

## 大ひずみを負荷できる単純せん断試験治具の開発

吉田聖哉

指導教員 吉田健吾 准教授

### 1. 緒言

塑性加工は、大量の製品を高速かつ低コストでつくり出すことができ、加工により強度やじん性の向上を図ることができる。さらに、歩留まりが高い利点があり、同一形状の製品を多量に、高速に、かつ安価に作ることを要求される現代社会のニーズと合致し大きく発展してきた。塑性加工を行うと材料にはひずみが生じ、ひずみが大きい場合には1を超えることもある<sup>2)</sup>。そのため大きなひずみ域での塑性変形挙動を知ることが、塑性加工を行う上で重要となる。

塑性変形挙動を知る方法として、古くから単軸引張試験が用いられてきた。しかし、単軸引張ではくびれ発生以降の応力-ひずみ曲線を得ることができない。大ひずみ域の応力-ひずみ曲線を得る方法としては、圧縮試験、せん断試験などがある。圧縮試験では、くびれが発生しないが、細長い材料では、座屈が発生することがある。せん断試験では、くびれが発生せず、座屈も起こらないため、大きなひずみまで応力-ひずみ曲線を得ることができる。Bouvier<sup>3)</sup>らは、せん断試験で試験片にほぼ均一な応力状態を誘起させるために、試験片のアスペクト比が重要になると述べている。しかし、適切なアスペクト比を得る過程については述べていない。

本研究では、島津製サーボパルスに設置でき、100 kNの荷重に耐えられるせん断試験用治具を開発する。そして、その治具でせん断試験を行い、大ひずみ域の応力-ひずみ曲線を測定する。さらに、試験片のせん断領域幅を一定とし、試験片長さを変えることで、適切なアスペクト比について検討する。試験片には厚さ1mm程のSPCEおよびA5052を用いる。

### 2. 単純せん断試験治具の開発

島津製サーボパルスに設置できる単純せん断試験治具の設計条件として以下の3点を満たすようにした。

- (1) 最大荷重 100 kN に耐えることができる。
- (2) 試験片のせん断変形部が CCD カメラで撮影できる。
- (3) 試験片厚さが異なる場合も治具中央で試験を行える。

Fig. 1 に単純せん断試験治具を示す。スペーサの挿入により試験片を治具の中央に合わせる。試験片は試験片固定部と押さえつけ部によって挟み、ボルトで固定する。CCD カメラでの撮影のために、押さえつけ部にテーパを付けた。試験機とフランジ部を固定し、下チャックを下降させることで、試験片をせん断変形させる。せん断変形で発生するモーメントは、シャフトで抑える。

### 3. 実験方法

#### 3.1 デジタル画像相関法

デジタル画像相関法を用いてひずみ計測を行った。試験片表面にスプレーでランダムパターンを付与し、CCD カメラで試験片を撮影することで、変形前後のランダムパターンの相関から変位を求めた。また、撮影領域全体のランダムパターンの変位分布からひずみ分布を得た。

#### 3.2 単軸引張試験

供試材は、厚さがそれぞれ 0.8 mm および 1 mm の SPCE および A5052 圧延板である。両者とも、幅 12.5 mm で平行部 75 mm の試験片を用いた。幅と長手方向の標点間距離はそれぞれ 11mm, 50 mm とした。圧延方向からの角度は 0° である。チャック変位速度は SPCE で 2.7 mm/min, A5052 で 3

mm/min, 軸方向のひずみ速度は  $5 \times 10^{-4}$  /s とした。

#### 3.3 単純せん断試験

試験片は圧延方向に切出した。試験片のせん断領域幅は 4 mm で一定として、長さは 20, 40, 60, 80, 100 mm とした。したがって、アスペクト比はそれぞれ 5, 10, 15, 20, 25 である。チャック変位速度を 0.0035 mm/s とし、チャック変位 7 mm に至るまで試験を行った。

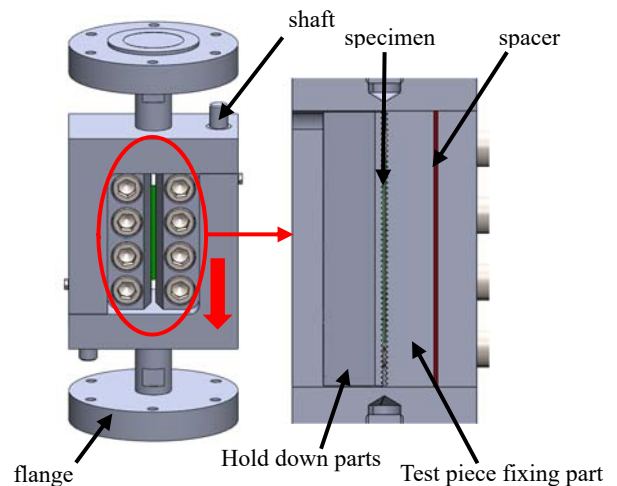


Fig. 1 Shear test jig

### 4. 実験結果

#### 4.1 単軸引張試験結果

単軸引張試験より同定された降伏応力、引張強さは、SPCE で 127 MPa, 274 MPa, A5052 で 83 MPa, 208 MPa であった。実験結果から得られた真応力-対数塑性ひずみ線図、Swift および Voce の式で単軸引張試験結果を近似した真応力-対数塑性ひずみ線図を Fig. 2 に示す。Swift の式を式(2)、Voce の式を式(3)に示す。

$$\sigma = k(\epsilon_0 + \epsilon^p)^n \quad (1)$$

$$\sigma = Y_\infty - (Y_\infty - Y_0)\exp(-C\epsilon^p) \quad (2)$$

近似に使用した範囲は対数塑性ひずみ 0.002 から、SPCE は 0.25 まで、A5052 は 0.17 までである。これらは、引張強さでの対数塑性ひずみである。近似までの範囲における実験と近似曲線の誤差は、SPCE および A5052 共に最大でも 10% であった。一方、破断以上の大ひずみ域では SPCE および A5052 共に、2つの近似曲線の真応力が大きく異なっている。ひずみが 0.8 での、2式の真応力の差は、SPCE では 150 MPa, A5052 では 160 MPa もある。以上のように、Swift および Voce の式による近似曲線は、引張強さ付近までは類似形状となるが、それ以降では差が大きくなる。

#### 4.2 単純せん断試験結果

単純せん断試験から得たせん断応力-せん断ひずみ線図を Fig. 3 に示す。SPCE はせん断ひずみ 0.4 まで、A5052 はせん断ひずみ 0.5 までの結果を得ることができた。せん断ひずみ  $\epsilon_{12}$  を相当塑性ひずみ  $\bar{\epsilon}$  に換算する。相当塑性ひずみは以下の式で与えられる。

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \epsilon_{12} \quad (3)$$

式(3)より、相当塑性ひずみは、SPCE で 0.5, A5052 で 0.6 と

なる。SPCE および A5052 共に、単軸引張より単純せん断で大きなひずみを得た。両者ともアスペクト比が 5 以外の 4 本の曲線は類似形状となった。アスペクト比が 5 とそれ以外を比較すると、せん断ひずみが 0.2 付近でせん断応力に 20 MPa の差異が出た。よって、アスペクト比は 10 以上がよい。

### 4.3 単軸引張試験の予測

せん断応力-せん断ひずみ線図に合うように Swift および Voce の式のパラメータを同定した。Fig. 4 にせん断応力-せん断ひずみ線図と、同定より得たせん断応力-せん断ひずみ線図を示す。また、式(3)により引張ひずみをせん断ひずみに換算した値も示す。換算したせん断ひずみは、SPCE で 0.35, A5052 で 0.17 である。単純せん断の方が、単軸引張に比べて、大きなひずみまで測定できている。SPCE では、Swift の式による結果は、せん断ひずみが 0.3 付近まで試験結果と一致した。また、Voce の式による結果は、せん断ひずみが 0.1 以降で試験結果と一致した。A5052 では、Swift および Voce の式による結果は、共にせん断ひずみが 0.1 以降で試験結果と一致した。

Fig. 4 で決定した Swift および Voce の式の各パラメータを用いて単軸引張試験の予測を行い、得られた真応力-対数塑性ひずみ線図、単軸引張試験結果から Swift および Voce の式で近似した真応力-対数塑性ひずみ線図を Fig. 5 に合わせて示す。SPCE および A5052 共に、単純せん断で決定した加工硬化式で単軸引張に合う結果を得ることができる。大ひずみ域での、2 つ近似曲線の真応力の差は、ひずみが 0.8 で SPCE は 50 MPa, A5052 は 5 MPa となっている。SPCE は、破断以上の大ひずみ域で、2 つの近似曲線の真応力の差が拡大していくが、A5052 は、破断以上の大ひずみ域でも、2 つの近似曲線の真応力の差は小さい。破断以上の大ひずみ域でみると、加工硬化式を単純せん断で決めた方が、単軸引張よりも真応力の差が明らかに小さい。単軸引張、単純せん断で得た各式での真応力差は、ひずみ 0.8 で、SPCE は 20 MPa, A5052 は Swift の式で 100 MPa, Voce の式で 10 MPa となる。

## 5. 考察

単軸引張試験結果から Swift および Voce の式で真応力-対数塑性ひずみ線図を予測した場合、2 つの近似曲線は引張強さまで類似形状となる。しかし高ひずみ域になるにつれて 2 つの近似曲線の真応力の差は大きくなる。一方、単純せん断試験結果から Swift および Voce の式のパラメータを推定し、予測した真応力-対数塑性ひずみ線図では、2 つの式の真応力の差が単軸引張試験結果で得られた差よりも小さい。そのため、単純せん断試験を用いて、大ひずみまでせん断応力-せん断ひずみ線図を測定し、単軸引張試験の予測を行うことは有用である。単純せん断試験で得られる 2 つの近似曲線においても、ひずみが大きくなるにつれて真応力の差は大きくなっている。そのため、完全に予測することは困難であると考えられる。本研究では、単純せん断試験結果より Swift および Voce の式のパラメータを手動で同定した。パラメータの同定方法を変更することで、大ひずみ域でもより真応力差の小さい予測ができる可能性がある。

## 6. 結言

単純せん断試験を実施できる治具の開発した。そして、SPCE と A5052 の単純せん断試験を行い、以下の知見を得た。

1. 単純せん断試験より、アスペクト比は 10 以上が好ましい。
2. 単純せん断試験を用いて単軸引張試験を予測した場合、破断以上の大ひずみ域での Swift と Voce の式の差は、単軸引張試験結果から予測した 2 つの式の差より小さくなる。

## 参考文献

- 1) 長田修次, 柳本潤: 基礎からわかる塑性加工, (1997), 1-13, コロナ社
- 2) 吉田総仁: 弾塑性力学の基礎, (1997), 121-122, 共立出版
- 3) S.Bouvier, et al. Journal of Materials Processing Technology, 172, (2006), 98-101

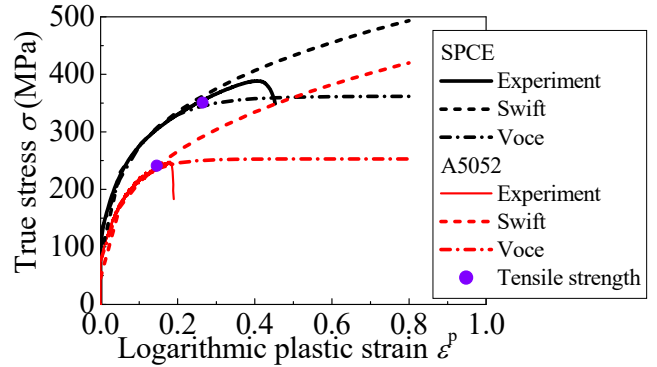


Fig. 2 True stress-logarithmic plasticity strain diagram

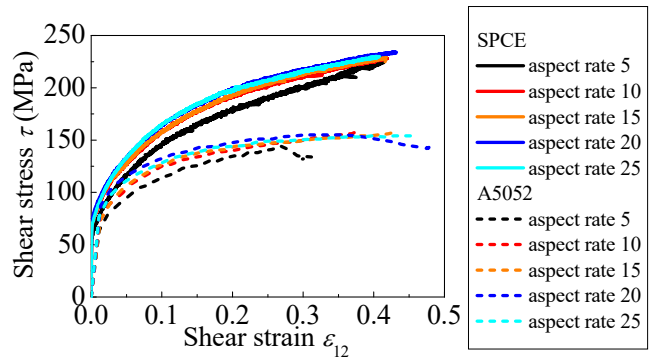


Fig. 3 Shear stress-shear strain diagram

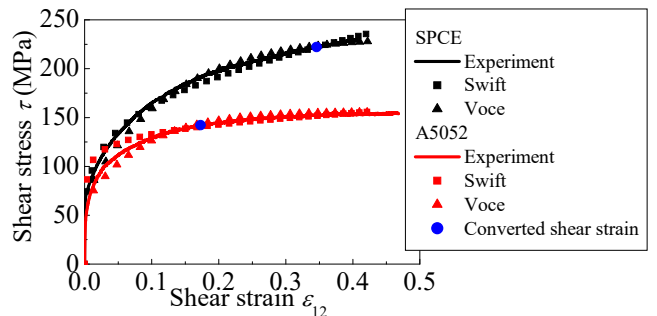


Fig. 4 Estimation of parameters and stress-strain diagram

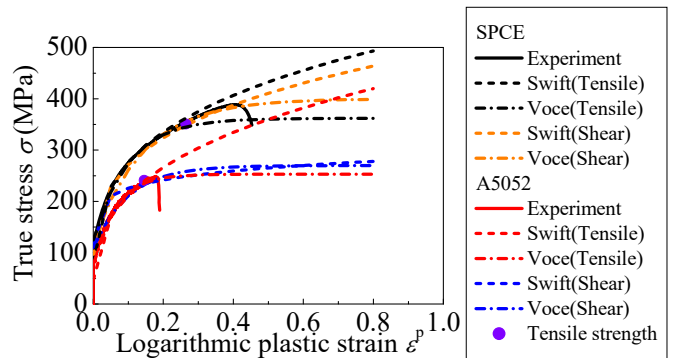


Fig. 5 Prediction of uniaxial tension