

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^a, 古田 将吾^b, 小林 正和^b, Pei Loon Khoo^b, 上杉 健太郎^c
Shin Orii^a, Shogo Furuta^b, Masakau Kobayashi^b, Pei Loon Khoo^b, Kentaro Uesugi^c

^a(株)アーレスティ, ^b豊橋技術科学大学, ^c(公財)高輝度光科学研究センター
^aAhresty Corporation, ^bToyohashi University of Technology, ^cJASRI

アルミニウム合金ダイカスト材の延性低下を招くとされる金属間化合物の形態を放射光マルチスケール CT を用いて評価した。Al-Si-Mn 系に鉄およびバナジウムを添加した材料の金属間化合物の形態は塊状であった。バナジウムに加えてストロンチウム添加したとき、金属間化合物の形態は V 添加材と同様の塊状であったが、鉄とバナジウム添加の場合に粗大な板状であったシリコンの形態が、ストロンチウム添加の効果で棒状で微細になった。

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, トモグラフィー

背景と研究目的：

本実験は、自動車部品などに利用されているダイカスト用アルミニウム合金において、ダイカストで凝固させられたとき、微量添加元素（例えば、マンガン、バナジウム、ストロンチウム）が、延性を低下させる要因の一つとされる鉄を含んだ金属間化合物の「三次元的な形状」や「サイズ分布」の変化を明確にするものである。走査型電子顕微鏡等による二次元断面での一部の組織観察から、AlFeMnSi 系晶出物の形態を丸いものとするとき、特定の添加元素が利用されている。しかしながら、技術的な裏付け（定量的な評価データがない）がないことが背景にある。

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。

アルミニウム合金ダイカスト材において、鉄は金型の焼付きを防止するなどの正の効果もあるが、主要元素であるアルミニウムやシリコンと結合し、脆い金属間化合物を形成し、0.2~3%以上の鉄の混入は合金の靱性を低下させる。アルミニウムリサイクル地金において鉄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を残したままでも十分な靱性を確保することが、アルミニウム合金ダイカスト部材を車体構造部品へ広く適用するための技術的な課題となっている。

そのような中で、アルミニウム合金ダイカスト部材の力学的特性向上、すなわち、靱性や延性の低下を防ぐために、現在、鉄を含む金属間化合物の晶出時にその形態を変化させるという元素がダイカスト合金に、しばしば添加されている。これまでの経験において、多かれ少なかれ元素添加の力学特性への効果はあると言えるが、その形態変化を「定量的」に捉えるために十分な観察手法が「手近にない」ために、(1)それぞれの添加元素による形態の違いやサイズ分布に関する評価ができていない。(2)その形態変化が実際に靱性や延性に影響しているのかどうかの証拠も直接的に得られていない。まずは、(1)の現状抱える疑問点を解決すべく、BL47XU にて実験を実施した。高分解能な放射光マルチスケール CT を用いることで非破壊観察によって、それぞれの添加元素によって AlFeSi 系晶出物の形態やサイズが異なるかを明確化することを目的とする。

実験：

試料は Al-Si-Mn 系のアルミニウム合金である。鉄の添加量およびバナジウム、ストロンチウム添加量を変化させた溶湯を用い、ダイカストマシンで作製した板材である。BL47XU におけるマルチスケール CT 実験は X 線エネルギー 15 keV で行った。観察試料のサイズは X 線エネルギーに応じたサイズ（およそ厚さ 400 μm ）として、ダイカスト板材の中央部より放電加工で採取し、研磨にて仕上げ作製した。マルチスケール CT は BL47XU で常用利用されているもので、ボクセルサイズ (0.384 μm)³ および (48 nm)³ である。視野サイズは、マイクロ CT およびナノ CT で 1252 × 1252 × 1504 ピクセルおよび 1144 × 1144 × 904 であり、投影数はともに 1800 枚で、露光時間はそれぞれ 100 ms と 250 ms とした。なお、マイクロ CT においては屈折コントラストを、ナノ CT では位相板を使っている。今回、実験時間が限られるため、回転ステージに試験機等は設置せずに試料の三次元観察に努めた。良好な画像を得られる条件を見つけ出した後、マイクロ CT で試験片全体を撮像した後、ナノ CT により一部を拡大して撮像することを各試料で実施した。

結果および考察：

Fig. 1 に 0.4%Fe 添加したアルミニウム合金ダイカスト材のマイクロ CT の断層像を示す。(a) は鉄添加、(b) は鉄に加えてバナジウムを添加したもの、さらに、(c) は (b) にストロンチウムを添加したものである。断層像中に見られる白いつぶつぶは線吸収係数から Fe を含む AlFeMnSi 系の金属間化合物であることが分かる。灰色で観察されるアルミニウム母相よりも幾らか暗色の模様も母相中に見られるが、これはシリコンである。3~4 μm の比較的小さな金属間化合物に加えて、ところどころに 10 μm 以上の粗大な金属間化合物が存在していた。その金属間化合物の三次元形態の様相を Fig. 1 に合わせて示している。この粗大な金属間化合物については、(a) 鉄のみのものが、特定の結晶面が表面となっていると推察できる塊状であり、(b) バナジウム添加によってその形態は変化し、(c) ストロンチウムの添加で、放射状の板状になっている。これは、二次元観察による参考文献[1]の観察結果と対応する。これらの形態の変化から凝固過程が幾分異なることが示唆される。

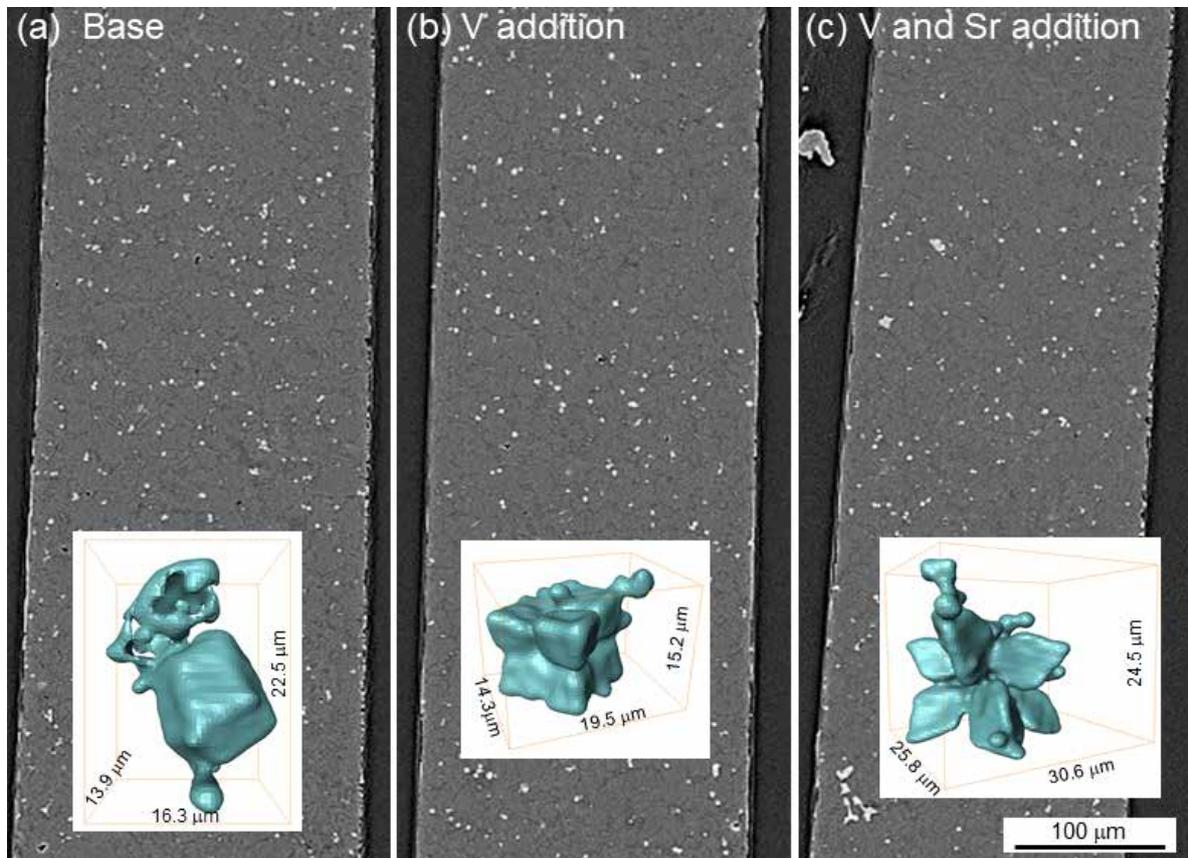


Fig. 1 0.4%Fe 材のマイクロ CT 断層像と粗大金属間化合物形態：(a)鉄添加，(b)鉄とバナジウム添加，(c)鉄，バナジウムおよびストロンチウム添加

Fig. 2 にナノ CT の結果を示す。Fig. 2 の(a)はアルミニウム合金ダイカスト材に鉄を 0.4wt%添加したときの内部組織である。上段の断層像をみると、グレーのアルミニウム母相中に濃いグレーの共晶凝固したシリコン粒子と白色の鉄系金属間化合物(IMC と表示)が確認できる。(b)は鉄に加え、バナジウムを添加したものであり、(c)はさらにストロンチウムを添加している。金属間化合物のみを抽出して示した三次元像が Fig. 2 の下段である。三次元像を見ると、いずれの金属間化合物も塊状であり、(b)のようにバナジウムの添加すると(a)の鉄添加材に比べて、やや粗大な金属間化合物が形成されていることが分かる。なお、ナノ CT 像で見られる大きな粒子が、マイクロ CT で見られた小さな粒子に対応する。この視野外でより粗大な金属間化合物が形成されていることに留意が必要である。(c)のストロンチウム添加によって、鉄系金属間化合物の形態は大きく変化しない。しかしながら、断層像をより詳細に見るとストロンチウム添加の効果[2]により、シリコン粒子は微細化していることも分かる。

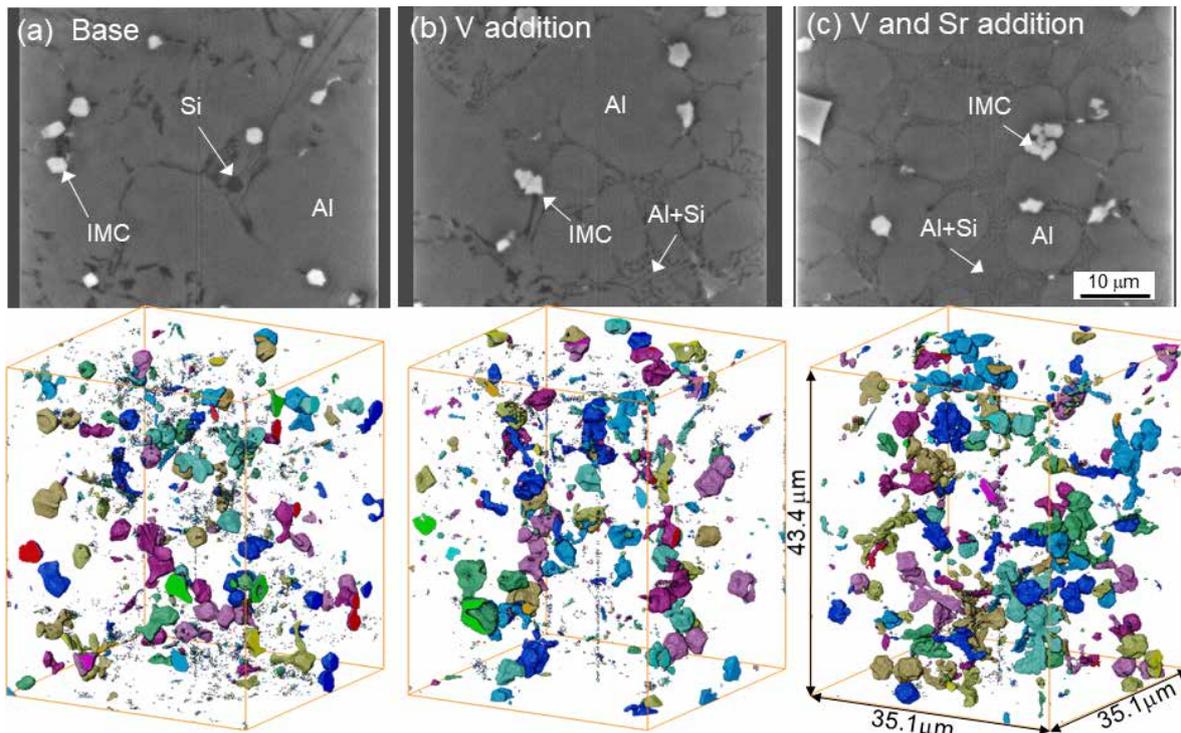


Fig. 2 放射光マルチスケール CT (ナノ CT) によるアルミニウム合金ダイカスト材の撮像結果； (a)0.4%鉄添加，(b)鉄とバナジウム添加，(c)鉄，バナジウムおよびストロンチウム添加

今後の課題：

今後、金属間化合物の形態やサイズを定量的に評価し、別途行う引張試験での力学特性の相関について解析を進めていく予定である。そして、次の実験では、力学特性に明瞭に差のある試料を準備して、放射光マルチスケール CT によるその場引張試験を実施し、アルミニウム合金ダイカスト材における金属間化合物が延性・破壊プロセスに与える影響（メカニズム）を明らかにする。継続的な取り組みにて、材料組織設計に活用する。

参考文献：

- [1] S. Ferraro, A. Fabrizi and F. Timelli, *Mater. Chem. Phys.* **153**, 168-179 (2015).
- [2] S. Furuta et al, *Mater. Charact.*, **130**, 237-242 (2017).