難燃性マグネシウム合金や 耐熱マグネシウム合金の開発と応用

小原 久*

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 66, No. 5 (2016), 233-239
© 2016 The Japan Institute of Light Metals

Development and application of flame-retardant and heat-resistant magnesium alloys

Hisashi OHARA*

Keywords: *magnesium alloys, flame-retardant, heat-resistant*

1. はじめに

戦後の日本におけるマグネシウム産業は、マグネシウム合金鋳物、アルミニウム合金添加成分やチタン製錬の還元材などとして使用されることから始まった。1954年にチタン製錬工程から発生する四塩化マグネシウムから電解法によりマグネシウムが回収され、1957年に古河マグネシウム(株)が熱還元法によるマグネシウム生産を開始した。そして早くも1960年には東洋工業(株) (現マツダ(株)) がマツダ R360 クーペを発売し、トランスミッションケースなど6点の主要なエンジン部品にマグネシウム合金を採用し、本格的な自動車部品へのマグネシウム合金利用が始まることとなった。その後、紆余曲折はあるものの日本のマグネシウム産業は図1に示す通り着実な成長を続け、1988年には国内のマグネシウム総生産能力が約23,000トンまで拡大することとなった。ただ、海外とのマグネシウム生産コスト競争により徐々に国内製錬が縮小となり、1994年に完全に生産を中止することとなった。しかし、国内生産とは逆にマグネシウムの需要は着実な増加を示し、1980年には業務用ビデオカメラケース、1982年ホンダシティターボのシリンダヘッドカバー、1983年ステアリングコラム・アッパブラケット、1989年ハンドル芯金などにマグネシウム合金が採用され、1991年には携帯電話の筐体、1995年にノートパソコン筐体などにまで使用されることとなり、2007年には47,435トンの最大需要量を達成した。その後、リーマンショックの経済不況や地産地消対応によるマグネシウム加工拠点の海外流出などにより需要量の減少となったが、2014年にはようやく40,290トンまで回復することができた。この間の1999年には、国内で開発されたACM522耐熱マグネシウム合金によりインサイトのオ

イルパンが開発され¹⁾、2002年頃にはAE62-Ca耐熱マグネシウム合金製トランスミッションケースが北米乗用車向けに開発され²⁾、欧米と同様に自動車部品の幅広いマグネシウム化が実現することとなった。

マグネシウムは密度が約 1.74Mg/m^3 と構造用金属材料としては最も軽量の素材であることはよく知られている。構造材としてマグネシウムを利用する場合は、Al, Zn, Mn, その他の金属成分を添加することによりマグネシウム合金として使用されるのが普通である。この場合の密度は、 $1.3\sim 2.0\text{Mg/m}^3$ 程度となっている。軽量化が必要な時にはマグネシウム合金が候補材料として検討される機会も増しているものと見られるが、まだまだ実際に採用されるケースは少ないのが現状である。また、たとえマグネシウム合金が採用されたとしても、その後の汎用構造材料の技術や性能向上により、容易に代替されてしまうことも多くある。

この原因は、技術的観点では次のような事項によるものと考えられる。

- ①他の汎用構造材料に比べ大気中でマグネシウム合金溶湯を扱う場合には、防燃対策が必要である。
- ②マグネシウム合金は、ヤング率がアルミニウム合金のほぼ半分程度であることから、構造部材として必要な剛性を得るためには専門的な設計が必要である。
- ③マグネシウム合金は基本的に標準電極電位が卑であることから、他の金属材料と接触させる場合には絶縁や電解液排除などの流電防止対策が必要である。
- ④マグネシウム合金の特性が、広く知られていない。
- ⑤マグネシウム合金材料についての加工技術が普及していない。
- ⑥材料コストが高水準にある。

*一般社団法人日本マグネシウム協会 (〒103-0027 東京都中央区日本橋3-6-10) Japan Magnesium Association (3-6-10 Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo 103-0027) E-mail: ho01-mag@kt.rim.or.jp
受付日：平成28年2月18日 受理日：平成28年3月8日

図1 日本のマグネシウム需要量の推移と製品開発の歩み

図2 鉄道車両用荷物支持部材: AZ91+Ca

などが挙げられる。

しかし、欧米などにおいては深刻化する地球温暖化の対応策の1つとして自動車からの排出ガスの削減が急務となっており、一層厳しい自動車排出ガスの規制を強化する方向にある。例えば、乗用車のCO₂排出ガス規制値を走行燃費で示すと2015年に欧州では17.8km/L、日本で16.8km/L、中国14.5km/L、2016年に米国で15.1km/Lなどが燃費向上目標とされており、2020年では欧州で24.4km/L、日本20.3km/L、中国20.0km/Lまで強化されることとなっている。さらに、日本や中国ではこれ以降の燃費規制目標は発表されていないものの、2025年には欧州では30~34km/Lへの規制強化目標が提

図3 鉄道車両用座席の試作

案され、米国では23.2km/Lの目標値が発表されている。なおこれに止まらず、欧州においては2030年に向けてより一層排出ガスの規制が強化され続けるとも見られている。このような、自動車に対するCO₂排出ガス削減の目標を実現するため自動車産業界においてはエンジンの効率化、コンパクト化、ディーゼル化、電気自動車化、ハイブリッド化、水素燃料電池車などの開発が進められ多様な対応が図られている。また、車両重量100kgの軽量化で1km/Lの燃費向上につながると言われており、車両重量軽量化推進のため各種材料での対応が進められている。特に、構造用金属材料で最も軽量なマグネシウム合金では、自動車車体の軽量化を確実に実現するため、新たなマグネシウム合金の開発も進められており、その一端を紹介する。

2. 難燃性マグネシウム合金の開発状況

マグネシウムについての古くからの課題は、マグネシウム溶湯が空気中の酸素と接触すると酸化燃焼反応が起こることであり、この状況を回避するため以前から塩化物系フラックスの散布や亜硫酸ガス、 SF_6 ガスおよび同程度の特性を有す

る環境対応防燃ガスによる空気との絶縁、ダイカスト用マグネシウム合金でのCaやBeの微量添加などの対策が実施され³⁾、本格的に燃焼が防止できる難燃性マグネシウム合金の開発が期待されてきた。このなかにあつて、日本、欧州並びに韓国において積極的に、難燃性マグネシウム合金の開発と難燃性評価が行われている。

日本においては1994年に秋山が初めてマグネシウム合金の難燃化を提唱し「Ca添加による難燃性Mg合金」を発表した。AZ91ダイカスト用マグネシウム合金にCaを0~5%、Znを0.7, 1.4, 2.1%添加し、粉末化した場合のマグネシウム合金の発火温度の変化を測定することにより、Ca添加の増加に伴い発火温度が上昇することを示した⁴⁾。この後、各種既存マグネシウム合金にCaを添加し、難燃化を図る研究が進められている⁵⁾。

また、熊本大学ではKUMADAI高強度高耐熱マグネシウム合金が優れた難燃特性を有することが実測されたとともに、1050°Cの加熱を受けても発火しないKUMADAI不燃マグネシウム合金を開発し、自動車分野だけでなく難燃高強度高耐食性のマグネシウム合金特性が要求される航空機分野での応用が期待されている⁶⁾。

これらの研究開発の結果、難燃性マグネシウム合金押出材が高速道路のETC遮断機の遮蔽用阻止棒に使用され、多軸ボール盤の多軸ヘッドなどに実用化され⁷⁾、高速車両では図2に示す難燃性マグネシウム合金ダイカスト材が荷物棚支持材にも採用されることとなっている。また、これら実用化された製品以外にも図3に示す鉄道車両用座席フレームやターボチャージャファン、ピストンなど各種の製品も試作されることとなっている。

欧州においては、2000年頃から地球温暖化対策の観点から航空機による排ガス削減とともに、エネルギーコストの削

図4 米国FAAにより基準化されたマグネシウム合金の燃焼試験方法

FAA Test Results of ECO-Mg

図5 KITECHでの難燃性マグネシウム合金ECO-Mgの燃焼試験結果 (by S. K. Kim)

図6 KITECHが提案するFAA試験体を用いた複合的燃焼試験結果 (by S. K. Kim)

図7 燃焼性試験のための試験体形状と試験方法 (by S. K. Kim)

図8 韓国のKIMSで試験中の難燃マグネシウム合金 (by B. S. You)

減が問題となり機体の重量軽減が検討されることとなった。このため、航空機内装材や装備品への耐熱高強度マグネシウム合金の適用が検討されたが、航空機用シートフレームについてSAE規格でマグネシウム合金の使用が規制されていることがわかり、2007年頃からこの規格改正に向けた検討が始まり、マグネシウム合金の燃焼性を評価するための図4に示す燃焼試験法と評価基準が確立することとなった。評価基準は、長さ20インチ×幅1.5インチ×厚さ0.25インチの長方形試験体を約930°Cのオイルバーナで4分間加熱し、加熱終了後3分以内に自己消火し、重量損失が初期重量の10%以内であることとなっている^{8)~10)}。

韓国においては、2つの研究機関でそれぞれに難燃性マグネシウム合金の開発が進められ、現在に至っている。その1つは、Korea Institute of Industrial Technology (KITECH) Shae K. Kimらで、2005年にマグネシウム合金へのCaOの添加による発火特性効果について研究成果を発表¹¹⁾し、それ以降AZ31, AM60, AZ91などの汎用マグネシウム合金にCaOを添

加しECO-Mgとして機械的性質や発火温度への影響を調査するとともに、各種耐熱合金との発火温度の比較データなどを提供している。さらには、構造用マグネシウム合金素材に対する燃焼性測定試験方法についても検討を行い、従来から実施されている各種マグネシウム粉末を用いた発火温度測定だけでなく、図5の円錐棒状試験体での発火性試験を始め、図6に示す長方形の試験体による発火温度測定や組織観察、小形状個体を切出した発火試験など複合試験による性能評価を提案している。また、図7にKITECHが提案する各種試験体形状での燃焼性試験法を示す。

もう1つは、Korea Institute of Materials Science (KIMS)のBong Sun Youらの研究であり、2000年にマグネシウム合金へのCa添加による酸化特性の効果について研究発表¹²⁾し、最近では図8に示す通り既存の各種マグネシウム合金にCaとYを添加したマグネシウム合金の発火温度の上昇と共に、図9に示す通り、機械的性質への影響を発表している。図10に、推奨するCa, Y添加の変化による発火温度への影響を示す。

図9 難燃マグネシウム合金の機械的性質比較 (by B. S. You)

図10 Ca, Y添加量の変化による発火温度への影響 (by B. S. You)

3. 耐熱マグネシウム合金の開発状況と適用

輸送機器の軽量化では車体重量の軽量化だけでなく駆動機器部品の軽量化も重要な課題であり、パワートレイン分野でのマグネシウム合金の応用が期待されている。このため、各国で耐熱性やクリープ特性に優れたマグネシウム合金の開発が進められている。

世界的には、日本での開発も含め表1のような耐熱マグネシウム合金が開発され、実用化されている。1970年に開発されたMg-Al-Si系のAS21合金は、ドイツのVolkswagen社向けに提供され、その後同系統のAS31がベンツ車のオートトランスミッションに採用されている。1987年頃にイギリスのMagnesium Elektron社が開発したMg-Y-RE-Nd-Zr系WE54, WE43は高強度耐熱マグネシウム合金としてパワートレイン部品やトランスミッションなどに使用され、航空機シートフレームなどの内装部品への応用が検討されている。Mg-Al-RE系のAE42は1995年頃に開発されているが、米国のUSCAR自動車軽量化プロジェクトの中でエンジンクレードルとしてGM-コルベットZ06に採用されアルミニウム合金に比べ35%の軽量化を実現している。MRI153マグネシウム

表1 世界的に開発された代表的な耐熱マグネシウム合金例

年	合金名	合金系
1970	AS21 耐熱合金	Mg-Al-Si系
1987頃	WE54, WE43 合金	Mg-Y-RE系
1995頃	AE42 合金	Mg-Al-RE系
1999	ACM522 合金	Mg-Al-Ca-RE系
2000	MRI153 合金	Mg-Al-Ca-Sr系
2001	KUMADAI耐熱マグネシウム合金	Mg-Zn-Y系
2001	AJ51, AJ52 合金	Mg-Al-Sr系
2002	AE62-Ca 合金	Mg-Al-RE-Ca系
2003	Elektron21 合金	Mg-RE-Zn-Zr系

図11 日産自動車 オイルパン：MRI153合金

図12 ホンダトランスミッション：AEX631合金 (Mg-6%Al-3%RE-1%Ca-0.5%Zn)

ム合金は、イスラエルで開発された耐熱マグネシウム合金であるが、図11に示すNISSANスカイラインGTRのオイルパンに採用され特性を発揮している。2001年に公開されたMg-Al-Sr系のAJ51, AJ52マグネシウム合金は、AJ62マグネシウム合金としてBMW社が開発した直列6気筒アルミニウム/マグネシウム複合エンジンのベッドプレートとして採用され、従来のアルミニウム合金エンジンに比べ25%の軽量

表2 日本国内における耐熱マグネシウム合金の特許公開例

番号	年	番号	出願者	タイトル	合金種
1	1993年	平5-33096	トヨタ自動車㈱	耐熱マグネシウム合金	Mg-1.0~6.0%Al-1.0~6.0%Zn-0.2~3.0%RE
2		平5-171333	トヨタ自動車㈱	耐熱性、耐食性および鍛造性に優れたマグネシウム合金	Mg-1.0~6.0%Zn-0.1~2.0%RE-0.1~2.0%Zr-0.1~3.0%Si-0.1~6.0%Al
3	1994年	平6-49580	三井金属工業㈱	ガドリニウム及びサマリウムを含有する高強度マグネシウム合金	Mg-4~25% (Gd-Sm) -0.8~5% (Ca, Y, Sc, La) -2% (Zr, Mn)
4		平6-172948	トヨタ自動車㈱	耐熱マグネシウム合金の製造方法	Mg-3.0~10.0%Al-6.0%Zn-3.0%RE-1%Mn
5		平6-256883	㈱神戸製鋼所	優れたクリープ強度を有するマグネシウム合金	Mg-2.0~12.0%Al-2.0%Mn-4.0%Zn
6	1995年	平7-11371	トヨタ自動車㈱	耐熱マグネシウム合金	Mg-1.0~3.0%Al-0.25~3.0%Zn-0.5~4.0%RE
7		平7-11372	宇部興産㈱	高温クリープ強度および靱性に優れたマグネシウム合金	Mg-1.0~6.5%Al-0.5~1.5%Si-0.001~0.075%Co
8		平7-11373	宇部興産㈱	耐熱マグネシウム合金	Mg-1.0~6.5%Al-0.5~1.65%Si-0.001~1.05%Sb
9		平7-11374	宇部興産㈱	マグネシウム合金	Mg-1.5~10.0%Al-2.0%RE-0.25~5.5%Ca-0.2~2.5% (Cu, Zn)
10		平7-34172	トヨタ自動車㈱	ダイカスト用マグネシウム合金	Mg-0.5~2.0%Ag-0.5~3.0%Ca-0.2~0.7%Mn
11		平7-331375	トヨタ自動車㈱	鍛造用耐熱マグネシウム合金	Mg-1~3.5%Al-0.25~3.5%Zn-0.5~4.0%RE-0.1~1.0%Mn-0.1~1.0%Ca
12	1996年	平8-81728	宇部興産㈱	耐クリープ性、耐食性を有するマグネシウム合金	Mg-4.0~15.0%Zn-0.5~3.0%Si-0.5~8.0%Al
13	1997年	平9-256099	㈱豊田中央研究所	耐熱マグネシウム合金	Mg-1.0~6.0%Zn-0.5~3.0%Ca-0.4~1.0%Zr-1.5~2.7%RE (-2.0%Al-1.0%Mn)
14		平9-291332	本田技研工業㈱	耐熱性マグネシウム合金	Mg-4.5~10%Al-0.1~3%Ca-1~3%RE-0.3~1%Mn
15	1998年	平10-324941	アイシン高丘㈱	優れた高温特性とダイカスト鍛造性を有するマグネシウム合金	Mg-2~9%Al-6~12%Zn-0.1~2.0%Ca-0.2~0.5%Mn
16	1999年	平11-323474	マツダ㈱	マグネシウム鋳物部材	Mg-5~10%Al-0.2~1%Si-0.05~0.50%Ca
17	2000年	2000-319744	ゼネラル・モーターズ・コーポレーション	耐クリープマグネシウム合金のダイカスト	Mg-3~6%Al-1.7~3.3%Ca-0.2%Sr
18	2001年	2001-107171	㈱日本製鋼所	耐熱性と鍛造性に優れたマグネシウム合金およびマグネシウム合金耐熱部材	Mg-4.5~7.4%Al-1.5~4.4%Ca-0.2~1.0%Mn-10~1000ppmBa (-0.5%Si-0.5%Zn)
19	2002年	2002-327231	三菱アルミニウム㈱	耐熱マグネシウム合金鍛造品およびその製造方法	Mg-1.5~6%Al-0.5~3%Ca-0.21~1%Sr-0.1~1%Mn
20	2003年	2003-55728	㈱豊田中央研究所	耐熱マグネシウム合金	Mg-12%以上Al-RE (-Li, Cu, Si, Zn, Ti) -2%Mn-Be
21	2004年	2004-232060	㈱豊田自動織機	鍛造用耐熱マグネシウム合金および耐熱マグネシウム合金鋳物	Mg-1~15%Ca-3~24%Al (4 ≤ Ca+Al ≤ 25)
22		2004-238676	デッドシーマグネシウムエルティエーディー	マグネシウム合金	Mg-4.7~7.3%Al-0.17~0.60%Mn-0.0~0.8%Zn-1.8~3.2%Ca-0.3~2.2%Sn-0.0~0.5%Sr
23		2004-238678	デッドシーマグネシウムエルティエーディー	マグネシウム合金	Mg-4.8~9.2%Al-0.08~0.38%Mn-0.00~0.9%Zn-0.2~1.2%Ca-0.05~1.4%Sr-0.00~0.8%RE (-0.02%Zr-0.001%Be)
24		2004-277761	アイシン精機㈱	高強度ダイカスト用耐クリープマグネシウム合金	Mg-4.0~9.0%Al-0.8~2.0%Si-0.1~1.3%Ca-0.01~1.5%RE-1.2%Mn-0.1%Zn-0.5%Sr
25	2005年	2005-113260	トヨタ自動車㈱	ダイカスト用耐熱マグネシウム合金および同合金のダイカスト製品	Mg-6~10%Al-1.8~5%Ca-0.05~1.0%Sr-0.1~0.6%Mn (-0.1~3%RE)
26		2005-120449	㈱豊田中央研究所	鍛造用耐熱マグネシウム合金とマグネシウム合金製鋳物およびその製造方法	Mg-0.2~3%Ca-1~4%RE-1%Zn-0.1~1%Sr-0.3~1% (Zr, Mn)
27		2005-179776	㈱日立製作所	マグネシウム合金	Mg-10~15%Al-0.5~10%Sn-0.1~3%Y-0.1~1%Mn
28		2005-187894	三菱アルミニウム㈱	耐熱マグネシウム合金鍛造品	Mg-1.5~6%Al-0.3~3%Ca-0.1~1%Mn-0.21~1.0%Sr-1~100ppmBe (-0.1~1%Si-0.2~1.0%Zn)
29		2005-187895	三菱アルミニウム㈱	耐熱マグネシウム合金鍛造品	Mg-1.5~6%Al-0.3~3%Ca-0.1~1%Mn-0.01~1%Sr-0.1~3%La-0.1~3%Ce-0.1~3%Nd (-0.1~1%Si-0.2~1%Zn)
30		2005-187896	三菱アルミニウム㈱	耐熱マグネシウム合金鍛造品	Mg-1.5~6%Al-0.3~3%Ca-0.1~1%Mn-0.01~1%Sr-0.1~3%La-0.1~3%Ce-0.1~3%Nd (-0.1~1%Si-0.2~1%Zn)
31		2005-240129	三菱アルミニウム㈱	耐熱マグネシウム合金鍛造品	Mg-1.5~6%Al-0.3~3%Ca-0.1~1%Mn-0.21~1%Sr-0.1~1%Ge-0.1~1%Pb-0.1~1%Sn-0.1~1%Ag (-0.1~1%Si-0.2~1%Zn-1~100ppmBe-0.1~3%RE)
32		2005-240130	三菱アルミニウム㈱	耐熱マグネシウム合金鍛造品	Mg-1.5~6%Al-0.3~3%Ca-0.1~1%Mn-0.21~1%Sr-0.1~1%Ge (-0.1~1%Si-0.2~1%Zn-1~100ppmBe-0.1~3%RE)
33	2006年	2006-291327	三菱アルミニウム㈱	耐熱マグネシウム合金鍛造品	Mg-6.1~8%Al-0.5~1.8%Ca-0.1~1%Sr-0.1~0.5%Mn
34	2007年	2007-70688	(独)産業技術総合研究所	熱間加工により作製される耐熱マグネシウム合金及びその製造方法	Mg-Al-Ca-Sr-Mn
35		2007-186766	住友電気工業㈱	マグネシウム合金ねじの製造方法及びマグネシウム合金ねじ	Mg-4.0~10.0%Al-2%Zn-2%Mn-5%Si
36		2007-197796	アイシン精機㈱	マグネシウム合金および鋳物	Mg-6~12%Al-0.1~1.5%Mn-Ca/Al: 0.55~1.0 (>0.5%Sr->2.5%RE->1%Si->2%Sn)
37		2007-270159	リョービ㈱	耐クリープマグネシウム合金	Mg-2.5~6.5%Al-0.3~3.0%Ca-0.15~3.0%Sn-0.2~0.5%Mn (-0.01~0.3%Sr)
38	2008年	2008-81773	住友電気工業㈱	マグネシウム合金材及びその製造方法	Mg-2.0~8.0%Al-0.1~2.0%Zn-0.01~2.0%Mn-0.1~3.0%Ca
39		2008-266733	㈱豊田自動織機	鍛造用マグネシウム合金およびマグネシウム合金鋳物	Mg-1~5%Cu-0.1~5%Ca-1~3%Sn
40		2008-266734	㈱豊田自動織機	鍛造用マグネシウム合金およびマグネシウム合金鋳物	Mg-1~5%Cu-0.1~5%Ca-1~5%Ag
41	2009年	2009-7676	㈱豊田自動織機	鍛造用耐熱マグネシウム合金および耐熱マグネシウム合金鋳物	Mg-1~15%Ca-3~10%Al-0.1~1%Mn
42		2009-144215	㈱日本製鋼所	耐熱マグネシウム合金材およびその製造方法	Mg-0.5~4at%Zn-0.5~4at%Y-0.5at%Zr
43		2009-149952	本田技研工業㈱	耐熱性マグネシウム合金及びその製造方法	Mg-1~3at%Zn-1~3at%Y-0.01~0.5at%Zr
44		2009-291332	本田技研工業㈱	耐熱性マグネシウム合金	Mg-4.5~10%Al-0.1~3%Ca-1~3%RE-0.3~1%Mn
45	2010年	2010-77516	㈱豊田中央研究所	マグネシウム合金	Mg-6~10%Al-2.2~8.0%Ca-0.1~1.0%Si-0.05~1.0%Sn-0.05~1.0%Mn (-1.0%Sr, -1.0%RE)
46		2010-90405	㈱豊田自動織機	耐熱性マグネシウム合金	Mg-Al-Ca
47		2010-215974	㈱神戸製鋼所	耐力の等方性が優れた耐熱マグネシウム合金押出材およびその製造方法	Mg-1~8%Y-1~8%Sm
48		2010-242146	㈱豊田中央研究所	マグネシウム合金およびマグネシウム合金部材	Mg-6~20%Al-3~9%Ca
49	2011年	2011-99136	㈱アーレスティ	耐熱マグネシウム合金および合金鋳物の製造方法	Mg-9.20~12.6%Al-0.9~2.0%Ca-0.0005~0.1000%Be-0.10~0.45%Mn
50		2011-117064	㈱神戸製鋼所	疲労強度特性に優れた耐熱マグネシウム合金およびその耐熱マグネシウム合金の製造方法並びにエンジン用耐熱部品	Mg-1~8%Y-1~8%Sm
51		2011-140701	本田技研工業㈱	鍛造用マグネシウム合金及びマグネシウム鍛造体の製造方法	Mg-1~3at%Zn-1~3at%Y-1~3at%Ag
52		2011-208279	韓国生産技術研究院	溶湯流動性及び耐熱間亀裂性に優れたマグネシウム系合金及びその製造方法	Mg-アルカリ土類金属酸化物 (CaO), Ca ≤ 1.4~1.7×CaO
53		2011-219820	㈱豊田自動織機	耐熱マグネシウム合金	Mg-1~4%Cu-2%Ca-2%Mn-0.001~1.5%Sc
54	2012年	2012-57227	㈱神戸製鋼所	高温疲労強度特性に優れた耐熱マグネシウム合金およびその耐熱マグネシウム合金の製造方法並びにエンジン用耐熱部品	Mg-1.8~8%Y-1.4~8.0% (Sm, Nd)-0.5~2%Ho
55		2012-126982	㈱豊田中央研究所	耐熱マグネシウム合金の製造方法、耐熱マグネシウム合金鋳物およびその製造方法	Mg-0.2~5% (Ca, Si, Sn) -1~11%Al-0.5~5Zn-Cu0.5以下
56		2012-197486	㈱豊田自動織機	マグネシウム合金	Mg-12%以上Al-0.01~1%Ca
57		2012-214853	国立大学法人熊本大学	マグネシウム合金及びその製造方法	Mg-0.2~5.0%Zn-0.5~5.0% (Gd, Tb, Tm, Lu), 但し 0.5Zn-0.5 ≤ (Gd, Tb, Tm, Lu)
58	2013年	2013-19030	㈱戸畑製作所	耐熱性及び難燃性を有するマグネシウム合金及びその製造方法	Mg-Al-0.5~5%Ca-0.5~5%Si
59	2014年	2014-1428	㈱栗本鐵工所	耐熱マグネシウム合金	Mg-3.0~7.0%Al-0.1~0.6%Mn-1.5%Ca以上-0.4%Si以上 (Ca/Si ≥ 2.0)
60		2014-196525	㈱栗本鐵工所	耐熱マグネシウム合金	Mg-3.0~7.0%Al-0.1~0.6%Mn-1.5~2.5%Ca-0.2~1.3%Si-0.4~2.3%Y

化を達成することとなった。2003年に公開されたElectron21マグネシウム合金は、英国Magnesium Elektron社のNd, Gdを主成分とする開発合金であり、200°Cを超える環境で特性を発揮するマグネシウム合金として紹介されている。ACM522やAE62-Ca, KUMADAI耐熱マグネシウム合金は、日本で開発されたマグネシウム合金であり、図12に示すトランスミッションケースに採用され、エンジンピストンやターボチャージャーなどに試作されている。ちなみに、ACM522の記号はAXM522の表示の方が正確ではないかとの指摘もある。これらの耐熱マグネシウム合金のほかには中国上海交通大学で開発されたJDM2, JDM3なども実用化が検討されているようである。

1993年から2014年までに日本で公開された耐熱マグネシウム合金についての特許例を表2に示す。この特許公開状況を見ると、抜け落ちもあると思われるが22年間で60件の耐熱マグネシウム合金特許が公開されており、登録数の多い企業としてはトヨタ自動車、豊田自動織機、三菱アルミニウムの3社が7件と多く、豊田中央研究所6件、本田技術研究所と宇部興産4件などとなっている。これらの提案された耐熱マグネシウム合金は、添加成分として主にAl-CaにREやSi, Al-SiにSr, REやCa, Al-ZnにMnやCa, Zn-REなどを基にさらに各種成分を添加しているものも見られる。

4. おわりに

自動車は社会の重要な移動手段として年々進化を遂げており、自動運転や衝突防止システムの導入など新装備の装着により車両重量の増加をもたらす反面、環境対策の強化による排気ガス削減のための軽量化も喫緊の重要な課題となっていることは、はじめに紹介した通りである。このため、構造用金属材料の中で最も軽量のマグネシウム合金を自動車部品として活用するため、欧米において活発な研究開発が進められている。

難燃性マグネシウム合金は、日本が世界に先駆けて考え方を示した研究開発の成果であり、世界的に注目されているKUMADAI不燃マグネシウム合金は、マグネシウムの沸点である1091°Cを超えて加熱しても発火しないことが紹介されている⁶⁾。また、権田金属工業が開発したAZX612マグネシウム合金を用いた建築材料が2013年に国土交通省から不燃認定を受けている。海外においては、欧州で英国のMEL社が航空機のシートフレームを軽量化するため米国のFAAでWE43合金の燃焼試験を実施し、試験条件をクリアすることとなった。ちなみに、一般社団法人日本マグネシウム協会

においても「経済産業省委託 平成26年度経済産業省 高機能JIS等整備事業 高機能JIS開発 難燃性、不燃性マグネシウム合金の特性評価方法に関するJIS開発」の一環としてAZ61, AZ91, AZX311, AMX602, AZX611, AZX612, AZX911, AZX912の8種類のマグネシウム合金についてFAAで試験を行い、試験条件をクリアしている。

マグネシウム合金の難燃化/不燃化は、使用用途の伸長だけでなく、マグネシウム合金の溶解作業を画期的に改善することが可能になるものと考えられ、粉体は別としてその波及効果は非常に大きいものと言える。

世界的に多数のマグネシウム合金が開発され実用化されてきたが、わが国で開発された耐熱マグネシウム合金の利用はほとんどなく、あまり普及していないのが現状である。自動車の軽量化を図るためにはパワートレイン部品の軽量化も重要な課題であり、わが国で開発された耐熱マグネシウム合金の早期な実用化が期待される。

この解説執筆にあたり、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業未来開拓プログラム（革新的新構造材料等研究開発プロジェクト）」並びに「経済産業省委託 平成26年度経済産業省 高機能JIS等整備事業 高機能JIS開発 難燃性、不燃性マグネシウム合金の特性評価方法に関するJIS開発」の成果を参考としています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小池精一，鷲頭和裕，田中重一，馬場剛志，木皮和男：HONDA R&D Technical Review, **12-1** (2000), 167-174.
- 2) 宮下英明，田 雅之，坂田正保，早川幸宏，松村定晴：HONDA R&D Technical Review, **14-2** (2002), 135-142.
- 3) 日本マグネシウム協会編：マグネシウム技術便覧，(2000), 159-163.
- 4) 秋山 茂：鋳物，**66** (1994), 38-42.
- 5) 上田光二，谷州 博，中村 喬：近畿車輛技法，**14-10** (2007), 40-42.
- 6) 河村能人：軽金属，**65** (2015), 466-471.
- 7) 上田光二：近畿車輛技報，**11** (2004), 38-41.
- 8) T. Marker: Evaluating the Flammability of Various Magnesium Alloys During Laboratory- and Full-Scale Aircraft Fire Tests, FAA Final Report, DOT/FAA/AR-11/3, 1 (2013).
- 9) T. Marker: Development of a Laboratory-Scale Flammability Test for Magnesium Alloys Used in Aircraft Seat Construction, FAA Final Report, DOT/FAA/TC-13/52, 2 (2014).
- 10) The FAA Fire Safety Branch Document: Aircraft Materials Fire Test Handbook—DOT/FAA/AR-00/12, Chapter 25.
- 11) S. K. Kim, J. K. Lee, H. Cho, H. H. Jo, W. Ha and Y. J. Kim: Magnesium Technology 2005, 285-289.
- 12) B. S. You, W. W. Park and I. S. Chung: Scr. Mater., **42** (2000), 1089-1094.