

# 切欠きをもつ純アルミニウム板材(A1050P-O) の引張りによる延性破壊

徳田 つる代\*・鶴 秀登\*\*・伊藤 幸男\*  
・伊藤 嘉基\*・岩崎 俊佑\*・中山 恭秀\*\*・山下 敏久\*

## Ductile Fracture in Tension on Notched Plate of Aluminum (A1050P-O)

Tsuruyo Tokuda\*, Hideto Tsuru\*\*, Yukio Itou\*, Yoshiki Itou\*  
Shunsuke Iwasaki\*, Yasuhide Nakayama\*\* and Toshihisa Yamashita\*

### Abstract

Tensile tests of Aluminum notched plate (A1050P-O) were carried out and macroscopic observations of ductile fracture at notch root were made. Crack starting point and behavior of crack propagation were observed during tensile tests. Moreover, numerical calculations by FEM Software were done for various configurations corresponding to the specimens and the results of tests and calculations were discussed.

### 1. 緒言

機械や構造物などの設計や保守・管理において材料の強度評価は不可欠である。一般的に延性をもつ金属材料については、静荷重や繰返し荷重などを負荷し、材料の破壊を微視的挙動でとらえる研究や巨視的挙動で評価する研究が多くなされている<sup>[1]~[3]</sup>。構造材料としては破断に至るまでの大きな塑性変形はあってはならないが、塑性加工などにおいては大きな塑性変形を求められ、その過程における破断予測は研究の対象でもある。

本研究は、純アルミニウム板材を用い、研究結果の少ない各種形状の切欠きから発生するき裂とその進展による板の破断までの巨視的挙動を観察した。各種切欠きをもつ試験片の引張試験から破断の起点とその方向などの実験データを収集し、さらに試験片形状について FEM による弾性解析を行い、実験結果と併せて破断現象を検討した。

### 2. 実験方法

#### 2. 1 試験片と試験機

引張試験に用いた材料は純アルミニウム板材 (A1050P-O) で、99.5%以上の Al 純度をもつ。表 1, 2 に化学成分および機械的性質を示す。

表 1 A1050P の化学成分[%]<sup>[4]</sup>

Si	Fe	Cu	Mn	Mg
0.25 以下	0.40 以下	0.05 以下	0.05 以下	0.05 以下

Zn	V	Ti	その他	Al
0.05 以下	0.05 以下	0.03 以下	0.03 以下	99.5 以上

表 2 A1050P-O の機械的性質<sup>[4]</sup>

引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び率 (%)	縦弾性係数(MPa)	ポアソン比
60 以上 100 以下	20 以上	25 以上	70000	0.33

切欠きをもつ純アルミニウム板材(A1050P-O)の引張りによる延性破壊  
(徳田・鶴・伊藤幸・伊藤嘉・岩崎・中山・山下)

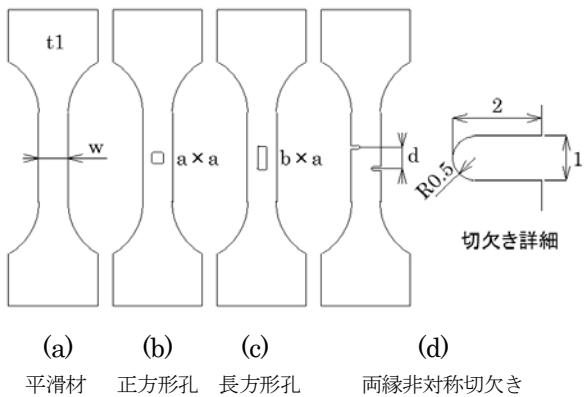


図1 試験片形状

図1に試験片形状を示す。図1(a)は平滑材を示す。その平行部は長さ 30mm, 板幅  $W=10\text{mm}$ , 板厚 1mm で, 材料の機械的性質を求める実験に用いた。そして, 切欠き試験片はこの寸法に次のような切欠きを入れた。図1(b)は板の中央に正方形孔をもつ試験片で, 切欠きの一辺  $a=1, 2, 3, 4\text{mm}$  の4種類がある。なお, 孔の角には半径 0.5mm の丸みをつけた。図1(c)は板の中央に長方形孔をもつ試験片で, 切欠きの寸法 (軸方向長さ  $b \times$  幅方向長さ  $a$ )  $b \times a=2 \times 2, 4 \times 2, 6 \times 2, 8\text{mm} \times 2\text{mm}$  の4種類を用意した。これも孔の角は半径 0.5mm の丸みをつけた。図1(d)は平滑材の両縁の非対称な位置に深さ 2mm の同一形状の切欠きをもつ試験片で, その切欠き中央の間隔  $d=0, 2.5, 3.0, 3.5, 6.0\text{mm}$  の5種類とした。これらの加工にはワイヤカット放電加工機(FANUC TAPE CUT W1)を用い, 作製した試験片を  $360^\circ\text{C}$  で1時間保持する焼鈍を行った。

実験は引張試験機(INSTRON 3343)を用いた。負荷速度は  $0.5\text{mm}/\text{min}$  とした。なお, この試験機の荷重容量は 1kN である。

## 2. 2 数値解析

実験に用いた形状で数値解析を行った。解析は弾性計算のみで行い, 負荷形式を一様応力と一様変位としてそれぞれの最大応力と相当応力の分布を求めた。数値解析には市販の有限要素法ソフトウェア(プリ・ポストプロセッサ: MSC. Patran, ソルバ: MD. Nastran)を用い, 四角形要素の4節点で計算した。

## 3. 結果と考察

### 3. 1 平滑材の引張り

図2に純アルミニウム板材(A1050P-O)の引張試験結果を示す。

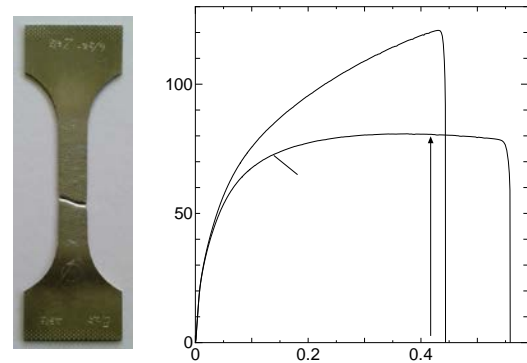


図2 平滑材の破断と応力-ひずみ関係

それぞれ縦軸と横軸は公称応力  $\sigma_n$  と公称ひずみ  $\varepsilon_n$ , および真応力  $\sigma_t$  と真ひずみ  $\varepsilon_t$  である。実験結果から引張強さ  $\sigma_B=80\text{MPa}$ , 伸び率  $\phi=57\%$ , 試験片にひずみゲージを用いて測定した縦弾性係数  $E=75343\text{MPa}$ , ポアソン比  $\nu=0.372$  を得た。

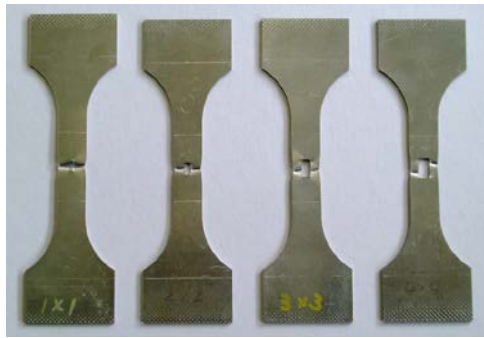
また, 真応力  $\sigma_t$  と真ひずみ  $\varepsilon_t$  を用いて次式の  $n$  乗硬化則で近似すると, 塑性係数  $K=161.1\text{MPa}$ , ひずみ硬化指数  $n=0.324$  となる。

$$\sigma_t = K\varepsilon_t^n \quad (1)$$

### 3. 2 正方形孔をもつ板の引張り

図3に試験片の破断結果を示す。図4はこの実験における負荷応力  $\sigma_0$  と公称ひずみの関係である。この結果を切欠き断面の公称応力を用いて整理すれば図5となる。また, 図6に  $2 \times 2$  の孔をもつ試験片形状の数値解析による相当応力分布を示す。なお解析は対称性を考慮して  $1/4$  領域で行った。最大応力は孔の角付近の孔縁に生じることがわかる。そして実験による破断の起点とほぼ一致している。なお破断までの負荷応力の差は孔の大きさによって違っているが, 公称応力を用いるとほとんど差がなく, また平滑材ともほぼ同じであることから, 破断荷重は切欠きの応力集中の影響を受けないことがわかる。切欠きはひずみ集中を起こし, 破断伸び・ひずみに影響をおよぼしているようで, この弾塑性を考慮した数値解析は今後行う予定である。

なお, 数値解析における負荷様式による違いはほとんどないため, 以後も含めて結果は一様応力の結果を示している。



1×1 2×2 3×3 4×4  
 図3 正方形孔試験片の破断結果(a×a)

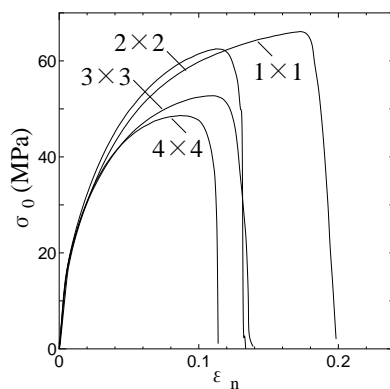


図4 負荷応力-公称ひずみ(正方形孔)

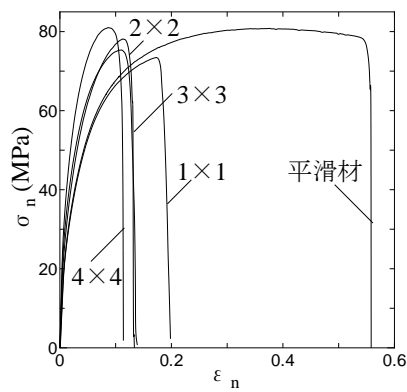


図5 公称応力-公称ひずみ(正方形孔)

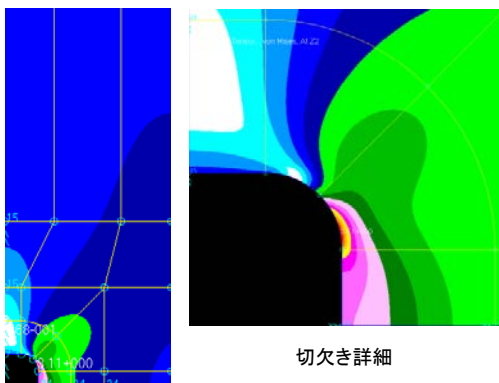


図6 1/4領域の相当応力分布(正方形孔2×2)

### 3.3 長方形孔をもつ板の引張り

図7に試験片の破断結果を示す。図8はこの実験における負荷応力と公称ひずみの関係である。この試験片は切欠きの幅  $a$  がすべて同じであるから、切欠き断面の公称応力を用いた図9は、図8の縦軸を1.25倍したものとなる。また数値解析を行い、図10に  $b \times a = 4 \times 2$  の場合の相当応力分布を示す。正方形孔と同様に、最大応力は孔の角付近の孔縁に生じる。また、縦長の孔ほど最大応力は小さくなる。しかし、長方形孔も正方形孔の場合と同様に破断までの負荷応力の差はほとんどないが、破断伸び・ひずみに孔形状の違いがあり、縦長孔の場合ほど破断伸び・ひずみが大きくなっている。その値は平滑材の伸び・ひずみに比べると著しく小さい。切欠きによるひずみ集中の影響が大きいようである。



2×2 4×2 6×2 8×2  
 図7 長方形孔試験片の破断結果(b×a)

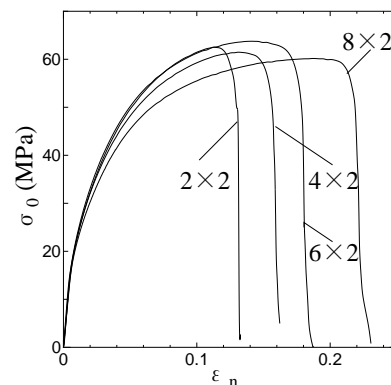


図8 負荷応力-公称ひずみ(長方形孔b×a)

切欠きをもつ純アルミニウム板材(A1050P-O)の引張りによる延性破壊  
(徳田・鶴・伊藤幸・伊藤嘉・岩崎・中山・山下)

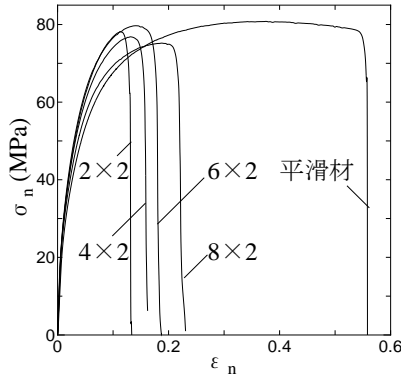


図9 公称応力-公称ひずみ(長方形孔 b×a)

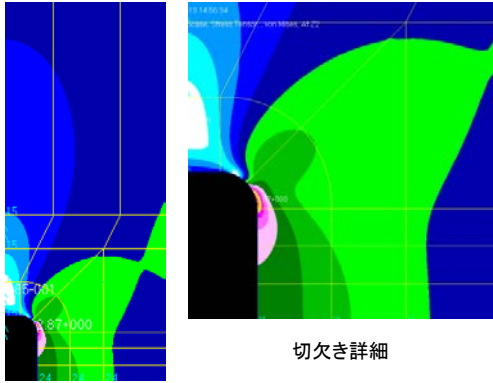


図10 1/4領域の相当応力分布(長方形孔 4×2)

3. 4 両縁非対称切欠きをもつ板の引張り

図11に試験片の破断結果を示す。図12はこの実験における負荷応力と公称ひずみの関係である。この場合、公称応力の評価として両側切欠きか片側切欠きかの判断が難しいので、負荷荷重を平行部の断面積で除した負荷応力 $\sigma_0$ を用いて整理した。そして図13, 14に切欠き間隔 $d=2.5$ と $d=6.0$ の形状における相当応力分布を示す。両縁非対称切欠きでは、最大応力の位置が切欠き底の中心よりずれた位置で、相手の切欠きから離れた切欠き縁の位置に生じるようである。また切欠きが離れた場合、すなわち $d$ が大きくなるとその値もやや大きくなる。実験結果から見ると、破断までの負荷応力は $d$ が大きいかほどやや大きくなっている。しかし、破断伸び・ひずみも含めてその差は小さい。このことは前述したように、応力集中は破断荷重へ影響をおよぼさないことと、切欠きの形状が同じで切欠き底のひずみ分布がほぼ等しいためと推測でき、破断までの応力・ひずみが切欠き位置の影響を受けないことがわかる。しかし、 $d=3.0$ と $d=3.5$ の破断結果から、ひずみ集中の相互干渉に切欠き位置が影響しているようである。

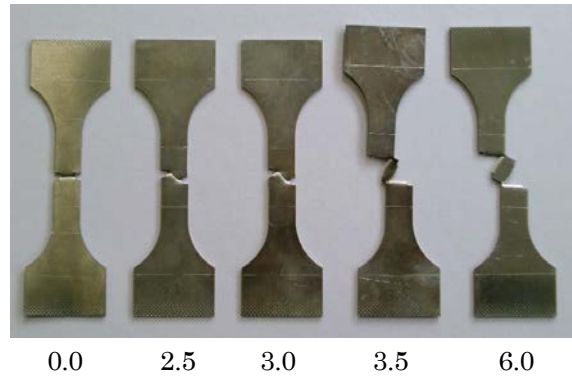


図11 両縁非対称試験片の破断結果(d)

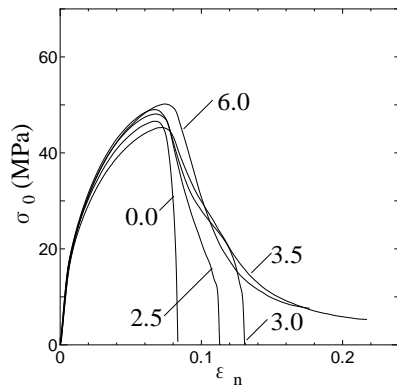


図12 負荷応力-公称ひずみ(両縁非対称切欠き)

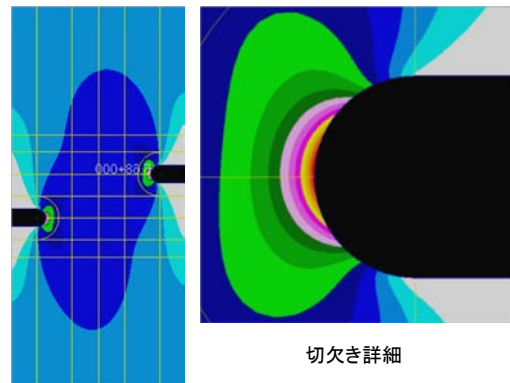


図13 相当応力分布(d=2.5)

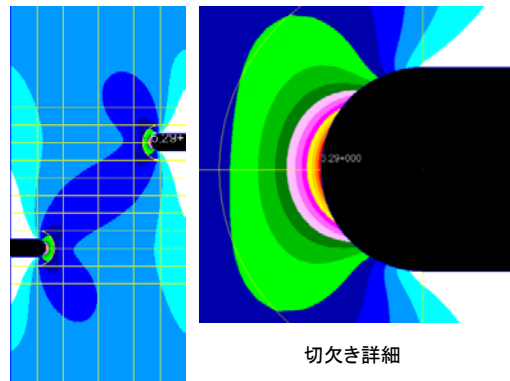


図14 相当応力分布(d=6.0)

#### 4. 結 言

切欠きをもつ純アルミニウム板材(A1050P-O)を用いて引張試験を行い、巨視的な延性破壊を観察した。また、その弾性数値解析を行い実験結果と併せて検討した。得られた概要は以下の通りである。

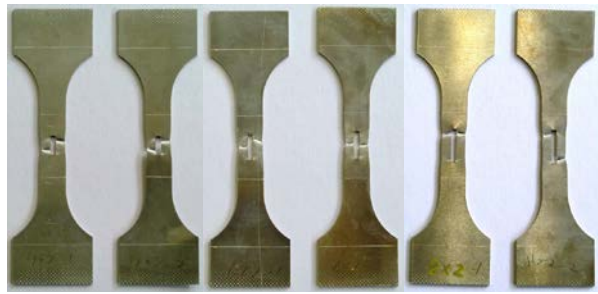
1. 平滑材を用いた引張試験の結果から規格と同様な各種機械的性質が得られた。
  2. 正方形孔における最大応力は孔の角付近の孔縁に生じ、破断の起点となるが破断荷重に影響をおよぼさないことがわかった。
  3. 長方形孔における最大応力も孔の角付近の孔縁に生じ、破断の起点となる。また縦長の孔ほど最大応力は小さくなることがわかった。破断伸び・ひずみは縦長の孔ほど大きくなるが、切欠きによるひずみ集中の影響が大きく、平滑材の破断伸び・ひずみに比べると著しく小さい。
  4. 両縁非対称切欠きにおける最大応力の位置は切欠き底の中心よりずれた位置で、相手の切欠きから離れた切欠き縁の位置に生じることがわかった。またその値は切欠きが離れた場合にやや大きくなる。しかし、破断伸び・ひずみも含めてその差は小さいことから、破断までの応力・ひずみが切欠き位置の影響を大きく受けないことがわかった。
- なお、この実験のデータには専攻科生産システム工学実験で実施したデータの一部が含まれている。

#### 参考文献

- [1] 西谷弘信・真壁朝敏：引張試験における7:3黄銅の延性破壊の機構，材料（第31巻第344号）452-457，（1982.5）
- [2] 西谷弘信：き裂における応力拡大係数に相当する切欠きにおける応力場の尺度，日本機械学会論文集・A編，（第48巻第447号）1353-1359，（1983.11）
- [3] 黒木剛司郎・大森宮次郎・友田陽：金属の強度と破壊（第2版），（1986.10）
- [4] JIS H 4000，アルミニウム及びアルミニウム合金の板材及び条，（2006）

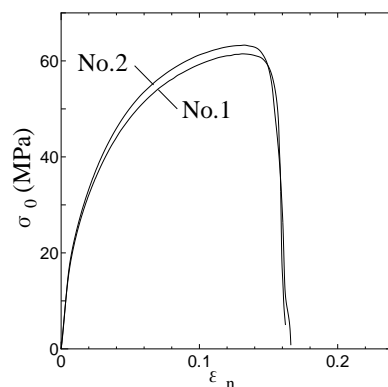
#### 付録 同一形状試験片での結果の違い

$b \times a = 4 \times 2, 6 \times 2, 8 \times 2$  の長方形孔をもつ試験片を用いてそれぞれ2回の引張試験を行った。付図1に試験片の破断結果を、付図2~4に負荷応力と公称ひずみの関係を示す。破断の起点が異なる場合があったが、概ね最大応力点が破断の起点となっている。また、応力-ひずみ関係は、破断形態による違いが大きく現れていないことがわかる。

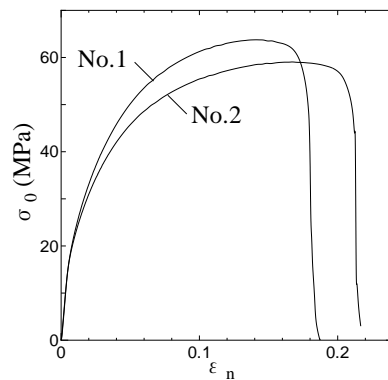


付図1 同一形状の破断結果  
(4×2) (6×2) (8×2)

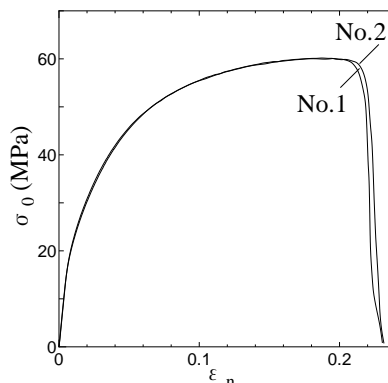
付図1 同一形状の破断結果



付図2 負荷応力-公称ひずみ(4×2)



付図3 負荷応力-公称ひずみ(6×2)



付図4 負荷応力-公称ひずみ(8×2)