



入門講座

高温融体物性入門-3

溶融スラグの粘度

—最近の研究—

Viscosity of Molten Slag

— Recent Research Work —

中島邦彦

Kunihiko Nakasima

九州大学 大学院工学研究院
教授

1 はじめに

融体を利用した「ものづくり」において、そのプロセスの設計や制御、あるいは高効率化を目指すうえで、高温融体の物理化学的性質を把握し、正確な記述と予測を可能にすることが重要である。

溶融スラグ・フラックスは、鉄鋼を初め、金属の製・精錬用材料、連続鋳造用の潤滑剤・拔熱媒体あるいは押し出し用の潤滑剤などとして不可欠な液体材料であり、一層の高機能化が望まれている。従来から、金属製錬プロセスでは、“良い金属を作るためには良いスラグを作れ”と言われている。さらに、最近では廃棄物の溶融処理により生成するごみ溶融スラグの有効利用や、放射性廃棄物の溶融・固化処理などにおける溶融スラグの性状解明も重要な課題となっている。

鉄鋼製錬プロセスでは、相平衡に関する情報のみならず、物質の流動性や伝熱・対流などの熱エネルギーの伝達の評価のために、高温融体の粘性、表面張力、熱伝導度などの諸物性値の情報が不可欠である。中でも、スラグのように不規則な網目構造をつくる融体の粘度は、網目構造の網目状態に敏感に反映するため、融体の流動性や反応性のみならず凝固体の分子配列も支配する。また、融体の粘度は化学組成あるいは温度を変えることによって、密度、表面張力、熱伝導度などに比べて、大幅に ($10^3 \sim 10^4$ 倍) 変えることができる物性値であるため、粘度の管理が重要な操業パラメータとなる。

本稿では、溶融スラグの粘度の代表的測定方法である円筒回転法の原理と装置について概説するとともに、最近、当研究室で測定している溶融スラグの粘度データについて紹介する。

2 粘度の定義と粘性流体

粘性は、熱力学的には隣接する流体の層の間で流速の差か

ら生じる摩擦により、機械的エネルギーが熱エネルギーとして散逸する現象であり、分子論的には隣接した分子間の引力によって速度差を減殺しようとすること（運動量の平均化）から生じる抵抗であると説明されている¹⁾。いま、図1に示すように流動体を間にはさんだ2枚の面積無限大の平面が相対速度 u で運動する時に発生するずれ応力 τ は、速度勾配 ($\partial u / \partial y$) に乱れがない（層流）場合、速度勾配に比例するとして次式で与えられる。（ニュートンの式）

$$\tau = \eta \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad \text{..... (1)}$$

ここで、比例定数 η は流体によって定まる定数で、粘度と定義する。液体では温度が上がれば粘度は減少し、圧力を高くすると粘度は増加する。粘度の逆数 ($1/\eta$) を流動度、粘度を密度で割った値 ($\nu = \eta / \rho$) を動粘度という。なお、粘度の単位には、一般的には P (poise ; ポアズ) が用いられるが、以下の換算を理解しておく为好都合である。

$$1 [\text{Pa} \cdot \text{s}] = 1 [\text{N}/\text{m}^2 \cdot \text{s}] = 10 [\text{dyne}/\text{m}^2 \cdot \text{s}] = 10 [\text{P}],$$

$$1 [\text{cP}] = 1 [\text{mPa} \cdot \text{s}]$$

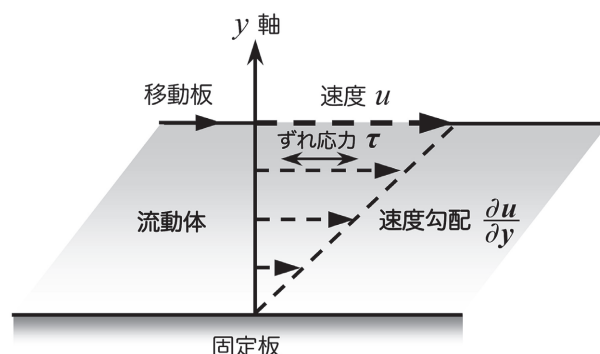


図1 ずれ流動の概念図

図2に種々の流体の流動曲線を示す。ニュートンの法則(1)式に従い、単位面積に働くずり応力 τ がずり速度 $(\partial u / \partial y)$ に比例するような流体をニュートン流体(a)と呼び、溶融スラグは一般にニュートン流体とされる。(a)以外は非ニュートン流体である。(b)はビンガム流体でトマトケチャップ、各種スラリーやペーストなど、(c)は疑似塑性流体で塗料・染料、高分子溶液やエマルションなど、(d)はダイラタント流体ででんぷん水溶液、粘土スラリーや高濃度サスペンションなどがある。さらに細かな分類については文献¹⁾を参照されたい。なお、マルチフェイズフラックス(固液相共存流体)は、固層率の増加に伴い、ビンガム流体的挙動を示すようになる²⁾。

3 粘度の測定方法

図3に(a)円筒回転法³⁾、(b)回転振動法³⁾、(c)振動片法⁴⁾および(d)貫入-変形-回転法^{5,6)}による測定可能な粘度範囲を示す。一般的に鉄鋼製・精錬反応プロセスに用いられる溶融スラグの粘度は $10^{-4} \sim 10^2 \text{Pa} \cdot \text{s}$ の範囲に入ると考えられるため、図3に示した測定法を使い分けることによって所

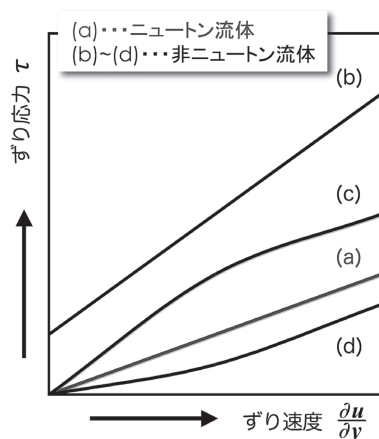


図2 種々の流体におけるずり速度とずり応力の関係

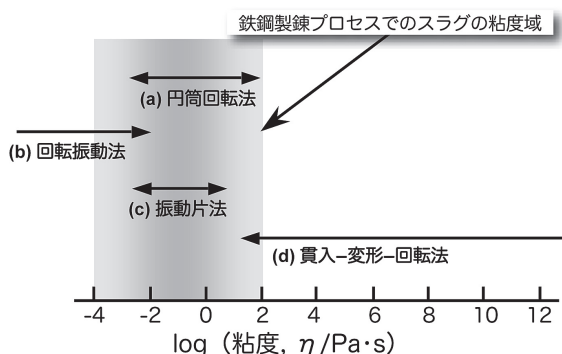


図3 種々の測定法における粘度の測定可能範囲

望の粘度データを収集することが可能である。上記の測定法の他に細管法⁷⁾、落体法および球引き上げ法^{7,8)}などの測定手法が考案されているが、これらの方法によって測定されたデータは報告例が非常に少ない。回転振動法(b)は、高粘度のスラグ融体ではなく金属融体もしくはカルシウムフェライトなどの低粘度融体の粘度測定に適しており、融体に周期的な振動を与えた際の対数減衰率から粘度を算出する測定手法である^{3,9,10)}。佐藤らは本測定方法を用いて、溶融金属・合金の粘度を系統的に測定し、報告している¹¹⁻¹³⁾。振動片法(c)は、スラグ融体中に薄平板を浸漬させて正弦的に振動させることにより、振動片の振幅が融体の粘度に対応して変化する振幅を測定することによって粘度を算出する方法である^{4,14)}。貫入-変形-回転法(d)は^{5,6)}、ガラスから過冷却状態までの粘度を貫入法および平行板変形法によって、融体の粘度を平行板回転法によって連続的に測定する方法である。それぞれの粘度方法および装置の詳細は、文献を参照されたい。本稿では円筒回転法(a)の原理と測定方法および装置の詳細について紹介する。

円筒回転法

円筒回転法(共軸二重円筒回転法)とは同一の回転軸を有する外筒(ルツボ)と内筒の間にスラグ融体を満たし、いずれか一方の円筒を一定の角速度で回転させとき、融体の粘性抵抗によって内筒に生じる回転モーメント(トルク)から粘度を算出する測定手法である。図4に外筒(ルツボ)回転法および内筒回転法の原理図を示す。測定したトルクを次の(2)式に代入することによって粘度を算出する³⁾。

$$\eta = \frac{M}{4\pi\omega h} \left[\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2} \right] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 η は粘度、 M はトルク、 ω は円筒の回転角速度、 h は内筒の融体へ浸漬深さ、 r_i は内筒の半径および r_o は外筒の半径である。ただし、(2)式は円筒の長さが無限である場

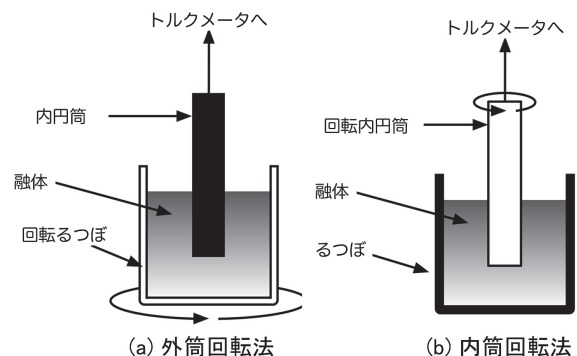


図4 円筒回転法の概略図

合にのみ成立するため、実際の測定ではルツボ底面の影響を考慮する必要がある。そのため、測定毎に常温において粘度既知の標準試料（シリコンオイル等）を用いて検量線を作成し、見かけの粘度を算出した後に、高温におけるコンタクトマテリアルの熱膨張の影響を補正した値を測定粘度値とするのが一般的である。

図5に外筒（ルツボ）回転法による粘度測定装置の一例¹⁵⁾を示す。これは融体の粘性抵抗によって内筒に生じるトルクを、炉体上部に設置した差動トランスを用いて電位差として検出する装置である。測定系（内筒、オイルダンパーおよびトランスコア）を懸垂する弾性体（トーションワイヤー）の線径および長さを変化させることにより、 $10^{-3} \sim 10^2 \text{Pa} \cdot \text{s}$ の範囲において標準偏差 $\pm 3\%$ 程度の高精度な粘度測定が可能である。ただし、炉体の上下端に回転軸を有するため炉内部の厳密な雰囲気制御は困難である。

図6に内筒回転法による粘度測定装置の一例¹⁶⁾を示す。これは炉体上部に設置した市販の回転式粘度計を用いてトルクを検出する装置である。外筒回転法（図5参照）とは異なり炉体下部に回転軸を持たず、また上部の測定系をアクリルケースによって封止できるため、厳密な雰囲気制御が可能である。これによって、 Fe_xO のRedox平衡を炉内の酸素分圧で制御したスラグ融体や、Oの他にF、SおよびNといった複数のアニオンを含有する融体についてもそれぞれの分圧を制御することにより、平衡下において粘度を測定することが可能である^{16,17)}。

また、これらの円筒回転法は測定可能な粘度範囲が広いことに加えて、ずり速度を幅広い範囲で変化させることが可能であるため、液相線以下の過冷却状態および固液共存状態の粘性を高温下において評価することができる唯一の測定手法である¹⁸⁾。

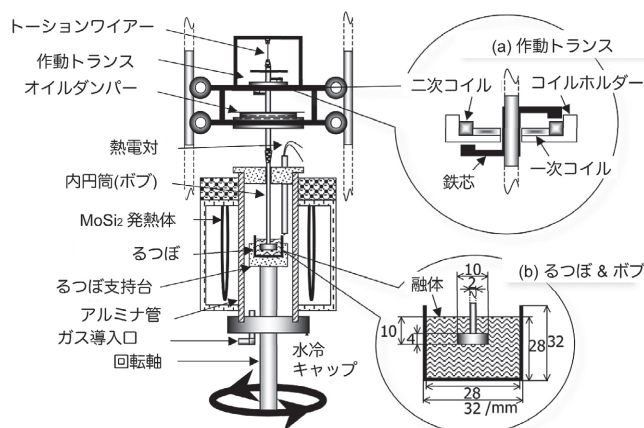


図5 外筒回転法装置の概略図

4 最近の粘度測定例

4.1 アルミナを含む多元系スラグの粘度

近年、一般廃棄物やその焼却残渣の最終埋立処分場の逼迫から、廃棄物もしくはその焼却残渣を高温で熔融し、減容・無害化するプロセスが注目を集めており、実際に様々な廃棄物熔融プラントが全国で稼働している。しかしながら、生成するスラグは原料が元来ごみであるため、その組成や性状が不明であった。そこで、当研究室において実際の焼却残渣および生成したスラグの組成を調査した結果、主要成分は高炉スラグと非常に似通った組成を有することがわかった¹⁹⁾。すなわち、 CaO 、 SiO_2 および Al_2O_3 を主成分とし、 CaO/SiO_2 が0.3～1.5で Al_2O_3 濃度が20mass%前後であり、アルカリ・アルカリ土類金属酸化物および酸化鉄等を含む多元系スラグであることを明らかにした。

そこで、外筒回転法粘度測定装置を用いて $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0.67$, 1および1.22, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20\text{mass}\%$) 系スラグに対して、アルカリ・アルカリ土類金属酸化物を5～15mass%添加した4元系スラグについて系統的に粘度を測定した²⁰⁾。

図7に測定結果の一例として1873Kにおける $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系スラグの粘度に及ぼすアルカリ金属酸化物添加の影響を示す。図より、いずれの系においても Li_2O および Na_2O の添加によって粘度が減少し、また、 Na_2O に比較して Li_2O の方が粘度減少に対する寄与が大きいことがわかる。一方、図より、従来から網目修飾酸化物として粘度を減少させる成

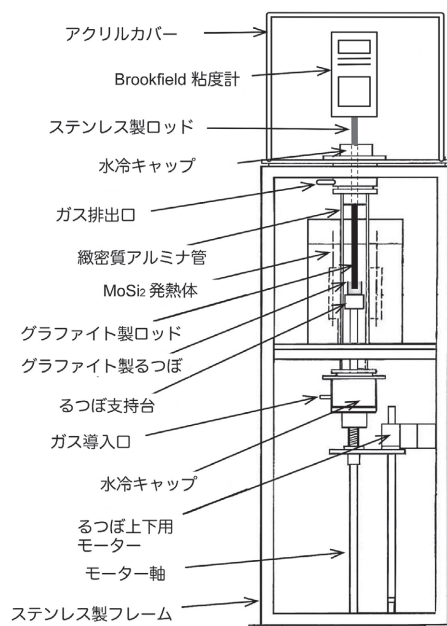


図6 内筒回転法装置の概略図

分として知られている K_2O の添加²¹⁻²⁵⁾ によって、 $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 系スラグの粘度が増加することがわかる。これらの現象は、同系溶融スラグの主たる流動ユニットが、アルミノシリケートアニオンの構造変化に起因するためであることが、 ^{27}Al および ^{29}Si MAS-NMR による急冷ガラスの構造解析から明らかになった^{19,20)}。

2 元あるいは 3 元系といった単純な系の粘度測定結果に基づく半経験的な理論は、そのまま多元系 (特にアルミナを多量に含有するスラグ組成) に拡張することができないことがしばしば存在する。

4.2 固液相共存フラックスの粘度

鉄鋼精錬プロセスで精錬剤として用いられている石灰系フラックスの多くは、その操業温度において固液相共存状態にある。しかしながら、従来、脱硫、脱磷といった多元競合的な精錬反応は均一液相を前提としたモデル解析によってプロセスの解明がなされてきた。しかし、固液相共存下での精錬反応を最適化・高効率化するためには、固液相共存フラックス中の移動現象を考える必要がある。

そこで、当研究室では固液相共存状態におけるフラックス中の物質移動を支配する粘度に注目し、外筒回転法粘度測定装置を用いて、高温下 (液相線以下の固液共存領域) における石灰系フラックスの粘性を評価した²⁾。粘度測定は、液相線温度以下においては 5K 間隔 (各測定温度で検出値が安定するまで、すなわち固液比が平衡になるまで保持) で行い、装置の測定限界まで粘度測定を継続した。

図 8 に測定結果の一例として溶融 $47.5CaO-47.5Al_2O_3-5K_2O$ スラグの粘度測定結果を示す。図 8 中の実線は液相線温度以上の粘度データをアレニウス型の温度依存式によって

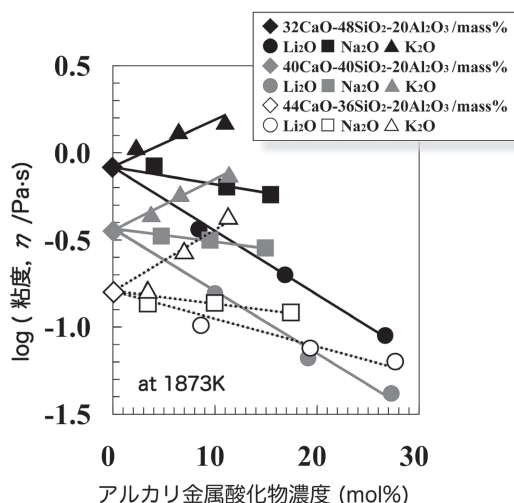


図 7 $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 系スラグの粘度に及ぼすアルカリ金属酸化物の添加効果

回帰し、液相線温度以下の温度範囲に外挿した結果を示している。また、図 9 に図 8 中に①～③で示した溶融状態のスラグを急冷した試料の SEM 写真を示す。図 9 中の結晶化率は SEM の画像解析により求めた。括弧内の数字は液相線温度からの差である。

図 8 より、粘度はいずれのルツボ回転数においても、温度の低下に伴って増加することがわかる。この傾向は液相線温度 (1723K) より低い温度においても同様であり、連続的に粘度が増加することがわかった。また、1653K 近傍までは測定値と外挿値とがよく一致している。これは、液相線温度以上で求めたアレニウス型の温度依存式を用いて、液相線温度以下 70K 程度までの粘度を表現することができることを示している。ただし、この傾向はスラグ組成 (結晶化速度) に依存して変化する²⁾。一方、図より、ルツボの回転数に対する依存性は 1873 ~ 1563K 付近まではほとんど見られず、それ以下の温度においては回転数によって粘度値に徐々に差が生じているのがわかる。具体的には、ルツボの回転数が小さいほど、検出される粘度の値が大きくなることがわかった。これは、結晶の晶出によるものであると考えられ、流体に加わる

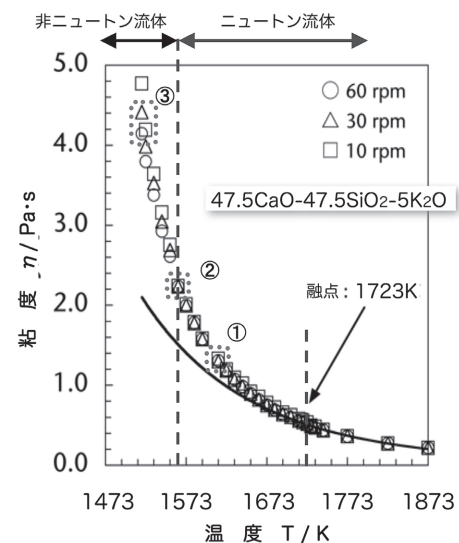


図 8 $47.5CaO-47.5SiO_2-5K_2O$ スラグの粘度の温度依存性

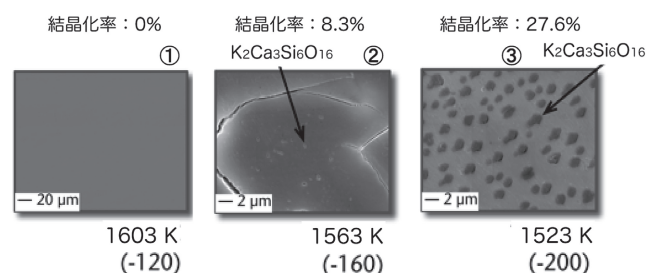


図 9 $47.5CaO-47.5SiO_2-5K_2O$ スラグの結晶化挙動 (図 8 中の①、②、③における急冷試料の結晶化状態)

ずり応力 (ルツボ回転数) に応じて見かけ粘度が変化する非ニュートン流体の特徴を表している。

図9より、同組成スラグ融体を1603Kから急冷した場合、均一なガラスが得られていることがわかる。しかし、液相線温度以下であることから、この温度領域では過冷却状態のスラグ融体の粘度を評価していたものと考えられる。また、1563Kから急冷した試料は、微細なサブミクロンオーダーの $\text{K}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$ 結晶 (固相率8.3%) を含むことがわかる。なお、図中のクラックは急冷過程において生じたものである。図8からもわかるように、1563Kの融体はニュートン流体を保っていることから、液相線温度以下の固液相共存領域においても晶出する結晶が微細であり、なおかつその固相率が低い場合は、融体はニュートン性を維持し、急激な粘度増加を示さないことがわかる。また、図9より、1523Kから急冷した試料は1~2ミクロンの $\text{K}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$ 結晶が分散しており、その固相率は27.6%であることがわかる。図8から、1523Kにおけるような固液相共存状態では、熔融スラグの粘度は急激に上昇し、非ニュートン流体として挙動するようになることがわかる。

外筒回転法を用いることによって、従来困難であった高温下における固液相共存状態の熔融スラグの見かけの粘性を高精度 (標準偏差 $\pm 6.0\%$ 以内) で評価することができた。今後とも系統的にこのような測定を積み重ねることによって、固液相共存下での製精錬反応の解明に役立つものと考ええる。

4.3 酸化鉄を含む融体の粘度

焼結鈰の焼成工程では、 CaO 、 Fe_2O_3 を主成分とし Al_2O_3 、 SiO_2 および MgO 等の脈石成分を含むカルシウムフェライト系融体が生成し、融体の流動を介して鈰物組織や物理構造の変化が起きることが知られている^{26,27)}。そのため、焼結鈰の組織・構造形成への影響の大きいカルシウムフェライト系融体の鈰石中への浸透現象を解釈する場合は、融体の物理的性質 (粘度・表面張力) を把握しておく必要がある。しかしながら、カルシウムフェライトのように酸化鉄濃度の高い融体の物性値測定は、いくつかの研究例²⁸⁻³¹⁾に限られているのが現状である。また、 $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3$ 系融体の粘度測定を行ったMachidaら²⁹⁾は、測定者間の測定較差が大きいことを述べており、信頼性の高いカルシウムフェライト系融体の物性値データの蓄積が望まれている。さらに、カルシウムフェライト系融体を一定温度で保持して粘度を測定した場合、融体の粘度が保持時間とともに低下すること³¹⁾が報告されている。

そこで、本研究では、カルシウムフェライト (CF) 系融体および酸化鉄含有スラグの粘度の保持時間依存性と構造変化について検討している。

図10に、1773KにおけるCF系融体の粘度の保持時間依存性を示す³¹⁾。図より、粘度が安定するまでに要した時間は、 SiO_2 や Al_2O_3 を添加しても大きく変化せず、120min程度であることがわかる。また、CF融体に5wt%の SiO_2 または Al_2O_3 を添加することにより、粘度が上昇した。これは、網目形成酸化物として挙動する SiO_2 や Al_2O_3 の添加により流動ユニットが大きくなったためと考えられる。

一般的に、高温融体を一定温度で熔融した場合、容器 (ルツボ) 内の融体の温度が均一化するまでに要する時間は、数十minであると報告されている³²⁾。一方、本研究では、融体の粘度の値が安定するまでに120min程度要していることから、CF系融体の粘度の保持時間依存性は、融体の温度変化によるとは考え難い。また、融体中の酸化鉄 (FeO および Fe_2O_3) は、塩基度や温度、気相中の酸素分圧によって $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3$ 間のredox平衡がシフトすることが知られている³³⁾。本研究においても、CF系融体を各測定温度に昇温・熔融した場合、時間とともに融体中の $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$ 比が高くなり、粘度に影響する可能性がある。しかしながら、CF系融体は高塩基性であり融体中の O^{2-} の活量が高く、CF融体が大気中の酸素と平衡した場合、鉄の総量に対する Fe^{2+} の割合は低く、1823Kで10%以内であることが報告³⁴⁾されている。そのため、本研究においてもCF系融体中の酸化鉄はその大半が Fe_2O_3 として存在すると考えられる。加えて、気相中の酸素分圧を制御して $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$ 系融体中の $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$ を変化させた場合、 FeO 濃度が高い融体の方が、粘度が高いことが報告されている³⁵⁾。以上のことから、本研究で保持時間に伴って粘度が低下した現象は、 $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$ 比の上昇によるものとは考え難い。

一般的に融体中の Fe_2O_3 は系の塩基度が高い場合は酸素4配位構造 Fe^{3+} (4) をとり、 SiO_2 と同様に網目形成酸化物とし

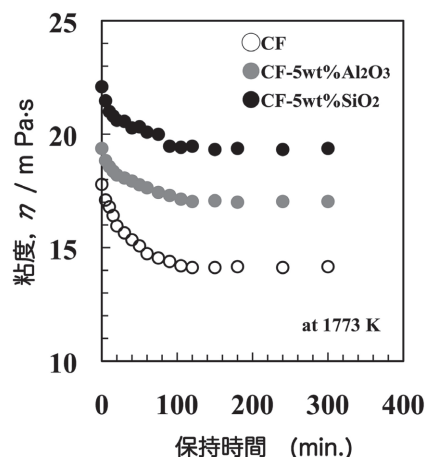


図10 カルシウムフェライト系スラグの粘度の時間変化

て挙動し、粘度を増加させる。逆に、系の塩基度が低い場合は酸素6配位構造 $\text{Fe}^{3+}(6)$ をとり粘度を減少させることが広く知られている¹⁸⁾。CF系融体においても、等温保持による粘度測定中に融体中の $\text{Fe}^{3+}(4)/\text{Fe}^{3+}(6)$ 比が低下したため、粘度が時間とともに低下した可能性がある。

本研究では、CF系融体の構造を凍結したガラス試料を作製することが困難であったため、CF系融体と同様に酸化鉄を含有しており、溶融時間と構造変化との関係が報告³³⁾されている $40\text{CaO}-40\text{SiO}_2-20\text{Fe}_2\text{O}_3$ (mol%) 融体を大気中 1773K で溶融し、粘度の保持時間依存性を測定した。

図11に、1773Kにおける $40\text{CaO}-40\text{SiO}_2-20\text{Fe}_2\text{O}_3$ (mol%) 融体の粘度の保持時間依存性を Nagata ら³³⁾の報告した構造解析結果とともに示す。粘度測定用試料には、Nagata らと同じ溶融温度、溶融時間 (120min) および雰囲気 (大気中) 下にて予備溶製を施した試料を用いた。図より $40\text{CaO}-40\text{SiO}_2-20\text{Fe}_2\text{O}_3$ (mol%) 融体の粘度は、CF系融体と同様に時間とともに低下することがわかる。また、融体中の Fe^{2+} の存在割合の時間依存性はほとんどないことがわかる。これは、予備溶製温度と実験温度が等しいため、予備溶製時に融体中の $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 比がほぼ平衡値に到達していたためと考えられる。一方で、融体中の $\text{Fe}^{3+}(4)$ の存在割合は保持時間とともに低下し、逆に $\text{Fe}^{3+}(6)$ の割合は保持時間とともに上昇していることがわかる。また、融体中の $\text{Fe}^{3+}(4)$ および $\text{Fe}^{3+}(6)$ の割合は、粘度が安定した 120min 以降は、ほぼ一定の値を示していた。これは、融体粘度の時間依存性が $\text{Fe}^{3+}(4)/\text{Fe}^{3+}(6)$ 比の変化に支配されていることを示しており、CF系融体についても同様の機構によって粘度が保持時間依存性を示したものと考えられる。

酸化鉄を(多量に)含む溶融スラグの粘度測定においては、融体の構造変化に伴う粘度の時間変化を考慮する必要がある。

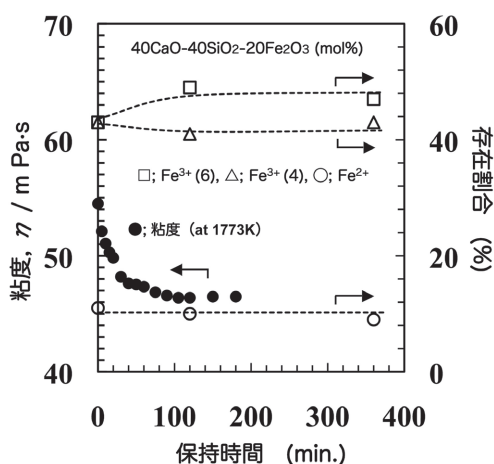


図 11 $40\text{CaO}-40\text{SiO}_2-20\text{Fe}_2\text{O}_3$ スラグの粘度の時間変化と酸化鉄の構造変化

5 おわりに

本稿では、溶融スラグの粘度の代表的な測定方法である円筒回転法の原理と装置について概説するとともに、最近、当研究室で測定している溶融スラグの粘度データについて紹介した。近年では、製造プロセスの高効率化や材料の高機能化の要望に伴い、溶融スラグ・フラックスはより複雑な多元系が用いられつつあり、精度の良い粘度測定が望まれている。

粘度をはじめとする高温融体の物性値測定には、高温での測定に伴う一般的な困難さは勿論のこと、測定に時間がかかること、技術的にも習熟とノウハウを必要とすること、など問題点はあるが、高温融体の物性値は材料プロセス上重要なデータである。若い研究者の方々が、高温融体の物性に興味を持たれ、活発に研究されることを期待したい。

なお、本稿では触れていない「融体の構造モデル³⁶⁻³⁹⁾」「粘度の推算式⁴⁰⁻⁴³⁾」については、優れた解説記事および著書があるので、そちらを参照されたい。

参考文献

- 1) 白石裕：金属，66 (1996) 10, 885.
- 2) 齊藤敬高，吉村慎二，春木慎一郎，山岡由宗，助永壮平，中島邦彦：鉄と鋼，95 (2009) 3, 282.
- 3) K.C.Mills：Slag Atlas 2nd Edition, Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf, (1995), 351.
- 4) 森田善一郎，飯田孝道，川本正幸，毛利晃：鉄と鋼，70 (1984) 9, 1242.
- 5) 白石裕，長崎誠三，山城道康：日本金属学会誌，60 (1996) 2, 184.
- 6) Y.Shiraishi, S.Nagasaki and M.Yamashiro：ISIJ Int., 37 (1997), 383.
- 7) K.C.Mills：Slag Atlas 2nd Edition, Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf, (1995), 350.
- 8) 高橋克明，谷岡守：応用物理，35 (1966) 11, 786.
- 9) R.Roscoe：Proc.Phys.Soc., 72 (1958), 576.
- 10) H.R.Thresh：Trans.Met.Soc.AIME, 233 (1965), 76.
- 11) Y.Sato, Y.Kameda, T.Nagasawa, T.Sakamoto, S.Moriguchi, T.Yamamura and Y.Waseda：J.Crystal Growth, 249 (2003), 404.
- 12) 佐藤譲，杉澤孝志，青木大輔，安保雄介，柳瀬恵一，山村力：CAMP-ISIJ, 1 (2006), 45.
- 13) 佐藤譲：高温学会誌，5 (1996) 9, 260.
- 14) 飯田孝道，川本正幸，藤本慎二，森田善一郎：鉄と鋼，71 (1985) 11, 1490.
- 15) N.Saito, N.Hori, K.Nakashima and K.Mori：Metall. Mater.Trans., 34B (2003), 509.

- 16) 助永壮平, 中田大司, 一木智康, 齊藤敬高, 中島邦彦 : 日本金属学会誌, 71 (2007) 11, 1050.
- 17) 中田大司, 齊藤敬高, 中島邦彦 : CAMP-ISIJ, 1 (2006), 165.
- 18) 飯田孝道, 喜多善史, 上田満, 森克巳, 中島邦彦 : 溶融スラグ・ガラスの粘性, アグネ技術センター, 東京, (2003), 107.
- 19) 佐藤崇, 齊藤敬高, 中島邦彦, 森克巳, 平昭大成 : 資源処理技術, 49 (2002), 128-133.
- 20) S.Sukenaga, N.Saito, K.Kawakami and K.Nakashima : ISIJ Int., 46 (2006), 352-358.
- 21) H.R.Lillie : J.Am.Ceram.Soc., 22, 11 (1939), 367.
- 22) L.Shartsis, S.Spinner and W.Capps : J.Am.Ceram.Soc., 35, 6 (1952), 155.
- 23) J.O' M.Bockris, J.D.Mackenzie and J.A.Kitchener : Trans.Faraday Soc., 57 (1955), 1734.
- 24) T.P.Shvaiko-Shvaikovskaya, O.V.Mazurin and Z.S.Bashun : Neorg.Mater, 7-1 (1971), 143.
- 25) H.J.Pohlmann : Glstech.Ber., 49-8 (1976), 177.
- 26) T.Maeda, K.Nishioka, K.Nakashima and M.Shimizu : ISIJ Int., 44 (2004), 2046.
- 27) K.Nakashima, N.Saito, S.Shinozaki, R.Tanaka, T.Maeda, M.Shimizu and K.Mori : ISIJ Int., 44 (2004), 2052.
- 28) 角田成夫, 三森隆, 森永健次, 柳ヶ瀬勉 : 日本金属学会誌, 44 (1980), 94.
- 29) S.Machida, K.Nushiro, K.Ichikawa, H.Noda and H.Sakai : ISIJ Int., 45 (2005), 513.
- 30) S.Wright', L.Zhang, S.Sun and S.Jahanshahi : J.Non-Crystalline Solids, 282 (2001), 15.
- 31) N.Saito, N.Hori, K.Nakashima and K.Mori : Metall.Mater.Trans., 34B (2003), 509.
- 32) F.-Z.Ji, D.Sichen and S.Seetharaman : Metall.Mater.Trans.B, 28B (1997), 827.
- 33) K.Nagata and M.Hayashi : J.Non-Crystalline Solids, 282 (2001), 1.
- 34) H.Larson and J.Chipman : J.Metals, 5 (1953), 1089.
- 35) K.Seki and F.Oeters : Trans.ISIJ, 24 (1984), 445.
- 36) K.C.Mills : Slag Atlas 2nd Edition, Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf, (1995), 1-8.
- 37) Chemical Properties of Molten Slags, ISIJ, Tokyo, (1991), 243.
- 38) B.O.Mysen : Relationships between silicate melt structure and petrologic processes, Earth-Science Reviews, 27 (1990), 281.
- 39) 佐々木康, 石井邦宜 : 鉄と鋼, 88 (2002), 419.
- 40) K.C.Mills : Slag Atlas 2nd Edition, Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf, (1995), 352-354.
- 41) 飯田孝道, 喜多善史, 上田満, 森克巳, 中島邦彦 : 溶融スラグ・ガラスの粘性, アグネ技術センター, 東京, (2003), 63-71.
- 42) M.Hanao, M.Kawamoto, T.Tanaka and M.Nakamoto : ISIJ Int., 46 (2006), 346.
- 43) M.Nakamoto, J.H.Lee and T.Tanaka : ISIJ Int., 45 (2005), 651.

(2009年8月31日受付)