

機械振動法による ADC12 合金 セミソリッドダイカスト工法開発と実用化

鬼頭 雅幸 篠田 潤一 小出 怜 市村 優汰 村上 雄一郎 三輪 謙治

要旨

セミソリッドダイカスト工法は、鑄造欠陥の低減や寸法精度の向上といった利点がある。一方、ダイカスト用合金として広く用いられている ADC12 合金は、セミソリッドスラリー生成に適した固相率となる温度域が狭いため、セミソリッドダイカストに用いることが困難であった。

本開発では、熔融状態から固液共存温度まで冷却する過程で機械的な振動を付与し、条件を最適化することにより、ADC12 合金スラリーの生成に成功した。また、本技術を量産工程で成立させ、FCEV(燃料電池電気自動車)に使用する水素供給ユニット部品に採用されることとなった。

また、この技術を改良して量産化したシステムを総称し、AiSS-Casting®(アイズキャストینگ)と商標登録した。AiSS-Casting® = Aisan Semi Solid Casting(2025.2.7 商標登録済み)

1. はじめに

昨今の自動車産業においては、カーボンニュートラルの要求が強まる中、アルミ粗形材に対し、これまで以上に、高品質・軽量化・低コストのニーズが高まっている。

図1 コストと品質の関係図

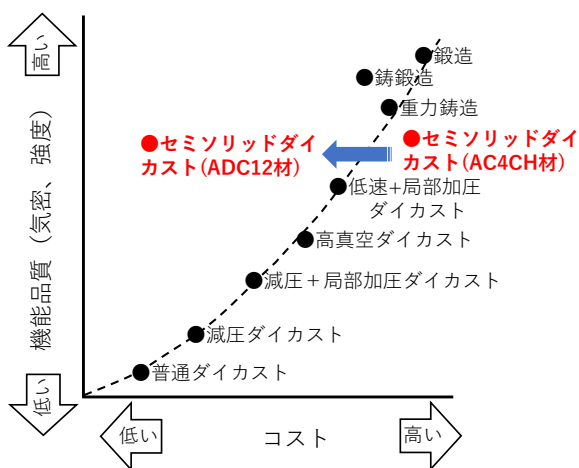


図1に示すのはアルミ粗形材を生産する工法における機能品質とコスト曲線であり、機能品質が上げればそれに伴いコストも上昇する。

その中で、従来から存在するセミソリッドダイカストは、AC4CH 材を使用するのが一般的であるが、

- ・市場の流通量が少なく、材料費が高い
- ・流動性が低いため形状によっては厚肉となる

- ・機械的特性が低いため、要求品質によっては熱処理などの後処理が必要

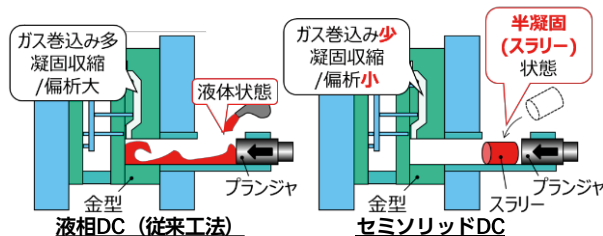
などの要因によりコストが高くなる。

そこで、市場の流通量が多く比較的安価なダイカストで使用する ADC12 材にセミソリッドダイカストを適応することで、高品質と低コスト化の両立が可能となり、ニーズに対応できると考えた。

2. セミソリッドダイカストの特徴

通常の液相ダイカストでは、図2に示す通り、液体が波立つことによる空気の巻き込み、液相から固相への相変化による収縮が発生する。

図2 液相とセミソリッドダイカストの違い



これらの現象により、巻き込み、収縮による鑄巣の発生や急冷による合金成分の偏析が発生し、内部品質を低下させる要因となっており、これらは液体金属を高速成形する以上避けられない問題である。

これに対し、セミソリッドダイカストでは液体よりも温

度が低い半凝固状態のスラリーから成形するため、凝固収縮が減少し鑄巣の低減や寸法再現性の向上が期待できる。

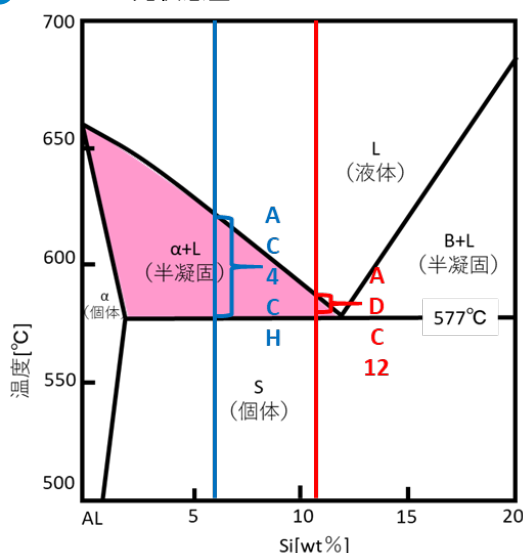
また、プランジャが動き出す射出時においても、波立ちが無い為、巻込みが減少することでも鑄巣低減が期待できる。

さらには、金型に充填される材料は全体的にスラリー状態であるが故、ある程度均一な組織の状態になっており、偏析が減少し、機械的性質のバラつきが低減し、平均値の向上も期待できる。

このことから液体金属を成形するという従来のダイカストの根本的な問題を解決する工法と考えられているが、当然その背反もある。

1つ目は粘性の高い流体を流そうとするため、湯流れ性が悪化し、充填不良になりやすくなる。

図3 AL-Siの2元状態図



2つ目はADC12を適応する場合、材料の特性による課題がある。

図3に示す状態図の通り、ADC12は固液共存状態で存在できる温度域がAC4CHに対し小さいため、温度コントロールが難しく、半凝固金属スラリーを生成するのが困難であると考えられていた。

また、図4に示す通り、凝固の形態も異なり、AC4CHでは、粥状に均一に凝固が進行するが、ADC12合金は、温度が低下しやすい外周部より凝固していく性質があるため、スラリー内で固相率が不均一、偏析しやすい傾向がある。このように、安価で強度に優れるADC12合金においては、固相が均一で良質なセミソリッドスラリーを生成することが困難であると考えられていた。

3. ADC12合金セミソリッドスラリーの生成

スラリーを生成するにあたっては、熔融金属よりも低い温度の容器を機械的に振動させながら、熔融金属を容器に

図4 合金違いによる凝固イメージ

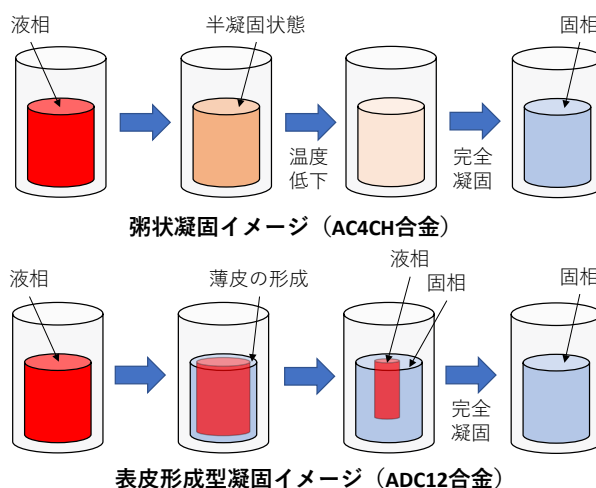


図5 スラリー生成イメージ

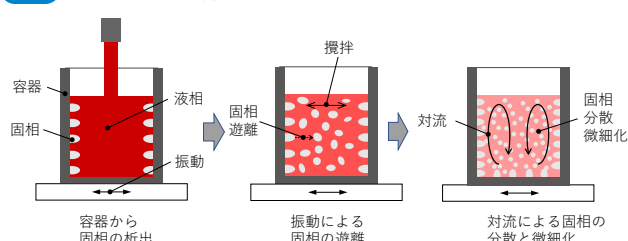
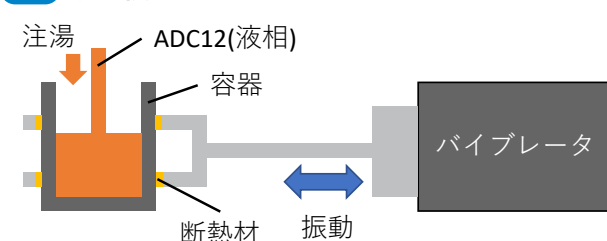


図6 機械振動装置イメージ図



注いで固液共存状態まで対流させながら冷却させる。

熔融金属が冷却されると、温度の低い容器表面から固相が析出する。

そのイメージを図5に示す。

従来のAC4CHでは電磁攪拌のような回転方向の流動を与えて、容器表面から析出する固相を分散、微細化させてスラリーを得るが、ADC12では容器との接触面に硬い初期凝固殻が生成され良好なスラリーが得られない。

そこで、今回ADC12で良好なスラリーを得る方法として、機械振動を加えることで、強い攪拌力を与えることにより固相を容器表面から遊離させた。

その装置のイメージ図を図6に示す。

これにより、対流による固相の分散と微細化を促進し固相が均一となる。最適な機械振動を付与することで、良質なスラリーを生成する方法を確立した。

この機械振動によるスラリー生成方法の効果を図7に示す。

図7 ADC12合金の金属スラリーの組織観察

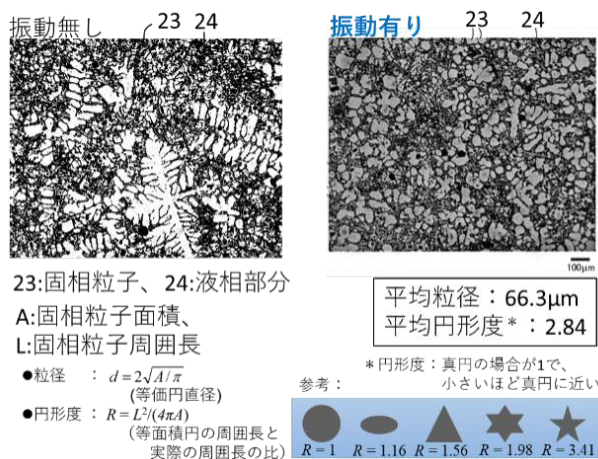


図8 ADC12合金スラリーのカット観察



振動無しの状態ではデンドライト状に成長した粗大な組織が観察されるのに対し、振動有りの状態においては、組織が微細化されており、粗形材の素性を低下させないために望ましいとされる固相粒子の平均粒径は小さく、平均円形度も小さいセミソリッドスラリーを得ることが可能となった。

またそのスラリーは金属ヘラで簡単に切れ、スラリー表面から内部まで均一な硬さで、カット断面は滑らかできれいなスラリーを生成することが可能となった。(図8)

4. スラリーの流動性確保の課題について

渦巻状テストピースが得られる流動長評価用の金型を用いて、ゲート厚さや射出速度を可変させることでせん断応力が流動長へ与える影響を評価した。

図9に示す渦巻き試験片にてゲート厚さと流動長の関係の評価結果を図10に示す。

セミソリッド状態では、ゲート厚さを小さくすることにより流動長が上昇する傾向がある。

ゲート厚さが4.0 mmの場合は、流動抵抗が低下したため流動長が上昇したと考えられる。

図9 渦巻き試験片

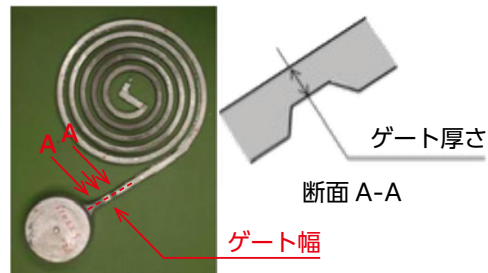
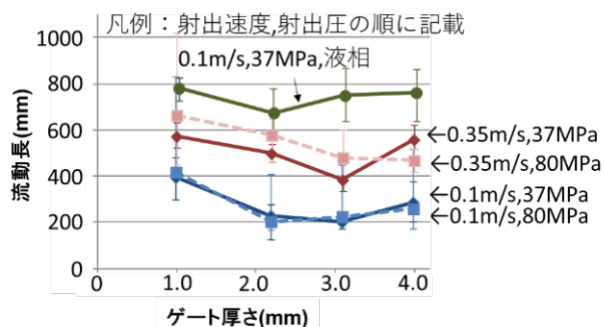


図10 ゲート厚さと流動長の関係



次に、この流動長試験で振ったパラメータを、

せん断速度: $\gamma = 6Q/(BH^2) = 6V/H$

(γ :せん断速度, V :ゲート速度, Q :体積流量,
 B :ゲート幅, H :ゲート厚さ)

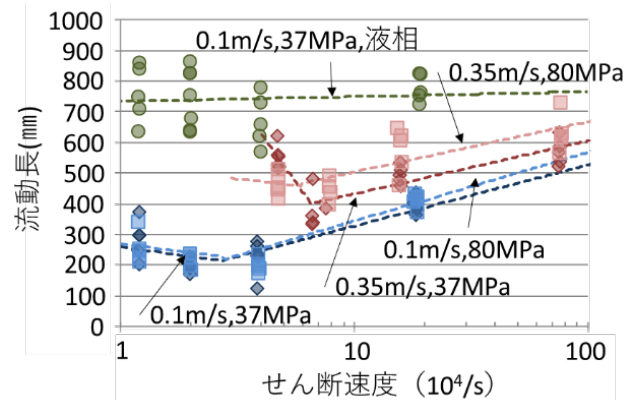
せん断応力 $\tau = \gamma \cdot \eta$ η :みかけ粘度

で、まとめ直してみる。

せん断速度は、ゲート幅とゲート厚さは小さい方がせん断速度は大きくなり、またゲート速度が速い方がせん断速度は大きくなる。

算出したせん断速度により流動長との関係をまとめ直した結果を図11で示す。

図11 セン断速度と流動長の関係



セミソリッド状態では、一定以上のせん断速度の増加に伴い、流動長が向上する。これは、ゲート部でせん断速度が上昇することにより、スラリーが受けるせん断応力が増加し、スラリーの粘度が低下し、流動性が向上するためと

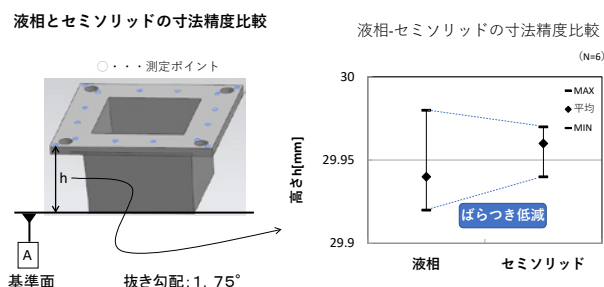
考えられる。

このように、ある程度のせん断速度を与えることで、液相に近い流動長を確保できることが分かった。

5. 寸法精度と機械的特性について

図 12 に示す製品を液相とセミソリッドダイカストで铸造し寸法精度に与える影響を評価した。

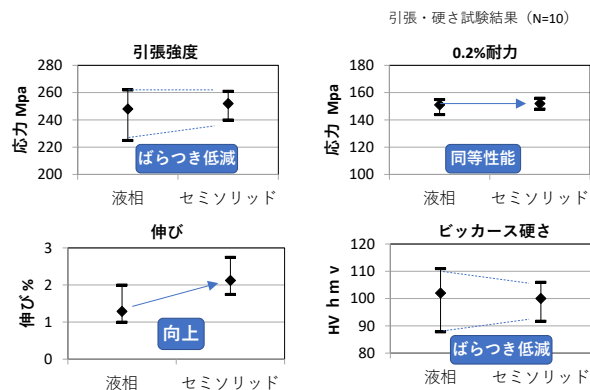
図 12 液相とセミソリッドの寸法精度比較



セミソリッドは液相に対して寸法ばらつきが低減している。これは、凝固の際の収縮率が小さいため、寸法再現性が向上したと考えられる。

次に、液相とセミソリッドでダイカストした試験片 (φ10) を用いて試験を実施し、各機械的特性について比較評価した結果を図 13 に示す。

図 13 液相とセミソリッドの機械的特性



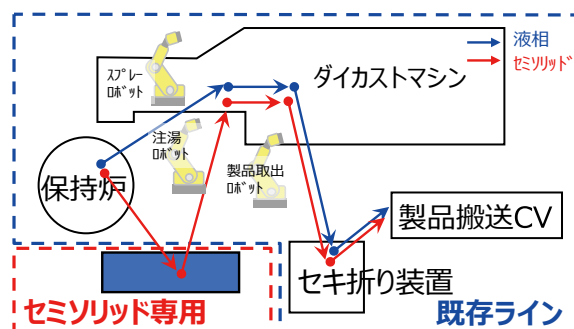
伸びについては向上し、そのほかの項目においても液相と同等以上という結果が得られた。これは、加振されたことにより組織が均一に微細化された状態となり、偏析も少ないため、ばらつきが低減し安定性が向上したと考えられる。

6. 液相とセミソリッドダイカスト共用ラインの構築

弊社で構築した液相とセミソリッドダイカストの共用ラインを図 14 に示す。

青枠内が既存ダイカストライン部、赤枠内がスラリーを生

図 14 ライン概要



成するためのセミソリッド専用工程となる。セミソリッドをダイカストする時は、この専用工程にて容器の冷却、容器への離型剤塗布、機械振動を付与してのスラリー生成といった流れをロボット搬送することで全自動にて実施している。

このように共用ラインとすることで、投資抑制と負荷に応じた生産設備の有効活用が可能となりコスト低減を図ることができた。

7. 本開発の効果

最後に、本開発の効果を図 15、16 に示す。

図 15 内部品質の向上

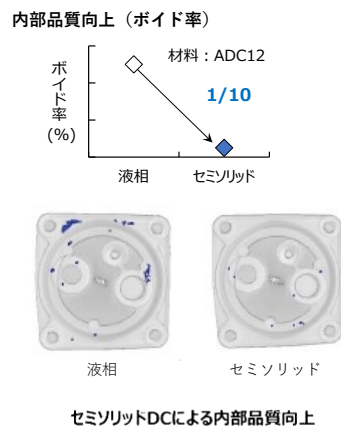
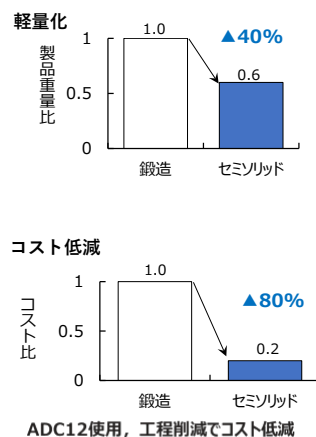


図 16 軽量化とコスト低減の効果



1つ目は、内部品質の向上である。液相に対してセミソリッドは、ボイド率を1/10に低減できており、セミソリッドダイカストの特徴である、巻込み、収縮による内部欠陥である鑄巣の低減が確認できる。

2つ目は、軽量化である。重量に関しては流動性を確保し、液相同等のニアネットシェイプでの製品化を実現することにより、従来の鍛造部品に対して、約40%の軽量化ができた。

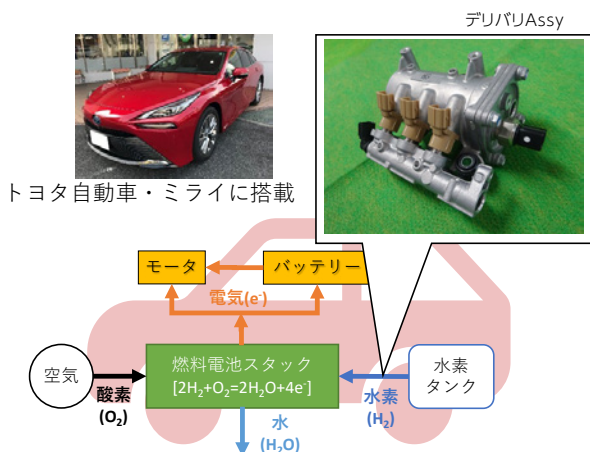
3つ目は、コスト低減である。ADC12を使用し、液相ダイカストと共用ラインを構築することで、鍛造に比べて約80%のコスト低減をすることができた。また、ADC12を使用することにより、T6処理が不要となりCO₂低減にも貢献している。

8. まとめと今後

本開発によりこれまで困難とされていたADC12のような共晶点に近い組成でもセミソリッドスラリーを生成することに成功した。それにより、大半の合金に対しこの技術に応用することが可能となった。

今回この技術を使用し、関係者の多大な協力を得て第2世代のFCV水素系デリバリAssyの量産までたどり着くことができた。(図17)

図17 FCV水素系デリバリAssy



本研究は、愛知県の「知の拠点あいち・重点研究プロジェクト」の一環として実施したものである。同プロジェクトでご協力頂いた、元産業技術総合研究所 三輪謙治氏 ならびに、産業技術総合研究所 村上雄一郎氏に深く感謝します。

参考文献

- 村上雄一郎, 他5名, AC4CHアルミニウム合金半凝固スラリーの固相粒子形態に及ぼす機械振動条件の影響, 鑄造工学86(9) (2014) 728-733.
村上雄一郎, 他5名 機械振動付与によって作製したAC4CHアルミニウム合金セミソリッドスラリーの流動性評価, 鑄造工学 86(10) (2014) 773-780.
Y. Murakami, 他4名, Non-Equilibrium Phase Crystallization of Al-Si Alloy Close to Eutectic Composition by Mechanical Vibration, Materials Transactions 63(12) (2022) 1657-1661.
村上雄一郎, 他4名, 機械振動付与によるADC12アルミニウム合金セミソリッド

スラリー作製技術, 鑄造工学 95(1) (2023) 16-22.

村上雄一郎, 他5名, AC4CH アルミニウム合金のセミソリッド成形における成形条件が流動性に与える影響, 鑄造工学84(11) (2012) 605-611.

村上雄一郎, 他5名, AC4CH 合金のセミソリッドダイカストにおける射出速度が初晶 α -Al 相粒子分布に与える影響, 鑄造工学85(10) (2013) 665-671.

Y. Murakami, 他5名, Effect of the shape of solid particles on the distribution of particles in jis AC4CH (A356) Aluminum alloy Semi-Solid High-Pressure die casting, Light Metals 2016, 2016, pp. 201-206.

Y. Murakami, 他5名, Effect of Casting Condition in Semi-Solid Aluminum Alloy Injection Process on Distribution of Defects and Density, Shape Casting (2014) 11-18.

Y. Murakami, 他4名, Development of Slurry Preparation Method by Applying Mechanical Vibration, Solid State Phenomena 285 (2019) 333-338.

Y. Murakami, 他6名, Effect of Solid Particles on Fluidity of Semi-Solid Aluminum Alloy Slurry, Light Metals 2012 (2012) 297-301.

Y. Murakami, 他6名, Evaluation of fluidity of semi-solid aluminum alloy slurry prepared by mechanical vibration, 71st World Foundry Congress: Advanced Sustainable Foundry, WFC 2014, 2014.

Y. Murakami, 他4名, Effect of vibration conditions and shear rate on the shape of solid particles in JIS AC4CH aluminum alloy slurry made by applying mechanical vibration, 72nd World Foundry Congress, WFC 2016, 2016.

著者



鬼頭 雅幸
工機・生技開発部



篠田 潤一
基幹製品生技部



小出 怜
工機・生技開発部



市村 優汰
基幹製品生技部



村上 雄一郎
産業技術総合研究所 元産業技術総合研究所



三輪 謙治

受賞実績

- | 年度 | 受賞内容 |
|-------|---|
| 令和3年度 | 愛知発明表彰 愛知発明賞
(一般社団法人 愛知県発明協会)
中部地方発明表彰 発明奨励賞
(公益社団法人 発明協会) |
| 令和5年度 | 日本鑄造工学会 豊田賞
(公益社団法人 日本鑄造工学会)
素形材産業技術賞 奨励賞
(一般財団法人 素形材センター)
中部科学技術センター顕彰 大賞
(公益財団法人 中部科学技術センター) |

