

結晶塑性モデルを利用した板成形シミュレーションの高度化に関する研究

静岡大学 機械工学科

准教授 吉田 健吾

(2021年度 一般研究開発助成 AF-2021024-B3)

キーワード：結晶塑性モデル，有限要素法，くびれ

1. 緒 言

結晶塑性モデルは集合組織に起因する塑性異方性を予測できるため、板材成形の分野で高い注目を集めている。過去20年間にわたり、さまざまな板材成形シミュレーションに結晶塑性モデルが適用されてきた^{1),2),3)}。結晶塑性有限要素法(CPFEM)を用いた成形シミュレーションにおいて、円筒深絞りが頻繁に扱われる加工方法である。一般的には、結晶粒径はブランク寸法よりも3桁以上小さいため、板材成形シミュレーションにおいては均質化方法が必要となる。Zhaoら⁴⁾はTaylorモデルを用いて、アルミニウム合金板の代表的な集合組織成分がカップ形状に与える影響を調査した。Raabeら⁵⁾は同様の方法を鋼板に適用した。Rousselierら⁶⁾は少数の結晶方位を用いて集合組織を近似的に表すことで、計算コストを削減する手法を開発し、深絞り成形に適用している。BarrettとKnezevic⁷⁾は、弾塑性セルフコンシステントモデルを用いて、アルミ合金板の深絞り成形を解析している。一方、Hamaら⁸⁾は、すべりと双晶の両方を考慮できる結晶塑性モデルを用いて、純チタン板の深絞り成形を解析した。

このように、過去20年間で円筒深絞りシミュレーションにおいて結晶塑性モデルが広く用いられており、カップ形状の予測が精力的に行われてきた。一方、限界絞り比(LDR)は、絞り性を表す広く知られた指標であるにもかかわらず、著者の知る限り、この点を研究した報告がない。LDRは2軸応力状態における流動応力の異方性または降伏面形状によって支配されることが知られている。フランジ部の材料要素は半径方向に伸び、周方向に圧縮される引張ー圧縮複合負荷を受け、カップ壁の底部では平面ひずみ引張を受ける。つまり、これら2つの応力状態下での流動応力の相対的強度がLDRを支配する。

結晶塑性モデルは、集合組織に起因する2軸応力状態の流動応力の異方性も予測可能である。BarlatとRichmond⁹⁾、Lequeuら¹⁰⁾は、アルミ合金板の降伏曲面に対する集合組織の影響を調査した。Kuwabaraら¹¹⁾は、等塑性仕事面を実験的に測定し、Taylorモデルを用いた多結晶解析が妥当であることを示した。

現在、2軸引張試験機は多くの研究室に導入されている。一方で、引張ー圧縮複合応力状態に対する2軸応力試験は依然として限定的である。KuwabaraとNakajima¹²⁾,

Yangら¹³⁾、Yoshidaら¹⁴⁾は、2軸応力試験機に独自の座屈防止治具を組み込み、引張と圧縮を同時に加えた。これにより、応力空間の第2象限および第4象限における降伏応力を測定することに成功した。これらの2軸応力試験は、平面ひずみ引張および引張ー圧縮複合応力状態での降伏応力・流動応力の評価が可能であり、LDRにとって重要な材料特性を測定できる試験方法である。

本研究は、結晶塑性モデルを用いた有限要素法解析について、さまざまな応力状態下での材料の塑性挙動の予測精度、および円筒深絞り成形におけるカップ高さおよびLDRの予測精度を明らかにすることを目的とする。単軸引張、2軸引張、引張ー圧縮複合2軸応力試験を行い、供試材の塑性異方性および加工硬化挙動を評価する。結晶塑性モデルを用いた解析によってR値および2軸流動応力の予測精度を評価する。その後、さまざまな絞り比で円筒深絞りを行い、カップ高さ、LDR、パンチカーストローク曲線を評価する。

2. 実験方法

2.1 材料試験

供試材は板厚1.0 mmのA5052-O板である。単軸引張試験は引張方向と圧延方向のなす角度をθとして、 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の7方向に対して実施した。

2軸応力試験は、圧延方向をx軸、圧延直角方向をy軸とし、応力比が $\sigma_x:\sigma_y = 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$ の2軸引張、 $\sigma_x:\sigma_y = 1:-2, 1:-1, 2:-1, -1:2, -2:1, -1:1$ の引張ー圧縮組合せ負荷を行った。

2.2 円筒深絞り試験

円筒深絞り加工の金型寸法は、パンチ直径60 mm、パンチ肩半径6 mm、ダイス穴直径64 mm、ダイス肩半径6 mmである。ブランク直径は、108, 114, 120, 126, 132, 138 mmとした。ブランク直径/パンチ直径で定義した絞り比DRは1.8~2.3で、0.1刻みである。初期のフランジ部の面圧が降伏応力と引張強さの平均値の1%となるようにしわ抑え力を設定した。潤滑剤には二硫化モリブデンを使用した。フランジ部のピンチングを抑制するために、ダイスとしわ抑え板の間には1 mmのスペーサーを設置した。

3. 多結晶体の均質化

3.1 結晶塑性モデル

本研究では、粘塑性型の結晶塑性モデルを用いた。すべり系 α のすべり速度 $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ は次式で与えた。

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0 \operatorname{sgn}(\tau^{(\alpha)}) \left(\frac{|\tau^{(\alpha)}|}{g^{(\alpha)}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\gamma}_0$ は基準すべり速度、 $\tau^{(\alpha)}$ は分解せん断応力、 $g^{(\alpha)}$ はすべり抵抗、 m はひずみ速度感受性指数である。

$g^{(\alpha)}$ の初期値は臨界分解せん断応力 τ_0 とし、その発展は次式で与えた。

$$\dot{g}^{(\alpha)} = h \sum_{\beta} |\dot{\gamma}^{(\beta)}| \quad (2)$$

ここで、 h は硬化率であり、次式で与えた。

$$h = C_1 \tau_1 \exp(-C_1 \gamma_A) + C_2 \tau_2 \exp(-C_2 \gamma_A) \quad (3)$$

ここで、 C_1, C_2, τ_1, τ_2 は材料定数、 γ_A は次式で与えられる累積すべりである。

$$\gamma_A = \int_0^t \sum_{\beta} |\dot{\gamma}^{(\beta)}| dt \quad (4)$$

3.2 Two grain cluster モデル

均質化方法として Two-grain cluster (TGC) モデルを用いた。2つの結晶粒I、IIを考慮し、それらの速度勾配 $\mathbf{L}_I, \mathbf{L}_{II}$ は $\tilde{\mathbf{L}}$ と擾乱成分 $\tilde{\mathbf{L}}$ を用いて次式で与える。

$$\mathbf{L}_I = \tilde{\mathbf{L}} + \tilde{\mathbf{L}}, \quad \mathbf{L}_{II} = \tilde{\mathbf{L}} - \tilde{\mathbf{L}} \quad (5)$$

$\tilde{\mathbf{L}}$ は結晶粒界の適合条件を満たすように次式で与えた。

$$\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{c} \otimes \mathbf{n} \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{c} は緩和ベクトル、 \mathbf{n} は結晶粒界の単位法線ベクトルである。結晶粒界の力のつり合いは、Cauchy 応力 $\boldsymbol{\sigma}$ を用いて次式で与えられる。

$$\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}_I = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{II} \quad (7)$$

式(5)～(7)および構成則を用いて、 \mathbf{c} を決定した。

4. 実験結果および解析結果

4.1 集合組織

供試材の極点図をX線回折により測定した。供試材を研磨することで、板厚の100%，87.5%，75%，62.5%，50%の位置で測定した。その後、結晶方位分布関数を解析した。板厚の100%，87.5%，75%，62.5%，50%の位置での測定結果を加重平均した集合組織の{111}極点図を図1に示す。重みは板厚の100%，50%は0.125、それ以外は0.25とした。集合組織はcube方位に発達してい

た。各集合組織データより5000方位を創生し、結晶塑性解析に使用した。

4.2 単軸引張試験

圧延方向($\theta = 0^\circ$)の単軸引張の応力-ひずみ曲線と解析結果が一致するように材料特性を決定した。以後の解析では、 $\tau_0 = 37.9$ MPa, $\tau_1 = 52.3$ MPa, $C_1 = 4.42$, $C_2 = 34.4$ MPa, $C_2 = 0.186$ とした。応力-ひずみ曲線を図2に示す。結晶塑性解析の結果は実験結果によく一致している。

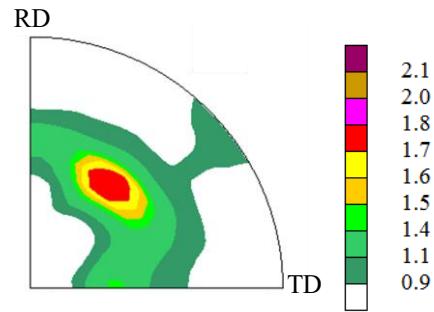


図1 {111}極点図

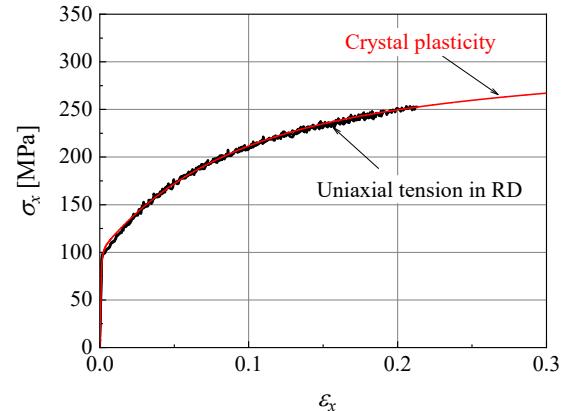


図2 単軸引張の応力-ひずみ曲線

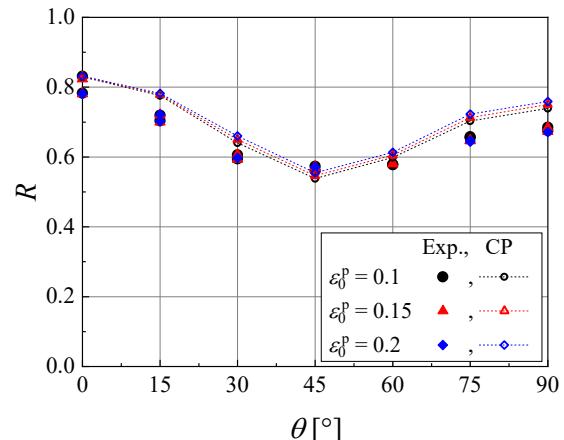


図3 R値の測定結果と結晶塑性解析の結果

単軸引張において塑性ひずみが 0.1, 0.15, 0.2 の時の R 値を図 3 に示す。実験、解析ともに塑性変形の進行とともに R 値の変化は小さく、結晶塑性モデルは実験の傾向をよく再現できている。

4.3 2 軸応力試験

2 軸応力試験において塑性仕事が等価となる時の流動応力を図 4 に示す。圧延方向単軸引張において塑性ひずみが $\varepsilon_0^p = 0.002, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$ に対する塑性仕事と等価となる応力点である。結晶塑性解析の結果は、純粋せん断から平面ひずみ引張まで広い応力比の範囲で実験の傾向をとらえられている。ただし、等 2 軸引張において若干加工硬化を過小に予測する傾向があった。

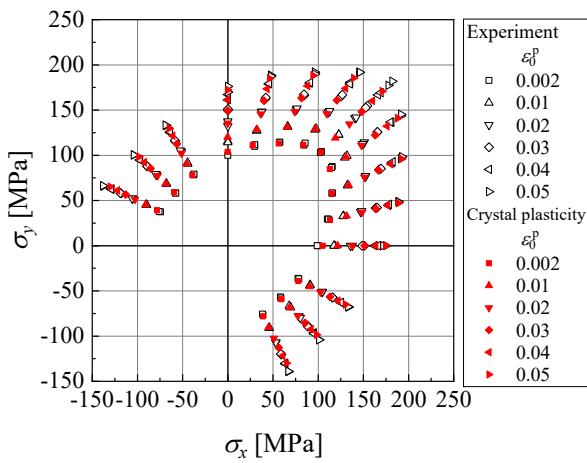


図 4 等塑性仕事点

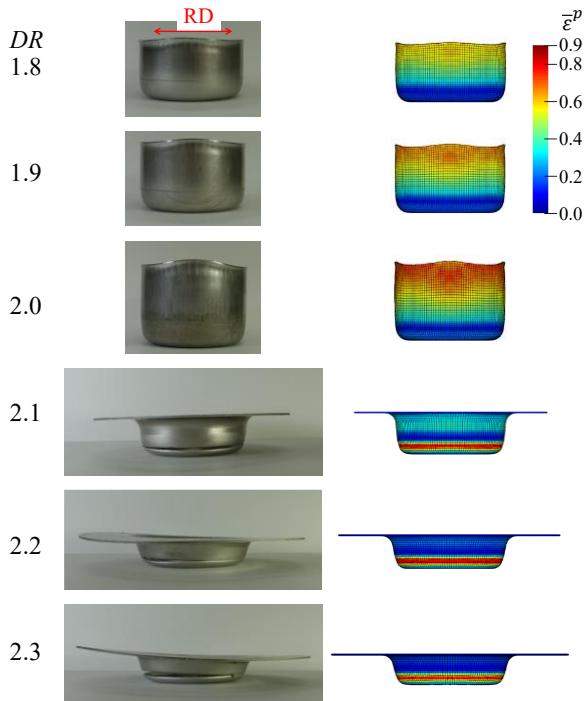


図 5 円筒深絞りの実験結果とシミュレーション結果

4.4 円筒深絞り

円筒深絞りの実験結果およびシミュレーション結果を図 5 に示す。実験において、 $DR=1.8\sim2.0$ においては割れが発生することなく成形できた。一方、 $DR=2.1\sim2.3$ においてはパンチ肩部において割れが発生した。したがって、本供試材の LDR は 2.0 であった。実験と同様に、有限要素法シミュレーションにおいて、 $DR=1.8\sim2.0$ においてはカップを成形することができた。一方、 $DR=2.1\sim2.3$ においてはパンチ肩部にひずみが集中し局所くびれが発生した。したがって、実験と同じで LDR は 2.0 であった。

成形が可能であった $DR=1.8\sim2.0$ について、成形後のカップ側壁の高さを測定した結果を図 6 に示す。 $DR=1.8, 1.9$ については、シミュレーションの結果と実験結果は一致した。一方、 $DR=2.0$ においては最大で 1 mm カップ高さを過小に予測することが分かった。

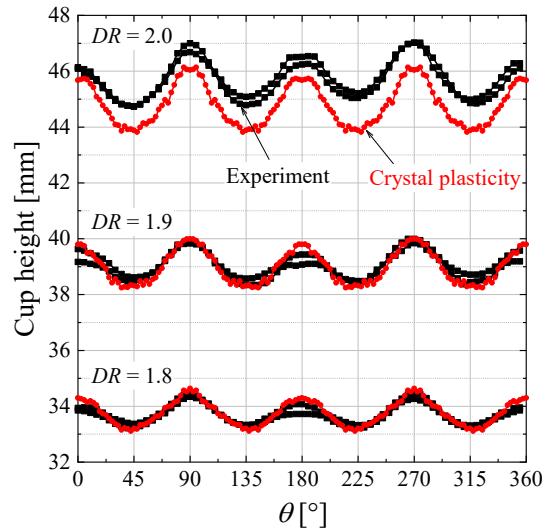


図 6 カップ側壁の高さ

すべての実験条件において、パンチ荷重とストロークの関係を図 7 に示す。割れることなく成形できた $DR=1.8\sim2.0$ においては、実験の結果とシミュレーション結果は良く一致した。一方で、割れが発生した $DR=2.1\sim2.3$ においては、くびれの発生に伴う荷重低下の発生が実験結果よりも遅い傾向があった。これは $DR=2.1\sim2.3$ のすべてにおいて共通であった。つまり、くびれの発生を予測することはできたが、その発生が若干遅く、成形性を高く見積もっていた。

5. 結言

本研究では、単軸引張および 2 軸引張試験より得られた塑性変形特性と結晶塑性モデルの予測の比較を通じて解析精度を検証した。また、複数の絞り比のもと円筒深絞りを実施して、カップ高さと LDR の予測精度を検討した。

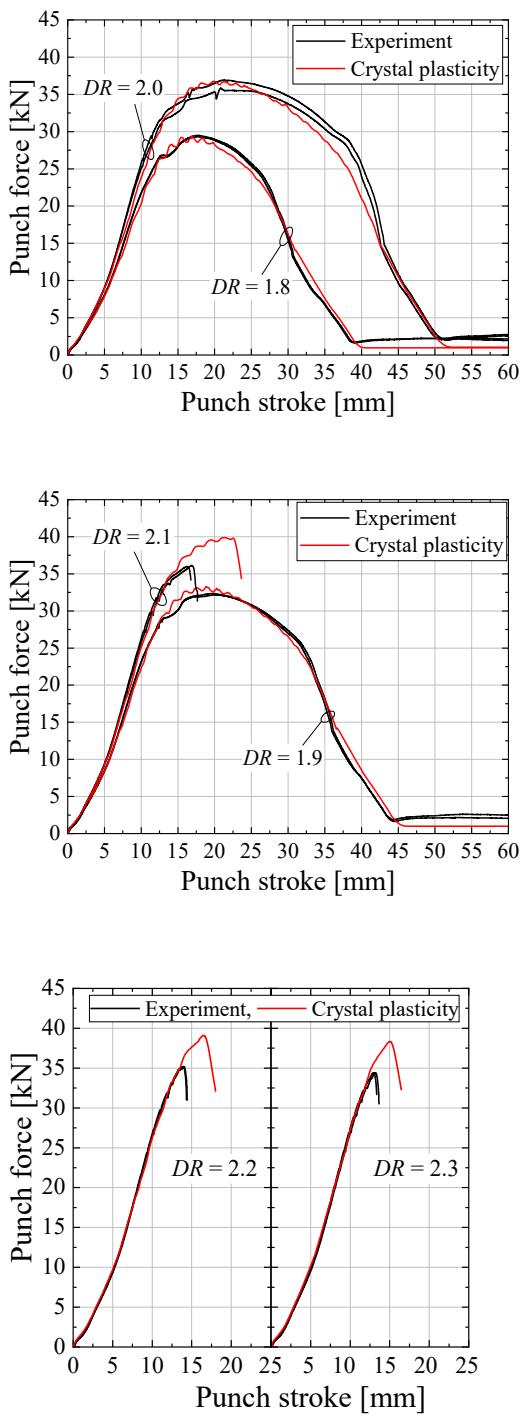


図 7 パンチ荷重とストロークの関係

これらより以下の結論を得た。

- 結晶塑性モデルは R 値の面内分布を正確に再現できた。ひずみが 0.05 未満では、平面ひずみ引張および引張一圧縮組合せ 2 軸応力状態における流動応力を正確に予測した。ただし、等 2 軸応力状態付近では降伏応力を過小評価した。
- 実験では絞り比 $DR = 1.8 \sim 2.0$ で成形でき、 $DR \geq 2.1$ で破断が発生した。結晶塑性シミュレーションはこの傾向を正しく再現し、 $DR \geq 2.1$ でカップ壁底部に局所くびれの発生が予測された。 $DR = 1.8 \sim 2.0$ ではカップ高さも実験値と一致した。したがって、カップ高さと LDR の再現性は高いことが分かった。

参考文献

- 1) Mohammed, B., Park, T., Kim, H., Pourboghrat, F., & Esmailpour, R. (2018). Materials Science and Engineering: A, 725, 250-266.
- 2) Adzima, F., Balan, T., & Manach, P. Y. (2020). International Journal of Material Forming, 13, 649-659.
- 3) Joo, M., Wi, M. S., Yoon, S. Y., Lee, S. Y., Barlat, F., Tome, C. N., & Jeong, Y. (2023). International Journal of Mechanical Sciences, 237, 107796.
- 4) Zhao, Z. S., Mao, W. M., Roters, F., & Raabe, D. (2004). Acta Materialia, 52(4), 1003-1012.
- 5) Raabe, D., Wang, Y., & Roters, F. (2005). Computational Materials Science, 34(3), 221-234.
- 6) Rousselier, G., Barlat, F., & Yoon, J. W. (2009). International Journal of Plasticity, 25(12), 2383-2409.
- 7) Barrett, T. J., & Knezevic, M. (2019). Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 354, 245-270.
- 8) Hama, T., Hirano, K., & Matsuura, R. (2022). International Journal of Material Forming, 15(1), 8.
- 9) Barlat, F., & Richmond, O. (1987). Materials Science and Engineering, 95, 15-29.
- 10) Lequeu, P., Gilormini, P., Montheillet, F., Bacroix, B., & Jonas, J. J. (1987). Acta Metallurgica, 35(2), 439-451.
- 11) Kuwabara, T., Van Bael, A., & Iizuka, E. (2002). Acta materialia, 50(14), 3717-3729.
- 12) Kuwabara, T., & Nakajima, T. (2011). Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 5(12), 709-720.
- 13) Yang, X., Jiao, M., Liu, Z., Zhao, H., Peng, Y., Wu, L., & Shi, B. (2025). International Journal of Plasticity, 104247.
- 14) Yoshida, K., Kamiya, Y., & Kai, K. (2025). International Journal of Material Forming, 18, 29.