

氏名・(本籍)	趙 薪茗 (中華人民共和国)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第工52号
学位授与の日付	令和3年3月20日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当(課程博士)
学位論文題目	AZ31マグネシウム合金における変形双晶を援用した 力学的性質制御に関する研究
論文審査委員	主査 教授 清水 一郎 副査 教授 中川 恵友 教授 中谷 達行 准教授 中井 賢治 教授 尾崎 公一 (岡山県立大学情報工学部)

# 論文内容の要旨

申請者氏名 趙 薪茗

## 論文題目 AZ31 マグネシウム合金における変形双晶を援用した 力学的性質制御に関する研究

工業用金属材料の中で最軽量であるマグネシウム合金は、優れた比強度や耐腐食性、生体適合性を備えるため、輸送機器をはじめとする各種機械や医療機器への応用が求められている。一方、最密六方結晶構造であるマグネシウム合金は、他の金属材料と比較して特異な塑性挙動や強い塑性異方性を示す。本研究は、そのようなマグネシウム合金が有する力学的特異性に着目し、その一因である変形双晶を含む結晶学的組織を、AZ31 マグネシウム合金薄肉円管材に対して領域選択的に発生させることにより、局所領域における力学的性質を制御する手法の確立を目指して行ったものである。このような局所力学的性質制御は、例えば生体吸収型冠動脈ステントなど、領域によって求められる力学的性質が異なる構造体への応用が期待できる。本論文では上述の目標に対して、段階的に行った研究成果について説明する。加えて、薄肉円管材における選択領域の力学的性質を評価する手法の開発についても述べる。

### 圧縮変形が AZ31 マグネシウム合金の集合組織変化に及ぼす影響に関する検討

AZ31 マグネシウム合金の長尺材（丸棒材、円管材）を製造する際に生成される底面集合組織は、機械的性質だけでなく成形性にも少なからず影響を及ぼす。そこで、熱処理と局所変形の組み合わせにより、マグネシウム合金丸棒材の底面集合組織（塑性異方性）を局所的に制御する手法について基礎的検討を行った。その結果 Fig. 1 に示すように、丸棒軸方向に圧縮変形を与えると、変形量が比較的小さくても、その直下領域では変形双晶が活動し、それに起因して集合組織が変化することが確認された。この知見をもとに、薄肉円管において選択領域的に変形双晶を活動させる手法について検討を行うこととした。

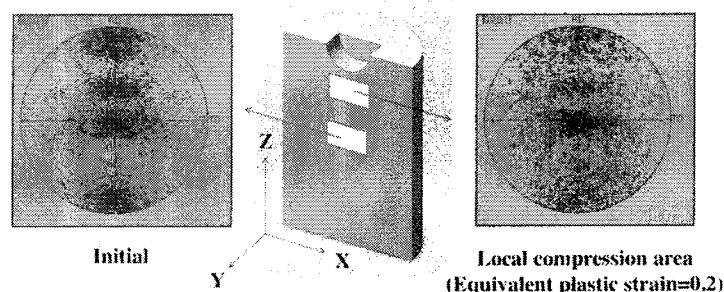


Fig. 1 {0001} pole figures showing initial texture and texture beneath the local compression area.

### AZ31 マグネシウム合金薄肉円管における変形双晶を援用した局所力学的性質制御の試み

薄肉円管材の局所力学的性質制御にあたっては、選択領域に塑性変形を与えた後、素材である薄肉円管形状に戻ることが求められる。そこでまず、集合組織および塑性異方性を有する AZ31 マグネシウム合金押し出し丸棒試験片に対して単軸負荷反転試験を行い、前段階の変形が後続変形における力学的挙動に及ぼす影響を調査した。その結果、Fig. 2 に示すように、最初に引張り予変形を与えた場合は、後続の圧縮変形において、予変形量の増加に伴う降伏応力の増加と、変形双晶に起因する三段階の加工硬化挙動が認められた。一方、最初に圧縮予変形を与えた場合は、後続の単軸引張りにおいて、予変形無しでは現れなかった加工硬化率の増加域が現れること、その増加域は予変形が増加するほど顕著になることがわかった。

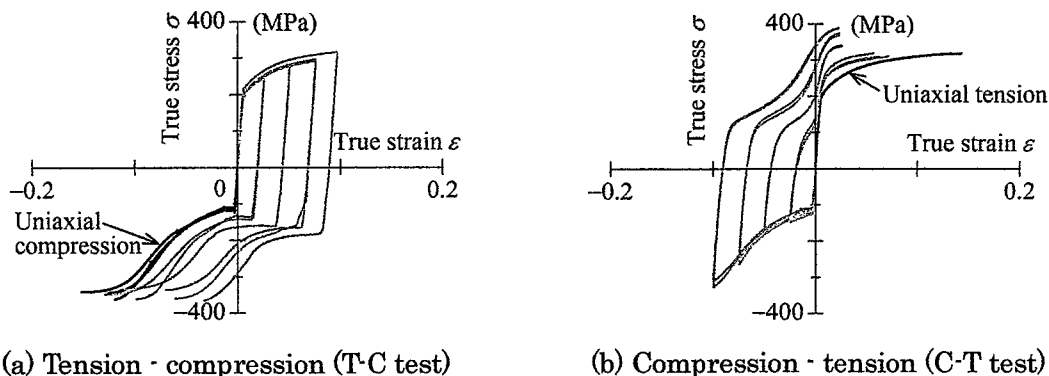


Fig. 2 True stress-strain curves in tension-compression and compression-tension tests of AZ31 extruded circular bar.

以上の結果を踏まえて、AZ31 マグネシウム合金薄肉円管材の選択領域に対して、張出し変形 (LBP) させた後に元形状に戻す変形と加工硬化低減焼鈍 (FA) を与える円周方向局所張出し試験法を考案した。それに要する治具 (Fig. 3) を作製するとともに、実際に薄肉円管材に試験を実施して、薄肉円管の軸方向に長くとした選択領域に適用した。

局所張出しを与えた領域から試験片を切り出して、その力学的性質を単軸引張り試験で評価した結果、Fig. 4 に示すように初期状態 (Initial) と比較して、流れ応力の増加と塑性伸びの向上が認められた。これらの両立は、変形双晶による微細化硬化と、双晶に伴って後続すべり変形の活動が容易になったことに起因すると考えられる。後方散乱電子線回折法で結晶学的組織を評価した結果、張出し領域では変形双晶の活動が観察され、加工硬化低減を目的とした最終焼鈍後でも、その変形双晶の残存が確認された。一方、マイクロビッカース硬さを測定したところ、Fig. 5 に示すように局所張出しおよび復元工程では加工硬化のために硬さ

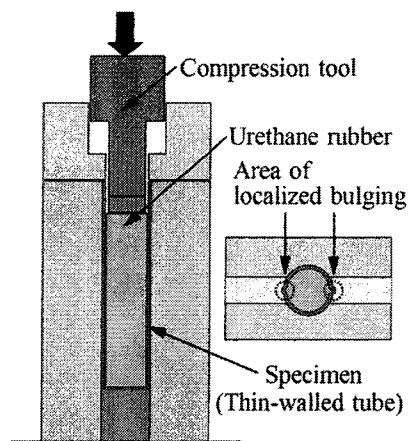


Fig. 3 Apparatus for localized bulging of thin-walled circular tube specimen.

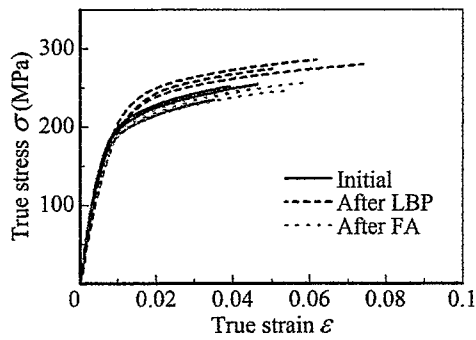


Fig. 4 True stress-true strain curves by uniaxial tensile tests at initial, after LBP, and after FA.

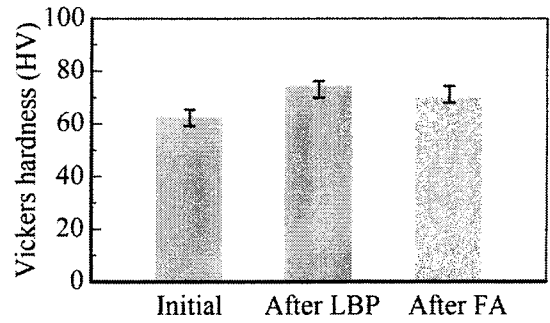


Fig. 5 Vickers hardness at initial, after LBP, and after FA.

が増加したが、最終焼鈍後は、ほぼ初期状態近くまで硬さを低下させることができた。すなわち、変形双晶を局部的に残存させたまま、加工硬化の影響を低減させることが可能となった。

#### 異方性を有する AZ31 マグネシウム合金薄肉金属円管のチューブエンドフレア試験による円周方向応力-ひずみ関係の逆推定

薄肉円管における選択領域の力学的性質を評価する手法として、AZ31 マグネシウム合金薄肉円管素材における軸方向と円周方向の塑性異方性に着目し、円錐工具を用いたチューブエンドフレア試験によって、円管素材円周方向の力学的性質を評価する手法について検討を行った。まず、AZ31 マグネシウム合金薄肉円管の軸方向の力学的性質を明らかにするために、単軸引張り試験を実施した。一方、リング圧縮試験と有限要素法解析を用いて、チューブエンドフレア試験時の摩擦係数を算出した。チ

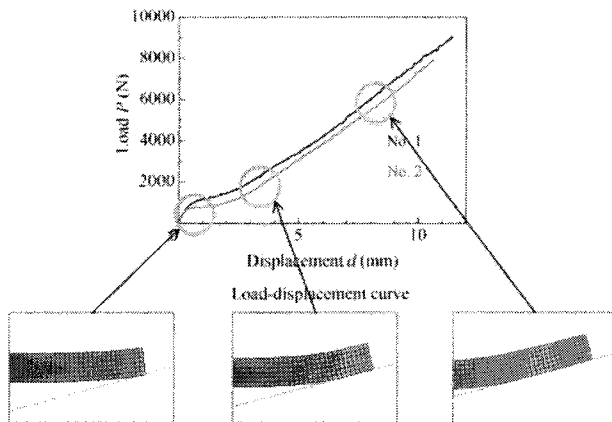


Fig. 6 Load-displacement curves in tube-end flaring tests by using conical tool having tip angle of 20 degrees.

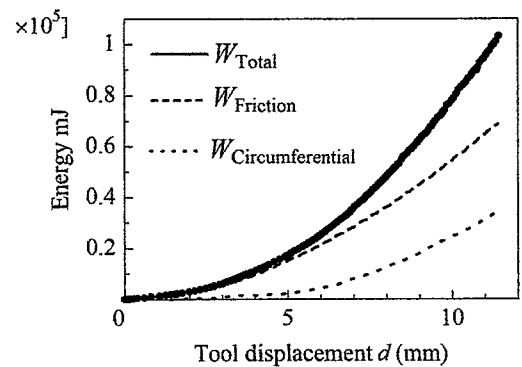


Fig. 7 Energy-displacement curves in tube-end flaring test.

ユーブエンドフレア試験における変形過程 (Fig. 6) を考慮すると、曲げ変形が主変形である第 1 段階、工具荷重増分が増加する第 2 段階、工具荷重増分がほぼ一定となる第 3 段階に分けることができる。有限要素法によるシミュレーション解析結果を援用し、Fig. 7 に示すように、実験で得られた工具全エネルギーから、初期の曲げエネルギー、弾性変形エネルギー、摩擦エネルギーなどを個別評価して差し引くことにより、円周方向変形に要したエネルギーを算出することができた。本手法は、ステントのような極めて小さい直径を有する薄肉円管材に対しても適用可能である。

以上、本研究では AZ31 マグネシウム合金薄肉円管材の局所選択領域における力学的性質を、変形双晶を援用することにより制御する手法について総合的に調べ、それが可能であることを証明した。本論文内で示した結果は円管軸方向に長い局所領域へ適用したものに限定されているが、開発した手法はそれ以外の選択領域に対しても適用可能であり、将来的に各種製品へのマグネシウム合金の最適利用に寄与することが期待される。

発 表 論 文 :

学術論文 (査読有)

- [1] 趙 薪茗, 清水一郎, 後 公大, 和田 晃, 北川陽菜, 中井賢治: AZ31 マグネシウム合金薄肉円管における変形双晶を援用した局所力学的性質制御の試み, 実験力学, 20 巻 2 号, pp. 131-138 (2020 年 6 月).
- [2] Haruna Kitagawa, Ichiro Shimizu, Akira Wada, Tatsuyuki Nakatani, **Xinming Zhao** and Takashi Tamura: *Finite Element Study on Influence of Stent Deployment upon Mechanical Response of Coronary Artery*, *Advanced Experimental Mechanics*, Vol. 5, pp. 128-134 (2020-8).

国際会議 Proceedings (査読有)

- [1] **Xinming Zhao**, Ichiro Shimizu and Akira Wada: *Experimental Study on Mechanical Property Control in Local Area of AZ31 Magnesium Alloy Thin-Walled Circular Tube*, Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Kaohsiung, Taiwan, (2018-10-31), Paper No. F05055 in USB, 4 pages.
- [2] Haruna Kitagawa, Ichiro Shimizu, Akira Wada, Tatsuyuki Nakatani, **Xinming Zhao** and Takashi Tamura: *Influence of Stent Deployment on Mechanical Response of Coronary Artery*, Proceedings of the 14th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Tsukuba, Japan, (2019-11-2), Paper No. FL374 in USB, 4 pages.

## 審査結果の要旨

本研究は、実用金属中で最軽量であり、工業製品や医療機器に利用が期待されているものの、最密六方結晶構造のため延性に乏しいマグネシウム合金を対象とし、結晶方位に対して特定方向に負荷を受けた際に活動する変形双晶を援用することによって、用途に応じて領域選択的に異なる力学的性質を付与することを目指して行われたものである。

当該目的のためにまず、マグネシウム合金の特徴と力学的性質、マグネシウム合金の組織制御に関する研究事例と課題を調べるところから開始された。続いて、AZ31 マグネシウム合金押し出し丸棒材を対象とし、底面集合組織が力学的性質や成形性に影響を及ぼすことに着目して、熱処理と局所圧縮変形を組み合わせることにより、マグネシウム合金の集合組織を領域選択的に制御する方法について、有限要素法解析を組み合わせながら基礎的検討が行われた。その結果、比較的小さな圧縮塑性ひずみであっても、集合組織や変形双晶の活動に起因して最密六方晶の配向度が変化することが見出された。

次に、負荷反転が変形双晶活動ひいては力学的性質に及ぼす影響を明らかにするため、塑性異方性を有する AZ31 マグネシウム合金丸棒材に対して単軸負荷反転試験を行い、前段階の変形における予ひずみや応力状態が、後続変形における応力-ひずみ関係や破断条件に及ぼす影響が調べられた。得られた結果から、集合組織と前段階変形時の負荷方向の関係によって変形双晶の活動が影響を受け、力学的性質が変化することが確かめられた。

以上の基礎的検討結果を踏まえ、AZ31 マグネシウム合金薄肉円管材に対して、局所領域を張出し変形させた後、反転負荷によって元形状に戻すことにより、領域選択的に異なる力学的性質を与える手法と、それに必要な装置類が開発された。実際に2種類の薄肉円管材に適用し、適切な条件の熱処理と組み合わせることによって、当初の目的であった選択領域に異なる力学的性質の付与が可能であることが明らかにされた。加えて、開発手法によって製造した薄肉円管の力学的性質評価法のひとつとして、円錐工具を用いたチューブエンドフレア試験により円管素材円周方向の力学的性質を評価する手法についても検討が行われ、その手順が構築された。

これらの研究成果をまとめた学位論文について、令和3年2月4日に公聴会を開催し、その後学位論文最終審査を行った。学位授与の方針にしたがって詳細に審査した結果、本審査委員会は、委員全員の一致にて、上述した一連の研究は十分な情報収集と詳細な検討に沿って行われており、得られた研究成果は将来的に工業分野においてその貢献が期待されるとの結論に至った。

以上、本審査委員会は、本論文審査および公聴会における最終審査結果に基づき、本学位論文の提出者である趙薪茗は博士（工学）の学位を授与されるにふさわしいと認める。