

# 材料特性がカップ成形シミュレーションに及ぼす影響

島貴護

指導教員 吉田健吾 准教授

## 1. 緒言

圧延を経て製造された金属板は板面方向に異方性を持つ。これを面内異方性と呼び、カップ成形時の材料流れや板厚変化に大きな影響を与える<sup>[1]</sup>。そのため、カップ成形を行うとカップの縁には耳が発生する。通常、耳は除去されて廃棄されるため、材料の歩留りを低下させる<sup>[2]</sup>。アルミニウム合金板は鋼板に比べて破断しやすい、 $r$  値が小さいなど、プレス成形が難しい材料である<sup>[3]</sup>。そのため耳の発生や成形不具合を高精度に予測し、生産性の向上や、アルミニウム合金板のプレス成形品への適用の拡大に繋げることが望まれる。

Yoon ら<sup>[4]</sup>は、Yld2004-18p 降伏関数が材料の降伏応力と  $r$  値の異方性を正確に表現することができており、6 または 8 個の耳を予測できること、カップ縁高さが実験結果に近くなることを示した。Banabic ら<sup>[5]</sup>は、BCC2008 降伏関数を用いており、材料の異方性、カップ縁高さ、耳の数、これらの実験結果を正確に表現することを示した。また、8 個以上の耳が発生するような複雑な異方性を持つ材料のシミュレーションにも、BCC2008 は対応できることを示した。

そこで本研究では、アルミニウム合金板 A6016-T4 の円筒深絞り試験を行い、カップ縁の高さを測定する。また Hill の 2 次降伏関数、および Yld2004 を用いてカップ成形シミュレーションを行う。実験結果と解析結果のカップ縁の高さを比較し、差が生じる要因を検討する。以上により、カップ成形シミュレーションの予測精度向上を目指す。

## 2. 円筒深絞り試験

### 2.1 実験方法

パンチ速度は 1mm/s とし、潤滑剤は牛脂を用いた。ダイとシワ抑え板の間に厚さ 1mm のスペーサーを設置した。ブランクの絞り比は 1.8 と 2.0 で、対応するブランク径は 59.4, 66.0mm である。しわ抑え力  $F_H$  は Siebel が提案した式(1)<sup>[3]</sup>より算出した。

$$F_H = \left\{ \left( \frac{D}{d_p} - 1 \right)^2 + 0.005 \frac{d_p}{t_0} \right\} \times \frac{\pi}{4} \left\{ D^2 - (d_p + r_d)^2 \right\} \frac{\sigma_B}{400} \quad (1)$$

ここで、 $D$  はブランク径、 $d_p$  はパンチ径 33.0mm、 $t_0$  は板厚 0.993mm、 $r_d$  はダイ肩半径 6mm、 $\sigma_B$  は材料の引張強さ 220MPa である。パンチ肩半径は 4.5mm、ダイ穴径は 37.7mm である。

### 2.2 供試材

供試材はアルミニウム合金板 A6016-T4 を用いた。引張強さは 220MPa である。A6016-T4 の  $r$  値分布と面内降伏応力を Fig. 1 と Fig. 2 に示す。横軸は圧延方向(RD)からの角度である。 $r$  値分布は下に凸となっており、45°で極小となる。最大値と最小値の差は約 0.4 である。面内降伏応力は下に凸となっており、60°で極小となる。最大値と最小値の差は約 10MPa である。単軸引張試験で得られた応力ひずみ曲線を Voce の式を用いて近似した式を以下に示す。

$$\sigma = 358.96 - 202.16 \times \exp(-11.508 \times \epsilon^p) \quad (2)$$

### 2.3 実験結果

Fig. 3 と Fig. 4 に絞り比 1.8, 2.0 に対するカップ縁高さを示す。横軸は RD からの角度である。カップ縁高さを 360°測定し、円筒深絞り問題の対称性より、カップ縁高さを 0°から

90°に平均化した。すべての絞り比において、カップ縁高さは RD と TD で山となり、RD から 45°方向で谷となった。

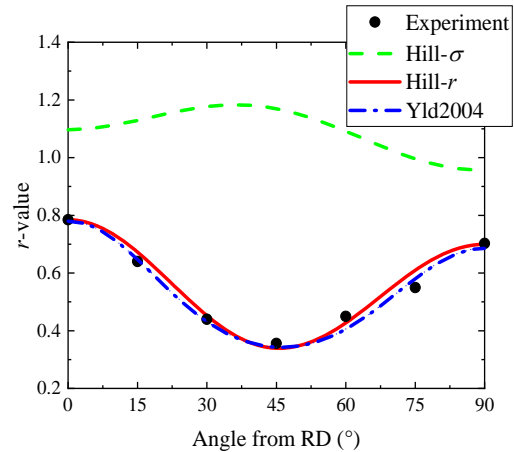


Fig. 1  $r$ -value with tensile directions

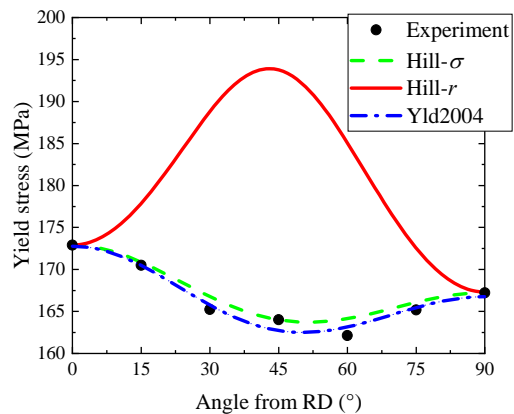


Fig. 2 Yield stress with tensile directions

## 3. カップ成形シミュレーション

### 3.1 材料の異方性

異方性降伏関数は Hill の 2 次降伏関数、および Yld2004 を用いた。異方性係数は、Hill では RD から 0°、45°、90°方向の降伏応力 ( $Y_0, Y_{45}, Y_{90}$ ) と等 2 軸引張降伏応力  $Y_b$  を用いたものと、RD から 0°、45°、90°方向の  $r$  値 ( $r_0, r_{45}, r_{90}$ ) と  $Y_0$  を用いた 2 つの方法で決定した。Yld2004 は RD から TD まで 15° 毎の降伏応力と  $r$  値、また  $Y_b$  と等 2 軸引張における塑性ひずみ速度比を用いて異方性係数を決定した。次数  $M$  は 8 とした。それぞれを、Hill- $\sigma$ 、Hill- $r$ 、Yld2004 と表す。Fig. 1 と Fig. 2 に異方性降伏関数により計算された  $r$  値分布と面内降伏応力を示す。Fig. 1 より、Hill- $r$  と Yld2004 は実験結果と傾向が一致しているが、Hill- $\sigma$  は実験結果よりも大きく、上に凸となった。Fig. 2 より、Hill- $\sigma$  と Yld2004 は実験結果と傾向が一致しているが、Hill- $r$  は上に凸となり、45°付近で極大となった。

### 3.2 解析方法

FEM 解析ソフト Marc Mentat 2016 を利用し、カップ成形

シミュレーションを行った。円筒深絞り問題の対称性より、1/4をモデル化した。ブランクは4節点薄肉シェルを用いた。初期板厚は0.993mmとした。ヤング率は67.4GPa、ポアソン比は0.347とした。メッシュ分割は、円周方向に36分割、半径方向は約1mmに分割した。ブランク中心の半径方向は、絞り比1.8のブランクでは2mmとし、絞り比2.0は1.5mmに分割した。金型は剛体のシェルとした。ダイーしわ抑え板間は1mmの一定隙間とした。応力ひずみ曲線は式(2)を用いた。

### 3.2 解析結果

Fig. 3 と Fig. 4 に、絞り比1.8, 2.0に対するカップ縁高さの解析結果を示す。絞り比1.8は摩擦係数を $\mu=0.115$ とした。一方、絞り比2.0の場合は摩擦係数を $\mu=0$ とした。ただし、Hill- $\sigma$ については摩擦係数を $\mu=0.115$ とした結果も示す。両絞り比において、Hill- $r$ とYld2004は下に凸で、45°付近で極小となった。Hill- $\sigma$ は上に凸で、45°付近で極大となった。

両絞り比において、Hill- $\sigma$ は上に凸であり、実験結果とは反対である。Fig. 1 に示す $r$ 値分布より、Hill- $\sigma$ は実験結果と凹凸が逆になっている。 $r$ 値が大きい方向では $r$ 値が小さい方向と比較して、絞り変形による板厚増加が起こりにくいため、板幅方向のひずみが大きくなり耳となる<sup>[3]</sup>。そして、 $r$ 値分布とカップ縁高さの凸方向は一致する。

両絞り比において、Hill- $r$ のカップ縁高さは実験結果よりも低くなっており、45°でその差が最大となっている。Fig. 2 より、Hill- $r$ は面内降伏応力を45°付近で約30MPaも大きく計算している。つまり、45°付近では材料の降伏応力が大きく、塑性変形しにくい。さらに、 $r$ 値が小さい45°方向は、板幅方向のひずみの増加も小さく、カップ縁高さは谷となる。この2つの要因により、Hill- $r$ のカップ縁高さは実験結果よりも低く、45°付近で過小に計算された。

両絞り比において、Yld2004はカップ縁高さが実験結果と45°付近で一致している。Fig. 1 と Fig. 2 より、Yld2004は材料の異方性を正確に表現できているためである。

### 4. 考察

Hill- $\sigma$ とHill- $r$ の解析結果から、カップ縁の形状は $r$ 値の異方性による影響が支配的であることがわかった。しかし、降伏応力の大きさの影響も受けており、降伏応力を大きく計算すると、カップ縁高さは低くなった。したがって、A6016-T4のカップ成形シミュレーションを行う場合、 $r$ 値と降伏応力の異方性を実験で正確に測定し、正確に予測できる降伏関数を用いる必要がある。

Yoonら<sup>[4]</sup>はYld2004を用いて解析を行っており、カップ縁高さの実験結果と解析結果が良く一致することを示した。本実験では、実験結果とYld2004の解析結果より、カップ縁高さは45°付近ではほぼ一致しているが、0°、90°付近ではYld2004が低くなった。この原因として、実験では摩擦力が生じ、しわ抑え力を一定としているが、解析では摩擦係数を $\mu=0$ とし、一定隙間としていることが挙げられる。ブランクが絞り込まれていくと、耳となるフランジ部のみがダイとしわ抑え板に挟まれて、しわ抑え力と摩擦力を受けるときがある。そのため、フランジ部が円周方向に引張を受け、耳が高くなる。Hill- $\sigma$ の摩擦ありとなしを比較すると、両者の差は耳の部分で最大になっている。次に、しわ抑え力一定の場合は、板厚の変化に伴いしわ抑え板も上下に移動するため、板厚が最も厚い部分を抑える。一定隙間では、強い力で抑えており板厚が1mm以上の領域にしわ抑え力が作用する。この違いにより、面圧や、板厚分布、カップ縁高さに差が生じると考えられる。Yld2004では、以上が考慮されていないため、カップ

縁高さは0°、90°付近で低くなったと考えられる。

### 5. 結言

A6016-T4を供試材として円筒深絞り試験と、カップ成形シミュレーションを行った結果、以下の知見を得た。

- (1) カップ縁の形状は $r$ 値の異方性の影響を強く受けており、 $r$ 値が小さい方向では、カップ縁高さは谷となる。そして、 $r$ 値の影響が支配的であるが、降伏応力の影響も受けており、降伏応力が大きい場合、カップ縁高さは低くなる。したがって、A6016-T4のカップ成形シミュレーションを行う場合は、 $r$ 値と降伏応力の異方性を高精度に予測できる降伏関数を用いる必要がある。
- (2) Yld2004においては、しわ抑え力を一定とし、摩擦力を考慮して解析を行うことで、カップ縁高さは実験結果に近づくと考えられる。

### 参考文献

- [1] 濱崎洋：軽金属, 65-11 (2015), 536-541
- [2] 土田信ら：軽金属, 58-10 (2008), 497-502
- [3] 日本塑性加工学会：わかりやすいプレス加工, 日刊工業新聞社, (2011), 51-67
- [4] J.W. Yoon, et al. International Journal of plasticity 22 (2006) 174-193
- [5] D. Banabic, et al. European Journal of Mechanics A/Solids 45 (2014), 59-74

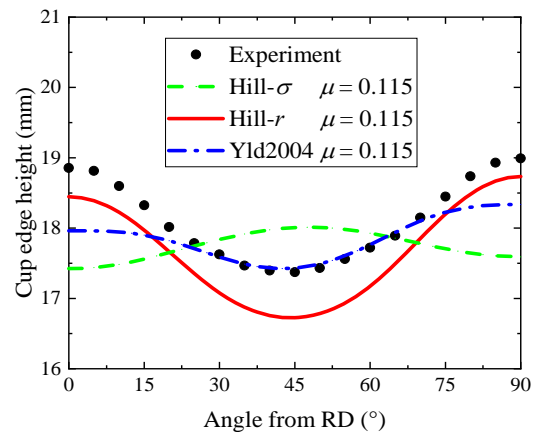


Fig. 3 Cup edge height of drawing ratio 1.8

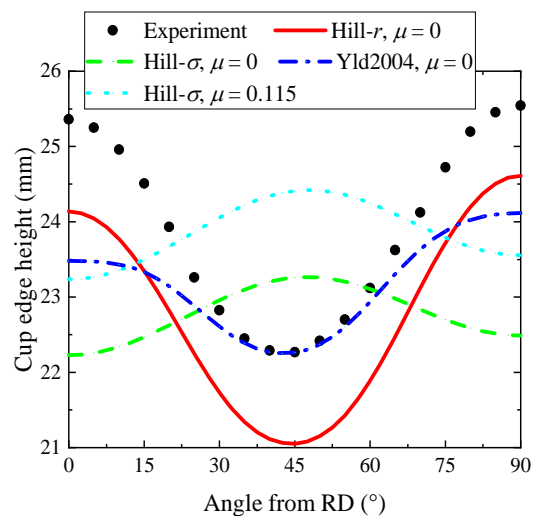


Fig. 4 Cup edge height of drawing ratio 2.0