

# 異方性が穴広げ成形シミュレーションに及ぼす影響

竹森友亮

指導教員 吉田健吾 准教授

## 1. 緒言

近年、自動車は私たちの生活に欠かせない製品である。自動車車体は主にプレス加工で製造されており、プレス加工時の伸びフランジ変形部での成形不良が問題視されている。伸びフランジ変形部の割れは、穴広げ試験における穴縁から発生する割れで再現できるため、穴広げ試験はプレス加工時の成形不良を議論するために有用な手段である。したがって、穴広げ成形シミュレーションにより材料の割れを予測することができれば、伸びフランジ変形部の割れの予測が可能となる。

Korkolis ら<sup>1)</sup>は、アルミニウム合金板 A6022-T4 材について異方性降伏関数 Yld2000-2d を適用し、穴広げ成形シミュレーションを行っている。穴付近の板厚の変化が極大、極小となる角度は一致しているものの、絶対値は解析と実験で外れていた。予測の改善として、適用する異方性降伏関数の検討が必要である。

本研究では、初期穴径が 30 mm のアルミニウム合金板 A6016-T4 の穴広げ試験を行い、異方性が穴広げ成形シミュレーションに及ぼす影響を明らかにする。等方性を仮定した Von Mises と、異方性降伏関数である Hill の 2 次降伏関数を用いて解析を行う。また解析モデルや解析条件が計算結果に与える影響を検証する。

## 2. 実験・解析方法

### 2.1. 非線形有限要素解析

非線形有限要素解析には、Marc Software Corporation の Marc を用いる。Solid Works で張出し試験機と穴広げ試験片の解析モデルを作成し、Marc に読み込む。解析は対称性を考慮し 1/4 モデルで行う。解析で用いる降伏関数は、Von Mises と Hill の 2 次降伏関数である。

### 2.2. Hill の 2 次降伏関数

異方性主軸の圧延方向を  $\hat{e}_1$ 、圧延直角方向を  $\hat{e}_2$ 、板厚方向を  $\hat{e}_3$ 、変形抵抗を  $g$ 、相当応力を  $\bar{\sigma}$  とすると、異方性材料における降伏条件は、

$$f = \bar{\sigma}(\sigma, \hat{e}_i) - g(\bar{\epsilon}^p) = 0 \quad (1)$$

で与えられる。本解析で用いる Marc に組み込まれている Hill の 2 次降伏関数の相当応力は、

$$\bar{\sigma} = \left[ \frac{1}{2} \{ a_1(\hat{\sigma}_{22} - \hat{\sigma}_{33})^2 + a_2(\hat{\sigma}_{33} - \hat{\sigma}_{11})^2 + a_3(\hat{\sigma}_{11} - \hat{\sigma}_{22})^2 + 3a_4\hat{\tau}_{31}^2 + 3a_5\hat{\tau}_{23}^2 + 3a_6\hat{\tau}_{12}^2 \} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

と定義されている。ここで  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  は異方性係数、 $\hat{\sigma}_{ii}$  と  $\hat{\tau}_{ij}$  はそれぞれ異方性主軸における垂直応力とせん断応力である。Hill の 2 次降伏関数は、単軸引張試験より得られた  $r$  値と圧延方向から  $0^\circ$  の降伏応力から求めた異方性係数（以下、Hill-r）と、圧延方向から  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  の単軸引張と等 2 軸引張試験より得られた降伏応力から求めた異方性係数（以下、Hill- $\sigma$ ）の 2 種類で行う。

### 2.3. 供試材

A6016-T4 材の単軸引張試験と、Hill の 2 次降伏関数から得られた  $r$  値分布と降伏応力分布を Fig. 1, 2 に示す。単軸引張試験は圧延方向から  $0^\circ$  から  $90^\circ$  までの  $15^\circ$  刻みの 7 方向で行い、 $r$  値は対数塑性ひずみが 0.03 の時の値を用いた。 $r$  値は板厚方向に変形しやすいか、板幅方向に変形しやすい

いかを表すパラメータであり、 $r$  値の大小により板厚方向の変形挙動は変わる。本研究で用いる供試材には Fig. 1 のような異方性があるといえる。また降伏応力は大きいほど塑性変形が生じにくい。

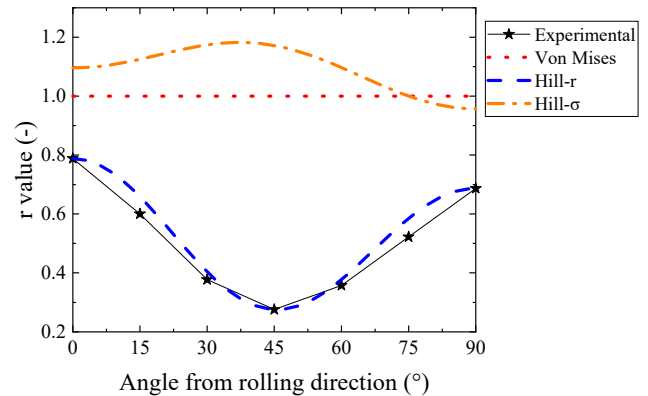


Fig. 1 Distribution of In-plane  $r$  value

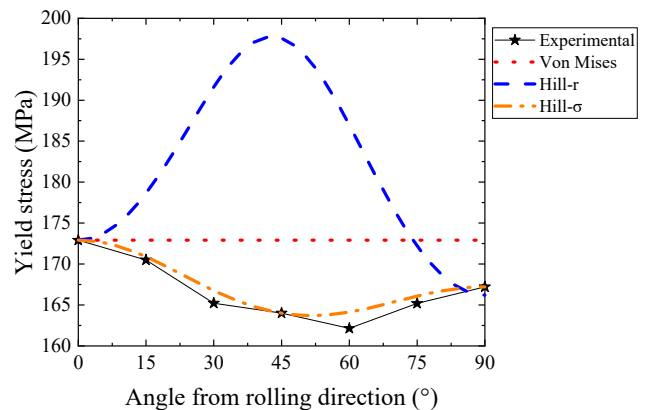


Fig. 2 Distribution of In-plane yield stress

### 2.4. 穴広げ試験

穴広げ試験片は厚さ 0.999 mm の A6016-T4 圧延板で、 $190 \times 190$  mm の板の中心に放電加工で 30 mm 穴を開けたものである。穴広げ試験には、直径 100 mm、パンチ肩半径 10 mm の平頭パンチを持つ張出し試験機を用いた。パンチ上昇速度は 0.41 mm/s で行った。穴広げ試験はパンチストローク 19.65 mm と破断が発生するまで行った。締め付けトルクは 100 kN・m とした。

穴広げ試験における試験片の穴縁は、円周方向の単軸引張状態である<sup>2)</sup>。つまり圧延方向から  $0^\circ$  の穴縁部では  $90^\circ$  方向の単軸引張、圧延方向から  $90^\circ$  の穴縁部では  $0^\circ$  方向の単軸引張試験で得られた材料特性値が関係する。

### 3. 実験・解析結果

#### 3.1. 穴縁近傍の板厚ひずみ分布

穴縁から 2 mm の位置における板厚ひずみ分布について、実験結果と解析結果を Fig. 3 に示す。横軸は圧延方向からの角度である。実験結果は圧延方向からの角度 90° でおおそ対称、解析は 1/4 モデルで行っているため、実験結果と解析結果の比較は 0° ~90° で行う。実験結果は圧延方向、圧延直角方向で極大、45° 方向付近で極小となった。Von Mises は等方性を仮定しているため均一な分布となっている。Hill-r は圧延方向、圧延直角方向で極大、45° 方向で極小となり、極大値と極小値の発生角度が実験結果とおおよそ一致した。それに対して Hill-σ は、45° 方向で極大、圧延方向、圧延直角方向で極小となり、実験値、Hill-r と正反対の結果となった。

穴縁では単軸引張状態であるため、板厚ひずみ分布は、単軸引張試験から得られた  $r$  値と降伏応力に関係している。 $r$  が小さいときは板厚減少が大きくなる。Fig. 1 より実験値と Hill-r の  $r$  値分布はおおよそ一致しているため、板厚ひずみ分布の極大、極小の発生角度もおおよそ一致した。また Fig. 2 より Hill-r は実験値よりも 45° の降伏応力が大きく計算されており、塑性変形が起りにくいことが、実験値と計算値の絶対値の差につながった。一方 Hill-σ の  $r$  値分布は極大、極小が実験値と正反対であるため、Fig. 3 に示すように板厚ひずみ分布の極大、極小は実験結果と正反対の結果になった。

#### 3.2. 半径方向の板厚ひずみ分布

半径方向の板厚ひずみ分布について、実験結果と解析結果を Fig. 4, 5 に示す。横軸は穴縁からの距離である。Fig. 4 は圧延方向と圧延直角方向における結果である。実験結果では穴縁からの距離の増加に伴い板厚ひずみの値は減少している。Von Mises と Hill-σ については同様の傾向を示した計算結果となった。Hill-r は半径座標 10 mm で極小となる極小型であり、他の降伏関数や実験結果とは全く異なる計算結果となった。圧延方向と圧延直角方向の計算結果には大きな差はなかった。Fig. 5 は 45° 方向における結果である。実験結果では穴縁からの距離の増加に伴い板厚ひずみの値は減少しており、すべての降伏関数でこの傾向と一致する。Hill-r は上に凸の放物線を描いており、穴縁からの距離の増加に伴い計算値は実験値に近づいている。Von Mises は等方性を仮定しているため Fig. 4, 5 で計算値は一致した。

Fig. 6 に各降伏関数から得た降伏曲面を示す。縦軸は円周方向の垂直応力、横軸は半径方向の垂直応力で、それぞれ圧延方向の降伏応力で無次元化した。また圧延方向の穴縁から 2 mm と 10 mm の位置での半径方向と円周方向の応力比を求め、降伏曲面内にプロットした。Fig. 6 で降伏曲面と、応力比を表す破線が交わる箇所をそれぞれ A, B とする。A から B の変化で、Hill-r は降伏応力の高くなる度合いが Von Mises, Hill-σ と比較して低く、強度が低くなる。そのため穴縁からの距離が増加するほど Hill-r は板厚減少が大きく、板厚ひずみは増加する。また A と B における Von Mises と Hill-σ の降伏曲面はおおよそ一致しており Hill-r よりも後に降伏するので、同様の比率で板厚ひずみは減少する。

### 4. 結言

初期穴径 30 mm の A6016-T4 圧延板の穴広げ試験と非線形有限要素解析の結果から次の知見を得た。

1. 穴縁近傍は単軸応力状態であるため、穴縁近傍の板厚変形は単軸引張試験から得られた  $r$  値と降伏応力が大きく関わっている。
2. 半径方向の板厚の解析結果は降伏曲面と半径方向、円周方向の応力比を用いて説明できる。

### 参考文献

- 1) Yannis P. Korkolis, Benjamin Brownell, Sam Coppiters, Haobin Tian : Journal of Physics Conference Series 734
- 2) 黒崎靖ら：日本機械学会論文集(C 編), 51 巻 462 号(1985)

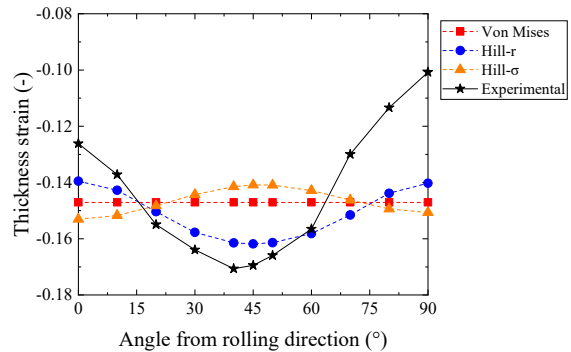


Fig. 3 Thickness strain along bore edge

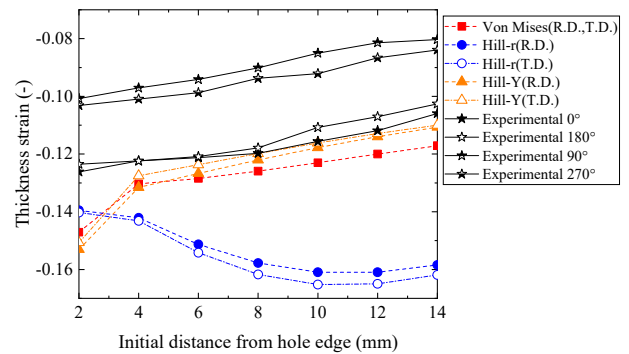


Fig. 4 Radial thickness strain R.D. and T.D.

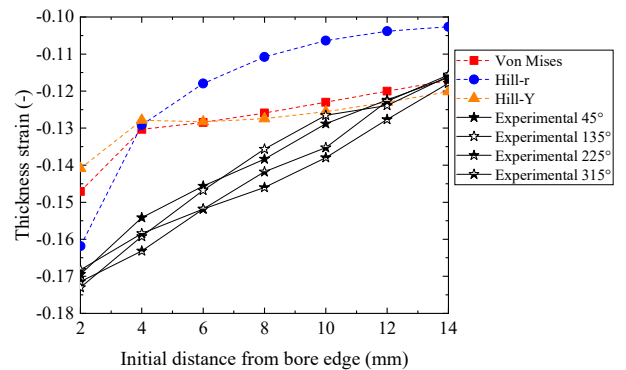


Fig. 5 Radial thickness strain 45 direction

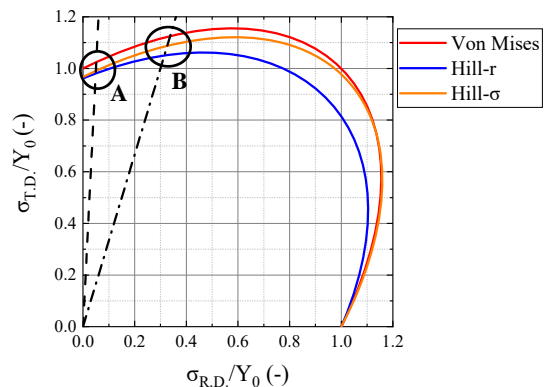


Fig. 6 Yield surface with stress ratio

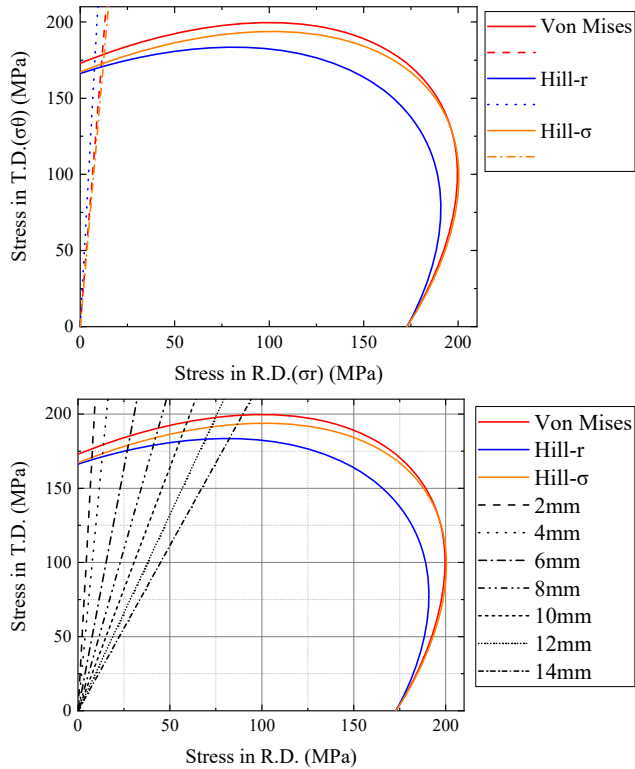


Fig. 6 Yield surface

#### 4. 考察

穴広げ試験の穴縁近傍は単軸引張状態であるので、その位置での板厚ひずみは、単軸引張試験により正確な材料特性値が測定できていれば予測は可能であると考えられる。Fig. 3で計算値の極大と極小が実験値とおよそ一致したのは、 $r$  値が影響していることを示した。Kokolis ら<sup>3)</sup>は Yld2000-2d を用いて、穴縁近傍の板厚分布の解析を行っている。Yld2000-2dでの  $r$  値分布は圧延方向、圧延直角方向で極大、 $45^\circ$  方向で極小であり、本研究の Hill-r での  $r$  値と同様の異方性を示している。本研究の結果と同様に、Kokolis らの解析結果は極大、極小の発生箇所は一致していたが、その値に関しては大きな差が生じていた。この結果を踏まえて、予測改善のために材料モデルの検討を挙げている。したがって、試験片モデルに適切な材料特性値や異方性降伏関数を当てはめることが、予測精度の向上につながると考える。

橋本ら<sup>1)</sup>は 590MPa 級冷延鋼板を用いて各降伏関数を適用し、穴広げ成形シミュレーションを行っている。適用した降伏関数は、2 軸引張試験結果の再現精度が最も優れていた Yld2000-2d で、その計算値が実験値に最も近かったため、2 軸引張試験に基づいて適切な異方性降伏関数を選択することが必要不可欠であると述べている。