

# マグネシウム合金の曲げ加工における変形機構の解明

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

(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015037)

キーワード：マグネシウム，3点曲げ変形，結晶方位依存性，異方性，変形機構，降伏応力

## 1. 研究の目的と背景

近年の環境問題の観点から，各種輸送機器の軽量化のための構造材料として，軽量のマグネシウム合金が注目されている．そのような合金を利用する場合に，材料の変形機構を十分に明らかにすることは有益である．特にマグネシウムは hcp 構造であるために，fcc や bcc 構造の金属と比べると多種類のすべり系や双晶系の活動が必要であり，非常に複雑であるといえる．すなわち，マグネシウムでは底面すべりおよび  $\{10\bar{1}2\}$  双晶が活動的な変形機構である．しかし底面に垂直もしくは平行な応力が作用する場合には底面すべりは活動できない．また底面に垂直な引張では  $\{10\bar{1}2\}$  双晶は容易であるが，逆に圧縮では活動しない．このようなことから変形に強い結晶方位依存性が生じると考えられる．

マグネシウム合金を自動車等の構造部材や部品に加工する場合，曲げ加工性は重要な要素である．しかし曲げでは，同時に引張と圧縮の応力が生じるため，その変形挙動はさらに複雑になると考えられるが，そのような観点での研究はほとんどない．そこで本研究では，マグネシウムの曲げにおける変形挙動の結晶方位依存性を調べるために，マグネシウム単結晶の3点曲げおよび4点曲げを行い，純マグネシウムの変形挙動の結晶方位依存性について調査し，その変形機構を明らかにすることとした．またマグネシウムは圧延を行うと強い底面集合組織を持つことから，圧延板材の曲げ変形でも，圧延方向に対する変形の異方性が現れると予想される．そこで純マグネシウムの圧延材の曲げ変形挙動についても調査し，単結晶および多結晶圧延材の変形挙動の比較を行った．

## 2. 実験方法

純マグネシウムインゴット(純度 99.99%)から，改良型ブリッジマン炉によりマグネシウム単結晶を育成し，寸法約  $3 \times 3 \times 30$  mm の試験片を作製した．単結晶試験片の方位を図 1 に示す．A および B 試験片は中立面が  $\{0001\}$  に平行であり，中立軸方向がそれぞれ  $[1\bar{1}00]$  および  $[11\bar{2}0]$  である．C 試験片は中立面が  $\{11\bar{2}0\}$  であり，中立軸方向が  $[1\bar{1}00]$  である．D 試験片は中立軸方向が  $[0001]$ ，すなわち底面に垂直である．E 試験片は中立面が  $\{1\bar{0}10\}$  で中立軸方向が  $[\bar{1}2\bar{1}0]$  である．これらの試験片を用いて，3点曲げ試験はスパン長さ  $L=14$  mm で，4点曲げ試験はスパン長さ  $L_1=6$  mm， $L_2=24$  mm で行った．いずれも曲げ速度は  $1.67 \times 10^{-2}$  mm/s，

試験温度は室温とした．曲げ荷重  $P$  から次式より曲げ応力  $\sigma$  を評価した．

$$\sigma = 3PL / (2bt^2) \quad (3 \text{ 点曲げ}) \quad (1)$$

$$\sigma = 3P(L_2 - L_1) / (2bt^2) \quad (4 \text{ 点曲げ}) \quad (2)$$

ここで  $b$  は試験片幅， $h$  は試験片高さである．

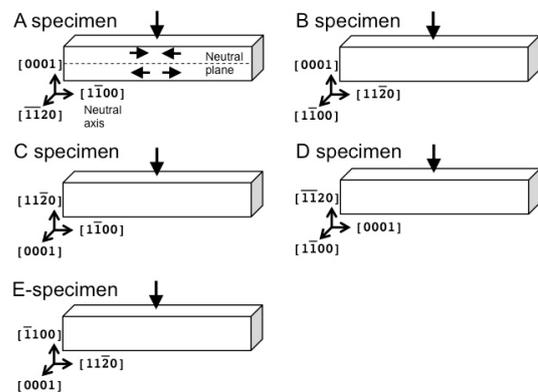


図 1 単結晶試験片の結晶方位

また，同インゴットを 523K で熱間圧延し，673K で 390s 熱処理を行い，粒径  $47.7 \mu\text{m}$  の圧延材を作製した．圧延材は図 2 に示すような  $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$  集合組織を持っていた．

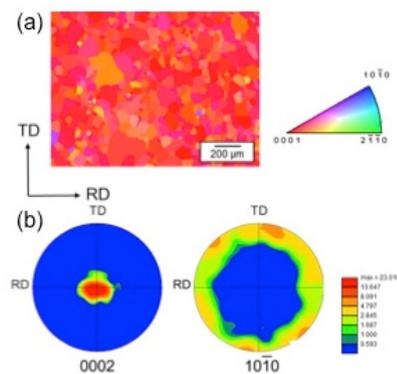


図 2 (a)圧延材の IPF マップおよび(b)極点図

この圧延材より図 3 に示す多結晶試験片を作製した．RD, ND, TD はそれぞれ圧延方向，圧延面垂直方向，幅方向である．試験片寸法は  $3 \times 3 \times 25$  mm とした．ここでは中立面が圧延面に平行な RT および TR 試験片と中立面に対し圧延面が垂直である TN および RN 試験片の 4 種類とした．

単結晶および圧延材共に、試験後は表面のすべり線や双晶をノマルスキー型微分干渉顕微鏡を用いて観察した。

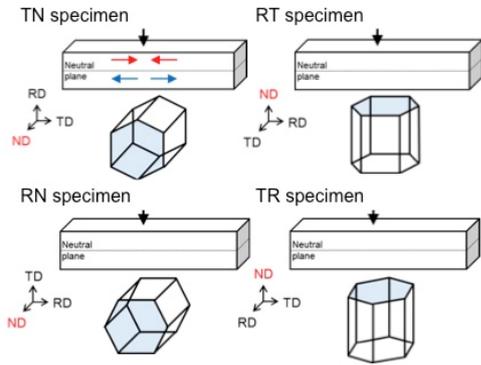


図3 圧延材試験片の方位

### 3. 実験結果および考察

#### 3・1 単結晶の3点曲げ試験

A-E試験片の3点曲げ曲げ応力-変位曲線を図4に示す。ここで曲げ変位は試験片中央部の変位量である。また直線域から外れははじめた応力を曲げ降伏応力 $\sigma_y$ とし、図中に矢印で示した。AおよびB試験片の曲線の形状は良く似ており、それぞれ18MPaおよび12MPaで降伏した後、直線的に加工硬化した。曲げ変位を3~4mm程度で試験を停止したがこの範囲では判断しなかった。これに対しC試験片は31~33MPaで降伏落下を示した後、小さなセレーションを示しながら急激に加工硬化し、曲げ変位約1mmでき裂が発生した。D試験片は約10MPaと4つの試験片中最も低い応力で降伏し、その後のほぼ一定の流動応力で変形した。この場合も試験の範囲ではき裂は生じなかった。

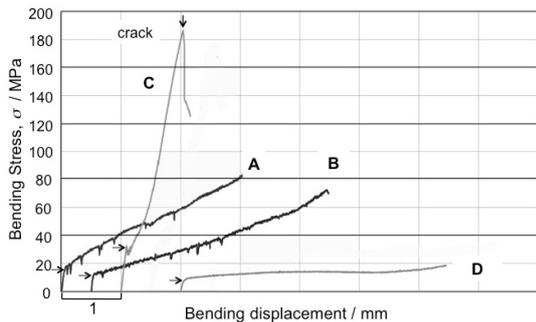


図4 単結晶の3点曲げ応力-変位曲線

図5にA試験片の試験後の外観を示す。3点曲げであるにも関わらず、試験後は「ひ」の字型に変形した。中央圧子と支持部の間では、試験片表面に底面に沿ったすべり線が様に分布していた。変形中に表面を観察した結果、この底面すべりは中央圧子の下部から発生し、曲げ変位の増

加に伴い試料の両側に広がった。しかし左右の支持部から外にはすべりは生じなかった。B試験片もA試験片と同様な変形であった。

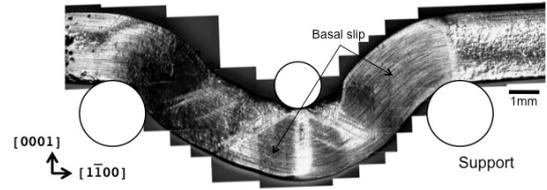


図5 A試験片の曲げ変形後の形状

図6にC試験片の様子を示す。試料は、中央部が1mm程度変位した後、試料の外側(引張側)にき裂が発生した。このき裂は $(10\bar{1}1)$ に沿っていた。支持部の間には、試料の圧縮側から引張側に向けて多数の双晶が発生しており、その先端は試料の引張側の端にまで到達するほどであった。これらの双晶トレースが $[11\bar{2}0]$ に沿っていることから、 $(1\bar{1}02)$ および $(\bar{1}102)$ 双晶が活動したと考えられる。

図7にD試験片の結果を示す。この場合、V字型に変形しており、曲げ変位4mm程度でもき裂は生じていない。D試験片の表面には、中央圧子と両支持部の間に $[\bar{1}\bar{1}20]$ に沿ったすべり線が一様に分布していた。この試料では底面が試料側面に対し垂直で、中央圧子の押し込み方向に平行であることから、これらのすべり線は底面すべりの活動によると考えられる。以上のように、マグネシウムでは結晶方位により曲げ変形挙動は異なり、主に底面すべりもしくは $\{10\bar{1}2\}$ 双晶により変形することがわかった。

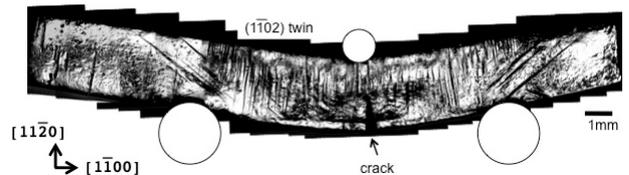


図6 C試験片の曲げ変形後の形状

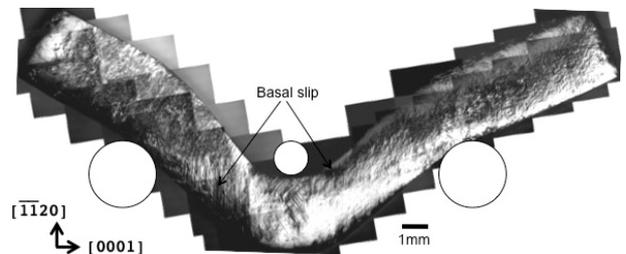


図7 D試験片の曲げ変形後の形状

#### 3・2 単結晶の4点曲げ試験

4点曲げ試験における曲げ応力-曲げ変位曲線を図8お

よび9に示す。比較のため3点曲げの結果も併記した。図8に示すように、AおよびB試験片の曲線の形状はよく似ており、いずれも約15 MPaで降伏後、緩やかに加工硬化し、変位約2 mmに達してもき裂は生じなかった。CおよびE試験片は約30 MPaで降伏したが、C試験片は変位約1 mm以上で急激な加工硬化を示し、変位約1.4 mmでき裂が生じた。一方、E試験片は降伏後、緩やかに加工硬化し、変位2.5 mmに達してもき裂は生じなかった。3点曲げの場合と比較すると、A, B, Cは同様な形状であるが、Eでは高い加工硬化を示さないことがわかった。

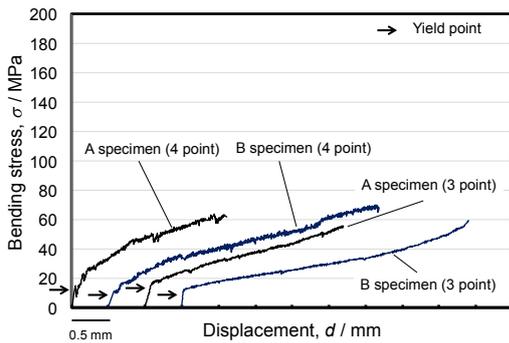


図8 AおよびB試験片の3点曲げおよび4点曲げ応力-変位曲線

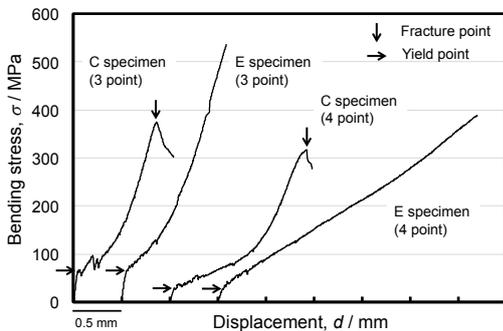


図9 CおよびE試験片の3点曲げおよび4点曲げ応力-変位曲線

図10にAおよびB試験片の4点曲げ時の形状を示す。いずれも底面すべりのすべり線が中央の圧子と左右の支持部の間で観察され、2つの中央圧子間ではすべり線は観察されなかった。また試験片形状は鍋型になった。CおよびE試験片では図11に示すようにV字型に変形した。4点曲げにおいても3点曲げと同様、圧縮側で生じた $\{10\bar{1}2\}$ 双晶の先端は、中立軸を超えて引張側まで伸びており、CおよびE試験片は $\{10\bar{1}2\}$ 双晶によって変形することが分かった。またC試験片は変位1mm程度でき裂が生じたが、E試験片ではき裂は生じなかった。これは、E試験片では圧縮側で生じた双晶内の結晶方位は、C試験片の場合と異なり、底面すべりが活動できる方位となるため、C試験片

では双晶しか活動できないが、E試験片では双晶内で底面すべりが活動し、変形がより容易であるためと考えられる。

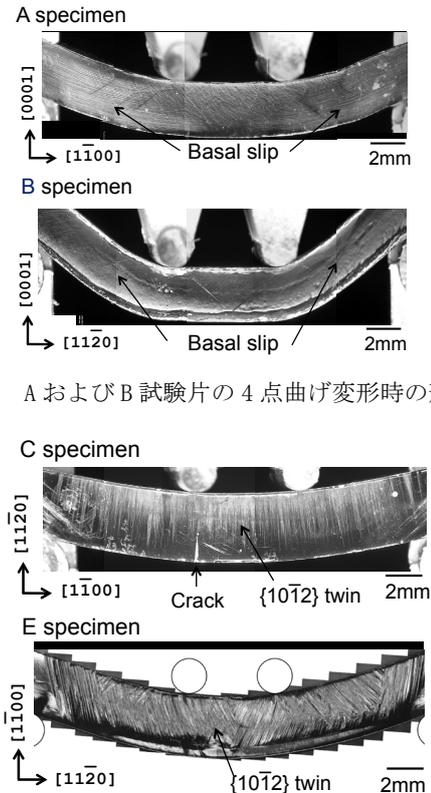


図10 AおよびB試験片の4点曲げ変形時の形状

図11 CおよびE試験片の4点曲げ変形時の形状

### 3・3 単結晶の曲げ変形における降伏応力の支配機構

一般に曲げ変形においては、試験片の外側に引張応力、内側に圧縮応力が作用し、中央の中立面では応力は生じない。本研究で用いた試験片は、いずれも中立面が底面に平行、もしくは垂直であるので、この曲げによる引張および圧縮応力では底面すべりは生じないことになる。しかしA, BおよびD試験片はいずれも底面すべりにより延性的に変形した。したがって、この3点曲げにおける曲げ降伏応力は、式(1)による曲げ応力値では直接評価できないことになる。そこでまず、マグネシウムの3点曲げにおける降伏の支配機構について次のように考えた。

AおよびB試験片では、図12(a)に示すように、底面に沿ってせん断力 $\tau_{xy}$ が作用すると、中央の圧子から底面すべりが生じ、その転位は支持部の方向に運動する。支持部の直上では転位が体積するため、変形は中央圧子と支持部の間のみで生じ、その結果図5のような形状になる。一般に3点曲げにおいて中央部に生じるせん断応力は次式で求められる。

$$\tau_{xy} = P / (2bh) \quad (3)$$

AおよびB試験片の降伏時の荷重 $P$ から求めた $\tau_{xy}$ は0.7-1.0MPaであり、これはマグネシウムにおける底面すべりの臨界分解せん断応力 $CRSS$ とほぼ一致する。従っ

て A および B 試験片では、底面に作用するせん断力が曲げ降伏応力を決定するといえる。

C 試験片は圧縮側の双晶のみで変形した。このとき引張側ではほとんど変形が生じていないと考え、図 12(b)に示すように、中立面が引張側に移動したとすると、圧縮応力  $\sigma$  は、(1)式の  $h$  が 2 倍になったとみなし次式となる。

$$\sigma = 3PL / (8bt^2) \quad (4)$$

その値は約 4MPa となり、これ  $\{10\bar{1}2\}$  双晶の変形応力<sup>2)</sup>と一致する。したがって、圧縮応力が作用すると双晶により降伏し、圧縮側が双晶で占められるとそれ以上は変形できなくなるため、破断したと考えられる。

D 試験片は底面すべりで変形しており、図 12(c)の底面上のせん断力  $\tau_{yx}$  は A および B 試験片と同様に求められ、その値は約 0.5MPa であり、底面すべりの CRSS と一致する。またこの場合は底面転位が容易に結晶の外に抜け出ることができるため、ほとんど加工硬化を示さなかったと考えられる。

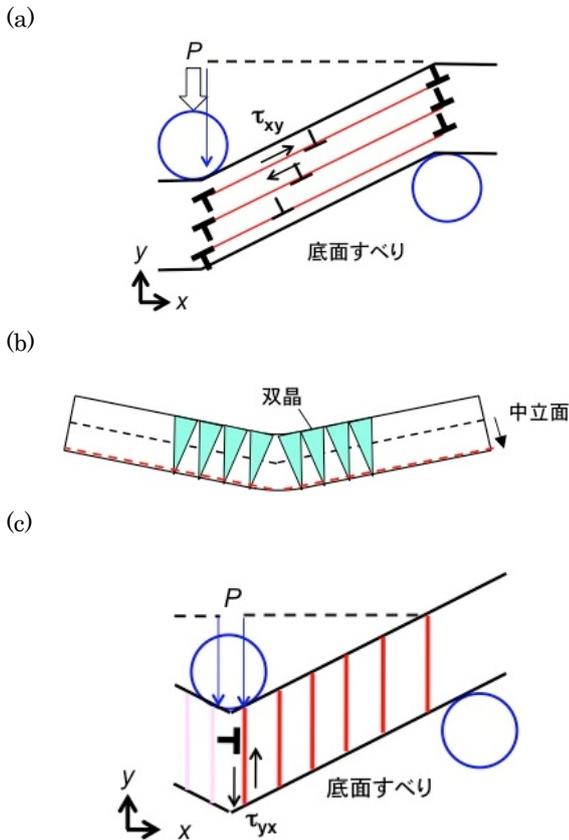


図 12 マグネシウムのまげ変形機構。(a)A および B 試験片、(b)C および E 試験片、(c)D 試験片

次に 4 点曲げ試験における曲げ降伏応力について考えた。A および B 試験片では、図 10 のように、中央圧子間では変形が生じず、中央圧子と両側の支持部の間のみが変形した。これは 4 点曲げではこの部分のみにせん断応力が作用するためである。すなわちこの中央圧子と両支持部の

間は、3 点曲げと同様の変形であり、図 12(a)と同じ機構を考えることができる。したがって、その曲げ降伏時のせん断応力も 3 点曲げの場合と同様に求められ、その値は約 0.7 MPa であり、3 点曲げと同様に底面すべりの CRSS とほぼ一致した。すなわち、4 点曲げ試験においても、A および B 試験片は底面すべりにより変形し、その降伏応力は底面に作用するせん断応力に支配されるといえる。

C および E 試験片の 4 点曲げでは、図 11 に示すように、中央圧子の間も  $\{10\bar{1}2\}$  双晶が生じており、3 点曲げと同様に V 字型に変形した。また圧縮側で生じた  $\{10\bar{1}2\}$  双晶の先端は、中立軸を超えて  $3/4h$  程度まで引張側に伸びていた。このことから 3 点曲げの場合と同様、中立層が引張側へ移動したとして圧縮応力を求めると約 7.5 MPa となり、この場合も双晶変形に必要な応力とほぼ一致した。すなわち、C および E 試験片の 4 点曲げにおいても  $\{10\bar{1}2\}$  双晶によって変形し、その降伏応力は双晶の発生応力に支配されることが分かった。

ここで図 9 に示したように、C 試験片はき裂が生じ、E 試験片ではき裂は生じず、また降伏後の加工硬化率も E 試験片の方が低くなり、降伏後の変形挙動が異なった。マグネシウムでは  $\{10\bar{1}2\}$  双晶が生じると  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  軸に対し約  $86^\circ$  の結晶回転が生じることがわかっている。図 13 に C および E 試験片における双晶による結晶回転をステレオ投影で解析した結果を示す。この図より、C 試験片では双晶内は方位回転しても底面すべりのシュミット因子 SF は 0.07 と低いが、E 試験片では SF は 0.44 と大きな値となる。したがって、E 試験片では圧縮側で生じた双晶内で底面すべりが活動できることになり、実際に底面すべりのすべり線が観察できた。すなわち、双晶内部で変形ができるようになるため C 試験片より変形が容易となり、加工硬化率が低く、き裂が発生しなかったと考えられる。

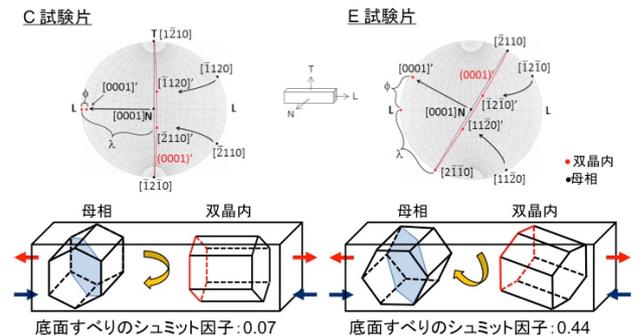


図 13 C および E 試験片における双晶内の方位回転

### 3・4 多結晶圧延材の 3 点曲げ試験

図 14 に多結晶試験片における曲げ応力-変位曲線を示す。ここで曲げにおける曲げ変形過程を調査したため除荷と負荷を繰り返している。降伏応力はいずれの試験片でも 100MPa 程度で方位による差はないが、TN および RN 試

験片は RT および TR 試験片より大きな加工硬化を示すことがわかる。ここで変形挙動は TN と RN 試験片、および RT と TR 試験片は同様であったため、TN および TR 試験片の結果を示す。図 15 に 3 点曲げにおける試験片形状を示す。TN 試験片では V 字型に曲がったが、TR 試験片では、単結晶の A および B 試験片より程度は低い「ひの字」型に変形した。TR 試験片は中立面が圧延面と平行であるが、圧延材の圧延面には底面が平行となる集合組織を持っており、単結晶と似た挙動を示したといえる。

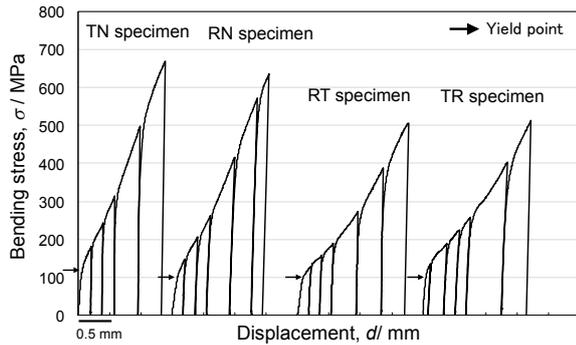


図 14 多結晶圧延材の 3 点曲げ応力-変位曲線

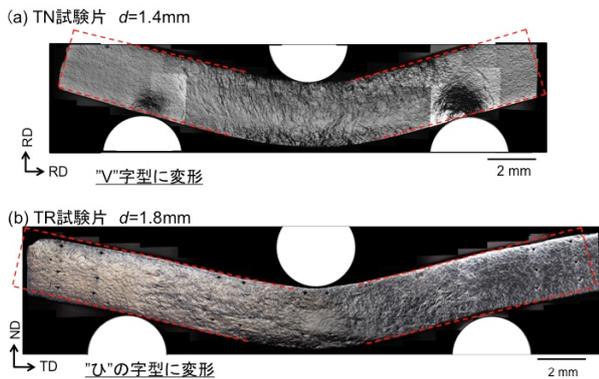


図 15 (a) TN および (b) TR 試験片の 3 点曲げ変形時の形状

図 16 に、TN および TR 試験片表面で観察された双晶および底面すべり線の分布を、それぞれ赤色および青色で示す。TN 試験片では、降伏直後に圧子真下に双晶が発生し、曲げ変形の進行に伴い圧縮側に双晶領域が広がっていた。その結果、TN 試験片では圧縮側が双晶変形のみで変形しており、その領域は中立面を超えていた。これに対し TR 試験片では、図 16(b) のように、両支持部の間では、圧縮側から引張側にかけてほぼすべての結晶粒で底面すべりが生じていた。これは集合組織を持っているため、単結晶の A および B 試験片と同様に、底面に平行なせん断力が生じたために底面すべりが活動したと考えられる。すなわち多結晶圧延材変形挙動は、対応する方位の単結晶の変形挙動とよく似ていることが分かった。

ここで TR および RT 試験片では、圧縮側では圧子直下以外では双晶も観察された。そこでこの TN および TR の

双晶分布の違いを検討するため、有限要素解析ソフト ANSYS を用いて弾性応力解析を行った。その結果を図 16 に示す。ここで  $\{10\bar{1}2\}$  双晶面に 10MPa 以上のせん断応力が発生した領域を赤色で示した。その結果、この応力解析は図 16 の双晶分布とよく一致していることがわかる。すなわち、図 17(a) の TN 試験片では、圧縮側に広く双晶が発生し、その応力は中立面を超えて引張側にも広がることを示している。これに対し図 17(b) の TR 試験片では、圧子直下には双晶面にせん断応力が働かないことを示している。これは圧子による圧縮応力が、底面に垂直方向に作用するため、双晶面のせん断力を打ち消したためと言える。

今回の多結晶圧延材の平均結晶粒径は約  $50\mu\text{m}$  であり、引張試験をしたところ、その降伏応力は 90MPa であった。一般にマグネシウム圧延材では、圧縮応力は引張応力のおよそ 1/2 になることが知られている。今回の 3 点曲げでは図 14 に示すように曲げ降伏応力は 100MPa 程度であった。しかし、図 16 のように、双晶が中立面を超えて 0.2h 程度まで広がっていた。そこで、中立面が引張側に 0.2h 移動したとすると降伏時に圧縮側に働く応力は 50MPa と見積もられ、これは引張試験から見積もられる圧縮降伏応力とほぼ一致する。したがって、多結晶圧延材の降伏応力は双晶の発生応力に支配されていると考えられる。

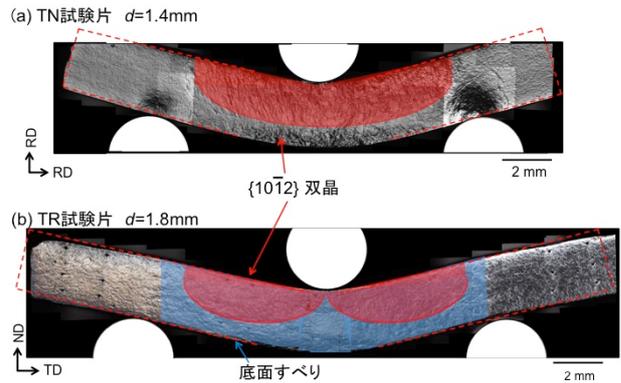


図 16 TN および TR 試験片における底面すべりおよび双晶の分布。

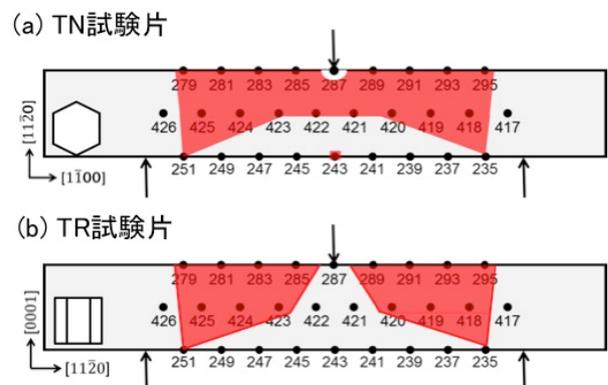


図 17 有限要素解析による TN および TR 試験片における双晶変形発生応力の応力分布

### 3・5 多結晶圧延材におけるスプリングバック

曲げ加工では、除荷した際に弾性応力回復によるスプリングバックが生じる。この値は曲げ加工の精度に影響することからその傾向を知ることが必要である。純マグネシウム圧延材における曲げ変位とスプリングバック角 $\theta$ の関係を図18に示す。試験片方位により多少の差は見られるもの曲げ変位1mmまでは変位と $\theta$ は比例しているが、曲げ変位1mm以上では $\theta$ はほぼ一定となった。図14の曲げ応力-変位曲線では、変位1mm以上でも加工硬化は続けているにもかかわらず $\theta$ は一定となった。マグネシウム多結晶材では、図16に示したようにいずれの方位でも双晶変形が容易に生じている。双晶変形はすべり変形と異なり、除荷時に逆双晶を生じて消滅するものがあるため、その影響であると考えられるが、その現象を観察することはできなかったため、今後の検討課題と言える。

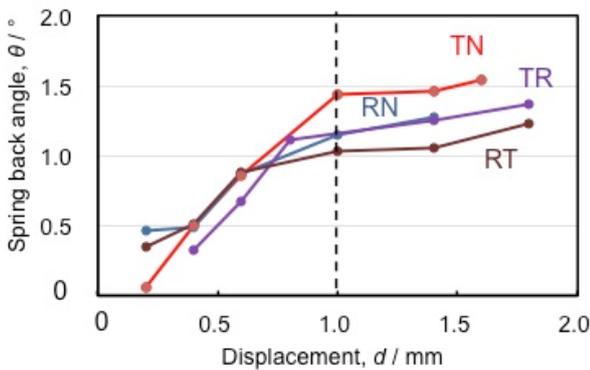


図18 多結晶圧延材における曲げ変位とスプリングバック角の関係

### 4. 結言

マグネシウムの曲げ変形機構の結晶方位依存性を調査するために、単結晶の3点曲げおよび4点曲げ試験を行った。その結果、AおよびB試験片では底面すべりにより容易変形し、「ひの字」型になった。CおよびE試験片では双晶によりV字型に変形した。C試験片では変形後わずかな曲げ変位ののち破断したが、E試験片では破断することなく変形した。D試料は底面すべりにより変形し、加工硬化をほとんど示さなかった。これらの曲げ変形の降伏応力は、それぞれ底面すべりのCRSSおよび $\{10\bar{1}2\}$ 双晶の変形応力により支配されることがわかった。

集合組織を持つ純マグネシウム多結晶圧延材を用いて曲げ試験を行った結果、中立面に底面が平行な試験片では底面すべり及び双晶により変形し、中立面に底面が垂直な試験片では双晶変形により変形した。これらの曲げ変形挙動の傾向は単結晶の場合と同様であった。すなわち、底面すべりおよび双晶変形の活動により、強い結晶方位依存性があることがわかった。

多結晶材のスプリングバック角は曲げ変位と比例して増加するが、ある変位以上では一定になることがわかった。

### 謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成AF-2015037によって実施したものである。ここに深く感謝する。

### 参考文献

- 1) H. Asada and H. Yoshinaga: Journal of The Japan Institute of Light Metal 23 (1959), 649-652.
- 2) E.W. Kelly et al.: Trans. Metal. Soc. AIME. 242 (1968) 5-13.