

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06056

研究課題名(和文) 金属板材の温間プレス成形CAEを実現する応力-ひずみモデルの構築と成形限界予測

研究課題名(英文) High-temperature constitutive model for high-temperature press forming CAE

研究代表者

濱崎 洋 (Hamasaki, Hiroshi)

広島大学・工学研究科・助教

研究者番号：30437579

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：アルミニウムの温間二軸変形特性を調査するため温間二軸試験装置を開発した。本装置は室温から300℃まで試験片を加熱でき、さらにひずみ速度と応力比を同時に制御可能である。本装置によりA5182-0、A5182-0板材の温間二軸引張試験を実施し等塑性仕事面を求めた。その結果、A5182-0材では等塑性仕事面形状はvon Misesにはほぼ一致し、A1050-0材ではTrescaに一致した。また、等塑性仕事面形状は温度、ひずみ速度の影響をほとんど受けないことを確認した。これは供試材が焼鈍し材であり昇温で集合組織が変化しないこと、FCCのため温間ですべり系が変わらないためである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでアルミニウム合金の温間二軸変形特性を調査した例はほとんどなく、本研究で得られた実験結果は金属の変形特性の一部を解明しており学術的に意義がある。また、温間での引張試験に求められる温度制御の許容値も明確にしており、今後の材料試験の標準化に対して指針を示すものである。また、本試験結果をもとに応力ひずみ構成則を構築することで単軸だけでなく多軸変形も高精度に記述できるようになるためプレス成形シミュレーションの計算精度向上が期待できる。これにより、プレス現場での金型設計や材料の加熱条件、冷却工程の設計などをコンピュータシミュレーションで実施でき、コストと開発時間の短縮が図れる。

研究成果の概要(英文)：High-temperature biaxial tension test apparatus was developed in this study. The heat device can heat the specimen up to 300 deg. Celsius with the errors of 1 deg. in the thickness direction and 5 deg. in plane. Additionally, x-axis of the device is displacement control while y-axis is load control based on the measured load of x-axis. This can achieve the simultaneous control of strain rate and stress ratio which is necessary for high temperature biaxial tension test.

Biaxial tension tests for A5182-0 and A1050-0 sheets were performed. As a results, it was found that equi-plastic work locus for A5182-0 was able to express by von Mises yield criteria and the one for A1050-0 was similar to the tresca criteria. For both material, the shape of plastic work loci were almost independent on temperature because these were annealed FCC materials. It was also found that the strain rate did not affect the shape of plastic work loci for both materials.

研究分野：塑性力学

キーワード：アルミニウム合金 温間変形 プレス成形 異方性 温度依存性 ひずみ速度依存性 等塑性仕事面

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自動車を中心とした輸送機において、CO<sub>2</sub> 削減と燃費向上に車体重量軽量化が有効であることは広く知られている。これまで自動車では従来の軟鋼板からより高強度の高張力鋼板への置き換えが積極的になされ、これにより高強度化は達成してきている。しかし、軟鋼板も高張力鋼板も同じ鉄鋼材料であるため薄肉化で軽量化を図ると剛性が低下する。一方、アルミニウム合金のヤング率は鋼の半分～1/3 であるが、鉄鋼に比べてはるかに軽量であるため同程度の剛性を持つ板厚であっても軽量化を達成できる。一方、アルミニウム合金板はプレス成形では難成形材であり、冷間でのプレスで過大なスプリングバック、割れが生じやすい。また、5000 系合金では加工によりストレッチャーストレインと呼ばれる縞模様が発生し外観を損ねる。これらの成形不良を解消するために材料を 300 ℃ まで加熱してプレスする温間加工の有効性が示され、すでに実用化されている。しかし、金型設計や加工プロセス設計のための数値シミュレーション精度が低く、冷間のように CAE を活用してコストと開発期間を削減できないことが問題である。

### 2. 研究の目的

- (1) 本研究では、アルミニウム合金板の室温から 300 ℃ までの二軸引張試験を可能とする温間二軸試験装置を開発する。この時、温度の誤差を 1 ℃ として高精度な温度制御を行う
- (2) 開発した試験装置により、1000、5000 系アルミニウム合金板の室温から 300 ℃ において単軸と二軸引張試験を実施し、プレス成形で想定される応力 ひずみ特性を把握する。

### 3. 研究の方法

- (1) 試験機には室温の二軸引張試験装置を使用し、これに自作の加熱装置をセットして温間二軸試験装置を作成した。加熱は板裏面から熱風発生器により加熱し、板厚方向の温度分布をなくすため上面にリング状の電気ヒーターをセットした。
- (2) 温間ではひずみ速度の影響を大きく受けるため、相当塑性ひずみ速度一定下で種々の応力経路における実験が必要となる。そこで、X 軸を変位制御としてひずみ速度をだまかに調整し、その時の荷重をもとに所定の応力比を達成する Y 軸荷重をフィードバック制御することで、ひずみ速度と応力比を同時にコントロール可能なシステムを構築した。
- (3) 1000 系および 5000 系アルミニウム合金板の温間単軸、二軸引張試験を実施した。得られた結果から等塑性仕事面を求め、その温度、ひずみ速度依存性、法線則について議論することでアルミニウムの二軸変形特性を明らかにした。

### 4. 研究成果

- (1) 図 1 に作成した温間二軸引張試験装置を、図 2 に十字型試験片を示す。本試験では試験温度が室温から 300 ℃ まで加熱可能となっており、試験片の温度差は板厚方向で 1 ℃ 以内、試験片変形部(図 2 中心の正方形部)で 5 ℃ 以内であった。次にこの温度分布を有限要素法に代入して二軸引張試験解析を実施した結果、図 2 の温度分布が等塑性仕事面形状の測定に与える影響は無視できるほど小さいことを確認した。

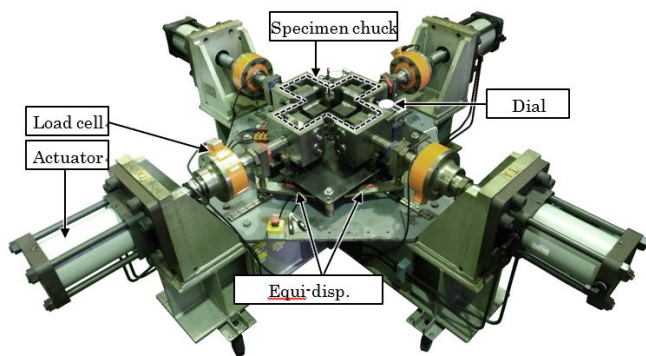


図 1 二軸試験装置の外観

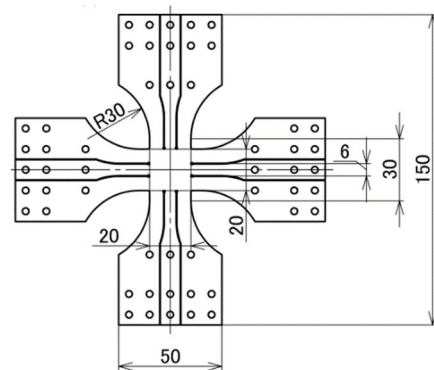


図 2 十字型試験片

- (2) 試験温度が応力 ひずみ曲線に与える影響を調査するため、A5182-O 板材(板厚 1mm) について中心温度の目標値を 293 および 300 ℃ とした引張試験を実施した。得られた結果を図 3 に示す。この図より、試験片の中心温度が 5 ℃ 上昇すると応力値は最大で 7MPa 低下することが確認された。温間では室温に比べて流動応力が大きく低下するため、5MPa の差は等塑性仕事面形状に強く影響すると考えられる。よって、本試験装置で正確な温度制御を行うことで高精度な二軸引張試験が実施可能であることを確認した。

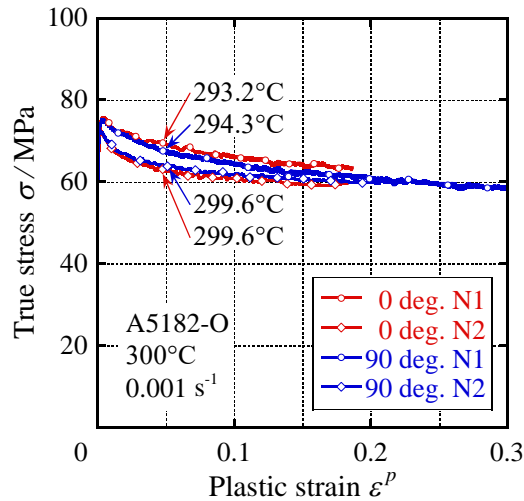


図3 293 および 300 における A5182-O 材の応力ひずみ曲線の比較

(3) 試験機の有効性が検証できたため、続けて A5182-O 板材の単軸引張試験により基本的な変形特性を調査した。表 1 に 0.2%耐力, 引張強さ, Swift 則の材料パラメータおよび  $r$  値を示す。なお, 試験温度は 20, 200, 300, 引張方向は圧延方向から 0, 45, 90° である。また, 300° では加工軟化したため Swift パラメータは求めていない。本結果より, 一般的な金属と同じく温度上昇に伴い応力が低下し, さらに加工硬化が弱くなることがわかった。また,  $r$  値は温度の影響をほとんど受けていないことを確認した。なお, 詳細は省略するが A1050-O 材 (板厚 2mm) でも同様の結果となった。

表 1 A5182-O 材の温間単軸引張試験から得られた変形特性

Temperature / °C	Tensile direction / deg.	$\sigma_{0.2}$	$TS$	$C^*$	$\epsilon_0^*$	$n^*$	$r^{**}$
		/ MPa	/ MPa	/ MPa			
20	0	136.1	283.1	603.7	0.004	0.34	0.71
	45	137.2	275.4	560.1	0.000	0.32	0.63
	90	139.3	277.1	555.5	0.000	0.31	0.72
200	0	120.1	165.3	236.3	0.001	0.12	0.83
	45	120.8	162.7	236.8	0.001	0.13	0.93
	90	122.8	169.4	251.9	0.001	0.13	0.75
300	0	72.4	72.9				0.82
	45	71.8					0.80
	90	72.3	72.5				0.98

(4) 図 4 に A5182-O 材の温間二軸引張試験から得られた等塑性仕事面を示す。本図より, 20° においては温間に比べて応力が少し高くなっているが, 全体的に von Mises の形状に一致しており, 等塑性仕事面形状に対する温度の影響は小さいことが確認できた。これは本材料が焼き鈍し材であり, 加熱によって集合組織がほとんど変化しないこと, FCC 材であるため温間と室温ですべり系が同一であることに起因していると考えられる。次に図 5 に A1050-O 材の等塑性仕事面形状を示す。A5182-O 材と異なり, 純アルミニウムでは Tresca の降伏曲面形状に近くなることが確認された。しかし, こちらの材料でも A5182-O 材と同一の理由により形状の温度依存性は確認されなかった。

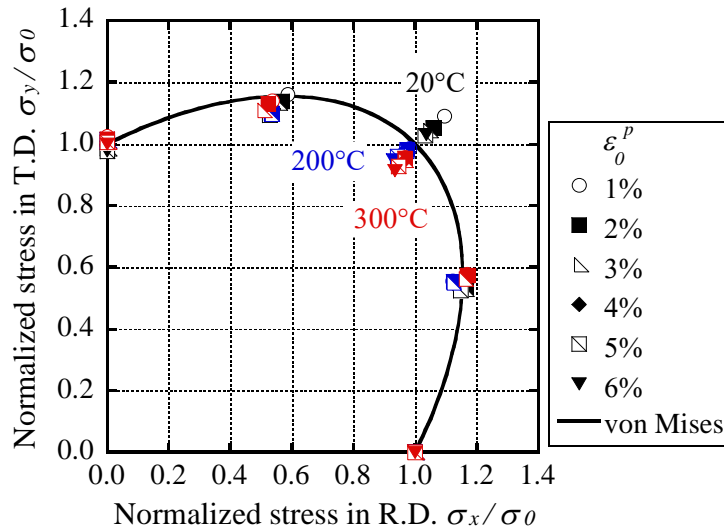


図4 A5182-O材の温間正規化等塑性仕事面

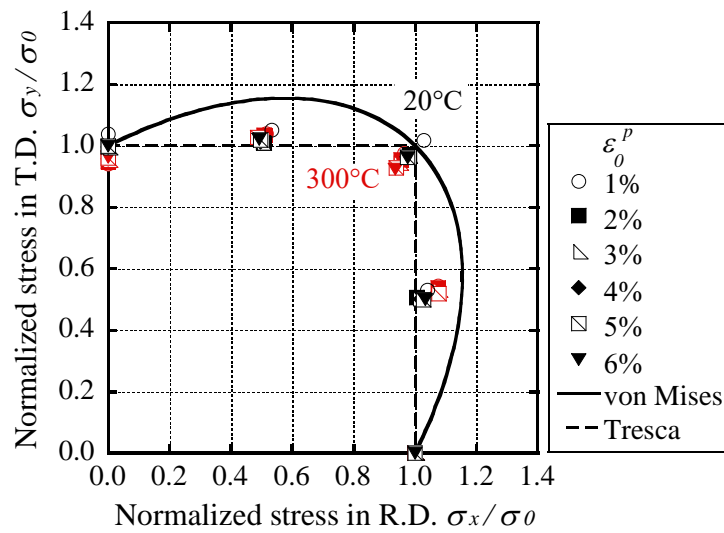


図5 A1050-O材の温間正規化等塑性仕事面

(5) A5182-O材のひずみ速度依存性を調査するため、相当塑性ひずみ速度0.001および0.01/sにおける温間二軸引張試験を実施した。なお、試験温度は300である。得られた結果を図6に示す。この結果から本供試材では等塑性仕事面形状にひずみ速度依存性が現れないことを確認した。

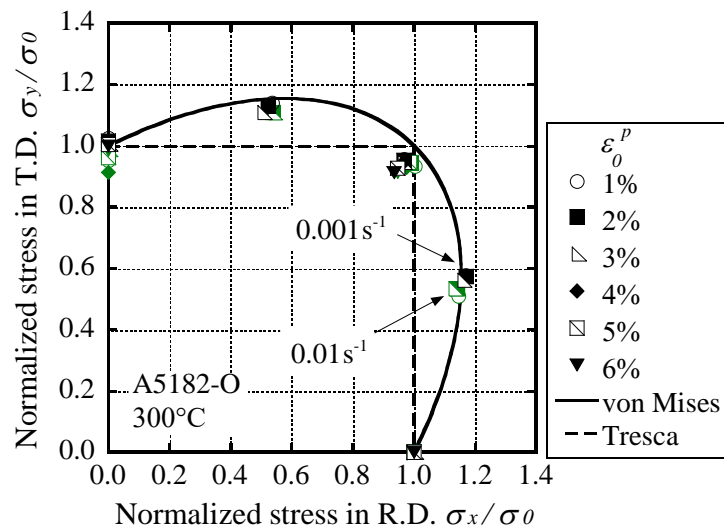


図6 A5182-O材のひずみ速度を変化させたときの温間正規化等塑性仕事面

(6) 上記(4)で A1050-O 材では等塑性仕事面が Tresca に近くなったが、300℃ では平面ひずみ付近の結果が von Mises と Tresca の間に位置している。しかし、応力が 2MPa 低下するだけで実験値は Tresca の線上にのり、実験に要求される測定精度が極めて高くなる。そこで、一般の金属では塑性ひずみ増分ベクトルの向きが等塑性仕事面の法線方向にほぼ一致するという法線則をもとに、A1050-O 材の平面ひずみ付近の形状を予測した。さらに測定の信頼性を上げるため応力比 1:4 および 4:1 の試験も追加した。得られた結果を図 7 に示す。横軸は応力空間における 0° 方向 (x 軸) からの傾き角であり、縦軸は等塑性仕事面の法線が x 軸となす角度である。この結果より、応力比 1:2, 1:4, 2:1, 4:1 では平面ひずみであり、これにより等塑性仕事面形状は Tresca に近いことが確認できた。

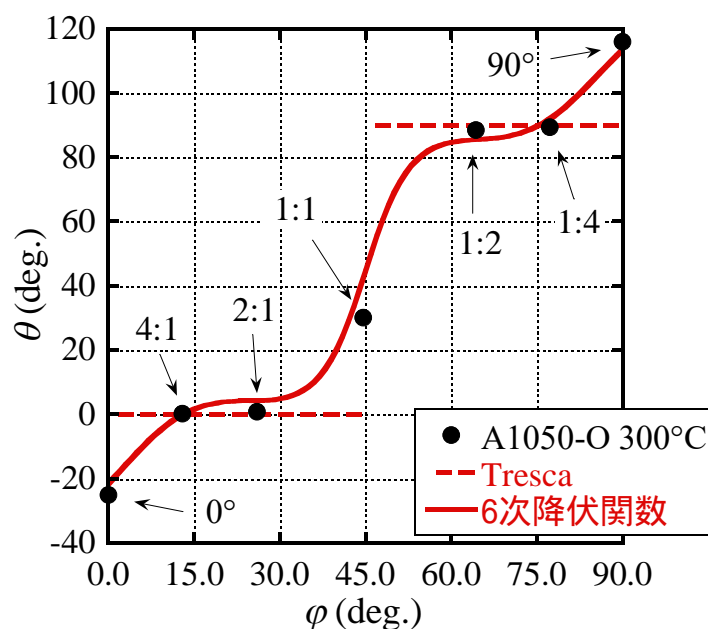


図 7 300℃における A1050-O 材の等塑性仕事面の法線方向

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroshi Hamasaki, Tatsuya Ohno, Takashi Nakano, Eiichiro Ishimaru	4. 巻 146-147
2. 論文標題 Modelling of cyclic plasticity and martensitic transformation for type 304 austenitic stainless steel	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 536-543
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijmecsci.2017.12.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大須賀智孝, 濱崎洋
2. 発表標題 温間二軸引張試験によるアルミニウム合金の温間二軸変形特性観察
3. 学会等名 第137回軽金属学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大須賀智孝, 濱崎洋
2. 発表標題 1000系および5000系アルミニウム板材の温間二軸変形
3. 学会等名 日本塑性加工学会中国・四国支部第20回学生研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Hamasaki, Fumiaki Tamashiro
2. 発表標題 Biaxial deformation on AA5182-0 aluminium alloy sheet at warm temperature
3. 学会等名 The 11th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shota Kusaka, Hiroshi Hamasaki
2. 発表標題 Stress-strain curve and martensite volume fraction under biaxial tension for type 304 stainless steel
3. 学会等名 The 11th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱崎洋, 森光勇太, 吉田総仁
2. 発表標題 A5182-0アルミニウム合金板の温間応力緩和特性
3. 学会等名 軽金属学会第133回秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 玉城史彬, 濱崎洋
2. 発表標題 5000系アルミニウム合金板の温間等塑性仕事面の実験観察
3. 学会等名 日本塑性加工学会中国・四国支部学生研究発表会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----