



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	純せん断試験による Mg 単結晶の非底面すべり挙動評価法確立と Y 添加の影響
Author(s)	峯田, 才寛; 三浦, 誠司; 向井, 敏司 他
Citation	日本金属学会誌, 77(10), 466-472 https://doi.org/10.2320/jinstmet.JAW201308
Issue Date	2013-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74944
Type	journal article
File Information	J. Jpn. Inst. Met. 77(10) 466.pdf



純せん断試験による Mg 単結晶の 非底面すべり挙動評価法確立と Y 添加の影響

峯田 才寛^{1,*} 三浦 誠司² 向井 敏司³ 上田 幹人² 毛利 哲夫⁴

¹北海道大学大学院工学院材料科学専攻

²北海道大学大学院工学研究院材料科学部門

³神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻

⁴東北大学金属材料研究所計算材料科学センター

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 77, No. 10 (2013), pp. 466–472

© 2013 The Japan Institute of Metals and Materials

Pure-Shear Test for Investigation of Non-Basal Slip System Operation of Mg Alloy Single Crystal with and without Y

Takahiro Mineta^{1,*}, Seiji Miura², Toshiji Mukai³, Mikito Ueda² and Tetsuo Mohri⁴

¹Division of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060–8628

²Division of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060–8628

³Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe 657–8501

⁴Center for Computational Materials Science, Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980–8577

In Mg alloys, the most favorable deformation mechanism is the basal slip, and extension twinning also contributes to plastic deformation. Other mechanisms such as prismatic slips, pyramidal slips and twinning except for extension twinning scarcely occur. However, these slip systems also contribute to the plastic deformation of poly crystal Mg alloys, so the determination of CRSS of such non-basal slip systems are inevitable as a basis for the prediction of the deformation behavior of poly-crystal Mg alloys. Because of the difficulty of the evaluation of CRSS for non-basal slip by conventional compression test, newly designed “Pure shear test” is applied to evaluate the CRSS of the prismatic slip Mg alloy single crystals containing Y. Also a modification of Bridgman method using LiF+LiCl is attempted to obtain a pure-Mg single crystal. [doi:10.2320/jinstmet.JAW201308]

(Received April 25, 2013; Accepted July 9, 2013; Published October 1, 2013)

Keywords: magnesium alloy, non-basal slip system, prismatic slip, twinning, single crystal, critical resolved shear stress (CRSS)

1. 緒 言

Mg 合金は様々な優れた特性を有する軽量高比強度材料として近年注目を集めている¹⁾。しかしその最たる欠点として、塑性変形に対する異方性の大きさが原因となっている冷間加工性の悪さが挙げられる。HCP 構造を有する Mg 合金の塑性変形機構としては底面すべり、柱面すべり、一次錐面すべり、二次錐面すべり、引張変形双晶等があるが (Fig. 1)、それぞれの CRSS は異なり、その中で CRSS が小さい底面すべり、引張双晶が主たる変形機構となっている。Pure-Mg において底面すべり、引張双晶の臨界分解せん断応力 (CRSS) は室温でそれぞれ 0.5, 2.5 MPa²⁾ 程度と報告されている一方、その他の塑性変形機構の CRSS は底面すべり、引張双晶の 10 倍以上高いとされている^{3–9)}。この大きな差が Mg 合金の冷間加工性の悪さの原因であり、この欠点の改善が Mg 合金の実用化に必要な不可欠であると考えられ

る。AZ 系 Mg 合金多結晶体の力学試験から、非底面すべり機構の一つである柱面すべりの活性化が合金系の延性を改善することが報告されている^{10,11)}。粒界における応力集中が柱面での転位の活性化に寄与しているが、さらなる柱面すべりの活性化には底面すべりおよび引張双晶の CRSS と柱面す

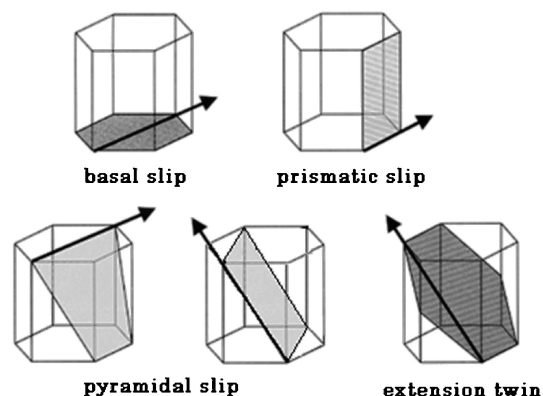


Fig. 1 Plastic deformation mechanisms for Mg.

* 北海道大学大学院生 (Graduate Student, Hokkaido University)

べりのそれとの相対的な差が小さくなる必要がある。

Tsuru らは, density function theory を用いて柱面すべりの GSF (generalized stacking fault) を求め, 活動に必要な応力を推定した. その結果, Y 添加が柱面すべりの CRSS 低下に効果的であるとの結論を示している¹²⁾. これに対し, Mg-Y 合金は底面すべりと引張双晶の固溶強化能が他の合金系に比べ非常に大きい¹³⁻¹⁴⁾. よって, 非底面すべりの CRSS との相対的な差が小さくなり, Mg-Y 合金は延性改善効果を期待されるとともに, 固溶強化理論の上からも興味深い. しかしながら, これまでの実験的研究から Mg での柱面すべりの活動には不明な点も多い.

単結晶を用いて CRSS が異なる塑性変形機構を選択的に活動させ, その挙動を調査するためには, 以下に示す条件を満たす応力軸を選択する必要がある¹⁵⁾.

$$\sigma_1 = \tau_1/s_1 < \sigma_2 = \tau_2/s_2 \quad (1)$$

ここで σ は外力, τ は CRSS, s は選択した応力軸に対応する Shear factor であり, 添え字の 1 は調査対象の塑性変形機構, 2 は競合する塑性変形機構である. 単軸応力下では s は Schmid factor となるが, ここではより広義に, せん断応力も含めた応力を, 特定のせん断面, せん断方向への分解せん断応力 (RSS) に変換するための変換係数を Shear factor と定義することとする (Appendix 参照)¹⁶⁻¹⁸⁾.

式 (1) より,

$$\tau_1/\tau_2 < s_1/s_2 \quad (2)$$

すなわち, それぞれの塑性変形機構の CRSS 比が Shear factor 比に近いと, 目的とする特定の変形機構のみを活動させることは困難となる. よって圧縮試験などの単軸応力によって Mg の非底面すべり機構を活動させようとする場合⁵⁾, 底面すべりや引張双晶の τ が小さいために困難である. 一方, 特定の面に対してせん断変形を生起させる実験手法として, 純せん断試験が提案されている¹⁹⁾. 後述のとおりこの試験法では s_1/s_2 を有利に設定できる. よって, 単結晶試料を用いた純せん断試験による Pure-Mg と Mg-Y 合金の柱面すべりの CRSS 定量的評価を目標とし, そのために必要な単結晶育成法の改良と試験法の確立を目的とした.

2. 力学試験方法の検討

本研究では純せん断試験を用いた CRSS の定量的評価を目標としており, 本試験方法が従来の圧縮試験による方法に比べどのような優位点を持つかを検討する. Mg 単結晶の力学試験において問題となるのは, 最も活動しやすい底面すべりを抑制しながら非底面すべりを活動させる際に, 引張双晶が導入される点である. 底面すべりのすべり面・すべり方向は $\{0001\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$, 柱面すべりのそれは $\{10\bar{1}0\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$ である. 圧縮応力軸を c 軸と垂直, かつ $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ と 45° の角度を持った方向とした圧縮試験片を作製すれば, 底面すべりの Schmid factor が 0, かつ柱面すべりの Schmid factor を最大値である 0.5 とすることができる. しかしその際の引張双晶 $\{10\bar{1}2\}\langle 10\bar{1}1 \rangle$ の Schmid factor の最大値は 0.43 となり, 柱面すべりのそれとの比の値は 1.16 である. つまり, 圧縮試験を用いて柱面すべりの CRSS を求めるとすると, 式

(2) に示されるようにその値が引張双晶の CRSS の 1.16 倍以下でなくてはならない, という条件を満足する必要がある, これは困難であると予想される.

本研究では純せん断試験ジグを新たに設計・作製した¹⁹⁾. ジグの模式図を Fig. 2 に示す. 試験片の結晶学的方位は (a) に示したとおりであり, (b) に示すように, 三つのパーツから成るジグの中央パーツのみに下向きの力を加えることで (c) のように Shear area のみにせん断応力を与え, 柱面すべりに対する Shear factor は 1.0, かつ底面すべりの Shear factor は 0 となる. この負荷応力と Mg の結晶との対応関係を Fig. 3 に図示する. 引張双晶の Shear factor の最大値は 0.43 となり, (Appendix 参照)

$$\frac{\tau(\text{tw})}{0.43} > \frac{\tau(\text{pr})}{1.0}$$

もしくは

$$\frac{\tau(\text{pr})}{\tau(\text{tw})} < \frac{1.0}{0.43} = 2.33$$

ここで $\tau(\text{tw})$ は引張双晶, $\tau(\text{pr})$ は柱面すべりの CRSS であり, 圧縮試験の場合は 1.16 であった比が 2.33 と拡大した. すなわち $\tau(\text{tw})$ と比べてより大きな CRSS を示す $\tau(\text{pr})$ まで定量的に測定できると期待される.

試験片はブロックで挟んでネジ締結をし, ジグと試験片の

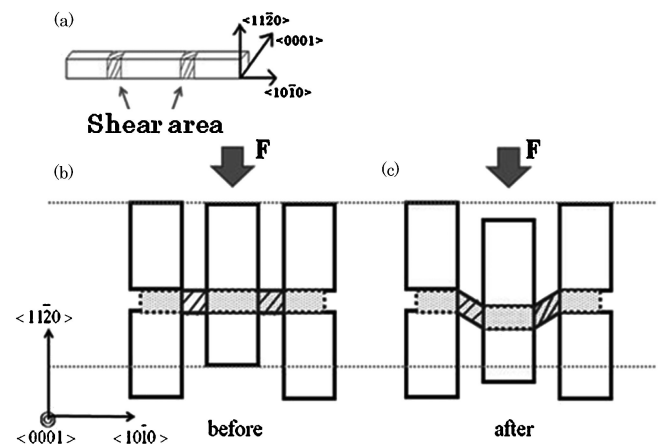


Fig. 2 (a) Geometric configuration of a pure shear specimen, and a pure shear jig (b) before and (c) after testing.

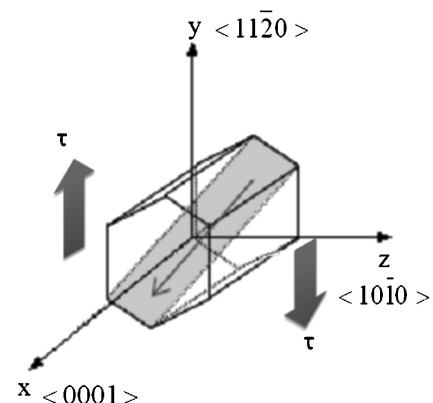


Fig. 3 Geometric relation between shear stress during the pure shear testing and one of the extension twins.

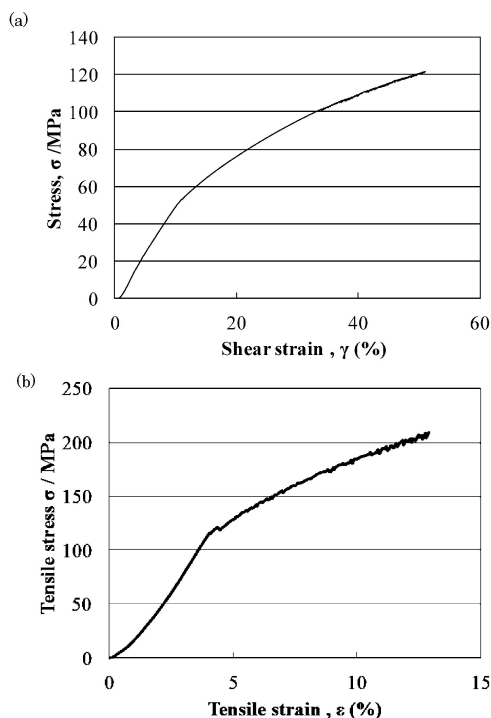


Fig. 4 Stress-Strain curves of Pure-Al specimens obtained by (a) shear test and (b) tensile test.

接触面にはさらに常温で固化するワックスを塗布して固定した。なお、ネジ締結による試料の過度の塑性変形を抑制するため、試験片周辺にストッパーとして SUS304 ステンレスブロックを配置した。本ジグから得られる結果の評価のため、Pure-Al 試験片を用いた純せん断試験と引張試験の結果の比較を行った。同一の Pure-Al 丸棒から引張試験片と純せん断試験片を切り出し、350°C、12 h の条件で焼鈍を行った後に各試験を行った。得られた結果を、Fig. 4 に示す。せん断試験、引張試験の応力-歪曲線から得られる 0.2% 流動応力はそれぞれ $\tau_{0.2} = 58 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_{0.2} = 110 \text{ MPa}$ であり、von Mises の関係式から得られる $\tau = \sigma / \sqrt{3}$ を用いると、二つの 0.2% 流動応力の差はわずかであった²⁰⁾。そのため本ジグによって特定のすべり系の流動応力を定量的に求めることが可能であると考えた。

3. 実験方法

3.1 単結晶育成法

本研究における純せん断試験には、Bridgman 法により作製された Pure-Mg 単結晶試料と、Mg 固溶体である Mg-0.5 at%Y および Mg-0.8 at%Y 単結晶試料を用いた。単結晶試料の育成には原料として Pure-Mg (>99.95%：大阪富士工業㈱)、Mg-Y 母合金 (Mg-23.5 mass%Y) を用いた。Pure-Mg 単結晶試料は、酸化物の除去を目的として LiF-LiCl 混合塩 (mol 比 3 : 7) と共に Pure-Mg インゴットを高純度グラファイト製るつぼに入れ Bridgman 炉に挿入し、炉中央の熔融帯領域温度 675°C、育成速度 2.8 mm/h として、Ar 雰囲気下にて育成した。LiF-LiCl 混合塩を用いることによる Pure-Mg 単結晶試料の組成への影響を調べるため、ICP

分析 (住友金属テクノロジー㈱) を行った。Mg-Y 単結晶試料は、まず高周波溶解炉 (日新技研㈱, NEV-MO4C 型) を用いて Pure-Mg を高純度グラファイト Bridgman るつぼ内で熔融させ、凝固後に Mg-Y 母合金を適量挿入し、酸化物の混入を防ぐためにるつぼごと石英管へ Ar 封入を行い Bridgman 炉に挿入した。育成速度は 1.2 mm/h である。

MgO などの酸化物を除去するためには、塩化物やフッ化物などの熔融塩が効果的とされる。Mg と比べて比重が大きい熔融塩では、熔融した Mg が浮遊して二層構造となり、酸化物除去や単結晶育成における結晶成長に悪影響が現れる恐れがある。そこでここでは、各種塩の中で比重が比較的小さい LiF, LiCl を候補とした。LiF, LiCl のそれぞれの融点は 848°C, 610°C であり、共晶組成 (LiF : LiCl = 3 : 7 (mol 比)) における融点は 500°C である²¹⁾。これは Pure-Mg の融点である 650°C より十分低く、単結晶育成時には熔融状態となっている。LiF-LiCl 混合塩の比重はわずかに Mg より大きい (650°C における密度 Mg (l) : 1.588 Mg/m³²²⁾, LiF (l) : 1.886 Mg/m³, LiCl (l) : 1.483 Mg/m³, 混合熔融塩 (mol 比 = 3 : 7) : 1.608 Mg/m³²³⁾)、Mg は混合塩の融体中で浮遊するものの層状にはならず、球状の塊となって成長した。そのため本研究における Pure-Mg 単結晶育成にはこの混合塩を用いた。一方、Y は LiF-LiCl 混合塩と反応するため、Mg-Y 合金単結晶試料の育成には LiF-LiCl 混合塩を用いず、石英管への Ar 封入とした。

作製された単結晶試料に機械研磨 (エメリー研磨 #600 ~ #2000, および OP-S : 粒径 0.04 μm によるバフ研磨) を施し、FE-SEM/EBSD 方位解析 (JEOL JSM-6500F) を行い、本試験を行うに適した方位となるように純せん断試験片を作製した。ここで、〈0001〉, 〈10 $\bar{1}0$ 〉, 〈11 $\bar{2}0$ 〉方向に対する Shear area の寸法はそれぞれ $2.0 \pm 1.0 \text{ mm}$ である。また、蛍光 X 線分析装置 (JEOL JSX-3220Z) を用いて Mg-Y 単結晶試料組成の評価を行った。試験片作製後、すべり線観察面に機械研磨を施し、試験片作製時に導入された転位の消滅を促進するためサイクル焼鈍 (室温から 100°C まで 4 h で昇温, その後 100°C から 150°C の範囲で 4 h × 8 cycles) を行った。Mg-Y 単結晶試料には Pure-Mg 単結晶試料と同じ条件でサイクル焼鈍を行った後に溶体化熱処理 (500°C まで 2 h で昇温, その後 1 h 保持し急冷) を行った。熱処理後さらにバフ研磨を行った後 C₂H₅OH-4 mass%HCl を用いてエッチングを施し、試験片とした。

純せん断試験は上述されている純せん断試験ジグと Instron 社製 Instron5584 型試験機を用いて室温で行った。せん断ひずみ速度は $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ とし、荷重データは 20 ms 毎に取得した。

試験後の試験片は光学顕微鏡, FE-SEM, EBSD を用いてすべり線の解析を行うとともに、必要に応じて画像解析 (Image J) を試みた。

4. 結果および考察

4.1 単結晶育成法

光学顕微鏡観察および目視観察から、育成された試料は単

結晶であることを確認した。育成した Pure-Mg 単結晶の ICP 分析より, Li の混入量は 100 ppm 未満であった。また, Mg-Y 合金では, 蛍光 X 線分析によりインゴット全体において目標組成である Mg-0.5 at%Y および Mg-0.8 at%Y となっていることが確認された。

4.2 純せん断試験

純せん断試験結果を Fig. 5 に示す。荷重を断面積で除したものを σ と定義し, 0.2%せん断歪に対する流動応力として評価された σ_y は, Pure-Mg, Mg-0.5 at%Y および Mg-0.8 at%Y のそれぞれにおいて 8.0, 13.0, 22.0 MPa である。以下に, それぞれの試料に関する観察結果と考察を示す。

(a) Pure-Mg

Pure-Mg の試験後の試験片を Top view ($\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向) から観察した極点図と OIM 解析像を Fig. 6 に示す。図中の OIM 解析像における黒線は, 86° の角度差を持った界面を示

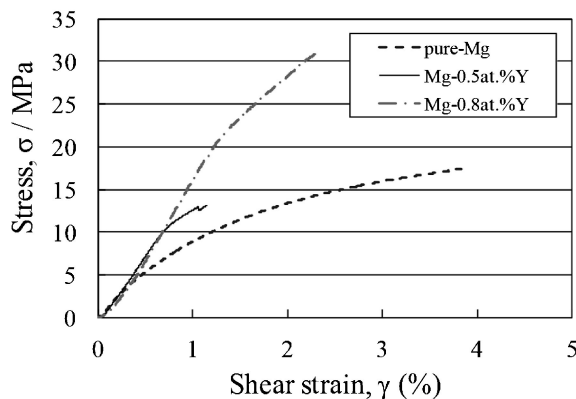


Fig. 5 Shear stress–Shear strain curves of Pure-Mg and Mg-Y single crystal specimens by pure shear test.

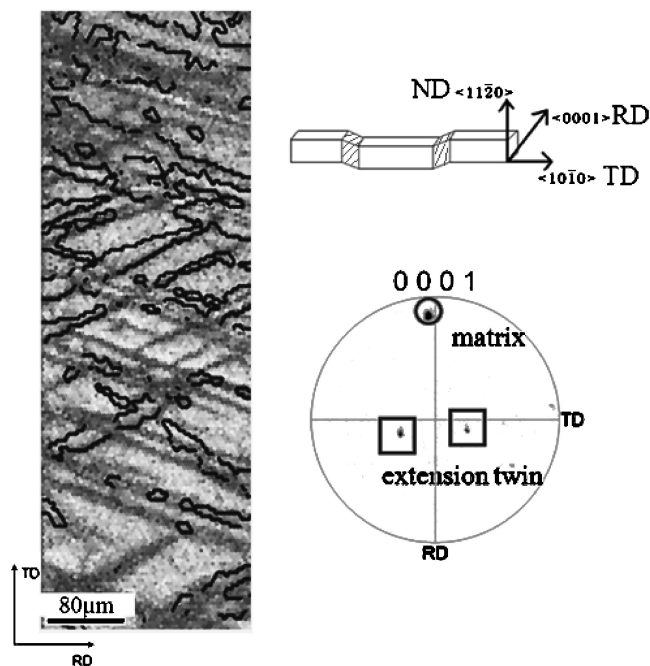


Fig. 6 Result of OIM analysis and a pole figure of the pure-Mg specimen after pure shear testing. The areas surrounded by black lines are extension twin.

している。極点図より, 二種類の引張双晶が導入されていることがわかる。また, 柱面すべりのものと考えられるすべり線は上下面, 両側面において観察されなかった。逆極点図より求めた双晶の体積率は約 25% であり, Mg における引張双晶のせん断歪量 $s = 0.13$ および Shear factor = 0.43 を考慮すると

$$13\% \times 0.25 \times 0.43 = 1.4\%$$

という塑性歪量を得る。本試験における塑性歪量は 2.5% 程度であり, 主たる変形は引張双晶によるものと考えられる。

Pure-Mg における変形開始時の外力 σ_y は 8.0 MPa であり, 双晶変形に対しては

$$8.0 \text{ MPa} \times 0.43 = 3.4 \text{ MPa}$$

という RSS を得る。先行研究における Pure-Mg での引張双晶の CRSS は 2.5 MPa 程度とされており²⁾, 本試験で得られた値は引張双晶の発生応力として妥当なものであると考えられる。

また, Fig. 7 にセレーション解析のグラフを示す。Mg 合金において, 双晶が発生する際, 応力–歪曲線にセレーションが発生する。このグラフでは横軸に $d\sigma/d\gamma$, 縦軸に外力 σ をとっている。通常の応力–歪曲線では応力の増加に伴い歪量が増加するため $d\sigma/d\gamma$ の値は正であるが, セレーションが発生して応力が急減した際にはその値が負となる。Fig. 7 より, σ_y 付近より $d\sigma/d\gamma$ が負, すなわちセレーション発生が顕著となることがわかり, ここからも本試験での主たる塑性変形機構はセレーション発生を特徴とする引張双晶であったと考えられる。

(b) Mg-0.5 at%Y

Mg-0.5 at%Y の試験後の試験片を Top view ($\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向) から観察した極点図を Fig. 8 に示す。引張双晶の導入量は極めて小さく, 今回の試験により与えられた塑性変形量のすべてを担うことはできないと判断された。先行研究では, Mg-0.5 at%Y における引張双晶の CRSS は 15 MPa と報告されている¹⁴⁾。ここで式(3)を用いると,

$$15 \text{ MPa} / 0.43 = 34.9 \text{ MPa}$$

という負荷せん断応力値を得る。これに対し, 本試験において負荷した $\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ せん断応力の最大値は 13.0 MPa であり, 引張双晶発生に必要な応力に到達しておらず, 引張

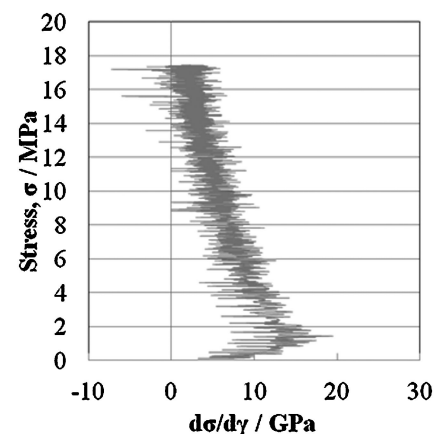


Fig. 7 A result of serration analysis of the pure shear test of the pure-Mg specimen.

双晶以外の塑性変形機構が変化を担っていると結論づけられる。

Fig. 9 に試験後の試験片表面の FE-SEM 像を示す。Fig. 8 に三角で示した活動 $\{10\bar{1}0\}$ 面の観察面への trace は、わずかに傾斜していた直線である。与えた塑性変形量は小さく、すべり線は非常に見え難い状態であったが、Fig. 9(a), (b) に示すように、平行なすべり線が複数個所で確認された。Fig. 9(c) に Fig. 9(b) の拡大図を示す。変形量が小さいため、すべり線の確認が困難であることから、画像処理ソフト

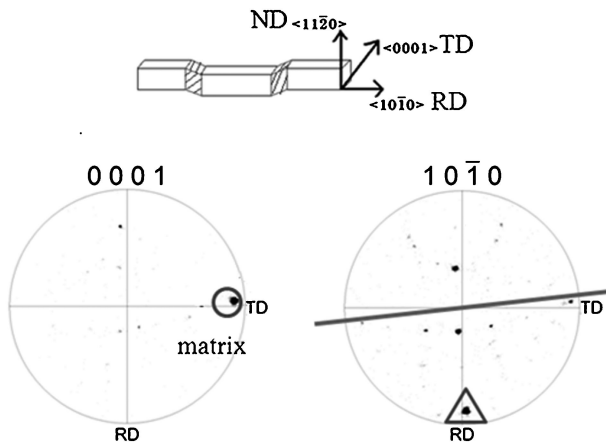


Fig. 8 A pole figure of the Mg-0.5 at%Y specimen after pure shear testing.

(Image J) を用いて本画像にフーリエ変換と逆フーリエ変換を施す画像処理を行った。その結果を Fig. 9(d) に示す。この図から、逆極点図の情報よりわかる柱面すべりのすべり線と考えるのに妥当な方向へ線が入っており、これらは柱面すべりのすべり線であると考えることができる。一方、本試験における一次錐面、二次錐面すべりの Shear factor はそれぞれ 0.88, 0.42 である。それらのすべり系が活動した際に観察されるであろうすべり線は、柱面すべりの理論的なすべり線に対してそれぞれ 28° , 35° 傾くこととなるので、これは SEM 像から得られるすべり線と明らかに異なっている (Fig. 10)。なお、本研究において試験片側面にすべり線は観察されなかった。この側面にすべり線が観察されないという事実は、活動が予想される柱面転位のバーガースベクトルが側面と平行になるという幾何学的要因と対応しており、ここからも柱面すべりの活動が示唆される。

以上より、Mg-0.5 at%Y において柱面すべりが活動していると考えられる。本試験における Shear factor を考慮するとその CRSS は $13.0 \times \cos 10^\circ = 12.8 \text{ MPa}$ であり、これまで報告されている Pure-Mg での CRSS に比べ Y 添加による柱面すべりの CRSS 低下が起きているものと考えられる。

(c) Mg-0.8 at%Y

Mg-0.8 at%Y 試料の極点図と試験後の試験片の FE-SEM 像を Fig. 11 に示す。これらより、柱面すべりのすべり線と

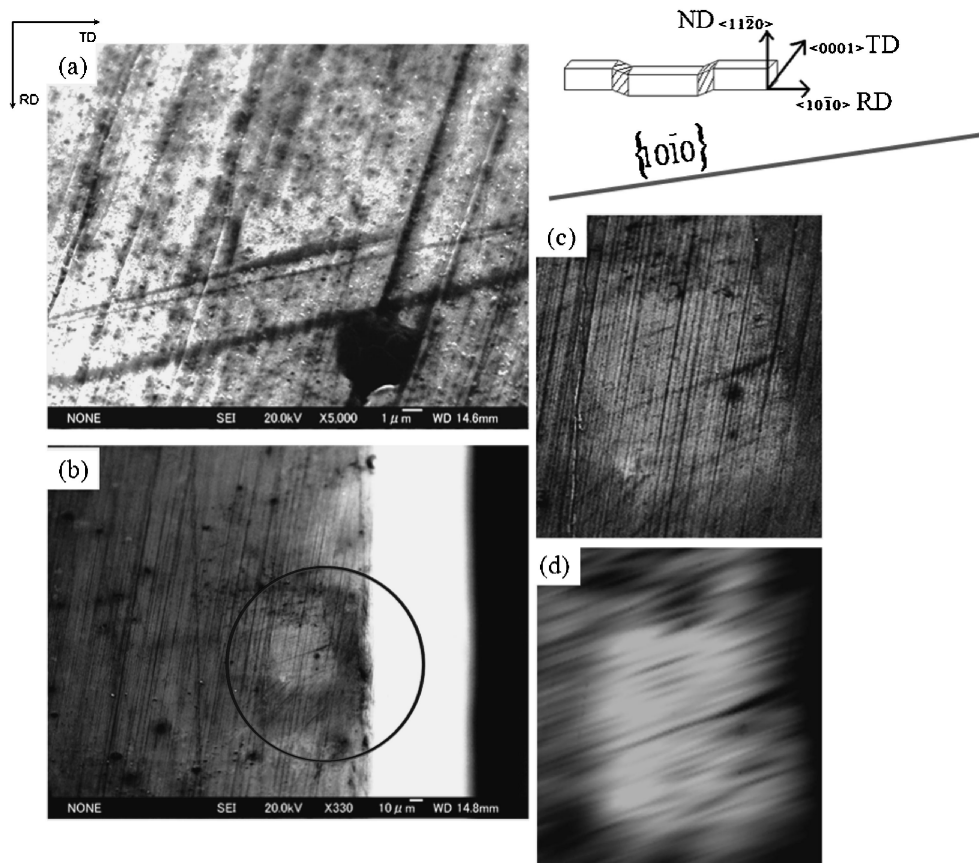


Fig. 9 FE-SEM images of slip trace of the Mg-0.5 at%Y specimen after pure shear testing (a & b).

(c): a magnified view of (b), and (d): an image obtained by Fourier transform and Inverse Fourier transform of the image shown in (c).

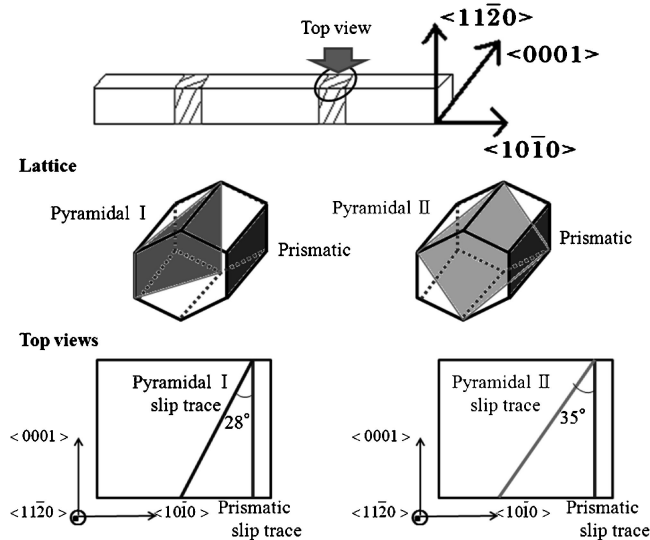


Fig. 10 Predicted slip traces on the top view.

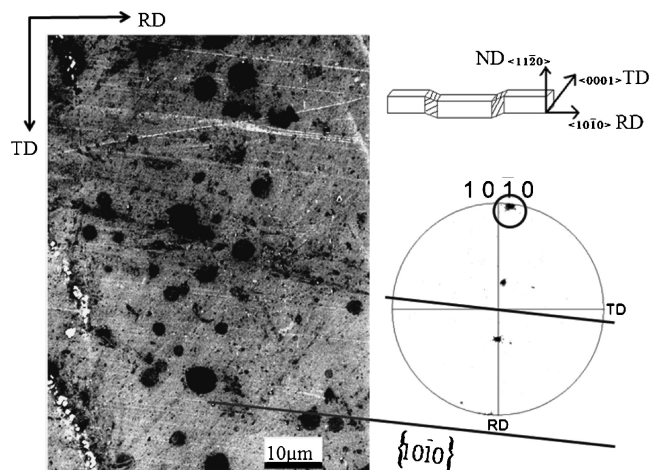


Fig. 11 An FE-SEM image and a pole figure of the Mg-0.8 at%Y after testing.

考えるに妥当なすべり線が存在していることがわかる。また、引張双晶は観察されなかった。本研究におけるせん断試験片に隣接したインゴットより作製した、 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 応力軸とする圧縮試験の結果より、Mg-0.8 at%Y における引張双晶の CRSS は 31.0 MPa と評価された。本研究における外力 σ の最大値は 32 MPa 程度であり、Shear factor を考慮すると引張双晶の RSS は $32 \times 0.43 = 13.8$ MPa となる。この値は圧縮試験から得られた引張双晶の CRSS より大幅に小さいため、Mg-0.8 at%Y において引張双晶を発生させるには不十分と考えられる。よって、Mg-0.8 at%Y において柱面すべりが活動していると考えられ、その CRSS は 22.0 MPa である。

本研究で行った Mg-0.5 at%Y と Mg-0.8 at%Y 単結晶を用いた純せん断試験の結果から Y 添加による柱面すべりの固溶軟化の可能性が実験的に示唆されたが、その濃度、温度依存性については未だ不明な点が残る。Mg における Y の固溶限は 3.5 at% 程度であり²⁴⁾、今後は本研究で用いた Mg-0.5 at%Y および Mg-0.8 at%Y よりも高い濃度の Y 添

加合金単結晶を用いた実験、さらには種々の歪速度や温度にて力学試験を行い、活性化体積等の評価を行うことから変形メカニズムを解明することが必要である。

5. 結 論

本研究では、Pure-Mg および Mg-Y 合金単結晶試料における柱面すべりの CRSS 定量的評価を目標として、単結晶試料育成法の改良と純せん断試験を行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) Pure-Mg 単結晶の育成法として LiF + LiCl 混合塩を用いることで酸化物を除去した単結晶試料を作製することが可能であることが示された。

(2) 非底面すべりの CRSS を求めるために純せん断試験法とそれに必要なジグの開発を行った。

(3) Pure-Mg では、純せん断試験により双晶活動が起こり、柱面すべりの CRSS を求めることに至らなかった。これは柱面すべりの CRSS が 8.0 MPa 以上であることを意味する。

(4) Mg-0.5 at%Y において、純せん断試験により柱面すべりの CRSS は 12.8 MPa と見積もられた。

(5) Mg-0.8 at%Y において、純せん断試験により柱面すべりの CRSS は 22.0 MPa と見積もられた。また、圧縮試験により引張双晶の CRSS は 31.0 MPa と見積もられた。

(6) Pure-Mg における非底面塑性変形機構の報告値と比較して、Y 添加により、柱面すべりの固溶軟化が起きている可能性が示唆された。

本研究の遂行にあたり、北海道大学大学院工学研究院 橋本直幸准教授、滝沢聡助教、大久保賢二技術職員、宮崎宣幸技術職員の御助言、御支援を頂きました。また、混合塩の利用については熊本大学 安藤新二教授に御指導頂きましたことを記して謝します。

本研究成果は、トヨタ自動車㈱の先端技術共同研究プログラムの一環として行ったものであります。

文 献

- 1) S. Sandlobes, S. Zaefferer, I. Schestakow, S. Yi and R. Gonzalez-Martinez: Acta Mater. **59**(2011) 429-439.
- 2) R. L. Bell and R. W. Cahn: Proc. Roy. Soc. A **239**(1957) 494-521.
- 3) H. Yoshinaga and R. Horiuchi: Trans. JIM **4**(1963) 1-8.
- 4) H. Yoshinaga and R. Horiuchi: Trans. JIM **4**(1963) 134-141.
- 5) T. Obara, H. Yoshinaga and S. Morozumi: Acta Metall. **21**(1973) 845-853.
- 6) S. Ando, K. Nakamura, K. Takashima and H. Tonda: Keikinzoku **42**(1992) 765-771.
- 7) A. Couret and D. Caillard: Acta Metall. **33**(1985) 1447-1454.
- 8) H. Yoshinaga and R. Horiuchi: Trans. JIM **5**(1964) 14-21.
- 9) H. Yoshinaga, T. Obara and S. Morozumi: Mater. Sci. Eng. **12**(1973) 1-8.
- 10) J. Koike, T. Kobayashi, T. Mukai, H. Watanabe, M. Suzuki, K. Maruyama and K. Higashi: Acta Mater. **51**(2003) 2055-2065.
- 11) T. Kobayashi, J. Koike, Y. Yoshida, S. Kamado, M. Suzuki, K. Maruyama and Y. Kojima: J. Japan Inst. Metals **67**(2003) 149-152.
- 12) T. Tsuru, Y. Udagawa, M. Yamaguchi, M. Itakura, H. Kaburaki and Y. Kaji: J. Phys. Condens. Matter. **25**(2013)

- 022202_1-022202_5.
- 13) S. Miura, S. Imagawa, T. Toyoda, K. Ohkubo and T. Mohri: Mater. Trans. **49**(2008) 952-956.
 - 14) S. Miura, I. Sato, Y. Iwamoto, T. Mineta, S. Takihana, Y. Watanabe, H. Miura, T. Mukai and T. Mohri: Mater. Sci. Eng. A, submitted (2013).
 - 15) S. Miura, S. Ochiai, Y. Ohya, Y. Mishima and Y. Suzuki: J. Japan Inst. Metals **51**(1987) 400-406.
 - 16) W. Z. Han, Z. F. Zhang, S. D. Wu and S. X. Li: Acta Mater. **55**(2007) 5889-5900.
 - 17) W. Z. Han, G. M. Cheng, S. X. Li, S. D. Wu and Z. F. Zhang: Phys. Rev. Lett. **101**(2008) 115505-115508.
 - 18) J. J. Jonas, S. Mu, T. Al-Samman, G. Gottstein, L. Jiang and E. Martin: Acta Mater. **59**(2011) 2046-2056.
 - 19) W. Hußnätter and M. Merklein: International Journal of Material Forming **1**(2008) 233-236.
 - 20) K. Ko, T. Murakami and K. Ikeda: J. JILM **48**(1998) 563-568.
 - 21) H. M. Haendler, P. S. Sennett and C. M. Wheeler, Jr.: J. Electrochem. Soc. **106**(1959) 264-268.
 - 22) The Japan Institute of Metals and Materials: *Kaitei4han Kinzoku data book*, (Maruzen, Tokyo, 2004) p. 10.
 - 23) The Japan Institute of Metals and Materials: *Kaitei4han Kinzoku data book*, (Maruzen, Tokyo, 2004) p. 74.
 - 24) H. Okamoto: *Desk Handbook Phase Diagrams for Binary Alloys*, (ASM International, 2000) p. 557.

Appendix

外力とRSSを結び付けるパラメータとしてのSchmid factor および Shear factor を以下のように再定義する。

Fig. A-1 に示す幾何学的条件下で、試験片に単軸応力 σ_z を負荷することを考える。ここで x 軸および y 軸は周方向、 z 軸は応力軸方向と一致している。 x - y - z 座標系を y 軸回りに θ 、 z' 軸回りに φ 回転させることで、 x'' - y'' - z'' 座標系へと変換することができ、その際の $\tau_{x''z''}$ への変換係数は図のすべり面、すべり方向に対する Schmid factor となると考えら

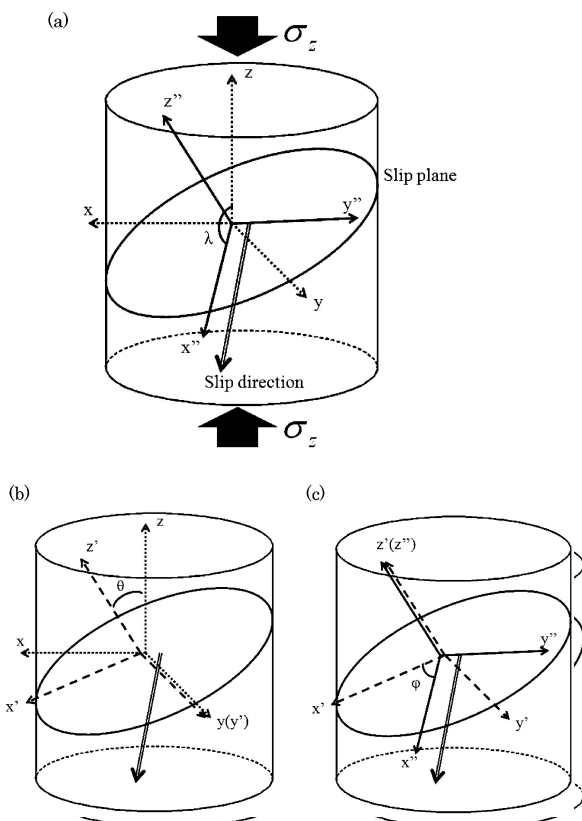


Fig. A-1 Rotation angle between (a) stress axis and slip direction, (b) stress axis and normal direction of slip plane, and (c) x' and slip direction.

れる。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x''} & \tau_{x''y''} & \tau_{x''z''} \\ \tau_{y''x''} & \sigma_{y''} & \tau_{y''z''} \\ \tau_{z''x''} & \tau_{z''y''} & \sigma_{z''} \end{pmatrix} = R_2 R_1 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix} R_1^T R_2^T$$

$$= \sigma_z \begin{pmatrix} \sin^2 \theta \cos^2 \varphi & \sin^2 \theta \sin \varphi \cos \varphi & -\sin \theta \cos \theta \cos \varphi \\ \sin^2 \theta \sin \varphi \cos \varphi & \sin^2 \theta \sin^2 \varphi & -\sin \theta \cos \theta \sin \varphi \\ -\sin \theta \cos \theta \cos \varphi & -\sin \theta \cos \theta \sin \varphi & \cos^2 \theta \end{pmatrix}$$

R_1 : y 軸周り θ 回転テンソル

R_2 : z' 軸周り φ 回転テンソル

となり、 $\tau_{x''z''}$ の係数、つまり Schmid factor は $-\sin \theta \cos \theta \cos \varphi$ となる。ここで応力軸である z 軸と平行な単位ベクトル $\vec{A}$ 、すべり方向と平行な単位ベクトル $\vec{B}$ を x' - y' - z' 座標系上に表したものが Fig. A-2 である。 $\vec{A}$ と $\vec{B}$ の内積は

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = -\sin \theta \cos \varphi = \cos \lambda$$

となり、ここで λ は圧縮応力軸とすべり方向の成す角度である。これを用いることで Schmid factor は

$$-\sin \theta \cos \theta \cos \varphi = \cos \theta \cos \lambda$$

となり、これは圧縮応力軸とすべり面法線方向との成す角度が θ 、すべり方向との成す角度が λ である際の Schmid factor である。

次に、せん断応力下における RSS を求めるための係数としての Shear factor を求める。例として引張双晶における Shear factor の計算方法を以下に示す。

Fig. 3 に本試験法での HCP 格子とせん断方向の幾何学関係を示す。Shear area にかかる応力は $\tau_{yz} = \tau_{zy} = \tau$ のみであり、その応力を $\{10\bar{1}2\}$ 面を $x''z''$ 面、 $\langle 1011 \rangle$ 方向を x'' 方向とする回転テンソルを考慮すると

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x''} & \tau_{x''y''} & \tau_{x''z''} \\ \tau_{y''x''} & \sigma_{y''} & \tau_{y''z''} \\ \tau_{z''x''} & \tau_{z''y''} & \sigma_{z''} \end{pmatrix} = R_4 R_3 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau \\ 0 & \tau & 0 \end{pmatrix} R_3^T R_4^T$$

$$= \frac{\tau}{4} \begin{pmatrix} -2\sqrt{3} \sin^2 47^\circ & 2\sqrt{3} \sin 47^\circ \cos 47^\circ & -2 \sin 47^\circ \\ 2\sqrt{3} \sin 47^\circ \cos 47^\circ & -2\sqrt{3} \cos^2 47^\circ & 2 \cos 47^\circ \\ -2 \sin 47^\circ & 2 \cos 47^\circ & 2\sqrt{3} \end{pmatrix}$$

R_3 : x 軸周り 30° 回転テンソル

R_4 : z' 軸周り 47° 回転テンソル

となり、 $\tau_{x''y''}$ の係数が純せん断試験による引張双晶の Shear factor となる。その値として $(2\sqrt{3}/4) \sin 47^\circ \cos 47^\circ = 0.43$ を得る。

同様に、本試験方法における柱面すべりおよび底面すべりの Shear factor の値はそれぞれ 1.0, 0.0 となる。

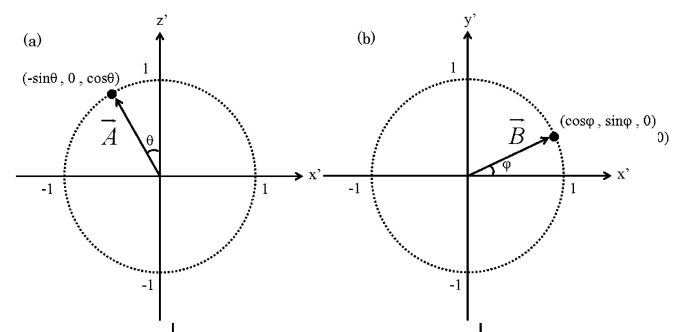


Fig. A-2 Unit vectors in (a) x' - z' plane and (b) x' - y' plane. $\vec{A}$ is parallel to z axis and $\vec{B}$ is parallel to x'' axis.