

# 高炉羽口部における微粉炭燃焼挙動と 燃焼性に及ぼす吹き込みランス配置の影響

有山 達郎\*・佐藤 道貴\*・山川 裕一\*・山田 善郎\*<sup>2</sup>・鈴木 実\*<sup>3</sup>

Combustion Behavior of Pulverized Coal in Tuyere Zone of Blast Furnace  
and Influence of Injection Lance Arrangement on Combustibility

Tatsuro ARIYAMA, Michitaka SATO, Yu-ichi YAMAKAWA, Yoshiro YAMADA and Minoru SUZUKI

**Synopsis :** Hot model experiments on pulverized coal injection were carried out to understand the combustion mechanism of pulverized coal injected into the blast furnace. The combustion behavior of the pulverized coal was directly observed by a high speed camera, and the temperature distribution of combustion flame was analyzed by an image processor. According to the results, the combustion flame was not uniform across the cross-section of blow pipe and tuyere, and the fluctuation of the flame was observed. Then, it was found that the dispersion of pulverized coal had a great role on combustibility owing to the rapid consumption of oxygen by the combustion of volatile matter. Moreover, it was confirmed that the arrangement of injection lance influenced on the combustion efficiency, since the dispersion of coal particles was settled by the injection lance. On the basis of the above results, the dispersion of coal particles was analyzed by the calculation of the average distance of individual coal particles to easily evaluate the effect of the lance arrangement.

**Key words :** blast furnace ; iron making ; pulverized coal injection ; combustion ; injection lance ; hot model.

## 1. 緒言

高炉への微粉炭多量吹き込みは、製鉄工程でのコスト低減、原料炭から一般炭への転換促進、およびコークス炉の寿命対策などの観点から近年、積極的に推進されている。このような背景から、ホットモデルを用いた微粉炭燃焼実験<sup>1)2)</sup>、数式シミュレーションによる燃焼挙動解析<sup>3)4)</sup>など微粉炭多量吹き込みに関わる多くの研究が実施されている。従来の微粉炭燃焼のモデル化など燃焼挙動の扱いに注目すると、基本的には単一粒子の燃焼挙動に基づき、また運動挙動に関してはランスから吹き込まれた以降、断面で均一な扱いなど比較的、単純化した考えによるものが多い。しかしながら、羽口からレースウェイ内に至る場合は高ガス流速の条件であり、ランスから供給された微粉炭の挙動は上記のような扱いとは異なることが予測される。今後、微粉炭多量吹き込みを指向する上で、高炉条件下における微粉炭燃焼の本質的な挙動を把握して技術改善の方向を見いだす必要があると思われるが、現在では実測例が不足し、実態に基づいた知見が十分ではない。実炉の羽口後方からの直接観察例<sup>5)</sup>はあるが、燃焼過程の十分な解析にまでは至っていない。そこで本研究では、ホットモデルにより高炉燃

焼場に近い条件でランスから吹き込まれた直後の空間部における微粉炭燃焼に注目し、高速度カメラによる燃焼場の直接観察を行い、微粉炭流れ、燃焼過程の解析を行った。さらに吹き込みランスの配置など微粉炭吹き込み方法の影響についても検討を加えた。その結果、今後、高炉燃焼場における微粉炭の燃焼性の改善、同時に現象のモデル化を図る上で重要な知見が得られたので報告する。

## 2. 実験装置および観察手法

本実験に用いた装置をFig. 1に示す。本装置はコークス充填層とブローパイプ部から構成され、羽口1本のホットモデルである。羽口径は $\phi 65\text{mm}$ 、ブローパイプ部内径は $\phi 90\text{mm}$ である。また高温熱風はLPGを燃焼させたガスに所定の酸素を混合し、濃度調整してブローパイプ部に送った。なお、LPG燃焼に伴う $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ の影響を一定にするため、いずれの実験でもLPG使用量は同一とした。ブローパイプ部の詳細をFig. 2に示す。ブローパイプ部には吹き込みランス挿入と粒子サンプリング用の孔が上下方向に300mm間隔で5ヶ所設けられており、今回の実験では吹き込み直後の空間部における燃焼挙動に注目したため、このブローパイプ

平成5年8月13日受付 平成5年12月3日受理 (Received on Aug. 13, 1993; Accepted on Dec. 3, 1993)

\* NKK総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

\* 2 NKK基盤技術研究所 (Applied Technology Research Center, NKK Corporation)

\* 3 NKKエンジニアリング研究所 (Engineering Research Center, NKK Corporation)

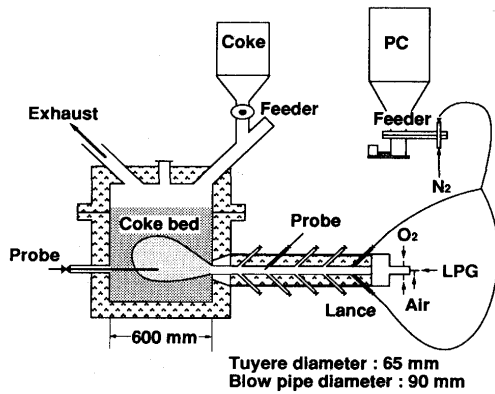


Fig. 1. Hot model for pulverized coal combustion.

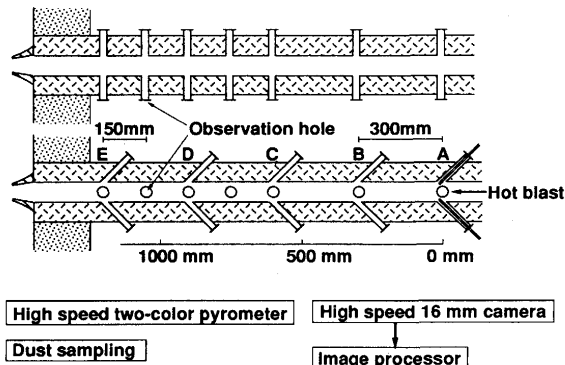


Fig. 2. Structure of blow pipe and measuring device.

部を用いて燃焼実験を行った。また、微粉炭燃焼の直接観察と2色温度計による温度測定を可能にするために、Fig. 2の平面図に示したような観察孔(孔径40mm)を水平方向に150mm、ないし300mm間隔で設けた。この観察孔は背面の影響を避けるため対称に設けてある。これらの観察孔を介して、16mm高速度カメラによる燃焼場の直接撮影、2色温度計による温度測定を行った。16mm高速度カメラの撮影速度は5000fps、各コマの露光時間は $2.5\mu\text{s}$ である。撮影現像後のフィルムは画像解析機にかけ画面の明暗度を255分割し、ほぼ同一の光学系で撮影された黒体炉の撮影結果との参照により燃焼場の輝度温度分布を求めた。2色温度計は燃焼にともなう瞬間的な温度変動に対応するため高速型(応答時間0.5ms、測定波長0.85、 $1.0\mu\text{m}$ )を用い、測定面での視野径を5mmと絞り、測定温度変動のピーク値の時間平均値を測定データとして用いた。

主要実験条件をTable 1に示す。吹き込みランスの条件として、上方から1本で吹き込んだ場合をシングルランス、上下対称位置の2本で吹き込んだ場合をダブルランスとした。微粉炭吹き込み量は空気過剰率に換算して1.03、0.78の2水準であり、表中に示すように各々、実高炉の微粉炭吹き込み量(PCR)150、200kg/T(送風原単位 $1100\text{Nm}^3/\text{t}$ )にはほぼ相当する。なお、以下の説明では後者のkg/tの数字を用いた。キャリアーガスとして $\text{N}_2$ を用い、いずれのランスともランス先端の吹き込み速度は $15\text{m/s}$ 、固気比は200

Table 1. Experimental conditions.

•Experimental conditions of hot model.

Gas volume	350 $\text{Nm}^3/\text{h}$
Blast temperature	1200 $^\circ\text{C}$
Gas velocity in blow pipe	82 $\text{m/s}$
Coal injection rate	48, 65 $\text{kg/h}$
Oxygen content	21 %
Fuel equivalence ratio	1.03, 0.78
PCR	150, 200 $\text{kg/t}$
Size distribution of PC	$-74\mu\text{m}$ , 80%

•Proximate analysis of coal (dry base).

VM(%)	FC(%)	Ash(%)
33.2	57.0	9.8

kg/tの条件で11 ( $\text{kg}/\text{Nm}^3$ )とした。

### 3. 直接観察による微粉炭燃焼挙動

#### 3・1 高速度写真による燃焼場の直接観察

微粉炭燃焼場の基本特性を観察するために、シングルランスを用い、ランス先端から150、300、600、900mm位置の観察孔から16mm高速度カメラによる撮影を行った。ランス位置はFig. 2のAあるいはCに設定した。その後、第2章に述べたような画像解析の手法で微粉炭燃焼場の観察、温度解析を行った。微粉炭吹き込み量は $200\text{kg/t}$ 相当である。画像処理後の写真をFig. 3に示す。本写真に撮影されている画像は微粉炭粒子群の輝炎である。微粉炭粒子の近傍では石炭より放出された炭化水素が熱分解し、生成したススが火炎中で発光し、輝炎を形成していると考えられる<sup>6)7)</sup>。本画像解析による黄色部の領域は約 $2000^\circ\text{C}$ に、赤色部は約 $1800\sim 2000^\circ\text{C}$ の温度領域に相当し、青色部はバックグラウンドである。よって上記の黄色、赤色部に相当する領域では微粉炭燃焼域が存在し、その周囲の青色部には、微粉炭は存在しない。

Fig. 3によると、ランスから150、300mmの位置では微粉炭燃焼輝炎は観察孔のやや上方に存在し、微粉炭の流れは観察孔内に一様に広がっておらず、空間的に不均一な状態で燃焼が進行している様子が観察される。またランスから600、900mmの距離になると微粉炭燃焼域は比較的、観察孔全面に均一に広がっている。すなわち、微粉炭はランスから出た直後、瞬時に断面方向に広がらず、軸方向の流れにともない徐々に拡散している。次に高速度写真の各コマを連続的に見ると、微粉炭燃焼による輝炎の生成に時間的変動が観察された。すなわち、微粉炭は連続体ではなく、断続的に流れていると考えられる。詳細は次の3・2節で述べるが、このような時間変動は周期が極めて微小であるため、微粉炭供給装置の特性ではなく、ランスから空間部に微粉炭が解放される際に生じる微粉炭流れの本質的な現象と推測される。このように、ランスから吹き込まれた直後の空間部における微粉炭燃焼は、空間的、時間的に不均一な状

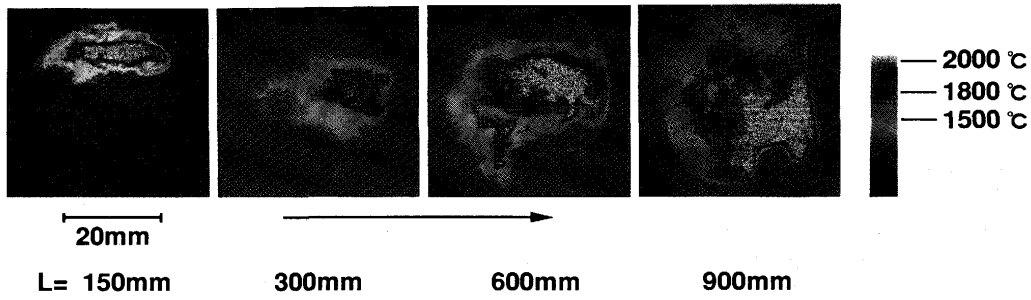


Fig. 3. Combustion flame of coal particles in blow pipe by high speed camera (PCR: 200kg/t, L: distance from lance).

態で進行すると判断される。

3・2 ランス配置の燃焼挙動へ及ぼす影響

ランスから吹き込まれた微粉炭の流れは上述の観察の結果のような特性を持つため、微粉炭燃焼域はその出発点を規定するランス配置の影響を受けると考えられる。そこでランスを複数化したダブルランスを用い、シングルランスとの比較を行った。観察手法は3・1節と同様でランス (Fig. 2のAの位置に設定) から300, 600, 900mm位置の観察孔において高速度写真撮影を行い、両者の比較を行った。写真による対比をFig. 4に示す。シングルランスでは300~600mmまで局所的に偏在した微粉炭流の燃焼場を示しているのに対し、ダブルランスでは初期から輝炎が観察孔上下方向に広がっており、比較的、均一な燃焼場を形成しているのがわかる。

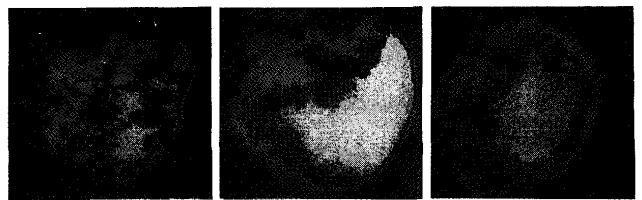
次に、両者のランスにおける連続写真に注目し、時間的な輝度変動の特性を観察した。ランスから300mmの同一位置で0.2ms毎の写真をFig. 5に示す。黄色の部分が高輝度高温部を示すが、シングルランスではその出現が間欠的であるのに対し、ダブルランスでは連続的に近い。さらにこの現象を明瞭に比較するため、各コマの最高輝度を画像解析機で数値化し、一連の操作における最高値を基準とした相対変化として輝度の微小時間変動を求めた。ランスから300,

600mmの位置における出力結果をFig. 6に示す。縦軸は相対的な輝度であり温度に対応する。まず、シングルランスの場合、ランスから300mmの位置では相対輝度の上下変動が激しく、数ms毎にピークが出現している。これらの変動は微粉炭粒子群の間欠的な通過に対応していると考えられ

(a) Single lance



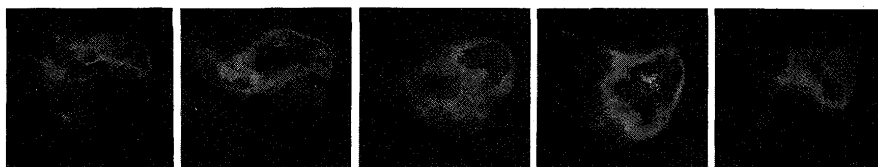
(b) Double lance



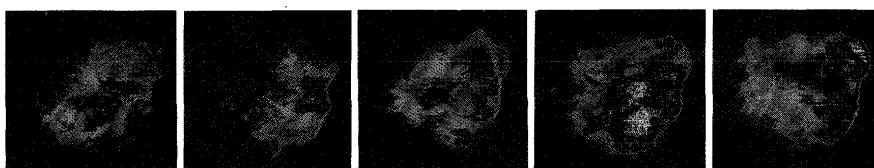
L= 300mm                      600mm                      900mm

Fig. 4. Comparison of combustion flame of pulverized coal between single lance and double lance (PCR: 200kg/t, L: distance from lance).

(a) Single lance



(b) Double lance



time →

0 ms                      0.2 ms                      0.4 ms                      0.6 ms                      0.8 ms

Fig. 5. High speed photograph of combustion flame (distance from lance : 300mm).

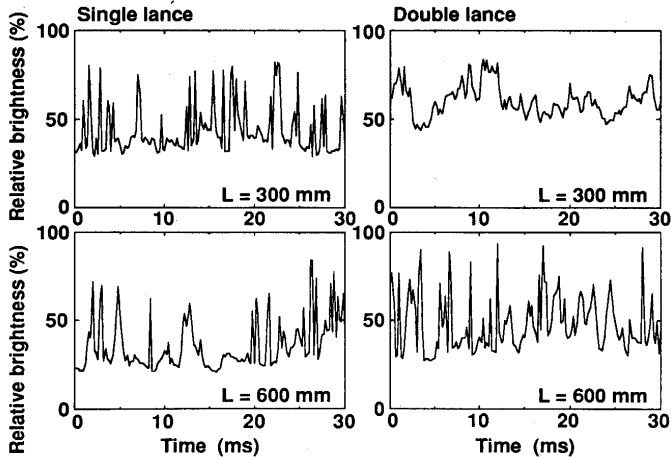


Fig. 6. Fluctuation of relative brightness in pulverized coal combustion flame (L: distance from lance).

る。なお、この変動の周波数解析も行ったが、ランダムな変動であり特定の周波数は認められなかった。一方、ダブルランスでは同一位置でも比較的相対輝度の変動が滑らかであり、その平均レベルが高い。よってFig. 5の写真観察のように時間的に均一で、より高温の燃焼場が形成されていると判断される。また600mm位置で比較すると、両者の差異は小さくなり、傾向は類似している。すなわち、ランスから離れると、乱流場によるガスの乱れが微粉炭粒子群の時間変動に支配的になり、ランス配置の影響は薄れていくものと推測される。

以上の結果より、ランス先端から300~600mm位置までは、微粉炭流れの初期条件を決定するランス配置が以降の微粉炭の断面での均一性に影響する。出発点を複数化したダブルランスの方が、空間的に均一な燃焼場を作りやすい。さらにダブルランスの方が、二つのランス吐出流の相互作用により、脈動現象として見られる時間的変動も緩和されやすい傾向にあると推測される。なお、シングルランスの場合、ランスから150, 300mm位置で観察孔上方に輝炎が存在しているのは、微粉炭が偏在した燃焼粒子群を形成するため、断面方向でバルク的气体との間に温度差を生じ、浮力の効果により生じたものと考えられる。

#### 4. 燃焼率, 温度変化測定結果

微粉炭燃焼の直接観察結果から、微粉炭流れの特性が燃焼性にも影響すると考えられる。そこでサンプリング孔からの粒子採取による燃焼率の測定、観察孔からの高速2色温度計による燃焼場の温度測定を行い、ランスなど吹き込み条件との対比を見た。なお、粒子採取プローブは水冷3重管を用い、採取粒子の燃焼停止のためプローブ先端より $N_2$ を送り込んだ。燃焼率は、微粉炭中の灰分を基準とした可燃分の消費率として求めた。吹き込み量は150, 200kg/t相当の2水準である。燃焼率の測定結果をFig. 7に示す。全

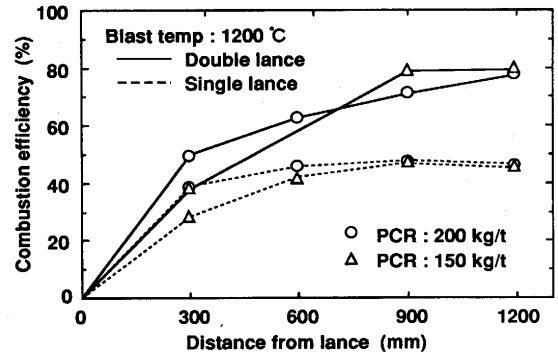


Fig. 7. Influence of injection lance arrangement on combustion efficiency.

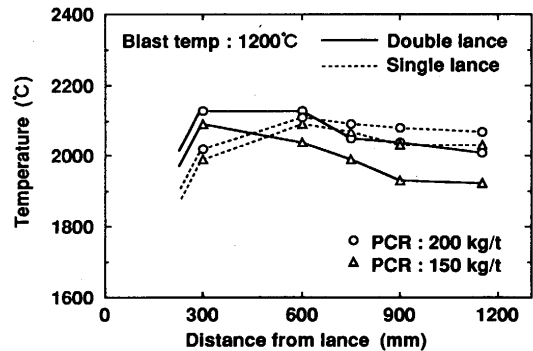


Fig. 8. Temperature change of combustion flame measured by high speed two-color pyrometer.

体の動きとして、吹き込み位置から600mmまでの領域で燃焼率は速やかに上昇している。この範囲では輝炎の生成に見られるように、微粉炭の熱分解にともなう揮発分燃焼が燃焼の主体となっていると推測される。2種類のランスの比較では、ダブルランスの場合、燃焼前半で燃焼率は急上昇し、600mm位置で燃焼率は約60%に達しているのに対し、シングルランスでは同一位置で燃焼率は約40%にとどまっている。以降、燃焼率の変化は緩慢であり、両者の燃焼率はほぼ平行した動きになっている。また両者のランスともに吹き込み量の影響は明確ではない。全体として、ランスから300~600mmの付近でランスの影響が現れているのがわかる。

高速2色温度計による測定結果をFig. 8に示す。本測定結果は温度変動のピーク値の時間平均値として求めたものであるが、Fig. 3の写真から観察される輝炎の温度を示していると考えられる。すなわち、バルク的气体温度ではなく、粒子群近傍の火炎帯の温度と考えられる。微粉炭吹き込み量の影響はやはり明確ではないが、ダブルランスの場合、ランスから300mm位置で瞬時に約2100°Cの最高温度に達しているのに対し、シングルランスではピーク位置が600mmの位置と温度上昇が遅い。以降は、両者ともにバルク的气体に熱を与えることにより、温度は徐々に低下していると推察される<sup>8)</sup>。

よって、ランス先端から300~600mm付近までの領域では、

Fig. 3 ~ 5 の高速度写真で観察されたような微粉炭流れの空間的、時間的な均一性の差異が燃焼性の大きな支配要因となっていると考えられる。

## 5. 微粉炭の燃焼機構と燃焼性評価に関する考察

### 5.1 微粉炭の燃焼機構

以上の結果から微粉炭の燃焼機構を次のように考察した。ランスから吹き込まれた微粉炭流れと酸素消費の関係は模式的にFig. 9のように表せる。シングルランスの場合、微粉炭は流れとともに徐々に断面方向に拡散する。よって、Fig. 9 (b)のように局所的に微粉炭濃度が高くなる。微粉炭が急速熱分解し、揮発分の燃焼が開始すると、微粉炭粒子近傍の酸素は急速に消費される<sup>9)10)</sup>。粒子群の周囲から酸素が供給されるが、ブローパイプおよび羽口内においてガスは拘束された空間での一方向流れであり、断面方向での酸素の拡散効果には限界があると考えられる。そこでシングルランス使用時のように局所的に微粉炭相互の粒子間距離が接近している場合には、その粒子群周囲の酸素濃度は急減する。一方、ダブルランスでは微粉炭濃度が比較的、均一化することにより、ブローパイプ断面内の酸素濃度も平均化すると推測される。

また、それらの微粉炭燃焼場では、次のような機構で微粉炭粒子群の存在状態が燃焼速度に影響していると考えられる。ランス配置によって局所的に微粉炭相互の粒子間距離が接近している場合には、前述のように粒子群内近傍の酸素濃度は急速低下する。火炎における揮発分の燃焼反応は複雑であるが、周囲の酸素濃度がその速度に影響する<sup>11)</sup>。またこの反応は大きな発熱反応であるため、Fig.10に示したように輻射を介してその発生熱は石炭の熱分解に寄与する

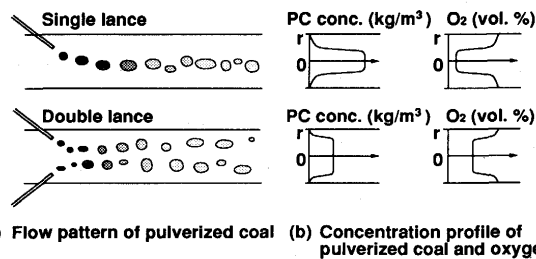


Fig. 9. Influence of lance arrangement on flow pattern of coal particles and oxygen concentration.

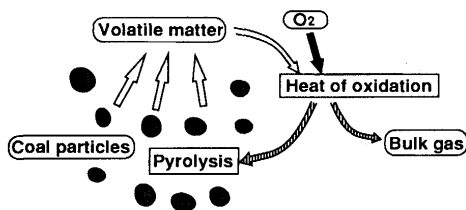


Fig. 10. Mechanism of pulverized coal combustion.

と考えられる<sup>9)12)</sup>。よって、局所的に酸素不足になると揮発分の燃焼速度低下を招き、結果的に熱供給不足になり石炭の熱分解速度も減速し、以降の燃焼率を停滞させる。Fig. 7の実験においてもランスから300~600mm付近は揮発分燃焼からチャーの燃焼域に移行する領域と推測されるが、前述のようなランス配置に起因する局所的な酸素濃度の影響を受け、燃焼率の動きに差異を生じたものと推測される。

### 5.2 ランス配置と燃焼性評価

微粉炭の空間内における分散の制御が燃焼性の大きな要素となる。そこで断面方向の微粉炭の広がり注目し、微粉炭粒子群の局所的な濃度と対応する粒子間距離を求め、微粉炭流れの制御因子であるランス配置と燃焼性とを結び付ける指標とした。Fig.11にその計算の考えを示す。本図のように、いずれのランスでも微粉炭は仮想上の一点から一定の角度 $\theta$ で広がるとモデル化した。ここで出発点はランス位置に設定した。微粉炭の存在部分の面積 $S$ は流れ方向に行くにしたがって大になる。また微粉炭はガスにより加速されるため軸方向にもその粒子間距離は広がる。互いに適切な距離をおいて設置されたダブルランスではその出発点が複数化することにより断面全体に早く広がる。この関係を定式化すると次式のようなになる。

$$W_p = S(1 - \epsilon) \rho_p u_p \dots\dots\dots (1)$$

$$du_p/dL = (3/4)(C_d/D_p)(\rho_g/\rho_p) |u_g - u_p| (u_g - u_p)/u_p \dots\dots\dots (2)$$

$W_p$ : 微粉炭吹き込み量(kg/s)  $S$ : 微粉炭存在域面積( $m^2$ )  
 $u_p$ : 粒子速度 (m/s)  $u_g$ : ガス線速度 (m/s)  
 $\epsilon$ : 微粉炭存在域での空隙率(-)  $\rho_p$ : 粒子密度( $kg/m^3$ )  
 $\rho_g$ : ガス密度 ( $kg/m^3$ )  $C_d$ : 抵抗係数 (-)  
 $D_p$ : 粒子径 (m)  $L$ : 吹き込み位置からの距離(m)  
 ここで、赫ら<sup>3)</sup>と同一の一次元の微粉炭燃焼シミュレーションモデルにより $\rho_g$ ,  $u_p$ ,  $u_g$ ,  $D_p$ の軸方向変化を求めた。な

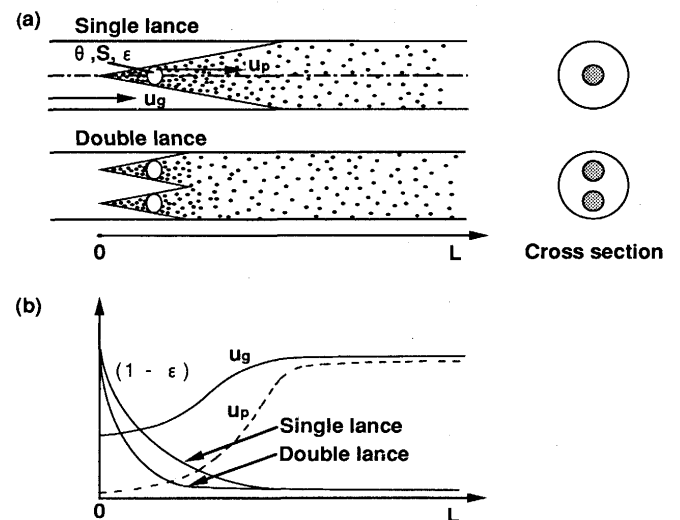


Fig. 11. Calculation of distance between coal particles.

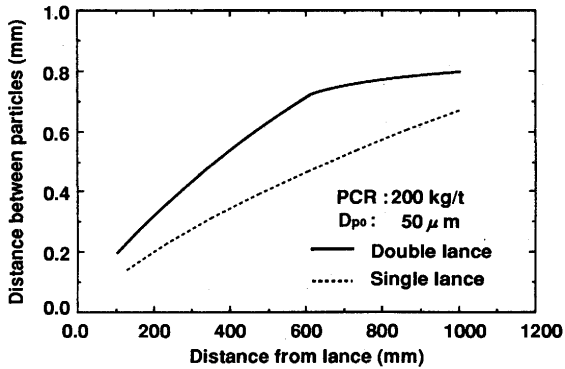


Fig. 12. Change of distance between coal particles in longitudinal direction.

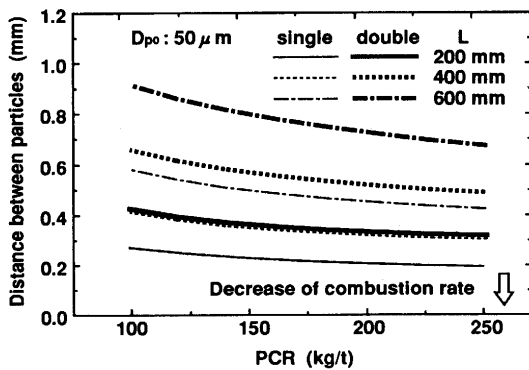


Fig. 13. Influence of injection rate and injection lance arrangement on distance between coal particles (L: distance from lance).

お、式(2)において $D_p$ はチャーの燃焼、 $\rho_p$ は脱揮反応とチャーの燃焼の両者に対応して変化するものとし、 $C_d$ は粒子レイノルズ数の関数とした<sup>3)</sup>。微粉炭の初期速度は15m/sとした。微粉炭存在域面積のSはFig. 8 (a)に示す各ランスからの微粉炭の広がり角 $\theta$ によって算出できる。これらの結果を式(1)に与え、微粉炭存在域における $\varepsilon$ を求め、微粉炭の粒子間距離を求めた。各変数の軸方向の概略変化はFig.11(b)のようになる。なお微粉炭の広がり角 $\theta$ は不明であり、実測例はない。本研究ではFig. 3による観察結果より、 $\theta$ を $4^\circ$ と設定した。以上の方法による軸方向の粒子間距離変化をFig.12に示す。また微粉炭の初期粒子径 $D_{p0}$ は $50\mu\text{m}$ とした。軸方向において、断面方向の分散と同時に高流速のガスによる粒子加速の双方の効果で微粉炭の粒子間距離は徐々に大きくなるが、ダブルランスの方が同一位置でも粒子間距離を早くから大きく保つことができ、微粉炭の分散性が向上していることが定量的に評価できる。よって、前述のような局所的な酸素不足の状態になりにくいと推測される。Fig.13は微粉炭吹き込み量に対して各ランスにおける粒子間距離を求めた結果である。微粉炭吹き込み量の増加とともに、粒子間距離は減少して空間的に高密度の燃焼場となり、燃

焼速度が減速しやすくなる。ただし、Fig.12と同様にランスを複数化することにより、200kg/tを越える微粉炭多量吹き込みの条件でも比較的、粒子間距離を大きく保つことができ、燃焼速度上、有利となると推察される。

なお、微粉炭の性状、たとえば揮発分の量によって、以上の燃焼機構の支配因子も異なることが考えられ、炭種などの影響についてもさらに検討の余地がある。

## 6. 結言

高炉燃焼場に近い条件で微粉炭燃焼実験を行い、次のような結論を得た。

1) 高速度カメラにより微粉炭燃焼挙動を直接観察し、1本のランスから出た微粉炭は粒子群となり、空間的、時間的にも不均一な燃焼形態をとる。

2) ダブルランスとシングルランスの両者を高速度カメラによる撮影、輝度変動解析から比較した結果、ランスを複数化した前者の方が不均一性を緩和できる。

3) 燃焼過程の微粉炭採取、高速2色温度計による測定から、空間内の微粉炭粒子群の流れ構造の差異が燃焼率、温度変化にも影響している。

4) 上述の観察、実験結果より、微粉炭濃度が空間的に均一になるような吹き込み方法が微粉炭粒子群周囲の酸素を有効に利用でき、燃焼速度の面で有利であると推察された。さらに、微粉炭の空間濃度に対応する指数として、微粉炭の粒子間距離を導入し、モデル計算で求めた粒子間距離からランス配置の影響を検討した。

## 文 献

- 1) 山口一良, 上野浩光, 田村健二: 鉄と鋼, 78 (1992), p.1214
- 2) 山縣千里, 須山真一, 堀坂 修, 梶原義雅, 小松周作, 紫富田浩, 網永洋一: 材料とプロセス, 4 (1991), p.84
- 3) 赫 冀成, 桑原 守, 鞭 巖: 鉄と鋼, 72 (1986), p.1847
- 4) A.S.Jamaluddin, T.F.Wall and J.S.Truelove: Iron-Making Steelmaking, 13 (1986), p.91
- 5) 柿内一元, 関屋政洋, 松井 章, 天野 繁, 上野浩光: 材料とプロセス, 4 (1991), p.1043
- 6) W.R.Seeker, G.S.Samuels, M.P.Heap and J.D.Trolinger: 18th Symp. (Int.) on Combustion, (1981), p.1213
- 7) 斎藤正浩, 定方正毅, 佐藤正之, 佐賀井武: 化学工学論文集, 13 (1987), p.451
- 8) K.Ohtake and K.Okazaki: Int. J.Heat Mass Transfer, 31 (1988), p.397
- 9) C.W.Lau and S.Niksa: Combustion and Flame, 90 (1992), p.45
- 10) 山川裕一, 有山達郎, 佐藤道貴, 浅川幸彦, 鈴木 実: 材料とプロセス, 6 (1993), p.86
- 11) L.D.Smoot and D.T.Pratt: Pulverized-Coal Combustion and Gasification, (1979), p.178 [Plenum Press, New York]
- 12) L.D.Timothy, A.F.Sarofim and J.M.Beer: 19th Symp. (Int.) on Combustion, (1982), p.1123