

# The 11th Pacific Rim, International Conference on Advanced Materials and Processing, PRICM11

熊本大学 先進マグネシウム国際研究センター  
教授 安藤 新二  
(2023 年度 国際会議等参加助成 AF-2023049-X1)

キーワード：マグネシウム，曲げ変形，結晶方位依存性

## 1. 開催日時

2023 年 11 月 19 日～11 月 23 日

## 2. 開催場所

ICC, Jeju, Korea (大韓民国 済州島国際会議場)

## 3. 国際会議報告

### 3・1 会議の概要

この会議は金属や複合材料の開発および製造プロセスに関する国際会議であり、環太平洋域の 5 カ国の金属系学会 (JIM (日本), CSM (中国), KIM (韓国), TMS (米国), MA (オーストラリア)) の共催によるものである。3 年に 1 度の開催で 30 年以上の歴史がある。今回は韓国の KIM が主催し、大韓民国済州島で開催された。参加者は 1109 名で 1026 件の発表があり、日本、韓国、中国、米国、オーストラリアを中心に 20 カ国から参加があった。

### 3・2 発表概要-マグネシウム単結晶の引張試験-

本研究者は「Orientation dependence of active non-basal slips in pure magnesium single crystals (純マグネシウム (以下 Mg) 単結晶の引張試験の結晶方位依存性)」というタイトルで口頭発表を行った。

Mg 合金は軽量で高比強度を持つことから、電気自動車や航空機の材料として注目されているが、室温での延性の低さが問題となり、まだ十分に活用される状況にはない。Mg は主すべり系である底面すべりだけでは十分な延性を示すことができず、延性向上には非底面すべり系の活性化が必要である。そのような非底面すべりとして、一般には柱面すべりが起こるとされているが、本研究者の文献調査の結果、これは多くの研究者の誤解であると考えられる。これに対し本研究者は、2 次錐面すべり (以下 SPCS) が活動し、その特異な変形挙動が生じる機構を提案している<sup>1)</sup>。ここで、従来の研究と本研究者の結果の違いが生じた原因として、Mg の変形機構に強い荷重軸方位依存性があることが予想される。そこで本研究では、これを検証するために、Mg 単結晶をさまざまな荷重軸方位で引張試験し、その変形挙動を調査することを目的とした。

純 Mg インゴットを用いて、ブリッジマン法により寸法  $3 \times 0.3 \times 20 \text{ mm}^3$  の単結晶引張試験片を作製した。底面すべりが起こらないように試験片の荷重軸を底面に平行とし、

[10 $\bar{1}$ 0] 方向と [11 $\bar{2}$ 0] 方向の間で 5° 刻みで変化させた。

これらの試験片を室温において引張試験を行い、得られた応力歪曲線を図 1 に示す。[11 $\bar{2}$ 0] 引張では降伏後、強い加工硬化を示したが、荷重軸が [10 $\bar{1}$ 0] に近づく、降伏応力が上昇し、延性が低下した。荷重軸 15° では加工硬化を示さなくなり、6° 以下では脆性的に破断した。

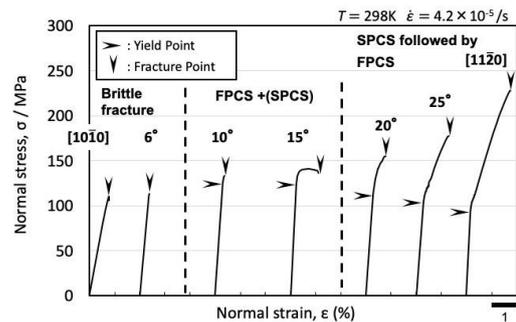


図 1 純 Mg 単結晶の応力歪曲線の結晶方位依存性

偏光顕微鏡による結晶表面のすべり線観察から、荷重軸 [11 $\bar{2}$ 0] ~ 20° の範囲では SPCS により降伏し、その後、変形と共に 1 次錐面すべり (FPCS) が活動した。荷重軸 10° ~ 15° では、主に FPCS により変形が起こり、SPCS は部分的に生じるようになった。これらのすべり系の活動に必要な臨界分解剪断応力 (以下 CRSS) を、すべりが観察された荷重から求めた結果、荷重軸が [11 $\bar{2}$ 0] から [10 $\bar{1}$ 0] に近づく、SPCS の CRSS は増加し、逆に FPCS では減少することがわかった。これは、一般の金属のすべり系では、CRSS はほぼ一定であることとは、大きく異なる現象である。

この CRSS の変化が生じた理由を考えるために、透過型電子顕微鏡による転位観察を行った。その結果、荷重軸の変化に伴い、底面に垂直な  $\langle c \rangle$  転位が観察されるようになった。この転位は、SPCS の  $\langle c+a \rangle$  転位の運動の障害となるため、SPCS の CRSS が増加したと考えられる。この底面に垂直な  $\langle c \rangle$  転位が生じた機構を図 2 のように提案した。すなわち、荷重軸が [11 $\bar{2}$ 0] から [10 $\bar{1}$ 0] に変化すると、柱面上に剪断応力が作用するようになり、これが SPCS で活動する  $\langle c+a \rangle$  らせん転位を、柱面上で  $\langle c \rangle$  転位と  $\langle a \rangle$  転位に分解したと考えられる。この分解により、活動できる  $\langle c+a \rangle$  転位の密度が減少し、さらに  $\langle c \rangle$  転位が  $\langle c+a \rangle$  転位のすべり運動を阻害するようになる。したがって、荷重軸の変化と共に SPCS が起こりにくくなったといえる。

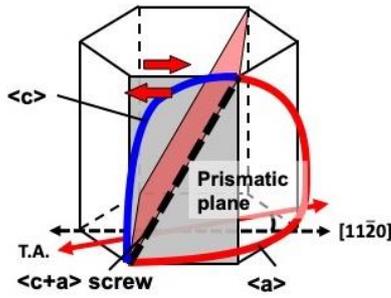


図2 せん断力による<math>\langle c+a \rangle</math>らせん転位の分解機構

### 3・3 発表概要 -Mg-Y 合金単結晶の曲げ試験-

同行した大学院生は「Effect of yttrium addition on bending deformation behavior of magnesium single crystal」(Mg 単結晶の曲げ変形におけるイットリウム添加の影響)という題目でポスター発表を行った。

Mg を自動車のボディ等に使用する場合は、プレス成形や曲げ加工における変形特性も必要になる。Mg の主な変形機構は底面すべりおよび{10 $\bar{1}$ 2}双晶であるが、前者は底面に垂直および平行な引張や圧縮では活動できず、後者は底面に垂直な圧縮や平行な引張では活動できない。したがって、曲げ変形のように1つの板材に引張と圧縮の2つの応力が同時に作用する場合、Mg 板材の曲げ変形性は結晶方位に強く影響されると考えられる。これまで純Mg単結晶の3点曲げ試験において、結晶方位により底面すべりおよび双晶変形の活動が変化し、曲げ変形挙動に結晶方位依存性が観察された<sup>2)</sup>。さらに、純Mg圧延板材は、強い底面集合組織を持つことから、多結晶材であっても単結晶とよく似た変形挙動を示す<sup>3)</sup>。さらに強度と延性を改善するためにイットリウム(以下Y)を添加した結果、曲げ中立面が圧延面に平行な場合より、垂直の方が延性は著しく向上することが分かった<sup>4)</sup>。この延性の異方性の原因を明らかにするために、Mg-(0.23-0.68 at.%)Y合金単結晶試験片の3点曲げ試験を行った。試験片寸法は3×3×25 mm<sup>3</sup>、スパン $l=14$  mmとした。試験片の長手方向は[11 $\bar{2}$ 0]とし、曲げ中立面が底面に平行(B試験片)および垂直(E試験片)の2種類の試験片を比較した。

得られた曲げ応力-曲げ歪曲線を図3に示す。B試験片の曲げ降伏応力 $\sigma_y$ はY添加に伴い、増加した。また延性は純Mg同様高く、曲げ歪み33%以上でも破断しなかった。試験後の形状は、純Mgと同様にGull shapeになった。この場合の曲げ変形は底面すべりによって生じており、 $\sigma_y$ から底面上に作用する剪断応力を求めると、引張試験で得られている底面すべりのCRSSのY濃度依存性の曲線と一致した。したがって、B試験片における $\sigma_y$ の上昇は、Y添加による底面すべりのCRSS上昇によることが分かった。

E試験片の結果は、図3に示すように、B試験片同様、 $\sigma_y$ はY添加に伴い上昇した。曲げ延性はY添加に伴い上昇し、0.68 Y以上では30%を超えても破断しなかった。

また曲線の形状も大きく異なった。純MgのE試験片では、{10 $\bar{1}$ 2}双晶により降伏するため、曲げ変形の中立面が試験片の引張側に位置する。Yを添加すると{10 $\bar{1}$ 2}双晶が減少し、中立面は引張側から試験片中央に移動した。E試験片の $\sigma_y$ から{10 $\bar{1}$ 2}双晶の活動応力を求めると、Y添加に伴い増加しており、この傾向は引張変形により得られた傾向と一致した。Y添加により{10 $\bar{1}$ 2}双晶が抑制されるため、曲げの中立面は移動するが、同時に引張側で1次錐面すべりが活動するようになり、引張側で十分な延性を生じるようになったため、この方位の曲げ延性が向上したことがわかった。

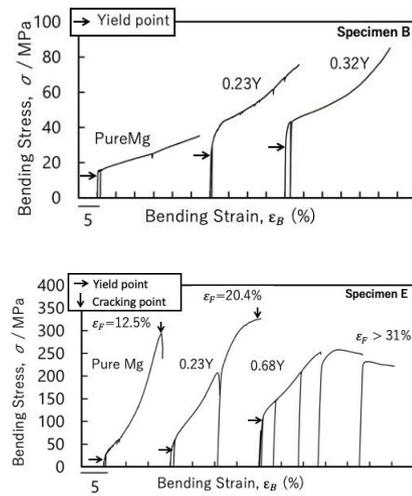


図3 Mg-Y合金単結晶の3点曲げ応力-変位曲線 (上：B試験片，下：E試験片)

同行した大学院生は、上記の内容を英語によりポスター発表を行った。その結果、Best Poster Presentation賞を受賞した。海外の研究者との英語での議論は、学生の良い経験になったといえる。



図4 ポスター発表表彰式

### 謝辞

本発表内容の一部は、公益財団法人天田財団平成26年度一般研究開発助成(AF-2015037)により実施したものである。当国際会議等参加助成と併せて深い感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 安藤, 中村, 高島, 頓田: 軽金属, 42(1992), 765.
- 2) 北原, 津志田, 安藤: 日本金属学会誌, 80(2016), 102.
- 3) 安藤, 岡, 福森, 北原: 軽金属学会第 137 回秋期大会講演概要(2019), 103
- 4) 安藤, 古川, 岡, 北原: 軽金属学会第 140 回春期大会講演概要(2021), 229.