改良型サイクロンによるフライアッシュ微粒子の高精度分級[†]

吉田英人・網 浩之・今井 清

広島大学工学部 化学工学科^{††}

横道 豊

中国電力(株) 技術研究センター^{†††}

50%分離径が可変となる改良型サイクロンを用いて、フライアッシュ微粒子を分級し、また未燃炭素に関して実験的検討を行なった。サイクロン下部に設置した円錐体高さを可変にすることで、50%分離径を0.9~2.3 μm の広い範囲で簡便に変化させることができた。また円錐体頂角を小さくすると、円錐体上壁での粒子沈着量が減少し、高精度の分級が可能となる。

50%分離径が1 μm 以下と小さくなると、微粉収率が低下し、また微粉中の未燃炭素量も増加した。未燃炭素量が増加したのは、分散器内で粗粒子が破碎し内部の未燃微粒子が分散したために生じたと考えられる。

50%分離径が小さくなると、粗粉中の未燃炭素量はほぼ一定値を示すが、微粉中の未燃炭素量は増加傾向にある。実験値は未燃炭素の物質収支を考慮した計算値とほぼ一致した。

緒 言

近年、火力発電所に於て微粉炭燃焼の割合が増加している。しかしながら石炭を燃焼した場合には多量のフライアッシュが副生するため、その有効利用を検討することが重要な課題である。フライアッシュは球形粒子であるため、セメントに混入した場合、強度や気密性の面で優れた製品ができるので従来より利用されてきた。特にフライアッシュの粒子径が小さくかつ粒度分布幅が狭い程より優れた機能が生じるため、分級操作が必要となる。使用したフライアッシュ中には未燃炭素に関して含有量の比較的多い粒子と少ない粒子の二者が存在する。未燃炭素は微粉炭粒子の粒径が大きく、かつ燃焼が不完全な場合に生じ易く、セメント中へフライアッシュを混入させる場合は未燃分の少ないフライアッシュが望ましい。よってフライアッシュを分級する場合、粒度および未燃分の両者を考慮する必要がある。

本報ではサイクロンによってフライアッシュを高精度に分級し、また分級後の粗粉および微粉中の未燃炭素含有量の変化を調べることを目的とした。

また50%分離径を変化させる新しい手法として、サイクロン円錐壁下端に設置してある円錐体高さを移動させると共に、分級特性に及ぼす円錐体頂角の影響を調べた。

さらに分級後の未燃炭素量について考察を行ない若干の興味ある新しい知見を得た。

1. 実験装置および方法

使用した実験装置をFig. 1に示す。サイクロン口径は72mmとし、また各部寸法は従来の実験により分級性能が優れた形状を基にして決定した^{1,2,5)}。粗粉捕集箱入口径が出口管径よりも大きくかつ捕集箱高さが高いのが特徴である。試験粒子として微粉炭火力発電所(中国電力(株), 新小野田火力)より副生したフライアッシュ(質量中位径 $\bar{D}_p=11.87 \mu\text{m}$, 未燃分3.2wt%)を用いた。

部分分離効率 η は各捕集粉の粒度分布を遠心沈降式粒度測定器(島津, SA-CP4L)を用いて測定し、捕集量分率を考慮して次式により算出した。ただし供給粉の粒度分布および重量は全捕集粉の合計重量と重量比を考慮して求めた。

$$\eta = \frac{\Delta W_c}{\Delta W_c + \Delta W_F} \quad (1)$$

上式で Δ は微小粒径範囲の値であり、 ΔW_c , ΔW_F はそれぞれ粗粉側および微粉フィルター側の微小粒径範囲における捕集粉塵質量である。なお粉体供給機の後にリング

[†] 1993年6月28日受理; 化学工学会第58年会(鹿児島, 1993年4月)にて一部発表, 粉体工学会春期研究発表会(京都, 1993年5月)にて一部発表

^{††} 〒724 東広島市鏡山1-4-1

Fig. 1 Experimental apparatus of cyclone classifier

ノズル式分散器³⁾(日清エンジニアリング(株))を設けてある。サイクロンの入口流速は 28 m/s^* の条件で実験した。

Fig. 2 は使用したサイクロンの各部寸法を示してあり、材質はステンレス製とした内壁はバフ研磨を施してある。サイクロンの特徴として、捕集箱入口部に設置してある円錐体が上下移動可能となっている。サイクロンの50%分離径は円錐体高さを可変することで容易に変化させることが可能である。

また円錐体頂角の影響を調べるため、 90° と 55° の2種類を用いた。また分級後の粗粉および微粉中の未燃炭素の測定では、粒子を坩堝に約 50 mg 計り取り 110°C 程度の乾燥器で水分を蒸発させた後、電気炉で 800°C の条件で2時間焼き、数回のくり返し操作の後で前後の質量差より未燃炭素量を算出した。

さらに粒度別の未燃炭素量は、Fig. 1 に示される様にサイクロン入口部で気流をサンプリングし、アンダーセンインパクトによる各段ごとの捕集粉塵に対し、前述の操作を行なうことにより決定した。

2. 実験結果および考察

サイクロンの50%分離径を変更するには、入口流速やサイクロン口径を変化させること、および入口部案内板の利用⁵⁾があるが、本報では新しく粗粉入口部の円錐体高さを調節する手法を試みた。

円錐体高さ h を $3\sim 7\text{ mm}$ の範囲で移動させた場合の部分分離効率曲線の変化をFig. 3に示す。ただし円錐体の頂角は 90° の場合である。捕集箱入口と円錐体底面の間隔 h が増加すると、50%分離径が小さくなる。また50%分離径は h が 7 mm の場合 $0.94\text{ }\mu\text{m}$ 、 h が 3 mm の場合は、 $2.31\text{ }\mu\text{m}$ であり、間隔 h を変化させることで広い範

* サイクロン入口部圧力は分散器下部からの外気の導入を行わなかったため $2.7\times 10^4\text{ (Pa)}$ となっており、 28 (m/s) は減圧下の条件での値である。

Fig. 2 Dimensions of the cyclone with movable apex cone

Fig. 3 Effect of the height of apex cone on the partial separation efficiency (apex angle 90°)

囲で50%分離径が変化することがわかる。また全体的に評価して、部分分離効率曲線が水平に平行移動する特性を示しており、円錐体高さを調整することは50%分離径を変化させる方法として望ましいといえる。

そこで、サイクロンによる分級の効果を実際に確認するために、原料および分級した粗粉、微粉を走査型電顕(JSM 5200)を用いて観察した。

Fig. 4 に分級前のフライアッシュ、間隔 $h=3\text{ mm}$ の条件で分級した粒子および $h=7\text{ mm}$ の場合で分級した粒子のSEM写真を示す。これらの粒子を比較すると、分級

(1) Feed particle

(2-a) Coarse particle $h=3\text{mm}$

(2-b) Fine particle $h=3\text{mm}$

(3-a) Coarse particle $h=7\text{mm}$

(3-b) Fine particle $h=7\text{mm}$

Fig. 4 Photographs of the feed and classified particles

前の粒子に比べて、分級後の微粉は明確に粒子径が小さくなっている。また、 $h=3\text{mm}$ と $h=7\text{mm}$ の微粉を比較すると、 $h=3\text{mm}$ の場合は微粉中に若干の粗粉の混入が認められる。しかし、 $h=7\text{mm}$ の場合、微粉は非常に粒子径が小さくかつ粒子径が揃っている。以上の結果から、円錐体高さの移動による分級径可変の効果が確認できた。

以上の結果は円錐体の頂角が 90° の場合であるが、円錐体間隔 h が小さい場合に円錐体の傾斜部壁面に一部沈着する粒子が存在した。特にFig. 4において、 $h=3\text{mm}$ の条件での微粉中の粗粉の混入は円錐体上面に沈着した一部の粒子が再飛散するために生じたと考えられる。よって粒子の沈着を減少させる目的で円錐体頂角を 55° にし、同様に実験した結果をFig. 5に示す。

間隔 h の移動範囲として、 $3.9\sim 7.8\text{mm}$ と変化しており、この場合もFig. 3と同様に50%分離径が広い範囲で変化することがわかる。またFigs. 3, 5共に粒子径の小さい領域で部分分離効率が急激に変化しており、鋭い分級が可能となっている。さらに頂角 90° の場合と比較して、頂角 55° の場合には円錐体上壁部での沈着粒子量が少なかった。これは当然ながら、頂角 55° の方が一度沈着した粒子が斜面を降下し粗粉捕集箱に入り易いために生じたものである。ただしFigs. 3, 5で s は捕集箱入口部において全面積から円錐体断面面積を除いた面積を示す。

円錐体頂角の影響をより明確にするため、捕集箱入口部の流路断面面積 s を同一条件にして部分分離効率の変化を調べた結果をFig. 6に示す。頂角 55° の場合の方が、

Fig. 5 Effect of the height of apex cone on the partial separation efficiency (apex angle 55°)

頂角 90° の場合よりも 50% 分離径がより小さい。これは頂角 55° の場合、円錐体上面で沈着した粒子が容易に捕集箱に入るのに比べて、頂角 90° の場合は円錐体上面に沈着した粒子の一部は再飛散して微粉側へ混入する確率が高いため生じたと考えられる。

Figs. 3~6 の実験結果より、円錐体高さを移動させると 50% 分離径が変化した。次に分離径が変化する原因を検討した。

Fig. 7 はモデルに用いたサイクロンの概略を示してあり、図中の斜線部 dz 区間での粒子に関する物質収支式は次式となる。

$$\frac{d}{dt}(\pi R_2^2 c dz) = -2\pi R_2 c v_r dz \quad (2)$$

なお $z=0$ はサイクロン上部を、 $z=z$ は上部より垂直方向に z 移動した面上の座標を示している。

Eq. (2) で v_r は粒子の半径方向速度であり、粒子速度が流体速度と同一であると仮定すると次式で表現される*。

$$v_r = \frac{\rho_p D_p^2 u_0^2}{18\mu R_2} \quad (3)$$

Eq. (3) を Eq. (2) に代入し、部分分離効率を求めると次式となる。

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\rho_p D_p^2 u_0^2 t_r}{9\mu R_2^2}\right) \quad (4)$$

Eq. (4) において t_r はサイクロン内部での粒子の滞留時間であり、流体の滞留容積を V とすると次式で表現される。

* 厳密には粒子径が大きい場合、粒子と流体の速度差が存在するため電算機による数値解析が必要である。

Fig. 6 Effect of apex angle of the apex cone on the partial separation efficiency

Fig. 7 Model of particle separation by the cyclone classifier

$$t_r = \frac{V}{Q} \quad (5)$$

Eq. (5) を Eq. (4) に代入して 50% 分離径と滞留容積の関係性を求めると次式となる。

Fig. 8 Relation between holdup of fluid and height of the apex cone

$$D_{p50} = \sqrt{\frac{6.24 \mu R_2^2 Q}{\rho_p u_0^2 V}} \quad (6)$$

Fig. 8はFig. 3における実験値の50%分離径を用い、Eq. (6)から計算した滞留容積 V と円錐体間隔 h の関係を示したものである。 h の値が増加すると、 V が増加し、Eq. (5)より粒子のサイクロン内部における滞留時間が増すため、より微粒子までサイクロンで捕集されることになる。なおサイクロン入口部より捕集箱入口部までの滞留容積は約750cm³であり円錐体間隔 h が3～5mmの条件では、円筒部および円錐部の一部しか流体の滞留容積とならない。

なお $h=7$ mmの条件では、捕集箱上部でも気流の旋回速度の存在⁴⁾により、分級効果を受ける粒子が観察されたため、50%分離径が小さくなったものと考えられる。

次に50%分離径の変化により微粉側未燃炭素量および微粉側の捕集効率はどう変化するかを調べた結果をFig. 9に示す。50%分離径が減少すると、微粉の捕集効率は低下し、一方未燃炭素量が増加する。実用上、分級したフライアッシュの微粉側をセメント原料として利用する場合は未燃炭素量が少ない方が望ましい。よってサイクロンの50%分離径を約1.5 μ m以上にすることが、微粉収率および未燃炭素量の点から考えて妥当である。

なお50%分離径の減少により、微粉の未燃炭素量が増加したのは、原料フライアッシュ中で粗粒子内部に存在する多数の粒径約1 μ m程度の未燃分を多く含む微粒子が分散器およびサイクロン中で分散、粉碎されて、微粉側フィルター部で回収されたために生じたと考えられる。

つまりサイクロンの50%分離径が小さくなると、微粉

Fig. 9 Change of collection efficiency and unburned carbon amount of fine particle side on the 50% cut size of the cyclone

Fig. 10 Unburned carbon distribution

側の未燃炭素量が増加したのは、原料中で粗粒子内部に存在する未燃炭素を多く含む微粒子が、リングノズル分散器で分散され、この分散した微粒子がサイクロンに入るために生じたのではないかと考えられる。よってこの点を確認するために、原料フライアッシュ中の未燃炭素量の粒子径依存性を調べた。実験手法として、Fig. 1で示される様にサイクロン入口部で気流をサンプリングし、インパクターの各段の捕集粉塵量より、各段ごとの未燃炭素量を求めた。

Fig. 10は実験結果であり、粒子径が小さくなると未燃炭素量も増加する傾向にある。即ちFig. 9において、分級した微粉側で未燃炭素量が増加したのは、原料中で微粉側に未燃炭素が多く存在したためである。

なお図中に示した $S(D_p)$ は粒子径 D_p における未燃炭素の存在割合を示す。

原料フライアッシュの粒度分布と、未燃炭素量の頻度分布の関係を調べた結果をFig. 11に示す。図中において原料粒度分布 f は、遠心沈降法による測定結果である。また未燃炭素量の粒子径依存性については、Fig. 10の実

Fig. 11 Particle size and unburned carbon frequency of the feed particles

測結果を基に、次式で計算することができる。

$$\Delta c = f(D_p) \Delta D_p \cdot S(D_p) \quad (7)$$

Eq. (7) で $S(D_p)$ は未燃炭素の粒径による変化を示し、Fig. 11 における未燃炭素の頻度分布は $f(D_p) \cdot S(D_p)$ の値を計算したものである。原料 m_0 (g) 中に含まれる未燃炭素の全量を m_c (g) とすると、未燃炭素の物質収支式より次式が成立する。

$$\int_0^\infty m_0 f(D_p) S(D_p) dD_p = m_c \quad (8)$$

即ち図中で未燃炭素の原料に対する割合は 3.2wt% となり、この値は原料中の未燃炭素量とほぼ一致している。さらに未燃炭素の頻度分布より、未燃炭素は粒子径 1 ~ 2 μm 程度の粒子に多く存在している。なお Fig. 11 の未燃炭素の計算ではインパクターの測定値を用いており、約 8 μm 以上の未燃分は Fig. 10 より約 3wt% の一定値を仮定して求めた。

次にサイクロンの 50% 分離径の変化に対し、微粉および粗粉側の未燃炭素量がどう変化するかを調べた結果を Fig. 12 に示す。50% 分離径の変化により、粗粉側未燃炭素量は 2.7 ~ 2.9 wt% となるのに対し、微粉側の未燃炭素量は分離径の低下と共に急激に増加する。粗粉側の未燃炭素量が、原料の未燃炭素量 3.2wt% より低くなっており、この減少量が微粉側での未燃炭素量の増加に寄与していると考えられる。また 50% 分離径が 2 μm 以上では、粗粉および微粉側の未燃炭素量はほぼ一定となる傾向がある。

次に分級した粗粉および微粉の未燃炭素量の変化に対して以下の検討を行なった。

原料 m_0 (g) 中に含まれる未燃炭素の全量を m_c (g) とし、未燃炭素の頻度分布関数を $f_c(D_p)$ とすると、粒子径 $D_p \sim D_p + \Delta D_p$ の領域の未燃炭素の収支は次式で表わされる。

$$m_0 f(D_p) \Delta D_p \cdot S(D_p) = m_c f_c(D_p) \Delta D_p \quad (9)$$

Eq. (9) より $f_c(D_p) \Delta D_p$ に関して次式が得られる。

Fig. 12 Relation between unburned carbon amount of the classified particles and the 50% cut size of the cyclone

$$f_c(D_p) \Delta D_p = \frac{m_0}{m_c} f(D_p) \Delta D_p \cdot S(D_p) \quad (10)$$

当然ながら $f_c(D_p)$ を粒子径について積分すると、Eq. (8) を考慮して 1 となる。

$$\int_0^\infty f_c(D_p) dD_p = \frac{m_0}{m_c} \int_0^\infty f(D_p) S(D_p) dD_p = 1 \quad (11)$$

原料中の未燃炭素の全量 m_c (g) に対して、粗粉側および微粉側における未燃炭素量を m_{c1} , m_{c2} (g) とすると、未燃炭素に関する次式が成立する。

$$m_{c1} + m_{c2} = m_c \quad (12)$$

よって粗粉および微粉側の未燃炭素量については、部分分離効率を考慮して次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \text{粗粉側} \quad \int_0^\infty \eta(D_p) f_c(D_p) dD_p &= \frac{m_{c1}}{m_c} \\ \text{微粉側} \quad \int_0^\infty [1 - \eta(D_p)] f_c(D_p) dD_p &= \frac{m_{c2}}{m_c} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

実際の計算では、Fig. 11 および Eq. (10) より $f_c(D_p)$ を求め、部分分離効率 η は Fig. 3 を用い、Eq. (13) により粗粉および微粉側の未燃炭素割合を計算することができる。ただし Eq. (13) において、サイクロン内部では粒子の粉碎は生じないものと仮定している。

Eq. (13) を用いた計算値を Fig. 12 において破線で示しており、実験値と計算値は当然ではあるがほぼ一致している。ただし 50% 分離径が小さい場合の微粉側の未燃炭素量については、実験値と計算値で差異が生じている。この理由として、未燃分測定上の誤差およびサイクロン内部における粗粒子の破碎等が考えられ、今後検討する必要がある。

結 言

50% 分離径が可変となる、改良型サイクロンを用いて

フライアッシュ微粒子の高精度分級実験を行ない以下の知見を得た。

(1) サイクロン下部に設置した円錐体高さを可変にすることで、50%分離径を0.94~2.31 μm までの広い範囲で簡便に変化することができた。

(2) 捕集箱入口部に設置した円錐体頂角を小さくすることにより、円錐体上壁面での微粒子の沈着量が減少し、かつ高精度の分級が可能となった。

(3) 50%分離径が1 μm 以下に小さくなると、微粉収率が低下し、また微粉中の未燃炭素量も増加した。なお微粉中の未燃炭素量が増加したのは、サイクロン手前の粒子分散器内で、粗粒子が破碎され内部の未燃微粒子が分散し微粉側フィルターで捕集されたため生じたと考えられる。

(4) 50%分離径の低下に対し、粗粉中の未燃炭素量はほぼ一定値を示すが、微粉中の未燃炭素量は増加傾向にあり、実験値は未燃炭素の収支を考慮した計算値とほぼ一致した。

[謝 辞] サイクロンを製作していただきました山田幸良、冬木 正様(日清製粉(株))に感謝いたします。

Nomenclature

c	=particle concentration	[kg/m ³]
Δc	=unburned carbon amount calculated by Eq. (7)	[-]
$D_p, \bar{D}_p, D_{p50}$	=particle diameter, mass median particle diameter and 50% cut size of cyclone	[μm]
$f(D_p)$	=particle size distribution, mass base	[%/ μm]
$f_c(D_p)$	=distribution of unburned carbon amount	[-/ μm]
h	=spacing between the inlet of dust box and bottom of apex cone	[mm]

m_o, m_c	=total mass of the feed and unburned carbon amount of the feed particle	[g]
m_{c1}, m_{c2}	=unburned carbon amount of coarse and fine particles respectively	[g]
Q	=feed flow rate	[m ³ /s]
R_2	=radius of cylindrical part of cyclone	[m]
$S(D_p)$	=unburned carbon amount	[-]
s	=cross sectional area of flow at the inlet of dust box	[mm ²]
t, t_r	=time and residence time of particle	[s]
u_o	=inlet fluid velocity	[m/s]
v_r	=radial particle velocity calculated by Eq. (3)	[m/s]
V	=holdup of fluid in the cyclone	[m ³]
$\Delta W_c, \Delta W_f$	=mass of collected particle of coarse and fine sides respectively	[g]
z	=coordinate of axial direction	[m]
η	=partial separation efficiency	[-]
ρ_p	=particle density	[kg/m ³]
μ	=gas viscosity	[Pa·s]
α	=apex angle of apex cone	[deg.]

Literature cited

- 1) Iinoya, K., T. Fuyuki, Y. Yamada, H. Hisakuni and E. Sue: *J. of the Soc. of Powder Tech., Japan*, **29**, (5), 351-355 (1992)
- 2) Iinoya, K., H. Hisakuni, E. Sue, T. Fuyuki and Y. Yamada: Proceedings of Second World Congress, Particle Tech., Japan, pp.120-126, Kyoto (1990)
- 3) Yamada, Y., H. Murata and K. Iinoya: Proceedings of Second World Congress, Particle Tech., Japan, pp.48-54, Kyoto (1990)
- 4) Yoshida, H., T. Saeki, K. Hashimoto and T. Fujioka: *J. Chem. Eng. Japan*, **24**, (5), 640-647 (1991)
- 5) Yoshida, H., T. Saeki, T. Fujioka, T. Ueda and T. Fuyuki: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **19**, (3), 476-482 (1993)

Separation of Flyash Particle by Revised Cyclone with High Accuracy

Hideto Yoshida, Hiroyuki Ami, Kiyoshi Imai
and Yutaka Yokomichi*

Dept. of Chem. Eng., Hiroshima Univ., Higashi-Hiroshima 724

Key Words : Cyclone Classifier, Submicron Cut-Size, Partial Separation Efficiency, Particle Size Distribution, Flyash Particle

Experimental studies were conducted on the separation of fine flyash particle by use of a revised type of cyclone with movable 50% cut size. The amount of unburned carbon in the separated particle was also measured. The 50% cut size of the cyclone was changed from 0.9 to 2.3 μm by use of the vertically movable apex cone of the cyclone. When the apex angle of the apex cone was smaller, the amount of particle deposition decreased and high-efficiency particle separation was obtained.

In the case where the 50% cut size becomes less than 1 μm , the collection efficiency of the fine-particle side decreased and amount of unburned carbon increased in the fine-particle side.

The reason why the unburned carbon increased in the fine-particle side is that coarse particles were smashed in the ring nozzle disperser and fine particles having a high unburned carbon content were introduced into the cyclone.

When the 50% cut size becomes smaller, the unburned carbon amount in the coarse-particle side was nearly constant, but the value increased in the fine-particle side. The experimental data of the unburned carbon amount agreed well with the calculated results.

* Chugoku Electric Power Co., Inc., Technical Research Center, Minami-ku, Hiroshima 732

~~~~~