

平成30年6月8日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18250

研究課題名(和文) 気泡ウエイク構造を利用した溶融塩浴活性金属液滴エマルジョン化による高速共還元法

研究課題名(英文) High-speed reduction method by bubbles induced emulsified metal droplets in molten salt bath

研究代表者

夏井 俊悟 (Natsui, Shungo)

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：70706879

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：溶融塩中で電析した液体金属Me(Me = Ca, Li, またはそれらの合金)を用いた、酸化物 $XO_{x-1}$ (X = Ti, Zrなど還元が困難な元素)の直接熱還元において、酸化物とMeとの反応界面の制御は重要な要素である。溶融塩浴中のMeエマルジョン化現象を理解するために、Me-溶融塩界面の高速顕微鏡によるその場観察と多相系SPHモデルによる力学解析を実施した。不活性気泡流のみならず、電極界面付近での微小領域対流の影響が無視できないことが新たにわかった。本現象と制御された電位との相関を新たに見出し、これはコロイドMeの空間的な不均一性が、局所溶解性や界面張力分布形成に寄与する可能性を示唆した。

研究成果の概要(英文)：In the thermic reduction of oxide  $XO_{x-1}(s)$ (X = Ti, Zr, or difficult reducibility metals) using electrodeposited liquid metal (Me = Ca, Li, or their alloys), the presence of dissolved Me at the vicinity of the cathode is essential, when the oxide is placed close to the cathode. To understand the transient behavior of Me droplets in the molten salt bath, the interface between the electrodeposited phase and the bath system was observed in-situ using a high-speed digital microscope. Further, the transient behaviors of multi-fluid system were investigated using the SPH model. We found that the droplets on the electrode are slightly flattened, when the colloidal Me content decreases. This mechanism indicates that the heterogeneous distribution of the colloidal Me may be due to the local Me solubility in the electrolyte.

研究分野：金属・資源生産工学

キーワード：コロイダルメタル 溶融塩電解 その場観察 界面活性 数値流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

高温熔融塩化物中で電析した液体金属の良好な還元性を利用した直接共還元は、チタン(Ti)など難還元性元素の新製錬法、あるいはCO<sub>2</sub>ガスの直接分解法への応用が注目される。他の提案されているプロセスよりも圧倒的に高速な還元速度が魅力であり、産業レベルでの生産の実現性も高い。近年では、様々な熔融塩および製錬対象とする酸化物系を用いた電気化学的研究がなされている。多くの研究の対象となっているTiO<sub>2</sub>の直接還元では、広く熔融CaCl<sub>2</sub>が用いられる。これはCaCl<sub>2</sub>がO<sup>2-</sup>イオンおよび液体Caの両者を溶解する溶媒であることが理由であり、さらに電解析出する液体Caによる脱酸は、純Tiでは100mass ppm未満の非常に低い酸素レベルを達成できることが熱力学的に示されている。しかし、現在、電析CaによるTiO<sub>2</sub>の直接還元ではこの純度レベルに達しておらず、最高で4200mass ppmO程度となることが報告されている。また、CaCl<sub>2</sub>と同様、LiClおよびその二元塩化物系は、より低温でO<sup>2-</sup>の溶解度を有するので広く用いられるが、低温化したLiCl-KCl共晶融体(723K)では、TiO<sub>2</sub>の還元挙動はCa系よりも非常に遅いことがわかっている。

上記メカニズムにおいて、化学溶解した金属Ca(あるいはLi)はTiO<sub>x+1</sub>と陰極との直接的接触がないとしても効果的に作用する。したがって、この方法の還元効率、電解析出した液体金属と熔融塩との間の界面の形態によって大きく影響されると考えられる。適切な乳化剤が存在する場合には、機械的攪拌なしに、電析した液体金属の周囲に金属霧(コロイダルメタル)が形成されることは広く知られている。熱力学的考察より、これは電析分子によって形成されたナノスケールの粒子であることが証明されている。Watanabeらは、723KのLi-LiCl-KCl-Li<sub>2</sub>O系において、Liの溶解度がLi<sub>2</sub>Oの含有量とともに増加することを見出し、真のLi溶解に加えてLiのコロイド粒子が中間体として存在することを示唆している。O<sup>2-</sup>とLiとの相互作用によって生成するLi<sub>2</sub>Oは、コロイド溶液中の乳化剤と同様の役割を果たすはずである。Takenaka et alもコロイダルLiの形成は電流の濃度に強く依存し、高電流密度はその形成を促すことを示唆している。コロイダルLiの生成メカニズムに関するこれまでの理論的研究では、熔融LiClマトリックス中のLi<sub>2</sub>Clやダイマー(Li<sub>2</sub>)のような「超リチウム化」化合物の存在が言及されてきた。しかし、最近米国Merwin et alの研究によりin-situ顕微ラマン分光法をLiCl-Li系に適用し、得られた結果はリチウムクラスターLi<sub>8</sub>と一致することが明らかとなった。しかし、液体Li-熔融塩界面でのコロイダルLi形成の根本原因である電気化学的に析出したカソード表面上の液体Liの形態はあまり理解されていないのが現状である。

## 2. 研究の目的

熔融塩中カソード付近で生成する還元性金属液滴およびコロイダルメタルと酸化物界面形態と流動現象はその重要性にもかかわらず制御が十分ではなく、またこのスケールでは還元剤である熔融活性金属は、反応後に自身が固体酸化物として熱還元反応を阻害する問題も同時に顕在化する。このような多相界面を有する対流場の理解を深め、高いエネルギー効率を有する酸化物還元システムを模索することができれば、従来の固体酸化物の還元速度をも格段に向上できる。

近年のデジタル光学技術の進歩によりCMOSイメージセンサは格段の感度を実現しており、低倍率ながらも走査型電子顕微鏡レベルの解像度において10000fps近い高速撮影が可能になってきた。高速度カメラと超長距離で作用するズームレンズを搭載した高速デジタル顕微鏡を駆使して、熔融塩化物中の流動現象を直接観察することを試みた。得られた電極表面画像を解析することで、熔融LiCl-KCl中の液体Liの分散形態、ならびにCaCl<sub>2</sub>-LiCl中の電析形態について調べた。さらに、in-situで電析した液滴の形態を調査することで種々の物性も明らかにすることを目的とした。

一方、近年のコンピュータの高速化から界面の流動を数値的に解く数値流体力学モデルの大規模化、および汎用化がすすんでいる。本技術を最大限生かし、気-液-液界面の流動場の可視化と力学解析へと繋げることを試みた。本研究では、Lagrange的記述法の一つであるWC-SPHモデルを適用してNavier-Stokes式を解いた。熔融金属の分散挙動は、異相間界面エネルギーが支配的な因子のひとつであるが、非圧縮性流体を対象とした液相間界面張力不安定性を高精度解析可能な離散モデルの開発は未踏領域であるため、新たな数値モデル開発も併せて実行した。

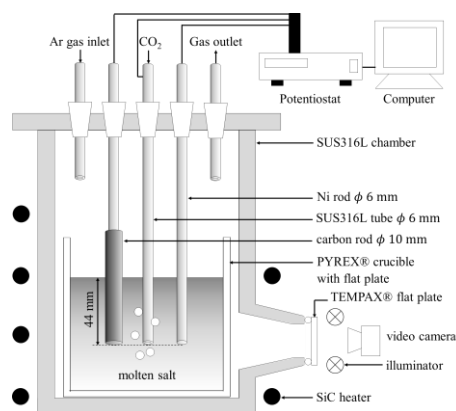


Fig. 1. 高温電気化学セル

最終的に本研究では、熔融塩中で電解析出した熔融活性金属のエマルジョン化および流動現象を明らかにし、界面化学および流体力学的両側面から還元反応の最適化を試みることを目的としている。さらに、化学的に不活性な Ar など気泡と活性金属との接触界面積を最大化するために気泡ウエイクによる気液界面制御で活性金属を微小液滴として分散させる技術開発についても検討した。

### 3. 研究の方法

熔融塩電解の流動場可視化実験は、以下の手順に従った。723~823K の Ar 雰囲気中で熔融塩化物(LiCl-CaCl<sub>2</sub> 共晶塩, LiCl-KCl 共晶塩など)に種々の作用極を浸漬した。対極をグラファイト(φ 9.0 mm)、参照電極を Ag/Ag<sup>+</sup>として電気化学測定を行った。作用極は適宜観察面をフラットにするためエンドミルで半円柱状に加工を施した。容器材料は平面付き Pyrex ガラスであり、電解処理はすべて高温で真空処理可能な石英チャンパー内で行った。電気化学測定は、電気化学測定システム(北斗電工製, HZ-5000)を用いてサイクリックボルタメトリー(掃引速度 10 mV/s)と定電位電解(E = -2.45~-2.75 V vs Ag/Ag<sup>+</sup>, 2s)を採用した。

作用極 Mo-熔融塩界面の観察には、高感度 CMOS センサを搭載したデジタル高速度カメラに長距離顕微鏡(WD=95mm)を接続して用いた。録画と電気化学計測の周波数は互いに異なるため、何らかの基準に合わせて経過時刻を与える必要がある。本同期システムは対象物におけるセンサ信号(電極間電圧)にトリガーをかけ、これを基準に得られたアナログデータとカメラの画像信号と同期させる。信号は、同期装置に入力し、撮影時の電圧を時間誤差 4μs で記録した。なお、撮影条件は 640×480 画素、で 8000fps(125μs 毎)である。得られた画像データは、画像処理ソフトウェアにより解析を行った。

界面流動問題について、WC-SPH 法によるコンピュータシミュレーションを以下の手順で行った。SPH 法は流体を有限個の粒子で表現し、流体の挙動をその粒子の運動によって計算する手法である。各計算粒子における物理量はカーネル関数と呼ばれる重み関数の重ねあわせによって求めた。密度差の大きな流動現象問題において実績のある Wendland のカーネル関数を一貫して用いた。流体の運動量保存則として、非圧縮性 Navier-Stokes の式を考え、SPH 近似に基づいて離散化した。本解析のキーとなる界面張力項の計算において、ポテンシャル関数の空間微分によって表面張力を計算する粒子間ポテンシャルモデルを適用した。

### 4. 研究成果

よく可視化できた例として、LiCl-CaCl<sub>2</sub> 共晶塩中 Mo 電極のサイクリックボルタモグラ

ムと対応する電極表面写真、定電位測定時の高速顕微鏡写真から、電流上昇に対する界面流動場の対応が確認できた。Ag/Ag<sup>+</sup>基準での電解析出電位より卑側の電位では、析出物の発生が写真より確認でき、電極表面は金属性の光沢と同時に黒色の霧状物質に覆われた。当初の予想通り、析出液体金属(Li-Ca 合金)は銀白色の析出物と黒色金属霧の2種類の形態として存在していることを確認した。また、時間の経過とともに霧が浴中を拡散していく様子が確認された。カソード電流における電荷量を Q<sub>c</sub>、アノード電流における電荷量を Q<sub>a</sub>として局所電流効率 Q<sub>a</sub>/Q<sub>c</sub>を採用して析出物の浴中への拡散を評価した。2s 間の定電位電解時の電極表面を高速顕微鏡による観察結果をみると、いずれの電位でも微小な金属液滴が生成、合体をしていく一方、黒色の金属霧が六角形のセル状となり電極表面を移動した。セル状の黒色霧は時間の経過に伴い、セル直径が増大した。なお、同一部分の観察により、電位が卑の場合の方が同一電荷量(q = It)でのセル直径が大きく、対流場が高速に生成した。この対流メカニズムとして、分散相同士が電気的中性を保持するための電氣的凝集、あるいは電解反応による急激な温度勾配あるいは濃度勾配により生じる対流の影響が示唆される。

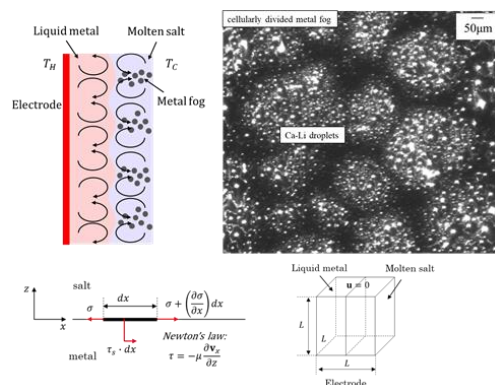


Fig. 2. 純 Mo 電極上での電析物流動形態

上述の対流場は電析物と合金を形成しない Mo 表面の場合であり、還元対象とする酸化物が存在する場合には、異なる流動形態も見受けられた。例えば、1073 K, 1h の熱処理を施した Ti 酸化物をカソードに LiCl-KCl 中電位印加を行ったさい、まず初期に白色である酸化皮膜表面が黒色への変化が確認された。また、還元は均一には進行せず、黒色部分を起点として広がっていく様子が確認された。また還元後の表面には気泡の発生が見られ、Li 液体の析出は微小であるが確認された。気泡ウエイクによる攪拌効果は十分大きくなく、電極表面のごく近傍の流動形態は別な支配因子がある可能性が示唆された。1173 K, 1 h 熱処理における Ti 酸化物においては印加により 1073 K と同様に黒色表面へと還元反応の進行が見られたが、表面上での還元反応は 70 ms 程度で進行を終える一方、その後、

表面に液滴の生成が見られる。電位の印加中においては液滴表面が揺らいでいることから液滴が表面を移動しているものと考えられる。気泡、液滴の生成は印加の終了後まで確認された。印加の終了後には 1073 K でも見られた気泡と黒色表面が見られた。また微小液滴が印加により表面を覆う様子が確認された。Fig. 3 に示すように、電位印加の前後で黒色の皮膜が剥離したことから、液滴は黒色皮膜より内部で発生しているものとみられる。表面で濡れた表面積の増加が見られた一方、Li が濡れ広がる挙動は確認されなかった。このことから比較的導電性の高い液体 Li 部分から濡れ広がるよりも、酸化皮膜表面上で液体が析出する反応が進行したものと考えられる。また析出した Li 液滴は前述の Mo 電極上で発生したものと比較して非常に微小であることが確認された。1273 K, 1 h 熱処理における Ti 酸化物においては 1073 K と同様の傾向が見られた。Fig. 4 に還元時における模式図を示す。α-Ti の酸化物皮膜、酸化皮膜内部（ここでは TiO<sub>x</sub> と定義する）で密な皮膜として形成されており、電位印加においては皮膜と皮膜内部間で液滴が生成されたため、表面が黒色に変化した後、液滴形成が見られなかったものと推察される。変態点を超えた場合、Ti の酸化被膜が密にならず Li 液滴が被膜の外部から析出したものと推察される。さらに熱処理温度を上昇させた条件においては酸化物被膜の剥離現象が起きたため、TiO<sub>2</sub> と TiO<sub>x</sub> 間で空隙が生じた。

一般に金属融体を用いた還元手法においては焼結体やバスケット形状に酸化物粉末を充填させたものをカソード電極として用いる。酸化物と導体と熔融塩の三相の界面が存在する場合においては、Li 液滴による還元で Li 液体が TiO<sub>2</sub> 酸化物表面から濡れるのではなく、導体であるバスケット部分で濡れ、酸化物に液滴が濡れ広がるものと推測される。電極付近で生成する気泡や、Ar ガスの導入によって、コロイダルメタルが攪拌される様子が確認された。SPH モデルにおいても、浴中の液相の流動に対して気泡の導入は大きな効果を有し、電極付近の反応化学種の移動に影響を与えることが再現された。しかしながら、本モデルはマイクロスケールでの流動現象を追跡するには更なる計算機容量が要求されることがわかった。電極最表面付近においては、界面張力勾配による移動が支配的となる可能性があり、今後は本現象をより明確にする方法を策定したい。このようなマイクロ対流は、単純化した流体力学モデルからわずかな界面張力差でも本スケールでは相対的に大きな流速が生じることが示唆された。この流速に起因した流動は、電極付近での混合過程にさらに効果的な寄与をもたらすことが期待される。

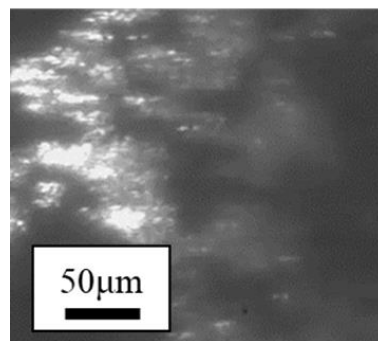


Fig. 3. TiO<sub>2</sub> 電極上での電析物流動形態

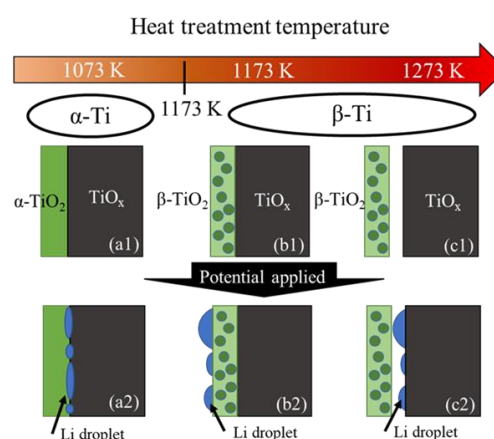


Fig. 4. TiO<sub>2</sub> 電極上での電析および還元の進行

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- 1) Shungo Natsui, Ryota Nashimoto, Daiki Nakajima, Tatsuya Kikuchi, Ryosuke O. Suzuki, “Column and film lifetimes in bubble-induced two-liquid flow”, *Physical Review E*, 査読有, in press, 2018.
- 2) Shungo Natsui, Ryota Nashimoto, Hifumi Takai, Takehiko Kumagai, Tatsuya Kikuchi, and Ryosuke O. Suzuki, “SPH Simulations of the Behavior of Two Immiscible Liquid Stirred by the Movement of a Gas Bubble”, *Chemical Engineering Science*, 査読有, Vol.141, 342–355, 2016. 10.1016/j.ces.2015.11.018
- 3) Shungo Natsui, Ryota Nashimoto, Hifumi Takai, Takehiko Kumagai, Tatsuya Kikuchi, and Ryosuke O. Suzuki, “Temperature Dependence of Behavior of Interface between Molten Sn and LiCl-KCl Eutectic Melt Due to Rising Gas Bubble”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 査読有, Vol.47(3), 1532-1537, 2016. 10.1007/s11663-016-0618-9
- 4) Shungo Natsui, Ryota Nashimoto, Daiki Nakajima, Takehiko Kumagai, Tatsuya Kikuchi, and Ryosuke O. Suzuki,

- “Observation of Interface Deformation in Sodium Polytungstate Solution–Silicone Oil System due to Single Rising Bubble”, *ISIJ International*, 査読有, Vol. 57, No. 2, 394-396, 2017.  
10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-521
- 5) Shungo Natsui, Ryota Nashimoto, Takehiko Kumagai, Tatsuya Kikuchi, and Ryosuke O. Suzuki, “An SPH Study of Molten Matte-Slag Dispersion”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 査読有, Vol.48(3), 1792-1806, 2017.  
10.1007/s11663-017-0930-z
  - 6) Shungo Natsui, Takuya Sudo, Tatsuya Kikuchi, and Ryosuke O. Suzuki, “Morphology of Lithium Droplets Electrolytically Deposited in LiCl-KCl-Li<sub>2</sub>O Melt”, *Electrochemistry Communications*, 査読有, Vol.81, 2017.  
10.1016/j.elecom.2017.06.001
- 〔学会発表〕（計 24 件）
- 1) 夏井 俊悟, “ベースメタル製錬における高温分散相と流れ”, 日本化学会新領域研究グループ主催“分散凝集の学理構築への戦略”, 日本化学会 化学会館, 2018 年 3 月 27 日【招待講演】
  - 2) 夏井 俊悟, “二融体界面に生成する微粒子と形態制御に関する研究”, 2017 年度ベースメタル研究ステーションワークショップ”固液界面での接触と反応をどのように制御するか”, 2018 年 1 月 15 日, 東北大学多元物質科学研究所事務棟 2F 大会議室, 【招待講演】
  - 3) Shungo Natsui, “Discrete Element Study for Low Carbon Ironmaking Design”, Yonsei Emerging Steel (YES) Innovation Forum 2017, February 23, 2017, Yonsei University, MSE (Academic Seminar & Center Tour). 【招待講演】
  - 4) 夏井 俊悟, 「SPH 法による二液相界面の流れ解析」, 国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟きぼう利用プロジェクト「静電浮遊法を用いた鉄鋼精錬プロセスの基礎研究～高温融体の熱物性と界面現象～」2016 年 7 月 31 日, Interfacial Energy 個別調整会/研究会, 学習院大学目白キャンパス南 7 号館 4 階会議室【招待講演】
  - 5) 夏井 俊悟, 「離散要素型解法による高温素材プロセスの数値解析」, 2016 年 5 月 12 日, 第 2 回材料プロセス談話会特別講演会, 九州大学伊都キャンパス【招待講演】
  - 6) Shungo Natsui, Takuya Sudo, Tatsuya Kikuchi, and Ryosuke O. Suzuki, “High-speed Observation of Electrolytic Deposition of Liquid Lithium Droplets in molten LiCl-KCl Melt”, 232nd ECS Meeting October 16, 2017, National Harbor, USA.
  - 7) Shungo Natsui, Akinori Sawada, Tatsuya Kikuchi, and Ryosuke O. Suzuki, “A direct numerical simulation of trickle flow in non-spherical particle beds”, 1<sup>st</sup> International Conference on Energy and Material Efficiency and CO<sub>2</sub> Reduction in the Steel Industry (EMECCR2017), October 12, 2017, Kobe Internatinal Conference Center, Kobe, Japan.
  - 8) Shungo Natsui, “Phenomenological analysis of interfacial behavior of melts”, Joint Workshop between KU and HU on Computational Materials Processing, August 1, 2017, Hokkaido Univ., Sapporo, Japan.
  - 9) Shungo Natsui, Ryota Nashimoto, Tatsuya Kikuchi, and Ryosuke O. Suzuki, “Development of Fully-Lagrangian Numerical Simulation for Multi-phase Flow in Metallurgical Processes, The Eleventh Korea-Japan Workshop on Science and Technology in Ironmaking and Steelmaking, August 6, 2016, Zaoh, Miyagi, Japan.
  - 10) Shungo Natsui, Ryota Nashimoto, Tatsuya Kikuchi, and Ryosuke O. Suzuki, “SPH Analysis of Interfacial Flow of the Two Immiscible Melts”, 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (Molten16), May 25, 2016, Seattle, Washington, USA.
  - 11) Shungo Natsui, Tatsuya Kikuchi, and Ryosuke O. Suzuki, “Particle-based Multiphase Flow Simulation for Low Carbon Ironmaking Design”, Asia Steel International Conference 2015 (Asia Steel 2015), 7A-13, October 7, 2015, Yokohama, Japan.
  - 12) Shungo Natsui, Ryota Nashimoto, Hifumi Takai, Takehiko Kumagai, Tatsuya Kikuchi, and Ryosuke O. Suzuki, “Dynamic Analysis of Interfacial Tension Instability by Gas Bubble Passing through Molten Metal-Slag Interfaces”, Conference Of Metallurgists (COM 2015) Sustainability in Ironmaking/Steelmaking Symposium, August 24, 2015, Fairmont Royal York, Toronto, Canada.
  - 13) 夏井 俊悟、数土 卓也、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “熔融 CaCl<sub>2</sub>-LiCl 電解におけるカソード界面と流れ”, 資源素材学会 2018 年春季講演大会, 2018 年 3 月 28 日, 東京大学本郷キャンパス.
  - 14) 数土 卓也、夏井 俊悟、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “熔融 LiCl-KCl 中で電析した Li 液滴と Ti 酸化物との濡れ”, 第 49 回熔融塩化学討論会, 2017 年 12 月 1 日, 関西大学千里山キャンパス
  - 15) 数土 卓也、夏井 俊悟、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “熔融 LiCl-KCl の電析による液体 Li の高速顕微鏡観察”, 資源・素材 & EARTH 2017 (札幌) 平成 29 年度資源・素材関係協会合同秋期大会, 2017 年 9 月 27 日, 北

- 海道大学
- 16) 数土 卓也、夏井 俊悟、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “熔融塩中で析出したLi液滴の高速顕微鏡観察”, 日本金属学会 2017 年秋期(第 161 回)講演大会、2017 年 9 月 7 日、北海道大学
  - 17) 数土 卓也、夏井 俊悟、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “流動 TiO<sub>2</sub> 粒子の電解還元挙動”, 第 48 回熔融塩化学討論会, 2016 年 11 月 25 日, 新潟大学駅南キャンパス「ときめいと」
  - 18) 数土 卓也、夏井 俊悟、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “LiCl-KCl-Li<sub>2</sub>O 熔融塩中での流動 TiO<sub>2</sub> 粒子の電解還元”, 日本金属学会 2016 年秋期講演大会ポスターセッション, 2016 年 9 月 21 日, 大阪大学豊中キャンパス.
  - 19) 夏井 俊悟、高井 比文、梨元 涼太、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “非球形粒子層における分散液相流動モデル”, 日本鉄鋼協会 第 172 回秋季講演大会, 2016 年 9 月 22 日, 大阪大学豊中キャンパス.
  - 20) 梨元 涼太、夏井 俊悟、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “3 次元 SPH シミュレーションによるマット - スラグ分離挙動解析”, 平成 28 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 2016 年 9 月 15 日, 岩手大学理工学部キャンパス
  - 21) 夏井 俊悟、梨元 涼太、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “二液相間に生成・分離するエマルジョンの動力学モデル”, 平成 28 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 2016 年 9 月 15 日, 岩手大学理工学部キャンパス.
  - 22) 数土 卓也、夏井 俊悟、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “LiCl-KCl 熔融塩中における流動酸化粒子の電解還元”, 日本金属学会日本鉄鋼協会北海道支部サマーセッション, 2016 年 7 月 1 日, 北海道大学情報教育館スタジオ型多目的室・遠友学舎.
  - 23) 梨元 涼太、夏井 俊悟、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “気泡慣性力による二液相界面流動の SPH シミュレーション”, 第 171 回日本鉄鋼協会春季講演大会, No. 20, 2016 年 3 月 25 日, 東京理科大学葛飾キャンパス
  - 24) 梨元 涼太、夏井 俊悟、菊地 竜也、鈴木 亮輔, “上昇気泡による熔融メタル・スラグ界面流動の 3 次元 SPH シミュレーション”, 平成 27 年度日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同冬季講演大会, 平成 27 年 12 月 18 日, 北海道大学フロンティア応用科学研究棟

[その他]

#### 研究紹介活動(3 件)

- 1) 夏井 俊悟, 「界面を含む高温融体の流れ」, 2017 年 8 月 3 日, 第 8 回熱経部会技術検討会, 新日鐵住金室蘭製鉄所.【招待講演】
- 2) 夏井 俊悟, 「融体界面の流れの不思議な

- 世界」, 2016 年 11 月 22 日, 化学科特別講演会, 旭川工業高等専門学校.【招待講演】
- 3) 夏井 俊悟, 「流れと界面の不思議～高温融体の世界から地球温暖化まで～」, 2016 年 9 月 17 日, 国際科学技術財団主催やさしい科学技術セミナー, 岩手県立久慈高等学校

#### 受賞(6 件)

- 1) 日本鉄鋼協会研究奨励賞, 2018 年 3 月 19 日
- 2) 平成 29 年度日本金属学会秋季大会第 29 回優秀ポスター賞, 2017 年 9 月 8 日
- 3) 平成 29 年度日本鉄鋼協会第 174 回秋季講演大会学生ポスターセッション優秀賞, 2017 年 9 月 8 日
- 4) 平成 27 年度北海道大学大学院研究総長賞(奨励賞), 2016 年 2 月 3 日
- 5) 第 63 回日本金属学会論文賞(材料化学部門), 2015 年 9 月 16 日
- 6) 平成 27 年度日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同サマーセッション 優秀ポスター賞, 2015 年 7 月 17 日.

ホームページ

<http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/ecopro/>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

夏井 俊悟 (NATSUI, Shungo)  
北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：70706879

##### (2)研究分担者 なし

##### (3)連携研究者 なし

##### (4)研究協力者

鈴木 亮輔 (SUZUKI, Ryosuke)  
菊地 竜也 (KIKUCHI, Tatsuya)  
数土 卓也 (SUUDO, Takuya)  
梨元 涼太 (NASHIMOTO, Ryota)  
高井 比文 (TAKAI, Hifumi)