

# アルミニウム合金板の温間面内異方性の研究

広島大学大学院 工学研究院

助教 濱崎 洋

(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013029)

キーワード：面内異方性，アルミニウム合金，温間成形

## 1. 研究の目的と背景

金属板材は圧延により強い集合組織が形成され、これにより板面内で異方性を示すことが知られており<sup>1)</sup>、その変形特性は以下の3つに代表される。

- ① 単軸引張時の応力の方向依存性
- ② 単軸引張時の  $r$  値の方向依存性
- ③ 降伏曲面形状

これらの面内異方性について様々な金属材料における実験報告およびそれらを表現する降伏関数の提案がなされている。一方、アルミニウム合金においては成形性の向上を目的とした温間プレス成形が少なくない。そのため、金型設計段階での数値シミュレーションには室温から成形温度までの温度依存性とひずみ速度依存性を考慮した材料構成則が求められる。単軸引張試験から得られる応力-ひずみ特性については温間加工硬化則がいくつか提案されているものの、二軸引張試験については実験が困難であり、温間降伏曲面の報告はあまり見られない<sup>2)</sup>。

そこで本研究では、室温から 300℃まで板材を加熱できる装置を二軸試験機に組み込み、さらに任意の応力比を保持したまま所定の引張速度を与えられる温間二軸引張試験装置を開発した。また、本試験機によりアルミニウム合金板の温間降伏曲面を取得し、温度の影響を調査したので報告する。

## 2. 温間二軸引張試験装置

### 2.1 加熱装置の概要

図1に開発した二軸試験装置の概要を示す。中央に配置した恒温槽の内部において試験片温度を一定に保ち、油圧シリンダーにより二軸方向に引張力を与える。図2に加熱装置の概略図を示す。恒温槽外部からヒートガンにより熱風を送付し、途中に設けたヒーターを通すことで試験片下部を所定の温度まで加熱する仕組みである。また、試験片下部から上部へ熱風を循環するための通路を設けている。さらに上面にはヒーターを内挿した蓄熱リングを設置し、ヒーターの熱量をヒートガンとは独立に制御することで試験片上面・下面での温度ムラを小さくしている。

### 2.2 動画撮影によるひずみの測定

本試験は恒温槽中で実施し、さらに 300℃までの過熱を考えているため、ひずみ測定に接触式の変位計やひずみゲージは使用できない。そこで試験片変形部に白色艶消しスプレーを塗布し、その後、図3に示すように変形部中心に位置する一辺の長さ 10mm の四角形の頂点に黑色インク

でマークをつけ、変形中はこのマークを動画撮影した。さらに試験後にマーク間距離を測定することでひずみを算出した。図4にひずみゲージと画像処理により算出したひずみの差異を示す。これにより、本画像処理装置ではひずみゲージと同等の精度でひずみ測定が可能であることを確認した。



図1 温間二軸引張試験装置

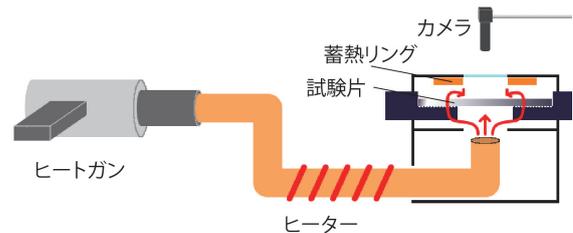


図2 加熱装置および恒温槽の概略図

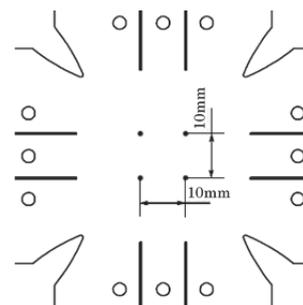


図3 ひずみ測定用マーク

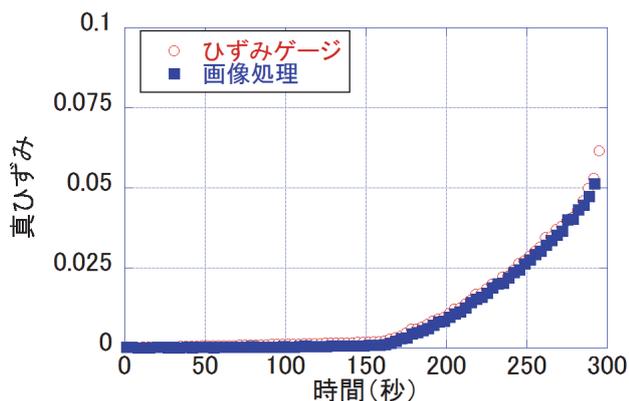


図4 ひずみゲージと画像処理によるひずみの比較

### 2.3 引張速度の制御

二軸引張試験では、各軸方向の応力比を一定にすることで比例変形時の降伏曲面形状を取得する。しかし、引張軸の荷重速度制御では変形の進行に従ってひずみ速度が変化するため、温間では引張速度制御も同時に考慮する必要がある。そこで本試験機では次のような制御をおこなった。

- ① 試験の応力比を決定する。
- ② x 軸の引張速度を一定として速度制御する。
- ③ x 軸の荷重をリアルタイムで計測し、y 軸には所定の応力比となるような荷重制御を与える。

これにより、ひずみ速度を試験中にほとんど変化させることなく、応力比一定の試験を可能としている。

## 3. 供試材および試験条件

### 3.1 供試材および試験片形状

供試材はアルミニウム合金板 A5182-O (t=1.0mm) であり、これを図5のような十字型試験片形状に加工して試験片とした。ここで、引張方向のうち片方は圧延方向 (R.D.) となるようにした。

### 3.2 試験条件

R.D.を x 方向、その直行方向 (T.D.) を y 方向とすると、試験で設定した応力比 ( $\sigma_x : \sigma_y$ ) は 1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1 である。ここで 1:0 および 0:1 はそれぞれ R.D. と T.D. への単軸引張試験であり、1:1 は等二軸引張、2:1 および 1:2 はそれぞれ T.D. および R.D. のひずみが 0 となる平面ひずみ引張に相当する。試験温度は室温 (R.T.), 200 および 300°C であり、ひずみ速度は 0.001/s となるように設定した。

## 4. 試験結果および考察

### 4.1 温度ムラの調査結果

図6に試験温度 300°Cにおける試験片の温度推移を示す。温度は試験片に溶接した熱電対により計測した。まず、試験片の中央部と変形部端部の温度差はほとんどないことが確認でき、同一面内ではほぼ均熱状態であることが確認できる。また、上面および下面での温度差は 12°C であり、

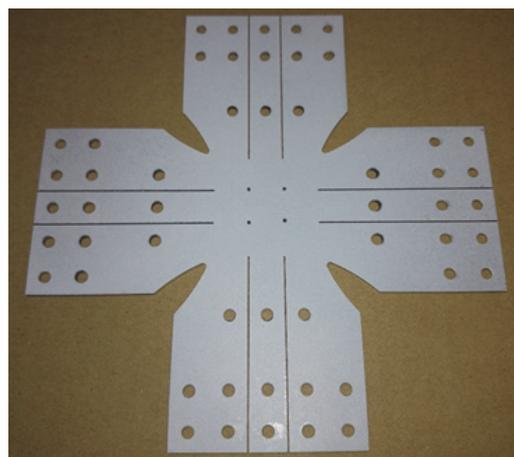


図5 十字型試験片

これまでのアルミニウム合金板の温間単軸引張試験結果から無視できるほど小さいことが確認された。なお、試験温度が低下するにつれて上面と下面の温度差も小さくなるため、他の温度における結果は掲載していない。

### 4.2 ひずみ速度の調査結果

図7および8にそれぞれ 20 および 300°Cにおける種々の応力比での温間二軸試験で得られたひずみ速度を示す。目標とするひずみ速度は 0.001/s であり、200°Cでは 0.0005~0.001/s の間で変形が進行していることがわかる。一方、300°Cにおける試験では、ひずみ速度 0.0008~0.0017/s であり 200°Cに比べて差が大きい。また、いずれの温度でも応力比によりひずみ速度にばらつきがみられる。これは、試験中には試験片つかみ治具の変位速度を制御しているが、試験片は中央の変形領域だけでなく腕部でも無視できないほどの変形がおきているためと考えられる。従って、特に高速変形ではひずみ速度の差が顕著に流動応力の差となって表れるため、予備試験をして試験条件を決定する必要がある。今回はひずみ速度が低速であり、上述した速度の差は降伏曲面形状に大きな影響を与えないと考えてデータ整理を行った。

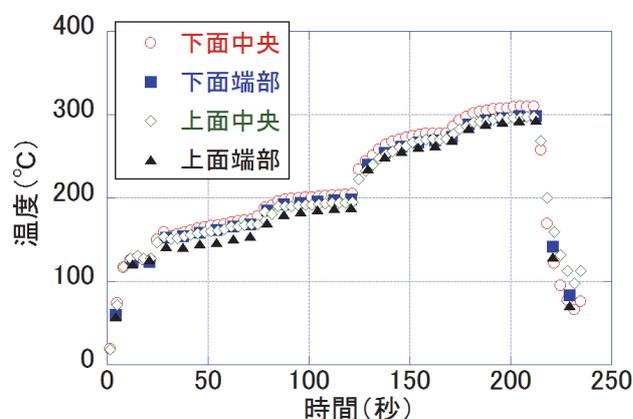


図6 試験片変形部の温度ムラ (試験温度 300°C)

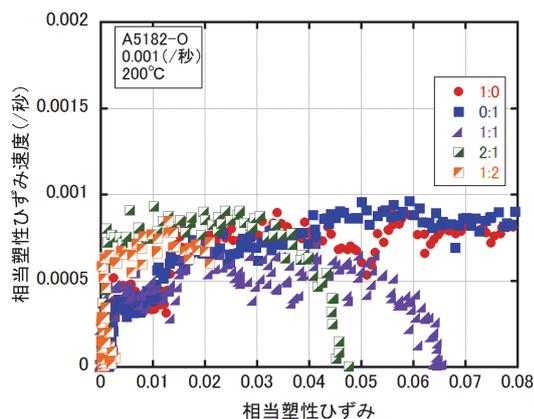


図7 各応力比におけるひずみ速度 (200°C)

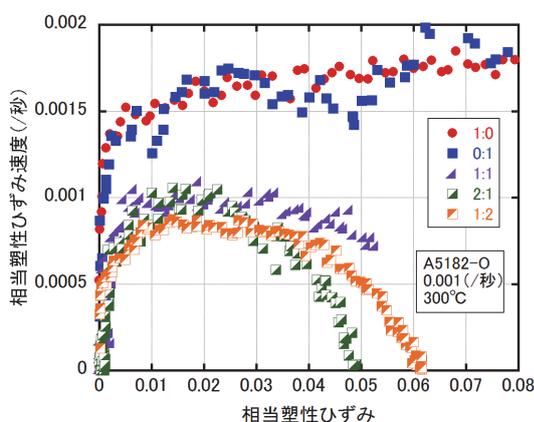


図8 各応力比におけるひずみ速度 (300°C)

### 4.3 試験結果および考察

図9に R.T., 200°Cおよび 300°Cにおけるひずみ速度 0.001/s での単軸引張試験から得られた応力-ひずみ曲線を示す。試験は各条件 2 回実施し、すべての曲線をプロットしている。本結果より、流動応力については再現性の高い試験が実施できていることを確認した。一方、R.T.および 300°Cでは延性の再現性も得られているが、200°Cでは 1 回目の試験では 2 回目よりもくびれ発生ひずみが 2 倍以上となっている。2 回目では試験片腕部で強くくびれが発生しており、変形領域に比べて腕部の温度が高くなりそこに変形が集中したためであると考えられる。

図10から12にそれぞれ R.T., 200, 300°Cの温間二軸引張試験から得られた A5182-O 材の降伏曲面および後続の等塑性仕事曲面を示す。ここで等塑性仕事曲面とは、単軸引張で基準となる塑性仕事（ここでは相当塑性ひずみ 0.2, 1, 2, 3, 4, 5, 6%に対応）と等価な二軸変形中の応力点を抽出し、引張方向応力空間にプロットして得られる曲面である。いずれの温度でも塑性変形の進行に伴って応力が高くなり、等塑性仕事面が拡大している様子が観察できる。一方、流動応力の絶対値は温度の上昇に伴って低下しており、これは図9の単軸引張試験結果と対応している。また、等塑性仕事曲面の拡大率も温度上昇とともに低下し

ており、300°Cにおいては 0.2%の曲面と 6%の曲面ではその大きさに違いは小さい。図9の単軸引張試験結果を見ると、本供試材は室温で大きな加工硬化を示しており、塑性ひずみ 0.2%から 6%の間における応力の上昇が顕著であるのに対して、200°Cでは加工硬化が弱くなり、300°Cでは応力はほぼ一定値をとっているためである。この温度上昇に伴う加工硬化率の減少は変形中に動的回復が起こっていることが原因と考えられる。

図13～15にそれぞれ R.T., 200°C, 300°Cの等塑性仕事曲面を R.T.の単軸引張応力で除した無次元化等塑性仕事曲面を示す。本図により、塑性変形の進行に伴う曲面形状の変化を見ることができる。また、図には von Mises の降伏曲面を実線で示している。いずれの温度でも塑性ひずみが増加しても曲面形状はほとんど変化しておらず、これにより本供試材は二軸応力の異方性の発展が小さい材料であることがわかる。一方、温度と曲面形状に着目すると、まず R.T.では平面ひずみ変形で von Mises よりも応力が低くなっているが、2:1 と 1:2 の差はほとんど見られず常温で面内異方性の小さな材料であることが確認できる。一方、200 および 300°Cでは等二軸応力が von Mises の曲面よりも内側にあり R.T.とは異なる結果が得られた。また、平面ひずみ応力については、200°Cでは 1:2 の応力が 2:1 のそれよりも高く、300°Cではそれが逆転する現象が観察された。一般に fcc 材料であるアルミニウム合金では活動すべり系が限定される R.T.で異方性が強くなり、温度が上昇するにつれて等方性に近づくものと考えられる。本結果はその予想とは逆の傾向であり、今後は試験精度と再現性を調査すると共に、組織観察を実施して原因を調査する必要がある。

### 謝辞

本研究の内容は公益財団法人天田財団平成 25 年度一般研究開発助成により実施しました。本紙面を借りてお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) K. Kuwabara et al.: Int. J. Plast., 21 (2005), 101.
- 2) T. Naka et al.: J. Mater. Proc. Technol., 140 (2003), 494.

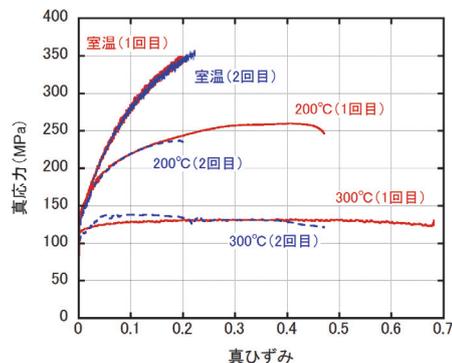


図9 R.T., 200, 300°Cの単軸引張試験から

得られた応力-ひずみ曲線

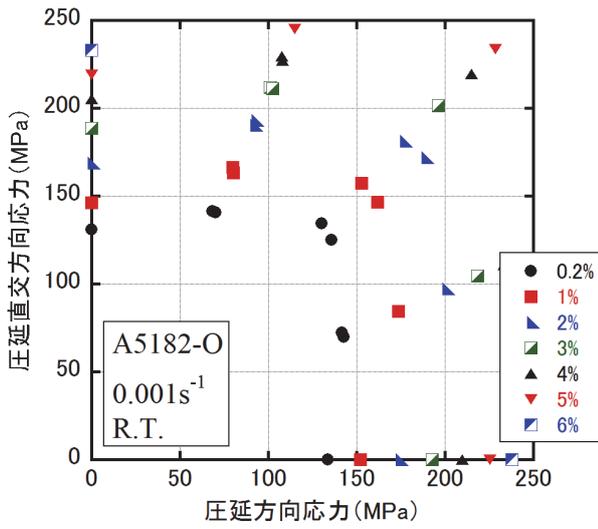


図 1 0 A5182-O 材の等塑性仕事曲面 (R.T.)

図 1 2 A5182-O 材の等塑性仕事曲面 (300°C)

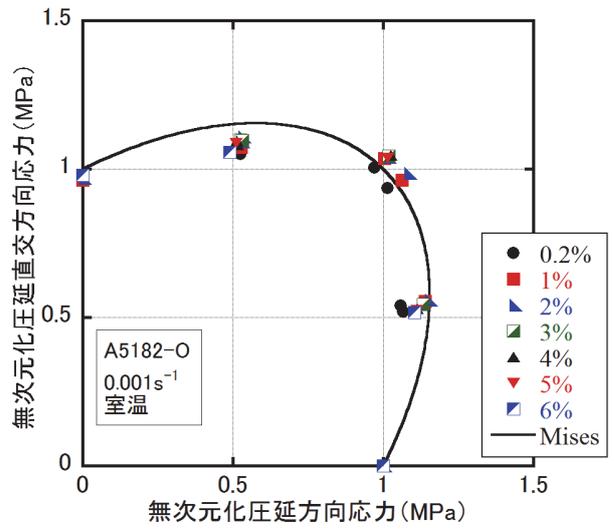


図 1 3 A5182-O 材の無次元化等塑性仕事曲面 (R.T.)

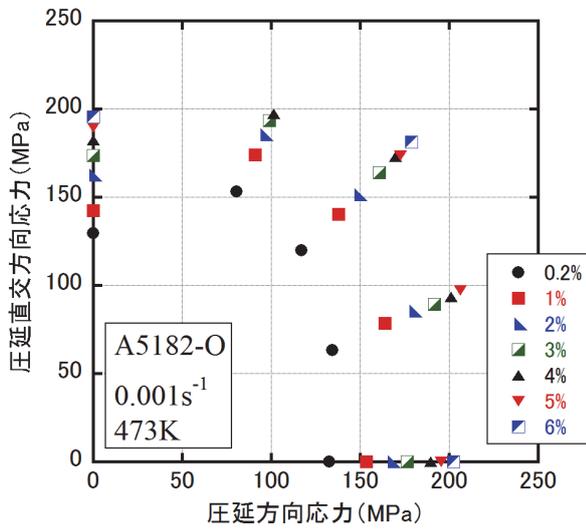


図 1 1 A5182-O 材の等塑性仕事曲面 (200°C)

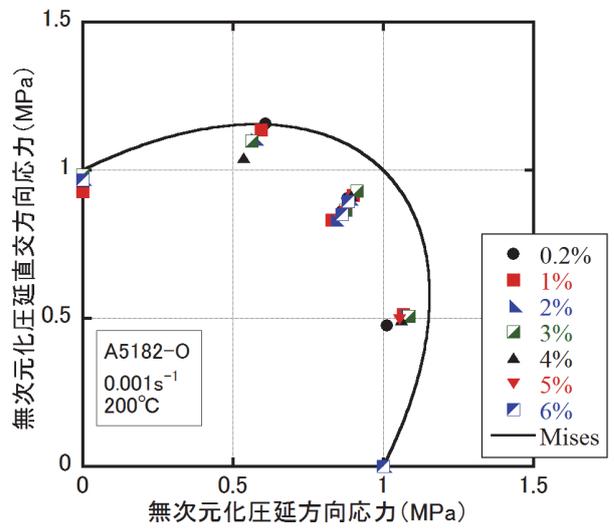


図 1 4 A5182-O 材の無次元化等塑性仕事曲面 (200°C)

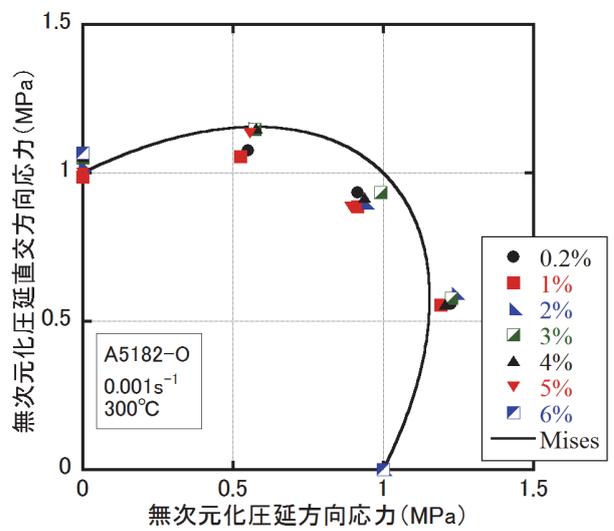
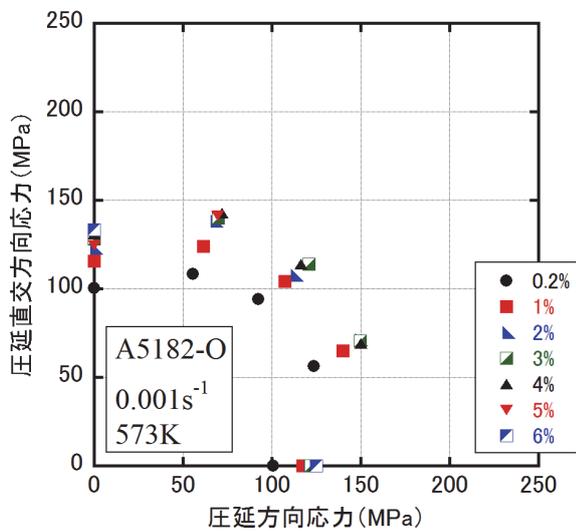


図 1 5 A5182-O 材の無次元化等塑性仕事曲面 (300°C)