

修士論文概要書

Summary of Master's Thesis

Date of submission: 01/15/2020

専攻名 (専門分野) Department	総合機械工学専攻	氏名 Name	菅原 一真	指導 教員 Advisor	中垣 隆雄 印 Seal
研究指導名 Research guidance	エクセルギー工学	学籍番号 Student ID number	CD 5218B046-7		
研究題目 Title	遠心分離による熔融鉄鋼スラグからの有価物回収に向けた研究 ～数値計算による分離メカニズムの解明～				

1. 緒言

本研究では、熔融スラグから $\text{FeO} \cdot \text{CaO}$ を分離・回収した後、製鉄プロセスに再利用することで、 CO_2 排出量の削減を図る。回収後の $\text{FeO} \cdot \text{CaO}$ の再利用による CO_2 排出量の削減については以下のように考えられる。現行の製鉄プロセスでは、還元剤であるコークスにより、 Fe_2O_3 を主成分とする赤鉄鉱石は FeO を経由して Fe に還元されるが、この還元過程で CO_2 が生成される。そこで、回収した FeO を製鉄プロセスに再利用することで、還元過程から生成される CO_2 を削減できる。一方、現行の製鉄プロセスでは、 CaO は鉄鉱石中に含まれる不純物を取り除きスラグを形成する。 CaO は石灰石 (CaCO_3) の熱分解から生成され、熱分解過程で CO_2 が生成される。そこで、回収した CaO を再利用することで、熱分解過程で生じる CO_2 を削減できる。遠心分離法は熔融スラグ中の各化合物を高速に分離可能である。Gao らは、熔融スラグの遠心分離の実験をラボスケールで実施し、化合物をラジアル方向に概ね分離可能であると報告している^[1]。そこで、本研究では、Gao らの実験を、数値計算で模擬することで、分離メカニズムの解明を図った。

2. 数値計算モデルの概要

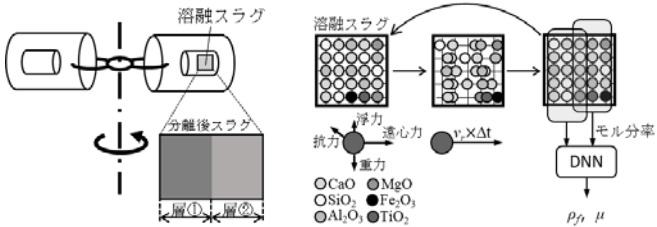


図1 遠心分離の実験^[1]

図2 数値計算モデル

熔融状態のスラグをモデル化するため、遠心分離機内を格子構造に分割し、各格子に球形と仮定した6種類の化合物粒子をランダムに配置した。次に、粒子への作用力の釣り合いから、式(1)に示す各粒子の終端速度 v_r を計算し、各粒子のタイムステップ当たりの移動距離に応じて、粒子をラジアル方向に並び替えることで、分離中の組成分布の時間変化をモデル化した。モデルにおける粒子は、熔融スラグ中に生じた各化合物分子の凝集体として扱い、その粒子密度 ρ_p は、全化合物の粒子を単一組成と仮定し、一昨年度本研究室にて作成したディープニューラルネットワーク (DNN) で推測した。粒子径 d は、全化合物で同一と仮定し、文献で報告されている実験結果^[1] をフィッティングすることで推定した。周辺スラグの密度 ρ_f および粘度 μ は、分離中に変化する局所の組成に依存するが、これらはタイムステップ毎に、DNN によって推測した。

3. 数値計算モデルの改良

全化合物の粒子径 d を $4\mu\text{m}$ の一定値として実験を模擬することで、熔融スラグ中の化合物のうち、 SiO_2 、 Fe_2O_3 および TiO_2 の分離の傾向を再現した。しかしながら、実験の $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ のモル分率 (層①>層②) および CaO のモル分率 (層①<層②) の模擬は困難であった。分離は、粒子の移動によって進行すると考えられ、粒子の組成は分離後のスラグの組成分布を決定付

ける重要な因子である。これまで、粒子の組成を単一化合物としていたが、分子サイズの近い複数の化合物が凝集することも考えられる。分離後のスラグの XRD 分析の結果^[1] から、遠心分離によって $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{CaTiO}_3$ の粒子が熔融スラグ中を移動したことが示唆されたため、これらの粒子をモデル化した。前述の通り、全化合物の粒子径 d を同一として扱うことに対して、粒子はブラウン運動する分子の凝集体であるため、 d の構成分子のサイズおよび個数への依存を考慮する必要がある。そこで、熔融状態での各化合物の分子構造から、分子のサイズを推定し、「分子サイズ」と、個数濃度および平均自由行程から算出した「粒子を構成する分子数」から、 d を算出し、モデルに反映した。

4. CaTiO_3 粒子の挙動解析

改良後のモデルでは、 CaO のモル分率が層①<層②となる傾向を模擬できたが、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ は依然として実験結果と乖離していた。式(1)から、各化合物の d が異なる場合、同一位置に存在する粒子の v_r の大小関係は、 ρ_p および d に依存する。 CaTiO_3 と Fe_2O_3 の ρ_p はそれぞれ 3120 kg/m^3 、 4064 kg/m^3 であるため、式(1)の $\rho_p - \rho_f$ の項は $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaTiO}_3$ である。しかし、 CaTiO_3 の d は全化合物の中で最大であるため、図3の領域(a)で、 CaTiO_3 粒子が最も早期に外側方向に移動することで、 CaO のモル分率が層①<層②となったと考えられる。

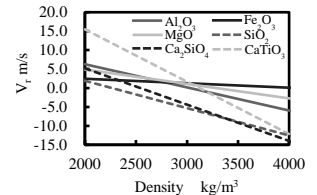


図3 ρ_f に対する v_r の変化

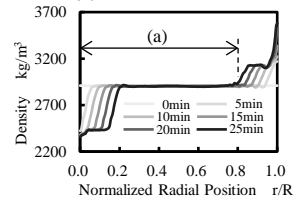


図4 ρ_f の分布

5. $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 粒子のモデル化

熔融スラグが高温の場合、各化合物の分子がサイズに応じて凝集し、単一化合物や $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{CaTiO}_3$ の粒子が生じると考えられる。しかし、分離後のスラグの XRD 分析の結果^[1] から、実験の温度条件 (1578K) では、サイズの異なる複数の化合物分子から構成される $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 粒子も存在したことが示唆されたため、この粒子をモデル化したところ、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ の乖離についても、解消した。 $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ の ρ_p は 2626 kg/m^3 であるため、図5の ρ_f の分布における領域(b)において、式(1)の $\rho_p - \rho_f$ の項は負となる。すなわち、同領域(b)で、 $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 粒子が内側方向に移動することで、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ のモル分率が層①>層②となったと考えられる。本検討から、分子が凝集した粒子の移動によって分離が進行し、その粒子の組成に影響する熔融スラグの温度が遠心分離に重要な因子であると言える。

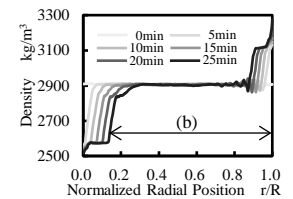


図5 ρ_f の分布

