

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01691

研究課題名（和文）TRIP/TWIP相乗効果を伴う 型Mg合金による超高強度・高延性化

研究課題名（英文）High-strength and high-ductility BCC Mg alloys with synergistic effect of TRIP and TWIP

研究代表者

安藤 大輔（Ando, Daisuke）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50615820

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：様々な添加濃度の2元系Mg-Sc合金及び、d軌道レベルによる相安定性・主たる変形機構の遷移を予想して3元系Mg-Sc-X合金を検討したが、変形双晶支配となる合金の創製には至らなかった。一方で、変形誘起マルテンサイト変態によるTRIP効果を発現する2元系Mg-Sc合金及び3元系Mg-Sc-X合金を創製することには至った。特に、XにRE（レアアース）元素を選択した合金においては、過去に報告されているいずれのMg基合金と比較しても、最も高い強度・延性バランスを有していることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マグネシウム合金はその軽量さからモバイル電子機器の筐体に用いられている。本研究では、マグネシウム合金の使用用途を広げるために、その強度・延性バランスを向上させる試みを、過去にマグネシウム基では報告例がない（結晶）相変態を用いて実現することを試みた。この成果により、高強度・高延性なMg合金を創製ことができ、この合金は航空宇宙産業や医療用途向けの材料として期待できる。

研究成果の概要（英文）：Binary Mg-Sc alloys and ternary Mg-Sc-X alloys were investigated using prediction of the transition of phase stability and main deformation mechanism at the d-orbital level method. However, we were not able to create a deformation twinning dominant alloy. On the other hand, we have succeeded in creating binary Mg-Sc alloys and ternary Mg-Sc-X alloys that exhibit the TRIP effect due to deformation-induced martensitic transformation. In particular, the alloy with RE (rare earth) element selected as X has the highest strength and ductility balance compared with any of the previously reported Mg-based alloys.

研究分野：材料組織学

キーワード：マグネシウム スカンジウム 相変態 マルテンサイト 超弾性 TRIP TWIP

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

Mg合金はその軽量性からモバイル電子機器の筐体に用いられ、今後は自動車や鉄道、航空機の部品への応用が期待される。しかし、Mg合金において強度・延性を改善する手法は、HCP構造を有する主相に対して固溶あるいは析出を利用する方法に限定され、HCP固有の変形異方性のため加工性が著しく悪く、構造材料としてAl合金並の特性を得ることは困難である[1]。これは、近年注目されているMg-TM-RE(TM;遷移金属、RE;希土類金属)合金においても同様である。Mg-TM-RE合金は、長周期積層構造(LPSO)相を析出させ、押出方向の引張降伏強度が450MPaと高強度になると報告されている[2]。しかし、LPSO相といえどもHCP構造が基本の析出相なため、延性には異方性があり、最も延性のある押出方向でも8%程度という問題がある。このように、主相の選択肢としてHCP単相しかないことが、Mg合金の根本的問題である。Ti合金のように、BCC単相やBCC/HCP二相組織を有し、加工熱処理によって種々の組織を持った高強度・高延性Mg合金を得ることは長年の夢であった。この観点において、Mg-Li合金は唯一、BCC相を取り入れることで、室温でも延性に優れ、等方変形ができ、200で超塑性を発現するなど興味深い結果が得られている[3]。これまで、Mg-Li合金は低強度・低耐食性が問題視されてきたが、Mg-11wt%Li-3wt%Al-0.6wt%Y-0.2wt%ZrのBCC単相合金が結晶粒の極微細化により引張強度250MPa、引張伸び25%を有し、かつ高耐食性を示すことが報告[4]され、MgにおけるBCC相の利用が近年注目を集め始めている。

しかし、Mg-Li合金においてHCP/BCC相の分量はLi添加量でしか制御することが出来ない。一方、Mg基で唯一、Mg-Sc合金だけがSc添加量だけでなく、同組成において高温相のBCC相と低温相のHCP相を利用した熱処理によって組織制御できる合金であることに注目して、独自に研究を進めてきた。その結果、Mg-Sc合金はTi合金のように加工熱処理によって種々の組織を有して高強度・高延性を両立できること[Mater. Sci. Eng. A670 (2016), 335-341.]、時効熱処理によってBCC相中にHCP相を極微細に析出させることでMg基では報告例がないレベルでの超高硬度化すること[Materials Letters 161 (2015), 5-8]を示した。そして、Mg基合金は母相が柔らかいのでマルテンサイト変態は生じないというのが専門家の定説であったが、それを覆してMg基において世界で初めてマルテンサイト変態が生じ、超弾性・形状記憶特性を発現すること[Science,353(2016),368-370.](図1, 2)を報告した。

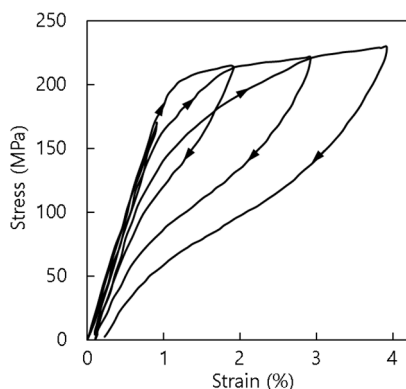


図1 Mg-20.5at%Sc合金の  
マイナス150 下での超弾性特性

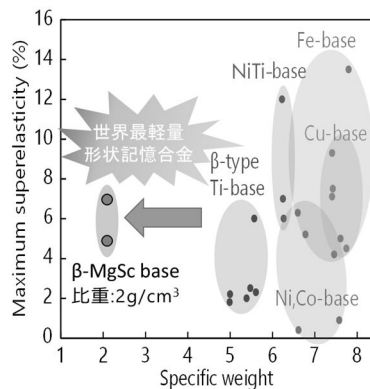


図2 Mg-Sc合金と種々の超弾性合金の  
超弾性回復ひずみと比重の関係

この研究過程において、塑性変形中に準安定 BCC 相( )が徐々に斜方晶の Orthorhombic 相( )、hcp相( )へと変態する TRIP 効果や変形誘起オメガ相( )変態も生じている可能性を示唆する結果も得られている。この傾向は BCC を有する Ti-Mo 合金において、BCC 相の安定性を制御することで、塑性変形機構が、すべり変形支配から変形双晶支配、応力誘起マルテンサイト変態支配へと遷移する事象と酷似している。この傾向は森永らが提唱する Ti と添加する金属との結合次数と d 軌道レベルを用いてよく整理されており、BCC 相内で {332} <113> 双晶の形成と応力誘起マルテンサイト変態とが競合的に生じうる組成領域で TRIP/TWIP 相乗効果を示す準安定 型合金の開発[2,3,4]がなされている。

独自に開発した Mg-Sc 合金でも、同様に 相の安定性を Sc 添加量、第三元素添加で制御出来れば、TRIP/TWIP 相乗効果により現行の Mg 合金開発では到達しえなかったレベルでの高強度・高延性化しうる準安定 型 Mg 合金を創製できないだろうかという着想に至った。

[1] Barnett, M. R.: Materials Science and Engineering A, 464 (2007), 1-7.

[2] Y. Kawamura et al.: Magnesium Technology (2005), 499-502.

[3] R. Z. Wu et al.: Rev. Adv. Mater. Sci. 24 (2010)35-43.

[4] W. Xu et al, Nature Material, 14 (2015), 1229-1236.

[5] J. Y. Zhang et al.: Journal of Alloys and Compounds, 699 (2017), 775-782.

## 2. 研究の目的

本研究では 相の安定性を制御することにより、室温超弾性特性の向上を図ることならびに変形双晶支配の Mg-Sc 合金を創製し、生じる変形双晶のタイプを特定すること、さらに、変形双晶と変形誘起マルテンサイト変態とが競合する組成領域において、TRIP/TWIP 相乗効果が生じるかを複雑な複合変形組織をその場観察用応力負荷装置を用いて詳細に観察することで、その現象を理解して、準安定型 Mg 合金の更なる超高強度・高延性化を目指した組成制御に関する材料学的指針を確立することを目的とした。

## 3. 研究の方法

原材料として Mg-(15~30)wt.%Sc 母合金を中国企業オリエンタルスカンジウムに溶解・ casting してもらったものを用いた。この母合金と純マグネシウムおよび第三元素の純物質を所望の組成になるように加えて、He 雰囲気下で高周波溶解炉を用いて再溶解し、SUS340 製鋳型に流し込んで鋳造材を得た。その後、鋳造材を 600 で 24 時間焼鈍し、同様に鋳造材を 600 で 15 分予加熱した後に熱間ロールで圧下率 10-20% の圧延を施した。得られた圧延板に、異常粒成長法にて粗大な結晶粒を導入して、板厚に対して結晶粒が貫通するようなバンパー試料もしくは単結晶試料を作製して超弾性能ならびに変形機構の調査を行った。機械的特性評価には万能試験機を用い、変形組織観察には光学顕微鏡、走査電子顕微鏡、透過電子顕微鏡を用いた。また、結晶構造変化の分析には XRD を用いた。ここで、第三元素として加えた純物質は、Ag、Al、Cu、Li、Sn、Zr、Zn、Gd、Y などである。

## 4. 研究成果

d 軌道レベルによる相安定性・主たる変形機構の遷移を予想して様々な添加濃度の 2 元系 Mg-Sc 合金及び、3 元系 Mg-Sc-X 合金を検討したが、変形双晶支配となる合金の創製には至らなかった。一方で、変形誘起マルテンサイト変態による TRIP 効果を発現する 2 元系 Mg-Sc 合金及び 3 元系 Mg-Sc-X 合金を創製することには至った。特に、X に RE (レアアース) 元素を選択した合金においては、過去に報告されているいずれの Mg 基合金と比較しても、最も高い強度・延性バランスを有していることが明らかになった。

本研究成果は現在学術論文執筆中であり、かつ研究を担った学生の博士論文に記載される予定であるために公表を差し控えており、2024 年 3 月 31 日までに再提出を行うために詳細は割愛する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 山岸奎佑, 安藤大輔, 須藤祐司, 小池淳一
2. 発表標題 粒径制御によるMg-Sc二元系合金の室温超弾性特性の向上
3. 学会等名 一般社団法人 軽金属学会第 136 回春期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Yamagishi, Daisuke Ando, Yuji Sutou, Junichi Koike
2. 発表標題 Superelastic property of Mg-Sc binary alloys at room temperature
3. 学会等名 The 10th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富田航平, 安藤大輔, 須藤祐司, 小池淳一
2. 発表標題 Al4Ba型構造の金属間化合物を含有するAl-X合金の機械的特性及び構造変態
3. 学会等名 公益社団法人 日本金属学会 第165回 秋期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山岸奎佑, 安藤大輔, 須藤祐司
2. 発表標題 Mg-Sc合金の再結晶集合組織形成に及ぼす加工熱処理の影響
3. 学会等名 公益社団法人 日本金属学会 第165回 秋期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Ando, Keisuke Yamagishi, Yuji Sutou, Junichi Koike, Yukiko Ogawa
2. 発表標題 Age hardening effect and Superelasticity of Martensitic transformable Mg-Sc based alloys
3. 学会等名 The 10th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Ando, Yukiko Ogawa, Keisuke Yamagishi, Yuji Sutou, Junichi Koike
2. 発表標題 Phase trasformable Mg-Sc based alloy and its functionality
3. 学会等名 The 4th Russia-Japan International Semior on Advanced Materials MRC International symposium 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山岸奎佑, 小川由希子, 安藤大輔, 須藤祐司, 小池淳一
2. 発表標題 Mg-Sc合金のマルテンサイト変態および超弾性特性
3. 学会等名 SMAシンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安藤大輔
2. 発表標題 マグネシウム合金の変形機構解明 および新規合金開発
3. 学会等名 一般社団法人 軽金属学会第 135 回秋期大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山岸奎佑, 小川由希子, 安藤大輔, 須藤祐司, 小池淳一
2. 発表標題 Mg-Sc合金のマルテンサイト変態と超弾性特性
3. 学会等名 日本金属学会 第163回講演大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------