

京都大学	博士 (工学)	氏名	蘭 小東
論文題目	Effects of grain size and Mg contents on deformation behavior and strengthening mechanisms in Al-Mg alloys (Al-Mg 合金の変形挙動に及ぼす結晶粒径および Mg 量の影響とその変形機構)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、アルミニウム-マグネシウム (Al-Mg) 合金の機械的性質に及ぼす結晶粒径と Mg 量の影響を系統的に調査し、同合金が引張変形中に示す特異な不均一変形挙動 (セレーション挙動) とともに、合金の強化機構を実験的に調査・議論した研究成果を取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。Al-Mg 合金は、Mg の固溶強化により高強度を達成した非熱処理型アルミニウム合金であり、軽量化を通じた燃費向上と温暖化ガス排出量削減が重要な課題となっている航空機産業や自動車産業などにおける軽量構造材料として重要度が増している。Al-Mg 合金の更なる改良と社会実装の拡大のためには、その力学特性、特に同合金系が示す優れた加工硬化特性の基礎的理解が重要である。近年、金属材料一般においてその平均結晶粒径を <math>1 \mu\text{m}</math> 以下に超微細化することが可能となっているが、Al-Mg 合金における結晶粒超微細化例は限られている。また合金の Mg 量を増すことによってさらなる高強度が期待されるが、Mg 量の変化に伴う力学特性の変化をその機構とともに調べた研究例は少ない。そこで本研究では、Al-Mg 合金の力学特性に及ぼす結晶粒超微細化および Mg 添加量の影響を実験的に調査し、Al-Mg 合金の力学特性を特に加工硬化挙動に着目して明らかにすることを第一の目的としている。また Al-Mg 合金は引張変形により得られる応力-ひずみ曲線上にセレーションと呼ばれる鋸歯状の応力変動が現れることがよく知られており、これが優れた加工硬化特性と関係していると考えられているが、その詳細は必ずしも明らかになっていない。本研究では、Al-Mg 合金におけるセレーションの特徴を先端的な実験解析方法により調べ、力学特性、特に加工硬化特性に及ぼす影響についても明らかにすることを目的としている。</p> <p>第2章では、Al-Mg 合金の機械的性質に及ぼす結晶粒径と Mg 量の影響を系統的に調査している。High Pressure Torsion (HPT) 法による巨大ひずみ加工を加えたのちに焼鈍を施すことにより、平均結晶粒径 <math>0.35 \mu\text{m}</math> ~ 数十 <math>\mu\text{m}</math> の完全再結晶組織を有する試料を Al-2.5Mg (mass%) ~ Al-10Mg 合金において作製することに成功した。これらの室温引張試験を行い、種々の Mg 量および平均粒径を有する Al-Mg 合金の応力-ひずみ関係を系統的に取得している。その結果、結晶粒超微細化に伴い降伏挙動が連続降伏から降伏点降下と Lüders 変形を伴う不連続降伏に変化するが、不連続降伏が現れる臨界粒径は Mg 量の増加とともに大きくなること、またセレーションの程度や形態も Mg 量および結晶粒径により変化することを見出した。得られた降伏応力および変形応力を平均粒径の-1/2 乗に対してプロットしたところ、いずれも Hall-Petch 関係を満たしていたが、Mg 量の増加とともに Hall-Petch 曲線の切片 (摩擦応力) および傾きが増大することを明らかにした。摩擦応力が Mg 量の増加とともに単調に増大するのに対し、Hall-Petch 曲線の傾きはある Mg 量以上ではほぼ一定となることを見出し、これは Mg の粒界偏析量の飽和と対応していることを示した。</p>			

第3章では、平均粒径を約  $10\mu\text{m}$  に統一した試料の力学特性を比較することにより、固溶 Mg 量が力学特性に及ぼす影響を調査している。応力-ひずみ曲線の解析より、Mg 量の増加とともに加工硬化が増大し、高強度と高延性が両立できることが前章から明らかになっており、本章では特に加工硬化に及ぼす Mg 量の影響に焦点を絞っている。放射光 X 線回折による引張変形中その場回折により転位密度を定量化し、Mg 固溶量の増加とともに転位密度が増大していることを確認した。こうした変化は加工硬化率の増大とよく対応していた。引張変形材においては、固溶 Mg 量の増加とともに波状のすべり線が観察されなくなった。また変形材を TEM 観察したところ、Mg 量の増大とともに転位組織がセル状組織から平面的組織に変化することを見出し、Mg 量の増大とともに交差すべりが抑制されていることを明らかにしている。Mg 量の増加とともに交差すべりが抑制され加工硬化が促進される理由として、転位-溶質 (Mg 原子) 相互作用により直線的転位が形成されにくくなっていることとともに、溶質原子間相互作用が転位運動に与える影響も考慮した議論を展開している。

第4章では、セレーション挙動と加工硬化の関係に着目し研究を行なっている。引張変形中のデジタル画像相関法を用いた局所ひずみ解析により、引張試験片の平行部には PLC (Portevin-Le Chatelier) 帯と呼ばれる不均一変形帯の生成、伝播、消滅が繰り返し生じることを見出した。PLC 帯とセレーションの関係を対応づけ、セレーションの程度および PLC 帯内のひずみの集中度が粒径と固溶 Mg 量に影響を受けることを明らかにし、転位芯近傍の Mg 原子の cross-core diffusion モデルをもとにセレーションの発現機構と加工硬化への影響に関する議論を行なっている。

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。

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、Mg の固溶強化により高強度を達成した非熱処理型アルミニウム合金であり、輸送機器や構造物の軽量化の要求が増す中、注目度の高まっているアルミニウム-マグネシウム (Al-Mg) 合金の機械的性質に及ぼす結晶粒径と Mg 量の影響を系統的に調査し、同合金の強化機構を実験的に調査・議論した研究の結果を取りまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. High Pressure Torsion (HPT) 法による巨大ひずみ加工を加えたのちに焼鈍を施すことにより、平均結晶粒径  $0.35 \mu\text{m}$  ~ 数十  $\mu\text{m}$  の完全再結晶組織を有する試料を Al-2.5Mg ~ Al-10Mg (mass%) 合金において作製することに成功し、室温における応力-ひずみ関係を系統的に明らかにした。結晶粒微細化に伴い降伏挙動が大きく変化すること、降伏応力および変形応力は Hall-Petch 関係を満たすが、摩擦応力および Hall-Petch 関係の傾きが Mg 量の増大とともに異なる変化を示すことを明らかにし、その原因を議論した。
2. 平均粒径を統一した種々の Mg 量の変形特性を調べ、固溶 Mg 量が機械的性質に及ぼす影響を明らかにした。放射光 X 線回折による引張変形中その場回折により転位密度を定量化し、Mg 固溶量の増加とともに転位密度が増大していることを確認した。すべり線および変形組織の投下電子顕微鏡観察などにより、Mg 量の増大とともに交差すべりが抑制されていることを明らかにした。Mg 量の増加とともに交差すべりが抑制され加工硬化が促進される理由として、転位-溶質 (Mg 原子) 相互作用および溶質-溶質相互作用を元に考察を行った。
3. 引張変形中のデジタル画像相関法を用いた局所ひずみ解析により、引張試験片の平行部には PLC (Portevin-Le Chatelier) 帯と呼ばれる不均一変形帯の生成、伝播、消滅が繰り返し生じることを見出した。PLC 帯とセレーシヨンの関係に対応づけ、セレーシヨンの程度および PLC 帯内のひずみの集中度が粒径と固溶 Mg 量に影響を受けることを明らかにした。転位芯近傍の Mg 原子の cross-core diffusion モデルをもとにセレーシヨンの発現機構と加工硬化への影響を説明した。

以上の成果をまとめた本論文は、軽量構造材料として重要な Al-Mg 合金の変形挙動に及ぼす結晶粒超微細化の影響と固溶 Mg 量の影響を系統的に明らかにしている。本研究により得られた知見は、Al-Mg 合金における加工硬化の基礎的理解の深化に寄与するものであり、学術上および実用上も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 3 年 2 月 18 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、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 6 年 3 月 22 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。