

【解説】

延性ダイカストの製造技術

(株)MRDC 森中 真行*

1988年、アウディ社は延性ダイカスト部品を組み合わせたボディの乗用車「A8」を発表した。おそらく、その数十年前から、血のにじむような研究を重ねたものと推察される。その後、ヨーロッパの多くのメーカーがアルミフレームの自動車を発表した。21世紀に入ると、さらにマグネシウム (Mg) や CFRP などを採用したいわゆるマルチマテリアルのボディに発展させた。

ただし、マルチマテリアルという言葉は、延性ダイカストによりアルミニウム (Al) のボディやフレームをつくり上げたメーカーだけが使える言葉である。それをつくれぬ者が逃げ口実として「アルミボディはもう古い」などと言ってはならない。よって、今後の軽量化において、延性ダイカストは必ず越えなければならない壁である。

延性ダイカストが求められる背景

自動車には多くのアルミ合金鋳物、ダイカスト品が使用されている。ネットシェイプで鋳造する際は凝固割れ、ひけ巣が生じやすい。そのため、展伸用の固溶体型合金 (単相の凝固) は使用できない。使用されているのは、歴史的に亜共晶 Al-Si 系合金 (2段階の凝固) である。よって、この合金は現代社会を構成する極めて重要な基盤材料である。

Al-Si 系合金は図1の Al-Si 2元状態図で示すように、初晶 α -Al 相と共晶 (α -Al 相+Si 相) より形成される。これらの結晶のうち、 α -Al 相は延性である。

よって、ひずみを与えると変形するものの、容易には破壊に至らない。他方、Si 相 (共晶で晶出) にひずみを与えた場合、変形能がゼロであることからすぐに破壊する。そして、周囲の α -Al 相に亀裂を生じさせることにより、鋳物が破壊に至る。そのため、Al-Si 系合金は脆性である。

そのような物性から Al-Si 系合金ダイカストは、延性や強度を必要とされる部品には使用されてこなかった。トランスミッションケースが代表例だが、液体が漏れなければよいという部品に使用されてきた。ただし、さらに以前は、それらの部品の多くは鋳鉄であった。よって、先人たちが鋳鉄部品をアルミ化することにより、軽量化に貢献してきたのである。

しかし、最近では切実な地球環境の問題から、軽量化のためにボディをアルミ化する必要が生じてきた。また、脱ガソリンエンジンの問題から、さまざまな部

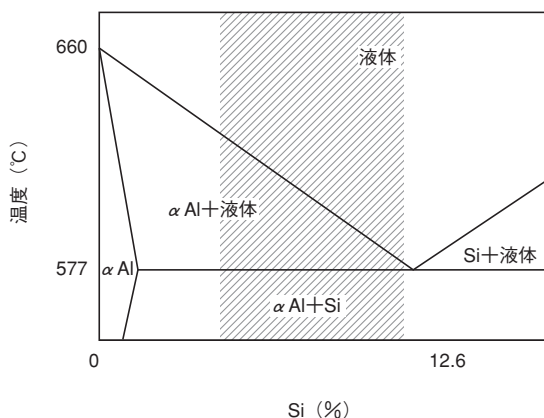


図1 Al-Si 2元状態図 (部分)。鋳造用の Al-Si 合金の多くはハッチングの範囲内にある

*Mayuki Morinaka : 代表取締役社長
〒437-0215 静岡県周智郡森町森 845-4
TEL (080) 1596-7334

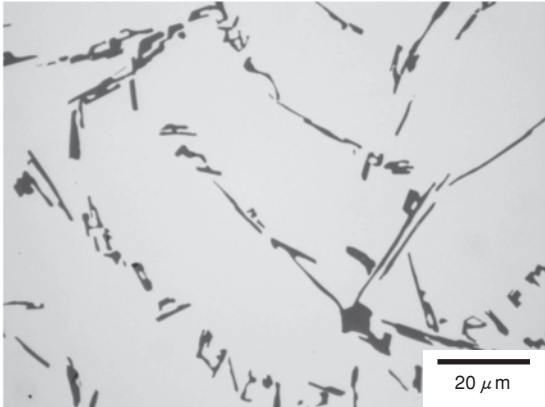


図2 Al-7% Si合金のマイクロ組織。共晶 Si 相の形態は板状である（脆性）

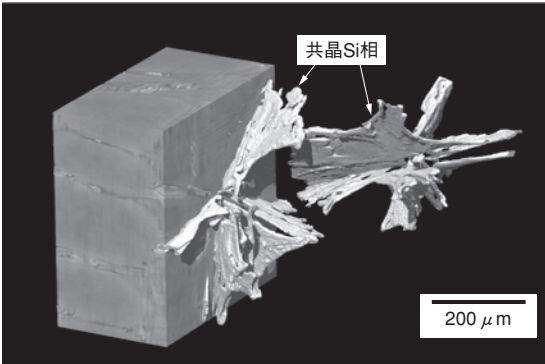


図3 Al-7% Si合金のSpring-8 像。共晶 Si 相の形態は板状である（脆性）

品やフレームをアルミ合金で製造する必要が生じてきた。ボディフレームは延性でなければならない。また、さまざまな部品には、溶接やリベット接合、あるいは塑性加工などが要求されるものと思われる。

これらのニーズに応えるには、従来のダイカストとは別に延性ダイカストが必要である。つまり時代は、鋳鉄→アルミニウム→延性ダイカストという材料の革新を求めている。本当の技術革新は材料からしか起こらないからである¹⁾。すでに時は満ちた。材料科学者やエンジニアたちが立ち上がり、延性ダイカストの壁を越えるべきときである。

なぜ延性が得られないのか

工業用 Al-Si 系合金の場合、晶出する共晶 Si 相の形態は、図 2 にマイクロ組織(2次元)を、図 3 に Spring-8 像(3次元像)を示すように板状である²⁾。また、

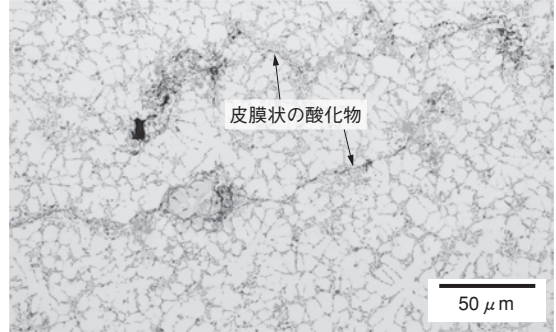


図4 ダイカスト製品内から見つかった皮膜状の酸化物の例（脆性）

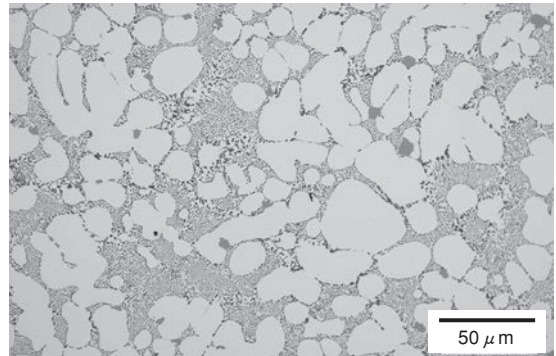


図5 延性ダイカスト部品のマイクロ組織。酸化物がほとんどなく、共晶 Si 相の形態は棒状であった

多くの場合に時効析出を目的として、少量の Mg が添加されている。Mg は Al よりも酸化しやすいことから、溶湯中で酸化物 (MgO や $MgAl_2O_4$) を形成する。これらを十分に除去せずに注湯を行うと、酸化物が製品内にもち込まれる。特に図 4 に例示するように、皮膜状の酸化物が鋳造製品内に混入すると顕著に脆性となる。以上の 2 点 (Si 相の板状化、酸化物の混入) が延性ダイカストの基本的な阻害要因である。

図 5 はダイカストにより作製された市用品 (部品入手) の延性ダイカストのマイクロ組織である。酸化物がほとんどなく、また、共晶 Si 相の形態は棒状であることから実際に延性と思われる。他方、図 6 は別の市用品 (部品入手) の例である。この場合、板状に晶出した共晶 Si 相と、皮膜状の酸化物が混入していることから脆性と考えられる。このように、延性ダイカストは Sf36 (A365) 合金インゴット³⁾を使用しさえすれば製造できるものではない。もし、うまく延性ダイカストが製造できたら、マイクロ組織に酸化物は観

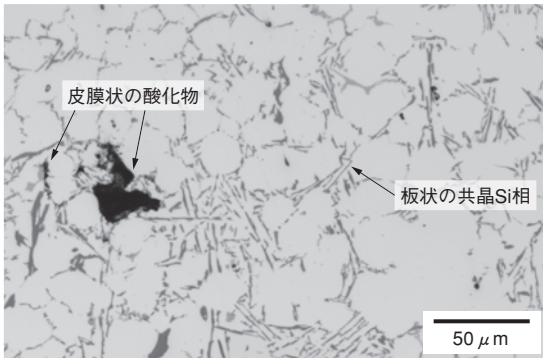


図6 延性ダイカストとされる部品のマイクロ組織。皮膜状の酸化物と板状の共晶 Si 相が存在した。脆性と考えられる

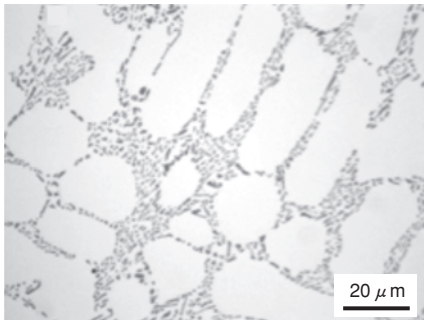


図7 Al-7% Si 合金のマイクロ組織。共晶 Si 相の形態は棒状である（延性）

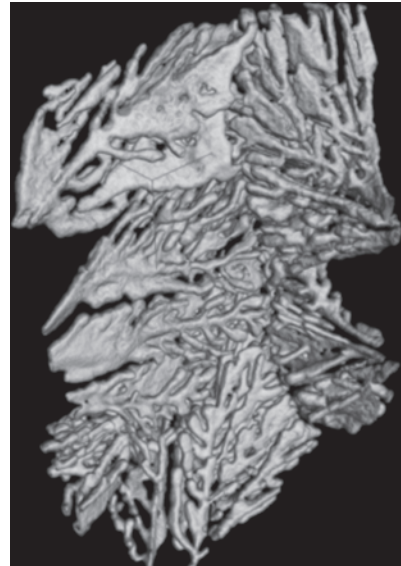


図8 Al-7% Si 合金の Spring-8 像。共晶 Si 相の形態は棒状である（延性）

合金の例を示すように、5% 程度だった伸びが 25% 程度に向上する²⁾。凝固学による板状/棒状の遷移メカニズムの説明の概略は以下のとおりである。

Al-Si 共晶液相が凝固する際、固液界面の移動速度（成長速度）を速くすると過冷が増加する。過冷が増加すると自由エネルギーが上昇する。この上昇した自由エネルギーを駆動力として、界面積の増加が可能に

察されない。また、共晶 Si 相は、図7にマイクロ組織（2次元）を、また、図8に Spring-8 像（3次元像）の例を示すように棒状を呈している。以下に当社が技術供与することが可能な延性ダイカストの原理と技術を紹介する。

延性ダイカストの原理

1. 共晶 Si 相の板状/棒状の遷移メカニズム

Al-Si 系合金を延性にするためには共晶 Si 相の形態を、図2および図3に示した板状から、図7および図8に示した棒状の形態に遷移させる必要がある。遷移させると、図9に Al-7% Si

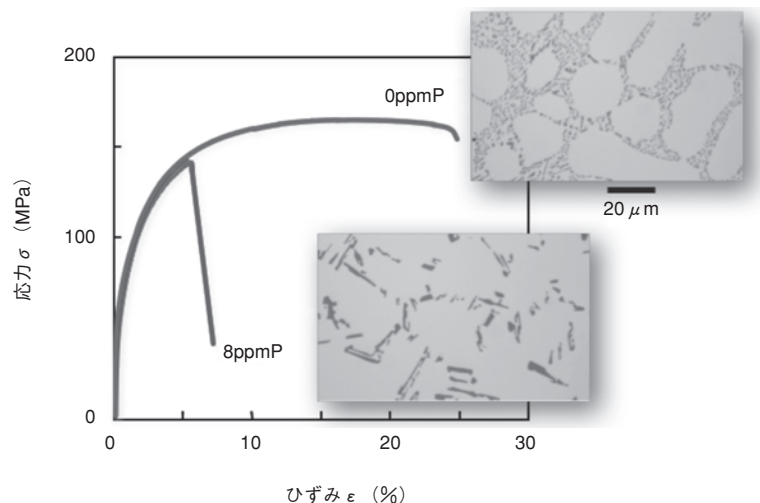


図9 Al-7% Si 合金の応力/ひずみ線図とマイクロ組織（舟金型）。共晶 Si 相の形態が棒状の場合の伸びは 25% 程度だった。板状の場合には 5% 程度に低下した²⁾

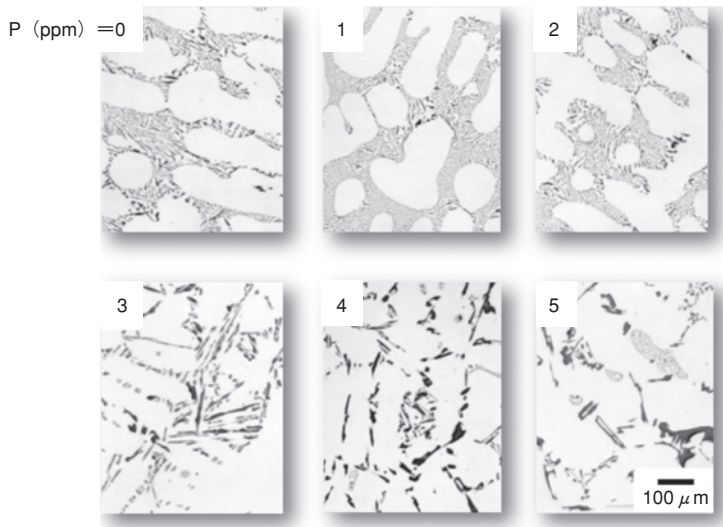


図10 Al-7%Si合金の共晶Si相の形態に及ぼすP量の影響(砂型)。共晶Si相の形態は、P量が2ppm以下の場合には棒状であった(延性)。しかし、3ppm以上になると板状に遷移した(脆性)

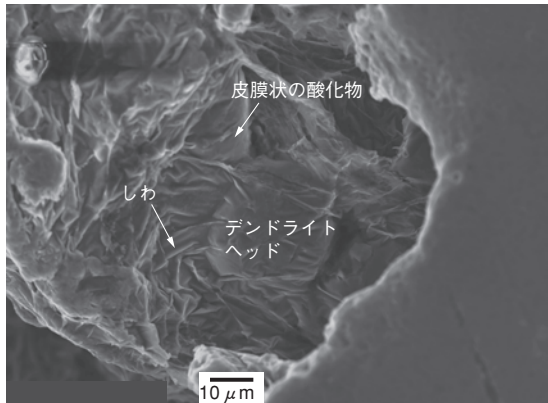


図11 ポロシティ内面を覆う皮膜状の酸化物。酸化物は皮膜であることから表面にしわが形成された

なる。その結果、共晶の相間隔の狭小化、および共晶Si相が棒状化に遷移する。そのために必要な共晶Si相の成長速度は $1\mu\text{m/s}$ 程度と考えられている⁴⁾。

これを達成するには、溶湯中に共晶Si相の核物質があってはならない。共晶Si相の核物質はAIPである。そのため、図10に示すように、Al-7%Si合金においてはP量が3ppm以上になるとAIPが形成され、共晶Si相の棒状化は生じない。一方、P量が2ppm以下の場合にはAIPが形成されず、棒状化が生じる⁵⁾。

2. 酸化物の混入メカニズム

アルミ合金溶湯の表面には、瞬時に微小な結晶(MgOなど)が皮膜状に形成される。やがてはちぎれて沈降する。あるいは乱雑な溶湯の扱いにより巻き込まれる。巻き込まれた皮膜の片面(表面側)は微小な結晶で覆われている。そのため、溶湯で濡れずにドライな界面を有している。

例として、図11にポロシティの内面をSEM(走査型電子顕微鏡)観察したものを示す。デンドライトの先端部の表面で、酸化皮膜がしわになっている。このような生成直後の酸化皮膜は $1\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ 程度と薄い⁶⁾。そのため、SEM-EDS(エネルギー分散型X

線分析装置)などのマッピング分析では酸素が検出されにくい。また、黒色でない場合が多いためKモールド法によっても検出されにくい。しかし、存在そのものが亀裂(ドライな界面)であることから機械的性質を低下させる。そして、温度勾配が小さい部位や溶体化時に開口し、剥離状、三日月状、球状のポロシティを形成させる。

このような酸化物は、溶解原料であるインゴットの段階から内在している。これに溶解時の酸化が加わる。さらに北岡⁷⁾が数十年来より指摘しているように、移湯時の「滝」により急増する。特にフラックスを添加せずに回転翼式脱ガスを行った場合には急増する⁸⁾。これらの酸化物が、フラックスにより十分に除去されないことにより脆性になる。

延性ダイカストの技術

延性ダイカストを得るためには、合金インゴットだけでなく溶解炉、ラドリング技術、初期凝固層なども重要になる。それらには多くの注意が必要であるが紙数の都合で割愛する。また、それらを満足したものと仮定し、最終工程であるラドル内での共晶Si相の棒状化、および皮膜状の酸化物の除去を対象とした技術について述べる。

図12は当社が開発した「TAC」と呼ばれるプロ

セスを行うための装置である。添加物「A」および「B」を投入後に強い攪拌が行われる。そして、生成した滓を除去した後に注湯が行われる。このプロセスにより、1ショット単位で共晶Si相は棒状になり、また、酸化物は微小なものまで除去される。これはアルミニウム精錬（電気分解）における技術⁹⁾の応用である。そして、Si36合金やADC3系の合金などを使用して読者の技術と合わせれば、延性ダイカストを得られる可能性が生まれる。

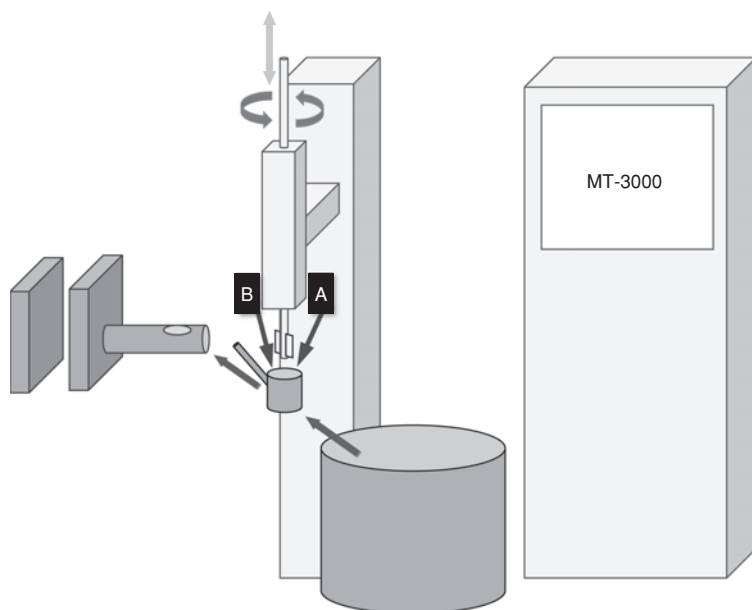


図12 TACプロセス装置

炉前分析

板状の共晶Si相および皮膜状の酸化物とともに、鑄造製品のマイクロ組織を観察すれば容易に見つけることができる。それにもかかわらず鑄造現場ではほとんど観察されていないように思われる。よって、まずはマイクロ組織を観察する習慣を確立することが望ましい¹⁰⁾。そのうえで当社が供与できる以下のような炉前分析を行うとよい。

1. 板状の共晶Si相の炉前分析

共晶Si相の形態（板状/棒状）の判別を炉前で行うには熱分析法が適している。その原理の説明は参考文献11)、12)に譲るが、要するに自由エネルギーの

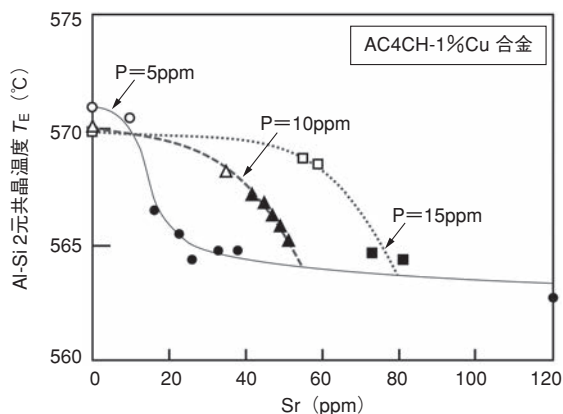


図13 共晶Si形態の炉前分析として、熱分析法による共晶温度を利用することができる

問題から、平衡温度からの過冷度¹³⁾により判別を行うものである。図13の合金の場合には567℃がしきい値である。

2. 皮膜状の酸化物の炉前分析

皮膜状の酸化物を炉前分析するのにいくつかの方法が考えられる。それらのうち最も簡便なものは図14

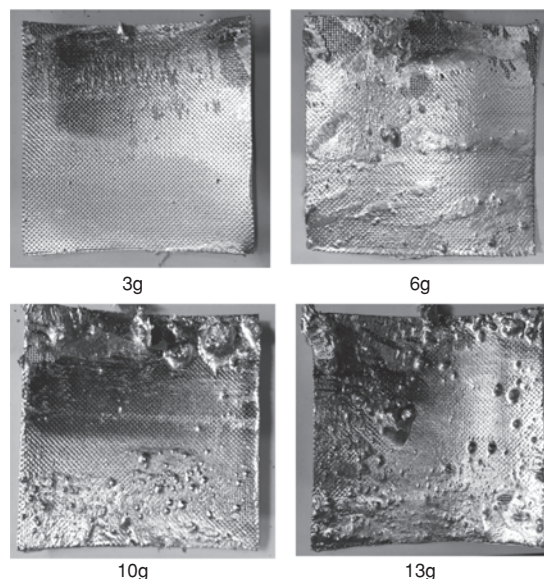


図14 酸化物量の炉前分析として、金網法を利用することができる

に示した金網法^{14),15)}である。これは機械裁断されたステンレス金網を溶湯中に浸漬し、半回転後に引き上げるものである。そして増加した重量で評価を行うという単純な方法である。所要時間は1分間程度で、結果は重量(g)で明確に表示される。そのためすでに多くの作業員から好評を博している。

☆

最近の約50年間において、ダイカストを取り巻く装置産業は確かに発展した。ダイカストマシンは使いやすくなり、金型は長もちするようになった。また、安価なADC12合金を使用して、脆性ながら薄肉で複雑な形状の製品をつくれるようになった。ただし、それはアジア諸国も同じ状況である。

他方、ダイカスト製品の中身はどうであろうか。目を見張るような性質のダイカスト製品、また、安心できる良好な性質のダイカスト製品はつくれたであろうか。あるいは、ドイツ人にマイクロ組織を調べられても恥ずかしくない製品はつくれたであろうか。残念ながら、おそらく答えはノーであろう。

すると、この壁を越えることができれば、世界のトップに並ぶことができると容易にわかる。ただし、容易ではない。専用のインゴットを購入して高価な装置を集めても、さらに本稿で紹介したTACプロセスを導入しただけでも延性ダイカストは製造できない。技術の前例(ノウハウ、つまり知識)がないからである。

最後に少し考えていただきたい。100年ほど前まで、アルミニウムをダイカストした人はいなかった。しかし、1915年にDöhlerが前例のないことに挑戦した¹⁶⁾。そして、アルミダイカストを当たり前にして歴史に名を残した。さて、100年後も使われているダイカストはどのようなものでしょうか。また、読者が時代の壁を越えて前例になり、歴史に名を残せるものは何であろうか。

参 考 文 献

- 1) 鈴木隆：私の結晶成長人生(日本結晶成長学会創立20周年記念特集)、日本結晶成長学会誌、Vol.21、No.5(1994)、p.535
- 2) 豊田充潤、森中真行、戸田裕之：Al-7% Si合金の機械的性質に及ぼすP量の影響、*鑄造工学*、Vol.86、No.11(2014)、p.832
- 3) 渡邊修一郎、R.Franke：自動車車体用高延性アルミニウ

ムダイカスト合金の開発、*鑄造工学*、Vol.79、No.6(2007)、p.297

- 4) S-Z.Lu, A.Hellawell; The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning, *Metallurgical Transactions A* 18 (1987), p.1721
- 5) 森中真行：Al-7mass%Si合金の共晶凝固に及ぼす微量りんの影響、*鑄造工学*、Vol.75、No.5(2003)、p.325
- 6) J.Campbell; *Complete Casting Handbook* (Elsevier), 2015, p.23
- 7) 木村亮介、神戸洋史、北岡山治、佐藤健二、吉田誠：ダイカストの溶湯品質、*鑄造工学*、Vol.87、No.6(2015)、p.412
- 8) 森中真行：AC4C合金溶湯における窒素ガス回転翼脱ガス時の酸化物生成に及ぼす改良処理剤の影響、*鑄造工学*、Vol.76、No.11(2004)、p.897
- 9) 常川雅功：精練用フラックスによるアルミニウム溶湯処理技術、*軽金属*、Vol.54、No.2(2004)、p.75
- 10) 森中真行、大城直人、小林哲：日本鑄造工学会東海支部非鉄鑄物研究部会報告(2018)、p.225
- 11) 森中真行、豊田充潤：Sr改良したAl-8% Si-0.4% Cu-0.4% Mg合金溶湯の熱分析技術、*鑄造工学*、Vol.89、No.10(2017)、p.638
- 12) 森中真行、飯牟礼貴志、仁科芳彦、豊田充潤：AC4CHに1% Cuを添加した合金の共晶Si相改良処理におけるSr/P比の影響、*鑄造工学*、Vol.92、No.1(2020)、p.28
- 13) D.Apelian, G.K.Sigworth, K.R.Whaler; *AFS Trans*, Vol.92(1984), p.297
- 14) 大塚良達：アルミニウムの溶解と溶湯処理、*軽金属*、Vol.39、No.6(1989)、p.466
- 15) 豊田充潤、森中真行：低りんアルミニウム合金溶湯の製造技術、*鑄造工学*、Vol.89、No.4(2017)、p.182
- 16) 西直美：基礎から学ぶ鑄造工学、*日本鑄造工学会*(2015)、p.38