

車両構体への適用に向けた 難燃性マグネシウム合金の破壊特性の評価

森 久史* 上東 直孝* 宮内 瞳苗*
石塚 弘道** 辻村 太郎***

**Evaluation of the Fracture Property of the Flame-resistant Magnesium Alloy
for the Application to Car Vehicle Body Structure**

Hisashi MORI Naotaka UEHIGASHI Toru MIYAUCHI
Hiromichi ISHIDUKA Taro TSUJIMURA

The flame-resistant magnesium alloy is a magnesium alloy which has had calcium added to it. Using flame-resistant magnesium alloy should make it possible to reduce the weight of car bodies. However, the fracture properties of this material, such as fracture toughness (J_{IC}) and impact value remain to be investigated before it can be applied to the construction of railway vehicle structures. This paper describes the evaluation of the fracture properties which have become clear through fracture toughness and Charpy impact tests on the flame-resistance magnesium alloy. As a result of the comparison the fracture toughness and the impact value between AZ31 alloy and AZX311 alloy, it has been clarified that the J_{IC} were influenced by the addition of Ca, the Charpy impact value were correlated with the J_{IC} , and the ductile mechanism of the fracture were shown in the flame-resistant magnesium alloy.

キーワード：難燃性マグネシウム合金，車両軽量化，破壊じん性，き裂発生，金属組織

1. はじめに

車両構体の軽量化を目的として難燃性マグネシウム合金の適用が考えられる。難燃性マグネシウム合金はマグネシウム合金にカルシウムを添加した合金であり、カルシウムを添加することによって酸素の遮断性が増し、発火温度が上昇して燃えにくくなる特性を示す¹⁾。

これまで著者らは難燃性マグネシウム合金を試作して引張強さがアルミニウム合金（6N01材）とほぼ同等であり、温間加工および溶接・接合も可能であることを確認した。しかし、材料の延性が低いところに欠点があった²⁾。

鉄道部材は強度を重視して設計が行われる。このような延性の低い材料においては、材料内に製造欠陥や溶接欠陥が存在した場合、欠陥部における応力集中によってき裂が発生しやすくなり、塑性変形が生じる前に急速破壊する可能性が高くなる。そのため、設計時に設定した許容応力よりも低い強度で破壊が生じるようになる。

そこでこのような軽量金属材料を扱うには、破壊特性を十分に明らかにしておくことが必要となる。代表的な

破壊特性の検討としてシャルピー衝撃試験がある。ただし、この試験で得られる吸収エネルギーや衝撃値は材料間の評価において有効なパラメータになるが、構造設計におけるパラメータとしては使用できない。一方、破壊特性を定量的に評価するためのパラメータとして破壊じん性がある。

破壊じん性を評価するには、まず破壊の物理的な現象を定義する必要がある。すなわち、き裂が発生した時点または、き裂が進展して完全に分離する時点等、破壊の定義を明確にすることが必要である。破壊じん性は、き裂が進展して完全に分離する時には臨界応力拡大係数 (K_{IC}) として定義される。また金属材料のような塑性変形が生じる材料では、塑性変形の影響が生じることから、欠陥からき裂が発生する延性き裂発生じん性 (J_{IC}) も破壊じん性値として定量的に表される³⁾。

ここで、 K_{IC} は欠陥からき裂が発生し、そのき裂が急速に進展して破壊に至るまでの抵抗、 J_{IC} は欠陥からき裂が発生する抵抗を表す。これらの値は強度や伸びと同様に材料固有の特性となる。

マグネシウム合金の破壊じん性は汎用マグネシウム合金については調べられている^{4) 5)} が、難燃性マグネシウム合金について調査された報告例はない。

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室
** 車両構造技術研究部
*** 研究開発推進室

特集：材料技術

難燃性マグネシウム合金は、難燃性を付与するために添加したカルシウムが反応して金属間化合物 (Al_2Ca) を生成し、それが破壊じん性に影響すると考えられる。

また、破壊じん性試験は特殊な試験片等が必要であり、品質評価試験としては簡便ではない。そこで、破壊じん性値とシャルピー衝撃値との関係を明らかにしておくことにより、破壊特性評価をシャルピー衝撃試験によって簡便に評価できるようになる。

そこで本研究では、難燃性マグネシウム合金に引張試験、破壊じん性試験、シャルピー衝撃試験を行って破壊特性を調査し、難燃性マグネシウム合金の添加元素であるカルシウムが破壊特性に及ぼす影響、シャルピー衝撃値と破壊じん性との関係、破壊機構について調べた。

2. 調査方法

2.1 試験材

本試験では、亜鉛、カルシウムの添加量を一定とし、アルミニウム量が異なる2種類の難燃性マグネシウム合金、Mg-3Al-Zn-Ca合金（以降、AZX311合金とする）およびMg-6Al-Zn-Ca合金（以降、AZX611合金とする）を用いた。また比較のために、カルシウム非添加でアルミニウム量および亜鉛量が同じ化学組成の汎用マグネシウム合金、Mg-3Al-Zn合金（以降、AZ31合金とする）およびMg-6Al-Zn合金（以降、AZ61合金とする）を用いた。試験材にはそれぞれを押し手法によって製作した板を用いた。

図1に各合金の金属組織を示す。また表1に光学顕微鏡観察で撮影した写真から求めた平均結晶粒径を示す。

試験片には等軸の結晶粒が認められて、それらの結晶粒の大きさは表1に示すようにAZX611合金 > AZ61合金 > AZ31合金 > AZX311合金であった。また、AZX311合金およびAZX611合金では微細な析出物が筋状となって押し方向に認められた。

引張試験、破壊じん性試験、シャルピー衝撃試験では、押し方向に対して平行に試験片を採取して調査した。

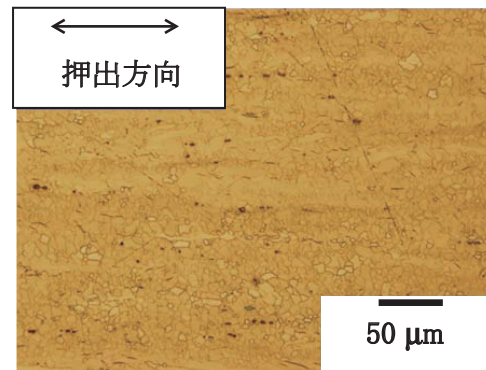
表1 試験材の平均結晶粒径 (μm)

合金種類	AZ31	AZ61	AZX311	AZX611
結晶粒径	7.5	31.0	6.6	38.0

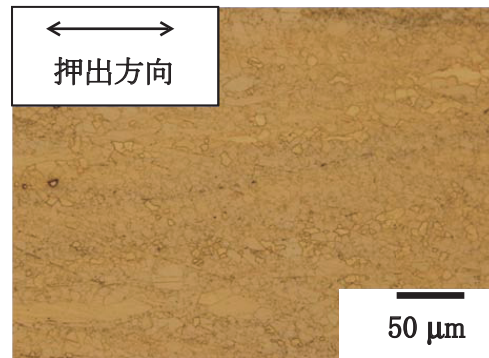
2.2 試験方法

2.2.1 引張試験

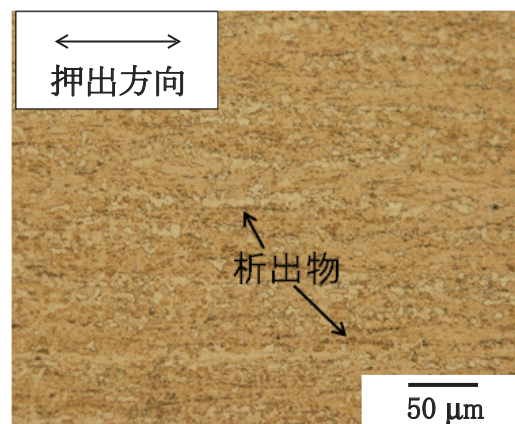
引張試験には板形状の試験片を用いた。寸法はJIS金属材料の引張試験14号規格の比例試験片基準に準じている。試験は、油圧引張圧縮試験機を用い、室温、大気中、ひずみ速度として0.048/sで行った。



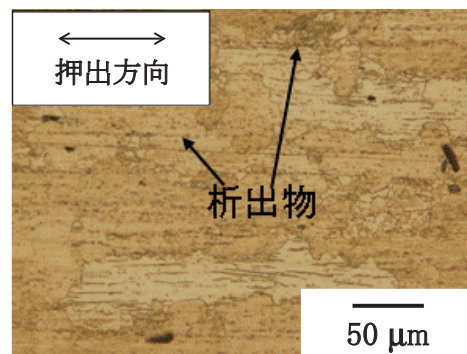
(a) AZ31合金



(b) AZ61合金



(c) AZX311合金



(d) AZX611合金

図1 試験材の金属組織
(光学顕微鏡による観察)

2.2.2 破壊じん性試験

破壊じん性試験は、米国機械学会規格 (ASTM E813-81 規格) の「Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness」に従って行った。試験片の形状および寸法を図2に示す。これは、厚みが5mmのコンパクトテンション試験片 (CT 試験片) である。

破壊じん性の求め方について説明する。まず、図2に示すCT試験片に疲労負荷によって予き裂を導入し (予き裂長さ (a_0) は規格範囲: $a_0 \geq 1.25\text{mm}$)、室温において予き裂材に負荷試験速度 $8.3 \times 10^{-5}\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ で引張負荷を与えてき裂を進展させた。

荷重とき裂長さ (予き裂から進展したき裂の長さ) との関係を求め、推奨計算式 (J積分法) を用いてJ値を得る。これをいくつかの長さの予き裂材に対して行い、J値を求め、き裂長さ (予き裂長さ+進展き裂長さ) とJ値との関係を示す線 (R 曲線) を得る。

次に式 (1) のオフセット直線を引張試験の結果を参照して求め、その直線をR 曲線にプロットする。R 曲線とオフセット直線との交点を J_Q 値として定め、求めた J_Q 値を式 (2) で評価する。式 (2) を満足する場合には J_Q 値を延性き裂発生じん性 (J_{IC}) として定める。

$$J = 2\sigma_0\Delta a \tag{1}$$

$$B \geq 2.5 \left(\frac{J_Q}{\sigma_y} \right) \tag{2}$$

ここで、 σ_0 は引張試験で得られた0.2%耐力 (σ_y) と最大引張強さの平均値、 Δa はき裂長さ、 B は板厚である。

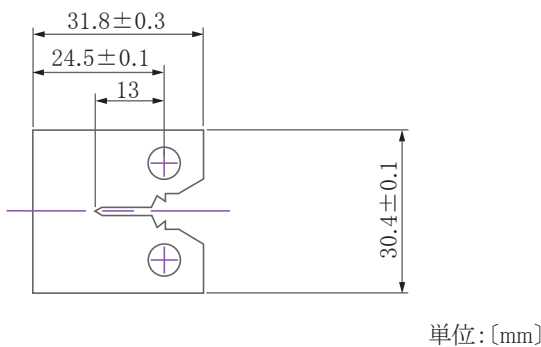


図2 破壊じん性試験に用いたCT試験片の形状および寸法

2.2.3 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験は、図3に示す試験片を用い、衝撃値および吸収エネルギーを求めた。試験には東京試験機社製シャルピー試験機を用い、秤量は5kg・m、ハンマーの持ち上げ角度は138.5degで行った。

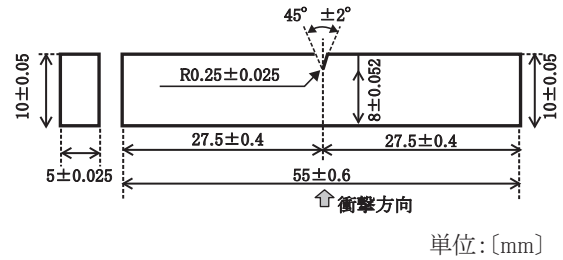


図3 シャルピー衝撃試験に用いた試験片の形状および寸法

2.2.4 破面観察

破壊の機構を調査するため、各試験後の破面は走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。また、き裂の進展状況の観察は光学顕微鏡を用いて行った。

3. 試験結果および考察

3.1 引張試験による強度確認

図4に0.2%耐力および最大引張強さを示す。また表2に破断伸びを示す。0.2%耐力および最大引張強さはカルシウムを添加しても影響は少ないが、伸びはカルシウムの添加によって低下することがわかった。

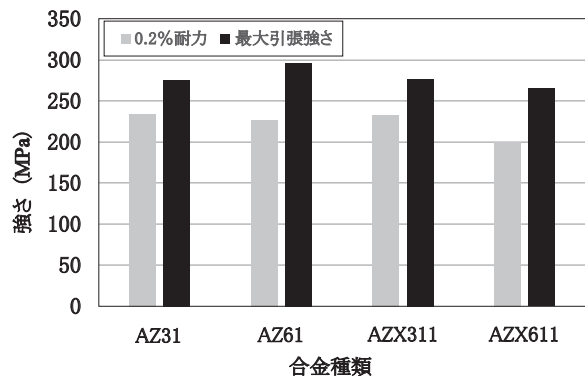


図4 試験材の0.2%耐力と最大引張強さ

表2 試験片の伸び (%)

合金種類	AZ31	AZ61	AZX311	AZX611
伸び	18.8	18.8	14.6	10.6

3.2 破壊じん性試験による評価

図5に代表的な例としてAZ31合金およびAZX311合金のR 曲線を示す。また、図1および式 (1) より得られたオフセット直線も同時に示した。R 曲線とオフセット直線の交点から求めた。 J_Q は式 (2) を満足しており、本研究で求められた J_Q は J_{IC} として定義できる。 J_{IC} を表3に示す。難燃性マグネシウム合金のじん性は汎用合金よりも低い値を示す。このことから、カルシウムの添

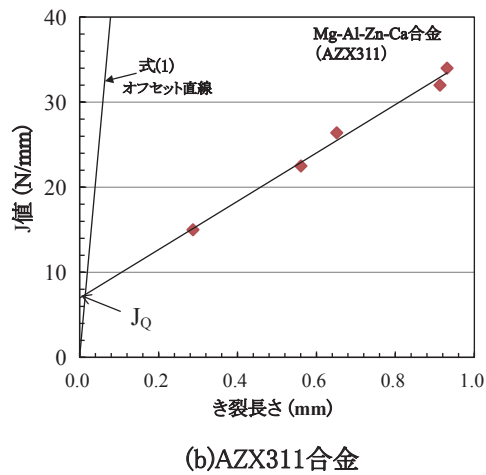
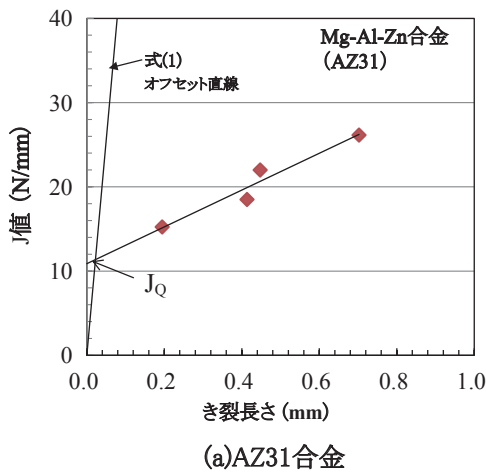


図5 AZ31合金とAZX311合金のR曲線

表3 試験片の延性き裂発生じん性 J_{IC} (N/mm)

合金種類	AZ31	AZ61	AZX311	AZX611
延性き裂発生じん性	11.7	7.4	7.1	3.4

加がじん性に及ぼす影響は大きいと考えられる。

式(2)を満足する場合、 J_{IC} と K_{IC} との間には(3)式の関係がある⁵⁾。ここで、Eは弾性率、 ν はポアソン比である。

$$K_{IC} = \left(\frac{EJ_{IC}}{1-\nu^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

超音波加振法によって弾性率を求めた結果、AZ31合金で42GPa、AZ61合金で43GPa、AZX311合金で44GPa、AZX611合金で41GPaであり、ポアソン比は合金種類によらず0.29であった。弾性率及びポアソン比の測定結果ならびに J_{IC} 値を式(3)に導入し、 K_{IC} を求めた結果を表4に示す。

難燃性マグネシウム合金の K_{IC} の報告例がないため、AZ31合金、AZ61合金の K_{IC} を文献で調べた結果、

表4 試験片の破壊じん性 K_{IC} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)

合金種類	AZ31	AZ61	AZX311	AZX611
破壊じん性	23.1	18.2	18.0	12.5

AZ31合金で $22 \sim 24 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ であり、AZ61合金で $17 \sim 20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ との報告がある^{4) 5)}。本結果より、本試験で求めた破壊じん性値は妥当な値を示していると考えられる。

3.3 シャルピー衝撃試験による評価

表5に吸収エネルギーとシャルピー衝撃値の結果を示す。吸収エネルギー及びシャルピー衝撃値ともに汎用マグネシウム合金と比較して難燃性マグネシウム合金では低下することを確認した。また難燃性マグネシウム合金においても、破壊じん性と同様にAZX311合金がAZX611合金よりも大きいことを認めた。

シャルピー衝撃値はき裂の発生やその進展を含めたじん性となる⁶⁾。本研究の結果では、延性き裂発生じん性とシャルピー衝撃値との一致が認められる。

このことから、シャルピー衝撃値は延性き裂発生じん性を表していると考えられ、マグネシウム合金のき裂発生じん性はシャルピー衝撃値を用いることで簡便に評価できると考えられる。

表5 試験片の吸収エネルギー (J) とシャルピー衝撃値 (J/cm^2)

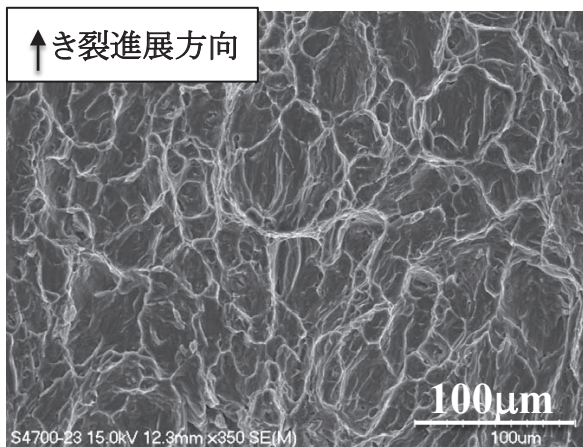
合金種類	AZ31	AZ61	AZX311	AZX611
吸収エネルギー	3.0	2.9	2.1	1.2
シャルピー衝撃値	7.7	7.3	6.0	3.0

3.4 破面状況

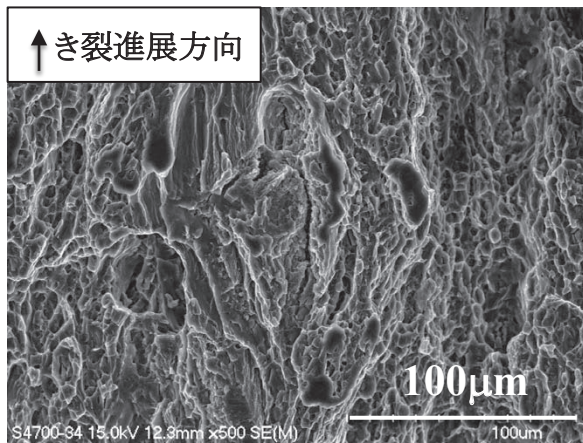
代表例として図6にAZ31合金及びAZX311合金の破壊じん性試験後の破面を示す。AZ31合金およびAZX311合金ともに破面には空洞状の破壊の痕跡が認められる。

一般的に金属材料のマクロでの破壊機構は脆性機構と延性機構とに分類され、脆性破壊では破面が平坦であるのに対し、延性破壊では空洞状の破面を示す⁷⁾。そこで破面を切断し、断面方向から観察した結果を図7に示す。AZ31合金及びAZX311合金ともに破面に塑性変形によって生じたと考えられる微細な凹凸を示しており、脆化要素である粒界き裂等は認められない。

塑性変形の観点から破壊機構を分類すると、脆性機構は伸びの低い材料、延性機構は伸びの大きな材料で認められる^{7) 8)}。引張試験後の破面断面観察よりマグネシウム合金及び難燃性マグネシウム合金ともに伸びは小さ



(a)AZ31合金



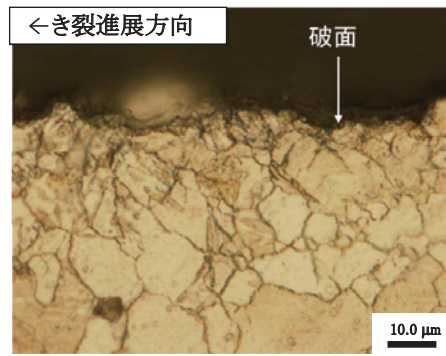
(b)AZX311合金

図6 AZ31合金とAZX311合金の破壊じん性試験後のSEMによる破面観察結果

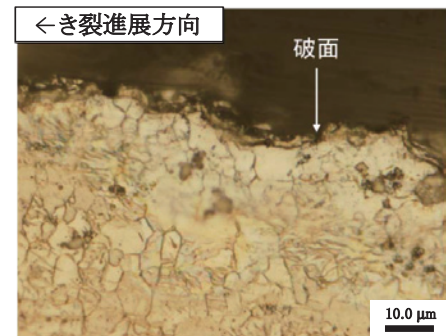
いが、延性機構によってき裂が進展した痕跡が認められる⁵⁾。

しかし、マクロな破面解析では両者の相違が認められず、Caを添加することによる破壊じん性の低下を説明できない。その相違を確認するために、破面をミクロな視点から解析した。その結果、難燃性マグネシウム合金で発生した空洞の径は汎用マグネシウム合金よりも微細であることがわかった。

難燃性マグネシウム合金の破面を詳細に観察したところ、図8に示すように空洞近傍にて析出物の割れが多数認められた。このように、マクロ観察では破壊機構に相違が認められなかったが、ミクロ観察において相違が認められた。難燃性マグネシウム合金で認められる析出物はアルミニウムとカルシウムとの化合物であることを確認している²⁾。この化合物はマグネシウムの母相よりもきわめて硬く弾性率が高い。そのため、析出物で応力集中が発生し、その結果、微細な空洞が発生しやすくなる。



(a)AZ31合金



(b)AZX311合金

図7 破面の断面方向からの観察結果

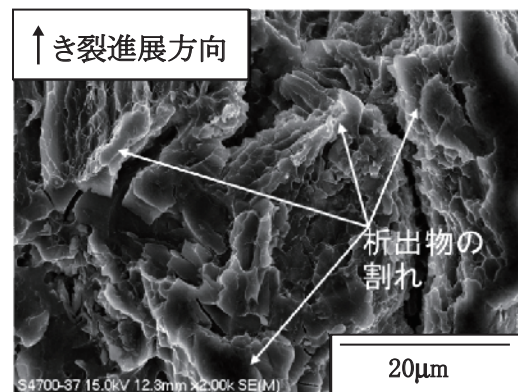


図8 AZX311合金の破壊じん性試験後の破面で認められた析出物の割れ

また、析出物自身が破壊する可能性がある⁷⁾。

このため、難燃性マグネシウム合金の破壊じん性が汎用マグネシウム合金と比較して低下したと考えられる。

以上のように、マグネシウム合金の難燃性を付与するために添加したカルシウムが破壊じん性に影響を及ぼしていることが分かった。車両部材への適用を考えるに当たり、強度に基づいた設計とともに破壊じん性を考慮したフェールセーフ設計についても検討しておくことが必要であると考えられる。

4. おわりに

本研究では、難燃性マグネシウム合金の破壊特性を調査し、難燃性マグネシウム合金の添加元素であるカルシウムが破壊特性に及ぼす影響、シャルピー衝撃値と破壊じん性との関係、破壊機構について調べた。結果を下記に示す。

- (1) 難燃性マグネシウム合金は汎用マグネシウム合金と比較して、素材の引張強度に相違は認められないが、引張の伸びや破壊じん性およびシャルピー衝撃値が低いことを確認した。
- (2) シャルピー衝撃値と延性き裂発生じん性が良好な対応を示した。マグネシウム合金のき裂発生じん性の評価ではシャルピー衝撃値を用いることで簡便に評価できることがわかった。
- (3) 難燃性マグネシウム合金では、伸びは小さいが、空洞を伴う延性機構により破壊することがわかった。難燃性マグネシウム合金の破面で認められた空洞は汎用マグネシウム合金よりも微細である。
- (4) 車両部材への適用を考えるに当たり、強度に基づいた設計とともに破壊じん性を考慮したフェールセーフ設計についても検討しておくことが必要であると考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、千葉工業大学 船見教授、野田博士には多大なる協力を得た。この場をお借りして心よりお礼申し上げます。

文 献

- 1) 秋山 茂, 上野 英俊, 坂本 満, 平井 寿敏, 北原 晃: 難燃性マグネシウム合金の開発, まてりあ, Vol. 39, No.1, pp.72-74, 2000
- 2) 森 久史, 上東 直孝, 辻村 太郎, 石塚 弘道, 花木 悟, 清水 和紀: 車両構体への難燃性マグネシウム合金の適用, 鉄道総研報告, Vol.28, No.2, pp.41-46, 2014
- 3) 迎町 典彦: 欠陥評価のための破壊力学, 防食技術, Vol.37, No.7, pp.438-443, 1988
- 4) 染川 英俊: マグネシウム合金の破壊靱性に関する問題点とその改善策, まてりあ, Vol.47, No.43, pp.157-160, 2008
- 5) H.Somekawa and T.Mukai: Effect of dominant diffusion process on cavitation behavior in superplastic Mg-Al-Zn alloy, Scr. Mater., Vol. 57, No.11, pp. 1008-1011, 2007.
- 6) 三村 宏: 破壊靱性を支配する諸因子, 鉄と鋼, Vol.64, No.7, pp.906-916, 1978
- 7) 小指 軍夫: 破壊現象, 日本金属学会会報誌, Vol.26, No.7, pp.650-655, 1987
- 8) 向井 喜彦: 各種破面フラクトグラフィーの概説, 溶接学会誌, Vol.45, No.12, pp.1001-1007, 1976