

## アルミニウム合金ダイカスト材における AlFeSi 系金属間化合物への 微量添加元素の影響 Effect of Trace Additional Element on AlFeSi Intermetallic Compounds in Aluminum Alloy Die-cast

折井 晋<sup>a</sup>, 古田 将吾<sup>b</sup>, 小林 正和<sup>b</sup>, Pei Loon Khoo<sup>b</sup>, 上杉 健太朗<sup>c</sup>  
Shin Orii<sup>a</sup>, Shogo Furuta<sup>b</sup>, Masakau Kobayashi<sup>b</sup>, Pei Loon Khoo<sup>b</sup>, Kentaro Uesugi<sup>c</sup>

<sup>a</sup>(株)アーレスティ, <sup>b</sup>豊橋技術科学大学, <sup>c</sup>(公財)高輝度光科学研究センター  
<sup>a</sup>Ahresty Corporation, <sup>b</sup>Toyohashi University of Technology, <sup>c</sup>JASRI

Fe 量を変化させたアルミニウム合金ダイカスト材を用い、延性低下を招くとされる AlFeSi 系金属間化合物の損傷を放射光マイクロ CT を用いて、その場引張試験により評価した。凝固プロセスの違いによって、生じたサイズの異なる 2 つの AlFeSi 系金属間化合物のうち、粗大なものについて調査したところ、その存在頻度が高い 0.8%Fe 材において、降伏後に金属間化合物に割れが生じていることが分かった。破断面位置との関係を詳細に検討することで、粗大金属酸化物が破壊にどのように影響を及ぼしているかをはっきりさせることができる。

**キーワード：** アルミニウム合金, ダイカスト, 金属間化合物, 三次元形態, トモグラフィ

### 背景と研究目的：

ダイカスト法で作製されるアルミニウム合金製部材は自動車部品などに広く利用されている。ダイカスト用合金は許容される合金組成範囲が広いことから、精錬時に炭素排出量の大きい新地金を使わず、より低排出であるリサイクル地金を使うことができるため、自動車メーカー企業のカーボンニュートラルにおいて利点がある。現在、世界中で推し進められている自動車の電化によって、ダイカスト材の適用箇所が変化（例えば、トランスミッションケースから車体構造部品へ）し、合金には既存より高い靱性（延性）が求められている。靱性は様々な要因によって決定されるが、Fe によって形成される脆性な金属間化合物が、合金の靱性を低下させる一因となっている。しかしながら、Fe は金型への焼き付き防止等の効果もあり、さらに Al リサイクル地金において Fe などの元素の混入を避けることは、現在、技術的およびコスト的に難しい。従って、取り除くことが困難な不純物元素 Fe を残したままでも十分な靱性の確保が必要である。しかしながら、Fe 系の金属間化合物が Al 合金ダイカスト部材の靱性や延性の低下すなわち破壊にどのように影響しているかは不明瞭であり、合金設計の最適化のためには Fe 量の増加による金属間化合物の定量的な評価およびそれら金属間化合物が破壊にどのような影響しているか調査する必要がある。

そこで、本研究では Fe 含有量の異なる Al-Si-Fe-Mn 合金のマイクロ組織及び力学特性を調査し、放射光 CT を用いた引張その場観察を行うことで、Fe 系の金属間化合物が破壊にどのような影響を及ぼしているかを調査した。また、同様に型温度の影響についても調査した。

### 実験：

実験試料は Fe 量を目標値で 0.4%および 0.8%と変化させた Al-Si-Fe-Mn 合金を用いた。共晶 Si 粒子を微細化させるために、Sr を微量添加している。鑄造機は 3300 kN で、溶湯温度 973 K、鑄造圧力 50 MPa、射出速度 2.5 m/s、で Fig. 1 に示すようなダイカスト品を鑄造した。型温度はおおよそ 393 K~423 K および 473 K~523 K で鑄造し、それぞれ、低温(T と記述する)および高温材とした。型から平板ダイカスト品を取り出した後、室温まで空冷した。Table 1 に固体発光分析により得られた平板ダイカスト品の化学組成を示す。平板ダイカスト品から試験片を切り出して、マイクロ組織観察、力学特性調査、および X 線 CT によるその場引張観察を行った。なお、本研究ではダイカスト表面は評価対象から除いており、力学特性試験に用いた試験片は表面より 0.3 mm ほど研磨により除去した。X 線 CT は SPring-8 の BL47XU で行った。Nano-CT は投影数 1800 枚、露光時間 500 ms の条件で撮像し、Voxel size は 41.6 nm であった



Fig. 1 Appearance of aluminium die-cast sample

Table 1 Chemical composition of aluminium die-cast alloy in this study

	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Ti	Sr	V	Al
04Fe	8.62	0.44	0.48	0.24	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.025	0.022	Bal.
08Fe	8.6	0.87	0.43	0.23	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.03	0.022	Bal.

結果および考察：

Fig. 2 に Fe 量が(a) 0.4%および(b) 0.8%の高温材のマイクロ組織を示す。観察位置は平板部の中央付近および板厚中心である。Fe 量の違いによって、初晶 $\alpha$ -Al および共晶相に影響はなく、Fe 量の増加により、図中に矢印で示したような粗大な Fe 系化合物が多くみられるようになった。光学顕微鏡スケールでのマイクロ組織は、型の温度を低くした場合も、高温材とほとんど同様であった。

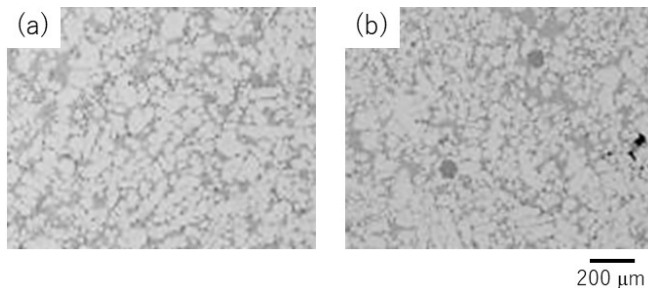


Fig. 2 Microstructures of (a) 0.4Fe and 0.8Fe

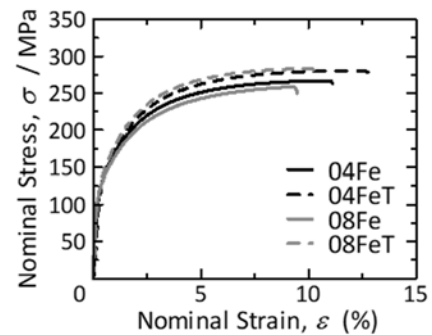


Fig. 3 Stress and strain curves

Fig. 3 に各試料の代表的な応力-ひずみ線図を示す。0.4Fe と 0.8Fe では型温度によらず、Fe 量の多い 0.8Fe の全伸びが小さいことが分かる。一方、型温度が低くなると延性および引張強度とも向上することが分かる。また、ビッカース硬さも向上していた。マイクロ組織にはほとんど変化がみられないことから、初晶 $\alpha$ -Al 中の溶質元素の固溶・析出状態が変化している可能性が考えられる。

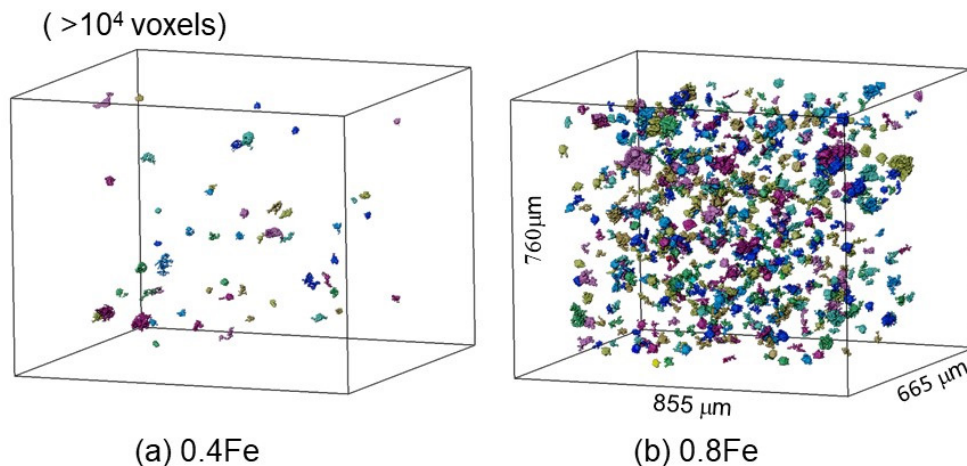


Fig. 4 Spatial distribution of AlFeSi intermetallic particles: (a)0.4%Fe and (b)0.8%Fe

Fig. 4 は、Fe 量(a)0.4%および(b)0.8%と変化させた試料内部の粗大な AlSiFe 系金属間化合物（晶出物、体積が  $10^4$  voxel より大きいとして抽出した）の空間分布を示す。なお、晶出物は、Fig. 4 に示す粗大なものに加えて、数 $\mu\text{m}$ の微細なものもあるが、本研究では粗大なものについて着目する。(a)Fe 量 0.4%では、粗大な金属間化合物の数密度は小さいが、(b)Fe 量 0.8%では数密度が増加し、サイズもやや大きいようにも見える。実際は、CT 画像をみると、数 $\mu\text{m}$ の微細な金属間化合物が凝集しているものも、粗大な金属間化合物として抽出されているので、目視確認などによる精密な解析が必要である。

Fig. 5 は、Fe 量 0.8%材における引張その場観察の結果である。(a)は各負荷段階における CT 断層像と破断面の断層像を示しており、引張軸は上下方向である。図で変形が進むに従い、上下方向に伸び、粒子の損傷が確認できる。破断後の試料も示しているので、最終的にどの場所で壊れたかも分かる。(b)はその場引張観察実験の荷重変位線図で、図中の番号は、0 が荷重負荷前、1 が 1st step そして、2 が 2nd step として CT 撮像した場所である。(c)の粗大金属間化合物の拡大図（拡大位置は(a)に示されている）は、1st step の視野内ひずみが 5.8%で既に生じていることを示している。

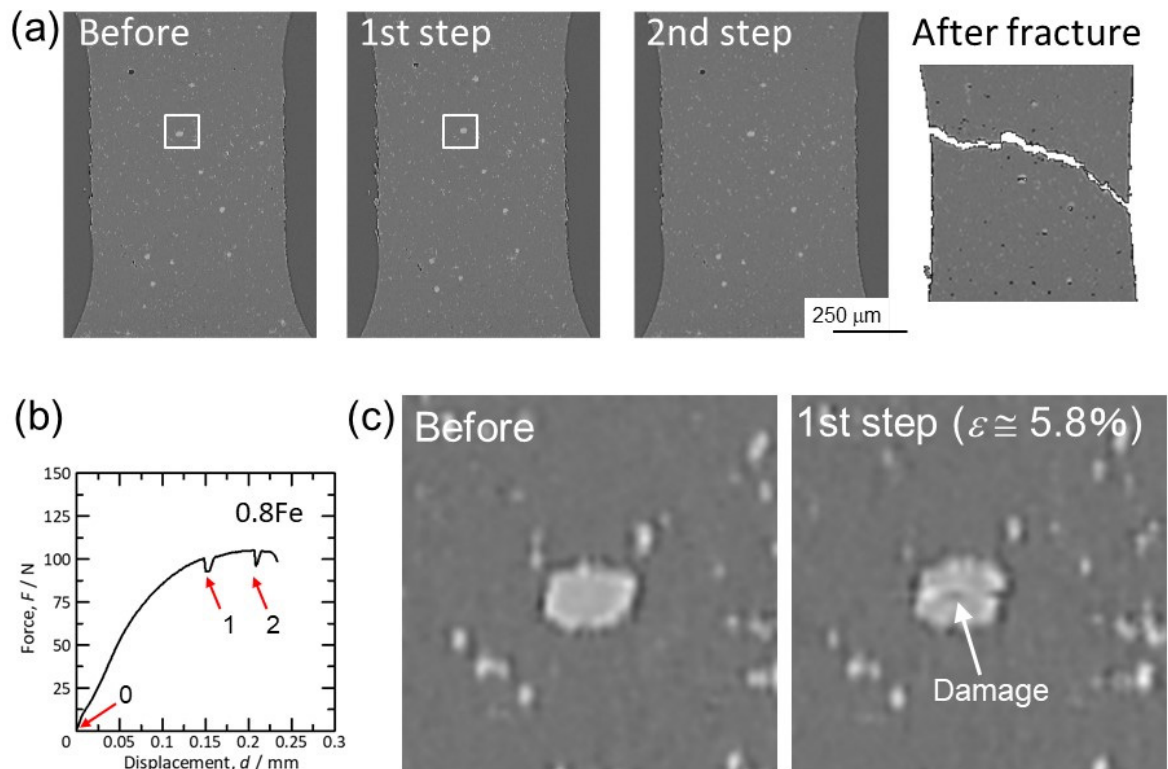


Fig. 5 Results of in-situ tensile test for 0.8%Fe: (a) slice images along the tensile direction at each steps during tensile test, (b) load-displacement curve in in-situ tensile test and (c) magnified slice image of large AlFeSi intermetallic particles

#### 今後の課題：

引続き、本その場引張試験による観察で、Al 合金ダイカスト材の添加元素による粗大金属間化合物の形態や数密度と力学特性を関連づけることで、力学特性向上あるいは低下の理由を検討する。加えて、Fe 量の異なる試料の変形・損傷の解析を進め、破断面位置との関係を見ることで、その影響を確認する。なお、サイズ数 $\mu\text{m}$ の微小な金属間化合物粒子の影響（特にき裂伝播挙動に対する影響）については、引続き放射光を利用したその場観察実験によって明らかにする予定である。