総 説

粉粒体輸送装置計画上の要諦

狩 野 武*
Takeshi Kano

1. ま え が き

日常生活あるいは生産工業で扱っている物資には、原料から製品の状態にいたるまでのいずれかの段階で、粉粒体の形をとるものが多い。その理由はそれぞれの場合によって異なるが、粉粒体には流体や固体には見られないいくつかの独特の性質があって、それらが取扱いは加工に都合が良いためといえる。

そのため、いろいろな物資の極微量から大容量までが粉粒体の状態で扱われていて、それらの総計はばく大な量にのぼる。これを社会活動という観点から見ると、粉粒体の輸送にばく大なエネルギーを費していることになる。このような事情の下で、生活活動合理化の一環として、また省エネルギーの見地からも粉粒体輸送技術の改善の方途が模索されている。

本文ではこのような観点から粉粒体輸送装置の計画にあたって、与えられた条件に対して適切とする方式の選定要領と、特に空気輸送装置の所要動力低減の方法と注意事項について概説する。ご参考になるところがあれば幸いである。

2. おもな粉粒体の年間生産量と国内輸送¹⁾

粉粒輸送についての論議を進めるに先だって、まず工業規模で扱われているおもな粉粒体の種類と年間生産量を調べてみると表1のとおりである。これらには国産品と輸入品、原料、中間製品、あるいは最終製品といろいろな段階のものがあるが、合計約1億6千万トンで、国民1人当たり1年間に約1.5トンの粉粒体を消費していることになる。

これらの粉粒体を原料から最終需要の地点まで何らかの方法で輸送しているのであるが、表には省いてある物資や二次、三次製品を勘定に入れると、ばく大な量に達することが考えられる。

おもな粉粒体について、国内輸送にとられている方法を調べてみると図1のとおりで、トラックによる割合がいきわめて多い。

また参考までに一般貨物の輸送量を調べてみると図2のとおりで、1975年度では年間約50億トンに達し、その約85%はトラックによって輸送している。ところが(輸送量)×(距離)で表わした輸送規模の推移は図3のとおりで、1975年では船で約51%、トラックで約36%になっている。これらのことは、比較的小規模の輸送にはトラックが簡便で利用しやすく、大規模の輸送には周囲が海であることを利用して船によったほうが都合がよいことを示している。これは図4に示すように、トラックは1トン1km当たりのエネルギー消費率が大きいことからもうなずかれる。しかし中小規模の輸送の大部分をその簡便さのためにトラックに依存し年間巨額に達していることは、石油のほとんどを輸入に仰ぎ、しかも道路事情がひっ迫しているわが国での輸送のあり方の一つの問題点と考えられる。

図1 おもな粉粒体の国内輸送方法 (1975)

(単位 100万トン, () 内は%)

昭和53年5月4日受理

* 静岡大学工学部化学工学科 (〒432 浜松市城北3-5-1)

TEL 0534-71-1171

表 1 おもな粉粒体の年間生産量 (1975年)

品 目			単位 1,000トン	
飼料・食料	米	(国産99.8%)	13,194	47,968
	小麦	(4.0)	5,956	
	大豆	(3.6)	3,460	
	とうもろこし	(0.1)	7,481	
	砂糖	(15.8)	2,937	
	塩	(14.3)	7,470	
肥料	窒素系	尿素	2,983	11,755
		硫酸安	1,920	
		塩安	733	
		石灰窒素	186	
	りん系	硝安	12	
		りん酸石灰	564	
	複合	溶成りん肥	476	
		化成肥料	4,247	
業	鉱	配合肥料	634	
		けい石	8,767	20,739
		ドロマイト	4,330	
		けい砂	3,918	
		耐火粘土	619	
		砂鉄	177	
りん鉱石	2,928			

品 目			単位 1,000トン	
よう業	セメント	65,517	69,396	
	アルミナ	2,569		
	ソーダ灰	1,123		
	石こう	187		
顔料	カーボンブラック	370	794	
	酸化チタン	127		
	そ の 他	297		
合成樹脂	熱硬化性	ユリア	486	5,167
		フェノール	196	
		そ の 他	469	
	熱可塑性	ポリエチレン	1,295	
		塩ビ	1,125	
		ポリスチレン	690	
		ポリプロピレン	594	
		そ の 他	312	
石油系繊維	ポリエステル	535	1,246	
	アクリル	310		
	ナイロン	300		
	ビニロン	40		
	ポリプロピレン	35		
	そ の 他	26		
合 計			157,065	

(注) 石灰石 143,857×10³トン、石炭 80,936×10³トンなどの鉱業品は除く。

3. 粉粒体輸送装置の種類と特徴

粉粒体輸送装置にはいろいろな種類があるが、工業規模で用いられている代表的なものをあげると表2のとおりである。これらの各機種にはそれぞれいろいろな形式と容量のものがあ、一概にそれらの特徴をあげにくい、表には選択上の目安として一般的な比較値と参考事項をあわせ記入してある。

これらの粉粒体輸送装置にはそれぞれの特徴に対応して、適切とする用途と使用規模とがある。国内実例のうち仕様値が明りょうなものについて、機種別に相当輸送距離[m]と輸送量[t/h]の関係を図5²⁾に示す。また相当輸送距離と輸送量の積[m・t/h]で表わした輸送規模と、単位輸送規模当たりの所要動力率[kW/(m・t/h)]との関係は図6³⁾のとおりである。

ここで相当輸送距離 L_{eq} は、各機種についての比較を見るために、いずれも次式から計算した。

$$L_{eq} = L_h + ch + nND \quad [m] \quad \cdots (3.1)$$

ただし、 L_h ：水平輸送距離[m]、 L_v ：鉛直輸送距離[m]、 c ：鉛直水平換算係数、 n ：ベンドの箇數、 N ：ベンド水平換算係数、 D ：輸送管の内径[m]であり、今回の計算では $c=1.5$ 、 $n=3$ 、 $N=100$ とし、空気輸送以外の機種では $n=0$ としている。

ベルトコンベアは構造が簡単で保守運転が容易であり、しかも所要動力が小さい長所を持っていて、大容量、長距離の輸送にも数多く用いられている。

チェンコンベア、バケットエレベータは信頼性が高く保守運転が容易な装置であるが、構造的な制約があって比較的中小容量の規模で多く用いられている。

これらに対して空気輸送装置は大規模から小規模にいたるまで広い範囲にわたって用いられているが、他の機種に比べて所要動力率が大きく、約10倍前後の値を示している。

なおいずれの機種についても、輸送規模が大きいほど

図 2 日本の輸送機関別輸送量
() 内は%を示す。

図 3 日本の機関別輸送規模
() 内は%を示す。

表 2 粉粒体輸送装置のおもな種類と特徴

方式	種類	適用範囲				経路の選択				トラブル	補修箇所	所要動力
		距離 [m]	輸送量 [t/h]	最大 粒子径 [mm]	最高 温度 [°C]	水平	鉛直	曲り	分岐			
連続式	固定式											
	スクリュコンベア	0.5 ~ 10	2 ~ 300	30	300	○	△	×	×	B C C	全面的	中
	振動・揺動コンベア	2 ~ 15	0.4 ~ 200	30	*	○	△	△	△	A B A	全面的	大
	循環式											
	ベルトコンベア	5 ~ 2,000	5 ~ 6,000	—	*	○	×	×	△	C A A	ローラ, 軸受	小
バッチ式	チェンコンベア	2 ~ 200	1 ~ 300	50	300	○	○	○	×	A C B	チェーン軸受	中
	バケットコンベア	10 ~ 60	1 ~ 600	100	80	×	○	×	×	A C B	チェーン軸受	小
	管路式											
	空気輸送	20 ~ 1,000	0.5 ~ 500	30	600	○	○	○	○	C C C	ベンド, 弁	大
	エヤースライド	1 ~ 200	5 ~ 300	1	80	下り4 ~ 10°	○	○	○	C C B	ダンパ	小
バッチ式	水力輸送	50 ~ 10,000	10 ~ 200	30	80	○	○	○	○	C C C	ベンド, 弁	大
	専用貨車	大	10 ~ 30	—	80	○	×	○	×	C ~ ~	~	小
	タンクローリ	大	5 ~ 15	30	80	○	×	○	×	C C C	バックリン, 弁	小
	コンテナ	大	1 ~ 3	50	80	○	○	○	×	B A A	出入口	小
	船	特大	~10万トン	—	80	○	×	○	×	B B B	—	小

- (注) (1) * 印: ゴムを用いるものは80°C, 鋼類を用いるものは300°C。(5) 特別設計のものは除外する。
 (2) ~印: 構造によっていちじるしく異なる。(6) ○, △, ×は適するもの順を表わす。
 (3) 所要動力は単位輸送量についての比較を示す。(7) A, B, Cは多いもの順を表わす。
 (4) バッチ式は1基当たりの数値を示す。

図4 物資輸送機関のエネルギー消費率 () 内は国鉄を1とした場合の比率を示す。

図5 各種粉粒体輸送装置の使用実績範囲

図6 各種粉粒体輸送装置の輸送規模と所要動力率との関係

下で運転している特別設計のものもあるので、一概に優劣を論ずることはできないが、各機種の特徴順位をあげると表3のとおりである。

4. 空気輸送装置所要動力の検討

空気輸送装置はその空気流の圧力が負圧か正圧かによって吸引式と圧送式に大別でき、後者には空気源機械の形式によって低圧式と高圧式とがある。それぞれ独得の長所とそれを発揮することができる適用分野を持っている。そこでまず各機種が用いられている輸送規模と、所要動力率の実績値を調べてみると図7のとおりになる。いずれの機種についても輸送規模が大きいほど所要動力は小さい傾向を示し、機種の違いによる差異はほとんど認められない。

空気輸送装置がいろいろな方面に用いられているのは、他の機種は適用できないむずかしい条件下でも輸送できる場合が多いことにもよると考えてよい。しかし所要動力が大きいことは設備としては不利なことで、その低減にいろいろと研究・努力がつけられてきた。その間、設計・計画法が格段に進歩し、いろいろな新製品が開拓されてきたが、他の機種に比べてなお依然として一般的に所要動力が大きいことは否定できない。

そこで次に所要動力低減の方策について検討⁹⁾してみよう。

表3 粉粒体輸送装置の特徴順位 (大きい順)

機種	事項	輸送距離	輸送量	輸送規模	所要動力
スクリュコンベア		5	6	6	3
振動・揺動コンベア		6	2	5	2
ベルトコンベア		1	1	1	6
チェンコンベア		3	5	4	4
バケットエレベータ		4	4	3	5
空気輸送装置		2	3	2	1

所要動力率が小さい。このことは生産工業の規模が大きいほど、すなわち多量生産・大容量方式の規模が大きいほど製品原価を低下できることを示唆していて興味深い。

ところで、それらの機種はいずれも独得の長所と短所を持っている。また図には除いてあるが、特別な条件の

図7 空気輸送装置の輸送規模と所要動力率との関係

一般的に、粉粒体を輸送中に空気源機械が示す圧力を p [mmAq]、空気量を Q [m³/min] とすると、空気源機械の動力 kW は

$$kW = \frac{pQ}{60 \times 100\eta} \quad \dots\dots(4.1)$$

$$Q = 60\pi D^2 u_a / 4 \quad \dots\dots(4.2)$$

で表わされる。

ここで、 η は機械効率とモータ効率ならびに装置としての安全率を含めた効率で一般的に 0.6~0.75、 D は輸送管の内径 [m]、 u_a は輸送空気速度 [m/sec] である。

圧力 p の中には当然のことながら空気管、排気管、分離器、フィルターなどによる圧力損失も含まれるが、ここでは輸送条件が所要動力におよぼす影響の仕方を明らかにし、動力低減の方策を見出すことを目的として、それらの付帯的な圧力損失を除外し、輸送管中の圧力損失だけについて検討することにする。そして圧力損失は、粒子の加速損失 Δp_{ac} と定常輸送の圧力損失 Δp_m とからなると考え、それぞれを次のように半理論式で表わす。

$$p = \Delta p_{ac} + \Delta p_m \quad \dots\dots(4.3)$$

$$\Delta p_{ac} = (c + \mu_s) \frac{\gamma_a}{2g} u_a^2 \quad \dots\dots(4.4)$$

$$\Delta p_m = (1 + \beta \mu_s) \lambda_a \frac{L_{eq}}{D} \frac{\gamma_a}{2g} u_a^2 \quad \dots\dots(4.5)$$

ここで記号は次のとおりである。

c : 粉粒体の供給方法によって決まる定数で、ロータリフィーダによる場合 $c=1$ 、吸引ノズルによる場合 $c=10$ 、

β : 粉粒体の性状によって決まる定数で約 0.4~0.6

(輸送しにくいものほど大きい)

μ_s : 混合比で

$$\mu_s = W_s / W_a \quad [-] \quad \dots\dots(4.6)$$

すなわち単位時間に輸送される粉粒体の重量 W_s [Kg/min] とその輸送に必要とする空気の重量 W_a [Kg/min] の比

γ_a : 空気の比重量 [Kg/m³]、 λ_a : 空気だけを流した場合の管摩擦係数 [-]、 L_{eq} : 輸送管の相当長さ [m]、 D : 輸送管の内径 [m]、 g : 重力の加速度 [m/sec²] である。

そこで(4.1)式に(4.2)~(4.6)式を代入して整理すると次式を得る。

$$kW = K_1 \left\{ \left(c + \frac{K_2}{D^2 u_a} \right) + \left(1 + \beta \frac{K_2}{D^2 u_a} \right) \lambda_a \frac{L_{eq}}{D} \right\} D^2 u_a^3 \quad \dots\dots(4.7)$$

ここで

$$K_1 = \frac{\pi}{400\eta} \cdot \frac{\gamma_a}{2g} \quad \dots\dots(4.8)$$

$$K_2 = \frac{W_s}{15\pi \gamma_a} \quad \dots\dots(4.9)$$

である。与えられた輸送条件に対しては K_1 および K_2 はそれぞれ定数になり、動力の大きさは主として輸送管の内径 D と輸送空気速度 u_a の大きさに左右されることがわかる。

しかし上式だけでは各因子が与える影響の仕方が直接にはわかりにくいので、一例として $D=0.155$ m (5 インチ管)、 $W_s=20$ t/h=333 Kg/min、 $c=1$ 、 $\beta=0.42$ 、 $\gamma_a=1.20$ Kg/m³、 $\lambda_a=0.02$ 、 $\eta=0.65$ とし、いろいろな相当輸送距離 L_{eq} と輸送空気速度 u_a の場合について(4.3)式および(4.7)式を数値計算して、その結果を図に描くと図8(a)のようになる。また1 t/h 当たりの所要動力 K [kW/(t/h)] と、単位輸送規模 (m·t/h) 当たりの所要動力率 κ [kW/(m·t/h)] を計算して図に描くと、同じく図(b)のようになる。図から与えられた条件の下では輸送空気速度が小さいほど、また当然のことながら相当輸送距離が短いほど動力、所要動力および所要動力率が小さいことがわかる。

また次の例として、 $u_a=22$ m/sec、他の条件は上記と同じとし、いろいろな相当輸送距離 L_{eq} と輸送管内径 D の場合について同様に数値計算して、その結果を図に描くと図9のようになる。この図から一定量の粉粒体を輸送するにあたって輸送管内径が大きいほど、動力、所要

(a)

(b)

図8 輸送空気速度と装置特性との関係

(図中記号の a c は粒子の加速に要する値を示す)
分離捕集器, 吸排気管などの圧力損失として小計500mmAq を含む。

(a)

(b)

図9 輸送管内径と装置特性との関係

(図中記号の a c は粒子の加速に要する値を示す)
分離捕集器, 吸排気管などの圧力損失として小計500mmAq を含む。

動力および所要動力率が小さいことがわかる。

なお所要動力率は, 他の条件が同じであれば相当輸送距離が長いほど小さい値になっている。このことは距離が長いほど動力値そのものは当然大きくなるが, その増加の割合が小さいことを表わして, 空気輸送装置は比較的距離の長い輸送にその長所を発揮しやすいという一般の通念を裏付けているともいえる。

以上のことから, 与えられた輸送条件に対して空気輸送装置の所要動力を低減するためには, 内径の大きい輸送管によって, できるだけ小さい空気速度で輸送するこ

とが望ましいといえる。

ところでこの命題を果すためには, 周到な配慮にもとづく設計技術が必要である。実際には現在のところ, すべてを理論的に決定できる状態にまではいたっていないので, おのずから経験的知識によることが多い。特に装置の優劣を左右することになる輸送空気速度の最終決定は経験によっている。

設計技術の詳細にわたっての説明は本文では割愛するが, 輸送空気速度の選定にあたって考慮・検討しなければならない事項のうちおもなもの⁶⁾を列挙すると次のと

おりである。

(1) **粉粒体の物性** (一般的に粉粒体は大小いろいろな大きさと形の粒子からなっていること、小さい粒子が必ずしも輸送しやすいとは限らないこと、不揃いなものほど・偏平なものほど・鋭い突起があるものほど・付着凝集しやすいものほど・真比重量が大いものほど・弾性があるものほど・軟かく変形しやすいものほど輸送にくいこと、温度・湿度・圧力・分散状態によって性状ひいては輸送の難易の程度が変わることなど)

(2) **粒子の破碎性、機器に与える磨耗性** (破碎性、磨耗性は速度のほぼ3乗に比例するものが多いが、詳しくは粒子の種類・壁面の材質・角度・混合比などによって程度と対策方法が異なることなど)

(3) **輸送管内の速度分布と濃度分布** (境界層の存在、管内径・Reynolds 数・粒子の物性・混合比などによって速度分布と濃度分布が異なること、加速領域・減速領域での粒子群の挙動、バンド・切換弁・ダンパ・断面拡大あるいは縮小部での偏流と粒子の停滞など)

(4) **配管状態** (水平・鉛直長さ、バンドの数と場所、長い水平管・バンドがつづくところ・立上りバンド・傾斜配管などでは輸送にくいことなど)

(5) **ガスの成分と温度、圧縮・膨脹性** (含有ガスの物理化学的性質、温度による比重量の相違、 SO_2 ガス含有による酸露点上昇による粒子付着現象、管壁との温度差による粒子の熱付着、圧縮・膨脹性による速度と動圧の変化など)

(6) **比例法則** (混相流では比例法則が完全には未確認、Reynolds 数と Froude 数、管内径・混合比が大いほど輸送空気速度を大きくとる必要があることなど)

(7) **粒子の飛散とたい積の限界条件⁷⁾** (粒子の性状、壁面・物体のまわりなどの流れによって限界条件が異なることなど)

(8) **低速、高混合比の輸送条件** (管底をしゅう動あるいは脈動する状態での最小輸送空気速度、輸送量と輸送空気速度の関係など)

(9) **プラグ状の輸送条件** (プラグの長さと要求輸送量に対して適切とする輸送速度、空気の圧力をそのまま利用する輸送は動圧を利用する輸送と原理が違うことなど)

5. 輸送装置計画上の要諦

生産工業では原料から製品にいたるまで、いろいろな物資を粉粒体の状態で扱うことが多い。特に日本では重要な原料のほとんどから食料の約60%にいたるまでを輸入に依存していて、粉粒体状の物資の円滑かつ経済的な

輸送はきわめて重量な課題である。

物資の輸送は、海上輸送と陸上輸送を含めた工場外輸送と、設備・装置間の工場内輸送に大別することができる。それぞれの場合に対していろいろ独特の特徴を持った輸送方法・機種がある。

輸送の計画をたてる上でまず第一に重要なことは、輸送物の性状と輸送条件に対してもっとも適切とする特性を持った機種・形式を選定することである。この選択を誤るとどのように仕様値の適正化を図ってもとうてい満足な結果が得られないばかりか、輸送物の品質を低下させたり、いたずらに装置の保守管理に迫られることが多く、はなはだしい場合には事故を招くこともある。

次に、もっとも適切とする機種、形式を選定した上は、当然のことながらその信頼性と耐久性の向上、運転と保守管理の簡易化、設備費と運転維持費の低減などを図り、仕様を合理的に決めることが望まれる。

一般に輸送装置は設備費と運転費を節減するために、所要動力を必要最小限度に選び、電動機や空気源機械に余裕を与えないことが多い。またそのように機器を選定することが設計・計画者の才腕のように考えられることがあるが、少なくとも粉粒体の輸送については、そのような考え方は必ずしも妥当ではなく、むしろ危険なことが多い。その理由は次のとおりである。

粉粒体は置かれた環境によって性状がいちじるしく変化する。たとえば温度、湿度、圧力、ガス、振動、扱い方などによって物性が変化し、また名称が同じでも産地と製造条件、経過日数などによって相違する。このため一定の工場内輸送でも原料や生産条件あるいは春夏秋冬による性状の変化は当然あり得る。さらに機器の損耗、補修後の運転経過などによって性能の多少の違いはある。装置としてはこれらの変化があっても所定の輸送をできることが必要で、そのために能力に多少の余裕のある機器を用いることが望ましい。また電力代は電動機の銘板にある仕様値どおりに支払うものではなく、負荷に対して実際に使用した電力代を支払うことになるので、余裕のある電動機を用いても実際上は動力費は変わらない。

なお、動力費が製品原価に占める割合が微小であったり、その合計値がわずかであれば、エネルギー消費量を少しでも節減するためや技術的に何ら疑問を残さず問題がない場合はともかく、少しでも不確実なことがある場合は、危険をおかしてまで動力費の低減を図ることは避けるべきである。むしろ動力費が多少割高になっても信頼性や安定性の高い装置にしたほうが利益が得られ、また結局はエネルギーの節減になることが多い。このこ

とが粉粒体輸送装置計画上の根本的な要諦であるといえる。

参 考 文 献

- 1) 経済上の数値は朝日新聞社刊, 朝日年鑑(昭和53年版), 少年朝日年鑑(昭和53年版), および矢野恒太記念会編, 日本国勢図会(1977), 国勢社による。
- 2), 3), 4) 日本粉体工業協会貯槽供給輸送分科会が昭和51年8月に実施した調査結果を図に描いた。狩野武: 最近の粉粒体輸送装置, 化学工学, 41-2(1977,) 66~72にも紹介してある。
- 5) 狩野武: 粉体工学研究会第13回夏期シンポジウム講演要旨集, 10~14ページ(昭52-7)を加筆訂正し, 条件を変えて数値計算した。化学工学協会第43年会シンポジウム要旨数, 1~6ページ(昭53-4)。
- 6) たとえば狩野武: 粉粒体輸送装置(7版), 81~144ページ(昭53), 日刊工業新聞社。
- 7) たとえば狩野武: 粉体粒子の挙動, 267~354ページ(昭52), 産業技術センター。

要 旨

バグ・フィルターの運転圧損に関する検討

牧野 和孝* 森 康維* 井伊谷鋼一*
Kazutaka Makino Yasushige Mori Koichi Iinoya

バグ・フィルターの運転圧損を中心としてエネルギーの観点から何が重要な課題であるかを論じた。すなわち, バグ・フィルターの年間経費式をファンの固定費と動力費, バグ・フィルターの固定費およびろ布取り替え費から構成した。ろ布の寿命は耐用払い落とし回数または使用時間で決まると考え, 年間経費を最小にする最適な運転圧損, ろ過風速, および払い落とし周期などを求めた。

ろ布のみの圧損が無視できる場合には解析的に最適解が求まるので, 運転圧損, ろ過風速, および粉じん負荷に制限がある場合も含めて最適解を示した。2~3のメーカーやユーザーに問い合わせた実際的な定数値を使って, 多くの具体例について数値計算を行なった。さらに各パラメータの最適解に対する影響を議論した。その結果, 多くの結論を得たが, たとえば, 最適設計条件は処理ガス風量やバッグ室数に余り影響を受けないが, 粉じん濃度や払い落とし残留率に大きく影響される。そして特に, これらの結果を基礎にしてバグ・フィルターの払落し操作の重要性をエネルギー観点より指摘した。

昭和53年4月17日受理

* 京都大学工学部化学工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

TEL 075-751-2111