



T. Aida

ねじり加工した AZ61 マグネシウム合金円管材 の室温成形加工性

会田 哲夫*

1. 背景

近年、地球温暖化抑制のため自動車産業では排気ガス削減に力を注いでおり、特に軽量化が有効的な手段であることから、アルミニウムなどの軽金属がバンパーやスペースフレームに用いられている。また、剛性を保つためにこれらの部品は中空材が適用されており、曲げ加工やハイドロフォーミング等の塑性加工を経て、複雑かつ軽量・高剛性な製品に仕上げられる。この経緯から、実用金属中最軽量なマグネシウム合金を用いた中空材が自動車産業や航空機器産業等に注目されている。そのため、マグネシウム合金を用いた中空材の、曲げ加工性改善の研究が進められている。

長谷川らは AZ31 合金押しパイプ材のプレス曲げ加工に及ぼす加工温度の影響を調査した¹⁾。その結果、室温ではパイプ直径 D_0 に対する曲げ半径 R_0 の比（以下曲げ比と表記する）が 2.5 でも曲げ部に割れが生じたが、473K では曲げ比 2.0 でも曲げ部に割れが生じず、良好なプレス曲げ加工が可能であることを報告している。他方、AZ612)や AM303)に対してもパイプの曲げ加工性についての報告例もあるが、90°曲げにおける加工性については、詳細に調べられていない。他方、AZ31 合金押し管材のバルジ成形に及ぼす加工条件の影響⁴⁾においては、バルジ成形温度、内圧、押し込み圧力のバランスが重要であり、その成形加工範囲は成形温度分布の大きさや位置が決まり、350℃以上で良好な温間バルジ成形が可能である。マグネシウム合金の結晶構造は稠密六方晶を有しており、一般的に温間以上での塑性加工が適用される。しかし、強度とコストの観点から考えると、室温での曲げ加工が可能となることを望ましい。

そこで本研究では、強度とコストの観点から室温における変形機構に着目し、AZ61 マグネシウム合金押し管材にねじり加工を施し、内部の結晶組織を変化させた。そして機械的性質の評価を行い、室温における回転引曲げ加工およびバルジ成形に及ぼすねじり加工の影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は外直径 $D_0=24\text{mm}$ 、肉厚 $t_0=2.2\text{mm}$ の三協マテリアル株式会社製 AZ61 マグネシウム合金押し管材（以下、供試材と呼称する）を用いた。

2.2 ねじり加工

本実験でのねじり加工は、(株)渡製作所製の片側回転式ねじり戻し加工機を用いた。機械的性質を評価する試験片は標点距離 $L=200\text{mm}$ 、ねじり速度 1rpm、室温でねじり加工を施した。ねじり角度は破断するまで施し、供試材は 348°（せん断ひずみ $\gamma=0.36$ ）、均質化処理を施した供試材は、362°（ $\gamma=0.38$ ）ねじることが可能であった。

回転引曲げ試験を行う試験片については、標点距離 $L=550\text{mm}$ 、ねじり速度 1rpm、室温でねじり加工を施した。ねじり角度はすべて 720°（ $\gamma=0.27$ ）まで施した。また、すべてのねじり加工を施す試験片は、扁平変形を防ぐためにパイプ内部に鋳物砂を充填して加工を施した。

他方、バルジ加工用試験片は、標点距離 $L=950\text{mm}$ とし、加工温度は Table 1 に示す R.T.、50℃、100℃、150℃、200℃の条件で、ねじり速度 1rpm（R.T.のみ 1rpm、3rpm）にて破断する寸前の 1080°までねじり加工を施した。また、R.T.と 200℃の試験片に関しては、加工ひずみ除去の影響を比較するために、ねじり試験後に焼なましを施した。

Table 1 Condition of specimen

Specimen number	Temperature	Torsion speed	Homogenization treatment
a	R.T.	1rpm	-----
b	R.T.	1rpm	400℃, 1h
c	R.T.	3rpm	-----
d	50℃	1rpm	-----
e	100℃	1rpm	-----
f	150℃	1rpm	-----
g	200℃	1rpm	-----
h	200℃	1rpm	500℃, 1h

2.3 機械的性質

試験片の加工条件を Table 2 に示す。各試験片条件について、引張試験と圧縮試験を行い、ねじり加工が及ぼす機械的性質の評価を行った。引張試験片は押し出し方向に対して、平行に採取した JIS14B の円弧状試験片を用い、平行部幅 $W=8\text{mm}$ 、標点距離 $L=24\text{mm}$ とした。また、圧縮試験片は高さを直径と同じ $H=24\text{mm}$ とし、引張試験、圧縮試験を共に室温で行い、互いの耐力を比較した。ひずみ速度は引張試験を $3.47 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 、圧縮試験を $1.67 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ と設定した。

* 富山大学大学院理工学研究部 准教授

2. 4 回転引曲げ試験

試験片の曲げ加工条件を **Table 3** に示す。各試験片条件について、協同アルミ(株)製の回転引曲げ試験機を用いて、室温で曲げ比 R_0/D_0 を 2.6, 2.8, 3.0 とし、目標曲げ角度を 90° と設定して試験を行い、ねじり加工による回転引曲げ加工性の評価を行った。回転引曲げ加工性の評価方法は試験片外観と肉厚ひずみ、扁平化率を調査した。肉厚ひずみは初期肉厚から変化した肉厚を引き、その後初期肉厚で除した値とした。また、扁平化率は最大直径から最小直径を引き、それを初期直径で除した値とした。

Table 2 Processing conditions of specimen

Specimen number	Homogenization treatment ($T=400^\circ\text{C}$, $t=20\text{h}$)	Torsion processing
①	Without	Without
②	Without	With
③	With	Without
④	With	With

Table 3 Bending condition of specimen

Dimensions of specimen	$\phi 24 \times t 2.2 \times 550\text{mm}$
Bending ratio	2.6, 2.8, 3.0
Bending angle	90°
Bending processing speed	$7^\circ/\text{s}$
Bending temperature	R.T.

2. 5 バルジ試験

試験片の加工条件は、株式会社日東製のバルジ試験機を用いて、ねじり加工を施した長さ $L=950\text{mm}$ 、外直径 $D_0=24\text{mm}$ 、肉厚 $t_0=2.2\text{mm}$ の試験片を試験片の中心部 120mm を外直径 $D_1=26\text{mm}$ 、肉厚 $t_1=2.0\text{mm}$ に室温にてバルジ加工を行った。

3. 実験結果

3. 1 機械的性質

Fig. 1 に室温での引張試験・圧縮試験の耐力の比較結果を示す。ねじり加工を行っていない試験片は、圧縮試験での 0.2%耐力(CYS)を引張試験の 0.2%耐力(TYS)で割った値（以下、耐力比と称す）が 0.63 となり、引張試験の耐力と比較して、圧縮の耐力が低いことがわかる。均質化処理を行った試験片でも耐力比が 0.66 と同じ結果になった。一方、ねじり加工を施した試験片は耐力比が 1.06 となり、引張試験の耐力と圧縮試験の耐力比が 1 に近づいた。**Fig. 2** にひずみが 0.27 以上で耐力比が 1 となり、この要因として、結晶方位がランダム化したことによるものと推察される。

3. 2 回転引曲げ試験

Fig. 3 に各曲げ半径における回転引曲げ試験片の外観を示す。ねじり加工を行っていない供試材は、曲げ比 2.6,

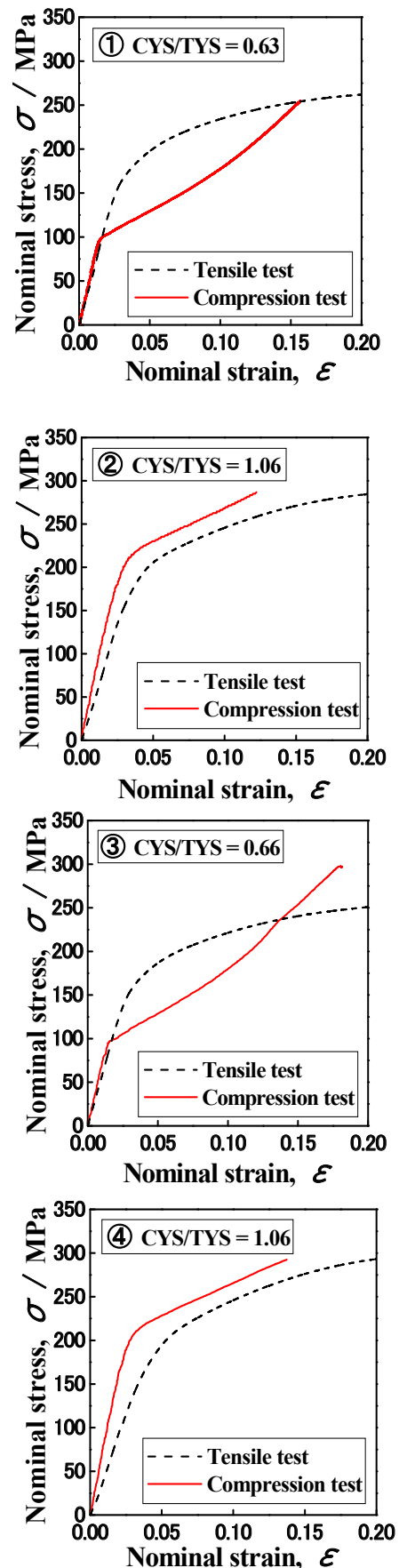


Fig. 1 Stress-strain curve of tensile test and compression test of AZ61 extruded pipe. ① As extruded ② Fracture torsion ($\gamma=0.36$) ③ Homogenization treatment ④ Fracture torsion after homogenization treatment ($\gamma=0.38$)

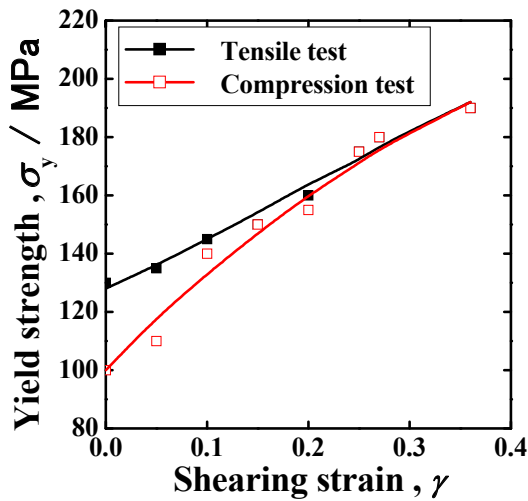
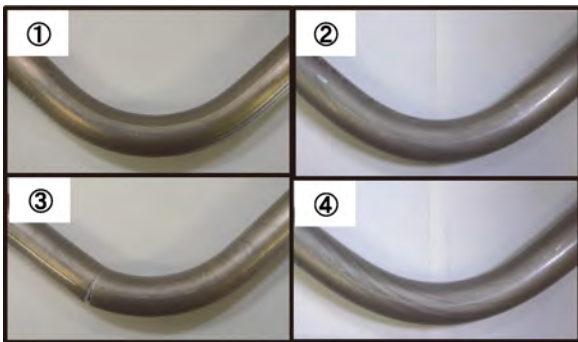
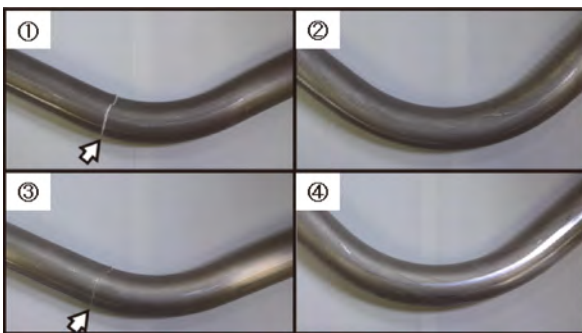


Fig. 2 Comparison of tensile and compression yield strength by difference of shearing strain.

(a) $R_0/D_0=2.6$



(b) $R_0/D_0=2.8$



(c) $R_0/D_0=3.0$

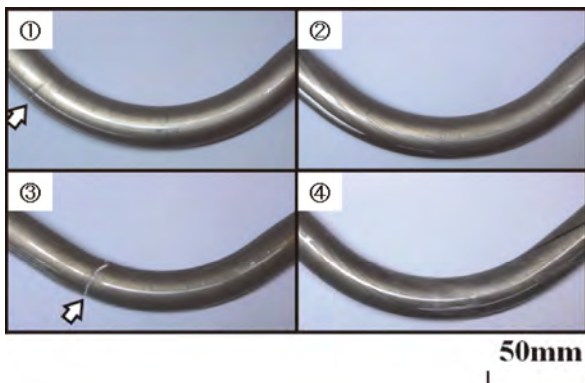


Fig.3 Appearance of bending specimen of AZ61 extruded pipe. ① As extruded ② Torsion ($\gamma=0.27$) ③ Homogenization treatment ④ Torsion after homogenization treatment ($\gamma=0.27$)

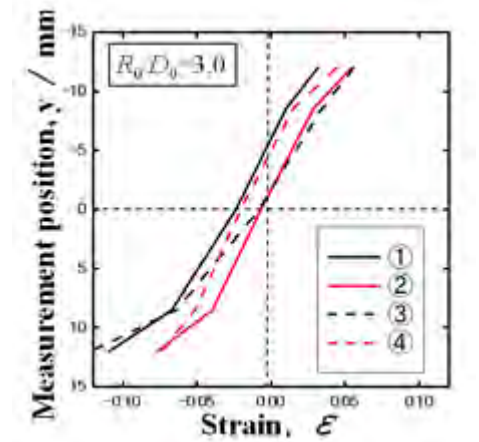
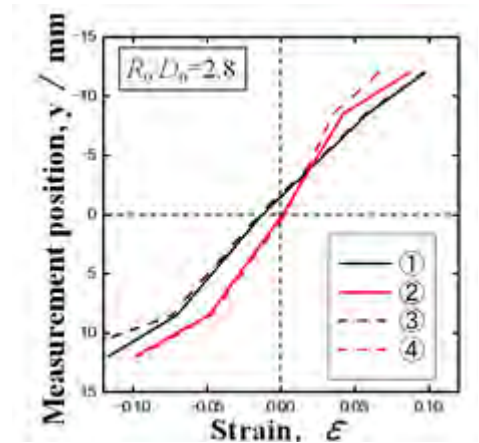
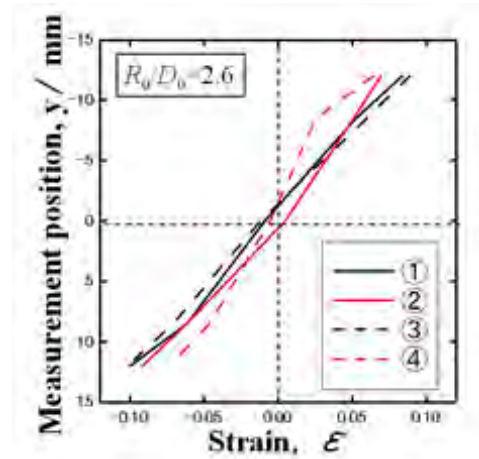


Fig.4 Thickness strain distribution at bending center of AZ61 extruded pipe. ① As extruded ② Torsion ($\gamma=0.27$) ③ Homogenization treatment ④ Torsion after homogenization treatment ($\gamma=0.27$)

2.8, 3.0のいずれでも Fig. 3 中の矢印で示した位置にクラックが生じた。また、均質化処理だけを施しても同様なクラックが生じた。一方、供試材や均質化処理材に対しねじり加工を施すことにより、曲げ比 2.6, 2.8, 3.0 のいずれにおいても曲げ部にクラックの発生が見られず、良好な曲げ加工が可能であった。

Fig.4 に各曲げ半径における曲げ中央部の肉厚ひずみ分布を示す。ねじり加工を行うことで引張側のひずみのレベルが減少しており、ひずみが 0 となる位置が中立面と考える。この結果からねじり加工を施すことで曲げの

中立面が引張側に移動し、圧縮面の肉厚ひずみは減少していることがわかる。この原因として、ねじり加工を施すことで引張りと圧縮の耐力が共に増加したが、特に圧縮側の耐力が著しく増加したために、圧縮側の変形抵抗が増加した。その結果、圧縮側でのひずみが低減し、肉厚の増加が抑制されたためといえる。

Table4 に各曲げ半径における扁平化率を示す。押しのまま材と均質化処理を施した試験片の扁平化率は、曲げ加工中に試験片が破断したため低い値を示す。一方ねじり加工を施した場合は耐力が増加したために扁平化が進んでも破断せずに曲げ試験が可能である。また、曲げ比が小さいほど扁平化が増加する。

Table4 Flattening ratio of AZ61 extruded pipe. ①As extruded ②Torsion ($\gamma=0.27$) ③ Homogenization treatment ④ Torsion after homogenization treatment ($\gamma=0.27$)

	①	②	③	④
$R_0/D_0=2.6$	0.044	0.068	0.075	0.069
$R_0/D_0=2.8$	0.038	0.063	0.044	0.068
$R_0/D_0=3.0$	0.045	0.057	0.049	0.067

3.3 温間ねじり試験

Fig.5 に各加工温度におけるねじり試験片の外観写真を示す。また、試験片のねじり試験における固定端からの距離とねじれ角およびせん断ひずみの関係を **Fig.6** に示す。室温でねじり加工を施した試験片は中心部分に比べ、両端部分のねじれ角が大きくなった。また、加工温度が大きくなるにつれ、中心部分のねじれ角が大きくなり、両端部分のねじれ角が小さくなった。また、室温で加工速度 3rpm のねじり加工を施した試験片は、50℃でねじり加工を施した試験片と同様のねじれ角となった。

3.2 バルジ試験

Fig.7 に各条件のねじり試験片におけるバルジ試験片の外観を示す。R.T., 1rpm でねじり加工を施した試験片は熱処理の有無に関わらず割れが発生した。一方、50℃以上の温間ねじり加工を施したものは、加工速度 3rpm でねじり加工を施したものは割れの発生が見られず、良好なバルジ加工が可能であった。

	End of the pipe	Center of the pipe
R.T.		
R.T. (3rpm)		
50℃		
100℃		
150℃		
200℃		

Fig. 5 Photos of pipe on processing twist in each temperature condition.

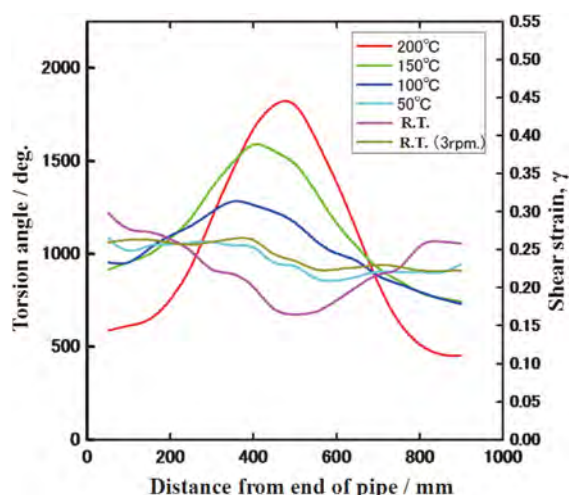


Fig. 6 Shear strain and twist angle at pipe after torsion processing.

	Without heat treatment	With heat treatment after processing torsion
R.T.		
R.T. (3rpm)		
50℃		
100℃		
150℃		
200℃		

Fig. 7 Photos of pipe on processing bulge at room temperature

4. 結言

AZ61 マグネシウム合金押しパイプ材に室温でねじり加工を施し、その後回転引曲げおよびバジル成形加工を行い室温曲げ加工性に及ぼすねじりの影響を評価した結果、以下の知見を得た。

- (1) ねじり加工を施した場合、室温での圧縮と引張りの耐力差が減少し、ほぼ同様な値となった。
- (2) ねじり加工しない場合、室温での回転引曲げ加工では曲げ比が 2.6, 2.8, 3.0 のいずれでも曲げ部にクラックが発生したが、ねじり加工を施すことでクラックの発生は認められず、良好な曲げ加工が可能であった。
- (3) ねじり加工を施した場合、曲げの中立面は圧縮側に移動した。これは圧縮側の耐力が著しく増加したために、圧縮側でのひずみが減少し、肉厚の増加が抑制された。
- (4) 標点距離 950mm の押し管材にねじり加工を施した場合、加工温度によってそれぞれの位置のねじれ角に大きな違いが生じ、室温でねじれ加工を行うと最

も均一にねじれた。

- (5) 室温バルジ試験において，室温，1rpm でねじり加工を施した試験片に割れが生じたが，それ以上の加工温度および回転速度でねじり加工を施した試験片には割れの発生は認められず，良好なバルジ加工が可能であった。

謝 辞

最後に本研究成果を発表するにあたり，公益財団法人天田財団より研究助成を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 長谷川収・真鍋健一・井上直人・西村 尚：塑性と加工, **48-556**, (2007), 422-426.
- 2) 岩井匡之・河野裕一郎・目良雅裕・本保元次郎・清水 亨：軽金属学会第 113 回秋期大会講概 (2007), 419-420.
- 3) Wu,W. Zhang,P. Zeng,X. Jin,L. Yao,S. Luo,A.A.: Mat. Sci. Eng. A, **486**, (2008), 596-601.
- 4) 直井久・内山剛志：法政大学大学院工学研究科紀要, Vol.47(2006).