

# 張出し試験のパンチ寸法・形状が成形限界線図に与える影響

羽津 将城

指導教員 吉田健吾 准教授

## 1. 緒言

金属材料を塑性加工して複雑な形状の部品を製造するには、優れた加工性が必要となる。また、部品の軽量化と薄肉化のためには高い強度が求められる。しかし、加工性と強度は相反するものである。それぞれの部品に適した材料を選定するためには、力学的特性や加工性を調査することが重要である。金属板材の場合は、力学的特性を調査する引張試験と実際の加工で必要となる加工性を評価する張出し試験、曲げ試験などがある。

張出し試験は、国際標準化機構 (ISO) で規格されている<sup>(1)</sup>。張出し試験には平頭パンチを用いた Marciniak 法と球頭パンチを用いた Nakajima 法の二つがある。ISO 規格で決められている張出し試験は直径 100 mm のパンチを使用するため、試験を行うには大きな板材が必要である。しかし、金属板材の研究、開発における試作品は、大きく、かつ大量に作ることが困難であり、ISO 規格における張出し試験は適さない。そのため、試験機の小型化が求められる。橋本<sup>(2)</sup>は球頭試験において、直径 50 mm のパンチを使用し、パンチの小型化の評価を行っている。パンチ径が大きい方が破断限界ひずみが大きい、パンチ径 50 mm~100 mm の範囲では支障がないと結論付けた。

本研究では、橋本の試験条件より小さい ISO 規格の 1/4 となる直径 25 mm のパンチを使用する。試験片は A6016-T4 板材を使用し、ひずみの測定方法はスクライブドサークル法を使用する。小型の平頭パンチと球頭パンチの実験と ISO 規格を満たす試験機の平頭パンチと球頭パンチの実験の計 4 種の結果を比較し、小型化の実用性や問題点を検討する。

## 2. 実験方法

### 2-1 張出し試験法

ISO 規格の張出し試験には、平頭パンチを使用した Marciniak test と球頭パンチを使用した Nakajima test の二つの試験がある。Marciniak test の概略図を Fig. 1 に示す。試験片と中央に穴の開いた駆動板をダイスで固定し、平頭パンチを上昇させることで試験片を変形させる。穴の開いた駆動板を用いることで、試験片とパンチの接触を防ぎ、摩擦の影響をなくすることができる。そのため、ひずみの勾配が緩やかな試験条件にすることと駆動板の穴部にひずみを集中させることができる。

Nakajima test の概略図を Fig. 2 に示す。試験片をダイスで固定し、球頭パンチを上昇させることで試験片を変形させる。試験片とパンチが接触しているため、摩擦が生じる。球頭であるため、ひずみは一樣ではない。また、平頭張出しのように中央付近で破断させることが難しい。

試験片の板幅を変えることで様々なひずみ比の試験ができる。破断した試験片の圧延方向ひずみと圧延方向に対して直角なひずみを成形限界図(FLD: Forming Limit Diagram)に示すことで成形性を評価する。

### 2-2 パンチ寸法

本研究では、ISO 規格に従う試験機を大型と呼ぶ。平頭張出し試験で使用するパンチは直径  $d=100$  mm, R 部  $R_f=10$  mm である。球頭張出し試験で使用するパンチは半径  $R_h=50$  mm である。

小型試験機のパンチ直径は ISO 規格の 1/4 とする。平頭張出し試験で使用するパンチは直径  $d=25$  mm, R 部  $R_f=5$  mm である。球頭張出し試験に使用するパンチは半径  $R_h=12.5$  mm である。

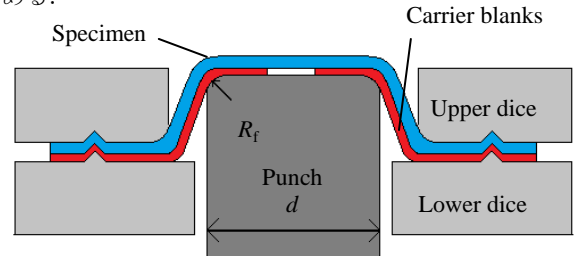


Fig. 1 Schematic diagram of Marciniak test

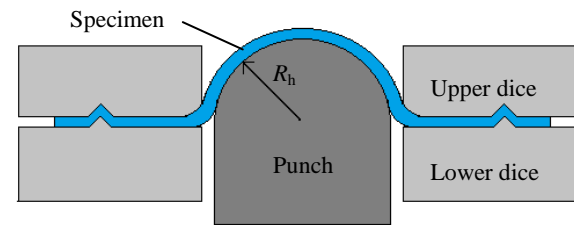


Fig. 2 Schematic diagram of Nakajima test

### 2-3 試験片

板厚 0.9 mm のアルミニウム合金板 (A6016-T4) を使用する。圧延方向の長さを  $l$ 、圧延直角方向の長さを  $w$  とおく。大型試験機に使用する試験片の寸法は  $l=220$  mm,  $150$ ,  $134$ ,  $125$ ,  $100$  mm とする。 $w=134$  mm は大型平頭の平面ひずみ引張でのみ使用する。小型試験機に使用する試験片の寸法は  $l=50$  mm,  $w=50$ ,  $40$ ,  $30$ ,  $25$  mm とする。

### 2-4 ひずみの計測方法

ひずみの測定はスクライブドサークル (SC: Scribed Circle) 法を使用する。スタンプを用いて試験片に SC を印字をする。SC は直径 5 mm の円と 5 mm の格子のグリッドで構成されている。円と格子を組み合わせた 2.5 mm のグリッドを基準長さとする。変形前と破断後の試験片のグリッドを測定し、圧延方向の対数ひずみ  $\epsilon_{RD}$  と圧延方向に対して直角方向の対数ひずみ  $\epsilon_{TD}$  を求める。ひずみの測定箇所は破断によりグリッドが欠損しておらず、かつ破断部に隣接するグリッドとする。また、ひずみ比  $\rho$  を  $\rho = \epsilon_{TD} / \epsilon_{RD}$  とする。

## 3. 実験結果

各試験条件において測定した  $\epsilon_{RD}$ ,  $\epsilon_{TD}$  を Fig. 3 に示す。同図に単軸引張において測定した  $\epsilon_{RD}$ ,  $\epsilon_{TD}$  を示す。また、同一条件における  $\epsilon_{RD}$ ,  $\epsilon_{TD}$  の平均を繋いだ線を示す。各試験条件の破断後の試験片を Fig. 4 に示す。上から順に大型平頭、大型球頭、小型平頭、小型球頭の試験片である。各試験片の下部にひずみ比  $\rho$ 、試験片の幅  $w$  を記載する。試験回数は各試験条件につき、2 回もしくは 3 回である。本研究では大型平頭パンチの実験結果を基準とし、パンチの寸法および形状が与える影響を検討する。

### 3-1 大型平頭張出し試験

Fig. 4 より試験片  $w=100$  mm はパンチ R 部で破断しているため、Fig. 3 には図示していない。他の試験片では、破断部は圧延方向に対して直角に割れ、試験片の中央を通る。Fig. 3 の青色の線で示すように  $\epsilon_{RD}$  は単軸引張から平面ひずみ引張 ( $\epsilon_{TD}=0$ ) では減少し、 $\epsilon_{TD}=0$  から  $\epsilon_{TD}=0.1$  付近まで増加し、 $\epsilon_{TD}=0.1$  付近から等二軸引張 ( $\epsilon_{TD}=\epsilon_{RD}=0.25$ ) まで減少する傾向がある。平面ひずみ引張の  $\epsilon_{RD}$  の平均は 0.21 である。

### 3-2 大型球頭張出し試験

Fig. 4 より試験片は圧延方向に対して直角に割れており、パンチの頂点で割れていない。 $w=220$  mm 試験片の頂点付近のひずみは約  $\epsilon_{TD}=\epsilon_{RD}=0.14$  であり、 $\rho=1$  である。一方、割れ付近は  $\epsilon_{TD}=0.15$ 、 $\epsilon_{RD}=0.30$  であり  $\rho=0.49$  である。このように頂点では等二軸であるものの、破断部のひずみ比は異なっている。よって、等二軸引張ができない。Fig. 3 の赤色の線で示すように  $\epsilon_{RD}$  は単軸引張から  $\epsilon_{TD}=0$  では減少し、 $\epsilon_{TD}=0$  から等二軸引張 ( $\epsilon_{TD}=0.15$ ) まで増加する傾向がある。平面ひずみ引張の  $\epsilon_{RD}$  の平均は 0.23 である。

大型平頭と比較すると、FLD は単軸引張から  $\epsilon_{TD}=0.1$  付近は同じ形状である。また、平面ひずみ引張の  $\epsilon_{RD}$  の差は 0.02 程度である。よって、大型球頭から得られる FLD は  $\rho=1$  付近を除き、大型平頭と同等であり、ひずみの差は最大 0.02 程度である。

### 3-3 小型平頭張出し試験

Fig. 4 より試験片  $w=25$  mm はパンチ R 部で破断しているため、Fig. 3 には図示していない。他の試験片は圧延方向に対して直角に割れている。パンチの頂点で割れていないが、破断部は駆動板の穴で生じた。Fig. 3 の緑色の線で示すように  $\epsilon_{RD}$  は単軸引張から  $\epsilon_{TD}=0$  では減少し、 $\epsilon_{TD}=0$  から  $\epsilon_{TD}=0.1$  付近まで増加し、 $\epsilon_{TD}=0.1$  付近から等二軸引張まで減少する傾向がある。平面ひずみ引張の  $\epsilon_{RD}$  の平均は 0.22 である。

大型平頭と比較すると、FLD は全範囲で同じ形状である。また、平面ひずみ引張の  $\epsilon_{RD}$  の差は 0.01 程度であり、等二軸引張の差は  $\epsilon_{TD}=0.05$ 、 $\epsilon_{RD}=0.02$  程度である。よって、小型平頭から得られる FLD は大型平頭とひずみの差は最大 0.05 程度で同等である。

### 3-4 小型球頭張出し試験

Fig. 4 より試験片は圧延方向に対して直角に割れており、パンチの頂点で割れていない。Fig. 3 の黄色色の線で示すように  $\epsilon_{RD}$  は単軸引張から  $\epsilon_{TD}=0$  では減少し、 $\epsilon_{TD}=0$  から  $\epsilon_{TD}=0.1$  付近まで増加し、 $\epsilon_{TD}=0.1$  付近から等二軸引張まで減少する傾向がある。平面ひずみ引張の  $\epsilon_{RD}$  の平均は 0.23 である。また、等二軸引張のひずみは大きくばらつく。 $\epsilon_{TD}$ 、 $\epsilon_{RD}$  の最大値と最小値の差はそれぞれ 0.13、0.14 程度である。

大型平頭と比較すると、FLD は全範囲で同じ形状である。また、平面ひずみ引張の  $\epsilon_{RD}$  の差は 0.02 程度であり、等二軸引張の差は  $\epsilon_{TD}=0.03$ 、 $\epsilon_{RD}=0.01$  程度である。よって、小型平頭から得られる FLD は大型平頭とひずみの差は最大 0.03 程度で同等である。

## 4. 結言

アルミニウム合金板を用いて大型平頭張出し試験、大型球頭張出し試験、小型平頭張出し試験、小型球頭張出し試験の 4 種の試験を行い、大型平頭張出し試験の結果を基準とし比較することで小型化に関する問題点や改善点について調査した。以下に研究で得られた知見について示す。

1. 各条件の FLD の平均値を比較し、ひずみの差は小さい。そのため、パンチの寸法・形状が FLD の結果に与える影響は小さい。

2. 球頭パンチでは等二軸引張が難しいことやひずみがばらつくことが問題である。

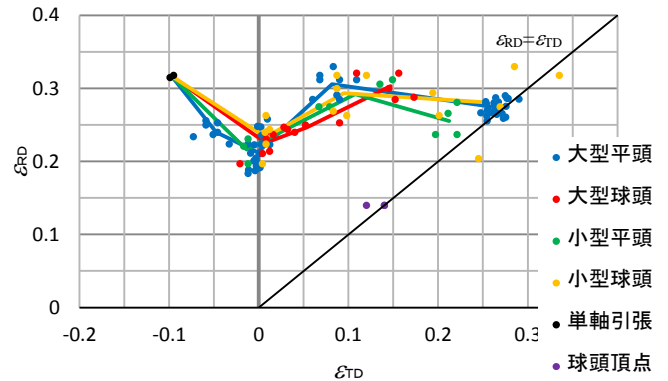


Fig. 3 FLD of the punch test

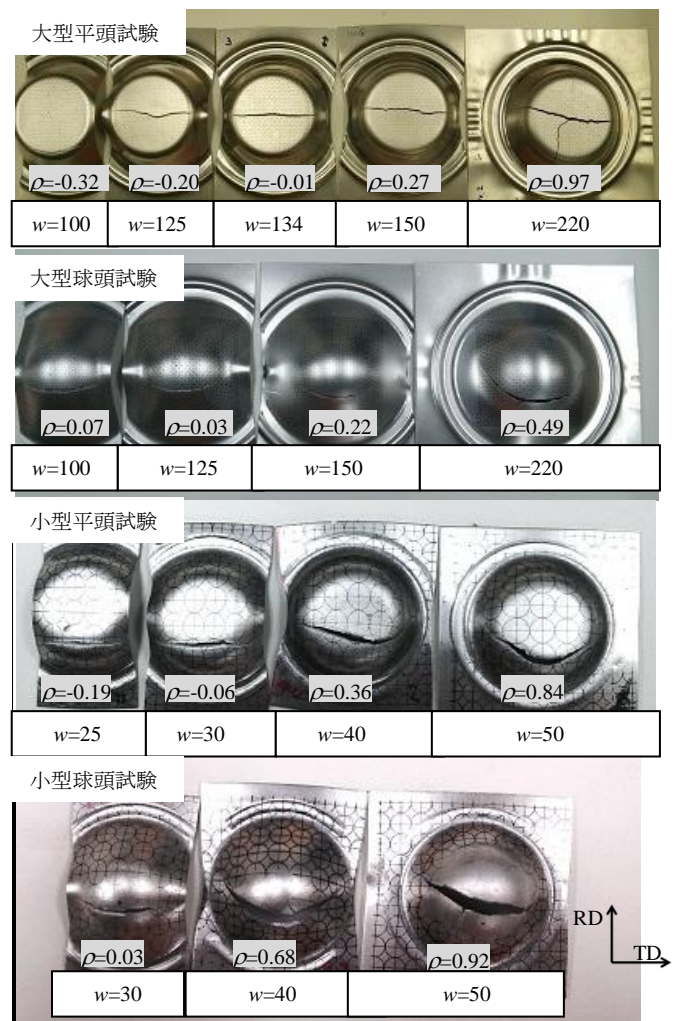


Fig. 4 Specimen after the break

## 参考文献

- 1) ISO12004-2, Metallic material-sheet and strip-determination of forming-limit curve, (2008).
- 2) 橋本浩二：塑性と加工，41 (2000) 473.

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。