

## 空気分級における分級精度について\*

70562

小門純一\*\*・八田夏夫\*\*\*・中安健一\*\*\*\*

## Study on Classification Accuracy of Pneumatic Sieve

Jun-ichi KOKADO, Natsuo HATTA, and Kenji NAKAYASU

## Synopsis:

The classification method by pneumatic sieve has been developed to eliminate fines in ores charged into blast furnaces. When particles are supplied into air stream upward, smaller particles float up and larger one sink down. In this method, the apparent specific weight, the drag coefficient of the particles, and the interference of moving particles in the air stream (especially between floating-up and sinking-down particles) affect the classification accuracy.

In this paper, the above effects are experimentally and theoretically discussed. Conclusions are as follows;

(1) The classification by pneumatic sieve is available with the difference of floating velocity of particles, even if apparent specific weight and drag coefficient scatter in some extent.

(2) The scattering of apparent specific weight and drag coefficient affects the classification accuracy significantly for the particles of diameter nearly equal to the floating particle diameter  $D_s$ , and negligibly for the particles of diameter less than half of  $D_s$ .

(3) For the classification of particles in the same particle size distribution, the weight ratio in each size range of floating-up particles to supplied one decreases logarithmically with increasing mixing ratio  $M$ .

(Received July 18, 1969)

## 1. 緒 言

高炉へ装入する原料の整粒の良否は高炉作業成績を左右する主要な要素の一つである。粗大粒子を除去することによって、出鉄比の増加やコークス比の低下など高炉の作業成績およびその経済性を向上できることは今日よく知られている<sup>1)2)</sup>。一方、微細粒子の高炉への混入を避けることも、粗大粒子の除去と同様に、高炉成績の改善に有効であることは当然予想されることであるが、その程度はまだ十分に明らかにされていない。高炉装入物の大半を占める焼結鉱は、通常網目寸法5~10 mmのふりいでふるわれていて、炉前における5 mm以下の微細粒子の割合は3~10%程度になっている。この5 mm以下のものは、焼結機のところでふるわれたときにすでに混入していたもののほか、炉前まで輸送される間に微細化したものも少なくない。したがって、微細粒子の高炉への混入を避けるためには炉前でふるい分けられることが望ましい。5 mm以下の微細粒子を炉前で網目ふるいによってふるい分けることは網目の目詰まりや処理能力の点などから簡単でないのが普通である。そこで、高炉装入原料中の微細粒子をできるだけ簡単にしかも経済的に除去することを目的として、装入原料の空気分級に関する研究を行なってきた。

空気分級は同じ種類の粒子をその寸法差による浮遊速度の差によつて分級しようとするものであるから、粒子群の見掛比重量および抗力係数のばらつきが分級精度におよぼす影響は大きい。また、処理量の増加にともなつて気流中を運動する粒子同志の衝突の頻度が高くなり、これらが分級精度におよぼす影響も無視できなくなる。

本研究は空気分級におけるその精度について実験し、理論的には抗力係数および見掛比重量のばらつきおよび粒子同志の衝突が分級精度におよぼす影響について定性的な解析を行なつたものである。

## 2. 実 験

## 2.1 実験方法およびその装置

空気分級法において、ほぼ鉛直に落下する粒子群の流れに対し、気流方向を直交流とする場合と対抗流とする場合とが代表的なものとなる。われわれの行なつた実験では、後者の鉛直に上昇する気流中に粒子群を挿入して

\* 昭和43年9月本会講演大会にて発表

昭和44年7月18日受付

\*\* 京都大学工学部 工博

\*\*\* 京都大学工学部

\*\*\*\* 京都大学工学部大学院

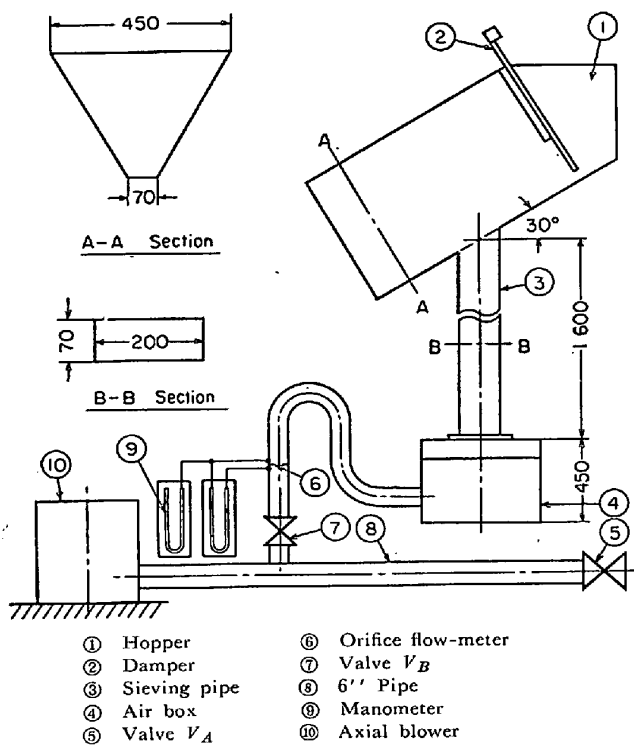


Fig. 1. Sieving apparatus for the experiment.

一定粒子径以下の微細粒子群を浮上させ、そのほかの粒子群を沈降させて別々に捕収するという方法が採用されている。すなわち、Fig. 1に示すように、気流は貯気槽を経てふるい分け管内を上昇する。一方、ふるい分け試料はその自重により傾斜板上を降下し、ふるい分け管の最上部から上昇気流中に供給され、分級される。使用した送風機は定格 22 kW、風量 20m<sup>3</sup>/min、圧力 2000 mmAq の 4 段軸流送風機で、気流は送風機から 6'' 管、スルースバルブ  $V_B$ 、オリフィス流量計を経て貯気槽に送られる。貯気槽を設置した理由は気流を直接的にふるい分け管に入れると、ふるい分け管内の風速分布の乱れが著しいためである。ふるい分け管の断面は 7cm×20cm の長方形であり、管長は 1.6m とした。なお、以下の実験および考察において、試料の粒度構成を求めるための標準の値として網目ふるいの値を用いることにする。

## 2.2 試料の見掛比重および抗力係数のばらつき

コークスや焼結鉱を空気分級する際、個々の粒子の形が一定でなく、またそれらの内部の空けきにも粒子によつて差があるので、あらかじめ見掛比重および抗力係数のばらつきの範囲を知っておく必要がある。

まず、コークスについてその粒子径が網目ふるいで 2 mm から 22 mm のもの合計 378 個、重さにして 0.557 kg を無作為に選び、それらの見掛比重を測定した結果、その平均値  $\bar{\gamma}_K$  が  $0.94 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> および標準偏

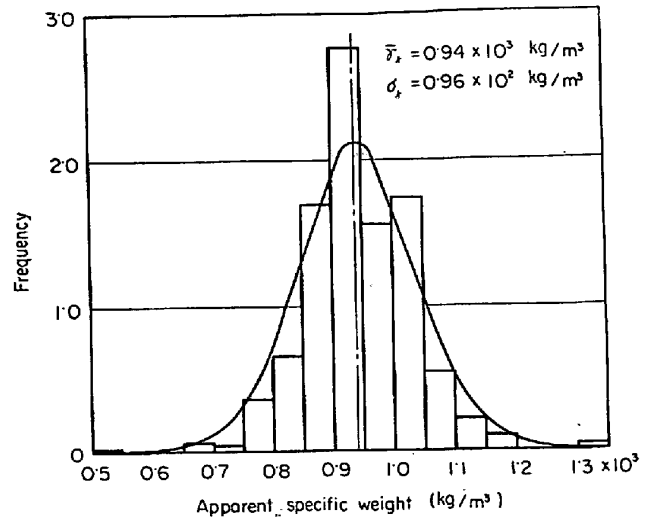


Fig. 2. Distribution of apparent specific weight of cokes.

差  $\sigma_{\gamma_K}$  が  $0.96 \times 10^2$  kg/m<sup>3</sup> であることがわかった。見掛比重のばらつきの状態は Fig. 2 に示すように、正規分布と見なしてよく、平均値に対する偏差が  $\pm 15\%$  以内のものは全体の 85.8% であつた。また Fig. 3 に示すように、粒子径の差に対する見掛比重の差はほとんど認められなかつた。この実験に使用された網目ふるいの目は正方形で、一辺の長さが 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 9 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm, および 22 mm のもの 14 種類である。ある粒子と同一重量および同一見掛比重をもつ球の直径をこの粒子の換算直径と呼び、また各網目区分の中間の値をその区分の粒子の代表径と呼ぶことにする。いま、見掛比重を求めた個々の粒子について換算直径を求め、これと網目ふるいによる代表径とを比較すれば Fig. 4 のようである。この図から、換算直径は代表径とほぼ等しいと見なせることがわかる。

つぎに焼結鉱についても 3 mm から 22 mm のもの合計 213 個、重量にして 0.801 kg の粒子を無作為に抽出して、見掛比重を測定した。その結果、見掛比重の平均値  $\bar{\gamma}_K$  が  $3.18 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>、標準偏差  $\sigma_{\gamma_K}$  が  $2.11 \times 10^2$  kg/m<sup>3</sup> であり、そのばらつきは Fig. 5 に示すように、コークスの場合と同様に正規分布と見なしてよく、平均値に対する偏差が  $\pm 15\%$  以内のものは 97.4% であつた。また、この場合も粒子の大きさから見掛比重の相関関係はコークス粒子の場合と同様にほとんど認められなかつた。

試料の抗力係数  $C$  は粒子の浮遊速度  $u_s$  m/sec がわかれば次式によつて求めることができる<sup>3)</sup>。

$$C = \frac{4g\gamma_K D_s}{3\gamma_L u_s^2}$$

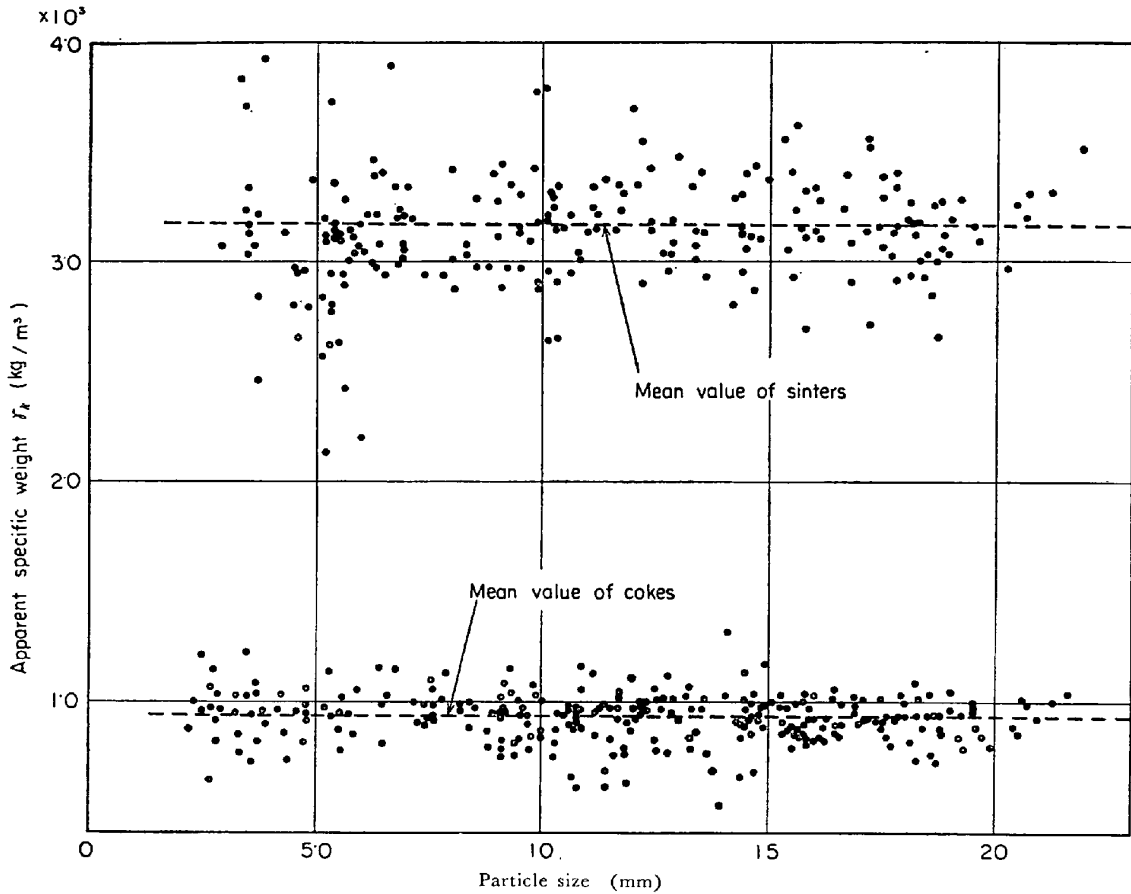


Fig. 3. Relation between particle size and apparent specific weight for cokes and sinters.

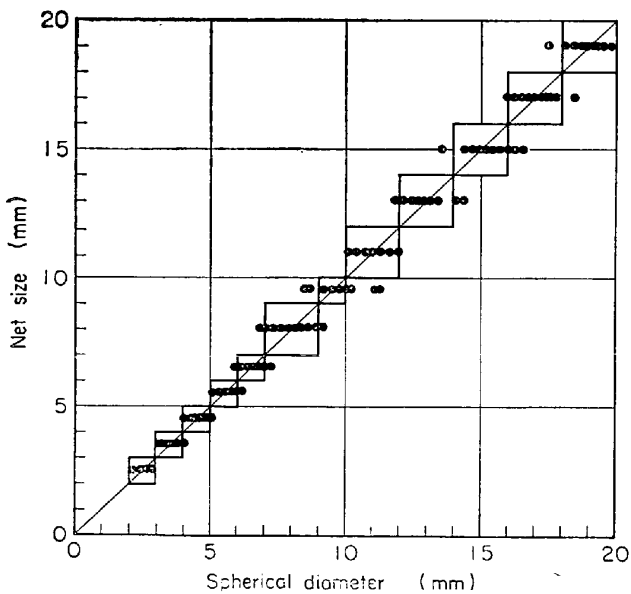


Fig. 4. Relation between net size and spherical diameter.

ここに、 $D_s$  は浮遊粒子の換算直径  $m$ 、 $\gamma_K$  はその粒子の見掛比重  $kg/m^3$ 、 $\gamma_L$  は空気の比重  $kg/m^3$  および  $g$  は重力の加速度  $m/sec^2$  である。一般に、抗力係数の値はレイノルズ数の関数であるが、コークスや焼結鉱のように不規則な形をした粒子については、レイノルズ

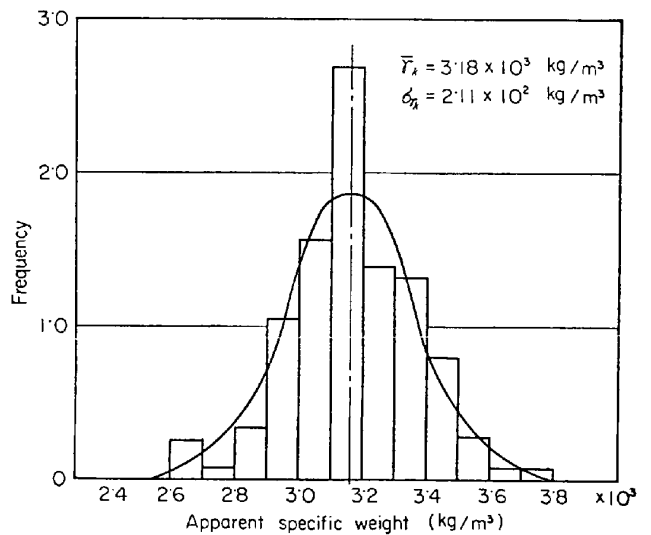


Fig. 5. Distribution of apparent specific weight of sinters.

数が  $10^3$  以上になればほぼ一定値となることが知られている<sup>4)</sup>。

コークスの抗力係数を測定した結果、粒子のレイノルズ数  $5 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$  の範囲において、その平均値  $\bar{c}$  が 1.15 であり、標準偏差  $\sigma_c$  が 0.07 であることが認められた。そのばらつきの状態は Fig. 6 に示すように正規

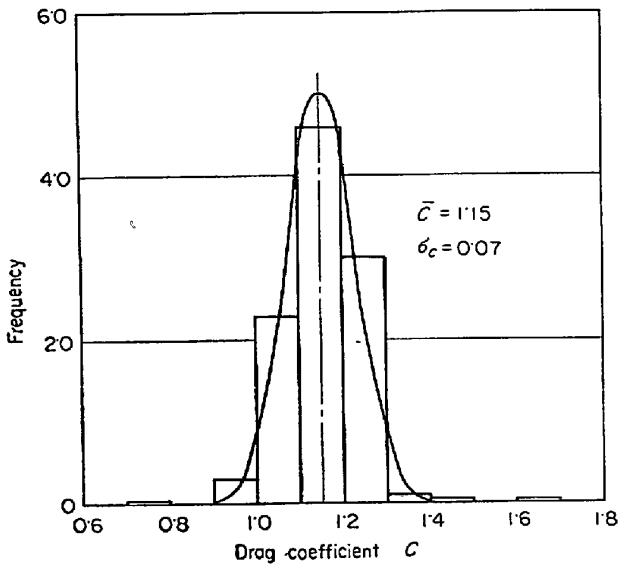


Fig. 6. Distribution of drag-coefficient of cokes.

分布に近く、また、平均値に対する偏差が  $\pm 15\%$  以内のものは全体の  $98.6\%$  であることがわかった。

つぎに、焼結鉱についてはレイノルズ数が  $3.6 \times 10^3$  から  $4.0 \times 10^4$  の範囲で実験した結果、抗力係数の平均値  $\bar{c}$  は  $0.8$ 、および標準偏差  $\sigma_c$  が  $0.14$  であり、そのばらつきの状態は Fig. 7 に示すように正規分布に近くまた平均値に対する偏差が  $\pm 15\%$  以内のものは  $61.0\%$  であることがわかった。

2.3 粒子の浮遊速度

コークスおよび焼結鉱の場合、抗力係数および見掛比重量は上に述べたようにばらついているが、それぞれの平均値  $\bar{K}$  および  $\bar{c}$  を用いて、平均浮遊速度  $\bar{u}_s$  を計算すれば Fig. 8 に示された一点鎖線のようなものである。また、抗力係数および見掛比重量がばらついているために、同一粒子径のものでも浮遊速度が異なる値をもつ場合がある。そこで、それぞれのばらつきの範囲が平均値に対して  $\pm 15\%$  以内であるとすると、粒子径に対する浮遊速度の変動域は同図の斜線部で示されている幅の中に入る。ただし、各粒子の抗力係数および見掛比重量のばらつきはさきに述べたように、正規分布と見なしてよいから、各粒子の浮遊速度は量的に考えて  $\bar{u}_s$  に近いものが多い。

またこの際、空気の比重量  $\gamma_L$  を  $1.02 \text{ kg/m}^3$  として計算したが、これは送風機出口に冷却器がなく、気流温度が  $70^\circ\text{C}$  と高いためである。

2.4 ふるい分け管入口における粒子の鉛直方向の初速度  $v_0$

試料は Fig. 1 に示されているホッパから、

傾斜角度が  $30^\circ$  の床板の上を自重によつて、速度を増しながら降下してきて、約  $0.6\text{m}$  離れたふるい分け管入口に達する。したがつて、床板と同じ材質の板の上に試料をのせ、徐々に傾斜角を大きくすることによつて、試料と床板間の静摩擦係数を求めた結果、それは  $0.46 \sim 0.58$  であつたので動摩擦係数を  $0.4$  と考え、ふるい分け管入口における粒子の鉛直方向の初速度  $v_0$  を求めると  $0.67\text{m/sec}$  となつた。また、この値が十分に適当であるかどうかを確かめるために、もう一つの方法によつて  $v_0$  を求めた。すなわち、実験装置のふるい分け管を取りはずした状態で、粒子をホッパから降下させた場合、粒子は床板を離れて、ある位置に落下する。そのときの飛出水平距離と落下高さを測ることによつて  $v_0$  を求めてみた結

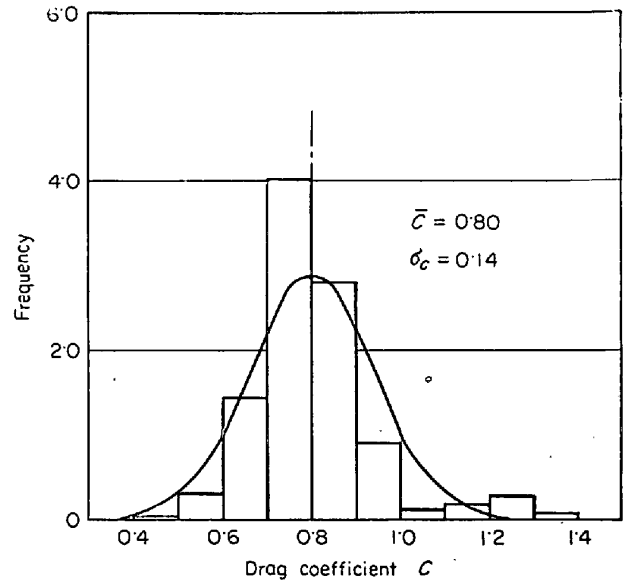


Fig. 7. Distribution of drag coefficient of sinters.

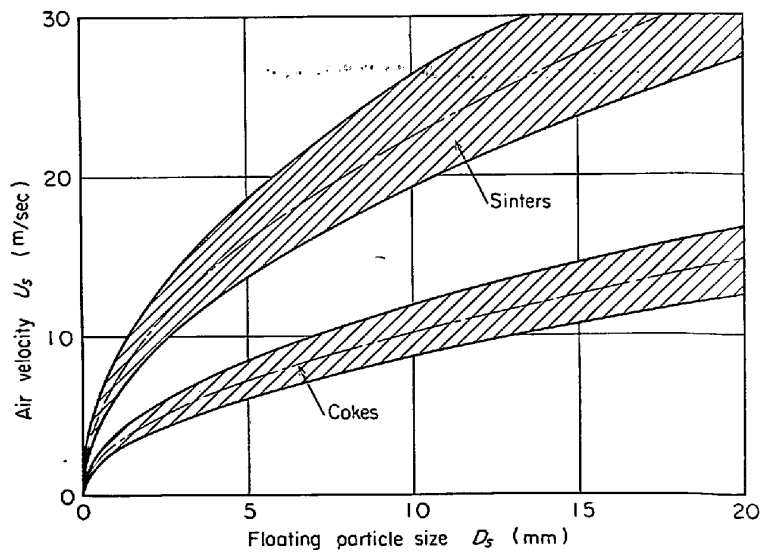


Fig. 8. Relation between air velocity and floating particle diameter of cokes and sinters.

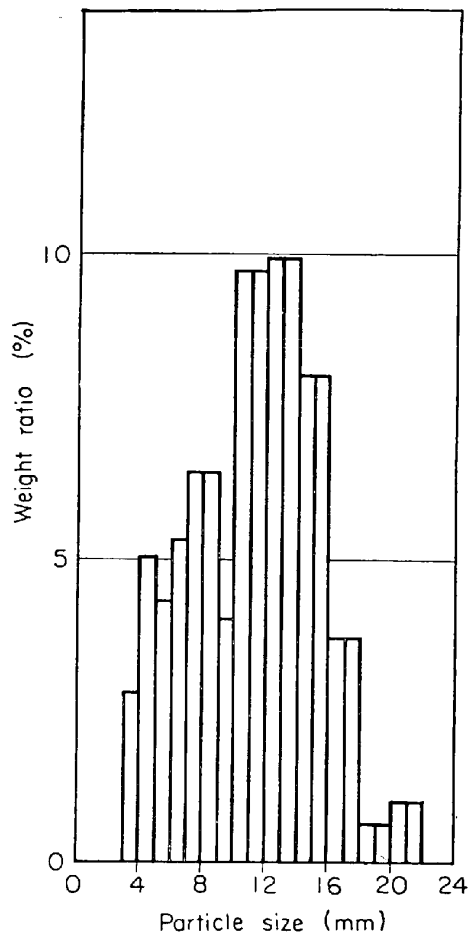


Fig. 9. Particle size distribution of cokes for the experiment.

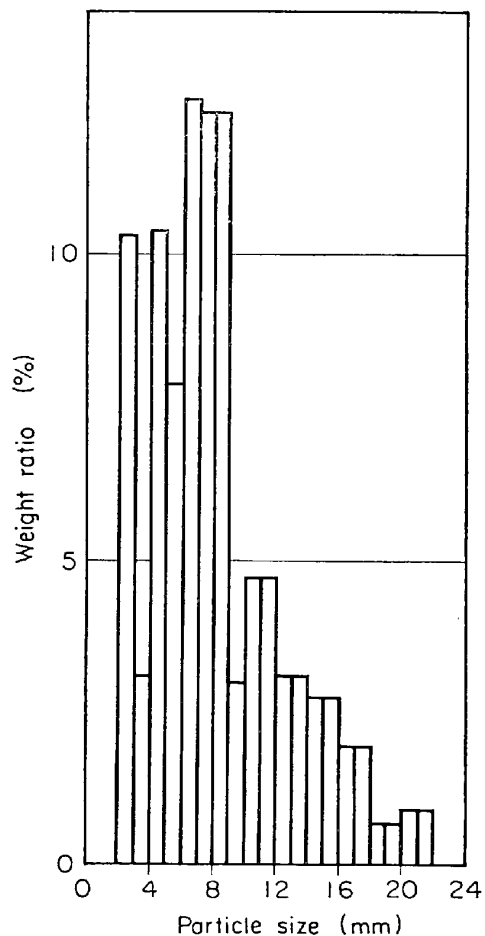


Fig. 10. Particle size distribution of sinters for the experiment.

果、さきの値とほとんど同じ値を示した。また、この場合の試料として選んだコークスおよび焼結鉱の  $v_0$  の値は両者とも同一の値であつた。

つぎに、粒子群がホッパから床板を降下してくる間の経路条件は粒子量に応じて変動し、粒子間の干渉の程度に差が生じて、 $v_0$  の値が異なるのではないかと思ひ試みたが、その値の変動範囲は大きくなく、単一粒子状態の場合とほぼ同一と考えてよいことがわかつた。

2.5 実験結果

実験に供したコークスおよび焼結鉱を 2.2 に述べた寸法の網目ふるいでふるい分けてみた結果、Fig. 9 および Fig. 10 に示す粒度分布が得られた。

まず、Fig. 9 に示すような粒度分布をもつコークス粒子群の気流による分級実験は Fig. 1 に示した装置を用いて、平均風速が 8.5m/sec, 9.0m/sec および 10.5 m/sec の場合について行なわれた。ある網目寸法区分に属する粒子の全重量を  $W_{s-i}^*$  とし、これらの風速で実際に浮上した粒子重量を  $W_{s-i}$  として、その比  $W_{s-i}/W_{s-i}^*$  を寸法区分別浮上粒子回収率と呼び、また単位時間当た

りの供給粒子量  $a$  t/hr と使用空気量  $b$  t/hr の比  $M=a/b$  を混合率と呼ぶことにする。そこで浮遊粒子径  $D_s$  ( $D_s$  は  $r_K$  および  $C$  がばらついているために一定でないが、ここでは第(2)式に示す  $\bar{D}_s$  と等価である。) に対する寸法区分別の浮上粒子の代表径  $d_{s-i}$  の比  $d_{s-i}/D_s$  を助変数として、片対数グラフを用いて、たて軸に  $W_{s-i}/W_{s-i}^*$  を、横軸に  $M$  をとつてコークスのふるい分け実験結果を示すと Fig. 11 (a), (b) および (c) のようになった。

これらの図から、浮遊粒子径  $D_s$  の半分以下の径をもつ浮上粒子に対しては良好な回収率を期待できるが、浮上粒子の径が大きくなるにしたがつて、その回収率は急速に低下し、浮遊粒子径付近の大きさをもつ粒子群をふるい分けることはほとんど困難となることがわかる。つぎに、同一寸法区分に属する浮上粒子回収率は混合率  $M$  が増すにつれて、片対数線図上で直線的に低下する傾向が認められる。したがつて、この方法によつて粒子群を分級する場合、その分級精度をよくするためには、網目ふるいによる場合と同様に処理量を小さくとり、2回以

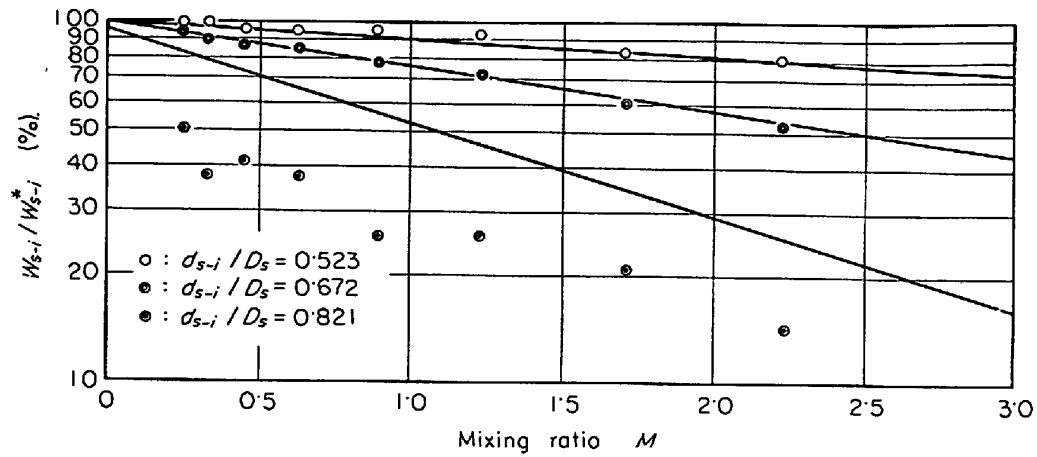
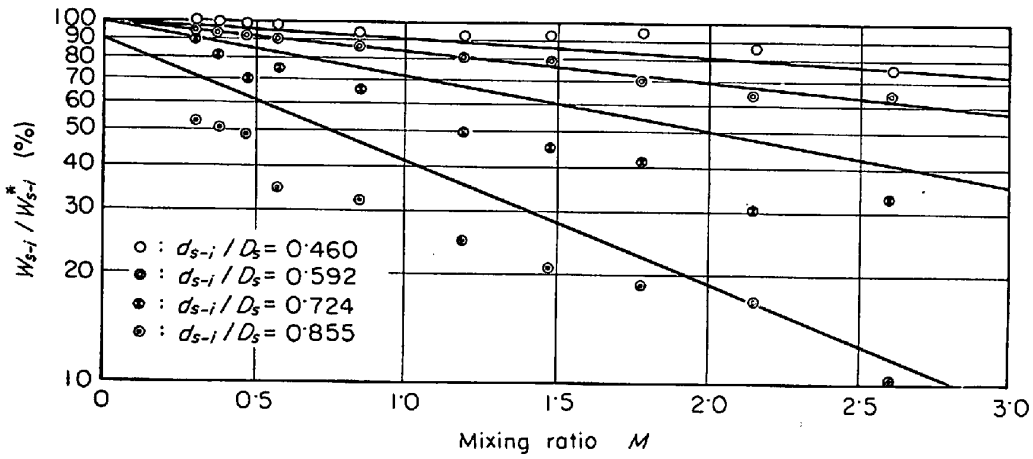
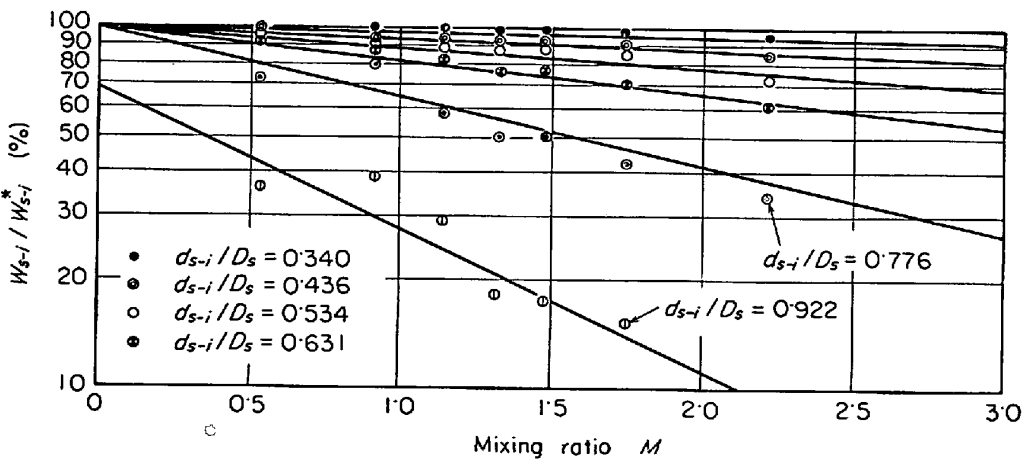
(a)  $U_s = 8.5 \text{ m/sec}$ (b)  $U_s = 9.0 \text{ m/sec}$ (c)  $U_s = 10.5 \text{ m/sec}$ 

Fig. 11. Experimental results in case of using cokes.

上ふるうことが望ましいと考えられる。

一方、焼結鉱については、Fig. 10 に示した粒度分布をもつ粒子群が平均風速  $16.4 \text{ m/sec}$  および  $17.8 \text{ m/sec}$

で分級された。その結果、Fig. 12 (a) および (b) に示すようであり、寸法区別浮上粒子回収率と混合率の関係はコークスの場合とほとんど同じ傾向を示した。

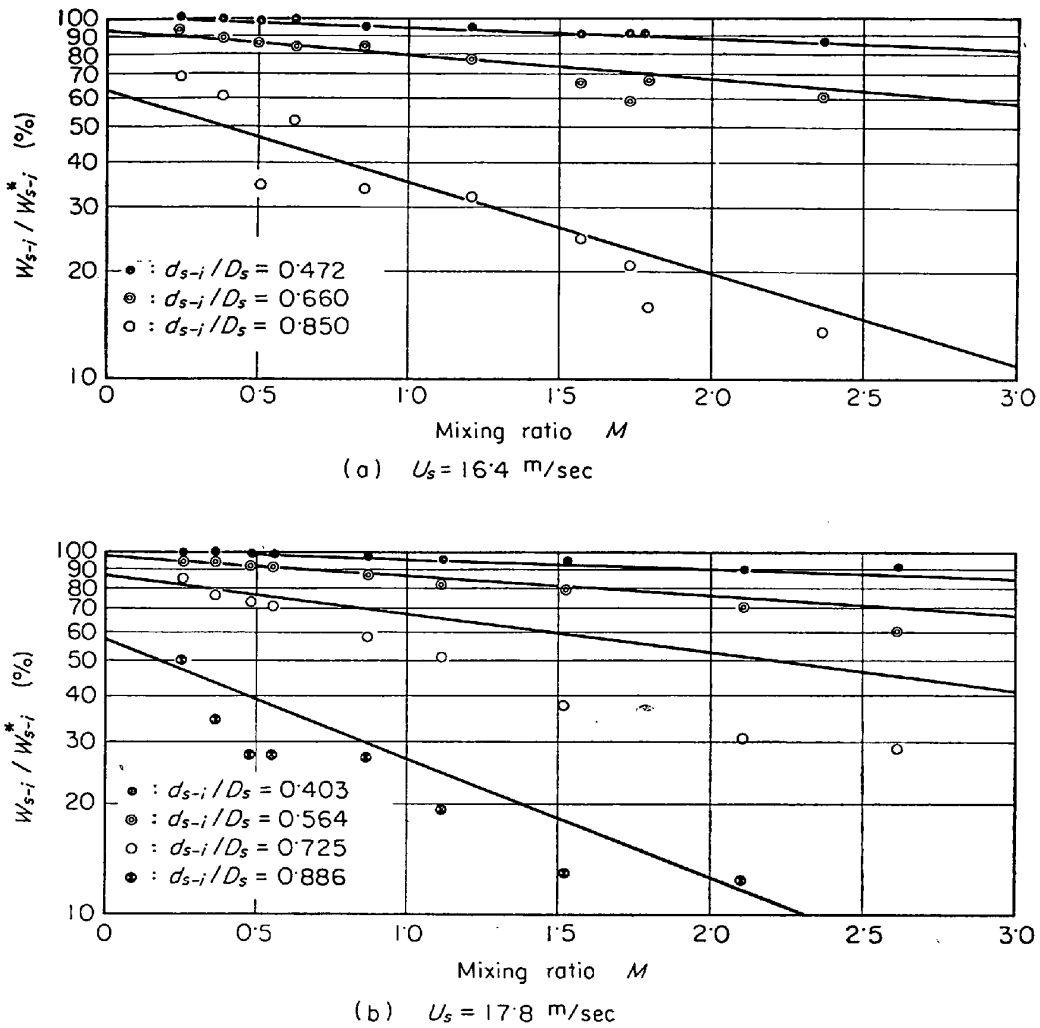


Fig. 12. Experimental results in case of using sinters.

### 3. 分級精度の解析

空気分級の性能、とくに分級精度に関与する諸因子相互の関係を明らかにするため、簡単な解析を行なつてみた。

空気分級において、その分級精度を左右するものの一つとして、まず粒子の見掛比重および抗力係数のばらつきの影響を考えなければならない。

いま、浮遊粒子径  $D_s$  を粒子寸法を測る基準として、ふるい分け網目寸法を小さいものから順に  $D_{s-n}, D_{s-(n-1)}, \dots, D_{s-1}, D_s, D_{s+1}, \dots, D_{s+m}$  とし、これら網目寸法区分別の粒子の代表径を  $d_{s-n}, d_{s-(n-1)}, \dots, d_{s-1}, d_{s+1}, \dots, d_{s+m}$  とする。また、これらの代表径をもつ粒子1個の重量および単位時間当たりの供給個数をそれぞれ  $G_{s-n}, G_{s-(n-1)}, \dots, G_{s-1}, G_{s+1}, \dots, G_{s+m}$  および  $N_{s-n}, N_{s-(n-1)}, \dots, N_{s-1}, N_{s+1}, \dots, N_{s+m}$  とする。したがつて、代表径が  $d_{s-i}$  の粒子が単位時間当たりふるい分け管に挿入される量  $W_{s-i}^*$  は  $G_{s-i} \cdot N_{s-i}$  に等

しい。

一般に、浮遊粒子径  $D_s$  は風速  $u_s$ 、見掛比重  $\gamma_K$  および抗力係数  $C$  の関数で、つぎのように表わされる。

$$D_s = K \cdot u_s^2 \frac{C}{\gamma_K} \left( K = \frac{3\gamma_L}{4g} = \text{一定} \right)$$

したがつて、コークスおよび焼結鉱のように見掛比重  $\gamma_K$  および抗力係数  $C$  がばらついている場合、同一風速の下でも浮遊粒子径  $D_s$  はばらつく。いま、 $\gamma_K$  および  $C$  の2変数が独立で、それぞれの母平均を  $\bar{\gamma}_K$  および  $\bar{C}$ 、それぞれの標準偏差を  $\sigma_{\gamma_K}$  および  $\sigma_C$  とすれば  $D_s$  の標準偏差  $\sigma_D$  および期待値  $\bar{D}_S$  はつぎのように示すことができる<sup>5)</sup>。

$$\begin{aligned} \sigma_D &= \left[ \left( \frac{\partial D_s}{\partial C} \right)^2 \sigma_C^2 + \left( \frac{\partial D_s}{\partial \gamma_K} \right)^2 \sigma_{\gamma_K}^2 \right]^{1/2} \Big|_{\gamma_K = \bar{\gamma}_K, C = \bar{C}} \\ &= \left\{ \left( K \cdot u_s^2 \frac{1}{\bar{\gamma}_K} \right)^2 \cdot \sigma_C^2 + \left( -K u_s^2 \frac{\bar{C}}{\bar{\gamma}_K^2} \right)^2 \sigma_{\gamma_K}^2 \right\}^{1/2} \\ &= K u_s^2 \cdot \frac{\bar{C}}{\bar{\gamma}_K} \left[ \left( \frac{\sigma_C}{\bar{C}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{\gamma_K}}{\bar{\gamma}_K} \right)^2 \right]^{1/2} \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

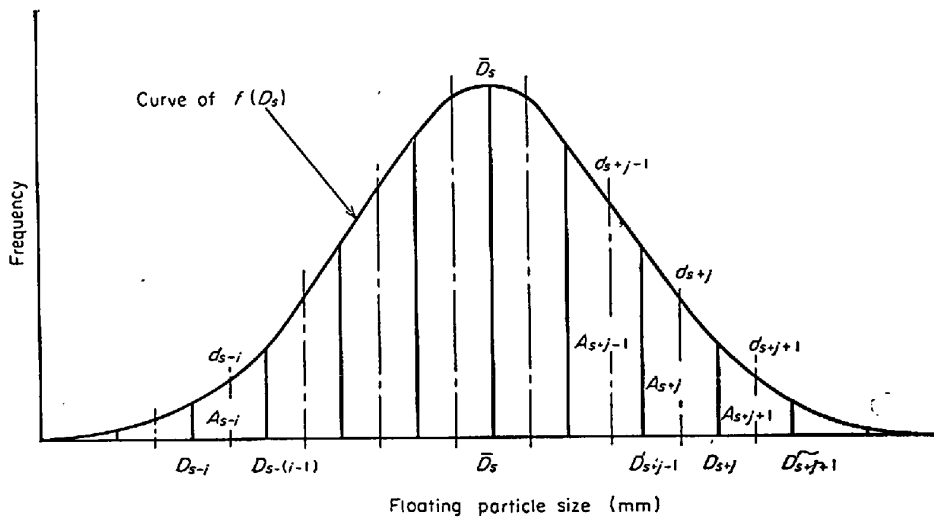


Fig. 13. Distribution of diameter of floating particles.

$$\bar{D}_s = K u_s^2 \frac{\bar{C}}{\bar{\gamma} K} \dots\dots\dots (2)$$

また、浮遊粒子径  $D_s$  の分布は近似的に正規分布であると見なすことができるので<sup>9)</sup>、その確率密度関数  $f(D_s)$  はつぎのようになる。

$$f(D_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_D}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_D^2} (\bar{D}_s - D_s)^2\right\} \dots (3)$$

いま、 $f(D_s)$  が Fig. 13 に示すようになったとし、浮遊粒子群の粒子径域をさきに述べたように各区間に細分化し、各区間に属する粒子群の浮遊する確率を粒子径の小さいものより順に、 $A_{s-n}, A_{s-(n-1)}, \dots, A_{s-1}, A_{s+1}, \dots, A_{s+m}$  とする。この分布曲線は浮遊粒子群の粒径のばらつきを示すものであるから、粒子径  $\bar{D}_s$  を目標にふるい分けようとしても、結果的には  $A_{s-n}, A_{s-(n-1)}, \dots, A_{s-1}, A_{s+1}, \dots, A_{s+m}$  の確率で  $d_{s-n}, d_{s-(n-1)}, \dots, d_{s-1}, d_{s+1}, \dots, d_{s+m}$  を浮遊粒子径として分級していることになる。したがって、浮遊する粒子は浮上粒子として回収できないと考えると、たとえばその代表径が  $d_{s-i}$  の浮上粒子群の回収量  $\Phi[d_{s-i}]$  は粒子同志の衝突がない場合にはつぎの第(4)式のようになる。

$$\begin{aligned} \Phi[d_{s-i}] &= W_{s-i}^* \sum_{j=-(i-1)}^{\infty} A_{s+j} \\ &= W_{s-i}^* \int_{D_{s-(i-1)}}^{\infty} f(D_s) dD_s = W_{s-i}^* \varphi_{s-(i-1)} \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、  

$$\int_{D_{s-(i-1)}}^{\infty} f(D_s) dD_s = \varphi_{s-(i-1)}$$

これは見掛比重量と抗力係数のばらつきのみによる浮上粒子の回収量を表わしており、処理粒子量が少ない場合にはこれで十分であるが、処理粒子量の増大とともに粒子同志の衝突の影響が無視できなくなる。したがって、

粒子同志の衝突がその分級精度におよぼす影響も考慮しなければならない。

いま、さきに述べたような粒度構成をもつ粒子群がふるい分け管に挿入される場合、時間的にその粒度構成が同じであると仮定し、各粒度区分に属する粒子の時間的挿入間隔を  $\Delta t_{s-n}, \Delta t_{s-(n-1)}, \dots, \Delta t_{s-1}, \Delta t_{s+1}, \dots, \Delta t_{s+m}$  とする。ふるい分け管に入った粒子群は、下向きの分速度をもっているから、上向きの気流に抗して一たんは沈降するが、その粒子径が浮遊粒子のそれより小さいものはやがてその下向きの速度が零になり、それ以後は運動方向を上向きに変えて浮上する。これらの浮上粒子がふるい分け管内を上向きに運動する時間をその粒子の浮上時間と呼び、これを各代表径をもつ粒子に対し、 $\tau_{s-n}, \tau_{s-(n-1)}, \dots, \tau_{s-2}$  および  $\tau_{s-1}$  とする。また、浮上粒子群はこの浮上する過程において、粒子径が浮遊粒子のそれより大きい沈降粒子群と衝突し、その浮上を妨げられ、分級精度が低下する。この衝突の頻度は浮上時間に比例する。いま、断面積  $F$  の管内を沈降する粒子の径を  $d_{s+j}$ 、浮上する粒子のそれを  $d_{s-i}$  とし、これらの粒子がまったく接触しない場合を衝突がなかつたとすれば、沈降粒子の有効断面積  $S_{ij}$  はつぎのように表わすことができる。

$$S_{ij} = (d_{s-i} + d_{s+j})^2 \pi / 4$$

したがって、 $d_{s-i}$  の粒子径をもつ浮上粒子1個と  $d_{s+j}$  の粒子径をもつ沈降粒子1個が衝突しない確率  $p'_{ij}$  はつぎのようになる。

$$p'_{ij} = 1 - \frac{S_{ij}}{F} \dots\dots\dots (5)$$

$F \gg S_{ij}$  になるように管断面積を設けておけば第(5)式はつぎのように近似できる。



$$p'_{ij} = 1 - \frac{S_{ij}}{F} = e^{-S_{ij}/F} \dots\dots\dots (6)$$

$S_{ij}/F < 0.1$  であればこの式は十分に満足される。また、その粒子径が  $d_{s-i}$  の粒子の浮上時間は  $\tau_{s-i}$  であり、その間に会合する粒子径  $d_{s+j}$  の沈降粒子の個数は  $\tau_{s-i}/\Delta t_{s+j}$  個である。したがって、代表径が  $d_{s-i}$  の粒子が代表径  $d_{s+j}$  の粒子群と衝突することなしに浮上粒子として回収される確率  $p_{ij}$  はつぎのように示すことができる。

$$p_{ij} = \left(1 - \frac{S_{ij}}{F}\right)^{\tau_{s-i}/\Delta t_{s+j}} = \exp\left\{-\frac{S_{ij}}{F} \cdot \frac{\tau_{s-i}}{\Delta t_{s+j}}\right\} \dots\dots\dots (7)$$

以上は代表径が  $d_{s-i}$  の粒子とそれが  $d_{s+j}$  の粒子の組み合わせについて考えてきたが、 $d_{s-i}$  の粒子径をもつ粒子が上昇する過程において、 $j=1, 2, \dots, m$  の沈降粒子全体と衝突する機会があるから、代表径が  $d_{s-i}$  の粒子群の回収率  $P_i$  はつぎのように書くことができる。

$$P_i = \prod_{j=1}^m p_{ij} = \prod_{j=1}^m \left(1 - \frac{S_{ij}}{F}\right)^{\tau_{s-i}/\Delta t_{s+j}} = \exp\left\{-\frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{ij}}{\Delta t_{s+j}}\right) \cdot \tau_{s-i}\right\} \dots\dots\dots (8)$$

いま、代表径  $d_{s-i}$  をもつ粒子群の単位時間当たりの供給量  $W_{s-i}^*$  に対して、そのうち実際に浮上粒子として回収される量を  $W_{s-i}$  とすれば、

$$P_i = W_{s-i}/W_{s-i}^*$$

であるから、第(8)式はつぎのように表わすことができる。

$$\frac{W_{s-i}}{W_{s-i}^*} = \exp\left\{-\frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{ij}}{\Delta t_{s+j}}\right) \cdot \tau_{s-i}\right\} \dots\dots\dots (9)$$

この式は浮上粒子群のうち浮遊粒子径に近い径をもつものほど、 $S_{ij}$  および  $\tau_{s-i}$  の値が大きくなるので、その回収率は低下することを表わして、前述の実験結果とその傾向が一致している。

浮上粒子回収率に対し、浮上粒子群と沈降粒子群との衝突による回収率の低下と見掛比重量と抗力係数のばらつきによるそれは互いに独立と考えられるから、寸法区分別の浮上粒子回収量はつぎの第(10)式のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} W_{s-n} &= \varphi_{s-(n-1)} \cdot W_{s-n}^* \\ &\times \exp\left\{-\frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{nj}}{\Delta t_{s+j}}\right) \tau_{s-n}\right\} \\ W_{s-(n-1)} &= \varphi_{s-(n-2)} \cdot W_{s-(n-1)}^* \\ &\times \exp\left\{-\frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{(n-1)j}}{\Delta t_{s+j}}\right) \tau_{s-(n-1)}\right\} \\ &\dots\dots\dots \\ W_{s-1} &= \varphi_{s-0} \cdot W_{s-1}^* \\ &\times \exp\left\{-\frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{1j}}{\Delta t_{s+j}}\right) \tau_{s-1}\right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

したがって、粒子同志の衝突がないと見なせる場合、すなわち、混合率が非常に小さい場合には浮上粒子回収量は第(4)式で示される  $\Phi[d_{s-i}]$  の値に近づくが、混合率が增大するとともに、衝突の影響が無視できなくなり、浮上粒子の回収量は対数的に低下する。

また、このようなふるい分け装置によつて粒子群を分級する場合には管長  $l$  はある値以上のものでなければならない。下向きの初速度をもつた粒子径  $d_{s-i}$  の浮上粒子がふるい分け管へ挿入され、管内で減速されて、ついに速度が零に達するが、その位置が投入位置から測つて  $l_{s-i}$  であるとすれば、

$$l > l_{s-i}$$

を満足されねばならない。したがって、一般に径が  $\bar{D}_s$  の浮遊粒子の速度が零になる位置を投入位置から測つて  $l_s$  とすれば、

$$l \geq l_s \dots\dots\dots (11)$$

を満たすように  $l$  を設定する必要がある。したがって、われわれの用いたふるい分け管の長さは 1.6m であり、十分満足している。

#### 4. 検 討

混合率  $M$  と寸法区分別の浮上粒子回収率  $W_{s-i}/W_{s-i}^*$  の関係については、気流速度  $u_s$  およびふるい分け粒子の粒度分布が一定で、供給量だけを変えた際、 $\sum_{j=1}^m (S_{ij}/\Delta t_{s+j})$  の値は混合率  $M$  に比例するから、その比例定数を  $k$  として、第(10)式の両辺について対数をとると、つぎのようになる。

$$\begin{aligned} \log \frac{W_{s-i}}{W_{s-i}^*} &= \log \varphi_{s-(i-1)} - \frac{1}{F} \left(\sum_{j=1}^m \frac{S_{ij}}{\Delta t_{s+j}}\right) \tau_{s-i} \\ &= \log \varphi_{s-(i-1)} - k \frac{1}{F} M \tau_{s-i} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

この式の右辺第1項は抗力係数および見掛比重量のばらつきによつて、第2項は沈降粒子と浮上粒子の衝突の頻度によつて決まる値である。したがって、混合率  $M$  の増加にともなつて、寸法区分別の浮上粒子回収率  $W_{s-i}/W_{s-i}^*$  は片対数線図上で直線的に低下することを意味しており、さきに述べた実験結果とその傾向が一致する。

$\varphi_{s-(i-1)}$  の値はさきに述べたように、標準偏差  $\sigma_D$  の関数である。いま、前述のいくつかの実験のうち、コークス粒子を 10.5m/sec、焼結鉍粒子を 17.8m/sec の風速で分級した場合の結果を上記述べた解析方法にしたがつて検討してみよう。これらの風速に対する  $\sigma_D$  の値を第(1)式によつて計算すればそれぞれ 0.641 mm および 1.090 mm となりコークスおよび焼結鉍に対する  $f(D_s)$  の曲線は Fig. 14 および Fig. 15 に示すようになる。

これから明らかなように、見掛比重と抗力係数のばらつきが分級精度におよぼす影響は期待値  $\bar{D}_s$  付近で著しいが、上記のふるい分け風速の場合、コークスでは9

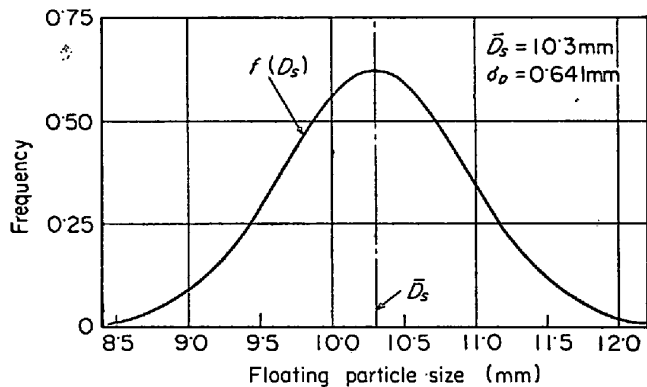


Fig. 14. Distribution of floating particle diameter of cokes ( $u_s=10.5\text{m/sec}$ ,  $\bar{D}_s=10.3\text{mm}$ ).

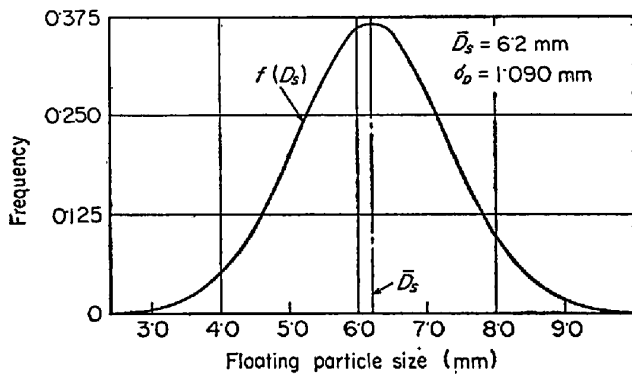


Fig. 15. Distribution of floating particle diameter of sinters ( $u_s=17.8\text{m/sec}$ ,  $\bar{D}_s=6.2\text{mm}$ ).

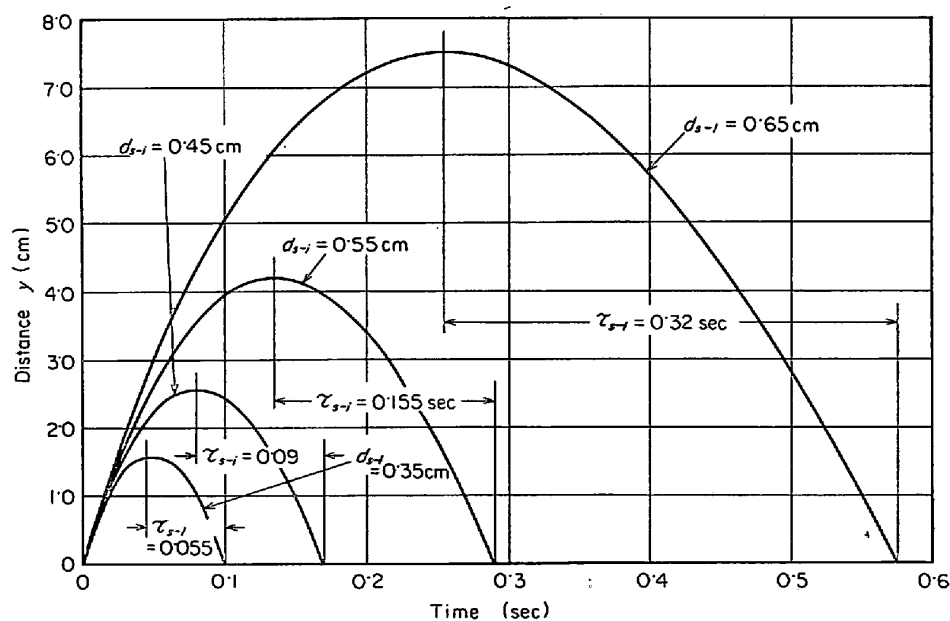


Fig. 16. Relation between time and travelling distance of cokes in vertical air stream ( $u_s=9.0\text{m/sec}$ ,  $v_0=0.67\text{m/sec}$ ).

mm以下、焼結鉱では4 mm以下の浮上粒子群に対してはその影響はほとんどないことがわかり、Fig. 11(a), (b), (c)および Fig. 12 (a), (b)に示した実験結果とその傾向が一致する。

また、浮上粒子の浮上時間  $\tau_{s-i}$  が浮上粒子回収率  $W_{s-i}/W_{s-i}^*$  におよぼす影響の程度について検討する。浮遊粒子径  $\bar{D}_s$  よりも比較的小さい径をもつ浮上粒子群、たとえば  $\bar{D}_s/2$  より小さい径をもつ粒子群の回収率が非常に良好であるのは、それらの粒子の浮上時間が短く、沈降粒子群との衝突の頻度が低いためであり、一方浮遊粒子径付近の径をもつ浮上粒子群の回収率がよくないのは、それらの粒子の浮上時間が長く、沈降粒子群との衝突の頻度も高いためであると考えられる。また、このことは同じ粒度分布の粒子群であつても、ふるい分け風速が大きい場合には同一径の浮上粒子群の回収率はふるい分け風速の小さい場合のそれよりも良好であるということからも明らかである。このように、浮上時間  $\tau_{s-i}$  が浮上粒子回収率  $W_{s-i}/W_{s-i}^*$  におよぼす影響はきわめて大きいと考えられる。ふるい分け管内の粒子群の運動は浮上および沈降が同時に行なわれており、それらの挙動の様子はきわめて複雑である。しかし、実際に浮上して回収された粒子群というのは、れわわれの論理過程から考えてみると衝突の影響を全然受けていないものの集まりであるとしているために、それらの粒子は単一粒子運動状態にあると見なせる。つまり、粒子同志の衝突を一度も経験していないものが浮上粒子として回収されるとみているわけである。したがって、浮上粒子群の運動を

Table 1. Comparison of calculated value of  $W_{s-i}/W_s^*-i$  in each size range with experimental for cokes ( $M=1.0$ ).

$u_s$ (m/sec)	$\bar{D}_s$ (mm)	$D_{s-i} \sim D_{s-(i-1)}$ (mm)	$\tau_{s-i}$ (sec)	$\frac{1}{F} \sum \frac{S_{ij}}{\Delta t_{s+j}}$	$\frac{1}{F} \left( \sum \frac{S_{ij}}{\Delta t_{s+j}} \right) \tau_{s-i}$	cal. † $W_{s-i}/W_s^*-i$ (%)	exp. † $W_{s-i}/W_s^*-i$ (%)
8.5	6.7	3 ~ 4	0.065	1.87	0.109	90.2	90
		4 ~ 5	0.120	2.14	0.257	77.3	76
		5 ~ 6	0.245	2.41	0.590	52.6	27
9.0	7.6	3 ~ 4	0.055	1.63	0.090	91.5	92
		4 ~ 5	0.090	1.86	0.168	84.5	84
		5 ~ 6	0.155	2.11	0.327	72.2	60
		6 ~ 7	0.320	2.36	0.755	42.2	30
10.5	10.3	3 ~ 4	0.030	1.30	0.039	96.4	96
		4 ~ 5	0.050	1.46	0.073	93.0	93
		5 ~ 6	0.070	1.64	0.115	89.1	88
		6 ~ 7	0.105	1.81	0.190	82.6	81
		7 ~ 9	0.200	2.10	0.420	64.4	65
		9 ~ 10	0.370	2.42	0.895	27.7	27

† cal. and exp. show calculation value and experimental of  $W_{s-i}/W_s^*-i$ .

Table 2. Comparison of calculated value of  $W_{s-i}/W_s^*-i$  in each size range with experimental for sinters ( $M=1.0$ ).

$u$ (m/sec)	$\bar{D}_s$ (mm)	$D_{s-i} \sim D_{s(i-1)}$ (mm)	$\tau_{s-i}$ (sec)	$\frac{1}{F} \sum \frac{S_{ij}}{\Delta t_{s+j}}$	$\frac{1}{F} \left( \sum \frac{S_{ij}}{\Delta t_{s+j}} \right) \tau_{s-i}$	cal. $W_{s-i}/W_s^*-i$ (%)	exp. $W_{s-i}/W_s^*-i$ (%)
16.4	5.3	2 ~ 3	0.060	1.14	0.068	93.4	93
		3 ~ 4	0.125	1.37	0.172	77.6	78
		4 ~ 5	0.365	1.62	0.591	34.7	35
17.8	6.2	2 ~ 3	0.045	0.97	0.044	95.8	96
		3 ~ 4	0.095	1.16	0.110	87.6	85
		4 ~ 5	0.170	1.35	0.230	68.2	56
		5 ~ 6	0.480	1.57	0.753	27.1	23

単一粒子のそれとして考え浮上時間を求めた。その計算結果の一例をコークス粒子を風速 9.0m/sec で分級した場合について示せば Fig. 16 のようになる。これはふるい分け管内の浮上粒子の位置と時間の関係を示したものであるが、たて軸にはふるい分け管の最上部から粒子の位置までの距離  $y$  cm を、横軸には時間  $t$  sec をとっている。したがって、粒子の浮上時間  $\tau_{s-i}$  というのは、たとえば同図に示されているように、その粒子の沈降速度が零に達したときから測ればよい。また、上の計算は粒子群がふるい分け管内に入る瞬間の初速度  $v_0$  をさきに述べたように 0.67m/sec として行なった。このように単粒子運動として計算した  $\tau_{s-i}$  の値を用いて、 $M=1$  の場合の浮上粒子回収率の計算値と実験値とを比較すれば、コークス粒子に対しては Table 1 に、焼結鉱粒子に対しては Table 2 に示すようである。

また、Fig. 11(a), (b), (c) および Fig. 12(a), (b) に示した直線はこのようにして行なった計算値であ

る。これから明らかのように、計算値と実験値は比較的よく一致していると考えてさしつかえない。しかし、浮遊粒子径付近の径をもつ浮上粒子群の回収率は一般に計算値よりも低い傾向にあるが、これらの粒子群の実際の浮上時間が、単一粒子運動として得たその計算値より大きくなっているためと考えられる。

### 5. 結 論

空気によつて同一種類の粒子群を粒度別に分級する場合、その分級精度は粒子群の見掛比重量および抗力係数のばらつきや粒子同志の干渉、とくに沈降粒子群と浮上粒子群の衝突によつて影響を受ける。その影響の程度をコークスおよび焼結鉱を用いて実験し、同時に解析的な検討を加えた。その結果を要約すればつぎのようである。

1) 見掛比重量や抗力係数にいくらかのばらつきがあつても、個々の粒子の浮遊速度に差があれば、それらの

粒子を気流によつて粒度別に分級できる。

2) 見掛比重量と抗力係数のばらつきが分級精度におよぼす影響は浮遊粒子径  $\bar{D}_s$  付近の径をもつ浮上粒子群に対して著しく  $\bar{D}_s$  の半分程度以下の径をもつ粒子群に対してはその影響はほとんど認められない。

3) 同一の粒度分布の粒子群を分級する場合、寸法区分別の浮上粒子回収率は片対数線図上で、混合率  $M$  の増加にしたがつて直線的に低下する。その傾斜は管断面積  $F$  と  $\Sigma (S_{ij}/\Delta t_{s+j})\tau_{s-i}$  の値によつて定まる。

4) われわれの行なつた実験範囲内では、浮遊粒子径の半分以下の径をもつ浮上粒子群の回収率はきわめて良好であることがわかつた。

5) ふるい分け粒子群中に含まれる浮上粒子量の多少と寸法区分別浮上粒子回収率の関係はほとんどないと考えてよい。

6) 寸法区分別浮上粒子回収率を計算する際、浮上粒子群の浮上時間  $\tau_{s-i}$  を、粒子径が浮遊粒子径に対して比較的小さい場合には、単一粒子運動として求めてもよいが、粒子径が大きくなつて浮遊粒子径に近づくと、粒子相互の干渉を考慮して浮上時間を決めなければならない。

#### 文 献

- 1) 鉄鋼共同研究会, 製鉄部会, 第 16 回資料
- 2) " , " , 第 23 回資料
- 3) 小門, 八田, 中安, 平井: 水曜会誌, 16 卷, 7 号 p. 546~549
- 4) 三雲, 小門: 京大工学部紀要, 19 卷, p. 53
- 5) 近藤良夫, 舟坂: 渡編, 技術者のための統計的方法, 共立出版, 昭和 42 年 11 月, p. 41~42
- 6) 7) 小門, 八田, 中安, 平井: 水曜会誌, 16 卷, 7 号, p. 546~549