

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760098

研究課題名(和文)多軸応力を受ける多結晶金属の塑性異方性を検出する材料試験の開発

研究課題名(英文)Development of material testing technique for polycrystalline metals subjected to multi-axial stresses

研究代表者

吉田 健吾 (Yoshida, Kengo)

山形大学・理工学研究科・助教

研究者番号：70436236

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究において軸力-内圧-ねじりを負荷できる多軸試験機を用いて、多軸応力状態における加工硬化挙動の計測手法の開発を行った。また、異なる状態で一種類の応力のみが作用する状態における加工硬化挙動の計測も実施した。本研究より、以下の知見が得られた。

A3003を対象とした多軸応力試験結果より、加工硬化挙動は与えられた累積ひずみのみならず応力状態にも依存することが明らかとなった。AZ31を用いた単軸引張・圧縮・単純せん断試験結果より、双晶変形を伴う場合は、応力状態が異なることで加工硬化挙動が著しく異なることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Experimental techniques for measuring the work hardening behavior was developed using the axial force-internal pressure-torsion type multi-axial stress testing machine. Work hardening behavior of a material subjected to variety of one stress component was also observed. The following conclusions were derived.

Multiaxial stress test of A3003 revealed that the work hardening behavior depends not only on the accumulated plastic strain but also on the applied stress state. Uniaxial tension/compression and simple shear test of AZ31 showed that the work hardening behavior is drastically affected by the stress state provided that deformation twinning is activated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：塑性変形

## 1. 研究開始当初の背景

金属材料の降伏関数は、1913年に von Mises が提唱した等方性の降伏関数が有名である。1948年には Hill (Roy. Soc. London) によって異方性を再現できる異方性降伏関数が提案された。その後、Hill の降伏関数の不備が指摘され、様々な異方性降伏関数が開発されてきた。特に、近年は、Barlat ら (2005)、Hu (2007)、Soare ら (2008)、Plunkett ら (2008) などが独自に降伏関数を提案されている。

理論モデルの提案が相次ぐものの、材料試験技術の開発は少なく、提案された異方性降伏関数を初めとする塑性構成則の実験検証は十分に行われていないという事実がある。近年の材料試験に関する研究として、板材を2つの方向に引張る2軸引張試験が Kuwabara (1998, J. Mater. Proc. Tech.; 2007, Int. J. Plasticity) または Hoferlin ら (2000, Model. Sim. Mat. Sci.) によって開発されている。これらの実験では、面内の2方向の垂直応力を負荷することができる。しかし、せん断応力を発生させることは出来ない。実際の塑性加工では、当然、せん断応力も負荷されるので、現実の変形状態に近い材料試験を行うには、垂直応力に加えてせん断応力も負荷できる実験技術の構築が必要である。

これに対して、円管に軸力、内圧、ねじりを負荷すると、3種類の応力成分を発生させることが可能である。既に、研究代表者は軸力-内圧-ねじり型の材料試験機を開発している。本研究では、このような特殊な材料試験機を活用して、多軸応力状態における塑性変形挙動を精密に測定できる実験方法を確立し、種々の材料の加工硬化挙動を実測する。

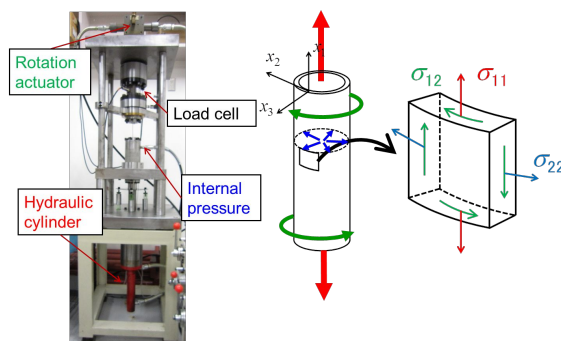


図1 軸力-内圧-ねじり型の多軸応力試験機

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、これまでに開発を進めてきた図1の材料試験機を用いて、3種類の応力成分が同時に作用する3軸応力状態での材料試験方法を構築する。2種類の垂直応力ならびにせん断応力を種々の比率で組み合わせた複合負荷試験により、3次元応力空間における加工硬化挙動の全貌を解明する。これにより、塑性異方性を詳細かつ定量的に測定・評価する。

(2) 軸方向のみの負荷においても、引張と圧縮の2様式がある。これによって単軸でありながら負荷方向の差異による加工硬化の変化を確認できる。さらに、ねじりのみを負荷したせん断応力のみが作用する単純せん断状態である。応力成分が1種類のみ作用するが、単軸引張とは異なる状態である。このように種々の方法で1種類の応力成分のみが作用する状態を作り出し、それに対する加工硬化挙動を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 軸方向、円周方向の垂直応力を  $\sigma_{11}$  および  $\sigma_{22}$  とし、せん断応力を  $\sigma_{12}$  とする。まず、 $\sigma_{11} - \sigma_{22}$ 、 $\sigma_{11} - \sigma_{12}$  の組合せによる線形2軸応力経路を負荷する。応力比は、 $\sigma_{11} : \sigma_{22} = 1:0, 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4, 0:1$  の9通り、 $\sigma_{11} : \sigma_{12} = 2:1, 1:1, 1:2, 1:4, 0:1$  の5通りの合計14通りとした。その後、 $\sigma_{11} - \sigma_{22} - \sigma_{12}$  の3種類の応力を負荷した3軸応力試験を実施した。供試材は、A3003-O 押し出し円管を用いる。外径は19 mm、公称肉厚は0.75 mmである。

(2) 負荷方向の違いを明らかにするために、円管試験片に単軸引張、単軸圧縮、単純せん断の3種類の応力状態を負荷した。供試材は、AZ31-O 押し出し円管を用いる。公称外径は25 mm、公称肉厚は1 mmである。

## 4. 研究成果

### (1) 多軸応力状態の加工硬化挙動

#### 2軸応力試験における等塑性仕事面

軸方向単軸引張試験において、管軸方向塑性ひずみが任意の値  $\varepsilon_0^p$  に達した瞬間の単位体積当たりの累積塑性仕事を  $W^p$  とし、種々の応力比の線形応力経路において、 $W^p$  と等量の塑性仕事を消費した瞬間の応力値  $(\sigma_{11}, \sigma_{22})$ 、 $(\sigma_{11}, \sigma_{12})$  を応力空間に図示して等塑性仕事点を作成した。試験は、軸方向単軸

引張試験で4回，その他の応力比で2回行った。

$\sigma_{11} - \sigma_{22}$  の2軸応力試験での測定結果を図2(a)に， $\sigma_{11} - \sigma_{12}$  の2軸応力試験での測定結果を図2(b)に示す．それぞれ，各  $\varepsilon_0^p$  における管軸方向単軸引張の塑性流動応力  $\sigma_0$  で当該の  $\varepsilon_0^p$  の等塑性仕事点を無次元化して示している．応力経路毎の測定値を平均化した後，無次元化した．もし，材料が等方硬化挙動を示す場合，無次元化された等塑性仕事点は一点に重なる．参考までに，等方硬化を仮定した von Mises，Hosford の降伏曲面および結晶塑性解析により求めた等塑性仕事点の計算値を示す．Hosford の降伏条件式は次数を8とした．結晶塑性解析は測定した結晶方位を用いて行った．その計算結果は，ほぼ等方硬化を示したため， $\varepsilon_0^p = 0.02$  に対する結果のみ示す．

$\sigma_{11} - \sigma_{22}$  の2軸応力試験で測定された等塑性仕事点に関して， $\varepsilon_0^p = 0.001$ ， $\varepsilon_0^p = 0.002$  では Hosford の降伏曲面，結晶塑性解析の計算値とよく一致する．しかしながら，その後の  $\varepsilon_0^p$  では，塑性変形に伴う加工硬化量が単軸引張のそれに比べ小さいため，単軸引張以外の応力比では Hosford の降伏曲面の内側に位置している．特に， $\sigma_{22} > \sigma_{11}$  となる応力比における加工硬化量が， $\sigma_{11} > \sigma_{22}$  となる応力比におけるそれより小さい．すなわち，この試験において，本供試材は等方硬化挙動を示さず，異方硬化挙動を呈した．

$\sigma_{11} - \sigma_{12}$  の2軸応力試験で測定された等塑性仕事点に関して， $\varepsilon_0^p = 0.001$ ， $\varepsilon_0^p = 0.002$  では von Mises の降伏曲面および結晶塑性解析の計算値よりわずかに外側に位置している．しかし，その後の  $\varepsilon_0^p$  では，塑性変形に伴う加工硬化量が単軸引張のそれに比べ小さいため，単軸引張以外の応力比では， $\varepsilon_0^p = 0.02$  のときには Mises の降伏曲面，結晶塑性解析の計算値にほぼ一致する．また， $\sigma_{12} > \sigma_{11}$  となる応力比における加工硬化量が， $\sigma_{11} > \sigma_{12}$  となる応力比におけるそれより僅かに小さい．しかし， $\sigma_{11} - \sigma_{22}$  の2軸応力試験の結果と比較すると，この試験での応力比による加工硬化量の差異は僅少であり，明瞭な異方硬化挙動は確認されなかった．

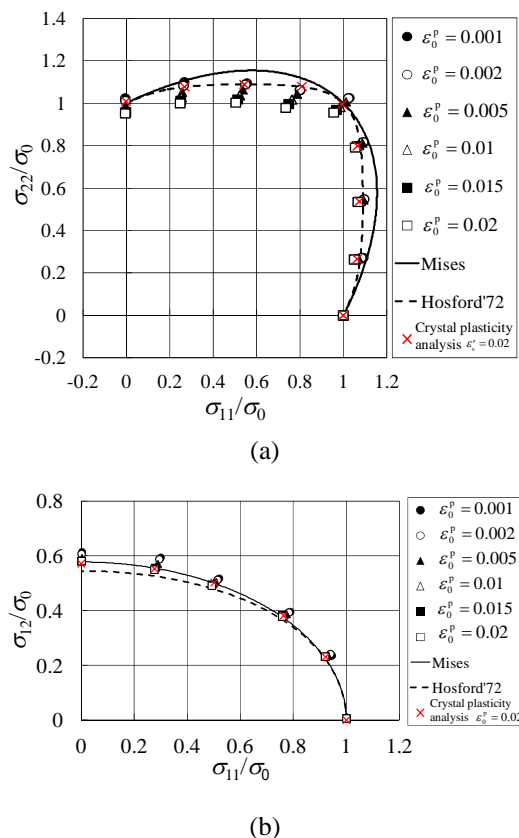


図2 2軸応力状態の等塑性仕事面

### 3軸応力試験における等塑性仕事面

塑性変形挙動のさらなる調査のために， $\sigma_{11} - \sigma_{22} - \sigma_{12}$  の組合せによる線形3軸応力経路を荷し，等塑性仕事点を測定した．軸方向応力と円周方向応力を  $\sigma_{11} : \sigma_{22} = 1:2$  の一定に保持し，せん断応力  $\sigma_{12}$  の比を変化させて荷したときの等塑性仕事点を  $\sigma_{22} - \sigma_{12}$  応力空間に図示した結果を図3に示す．2軸応力状態の結果と同様に，それぞれの等塑性仕事点を無次元化して示しており，各種降伏関数，結晶塑性解析による結果も合わせて図示してある．結晶塑性解析による計算値は，ほぼ等方硬化を示したため， $\varepsilon_0^p = 0.02$  に対する結果のみ図示している．これまでの結果と同様に，塑性変形に伴う加工硬化量が単軸引張のそれに比べ小さいため，全ての応力比において，実験点が内側に移動している． $\sigma_{22} > \sigma_{11} \geq \sigma_{12}$  となる応力比において， $\varepsilon_0^p = 0.001$ ， $\varepsilon_0^p = 0.002$  では Hosford の降伏曲面，結晶塑性解析の計算値とよく一致し，塑性変形に伴って，内側に位置している．これは  $\sigma_{11} - \sigma_{22}$  の2軸応力試験で得られた異方硬化挙動と同じ傾向である．一方， $\sigma_{12} \geq \sigma_{22} > \sigma_{11}$  の応力比において， $\varepsilon_0^p = 0.001$ ， $\varepsilon_0^p = 0.002$  では von Mises の降伏曲面および結晶塑性解析の計算値よりわずかに

に外側に位置しているが  $\varepsilon_0^p = 0.02$  のときには Mises の降伏曲面，結晶塑性解析の計算値にほぼ一致する．これは  $\sigma_{11} - \sigma_{12}$  の 2 軸応力試験で得られた異方硬化挙動と同じ傾向である． $\sigma_{11} : \sigma_{22} = 1:1$  または  $2:1$  の一定に保持して  $\sigma_{12}$  の比を変化させて負荷する 3 軸応力試験を実施したところ，同様の傾向を示した．

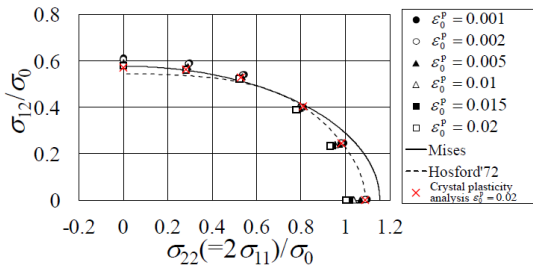


図 3 3 軸応力状態の等塑性仕事面

## (2) 種々の負荷方向への試験

### AZ31 の組織観察

押し出し方向 (ED) 直交断面において，SEM-EBSD を用いて結晶方位分布を測定した．測定範囲は板厚方向 (ND) × 円周方向 (TD) が  $900 \times 300 \mu\text{m}$  である 4 力所で測定を行い，それらを統合して得た (0001) 極点図を図 4 に示す．極点図より本供試材は底面が ND から TD に分散し，ED への傾きは小さい．押し出し丸棒・円管に見られる底面集合組織を有していた．また，このときには双晶は確認されなかった．

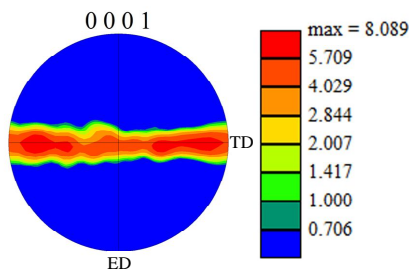


図 4 AZ31 の集合組織

### 単軸引張・圧縮，単純せん断試験結果

反転負荷条件として全ひずみ理論における相当塑性ひずみの式に全ひずみを代入し，相当全ひずみ  $\bar{\varepsilon}^{\text{Total}}$  を定義した．単軸引張，単軸圧縮，ねじり負荷試験を  $\bar{\varepsilon}^{\text{Total}} = 0.03$  に達するまで実施する．図 5 に各試験で測定された真応力 - 対数ひずみ曲線を示す．軸方向応力を  $\sigma_{11}$ ，軸方向のひずみを  $\varepsilon_{11}$  とし，せん断応力

を  $\sigma_{12}$ ，せん断ひずみ (テンソル) を  $\varepsilon_{12}$  としている．0.2% 耐力は引張負荷時の 192 MPa に対し，圧縮負荷時は 83 MPa であり，両者で 2 倍以上異なる値を示した．ねじり負荷試験では，せん断応力  $\sigma_{12} = 27$  MPa 付近で降伏した．von Mises の相当応力に換算すると，約 46 MPa であり，単軸圧縮負荷時の約 1/2 である．また，降伏直後から  $\varepsilon_{12} = 0.004$  までは高い硬化率を示し，それ以降では，相当応力，相当全ひずみ  $\bar{\varepsilon}^{\text{Total}}$  換算で単軸圧縮の結果とおおむね一致する結果を得た．

各負荷試験後に測定した双晶面積率を表 1 に示す．単軸引張後では，双晶面積率は 0.1% を示し，ほとんど双晶は活動していない．一方，単軸圧縮後では約 26% を示し，単軸圧縮負荷時において明らかに双晶が活動している．一方，ねじり負荷後の双晶面積率は約 4% であり，単軸圧縮負荷時に比べ少ないものの双晶の活動が確認できた．

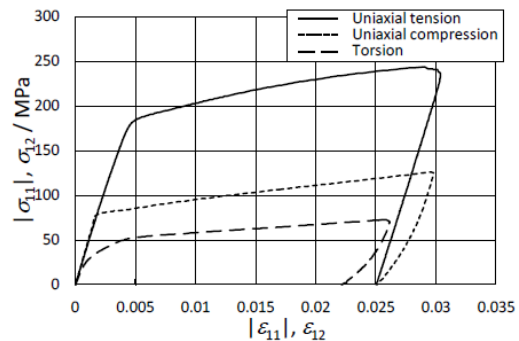


図 5 真応力-対数ひずみ曲線

表 1 実験後の双晶面積率

引張	圧縮	ねじり
0.1 %	26 %	4.0 %

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Yoshida, K., Ishii, A., Tadano, Y., 2014. Work-hardening behavior of polycrystalline aluminum alloy under multiaxial stress paths, International Journal of Plasticity, 53, 17-39, 査読有.

〔学会発表〕(計 4 件)

Yoshida, K., Ishii, A., Tadano, Y., Stress-strain relations of aluminum alloy tubular specimen subjected to axial

load-internal pressure-torsion, Plasticity 2014, Freeport, Bahamas, 2014年1月3日.  
浅野瑞・吉田健吾：軸力およびねじりの反転負荷を受ける AZ31B の塑性変形挙動，第 64 回塑性加工連合講演会講演論文集，185-186，2013年11月3日，大阪.  
吉田健吾・石井敦達・只野裕一：多軸応力を受ける fcc 金属の加工硬化挙動，第 64 回塑性加工連合講演会講演論文集，421-422，2013年11月2日，北九州.  
石井敦達・吉田健吾：多軸応力負荷を受ける A3003 の塑性変形挙動，第 63 回塑性加工連合講演会講演論文集，81-82，2012年11月4日，北九州.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

吉田 健吾 ( YOSHIDA KENGO )  
山形大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：70436236