

# 2 軸応力下におけるアルミニウム合金板材の 機械的性質と結晶粒成長

上海交通大学材料科学部

副教授 孫 業賛

(平成 16 年度国際交流助成 AF2004029)

キーワード：アルミニウム合金薄板， 2 軸応力下， 結晶粒成長

## 1. 研究の目的と背景

アルミニウム合金板材は重要な産業用資材として航空機と自動車向けに広範囲に活用されている。単軸引張応力下における合金の負荷と結晶粒成長の関係はすでに研究がなされ、その結果が材料科学の文献に報告<sup>1-3)</sup>されている。しかし、多軸応力下における負荷と結晶粒成長の関係については研究報告が多くない。従って、多軸応力下における微細構造と機械的性質に関し、単軸引張応力下とどのような相異があるのかについては余り知られていない。アルミニウム合金板材製十字型試験片を用いて 2 軸応力下における結晶粒の変形と結晶粒界破壊のプロセスについて、基本的な材料科学の疑問を考察する。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材と試験片，試験機

供試材には公称板厚 1mm のアルミニウム合金板材 A1050-O を用いた。単軸引張試験片形状は JIS 5 号とし、試験片は長手方向と圧延方向とが 45 度方向 (DD) となるように板材から採取した。この試験片を 2 軸引張試験に対応する単軸試験片とし、引張試験機はインストロンタイプ (約 10 tonf) を用いた。

2 軸引張試験片は片面腐食型で、板材の圧延方向 (RD) と板材の圧延方向と垂直方向 (TD) とを直交させた 140 × 140mm の十字型試験片<sup>4)</sup>を採用した。2 軸引張試験機は機械式ひずみ制御試験機<sup>4)</sup> (1 軸に対し約 1 tonf) を用いた。

### 2.2 実験数

単軸引張試験と 2 軸引張試験の実験内容を表-1 に示す。2 軸引張試験は十字型試験片の RD 軸を装着した側と TD 軸を装着した側の引張速度を変化させてつくったひずみ比を基準としておこなった。各々の引張速度は表-1 実験数

ひずみ比 $\epsilon_0$	荷重比 $\sigma_0 = P_y/P_x$	途中止め	破断点
-0.5	0	B <sub>1</sub> , C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>
1	1	B <sub>2</sub> , C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
0.67	0.88	B <sub>3</sub> , C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>
0.33	0.71	B <sub>4</sub> , C <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>
A は素材, 各荷重比共通			

当ひずみで一致するように設定した。荷重比は  $\bar{\sigma} = 1$  , 公称ひずみ  $\epsilon_0 \cong$  真ひずみ として、ひずみ比から算出

した。以後、この荷重比を用いる。

ミクロ組織測定のため試験片採取はそれぞれの点で引張試験を途中止めし、試験片中心部から 3 方向 (表面, 圧延方向断面, 圧延方向と垂直の断面) 各々 4 × 4mm 程度を摘出した。

## 3. 実験結果と解析

### 3.1 荷重 - 時間曲線

2 軸引張試験では十字型試験片の RD 軸を装着した側の負荷を TD 軸より大きくとり荷重比を設定した。荷重比  $\sigma_0 = P_y/P_x$  において、 $\sigma_0 = 1.0$  を図-1,  $\sigma_0 = 0.88$  を図-2,  $\sigma_0 = 0.71$  を図-3 にそれぞれ示す。

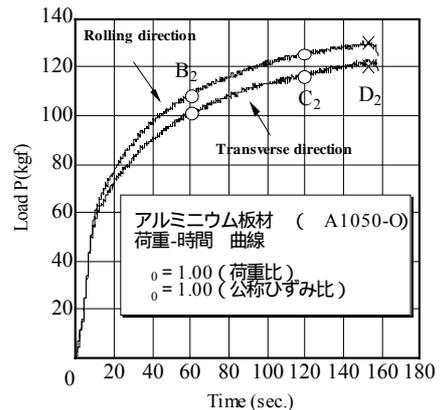


図-1 荷重比  $\sigma_0 = 1.0$  の時間-荷重 曲線。曲線上の B<sub>2</sub>, C<sub>2</sub> は引張り過程の中間である第 2 点。D<sub>2</sub> は試験片の破断点である。

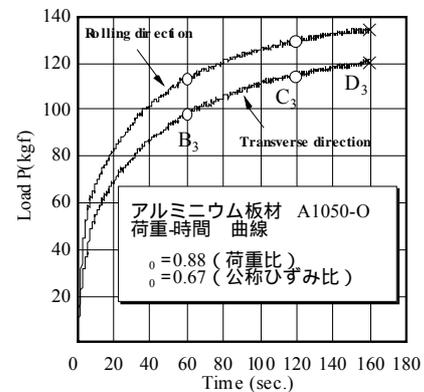


図-2 荷重比  $\sigma_0 = 0.88$  の時間-荷重 曲線。曲線上の B<sub>3</sub>, C<sub>3</sub> は引張り過程の中間である第 2 点。D<sub>3</sub> は試験片の破断点である。

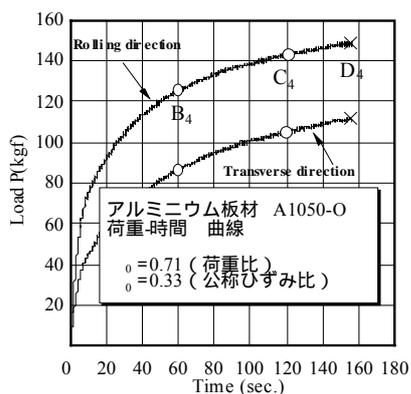


図-3 荷重比  $\sigma_0 = 0.71$  の時間-荷重 曲線 . 曲線上の  $B_4, C_4$  は引張り過程の中間である第2点 .  $D_4$  は試験片の破断点である .

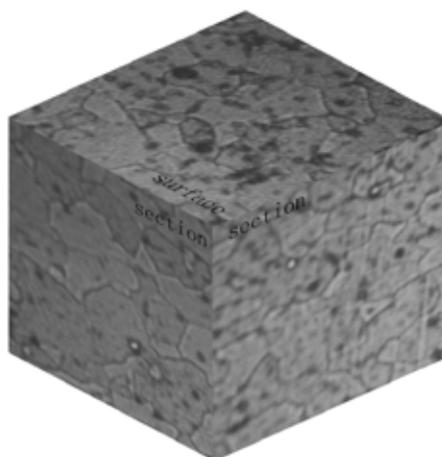


図-4 アルミニウム合金A1050-O薄板の素材 A

図-1から図-3において,  $P_x$  と  $P_y$  間の荷重差は  $\sigma_0$  の減少と共に増加している . これは RD 軸の主応力  $\sigma_1$  と RD 軸に帰属するせん断応力  $\tau_x$  が TD 軸の主応力  $\sigma_2$  とそのせん断応力  $\tau_y$  より大きいことを意味する . せん断応力  $\tau_x$  と  $\tau_y$  とは金属における結晶粒界に従って作用し, 面内 2 軸応力下における結晶粒成長の挙動を決定する .

### 3.2 ミクロ組織

表-1におけるミクロ組織を図-4から図 -16 に示す . このミクロ組織を作成するために用いた化学薬品調合表を表-2に示す . おおのサンプル作成の最適腐食時間は 4 分以内を基準にした .

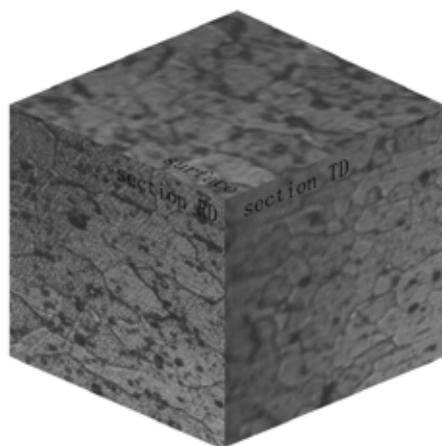


図-5 単軸引張試験における途中止め  $B_1$

表-2 化学薬品調合 腐食液の成分<sup>5)</sup>

名称	分量	状態
Poulton 液	50 ml	濃縮
HNO <sub>3</sub>	25 ml	濃縮
K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	30g / 100ml H <sub>2</sub> O	
Poulton 液の割合		
HF	1 ml	48%
HCl	12 ml	濃縮
HNO <sub>3</sub>	6 ml	濃縮
蒸留水	1 ml	

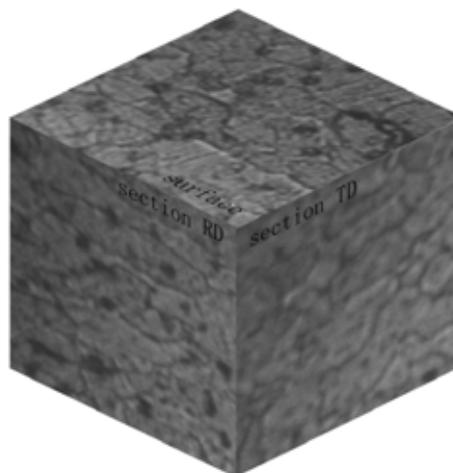


図-6 単軸引張試験における途中止め  $C_1$

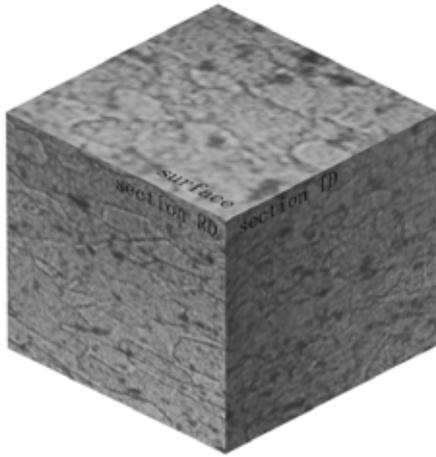


図-7 単軸引張試験における途中止め  $D_1$

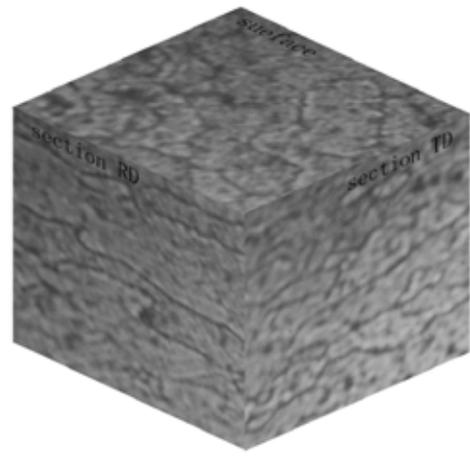


図-10 2軸引張試験  $\nu = 1$ における途中止め  $D_2$

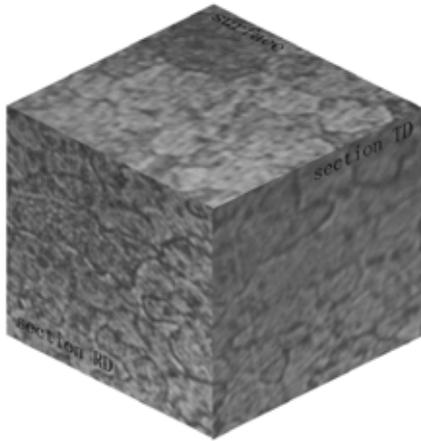


図-8 2軸引張試験  $\nu = 1$ における途中止め  $B_2$

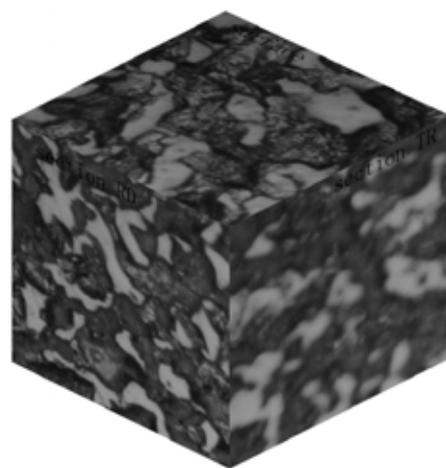


図-11 2軸引張試験  $\nu = 0.88$ における途中止め  $B_3$

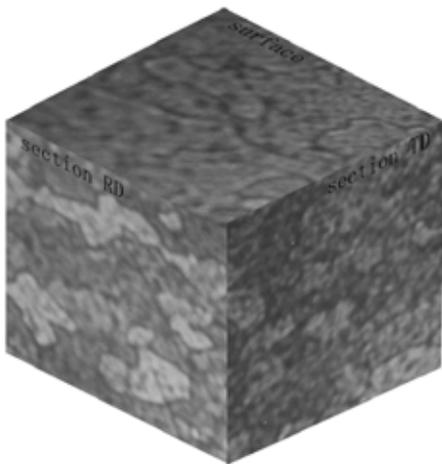


図-9 2軸引張試験  $\nu = 1$ における途中止め  $C_2$

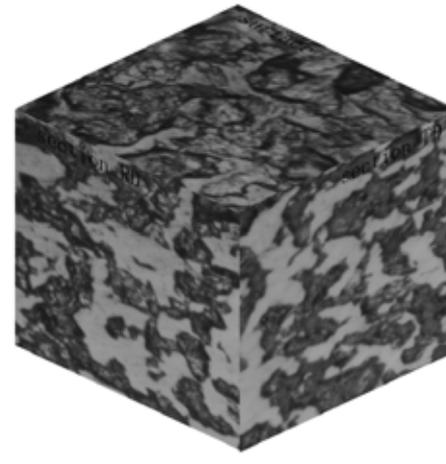


図-12 2軸引張試験  $\nu = 0.88$ における途中止め  $C_3$

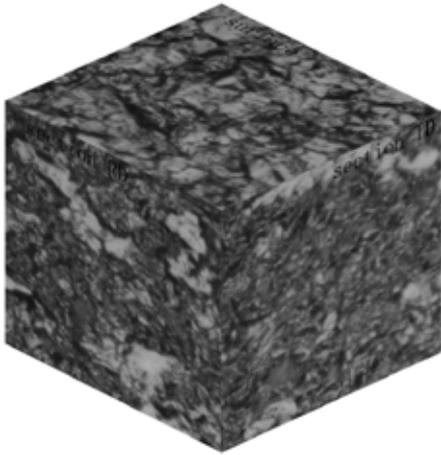


図 -13 2 軸引張試験  $\sigma_0 = 0.88$ における途中止め  $D_3$

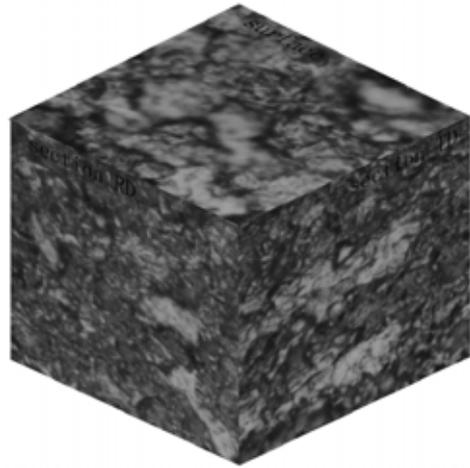


図 -16 2 軸引張試験  $\sigma_0 = 0.71$ における途中止め  $D_4$

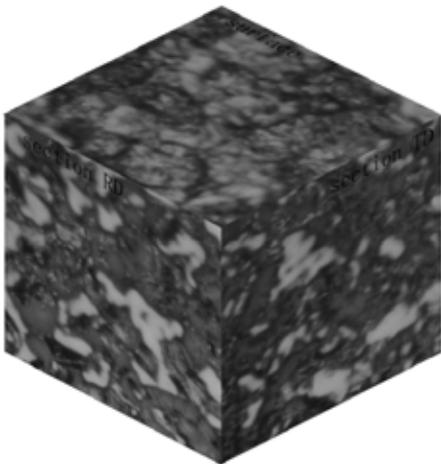


図 -14 2 軸引張試験  $\sigma_0 = 0.71$ における途中止め  $B_4$

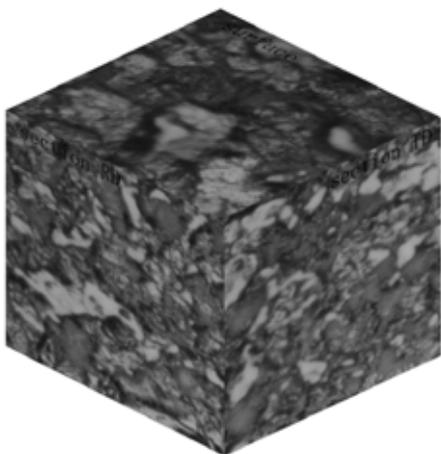


図 -15 2 軸引張試験  $\sigma_0 = 0.71$ における途中止め  $C_4$

### 3.3 結晶粒成長

素材表面の 1 平方ミリメートルに存在する結晶粒数は線分法により求めた．試験片の伸びと粒径成長の関係を図 -17 に示す．

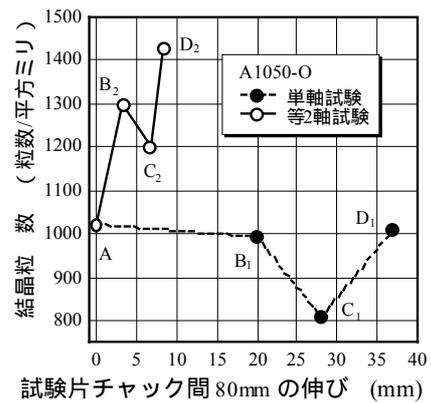


図-17 等2軸と単軸引張試験における平方mmあたりの試験片伸びにたいする結晶粒増減推移

ポイントAはA1050-Oの素材である．単軸試験と等2軸試験のグラフを比較すると結晶粒成長の法則が考察できる．いずれの場合もC点で結晶粒の様子が変わる．B点からC点までは結晶粒の大きさが増加し，単位面積あたりの数が減少する．C点を通ると1つの結晶粒は試験片の伸びが増加するとともに分裂する．この結果，1つの結晶粒の大きさが減少し単位面積あたりの数が増加する．単位面積あたりの2軸引張りにおける結晶粒の数は単軸引張りにおけるそれよりも大きいことは明白である．2軸引張り  $\sigma_0 = 1.0$ では全ての点で素材Aより上にある．逆に単軸引張り  $\sigma_0 = 0$ は素材Aより下のラインにある．又，2軸応力下における結晶粒の伸びは単軸応力下のそれより短い．

1 平方 mm あたりの伸びに対する結晶粒の関係は図 -18 に示す．

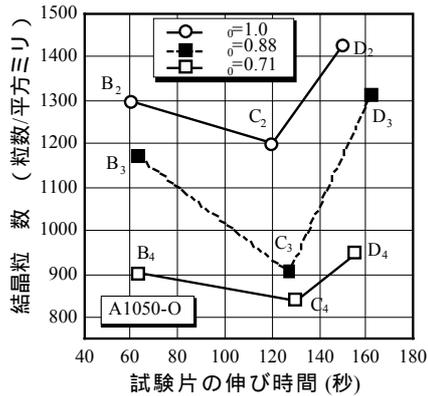


図-18 2軸試験の荷重比における1平方mmあたりの結晶粒の変化。

図 -17 において、 $B_2, C_2$  と  $D_2$  点を通過する線は  $\sigma_0 = 1.0$  の時の実験結果である。 $B_3, C_3$  と  $D_3$  点を通過する線は  $\sigma_0 = 0.88$  の時の実験結果である。 $B_4, C_4$  と  $D_4$  点を通過する線は  $\sigma_0 = 0.71$  の時の実験結果である。この3つの線をそれぞれ比較すると単位面積あたりの結晶粒数は  $\sigma_0$  値の減少とともに減少していることが、ほぼ実態として決定されている。この理由は各々の結晶粒界におけるせん断力効果が  $\sigma_0$  値の減少とともに2軸から単軸に徐々に変化している。各々の結晶粒が2軸せん断力によって分解される程度は  $\sigma_x = \sigma_y$  ( $\sigma_0 = 1.0$ ) のとき最大になる。試験片表面の面上 RD における引張荷重を  $R$ 、TD を  $T$  とする。

$$P_{eq} = \sqrt{R^2 + T^2} \quad \text{で定義する合力を } P_{eq} \text{ とする。}$$

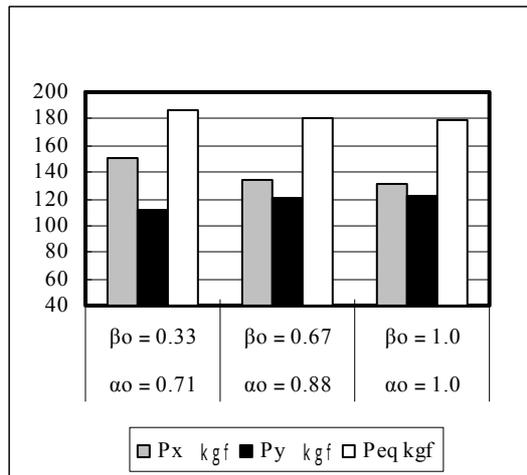


図 -19 荷重 - 時間 曲線のD点における破断荷重と荷重比  $\sigma_0$ 、ひずみ比  $\epsilon_0$  に対する関係のグラフ。

荷重比  $\sigma_0$  別の荷重 - 時間 曲線のD点における

$R$ 、 $T$  と  $P_{eq}$  を図 -19 に示す。図 -19 をみると破断をまねく荷重  $R$  と  $T$  は  $\sigma_0$  とともに変化しているのに対しては  $P_{eq}$  はほとんど一定である。引張をうけている間、結晶粒の成長はただ  $\sigma_0$  と結びついているだけで  $P_{eq}$  は関係がないことが立証できた。試験片の破断が開始された時、破断荷重  $R$  と  $T$  は全て  $P_{eq}$  の下におかれる。これは図 -17 で示すように、単軸状態伸び以上に2軸状態の伸びを短くさせている。その理由は  $R$  と  $T$  は一方向ではなく全方向に結晶粒を膨張させているためである。

#### 4. 結 言

十字型試験片を用いて2軸応力下における実験をおこなった。実験の結果、単軸応力下では知り得なかった以下の知見が習得できた。

1. 引張応力下における結晶粒の成長は2つの場面に分類できる。単軸であれ2軸であれ単位面積あたりの結晶粒数は塑性変形の過程で始めは減少する。その後結晶粒の自己分裂過程でその数が増加する。
2. 2軸応力下における単位面積あたりの結晶粒の数は荷重比  $\sigma_0$  が大きいほど大きく、荷重比に相関性を示している。
3. 2軸引張応力下におけるアルミニウム合金板材は、2方向の合力で定義される破断荷重  $P_{eq}$  は一定であり、荷重比  $\sigma_0$  と相関しない。

#### 謝 辞

この論文は法政大学工学部大澤研究室で2004年夏に着手し秋に完成した。大澤泰明教授並びに大澤研究室学生諸君は実験に好意で協力していただいた。ミクロ組織の金相写真作成にあたり井野博満教授から井野研究室の機材を使用させていただいた。私の研究に協力して頂いた法政大学の皆様に深く感謝の意を表します。

この研究は天田金属加工機械技術振興財団からの助成金の交付をうけて制作いたしました。天田金属加工機械技術振興財団のご好意に深く感謝申し上げます。

#### 参 考 文 献

1. William F. Smith, Principles of Materials Science and Engineering, 2<sup>nd</sup> ed, McGraw-Hill,(1990), 243-308.
2. R. W. Herzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, 3d ed., Wiley, (1989).
3. T.H.Courtney, Mechanical Behavior of Materials, McGraw-Hill, (1989).
4. 吉水源宏・桑原利彦・杉林俊雄・磯野宏秋・戸次洋一郎・大澤泰明：軽金属，53(2003), 284-289.
5. 材料技術教育会編集，組織検査用試料の作り方，横書店，(2000). 197-216.