

# 粉体輸送

## 1. 粉体輸送装置

粉体輸送装置は、ベルトやスクリーやチェーンなど機械要素の運動を利用して輸送する機械式と管路内で空気流やスラリー流として輸送する流体式に大別される。機械式であるベルトコンベアは、装置内をえんえんと循環する搬送体(ベルトなど)に粉粒体を積載して輸送する。粉粒体と搬送体の間に作用する摩擦のために粉粒体が前進する。大型化が容易であるため貯槽からの切り出しに用いられることが多い。密閉化が困難であるため微粉など飛散しやすいものは適さない。スクリーコンベアは、断面形状が円またはU字をした本体内でらせん状のスクリーを水平方向に回転させ、粉粒体を前方へ押し出して輸送する。輸送速度の調節が容易である。チェーンコンベアの一種であるバケットコンベアは、バケットエレベーターとも呼ばれる。チェーンに多数のバケット(容器)を巻き付けておき、そこに輸送物を入れて垂直上方へ荷揚げする。大量輸送に適している。排出方式によって遠心排出型、完全排出型、誘導排出型に分類される。流体式である空気輸送装置は、ニューマチックコンベアとも呼ばれる。設備が単純で短距離に適用しやすい吸引式、低濃度の浮遊状態で連続輸送する低圧圧送式、低～高濃度のしゅう動状態またはプラグ流状態でバッチ輸送する高圧圧送式、設備が単純かつ低動力で大容量の水平輸送が可能なエアライド式に大別される。

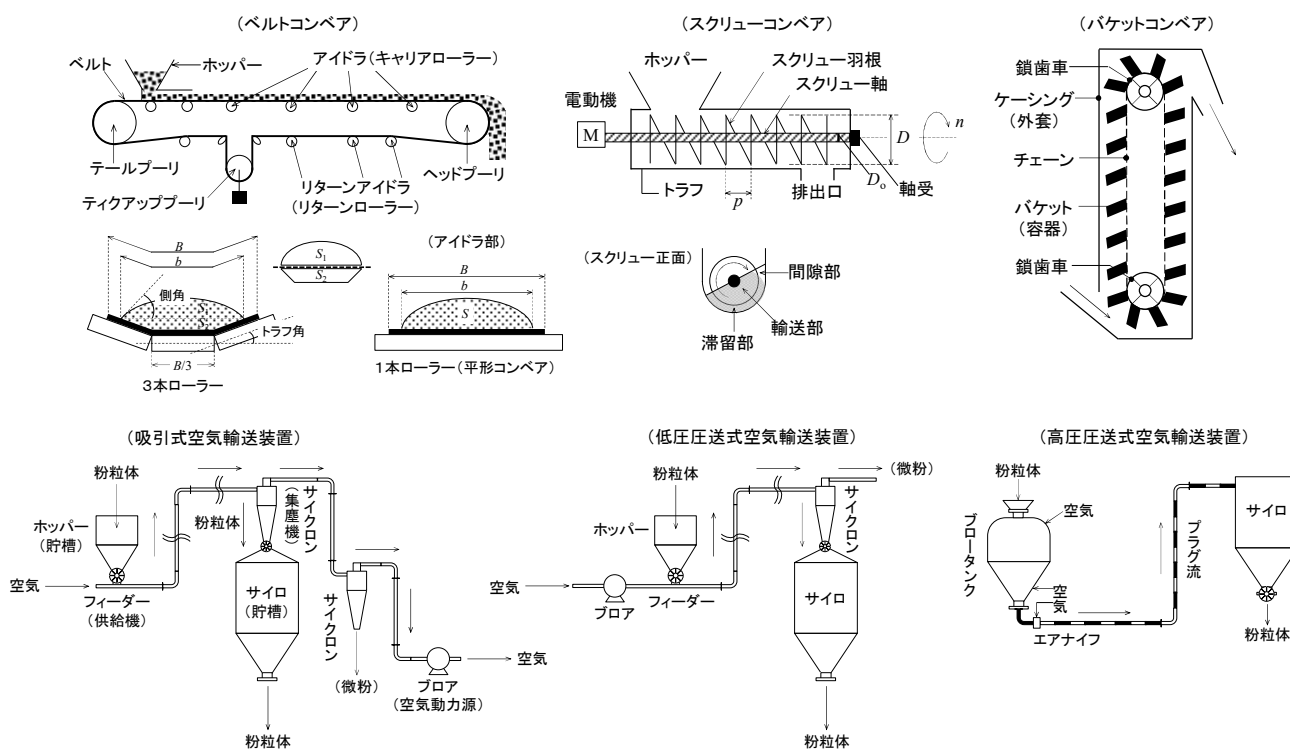


図 1.1 粉体輸送装置の例

## 2. 機械式輸送

### 2. 1 ベルトコンベア

①輸送性能 ベルトコンベアの輸送性能  $Q$  [t/h]は、次式で与えられる。

$$Q=60Sv\rho_b \quad \cdots(2.1.1)$$

$$S=K(0.9B-0.05)^2 \quad \cdots(2.1.2)$$

ただし、 $B$  はベルト幅[m]、 $K$  は定数、 $S$  は輸送物の積載断面積[m<sup>2</sup>]、 $u$  はベルト速度[m/min]、 $\rho_b$  は輸送物のかさ密度[t/m<sup>3</sup>]。

ベルト幅  $B$  とベルト速度  $u$  は、所定の輸送性能  $Q$  を満たす組み合わせを表より選ぶ。 $S$  の式を  $Q$  の式に代入する。

$$Q=60K(0.9B-0.05)^2v\rho_b \quad \cdots(2.1.3)$$

$$v=Q/[60K(0.9B-0.05)^2\rho_b] \quad \cdots(2.1.4)$$

上式に適当なベルト幅  $B$  を試行錯誤的に代入して、標準仕様の表の最大ベルト速度になるべく近くなるようなベルト速度  $u$  を見つける。

②輸送所要動力 ベルトコンベアの輸送所要動力  $P$  [kW]は、無積載時動力  $P_1$  [kW]と水平輸送時動力  $P_2$  [kW]と垂直輸送時動力  $P_3$  [kW](下りの場合は負)と自走式トリッパ(コンベアの間で運搬物を降ろす装置。コンベアのみにも適用)運転時動力  $P_t$  [kW]の和で求める。

$$P=P_1+P_2+P_3+P_t \quad \cdots(2.1.5)$$

無積載時動力  $P_1$  [kW]は、次式で与えられる。

$$P_1=0.06fwu(L+L_0)/367 \quad \cdots(2.1.6)$$

ただし、 $f$  はローラーの回転摩擦係数[-](標準値 0.03)、 $L$  はベルト長さ[m](輸送距離に相当)、 $L_0$  はベルト長さの補正值[m](標準値 49 m)、 $u$  はベルト速度[m/min]、 $w$  は輸送物以外のベルト長さあたり運動部分重量[kg/m]。

式中の 0.06 は、ベルト速度の単位を[m/min]から[m/h]に換算する分(=60 min/h)と動力の単位を[W]から[kW]に換算する分(=10<sup>-3</sup> kW/W)に相当する。式中の 367 は、力と速度の積  $w(L+L_0)^{\text{kgf}} \times (60v)^{\text{m/h}}$  で表される動力の工学単位[kgf・m/h]から SI 単位[N・m/s]に換算する分(=(9.8)<sup>N/kgf</sup>(1/3600)<sup>h/s</sup>≒ 1/367)に相当する。

水平輸送時動力  $P_2$  [kW]は、次式で与えられる。

$$P_2=fQ(L+L_0)/367 \quad \cdots(2.1.7)$$

ただし、 $Q$  は輸送性能[t/h]。

垂直輸送時動力  $P_3$  [kW]は、次式で与えられる。

$$P_3=HQ/367 \quad \cdots(2.1.8)$$

ただし、 $H$  は垂直揚程[m](上り下りの高さ。下りの場合は負)。

自走式トリッパ運転時動力  $P_t$  [kW]は、表より読み取る(ベルトコンベア)。

電動機動力  $P_M$  [kW]は、次式で求める。

$$P_M=P/\eta_M \quad \cdots(2.1.9)$$

ただし、 $\eta_M$  は電動機の機械効率[-](=0.75~0.85)。

電動機の定格出力を以下に示す。計算値よりもひとまわり大きい規格を選定する。

0.2, 0.4, 0.75, 1.5, 2.2, 3.7, 5.5, 7.5, 11, 15, 18.5, 22, 30, 37, 40, 50, 60, 75, 100, 120, 150, 200 kW

表 2.1.1 ベルト幅と最大ベルト速度の関係(ベルトコンベア) [文献 1-3]

ベルト幅 [mm]	最大ベルト速度[m/min]								
	石炭 (大)*	石炭 (小)**	鉱石 (大)*	鉱石 (小)**	砂利 (大)*	砂利 (小)**	砂	木材 チップ	穀物
400	90	90	75	90	75	90	90	135	135
450	120	120	90	120	90	120	120	135	135
500	120	120	105	120	105	120	120	150	150
600	135	150	120	150	120	150	150	180	180
750	150	180	135	180	135	180	180	210	210
900	170	195	150	195	150	195	195	240	240
1050	180	210	150	195	150	195	210	240	240
1200	180	210	165	195	165	195	210	240	240
1400	195	210	165	195	165	195	210	240	240
高密度***	約 0.75		約 2.3		約 1.8		約 1.7	約 0.24	約 0.75
側角***	約 19°		約 19°		約 19°		約 20°	約 27°	約 12°

\*75 mm 以上, \*\*75 mm 未満, \*\*\*乾燥状態や含有成分等によって変動する。  
フィーダーとして用いる場合は、最大ベルト速度 30 m/min 以下が目安となる。ここでは便宜上、上の表を 1/8 倍した値を用いる。

表 2.1.2 積載断面積 S 式の K 値 [文献 1-3]

トラフ角度	運搬物側角		
	10°	20°	30°
0°	0.0295	0.0591	0.0906
20°	0.0963	0.1245	0.1535
30°	0.1232	0.1488	0.1754
45°	0.1484	0.1698	0.1915

表 2.1.3 運搬物以外の運動部分の仮定重量 [文献 1-3]

ベルト幅[mm]	400	450	500	600	750	900	1050	1200
運動部分の仮定重量[kg/m]	24.0	28.3	31.3	37.3	50.7	65.7	74.3	88.0

表 2.1.4 自走式トリッパ運転時動力(ベルトコンベア) [文献 1-3]

ベルト幅[mm]	400	450	500	600	750	900	1050	1200
トリッパ運転時動力[kW]	1.50	1.50	1.50	1.50	2.65	2.65	3.55	3.55

【計算例】ベルトコンベア

- かさ密度 2.3 t/m<sup>3</sup>、粒子径 50 mm の鉱石を幅 500 mm のベルトコンベアで輸送する場合の輸送性能 Q [t/h]を求めよ。トラフ角度 20°とする。(330 t/h)  
 $S=K(0.9B-0.05)^2=(0.1245)[(0.9)(0.500)-0.05]^2=0.01992 \text{ m}^2$   
 $Q=60Sup_b=(60)(0.01992)(120)(2.3)=329.87 \text{ t/h} \approx \underline{330 \text{ t/h}}$
- かさ密度 2.3 t/m<sup>3</sup>、粒子径 50 mm の鉱石をベルトコンベアで 1 時間あたり 1000 t、上り方向に 200 m (揚程 10 m) 輸送する場合の①ベルト幅 B [mm]、②ベルト速度 u [m/min]、③輸送所要動力 P [kW]、④電動機の定格出力 P<sub>M</sub> [kW]を求めよ。キャリアローラー数 3、トラフ角度 20°、トリッパ有り、電動機

効率 0.9 とする。 (①750 mm, ②149 m/min, ③59.5 kW, ④75 kW)

$$B=750 \text{ mm}$$

$$u=Q/[60K(0.9B-0.05)^2\rho_s]=1000/[(60)(0.1245)\{(0.9)(750/1000)-0.05\}^2(2.3)]=149.00 \text{ m/min} \doteq 149 \text{ m/min}$$

$$(L+L_0)/367=(200+49)/367=0.67847$$

$$P_1=0.06f_wu[(L+L_0)/367]=(0.06)(0.03)(50.7)(149.00)(0.67847)=9.2256 \text{ kW}$$

$$P_2=fQ[(L+L_0)/367]=(0.03)(1000)(0.67847)=20.354 \text{ kW}$$

$$P_3=HQ/367=(10)(1000)/367=27.247 \text{ kW}$$

$$P_t=2.65 \text{ kW}$$

$$P=P_1+P_2+P_3+P_t=9.2256+20.354+27.247+2.65=59.476 \text{ kW} \doteq 59.5 \text{ kW}$$

$$P_M=P/\eta_M=59.476/0.9=66.084 \text{ kW} \rightarrow 75 \text{ kW}$$

### 【問題】 ベルトコンベア

- (1) かさ密度  $0.75 \text{ t/m}^3$  の穀物を幅  $400 \text{ mm}$  のベルトコンベアで輸送する場合の輸送性能  $Q \text{ [t/h]}$  を求めよ。トラフ角度  $20^\circ$  とする。 (56.2 t/h)
- (2) かさ密度  $0.75 \text{ t/m}^3$  の穀物をベルトコンベアで 1 時間あたり  $500 \text{ t}$ 、上り方向に  $1000 \text{ m}$  (揚程  $20 \text{ m}$ ) 輸送する場合の①ベルト幅  $B \text{ [mm]}$ 、②ベルト速度  $u \text{ [m/min]}$ 、③輸送所要動力  $P \text{ [kW]}$ 、④電動機の定格出力  $P_M \text{ [kW]}$  を求めよ。キャリアローラー数 3、トラフ角度  $20^\circ$ 、トリッパ有り、電動機効率 0.9 とする。 (①900 mm, ②200 m/min, ③140 kW, ④200 kW)

## 2. 2 スクリューコンベア

①輸送性能 スクリューコンベアの輸送性能  $Q \text{ [t/h]}$  は、次式で与えられる。

$$Q=60S\rho_b \quad \cdots(2.2.1)$$

ただし、 $S$  は輸送物の輸送部占有断面積 $[\text{m}^2]$ 、 $u$  は輸送速度 $[\text{m/min}]$ 、 $\rho_b$  は輸送物のかさ密度 $[\text{t/m}^3]$ 。

輸送物の輸送部占有断面積  $S$  は、充填率  $\phi$  [–] の定義式(スクリュー断面積と輸送部における占有断面積の比)より導かれる。

$$\phi=S/[\pi(D^2-D_o^2)/4] \quad \cdots(2.2.2)$$

$$S=(\pi/4)(D^2-D_o^2)\phi \quad \cdots(2.2.3)$$

ただし、 $D$  はスクリュー外径 $[\text{m}]$ 、 $D_o$  はスクリュー軸径 $[\text{m}]$ 。

スクリュー外径  $D$  は、輸送物の粒子径をもとに標準仕様の表から選ぶ。粉粒体の粒子径や塊状物の割合が大きい場合は、スクリュー径を大きくとる。充填率  $\phi$  は、表より読み取る。

輸送速度  $u$  は、スクリューのピッチ  $p \text{ [m]}$  と回転速度  $n \text{ [rpm]} (=1/\text{min})$  の積で表される。

$$u=pn \quad \cdots(2.2.4)$$

安息角が大きいもの(流動性が良くないもの)、粉粒体の流動性が悪い場合や急勾配で使用する場合は、ピッチを小さくして輸送速度を小さくする。

②臨界回転速度 質量  $m_p \text{ [kg]}$  の単一固体粒子が有効半径  $R \text{ [m]} (=スクリュー半径-粒子半径 \doteq スクリュー半径)$  のスクリューの回転によって持ち上げられているとき、固体粒子にかかる遠心力と重力はつり合っている。

$$m_p u_p^2 / R = m_p g \cos \theta \quad \cdots(2.2.5)$$

$$(R\omega)^2 / R = g \cos \theta \quad \cdots(2.2.6)$$

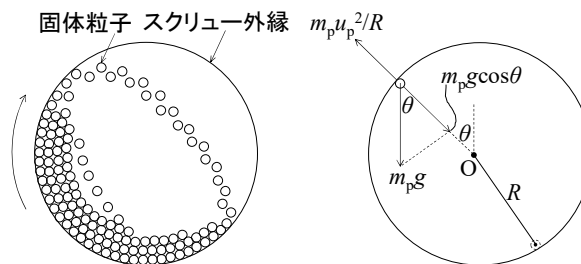
$$R^2 [2\pi(n/60)]^2 / R = g \cos \theta \quad \cdots(2.2.7)$$

$$(2\pi/60)^2 R n^2 = g \cos \theta \quad \cdots(2.2.8)$$

$$n = [g \cos \theta / \{(2\pi/60)^2 (D/2)\}]^{1/2}$$

$$[R = (D/2) - (D_p/2) \doteq D/2] \quad \cdots(2.2.9)$$

$$n = 42.3 [(\cos \theta) / D]^{1/2} \quad \cdots(2.2.10)$$



粒子がスクリーの頂点( $\theta=90^\circ$ )でスクリーから離れるときの回転速度が臨界回転速度  $n_c$  [rpm]となる。

$$n_c = 42.3 / D^{1/2} \quad \cdots(2.2.11)$$

この値よりも大きいと固体粒子はスクリーと一体となって回転するため、排出が困難となる。フィーダーとして用いる場合は100 rpm程度以下、コンベアとして用いる場合は180 rpm程度以下が目安となる。実際の回転速度  $n$  [rpm]は、輸送性能の式より求める。

$$Q = 60 S p n \rho_b \quad [u = p n] \quad \cdots(2.2.12)$$

$$n = Q / (60 S p \rho_b) \quad \cdots(2.2.13)$$

③輸送所要動力 スクリューコンベアの輸送所要動力  $P$  [kW]は、水平輸送動力と垂直輸送動力(下りの場合は負)の和で与えられる。

$$P = (K Q L \pm Q H) / 367 \quad \cdots(2.2.14)$$

ただし、 $H$ は垂直揚程[m](上り下りの高さ。下りの場合は負)、 $K$ は定数、 $L$ はスクリー長 [m](輸送距離に相当)、 $Q$ は輸送性能[t/h]。  $K$ 値は表より読み取る。

電動機動力  $P_M$  [kW]は、次式で求める。

$$P_M = P / \eta_M \quad \cdots(2.2.15)$$

ただし、 $\eta_M$ は電動機の機械効率[-](=0.7~0.8)。

電動機の定格出力を以下に示す。計算値よりもひとまわり大きい規格を選定する。

0.2, 0.4, 0.75, 1.5, 2.2, 3.7, 5.5, 7.5, 11, 15, 18.5, 22, 30, 37, 40, 50, 60, 75, 100, 120, 150, 200 kW

表 2.2.1 運搬物のかさ密度と充填率の関係(水平輸送の場合) [文献 4, 5]

運搬物の例	穀物	粉炭、豆類	石炭	セメント、砂利	鉱石
運搬物の嵩密度[t/m <sup>3</sup> ]	0.5~0.7	0.6~0.8	0.8~1.2	0.8~1.8	1.8~
運搬物の寸法	微粉	粉~粒	粒~小塊	塊状	塊状
運搬物の摩耗性	無し	無し~小	中	中~大	大
充填率(コンベア)	0.45	0.38	0.31	0.25	0.125
充填率(フィーダー)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
$K$ 値(動力推算式)	1.2	1.8	2.5	4	7

表 2.2.2 スクリューコンベア(またはフィーダー)の標準仕様例 [文献 6-9]

運搬物の平均粒子径 $D_p$ [mm]	10	18	25	35	45	50
運搬物の最大粒子径 $D_{p,max}$ [mm]	25	50	75	100	125	150
スクリー外径 $D$ [mm]	100	200	300	400	500	600
スクリー軸径 $D_o$ [mm]	35	55	70	80	90	100
ピッチ $p$ [mm](コンベア)	80	150	210	280	340	400
ピッチ $p$ [mm](フィーダー)	50	100	150	200	250	300

**【計算例】スクリーコンベア**

- (1) かさ密度  $0.65 \text{ t/m}^3$ 、粒子径  $7 \text{ mm}$  の大豆をスクリーコンベアで輸送する場合の輸送性能  $Q \text{ [t/h]}$  を求めよ。スクリー回転速度  $120 \text{ rpm}$  とする。 (0.980 t/h)

$$S = (\pi/4)(D^2 - D_o^2)\phi = (\pi/4)(0.100^2 - 0.035^2)(0.38) = 0.0026189 \text{ m}^2$$

$$u = pn = (0.080)(120) = 9.60 \text{ m/min}$$

$$Q = 60S\upsilon\rho_b = (60)(0.0026189)(9.60)(0.65) = 0.98051 \text{ t/h} \doteq \boxed{0.980 \text{ t/h}}$$

$$n_c = 42.3/D^{0.5} = 42.3/(0.100)^{0.5} = 133.76 \text{ rpm} (>n)$$

- (1) かさ密度  $1.5 \text{ t/m}^3$ 、粒子径  $25 \text{ mm}$  の砂利をスクリーコンベアで 1 時間あたり  $20 \text{ t}$ 、水平方向に  $100 \text{ m}$  輸送する場合の①スクリー外径  $D \text{ [mm]}$ 、②スクリー軸径  $D_o \text{ [mm]}$ 、③ピッチ  $p \text{ [mm]}$ 、④スクリー回転速度  $n \text{ [rpm]}$ 、⑤臨界回転速度  $n_c \text{ [rpm]}$ 、⑥輸送所要動力  $P \text{ [kW]}$ 、⑦電動機の定格出力  $P_M \text{ [kW]}$  を求めよ。電動機効率  $0.7$  とする。(①300 mm, ②70 mm, ③210 mm, ④63 rpm, ⑤77 rpm, ⑥21.8 kW, ⑦37 kW)

$$D = \boxed{300 \text{ mm}}, D_o = \boxed{70 \text{ mm}}, p = \boxed{210 \text{ mm}}, \phi = 0.25$$

$$S = (\pi/4)(D^2 - D_o^2)\phi = (\pi/4)[(0.300)^2 - (0.07)^2](0.25) = 0.016709 \text{ m}^2$$

$$n = Q/(60S\upsilon\rho_b) = 20/[(60)(0.016709)(0.210)(1.5)] = 63.331 \doteq \boxed{63 \text{ rpm}}$$

$$n_c = 42.3/D^{0.5} = 42.3/(0.300)^{0.5} = 77.228 \text{ rpm} \doteq \boxed{77 \text{ rpm}} (>n)$$

$$P = (KQL \pm QH)/367 = [(4)(20)(100) \pm (20)(0)]/367 = 21.798 \text{ kW} \doteq \boxed{21.8 \text{ kW}}$$

$$P_M = P/\eta_M = 21.798/0.7 = 31.14 \text{ kW} \rightarrow \boxed{37 \text{ kW}}$$

**【問題】スクリーコンベア**

- (1) かさ密度  $1.5 \text{ t/m}^3$ 、粒子径  $25 \text{ mm}$  の砂利をスクリーコンベアで輸送する場合の輸送性能  $Q \text{ [t/h]}$  を求めよ。スクリー回転速度  $70 \text{ rpm}$  とする。 (22.1 t/h)
- (2) かさ密度  $1.0 \text{ t/m}^3$ 、粒子径  $35 \text{ mm}$  の石炭をスクリーコンベアで 1 時間あたり  $20 \text{ t}$ 、上り方向に  $1000 \text{ m}$  (揚程  $20 \text{ m}$ ) 輸送する場合の①スクリー外径  $D \text{ [mm]}$ 、②スクリー軸径  $D_o \text{ [mm]}$ 、③ピッチ  $p \text{ [mm]}$ 、④スクリー回転速度  $n \text{ [rpm]}$ 、⑤臨界回転速度  $n_c \text{ [rpm]}$ 、⑥輸送所要動力  $P \text{ [kW]}$ 、⑦電動機の定格出力  $P_M \text{ [kW]}$  を求めよ。電動機効率  $0.7$  とする。(①400 mm, ②80 mm, ③280 mm, ④32 rpm, ⑤67 rpm, ⑥137 kW, ⑦200 kW)

**2. 3 バケットコンベア**

①輸送性能 バケットコンベアの輸送性能  $Q \text{ [t/h]}$  は、次式で与えられる。

$$Q = 60\eta V\upsilon\rho_b/p \quad \cdots(2.3.1)$$

ただし、 $p$  はバケットのピッチ[m]、 $V$  はバケット 1 個の容積[m<sup>3</sup>]、 $\eta$  はバケットの積み荷効率[-](バケット容積に対する輸送物の体積割合。一般に  $0.7$  程度)、 $u$  は輸送速度[m/min](重い塊状物 18, 鉱石 40, 砂利 40, 石炭 40, 粉炭 120, 穀物 180 [文献 10, 11])、 $\rho_b$  は輸送物のかさ密度[t/m<sup>3</sup>]。

②輸送所要動力 バケットコンベアの輸送所要動力  $P \text{ [kW]}$  は、垂直輸送時動力  $P_1 \text{ [kW]}$  と下部の鎖歯車から輸送物をすくいあげる動力  $P_2 \text{ [kW]}$  と上部の鎖歯車を回転させる動力  $P_3 \text{ [kW]}$  と下部の鎖歯車を回転さ

せる動力  $P_4$  [kW] の和で与えられる。

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad \cdots(2.3.2)$$

安全のため、上式の計算値の 1.2 倍を見込む。

垂直輸送時動力  $P_1$  [kW] は、次式で与えられる。

$$P_1 = HQ/367 \quad \cdots(2.3.3)$$

ただし、 $H$  は垂直揚程[m]、 $Q$  は輸送性能[t/h]。

下部の鎖歯車から輸送物をすくいあげる動力  $P_2$  [kW] は、次式で与えられる。

$$P_2 = 12D_g Q/367 \quad \cdots(2.3.4)$$

鎖歯車径  $D_g$  [m] は、ホイールの歯数を  $N$  [-] として次式で表される。

$$D_g = p/\sin(180^\circ/N) \quad \cdots(2.3.5)$$

上部の鎖歯車を回転させる動力  $P_3$  [kW] と下部の鎖歯車を回転させる動力  $P_4$  [kW] は、十分に小さいため無視して差しつかえない。【文献 12】

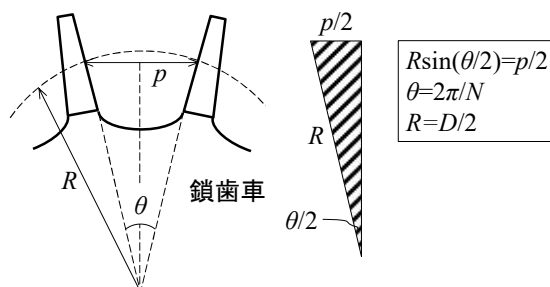
電動機動力  $P_M$  [kW] は、次式で求める。

$$P_M = P/\eta_M \quad \cdots(2.3.6)$$

ただし、 $\eta_M$  は電動機の機械効率[-] (約 0.8)。

電動機の定格出力を以下に示す。計算値よりもひとまわり大きい規格を選定する。

0.2, 0.4, 0.75, 1.5, 2.2, 3.7, 5.5, 7.5, 11, 15, 18.5, 22, 30, 37, 40, 50, 60, 75, 100, 120, 150, 200 kW



### 【計算例】バケットコンベア

かさ密度  $1.0 \text{ t/m}^3$  の石炭をバケットコンベアにより輸送速度  $40 \text{ m/min}$  で  $25 \text{ m}$  垂直輸送する場合の①輸送性能  $Q$  [t/h]、②輸送所要動力  $P$  [kW]、③電動機の定格出力  $P_M$  [kW] を求めよ。バケット 1 個の容積  $18 \text{ L}$ 、バケットピッチ  $300 \text{ mm}$ 、鎖歯車の歯数  $9$ 、バケットの積み荷効率  $0.7$ 、電動機の機械効率  $0.8$  とする。(①  $101 \text{ t/h}$ , ②  $11.7 \text{ kW}$ , ③  $15 \text{ kW}$ )

$$Q = 60\eta V u \rho_b / p = (60)(0.7)(18 \times 10^{-3})(40)(1.0)/(300 \times 10^{-3}) = 100.8 \text{ t/h} \doteq \boxed{101 \text{ t/h}}$$

$$P_1 = HQ/367 = (25)(100.8)/367 = 6.8664 \text{ kW}$$

$$D_u = p/\sin(180^\circ/N) = (300 \times 10^{-3})/\sin(180^\circ/9) = 0.87714 \text{ m}$$

$$P_2 = 12D_g Q/367 = (12)(0.87714)(100.8)/367 = 2.8909 \text{ kW}$$

$$P = 1.2(P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \doteq 1.2(P_1 + P_2) = (1.2)(6.8664 + 2.8909) = 11.708 \text{ kW} \doteq \boxed{11.7 \text{ kW}}$$

$$P_M = P/\eta_M = 11.708/0.8 = 14.635 \text{ kW} \rightarrow \boxed{15 \text{ kW}}$$

### 【問題】バケットコンベア

かさ密度  $0.8 \text{ t/m}^3$  の穀物をバケットコンベアにより輸送速度  $180 \text{ m/min}$  で  $20 \text{ m}$  垂直輸送する場合の①輸送性能  $Q$  [t/h]、②輸送所要動力  $P$  [kW]、③電動機の定格出力  $P_M$  [kW] を求めよ。バケット 1 個の容積  $2 \text{ L}$ 、バケットピッチ  $200 \text{ mm}$ 、鎖歯車の歯数  $12$ 、バケットの積み荷効率  $0.7$ 、電動機の機械効率  $0.8$  とする。(①  $60.5 \text{ t/h}$ , ②  $5.79 \text{ kW}$ , ③  $7.5 \text{ kW}$ )

## 3. 空気輸送

### 3. 1 浮遊速度

速度  $u$  [m/s] で上昇する気流中を終末速度  $u_t$  [m/s] で自由沈降する単一粒子の絶対速度  $u_p$  [m/s] は、上昇流の向きを正にとると次式で表される。

$$u_p = u - u_t \quad \cdots(3.1.1)$$

粒子の浮遊速度は、気流中で粒子が静止するときの気流速度で定義され ( $u_p=0$ )、終末速度に等しい。

$$u = u_t \quad \cdots(3.1.2)$$

終末速度  $u_t$  [m/s] は、静止流体中における粒子の運動方程式より導かれる。粒子形状は球とする。

$$(\pi/6)D_p^3\rho_p(du_p/dt) = (\pi/6)D_p^3\rho_p g - (\pi/6)D_p^3\rho g - C_D(\pi D_p^2/4)\rho u_p^2/2 \quad \cdots(3.1.3)$$

$$0 = (\pi/6)D_p^3\rho_p g - (\pi/6)D_p^3\rho g - (\kappa/Re_p^\varepsilon)(\pi D_p^2/4)\rho u_t^2/2 \quad [C_D = \kappa/Re_p^\varepsilon] \quad \cdots(3.1.4)$$

$$0 = (4/3)D_p(\rho_p - \rho)g - [\kappa/(D_p u_t \rho / \mu)^\varepsilon]\rho u_t^2 \quad [Re_p = D_p u_t \rho / \mu] \quad \cdots(3.1.5)$$

$$0 = (4/3)D_p(\rho_p - \rho)g - \kappa \mu^\varepsilon D_p^{-\varepsilon} u_t^{2-\varepsilon} \rho^{1-\varepsilon} \quad \cdots(3.1.6)$$

$$\kappa \mu^\varepsilon D_p^{-\varepsilon} u_t^{2-\varepsilon} \rho^{1-\varepsilon} = (4/3)D_p(\rho_p - \rho)g \quad \cdots(3.1.7)$$

$$u_t = [(4/3)\kappa D_p^{1+\varepsilon}(\rho_p - \rho)g / (\mu^\varepsilon \rho^{1-\varepsilon})]^{1/(2-\varepsilon)} \quad \cdots(3.1.8)$$

ただし、 $C_D$  は抵抗係数[-]、 $Re_p$  は粒子レイノルズ数、 $\rho$  は空気密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\mu$  は空気粘度[Pa·s]、 $\kappa$  と  $\varepsilon$  は定数 ( $Re_p < 2$  のとき  $\kappa=24$ ,  $\varepsilon=1$ (Stokes)、 $2 < Re_p < 500$  のとき  $\kappa=10$ ,  $\varepsilon=0.5$ (Allen)、 $500 < Re_p$  のとき  $\kappa=0.44$ ,  $\varepsilon=0$ (Newton))。

### 3. 2 粒子速度

#### 3.2.1 空気抵抗 [文献 13-15]

流速  $u$  [m/s] で流れている空気中を単一の球状粒子が速度  $u_p$  [m/s] で移動しているとき、粒子が空気流から受ける抵抗力  $R_f$  [N] は、次式で表される。

$$R_f = C_D(\pi D_p^2/4)\rho(u - u_p)^2/2 \quad \cdots(3.2.1.1)$$

$$R_f = (\kappa/Re_p^\varepsilon)(\pi D_p^2/4)\rho(u - u_p)^2/2 \quad \cdots(3.2.1.2)$$

$$R_f = [\kappa/\{D_p(u - u_p)\rho/\mu\}^\varepsilon](\pi D_p^2/4)\rho(u - u_p)^2/2 \quad \cdots(3.2.1.3)$$

$$R_f = [\kappa/(\rho/\mu)^\varepsilon](\pi D_p^{2-\varepsilon}/4)\rho(u - u_p)^{2-\varepsilon}/2 \quad \cdots(3.2.1.4)$$

静止空気中を移動する粒子の終末速度  $u_t$  [m/s] に対する空気抵抗  $R_{ft}$  [N] も同様の手順で導かれる。

$$R_{ft} = [\kappa/(\rho/\mu)^\varepsilon](\pi D_p^{2-\varepsilon}/4)\rho u_t^{2-\varepsilon}/2 \quad \cdots(3.2.1.5)$$

両者の比を取る。

$$R_f/R_{ft} = [\{\kappa/(\rho/\mu)^\varepsilon\}(\pi D_p^{2-\varepsilon}/4)\rho(u - u_p)^{2-\varepsilon}/2] / [\{\kappa/(\rho/\mu)^\varepsilon\}(\pi D_p^{2-\varepsilon}/4)\rho u_t^{2-\varepsilon}/2] \quad \cdots(3.2.1.6)$$

$$R_f/R_{ft} = (u - u_p)^{2-\varepsilon} / u_t^{2-\varepsilon} \quad \cdots(3.2.1.7)$$

空気抵抗  $R_{ft}$  [N] は、一般に粒子密度と空気密度の差が大きいことから浮力  $F_b$  [N] を無視するとき、運動方程式を用いて次式のように導かれる。粒子形状は球とする。

$$(\pi/6)D_p^3\rho_p(du_p/dt) = (\pi/6)D_p^3\rho_p g - F_b - R_{ft} \quad \cdots(3.2.1.8)$$

$$0 \doteq (\pi/6)D_p^3\rho_p g - R_{ft} \quad [du_p/dt=0, (\pi/6)D_p^3\rho_p g - F_b \doteq (\pi/6)D_p^3\rho_p g] \quad \cdots(3.2.1.9)$$

$$R_{ft} = (\pi/6)D_p^3\rho_p g \quad \cdots(3.2.1.10)$$

$R_f/R_{ft}$  の式に代入する。



$$R_f = (\pi/6)D_p^3 \rho_p g (u - u_p)^{2-\varepsilon} / u_i^{2-\varepsilon} \quad \cdots(3.2.1.11)$$

輸送物が粉体のとき  $\varepsilon=1$ (Stokes,  $Re_p < 2$ )、粒体のとき  $\varepsilon=0$ (Newton,  $500 < Re_p$ )。

### 3.2.2 定常輸送時

定常輸送時( $du_p/dt=0$ )の理論的な粒子速度  $u_p$  [m/s]は、管路内粒子群の運動方程式を用いて導かれる。

$$N(\pi/6)D_p^3 \rho_p (du_p/dt) = NR_f - N\mu_w(\pi/6)D_p^3 \rho_p g \cos\theta - N(\pi/6)D_p^3 \rho_p g \sin\theta \quad \cdots(3.2.2.1)$$

$$du_p/dt = g(u - u_p)^{2-\varepsilon} / u_i^{2-\varepsilon} - \mu_w g \cos\theta - g \sin\theta \quad \cdots(3.2.2.2)$$

$$0 = [(u - u_p)/u_i]^{2-\varepsilon} - \mu_w \cos\theta - \sin\theta \quad \cdots(3.2.2.3)$$

$$[(u - u_p)/u_i]^{2-\varepsilon} = \mu_w \cos\theta + \sin\theta \quad \cdots(3.2.2.4)$$

$$u - u_p = u_i (\mu_w \cos\theta + \sin\theta)^{1/(2-\varepsilon)} \quad \cdots(3.2.2.5)$$

$$u_p = u - u_i (\mu_w \cos\theta + \sin\theta)^{1/(2-\varepsilon)} \quad \cdots(3.2.2.6)$$

$$\phi = 1 - (u_i/u) (\mu_w \cos\theta + \sin\theta)^{1/(2-\varepsilon)} \quad [\phi = u_p/u] \quad \cdots(3.2.2.7)$$

ただし、 $\phi$ は無次元粒子速度[-]、 $\mu_w$ は壁摩擦係数[-]。

輸送物が粉体のとき  $\varepsilon=1$ (Stokes,  $Re_p < 2$ )、粒体のとき  $\varepsilon=0$ (Newton,  $500 < Re_p$ )。

運動方程式の右辺第1項は粒子群が空気流から受ける推力、第2項は粒子群が管壁から受ける摩擦力、第3項は重力の分力を表す。

終末速度  $u_i$  [m/s]は、次式より求める。

$$\text{(粉体, } Re_p < 2) \quad u_i = g(\rho_p - \rho)D_p^2 / (18\mu) \quad \cdots(3.2.2.8)$$

$$\text{(粒体, } 500 < Re_p) \quad u_i = [3g(\rho_p - \rho)D_p/\rho]^{1/2} \quad \cdots(3.2.2.9)$$

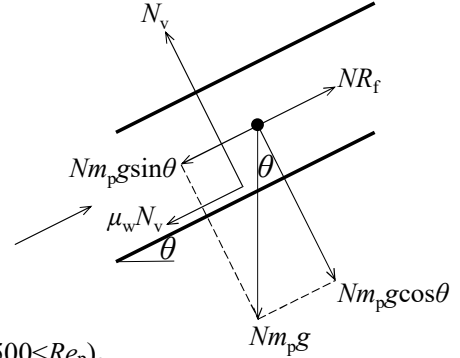
$$\text{(中間, } 2 < Re_p < 500) \quad u_i = [(4/225)g^2(\rho_p - \rho)^2/(\rho\mu)]^{1/3} D_p \quad \cdots(3.2.2.10)$$

ただし、 $Re_p$ は粒子レイノルズ数( $=D_p u \rho/\mu$ )。

実用的な粒子速度  $u_p$  [m/s]は、管材質に依存する。鋼管については次の推算式を用いる。[文献 16-18]

$$\text{(水平管)} \quad u_p/u = 6.2\Gamma^{-0.18}(\rho_p/\rho)^{-0.28} \quad \cdots(3.2.2.11)$$

$$\text{(鉛直管)} \quad u - u_p = 0.71u_i(1 + 0.0065Fr^{2.5}Fr_i^{-1.25})^{0.5} \quad [Fr = u/(gD)^{0.5}, Fr_i = u_i/(gD)^{0.5}] \quad \cdots(3.2.2.12)$$



### 3.2.3 非定常輸送時 [文献 14, 15]

非定常輸送時( $du_p/dt \neq 0$ )の理論的な粒子速度  $u_p$  [m/s]は、管路内粒子群の運動方程式を用いて導かれる。

$$N(\pi/6)D_p^3 \rho_p (du_p/dt) = NR_f - N\mu_w(\pi/6)D_p^3 \rho_p g \cos\theta - N(\pi/6)D_p^3 \rho_p g \sin\theta \quad \cdots(3.2.3.1)$$

$$du_p/dt = g(u - u_p)^{2-\varepsilon} / u_i^{2-\varepsilon} - \mu_w g \cos\theta - g \sin\theta \quad \cdots(3.2.3.2)$$

$$(u/g)(d\phi/dt) = (u^2 - 2uu_p + u_p^2)/u_i^2 - \mu_w \cos\theta - \sin\theta \quad [\phi \equiv u_p/u, \varepsilon=0 \text{ (粒体を仮定)}] \quad \cdots(3.2.3.3)$$

$$(u/g)(d\phi/dt) = (u/u_i)^2 - 2uu_p/u_i^2 + (u_p/u_i)^2 - \mu_w \cos\theta - \sin\theta \quad \cdots(3.2.3.4)$$

$$(u/g)(d\phi/dt) = (u/u_i)^2 [1 - 2(u_p/u) + (u_p/u)^2 - (u_i/u)^2 (\mu_w \cos\theta + \sin\theta)] \quad \cdots(3.2.3.5)$$

$$d\phi/dt = (gu/u_i^2) [1 - 2\phi + \phi^2 - (u_i/u)^2 (\mu_w \cos\theta + \sin\theta)] \quad \cdots(3.2.3.6)$$

$$d\phi/dt = A + 2B\phi + C\phi^2 \quad [A \equiv (gu/u_i^2) \{1 - (u_i/u)^2 (\mu_w \cos\theta + \sin\theta)\}, B \equiv -gu/u_i^2, C \equiv gu/u_i^2 (= -B)] \quad \cdots(3.2.3.7)$$

$$dt = d\phi / (A + 2B\phi + C\phi^2) \quad \cdots(3.2.3.8)$$

$$dt = d\phi / [C \{ (A/C) + (2B/C)\phi + \phi^2 \}] \quad \cdots(3.2.3.9)$$

$$dt = d\phi / [C(\phi - p)(\phi - q)] \quad \cdots(3.2.3.10)$$

$$dt = [d\phi / \{C(p - q)\}] [1/(\phi - p) - 1/(\phi - q)] \quad \cdots(3.2.3.11)$$

粒子の初速度は 0 とし、 $t=0 \sim t$  のとき  $\phi=0 \sim \phi$  の条件で積分する。

$$t=[1/\{C(p-q)\}][\{\ln(\phi-p)-\ln(-p)\}-\{\ln(\phi-q)-\ln(-q)\}] \quad \cdots(3.2.3.12)$$

$$t=[1/\{C(p-q)\}][\ln\{(\phi-p)/(-p)\}-\ln\{(\phi-q)/(-q)\}] \quad \cdots(3.2.3.13)$$

$$t=[1/\{C(p-q)\}]\ln\{(\phi-p)/(-p)\}/\{(\phi-q)/(-q)\} \quad \cdots(3.2.3.14)$$

$$t=[1/\{C(p-q)\}]\ln[\{(\phi-p)/(\phi-q)\}(q/p)] \quad \cdots(3.2.3.15)$$

2 次方程式の解  $p$  と  $q$  は、次式のように導かれる。

$$p=(1/2)[-(2B/C)+\{(2B/C)^2-4(A/C)\}^{1/2}] \quad \cdots(3.2.3.16)$$

$$p=-B/C+[(B/C)^2-(A/C)]^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.17)$$

$$p=1+(1/C)(B^2-AC)^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.18)$$

$$\boxed{p=1+(1/C)X} \quad \cdots(3.2.3.19)$$

$$q=(1/2)[-(2B/C)-\{(2B/C)^2-4(A/C)\}^{1/2}] \quad \cdots(3.2.3.20)$$

$$q=-B/C-[(B/C)^2-(A/C)]^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.21)$$

$$q=1-(1/C)(B^2-AC)^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.22)$$

$$\boxed{q=1-(1/C)X} \quad \cdots(3.2.3.23)$$

$$p-q=[1+(1/C)X]-[1-(1/C)X] \quad \cdots(3.2.3.24)$$

$$p-q=(2/C)X \quad \cdots(3.2.3.25)$$

$$q/p=[1-(1/C)X]/[1+(1/C)X] \quad \cdots(3.2.3.26)$$

$$q/p=(C-X)/(C+X) \quad \cdots(3.2.3.27)$$

$X$  は次式のように導かれる。

$$X=(B^2-AC)^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.28)$$

$$X=(C^2-AC)^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.29)$$

$$X=C^{1/2}(C-A)^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.30)$$

$$X=(gu/u^2)^{1/2}[(gu/u^2)-\{(gu/u^2)\{1-(u/u)^2(\mu_w \cos \theta + \sin \theta)\}\}]^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.31)$$

$$X=(gu/u^2)^{1/2}[(gu/u^2)(u^2/u^2)(\mu_w \cos \theta + \sin \theta)]^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.32)$$

$$X=(gu/u^2)^{1/2}[(g/u)(\mu_w \cos \theta + \sin \theta)]^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.33)$$

$$X=[(g^2/u^2)(\mu_w \cos \theta + \sin \theta)]^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.34)$$

$$\boxed{X=(g/u)(\mu_w \cos \theta + \sin \theta)^{1/2}} \quad \cdots(3.2.3.35)$$

$p$  と  $q$  の式を  $t$  の式に代入すると、無次元粒子速度が  $\phi$  に達するまでの所要時間  $t$  が導かれる。

$$t=[1/\{C(2/C)X\}]\ln\{(\phi-1-(X/C))/(\phi-1+(X/C))\}\{(C-X)/(C+X)\} \quad \cdots(3.2.3.36)$$

$$t=[1/(2X)]\ln\{(\phi-1-(X/C))/(\phi-1+(X/C))\}\{(C-X)/(C+X)\} \quad \cdots(3.2.3.37)$$

$$t=(2X)^{-1}\ln\{(\phi-1-(X/C))/(\phi-1+(X/C))\}\{(C-X)/(C+X)\} \quad \cdots(3.2.3.38)$$

$$\boxed{t=(2X)^{-1}\ln\{(\phi-1-X/C)/(\phi-1+X/C)\}\{(C-X)/(C+X)\}} \quad \cdots(3.2.3.39)$$

上式を整理すると、任意の時間  $t$  における無次元粒子速度  $\phi$  の式が導かれる。

$$e^{2Xt}=[\{C(\phi-1)-X\}(C-X)]/[\{C(\phi-1)+X\}(C+X)] \quad \cdots(3.2.3.40)$$

$$e^{2Xt}[C(C+X)(\phi-1)+X(C+X)]=C(C-X)(\phi-1)-X(C-X) \quad \cdots(3.2.3.41)$$

$$[C(C+X)e^{2Xt}-C(C-X)](\phi-1)=-X(C-X)-X(C+X)e^{2Xt} \quad \cdots(3.2.3.42)$$

$$\phi-1=[\{X(C-X)+X(C+X)e^{2Xt}\}/\{C(C+X)e^{2Xt}-C(C-X)\}] \quad \cdots(3.2.3.43)$$

$$\phi=[\{C(C+X)e^{2Xt}-C(C-X)\}-\{X(C-X)+X(C+X)e^{2Xt}\}]/[C(C+X)e^{2Xt}-C(C-X)] \quad \cdots(3.2.3.44)$$

$$\phi = [(C-X)(C+X)e^{2Xt} - (C-X)(C+X)] / [C(C+X)e^{2Xt} - C(C-X)] \quad \cdots(3.2.3.45)$$

$$\phi = (1/C) \{ [(C-X)(C+X)(1 - e^{-2Xt})] / [(C+X) - (C-X)e^{-2Xt}] \} \quad [C \equiv gu/u_t^2, X \equiv (g/u_t)(\mu_w \cos\theta + \sin\theta)^{1/2}] \quad \cdots(3.2.3.46)$$

十分に長い時間が経過すると ( $t \rightarrow \infty, e^{-2Xt} \rightarrow 0$ )、定常輸送時の無次元粒子速度式に一致する。

$$\phi = (1/C)(C-X)(C+X)/(C+X) \quad \cdots(3.2.3.47)$$

$$\phi = 1 - (X/C) \quad \cdots(3.2.3.48)$$

$$\phi = 1 - (g/u_t)(\mu_w \cos\theta + \sin\theta)^{1/2} / (gu/u_t^2) \quad \cdots(3.2.3.49)$$

$$\phi = 1 - (u_t/u)(\mu_w \cos\theta + \sin\theta)^{1/2} \quad \cdots(3.2.3.50)$$

### 【計算例】粒子速度

平均粒子径 3 mm、粒子密度 1400 kg/m<sup>3</sup>、壁摩擦係数 0.4 の小麦を鋼管により混合比 10、平均流速 20 m/s で水平に空気輸送する。定常輸送時の①理論的な粒子速度  $u_p$  [m/s]、②実用的な粒子速度  $u_p$  [m/s] を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s、重力加速度 9.81 m/s<sup>2</sup> とする。(①13.6 m/s, ②11.3 m/s)

$$u_t = [3g(\rho_p - \rho)D_p/\rho]^{1/2} = [(3)(9.81)(1400 - 1.2)(3 \times 10^{-3})/(1.2)]^{1/2} = 10.144 \text{ m/s (Newton 域を仮定)}$$

$$Re_p = D_p u_t \rho / \mu = (3 \times 10^{-3})(10.144)(1.20)/(18.2 \times 10^{-6}) = 2006 > 500 \quad \text{Newton 域の仮定は、正しい。}$$

$$\phi = 1 - (u_t/u)(\mu_w \cos\theta + \sin\theta)^{1/2} = 1 - (10.144/20)(0.4 \cos 0 + \sin 0)^{1/2} = 1 - (10.144/20)(0.4)^{1/2} = 0.67921$$

$$u_p = \phi u = (0.67921)(20) = 13.584 \text{ m/s} \approx \boxed{13.6 \text{ m/s}}$$

$$u_p/u = 6.2 \Gamma^{-0.18} (\rho_p/\rho)^{-0.28} = (6.2)(10)^{-0.18} (1400/1.20)^{-0.28} = 0.56708$$

$$u_p = (u_p/u)u = (0.56708)(20) = 11.341 \text{ m/s} \approx \boxed{11.3 \text{ m/s}}$$

### 【問題】粒子速度

- (1) 平均粒子径 7 mm、粒子密度 1200 kg/m<sup>3</sup>、壁摩擦係数 0.3 の大豆を鋼管により混合比 12、平均流速 20 m/s で水平に空気輸送する。定常輸送時の①理論的な粒子速度  $u_p$  [m/s]、②実用的な粒子速度  $u_p$  [m/s] を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s、重力加速度 9.81 m/s<sup>2</sup> とする。(①12.1 m/s, ②11.4 m/s)
- (2) 平均粒子径 3 mm、粒子密度 1400 kg/m<sup>3</sup>、壁摩擦係数 0.4 の小麦を 7B 鋼管により平均流速 20 m/s で鉛直上向きに空気輸送する。定常輸送時の①理論的な粒子速度  $u_p$  [m/s]、②実用的な粒子速度  $u_p$  [m/s] を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s、重力加速度 9.81 m/s<sup>2</sup> とする。(①9.86 m/s, ②11.3 m/s)
- (3) 平均粒子径 0.8 mm、粒子密度 2650 kg/m<sup>3</sup>、壁摩擦係数 0.4 の砂を鋼管により平均流速 20 m/s で斜め上向き 30°の方向に空気輸送する。定常輸送時の理論的な粒子速度  $u_p$  [m/s] を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s、重力加速度 9.81 m/s<sup>2</sup> とする。(14.1 m/s)

## 3. 3 空気单相流の圧力損失

管路内における空気单相流の圧力損失  $\Delta P_G$  [Pa] は、直管部の圧力損失  $\Delta P_{GS}$  [Pa] と曲管部の圧力損失  $\Delta P_{GB}$  [Pa] の和で表される。

$$\Delta P_G = \Delta P_{GS} + \Delta P_{GB} \quad \cdots(3.3.1)$$

直管部の圧力損失  $\Delta P_{GS}$  を導く。管壁が受ける流体抵抗  $F_w$  [N] は、円管の側面積と運動エネルギーに比例

するものとして次式で表される。

$$F_w = f(\pi DL)(\rho u^2/2) \quad \dots(3.3.2)$$

ただし、 $f$ は管(くだ)摩擦係数[-]。

垂直円管の出入口に作用する力のつり合いより直管部の圧力損失を表すファニングの式を得る。

$$\pi r^2 p_1 = \pi r^2 p_2 + \pi r^2 L \rho g + f(\pi DL)(\rho u^2/2) \quad \dots(3.3.3)$$

$$\pi r^2 \Delta P_{GS} = f(\pi DL)(\rho u^2/2) \quad \dots(3.3.4)$$

$$\Delta P_{GS} = [f(\pi DL) / \{\pi(D/2)^2\}] (\rho u^2/2) \quad \dots(3.3.5)$$

$$\Delta P_{GS} = 4f(L/D)(\rho u^2/2) \quad \dots(3.3.6)$$

$$\Delta P_{GS} = 4f(\Sigma L/D)(\rho u^2/2) \quad (\text{複数の直管が接続される場合}) \quad \dots(3.3.7)$$

$$Re < 2100 \text{ のとき} \quad f = 16/Re \quad \dots(3.3.8)$$

$$3000 < Re < 10^5 \text{ のとき} \quad f = 0.0791 Re^{-0.25} \quad \text{ブラジウス式} \quad \dots(3.3.9)$$

$$10^5 < Re \text{ のとき} \quad f = 0.0008 + 0.05525 Re^{-0.237} \quad \text{ニコラーゼ式} \quad \dots(3.3.10)$$

曲管部(バンド)の圧力損失  $\Delta P_{GB}$  [Pa]は、次式で与えられる。

$$\Delta P_{GB} = \Sigma \zeta_{GB} (\rho u^2/2) \quad \dots(3.3.11)$$

曲管部の損失係数 $\zeta_{GB}$ (ゼータ)[-]は、次式を用いる。【文献19】

$$Re(r/R)^2 < 91 \text{ のとき} \quad \zeta_{GB} = 0.00873 \alpha \lambda_c \theta (R/r) \quad [\lambda_c = 0.316 Re^{-1/5} (R/r)^2, Re = Dup/\mu] \quad \dots(3.3.12)$$

$$Re(r/R)^2 > 91 \text{ のとき} \quad \zeta_{GB} = 0.00241 \alpha \theta Re^{-0.17} (R/r)^{0.84} \quad \dots(3.3.13)$$

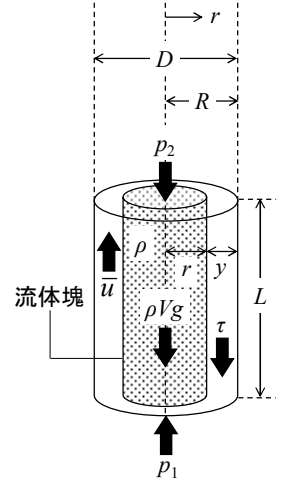
$$(45^\circ \text{バンド}) \quad \alpha = 1 + 14.2 (R/r)^{-1.47} \quad \dots(3.3.14)$$

$$(90^\circ \text{バンド, } R/r < 19.7) \quad \alpha = 0.95 + 17.2 (R/r)^{-1.96} \quad \dots(3.3.15)$$

$$(90^\circ \text{バンド, } R/r > 19.7) \quad \alpha = 1 \quad \dots(3.3.16)$$

$$(180^\circ \text{バンド}) \quad \alpha = 1 + 116 (R/r)^{-4.52} \quad \dots(3.3.17)$$

ただし、 $r$ は管半径[m]、 $R$ はバンドの曲率半径[m]、 $R/r$ は半径比[-]、 $u$ は輸送空気流速[m/s]、 $\theta$ は曲がり角[deg.]。



### 【計算例】空気単相流の圧力損失

管長 10 m の 7B 鋼管 3 本と半径比 12 の 90°バンド 2 個からなる管路内を空気が平均流速 20 m/s で流れている。管路内における①直管部の圧力損失  $\Delta P_{GS}$  [Pa]、②曲管部の圧力損失  $\Delta P_{GB}$ 、③全圧力損失  $\Delta P_G$  [Pa]を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s とする。(①598 Pa, ②111 Pa, ③709 Pa)

$$D = D_o - 2t_f = 190.7 - (2)(5.3) = 180.1 \text{ mm} = 0.1801 \text{ m}$$

$$Re = Dup/\mu = (0.1801)(20)(1.2)/(18.2 \times 10^{-6}) = 2.3749 \times 10^5$$

$$f = 0.0008 + 0.05525 Re^{-0.237} = 0.0008 + (0.05525)(2.3749 \times 10^5)^{-0.237} = 0.0037397$$

$$\Delta P_{GS} = 4f(\Sigma L/D)(\rho u^2/2) = (4)(0.0037397)(30/0.1801)(1.2)(20)^2/2 = 598.01 \text{ Pa} \approx \boxed{598 \text{ Pa}}$$

$$\alpha = 0.95 + 17.2 (R/r)^{-1.96} = 0.95 + (17.2)(12)^{-1.96} = 1.0819$$

$$Re(r/R)^2 = (2.3749 \times 10^5)(1/12)^2 = 1649.2 > 91$$

$$\zeta_{GB} = 0.00241 \alpha \theta Re^{-0.17} (R/r)^{0.84} = (0.00241)(1.0819)(90)(2.3749 \times 10^5)^{-0.17} (12)^{0.84} = 0.23072$$

$$\Delta P_{GB} = \Sigma \zeta_{GB} (\rho u^2/2) = (2 \zeta_{GB})(\rho u^2/2) = (2)(0.23072)(1.2)(20)^2/2 = 110.74 \text{ Pa} \approx \boxed{111 \text{ Pa}}$$

$$\Delta P_G = \Delta P_{GS} + \Delta P_{GB} = 598.01 + 110.74 = 708.75 \text{ Pa} \approx \boxed{709 \text{ Pa}}$$

**【問題】 空気単相流の圧力損失**

- (1) 管長 50 m の 8B 鋼管 2 本と半径比 12 の 90°ベンド 1 個からなる管路内を空気が平均流速 20 m/s で流れている。管路内における①直管部の圧力損失  $\Delta P_{GS}$  [Pa]、②曲管部の圧力損失  $\Delta P_{GB}$ 、③全圧力損失  $\Delta P_G$  [Pa]を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s とする。(①1713 Pa, ②54.2 Pa, ③1767 Pa)
- (2) 管長 6 m の 7B 鋼管 5 本と半径比 12 の 45°ベンド 4 個からなる管路内を空気が平均流速 20 m/s で流れている。管路内における①直管部の圧力損失  $\Delta P_{GS}$  [Pa]、②曲管部の圧力損失  $\Delta P_{GB}$ 、③全圧力損失  $\Delta P_G$  [Pa]を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s とする。(①598 Pa, ②140 Pa, ③738 Pa)

**3. 4 固気二相流の圧力損失**

**3. 4. 1 全圧力損失**

管路内における固気二相流の全圧力損失  $\Delta P_T$  [Pa]は、空気単相流の圧力損失  $\Delta P_G$  [Pa]と固体粒子の存在による付加圧力損失  $\Delta P_S$  [Pa]の和で与えられる。

$$\Delta P_T = \Delta P_G + \Delta P_S \quad \dots(3.4.1.1)$$

付加圧力損失  $\Delta P_S$  [Pa]は、①固体粒子の加速による圧力損失  $\Delta P_{SA}$  [Pa]、②直管部での粒子-管壁間摩擦による圧力損失  $\Delta P_{SF}$  [Pa]、③曲管部での粒子-管壁間摩擦による圧力損失  $\Delta P_{SB}$  [Pa]の和で表される。

$$\Delta P_S = \Delta P_{SA} + \Delta P_{SF} + \Delta P_{SB} \quad \dots(3.4.1.2)$$

**3. 4. 2 加速時圧力損失**

固体粒子の加速による圧力損失  $\Delta P_{SA}$  [Pa]は、次式で与えられる。

$$\Delta P_{SA} = \zeta_{SA}(\rho u^2/2) \quad \dots(3.4.2.1)$$

加速損失係数  $\zeta_{SA}$  [-]は、森川の式を用いる。[文献 18, 20]

$$\text{(水平管)} \quad \zeta_{SA} = (1.82 - 0.078u_t)\Gamma \quad \dots(3.4.2.2)$$

$$\text{(鉛直管)} \quad \zeta_{SA} = (2.43 - 0.089u_t)\Gamma \quad \dots(3.4.2.3)$$

ただし、 $u_t$  は終末速度[m/s]、 $\Gamma$  は混合比[-]。

終末速度  $u_t$  [m/s]は、次式より求める。

$$Re_p < 2 \text{ のとき} \quad u_t = g(\rho_p - \rho)D_p^2 / (18\mu) \quad \dots(3.4.2.4)$$

$$2 < Re_p < 500 \text{ のとき} \quad u_t = [(4/225)g^2(\rho_p - \rho)^2 / (\rho\mu)]^{1/3} D_p \quad \dots(3.4.2.5)$$

$$500 < Re_p \text{ のとき} \quad u_t = [3g(\rho_p - \rho)D_p / \rho]^{1/2} \quad \dots(3.4.2.6)$$

ただし、 $Re_p$  は粒子レイノルズ数(= $D_p u \rho / \mu$ )。

**【計算例】 加速時圧力損失**

平均粒子径 3 mm、粒子密度 1400 kg/m<sup>3</sup> の小麦を混合比 10、平均流速 20 m/s で空気輸送する。①水平管内における加速時圧力損失  $\Delta P_{SA,h}$  [kPa]、②鉛直管内における加速時圧力損失  $\Delta P_{SA,v}$  [kPa]を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s とする。(①2.47 kPa, ②3.67 kPa)

$$u_t = [3g(\rho_p - \rho)D_p / \rho]^{1/2} = [(3)(9.81)(1400 - 1.2)(3 \times 10^{-3}) / (1.2)]^{1/2} = 10.144 \text{ m/s (Newton 域を仮定)}$$

$$Re_p = D_p u \rho / \mu = (3 \times 10^{-3})(10.144)(1.20) / (18.2 \times 10^{-6}) = 2006 > 500 \quad \text{Newton 域の仮定は、正しい。}$$

$$\zeta_{SA,h} = (1.82 - 0.078u_t)\Gamma = [1.82 - (0.078)(10.144)](10) = 10.287$$

$$\Delta P_{SA,h} = \zeta_{SA,h}(\rho u^2/2) = (10.287)(1.2)(20)^2/2 = 2468.8 \text{ Pa} \doteq \boxed{2.47 \text{ kPa}}$$

$$\zeta_{SA,v} = (2.43 - 0.089u_t)\Gamma = [2.43 - (0.089)(10.144)](10) = 15.271$$

$$\Delta P_{SA,v} = \zeta_{SA,v}(\rho u^2/2) = (15.271)(1.2)(20)^2/2 = 3665.0 \text{ Pa} \doteq \boxed{3.67 \text{ kPa}}$$

### 【問題】 加速時圧力損失

- (1) 平均粒子径 7 mm、粒子密度 1200 kg/m<sup>3</sup> の大豆を混合比 12、平均流速 20 m/s で空気輸送する。①水平管内における加速時圧力損失  $\Delta P_{SA,h}$  [kPa]、②鉛直管内における加速時圧力損失  $\Delta P_{SA,v}$  [kPa] を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s とする。(①2.01 kPa, ②3.32 kPa)
- (2) 平均粒子径 3 mm、粒子密度 1400 kg/m<sup>3</sup> の小麦を混合比 20、平均流速 15 m/s で空気輸送する。①水平管内における加速時圧力損失  $\Delta P_{SA,h}$  [kPa]、②鉛直管内における加速時圧力損失  $\Delta P_{SA,v}$  [kPa] を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s とする。(①2.78 kPa, ②4.12 kPa)

### 3.4.3 直管部の粒子-管壁間圧力損失

球状の固体粒子を含む空気が管径  $D$  [m]、断面積  $A$  [m<sup>2</sup>] の円管内を一定流速で流れているものとする。気流が管路内を距離  $L$  [m] だけ進む間に生じる粒子-管壁間摩擦による圧力損失  $\Delta P_{SF}$  [Pa] は、流体塊に及ぼす力のつり合い式より導かれる。

$$PA = NR_f + (P - \Delta P_{SF})A \quad \cdots(3.4.3.1)$$

$$\Delta P_{SF} = NF/A \quad \cdots(3.4.3.2)$$

ただし、 $R_f$  は粒子 1 個が受ける空気抵抗 [N]、 $N$  は粒子個数 [–]。

実際の粒子運動は不規則であり、管路の壁面近傍と本体側とは流動挙動が大きく異なることから、上式に補正係数  $\eta$  [–] を乗じる。

$$\Delta P_{SF} = \eta NR_f/A \quad \cdots(3.4.3.3)$$

粒子個数  $N$  [–] の式を導く。固体粒子を含む空気が距離  $L$  [m] だけ進む間に成り立つ質量保存式を用いる。

$$Nm_p + (AL - Nm_p/\rho_p)\rho = \rho_{pf}AL \quad \cdots(3.4.3.4)$$

$$N = (\rho_{pf} - \rho)AL / [m_p \{1 - (\rho/\rho_p)\}] \quad \cdots(3.4.3.5)$$

$$N \doteq (\rho_{pf} - \rho)AL / m_p \quad (\rho \ll \rho_p) \quad \cdots(3.4.3.6)$$

$$\boxed{N \doteq (\rho_{pf} - \rho)AL / [(\pi/6)\rho_p D_p^3]} \quad \cdots(3.4.3.7)$$

ただし、 $m_p$  は粒子質量 [kg]、 $\rho$  は空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\rho_{pf}$  は粉体流密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\rho_p$  は粒子密度 [kg/m<sup>3</sup>]。

粉体流密度  $\rho_{pf}$  [kg/m<sup>3</sup>] は、次式のように導かれる。

$$\rho_{pf} = [w(L/u) + w_p(L/u_p)] / (AL) \quad \cdots(3.4.3.8)$$

$$\rho_{pf} = [(w/u) + (w_p/u_p)] / A \quad \cdots(3.4.3.9)$$

$$\rho_{pf} = (w/u) [1 + (w_p/u_p)/(w/u)] / A \quad \cdots(3.4.3.10)$$

$$\rho_{pf} = [1 + (w_p/w)/(u_p/u)] \rho \quad \cdots(3.4.3.11)$$

$$\boxed{\rho_{pf} = [1 + (\Gamma/\phi)] \rho} \quad [\phi = u_p/u, \Gamma = w_p/w] \quad \cdots(3.4.3.12)$$

ただし、 $w$  は空気の質量流量 [kg/s]、 $w_p$  は粒子の質量流量 [kg/s]、 $\phi$  は速度比 [–]、 $\Gamma$  は混合比 [–]。

空気抵抗  $R_f$  [N] は、次式で表される。

$$R_f = C_D(\pi D_p^2/4)\rho(u - u_p)^2/2 \quad \cdots(3.4.3.13)$$

$$C_D = \kappa / Re_p^\epsilon \quad \cdots(3.4.3.14)$$

$$Re_p = D_p(u - u_p)\rho/\mu \quad \cdots(3.4.3.15)$$

ただし、 $C_D$ は抵抗係数[-]、 $Re_p$ は粒子レイノルズ数[-]、 $u$ は空気速度[m/s]、 $u_p$ は粒子速度[m/s]、 $\rho$ は空気密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\mu$ は空気粘度[Pa·s]、 $\kappa$ と $\varepsilon$ は定数( $Re_p < 2$ のとき $\kappa=24$ ,  $\varepsilon=1$ (Stokes)、 $2 < Re_p < 500$ のとき $\kappa=10$ ,  $\varepsilon=0.5$ (Allen)、 $500 < Re_p$ のとき $\kappa=0.44$ ,  $\varepsilon=0$ (Newton))。

粒子レイノルズ数  $Re_p$  と円管内流れのレイノルズ数  $Re$  の比を取る。

$$Re_p/Re = [D_p(u - u_p)\rho/\mu] / (Du\rho/\mu) \quad \cdots(3.4.3.16)$$

$$Re_p/Re = [1 - (u_p/u)](D_p/D) \quad \cdots(3.4.3.17)$$

$$Re_p = (1 - \phi)(D_p/D)Re \quad \cdots(3.4.3.18)$$

抵抗係数  $C_D$  の式に代入する。

$$C_D = \kappa / [(1 - \phi)(D_p/D)Re]^\varepsilon \quad \cdots(3.4.3.19)$$

空気抵抗  $R_f$  の式に代入する。

$$R_f = [\kappa / \{(1 - \phi)(D_p/D)Re\}^\varepsilon] (\pi D_p^2 / 4) \rho (u - u_p)^2 / 2 \quad \cdots(3.4.3.20)$$

$$R_f = \pi \kappa D_p^2 \rho (u - u_p)^2 / [8 \{(1 - \phi)(D_p/D)Re\}^\varepsilon] \quad \cdots(3.4.3.21)$$

$$R_f = \pi \kappa D_p^2 \rho u^2 (1 - \phi)^2 / [8 \{(1 - \phi)(D_p/D)Re\}^\varepsilon] \quad \cdots(3.4.3.22)$$

粒子個数  $N$  と空気抵抗  $R_f$  と粉体流密度  $\rho_{pf}$  の式を  $\Delta P_{SF}$  [Pa] の式に代入する。

$$\Delta P_{SF} = (\eta/A) [\{1 + (\Gamma/\phi)\} \rho - \rho] AL / \{(\pi/6)\rho_p D_p^3\} [\pi \kappa D_p^2 \rho u^2 (1 - \phi)^2 / \{8 \{(1 - \phi)(D_p/D)Re\}^\varepsilon\}] \quad \cdots(3.4.3.23)$$

$$\Delta P_{SF} = [(3/4)\eta(\Gamma L/\phi)/(\rho_p D_p)] [\kappa \rho^2 u^2 (1 - \phi)^2 / \{(1 - \phi)^\varepsilon (D_p/D)^\varepsilon Re^\varepsilon\}] \quad \cdots(3.4.3.24)$$

$$\Delta P_{SF} = (3/2)\eta(\kappa \Gamma / Re^\varepsilon) [(1 - \phi)/\phi]^{2-\varepsilon} [(1/D_p)(D/D_p)^\varepsilon] (\rho/\rho_p) (\rho u^2 / 2) L \quad \cdots(3.4.3.25)$$

$$\Delta P_{SF} = 1.5\eta(\kappa \Gamma / Re^\varepsilon) [(1 - \phi)/\phi]^{2-\varepsilon} [(1/D_p)(D/D)(D/D_p)^\varepsilon] (\rho/\rho_p) (\rho u^2 / 2) L \quad \cdots(3.4.3.26)$$

$$\Delta P_{SF} = 1.5\eta(\kappa \Gamma / Re^\varepsilon) [(1 - \phi)/\phi]^{2-\varepsilon} (D/D_p)^{1+\varepsilon} (\rho/\rho_p) (L/D) (\rho u^2 / 2) \quad \cdots(3.4.3.27)$$

$$\boxed{\Delta P_{SF} = \lambda_{SF} (L/D) (\rho u^2 / 2)} \quad [\lambda_{SF} = 1.5\eta(\kappa \Gamma / Re^\varepsilon) [(1 - \phi)/\phi]^{2-\varepsilon} (D/D_p)^{1+\varepsilon} (\rho/\rho_p)] \quad \cdots(3.4.3.28)$$

$$\Delta P_{SF} = \lambda_{SF} (\Sigma L/D) (\rho u^2 / 2) \quad (\text{複数の直管が接続される場合}) \quad \cdots(3.4.3.29)$$

ただし、 $\lambda_{SF}$  は摩擦係数[-]。

補正係数  $\eta$  については、次式が知られている。[文献 21]

$$\eta = 0.0520 Fr^{1+(c/2.5)} \quad [Fr = u/(gD)^{1/2}] \quad \cdots(3.4.3.30)$$

### 3.4.4 曲管部の粒子-管壁間圧力損失 [文献 22, 23]

曲管部 (バンド) における固体粒子と管壁間の摩擦による圧力損失  $\Delta P_{SB}$  [Pa] は、次式で与えられる。

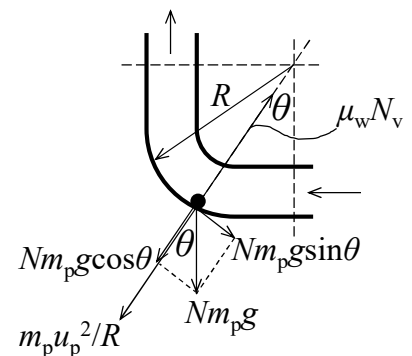
$$\Delta P_{SB} = \Sigma \zeta_{SB} \Gamma (\rho u^2 / 2) \quad \cdots(3.4.4.1)$$

バンドは鉛直面内に置かれるものとし、水平から鉛直上向きへの流れを考える。バンド内を流れる粒子群が微小距離  $Rd\theta (= 2\pi R \times d\theta / 2\pi)$  だけ進む間に生じる粒子-管壁間摩擦による微小圧力損失  $d(\Delta P_{SB})$  [Pa] は、重力による力  $W$  [N] と重力に基づく摩擦力  $F_g$  [N] と遠心力に基づく摩擦力  $F_c$  [N] の合力より導かれる。

$$d(\Delta P_{SB}) = (1/A)(W + F_g + F_c) \quad \cdots(3.4.4.2)$$

$$d(\Delta P_{SB}) = (1/A)[w_p(Rd\theta/u_p)g \sin\theta + \mu_w w_p(Rd\theta/u_p)g \cos\theta + \mu_w w_p(Rd\theta/u_p)(u_p^2/R)] \quad \cdots(3.4.4.3)$$

$$d(\Delta P_{SB}) = (1/A)w_p(Rd\theta/u_p)[g \sin\theta + \mu_w g \cos\theta + \mu_w (u_p^2/R)] \quad \cdots(3.4.4.4)$$



$$d(\Delta P_{SB})=[w_p R/(u_p A)][g \sin \theta d\theta + \mu_w g \cos \theta d\theta + \mu_w (u_p^2/R) d\theta] \quad \cdots(3.4.4.5)$$

$d(\Delta P_{SB})=0 \sim \Delta P_{SB}$  のとき  $d\theta=0 \sim \pi/2$  の範囲で積分する。

$$\Delta P_{SB}=[w_p R/(u_p A)][g\{-\cos(\pi/2)+\cos 0\}+\mu_w g\{\sin(\pi/2)-\sin 0\}+\mu_w (u_p^2/R)\{(\pi/2)-0\}] \quad \cdots(3.4.4.6)$$

$$\Delta P_{SB}=[w_p R/(u_p A)][g+\mu_w g+\mu_w (u_p^2/R)(\pi/2)] \quad \cdots(3.4.4.7)$$

$$\Delta P_{SB}=(u_p^2/R)[w_p R/(u_p A)](R/u_p^2)[g+\mu_w\{g+(u_p^2/R)(\pi/2)\}] \quad \cdots(3.4.4.8)$$

$$\Delta P_{SB}=(w_p u_p/A)[g(R/u_p^2)+\mu_w\{g(R/u_p^2)+(R/u_p^2)(u_p^2/R)(\pi/2)\}] \quad \cdots(3.4.4.9)$$

$$\Delta P_{SB}=(w_p u_p/A)[(gR/u_p^2)+\mu_w\{(gR/u_p^2)+(\pi/2)\}] \quad \cdots(3.4.4.10)$$

一般式と等置する。

$$\zeta_{SB} I(\rho u^2/2)=(w_p u_p/A)[(gR/u_p^2)+\mu_w\{(gR/u_p^2)+(\pi/2)\}] \quad \cdots(3.4.4.11)$$

$$\zeta_{SB}=(w_p u_p/\Gamma \rho u^2 A)[(u^2/u_p^2)(2gR/u^2)+\mu_w(u^2/u_p^2)\{(2gR/u^2)+(u_p^2/u^2)\pi\}] \quad \cdots(3.4.4.12)$$

$$\zeta_{SB}=(w u_p/\rho u^2 A)[(u/u_p)^2(2/Fr_R^2)+\mu_w(u/u_p)^2\{(2/Fr_R^2)+(u_p/u)^2\pi\}] \quad [I \equiv w_p/w, Fr_R \equiv u^2/(gR)^{1/2}] \quad \cdots(3.4.4.13)$$

$$\zeta_{SB}=[\{(w/\rho)/(uA)\}(u_p/u)][(u_p/u)^{-2}(2/Fr_R^2)+\mu_w(u_p/u)^{-2}\{(2/Fr_R^2)+(u_p/u)^2\pi\}] \quad \cdots(3.4.4.14)$$

$$\zeta_{SB}=2/(\phi Fr_R^2)+(\mu_w/\phi)[2/Fr_R^2+\phi^2\pi] \quad [w/\rho=uA=Q, \phi=u_p/u] \quad \cdots(3.4.4.15)$$

$$\boxed{\zeta_{SB,1}=\mu_w[\phi\pi+2/(\phi Fr_R^2)]+2/(\phi Fr_R^2)} \quad (\text{水平から鉛直上向き}) \quad \cdots(3.4.4.16)$$

流れ方向の影響については、粒子群に作用する力の向きを考慮して次式となる。

$$\boxed{\zeta_{SB,2}=\mu_w[\phi\pi-2/(\phi Fr_R^2)]+2/(\phi Fr_R^2)} \quad (\text{鉛直上向きから水平}) \quad \cdots(3.4.4.17)$$

$$\boxed{\zeta_{SB,3}=\mu_w[\phi\pi+2/(\phi Fr_R^2)]-2/(\phi Fr_R^2)} \quad (\text{鉛直下向きから水平}) \quad \cdots(3.4.4.18)$$

$$\boxed{\zeta_{SB,4}=\mu_w[\phi\pi-2/(\phi Fr_R^2)]-2/(\phi Fr_R^2)} \quad (\text{水平から鉛直下向き}) \quad \cdots(3.4.4.19)$$

### 【計算例】固気二相流の圧力損失

平均粒子径 3 mm、粒子密度 1400 kg/m<sup>3</sup>、壁摩擦係数 0.4 の小麦を混合比 10、平均流速 20 m/s で空気輸送する。管路は 7B 鋼管を用いて水平方向に 12 m、鉛直上向き方向に 6 m、水平方向に 12 m の順からなり、半径比 12 の 90°ベンドを 2 個用いている。管路内における①加速時圧力損失  $\Delta P_{SA}$  [kPa]、②直管部の圧力損失  $\Delta P_{SF}$  [kPa]、③曲管部の圧力損失  $\Delta P_{SB}$  [kPa]、④付加圧力損失  $\Delta P_s$  [kPa]を求めよ。ただし、粒子の加速は水平管内で起こるものとし、加速中に進む距離は管長に対して十分に短いものとする。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s、重力加速度 9.81 m/s<sup>2</sup> とする。(①2.47 kPa, ②4.15 kPa, ③3.54 kPa, ④10.2 kPa)

$$\textcircled{1} u_t=[3g(\rho_p-\rho)D_p/\rho]^{1/2}=[(3)(9.81)(1400-1.20)(3 \times 10^{-3})/(1.20)]^{1/2}=10.144 \text{ m/s}(\text{Newton 域を仮定})$$

$$Re_p=D_p u_t \rho/\mu=(3 \times 10^{-3})(10.144)(1.20)/(18.2 \times 10^{-6})=2006 > 500 \quad \text{Newton 域の仮定は、正しい。}$$

$$\zeta_{SA}=(1.82-0.078u_t)\Gamma=[1.82-(0.078)(10.144)](10)=10.287$$

$$\Delta P_{SA}=\zeta_{SA}(\rho u^2/2)=(10.287)(1.20)(20)^2/2=2468.8 \text{ Pa} \doteq \boxed{2.47 \text{ kPa}}$$

$$\textcircled{2} D=D_o-2t_f=190.7-(2)(5.3)=180.1 \text{ mm}=0.1801 \text{ m}$$

$$Re=D u \rho/\mu=(0.1801)(20)(1.20)/(18.2 \times 10^{-6})=2.3749 \times 10^5$$

$$Fr=u/(gD)^{1/2}=20/[(9.81)(0.1801)]^{1/2}=15.046$$

$$\eta=0.0520 Fr^{1+(\epsilon/2.5)}=(0.0520)(15.046)^{1+(0/2.5)}=0.78239$$

$$\phi_h=1-(u_t/u)(\mu_w \cos \theta + \sin \theta)^{1/(2-\epsilon)}=1-(10.144/20)(0.4 \cos 0 + \sin 0)^{1/(2-0)}=1-(10.144/20)(0.4)^{1/2}=0.67921$$

$$\lambda_{SF,h}=1.5 \eta (\kappa \Gamma / Re^\epsilon)[(1-\phi_h)/\phi_h]^{2-\epsilon}(D/D_p)^{1+\epsilon}(\rho/\rho_p)$$

$$=(1.5)(0.78239)(0.44)(10)/(2.3749 \times 10^5)^0[(1-0.67921)/0.67921]^{2-0}(180.1/3)^{1+0}(1.2/1400)=0.059271$$



$$\phi_v = 1 - (u_v/u)(\mu_w \cos \theta + \sin \theta)^{1/(2-\varepsilon)} = 1 - (10.144/20)(0.4 \cos 90^\circ + \sin 90^\circ)^{1/(2-0)} = 1 - (10.144/20)(1)^{1/2} = 0.4928$$

$$\lambda_{SF,v} = 1.5\eta(\kappa\Gamma/Re^\varepsilon)[(1 - \phi_v)/\phi_v]^{2-\varepsilon}(D/D_p)^{1+\varepsilon}(\rho/\rho_p)$$

$$= (1.5)(0.78239)(0.44)(10)/(2.3749 \times 10^5)^0 [(1 - 0.4928)/0.4928]^{2-0} (180.1/3)^{1+0} (1.2/1400) = 0.28146$$

$$\Delta P_{SF} = [\lambda_{SF,h}(\Sigma L_h/D) + \lambda_{SF,v}(\Sigma L_v/D)](\rho u^2/2) = [(0.059271)(24/0.1801) + (0.28146)(6/0.1801)](1.20)(20)^2/2 = 4146.0 \text{ Pa}$$

$$\doteq \boxed{4.15 \text{ kPa}}$$

$$\textcircled{3} R = (R/r)r = (R/r)(D/2) = (12)(0.1801/2) = 1.0806$$

$$Fr_R (= Fr_{R,2}) = u^2/(gR)^{1/2} = (20)^2/[(9.81)(1.0806)]^{1/2} = 122.85$$

$$\zeta_{SB,1} = \mu_w[\phi_v \pi + 2/(\phi_h Fr_{R,1}^2)] + 2/(\phi_h Fr_{R,1}^2) = (0.4)[(0.67921\pi) + 2/\{(0.67921)(122.85)^2\}] + 2/[(0.67921)(122.85)^2]$$

$$= 0.85379$$

$$\zeta_{SB,2} = \mu_w[\phi_v \pi - 2/(\phi_v Fr_{R,2}^2)] + 2/(\phi_v Fr_{R,2}^2) = (0.4)[(0.4928\pi) - 2/\{(0.4928)(122.85)^2\}] + 2/[(0.4928)(122.85)^2]$$

$$= 0.61943$$

$$\Sigma \zeta_{SB} = \zeta_{SB,1} + \zeta_{SB,2} = 0.85379 + 0.61943 = 1.4732$$

$$\Delta P_{SB} = \Sigma \zeta_{SB} \Gamma (\rho u^2/2) = (1.4732)(10)(1.20)(20)^2/2 = 3535.6 \text{ Pa} \doteq \boxed{3.54 \text{ kPa}}$$

$$\textcircled{4} \Delta P_S = \Delta P_{SA} + \Delta P_{SF} + \Delta P_{SB} = 2468.8 + 4146.0 + 3535.6 = 10150 \text{ Pa} \doteq \boxed{10.2 \text{ kPa}}$$

### 【問題】 固気二相流の圧力損失

- (1) 平均粒子径 3 mm、粒子密度 1400 kg/m<sup>3</sup>、壁摩擦係数 0.4 の小麦を混合比 20、平均流速 15 m/s で空気輸送する。管路は 7B 鋼管を用いて水平方向に 10 m、鉛直上向き方向に 10 m、水平方向に 10 m の順からなり、半径比 12 の 90°ベンドを 2 個用いている。管路内における①加速時圧力損失  $\Delta P_{SA}$  [kPa]、②直管部の圧力損失  $\Delta P_{SF}$  [kPa]、③曲管部の圧力損失  $\Delta P_{SB}$  [kPa]、④付加圧力損失  $\Delta P_S$  [kPa]を求めよ。ただし、粒子の加速は水平管内で起こるものとし、加速中に進む距離は管長に対して十分に短いものとする。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2  $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、重力加速度 9.81 m/s<sup>2</sup> とする。(①2.78 kPa, ②1.64 kPa, ③3.04 kPa, ④22.2 kPa)
- (2) 平均粒子径 7 mm、粒子密度 1200 kg/m<sup>3</sup>、壁摩擦係数 0.3 の大豆を混合比 12、平均流速 20 m/s で空気輸送する。管路は 8B 鋼管を用いて水平方向に 20 m、鉛直上向き方向に 5 m、水平方向に 15 m の順からなり、半径比 12 の 90°ベンドを 2 個用いている。管路内における①加速時圧力損失  $\Delta P_{SA}$  [kPa]、②直管部の圧力損失  $\Delta P_{SF}$  [kPa]、③曲管部の圧力損失  $\Delta P_{SB}$  [kPa]、④付加圧力損失  $\Delta P_S$  [kPa]を求めよ。ただし、粒子の加速は水平管内で起こるものとし、加速中に進む距離は管長に対して十分に短いものとする。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2  $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、重力加速度 9.81 m/s<sup>2</sup> とする。(①2.01 kPa, ②9.33 kPa, ③2.42 kPa, ④13.8 kPa)

## 3. 5 輸送空気速度

### 3.5.1 サルテーション速度

水平管内において浮遊流の状態から空気流速を下げると、やがて摺動流の状態に変化する。浮遊流と摺動流の境界となる空気速度をサルテーション速度といい、この速度の近傍において圧力損失が極小となる。理論的なサルテーション速度  $u_s$  [m/s]は、次式のように導かれる。[文献 24, 25]

$$\Delta P_{SF} = \eta N R_f / A \quad \cdots (3.5.1.1)$$

$$\Delta P_{SF}=0.0520Fr^{1+(\varepsilon/2.5)}[(\rho_{pf}-\rho)AL/\{(\pi/6)D_p^3\rho_p\}][(\pi/6)D_p^3\rho_pg(u-u_p)^{2-\varepsilon}/u_t^{2-\varepsilon}]/A \quad \dots(3.5.1.2)$$

$$\Delta P_{SF}/L=0.0520[u/(gD)^{0.5}]^{1+(\varepsilon/2.5)}[\{1+(\Gamma/\phi)\}\rho-\rho][gu^{2-\varepsilon}\{1-(u_p/u)\}^{2-\varepsilon}/u_t^{2-\varepsilon}] \quad \dots(3.5.1.3)$$

$$\Delta P_{SF}/L=0.0520[u/(gD)^{0.5}]^{1+(\varepsilon/2.5)}\Gamma\rho g(u/u_t)^{2-\varepsilon}[(1-\phi)^{2-\varepsilon}/\phi] \quad \dots(3.5.1.4)$$

$$\Delta P_{SF}/L=0.0520[u/(gD)^{0.5}]^{1+(\varepsilon/2.5)}\Gamma\rho g(u/u_t)^{2-\varepsilon}[\{(u_t/u)(\mu_w\cos\theta+\sin\theta)^{1/(2-\varepsilon)}\}^{2-\varepsilon}/\{1-(u_t/u)(\mu_w\cos\theta+\sin\theta)^{1/(2-\varepsilon)}\}] \quad \dots(3.5.1.5)$$

$$\Delta P_{SF}/L=Y u^{1+(\varepsilon/2.5)}[X^{2-\varepsilon}/\{1-(u_t/u)X\}] \quad [X\equiv(\mu_w\cos\theta+\sin\theta)^{1/(2-\varepsilon)}, Y\equiv 0.0520\{1/(gD)^{0.5}\}^{1+(\varepsilon/2.5)}\Gamma\rho g] \quad \dots(3.5.1.6)$$

$$\Delta P_{SF}/L=Y X^{2-\varepsilon}[u^{2+(\varepsilon/2.5)}/(u-u_t X)] \quad \dots(3.5.1.7)$$

$$d(\Delta P_{SF}/L)/du=Y X^{2-\varepsilon}[\{2+(\varepsilon/2.5)\}u_s^{1+(\varepsilon/2.5)}(u_s-u_t X) - u_s^{2+(\varepsilon/2.5)}(1)]/(u_s-u_t X)^2=0 \quad \dots(3.5.1.8)$$

$$[2+(\varepsilon/2.5)]u_s^{1+(\varepsilon/2.5)}(u_s-u_t X) - u_s^{2+(\varepsilon/2.5)}=0 \quad \dots(3.5.1.9)$$

$$[2+(\varepsilon/2.5)](u_s-u_t X) - u_s=0 \quad \dots(3.5.1.10)$$

$$[1+(\varepsilon/2.5)]u_s - [2+(\varepsilon/2.5)]u_t X=0 \quad \dots(3.5.1.11)$$

$$u_s=[2+(\varepsilon/2.5)]u_t X/[1+(\varepsilon/2.5)] \quad \dots(3.5.1.12)$$

$$u_s=[\{2+(\varepsilon/2.5)\}/\{1+(\varepsilon/2.5)\}]u_t(\mu_w\cos\theta+\sin\theta)^{1/(2-\varepsilon)} \quad \dots(3.5.1.13)$$

$$u_s=[\{2+(\varepsilon/2.5)\}/\{1+(\varepsilon/2.5)\}]u^* \quad \dots(3.5.1.14)$$

ただし、 $u^*$ は最小輸送速度[m/s]。

### 3.5.2 最小輸送速度

水平管内において摺動流の状態から空気流速を下げると、やがて管底への粒子沈積が起こる。この状態を閉塞限界といい、このときの空気速度を最小輸送速度という。これよりも空気速度を下げると、管路内で閉塞が起こって圧力損失が急激に増大する。理論的な最小輸送速度  $u^*$  [m/s]は、輸送中の粒子速度  $u_p$  [m/s]を 0 とおくことで導かれる。

$$0=1-(u_t/u^*)(\mu_w\cos\theta+\sin\theta)^{1/(2-\varepsilon)} \quad \dots(3.5.2.1)$$

$$u^*=u_t(\mu_w\cos\theta+\sin\theta)^{1/(2-\varepsilon)} \quad \dots(3.5.2.2)$$

#### 【計算例】輸送空気速度

平均粒子径 3 mm、粒子密度 1400 kg/m<sup>3</sup>、壁摩擦係数 0.4 の小麦を斜め上向き 45°の方向に空気輸送するときの①最小輸送速度  $u^*$  [m/s]、②サルテーション速度  $u_s$  [m/s]を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s、重力加速度 9.81 m/s<sup>2</sup>とする。(①10.1 m/s, ②20.2 m/s)

$$u_t=[3g(\rho_p-\rho)D_p/\rho]^{1/2}=[(3)(9.81)(1400-1.20)(3\times 10^{-3})/(1.20)]^{1/2}=10.144 \text{ m/s (Newton 域を仮定)}$$

$$Re_p=D_p u_t \rho/\mu=(3\times 10^{-3})(10.144)(1.20)/(18.2\times 10^{-6})=2006>500 \quad \text{Newton 域の仮定は、正しい。}$$

$$u^*=u_t(\mu_w\cos\theta+\sin\theta)^{1/(2-\varepsilon)}=(10.144)(0.4\cos 45+\sin 45)^{1/(2-0)}=10.092 \text{ m/s} \doteq \boxed{10.1 \text{ m/s}}$$

$$u_s=[\{2+(\varepsilon/2.5)\}/\{1+(\varepsilon/2.5)\}]u^*=[\{2+(0/2.5)\}/\{1+(0/2.5)\}](10.092)=20.184 \text{ m/s} \doteq \boxed{20.2 \text{ m/s}}$$

#### 【問題】輸送空気速度

(1) 平均粒子径 3 mm、粒子密度 1400 kg/m<sup>3</sup>、壁摩擦係数 0.4 の小麦を水平に空気輸送するときの①最小輸送速度  $u^*$  [m/s]、②サルテーション速度  $u_s$  [m/s]を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s、重力加速度 9.81 m/s<sup>2</sup>とする。(①6.42 m/s, ②12.8 m/s)

- (2) 平均粒子径 3 mm、粒子密度 1400 kg/m<sup>3</sup>、壁摩擦係数 0.4 の小麦を垂直に空気輸送するときの①最小輸送速度  $u^*$  [m/s]、②サルテーション速度  $u_s$  [m/s]を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m<sup>3</sup>、粘度 18.2 μPa·s、重力加速度 9.81 m/s<sup>2</sup> とする。(①10.1 m/s, ②20.3 m/s)

### 3. 6 空気輸送装置の設計

ここでは、吸引式および低圧圧送式に適用することを考える。

①**輸送空気速度** 輸送空気速度  $u$  [m/s]は、経験的に 15~45 m/s 程度が多い。ここでは選定基準として、圧力損失の極小値に近いサルテーション速度  $u_s$  [m/s]を用いる。ただし、用いる輸送管の傾斜角によって変化するため、それぞれの角度に対して計算しておき、それらの内の最大値を採用する。

$$u_s = \left\{ \frac{2 + (\varepsilon/2.5)}{1 + (\varepsilon/2.5)} \right\} u^* \quad \cdots(3.6.1)$$

$$u^* = u_t (\mu_w \cos\theta + \sin\theta)^{1/(2-\varepsilon)} \quad \cdots(3.6.2)$$

ただし、 $u_t$  は終末速度[m/s]、 $u^*$ は最小輸送速度[m/s]、 $\mu_w$  は壁摩擦係数[-]、 $\varepsilon$  は定数(輸送物が粉体のとき 1、粒体のとき 0)、 $\theta$  は輸送管の傾斜角[deg.]。

②**輸送空気量** 輸送空気量  $Q$  [m<sup>3</sup>/s]は、混合比  $\Gamma$  [-]の定義式より導かれる。

$$\Gamma = w_p/w \quad \cdots(3.6.3)$$

$$\Gamma = w_p/(\rho Q) \quad \cdots(3.6.4)$$

$$Q = w_p/(\Gamma\rho) \quad \cdots(3.6.5)$$

ただし、 $w$  は空気の質量流量[kg/s]、 $w_p$  は固体の質量流量[kg/s] (輸送性能に相当)、 $\rho$  は空気密度[kg/m<sup>3</sup>]。

③**輸送管径** 輸送管の内径  $D$  [m](=外径  $D_o - 2 \times$  肉厚  $t_r$ )は、輸送空気量  $Q$  [m<sup>3</sup>/s]の式より導かれる。計算値に近い管の呼びを JIS 表より選定する。仕様の管径にあわせて輸送空気量を修正する。

$$Q = uS \quad \cdots(3.6.6)$$

$$Q = u(\pi D^2/4) \quad \cdots(3.6.7)$$

$$D = [4Q/(\pi u)]^{1/2} \quad \cdots(3.6.8)$$

ただし、 $S$  は流路断面積[m<sup>2</sup>]、 $u$  は輸送管内の平均流速[m/s]。

④**輸送空気圧** 輸送空気圧  $P_a$  [Pa]は、輸送装置内における各圧力損失の総和で与えられる。実用上は、5%程度の余裕を見込む(計算値に 1.05 を乗じた空気圧を用いる)。

$$P_a = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 + \Delta P_6 + \Delta P_7 + \Delta P_8 + \Delta P_9 \quad \cdots(3.6.9)$$

ただし、 $\Delta P_1$  は空気取入れ口の圧力損失[Pa]、 $\Delta P_2$  は空気フィルターの圧力損失[Pa]、 $\Delta P_3$  は空気管内の圧力損失[Pa]、 $\Delta P_4$  は輸送物の加速に伴う輸送管内の粉体流圧力損失[Pa]、 $\Delta P_5$  は定常輸送時の粉体流圧力損失[Pa]、 $\Delta P_6$  は集塵機の圧力損失[Pa]、 $\Delta P_7$  は排気管内の圧力損失[Pa]、 $\Delta P_8$  は排気管出口の圧力損失[Pa]、 $\Delta P_9$  は背圧[Pa] (排気管を出た空気が持っている圧力)。

空気取入れ口の圧力損失  $\Delta P_1$  [Pa]は、次式で与えられる。

$$\Delta P_1 = K_1(\rho u_1^2/2) \quad \cdots(3.6.10)$$

$$u_1 = 4Q/(\pi D_a^2) \quad \cdots(3.6.11)$$

ただし、 $D_a$  は空気管径[m]であり、圧損低減のため輸送管径  $D$  [m]よりもひとまわり大きい呼び径のものを用いる。 $K_1$  は損失係数[-]であり、取り入れ口の形状に応じて 0.1~0.8 の間の値を取る。とくに指定がない場合は、安全を見込んで 0.8 にしておく。

空気フィルターの圧力損失  $\Delta P_2$  [Pa]は、200~400 Pa 程度を見積もる。とくに指定がない場合は、安全を見込んで 400 Pa にしておく。

空気管内の圧力損失  $\Delta P_3$  [Pa]は、ファニング式を用いる。

$$\Delta P_3 = 4f(L_3/D_a)(\rho u_3^2/2) \quad \dots(3.6.12)$$

$$u_3 = 4Q/(\pi D_a^2) \quad \dots(3.6.13)$$

ただし、 $L_3$  は圧送式の場合は空気源機械(コンプレッサーなど)と粉粒体供給機(フィーダー)の区間の相当長さ[m]、吸引式の場合は空気取入れ口と粉粒体供給機の区間の相当長さ[m]。

輸送物の加速に伴う輸送管内の粉体流圧力損失  $\Delta P_4$  [Pa]は、次式で与えられる。

$$\Delta P_4 = (C + \Gamma)(\rho u^2/2) \quad \dots(3.6.14)$$

$C$  は輸送方式に関する因子(圧送式の場合 1, 吸引式の場合 10)、 $u$  は輸送空気速度[m/s]。[文献 26, 27]

定常輸送時の粉体流圧力損失  $\Delta P_5$  [Pa]は、空気流の圧力損失  $\Delta P_G$  [Pa]に圧力損失比  $\alpha$  を乗じる。

$$\Delta P_5 = \alpha \Delta P_G \quad \dots(3.6.15)$$

$$\alpha = 1 + \beta \Gamma \quad \dots(3.6.16)$$

ただし、 $\beta$  は輸送物の性状に関する係数であり、多くの場合 0.4~0.6 程度である。[文献 26, 28]

とくに指定がない場合は、安全を見込んで 0.6 にしておく。

空気流の圧力損失  $\Delta P_G$  [Pa]は、ファニング式を用いる。

$$\Delta P_G = 4f(L_5/D)(\rho u^2/2) \quad \dots(3.6.17)$$

$$L_5 = L_h + kL_v + \delta D(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n)/90 \quad \dots(3.6.18)$$

$$k = 1 + 0.08\Gamma \quad \dots(3.6.19)$$

$$\delta = 70 + 2\Gamma \quad \dots(3.6.20)$$

ただし、 $D$  は輸送管径[m]、 $k$  と  $\delta$  は実験定数、 $L_5$  は管路の相当長さ[m]、 $L_h$  は管路の水平距離[m]、 $L_v$  は管路の垂直距離[m]、 $u$  は輸送空気速度[m/s]、 $\theta$  はベンドの曲がり角[deg.]、添え字  $n$  はベンドの数。

管路の急な拡大または縮小、ベンド以外の挿入物が含まれる場合は、その分も相当長さを含める。

集塵機の圧力損失  $\Delta P_6$  [Pa]は、サイクロンを用いるものとして次式となる。

$$\Delta P_6 = K_6(\rho u_6^2/2) \quad \dots(3.6.21)$$

$$K_6 = (30BH/D_E^2)[D_T/(L_1 + L_2)]^{0.5} \quad \dots(3.6.22)$$

ただし、 $K_6$  は損失係数[-]、 $Q$  は輸送空気量[m<sup>3</sup>/s]、 $u_6$  は入口流速[m/s](便宜上、輸送空気速度と同じにする)。サイクロンの各寸法は図を参照。

装置本体径  $D_T$  [m]は、次式のように導かれる。

$$Q = u_6 S \quad \dots(3.6.23)$$

$$Q = u_6 B H \quad \dots(3.6.24)$$

$$Q = u_6 (B/D_T)(H/D_T)D_T^2 \quad \dots(3.6.25)$$

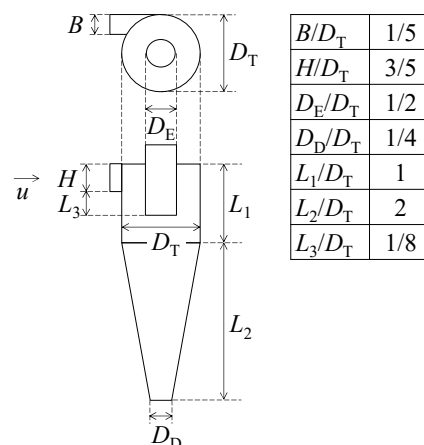
$$D_T = [Q / \{(B/D_T)(H/D_T)u_6\}]^{0.5} \quad \dots(3.6.26)$$

排気管内の圧力損失  $\Delta P_7$  [Pa]は、空気管内の圧力損失と同程度とする。

排気管出口の圧力損失  $\Delta P_8$  [Pa]は、次式を用いる。

$$\Delta P_8 = K_8(\rho u_8^2/2) \quad \dots(3.6.27)$$

$$u_8 = 4Q/(\pi D_d^2) \quad \dots(3.6.28)$$



ただし、 $D_d$ は排気管径[m]であり、空气管径と同程度とする。 $K_8$ は排気管出口の損失係数[-]であり、集塵機の損失係数と同程度とする。

⑤輸送所要動力 空気源機械の輸送所要動力  $E$  [kW]は、次式で与えられる。

$$E=QP_a/(1000\eta_M) \quad \cdots(3.6.29)$$

ただし、 $\eta_M$ は機械効率[-](=0.6~0.75)。

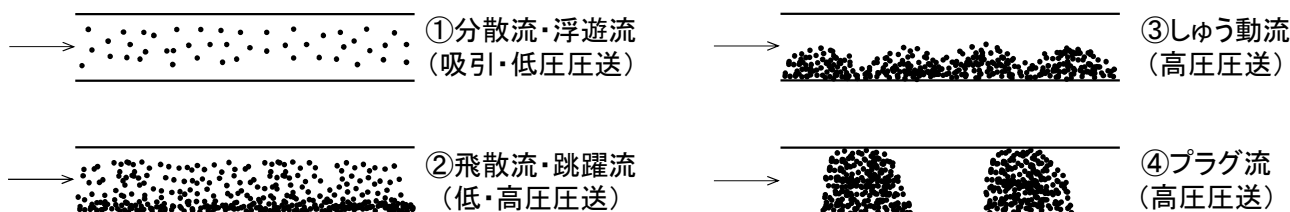


図 3.6.1 管路内における固気混相流動状態  
(①~④の順に空気圧と固体濃度が大きくなる)

表 3.6.1 空気輸送方式と輸送状態 [文献 29]

輸送方式	固体濃度	輸送状態	輸送圧力[Pa]	輸送速度[m/s]	混合比
吸引式 低圧圧送式	低	分散流・浮遊流	$0.1\sim 0.2\times 10^5$	15~30	0.1~10
		飛散流・跳躍流 (管底に密)	$0.2\sim 0.5\times 10^5$	15~30	5~15
			$0.4\sim 4\times 10^5$	15~30	7~50
高圧圧送式	高	しゅう動流	$2.5\sim 7\times 10^5$	5~15	40~150
		プラグ流	$2.5\sim 7\times 10^5$	1~10	50~300

表 3.6.2 配管用炭素鋼鋼管 (JIS G3452) [文献 30]

呼び径		外径 [mm]	厚さ [mm]	呼び径		外径 [mm]	厚さ [mm]
A	B			A	B		
6	1/8	10.5	2.0	80	3	89.1	4.2
8	1/4	13.8	2.3	90	3 1/2	101.6	4.2
10	3/8	17.3	2.3	100	4	114.3	4.5
15	1/2	21.7	2.8	125	5	139.8	4.5
20	3/4	27.2	2.8	150	6	165.2	5.0
25	1	34.0	3.2	175	7	190.7	5.3
32	1 1/4	42.7	3.5	200	8	216.3	5.8
40	1 1/2	48.6	3.5	225	9	241.8	6.2
50	2	60.5	3.8	250	10	267.4	6.6
65	2 1/2	76.3	4.2	300	12	318.5	6.9

### 3. 7 設計計算

装置形式	低圧圧送式	空気密度	1.20 kg/m <sup>3</sup>
輸送物の種類	小麦	空気粘度	$18.2\times 10^{-6}$ Pa·s
輸送物の粒子密度	1400 kg/m <sup>3</sup>	輸送量	27 t/h
輸送物の平均粒子径	3 mm	混合比	12
輸送物の壁摩擦係数	0.4	重力加速度	9.81 m/s <sup>2</sup>

定常輸送時の水平管長	40 m	曲がり管の数	2
定常輸送時の鉛直管長	20 m	$\beta$ 値	0.4
空気源機械－供給機間の相当長さ	10 m	集塵機の種類	標準型サイクロン
曲がり管の種類	90°円形バンド	背圧	500 Pa
曲がり管の半径比	12	空気源機械効率	0.6

### ①輸送空気速度

$$u_t = [3g(\rho_p - \rho)D_p/\rho]^{1/2} = [(3)(9.81)(1400 - 1.20)(3 \times 10^{-3})/(1.20)]^{1/2} = 10.144 \text{ m/s (Newton 域を仮定)}$$

$$Re_p = D_p u_t \rho / \mu = (3 \times 10^{-3})(10.144)(1.20)/(18.2 \times 10^{-6}) = 2006 > 500 \quad \text{Newton 域の仮定は、正しい。}$$

$$(\text{水平管}) u_{h,*} = u_t (\mu_w \cos \theta + \sin \theta)^{1/(2-\epsilon)} = (10.144)(0.4 \cos 0 + \sin 0)^{1/(2-0)} = 6.4156 \text{ m/s} \doteq 6.42 \text{ m/s}$$

$$(\text{水平管}) u_{s,h} = [2 + (\epsilon/2.5)] / [1 + (\epsilon/2.5)] u_{h,*} = [2 + (0/2.5)] / [1 + (0/2.5)] (6.4156) = 12.831 \text{ m/s} \doteq 12.8 \text{ m/s}$$

$$(\text{鉛直管}) u_{v,*} = u_t (\mu_w \cos \theta + \sin \theta)^{1/(2-\epsilon)} = (10.144)(0.4 \cos 90 + \sin 90)^{1/(2-0)} = 10.144 \text{ m/s} \doteq 10.1 \text{ m/s}$$

$$(\text{鉛直管}) u_{s,v} = [2 + (\epsilon/2.5)] / [1 + (\epsilon/2.5)] u_{v,*} = [2 + (0/2.5)] / [1 + (0/2.5)] (10.144) = 20.288 \text{ m/s} \doteq \boxed{20.3 \text{ m/s}} \quad \text{採用}$$

### ②輸送空気量

$$w_p = (27)(10^3)/(60^2) = 7.5 \text{ kg/s}$$

$$Q = w_p / (\Gamma \rho) = (7.5) / [(12)(1.20)] = 0.52083 \text{ m}^3/\text{s} \doteq 0.521 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{修正後 } \boxed{0.517 \text{ m}^3/\text{s}})$$

### ③輸送管径

$$D = [4Q/(\pi u)]^{1/2} = [(4)(0.52083)/(20.3\pi)]^{1/2} \doteq 0.18074 \text{ m}$$

$$D = D_o - 2t_f = 190.7 - (2)(5.3) = 180.1 \text{ mm} = \boxed{0.1801 \text{ m}} \quad (7B)$$

$$Q (=uS) = (20.3)[\pi(0.1801)^2/4] = 0.51714 \text{ m}^3/\text{s} \doteq 0.517 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{修正値})$$

### ④輸送空気圧

(1) 空気取入れ口の圧力損失

$$D_a = D_o - 2t_f = 216.3 - (2)(5.8) = 204.7 \text{ mm} = 0.2047 \text{ m} \quad (8B)$$

$$u_1 = 4Q/(\pi D_a^2) = (4)(0.517)/[\pi(0.2047)^2] = 15.709 \text{ m/s}$$

$$\Delta P_1 = K_1(\rho u_1^2/2) = (0.8)(1.20)(15.709)^2/2 = 118.45 \text{ Pa}$$

(2) 空気フィルターの圧力損失

$$\Delta P_2 = 400 \text{ Pa}$$

(3) 空気管内の圧力損失

$$u_3 (=u_1) = 15.709 \text{ m/s}$$

$$Re = D u_3 \rho / \mu = (0.2047)(15.709)(1.20)/(18.2 \times 10^{-6}) = 2.1201 \times 10^5$$

$$f = 0.0008 + 0.05525 Re^{-0.237} = 0.0008 + (0.05525)(2.1201 \times 10^5)^{-0.237} = 0.0038198$$

$$\Delta P_3 = 4f(L_3/D_a)(\rho u_3^2/2) = (4)(0.0038198)(10/0.2047)(1.20)(15.709)^2/2 = 110.51 \text{ Pa}$$

(4) 加速時の圧力損失

$$\Delta P_4 = (C + \Gamma)(\rho u^2/2) = (1 + 12)(1.20)(20.3)^2/2 = 3214.3 \text{ Pa}$$

(5) 定常輸送時の圧力損失

$$k = 1 + 0.08\Gamma = 1 + (0.08)(12) = 1.96$$

$$\delta = 70 + 2\Gamma = 70 + (2)(12) = 94$$

$$L_5 = L_h + kL_v + \delta D(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n)/90 = 40 + (1.96)(20) + (94)(0.1801)(90 + 90)/90 = 113.05 \text{ m}$$

$$Re = Dup/\mu = (0.1801)(20.3)(1.20)/(18.2 \times 10^{-6}) = 2.4105 \times 10^5$$

$$f = 0.0008 + 0.05525 Re^{-0.237} = 0.0008 + (0.05525)(2.4105 \times 10^5)^{-0.237} = 0.0037293$$

$$\Delta P_G = 4f(L_5/D)(\rho u^2/2) = (4)(0.0037293)(113.05/0.1801)(1.20)(20.3)^2/2 = 2315.1 \text{ Pa}$$

$$\alpha = 1 + \beta f = 1 + (0.4)(12) = 5.8$$

$$\Delta P_5 = \alpha \Delta P_G = (5.8)(2315.1) = 13427 \text{ Pa}$$

(6)集塵機の圧力損失

$$D_T = [Q/\{(B/D_T)(H/D_T)u_6\}]^{0.5} = [(0.517)/\{(1/5)(3/5)(20.3)\}]^{0.5} = 0.46068 \text{ m } (u_6 = u)$$

$$B = (B/D_T)D_T = (1/5)(0.46068) = 0.092136 \text{ m}$$

$$H = (H/D_T)D_T = (3/5)(0.46068) = 0.27640 \text{ m}$$

$$D_E = (D_E/D_T)D_T = (1/2)(0.46068) = 0.23034 \text{ m}$$

$$L_1 = (L_1/D_T)D_T = (1)(0.46068) = 0.46068 \text{ m}$$

$$L_2 = (L_2/D_T)D_T = (2)(0.46068) = 0.92136 \text{ m}$$

$$K_6 = (30BH/D_E^2)[D_T/(L_1+L_2)]^{0.5} = [(30)(0.092136)(0.27640)/(0.23034)^2][(0.46068)/(0.46068+0.92136)]^{0.5} = 8.3136$$

$$\Delta P_6 = K_6(\rho u_6^2/2) = (8.3136)(1.20)(20.3)^2/2 = 2055.5 \text{ Pa}$$

(7)排気管内の圧力損失

$$\Delta P_7 (\doteq \Delta P_3) = 110.51 \text{ Pa}$$

(8)排気管出口の圧力損失

$$u_8 = 4Q/(\pi D_d^2) = (4)(0.517)/[\pi(0.2047)^2] = 15.709 \text{ m/s } (D_d \doteq D_a)$$

$$\Delta P_8 = K_8(\rho u_8^2/2) = (8.3136)(1.20)(15.709)^2/2 = 1230.9 \text{ Pa } (K_8 \doteq K_6)$$

(9)背圧

$$\Delta P_9 = 500 \text{ Pa}$$

(10)輸送空気圧

$$P_a = (1.05)(\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 + \Delta P_6 + \Delta P_7 + \Delta P_8 + \Delta P_9)$$

$$= (1.05)(118.45 + 400 + 110.51 + 3214.3 + 13427 + 2055.5 + 110.51 + 1230.9 + 500) = 22225 \text{ Pa} \doteq \boxed{2.22 \text{ kPa}} \text{ (余裕 5\%)}$$

⑤輸送所要動力

$$E = QP_a/(1000\eta_M) = (0.517)(22225)/[(1000)(0.6)] = 19.150 \text{ kW} \doteq \boxed{19.2 \text{ kW}}$$

## 参考文献

- [1] JIS B 8805-1992
- [2] 小玉正雄, 石川義雄; 機械設計法(巻掛け伝動装置・コンベヤ), 産業図書(1964)6.5章
- [3] 林 恒美; 粉体技術ポケットブック, 工業調査会(1996)9.1章
- [4] 柴田 力; 粉粒体精密供給技術, アイシーピー(1986)3.5章
- [5] 日本粉体工業技術協会編; 粉粒体のバルクハンドリング技術, 日刊工業新聞社(1985)p.238
- [6] 林 恒美; 粉体技術ポケットブック, 工業調査会(1996)8.1章
- [7] 狩野 武; 粉体輸送技術, 日刊工業新聞社(1991)p.169
- [8] 真島卯太郎; コンベヤ計算法, 工学図書(1970)p.302
- [9] 国行一郎(編); 荷役機械工学便覧 改訂3版, コロナ社(1970)pp.229-232
- [10] 真島卯太郎; チェーン・コンベヤ 改訂版, 工学図書(1982)p.100
- [11] 真島卯太郎; コンベヤ計算法, 工学図書(1970)4.2章
- [12] 林 恒美; 粉体技術ポケットブック, 工業調査会(1996)9.2章
- [13] 森川敬信; 流体-固体二相流, 日刊工業新聞社(1979)3.1章

- [14] 狩野 武; 粉粒体輸送装置, 日刊工業新聞社(1969)4章
- [15] 狩野 武; 粉粒体輸送技術, 日刊工業新聞社(1991)6.5章
- [16] J.A. Hitchcock and C. Jones; *Brit. J. Appl. Phys.*, **9**(1958)218-222
- [17] S. Matsumoto, H. Harakawa, S. Suzuki and S. Ohtani; *Int. J. Multiphase Flow*, **12**(1986)445-458
- [18] 化学工学協会(編); 化学工学便覧 改訂五版, 丸善(1988)5.2.3章
- [19] 伊藤英覚; 機械学会誌, **62** (1959)1634-1643
- [20] 森川敬信; 粉体工学会誌, **15** (1978)330-335
- [21] 狩野武; 粉粒体輸送装置, 日刊工業新聞社(1969)p.91
- [22] 森川敬信; 流体-固体二相流, 日刊工業新聞社(1979)5.1章
- [23] 富田侑嗣; 粉体工学会誌, **23** (1986)592-598
- [24] 狩野 武; 粉粒体輸送装置, 日刊工業新聞社(1969)4章
- [25] 狩野 武; 粉粒体輸送技術, 日刊工業新聞社(1991)6.5章
- [26] 植松時雄, 池森亀鶴, 森芳郎, 伊藤四郎(編); 流体固体輸送工学ハンドブック, 朝倉書店(1966)p.441
- [27] 白戸紋平; 化学工学 機械的単位操作の基礎, 丸善(1980)p.86
- [28] 狩野 武; 粉粒体輸送技術, 日刊工業新聞社(1991)6.3章
- [29] 日本粉体工業技術協会編; 粉粒体のバルクハンドリング技術, 日刊工業新聞社(1985)p.269
- [30] JIS G3452

令和6年5月10日作成