

## 曲げ試験機の開発および難加工材料の曲げ加工性の評価

土居万純  
指導教員 吉田健吾准教授

### 1. 緒言

近年、地球温暖化が深刻化する中で、CO<sub>2</sub>削減が叫ばれている。それゆえ、自動車業界ではCO<sub>2</sub>削減のため燃費向上が求められている。この要求を満たすために、自動車の軽量化を進めている。そこで、近年注目されている材料として、高張力鋼板やマグネシウム合金などがある。高張力鋼板は強度が高い材料であるため、従来の材料での強度を保ちつつ、板を薄くすることが可能となる。よって自動車の部品の体積が減るため、軽量化することができる。また、マグネシウム合金は軽く比強度が高い材料であるため、従来の材料と同じ体積であっても軽量化することができる。しかしながら、高張力鋼板は材料の強度が高くなる反面、延性が低下する。一方、マグネシウム合金は六方晶系であることに起因して加工性が悪い。そのため、プレス加工や曲げ加工の際の割れによる成形不良が問題となっている。この問題を解決するために、高張力鋼板やマグネシウム合金などの割れに関する研究が行われている。その研究において、V曲げ試験が多用されている。しかしながら、V曲げ試験では変形している試験片の曲げ部分を観察することができず、曲げ部分のひずみの変化を時間を追って解析することはできない。一方、エアーベンディングによる曲げ試験では、曲げ試験時において、試験片の表面のひずみが進展する過程を解析することができる。このような利点があるにも関わらず、エアーベンディングの研究は少ない。

本研究では、エアーベンディングの曲げ試験を行い、曲げ部のひずみが進展し破断に至るまでの過程を解析することを目的とする。エアーベンディングによる曲げ試験機の設計製作を行い、製作した曲げ試験機を用いて、高張力鋼板とマグネシウム合金板の曲げ試験を行う。試験片の表面を CCD カメラで撮影し、曲げ割れが発生するまでのひずみの進展を解析する。

### 2. 曲げ試験機の開発

エアーベンディングを行う曲げ試験機を設計する。以下4つの点を満たす試験機を設計する。

- ①引張強度2[GPa]、厚さ2[mm]の試験片を曲げることができる。
- ②試験片の曲げ部分を試験中、撮影することができる。
- ③パンチの半径  $R$  とダイスの幅を変化させることができる(パンチ半径  $R$  の最小は1[mm])。

Fig. 1 に設計した曲げ試験機を示す。②より試験片とカメラの焦点距離をおおよそ一定に保つ必要がある。そこで、パンチを土台に固定し、シリンダに繋がれたダイスを引くことで試験片をパンチに押し当てて曲げる機構とした。

### 3. 試験方法

#### 3.1 引張試験

島津製作所製の AUTOGRAPH を用いて単軸引張試験を行う。試験片のひずみの検出方法は、CCD カメラで試験片を撮影し、その画像において標点間距離を 24.7[mm]として、DIC 法(デジタル画像相関法)を用いて伸びを計測することで求める。また、試験片は JIS2241 の 13B 号を用いる。長手方向を圧延方向とする。材料は板厚が共に 2[mm]のマグネシウム合金 AZ31 と高張力鋼板 S65C を用いる。

#### 3.2 曲げ試験

Fig. 1 に示した曲げ試験機を用いて曲げ試験を行う。ここで、ダイス幅を  $w$ 、パンチ半径を  $R$  と定義する。曲げ条件は、 $(w,R) = (25,10), (25,5), (15,5), (7,1)$ [mm]の4種類である。DIC 法により、試験片のひずみ分布を求める。また、試験片形状は JIS2248 より、 $20 \times 45$ [mm]、 $20 \times 30$ [mm]とする。長手方向を圧延方向とする。材料は引張試験と同じである。

### 4. 実験結果

#### 4.1 引張試験

単軸引張試験により、供試材の力学的特性を求めた。Table 1 にマグネシウム合金 AZ31、高張力鋼板 S65C の結果を示す。AZ31 は一様伸びと全伸びが一致している。これは、応力が低下する前に試験片が破断したためである。また、AZ31 と S65C の全伸びは S65C の方が大きく、 $n$  値を比較すると S65C は AZ31 の 3.4 倍大きいことが分かる。

#### 4.2 曲げ試験

##### 4.2.1 割れの発生形態

曲げ試験を行い、試験片の割れの進展を観察した。ここで、割れの発生は、撮影した画像において目視で割れが初めて確認された時とする。Fig. 2 は、 $(w,R) = (15,5)$ [mm]の条件で、(a)は AZ31、(b)は S65C である。図中の黄色の印は割れが発生した地点、番号は割れの発生した順番を示す。その結果、試験片の中央部分から割れが発生し始め、割れが発生した近くからまた別の割れが発生し、その個々の割れが両端に拡大していくことで、Fig. 2 のような大きな割れが成形されることが確認できた。これは、他の条件で曲げ試験をした時も同様の結果が得られた。また、Fig. 3 に各地点での割れのひずみ分布、Table 2、Table 3 に Fig. 2(a)(b)での個々の割れ発生地点①～⑤、①～④において割れが発生する直前の最大主ひずみを示す。個々の割れ直前の最大主ひずみは AZ31 は 0.07～0.10、S65C は 0.17～0.19 である。割れが進行するにつれてひずみが大きくなるわけではなく、一定の範囲内のひずみとなる。これは、他の条件で曲げ試験をした時も同様の結果が得られた。

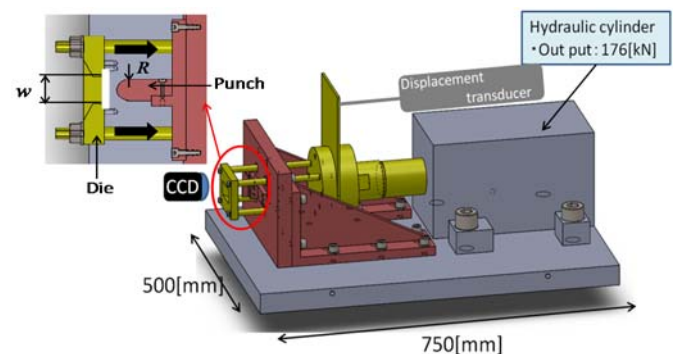


Fig. 1 Bend testing machine

Table 1 Tensile test results (AZ31)

	0.2% proof stress [MPa]	Tensile strength [MPa]	Uniform elongation [-]	Total elongation [-]	$n$ -value [-]
AZ31	157	277	0.070	0.070	0.015
S65C	1313	1460	0.048	0.085	0.051

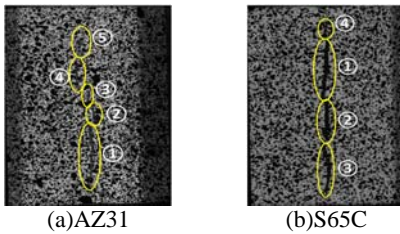


Fig. 2 Strain distribution ( $w,R$ )=(15,5)

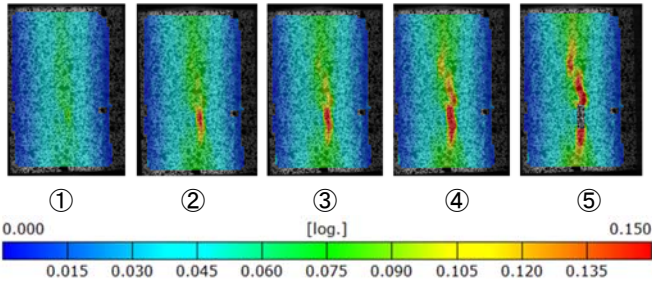


Fig. 3 Strain distribution at each number (AZ31)

Table 2 Maximum principal logarithmic strain (AZ31)

	①	②	③	④	⑤
Max strain	0.074	0.082	0.091	0.087	0.093

Table 3 Maximum principal logarithmic strain (S65C)

	①	②	③	④
Max strain	0.177	0.188	0.187	0.189

また、 $(w,R) = (25,10)$ [mm]の時、AZ31では3回実験を行い、1回は割れたが2回は割れず試験片の表面に細かいひびが入った。また、S65Cではひびも入らなかった。この時、AZ31の割れが発生する直前のひずみはすべての地点において0.07~0.10の範囲に入っていた。一方、S65Cのひずみは0.10~0.11の値をとっていた。これらの結果より、条件が異なっても、材料によっての一定の範囲内のひずみに達した時に割れが発生することが分かる。

単軸引張試験破断時のひずみと各条件での曲げ試験の①においてのひずみを Table 4 に示す。高張力鋼板では曲げ試験結果が全伸びの約2倍の値をとる。一方、マグネシウム合金では曲げ試験結果と全伸びがほぼ同じ値をとることが分かる。

#### 4.2.2 幾何学的ひずみと局所ひずみ

幾何学形状より曲げ表面のひずみ  $\varepsilon$  [-] は、 $\varepsilon = t/2 R_n$  より求められる。ここで、 $t$  は試験片の厚さ [mm]、 $R_n$  は曲率半径 [mm] である。曲線  $f(x)$  上の点  $(a, f(a))$  における曲率半径  $R_n$  は、式 (1) より求められる。

$$R_n = \frac{(1 + f'(a)^2)^{3/2}}{|f''(a)|} \quad (1)$$

曲線  $f(x)$  は、割れが生じる直前の試験片の曲がり形状から求める。試験片のパンチに当たっている部分の範囲で、試験片の曲がり形状を2次関数に近似することで曲線  $f(x)$  を求める。ただし、曲線  $f(x)$  上の点  $(a, f(a))$  は曲線  $f(x)$  の最小値とする。また、点  $(a, f(a))$  で曲げ表面のひずみにおける最大値をとる。

ここで、Fig. 4 に試験片に割れが発生する直前のひずみ分布と点  $(a, f(a))$  での幾何学的ひずみを比較したグラフを示す。ただし、横軸の X 軸座標はひずみが測定できた範囲の試験片の端を 0 とする。Fig. 4 より、試験片表面のひずみ分布は一様ではなく、中央部のひずみが最大で端に向かうにつれ小さくなる形状である。局所ひずみの最大値と幾何学的ひずみの最大値を比較すると、局所ひずみの最大値の方が大きい値をとる。そのため、幾何学的形状から破断時のひずみを予測することは難しい。

Table 4 Result of tensile test and bending test

		S65C	AZ31
Total elongation [log]		0.085	0.070
Bending test [log]	w25-R10	Do not crack	0.0788
	w25-R5	0.184	0.0965
	w15-R5	0.173	0.0758
	w7-R1		0.0696

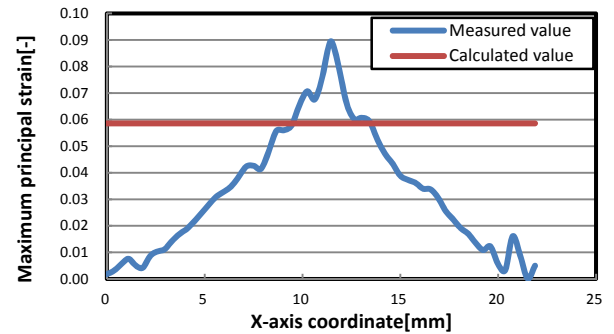


Fig. 4 Comparison measured value and calculated value

## 5. 考察

全ての条件で、まず試験片の中央部分から割れが発生し、時間の経過に伴い試験片の圧延直角方向に割れが拡大している。これは、曲げ試験の際、試験片の両端は単軸引張状態であるが、中央付近は平面ひずみ引張であることが挙げられる。マグネシウム合金と高張力鋼板の成形限界線図<sup>(1),(2)</sup>より、単軸引張での限界ひずみより平面ひずみ引張でのひずみの方が小さい。そのため、中央付近の方が端部分よりも割れが発生し易いと考えられる。

高張力鋼板では曲げ試験結果が全伸びの約2倍の値をとる理由として、単軸引張と曲げにおける引張ひずみ分布を考える。引張試験では試験片に均一に引張ひずみがかかるのに対して、曲げ試験では試験片の表面が最大の引張ひずみであり、中立面に近づくにつれ引張ひずみが小さくなっていく。そのため、曲げ試験では表面が全伸びに達しても、試験片の内部では割れのひずみに達することがないため、引張試験よりも割れにくくひずみが大きいと考えられる。しかし、マグネシウム合金では曲げ試験結果と全伸びがほぼ同じ値をとる。この理由として、マグネシウム合金(AZ31)の成形限界線図<sup>(1)</sup>より単軸引張のひずみは約0.3、平面ひずみ引張のひずみは約0.05と、とても小さい。そのため、内部に近づくにつれ引張ひずみは小さくなるが、表面の引張ひずみが小さいため同じ値をとると考えられる。

## 6. 結言

試験片の曲げ部分が観察できるエアベンディングを用いた曲げ試験機の開発した。高張力鋼板とマグネシウム合金板を供試材として、各3種類のダイスとパンチの条件で曲げ試験を行い、以下の知見を得た。

1. 曲げ試験において、まず中央部分から割れが発生し、時間経過に伴い個々の割れが発生し、試験片の圧延直角方向の両端部分に向かって拡大していく。
2. 単軸引張試験と曲げ試験の割れが発生するひずみを比較すると、高張力鋼板では約2倍の差が出た。一方、マグネシウム合金ではほぼ同じだった。
3. 破断時の局所ひずみは、試験片の幾何学的形状より正確に予測することが困難である。

## 参考文献

- 1) 金子純一、菅又信：軽金属，54-11(2004)，484-492。
- 2) 日野隆太郎：塑性と加工，53-621(2012)，25-29。

この成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。