

自動車用マグネシウムダイキャスト技術動向

武田 秀*

1. はじめに

京都議定書締結以降、CO₂増加による地球温暖化の問題が大きくクローズアップされ、大幅なCO₂削減が求められている。特に輸送機器のCO₂排出量比率は全体の20%近くあり⁽¹⁾、輸送機器の大半を占める自動車の燃費向上は急務となっている。自動車生産数は2013年度には全世界で年間8300万台⁽²⁾になり、中国・インドなどBRICS諸国の発展とともに年々自動車の需要は増加しており、今後この傾向は続くと考えられる。したがって、地球温暖化防止のための燃費向上(CO₂排出量削減)は自動車メーカーにとって待った無しの責務となっている。そのため、日・欧・米のCO₂削減の目標はこれまでになく厳しくなり、2020年の欧州の燃費(CO₂排出量)規制⁽³⁾では21.5 km/l(95 g/km)にもなっている。この規制をクリアするために各自動車メーカーは燃費向上の施策をHEV(ハイブリッド車)、EV(電池自動車)、FCV(燃料電池自動車)などエネルギー源を化石燃料から電気化への転換、フリクションの低減、鉄部品からアルミニウム化あるいはマグネシウム化による軽量化、そして日本では車体の小型化(軽自動車化)などが進められてきている。また、電気自動車化はエネルギー効率を大幅に上昇させる反面、車体バッテリーの重量、電気部品の増大など逆に車体重量を増やすことになった。従ってエネルギー源の転換と同時に材料置換などによる重量軽減を進める必要も生じてきている。図1に車両重量と燃費の関係⁽⁴⁾を示す。図から判るように単純に軽量化を行うことで、車体重量低減と比例してCO₂排出量削減ができる。従って比強度、比剛性が高いアルミニウムやマグネシウム合金材料を用いることで車体重量が低減でき、ひいては大幅なCO₂削減ができるといえる。本稿では、燃費向上のため自動車会社が進めている部品のマグネシウム化の状況を、部品群、材料種別ごとに整理し、当社でのマグネシウムダイキャストの量産実績を加味し、自動車のマグネシウム部品の今後の動向を概説する。

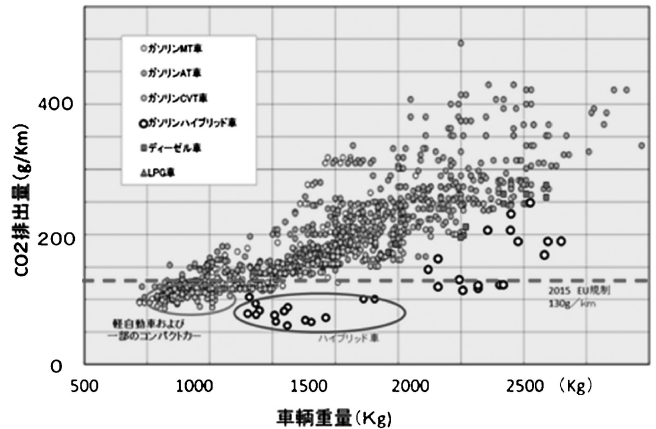


図1 車両重量とCO₂ガス排出量の関係。

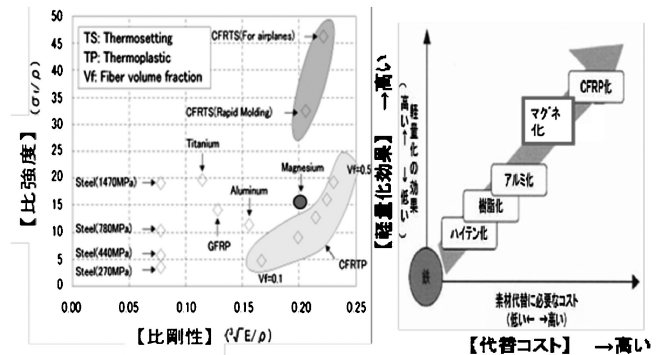


図2 各種材料の比剛性・比強度の位置づけおよび比強度とコストとの関係(概念図)。

2. 軽量化アイテムとしてのマグネシウム材料

マグネシウム合金は実用金属としては最軽量で、密度は鉄の1/4、アルミニウムの2/3であり、比強度・比剛性が他の金属に比べて優れており耐食性や高温クリープ性で課題はあるものの、自動車軽量化には今後も使われ続けるべき材料と考えられる。また、図2に炭素鋼、超高張力鋼板、アルミニウム・マグネシウム・プラスチック(ABS, PC)そしてCFRP

* 株式会社アールスティ テクニカルセンター；技術部(〒441-3114 豊橋市三弥町中原 1-2)
 Technical Trends of Magnesium Die-casting for Automobile Parts; Suguru Takeda (Ahresty Corporation, Toyohashi)
 Keywords: magnesium, HPDC, heat resistant alloy, automobile parts, technical trend, creep, bolt
 2014年7月22日受理[doi:10.2320/materia.53.594]

やGFRPなどの材料の比強度・比剛性の位置づけを示す⁵⁾。図を見てわかるように、軽合金が他の金属材料に比べコストは若干割高になるものの、比強度・比剛性が高く、現時点においては、自動車部品の軽量化に寄与する最良の材料と位置づけられるといえる。

3. ダイカスト工法とダイカスト用マグネシウム材料

図3にアルミニウム製品の用途別使用量と輸送関連部品の製法別の生産量占有率を示す。図からわかるようにアルミニウムで作られている輸送関連部品の半分以上はダイカストで生産されている⁶⁾。マグネシウムに至っては構造材用に使われる部品の70%以上はダイカストである。ダイカストは他の鋳造方法と比べ、鋳肌、寸法精度、生産性などで勝っており、現在の自動車部品生産に必要な不可欠な工法となっている。

マグネシウムが初めて車両に使われたのは“Indy 500”で、1921年のエンジンピストンの部品として使われた⁷⁾。後述するが、1940年代にはVW(フォルクスワーゲン社)がAS系(Mg-Al-Si系)の材料でトランスミッションケースを製造し、その後FORD, GMが多くの部品にマグネシウムを採用するようになった。一方日本では、1960年代には当時としては珍しいアルミニウムパワートレイン関連部品でマグネシウム部品をふんだんに使ったマツダR360クーペが登場した。当時の記録⁸⁾によると、とにかく軽量化したいとのことで、コストは二の次であった。しかしその後継車のキャロルは空冷エンジンから水冷エンジンへ変わったこともあり、コスト高でマグネシウムの使用は途切れてしまった。1980年代にはトヨタ、ホンダがマグネシウムを各所に使い始めた。しかしながら、欧米と比べるとマグネシウムの利用は少ないままである。

(1) 汎用マグネシウム合金

ダイカストで使われるマグネシウム汎用合金は主に、シリンダーヘッドカバー、キーロックハウジング、など比較的形狀が複雑な部品に用いられる構造用材料のAZ(Mg-Al-Zn)系合金と、衝撃吸収性が求められ、靱性・延性が要求されるステアリングハウジング、シートフレーム、インストラメントパネルなど車体用材料として使われるAM(Mg-Al-Mn)系合金の二系統がある。これらの合金は基本的にはMg-Alの二元状態図で示されるようにMgリッチ側で、Mgと金属間

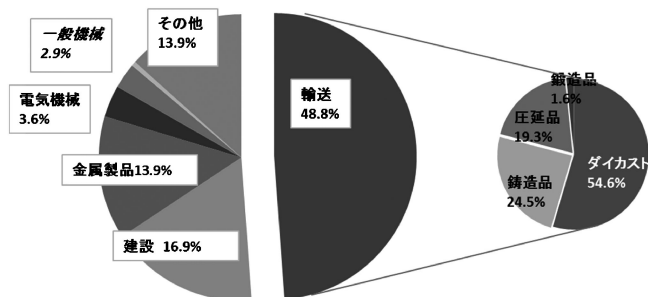


図3 軽合金(アルミニウム)の用途別使用量比率および輸送関連部品の製法別占有率。

化合物 $Mg_{17}Al_{12}$ との共晶合金である。一例としてAM60Bの組織写真を図4に示す。このAl, Mgの基本組成にZn, Mnが適量加えられている。これらの材料は $Mg_{17}Al_{12}$ の時効析出の増加に伴い強度・靱性が向上する。AZ系の場合は $Mg_{17}Al_{12}$ 以外に $Mg_{17}(Al, Zn)_{49}$ の時効析出効果による高強度化もある。Mn添加はMgの耐食性を著しく悪化させるFeをAl-Mn-Fe系の金属間化合物として晶出沈降させ、マグネシウム溶湯中のFeを減らすために入れるものであり、他のマグネシウム合金でも必要な添加元素となっている。

(2) 耐熱マグネシウム合金

さて、これら汎用合金中の合金の晶出物 $Mg_{17}Al_{12}$ や $Mg_{17}(Al, Zn)_{49}$ は熱的に高温で不安定となり、およそ393 K前後から著しいクリープが見られるようになる。そのため、エンジンやトランスミッションケースなど温度が高くなるエンジン回りの部品には汎用マグネシウム材の適用は困難となっている。

自動車部品の多くはボルトで各部品を締結するのが一般的であり、特にパワートレイン部品では、この締結した部品の内部には通常エンジンオイルやミッションオイルなど潤滑油が内包しており、締結部からの油の漏れはエンジンルーム内からの火災発生を引き起こす要因にもなり、絶対にはあってはならない。ところが、クリープがあると、時間とともにボルトとの熱膨張の違いも相まって、締結が緩み締結部品の間から油が漏れる事態が生じてしまう。この軸力の低下を防ぐために、既存の汎用合金あるいはマグネシウムにSi, RE(レアアース), Ca, Sr, やその他各種遷移元素を添加し、耐高温クリープ性(以降耐熱性と呼ぶ)を上げた耐熱マグネシウム合金がパワートレイン部品適用のために開発されてきた(図5参照)。また、同時に通常用いられるスチールボルトの代わりに、熱膨張がマグネシウムに近いアルミニウムボルトの採用などが行われている。各種材料の軸力低下特性を図6に示す。

1940年代にVWは、AS系(Mg-Al-Si)の合金AS41(Mg-4%Al-1%Si)を使い高温でも安定な Mg_2Si の晶出を利用して耐熱性を改善し、さらにはAl量を減らし β 相($Mg_{17}Al_{12}$)の析出を減らしたAS21(Mg-2%Al-1%Si)を利用するようになった。エンジン周りの部品重量は重いので、これらの軽量化効果は大きく、さらなる耐熱性の向上への要求は大きい。そして、1990年代になるとさらに高温特性の改善が強く求められるようになった。

欧州において、ダイムラークライスラーでは2002年にAS41を改良し耐熱性を向上させた、AS31HP(Mg-3%Al-

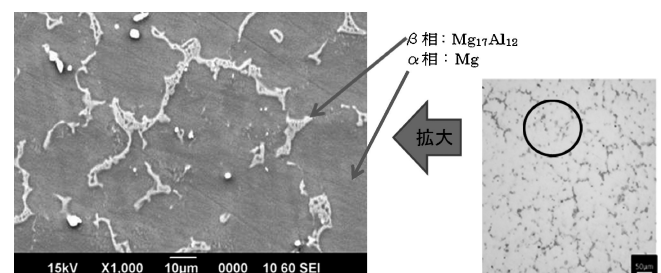


図4 AM60Bの一般的なSEM像。

1%Si系の合金)が使われるようになった。これに続きBMW社は、ノランダ社の開発したマグネシウム合金AJ62(Mg-6%Al-2%Sr合金)をマグネシウム製ブロックに採用した。ただし高温になるエンジンライナー部にはAl-Si過共晶合金を溶射したアルミニウム合金を鑄包んでいる。

日本では1990年代に種々のダイカスト用耐熱マグネシウム合金の開発がなされるようになり⁽⁹⁾、実量産ではACM522⁽¹⁰⁾(Mg-5%Al-2%Ca-2.5%RE)を用いたオイルパ

ンがホンダ製ハイブリッド車(初代インサイト)に採用され、三井金属鉱業で製造された。さらにこの合金の鑄造性を改善したAE62Ca⁽¹¹⁾が開発され、当社が北米Acura向けのマニュアルトランスミッションおよびクラッチケースの生産を行った。この合金はACM522と比較しAl量の増加、Ca量の削減で、鑄造性は多少改善されてはいるものの、AZ91DやAM60Bなどの汎用材に比べ、湯回り・鑄造割れなど鑄造性に劣る。これらの課題を解決するために、様々な生産技術対策(部分加圧、局部冷却、特殊な離型剤、金型温度管理)を欠陥発生部位へ適用し⁽¹²⁾、健全性を確保しなくてはならなかった。また、リサイクルにおいてもREやCaなど酸化しやすいため安価に再生リサイクルすることが困難であった。当社に限らず、国内外で開発されている大半の耐熱マグネシウム合金には、REやCaが多量に入っており、耐熱性は大幅に向上し、高温下でもマグネシウムが自動車のパワートレイン部品として使うことができるようになった。しかし上記で述べたような生産性や再生性の問題でコスト高となり日本ではその採用は限定的なものであった。そこで、当社ではこれらの開発経緯と製造実績から、多少耐熱性を犠牲にしても、生産性を加味したコストとその性能のバランスを考慮した合金系を検討し、リサイクルを含めた鑄造工程の改善を行ってきた。2007年には日産自動車のGT-Rのオイルパンに当社製造のマグネシウムが搭載された。このとき用いた合金は、Dead Sea Magnesium社で開発されたMRI153Mである。またこのコンセプトに近い合金としてノルスクハイドロ社のAS31HPもある。これらの材料の高温クリープ特性が抜群によいとはいえないが、鑄造性がよく、トータルコストを加味すればバランスのとれた材料といえる。

既存汎用マグネシウム合金にCaを加え、安価かつ適度な耐熱性を持つ合金の研究⁽¹³⁾も進められている。Caの添加により(Mg, Al)₂Caが粒界に網の目のように形成され良い耐熱特性が得られている⁽⁵⁾。耐熱マグネシウムへ添加するREの生産量のほとんどが中国であり、一国寡占状態が続いている。そのため、安定的に材料が入手できない懸念もあり、

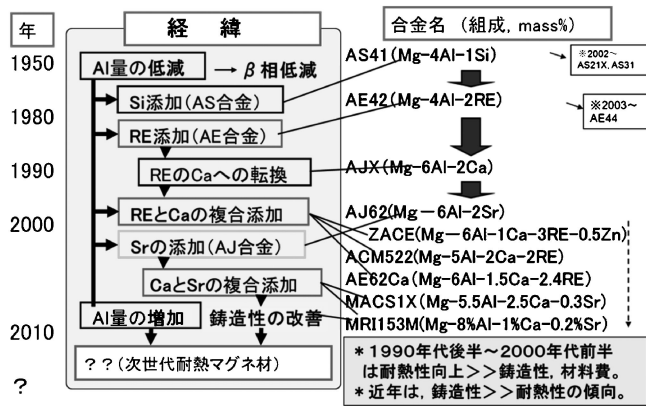


図5 耐熱マグネシウム合金の系譜。

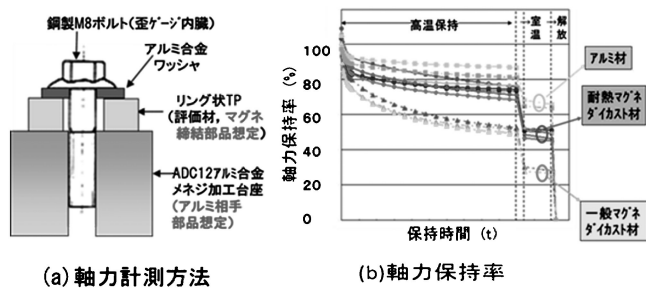


図6 軸力計測方法と高温保持における締結ボルトの軸力変化(圧縮クリープ特性)。

表1 各種耐熱マグネシウムの機械的性質。

項目	温度	AZ91D	MRI153M	MRI153D	ZACE05613	AJ62	AE44	AS41	ADC12
引張強さ (MPa)	R.T.	240	240	230	215	218	210	197	280
	100°C	229	207	210	196	195	165	154	260
	150°C	166	180	200	166	154	140	153	240
0.2%耐力 (MPa)	R.T.	145	150	160	130	124	109	136	185
	100°C	123	126	150	120	110	93	115	175
	150°C	105	128	135	115	98	88	95	165
伸び (%)	R.T.	5	4	2	2	6	8	3	0.5
	100°C	9	8	4	6	12	16	10	1
	150°C	14	13	8	9	15	23	17	2
疲労強さ (MPa)	R.T.	71	64	70	60	55	63	45	105
	100°C	42	46	44	41	41	43	38	75
	150°C	30	34	32	31	33	30	28	50

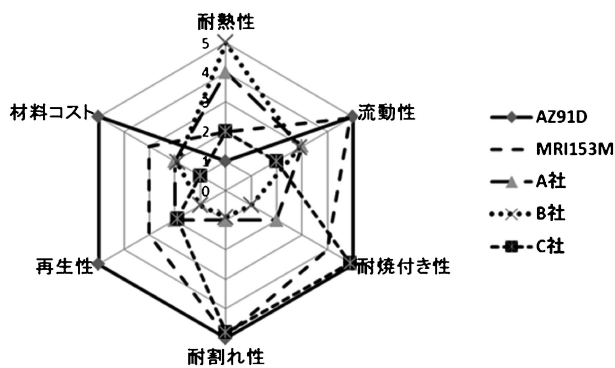


図7 各種耐熱材料の特性比較.

RE 使用量の少ないこれら材料は安定的に自動車メーカーに供給ができる点で良いともいえる。

これら一連の耐熱マグネシウム合金の特性を表1に、鋳造性など量産性の評価を図7のレーダーチャートに示す。尚、図では5点を最良として各種量産性を定性的に評価した。

4. マグネシウム材料の自動車への適用

本節では国内外で実際に量産に使用されたマグネシウム自動車部品を部位別に紹介し、今後のトレンドを考える。

(1) パワートレイン部品での実施事例

前述のように AZ91D は一般の構造部材として多く使われている。特に、温度がさほど高くないロッカーカバー、インテークマニホールドなどのパワートレイン系の部品への適用が多い(図8(b),(c),(d)参照)。また、一部トランスミッションケースなどにも使われていた(図8(a),(e)参照)。しかし最近では、これらの部品の中で温度の上がらない部位の構造部品は樹脂製品となりつつある。また、前述のように高温特性が要求されるトランスミッションケース、クラッチハウジング、オイルパンなどのパワートレイン部品には耐高温クリープ材料が使われている。これら耐熱材料を用いた実施事例を図8(f)~(j)に示す。

(2) 内装部品での実施事例

内装部品の多くは衝突の際、搭乗者と接触することが考えられ、その製品が割れたり、折れたりすることは搭乗者への安全確保の点で絶対に避けなければならない。そのため、内装部品の多くは延び・靱性のある AM 系のマグネシウム合金が使われる。実際、図9に示したように、ハンドル回り、エアバッグプレート、シートスタンションなど搭乗者と密な位置にある部品には AM 系の材料が使われている。

(3) 車体・シャーシ部品への適用

車体・シャーシ部品は内装部品と同じく、延性/靱性が要求される車体系の部品であり、AM60B/AM50Bなどのマグネシウム合金が使用されている。比較的大物のドアインナー、バックドアインナーやクラスターパネルのような大物にも使われている。また、ノルスクで開発された AE44 (Mg-

	a) T/M ケース 使用材料: AZ91D 自動車会社: VW 年代: 1940代		f) L6エンジンブロック 使用材料: AL62X 自動車会社: BMW 年代: 2004
	b) インテークマニホールド 使用材料: AZ91D 自動車会社: BMW 年代: 2003		g) エンジンオイルパン 使用材料: ACM622 自動車会社: ホンダ 製造会社: 三井金属鉱業 年代: 1999
	c) ロッカーカバー 使用材料: AZ91D 自動車会社: いすゞ 製造会社: アーレスティ 年代: 2001		h) オイルパン 使用材料: MR1153M 自動車会社: 日産自動車 製造会社: アーレスティ 年代: 2007
	d) PCU ケース 使用材料: AZ91D 自動車会社: ホンダ 製造会社: アーレスティ		i) トランスミッションケース 使用材料: AE62Ca 自動車会社: ホンダ 製造会社: アーレスティ 年代: 2003
	e) R360クーペ/パワードレイン関連部品/トランスミッションケース、タイミングケースカバー、クラッチハウジング、他 使用材料: AZ91D 自動車会社: マツダ		j) T/M ケース 自動車会社: タイムラー 使用材料: AS31X 製造会社: Honsel 年代: 2002年

図8 パワートレイン部品へのマグネシウム合金使用例.

	a) ステアリングアッパーブラケット 使用材料: AZ91D 自動車会社: トヨタ 年代: 1984		d) シートフレーム 使用材料: AM60B 自動車会社: 日産自動車 年代: 2004
	b) ハンドル芯金 使用材料: AM60B 自動車会社: ホンダ 年代: 1986		e) ステアリングコラムジャケット 使用材料: AM60B 自動車会社: トヨタ 年代: 2000
	c) ステアリングメンバー 使用材料: AM60B 自動車会社: 日産自動車 年代: 2004		f) エアバッグプレート 使用材料: AM60B 自動車会社: トヨタ 年代: 2002
			g) シートスタンション 使用材料: AM60B 自動車会社: FORD 年代: 1988

図9 内装部品へのマグネシウム合金使用例.

4%Al-4%RE)は耐熱合金ではあるが、延性があるため、エンジンクレイドルにも適用されている(図10参照)。

(4) マグネシウム合金の使われ方と代替材料

(1)~(3)に実施事例を示してきたが、前述のように単純に軽くするだけの部品の場合、マグネシウム材料を使用するメリットが少ないため、構造材として使われてきた AZ91D で使われている多くの部品では樹脂化がさらに進むと思われる。しかしながら、AM 系材料は樹脂より延性・靱性が勝っているため車体系の部品になお多く使われる。そのため、十数年前までは鋳造用の汎用マグネシウム材料の主流は AZ91D であったが、現在は AM 系材料が主流になりつつある。また、マグネシウム材料が耐熱性に問題があったとしても、放熱性が樹脂より勝っていることなどもあり、樹脂への転換の難しい場所では、さらなる軽量化のために耐熱マグネシウム使用は拡大すると考えられる。

