

別紙様式 2

学位論文要旨

所属専攻 産業創造工学 専攻

氏 名 白石 一馬

論文題名

LPSO 型 Mg-Zn-Y 合金鑄造材のための結晶塑性解析手法の構築および除荷時の非線形挙動の発現機構解明

要 旨

現代社会の経済維持や利便性維持のために輸送機器は不可欠だが、環境保護や経済的観点から、輸送機器の軽量化による燃費向上が求められている。マグネシウム (Mg) 合金は最軽量の实用金属であり、中でも長周期積層 (LPSO) 構造を有する LPSO 相を含む Mg 合金 (LPSO 型 Mg 合金) は優れた機械的特性と良好な耐熱性を示すことから多岐用途への適用可能性を持つ。LPSO 型 Mg 合金の普及促進のためには、効率的な製品開発を可能にする力学解析手法の開発が有効である。そこで本研究では、LPSO 型 Mg-Zn-Y 合金鑄造材のための結晶塑性解析手法の構築を目的とした研究を実施すると共に、除荷時の非線形挙動に適用することでその発現機構を解明した。

本論文は全 6 章から構成されており、以下にその概略を記す。

第 1 章「序論」では、Mg 合金の特徴と合金開発の歴史、LPSO 型 Mg 合金の研究動向を俯瞰するとともに、LPSO 型 Mg 合金鑄造材のための結晶塑性解析手法を構築する意義と除荷時の非線形挙動の理解および発現機構解明の意義を述べた。先行研究において、LPSO 相の支配的変形機構は底面すべり系  $(0001)\langle 11\bar{2}0 \rangle$  であり、特異な結晶構造に由来して最密六方 (HCP) 構造を持つ Mg 合金で頻繁に観察される引張変形双晶系  $\{10\bar{1}2\}\langle 10\bar{1}1 \rangle$  に相当する変形双晶系の活動が起こらないなど、LPSO 相は強い塑性異方性を持つことが明らかとなっている。その他 LPSO 相と LPSO 型 Mg 合金の力学特性の理解に向けた研究が多数行われてきたが、出発材料となる初期ランダム結晶方位を持つ多結晶鑄造材の変形挙動に関する研究は少なく、理解は不十分である。中でも負荷方向変化を伴う変形挙動の理解は、複雑負荷後の形状予測を実現するために必須である。商用 Mg 合金では底面すべり系や引張変形双晶系が活動することで、除荷時の非線形挙動が発現することが知られており、LPSO 型 Mg 合金においても除荷時の非線形挙動の理解と発現機構の解明が求められる。また、LPSO

相単結晶の変形挙動に関する数値解析が多数報告されている一方で、LPSO 相多結晶体や LPSO 型 Mg 合金の変形挙動を対象とする報告はほとんどなく、普及を促進し得る変形挙動の再現が可能な力学解析手法は、未だ構築されていない。そこで本研究では LPSO 型 Mg-Zn-Y 合金鑄造材のための結晶塑性解析手法の構築を主な目的とした。目的遂行のためには、様々な変形挙動の理解が不可欠であることから、LPSO 型 Mg-Zn-Y 合金鑄造材における除荷時の非線形挙動の実験的評価を実施するとともに、除荷時の非線形挙動に結晶塑性解析を適用した。

第 2 章「実験方法と結晶塑性解析手法」では、除荷時の非線形挙動を取得するための実験方法と使用した汎用的な結晶塑性解析手法の概略を解説した。本研究では、除荷時の非線形挙動に及ぼす LPSO 相の影響を評価するために、LPSO 相体積分率が異なる 6 種の LPSO 型 Mg-Zn-Y 合金鑄造材を使用した。鑄造材は、各純金属を高周波誘導溶解することで溶製した。所定の形状に加工した試験片を繰返し圧縮 - 除荷試験に供することで、除荷開始応力が異なる除荷時の変形挙動を取得した。結晶塑性解析手法は結晶塑性理論、つまり単結晶の塑性変形をすべりにより表現する理論、を導入した力学解析手法を意味する。結晶塑性理論の中でも発展的なものは、すべりに伴う転位の運動と蓄積の影響を表現できるが、本研究では除荷時の非線形挙動をすべり系活動と粒間/粒内不均一変形の観点から評価するために、標準の結晶塑性理論を使用した。結晶塑性解析手法として、大変形理論に基づく有限要素法に結晶塑性理論を導入した結晶塑性有限要素法を用いた。

第 3 章「LPSO 型 Mg-Zn-Y 合金鑄造材のための結晶塑性解析手法の構築」では、構成相の変形挙動を再現するために各単相合金鑄造材の単調負荷挙動をモデル化した。結晶塑性有限要素法においては、導入変形機構と有限要素メッシュが解析結果を左右する。導入変形機構として、 $\alpha$ -Mg 相については商用 Mg 合金の先行研究と同様のもの、LPSO 相については底面すべり系と柱面すべり系を導入すべきことがわかった。また、LPSO 相単相合金鑄造材に関しては、考慮する結晶粒数の増加に伴い流動応力が増加する一方で、各結晶粒に割り当てる要素数が増加するほど、流動応力は減少する傾向が明確なことを明らかにした。 $\alpha$ -Mg/LPSO 二相合金鑄造材のモデル化への試みとして、各単相合金鑄造材で決定した材料定数を用いた単調負荷解析を実施すると共に、LPSO 型 Mg-Zn-Y 合金鑄造材における、 $\alpha$ -Mg 相の不均一変形に及ぼす LPSO 相の影響を検討した。平均相当ひずみを用いて不均一変形度を評価したところ、LPSO 相体積分率の増加に伴い、 $\alpha$ -Mg 相への平均相当ひずみ集中が起こることがわかった。さらに  $\alpha$ -Mg 相における  $\langle c+a \rangle$  方向にすべることができる変形機構活動を抑制することで、上述の  $\alpha$ -Mg 相への相当ひずみの集中は、 $\alpha$ -Mg 相の塑性異方性に依存することが示唆された。これより、LPSO 相と比較して  $\alpha$ -Mg の方が相対的に等方的な塑性変形が可能であるために、LPSO 相体積分率増加に伴う  $\alpha$ -Mg 相への変形集中が生じると考えられる。

第 4 章「LPSO 型 Mg-Zn-Y 合金鑄造材における除荷時の非線形挙動の実験的・数値的評価」では、除荷時の非線形挙動に及ぼす LPSO 相の影響を実験的評価より明らかにした。ま

た、各単相合金鑄造材、特に LPSO 相単相合金鑄造材における除荷時の非線形挙動に結晶塑性解析手法を適用することで、手法の改良を行なうとともに、除荷時の非線形挙動の発現機構を解明した。実験結果より、LPSO 相体積分率に因らず全ての対象合金で除荷時の非線形挙動が確認された。実際の除荷完了点と線形除荷が生じた場合の除荷完了点のひずみ差と定義する非線形除荷ひずみを用いて、除荷時の非線形挙動の著しさを評価したところ、非線形除荷ひずみは除荷開始応力の絶対値の増加に伴い増加し、同じ除荷開始応力では LPSO 相体積分率の増加に伴い非線形除荷ひずみは増加することがわかった。除荷時の非線形挙動を左右する巨視的因子を検討・評価した結果、LPSO 相体積分率が高い合金ほど除荷中の線形弾性領域が小さく、除荷中の瞬間の傾きの変化がより急になることで、除荷時の非線形挙動が著しくなることが明らかとなった。第 3 章で構築した結晶塑性解析手法を改良するために、単相合金鑄造材における除荷時の非線形挙動の定量的再現を実施した。解析結果に基づく数値的評価の結果、LPSO 相単相合金鑄造材における除荷時の非線形挙動の主な発現機構は底面すべり系の活動であることが示唆された。すなわち、除荷開始までの圧縮負荷中に形成する不均一な応力場に由来して、除荷中であるにもかかわらず、局所的に巨視的負荷とは反対符号の引張負荷を受ける結晶粒で底面すべり系が活動することで、除荷時の非線形挙動はあらわれる。不均一な応力場が形成したのは、鑄造材における底面すべり系の Schmid factor のばらつきが非常に大きいことに起因する。更なる数値的検討として、すべり系の Schmid factor の分布が除荷時の非線形挙動に及ぼす影響を評価した。その結果、LPSO 相が持つ底面すべり系が支配的という強い塑性異方性は、加工硬化率が非常に低く、すべり抵抗値がほぼ変化しない場合でも、負荷中の巨視的応力の急激な増加を導くことが明らかとなった。これより、圧縮中に著しく不均一な応力場が生成するとともに、加工硬化に伴う除荷中の線形弾性領域の大きさがあまり増加しないことで、LPSO 相単相合金鑄造材の除荷時の非線形挙動は強化されたと示唆される。

第 5 章「除荷時の非線形挙動に及ぼす粒内不均一変形の影響に関する数値的検討」では、第 4 章では理解が困難であった粒内不均一変形のみが生じる場合でも、除荷時の非線形挙動があらわれることを明らかにした。結晶塑性解析に際しては、各結晶粒と全体の挙動の関係が理解しやすい双結晶モデルを使用した。単一の底面すべり系が支配的となるような初期結晶方位を与えた複数のモデルの解析結果より、非対称傾角粒界を持つモデルと対称傾角粒界を持つモデルにおいて、除荷時の非線形挙動があらわれる可能性が示された。それらモデルで生じた不均一変形を評価したところ、非対称傾角粒界を持つモデルにおける除荷時の非線形挙動は、結晶粒間の底面すべり系の Schmid factor の違いによる粒間不均一性に起因してあらわれたと言える。一方、対称傾角粒界を持つモデルにおける除荷時の非線形挙動は、粒内不均一性に起因してあらわれることがわかった。これは、境界条件と結晶粒界を維持するための変形拘束が存在することで生じた不均一性である。これより、粒間不均一性と粒内不均一性の双方が除荷時の非線形挙動の発現要因になり得ることがわかった。

第6章「総括」では、各章で得られた結果を要約して示した。

以上、LPSO型Mg-Zn-Y合金鋳造材のための結晶塑性解析手法の改良および除荷時の非線形挙動の発現機構解明を目的とした数値的評価を行うことで、LPSO相単相合金鋳造材における除荷時の非線形挙動を再現可能な結晶塑性解析手法が構築された。また、LPSO相の強い塑性異方性が、負荷中の顕著な粒間応力差の発達とすべり活動によって生じる除荷時の非線形挙動を顕著化することが明らかとなった。