



技術論文

CFマグネシウムダイキャスト材の機械的性質および耐食性

Mechanical and Corrosive properties of the CF Magnesium Die-Casts

鈴木 貴晴 稲波 純一 小池 俊勝

Abstract

A “CF (Controlled Filling) Magnesium Die-Casting Technology” was developed for manufacturing large, thin-walled magnesium parts for use as structural chassis parts on mass production motorcycles. This technology is a further development of Yamaha Motor’s CF Aluminum Die-Casting Technology, a vacuum-assisted die casting process that improves not only the soundness but also the mechanical properties by decreasing trapped gases in the cast. The specific fatigue strength achieved is 25% stronger than conventional aluminum die-casts, and it makes lighter designs possible. Impurities were minimized in the casts to almost the same level of weight loss as gravity-cast AC4CH aluminum and to a remarkably low level in comparison with that of SPHC steel. Furthermore, it is possible to attain a sufficient level of corrosion resistance required for exterior parts with appropriate undercoating and painting. Based on the experiment results, a CF magnesium die-cast rear frame with optimized part design and joining structure to prevent galvanic corrosion has been utilized in the mass production supersport model '08 YZF-R6. This paper describes the mechanical and corrosive properties of the CF magnesium die-casts.

要旨

構造材に使用可能な薄肉大物の部品を生産することを目的として、CF(Controlled Filling)マグネシウムダイキャスト技術の開発を行い、量産二輪車の車体部品に実用化した。本技術は、CFアルミダイキャスト技術をさらに発展させた生産技術であり、真空ダイキャストの活用により、充填時に巻き込まれるガスを減らすことができ、鋳物の健全性だけでなく、機械的性質も向上させることができる。CFマグネシウムダイキャスト材の比疲労強度は、アルミニウムダイキャスト材を約25%上回り、より一層の軽量化が可能になる。また、溶湯に含まれる不純物元素を厳しく管理しているため、ダイキャスト素材の腐食減量は、アルミニウムAC4CH重力鋳造材と同レベルであり、SPHC鋼板と比べて極めて少ない。さらに、最適な下地処理と塗装を組み合わせることにより、外装部品に求められる耐食性を十分に確保できる。これらの基礎的なデータをもとに、マグネシウム材に適した形状設計や電食を回避する締結構造を織込み、2008年モデルYZF-R6リアフレーム(図1)、および、2009年モデルYZF-R1リアフレームに採用された。本論文では、CFマグネシウムダイキャスト材の機械的性質および、耐食性について報告する。



図1 2008年モデル YZF-R6 に採用された
マグネシウムリアフレーム

1 はじめに

操作性と燃費を向上させるため、自動車軽量化の要求は年々強くなっている。アルミニウムの車体は、20年以上前から軽量化を目的に広く二輪車に使用されており、現在までに様々な合金や製造方法が開発されてきた。また、生産性と外観を向上させるため、薄肉大物品の成形が可能なアルミニウムダイキャスト技術が開発され、車体部品に使われてきた。当社でも高真空・金型温度制御・高速射出により、薄肉大物のアルミダイキャスト部品の量産が可能なCFアルミダイキャスト技術を開発し、2003年モデルより積極的に採用してきた²⁾。しかし、アルミニウムを使った車体の軽量化にも限界があり、新たな軽量化技術の開発が期待されている。マグネシウムは、実用金属中、最も軽量であり、次世代の軽量化材料として魅力的である。これまでも、自動車部品へのマグネシウムの適用に関しては、様々な報告がされている。自動車の内装に使われる大型部品をマグネシウム化して大幅な軽量化を達成した例³⁾や、外装用途品のマグネシウム化の報告^{4~5)}もある。しかし、車体部品での使用例報告は、ほとんど見当たらない。二輪車においては、主に軽量化向上の目的からレース車、スポーツ車のエンジンカバー類を中心にマグネシウム合金部品を積極的に採用してきた。しかし、自動車に比べて比較的、軽合金の使用比率の高い二輪車においてもマグネシウムを車体部品へ使用した例は見当たらない。

車体等の構造部品に適用するためには、人の乗車に耐えうる高強度、高靱性はもちろんのこと、外装部品としての十分な耐食性が必要とされる。マグネシウムの耐食性は、ダイキャスト素材に含まれる不純物元素量の影響をうけることが知られており⁶⁾、厳しい溶湯管理が要求される。そこで、従来の高真空・金型温度制御・高速射出に加え、溶湯の成分・温度管理を行い、高品質な薄肉大物のマグネシウムダイキャスト材の製造を可能にした。本論文では、量産二輪車の車体にマグネシウムを使うことを目的として、CFマグネシウムダイキャスト成形材の機械的性質や耐食性を調べ、従来のアルミニウム材との比較を行った。

2 実験方法

試料の化学組成を表1に示す。試料は、高さ120mm×幅250mm×長さ825mmのコールドチャンバー高圧ダイキャスト材より切り出した。基本肉厚は2mmである。図2にCFマグネシウムダイキャスト装置図を示す。不純物元素を厳しく管理した溶湯は、温度低下を最小限に抑えるため、金型に短時間充填される。その間、金型真空度・金型温度・溶湯射出速度は、チップの位置信号によって統合制御されている。表2にダイキャスト鑄造時の主な鑄造条件を示す。ショットウェイトは約5kgである。試料は、真空引き時間を変えて3種類の真空度レベル(−0.06MPa、−0.02MPa、0MPa)のダイキャスト材から切り出して準備した。なお、真空度0MPaは、真空を使用していない条件である。

表1 試料の化学組成 (mass%)

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Be	Mg
5.8	0.02	0.293	0.0168	0.003	0.0013	0.0005	0.0004	Bal.

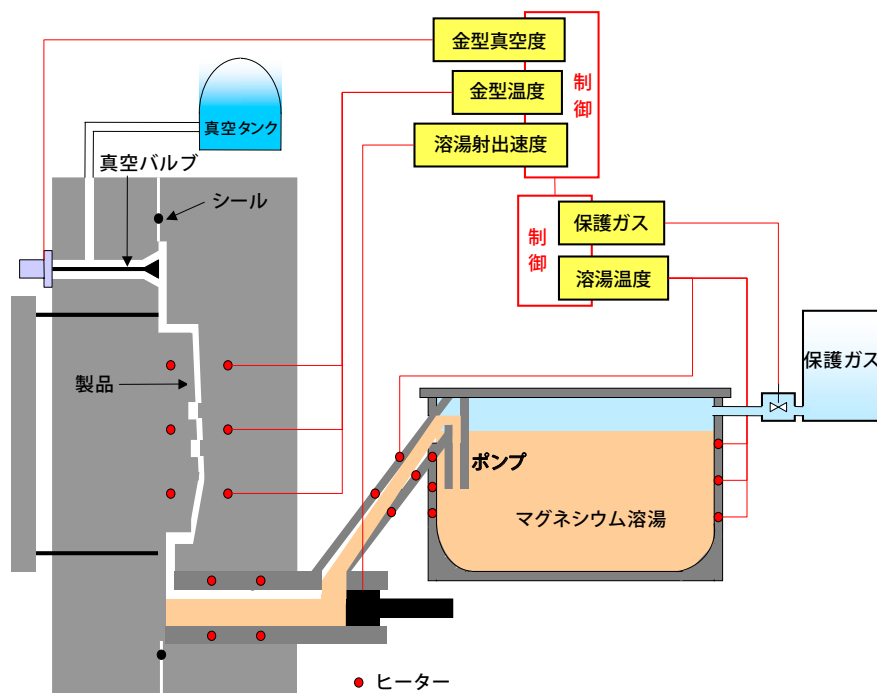


図2 CFマグネシウムダイキャスト装置図

表2 試料の casting 条件

Metal temp.	690 ± 5℃
Die temp.	200 ~ 250℃
Fill time	< 30 msec
Plunger speed	7 m · sec ⁻¹
Casting pressure	53MPa · cm ⁻²
Heat treatment	F

2.1 引張特性

試料の寸法を図3に示す。真空度による機械的性質の違いを調べるために3種類の真空度のダイキャスト材から、1種類あたり4個の試料を評価した。試料はダイキャスト材のゲート部とオーバーフロー部から各2個、切り出した。試験は、いずれもINSTRON 5882サーボ油圧式万能試験機を使用して常温で行い、引張強さ(UTS)と破断伸びを測定した。クロスヘッド速度は1.0mm・min⁻¹である。比較のため、アルミニウムA365-F材(真空度-0.06MPa、ゲート部)も準備した。また、試料採取部の断面組織も観察した。

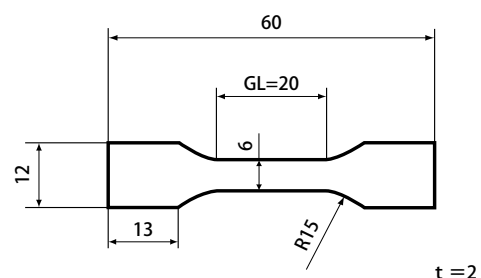


図3 引張試験用試料の寸法 (mm)

2.2 疲労特性

疲労試験は東京衡機製 PWOG-L タイプ平面曲げ疲労試験機を使用して常温で行った。全ての疲労試験は応力比($R = -1$)にて周波数25Hzで行った。試料は、引張特性の良好であった真空度 -0.06MPa 、ゲート部より切り出し、表面を1500番の研磨紙で両面研磨した。試料の寸法を図4に示す。比較のため、アルミニウムA365-F材(真空度 -0.06MPa 、ゲート部)も準備した。

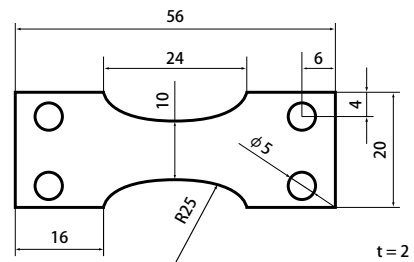


図4 疲労試験用試料の寸法 (mm)

2.3 耐食性

耐食性試験は、スガ試験機製ISO-3型試験機を使用し、JIS Z 2371塩水噴霧試験に基づいて行った。試験条件を表3に示す。結果を比較するため、JIS AC4CHアルミニウム重力鑄造材とSPHC鋼板も準備した。すべての試料は、表面を1500番の研磨紙で両面研磨した。試験後に表面の観察を行うとともに、重量の変化を測定した。次に、下地処理と塗装を行い、表面にカッターナイフで傷を入れた試料を準備し、同様に塩水噴霧試験を行った。試験後にテープ剥離を行い、外観観察を行った。また、マグネシウム部品はアルミニウム部品と締結して使用される場合が想定されるため、電食を防ぐ締結構造が必要となる。図5に示す締結構造の試料を準備し、塩水噴霧試験を行った。

表3 耐食性試験の条件

Testing machine	SUGA CASSER-ISO-3
Standard	JIS Z 2371
Solution	50 ± 5g/L NaCl (PH6.5 ~ 7.2)
Temp.	35 ± 2°C
Angle of specimen	30°

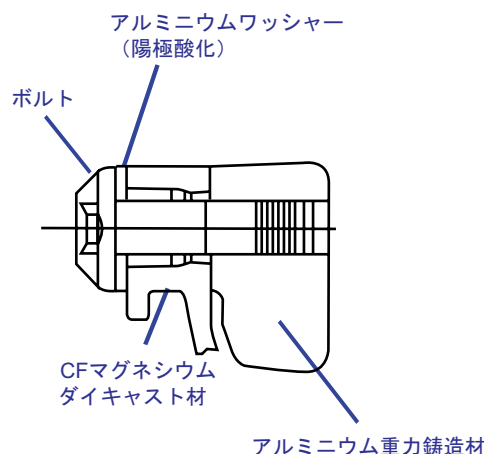


図5 マグネシウム部品とアルミニウム部品との電食防止締結構造

3 結果

3.1 引張特性

真空度の違いによるUTSの関係を図6に示す。ゲート部のUTSは真空度が上がると少しずつ向上する。オーバーフロー部のUTSは、真空度が上がるにつれて大幅に向上し、真空度 -0.06MPa の時、ゲート部とほぼ同等となる。真空度 -0.06MPa の時、ゲート部のUTSは 250MPa 以上であり、アルミニウムA365材のゲート部より少し低い。

真空度の違いによる破断伸びの関係を図7に示す。ゲート部、オーバーフロー部の伸びは真空度が上がるにつれて向上し、真空度 -0.06MPa の時、ゲート部とほぼ同等となる。真空度 -0.06MPa の時、ゲート部の伸びは 15% 以上であり、アルミニウムA365材を大きく上回る。オーバーフロー部の伸びは約 12% であった。その値はCFマグネシウムダイキャスト材ゲート部よりは低いが、アルミニウムA365材のゲート部より高い。

断面組織観察結果を図8に示す。マトリックスの結晶粒径と金属間化合物の分布は、どの条件もほぼ同じであった。真空度 0MPa のオーバーフロー部中心側には、複数のマイクロポアが認められた。

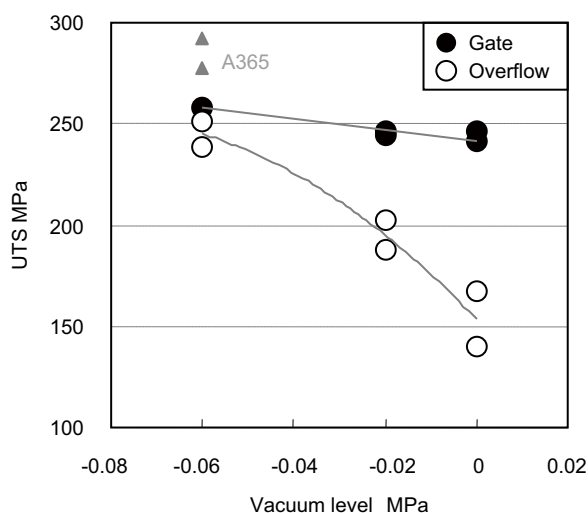


図6 真空度の違いによる UTS の関係

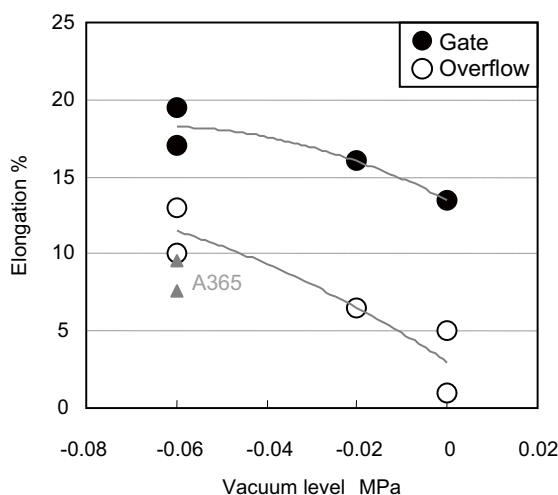


図7 真空度の違いによる伸びの関係

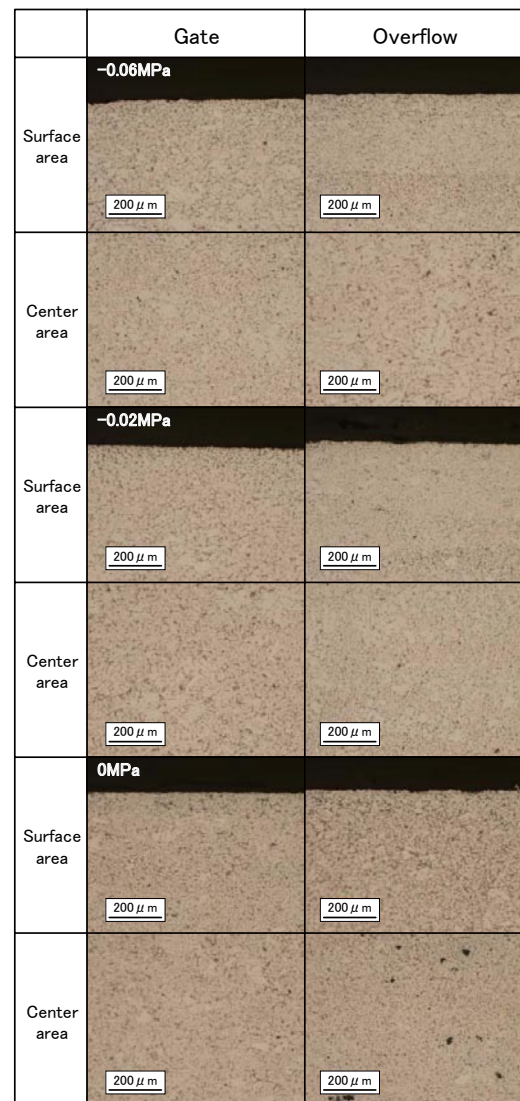


図8 断面組織観察結果

3.2 疲労特性

CFマグネシウムダイキャスト材とアルミニウムA365材のS-N曲線を比較して図9に示す。CFマグネシウムダイキャスト材は、高サイクル領域で時間強度の変化が少なく、高サイクル領域では低サイクル領域と比較してアルミニウムA365材との差が小さくなる。 1×10^7 回を疲労限度と定め、疲労限度応力で比較した場合、CFマグネシウムダイキャスト材は85MPaであり、アルミニウムA365材の93MPaより約10%低い。比重の影響を考慮し、比疲労強度（応力振幅を比重で除した値）での比較を行った（図10）。疲労限度応力で比較した場合、CFマグネシウムダイキャスト材は、アルミニウムA365材よりも約25%高い。

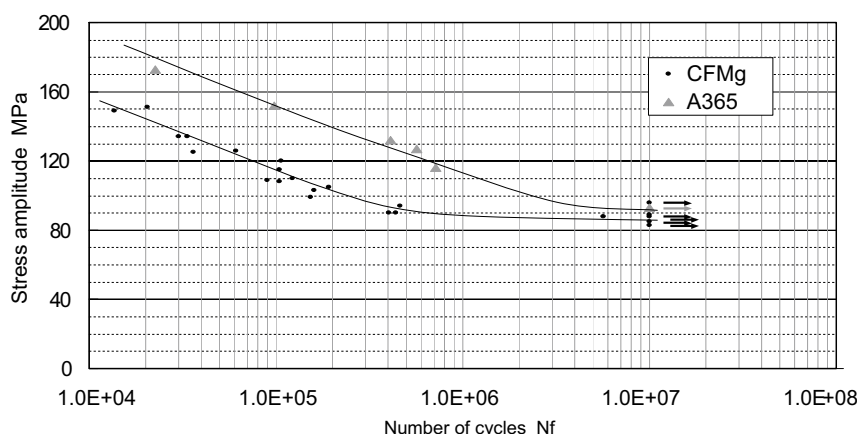


図9 CF マグネシウムダイキャスト材とアルミニウム A365 材の S-N 曲線

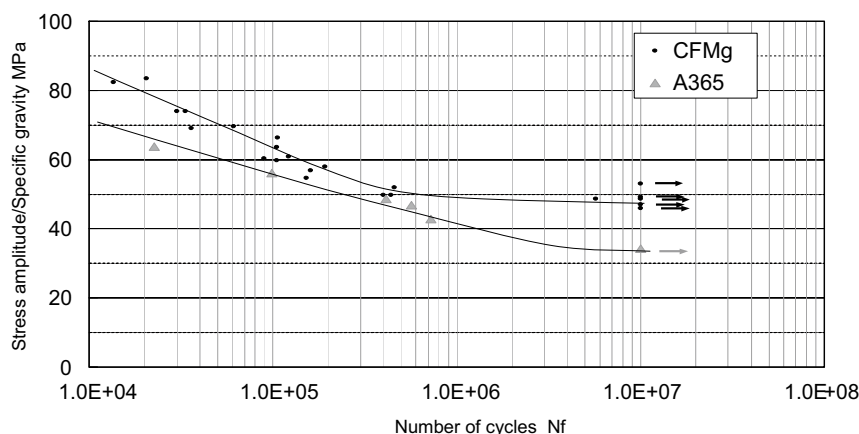


図10 CF マグネシウムダイキャスト材とアルミニウム A365 材の比疲労強度比較

3.3 耐食性

図11に塩水噴霧試験後の外観観察結果を示す。CFマグネシウムダイキャスト材の表面は白く変色しているが、表面に腐食ピットは観察されない。AC4CH重力鋳造材もまた、表面が白く変色しているが、腐食ピットは観察されない。SPHC鋼板の表面は茶色く変色し、表面に凹凸が認められる。

図12に塩水噴霧試験における腐食減量を示す。CFマグネシウムダイキャスト材はAC4CH重力鋳造材とほぼ同レベルであり、SPHC鋼板と比べて極めて少ない値であった。

図13に下地処理と塗装を行った試料の塩水噴霧試験後の外観観察結果を示す。テープ剥離を行った後も、傷部からの腐食は認められない。

図14は、図5に示した締結構造品の塩水噴霧試験後の写真である。締結部に有害な腐食は認められない。

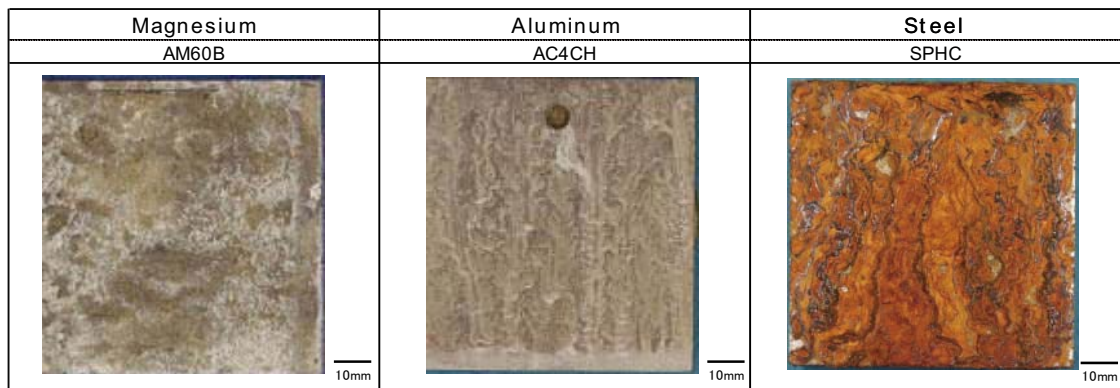


図 11 塩水噴霧試験後の外観観察結果

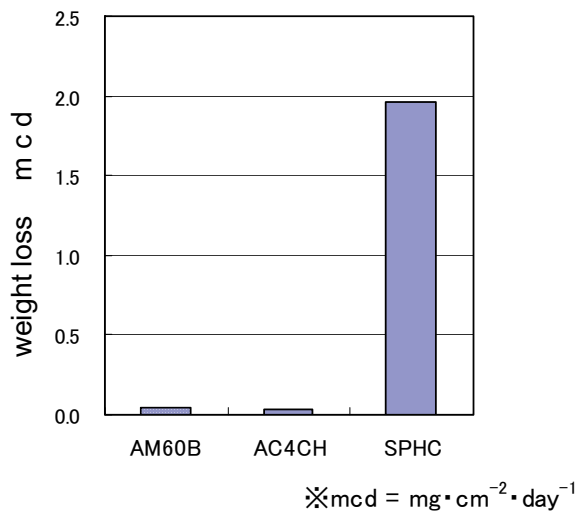


図 12 塩水噴霧試験における腐食減量



図 13 下地処理と塗装を行った CF マグネシウムダイキャスト材の塩水噴霧試験後の外観



図 14 塩水噴霧試験後の締結部外観

4 考察

4.1 引張特性

図6と図7を比較すると、UTSと伸びは真空度が高い時(−0.06MPa)に最も高い値となる。これは、マグネシウムダイキャスト材において真空度が引張特性に影響することを示している。その影響はオーバーフロー部において顕著に現れる。図8より、オーバーフロー部のマイクロポアは真空度が高いと観察されていない。断面組織は、真空度によって大きく影響されていない。以上の結果より、真空は鋳物中のマイクロポアなどの欠陥を減らすことにより、機械的性質を向上させる効果があると考えられる。一般的にダイキャストは溶湯速度が速く、充填中に溶湯が渦巻くので、キャビティ内のガスを多く巻き込む傾向がある。特にオーバーフロー部はゲート部に比べ、巻き込まれたガスが集まりやすい。真空は、キャビティ内のガスを除去し、鋳造品にガスを取り込む機会を減らし、最終的に鋳造品中のマイクロポアを減らす効果があると考えられる(特にオーバーフロー部)。結果として引張特性を向上させていると考えられる。

4.2 疲労特性

一般にマグネシウムダイキャスト材はアルミニウム材と比較して機械的性質が低いと言われているが、CFマグネシウムダイキャスト材は、アルミニウムA365材と比較して疲労限度応力の差は大きくない。図7、9より、延性が高いことが、高サイクル領域で疲労クラックの進展速度を遅くしていると考えられる。また、CFマグネシウムダイキャスト材は、比疲労強度で比較すると、アルミニウムA365材よりも約25%高いので、マグネシウムに適した設計を行うことで部材をより軽量に設計できることを示している。

4.3 耐食性

図13より、下地処理と塗装を行ったCFマグネシウムダイキャスト材は、塩水噴霧試験で傷部から腐食が認められないレベルの耐食性を示している。図11、12より、CFマグネシウムダイキャスト材はAC4CH重力鑄造材とほぼ同レベルの低い腐食減量を示している。素材の耐食性が良好であることが、下地処理と塗装を行ったCFマグネシウムダイキャスト材においても良好な耐食性を示す主な理由と考えられる。図14より、電位差の小さな金属の選択や、腐食回路の形成を妨げるための絶縁処理を行うことにより、異種金属との締結部においても、十分な耐食性が確保できると考えられる。

5 おわりに

CFマグネシウムダイキャスト材の機械的性質および、耐食性について調査した。

- 1) CFマグネシウムダイキャスト材は真空度 -0.06MPa において 250MPa のUTSと10%以上の伸びを有する。伸びはアルミニウムA365材を上回る。
- 2) CFマグネシウムダイキャスト材の真空度 -0.06MPa 、ゲート部の疲労限度応力は、 85MPa ($R=-1$) である。
- 3) CFマグネシウムダイキャスト材の腐食減量は、AC4CH重力鑄造品と同レベルであり、SPHC鋼板と比べて極めて少ない。
- 4) 下地処理と塗装を行ったCFマグネシウムダイキャスト材は、塩水噴霧試験において傷部から腐食が認められないレベルの耐食性を持つ。
- 5) CFマグネシウムダイキャストリアフレームは、アルミニウムダイキャストリアフレームと比較して約20%の軽量化を達成している。また、適切な締結構造を選択することにより、異種金属との接触部においても、外装部品に求められる十分な耐食性を確保できる。

■参考文献

- 1) 鈴木貴晴, 稲波純一, 小池俊勝: アルトピア 第38巻 第6号 (2008) Page 9-14
- 2) 橋内透, 山縣裕, 小池俊勝: 軽金属 第56巻 第4号 (2006) Page 233-239
- 3) S.Glen, S.Brian "Magnesium in Automobiles Application Trends and Advantages" Proc Annual Meeting International Magnesium Association Vol.63rd Page.66-72 (2006)
- 4) J.S.Balzer, P.K.Dellock and M.H.Maj, G.S.Cole, D.reed, T.Davis, T.Lawson, G.Simonds. "Strucural Magnesium Front End Support Assembly" SAE Technical Paper 2003-01-0186

- 5) C.J.Duke and S.D.Logan, "Lightweight Magnesium Spare Tire Carrier" Proc Annual Meeting International Magnesium Association Vol.64rd Page.75-80 (2007).
- 6) J.E.Hillis and K.N.Reichek "High Purity Magnesium AM60 Alloy: The Critical Contaminant Limits and the Salt Water Corrosion Performance" SAE Technical Paper 860288-1986

■ 著者



鈴木 貴晴

Takaharu Suzuki

コーポレートR&D統括部
材料技術部



稲波 純一

Junichi Inami

コーポレートR&D統括部
材料技術部



小池 俊勝

Toshikatsu Koike

コーポレートR&D統括部
材料技術部