

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14036

研究課題名(和文)サブミリ秒スケール金属融体界面の流れとコロイダルメタルの動力学

研究課題名(英文)Kinetics of submillisecond scale flow in between the melt interface and the colloidal metal

研究代表者

夏井 俊悟(Natsui, Shungo)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：70706879

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：高温金属融体の界面と分散相の動的な振る舞いについて、サブミリ秒スケールでの詳細な追跡を試みました。特に、Ar雰囲気中823Kにおける溶融LiCl-CaCl₂共晶融体中で、電位制御されたMo作用極上の電流応答と界面形態を時々刻々追跡したところ、電析液滴群の周囲には特徴的な分散相のネットワーク構造が自発生成することを発見しました。固体表面上の2融体界面流動の運動方程式を近似的に解きました。局所的な電解反応界面の不均一性によってこのようなセル状流れが生成する可能性があることを示しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

溶融塩(塩化物、酸化物など)中に分散する液体金属の挙動を知ることは、鉄、チタンなど多くの金属生産において共通、かつ経済的にも非常に重要です。高温溶融塩中の動的現象理解は容易ではありませんが、本研究では、電気化学的に制御された電極表面での高速顕微鏡による観察、電位・電流応答、流体力学解析など多角的な試みを実行し、様々な系でミリメートル以下かつミリ秒以下スケールでの考察を可能としました。特定の溶融塩中では、電析した合金液滴群の周囲にユニークな分散相ネットワーク構造が生成することを発見しました。界面の不均一性が生み出すセル状流れが、マイクロスケールでの混合を促進するかもしれません。

研究成果の概要(英文)：We examined to trace the behavior of the molten high-temperature metal as a dispersed phase in detail in various systems. For the first time, here we reported the time change of electrode surface on the sub-millisecond/micrometre scale in molten LiCl-KCl-CaCl₂ at 823 K in Ar atmosphere. When the potential was applied, liquid Ca-Li alloy droplets grew on the electrode, and the black colloidal metal moved on the electrode surface to form a network structure. The attraction, which operates on the interface between the different phases is explicitly defined as London dispersion force using the Fowkes theoretical model, and the interfacial tension can be calculated using the sum of the attraction magnitudes corresponding to the surrounding via computational fluid dynamics simulation (SPH). These results will provide important information about the microscale mixing action near the electrode, and accelerate the development of metallothermic reduction of oxides.

研究分野：高温物理化学

キーワード：高温融体 コロイダルメタル 溶融塩電解 電気化学 流体力学 その場観察

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

わが国の社会基盤となるベースメタル資源の生産は、大部分が高温融体を反応場とした高温素材プロセスに依るが、環境負荷が大きいことが知られている。しかし、いずれの金属種においても既に極限まで合理化された生産プロセス改善と設備改修がなされ、連続的な改良のみでは長期的な所用エネルギー量削減は困難である。現実の高温融体反応場の効率を決定付ける支配因子とは何かを明らかにしたプロセスの抜本的見直しが必要と思われる。乾式製錬においては、目的の金属融体は必ず何らかの溶融化合物と接触し、不純物を除去する方向に反応を進行させる。両者は相を成して接するが、従来、この複雑界面は平均化・粗視化され、平衡論に基づく熱力学モデルによりプロセス設計がなされてきた。しかし、現実の系において、融体界面の相分離過程が微視的には不均一反応であり、非平衡下で進行する。溶融塩(溶融塩化物、溶融スラグなど)相と金属融体との分散・懸濁、相界面に生成する第3相の存在の影響で、界面反応の素過程は、従来の時空間スケールの平均化で検知出来なかったため見かけ上極めて複雑となってしまう。

2. 研究の目的

溶融塩中の分散相挙動は、平均化しないスケールで明示的に分離解明可能であり、流れと界面形状を含んだ総体として定量化できないか、と考えた。2液相界面形状の支配的因子のひとつが界面張力と考え、界面電位を制御することで金属融体界面は、高温および化学的に活性であってもその流れ形態の特徴づけが可能と考えた。さらに、たとえばLiCl-KCl融体中で生成するLi液滴形状とそれに依る電流効率は、ごく少量の酸化イオン(O^{2-})源(0.1mol% Li_2O)による汚染に非常に敏感であることが判明している。

そこで、局所的に生じる様々な外乱要素を排除した高速・高感度のその場観察手法を開発することでさらなる溶融塩中での電析挙動解明を検討するに至った。さらに数値流体力学解析も併用して、高温界面化学と流体力学の両側面に立脚した考察を展開する。未踏の高温場でのサブミリ秒/サブミリメートルスケールでの分散相形成過程を明らかにすることを目的に、本研究では、塩化物中に電析した活性金属液滴を対象に、様々な動力学的効果を直接観察・同時計測することを試みた。

3. 研究の方法

直径100mm、高さ250mmの石英容器をin-situ観察用に十分に滑らかな平面を有するバレルアーチ型の形状に加工した。 ± 1 Kの精度で容器の内部温度を制御できるように電気抵抗炉を制御した。メタルハライドライト(最大光束:12,500lm、メインスペクトルピーク:550nm)を補助光源として使用した。高速デジタルカメラ(モノクロ、主応答スペクトル範囲:500~600nm、電極界面の変化を100 μ s程度で記録)および長距離ズームレンズ(作動距離:95mm、最小視野:666 μ m \times 500 μ m、およびピクセルあたりの長さ:1.04 μ m)を用いて直接観察を行った。液体金属電極界面は、画像処理ソフトウェア(Photron Co., Ltd.、PFV ViewerおよびImageJ)を使用して追跡した。試薬は主にLiCl(>99.0%)、 $CaCl_2$ (>95%)、KCl(>99.9%)を用いて融体を生成した。滑らかな平面を有するホウケイ酸ガラス容器、あるいは石英容器を用いて、約1Paで573Kで12時間以上乾燥させ、一定の測定温度に加熱したのち、5時間保持して残留水分を除去した。すべての実験は、Ar雰囲気(>99.9995%)で行った。石英ガラス保護管付きの熱電対を融体中に直接装入して逐次温度測定した。試薬を溶融させた後、作用極・対極・参照電極を外部とのシールを注意深く維持しながら溶融物に浸した。種々の電気化学測定には、北斗電工製HZ-5000を用いた。電極間電圧と顕微鏡画像は、アナログ信号同期システム(DI-SYNC 29N)を使用して4 μ sの誤差で同期した。出力信号はスコープコーダ(横河製, DL350)を用いて処理した。作用極は、エンドミル加工により予め観察側が平面となるようにトリミングしたMo棒(ϕ 1.5mm, 99.95%)を用いて、ロッド表面はエメリー紙で研磨した。同様に ϕ 1.5mmのチタン棒を熱処理したのも用いた。作用極の浸漬深さは、絶縁保護 Al_2O_3 管を使用して所定長さに固定した。対極はグラファイト棒(ϕ 10mm)、参照電極は Ag^+/Ag (0.5mol% $AgCl$, ϕ 1.0mm, 99.99%の銀線を含む)を使用した。

また、本質的に非定常かつ複雑な二液相界面の動的分離機構を明らかにするため、補助的に流体力学に基づく数値モデル解析を次のように実施した。溶融体をすべて連続粘性流体と近似して、その運動が非圧縮性Navier-Stokes式に従うと仮定した。断熱過程等エントロピー条件を仮定して、付帯条件付移動最小二乗Smoothed Particle Hydrodynamics(CLS-SPH)法を適用して圧力・粘性力・重力を明示的にモデル化した。ここで、異相界面にはたらく界面張力は、Fowkesの理論に従い、異相界面にはたらく分散力と界面張力との関係を連成して求めた。

4. 研究成果

種々の溶融塩中Mo作用極上での挙動を追跡してデータを収集することができた。特に823KでのLiCl- $CaCl_2$ 共晶融体中での挙動が特徴的であったため以下詳述する。なお、定量的データはNatsui et al., Scientific Reports, volume 8, 13114 (2018)に掲載されているので、参照されたい。サイクリックボルタムメトリにより Ag^+/Ag 平衡電位に対して $E_{ed} = -2.285$ Vでカソード電流の急激

な増加、および対応するアノード電流が得られ、それぞれ Li-Ca 合金の析出と溶解によるものであった。自由エネルギー変化に基づく熱力学解析と電析サンプルの ICP-AES 定量分析結果から、このピークでの電析合金組成を Ca : Li = 71 : 29 と推定し、さらにボルタモグラムのアノード反応およびカソード反応に寄与する電荷比から、局所電流効率を $q_a/q_c = 0.904$ が得られた。異なる電位で撮影されたスナップショットから、電析した Li-Ca 合金液滴の周囲に黒いコロイド状の分散相(金属霧)が観察され、これの化学溶解および浴中への拡散が電流効率低下に寄与する。 $E < E_{ed}$ では、電極の表面は光沢のある金属が見られ、コロイド状分散相はその界面付近にする形態となった。界面形態を詳細に調べるために、2.0 秒間-2.45 ~ -2.55 V vs. Ag⁺/Ag の範囲でクロノアンペロメトリを実施したところ、 $t > 0.02$ s で電流密度はほぼ一定であり、電解析出反応はほぼ一定の速度で進行した。このときの電極表面の写真を Fig. 1 に示す。電流-時間曲線とは対照的に、電極界面はこのスケールではかなり複雑な形態を示した。Mo 表面上で液滴は不均一に成長し、金属霧は電極表面付近を自発的に移動してネットワーク構造を形成した。このネットワークは、時間とともに径が大きくなる傾向があり、2 次元的な単位セルと見なすことができる。その単位胞を "セル" と称すれば、時間の経過に伴い、セル直径は徐々に増加する傾向を有する。長時間の電解によって、ネットワークが凝集し、セル構造が崩壊した。電位がより卑である場合、供給された等しい電荷量に対してセルが大きくなる傾向が見られ、このことは大きな電位差が金属霧の凝集を促進することを示している。

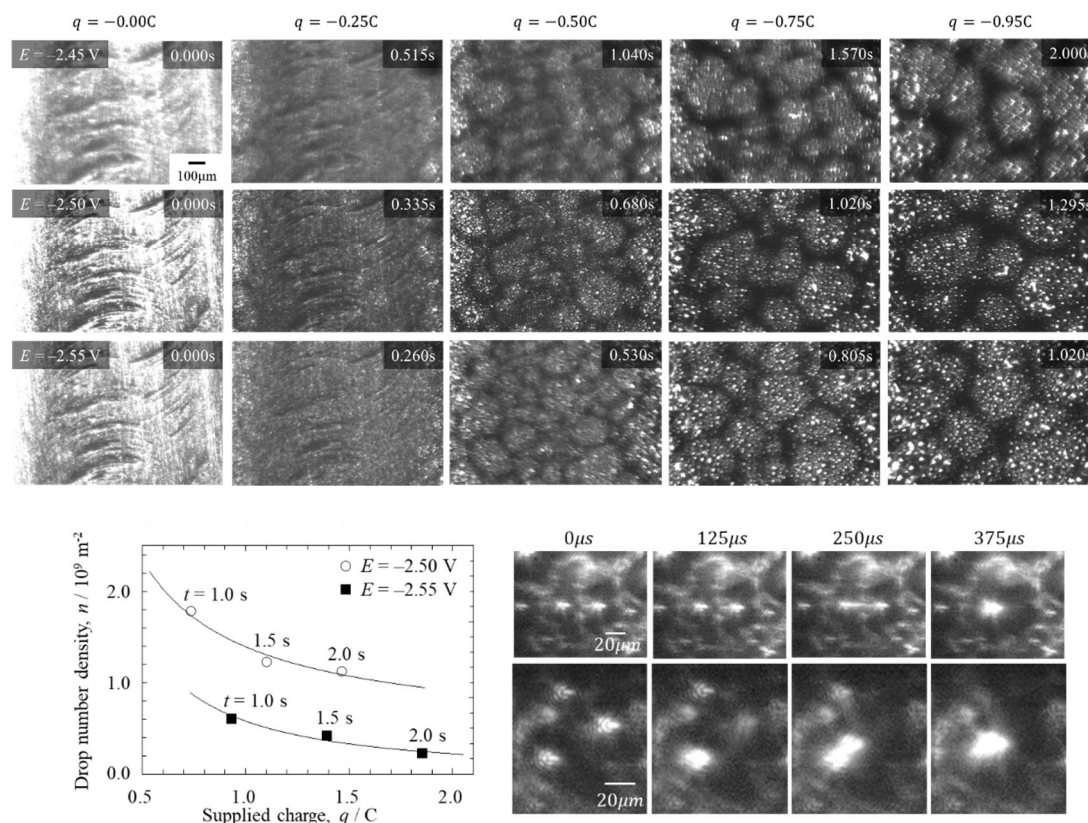


Fig. 1. Photograph of the electrodeposited melt and black colloidal metal formed on the flat Mo electrode at 823 K.

Mo 電極表面に電析した Ca-Li 合金液滴の形態と近傍のコロイド状 Me の凝縮挙動との相関について考察した。供給された電荷と液滴数密度の関係($t > 1.0$ s での明らかな液滴のみ計測できた)を調べたところ、供給電荷量が増加するにつれて、液滴は繰り返し合体して、数密度が減少した。電位が卑ほど液滴数密度は低下し、これは形成した液滴がより肥大化していることを示す。液滴の合体は $t < 500 \mu\text{s}$ とセルの流動に比べ非常に短時間のため、セル状流れの原因となる要素として除外できると考えた。したがって、電位の影響によって生じた溶融塩-金属液滴間の界面張力バランスの変化がセル状流れの主たる原因と仮定して議論を進めた。

一般にコロイドは表面電荷によって拡散電気二重層を形成するため、電気的中性を維持するように van der Waals 力と静電相互作用を考慮した DLVO 理論に基づいて分散・凝集挙動が議論される。一方で、金属霧は金属で形成される導電体のコロイドであるためこのようなポテンシャル力に支配されるとは考えにくい。近年、流体力学的相互作用を考慮した系では、考慮していない系に比べ、コロイド粒子がネットワーク構造を形成しやすいことが指摘されてきた。ポテンシャル以外の相互作用である流体力学的相互作用がネットワークのような "準安定的" な構造形成に影響することは、ソフトマターのような非平衡状態にある系の特徴とされている。"準安定" と述べたのは、一度ネットワーク構造を形成した後もネットワークが変形する場合、例えば、構造

が粗大化するときには、ある部分のネットワーク構造を切断しなければならない状態であるからである。このことは、局所的には凝集エネルギーを増加させることになり、その結果、凝集構造の粗大化は抑制されるはずで、矛盾する。系全体として収縮しようとしているが、系の連結性から縮むことができず自発的に生じる応力を蓄えることになる。この駆動力として、電解反応による急激な“勾配”が考え得る。このときの物理量は温度、濃度、電場等である。浮力を駆動力とする規則的なセル状の対流構造は“Bénard cells”として有名であるが、厚さ 1mm 以下の液相内に、重力方向とは無関係に多角形セルによる対流パターンが生成する。これは、2 相の液体が界面で接する場合、一般に高い界面張力側への流れが生じるため(Marangoni 効果)、これを駆動力とした Marangoni-Bénard 対流として知られる(J. R. A. Pearson, J. fluid mech. 4.5, 1958, 489-500.)。

Fig. 2 に以上検討したメカニズムを模式的に示す。界面張力勾配が一定であると単純化して、いま、Mo 電極上に直立した 2 液相(液体合金および熔融塩)を考える。互いに界面張力が異なる 2 液相が固相との界面上で接触したときに流れが生じるとする。境界条件として、z-x 平面の両端面に non-slip 条件、x-y 平面の上端面の x 方向速度 $u=0$ とおく。固-液-液界面の三重線まわりの立方体長さを L とおき、Marangoni 力は $F_m = \Delta\sigma L$ とする。ここで $\Delta\sigma$ は温度勾配による界面張力差である。Marangoni 力と面積 L^2 の x-y 平面および x-z 平面上の剪断力が釣り合うとき、定常状態に至ると考えると、Newton の粘性の法則から剪断力を見積もることが出来る。立方体底部中心で最高速度 u_m で移動しているとき、x-y 平面に生じる剪断力と z-x 平面で生じる剪断力が釣り合うため、 $u_m = \Delta\sigma/5\mu$ を得る。実験で得られたセル形状の時間変化から、代表的な成長速度は 0.39mm/s であった。熔融塩の粘性係数として $5 \times 10^{-3} \text{Pa s}$ とすれば、界面張力勾配がわずか 0.1mN/m 生じただけで $u_m=0.4\text{mm/s}$ の対流が生じることが見積もられた。この値は限られたスケールでは相対的に非常に大きな変化となる。

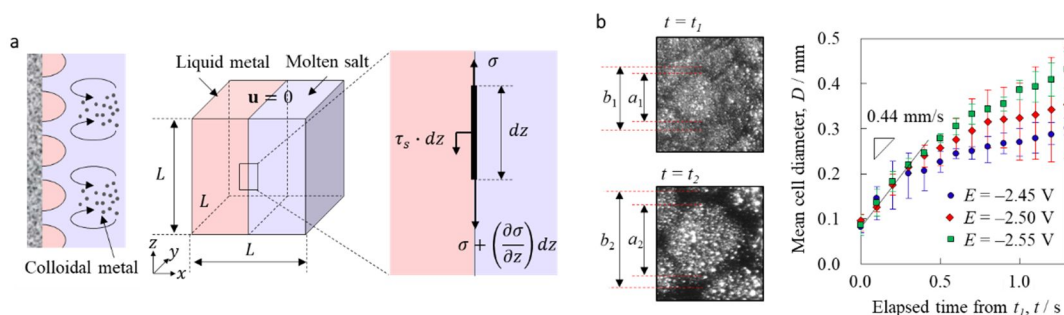


Fig. 2. Consideration of cells generation mechanism by the interfacial tension gradient induced convection.

一方で、反応性電極(電析した液体金属と反応する物質の電極)である場合、上述の非反応性電極とは異なる挙動を示す。熔融 LiCl-KCl 共晶塩中で金属 Ti 上に析出させた膜状 TiO_2 に電位を印加した場合についても検討したところ、形状に応じて特徴的な還元挙動が現れることを新たに発見した。その主たる要因は、(1)還元によるチタン酸化物の体積変化がもたらす物理的剥離、(2)表面不均一性に起因した導電部での局所的な電気化学反応、(3)電析 Li(l)のチタン酸化物への濡れ、であった。その根拠を以下に示す。なお、定量的データは Natsui et al., Metall and Materi Trans B 51, 11–15 (2020).に掲載されているので、参照されたい。

まず、酸化物表面で Li(l)が生成しない場合でも、定電位印加を繰り返すことで黒色表面が剥離し Li 液滴が付着した表面が現れることを確認した。このとき、 $E = -0.7 \sim -1.0 \text{V vs. Ag/Ag}^+$ において観測されたカソード電流は、報告されているチタンイオンの価数変化の理論還元電位、すなわち $\text{Ti}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Ti}^{2+}$ ($E = -0.6 \text{V vs Ag/Ag}^+$)および $\text{Ti}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ti}^0$ ($E = -1.0 \text{V vs Ag/Ag}^+$)と対応していた。LiCl-KCl 中への TiO_2 の溶解度はほとんどないと考えられるから、 TiO_2 電極が直接的な電気化学的還元反応が進行したと考えられる。白色であった TiO_2 電極が電位の掃引とともに黒色に変化し、時間経過とともに電極表面から黒色物質が剥離した。このとき、電流密度は非常に低下したことから、この物理的な剥離によって $E = -1.0 \text{V vs Ag/Ag}^+$ 付近での電極表面の反応性が失われたと言える。このとき用いた電極の構造は、金属 Ti 表面に厚さ $7.5\mu\text{m}$ の TiO_2 が接着した状態(XRD で確認済)であり、 TiO_2 は還元されると体積変化によって脆化・変形したと考えられる。Li(l)電析において金属霧は見られず、銀白色の析出物のみが確認された。電析した液体金属 Li を還元剤として機能させるときの電極挙動を詳細に調べるため、 $-2.75 \text{V vs Ag/Ag}^+$ 、2s 間のクロノアンペロメトリー測定を行ったときの種々の異なる TiO_2 被膜厚さ(T2.0: 平均 $2\mu\text{m}$ 、T7.5: 平均 $7.5\mu\text{m}$)条件での電極表面挙動について観察結果を Fig. 3 に示す。T2.0 の表面は、電位印加直後から白色から黒色へと変化した。この変化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。この黒色部は(1)式のメカニズムで還元された酸化物である。電位の印加終了後には、黒色の電極表面が確認された。T7.5 においては、電位印加により同様に黒色表面へと還元反応の進行が見られるものの、表面の黒色化は高速で、0.08 s 程度で一様な黒色表面となり、その直後から表面に金属光沢のある液滴生成が生じ、同時に電極表面を濡れ広がった。電位印加後は、T2.0 と同様に液滴が消失し、黒色表面が残存した。2 つの膜厚が異なる TiO_2 電極の

挙動の違いから、以下のことが言える。電気抵抗の高い初期の TiO_2 は、電気化学的還元メカニズムで TiO_2 が電極となって反応が進行して導電率が向上するが、この反応は膜の不均一さに起因して電気抵抗がことなるため、不均一に進行する。よって、比較的導電性の高い領域において $\text{Li}(\text{I})$ が生成した後、電極表面に濡れ広がって反応が進行する。T7.5 は、 TiO_2 の膜厚が厚いのみならず T2.0 よりもポーラスな皮膜であることが考えられ、熔融塩がポーラス TiO_2 内部まで浸透して、より電気抵抗の小さい部分で発生した $\text{Li}(\text{I})$ 液滴が、電極全体に濡れ広がることでチタン酸化物の還元反応が進行することが示唆される。このように、 TiO_2 を電極として用いる場合、電析した液体金属を還元剤として機能させるときマイクロスケールで見れば極めて複雑な反応場となることが明らかである。それは、反応の進行に伴う体積変化とそれに伴う応力発現、剥離、界面張力と濡れが同時に影響しあうマルチフィジックス現象となるためであり、これを考慮したうえで TiO_2 電極の効率的な還元のためには、 $\text{Li}(\text{I})$ 電析が導電部に集中することを避けながら、熔融塩との接触面積を増大させることが肝要と考えられる。

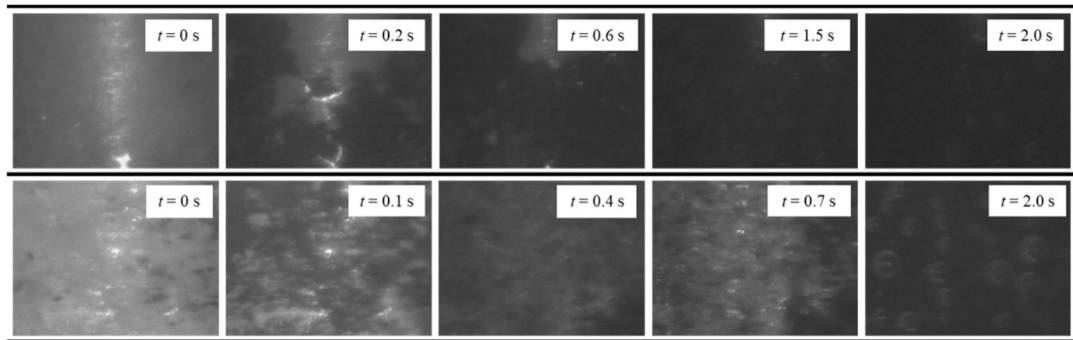


Fig. 3. Electroreduction behavior of TiO_2 electrodes observed by chronoamperometry (at $E = -2.75$ V; above: T2.0 and bottom: T7.5)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shungo Natsui, Takuya Sudo, Ryota Shibuya, Hiroshi Nogami, Tatsuya Kikuchi, Ryosuke O. Suzuki	4. 巻 51
2. 論文標題 Visualization of TiO ₂ reduction behavior in molten salt electrolysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metallurgical Materials Transactions B	6. 最初と最後の頁 11 - 15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11663-019-01733-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsuzaki Takahiro, Suzuki Ryosuke O., Natsui Shungo, Kikuchi Tatsuya, Ueda Mikito	4. 巻 60
2. 論文標題 Solubility of CaS in Molten CaCl ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 386 ~ 390
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.MA201803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsuzaki Takahiro, Suzuki Ryosuke O., Natsui Shungo, Kikuchi Tatsuya, Ueda Mikito	4. 巻 60
2. 論文標題 Solubility of CaS in CaCl ₂ -LiCl Eutectic Melt	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 411 ~ 415
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.MA201809	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Haraguchi Yasushi, Shibuya Ryota, Natsui Shungo, Kikuchi Tatsuya, O. Suzuki Ryosuke	4. 巻 83
2. 論文標題 Gas Generation Reactions during TiO ₂ Reduction Using Molten Salt	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Institute of Metals and Materials	6. 最初と最後の頁 441 ~ 448
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/jinstmet.JAW201901	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 NATSUI Shungo, NASHIMOTO Ryota, TONYA Kazui, SAWADA Akinori, KIKUCHI Tatsuya, SUZUKI Ryosuke O.	4. 巻 135
2. 論文標題 Numerical Analysis of Interfacial Morphology and Dispersion Behavior of High-Temperature Melts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of MMIJ	6. 最初と最後の頁 71 ~ 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2473/journalofmmij.135.71	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Natsui Shungo, Sudo Takuya, Kaneko Takumi, Tonya Kazui, Nakajima Daiki, Kikuchi Tatsuya, Suzuki Ryosuke O.	4. 巻 8
2. 論文標題 Spontaneous colloidal metal network formation driven by molten salt electrolysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-31521-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 澁谷凌太, 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔,
2. 発表標題 溶融塩電解における新規なカソード反応の熱測定法
3. 学会等名 電気化学会第51回溶融塩化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原口靖史, 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔
2. 発表標題 溶融塩を用いたTiO ₂ 電解還元時の副反応およびその経時変化
3. 学会等名 電気化学会第51回溶融塩化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澁谷 凌太、夏井 俊悟、鈴木 亮輔、菊地 竜也
2. 発表標題 溶融塩電解における新規な高速熱測定法の試み
3. 学会等名 資源・素材2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 問谷 一偉、夏井 俊悟、鈴木 亮輔、菊地 竜也
2. 発表標題 SPH法を用いた自溶炉シャフト内マット-スラグ液滴形成の基礎的シミュレーション
3. 学会等名 資源・素材2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澁谷 凌太、夏井 俊悟、鈴木 亮輔、菊地 竜也
2. 発表標題 溶融塩電解時の電析融体界面における熱挙動
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 夏井 俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔
2. 発表標題 溶融塩電解によるコロイダルメタルのセル状流れの自発形成
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第178回秋季講演大会-日本金属学会2019年秋季(165回)講演大会 共同セッション「高温溶融体の物理化学的性質」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澁谷涼太、夏井 俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔
2. 発表標題 溶融共晶塩電解におけるカソード界面の熱挙動
3. 学会等名 令和元年度日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部合同サマーセッション
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 問谷一偉、夏井 俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔
2. 発表標題 すべり・回転を考慮した SPH 法による動的な固液濡れ挙動モデル
3. 学会等名 令和元年度日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部合同サマーセッション
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原口靖史、澁谷涼太、夏井 俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔
2. 発表標題 TiO ₂ 溶融塩電解還元時のガス発生反応
3. 学会等名 日本金属学会2019年春季(第164回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 夏井俊悟
2. 発表標題 動的な高温分散相のマルチフィジックスによる製錬プロセスの解析と設計
3. 学会等名 日本実験力学会 マテリアル反応工学分科会主催 日本鉄鋼協会 環境・エネルギー・社会工学会 グリーンエネルギーフォーラム共催令和元年度第1回講演会「持続可能な社会を目指した材料設計・プロセスの新展開」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 夏井俊悟
2. 発表標題 金属製錬プロセスにおける界面を含む高温融体の流れ
3. 学会等名 日本鉄鋼協会東北支部 東北地区講演会および若手研究者フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shungo Natsui
2. 発表標題 Multiphysics approach for transient behavior of dynamic dispersed phase in metallurgical process
3. 学会等名 A Symposium on Smart Technology for Metallurgical Phenomena KPU-TU (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 夏井俊悟
2. 発表標題 高温分散相の動力学に基づく新たな学理構築に向けた検討
3. 学会等名 日本学術振興会製鉄第54委員会令和元年度産学連携特別講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shungo Natsui and Hiroshi Nogami
2. 発表標題 Detailed Numerical Modeling Approach for Clogging Phenomena in Coke Bed
3. 学会等名 Innovation of ironmaking technologies and future international collaboration 2019 -Toward highly efficient and ecological systems- (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 夏井俊悟
2. 発表標題 離散要素法とその応用手法による高温素材プロセスの数値解析
3. 学会等名 日本化学工学会粒子・流体プロセス部会熱物質流体工学分科会主催"熱物質流体工学セミナー" (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shungo Natsui
2. 発表標題 SPH Simulations for the Binary Droplet Morphology Based on Fowkes Hypothesis
3. 学会等名 2nd International Symposium on Decommissioning and Waste Management, Organized by ARC-DeconRes, Kyunghee Univ., CPM-IMRAM, and CFReND (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 夏井 俊悟、数土 卓也、菊地 竜也、鈴木 亮輔
2. 発表標題 溶融CaCl ₂ -LiCl電解におけるカソード界面と流れ
3. 学会等名 資源素材学会2018年春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原口靖史, 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔
2. 発表標題 炭素陽極を用いた溶融塩電解における気泡形成
3. 学会等名 平成30年度日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部合同サマーセッション
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔
2. 発表標題 熔融塩電解で自発生成するコロイダルメタルネットワーク
3. 学会等名 平成30年度日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部合同サマーセッション
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 夏井 俊悟、梨元 涼太、中島 大希、菊地 竜也、鈴木 亮輔
2. 発表標題 二液相界面における気泡惹起液柱・液膜の寿命
3. 学会等名 日本実験力学会 2018年度年次講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 問谷一偉、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔
2. 発表標題 Fowkes理論を適用した多相界面形態のSPHシミュレーション
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第176回秋季講演大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Ryosuke O. Suzuki, Shungo Natsui, and Tatsuya Kikuchi	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 423
3. 書名 Extractive Metallurgy of Titanium; Conventional and Recent Advances in Production of Titanium, chapter 12	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	鈴木 亮輔 (Suzuki Ryosuke) (80179275)	北海道大学・大学院工学研究院・教授 (10101)	
研究協力者	菊地 竜也 (Kikuchi Tatsuya) (60374584)	北海道大学・大学院工学研究院・准教授 (10101)	
研究協力者	問谷 一偉 (Tonya Kazui)	北海道大学・大学院工学研究院・修士課程 (10101)	
研究協力者	澁谷 凌太 (Ryota Shibuya)	北海道大学・大学院工学研究院・修士課程 (10101)	