

6000系アルミニウム合金板の穴広げ限界の予測手法*

飯塚 悠貴**, 桑原 利彦***, 速水 宏晃****

A Prediction Method of Hole Expansion Limit for
6000-Series Aluminum Alloy Sheet*

Yuki Iizuka **, Toshihiko Kuwabara *** and Hiroaki Hayamizu ****

This study investigates the applicability of the forming limit strain (FLS) and fracture limit strain (FrLS) determined from uniaxial tensile tests for predicting the hole expansion limit of a 6000-series aluminum alloy sheet. Since the stress state at the hole edge in hole expansion is uniaxial, the FLSs and FrLSs of the test sample are determined from the uniaxial tensile tests at various cut angles from the rolling direction. The experimental methods for determining the FLS and FrLS are presented. In the hole expansion experiment, the development of the strain distribution at a position 3 mm apart from the hole edge was precisely measured using digital image correlation method for three different hole diameters, and the maximum principal strain along the hole edge, ϵ_1 , was compared with the FLS and FrLS. We have confirmed that the fracture in the hole expansion experiment always occurred at the hole edge and when ϵ_1 reached the FrLS, regardless of the hole diameter. Therefore, the FrLS can be a criterion for predicting the hole expansion limit of the test sample.

Keywords: 6000-series aluminum alloy, hole expansion limit, forming limit strain, fracture limit strain, strain gradient

1. 緒 論

アルミニウム (Al) 合金板は鋼板に比べて室温でのプレス成形性に劣る。よって Al 合金板の適用拡大を図るためには、有限要素解析 (FEA: Finite Element Analysis) に代表される数値シミュレーション技術を活用し、破断やしわなどの成形不具合の予測精度を向上させ、それらを発生させないための最適な成形条件を迅速に決定することが肝要である^{1),2)}。

伸びフランジ成形はプレス成形品の代表的な変形様式の一つである³⁾。伸びフランジ成形では、破断は穴縁もしくはその近傍で発生する。すなわち、破断部のひずみ状態は穴縁線方向の単軸引張から平面ひずみ引張りの範囲である⁴⁾。伸びフランジ成形性の評価試験

方法として穴広げ成形試験があり、JIS⁵⁾ および ISO⁶⁾ によって標準化されている。鋼板の穴広げ性については多くの解析および実験研究がなされ (例えば文献^{7),8)} の参考文献欄を参照), データベースの蓄積も豊富である⁹⁾。一方、Al 合金板の穴広げ性の研究は鋼板に比べて少ない。櫻井ら¹⁰⁾ は Al-0.6mass%Mg-0.9mass%Si 合金とそれに 0.5mass%Cu を添加した合金を用いて、伸びフランジ性 (穴広げ率) に及ぼす製造条件と材料組織の影響を調査した。高木ら¹¹⁾ は 5000 系 Al 合金板の O 材について、伸びフランジ性に及ぼす打ち抜き型のクリアランスの影響および焼鈍による伸びフランジ性の向上効果を調査している。穴広げ成形シミュレーションとその実験検証に関する研究としては、6016-O および -T4¹²⁾, 6022-T4¹³⁾, 5022-O 材¹⁴⁾ を対象とした研究

* 本稿は軽金属 72 (2022), 702-707 より転載

This paper is reprinted from Journal of The Japan Institute of Light Metal, 72 (2022), 702-707.

** 東京農工大学 大学院工学府 機械システム工学専攻

Department of Mechanical Systems Engineering, Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

*** 東京農工大学 大学院工学研究院 先端機械システム工学部門, 工学博士

Division of Advanced Mechanical Systems Engineering, Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Dr. Eng

**** 株式会社 UACJ 板事業本部 名古屋製造所 生産技術部

Production Technology Department, Nagoya Works, Flat Rolled Products Division, UACJ Corporation.

がある。しかしいずれの研究も、成形シミュレーションに用いる材料モデルが板材変形の前測精度に及ぼす影響を論じたものであり、破断発生の時期や場所を予測することを目的とした研究ではない。

穴広げにおける材料の破断限界は、割れが発生した時点の穴広げ率（穴広げ成形試験前後の穴径の変化から計算される穴縁の平均公称ひずみ）で評価される。飯塚ら¹⁵⁾は、9種類の鋼板について、穴径とパンチ径を様々に変えて穴広げ成形試験を実施した。その結果、鋼種によらず、最大主ひずみ（円周方向ひずみ）の半径方向勾配が大きいほど穴広げ率が大きくなることを見出した。飯塚ら¹⁵⁾はこの原因として、「穴縁において単軸引張のひずみ局所化条件に達しても、半径方向のひずみ勾配によりひずみの局所化が抑制されるため」と考察している。しかし、穴広げ率が向上する原因が、①半径方向のひずみ勾配の増大により材料の破断ひずみ（局部くびれ内の破断直前のひずみ）そのものが増大するからなのか、②破断ひずみの大きさはひずみ勾配によらず変化しないが、破断部以外の穴縁線上の材料において、局所くびれの発生が抑制されたためなのか、は明らかされていない。もし後者であれば、穴広げにおける穴縁の破断ひずみは単軸引張試験におけるそれと一致するはずである。もしそうであれば、伸びフランジ成形において板縁において発生する割れは、単軸引張試験における破断ひずみを限界値として予測できるはずである。

本研究では、6000系Al合金板を供試材として、単軸引張試験における破断ひずみと穴広げにおける破断ひずみを測定し、両者の関係を明らかにすることを目的とする。前者については、圧延方向（RD）から15°毎に単軸引張試験を実施し、各方向における破断ひずみを測定する。後者については、3つの異なる穴径を有する試験片を用いて穴広げ成形試験を実施し、穴縁近傍におけるひずみの発達および破断ひずみをデジタル画像相関法（DIC: Digital Image Correlation）によ

り測定する。結果として、穴広げにおける穴縁の破断は、当該位置の円周方向ひずみが単軸引張における破断ひずみに達した時点で発生すると考えてよいことがわかった。

2. 穴広げ成形実験

2.1 供試材

供試材は、公称板厚1.1mmの6000系Al合金板6116-T4である。機械的性質を調べるため、伸び計（島津製作所製SG50-10H）およびDICシステムARAMIS[®]（GOM社製）を用いた単軸引張試験を、RDからの角度増分 $\Delta\theta=15^\circ$ 毎に実施した。試験片形状はJIS13B号に準拠し、試験中のひずみ速度は $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、撮影周期は1Hzとした。測定結果をTable 1に示す。異方性の主軸として、板材の圧延方向（RD）、板幅方向（TD）、板厚方向をそれぞれ x, y, z 軸とする。

2.2 実験方法

初期穴径を $d_0=15, 30, 45 \text{ mm}$ の3通りに変化させて穴広げ成形試験を実施した。金型寸法をFig. 1に示す。パンチ径100mm、ダイス穴径130mm、ビード直径195mm、パンチ肩部およびダイ肩部の丸み半径15mmである。試験片は $220 \times 220 \text{ mm}$ の矩形板とし、ワイヤ放電加工にて試験片中心に、 $d_0=15, 30, 45 \text{ mm}$ の穴を開けた。パンチと試験片の間にはワセリンを塗布したテフロンシートを挿入した。試験は、上金型（しわ抑え）にしわ抑え力を負荷してビードを成形後、パンチ速度0.10mm/sにて試験片を張出した。試験片の破断を目視で確認したら、直ちにパンチの上昇を止め、しわ抑え力を除荷し、試験を終了した。

穴広げ成形試験終了後に穴広げ率 λ を測定した。 λ は次式で定義される。

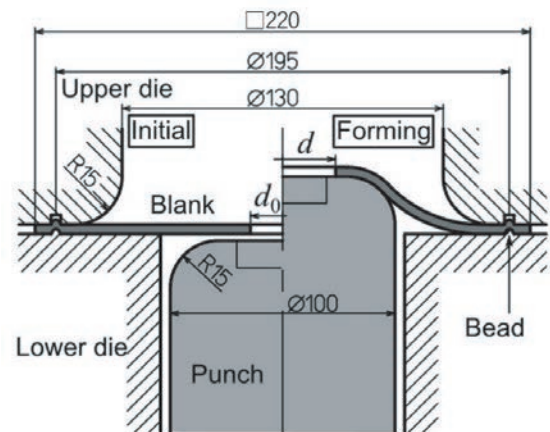


Fig. 1 Schematic diagram of the hole expansion experiment (unit: mm).

Table 1 Mechanical properties of the test material.

| Tensile direction from RD $\theta/^\circ$ | E /GPa | $\sigma_{0.2}$ /MPa | σ_B /MPa | ϵ_{TS}^P ** | r -value* |
|---|----------|---------------------|-----------------|----------------------|-------------|
| 0 | 67.4 | 139 | 251 | 0.20 | 0.75 |
| 15 | 67.2 | 133 | 248 | 0.22 | 0.58 |
| 30 | 68.0 | 130 | 247 | 0.22 | 0.37 |
| 45 | 69.9 | 130 | 240 | 0.25 | 0.30 |
| 60 | 69.5 | 129 | 239 | 0.24 | 0.37 |
| 75 | 67.3 | 129 | 242 | 0.22 | 0.53 |
| 90 | 66.8 | 132 | 244 | 0.21 | 0.72 |

* Measured at a nominal strain of 0.1

** Logarithmic plastic strain at the maximum tensile force

$$\lambda = \frac{d-d_0}{d_0} \quad (1)$$

ここで、 d_0 は初期穴径、 d は破断直前の穴径である。 d は、破断直前の穴径に合わせたフィッティング円を ARAMIS 上で作成し、同円の直径を測定することで求めた。

DIC システム ARAMIS[®] (GOM 社製) を用いて穴周辺のひずみの発達を測定した。各穴径に関して3回ずつ実験を実施した。撮影周期は 3 Hz, サブセットサイズは 17 px, サブセットステップは 6 px とした (1 px は 0.1 mm)。この条件におけるひずみ測定のプロット距離は 1.351 mm である。DIC により測定された板厚ひずみの妥当性の検証結果については、附録 A.1 を参照されたい。

2.3 実験結果

2.3.1 局部くびれおよび割れの発生位置

各穴径における局部くびれおよび割れの発生位置を Fig. 2 に示す。赤矢印は最初に割れが発生した位置、青矢印は最初の割れから 1 秒以内に割れた位置、白矢印は局部くびれの発生位置を示す。なお穴径 $d_0=45$ mm の試験では、 $\theta = 293^\circ$ で割れが発生したが、パンチを止めるのが遅れたため、他の方向 ($\theta = 22^\circ, 108^\circ$) においても、最初の割れから 3 秒後に割れが生じた。

$d_0 = 15, 30, 45$ mm における、3 回の試験の穴広げ率の平均値は各々 $0.54 \pm 0.01, 0.52 \pm 0.01, 0.51 \pm 0.01$ であり、穴径が小さいほど穴広げ率は大きくなった。同様の傾向は飯塚ら¹⁵⁾ の鋼板の穴広げ成形試験でも報告されている。

赤矢印で示された割れの発生位置が穴径によって異なっている。この原因の一つとして材料特性のばらつきが考えられる。加えて、穴径の変化により材料の変形挙動がわずかに変化した結果、3 節で決定される破断限界ひずみもしくは破断ひずみに到達する穴縁線上の位置が変化した可能性もある。

2.3.2 最大主ひずみの半径方向勾配

穴広げ成形実験における最大主ひずみ ϵ_1 (円周方向ひずみ) の半径方向勾配 $d\epsilon_1/dr$ を測定した。具体的には、破断直前における穴縁からの半径方向 5 mm 区間における ϵ_1 の平均勾配として $d\epsilon_1/dr$ を決定し、RD から 10° 毎の半径線に沿う $d\epsilon_1/dr$ の平均値を測定値とした。測定結果を Fig. 3 に示す。初期穴径が小さいほど $d\epsilon_1/dr$ は大きくなる。

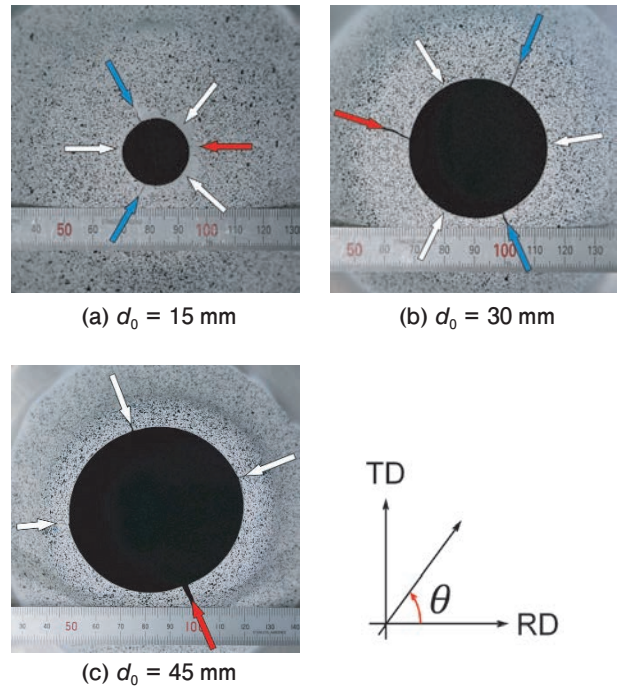


Fig. 2 Locations of localized necks and fractures. The red arrows indicate where the fracture first occurred. The blue arrows indicate the position of the crack occurring within 1 second after the first crack. The white arrows indicate where a localized neck was visible.

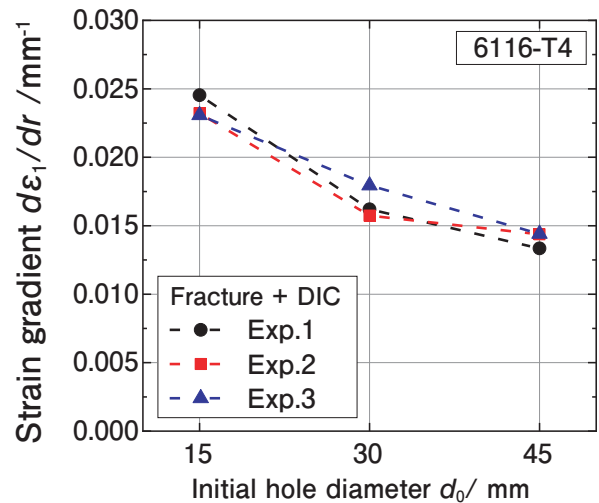


Fig. 3 Effect of initial hole diameter on strain gradient

2.3.3 最大主ひずみの発達

穴縁周辺において ϵ_1 が発達する様子を、DIC により測定した例を Fig. 4 に示す。穴縁に近いほど色が濃いことから、 ϵ_1 は穴縁で最大となることがわかる。なお、破断発生 (e) の 0.3 秒前 (撮影周期 3 Hz とした場合の 1 コマ前) を破断直前 (d) と定義した。

Fig. 4 の測定データに基づいて、穴縁の円周方向に沿う各位置 (RD からの角度 θ) における、破断の 30, 20, 10 および 0.3 秒手前の ϵ_1 の値を Fig. 5 に示す。ここで ϵ_1 は穴縁から 3 mm 離れた位置での測定値である。

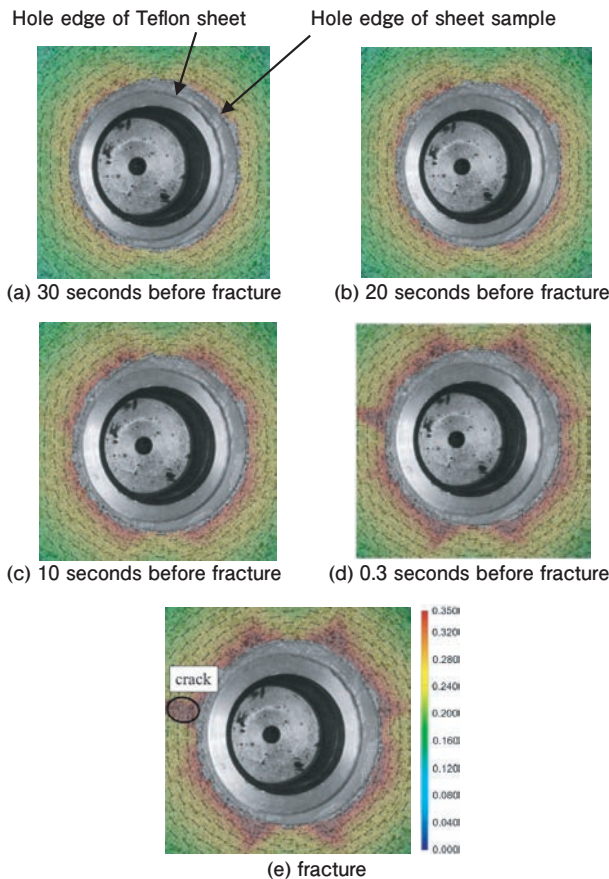


Fig. 4 Development of the maximum principal strains measured using DIC ($d_0 = 30$ mm).

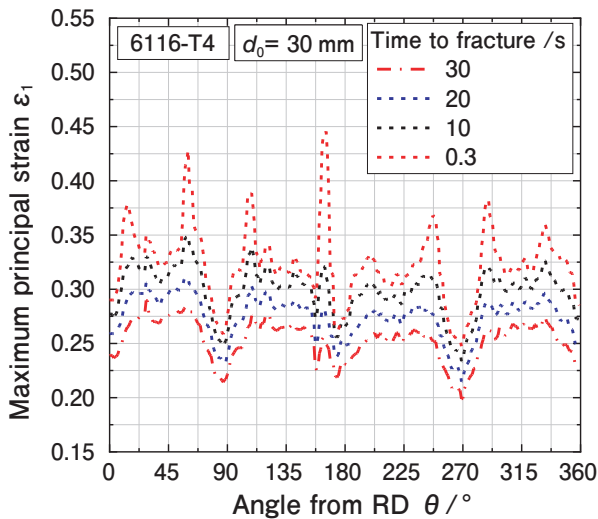


Fig. 5 Development of the maximum principal strains at positions 3 mm away from the hole edge ($d_0 = 30$ mm)

穴縁から 3 mm の位置で測定した理由は、一部の試験片の穴縁近傍において測定用の塗料が剥離し、ひずみが測定できなかったためである。本図より、複数方向で最大主ひずみが徐々に発達して極大となり、そのうちの 1 つないしは複数の箇所破断に至ることがわかった (Fig. 8 参照)。

局部くびれの発生位置および割れの起点は、いずれの穴径においても穴縁であった。すなわち割れは単軸応力状態で発生することがわかった。

3. 成形限界ひずみ、破断限界ひずみ、破断ひずみの決定方法

前章の測定結果より、少なくとも本供試材の穴広げ限界は、単軸引張応力状態における破断条件により規定されると予測される。そこで本章では、単軸引張試験における一様変形から破断に至る過程を詳細に観察する。最大荷重点までの一様変形後に徐々に拡散くびれが進展し、さらに拡散くびれの内部で局所くびれが発生し破断に至る過程を詳細に測定し、成形限界および破断限界を与えるひずみの決定方法を述べる。さらに次章では、穴広げにおける穴縁近傍の円周方向ひずみ (最大主ひずみ ϵ_1) の発達過程を詳細に観察する。そして ϵ_1 と単軸引張における成形限界ひずみおよび破断限界ひずみとを比較することにより、穴広げにおける破断時期の予測可能性を検証する。

3.1 成形限界ひずみの決定方法

単軸引張応力状態においては、金属薄板はまず一様に伸び変形し、その後試験片平行部に拡散くびれが発生する。拡散くびれが発達すると、やがて拡散くびれの中に板厚方向のくびれ (局部くびれ) が発生し、局部くびれの中でひずみが急速に発達して最後に破断する。ここで、引張試験片の長手方向を Y 軸、幅方向を X 軸にとり、局部くびれの内部および外部の長手方向ひずみ速度を各々 $\dot{\epsilon}_{Yin}$ 、 $\dot{\epsilon}_{Yout}$ とすると、局部くびれの発達に伴ってひずみ速度比 $\dot{\epsilon}_{Yin} / \dot{\epsilon}_{Yout}$ は急増する。そこで本報では、 $\dot{\epsilon}_{Yin} / \dot{\epsilon}_{Yout}$ が急増する直前の状態を成形限界と定義し、成形限界に達した時のひずみを成形限界ひずみ (Forming Limit Strain: FLS) と定義する。 $\dot{\epsilon}_{Yin} / \dot{\epsilon}_{Yout}$ の時間変化の例を Fig. 6 に示す。 $\dot{\epsilon}_{Yin} / \dot{\epsilon}_{Yout} \geq 10$ において $\dot{\epsilon}_{Yin} / \dot{\epsilon}_{Yout}$ が急速に増加することから、本報では、 $\dot{\epsilon}_{Yin} / \dot{\epsilon}_{Yout} = 10$ に達する直前の引張方向対数ひずみ ϵ_Y を FLS と定義した。

3.2 破断限界ひずみおよび破断ひずみの決定方法

単軸引張試験では、FLS に達した後、局部くびれ内部が徐々に平面ひずみ引張状態に移行し、最終的に破断に至る。そこで本報では、局部くびれ内部のひずみ経路が平面ひずみ引張状態に移行する瞬間を破断の前駆現象と見なし、その時のひずみを破断限界ひずみ (Fracture Limit Strain: FrLS) と定義する。

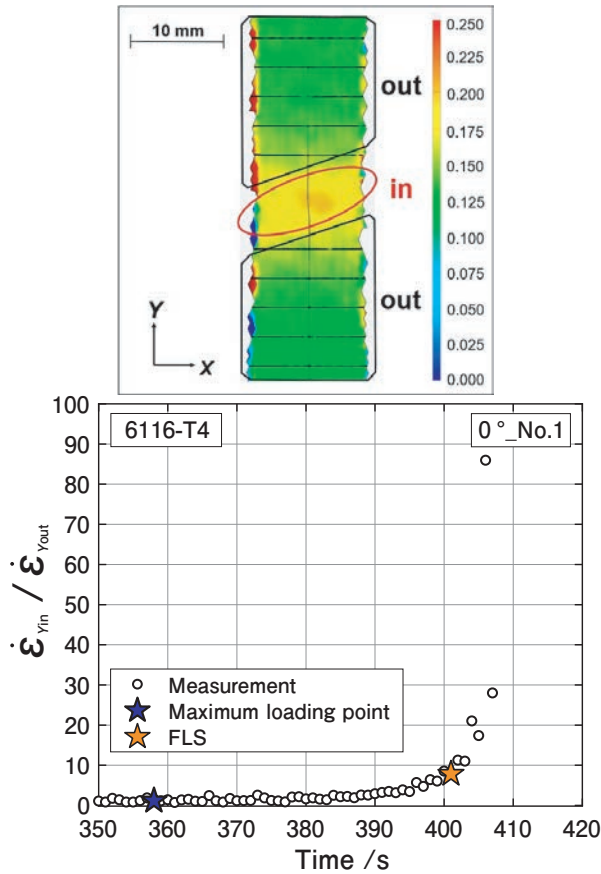


Fig. 6 Method of determining FLS using strain rate ratio, $\dot{\epsilon}_{y_{in}} / \dot{\epsilon}_{y_{out}}$

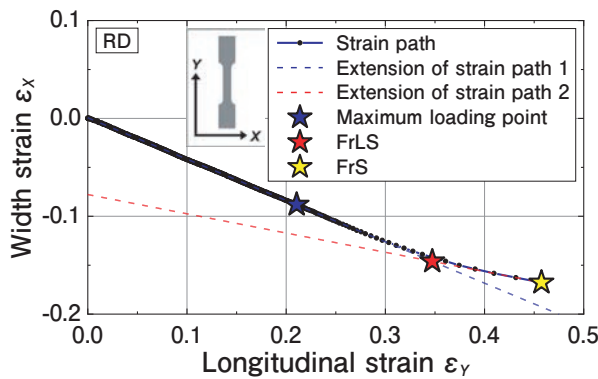
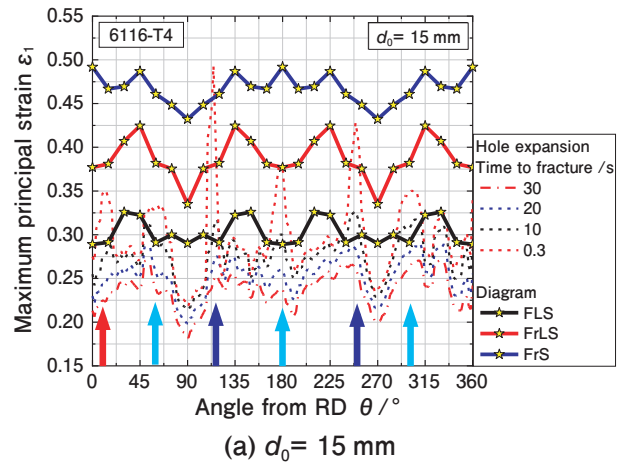
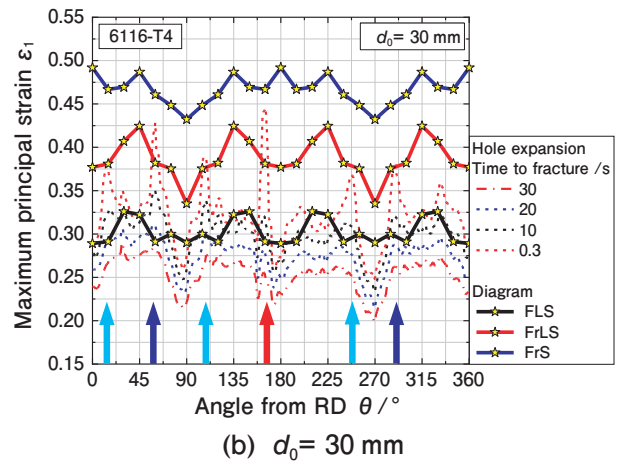


Fig. 7 Method of determining FrLS using strain path change

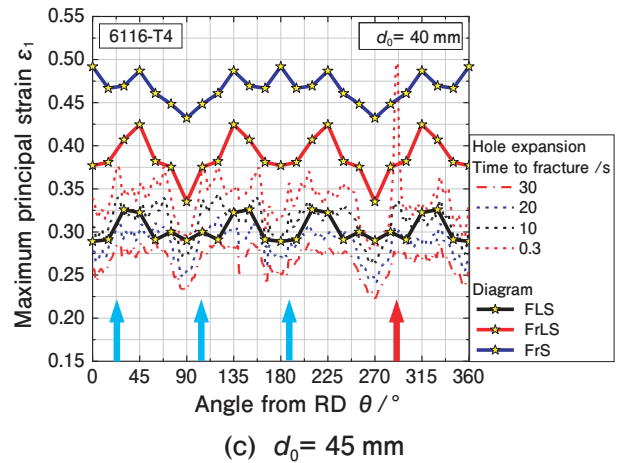
単軸引張試験片平行部における、板幅方向および引張方向ひずみの発達（ひずみ経路）を Fig. 7 に示す。まず、拡散くびれ発生以前の一樣変形状態におけるひずみ経路については、最大荷重点までの範囲で直線近似し、青破線（path 1）で示すように $+\epsilon_y$ 方向に延長する。次に局所くびれ内部のひずみ経路としては、破断直前の3点を線形近似し、赤破線で示すように $-\epsilon_y$ 方向に延長する。そして両直線の交点（赤星印）を、破断の前駆現象として局所くびれが急速に発達する瞬間とみなし、同点における引張方向対数ひずみ ϵ_y を



(a) $d_0 = 15$ mm



(b) $d_0 = 30$ mm



(c) $d_0 = 45$ mm

Fig. 8 FLS, FrLS, and FrS and the development of the maximum principal strains observed in the hole expansion experiment. The red arrows indicate where the fracture first occurred. The thick blue arrows indicate the position of the crack occurring within 1 second after the first crack. The thin blue arrows indicate where a localized neck was visible.

FrLS と定義した。さらにひずみ経路の終点（破断直前）における引張方向対数ひずみ ϵ_y （黄星印）を破断ひずみ（Fracture Strain: FrS）と定義した。

4. 結果と考察

—穴広げ成形における破断限界の予測方法—

$d_0 = 15, 30, 45$ mm の穴広げ成形実験において、穴縁から半径方向に 3 mm 離れた同心円に沿う ϵ_1 の測定結果を Fig. 8 に示す。 ϵ_1 は、穴縁での破断発生時から 30, 20, 10, 0.3 秒手前の 4 段階に分けて示している。ここで (b) における ϵ_1 の測定値は、Fig. 5 と同じである。各図には、切出し角度 15° 毎の単軸引張試験より測定された各ひずみを線形補間した FLS (黒実線), FrLS (赤実線), FrS (青実線) を重ね合わせている。☆印は、2つの試験片から得られた各ひずみの測定値の平均値である。また、赤矢印は最初に割れが発生した位置、青矢印は最初の割れから 1 秒以内に割れた位置、水色矢印は局部くびれが目視で確認された位置を示す。

いずれの初期穴径においても、割れが発生した位置 (赤矢印) もしくはその 1 秒以内に割れた位置 (青矢印) では、破断 0.3 秒前の ϵ_1 が FrLS に到達していることがわかる。よって穴径によらず (すなわち ϵ_1 の半径方向の勾配によらず), FrLS は穴広げにおける実用的な破断限界線と見なせることがわかる。 $d_0 = 30, 45$ mm の場合では、局部くびれの発生が目視で確認された位置 (水色矢印) において、破断 0.3 秒前の ϵ_1 が FrLS に到達するか直近まで上昇していることから、FrLS を穴広げにおける実用的な破断限界線と見なすことの妥当性を裏付けている。

FLS について考えると、破断部位の ϵ_1 が FLS に到達するのは破断の 10 ~ 20 秒手前であり (例外的に $d_0 = 15$ mm の破断部位 ($\theta = 0^\circ$) のみ 0.3 秒手前で ϵ_1 が FLS に到達している), 破断時期は安全側に予測される。

FrS による破断予測について考える。FrS の値は、単軸引張試験における局部くびれ内の破断直前の ϵ_Y の値である。Fig. 8 を見ると、破断手前 0.3 秒の ϵ_1 が FrS に到達しているのは、 $d_0 = 15$ mm の破断部 ($\theta = 116^\circ$) および $d_0 = 45$ mm の破断部 ($\theta = 293^\circ$) だけであり、それ以外は FrLS に ϵ_1 が到達した時点で破断が発生している。これは、単軸引張における破断直前の局部くびれ内の ϵ_1 と、穴広げにおける破断直前の穴縁の ϵ_1 が一致しないように見える。しかし、これは穴広げにおける ϵ_1 の測定位置が、厳密に言えば穴縁ではなく、穴縁から 3 mm 離れた位置であることに起因している。すなわち、穴縁が破断した瞬間において、穴縁の ϵ_1 は実際には FrS に到達しているが、穴縁から 3 mm 離れた位置の ϵ_1 は穴縁のそれよりも小さいことが原因である。穴縁と穴縁から 3 mm 離れた位置の

ϵ_1 の差異を $\Delta\epsilon_1$ とすると、 $\Delta\epsilon_1$ は Fig. 3 から見積もることができる。すなわち、 $d_0 = 15, 30, 45$ mm において、各々 $\Delta\epsilon_1 \approx 0.07, 0.05, 0.04$ である。2つの試験片から測定された FrS のばらつきは 0.05 ~ 0.03, FrLS のばらつきは 0.02 ~ 0 であった (Fig. A2 参照)。このことを考慮すると、上記の $\Delta\epsilon_1$ の値は、Fig. 8 における FrS と FrLS の差異と同程度であると言える。すなわち、Fig. 8 において、穴縁から 3 mm 離れた位置の ϵ_1 が FrLS に到達したとき、穴縁の ϵ_1 は FrS に到達していると考えてよい。

以上要するに、本供試材の穴広げ破断限界は ϵ_1 の半径方向勾配の大きさに依存せず、穴縁における ϵ_1 が FrS に到達した瞬間、もしくは穴縁から 3 mm 離れた位置の ϵ_1 が FrLS に到達した瞬間として決定できることがわかった。ただし実際の材料では、穴縁における破断時の ϵ_1 がばらつく (Fig. A2 参照)。さらに、FEA により FrS を計算するには、要素サイズを少なくとも板厚より小さくする必要があり、計算の負荷も大きくなる。そこで、穴縁から 3 mm 離れた位置の、ばらつきのより小さい ϵ_1 を観測し、それが FrLS に達した時点で穴広げ破断が発生すると判定した方が、破断発生を安定して予測でき、かつ FEA の計算負荷も少なくなり、実用性が高いと言える。

5. 結論

6000 系 Al 合金板の穴広げ成形実験を行った。穴径の異なる 3 種類の試験片すべてにおいて、割れは穴縁から発生した。穴縁の破断は、その位置の ϵ_1 が単軸引張における破断ひずみ (局部くびれ内の破断直前の最大主ひずみ) に達した時点で発生すると推定された。すなわち、穴広げにおける穴縁の破断ひずみは単軸引張試験におけるそれと一致すると考えてよい。

ただし実際の材料では、穴縁における破断時の ϵ_1 がばらつくので、穴縁から 3 mm 離れた位置の、ばらつきのより小さい ϵ_1 を観測し、それが FrLS に達した時点で穴広げ破断が発生すると判定した方が、破断発生を安定して予測でき、かつ FEA の計算負荷も少なくなり、実用性が高い。

参考文献

- 1) 桑原利彦・吉田健吾：軽金属, **65-5** (2015), 164-173.
<https://doi.org/10.2464/jilm.65.164>
- 2) 櫻井健夫：軽金属, **71-9** (2021), 425-428.
<https://doi.org/10.2464/jilm.71.425>
- 3) 薄鋼板成形技術研究会編：プレス成形技術難易ハンドブ

- ック-第4版-, (2017), 79, 日刊工業新聞社.
- 4) 桑原利彦: ふらすとす, **3-31** (2020) 388-394.
https://doi.org/10.32277/plastos.3.31_388
 - 5) JIS Z 2256: 2020 金属材料の穴広げ試験方法.
 - 6) ISO 16630: 2017, Metallic materials – Sheet and strip – Hole expanding test.
 - 7) Kuwabara, T., Hashimoto, K., Iizuka, E. and Yoon J.W.: J. Mater. Processing Technol., **211** (2011), 475-481.
https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.10.025
 - 8) 乃村峻矢・桑原利彦: 鉄と鋼, **106-9** (2020), 630-639.
https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-002
 - 9) 薄鋼板成形技術研究会編: プレス成形技術難易ハンドブック-第4版-, (2017), 112, 日刊工業新聞社.
 - 10) 櫻井健夫・松元和秀・小松伸也・河野紀雄: 軽金属, **60-1** (2010), 2-6.
https://doi.org/10.2464/jilm.60.2
 - 11) 高木康夫・増田哲也・松元和秀: 神戸製鋼技報, **57-2** (2007), 51-55.
https://doi.org/10.1016/j.jijplas.2016.10.002
 - 12) Kuwabara, T., Mori, T., Asano, M., Hakoyama, T., Barlat, F.: Int. J. Plasticity, **93** (2017), 164-186.
https://doi.org/10.1016/j.jijmecsci.2020.105706
 - 13) Ha, J., Coppieters, S., Korkolis, Y.P.: Int. J. Mech. Sci., **182** (2020), 105706.
https://doi.org/10.1016/j.jijplas.2016.10.002
 - 14) 三宅能安・桑原利彦: 軽金属, **70-6** (2020), 217-224.
https://doi.org/10.2464/jilm.70.217
 - 15) 飯塚栄治, 卜部正樹, 山崎雄司, 稲積透: 塑性と加工, **51-594** (2010), 74-79.

附 録

A.1 DICによる板厚ひずみの測定値の妥当性検証

DICによる面内ひずみ測定値から推定された板厚ひずみの測定値と、マイクロメータによる板厚ひずみの測定値の比較をFig. A1に示す。素板の初期穴径は $d_0 = 15$ mm, ひずみの測定場所は穴縁から半径方向に3 mm離れた位置, 測定時期は穴縁に破断が発生する0.3秒手前である。マイクロメータを当てる位置の誤差もあるので厳密な評価は難しいが, 両者の差異は多くの測定点で0~0.05, 最大でも0.075であり, DICによる面内ひずみの測定値の妥当性が確認できた。

A.2 FrSおよびFrLSのばらつき

2つの単軸引張試験片から測定されたFrSおよびFrLSのばらつきをFig. A2に示す。FrSのばらつきは0.05~0.03, FrLSのばらつきは0.02~0であった。ばらつきが少ない後者の方が破断限界基準としてより実用的と言える。

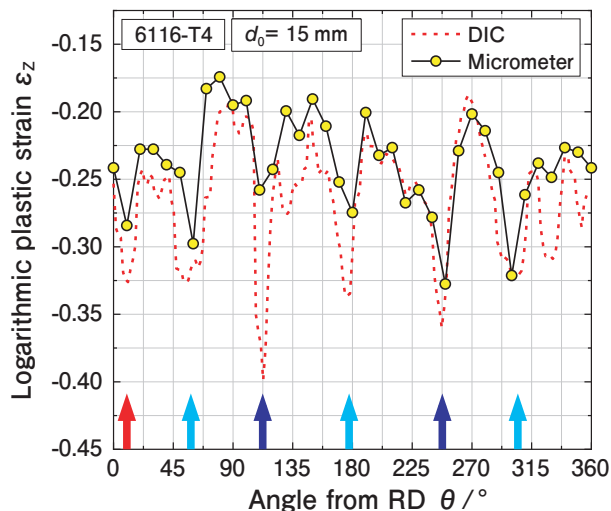


Fig. A1 Thickness strains measured using DIC compared with those measured using a micrometer. The measurement positions were 3 mm away in the radial direction from the hole edge. The DIC measurement was performed 0.3 s prior to the occurrence of fracture at hole edge. The initial hole diameter was $d_0 = 15$ mm.

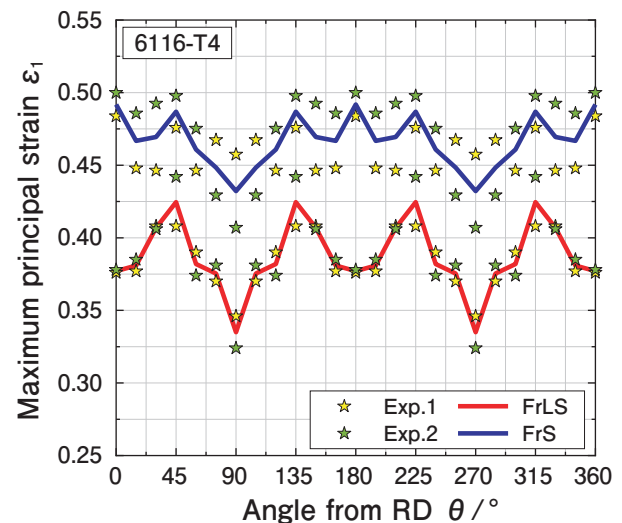


Fig. A2 Variation of the measured values of FrLS and FrS.



飯塚 悠貴 (Yuki Iizuka)
東京農工大学 大学院工学府
機械システム工学専攻



速水 宏晃 (Hiroaki Hayamizu)
(株)UACJ 板事業本部
名古屋製造所 生産技術部



桑原 利彦 (Toshihiko Kuwabara)
東京農工大学 大学院工学研究院
先端機械システム工学部門
工学博士