JIS 規格で規定する粉じん爆発試験手法の 微粉炭バーナ安定燃焼条件評価への応用

Evaluation of Flame Stability for Development of Pulverized Coal Fired Burners by Using a Japanese Industrial Standard Method (JIS Z8818; Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts)

谷口 正行^{a*}, 竹野 豊^b

Masayuki Taniguchi, Yutaka Takeno

Received 23 January 2013; Accepted 19 February 2013

In the present study, we used a Japanese industrial standard method (JIS Z8818; test method for minimum explosible concentration of combustible dusts) to examine ignition limit concentration. We examined the possibility to apply this JIS method to the evaluation of stable combustion conditions of pulverized coal fired burners. We evaluated flame stability by measuring the relationship between coal concentration and flame length obtained by using the JIS method. We defined the minimum coal concentration when the flame length became longer than a pre-set length as ignition limit concentration. Effects of coal properties, particle diameter, and, water content in coals on ignition limit concentration were investigated. The results obtained by the JIS method agreed with other fundamental experimental results and blow-off limit concentration obtained from a large-scale burner. As for the JIS standard method, the experimental equipment was cost-effective and it was relatively easy to operate. Application of the method provided quick estimation of flame stability of an actual burner.

Keywords: Coal combustion, Ignition, Explosion, Flame stability, Ignition limit concentration

1. 緒 言

燃料の着火性は、燃焼装置を設計する上で基本的な性能である。着火性能を評価する指標としては、可燃限界濃度（着火限界濃度）や燃焼速度（火炎伝播速度）がある。石炭粒子の着火性に関しては、小型バーナを用いて燃焼速度を測定した研究例^{1, 2)}、無重力場に浮遊させた微粉炭を着火させて火炎伝播速度（火炎

の成長速度）を測定した研究例³⁾、一列に並べた石炭粒子の一方を着火させ、隣の粒子に火炎が伝播するまでの時間を測定し、さらに、火炎の伝播が可能な最長の距離（火炎伝播距離）を測定した研究例⁴⁾などがある。我々はこれまでに、上向き気流中に浮遊した微粉炭にレーザを照射する方法により、種々の微粉炭の着火限界濃度と火炎伝播速度を測定した⁵⁾。この装置で得られた着火限界濃度と大型バーナ実験^{6, 7)}で得られた結果を比較し、燃料性状が着火限界濃度に与える影響に関して、基礎実験で得られた結果が大型バーナで得られた結果を再現することを示した⁷⁾。さらに、着火限界濃度と火炎伝播速度を予測するモデルを提案した⁸⁾。しかしながら、この装置には以下の欠点もあった。この装置では、上向き気流の流速と微粉炭の落下速度を釣り合わせることで、微粉炭を静止させる必要がある。このため、測定対象の微粉炭は粒子径を均一

粉体工学会第48回夏期シンポジウムにて一部発表

a 株式会社 日立製作所 日立研究所
(〒312-8507 茨城県ひたちなか市堀口832-2)
Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.
(832-2 Horiguchi Hitachinaka, Ibaraki 312-8507, Japan)

b バブコック日立株式会社 呉事業所
(〒737-8508 広島県呉市宝町6番9号)
Kure Division, Babcock Hitachi, K. K.
(6-9 Takara-cho Kure, Hiroshima 737-8508, Japan)

* 責任著者連絡先 Masayuki.taniguchi.xc@hitachi.com

にする必要がある。したがって、粒子径分布を持つ微粉炭の着火性能を実験で直接求めることが出来ない。均一径の粒子を得るには分級が必要であるが、その際に粒子を乾燥させる。このため、水分を含んだ微粉炭の着火性能を実験で直接求めることが出来ない。

粉体工業の分野では安全性の確保のために、粉じん爆発の限界濃度の測定が重要である。爆発限界濃度を測定する装置と規格もいくつか提案されている⁹⁾。JIS法で定められた規格¹⁰⁾「可燃性粉じんの爆発下限濃度測定方法；JIS Z8818」もそのひとつである。本研究では、このJIS法を微粉炭バーナの着火性の評価に応用した。

このJISに定められた爆発試験方法は、装置と実験方法の規格が定められているため、実験が容易であり、実験者の違いによる結果の差異も出にくい。また、粒子径分布を持つ微粉炭や水分を含む微粉炭の着火性能の評価も可能である。

本研究では、このJIS法を用いて、着火性能に与える石炭性状の影響、粒子径の影響、および微粉炭中に含まれる水分の影響を評価した。測定結果を大型バーナ実験で得られた結果、および他の基礎実験で得られた結果と比較し、本JIS法を微粉炭バーナの着火性評価に応用したときの適用性を評価した。

2. 実験装置および方法

2.1 レーザ着火実験装置

実験に使用したレーザ着火装置をFig. 1に示す。装置は、既報に示したものと同一である⁵⁾。装置の特徴は、層流の上向き気流中に浮遊させた微粉炭を、レーザにより急速に昇温し、実機に近い昇温速度が20000~100000 K/sの加熱条件下で着火させることである。装置の主要部分は、50 mm×50 mmの矩形のダ

Fig. 1 Structure of the laser ignition equipment

Fig. 2 Structure of the experimental equipment (JIS Z8818: test method for minimum explosible concentration of combustible dusts)

クトである。ダクトの中央部の約20 mm×20 mmの領域に微粉炭を浮遊させた。浮遊した微粉炭に、ビーム径が3 mmのパルスYAGレーザを照射して着火させた。着火した粒子の燃焼過程は、高速ビデオカメラ（シャッタースピード 10 μs, 1000コマ/s）で観測した。ビデオカメラでの観測結果から、パルスYAGレーザで直接加熱された微粉粒子から周囲の粒子へ火炎が移ったかどうかを判断し、火炎が移った場合、火炎が伝播したと判断した。火炎が伝播した場合には、火炎の成長速度から、火炎伝播速度を解析した⁵⁾。本装置では、反応セルを構成する石英ガラスの温度は常温であった。一方、実機ボイラでは炉壁温度が数百度であり、炉壁と火炎からの放射加熱を受けた状態で微粉粒子は着火する。炉壁からの放射加熱を模擬するため、15 Wの連続レーザで粒子群を加熱する光学系を設置した。着火位置での連続レーザのビーム径は15 mmであった。

2.2 粉じん爆発実験装置

粉じん爆発試験装置の構成をFig. 2に示す。装置構造と実験方法の詳細はJISマニュアル（JIS Z8818）に記載されている¹⁰⁾。着火部本体は円筒のガラス製で、内径が70 mm、内容積が1200 cm³である。着火部の下部から供給する空気ジェットにより粉体を吹き上げ、着火部容器内に粉体を分散させた後、電気放電により着火させる。放電の標準仕様は、電圧が15 kV、電流が20 mA、放電時間が0.5 sであり、このときの放電エネルギーは150 Jである。このエネルギーは静電気火花のエネルギーよりもかなり大きい。装置の内部で何らかの理由により火種が発生したときに、火種から延焼して爆発に到るかどうかを評価する。着火用の空気はボンベから供給して、いったん、ガス溜めに溜める。電磁バルブを開放することによりこの空気を

ジェットとして着火部へ噴射する。噴射圧力はゲージ圧で0.1MPaである。噴射する空気の温度は室温(24℃～32℃)である。

粉じんが爆発性もつ場合には、点火栓の位置から上方に向かって火炎が伝播する。点火栓の100mm上方に爆発判定ラインが設けられている。火炎がこのラインより上に伸びたとき、爆発したと判定する。着火部の上部は紙で覆われており、着火装置の外部から内部に向かってガスが流入することはない。紙の一部にはガス抜きが設けられており、着火部内部の圧力が上昇した場合には、内部から外部に向かってガスが流出する。

実験は、粉体濃度が0.2kg/m³の条件から開始する。爆発が生じたときは濃度を下げ、生じないときは濃度を上げて実験を繰り返す。爆発が生じない最大濃度を粉じん爆発下限濃度と定義する。爆発が生じたか否かは、同一濃度で複数回の実験を実施して判定する。粉じんの濃度は、投入した粉体質量を着火部の内容積で割った値である。

JIS規格では、乾燥した粉体と乾燥空気を使用することが推奨されているが、今回の目的のひとつは微粉炭中の含有水分量の影響評価なので、空気に水分を混入する機器を追設した。Fig. 2の混合器の下部に水を溜め、乾燥空気をバブリングすることで水分を供給した。この方法で、空気中の相対湿度を60%程度まで高められた。供給する水分が不足した場合には、酸素濃度が同一になるように空気に二酸化炭素を混合することで模擬した。

3. 実験結果および考察

3. 1 火炎伝播速度

レーザ着火実験で得られた火炎形状の例をFig. 3に示す。図中の時間は、レーザ照射を開始してから時間である。レーザ照射直後に、小さな楕円形の火炎が形成される。粒子群の濃度が可燃範囲内であれば、その火炎が成長した。火炎が成長するとき、火炎半径の増加速度を火炎伝播速度と定義した。得られた火炎写真から投影面積を計算し、同じ面積となる円の半径

Fig. 3 Examples of flame shape obtained with the laser ignition equipment

Fig. 4 Relationship between coal concentration and flame propagation velocity

を火炎半径と定義した。

Fig. 4は、実験結果の例であり、高揮発分瀝青炭(hv-bituminous)、低揮発分瀝青炭(lv-bituminous)、および無煙炭(anthracite)を対象に測定した、微粉炭の濃度と火炎伝播速度の関係である。図中の記号は実験結果でありラインは計算結果である。計算方法の詳細は既報⁸⁾に示した。2個の粒子の一方を着火させたとき、着火させた粒子から隣の粒子へ火炎が伝播するまでの時間を実験式により計算した。粒子間の距離を火炎が伝播する時間で割った値を火炎伝播速度と定義した。一般的に、粒子濃度が増加すると火炎伝播速度が大きくなった。ただし、火炎伝播速度の絶対値は石炭性状や粒子径により変化した。計算結果はこの実験結果の特徴を再現した。使用した石炭の分析結果はTable 1に示した。

バーナでの着火性能を評価する際には、まず、実験または計算によりバーナの出口近傍でのガス組成と粒

Table 1 Analysis of tested coals

Coal	Volatile matter [mass%, dry]	Ash [mass%, dry]	C	H	O	N	S
hv-bituminous	27.8	12.2	83.1	4.6	9.9	1.9	0.5
lv-bituminous	13.7	23.9	88.6	3.9	5.3	1.6	0.6
anthracite	7.7	15.7	96.6	1.2	1.5	0.6	0.1

Fig. 5 Photos of flame obtained with the JIS Z 8812 method

子濃度の分布を評価する。この結果に基づき火炎伝播速度の分布を計算する。計算された火炎伝播速度の値から、バーナ出口近傍での着火性能を判定する¹¹⁾。

着火性能の予測精度を高めるためには、多くの石炭についての実験データベースを得ることが重要である。ただし、Fig. 1の手法は、実験にあたっては石炭の分級が必要であり、実験が必ずしも容易ではない。実機で使用する実粉体を用いて容易に実験できる手法も望まれるため、JIS規格の粉じん爆発試験手法¹⁰⁾の応用をさらに試みた。

3. 2 粉じん爆発実験結果と他手法で得られた結果との比較

粉じん爆発実験で得られた火炎写真の例をFig. 5に示す。Fig. 5 (a)は、(一社)日本粉体工業技術協会 (APPIE) の標準粉体 (石松子) の着火と爆発の過程である。一般には、この粉体の爆発状態と対象粉体の爆発性の比較から、対象粉体の着火、爆発性が評価される。

Fig. 5 (b)は乾燥褐炭の着火と爆発の過程である。石松子と比べると着火、爆発性が劣るが、火炎の先端が爆発判定ライン (Explosion line) を超えており、この条件で乾燥褐炭は爆発した。Fig. 5 (c) と (d) は、乾燥瀝青炭の着火と爆発の過程である。石炭中に含まれる揮発分割合は、(c)の瀝青炭の値は(d)の瀝青炭の値より大きかった。瀝青炭の着火、爆発性は褐炭より劣った。Fig. 5 (c) と (d) を比べると (d) の火炎の成長は (c) よりも遅い。(c) では火炎の先端が爆発判

Fig. 6 Relationship between coal concentration and maximum flame length (symbols), and relationship between coal concentration and flame propagation velocity (lines) for various coals
Symbols are experimental results and lines are calculated results.

定ラインを超えており、爆発した。一方、(d)では火炎の先端が爆発判定ラインを超えず、爆発しなかった。瀝青炭の種類により着火、爆発性が異なった。一般的には、石炭中に含まれる揮発分割合が少なくなると着火、爆発性が劣る。

JISの定義に従うと、(d)の瀝青炭は爆発しない。ただ、この瀝青炭は石炭火力プラントで実際に使用されている。JISの定義は爆発に関するものであり、微粉炭バーナの着火性を評価するためには、若干の工夫が必要となる。(d)の瀝青炭でも、放電により形成された火炎が上方に向かって成長していたため、ある程度の着火性能は有する。本研究では火炎の長さの最大値を最大火炎長 (Maximum flame length) と定義した。最大火炎長の大小関係から着火性の良否を判断した。石炭火力プラントで実際に使用されている微粉炭では最大火炎長は少なくとも50mm以上であったため、点火位置から50mm上方に着火判定ライン (Ignition line) を設けた。火炎の先端が着火判定ラインを超えた場合には着火したと定義した。これに従うと、Fig. 5 (d) の条件では粉体は爆発しなかったが、着火したと定義される。

石炭の種類を変えて、微粉炭濃度と最大火炎長の関係を測定した。結果の例をFig. 6に示す。Fig. 6の記号は最大火炎長の測定結果である。最大火炎長の絶対値は石炭種により異なったが、いずれの場合にも、石炭濃度が高くなると最大火炎長が長くなる結果が得られた。本装置で点火位置から上方に向かって火炎が成

Fig. 7 Relationship between volatile matter content in coals and ignition limit concentration obtained with various experimental methods
 ● This study (JIS Z8818)
 □ Large scale burner^{6,7)}
 △ Laser ignition experiment⁵⁾
 ▲ Obtained from flame propagation distance measurement by Gieras et al⁴⁾

長する際には、火炎の伝播現象が生じていると考えた。最大火炎長が長くなるときには火炎の伝播が生じやすくなっていると考え、最大火炎長と火炎伝播速度の関連性を考察した。

Fig. 6 のラインは火炎伝播速度の計算結果である。Fig. 4 の計算と同じ方法により火炎伝播速度を計算し、相対値で示した。最大火炎長と火炎伝播速度の間には相関がみられ、最大火炎長が大きいときには火炎伝播速度も大きいと判断できる。この結果から、最大火炎長を測定することで、定性的には着火性の良否を判断できる。

最大火炎長が着火判定ラインを超える最小の微粉炭濃度を着火限界濃度と定義した。この定義で得られた着火限界濃度と他の装置、手法で得られた着火限界濃度（可燃限界濃度、または、吹き消え限界濃度）とを比較した。

Fig. 7 は微粉炭中の揮発分含有率と着火限界濃度との関係である。本実験で得られた結果を、レーザ着火実験で得られた結果⁵⁾、および大型バーナ実験で得られた吹き消え限界濃度^{6,7)}、および他の研究者の実験結果⁴⁾と比較した。この比較結果から、本研究で提案した着火限界濃度の定義の妥当性を検証した。大型バーナ実験では、実機と同寸法のバーナー基を用いて、安定に火炎が形成できる下限の微粉炭供給量と搬送空気量の比を求めた⁶⁾。揮発分含有率が大きくなると着火限界濃度は減少した。このときの変化の傾向は、4 種の実験で一致した。

Fig. 8 Effect of particle diameter on ignition limit concentration
 ● ignition limit concentration obtained from the JIS Z 8812 method
 □ blow-off limit concentration obtained from a large scale burner

Fig. 8 は、微粉炭の粒子径と着火限界濃度の関係である。大型バーナでの実験では、粒子径を細かくすることで着火限界濃度は低くなった。JIS 規格の粉じん爆発実験でも、この傾向を再現できた。

Fig. 7 および Fig. 8 の結果から、本研究で提案した着火限界濃度の定義は妥当であり、定性的には、JIS 規格の粉じん爆発実験で得られた結果から大型バーナでの吹き消え限界濃度を予測できることがわかった。

3. 3 着火性能に与える水分の影響

近年、褐炭などの低品位炭の利用が拡大しつつある¹²⁾。褐炭は瀝青炭に比べ水素含有率が多いため、同一の効率であれば CO₂ 発生量は瀝青炭のそれよりも少なくなる。ただし、多くの褐炭では水分含有率が多いという欠点もある¹²⁾。石炭中に水分が含まれると、着火性能が低下しやすい。本節では、褐炭中に含まれる水分が着火性能に与える影響を検討した。含水炭の水分含有率は JIS 法で測定した。水分含有率は、微粉炭中に含まれる水分質量を、乾燥炭質量と水分質量の和で割った値で示した。

Fig. 9 は、乾燥褐炭と含水褐炭の着火状態を比較した結果である。Fig. 9 (a) と (d) は乾燥褐炭であり、(b) と (c) は含水褐炭である。(c) と (d) には空气中に CO₂ を混入した。この CO₂ は褐炭中に含まれていた水が蒸発したときに発生する水蒸気を模擬した。Fig. 9 (a) と (b), (c), および (d) との比較から、含水褐炭では着火性能が低下することがわかる。

(b), (c), および (d) では、褐炭中の含水率が異

Fig. 9 Ignition performances of a lignite including water or not
Coal concentration was around 0.4 kg-dry coal/
m³-dry air

なる。含水率の高い褐炭(b)では空気中に CO₂ を混入させていないが、含水率の低い褐炭、(c) および (d)、では空気中に CO₂ を混入させた。微粉炭火力プラントの粉碎機で石炭を微粒化する際には、石炭中に含まれる水分の一部が蒸発する。ただし、蒸発水は系外には放出されず燃焼用空気中に含まれる。石炭中水分の蒸発率は、粉碎機の運転条件により変化する。(b)、(c)、および (d) の実験は、この蒸発率の違いを模擬した。石炭中に含まれる水分モル数と空気中に混入した CO₂ モル数の総和は、(b)、(c)、および (d) の実験ではほぼ同じである。

(b)、(c)、および (d) の着火状態には大きな差異が見られなかった。石炭中に水分が含まれると着火性能は低下した。ただし、水分含有の状態、すなわち、微粉炭中に水分が残留しているか、あるいは、水分が蒸発して空気中に含まれるか、による差異は小さかった。

(c) および (d) の実験条件について微粉炭濃度と最大火炎長の関係を測定し、さらに詳しく考察した。結果を **Fig. 10** に示す。図の横軸の微粉炭濃度は、乾燥状態での微粉炭の質量と乾燥状態での空気の体積との比で示した。微粉炭中に含まれる水分と空気中に混入した CO₂ は、濃度の評価に加えなかった。(i) は、微粉炭中に残留する水分は少ないが、空気中に混入した CO₂ 量が多い場合であり、(ii) は、微粉炭中に残留する水分は多いが、空気中に混入した CO₂ 量が少ない

Fig. 10 Relationships between coal concentration and maximum flame length

- (i) coal containing less water (2 mass%) and air containing much CO₂ [15 vol%]
- (ii) coal containing much water [15 mass%] and air containing less CO₂ [8 vol%], adiabatic flame temperatures were the same for both conditions.

場合である。両者の理論燃焼温度が等しくなるように、CO₂ の混入量を決めた。

微粉炭濃度が同じであれば、(i) と (ii) の最大火炎長はほぼ同じであった。石炭中に水分が含まれると理論燃焼温度が低くなるため着火性能が低下する。ただし、理論燃焼温度が等しければ、微粉炭中に残留する水分の大小の影響は小さかった。

石炭中に含まれる水分が着火性能に悪影響を与える要因としては、主に以下の3点が考えられる。

- (1) 水分の混入により、燃焼温度が低下する。
- (2) 石炭中水分が蒸発して空気中に混入することにより、酸素濃度が低下し、さらに燃焼温度が低下する。
- (3) 微粉炭中に残留する水分の蒸発に時間を要することにより、着火の開始が遅れる。

本研究の結果では、(3) の要因の影響は小さかった。水分が着火性に与える影響としては、(1) または (2) が支配的と考える。

微粉炭火力プラントでは、粉碎機的设计条件や運用条件の工夫により粉碎機内での石炭中水分の蒸発率を変化させることはできる。ただし、この蒸発率の差異は、バーナでの着火性能の向上にさほど寄与しない。

むしろ、着火性を向上させる他の要因、微粒化や微粉炭濃度の増加に重点を置き設計するのが良い。

4. 結 言

- (1) JIS規格の粉じん爆発試験手法を微粉炭バーナの安定燃焼条件の評価へ応用する可能性を検討した。実験時に得られる火炎を撮影して火炎長を評価することより、バーナでの安定燃焼条件を評価できる見通しが得られた。
- (2) 褐炭中に含まれる水分が着火性能に及ぼす影響を

検討した。水分が含まれることにより着火性能は低下した。ただし、水分含有の状態、すなわち、微粉炭中に水分が残留しているか、あるいは、水分が蒸発して空気中に含まれるか、による差異は小さかった。石炭中に含まれる水分が着火性能に悪影響を与える要因としては、水分の混入により燃焼温度が低下することと、石炭中水分が蒸発して空気中に混入することにより酸素濃度が低下することが支配的と考える。

References

- 1) Smoot, L. D. and M. D. Horton : "Propagation of laminar pulverized coal-air flames", *Prog. Energy Combust. Sci.*, **3**, 235-258 (1977)
- 2) Krazinski, J. L., R. O. Buckius and H. Krier : "Coal dust flames: A review and development of a model for flame propagation", *Prog. Energy Combust. Sci.*, **5**, 31-71 (1979)
- 3) Suda, T., K. Masuko, J. Sato, A. Yamamoto and K. Okazaki : "Effect of carbon dioxide on flame propagation of pulverized coal clouds in CO₂/O₂ combustion", *Fuel*, **86**, 2008-2015 (2007)
- 4) Gieras, M., R. Klemens and S. Wójcicki : "Ignition and combustion of coal particles at zero gravity", *Acta Astronautica*, **12**, 573-579 (1985)
- 5) Taniguchi, M., H. Kobayashi and S. Azuhata : "Laser ignition and flame propagation of pulverized coal dust clouds", *Proc. Combust. Inst.*, **26**, 3189-3195 (1996)
- 6) Kiyama, K., T. Tsumura, N. Sei, M. Taniguchi and S. Nomura : "Combustion Technologies for High Fuel Ratio Coals", *Proc., International Conference on Power Engineering-97*, Vol. 2, Tokyo, Japan, 507-512 (1997)
- 7) Taniguchi, M., H. Kobayashi K. Kiyama and Y. Shimogori : "Comparison of flame propagation properties of petroleum coke and coals of different rank", *Fuel*, **88**, 1478-1484 (2009)
- 8) Taniguchi, M., T. Shibata and H. Kobayashi : "Prediction of lean flammability limit and flame propagation velocity for oxy-fuel fired pulverized coal combustion", *Proc. Combust. Inst.*, **33**, 3391-3398 (2011)
- 9) Cashdollar, K. L. : "Coal dust explosibility", *J. Loss Prevention in the Process Industries*, **9**, 65-76 (1996)
- 10) JIS Z 8818 : "Test method for minimum explosible concentration of combustible dusts", (2002)
- 11) Taniguchi, M., K. Yamamoto, T. Okazaki, S. Rehfeldt and C. Kuhr : "Application of lean flammability limit study and large eddy simulation to burner development for an oxy-fuel combustion system", *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **58**, S111-S119 (2011)
- 12) Tian, Z. F., P. Witt, P. Schwarz and W. Yang : "Combustion of pre-dried brown coal in a tangentially-fired furnace under different operating conditions", *Energy & Fuels*, **26**, 1044-1053 (2012)