

# Mg 合金 AZ31 の温間角筒深絞り加工による成形性

中山 恭秀\*・中 哲夫\*\*・坂東 祐樹\*\*\*

## Formability by Rectangular Cup Deep Drawing of AZ31 Magnesium Alloy Sheet

Yasuhide Nakayama \*, Tetsuo Naka \*\*, Yuki Bando\*\*\*

### Abstract

The magnesium alloys, that have high specific strength, are often applied to the industrial products. However, the magnesium alloys exhibit low ductility at the room temperature on account of its hexagonal close-packed structure. It is difficult to give large deformation to the magnesium alloys at room temperature. Therefore, the plastic forming of a magnesium alloy sheets needs the process at warm temperature. In the present work, the numerical simulations and the experiments of warm deep drawing have been performed in order to evaluate the dependence of the temperature on the plastic forming of a magnesium alloy AZ31 sheet. As the results of numerical simulations, it was shown that the formability of deep drawing was improved by local heating to the punch and the die.

### 1. 緒言

工業用部材として広く用いられている金属材料は、経済性や供給規模、信頼性などの点から、その使用頻度、重要性は高く、一般に使用されている金属材料の弾塑性変形挙動については、従来から様々な観点より論じられている<sup>1)</sup>。その変形挙動を利用した塑性加工は、工業製品の加工法においては現在最も重要な加工法である<sup>2)</sup>。

一方、近年の地球環境問題、エネルギー消費削減などの要求に対応するために、自動車を中心に各種輸送分野において軽量化が強く求められている<sup>3)</sup>。軽量化を図るための候補材料として注目されているのがマグネシウム合金である。これは実用金属の中でも最も低密度で、高い比強度を持ち、資源も豊富に存在することから次世代の軽量構造材料として、鍛造部品を中心に、家電製品や輸送機器への利用が拡大している。しかしながらマグネシウム合金は六方稠密構造をしており、低温では非底面すべりの臨界せん断応力が大きいため、低温での延性が低く、一般的に難加工材である<sup>4)</sup>。

こうした点をふまえ、本研究では、マグネシウム合金 AZ31-B を用い、角筒の深絞り加工において、加工温度、加工速度、素板形状などを変化させた実験と解析を行い、加工工程の加工効率について検討した。また、パンチ形状に正方形だけでなく、長方形についても試み工具形状と素板形状の点から比較・検討を行った。

### 2. 実験方法

#### 2.1 深絞り加工

Fig.1に示すように、パンチとダイスを用いて平らな素板から底付き容器状の製品を成形する加工法を深絞り加工という。素板の破断を防ぐため、パンチとダイスの角部には丸みをつける。薄板の深絞り加工ではしわの発生を防ぐためにしわ抑え板が必要である。

この加工法は、成形品形状、素板形状、工具寸法、しわ抑え力、加工温度、加工速度など様々な加工条件が複雑に関係しており、加工条件の設定によってはしわの発生あるいは破断などが起こり、加工限界

\* 電子機械工学科

\*\* 商船学科

\*\*\* 専攻科 生産システム工学専攻

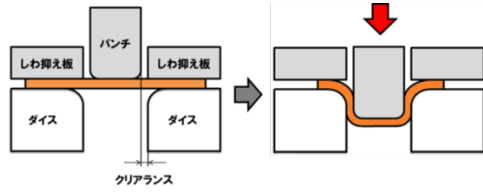


Fig.1 深絞り加工

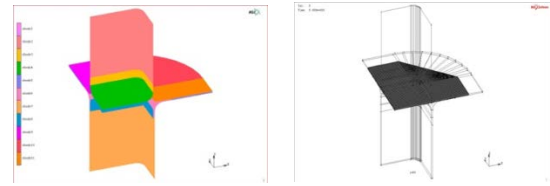


Fig.4 解析モデル

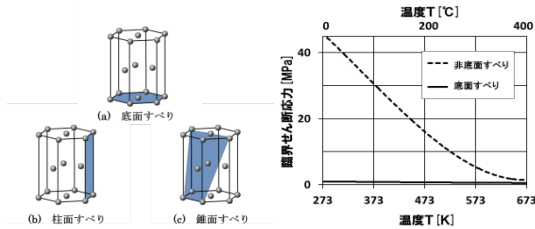


Fig.2 Mgのすべり系 Fig.3 Mgの臨界せん断応力



Fig.5 試験装置

がある。したがって、成形技術上最も重要な問題は、しわや破断を防ぎながら、素板に大きな絞り変形を与える加工条件を見つけることである。

2. 2 試験材料

マグネシウムのすべり系は底面、柱面、錐面の3つのすべり系により構成される (Fig.2)。低温域では、非底面の臨界せん断応力が高く、底面すべりのみにて変形が進み、すべり系が限られ、低延性となる (Fig.3)。一般に圧延により作製されるマグネシウム合金板には底面が圧延面に対して平行に配列するマグネシウム特有の集合組織が形成される<sup>5,6)</sup>。底面と柱面すべりによって、圧延方向と板幅方向には変形できるが、板厚方向には変形できなくなる。そのためマグネシウムは薄くなることができず、プレス加工の初期に破断してしまう。このため常温でのプレス加工は極めて難しく、一般に難加工材の部類に入る。しかし、高温域では、マグネシウムのすべり系が底面以外に柱面や錐面においてもすべりが起こるようになり、延性が増すと考えられ、温間あるいは熱間加工による成形性を改善させることが試みられ、板成形について様々な研究がなされている。本研究で用いた展伸用Mg-Al-Zn系合金は、成形性お

Table.1 Mg合金AZ31-Bの材料組成 (%)

Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ca	Mg
2.9	1.0	0.41	0.0023	0.01	<0.01	<0.001	<0.01	Bal

Table.2 Mg合金AZ31-Bの機械的特性値

ヤング率	ポアソン比	降伏応力	熱伝導率	比熱	質量密度
E [GPa]	$\nu$	$\sigma_y$ [MPa]	$C_r$ [W/mk]	k [J/kgK]	$\rho$ [Kg/mm <sup>3</sup> ]
28	0.4	100	76.9	1.04×10 <sup>3</sup>	1.78×10 <sup>6</sup>

よび溶接性に優れ、マグネシウム材として広く用いられている材料である。アルミニウムを3%、亜鉛を1%含有するAZ31-B細粒材で、板厚0.5mm、圧延幅160mm、平均結晶粒径7 $\mu$ mの板材である。Table.1に材料組成をTable.2に機械的特性値を示す。

2. 3 解析方法

工業製品の多くは塑性加工を利用して任意の部品の形に成形する。しかし安易に材料を成形して特性などを直接的に調べることはできない。そこで有限要素法 (FEM) を用いて材料成形のシミュレーションを行い、材料特性を解析する。解析は汎用の有限要素法ソフト、MSC Marc Mentat を用いた。ただし、金属材料の特性値として、ヤング率 E、加工硬化指数 n、ひずみ速度感受性指数 m、塑性変形における変形抵抗式の係数 K、B は、材料の変形が、ひずみおよびひずみ速度に依存する次式を用いた。

$$\sigma = K\epsilon^n \dot{\epsilon}^m + B \tag{1}$$

本研究で扱うマグネシウム合金は、特性値に温度依存性がある。ヤング率 E、加工硬化指数 n、変形抵抗式の係数 K、B は、温度の上昇とともに低下し、速度感受性指数 m は温度の上昇とともに増加する特性が知られており、温度の逆数との関係性が様々な研究から示されている。本研究では、各特性値と温度 T について、次のような関係式を用いた。

$$E = \frac{13088961}{T} + 327.8 \text{ [MPa]} \tag{2}$$

$$n = \frac{20}{T} + 0.072 \tag{3}$$

$$K = \frac{115490.8}{T} - 94.2 \text{ [MPa]} \tag{4}$$

Mg 合金 AZ31 の温間角筒深絞り加工による成形性 (中山・中・坂東)

$$B = \frac{107791.4}{T} - 147.9 \text{ [MPa]} \quad (5)$$

$$m = \frac{-61.6}{T} + 0.22 \text{ [MPa]} \quad (6)$$

Fig.4はFEM解析モデルであり、深絞り加工のパンチ・ダイス形状を設定温度別に色分けし表示したものである。また、対称性を考慮し、計算処理をより効率よく行うためパンチ・ダイス形状は1/4モデルである。

2. 4 試験方法

試験は、自作の温間角筒深絞り試験装置をインストロン型万能試験機に装着しコンピュータで制御する。ソフトウェアはエアンドデイ社の TACT を用いた。角筒深絞り装置にはヒーターが入っており、装置の温度を設定通りに調整する。ヒーターは、パンチに 250w×4 本の 1kw, ダイスに 200w×8 本の 1.6kw, しわ抑えに 200w×8 本の 1.6kw が設置されている。温度を試験条件温度に設定して試験機の温度を上昇させ、設定温度に達したら試験片を取り付ける。試験片は力が均等に加わるように試験機の中心に設置する。使用潤滑油は、日本工作油株式会社 GM-100 マグネシウム工作油を使用した。

3. 実験概要

3. 1 正方形深絞り加工

Fig.4に解析モデルを、Fig.5に角筒深絞り試験装置の様子を示す。工具形状は、パンチ角 50×50mm, ダイ角 52×52mm の正方形で、パンチコーナー、ダイスコーナーにそれぞれ半径 5mm の丸みをつけている、パンチとダイスのクリアランスは 1mm である。実験は温度による成形性を調べるため、20℃(室

温)~200℃の温度範囲において行なった。また、素板形状の違いによる成形性も調べるため、正方形, 正八角形, 円形の3種類の板材を用意した。

3. 2 長方形深絞り加工

これまでの角筒深絞り加工の研究の多くは正方形深絞りに関するもので、長方形角筒の深絞り加工についての研究は比較的少ない<sup>7,8)</sup>。しかし、世の中に出回っている工業製品は、必ずしも正方形ではなく、長方形形状の製品も多く存在するため、長方形形状の深絞り加工に関する成形性を検証することは大変重要である。そこで、本研究では長辺と短辺の各種長さのダイス穴における素板の形状が成形性に及ぼす影響について数値解析を行った。工具形状は、ダイス穴形状比1.5(42.46×63.68mm)と2.0(36.78×73.54mm)のモデルを用い、パンチコーナー、ダイスコーナーにそれぞれ5mmの丸み半径をつけている、パンチとダイスのクリアランスは1mmである。素板は形状比の異なる3種類の四角形を用意した。

4. 実験結果

4. 1 正方形深絞り加工

4. 1. 1 加工温度による影響

Fig.6, Fig.7に正八角形素板モデルにおいて成形温度を 20℃~200℃で変化させた解析結果を示す。

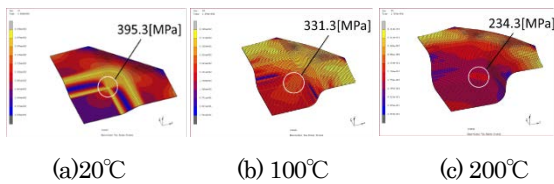


Fig.6 相当応力分布

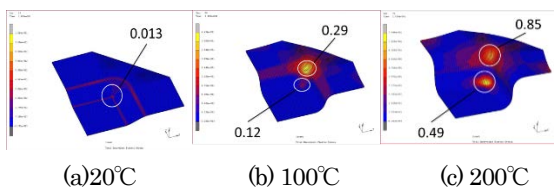


Fig.7 相当塑性ひずみ分布

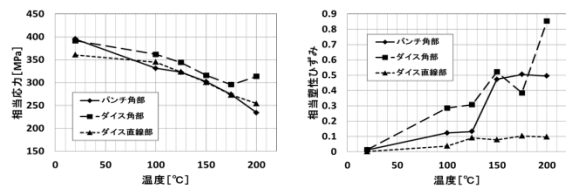


Fig.8 温度による影響

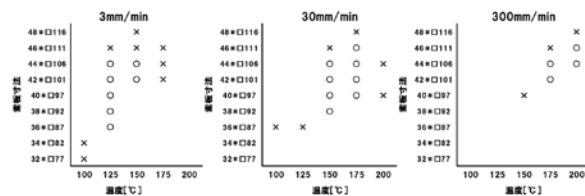


Fig.9 深絞り試験結果

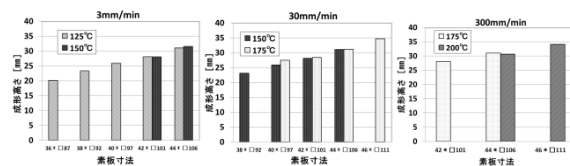


Fig.10 成形高さ比較(成形速度による影響)

またそれぞれのグラフを Fig.8 に示す. 成形温度 20°C(常温)の場合, 加工初期にパンチコーナー部で加工限界応力を超えてしまい, また, パンチ肩部, コーナー部において板厚が減少しており, パンチコーナー肩部で破断してしまうと予測される. このため, 常温での加工は困難であるといえる. しかし, パンチ, ダイスを加熱し, 成形温度を上昇させていくにつれ, 最大応力は低下し, 変形量も大きくなっている. したがって, 加工温度を上昇させることにより, 成形性が向上するものと考えられる. これらの数値解析結果のもと, 温度 100°C~200°Cでの深絞り試験を行った. 100°Cではすべての条件において破断する結果となった. これは, 解析結果でも示されたようにパンチ角部での破断が確認された.

#### 4. 1. 2 加工速度による影響

成形速度が遅い場合, 125°Cでも成形は可能ではあるが, 素板形状が比較的大きい場合はコーナー部で割れが生じた. これは, ダイスフランジ部の抵抗による影響であると考えられる.

200°Cではカベ割れが発生した. しかし, 成形速度が速い場合, 200°Cまで温度を上げて加工が可能である(Fig.9). また, 同じ温度でも300mm/minよりも30mm/minの方が, 成形高さが大きくなる結果となった(Fig.10). この理由としては, 速度が速いために試験片の温度が上昇しないうちに加工が行われたために変形抵抗が増加したと考えられる. 成形時の温度, 速度は, 最適値を決めることが重要である.

#### 4. 1. 3 素板形状による影響

解析の結果, パンチ押し込み量20[mm]の段階において, パンチコーナー部における応力値は, 円形がおおよそ150[MPa], 正八角形がおおよそ200[MPa], 正方形がおおよそ230[MPa]であった. 形状が円形に近づ

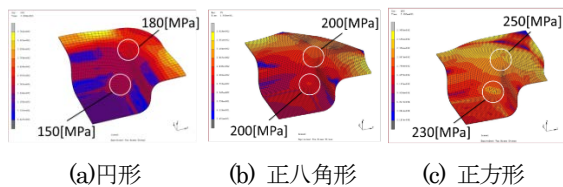


Fig.11 相当応力分布

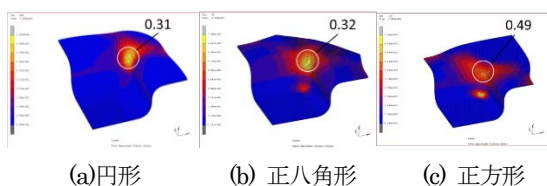


Fig.12 相当塑性ひずみ分布

くほど応力が低くなる. また, ダイス肩部における応力値も円形がおおよそ180[MPa], 正八角形がおおよそ200[MPa], 正方形がおおよそ250[MPa]と, 素板形状が円形に近づくほど低くなる. これらの理由としては, ダイスフランジ部の素板のはみ出し量が加工時の抵抗となり, 応力が増加したと考えられる. また, これらの影響によってダイス肩部でしわが発生する可能性がある. 以上の結果から, 素板形状は円形になるほど成形性が良くなると予測できる.

以上の解析結果から実験では, 素板形状が円形と正八角形の場合について深絞り試験を行った. Fig.13, Fig.14にその結果を示す. 正八角形素板では, ダイスコーナー部でしわの発生が確認された. 円形ではダイスコーナー部でのしわは抑えられている. また, 成形高さは素板形状が円形の方が大きくなった(Fig.14). よって, 素板形状は円形に近づくほど良いということが分かる.

本実験での最大成形深さは, 試験片形状が円形, パンチ速度30mm/min, 温度175°Cの条件が一番よく37.54mmであった.

#### 4. 2 長方形深絞り加工

##### 4. 2. 1 ダイス穴形状比 1. 5

解析結果をひずみ速度分布で比較すると, モデル1の場合, ダイス短辺部の流れ込みが悪く, 長辺部が先に絞り込まれている. また, モデル3の場合はこの逆で短辺部の流れ込みが極端に速く局所的にひずみ速度が速い箇所が見られる. モデル2については, ほぼ均等に絞り込まれていることが確認できる.

温度分布で比較すると, モデル1の場合長辺カベ部に温度の低い箇所が見られる. これは座屈の影響によりダイス肩部から板材が離れてしまい, 温度に偏りが生じてしまったことが考えられる. モデル3でも



円形素板

正八角形素板

Fig.13 深絞り試験結果(素板形状による影響)

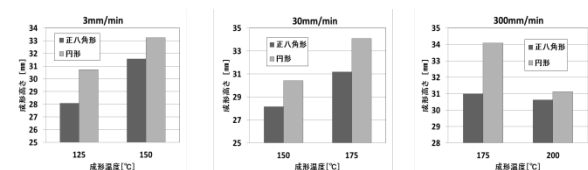
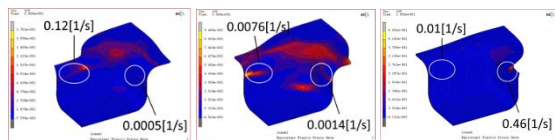


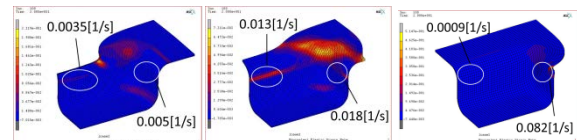
Fig.14 成形高さ比較(素板形状による影響)

## Mg 合金 AZ31 の温間角筒深絞り加工による成形性 (中山・中・坂東)



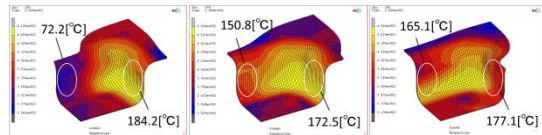
①形状比同じ ②はみ出し量同じ ③正方形

Fig.15 相当ひずみ速度分布(ダイス穴形状比 1.5)



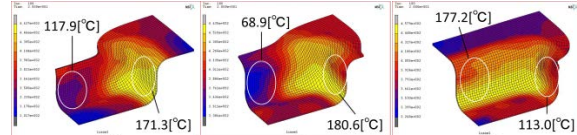
④形状比同じ ⑤はみ出し量同じ ⑥正方形

Fig.17 相当ひずみ速度分布(ダイス穴形状比 1.5)



①形状比同じ ②はみ出し量同じ ③正方形

Fig.16 温度分布(ダイス穴形状比 1.5)



④形状比同じ ⑤はみ出し量同じ ⑥正方形

Fig.18 温度分布(ダイス穴形状比 1.5)

同様の現象が短辺部において確認された。モデル 2 の場合はこのような温度分布の偏りは少なく、比較的均一になっており、成形性が良いと判断できる。

#### 4. 2. 2 ダイス穴形状比 2.0

モデル4の場合、長辺部が先に絞り込まれ、短辺部が絞り込まれないという状態になった。このため、長辺部のダイス肩部において応力値が高く、しわが生じることが考えられる。また、ダイス穴長辺部における座屈の影響により、板材がダイス肩部から離れてしまい、ダイス穴長辺部と短辺部において温度分布の偏りが生じている。

モデル5の温度分布を見ると、押し込み量10[mm]の段階では、温度に大きな差はなかったが、押し込み量20[mm]の段階で大きな温度差が生じていることから、座屈が発生してしまっている可能性がある。この結果から、成形性は良好であるが深い絞り成形は難しいものと判断できる。

モデル6の場合、短辺部のはみ出し量が短いため、パンチ押し込み量20[mm]の段階で、ダイス穴短辺側の素板が完全に絞り込まれている。この結果、ダイス短辺部側の素板のひずみ速度が極端に速くなっており、応力値も高くなっていることが確認できる。このモデルでは、ダイス穴短辺側においてしわの発生や破断などの成形不良を生じることが考えられる。

### 5. 結言

本研究では、マグネシウム合金AZ31-Bを対象材とし、角筒深絞り加工における成形性について解析と実験の両方から検証を行なった。得られた結果は以下の通りである。

#### ・正方形深絞りの場合

- (1)温度上昇とともに、応力値は減少し、成形高さは向上した。ただし、成形速度を適宜決定する必要がある。
- (2)温度が比較的低い場合、成形速度が速すぎると試験片の温度が上昇しないうちに加工が行われるため、変形抵抗が増加しカベ部に破断が生じる。
- (3)素板形状は円形に近づくほど成形性が良くなる。

#### ・長方形深絞りの場合

- (1)ダイスフランジ部における素板のはみ出し量によって、ダイス穴長辺部と短辺部の素板の流れ込みの速度に差が生じてしまい、成形性が低下する。
- (2)ダイス穴形状によらずダイス肩部における素板のひずみ速度を均一化し、同時にダイス穴引き込まれるよう素板形状を設定することが、温度分布の偏りをなくし、成形性向上につながる。

#### 参考文献

- 1) 吉田総仁：弾塑性力学の基礎，(1997)，共立出版
- 2) 大矢根守哉：塑性加工学，(1983)，養賢堂
- 3) 行武栄太郎，金子純一，管又信：塑性と加工，44-506(2003)，276-280
- 4) 古閑伸裕：塑性と加工44-506(2003)，250-255
- 5) 鎌土重晴：塑性と加工，48-556(2007)，358-365
- 6) 佐藤雅彦：塑性と加工，48-556(2007)，373-378
- 7) 水野高爾，鄂大幸：塑性と加工，38-435(1997)，372-376
- 8) 中村和彦，姿晴仁：塑性と加工，42-491(2001)，1228-1232