(色材, 52 [9] 494-506. 1979)

粉 粒 体 の 供 給 と 輸 送

櫛 田 昭*

1. ま え が き

産業界で取扱っている物質には、取扱いや加工に便利
なために、粉粒体の形をとるものが多い。また、おもな
粉粒体の年間生産量の1例を示すと表-1 のようになる
が¹⁾、これ以外の物質や二次、三次製品を合わせると相

当の量になってくる。そのため、粉粒体の取扱いについ
ての研究が行なわれ、種々の装置が開発されてきた。そ
の中の供給と輸送について以下に述べる。

2. 粉粒体の供給

2.1 供給装置^{2~5)}

表-1 おもな粉粒体の年間生産量 (1975 年)¹⁾

品		目	単位 1,000トン		品		目	単位 1,000トン	
飼 料・食 料	米	(国産99.8%)	13,194	47,968	よ う 業	セメント	65,517	69,396	
	小麦	(4.0)	5,956			アルミナ	2,569		
	大豆	(3.6)	3,460			ソーダ灰	1,123		
	とうもろこし	(0.1)	7,481			石こう	187		
	砂糖	(15.8)	2,937		顔 料	カーボンブラック	370	794	
	塩	(14.3)	7,470			酸化チタン	127		
肥 料	窒 素 系	尿素	2,983	11,755	合 成 樹 脂	熱 硬 化 性	ユリア	486	5,167
		硫酸	1,920				フェノール	196	
		塩 安	733				そ の 他	469	
		石灰窒素	186						
	りん系	硝酸 安	12						
		りん酸石灰	564						
	複 合	溶成りん肥	476						
		化成肥料	4,247						
		配合肥料	634						
鉱 業		け い 石	8,767	20,739	石 油 系 繊 維	ポリエステル	535	1,246	
	ドロマイト	4,330	アクリル			310			
	け い 砂	3,918	ナイロン			300			
	耐火粘土	619	ビニロン			40			
	砂 鉄	177	ポリプロピレン			35			
	りん鉱石	2,928	そ の 他			26			
					合	計	157,065		

(注) 石灰石 $143,857 \times 10^3$ トン, 石炭 $80,936 \times 10^3$ トンなどの鉱業品は除く。

昭和 54.4.6 受理

Feed and Conveyance of Solid Particles
Akira KUSHIDA

* 名古屋工業技術試験所

名古屋市北区平手町1丁目 (〒462)

表-3 使用目的による分類表⁵⁾

使 用 目 的		供 給 機 名
供給量に関するもの	1. 定量供給	ベルトスケール式, ホップスケール式, ロスインウエイト式 (コンスタントフィードウエヤ) ロータリフィーダ, 立て型回転翼式, チェーンフィーダ, ベルトフィーダ, テーブルフィーダ
	定重量供給 定容積供給	
	2. 可変量供給	電磁フィーダ, スクリューフィーダ, フロートコントロールバルブ, ロータリフィーダ
	3. 間けつ供給 4. 不定量供給	カットゲート, ロスチェーンフィーダ シュート, ゲート, ロスチェーンフィーダ, ロックホッパ
特殊目的のもの	1. 材料の流れの形を変えるもの	じやま板, ロール, 散布ストーカ, パイラ
	2. 材料の流れの速さを変えるもの	じやま板, ロックラダー
	3. 2個以上の場所に同時に等量分配するもの	バタフライバルブ, 回転シュート
	4. 2個以上の場所に切換えて供給するもの	バタフライバルブ, 回転シュート, 分岐バルブ
	5. 容器内に均一に供給するもの	有孔鉄管, デストリビュータ
	6. 容器から均一に取出すもの	分離防止装置
	7. シールしながら供給, 排出するもの	スクリューフィーダ, チェーンフィーダ, フロートロン
	8. 混合 (または分離) しながら供給するもの	バグミル, ロールフィーダ
	9. 圧力差のあるところへ供給または排出するもの	ロータリバルブ, ロックホッパ, ブロータンク, キニヨンポンプ, スクリューフィーダ

表-4 圧力差のあるところへ使用する供給機⁵⁾

	圧 力 差 の 大 き い 場 合 100 mmAq 以上	圧 力 差 の 小 さ い 場 合
高压に供給	ロータリバルブ, ブロータンク, キニヨンポンプ, ロックホッパ	ロータリバルブ, ロックホッパ, インゼクションバルブ, スクリューフィーダ
高压より排出	ロータリバルブ	ロータリバルブ, フロートロン
負圧に供給	ロータリバルブ, 吸引ノズル	ロータリバルブ, フロートロン, スクリューフィーダ
負圧より排出	ロータリバルブ, ロックホッパ	ロータリバルブ, チッピングシール, ロックホッパ, フロートロン

貯槽からの原料粉粒体の排出, 粉粒体処理装置への供給, 次段工程への移動, 製品粉粒体の取出し, パッカーへの供給など, 粉粒体を取扱う工場では1つのプラント中にも多くの供給装置が含まれている。取扱うことができる粉粒体は岩石, 鉱石などのような大塊 (100 mm 以上) から 1 μm 以下の超微粉体までのあらゆる固体であるが, 粉粒体を水などの液体によって泥しょう状, ペースト状にして供給する装置についてはここでは述べない。

供給装置には定量性, 安定性, 制御性, 経済性などが要求される。流動性の悪い粉粒体, 付着凝集性の強い微粉では橋かけ現象が起り, ホッパからの流出が滑らかに行なわれなくなり, ついには排出が停止することもある。この橋かけの形成崩壊が繰り返されると供給機の定量性はきわめて悪くなる。橋かけ防止対策にはホッパ構造上のくふう, 機械的槌打ち, 振動の利用, カキマゼなどにより流動性を増加させる必要がある。この反対に,

かさ比重が小さい数 100 メッシュ以上の微粉では, 流動性が良すぎてフラッシングを起こしやすいものがある。この現象が起ると粉体は液体のように流動化して小さなすき間からも流出し, 供給量の制御ができなくなる。フラッシングを起こしやすい粉体ではホッパ中の粉体ヘッドを余り高くしないこと, 空気をだき込ませるようなカキマゼを余りしないことが必要である。

供給装置は次のような分類方法がある。

- (1) 機構による分類
- (2) 取扱粉粒体による分類
- (3) 使用目的による分類

機構による分類は, さらに次のように分けられる。

- (1) 主として重力によるもの
- (2) 機械的に粉体層を移動するもの
- (3) 往復運動または振動によるもの
- (4) 流体圧または流動化によるもの

次節では代表的なものについて概略と長所などを述べる

が、これら以外の方法については文献を参照されたい。

表-2, -3, -4 は供給装置の選定表である。

2.2 各種の供給装置

2.2.1 主として重力によるもの

(i) ロータリフィーダ⁶⁾

図-1 のように数枚の羽根をもつロータをケース内で回転させ、上部から落下する粉粒体を羽根の間に受け入れ、これを下方へ排出供給する方式である。回転数と供給量との関係は図-2 のようになり、あまり回転数が早くなると粉粒体が羽根によって、はね飛ばされて十分に受け入れられないために供給量は低下する。最も広く使用されている装置の一つであり、次のような長所がある。

- (1) 粉粒体をはほぼ定量的に供給排出することができる。
- (2) 上部のホップやタンク内の粉粒体の量が多少変わっても供給排出量はあまり変わらない。
- (3) ある回転数の範囲では、無給排出量は回転数にはほぼ正比例する。従って回転数を変えることによって無給排出量を容易に変えることができる。
- (4) ある程度の気密を保つことができ、正圧下でも負圧下でも使用することができる。
- (5) 大きさが小さく、狭い所や高さの低い所にも取付けることができる。
- (6) 粉粒体粒子の破砕はほとんどない。

図-1 ロータリフィーダ
(ペーン式)

図-2 ロータリフィーダの回転数と供給量との関係

(7) 適切な構造にすることにより粒子のかみ込みは、ほとんど避けることができる。

(8) 空気輸送が可能なほとんどすべての粉粒体に対して用いることができる。

(9) 水冷構造にすることにより数百度の高温度の粉粒体に対しても用いることができる。

(10) 構造が簡単で運転、保守、分解点検、部品の交換修理が容易である。

供給量 $Q(\text{m}^3/\text{hr})$ は次式から求まる。

$$Q = 60 q n \eta$$

ここで q はロータ 1 回転による幾何学的排出量 (m^3)、 n はロータの回転数 (rpm)、 η は容積効率であり、 n の関数となる。種々の粉粒体に対して η を前もって求めておくとう便利である。

(ii) テーブルフィーダ^{7,8)}

図-3 のように回転する円盤の中心部の上にホップ下端出口が開いて、そこから粉粒体が回転円盤上面に、ある角度でたい積し、これを出口にあるかき取り板で円盤の回転につれてかき落とす方式である。かき取り板のそう入深さ、およびテーブルの回転数によって供給量の調節ができる。次のような長所がある。

- (1) 構造、操作とも簡単で故障が少ない。
- (2) 容量のわりに取付面積が小さい。
- (3) かなり広範囲に供給量の調節が可能である。

図-3 テーブルフィーダ

図-4 ロックホップ

- (4) 所要動力が少なく、設備費、維持費とも安い。
(iii) ロックホッパー⁹⁾

図-4 のように低圧部④より高圧部⑤に粉体を供給する場合に、中間タンク③を設けて、この圧力をバランスバルブ V_3 , V_4 を介して④, ⑤部に交互に平衡させ、これに連動してバルブ V_1 , V_2 を開閉し、④部の粉体を重力により下方に落下させる方法である。この場合、気体の移動はバランス回路によるため粉体の流れを妨げることはない。この長所は、

- (1) 高い圧力をもつタンクや炉内に粉粒体をほぼ連続的に供給できる。
- (2) かみ込みのためロータリフィーダでは取扱いが困難な粉粒体にも使用できる。

2.2.2 機械的に粉体層を移動するもの

- (i) ベルフィーダ⁵⁾ (図-5)

両端のプーリの間にエンドレスベルトをかけ、送り側をキャリアローラ、もどり側をリターンアイドラローラで支持して、ベルトの上に粉粒体をのせて供給する装置である。容器からの粉粒体の排出と定重量供給用に用いられ次のような長所がある。

- (1) きわめて広範囲の物質を取扱うことができる。
取扱う物質の比重、乾湿、粒径、腐食性、摩耗性などに左右されることが少なく、もろいものでも最少限の損傷で取扱うことができる。
- (2) 処理量の範囲が広い。
- (3) 連続的な定重量供給を行なうことができる。
- (4) 回転部分に粉粒体が接触しないので保守が容易で、故障がほとんどない。
- (5) 操作が円滑で騒音がない。

しかし、次のような短所がある。

- (1) 密閉構造にすることが困難で、蒸気や臭気を発生したり、飛散しやすいもの、外気の影響を受けると困るものは取扱いにくい。
- (2) 耐熱性ベルトを使用すれば 200°C 位までは取扱うことができるが、一般に 50°C を越えるとベルトの寿命が短くなる。
- (3) 粘着性の粉粒体は取扱いが困難である。

- (ii) スクリューフィーダ⁵⁾ (図-6)

図-5 ベルフィーダ

図-6 スクリューフィーダ

管の中でスクリュを回転させ、粉粒体に軸方向の推力を与えて移動させる。容器からの粉粒体の排出を定量的に行なうものであり、次のような長所がある。

- (1) ある回転数までは、供給量が回転数に比例し、比較的精度がよく調節も容易である。
- (2) 密閉型なので、ダストのものがなく、外部から汚染物の入るのを防ぐことができ、高圧、真空中の操作も行なうことができる。
- (3) 圧力差のある場所へ供給することができる。
- (4) 小型で容易に狭い場所へ取付けことができ、どちら側で駆動しても良い。
- (5) ジャケットを付けることにより、供給を行ないながら加熱、冷却などの操作も行なうことができる。

しかし、次のような短所がある。

- (1) 取扱う粉粒体により摩耗、かみ込みなどのトラブルが比較的多い。
- (2) 固化しやすいもの、粒径の大きなものは取扱いにくい。
- (3) 粉粒体が破碎されやすい。
- (4) 所要動力が比較的大きい。

2.2.3 往復運動または振動によるもの

- (i) パイプレーティングフィーダ⁹⁾ (図-7)

トラフとばねの共振による同調運動を利用したものであり、ホッパー、ビンなどの出口の下に設置され、容器内の粉粒体を排出し後段の機器に供給するのに用いられる。加振方式により電磁式、機械式などがある。次のよ

図-7 パイプレーティングフィーダ（電磁式）

うな長所がある。

- (1) トラフの摩耗が少ない。
- (2) 供給量の調節が容易である。特に電磁式では電圧を調節することによって供給量を0から最大量まで円滑に変えることができる。
- (3) 取扱い可能な粉粒体の範囲が広く、微粉から大塊まで、また摩耗性のものや高温のものにも使用できる。
- (4) 供給と同時にふるい分け操作も併用できる。

しかし、短所は、

- (1) フラッシュ性粉体には不適當である。
- (2) 粒度分離を生じやすい。

2.2.4 流体圧または流動化によるもの

(i) ブロータンク⁹⁾ (図-8)

粉体をタンク内に充てんし、タンクを密閉した後に、これに圧縮空気を導入して供給管内に粉体を圧送するものであり、フラクソ型、セラー型、流動盤型がある。次のような長所がある。

- (1) 構造ががんにょうで気密度が高く、数気圧の高圧下でも稼動することができる。
- (2) 圧縮空気以外に特別な動力を要せず、粉体を数百m離れた所に供給することができる。
- (3) 粉体を高い濃度の状態で供給することができる。
- (4) 構造が比較的簡単で可動部分が少なく故障が少ない。
- (5) 騒音がほとんどない。
- (6) タンクの供給回数を積算することによって総供給量を知ることができる。

(ii) エゼクタ¹⁰⁾ (図-9)

圧縮空気をノズルから高速度で噴出して、エゼクタ効

果によって粉粒体を吸引し、噴出空気とともに吹き出して供給するものである。次のような長所がある。

- (1) 運動する部分がない。
- (2) 粉粒体の受入口が負圧になるため空気の吹上げがない。そのため上部のホップは開放のままできるので、粉粒体を連続的に受入れて供給を続けることができる。
- (3) 低い所や狭い所にある粉粒体を吸引し、これを次段の機器に供給することができる。
- (4) ディフューザ以降は正圧になるため分離捕集器の構造が簡単になり、正圧をもつ機器へも供給できる。

しかし、次の短所がある。

- (1) 高圧の空気を多量に消費し能率が悪い。
- (2) 硬い粉粒体を扱う場合はスロート部の摩耗が大きい。

3. 粉粒体の輸送

3.1 輸送装置

粉粒体の輸送方式は表-5のようにいろいろあるが主力は次第に連続輸送特に空気輸送に移りつつあると見てよい。次節では、おもな輸送方式について概略と長所などを述べるが、空気輸送に重点がおいてある。これら以外の方法については文献を参照されたい。

輸送装置の計画の際には、設備費の大小だけでなく、粉粒体の性状、品質に与える影響、輸送量、輸送距離、輸送経路の状況、前後段の設備、運転保守の難易と経費などを総合的に考える必要がある。たとえば、含有水分、付着性、粒子の破砕などのために空気輸送ができない場合は、設備費が多くなっても機械的輸送方式を用いる。

表-5 粉粒体の輸送方式

連 続 式	機械的輸送方式	スクリュコンベヤ ベルトコンベヤ フローコンベヤ フライトコンベヤ バケットエレベータ 振動コンベヤ
	流体力輸送方式	空気輸送 エアスライド 水力輸送
バ ッ チ 式		船 貨 車 タンクローリ

図-8 ブロータンク (フラクソ型)

図-9 エゼクタ

表-6 各種材料とスクリュコンベヤの諸係数¹²⁾

材 料	φ	F	材 料	φ	F
粉末 アルミニウム	0.45	1.2	粉 状 石 灰	0.30	1.2
粒 状 炭	0.30	3.2	乾 燥 塩	0.30	2.4
微 粉 炭	0.45	1.2	珪 砂 (乾)	0.15	4.0
ポルトランドセメント	0.30	1.2	乾 燥 砂	0.30	4.0
小 麦	0.45	0.8	ソ ー ダ 灰 (重)	0.30	1.4
小 麦 粉	0.45	1.2	ソ ー ダ 灰 (軽)	0.45	1.4
粉 状 墨 鉛	0.45	0.8			

3.2 機械的輸送方式

a. スクリュコンベヤ^{11,12)}

スクリュフィーダの供給距離が長くなったものであり、既述の長所の外に、1本のスクリュの前後のねじの向きを反対にすることにより、中央部に供給された粉粒体を前後反対方向に分配輸送することができる長所がある。このコンベヤは輸送距離と輸送量がありすぎない場合に適する。一般に水平輸送に用いられるが、必要があれば輸送量を減じて上向きの傾斜輸送に用いることもできる。たとえば 10°, 30°, 40° の傾斜があれば輸送量をそれぞれ 90%, 30%, 10% に落して使用する。輸送量 G (t/hr) は次式から求められる。

$$G = \frac{\varphi D^2 l N \rho}{25,000}$$

ここで φ は粉粒体の送入率 (スクリュ断面中の粉粒体層の占める割合、普通は 0.1~0.45), D はスクリュ径 (cm), l はピッチ (cm), N はスクリュの回転数 (rpm), ρ は粉粒体のかさ比重である。また、この時の所要動力 P (PS) は次式から求まる。

$$P = [L(dw f_b N + GF) + GH] / 270$$

ここで L は輸送距離 (m), d は軸受部分の軸径 (m), w は単位長さ当たりのスクリュの重量 (t/m), f_b は軸受の種類によって決まる係数 (0.002~0.007), F は粉粒体により決まる係数 (表-6), H は傾斜輸送の場合の上昇高さ (m) である。

b. ベルトコンベヤ^{10,11)}

ベルトフィーダの供給距離が長くなったものであり、既述の長所のほかに、所要動力が他の輸送装置に比べて最も少なく、また、トリッパやスクレパを用いて輸送途中から粉粒体を取り出すこともできる。しかし、設備費が比較的大きく、特に雨、風をさへぎるためのカバー、支持するための架台の製作、設置に経費を要する。このコンベヤは水平、上向き、あるいは下向き傾斜輸送を任意に組合わせることができる。ベルト幅の約 80% をたい積粉粒体の幅と仮定すれば、輸送量 G (t/hr) は次式か

図-10 フローコンベヤの腕 (U型)

ら求められる。

$$\text{平形ベルト} : G = 150 b^2 \gamma v$$

$$\text{とい型ベルト} : G = 300 b^2 \gamma v$$

ここで b はベルトの幅 (m) (とい型の場合には水平投影幅), γ は粉粒体のかさ比重 (t/m³), v はベルトの速度 (m/sec) である。

c. フローコンベヤ¹⁰⁾

四角な断面のケーシング内で、エンドレスチェーンに適切な腕 (図-10) をつけたものを走らせ、粉粒体相互間の摩擦を利用して連続的に輸送する装置であり、次のような長所がある。

- (1) 水平だけでなく、垂直や傾斜輸送もできる。
- (2) 付着性のあるもの以外、ほとんどの粉粒体に対して用いることができる。
- (3) 輸送が確実で摩擦以外はほとんど事故がない。
材質と輸送速度を適切に選定すれば摩擦も問題にならない程度に低減することができる。
- (4) 密閉構造であるから粉粒体の飛散、異物の混入、雨水の漏れがない。
- (5) 本体は箱型断面であるから、曲げ剛性、ねじり剛性が大きく、地上や架台上に設置するため支持脚は簡単なものでよい。
- (6) ホッパ下または他の大容量の供給器の下に直結して輸送しても、ケースの断面積以上には輸送しないので、連続して定量的に輸送を続けることができる。
- (7) 輸送途中から粉粒体の追加投入、あるいは排出を行なうことができる。
- (8) 構造が簡単で運転保守が容易であり、チェーン

車軸受への給油以外はほとんど手数を要しない。

(9) 粉粒体粒子の破砕が比較的少ない。

しかし、次のような短所がある。

(1) ケース内に輸送物が多少残留する。

(2) 吸湿性の著しいもので腐敗性のあるものには不向きである。

輸送量 G (t/hr) は次式から求められる。

$$G=60 \eta A v r$$

ここで A はケースの断面積 (m^2)、 v はチェーン速度 (m/min)、 r は粉粒体のかさ比重量 (t/m^3)、 η は容積効率であり、穀類などの粒体の水平輸送では $0.8 \sim 0.9$ 、一般の粉粒体の傾斜あるいは垂直輸送では $0.5 \sim 0.7$ である。

d. バケットエレベータ^{10,11)} (図-11)

一条または二条のエンドレスチェーンまたはベルトに多数のバケットを取付け、本体ケース内に収容したもので、粉粒体や塊状の物質を垂直あるいは急な傾斜方向に輸送する装置であり、次のような長所である。

(1) 粘着性のあるもの以外は、ほとんどすべての粉粒体や塊状のものを連続的に輸送できる。

(2) 本体が密閉構造なので、輸送物質の飛散、外部からの異物の混入や雨水の浸入などが無い。

(3) 稼動中の騒音がほとんどない。

(4) 運転や保守管理が簡単である。

(5) すえ付面積が少ない。

(6) 所要動力が比較的少ない。

輸送量 G (t/hr) は次式から求められる。

$$G=3.6 \varphi (c/a) r v$$

ここで c はバケット容量 (l)、 a はバケットの間隔 (m)、 r は粉粒体のかさ比重量 (t/m^3)、 v はエレベータ速度 (m/sec)、 φ は粉粒体の装入率であり、大塊のものでは $0.4 \sim 0.5$ 、小塊のものでは $0.6 \sim 0.7$ 、穀物や粉体では $0.8 \sim 1.0$ である。また、所要動力 P (PS) は次式から求

図-11 バケットエレベータ

められる。

$$P=GH/270 \eta$$

ここで H は輸送の高さ (m)、 η は全効率であり、連続バケットでは 0.55 、その他のバケットでは 0.5 である。

3.3 流体力輸送方式

a. 空気輸送^{4,10,11,13,14)}

粉粒体を管内の空気流に浮遊させて輸送する方式で、吸引式 (図-12) と圧送式 (図-13) があり、次の四つの機器から成っている。

(i) 混入機

粉粒体を輸送管内に供給して、気体と混合、浮遊させる機器であり、輸送の始点に設けられる。吸引式の場合は低圧の輸送管へ空気と共に粉粒体を吸込ませるだけで

図-12 空気輸送 (吸引式)

図-13 空気輸送 (圧送式)

図-14 吸込ノズル (二重円筒型)

あるから機構的には簡単であり、一般に吸込ノズル (図-14) が用いられる。圧送式の場合は高压の輸送管内へ粉粒体を供給せねばならず、その際に空気が管外に漏れ出たり、空気圧のために粉粒体が逆流や閉そくしないような供給装置を用いる必要がある。(表-3, 4 参照)

(ii) 輸送管

空気と共に粉粒体を輸送する管路であり、輸送の主要部分である。一般にガス管を使用し、水平輸送の場合は管径が大きくなるほど粉粒体が浮揚しにくく脈動流になりやすいので、管径6インチ位が上限となる。また、水平直管部を余り長く作らないことと、水平から垂直への直角ベンドをなるべく避けることが必要である。管の摩擦がはなはだしくなるような粉粒体を輸送する場合は、特に曲管部には特殊鋳物などが使用される。

(iii) 分離器

空気流から粉粒体を分離する機器であり、輸送の終点に設けられ、一般にサイクロンを使用する。この1次サイクロンで捕集できなかった微粒子を2次サイクロン、フィルタなどによって捕集し排気を清浄にする。

(iv) 空気源

空気圧縮機類と真空ポンプ類とを含めたものである。圧送式にはターボ型が多く使用されるが、高压用には往復型圧縮機を用いる。吸引式の真空ポンプとしてはターボ型、往復型、ルーツ型などが使用される。

空気輸送は次のような長所がある。

- (1) 輸送物の包装、解袋が不要で作業能率が大きく、経費が節減される。
- (2) 運転要員は輸送量にかかわらず少人数で済み、全自動無人運転も行なうことができる。
- (3) 設備が簡単ですべ付面積が小さく、設備費、修理費が少ない。
- (4) 輸送経路を比較的任意にとることができ、工場の設備配置を合理化することができる。
- (5) 他の機械的輸送方式では経路の条件で設置、輸送できない場所でも輸送できる。
- (6) 天候や管路周辺の条件に無関係に輸送することができ、生産工程の計画が立てやすい。
- (7) 輸送物の吸湿、汚損、異物の混入を避けることができ、品質の保持と衛生上好ましい。
- (8) 比較的定量的に輸送することができ、生産管理上便宜である。
- (9) 輸送中あるいは輸送の終端で混合、分級、乾燥、加熱、冷却などの操作もあわせ行なうことができる。
- (10) 長い距離の集約あるいは分散輸送が可能であ

る。

- (11) 輸送の経路には輸送管を設置するだけでよく、水平、垂直傾斜を任意に行なうことができる。
- (12) 化学的に不安定な粉粒体も特殊なガスを用いて安全に輸送することができる。
- (13) 低压あるいは高压の容器内へも供給、輸送することができる。

しかし、次のような短所がある。

- (1) 所要動力が大きい。
- (2) 粉粒体の大きさが約50 mm以下に制限される。
- (3) 粘着性のあるものには不向きである。
- (4) 帯電性の粉体の場合には爆発の危険がある。

また、吸引式の長所は

- (1) 数箇所から1箇所へ集約輸送する場合に適する。
- (2) 広い場所に山積、あるいは低い所や深い所にある粉粒体を輸送する場合に適する。
- (3) 貯蔵タンク、ホッパーの下が狭く、圧送式では供給機が設置できない場合も容易に輸送することができる。
- (4) 輸送の始点で粉粒体の飛散を避けたい場合に適する。
- (5) 輸送の始点でその上部のタンク、ホッパーへの空気の漏れを避けたい場合に適する。
- (6) 粉粒体の投入口は開放のままでもよく、連続的に追加投入して輸送を続けることができる。
- (7) タンク、ホッパーから落下しにくい粉粒体でも圧送式に比べて円滑に供給し輸送を続けることができる。
- (8) 供給機の構造が圧送式の場合よりも簡単になる。
- (9) 粉粒体中に空気源機械の油分やドレンが混入することがない。
- (10) 輸送経路、装置内は大気圧以下になるため、装置に間隙があっても粉粒体や輸送空気が外部へ漏れることがない。
- (11) 粉粒体は大気圧以下の空気流によって扱われるため水分が蒸発しやすい。このため水分の多い粉粒体も圧送式に比べて輸送しやすい。

また、圧送式の長所は

- (1) 1箇所から数箇所へ分散輸送する場合に適する。
- (2) 大容量の粉粒体を長距離輸送する場合に適する。
- (3) 輸送空気の圧力上昇は空気源機械の最高吐出圧

力まで許すことができるので、輸送条件が多少変動してもある程度の順応性を持っている。

- (4) 大気圧以上の圧力を持つ容器内へも輸送することができる。
- (5) 機器、輸送管内は大気圧以上になるで、機器の接続部に間隙があっても外気や雨水が浸入することがない。
- (6) 分離捕集器の構造が簡単である。

粉粒体を球状粒子と仮定し、その抵抗係数を C_D 、比重量を $\gamma_s(\text{kg/m}^3)$ 、粒子径を $d(\text{m})$ 、重力の加速度を $g(\text{m/sec}^2)$ 、空気の比重量を $\gamma_a(\text{kg/m}^3)$ とすれば、空気中における粒子の浮遊速度 $v_t(\text{m/sec})$ は次式から求まる。

$$v_t = \left(\frac{4}{3} \frac{g d}{C_D} \frac{\gamma_s - \gamma_a}{\gamma_a} \right)^{1/2}$$

C_D は $R_e = v_t d / \nu$ によって変わる。ここで ν は空気の動粘性係数 (m^2/sec) である。

- (1) $R_e < 1$: 微細な粒子 (一般に $100 \mu\text{m}$ 以下) の場合であり、Stokes の抵抗法則が適用される。

$$v_t = \frac{(\gamma_s - \gamma_a)}{18\mu} d^2$$

ここで μ は空気の粘性係数 ($\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$) である。

- (2) $1 < R_e < 500$: 中間の大きさの粒子の場合であり、Allen の抵抗法則が適用される。

$$v_t = \left(\frac{2}{15} \frac{g}{\nu^{1/2}} \frac{\gamma_s - \gamma_a}{\gamma_a} \right)^{2/3} d$$

- (3) $500 < R_e$: 大きい粒子 (1 mm 以上程度) の場合であり、Newton の抵抗法則が適用される。

$$v_t = \left(\frac{g}{0.33} \frac{\gamma_s - \gamma_a}{\gamma_a} d \right)^{1/2}$$

空気輸送の際は、粉粒体の破損や輸送管の摩耗の防止、エネルギー節約などの観点から、できるだけ低速高濃度で輸送する方が有利である。垂直管の場合には v_t よりも大きな空気速度 $v_a(\text{m/sec})$ により輸送が可能であるが、水平管の場合にはあまり低速にすると粉粒体が沈積し始め、脈動流となり、空気源の余裕がないときは輸送管が閉そくする危険が生ずる。そのため v_a は v_t の数倍以上も必要になる物質もある (表-7参照)。

粉粒体の輸送量を $G(\text{kg/sec})$ 、輸送管の内径を $D(\text{m})$ 、輸送に必要な空気量を $Q(\text{m}^3/\text{sec})$ とすれば、

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 v_a$$

表-7 空気輸送に使われる粉粒体の性質¹³⁾

名 称	平均粒径 (mm)	真 比 重	か さ 比 重	浮 遊 速 度 $v_t(\text{m/sec})$	空 気 速 度 $v_a(\text{m/sec})$
小 麦	長径 5~8	1.3~1.4	0.66~0.83	9.8	18~30
大 麦		1.30~1.35	0.55~0.65	8.7	
麦 芽			0.5	8.1	21
玄 米	長径 5~6.9	1.12~1.22	0.56	7.7~9.0	15~25
ヒ エ	2.1	1.33	0.52	8.2	12~30
大 豆	長径 3.5~10	1.18~1.22	0.52~0.75	10.0	18~30
落 花 生			0.3~0.4	12.5~15.0	15
とうもろこし		0.7~0.75	0.7~0.75	8.9~9.5	30
菜 種	1.53	1.22	0.73	8.2	
綿 実		1.06	0.60	9.5	
砂	35~150 mesh	2.6	1.41	0.4~1.8	20~45
褐 炭 (粒)			0.75	8.7	20~30
褐 炭 (小塊)		1.16~1.34	0.62~0.80	10.6~11.0	18~40
セ メ ン ト	0.018 以下	3.10~3.15	1.4~1.5		
硝 石 灰	65 mesh	2.0	0.4~0.5		30
塩 化 ビ ニ ル	150 mesh 以上	1.3~2.5	0.63	0.48~	
ベ レ ッ ト	0.8	0.91	0.66	3.2	22~35
"	3.6	"	0.57	8.6	"
硫安 $(\text{HN}_4)_2\text{SO}_4$	20~60 mesh	1.77	1.0		25
石灰窒素 CaCN_2		2.0	1.12		20~30
閃 亜 鉛 鉱		4.3	2.28	17.7	
ア ル ミ 粉	100~150 mesh			0.8	
フライアッシュ	10~30 μ	2.0~2.2	1.0~1.6	0.01~0.10	20~25

混合比 m は次のようは定義される。

$$m = \frac{G}{Q\gamma_a}$$

空気輸送に必要なエネルギーは空気源から供給され、輸送管を始め各部において圧力損失(圧損)として消耗される。全圧損 ΔP (kg/m²) は混入機部の圧損 ΔP_N (kg/m²)、輸送管の圧損 ΔP_T (kg/m²)、分離器の圧損 ΔP_E (kg/m²) などから成っている。

$$\Delta P = \Delta P_N + \Delta P_T + \Delta P_E$$

(1) ΔP_N : 混入機として吸込ノズルを用いたときは

$$\Delta P_N \cong (1 + \zeta_N + \varphi_1 m) \frac{\gamma_a v_a^2}{2g}$$

から求められる。ここで $\varphi_1 = 0.2 \sim 0.3$ 空気の流入損失 $\zeta_N \cong 9$ である。

(2) ΔP_T : これは空気のみによる圧損 ΔP_a (kg/m²) と粉粒体による圧損 ΔP_s (kg/m²) とから成ると考えられ、更に ΔP_s 粉粒体を加速するための圧損 ΔP_{sc} (kg/m²)、定速直管部の圧損 ΔP_{sf} (kg/m²)、曲管部の圧損 ΔP_{sb} (kg/m²) などからなると考えられる。

$$\Delta P_s = \Delta P_{sc} + \Delta P_{sf} + \Delta P_{sb}$$

混入機として吸込ノズルを用いたときの ΔP_{sc} は前述の ΔP_N に含まれる。圧送式の場合には、

$$\Delta P_{sc} = \varphi_2 m \frac{\gamma_a v_a^2}{2g}$$

から求められる。ここで $\varphi_2 \cong 0.8$ である。

圧送式の場合は圧縮機の出口で空気に既に加速されており、吸引式で吸込ノズルを用いる場合は空気を加速するための圧損は前述の ΔP_N に含まれる。従って ΔP_a は定速直管部の圧損 ΔP_{af} (kg/m²)、曲管部の圧損 ΔP_{ab} (kg/m²) などからなると考えられる。

$$\Delta P_a = \Delta P_{af} + \Delta P_{ab}$$

ΔP_{af} , ΔP_{sf} は Fanning の式にならい次のようにおく。

$$\Delta P_{af} = \lambda_a \frac{L}{D} \frac{\gamma_a}{2g} v_a^2$$

$$\Delta P_{sf} = \lambda_s \frac{L}{D} \frac{\gamma_a}{2g} v_a^2$$

圧力損失比 α は、

$$\alpha = \frac{\Delta P_{af} + \Delta P_{sf}}{\Delta P_{af}} = \frac{\lambda_a + \lambda_s}{\lambda_a} = \frac{\lambda}{\lambda_a}$$

となる。ここで L は直管の長さ(m)、 λ_a は空気だけが流れる場合の管摩擦係数、 λ_s は粉粒体を輸送することによる管摩擦係数の増加、 $\lambda(=\lambda_a + \lambda_s)$ は粉粒体を輸送中の管摩擦係数である。 λ または α の値は粉粒体の物理的性質、輸送管の種類や内径、空気速度などによって異なり、実験的に求まるものである。 m と α との関係を求め

るための実験的研究は Gasterstädt¹⁵⁾ 以来行なわれ、 m の増加に従って α は増加すると発表されて来た。しかし、その後 Rossetti¹⁶⁾, Boothroyd¹⁷⁾ などが α が1以下になった結果を発表し、樺田¹⁸⁾は α は最初は増加し極大値を過ぎてから一旦減少して、その後再び増加する結果を得た。このように m と α との関係は単純なものでないことを十分注意する必要がある。しかし、 α の値が実験的に求まっていれば、 ΔP_{af} は Fanning の式から求まるので、 $\Delta P_{af} + \Delta P_{sf}$ は $\alpha \Delta P_{af}$ から計算される。

ΔP_{ab} , ΔP_{sb} は次のようにおく、

$$\Delta P_{ab} = \zeta_b \frac{\gamma_a v_a^2}{2g}$$

$$\Delta P_{sb} = \zeta_s \frac{\gamma_a v_a^2}{2g}$$

ここで、 ζ_b は空気だけが流れる場合の曲管部の損失係数、 ζ_s は粉粒体による損失係数の増加であり表-8から求められる。また、曲管にゴムホースも使用される¹⁹⁾。

(3) ΔP_E : これはサイクロンおよびバックフィルタなどの圧力損失であり、輸送量や輸送距離に関係なく大体 100~200 kg/m² 位である。

輸送のために必要な空気量 Q と全圧力損失 ΔP が決まれば、空気源の所要動力 P (RS)は、

$$P = \frac{Q \cdot \Delta P}{75 \eta}$$

η は空気源の総効率で 0.5~0.7 程度である。実際上は Q , ΔP に近似で、それよりも大きい値をもつ標準仕様の空気源をカタログから選定すればよい。

また、配管上は次の点に注意すべきである。

- (1) 輸送管の圧力損失を少なくし、動力を節約するため管内はできるだけ滑らかにし、最短距離の配管を行なうこと。また、ベンドの数はできるだけ減らし、適性な曲率半径をもたせること。
- (2) 高混合比の場合や硬い粉粒体を輸送するとき、特に摩擦を考慮し、管の厚さは十分にとり、摩擦のはなはだしい場所はその一部分または全体

表-8 付加損失係数 ζ_s の比較 ($m=1 \sim 5$)¹⁰⁾

ベドンの配置	R/D	ζ_s/m
水 平 面 内	5.8~10	0.83
水平から垂直上向	5.6	1.36
	8.3	1.0
	9.3	0.80
垂直上向から水平	6.0~9.8	0.70

R は曲率半径

図-15

を容易に交換できる構造にしておくこと。

- (3) 錆の混入を避けたい粉粒体の場合には、ステンレス、アルミニウム、塩化ビニールパイプなどを用いる。またゴム管や塩化ビニールパイプを使用する際は、静電気に対する防止策や安全策をとること。
- (4) 輸送管の支持はその自重と輸送物充満時の全重量に耐え、さらに配管施工上交換のできないような箇所は摩耗損傷による欠損まで考慮して十分強固なものを用いる。また地中埋設管は避けるべきである。

b. エアスライド^{10~12)} (図-15)

粉粒体に空気を吹込むと流動化して安息角が小さくなり、非常に流れやすくなる。この現象を利用して、3°~7°程度に傾斜したトラフを多孔質板で上下に仕切り、この中を流動化した粉粒体を重力によって流下させるものであり、次のような長所がある。

- (1) 可動部分がなく、運転、取扱いが容易である。
- (2) 所要空気動力がきわめて少ない。
- (3) 設備が簡単で、大容量の粉粒体も容易に輸送することができる。セメントの場合は300t/hrの輸送量で120m程度の距離まで輸送できる。
- (4) 閉そくの恐れが全くない。たとえ内部が粉粒体で充満されても出口から徐々に排出され、事故を招くことはない。
- (5) 流動化用の空気によって粉粒体の加熱、冷却などを同時に行なうことができる。

しかし、短所は

- (1) 粒子径が大きくて流動化しにくいものには適さ

ない。

- (2) 水分の多い粉粒体は付着性が大きく適さない。
- (3) 吸湿性の著しいもの、潮解あるいは空気中で化学変化しやすいものは適さない。

トラフを流下する粉粒体層の平均速度 v (cm/sec) は次のようになる。

$$v = kh\rho_b \sin \alpha$$

ここで h は層の厚さ (cm), ρ_b は粉粒体層のかさ密度 (g/cm^3), α は傾斜角 ($^\circ$), k は粉粒体の流れやすさを表す係数 ($cm^3/g \text{ sec}$) で実験的に求まる値である。

標準的な寸法は表-9 のようである。

c. 水力輸送^{20~23)}

粉粒体を管内の水と混合させて輸送するものであり、輸送媒体である水の比重量が空気の800倍もあるために粉粒体の浮遊が容易で、空気輸送に比べて管内流速を小さくとることができ、管の摩耗や輸送物の損傷も少なく、粉じんや騒音の発生がないなどの長所がある。

粉粒体の粒度により混相液を分類すると次のようになる。

(1) 構造流体：粒子径が $50 \mu m$ 以下のもので、静的に安定した懸濁液であり、静止させても粒子はほとんど沈降しない。ビンガム流体とみなすことができ、粘性の影響が大きい。

(2) 細分散懸濁液：粒子径が $50 \mu m$ から $100 \sim 150 \mu m$ までのもので、混相液が運動している場合のみ均一に分散した状態になるが、静止させると粒子は沈降する。

(3) 粗分散懸濁液：粒子径が $100 \sim 150 \mu m$ から $1.5 \sim 2 mm$ までのもので、これも混相液が運動している場合のみ粒子は懸濁されるが、動的に不安定であり、濃度分布はかなり不均一になる。

(4) 非均質分散系混相液：粒子径が $1.5 \sim 2 mm$ 以上のもので、流れの垂直面での濃度は著しい不均一性を示す。

水力輸送は水力採炭と鉱内排水の組合せによる石炭の

表-9 エアスライド標準値¹⁰⁾

A (mm)	B (mm)	C (mm)	容量 (m^3/hr)	
100	100	50	8.5	
150	100	50	17	
200	150	75	28	
250	150	75	56	
300	200	75	85	
350	250	75	114	
400	250	75	288	

輸送, 土木工事における泥しょうの輸送などに使用される。水と混合すると変質するもの, 輸送後脱水が困難なときや脱水に費用がかかり過ぎるときなどは使用されないで, 輸送対象の制限が大きい。泥しょうポンプを用いるときは, 粉粒体の大きさによりポンプの称呼が次のように区分される。

(1) 泥しょうポンプ, スラリポンプ 0.3 mm 以下の粒子

(2) サンドポンプ 0.3~6 mm の粒子

(3) ドレージポンプ 6 mm 以上の粒子

ポンプで輸送する場合に, 吸込側は押込みの状態にするような注意が必要である。吸上げの状態にするとキャビテーションが発生しやすい状態となり羽根車吸込口付近の損傷ははげしくなる。また, 空気を吸込むとポンプの性能が低下し, 振動を伴った不安定な運転になる。粉粒体の輸送量を $G(t/hr)$ とすれば, 必要な水の流量 $Q(m^3/min)$ は次式から求まる。

$$Q = \frac{1-c}{60\rho c} G$$

ここで ρ は粉粒体の真比重, c は粉粒体の体積濃度 (2 mm 以上の粒子が大部分の場合は 0.2 とする)。

4. お わ り に

粉粒体の供給と輸送は密接な関係があり, 供給距離の長くなったのが輸送であるとも考えられる。すなわち, 表-2 の 10~36 は輸送装置にもなり得るものである。故にその中のバケットエレベータ, エアスライドは輸送の章で述べた。供給と輸送に関する文献は沢山あり, 立派な単行本も発行されているので, 詳しいことについては, それを読んでいただきたい。

引用文献

- 1) 狩野 武: 粉体工学会誌, 15, 424 (1978)
- 2) 横山藤平: 別冊化学工業, 12, No. 4, 67 (1968)
- 3) 青木隆一: 化学工学, 26, 530 (1962)
- 4) 井伊谷鋼一編集: “粉体工学ハンドブック”, 朝倉書店 (1965)
- 5) 粉粒体供給装置委員会編: “粉粒体の貯槽と供給装置”, 日刊工業新聞社 (1963)
- 6) 狩野 武: 別冊化学工業, 12, No. 4, 101 (1968)
- 7) 林 彬: *ibid*, 94
- 8) 化学工学協会編: “粉体装置工学”, 日刊工業新聞社 (1971)
- 9) 西岡富士夫: 化学工学, 26, 546 (1962)
- 10) 狩野 武: “粉粒体輸送装置”, 日刊工業新聞社 (1969)
- 11) 化学工学協会編: “化学工学便覧 (改訂三版)”, 丸善株式会社 (1968)
- 12) 森 芳郎, 吉田文武編集: “詳論化学工学 (単位操作 I)”, 朝倉書店 (1962)
- 13) 上滝具貞: “粉粒体の空気輸送 (新版)”, 日刊工業新聞社 (1974)
- 14) 刀根英明: 別冊化学工業, 12, No. 3, 38 (1968)
- 15) Gasterstädt, J.: Forschungs-Arb. Ing.-Wesen, Nr 625 (1924)
- 16) Rossetti, S. J. and R. Pfeffer: *A. I. Ch. E. Journal*, 18, 31 (1972)
- 17) Boothroyd, R. G.: *Trans. Instn. chem. Engrs.*, 44, 306 (1966)
- 18) 櫛田 昭, 内海良治: 粉体工学会誌, 12, 573 (1975)
- 19) 櫛田 昭, 内海良治, 上田 康: 名古屋工業技術試験所報告, 15, 291 (1966)
- 20) 葛原定郎: 化学工学, 37, 657 (1973)
- 21) 坂本正克: *ibid*, 30, 200 (1966)
- 22) 坂本正克: 別冊化学工業, 12, No. 3, 117 (1968)
- 23) 田口早苗: *ibid*, 124

共 催 関 係

油化学講演会

—油化学工業におけるエネルギー問題—

主催 日本油化学協会

共催 色材協会, 他7学協会

日 時 昭和54年11月6日 (火) 13.30~17.00

会 場 日本化学会 4階講堂 (東京都千代田区神田駿河台 1-5 電話 03-295-4079 講堂直通)
国電, 地下鉄丸の内線バスーお茶の水下車徒歩 5 分

演題と講師

(13.30-15.00) プロセス産業におけるシステムマッ

クアプローチの効用

(株)コスミック 長野栄二氏

(15.10-16.40) 油化学工業における省エネルギー (花王石鹼の事例)

花王石鹼(株) 木内学氏

参加費 (要旨集付) (会費は当日会場受付でお支払下さい。)

本会個人会員および共催学協会個人会員 500円
非会員 1,000円

ただし, 学生会員は, それぞれ半額