

「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

茂田 潤一^{*1} 知恵賢二郎^{*2} 高野 卓^{*3} 長島 陽一^{*3}
Shigeta Jun-ichi Chie Kenjiro Takano Takashi Nagashima Yo-ichi

低炭素社会の実現のために再生可能エネルギーとしてバイオマスを利用した石炭混焼ボイラが増加している。しかし、石炭にバイオマスを混焼する際、バイオマスの種類によってはファウリング等の灰障害を誘発する懸念がある。

そこで、灰汚れ予測として低品位炭(亜瀝青炭)での実績がある膠着度による評価手法を用いて、比較的大量に確保できる木質系バイオマスと石炭を混焼した際のファウリング等の灰障害に及ぼす影響を検討した。

キーワード：バイオマス、石炭、膠着度、灰組成、石炭焚火力発電プラント、スラッキング、ファウリング

1. はじめに

近年、石炭焚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⁽¹⁾の普及によりバイオマスを混焼するボイラが増えている。バイオマスの特徴として、灰分が少ないにもかかわらず、灰障害(ファウリング、スラッキング、高温腐食)⁽²⁾⁽³⁾の原因となるアルカリ分(特にカリウム)が多く、しかもバイオマスの種類によって灰の組成が大きく異なる点が挙げられる。

これらバイオマスを燃料として使用する際、過去に経験していない燃焼灰による灰障害の発生が十分懸念される。そこで、低品位炭での灰汚れ(付着性)評価手法である膠着度測定法を利用して、石炭と木質系バイオマス混焼時の灰付着性を検討したので、その結果の一端を紹介する。

2. バイオマス混焼灰の付着性評価

2.1 試料性状

表1に石炭(瀝青炭)と木質系バイオマス(松、杉、^{かし}檜)の性状分析結果を示す。木質系バイオマスの特徴は、石炭より発熱量は低いが揮発分が多い。揮発分燃焼は燃焼性が高い(燃焼速度が速い)ため、バイオマスの混焼により燃焼性の向上が考えられる。また、窒素(N)分と硫黄(S)分が0.1%以下と少ないため、バイオマスの混焼では排ガス中の窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)低減が予測できる。

一方、木質系バイオマスの灰分は石炭より極めて少ないが、高温での灰の付着性を誘発する酸化カリウム(K_2O)含有量が多いことが特徴である。

*1：フェロー 博士(学術) 環境計量士(濃度関係)

*2：計測事業部 企画管理部 ソリューションエンジニアリンググループ 課長 博士(理学) 環境計量士(濃度関係、騒音・振動関係) 一般計量士

*3：計測事業部 化学・環境部

表1 石炭と木質系バイオマスの性状

項目		試料の状態	瀝青炭 A	松	杉	樫
高位発熱量[MJ/kg]		無水ベース	29,010	20,490	21,170	19,500
全水分[%]		到着ベース	7.3	22.9	—	—
工業分析	水分[%]	恒湿ベース	2.7	12.1	15.9	15.1
	灰分[%]		14.4	0.4	0.4	0.5
	揮発分[%]		27.6	74.1	68.4	72.7
	固定炭素[%]		55.3	13.4	15.3	11.7
	燃料比[—]		2.00	0.18	0.22	0.16
元素分析	炭素[%]	無水ベース	71.4	49.9	52.3	49.2
	水素[%]		4.20	6.05	6.1	6.1
	窒素[%]		1.30	0.05	<0.1	<0.1
	酸素[%]		7.9	43.6	41.1	44.1
	全硫黄[%]		0.50	0.01	<0.1	<0.1
	燃焼性硫黄[%]		0.40	0.00	<0.1	<0.1
	不燃性硫黄[%]		0.10	0.01	<0.1	<0.1
灰組成	SiO ₂	灰ベース	49.0	0.62	6.37	0.16
	Al ₂ O ₃		32.7	0.49	1.40	0.23
	Fe ₂ O ₃		6.85	0.35	10.5	0.51
	CaO		4.62	30.8	22.1	58.5
	MgO		0.95	10.2	8.29	9.22
	Na ₂ O		0.30	0.52	2.17	2.94
	K ₂ O		0.40	13.6	28.9	8.82
	SO ₃		2.20	1.60	1.14	1.23
	P ₂ O ₅		0.85	0.71	1.10	2.30
	TiO ₂		1.35	0.01	0.20	<0.01
	MnO		—	6.92	—	—
灰融点	変形温度[°C]	酸化性雰囲気	>1,500	1,280	1,260	1,320
	軟化温度[°C]		>1,500	1,320	1,320	1,340
	半球温度[°C]		>1,500	1,380	1,350	1,390
	溶流温度[°C]		>1,500	>1,500	1,400	1,420

2.2 灰焼結試験方法⁽²⁾⁻⁽⁴⁾

(1) 灰の調製

石炭の灰分分析法 (JIS M 8812) に準拠し、所定の割合で混合した試料を 815°C に設定したマッフル炉にて灰化した。

(2) 灰の焼結

焼結は内径 42mm のアルミナ管を取付けた電気管状炉 (図 1 を参照) で行い、雰囲気は空気とした。試験灰は幅 12mm、長さ 100mm のアルミナ

ポートに装填した。

- ・ 加熱温度：1,000 ~ 1,300°C
- ・ 加熱時間：1h 一定

(3) 膠着度の測定

灰の焼結試験より得られた塊状灰の固さを図 2 に示すミネルバ機器社製ラトラ試験機 (※ 1) により評価した。ラトラ試験機は直径 100mm、長さ 120mm の円筒形金網 (目開き 1mm #) を 80rpm で回転させる装置である。

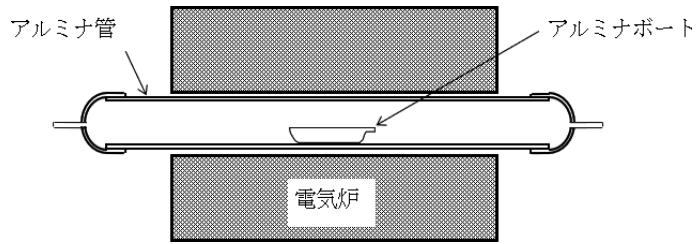


図1 灰の焼結試験装置

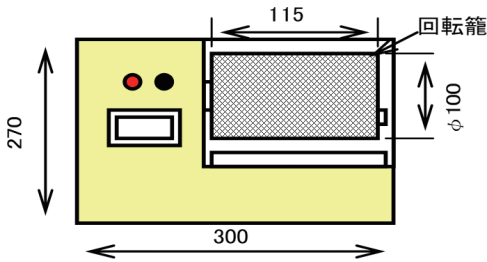


図2 ラトラ試験機

この円筒形金網に塊状灰を入れ金網を回転させると、塊状灰は一旦上方に持ち上げられた後、金網内壁に落下衝突するため表面から徐々に崩される。

焼結灰の固さを膠着度と定義し次式により求めた。

膠着度(%) = 試験後の重量(g) / 試験前の重量(g)

※1：一般社団法人粉体粉末冶金協会の規格「金属圧粉体のラトラ試験法 (JSPM 標準 4-69)」で定められた試験機で、加圧成形した金属圧粉体の耐摩耗性および先端安定性を測定するための装置。

2.3 試験結果

(1) 温度依存性

瀝青炭 A のみおよび瀝青炭 A に松を 30% 混合した場合の焼結温度と膠着度の関係を図 3 に示す。図 3 から、木質系バイオマスの添加により、灰の膠着度が高くなる(焼結しやすくなる)ことがわかる。また、松を 30% 添加した場合、瀝青炭 A と同一膠着度を示す温度条件は 30 ~ 100℃ 低温となる

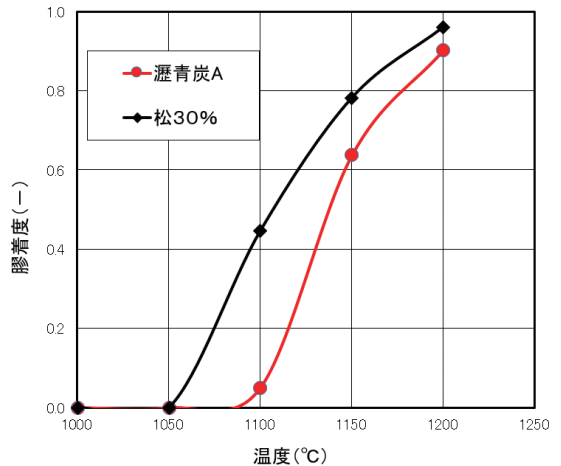


図3 焼結灰の膠着度その1 (温度の影響)

ことも確認された。

(2) バイオマス添加量の影響

図 4 に灰の加熱温度 1,100℃ における瀝青炭 A に対する松、杉および樅の添加量と膠着度の関係を示す。木質系バイオマスの種類の違いによる膠着度の変化は認められなかったが、いずれの木質系バイオマスも添加量が増えるほど灰の膠着度が高くなることが確認できた。バイオマス添加量 0% (瀝青炭 A のみ) の膠着度が約 0.05 であったのに対し、添加量 50% では 0.6 ~ 0.7 に上昇した。

図 4 より、今回用いた木質系バイオマスの添加量が約 20% 以下であれば、灰の焼結性はほとんど変化しないものと予測できる。

その他バイオマスとして、農業残渣系稲わら、木質系竹についても瀝青炭 B に 30% 混合した灰の膠着度を調査した。これらバイオマスの性状を

表2に、膠着度を図5に示す。松、杉、檜の混焼灰の1,100℃膠着度が0.38～0.42であったのに対し、稲わら混焼灰は0.48、竹混焼灰は0.26となった。バイオマスの種類により灰組成が異なることが、膠着度に影響を与えたものと考えられる。

2.4 考察

(1) 混焼灰のファウリングインデックスとスラッキングインデックス

火炉や後部伝熱面に燃焼灰が付着・堆積することによる伝熱阻害やガス流路閉塞などのトラブルを事前予測するため、ファウリングインデックス（火炉上部～後段の伝熱管への灰付着・閉塞への評

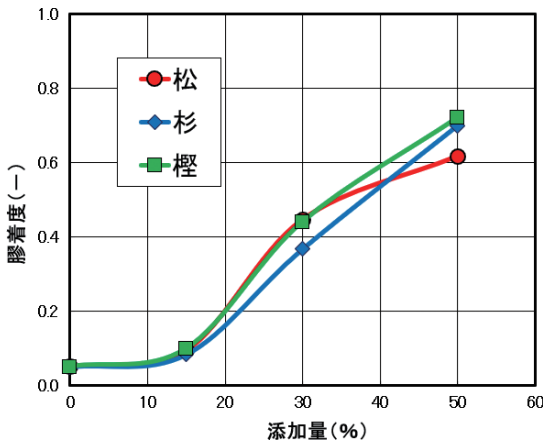


図4 焼結灰の膠着度（添加量の影響）1,100℃

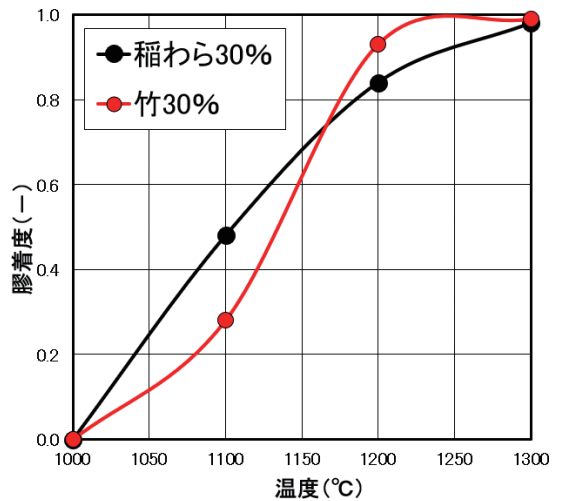


図5 焼結灰の膠着度その2（温度の影響）

表2 石炭と稲わらと竹の性状

項目		試料の状態	瀝青炭 B	稲わら	竹
高位発熱量[MJ/kg]		気乾ベース	29,200	16,100	19,600
灰分[%]		気乾ベース	11.4	11.4	0.8
灰組成	SiO ₂ [%]	灰ベース	57.7	67.8	19.5
	Al ₂ O ₃ [%]		33.0	0.27	0.36
	Fe ₂ O ₃ [%]		3.59	0.17	0.51
	CaO[%]		0.85	3.74	2.09
	MgO[%]		1.46	6.70	26.1
	Na ₂ O[%]		0.33	1.11	0.62
	K ₂ O[%]		0.93	16.1	41.5
	SO ₃ [%]		0.33	1.01	2.56
	P ₂ O ₅ [%]		0.40	2.42	2.84
	TiO ₂ [%]		1.10	<0.01	0.03
MnO[%]		0.05	0.49	0.19	

価)、およびスラッジングインデックス(火炉部分での灰付着評価)が広く用いられている。バイオマスの混焼により生成する灰のファウリングインデックス $Rf^{(5)(6)}$ およびスラッジングインデックス $Rs^{(5)(6)}$ がどのように変化するかを計算し、その結果を図6および図7に示す。

$$Rf = (\text{Base}) / (\text{Acid} \times \text{Na}_2\text{O}) \quad (1)$$

$$Rs = (\text{Base}) / (\text{Acid} \times \text{燃料中 S}) \quad (2)$$

ここで、Base(塩基性成分)：

$$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} \quad (3)$$

$$\text{Acid (酸性成分)}; \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 \quad (4)$$

なお、単位は灰中の各成分の濃度(%)である。

図6に示すように、木質バイオマスは表1よりBaseが主成分のため添加量を増やすことによりRfは大きくなるが、S分をほとんど含まないためRs値は小さくなる(図7)。

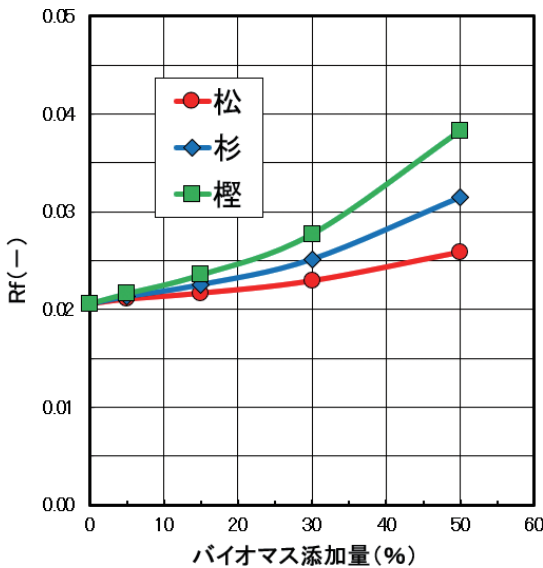


図6 バイオマス添加量とRf値との関係

表3にRf値とRs値の一覧を示す。バイオマス50%添加では瀝青炭Aと比較すると、Rf値は1.3～1.9倍前後になるのに対し、Rsは逆に0.6～0.7倍に低下する。

すなわち、従来のインデックスが適用できるとすると、バイオマスの添加によりファウリングは強くなるがスラッジングは逆に弱くなることになる。

(2) 膠着度とRfおよびRsとの関係

灰焼結試験で得られた灰の膠着度とRfおよびRsとの関係を図8、図9に示す。灰の膠着度はRfが大きくなるほど上がるのに対し、Rsが大きくなるほど下がることわかる。

Rsは式(2)で示すように燃料中のS分に比例するが、石炭中のS分の増加はFe成分がパイライト(FeS_2)として含まれることが多いため、S分の影響と言うよりFe成分の影響を評価するインデッ

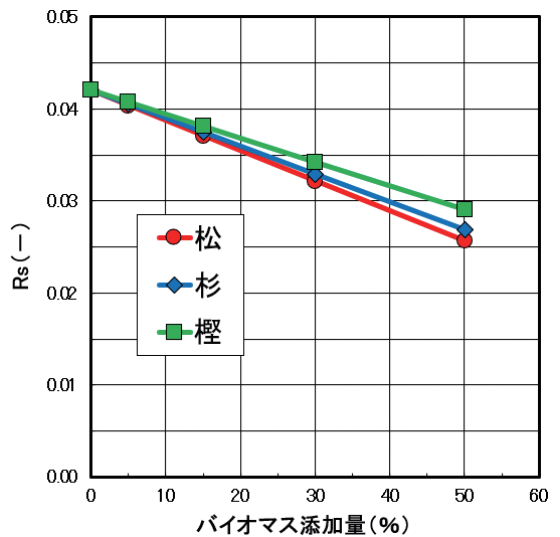


図7 バイオマス添加量とRs値との関係

表3 Rf値およびRs値

試料	Rf 値	Rs 値
瀝青炭 A	0.020	0.042
バイオマス 50%添加	0.025～0.038	0.025～0.030

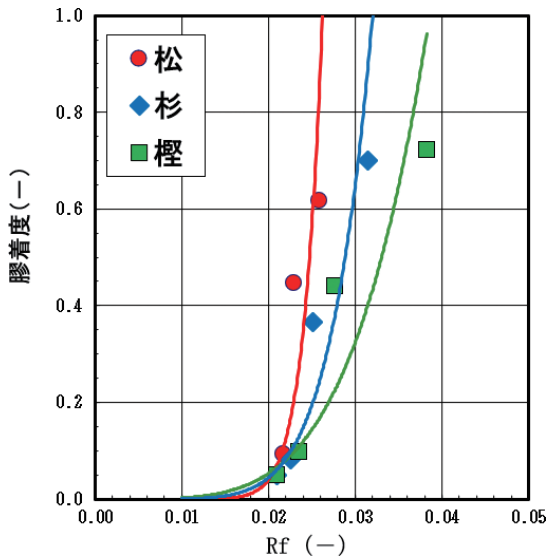


図8 膠着度と Rf 値との関係

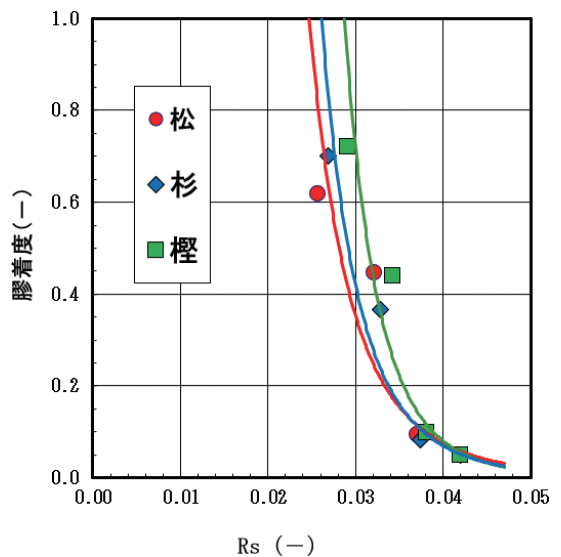


図9 膠着度と Rs 値との関係

クスである。石炭燃焼ボイラでは、ファウリングの主因子は灰中に含まれるアルカリ成分 (Na_2O 、 K_2O) である。木質系バイオマスは灰中に K_2O が特に多く含まれることから、ファウリングが強く懸念される。そのため、スラッキングインデックスでバイオマス混焼時の灰障害を予測するのは適切ではないと言える。

(3) バイオマスの種類による膠着度の差異

松、杉、檜との石炭混焼灰に比べて、稲わら、竹との石炭混焼灰で、膠着度に差異がみられた。これにはバイオマスの灰組成が大きくかかわっており、特に酸化カルシウム (CaO)、酸化マグネシウム (MgO) の存在が関与しているものと考えられる。一般的な石炭灰では、 CaO は CaSO_4 ($\text{CaO}+\text{SO}_3$)、 MgO は MgSO_4 ($\text{MgO}+\text{SO}_3$) の化合物形態をとることが多い。しかしバイオマスは灰中に SO_3 分が少ないことから、 CaO 、 MgO 単独で存在する可能性があり、この CaO (融点: $2,572^\circ\text{C}$)、 MgO (融点: $2,852^\circ\text{C}$) は高融点であることから灰の焼結を抑制したものと推察する。

バイオマスはその種類によって灰の組成が大きく異なり、バイオマスの種類と添加量によっては

灰障害を発生する懸念が十分あり、事前の調査・検討が必要となる。

3. まとめ

- (1) 木質系バイオマスを石炭に添加することにより灰の膠着度が上がることが確認された。しかも、その混焼量が増加するに従い、膠着度も上昇することがわかった。
- (2) 混焼灰の膠着度は、バイオマスの灰組成が影響するため、事前に灰組成を把握して、混焼量を定めることが必要である。
- (3) ファウリングインデックスと膠着度には相関がみられたが、スラッキングインデックスではみられなかった。しかし、ファウリングインデックスは、瀝青炭を対象とした予測評価法であるため、バイオマスを混焼した際の評価 (基準値) をそのまま利用するのは適切ではないと考える。
- (4) バイオマスを石炭と混焼した際に生じる灰の付着性を評価する上で、膠着度が効果的であることが確認でき、バイオマスの混焼量を予測するための一手法となると考える。

参考文献

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁資料：再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック、2018年度版
- (2) 毛利、茂田、鈴木、福島：微粉炭焚きボイラにおけるスラッシング予測指標の構築、火力原子力発電、Vol.56、No.1、2005、pp.26-31
- (3) 毛利、茂田、羽嶋、蔵田、山崎：スラッシング予測指標の実用化評価、火力原子力発電、Vol.59、No.7、2008、pp.11-17
- (4) 茂田、知恵：石炭焚ボイラにおける燃焼灰の付着挙動、IIC REVIEW、Vol.55、2016/04、pp.21-29
- (5) Skorupska：Coal specification-impact on power station performance, IEACR/52, 1993
- (6) 辻、日恵井、若林、白井：Formation Mechanisms, Evaluation Method and Research Perspective of Slagging and Fouling on Pulverized Coal Combustion、Journal of Japan Institute of Energy、89、2010、pp.893-902



フェロー
博士(学術)
環境計量士(濃度関係)

茂田 潤一

TEL. 03-6404-6615
FAX. 03-6404-6044



計測事業部 企画管理部
ソリューションエンジニアリング
グループ 課長 博士(理学)
環境計量士(濃度関係、騒音・振
動関係) 一般計量士

知恵賢二郎

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3541



計測事業部
化学・環境部

高野 卓

TEL. 045-791-3516
FAX. 045-791-3541



計測事業部
化学・環境部

長島 陽一

TEL. 045-791-3516
FAX. 045-791-3541