

粉粒固体供給機

桑井源禎・井出哲夫

粉末をとりあつかう化学工場などを見学された読者の中には、ホッパーの円錐部がもはや原形をどめぬ程にでこぼこに変形してしまっている有様を見た人々も少なくないであろう。あれはホッパーから円滑に流出する筈の粉粒体が設

計者の意図に反して時々つまってしまうために、工員がその都度ハンマーでたたいた痛ましい傷痕なのである。

われわれの日常生活においても粉粒状の固体を一つの容器から他の容器に移す場合などに、ある物は非常によく斜面やホッパーを流れ落ちるのに、他の物は振動を与えたり、棒でつついたりしてやらないとうまく流れ落ちてくれなかったり或はもうもうたる塵埃の洗礼をうけたりするようなことは誰しも経験しているであろう。

生産現場ではこのような粉粒固体の、プロセスへの供給は連続且つ定量的に行われなければならない。操作の自動化連続化は設備合理化或いは品質管理上の絶対要件であるが、固体供給の不連続性がしばしばこの可能性を妨げる。流体の場合はその供給速度の計測や制御は固体に比べて簡単であるが、固体ではなかなか問題が複雑である。現場ではどこでも困っているこの固体供給の問題をとり上げる研究者も案外少いとみえて、いざ文献をさがしてみるとなかなかこれといった解答に出会うことはまれである。それというのも、固体粒子の多様性の故に、供給機も亦多種多様ならざるを得ず、その問題の背後には固体粒子の本質に関する未開拓の困難な問題が横たわっているからである。固体供給機には万能な形式はあり得ない。従ってその選定又は設計に当っては固体粒子の性質すなわち粒子の大きさ、粒大分布、粒形、含水率、見掛け比重、飛塵性 (dustyness)、流動性などによりその使用目的に応じてこれを選ばなければならない。

特に化学工業においてはとり扱う物質の種類が多い上に、固体と流体間の反応を連続的に行わせる場合にはその混合比、流量などをかなり精確に規制しなければならない場合も多い。また固体粉末を正または負の気体圧力の場に連続的に供給する必要もしばしば起る。本稿では従来用いられている固体供給機の諸型式について簡単に説明した上でわれわれの研究結果の二、三について紹介したい。

粉粒状の固体を連続的且つ定量的に或る反応系に供給するという事は簡単なようにみえて案外難しいものである。気流中の微粉を分離することに苦心する技術者は、また気流中に微粉を供給することにしばしば頭を悩ますものである。

1. 固体供給機の諸型式^{1) 2)}

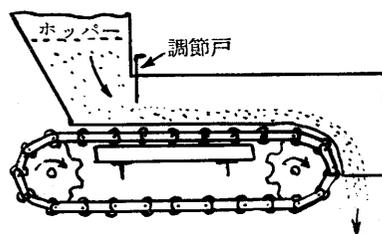
固体供給機の使命は粉粒状固体を連続的に且つ定量的に供給することにあるのはいうまでもないが、その供給量を制御するのに見かけ体積による方法と、重量による方法とがある。

前者は供給機からの固体の流出量を体積によって規制するものであるから粉粒体の見掛け比重の変化により重量にして $\pm 15\%$ 位の変動はどうしても避けられない。後者は固体の流量を重量そのものによつて規制するものであるから、 $\pm 1 \sim 2\%$ (重量) 位の精度を持たせることは困難ではないが、装置は多少複雑になる。

以上の他に固体を流体中に流動させた状態 (流動層) で他のプロセスへ供給する方法がある。

体積で流量を制御する固体供給機

比較的流動性のよい粉粒状固体は、通常用いられているベルト、エプロン、スクリュウ、フライト等のコンベア型をそのまま使用することができ、その供給率は送速度およびホッパーの調節戸の開度によって調節できる。第1図にその代表的なものを示す。これらは何れもどこ



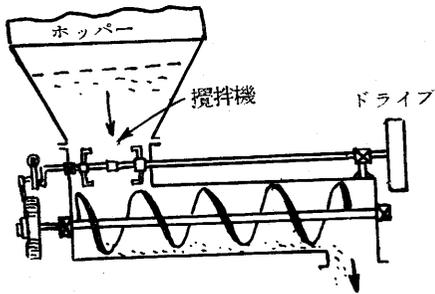
第1図 (A) エプロン供給機

の工場でも用いられる一般的な型式である。

上のベルトコンベアを短くして前後のプーレーを一つにしてしまうと、第2図の回転円筒式の供給機になる。

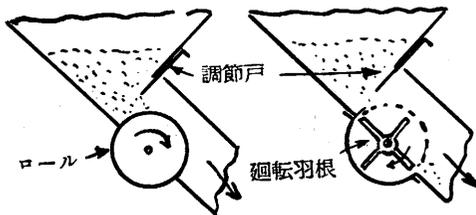
これは上のコンベア型と大差はないが、設計に当っては粉粒体の安息角を考慮に入れなければならない。

安息角 (または息角) というのは粉粒体を水平面上に盛り上げた場合に、その堆積の側面と平面との成す最大の角度であって、その粉粒体に特有の値である。この角度は物質の物理的性質および表面の状態によって決まり、特に粒子の大きさや形および表面条件が支配的であ



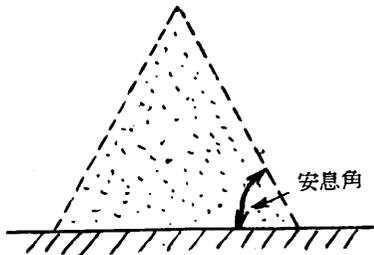
第2図 (B) スクリュー供給機

る。従って同じ物質でも粒子の大きさが変われば安息角は変わってくるし、また粉碎方法が異ると粒子の形が異なるために安息角が変化する。含水率が大きく効いてくるのは勿



第2図 廻転供給機

論である。一般に乾いた状態では大抵の粉粒体の安息角は $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ の範囲にあるが、水分などのために附着性のあるものでは 90° 近くになり、逆に細かくてエアレートされているような物では 0° に近い値を示すこともある。



第3図 安息角

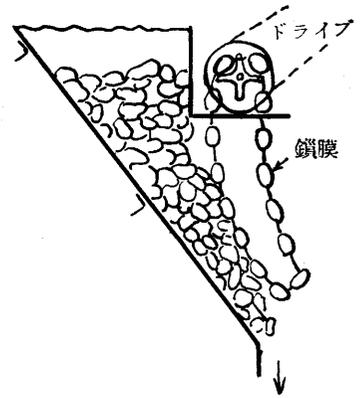
安息角と送り角とは厳密に区別される。送り角とは物体が他の平面をすべり初める時の平面の傾斜角であり、安息角は固体粒子相互間送り角である。従って安息角は送り角よりも数度大きいのが普通である。さて第2図のロール型供給機について考えると、このロールが静止の状態にあるときには、物質はその安息角の範囲内に止まっていなければならない。この時粒子がロールの上面からすべり落ちないようにロールの直径を大きくするか、またはその表面にギザギザをつけて送り角を大きくする必要がある。ロールが廻転を始めると粉粒体は摩擦力により堆積からかきとられて供給されるが、この型では供給速度の調節は戸の開度よりもロールの廻転速度によって主に行われる。

鎖膜供給機 (第4図) は鉱山などで塊状の原鉱をクラ

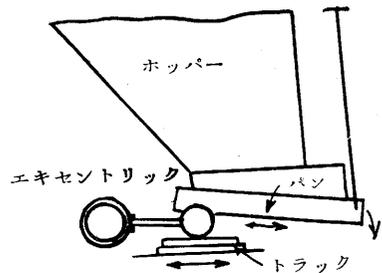
ッシャに供給する場合に用いられる。

往復振動を利用して固体を供給する方法もいろいろの型があるが、第5図はその一例である。この種の型では固体の供給は脈動的である。

コンベアの直線運動部分を廻転円盤でおきかえたものが第6図のテーブルフィーダであ

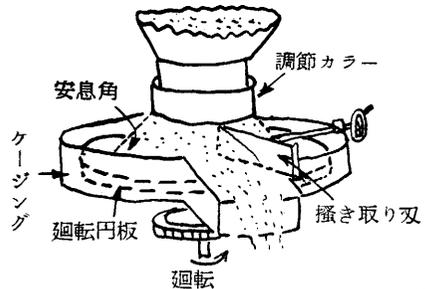


第4図 鎖膜供給機



第5図 往復振動板供給機

る。この型は最も広く用いられており、またその原理を応用したいろいろの供給機が考案されている。この型で

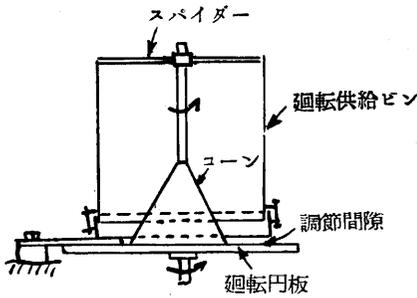


第6図 テーブルフィーダ

は固体の供給速度はかきとり双の位置、円盤の廻転速度、シリンダーと円盤との距離などによって変化する。われわれは簡単なテーブルフィーダを試作して、その供給機構および特性について研究し、報告した³⁾。

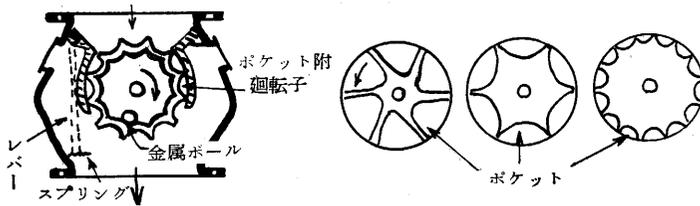
第7図はテーブルフィーダの一つの変形で、湿った附着性の物質を供給する為に特に考案された複合型供給機である。これは図に見るように円筒型の器 (ビン) がスパイダーによってシャフトに取りつけられ、底部の円盤と共に廻転するようになっている。供給速度は第6図のテーブルフィーダと同様に行われる。乾燥材料に対しても用い得ることは勿論である。

以上に述べた供給機は何れも解放型であって飛塵性の



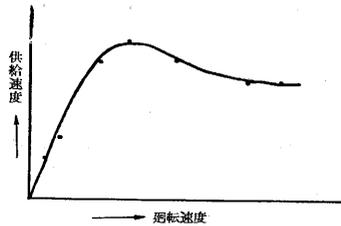
第 7 図 複合テーブルフィーダ

粉末をとりあつかう場合には不適当である。飛塵性が問題になるような場合或は小さい差圧に抗して粉末を気流中に供給するような場合には第 8 図のような回転ポケット



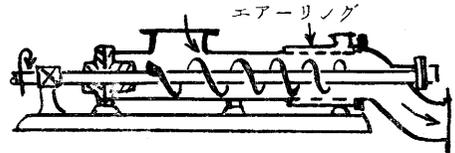
第 8 図 回転ポケット型供給機

ト型供給機が便利である。但しこの場合回転速度と回転子の溝数による程度の差はあっても、粉粒の供給は本質的に脈動的である。回転子の溝数が一定の場合供給率は回転数に比例すると常識的には考えられるが、



第 9 図 回転ポケット型供給機 供給特性

筆者らの実験結果⁴⁾によると第 9 図に示すように或る回転速度までは供給率は回転速度に比例するが、回転数が或る限界値以上になると却って減少する。これは回転子のポケットがホッパー底部に開孔する時間が短くなる為、充分粉粒が充填され得ぬためであると考えられる。従って供給率と回転速度の比例性を保つためには限界速度以下に回転をおさえることが必要である。



第 11 図 フラーキニオンポンプ

流動状態にして供給する方法

粉粒を流体中に流動させて化学反応を行わせる流動層反応は最近の化学工学で著しい進歩をとげた分野の一つであるが、これに伴って粉粒体を流体（主としてガス）中に定常的に供給する装置もいろいろ考えられている。

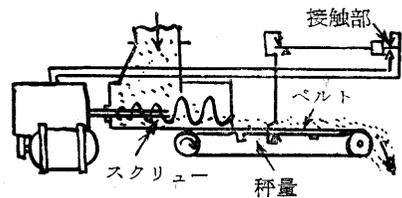
第 10 図は微粉炭のガス化に用いられている新しい供給機でガス圧力 30kg/cm² 位まで用いられる。

第 11 図はこの種の型で最も古くから用いられているフラーキニオンポンプである。使用空気圧力 2.5 kg/cm² ゲージで、1.5 lg/cm² ゲージまでの圧力に抗して固体粉末を送りこむことができる。

気体を用いた粉粒供給機にはまだ他に二、三あり、筆者の一人もジェットフィーダの新しい型式について研究し⁵⁾、現在工場で実用され好結果を得ている。

重量によって流量を制御する供給機

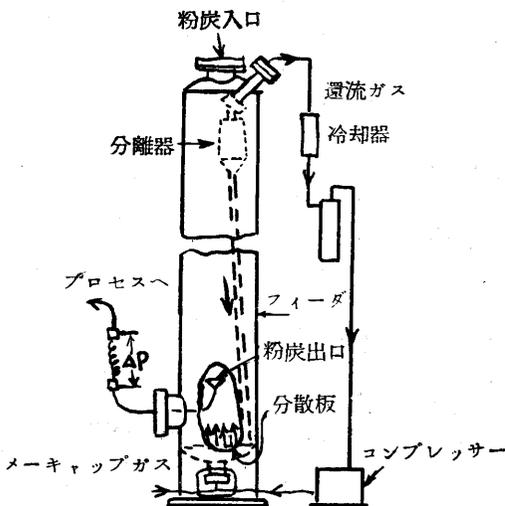
前述したように供給率の精度が要求される時はこの種の供給機が必要である。いろいろな型式があるがその原理は大体似たようなものである。



第 12 図 定量供給機

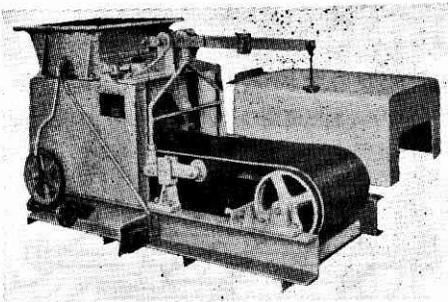
第 12 図はその一例であって、計量ベルトにかかる荷重の変化を原動機に伝えて、常にベルト上の粉粒体の重量を一定に保ちつつ供給するようにしたものである。計量ベルトへの粉粒の供給にはスクリューの他にパイプレーター、調節戸、ベルトなどが用いられる。

粉末製品の包装などに用いられる計量ホッパー供給機はホッパーの中の固体の重量が一定値になるとホッパー



第 10 図 流動供給機

への固体の供給がとまり、下から内容物が有働的に排出されるようになっている。



第13図 ボイドメータ

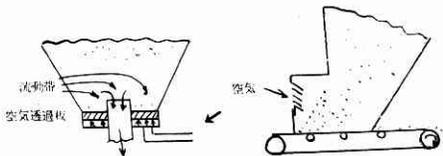
ボイドメータ (第 13 図) は粉状の砂、セメント、鉄石等種々の材料を一定の割合で混合する場合に使用される特殊供給機で、混合すべき材料の種類に応じて同時に二合以上を据付けて使用する。本体はホッパー、台枠、ベルトおよび秤量装置より成り、ホッパーの出口に自動調節戸を備えてベルトにより運搬される量を一定に調節し且つ計器によって混合量を指示するものである。

2. 固体供給機の諸問題

固体供給機には前述したように万能のものはいない。固体供給機の具備すべき要件としては(1)供給が円滑に且つ定常的なこと、(2)供給率を希望する範囲内で容易に調節できること、(3)構造がなるべく簡単なること、(4)粉末の飛散しないことなどがあげられる。

粉末は細くなったり、湿っていたりするとホッパーから自然に流出しなくなる。ホッパーの中で橋或はアーチを造ってしまうと、如何に優秀な供給機も役に立たなくなる。そこで固体供給機の問題は必然的にホッパーの構造、ひいては粉体の力学にまでさかのぼらざるを得ない。どんな場合に架橋現象を起してホッパーを閉塞するか、又これを防止するにはどうしたらよいか、振動を与えるとすればどのような振動を与えたら最も効果的であるかというような問題に対しては今の所明確な解答を与え得るまでに研究は進んでいない、ここでは現在行われている架橋現象の防止法について触れておこう。

ホッパーの中の粉体層に機械的な攪拌作用を与えたり、ホッパーの壁に発振器をとりつけて連続的な振動を与える方法は屢々用いられるが、振動の与え方如何によっては内部の粉体層がさらに密に詰まって逆にますます流れ難くなる場合があるから注意が必要である。



第14図 ピンまたはホッパーの閉塞防止法の例

第 14 図は粉体層の中へ空気を送って粉体を流れ易い状態にする方法の二例である。この他にホッパーの円錐部を二重壁にしておいて、その内部に圧縮空気を送ってホッパーの内壁をボコンボコンとふくらませたり凹ませたりして、ホッパー内壁への粉末の附着を防止する方法も考えられている。粉末の流動性に関する種々の因子についてはまた稿を改めて紹介したい。

3. 筆者らの二、三の研究結果

オリフィスからの粉粒体の重力による流出

粉粒体を充たした容器の下底に孔をあけておいて粉粒体を重力により自然に流出させる場合、その流出速度は何によって決まるだろうか。古くは砂時計にこの原理が利用されていることは周知のことであるが、この砂時計を考案した古の賢者は、固体粒子のオリフィスからの流出速度は粉粒体層の高さには無関係であることを既に知っていたのであろうか。

一見簡単にみえるこの現象は実は流体の場合のように簡単ではない。多くの研究者がこの現象についていろいろな式を呈案したが未だ決定的な式は出されていないようである。

オリフィスからの粉粒体の流出速度に関する因子としてはオリフィス孔径、粒子径、粒体の内部摩擦係数、ホッパー角度などがある。粒体層の高さは流出速度に無関係であることは前に述べた。

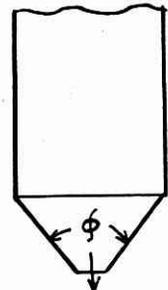
これに関して詳細な研究を行ったのは W. E. Deming⁹⁾等で、次元解析および実験結果から次のような式を呈出している。

$$W = 525D_0^{2.5}r/\rho\{34.6 + (67.4 + 444\sin\frac{1}{2}\phi)(D_p/D_0 + 0.130 - 0.161\mu)\} \quad (1)$$

これはかなり複雑な形であるが、粉粒体の流出速度に関する全ての因子を含んでいるので、精度が高く、適用範囲も広い式である。(1)式で ϕ は15図に示すようにホッパーの角度であるが、底部がホッパーでなく平板オリフィスの場合はその粉粒体の安息角の余角を用いればよい。

(1)式他にいろいろな実験式が出されているが⁷⁾⁸⁾、何れもその実験範囲では成立するが精度は余りよくないようである。

われわれの追試によれば(1)式が最もよく事実合うようである。



第15図 流出速度実験装置

然し同じ装置で同じサンプルを用いて実験をしても、物質によってはその日の気象条件(主として湿度)の影響を敏感にうけることがある。粒子が小さくなると特にこの影響はけん著である。また粒子径がオリフィス孔径の $1/10$ 以上になると架橋現象の為

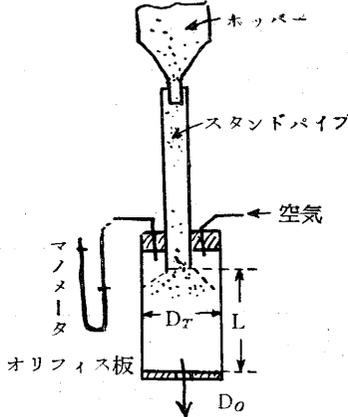
粉粒体は連続的にオリフィスから流出しなくなる。

空気圧力差を与えた場合のオリフィスから
粒体流出速度⁽¹⁰⁾

上に述べたのは重力のみによる流出であるが、今この粒体層の上部に空気圧力を与えた場合に底部オリフィスからの粒体の流出速度はどうであろうか。

筆者らは第 16 図のような実験装置を用いてその影響を調べた。

実験の結果によれば装置の寸法および試料が一定ならば粒体の流出速度は初めは空気圧力の平方根に比例して増大するが、圧力が大きくなると大体流出速度は圧力に比例するようになる(第17図参照)。すなわち圧力差の低い範囲



第16図 空気圧を与えたときのオリフィスからの粒体流出速度実験装置

$$w \propto \sqrt{P+P_0} \quad (2)$$

$$\text{または } w^2 - w_0^2 \propto P \quad (2)'$$

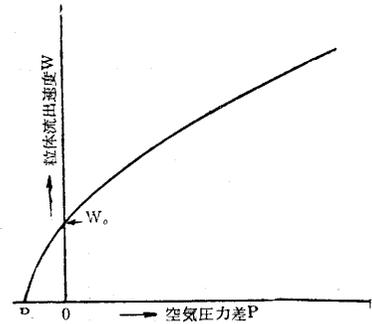
なる関係が成立する。但し w_0 は $P=0$ のときすなわち重力による流出速度であり、 P_0 は $w=0$ に相当する仮想圧力である。

工業的に粒体供給機として使用する場合は上の(2)式が成立するような範囲で充分であるから、この範囲につき容器並びに孔の寸法、粒体層高さ、粒子の大きさおよび比重量などを種々変えて実験を行い次のような式にまとめることができた。

$$\left. \begin{aligned} w &= CA_0 \sqrt{2gr(p+p_0)} (D_0/L) \\ \text{または } w^2 - w_0^2 &= CA_0^2 \cdot 2g \cdot r p D_0/L \\ C &= (D_0/D_P)^{0.25} \exp[-5.0(D_0/D_T)] \end{aligned} \right\} (3)$$

オリフィス孔の断面の形状は上式の C の値に著しい影響を与える。重力のみによる自然流出の場合にはオリフィス孔の断面の形は C には余り効いてこないが、これに空気圧力が加わると形の影響はけん著に現れてくる。(3)式は第 16 図に示したような矩形断面のオリフィスについて得られたものである。

上の結果は粒体供給装置の設計基準、供給装置の制御並びに供給速度の測定に役立つと考えられる。例えば圧力差 p によって粒体の流出速度をかなり広範囲にわたって調節できるし、また逆にその時の圧力の読みから直ちに粒体の供給速度を知ることができるであろう。また上の原理を応用して、ガスの絞り機構と連結することによ



第17図 空気圧力差と体比流出速度との関係

り管中を流れる混合ガスの固気比をガスの流量に無関係に常に一定に保つような供給機的设计も可能であると考えられる。

4. むすび

以上で固体供給機の諸型式およびわれわれの研究の二三について簡単な紹介を試みた。固体供給機の問題は現場において重要な問題であるにもかかわらず、技術者からは比較的等閑視されているものの一つである。今後粉末技術の進歩につれて、粉粒供給機もさらに進歩するであろうが、この方面に興味を持たれる人々の御協力を望んで止まない次第である。(1953. 12. 16)

使用記号の説明

C = 流出係数 [-]

A_0 = オリフィス断面積 [cm^2]

g = 重力加速度 [cm/sec^2]

r = 粒体の嵩比重量 [gw/cc]

p = 空気圧力差 [gw/cm^2]

p_0 = 重力による流出速度 w_0 に対応する仮想圧力
すなわち $w_0 = CA_0 \sqrt{2gr p_0} (D_0/L)$

D_0 = オリフィス孔径 [cm]

L = 容器内の粒体充填層高さ [cm]

D_P = 平均粒大 [cm]

D_T = 円筒容器内径 [cm]

ϕ = ホッパーの角度 [-]

μ = 粒体の内部摩擦係数 [-]

文 献

- (1) Thodore R. olive : Chem. Ergg. No. 11, 163 [1952]
- (2) Perry : chemical Engineer's Handbook, 3rd. ed.
- (3) 桑井, 井出, 北条 : 化学機械 16 313, [1952]
- (4) 桑井 : 化学機械 13 190 [1949]
- (5) 科研報告第 26 輯, 197, (1950)
- (6) W. E. Demming & A. L. Mehring : Ind. Eng. Chem., 21 661 (1929)
- (7) 白井 : 化学機械 16 86 (1952)
- (8) 高橋 : 理研報告 12 984 (昭 8)
- (9) 九里 : 応用物理 20 74 (1951)
- (10) 桑井 : 化学工学 17 453 (1953)