



バイオマス燃料が珪砂の流動性に及ぼす影響 ～小型流動床燃焼炉を用いた検討～

Tauchi Nozomi

田内 希^{*1}

Miyashita Kazuhiro

宮下 和太^{*1}

Shigeta Jun-ichi

茂田 潤一^{*2}

バイオマス燃焼技術の一つに循環流動層ボイラがある。これはバイオマス特有の種類ごとの性状の違いに柔軟に対応できるため、バイオマス資源の有効活用につながる技術として注目されている。しかし、その流動媒体である珪砂とバイオマス燃料の灰などが高温下で反応し、焼結体を形成したアグロメレーションが発生しており、火炉内の流動状態を悪化させる原因となる。バイオマス灰中のアルカリ金属成分（またはアルカリ土類金属成分）は焼結体生成に影響を与える因子であり、珪砂の流動性に影響を及ぼすことは知られているが、今後新規のバイオマス燃料の適用を考える際、燃料が流動性に及ぼす影響を評価し、トラブル発生リスクを抑制する必要がある。本稿では流動性に対する燃料の事前評価手法について得られた知見を紹介する。

キーワード： バイオマス、循環流動層ボイラ、灰障害、アグロメレーション、灰組成、燃焼性、小型流動床燃焼試験、珪砂、流動性

1. はじめに

バイオマス燃料は再生可能でカーボンニュートラルなエネルギー源として注目されている。化石燃料をバイオマスに転換することで、単位発熱量当たりのCO₂排出量を8～9割ほど削減することができる⁽¹⁾。バイオマス燃料は、燃料源として利用可能なあらゆる固形燃料を指すため、性状や形状が多様である。そのため燃焼傾向に差があるが、流動媒体（珪砂：SiO₂）を用いる循環流動層ボイラ（以下、CFBボイラ）は直接燃焼ボイラに対して比較的低温でゆっくり均一に燃

料を燃焼させることから、現在利用が拡大している。一方でバイオマス灰や無機成分と火炉内にある珪砂が高温下で反応することで、アグロメレーション（以下、アグロメ）と呼ばれる焼結体を形成し、それが成長することで流動不良を引き起こすことが報告されている（図1）^{(2),(3)}。実際、バイオマス灰中に多く含まれるアルカリ金属成分（主にカリウム、以下、K）により低融点化合物の形成が促進されること（式1）⁽⁴⁾や、アルカリ土類金属成分（主にカルシウム、以下、Ca）の働きにより、高融点の化合物が形成されること

*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）

がわかっている (式 2) ⁽⁵⁾。K₂O-CaO-SiO₂ の三元状態図を図 2 に示す。これは、K、Ca、Si それぞれの酸化物が混在した状態の存在割合により生成される化合物を示すものであり、またその融点は等高線として示されている。融点の等高線の色が、カラーバーの下方 (紫色) に近づくほど融点は低いが、図 2 中に示す通り SiO₂ が多くを占める条件下において、K₂O/CaO が一定の割合で反応する場合、融点は低く、ボイラ

の燃焼温度以下で溶融する化合物が形成されることがわかる。そのため、事前に適用燃料が珪砂の流動性に及ぼす影響を評価することが重要になる。

そこで当社では、実機火炉内の流動状態をラボレベルで模擬する「小型流動床燃焼炉」を導入し、燃料ごとの流動性評価・検討を進めてきた。本稿では、灰性状が異なる 4 種類のバイオマスを用いた珪砂の流動性に及ぼす影響を検討した。

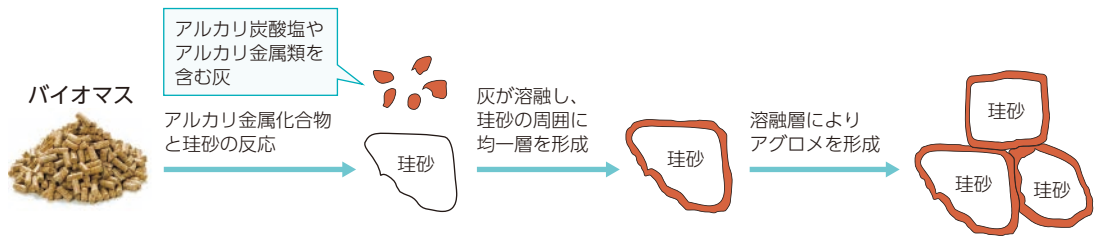
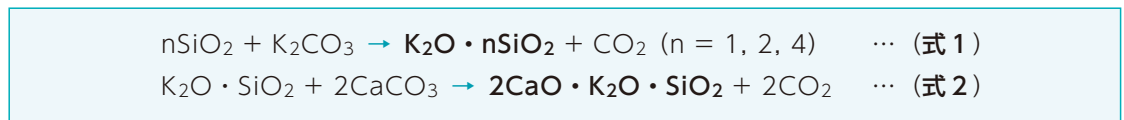


図 1 アグロメレーション形成メカニズムのイメージ図

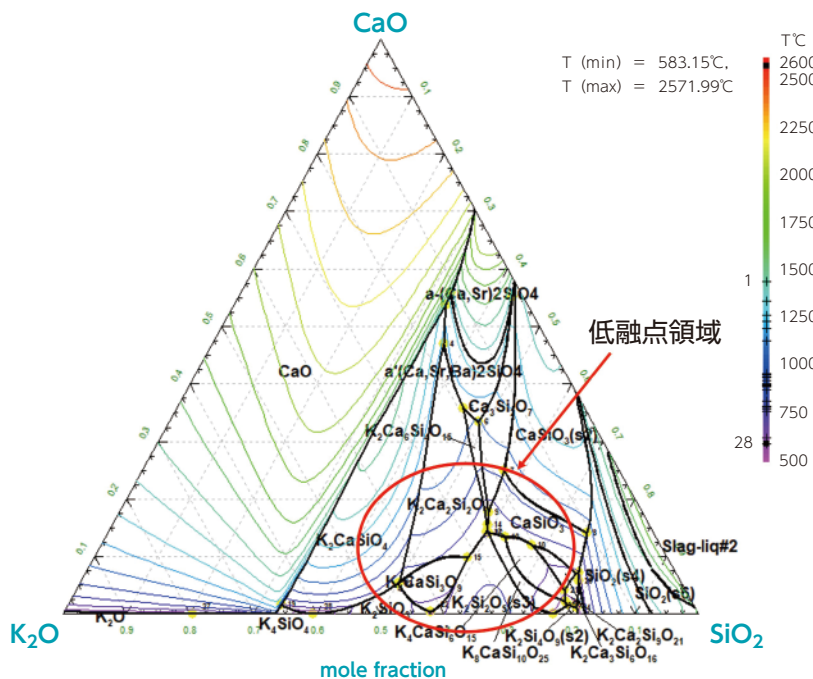


図 2 K₂O-CaO-SiO₂ による三元状態図

2. 試験方法

2.1 使用燃料

表 1 に本稿で用いた 4 種類のバイオマス燃料の灰組成を示す。木質系バイオマスを「WP」、農業残渣系を「AG」と示した。アグロメの形成には、先述した通り灰や無機成分由来のアルカリ金属 (Ca, Mg など) 成分やアルカリ土類金属 (Na, K など) 成分の影響が大きいことがわかっている。4 種類のバイオマスの特徴として、「WP1」・「WP2」は赤でハッチングしたアルカリ金属成分濃度が同等程度だが、青にハッチングしたアルカリ土類金属成分濃度が WP2 の方が 2 倍ほど多い。「AG1」・「AG2」はアルカリ土類金属成分濃度が同等程度だが、アルカリ金属成分濃度が AG2 の方が 6 倍ほど多い燃料である。

2.2 小型流動床燃焼試験

この燃焼炉を用いた小型流動床燃焼試験は高温下にて流動させた珪砂に燃料を投入することで、CFB ボイラ内の挙動 (珪砂の流動性) をラボ試験スケールにて模擬できるものである⁽⁶⁾。以下に装置概要を示す。層温度は反応管内の流動珪砂の温度を示している。

表 1 各バイオマス燃料の灰組成

試料		WP1	WP2	AG1	AG2
燃料	灰分 (wt%)	1.9	0.3	3.6	0.4
灰組成 (wt%)	SiO ₂	31.90	0.67	40.86	0.78
	Al ₂ O ₃	2.34	0.77	4.12	0.42
	TiO ₂	0.12	-	0.14	-
	Fe ₂ O ₃	4.90	0.25	2.80	0.84
	CaO	10.60	34.10	22.00	21.30
	MgO	15.10	16.40	3.90	8.93
	Na ₂ O	0.40	0.28	0.11	0.78
	K ₂ O	16.90	16.40	5.60	33.98
	P ₂ O ₅	4.75	5.00	2.58	3.19
	MnO	0.13	3.12	0.10	0.37
	SO ₃	5.30	2.60	1.95	3.62
	CuO	0.04	0.03	0.04	0.10
	Cl	0.03	0.01	0.02	0.00
	CO ₃	7.23	19.64	15.60	25.44

(1) 試験装置

- ・形式：常圧石英製流動床燃焼炉 (図 3)
- ・炉形状：石英管 (内径 45mm、板厚 3.6mm、高さ 1000mm)
- ・空気分散方式：石英焼結板
- ・試験条件など：表 2 参照

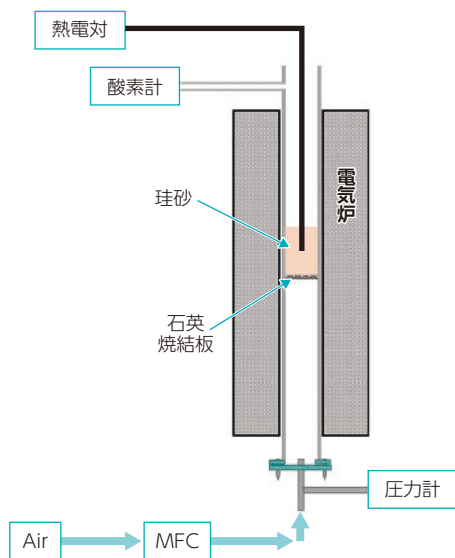


図 3 小型流動床燃焼炉概略図

(2) 評価方法

小型流動床燃焼試験では、表2の条件で燃料を投入し、「流動停止時の投入燃料（灰）量」を評価する。ここで、流動停止は「配管内圧力変動」と「目視」で判断する。珪砂の流動状態が悪くなるにつれて圧力変動幅は低下傾向を示し、流動が停止すると圧力変動がなくなる。そのため圧力変動が鈍化してきたら、定期的に反応管内を目視確認し、流動状態を把握する。

本試験では、既に発電に使用され、運用上問題がないとされる燃料の試験結果を基準とし、供試材の結果はその基準と比較して定性的に判断する。先行試験において、基準燃料の流動停止時の燃料投入量が約120gであったことから、120g

投入しても流動停止しなければ「流動停止無し」と記録し、「アグロメリスクの低い燃料」と評価する。

またアグロメの生成に主に寄与するのは燃料自体ではなく燃焼後の灰である。そのため、灰分（燃料中の灰になる割合）が小さければ、灰の単位時間当たりの蓄積量が少なくアグロメが生成しにくい。また灰中のKやCaの割合が灰の熔融温度に影響する。そこで、灰分を求める工業分析と、灰組成を求める成分分析を併せて実施し、総合的に燃料のアグロメ生成リスクを評価する。

評価項目を表3に示す。

表2 試験条件

形式	常圧石英製流動床燃焼炉
層温度	850℃・950℃
使用ガス	Air
流動砂	4号珪砂
流動砂量	約100g
空塔速度	0.34m/s
燃料投入量	0.5~1.0g/min

3. 試験結果

各燃料の小型流動床燃焼試験結果を表4に示す。また評価においては燃料ごとに灰分が異なることから、燃料投入量から投入灰量（g）を算出し、併せて比較した。

今回は、アグロメ形成に寄与する灰の熔融因子である K_2O ⁽⁴⁾ と、熔融抑制作用のある CaO ⁽⁵⁾ の存在割合が流動性に与える影響に着目した。ま

表3 評価項目

評価項目	評価内容	分析方法
燃料性状	燃料中の灰の割合（灰分）	工業分析
灰性状	灰中K量、Ca量など	成分分析
アグロメ生成傾向	投入燃料量	小型流動床燃焼試験
	流動時の圧力変動（流動停止すると変動なし）	

表4 小型流動床燃焼試験結果

燃料種	試験実施条件					流動停止有無	投入燃料量(g)	投入灰量(g)
	温度	灰分(wt%)	SiO ₂ 濃度(wt%)	K ₂ O濃度(wt%)	CaO濃度(wt%)			
WP1	850℃	1.9	31.90	16.90	10.60	有	33.2	0.63
WP1	950℃	1.9	31.90	16.90	10.60	有	8.7	0.17
WP2	850℃	0.3	0.67	16.40	34.10	無	270.9	0.81
AG1	850℃	3.6	40.86	5.60	22.00	無	120.0	4.32
AG2	850℃	0.4	0.78	33.98	21.30	無	364.7	1.46
AG2	950℃	0.4	0.78	33.98	21.30	有	60.7	0.24

た CFB ボイラの火炉内温度域は 850℃を基準とするが、部分的に 950℃になることがある。そのため、850℃試験に加えて、代表燃料（WP1、AG2）に対して 950℃試験を実施し、流動性に対する温度の影響を検討した。

3.1 アルカリ土類金属成分（CaO）が流動性に与える影響

K₂O 濃度がほぼ同等の WP1 と WP2 の 850℃試験において、CaO 濃度が低い WP1 は燃料を 33.2g、灰量として 0.63g 投入した段階で流動停止が確認された。一方、CaO 濃度が WP1 の約 3 倍の WP2 においては燃料を 270.9g、灰量 0.81g 投入したが試験終了時まで圧力変動の変化が見受けられず、流動状態の悪化も確認されなかった。そのため、K₂O 濃度が同等な場合、CaO 濃度が高い条件は灰の熔融が抑制され、流動状態が大幅に改善される可能性が示された。

3.2 アルカリ金属成分（K₂O）が流動性に与える影響

次に CaO 濃度がほぼ同等の AG1 と AG2 の 850℃試験では、どちらも流動停止しない結果となった。

AG1 は K₂O 濃度が 5.9wt%と低く、かつ CaO 濃度が 25.0wt%と高いことから、灰の熔融因子が少なく、熔融抑制因子が多いため、灰性状の視点においても流動停止しにくい燃料であるとわかる。一方、AG2 は、灰の熔融因子である K₂O 濃度が 34.0wt%と高い（流動停止した WP1 の約 2 倍）にも関わらず流動停止しなかった。これは、CaO が多く含まれることにより、**式 1** の反応から **式 2** の反応に進み、比較的融点の高い CaO・K₂O・SiO₂ 化合物が形成されたためと推察する。

3.3 層内温度が流動性に与える影響

最後に、WP1 と AG2 において 850℃から 950℃に温度を変更することで、温度条件が流動

性に与える影響を確認した。その結果、950℃の試験では、WP1 は 850℃の約 1/4、AG2 は約 1/6 という少ない投入量で流動停止した。熔融性シミュレーションでは、灰の溶融量が 900℃を境に顕著に増加することが確認されており⁽⁷⁾、これが原因の一つと考えられる。この結果から、CFB ボイラにおいても、火炉内部に生じた局所的な温度上昇が珪砂の流動性に影響を与えることが予測される。

4. まとめ

本稿では「バイオマス灰が珪砂の流動性に与える影響」を小型流動床燃焼炉にて評価し、以下に示す知見を得た。

- (1) 灰中に CaO が多く存在する場合、灰の熔融が抑制され、流動状態が大幅に改善する。
- (2) 灰中の K₂O 濃度が高くても、CaO が 20wt% 以上含まれる場合流動性低下が起こりにくい。これは、比較的高融点の CaO・K₂O・SiO₂ 化合物を形成するためと推測される。
- (3) 燃焼温度が 950℃に上昇すると顕著な流動性低下が起こる。このため実機 CFB ボイラにおいても局所的な温度上昇が珪砂の流動性低下を引き起こす可能性がある。

アグロメは珪砂が流動している CFB ボイラの火炉内で生成することから、ラボスケールにおいても珪砂流動条件で灰と珪砂の反応性を検討することは重要である。また環境温度が上昇すると、条件によっては加速的に珪砂流動性が低下することから、実機ボイラの燃焼温度域の把握や、それに応じた燃料種、燃料混合条件を検討する必要がある。今後新規バイオマス燃料の増加が見込まれ、

その性状は多岐にわたることが想定される。そのため、アグロメリスクをバイオマス燃料と珪砂流動性の観点から事前評価することが、ボイラの安定運用に役立てば幸いである。

参考文献

- (1) Matthew L. Aitken, Daniel H. Loughlin: Economic and environmental evaluation of coal-and-biomass-to-liquids-and-electricity plants equipped with carbon capture and storage, Clean Technologies and Environmental Policy, Vol.18, 2016, pp573-581
- (2) Yanqing Niu, Houzhang Tan, Shien Hui: Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt- induce Vol.52, 2016, pp1-61
- (3) A.-L. Elled, L.-E. Amand, B.-M. Steenari: Composition of agglomerates in fluidized bed reactors for thermochemical conversion of biomass and waste fuels: Experimental data in comparison with predictions by a thermodynamic equilibrium model, Fuel, Vol.111, 2013, pp696-708
- (4) 田内、宮下、茂田：バイオマス中アルカリ金属成分が流動層ボイラに及ぼす影響、IIC REVIEW、Vol.68、2022/10、pp19-26
- (5) Liang Wang, Johan E. Hustad, Oyvind Skreiberg, Geur Skjevark, Morten Gronli: A critical review on additives to reduce ash related operation problems in biomass, combustion applications Energy Procedia, Vol.20, 2012, pp20-29
- (6) Pawin Chaivatamaset, Panchan Sricharoon, Suvit Tia : Bed agglomeration characteristics of palm shell and corncob combustion in fluidized bed, Applied Thermal Engineering, Vol.31, 2011, pp2916-2927
- (7) 田内、宮下、茂田：バイオマス専焼におけるアグロメレーション 評価手法の検討、IIC REVIEW、Vol.70、2023/10、pp40-47



研究開発センター 研究開発グループ
田内 希

TEL 045-791-3522
FAX 045-791-3547



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



元フェロー
博士（学術） 環境計量士（濃度関係）
茂田 潤一

TEL 045-791-3516
FAX 045-791-3542