

分 級

— The Classification —



講師 東京大学生産技術研究所
助教授 工学博士
山本 英夫
Dr. Hideo Yamamoto



抄録：(化) 製品開発課
田村 俊彦
Toshihiko Tamura

This is the abridgement of the lecture given by Dr. H. Yamamoto.

To estimate a classifier or to confirm the sharpness of particle size distribution, it is required to measure particle size. The wrong way of measurement leads to the scattering of products however.

On this abridgement, principles of classification are introduced and then the estimation of classifier and the measurement of particle size are explained.

まえがき

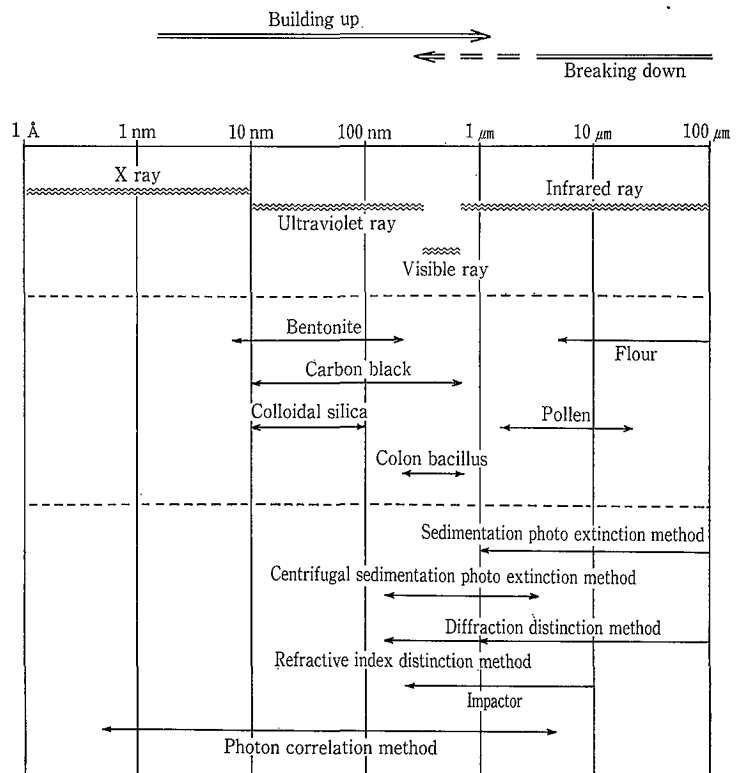
粒子の大きさが本当に揃っているのかどうか、あるいはこの粒子を揃える機械は性能がいいのかという評価をするためには、粒子の粒度分布を測定しなければなりません。この粒度分布の測定方法を間違えると製品が非常にばらつき、品質に対する信頼度が薄いものになってしまいます。本講演では、まず分級原理の解説を行い、分級結果の評価方法と粒子の粒度について説明を行います。

1. 分級の目的と分級原理

粒子を分けることを一般に分級と呼んでいますが、はじめに分級の定義を明確にしておきたいと思います。分級とは、字のごとく級(クラス)に分けることを意味します。特性が連続的に異なる粒子群から、目的とする特性範囲だけに区切って、いくつかの集団に分けていく操作を一般に分級と呼んでいます。特性としては、粒子の大きさだけでなく、粒子の形状、粒子の密度、電気的な性質、化学的な組成の違いや色の違いもあります。こういった特性が連続的に異なり広い幅を持った粒子の集合体の中から、ある特殊な範囲だけを選びだして区切っていくという操作を分級といいます。ただし多くの場合、単に分級といえ、主に粒子の大きさに注目してある種の大きさの幅に区切って行くこと、いわゆる粒度分級を意味します。それでは、現在のどのくらいまで粒度分級が可能かといえますと、だいたいミクロンオーダーくらいまでは技術が確立しているといえます。しかし1 μm以下のものについては大変難しいといわざるを

えません。

第1図は、種々の粒子の大きさを比較したものです。100 μm から 1 Å までの範囲で粒子の大きさを比較しています。また、粒子を作る方法として、粉碎法いわゆるブレイクダウン法と粒子を合成して作るビルディングアップ法を用いた場合の粒子製造の限界、並びに各粒子測定方法の

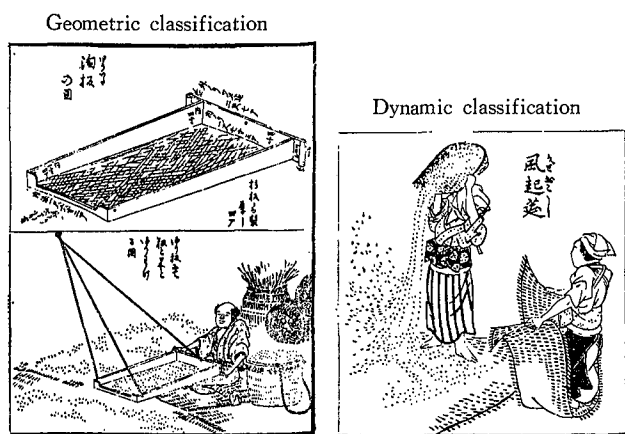


第1図 粒子径と測定方法
Fig. 1 Particle sizes and measurement methods

第 1 表 材料と粒径範囲

Table 1 Materials and spheres of particle size

Materials	Spheres of particle size
Powder metallurgy	500~ 10 μm
Fine ceramic	1~ 0.1 μm
Toner for electrophotography	15~ 5 μm
Resistance, dielectric substance	5~ 0.5 μm
Magnetic substance for sintering	5~ 0.05 μm
Material for membrane	1~ 0.01 μm
Carrier for electrophotography	0.1~ 0.01 μm
CVD	0.8~0.005 μm
Ultra-fine metal catalyst	0.05~0.005 μm
Magnetic fluid	0.01~0.001 μm



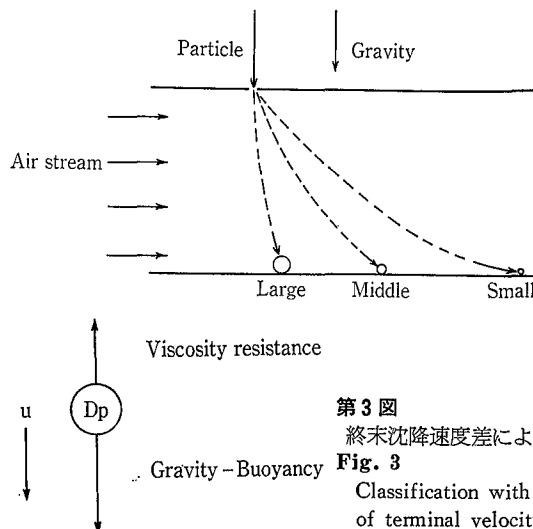
第 2 図 古典的粒度調整法
Fig. 2 Classical methods to regulate particle size

測定可能範囲も示しております。第 1 表に、実際に工業的規模で使われている粒子の大きさを示します。最近注目を浴びているファインセラミックスは、1~0.1 μm 程度いわゆるサブミクロン領域にあります。焼結性が良くなることから、さらに小さい粒子が望まれているのが現実ですが、ハンドリングが困難なため 0.1 μm が限界となっています。ただし、非常に粒度幅が狭い、粒の大きさの揃った粒子が望まれております。金属超微粒子触媒など非常に細かい粒子が用いられていますが、実際に粒度を揃えるのは非常に難しいことです。

第 2 図に示しますように、分級はその分級原理により、大きく、幾何学的分級と動力的分級に分けられます。幾何学的方法とは篩分けのことであり、動力的方法とは、風起しに代表される粒子の大きさにより生じる運動速度の差を利用して行う分級のことです。

動力的分級の原理は、粒子と流体との間に相対運動を起こさせ、その相対運動の差により分級を行うものです。粒子と流体との間に起こる相対運動の原因には、粒子自身の動力的性質である慣性力、ブラウン運動力とエネルギー勾配場による重力、遠心力、静電気力、熱泳動力などが考えられます。基本的な原理はいずれの場合も同様ですので、ここでは第 3 図を用い、重力による場合を例に説明します。

平行平板状のダクト内に気流を流しておき、粒子を上部より気流中に導入しますと、粒子には重力が働き、気流中に沈降し始めます。粒子が沈降始めると空気より粘性抵

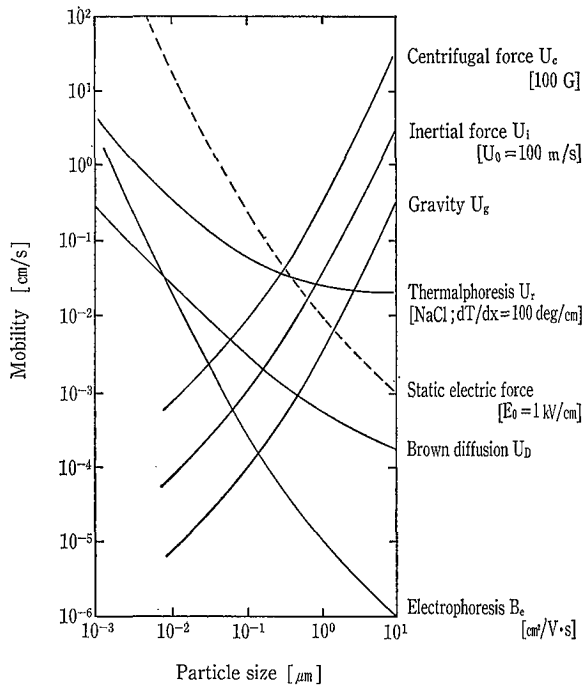


第 3 図
終末沈降速度差による分級

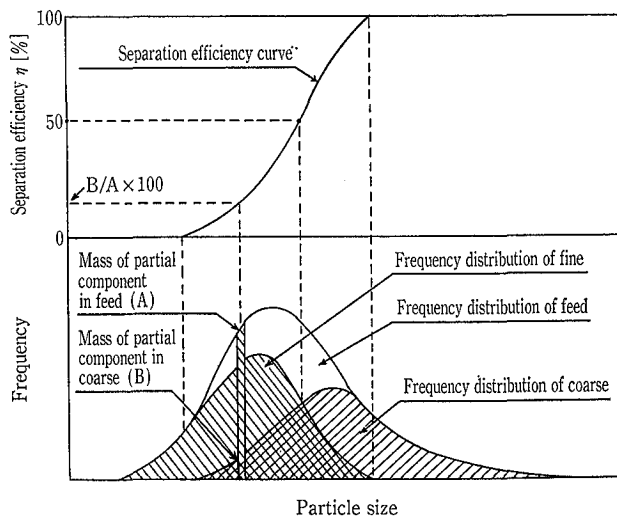
Fig. 3
Classification with difference of terminal velocity

抗を受け始め、粒子の沈降速度とともに粘性抵抗は増大し、重力と粘性抵抗がつり合う点で沈降速度は一定となります。このことは、雨粒が地表に到達するとき、一定の速度で落ちてくることを思い浮かべて頂ければ理解しやすいと思います。この一定で沈降する際の沈降速度は、粒径 D_p の関数となり、大きい粒径のものほど沈降速度も大きくなります。今、気流が左から右に流れているところに粒子を落としますと、粒子は気流に乗り右側に運動しますが、同時に重力により下方にも沈降しますので、第 3 図の破線に沿った方向に運動します。ところが下に向かう速度すなわち沈降速度は、粒子が大きいほど大きくなりますから、大きい粒子は短い時間で下面まで到達し、気流に乗りながら比較的近い場所に位置することになります。一方、小さい粒子は非常に沈降速度が遅いため、この気流に乗って遠くまで運ばれた後、下面に沈降することになります。このように粒子の大きさにより下面に到達する距離が異なりますので、各々個別に回収することにより分級が行われることとなります。これが分級の基本原理であり、こういった原理に基づき大きさ別に効率良く分ける装置が種々開発されております。

粒子と流体の間に相対速度を発生させるための力として、重力と遠心力が容易に想像できるわけですが、この他に慣性力があげられます。慣性力とは、粒子が流体とともに流れている場合に、流体の急激な変化に追従しないで同方向の運動を持続し続けようとする力です。これは、自動車がカーブする際の体の揺れを想像すると理解しやすいと思います。このようにある大きさを持った物体が運動をしているときには、必ず慣性力が存在します。慣性力の大きさは粒子の大きさによって異なりますので、この慣性力を利用して粒子を分けることもできます。第 4 図は、粒径と慣性力や重力、遠心力などによる移動速度を表したものです。例えば、1 μm の粒子の沈降速度は 0.1 mm/sec 以下であることが読み取れます。移動速度が大きいほど分級が容易となりますので、粒子が大きいほど分級が容易であり、逆にサブミクロン領域では、100 G の遠心力でさえ 1 秒間に 1 mm しか移動しなくなり、重力は利用が不可能な領域となります。



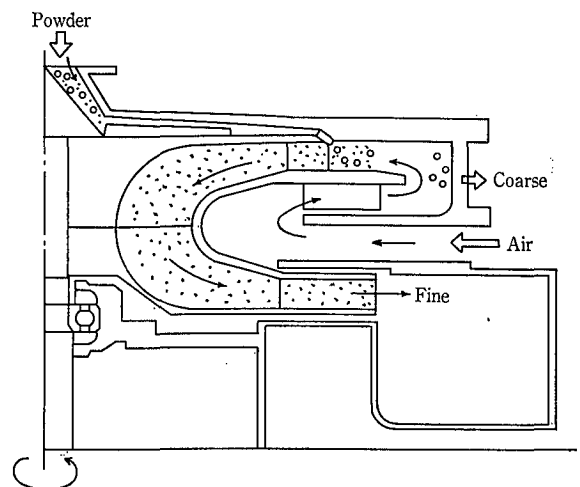
第4図 粒子径と移動速度
Fig. 4 Particle size and mobility



第5図 部分分離効率曲線
Fig. 5 Partial separation efficiency curve

2. 分級の評価と分級効率

実際に分級を行った場合の分級の評価方法として、分級効率を考えなければなりません。ある分級機に原料を入れて大きい粒子と小さい粒子に分けた際に、どのような状態に分かれているのか、本当に大きい粒子と小さい粒子に分かれているのかを評価する必要があります。原料粒子の粒度分布が第5図に示す²⁾ような分布の場合に、分級機に要求されていることは、ある大きさから右の部分(大きい粒子)と左の部分(小さい粒子)に分けることですが、実際には斜線に示すような分布になります。粗粉側に取り出された粒子は、大きい粒度分布を持ち、微粉側に取り出された粒子は、小さい粒度分布を持つといった状態となり、ある大



第6図 ターボクラシファイア構造断面図
Fig. 6 Structural cross section of TURBO CLASSIFIER

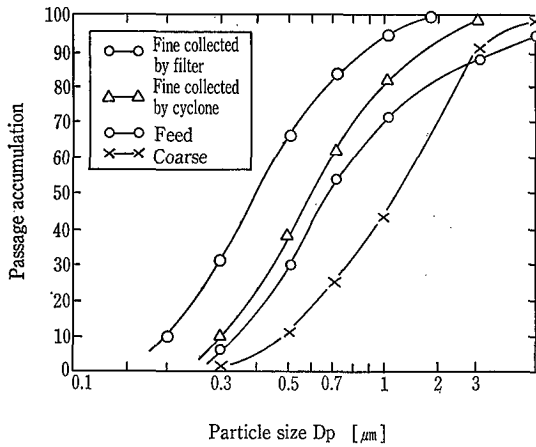
きさから大きい粒子と小さい粒子に分かれることにはなりません。したがって、この分級機の性能をどうして評価するかが問題となりますが、結局はそれぞれの大きさの粒子が、どのような割合で粗粉側と微粉側に分けられたかにより評価するしか方法がありません。

その評価の方法は、原料中のそれぞれの大きさの粒子の分かれ方に着目し、粗粉側に回収された粒子の割合をそれぞれの粒子の大きさに対して計算し、部分分離効率曲線なるものを求めて評価を行います。かりに、ある大きさの粒子を境に完全に粗粉と微粉に分かれた場合には、この曲線は垂直に立ち上がります。したがって、分級機の性能はこの部分分離効率曲線の立ち上がり方により評価できます。この曲線が寝ていれば寝ているほど分級の精度は悪くなっていると評価されます。分級後の粒度分布が原料と同じものであった場合には、この部分分離効率曲線はどの粒子径においても同じ値を示し、もはや分級機ではなく分割機ともいわざるをえない状態となります。

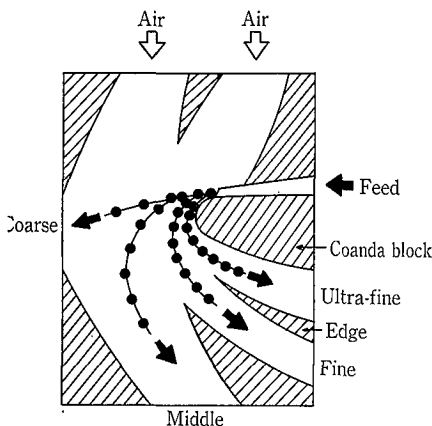
それではこの部分分離効率曲線がどの程度立ってくればよいのかといいますと、目的によって違いはありますが、非常にシャープといわれる分級機の場合には、部分分離効率曲線で25%の粒径と75%の粒径の比が1.2~1.4くらいとなり、通常のもので2.0くらいまでの値を示すようです。

3. 分級機の実例

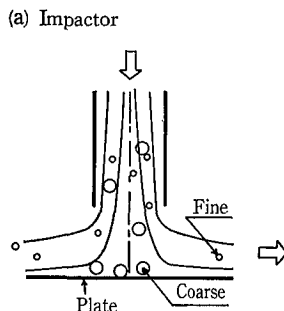
分級機は、湿式分級と乾式分級に分けられます。湿式分級とは水中で分級を行うことであり、乾式分級とは水を使わないで空気中で分級を行うことです。乾式分級はさらに篩分け、重力分級、慣性力分級、遠心力分級に分類できますが、なるべく小さい粒子を分級するためには遠心力を使うこととなります。第6図は、この一例であるターボクラシファイア(日清エンジニアリング製)の構造断面図です³⁾。高速回転をしている分級ロータにより空気が本体内部に導入され、粒子と混じり合いながら気流を形成します。気流は分級ロータと共に高速にて回転していますので、同時に遠心力が働きます。大きい粒子には大きい遠心力が働きますので、気流に対抗して逆方向(半径から遠い方向)に移動します。ところが小さい粒子には小さい遠心



第7図 分級後粒度分布
Fig. 7 Classified particle size distribution

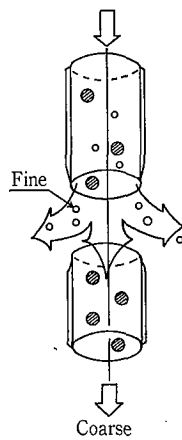


第8図 エルボージェット構造断面図
Fig. 8 Structural cross section of ELBOW JET

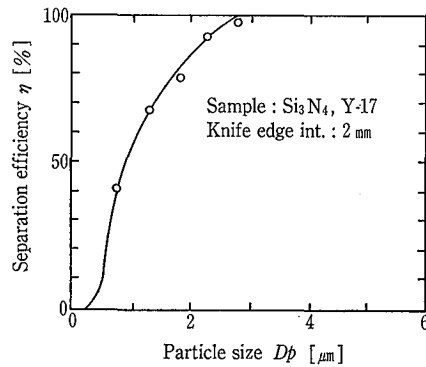
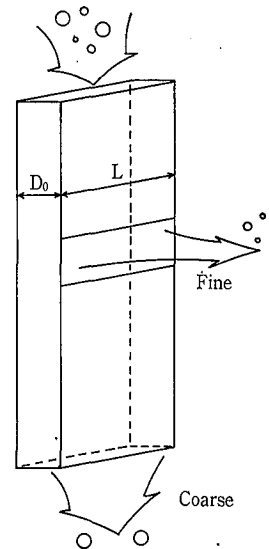


第10図 パーチュアルインパクト概要図
Fig. 10 Schematic view of virtual impactor

(b) Virtual impactor round nozzle



(c) Slit nozzle



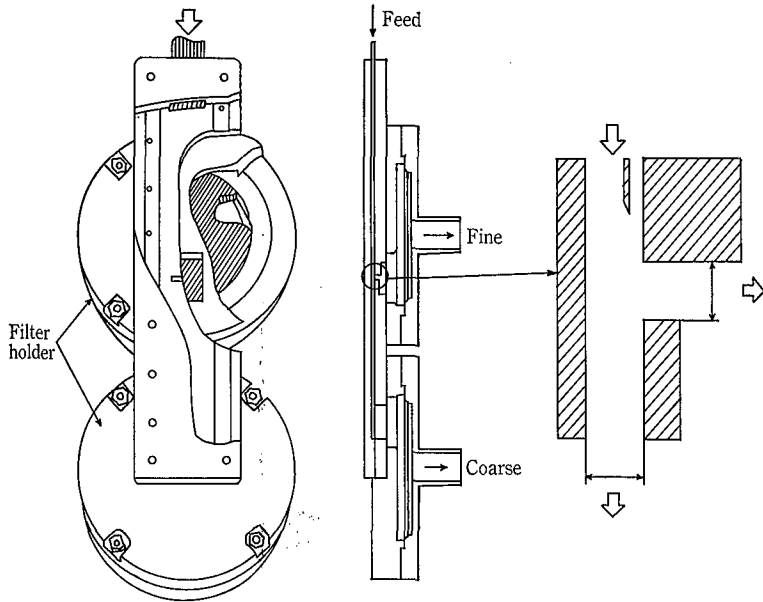
第9図
部分分級効率曲線
Fig. 9
Partial separation efficiency curve

りしか働きませんので、気流に取り込まれてしまいます。長期的には、大きい粒子は粗粉取出口から、小さい粒子は分級ロータ内を通過して渦巻ケーシングから取り出されます。粗粉側から回収された粉体並びに微粉側から回収された粉体をサイクロンにて捕集したもの、さらにサイクロンで捕集しきれなかったものをバグフィルターにて捕集したものの粒度分布を示したものが第7図です⁴⁾。最初50%粒径が0.7 μm程度であったものが、この分級機にて処理することにより、粗粉側で50%粒径がだいたい1.0 μm、微粉側で0.6 μm以下のものに分けることができます。これは、かなり優秀な分級機であると考えられます。

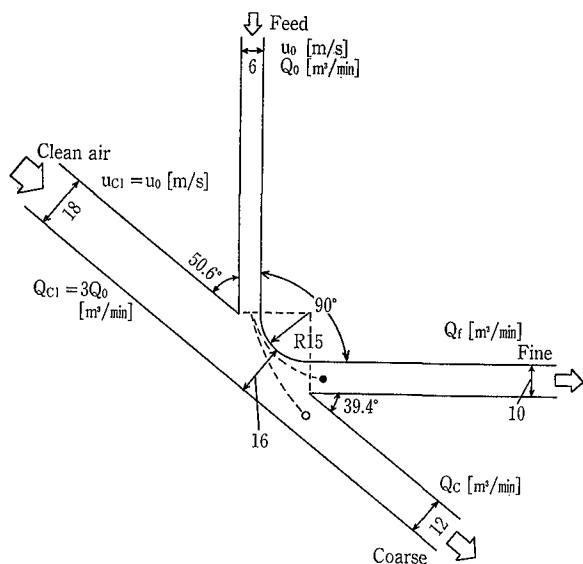
また、第8、9図は、慣性力を利用した分級機であるエルボージェット（日鉄鉱業製）の構造断面図および窒化珪酸分級の部分分離効率曲線です⁵⁾。2カ所から空気が高速で供給され気流を形成し、気流に向けて供給ノズルから立ち上る非常に高速で供給します。気流が形成されていない場合には粒子は直進しますが、慣性力の小さい粒子すなわち粒径の小さい粒子は、この気流により進路を大きく曲げられます。中粉は半ば進路を曲げられ、粗粉は慣性力が大きいために気流を通過します。そして、それぞれの場所に回収口を設けることにより分級を行います。

第10図は、私共が開発したものであり、インパクト形式のものを工業的規模に発展させた慣性力式の分級機です。(a)は、インパクトの模式図です。ノズルから勢いよく吹き出した気流の正面に邪魔板を置いておきますと、気流は大きく曲げられますが、大きい粒子は慣性力により気流に追従できずに邪魔板にぶつかります。ここに粘着剤を置いておきますと大きい粒子を回収することができます。一方小さい粒子は、慣性力が小さいために気流に追従し流れ出て、分級が行われるという原理です。しかし、粒子が多くなりますと邪魔板上に粒子がたくさん堆積し粒子の再飛散が始まりますので、処理量が非常に少なくなるという欠点があります。

そこで、堆積する粒子を連続的に排出する方法として考案されたのが(b)の方法です。邪魔板の代わりにノズルを設置し、ごく一部の気流を下方向に流します。大部分の気流は横方向に流れますので、原理的には(a)のインパクトと同様の効果を有し、大きい粒子は慣性力によりノズル内に飛び込みます。粗粒子はノズル内のごくわずかの気流により、取り出すことができます。これは粒子が実際には板に衝突（インパクト）しない、つまり仮想的なインパクトで「バーチュアルインパクト」と呼ばれています。



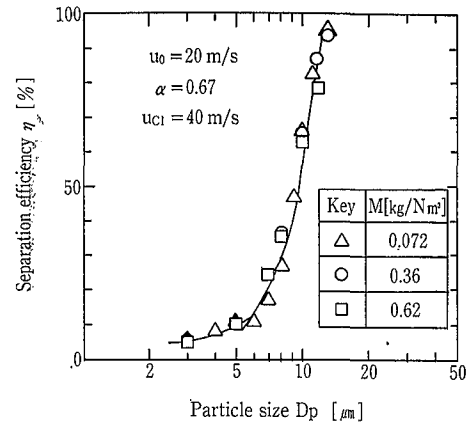
第11図 実験装置概要図
Fig. 11 Schematic view of experimental equipment



第12図 K型分級機概要図
Fig. 12 Schematic view of K-type classifier

ところが、このバーチャルインパクトにも円型ノズル使用による処理量の限界が問題としてあります。このインパクトの分離性に影響を及ぼす因子はノズルの直径であるために、これを大きくすることは分離性能を悪くすることになります。したがって、処理量を大きくするためにはこのような円筒状では好ましくないこととなります。そこで(c)のスリットノズルタイプを考案しました。分離性能はノズルの直径に影響されますので、ノズルの直径と同じ幅でL方向に延ばされたダクトを作成します。この場合、粒子の分離性能はダクト幅に影響されることとなりますので、(b)の方法と同様の分離性能で、なおかつ処理量を増やすことが可能となります。

実際の実験装置を第11図に示します。分級部形状を拡大

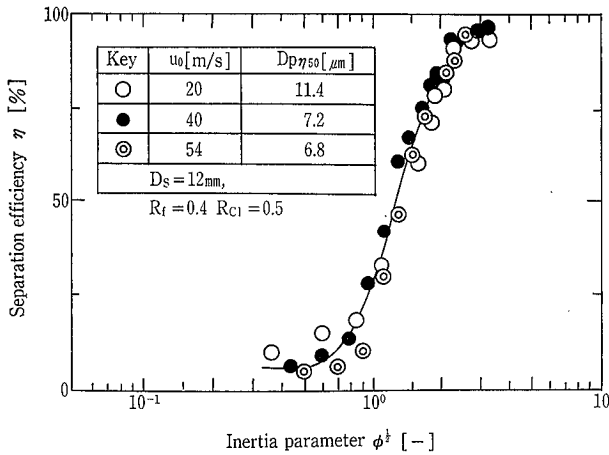


第13図 部分分級効率曲線
Fig. 13 Partial separation efficiency curve

したものが右側の図です。粒子は気流と共に上部より分級部に至り、ごく一部の気流のみ下側に流れます。気流の大部分は右側に流れますので、小さい粒子は気流に沿って右側に至り、大きい粒子は下側に回収されます。この装置を用いることにより、ミクロンオーダーの分級が可能となります。ところが実際には、このままではシャープな分離が行えません。なぜなら、この形のままでは分級のカットサイズ（分級粒径）は下がりますが、気流が曲がる際にエッジの部分に気流の乱れを生じ、渦が発生します。渦が発生すると粒子は気流に乱されて、きれいな分級ができなくなります。

きれいな気流の流れをつくるために実際に拡大模型を作成し、煙による気流の可視化を行い、渦ができないような形に改良したものが第12図の分級機です⁶⁾。供給口から原料を気流と共に供給し、別途粒子の入っていないきれいな気流を供給します。2つの気流を分級部にて合流させた後、全流量の大部分を微粉側に流し、ごく少量の気流を粗粉側に流します。供給された粒子のうち、大きい粒子は気流の流れに追従できずに粗粉側に回収され、小さい粒子は気流の流れに沿って微粉側に流れてきます。この装置を使った分級実験の結果は非常に良く、第13図のように、部分分離効率曲線が非常に立った状態となっています。

いま、分級部での流速が20 m/secの場合において8~9 μmの50%分離径が得られていますが、この流速を速くすればさらに小さな分離径が得られます。流速を速くすれば、カットポイントは小さくなるわけですが、流速が変わると慣性力も変わることになりますので、一つの部分分離効率曲線として表現するためには、粒子の慣性力を表すファクター（慣性パラメータ）で表現する必要があります。慣性パラメータで表示しますと流速が変わった場合においても、第14図に示すように一つの部分分離効率曲線として表すことができます。実際に分級部での気流流速が20 m/secの時に11.4 μmの分離径が得られ、54 m/secの時に6.8 μmの分離径が得られましたので、100 m/secの時には4 μm、200 m/secの時には2 μmの分離径に達することが期待されます。この分級機は大変有望な分級機と考えら



第14図 慣性パラメータと部分分級効率との関係
Fig. 14 Relationship between inertia parameter and separation efficiency

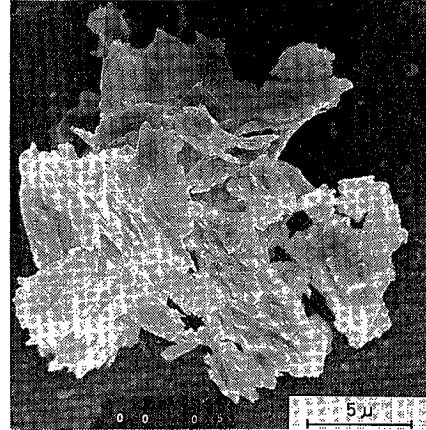
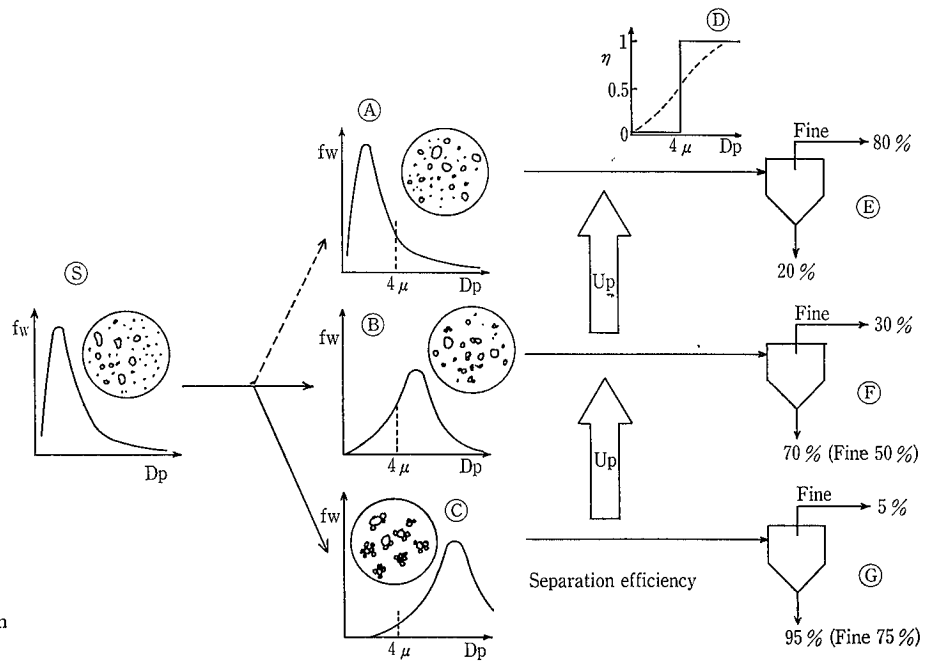


写真1 凝集体走査電子顕微鏡写真
Photo. 1 Scanning electron micrograph of agglomerated particle



第15図 分離効率の低下例
Fig. 15 Example of deterioration in separation efficiency

れましたので、分級機の形状からK型分級機と名付け、現在実用機として完成させることを考えております。

乾式分級機と比較して湿式の微粉分級機は現在あまり存在しません。現在湿式分級機として市販されているものは、重力沈降式、遠心式などいくつかありますが、実際の分級粒径は10~100 μm のものしか分級できないのが現状です。

4. 粒子の分散と分級性能

分級の粒度とともに重要な要因が分級精度、すなわち分級のシャープさであります。分級精度を良くするために、まず分級性能を低下させる要因を考え、その問題を解決する方法を考えることが必要です。一番の問題として粒子の凝集現象があり、原料をいかに均一に分散させて供給することができるかが、分級精度に大きく影響するといえます。また、分級機内における気流の乱れの問題も大切であり、このほか反復分級、多段分級により分級精度を向上することも考えられます。

第15図は、粒子の凝集現象による分級精度低下の例を示したものです。粒子というものは一個ずつ単独に存在するのではなく、ある集団の状態で存在しています。それを分級機に入れても一個一個の粒子になることはありません。分級機にばらばらに入った場合でも、分級機内でお互いがぶつかり合って、大きい粒子いわゆる凝集粒子になることがあります。このような場合には、いくら優秀な分級機でも精度の著しい低下が避けられません。

いま、第15図において⑤の粒度分布を持った粉体があるものとします。この粒度分布は粒子が一個一個ばらばらな状態のものであります。ところが実際に分級機に入る時には、このような状態ではなく、写真1に示すような凝集体として分級機に入り、この凝集体が単一の粒子として振舞います。したがって実際に観測される凝集体の粒度分布は、第15図⑥または⑦の粒度分布となり、一次粒子の粒度分布より大きい粒度分布となります。これをカットサイズ4 μm の非常に優秀な分級機に掛けて分級を行ったとしますと、

本来、粒子が完全に分散されている場合には、微粉側に80%、粗粉側に20%回収されなければならないものが、㊸の場合には微粉側に30%、粗粉側に70%、さらに㊹の場合においては微粉側にわずか5%、粗粉側に95%回収されることとなります。粗粉側の95%の粒子の中には、微粉側に回収されるべき粒子が多量に混入していますので、もはや分級精度が保てなくなります。このように分級機の性能を評価する場合には、粒子がいかに分散された状態で供給されているかを確認することが重要となります。

5. 粒子の粒度と粒度分布測定

分級機の性能評価を行うためには、粒子を分散状態で供給するとともに、分級された粒子の粒度分布を正確に測定する必要があります。第3章で述べましたように、部分分離効率曲線は分級機の性能を評価する一つの方法ですが、この部分分離効率曲線を求めるためには、少なくとも原料の粒度分布と粗粒側の粒度分布を測定する必要があります。この粒度分布の測定の仕方を間違えますと分級機を正確に評価することができませんので、粒度分布をいかに正確に測定するかが問題となります。世の中には種々の粒度分布測定装置がありますが、2つとして同じ結果を出すものがないといえる程粒度測定方法に問題があるのが現状です。粒度分布測定原理というものは、基本的には分級原理と同じです。つまり、粒度分布測定とは大きさ別にどの程度の数量の粒子があるかを知ることですので、大きさ別に分けること自体分級と全く同じ訳です。

粒度分布測定装置には、重力沈降式、遠心沈降式、慣性力式、静電気力式のほか、顕微鏡によるもの、コールターカウンター法や最近脚光を浴びています光散乱法などがあります。粉体になじみのない方からは、粒子の大きさを測定するには、顕微鏡と物差しによる測定で十分ではないかという意見をよく耳にしますが、顕微鏡により測定できるのは球形粒子の場合であり、実際の粒子の場合どこを粒子直径とするかの判断を下すことが困難です。

粒子の大きさとは何かということを考えてみたいと思います。直径100 μm の球形粒子と一辺が80 μm の立方体の粒子のいずれの粒子が大きいかを質問すると、直径100 μm の球形粒子の方が大きいと答える人が多いでしょう。ところが、通過できる円孔の直径を比較しますと、直径100 μm の球形粒子は直径100 μm の円の穴を通過できますが、一辺80 μm の立方体は通過することができません。

一方、通過できるスリット幅を比較しますと、直径100 μm の球形粒子は、幅80 μm のスリットを通過できませんが、一辺80 μm の立方体は通過できます。また、投影面積、体積については、100 μm の球形粒子の方が大きくなり、表面積については80 μm の立方体の方が大きくなります。したがって何をもちいて大小を比較するのが問題となりますが、結果的には粒子の大きさを利用する目的により、比較のための基準を決める必要があることとなります。ふるいを利用する場合には、立方体の方を大きい粒子と扱い、スリットを利用する場合には、球形粒子の方を大きい粒子と扱う、つまり、粒子の使い方により粒子の大きさの定義を変えることが要求されます。すなわち、その目的に応じて、体積や面積などの幾何学的量、あるいは沈降速度などの物理量で、粒子の大きさ(粒度)を表現すべきであります。便宜的にこれらを一次元の粒径に換算して用いているわけです。長さの単位で表現した方がわかりやすいように見えるからです。流体分級機においては、流体中を流れる運動速度が問題となりますから、沈降速度径なるものを定義し、粒子がある等速沈降速度で沈降する場合に、その速度で沈降する球形粒子の大きさで代表させます。このように、われわれが粒子の大きさを測定する場合には、粒子の目的に応じて粒子の大きさを定義し、粒子の測定方法を選択しなければなりません。

む す び

これまで粉碎や分級について、いろいろ話をさせていただきましたが、粉碎機または分級機の性能を評価する際には、粒度分布測定が一番重要になります。しかし、この粒度分布を測定する装置が現状では完成されたとはいえない状態にありますので、ユーザ側がその装置に精通して、自分の目的に応じた粒度分布測定装置を選択し、使いこなす必要があると考えています。

〔参考文献〕

- 1) 日本粉体工業技術協会編：分級装置技術便覧(1978)
- 2) 化学工学協会編：化学工学の進歩19, 粉粒体工学(1985)
- 3) 化学工学協会編：化学工学の進歩19, 粉粒体工学(1985)
- 4) 化学工学協会編：化学工学の進歩19, 粉粒体工学(1985)
- 5) 日本粉体工業技術協会編：粉体分級技術マニュアル(1990)
- 6) 山本英夫, 吉江健一, 菅沼彰：化学工学, 第49巻, 第1号(1985), p. 65

注：引用図表の表記方法については本技報にあわせて変更してあります。