

耐熱マグネシウム合金を適用した軽量オイルパンの開発

Development of Lightweight Oil Pans Made of a Heat-Resistant Magnesium Alloy

小 池 精 一*

Seichi KOIKE

馬 場 剛 志**

Tsuyoshi BABA

鷲 頭 和 裕*

Kazuhiro WASHIZU

木 皮 和 男*

Kazuo KIKAWA

田 中 重 一*

Shigekazu TANAKA

要 旨

Mg-Al-Ca-RE を基本とするダイカスト用高耐熱マグネシウム合金(以下 ACM522 と略す)を開発した。ACM522 は 150°Cの温度域で従来のダイカスト用耐熱マグネシウム合金 AE42を凌駕する高いクリープ特性を示し、汎用アルミニウム合金 ADC12 にも匹敵する優れた耐熱性と耐食性を有している。オイルパンのマグネシウム化は、ボルト締結部の軸力低下などの課題があって、これまで量産車では実用化に至っていない。筆者らは ACM522 をオイルパンに適用し、従来のアルミニウム製オイルパンに比較して35%の軽量化を達成した。

ABSTRACT

A new heat-resistant magnesium alloy (hereafter referred to as “ACM522”) for die-casting based on the Mg-Al-Ca-RE system has been developed. In the 150°C temperature range, the ACM522 yields high creep characteristics which are superior to the conventional AE42 heat-resistant magnesium alloy for die casting, and it exhibits an excellent resistance to both heat and corrosion which is equivalent to ADC12 general-purpose aluminum alloy. Use of magnesium for oil pans has raised a number of problems such as axial force drop in the bolted areas and, until now, oil pans made of magnesium had not applied to mass-produced automobiles. The authors applied the ACM522 for oil pans and reached to 35% less weight than conventional oil pans made of aluminum.

1. まえがき

近年、限られたエネルギーの有効利用、地球環境問題などから、輸送機器の燃費改善のための軽量化は最重要課題となっている。1999年秋にHondaは量産ガソリン車で世界最高燃費の 35Km/l を達成するハイブリッドカー「インサイト」を発売した。エンジンはハイブリッドシステム専用に開発され、軽量素材の適用拡大などの徹底した軽量化技術を採用することで1リットルエンジンでは世界最軽量を実現した。このエンジンの外観を Fig.1 に示す。エンジン部品の中でも比較的重量の重いオイルパンの軽量化は燃費を向上する上でも必須技術であった。オイルパンをマグネシウム化するにあたり、汎用合金である AZ91D, AM60B ではボルト締結部での軸力低下が著しく、新たな耐熱マグネシウム合金が必要であった。今回新しく開発したマグネシウム合金は Mg-Al-Ca-RE を基本成分とする合金で、耐熱性と耐食性に優れた合金である。また、ダイカスト製法を前提に、溶湯流動性と鑄造割れにも考慮した合金である。本合金

を適用したオイルパンは従来のアルミニウム製オイルパンに比べて35%の軽量化が達成できた。以上のような背景のもと、本稿では開発した耐熱マグネシウム合金 ACM522 の材料特性と、マグネシウムオイルパンの概要に関して述べる。



Fig.1 Honda integrated motor assist engine system

* 栃木研究所

**和光基礎技術研究センター

2. 背景

マグネシウム合金は密度 1.78g/cm^3 と実用金属材料中で最も軽量である。その軽量性に加えて、比強度、比剛性、電磁遮へい性、リサイクル性に優れることから自動車部品や携帯用電子機器を始めとする家電製品等への利用が急速に増えつつある。しかし、エンジンおよび、トランスミッション回りの部品への適用に際しては、低コストで良好な铸造性を持った耐熱マグネシウム合金の開発が必要である。オイルパンの機能はエンジンの下部に位置して、エンジン潤滑油を保持することである。一般的にシリンダブロックにボルト締結する構造がとられており、エンジン運転中の締結部の温度は最高 150°C 以上に達するため、従来より鋼板またはダイカストアルミニウム合金が使用されてきた。オイルパンをマグネシウム化するにあたり、機械的特性、铸造性、耐食性のバランスのとれた代表的なマグネシウム合金、AZ91D合金を適用すると、ボルト軸力の低下が著しく、新たなダイカスト用耐熱マグネシウム合金の開発が必要であった。

耐熱マグネシウム合金としてはこれまで数種類の合金が開発されている。AS41, AS21 合金は結晶粒界に Mg_2Si 金属間化合物を晶出させて、耐クリープ性を向上させた合金である。特に、アルミニウム含有量の少ないAS21は、AS41より铸造性は劣るが、耐クリープ性の面で優れている。また、AE42 は AS21 と同等以上の耐クリープ性を持つ合金であるが、材料コストと铸造割れが発生しやすいなど铸造上の問題がある⁽¹⁾。また、最近時Znを主要添加元素とし、さらにAlおよびCaを添加したMg-Zn-Al-Ca系の耐熱合金も開発されている⁽²⁾。この合金はAE42合金のクリープ特性、耐食性、ダイカスト性を上回ると報告されている。

筆者らはオイルパンへの適用を可能とする耐熱マグネシウム合金を新しく開発するため、以下の合金開発目標を設定した。

- ①ダイカストアルミニウム合金 ADC12 に匹敵するクリープ特性と耐食性を有すること
- ②オイルパンの量産を可能とする AZ91, AE42 と同等の铸造割れ特性を有すること

今回、開発した合金はダイカスト铸造性を考慮して、Mg-5Al 合金を基本に耐熱性向上元素として Ca と Ce 系ミッシュメタルを含有し、さらに耐食性向上をねらって少量の Mn を添加した Mg-5Al-2Ca-2Mn-0.3Mn 合金(ACM522)である。

3. 実験方法

3.1. 供試材

予め準備したマスタアロイを溶解加熱炉によって溶解した。その際、保護ガスは SF_6 , CO_2 , および空気の混合ガス

を用いた。溶解後約 700°C に保持し、350トンコールドチャンバダイカストマシンにより引張試験片金型、クリープ試験片金型に铸造した。得られた試験片は金型合わせ面のバリ取りを行い铸造状態のままで用いた。一方、疲労試験片は1000トンコールドチャンバダイカストマシンによって铸造したオイルパンより採取し、表面のチル層は機械加工により削除して試験に供した。

引張試験片、クリープ試験片、疲労試験片の形状をFig.2に示す。また引張り試験片から切り出したサンプルからICPにより化学組成を分析した。分析結果を Table 1 に示す。

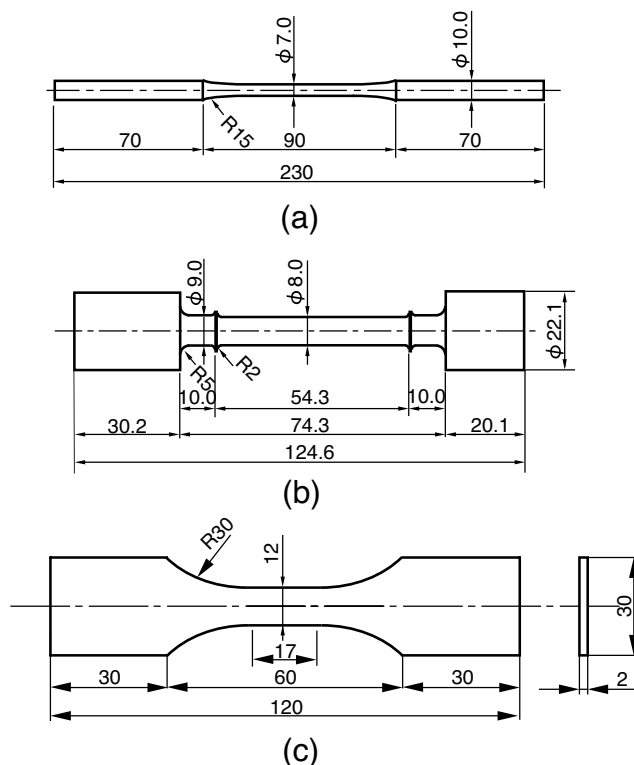


Fig.2 Die casting test specimens:
(a) tensile specimen
(b) creep specimen
(c) fatigue specimen

Table 1 Chemical composition of ACM522 alloy

Al□ wt%	Rare earth□ wt%	Ca□ wt%	Mn□ wt%	Fe□ ppm	Cu□ ppm	Ni□ ppm
5.3	2.6	2.0	0.17	19	18	< 1

3.2. 機械的特性

引張試験はインストロン型万能試験機を用い、ひずみ速度 0.5mm/min で行った。試験温度は室温、 100°C , 150°C , 180°C , 250°C とし、各温度において10分間保持後引張試験を開始した。伸び量は伸び計により応力-ひずみ曲線を作成し、0.2% 耐力と最大引張強さを求めた。

クリープ試験は JIS Z 2271 に準拠した。試験機はレバー比 10 : 1 の単てこ型 3 トンクリープ試験機を用いた。試験

温度は 150℃, 180℃, 200℃とし, PID 制御により温度変動は $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 以内で押さえた。クリープ伸び量は試験片の突出部を伸び計治具ではさみ, 炉外に変位量を取り出し, 左右 2 個のリニアゲージの平均値として記録した。各設定温度到達後 20 時間その温度に保持してから, 所定の引張応力 (50~100MPa) となる荷重を負荷した。

疲労試験は片振り引張り疲労試験により, 応力比 0.2, 周波数 25Hz で, 試験温度は室温, 120, 150℃で実施した。

3.3. 耐食性試験

耐食性評価は塩水噴霧試験により実施した。試験板はダイカスト鋳造したマグネシウムオイルパンの平面部から $25 \times 20 \times 3 \text{ mm}$ の板を切り出し, #1500 の耐水ペーパーで加工面を研磨した。試験方法は JIS Z 2371 に準拠した。試験条件は塩水濃度 5% NaCl, PH6.7~6.8, 温度 35℃, 湿度 99% 雰囲気とした。400hr 後, 試験板を 10% クロム酸溶液で煮沸洗浄し, さらに蒸留水で洗浄した。その後十分に乾燥させ重量を測定した。

3.4. 物理的特性

比重はアルキメデス法により求めた。また, 比熱, 熱伝導率といった熱定数はレーザフラッシュ法による。電気伝導率は 4 端子測定法, 熱膨張は押し棒式縦形熱膨張計により測定した。縦弾性係数, 減衰率は共振法により求めた。

3.5. 鋳造性試験

鋳造割れの測定には Singer, Jennings によって考案されたリングテスト法を用いた。この試験は準固相域での熱間割れを評価するのに適している。リング鋳型の形状を Fig.3 に示す。材質は鋳鉄である。鋳型の底部には断熱離型剤として BN をコーティングしておき, 鋳型を所定温度に保持し, そこに 700℃ に保持した溶湯を鋳造する。鋳造したリング試験片に発生した割れの長さを合計して評価した。

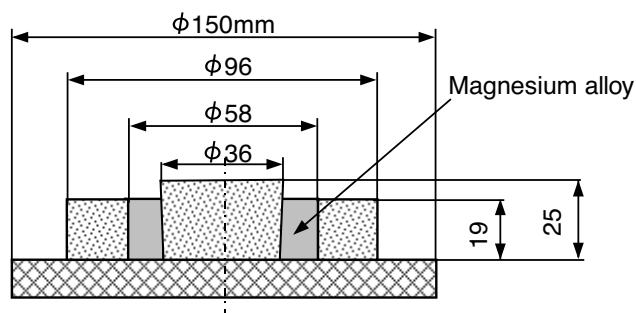


Fig.3 Ring-die plate for hot-cracking test

3.6. ボルト締結軸力試験

軸力試験に用いた試験片はダイカストのビスケット部より, 試験片を採取したものである。Fig.4 の概略図に示す方法で, M6 ボルト (めねじ長さ 2.5D) にひずみゲージを埋め込んだ軸力ボルトを使用し, 150℃での恒温炉に試験片を投入して, 軸力変動を測定した。比較のため, AZ91D でも同様に軸力試験を行った。

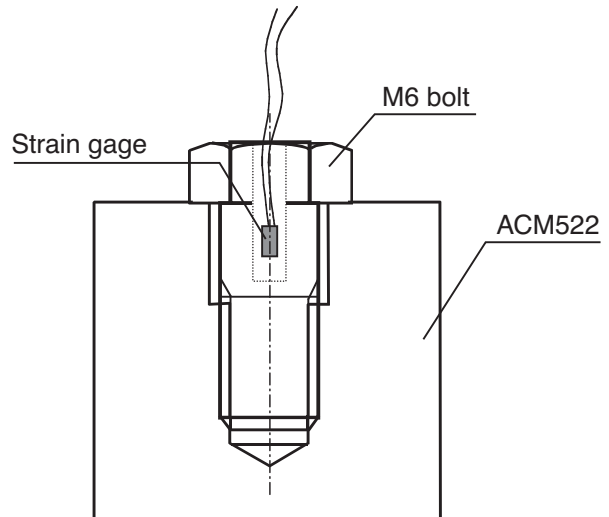


Fig.4 Bolt load retention test assembly

4. 結果と考察

4.1. 機械的特性

Fig.5 ~ Fig.7 に ACM522 の強度特性の温度依存性を示した。比較として AZ91D, AE42 および ADC12 を加えた。Fig.5 に示すように ACM522 の引張り強さは AZ91 よりも劣る。AE42 に対しては室温での引張り強度は劣るが, 100℃以上の温度域では ACM522 の方が優れている。また 0.2% 耐力に関しては Fig.6 に示すように, 室温では AZ91 と同等であるが, 100℃以上では AZ91D よりも優れる。AE42 に対しては室温から 250℃までの温度域で ACM522 の方が高い値を示している。伸びは Fig.7 に示すように, AE42 が最も高い延性を示す。ACM522 は, 室温で 3% 程度で AZ91 と同等であり, 高温になるにつれて伸びが増大する。汎用ダイカストアルミニウム合金である ADC12 と比較すると, ACM522 は引張り強度は全温度域で劣る。0.2% 耐力は室温で同等で, 高温での強度低下は ACM522 の方が大きい。延性は室温から 250℃まで ACM522 の方が高い。各温度における代表的な応力ひずみ曲線を Fig.8 に示す。加工硬化量が少なく, AE42 と類似したベント型を示していることから, ACM522 の強化機構は固溶強化もしくは析出強化ではなく, 結晶粒のすべりを抑制する粒界化合物相による強化機構が支配的であるものと考えられる。

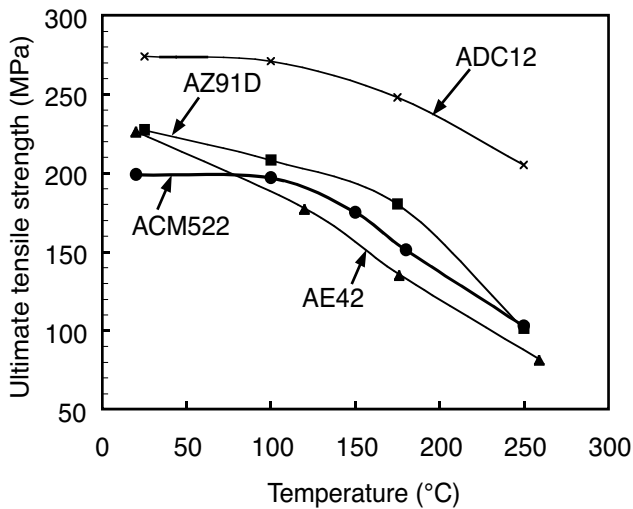


Fig.5 Ultimate tensile strength of ACM522 alloy compared with conventional die casting alloys

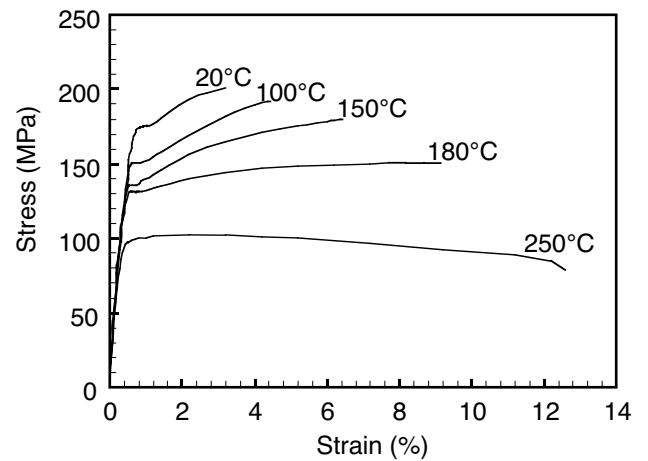


Fig.8 Stress-strain curves of ACM522 alloy

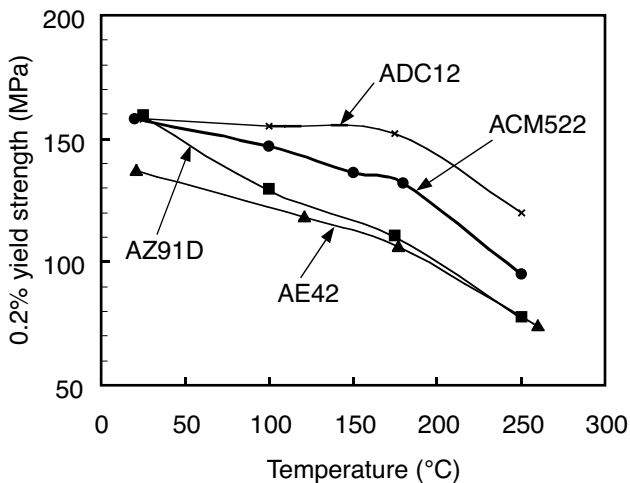


Fig.6 0.2% yield strength of ACM522 alloy compared with conventional die casting alloys

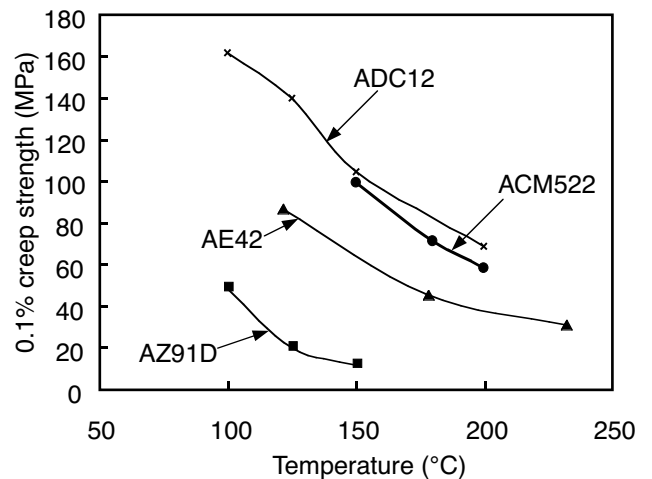


Fig.9 0.1% creep strength of ACM522 alloy compared with conventional die casting alloys

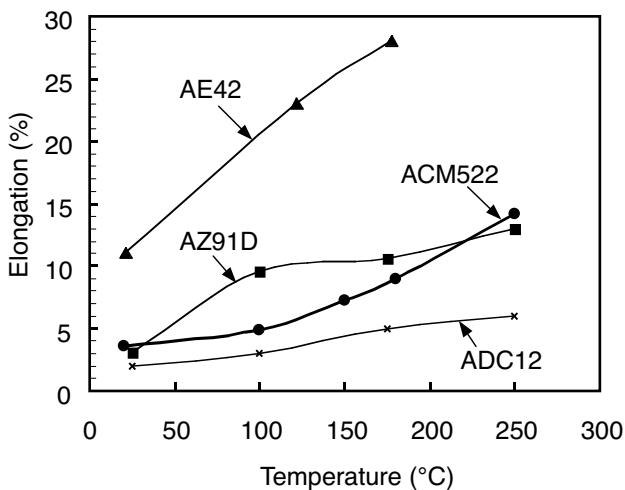


Fig.7 Elongation of ACM522 alloy compared with conventional die casting alloys

各試験温度で 100hr におけるクリープ伸びが 0.1%に到達する応力を各種ダイカスト合金と比較して、Fig.9に示した。0.1%クリープ伸びを与える応力はクリープ伸び(X)と応力(Y)を対数近似し、 $Y=a \times \log(X) + b$ で整理し、0.1%時の応力を計算した。ACM522のクリープ強度は150-200°Cの温度範囲で ADC12 にほぼ匹敵し、マグネシウム合金では AE42 を凌駕する卓越したクリープ強度特性を示す。

Fig.10 は ACM522 の室温、120°C、150°Cにおける S-N 曲線を示す。疲労強度は高温になるに伴って低下し、繰返し数 10^7 回での疲労強度は、室温で 130MPa、120°Cで 100MPa、150°Cでは 80MPa であった。

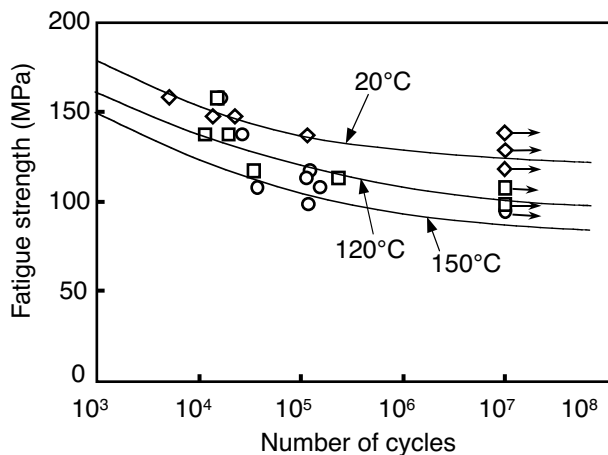


Fig.10 Fatigue strength of ACM522 alloy

ACM522の強化機構を考察するため、組織観察を行った。Fig.11 は ACM522 のダイカスト組織を SEM 組織像で観察したものである。初晶 α 相の間に、黒く粒状に分散している相は Al-Ce 化合物相である。色の薄い化合物は Al-Ca と Mg-Ca と思われる。これらの比較的微細な金属間化合物相が α 相の粒界に沿って微細に分散することにより、粒界が強化され優れたクリープ特性を得ることができるものと考えられる。

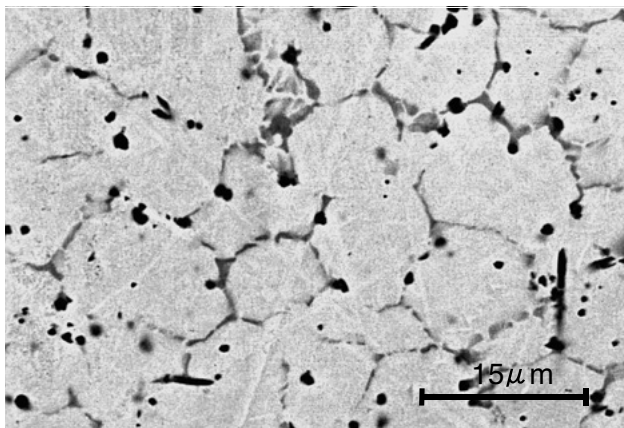


Fig.11 SEM image microstructure of ACM522 alloy

4.2. 耐食性

Fig.12 に塩水噴霧試験400hrにおける腐食速度をAZ91D, AE42, ADC12 合金と比較して示す。ACM522 は耐食性が良好とされるAE42に近い耐食性を示し、AZ91DやADC12よりも耐食性は優れている。マグネシウム合金の耐食性は、不純物元素に大きく影響されることが報告されている⁽³⁾。もっとも代表的なのがFe, Cu, およびNiである。これらの不純物元素は耐食性を低下させる臨界濃度が存在し、臨界濃度以下に成分管理すれば、すぐれた耐食性を示すことが知られている。ACM522の耐食性がADC12よりも優れているのはこのためであろう。また、ACM522の腐食の形態は α 相が優先的に溶出しており、AZ91D及びAE42と同様の腐食挙動であった。

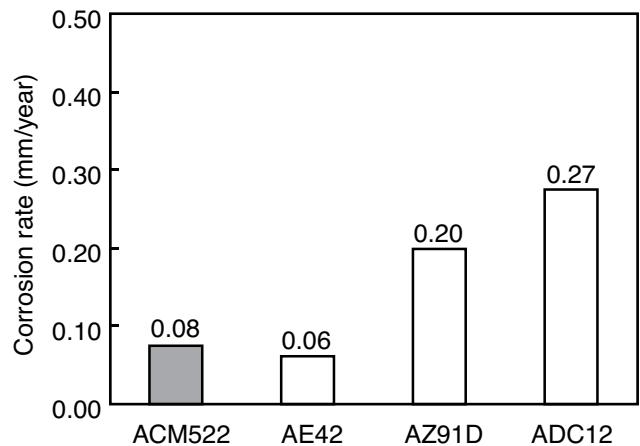


Fig.12 Corrosion rate of each alloy of the salt water spray test in 400 hours for some die casting alloys

4.3. 物理特性

物理特性一覧をTable 2に示す。比較としてAZ91D, AE42およびADC12を加えた。熱伝導率、電気伝導度はADC12よりも低い、AE42よりやや高い数値を示す。熱膨張係数は他のマグネシウム合金の中で最も小さい値を示し、ボルト締結部の温度変化に対しても有利である。減衰能は他のマグネシウム合金、アルミニウムダイカスト材と同等である。

Table 2 Physical properties of some die cast alloys

Properties□	ACM522□	AE42□	AZ91D□	ADC12□
Density (g/cm ³)□	1.79□	1.81□	1.81□	2.70□
Specific-heat (J/kg·°C)□	0.91□	0.96□	0.96□	0.96□
Thermal conductivity (W/mK)□	86.9□	78.6□	53.8□	100□
Electrical conductivity (%ICAS)□	22.5□	20.3□	12.7□	27.0□
Thermal expansion (/ ×10 ⁻⁶ °C)□	25.6□	27.7□	28.5□	24.0□
Modulus (GPa)□	45□	45□	45□	69□
Damping capacity (%)□	0.325□	N/A□	0.289□	0.305□

4.4. 鑄造割れ性

リング割れ試験はAZ91, AM60, AE42, ADC12について行った。AZ91やAE42では割れは最大で20mm発生する。またADC12ではリング割れは皆無であった。

ACM522の主成分であるAl, CaおよびR.E量を様々に変化させ、リング割れとの関係を調査した。Fig.13はR.Eの添加量を2%に固定した場合のAlおよびCa添加量と鑄造割れの関係を示す。

Al量が2-3%ではCa量が微量であっても大きな割れが発生する。Al量が増大するにつれて、割れ長さが減少しAl量が約5%ではCa量を約2%以下とすれば鑄造割れ性はAZ91, AE42と同等レベルとなる。

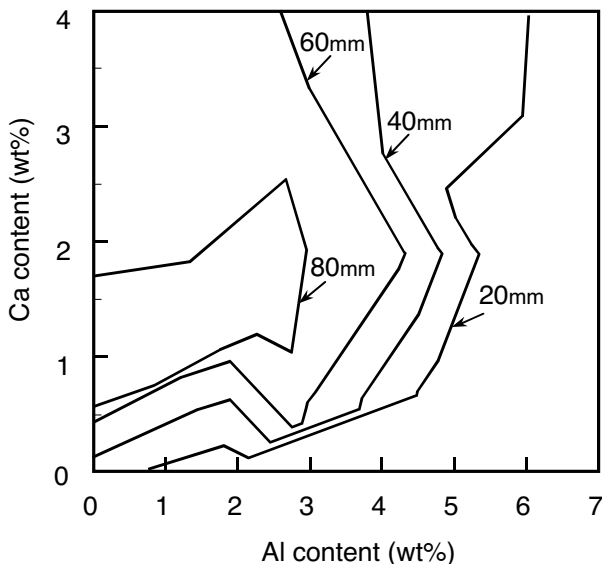


Fig.13 The effect of Al and Ca content on the total hot-crack length for the ACM522 alloy with rare earth = 2wt%

4.5. ボルト締結部の軸力試験

Fig.14 に 150°Cでのボルト締結部の軸力の変化を示す。ACM522 と鋼製ボルトの熱膨張差により、高温炉に投入した直後は軸力がわずかに増大する。その後時間経過とともに AZ91D の場合は軸力が急激に低下し 1000 時間後には軸力はほとんどゼロになる。これに対して、ACM522 の軸力は 1000 時間後でも、ほとんど低下していない。これは ACM522 のクリープ強度が大幅に向上したことにより、ボルト座面とめねじ部のへたりが抑制されたことによるものである。

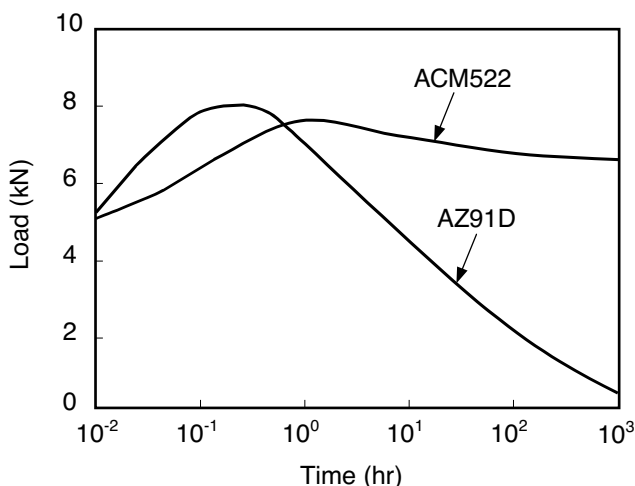


Fig.14 Bolt load retention test at 150°C

5. オイルパンの概要

ACM522 を適用したオイルパンの外観写真を Fig.15 に示す。オイルパンの側面にエアコンプレッサや、オイルフィ

ルタを直接取り付け等の機能集約をはかりながら重量は 2.5kg で、アルミニウムで製造した場合に比較して 35%の軽量化を達成した。ダイカスト製法による形状の自由度を活かして、複雑形状のオイルパンを一体鑄造成形した。ダイカスト成形時の鑄造熱間われを防止するため、肉厚変動が極力少なくなるような設計を心掛け、一般部肉厚は 2.5～3.0mm に設定した。また、剛性を確保するため必要に応じてリブを配置した。

オイルパンはエンジンの最下部に位置するため、走行中の路面の水分の巻き上げや泥跳ねなど、他のエンジン部品よりも厳しい腐食環境下に置かれる。また、マグネシウム合金は炭素鋼などの異種金属と電氣的に接触した状態で腐食環境下に置かれると、マグネシウムがアノードとなって選択的に腐食される。そのため、マグネシウムと異種金属間にアルミニウムなどのマグネシウムと電位の近い金属を介在させることで電位差を低減したり、絶縁材料を介在させて電氣的な絶縁を図るなどの腐食防止の対策が必要となる。今回のマグネシウムオイルパンの開発にあたっては、ボルト締結部には基本的に陽極酸化処理を施したアルミニウムワッシャを介在させることで、腐食防止対策とした。特に、メンテナンス時に脱着される頻度の高いドレンボルト部には、アルマイト処理をした別体プレートを設置することで、対策を行った。



Fig.15 Appearance of magnesium oilpan using ACM522 alloy

また、当初エンジン下まわりの剛性低下による騒音、振動音の悪化が懸念されたが、オイルパンの部分的な形状変更により重量増を抑えつつカバーすることができた。この結果を Fig.16 に示す。エンジンサイドブラケット上下振動音についての 1/3 オクターブ分析の結果、フランジ厚さの増加や曲面形状等の見直しをすることで、70～500Hz の領域で低減効果が得られ、特にクランク打音や加速エンジン音として問題となっていた 200～400Hz 帯の低減を図ることができた。

参考文献

- (1) Mercer II, E. W.: Magnesium Die Cast Alloys for Elevated Temperature Applications, SAE Paper 900788
- (2) Luo, A. and Shinoda, T.: A New Magnesium Alloy For Automotive Powertrain Applications, SAE Paper 980086
- (3) Hills, J., E and Reichel, K.N: Controlling the Salt Water Corrosion Performance of Magnesium AZ91 Alloy, SAE Paper 860228

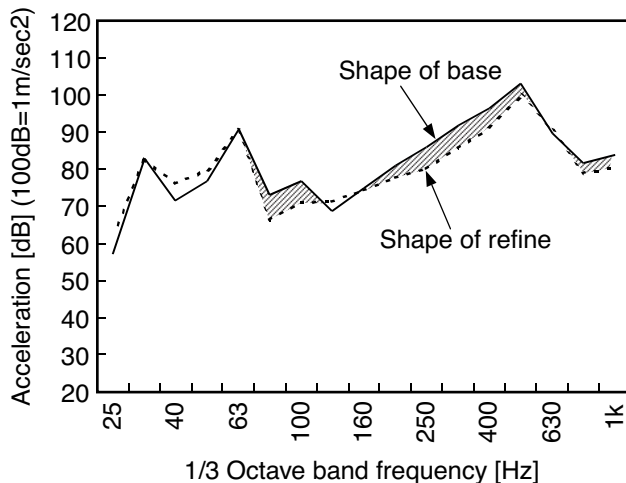


Fig.16 The effect of frequency of side mounting bracket (2 000rpm , 250mmHg)

6. 結論

以上新しく開発した耐熱マグネシウム合金の材料特性評価結果と、本合金を適用した軽量マグネシウムオイルパンの概要を報告した。本研究を通じて得られた成果をまとめると以下の通りである。

- ①開発した合金はダイカスト铸造性を考慮して、Mg-5Al合金を基本に耐熱性向上元素 Ca と Ce 系ミッシュメタルを含有し、さらに耐食性向上を狙って少量の Mn を添加した Mg-5Al-2Ca-2Mn-0.3Mn 合金(ACM522)である。
- ②ACM522 は汎用ダイカストアルミニウム合金である ADC12 に匹敵するクリープ特性と耐食性を有している。
- ③ACM522 を適用したマグネシウムオイルパンは、従来のアルミニウム製オイルパンに比べて35%の軽量化が達成できた。

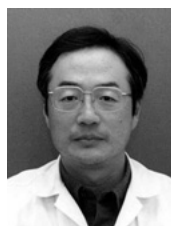
この軽量マグネシウムオイルパンは、量産ガソリン車で世界最高燃費の 35Km/l を達成するハイブリッドカー「インサイト」のエンジンに採用され、1999 年 11 月より量産されている。

今後、このマグネシウム合金は耐熱性の要件されるエンジン及び、トランスミッション部品へも適用拡大が進められていくものと期待される。

謝 辞

本開発にあたり、オイルパンのダイカスト铸造全般にわたり多大なる協力を頂いた(株)三井金属の関係者の方々に深く謝意を表します。

■ 著 者 ■



小池 精一



鷲頭 和裕



田中 重一



馬場 剛志



木皮 和男