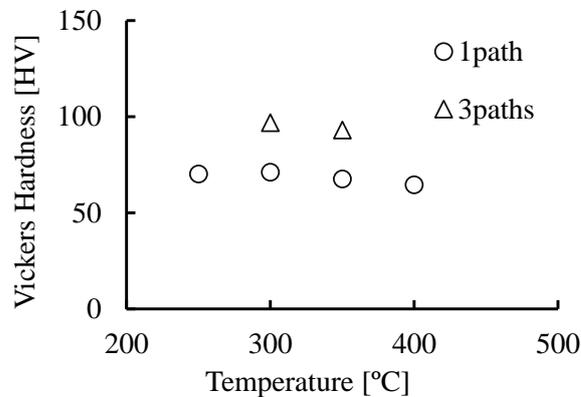


Fig. 14 Variation in Vickers hardness with temperature and pass for AZ31

## 謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団様のご支援のもと実施することができました。ここに厚く御礼申し上げます。ノースウェスタン大学 堂田邦明教授、熊本大学 李 泰旻助教(当時)、有明工業高等専門学校 南 明宏教授には、様々なご協力をいただきました。また、実験装置の設計製作、実験などは、熊本大学 今村康博技術専門職員、当時の熊本大学大学院生および学部生(石黒卓也君、河村龍之介君、宮本周英君、森 なつきさん、角田智浩君等)の協力により進めることができました。ご協力、ご支援いただきました皆様に心より御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) X. Dong, F. Chen, S. Chen, Y. Liu, Z. Huang, H. Chen, S. Feng, L. Zhao, Z. Wu, X. Zhang: Rare Journal of Materials Processing Technology, 219 (2015), 199-208.
- 2) M.R. Rokni, A. Zarei-Hanzaki, H.R. Abedi: Materials Science and Engineering A, 532 (2012), 593-600.
- 3) M. Schikorra, L. Donati, L. Tomesani, A.E. Tekkaya: Journal of Mechanical Science and Technology, 21 (2007), 1445-1451.
- 4) S. Z. Chavoshi, M. Tajdari, X. Luo: Journal of Mechanical Engineering Science, 229-5 (2014), 916-925.
- 5) K. Osakada, T. Kawasaki, K. Mori: Annals of the CIRP, 30-1 (1981), 135-138.
- 6) 日本塑性加工学会: 鍛造, (1995), 157, コロナ社.