

アルミニウム合金板の温間プレス成形 CAE の開発

広島大学大学院 工学研究科 機械物理工学専攻
助教 濱崎 洋
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016009)

キーワード：アルミニウム合金板，温間変形，温度・速度依存性

1. 研究の目的と背景

自動車車体軽量化のためアルミニウム合金板の利用が望まれているが¹⁾，鋼板に比べて難成形材であることからその適用は成形が容易な部品に限定されている．成形中の問題にはストレッチャーストレインマーク²⁾と呼ばれる5000系アルミニウム合金でみられる塑性変形による縞模様や，低ヤング率による大きなスプリングバック³⁾，また，平面ひずみ変形付近の割れが挙げられる．このような成形不良を解決するのに温間成形が有効であることは広く知られているが，金型やプレス工程設計のための数値シミュレーション技術は，常温におけるそれと比べて必ずしも十分に整備されているとは言えない．特にアルミニウムは鋼板と比べ融点が低く，比較的低温で流動応力が著しく低下し，また，それに伴ってひずみ速度依存性も大きくなる．このような温度およびひずみ速度依存性は主に単軸引張試験⁴⁾や圧縮試験で検討されているものの，板材の二軸変形下における温間応力 - ひずみ特性を調査した例は極めて少ない^{5,6)}．そのため，プレス成形シミュレーションを考えれば温間応力 - ひずみ構成モデルには検討，開発の余地が多く残されているのが現状である．

そこで本研究では，アルミニウム合金板の温間単軸引張試験，温間二軸引張試験および温間単軸応力緩和試験を実施して，温度およびひずみ速度の影響を詳細に調査した．この時，より信頼性の高い試験データ取得を目的として厳密な温度管理を行って試験を実施した．

2. 実験方法

2.1 温間二軸引張試験

用いた供試材は Al-Mg 合金 A5182-O 板材 ($t=1.0\text{mm}$) である．この供試材を放電加工機により図 1 (a) の単軸引張試験片および同図 (b) の二軸引張試験片に加工した．また，温間二軸引張試験装置を図 2 に示す．本装置は x 軸を変位速度制御とし，そこで計測される荷重を用いて y 軸は所定の応力比を保ちながら変形させることでひずみ速度と応力比を同時に制御することが可能となっている．また，試験片の変形部は恒温槽内に収まり，上部には伝熱ヒータを設置し，下部からはヒートガンによる熱風により試験片を加熱した．これにより本試験は目標温度からの誤差を 0.4°C 以内に収めている．また，予備試験にて試験片面内の温度分布を熱電対により測定し，その温度分布と単軸引

張試験で得られた温度，ひずみ速度依存の応力 - ひずみ曲線を与えて有限要素法 (FEM) 解析を実施した．その結果，温度誤差による等塑性仕事面測定への影響は無視できるほど小さいことを確認している．また，上部から撮影した写真によりデジタル画像相関法を用いてひずみを測定した．試験温度は 20 ， 200 および 300°C ，ひずみ速度は $0.001/\text{s}$ とし， 300°C のみ $0.01/\text{s}$ でも試験を実施した．

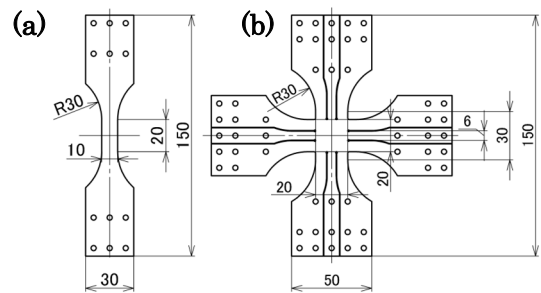


図 1 (a)温間単軸，(b)二軸引張試験片

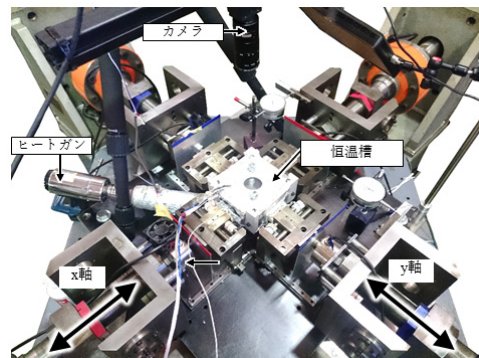


図 2 温間二軸引張試験装置

2.2 温間応力緩和試験

図 3 に応力緩和試験片形状を示す．本試験では図中の平行部 3 点に熱電対を溶接し，上下方向に 3 分割された電気炉にて昇温温度を制御した．また，変形中は昇温終了時における雰囲気温度を制御して試験を実施した．試験中は標点間 35mm の伸び計により試験片伸びを計測してひずみに変換した．応力緩和試験では所定の予ひずみ (約 10%) を与えたのちにクロスヘッド変位を固定して応力緩和挙

動を観察した。試験温度は 20, 100, 200, 300°C, 引張時のひずみ速度は 0.001, 0.01, 0.1/s とした。

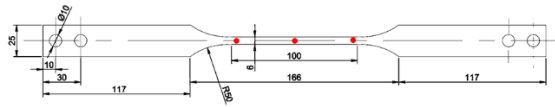


図3 応力緩和試験片

3. 試験結果

3.1 温間二軸引張試験結果

図4に試験温度 20°Cの単軸引張試験から得られた応力-ひずみ曲線を示す。本供試材では 20°Cにて顕著な動的ひずみ時効が確認された。また、0°方向が最も応力が高く、90, 45と続いた。図5および6にそれぞれ 200 および 300°Cにおける単軸引張試験結果を示す。200°Cでは、セレーションが発生せずに滑らかな応力-ひずみ線図となった。また、引張方向による明確な差異は確認されず、降伏後に加工硬化挙動を示しているが加工硬化率は 20°Cの時と比較して 1/3 程度に低下した。一方 300°Cでは、降伏応力が 20°Cの 1/2 程度まで下がり、降伏直後に流動応力が大きく低下しその後は緩やかに軟化した。引張方向の差異は 200°Cと同様にほとんど観察されなかった。また、各温度における r 値を表1に示す。0 および 90°方向の r 値は 20°Cでは 0.7 程度であったが、温間ではいずれも大きな値となり等方性材料へ近づいた。

続いて、図7, 8, 9にそれぞれ 20, 200, 300°Cでの二軸引張試験から得られた等塑性仕事面を示す。なお、形状の比較を容易にするため、圧延方向の単軸引張試験応力で他の結果を無次元化して示している。20°Cでの正規化等塑性仕事面形状は、概ね等方性材料の von Mises の降伏曲面に近い位置に応力値を取っているが、等二軸引張(応力比 1:1)における応力点がやや張出した結果となった。200 および 300°Cの正規化温間等塑性仕事面は室温とは逆に、等二軸応力がやや低い値となったが明確な差異は確認されなかった。300°Cでは変形中の動的回復に起因し加工軟化挙動を示していると推察されが、動的回復の程度が応力経路に依存するかはこれまでに分かっていない。単軸変形と比較し等二軸変形で動的回復がより早く進行すると仮定すれば等二軸応力がより低くなり本研究で得られた結果を説明することができるが、結晶粒観察などによる詳細な検討は今後の課題としたい。

本研究で供試材として用いた A5182-O 材の結晶構造は fcc 構造であり、すべり系は等方的な八面体すべり {111}<111>である。また、このすべり系の温度依存性は小さく、本供試材は焼鈍材であり昇温による集合組織変化もほぼ起こりえないと考えられる。そのため、本試験で得られた等塑性仕事面の形状差は比較的小さかったものと推測される。

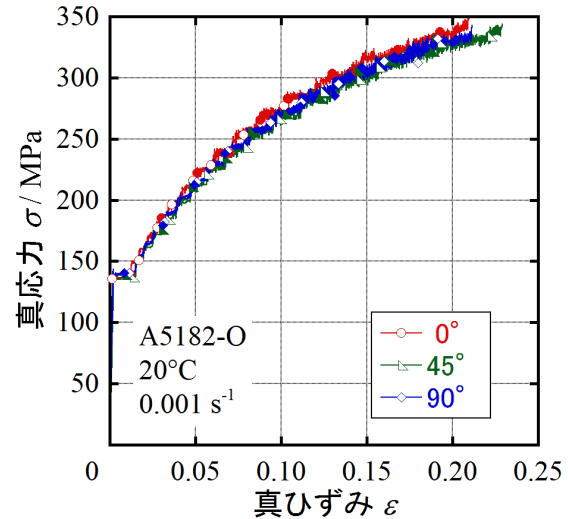


図4 20°Cの単軸引張試験結果

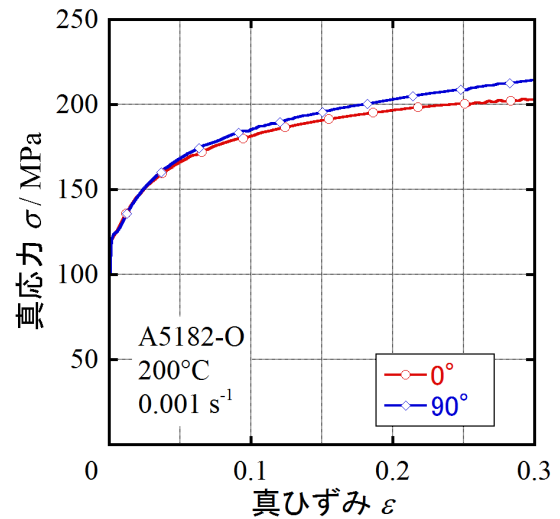


図5 200°Cの単軸引張試験結果

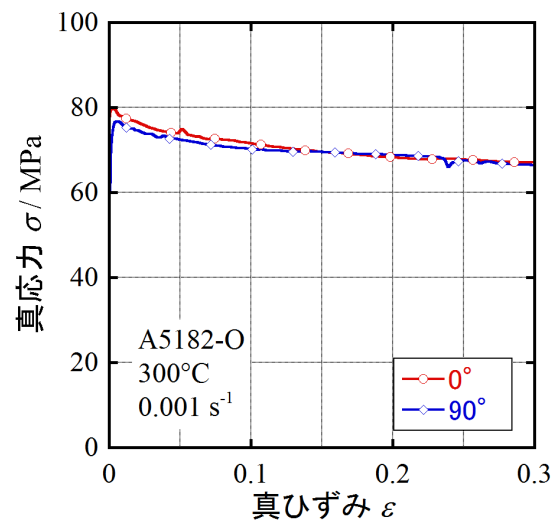


図6 300°Cの単軸引張試験結果

表1 各試験温度における r 値

温度 / °C	引張方向 / °	r 値
20	0	0.71
	90	0.72
200	0	0.83
	45	0.75
300	0	0.82
	45	0.98

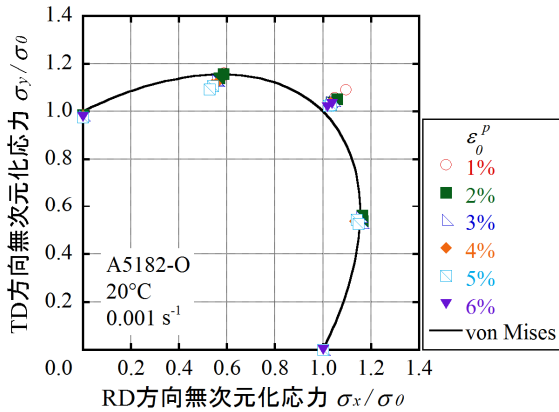


図7 20°Cの無次元化等塑性仕事面

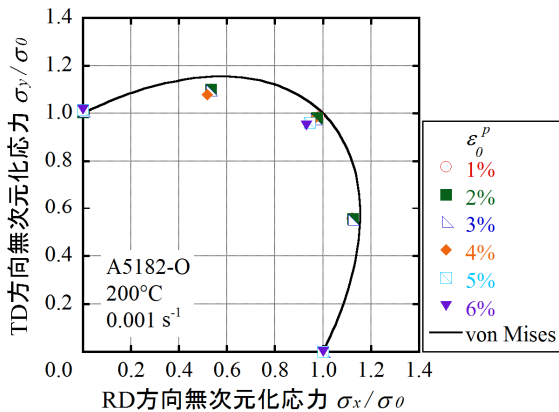


図8 200°Cの無次元化等塑性仕事面

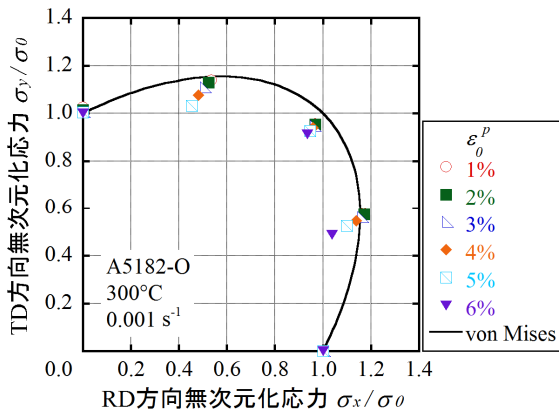


図9 300°Cの無次元化等塑性仕事面

図10に試験温度 300°C, ひずみ速度 0.01/s の単軸引張試験から得られた応力 - ひずみ曲線を示す. 0.001/s の結果 (図6) と比べ降伏点はほとんど変わっていないが, 塑性変形開始後からひずみ 1%程度まででおおよそ 20MPa 加工硬化を示し, その後はほぼ応力一定で変形が進行している. 以上のことから本供試材の 300°Cにおけるひずみ速度依存性は顕著であることが確認できる. 次に図11に試験温度 300°C, ひずみ速度 0.01/s の二軸引張試験から得られた応力比 1:1 および 2:1 の試験結果を示す. 単軸引張試験で見られた速度依存性にも関わらず, 試験で得られた応力点はおおよそ von Mises の降伏曲面上に位置しており, このことからひずみ速度が面内異方性に与える影響は小さいと考えられる.

図12に塑性ひずみ増分ベクトルの向きと von Mises 降伏関数の法線方向との比較を示す. いずれの温度においても試験結果は von Mises の法線方向とよく一致しており, これにより関連流動則が成立していることが確認できた.

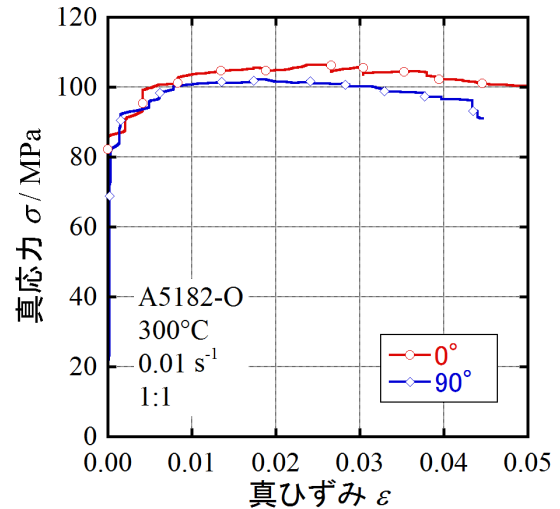


図10 300°C, ひずみ速度 0.01/s での単軸引張試験結果

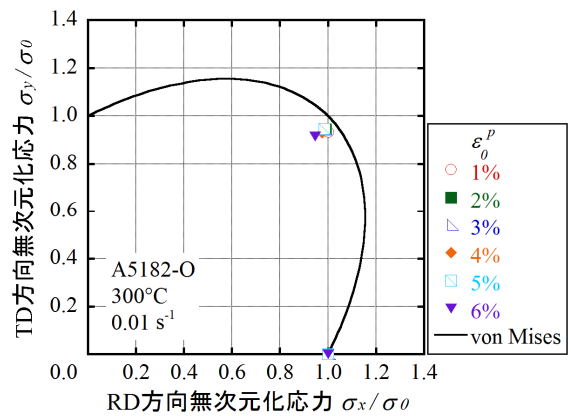


図11 300°C, ひずみ速度 0.01/s での無次元化等塑性仕事面

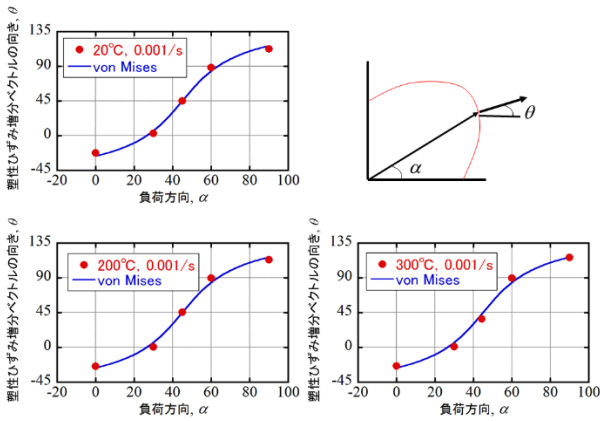


図 1.2 塑性ひずみ増分ベクトルに向き

3.2 温間応力緩和試験結果

図 1.1 に応力緩和試験予ひずみ付与時の応力 - ひずみ曲線を示す。二軸試験と同様に強い温度依存性と 200, 300°C での顕著なひずみ速度依存性が確認できる。また, 20°C では動的ひずみ時効も確認される。続いて図 1.2 にクロスヘッド保持時の応力と時間の関係を示す。まず 20°C では応力はほとんど低下していないが, 100°C では 10000s 後には 100MPa 程度応力緩和している。引張り予ひずみ時には 20°C と 100°C で流動応力にほとんど差が見られなかったにもかかわらず応力緩和特性が大きく異なる結果となった。これは室温での動的ひずみ時効と関係しているものと推測するが, 現状では明確な理由はわかっていない。また, 200, 300°C と試験温度が上昇するにつれて応力緩和は顕著になり, 特に保持開始直後で急速な応力現象が起こり, そこから緩やかに収束に向かう結果となった。また, 300°C ではほぼ応力 0MPa まで低下することが確認された。プレス成形では高温で成形・保持することにより曲げ変形時の残留モーメントがほぼ消滅してスプリングバックレスになることを示している。また, ひずみ速度が上昇するほど緩和後の収束応力が低く表れている。これは, ひずみ速度が変化するために保持開始応力, すなわち応力緩和の駆動力が異なるためであると考えられる。

次に, 各試験条件での応力緩和の程度を次式の応力緩和率にて評価した。

$$\frac{\sigma_* - \sigma}{\sigma_*} \times 100 (\%)$$

ここで σ_* は応力緩和開始時の応力である。この結果より, 応力緩和率は温度が上昇するほど予ひずみ速度 (あるいは応力緩和開始時の応力) の影響を強く受け, 100°C では 40%, 200°C では 70~80%, 300°C では 90~100% 応力が減少することが確認された。

4. 結言

アルミニウム合金板 A5182-O 材 (t=1.2mm) の温間単軸および二軸変形試験を実施した。単軸引張試験の結果,

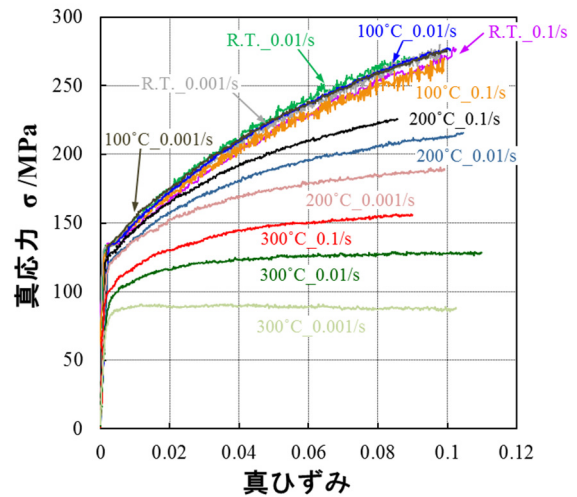


図 1.3 応力緩和試験予ひずみ時の応力 - ひずみ曲線

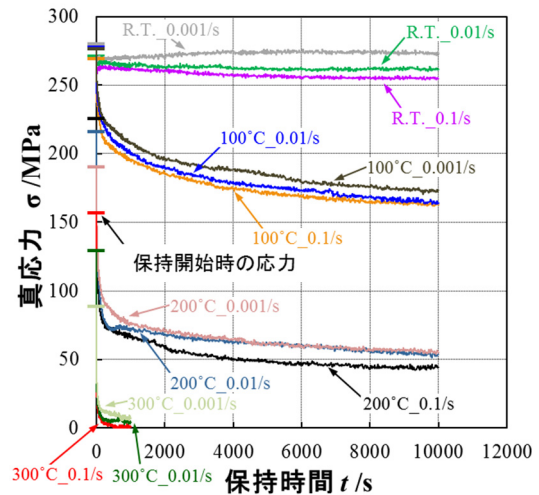


図 1.4 応力緩和試験結果

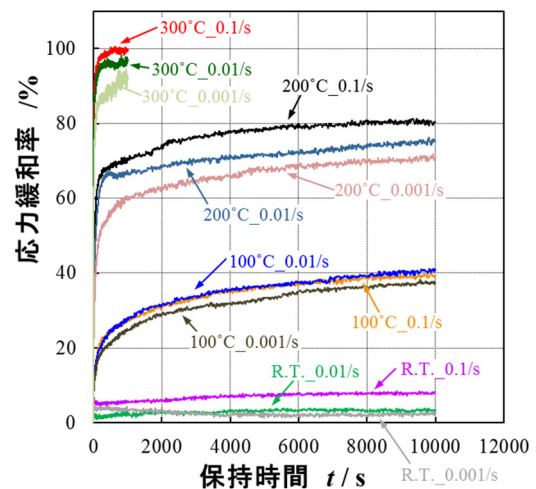


図 1.5 応力緩和率と保持時間の関係

本供試材は温度上昇に伴って応力が低下する温度依存性が現れた。また、二軸引張試験により得られた等塑性仕事面は温度の影響をほとんど受けず、さらにその形状は von Mises の降伏曲面とよく一致した。これは本材料が焼鈍し材であったため温度による集合組織変化が生じにくかったこと、また、アルミニウムが fcc 構造であり、温度に寄らずすべり系が一定であったことが原因であると考えられる。また、塑性ひずみ増分ベクトルの向きとは von Mises の降伏関数の法線方向とよく一致しており、関連流動則がおおむね成立することを確認した。

続いて 20~300°C における応力緩和試験を実施した。予ひずみ量は約 0.1 であり、この時、20°C および 100°C の応力 - ひずみ曲線はほぼ一致してひずみ速度依存性はほとんど発現しなかった。また、20°C では明確な動的ひずみ時効が観察された。一方、200, 300°C では大きなひずみ速度依存性が見られ、低速になるほど流動応力が低下した。応力緩和試験では、20°C ではほとんど応力緩和が生じないのに対し、100°C では最終的に 100MPa 程度応力が低下した。予ひずみ段階で応力 - ひずみ特性に差がみられていないにもかかわらず応力緩和特性が異なるのは動的ひずみ時効が関連していると考えられるがそのメカニズムは今後検討する必要がある。一方、温度が上昇するにしたがって応力緩和は顕著となった。また、予ひずみ時にひずみ速度依存性があるため、高温では応力緩和の駆動力となる緩

和開始時の予ひずみ速度により異なり、このことが収束応力の差となって現れることを確認した。最後に、100°C では 40%、200°C で 70~80%、300°C で 90~100% の応力緩和が生じることを確認した。

謝 辞

本研究に経済的支援を頂いた公益財団法人天田財団の研究助成金に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 櫻井健夫：神戸製鋼技報，57 (2007)，45.
- 2) 中山栄浩・山田和伸：軽金属，58 (2008)，662.
- 3) 上森武・澄川智史・中哲夫・麻寧緒・吉田総仁：軽金属，65 (2015)，582.
- 4) N. Abedrabbo, F. Pourboghrat: Int. J. Plast., 22 (2006), 314.
- 5) T. Naka, Y. Nakayama, T. Uemori, R. Hino, F. Yoshida: J. Mater. Process. Technol., 140 (2003), 494.
- 6) T. Naka, T. Uemori, R. Hino, M. Kohzu, K. Higashi, F. Yoshida: J. Mater. Process. Technol., 201 (2008), 395.
- 7) 吉永日出男：軽金属，21-12 (1971)，836.