微小重力場を用いた石炭燃焼機構に関する研究[†]

須田俊之^{1††}・益子克己¹・佐藤順一¹・宮前茂広¹
伊藤献一²・北野邦尋³・池田光二³

¹石川島播磨重工業（株），135-8732 江東区豊洲 3-1-15

²北海道大学工学部 機械工学科，060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

³通産省工業技術院 北海道工業技術研究所，062-0052 札幌市豊平区月寒東 2 条 17 丁目

石炭は、その埋蔵量の大きさから将来のエネルギー源として重要であるが、単位エネルギーあたりの二酸化炭素排出量が他の化石燃料に比べ多く、そのクリーンで高効率な燃焼技術の開発が求められている。微粉炭酸素燃焼技術は、石炭を酸素/循環排気ガスで燃焼させることで排ガスを全て二酸化炭素として回収する方法であり、窒素酸化物の低減などからも将来期待される石炭燃焼技術である。このような新しい石炭燃焼技術を開発する上で、石炭の基礎的な燃焼機構を解明することが重要であるが、著者らのグループではベンチスケールの微粉炭バーナによる燃焼試験に加え、微小重力場を用いることで石炭の基礎的な燃焼挙動を探ってきた。本報では、その中でも微粉炭粒子群中の火炎伝播機構に関する研究、および単一石炭粒子の燃焼挙動に関する研究について紹介する。

緒 言

全世界のエネルギー源の中で、石炭の占める割合は 27% 程度と大きく、石油に次ぐ重要な 1 次エネルギー源である。近年二酸化炭素による地球温暖化問題が注目されているが、石炭燃焼から発生する二酸化炭素は他の化石燃料よりも大きいため、二酸化炭素の分離・回収を考えた上での高効率な石炭燃焼システムを考える必要がある。このようなシステムの中で注目されている技術の一つに、微粉炭酸素燃焼技術が挙げられる (Noguchi, 1994; Okawa *et al.*, 1997)。本システムは、微粉炭を酸素及び再循環させた燃焼排ガス中で燃焼させることにより、燃焼排ガスから分離することなく高濃度で二酸化炭素を回収する技術である。システムの概略図を Fig. 1 の b に示す。この方法により、排気ガス中の二酸化炭素濃度は 95% 以上になり、脱硝・脱硫特性も改善される。また、従来型空気燃焼ボイラ+アミン吸収法による二酸化炭素回収型石炭燃焼システム (Fig. 1 a) に比較して、微粉炭酸素燃焼ではプラント効率が数% 向上することが試算されており、その優位性が確認されている。

このような新しい石炭燃焼技術を開発する上で、石炭の基礎的な燃焼メカニズムを解明することは重要である。石炭の基礎的な燃焼機構については、着火温度、火炎伝播速度などについて古くから数多くの報告があり、その実験的・理論的研究がいくつかのレビューにまとめられている (Essenhig, 1977; Krazinski *et al.*, 1979)。しかし、これら実験では、粒子の沈降・自然対流の影響により燃焼場の攪乱が起り、実験装置・手法によって実験結果がばらついてしまうという問題がある。このことは、石炭燃焼機構についての統一的な見解を得ることを困難にしており、理論解析との比較を難しくしている。これに対し微小重力環境では、粒子の沈降がないため比較的均一に微粒子群を空間中に分散でき、

また自然対流も発生しないため、本質的な石炭燃焼挙動を観察でき、その基本的メカニズムの解明に役立つと考えられる。

著者らのグループは、微粉炭酸素燃焼技術の開発のために、ベンチスケールの微粉炭バーナによる燃焼試験に加え、微小重力場を利用した石炭燃焼機構の研究を行ってきた。微小重力場を利用するメリットを最大限に生かすため、本研究では、石炭燃焼機構の中でも微粉炭粒子群中の火炎伝播機構に関する研究、および単一石炭粒子の着火挙動に関する研究を行い、火炎伝播速度および着火温度に対する各種燃焼パラメータの影響を探った。以下にその詳細を述べる。

1. 微粉炭粒子群の火炎伝播機構に関する研究

石炭の燃焼技術として最も広く用いられている方法は、石炭を平均粒径 70 μm 程度に微粉化して燃焼させる微粉炭燃焼である。このような微粉炭火炎の安定化には、微粉炭粒子群中の火炎伝播機構が重要である。本研究では、微粉炭火炎伝播機構の解明のために、微小重力場を利用することで球形燃焼容器中に均一な微粉炭粒子群を形成し、その火炎伝播挙動の観察を行った。試験では火炎伝播速度の測定を行い、火炎伝播速度に対する微粉炭空間中濃度、炭種、雰囲気ガス（特に二酸化炭素）など各種パラメータの影響を探った。

1.1 実験装置および方法

Fig. 2 に実験装置の概略図を示す。本装置では内径 200 mm の球形燃焼容器を用い、微粉炭を燃焼容器内に分散させ、容器中央部にて着火、高速度カメラによって火炎を撮影することで火炎の伝播挙動を観察した。微粉炭はあらかじめ燃焼容器下部に溜めておき、雰囲気ガスによって粒子を搬送し、分散管 ($\phi 1$ mm の穴が複数開いた環状の管) を通して燃焼容器内に分散させることで均一な粒子・ガス混合気を形成した。なお、微粉炭の空間濃度は、微粉炭投入量と燃焼容器体積から求めた。微粉炭粒子群への着火は、微粉炭粒子が停止するのを待った後 (7 秒間)、容器中央部に設置したニクロム線によって行った。火炎伝播挙動の観察は、16 mm 高速度カメラによって毎秒 500 コマで撮影することによって行い、火炎面位置の時間変化から火炎伝播速度を算出した。雰囲気

[†] 平成 11 年 5 月 24 日受理

Joint 1st Pan-Pacific Basin Workshop and 4th Japan-China Workshop on Microgravity Sciences (東京, 1998 年 7 月) にて発表

^{††} toshiyuki_suda@ihi.co.jp

Table 1 Physical and Chemical Analysis of Coal

Analysis	Coal A	Coal B	Coal C
Proximate (wt%)			
Moisture	5.47	3.52	2.76
Ash	10.52	11.70	12.09
Volatile	45.99	36.15	32.91
Fixed Carbon	37.96	48.63	52.24
Elemental (wt%, daf)			
Carbon	66.62	67.87	70.77
Hydrogen	5.82	5.01	4.84
Nitrogen	1.04	1.43	1.62
Organic Sulfur	0.18	0.99	0.59
Oxygen	16.28	12.06	9.28
Heating Value [cal/g]	6,630	6,680	6,920

Fig. 1 Comparison of coal combustion system with CO₂ recovery

気ガスとしては、酸素燃焼時における火炎伝播挙動を探るために、N₂/O₂ 及び CO₂/O₂ ガスを用いた。なお、酸素濃度が低い場合には火炎が安定に伝播しなかったため、酸素濃度は40%に固定した。その他、粒子の温度変化を測定するため高速度カメラと組み合わせた2色法の観察装置を用い、また圧力計及びノート型パソコンによって燃焼チャンバー内の圧力変化を測定した。

本研究では、微粉炭として揮発分含有量の異なる3種の石炭を用いた。その工業分析・元素分析結果をTable 1に示す。A, B, C炭の順に揮発分含有量が少なくなり、燃料比(=固定炭素/揮発分)はそれぞれ、0.8, 1.3, 1.6となる。なお、微粉炭は粒径53~63 μmのものを用いた。微小重力場を得る手段としては、北海道上砂川町にある(株)地下無重力実験センター(JAMIC)の落下塔設備を用いた。本設備は、10⁻⁴ gの微小重力環境を約10秒間提供することができる。

1.2 実験結果及び考察

1.2.1 火炎伝播挙動観察結果 Fig. 3に、本試験における微粉炭火炎伝播の様子を、A炭(N₂/O₂), C炭(N₂/O₂, CO₂/O₂)について示す。画像より、燃焼容器中央部に着火した火炎が、ほぼ球形に伝播している様子がわかる。火炎径の時間変化の測定結果では、火炎径は時間にほぼ比例して増加しており、本研究におけるような初期の火炎伝播挙動の観察範囲では、チャンバー内の圧力増加の影響はほとんどないものと思われる。火炎の伝播速度を比較すると、C炭の火炎伝播速度の方がA炭よりも遅く、揮発分の少ない石炭ほど火炎伝播速度が小さくなるのが分かる。また、火炎の明るさについても、C炭の方がA炭よりも暗く、伝播速度と同じ傾向を示している。特徴的なのは、CO₂/O₂ 雰囲気下では、N₂/O₂ 雰囲気と比べ火炎伝播速度、火炎輝度とも著しく減少

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

Particle diameter : 53-63 μm, O₂ : 40%
Fig. 3 Flame propagation in coal dust clouds

していることである。A炭における火炎の拡大画像をFig. 4に示す。火炎面で微粉炭粒子が個々に燃焼している様子が確認され、微粉炭粒子周りの火炎径は粒径のおよそ10~20倍であった。

1.2.2 火炎伝播速度測定結果 火炎伝播速度に対する微粉炭空間中濃度の影響をFig. 5に示す。全ての炭種とも、微粉炭濃度の増加と共に火炎伝播速度が増加し、ある最大値を取った後減少しているのが分かる。現在までの研究から、石炭粒子からの揮発分放出が粒子の着火過程に大きく影響することが分かっている(Essenhight *et al.*, 1989)。微粉炭濃度が小さい場合、石炭粒子の燃焼による熱供給が小さく、また揮発分放出量も少ない。また、逆に微粉炭濃度が大きい場合は、微粉炭粒子による熱容量増加の影響が大きくなり、粒子の昇温速度が小さくなる。これらの影響により、火炎伝播速度がある微粉炭濃度で最大値を取ると考えられる。なお、常重力場における平面火炎バーナによる実験でも同様の結果が得られているが(Smoot and Horton, 1977)、本研究の方が伝播速度の最大値は高めである。これは、本研究では酸素濃度が40%と高いこと、また常重力場における実験では微粉炭の

Coal A, particle diameter: 53–63 μm , CO_2/O_2 , O_2 : 40%
Fig. 4 Burning image of coal particles

particle diameter: 53–63 μm , O_2 : 40%
Fig. 5 Flame propagation velocity of coal dust clouds

沈降速度の影響があること、などが挙げられる。

微粉炭粒子群中の平均粒子間距離は、微粉炭濃度から下記の式によって求められる。

$$L = [(1/6\pi\rho d^3)/G]^{1/3} \quad (1)$$

L : 平均粒子間距離 [m] ρ : 粒子密度 [kg/m³]

d : 粒子径 [m] G : 微粉炭濃度 [kg/m³]

Eq. (1) により、Fig. 5 の横軸を粒子間距離に変換したものを Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、粒子間距離が約 $L=0.5 \text{ mm}$ のとき、すなわち粒径の約 10 倍程度になる場合に火炎伝播速度が最大となっている。これは、粒子周囲に形成される火炎径とほぼ同じオーダーである。気体燃料の層流予混合火炎では、伝播火炎前面の予熱帯厚さ δ は下記式で表される。

$$\delta = \alpha/v \quad (2)$$

δ : 予熱帯厚さ [m] α : 温度伝導度 [m^2/s]

v : 火炎伝播速度 [m/s]

Fig. 5 より $v=1.0 \text{ m/s}$ とすると、予熱帯厚さは窒素雰囲気では $\delta=0.03 \text{ mm}$ 、二酸化炭素雰囲気では $\delta=0.01 \text{ mm}$ 程度となり、粒子間距離に比較して十分に小さい。このことは、微粉炭粒子の加

particle diameter: 53–63 μm , O_2 : 40%
Fig. 6 Effect of distance between particles on flame propagation velocity

particle diameter: 53–63 μm , O_2 : 40%
Fig. 7 Effect of fuel ratio on maximum flame propagation velocity

熱は、主に隣接した粒子火炎からの輻射によっていることを示している。

炭種別に比較すると、揮発分含有量が大きくなるほど火炎伝播速度も増加しており、粒子間火炎伝播機構に個々の粒子からの揮発分放出過程が大きな影響を与えていることが分かる。Fig. 7 に火炎伝播速度最大値に対する燃料比の影響を示す。なお、燃料比は揮発分含有量に対する固定炭素含有量の比で表される。微粉炭粒子群中の火炎伝播機構としては、① 個々の粒子の着火により火炎が伝播、② 揮発分と雰囲気ガスとの可燃性混合気中の気相火炎伝播、③ 粒子周囲の揮発分混合気が隣接した粒子の火炎と接触・着火することによる火炎伝播、などが考えられる。火炎面の観察結果からは、個々の粒子が着火・燃焼している様子が見受けられており、①もしくは③の機構で火炎が伝播している可能性が高い。最も簡単な石炭からの熱分解モデルでは、揮発分放出速度は次式のように表される。

$$dV/dt = k \cdot (V_\infty - V) \quad k = B \exp(-E/RT) \quad (3)$$

V : 揮発分放出量 V_∞ : 最大揮発分放出量

これは、揮発分含有量の大きい石炭ほど、粒子からの揮発分の放出速度も大きくなることを表している。Fig. 7 から、燃料比が小さい、つまり揮発分含有量の大きい石炭ほど火炎伝播速度が大きくなる。

Coal B, particle diameter: 53-63 μm , O_2 : 40%
Fig. 8 Temperature change of coal particle

particle diameter: 53-63 μm , O_2 : 40%
Fig. 9 Luminosity change of pulverized coal cloud flame in N_2/O_2 gas

なっているが、その原因として、揮発分放出速度の増加により粒子周りの火炎成長速度が大きくなり、③の機構によって火炎伝播速度が上昇したことが挙げられる。

本研究では火炎伝播速度に対する二酸化炭素の影響を調べたが、Fig. 5, 7 から分かるように、二酸化炭素雰囲気下では、火炎伝播速度は窒素雰囲気下と比較し 1/3~1/5 まで著しく低下する。Fig. 8 に、2 色法によって測定した微粉炭粒子の温度変化を示す。 N_2/O_2 雰囲気下に比べ、 CO_2/O_2 雰囲気下では、粒子温度の最大値が大きく減少し、また粒子の昇温速度も小さいことが分かる。二酸化炭素の影響としては、① 熱・物質移動への影響、② 化学反応への影響 ($\text{Char} + \text{CO}_2$)、が考えられるが、 $\text{Char} + \text{CO}_2$ の反応速度は燃焼反応の速度に比較して数桁小さいことが分かっており (Wen *et al.*, 1979)、反応への影響は小さいと考えられる。熱移動への影響としては、二酸化炭素の熱容量が窒素に比較して 1.5 倍以上大きいこと、また輻射を再吸収することから、個々の粒子の昇温速度が小さくなり、熱分解速度の低下によって火炎伝播速度が低下したものと考えられる。これは、Fig. 3 において CO_2/O_2 中では火炎輝度が低いことから推測される。また、二酸化炭素中ではメタンの拡散係数が窒素に比較して 2/5 倍まで低下するため、粒子周りの火炎の成長が遅くなり、前述した③の機構による火炎伝播速度の低下を招いたものと考えられる。これら影響により、 CO_2/O_2

Fig. 10 Schematic diagram of the experimental apparatus

中では N_2/O_2 中に比較して火炎伝播速度が著しく低下するものと考えられる。本結果は、微粉炭酸素燃焼用の実機微粉炭バーナーを考えた場合、火炎の安定化を考慮した設計が重要であることを示唆している。

なお、Fig. 8 の粒子温度測定結果から、粒子の温度が一度減少した後再度上昇している様子が観察される。火炎伝播の観測でも、火炎が燃焼容器端まで伝播した後火炎の輝度が一度減少し、再度明るくなるという現象が観察された。この現象を定量的に測定するため、フィルム画像をコンピュータに取り込み、画像解析ソフトによって解析し、画面全体の明るさを積分した値を火炎輝度として求めた。炭種別による火炎輝度の時間変化を Fig. 9 に示す。この結果より、一度輝度が上昇してから再度減少する時間は着火後はほぼ 60 ms であり、A 炭に比べ C 炭では輝度の減少が著しいことが分かる。原因として考えられるのは、① 初期に微粉炭中の揮発分の燃焼が起こりその後表面燃焼がおこる、② 揮発分の成分が二種以上ありその放出時間が異なる、などが考えられる。この場合、C 炭の方が輝度の減少が大きく、また C 炭の揮発分含有量が少ないことから考えると、火炎輝度の減少は①によるものであり、C 炭は揮発分の燃え切り時間が早いので輝度の減少が大きかったと考えることができる。同様な現象が常重力場における試験にも見られるが (Chen *et al.*, 1995)、原因は明らかにされておらず、さらに実験・解析を行う必要がある。

2. 単一石炭粒子の着火機構に関する研究

1 章の微粉炭粒子群中火炎伝播挙動の観察結果より、微粉炭火炎伝播速度に対する各種燃焼パラメータの影響が明らかとなり、特に CO_2/O_2 雰囲気下では火炎伝播速度が著しく小さくなることが分かった。火炎面の拡大画像からは、個々の微粉炭粒子が着火し火炎が伝播している様子が見受けられた。従って、火炎伝播機構の解明には、個々の石炭粒子の着火機構解析が重要となる。本研究では、単一の石炭粒子を輻射ヒーターによって昇温・着火させ、その燃焼挙動および着火温度の測定を行った。また、着火温度に対する各種燃焼パラメータの影響を調べた。

2.1 試験装置及び方法

Fig. 10 に本試験で用いた試験装置を示す。本装置では、粒径約 1 mm の単一石炭粒子を、石英ファイバーによってはさむことで空間中に保持し、スポットヒーター (出力 75 W) を 4 方向から照射することで昇温させた。石炭粒子の燃焼挙動は、8 mm VTR 及び高速度カメラ (500 コマ/秒) によって撮影し、粒子からの揮発

Air, heating rate 938-966 K/S
Fig. 11 Combustion behavior of single coal particle

Fig. 12 Particle temperature and ionization probe signal

分放出挙動及び着火挙動を観察した。石炭粒子の温度変化は、石英ファイバーに取り付けた線径 0.05 mm の熱電対、及び 2 色法によって測定し、粒子の着火温度を求めた。石炭粒子及び着火装置は、内径 200 mm のチャンバー内に設置し、雰囲気気を変化させることができるようにした。なお、粒子の昇温速度は、照射するスポットヒータの数を増減させることで、300~1,200 K/s の範囲で変化させた。

本装置では、気相における着火を判定するために、白金線電極からなるイオンプローブを石炭粒子近傍に設置した。熱電対とイオンプローブの信号は、直流アンプによって増幅した後、コンピュータによって取り込み、その時間履歴を測定した。

試験では揮発分含有量の異なる 3 炭種を用いた。各炭種の分析結果は Table 1 と同様のためここでは省略する。雰囲気気には、空気、 N_2/O_2 及び CO_2/O_2 ガスを用い、酸素濃度を 21~60% の範囲で変化させた。圧力は全て常圧で行った。また全ての実験は、北海道小砂川町の地下無重力実験センターにおいて行った。

2.2 実験結果及び考察

2.2.1 燃焼挙動観察結果 Fig. 11 に、空気中における各炭種の燃焼挙動を 8 mm VTR によって観察した結果を示す。Fig. 11 はヒータ照射直後から 1.5 秒後までの画像で、粒子の昇温速度は約 950 K/s である。石炭粒子を加熱すると、まず粒子周囲から揮発分が放出される様子が観察される。その挙動は炭種によって異なり、A 炭では比較的均一に揮発分が放出されたが、B、C 炭ではジ

Fig. 13 Effect of heating rate on T_s

ェット状に放出される様子が観察された。燃焼後の石炭粒子を走査型電子顕微鏡によって観察すると、A 炭では表面にメッシュ状の比較的均一な孔が空いているが、B、C 炭では比較的大きな孔が表面に分布しており、Fig. 11 で得られた揮発分の放出挙動を裏付ける結果が得られた。

8 mm VTR の観察結果から、粒子から揮発分が放出された後、粒子周りのガスが急激に消散の様子が観察された (Fig. 11, A, B 炭 1.5 s 後の画像)。ガスが消散した時間とイオンプローブの信号が検出された時間がほぼ同じことから、これは粒子周りの揮発分による可燃性混合気の着火の影響だと考えられる。

2.2.2 着火温度に対する昇温速度の影響 Fig. 12 に、熱電対によって測定した石炭粒子の温度履歴、及びイオンプローブ信号の測定結果例を示す。粒子温度履歴から、粒子温度の傾きが急激に上昇する点があり、イオンプローブ信号のピークが得られた時間と異なっていることが分かる。粒子温度の急激な変化は、粒子自体の燃焼反応によるものと考えられ、本研究ではその温度を表面着火温度 (Heterogeneous Ignition Temperature, T_s) とした。また、イオンプローブ信号のピークは気相における着火を示しているため、その際の粒子温度を気相着火温度 (Homogeneous Ignition Temperature, T_g) とした。

Fig. 13 に、表面着火温度 T_s に対する昇温速度の影響を 3 炭種について示す。Fig. 13 より、昇温速度の増加に伴い T_s も増加することが分かる。現在までの研究により、昇温速度が増加すると石炭粒子からの揮発分放出速度・放出量が増加することが分かっているが (Kobayashi *et al.*, 1977)、これは石炭粒子表面での酸素濃度の減少を引き起こす。酸素濃度の減少により表面着火温度は上昇するので (Du and Annamalai, 1994)、これにより昇温速度が増加すると表面着火温度が増加すると考えられる。また、炭種別に見ると、揮発分の最も多い A 炭の T_s が最も大きく、これも上記考察を裏付けている。なお、B 炭と C 炭を比較すると、揮発分の多い B 炭の方が T_s が低くなっているが、揮発分の放出挙動 (ジェット強度の大小など) が影響しているものと考えられる。

2.2.3 着火温度に対する酸素濃度、二酸化炭素の影響 Fig. 14 に、 T_s に対する酸素濃度及び二酸化炭素の影響を、A 炭及び B 炭について示した。なお、粒子昇温速度は約 800 K/s に固定した。Fig. 14 より、A 炭 B 炭とも酸素濃度の上昇と共に T_s が減少していることが分かる。気相での酸素濃度が上昇すると、粒子表面近傍での酸素濃度も上昇すると考えられ、これにより表面着火温度

Fig. 14 Effect of oxygen concentration and CO₂ on T_s

が減少すると考えられる。微粉炭バーナーによる燃焼試験でも、酸素濃度の上昇と共に微粉炭が着火しやすくなることが確認されており、Fig. 14 の結果を裏付ける結果が得られている。

CO₂/O₂ 雰囲気と N₂/O₂ 雰囲気の場合を比較すると、A 炭では CO₂/O₂ 雰囲気の T_s の方が若干低くなっている。二酸化炭素の影響としては、1.2 章で述べたように、化学反応への影響 (Char + CO₂ → 2 CO)、また熱・物質輸送への影響が考えられる。但し Char + CO₂ → 2 CO の反応速度は、前述したように燃焼反応に比べ数桁遅いので、熱輸送への影響の方が大きいと考えられる。考えられる原因としては、二酸化炭素が粒子からの輻射を吸収することで粒子周りのガス温度が上昇し、粒子からの熱損失が減少して着火温度が減少する、もしくは揮発分の拡散速度の減少により火炎が粒子により近づき、また粒子表面における酸素濃度の減少も抑えられるため、表面着火温度が減少した可能性が考えられる。但し、本結果についてはまだデータ数が少なく、数値解析を含めた試験によってさらに検討する予定である。

結 言

本研究では、石炭酸素燃焼技術の開発のため、微小重力場を利用して石炭の燃焼機構についての基礎的研究を行った。石炭の燃焼の中でも微粉炭粒子群中の火炎伝播機構、及び単一石炭粒子の着火機構についての試験を行い、下記結果を得た。

- (1) 微粉炭粒子群中の火炎伝播速度は、微粉炭濃度の上昇とともに増加し、最大値を取った後減少する。
- (2) 揮発分含有量の多い石炭ほど火炎伝播速度が大きくなることから、火炎伝播機構には揮発分放出過程の影響が大きい。
- (3) CO₂/O₂ 雰囲気下では、N₂/O₂ 雰囲気下にならば伝播速度が著しく減少する。
- (4) 石炭からの揮発分放出挙動は炭種によって異なり、均一に放出される場合とジェット状に放出される場合がある。
- (5) 昇温速度の上昇と共に石炭粒子の表面着火温度は増加する。

(6) 酸素濃度の上昇と共に石炭粒子の表面着火温度は減少する。

なお、本研究は平成 11 年度も継続して試験を行い、微粉炭酸素燃焼技術のみならず、他の新石炭燃焼技術の開発に役立つような石炭燃焼に関する基礎的知見を得られるように、研究を進めて行く予定である。

〔謝 辞〕 本研究は、石炭利用次世代技術開発調査一環境調和型石炭燃焼技術分野「酸素燃焼技術」の一貫として、新エネルギー・産業技術開発機構の委託により、(財)石炭利用総合センターが実施したものである。ここに謝意を示す。

Nomenclature

d	= particle diameter	[m]
G	= concentration of coal particles	[kg/m ³]
L	= average distance between particles	[m]
T_g	= homogeneous ignition temperature	[K]
T_s	= heterogeneous ignition temperature	[K]
v	= flame propagation velocity	[m/s]
V	= amount of released volatile at time = t	[-]
V_∞	= amount of released volatile at time = ∞	[-]
α	= thermal diffusivity	[m ² /s]
δ	= preheating zone thickness	[m]
ρ	= particle density	[kg/m ³]

Literature cited

- Chen, J. C., M. Taniguchi and K. Ito; "Observation of Laser Ignition and Combustion of Pulverized Coals," *Fuel*, **74**, 323-330 (1995)
- Du, X. and K. Annamalai; "The Transient Ignition of Isolated Coal Particle," *Combustion and Flame*, **97**, 339-354 (1994)
- Essenhugh, R.; "Combustion and Flame Propagation in Coal Systems: A Review," Proceedings of Sixteenth International Symposium on Combustion, p. 353-374, Cambridge, USA (1977)
- Essenhugh, R. H., M. K. Misra and D. W. Shaw; "Ignition of Coal Particles: A Review," *Combustion and Flame*, **77**, 3-30 (1989)
- Kobayashi, H., J. B. Howard and A. F. Sarofim; "Coal Devolatilization at High Temperatures," Proceedings of Sixteenth International Symposium on Combustion, p. 411-425, Cambridge, USA (1977)
- Krazinski, J. L., R. O. Buckius and H. Krier; "Coal Dust Flames: A Review and Development of a Model for Flame Propagation," *Progress in Energy & Combustion Science*, **5**, 31-71 (1979)
- Noguchi, Y.; "Pulverized Coal Combustion in O₂/CO₂ Mixtures for CO₂ Recovery," *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, **97**, 22-24 (1994)
- Okawa, M., N. Kimura, K. Omata, T. Kiga, S. Takano and M. Kato; "The Characteristics of Pulverized-Coal Combustion in the System of O₂/Recycled Flue Gas Combustion for CO₂ Recovery," The first Asia-Pacific Conference on Combustion, p. 543-546, Osaka, Japan (1997)
- Smoot, L. D. and M. D. Horton; "Propagation of Laminar Pulverized Coal-Air Flames," *Progress in Energy & Combustion Science*, **3**, 235-258 (1977)
- Wen, C. Y. and E. S. Lee; *Coal Conversion Technology*, p. 141, Addison-Wesley Publishing Company, USA (1979)

Study of Coal Combustion Mechanism under Microgravity Condition

TOSHIYUKI SUDA¹, KATUMI MASUKO¹, JUNICHI SATO¹
SHIGEHIRO MIYAMAE¹, KENICHI ITO², KUNIHIRO KITANO³
and KOUJI IKEDA³

¹*Ishikawajima-Harima Heavy Industries, Tokyo 135-8732*

²*Division of Mechanical Science, Hokkaido University, Sapporo 060-8628*

³*Hokkaido National Industrial Research Institute, Sapporo 062-0052*

Key words: coal combustion, flame propagation, ignition, microgravity, carbon dioxide.

Coal is one of the important energy source because of its large reserves. However, emission of carbon dioxide from coal combustion is larger than other fossil fuels, and so development of clean and high efficiency coal combustion systes with carbon dioxide recovery is needed. Pulverized coal combustion with oxygen and the recycled flue gas is one of promising system to recover carbon dioxide from the exhaust gas of boilers for reducing the emission of carbon dioxide to the atmosphere. In order to develop this type of new coal combustion system, it is important to study the fundamental phenomena of coal combustion. Our group is making experiments not only using bench-scale pulverized coal burners, but also using microgravity condition in order to elucidate the fundamental mechanism of coal combustion. In this paper, studies on the flame propagation mechanism of pulverized coal clouds and on the ignition mechanism of single coal particle are introduced.