

スラグフォーミングを模擬する水モデル実験

水嶋 純一*1, 松野 都馬*1, 富田 朔弥*1, 樋口 善彦*2

Water Model Experiments for Simulating Slag Foaming

Junichi MIZUSHIMA*1, Toma MATSUNO*1,
Sakuya TOMITA*1 and Yoshihiko HIGUCHI*2

Synopsis: Slag foaming which is a common phenomenon during the refining process in the steelmaking industry changes the properties of slag and leads to deterioration of refining capability. Therefore, it is necessary to perform model experiments to investigate the foaming characteristics. In this report, cold model experiment apparatus based on sucrose solution was built and the effect of gas flow rate and viscosity of solution on foaming height. As a result, the height increased with decreasing in gas flow rate and viscosity due to the formation of a cavity zone in foaming slag.

(Received Sep.16, 2021)

Key words: slag foaming, viscosity, surface tension, water model, steelmaking

1. 緒 言

製鉄プロセスの精錬工程では溶鉄中の不純物を除去するために精錬剤として酸化物系のフラックスを利用している。千数百度の処理温度では鉄とともにフラックスも熔融状態になる。処理中の液体状フラックスはスラグと呼ばれ、精錬反応によって生じるガスや攪拌用ガスが内部に気泡として存在することによって体積が増大するフォーミング現象を引き起こす^{1,2)}。このスラグフォーミングには、溶鉄が巻き上がって生成した粒鉄と呼ばれる鉄粒子、および、未溶解の精錬剤が懸濁しており、フォーミングしたスラグの特性が複雑に変化している。その結果、反応速度や不純物除去能力、鉄歩留まりなどに大きな影響を及ぼしている。気泡を含まないスラグに対して、フォーミングしたスラグは見かけ粘度が高くなる傾向があり、スラグの攪拌作用が弱まって物質移動が抑制される結果、反応速度が低下する恐

れがある(Fig.1(a))。また、精錬処理終了後には、速やかに精錬容器を倒して溶鉄を次工程に運ぶために排出する必要があるが、見かけ粘度が高いフォーミングスラグ中に懸濁する粒鉄は沈降速度が遅いため、鉄歩留まりが低下する懸念がある。鉄歩留まりを確保するために沈降を待つ時間を延長すると生産性の低下につながってしまう(Fig.1(b),(c))。以上から、精錬能力に影響するスラグフォーミングの特性を評価する必要がある。しかし、製鉄所における精錬プロセスでは数百トンの溶鉄が高温で処理されているため、直接的に観察・測定することが困難なため、であり、モデル実験によりフォーミングの特性を評価することが望まれている。Martinsson et al.^{3,4)}は液体の粘度や表面張力を調整した水溶液にガスを吹き込む水モデル実験を行い、フォーミング高さに及ぼす各種因子の影響を評価するとともに、粒鉄を模擬した固体球の沈降速度を測定している。しかし、その実験手法や結果は報告の中で十分に明らかにされていない。そこで、本研究では水溶液系でのスラグフォーミングを模擬する水モデル実験装置を構築し、実験手法に関わる

*1 産業技術短期大学 機械工学科 令和2年度卒業生

*2 産業技術短期大学教授 博士(工学) 機械工学科

諸条件を明らかにして、フォーミングの評価を行った。

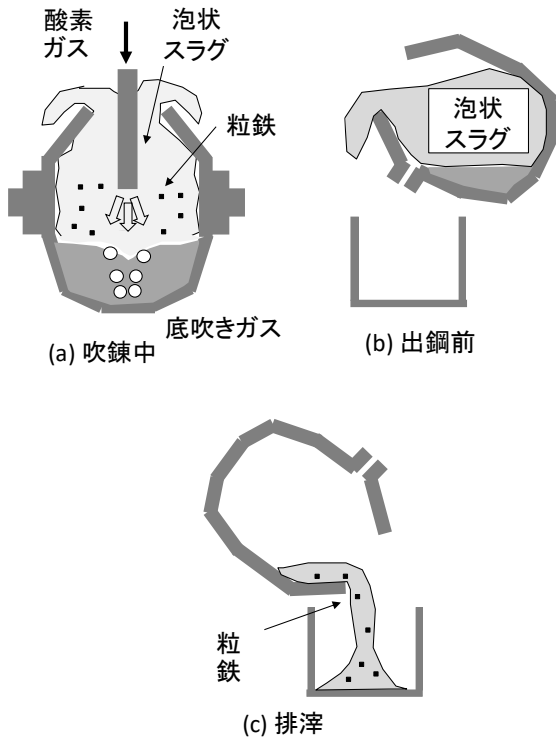


Fig.1 Refining operation in steelmaking plant.

2. 実験方法

本実験で用いた水モデル装置の概略図を Fig.2 に示す. コンプレッサから供給される圧縮空気をクーラーとエアフィルタを介して質量流量計 (KOFLOC 製マスフローメータ) に導入し, ガラスフィルタ (Büchner funnel type, フィルターサイズ 15-40 μ m) を介してアクリルシリンダー (内径 90mm) 内の高粘度流体に吹き込んだ. なお, 外側を囲い冷却用液体を使って高粘度流体の温度を調整した. 導入ガスによって生じたフォーミング挙動を動画で撮影し, フォーミング高さの経時変化を測定した. ショ糖水溶液の粘度を調整するために飽和溶解度近くの濃度条件も設定したことから, ショ糖の溶解を促進するために, ビーカーに収容した溶液をマグネティックスターラー (アズワン製, RS-1DN) で攪拌した. ショ糖水溶液の粘度は Fig.3 に示すように, 外筒を固定し内筒を回転させる B 型回転式粘度計 (Brookfield 社製, DV-E) で測定した. ショ糖水溶液の粘度は温度依存性が高いため,

Fig.3 に示すようにビーカー外側の冷却水で温度を調整し, 濃度および温度毎の粘度を測定した. 表面張力の調整には, 陰イオン性界面活性剤の 1 つであるラウリル硫酸ナトリウム (SLS: sodium lauryl sulfate), 別名, ドデシル硫酸ナトリウム (SDS: sodium dodecyl sulfate) を用いた. 表面張力は浸漬したリングを引き上げ, 付着した液膜が離脱する際の力から換算するリング法であるデュヌイ表面張力試験機 (伊藤製作所, D 型) で測定した.

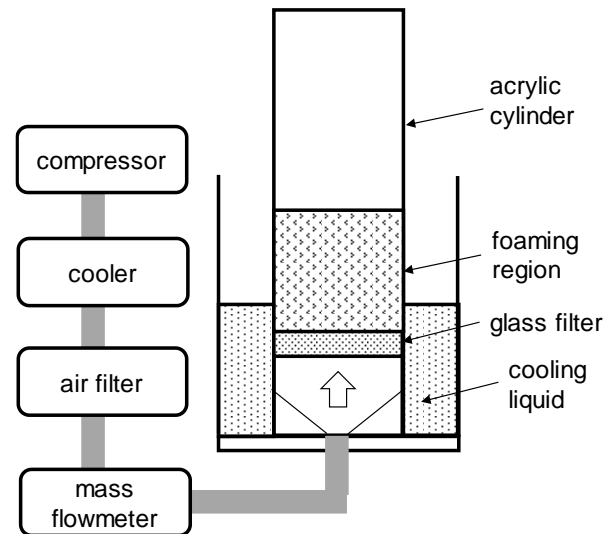


Fig.2 Schematic view of apparatus.

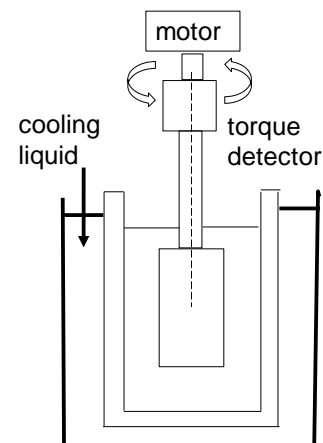


Fig.3 Schematic view of B-type viscometer.

実験条件は, 円筒内径 40, 65, 90 mm, 吹込みガス流量 0.5 ~ 3.9NL/min (空塔速度 0.0025 ~ 0.01m/s), 初期浴高さ 20mm, 液体粘度 50, 100,

150, 200 mPa·s, 表面張力 0.03N/m である.

3. 実験結果および考察

シヨ糖水溶液の粘度の温度依存性を測定した結果を Fig.4 に示す. 粘度は温度の増加とともに低下し, シヨ糖濃度の増加とともに増加した. この図から, 本実験条件ではシヨ糖水溶液の粘度は 5°C まで冷却することにより, 最大で 200mPa·s まで設定できることがわかる. シヨ糖水溶液の粘度 200mPa·s, 空塔速度 0.01m/s の条件でフォーミング挙動を観察した. 内径 65mm でのフォーミング写真の一例を Fig.5 に示すが, ほぼ均一な泡沫が

形成された. 次に, フォーミング高さの経時変化を異なる円筒内径で比較した結果を Fig.6 に示すが, 円筒内径を変更しても, 空塔流速が同じであればほぼ同じフォーミング挙動を示すことがわかる. 次に, 内径 65mm, 空塔速度 0.01m/s で, ガス吹込みからフォーミング高さに及ぼす粘度の影響を評価した結果を同じシヨ糖水溶液を用いた Martinsson et al.^{3,4)}の結果とともに Fig.7 に示す. ばらつきはあるものの, 粘度の増加とともにフォーミング高さが減少する傾向は Martinsson et al.の結果とほぼ一致しており, 本実験の手法は妥当であったと考えられる.

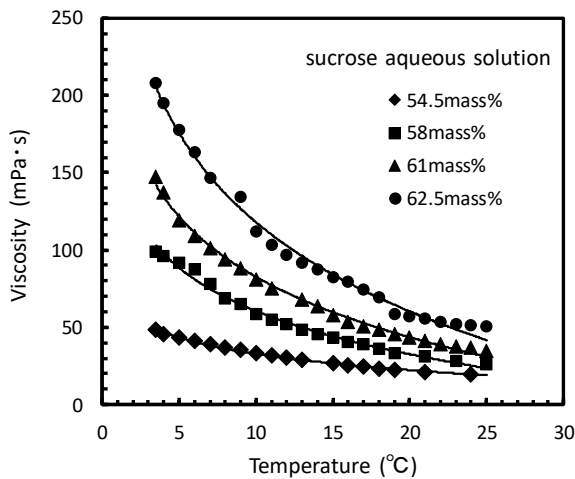


Fig.4 Effects of temperature and sucrose content on viscosity and in aqueous solution.

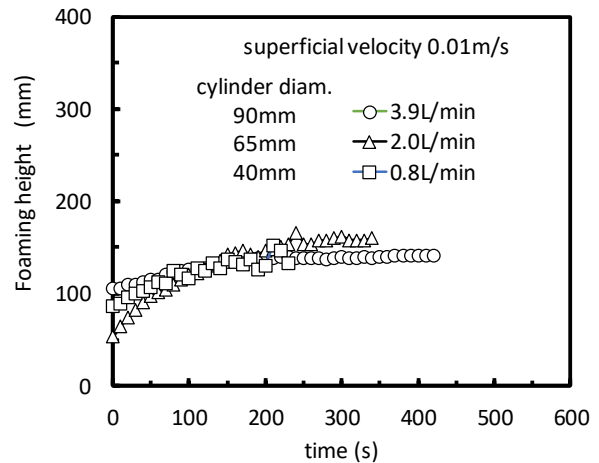


Fig.6 Time variation in foaming height.



Fig.5 Time variation in foaming height. (65Φ, 2.0L/min (0.01m/s).

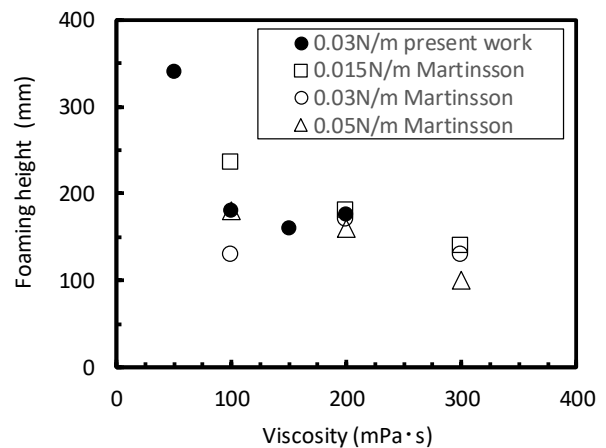


Fig.7 Effect of viscosity on foaming height.

次に, Figs.5,6 よりもガス流量を低下させて線流

速を 1/4 の 0.0025m/s とした条件 (65mmφ, 0.5L/min) でのフォーミング外観の経時変化を Fig.7 に示す. ガス導入後 10s~30s ではフォーミングはほぼ均一であるが, 40s 以降は部分的に不均一領域が生じており, 内部に空隙が形成され, それらが崩壊してフォーミング高さが一時的に低下する現象が観察された. この空隙の規模を目視で大中小に分類し, 線流速や粘性の影響を整理した結果を Fig.8 に示す. この図から, ガス空塔流速が低いほ

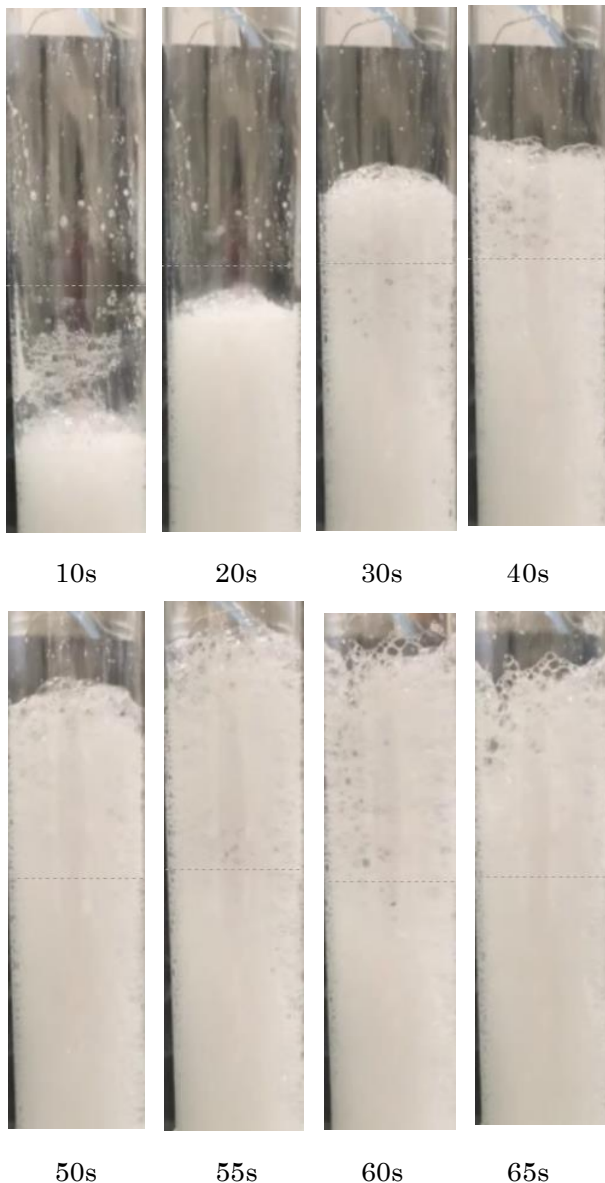


Fig.8 Time variation in foaming height (65Φ, 0.5L/min (0.0025m/s).

ど, あるいは, 粘度が低いほどフォーミング中に空

隙が発生しやすい傾向があることがわかる.

低空塔速度, あるいは, 低粘度条件でのフォーミング挙動のイメージを Fig.9 に示す. 低ガス流量条件では, 細かい泡が均一に生成し分散するため, 時間とともに徐々に泡高さが増加するが, それとともに内部で泡同士の合体が起こり, 大気泡が生成する. 生成した大気泡は上昇するが, 上層部に存在する細かい泡に阻まれて滞留し, 滞留中に下方から上昇してきた気泡が大気泡と合体し空洞が形成され, その空洞は時間とともに大きくなる. 空洞の上に存在していた細かい泡は時間とともに破泡し, 空孔上端部が開放され, 泡の最上部位置は下降する. Fig.8 の結果はこのような経過をたどったことで, 空洞が生成し, その後に崩壊したものと考えられる.

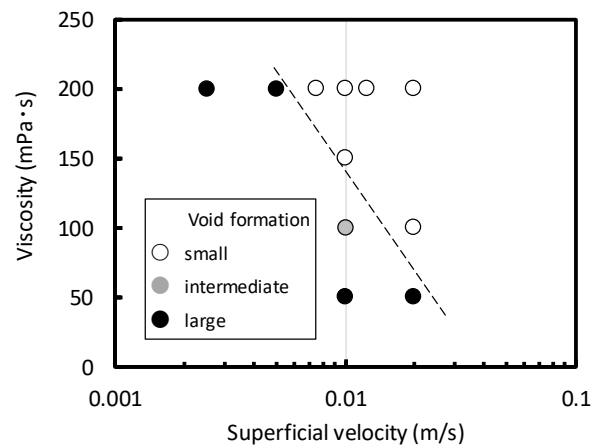


Fig.9 Condition for void formation in foam. (Cylinder diam. 65mm).

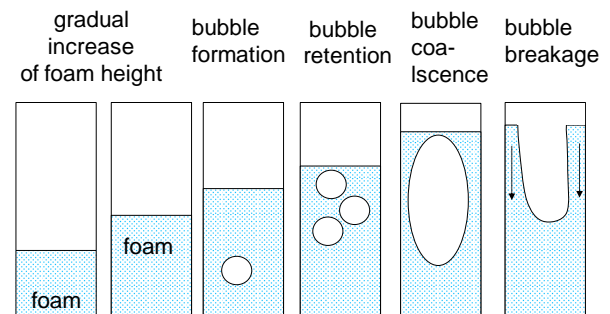


Fig.10 Schematic image of foaming behavior (high gas flow rate, high viscosity).

次に、高空塔速度、あるいは、高粘度条件でのフォーミング挙動のイメージを Fig.11 に示す。高空塔速度・高粘度条件では、ガラスフィルタの孔近傍で大気泡が生成しやすく、気泡径が大きいほど上昇速度が速いため、早期に上層部に到達し、上層部を貫通して短時間のうちに破泡する。その結果、フォーミング層中に空洞は形成され難くなり、フォーミング高さは安定した挙動を示す。高空塔速度の条件の実験でフォーミング層上方から観察すると、表面の細かい泡から中程度の気泡が連続的に破泡する様子が見て取れることから Fig.11 のイメージは実態に近いものと考えられる。

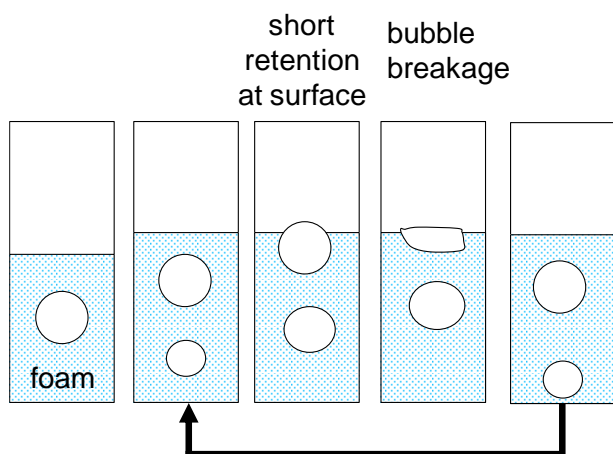


Fig.11 Schematic image of foaming behavior (low gas flow rate, low viscosity).

4. 結 言

本稿では、製鉄プロセスの精錬工程におけるスラグフォーミングを模擬するために、高粘度条件でのガス吹込みが可能な水モデル実験装置を構築し、フォーミング高さに及ぼすガス流量、液体粘度の影響を評価した。実験結果は類似の先行研究の結果とほぼ一致したことから本実験は妥当であったと考えられる。吹き込みガス流量が低く、流体粘度が低い場合にフォーミング層内に空洞が形成される傾向があり、その結果としてフォーミング高さが高くなる傾向があることを明らかにした。この空洞は細かい泡がフォーミング上層部で気泡の離脱を妨げることにより生じ、その結果としてフォーミング高さが大きくなったと考えられる。

謝 辞

本研究は日本鉄鋼協会「多相融体の流動理解のためのスラグみえる化」研究会グループの助言を受けて行われた。日本鉄鋼協会および本研究会に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 原 茂太, 荻野和巳: 鉄と鋼, **8**(1992),200.
- 2) 原 茂太, 生田昌久, 北村光章, 荻野和巳: 鉄と鋼, **69**(1983),1152.
- 3) J.Martinsson, Z.Deng and D.Sichen: ISIJ Int., **58**(2018), 1368-1370.
- 4) J.Martinsson: Dr. thesis of KTH Royal Institute of Technology (2018).