

京都大学	博士 (工学)	氏名	Go Jongbin
論文題目	Effect of Twinning and De-twinning on Macroscopic and Microscopic Deformation in AZ31 Magnesium Alloy (AZ31 マグネシウム合金のマクロ・ミクロ変形に及ぼす Twinning および De-twinning の影響)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、六方最密充填 (Hexagonal Close-Pack: HCP) 結晶構造を有するマグネシウム合金において発現する双晶変形 (deformation twinning) と、応力方向反転時にしばしば観察される変形双晶の復元 (de-twinning) に着目し、底面集合組織を有する AZ31 マグネシウム合金 (Mg-3Al-1Zn, wt.%) における巨視的な不均一変形挙動、de-twinning と不均一変形との関係、および不均一変形の発生原因を実験的に調査した研究成果をとりまとめたものであり、全5章から成っている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景と目的を示している。マグネシウム合金は構造用金属材料の中で最も密度が低く、高い比強度を有することから、軽量の構造材料として注目を浴びている。しかし、マグネシウム合金は HCP 結晶構造を有し、優先的に活動できるすべり系が底面すべりのみに限られるため、他の立方晶金属材料に比べて延性・成形性が乏しいことが問題となっている。HCP 結晶において底面は1種類しかなく、底面すべりだけでは二次元的な塑性変形しか実現できないことから、マグネシウム合金では c 軸方向の変形成分を有する双晶変形が生じる。HCP 構造を有するマグネシウム合金の c 軸方向に引張応力が加わると $\{10\bar{1}2\}$ 変形双晶が形成され (deformation twinning)、c 軸方向に圧縮応力が加わると形成された $\{10\bar{1}2\}$ 双晶が元の結晶方位に戻る de-twinning が発生することが報告されている。こうした de-twinning の発生は巨視的力学特性に大きく影響し、加工硬化を伴わない従来の金属材料と異なる特異な引張特性を示すことなどが報告されてきた。しかしながら、de-twinning と巨視的な変形応答との関係は十分に理解されておらず、それを de-twinning 発生前後の組織形成過程と関連して調査した研究報告例はない。そこで本研究では、de-twinning がマクロ力学特性に及ぼす影響を詳細に調査し、de-twinning と変形応力の関係を明らかにすることを研究目的としている。</p> <p>第2章では、予圧縮変形を加えたのち引張変形を施した AZ31 マグネシウム合金における、マクロスケールの不均一変形におよぼす応力負荷方向の影響について議論している。強い底面集合組織を有する AZ31 マグネシウム合金の熱間圧延・焼鈍ブロック材に対して TD (transverse direction) 方向に室温圧縮変形を加えることによって、多数の変形双晶を導入した。この TD 圧縮材に対して、TD 方向から 0°、45°、90° の角度をなす各方向に室温引張変形を施したところ、それぞれの応力-ひずみ曲線の形態が全く異なることを見出している。引張変形材の組織を同一視野観察した結果、0° 引張材では de-twinning が顕著に生じ、圧縮変形で導入された変形双晶がほぼ消失すること、45° 引張材でも de-twinning が生じるが 0° 材ほど顕著ではなく、残存する変形双晶も多いこと、そして 90° 引張材では de-twinning が全く生じないことを明らかにしている。DIC 法を用いた局所ひずみ解析により、de-twinning が発生する引張条件の場合には、試験片平行部にマクロスケールの不均一変形帯が観察され、生成・伝播・消滅過程を繰り返すことを見出された。この結果はマクロスケールの不均一変形と de-twinning に強い相関関係があることを示唆していた。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	Go Jongbin
------	---------	----	------------

第3章では、マクロスケールの不均一変形帯と de-twinning との関係を、同一視野における DIC 解析と SEM-EBSD による組織観察により調査した。ひずみの集中した不均一変形帯領域において de-twinning が優先的に進行することを確認している。ただし、1回の不均一変形帯の伝播時に個々の変形双晶が完全にマトリクス方位に戻るわけではなく、各回の de-twinning 量には限りがあり、不均一変形帯が繰り返し伝播することによって個々の双晶の de-twinning が徐々に進行し、0° 引張材の場合には最終的には消滅に至ることを見出している。0° 引張材の場合には、de-twinning の進行する段階は、変形初期から中期までの、変形応力が余り増加しない段階と対応していた。またミクロスケール DIC 法による局所ひずみ解析の結果から、0° 引張材の場合ひずみは主に de-twin が発生した領域に集中しており、マトリクス領域は塑性変形に殆ど寄与していないことが分かった。一方、第2章で明らかにした de-twinning の発生状況と対応し、不均一変形帯の発生・伝播は 45° 引張材では 0° 引張材よりも抑制されており、また 90° 引張材では顕著な不均一変形帯の発生・伝播は観察されなかった。これらの結果は、マグネシウム合金における de-twinning が、応力-ひずみ応答を大きく変化させることを明確に示すものであり、また de-twinning の発生は試験片中で均一に生じるものではなく、不均一変形帯が繰り返し発生・伝播することによって de-twinning が進行することを初めて見出したものである。

第4章では、de-twinning およびすべり変形により生じるひずみをより詳細に定量評価するとともに、de-twinning がすべり変形に及ぼす影響を、透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscopy: TEM) による変形ナノ組織観察と転位性格の同定などにより調査している。de-twinning は試験片の引張ひずみの発生に重要な寄与をしているが、観察されたマクロ引張ひずみの全てが de-twinning によるものではなく、転位すべりなどのその他の変形機構による塑性変形が生じていることを、前章までの研究結果が示唆していた。変形材の TEM 観察・解析の結果、de-twinning が活発に発生する変形条件においては、マトリクスにおいて底面 $\langle a \rangle$ すべりが主に観察されたが、de-twinning がほとんど発生しない変形条件では、錐面すべりのような非底面 $\langle a \rangle$ すべりと底面すべりがともに生じることを明らかにしている。また引張変形前の変形双晶中にも多数の底面 $\langle a \rangle$ 転位が導入されており、これらが原子の一斉運動により de-twinning を生じた結果、de-twinning により形成されるマトリクス方位領域にも双晶中の転位が引き継がれることを見出している。このように、de-twinning に加えて活動する転位すべりの、変形条件による相違を明らかにし、これらが巨視的な変形応力に及ぼす影響を議論している。

第5章は総括であり、本研究で得られた結果を要約しまとめている。

本論文は、HCP 結晶構造を有するマグネシウム合金においてしばしば生じる変形双晶の消滅 (de-twinning) という興味深い現象に着目し、de-twinning の特徴をマクロ・ミクロ・ナノの各スケールで調査して、de-twinning がマクロ力学特性に及ぼす影響、とくに変形応力との関係を明らかにすることを目的とした実験研究の結果を取りまとめたものである。本研究により得られた主な成果は次の通りである。

1. 底面集合組織を有する AZ31 マグネシウム合金に予圧縮変形を施して双晶を導入し、その後引き続き引張変形を施した場合の影響を調べ、同じ圧縮材であっても引張方向によって応力-ひずみ曲線の形状が大きく変化することを明らかにした。de-twinning が発生する引張条件の場合には、試験片平行部にマクロスケールの不均一変形帯が観察され、生成・伝播・消滅過程を繰り返すことを、デジタル画像相関 (DIC) 法を用いた局所ひずみ解析により見出した。
2. de-twinning と不均一変形帯の相関を、変形に伴う組織変化の同一視野観察などにより系統的に調査し、ひずみが集中した不均一変形帯において de-twinning が生じることを明らかにした。ミクロスケール DIC 法による局所ひずみ解析の結果から、de-twinning が活発に生じる引張方向の場合、ひずみは主に de-twinning 領域に集中しており、マトリクス領域は塑性変形に殆ど寄与していないこと、de-twinning の発生の程度により応力-ひずみ曲線の形状が決定されることを見出した。
3. 変形材の TEM 観察・解析の結果、de-twinning が活発に発生する変形条件においては、マトリクスにおいて底面 $\langle a \rangle$ すべりが主に観察されたが、de-twinning がほとんど発生しない変形条件では、錐面すべりのような非底面 $\langle a \rangle$ すべりと底面 $\langle a \rangle$ すべりがともに生じることを明らかにした。活動する転位すべりの変形条件による相違を明らかにし、巨視的な変形応力に及ぼす影響を議論している。

以上の成果をまとめた本論文は、底面集合組織を有し予圧縮変形を施した AZ31 マグネシウム合金に引き続いて種々の応力方向で引張変形を施した場合の変形機構を、巨視的および微視的な変形解析実験を元に明らかにしている。本研究で得られた知見は、マグネシウム合金における特徴的な現象である de-twinning がマクロな塑性変形挙動に及ぼす影響を系統的に明らかにしており、学術的に高い意義を有していることに加え、マグネシウム合金の加工性改善に関する指針も与えるものであって、学術上および実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 2 月 16 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、令和 9 年 4 月 1 日までの間当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。