



バイオマス燃料の流動層燃焼炉における灰凝集予測評価手法の開発 Development of an Ash Agglomeration Prediction Method for Biomass-Fired Fluidized Bed Combustion



Tauch Nozomi

田内 希^{*1,*3}

Demachi Toyoko

出町 豊子^{*4}

Yoshiie Ryo

義家 亮^{*6}

Miyashita Kazuhiro

宮下 和大^{*1}

Zhang Hui

張 慧^{*4}

Naruse Ichiro

成瀬 一郎^{*7}

Shigeta Jun-ich

茂田 潤一^{*2}

Ueki Yasuaki

植木 保昭^{*5}

This study investigates a rational pre-evaluation method for determining the type and minimum required dosage of additives to suppress sintering and agglomeration in circulating fluidized bed (CFB) boilers caused by biomass fuel ash. Thermodynamic equilibrium calculations were first used to estimate the fraction of molten slag formed with different inhibitory compounds, and effective additives were identified based on the relationship between slag formation and the onset threshold of adhesion. Al_2O_3 and MgO were thereby identified as effective in suppressing molten slag formation from biomass ash. Laboratory-scale adhesion tests on these selected additives showed that MgO , in particular, exhibits a strong sintering suppression effect even at low addition levels. Analysis of the formation behavior of solid Mg-containing compounds and SEM-EDS microstructural and compositional observations indicated that MgO addition promotes the formation of high-melting solid silicate phases, thereby reducing molten ash formation and interparticle binder effects. The experimental results agreed well with thermodynamic predictions, demonstrating the practicality of this method as a screening tool for sintering suppression.

*1：研究開発センター 研究開発グループ

*2：元フェロー 博士（学術） 環境計量士（濃度関係）

*3：名古屋大学 大学院 工学研究科

*4：名古屋大学 未来材料・システム研究所

*5：愛知工業大学 工学部機械学科 工学博士 教授

*6：岐阜大学 工学部化学・生命工学科 工学博士 教授

*7：名古屋大学 未来材料・システム研究所 工学博士 教授

本研究では、バイオマス燃料灰に起因する循環流動層（CFB）ボイラ内の焼結・アグロメレーション抑制を目的として、添加剤の種類および必要最小添加量を事前に合理的に評価する方法を検討した。まず、熱力学平衡計算を用いて各抑制化合物添加時の熔融スラグ生成割合を算出し、それと膠着度の立ち上がり閾値との関係から有効な添加化合物を抽出した。その結果、 Al_2O_3 および MgO がバイオマス灰起因の熔融スラグ生成を効果的に抑制する化合物であることを明らかにした。つぎに、選定した化合物を対象にラボスケール膠着度試験を実施したところ、とくに MgO は低添加率においても有効な焼結抑制効果を示した。さらに、 Mg の相状態分布（ Mg 基準）および全固体中での存在割合（全固体基準）に着目した固体 Mg 含有化合物の生成挙動の解析と SEM-EDS による微構造・組成分析を行った結果、 MgO 添加により高融点固体ケイ酸塩相の生成が促進され、熔融灰の形成および粒子間のバインダー効果が低下することが明らかとなった。これらの傾向は既往のミクロ観察結果とも整合しており、実測結果は熱力学平衡計算の予測と良好に一致した。以上より、本方法が焼結抑制を事前に検討するための実用的なスクリーニング手法として有効であることを示した。

Key Words Ash-related operational issues, Biomass ash agglomeration, Thermodynamic equilibrium calculation, Sinter ratio, MgO additive

1. 緒言

再生可能エネルギー導入拡大の流れを受け、バイオマス燃料を利用した循環流動層（CFB）ボイラの導入・運用が国内外で進められている¹⁻³⁾。一方で、バイオマス燃料は起源や産地により灰組成が大きく異なり⁴⁾、特にカリウムなどのアルカリ金属成分を多く含む燃料では、炉内における灰の熔融・付着を起点としたアグロメレーションが発生しやすいことが知られている⁵⁻⁷⁾。アグロメレーションは流動不良や運転停止を招く要因となるため、実機ボイラの安定運用における重要課題の一つになっている⁸⁾。

実際のボイラ運用においては、燃料受入段階で K 濃度や発熱量等に一定の基準が設けられているものの、燃料供給や調達上の制約により、アグロメレーションリスクが高いと評価される燃料であっても、その使用を完全には回避することができない⁹⁾。このため、燃料性状を踏まえつつ、運転条件の最適化等によりアグロメレーションリスクを低減するための運用指針の確立が求められている。

アグロメレーション対策の一つとして、添加剤

の投入が広く知られている¹⁰⁻¹⁴⁾。ラボ試験において、竹粉に MgO を添加することで、灰の融点温度が上昇し、熔融抑制効果が実験的に示されている¹⁴⁾。しかし、添加剤は一般的に高価であり、燃料灰組成に応じて有効な添加剤の種類が異なる上、十分な抑制効果を得るためには一定量以上の添加が必要となる¹⁵⁾。その結果、実機では汎用的に知られた添加剤を少量試験的に投入するにとどまり、十分な効果が確認できないまま本格導入が見送られる事例も多い¹⁶⁾。したがって、対象燃料に対して有効な添加剤の種類と必要最小添加量を、事前に合理的かつ定量的に評価できる方法の構築が重要である。

これまでに、バイオマス灰と珪砂の焼結性の指標である「膠着度」と、熱力学平衡計算により算出できる灰の熔融指標である「熔融スラグ生成割合」との間には、一定の相関関係が存在することを報告している¹⁷⁾。本研究ではこの知見に着目し、**Fig. 1** に示すように、バイオマス燃料に対して有効な添加剤を熱力学的観点から合理的に選定するとともに、実効的な最低添加量を定量的に提示することを目的とした。具体的には、対象とする

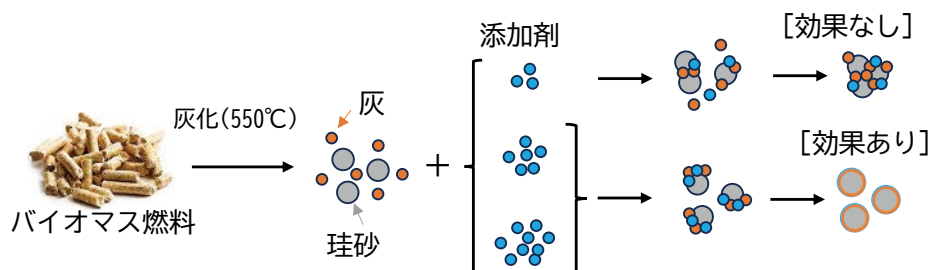


Fig.1 添加剤選定方法

バイオマス灰について熱力学平衡計算を行い、アグロメレーション抑制効果が期待される元素を抽出した上で、熔融スラグ生成割合の低減効果に基づき最適な添加化合物を選定する。さらに、添加後に生成する化合物の変化に着目してアグロメレーション抑制機構を理論的に考察するとともに、膠着度試験により焼結性が低減する最低添加量を実験的に検証し、最適な添加条件を明らかにする。

2. 実験試料および方法

2.1 実験試料

Table 1 に本研究で使用したバイオマス灰（以下、AR 灰）および珪砂の化学組成を示す。本研究で使用した AR 灰は、既往の研究において珪砂との混合条件下で高い焼結性を示すことが確認されており、焼結抑制効果の評価に適した代表的

な高凝集性灰として選定した。AR 灰は DIN EN 14775 に従い、 550 ± 10 °C で灰化して調製した。Na および K の定量分析は原子吸光分析装置（島津製作所、AA-7000）を用いて行い、S は高周波誘導炉（Leco, CHNS628）により燃焼させた後、赤外吸収法（IR 法）により測定した。Cl は水抽出後、イオンクロマトグラフィー（Thermo Scientific, Integrion RFIC）により測定し、その他の元素は誘導結合プラズマ発光分光分析装置（島津製作所、ICPS-8100）を用いて分析した。

AR 灰は、CaO 濃度に対して K_2O 濃度が高く、熔融性の高い灰組成を有することが特徴である。珪砂は粒径 0.06–0.7 mm のものを用い、 SiO_2 含有率は 98 mol % である。

アグロメレーション抑制に有効な添加化合物の候補として、高融点化合物を形成しうる Ca, Mg および Al の 3 元素を選定し^{13, 14, 18)}、実際の検証はこれらの酸化物（CaO, MgO および Al_2O_3 ）をそれぞれ添加剤として用いた。

2.2 熱力学平衡計算

熱力学平衡理論は、高温における熔融灰の生成挙動の解析に広く用いられている¹⁹⁻²¹⁾。そこで本研究でも、AR 灰に対する添加化合物の熔融抑制効果を、熱力学化学平衡論に基づき評価した。計算には化学熱力学平衡計算ソフトウェア FactSage8.1 (<https://www.factsage.com>) を用い、非理想液相としてデータベース FTsalt-SALTF および FToxid-SLAGA を選択した。熱力学平衡計算の条件を Table 2 に示す。計算は、CFB ボイラに

Table 1 バイオマス灰と珪砂の組成

サンプル	AR灰	珪砂
SiO_2	57.4	98.2
Al_2O_3	1.1	1.2
TiO_2	0.1	0.0
Fe_2O_3	2.1	0.0
CaO	10.0	0.0
MgO	11.9	0.0
Na_2O	0.3	0.1
K_2O	12.2	0.6
P_2O_5	1.5	0.0
MnO	0.1	0.0
SO_3	3.2	0.0
Cl	0.1	0.0

における典型的な燃焼温度範囲の高温域に相当する 1223 K、圧力 101.3 kPa の条件で実施した。ガス雰囲気については、ラボ試験条件を模擬した酸化性雰囲気と、実機燃焼炉内条件を模擬した還元性雰囲気の 2 条件を設定し比較検討した。入力質量比は (AR 灰 + 添加試薬) : 珪砂 = 1 : 1 とした。なお、添加率は各元素の安定酸化物 (Al_2O_3 , MgO , CaO) として灰に対して付加した物質質量 (mol) として定義し、その後、(AR 灰 + 添加試薬) と珪砂 (SiO_2) を質量比 1 : 1 で混合した組成を入力条件とした。ガス供給量については、ガス相が反応の律速要因とならないよう、試料中の反応に対して十分過剰となる量を供給することで、雰囲気はガス組成により規定される条件とした²²⁾。CFB ボイラの標準運転条件下では、灰と珪砂の混合比は一般に約 1 : 9 程度であるものの、運転条件により変動する可能性があるため、本研究では長期運転に伴う灰蓄積の影響を考慮し、高灰濃度条件を模擬している。本研究で採用した条件は実機燃焼環境よりも厳しい条件を設定しており、得られる評価は保守業務としては安全側の結果となる。ガス供給量は、十分な燃焼が達成されるように調整した。平衡計算では、主要な灰成分 (SiO_2 , CaO , K_2O , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 等) と、それらから形成しうるケイ酸塩、アルミン酸塩、炭酸塩、硫酸塩およびその他関連化合物をすべて考慮した。FactSage に内蔵している熱力学データに基づき、ケイ酸塩をはじめとする各種鉱物相の生成・分解反応を取り込むことで、低融点および高融点化合物の生成に関与する灰成分間の相互作用を反映させている。溶融

スラグ生成割合は、式 (1) に示すように、熱力学平衡計算により得られた溶融スラグの質量を投入した灰質量で除した値として定義している。

$$\begin{aligned} & \text{溶融スラグ生成割合 (wt\%)} \\ &= \frac{\text{溶融スラグ生成量 (g)}}{\text{入力総質量 (g)}} \times 100 \quad (1) \end{aligned}$$

2.3 実験方法

本研究では、焼結物の硬さを表す指標として式 (2) に示す膠着度を用い、バイオマス灰の凝集特性を評価した。焼結体の作製にあたっては、シリカボート (60 × 9 × 12 mm) に、バイオマス灰・添加試薬・珪砂を熱力学平衡計算と同一の組成比となるよう混合した試料を充填した。混合は JIS R 1306 に従い手動で行った。本試料は水平電気炉を用い、酸化雰囲気中で 1223 K まで一括加熱し焼結した (Fig. 2)。得られた焼結体 (約 1 g) は Fig. 3 に示すラトラ試験機の円筒状

$$\begin{aligned} & \text{膠着度 (-)} \\ &= \frac{\text{回転後の 1mm 以上の焼結体重量 (g)}}{\text{回転前の焼結体重量 (g)}} \quad (2) \end{aligned}$$

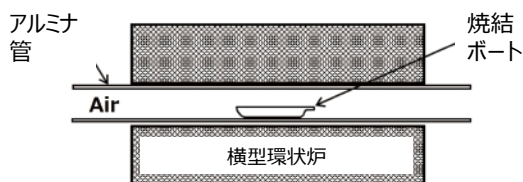


Fig. 2 横型環状炉

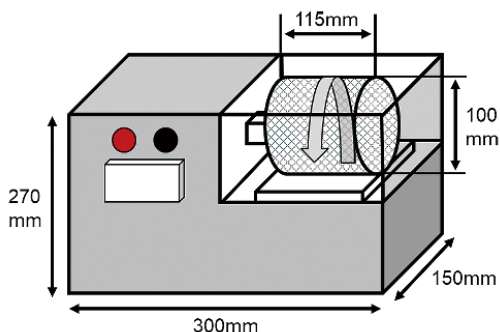


Fig. 3 ラトラ試験機のイメージ図

Table 2 熱力学平衡計算条件

計算温度 (K)			1223
ガス組成 (wt%)			
(1) 酸化雰囲気	N_2	79	
	O_2	21	
(2) 還元雰囲気	N_2	68	
	O_2	3	
	CO_2	23	
	H_2O	6	
灰組成 (wt%)			SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 , P_2O_5 , TiO_2 , MnO

金網内に挿入し、金網を 80 rpm で 250 回転させた。回転速度 80 rpm は、装置の機械的特性に基づき共振を回避しつつ安定運転が可能であることから採用した。

膠着度は、ラトラ試験後に残存する焼結片の割合として定義し、式 (2) に示すように、1.0 mm を超える残存焼結片の重量を初期試料重量で除した値として求めている。膠着度が 1.0 に近いほど焼結物は硬く、炉内での凝集発生リスクが高い。一方、膠着度が 0 に近い試料は凝集し難いとみなすことができる。商用規模 CFB ボイラを用いた事前運転評価では、膠着度が 0.4 を超えるバイオマス灰を使用した場合に、砂利状ベッド粒子の生成が大幅に増加したことから、膠着度 0.3 を低凝集性の判定基準 (実用的ベンチマーク) として採用した。

なお、本研究では実験結果と対応付けて熱力学平衡計算結果の解析も行っており、その際に用いる指標について以下のように定義した。「固体 Mg 含有化合物の生成割合 (Fig. 6)」は、Mg 化合物中の Mg のうち固体相として存在する割合として定義した。すなわち、本値は Mg の相状態 (固体/液体) の分布を表す指標である。一方、「固体生成物中の Mg 含有化合物割合 (Fig. 9)」は、全固体生成物に対して Mg を含む固体化合物が占める割合として定義した。

3. 実験結果および考察

3.1 熱力学平衡計算による抑制化合物添加による熔融スラグ生成挙動の変化

各種焼結抑制化合物 (Al_2O_3 、 MgO および CaO) について、任意の添加率における熔融スラグ生成割合の変化を、熱力学平衡計算により評価した。熔融・焼結挙動は、添加化合物と灰中成分との反応における化学量論比に強く依存することから、本解析では添加率を各元素の安定酸化物としての物質 (mol) 基準で整理した。なお、試料組成の詳細は 2.2 節に示した条件に従った。併せて質量基準 (wt%) との対応関係についても検討を行った。

Fig. 4 に、1223 K、酸化雰囲気における各抑制化合物添加時の熔融スラグ生成割合を示す。なお、本条件においては、還元雰囲気で計算した結果と比較しても熔融スラグ生成挙動に顕著な差は認められなかった。

本図より、 Al_2O_3 添加系では、添加率の増加に伴い熔融スラグ生成割合が系統的に低下する傾向が確認される。特に低添加率域から明確な低減効果が現れ、添加率 7 mol% (10 wt%) 以上では熔融スラグ生成割合が顕著に抑制されている。さらに添加率を増加させると、13 mol% (20 wt%)

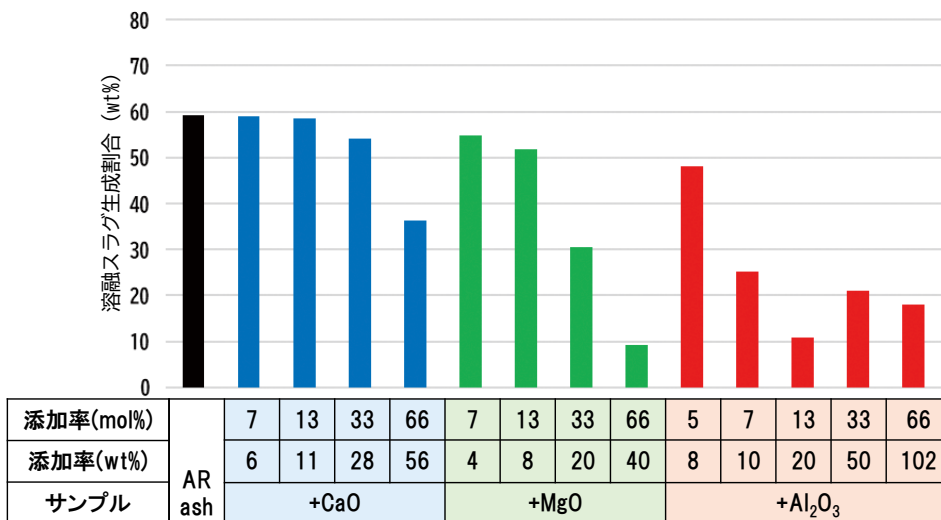


Fig. 4 1223 K における添加剤添加量と熔融スラグ生成割合の比較

付近で最小値を示し、それ以上の添加率では大きな変化は見られず、抑制効果が飽和する挙動を示している。Al₂O₃ 添加系において 13 mol% 付近で熔融スラグ生成割合が最小となる理由は、熱力学平衡計算により予測される固相生成挙動の変化に起因すると考えられる。すなわち、Al₂O₃ の添加により灰中のアルカリ成分 (K) およびアルカリ土類成分 (Ca) と SiO₂ が優先的に反応し、Ca-Al-Si 系および K-Al-Si 系の高融点アルミノケイ酸塩固相 (例: CaAl₂Si₂O₈(s) 等) の生成が促進されることで、低融点の液相 (熔融スラグ) に移行する Si およびアルカリ成分が、固相側へ取り込まれる。結果として、Al₂O₃ 添加率の増加に伴い熔融スラグ生成割合は低下し、13 mol% 付近でこれら固相生成が実質的に飽和 (主要反応相手成分が相対的に不足) する。それ以降は Al₂O₃ を追加しても液相低減効果が頭打ちとなり、最小値近傍で飽和する挙動を示す。

一方、MgO 添加系では、低添加率域では熔融スラグ生成割合の変化は比較的緩やかであるものの、添加率の増加に伴い急激な低下が生じている。添加率 33 mol% (20 wt%) を境として熔融スラグ生成割合が大幅に低下し、その後は添加率の増加に伴い加速的に抑制している。この挙動は、Mg を含む高融点固相の生成が促進されることで、熔融相の形成が効果的に抑制された結果と考えられる。

最後に、CaO 添加系では、添加率の増加に伴う熔融スラグ生成割合の低下は限定的であり、高添加率条件においても十分な抑制効果は得られていない。全体として、CaO は他の抑制化合物と比較して熔融スラグ生成挙動の改善効果が小さい結果となっている。

以上より、熔融スラグ生成割合の低減という観点からは、Al₂O₃ および MgO が有効な焼結抑制化合物である。本研究ではこれらの結果に基づき、Al および Mg を有効な抑制元素として選定し、次節においてラボスケール試験による膠着度の実測評価を実施した。

3.2 膠着度による焼結性評価

Fig. 5 に、Al₂O₃ および MgO の添加率に対する膠着度の変化を示す。添加率については、物質質量基準 (mol%) および質量基準 (wt%) の双方で整理し、添加率の定義による焼結抑制効果の差異を比較している。

本図より、Al₂O₃ 添加では、添加率の増加に伴い膠着度が単調に低下している。実用的な低凝集性の判定基準である膠着度 0.3 を下回る添加率は、7 mol% (10 wt%) 以上の条件で確認でき、とくに添加率 13 mol% (20 wt%) において膠着度は約 0.1 となり、焼結性がほぼ消失している。これは、前節で示した熔融スラグ生成割合が最小値を示す添加条件と良く対応しており、熔融相形成の抑制が膠着度低減に直接寄与していることを示唆している。

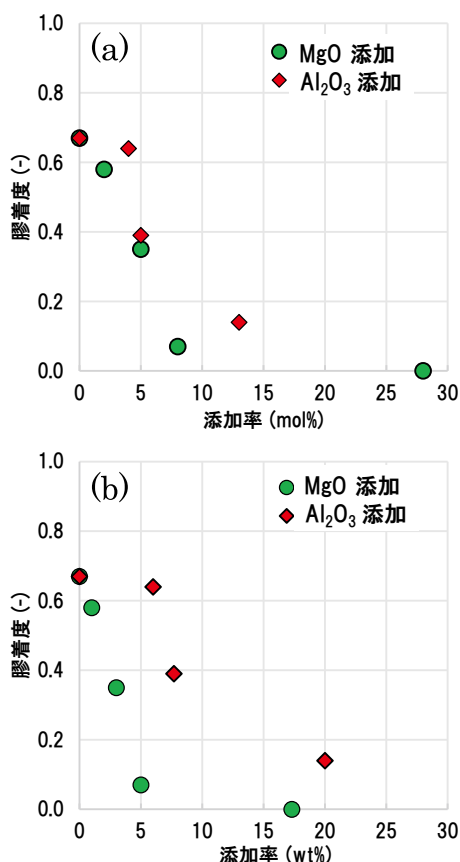


Fig. 5 1223 K における添加剤添加量と膠着度の関係
(a) モル比基準、(b) 質量比基準

一方、MgO 添加では、比較的少量の添加により膠着度が急激に低下している。添加率 8 mol% (5 wt%) の時点で膠着度は 0.3 を大きく下回っており、低凝集性条件を満足している。さらに添加率を増加させると、28 mol% (17 wt%) で膠着度が 0.0 となり焼結性が完全に消失している。MgO 添加では、 Al_2O_3 添加に比べて低添加率で大幅な焼結抑制効果が発現している。

添加率を物質質量基準 (mol%) で比較すると、MgO 添加系の方がやや低添加率で膠着度が低下するものの、 Al_2O_3 と MgO の膠着度低下挙動は概ね類似した傾向を示している。一方、質量基準 (wt%) で評価した場合には、MgO 添加の方がより低い添加割合で焼結抑制効果を示している。これらの結果は、焼結抑制効果が単なる添加質量ではなく、化学反応に関与する物質質量 (mol 数) に依存している可能性を示唆している。一方で、本研究では実機適用を想定し、添加条件が質量基準で与えられる点を考慮し、同一質量に対して供給される物質質量 (mol) の観点から評価を行った。なお、MgO は分子量が小さいため、同一質量添加条件において Al_2O_3 よりも多くの物質質量を供給できることが、焼結抑制効果の差異に寄与している可能性がある。一方で、この差異は供給される物質質量の違いのみに起因するものではなく、生成する固相化合物の種類および生成挙動の違いも影響している可能性がある。MgO 添加系では、添加量の増加に伴い生成する Mg 含有固相の組成が変化し、高融点固相による構造形成が進むことで膠着抑制に寄与していると考えられる。これらの傾向は、Mg 系化合物生成と膠着抑制の相関を報告した既往研究とも整合する¹⁶⁾。

これに対して、 Al_2O_3 添加系では生成物の変化は比較的限定的であり、主として液相量の低減に支配された焼結抑制挙動を示すものと考えられる。

以上の結果より、Mg を含む抑制化合物は、低質量添加条件においても高い焼結抑制効果を発現している。次節では、MgO 添加時の焼結抑制メカニズムについて、熱力学平衡計算および生成する

固体化合物の比較を通じて詳細に検討する。

3.3 焼結抑制メカニズムの検討

Fig. 6 に、MgO 添加率 (wt%) に対する固体 Mg 含有化合物の生成割合 (mol%) および膠着度の変化を示す。本図では、前節までの検討において質量基準での添加が実機適用上有利である可能性が示されたことを踏まえ、横軸には MgO 添加率を wt% 表記している。一方、生成する固体相の挙動については化学量論的反応を反映するため、固体 Mg 化合物の割合を mol% で評価している。

本図より、MgO 添加率の増加に伴い、 $\text{CaO-MgO-SiO}_2(\text{s})$ の生成が促進されるとともに、MgO 添加率 5 wt% 以上においては、 $\text{K}_2\text{O-5MgO-12SiO}_2(\text{s})$ が新たに生成していることが分かる。これらの高融点 Mg 含有固体相の生成により、全固体相に占める Mg 化合物の割合は単調に増加している。一方、膠着度は MgO 添加率の増加に伴い大きく低下しており、とくに MgO 添加率 5 wt% 付近で急激な減少が認められる。さらに、MgO 添加率 17 wt% では膠着度はほぼ 0 に達しており、焼結性が抑制された状態になっている。

これらの結果から、MgO 添加による焼結抑制は、単なる融点上昇効果ではなく、Mg を含む固体ケイ酸塩相の生成促進に起因する熔融 SiO_2

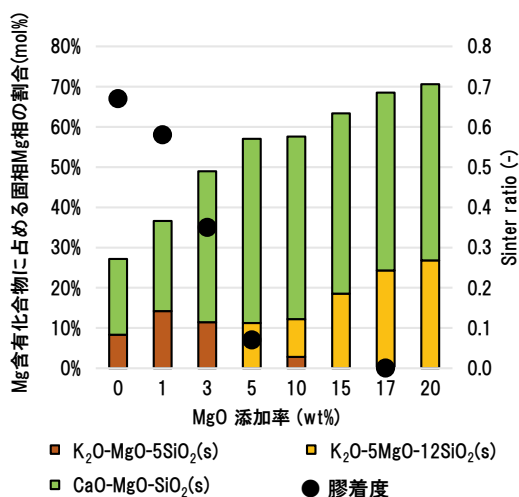


Fig. 6 MgO 添加量と Mg 含有固相の存在割合との関係 (割合は Mg 質量収支に基づいて算出)

成分の固相への取り込み、すなわちスラグ化抑制機構によって生じていると考えられる。竹粉で直接測定・解明された知見が他のバイオマス灰にも適用でき、また、適用可能な理由が熱力学平衡論で理論的に説明できた¹⁴⁾。

以上の考察を検証するため、次節では MgO 無添加および MgO 添加試料（代表条件として MgO 5 wt%）を対象に、SEM-EDS による断面観察を実施し、固体相形成および付着状態の差異を詳細に評価した。

3.4 断面の SEM-EDS 分析

Fig. 7 に断面 SEM-EDS 分析の対象とした膠着度測定サンプルの外観を、Fig. 8 に SEM による断面観察結果をそれぞれ示す。SEM による断面観察の結果、MgO 無添加条件では、珪砂粒子間および珪砂表面を覆うように付着灰が分布しており、付着灰が粒子間を結合するバインダーとして機能している状態が観察できる。一方、MgO を 5 wt% 添加した条件では、珪砂周囲に存在する



Fig. 7 1223 K における焼結率評価用試料の外観写真
(1) MgO 無添加、(2) 5 wt% MgO 添加

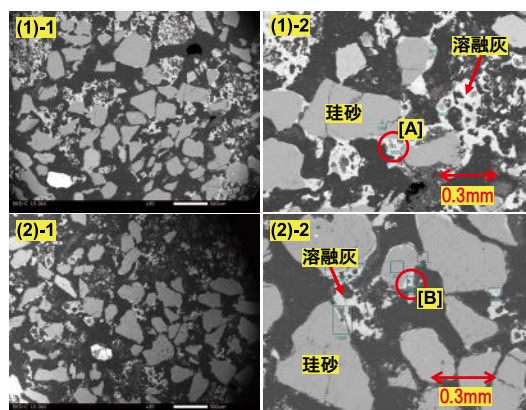


Fig. 8 MgO 無添加および 5 wt% MgO 添加試料の SEM 断面観察結果 (1-1、1-2：無添加、2-1、2-2：5 wt% MgO 添加。低倍率像および高倍率像。)

付着灰が減少しており、とくに珪砂同士を架橋する付着灰の分布が減少している。この付着灰量の減少により、粒子間の結合力、すなわちバインダー効果が低下し、結果として膠着度が大きく低下したものとする。

これらの微構造変化の要因を明らかにするため、Fig. 8 の [A] および [B] において SEM-EDS による付着灰の点分析を実施した。AR 灰単体および MgO を 5 wt% 添加した条件における灰組成の実測値を Table 3 に示す。なお、 Al_2O_3 についてはオスミウム蒸着の影響により検出できていない。しかし、主要成分については計算値と実測値は概ね一致しており、計算結果が実機灰組成を適切に再現しているといえる。

この組成分析結果を基に、MgO 添加の有無による固体 Mg 含有化合物の生成割合を、実測データと計算結果の双方から比較した結果を Fig. 9 に示す。

Table 3 珪砂付着灰の組成における計算値と EDS 測定値の比較

mol%	添加剤なし		MgO 5wt%添加	
	AR灰	A.EDS	計算値	B.EDS
SiO ₂	57.4	59.3	53.0	56.6
Al ₂ O ₃	1.1	-	1.1	-
TiO ₂	0.1	0.0	0.1	0.3
Fe ₂ O ₃	2.1	0.0	2.0	1.6
CaO	10.0	8.3	9.3	9.9
MgO	11.9	12.1	18.6	17.0
Na ₂ O	0.3	1.0	0.3	0.7
K ₂ O	12.2	15.3	11.3	10.9
P ₂ O ₅	1.5	1.9	1.4	1.9
MnO	0.1	0.3	0.1	0.0
SO ₃	3.2	2.0	2.9	0.8
Cl	0.1	0.0	0.1	0.0

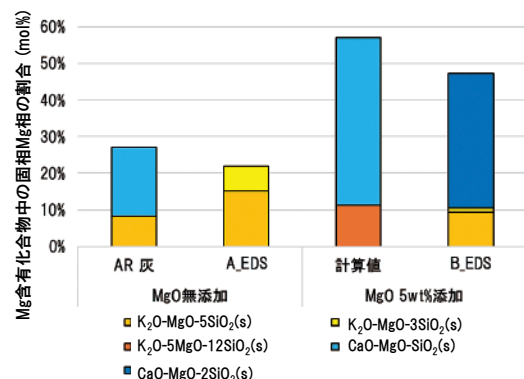


Fig. 9 Mg 含有固相の割合

(※割合は、固体生成物全体に対する比率として定義)

本図より、MgO 添加条件では CaO-MgO-SiO₂ 系化合物や K₂O-5MgO-12SiO₂ 系化合物等の固体 Mg 化合物の生成割合が増加している。この固体相生成割合の増加傾向は、熱力学平衡計算から予測された挙動と定性的に良く一致している。

以上の結果より、実験的にも計算結果と同様の傾向が示されたことから、熱力学平衡計算を用いた燃料灰の熔融抑制効果評価は、焼結リスク低減対策を事前に検討するための有効なスクリーニング方法となり得る。

4. 結 言

本研究では、バイオマス燃料灰に起因する焼結・膠着挙動の抑制を目的として、抑制化合物添加による熔融挙動および焼結性の評価手法を検討した。まず、熱力学平衡計算を用いて各抑制化合物の添加率に対する熔融スラグ生成割合を算出し、膠着度立ち上がり閾値との関係から有効な抑制化合物を選定した。その結果、Al₂O₃ および MgO が熔融スラグ生成を効果的に抑制する可能性を有した。

つぎに、選定した化合物を対象としてラボスケール膠着度試験を実施したところ、とくに MgO 添加では低添加率において膠着度が低下し優れた焼結抑制効果を示した。また、MgO 添加率に対する固体 Mg 含有化合物の生成割合と膠着度の関係を整理した結果、高融点 Mg 含有固体ケイ酸塩相の生成増加に伴い、焼結性が低減した。

さらに、SEM-EDS による断面観察および付着灰の組成分析を通じて、MgO 添加により珪砂周囲の付着灰が減少し、粒子間のバインダー効果が低下する様子を実体的に捉えることができた。実測に基づく固体相生成挙動は熱力学平衡計算結果と良好に一致しており、本方法が焼結抑制効果を事前に評価・スクリーニングする有効であることを示した。

本稿は下記文献より引用・転載（一部日本語表記を変更）した。

田内 希ら：「バイオマス燃料の流動層燃焼炉における灰凝集予測評価手法の開発」, 日本エネルギー学会誌, Vol.105, No.9, pp.236-242 (2026).

References

- 1) Lin, W.; Dam-Johansen, K.; Frandsen, F., *Chem. Eng. J.*, 96, 171-185 (2003)
- 2) Peters, J.; May, J.; Ströhle, J.; Eppele, B., *Energies*, 13(18), 4665 (2020)
- 3) Urian, D. M.; Calderon, A. D., *Proc. 4th Int. Conf. Biomass. Util. Sustainable Energy*, Sep. 2-3, 2024, Penang, Malaysia
- 4) Öhman, G.; Nordin, N.; Skrifvars, M.; Backman, R.; Hupa, R., *Energy Fuels*, 14, 245-252 (2000)
- 5) Olofsson, G.; Ye, Z. C.; Bjerle, I.; Andersson, A., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 41, 2888-2894 (2002)
- 6) Anicic, B.; Lin, W.; Wu, H.; Dam-Johansen, K., *Proc. 12th Int. Conf. Fluid. Bed Technol.*, May. 23-26, 2017, KrakoARoland
- 7) Ghiasi, E.; Montes, A.; Ferdosian, F.; Tran, H.; Xu, C., *Int. J. Chem. React. Eng.*, 16, 4 (2018)
- 8) Benny, M.; Suraj, P.; Arun, P.; Muraleedharan, C., *J. Therm. Anal. Calorim.*, 148, 9289-9308 (2023)
- 9) Lamers, F. et al., IEA Bioenergy Task 32, Deliverable D7, (2018)
- 10) Davidsson, K. O.; Steenari, B. M.; Eskilsson, D., *Energy Fuels*, 21, 1959-1966 (2007).
- 11) Morris, J. D.; Daoood, S. S.; Nimmo, W., *Renewable Energy*, 194, 1166-1180 (2022)
- 12) Chi, H.; Pans, M. A.; Sun, C.; Liu, H., *Renewable Energy*, 185, 945-958 (2022)
- 13) Akiyama K., Pak, H.; Ueki Y.; Yoshiie R.; Naruse I., *Fuel*, 90, 3230-3236 (2011)
- 14) Tanoue K.; Umehara N.; Fujita M.; Ninomiya Y., *J. Wood Chem. Technol.*, 43, 119-134 (2023)
- 15) Ulusoy, B.; Anicic, B.; Wu, H.; Lin, W.; Dam-Johansen, K., *Fluid. XVI Conf. Proc.*, May. 26-31, 2019, Guilin, China
- 16) Abioye, K. J.; Harun, N. Y.; Sufian, S.; Yusuf, M.; Jagaba, A. H.; Ekeoma, B. C.; Kamyab, H.; Sikiru, S.; Waqas, S.; Ibrahim, H., *J. Energy Inst.*, 101490, 112 (2024)

- 17) Tauchi N.; Miyashita K.; Shigeta J.; Zhang, H.; Demachi T.; Yoshiie R.; Ueki Y.; Naruse I., *Mech. Eng. J.*, 13 (2026)
- 18) Wang, L.; Hustad, J. E.; Skreiberg, O.; Skjevraak, G.; Grønli, M., *Energy Procedia*, 20, 20-29 (2012)
- 19) Król, K.; Moroń, W.; Nowak-Woźny, D., *Energies*, 16, 362 (2023)
- 20) Falk, J.; Hannl, T. K.; Skoglund, N.; Backman, R.; Öhman, M., *Energy Fuels*, 36, 7035–7051 (2022)
- 21) Fan, H.; Li, F.; Guo, M.; Han, G.; Guo, Q.; Fang, Y., *J. Therm. Anal. Calorim.*, 150, 20267–20280 (2025)
- 22) Aganuma H.; Mori T.; Watanabe S.; Sawada A.; Goto T.; Ueki Y.; Yoshiie R.; Naruse I., *Mech. Eng. J.*, 9 (2022)

田内希※1, ※2†, 宮下和大※1, 茂田潤—※1, 出町豊子※3, 張慧※3, 植木保昭※4, 義家亮※5, 成瀬一郎※3

- ※1 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd.
6-17, Fukuura 2-chome, Kanazawa-ku, Kanagawa,
236-0004, Japan
- ※2 Graduate School of Engineering, Nagoya
University, Tokai National Higher Education and
Research System
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, Japan
- ※3 Institute of Materials and Systems for
Sustainability, Nagoya University, Tokai National
Higher Education and Research System
- ※4 Department of Mechanical Engineering, Faculty
of Engineering, Aichi Institute of Technology
1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota, Aichi,
470-0392, Japan
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan
- ※5 Faculty of Engineering, Gifu University, Tokai
National Higher Education and Research System
Yanagido 1-1, Gifu, Gifu 501-1193, Japan.

- ※1 株式会社 IHI 検査計測
〒 236-0004 神奈川県横浜市金沢区福浦二丁目 6 番 17 号
- ※2 東海国立大学機構名古屋大学大学院工学研究科
〒 464-8603 愛知県名古屋市中種区不老町
- ※3 東海国立大学機構名古屋大学未来材料・システム研究所
〒 464-8601 愛知県名古屋市中種区不老町
- ※4 愛知工業大学工学部機械学科
〒 470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247
- ※5 東海国立大学機構岐阜大学工学部
〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1 番 1

† Corresponding author: tauchi2626@ihi-g.com