参 考 資 料

粉体工学実験法(7)*

—フルイ分けの操業試験—

Experimental Procedures for the Performance Testing of Screening

三 輪 茂 雄**

Shigeo Miwa

1. まえがき

“大学出てから15年、今じゃ〇〇の人事課長、クビにしたのが5万人”なんて歌を、気軽に歌っていた新入社員時代もあったのであるが、歌われる立場になってみるとツライものである。“フルイはじめて15年……、こわしたフルイが5万台”これはちょっとオーバー、破った網なら5万尺といってもオーバーではないかも知れない。

とにかく、新しいフルイ機を購入するときの、立合試験くらいやりにくいものはない。メーカー、ユーザーいづれの立場からもそうである。慎重を期して、トラック1台分の試料をかつぎこんで、3日間出張して、メーカーさんに迷惑をかけたこともある。またきわめて高価な粉末だからといって、ポリエチレン袋の底の方に少々だけ試料をもらって、フルイ機の選定と能力計算を強いられたこともあった。最近はいよいよダイヤル即時通話になったから、いきなり TEL が未知の読者からかかってきて、“品物はマル秘ですが、ウドン粉の細かいようなものです”。という情報だけで考えさせられたりする。これはとても無理な相談である。

一般に、フルイ分け操作の応用範囲はきわめて広く、要求される機能もさまざまで、用途により試験法も違う。とくに粉体特性は、何がしかの測定値を並べれば、規定できるというものではないから、その都度の判断を必要とする。そういつていたのでは、しかし、粉体工学実験法シリーズなど書けるものではないので、ここでは例のように、対象を限定して、流動性のよい粉体（粒体といった方がいいかも知れないが）のフルイ分けを考える。

操業成績の試験というものは、手がつけにくくて、地味なものである。簡単な入手しうる測定値を、どう組合

せ、有用な客観的な情報に加工するかということが第一の課題である。実際のフルイ分けには、さまざまの場合があるにしても、フルイ分けというものを理解する基礎としては、一応次にのべるような実験を行なうことが必要であろう。

2. 実験装置および一般実験器具

1. フルイ機械：振動フルイ、面内運動フルイいづれでもよい。大きさも、実験者の馬力次第だし、計測装置が備わっていれば、現場実験も可能である。

2. フルイ網：金網、篩網など。選択については別著^{2,3)}参照。

3. 粉体供給ホッパー、フィーダーおよび架台。

4. 粒度測定用 Ro-Tap シェーカー
(ストローク28mm, 回転数290 r.p.m. タップ数156回毎分)

5. 標準フルイ一式(200mmφ, 45mm高さ)および目詰り除去ブラシ²⁾。

6. 20kg上皿バネばかり。ひょう量100g, 感量0.1gの上皿天びん。

7. ストップウォッチ。

8. 受器。

9. 試料入れ(ポリエチレン袋, アルミ箔)

10. 二分割器

3. 試料粉体

試験目的によってきまるもので、それに応じて、網目は何をつかうかも、あらかじめきまってくる。以下にのべるのは、大学の実験室で行ない比較的美しいで、あたりを粉だらけにしないことが必要だったので、研磨材用の SiC の70番手と90番手を混合したものをを用いた。これはあらかじめ酸洗、水洗してあり、粒子が取り扱い中に摩耗することもないので、何回でも繰返しつかえるし絶対にはこりが立たない。それに、(月の表面の粉体の

* 昭和44年8月1日受理

** 同志社大学工学部化学工学科(京都市上京区今出川鳥丸)
TEL 075-211-2311

ように?) 黒光りした結晶で流動性もよく、たいへん魅力的な粉体であるから、学生諸君も、いわゆる砂遊びの観念をなくして、まじめに実験する気になるらしいのいいところ。(粉体はそうにきれいで、素直なものだと学生諸君が思ったら、将来、社会に出てから困りはしないか、という声もあるが、はじめから幻滅では粉屋になり手がなくなるので、あえてここでは“ステキ”な粉体を選んだ。)

したがって網も、篩絹××6(番手)を使うことにした。表1は試料粉体の一応の特性値である。

4. 粉体供給ホッパーおよびフィーダー

後に述べるように、点供給式が可能なフルイ機を使うので、図1に示すようなホッパーで、底部に、種々の直径の平面オリフィスを入れかえできるものを、定量供給フィーダーを兼ねて使用する。(振動フルイの場合は、別に振動フィーダーを用いる必要がある。)

流動性のよい粉体がオリフィスから流出するときの重量流出速度は、粉体層高に無関係に一定であり、オリフィス径を変えることによって、必要な定量供給が可能なことを利用する。

種々のオリフィス径 D_o [mm] について、重量流出速度を測定し、表2のデータを得た。これを両対数紙にプロットすると、図3のように、非常にきれいな直線をうることができる。(流量の測定はなるべく一回の流出時間を長くにとって、ストップウォッチ

表1 試料粉体の特性値

標準フルイ目開き [μ]	粒 度 %	度 Σ%
250	3.6	3.6
210	23.1	26.7
177	23.2	49.9
149	39.3	89.2
125	10.4	99.6
-125	0.4	0.4
粒子密度 $\rho_p = 3.2 \text{ g/cm}^3$		
嵩 密 度 $\rho_B = 1.48 \text{ g/cm}^3$		
安息角 $\theta_r = 40^\circ$		
水 分 0.0%		

表2 オリフィス流出速度

オリフィス径 D_o [mm]	重量流出速度 W [ton/hr]
8	0.0514
10	0.0918
12.5	0.161
15	0.266
16	0.307
18	0.408
20	0.536
60	9.76

図1 供給ホッパー

チと、ダンパー操作の誤差を少なくする配慮が必要である。)プロットするときは、先の十分とがった鉛筆ないしペンでないと、プロットの点の大きさのエラーの方が大きくなる。それくらいきれいに直線に並ぶから、ほんとにうれしくなってしまう。いつもこんなきれいなデータが出たらなあ、と、嘆息したくなる。(ひょう量には上皿パネはかりのような頼りないものをつかうのに、よくぞと感心するのは、いつも化学天びんになじんでいるので、ヘルスメーターや、キッチンバランスを馬鹿にしている化学系の学生諸君である。今後いっさいラフ天びんだの、粗天びんだのというなかれ。)

ここで暇があったら、粉体工学ハンドブック¹⁾の120頁をひらいて、多くの研究者によって提案されている流出速度式を用い、表1のデータをもとに計算して、表2のデータと比較してみるのもおもしろい(表3)。なぜボクロフスキーの仮説から導かれるように、 D_o の指数が2.5にならず、多少大

図2 ホッパー底部のオリフィスとダンパー

図3 オリフィス径と重量流出速度の関係

表3 流出速度式よりの計算 ($\rho_B = 1.48 \text{ g/cm}^3$, $D_p = 0.19 \text{ mm}$, $\phi_r = 40^\circ$)
として $D_o = 9 \text{ mm}$ につき計算

著 者	計 算 式	計算値 [tons/hr]
リンチェフスキー	$W = 1.54 \cdot \rho_B \cdot D_o^{2.5} \times 10^{-4}$	0.0554
Rausch	$W = 0.64 \cdot \rho_B (C_w \cdot C_o / \sqrt{\tan \phi_r}) D_p^{-0.2} \cdot D_o^{2.7} \times 10^{-4}$	0.0520
Beverloo	$W = 2.08 \cdot \rho_B (D_o - 1.4 D_p)^{2.5} \times 10^{-4}$	0.0695

実測値 0.068

きな値になるのかを考える必要もあろう。ただし、ここではフルイの実験が目的であるから道草を食ってしまったのはダメ。

ともかく、とてもよい直線になるのだから、オリフィスフィーダーを作るときは、小さいのと、うんと大きいのと2点だけ測定して、あとは安心して内挿あるいは外挿してよい。へんな流出速度式で計算しているよりも、よほどはよい。

5. フルイ機械とフルイ網

連続式の篩分機ならなんでもいいが、大きいのだと、実験者の馬力の方が問題になる。ここでは大学のことから、一番かわいいジャイロシフターB2形(図4)を使うことにする。回転数と回転直径を測定する。ジャイロシフターなら、回転数は、ストップウォッチをみながら手でタッチを数えればよい。ただし少なくとも一分間測定すること。回転直径はモノサシでもよい。(振動篩の場合には、ストロボや、振幅測定器具が必要になる。)このように測定した値の検討については〔備考1〕を参照。

フルイ網は、要すれば〔備考2〕に従って検査する。ここでは××6の篩絹であるから、別著²⁾18頁の表より

図4 実験用フルイ機

表4 フルイ分け実験結果と計算(オリフィス径9mmφ, 0.068ton/hr)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
	標準フルイ 目開き [μ]	測 網 上 o	定 網 下 u	粒度% (計算)		Σf=100 としての配分 (4)×0.385 (5)×0.615 (6)+(7) o u f			Σ(4) o	左らんの積算 Σ(5) u	Σ(8) f
フルイ網→	250	5.5g	0 g	5.5	0	2.1	0	2.1	5.5	0	2.1
	210	52.7	2.8	53.0	2.8	20.4	1.7	22.1	58.5	2.8	24.2
	177	38.5	15.8	38.6	15.8	14.9	9.4	24.3	97.1	18.0	48.5
	149	2.7	61.7	2.7	61.9	1.0	38.3	39.3	99.8	80.4	87.8
	125	0.2	18.5	0.2	18.6	0.1	11.5	11.6	100.0	99.1	99.4
	-125	0	0.9	0	0.9	0	0.6	0.6	100.0	100.0	100.0
	TOTAL	99.6	99.7	100.0	100.0	38.5	61.5	100.0			
	重量配分 (kg)	9.02	14.4	0.385	0.615						
	全供給量 23.42		合計 1.00								

74mesh, 実効目開き210 [μ]である。

6. フルイ分け実験

1) 粉体試料を供給ホッパーに入れる。あらかじめ、使用するオリフィス径を決めダンパーは閉にしておく。ジャイロシフターB2形の場合少なくとも25~50 [kg] 必要である。

2) フルイからの網上産物(oversize product)および網下産物(undersize product)の排出口に、受器を確実にセットし、フルイ機のスイッチを入れる。動作は順調かどうか、異常音はないか、受器と排出口がぶつかり合っていないか、などについて点検する。異常があったら調整を行なう。(とくに締付けボルトについては、ゆるみのないよう注意のこと。網面の二次振動にも配慮する。)

3) 異常なければ、供給ホッパーのダンパーを開くと同時に、ストップウォッチを押し、フルイの運転時間を測定する。運転中は、フルイ網面上の粒子の運動状態についてよく観察する。(網面全体に一樣にひろがっているか、流れの局所的停滞はないか、粉体層の厚みはどれくらいか、など。)

4) フルイ分けを完了したら、網上および網下産物重量を測定し、次に、流れ切断法〔備考3〕により、それぞれ約100gの代表サンプルをとる。(約1kgくらいまでは流れ切断法により、それ以後は二分割器を使うのもよい。)サンプルは、試料袋に入れ、メモしておく。

5) 試料の粒度を、標準フルイとRo-Tapシェーカーで測定する。標準フルイはフルイ分け操作の目的によっても目開き範囲のとり方がちがってくるが、ここでは表1と同じく、フィードの粒度範囲をカバーするよう√2シリーズにとった。表4の(2), (3)らんに示した。

7. フリ分け結果の整理と分離効率の表示

フリ分け結果は、表4の(4), (5)らんのように、網上和網下の粒度分布ならびに重量配分のデータによって示される。この場合、作業網として $\times \times 6$ 、すなわち210 $[\mu]$ の目開きを使ったのであるから、網上産物の中には210 $[\mu]$ より細かいものはゼロであり、網下産物の中には、210 $[\mu]$ より粗いものがゼロでなければならない。そこで表4には、フリ網目の位置を矢印で示してある。しかしながら、実際には、網上にも網下にも、迷い込みがある。この迷い込みの度を定量的に表わすのに

図5 フィード、網上および網下産物の積算粒度線図

分離効率を用いるが、これにはいろいろな方法がある。

A. 部分分離効率曲線（粒度区分法）

次の手順で行なう。

1) 表4の(6), (7), (8)らんの計算を行なう。(4), (5)らんの各標準フリ別の ϕ に、網上、網下重量配分率を乗ずる。

2) 表4の(9), (10), (11)らんのように、積算 ϕ を求める。

3) これを図5のように図示し、注意おかく、なめらかな曲線にする。

4) 表5の(2), (4)らんのように、oとuの積算フリ上 ϕ を図5から、等間隔の粒度区分(この例では10 μ)に

図6 f, o, u の微分型粒度分布曲線

表5 粒度区分法による部分分離効率計算表 (10 μ 区間の場合)

(1) 粒度区分 10 μ 間隔	(2) 図5よりよみとり $\Sigma\%$	(3) o %/10 μ	(4) $\Sigma\%$	(5) u %/10 μ	(6) (3) $\times$ 0.385 o	(7) (5) $\times$ 0.615 u	(8) (6)+(7) f	(9) Σf	(10) (6)/(8) o/f
290	0	0			0	0	0	0	
280	0.5	0.5			0.19	0.19	0.19	0.19	
270	1.4	0.9			0.35	0.35	0.35	0.54	
260	3.1	1.7			0.65	0.65	0.65	1.19	
250	5.6	2.5			0.96	0.96	0.96	2.15	
240	10.2	4.6	0	0	1.77	0	1.77	3.92	100.0
230	17.5	7.3	0.2	0.2	2.81	0.12	2.93	6.85	96.3
220	32.6	15.1	1.1	0.9	5.82	0.55	6.37	13.22	91.2
210	58.5	25.9	2.8	1.7	9.98	1.05	11.03	24.25	90.5
200	80.3	21.8	5.3	2.5	8.40	1.54	9.94	34.19	84.7
190	90.3	10.0	9.2	3.9	3.85	2.40	6.25	40.44	61.6
180	96.0	5.7	15.1	5.9	2.19	3.63	5.82	46.26	37.6
170	98.8	2.8	30.0	14.9	1.08	9.16	10.24	56.50	10.5
160	99.8	1.0	54.0	24.0	0.38	14.76	15.14	71.64	2.5
150	100.0	0.2	77.9	23.9	0.07	14.70	14.77	86.41	0.5
140		0	92.7	14.8	0	9.10	9.10	95.51	
130			97.8	5.1		3.14	3.14	98.65	
120			99.8	2.0		1.23	1.23	99.88	
110			100.0	0.2		0.12	0.12	100.00	
100						0	0		
					38.5	61.5	100.0		

ついて読み取る。次に、逐次各区分ごとの差をとって(3), (5)らんを求める。(これになるべく順次傾向的に変化するように、要すれば(2), (4)らんの読み取りを、やり直し、あるいは図5自体を修正する。)

5) 表4のときと同様にして、配分率を乗じ、(6), (7)らんを求め、その和として(8)らんを計算する。

6) (9)らんはチェッ計算で、図5のf曲線と合うことを確かめる。

7) (6), (7), (8)らんの値から、分離の状態を構造的に表わす図6をうる。(fの曲線が、この例では、たまたま2峰分布になっているが、これはあらかじめ整粒されたものを混合し、前述のように70番と90番のSiCを混合して中間の80番を抜かしたために起こったものである。このように2つの山の谷間のあたりで分離するのと、山のピークのあたりで分離するのとの比較は興味あるテーマであるがここでは省略する。) o, u 曲線の交点は、分離粒子径を表わし、この場合190 [μ] である。(次の D_{50} と同じ)。

8) 表5の(10)らんで o/f を求め、粒子径(各粒度区分の中点)にたいしプロットすると、部分分離効率曲線図7をうる。部分分離効率50%に対応する粒子径では網上になるものと網下になるものの絶対量がひとしくなり、分離点(cut size)のひとつの基準とし、50%分離粒子径と呼び D_{50} で表わす。

B. 部分分離効率曲線(図式法)

図5の積算曲線から図6の微分曲線を求めるのに図式微分を行なうこともできる[備考4]。個人差が入りやすいので、上記の区分法の方が一般的であろう。

C. Sharpness Index (分離の鋭さを示す指標)

図7の曲線を積算正規分布曲線と考えて、正規確率紙にプロットすると図8をうる。(このデータはあまりよくないので、いささか強引であることは承知の上で、エイ、と引いた。こういうことはあまりしない方がよい。一般にはもっともっとよい直線になることが多い。) これから標準偏差 $\sigma=17[\mu]$ を得、相対標準偏差 σ/D_{50}

図7 部分分離効率曲線

で表わして、0.09がえられた。これを、分離の鋭さの指標として用いることができる。

D. 総合分離効率(篩分効率)

篩分効率は、実際にはいろいろ勝手な定義のものが使われており、とり方によって、どうにでもなるとさえいえる。(このことについては別著²⁾の第6章に詳しくのべてある。とくに P. 212 の底上げ効率は、メーカーもユーザーも注意してほしい。) 計算式の形のほかに、分離点のとり方も大切である。ここでは上記の50%分離粒子径を使うことにすると次のようになる[備考5]。

x_f : フィード中の網上成分含有率

x_o : 網上産物中の網上成分含有率

x_u : 網下産物中の網上成分含有率

F : フィードの総重量

O : 網上産物の総重量

U : 網下産物の総重量

$$\text{網上成分回収率 } \tau_o = \frac{x_o \cdot O}{x_f \cdot F} = \frac{0.99 \times 0.385}{0.41 \times 1} = 0.855$$

図8 正規確率紙に部分分離効率曲線をプロット

図9 物質収支

$$\begin{aligned} \text{網下成分回収率 } r_u &= \frac{(1-x_u) \cdot U}{(1-x_f) \cdot F} \\ &= \frac{(1-0.095) \times 0.615}{(1-0.41) \times 1} = 0.943 \end{aligned}$$

$$\text{Newton 効率 } \eta_1 = \eta_o + \eta_u - 1 = 0.798$$

一般に分離効率は η_1 のみでなく、その内容を示す η_o と η_u とを同時にチェックすることが大切である。

8. 網上における移送速度の決定

移送速度は、特定の粒子に注目して、ストップウォッチで一固定距離を進む速さを測定して求めることができるが、その値は、网上的粉体層の最上層の特殊な粒子に関するものであり、平均的な値からかたよっているのが普通である。全体としての平均値は、次のようにして求める。

1) 瞬間網上滞留量 w の測定：定量供給しつつ、フルイ分けを行ない、定常状態になってから、フィードの供給を止め、同時に、網上産物の受器を新しいのにとりかえて、フルイの運転をつづけ、網上を全部、受器に排出させ、その重量をもって、瞬間網上滞留量とする。

(この場合、供給が止まるので、网上的フルイ分け条件が変り、網上産物粒度が、定常状態のときとはちがうおそれがあれば、受器にとったものの粒度を測定し、表4の粒度を参照して補正する。)

別法として、供給を止めると同時に、フルイの運転も止め、網枠ごととり外して、あるいは、網の上の粉体を箒あるいは掃除機で集め、その粒度と重量から求めてもよい。(これは大処理量の現場実験で、受器の切りかえ設備がないときなどにつかう。)

2) 次のような比例関係があることは容易に理解できる。

$$\frac{u}{L} = \frac{W_{of}}{w} \quad \dots\dots(1)$$

u : 移送速度 [m/hr]

L : フルイ網面の長さ [m]

W_{of} : (時間当りのフィード供給重量) × (網上割合), つまり, 網上で網を通過せずに網上産物として排出させるものについての供給量 [tons/hr]

w : 瞬間網上滞留量 [tons]

そこで, W_{of} をいろいろかえて実験して, それに対応する w を求め

$$\log(w/L) = \log W_{of} - \log u \quad \dots\dots(2)$$

なる関係から $\log W_{of}$ にたいし $\log(w/L)$ をプロットすれば, 勾配1の直線がえられ, その切片から u が得られる。あるいは(1)式より計算する。

W_{of} をかえても u が変化しなければ, 勾配1の直線になるはずであるが, フルイ機の振動方式によっては, 勾配は1にならず, したがって, W_{of} つまり供給量によって u が変化する場合がある。(これは, 粉体輸送能力が, フルイ網の運動のみで行なわれず, 一部分を重力に依存している場合に起こる。)

表6は測定例である。図10は(2)式によるプロットである。供給量が大きくなると, u が増加する傾向があるが, これは面内運動形に一般にみられるところで, 押流される傾向があることを示している。

9. 粒子層厚み

网上的粒子層の厚みは, フルイの操業条件の目安として重要である。

(1)式を次のように書き直す。フルイ網の幅を B [m]

図10 移送速度の一定性

表6 移送速度の測定

$L=0.7$ [m]

オリフィス径 D_o [mm]	フィード供給量 (図3より) [tons/hr]	(測定) o/f	W_{of} (2)×(3) [tons/hr]	(測定) w [tons]	w/L	移送速度 u (7)× L [m/hr] [cm/sec]		粒子層厚 δ [—]
6	0.024	0.451	0.0108	0.91×10^{-4}	1.30×10^2	83.3	2.32	0.96
9	0.068	0.386	0.0262	1.67	2.38	110	3.05	1.77
11	0.117	0.400	0.0468	3.04	4.35	108	3.00	3.23
17	0.360	0.413	0.149	6.94	9.94	150	4.17	7.40

として

$$W_{of} = u \frac{w}{L} = u \left(\frac{w}{L \cdot B} \right) B \quad \dots\dots(3)$$

均一球の疎充てんを考えると1個球 D_p^2 はなる面積を占有するから、単位面積当りの粒子重量は、粒子密度を ρ_p として

$$\frac{w}{L \cdot B} = \frac{(\pi/6) D_p^3 \rho_p \delta}{D_p^2} = 0.523 \cdot D_p \cdot \rho_p \cdot \delta$$

(3)式に入れて次式をうる。ただし $D_p[\text{m}]$, $\rho_p[\text{tons/m}^3]$ とする。

$$W_{of} = 0.523 \cdot D_p \cdot \rho_p \cdot u \cdot \delta \cdot B \quad \dots\dots(4)$$

ここに δ は粒子層厚みで、粒子径の δ 倍の厚みであることを示す。つまり D_p なる直径の球が δ 層あると考えるわけである。(詳しくは別著²⁾275頁参照)

表6の(8)らんの値は、 D_p が網の目開き210[μ]にひとしいとして、 δ を計算した値である。(実用上、目開きの倍数で表わすのが普通である。)

10. あとがき

工業用フルイ機の操業条件のテスト方法を実験例によって説明した。粉体工学実験法シリーズの前例にならない例に引用したデータは、あまり立派なものではないのを使った。だいたい、日常の実験では、いつもいつも模範的データが出るとは限らないもので、ありふれた少しおかしいようなデータの方が、かえって未知の課題を含んでいることもあるものである。

網上におけるフルイ分けの進行過程を解析するもう少し立ち入った研究については、別の機会に詳説することにした。

3年次の学生実験で、本稿でのべた内容の実験を実施している。オリフィスの実験は、時間がかかり、このほかにもやることがあるので、別に独立させてある。設備があれば、輸送機、粉碎機などと組合せたらよいと思っ

ている。

本稿をまとめるにあたり、学生実験の指導にあたって、大学院学生田坂和彦君および志波靖磨君の協力をえたことを付記する。

〔備考1〕

A: 全振幅 [mm]

N: 回転数または振動数 [rpm]

とすると

$$\begin{aligned} \text{遠心効果 } K &= \frac{r\omega^2}{g} = \frac{(2\pi^2)}{g} \left(\frac{N}{60} \right)^2 \left(\frac{A}{20} \right) \\ &= 0.56 N^2 A \times 10^{-6} \end{aligned}$$

一般に、他の型式の機械との比較は別著²⁾の273頁参照。

〔備考2〕

金網ならメッシュ(1インチ間の目数)と線径を調べて、別著²⁾5頁の表や24頁の図を用いてチェックする。

目開きを直接に万能投影器などで測定するのは実用的でなく、errorも多い。

〔備考3〕

本誌, 6, [1], 16~23(1969)の粉体工学実験法(5)……試料分割法の項参照。

〔備考4〕

別著²⁾225頁参照。

〔備考5〕

50分離粒子径は、結果として表われた値である。結果論で効率を論じてナンセンスである。あらかじめ分離すべき粒子径をきめておいて、効率を求めるべきで、たとえば網の目開きを使うべきであるという理念論の方が筋が通る。ところが、その場合は、網目をかえれば、いくらでも値が変わるから、フルイ機のテストをやっているのか、網のテストをやっているのか、わからなくなってしまうという問題が残る。

引 用 文 献

- 1) 井伊谷鋼一編“粉体工学ハンドブック”(朝倉書店)
- 2) 三輪茂雄著“粉体のフルイ分け”(日刊工業新聞社)

- 3) 井伊谷, 三輪共著: 化学工学通論II(朝倉書店)