

解説 *Explanation***亜共晶系 Al-Si-Cu 合金ダイカストの凝固形態と諸性質及び品質**
—合金種の使い分けに関する提案—

原稿受付 2019 年 6 月 27 日

ものづくり大学紀要 第 9 号 (2019) 50~56

西 直美

ものづくり大学 技能工学部 総合機械学科

Effects of solidification morphology on properties and quality of hypoeutectic Al-Si-Cu alloy die castings

Naomi NISHI

Dept. of Mechanical and Production Engineering, Institute of Technologists

Abstract

Aluminum alloys are widely used for die casting because lightweight, excellent corrosion resistance, and well dimensional stability. Especially in Japan hypoeutectic systems Al-Si-Cu alloy are used about 95%. In this paper, some properties such as mechanical properties, fluidity and casting defects formation of JIS-ADC10 and JIS-ADC12 alloy die casting were discussed. Solidification morphology of ADC10 is a mussy type and its of ADC12 is close to a skin-formation type. Therefore, both alloys have different mechanical properties, flowability, and casting defects such as shrinkage porosities. It is desirable to use both alloys properly depending on the application.

Key Words : Die casting, Aluminum alloy, ADC10, ADC12, Solidification morphology**1. はじめに**

アルミニウム合金ダイカストは、軽量で耐食性に優れ、経年寸法変化が少ないことからダイカスト合金の中では最も多く用いられ、ダイカスト合金全体の約 97%を占めており、多くの産業分野で使用されている。アルミニウム合金ダイカストは、JIS H 5302:2006 に規定され、旧来から日本国内で使用されている ADC 系合金が 9 種類、ISO の合金が 11 種類の合計 20 種類が規定されている。

亜共晶系の Al-Si-Cu ダイカスト合金には ADC10 と ADC12 があるが、最近では両合金は区別されずに殆ど ADC12 が使用されている。しかし、両合金の凝固形態は、前者が粥状型合金、後者が表皮形成型合金に近く、諸特性が異なってい

る。そこで、従来の研究結果から両合金の凝固形態と諸特性及び品質との関係を考察し、合金の使い分けに関する提案を行う。

2. 合金種としての ADC10 と ADC12 の違い

アルミニウム合金ダイカストは、製品規格として JIS H 5302:2006 に規定されている。なお、ダイカスト用のアルミニウム合金地金は、JIS H 2118:2006 に規定されている。表 1 に日本で使用されている主なアルミニウム合金ダイカストの種類と化学組成及び用途例を示す¹⁾。

アルミニウム合金は、大きく分けて Al-Si 系合金及び Al-Mg 系合金の 2 種類がある。Al-Si 系合金はさらに Al-Si 系、Al-Si-Mg 系、Al-Si-Cu 系

表1 主なアルミニウム合金ダイカストの種類と用途¹⁾

JIS記号	特徴	使用部品例
ADC1	耐食性、鋳造性は良いが耐力はやや低い	自動車メインフレーム、フロントパネル、屋根瓦 など
ADC3	衝撃値と耐食性が良いが、鋳造性が良くない	自動車ホイールキャップ、二輪車クランクケース、自転車ホイール、船外機プロペラ など
ADC5	耐食性が最良で、伸び・衝撃値が高いが鋳造性が良くない	農機具アーム、船外機プロペラ、釣具レバー・スプール(糸巻き) など
ADC6	耐食性はADC5に近く、鋳造性がADC5より優れるがAl-Si系に比べると劣る	二輪車ハンドレバー、ウインカーホルダー、ウォーターポンプ、船外機プロペラ・ケース など
ADC10	機械的性質、被削性及び鋳造性に優れる	シリンダーブロック、トランスミッションケース、シリンダーヘッドカバー、ハードディスクケース、電動工具、ガス器具、床板、エスカレーター部品、その他アルミニウム製品のほとんどすべてのものに用いられている
ADC12	機械的性質、鋳造性に優れる	
ADC14	耐磨耗性に優れるが伸び、衝撃値は良くない	カーエアコンシリンダーブロック、ハウジングクラッチ、シフトフォーク など

に分類される。なお、JIS H 5302:2006 には表1の他に亜鉛の含有量を3.0%まで許容したADC10Z、ADC12Zの2種類、ISOから導入された11種類の合金がある。

表1に示されているように亜共晶系のAl-Si-Cu系合金であるADC10とADC12は、殆ど区別されることなく使用されている。その化学組成は、表2に示すようにCuとSiの含有量が僅かに違うのみである¹⁾。しかし、両合金の誕生の経緯を見るとそのルーツは全く異なる²⁾。

表2 ADC10とADC12の主な化学組成(%)¹⁾

JIS記号	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Al
ADC10	2.0-4.0	7.5-9.5	≦0.3	≦1.0	≦1.3	≦0.5	≦0.5	残部
ADC12	1.5-3.5	9.6-12.0	≦0.3	≦1.0	≦1.3	≦0.5	≦0.5	残部

ADC10は、外国の規格を参考にした日本航空機規格航格第7231のラウタル系合金チ602から始まる。戦後1947年に制定されたJES金属7183では、ラウタル系合金はAlADC2に引き継がれた。さらにJIS H 5302:1958では、ASTM規格などを参考にSi量を増やしたADC10が規格化された。その後、1965年の第1回の改正では、耐食性を改善するためにCuの含有量の上限が4.5%から4.0%

に抑えられた。その後は、Sn、Pb、Tiなどの微量元素の上限値が設定された。このように、ADC10はラウタル系合金を受け継いだ古くからある合金である。

一方、ADC12は日本で開発されたオリジナルの合金である。川松によると1950年代前半の扶桑軽合金(株)(現在:(株)アーレスティ)で当時使用されていた合金は、主にAl-Si-Cu系のラウタル合金AlADC2とAl-Si系のシルミン合金AlADC3であった³⁾。しかし、これらの合金は鋳物用合金をダイカストに適用したもので鋳造性が悪く、同社では鋳造性に優れたダイカスト用合金の開発に取り組み、Al-8%Si-3%Cu合金をベースにSi量、Cu量、Fe量の最適化をはかった。その結果、湯流れ性をよくするためにSiを11.3%添加し、加工性をよくするためにCuを1.5~2.0%添加し、さらに焼付きを防ぐためにFeを0.8~1.0%添加した合金(社内規格No.10)を開発し、これが後のADC12となった。

ADC12は、表1に示したAl-Si二元共晶組成合金であるADC1(シルミンと呼ばれる)にCuを添加したことから含銅シルミンと呼ばれる。

以上のようにADC12はADC10に比べて後発の材料であり、2006年のISOの改正に伴い日本から提案されて採用されるまでは相当合金は海外の規格には無い合金であった。

3. ADC10とADC12の使用状況の推移

図1に1961年以降のアルミニウム合金ダイカストの生産割合の推移を示す。図中の数字はADC10とADC12の値を示す²⁾。ADC10は1961年には約16%、1968年には約26%とその使用割合は2~3割程度であったが、2001年の調査では約0.5%と激減し、ADC12が約94.2%と増加している⁴⁾。これには、様々な原因が考えられるがADC10とADC12は表2に示したように化学組成から見ても特性から見ても、ほぼ同一合金であるとみなされていることがある。また、単一合金を大量に購入し、溶解することで経済的にも有利であることが一因であると考えられる。

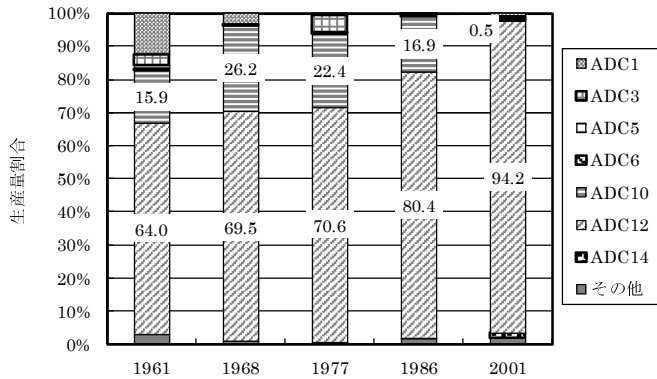


図1 1961年以降のアルミ鋳造ム合金ダイカストの生産割合の推移

4. ADC10 と ADC12 の特性の違い

ADC10 と ADC12 の Cu と Si の組成の相違は、表2に示したように ADC10 は Si が 7.5~9.5%, Cu が 2.5~4.0%, ADC12 は Si が 9.6~12.0%, Cu が 1.5~3.5% である。Si と Cu の組成範囲を示すと図2のように Cu は重複する部分が多いが、Si が完全にずれている。Al-Si 二元系状態図で見ると Al-Si の共晶組成は Si が 12.6% であることから ADC10 の Si の組成範囲に比較して ADC12 の Si の組成範囲は共晶点に近い領域にある。この僅かな相違が両合金の諸特性に及ぼす影響を以下に述べる。

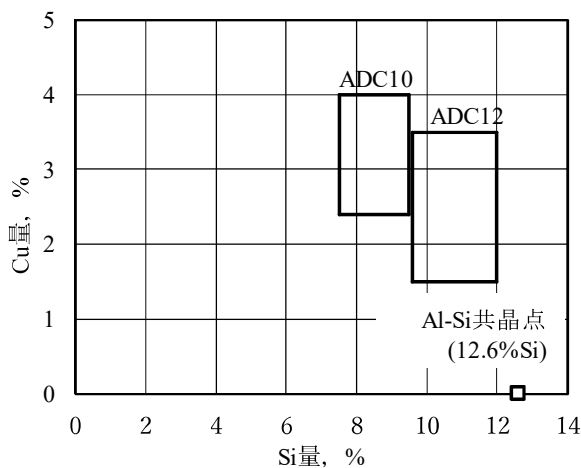
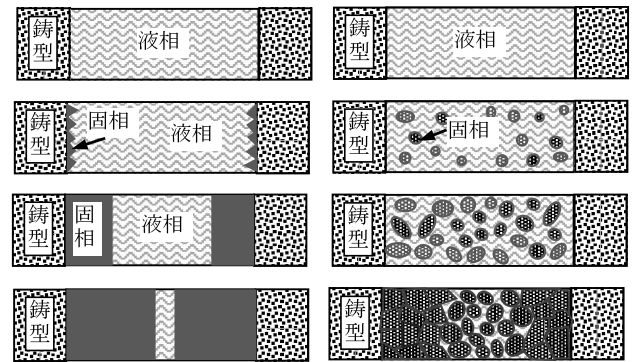


図2 ADC10 と ADC12 の Si と Cu の組成範囲

4.1 凝固形態の相違

一般的に金属は、合金組成によって凝固形態が異なり、図3に示すように(a)表皮形成型凝固(スキnfォーメーション型凝固)と(b)粥状型凝固

(マッシー型凝固)に大別される⁵⁾。前者は純金属や Al-12.6%Si 共晶合金などの固液共存幅のない場合で、鋳型界面から薄皮が生成し、凝固の進行と共に次第にその厚さを増して内側に成長する。後者は Al-6%Si のように固液共存幅が広い合金で、デンドライトの生成及び成長によって凝固が進行する。したがって凝固途中の鋳物内部は編み目状に発達したデンドライトが存在する。



(a)表皮形成型凝固 (b)粥状型凝固

図3 金属の凝固形態⁵⁾

表3に統合型熱力学計算ソフトウェア Thermo-Calc[®]で計算した ADC10 と ADC12 の液相線温度、共晶温度を示す。液相線から共晶までの温度幅は ADC10 で 28°C であり、ADC12 で 12°C である。これより ADC10 は粥状型凝固に近く、ADC12 は表皮形成型凝固に近いといえる。

表3 ADC10 と ADC12 の液相線・共晶温度、固液共存幅(°C)

合金	液相線温度	共晶温度	固液共存幅
ADC10	592	564	28
ADC12	580	568	12

4.2 ミクロ組織の相違

図4に ADC10 と ADC12 のインゴットとダイカストのミクロ組織を示す。インゴットの組織は両合金で大きく異なり、ADC10 では大きなデンドライト状に発達した α -Al 晶が観察されるが、ADC12 では針状に観察される共晶の Si が多く観察され、一部に α -Al 晶のデンドライトが観察される。一方、ダイカストの場合は ADC10 と ADC12 はほとんど同じような組織を呈している。

このようにインゴットとダイカストでは大きくミクロ組織が異なる。本来、Al-Si の共晶点に近い ADC12 は、インゴットに見られるように共晶 Si

が多く発生するはずである。インゴットの冷却速度は、ダイカストに比較すると極めて遅くなるため、平衡状態図に近い凝固が起こるものと考えられる。一方、ダイカストの場合は冷却速度が数 100°C/s と大きいいため、非平衡凝固となる。

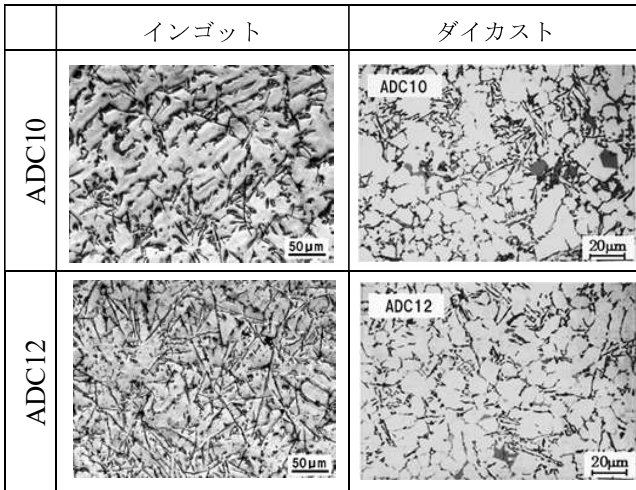


図4 ADC10とADC12のインゴットとダイカストのマイクロ組織

図5に共晶型二元系合金の状態図の模式図を示す。水平線は共晶凝固温度を示しており、共晶点Eは急冷されることで過冷却して斜線のように右にずれる。この斜線の領域をカップルドゾーンという。共晶点は、過冷却が大きいほど右にずれ、初晶が生じやすくなる。その結果、ADC12の組織は亜共晶側にずれてADC10のマイクロ組織との差が少なくなったと考えられる。

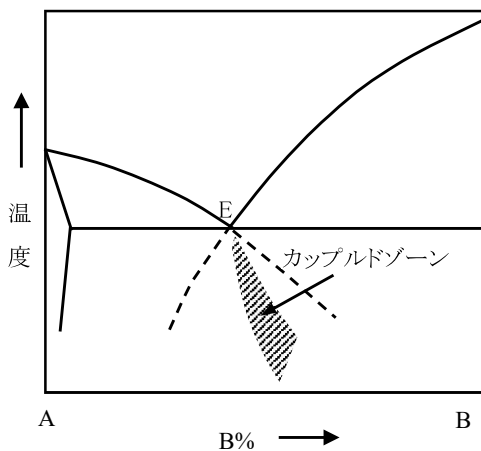


図5 カップルドゾーンの模式図

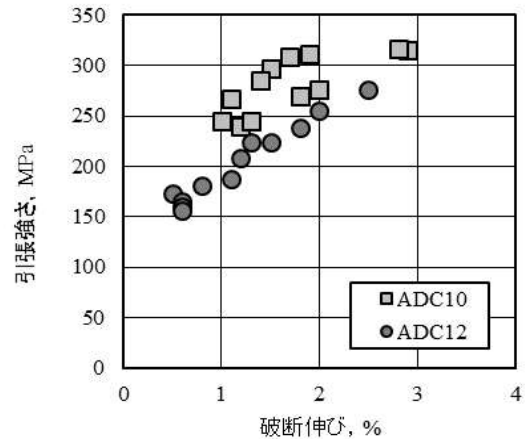


図6 実製品から切り出したADC10とADC12の引張強さと破断伸び⁶⁾

4.3 強度特性の相違

図6にADC10とADC12のダイカスト製品から切り出した試験片の引張試験（実体強度という）の結果を示す⁶⁾。これらより明らかなようにADC10の方がADC12に比較して強度特性に優れていることがわかる。これは、ADC10の方がADC12に比べてCu量が高いことに起因している。また、ADC10の方が強度及び伸びのばらつきが少なく、強度特性が安定している。したがって、強度面ではADC10の方がADC12より優位であるといえる。

5. ADC10とADC12の特性の違い

5.1 ダイカストの欠陥の種類

ダイカストは高速で金型キャビティに鋳込まれ、高圧下で極めて短時間に凝固を完了するために微細な鋳造組織が得られる反面、ダイカストに特有な種々の欠陥を発生する。これらの欠陥の中で、ADC10とADC12の合金種によってその発生が異なると考えられるものについて以下に紹介する。

5.2 ひげ巣

多くの熔融金属（溶湯という）は、凝固して固体になる際に体積が減少する（凝固収縮という）。金型内に鋳込まれた溶湯が凝固する際に、凝固収縮分の溶湯が押し湯から補給されればひげ巣を発生することはないが、この補給が途絶えると鋳物内部に空洞を発生する。これをひげ巣という。

図7にダイカストに発生したひけ巣の例を示す。ひけ巣には、(a)内部にデンドライトの突起が観察される比較的大きく、場合によっては数mmに及ぶもの（集中ひけともいう）と、(b)ある程度の範囲にわたり海綿状あるいは多孔質状に生成する「ざく巣」がある。

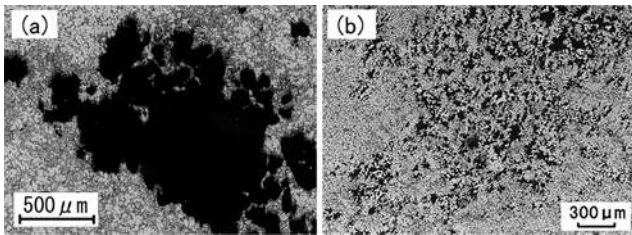


図7 ひけ巣の事例 (a)ひけ巣 (b)ざく巣

ひけ巣とざく巣の相違点は、凝固形態の違いによるものである。表皮形成型合金では、凝固の進行に伴って肉厚中央部に最終凝固部が形成され、凝固収縮に伴って発生する空洞も中央部に形成される。一方、粥状凝固型合金では、鋳物全体が凝固するため、凝固収縮による空洞は鋳物内部の広範囲にわたりデンドライトのネットワークの間に形成される。

したがって、表皮形成型に近いADC12はひけ巣になりやすく、粥状型に近いADC10はざく巣を発生しやすい。ざく巣は一つ一つの巣の大きさは小さいが、それぞれが連結して全体としては大きな巣と見なせるので、耐圧性にはひけ巣よりも悪影響が大きいといえる。

5.3 湯流れ欠陥

湯流れ性に起因して発生する欠陥には、図8の「湯境」に代表されるような欠肉部を伴うものがある。他にも、未充填、湯じわなどがある。いずれも流動過程での溶湯温度の低下により発生するものと金型キャビティの空気やガスなどの背圧により発生するものがある。ここでは、前者の原因による湯流れ欠陥の発生に及ぼすADC10とADC12の違いについて検討する。

MITのM.C.Flemingsらは図9に示す薄肉部の凝固による流動停止モデルを提案している⁷⁾。(a)および(b)は純金属で過熱度（鋳込み温度と融点あるいは液相線温度の差）がある場合とない場合を示す。

純金属や共晶組成合金の凝固は、固液共存幅が

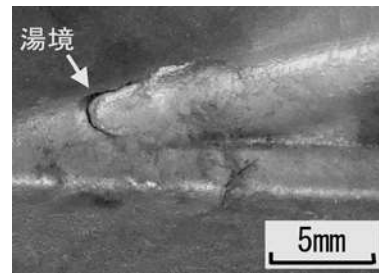


図8 湯境の例

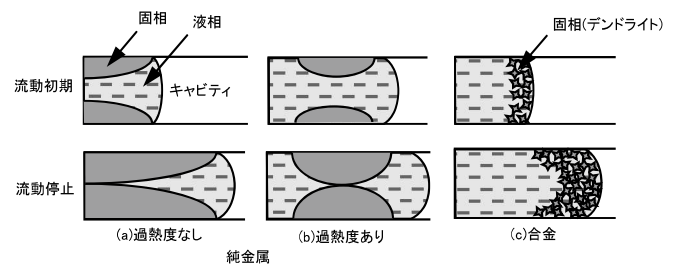


図9 流動停止モデル⁷⁾

なく表皮形成型であることから、金型と接した部分から凝固し、次第に内部に凝固が進行する。溶湯の過熱度がない場合は入り口部から凝固し、この部分が凝固完了することで流動が停止する。過熱度がある場合には、それに相当する熱が金型に奪われてから凝固が始まるために(b)のように入り口からある程度離れた所で凝固開始する。

純金属の場合の溶湯過熱度を考慮した流動長さは式(1)で示される。

$$L_f = \frac{\rho \{c(\theta_c - \theta_f) + H_f\} w S}{h(\theta_f - \theta_0) C} \quad (1)$$

ここで、 ρ ：溶湯の密度、 c ：溶湯の比熱、 θ_c ：鋳込み温度、 θ_f ：融点、 H_f ：凝固潜熱、 w ：流速、 S ：流路の断面積、 h ：熱伝達係数、 θ_0 ：金型温度、 C ：流路の周囲長

一方(c)の合金の場合には、固液共存幅があるため粥状凝固になり、溶湯中に固相が生成する。晶出した固相は溶湯とともに流れ、流れの先端が最も固相が多く発生し、ある固相の割合になると見かけの粘性が急激に高くなり流動が停止する。このときの固相率が流動停止固相率である。したがって、粥状凝固する合金の流動長さは式(2)で示される。

$$L_f = \frac{\rho \{(\theta_c - \theta_L) - f_c H_f\} w S}{h(\theta_L - \theta_0) C} \quad (2)$$

ここで、 θ_L : 液相線温度、 f_c : 流動停止固相率

図 10 に肉厚 1mm の金型にダイカストした場合の ADC10, ADC12 合金の流動長さの比較を示す⁸⁾。同一鑄造条件でダイカストしても ADC12 合金の方が ADC10 合金に比べて流動長さが長い。その原因として Si 量の差に伴う式(1)及び式(2)の凝固潜熱量の違いが考えられるが、両者の差は 15% 程度であり、図 10 の差は説明しにくい。ADC12 は表皮成型凝固に近いことから式(2)の流動停止固相率が 1 に近いことが考えられ、その分湯流れ性がよくなったものと思われる。一方、ADC10 は粥状凝固に近く、実験結果より流動停止固相率は 0.4~0.6 程度であることから ADC12 に比較して流動長さが短くなったものと考えられる⁷⁾。したがって、湯流れ欠陥を低減させるためには ADC10 よりも ADC12 を選択する方がよいといえる。

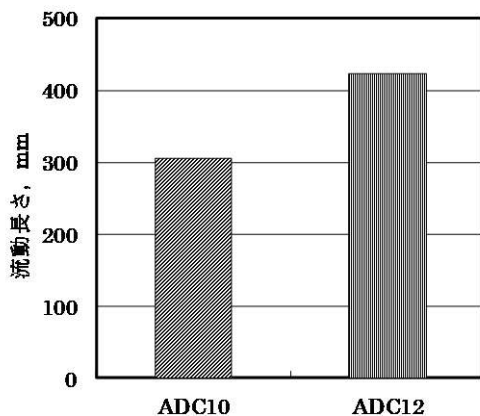


図 10 流動長さに及ぼす合金種の影響⁸⁾

5.4 破断チル層

コールドチャンバーダイカストでは、溶湯が射出スリーブに注湯されるとスリーブ壁に急激に熱が奪われて冷却され、場合によっては凝固を開始する。そこで発生した凝固層は、プランジャーチップの移動に伴い、破碎され溶湯と一緒に金型キャビティまで到達する。この凝固層は「破断チル層」と呼ばれる⁹⁾。キャビティに巻き込まれた破断チル層は、周囲の溶湯と完全に融合できずに、不連続な界面を形成して一種の湯境を伴うことになる。したがって、破断チル層が混入するとダイカストの実体強度を著しく低下させる。

駒崎らは射出スリーブ内の凝固現象について詳

細に検討し、射出スリーブ内で発生した凝固層が製品内に混入して形成される異常組織を図11の3種類に分類した¹⁰⁾。これらの3種類は、図12に示すようにいずれも射出スリーブ内の凝固位置の違いで異なる。

異常組織は、射出スリーブ内での凝固によるものであることから、合金の種類や組成、つまり合金の凝固形態によって影響を受けると考えられる。駒崎らは、Al-Si二元系及び実用合金を用いて異常組織の発生状況に及ぼす合金組成の影響について検討し、Si含有量の異なる3種類の合金(5%, 8%, 11%)をASTM引張試験片金型にダイカストした¹¹⁾。結果の一部を図13に示す。破断チル層出現率(□)は、引張試験後の破断面に破断チル層が現れた試験片数を全試験片数で除した値で示した。

また、粗大 α -Al晶の面積率(■)は、マイクロ組織中の粗大 α -Al晶の面積を観察視野面積で除した値を用いた。図13で明らかなように、粗大 α -Al晶はSi量の増加とともに低下し、破断チル層出現率は逆にSi量の増加により高くなった。

Si量の少ない場合は粥状凝固するため、射出スリーブ内ではデンドライトの発達した状態で凝固が進行し、粗大 α -Al晶主体の異常組織になり、表皮成型凝固の場合にはスリーブ壁から凝固殻が

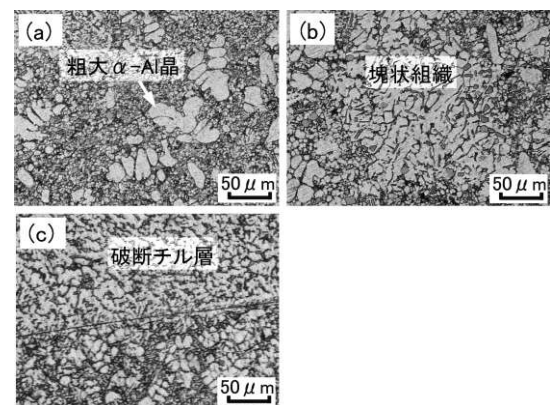


図 11 射出スリーブ内で生成した異常組織⁸⁾

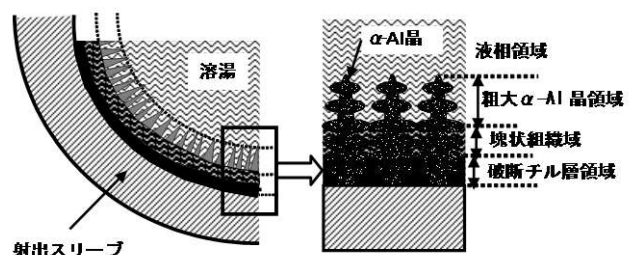


図 12 射出スリーブ内の凝固モデル

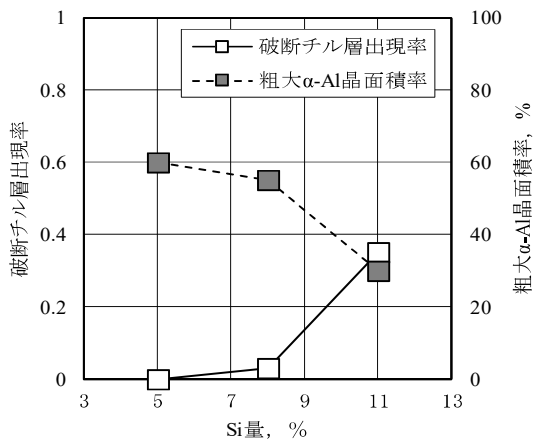


図13 粗大 α -Al晶の面積率と破断チル層出現率に及ぼすSi含有量の影響⁹⁾

生成・成長して凝固が進行するため破断チル層主体の異常組織になる。

また、Si量の異なる実用合金AC2A、ADC10、ADC12を用いて同様な実験を行ったところ、図13と同様な結果が得られた。これより、ADC10合金はADC12合金に比較して破断チル層の発生が少ないことがいえる。また、機械的性質を測定したところ、AC2A及びADC10は強度のばらつきが少なかったが、ADC12はばらつきが多く、破断チル層の影響が表れたものと推察される。これは、4.3の強度特性のばらつきとも対応している。

6. まとめ

今日では同種の合金と見なされているADC10とADC12について諸特性、欠陥発生に及ぼす合金種の違いについて検討し、以下のような結論を得た。

- 1) 表4にADC10とADC12合金の特性を比較して示す。
- 2) ADC10は粥状凝固型合金で、ADC12は表皮形成型に近い合金である。

3) 冷却速度の大きなダイカストでは両合金の間にマイクロ組織の差異は少ないが、流動性や欠陥の発生においては凝固の影響を受けるため、両合金に差が認められる。

4) 両合金は用途によって使い分けることが望ましい。

表4 ADC10とADC12合金の特性比較

	ADC10	ADC12
合金系	ラウタル系	含銅シルミン
凝固形態	粥状凝固型	表皮形成型
ひけ巣	ざく巣が出やすい	ひけ巣が出やすい
耐圧性	漏れやすい	漏れにくい
湯流れ性	流れにくい	流れやすい
破断チル層	粗大 α -Al晶主体型	破断チル層主体型
機械的性質	強度が高く、ばらつきが小さい	ばらつきが大きい
用途	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的厚肉品で強度が必要な部品 ・切削性が必要な部品 	<ul style="list-style-type: none"> ・薄肉品で湯回り性が要求される部品 ・耐圧性が必要な部品

文献

- 1) (一社)日本ダイカスト協会：「ダイカストの標準DCS M<材料編>,(2010)5.
- 2) 西：素形材, 57,3(2016),8.
- 3) 川松：Al-ある,(2008)11.5.
- 4) 西：会報ダイカスト,119(2004)623)
- 5) 西：「わかる！使える！ 鋳造入門」日刊工業新聞社,(2018)29.
- 6) (一社)日本アルミニウム合金協会, (一社)日本ダイカスト協会：「アルミニウム合金ダイカストの実体強度と顕微鏡組織」(2003).
- 7) 新山：「鋳造伝熱工学—鋳造設計の基礎—」アグネ技術センター (2001)194.
- 8) 蓮野, 浅田, 村島, 岩国, 西：日本ダイカスト会議論文集JD98-31(1998)201.
- 9) 岩堀, 戸沢, 山本, 中村：軽金属,34(1984)389.
- 10) 駒崎, 松浦, 西：鋳物,65(1993)191.
- 11) 駒崎, 丸山, 西：鋳物,67(1995)258.