

# 単軸引張を受ける AZ31 圧延板の成形性のひずみ速度依存性

高田 広

指導教員 吉田健吾 准教授

## 1. 緒言

マグネシウム合金は、実用金属の中で最も軽く、比強度に優れるため、電子機器などに軽量化を目的として利用されている。また、マグネシウムはリサイクル性にも優れるため、環境負荷の小さい材料として様々な産業への応用が期待されている。しかし、マグネシウム合金は成形性が低く、特に常温での加工は困難である。このため、現状ではダイカストなどの鋳造法や温間でのプレス加工によって製造されているが、常温でのプレス加工が可能となれば、低コスト化と利用の拡大が期待できる。

成形性に影響を与える要因には温度や加工方法、材料組成、ひずみ速度などがある。Agnew ら<sup>(1)</sup>は単軸引張におけるマグネシウム合金の全伸びはひずみ速度に強く依存し、速いほど成形性が悪いと報告している。しかしながら、全伸びがひずみ速度に依存する原因については明らかにされていない。

そこで本研究では、市販の AZ31 圧延板を用いて  $10^{-5} \sim 10^{-1}$  [1/s] の異なったひずみ速度における単軸引張試験を行い、全伸びおよび破断部のひずみのひずみ速度依存性を明らかにする。また、低ひずみ速度において成形性が高い要因を検討する。

## 2. 実験方法

島津製精密万能試験機オートグラフ AG-100kND で単軸引張試験を行う。ひずみの測定は島津製伸び計 SG25-100 を取り付けて行う。評点距離は 25 [mm] で、最大で 100 [%] のひずみを測定することができる。Table 1 に引張試験の試験条件を示す。引張試験における真ひずみ速度は  $1.1 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-1}$  [1/s] の 5 種類とする。試験はそれぞれの条件において 3 回ずつ行った。試験片は厚さ 0.80 [mm] のマグネシウム合金 AZ31 圧延板を JIS13 号 B 試験片の形状に加工したものである。平行部長さは 60 [mm]、平行部幅は 12.5 [mm] である。圧延方向と引張方向を一致させた。25 [mm] の標点間にけがき線を描き、試験後にけがき線をノギスで測定した。その結果から対数ひずみを計算し、全伸びとした。全伸びは JIS 規格では破断時の公称ひずみとして定義されているが、本研究では破断時の対数ひずみとして定義した。

多くの材料ではひずみ速度が速いほど塑性流動応力が増加する。これはひずみ速度硬化と呼ばれる現象である。ひずみ速度硬化を考慮した加工硬化則は、式(1)で表わされる。 $c(\alpha + \epsilon^p)$  の部分は Swift の式で、加工硬化を表わす。 $(\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0^p)^m$  の部分はひずみ速度硬化を表わす。 $\dot{\epsilon}_0^p$  は基準ひずみ速度で、任意に決めることができる。本研究では最も遅いひずみ速度を基準とし、 $\dot{\epsilon}_0^p = 1.1 \times 10^{-5}$  [1/s] とした。 $m$  はひずみ速度感受性指数(以後  $m$  値と表記)で、ひずみ速度硬化の度合を表わす値である。式(1)において Swift の式の部分を  $g$  と置き、両辺の対数を取って整理すると式(2)となる。したがって、縦軸を  $\log_{10}(\sigma/g)$ 、横軸を  $\log_{10}(\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0^p)$  としたグラフの傾きから  $m$  値を求められる。

$$\sigma = c(\alpha + \epsilon^p)^n (\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0^p)^m \tag{1}$$

$$\log_{10}(\sigma/g) = m \log_{10}(\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0^p) \tag{2}$$

Table 1 Tensile test conditions

ヘッド速度	真ひずみ速度
[mm/min]	[1/s]
0.05	$1.1 \times 10^{-5}$
0.50	$1.1 \times 10^{-4}$
5.00	$1.1 \times 10^{-3}$
50.0	$1.1 \times 10^{-2}$
500	$1.1 \times 10^{-1}$

## 3. 結果および考察

### 3-1 実験結果

真ひずみ速度  $\dot{\epsilon} = 1.1 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-1}$  [1/s] における引張試験より、各ひずみ速度における応力とひずみの関係が得られた。Fig. 1 に各ひずみ速度における荷重—伸び線図を示す。荷重  $F$  [N] は初期断面積  $A_0$  [mm<sup>2</sup>] で除しており、伸び計の変位  $U$  [mm] は初期長さ  $L_0$  [mm] で除している。Fig. 1 より、 $\dot{\epsilon} = 1.1 \times 10^{-3}$  [1/s] 以上のひずみ速度では破断時の伸びは  $U/L_0 = 0.26 \pm 0.01$  である。これに比べ、 $\dot{\epsilon} = 1.1 \times 10^{-5}, 1.1 \times 10^{-4}$  [1/s] での伸びは 0.10 程度大きい。また、 $\dot{\epsilon} = 1.1 \times 10^{-5}, 1.1 \times 10^{-4}$  [1/s] では、ひずみ速度による塑性流動応力の増加が大きいことがわかる。 $\dot{\epsilon} = 1.1 \times 10^{-3}$  [1/s] 以上ではひずみ速度による塑性流動応力の違いは小さく、ひずみ速度硬化の影響が小さいことがわかる。

$\dot{\epsilon} = 1.1 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-1}$  [1/s] の実験結果から、対数塑性ひずみが  $\epsilon^p = 0.05, 0.10, 0.13$  のときの応力を求めた。そして、それぞれの  $\epsilon^p$  について  $\log_{10}(\sigma/g)$  と  $\log_{10}(\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0^p)$  の関係を求めた。Fig. 2 に結果を示す。低ひずみ速度ではひずみ速度に対する塑性流動応力の変化が大きかったため、 $\dot{\epsilon} = 3.2 \times 10^{-5}, 3.2 \times 10^{-4}$  [1/s] の実験を追加で行った。

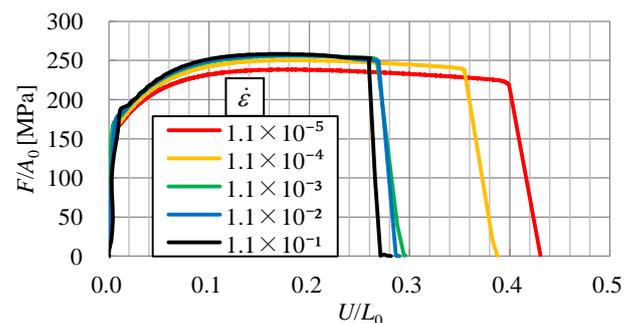


Fig. 1  $F/A_0-U/L_0$  diagram

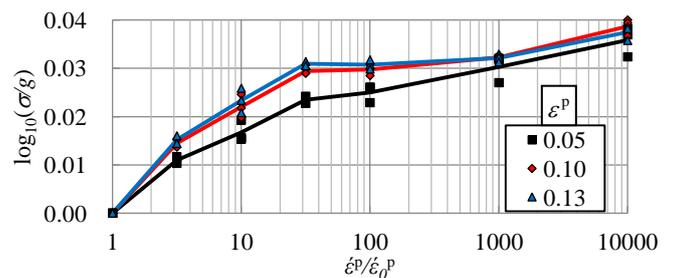


Fig. 2  $\log_{10}(\sigma/g) - \epsilon^p / \dot{\epsilon}_0^p$  diagram

Fig. 2において、グラフの傾きが  $m$  値である。 $m$  値がひずみ速度によらず一定ならば、グラフは1本の直線となる。しかし、実際にはひずみ速度が速いほど傾きが小さくなる傾向がある。したがって、ひずみ速度によって  $m$  値が変化していると考えられる。 $m$  値を求める試験片より一段階遅いひずみ速度における平均値とその試験片のプロット点との傾きを求め、その試験片の  $m$  値とした。そのため、最も遅いひずみ速度の  $\dot{\epsilon}=1.1 \times 10^{-5}$  [1/s]では  $m$  値は求められない。Fig. 3に求めた  $m$  値を示す。Fig. 3より  $\dot{\epsilon}=3.2 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-3}$  [1/s]の低ひずみ速度では  $m$  値は約0.01~0.03である。  $1.1 \times 10^{-3}$  [1/s]以上のひずみ速度では  $m$  値は約0~0.007であり、低ひずみ速度の  $m$  値に比べ小さい。また、 $\epsilon^p$  が大きいほどひずみ速度による  $m$  値の変化が大きい。

### 3-2 有限要素法解析結果

Von Mises の降伏関数、関連流動則、等方硬化則に基づいて有限要素法解析を行い、 $m$  値と全伸びの関係を求めた。ひずみ速度感受性指数  $m$  を 0.0001, 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 に変化させて解析を行い、全伸びの変化を調べる。解析におけるひずみ速度は  $1.1 \times 10^{-4}$  [1/s]とした。応力低下率を公称応力の低下量/最大公称応力から求め、応力低下率が5 [%]のときの対数ひずみを解析における全伸びとした。これは、実験では応力低下率が2~9 [%]のときに破断したためである。 $1.1 \times 10^{-4}$  [1/s]における実験値の全伸びと  $m=0.015$  における解析値の全伸びが一致するように初期不整を与えた。Fig. 4に  $m=0.0001 \sim 0.020$  の解析における荷重-伸び線図を示す。Fig. 4より、解析において  $m$  値が大きくなるにつれ応力が低下し始めるまでの伸びが大きくなることわかる。

Fig. 5に実験と解析における  $m$  値と全伸びの関係を示す。実験における全伸びは25 [mm]標点間の距離を試験後にノギスで測定して求めた対数ひずみである。解析における全伸びは、応力低下率が5 [%]のときの対数ひずみである。Fig. 5より、実験と解析のどちらにおいても、 $m=0 \sim 0.007$  に比べて  $m=0.015$  付近では全伸びが0.07程度大きく、両者の傾向は一致している。したがって、ひずみ速度による全伸びの違いは、 $m$  値の変化が原因であるといえる。全伸びが  $m$  値に依存するのは、 $m$  値が大きいほどひずみ速度硬化によるくびれの抑制が大きいためである。この現象は解析における応力低下率が5 [%]のときの相当塑性ひずみ分布からも確認された。相当ひずみは  $m=0.005$  では0.182 ~ 0.539で、 $m=0.015$  では0.226 ~ 0.493であった。つまり、 $m$  値が大きいほど試験片中のひずみの差は小さくなる。したがって、 $m$  値が大きいほどくびれが抑制され、一様に近い変形が起きている。

### 3-3 考察

$1.1 \times 10^{-3}$  [1/s]以上のひずみ速度において  $m$  値が低くなる原因として、塑性変形による塑性発熱に伴う熱軟化の影響が考えられる。材料が塑性変形する際、応力-ひずみ曲線の面積に比例した発熱があることが知られている。遅いひずみ速度では、外部に放熱する時間が長い、速いひずみ速度では放熱する時間が短いため、試験片温度が上昇する。このため、速いひずみ速度ではひずみ速度硬化の影響と熱軟化の影響が打ち消し合い、 $m$  値が小さくなると考えられる。実験結果の応力-ひずみ曲線の面積から発熱量を計算した。また、熱伝導と熱伝達による放熱量を計算し、引張試験中の試験片の温度変化を予測した。さらに、温度と応力の関係からそのときの応力低下を計算した。それを実験結果に足し合わせ、試験片の温度が一定であった場合の  $m$  値を計算した。その結果、 $\dot{\epsilon}=1.1 \times 10^{-3}$  [1/s]以上での  $m$  値は約0.01となった。つまり、温度の影響を除外しても  $m$  値はひずみ速度に依存すると考

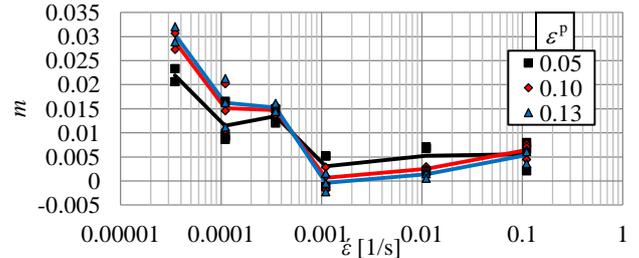


Fig. 3 Variation in  $m$  value with strain rate

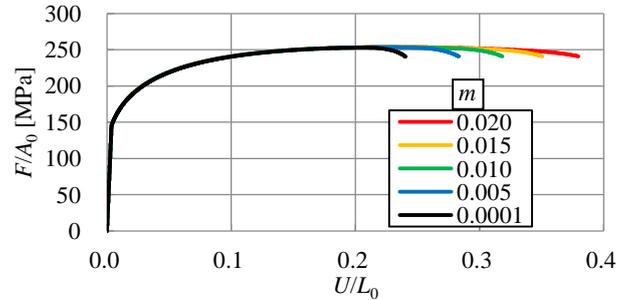


Fig. 4  $F/A_0-U/L_0$  diagram for FEM analysis

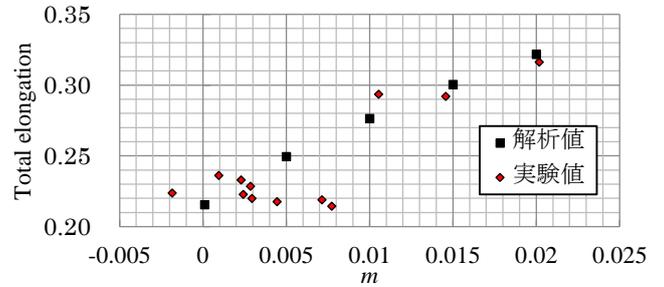


Fig. 5 Variation in total elongation with  $m$  value

えられる。また、 $m$  値がひずみ速度に対して一定となるには、応力-ひずみ曲線から求めた発熱の2~3倍程度の発熱が必要であることがわかった。これは計算の精度で説明できる大きさではない。したがって、計算の精度から  $m$  値は増減するが、いずれにせよ  $m$  値はひずみ速度に依存すると考えられる。

## 4. 結言

マグネシウム合金 AZ31 圧延板を用いて、常温におけるひずみ速度  $1.1 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-1}$  [1/s]の単軸引張試験を行い、その全伸びを測定した。そして、各ひずみ速度におけるひずみ速度感受性指数を求めた。また、有限要素法によりひずみ速度感受性指数 ( $m$  値) と伸びの関係を解析し、以下の知見を得た。

1. 単軸引張試験において、ひずみ速度が速いほど全伸びは小さい。特に、 $\dot{\epsilon}=1.1 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-3}$  [1/s]で全伸びが急激に減少する。
2.  $1.1 \times 10^{-3}$  [1/s]よりも遅いひずみ速度の  $m$  値に比べ、 $1.1 \times 10^{-3}$  [1/s]以上での  $m$  値は小さい。
3. 実験でひずみ速度によって全伸びが異なる原因は、ひずみ速度による  $m$  値の変化であることが有限要素法解析から確かめられた。
4. 塑性発熱に伴う熱軟化の影響を除外しても  $m$  値はひずみ速度に依存する。

### 参考文献

- (1) S. R. Agnew, O. Duygulu: International Journal of Plasticity 21 (2004), 1166-1174.