



若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

これまでの研究の歩みと今後の抱負

My Research Works from the Past to the Present and Even into the Future

嶋崎真一

Shimasaki Shin-ichi

東北大学
大学院環境科学研究科
助教

1 はじめに

筆者の所属する循環材料プロセス学分野では、人類社会および地球の生態系が直面している環境問題に対して持続可能な高度循環社会を実現するために、環境に調和した材料プロセスの設計を行うことを目的としている。以下では、筆者が近年注力している研究の一端を紹介するとともに、各研究の今後の展望について簡単に触れる。

2 材料電磁プロセッシングに関する研究

材料電磁プロセッシング (Electromagnetic Processing of Material ; EPM) とは、電場・磁場の作用下での電気伝導性流体の運動を取り扱う電磁流体力学の知見を材料製造プロセスに適用したものである¹⁾。高密度のエネルギーを非接触で作用させることができるという特徴があり、攪拌・制動・分離・加熱・浮揚などの様々な応用技術が展開されている。筆者はこの材料電磁プロセッシングに関して、以下のような研究を行っている。

2.1 熔融金属ジェットの電磁力による制御

地球温暖化に伴う二酸化炭素ガスの排出制限や、電気エネルギー需要の逼迫などを背景にして、太陽電池が大きな注目を集めている。球状シリコン太陽電池は、直径1mm程度のシリコン球とアルミニウム製の反射鏡からなる太陽電池である²⁾。これは従来の結晶系シリコンを用いた板状の太陽電池に比べて単位発電量当りのシリコン原材料使用量が1/5以下になるとされており³⁾、その実用化と普及に大きな期待が寄せられている。しかし高品質なシリコン球を効率的に製造する技術が確立されていないため、未だ普及には至っていないのが現状である。

筆者らは、この球状シリコン太陽電池に供するための金属シリコン球を高精度に製造する技術の開発を行っている⁴⁻⁶⁾。熔融金属ジェットに対して電磁力を一定の周期で間欠的に作用させることにより、熔融金属ジェットから均一なサイズの液滴を分断させて落下中に凝固させることにより、サイズが揃った金属球を得ることができる。

熔融金属としてガリウムを用いたラボ実験において、電磁力を作用させるための各種デバイスの開発や、その最適な操作条件の決定などを行った。また、電磁界解析と界面追跡を含む混相流解析を組み合わせて、電磁力間欠印加による液滴分断現象の数値計算による再現を試みている。図1はその結果の一例であり、電磁力を適切に作用させることにより、液体金属ジェットを等間隔に分断することに成功している。

現在は熔融シリコンを対象にした高温系の試験を行っている。また、電磁力間欠印加に加えて、高電場を作用させるこ

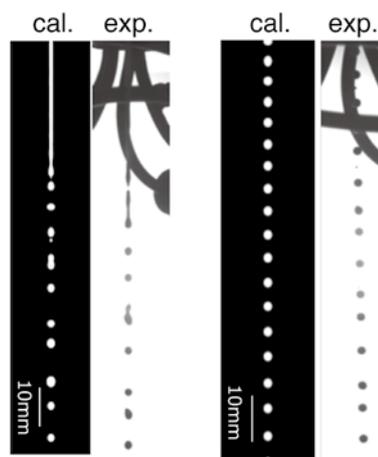


図1 液体金属ガリウムのジェット分断の様子。左は電磁力を印加せずに、そのままジェットを噴出した場合のもの。右は液体金属ジェットに対して一定間隔で電磁力を作用させた場合のもの。電磁力を用いることにより、液滴のサイズが均一になっていることが分かる。また数値計算により実験結果を再現することに成功している。

とにより液滴を帯電させて、クーロン力により液滴の軌跡を制御する技術の開発を行っている。今後、これらの技術が成熟して実産業で展開され、球状シリコン太陽電池が実際に世に普及することを目標にして研究に取り組んでいる。

2.2 電磁攪拌によるダイカスト用スラリーの高速製造

半凝固・半溶融鑄造法は、固液共存状態の金属スラリーを用いた鑄造法である。製品の強度に優れ、また金型への負荷も小さいために、アルミニウム・ダイカストへの適用が期待されている。特に近年、半凝固・半溶融鑄造法の一つであるカップ法が注目されている。カップ法の概要を図2に示す。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こり、ある一定時間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。

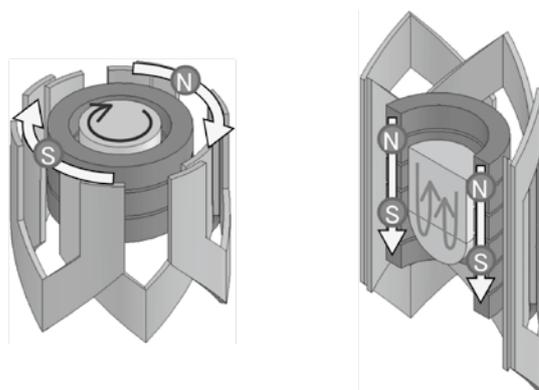
筆者らはこのカップ法に二軸移動磁界攪拌を適用し、より大型のカップにおいて高品質のスラリーを製造することを試みた⁷⁻⁹⁾。二軸移動磁界攪拌とは図3に示すように回転移動磁界 (RMF) と垂直移動磁界 (TMF) を組み合わせることにより、電磁攪拌機能の向上を目指したものである。RMFとTMFの電流をそれぞれ独立に制御することによって、従来の電磁攪拌法では実現することのできなかった様々な攪拌を加えることができる。

実験によって得られた初晶組織のEBSD解析結果の一例を図4に示す。電磁攪拌を印加することによって、初晶組織

が樹枝状から小さな球状に変化していることがわかる。得られた実験結果を解析することによって、初晶の大きさはおおむね冷却速度の大きさに依存していることが明らかにされた。またRMFとTMFを適切に組み合わせることにより、重量2.6kgのアルミニウム合金 (AC4C) の全体にわたって、50 μm 未満の微細な初晶組織を有する高品質なスラリーを安定的に製造する技術を確立することができた。現在、この電磁攪拌を併用したカップ法は、実際の産業プロセスで使用され始めている。

3 介在物粒子挙動に関する研究

金属の最終製品中に非金属介在物粒子が残存すると、製品品質に多大な悪影響を与えることが知られている。金属中の介在物粒子について、筆者らはその凝集機構や気泡への付



(a) Rotating Magnetic Field (b) Traversing Magnetic Field

図3 二軸移動磁界攪拌の概念図。回転移動磁界攪拌 (RMF) と垂直移動磁界攪拌 (TMF) を組み合わせることにより、様々な攪拌モードを実現することができる。

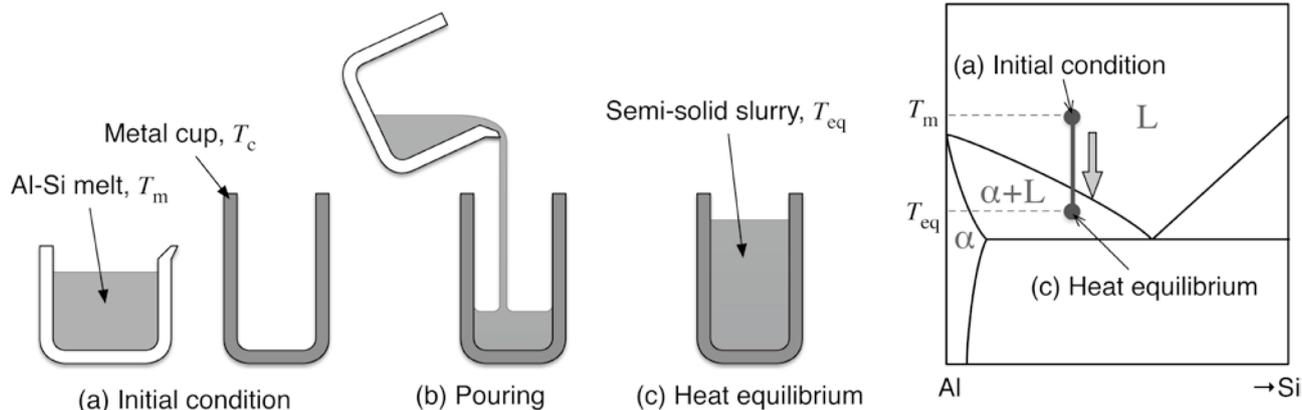


図2 カップ法の概要。熔融金属を金属製のカップに注湯することで急冷する。カップの熱容量を適切に設計することにより、半凝固スラリーを得ることができる。

着現象¹⁰、液面からの巻き込み¹¹や相対速度¹²などについて主に水/プラスチック粒子系を用いたモデル試験を行い、様々な知見を積み重ねてきた。一方で、熔融金属/セラミックス粒子系を用いたモデル試験においては、金属中に混在した非金属介在物粒子を直接観察する手段が無かったために、断面観察からの推定などに依存せざるを得なかった。

そこで筆者らはSPring-8によるX線マイクロCTを用いて、熔融金属中における介在物粒子の凝集体の観察を行った¹³⁻¹⁵。凝集体の三次元情報に基づいて、フラクタル次元や円形度、充填度などの構造に関するパラメータを抽出し、二次元断面情報との比較・検討を行っている(図5)。また熔融金属/セラミックス粒子系による凝集実験を行った結果、これまで水/プラスチック粒子系で確立されてきた知見が熔融金属系においても適用可能であることが初めて確認された

(図6)。水を用いたコールドモデル実験を多く行っている筆者らにとっては、この結果は然るべきものではあったが、やはり実際の熔融金属を用いた系で確認することができたのは大きな収穫といえる。

4 これまでの研究の歩みと今後の抱負

筆者はこれまでに、材料電磁プロセッシングや流体中における介在物粒子挙動について研究を行ってきた。本稿で紹介したものはその一部であり、他にも以下に示すようなテーマを手がけている。

- ・熔融金属中介在物の気泡付着現象に関する研究
- ・液体サイクロンと電磁分離の併用による介在物除去技術の開発

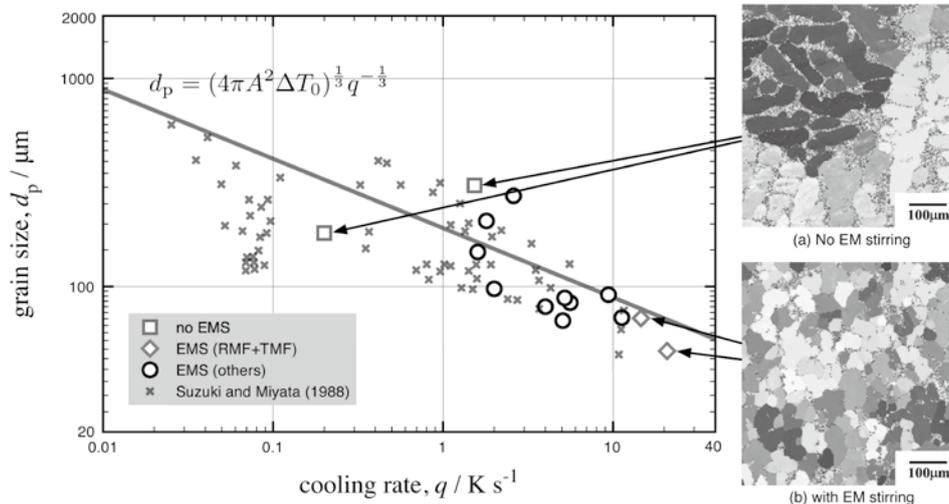


図4 スラリーの冷却速度と初晶サイズの関係。冷却速度が大きいかほど初晶のサイズが小さくなり、初晶組織が樹枝状晶から球状に変化している。また冷却速度は電磁攪拌のモードに依存しており、電磁攪拌を適切に印加することにより、無攪拌時よりも約一桁冷却速度を向上させることができる。

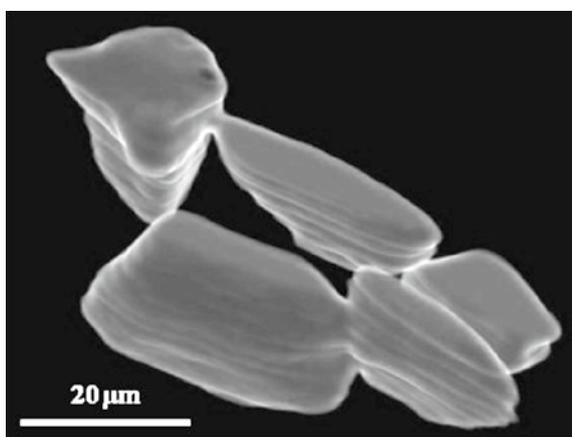


図5 SPring-8のX線マイクロCTによって撮影された熔融金属中(AI)の介在物粒子(TiB₂)の三次元立体像。5個の単位粒子が凝集体を構成している。

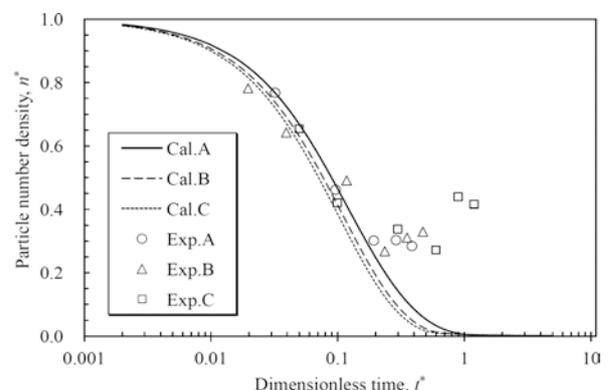


図6 熔融金属(AI) / セラミックス粒子(SiC)系による凝集実験結果と理論凝集曲線との比較。条件A、B、Cでは粒子濃度や攪拌強度が異なる。凝集初期において、実験値は理論値と良く一致している。凝集後期では凝集体の再分散が起きていると考えられる。

・液中粒子に作用する抗力および揚力

これらの研究に共通するのは、実験と理論(数値計算)の両方を用いて対象に迫る手法である。実験だけ、あるいは、数値計算だけを行うのではなく、その両方を駆使することを前提に研究を組み立てる姿勢は、筆者の恩師である故・菊池淳名誉教授および谷口尚司教授(いずれも東北大)から厳しくご指導いただいていた。実験と数値計算の両方に精通するのは、専門化が進行した現在では次第に困難な道になってきているが、今後ともこの姿勢は堅持していきたいと考えている。

鉄鋼協会においては「精錬反応プロセスにおける混相流・多重スケール解析技術の開発」研究会¹⁶⁾(主査:北大、熊谷剛彦助教)や「電磁振動印加時の物理現象解明研究会」(主査:北大、岩井一彦教授)に参加している。これらの研究会において、多くの尊敬できる大学・企業の研究者に巡り会うことができたのは、かけがえの無い財産となった。

ちょうど不惑を迎え、そろそろ若手から脱する時期となった。年とは裏腹に未だ迷うことも多いが、人との繋がりを大切にして、社会に還元できるような研究を行っていきたいと考えている。

今後ともご指導、ご鞭撻を賜りますよう、よろしく願い申し上げます。次第です。

参考文献

- 1) 浅井滋生: 入門 材料電磁プロセッシング, 内田老鶴圃 (2000)
- 2) T. Minemoto, M. Murozono, Y. Yamaguchi, H. Takakura, and Y. Hamakawa: Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 90 (2006), 3009.

- 3) Saving Silicon, Nat. Photonics, 1 (2007), 558.
- 4) S. Shimasaki and S. Taniguchi: Appl. Math. Model., 35 (2011), 1571.
- 5) 嶋崎真一: (公財) JFE21世紀財団 大学研究助成 技術研究報告書, (2013), 203.
- 6) 嶋崎真一, 谷口尚司, 今西健太郎, ボジャレビクス・バルデイス: 特開2010-236059.
- 7) 谷口尚司, 上野和之, 嶋崎真一, 大久保光治, 安藤努, 笠原奉文: 鉄と鋼, 92 (2006), 364.
- 8) 板村正行, 菊地政男, 前田琢磨, 安斎浩一, 嶋崎真一, 渡邊一彦: 鑄造工学, 82 (2010), 812.
- 9) 谷口尚司, 安斎浩一, 上野和之, 板村正行, 嶋崎真一: WO2008/056809.
- 10) H. Arai, K. Matsumoto, S. Shimasaki, and S. Taniguchi: ISIJ Int., 49 (2009), 965.
- 11) 嶋崎真一, 和田敏之, 谷口尚司: 鉄と鋼, 89 (2003), 637.
- 12) 嶋崎真一, 和田敏之, 谷口尚司: 鉄と鋼, 90 (2004), 538.
- 13) T. Li, S. Shimasaki, S. Taniguchi, K. Uesugi, and S. Narita: Metall. Mater. Trans. B, 44 (2013), 750.
- 14) T. Li, S. Shimasaki, S. Taniguchi, K. Uesugi, and S. Narita: ISIJ Int., 53 (2013), 1943.
- 15) T. Li, S. Shimasaki, S. Taniguchi, K. Uesugi, and S. Narita: ISIJ Int., 53 (2013), 1958.
- 16) 日本鉄鋼協会 高温プロセス部会「精錬反応プロセスにおける混相流・多重スケール解析技術の開発」最終報告書, (2013).

(2013年12月24日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

北海道大学 大学院工学研究院 材料科学専攻エコマテリアル講座 教授

岩井 一彦

嶋 嶋先生は環境に関する材料プロセス分野、精錬分野で活躍されている若手の研究者です。

球状太陽電池用シリコンの作製は、電磁場と流体力学とをカップリングさせて最適化を行う研究です。鉄鋼協会の講演大会等で講演を拝聴させていただいていますが、装置の組み立てからオペレーションまで、実験の難易度は高く感じられるにもかかわらず良い結果を示されるので、いつも感心するとともに、嶋先生の能力を最大限発揮できる研究テーマの一つであると感じています。また、科学研究費補助金テーマとして採択されていることから、第三者からみても重要性が高いのは間違いないでしょう。今後の発展が楽しみです。プロセス研究は、アイデアが良くともコストや設備等で実用化されない例がままありますが、ダイカスト用スラリーの研究は実用化の段階に達しており、大変うらやましく思う次第です。介入物のご研究は、いつも参考にさせていただいております。

嶋先生は、高温プロセス部会 精錬フォーラム 混相流研究会の主査を務められたこと、「精錬反応プロセスにおける混相流・多重スケール解析技術の開発」研究会を中心となって立ち上げたこと等からわかるとおり、次世代を担う研究者であることは衆目の一致するところだと思います。震災は大きな試練だったのでしょうか、それを乗り越えて成果を出されている一因に周囲の支えがあったからだろうと推測しております。

2012年に中国で開催された国際会議には、奥様と仲むつまじくエクスカージョンに参加されていたので、奥様は嶋先生の仕事(教育・研究)をよく理解されており、普段から先生を支えてみえるのだらうと思います。また、良い上司(谷口先生)のもとでの研究環境も良い結果を生む要因の一つであると思います。

これからの長い研究者生活の中で、何を目標として、そこまでどのような手法で到達するのか、すでに考えてお見えのことでしょう。先生は、移動速度論、流体力学、熱力学等のみならず、電磁気学という材料工学に携わる研究者にあまり馴染みのない学問に精通しています。また、東北大学環境科学研究科という文理融合の最たる部署に所属されているので、材料以外の視点から多角的に物事を見る素養を有しているはずで、数値計算と実験の2本柱を堅持する姿勢を崩さずに、より高い視点で今まで以上に大きな仕事をしていただき、先生が描いたご自身の大きな夢を我々に示していただきたいと思います。次世代の研究者育成も重要な仕事です。まだまだ思っているとおつという間に時間が過ぎてしまいます。もうしばらくしたら、先生からみて次世代の育成も考えはじめてもよろしいのではないのでしょうか。

お願いばかりで恐縮ですが、嶋先生の今後の更なるご活躍を期待しております。

新日鐵住金(株) 技術開発本部 プロセス研究所 製鋼研究開発部 主幹研究員

塚口 友一

嶋 嶋先生とは、谷口尚司教授(東北大)のご指導のもと、介入物粒子の除去に関する研究に共同で取り組むようになって7年が経ちます。その間、時には一緒に汗を流して実験しながら、先輩というよりも同僚の感覚でお付き合いさせて頂いています。というわけで、指導的なことを述べる立場にはありませんが、嶋先生に近い目線からコメントしたいと思います。

著者が仕事のフィールドとしている製鋼プロセス研究は、対象が1500℃を超えるような高温物なので実験や測定が難しく、モデル実験や数値計算(シミュレーション)を多用することになります。パソコンの性能が向上した昨今では、パッケージソフトを購入すれば比較的容易に見栄えの良いシミュレーション結果を手にすることができるので、その結果を鵜呑みにしてしまいがちです。

しかしながら嶋先生も述べられているように、研究においては実験と理論(数値計算)の両輪が共に重要であり、そのどちらが欠けても真実に近づく研究はできません。その点で、嶋先生の研究アプローチは、実験の精緻さに徹底してこだわり、実験結果と理論(計算モデル)との差異を追究して行く姿勢が一貫しています。研究者として当たり前のこと

ではありますが、その真摯な研究姿勢には、いつも感心させられます。著者との7年に渡る共同研究では、その甲斐あって、溶鋼中で生じる現象がかなり正確に予測できるようになってきました。

また嶋先生は、自ら実験される他、多くの学生さんを指導しながら、多岐に渡る研究テーマを推進されています。時に厳しく指導される一方、威圧的でない人間味ある雰囲気を醸成されており、研究室の学生さん達が、生き生きと目を輝かせて学業や研究に打ち込んでいる姿が印象的です。それはもちろん、谷口尚司教授のご指導によるところも大きいと思いますが、企業の立場からは、元気で、しっかり教育指導された研究者・技術者を毎年世に送り出して頂いていることもまた、非常に有り難いことです。

嶋先生は、今が、研究者として脂の乗った旬であると思います。今後は、こだわりの研究姿勢を堅持されることに加え、谷口尚司教授から受け継いだものをさらに発展させて、実プロセスに役立つ、あるいは企業における研究開発にヒントを与える研究成果を、発信し続けて頂きたいと思います。そして、世に出た多くの教え子達が活躍されることを、合わせて祈念しています。