

集 塵

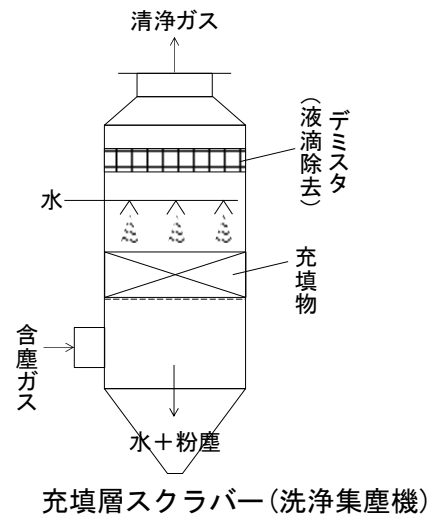
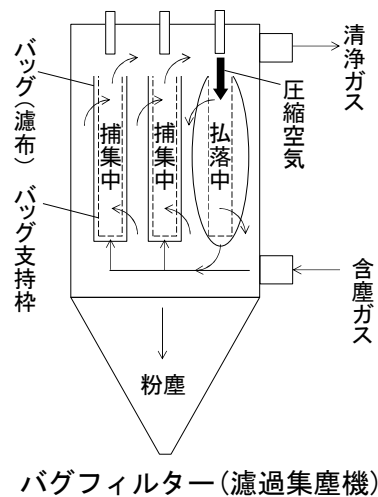
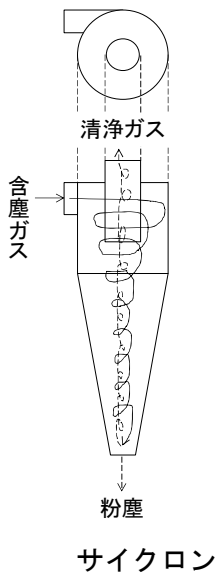
1. 集塵装置

集塵装置は、粉塵粒子の捕集機構によって重力式、慣性力式、遠心力式、濾過式、洗浄式、電気式に大別される。**重力式**は、ガス中の粉塵粒子を沈降室内で自然沈降させて除塵する。**慣性力式**は、邪魔板などの固体壁に含塵ガスを衝突させて気流の向きを急変させ、慣性(現行の運動状態を続けようとする性質)のため気流の変化に追従できない粉塵粒子を気流の流線からずらすことで除塵する。**遠心力式**は、**サイクロン**と呼ばれ、含塵ガスに旋回流を与えて気流から分離することで除塵する。**濾過式**は、繊維充填層に粉塵粒子を捕集させて内部からの濾過を行う**エアフィルター**と濾布の表面に粉塵粒子を捕集させて外部からの濾過を行う**バグフィルター**がある。**洗浄式**は、**スクラバー**と呼ばれ、含塵ガスを洗浄水に接触させて除塵する。**電気式**は、**コットレル**と呼ばれ、ガス中の粉塵粒子に電荷を与えて電極で挟まれた電界中を通過させることで除塵する。

集塵装置の性能を表す**総合集塵効率** E [-]は、次式で定義される。

$$E = \frac{C_0 - C}{C_0} \quad \dots(1.1)$$

ただし、 C_0 は装置入口の粉塵粒子濃度[kg/m^3]、 C は装置出口の粉塵粒子濃度[kg/m^3]。



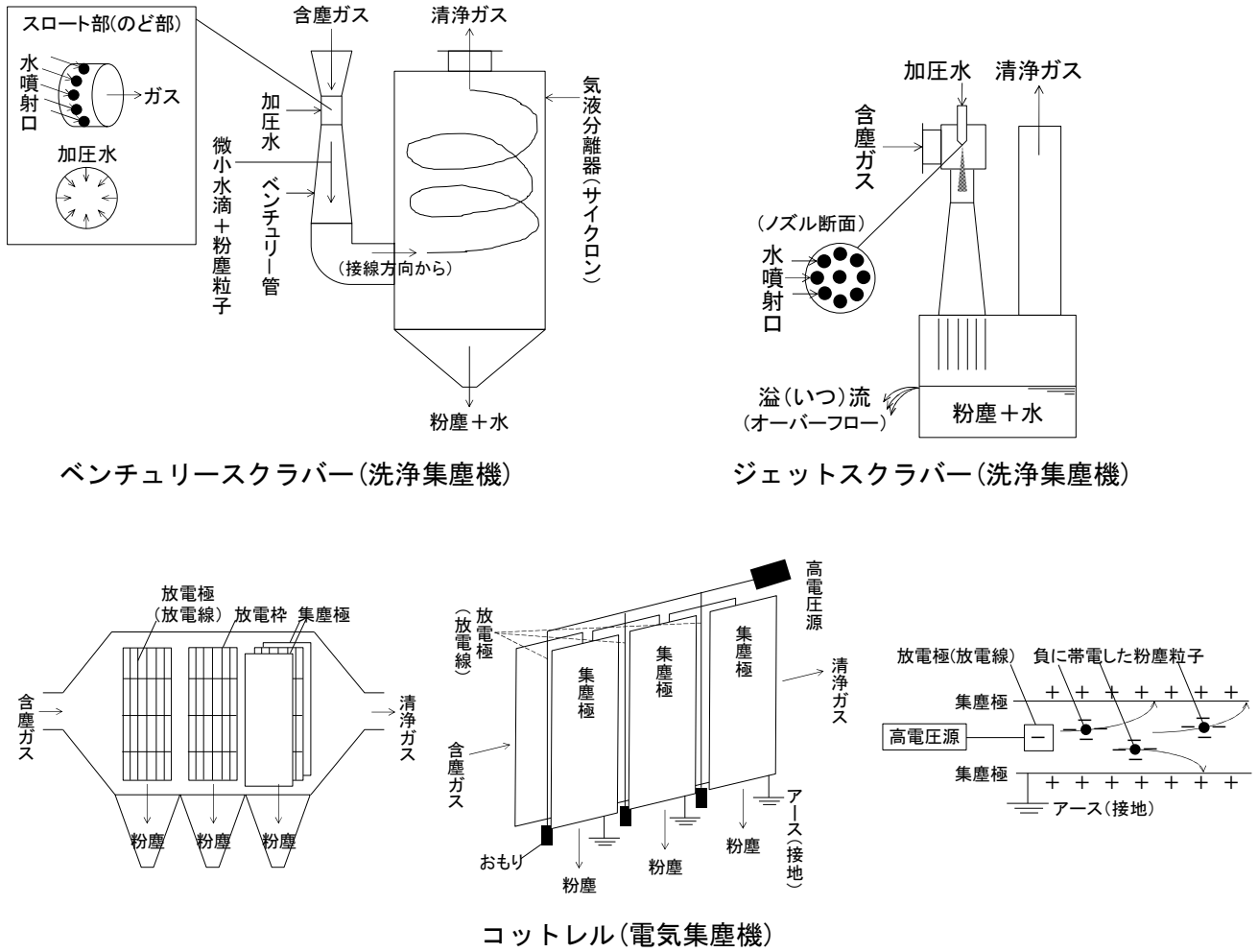


図 1.1 集塵装置の例

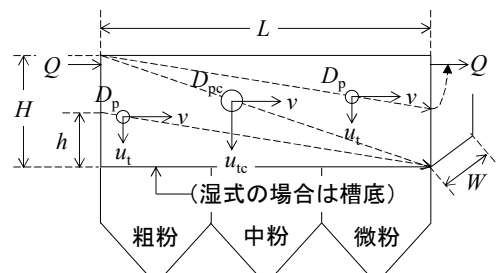
2. 重力集塵

2. 1 性能設計

長さ L [m]、幅 W [m]、深さ H [m]の直方体の沈降室に粉塵粒子を含むガスが水平方向に流量 Q [m^3/s]で流入すると、ガス中の粉塵粒子は移動速度 v [m/s]で水平方向に移動すると同時に、終末速度 u_t [m/s]で沈降する。粗大粒子は沈降室内の底面または受け器に達して捕集され、微小粒子は水平流とともに沈降室の外へ流出する。工学的には、粒子が水平に L [m]進むのに要する時間(滞留時間) t_h [s]が垂直に H [m]沈降するのに要する時間(沈降時間) t_v [s]と等しいか、それよりも短ければ沈降室内で捕集される。すなわち、次式が成り立つ。

$$t_h \leq t_v \quad \dots(2.1.1)$$

$$\frac{H}{u_t} \leq \frac{L}{v} \quad \dots(2.1.2)$$



$$u_t \geq v \frac{H}{L} = \frac{Q}{WH} \frac{H}{L} = \frac{Q}{WL} \quad \cdots(2.1.3)$$

捕集されうる下限の粒子径を**分離限界粒子径** D_{pc} [m]といい、上式で等号が成り立つ場合に相当する。分離限界粒子径をもつ粉塵粒子の終末速度 u_{tc} [m/s]は、次式で表される。

$$u_{tc} \left(= v \frac{H}{L} \right) = \frac{Q}{WL}$$

Stokes 域の場合、分離限界粒子径 D_{pc} は次式のように導かれる。

$$u_{tc} \left(= \frac{Q}{WL} \right) = \frac{g(\rho_p - \rho) D_{pc}^2}{18\mu} \quad \cdots(2.1.4)$$

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{18\mu}{g(\rho_p - \rho)} \frac{Q}{WL}} \quad (\text{Stokes}) \quad \cdots(2.1.5)$$

Allen 域の場合、分離限界粒子径 D_{pc} は次式のように導かれる。

$$u_{tc} \left(= \frac{Q}{WL} \right) = \sqrt[3]{\frac{4}{225} \frac{g^2(\rho_p - \rho)^2}{\rho\mu}} D_{pc} \quad \cdots(2.1.6)$$

$$D_{pc} = \left[\frac{4}{225} \frac{g^2(\rho_p - \rho)^2}{\rho\mu} \right]^{-1/3} \frac{Q}{WL} \quad (\text{Allen}) \quad \cdots(2.1.7)$$

Newton 域の場合、分離限界粒子径 D_{pc} は次式のように導かれる。

$$u_{tc} \left(= \frac{Q}{WL} \right) = \sqrt{\frac{3g(\rho_p - \rho) D_{pc}}{\rho}} \quad \cdots(2.1.8)$$

$$\frac{3g(\rho_p - \rho) D_{pc}}{\rho} = \left(\frac{Q}{WL} \right)^2 \quad \cdots(2.1.9)$$

$$D_{pc} = \frac{\rho}{3g(\rho_p - \rho)} \left(\frac{Q}{WL} \right)^2 \quad (\text{Newton}) \quad \cdots(2.1.10)$$

分離限界粒子径 D_{pc} は、いずれの沈降領域も沈降室の深さ H によらない。このことは、たとえば深さ H をもとの半分にしたとき、流入速度 $v(=Q/WH)$ はもとの2倍となり終末速度 u_{tc} は不変なので $(2v(H/2)/L=vH/L=u_{tc})$ 、分離限界粒子径 D_{pc} も不変であることからわかる。

分離限界粒子径 D_{pc} よりも小さい粒子径 D_p をもつ粉塵粒子は、流入位置を下げることで捕集できる。いま、槽底から h [m]の高さから流入した粒子径 D_p の粉塵粒子が終末速度 u_t [m/s]で沈降し、ちょうど流出口で槽底に達したとする。この粒子と同じ終末速度 u_t をもつ粉塵粒子は、槽底からの高さ $0 \sim h$ [m]の間で流入した場合は捕集されるが、 $h \sim H$ [m]の間で流入した場合は捕集されない。上記粒子と同じ終末速度 u_t をもつ粉塵粒子に対する部分分離効率 η_p [-]は、分離限界粒子径 D_{pc} 以下の粒子径 D_p を持つ粉塵粒子の捕集率(回収率)であることから、次式のように表される。

$$\eta_p = \frac{vhWC}{vHWC} = \frac{h}{H} = \frac{vh/L}{vH/L} = \frac{u_t}{u_{tc}} \quad (u_t < u_{tc}) \quad \cdots(2.1.11)$$

ただし、 C は粒子濃度 [kg/m^3]。

いま、棚を水平に等間隔で差し込んで N 段に分割すると沈降室の深さは H/N になり、沈降距離が $1/N$ 倍になることから、 u_{tc} も $1/N$ 倍になる (流入速度 v が不変なので $v(H/N)/L = u_{tc}/N$)。このとき、部分分離効率 η_p はもとの N 倍まで向上する。

沈降領域ごとの部分分離効率 η_p [-] は、次式のように導かれる。

$$\eta_p \left(= \frac{u_t}{u_{tc}} \right) = \frac{g(\rho_p - \rho)D_p^2}{18\mu} \bigg/ \frac{g(\rho_p - \rho)D_{pc}^2}{18\mu} = \left(\frac{D_p}{D_{pc}} \right)^2 \quad (\text{Stokes}) \quad \cdots(2.1.12)$$

$$\eta_p \left(= \frac{u_t}{u_{tc}} \right) = \sqrt[3]{\frac{4}{225} \frac{g^2(\rho_p - \rho)^2}{\rho\mu} D_p} \bigg/ \sqrt[3]{\frac{4}{225} \frac{g^2(\rho_p - \rho)^2}{\rho\mu} D_{pc}} = \frac{D_p}{D_{pc}} \quad (\text{Allen}) \quad \cdots(2.1.13)$$

$$\eta_p \left(= \frac{u_t}{u_{tc}} \right) = \sqrt{\frac{3g(\rho_p - \rho)D_p}{\rho}} \bigg/ \sqrt{\frac{3g(\rho_p - \rho)D_{pc}}{\rho}} = \sqrt{\frac{D_p}{D_{pc}}} \quad (\text{Newton}) \quad \cdots(2.1.14)$$

沈降領域ごとの 50% 分離粒子径 D_{50} [m] は、部分分離効率 η_p を 0.5 と置くことで導かれる。

$$D_{50} = \sqrt{0.5} D_{pc} \quad (\text{Stokes}) \quad \cdots(2.1.15)$$

$$D_{50} = 0.5 D_{pc} \quad (\text{Allen}) \quad \cdots(2.1.16)$$

$$D_{50} = 0.5^2 D_{pc} \quad (\text{Newton}) \quad \cdots(2.1.17)$$

【計算例】重力集塵機 (性能設計)

長さ 5.00 m、幅 2.00 m、深さ 1.00 m の重力集塵機を用いて粒子密度 $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ の粉塵粒子を含むガスを毎時 1800 m^3 で流入させて連続処理する場合の分離限界粒子径 D_{pc} [μm] と 50% 分離粒子径 D_{50} [μm] を求めよ。空気の密度 $1.20 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、粘度 $18.2 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、重力加速度 $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ とする。 ($D_{pc}=25.1 \mu\text{m}$, $D_{50}=17.8 \mu\text{m}$)

$$Q = 1800 \text{ m}^3/\text{h} / 3600 \text{ s/h} = 0.500 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$u_{tc} = Q/(WL) = (0.500)/(2.00)(5.00) = 5.00 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$D_{pc} = \left[\left\{ \frac{18\mu}{g(\rho_p - \rho)} \right\} (Q/WL) \right]^{1/2} = \left[\frac{18\mu u_{tc}}{g(\rho_p - \rho)} \right]^{1/2} = \left[\frac{(18)(18.2 \times 10^{-6})(5.00 \times 10^{-2})}{(9.81)(2650 - 1.20)} \right]^{1/2} \\ = 2.5107 \times 10^{-5} \text{ m} \doteq \boxed{25.1 \mu\text{m}}$$

$$Re_p = D_{pc} u_{tc} \rho / \mu = (2.5107 \times 10^{-5})(5.00 \times 10^{-2})(1.20) / (18.2 \times 10^{-6}) = 0.082770 (< 2) \text{ Stokes 域の仮定は正しい}$$

$$D_{50} = (0.5)^{0.5} D_{pc} = (0.5)^{0.5} (2.5107 \times 10^{-5}) = 1.7753 \times 10^{-5} \text{ m} \doteq \boxed{17.8 \mu\text{m}}$$

2. 2 構造設計

沈降室容積 V [m^3] は、流体の流量 Q [m^3/s] と平均滞留時間 τ [s] の積で表される。平均滞留時間 τ は、深さ H [m] まで沈降するのに要する時間 t_v [s] に等しいものとする。

$$V = Q\tau \quad \cdots(2.2.1)$$

$$V = \frac{QH}{u_t} \left[\tau(=t_v) = \frac{H}{u_t} \right] \quad \cdots(2.2.2)$$

沈降室の床面積 A [m²]と断面積 S [m²]は、次式より求める。

$$A = \frac{V}{H} \quad \cdots(2.2.3)$$

$$S = \frac{Q}{v_{\max}} \quad \cdots(2.2.4)$$

ただし、 v_{\max} は最大許容流速[m/s]。

沈降室の長さ L [m]と幅 W [m]は、次式より求める。

$$L = \frac{A}{W} \quad \cdots(2.2.5)$$

$$W = \frac{S}{H} \quad \cdots(2.2.6)$$

適当な深さ H [m]を与えると、沈降室の容積と寸法を決めることができる。

【計算例】重力集塵機(構造設計)

重力集塵機を用いて粒子密度 2650 kg/m³、粒子径 44 μm 以上の粉塵粒子を含む空気を毎秒 4.00 m³ で連続処理する場合の沈降室容積 V [m³]と幅 W [m]および長さ L [m]を求めよ。空気の最大許容風速 2.00 m/s、沈降室の深さ 1.00 m、空気の密度 1.20 kg/m³、粘度 18.2 μPa·s、重力加速度 9.81 m/s² とする。($V=26.0$ m³, $W=2.00$ m, $L=13.0$ m)

$$u_t = g(\rho_p - \rho)D_p^2 / 18\mu = (9.81)(2650 - 1.20)(44 \times 10^{-6})^2 / [(18)(18.2 \times 10^{-6})] = 0.15356 \text{ m/s}$$

$$Re_p = D_p u_t \rho / \mu = (44 \times 10^{-6})(0.15356)(1.20) / (18.2 \times 10^{-6}) = 0.44549 (< 2) \text{ Stokes 域の仮定は正しい}$$

$$V = QH / u_t = (4.00)(1.00) / (0.15356) = 26.048 \text{ m}^3 \doteq \boxed{26.0 \text{ m}^3}$$

$$A = V / H = 26.048 / 1.00 = 26.048 \text{ m}^2$$

$$S = Q / v_{\max} = 4.00 / 2.00 = 2.00 \text{ m}^2$$

$$W = S / H = 2.00 / 1.00 = \boxed{2.00 \text{ m}}$$

$$L = A / W = 26.048 / 2.00 = 13.024 \text{ m} \doteq \boxed{13.0 \text{ m}}$$

3. 遠心力集塵

3. 1 接線流速分布

粉塵を含んだ空気を外側から中心部に向かって回転運動させると、粉塵粒子には遠心力と抗力が作用し、粒子径の大きなものは回転の外側へ移動して装置下部で回収され、粒子径の小さなものは回転中心へ移動して装置上部から空気とともに排出される。回転中心部の流体は強制渦の状態となっており、接線方向の流速 u_θ [m/s]は、回転中心半径 r [m]に比例する。

$$u_{\theta} = r\omega \quad \cdots(3.1.1)$$

$$u_{\theta} r^{-1} = \text{const.} \quad (\omega = \text{const.}) \quad \cdots(3.1.2)$$

ただし、 ω は角速度[rad/s]。const.は一定の意。

回転の外側は半自由渦の状態となっており、次式で表される。

$$u_{\theta} r^n = \text{const.} \quad (n=0.5 \sim 0.9) \quad \cdots(3.1.3)$$

角運動量保存則(回転の勢いが常に一定)が成り立つ渦流を自由渦といい、次式のように導かれる。

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{u}_{\theta} = \vec{0} \quad \cdots(3.1.4)$$

$$u_{\theta} r = \text{const.} \quad \cdots(3.1.5)$$

以上より、回転流体内部の任意の位置 r における接線速度 u_{θ} は、半自由渦の式($u_{\theta} r^n = \text{const.}$)をもとに、 $n = -1$ のとき強制渦、 $n = 0.5 \sim 0.9$ のとき半自由渦、 $n = 1$ のとき自由渦として整理される。

3. 2 遠心沈降速度

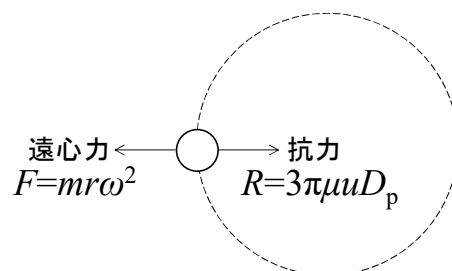
接線方向より流入した回転気流中の粉塵粒子が半径方向(円柱壁側)へ向かって遠心沈降する速度 u_{tc} [m/s]は、流体抗力と遠心力のつり合いより導かれる。

$$C_D \frac{\pi D_{pc}^2}{4} \frac{\rho u_{tc}^2}{2} = \frac{\pi}{6} D_{pc}^3 (\rho_p - \rho) r \omega^2 \quad [F = mr\omega^2] \quad (\text{右辺は有効質量}) \quad \cdots(3.2.1)$$

$$3\pi\mu u_{tc} D_{pc} = \frac{\pi}{6} D_{pc}^3 (\rho_p - \rho) r \omega^2 \quad (\text{Stokes}) \quad \cdots(3.2.2)$$

$$3\pi\mu u_{tc} D_{pc} = \frac{\pi}{6} D_{pc}^3 (\rho_p - \rho) \frac{u_{\theta}^2}{r} \quad [u_{\theta} = r\omega] \quad \cdots(3.2.3)$$

$$u_{tc} = \frac{(\rho_p - \rho) D_{pc}^2 u_{\theta}^2}{18\mu r} \quad [u_{\theta} = u_{\theta}] \quad \cdots(3.2.4)$$



ただし、 u_{θ} は入口流速[m/s]であり、装置内における接線方向の流速 u_{θ} [m/s]に等しい。

3. 3 性能設計

3.3.1 分離限界粒子径

入口より流入した気流が入口形状(矩形)を維持したまま N 回回転して排出されるものとする。それまでの間に粒子は $r = (D/2) - B$ から $r = D/2$ まで B [m]沈降することから、気流の滞留時間と遠心沈降時間は等しい(D は円柱部直径、 B は入口幅)。

$$\frac{2\pi(D/2)N}{u_{\theta}} = \frac{B}{u_{tc}} \quad \cdots(3.3.1)$$

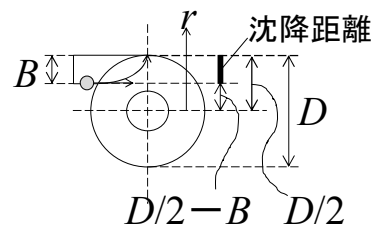
$$u_{tc} = \frac{B u_{\theta}}{\pi N D} \quad \cdots(3.3.2)$$

遠心沈降速度 u_{tc} の式に代入すると、分離限界粒子径 D_{pc} [m]の簡便式が導かれる。

$$\frac{Bu_0}{\pi ND} = \frac{(\rho_p - \rho)D_{pc}^2}{18\mu} \frac{u_0^2}{(D/2)} \quad \dots(3.3.3)$$

$$\frac{B}{\pi N} = \frac{(\rho_p - \rho)D_{pc}^2}{9\mu} u_0 \quad \dots(3.3.4)$$

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu B}{\pi Nu_0(\rho_p - \rho)}} \quad \dots(3.3.5)$$



厳密には、遠心沈降速度式を積分して導かれる。時間 $t=0$ のとき $r=(D/2)-B$ の位置にある粒子が時間 $t=t$ に円柱壁に到達するものとして($r=D/2$)、遠心沈降速度式は次式のように導かれる。

$$(u_{tc} =) \frac{dr}{dt} = \frac{(\rho_p - \rho)D_p^2}{18\mu} \frac{u_0^2}{r} \quad \dots(3.3.6)$$

$$\int_{(D/2)-B}^{D/2} r dr = \frac{(\rho_p - \rho)D_p^2}{18\mu} u_0^2 \int_0^t dt \quad \dots(3.3.7)$$

$$\frac{(D/2)^2}{2} - \frac{[(D/2)-B]^2}{2} = \frac{(\rho_p - \rho)D_p^2}{18\mu} u_0^2 t \quad \dots(3.3.8)$$

$$\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - B\right)^2 = \frac{(\rho_p - \rho)D_p^2}{9\mu} u_0^2 t \quad \dots(3.3.9)$$

$$\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D^2}{4} - DB + B^2\right) = \frac{(\rho_p - \rho)D_p^2}{9\mu} u_0^2 t \quad \dots(3.3.10)$$

$$DB - B^2 = \frac{(\rho_p - \rho)D_p^2}{9\mu} u_0^2 t \quad \dots(3.3.11)$$

$$D_p = \sqrt{\frac{9\mu B(D-B)}{(\rho_p - \rho)u_0^2 t}} \quad \dots(3.3.12)$$

粉塵粒子が捕集されるまでの時間 $t=0 \sim t$ の間に気流が N 回回転するものとして、次式が成り立つ。

$$t = \frac{2\pi(D/2)N}{u_0} = \frac{\pi ND}{u_0} \quad \dots(3.3.13)$$

D_p の式に代入すると、分離限界粒子径 D_{pc} [m] の厳密式が導かれる。

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu B(D-B)}{(\rho_p - \rho)u_0^2} \frac{u_0}{\pi ND}} \quad \dots(3.3.14)$$

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu B(D-B)}{\pi ND u_0 (\rho_p - \rho)}} \quad \dots(3.3.15)$$

気流の回転数 N は、Peavy(ピーヴィ)らの式を用いる。 **[文献 1, 2]**

$$N = \frac{2L_1 + L_2}{H} \quad \dots(3.3.16) \quad \text{小数以下は切り上げる}$$

3.3.2 捕集効率

総合捕集効率 E [-] については、装置内に流入する粉塵粒子の粒子径分布における階級ごとの部分捕集効率 η_p と重量組成 Δw_i の積の総和より求める。[文献 3]

$$E = \sum \eta_p \Delta w_i$$

部分捕集効率 η_p [-] については、水田・木村の式が簡便である。[文献 4]

$$\eta_p = 1 - \exp \left[-0.693 \left(\frac{D_p}{D_{50}} \right) \right]$$

50%分離粒子径 D_{50} [m] については、Lapple の式がある。[文献 5]

$$D_{50} = \sqrt{\frac{9\mu B}{2\pi\rho_p N u_0}}$$

3.4 構造設計

円柱部直径 D [m] は、所要流量 Q [m³/s] と入口流速 u_0 [m/s] (一般に、10~20 m/s 程度)、入口部の寸法比 B/D と H/D を用いて次式のように導かれる。

$$Q = B H u_0 = \left(\frac{B}{D} \right) \left(\frac{H}{D} \right) D^2 u_0 \quad \dots(3.4.1)$$

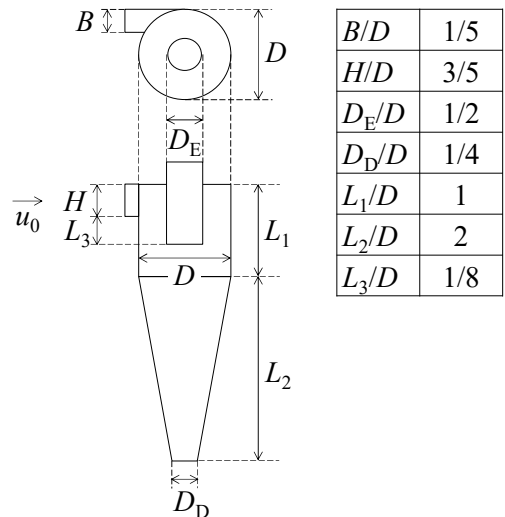
$$D = \sqrt{\frac{Q}{(B/D)(H/D)u_0}} \quad \dots(3.4.2)$$

上式の計算値をもとに入口部の幅や胴長など各部位の寸法を求める。

処理量 P [t/h] のときの所要流量 Q [m³/h] は、次式で表される。

$$Q = \frac{P}{\rho\gamma} \quad \dots(3.4.3)$$

ただし、 γ は固体と流体の混合比[t-固体/t-流体]、 ρ は流体密度[t/m³]。



3.5 流動設計

サイクロンの入口(1)と出口(2)でベルヌーイの定理を適用すると、次式のように導かれる。

$$\frac{p_1}{\rho} + gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} + \sum F \quad \dots(3.5.1)$$

$$\sum F = \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} \quad [Z_1 \approx Z_2] \quad \dots(3.5.2)$$

$$\sum F = \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{u_1^2 - (A_1/A_2)^2 u_1^2}{2} \quad [u_1 A_1 = u_2 A_2] \quad (\text{連続の式}) \quad \cdots(3.5.3)$$

$$\rho \sum F = (p_0 - p_1) + \frac{\rho u_1^2}{2} [1 - (A_1/A_2)^2] \quad \cdots(3.5.4)$$

$$\Delta P = \left[\frac{p_1 - p_2}{\rho u_1^2 / 2} + 1 - (A_1/A_2)^2 \right] \frac{\rho u_1^2}{2} \quad [\Delta P \equiv \rho \sum F] \quad \cdots(3.5.5)$$

$$\boxed{\Delta P = F \frac{\rho u_1^2}{2}} \quad \left[F \equiv \frac{p_1 - p_2}{\rho u_1^2 / 2} + 1 - (A_1/A_2)^2 \right] \quad \cdots(3.5.6)$$

ただし、 F は圧力損失係数[-]、 ΔP は圧力損失[Pa]、 $\sum F$ は全摩擦損失[J/kg]。

圧力損失係数 F については、たとえば井伊谷(いのゑ)の式[文献 6]、First & Silverman の式[文献 7]、Shepherd(シェパード) & Lapple の式[文献 8]が知られている。

(井伊谷の式)
$$F = \frac{30BH}{D_E^2} \sqrt{\frac{D}{L_1 + L_2}} \quad \cdots(3.5.7)$$

(First & Silverman の式)
$$F = \frac{24BH}{D_E^2} \sqrt{\frac{D^2}{L_1 L_2}} \quad \cdots(3.5.8)$$

(Shepherd & Lapple の式)
$$F = \frac{16BH}{D_E^2} \quad \cdots(3.5.9)$$

標準型サイクロンの場合、寸法比の定義にもよるが $F=8$ 程度である。

【計算例】遠心力集塵機

空気中に含まれる粉塵を標準型サイクロンにより下記の条件で捕集する。①サイクロン構造の各寸法 $D, B, H, D_E, D_D, L_1, L_2, L_3$ [mm]、②分離限界粒子径 D_{pc} [μm] (厳密式)、③圧力損失 ΔP [kPa] (井伊谷の式) を求めよ。($D=761$ mm ほか、 $D_{pc}=4.14$ μm , $\Delta P=2.00$ kPa)

処理量	1.80 t/h	空気密度	1.20 kg/m ³
固体混合比	0.3	空気粘度	18.2 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	入口流速	20.0 m/s

$$\textcircled{1} Q = P/\rho\gamma = (1800/3600)/[(1.20)(0.3)] = 1.3888 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D = [Q/\{(B/D)(H/D)u_0\}]^{0.5} = [(1.3888)/\{(1/5)(3/5)(20.0)\}]^{0.5} = 0.76070 \text{ m} \doteq \boxed{761 \text{ mm}}$$

$$B = (B/D)D = (1/5)(760.70) = 152.14 \text{ mm} \doteq \boxed{152 \text{ mm}}$$

$$H = (H/D)D = (3/5)(760.70) = 456.42 \text{ mm} \doteq \boxed{456 \text{ mm}}$$

$$D_E = (D_E/D)D = (1/2)(760.70) = 380.35 \text{ mm} \doteq \boxed{380 \text{ mm}}$$

$$D_D = (D_D/D)D = (1/4)(760.70) = 190.17 \text{ mm} \doteq \boxed{190 \text{ mm}}$$

$$L_1 = (L_1/D)D = (1)(760.70) = 760.70 \text{ mm} \doteq \boxed{761 \text{ mm}}$$

$$L_2 = (L_2/D)D = (2)(760.70) = 1521.4 \text{ mm} \doteq \boxed{1521 \text{ mm}}$$

$$L_3 = (L_3/D)D = (1/8)(760.70) = 95.087 \text{ mm} \doteq \boxed{95.1 \text{ mm}}$$

$$\textcircled{2} N = (2L_1 + L_2) / H = [(2)(760.70) + (1521.4)] / 456.42 = 6.6666 \doteq 7 \text{ 回転}$$

$$D_{pc} = [9\mu B(D - B) / \pi N D u_0 (\rho_p - \rho)]^{0.5}$$

$$= [(9)(18.2 \times 10^{-6})(0.15214)(0.76070 - 0.15214) / \{(7\pi)(0.76070)(20.0)(2650 - 1.2)\}]^{0.5} = 4.1367 \times 10^{-6} \text{ m} \doteq \boxed{4.14 \mu\text{m}}$$

$$\textcircled{3} F = (30BH / D_E^2) [D / (L_1 + L_2)]^{0.5} = [(30)(0.15214)(0.45642) / (0.38035)^2] [(0.76070) / (0.76070 + 1.5214)]^{0.5} = 8.3138$$

$$\Delta P = F(\rho u_1^2 / 2) = F(\rho u_0^2 / 2) = (8.3138)(1.2)(20.0)^2 / 2 = 1995.3 \text{ Pa} \doteq \boxed{2.00 \text{ kPa}}$$

4. 慣性力集塵

4. 1 捕集効率

粉塵を含む気流中に障害物が存在するとき、障害物の近傍で気流の向きが変化する。粉塵粒子は、慣性のために障害物の近傍で流線から外れ、障害物に衝突して捕集分離される。このような捕集機構を**慣性衝突**という。また、粉塵粒子が点とみなせないほど大きい場合は、重心の軌跡が障害物に接触せずとも粒子の一部が接触して捕集される。このような現象を**さえぎり効果**という。慣性衝突における捕集効率(慣性衝突捕集効率) η_T [-]は、幅 X で与えられる限界粒子軌跡内の断面積 A_1 と障害物の投影面積 A_2 の比で定義される。障害物形状が太さ D 、長さ L の円柱のときは、次式のように導かれる。

$$\eta_T \equiv \frac{A_1}{A_2} = \frac{XL}{DL} = \frac{X}{D} \quad \dots(4.1.1)$$

しかし、粒子軌跡の幅 X を推定することは難しく、上式は実用的でない。

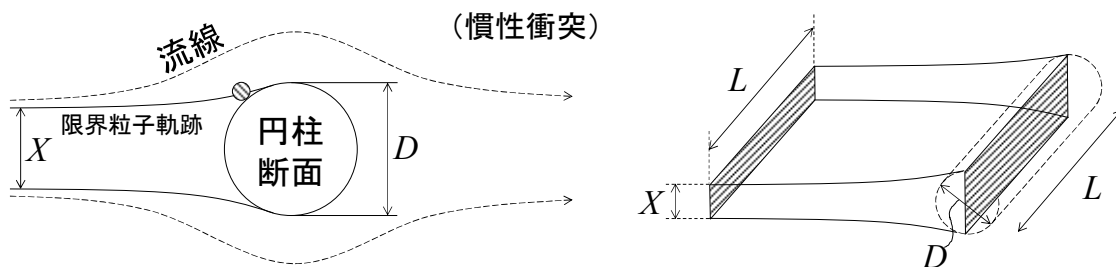


図 4.1.1 慣性衝突モデル

4. 2 停止距離

球粒子が障害物から見て相対速度 u_0 [m/s]で水平方向に投げ出されるとき、ある時間 t [s]における粒子の移動速度 u [m/s]は、次式のように導かれる。

$$\frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p \frac{du}{dt} = - \frac{C_D (\pi D_p^2 / 4) (\rho u^2 / 2)}{C_C} \quad \dots(4.2.1)$$

$$\frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p \frac{du}{dt} = - \frac{24 (\pi D_p^2 / 4) (\rho u^2 / 2)}{Re_p C_C} \quad \dots(4.2.2)$$

$$\frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p \frac{du}{dt} = - \frac{24}{D_p u \rho / \mu} \frac{(\pi D_p^2 / 4)(\rho u^2 / 2)}{C_c} \quad (\text{Stokes}) \quad \cdots(4.2.3)$$

$$\frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p \frac{du}{dt} = - \frac{3\pi\mu D_p u}{C_c} \quad \cdots(4.2.4)$$

$$\int_{u_0}^u \frac{du}{u} = \int_0^t - \frac{18\mu}{C_c D_p^2 \rho_p} dt \quad \cdots(4.2.5)$$

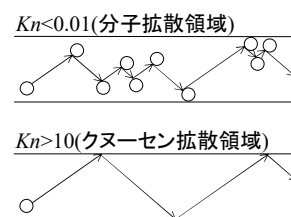
$$\boxed{u = u_0 \exp\left(-\frac{18\mu}{C_c D_p^2 \rho_p} t\right)} \quad \cdots(4.2.6)$$

$$C_c = 1 + Kn \left[2.46 + 0.82 \exp\left(-\frac{0.44}{Kn}\right) \right] \quad \cdots(4.2.7)$$

C_c はカニングガムの補正係数[-]であり、スリップ効果による流体抵抗の減少分を補正するための因子。(抵抗力を C_c で割り算した値が補正後の流体抵抗になる。) 気体中かつ粒子径 1 μm 程度以下でスリップ効果の影響が大きくなる。なお、液体の場合は 1 である。【文献 9】

Kn は Knudsen(クヌーセン)数であり、拡散分子の平均自由行程 λ [m](固体壁に衝突した溶質が再び固体壁に衝突するまでに進む平均距離)と流れ場の代表長さ L [m](ここでは粒子径 D_p [m])の比で定義される。

$$Kn \equiv \frac{\lambda}{L} \quad \cdots(4.2.8)$$



平均自由行程の簡便な推算式として、次式がある。【文献 10, 11】

$$\lambda = \frac{3.2\mu}{P} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M_A}} \quad \cdots(4.2.9)$$

ただし、 M_A は気体分子のモル質量[kg/mol]、 P は全圧[Pa]、 R は気体定数 8.314 J/(mol·K)、 μ は粘度[Pa·s]。(1気圧 20°Cの空気の場合で $\lambda \approx 0.07 \mu\text{m} \approx 0.1 \mu\text{m}$)

速度 u [m/s]で等速度運動している粒子が急停止すると、粒子は障害物に対する相対速度 u_0 [m/s]で流体中に投げ出される。投げ出されてから停止するまでの停止距離 S_D [m]は、次式のように導かれる。

$$S_D \equiv \int_0^\infty u dt \quad \cdots(4.2.10)$$

$$S_D = \int_0^\infty u_0 \exp\left(-\frac{18\mu}{C_c D_p^2 \rho_p} t\right) dt \quad \cdots(4.2.11)$$

$$S_D = -\frac{u_0}{18\mu / C_c D_p^2 \rho_p} \left[\exp\left(-\frac{18\mu}{C_c D_p^2 \rho_p} t\right) \right]_0^\infty \quad \cdots(4.2.12)$$

$$S_D = -\frac{u_0}{18\mu / C_c D_p^2 \rho_p} (-1) \quad \cdots(4.2.13)$$

$$\boxed{S_D = \frac{C_c D_p^2 \rho_p u_0}{18\mu}} \quad \cdots(4.2.14)$$

上式は、慣性の大きさの目安を表している。粒子径が大きくて流体の速度が大きいかほど慣性の効果が大きく、急に方向転換できない。

4. 3 慣性衝突特性

ストークス数 Stk は、停止距離 S_D と障害物の代表長さの半径 R (直径 D) の比で定義される。

$$Stk \equiv \frac{S_D}{R} \quad \cdots(4.3.1)$$

$$Stk = \frac{C_c D_p^2 \rho_p u_0}{18 \mu R} \quad \cdots(4.3.2)$$

粒子慣性パラメーター Ψ [-](プサイ)は、障害物に対する相対速度 u_0 の粒子を距離 R (障害物の代表長さの半径に相当) で停止させるのに必要な力 F [N] と相対速度 u_0 の粒子が受ける流体抵抗 R_D [N] の比で定義される。

$$\Psi \equiv \frac{F}{R_D} \quad \cdots(4.3.3)$$

貫入粒子を停止させるのに必要な力 F [N] は、次式のように導かれる。

$$u = u_0 + at \quad \cdots(4.3.4) \quad (\text{等加速度直線運動})$$

$$\frac{dx}{dt} = u_0 + at \quad \cdots(4.3.5)$$

$$x = u_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad \cdots(4.3.6)$$

$$x = u_0 \left(\frac{u - u_0}{a} \right) + \frac{1}{2} a \left(\frac{u - u_0}{a} \right)^2 \quad \left[t \equiv \frac{u - u_0}{a} \right] \quad \cdots(4.3.7)$$

$$2ax = 2u_0(u - u_0) + (u - u_0)^2 \quad \cdots(4.3.8)$$

$$2ax = 2u_0u - 2u_0^2 + (u^2 - 2uu_0 + u_0^2) \quad \cdots(4.3.9)$$

$$u^2 - u_0^2 = 2ax \quad \cdots(4.3.10)$$

$$0 - u_0^2 = 2aR \quad \cdots(4.3.11)$$

$$a \left(\equiv \frac{du}{dt} \right) = -\frac{u_0^2}{2R} \quad \cdots(4.3.12)$$

$$F = \frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p \left(-\frac{du}{dt} \right) \quad \cdots(4.3.13) \quad (\text{加速度は負の値を取るなので負号を付して正の値にした})$$

$$F = \frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p \left(\frac{u_0^2}{2R} \right) \quad \left[a \left(\equiv \frac{du}{dt} \right) = -\frac{u_0^2}{2R} \right] \quad \cdots(4.3.14)$$

$$F = \frac{\pi}{12R} D_p^3 \rho_p u_0^2 \quad \cdots(4.3.15)$$

流体抵抗 R_D [N] は、Stokes 域を仮定して次式で与えられる。

$$R_D = \frac{3\pi\mu D_p u_0}{C_c} \quad \cdots(4.3.16)$$

F と R_D の式を Ψ の式に代入する。

$$\Psi = \frac{(\pi/12R)D_p^3 \rho_p u_0^2}{3\pi\mu D_p u_0 / C_C} \quad \dots(4.3.17)$$

$$\Psi = \frac{C_C D_p^2 \rho_p u_0}{36\mu R} \left[C_C = 1 + Kn \left[2.46 + 0.82 \exp\left(-\frac{0.44}{Kn}\right) \right], Kn = \frac{\lambda}{L}, \lambda = \frac{3.2\mu}{P} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M_A}} \right] \quad \dots(4.3.18)$$

u_0 は障害物に対する粉塵粒子の相対速度($u_0 = |u_g - u_w|$)を用いる。粉塵粒子自身の絶対速度はガス流速 u_g に等しいことから、粉塵ガス流速が障害物の移動速度 u_w に比してずっと大きい場合($u_g \gg u_w$)、 u_0 はガス流速 u_g に近似される。

Stk と Ψ の間には次式が成り立つ。

$$Stk = 2\Psi \left[Stk \equiv \frac{C_C D_p^2 \rho_p u_0}{18\mu R} \right] \quad \dots(4.3.19)$$

粒子慣性パラメーター Ψ と障害物まわりの流体に対するレイノルズ数 Re は、慣性衝突捕集効率 η_T [-] の関数になっている。

粘性流($Re \leq 1$)の場合は、Davies の効率推定線図を式化した次式がある。[文献 12, 13]

$$\eta_T = 1 - 1.2Re^{-0.2}\Psi^{-0.54} + 0.36Re^{-0.4}\Psi^{-1.08} \left[Re \equiv \frac{Du_0\rho}{\mu} \right] \quad \dots(4.3.20)$$

中間流($1 \leq Re$)の場合は、Landahl & Hermann の効率推定線図を式化した次式がある。[文献 14]

$$\eta_T = \Psi^3 / (\Psi^3 + 0.77\Psi^2 + 0.22) \quad (Re=10) \quad \dots(4.3.21)$$

上の2式は、いずれもさえぎり効果を考慮していない($D_p \ll D, R_I = 0$)。

さえぎり効果を考慮する場合の慣性衝突さえぎり捕集効率 η_{TI} については、Torgeson (トージソン) の式がある。[文献 13, 15]

$$\eta_{TI} = 0.0518R_I^{3/2} (4\pi/k_L) [1 + (\Psi/R_I^{3/2})(0.5 + 0.8R_I)] \left[k_L \equiv 2 - \ln Re, R_I \equiv D_p/D \right] \quad \dots(4.3.22)$$

ただし、 k_L は単一円柱に対する流体力学因子 (Lamb の流れ) [-] [文献 16]、 R_I はさえぎりパラメーター。

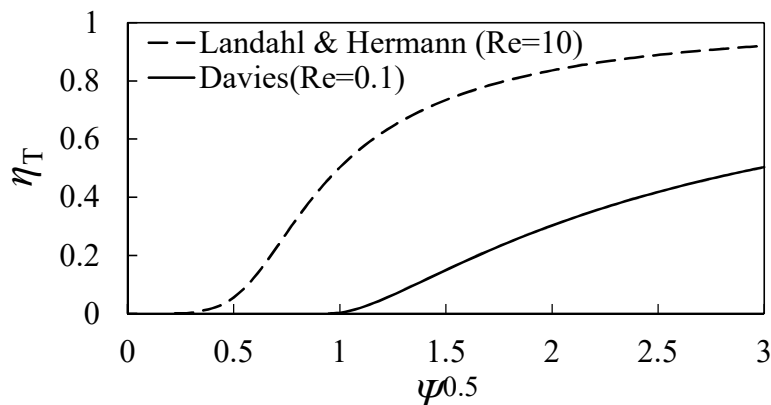


図 4.3.1 効率推定線図の例(さえぎり効果無し) [文献 17, 18]

【計算例】慣性衝突捕集効率

100 kPa, 20°Cの気流中(流速 80.0 cm/s, 密度 1.20 kg/m³, 粘度 18.2 μPa·s, 分子量 28.8)に含まれる粉塵粒子(粒子径 1.00 μm, 粒子密度 2650 kg/m³)が円柱状の単一繊維(繊維径 10.0 μm)に慣性衝突捕集される場合の①慣性衝突捕集効率 η_Γ [%]と②慣性衝突さえぎり捕集効率 η_Π [%]をそれぞれ求めよ。(①4.25%, ②11.6%)

$$\textcircled{1} Re = Du_0\rho/\mu = (10.0 \times 10^{-6})(80.0/100)(1.20)/(18.2 \times 10^{-6}) = 0.52747$$

$$\lambda = 3.2(\mu/P)(RT/2\pi M_A)^{0.5} = (3.2)(18.2 \times 10^{-6}/100 \times 10^3)[(8.314)(293.15)/\{(2\pi)(28.8/1000)\}]^{0.5} = 6.7590 \times 10^{-8} \text{ m}$$

$$Kn = \lambda/L = \lambda/D_p = (6.7590 \times 10^{-8})/(1.00 \times 10^{-6}) = 0.067590$$

$$C_C = 1 + Kn[2.46 + 0.82 \exp(-0.44/Kn)] = 1 + (0.067590)[2.46 + 0.82 \exp(-0.44/0.067590)] = 1.1663$$

$$\Psi = C_C D_p^2 \rho_p u_0 / (36\mu R) = C_C D_p^2 \rho_p u_0 / [36\mu(D/2)]$$

$$= (1.1663)(1.00 \times 10^{-6})^2 (2650)(80.0/100) / [(36)(18.2 \times 10^{-6})(10.0 \times 10^{-6}/2)] = 0.75474$$

$$\eta_{\Gamma} = 1 - 1.2Re^{-0.2}\Psi^{-0.54} + 0.36Re^{-0.4}\Psi^{-1.08} = 1 - (1.2)(0.52747)^{-0.2}(0.75474)^{-0.54} + (0.36)(0.52747)^{-0.4}(0.75474)^{-1.08}$$

$$= 0.042525 \doteq \boxed{4.25\%}$$

$$\textcircled{2} k_L = 2 - \ln Re = 2 - \ln 0.52747 = 2.6396$$

$$R_I = D_p/D = 1.00/10.0 = 0.1$$

$$\eta_{\Pi} = 0.0518R_I^{3/2}(4\pi/k_L)[1 + (\Psi/R_I^{3/2})(0.5 + 0.8R_I)] = (0.0518)(0.1)^{3/2}(4\pi/2.6396)[1 + (0.75474/0.1^{3/2})(0.5 + (0.8)(0.1))]$$

$$= 0.11574 \doteq \boxed{11.6\%}$$

5. 濾過集塵

5. 1 捕集機構

粉塵を含む気流中に障害物が存在するとき、障害物の近傍で気流の向きが変化する。粉塵粒子は慣性のために流線から外れ、障害物に付着することで捕集される。このような捕集機構を**慣性衝突機構**といい、大粒径(1 μm 以上)かつ高流速(0.5 m/s 以上)で顕著となる。粉塵粒子が小さい場合は、ブラウン運動によって流線から外れた粒子が障害物に付着することで捕集される。このような捕集機構を**拡散機構**といい、小粒径(0.5 μm 以下)かつ低流速(0.1 m/s 以下)で顕著となる。粉塵粒子が大きい場合は、重力沈降によって流線から外れた粒子が障害物に付着することで捕集される。このような捕集機構を**重力機構**といい、大粒径(1 μm 以上)かつ低流速(0.1 m/s 以下)で顕著となる。帯電した粉塵粒子は、静電気力のために流線から外れ、障害物に付着することで捕集される。このような捕集機構を**静電気機構**といい、小粒径(0.5 μm 以下)かつ低流速(0.1 m/s 以下)で顕著となる。

上記の機構は粉塵粒子を点とみなしているが、実際には大きさがあることから、重心点の軌跡が障害物に接触せずとも粒子の肉厚の一部が障害物に接触することで捕集が起こる。このような現象を**さえぎり効果**といい、大粒径(0.5 μm 以上)で低流速(0.1 m/s 以下)ほど顕著となる。多くの場合、上記の捕集機構(慣性衝突、ブラウン拡散、重力沈降、静電気沈着)に粒子の大きさを考慮する形で捕集効率を高める効果として考慮され、単独での捕集機構(直接さえぎり機構という)としては考えにくい。

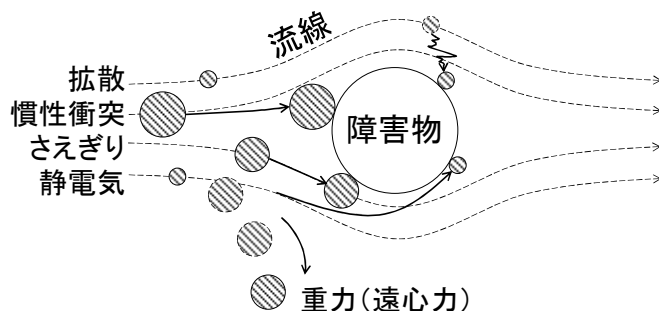


図 5.1 捕集機構の例

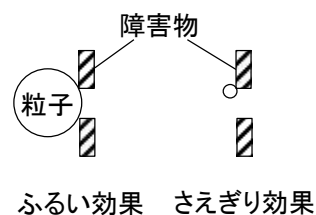


図 5.2 さえぎりによる粒子捕集

5. 2 単一繊維の捕集効率

慣性衝突支配(T)の場合は、粘性流($Re < 1$)に対する Davies の効率推定線図を式化した次式を用いる。[文献 12, 13]

$$\eta_T = 1 - 1.2Re^{-0.2}\Psi^{-0.54} + 0.36Re^{-0.4}\Psi^{-1.08} \left[Re \equiv \frac{D_f u_0 \rho}{\mu} \right] \quad \dots(5.2.1)$$

$$\Psi = \frac{C_C D_p^2 \rho_p u_0}{36\mu R} \left[C_C = 1 + Kn \left[2.46 + 0.82 \exp\left(-\frac{0.44}{Kn}\right) \right], Kn = \frac{\lambda}{L}, \lambda = \frac{3.2\mu}{P} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M_A}} \right] \quad \dots(5.2.2)$$

ただし、 Ψ は粒子慣性パラメーター[-]。

慣性衝突さえぎり支配(TI)の場合は、Torgeson (トージソン) の式を用いる。[文献 13, 15]

$$\eta_{TI} = 0.0518R_1^{3/2} (4\pi/k_L) [1 + (\Psi/R_1^{3/2})(0.5 + 0.8R_1)] \left[k_L \equiv 2 - \ln Re, R_1 \equiv D_p/D \right] \quad \dots(5.2.3)$$

ただし、 k_L は単一円柱に対する流体力学因子 (Lamb の流れ)[-]、 R_1 はさえぎりパラメーター。

拡散支配(D)の場合は、粘性流($Re < 1$)に対する Stechkina (スチェッキン) の式を用いる。[文献 19]

$$\eta_D = 2.9k_L^{-1/3} Pe^{-2/3} + 0.624Pe^{-1} \left[k_L \equiv 2 - \ln Re, Re \equiv \frac{D_f u_0 \rho}{\mu}, Pe \equiv \frac{u_0 D_f}{D_{BM}}, D_{BM} = \frac{1.38 \times 10^{-23} T}{3\pi\mu D_p / C_C} \right] \quad \dots(5.2.4)$$

ただし、 D_{BM} は粒子拡散係数[m²/s]。

拡散さえぎり支配(DI)の場合は、Friedlander (フリードランダー) の式を用いる。[文献 20]

$$\eta_{DI} = 6Re^{-1/2} Sc^{-2/3} + 3Re^{1/2} R_1^2 \left[Re \equiv \frac{D_f u_0 \rho}{\mu}, Sc \equiv \frac{\mu}{\rho D_{BM}}, D_{BM} = \frac{1.38 \times 10^{-23} T}{3\pi\mu D_p / C_C}, R_1 \equiv \frac{D_p}{D_f} \right] \quad \dots(5.2.5)$$

重力支配(G)の場合は、吉岡・江見らの式を用いる。[文献 21]

$$\text{(水平流)} \quad \eta_G = \frac{G}{\sqrt{1+G^2}} \quad \dots(5.2.6)$$

$$\text{(下降流)} \quad \eta_G = \frac{G}{1+G} \quad \dots(5.2.7)$$

重力パラメーター G [-]は、粒子の終末速度と流体の代表速度の比で定義される。

$$G = \frac{D_p^2 \rho_p g}{18 \mu u_0} \quad \dots(5.2.8)$$

重力さえぎり支配(GI)の場合は、粘性流($Re < 1$)に対する吉岡・江見らの式を用いる。[文献 21]

$$\text{(水平流)} \quad \eta_{GI} = \frac{1 + R_I}{\sqrt{1 + G^2} \sqrt{1 + [R_I^2 / (k_L G)]^2}} \left[\frac{R_I^2}{2k_L^2 G} \left\{ \frac{1}{(1 + R_I)^2} - 1 + \ln(1 + R_I)^2 \right\} + G \right] \quad \dots(5.2.9)$$

$$\text{(下降流)} \quad \eta_{GI} = \frac{1 + R_I}{1 + G} \left[\frac{1}{2k_L} \left\{ \frac{1}{(1 + R_I)^2} - 1 + \ln(1 + R_I)^2 \right\} + G \right] \quad \dots(5.2.10)$$

$$\left[k_L \equiv 2 - \ln Re, Re \equiv \frac{D_f u_0 \rho}{\mu}, G \equiv \frac{D_p^2 \rho_p g}{18 \mu u_0}, R_I \equiv \frac{D_p}{D_f} \right]$$

直接さえぎり支配(I)の場合は、粘性流($Re < 1$)に対する次式を用いる。[文献 13, 14]

$$\eta_I = \frac{1}{2k_L} \left[2(1 + R_I) \ln(1 + R_I) - (1 + R_I) + \frac{1}{1 + R_I} \right] \quad \dots(5.2.11)$$

慣性衝突、拡散、重力、さえぎりの各機構が複合的に寄与する場合(TDI, TGI, GDI など)は、各効率の単純和を用いる。[文献 13]

$$\eta_{TDI} = \eta_T + \eta_D + \eta_I \quad \dots(5.2.12)$$

$$\eta_{TGI} = \eta_T + \eta_G + \eta_I \quad \dots(5.2.13)$$

$$\eta_{GDI} = \eta_G + \eta_D + \eta_I \quad \dots(5.2.14)$$

【計算例】 拡散捕集効率

100 kPa, 20°Cの気流中(流速 10.0 cm/s, 密度 1.20 kg/m³, 粘度 18.2 μPa·s, 分子量 28.8)に含まれる粉塵粒子(粒子径 0.500 μm, 粒子密度 2650 kg/m³)が円柱状の単一繊維(繊維径 10.0 μm)に捕集される場合の①拡散捕集効率 η_D [%]と②拡散さえぎり捕集効率 η_{DI} [%]をそれぞれ求めよ。(①0.278%, ②0.797%)

$$\text{① } Re = D_f u_0 \rho / \mu = (10.0 \times 10^{-6})(10.0/100)(1.20)/(18.2 \times 10^{-6}) = 0.065934$$

$$\lambda = 3.2(\mu/P)(RT/2\pi M_A)^{0.5} = (3.2)(18.2 \times 10^{-6}/100 \times 10^3)[(8.314)(293.15)/\{(2\pi)(28.8/1000)\}]^{0.5} = 6.7590 \times 10^{-8} \text{ m}$$

$$Kn = \lambda/L = \lambda/D_p = (6.7590 \times 10^{-8})/(0.500 \times 10^{-6}) = 0.13518$$

$$C_C = 1 + Kn[2.46 + 0.82 \exp(-0.44/Kn)] = 1 + (0.13518)[2.46 + 0.82 \exp[-(0.44/0.13518)]] = 1.3368$$

$$D_{BM} = 1.38 \times 10^{-23} T / (3\pi \mu D_p / C_C) = (1.38 \times 10^{-23})(293.15) / [(3\pi)(18.2 \times 10^{-6})(0.500 \times 10^{-6}) / (1.3368)] \\ = 6.3055 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pe = u_0 D_f / D_{BM} = (10.0/100)(10.0 \times 10^{-6}) / (6.3055 \times 10^{-11}) = 15859$$

$$k_L = 2 - \ln Re = 2 - \ln 0.065934 = 4.7191$$

$$\eta_D = 2.9k_L^{-1/3} Pe^{-2/3} + 0.624 Pe^{-1} = (2.9)(4.7191)^{-1/3} (15859)^{-2/3} + (0.624)(15859)^{-1} = 0.0027783 \doteq \boxed{0.278\%}$$

$$\text{② } v = \mu/\rho = 18.2 \times 10^{-6} / 1.20 = 1.5166 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Sc = \mu/\rho D_{BM} = v/D_{BM} = (1.5166 \times 10^{-5}) / (6.3055 \times 10^{-11}) = 2.4052 \times 10^5$$

$$R_f = D_p / D_f = 0.500 / 10.0 = 0.05$$

$$\eta_{DI} = 6Re^{-1/2} Sc^{-2/3} + 3Re^{1/2} R_f^2 = (6)(0.065934)^{-1/2} (2.4052 \times 10^5)^{-2/3} + (3)(0.065934)^{1/2} (0.05)^2 = 0.0079675 \div \boxed{0.797\%}$$

【計算例】重力捕集効率

100 kPa, 20°Cの気流中(流速 10.0 cm/s, 密度 1.20 kg/m³, 粘度 18.2 μPa·s)に含まれる粉塵粒子(粒子径 2.50 μm, 粒子密度 2650 kg/m³)が円柱状の単一繊維(繊維径 10.0 μm)に水平流で捕集される場合の①重力捕集効率 η_G [%]と②重力さえぎり捕集効率 η_{GI} [%]をそれぞれ求めよ。重力加速度 9.81 m/s² とする。(①0.496%, ②1.29%)

$$\textcircled{1} G = (D_p^2 \rho_p g) / (18 \mu u_0) = (2.50 \times 10^{-6})^2 (2650) (9.81) / [(18)(18.2 \times 10^{-6})(10.0/100)] = 0.0049596$$

$$\eta_G = G / [(1 + G^2)]^{0.5} = (0.0049596) / [1 + (0.0049596)^2]^{0.5} = 0.0049595 \div \boxed{0.496\%}$$

$$\textcircled{2} Re = D u_0 \rho / \mu = (10.0 \times 10^{-6})(10.0/100)(1.20) / (18.2 \times 10^{-6}) = 0.065934$$

$$k_L = 2 - \ln Re = 2 - \ln 0.065934 = 4.7191$$

$$R_f = D_p / D_f = 2.50 / 10.0 = 0.25$$

$$\eta_{GI} = (1 + R_f)(1 + G^2)^{-0.5} [1 + R_f^4 (k_L G)^{-2}]^{-0.5} [R_f^2 (2 k_L^2 G)^{-1} \{ (1 + R_f)^{-2} - 1 + \ln(1 + R_f)^2 \} + G]$$

$$= (1 + 0.25) [1 + (0.0049596)^2]^{-0.5} [1 + (0.25)^4 \{ (4.7191)(0.0049596) \}^{-2}]^{-0.5}$$

$$\times [(0.25)^2 \{ (2)(4.7191)^2 (0.0049596) \}^{-1} \{ (1 + 0.25)^{-2} - 1 + \ln(1 + 0.25)^2 \} + 0.0049596] = 0.012876 \div \boxed{1.29\%}$$

5. 3 エアフィルター

5.3.1 集塵効率

繊維充填層フィルター(幅 B [m]、高さ H [m]、厚み L [m])内の微小区間 dL [m]を流量 Q [m³/s](流速 u_0 [m/s])で通過する含塵ガス中の粉塵減少量は、物質収支によりフィルター側の粒子捕集量 dM/dt [kg/s]に等しい。

$$QC - Q(C + dC) = \frac{dM}{dt} \quad \dots(5.3.1.1)$$

$$-QdC = \eta_\varepsilon u_0 C dA_{pr} \quad \dots(5.3.1.2)$$

$$-QdC = \eta_\varepsilon u_0 C D_f l_f dV \quad [dA_{pr} \equiv D_f l_f (BHdL) = D_f l_f dV] \quad \dots(5.3.1.3)$$

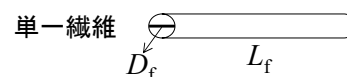
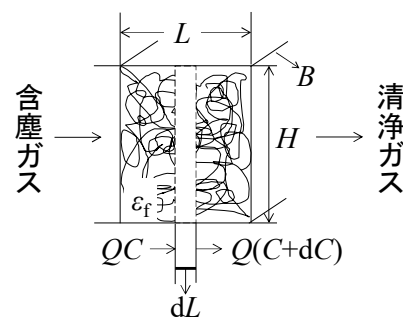
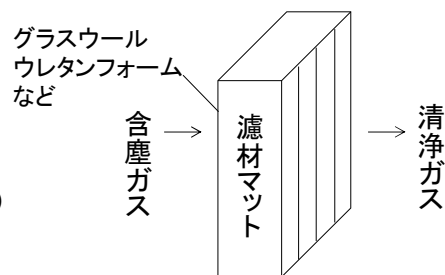
$$-QdC = \eta_\varepsilon u_0 C D_f \frac{4(1 - \varepsilon_f)}{\pi D_f^2} BHdL \quad \left[dV \equiv BHdL, l_f = \frac{4(1 - \varepsilon_f)}{\pi D_f^2} \right] \quad \dots(5.3.1.4)$$

$$\frac{Q}{BH \varepsilon_f} dC = -\eta_\varepsilon u_0 C D_f \frac{4}{\pi D_f^2} \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) dL \quad \dots(5.3.1.5)$$

$$u_0 dC = -\eta_\varepsilon u_0 C \frac{4}{\pi D_f^2} \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) dL \quad \left[\frac{Q}{BH \varepsilon_f} = \frac{u}{\varepsilon_f} = u_0 \right] \quad \dots(5.3.1.6)$$

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = -\eta_\varepsilon \int_0^L \frac{4}{\pi D_f^2} \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) dL \quad \dots(5.3.1.7)$$

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{4L}{\pi D_f^2} \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) \eta_\varepsilon \quad \dots(5.3.1.8)$$



$$C = C_0 \exp \left[-\frac{4L}{\pi D_f} \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) \eta_\varepsilon \right] \quad \cdots(5.3.1.9)$$

$$\boxed{E = 1 - \exp \left[-\frac{4L}{\pi D_f} \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) \eta_\varepsilon \right]} \quad \left[E \equiv \frac{C_0 - C}{C_0} \right] \quad \cdots(5.3.1.10) \quad (\text{対数透過式という})$$

ただし、 A_{pr} は流れ方向に対する繊維群の全投影面積[m²]、 C は粒子濃度[kg/m³]、 D_f は繊維径[m]、 E はフィルター捕集効率[-]、 l_f は繊維充填層体積あたりの繊維長[m/m³]、 Q は繊維充填層内のガス流量[m³/s]、 u_0 は繊維充填層内における繊維周りの平均流速[m/s](= u/ε_f)、 u は空塔速度[m/s](= Q/BH)、 V は繊維充填層体積[m³](= BHL)、 ε_f は繊維充填層の空隙率[-]、 η_ε は繊維間の相互干渉効果を含めた単一繊維捕集効率[-]。 η_ε の推算式については、たとえばChenの式がある。【文献22】

$$\eta_\varepsilon = \eta_0 [1 + 4.5(1 - \varepsilon_f)] \quad \cdots(5.3.1.11)$$

ただし、 η_0 は繊維間相互干渉効果を無視する場合の単一繊維捕集効率[-]。

5.3.2 圧力損失

清浄時の繊維充填層の圧力損失 ΔP [Pa]は、流体抵抗 F [N]と繊維充填層断面積 BH [m²]の比で表される。

$$\Delta P = \frac{F}{BH} \quad \cdots(5.3.2.1)$$

ただし、 B は繊維充填層の幅[m]、 H は繊維充填層の高さ[m]。

気流に対して繊維を垂直に充填した場合の流体抵抗 F [N]は、繊維群を円柱群と見なして次式で表される。

$$F = C_D \frac{\rho u_0^2}{2} l_f BHL D_f \left(= C_D A_{pr} \frac{\rho u_0^2}{2} \right) \quad [A_{pr} \equiv l_f BHL D_f = l_f V D_f = L_f D_f] \quad \cdots(5.3.2.2)$$

ただし、 A_{pr} は流れ方向に対する繊維群の全投影面積[m²]、 C_D は抵抗係数[-]、 D_f は繊維径[m]、 l_f は繊維充填層体積あたりの繊維長[m/m³]、 L は繊維充填層長さ[m]、 L_f は繊維の全長[m](= $l_f V$)、 u_0 は繊維充填層内における繊維周りの平均速度[m/s](= u/ε_f)、 V は繊維充填層体積[m³](= BHL)。

繊維充填層体積あたりの繊維長 l_f [m/m³]は、充填層の空隙率を ε_f [-]として次式のように導かれる。

$$BHL(1 - \varepsilon_f) = BHL \frac{\pi D_f^2}{4} l_f \quad \cdots(5.3.2.3)$$

$$l_f = \frac{4(1 - \varepsilon_f)}{\pi D_f^2} \quad \cdots(5.3.2.4)$$

F の式に代入したものを ΔP の式に代入する。

$$\Delta P = C_D \frac{\rho u_0^2}{2} \frac{4(1 - \varepsilon_f)}{\pi D_f^2} BHL D_f \times \frac{1}{BH} \quad \cdots(5.3.2.5)$$

$$\Delta P = C_D \frac{2\rho u_0^2(1 - \varepsilon_f)L}{\pi D_f} \quad \cdots(5.3.2.6)$$

$$\Delta P = C_D \frac{2\rho u^2(1 - \varepsilon_f)L}{\pi D_f \varepsilon_f^2} \quad [u_0 \equiv u/\varepsilon_f] \quad \cdots(5.3.2.7)$$

$$\Delta P = C_{De} \frac{2\rho u^2 L}{\pi D_f} \left(\frac{1-\varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) \quad [C_{De} \equiv C_D/\varepsilon_f] \quad \cdots(5.3.2.8)$$

ただし、 C_{De} は有効抵抗係数[-]であり、流れに対して直角でない一般の繊維充填層に対して適用される。常圧下における有効抵抗係数 C_{De} については、木村・井伊谷の実験式がある。[文献 23]

$$C_{De} = \frac{1}{\varepsilon_f} \left(0.6 + \frac{4.7}{\sqrt{Re}} + \frac{11}{Re} \right) \quad \left[Re \equiv \frac{D_f u_0 \rho}{\mu} \right] \quad \cdots(5.3.2.9)$$

5.3.3 構造設計

繊維充填層フィルターの厚み L [m]は、フィルター捕集効率 E [-]または圧力損失 ΔP [Pa]の式より求める。 E の式を用いる場合は、一般にフィルター捕集効率は 100%に近いことから、たとえば捕集効率 99%を実現するのに必要となるフィルター厚み L_{99} [m]は次式のように導かれる。

$$0.99 = 1 - \exp \left[-\frac{4L_{99}}{\pi D_f} \left(\frac{1-\varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) \eta_\varepsilon \right] \quad \cdots(5.3.3.1)$$

$$-\frac{4L_{99}}{\pi D_f} \left(\frac{1-\varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) \eta_\varepsilon = \ln 0.01 \quad \cdots(5.3.3.2)$$

$$L_{99} = \frac{1.15\pi D_f}{\eta_\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon_f}{1-\varepsilon_f} \right) \quad \cdots(5.3.3.3)$$

【計算例】 濾過集塵機(エアフィルター) (性能設計)

粉塵を含む空気を繊維充填層フィルターにより除塵処理する場合の①単一繊維捕集効率 η_0 [%]、②フィルター捕集効率 E [%]、③圧力損失 ΔP [kPa]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①11.8%、②100%、③3.61 kPa)

処理量	900 m ³ /h	粉塵粒子径	1.00 μm
フィルター幅	500 mm	空気密度	1.20 kg/m ³
フィルター高さ	500 mm	空気粘度	18.2 μPa·s
フィルター厚み	100 mm	空気圧	100 kPa
フィルター繊維径	10.0 μm	空気温度	20°C
フィルター空隙率	98.0%	空気平均分子量	28.8
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	捕集機構	慣性衝突拡散さえぎり機構

$$\textcircled{1} u = Q/(BH) = (900/3600)/[(500/1000)(500/1000)] = 1.00 \text{ m/s}$$

$$u_0 = u/\varepsilon_f = (1.00)/(98.0/100) = 1.0204 \text{ m/s}$$

$$Re = D_f u_0 \rho / \mu = (10.0 \times 10^{-6})(1.0204)(1.20)/(18.2 \times 10^{-6}) = 0.67279$$

$$\lambda = 3.2(\mu/P)(RT/2\pi M_A)^{0.5} = (3.2)(18.2 \times 10^{-6}/100 \times 10^3)[(8.314)(293.15)/\{(2\pi)(28.8/1000)\}]^{0.5} = 6.7590 \times 10^{-8} \text{ m}$$

$$Kn = \lambda/L = \lambda/D_p = (6.7590 \times 10^{-8})/(1.00 \times 10^{-6}) = 0.067590$$

$$C_c = 1 + Kn[2.46 + 0.82 \exp(-0.44/Kn)] = 1 + (0.067590)[2.46 + 0.82 \exp(-0.44/0.067590)] = 1.1663$$

$$\Psi = C_c D_p^2 \rho_p u_0 / (36\mu R) = C_c D_p^2 \rho_p u_0 / [36\mu(D_f/2)]$$

$$= (1.1663)(1.00 \times 10^{-6})^2 (2650)(1.0204) / [(36)(18.2 \times 10^{-6})(10.0 \times 10^{-6}/2)] = 0.96268$$

$$\eta_T = 1 - 1.2Re^{-0.2}\Psi^{-0.54} + 0.36Re^{-0.4}\Psi^{-1.08} = 1 - (1.2)(0.67279)^{-0.2}(0.96268)^{-0.54} + (0.36)(0.67279)^{-0.4}(0.96268)^{-1.08} = 0.11358$$

$$D_{BM} = 1.38 \times 10^{-23} T / (3\pi\mu D_p / C_C) = (1.38 \times 10^{-23})(293.15) / [(3\pi)(18.2 \times 10^{-6})(1.00 \times 10^{-6}) / (1.1663)] = 2.7506 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pe = u_0 D_f / D_{BM} = (1.0204)(10.0 \times 10^{-6}) / (2.7506 \times 10^{-11}) = 3.7097 \times 10^5$$

$$k_L = 2 - \ln Re = 2 - \ln 0.67279 = 2.3963$$

$$\eta_D = 2.9k_L^{-1/3} Pe^{-2/3} + 0.624 Pe^{-1} = (2.9)(2.3963)^{-1/3} (3.7097 \times 10^5)^{-2/3} + (0.624)(3.7097 \times 10^5)^{-1} = 4.2143 \times 10^{-4}$$

$$R_f = D_p / D_f = 1.00 / 10.0 = 0.100$$

$$1 + R_f = 1 + 0.100 = 1.10$$

$$\eta_i = (2k_L)^{-1} [2(1 + R_f) \ln(1 + R_f) - (1 + R_f) + (1 + R_f)^{-1}] = [(2)(2.3963)]^{-1} [(2)(1.10) \ln(1.10) - (1.10) + (1.10)^{-1}] = 0.0039171$$

$$\eta_0 = \eta_{TDI} = \eta_T + \eta_D + \eta_i = 0.11358 + 4.2143 \times 10^{-4} + 0.0039171 = 0.11791 \approx \boxed{11.8\%}$$

$$\textcircled{2} \eta_e = \eta_0 [1 + (4.5)(1 - \varepsilon_f)] = (0.11791)[1 + (4.5)(1 - 0.98)] = 0.12852$$

$$E = 1 - \exp[-\{(4L)/(\pi D_f)\} \{(1 - \varepsilon_f)/\varepsilon_f\} \eta_e] = 1 - \exp[-\{(4)(100/1000)/(10.0 \times 10^{-6} \pi)\} \{(1 - 0.98)/(0.98)\} (0.12852)] = 1 = \boxed{100\%}$$

$$\textcircled{3} C_{De} = (0.6 + 4.7/Re^{0.5} + 11/Re)/\varepsilon_f = [0.6 + (4.7)/(0.67279)^{0.5} + (11/0.67279)]/0.98 = 23.142$$

$$\Delta P = C_{De} [2\rho u^2 L / (\pi D_f)] [(1 - \varepsilon_f)/\varepsilon_f] = (23.142)[(2)(1.20)(1.00)^2 (100/1000) / (10 \times 10^{-6} \pi)] [(1 - 0.98)/0.98] = 3607.9 \text{ Pa} \approx \boxed{3.61 \text{ kPa}}$$

【計算例】濾過集塵機(エアフィルター)(構造設計)

粉塵を含む空気を繊維充填層フィルターにより除塵処理する場合の①単一繊維捕集効率 η_0 [%]と②フィルター厚み L_{99} [mm]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①0.688%, ②236 mm)

処理量	360 m ³ /h	空気密度	1.20 kg/m ³
フィルター幅	500 mm	空気粘度	18.2 μPa·s
フィルター高さ	500 mm	空気圧	100 kPa
フィルター繊維径	10.0 μm	空気温度	20°C
フィルター空隙率	98.0%	空気平均分子量	28.8
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	フィルター捕集効率	99%
粉塵粒子径	0.500 μm	捕集機構	拡散さえぎり支配

$$\textcircled{1} u = Q / (BH) = (360/3600) / [(500/1000)(500/1000)] = 0.400 \text{ m/s}$$

$$u_0 = u / \varepsilon_f = (0.400) / (98.0/100) = 0.40816 \text{ m/s}$$

$$Re = D_f u_0 \rho / \mu = (10.0 \times 10^{-6})(0.40816)(1.20) / (18.2 \times 10^{-6}) = 0.26911$$

$$\lambda = 3.2(\mu/P)(RT/2\pi M_A)^{0.5} = (3.2)(18.2 \times 10^{-6} / 100 \times 10^3) [(8.314)(293.15) / \{(2\pi)(28.8/1000)\}]^{0.5} = 6.7590 \times 10^{-8} \text{ m}$$

$$Kn = \lambda / L = \lambda / D_p = (6.7590 \times 10^{-8}) / (0.500 \times 10^{-6}) = 0.13518$$

$$C_C = 1 + Kn [2.46 + 0.82 \exp(-0.44/Kn)] = 1 + (0.13518) [2.46 + 0.82 \exp(-0.44/0.13518)] = 1.3368$$

$$D_{BM} = 1.38 \times 10^{-23} T / (3\pi\mu D_p / C_C) = (1.38 \times 10^{-23})(293.15) / [(3\pi)(18.2 \times 10^{-6})(0.500 \times 10^{-6}) / (1.3368)]$$

$$= 6.3055 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pe = u_0 D_f / D_{BM} = (0.40816)(10.0 \times 10^{-6}) / (6.3055 \times 10^{-11}) = 64730$$

$$v = \mu / \rho = 18.2 \times 10^{-6} / 1.20 = 1.5166 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Sc = \mu / \rho D_{BM} = v / D_{BM} = (1.5166 \times 10^{-5}) / (6.3055 \times 10^{-11}) = 2.4052 \times 10^5$$

$$R_f = D_p / D_f = 0.500 / 10.0 = 0.0500$$

$$\eta_0 = \eta_{Df} = 6Re^{-1/2}Sc^{-2/3} + 3Re^{1/2}R_1^2 = (6)(0.26911)^{-1/2}(2.4052 \times 10^5)^{-2/3} + (3)(0.26911)^{1/2}(0.0500)^2 = 0.0068812 \doteq \boxed{0.688\%}$$

$$\textcircled{2} \eta_\varepsilon = \eta_0 [1 + (4.5)(1 - \varepsilon_f)] = (0.0068812)[1 + (4.5)(1 - 0.98)] = 0.0075005$$

$$L_{99} = (1.15\pi D_f / \eta_\varepsilon) [\varepsilon_f / (1 - \varepsilon_f)] = (1.15\pi)(10.0 \times 10^{-6}) / (0.0075005) [(0.98) / (1 - 0.98)] = 0.23602 \text{ m} \doteq \boxed{236 \text{ mm}}$$

$$C_{De} = (0.6 + 4.7 / Re^{0.5} + 11 / Re) / \varepsilon_f = [0.6 + (4.7) / (0.26911)^{0.5} + (11 / 0.26911)] / 0.98 = 51.566$$

$$\Delta P = C_{De} [2\rho u^2 L_{99} / (\pi D_f)] [(1 - \varepsilon_f) / \varepsilon_f] = (51.566) [(2)(1.20)(0.400)^2 (0.23602) / (10 \times 10^{-6} \pi)] [(1 - 0.98) / 0.98]$$

$$= 3035.9 \text{ Pa} \doteq 3.04 \text{ kPa} \text{ 適正な範囲内にある}$$

5. 4 バグフィルター

5.4.1 集塵効率

清浄濾布時のフィルター捕集効率 E_0 [-] は、次式で与えられる。

$$E_0 = \eta_\varepsilon (1 - \varepsilon_f) \quad \cdots (5.4.1.1)$$

$$\eta_\varepsilon = \eta_0 [1 + 4.5(1 - \varepsilon_f)] \quad \cdots (5.4.1.2)$$

ただし、 ε_f は濾布の空隙率[-]、 η_0 は単一繊維の捕集効率[-]、 η_ε は繊維間の相互干渉効果を含めた単一繊維捕集効率[-]。

粉塵負荷時のフィルター捕集効率 E [-] は、次の実験式で求められる。【文献 24】

$$E = \left[0.001 (R_H / D_{ps})^2 Re^{-2.5} \varepsilon_f^{-3} m (\rho_p D_f)^{-1} + 1 \right] E_0 \quad \left[Re \equiv \frac{D_f u \rho}{\mu} \right] \quad \cdots (5.4.1.3)$$

ただし、 D_f は濾布繊維径[m]、 D_{ps} は粉塵粒子の比表面積径[m]、 m は粉塵負荷量[kg/m²] (濾布面積あたりの粉塵堆積量)、 R_H は濾布の動水半径[m] (目開きを仮想円管とみなした場合の相当半径=流路断面積÷濡れ辺長)、 u は濾過速度[m/s]、 ρ_p は粉塵粒子密度[kg/m³]。

清浄時よりも粉塵負荷時の濾布の方が捕集効率は高い。これはケーキ濾過の場合と同じで、粉塵層が濾材の役割を果たすからである。

5.4.2 圧力損失

堆積粉塵層の圧力損失 ΔP_c [Pa] は、ダルシーの式を用いて次式のように導かれる。

$$u = k_p \frac{\Delta P_c}{\mu L} \quad \cdots (5.4.2.1)$$

$$u = \frac{\Delta P_c}{\mu \zeta_c} \quad \left[R_c \equiv L / k_p \right] \quad \cdots (5.4.2.2)$$

$$\Delta P_c = \mu u \zeta_c \quad \cdots (5.4.2.3)$$

ただし、 ζ_c は粉塵層の抵抗[1/m]。(ζは「ゼータ」と読む)

粉塵層抵抗 ζ_c [1/m] は、粉塵量 W_c [kg-固体] に比例し、集塵面積 A [m²] に反比例する。

$$\zeta_c = \alpha \frac{W_c}{A} = \alpha m \quad \cdots (5.4.2.4)$$

ただし、 m は粉塵負荷量[kg/m²]、 α は粉塵充填層の平均比抵抗[m/kg]。

粉塵負荷量 m は、次式のように変形される。

$$m \left(\equiv \frac{W_c}{A} \right) = \frac{\rho_p V (1 - \varepsilon)}{A} \quad \cdots(5.4.2.5)$$

$$m = \frac{\rho_p AL(1 - \varepsilon)}{A} \quad \cdots(5.4.2.6)$$

$$m = \rho_p L(1 - \varepsilon) \quad \cdots(5.4.2.7)$$

ただし、 L は粉塵層高[m]、 V は粉塵充填層の体積[m³]、 ε は空隙率[-]。

ζ_c と m の式を ΔP_c の式に代入すると、堆積粉塵層の実用的な圧力損失が導かれる。

$$\Delta P_c = \mu u \alpha m \quad \cdots(5.4.2.8)$$

$$\boxed{\Delta P_c = \mu u \alpha \rho_p L(1 - \varepsilon)} \quad \cdots(5.4.2.9)$$

コゼニー・カルマンの式を用いて ΔP_c を消去すると、比抵抗 α が導かれる。

$$5S_V^2 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu u L = \mu u \alpha \rho_p (1 - \varepsilon) \left[\frac{\Delta P_c}{L} = 5S_V^2 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu u \right] \quad \cdots(5.4.2.10)$$

$$\frac{180}{D_{ps}^2} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu u L = \alpha \rho_p (1 - \varepsilon) \mu u L \quad [S_V \equiv 6/D_{ps}] \quad \cdots(5.4.2.11)$$

$$\boxed{\alpha = \frac{180}{\rho_p D_{ps}^2} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}} \quad \cdots(5.4.2.12)$$

上式はあくまで概略値であり、実際にはこの値よりも小さくなることが知られている。

粉塵層の空隙率 ε については、木村・井伊谷の相関式がある。[文献 25]

$$(\text{長繊維}) \quad (1 - \varepsilon)_{\text{long}} = 0.40D_{ps}^{0.3} - 0.37D_{ps}^{0.1} + 0.15D_{ps}^{0.04} - 0.03 \quad (D_{ps} \text{ の単位は} [\mu\text{m}]) \quad \cdots(5.4.2.13)$$

$$(\text{短繊維}) \quad (1 - \varepsilon)_{\text{short}} = 0.55(1 - \varepsilon)_{\text{long}} \quad \cdots(5.4.2.14)$$

長繊維の例としてはガラス繊維、短繊維の例としては合成繊維(起毛)がある。

濾材の圧力損失 ΔP_m [Pa] は、濾材を抵抗 ζ_m [1/m] の仮想粉塵層に置き換えて次式で表される。

$$\Delta P_m = \mu u \zeta_m \quad \cdots(5.4.2.15)$$

濾布を用いる場合は、木村・井伊谷の式がある。

$$\Delta P_m = C_D \frac{\rho u^2}{2} \frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \quad \cdots(5.4.2.16)$$

$$C_D = \left[1220(D_f/R_H)^{2/3} - 2880(D_f/R_H)^{1/3} + 1550 \right] Re^{-1} \quad \cdots(5.4.2.17)$$

$$C_D \approx \frac{160}{Re} \left(\frac{D_f}{R_H} \right) \quad (D_f/R_H > 10) \quad \cdots(5.4.2.18)$$

ただし、 C_D は抵抗係数[-]、 D_f は濾布繊維径[m]、 R_H は濾布の動水半径[m]、 ε_f は濾布の空隙率[-]。

もとの式に木村・井伊谷の式を代入すると、濾材抵抗 ζ_m が導かれる。

$$\mu u \zeta_m = \frac{160}{Re} \left(\frac{D_f}{R_H} \right) \frac{\rho u^2}{2} \frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \quad \cdots(5.4.2.19)$$

$$\mu u \zeta_m = \frac{160}{D_f u \rho / \mu} \left(\frac{D_f}{R_H} \right) \frac{\rho u^2}{2} \frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \quad \cdots(5.4.2.20)$$

$$\zeta_m = \frac{80}{R_H} \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) \quad \cdots(5.4.2.21)$$

バグフィルターの全圧力損失 ΔP [Pa]は、堆積粉塵層の圧力損失 ΔP_c [Pa]と濾材の圧力損失 ΔP_m [Pa]の和で表される。

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m \quad \cdots(5.4.2.22)$$

$$\Delta P = \mu u \alpha m + \mu u \zeta_m \quad \cdots(5.4.2.23)$$

$$\Delta P = (\alpha m + \zeta_m) \mu u \quad \cdots(5.4.2.24)$$

$$\Delta P = \left[\frac{180}{\rho_p D_{ps}^2} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) m + \frac{80}{R_H} \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) \right] \mu u \quad \left[\alpha \equiv \frac{180}{\rho_p D_{ps}^2} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}, \zeta_m \equiv \frac{80}{R_H} \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \right) \right] \quad \cdots(5.4.2.25)$$

5.4.3 構造設計

集塵面積 A [m²]と濾布袋(バッグという。布を丸くして袋状に吊り下げたもの)の本数 N_b [-]は、次式で与えられる。

$$A = \frac{Q}{u} \quad \cdots(5.4.3.1)$$

$$N_b = \frac{A}{\pi D_b L_b} \quad \cdots(5.4.3.2)$$

ただし、 D_b はバッグの直径[m]、 L_b はバッグの長さ[m]、 Q は含塵ガス処理量[m³/s]、 u は濾過速度[m/s]。坂下によれば、集塵面積 A [m²]は濾過係数 F [m/s]を用いて次式で与えられる。[文献 26, 27]

$$A = \frac{Q}{F} \quad \cdots(5.4.3.3)$$

$$F = M \cdot X \cdot T \cdot S \cdot C \cdot P \quad \cdots(5.4.3.4)$$

ただし、 M は粉体因子、 X は用途因子、 T は温度因子、 S は粒度因子、 C は濃度因子、 P は圧力因子

5.4.4 集塵時間

集塵時間 τ [s]は、濾布面積あたりの粉塵堆積量が m [kg/m²]に達するまでの所要時間に相当する。この時間に達したらバッグに堆積した粉塵の払い落としを行う。

$$\tau = \frac{m}{E C_0 u} \quad \cdots(5.4.4.1)$$

ただし、 C_0 は入口粉塵濃度[kg/m³]、 E はフィルター集塵効率[-]。

【計算例】 濾過集塵機(バグフィルター)

粉塵を含む空気をバグフィルターにより除塵処理する場合の①単一繊維捕集効率 η_0 [%]、②粉塵負荷時のフィルター捕集効率 E [%]、③圧力損失 ΔP [kPa]、④集塵面積 A [m²]、⑤バッグの本数 N_b [-]、⑥粉塵払い落としまでの所要時間 t [min]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①0.154%、②99.2%、③

0.964 kPa, ④2.50 m², ⑤8, ⑥7.06 min)

濾布材質	合成繊維(短繊維)	入口粉塵濃度	10.0 g/m ³
処理量	450 m ³ /h	濾布空隙率	0.100
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	濾布繊維径	100 μm
粉塵粒子径(比表面積径)	1.50 μm	濾布目開き動水半径	5.00 μm
空気密度	1.20 kg/m ³	濾布袋(バッグ)直径	100 mm
空気粘度	18.2 μPa·s	濾布袋(バッグ)長さ	1000 mm
空気圧	100 kPa	粉塵負荷	0.210 kg/m ²
空気温度	20°C	濾過速度	5.00 cm/s
空気平均分子量	28.8	捕集機構	拡散さえぎり支配

$$\textcircled{1} Re = D u \rho / \mu = (100 \times 10^{-6})(5.00 \times 10^{-2})(1.20) / (18.2 \times 10^{-6}) = 0.32967$$

$$\lambda = 3.2(\mu / P)(RT / 2\pi M_A)^{0.5} = (3.2)(18.2 \times 10^{-6} / 100 \times 10^3) \{ (8.314)(293.15) / \{ (2\pi)(28.8 / 1000) \} \}^{0.5} = 6.7590 \times 10^{-8} \text{ m}$$

$$Kn = \lambda / L = \lambda / D_p = (6.7590 \times 10^{-8}) / (1.50 \times 10^{-6}) = 0.045060$$

$$C_C = 1 + Kn[2.46 + 0.82 \exp(-0.44 / Kn)] = 1 + (0.045060)[2.46 + 0.82 \exp\{- (0.44 / 0.045060)\}] = 1.1108$$

$$D_{BM} = 1.38 \times 10^{-23} T / (3\pi \mu D_p / C_C) = (1.38 \times 10^{-23})(293.15) / \{ (3\pi)(18.2 \times 10^{-6})(1.50 \times 10^{-6}) / (1.1108) \}$$

$$= 1.7465 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pe = u_0 D_f / D_{BM} = (5.00 \times 10^{-2})(100 \times 10^{-6}) / (1.7465 \times 10^{-11}) = 2.8628 \times 10^5$$

$$v = \mu / \rho = 18.2 \times 10^{-6} / 1.20 = 1.5166 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Sc = \mu / \rho D_{BM} = v / D_{BM} = (1.5166 \times 10^{-5}) / (1.7465 \times 10^{-11}) = 8.6836 \times 10^5$$

$$R_f = D_p / D_f = 1.50 / 100 = 0.0150$$

$$\eta_0 = \eta_{DI} = 6Re^{-1/2} Sc^{-2/3} + 3Re^{1/2} R_f^2 = (6)(0.32967)^{-1/2} (8.6836 \times 10^5)^{-2/3} + (3)(0.32967)^{1/2} (0.0150)^2 = 0.0015356 \div \boxed{0.154\%}$$

$$\textcircled{2} \eta_\varepsilon = \eta_0 [1 + 4.5(1 - \varepsilon_f)] = (0.0015356)[1 + (4.5)(1 - 0.1)] = 0.0077547$$

$$E_0 = \eta_\varepsilon (1 - \varepsilon_f) = (0.0077547)(1 - 0.1) = 0.0069792$$

$$E = \{ (0.001)(R_H / D_{ps})^2 Re^{-2.5} \varepsilon_f^{-3} (m / \rho_p D_f) + 1 \} E_0$$

$$= \{ (0.001)(5.00 \times 10^{-6} / 1.50 \times 10^{-6})^2 (0.32967)^{-2.5} (0.1)^{-3} (0.21) / \{ (2650)(100 \times 10^{-6}) \} + 1 \} (0.0069792) = 0.99175$$

$$\div \boxed{99.2\%}$$

$$\textcircled{3} (1 - \varepsilon)_{\text{long}} = 0.40 D_{ps}^{0.3} - 0.37 D_{ps}^{0.1} + 0.15 D_{ps}^{0.04} - 0.03 = (0.40)(1.50)^{0.3} - (0.37)(1.50)^{0.1} + (0.15)(1.50)^{0.04} - 0.03$$

$$= 0.18888$$

$$(1 - \varepsilon)_{\text{short}} = 0.55(1 - \varepsilon)_{\text{long}} = (0.55)(0.18888) = 0.10388$$

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon)_{\text{short}} = 1 - 0.10388 = 0.89612$$

$$\alpha = [180 / (\rho_p D_{ps}^2)] (1 - \varepsilon) / \varepsilon^3 = [180 / \{ (2650)(1.50 \times 10^{-6})^2 \}] (1 - 0.89612) / (0.89612)^3 = 4.3579 \times 10^9 \text{ m/kg}$$

$$\Delta P_c = \mu u \alpha m = (18.2 \times 10^{-6})(5.00 \times 10^{-2})(4.3579 \times 10^9)(0.21) = 832.79 \text{ Pa}$$

$$\zeta_m = (80 / R_H)(1 - \varepsilon_f) / \varepsilon_f = [80 / (5.00 \times 10^{-6})] (1 - 0.1) / 0.1 = 1.4400 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$$

$$\Delta P_m = \mu u \zeta_m = (18.2 \times 10^{-6})(5.00 \times 10^{-2})(1.4400 \times 10^8) = 131.04 \text{ Pa}$$

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m = 832.79 + 131.04 = 963.83 \text{ Pa} \div \boxed{0.964 \text{ kPa}}$$

$$\textcircled{4} A = Q / u = (450 / 3600) / 0.05 = \boxed{2.50 \text{ m}^2}$$

$$\textcircled{5} N_b = A / (\pi D_b L_b) = 2.50 / [\pi (100 / 1000)(1000 / 1000)] = 7.9577 \div \boxed{8}$$

$$\textcircled{6} \tau = m / (E C_0 u) = (0.21) / \{ (0.99175)(10.0 / 1000)(5.00 \times 10^{-2}) \} = 423.49 \text{ s} = 7.0582 \text{ min} \div \boxed{7.06 \text{ min}}$$

6. 洗淨集塵

6. 1 向流スクラバー

6. 1. 1 単一液滴の捕集効率

慣性衝突機構における捕集効率 η_T [-] は、上岡(うえおか)の式が簡便である。[文献 28, 29]

$$\eta_T = \frac{\Psi}{\Psi + 0.65} \quad \cdots(6.1.1.1)$$

$$\Psi = \frac{C_C D_p^2 \rho_p u_r}{36 \mu_g (d_{pw}/2)} \left[C_C = 1 + Kn \left[2.46 + 0.82 \exp\left(-\frac{0.44}{Kn}\right) \right], Kn = \frac{\lambda}{D_p}, \lambda = \frac{3.2 \mu_g}{P} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M_A}} \right] \quad \cdots(6.1.1.2)$$

ただし、 d_{pw} は液滴径[m]、 D_p は粉塵粒子径[m]、 u_r は液滴に対する粉塵粒子の相対移動速度[m/s](=液滴の終末速度 u_t [m/s])、 μ_g はガス粘度[Pa·s]、 ρ_p は粉塵粒子密度[kg/m³]。

粉塵粒子が速度 u_g [m/s] で気流とともに上昇し、液滴が速度 u_w [m/s] で下方へ沈降しているとき、液滴側から見た粉塵粒子は上方へ速度($u_g + u_w$) [m/s] で移動しているように見える。この速度($u_g + u_w$) [m/s] を液滴に対する粉塵粒子の相対移動速度 u_r [m/s] といい、気流方向を正として次式のように表される。

$$u_r = u_g - (-u_w) = u_g + u_w \quad \cdots(6.1.1.3)$$

ただし、 u_g は粉塵粒子の絶対沈降速度[m/s]、 u_w は液滴の絶対沈降速度[m/s]。

同様に、液滴が速度 u_w [m/s] で下方へ沈降し、粉塵粒子が速度 u_g [m/s] で気流とともに上昇しているとき、粉塵粒子側から見た液滴は下方へ速度($u_w + u_g$) [m/s] で移動しているように見える。この速度($u_w + u_g$) [m/s] を粉塵粒子に対する液滴の相対移動速度 u_t [m/s] といい、沈降方向を正として次式のように表される。

$$u_t = u_w - (-u_g) = u_w + u_g \quad \cdots(6.1.1.4)$$

液滴の相対移動速度 u_t は、終末速度と同義である。(もとより終末速度は相対速度の扱いである。) 上式を u_r の式に代入して液滴の絶対速度 u_w を消去すると、 u_r と u_t は互いに等しいことが分かる。(液滴側から粉塵粒子を見ても粉塵粒子側から液滴を見ても同じ速度 $u_t = u_w + u_g$ で移動しているように見える。)

$$u_r = u_g + (u_t - u_g) = u_t \quad \cdots(6.1.1.5)$$

拡散機構における捕集効率 η_D [-] は、Johnstone & Roberts の式で与えられる。[文献 30-32]

$$\eta_D = \frac{4D_{BM}}{\delta u_t} \left[D_{BM} = \frac{1.38 \times 10^{-23} T}{3\pi \mu_g d_{pw} / C_C} \right] \quad \cdots(6.1.1.6)$$

$$\frac{d_{pw}}{\delta} = 2 + 0.557 Re^{0.5} Sc^{0.375} \left[Re = \frac{d_{pw} u_t \rho_g}{\mu_g}, u_t = \frac{g(\rho_{pw} - \rho_g) d_{pw}^2}{18 \mu_g}, Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{BM}} \right] \quad \cdots(6.1.1.7)$$

ただし、 d_{pw} は液滴径[m]、 D_{BM} は液滴の拡散係数[m²/s]、 u_t は液滴の終末速度[m/s]、 δ は液滴周りの境膜厚み[m]、下付き文字 g はガス側の値。

6. 1. 2 集塵効率

向流スクラバー(塔径 D_T [m]、塔高 Z [m])内の微小区間 dZ [m] を流量 Q [m³/s](流速 u_g [m/s]) で通過する

含塵ガス中の粉塵減少量は、終末速度 u_t [m/s]で沈降する液滴の粒子捕集量に等しい。

$$QC - Q(C + dC) = \eta_0 u_t C d A_{pr} \quad \left[u_t = g(\rho_{pw} - \rho_g) d_{pw}^2 / (18 \mu_g) \right] \quad \cdots(6.1.2.1)$$

$$-QdC = \eta_0 u_t C (A_{pw} / V_{pw}) \phi_w (\pi D_T^2 / 4) dZ \quad \left[dA_{pr} \equiv (A_{pw} / V_{pw}) \phi_w (\pi D_T^2 / 4) dZ = (A_{pw} / V_{pw}) dV \right] \quad \cdots(6.1.2.2)$$

$$-u_g A_T dC = \eta_0 u_t C (3/2 d_{pw}) \phi_w A_T dZ \quad \left[A_T \equiv \pi D_T^2 / 4, A_{pw} \equiv (\pi/4) d_{pw}^2, V_{pw} \equiv (\pi/6) d_{pw}^3 \right] \quad \cdots(6.1.2.3)$$

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = -\frac{3\eta_0 \phi_w u_t}{2d_{pw} u_g} \int_0^Z dZ \quad \cdots(6.1.2.4)$$

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{3\eta_0 A_T \phi_w u_t}{2d_{pw} Q} Z \quad \left[u_g = \frac{Q}{A_T} \right] \quad \cdots(6.1.2.5)$$

$$C = C_0 \exp \left(-\frac{3\eta_0 A_T \phi_w u_t}{2d_{pw} Q} Z \right) \quad \cdots(6.1.2.6)$$

液滴の体積分率 ϕ_w [-]は、給液量 W [m³/s]の式より導かれる。

$$W = u_w A_T \phi_w \quad \cdots(6.1.2.7)$$

$$\phi_w = \frac{W}{A_T u_w} = \frac{W}{A_T (u_t - u_g)} \quad \cdots(6.1.2.8)$$

これらを C の式に代入すると、洗浄捕集効率 E [-]が導かれる。

$$C = C_0 \exp \left[-\frac{3\eta_0 W u_t}{2d_{pw} Q (u_t - u_g)} Z \right] \quad \cdots(6.1.2.9)$$

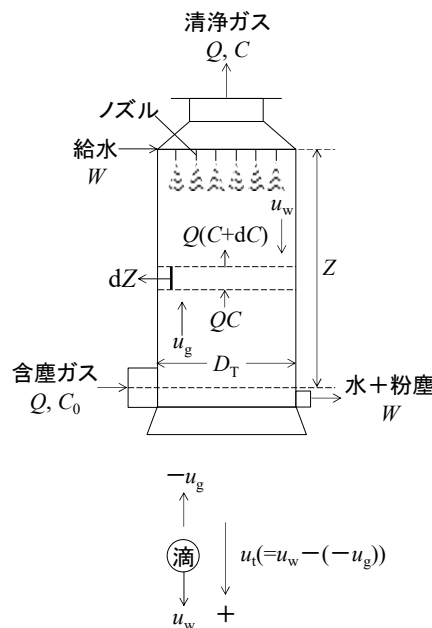
$$\boxed{E = 1 - \exp \left[-\frac{3\eta_0 u_t L_G}{2d_{pw} (u_t - u_g)} Z \right]} \quad \left[E \equiv \frac{C_0 - C}{C_0}, L_G \equiv \frac{W}{Q} \right] \quad \cdots(6.1.2.10)$$

ただし、 A_T は塔断面積[m²]、 A_{pr} は流れ方向に対する液滴群の全投影面積[m²]、 A_{pw} は液滴の断面積[m²]、 C は塔出口の粒子濃度[kg/m³]、 C_0 は塔入口の粒子濃度[kg/m³]、 d_{pw} は液滴径[m]、 D_T は塔径[m]、 E は洗浄捕集効率[-]、 L_G は液ガス比[-]、 Q は含塵ガス流量[m³/s]、 u_g はガス流速[m/s]、 u_t は液滴の終末速度(相対沈降速度) [m/s]($=u_w - (-u_g) = u_w + u_g$; 沈降方向が正)、 u_w は液滴の絶対沈降速度[m/s]、 V は液体積[m³]、 V_{pw} は単一液滴の体積[m³]、 Z は塔高[m]、 ϕ_w は液滴の体積分率(ホールドアップ) [-]、 η_0 は単一液滴の捕集効率[-]。

液滴径 d_{pw} は、圧力ノズルの仕様に依存する。液滴が直線状に散布される直線流型[文献 32-34]と円錐状に散布される旋回流型[文献 35, 36]に大別される。

$$\text{(直線流型)} \quad d_{pw} = 4.72 \left(\frac{d_N}{u_N} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho_w} \right)^{0.5} \left[1 + 0.0334 \times 10^6 \left(\frac{\mu_w}{\rho_w} \right) \right] \quad \cdots(6.1.2.11)$$

$$\text{(旋回流型)} \quad d_{pw} = 33.65 d_N^{1.59} G_L^{-0.54} \sigma^{0.6} \rho_w^{0.32} \quad \cdots(6.1.2.12)$$



ただし、 d_N はノズル径[m]、 d_{pw} は平均液滴径[m]、 u_N はノズル流速[m/s]、 G_L はノズル流量[kg/s]、 σ は液体の表面張力[kg/s²]、 μ_w は液粘度[Pa·s]、 ρ_w は液密度[kg/m³]。

直線流型におけるノズル径 d_N は、ノズル噴射液の流動状態を表すジェット数 Je より求める。

$$Je = \frac{u_N^2 \rho_g d_N}{\sigma} \left(\frac{\rho_w}{\rho_g} \right)^{0.45} \quad \cdots(6.1.2.13)$$

$$d_N = \frac{\sigma Je}{u_N^2 \rho_g} \left(\frac{\rho_g}{\rho_w} \right)^{0.45} \quad \cdots(6.1.2.14)$$

$Je < 0.1$ のとき滴下、 $Je = 1 \sim 10$ のとき層流、 $Je = 10 \sim 500$ のとき乱流、 $Je > 500$ のとき噴霧流。ノズルからの液噴射をスプレー状の噴霧流とするには、 $Je = 500$ 以上が望ましい。[文献 37]

6.1.3 構造設計

洗浄捕集効率 E が設定値として与えられている場合は、 E の式より塔高 Z が導かれる。

$$\ln(1 - E) = -\frac{3\eta_0 u_t L_G}{2d_{pw}(u_t - u_g)} Z \quad \cdots(6.1.3.1)$$

$$Z = \frac{2d_{pw}(u_t - u_g)}{3\eta_0 u_t L_G} \ln \frac{1}{1 - E} \quad \cdots(6.1.3.2)$$

【計算例】 洗浄集塵機(向流スクラバー)(性能設計)

粉塵を含む空気を向流スクラバーにより除塵処理する場合の①液滴終末速度 u_t [cm/s]、②単一液滴捕集効率 η_0 [%]、③洗浄捕集効率 E [%]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①14.5 cm/s, ②2.94%, ③94.3%)

処理量	8000 m ³ /h	洗浄水粘度	1.00 mPa·s
液ガス比	1.00×10 ⁻⁴	界面張力	0.072 kg/s ²
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	ノズル形状	直線流型
粉塵粒子径	1.00 μm	ノズル流速	12.0 m/s
空気密度	1.20 kg/m ³	ジェット数	1000
空気粘度	18.2 μPa·s	塔径	5.00 m
空気圧	100 kPa	塔高	10.0 m
空気温度	20°C	捕集機構	慣性衝突支配
空気平均分子量	28.8	重力加速度	9.81 m/s ²
洗浄水密度	1000 kg/m ³		

$$\textcircled{1} d_N = [(\sigma Je)/(u_N^2 \rho_g)](\rho_g/\rho_w)^{0.45} = [(0.072)(1000)/\{(12)^2(1.20)\}](1.20/1000)^{0.45} = 0.020203 \text{ m}$$

$$d_{pw} = 4.72(d_N/u_N)(\sigma/\rho_w)^{0.5} [1 + 0.0334 \times 10^6(\mu_w/\rho_w)] = (4.72)(0.020203/12)(0.072/1000)^{0.5} [1 + (0.0334 \times 10^6)(0.001/1000)] = 6.9680 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$u_t = g(\rho_{pw} - \rho_g)d_{pw}^2 / (18\mu_g) = (9.81)(1000 - 1.20)(6.9680 \times 10^{-5})^2 / [(18)(18.2 \times 10^{-6})] = 0.14521 \text{ m/s} \doteq \boxed{14.5 \text{ cm/s}}$$

$$Re = d_{pw} u_t \rho_g / \mu_g = (6.9680 \times 10^{-5})(0.14521)(1.20) / (18.2 \times 10^{-6}) = 0.66713 \text{ (stokes)}$$

$$\textcircled{2}\lambda=3.2(\mu/P)(RT/2\pi M_A)^{0.5}=(3.2)(18.2\times 10^{-6}/100\times 10^3)[(8.314)(293.15)/\{(2\pi)(28.8/1000)\}]^{0.5}=6.7590\times 10^{-8}\text{ m}$$

$$Kn=\lambda/L=\lambda/D_p=(6.7590\times 10^{-8})/(1.00\times 10^{-6})=0.067590$$

$$C_C=1+Kn[2.46+0.82\exp(-0.44/Kn)]=1+(0.067590)[2.46+0.82\exp[-(0.44/0.067590)]=1.1663$$

$$u_g=Q/A=Q/[\pi(D_T/2)^2]=(8000/3600)/[\pi(5.00/2)^2]=0.11317\text{ m/s}$$

$$u_t=u_i=0.14521\text{ m/s}$$

$$\Psi=C_C D_p^2 \rho_p u_t / [36\mu(d_{pw}/2)]=(1.1663)(1.00\times 10^{-6})^2(2650)(0.14521)/[(36)(18.2\times 10^{-6})(6.9680\times 10^{-5}/2)]=0.019660$$

$$\eta_0(=\eta_T)=\Psi/(\Psi+0.65)=0.019660/(0.019660+0.65)=0.029358\div\boxed{2.94\%}$$

$$\textcircled{3}E=1-\exp[-(3\eta_0 u_t L_G Z)/\{2d_{pw}(u_t-u_g)\}]$$

$$=1-\exp[-(3)(0.029358)(0.14521)(1.00\times 10^{-4})(10.0)/\{(2)(6.9680\times 10^{-5})(0.14521-0.11317)\}]=0.94297\div\boxed{94.3\%}$$

【計算例】 洗浄集塵機(向流スクラバー)(構造設計)

粉塵を含む空気を向流スクラバーにより除塵処理する場合の①液滴終末速度 u_t [cm/s]、②単一液滴捕集効率 η_0 [%]、③塔高 Z [m]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①14.5 cm/s, ②0.276%, ③7.98 m)

処理量	10000 m ³ /h	洗浄水粘度	1.00 mPa·s
液ガス比	2.50×10^{-4}	界面張力	0.072 kg/s ²
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	ノズル形状	直線流型
粉塵粒子径	0.250 μm	ノズル流速	12.0 m/s
空気密度	1.20 kg/m ³	ジェット数	1000
空気粘度	18.2 μPa·s	塔径	5000 mm
空気圧	100 kPa	捕集機構	慣性衝突支配
空気温度	20°C	洗浄捕集効率	99%
空気平均分子量	28.8	重力加速度	9.81 m/s ²
洗浄水密度	1000 kg/m ³		

$$\textcircled{1}d_N=[(\sigma Je)/(u_N^2 \rho_g)](\rho_g/\rho_w)^{0.45}=[(0.072)(1000)/\{(12)^2(1.20)\}](1.20/1000)^{0.45}=0.020203\text{ m}$$

$$d_{pw}=4.72(d_N/u_N)(\sigma/\rho_w)^{0.5}[1+0.0334\times 10^6(\mu_w/\rho_w)]=4.72(0.020203/12)(0.072/1000)^{0.5}[1+(0.0334\times 10^6)(0.001/1000)]=6.9680\times 10^{-5}\text{ m}$$

$$u_t=g(\rho_{pw}-\rho_g)d_{pw}^2/(18\mu_g)=(9.81)(1000-1.20)(6.9680\times 10^{-5})^2/[(18)(18.2\times 10^{-6})]=0.14521\text{ m/s}\div\boxed{14.5\text{ cm/s}}$$

$$Re=d_{pw}u_t\rho_g/\mu_g=(6.9680\times 10^{-5})(0.14521)(1.20)/(18.2\times 10^{-6})=0.66713\text{ (stokes)}$$

$$\textcircled{2}\lambda=3.2(\mu/P)(RT/2\pi M_A)^{0.5}=(3.2)(18.2\times 10^{-6}/100\times 10^3)[(8.314)(293.15)/\{(2\pi)(28.8/1000)\}]^{0.5}=6.7590\times 10^{-8}\text{ m}$$

$$Kn=\lambda/L=\lambda/D_p=(6.7590\times 10^{-8})/(0.250\times 10^{-6})=0.27036$$

$$C_C=1+Kn[2.46+0.82\exp(-0.44/Kn)]=1+(0.27036)[2.46+0.82\exp[-(0.44/0.27036)]=1.7086$$

$$u_g=Q/A=Q/[\pi(D_T/2)^2]=(10000/3600)/[\pi(5.00/2)^2]=0.14147\text{ m/s}$$

$$u_t=u_i=0.14521\text{ m/s}$$

$$\Psi=C_C D_p^2 \rho_p u_t / [36\mu(d_{pw}/2)]=(1.7086)(0.250\times 10^{-6})^2(2650)(0.14521)/[(36)(18.2\times 10^{-6})(6.9680\times 10^{-5}/2)]=0.0018001$$

$$\eta_0(=\eta_T)=\Psi/(\Psi+0.65)=0.0018001/(0.0018001+0.65)=0.0027617\div\boxed{0.276\%}$$

$$\textcircled{3}Z=[2d_{pw}(u_t-u_g)/(3\eta_0 u_t L_G)]\ln[1/(1-E)]$$

$$=[(2)(6.9680\times 10^{-5})(0.14521-0.14147)/\{(3)(0.0027617)(0.14521)(2.50\times 10^{-4})\}]\ln[1/(1-0.99)]$$

$$=7.9803\text{ m}\div\boxed{7.98\text{ m}}$$

6. 2 ベンチュリースクラバー

含塵ガスをスロート部(のど部)に流して高速気流とする。そこに加圧水を管側面の噴射口から噴射して高速気流のせん断により微小水滴とする。粉塵粒子は、微小水滴に捕集されてサイクロンへ運ばれ、気流から分離される。

6.2.1 集塵効率 [文献 38-40]

水平流型ベンチュリースクラバー(装置長 Z [m])内の微小区間 dZ [m]を流量 Q [m³/s](流速 u_g [m/s])で通過する含塵ガス中の粉塵減少量は、物質収支により気流から見て相対速度 $u_r (=u_w - u_g)$ [m/s]で移動する洗浄水液滴(絶対速度 u_w [m/s])の粒子捕集量 dM/dt [kg/s]に等しい。

$$QC - Q(C + dC) = \frac{dM}{dt} \quad \dots(6.2.1.1)$$

$$-QdC = \eta_0 u_r C dA_{pr} \quad \dots(6.2.1.2)$$

$$-QdC = \eta_0 f u_g C (A_{pw} / V_{pw}) \phi_w A_T dZ \quad \dots(6.2.1.3)$$

$$\left[f \equiv u_r / u_g, dA_{pr} \equiv (A_{pw} / V_{pw}) \phi_w A_T dZ = (A_{pw} / V_{pw}) dV \right]$$

$$-u_g A_T dC = \eta_0 u_g C (3/2 d_{pw}) \phi_w A_T f dZ \quad \dots(6.2.1.4)$$

$$\left[u_g = Q / A_T, A_{pw} \equiv (\pi/4) d_{pw}^2, V_{pw} \equiv (\pi/6) d_{pw}^3 \right]$$

$$-\frac{dC}{C} = \frac{3\eta_0 \phi_w f}{2 d_{pw}} dZ \quad \dots(6.2.1.5)$$

ただし、 f は気液速度比[-]($=u_r/u_g$)。

給流量 W [m³/s]の式を用いて液滴の体積分率 ϕ_w を消去する。

水平流の場合、一般に $u_w < u_g$ が成り立つ($|u_r| = -u_r$)。

$$W = u_w A_T \phi_w = (|u_r| + u_g) A_T \phi_w = (-u_r + u_g) A_T \phi_w = (1 - f) u_g A_T \phi_w \quad \left[|u_r| \equiv u_w - u_g < 0, f \equiv u_r / u_g \right] \quad \dots(6.2.1.6)$$

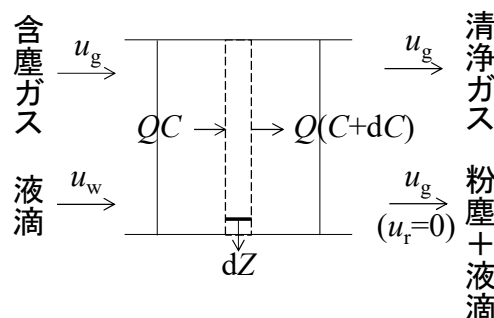
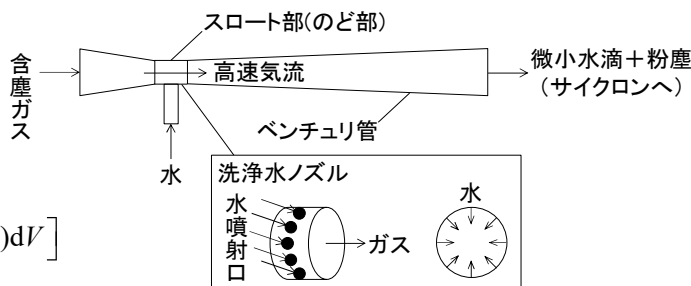
$$-\frac{dC}{C} = \frac{3\eta_0 W f}{2 d_{pw} (1 - f) u_g A_T} dZ \quad \left[\phi_w \equiv \frac{W}{(1 - f) u_g A_T} \right] \quad \dots(6.2.1.7)$$

水平方向に移動する液滴粒子の運動方程式は、次式のように導かれる。

$$\frac{\pi}{6} d_{pw}^3 \rho_w \frac{du_r}{dt} = -C_D \frac{\pi d_{dw}^2}{4} \frac{\rho_g u_r^2}{2} \quad (C_D \doteq 1) \quad \dots(6.2.1.8)$$

$$du_r = -\frac{3C_D \rho_g u_r^2}{4 d_{pw} \rho_w} dt \quad \dots(6.2.1.9)$$

$$u_g df = -\frac{3C_D \rho_g u_r^2}{4 d_{pw} \rho_w} \frac{dZ}{u_w} \quad \left[f \equiv u_r / u_g \right] \quad \dots(6.2.1.10) \quad (Z \text{は絶対座標基準で定義})$$



$$u_g df = -\frac{3C_D \rho_g u_r^2}{4d_{pw} \rho_w (1-f) u_g} \frac{dZ}{u_g} \left[u_w/u_g = (-u_r + u_g)/u_g = (-fu_g + u_g)/u_g = 1-f \right] \quad \cdots(6.2.1.11)$$

$$df = -\frac{3C_D \rho_g}{4d_{pw} \rho_w} \frac{f^2}{1-f} dZ \quad \cdots(6.2.1.12)$$

$$dZ = -\frac{4d_{pw} \rho_w}{3C_D \rho_g} \frac{1-f}{f^2} df \quad \cdots(6.2.1.13)$$

粒子濃度の相対変化量の式に代入すると、洗浄捕集効率 $E[-]$ が導かれる。

$$-\frac{dC}{C} = \frac{3\eta_0 W f}{2d_{pw} (1-f) u_g A_T} \left(-\frac{4d_{pw} \rho_w}{3C_D \rho_g} \frac{1-f}{f^2} df \right) \quad \cdots(6.2.1.14)$$

$$\frac{dC}{C} = \frac{2\eta_0 W f}{(1-f) Q C_D} \frac{1}{\rho_g} \frac{\rho_w}{f^2} \frac{1-f}{f^2} df \quad \cdots(6.2.1.15)$$

$$\frac{dC}{C} = \frac{2}{55} \frac{f}{1-f} \frac{d_{pw} u_r \rho_g}{\mu_g} \frac{\rho_w}{\rho_g} \frac{1-f}{f^2} L_G \eta_0 df \quad \left[C_D \equiv \frac{55}{Re}, L_G \equiv \frac{W}{Q} \right] \quad \cdots(6.2.1.16)$$

$$\frac{dC}{C} = \frac{2}{55} \frac{d_{pw} u_g \rho_g}{\mu_g} \frac{\rho_w}{\rho_g} L_G \eta_0 df \quad \cdots(6.2.1.17)$$

$$\frac{dC}{C} = \frac{2}{55} \frac{d_{pw} u_g \rho_w}{\mu_g} L_G \left(\frac{2\Psi' f}{2\Psi' f + 0.7} \right)^2 df \quad \left[\eta_0 \equiv \left(\frac{2\Psi' f}{2\Psi' f + 0.7} \right)^2 \right] \quad (\text{慣性衝突支配}) \quad \cdots(6.2.1.18)$$

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \frac{2}{55} \frac{d_{pw} u_g \rho_w}{\mu_g} L_G \int_f^0 \left(\frac{2\Psi' f}{2\Psi' f + 0.7} \right)^2 df \quad \cdots(6.2.1.19)$$

右辺の積分区間について、気流から見た液滴粒子の相対速度は、 u_r から 0 まで減少する。すなわち、液滴粒子の絶対速度は、 u_w から u_g まで加速する。

$$E = 1 - \exp \left[-\frac{2}{55} \frac{d_{pw} u_g \rho_w}{\mu_g} L_G F(2\Psi', f) \right] \quad \left[E \equiv \frac{C_0 - C}{C_0}, F(2\Psi', f) \equiv \int_f^0 \left(\frac{2\Psi' f}{2\Psi' f + 0.7} \right)^2 df \right] \quad \cdots(6.2.1.20)$$

$$F(2\Psi', f) = \frac{1}{2\Psi'} \left[-0.7 - 2\Psi' f + 1.4 \ln \frac{2\Psi' f + 0.7}{0.7} + \frac{0.49}{0.7 + 2\Psi' f} \right] \quad \cdots(6.2.1.21)$$

$$\Psi' = \frac{C_C D_p^2 \rho_p u_g}{18 \mu_g d_{pw}} \quad \left[C_C = 1 + Kn \left[2.46 + 0.82 \exp \left(-\frac{0.44}{Kn} \right) \right], Kn = \frac{\lambda}{D_p}, \lambda = \frac{3.2 \mu_g}{P} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M_A}} \right] \quad \cdots(6.2.1.22)$$

気液速度比 f は、粉塵粒子の濡れ性や液ガス比によって変動する。液ガス比 8×10^{-4} 程度以上の条件では、親水性粒子の場合 0.45、疎水性粒子の場合 0.2 を用いる [文献 39]。あるいは、全般的な近似値として 0.25 を用いる [文献 40]。ガス流速 u_g [m/s] は、スロート部のガス流速 u_{gt} を用いる ($u_g = u_{gt}$)。

液滴径 d_{pw} の推算については、抜山(ぬきやま)・棚沢(たなさわ)の式を用いる。 [文献 30, 40, 41]

$$d_{pw} = \frac{585}{u_{gt}} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_w}} + 597 \left(\frac{\mu_w}{\sqrt{\sigma \rho_w}} \right)^{0.45} L_G^{1.5} \quad \cdots(6.2.1.23)$$

ただし、 d_{pw} は液滴径[μm]、 L_G は液ガス比[L/m^3]、 u_{gt} はスロート部のガス流速[m/s]、 σ は表面張力[dyn/cm]、 μ_w は液粘度[P]、 ρ_w は液密度[g/cm^3]。

上式を SI 単位系に直すと、次式のようになる。

$$10^6 d_{pw} = \frac{585}{u_{gt}} \sqrt{\frac{1000\sigma}{0.001\rho_w}} + 597 \left(\frac{0.1\mu_w}{\sqrt{1000\sigma \cdot 0.001\rho_w}} \right)^{0.45} (0.001L_G)^{1.5} \quad \cdots(6.2.1.24)$$

$$d_{pw} = \frac{0.585}{u_{gt}} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_w}} + 6.70 \times 10^{-9} \left(\frac{\mu_w}{\sqrt{\sigma \rho_w}} \right)^{0.45} L_G^{1.5} \quad \cdots(6.2.1.25)$$

ただし、 d_{pw} は液滴径[m]、 L_G は液ガス比[$-$]、 u_{gt} はスロート部のガス流速[m/s]、 σ は表面張力[kg/s^2]、 μ_w は液粘度[$\text{Pa}\cdot\text{s}$]、 ρ_w は液密度[kg/m^3]。

6.2.2 構造設計

スロート部の管径 D_t [m]は、スロート部を流れる含塵ガスの流量 Q [m^3/s]の式より導かれる。

$$Q = \frac{\pi D_t^2 u_{gt}}{4} \quad \cdots(6.2.2.1)$$

$$D_t = \sqrt{\frac{4Q}{\pi u_{gt}}} \quad \cdots(6.2.2.2)$$

噴射口より噴射される加圧洗浄水の流量 W [m^3/s]は、次式で表される。

$$W = \frac{n\pi D_s^2}{4} u_s \quad \cdots(6.2.2.3)$$

ただし、 D_s は噴射口径[m]、 n は噴射口の数[$-$]、 u_s は噴射速度[m/s]。

液ガス比を取ると、洗浄水噴射口の数 n [$-$]が導かれる。小数点以下は切り上げる。

$$L_G \left(\equiv \frac{W}{Q} \right) = \frac{n\pi D_s^2 u_s}{4} / \frac{\pi D_t^2 u_{gt}}{4} \quad \cdots(6.2.2.4)$$

$$n = L_G \left(\frac{u_{gt}}{u_s} \right) \left(\frac{D_t}{D_s} \right)^2 \quad \cdots(6.2.2.5)$$

加圧洗浄水の噴射速度 u_s [m/s]は、オリフィス理論に基づき導かれる。オリフィス孔(噴射口)の手前と直後で流体の機械的エネルギー保存則(ベルヌーイの定理)を適用する。

$$\frac{p_1}{\rho} + gZ_1 + \frac{\bar{u}_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + gZ_2 + \frac{\bar{u}_2^2}{2} \quad \cdots(6.2.2.6)$$

$$\frac{\bar{u}_2^2}{2} = \frac{\bar{u}_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} \quad [Z_1 - Z_2 \approx 0] \quad \cdots(6.2.2.7)$$

$$\bar{u}_2^2 = \bar{u}_1^2 + \frac{2\Delta p}{\rho} \quad [\Delta p \equiv p_1 - p_2 > 0] \quad \cdots(6.2.2.8)$$

ただし、 Δp は圧力降下[Pa]、 u は流体の平均流速[m/s]、 Z は基準面からの高さ[m]、 ρ は流体密度[kg/m³]。オリフィス孔(噴射口)の手前と後ろ(縮流部)で連続の式を適用する。

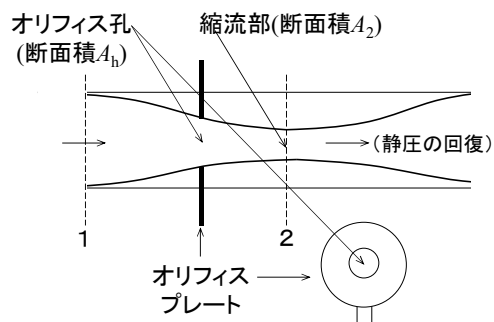
$$A_1 \bar{u}_1 = A_2 \bar{u}_2 \quad \cdots(6.2.2.9)$$

ただし、 A は流路断面積[m²]。

$$\bar{u}_2^2 = (A_2/A_1)^2 \bar{u}_1^2 + \frac{2\Delta p}{\rho} \quad \cdots(6.2.2.10)$$

$$[1 - (A_2/A_1)^2] \bar{u}_1^2 = \frac{2\Delta p}{\rho} \quad \cdots(6.2.2.11)$$

$$\bar{u}_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad \cdots(6.2.2.12)$$



縮流部断面積 A_2 をオリフィス孔(噴射口)の断面積 A_h の定数倍に、平均流速 u_2 を噴射速度 u_s に置換する。

$$u_s = \frac{1}{\sqrt{1 - (CA_h/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [\bar{u}_2 \equiv u_s, A_2 \equiv CA_h] \quad \cdots(6.2.2.13)$$

$$u_s = \frac{1}{\sqrt{1 - C^2 m_o^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [m_o \equiv \frac{A_h}{A_1}] \quad \cdots(6.2.2.14)$$

$$u_s = C_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [C_d \equiv 1/\sqrt{1 - C^2 m_o^2}] \quad \cdots(6.2.2.15)$$

ただし、 C は定数[-]、 C_d は流出係数[-]、 m_o は開口比[-]。

流出係数 C_d は、レイノルズ数が十分に大きい場合、約 0.6 に漸近する [文献 42-44]。

圧力降下 Δp [Pa] は洗浄水の噴射圧 P_w [Pa] に、流体密度 ρ [kg/m³] は液密度 ρ_w [kg/m³] に相当する。

$$u_s = C_d \sqrt{\frac{2P_w}{\rho_w}} \quad \cdots(6.2.2.16)$$

6.2.3 圧力損失

ベンチュリースクラバーの圧力損失 ΔP [Pa] は、次式で表される。 [文献 40, 45]

$$\Delta P = \left(a + \frac{bL_G}{1000} \right) \frac{\rho_g u_{gt}^2}{2} \quad \cdots(6.2.3.1)$$

定数 a と b については多くの報告例があるが、より安全側で設計するには $a=b=1$ とおく。

【計算例】洗浄集塵機(ベンチュリースクラバー)

粉塵を含む空気を水平流型ベンチュリースクラバーにより除塵処理する場合の①単一液滴捕集効率 η_0 [%]、②洗浄捕集効率 E [%]、③圧力損失 ΔP [kPa]、④スロート部管径 D_t [mm]、⑤噴射口数 n [-]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①92.3%、②96.8%、③6.00 kPa、④97.7 mm、⑤13)

処理量	2700 m ³ /h	洗浄水粘度	1.00 mPa·s
液ガス比	0.001	界面張力	0.072 kg/s ²
粒子密度	2650 kg/m ³	スロート部ガス流速	100 m/s
粉塵粒子径	1.00 μm	洗浄水噴射圧	100 kPa
空気密度	1.20 kg/m ³	噴射口径	3.00 mm
空気粘度	18.2 μPa·s	捕集機構	慣性衝突支配
空気圧	100 kPa	重力加速度	9.81 m/s ²
空気温度	20°C	f 値	0.45
洗浄水密度	1000 kg/m ³		

$$\textcircled{1} \lambda = 3.2(\mu/P)(RT/2\pi M_A)^{0.5} = (3.2)(18.2 \times 10^{-6}/100 \times 10^3)[(8.314)(293.15)/\{(2\pi)(28.8/1000)\}]^{0.5} = 6.7590 \times 10^{-8} \text{ m}$$

$$Kn = \lambda/L = \lambda/D_p = (6.7590 \times 10^{-8})/(1.00 \times 10^{-6}) = 0.067590$$

$$C_C = 1 + Kn[2.46 + 0.82 \exp(-0.44/Kn)] = 1 + (0.067590)[2.46 + 0.82 \exp(-0.44/0.067590)] = 1.1663$$

$$d_{pw} = (0.585/u_{gt})(\sigma/\rho_w)^{0.5} + 6.70 \times 10^{-9}[\mu_w/(\sigma\rho_w)^{0.5}]^{0.45} L_G^{1.5}$$

$$= (0.585/100)(0.072/1000)^{0.5} + (6.70 \times 10^{-9})[(1.00 \times 10^{-3})/\{(0.072)(1000)\}]^{0.45} (0.001)^{1.5} = 4.9638 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\Psi' = C_C D_p^2 \rho_p u_{gt} / (18 \mu_g d_{pw}) = (1.1663)(1.00 \times 10^{-6})^2 (2650)(100) / [(18)(18.2 \times 10^{-6})(4.9638 \times 10^{-5})] = 18.973$$

$$2\Psi'f = (2)(18.973)(0.45) = 17.075$$

$$\eta_0 (= \eta_T) = [2\Psi'f / (2\Psi'f + 0.7)]^2 = [17.075 / (17.075 + 0.7)]^2 = 0.92278 \approx \boxed{92.3\%}$$

$$\textcircled{2} F = [-0.7 - 2\Psi'f + 1.4 \ln\{(2\Psi'f + 0.7)/0.7\} + 0.49/(0.7 + 2\Psi'f)] / (2\Psi')$$

$$= [-0.7 - 17.075 + 1.4 \ln\{(17.075 + 0.7)/0.7\} + 0.49/(0.7 + 17.075)] / [(2)(18.973)] = -0.34907$$

$$E = 1 - \exp[(2/55)(d_{pw} u_{gt} \rho_w / \mu_g) L_G F]$$

$$= 1 - \exp[(2/55)\{(4.9638 \times 10^{-5})(100)(1000)/(18.2 \times 10^{-6})\}(0.001)(-0.34907)] = 0.96863 \approx \boxed{96.8\%}$$

$$\textcircled{3} \Delta P = (a + bL/1000)(\rho_g u_{gt}^2/2) = [1 + (1)(0.001)/(1000)][(1.20)(100)^2/2] = 6000.0 \text{ Pa} \approx \boxed{6.00 \text{ kPa}}$$

$$\textcircled{4} D_t = [4Q/(\pi u_{gt})]^{0.5} = [(4)(2700/3600)/(100\pi)]^{0.5} = 0.097720 \text{ m} \approx \boxed{97.7 \text{ mm}}$$

$$\textcircled{5} u_s = C_d(2\Delta P/\rho)^{0.5} = C_d(2P_w/\rho_w)^{0.5} = (0.6)[(2)(100 \times 10^3)/(1000)]^{0.5} = 8.4852 \text{ m/s}$$

$$n = L_G(u_{gt}/u_s)(D_t/D_s)^2 = (0.001)(100/8.4852)[0.097720/(3.00/1000)]^2 = 12.504 \approx \boxed{13} \text{ (切り上げ)}$$

7. 電気集塵

空気などの絶縁体に電圧を印加して電圧を高めてゆくと、ある閾値を越えたところで絶縁体の抵抗値が急低下して絶縁体に電流が流れる。これを放電という。とくに放電極の形状が針状の場合、放電が起こる直前にコロナと呼ばれる微光が針の先端で見られる。このような放電機構をコロナ放電という。電気集塵の場合、放電極が有刺鉄線のような形状になっており、集塵電極との間で電圧を高めてゆくと、ある電圧値で絶縁体である空気に電流が流れてコロナ放電が起こる。そこへ粉塵を含む空気を通過させると、粉塵粒子が負に帯電して接地された集塵電極の方向へ静電気力で引き寄せられて捕集される。

7. 1 放電特性

7.1.1 電界の強さ [文献 46]

クーロンの法則によれば、距離 r [m] だけ離れた点電荷 q_1 [C] と q_2 [C] の間に働く静電気力 (クーロン力) F [N] は、真空の誘電率 ϵ_0 [$\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$] を用いて次式で表される。

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r^2} \quad [q_1=q_2=q] \quad \cdots(7.1.1.1)$$

点電荷まわりの静電気力が及ぶ空間領域を電界という。ある点電荷 q [C] が作り出す電界の強さ E [V/m^2] は、次式で表される。

$$E = \frac{F}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad \cdots(7.1.1.2)$$

ガウスの法則によれば、閉曲面の外側へ出てくる電気力線の総本数は、閉曲面内の全電気量に比例する。閉曲面形状が球面 (半径 r) の場合の電界強度 E [V/m^2] は、次式のように導かれる。

$$E(4\pi r^2) = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \cdots(7.1.1.3)$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \cdots(7.1.1.4)$$

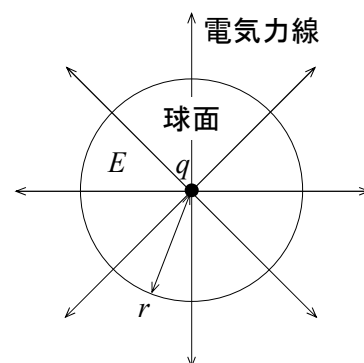
閉曲面形状が円筒 (半径 r 、長さ L) の場合の電界強度 E [V/m^2] は、次式のように導かれる。

$$E(2\pi rL) = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \cdots(7.1.1.5)$$

$$E = \frac{q/L}{2\pi\epsilon_0 r} \quad \cdots(7.1.1.6)$$

$$E' = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad [E' \equiv EL] \quad \cdots(7.1.1.7)$$

ただし、 E' は単位長さあたりの電界強度 [V/m]。



7.1.2 コロナ放電開始電界強度

放電極 (半径 a [m]) と集塵極 (半径 b [m]) からなる二重円筒を考える。帯電している円筒間の電位差 V [V] は、次式のように導かれる。

$$V = -\int_b^a E(r) dr \quad \cdots(7.1.2.1) \quad (\text{位置 } b \text{ を基準とした位置 } a \text{ における電位})$$

$$V = -\int_b^a \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} dr \quad \cdots(7.1.2.2)$$

$$V = -\frac{q}{2\pi\epsilon_0} [\ln r]_b^a \quad \cdots(7.1.2.3)$$

$$V = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} (\ln b - \ln a) \quad \cdots(7.1.2.4)$$

$$V = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{b}{a} \quad \cdots(7.1.2.5)$$

$$V = rE' \ln \frac{b}{a} \quad \left[E' = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} \right] \quad \cdots(7.1.2.6)$$

$r=a$ [cm]のとき E' は最大値を取る。このときの電界強度 E' と印加電圧 V がコロナ放電開始に必要な電界強度 E_0 [kV/cm]と印加電圧 V_0 [kV]になる。

$$V_0^{\text{kV}} = a^{\text{cm}} E_0^{\text{kV/cm}} \ln \frac{b^{\text{cm}}}{a^{\text{cm}}} \quad \cdots(7.1.2.7)$$

ただし、 a は放電極半径[m]、 b は集塵極半径[m]($a \ll b$ より放電極と集塵極の距離に近似される)。

放電極の汚れを考慮した場合のコロナ放電開始電界強度 E_0 [kV/cm]は、Peek の式で求める。[文献 47]

$$E_0^{\text{kV/cm}} = f \left(c\delta + d \sqrt{\frac{\delta}{a^{\text{cm}}}} \right) \left[\delta \equiv \frac{293.15}{273.15 + T} \left(\frac{P}{760} \right) \right] \quad \cdots(7.1.2.8)$$

ただし、 f は放電極の表面粗さ指数[-]であり、清浄な放電極の場合は1となる。 P は気体の圧力[mmHg]、 T は気体の温度[°C]、 δ は気体相対密度[-]。定数 c と d は、ガスの種類が空気るとき $c=30$ 、 $d=9$ 。

上式は円筒型に対する推算式であるが、平板型に対しても適用できる。

7.1.3 集塵極近傍の電界強度

清浄空気中における集塵極近傍の電界強度 E_p [esu]について、次の近似式が知られている。[文献 48]

$$\text{(円筒型)} \quad E_p^{\text{esu}} = \sqrt{\frac{2I^{\text{esu/cm}}}{K^{\text{esu}}}} \quad \cdots(7.1.3.1) \quad \text{※静電単位系}$$

$$\text{(平板型)} \quad E_p^{\text{esu}} = \sqrt{\frac{4I^{\text{esu/cm}} b^{\text{cm}}}{K^{\text{esu}} p^{\text{cm}}}} \quad \cdots(7.1.3.2) \quad \text{※静電単位系}$$

ただし、 $2b$ は集塵極間隔(平板型)[cm]、 I は放電極長さあたりの電流密度[esu/cm]、 K はイオン移動度[esu]または[(cm/s)/(V/cm)](= $v^{\text{cm/s}} \div E^{\text{V/cm}}$)、 $2p$ は放電極間隔[cm]。

放電極長さあたりの電流密度 I [esu/cm]について、円筒型の場合は Townsend(タウンゼント)の式[文献 49]、平板型の場合は Cooperman の式[文献 50-52]がある。

$$\text{(円筒型)} \quad I^{\text{esu/cm}} = \frac{2K^{\text{esu}} V^{\text{esu}} (V^{\text{esu}} - V_0^{\text{esu}})}{(b^{\text{cm}})^2 \ln \frac{b^{\text{cm}}}{a^{\text{cm}}}} \quad \cdots(7.1.3.3) \quad \text{※静電単位系}$$

$$\text{(平板型, } b/p \leq 0.5) \quad I^{\text{esu/cm}} = \frac{K^{\text{esu}} V^{\text{esu}} (V^{\text{esu}} - V_0^{\text{esu}})}{(b^{\text{cm}})^2 \ln \frac{4b^{\text{cm}}}{a^{\text{cm}} \pi}} \quad \cdots(7.1.3.4) \quad \text{※静電単位系}$$

$$\text{(平板型, } b/p \geq 0.5) \quad I^{\text{esu/cm}} = \frac{2p^{\text{cm}} K^{\text{esu}} V^{\text{esu}} (V^{\text{esu}} - V_0^{\text{esu}})}{\pi (b^{\text{cm}})^3} \quad \cdots(7.1.3.5) \quad \text{※静電単位系}$$

E_p の式に代入して K を消去する。

$$\text{(円筒型)} \quad E_p^{\text{esu}} = \sqrt{\frac{4V^{\text{esu}} (V^{\text{esu}} - V_0^{\text{esu}})}{(b^{\text{cm}})^2 \ln \frac{b^{\text{cm}}}{a^{\text{cm}}}}} \quad \cdots(7.1.3.6) \quad \text{※静電単位系}$$

$$(平板型, b/p \leq 0.5) \quad E_p^{esu} = \sqrt{\frac{4V^{esu}(V^{esu} - V_0^{esu})}{p^{cm} b^{cm} \ln \frac{4b^{cm}}{a^{cm} \pi}}} \quad \cdots(7.1.3.7) \quad \text{※静電単位系}$$

$$(平板型, b/p \geq 0.5) \quad E_p^{esu} = \sqrt{\frac{8V^{esu}(V^{esu} - V_0^{esu})}{\pi(b^{cm})^2}} \quad \cdots(7.1.3.8) \quad \text{※静電単位系}$$

7. 2 集塵効率

電気集塵装置の捕集効率は、Deutsch(ドイチュ、ドイチェ)の式で与えられる【文献 53】。集塵極間(電界強度 E_p [V/m])の微小区間 dL [m]を流量 Q [m³/s](流速 u_0 [m/s])で通過する帯電した粉塵粒子(粒子径 D_p [m]、帯電量 q [C])は、静電気力を受けて集塵極方向へ移動する。このとき、含塵ガス中の粉塵減少量は、物質収支により集塵極側の粒子捕集量 dM/dt [kg/s]に等しい。

$$QC - Q(C + dC) = \frac{dM}{dt} \quad \cdots(7.2.1)$$

$$-QdC = (A/L)CvdL \quad \cdots(7.2.2)$$

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \int_0^L -\frac{(A/L)vdL}{Q} \quad \cdots(7.2.3)$$

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{Av}{Q} \quad \cdots(7.2.4)$$

$$\boxed{E = 1 - \exp\left(-\frac{Av}{Q}\right)} \quad \left[E \equiv \frac{C - C_0}{C_0} \right] \quad \cdots(7.2.5)$$

$$(円筒型) \quad \frac{A}{Q} = \frac{2\pi R_c L}{\pi R_c^2 u_0} = \frac{2t}{R_c} \quad \cdots(7.2.6)$$

$$(平板型) \quad \frac{A}{Q} = \frac{2LH}{2bHu_0} = \frac{t}{b} \quad \cdots(7.2.7)$$

ただし、 A は集塵極面積[m²]、 A/L は集塵極長さあたりの集塵極面積[m²/m]、 E は電気捕集効率[-]、 H は集塵極高さ[m]、 L は集塵極長さ[m]、 R_c は円筒半径[m]、 $2b$ は集塵極間隔[m]、 t は時間[s]、 u_0 はガス流速[m/s]、 v は帯電粒子の移動速度(電気集塵速度)[m/s]。

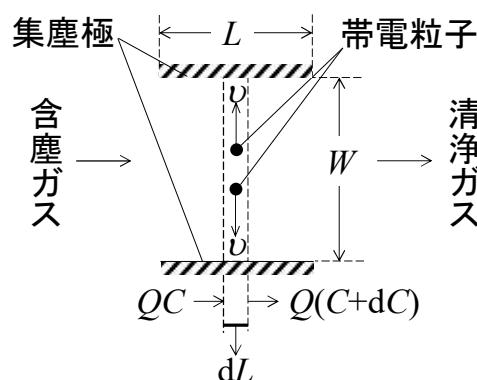
帯電粒子の移動速度 v は、クーロン力と流体抗力(Stokes 域)のつり合いより求める。

$$qE_p = \frac{3\pi\mu D_p v}{C_c} \quad \left[C_c = 1 + Kn \left[2.46 + 0.82 \exp\left(-\frac{0.44}{Kn}\right) \right], Kn = \frac{\lambda}{D_p}, \lambda = \frac{3.2\mu_g}{P} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M_A}} \right] \quad \cdots(7.2.8)$$

$$\boxed{v = \frac{Ne_0 E_p}{3\pi\mu D_p / C_c}} \quad [q \equiv Ne_0] \quad \cdots(7.2.9)$$

ただし、 e_0 は電気素量[C](電子1個がもつ電気量=1.60×10⁻¹⁹ C=4.8×10⁻¹⁰ esu)、 E_p は集塵極近傍の電界強度[V/m]、 N は帯電粒子1個がもつ電子数[-]。

電子数 N は、次式より求める。【文献 54】



$$\text{(慣性衝突機構)} \quad N = \frac{k_0 E_0^{\text{esu}} (D_p^{\text{cm}})^2}{4e_0^{\text{esu}}} \left[k_0 \equiv 1 + 2 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right] \quad \cdots(7.2.10) \quad \text{※静電単位系}$$

$$\text{(慣性衝突拡散機構)} \quad N = \left[(1 + 2Kn)^2 + \frac{2}{1 + 2Kn} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \right] \frac{E_0^{\text{esu}} (D_p^{\text{cm}})^2}{4e_0^{\text{esu}}} \quad \cdots(7.2.11) \quad \text{※静電単位系}$$

ただし、 D_p は粉塵粒子径[cm]、 e_0 は電気素量[esu]($=4.8 \times 10^{-10}$ esu)、 E_0 はコロナ放電開始電界強度[esu]、 k_0 は誘電係数、 ϵ_r は帯電粒子の比誘電率(不導体のとき1、良導体のとき ∞)。

7. 3 構造設計

集塵極面積 A [m^2]は、電気捕集効率 E [-]の式を用いる。

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{Av}{Q}\right) \quad \cdots(7.3.1)$$

$$\exp\left(-\frac{Av}{Q}\right) = 1 - E \quad \cdots(7.3.2)$$

$$-\frac{Av}{Q} = \ln(1 - E) \quad \cdots(7.3.3)$$

$$A = -\frac{Q}{v} \ln(1 - E) \quad \cdots(7.3.4)$$

平板型の場合、放電極－集塵極間隔比 $2p/2b(=p/b)$ が $\pi/4$ のときに放電性能が最も良好となる。[文献 55]

円筒型の場合、集塵極長さ L [m]は次式で表される。

$$L = \frac{A}{2\pi b} \quad \cdots(7.3.5)$$

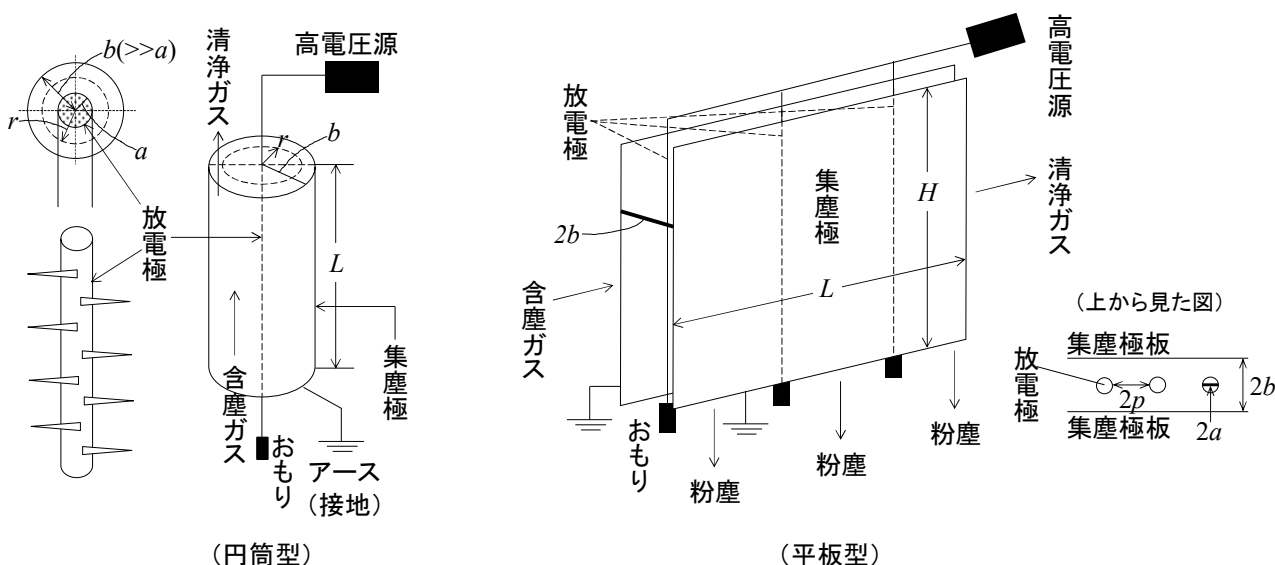


図 7. 3. 1 電気集塵機構の概略

【計算例】電気集塵機

粉塵を含む空気を電気集塵機により除塵処理する場合の①コロナ放電開始電界強度 E_0 [kV/cm]、②コロナ放電開始印加電圧 V_0 [kV]、③集塵極近傍の電界強度 E_p [kV/cm]、④帯電粒子の移動速度 v [cm/s]、⑤電気捕集効率 E [%]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①58.5 kV/cm, ②26.9 kV, ③7.11 kV/cm, ④78.4 cm/s, ⑤99.1%)

集塵機構造	平板型	放電極半径(a)	0.100 cm
処理量	72000 m ³ /h	集塵極間隔($2b$)	20.0 cm
印加電圧	60.0 kV	放電極－集塵極間隔比(p/b)	$\pi/4$
粉塵粒子径	1.00 μ m	捕集機構	慣性衝突機構
粉塵粒子の比誘電率	1	集塵極面積	120 m ²
空気粘度	18.2 μ Pa·s	重力加速度	9.81 m/s ²
空気圧	100 kPa(760 mmHg)	f 値	1
空気温度	20°C		

$$\textcircled{1} \delta = [(293.15)/(273.15+T)](P/760) = [(293.15)/(273.15+20)](760/760) = 1$$

$$E_0 = f[c\delta + d(\delta/a)^{0.5}] = (1)[(30)(1) + (9)(1/0.100)^{0.5}] = 58.460 \text{ kV/cm} \doteq \boxed{58.5 \text{ kV/cm}}$$

$$\textcircled{2} V_0 = aE_0 \ln(b/a) = (0.100)(58.460) \ln[(20.0/2)/(0.100)] = 26.921 \text{ kV} \doteq \boxed{26.9 \text{ kV}}$$

$$\textcircled{3} b/p = 1/(p/b) = 1/(\pi/4) \doteq 1.27 (> 0.5)$$

$$V = (60.0 \times 10^3)^V (1/300)^{\text{esu}/V} = 200 \text{ esu}$$

$$V_0 = (26.921 \times 10^3)^V (1/300)^{\text{esu}/V} = 89.736 \text{ esu}$$

$$E_p = [8V(V - V_0)/(\pi b^2)]^{0.5} = [(8)(200)(200 - 89.736)/\{\pi(20.0/2)^2\}]^{0.5} = (23.697)^{\text{esu}}(3/10)^{(\text{kV/cm})/\text{esu}} = 7.1091 \text{ kV/cm} \doteq \boxed{7.11 \text{ kV/cm}}$$

$$\textcircled{4} \lambda = 3.2(\mu/P)(RT/2\pi M_A)^{0.5} = (3.2)(18.2 \times 10^{-6}/100 \times 10^3)[(8.314)(293.15)/\{(2\pi)(28.8/1000)\}]^{0.5} = 6.7590 \times 10^{-8} \text{ m}$$

$$Kn = \lambda/L = \lambda/D_p = (6.7590 \times 10^{-8})/(1.00 \times 10^{-6}) = 0.067590$$

$$C_c = 1 + Kn[2.46 + 0.82 \exp(-0.44/Kn)] = 1 + (0.067590)[2.46 + 0.82 \exp(-0.44/0.067590)] = 1.1663$$

$$k_0 = 1 + (2)(\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2) = 1 + (2)(1 - 1)/(1 + 2) = 1$$

$$E_0 = (58.460)^{\text{kV/cm}}(10/3)^{\text{esu}/(\text{kV/cm})} = 194.86 \text{ esu}$$

$$N = k_0 E_0 D_p^2 / (4e_0) = (1)(194.86)(1.00 \times 10^{-4})^2 / [(4)(4.8 \times 10^{-10})] = 1014.8$$

$$v = Ne_0 E_p / (3\pi \mu D_p / C_c) = (1014.8)(1.60 \times 10^{-19})(7.1091 \times 10^5) / [(3\pi)(18.2 \times 10^{-6})(1.00 \times 10^{-6}) / (1.1663)] = 0.78484 \text{ m/s} \doteq \boxed{78.4 \text{ cm/s}}$$

$$\textcircled{5} E = 1 - \exp(-Av/Q) = 1 - \exp[-(120)(0.78484)/(72000/3600)] = 0.99098 \doteq \boxed{99.1\%}$$

【単位換算】

電圧 V : 1 V = 1/300 esu

電界強度 E : 1 kV/cm = 10/3 esu (1 V/m = 1/(3×10⁴) esu)

電流 I : 1 mA/cm = 3×10⁶ esu/cm (1 A/m = 3×10⁷ esu/cm)

※esu(electrostatic unit)は静電単位(スタットクーロン statC)

(参考) 電気集塵機的设计式における単位変換

①放電極の汚れを考慮した場合のコロナ放電開始電界強度 E_0

(静電単位系) $E_0^{\text{KV/cm}} = f\left(c\delta + d\sqrt{\frac{\delta}{a}}\right) \left[\delta \equiv \frac{293.15}{273.15 + T} \left(\frac{P}{760}\right)\right]$

(SI 単位系) $E_0^{\text{V/m}} = 10^5 f\left(c\delta + \frac{d}{10}\sqrt{\frac{\delta}{a}}\right) \left[\delta \equiv \frac{293.15}{273.15 + T} \left(\frac{P}{101325}\right)\right]$

(単位換算) $E_0^{\text{V/m}} = (10^3)^{\text{V/kV}} (10^2)^{\text{cm/m}} f\left(c\delta + d\sqrt{\frac{\delta}{a^{\text{m}} \times (10^2)^{\text{cm/m}}}}\right)^{\text{kV/cm}} = 10^5 f\left(c\delta + \frac{d}{10}\sqrt{\frac{\delta}{a}}\right)^{\text{V/m}}$

②清浄空気中における集塵極近傍の電界強度 E_p

(円筒型, 静電単位系) $E_p^{\text{esu}} = \sqrt{\frac{2I^{\text{esu/cm}}}{K^{\text{esu}}}}$

(円筒型, SI 単位系) $E_p^{\text{V/m}} = 3 \times 10^4 \sqrt{\frac{20I^{\text{A/m}}}{K^{\text{(m/s)/(V/m)}}}}$

$$E_p^{\text{V/m}} = (3 \times 10^4)^{\text{(V/m)/esu}} \sqrt{\frac{2 \times I^{\text{A/m}} \times (3 \times 10^7)^{\text{(esu/cm)/(A/m)}}}{K^{\text{(m/s)/(V/m)}} \times (10^4)^{\text{cm}^2/\text{m}^2} \times 300^{\text{esu}/[(\text{cm/s)/(V/cm)]}}}}$$

(単位換算) $= (3 \times 10^4)^{\text{(V/m)/esu}} \sqrt{\frac{20^{\text{(esu/cm)(m}^3/\text{AVs)/esu}} I^{\text{A/m}}}{K^{\text{(m/s)/(V/m)}}}}$
 $\left(= (3 \times 10^4)^{\text{(V/m)/esu}} \sqrt{2 \times 10^{\text{(esu/cm)(m}^3/\text{AVs)/esu}} (I/K)^{\text{AVs/m}^3}} \right)$

※根号の外は SI 単位系に変換する式、根号の中は静電単位系の式

(平板型, 静電単位系) $E_p^{\text{esu}} = \sqrt{\frac{4I^{\text{esu/cm}} b^{\text{cm}}}{K^{\text{esu}} p^{\text{cm}}}}$

(平板型, SI 単位系) $E_p^{\text{V/m}} = 3 \times 10^4 \sqrt{\frac{40I^{\text{A/m}} b^{\text{m}}}{K^{\text{(m/s)/(V/m)}} p^{\text{m}}}}$

$$E_p^{\text{V/m}} = (3 \times 10^4)^{\text{(V/m)/esu}} \sqrt{\frac{4 \times I^{\text{A/m}} \times (3 \times 10^7)^{\text{(esu/cm)/(A/m)}} \times b^{\text{m}} \times (10^2)^{\text{cm/m}}}{K^{\text{(m/s)/(V/m)}} \times (3 \times 10^6)^{\text{esu}/[(\text{m/s)/(V/m)]}} \times p^{\text{m}} \times (10^2)^{\text{cm/m}}}}$$

(単位換算) $= (3 \times 10^4)^{\text{(V/m)/esu}} \sqrt{\frac{40^{\text{(esu/cm)(m}^3/\text{AVs)/esu}} I^{\text{A/m}} b^{\text{m}}}{K^{\text{(m/s)/(V/m)}} p^{\text{m}}}}$
 $\left(= (3 \times 10^4)^{\text{(V/m)/esu}} \sqrt{4 \times 10^{\text{(esu/cm)(m}^3/\text{AVs)/esu}} (I/K)^{\text{AVs/m}^3} (b/p)^{\text{m/m}}} \right)$

※根号の外は SI 単位系に変換する式、根号の中は静電単位系の式

③放電極長さあたりの電流密度 I

(円筒型, 静電単位系) $I^{\text{esu/cm}} = \frac{2K^{\text{esu}} V^{\text{esu}} (V^{\text{esu}} - V_0^{\text{esu}})}{(b^{\text{cm}})^2 \ln \frac{b^{\text{cm}}}{a^{\text{cm}}}}$

(円筒型, SI 単位系)

$$I^{A/m} = \frac{2K^{(m/s)/(V/m)}V^V(V^V - V_0^V)}{9 \times 10^9 (b^m)^2 \ln \frac{b^m}{a^m}}$$

$$I^{A/m} = \frac{1}{(3 \times 10^7)^{(esu/cm)/(A/m)}} \frac{2 \times K^{(m/s)/(V/m)} \times (3 \times 10^6)^{esu/[(m/s)/(V/m)]}}{(b^m \times (10^2)^{cm/m})^2 \ln \frac{b^m \times (10^2)^{cm/m}}{a^m \times (10^2)^{cm/m}}}$$

(単位換算)

$$\times \frac{V^V}{300^{V/esu}} \left(\frac{V^V}{300^{V/esu}} - \frac{V_0^V}{300^{V/esu}} \right) = \frac{2K^{(m/s)/(V/m)}V^V(V^V - V_0^V)}{9 \times 10^9 (b^2)^m \ln \frac{b^m}{a^m}}$$

$$\left(= \frac{1}{(3 \times 10^7)^{(esu/cm)/(A/m)}} \frac{2 \times K^{(m/s)/(V/m)}V^V(V^V - V_0^V)}{300^{(cm^2/esu^3)(V/s)} (b^2)^{m2} \ln(b^m/a^m)} \right)$$

※SI 単位系に変換する式と静電単位系の式のかげ算になっている

(平板型, $b/p \leq 0.5$, 静電単位系)

$$I^{esu/cm} = \frac{K^{esu}V^{esu}(V^{esu} - V_0^{esu})}{(b^{cm})^2 \ln \frac{4b^{cm}}{a^{cm}\pi}}$$

(平板型, $b/p \leq 0.5$, SI 単位系)

$$I^{A/m} = \frac{K^{(m/s)/(V/m)}V^V(V^V - V_0^V)}{9 \times 10^9 (b^m)^2 \ln \frac{4b^m}{a^m\pi}}$$

$$I^{A/m} = \frac{1}{(3 \times 10^7)^{(esu/cm)/(A/m)}} \frac{K^{(m/s)/(V/m)} \times (3 \times 10^6)^{esu/[(m/s)/(V/m)]}}{(b^m \times (10^2)^{cm/m})^2 \ln \frac{4b^m \times (10^2)^{cm/m}}{a^m \times (10^2)^{cm/m}\pi}}$$

(単位換算)

$$\times \frac{V^V}{300^{V/esu}} \left(\frac{V^V}{300^{V/esu}} - \frac{V_0^V}{300^{V/esu}} \right) = \frac{K^{(m/s)/(V/m)}V^V(V^V - V_0^V)}{9 \times 10^9 (b^2)^m \ln \frac{4b^m}{a^m\pi}}$$

$$\left(= \frac{1}{(3 \times 10^7)^{(esu/cm)/(A/m)}} \frac{K^{(m/s)/(V/m)}V^V(V^V - V_0^V)}{300^{(cm^2/esu^3)(V/s)} (b^2)^{m2} \ln(4b^m/a^m\pi)} \right)$$

※SI 単位系に変換する式と静電単位系の式のかげ算になっている

(平板型, $b/p \geq 0.5$, 静電単位系)

$$I^{esu/cm} = \frac{2p^{cm}K^{esu}V^{esu}(V^{esu} - V_0^{esu})}{\pi(b^{cm})^3}$$

(平板型, $b/p \geq 0.5$, SI 単位系)

$$I^{A/m} = \frac{2p^mK^{(m/s)/(V/m)}V^V(V^V - V_0^V)}{9 \times 10^9 \pi(b^m)^3}$$

$$I^{A/m} = \frac{1}{(3 \times 10^7)^{(esu/cm)/(A/m)}} \frac{2p^m \times (10^2)^{cm/m} \times K^{(m/s)/(V/m)} \times (3 \times 10^6)^{esu/[(m/s)/(V/m)]}}{\pi(b^m \times (10^2)^{cm/m})^3}$$

(単位換算)

$$\times \frac{V^V}{300^{V/esu}} \left(\frac{V^V}{300^{V/esu}} - \frac{V_0^V}{300^{V/esu}} \right) = \frac{2p^mK^{(m/s)/(V/m)}V^V(V^V - V_0^V)}{9 \times 10^9 \pi(b^3)^m3}$$

$$\left(= \frac{1}{(3 \times 10^7)^{(esu/cm)/(A/m)}} \frac{2p^mK^{(m/s)/(V/m)}V^V(V^V - V_0^V)}{300^{(cm^2/esu^3)(V/s)} (b^3)^{m3}} \right)$$

※SI 単位系に変換する式と静電単位系の式のかげ算になっている

④Iの式を E_p の式へ代入

(円筒型, SI 単位系)
$$E_p = 3 \times 10^4 \sqrt{\frac{40}{9 \times 10^9 b^2 \ln \frac{b}{a}} V(V - V_0)} = \sqrt{\frac{4V(V - V_0)}{b^2 \ln \frac{b}{a}}}$$

(平板型, $b/p \leq 0.5$, SI 単位系)
$$E_p = 3 \times 10^4 \sqrt{\frac{40}{9 \times 10^9 pb \ln \frac{4b}{a\pi}} V(V - V_0)} = \sqrt{\frac{4V(V - V_0)}{pb \ln \frac{4b}{a\pi}}}$$

(平板型, $b/p \geq 0.5$, SI 単位系)
$$E_p = 3 \times 10^4 \sqrt{\frac{80}{9 \times 10^9 \pi b^2} V(V - V_0)} = \sqrt{\frac{8V(V - V_0)}{\pi b^2}}$$

⑤単一の帯電粒子がもつ電子数 N (慣性衝突機構)

(静電単位系)
$$N = \frac{k_0 E_0^{\text{esu}} (D_p^{\text{cm}})^2}{4e_0^{\text{esu}}} \left[k_0 \equiv 1 + 2 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right]$$

(SI 単位系)
$$N = 1.11 \times 10^{-10} \frac{k_0 E_0^{\text{V/m}} (D_p^{\text{m}})^2}{4e_0^{\text{C}}} \left[k_0 \equiv 1 + 2 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right]$$

(単位換算)
$$N = \frac{k_0 [E_0^{\text{V/m}} / (3 \times 10^4)^{(\text{V/m})/\text{esu}}] (D_p^{\text{m}} \times (10^2)^{\text{cm/m}})^2}{(4)(1.6 \times 10^{-19})^{\text{C}} / (3.33 \times 10^{-10})^{\text{C/esu}}} = 1.11 \times 10^{-10} \frac{k_0 E_0 D_p^2}{4e_0}$$

参考文献

- [1] H. Peavy, D. Row, G. Tchobanoglous; Environmental Engineering, McGraw-Hill(1978)
- [2] G. Kiely; Environmental Engineering, McGraw-Hill(1998) 16.4.5 章
- [3] P.A. Schweitzer; Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers, 3rd Ed., McGraw-Hill (1997) 6-20
- [4] 水田一, 木村典夫; 粉体工学研究会誌, **11** (1974) 132
- [5] C.E. Lapple; Amer. Ind. Hyg. Quarterly, **11** (1950) 40
- [6] 井伊谷鋼一; 集塵装置(新版), 日刊工業新聞社(1963) 6.2.2 章
- [7] M.W. First and L. Silverman; Heating & Ventilating, **45** (1948) 80
- [8] C.B. Shepherd and C.E. Lapple; Ind. Eng. Chem., **31** (1939) 972
- [9] E.H. Kennard; Kinetics Theory of Gases, McGraw Hill (1938)
- [10] C.J. Geankoplis; Transport Processes and Separation Process Principles, 4th Ed., Pearson Education Ltd. (1972) p.502
- [11] N. Anantharaman, K.M. Meera Sheriffa Begum; Mass Transfer: Theory and Practice, Prentice-Hall of India Pvt.Ltd. (2011) p.16
- [12] 木村典夫; 化学プラント技術会議録(1967) p.1-3-1
- [13] 井伊谷鋼一(編著); 集塵装置の性能, 産業技術センター(1976) 5.3 章
- [14] C.N. Davies; Aerosol Science, Academic Press (1966)
- [15] W.L. Torgeson; General Mills, Inc. Minneapolis 13 (1961)
- [16] H. Lamb; Hydrodynamics 6th Ed., McGraw Hill (1932), p.614
- [17] C.N. Davies; Proc. Inst. Mech. Engrs. (London) **131** (1952) 185
- [18] H.D. Landahl and R.G. Hermann; J. Colloid Sci., **4** (1949) 103
- [19] I.B. Stechkina; Dokl. Akad. Nauk SSSR, **167** (1966) 1327
- [20] S.K. Friedlander; Ind. Eng. Chem., **50** (1953) 1161
- [21] 吉岡直哉, 江見準, 金岡千嘉男, 安並正雄; 化学工学, **36** (1972) 313-319
- [22] C.Y. Chen; Chem. Revs., **55** (1955) 595-623
- [23] 木村典夫, 井伊谷鋼一; 化学工学, **23** (1959) 792-799
- [24] 木村典夫, 白戸紋平; 化学工学, **34** (1970) 984-990
- [25] 木村典夫, 井伊谷鋼一; 化学工学, **29** (1965) 166-174

- [26] 坂下攝; 粉体のスケール・アップ手法, 工業調査会(1992)
- [27] 坂下攝; 粉体プロセス設計ー演習ノートー 月刊「化学装置」別冊, 工業調査会(1999)
- [28] 井伊谷鋼一(編); 粉体工学ハンドブック, 朝倉書店(1965) 5.6 章
- [29] 化学工学協会編; 化学工学便覧 新版, 丸善(1957) p.692
- [30] 藤田重文, 東畑平一郎(編); 化学工学Ⅱ 第2版「機械的操作」, 東京化学同人(1972), 4.5 章
- [31] 上岡豊; 機械学会論文集, **23** (1957) 309-313
- [32] 井伊谷鋼一(編著); 集塵装置の性能, 産業技術センター(1976) 4.4 章
- [33] H.F. Johnstone and M.H. Roberts; *Ind. Eng. Chem.*, **41** (1949) 2417-2423
- [34] 東畑平一郎, 関口勲; 化学工学, **25** (1961) 615-624
- [35] G.M. Turner and W.R. Moulton; *Chem. Eng. Progr.*, **49** (1953) 169, 226
- [36] 井伊谷鋼一(編著); 集塵装置の性能, 産業技術センター(1976) 4.3 章
- [37] 化学工学協会編; 化学工学便覧 新版, 丸善(1957) p.692
- [38] S. Calvert; *AIChE J.*, **16** (1970) 392-396
- [39] S. Calvert, D. Lundgren, D.S. Mehta; *J. Air Poll. Cont. Assoc.*, **22** (1972) 529-532
- [40] 井伊谷鋼一(編著); 集塵装置の性能, 産業技術センター (1976) 4.5 章
- [41] 抜山四郎, 棚沢泰; 日本機械学会誌, **5** (1939) 136-143
- [42] J.R. Backhurst, J.H. Harker, J.F. Richardson and J.M. Coulson; *Coulson & Richardson's Chemical Engineering Vol.1, 6th Ed.*, Butterworth Heinemann(1999), p.251(Fig. 6.16)
- [43] D. Kunii, O. Levenspiel; *Fluidization Engineering 2nd Ed.*, Butterworth-Heinemann(1991), p.105
- [44] W.C. Yang (Ed.); *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*, CRC Press(2003), p.159
- [45] 井伊谷鋼一; 集塵装置(新版), 日刊工業新聞社(1963), 9.3.2 章
- [46] 原康夫; 物理学通論Ⅱ, 学術図書出版社(1988), 16 章
- [47] F.W. Peek; *Dielectric Phenomena in High voltage Engineering 3rd Ed.*, McGraw-Hill (1929) p.64
- [48] H.J. White; *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison-Wesley, Massachusetts (1963)
- [49] 松本俊次; 電気集塵装置, 日刊工業新聞社(1975), 3.2 章
- [50] P. Cooperman; *AIEE Trans., Pt.1* **79** (1960) 47-50
- [51] 高分子学会編; 静電気ハンドブック, 地人書館(1970)
- [52] 井伊谷鋼一(編著); 集塵装置の性能, 産業技術センター(1976) 3.3 章
- [53] W. Deutsch; *Annalen der Physik*, **68** (1922) 335
- [54] 井伊谷鋼一(編著); 集塵装置の性能, 産業技術センター(1976) 3.2 章
- [55] 大気汚染研究全国協議会(編); 除塵装置ハンドブック, コロナ社(1963) p.175

教科書

(下線は推薦図書)

- [1] 山際 和明; 機械的分離工学, 新潟大学工学部化学システム工学科化学工学コース(自作教科書)
- [2] 大気汚染研究全国協議会(編); 除塵装置ハンドブック, コロナ社(1963)
- [3] 井伊谷鋼一(編); 粉体工学ハンドブック, 朝倉書店(1965)
- [4] 粉体工学会(編); 粉体工学便覧, 日刊工業新聞社(1986)
- [5] 粉体機器・装置ハンドブック編集委員会(編); 粉体機器・装置ハンドブック, 日刊工業新聞社(1995)
- [6] 林 恒美; 粉体技術ポケットブック, 工業調査会(1996)
- [7] 伊藤 光弘; 図解 粉体機器・装置の基礎, 工業調査会(2005)
- [8] 今木 清康; 粉体工学演習, コロナ社(1987)
- [9] 坂下 攝; 粉体のスケール・アップ手法, 工業調査会(1992)
- [10] 坂下 攝; 粉体プロセス設計ー演習ノートー 月刊「化学装置」別冊, 工業調査会(1999)
- [11] 化学工学協会(編); 化学工学便覧 新版, 丸善 (1957)
- [12] 上岡 豊; ベンチュリ・スクラバ, 続・新化学工学講座 13, 日刊工業新聞社(1960)
- [13] 井伊谷鋼一; 集塵装置(新版), 日刊工業新聞社(1963)
- [14] 橋本 清隆, 谷口 堯; 電気集塵装置の理論と実際, 電気書院(1965)
- [15] 辻 克彦, 林 太郎, 柴田 優; 換気・集じんシステム, 朝倉書店(1973)
- [16] 松本 俊次; 電気集塵装置, 日刊工業新聞社(1975)

- [17] 井伊谷鋼一(編著); 集塵装置の性能, 産業技術センター(1976)
- [18] 日本粉体工業会(編); バグフィルターハンドブック, 産業技術センター(1977)
- [19] 狩野 武; 粉体粒子の挙動, 産業技術センター(1977)
- [20] 井伊谷鋼一; 集塵工学, 日刊工業新聞社(1978)
- [21] 労働省労働衛生課(編); 局所排気・空気清浄装置の標準設計と保守管理(下), 中央労働災害防止協会(1985)
- [22] 日本エアロゾル学会(編), 高橋幹二(著); エアロゾル学の基礎, 森北出版(2003)
- [23] 吉田 文武, 森 芳郎編; 詳論 化学工学 I 「単位操作 I」, 朝倉書店(1962)
- [24] 藤田 重文, 東畑平一郎(編); 化学工学 II 第 2 版「機械的操作」, 東京化学同人(1972)
- [25] 三輪 茂雄; 粉体工学通論, 日刊工業新聞社(1981)
- [26] 井伊谷 鋼一, 三輪 茂雄; 改訂新版 化学工学通論 II, 朝倉書店(1982)
- [27] H.J. White; Industrial Electrostatic Precipitation, Pergamon Press(1963)
- [28] W. Strauss; Industrial Gas Cleaning, Pergamon Press(1966)
- [29] C.N. Davies; Aerosol Science, Academic Press(1967)
- [30] C.N. Davies; Air Filtration, Academic Press(1973)
- [31] R.G. Dorman; Dust Control and Air Cleaning, Pergamon Press(1974)
- [32] H. Peavy, D. Row, G. Tchobanoglous; Environmental Engineering, McGraw-Hill(1978)
- [33] O. Storch *et al.*; Industrial Separators for Gas Cleaning, Elsevier Science(1979)
- [34] S. Calvert, H.M. Englund; Handbook of Air Pollution Technology, Wiley-Interscience(1984)
- [35] G. Kiely; Environmental Engineering, McGraw-Hill(1998)
- [36] W.C. Hinds; Aerosol Technology 2nd Ed., Wiley-Interscience(1999)

令和 4 年 12 月 17 日作成

令和 5 年 1 月 5 日改訂

令和 5 年 2 月 26 日改訂

令和 5 年 12 月 25 日改訂

令和 6 年 1 月 11 日改訂

令和 6 年 1 月 19 日改訂

問 題

(1) [重力集塵機(性能設計)]長さ 10.0 m、幅 4.00 m、深さ 1.00 m の重力集塵機を用いて粒子密度 2650 kg/m³ の粉塵粒子を含むガスを毎時 1800 m³ で流入させて連続処理する場合の分離限界粒子径 D_{pc} [μm]と 50%分離粒子径 D_{50} [μm]を求めよ。空気の密度 1.20 kg/m³、粘度 18.2 μPa·s、重力加速度 9.81 m/s² とする。($D_{pc}=12.6$ μm, $D_{50}=8.88$ μm)

(2) [重力集塵機(構造設計)]重力集塵機を用いて粒子密度 2650 kg/m³、粒子径 88 μm 以上の粉塵粒子を含む空気を毎秒 4.00 m³ で連続処理する場合の沈降室容積 V [m³]と幅 W [m]および長さ L [m]を求めよ。空気の最大許容風速 2.00 m/s、沈降室の深さ 1.00 m、空気の密度 1.20 kg/m³、粘度 18.2 μPa·s、重力加速度 9.81 m/s² とする。($V=5.55$ m³, $W=2.00$ m, $L=2.77$ m)

(3) [遠心力集塵機]空気中に含まれる粉塵を標準型サイクロンにより下記の条件で捕集する。①サイクロン構造の各寸法 $D, B, H, D_E, D_D, L_1, L_2, L_3$ [mm]、②分離限界粒子径 D_{pc} [μm](厳密式)、③圧力損失 ΔP [kPa](井伊谷の式)を求めよ。(① $D=878$ mm ほか、② $D_{pc}=5.13$ μm, ③ $\Delta P=1.12$ kPa)

処理量	1.80 t/h	空気密度	1.20 kg/m ³
固体混合比	0.3	空気粘度	18.2 μPa·s
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	入口流速	15.0 m/s

(4) [遠心力集塵機]空気中に含まれる粉塵を標準型サイクロンにより下記の条件で捕集する。①サイクロン構造の各寸法 $D, B, H, D_E, D_D, L_1, L_2, L_3$ [mm]、②分離限界粒子径 D_{pc} [μm](厳密式)、③圧力損失 ΔP [kPa](井伊谷の式)を求めよ。(① $D=1242$ mm ほか、② $D_{pc}=6.10$ μm, ③ $\Delta P=1.12$ kPa)

処理量	3.60 t/h	空気密度	1.20 kg/m ³
固体混合比	0.3	空気粘度	18.2 μPa·s
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	入口流速	15.0 m/s

(5) [慣性衝突捕集効率]100 kPa, 20℃の気流中(流速 150 cm/s, 密度 1.20 kg/m³, 粘度 18.2 μPa·s, 分子量 28.8)に含まれる粉塵粒子(粒子径 1.00 μm, 粒子密度 2650 kg/m³)が円柱状の単一繊維(繊維径 10.0 μm)に慣性衝突捕集される場合の①慣性衝突捕集効率 η_T [%]と②慣性衝突さえぎり捕集効率 η_{TI} [%]をそれぞれ求めよ。(①25.1%, ②27.6%)

(6) [慣性衝突捕集効率]100 kPa, 20℃の気流中(流速 80.0 cm/s, 密度 1.20 kg/m³, 粘度 18.2 μPa·s, 分子量 28.8)に含まれる粉塵粒子(粒子径 2.00 μm, 粒子密度 2650 kg/m³)が円柱状の単一繊維(繊維径 10.0 μm)に捕集される場合の①慣性衝突捕集効率 η_T [%]と②慣性衝突さえぎり捕集効率 η_{TI} [%]をそれぞれ求めよ。(①37.1%, ②47.8%)

(7) [拡散捕集効率]100 kPa, 20℃の気流中(流速 1.00 cm/s, 密度 1.20 kg/m³, 粘度 18.2 μPa·s, 分子量 28.8)に含まれる粉塵粒子(粒子径 0.500 μm, 粒子密度 2650 kg/m³)が円柱状の単一繊維(繊維径 10.0 μm)に捕集される場合の①拡散捕集効率 η_D [%]と②拡散さえぎり捕集効率 η_{DI} [%]をそれぞれ求めよ。(①1.15%, ②1.97%)

(8) [拡散捕集効率]100 kPa, 20℃の気流中(流速 10.0 cm/s, 密度 1.20 kg/m³, 粘度 18.2 μPa·s, 分子量 28.8)に含まれる粉塵粒子(粒子径 0.100 μm, 粒子密度 2650 kg/m³)が円柱状の単一繊維(繊維径 10.0 μm)に捕集される場合の①拡散捕集効率 η_D [%]と②拡散さえぎり捕集効率 η_{DI} [%]をそれぞれ求めよ。(①1.40%, ②3.00%)

- (9) [重力捕集効率]100 kPa, 20°Cの気流中(流速 1.00 cm/s, 密度 1.20 kg/m³, 粘度 18.2 μPa·s)に含まれる粉塵粒子(粒子径 2.50 μm, 粒子密度 2650 kg/m³)が円柱状の単一繊維(繊維径 10.0 μm)に水平流で捕集される場合の①重力捕集効率 η_G [%]と②重力さえぎり捕集効率 η_{GI} [%]をそれぞれ求めよ。重力加速度 9.81 m/s²とする。(①4.95%, ②6.23%)
- (10) [重力捕集効率]100 kPa, 20°Cの気流中(流速 10.0 cm/s, 密度 1.20 kg/m³, 粘度 18.2 μPa·s)に含まれる粉塵粒子(粒子径 5.00 μm, 粒子密度 2650 kg/m³)が円柱状の単一繊維(繊維径 10.0 μm)に水平流で捕集される場合の①重力捕集効率 η_G [%]と②重力さえぎり捕集効率 η_{GI} [%]をそれぞれ求めよ。重力加速度 9.81 m/s²とする。(①1.98%, ②4.84%)
- (11) [複合捕集効率]100 kPa, 20°Cの気流中(流速 10.0 cm/s, 密度 1.20 kg/m³, 粘度 18.2 μPa·s)に含まれる粉塵粒子(粒子径 5.00 μm, 粒子密度 2650 kg/m³)が円柱状の単一繊維(繊維径 10.0 μm)に水平流で捕集される場合の①慣性衝突拡散さえぎり捕集効率 η_{TDI} [%]、②慣性衝突重力さえぎり捕集効率 η_{TGI} [%]、③重力拡散さえぎり捕集効率 η_{GDI} [%]をそれぞれ求めよ。重力加速度 9.81 m/s²とする。(①13.4%, ②15.4%, ③6.09%)
- (12) [複合捕集効率]100 kPa, 20°Cの気流中(流速 100 cm/s, 密度 1.20 kg/m³, 粘度 18.2 μPa·s)に含まれる粉塵粒子(粒子径 0.500 μm, 粒子密度 2650 kg/m³)が円柱状の単一繊維(繊維径 10.0 μm)に水平流で捕集される場合の①慣性衝突拡散さえぎり捕集効率 η_{TDI} [%]、②慣性衝突重力さえぎり捕集効率 η_{TGI} [%]、③重力拡散さえぎり捕集効率 η_{GDI} [%]をそれぞれ求めよ。重力加速度 9.81 m/s²とする。(①10.5%, ②10.4%, ③0.176%)
- (13) [濾過集塵機(エアフィルター)(性能設計)]粉塵を含む空気を繊維充填層フィルターにより除塵処理する場合の①単一繊維捕集効率 η_0 [%]、②フィルター捕集効率 E [%]、③圧力損失 ΔP [kPa]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①1.15%, ②99.8%, ③3.29 kPa)

処理量	1800 m ³ /h	粉塵粒子径	1.00 μm
フィルター幅	1000 mm	空気密度	1.20 kg/m ³
フィルター高さ	1000 mm	空気粘度	18.2 μPa·s
フィルター厚み	200 mm	空気圧	100 kPa
フィルター繊維径	10.0 μm	空気温度	20°C
フィルター空隙率	98.0%	空気平均分子量	28.8
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	捕集機構	慣性衝突支配

- (14) [濾過集塵機(エアフィルター)(性能設計)]粉塵を含む空気を繊維充填層フィルターにより除塵処理する場合の①単一繊維捕集効率 η_0 [%]、②フィルター捕集効率 E [%]、③圧力損失 ΔP [kPa]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①0.390%, ②99.2%, ③3.22 kPa)

処理量	360 m ³ /h	粉塵粒子径	0.500 μm
フィルター幅	500 mm	空気密度	1.20 kg/m ³
フィルター高さ	500 mm	空気粘度	18.2 μPa·s
フィルター厚み	250 mm	空気圧	100 kPa
フィルター繊維径	10.0 μm	空気温度	20°C
フィルター空隙率	98.0%	空気平均分子量	28.8
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	捕集機構	拡散さえぎり支配

- (15) [濾過集塵機(エアフィルター)(構造設計)]粉塵を含む空気を繊維充填層フィルターにより除塵処理する場合の①単一繊維捕集効率 η_0 [%]と②フィルター厚み L_{99} [mm]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①1.38%, ②117 mm)

処理量	360 m ³ /h	空気密度	1.20 kg/m ³
フィルター幅	1000 mm	空気粘度	18.2 μPa·s
フィルター高さ	1000 mm	空気圧	100 kPa
フィルター繊維径	10.0 μm	空気温度	20°C
フィルター空隙率	98.0%	空気平均分子量	28.8
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	フィルター捕集効率	99%
粉塵粒子径	0.100 μm	捕集機構	拡散支配

- (16) [濾過集塵機(エアフィルター)(構造設計)]粉塵を含む空気を繊維充填層フィルターにより除塵処理する場合の①単一繊維捕集効率 η_0 [%]と②フィルター厚み L_{99} [mm]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①1.52%, ②107 mm)

処理量	1800 m ³ /h	空気密度	1.20 kg/m ³
フィルター幅	1000 mm	空気粘度	18.2 μPa·s
フィルター高さ	1000 mm	空気圧	100 kPa
フィルター繊維径	10.0 μm	空気温度	20°C
フィルター空隙率	98.0%	空気平均分子量	28.8
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	フィルター捕集効率	99%
粉塵粒子径	1.00 μm	捕集機構	慣性衝突拡散さえぎり支配

- (17) [濾過集塵機(バッグフィルター)]粉塵を含む空気をバッグフィルターにより除塵処理する場合の①単一繊維捕集効率 η_0 [%]、②粉塵負荷時のフィルター捕集効率 E [%]、③圧力損失 ΔP [kPa]、④集塵面積 A [m²]、⑤バッグの本数 N_b [-]、⑥粉塵払い落としまでの所要時間 t [min]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①13.8%, ②98.9%, ③2.83 kPa, ④2.00 m², ⑤7, ⑥4.27 min)

濾布材質	ガラス繊維(長繊維)	入口粉塵濃度	10.0 g/m ³
処理量	1080 m ³ /h	濾布空隙率	0.100
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	濾布繊維径	100 μm
粉塵粒子径(比表面積径)	8.00 μm	濾布目開き動水半径	5.00 μm
空気密度	1.20 kg/m ³	濾布袋(バッグ)直径	100 mm
空気粘度	18.2 μPa·s	濾布袋(バッグ)長さ	1000 mm
空気圧	100 kPa	粉塵負荷	0.380 kg/m ²
空気温度	20°C	濾過速度	15.0 cm/s
空気平均分子量	28.8	捕集機構	慣性衝突重力さえぎり支配(水平流)
重力加速度	9.81 m/s ²		

- (18) [濾過集塵機(バッグフィルター)]粉塵を含む空気をバッグフィルターにより除塵処理する場合の①単一繊維捕集効率 η_0 [%]、②粉塵負荷時のフィルター捕集効率 E [%]、③圧力損失 ΔP [kPa]、④集塵面積 A [m²]、⑤バッグの本数 N_b [-]、⑥粉塵払い落としまでの所要時間 t [min]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①0.0836%, ②99.7%, ③3.42 kPa, ④3.12 m², ⑤10, ⑥2.92 min)

濾布材質	合成繊維(短繊維)	入口粉塵濃度	10.0 g/m ³
処理量	900 m ³ /h	濾布空隙率	0.100
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	濾布繊維径	100 μm
粉塵粒子径(比表面積径)	0.500 μm	濾布目開き動水半径	5.00 μm
空気密度	1.20 kg/m ³	濾布袋(バッグ)直径	100 mm
空気粘度	18.2 μPa·s	濾布袋(バッグ)長さ	1000 mm
空気圧	100 kPa	粉塵負荷	0.140 kg/m ²
空気温度	20°C	濾過速度	8.00 cm/s
空気平均分子量	28.8	捕集機構	拡散支配

- (19) [洗浄集塵機(向流スクラバー)(性能設計)]粉塵を含む空気を向流スクラバーにより除塵処理する場合の①液滴終末速度 u_t [cm/s]、②単一液滴捕集効率 η_0 [%]、③洗浄捕集効率 E [%]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①14.5 cm/s, ②0.0764%, ③97.6%)

処理量	8000 m ³ /h	洗浄水粘度	1.00 mPa·s
液ガス比	5.00×10^{-3}	界面張力	0.072 kg/s ²
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	ノズル形状	直線流型
粉塵粒子径	0.100 μm	ノズル流速	12.0 m/s
空気密度	1.20 kg/m ³	ジェット数	1000
空気粘度	18.2 μPa·s	塔径	5.00 m
空気圧	100 kPa	塔高	10.0 m
空気温度	20°C	捕集機構	慣性衝突支配
空気平均分子量	28.8	重力加速度	9.81 m/s ²
洗浄水密度	1000 kg/m ³		

- (20) [洗浄集塵機(向流スクラバー)(構造設計)]粉塵を含む空気を向流スクラバーにより除塵処理する場合の①液滴終末速度 u_t [cm/s]、②単一液滴捕集効率 η_0 [%]、③塔高 Z [m]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①14.5 cm/s, ②0.00894%, ③12.4 m)

処理量	10000 m ³ /h	洗浄水粘度	1.00 mPa·s
液ガス比	5.00×10^{-3}	界面張力	0.072 kg/s ²
粉塵粒子密度	2650 kg/m ³	ノズル形状	直線流型
粉塵粒子径	0.100 μm	ノズル流速	12.0 m/s
空気密度	1.20 kg/m ³	ジェット数	1000
空気粘度	18.2 μPa·s	塔径	5000 mm
空気圧	100 kPa	捕集機構	拡散支配
空気温度	20°C	洗浄捕集効率	99%
空気平均分子量	28.8	重力加速度	9.81 m/s ²
洗浄水密度	1000 kg/m ³		

- (21) [洗浄集塵機(ベンチュリースクラバー)]粉塵を含む空気を水平流型ベンチュリースクラバーにより除塵処理する場合の①単一液滴捕集効率 η_0 [%]、②洗浄捕集効率 E [%]、③圧力損失 ΔP [kPa]、④スロート部管径 D_t [mm]、⑤噴射口数 n [-]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①37.8%,

②98.6%, ③6.00 kPa, ④97.7 mm, ⑤20)

処理量	2700 m ³ /h	洗浄水粘度	1.00 mPa·s
液ガス比	0.005	界面張力	0.072 kg/s ²
粒子密度	2650 kg/m ³	スロート部ガス流速	100 m/s
粉塵粒子径	1.00 μm	洗浄水噴射圧	1000 kPa
空気密度	1.20 kg/m ³	噴射口径	3.00 mm
空気粘度	18.2 μPa·s	捕集機構	慣性衝突支配
空気圧	100 kPa	重力加速度	9.81 m/s ²
空気温度	20°C	f 値	0.45
洗浄水密度	1000 kg/m ³		

- (22) [洗浄集塵機(ベンチュリースクラバー)]粉塵を含む空気を水平流型ベンチュリースクラバーにより除塵処理する場合の①単一液滴捕集効率 η_0 [%]、②洗浄捕集効率 E [%]、③圧力損失 ΔP [kPa]、④スロート部管径 D_t [mm]、⑤噴射口数 n [-]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①88.3%, ②95.6%, ③3.84 kPa, ④210 mm, ⑤21)

処理量	10000 m ³ /h	洗浄水粘度	1.00 mPa·s
液ガス比	0.001	界面張力	0.072 kg/s ²
粒子密度	2650 kg/m ³	スロート部ガス流速	80.0 m/s
粉塵粒子径	1.00 μm	洗浄水噴射圧	500 kPa
空気密度	1.20 kg/m ³	噴射口径	3.00 mm
空気粘度	18.2 μPa·s	捕集機構	慣性衝突支配
空気圧	100 kPa	重力加速度	9.81 m/s ²
空気温度	20°C	f 値	0.45
洗浄水密度	1000 kg/m ³		

- (23) [電気集塵機]粉塵を含む空気を電気集塵機により除塵処理する場合の①コロナ放電開始電界強度 E_0 [kV/cm]、②コロナ放電開始印加電圧 V_0 [kV]、③集塵極近傍の電界強度 E_p [kV/cm]、④帯電粒子の移動速度 v [cm/s]、⑤電気捕集効率 E [%]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①58.5 kV/cm, ②26.9 kV, ③5.42 kV/cm, ④59.8 cm/s, ⑤97.2%)

集塵型式	平板型	放電極半径(a)	0.100 cm
処理量	72000 m ³ /h	集塵極間隔($2b$)	20.0 cm
印加電圧	120 kV	放電極-集塵極間隔比(p/b)	π
粉塵粒子径	1.00 μm	捕集機構	慣性衝突機構
粉塵粒子の比誘電率	1	集塵極面積	120 m ²
空気粘度	18.2 μPa·s	重力加速度	9.81 m/s ²
空気圧	100 kPa(760 mmHg)	f 値	1
空気温度	20°C		

- (24) [電気集塵機]粉塵を含む空気を電気集塵機により除塵処理する場合の①コロナ放電開始電界強度 E_0 [kV/cm]、②コロナ放電開始印加電圧 V_0 [kV]、③集塵極近傍の電界強度 E_p [kV/cm]、④帯電粒子の移動速度 v [cm/s]、⑤電気捕集効率 E [%]をそれぞれ求めよ。設計条件は下記の通りとする。(①58.5

kV/cm, ②40.4 kV, ③0.508 kV/cm, ④7.24 cm/s, ⑤97.3%)

集塵型式	円筒型	放電極半径(a)	0.100 cm
処理量	1800 m ³ /h	集塵極間隔($2b$)	200 cm
印加電圧	90.0 kV	放電極-集塵極間隔比(p/b)	0
粉塵粒子径	1.00 μm	捕集機構	慣性衝突拡散機構
粉塵粒子の比誘電率	1	集塵極面積	25 m ²
空気粘度	18.2 μPa·s	重力加速度	9.81 m/s ²
空気圧	100 kPa(760 mmHg)	f 値	1
空気温度	20°C		