

UDC 669.162.12 : 622.79

論文

## 水平式空気分級法による高炉原料中の微細粒子の除去について\*

八 田 夏 夫\*\*・小 門 純 一\*\*

### Removal of Fine Particles in Ores for Blast Furnace by Pneumatic Classifier of Horizontal Type

Natsuo HATTA and Jun-ichi KOKADO

#### Synopsis:

A pneumatic classifier of horizontal type is used instead of the wire sieve in order to eliminate fines in ores charged into blast furnace. The former is very convenient because it is free from troubles such as choking of the meshes and the breakdown in the case of the wire sieve. The removal of fines in sintered ores with increasing the mixing ratio (feed quantity to air quantity) was experimentally and theoretically examined in consideration of the scattering of the apparent specific weight and drag coefficient for the particles.

The results obtained are as follows:

- (1) The classification is effectively carried out in when a distinct difference in horizontal travelling distance according to particle size can be made, even if the apparent specific weight and drag coefficient scatter in some extent.
- (2) With increasing the mixing ratio, the classification accuracy is lowered due to increasing of the collision frequency among the particles within the classification region. It is possible to avoid to some extent by thinning the thickness of feed particle bed.
- (3) The removal of fines is considerably successful by decreasing the cross section area of duct and increasing the air velocity in the case of classifying under condition of the same feed quantity and the same air quantity.
- (4) For the increase of the mixing ratio, it is practically economical to shorten the height of the duct and to make a calm zone within the classifying region without lowering the classification accuracy remarkably.

#### 1. 緒 言

高炉装入原料の整粒の良否は高炉操業成績を左右する重要な要素の一つである。高炉内における装入物の被還元性は粒度が小さいほど良いが、炉内通気抵抗は装入物の平均粒径の1.2乗に逆比例して増加すると報告されているように<sup>1)2)</sup>、粉状のものが多く混入すると、その通気性は不良かつ不均一となり、スリップやたな吊りの発生を助長する。このような観点から、輸送中に発生した高炉原料中の微細粒子を炉前で除去することが必要となる。微細粒子の除去には、現在網目ふるいが主として使用されているが、網目の目詰まりや破損が障害となることが多い。そこで、この微細粒子の除去に空気分級法が用いられないかを検討してみた。

空気分級法において、ほぼ鉛直に落下してくる粒子群の流れに対し、気流方向を対抗流とする場合（鉛直式分級法）と直交流とする場合（水平式分級法）とが最も基本的なものである。

高炉装入原料から微細粒子を除去するという立場から、鉛直式分級法については、すでに種々の検討を行なったが<sup>3)~5)</sup>、この場合には、給鉱量の増加とともに、微細粒子の除去率が急激に悪化するという欠点があつた。しかしながら、水平式分級法では給鉱量を増加しても、5 mm 以下の微細粒子の除去率の低下は比較的少ないことが、焼結鉱のふるい分け実験で明らかになつた。

本論文では、水平式分級の際、ふるい分け粒子の見掛比重量と抗力係数のばらつきを考慮して、使用風量に対する給鉱量の比（混合率）の増大に伴う微細粒子の除

\* 昭和52年3月9日受付 (Received Mar. 9, 1977)

\*\* 京都大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kyoto University, Honmachi Yoshida Sakyo-ku Kyoto 606)

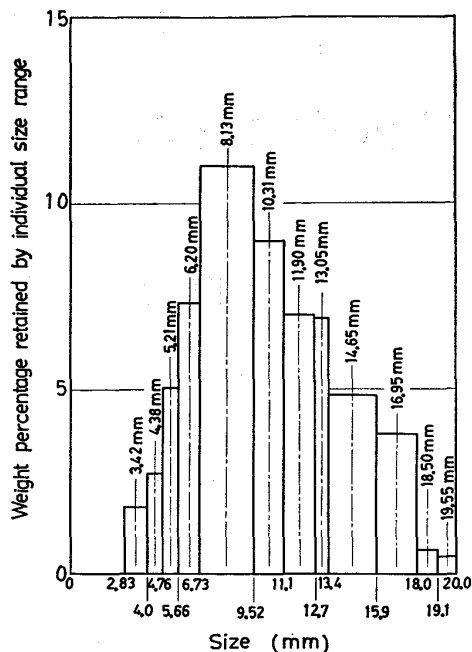


Fig. 1. Size distribution of the sintered ore used in this experiment (Size in this figure shows representative diameter of each size range).

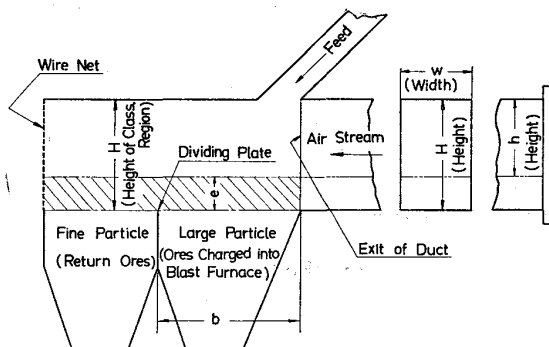


Fig. 2. Outline of experimental apparatus.

去率がどのようになるかを実験的および理論的に考察した。

## 2. ふり分け実験

空気分級によつて、高炉装入原料中に含まれる微細粒子が、どの程度除去され得るかを知らるために、焼結鉱粒子群を用いて、ふるい分け実験を行なつた。粒度を測定する際に用いた網目ふるいの網目寸法を横軸にとつて、実験に使用した焼結鉱粒子群の粒度分布を示すと、Fig. 1 のようである。寸法的に隣接する各網目区分の中間の値を代表径と呼ぶことにし、同図中に示されている寸法がそれである。また、各網目区分に属する個々の粒子について、同一比重量および同一重量の球に換算したときの換算直径は代表径とほぼ等しいことがわかっている<sup>3)</sup>。

Fig. 2 はふるい分け装置の概要を示したものである。水平気流の平均風速は 18m/s, 24m/s および 36m/s とし、使用風量を一定にするために、送風ダクトの幅は 10 cm と一定にし、高さ  $H$  を、それぞれ風速に応じて、20 cm, 15 cm および 10 cm とした。Fig. 2 に示したように、仕切板とダクト出口との間の水平距離  $b$  を 22.5 cm とし、風量  $G_L$  (kg/min) に対する給鉱量  $G_K$  (kg/min) の比、すなわち混合率  $M$  を 6.6 とした。ふるい分けようとする粒子群の代表径を小さいものから順に  $d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_j, \dots, d_m$  とし、代表径  $d_i$  の粒子群の単位時間当りの供給量  $W_i^*$  に対して、実際に仕切板を越えて微細粒子として除去される量  $W_i$  の比、すなわち  $W_i/W_i^*$  を寸法区分別除去率と呼ぶことにする。いま、上記の実験の結果を寸法区分別除去率で示すと、Fig. 3 の●印のようになった。これからわかるように、同一粒度分布をもつ同一種類の粒子群を、同一風量かつ同一混合率でふるい分ける場合、ダクトの高さ  $H$

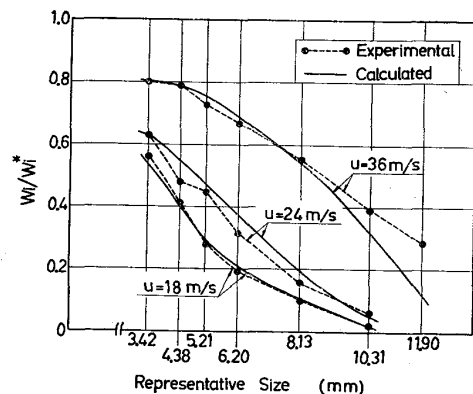


Fig. 3. Removal of particles in each size range when the horizontal distance between the exit of duct and the dividing plate is 22.5 cm.

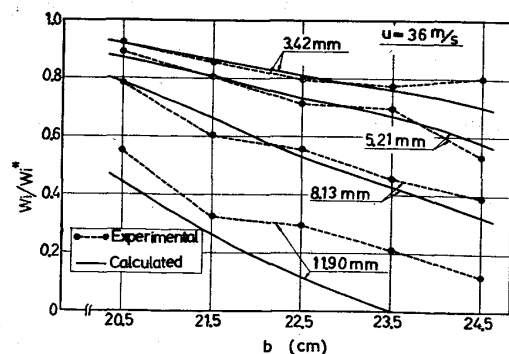


Fig. 4. Removal of fines of each representative diameter with varying the horizontal distance between the exit of duct and the dividing plate.

を小さくして、風速を大きくした方が微細粒子除去率は良好であることがわかる。しかし、この場合には微細粒子群中に 10 mm 以上の径をもつ比較的大きい粒子群の混入する割合も増加する傾向にあるので、仕切板の水平位置を後方へ変えることによって、その傾向を緩和することが必要であろう。Fig. 4 は風速 36m/s で、ダクト出口と仕切板との水平距離  $b$  を変化させた場合の寸法区分別除去率の実験値と計算値を、代表径が 3.42 mm, 5.21 mm, 8.13 mm および 11.90 mm の粒子群について示したものである。 $b$  が大きくなるに従って、各代表径の粒子群の除去率は減小するが、その傾向は粒子径が大きいものほど著しい。

つぎに、このような空気分級法が実用的に操業されるためには混合率が大きくなければならない。混合率を増大するためには、同一風量に対して給鉱量を増やしても、同一給鉱量に対して風量を減らしても、相対的には

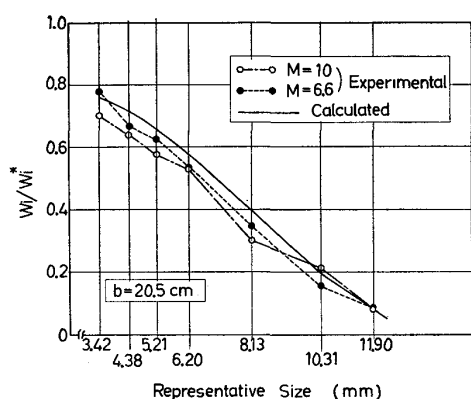


Fig. 5. Comparison of removal of fines in each size range in case where the cross section area of duct is  $15 \times 10 \text{ cm}^2$  ( $M=6.6$ ) and  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  ( $M=10$ ) ( $u=24 \text{ m/s}$ ).

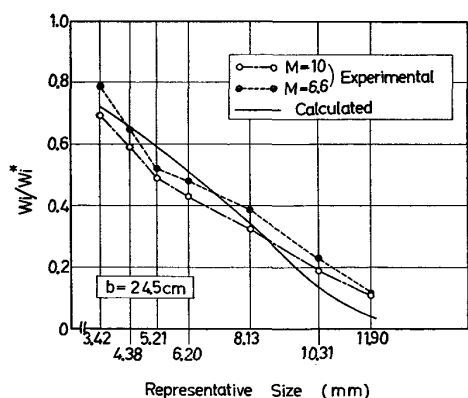


Fig. 6. Comparison of removal of fines in each size range in case where the cross section area of duct is  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  ( $M=6.6$ ) and  $10 \times 6.7 \text{ cm}^2$  ( $M=10$ ) ( $u=36 \text{ m/s}$ ).

全く同じことである。ところが水平気流中に大量に粒子群を供給する際、気流方向に対する供給粒子層の厚さが大き過ぎて、供給粒子層の深部にある微細粒子が仕切板を越すことができなくなつて、粗大粒子群中に混入し、除去率が極端に悪化する場合がある。したがって、給鉱量は上記の実験と同一にし、風量を減少させると、上記の実験結果に対して、ふるい分け精度がどの程度低下するかを調べてみた。そのための実験装置は Fig. 2 に示されているように、ダクトの断面を、さきの実験では  $H \times w$  としていたものを、この実験ではダクトの高さを  $H$  から  $h$  に小さくして、 $h \times w$  とした。一方、ふるい分け領域上端から仕切板上端に至る鉛直距離はさきの実験の場合と全く同じように  $H$  としているので、ふるい分け領域の  $e$  の区間 (Fig. 2 の斜線部) は近似的に無風地帯となり、混合率はさきの実験の場合の  $H/h$  倍に増加していることになる。そこで、風速 24m/s で  $h$  を 10 cm および風速 36m/s で  $h$  を 6.7 cm とした二通りの場合について実験を行なつた。混合率はいずれの場合も  $M=10$  である。Fig. 5 は風速 24m/s で仕切板とダクト出口の距離  $b$  を 20.5 cm とした場合の寸法区分別除去率である。Fig. 6 は風速 36m/s で  $b$  を 24.5 cm とした場合のものである。これらの図で ●印は  $M=6.6$ 、○印は  $M=10$  のときの結果であり、その両方を比較したものである。これらの図からわかるように、 $M=10$  の場合には、 $M=6.6$  の場合に比べて、微細粒子の除去率は若干低下する傾向にあるが、顕著な低下は認められない。

### 3. ふるい分け実験に対する理論的検討

比重量  $\gamma_L \text{ kg/m}^3$  の空気が速度  $u \text{ m/s}$  で水平に流れているとし、その気流中へ抗力係数  $C$ 、見掛け比重量  $\gamma_K \text{ kg/m}^3$ 、重さ  $G \text{ kg}$  の粒子が挿入されたものとする。いま、この粒子の運動飛跡の任意の水平および鉛直位置を  $(x, y)$ 、その位置における粒子速度を  $(\dot{x}, \dot{y})$ 、ここで考えている粒子の形状が同一見掛け比重量および同一重量の球であるとしたときの換算直径を  $D \text{ m}$ 、時間を  $t \text{ s}$ 、重力の加速度を  $g \text{ m/s}^2$  とすると、水平気流中の粒子の運動方程式は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{x}}{dt} &= \frac{3\gamma_L C}{4D\gamma_K} \left\{ (u - \dot{x})^2 + \dot{y}^2 \right\}^{1/2} (u - \dot{x}) \\ \frac{d\dot{y}}{dt} &= g - \frac{3\gamma_L C}{4D\gamma_K} \left\{ (u - \dot{x})^2 + \dot{y}^2 \right\}^{1/2} \dot{y} \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

また、さきの実験で、混合率を増すためにダクトの高さを小さくした場合には、Fig. 2 で示されている  $e$  の区間は  $u=0$  と考えても差しつかえないので、この区間に

おける運動方程式は第 (1) 式から直ちにつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{x}}{dt} &= -\frac{3\gamma_L C}{4D\gamma_K} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{1/2} \dot{x} \\ \frac{d\dot{y}}{dt} &= g - \frac{3\gamma_L C}{4D\gamma_K} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{1/2} \dot{y} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

この第 (2) 式を解く場合には、第 (1) 式から求めら

れる  $y = h$  の位置における水平および鉛直方向の速度を初期条件とすればよい。

前の実験の条件に適合するように、粒子挿入の際の水平および鉛直方向の初期速度の実測値  $\dot{x}_0 = 0.58 \text{ m/s}$  および  $\dot{y}_0 = 0.34 \text{ m/s}$  として、風速  $u$  が 18 m/s, 24 m/s および 36 m/s の場合の粒子の飛跡を、粒子の代表径を助変数として示すと、Fig. 7 (a), (b) および (c) のようである。ただし、この計算では  $\gamma_K = 3180 \text{ kg/m}^3$  およびレイノルズ数が  $10^3$  以上では抗力係数は一定と見なしてもよいので、 $C = 0.8$  とした。また、この図で破線で示されている部分は  $u = 0$  の領域を設けた場合の運動飛跡である。水平気流による分級は粒子径の差に対する水平飛出距離の差が大きい程効果があるという観点から見ると、 $u = 0$  の領域を設けた場合には大粒子に対して、微細粒子の水平飛出距離の減少の割合が大きくなっているため、前の実験で微細粒子の除去率が若干減少したという実験事実と一致している。

さて、高炉装入原料の大半を占める焼結鉱のような粒子は、個々の粒子の形が一定でなく、またそれらの内部の空げきにも粒子によつて差があるので、個々の粒子の見掛け重量  $\gamma_K$  および抗力係数  $C$  の値はばらつく。それらのばらつきの状態を本実験で用いた焼結鉱粒子について測定してみた結果<sup>3)</sup>、 $\gamma_K$  も  $C$  も正規分布状態に近似してよく、それらの平均値  $\bar{\gamma}_K$ 、 $\bar{C}$  および標準偏差  $\hat{\sigma}_\gamma$ 、 $\hat{\sigma}_C$  の値は Table 1 に示すようである。

このように、 $\gamma_K$  や  $C$  がばらつくことは運動方程式からもわかるように、同一径の粒子でも、水平飛出距離に差が生じて、ふるい分け寸法精度に影響し、その影響の仕方は  $C/\gamma_K$  によつて決まる。見掛け重量と抗力係数は互いに独立であると考えてよいから、この二つの変数の比の平均値  $E$  と標準偏差  $\hat{\sigma}_d$  はつぎのように計算できる<sup>6)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} E &= \bar{C}/\bar{\gamma}_K \\ \hat{\sigma}_d^2 &= \left[ \left\{ \frac{\partial}{\partial C} \left( \frac{C}{\gamma_K} \right) \right\}^2 \hat{\sigma}_C^2 + \left\{ \frac{\partial}{\partial \gamma_K} \left( \frac{C}{\gamma_K} \right) \right\}^2 \hat{\sigma}_\gamma^2 \right] \gamma_K = \bar{\gamma}_K, C = \bar{C} \\ &= E^2 (\hat{\sigma}_C^2 / \bar{C}^2 + \hat{\sigma}_\gamma^2 / \bar{\gamma}_K^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

Table 1. Mean value and standard deviation on the apparent specific weight and drag coefficient of the sintered ores.

|                  | Mean value                             | Standard deviation                         |
|------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Apparent Sp. Wt. | $\bar{\gamma}_K = 3180 \text{ kg/m}^3$ | $\hat{\sigma}_\gamma = 211 \text{ kg/m}^3$ |
| Drag Coefficient | $\bar{C} = 0.8$                        | $\hat{\sigma}_C = 0.14$                    |

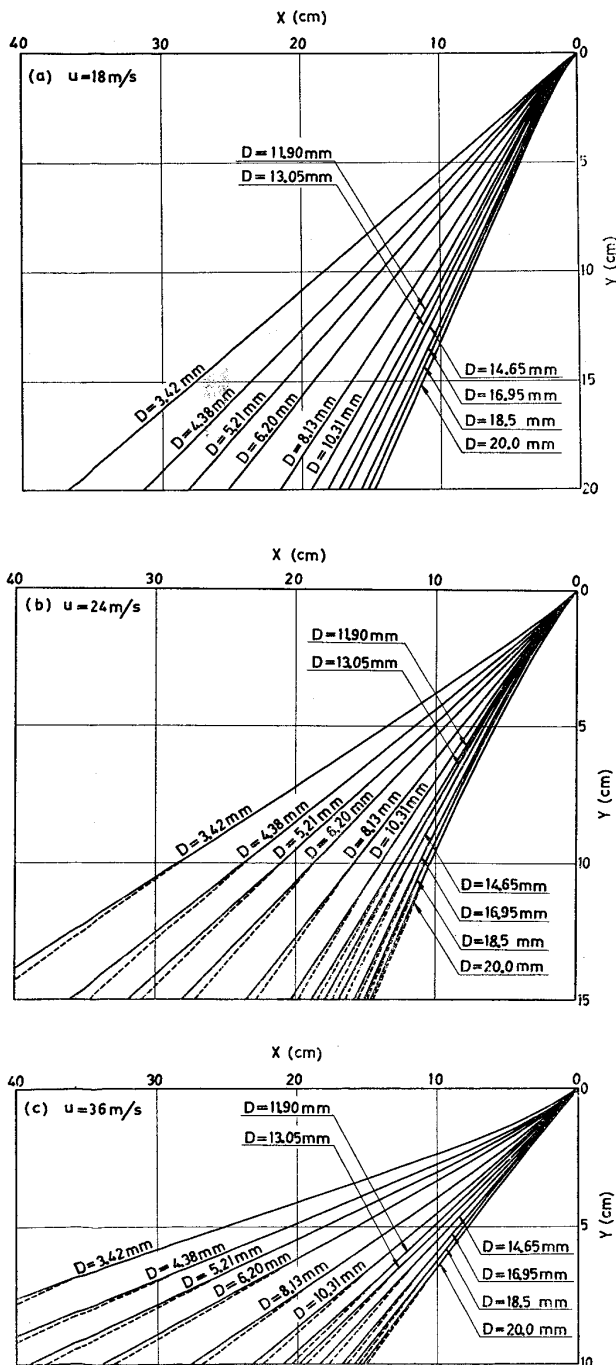


Fig. 7. Travelling trace of the sintered ores with  $\bar{\gamma}_K = 3180 \text{ kg/m}^3$  and  $\bar{C} = 0.8$  (The dotted line shows the travelling trace within the calm zone).

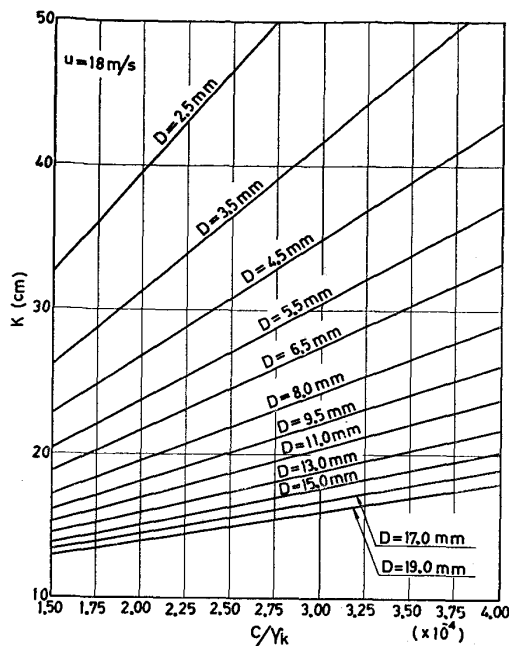


Fig. 8. Relationship between the various value of  $C/\gamma_K$  and horizontal travelling distance  $k$  at the point where the sintered ores drop vertically 20 cm.

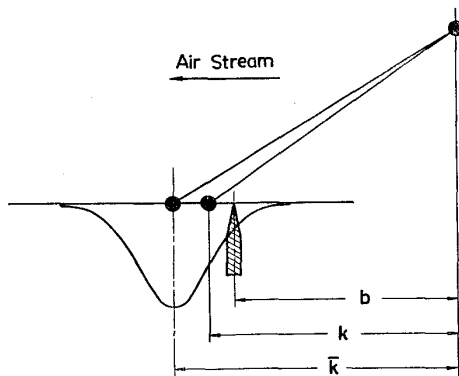


Fig. 9. Distribution of the horizontal travelling distance  $k$  in the case of separately feeding of the particles with the same diameter.

計算の結果、 $E = 2.52 \times 10^{-4}$  および  $\hat{\sigma}_d = 4.71 \times 10^{-5}$  となり、 $C/\gamma_K$  の値の分布も近似的に正規分布と見なしてよいことがわかった<sup>4)</sup>。いま、 $u = 18 \text{ m/s}$  の水平気流中に、焼結鉱粒子が挿入されたとし、粒子挿入個所から鉛直に 20 cm 落下する間に動く水平飛出距離  $k$  と  $C/\gamma_K$  の関係を、粒子径  $D$  を助変数として示すと、Fig. 8 のようになる。この図から、同じ径の粒子の水平飛出距離  $k$  は  $C/\gamma_K$  の値の増減に伴って直線的に変動していることがわかる。したがって、さきに述べたように、 $C/\gamma_K$  が正規分布していると見なせるので、 $k$  も正規分布しているとしてよい。すなわち、見掛け重量および抗力係数

が、その平均値  $\bar{\gamma}_K$  および  $\bar{C}$  である粒子の水平飛出距離を  $\bar{k}$ 、その標準偏差を  $\hat{\sigma}_k$  で示すと、同一径の粒子の水平飛出距離の分布を示す確率密度関数  $f(k)$  はつぎのようになる。

$$f(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}_k} \exp \left\{ -\frac{(\bar{k} - k)^2}{2\hat{\sigma}_k^2} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

したがって、Fig. 9 に示すように、仕切板が粒子挿入個所から水平距離  $b$  の位置にあるとすれば、代表径  $d_i$  の粒子群が仕切板を越える確率、すなわち除去される割合  $\Phi(d_i)$  は次式で計算できる。

$$\Phi(d_i) = \int_b^{\infty} f(k) dk \dots \dots \dots (5)$$

ところが第 (5) 式は粒子が単一的に水平気流中に供給される場合に適用できるものである。給鉱量が多い場合で、粒子群を連続的にふるい分けようとする場合には、ふるい分け領域入口で粒子群は一つの層を形成して水平気流中に供給されることになる。その層の厚さ  $a$  は給鉱量の増大とともに、ほぼ比例的に増加する。いま Fig. 10 に示すように、その層の厚さ  $a$  を適当な微小厚さ  $\Delta a$  ごとに  $n$  等分し、その分割された区間の中心から粒子が供給されているものとする。この場合、粒子群が同一寸法のものであれば、同図に示されているように、どの区間から放出された粒子の落下位置も、それぞれ正規分布状態で分散すると考えられる。したがって、仕切板が供給粒子層の最深部の区間の中心から水平に測って距離  $b$  の位置にあるとすると、この場合の代表径  $d_i$  の除去率は第 (5) 式からつぎのようになる。

$$\Phi(d_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \int_b^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}_k} \exp \left\{ -\frac{(\bar{k} + j\Delta a - k)^2}{2\hat{\sigma}_k^2} \right\} dk \dots \dots \dots (6)$$

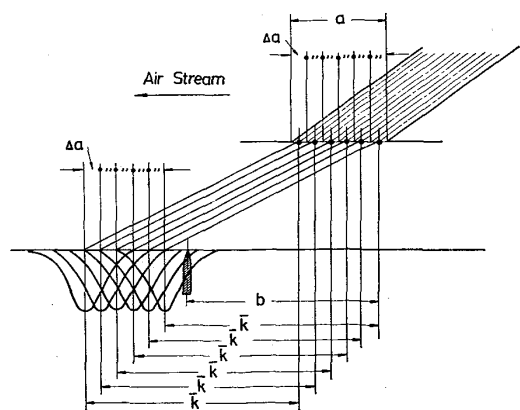


Fig. 10. Distribution of the horizontal travelling distance of the particles with the same diameter in the case of bedded feed.

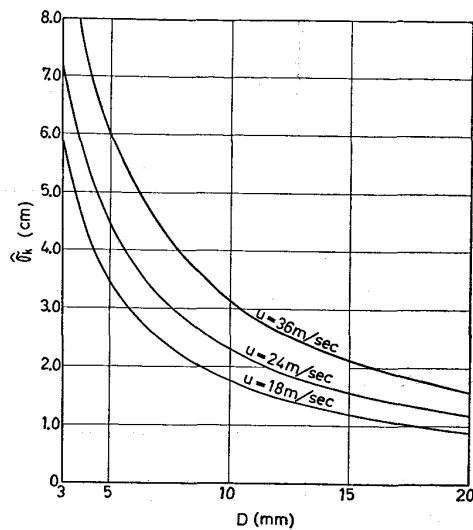


Fig. 11. Relationship between the particle diameter  $D$  and the standard deviation  $\hat{\sigma}_k$ .

ここで、第(5)式および第(6)式を計算するためには、あらかじめ  $\hat{\sigma}_k$  の値が求められていなければならない。これは  $C/\gamma_K$  の分布も  $k$  の分布も正規的であるということ、およびその両者が比例関係にあることから、 $\hat{\sigma}_k$  の値は容易に求めることができる。Fig. 11 は粒子径  $D$  と標準偏差  $\hat{\sigma}_k$  の関係を、さきの実験条件に適合させて、風速が 18m/s, 24m/s および 36m/s の場合について計算した結果を示すものである。これからわかるように、風速が大きいほど  $\hat{\sigma}_k$  の値は大きく、また同一風速でも粒子径が小さいほど大きくなっていることがわかる。

このように、水平飛出距離  $k$  がばらつくということは、さきの実験結果でもそうであったように、微細粒子の除去が完全には行ない得ない一因であることを示している。また、比較的大きい粒子が微細粒子群中に混入する原因でもある。

つぎに、微細粒子の除去が完全に行なわれ得ないもう一つの大きな要因は粒子同志の干渉によるものと考えられる。いま、個々の粒子に見掛け重量と抗力係数にばらつきがないとすると、仕切板を越える通過粒子とそれを越えない非通過粒子の区別は、その粒子の寸法だけで決定することができると思われる。しかし、そのほかに供給粒子層の厚さ  $a$  が比較的大きいと、同じ大きさの粒子であつても、その層の表面に近い所から供給されるものは仕切板を越えるが、深部から供給されるものはそれを越えない粒子があり、そのような粒子を境界粒子と呼ぶことにする。したがって、粒子群は粒子径の小さいものから順に、通過粒子群、境界粒子群および非通過粒子群の三つに分類することができる。以下の解析の便を計る

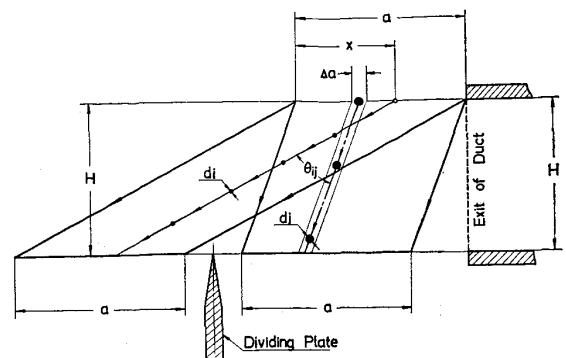


Fig. 12. Collision model of the particles of representative diameters  $d_i$  and  $d_j$ .

ために、代表径が  $d_1, d_2, \dots, d_i$  のものを通過粒子群とし、代表径が  $d_{i+1}, d_{i+2}, \dots, d_{j-1}$  のものを境界粒子群とし、代表径が  $d_j, d_{j+1}, \dots, d_m$  のものを非通過粒子群とする。さて、粒子群をふるい分け領域に供給する場合、時間的にその粒度構成が同じであるとし、各粒子径域に属する粒子の時間的挿入間隔を  $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_i, \dots, \Delta t_j, \dots, \Delta t_m$  とする。粒子群は上端から供給されて、下端で回収されるが、その間のふるい分け領域を通過するに要する時間、すなわち Fig. 12 に示される高さ  $H$  を落下するに要する時間を  $T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_j, \dots, T_m$  とする。また、粒子の飛跡を含む管の面積を  $F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_j, \dots, F_m$  とする。いま、代表径  $d_i$  の通過粒子が代表径  $d_j$  の非通過粒子とまったく接触のないものが仕切板を越えるものとする。そうすると、非通過粒子の影響面積  $S_{ij}$  は  $(d_i + d_j)^2 \pi / 4$  となる。いま、この二粒子の進行方向の交叉角を  $\theta_{ij}$ 、ふるい分け領域入口における気流方向に対する供給粒子層の厚さを  $a$  とする。その際、代表径  $d_i$  の通過粒子の運動進路が、 $a$  に比して十分小さい微小層  $\Delta a$  から挿入される代表径  $d_j$  の非通過粒子と衝突しない確率  $p_{ij}'$  はつぎのようになる。

$$p_{ij}' = 1 - \frac{T_j}{\Delta t_j} \cdot \frac{\Delta a}{a} \cdot \frac{S_{ij}}{F_j \sin \theta_{ij}} \dots \dots \dots (7)$$

したがって、代表径  $d_i$  の粒子が供給粒子層の表面から水平に距離  $x$  の位置から供給される場合に、代表径  $d_j$  の非通過粒子と衝突せずに、通過粒子として除去される確率  $p_{ij}$  はつぎのようである。

$$\left. \begin{aligned} p_{ij} &= \left( 1 - \frac{T_j}{\Delta t_j} \cdot \frac{\Delta a}{a} \cdot \frac{S_{ij}}{F_j \sin \theta_{ij}} \right)^{x/\Delta a} \\ &= \exp \left( -A_{ij} \frac{x}{a} \right) \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

ここで、 $A_{ij} = \frac{T_j}{\Delta t_j} \cdot \frac{S_{ij}}{F_j \sin \theta_{ij}}$

以上は代表径が  $d_i$  の通過粒子と  $d_j$  の非通過粒子の衝

突だけを考慮して求めたものであるが、 $d_i$  の径をもつ通過粒子が仕切板を越える過程において、そのほかの径をもつ非通過粒子群との衝突も考慮しなければならない。その際には、いま考えている粒子が通過粒子として除去される確率  $P_i'$  はつぎのようになる。

$$P_i' = \prod_{n=j}^m p_{in} = \exp\left(-\sum_{n=j}^m A_{in} \frac{x}{a}\right) \dots\dots\dots (9)$$

ここに示された第(8)式および第(9)式は代表径  $d_i$  の粒子が供給粒子層の表面から測つて  $x$  の位置から供給されるとした際の仕切板を越える確率であり、層の表面から深部に至るにつれて、通過粒子除去率は指数的に低下することを示している。したがって、厚さ  $a$  の供給粒子層全域から均等に水平気流中に供給される際の代表径  $d_i$  の粒子群の除去率  $P(d_i)$  はつぎのようになる。

$$P(d_i) = \frac{1}{a} \int_0^a \exp\left(-\sum_{n=j}^m A_{in} \frac{x}{a}\right) dx$$

$$= \frac{1}{\sum_{n=j}^m A_{in}} \left\{ 1 - \exp\left(-\sum_{n=j}^m A_{in}\right) \right\} \dots\dots\dots (10)$$

以上は境界粒子が存在しない場合について解析してきたが、境界粒子が存在する場合についても同様に考えることができる。その場合には、代表径  $d_i$  の通過粒子が今まで述べたように、非通過粒子群との衝突のほかに、一部の境界粒子群との衝突も考えなければならない。前に定義したように、境界粒子の代表径は  $d_{i+1}, d_{i+2}, \dots, d_{j-2}, d_{j-1}$  としたから、Fig. 13 に示すように、これらの境界粒子が丁度仕切板の上端に落ちてくるような供給位置を、供給粒子層の表面から測つて  $a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_{j-2}, a_{j-1}$  とする。まず、 $0 \leq x \leq a_{j-1}$  の範囲の一点から水平気流中に供給される通過粒子が境界粒子と衝突し

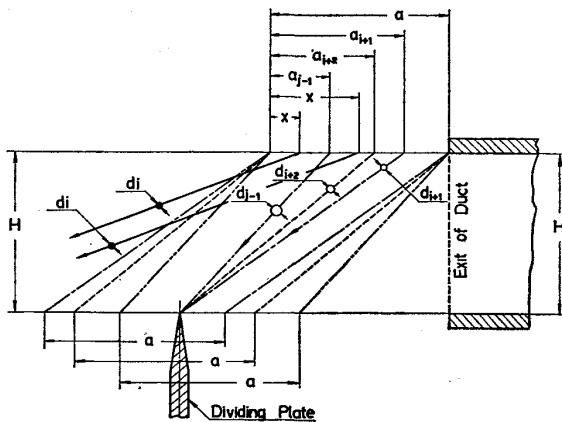


Fig. 13. Collision model on the particles of representative diameter  $d_i$  and critical particles, which cross over or not the dividing plate according to the position within the feed particle bed.

たとしても、この範囲から供給される境界粒子群はいずれも仕切板を越すと考えられるから、通過粒子として除去される確率を求める際には非通過粒子群との衝突だけを考慮すればよい。つぎに、 $a_{j-1} \leq x \leq a_{j-2}$  の範囲の一点から供給される通過粒子が仕切板を越える確率  $P_i'$  を求める際、供給粒子層の表面から  $a_{j-1}$  までの範囲では非通過粒子群との衝突を  $a_{j-1}$  から  $x$  までの範囲ではそれらとの衝突のほかに、代表径  $d_{j-1}$  の境界粒子群との衝突の可能性も考慮しなければならない。このように代表径  $d_i$  の通過粒子が仕切板を越える確率  $P_i'$  は、その通過粒子が水平気流中に供給される位置によって変わる。いま、代表径  $d_i$  の粒子が供給粒子層の表面から  $x$  の距離にあるとして、各区間ごとに  $P_i'$  を示すとつぎのようである。

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq x \leq a_{j-1} : P_i' &= \exp\left(-\frac{x}{a} \sum_{n=j}^m A_{in}\right) \\ a_{j-1} \leq x \leq a_{j-2} : \\ P_i' &= \exp\left(-\frac{a_{j-1}}{a} \sum_{n=j}^m A_{in} \right. \\ &\quad \left. - \frac{x-a_{j-1}}{a} \sum_{n=j-1}^m A_{in}\right) \\ &\dots\dots\dots \\ a_{i+1} \leq x \leq a : \\ P_i' &= \exp\left(-\frac{a_{j-1}}{a} \sum_{n=j}^m A_{in} \right. \\ &\quad \left. - \frac{a_{j-2}-a_{j-1}}{a} \sum_{n=j-1}^m A_{in} - \dots\dots \right. \\ &\quad \left. \dots\dots - \frac{x-a_{i+1}}{a} \sum_{n=i+1}^m A_{in}\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

以上のことから、厚さ  $a$  の供給粒子層全域から均等に水平気流中に供給される際の代表径  $d_i$  の粒子群の除去率  $P(d_i)$  はつぎのようになる。

$$P(d_i) = \frac{1}{\sum_{n=j}^m A_{in}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{a_{j-1}}{a} \sum_{n=j}^m A_{in}\right) \right.$$

$$+ \frac{1}{\sum_{n=j-1}^m A_{in}} \exp\left(\frac{a_{j-1}}{a} A_{ij-1}\right)$$

$$\cdot \left[ \exp\left\{-\frac{a_{j-1}}{a} \sum_{n=j-1}^m A_{in}\right\} \right.$$

$$\left. - \exp\left\{-\frac{a_{j-2}}{a} \sum_{n=j-1}^m A_{in}\right\} \right] + \dots\dots$$

$$\dots\dots + \frac{1}{\sum_{n=i+1}^m A_{in}} \exp\left(\frac{a_{j-1}}{a} \sum_{n=i+1}^m A_{in}\right)$$

$$\cdot \left[ \exp\left\{-\frac{a_{i+1}}{a} \sum_{n=i+1}^m A_{in}\right\} \right.$$

$$\left. - \exp\left\{-\sum_{n=i+1}^m A_{in}\right\} \right] \dots\dots\dots (12)$$

また、同様に境界粒子の除去率は、たとえば代表径  $d_{j-2}$  の境界粒子の除去率  $P(d_{j-2})$  はつぎのように示し得る。

$$P(d_{j-2}) = \frac{1}{\sum_{n=j}^m A_{in}} \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{a_{j-1}}{a} \sum_{n=j}^m A_{in} \right) \right. \\ + \frac{1}{\sum_{n=j-1}^m A_{in}} \exp \left( \frac{a_{j-1}}{a} A_{ij-1} \right) \\ \cdot \left[ \exp \left\{ -\frac{a_{j-1}}{a} \sum_{n=j-1}^m A_{in} \right\} \right. \\ \left. \left. - \exp \left\{ -\frac{a_{j-2}}{a} \sum_{n=j-1}^m A_{in} \right\} \right] \right\} \dots\dots\dots (13)$$

通過粒子の除去率を示す第 (10) 式、第 (12) 式および境界粒子の除去率を示す第 (13) 式は粒子同志の衝突のみを考慮して求められたものである。したがって、焼結鉱粒子群を分級する場合には、衝突に起因する除去率の低下のほかに、さきに述べた見掛け重量と抗力係数のばらつきによるそれも考慮しなければならない。ところが、これらの現象は互いに独立であるから、両者の影響を考慮した寸法区分別除去率  $W_i/W_i^*$  は第 (6) 式と第 (12) 式からつぎのように表わすことができる。

$$W_i/W_i^* = \Phi(d_i) \cdot P(d_i) \dots\dots\dots (14)$$

また、境界粒子の場合もまったく同様であり、たとえば  $d_{j-2}$  の径をもつ境界粒子については

$$W_{j-2}/W_{j-2}^* = \Phi(d_{j-2}) \cdot P(d_{j-2}) \dots\dots\dots (15)$$

となる。

さて、さきに示した実験の条件に適合させて、第 (14) 式および第 (15) 式によつて寸法区分別除去率を計算してみた。その結果、Fig. 3 および Fig. 4 の実線で表わされているようになり、実験値と比較的よく一致することがわかる。

また、混合率を 10 として行なつた実験の場合も、Fig. 7 からわかるように、個々の径をもつ粒子の飛跡が、 $M=6.6$  で行なつた場合のそれと比べて、大きな変化がないので、両混合率の分級精度の間に顕著な差は認められない。Fig. 5 および Fig. 6 の実線は除去率の計算値である。ところで、さきの実験において観測の結果、供給粒子層の厚さ  $a$  が  $M=6.6$  および  $M=10$  のいずれの場合も 38 mm であつたので、寸法区分別除去率の計算の際にはその値を用いた。

つぎに、供給粒子層の厚さ  $a$  が微細粒子除去率にどのように影響するかを調べるために、一例として、Fig. 1 に示す粒度分布をもつ焼結鉱を、ダクト出口と仕切板との水平距離  $b=20.5$  cm の場合、ふるい分け風速  $u=18$  m/s でふるい分けるとき、種々の代表径をもつ粒子が層内の供給位置によつて、仕切板を越える確率がどのよ

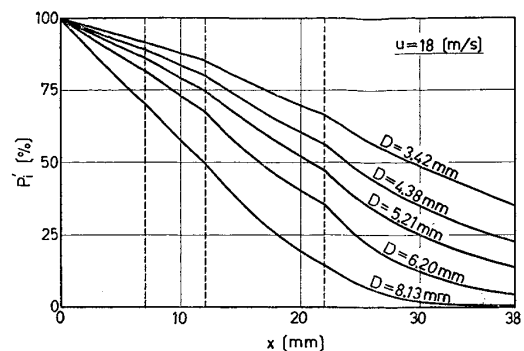


Fig. 14. Removal probability of fines of each representative diameter according to the position within the feed particle bed.

うになるかを、第 (11) 式を用いて寸法区分別に計算した。たて軸に粒子が仕切板を越える確率  $P_i'$  を、横軸に粒子の層表面からの距離  $x$  をとり (Fig. 13 参照)、代表径の比較的小さい粒子群に対してその計算結果を示すと、Fig. 14 のようである。粒子群の供給が時間平均的に定常的であつても、焼結鉱のような粒子群は個々の形状が不規則であると同時に、粒子の寸法が不均一であるために、供給粒子層の表面には供給粒子の半径に相当する凹凸があり、その厚さ  $a$  は必ずしも一定でない。したがって、上記の計算における層の厚さ  $a$  としては、表層の粒子中心点と底層のそれとの水平距離をとつてゐる。これらの図の中で、それぞれの確率曲線の勾配が急に変化している破線の個所は非通過粒子との衝突のほかに、境界粒子 ( $D=10.31$  mm,  $11.90$  mm および  $13.05$  mm) との衝突が起こり始める位置を示している。この図からもわかるように、比較的微細な粒子であつても、供給粒子層の深部から挿入される場合の除去確率はかなり低下していることがわかる。このことは、粒子群の粒度分布、風速およびダクト出口と仕切板との距離によつて左右されるので一概には言えないが、供給粒子層の厚さをあまり大きくできないことを示し、高々 50~60 mm が限度のように思われる。その意味で、工業的に大量処理するときには、供給粒子層の厚さに限度があるために、幅を大きくしなければならないが、ふるい分け領域入口における粒子の速度を大きくし、供給粒子層の厚さを小さくすることによつて、ある程度緩和できる。

#### 4. 結 論

高炉装入原料から網目ふるいでは、ふるい難い微細粒子群を除去するのに、水平式空気分級法を利用する場合のふるい分け性能を実験的および理論的に検討してみた。

ふるい分け寸法精度におよぼす主要な因子として、第一に被ふるい分け粒子群の見掛比重量および抗力係数の値のばらつき、第二にふるい分け領域内の粒子同志の衝突を挙げ、その影響の程度を解析し、寸法区分別の微細粒子除去率を見積るための計算式を誘導した。そして計算値と実験値が比較的良好一致することがわかった。

焼結鉱のように、見掛比重量や抗力係数にある程度のばらつきがあつても、粒子径に対する水平飛出距離に明りような差ができれば、分級は可能である。

供給粒子層の厚さを大きくすることによつて、混合率を増加させれば、ふるい分け領域内における粒子間の衝突の頻度が高まり、微細粒子除去率は低下する。その低下の程度は粒子径の小さいものほど小さく、境界粒子径に近づくにつれて大きくなる。

同一風量および同一混合率で分級する際、送風ダクトの断面積を小さくして、風速を大きくした方が、微細粒

子の除去率が良好である。

水平式分級は仕切板の上端をダクト断面の下端と同一レベルに設置するのが一般的であるが、混合率を増加させるために、ダクトの高さを小さくし、ふるい分け領域内に、ある限られた範囲内の無風地帯を設けても、分級精度に顕著な低下が認められず、実用上経済的である。

#### 文 献

- 1) T. L. JOSEPH: Blast Furn. Steel Pl., (1957) May
- 2) T. L. JOSEPH: Blast Furn. Steel Pl., (1957) April
- 3) 小門純一, 八田夏夫, 中安健一: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 683
- 4) J. KOKADO, N. HATTA, and K. NAKAYASU: The Memoirs of the Faculty of Eng., Kyoto Univ., Vol. XXXII, Part I (1970), S. 93
- 5) 小門純一, 八田夏夫, 中沢政治: 水曜会誌, 第17巻 (1970) 3号, p. 107
- 6) 近藤良夫, 舟阪 渡編: 技術者のための統計的方法, 共立出版, (1967), p. 41