

# 微粉炭揮発分の高炉還元材比への影響と 混合微粉炭の燃焼挙動

国友 和也\*・折本 隆\*・西村 恒久\*・内藤 誠章\*・八木 順一郎\*<sup>2</sup>

Effects of Volatile Matter of Pulverized Coal on Reducing Agents Rate of Blast Furnace and Combustion Behavior of Coal Mixture

Kazuya KUNITOMO, Takashi ORIMOTO, Tsunehisa NISHIMURA, Masaaki NAITO and Jun-ichiro YAGI

**Synopsis :** The effective calorific value of pulverized coal in a temperature region over 1400°C in the blast furnace was examined, and it was shown that in an operation in which the heat balance in the lower part of the blast furnace was a rate-controlling factor, a pulverized coal having a lower average volatile matter content was effective in lowering the reducing agents rate. However, there is a restriction in the amount of the resource of semi-anthracite coal whose volatile matter is relatively low, we examined a mixed pulverized coal obtained by mixing a high and low volatile matter content coals. The combustion behavior of the mixed pulverized coal was examined by conducting a combustion experiment and a simulation analysis. It was found that when a mixed coal obtained by mixing coals of different volatile matter contents was used, the combustion temperature of the mixed coal deviated toward the high temperature side from a weighted average value of temperatures obtained when each of the coals of different volatile matter contents was burned individually, and that the use of the mixed pulverized coal showed a remarkable effect on the promotion of temperature rise particularly in the initial period. This was because the high volatile matter content coal formed a high-temperature combustion field and promoted the combustion of the low volatile matter content coal.

**Key words :** ironmaking; blast furnace; pulverized coal injection; combustion.

## 1. 緒言

1981年に新日鐵大分製鐵所第1高炉で、わが国で初の高炉への微粉炭吹込み操業が開始された。それ以来、操業安定、コスト削減、生産性向上、石炭選択自由度拡大の手段として有効な技術であり、コークス炉老朽化、環境問題などにも対処できる効果的手段として、微粉炭吹込み操業は各炉に広まっていった。2002年末の実績では、国内31基の高炉すべてに微粉炭が吹込まれており、その平均原単位は130 kg/t程度であり、年間平均で200 kg/t以上の高炉もある。一方で、微粉炭吹込みに伴い、コークス粉が炉芯へ蓄積して通気・通液性を阻害する問題や、風圧変動や炉壁熱負荷が上昇するなどといった問題が顕在化してきており、さまざまな研究開発が続けられてきている<sup>1-9)</sup>。

安定的な微粉炭吹込みを達成するためには、高炉炉口～レースウェイ部の限られた空間内で、いかに安定的に微粉炭を燃焼できるかがポイントと考えられてきた。この空間における微粉炭の滞留時間は短く、しかも酸素過剰率が1.0を大きく下回る条件であるため、燃焼条件としては極めて過酷といえる。このため、多くの燃焼実験が実施され、燃焼に影響する種々の要因が検討されてきた。また、高炉吹込み用の微粉炭の性状としては、比較的揮発分の高い石

炭が従来は好まれた。これは燃焼性を最優先の課題と認識して、羽口先での燃焼性の良い石炭を優先的に使用するとともに、搬送性に関しても従来の微粉炭用石炭資源の範疇では揮発分が一定以下の石炭の搬送性が高揮発分炭の搬送性に比して劣っていたことに起因すると考えられる。しかし、最近では非常に多彩な石炭の中から、燃焼性、搬送性、価格、置換率などを総合的に考慮して選択されてきている。この中で、揮発分の低い半無煙炭もしくは無煙炭なども高炉吹込み用微粉炭として用いることも検討されてきている<sup>10-12)</sup>。これは燃焼技術の向上や未燃焼チャーや炉下部コークス粉の挙動に対する理解の深まりを踏まえて、より多様な資源に対応することを狙ったものである。また、後述するように、微粉炭の吹込み量が一定の場合において、半無煙炭もしくは無煙炭と揮発分の高い石炭とを混合して平均の揮発分を低下させた石炭を使用した場合は、微粉炭のコークスとの置換率が高くなり、還元材比を低減することができる傾向があることが実炉においても確認されてきた。このため、低揮発分炭に対しては、高炉還元材比の低減効果、ひいてはエネルギー原単位、二酸化炭素排出量削減効果も期待されうるが、その効果発現機構や燃焼性などによる限界、性状の異なる石炭の混合作用など不明確な点も多い。

平成15年9月26日受付 平成15年12月24日受理 (Received on Sep. 26, 2003; Accepted on Dec. 24, 2003)

\* 新日本製鐵(株)環境・プロセス研究開発センター (Environment & Process Technology Center, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi, Futtsu, 293-8511)

\* 2 東北大学多元物質科学研究所 (Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University)

従来の微粉炭用の石炭に比べて揮発分が十数%と相対的に低い半無煙炭は還元材比低減効果があったとしても、採掘される地域や量がその他の石炭と比べて限定されていることなど資源的にも制約があり、使用量を大幅に増加させ依存性を拡大してゆくには安定供給と価格形成の面で問題がある。このために、揮発分、構成元素割合、灰分割合、灰分組成など性状の異なる石炭を混合使用し、吹込み微粉炭の平均揮発分を低下させ還元材比低減効果を狙うとともに、燃焼性、搬送性などを維持、向上させてゆくことも重要な対策となりうる。しかし、その際には、燃焼性の悪い石炭の混合が全体としての燃焼効率を低下させる懸念も生じる。したがって、微粉炭揮発分の高炉還元材比への影響はどのようなメカニズムで発現されるのかを明らかにするとともに、単一性状の微粉炭と性状の異なる微粉炭を混合したものでどのような差異があるかを明らかにすることが必要である。

このような背景のもとに、まずはじめに、高炉還元材比に及ぼす揮発分の異なる微粉炭の影響について、マクロな視点から考察し還元材比低減のメカニズムに対して検討を加えた。次に、その手段となる、揮発分の比較的少ない半無煙炭や高揮発分炭と低揮発分炭の混合微粉炭の燃焼挙動の差異を明らかにするために堅型円筒燃焼炉での空間燃焼実験および燃焼シミュレーション解析を行い検討を加えた。

## 2. 低揮発分炭の還元材比低減効果

君津第4高炉（内容積5151 m<sup>3</sup>）において、微粉炭の吹込み量を108~118 kg/tとほぼ一定の条件で微粉炭の平均の揮発分を変化させた場合の還元材比の変化の一例を Fig. 1 に示す。ここで高炉の還元材比は、微粉炭以外の原燃料条件や送風条件を補正した修正還元材比とした。Fig. 1 によると、微粉炭の吹込み量が一定のもとで微粉炭の揮発分の低下により還元材比が低下しているため、揮発分が低い微粉炭ほどコークスとの置換率が高くなる傾向があると理解される。その一つの理由として、Fig. 2 に示すように高揮発分炭ほど高発熱量が低い傾向にあることが指摘できるがその差異は2割程度である。高炉での還元材比低下の効果の説明するには、ソリューションロス反応が活発な高炉の下部の高温域においては、微粉炭の揮発分の差がさらに大きな影響を与えらることに注目する必要がある。すなわち、揮発分の主成分の炭化水素が分解して生じる水素は、高温のコークスの存在する炉下部では、たとえ燃焼して水蒸気となってもコークスとの反応で水素と一酸化炭素とに分解され発熱反応には寄与しないとともその発生ガスの昇温には一定の熱量を必要とする。このため、揮発分の高い石炭を使用する場合、炉下部で必要な熱を確保するためには低揮発分炭と比べて還元材比は高くなるものと考えられ

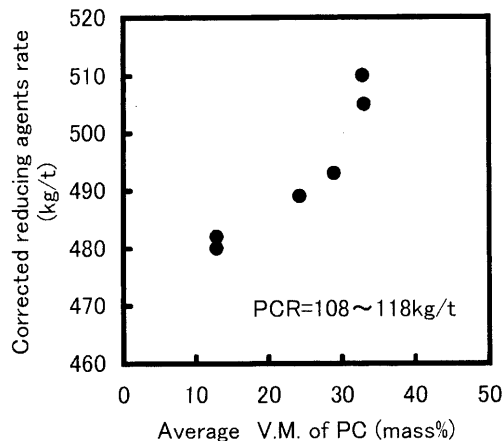


Fig. 1. Effect of average volatile matter content of pulverized coal on corrected reducing agents rate.

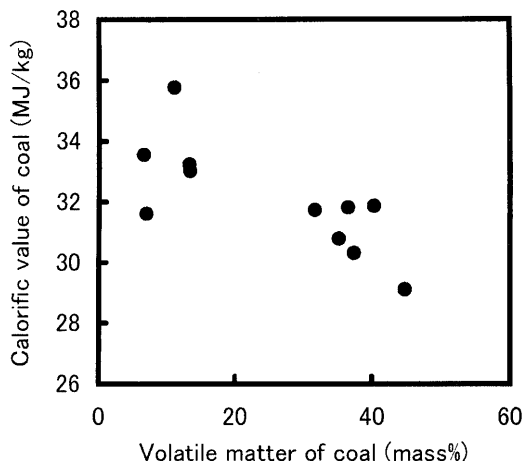


Fig. 2. Relationship between volatile matter content of coal and calorific value of coal.

る。

以上の観点から、炉下部発熱量を定義し検討を加えた。すなわち、溶銑に熱をつける滴下帯領域である1400°C以上の領域での炭材の有効発熱量を炉下部発熱量と定義した。炉下部発熱量は、(1)式に示すように、炭材のCOまでの部分燃焼熱および持ち込み顕熱から、炭材由来のCO、H<sub>2</sub>、灰分の昇温に要する熱量を差し引いた熱量とした。

$$Q_L = Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4 - Q_5 - Q_6 + Q_7 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $Q_L$ ：炭材の炉下部発熱量 (J/kg)

$Q_1$ ：炭材の低発熱量 (J/kg)

$Q_2$ ：CO(g)+1/2 O<sub>2</sub>(g)=CO<sub>2</sub>(g)の発熱量 (J/kg)

$Q_3$ ：H<sub>2</sub>(g)+1/2 O<sub>2</sub>(g)=H<sub>2</sub>O(g)の発熱量 (J/kg)

$Q_4$ ：基準温度から1400°CまでのCOの昇温に要する熱量 (J/kg)

$Q_5$ ：基準温度から1400°CまでのH<sub>2</sub>の昇温に要する熱量 (J/kg)

$Q_6$ ：基準温度から1400°Cまでの灰分の昇温に要する熱量 (J/kg)

$Q_7$ ：炭材の持ち込み顕熱 (J/kg)

微粉炭の高発熱量と炉下部発熱量との関係を Fig. 3 に示す。発熱量が高い石炭ほど炉下部発熱量も高い傾向を示すが、同程度の発熱量であっても炉下部発熱量が異なる場合もある。一般に、高発熱量が同じであれば水素含有量の少ない石炭は炉下部発熱量が高くなる。これは前述のとおり、高炉下部のように高温の кокс が存在する条件下では、羽口先で燃焼した水素が直ちに還元されるため発熱に寄与しないだけでなく、炭材から発生したガスの昇温に熱を要するためである。また、石炭種類による高発熱量の差異は2割程度であるのに対して、炉下部発熱量の高い石炭と低い石炭とでは倍以上の差があるため、炉下部での熱バランスが律速となっている操業においては、炉下部発熱量の高い低揮発分炭が有利であると考えられる。

実操業において、微粉炭の揮発分を変化させた場合の還元材比の低減効果を調べた。名古屋1, 3高炉において、種々の微粉炭を使用した時の微粉炭の炉下部発熱量と実績の кокс 置換率との関係を Fig. 4 に示す。炉下部発熱量の低い微粉炭の置換率は低下しており、低還元材比を狙った操業においては炉下部発熱量の低い微粉炭は好ましくない。しかし、この現象が一般的なものかどうかを調べるために、北海2高炉、戸畑4項炉のデータも加えて、炉下部

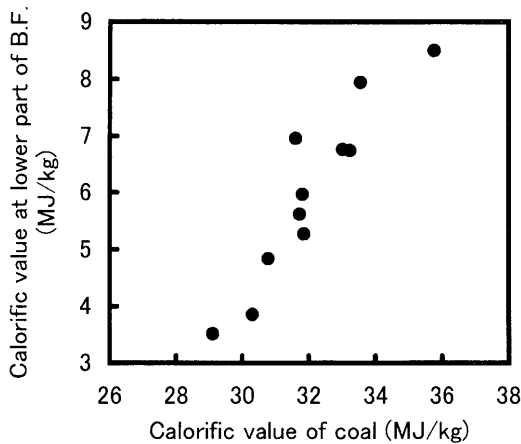


Fig. 3. Relationship between calorific value of coal and calorific value in lower part of blast furnace.

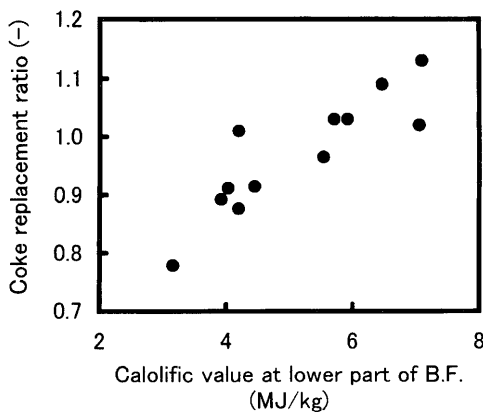


Fig. 4. Relationship between calorific value in lower part of blast furnace and coke replacement ratio.

発熱量の異なる微粉炭を用いた場合の熱・物質収支に関して、リスト線図を用いて検討を加えた。炉下部での発熱量と炭素・水素・酸素の収支に基づきシャフト部での還元制約を考慮せずに推定した還元材比の変化と、実績の還元材比の変化との関係を Fig. 5 に示す。Fig. 5 によると、炉下部発熱量の変化から推定される還元材比低下代に対して実績の還元材比の変化は、還元材比の低下幅が小さい場合はほぼ一致するが、低下幅が大きい場合は推定値に対して実績値は追従していない。これは、シャフト部での還元制約を考慮せずに還元材比の低下幅を推定したこと起因するものと考えられる。すなわち、炉下部熱収支上は還元材比が下げられると計算される場合でも、ポッシュガス原単位の低下幅が大きくシャフト効率 $100\%$ を超えないと還元が補償できなくなるバランスになってしまい、そのレベルまでは還元材比が下げられない実績操業結果となっているものと考えられる。したがって、シャフト効率に余裕のある場合においては炉下部発熱量の高い微粉炭を用いて還元材比の低減を図れる可能性がある。すなわち、熱流比が低い操業などシャフト効率が低い場合は、炉下部発熱量の大きい微粉炭を用いて炉下部の熱バランスを保ちながらシャフト部への還元ガス量を低下させ、シャフト効率を高める操業を志向することで還元材比の低下が図れる場合があると考えられる。なお、実績においても計算上シャフト効率が $100\%$ を超える点も存在しているが、これは前提としている保存帯温度や平衡組成、径方向の分布、データのばらつきなどによるものと考えられる。

### 3. 揮発分の異なる石炭の燃焼実験

前項では、熱収支の観点から低揮発分炭の高炉還元材比低減効果について検討を加えたが、低揮発分炭の使用時に

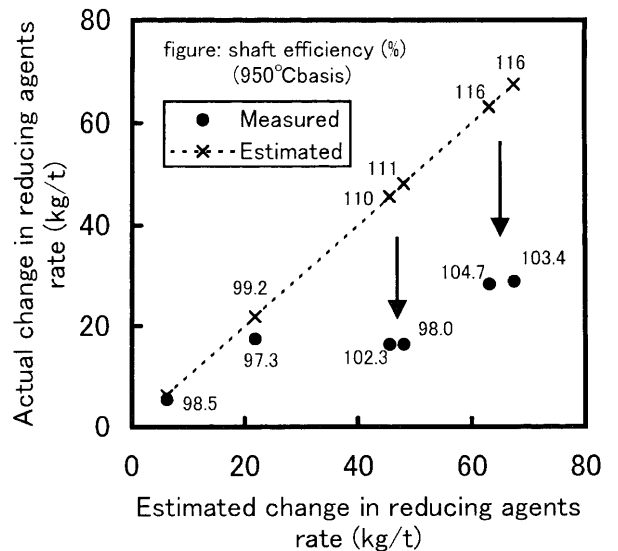


Fig. 5. Comparison between estimated and measured decreases in reducing agents rate.

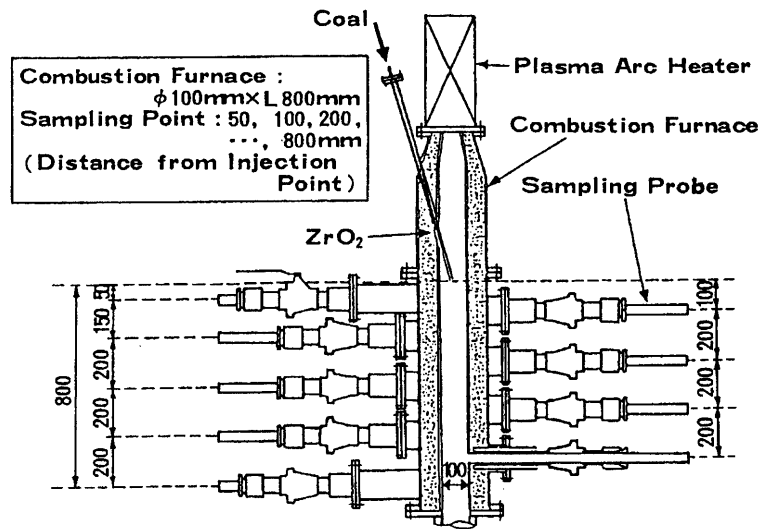


Fig. 6. Cylindrical combustion furnace in vertical type used in spatial combustion experiment.

は燃焼性に注意しておく必要がある。また、吹込み炭材平均の揮発分や炉下部発熱量が同じであっても、揮発分が相対的に低い半無煙炭のみを用いる場合に対して、揮発分の高い石炭と揮発分の低い無煙炭との混合物を燃焼させた場合にどのような差異が生じるかを把握しておく必要がある。このために以下の実験を行い検討を加えた。

### 3.1 実験装置

微粉炭の空間燃焼実験に用いた装置の概要を Fig. 6 に示す。この装置は、内径 100 mm、微粉炭が燃焼する有効炉長 800 mm の縦型円筒燃焼炉である。プラズマアークヒーターにより加熱された熱風とともに微粉炭を斜め上方から吹き込む。炉内に吹き込まれた微粉炭の熱分解、燃焼挙動を逐次測定するために、吹込み位置から 50 mm および 100 mm から 800 mm まで 100 mm ごとに測定孔を設置している。

実験は、1600°C に昇温した窒素で炉体を 3 時間加熱した後、所定の実験条件のもとで、予熱した空気もしくは酸素富化空気を送風するとともにランスから微粉炭を吹き込む。測定は、各測定孔から W-Re 熱電対を炉の中心軸上に挿入しガス温度を測定するとともに、小スポット放射温度計で粒子温度を測定した。燃焼が安定した状態でダスト（燃焼チャー）採取を実施した。

### 3.2 実験条件

微粉炭の空間燃焼実験には、Table 1 に示す各種微粉炭（乾燥粉砕後 -100  $\mu\text{m}$  に粒度調整）を用いた。性状の異なる石炭の混合燃焼挙動を調べるため、Coal A1（高揮発分炭）と Coal B1（低揮発分炭）との混合微粉炭の混合割合を質量比で 1:3, 1:1, 3:1 の 3 水準に変化させ、単独の場合を加えて計 5 水準を比較した。以下に示す条件は、この実験を通じて一定とした。

送風温度：1280°C、総ガス流量：108.6  $\text{Nm}^3/\text{h}$ 、微粉炭吹込み速度：19  $\text{kg}/\text{h}$ 、微粉炭濃度：175  $\text{g}/\text{Nm}^3$ 、酸素比：

Table 1. Properties of pulverized coals used in experiments and calculations.

	Coal A1	Coal B1
VM(mass%)	36.30	8.05
Ash(mass%)	4.33	10.20
C(mass%)	77.1	83.0
H(mass%)	4.68	3.28
O(mass%)	12.70	1.99
Q(MJ/kg)	30.54	32.46

0.82、ランス：単管 8A ランス、微粉炭搬送窒素：5.0  $\text{Nm}^3/\text{h}$ 。

なお、酸素富化率は、各水準で酸素比が一定(0.82)となるように、微粉炭の平均組成に応じて変更した。

各種測定およびサンプリングは、ガス条件、微粉炭種類を変更後 10 分以上保持し、温度、吹込み速度が安定してから実施した。温度は、ランス先端から 50 mm および 100 mm から 800 mm まで 100 mm ピッチで測定した。このうち、600 mm は常に、また、200 mm, 400 mm, 800 mm は実験水準により放射温度計で固体温度を測定し、それ以外の位置、水準では熱電対で雰囲気温度を測定した。ダストは 100 mm から 700 mm の間 200 mm ピッチで採取し微粉炭の燃焼効率を求めた。燃焼効率は、吹込み前後で灰分の量は一定で質量変化分は可燃分が燃焼したものと簡易的に仮定して求めた。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 揮発分の異なる微粉炭の混合燃焼挙動

揮発分の高い微粉炭に揮発分の低い微粉炭を混合して空

間燃焼実験装置で燃焼させた場合の熱電対で測定した温度分布を Fig. 7 に示す。Coal A1 の場合、ランス前 50 mm の温度は Coal B1 と同程度か若干低いとその後の上昇は速く、ランス先端から 500 mm で 1700°C 以上に達する。一方、Coal B1 の場合は、ガス温度の上昇は緩やかであり最終的な到達温度も 1600°C 前後である。両者を混合した場合の温度分布もあわせて示しているが、ばらつきは大きいものの混合比率が 1:1 の場合は中央値よりも Coal A1 単独の場合に近づく傾向を示す。Fig. 8 に示すように、到達ガス温度としてランス先端から 400~800 mm の平均温度を採用し比較するとこの傾向はもう少し明確になり、Coal A1 の割合が 50% 以上の場合 (1:1, 3:1) は単独炭燃焼データの加重平均値に比べて高温側にシフトしている傾向が認められる。これは、Coal A1 が形成した高温の燃焼場が Coal B1 の燃焼を促進した結果と考えられる。

ランス先端から 600 mm の位置で放射温度計により測定した粒子温度の比較を Fig. 9 に示す。混合割合が 1:1 もしくはそれより Coal A1 が多い場合、最高温度は 1700°C 前後と高い値を示しており、1:3 の条件のように Coal B1 の割

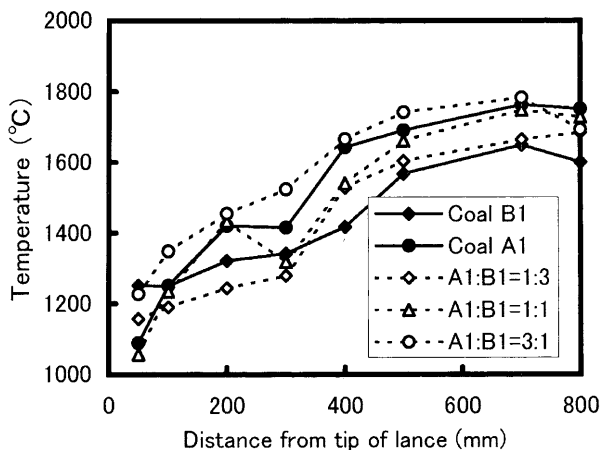


Fig. 7. Comparison of temperature distribution between single and mixed pulverized coal combustion.

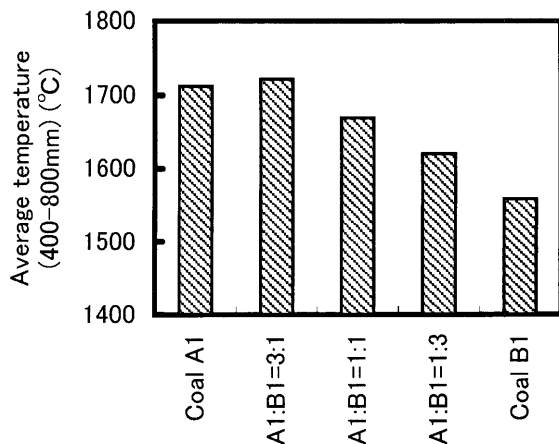


Fig. 8. Comparison of average temperature at distances of 400 to 800 mm from lance tip between single and mixed pulverized coal combustion.

合が支配的になると急激に温度は下がっている。

Fig. 10 に Coal A1 と Coal B1 とを混合燃焼させた場合の平均の揮発分と、ランス先端から 100 mm および 700 mm で採取したチャーの平均の燃焼効率との関係を示す。ランス先端から 700 mm における燃焼効率に対してランス先端から 100 mm における燃焼効率は、平均揮発分が 16% 以下のケースでは特に低くなっており、ここでの燃焼遅れが前述の温度分布に影響を与えていると考えられる。平均揮発分が 22% 以上では、700 mm での燃焼効率は 60% 以上で 100 mm での燃焼遅れも顕著ではない。以上から、低揮発分炭を使用する場合には高揮発分炭を混合使用し高温の燃焼場を形成し一定の燃焼効率を確保することが望ましいと考えられる。

#### 4.2 混炭の影響に関するシミュレーション解析

微粉炭の燃焼モデルに関しては、従来から多くの検討がなされている。例えば、赫ら<sup>13)</sup>は送风管と羽口内、羽口先燃焼帯における各プロセス変数について反応工学的な理論解析を行い、そのモデルを元にオールコークス操業との対

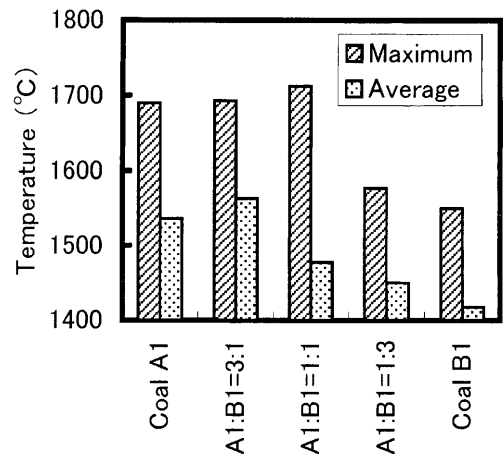


Fig. 9. Average and maximum temperature values measured with radiation thermometer at distance of 600 mm from lance tip for single and mixed pulverized coal combustion.

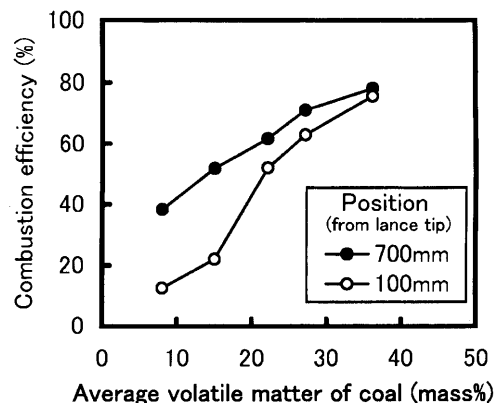


Fig. 10. Relationship between average volatile matter of coal and combustion efficiency at distance of 100 mm and 700 mm from lance tip.

比を行っている。田村ら<sup>14)</sup>は、レースウェイ燃焼炉実験結果と羽口前燃焼帯の数学モデルに基づく解析により、微粉炭吹込み量の上限に関する検討を行っている。肖ら<sup>15)</sup>は、微粉炭と粉鉱石の複合吹込み時のレースウェイでのガス流れ、伝熱の特性を考慮した数式モデルを提案している。これらの検討に用いられた数式モデルは、その目的から、微粉炭性状に関しては平均的値で代表させており、例えば揮発分が大きく異なる微粉炭の混合燃焼時の挙動を検討することには適さないと考えられる。すなわち、前項の結果によると揮発分の燃焼に対する影響は線形ではないため平均値では複数炭種の同時吹込み時の挙動が正確には評価できないと考えられる。そこで、田村らの微粉炭燃焼モデル<sup>14)</sup>をベースに複数の炭種の混合燃焼挙動が推定可能となるように修正を加えた。具体的には、以下のような点を変更した。

- (1) 田村らのモデルでは微小時間  $dt$  についての基礎式から、各時点における微粉炭粒子位置を算出し、そこでの粒子温度・反応状況やガス温度・組成等を評価していた。これに対して、微小距離  $dx$  についての基礎式を与え、性状の異なる粒子ごとに熱分解速度、チャーの粒径変化、移動速度、燃焼率などを独立に解くとともに雰囲気ガスは微小区間内では直ちに混合するものと仮定して、複数種類の粒子の挙動の評価を可能とした。
- (2) 田村らのモデルでは微粉炭の熱分解反応速度を揮発量の1次関数で評価するとともに、実際の揮発量の工業分析値からの増加分を実験値をもとにした回帰式で求めた係数を工業分析値にかけて評価していた。これに対して、高温での熱分解反応と低温での熱分解反応の2反応の競合モデルで評価するようにした。すなわち、田村らのモデルではBadziochら<sup>16)</sup>によって提示されている、等温気化過程に対する一段階プロセスの速度式により評価しているため、雰囲気特に温度変化の燃焼特性に及ぼす影響を評価することが不可能であった。また  $Q$  ファクターをはじめとする炭種の影響を評価するためのパラメータも一般性に欠ける難点があった。そこでKobayashiら<sup>17)</sup>によって提示されている低温反応と高温反応の2反応競合モデルを採用することで、雰囲気温度の変化の燃焼特性に及ぼす影響を考慮することとした。

Fig.11に空間燃焼実験装置と同様の空塔燃焼条件（送風温度：1280°C、微粉炭比：175 g/Nm<sup>3</sup>、酸素比：0.82）における、高揮発分炭（Table 1のCoal A1）単独および低揮発分炭（Table 1のCoal B1）単独と両者を等質量混合した場合の微粉炭の燃焼特性について評価した結果の一例を示す。ガス温度の極大値である燃焼焦点は、高揮発分炭で吹込位置より150 mm程度、無煙炭では220 mm程度に位置し

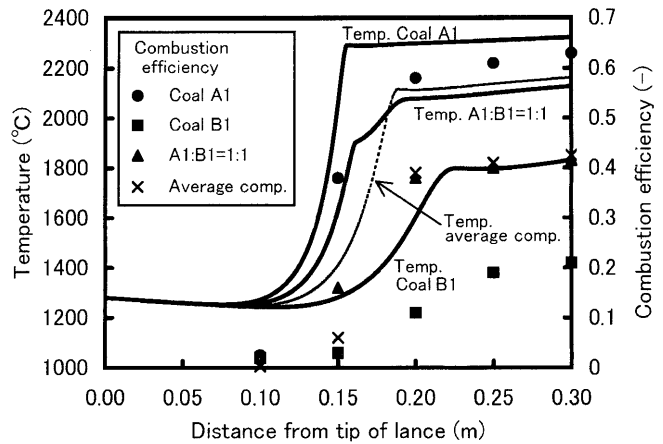


Fig. 11. Comparison of calculated gas temperature values between single and mixed pulverized coal combustion, and difference from calculated values in case of adoption of average composition.

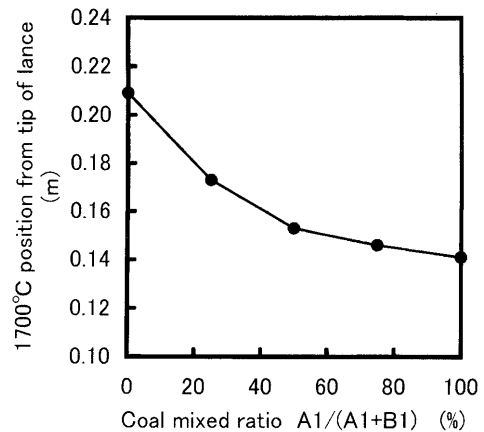


Fig. 12. Results of calculation of relationship between coal mixing ratio for mixed pulverized coal combustion and position from lance tip in which gas temperature reaches 1700°C.

ている。混合して燃焼させることにより、昇温カーブが両者の中間よりも手前になることが確認された。これは両者の平均組成を採用して計算した結果では表現されていない現象であり、数学モデルからも混炭効果が確認された。混合の割合を変えた場合にガス温度が1700°Cに到達する位置の変化をFig.12に示す。高揮発分炭の混合割合が比較的小さい場合でも、ガス温度が1700°Cに到達する位置は手前に移動することがわかる。

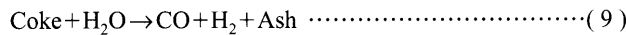
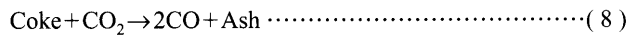
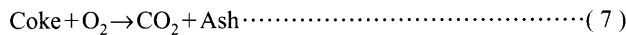
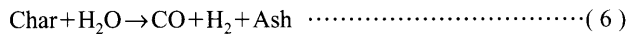
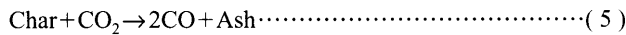
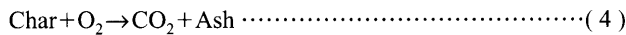
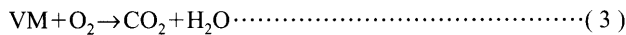
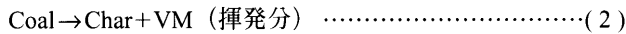
なお、実験値と計算値との間に温度レベルや位置などに差異があるが、計算では放散熱の影響を取り込んでいないこと、すべての粒子とガスが理想的に完全混合すること、実験では炉中心軸上で温度を測っているが全断面の代表的温度ではないことなどに起因するものと考えられる。ここでの解析では、相対的な変化を評価することを目的としているため、補正パラメータの設定による絶対値のフィッティングはあえて行わなかった。

#### 4.3 混合微粉炭のレースウェイでの燃焼挙動の推定

前項でのシミュレーションは微粉炭単独の空間燃焼を想

定したものであるため、実際の高炉の羽口前状況とは異なる。このため、田村らのモデルをベースに以下の点を修正し、羽口前燃焼帯のモデルを構築した。

田村らのモデルでは燃焼帯における断面積を一定としているが、今回のモデルでは羽口中心軸上に広がり角30°で広がる燃焼空間を仮定<sup>18)</sup>し、羽口先端あるいは微粉炭吹込ランス先端から、位置 $x$ 、長さ $dx$ の微小円筒について伝熱と反応にともなう熱量および物質質量変化について微分収支をとるものとした。ただし、羽口・レースウェイ内の通過および微粉炭・コークスの加速にともなうガスの圧力変化は無視し、断面積変化にガス線速度が反比例すると仮定した。また、田村らのモデルでは、微粉炭の分解・揮発分の燃焼とチャーの燃焼反応を逐次反応と仮定していたが、混炭の影響を明らかにするために、分解前の微粉炭と分解後のチャーの混在を許容するものとした。このため、異炭種の分解や燃焼は独立に進行するものとし相互作用は無いものと仮定した。ただし、分解・燃焼に伴うガス組成および温度変化が間接的にその場の各炭材の反応に影響することになる。個々の微粉炭の反応としては田村らのモデルと同様に以下の反応を考慮した。



反応速度については、(2)は揮発量の1次式である二反応の競合として取り扱い、反応速度定数はKobayashiら<sup>17)</sup>の値を採用した。また、(3)の反応は瞬間的に完了、(4)~(6)は反応と拡散の競合、(7)~(9)は拡散律速と仮定し、速度定数などは田村らのモデルで採用している値をそのまま用いた。

Fig.13に、Table 1におけるCoal B1単独およびCoal A1とCoal B1との等量混合時のガス組成分布、ガス温度分布の計算結果を示す。計算条件は、送風温度：1150°C、送风量：4200 Nm<sup>3</sup>/min、酸素量：200 Nm<sup>3</sup>/min、微粉炭量：0.78 t/minとした。微粉炭吹込み後、微粉炭の昇温に伴う揮発分の放出と燃焼によりCO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oが増加する。レースウェイ内で生成したチャーおよびコークスが燃焼するとともに生成したCO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oと反応しCOおよびH<sub>2</sub>が生成する。高揮発分炭と低揮発分炭との混合燃焼時は低揮発分炭単独

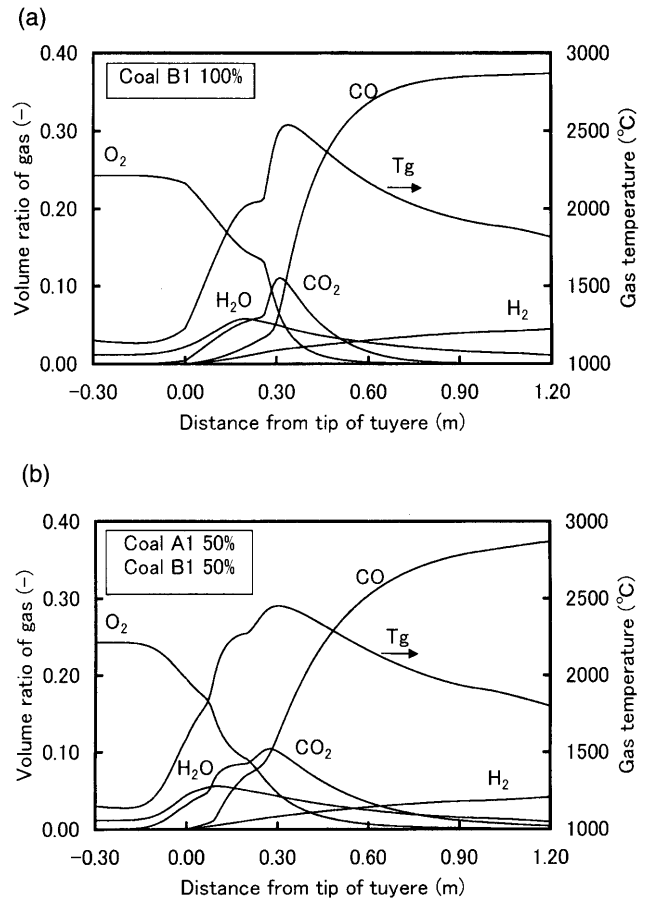


Fig. 13. Calculation results on the distribution of gas composition and temperature in front of tuyere. (a) Single combustion of Coal B1. (b) Mixed combustion of equal amounts of Coal A and Coal B.

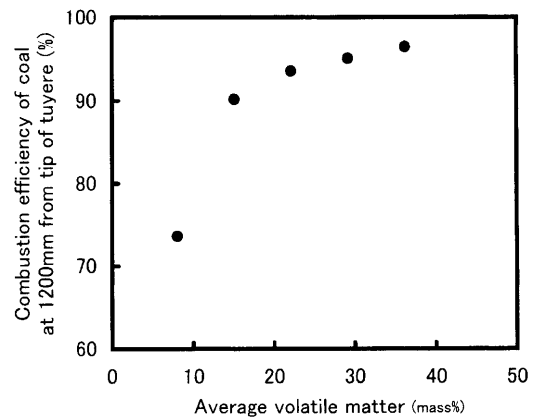


Fig. 14. Calculated change in pulverized coal combustion efficiency at 1200mm from tuyere tip due to change in average volatile matter content.

燃焼時と比較して、揮発分の放出、燃焼によるO<sub>2</sub>の消費、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oの生成が速やかに進行しCO<sub>2</sub>のピークで示される燃焼焦点が微粉炭吹込み位置に比較的近い位置となっているが、低揮発分炭単独では揮発分の放出、燃焼が少ないために燃焼焦点が炉内側に位置している。高揮発分炭と低揮発分炭を混合した場合の、羽口先から1.2mにおける微粉炭燃焼効率と平均揮発分との関係をFig.14に示す。平均揮

発分が10%以下では燃焼効率は大幅に低下するため、低揮発分微粉炭の燃焼の促進には一定以上の高揮発分炭の混合が必要かつ効果的であると考えられる。

## 5. 結言

微粉炭の揮発分と高炉の還元材比との関係に関して、炉下部発熱量の概念を導入し検討を加えた。また、竪型円筒燃焼炉での空間燃焼実験により高揮発分炭と低揮発分炭との混合微粉炭の燃焼挙動に関し明らかにするとともに燃焼シミュレーション解析により検討を加えた。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 高炉の1400°C以上の領域での微粉炭の有効発熱量について検討し、炉下部での熱バランスが律速となっている操業においては、微粉炭の平均揮発分が低いほうが還元材比の低減に効果があることを示した。

(2) 低揮発分炭と高揮発分炭を混合使用することにより、燃焼温度はそれぞれ単独の場合の加重平均値よりも高温側に偏倚し、特に初期の昇温の促進効果が顕著である。これは高揮発分炭が高温の燃焼場を形成し低揮発分炭の燃焼を促進しているためと考えられる。

(3) 複数の炭種の混合燃焼挙動が推定可能な燃焼モデルを策定し、低揮発分炭に対する高揮発分炭の燃焼促進効果を明らかにした。平均揮発分が10%以下では燃焼効率は大幅に低下するため、燃焼の促進には一定以上の高揮発

分炭の混合が効果的である。

## 文 献

- 1) Advanced Pulverized Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation, ed. by K.Ishii, Pergamon, Oxford, (2000).
- 2) C.Yamagata, S.Suyama, S.Horisaka and Y.Kajiwara: *Sumitomo Met.*, **44** (1992), 36.
- 3) T.Ariyama, M.Sato, R.Murai, K.Miyagawa, K.Nozawa and T.Kamijo: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 1114.
- 4) M.Shimizu, R.Ito and K.Hoshino: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 6.
- 5) T.Kamijo, N.Takahashi, K.Hoshino, Y.Yoshida, R.Ito, K.Shibata and H.Miyagawa: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 848.
- 6) K.Nozawa, T.Kamijo and M.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 882.
- 7) K.Takeda, N.Ishiwata, T.Uchiyama and H.Itaya: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 2.
- 8) K.Yamaguchi, H.Ueno and K.Tamura: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1214.
- 9) K.Yamaguchi, T.Sugiyama, T.Yamamoto, H.Ueno and S.Matsunaga: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 2.
- 10) T.Nishimura and K.Kunitomo: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 115.
- 11) K.Kunitomo and T.Nishimura: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 857.
- 12) T.Nishimura and K.Kunitomo: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 858.
- 13) J.He, M.Kuwabara and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), 1847.
- 14) K.Tamura, H.Ueno, K.Yamaguchi, M.Sugata, S.Amano and K.Yamaguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 755.
- 15) X.Xingguo, K.Nozawa, S.Sasahara, M.Shimizu and S.Inaba: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1230.
- 16) S.Badzioch and P.G.W.Hawksley: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **9** (1970), 521.
- 17) H.Kobayashi, J.B.Howard and A.F.Sarofim: 16th Symp. Int'l on Combust., The Combustion Institute, Pittsburgh, (1976), 411.
- 18) K.Nozawa, K.Miyagawa, R.Ono, T.Kamijo and M.Shimizu: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 74.