

称号及び氏名	博士（工学） 家永 裕一
学位授与の日付	平成 26 年 9 月 30 日
論文名	「自動車用ピストンに向けた長周期積層構造相で強化した耐熱マグネシウム合金の開発」
論文審査委員	主査 東 健司
	副査 森 茂生
	副査 中平 敦

論文要旨

昨今、燃費向上と炭酸ガス排出削減と同時に、単に人や荷物を輸送する道具ではなく、環境に配慮しつつも、気持ちの良い走りを両立できる自動車が望まれている。自動車の製造から廃車までに消費する全エネルギー量の 8 割以上が、走行時に消費されているので、車両の軽量化は、消費エネルギーの低減によるランニングコストの削減に有効な手段である。それ故、鉄鋼部材のアルミニウム合金化、さらにより軽量化なマグネシウム合金化が車体を中心に行われている。近年では、マグネシウム合金（ACM522、AE62-Ca 等）が 423～453 K 近辺の温度域で使用されるオイルパン、トランスミッションケース等エンジン周りの部品に適用され始めている。

他方、従来の車体等静止部品の静的軽量化効果から、主運動系部品（ピストン）の動的軽量化効果に関心が移ってきている。その理由は、条件によってはピストン 1 g の動的軽量化効果は車体 5,000 g の静的軽量化効果に相当するからである。そのため、より高温域（473 K 以上）で使用できる高強度耐熱マグネシウム合金の開発が必要とされている。過去において、英国 MEL 社で開発された WE54 は高温強度が高く、ピストン用途に期待されていたが、熱伝導度が低いため、運転時の膨張が大きく、シリンダーとのクリアランスが保てないという理由で、採用されていない。一方、長周期積層構造の強化相（LPSO 相； $Mg_{12}ZnY$ ）を有する高強度耐熱合金（Mg-Zn-Y）が開発され、ピストン用合金として期待されている。現在、この合金に関しては、 $\phi 50$ mm 程度の小型部材までの報告はあるが、約 $\phi 80$ mm 程度のピストンの実用サイズでの製造プロセス開発は報告さ

れていない。以上のことから、熱伝導度を確保して、実用サイズでのピストンの軽量高強度な耐熱マグネシウム合金が開発できれば、運動性能の向上による気持ちの良い走り
と燃費の向上を両立する自動車を開発することが可能となる。

本研究開発では、長周期積層構造を有する高強度耐熱マグネシウム合金の実用サイズでの製造プロセス開発を前提として、①現行鋳造品同等の低コストタイプの鋳造材と②ピストン重量で50%軽量化を可能とする高温高強度タイプの押出材の製造開発を目的とした。達成目標値は、低コストタイプとしては、473 Kでの0.2%耐力140 MPa以上、引張強さ220 MPa以上、疲労強度80 MPa以上、および高温高強度タイプとしては、473 Kでの0.2%耐力170 MPa以上、引張強さ300 MPa以上、疲労強度100 MPa以上、とした。また、473 Kでの熱伝導度の目標値は、100 W/m・K以上とした。

本論文は、次の6章から構成されている。

第1章では、自動車の軽量化による環境問題対策に対するマグネシウム合金への期待と現状を述べた。次に、燃費向上だけでなく慣性重量低減によるレスポンスアップ等、走りの楽しさも期待できるピストンへの適用を主目標に、その実用化のための課題を整理し、その対策法を示した。具体的には、473 Kを超える高温での使用に耐え得る具体的なマグネシウム素材として、長周期積層構造を有する軽量な高強度耐熱マグネシウム合金を取り上げ、その材料組織学的課題（鋳造時の凝固偏析や重力偏析等）等を明らかにした。さらに、既に提案されている高温変形に関する構成式を活用することで、本合金のピストン用素材としての高温での達成目標値の実現の可能性を検討した。また、コスト低減と素材大型化に対応できる回転凝固手法を基に、工業的に均質な大型の押出用インゴットの製法の可能性を検討した。最後に、本研究の背景、目的をまとめて記述した。

第2章では、本研究で行った実験方法について述べた。

第3章では、現行鋳造品同等の低コストタイプの高強度耐熱マグネシウム鋳造合金の開発を行った。良好な高温特性と熱伝導率が期待できるMg-Zn-Y系鋳造合金を基に、種々の添加元素と冷却速度を変えて、その鋳造組織形態の適正化を検討した結果、強度と延性を兼ね備えた耐熱マグネシウム合金、即ち $Mg_{95.8}Zn_2Y_2Zr_{0.2}$ 鋳造合金を開発することができた。Zr添加は、初晶をデンドライト状からセル状に変化させ、結晶粒を微細化させた。長周期積層構造の強化相の粒界被覆率を増加させることで、室温および高温での強度向上に貢献することを、また、延性を阻害する $Mg_3Zn_3Y_2$ 化合物相の粗大化を防止すること等を明らかにした。冷却速度の増加は、結晶粒径を10 μm 前後と微細化させ、強度向上の寄与度を高めることを明らかにした。また、 $Mg_{95.8}Zn_2Y_2Zr_{0.2}$ 鋳造合金の種々の機械的性質を詳細に調査した結果、この合金は、当初に設定した目標値を達成しており、473 K以上の高温でも非常に高い熱安定性を保ち、鋳造ままで耐熱アルミニウム合金同等以上の引張

り強度、疲労強度、クリープ特性を有することがわかった。例えば、523 Kでの引張強度は223 MPaであった。この値は、自動車のピストンにも使われる高強度アルミニウム合金A4032-T6材の2倍、573 Kでは約3倍である。但し、0.2 %耐力は、473 K以下では耐熱アルミニウム合金より低く、523 K以上の高温域で同等以上であることが示された。さらに、 $Mg_{95.8}Zn_2Y_2Zr_{0.2}$ 鋳造合金の高温での強化機構を、従来の構成式を活用することで、材料組織学的見地から検討した結果、本合金では固溶強化、粒界被覆率の寄与に比べ、高温域においてもホールペッチ則で表現できる結晶粒の微細化により強度が増加することも明らかにした。

物性面に関しては、比重はアルミニウム合金の70 %と低比重であった。また、部品化の課題のひとつである熱伝導度は、473Kで102 W/m・Kであり、商用マグネシウム合金を大きく上回り、商用アルミニウム合金に近い特性を示した。鋳造性についても、化合物強化した一般の耐熱合金で問題となる凝固収縮時の割れも広い温度条件範囲で発生がなく、湯流れ性も汎用合金AZ91Dと同等で良好な特性を示した。

$Mg_{95.8}Zn_2Y_2Zr_{0.2}$ 鋳造合金は、Zr添加による結晶粒径微細化効果により優れた機械的性質を有することが明らかにされたが、肉厚部品のように高い冷却速度を確保できない場合、Zr添加による結晶粒径微細化に起因した高強度化が期待できない。ここでは、室温から473 Kにおける0.2 %耐力の達成目標値（室温；140 MPa以上）の確保および更なる向上を目的として、粒界被覆率を増加させる可能性のある第4元素（Ni、La、Ba、Ag）を添加し、その機械的性質に及ぼす効果を検討した。その結果、1 at. %以上のAg添加が効果的であり、3 at. %添加合金では、伸びが1 %と低下するが、Mg-Zn-Y系合金と比べて60 %の強度増加を示した。また、Ag添加合金の高温域（473、523 K）の0.2 %耐力においても20 %前後の強度向上が確認された。

第4章では、高強度耐熱マグネシウム $Mg_{95.8}Zn_2Y_2Zr_{0.2}$ 鋳造合金を用いたピストン重量で50 %軽量化を可能とする押出材の製造開発を検討した。第一段として、押出用の大型インゴットの偏析を防ぐ、溶解・鋳造手法の最適化プロセスについて検討した。まず最初に実施した、水とワックスを用いた模擬試験での適正回転条件は、周速530 mm/s (30 rpm)、反転時間35sec.、リップ付きであることがわかった。この模擬試験結果を参考に、溶解・鋳造手法のプロセスを検討した結果、通常行われている溶解時の攪拌だけでなく、インゴットケース自体を回転させることで凝固終了まで攪拌可能とし、凝固初期に起こる重力偏析だけでなく、最終凝固部に起こる凝固偏析をも防止できることを明らかにした。具体的には、約200 KgのMg-Zn-Y系合金をAr雰囲気中で高周波溶解し、鋳造後、インゴットケース内で攪拌を行い、凝固完了後の鋳造組織、化学成分の均質性、インゴット各部位の機械的性質を調査した。攪拌を行わない通常のインゴットと比較した結果、大型

インゴットの均質性を証明することができた。攪拌は、鑄造組織の均質性維持のみならず、その結晶粒径微細化効果をも促進しており、大型鑄造での欠点である鑄造組織の粗大化に起因した強度低下の抑制にも効果的であることを明らかにした。

次に、第二段として、上記インゴットをφ100 mmの大型押出材に成形加工した素形材の機械的性質を調査した結果、当初の達成目標値である473 Kでの0.2 %耐力170 MPa、引張強さ300 MPa、疲労強度100 MPaを満足し、ピストン重量で50 %軽量化の可能性の見通しを得ることができた。473 K以上の高温域で顕著な強度低下を示すアルミニウム合金と比較した場合、本プロセスで製造した押出材は顕著な強度低下は示さない。例えば、0.2 %耐力は、室温から573 Kの全温度域において、A4032-T6材より高い値を示し、特に523 Kでの値(247 MPa)は、A4032の103 MPaと比べて2倍超の高強度を示した。また、疲労強度、衝撃、クリープ特性、熱安定性も耐熱アルミニウム合金と比較して、明らかな優位性を示した。構成式を活用して高温変形機構を検討した結果、押し出し後の高温強度の達成は、低い押し出し比により崩れなかったLPS0相のネットワーク構造の保持による高温強度低下の抑制に加え、化合物相の微細分散や異方性に起因した結果であると推察された。

第5章は、研究成果と今後の展開について記述した。

第6章は、総論として、本研究により得られた知見をまとめ、総括を行った。

本研究では、ピストン等の主運動系部品の、473 K以上の高温での使用に耐え得る軽量耐熱マグネシウム合金の実用サイズでの製造プロセス開発を目的に、凝固偏析や重力偏析等が発生し易い希土類金属含有の高強度耐熱マグネシウム合金において、回転凝固手法を基に工業的に均質な大型のインゴットの製法を世界に先駆け確立した開発研究である。さらに、 $Mg_{96}Zn_2Y_2$ 合金を基とした均質インゴットを用いて押し出し加工を行い、その押し出し合金の高い強度特性を明らかにし、達成目標値を満足するピストン部品を作製することができた。また、その強化機構を基に、一般には低強度と言われている本合金系の鑄造ままでの強度特性の強化を図った。ホールペッチ則の効果が高いマグネシウム合金の特性を生かすため、第4元素を添加し、結晶粒微細化を含めた組織制御を行うことにより、鑄造ままで耐熱アルミニウム合金同等の高温引張強度、高温疲労、クリープ特性を発現させ、かつ鑄造性の良い低コストな鑄造法への道を示すこともできた。これらの成果は、自動車等の耐熱部材の軽量化を考える際、塑性加工材、鑄造材ともに本合金系は有望な材料として期待できる。

審査結果の要旨

従来の車体等静止部品の静的軽量化効果から、主運動系部品（ピストン）の動的軽量化効果に関心が移ってきており、473 K以上の温度域で使用できる高強度耐熱マグネシウム合金の開発が必要とされている。長周期積層構造の強化相（LPSO相； $Mg_{12}ZnY$ ）を有する高強度耐熱合金（ $Mg-Zn-Y$ ）が開発され、ピストン用合金として期待されている。熱伝導度を確保して、実用サイズでのピストン用の軽量高強度な耐熱マグネシウム合金が開発できれば、運動性能と燃費を両立する自動車を開発することが可能となる。本研究では、実用サイズでの製造プロセス開発を前提として、現行鋳造品同等の低コストタイプの鋳造材と、ピストン重量で50%軽量化を可能とする高温高強度タイプの押出材の製造開発を目的とした。素形材の達成目標値は、低コストタイプでは、473 Kでの0.2%耐力140 MPa以上、引張強さ220 MPa以上、疲労強度80 MPa以上、また、高温高強度タイプとしては、473 Kでの0.2%耐力170 MPa以上、引張強さ300 MPa以上、疲労強度100 MPa以上、とした。さらに、473 Kでの熱伝導度の目標値は、100 W/m・K以上としており、以下に述べるような研究成果を得ている。

- ① 種々の添加元素と冷却速度を変えて、 $Mg-Zn-Y$ 系合金の鋳造組織形態の適正化および機械的性質を検討、調査した結果、 $Mg_{95.8}Zn_2Y_2Zr_{0.2}$ 鋳造合金が初期目標値を達成することを明らかにした。Zr添加が結晶粒を微細化させること、また長周期積層構造の強化相の粒界被覆率の増加が室温および高温での強度向上に貢献し、延性を阻害する $Mg_3Zn_3Y_2$ 化合物相の粗大化も防止すること等を明らかにした。
- ② $Mg_{95.8}Zn_2Y_2Zr_{0.2}$ 鋳造合金を用いたピストン重量で50%軽量化を可能とする押出材の製造開発を目指して、大型インゴットの溶解・鋳造手法の最適化プロセスを検討した結果、その均質性を証明することができた。
- ③ 大型インゴットを $\phi 100$ mmの大型押出材に成形加工した素形材の機械的性質を調査した結果、当初の達成目標値を満足し、ピストン重量で50%軽量化の可能性の見通しを得た。高温変形機構を検討した結果、押し出し後の高温強度の達成は、低い押し出し比により崩れなかったLPSO相のネットワーク構造の保持による高温強度低下の抑制に加え、化合物相の微細分散や異方性に起因した結果であることを明らかにした。

本研究成果は、学術的のみならず工業的にも大いに期待できる有益な知見を含んでおり、材料開発および製造技術の一層の高度化に貢献するところ大である。さらに、申請者が自立して研究を行うに十分な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。