

# 高延性 Al-Mg 系合金ダイカストの鑄肌曲げ変形挙動

## Bending Behavior of Casting Surface in High Ductility Al-Mg System Alloys for High-Pressure Die Casting

山浦 秀樹\*  
Hideki Yamaura

渡邊 秀綱\*\*  
Hidetsuna Watanabe

中野 英治\*  
Hideharu Nakano

島崎 真一\*\*  
Shin-ichi Shimasaki

自動車の車体構造部品を想定した高延性 Al-Mg 系合金ダイカストのミクロ組織や内部品質の状態と機械的性質、特に実際の部品の変形を想定した鑄肌の曲げ特性への影響について、基礎的な研究を行った。この合金は難鑄造材であるため、ダイカスト品には微小ひけ巣が存在する。しかし、材料自体の延性が高いことで、破断することなく屈曲することがわかった。実際に車体衝撃吸収部材を試作して圧潰試験を行ったところ、アルミニウム展伸材に匹敵する変形挙動を示すことから、高延性 Al-Mg 系合金ダイカストは車体部品に使用できる可能性がある。

Basic research on high ductility Al-Mg system alloys for high-pressure die casting, which is assumed to be automobile body structure parts, was studied. The investigation was focused on the effect of micro structure and internal conditions upon mechanical properties, especially bending performance with casting surface, which is the main transformation of actual components. This alloy has such poor castability that micro shrinkage often exists in castings. However, this alloy casting can be flexure without fracture by bending formation due to the high ductility of the material. The compression tests of an impact absorbed parts model from die castings of this alloy were carried out experimentally and the results showed the deformation behavior is equivalent to that of expanded aluminum alloys. Therefore, die casting products with this alloy can be used for automobile body parts.

● Key Word : Al-Mg 系ダイカスト, 高延性, 車体構造部品  
● Production Code : Aluminum alloy die casting

● R&D Stage : Research

### 1. 緒言

自動車など輸送機器の燃費向上は、化石燃料の枯渇と二酸化炭素の増加を抑制するために取り組み続けなければならない課題である。そのための一つの手段として軽量化が挙げられる。しかし、自動車は安全性や快適性の向上を目的とした機能が増えているため、むしろ車両重量は増加する傾向にあり<sup>1)</sup>、この観点からも軽量化の推進が強く求められている。軽量化を達成する手段は、部品統合などによる構造変更と、より低密度の材料を採用する材料置換のいずれかで実現されるが、現実には両方の考えを合わせて具体化されている<sup>1), 2)</sup>。

アルミニウム合金による軽量化はエンジン・駆動系部品への採用が進んでおり、1990年以降には車体そのものをアルミニウム合金とする車種が量産され始めた<sup>3)</sup>。21世紀に入ると、オールアルミニウム車体とともにマルチマテリアル車体と称して、一般鋼板、ハイテン、アルミニウム合金、

マグネシウム合金、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) などを適材適所で組み合わせて、軽量化とコストの両立を狙う車種が登場している<sup>4)</sup>。どちらの車体も骨格を有するスペースフレーム構造が主流になるとの報告があり<sup>2)</sup>、スペースフレーム構造では、板以外にも押出し材や鑄造品が多用されることから<sup>2)~4)</sup>、アルミニウムダイカストの新たな用途として有望である。

このような車体構造部品は、衝突安全性の確保のために高延性を有することが必須条件と考えられ、従来のアルミニウムダイカスト部品よりも高い伸びや曲げ特性が求められる。そこで、アルミニウム鑄造合金の主流である Al-Si 系でさらなる延性向上を図る取り組みと、材料特性として Al-Si 系よりも高い延性が見込める Al-Mg 系合金をダイカストに使用する取り組み、それぞれで材料と工法の開発が進められている<sup>5)</sup>。

Al-Mg 系合金は、成分調整によって熱処理をしなくても 220 MPa 以上の高耐力から 25 % 以上の伸びを示す高延性ま

\* 日立金属株式会社 自動車機器事業部  
\*\* 株式会社アルキャスト

\* Automotive Components Division, Hitachi Metals, Ltd.  
\*\* Alcast, Ltd.

で、機械的性質を変化させることが可能な材料である。しかし、Al-Si系共晶合金と比べると、凝固開始温度が高く、凝固時に体積が膨張するSiを含まない合金であることから、凝固時の溶湯補給が完全でない限り微小ひげ巣の発生は不可避と考えられ<sup>6), 7)</sup>、凝固割れが発生しやすいなど、いわゆる難鑄造合金である。したがって、ニアネットシェイプで鑄造することは困難で、採用例は少ない。

一方で1990年代から高真空ダイカスト技術が大きく進歩し、溶湯の射出機構も高精度で高速に充填できるようになったことから、鑄造性の欠点を鑄造技術である程度は補えるようになってきた<sup>5)</sup>。実際に日立金属では、種々のダイカスト合金における内部品質と射出条件の関係を適正化する手法の研究に取り組み<sup>8), 9)</sup>、材料ではAl-Mg<sub>2</sub>Si擬共晶組成を基本にして、現在のダイカスト合金の主流であるJIS-ADC12 (Al-Si-Cu系合金) よりも高い耐力を持つダイカスト用Al-Mg系合金を開発してきた経験がある<sup>10)</sup>。そこで、さらにAl-Mg系合金を車体部品に適用することを目標に展伸材に匹敵する高延性ダイカストの研究に着手した。

本報では、高延性のダイカスト用Al-Mg系合金の選定と鑄造後のマイクロ組織や内部品質の状態と機械的性質、特に実際の部品の変形を想定した鑄肌の曲げ特性への影響についての基礎的な検討と、衝撃吸収部品を想定したモデルの試作・評価結果について述べる。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

Al-Mg系ダイカスト合金の成分と機械的性質の関係を調べるにあたって、添加元素であるMn, TiはJIS-AC7Aや主なJIS-5000系展伸合金の成分を参考にして、それぞれ0.5 mass%と0.15 mass% (以下, %はmass%を表す) を基本組成とした。Mgは3.0 %から8.0 %の範囲で基礎調査を行い、その結果に基づいて以後の組成を決定した。

供試材は、工業用純アルミニウムと純マグネシウム、Al-10 %Mn, Al-5 %Ti母合金を用い、ダイカストの手元炉を兼ねた黒鉛るつば炉にて狙いの成分に溶製した。溶解後にフラックスによる除滓とArガス吹き込みによる脱ガス処理を実施した。

また、アルミニウム合金は、凝固速度に依存する結晶粒の大きさやデンドライトの2次枝の間隔が機械的性質に大きく影響する。したがって本実験では試験片にJIS H5202に規定されている、金型試験片採取用金型を用いず、すべてをダイカストで作成した。そして、鑄造品は、鑄肌のままで使用される例が大半を占めることから、鑄肌付きの状態で行張試験や曲げ試験を行うこととした。

引張試験片は、各種試験片を鑄造できる金型にて成形し、ここから図1に示す鑄肌付き引張試験片を得た。この試験片は、溶湯射出時の鑄造圧力が伝達しやすい位置に配置されているので、難鑄造合金であっても鑄造欠陥の少ない引張試験片が容易に得られる。よって概ね合金自体が持つ機械的性質を把握することができる。

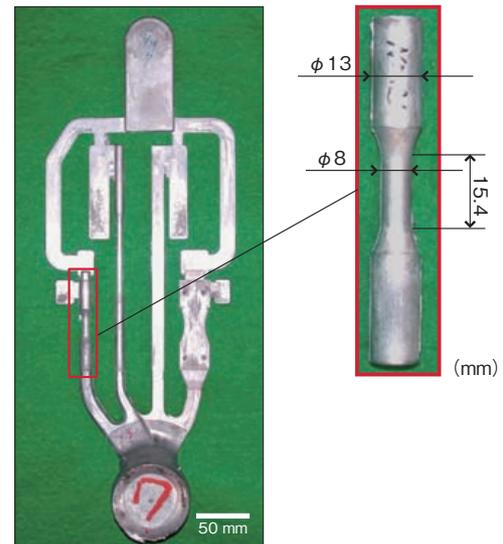


図1 鑄肌付き引張試験片の外観

Fig. 1 Shape of a tensile test piece with casting surface

曲げ試験片は、図2に示す一般肉厚が3 mmの舟型形状のテスト品と車体衝撃吸収部材を模したダイカスト品を鑄造して、複数の部位から幅12 mmの試験片を切り出した。衝撃吸収部材とは、高延性を必要とする車体部品のひとつで、これを模して、図3に示す胴部の平均肉厚が2.5 mmのカップ状の鑄造品を試作した。

これら試験鑄造品は、型締め力3430 kNの鑄造機を使用し、射出条件は低速射出速度を0.3 m/s、高速射出速度を2.0~4.0 m/s、鑄造圧力を70~100 MPaの範囲で適宜調整しながら、真空ダイカスト条件で成形した。



図2 舟型形状テスト品の外観

Fig. 2 Shape of a ship form casting

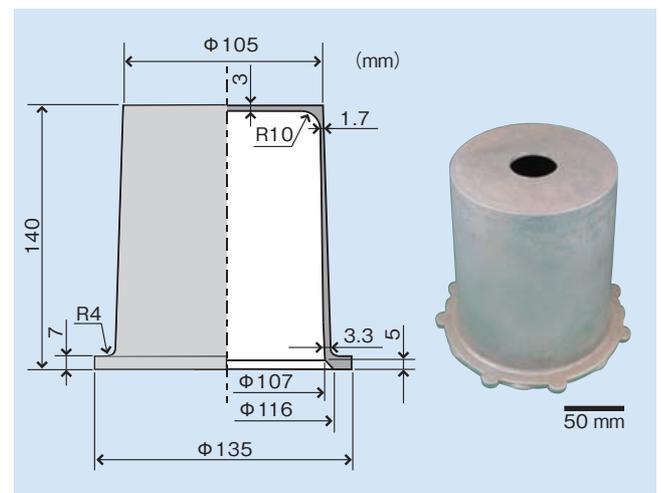


図3 衝撃吸収部材モデルの形状および鑄造品の外観

Fig. 3 Shape and external appearance of an impact absorbed parts model

## 2.2 材料評価

各合金のマイクロ組織および内部品質の観察は、光学顕微鏡、FE-SEM (Field Emission-Scanning Electron Micro-scope: 電界放射型走査電子顕微鏡) を用い、晶出物の面積率は、無腐食状態の光学顕微鏡画像をコンピュータの画像解析を用いて定量化した。また、金属間化合物の特定にはFE-SEMに併設しているEDX分析 (Energy Dispersive X-ray spectroscopy: エネルギー分散型X線分光法) を使用した。

引張試験は50 kNの電気サーボ型万能試験機にて、引張速度を2 mm/minとして、室温中で実施した。

曲げ試験は、先端の半径が1.5 mmの治具を4 mm/minの速度で支点間距離 20 mmの治具に押し付け、その過程で亀裂が入るまでの曲げ角度で評価した。さらに押し付け治具の変位が6.8 mmに達すると曲げ角度が約90°になり、3点曲げではこれ以上に曲げることができない。この場合は試験片を万力で挟んで徐々に曲げていき、亀裂を目視した時点の曲げ角度を求めた。

なお、鑄肌に存在する微小ひけ巣の影響に注目した試験では、浸透探傷試験の反応の有無で区別してから最大応力部の位置を決めて実施した。

衝撃収束部材モデルの圧潰試験は、アムスラー型万能試験機を用い、約20 mm/minの速度で荷重を加えた。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 引張特性に及ぼす Mg の影響

表1は鑄肌付き試験片の化学成分で、それぞれの無腐食状態のマイクロ組織を図4に、その中で5%Mgと8%Mgの高倍率の写真を図5に示す。この観察によると、Mg濃度の増加に従ってMg<sub>2</sub>SiやAl-(Mn, Fe)系の金属間化合物の晶出量が増えており、8%MgではAl<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>の存在も認められた<sup>10)</sup>。

次に本実験のAl-Mg系合金におけるMg濃度と耐力、伸びの関係を図6に示す<sup>10)</sup>。各プロットは複数の試料の平均値で、測定値のばらつきの範囲も示している。結果、耐力はMgの増加と共に直線的に増加するのに対して、伸びは4から6%の範囲で急激に低下した。その要因は、図7に示すMgとマイクロ組織中の金属間化合物晶出面積の関係か

表1 鑄肌付き引張試験片の成分 (mass%)

Table 1 Chemical composition of tensile test pieces with casting surface

	Mg	Mn	Ti	Si	Fe	Al
3%Mg	2.70	0.48	0.16	0.08	0.11	Bal.
4%Mg	4.22	0.51	0.16	0.08	0.11	Bal.
5%Mg	5.07	0.53	0.14	0.08	0.11	Bal.
6%Mg	6.00	0.51	0.14	0.05	0.11	Bal.
7%Mg	7.17	0.53	0.14	0.05	0.12	Bal.
8%Mg	8.21	0.53	0.13	0.06	0.15	Bal.

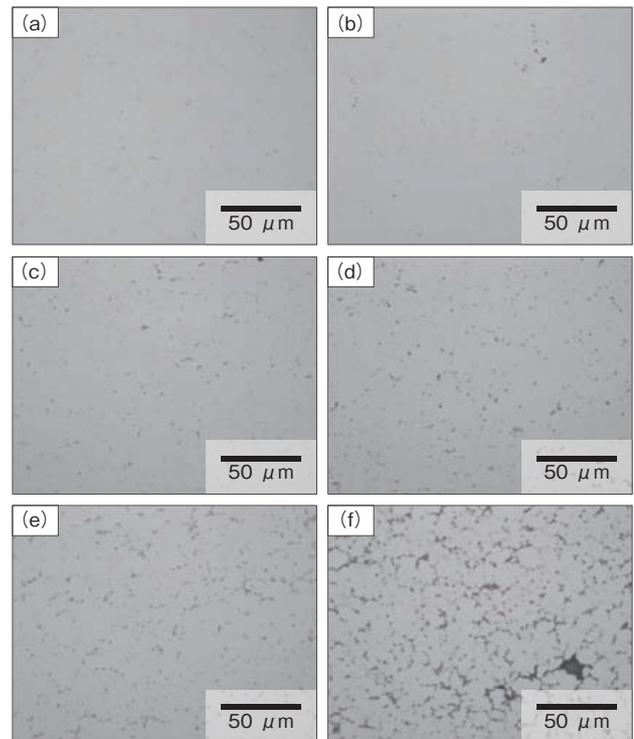


図4 Al-Mg系合金ダイカストのマイクロ組織 (a) 3%Mg, (b) 4%Mg, (c) 5%Mg, (d) 6%Mg, (e) 7%Mg, (f) 8%Mg  
Fig. 4 Microstructures of Al-Mg system alloys from tensile test pieces (a) 3%Mg, (b) 4%Mg, (c) 5%Mg, (d) 6%Mg, (e) 7%Mg, (f) 8%Mg

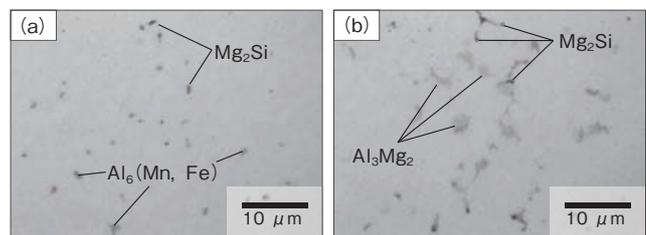


図5 図4のAl-Mg系合金ダイカスト組織の拡大写真 (a) 5%Mg (b) 8%Mg  
Fig. 5 Microstructures in high magnification of Fig. 4 (a) 5%Mg and (b) 8%Mg

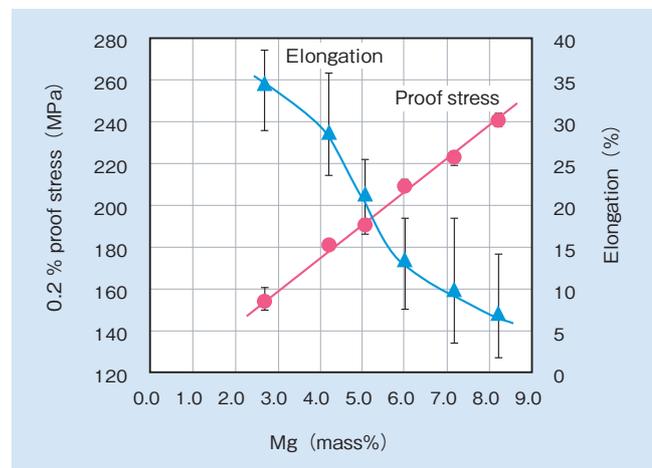


図6 Al-x%Mg-0.5%Mn-0.15%Tiにおける耐力と伸びに及ぼすMgの影響  
Fig. 6 Effect of Mg for proof stress and elongation in Al-x%Mg-0.5%Mn-0.15%Ti

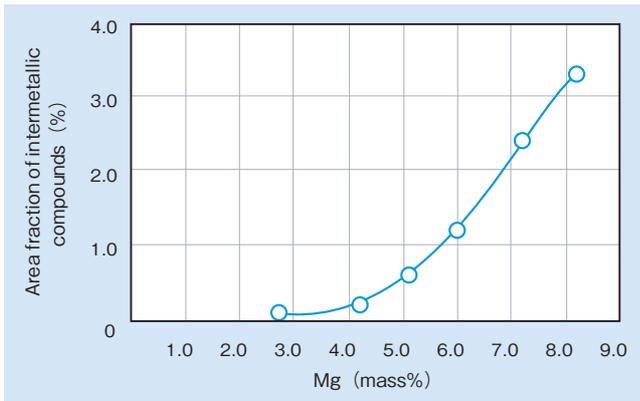


図7 Al-Mg 系合金ダイカストのマイクロ組織における Mg と金属間化合物の面積率の関係

Fig. 7 Relationship between Mg % and area fraction of intermetallic compound in micro structure of Al-Mg alloys from high pressure die-castings

ら推測すると、金属間化合物の晶出力の増加が4 %Mgを超えたあたりから顕著になることで伸びの低下を招いていると考えられる。

林の報告によると、車体に適用される主なアルミニウム合金は、機械的性質の伸びが25%以上を有するものが選択されている<sup>11)</sup>。そこで、本研究の高延性の狙いを25%以上と設定すると、図6, 7の結果からMg濃度の上限を4.5%として、さらに検討を進めた。

### 3.2 鑄肌に露出した微小ひげ巣の影響

曲げ試験は、表2に示す成分で舟型形状テスト品(S1)と衝撃吸収部材モデル(M1, M2)を鑄造し、そこから切り出した試験片で実施した。

表2 舟型形状テスト品(S1)および衝撃吸収部材モデルの成分(M1, M2) (mass%)

Table 2 Chemical composition of specimens from ship form casting (S1) and impact absorbed parts model (M1, M2)

	Mg	Mn	Ti	Si	Fe	Al
S1	4.04	0.44	0.12	0.03	0.08	Bal.
M1	4.51	0.53	0.17	0.05	0.08	Bal.
M2	3.01	0.47	0.15	0.03	0.08	Bal.

曲げ変形は、外周側表面の引張応力が亀裂発生の原因になるので、鑄肌付き試料における延性評価を目的とした本研究では、鑄肌の状態が亀裂発生に強く影響することが十分に予想される。試料の鑄肌を実体顕微鏡で観察した例を図8に示す。写真点線の右側の領域に認められる亀甲模様は初晶デンドライト間の隙間で、微小ひげ巣が表面に露出している状態である。そこで、鑄肌の状態と曲げと角度の関係に注目し、影響を確認した。

鑄肌の微小ひげ巣は浸透探傷試験で検出することができるので、探傷試験の反応が認められた部位に最大曲げ応力が負荷されるように荷重をかけた試験と、反応が認められなかった部位に荷重をかけた試験を行った。その結果を図9に示した。予想どおり、鑄肌のひげ巣の存在は曲げ特性の劣化の原因であることが明らかになった。

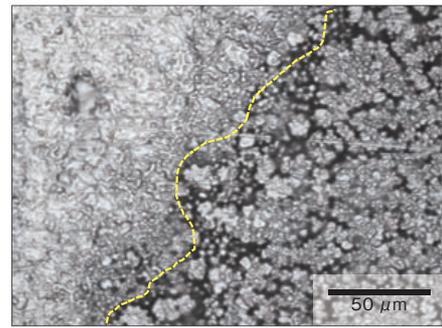


図8 ダイカスト鑄肌に存在する微小ひげ巣の例  
Fig. 8 Example of micro shrinkage on casting surface

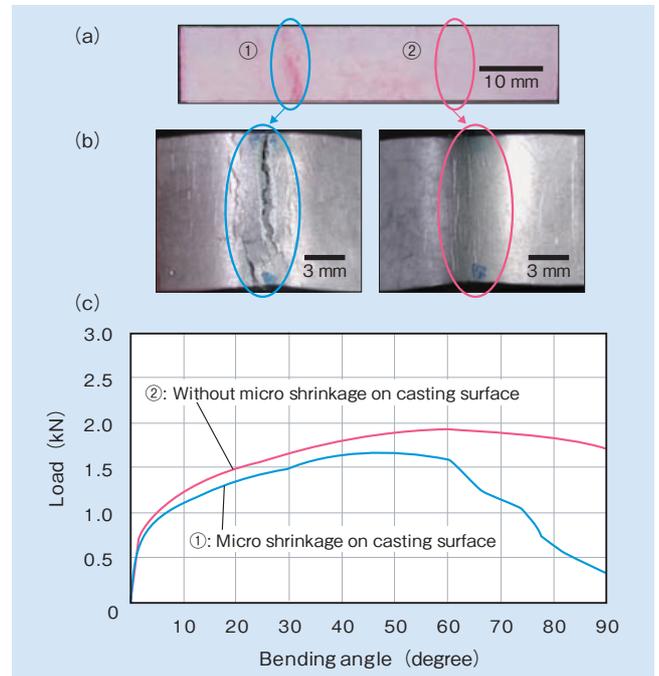


図9 曲げ特性に及ぼす鑄肌の影響

(a) 浸透探傷試験後の試験片の外観, (b) 曲げ試験後の試験片の外観 (c) 曲げ試験における荷重-変位曲線

Fig. 9 Effect of casting surface on bending properties

(a) external appearance of test piece after penetrant inspection  
(b) external appearance of test piece after bending tests  
(c) displacement-load curve of bending tests

### 3.3 亀裂発生角度に対する微小ひげ巣分布の影響

図10は同一の舟型形状テスト品の異なる部位から切り出した試験片での90°曲げ試験結果の一例である。グラフ上の試験片2は試験中に10%以上の荷重低下が認められたのに対して試験片1は荷重低下が認められなかった。

試験後の断面をマクロ観察すると、両者ともに黒色層状に微小ひげ巣が認められた(図11)。本試料はSiを含まない合金である上に、共晶凝固領域を持たない亜共晶組成であることから、凝固時の溶湯補給が完全となる鑄造条件を得ない限り微小ひげ巣の発生は不可避と考えられる。同一の鑄造品からの切り出し試験片でも部位によりひげの発生傾向が異なっていたためにこのような結果になったと考えられる。

また、断面観察によると、図11(a)の試験片1にも微小な亀裂が発生していたが、表層で伸展が止まっていた。こ

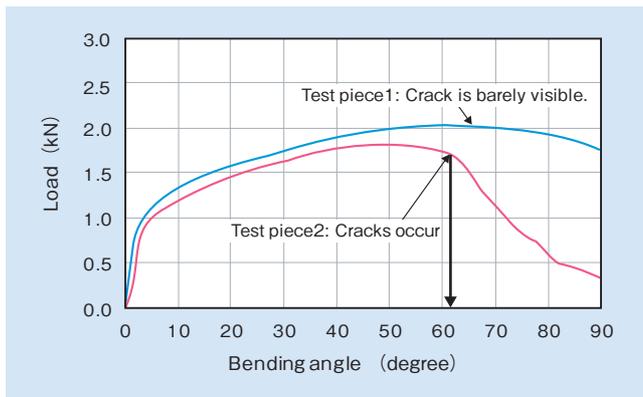


図10 90° 曲げ試験の荷重-変位曲線例  
Fig. 10 Example of displacement-load curves of 90° bending tests

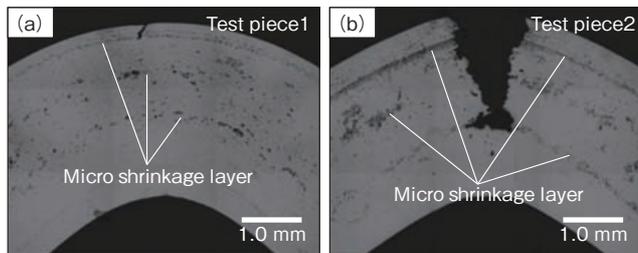


図11 図10における曲げ試験後の試料断面  
Fig. 11 Sections of specimens after bending tests in Fig. 10

から微小ひげ巣の密度が小さければ、材料自体の延性が高いことで亀裂が進まずに変形することがあると推測される。

これまで述べたように、曲げ角度は鋳肌に露出した微小ひげ巣の影響を受けるが、内部にも微小ひげ巣は層状にしばしば存在しており、測定結果から亀裂が発生するまでの曲げ角度は、そのひげ巣の分布に影響されることが予想される。図12はそれらのひげ巣分布を模式的に整理したものである。ほとんどすべての薄肉部位で内部にはひげ巣層が存在するが、図12(a)のように表面近傍にも存在する場合には、亀裂発生に至るまでの曲げ角度が小さくなると考えた。そこで、新たな組織の定義として、鋳肌から連続した組織がひげ巣によって分けられるまでの層を“健全層”とし、この厚さと亀裂発生角度の関係を整理した。ちなみに図8のようなひげが表面に露出した試料の場合、健全層は存在しない。

舟型形状品と衝撃吸収部材モデル、それぞれから切り出した試験片における、亀裂発生角度と健全層厚さの関係を

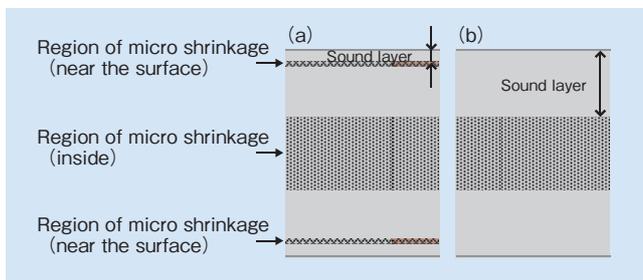


図12 Al-Mg合金ダイカストにおける薄肉部断面の模式図  
(a) 曲げ角度が小さくなる状態 (b) 曲げ角度が大きくなる状態  
Fig. 12 Schematic drawing of thin-walled section in high pressure die casting from Al-Mg alloy (a) state of small bending angle (b) state of large bending angle

図13に示す。横軸は、板厚に対する外周側の健全層厚さの割合(最大で50%)とし、舟型形状品から切り出した試料(S1)の一次関数で回帰分析をした結果を加えている。4.0%Mgの舟型形状品(S1)と4.5%Mgの衝撃吸収部材モデル(M1)の試験結果は予想どおり、鋳肌からの健全層が厚いほど、亀裂発生角度が大きくなる傾向がある。これは、一番外側の面になるほど大きな曲げ応力が生じることで、健全層が薄いと変形能が小さいために、亀裂が発生すると考えられる。そして、図13中(S1)の回帰直線の外挿から、4.0%Mgであれば健全層の厚さが50%に近づく。すなわち微小ひげ巣がほとんど存在しなくなれば亀裂なく180°まで屈曲する可能性があるかと推定できる。

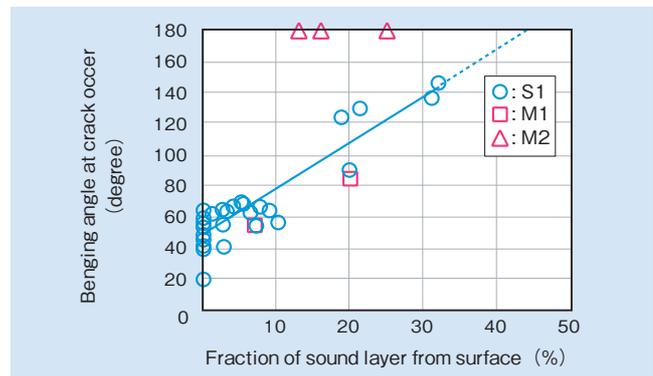


図13 健全層厚さと亀裂発生角度の関係  
Fig. 13 Relationship between the fraction of sound layer thickness and the bending angle until the occurrence of cracking

一方、3.0%Mgで鋳造した衝撃吸収部材モデルから切出した試験片M2は、少なくとも健全層の厚さが13%の状態でも破断なく180°まで屈曲した。図14は、屈曲部断面のマクロ組織の一例で、内部には微小ひげ巣層が存在しているが、破断することなく屈曲していることが確認できる。すなわち、表面に露出しない微小ひげ巣は許容して大変形に耐えていることになる。

以上の結果から、微小ひげ巣がほとんど存在しないダイカスト品を得ることができれば、4.0%Mgで大きな曲げ変形に耐え得る可能性はあるが、難鋳造合金であるこの組成で、鋳造品の微小ひげ巣を完全に無くしていくことは現実的ではない。むしろ、少量の微小ひげ巣を許容して大変形に耐える材料という観点から、3.0%Mgを採用する方が車体部品に応用できると考えた。

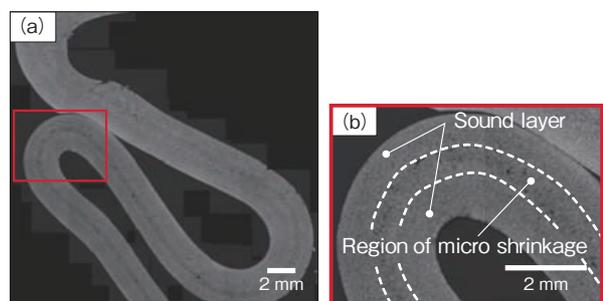


図14 屈曲部断面の微小ひげ巣層  
(a) マクロ組織写真, (b) (a)中の四角で囲まれた部位の拡大  
Fig. 14 Micro shrinkage layer in section of flexure region (a) macro structure, (b) high magnification photo of the square in (a)

### 3.4 衝撃吸収部材モデルの圧潰試験

これまでに日立金属は、衝撃吸収部材モデルの形状を圧潰する際に薄肉部から徐々に屈曲させることで、吸収荷重を制御することを想定して設計し、JIS-5052合金 (Al-Mg-Si 系合金) のブロックから削り出して製作した同形状の衝撃吸収部材モデルにて検証してきた<sup>12), 13)</sup>。

今回の Al-3.0 % Mg ダイカスト品では、圧潰の過程で非軸対称変形が生じているが、想定どおり胴部は薄肉側から順番に屈曲が進み、破断することなく蛇腹状に潰れていった (図 15)。このダイカスト品にも図 14 に示すような微小ひげ巣層が内部には存在しているが、合金固有の延性ゆえに、破断しなかったと考えられる。



図 15 衝撃吸収部材モデルの圧潰過程の様子

Fig. 15 Photos during squashing process of impact absorbed parts model

図 16 は JIS5052 合金から削り出したモデルとの圧潰挙動の比較結果である。両者の荷重-変位線図は、2 番目の屈曲の発生タイミングがずれているものの、吸収エネルギーを表すグラフ上の横軸と変位曲線で囲まれた面積が概ね等しいことから、ダイカスト品でも展伸合金の板や押出し材と同様の変形挙動とエネルギー吸収性能を有する車体部品を得ることが可能であると考えられる。

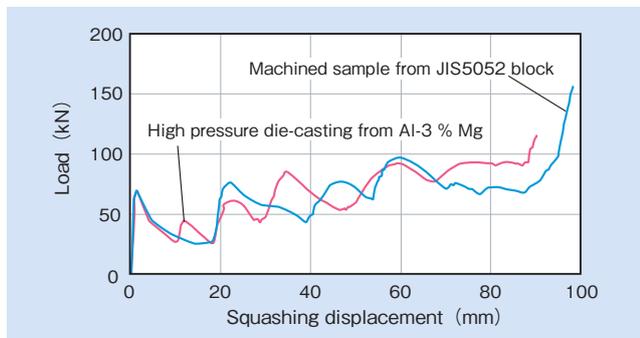


図 16 衝撃吸収部材モデルの圧潰試験における荷重-変位曲線

Fig. 16 Displacement-load curve in squashing tests of impact absorbed parts model

## 4. 結 言

車体構造部品に使用できるアルミニウム合金ダイカストを想定して、高延性 Al-Mg 系合金ダイカストの曲げ特性を中心に基礎検討を行った。その結果を以下に示す。

- (1) 引張試験で、車体部品への採用の目安とした 25 % 以上の伸びが期待できる基本組成は、4.5 % Mg 未満の合金である。
- (2) 亜共晶 Al-Mg 系合金のダイカスト品には不可避な微小ひげ巣領域が存在し、条件によっては鋳肌に露出する。
- (3) 微小ひげ巣の存在部位が鋳肌から遠い距離になるほど、亀裂発生までの曲げ角度は大きくなる。

- (4) 微小ひげ巣が存在していても、材料固有の延性が高くなることで、曲げ応力に対して破断せずに屈曲する。
- (5) Al-3 % Mg 合金で試作した衝撃吸収部材モデルは、圧潰試験において破断することなく、屈曲して潰すことができた。
- (6) この衝撃吸収部材モデルの圧潰時の挙動や吸収エネルギーは、JIS-5052 展伸合金と同等であることから、高延性 Al-Mg 系合金ダイカストは車体部品に使用できる可能性があると考えられる。

## 引用文献

- 1) 三浦隆宏: アルトピア (カロス出版), 38 (2008), No.1, p.17
- 2) 木山 啓, 北野泰彦, 中尾敬一郎: 軽金属, 56 (2006), p.63
- 3) 神戸洋史: 軽金属, 55 (2005), p.435
- 4) 千葉晃司: 素形材, 50 (2009), No.6, p.16
- 5) 渡邊修一郎: 素形材, 50 (2009), No.9, p.23
- 6) 高瀬孝夫: 日本金属学会誌, 3 (1939), p.53
- 7) 高瀬孝夫: 日本金属学会誌, 3 (1939), p.114
- 8) 金内良夫: 日立金属技報, 23 (2007), p.27
- 9) 金内良夫, 中野英治, 島崎真一: 2008 年日本ダイカスト会議論文集, p.131
- 10) 渡邊秀綱, 金内良夫, 島崎真一, 山浦秀樹, 中野英治: 2010 年日本ダイカスト会議論文集, p.109
- 11) 林 央: 軽金属, 55 (2005), p.371
- 12) 増田健一, 森田茂隆, 牛島邦晴, 春山繁之, 赤星保浩, 陳 玳珩: 自動車技術会学術講演会前刷集 No.48-05 (2005), No.20055301
- 13) 森田茂隆, 原 雅徳, 陳 玳珩, 春山繁之, 赤星保浩: 自動車技術会学術講演会前刷集 No.48-05 (2005), No.20055303



山浦 秀樹

Hideki Yamaura

日立金属株式会社  
自動車機器事業部  
素材研究所  
博士 (工学), 技術士 (金属)



渡邊 秀綱

Hidetsuna Watanabe

株式会社アルキャスト



中野 英治

Hideharu Nakano

日立金属株式会社  
自動車機器事業部  
素材研究所  
技術士 (金属)



島崎 真一

Shin-ichi Shimasaki

株式会社アルキャスト