

層流炉における単一微粉炭粒子燃焼の直接観察

有山 達郎*・山川 裕一*・佐藤 道貴*

Direct Observation of a Single Coal Particle Combustion in a Laminar Flow Furnace

Tatsuro ARIYAMA, Yu-ichi YAMAKAWA and Michitaka SATO

Synopsis : The experiment on a single coal particle combustion was carried out with a laminar flow furnace to clarify the fundamental combustion mechanism of pulverized coal particles injected into the blast furnace. High speed camera was used to observe the coal particle combustion, and the temperature distribution nearby the coal particle was estimated by the image analyzer. A flame sheet around the particle due to the combustion of volatile matter was observed after the ignition, and it was found that the radius of flame was dependent on the oxygen concentration and coal type. On the basis of these results, it was estimated that the location of the flame sheet of coal particle influenced on the combustion rate through the heat supply from the combustion flame of volatile matter. Moreover, in the case of massive coal injection in a blast furnace, the dispersion of coal particles and the oxygen content nearby the coal particles were considered to be significant on the combustion rate.

Key words : blast furnace ; pulverized coal injection ; single coal particle ; combustion ; direct observation ; image analyzer ; laminar flow furnace.

1. 緒言

近年、高炉において微粉炭吹き込みが普及し、吹き込み量が 200kg/t に近い多量吹き込みも達成されつつある¹⁾²⁾。しかし炉頂ダスト中未燃ダストの増大など微粉炭吹き込みの限界に関わる問題も顕在化しつつあり³⁾、今後の研究課題も多い。微粉炭の燃焼挙動についてはホットモデルによる炉外燃焼実験、数式シミュレーションなどにより⁴⁾⁵⁾、巨視的な燃焼挙動の解明は進んでいるが、今後、さらに多量吹き込みなどを旨とする上で、高温場における微粉炭燃焼の基礎的な理解に基づいた理論構築が必要と思われる。このような観点から、本研究では微粉炭燃焼を解析する上で基礎となる微粉炭単一粒子の燃焼挙動に着目した。既に沈ら⁶⁾屈ら⁷⁾により単一粒子の燃焼挙動の観察が、室温下の条件でレーザー光加熱の手法によってなされているが、本研究では層流炉により高炉の熱風温度とほぼ同じ温度条件の雰囲気中に微粉炭粒子を落下させ、高炉への微粉炭吹き込みに近い急速加熱場における燃焼挙動を高速度カメラによって直接観察した。その結果、単一粒子燃焼の経時変化とともに、酸素濃度、炭種の影響による単一粒子の燃焼機構の変化などが明らかになり、今後、微粉炭多量吹き込みの研究を進展させる上で、重要な結論が得られたので報告する。

2. 実験装置

Fig. 1 に実験装置を示す。電気加熱式の層流炉であり、上

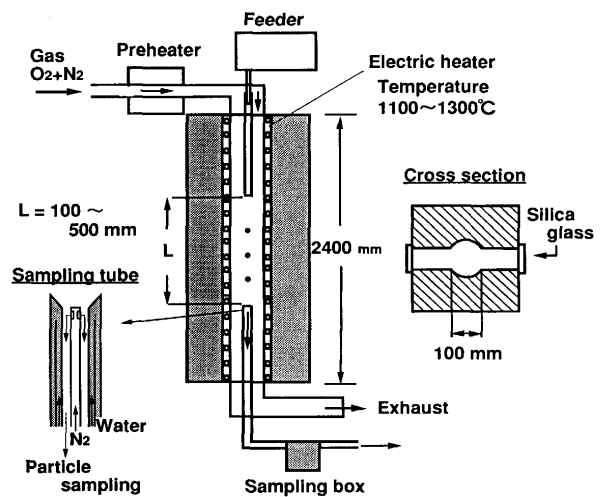


Fig. 1. Schematic representation of experimental apparatus.

方から予熱器を経由して炉内にガスが供給される。同時に微粉炭粒子を上部のフィーダーより微量ずつ連続的に切り出し、水冷された供給管を経て、炉内に落下させる。そして所定の位置に設置された水冷の粒子採取管により下方から燃焼過程の微粉炭粒子は吸引される。ここで、燃焼粒子を採取後、ただちに燃焼が停止するように水冷の粒子採取管先端から N_2 を供給し、微粉炭粒子とともに吸引し、下流部に設けたフィルターで回収した。層流炉内部のガス通過部内径は $\phi 100\text{mm}$ である。粒子供給管と採取管の距離(L)は $100\sim 500\text{mm}$ と変更可能である。なお、この炉の特徴として高さ方向にガラススリットを設け、両面の石英ガラスを

通して、燃焼過程の微粉炭粒子の直接観察を可能にした。両面に石英ガラスを設けたのは直接観察および2色温度計による粒子温度測定時に、背面の熱輻射の影響を避けるためである。またヒータを高さ方向に3分割して、独立して温度制御を行い、炉内が軸方向で等温(±5°Cの範囲)になるようにした。

3. 実験方法および実験条件

前述の方法で微粉炭粒子を連続的に上方から炉内に落下させた。その際の測定、観察の手法をFig. 2に示す。まず、高速応答の2色温度計(応答時間0.5ms, 測定波長0.85, 1.0 μm)の受光部を所定の位置に約10秒間固定して、燃焼中の微粉炭粒子の温度を測定した。この際、複数の粒子通過時の温度出力を記録計で捉え、その応答のピーク値の平均値を各位置における代表測定値とした。次に16mm高速度カメラにより燃焼粒子を撮影し、現像後のフィルム上の画像を光学的に拡大して燃焼中の同一の単一粒子の燃焼画像を求めた。また同一の光学系で1200~2200°Cの黒体炉の撮影を行い、両者の輝度の比較により撮影された燃焼過程の粒子の温度を推定した。この一連の操作は画像解析機を用いて行ったが、フィルム上の輝度を255等分して、その輝度分布を求めた。16mm高速度カメラの撮影速度は5000fpsで、一画面の露光時間は0.02msである。なお、燃焼率は採取した微粉炭粒子の灰分量を分析し、灰分基準の可燃分消費量として定義して求めた。

実験条件をTable 1に示す。炉内雰囲気温度は1200°Cとし、ガス流速は4 m/sに設定した。ガス流速は高炉羽口部の条件と異なり低い、流れの影響を抑制し燃焼挙動観察を容易にするためにこの条件を設定した。また、微粉炭の供給量は粒子毎の干渉を防ぎ単一粒子としての観察を可能にするため30g/hと微小にした。粒度は通常、高炉の微粉炭吹き込みで用いられているものに近いが、解析のために予め44~63 μmに篩ったものを用いた。本研究では、Table 1に示すような酸素濃度の条件を設定した。また微粉炭の炭種は実際に高炉の微粉炭吹き込みに用いられているA, Cの他

Table 1. Experimental conditions.

Temperature	1200°C
Gas velocity	4m/s
Oxygen content	7,15,21,25%
Feed rate	30g/h
Particle diameter	44~63 μm
Sampling point	100~500mm

Table 2. Properties of coal particles.

	Proximate analysis (dry base,%)			Ultimate analysis (dry base,%)				
	VM	FC	Ash	C	H	S	N	O
A	33.3	59.3	7.4	76.8	4.7	0.6	1.9	8.7
B	25.8	65.3	8.8	79.3	4.4	0.4	1.9	5.2
C	42.3	54.3	3.4	76.8	5.7	0.4	1.6	12.2

に比較用に低揮発分炭Bの3種を使用した。Table 2に各炭種の工業分析値、元素分析値を示す。

4. 単一粒子の基本的な燃焼挙動

前述の手法で撮影した単一粒子の連続画像と2色温度計による粒子温度測定結果をFig. 3に示す。炭種はA炭で、酸素濃度は15%である。本写真は着火直後を基準とし、以降の0.6ms,あるいは1.0ms毎の同一粒子の連続写真を示す。本写真は、画像解析処理されたもので、黄色の部分は1500°C前後、赤色部は1400°C付近の温度域を示す。この写真からわかるように着火後、粒子の周囲には黄色の高温温度域で表示される火炎が急速に成長する。微粉炭は高温気流中で急速加熱され、熱分解により生じた揮発分を粒子周囲に放出し、着火、燃焼を開始するが、粒子表面から離れた位置にその燃焼火炎面が形成される。その火炎面内では燃料過剰で酸素不足雰囲気になり、炭化水素の熱分解によるススが発光し、このような輝炎が観察されたと推測される⁸⁾。また粒子画像で見る限り、これら急速加熱場においても粒子の分裂はない。そして着火後、約4 ms以上経過すると徐々に火炎径は減衰する。

次にFig. 3の右に2色温度計による温度計測値の例を示

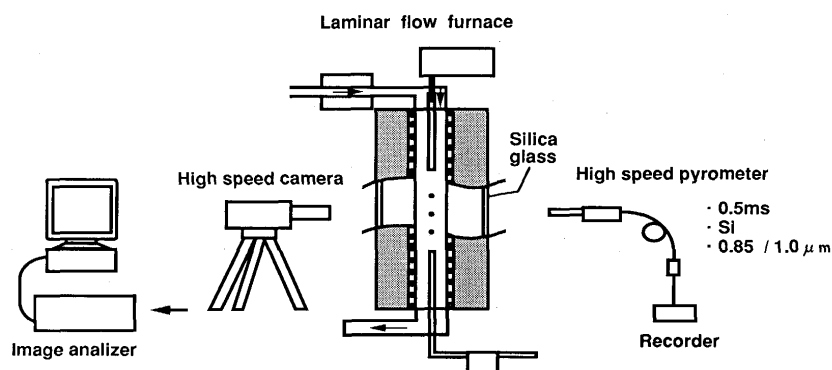


Fig. 2. Laminar flow furnace and measuring device.

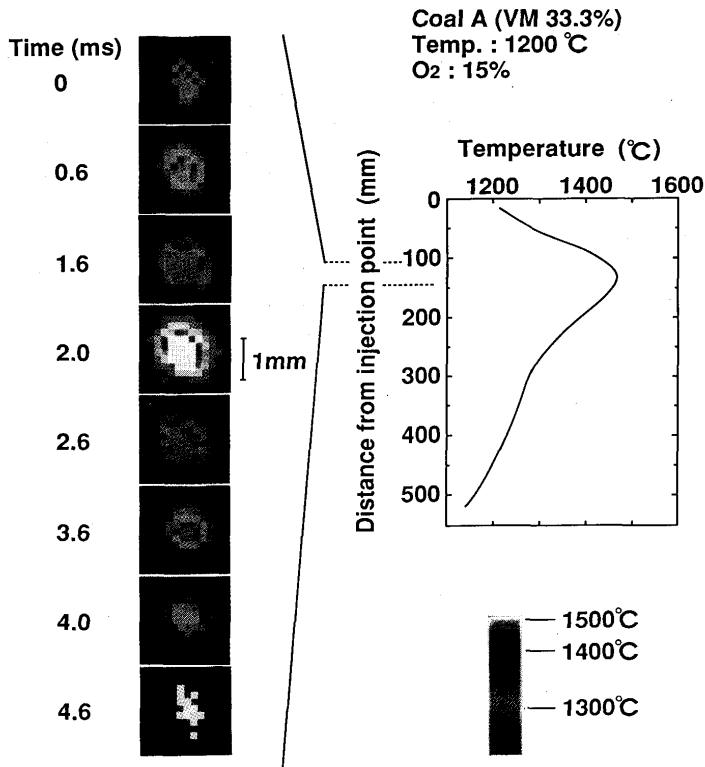


Fig. 3. Observation of burning behavior and temperature change of coal particle.

す。この値は前述の粒子周囲の火炎の温度を測定しているものと考えられる。ただし、写真観察による粒子の温度推移は短時間に急変化するが、2色温度計による測定値の動きはやや緩慢である。これは固定された位置で測定された2色温度計の値は複数の重複した粒子温度を測定し、結果的に各粒子温度推移が平均化されたためによると思われる。しかし、2色温度計の測定値は前述の直接観察に見られる輝炎の生成による粒子周囲の温度変化と傾向は一致する。すなわち、粒子温度は着火後、揮発分の急速燃焼により急上昇するが、その後、チャーの燃焼域に移行するとともに雰囲気温度に近くなる。

5. 炭種の影響

5・1 炭種変更時の粒子温度と燃焼率変化

炭種を変更した場合の粒子温度変化をFig. 4に示す。揮発分の最も高い炭種Cの場合、供給管より50~100mm付近で最高温度に達している。炭種B使用時には150~200mm付近と揮発分量によって温度推移が異なる。また、燃焼率変化をFig. 5に示す。本図からわかるように、燃焼率は揮発分量の大きい炭種ほど炉内投入後、速やかに大になり、その後は距離方向に対しその上昇は緩慢になる。前半の揮発分燃焼時には火炎温度が急上昇し、その放散熱により微粉炭熱分解が加速されるため、燃焼率が温度の動きに対応して変化していると推測される。また、燃焼前半の燃焼率上昇の

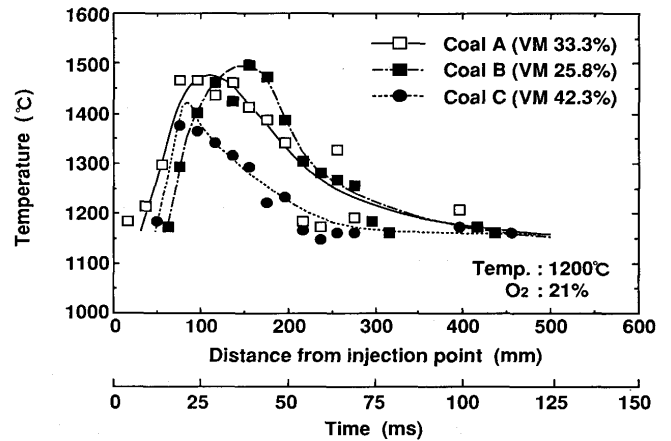


Fig. 4. Influence of coal brand on coal particle temperature measured by pyrometer.

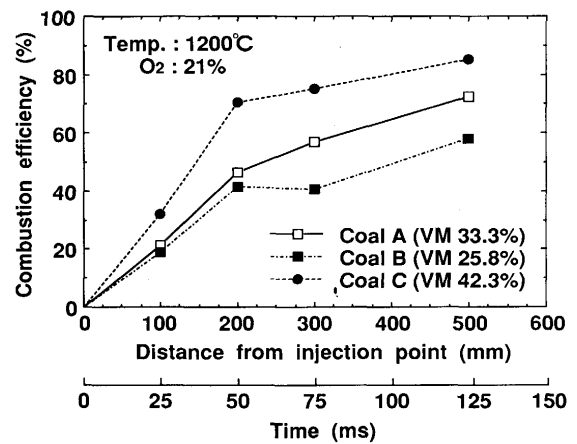


Fig. 5. Influence of coal brand on combustion efficiency.

割合は工業分析値の揮発分量より大きい値を示しているが、いわゆる急速加熱場の条件による揮発分発生量の増大⁹⁾、また部分的にチャー燃焼が同時に生じているものと考えられる。

5・2 直接観察による燃焼挙動

各炭種の高速度カメラによる単一粒子の燃焼挙動直接観察結果をFig. 6に示す。いずれの写真もFig. 3と同様に同一の粒子を対象に着火後の瞬間を基準に以降、1ms毎に経時変化を示したものである。揮発分の高いC炭の場合、粒子温度変化と対応して、着火後、短時間に火炎は消失し、チャーの燃焼に移行しているのがわかる。また、ここで火炎の大きさに注目すると、いずれの粒子も着火後、火炎径は成長し、2~3ms後に最大になっているが、揮発分の低い微粉炭になる程、火炎径が大きく成長している。例えば、B炭では火炎の直径は約1mmにまで成長している。

ここで火炎径の変化に対し、高温場における微粉炭粒子の熱分解に伴う膨張の影響が考えられる。そこで、供給管直後と、200mm位置で採取した粒子の粒度分布をマイクロ

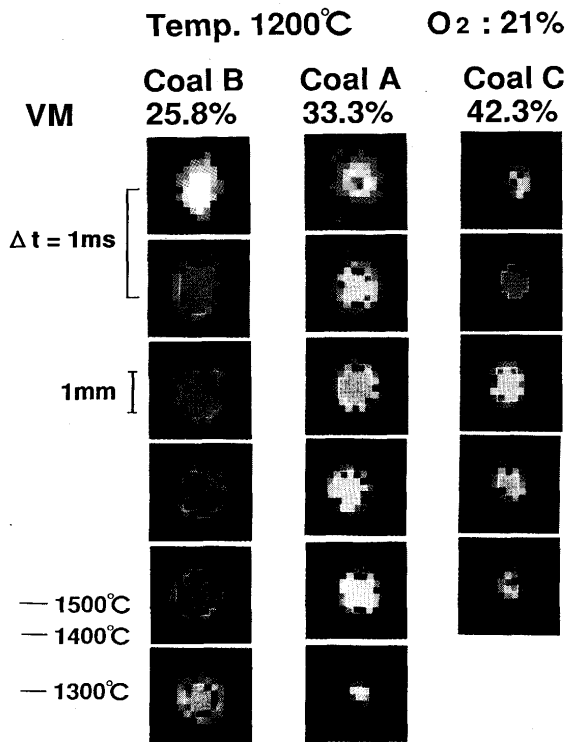


Fig. 6. Observation of burning behavior of coal particles.

トラックで測定した。その結果をFig. 7に示す。本図でわかるようにB炭に若干、粒度が増大する傾向が認められるものの、特に粒子の膨張に関して炭種による差は見られない。また、粒子分裂による大きな粒度変化も生じていない。よって、Fig. 6の火炎径の炭種による相違は燃焼粒子の粒度変化ではなく、各炭種による揮発分燃焼の特性によるものと判断される。

6. 酸素濃度の影響

6.1 酸素濃度の粒子温度、燃焼率への影響

A炭を用い、酸素濃度を変更して粒子温度変化を測定した結果をFig. 8に示す。酸素濃度が大きくなるにつれて、最高温度は上昇し、その出現位置も上流側に移る。また、直接観察結果によると、着火位置も酸素濃度の増加とともに上流側に移行する。特に酸素濃度25%の場合、移行の度合いが大きいのが認められた。

次に供給管から200, 300mm位置において粒子採取を行い、燃焼率測定を行った。Fig. 9に酸素濃度と燃焼率との関係を示す。酸素濃度の増加により全体的に燃焼率は上昇する傾向が認められる。ここで、酸素濃度25%のケースは燃焼率向上の効果がやや大きいのが、直接観察の結果のように早期着火の効果も加わったためと推測される。

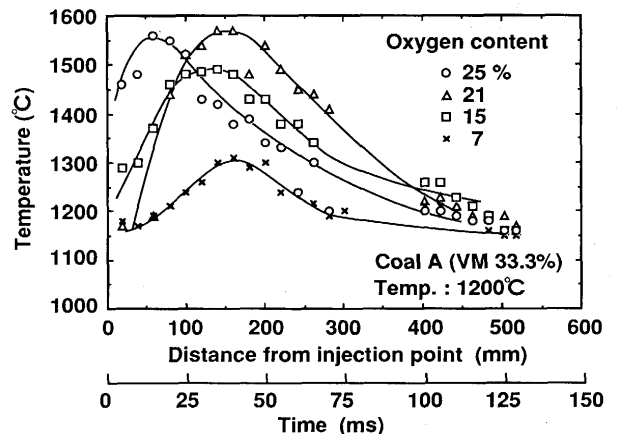


Fig. 8. Influence of oxygen content on temperature change of coal particles measured by pyrometer.

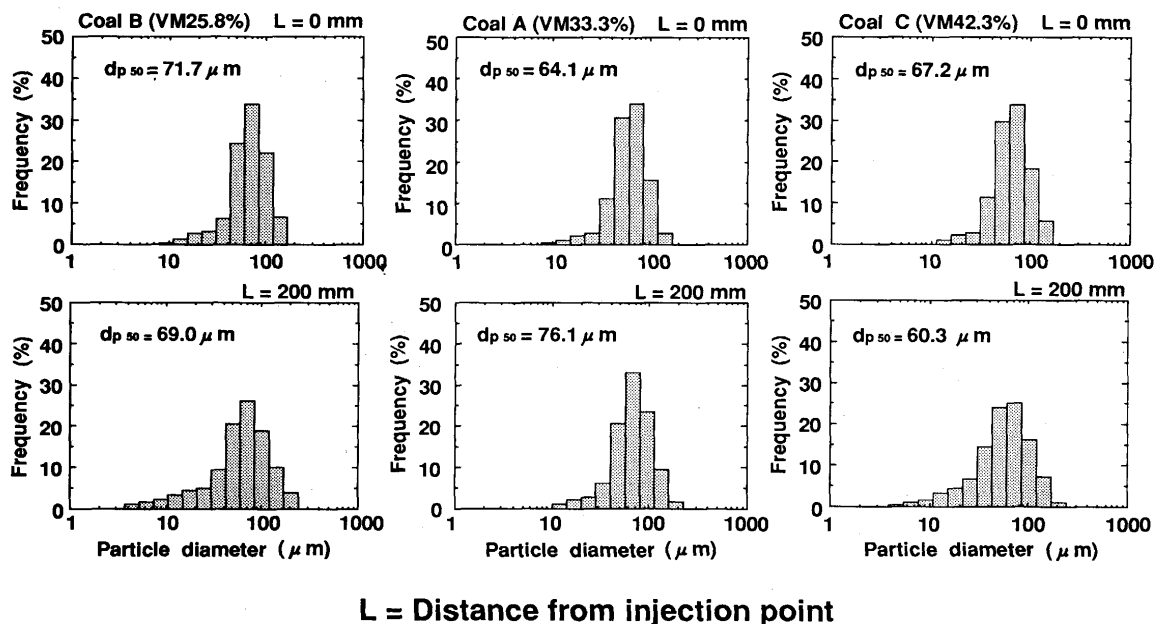


Fig. 7. Change in coal particle size distribution.

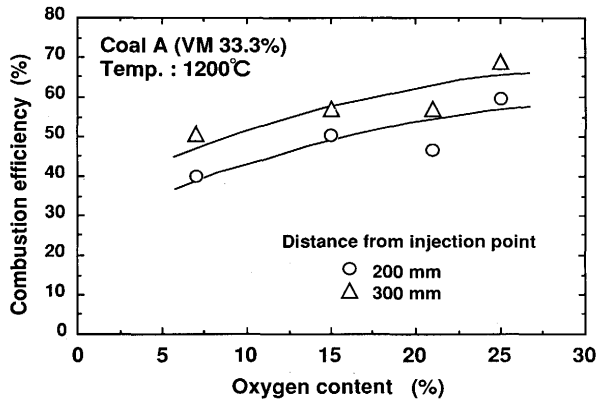


Fig. 9. Influence of oxygen content on combustion efficiency.

6・2 直接観察による酸素濃度の影響

高速度カメラによる単一粒子の燃焼挙動直接観察を行った。一連の高速度写真と同様に着火瞬間を基準に以降、同一粒子の1 ms毎の経過をFig.10に示す。酸素濃度7%の場合は、Fig. 8の結果に示す粒子温度が低いため、他の場合のように鮮明な画像が得られなかったが、酸素濃度が15, 21, 25%と増加するにつれて着火後、速やかに火炎は生成し、急速に消失する。15%の場合に火炎が長く持続されているのがわかる。また、その火炎径に注目すると、画像のやや不鮮明な酸素濃度7%を除き、酸素濃度が15%の場合に最も火炎径は肥大化する。酸素濃度の増大とともに火炎径は大きく成長せず、相対的に小さいままチャーの燃焼に移行している。ただし、Fig. 9の燃焼率変化からわかるように、

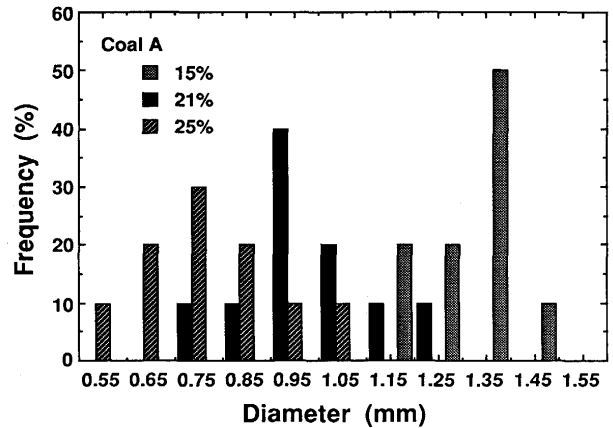


Fig. 11. Relation between maximum flame diameter of a coal particle and oxygen content.

この酸素濃度の高い条件程、燃焼速度は大きく、微粉炭の熱分解、それに伴う燃焼の進行が活発である。

次にこれらの火炎の生成径に注目し、定量的な比較を行うため、各酸素濃度の条件において火炎が最も成長した瞬間の直径を高速度写真から実測した。各ケースについて20個の粒子画像についてその直径を測定した。ただし、酸素濃度が7%のケースは燃焼温度が低く、明確に火炎が捉えられないため除外した。その測定結果をFig.11に示す。正規化した頻度として示すが、酸素濃度が15%時には1.35mm付近に最大値があるのに対し、21, 25%となるにつれ、それぞれ0.95, 0.75mmと火炎径が縮小する傾向にあることが明らかになった。

Coal A (VM 33.3%) Temp. 1200°C

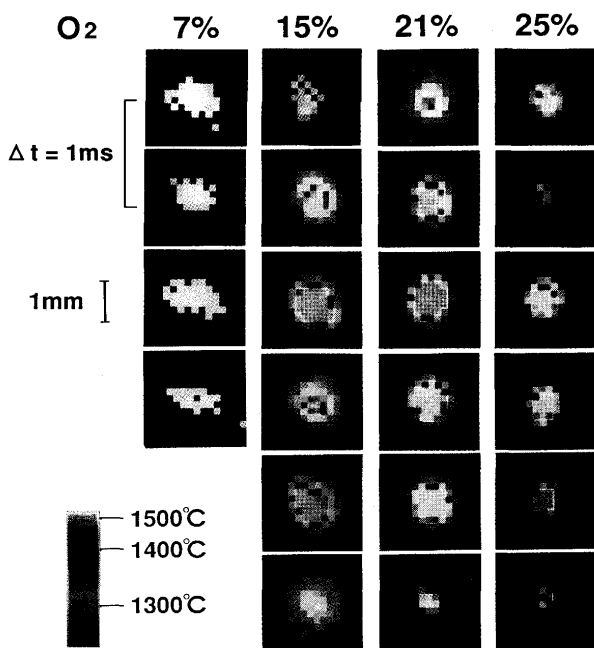


Fig. 10. Observation of burning behavior of coal particle under different oxygen content conditions.

7. 考察

微粉炭燃焼機構と炭種、酸素濃度の関係について次のように考察した。既に述べたように、粒子周囲の火炎は微粉炭の急速熱分解により放出された揮発分の燃焼により生成したと考えられるが、この火炎径の大きさが燃焼条件によって異なることに注目した。揮発分を構成する炭化水素の燃焼速度には酸素分圧が影響する¹⁰⁾。よって燃焼火炎面の位置は揮発分の燃焼速度と周囲の酸素濃度との関係により決まると予測される。すなわち、熱分解による揮発分放出速度に比べ、周囲の酸素濃度が低く炭化水素の燃焼速度が小さい場合には、その消費が遅れ、火炎径は成長し火炎面は粒子表面から離れた距離に位置する。また酸素濃度が十分で炭化水素の燃焼速度が大になるにつれて粒子表面に接近すると考えられる。この模式図をFig.12に示す。すなわち、周囲の酸素濃度によって、本図のように燃焼火炎面の位置が変化する。

さらにFig.12に示すように、火炎面では炭化水素が燃焼消費されることにより燃焼熱が発生し、Lauらの報告にあるように¹¹⁾、火炎面が粒子表面に近ければその熱は輻射の効果により粒子に伝達されやすい(Fig.12(b))。よって、酸素濃度

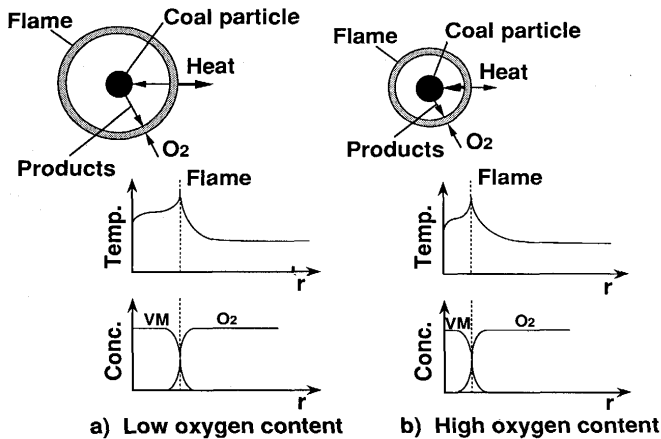


Fig. 12. Schematic representation of combustion mechanism of a single coal particle.

が大の場合、燃焼熱が粒子に活発に伝わり、その熱はさらに微粉炭の熱分解を促進し、結果的に燃焼率を増大させる。一方、Fig.12(a)のように火炎面が粒子表面から離れた位置にあると、火炎面での燃焼熱はガス中に放散しやすく、その粒子の燃焼向上には寄与しにくい。また、炭種の影響に関しては、高揮発分炭Cでは、Table 1 からわかるようにH/C値が高いため、揮発分燃焼速度自身が大になり、酸素濃度の大きい場合と同様な効果が生じたと考えられる。ただし、揮発分の放出速度の観点からは合致しない点もあり、急速熱分解時の炭種の差による揮発分噴出機構の変化など¹²⁾、微視的な他の要因についてもさらに検討を要すると思われる。また、いずれの場合でも揮発分燃焼の末期では、熱分解速度自身急速に低下し、チャーの燃焼主体の表面燃焼に近くなるため状況は異なる。

以上の現象は、層流拡散炎の条件における単一粒子の燃焼の観察に基づくものである。しかし、微粉炭吹き込み高炉の羽口部においても、粒子群を単位とした類似の現象が生じ、粒子の分散が良好でなく微粉炭の空間粒子密度が大きいと、その周囲に酸素不足下の領域が成長し、燃焼の進行に影響を与えることが推測される。この時、単一粒子の火炎径の変化に見られるように、粒子周囲の酸素濃度によって、その影響度は異なると考えられる。また、粒子の分散を高めることにより、粒子同士の干渉が減じ、燃焼性の

向上が期待できると予測される¹³⁾。

8. 結論

層流炉を用い、高速度カメラによる単一粒子の燃焼挙動の直接観察を行った結果、次の結論を得た。

1) 微粉炭粒子の着火後、揮発分燃焼とともに粒子周囲に酸素不足の領域からなる輝炎が急成長する。同時に、粒子温度は大きく変化する。

2) 粒子周囲に生成する火炎の径は揮発分量、酸素濃度によって異なる。また、火炎面での発生熱が微粉炭熱分解の熱供給源となっていると予測され、その生成位置の相違が燃焼率の変化に大きく影響している。

3) 微粉炭の多量吹き込み時のように空間内の粒子個数密度が大きい場合には、粒子周囲の酸素不足の領域が干渉し、燃焼の進行に影響する。ただし、粒子周囲の酸素濃度を高く維持すること、あるいは粒子間距離を大きく保つことにより、これらの影響は軽減されると予測される。

文 献

- 1) 柿内一元, 松永伸一, 坂本愛一郎, 松岡裕直, 上野浩光, 山口一良: 材料とプロセス, 7 (1994), p.126
- 2) 北野新治, 中矢 尚, 山形仁郎, 奥田哲央, 柴田耕一郎, 後藤哲也, 伊藤良二, 矢場田武: 材料とプロセス, 7 (1994), p.124
- 3) 山口一良, 松永伸一, 上野浩光, 柿内一元, 天野 繁: 材料とプロセス, 7 (1994), p.954
- 4) K.Yamaguchi, H.Ueno, M.Naito and K.Tamura: ISIJ Int., 31 (1991), p.677
- 5) 埜上 洋, 三浦隆利, 古川 武: 鉄と鋼, 78 (1992), p.1222
- 6) 沈 峰満, 稲田隆信, 山本賢作, 岩永祐治: 鉄と鋼, 80 (1994), p.1
- 7) 屈 明昌, 石垣政裕, 徳田昌則: 材料とプロセス, 6 (1993), p.918
- 8) 齊藤正浩, 定方正毅, 佐藤正之, 佐賀井武: 化学工学論文集, 13 (1988), p.451
- 9) H.Kobayashi, J.B.Howard and A.F. Sarofim: 16th Symp. Int. on Combustion, (1976), p.411
- 10) L.D.Smoot and D.T.Pratt: Pulverized Coal Combustion and Gasification, (1979), p.178 [Plenum Press, New-York]
- 11) C.W.Lau and S.Niksa: Combustion and Flame, 90 (1992), p.45
- 12) 大竹一友: 高炉下部における移動現象 (充填層中の気・固・液移動現象部会報告書), (1992), p.5 [日本鉄鋼協会・特定基礎研究会]
- 13) 有山達郎, 佐藤道貴, 山川裕一, 山田善郎, 鈴木 実: 鉄と鋼, 80 (1994), p.288