

# 篩 分 に 関 す る 研 究

井 出 哲 夫

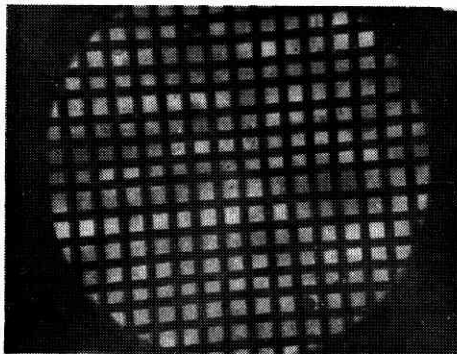
篩分操作は粉粒体をその大きさによって分ける場合に、生産現場または実験室で日常行われる最も簡単な操作であるが、その機構については不明の点が多く、研究報告も余り見あたらない。ある粉体を篩で分ける時、篩下の粒子の大きさと篩目開きとはどんな関係にあるだろうか。また長時間篩分を行ってもなお網下量が一定にならない時、その極限值を求めるにはどうしたらよいだろうか。

個体の粉末を篩によって分級するという操作は、小児の砂遊びや家庭の台所から大は各鉱山、工場などにおいて日常行われており、極めてありふれた操作であるが、その科学的解明はなかなか難しく、篩分機の設計に当っては頼るべき法則がなく専ら経験と勘によらざるを得ない現状である。実験室においても試験用標準篩を用いて粒大分布を求めることが多いので経験された方もあると思うが、一定の篩で相当長時間篩分を行っても常に網下には少量ずつ粉が落下してくるので、篩分の終点を求めることはなかなか厄介な問題である。篩分操作は元来三次元的な不規則形の粒子を正方形、矩形、円形等の二次元的な形の孔を通して分けるので分級が不完全であるばかりでなく、300 mesh (44 ミクロン) 程度以下の微粒域においてはほとんど分級が不可能になる。

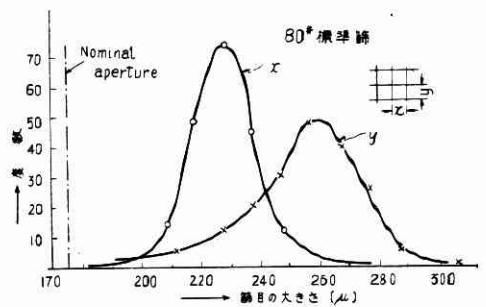
以下に紹介するのはわれわれの実験室において行った研究の一部であって、まだ完結の域に達していないが、おおかたの御叱正と御教示を得れば幸甚である。

## 1. 実験方法

使用した篩は和製の標準篩である。標準篩にはそれぞれ篩番号と公称目開きが決っており、篩のネームプレートにもこれが記入してあるが、うっかりこの寸法を信用すると場合によっては相当な誤差を生ずることがある。第1図に顕微鏡写真で示したように目開きは篩によって



第1図 80# 標準篩の顕微鏡写真



第2図 篩の目開きの頻度曲線

かなり変動がある。第2図は 80 メッシュの篩についてたてよこそれぞれ 200 ケずつコンパレータで測定した目開きの頻度曲線である。これから分るように目開きはたてよこが必ずしも等しくなく、多くの場合くいちがっているのが普通である。従って篩の平均目開きとしては、たてよこそれぞれの平均値のさらに平均値をとるか又は対角線の平均値をとって代表寸法としなければならない。われわれは使用した篩についてはすべて上のような較正を行い今後の考察の基礎とした (第1表)。

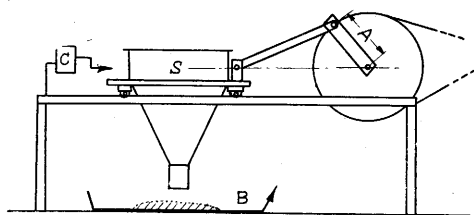
第1表 試験篩の較正值

mesh	公称目開き [ミク ロン]	$\bar{x}$ [ミク ロン]	$\bar{y}$ [ミク ロン]	$\frac{x+y}{2}$		$\sqrt{\bar{x} \bar{y}}$ [ミク ロン]	$\sigma_x$ [ミク ロン]	$\sigma_y$ [ミク ロン]	$\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ [ミク ロン]
				[ミク ロン]	[ミク ロン]				
10	1651	1712	1644				73	133	2370
30	495	576	771						962
50	292	327	314	321	320	12.7	17.0		453
60	246	290	235	263	251	15.0	10.8		362
80	175	250	225	238	237	19.8	12.2		336
100	147	190	166	178	178				252
120	124	128	123	126	125				178
150	104	111	95	103	103				146
180	83	90	86	88	88				125
200	74	90	71	80	80				110
250	62	90	75	60	60				85

次に篩分機は自製の往復単振動 shaker で第3図に示

す如く振幅と回転数がある範囲内で自由に変えられるようになってゐる。

粉体試料としては宇部大羽炭を試験用小型ボールミルにて一定条件の下に粉碎して用いた。



S: 試験篩 C: 計数器 B: 受器 A: 篩幅  
第3図 実験装置

2. 実験結果

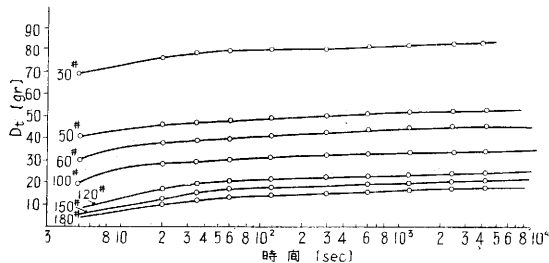
1) 篩分効率の時間的变化

篩分効率の定義はいろいろあるが本研究においては次式の如く定義する。

$$E = 100 \frac{D_t}{D_\infty} \dots\dots\dots (1)$$

ここに  $E$ =篩分効率(%)  $D_t$ =時間  $t$  における通過分(Durchgang)の重量,  $D_\infty$ =無限時間篩分を行った時に得られるべき真の通過分の重量

(1)式からわかるように篩分効率は時間を長くすれば次第に100%に接近するわけであるが, 出て来る通過分(網下)の量は時間とともに減少してくるので, 篩分効率に近くなる程単位篩分効率の増加に要する時間は大変長くなる。この通過量と篩分時間との関係は, 試料の粒大分布, 形状, 最初にチャージする試料の重量, 篩の目開きの分布特性などによって著しく影響されると考えられる。第4図は上記の粉炭試料を最初100grとり30メッシュの篩で4200秒(70分)篩分し, その通過分を今度



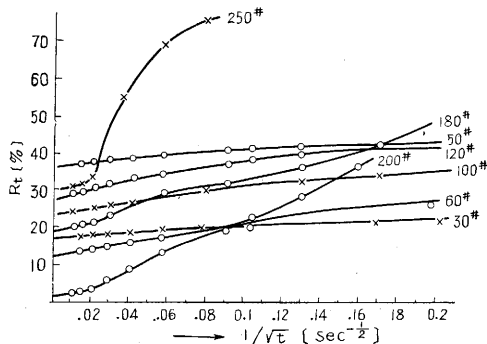
第4図 篩分時間に対する各篩通過量

は50メッシュの篩にかけるというように順次篩分を行った場合の通過量を時間に対してプロットしたものである。但し篩分条件はいずれも振幅40mm, 振動数188/minである。この図からわかるように4200秒の後にもなお  $D_t$  は僅かずつ増加しつつあり一定値を示さない。従って(1)式の  $D_\infty$  を求めるためにはさらに長時間の篩分を行わなければならないがこれはかなり手間のかかることである。

Fagerholt<sup>④</sup> は篩分の機構についてかなり大胆な仮定を立て理論的に, ある時間  $t$  における網上量(Ruckstand)  $R_t$  と時間との間には次の関係が成立すると述べている。

$$R_t - R_\infty = \frac{C}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots (2)$$

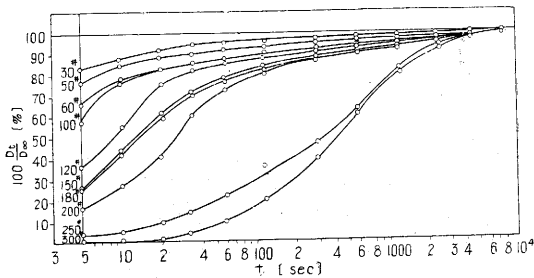
ここに  $R_t$ =時刻  $t$  における網上量,  $R_\infty$ =無限時間篩分を行った時に得られるべき網上量,  $C$ =粒子及び篩目によって決まる常数



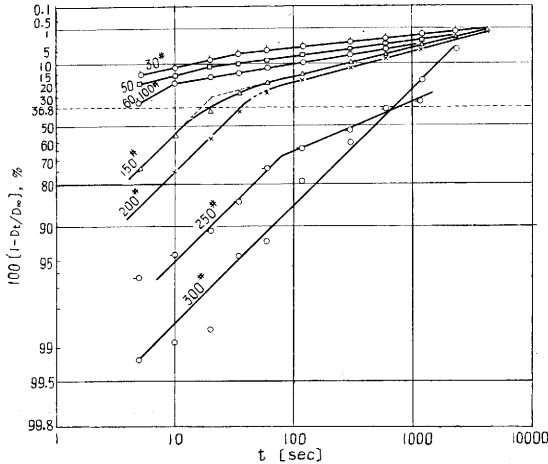
第5図  $R_t : 1/\sqrt{t}$  曲線

そこで(2)式が常に成立するならば  $R_t : 1/\sqrt{t}$  のプロットにおいて  $t \rightarrow \infty$  すなわち  $1/\sqrt{t} = 0$  における  $R_\infty$  の値を簡単に求めることができ, 従って  $D_\infty$  も求められるわけである。第4図の実験結果を(2)式に従ってプロットしたのが第5図である。図についてみるに, いづれの篩についても篩分時間の全範囲にわたっては(2)式のような直線関係は成立しないが,  $t$  の大きい値に対しては30, 50, 60, 100メッシュの粗篩についてはかなりよい直線性を示している。それより細かい篩では同じ時間範囲では直線性は余りよくない。篩の目が細かくなると, 篩目に粒子がつまってこれを閉塞したり, 試料の水分の影響が現われてきたりするためであろうと考えられる。これを要するに一般にはFagerholtの理論は成立せず, その適用範囲は極めてせまいといえることができる。

しかし  $t$  の大きい領域(この実験範囲では  $t > 600 \sim 1200$ 秒)においては一応直線関係が成立すると見なすことができるから, この直線を延長して  $1/\sqrt{t} = 0$  に対する  $R_\infty$  を推定することは可能である。このようにして求めた  $R_\infty$ , 従って  $D_\infty$  から, われわれは篩分効率



第6図 篩分効率の時間的变化



第 7 図  $\lg(1 - \frac{D_t}{D_\infty}) : \lg t$  プロット

$D_t/D_\infty$  の時間的变化を求めることができる。その結果を第 6 図に示す。第 6 図のたて軸には篩分効率を算術目盛りにとってあるが、これを二重対数目盛りにプロットしたのが第 7 図である。図についてみるにおおのこの篩について大体 2 本の直線 (折線) として表わされるから、一般に次式のようにまとめることができる。

$$1 - \frac{D_t}{D_\infty} = \exp(-t/\bar{t})^n \dots \dots \dots (2)$$

但し  $\bar{t}$  は各篩目及び試料の特性によって定まる常数で [Sec] なる次元を有する。一つの篩について考えれば、篩分機構には二つの段階があり、ある限界点を境にして、それ以前を第 1 段階、以後を第 2 段階と名づけることができる。今各段階における  $n$  の値をそれぞれ  $n_1, n_2$  とすれば、第 1 段階においては各篩につき  $n_1=1$ 、第 2 段階においては  $n_2=0.1 \sim 0.6$  位の値であり、 $n_2$  は篩目が細かい程大きくなる傾向がある。また目の粗い篩においては第 1 段階の期間が短かく、目が細くなるに従ってその期間が長くなる傾向が認められる。これらの傾向は篩分機構の本質を究めるのに重要な手がかりを与えるものであると考えられるが、このことについては後に言及する筈である。

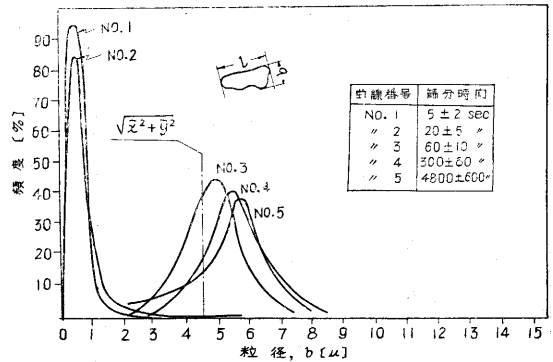
2) 篩を通過する粒子の大きさの時間的变化

今ある篩に粉体試料を載せて篩分を行うと、最初は篩の網目よりもはるかに細かい粒子がさかんにおちてくる。篩分をつづけるに従って通過粒子の大きさは次第に篩目に近づき、単位時間に通過する粒子の量は急激に減少してくることは当然想像されることである。しかし相当長時間篩分しても通過量が 0 になることはあり得ない。何故ならば篩の目自体にバラツキがあって、限界粒子は目開きの大きい篩目を探して絶えずそこを通り抜けようとするし、また細長い形の粒子は篩目の対角線にそってスレスレにこれを通り抜けようとしているからである。以上の想像からもわかるように、篩目を通過する粒

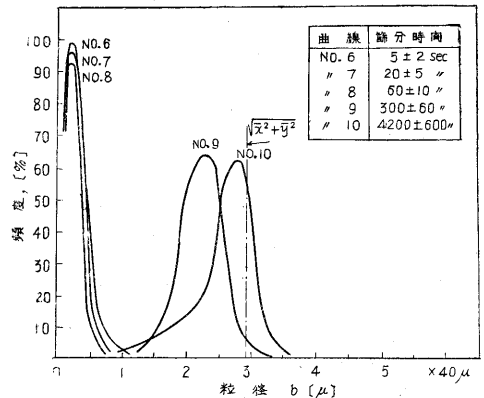
子の大きさの時間的变化は、粒子の粒大分布、形状、篩の目開きの分布並に振動の与え方によって変って来るものである。

2 の 1) と同一の試料を用いて同一の条件で篩分を行い、ある時間後に通過してくる粒子を採取してこれを顕微鏡で 200 ケにつき長径  $l$ 、短径  $b$  をそれぞれ測定しその分布状態を調べてみた。第 8~9 図はそれぞれ 100#, 200# の篩につき短径  $b$  の分布が篩分時間と共に変化する様子を示したものである。図中例えば篩分時間  $60 \pm 10$  sec. とあるのは、篩分開始後 50 秒から 70 秒までの 20 秒間に篩目を通過してきた粒子という意味である。また図中に鎖線で示したのはその篩の目開きのたての平均  $\bar{x}$ 、よこの平均  $\bar{y}$  から求めた対角線の平均値である。

この第 8~9 図を前の第 7 図と比較してみると、先に述べた篩分法則で第 1 段階、第 2 段階の表われる理由がうなづけるであろう。すなわち第 1 段階とは篩の目開きに比べてはるかに小さい粒子が自由に通過する段階であり、第 2 段階とは粒子の大きさが篩目開きに近くなり確率によって篩目を通過する段階であるといえよう。



第 8 図 100 Mesh-Sieve 通過分の粒大分布の時間的变化



第 9 図 200 Mesh-Sieve 通過分の粒大分布の時間的变化

3) 篩間粒子の粒大分布

われわれは通常粒体の大きさを揃えるのに、目開きの異なる 2 枚の篩を用い、その間にはさまれた粒体を一応均一径粒と見なし、その大きさを表わすのに上下篩の目

開きの算術または幾何平均をもってしている。しかしこれは便宜上そうしているのであって、別に根拠があるわけではない。そこで篩間粒子と篩の目開きとの間にどんな関係があるかを実験的に調べてみた。試料粒体は前述の実験 2・1 において得られた、篩分終了後のものを用い、顕微鏡下で各サンプルにつき 200 ケずつ長さ  $l$ 、幅  $b$  を測定したものである。その測定結果を第 2 表に示す。表中  $M_g(l)$ 、 $\sigma_g(l)$  はそれぞれ  $l$  についての個数幾何平均及び幾何標準偏差を示す。 $M_g(b)$ 、 $\sigma_g(b)$  についても同様、この表から分るように、各篩間粒子の  $\sigma_g$  はほぼ等しい。また対角線目開き  $x_d$  と  $M_g(l)$ 、 $M_g(b)$  とはかなりの相関性を示し、 $M_g(b)$  は略  $x_d$  に等しいことが分る。従って篩分においては篩目の対角線と粒子の幅とが支配的な要素であると考えられるが、篩目開きと粒子径との割合は物質の形によっても変化するものであるから、篩目開きを以て分離した粒子群の粒径を規定する場合にはそのとり方に充分の注意を払わねばならない。

第 2 表

篩番号 メッシュ	対角線 目開き $x_d$ [ミクロン]	$l$ [ミクロン]		$b$ [ミクロン]		$M_g(l)$ $x_d$	$M_g(b)$ $x_d$
		$M_g$ ( $l$ )	$\delta_g$ ( $l$ )	$M_g$ ( $b$ )	$\delta_g$ ( $b$ )		
		10-30	771	1120	3.76	812	5.10
30-50	452	572	3.84	440	3.50	1.27	0.90
50-60	368	480	5.10	352	5.00	1.31	0.96
60-100	253	372	4.24	260	5.10	1.48	1.03
100-120	174	272	3.94	176	4.60	1.56	1.01
120-150	148	208	4.30	148	5.95	1.41	1.05
150-180	129	156	3.94	108	4.95	1.21	0.96
200-250	85	125	3.94	82	5.05	1.46	0.97

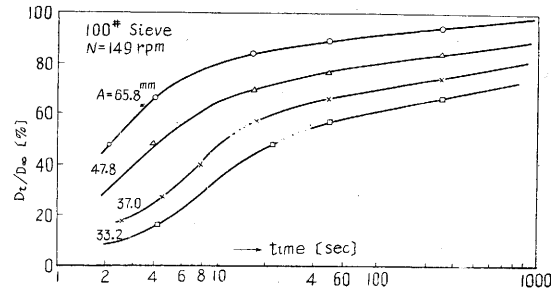
4) 振動の与え方と篩分速度

今まで述べた実験では篩に与えた振動は一定で振幅 40 mm、振動数 188/min の水平往復振動であった。今度はこの振動条件を変えると篩分速度（または篩分効率）はどのように変わるであろうか。振動条件を色々変えてみたいのであるが、装置の都合上不可能なので、振幅と振動数を変えて実験を行った。

まず振動数を一定にしておいて、同一の篩につき振幅を変化して篩分を行った結果を第 10 図に示す。図からわれわれの実験範囲では振幅(A)の増加と共に、一定の篩分効率に達するまでの所要時間が短縮されることがわかる。次に同一の篩につき今度は振幅を一定として振動数を変化させてみると、やはり速度の増加と共に第 10 図に似たような傾向が認められるのである。そこで振幅と振動数との両者の影響を総合した値として、この場合の単振動の加速度の最大値  $\alpha$  なる値について比較してみた。 $\alpha$  は次式で求められる。

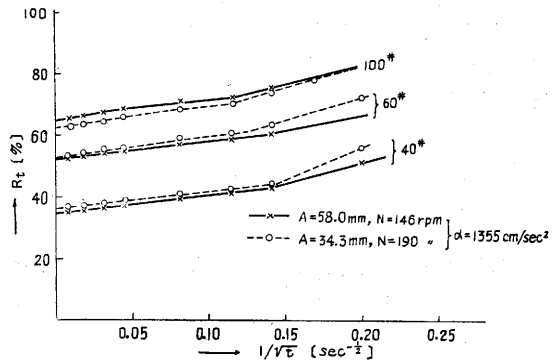
$$\alpha = A\omega^2 = A(2\pi n)^2$$

但し  $A$  = 振幅,  $\omega$  = 角速度,  $n$  = 振動数



第 10 図 篩振幅の影響

この  $\alpha$  の値が一定となるような振幅と振動数の組合せについて実験してみると、われわれの実験範囲では  $\alpha$  が一定ならば篩分時間と網上量  $R_t$  の関係はほぼ一致するような傾向がある。その一例を第 11 図に示してある。しかしこれだけの実験結果から結論を出すことはまだ早いようである。



第 11 図

篩に与える振動は一定時間に最大の篩分効率を与えるようなものがないわけであって、そのために市販の篩分機にはいろいろの工夫が施されているが、篩分されるべき物質の種類や形状、さらに網上に charge する量によってもその篩分効率と振動条件との関係は変わってくるので、全ての場合に適用されるような振動条件というものはまだ見出されていない。

3. むすび

以上われわれの実験結果を紹介した。篩分法則としては、われわれの知るかぎりでは前述の Fagerholt の式が唯一のものであるが、これもかなり大胆な仮定から理論的に導いたものであるから、われわれの実験結果が示すように必ずしも常に事実とは一致しない。われわれの提案した実験式(2)は、まだ完全な形ではないが、今後の研究に対して一つの足がかりとなるものであると思う。

本研究は、故桑井助教授の御指導により、筆者が元当研究所員北条護二氏と共に行った研究をまとめたものである。またデータについては那須野精一君の卒業研究に負う所が多い。ここに謹んで故人の冥福を祈ると共に、上記二氏に感謝する次第である。(1954. 5. 13)

文献

1. J. M. Dallavalle : Micromeritics, 2nd Ed. p.110, 1948