付着性微粒子を含む固気二相流の長焦点顕微鏡観察[†]

幡野博之*・松田裕光**・河野尚志

ウェストバージニア大学 化学工学科^{††}

石炭の燃焼やガス化を行う際、燃焼や反応によって1から数十 μm 程度の粒子径分布を持った微粒子が生成する⁵⁾。これらが、そのまま後段のプロセスに放出されるとガスタービンブレードのエロージョンや環境への影響が問題となってくるため、クリーンアップシステムの設計が重要となる。

粒子間の相互作用が無い場合には固気二相流の圧損失¹⁾、半径方向粒子速度分布^{3,6)}、ガス速度分布⁶⁾などが検討されている。しかし、付着性の強い微粒子を含む固気二相流の流動特性の検討は行われておらず、粒子がどのような形態で飛翔しているといったことすらも十分に明らかにされていない。

そこで本研究では、ガラス製2次元ベッド中に付着性の強い平均粒子径 $7\mu\text{m}$ の酸化アルミナ粒子を混ぜた平均粒子径 $70\mu\text{m}$ のFCC粒子を流し、長焦点顕微鏡を用いて固気二相流内を撮影し粒子の飛翔状態に関する検討を行った。

実験方法

実験装置の概要をFig. 1に示す。装置本体はガラス製の2次元ベッドで気体、粒子ともにリサイクルは無い。本体の直管部は高さが4.0m、幅0.06m、奥行き0.005mの矩形断面を持ち、塔底部と塔頂部には拡大・縮小部を取り付けてある。微粒子を含む粒子は定量供給機から固気混合槽に送られ、空気中に分散された後、塔底部から装置内に供給される。塔頂から流出した粒子はサイクロンで捕集され、実験終了時までサイクロン下部に取り付けられたホッパーにためておかれる。

サイクロンで捕集できなかった粒子はバグフィルターで回収され環境中への放出を防いでいる。

実験終了後、粒子供給機内の残留粒子とサイクロンで捕集された粒子は回収、秤量され正確な粒子供給量が求められる。

撮影に用いた長焦点顕微鏡の焦点は顕微鏡の先端から約55mmの位置にあり撮影倍率は50~200倍である。長焦点顕微鏡の映像は発光時間1/7700秒のストロボライト

を利用して写真撮影している。また、撮影は入口の影響の無くなったと見なせる4と5の中間、すなわち入口から約2.4mの位置で行った。

本研究では粗粒子としてFCC触媒粒子(Fluidized Clinking Catalyst, $d_p=70\mu\text{m}$, $\rho_p=1400\text{kg/m}^3$)を、微粒子として水酸化アルミナ($d_p=7\mu\text{m}$, $\rho_p=2400\text{kg/m}^3$)を用い、微粒子濃度を変えて単位体積当たりの平均的な付着力を変えた粒子を調整している。今回は微粒子濃度、 C を重量分率で0, 5, 10, 15%として実験に使用している。

ガス空塔速度、 U_0 は1~10m/s、固気比 G_s/G_g は、1~10の間で変化させて検討している。

実験結果および考察

微粒子濃度 C を5wt%一定とし、 U_0 を1, 2, 5m/sと変えた時の管中心部における顕微鏡写真をFig. 2に示す。写真の観測空間は横2.3mm、縦1.6mm、奥行き約2mmである。ガス流速が1m/sの場合、チョーキングに近い流動状態となりほとんどの粒子は静止して写っている。ストロボライトの発光時間は1/7700秒なので粒子速度 v_p は0.1~0.2m/s以下となりガス流速 U_0 よりかなり遅くなっている。また、分散して飛翔している粒子ばかりでなく凝集体も見られる。

U_0 が、2m/s, 5m/sと増加するにしたがって粒子像はブレようになる。ブレの長さから粒子軌跡の幅を減じた長さをストロボが発光している間に移動した距離と仮定して v_p を計算した結果、このガス流速では、中心部における v_p は U_0 の1.5倍程度であった。一方、飛跡の幅から粒子径を求めることができる。この粒子濃度の場合、 U_0 が1m/sの時に見られた凝集体は U_0 が2m/s以上になるとあまり見られなくなる。

U_0 が、2m/s, 5m/sと増加するにしたがって粒子像はブレようになる。ブレの長さから粒子軌跡の幅を減じた長さをストロボが発光している間に移動した距離と仮定して v_p を計算した結果、このガス流速では、中心部における v_p 場合の映像である。この場合FCC粒子同士の凝集体が観察される。凝集体の直径は100 μm 程度とそれほど大きくはない。

微粒子濃度が10, 15wt%と増加するにつれて凝集している粒子の数が増えるため凝集体の直径も大きくなる。例えば(d)で見られるように、凝集粒子同士がさ

[†] 1989年3月4日受理

^{††} Morgantown, WV 26506-6101, USA

* 東京工業大学 資源化学研究所

** (財)電力中央研究所 横須賀研究所

Fig. 1 Outline of experimental apparatus

Fig. 2 Micrographs of powders under various gas velocity: (a) $U_0=1\text{ m/s}$ (b) $U_0=2\text{ m/s}$ (c) $U_0=5\text{ m/s}$ ($C=5\%$, $G_s/G_g=2$)

らに凝集して直径が400から600 μm にもなる巨大な凝集体も観察できる。

固気2相流中における粒子の飛翔状態をまとめると微粒子の付着状況によって以下のような4種類に分類できる。Fig. 4の拡大した顕微鏡写真で分類を説明する。ただし、顕微鏡写真は微粒子濃度が5wt%，ガス流速が2 m/sの条件で管中心から25 mm横に離れた位置で撮影している。

1. 分散粗粒子：

Fig. 4(a)に示すように粗粒子であるFCC粒子同士が凝集しないで飛翔していることも多い。ただし、本来な

Fig. 3 Micrographs of powders under various fine contents: (a) $C=0\%$ (b) $C=5\%$ (c) $C=10\%$ (d) $C=15\%$ ($U_0=1\text{ m/s}$, $G_s/G_g=2$)

Fig. 4 Various kinds of powder structure: (a) coarse particles coated with fine particles (b) flocculated particles (c) huge flocculated particles (d) fine particle (e) fine particles ($U_0=2\text{ m/s}$, $G_s/G_g=2$, $w/W=0.83$)

めらかな球状の粒子表面には凹凸が多く細かな水酸化アルミナが付着しているといえる。

2. 粉体凝集体

(a)：Fig. 4(b)に示すようにFCC粒子が数個凝集し、それらFCC粒子の凝集には微粒子が介在している。

(b)：Fig. 4(c)に示すようにFCC粒子が数十個あつまり、巨大な凝集体を形成している。

3. 分散微粒子：

Fig. 4(d)と(e)の円内に示すように微粒子が粗粒子の間を単独で飛翔している。微粒子の飛翔速度が速いため、映像は静止していないが、粒子飛跡の長さから、 v_p は0.5 m/s、粒子径、 d_p は5~10 μm 程度と計算できる。

4. 微粒子凝集体：

微粒子のみの凝集体。顕微鏡写真では実際に確認できていない。しかし、最小流動化状態付近²⁾、あるいは、サブマイクロン粒子を流動化した際のフリーボードで⁴⁾観察されており、微粒子濃度、ガス流速などの条件によっては存在する可能性がある。

固気比を変えた場合の顕微鏡写真は省くが、固気比が増えるに従って一画面内の粒子数、すなわちホールドアップが増加していた。

固気2相流内の粉体凝集体は塔中心軸上ではガス流速が増加すると、Fig. 2に示すように分散してほとんど見られなくなるが、塔中心軸から離れるとFig. 4に示すように分散しないで残っているものも多い。粉体凝集体の大きさや割合は微粒子の場合と同じように⁴⁾粉体の付着力とガスによる抗力とのバランスで決まると考えられる。これについては今後、微粒子と粗粒子の付着力といった粉体物性なども考慮して検討を行う必要がある。

Nomenclature

C = concentration of fine powder	[%]
d_p = diameter of powders	[μm]
G_s/G_g = solid loading ratio	[-]

U_0 = superficial gas velocity	[m/s]
v_p = rising velocity of powders	[m/s]
w/W = non-dimensional lateral position	[-]

ρ_p = particle density	[kg/m ³]
-----------------------------	----------------------

Literature cited

- 1) Kim, J.M. and J.D. Seader: *AIChE J.*, **29**, 353 (1983)
- 2) Kono, H.O., C.C. Huang, E. Morimoto, T. Nakayama and T. Hikosaka: *Powder Technol.*, **53**, 163 (1989)
- 3) Mann, U. and E.J. Crosby: *IEC Proc. Des. Dev.*, **16**, 9 (1977)
- 4) Morooka, S., K. Kusakabe, A. Kobata and Y. Kato: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **21**, 41 (1988)
- 5) Pilat, M.J. and T.W. Steig: *Atmospheric Environment*, **17**, 2429 (1983)
- 6) Tsuji, Y., Y. Morikawa and H. Shiomi: *J. Fluid Mech.*, **139**, 417 (1984)

Microscopic Observation of Gas-Solid Two-Phase Flow with Adhesive Fine Particles

Hiroyuki Hatano*, Hiromitsu Matsuda** and Hisashi Kono

Dept. of Chem. Eng., West Virginia Univ., Morgantown

Key Words: Fluidization, Fine Powder, Two-Phase Flow, Micrograph, Flocculated Powder, Adhesion

Adhesive fine powder of micron-order diameter affects flow properties of gas-solid two-phase flow. However, only a few fundamental research studies have been performed.

In this study, flow of a mixture of FCC ($d_p=70\mu\text{m}$, $\rho_p=1400\text{kg/m}^3$) and aluminum hydroxide ($d_p=7\mu\text{m}$, $\rho_p=2400\text{kg/m}^3$) in a two-dimensional bed ($5\times60\times400\text{mm}$) is observed with a long-distance focus microscope.

It is found that individual FCC particles are coated with aluminum hydroxide. Large flocculated powder of FCC produced by medium adhesion force of aluminum hydroxide is observed. Size and number of flocculated powder are a function of gas velocity and concentration of fine particles.

* Research Lab. of Resources Util., Tokyo Inst. of Tech.

** Yokosuka Lab., Central Research Inst. Electric Power Industry