

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21912

研究課題名（和文）自動車エンジン用400MPa超級ウィドマンシュテッテン組織型Mg耐熱性合金の創製

研究課題名（英文）Development of Widmanstatten type heat resistant Magnesium alloys with over 400 MPa for automobile engine cylinder

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） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は車両重量1000kgf減に匹敵する燃費向上が望める自動車用エンジンシリンダーを400MPa超級ウィドマンシュテッテン組織型Mg耐熱合金の創製することで達成を目指し、Mg基合金では初めての試みである相変態を利用した高温強度向上のメカニズムを明らかにした。その結果、300℃下で良好な延性を示し、最大引張強度が430MPaとなる合金を創製し、元素添加により、300℃長時間熱処理にも耐える合金を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究成果により、300℃下でも400MPa超級の引張強度を持つ材料を創製できた。しかしながら、自動車用途に使用するにはスカンジウムは高価な添加元素である。そこで、航空宇宙産業での使用を念頭に今後の発展研究を続けていく。航空宇宙産業で使用することで、大幅な軽量化が望め、打ち上げコストや燃費向上に役立つと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, an automotive engine cylinder with improved fuel efficiency comparable to a 1000 kgf reduction in vehicle weight was achieved by creating a 400 MPa-grade Wiedmannstetten-type Mg heat-resistant alloy. At the same time, the mechanism of high-temperature strength improvement by using phase transformation, which is the first attempt in Mg-based alloys, was investigated. As a result, an alloy with good ductility at 300 °C and a maximum tensile strength of 430 MPa was created, and by adding elements, an alloy that can withstand prolonged heat treatment at 300 °C was developed.

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 耐熱材料 エンジンシリンダー ウィドマンシュテッテン

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

筆者はこれまでに Mg 基合金で世界初の『相変態』による金属組織制御法を提案し、室温の強度・延性バランスのとれた合金を報告してきた。また、同組成の Mg-Sc 合金において、『マルテンサイト変態 (bcc 相から orthorhombic 相)』が生じ、極低温で超弾性変形することを世界で初めて示した[Science 353 (2016)368-370.]。これは世界最軽量(2g/cm³)の形状記憶合金である。現在では、Sc 添加濃度を変えると様々な温度下でも超弾性すると分かっている。

その研究の過程で、本合金の準安定な bcc 相は時効熱処理すると orthorhombic 相を経て hcp 相へと変態し、ウィドマンシュテッテン組織(針状で幅 50nm 以下、長さ数百 nm 以下)になることを観察していた(図 1)。この時効材は室温下で 500MPa を超える高強度ながら、弾性域で破断してしまう。この組織において高温で延性が得られれば軽量耐熱材料として期待できる。さらにこの合金は『相変態』による組織制御強化法なので、鑄造材を一度 bcc 単相へと熱処理し、急冷、時効熱処理をするだけで報告値の機械特性が得られるというメリットもある。よって、これらの特性を利用して、現状の自動車エンジン用シリンダーの環境より高温の 300 °C 下で、400MPa 超級の耐熱性を鑄造材で成し得る Mg 基『超』合金の創製を目指した研究を行いたく研究を始めた。本研究の目標を達成することで、車両重量 1000kgf 減に匹敵する自動車燃費向上が望める。

筆者はこれまでに自動車部材を Mg 合金に置き換える研究を行ってきた。特に、室温でプレス成型が可能な Mg 合金薄板材の研究開発であった。その中で、筆者は車両構造部材の軽量化だけでなく、主運動系部品、例えばエンジンシリンダーの軽量化効果に注目するに至った。エンジン許容回転数が 9000rpm の時、ピストンには最大加速度 5000G が負荷される。つまり、ピストン重量の 5000 倍もの荷重がピストン支柱にかかるので、ピストンを 1g 軽量化すると、その荷重が 5000gf 軽減される。現在用いられる Al 合金製ピストン(350g)を Mg 合金製に置き換えると、比重差分で 126g の軽量化が可能で、630kgf の荷重軽減になると試算される。使用される車両構造部材をこれほどまで軽量化することは不可能であり、燃費向上への効果は絶大である。しかしながら、エンジンシリンダーが使用される 200 °C 以上の環境で要求される機械強度を持った Mg 合金は未だ開発されていない。唯一、日本発の新合金である LPSO 型 Mg 合金だけが高温強度・耐熱安定性が報告されているが、強度を発現させるためには熱間押出による強加工が必要であり、大型部材を製造するには課題を残したままである。

また、現状使用されている Al 合金の高温強度は 200 °C を超えると急激に落ちることが知られている(図 2)。それは析出物の粗大化、再結晶、結晶粒粗大化による。そのため自動車用エンジンシリンダーの設計耐熱性は 200 °C と規定されているが、この合金は 300 °C を超えても 360MPa 以上の最大引張強度を維持できるので、エンジンシリンダーの耐熱設計自体を変えて、より効率的にエンジンを回転させられる可能性もある。300 °C 下での比強度から換算すると、車両重量 1000kgf 減に匹敵する自動車の燃費向上が望めると考えている。

エンジンシリンダーは最高到達温度(200 °C)で 1000 時間を経ても、急激な強度低下を起こしてはいけない。本提案合金はすでにこの耐熱性を持っているが、申請者はさらに高温下(300 °C)での使用を目指したい。現状の合金は、300 °C で長時間加熱すると、析出相が徐々に大きくなり、次第に強度低下が生じてしまう。そこで、準安定の bcc 相には固溶するが、析出した hcp 相には固溶できない Ti や Zr を第三元素として添加することで、変態時に析出相界面に偏析され、析出相成長のピン止め効果を生じさせることで達成させたい。300 °C 以上の高温下で 1000 時間の熱処理でも機械強度変化が小さい Mg-Sc-X 合金を創出する研究計画である。

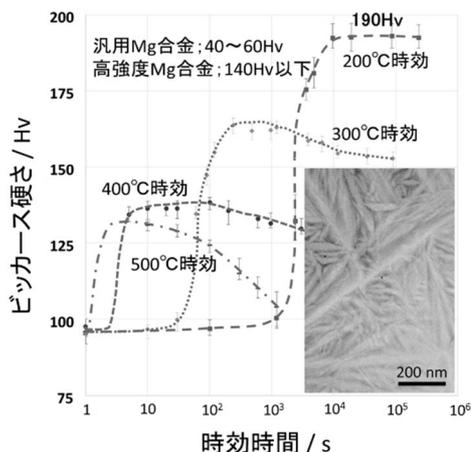


図 1 Mg-Sc 合金の時効熱処理によるウィドマンシュテッテン組織と硬さ

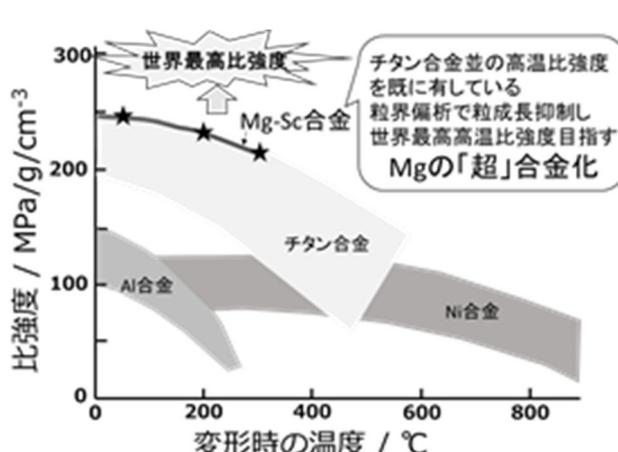


図 2 Mg-Sc 合金と様々な合金の比強度と変形温度の関係

2. 研究の目的

300 °Cで 400MPa 級の耐熱性 Mg 超合金の創製を目標に、相変態を利用した組織制御による手法を確立することを目的とする。

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・鋳造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 °Cで 24 時間焼鈍し、同様に鋳造材を 600 °C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ブー試料もしくは単結晶試料を作製し、時効熱処理による硬さ変化の調査を行った。更に、時効熱処理によって最高硬さが得られたサンプルを 300 °Cで保持した場合の硬さ変化も調査し、結晶粒径粗大化の観察結果と比較した。300 °Cでの機械的特性評価には恒温槽付き万能試験機を用い、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

BCC 型 Mg-Sc 基合金において時効析出により超微細に HCP 相をウィドマンシュテッテン状に組織にすると、室温では弾性域で破断するが、300 °C下で良好な延を示し、最大引張強度が 430MPa になることが分かった。これは現在使用されている耐熱 Al 合金の 3 倍以上であり、研究室レベルでの最新耐熱性 Mg 合金と比べても 2 倍以上強い(図 3)。さらに、第 3 元素として様々な金属元素を添加することで、さらなる高強度化、および熱的安定性を目指す研究を行った。その結果、Mg-Sc 合金に RE 元素、特に Sc 添加量を減らしてその分を Y 添加に置き換えた合金において、母相である BCC 相の強度・高度が上昇したことで、HCP 相をウィドマンシュテッテン状に析出させた試料では 2 元系合金を超える機械特性が得られた。また、Y は BCC 安定化元素であるので、Sc 添加量を低減できるだけでなく、析出した HCP 相の相成長も抑制できたことで耐熱性が向上した。

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。

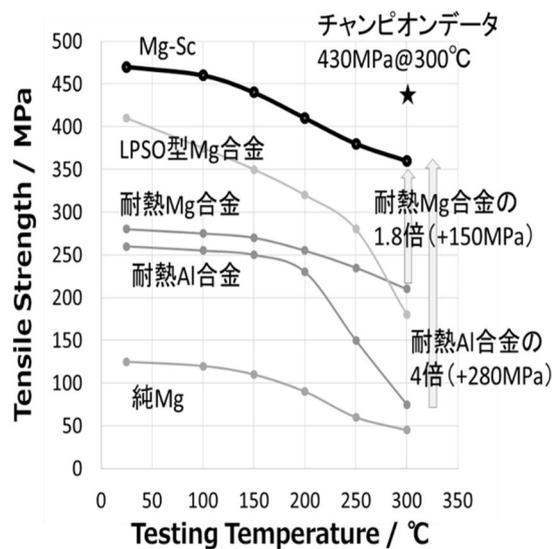


図 3 本合金の高温強度特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------