

灰障害予測に対するシミュレーションの適用

内村 大道 ^{*1} 宮下 和大 ^{*2}
Uchimura Hiromichi Miyashita Kazuhiro

当社では石炭灰の膠着度(かたさ)を指標として石炭焚きボイラにおける灰障害の起こりやすさを評価してきた。膠着度試験は石炭試料を粉碎、灰化、再焼結した後に焼結体のかたさを測定する手法である。膠着度試験は、ラボにて灰障害を予測できる有用な手法であるが、その反面、灰化などの処理に時間が掛かる。そこで、灰障害の起きやすさをシミュレーションで評価できれば、時間が短縮できる。本稿では、石炭灰と石炭-バイオマス混焼灰の化学組成値に基づくシミュレーションを適用し、計算結果と膠着度の相関について検討した。その結果、計算結果と膠着度に一定の相関が見られ、灰障害のスクリーニング手法としてシミュレーションは有効であることを確認した。

キーワード：灰障害、膠着度、シミュレーション、石炭、バイオマス

1. はじめに

石炭焚き火力発電ボイラでは、石炭の燃焼によって生じた灰が伝熱管に付着、成長し、伝熱性の低下や閉塞を引き起こす灰障害が発生する。灰障害の起こりやすさは石炭の種類により差がある

ため、当社では灰障害の起こりやすさを評価する手法として膠着度試験を提供し、定量的に灰障害を評価してきた⁽¹⁾。図1に、膠着度測定の概略を示す。膠着度試験ではまず電気炉を用いて石炭灰を調製する。次に、調製した石炭灰を専用の磁性皿に詰め、管状炉内にて実機ボイラの燃焼温度近

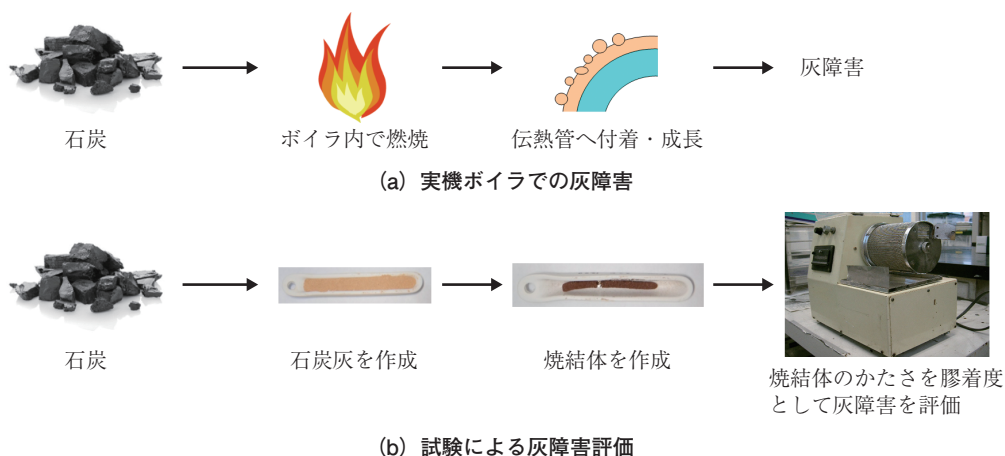


図1 膠着度測定の概略

*1：計測事業部 化学・材料部 福浦グループ
 *2：研究開発センター 研究開発グループ

傍で焼結して焼結体のかたさを調べる。膠着度と灰障害の程度を表1に示す。焼結体がかたく壊れにくいと膠着度は高くなり、灰障害が生じやすいことを意味する。

膠着度は、ラボにて灰障害を予測できる有用な手法である。一方、試料の受け渡し、焼結体の作製および測定するために時間が掛かる。仮に、石炭灰の化学組成情報をもとにシミュレーションで灰障害の起こりやすさを評価できれば、データのみでの評価が可能となる。そこで、熱力学平衡計算ソフトウェア「FactSage⁽²⁾」を用いたシミュレーションし、計算値と膠着度の相関を求め灰障害を評価した。

また、近年、石炭焚き火力発電ボイラでは排出二酸化炭素削減や発電量固定価格買取制度の普及によりバイオマスを混焼するケースが増えてい

る。そこで、石炭-バイオマス混焼条件においても、同様に計算値と膠着度の相関を比較検討した。

2. シミュレーションについて

FactSageは、多成分系の化学反応をシミュレートできる熱力学平衡計算ソフトウェアである。物質情報や計算温度範囲、雰囲気ガス組成等を入力することで、各温度で生成する化合物のさまざまな情報が得られる。計算例を図2に示す。横軸が温度(℃)、縦軸が反応生成物の重量(wt%)を示す。図2のように、各温度での生成物を計算することができる。

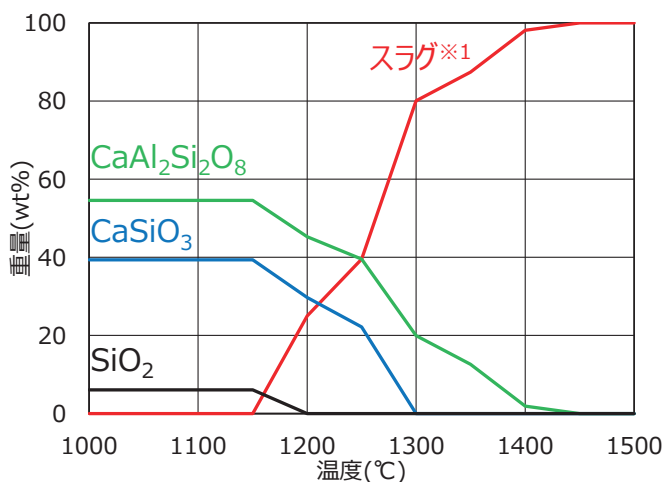
灰障害は部分的に溶融した灰が配管に付着して成長した結果発生すると推定される。そのため、溶融状態となった石炭灰の割合と膠着度に相関があると考えられる。そこで、スラグ等の灰が溶融して液体になった割合を“液相率”とし、計算から求めた液相率と実測値である膠着度の比較した。液相率は次のとおり定義した。

$$\text{液相率} = \frac{\text{液相の重量}}{\text{液相} + \text{固相の重量}}$$

この式において、すべて溶融すると液相率は1となる。

表1 膠着度と灰障害の程度の関係

実機灰の付着状態	灰障害の程度	膠着度
パウダー状で付着	なし(O)	<0.2
手では簡単に崩すことができる	小(O)	0.2-0.4
手では簡単に崩すことができない	中(△)	0.4-0.8
崩すことができない (溶融してガラス状態)	大(x)	>0.8



※1: 溶融した複数の酸化物

図2 SiO₂ (50wt%)、CaO (30wt%)、Al₂O₃ (20wt%) 混合物の各温度における生成物

3. 液相率と膠着度の計算または実験条件

液相率または膠着度は以下の条件で、計算または実験により求めた。

- ①温度 : 800 ~ 1500℃ (100℃きざみ)
- ②雰囲気 : 大気圧、空気雰囲気
- ③灰種 : 石炭灰 16 種、石炭-バイオマス混焼灰 2 種

液相率は灰組成と上記の条件から計算し、膠着度は 1 章で説明した手順で測定した。

4. 結果

4.1 石炭灰の液相率と膠着度の関係

任意の 5 種類 (No.1 ~ 5 と仮称) の石炭灰を例に取り、温度と液相率 (計算値) の関係を 図 3 に、温度と膠着度 (実測値) の関係を 図 4 に示す。液相率および膠着度のいずれも温度上昇に伴って増加することが確認された。このことから、液相率と膠着度に相関があることが推測される。

次に、石炭灰 16 種の 1000℃、1100℃、1200℃

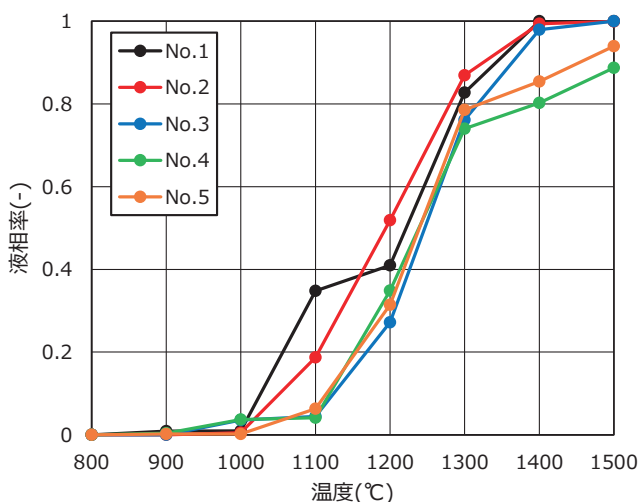


図 3 温度と液相率 (計算値) の関係

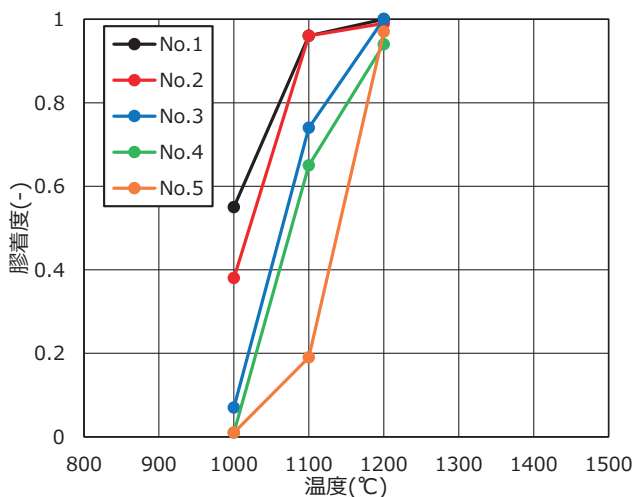


図 4 温度と膠着度 (実測値) の関係

での液相率（計算値）と膠着度（実測値）の関係を図5に示す。

ほとんどの石炭灰で液相率の増加とともに膠着度が増加する傾向が見られ、プロットは近似曲線の近傍に存在する。また、大部分の石炭灰は液相率0.15を超えると、灰障害の危険性が高いことを意味する膠着度0.8を超えることが確認された。この結果から、液相率0.15を評価ラインとして、液相率を用いた灰障害のスクリーニングが可能と考えられる。

ただし、領域Aのように液相率が0.15以下でも膠着度が0.8を超え、灰障害の危険性が大きい灰種もある。そこで、液相率を用いたスクリーニングの適用は、液相率0.15を超える灰種を危険と判定し、液相率0.15未満は併せて膠着度測定することが望ましい。

領域A、Bのように、近似曲線から外れる原因として、シミュレーションでは考慮できないスラグの粘度、石炭灰粒子径、アルカリ化合物の偏在などの影響が考えられる。今後、近似曲線から外れる原因について検討していく。

4.2 石炭-バイオマス混焼灰の液相率と膠着度の比較

これまで石炭-バイオマス混焼条件を模擬した際の膠着度試験を実施し、混焼時に生じる灰の付着性を評価するうえで膠着度が効果的であることを確認している⁽³⁾。今回は、石炭にバイオマスをカロリーベースで30%混合し混焼を模擬した場合の、灰の液相率と膠着度を比較検討した。混合するバイオマスは竹および杉チップを対象とした。竹は放置竹林の有効活用が課題となっており、竹を原料とするバイオマス発電が始まりつつある⁽⁴⁾状況を考慮して選定した。杉は間伐材から発電用チップを製造して利用⁽⁵⁾されていることから選定した。石炭灰、バイオマス灰および混合物の化学組成を表2に示す。

表2の混合物の組成と3章の計算条件をもとに液相率を計算した。図6に石炭-バイオマス混焼灰の液相率（計算値）、図7に膠着度（実測値）をそれぞれ示す。

液相率と膠着度の値はともに、石炭灰に比べ、石炭-バイオマス混焼灰の方が大きく、その程度は竹混焼灰で顕著であることが確認された。これ

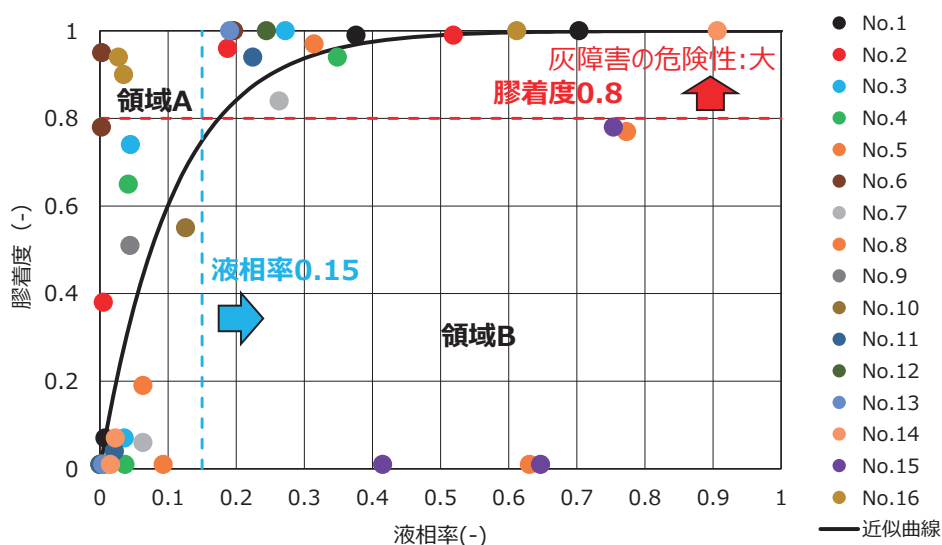


図5 液相率（計算値）と膠着度（実測値）の関係

表2 石炭灰、バイオマス灰混合時の成分 (wt%)

試料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO
石炭灰	58	33	0	1	1	1
竹灰	20	0	1	43	2	27
杉チップ灰	5	2	0	22	31	35
石炭灰+竹灰	56	31	0	3	1	3
石炭灰+杉チップ灰	57	33	0	1	1	2

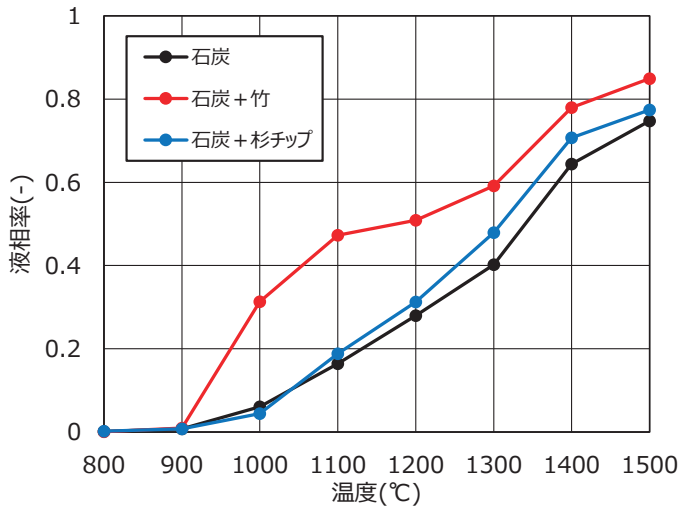


図6 石炭-バイオマス混焼灰の液相率 (計算値)

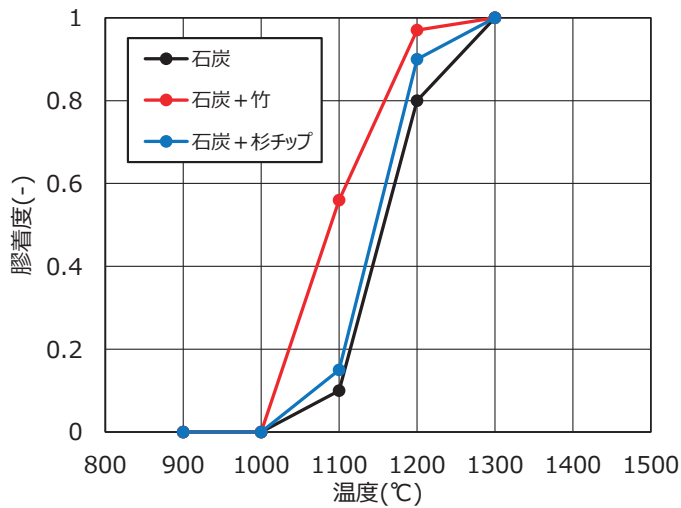


図7 石炭-バイオマス混焼灰の膠着度 (実測値)

は、混合によって灰障害が起りやすくなることを示唆している。特に、竹混焼灰では、表2に示すとおり竹灰には低融点の K_2O が大量に含まれており、その影響で液相率や膠着度が増加したと考えられる。一方、杉チップ混焼灰は、液相率・膠着度とも石炭灰との差が小さいが、これは石炭灰に杉チップ灰をカロリーベースで30%混合しても、組成がほとんど変化しなかったためと考えられる。

以上より、石炭-バイオマス混焼灰も液相率(計算値)の傾向が、膠着度(実測値)と一致することを確認した。しかし、まだ石炭-バイオマス混焼条件でのデータ数が少ない。今後データを蓄積していき、灰障害予測のスクリーニングとしての適用を目指していく。

5. まとめ

石炭灰において、FactSageによるシミュレーションで得られる液相率(計算値)と膠着度(実測値)には一定の相関があることがわかった。これを用いれば、液相率0.15を超えた石炭灰は灰障害の危険性が高いと判断するスクリーニング手法の1つとなる。ただし、液相率0.15未満については、危険側の予測になることがあるので、スクリーニングに併せて膠着度を測定することが望ましい。

石炭-バイオマス混焼灰の液相率の傾向が、膠着度と一致することを確認した。しかし、まだ石炭-バイオマス混焼条件でのデータ数が少ない。今後データを蓄積していき、混焼条件での灰障害予測のスクリーニングとしての適用を目指していく。また、石炭-バイオマス混焼条件だけでなく、利用が拡大しているバイオマス専焼条件への適用も含め検討を進めていく。

参考文献

- (1) 知恵賢二郎、茂田潤一：灰汚れ評価「灰の膠着度」の亜瀝青炭への適用について、IIC REVIEW、No.61、2019/04、pp.8-12
- (2) 株式会社計算力学研究センターホームページ：<https://www.rccm.co.jp/product/thermodynamics/factsage/>
- (3) 茂田潤一、知恵賢二郎、高野卓、長島陽一：「灰の膠着度」による石炭・バイオマス混焼時の灰汚れ予測評価、IIC REVIEW、No.63、2020/04、pp.31-37
- (4) 田中良平：バイオマスとしての竹の利用、九州森林研究、No.71、2018/03、pp.137-140
- (5) 公益財団法人かながわトラスとみどり財団ホームページ：<https://ktm.or.jp/woodybiomass/>



計測事業部
化学・材料部
福浦グループ
内村 大道
TEL. 045-791-3516
FAX. 045-791-3542



研究開発センター
研究開発グループ
宮下 和大
TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547