

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 2 日現在

機関番号：11301
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21760597
 研究課題名（和文）二軸移動磁界攪拌による超微細結晶粒を有するダイカスト用半凝固金属スラリーの製造
 研究課題名（英文）Fabrication of semi-solid slurry for die casting with electromagnetic stirring
 研究代表者
 嶋崎 真一（SHIMASAKI SHINICHI）
 東北大学・大学院環境科学研究科・助教
 研究者番号：00447145

研究成果の概要（和文）：半凝固スラリーとは、温度を制御することによって熔融金属の一部を予め凝固させ液体（熔融金属）と固体粒子（凝固相）が混じり合った状態にしたものであり、品質の良いスラリーを効率的に生産する方法が切望されている。本研究では、ダイカスト用のアルミニウム合金をターゲットとして、電磁攪拌法とカップ法（溶湯急冷法）を組み合わせることで短時間で均質なスラリーを製造する方法を確立した。

研究成果の概要（英文）： Semi-solid slurry is a mixture of liquid phase (molten metal) and solidified primary phase (solid particles). It is made by precision control of melt temperature and is used for die-casting. In this study, slurry was fabricated by the Cup-Cast method (rapid cooling technique for melt) with an electromagnetic stirring. The results indicated that the electromagnetic stirrer made it possible to accelerate the cooling rate of the melt, thus resulting in higher quality slurry.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：半凝固スラリー・電磁攪拌・初晶微細化

1. 研究開始当初の背景

(1) カップ法の概要

半凝固・半熔融鑄造法は、固液共存状態の金属スラリーを用いた鑄造法であり、ひげ巣や気泡の巻き込みなどの鑄造欠陥が生じにくく、微細なマイクロ組織が得られるという特徴がある。さらに

溶湯の一部があらかじめ凝固しているために、金型への熱負荷が小さいというメリットも有している。一方で、微細な初晶が懸濁している高品質スラリーを低コストかつ安定的に供給することが難しいために、半凝固・半熔融鑄造法は期待されているほどには普及していないのが現状であ

った。

このような状況で、近年、半凝固・半熔融鑄造法の一つであるカップ法が注目されている。カップ法とは、室温のステンレス製カップに湯を注湯することにより溶湯を急冷してスラリーを製造する方法であり、他の半凝固・半熔融スラリー製造法と比較して、1.スラリー製造工程が単純、2.装置が安価かつ小型、3.スラリー製造に要する時間が短いといった特徴がある。

カップ法の概要を以下に述べる。高温の溶湯をステンレス製の低温のカップに注湯することにより、溶湯とカップの間で熱交換が起り、ある一定時間(典型的には数秒~十数秒)経過後に両者は平衡温度に到達する。この平衡温度が液相線と共晶温度の間であれば、溶湯の一部が凝固したスラリーが得られる。カップ法においては、適当な固相率のスラリーが得られるように溶湯とカップの初期温度およびカップの熱容量が設計されており、カップに溶湯を注湯するという単純な操作により、短時間でダイカスト用スラリーを得ることが可能である。

(2) 電磁攪拌法のカップ法への適用

従来のカップ法においては、湯をカップに注湯するときの流れによる攪拌効果で、カップ内スラリー温度の均一化を図っていた。この方法では、スラリーを大型化した場合には、カップ内の温度が十分に均一にならず、その適用可能なサイズに制約があった。

これに対して移動磁界を用いた電磁攪拌法をカップ法と組み合わせることにより、カップ法をより大型のスラリー製造に対して適用することが可能となると考えられる。また、電磁攪拌を加えることによって、初晶の微細化効果も期待される。

研究代表者はこれまでに、新しい電磁攪拌法として二軸移動磁界攪拌法を提唱している。これは回転移動磁界と垂直移動磁界を組み合わせることにより、電磁攪拌機能の向上を目指したものである。2種類の電磁攪拌を同時に印加することにより、液面を平坦かつ静穏に維持したまま液内部に攪拌を加えることが可能となっている。また、攪拌初期においては回転攪拌のみを加え、続いて垂直攪拌を加えるといった柔軟な操作が可能であり、従来電磁攪拌法では実現することのできなかつた様々な攪拌を加えることができる。

2. 研究の目的

本研究においては、カップ法に対して二軸移動磁界攪拌を適用することにより、微細な初晶組織を有するダイカスト用スラリーを製造することを目的とする。ターゲットはダイカスト用 Al-Si 系合金とし、 $50\mu\text{m}$ 以下の初晶サイズを有する大型のスラリーを、均一かつ安定的に製造する技術の確立を目指した。

3. 研究の方法

(1) 全体の手順

新規に設計した移動磁界攪拌装置(図 1 および 2 参照)を用いて、カップへ注湯中の溶湯に電磁力を印加し、スラリーを製造した。スラリーの一部を取り出して水冷し、試料を得る。二軸移動磁界攪拌の組み合わせやその強度、注湯温度やカップ温度などをパラメータとして、実験を行った。

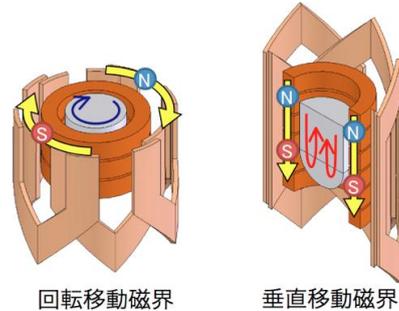


図 1. 二軸移動磁界攪拌装置の概略



図 2. 二軸移動磁界攪拌装置の外観

試料は切断・研磨後に光学顕微鏡および EBSP による観察を行い、初晶粒の大きさや形状・均一性を評価した。またカップに装着した熱電対で温度を測定し、攪拌条件の違いによるよう等温度の変化や均一性を評価した。

(2) 溶湯・カップの初期温度の設定

実験には一般鑄造用アルミニウム合金である AC4CH を用いた。主な組成は Al-6.7Si-0.4Mg であり、この合金の温度と固相率の関係を図 3 に示す。この関係は熱力学データベースである Thermo-Calc を用いて算出したものである。今回の実験ではスラリー固相率 0.32 を目標としており、そのときの溶湯温度は図 3 より 872 K となる。溶湯とカップの熱容量や凝固潜熱の関係から、注湯時の溶湯(質量 2.6 kg)の初期温度を 963 K、SUS304 製ステンレスカップ(質量 2.2 kg)の初期温度を 295 K と設定した。

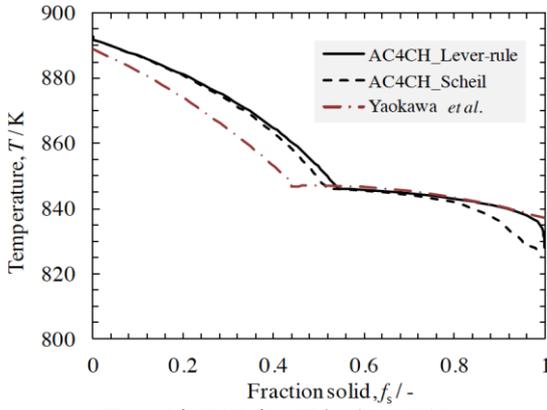


図 3. 溶湯温度と固相率の関係

(3) 電磁攪拌条件

二軸移動磁界攪拌装置では、回転移動磁界 (RMF) と垂直移動磁界 (TMF) を個別に制御することが可能である。今回の研究においては、以下の 4 通りの組み合わせの攪拌を用いた。

- a) 無攪拌
- b) RMF (4, 8, 12, 20A)
- c) TMF (5, 10, 18, 26, 32A)
- d) RMF→TMF (RMF: 32A, TMF: 32A)

無攪拌の条件では、所定温度の溶湯をカップに注湯し、90 秒間保持後カップから取り出し、試料を採取した。RMF と TMF の条件では、注湯直後から電磁攪拌を 30 秒間印加し、その後無攪拌と同様に 90 秒後に試料を採取した。RMF→TMF では、注湯後 0-5 秒間は RMF を印加し、2-30 秒間は TMF を印加した。その後は他の実験と同様にして試料を採取した。

なお注湯開始から完全に湯を注ぎ終わるまでには 5 秒を要する。条件によっても多少異なるが、注湯開始直後から初晶が生成してスラリーの見かけ粘度が上昇し、おおよそ 15-20 秒程度で電磁攪拌による流動が停止する。

(4) 温度測定

カップには 6 つの熱電対を取り付け、注湯直後からスラリーを取り出すまでの 90 秒間の温度の経時変化を記録した。温度の測定位置を図 4 に示す。

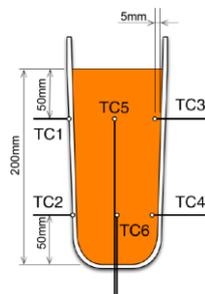


図 4. カップ内の熱電対位置

4. 研究成果

(1) 溶湯の温度変化

無攪拌および RMF→TMF の場合の溶湯の温度変化をそれぞれ図 5 と 6 に示す。図より、移動磁界攪拌を印加した場合には、溶湯内部の温度 (TC3 から 6) の差が小さくなっており、スラリー内部の温度がより均一になっていることがわかる。また、熱交換の速度も速くなっており、溶湯の冷却速度が上がっていることが分かる。

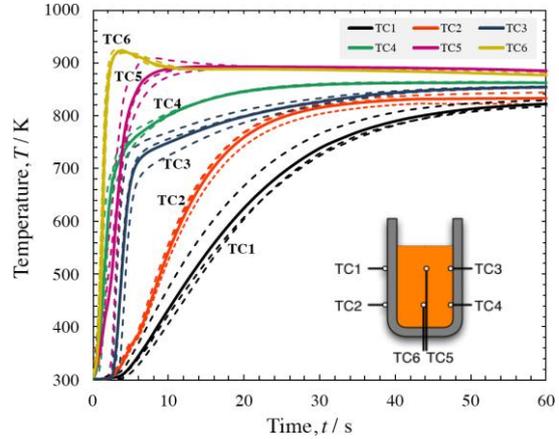


図 5. 溶湯の温度変化 (無攪拌)

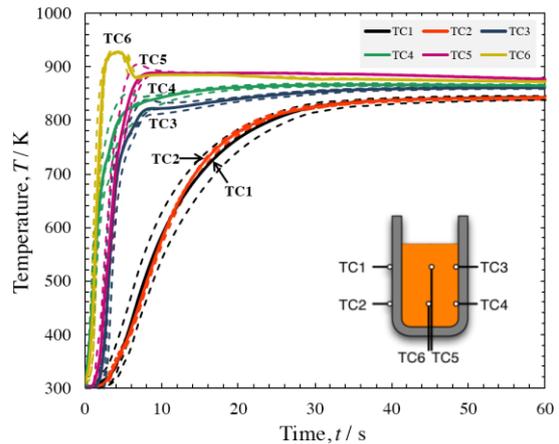


図 6. 溶湯の温度変化 (RMF→TMF)

溶湯温度の均一性を評価する基準として、溶湯の温度差がもっとも大きい TC3 と TC6 の温度差をとり、時間に対してプロットしたものを図 7 に示す。図より、RMF→TMF の場合にもっとも溶湯温度が均一になっていることが分かる。

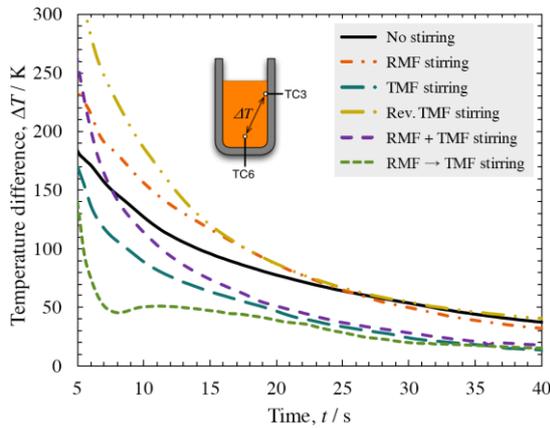


図 7. 溶湯温度の均一性

得られた温度データより、カップ-溶湯間の熱伝達係数を見積もった。その結果を図 8 に示す。図より、熱伝達係数のピークの大きさは、無攪拌 < TMF < RMF < RMF → TMF となっており、この順で溶湯の冷却速度が上がっていると考えられる。初晶の大きさは主に冷却速度で決定されると考えられるため、電磁攪拌によって初晶サイズが小さくなることが予想される。

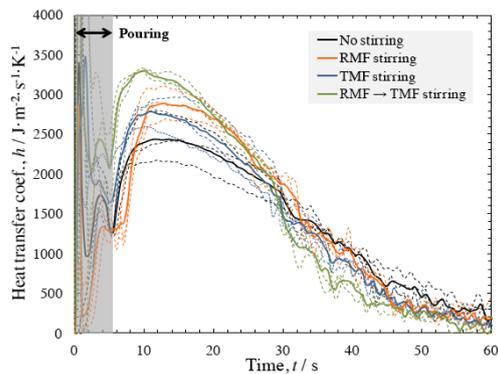


図 8. カップ-溶湯間の熱伝達係数

(2) 初晶粒サイズ

実験で得られた試料の光学顕微鏡写真の一例を図 9 に示す。図に示すように、無攪拌の場合は、樹枝状晶の初晶となっているが、電磁攪拌を印加することによって、初晶形状が球形に変化していることがわかる。この画像を二値化して初晶の大きさを求めたところ、おおよそ 50-90 μm 程度となり、攪拌条件による差があまり明確にならなかった。これは、樹枝状の初晶を二次元断面で観察することにより、単一の初晶が複数の初晶と誤って認識されてしまうことによる。

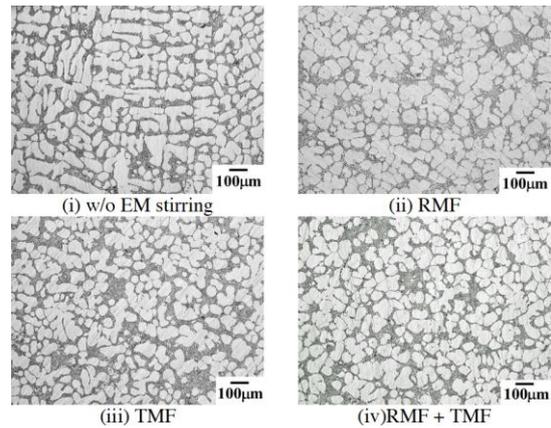


図 9. スラリー初晶組織の光学顕微鏡写真

図 10 に、先ほどと同じ組織を EBSP で観察した結果を示す。EBSP では同じ結晶方位を持つ部分が同じ色で表示される。無攪拌の場合は、大きな領域が同じ色を有しており、同一の大きな樹枝状晶であることが分かる。

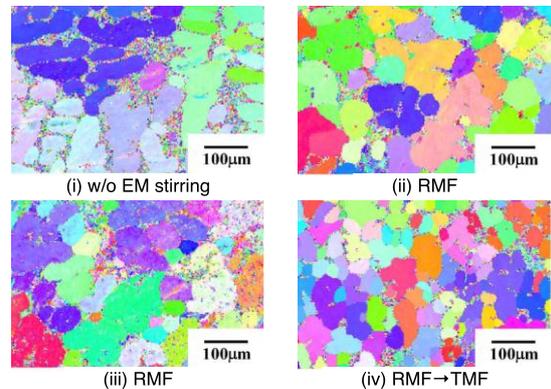


図 10. スラリー初晶組織の EBSP 観察結果

EBSP の結果において、同一の色で隣接している領域を一つの初晶だと見なして、その大きさや形状を評価した結果を図 11 に示す。初晶の大きさを見ると、無攪拌の場合は 300 μm と大きいですが、電磁攪拌を印加することによって 70 μm から最小で 50 μm 未満にまで小さくなっている。またそのサイズのばらつきも小さい。

4π (面積) / (周囲長) で定義される形状因子 (真円の場合に 1 をとる) を見ると、無攪拌 < RMF < TMF < RMF → TMF の順で大きくなっており、初晶形状がより球形に近づいていることが分かる。

光学顕微鏡と EBSP から得られた初晶サイズを比較したものを図 12 に示す。図より、両者には大きな違いが有り、正確なサイズを得るには EBSP を用いた測定が有効であることがわかった。

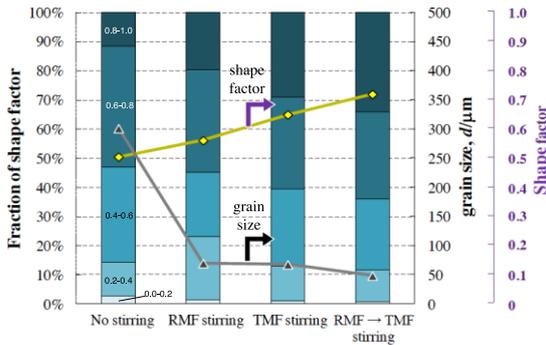


図 11. スラリー初晶のサイズおよび形状因子

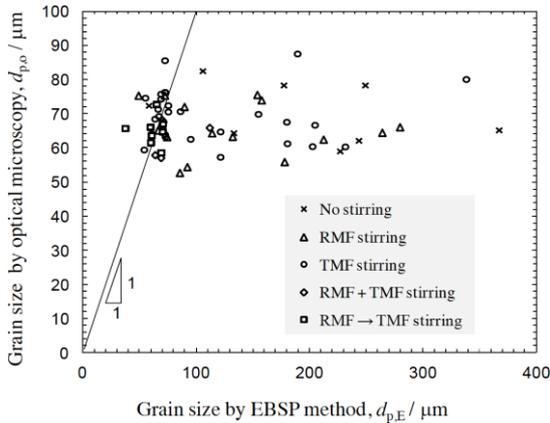


図 12. 光学顕微鏡とEBSPによる初晶粒径

スラリーへの投入エネルギーを、溶湯の単位質量当りの注湯時の位置エネルギーと電磁攪拌によって与えられるエネルギーの和であると定義して、その投入エネルギーと初晶サイズの関係を図 13 に示す。電磁攪拌によるエネルギーの算出には電磁界解析ソフトの J-Mag を用いている。図より、投入エネルギーが大きくなるにつれて、初晶が小さくなっている傾向が見られる。また、同じ投入エネルギーであれば、TMF よりも RMF のほうが初晶が小さくなる傾向にある。RMF → TMF 攪拌は、全ての攪拌方法の中で最も小さな初晶を持つスラリーを製造することに成功していることが分かる。

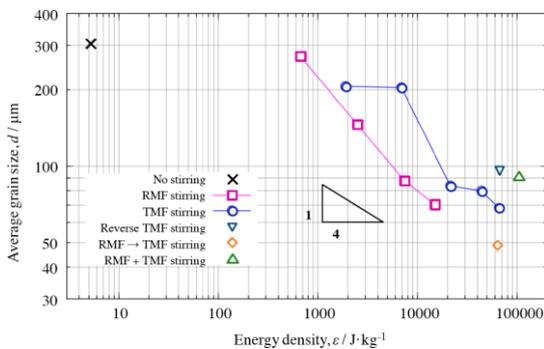


図 13. スラリーへの投入エネルギー密度と初晶粒径の関係

(3) 考察

これまでの結果より、各攪拌方法のスラリーへ及ぼす効果を考察してみる。

RMF においては、小さな初晶を少ないエネルギーで生成することが出来る一方で、溶湯全体を均一にする効果に乏しいことが特徴である。これは、カップが円筒形であるために RMF によって溶湯の回転運動を引き起こすのは、比較的容易であるためである。そのため大きな線速度が壁面近傍で生じ、大きな熱伝達係数が得られたものと思われる。また、回転流れにより溶湯が遠心力で壁面に押し付けられるため、溶湯とカップの接触面積が増大することも、冷却速度の向上に寄与している。しかし、あまり強い RMF 攪拌を印加すると、溶湯が回転によってカップから溢れてしまうために、今回の実験では 20A 以上の強い電流を印加することができなかった。また、回転流れでは内側と外側の溶湯を入れ替えることが出来ないために、温度分布が不均一になりやすい。

TMF は、初晶を小さくするためには RMF よりも大きなエネルギーを要する。これは、TMF による垂直方向の流れは、一度カップの底部にぶつかって反転する必要があるからである。一方、TMF では溶湯全体を均一にする効果が高いことが特徴である。

RMF → TMF のように攪拌を途中で切り替えることによって、注湯初期においては RMF 単独印加時よりも強い回転攪拌 (32A) を印加して高い冷却速度を達成し、溶湯がカップから溢れる前に TMF に切り替えてスラリー全体の均一化を踏むことができる。すなわち、RMF と TMF の良い特徴を組み合わせ得られたものと考えられる (図 14 参照)。

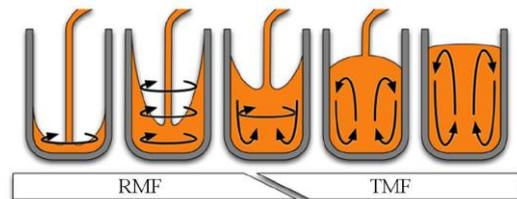


図 14. RMF → TMF 攪拌の模式図

(4) まとめ

カップ法と二軸移動磁界攪拌を組み合わせ、微細な初晶組織を有するダイカスト用スラリーを製造することを試みた。RMF → TMF とすることで、2.6 kg 級の比較的大型のスラリーにおいて、均一な 50 μm 未満の初晶を得ることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① K. Ueno, K. Hojo, H. Ishii, S. Shimasaki, and S. Taniguchi, Numerical Study of Tem-

perature Development of Slurry of Al-Si Alloy in Double-Axis-Electromagnetic Stirrer, Proc. 7th Int. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials (EPM2012), 2012, (accepted). (査読無し)

- ② S. Shimasaki Y. Takado, and S. Taniguchi, Effect of electromagnetic stirring on fabrication of Al-Si semi-solid slurry by the Cup-Cast method, Proc. 7th Int. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials (EPM2012), 2012, (accepted). (査読無し)
- ③ Y. Takado, H. Nakaya, S. Shimasaki, and S. Taniguchi, Effect of Electromagnetic Stirring on Fabrication of Al-Si Semi-Solid Slurry by the Cup Cast Method, Proc. 8th Int. pamir Conf. on Fundamental and Applied MHD, (2011), 855-859. (査読無し)
- ④ 板村 正行, 菊地 政男, 前田 琢磨, 安斎 浩一, 嶋崎 真一, 渡邊 一彦, 低コスト・高品質・高迅速半凝固スラリー生成技術の開発, 鑄造工学, 82 巻 (2010), 812-818. (査読あり)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 高道 悠季, 中屋 裕登, 嶋崎 真一, 谷口 尚司, 電磁攪拌式カップ法による Al-Si 半凝固スラリーの製造, 第 162 回鉄鋼協会秋季講演大会, 2011/09/20, 大阪.
- ② Y. Takado, H. Nakaya, S. Shimasaki and S. Taniguchi, Effect of Electromagnetic Stirring on Fabrication of Al-Si Semi-Solid Slurry by the Cup Cast Method, Int. pamir Conf. on Fundamental and Applied MHD, September 5-9, 2011, Borgo, Corsica, France.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

嶋崎 真一 (SHIMASAKI SHINICHI)
東北大学・大学院環境科学研究科・助教
研究者番号：00447145

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：