遠心分離

１．遠心力場の力学

１．１　遠心効果

質量 m [kg]の粒子が半径 r [m]の円周上を角速度 ω [rad/s]で円運動するとき、粒子に作用する遠心力 F [N]は、次式で表される。

$$F = mr\omega^2 \quad \cdots(1.1.1)$$

角速度 ω [rad/s]は、一周の角度 2π [rad]と回転物体の周期$(1/n)$ [s]の比で表される。

$$\omega = \frac{2\pi^{\mathrm{rad}}}{(1/n)^{\mathrm{s}}} = 2\pi n \quad \cdots(1.1.2)$$

遠心効果 Z [－]は、遠心機の性能を示す目安であり、重力に対する遠心力の比で定義される。重力加速度 g の倍数に相当し、たとえば Z=3000 のときは「3000Ｇ(ジー)」と呼ぶ。

$$Z = \frac{mr\omega^2}{mg} \quad \cdots(1.1.3)$$

$$Z = \frac{r\omega^2}{g} \quad \cdots(1.1.4)$$

$$Z = \frac{r(2\pi n)^2}{g} \quad \cdots(1.1.5)$$

$$\boxed{Z = \frac{4\pi^2 rn^2}{g}} \quad \cdots(1.1.6)$$

遠心半径 r_1 から r_2 へ向かって移動する粒子に作用する**平均遠心効果** Z_{lm} [－]は、上式の r を対数平均遠心半径 r_{lm} に置き換えて次式で表される。

$$\boxed{Z_{\mathrm{lm}} = \frac{4\pi^2 r_{\mathrm{lm}} n^2}{g}} \quad \left[r_{\mathrm{lm}} \equiv \frac{r_2 - r_1}{\ln(r_2/r_1)}\right] \quad \cdots(1.1.7)$$

１．２　遠心力場における液圧[文献 1-3]

液体が回転軸の中心より r [m]の位置で回転している。回転液体が器壁に及ぼす圧力Δp [Pa]は、環筒状液体の内部に設けられた厚さ dr、高さ h の薄い環筒状液体に作用する力のつり合い式より導かれる。

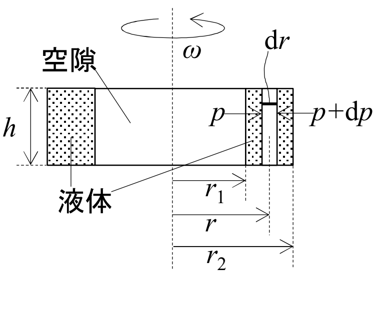
$$(2\pi rh)p + \rho[\pi\{(r+\mathrm{d}r)^2 - r^2\}h]r\omega^2 = (2\pi rh)(p + \mathrm{d}p) \quad \cdots(1.2.1)$$

$$(2\pi rh)p + \rho(2\pi rh\mathrm{d}r)r\omega^2 = (2\pi rh)(p + \mathrm{d}p) \quad [(\mathrm{d}r)^2 = 0] \quad \cdots(1.2.2)$$

$$\rho\omega^2 r\mathrm{d}r = \mathrm{d}p \quad [(\mathrm{d}r)^2 = 0] \quad \cdots(1.2.3)$$

$$\int_{p_1}^{p_2} \mathrm{d}p = \rho\omega^2 \int_{r_1}^{r_2} r\mathrm{d}r \quad \cdots(1.2.4)$$

r_1 は液表面、r_2 は器壁



$$\boxed{\Delta p = \frac{\rho\omega^2}{2}(r_2^2 - r_1^2)} \quad \left[\Delta p = p_2 - p_1\right] \quad \cdots(1.2.5)$$

$$\boxed{\Delta p = \frac{\rho}{2}(u_2^2 - u_1^2)} \quad \left[u = r\omega^2\right] \quad \cdots(1.2.6)$$

２．沈降分離速度

２．１　流体抗力

流体中を移動する球状固体粒子が受ける流体抗力 R_f [N]は、次式で表される。

$$R_\mathrm{f} = C_\mathrm{D}\frac{\pi {D_\mathrm{p}}^2}{4}\frac{\rho u^2}{2} \quad \cdots(2.1.1)$$

ただし、C_D は抵抗係数[－]、D_p は粒子径[m]、u は粒子の移動速度[m/s]、ρ は流体密度[kg/m^3]。
抵抗係数 C_D は粒子レイノルズ数 Re_p [－]の関数であり、次式のように場合分けされる。

Stokes 域(Re_p<2)のとき　$C_\mathrm{D} = \dfrac{24}{Re_\mathrm{p}} \quad \cdots(2.1.2)$

Allen 域(2<Re_p<500)のとき　$C_\mathrm{D} = \dfrac{10}{\sqrt{Re_\mathrm{p}}} \quad \cdots(2.1.3)$

Newton 域(500<Re_p)のとき　$C_\mathrm{D} = 0.44 \quad \cdots(2.1.4)$

粒子レイノルズ数 Re_p [－]は、次式で定義される。

$$Re_\mathrm{p} = \frac{D_\mathrm{p} u \rho}{\mu} \quad \cdots(2.1.5)$$

各領域の抵抗係数 C_D を R_f の式に代入する。
Stokes 域(Re_p<2)のとき

$$R_\mathrm{f} = \frac{24}{Re_\mathrm{p}}\frac{\pi {D_\mathrm{p}}^2}{4}\frac{\rho u^2}{2} \quad \cdots(2.1.5)$$

$$R_\mathrm{f} = \frac{24}{(D_\mathrm{p} u \rho / \mu)}\frac{\pi {D_\mathrm{p}}^2}{4}\frac{\rho u^2}{2} \quad \cdots(2.1.6)$$

$$\boxed{R_\mathrm{f} = 3\pi\mu u D_\mathrm{p}} \quad \cdots(2.1.7)$$

Allen 域(2<Re_p<500)のとき

$$R_\mathrm{f} = \frac{10}{\sqrt{Re_\mathrm{p}}}\frac{\pi {D_\mathrm{p}}^2}{4}\frac{\rho u^2}{2} \quad \cdots(2.1.8)$$

$$R_{\rm f} = \frac{10}{\sqrt{D_{\rm p} u \rho / \mu}} \frac{\pi D_{\rm p}{}^2}{4} \frac{\rho u^2}{2} \quad \cdots(2.1.9)$$

$$\boxed{R_{\rm f} = 1.25\pi\rho^{0.5}\mu^{0.5}u^{1.5}D_{\rm p}{}^{1.5}} \quad \cdots(2.1.10)$$

Newton 域($500<Re_{\rm p}$)のとき

$$R_{\rm f} = 0.44 \frac{\pi D_{\rm p}{}^2}{4} \frac{\rho u^2}{2} \quad \cdots(2.1.11)$$

$$\boxed{R_{\rm f} = 0.055\pi\rho u^2 D_{\rm p}{}^2} \quad \cdots(2.1.12)$$

２．２　重力沈降速度

粒子密度 $\rho_{\rm p}$ [kg/m^3]、粒子径 $D_{\rm p}$ [m]の固体粒子が密度 ρ [kg/m^3]、粘度 μ [Pa･s]の流体中を終末速度 $u_{\rm t}$ [m/s]で重力沈降するとき、流体抗力と外力（重力および浮力）がつり合うことから次式が成り立つ。

$$R_{\rm f} = \frac{\pi}{6} D_{\rm p}{}^3 (\rho_{\rm p} - \rho) g \quad \cdots(2.2.1)$$

各領域の流体抗力 $R_{\rm f}$ を上式に代入する。

Stokes 域($Re_{\rm p}<2$)のとき

$$3\pi\mu u_{\rm t} D_{\rm p} = \frac{\pi}{6} D_{\rm p}{}^3 (\rho_{\rm p} - \rho) g \quad \cdots(2.2.2)$$

$$\boxed{u_{\rm t} = \frac{g(\rho_{\rm p} - \rho) D_{\rm p}{}^2}{18\mu}} \quad \cdots(2.2.3)$$

Allen 域($2<Re_{\rm p}<500$)のとき

$$1.25\pi\rho^{0.5}\mu^{0.5}u_{\rm t}{}^{1.5}D_{\rm p}{}^{1.5} = \frac{\pi}{6} D_{\rm p}{}^3 (\rho_{\rm p} - \rho) g \quad \cdots(2.2.4)$$

$$\boxed{u_{\rm t} = \sqrt[3]{\frac{4}{225} \frac{g^2(\rho_{\rm p} - \rho)^2}{\rho\mu}} D_{\rm p}} \quad \cdots(2.2.5)$$

Newton 域($500<Re_{\rm p}$)のとき

$$0.055\pi\rho u_{\rm t}{}^2 D_{\rm p}{}^2 = \frac{\pi}{6} D_{\rm p}{}^3 (\rho_{\rm p} - \rho) g \quad \cdots(2.2.6)$$

$$\boxed{u_{\rm t} = \sqrt{\frac{3g(\rho_{\rm p} - \rho) D_{\rm p}}{\rho}}} \quad \cdots(2.2.7)$$

２．３　遠心沈降速度

粒子密度 $\rho_{\rm p}$ [kg/m^3]、粒子径 $D_{\rm p}$ [m]の固体粒子が密度 ρ [kg/m^3]、粘度 μ [Pa･s]の流体中を終末速度 $u_{\rm c}$ [m/s]

で遠心沈降するとき、流体抗力と外力(遠心力および浮力)がつり合うことから次式のように導かれる。

$$R_\mathrm{f} = \frac{\pi}{6} D_\mathrm{p}^{3} (\rho_\mathrm{p} - \rho) a_\mathrm{c} \quad \cdots(2.3.1)$$

$$R_\mathrm{f} = \frac{\pi}{6} D_\mathrm{p}^{3} (\rho_\mathrm{p} - \rho) r\omega^2 \quad \cdots(2.3.2)$$

$$R_\mathrm{f} = \frac{\pi}{6} D_\mathrm{p}^{3} (\rho_\mathrm{p} - \rho) g \frac{r\omega^2}{g} \quad \cdots(2.3.3)$$

$$R_\mathrm{f} = \frac{\pi}{6} D_\mathrm{p}^{3} (\rho_\mathrm{p} - \rho) gZ \quad \left[Z \equiv \frac{mr\omega^2}{mg} = \frac{r\omega^2}{g} \right] \quad \cdots(2.3.4)$$

ただし、a_cは遠心加速度[m]、rは遠心半径[m]、Zは遠心効果[−]、ωは角速度[rad/s]。

各領域の流体抗力 R_fを上式に代入する。

Stokes 域(Re_p<2)のとき

$$3\pi\mu u_\mathrm{c} D_\mathrm{p} = \frac{\pi}{6} D_\mathrm{p}^{3} (\rho_\mathrm{p} - \rho) gZ \quad \cdots(2.3.5)$$

$$\boxed{u_\mathrm{c} = \frac{g(\rho_\mathrm{p} - \rho) D_\mathrm{p}^{2}}{18\mu} Z} \quad (=Zu_\mathrm{t}) \quad \cdots(2.3.6)$$

Allen 域(2<Re_p<500)のとき

$$1.25\pi\rho^{0.5}\mu^{0.5} u_\mathrm{c}^{1.5} D_\mathrm{p}^{1.5} = \frac{\pi}{6} D_\mathrm{p}^{3} (\rho_\mathrm{p} - \rho) gZ \quad \cdots(2.3.7)$$

$$\boxed{u_\mathrm{c} = \sqrt[3]{\frac{4}{225} \frac{g^2 (\rho_\mathrm{p} - \rho)^2}{\rho\mu}} D_\mathrm{p} Z^{2/3}} \quad (=Z^{2/3}u_\mathrm{t}) \quad \cdots(2.3.8)$$

Newton 域(500<Re_p)のとき

$$0.055\pi\rho u_\mathrm{c}^{2} D_\mathrm{p}^{2} = \frac{\pi}{6} D_\mathrm{p}^{3} (\rho_\mathrm{p} - \rho) gZ \quad \cdots(2.3.9)$$

$$\boxed{u_\mathrm{c} = \sqrt{\frac{3g(\rho_\mathrm{p} - \rho) D_\mathrm{p}}{\rho}} Z^{1/2}} \quad (=Z^{1/2}u_\mathrm{t}) \quad \cdots(2.3.10)$$

遠心沈降速度 u_cは、Stokes 域で重力沈降速度 u_tの Z倍、Allen 域で $Z^{2/3}$倍、Newton 域で $Z^{1/2}$倍に増大する。遠心半径が r_1から $r_2(>r_1)$に変化する場合は、Zの代わりに平均遠心効果 Z_lm [−]を用いる。また、u_cを対数平均遠心速度 $u_\mathrm{c,lm}$ [m/s]に置き換える。

$$Z_\mathrm{lm} = \frac{r_\mathrm{lm}\omega^2}{g} \quad \left[r_\mathrm{lm} \equiv \frac{r_2 - r_1}{\ln(r_2/r_1)} \right] \quad \cdots(2.3.11)$$

【計算例】遠心沈降速度

遠心機(回転数 8000 rpm)の回転中心より 10.0 cm 離れた位置にある液中の固体粒子(粒子径 0.500 μm, 粒子密度 2650 kg/m^3)の①遠心効果 Z [−]と②遠心沈降速度 u_c [mm/s]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①7154, ②0.161 mm/s)

①$Z=4\pi^2 rn^2/g=(4\pi^2)(10.0\times10^{-2})(8000/60)^2/(9.81)=7154.3\fallingdotseq\boxed{7154}$

②$u_t=g(\rho_p-\rho)D_p{}^2/(18\mu)=(9.81)(2650-1000)(0.500\times10^{-6})^2/[(18)(1.00\times10^{-3})]=2.2481\times10^{-7}$ m/s Stokes 域を仮定

$Re_p=D_p u_t\rho/\mu=(0.500\times10^{-6})(2.2481\times10^{-7})(1000)/(1.00\times10^{-3})=1.1240\times10^{-7}$ (<2)　仮定は正しい

$u_c=Zu_t=(7154.3)(2.2481\times10^{-7})=1.6083\times10^{-4}$ m/s$\fallingdotseq\boxed{0.161\ \mathrm{mm/s}}$

３．遠心沈降機

３．１　分離限界粒子径

固体粒子が液体から完全に分離されるには、粒子の沈降時間(装置壁面あるいは液液界面に到達するまでの時間) t [s]が液の滞留時間(塔頂に到達するまでの時間) τ [s]よりも短ければよい($t<\tau$)。

$$t<\tau \quad \cdots(3.1.1)$$

$$\frac{X}{u_{\mathrm{c,lm}}}<\frac{V}{Q} \quad \cdots(3.1.2)$$

$$Q<u_{\mathrm{c,lm}}S_0 \quad \left[S_0\equiv\frac{V}{X}\right] \quad \cdots(3.1.3)$$

ただし、S_0 は沈降面積[m²]、$u_{\mathrm{c,lm}}$ は対数平均遠心沈降速度[m/s]、V は遠心機内の液体積[m³]、X は沈降距離[m]。(円筒型遠心機の場合は $X=r_2-r_1$(固液分離型)、$X=r_i-r_1$(液液分離型の重液滴)、$X=r_2-r_i$(液液分離型の軽液滴))

$u_{\mathrm{c,lm}}$ に含まれる粒子径 D_p が分離限界粒子径 D_{pc} であるとき、上式において等号が成り立つ。

Stokes 域(Re_p<2)のとき

$$Q=S_0 Z_{\mathrm{lm}}u_t(=u_t S) \quad \left[u_{\mathrm{c,lm}}\equiv Z_{\mathrm{lm}}u_t\right] \quad \cdots(3.1.4)$$

$$Q=S\frac{g(\rho_p-\rho)D_{pc}^2}{18\mu} \quad \left[S\equiv S_0 Z_{\mathrm{lm}},\ u_t\equiv\frac{g(\rho_p-\rho)D_{pc}^2}{18\mu}\right] \quad \cdots(3.1.5)$$

$$\boxed{D_{pc}=\sqrt{\frac{18\mu}{g(\rho_p-\rho)}\frac{Q}{S}}} \quad \text{(Stokes)} \quad \cdots(3.1.6)$$

Allen 域(2<Re_p<500)のとき

$$Q=S_0 Z_{\mathrm{lm}}{}^{2/3}u_t(=u_t S) \quad \left[u_{\mathrm{c,lm}}\equiv Z_{\mathrm{lm}}{}^{2/3}u_t\right] \quad \cdots(3.1.7)$$

$$Q=S\sqrt[3]{\frac{4}{225}\frac{g^2(\rho_p-\rho)^2}{\rho\mu}}D_{pc} \quad \left[S\equiv S_0 Z_{\mathrm{lm}}{}^{2/3},\ u_t\equiv\sqrt[3]{\frac{4}{225}\frac{g^2(\rho_p-\rho)^2}{\rho\mu}}D_{pc}\right]$$

$$\boxed{D_{pc}=\left[\frac{4}{225}\frac{g^2(\rho_p-\rho)^2}{\rho\mu}\right]^{-1/3}\frac{Q}{S}} \quad \text{(Allen)} \quad \cdots(3.1.8)$$

Newton 域($500<Re_\mathrm{p}$)のとき

$$Q=S_0\sqrt{Z_\mathrm{lm}}\,u_\mathrm{t}\,(=u_\mathrm{t}S)\qquad \left[u_\mathrm{c,lm}\equiv\sqrt{Z_\mathrm{lm}}\,u_\mathrm{t}\right]\qquad\cdots(3.1.9)$$

$$Q=S\sqrt{\frac{3g(\rho_\mathrm{p}-\rho)D_\mathrm{pc}}{\rho}}\qquad\left[S\equiv S_0Z_\mathrm{lm},u_\mathrm{t}\equiv\sqrt{\frac{3g(\rho_\mathrm{p}-\rho)D_\mathrm{pc}}{\rho}}\right]\qquad\cdots(3.1.10)$$

$$\boxed{D_\mathrm{pc}=\frac{\rho}{3g(\rho_\mathrm{p}-\rho)}\left(\frac{Q}{S}\right)^2}\quad\text{(Newton)}\qquad\cdots(3.1.11)$$

S は遠心沈降面積[m^2]であり、遠心沈降機の沈降面積 S_0 [m^2]に相当する分離性能をもつ重力沈降機の沈降面積に相当する[文献 4]。給液量 Q [m^3/s]と装置ごとの遠心沈降面積 S [m^2]を決定することで分離限界粒子径 D_pc [m]が求まる。

３．２　円筒型遠心機

3.2.1　固液分離型

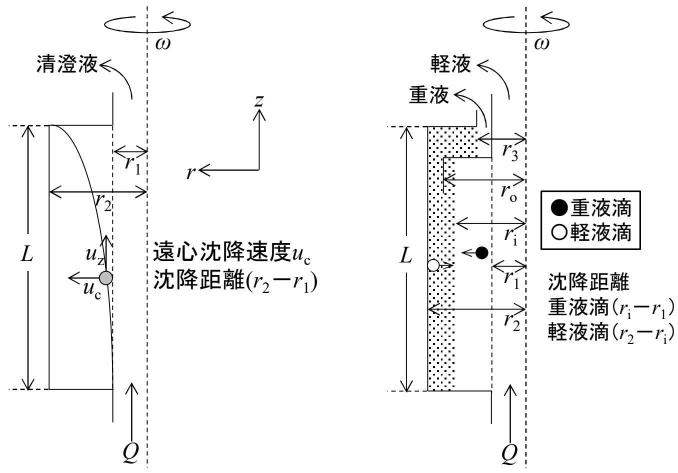
半径方向に r 軸、軸方向に z 軸をとる。

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=u_\mathrm{c}\qquad\cdots(3.2.1.1)$$

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=\frac{Q}{\pi(r_2^2-r_1^2)}\qquad\cdots(3.2.1.2)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z}=\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\Big/\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\qquad\cdots(3.2.1.3)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z}=\frac{\pi(r_2^2-r_1^2)}{Q}u_\mathrm{c}\qquad\cdots(3.2.1.4)\quad\text{粒子軌跡式}$$



（固液分離型）　　（液液分離型）

Stokes 域($Re_\mathrm{p}<2$)のとき

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z}=\frac{\pi(r_2^2-r_1^2)}{Q}Zu_\mathrm{t}\qquad\left[u_\mathrm{c}\equiv Zu_\mathrm{t}\right]\qquad\cdots(3.2.1.5)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z}=\frac{\pi(r_2^2-r_1^2)}{Q}\frac{r\omega^2}{g}u_\mathrm{t}\qquad\left[Z\equiv\frac{r\omega^2}{g}\right]\qquad\cdots(3.2.1.6)$$

$$\int_{r_1}^{r_2}\frac{\mathrm{d}r}{r}=u_\mathrm{t}\frac{\pi(r_2^2-r_1^2)\omega^2}{Qg}\int_0^L\mathrm{d}z\qquad\cdots(3.2.1.7)$$

$$Q=u_\mathrm{t}\frac{\pi L\omega^2(r_2^2-r_1^2)}{g\ln(r_2/r_1)}\qquad\cdots(3.2.1.8)$$

$$Q=u_\mathrm{t}\frac{2\pi L\omega^2}{g}\frac{r_2-r_1}{\ln(r_2/r_1)}\frac{r_2+r_1}{2}\qquad\cdots(3.2.1.9)$$

$$\boxed{Q = u_\mathrm{t}\frac{2\pi L\omega^2}{g}r_\mathrm{lm}r_\mathrm{m}} \quad \left[r_\mathrm{lm} \equiv \frac{r_2 - r_1}{\ln(r_2/r_1)}, r_\mathrm{m} \equiv \frac{r_2 + r_1}{2}\right] \quad \text{(Stokes)} \quad \cdots(3.2.1.10) \quad \text{設計方程式}$$

$$\boxed{S = \frac{2\pi L\omega^2}{g}r_\mathrm{lm}r_\mathrm{m}} \quad \left[Q = u_\mathrm{t}S, u_\mathrm{t} \equiv \frac{g(\rho_\mathrm{p} - \rho)D_\mathrm{pc}^2}{18\mu}\right] \quad \text{(Stokes)} \quad \cdots(3.2.1.11)$$

$$\boxed{S_0 = 2\pi r_\mathrm{m}L} \quad \left[S \equiv S_0 Z_\mathrm{lm}, Z_\mathrm{lm} = \frac{r_\mathrm{lm}\omega^2}{g}\right] \quad \text{(Stokes)} \quad \cdots(3.2.1.12)$$

Newton 域($500<Re_\mathrm{p}$)のとき

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z} = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{Q}\sqrt{Z}u_\mathrm{t} \quad \left[u_\mathrm{c} \equiv \sqrt{Z}u_\mathrm{t}\right] \quad \cdots(3.2.1.13)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z} = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{Q}\sqrt{\frac{r\omega^2}{g}}u_\mathrm{t} \quad \left[Z \equiv \frac{r\omega^2}{g}\right] \quad \cdots(3.2.1.14)$$

$$\int_{r_1}^{r_2} r^{-1/2}\mathrm{d}r = u_\mathrm{t}\frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)\omega}{Q\sqrt{g}}\int_0^L \mathrm{d}z \quad \cdots(3.2.1.15)$$

$$\left[\frac{r^{(-1/2)+1}}{(-1/2)+1}\right]_{r_1}^{r_2} = u_\mathrm{t}\frac{\pi L\omega(r_2^2 - r_1^2)}{Q\sqrt{g}} \quad \cdots(3.2.1.16)$$

$$\frac{\sqrt{r_2} - \sqrt{r_1}}{1/2} = u_\mathrm{t}\frac{\pi L\omega(r_2^2 - r_1^2)}{Q\sqrt{g}} \quad \cdots(3.2.1.17)$$

$$Q = u_\mathrm{t}\frac{\pi L\omega}{2\sqrt{g}}\frac{r_2^2 - r_1^2}{\sqrt{r_2} - \sqrt{r_1}} \quad \cdots(3.2.1.18)$$

$$Q = u_\mathrm{t}\frac{\pi L\omega}{2\sqrt{g}}\frac{(r_2 + r_1)(r_2 - r_1)(\sqrt{r_2} + \sqrt{r_1})}{(\sqrt{r_2} - \sqrt{r_1})(\sqrt{r_2} + \sqrt{r_1})} \quad \cdots(3.2.1.19)$$

$$Q = u_\mathrm{t}\frac{\pi L\omega}{2\sqrt{g}}\frac{(r_2 + r_1)(r_2 - r_1)(\sqrt{r_2} + \sqrt{r_1})}{r_2 - r_1} \quad \cdots(3.2.1.20)$$

$$Q = 4u_\mathrm{t}\frac{\pi L\omega}{2\sqrt{g}}\frac{r_2 + r_1}{2}\frac{\sqrt{r_2} + \sqrt{r_1}}{2} \quad \cdots(3.2.1.21)$$

$$\boxed{Q = u_\mathrm{t}\frac{2\pi L\omega}{\sqrt{g}}r_\mathrm{m}(\sqrt{r})_\mathrm{m}} \quad \left[r_\mathrm{m} \equiv \frac{r_2 + r_1}{2}, (\sqrt{r})_\mathrm{m} \equiv \frac{\sqrt{r_2} + \sqrt{r_1}}{2}\right] \quad \text{(Newton)} \quad \cdots(3.2.1.22) \quad \text{設計方程式}$$

$$\boxed{S = \frac{2\pi L\omega}{\sqrt{g}}r_\mathrm{m}(\sqrt{r})_\mathrm{m}} \quad \left[Q = u_\mathrm{t}S, u_\mathrm{t} \equiv \sqrt{\frac{3g(\rho_\mathrm{p} - \rho)D_\mathrm{pc}}{\rho}}\right] \quad \text{(Newton)} \quad \cdots(3.2.1.23)$$

$$S = 2\pi r_{\mathrm{m}} L \left(\frac{r_{\mathrm{lm}}\omega^2}{g} \right)^{1/2} \quad \cdots(3.2.1.24)$$

$$S = 2\pi r_{\mathrm{m}} L \left(\frac{r_{\mathrm{lm}}\omega^2}{g} \right)^{1/2} \left(\frac{r_{\mathrm{lm}}\omega^2}{g} \right)^{1/6} \left(\frac{r_{\mathrm{lm}}\omega^2}{g} \right)^{-1/6} \quad \cdots(3.2.1.25)$$

$$S = \frac{2\pi r_{\mathrm{m}}{}^{5/6} L g^{1/6}}{\omega^{1/3}} Z_{\mathrm{lm}}{}^{2/3} \quad \cdots(3.2.1.26)$$

$$\boxed{S_0 = \frac{2\pi r_{\mathrm{m}}{}^{5/6} L g^{1/6}}{\omega^{1/3}}} \quad \left[S \equiv S_0 Z_{\mathrm{lm}}{}^{2/3}, Z_{\mathrm{lm}} = \frac{r_{\mathrm{lm}}\omega^2}{g} \right] \quad (\mathrm{Newton}) \quad \cdots(3.2.1.27)$$

ただし、L は装置長[m]、Q は給液量[m^3/s]、r_1 は円筒内半径[m]、r_2 は円筒外半径[m]、S は遠心沈降面積[m^2]。分離限界粒子径よりも小さい固体粒子は、液とともに装置外へ流出する（分離できていない）。

【計算例】円筒型遠心機（固液分離）

固体粒子（粒子密度 2650 kg/m^3）を含む希薄懸濁液を円筒型遠心機（r_1=30.0 mm, r_2=40.0 mm, L=700 mm）により給液量 30.0 L/min、回転数 12000 rpm で固液分離する場合の①遠心沈降面積 S [m^2]と②分離限界粒子径 D_{pc} [μm]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①861 m^2, ②0.803 μm)

①$r_{\mathrm{lm}}=(r_2-r_1)/\ln(r_2/r_1)=(40.0-30.0)/\ln(40.0/30.0)=34.760$ mm

$r_{\mathrm{m}}=(r_2+r_1)/2=(40.0+30.0)/2=35.0$ mm

$\omega=2\pi n=(2\pi)(12000/60)=400\pi$ rad/s

$S=(2\pi L\omega^2/g)(r_{\mathrm{lm}})(r_{\mathrm{m}})$　Stokes 域を仮定

$=[(2\pi)(700/1000)(400\pi)^2/(9.81)](34.760/1000)(35.0/1000)=861.34\ \mathrm{m}^2 \fallingdotseq \boxed{861\ \mathrm{m}^2}$

②$D_{\mathrm{pc}}=[(18)(\mu/g)(Q/S)/(\rho_{\mathrm{p}}-\rho)]^{0.5}$　Stokes 域を仮定

$=[(18)(1.00\times10^{-3}/9.81)\{(30\times10^{-3}/60)/(861.34)\}/(2650-1000)]^{0.5}=8.0344\times10^{-7}\ \mathrm{m} \fallingdotseq \boxed{0.803\ \mu\mathrm{m}}$

$u_{\mathrm{t}}=g(\rho_{\mathrm{p}}-\rho)D_{\mathrm{pc}}{}^2/(18\mu)=(9.81)(2650-1000)(8.0344\times10^{-7})^2/[(18)(1.00\times10^{-3})]=5.8048\times10^{-7}$ m/s

$Re_{\mathrm{p}}=D_{\mathrm{pc}}u_{\mathrm{t}}\rho/\mu=(8.0344\times10^{-7})(5.8048\times10^{-7})(1000)/(1.00\times10^{-3})=4.6638\times10^{-7}$ (<2)　仮定は正しい

3.2.2　液液分離型［文献 4-8］

油水分離などに用いられる。密度の大きい側が重液(密度 ρ_{H})、小さい側が軽液(密度 ρ_{L})となる。軽液中の重液滴は自由表面位置 $r=r_1$ から静的界面位置 $r=r_{\mathrm{i}}$ までを沈降する。一方、重液中の軽液滴は側面壁位置 $r=r_2$ から静的界面位置 $r=r_{\mathrm{i}}$ までを沈降する。軽液滴が重液滴に対して反対方向（回転中心方向）に移動することは、次のようにして理解できる。すなわち、運動方程式から導かれる軽液滴の終末速度 u_{t} 式の密度差が$(\rho_{\mathrm{L}}-\rho_{\mathrm{H}})$となることから（軽液滴に作用する重力と浮力の差に相当）、u_{t} 自身は負であり、したがって軽液滴に対する半径方向の移動速度 $\mathrm{d}r/\mathrm{d}t=u_{\mathrm{c}}(=Zu_{\mathrm{t}}$, stokes 域)も負となる（$\mathrm{d}r/\mathrm{d}t=-u_{\mathrm{c}}$ と置く場合は、$-u_{\mathrm{c}}=Zu_{\mathrm{t}}$）。

静的界面位置 r_{i} を導く。円筒型遠心機の場合、回転する軽液と重液が静的界面に及ぼす液圧は等しいことから次式のように導かれる。

$$\frac{\rho_L \omega^2}{2}(r_i^2 - r_1^2) = \frac{\rho_H \omega^2}{2}(r_i^2 - r_3^2) \quad \cdots(3.2.2.1)$$

$$\rho_L (r_i^2 - r_1^2) = \rho_H (r_i^2 - r_3^2) \quad \cdots(3.2.2.2)$$

$$(\rho_H - \rho_L) r_i^2 = \rho_H r_3^2 - \rho_L r_1^2 \quad \cdots(3.2.2.3)$$

$$\boxed{r_i = \sqrt{\frac{\rho_H r_3^2 - \rho_L r_1^2}{\rho_H - \rho_L}}} \quad \cdots(3.2.2.4)$$

静的界面とは給液が停止されている遠心場において生成される界面のことであり、給液中に生成する動的界面とは区別される[文献 4]。厳密には動的界面半径 r_{id} を用いるが、運転条件によって界面位置が不安定化しやすい。円筒型遠心機の場合は、重液側と軽液側の圧力損失がほぼ等しくなることから、動的界面半径は静的界面半径とほぼ等しくなることが知られている。[文献 9]

重液と軽液の給液量 Q_H および Q_L [m^3/s]は、全給液量 Q [m^3/s]が重液と軽液の給液量の和で表されることから、次式のように導かれる。

$$Q = Q_H + Q_L \quad \cdots(3.2.2.5)$$

$$\boxed{Q_L = \phi Q_H} \quad \left[\phi \equiv \frac{Q_L}{Q_H} = \frac{V_L}{V_H}\right] \quad \cdots(3.2.2.6)$$

$$Q = Q_H + \phi Q_H \quad \cdots(3.2.2.7)$$

$$\boxed{Q_H = \frac{Q}{1+\phi}} \quad \cdots(3.2.2.8)$$

ただし、ϕは軽液と重液の体積比[−]。

Stokes 域(Re_p<2)のとき

$$\text{（軽液相）} \quad Q_L = u_t \frac{2\pi L \omega^2}{g} r_{lm} r_m \quad \left[u_t \equiv \frac{g(\rho_H - \rho_L) D_{pc,H}^2}{18\mu_L}, r_{lm} \equiv \frac{r_i - r_1}{\ln(r_i / r_1)}, r_m \equiv \frac{r_i + r_1}{2}\right] \quad \cdots(3.2.2.9)$$

$$S = \frac{2\pi L \omega^2}{g} r_{lm} r_m \quad [Q = u_t S] \quad \text{(Stokes)} \quad \cdots(3.2.2.10)$$

$$\text{（重液相）} \quad Q_H = (-u_t) \frac{2\pi L \omega^2}{g} (-r_{lm}) r_m \left[(-u_t) \equiv -\frac{g(\rho_L - \rho_H) D_{pc,L}^2}{18\mu_H}, (-r_{lm}) \equiv -\frac{r_2 - r_i}{\ln(r_i / r_2)}, r_m \equiv \frac{r_2 + r_i}{2}\right] \cdots(3.2.2.11)$$

$$S = \frac{2\pi L \omega^2}{g} (-r_{lm}) r_m \quad [Q = (-u_t) S] \quad \text{(Stokes)} \quad \cdots(3.2.2.12)$$

重液相の場合、重液中を移動する軽液滴に対する運動方程式より u_t 式中の密度差は(ρ_L−ρ_H)となり(軽液滴に作用する重力と浮力の差に相当)、u_t 自身は負となる。粒子軌跡式 dr/dz の積分区間が z=0〜L のとき r=r_2(側壁)〜r_i(界面)に変更されるため r_{lm} 式の分母は ln(r_i/r_2)となり(r_1<r_2)、r_{lm} 自身は負となる。S 値を正にするため r_{lm} に負号を付した。また、Q_H 値を正にするため u_t に負号を付した(r_{lm} に付した負号を消去するための負号)。

【計算例】円筒型遠心機（液液分離）

60.0 vol%の油（密度 800 kg/m^3、粘度 1.60 mPa･s）と 40.0 vol%の水（密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s）からなる乳化液を円筒型遠心機（r_1=35.0 mm, r_2=60.0 mm, r_3=40.0 mm, L=1200 mm）により全給液量 1.80 m^3/h、回転数 12000 rpm で除去する場合の①油相側の遠心沈降面積 S [m^2]、②水滴の分離限界粒子径 $D_{\mathrm{pc,H}}$ [μm]、③水相側の遠心沈降面積 S [m^2]、④油滴の分離限界粒子径 $D_{\mathrm{pc,L}}$ [μm]を求めよ。重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①2451 m^2, ②1.34 μm, ③4058 m^2, ④0.672 μm)

①$r_\mathrm{i}=[(\rho_\mathrm{H}r_3{}^2-\rho_\mathrm{L}r_1{}^2)/(\rho_\mathrm{H}-\rho_\mathrm{L})]^{0.5}=[\{(1000)(40.0)^2-(800)(35.0)^2\}/(1000-800)]^{0.5}=55.677$ mm

$r_\mathrm{lm}=(r_\mathrm{i}-r_1)/\ln(r_\mathrm{i}/r_1)=(55.677-35.0)/\ln(55.677/35.0)=44.541$ mm

$r_\mathrm{m}=(r_\mathrm{i}+r_1)/2=(55.677+35.0)/2=45.338$ mm

$\omega=2\pi n=(2\pi)(12000/60)=400\pi$ rad/s

$S=(2\pi L\omega^2/g)(r_\mathrm{lm})(r_\mathrm{m})$　Stokes 域を仮定

$=[(2\pi)(1200/1000)(400\pi)^2/(9.81)](44.541/1000)(45.338/1000)=2450.9\ \mathrm{m}^2 \fallingdotseq \boxed{2451\ \mathrm{m}^2}$

②$\phi=V_\mathrm{L}/V_\mathrm{H}=(100-40.0)/40.0=1.50$

$Q_\mathrm{H}=Q/(1+\phi)=1.80/(1+1.50)=0.720$ m^3/h

$Q_\mathrm{L}=\phi Q_\mathrm{H}=(1.50)(0.720)=1.08$ m^3/h

$D_\mathrm{pc,H}=[(18)(\mu_\mathrm{L}/g)(Q_\mathrm{L}/S)/(\rho_\mathrm{H}-\rho_\mathrm{L})]^{0.5}$ Stokes 域を仮定

$=[(18)(1.60\times10^{-3}/9.81)\{(1.08/3600)/(2450.9)\}/(1000-800)]^{0.5}=1.3404\times10^{-6}\ \mathrm{m}\fallingdotseq\boxed{1.34\ \mu\mathrm{m}}$

$u_\mathrm{t}=g(\rho_\mathrm{H}-\rho_\mathrm{L})D_\mathrm{pc,H}{}^2/(18\mu_\mathrm{L})=(9.81)(1000-800)(1.3404\times10^{-6})^2/[(18)(1.60\times10^{-3})]=1.2239\times10^{-7}$ m/s

$Re_\mathrm{p}=D_\mathrm{pc,H}u_\mathrm{t}\rho_\mathrm{L}/\mu_\mathrm{L}=(1.3404\times10^{-6})(1.2239\times10^{-7})(800)/(1.60\times10^{-3})=8.2025\times10^{-8}$ (<2)　仮定は正しい

③$(-r_\mathrm{lm})=-(r_2-r_\mathrm{i})/\ln(r_\mathrm{i}/r_2)=-(60.0-55.677)/\ln(55.677/60.0)=57.811$ mm

$r_\mathrm{m}=(r_2+r_\mathrm{i})/2=(60.0+55.677)/2=57.838$ mm

$\omega=2\pi n=(2\pi)(12000/60)=400\pi$ rad/s

$S=(2\pi L\omega^2/g)(-r_\mathrm{lm})(r_\mathrm{m})$　Stokes 域を仮定

$=[(2\pi)(1200/1000)(400\pi)^2/(9.81)](57.811/1000)(57.838/1000)=4058.2\ \mathrm{m}^2\fallingdotseq\boxed{4058\ \mathrm{m}^2}$

④$D_\mathrm{pc,L}=[-(18)(\mu_\mathrm{H}/g)(Q_\mathrm{H}/S)/(\rho_\mathrm{L}-\rho_\mathrm{H})]^{0.5}$ Stokes 域を仮定

$=[-(18)(1.00\times10^{-3}/9.81)\{(0.720/3600)/(4058.2)\}/(800-1000)]^{0.5}=6.7241\times10^{-7}\ \mathrm{m}\fallingdotseq\boxed{0.672\ \mu\mathrm{m}}$

$(-u_\mathrm{t})=-g(\rho_\mathrm{L}-\rho_\mathrm{H})D_\mathrm{pc,L}{}^2/(18\mu_\mathrm{H})=-(9.81)(800-1000)(6.7241\times10^{-7})^2/[(18)(1.00\times10^{-3})]=4.9282\times10^{-8}$ m/s

$Re_\mathrm{p}=D_\mathrm{pc,L}(-u_\mathrm{t})\rho_\mathrm{H}/\mu_\mathrm{H}=(6.7241\times10^{-7})(4.9282\times10^{-8})(1000)/(1.00\times10^{-3})=3.3137\times10^{-8}$ (<2)　仮定は正しい

３．３　分離板型遠心機[文献 1-3, 10]

分散板に対して平行方向に x 軸、垂直方向に y 軸をとる。分離板の半頂角 θ [rad]、液流速 υ [m/s]、遠心沈降速度 u_c [m/s]とする。

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=u_\mathrm{c}\sin\theta-\upsilon\quad\cdots(3.3.1.1)$$

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=u_\mathrm{c}\cos\theta\quad\cdots(3.3.1.2)$$

半径基準の粒子軌跡式は、以下のように導かれる。

$r = x\sin\theta + y\cos\theta \quad \cdots(3.3.1.3)$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = \sin\theta\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} + \cos\theta\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} \quad \cdots(3.3.1.4)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = \sin\theta(u_\mathrm{c}\sin\theta - \upsilon) + \cos\theta(u_\mathrm{c}\cos\theta) \quad \cdots(3.3.1.5)$$

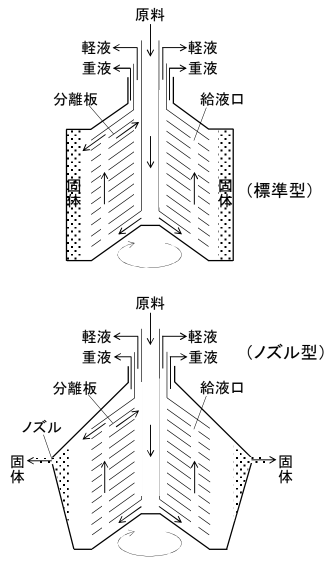
$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = u_\mathrm{c}\sin^2\theta - \upsilon\sin\theta + u_\mathrm{c}\cos^2\theta \quad \cdots(3.3.1.6)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = u_\mathrm{c} - \upsilon\sin\theta \quad \left[\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1\right] \quad \cdots(3.3.1.7)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}y} = \frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\cdot\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}y} = \frac{u_\mathrm{c} - \upsilon\sin\theta}{u_\mathrm{c}\cos\theta} \quad \cdots(3.3.1.8)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}y} = -\frac{\upsilon}{u_\mathrm{c}}\tan\theta + \frac{1}{\cos\theta} \quad \cdots(3.3.1.9)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}y} \approx -\frac{\upsilon}{u_\mathrm{c}}\tan\theta \quad \cdots(3.3.1.10) \quad \text{粒子軌跡式}$$



上の近似式について、供給口より飛び出した粒子が分離板上に捕集されるには、半径の減少速度としての dr/dt(<0)はなるべく小さく、かつ位置 y の増加速度としての dy/dt(>0)はなるべく大きい方が望ましい。したがって、dr/dt と 1/(dy/dt)の積からなる dr/dy は、なるべく小さい方が望ましい。半頂角 θ は鋭角であり、上式の 1/cosθ は正の値をとることから、この項を無視する方が設計上安全である。

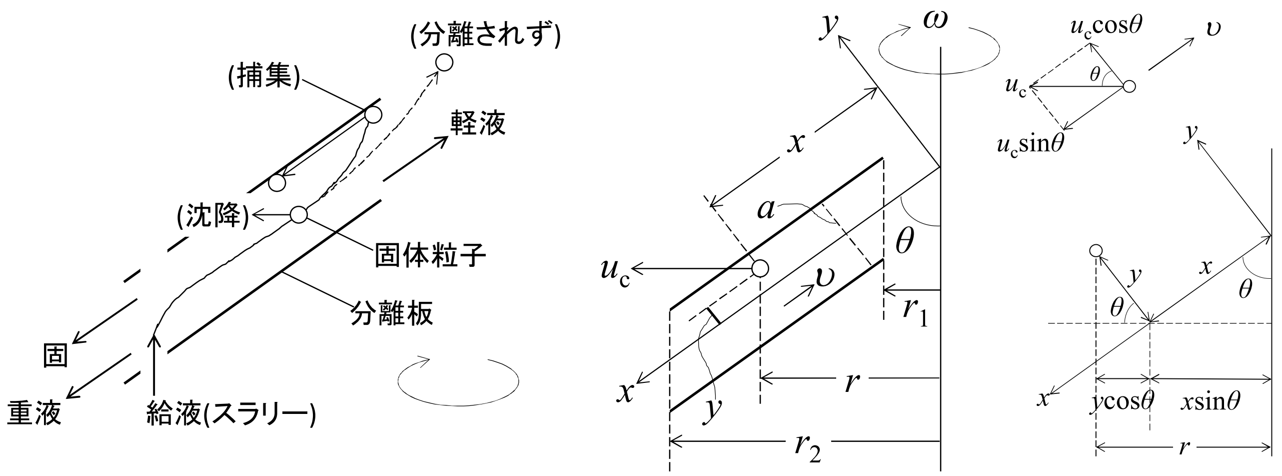


図 3. 3. 1　分離板型遠心分離の原理と粒子軌跡の解析

分離板間隙を流れる液流速υ [m/s]は、全流量 Q を間隙数 N で等分した流量 Q/N [m^3/s]と分離板間隙の平均断面積 S_av [m^2]の比で表される。

$$\upsilon = \frac{Q/N}{S_\mathrm{av}} \quad \cdots(3.3.1.11)$$

間隙の平均断面積 S_av は、上部の分離板の周長 $r+\Delta r/2$ を基準にした断面積と下部の分離板の周長 $r-\Delta r/2$

を基準にした断面積の算術平均をとることで導かれる。

$$S_{\mathrm{av}}=\frac{S_{r+\Delta r/2}+S_{r-\Delta r/2}}{2}\quad\cdots(3.3.1.12)$$

$$S_{\mathrm{av}}=\frac{2\pi(r+\Delta r/2)a+2\pi(r-\Delta r/2)a}{2}\quad\cdots(3.3.1.13)$$

$$S_{\mathrm{av}}=2\pi ra\quad\cdots(3.3.1.14)$$

υの式に代入する。

$$\upsilon=\frac{Q}{2\pi raN}\quad\cdots(3.3.1.15)$$

粒子軌跡 dr/dy の式に代入する。

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}y}=-\frac{Q\tan\theta}{2\pi raNu_{\mathrm{c}}}\quad\left[\upsilon\equiv\frac{Q}{2\pi raN}\right]\quad\cdots(3.3.1.16)\quad\text{粒子軌跡式}$$

分離限界の粒子は、$y=-a/2$, $r=r_2$ の位置より分離板の間隙に流入し、$y=+a/2$, $r=r_1$ の位置で捕集される粒子であることから、この積分区間で積分する。

Stokes 域(Re_{p}<2)のとき

$$\int_{r_2}^{r_1}Zu_{\mathrm{t}}r\mathrm{d}r=-\frac{Q\tan\theta}{2\pi aN}\int_{-a/2}^{+a/2}\mathrm{d}y\quad\left[u_{\mathrm{c}}=Zu_{\mathrm{t}}\right]\quad\cdots(3.3.1.17)$$

$$\int_{r_2}^{r_1}u_{\mathrm{t}}\frac{r^2\omega^2}{g}\mathrm{d}r=-\frac{Q\tan\theta}{2\pi N}\quad\left[Z=\frac{r\omega^2}{g}\right]\quad\cdots(3.3.1.18)$$

$$\frac{u_{\mathrm{t}}\omega^2}{g}\left(\frac{r_1^3}{3}-\frac{r_2^3}{3}\right)=-\frac{Q\tan\theta}{2\pi N}\quad\cdots(3.3.1.19)$$

$$\boxed{Q=\frac{2\pi N\omega^2(r_2^3-r_1^3)}{3g\tan\theta}u_{\mathrm{t}}}\quad(\text{Stokes})\quad\cdots(3.3.1.20)\quad\text{設計方程式}$$

$$\boxed{S=\frac{2\pi N\omega^2(r_2^3-r_1^3)}{3g\tan\theta}}\quad\left[Q=u_{\mathrm{t}}S,u_{\mathrm{t}}\equiv\frac{g(\rho_{\mathrm{p}}-\rho)D_{\mathrm{pc}}^2}{18\mu}\right]\quad(\text{Stokes})\quad\cdots(3.3.1.21)$$

Newton 域(500<Re_{p})のとき

$$\int_{r_2}^{r_1}\sqrt{Z}u_{\mathrm{t}}r\mathrm{d}r=-\frac{Q\tan\theta}{2\pi aN}\int_{-a/2}^{+a/2}\mathrm{d}y\quad\left[u_{\mathrm{c}}=\sqrt{Z}u_{\mathrm{t}}\right]\quad\cdots(3.3.1.22)$$

$$\int_{r_2}^{r_1}\sqrt{\frac{r\omega^2}{g}}u_{\mathrm{t}}r\mathrm{d}r=-\frac{Q\tan\theta}{2\pi N}\quad\left[Z=\frac{r\omega^2}{g}\right]\quad\cdots(3.3.1.23)$$

$$\frac{\omega}{\sqrt{g}}u_{\mathrm{t}}\int_{r_2}^{r_1}r^{1.5}\mathrm{d}r=-\frac{Q\tan\theta}{2\pi N}\quad\cdots(3.3.1.24)$$

$$\frac{\omega}{\sqrt{g}}u_{\mathrm{t}}\left(\frac{r_1^{2.5}}{2.5}-\frac{r_2^{2.5}}{2.5}\right)=-\frac{Q\tan\theta}{2\pi N}\quad\cdots(3.3.1.25)$$

$$\boxed{Q=\frac{2\pi N\omega(r_2^{2.5}-r_1^{2.5})}{5\sqrt{g}\tan\theta}u_{\mathrm{t}}}\quad(\text{Newton})\quad\cdots(3.3.1.26)\quad\text{設計方程式}$$

$$\boxed{S=\frac{2\pi N\omega(r_2^{2.5}-r_1^{2.5})}{5\sqrt{g}\tan\theta}}\quad\left[Q=u_\mathrm{t}S, u_\mathrm{t}\equiv\sqrt{\frac{3g(\rho_\mathrm{p}-\rho)D_\mathrm{pc}}{\rho}}\right]\quad\text{(Newton)}\quad\cdots(3.3.1.27)$$

遠心機本体(ボウル)の最適直径 D_B [m]は、次式で与えられる。[文献 11, 12]

$$D_\mathrm{B}=\frac{8}{3}\left(\frac{r_2^3-r_1^3}{r_2^2}\right)\quad\cdots(3.3.3.1)$$

ただし、r_1 は分離板内径[m]、r_2 は分離板外径[m]。

【計算例】分離板型遠心機

固体粒子(粒子密度 2650 kg/m^3)を含む希薄懸濁液を分離板型遠心機(r_1=40.0 mm, r_2=160 mm, θ=30°, N=20)により給液量 180 L/min、回転数 3000 rpm で固液分離する場合の①遠心機直径 D_B [mm]、②遠心沈降面積 S [m^2]、③分離限界粒子径 D_pc [μm]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①420 mm, ②2943 m^2, ③1.06 μm)

①D_B=(8/3)[(r_2^3－r_1^3)/r_2^2]=(8/3)[(160/1000)^3－(40.0/1000)^3]/(160/1000)^2=0.420 m=$\boxed{\text{420 mm}}$

②ω=2πn=(2π)(3000/60)=100π rad/s

S=2π$N\omega^2$(r_2^3－r_1^3)/(3gtanθ)　Stokes 域を仮定

=(2π)(20)(100π)^2[(160/1000)^3－(40.0/1000)^3]/[(3)(9.81)(tan30°)]=2943.0 m^2≒$\boxed{\text{2943 m}^2}$

③D_pc=[(18)(μ/g)(Q/S)/(ρ_p－ρ)]$^{0.5}$　Stokes 域を仮定

=[(18)(1.00×10^{-3}/9.81){(180×10^{-3}/60)/(2943.0)}/(2650－1000)]$^{0.5}$=1.0646×10^{-6} m≒$\boxed{\text{1.06 μm}}$

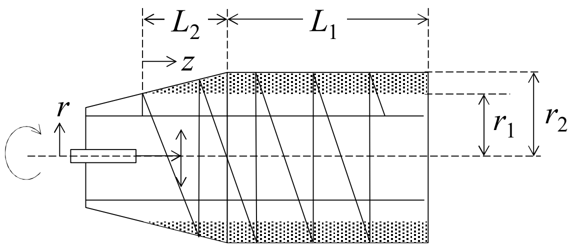
u_t=g(ρ_p－ρ)D_pc^2/(18μ)=(9.81)(2650－1000)(1.0646×10^{-6})^2/[(18)(1.00×10^{-3})]=1.0191×10^{-6} m/s

Re_p=$D_\mathrm{pc}u_\mathrm{t}\rho$/$\mu$=(1.0646×10^{-6})(1.0191×10^{-6})(1000)/(1.00×10^{-3})=1.0849×10^{-6} (<2)　仮定は正しい

３．４　デカンタ型遠心機[文献 1, 3]

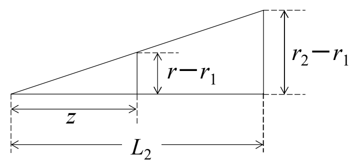
遠心沈降面積 S [m^2]は、円筒部と円錐部の和からなる。円筒部の沈降面積 S_1 [m^2]は、円筒型遠心機の式を用いる。以下、円錐部の遠心沈降面積 S_2 [m^2]を導く。

半径方向に r 軸、軸方向に z 軸をとる。



$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=u_\mathrm{c}\quad\cdots(3.4.1)$$

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=\frac{Q}{\pi\left[(r_2-r_1)\dfrac{z}{L}+r_1\right]^2-\pi r_1^2}\quad\cdots(3.4.2)$$



$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=\frac{Q}{\pi\left[\left(\dfrac{r_2-r_1}{L_2}\right)^2z^2+2r_1\left(\dfrac{r_2-r_1}{L_2}\right)z+r_1^2\right]-\pi r_1^2}\quad\cdots(3.4.3)$$

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=\frac{Q}{\pi m(mz^2+2r_1z)}\quad\left[m\equiv\frac{r_2-r_1}{L_2}\right]\quad\cdots(3.4.4)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z} = \frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \Big/ \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} \quad \cdots(3.4.5)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z} = \frac{\pi m(mz^2 + 2r_1 z)}{Q} u_\mathrm{c} \quad \cdots(3.4.6) \quad \text{粒子軌跡}$$

Stokes 域(Re_p<2)のとき

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z} = \frac{\pi m(mz^2 + 2r_1 z)}{Q} Z u_\mathrm{t} \quad [u_\mathrm{c} = Z u_\mathrm{t}] \quad \cdots(3.4.7)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z} = \frac{\pi m(mz^2 + 2r_1 z)}{Q} \frac{r\omega^2}{g} u_\mathrm{t} \quad \left[Z = \frac{r\omega^2}{g}\right] \quad \cdots(3.4.8)$$

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\mathrm{d}r}{r} = \frac{\pi\omega^2 m}{Qg} u_\mathrm{t} \int_0^{L_2} (mz^2 + 2r_1 z)\mathrm{d}z \quad \cdots(3.4.9)$$

$$\ln\frac{r_2}{r_1} = \frac{\pi\omega^2 m}{Qg} \left[\frac{mz^3}{3} + \frac{2r_1 z^2}{2}\right]_0^{L_2} u_\mathrm{t} \quad \cdots(3.4.10)$$

$$Q = \frac{\pi\omega^2}{g\ln(r_2/r_1)} m\left(\frac{mL_2{}^3}{3} + r_1 L_2{}^2\right) u_\mathrm{t} \quad \cdots(3.4.11)$$

$$Q = \frac{\pi\omega^2}{g\ln(r_2/r_1)} \frac{r_2 - r_1}{L_2}\left[\frac{r_2 - r_1}{L_2}\left(\frac{L_2{}^3}{3}\right) + r_1 L_2{}^2\right] u_\mathrm{t} \quad \left[m \equiv \frac{r_2 - r_1}{L_2}\right] \quad \cdots(3.4.12)$$

$$Q = \frac{\pi\omega^2}{g\ln(r_2/r_1)} \frac{r_2 - r_1}{L_2}\left(\frac{r_2 - r_1}{3} L_2{}^2 + r_1 L_2{}^2\right) u_\mathrm{t} \quad \cdots(3.4.13)$$

$$Q = \frac{\pi\omega^2}{g\ln(r_2/r_1)} (r_2 - r_1)\left(\frac{r_2 + 2r_1}{3} L_2\right) u_\mathrm{t} \quad \cdots(3.4.14)$$

$$Q = \frac{\pi L_2\omega^2}{3g\ln(r_2/r_1)} (r_2 - r_1)(r_2 + 2r_1) u_\mathrm{t} \quad \cdots(3.4.15)$$

$$Q = \frac{\pi L_2\omega^2}{3g} (r_2 + 2r_1) r_\mathrm{lm} u_\mathrm{t} \quad \left[r_\mathrm{lm} \equiv \frac{r_2 - r_1}{\ln(r_2/r_1)}\right] \quad \text{(Stokes)} \quad \cdots(3.4.16)$$

$$\boxed{S_2 = \frac{\pi L_2\omega^2}{3g} (r_2 + 2r_1) r_\mathrm{lm}} \quad \left[Q = u_\mathrm{t} S_2, u_\mathrm{t} \equiv \frac{g(\rho_\mathrm{p} - \rho)D_\mathrm{pc}^2}{18\mu}\right] \quad \text{(Stokes)} \quad \cdots(3.4.17)$$

Newton 域(500<Re_p)のとき

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z} = \frac{\pi m(mz^2 + 2r_1 z)}{Q} \sqrt{Z} u_\mathrm{t} \quad [u_\mathrm{c} = \sqrt{Z} u_\mathrm{t}] \quad \cdots(3.4.18)$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z} = \frac{\pi m(mz^2 + 2r_1 z)}{Q} \sqrt{\frac{r\omega^2}{g}} u_\mathrm{t} \quad \left[Z = \frac{r\omega^2}{g}\right] \quad \cdots(3.4.19)$$

$$\int_{r_1}^{r_2} r^{-1/2}\mathrm{d}r = \frac{\pi\omega m}{Q\sqrt{g}} u_\mathrm{t} \int_0^{L_2} (mz^2 + 2r_1 z)\mathrm{d}z \quad \cdots(3.4.20)$$

$$\left[\frac{r^{(-1/2)+1}}{(-1/2)+1}\right]_{r_1}^{r_2}=\frac{\pi\omega m}{Q\sqrt{g}}\left[\frac{mz^3}{3}+\frac{2r_1z^2}{2}\right]_0^{L_2}u_\mathrm{t}\quad\cdots(3.4.21)$$

$$\frac{\sqrt{r_2}-\sqrt{r_1}}{1/2}=\frac{\pi\omega}{Q\sqrt{g}}m\left(\frac{mL_2{}^3}{3}+r_1L_2{}^2\right)u_\mathrm{t}\quad\cdots(3.4.22)$$

$$Q=\frac{\pi\omega}{2\sqrt{g}(\sqrt{r_2}-\sqrt{r_1})}\frac{r_2-r_1}{L_2}\left[\frac{r_2-r_1}{L_2}\left(\frac{L_2{}^3}{3}\right)+r_1L_2{}^2\right]u_\mathrm{t}\quad\left[m\equiv\frac{r_2-r_1}{L_2}\right]\quad\cdots(3.4.23)$$

$$Q=\frac{\pi\omega}{2\sqrt{g}(\sqrt{r_2}-\sqrt{r_1})}(r_2-r_1)\left(\frac{r_2+2r_1}{3}L_2\right)u_\mathrm{t}\quad\cdots(3.4.24)$$

$$Q=\frac{\pi L_2\omega}{6\sqrt{g}}\frac{(r_2-r_1)(r_2+2r_1)}{\sqrt{r_2}-\sqrt{r_1}}u_\mathrm{t}\quad\cdots(3.4.25)$$

$$Q=\frac{\pi L_2\omega}{6\sqrt{g}}\frac{(r_2-r_1)(r_2+2r_1)(\sqrt{r_2}+\sqrt{r_1})}{(\sqrt{r_2}-\sqrt{r_1})(\sqrt{r_2}+\sqrt{r_1})}u_\mathrm{t}\quad\cdots(3.4.26)$$

$$Q=\frac{\pi L_2\omega}{6\sqrt{g}}\frac{(r_2-r_1)(r_2+2r_1)(\sqrt{r_2}+\sqrt{r_1})}{r_2-r_1}u_\mathrm{t}\quad\cdots(3.4.27)$$

$$Q=\frac{2\pi L_2\omega}{6\sqrt{g}}(r_2+2r_1)\frac{\sqrt{r_2}+\sqrt{r_1}}{2}u_\mathrm{t}\quad\cdots(3.4.28)$$

$$Q=\frac{\pi L_2\omega}{3\sqrt{g}}(r_2+2r_1)(\sqrt{r})_\mathrm{m}u_\mathrm{t}\quad\left[(\sqrt{r})_\mathrm{m}\equiv\frac{\sqrt{r_2}+\sqrt{r_1}}{2}\right]\quad\text{(Newton)}\quad\cdots(3.4.29)$$

$$\boxed{S_2=\frac{\pi L_2\omega}{3\sqrt{g}}(r_2+2r_1)(\sqrt{r})_\mathrm{m}}\quad\left[Q=u_\mathrm{t}S_2,u_\mathrm{t}\equiv\sqrt{\frac{3g(\rho_\mathrm{p}-\rho)D_\mathrm{pc}}{\rho}}\right]\quad\text{(Newton)}\quad\cdots(3.4.30)$$

円筒部と円錐部の遠心沈降面積の和をとる。

$$Q=\left[\frac{2\pi L_1\omega^2}{g}r_\mathrm{lm}r_\mathrm{m}+\frac{\pi L_2\omega^2}{3g}(r_2+2r_1)r_\mathrm{lm}\right]u_\mathrm{t}\quad\left[r_\mathrm{lm}\equiv\frac{r_2-r_1}{\ln(r_2/r_1)},r_\mathrm{m}\equiv\frac{r_2+r_1}{2}\right]\quad\text{(Stokes)}\quad\cdots(3.4.31)$$ 設計方程式

$$S=\frac{2\pi L_1\omega^2}{g}r_\mathrm{lm}r_\mathrm{m}+\frac{\pi L_2\omega^2}{3g}(r_2+2r_1)r_\mathrm{lm}\quad\left[Q=u_\mathrm{t}S,u_\mathrm{t}\equiv\frac{g(\rho_\mathrm{p}-\rho)D_\mathrm{pc}^2}{18\mu}\right]\quad\text{(Stokes)}\quad\cdots(3.4.32)$$

$$Q=\left[\frac{2\pi L_1\omega}{\sqrt{g}}r_\mathrm{m}(\sqrt{r})_\mathrm{m}+\frac{\pi L_2\omega}{3\sqrt{g}}(r_2+2r_1)(\sqrt{r})_\mathrm{m}\right]u_\mathrm{t}\quad\left[(\sqrt{r})_\mathrm{m}\equiv\frac{\sqrt{r_2}+\sqrt{r_1}}{2}\right]\quad\text{(Newton)}\quad\cdots(3.4.33)$$ 設計方程式

$$S=\frac{2\pi L_1\omega}{\sqrt{g}}r_{\mathrm{m}}(\sqrt{r})_{\mathrm{m}}+\frac{\pi L_2\omega}{3\sqrt{g}}(r_2+2r_1)(\sqrt{r})_{\mathrm{m}}\quad\left[Q=u_{\mathrm{t}}S,u_{\mathrm{t}}\equiv\sqrt{\frac{3g(\rho_{\mathrm{p}}-\rho)D_{\mathrm{pc}}}{\rho}}\right]\ \text{(Newton)}\quad\cdots(3.4.34)$$

L_1 は円筒部分の装置長[m]、L_2 は円錐部分の装置長[m]。

【計算例】デカンタ型遠心機

固体粒子（粒子密度 2650 kg/m^3）を含む希薄懸濁液をデカンタ型遠心機（r_1=250 mm, r_2=300 mm, L_1=1500 mm, L_2=500 mm）により給液量 18.0 m^3/h、回転数 2500 rpm で固液分離する場合の①遠心沈降面積 S [m^2]と②分離限界粒子径 D_{pc} [μm]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①5316 m^2, ②1.02 μm)

①$r_{\mathrm{lm}}=(r_2-r_1)/\ln(r_2/r_1)=(300-250)/\ln(300/250)=274.24$ mm

$r_{\mathrm{m}}=(r_2+r_1)/2=(300+250)/2=275$ mm

$\omega=2\pi n=(2\pi)(2400/60)=80\pi$ rad/s

$S=(2\pi L_1\omega^2/g)r_{\mathrm{lm}}r_{\mathrm{m}}+(\pi L_2\omega^2/3g)(r_2+2r_1)r_{\mathrm{lm}}$　Stokes 域を仮定

$=[(2\pi)(1500/1000)(80\pi)^2/(9.81)](274.24/1000)(275/1000)$

$+[(\pi/3)(500/1000)(80\pi)^2/(9.81)]\{(300/1000)+(2)(250/1000)\}(274.24/1000)=5316.2\ \mathrm{m}^2\fallingdotseq\boxed{5316\ \mathrm{m}^2}$

②$D_{\mathrm{pc}}=[(18)(\mu/g)(Q/S)/(\rho_{\mathrm{p}}-\rho)]^{0.5}$　Stokes 域を仮定

$=[(18)(1.00\times10^{-3}/9.81)\{(18/3600)/(5316.2)\}/(2650-1000)]^{0.5}=1.0226\times10^{-6}\ \mathrm{m}\fallingdotseq\boxed{1.02\ \mu\mathrm{m}}$

$u_{\mathrm{t}}=g(\rho_{\mathrm{p}}-\rho)D_{\mathrm{pc}}^2/(18\mu)=(9.81)(2650-1000)(1.0226\times10^{-6})^2/[(18)(1.00\times10^{-3})]=9.4035\times10^{-7}$ m/s

$Re_{\mathrm{p}}=D_{\mathrm{pc}}u_{\mathrm{t}}\rho/\mu=(1.0226\times10^{-6})(9.4035\times10^{-7})(1000)/(1.00\times10^{-3})=9.6160\times10^{-7}$ (<2)　仮定は正しい

３．５　スケールアップ

円筒型遠心機を寸法比一定で α 倍にスケールアップするとき、スケールアップの前(添え字 1)と後(添え字 2)の間で次式が成り立つ。

$$\frac{r_{1,2}}{r_{1,1}}=\frac{r_{2,2}}{r_{2,1}}=\frac{L_2}{L_1}(\equiv\alpha)\quad\cdots(3.5.1)$$
分子がスケールアップ後の寸法、分母がスケールアップ前の寸法

スケールアップの前後における遠心沈降面積の比は、次式のように導かれる。

$$\frac{S_2}{S_1}=\frac{2\pi L_2\omega_2{}^2}{g}r_{\mathrm{lm},2}r_{\mathrm{m},2}\Big/\frac{2\pi L_1\omega_1{}^2}{g}r_{\mathrm{lm},1}r_{\mathrm{m},1}\quad\left[r_{\mathrm{lm}}\equiv\frac{r_2-r_1}{\ln(r_2/r_1)},r_{\mathrm{m}}\equiv\frac{r_2+r_1}{2}\right]\quad\cdots(3.5.2)$$

$$\frac{S_2}{S_1}=\frac{L_2}{L_1}\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2\frac{r_{\mathrm{lm},2}}{r_{\mathrm{lm},1}}\frac{r_{\mathrm{m},2}}{r_{\mathrm{m},1}}\quad\cdots(3.5.3)$$

$$\frac{S_2}{S_1}=\alpha\left(\frac{2\pi n_2}{2\pi n_1}\right)^2\left[\frac{\alpha r_2-\alpha r_1}{\ln(\alpha r_2/\alpha r_1)}\Big/\frac{r_2-r_1}{\ln(r_2/r_1)}\right]\left(\frac{\alpha r_2+\alpha r_1}{2}\Big/\frac{r_2+r_1}{2}\right)\quad\cdots(3.5.4)$$

$$\boxed{\frac{S_2}{S_1}=\alpha^3\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}\quad\cdots(3.5.5)$$

スケールアップの前後における給液量の比は、次式のように導かれる。

$$\frac{Q_2}{Q_1}=\frac{u_{t2}S_2}{u_{t1}S_1} \quad \cdots(3.5.6)$$

$$\frac{Q_2}{Q_1}=\left[\frac{g(\rho_p-\rho)D_{pc,2}^2}{18\mu}\bigg/\frac{g(\rho_p-\rho)D_{pc,1}^2}{18\mu}\right]\alpha^3\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad \cdots(3.5.7)$$

$$\boxed{\frac{Q_2}{Q_1}=\alpha^3\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\left(\frac{D_{pc,2}}{D_{pc,1}}\right)^2} \quad \cdots(3.5.8)$$

回転速度の比は、次式で表される。

$$\frac{n_2}{n_1}=\alpha^{-3/2}\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{1/2}\left(\frac{D_{pc,2}}{D_{pc,1}}\right)^{-1} \quad \cdots(3.5.9)$$

【計算例】スケールアップ

円筒型遠心機（$r_{1,1}$=30.0 mm, $r_{2,1}$=40.0 mm, L_1=700 mm, 処理性能 60.0 L/min, 回転速度 12000 rpm, 遠心沈降面積 860 m^2, 分離限界粒子径 0.800 μm）を寸法比一定の下で２倍にスケールアップして処理性能 600 L/min, 分離限界粒子径 2.00 μm とする。スケールアップ後の①遠心機寸法 $r_{1,2}$ [mm], $r_{2,2}$ [mm], L_2 [mm]、②回転速度 n_2 [rpm]、③遠心沈降面積 S_2 [m^2]を求めよ。(①$r_{1,2}$=60.0 mm, $r_{2,2}$=80.0 mm, L_2=1400 mm, ②5367 rpm, ③1376 m^2)

①$r_{1,2}=\alpha r_{1,1}=(2)(30.0)=\boxed{60.0\ \text{mm}}$, $r_{2,2}=\alpha r_{2,1}=(2)(40.0)=\boxed{80.0\ \text{mm}}$, $L_2=\alpha L_1=(2)(700)=\boxed{1400\ \text{mm}}$

②$n_2=\alpha^{-3/2}n_1(Q_2/Q_1)^{1/2}(D_{pc,2}/D_{pc,1})^{-1}=(2)^{-3/2}(12000)(600/60.0)^{1/2}(2.00/0.800)^{-1}=5366.5\ \text{rpm}\fallingdotseq\boxed{5367\ \text{rpm}}$

③$S_2=S_1\alpha^3(n_2/n_1)^2=(860)(2)^3(5366.5/12000)^2=1375.9\ \text{m}^2\fallingdotseq\boxed{1376\ \text{m}^2}$

参考文献

[1] 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), 9 章
[2] 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), 3.4 章
[3] 化学工学協会(編); 解説 化学工学演習 第 2 版 下巻, 槙書店(1973), 3 章
[4] 大山義年; 遠心分離 新化学工学講座V-3, 日刊工業新聞社(1958), 3 章
[5] 大野光之; 初歩から学ぶ化学装置設計, 工業調査会(2009), 10 章 4 節
[6] 藤田重文(編); 化学工学演習 第 2 版, 東京化学同人(1979), pp.201-203
[7] 今木 清康; 粉体工学演習, コロナ社(1987), pp.196-199
[8] 光武 量; 例題演習 化学工学, 産業図書(1964), pp.98-101
[9] 白戸紋平; 化学工学 機械的操作の基礎, 丸善(1980), 9.4 章
[10] GEA 社ホームページ(動画が秀逸)https://www.enshinbunriki.com/principle/
[11] P.A. Schhweitzer (Ed.); Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers 3rd Ed., McGraw-Hill (1997), p.4-80
[12] W. W-F. Leung; Industrial Centrifugation Technology, McGraw-Hill (1998), p.92

令和 5 年 1 月 30 日作成

令和 6 年 1 月 13 日改訂

令和 6 年 2 月 6 日改訂

問　題

(1) ［遠心沈降速度］遠心機（回転数 9600 rpm）の回転中心より 7.00 cm 離れた位置にある液中の固体粒子（粒子径 1.00 μm, 粒子密度 2650 kg/m^3）の①遠心効果 Z [－]と②遠心沈降速度 u_c [mm/s]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①7212, ②6.48 mm/s)

(2) ［遠心沈降速度］遠心機（回転数 9600 rpm）の回転中心より 3.50 cm 離れた位置にある液中の固体粒子（粒子径 1.00 μm, 粒子密度 2650 kg/m^3）の①遠心効果 Z [－]と②遠心沈降速度 u_c [mm/s]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①3606, ②3.24 mm/s)

(3) ［円筒型遠心機（固液分離）］固体粒子（粒子密度 2650 kg/m^3）を含む希薄懸濁液を円筒型遠心機（r_1=30.0 mm, r_2=40.0 mm, L=700 mm）により給液量 30.0 L/min、回転数 18000 rpm で固液分離する場合の①遠心沈降面積 S [m^2]と②分離限界粒子径 D_{pc} [μm]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①1938 m^2, ②0.536 μm)

(4) ［円筒型遠心機（固液分離）］固体粒子（粒子密度 2650 kg/m^3）を含む希薄懸濁液を円筒型遠心機（r_1=30.0 mm, r_2=40.0 mm, L=700 mm）により給液量 60.0 L/min、回転数 12000 rpm で固液分離する場合の①遠心沈降面積 S [m^2]と②分離限界粒子径 D_{pc} [μm]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①861 m^2, ②1.13 μm)

(5) ［円筒型遠心機（液液分離）］ 75.0 vol%の油（密度 800 kg/m^3、粘度 1.60 mPa･s）と 25.0 vol%の水（密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s）からなる乳化液を円筒型遠心機（r_1=35.0 mm, r_2=60.0 mm, r_3=40.0 mm, L=800 mm）により全給液量 3.60 m^3/h、回転数 12000 rpm で除去する場合の①油相側の遠心沈降面積 S [m^2]、②水滴の分離限界粒子径 $D_{pc,H}$ [μm]、③水相側の遠心沈降面積 S [m^2]、④油滴の分離限界粒子径 $D_{pc,L}$ [μm]を求めよ。重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①1634 m^2, ②2.60 μm, ③2705 m^2, ④0.921 μm)

(6) ［円筒型遠心機（液液分離）］ 50.0 vol%の油（密度 800 kg/m^3、粘度 1.60 mPa･s）と 50.0 vol%の水（密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s）からなる乳化液を円筒型遠心機（r_1=35.0 mm, r_2=60.0 mm, r_3=40.0 mm, L=800 mm）により全給液量 9.00 m^3/h、回転数 9000 rpm で除去する場合の①油相側の遠心沈降面積 S [m^2]、②水滴の分離限界粒子径 $D_{pc,H}$ [μm]、③水相側の遠心沈降面積 S [m^2]、④油滴の分離限界粒子径 $D_{pc,L}$ [μm]を求めよ。重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①919 m^2, ②4.47 μm, ③1522 m^2, ④2.74 μm)

(7) ［分離板型遠心機］固体粒子（粒子密度 2650 kg/m^3）を含む希薄懸濁液を分離板型遠心機（r_1=40.0 mm, r_2=160 mm, θ=30°, N=20）により給液量 180 L/min、回転数 4500 rpm で固液分離する場合の①遠心機直径 D_B [mm]、②遠心沈降面積 S [m^2]、③分離限界粒子径 D_{pc} [μm]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①420 mm, ②6622 m^2, ③0.710 μm)

(8) ［分離板型遠心機］固体粒子（粒子密度 2650 kg/m^3）を含む希薄懸濁液を分離板型遠心機（r_1=40.0 mm, r_2=160 mm, θ=30°, N=30）により給液量 180 L/min、回転数 3000 rpm で固液分離する場合の①遠心機直径 D_B [mm]、②遠心沈降面積 S [m^2]、③分離限界粒子径 D_{pc} [μm]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①420 mm, ②4415 m^2, ③0.869 μm)

(9) ［デカンタ型遠心機］固体粒子（粒子密度 2650 kg/m^3）を含む希薄懸濁液をデカンタ型遠心機（r_1=200 mm, r_2=250 mm, L_1=1250 mm, L_2=250 mm）により給液量 36.0 m^3/h、回転数 3000 rpm で固液分離する場合の①遠心沈降面積 S [m^2]と②分離限界粒子径 D_{pc} [μm]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①4369 m^2, ②1.60 μm)

(10) ［デカンタ型遠心機］固体粒子（粒子密度 2650 kg/m^3）を含む希薄懸濁液をデカンタ型遠心機（r_1=200 mm, r_2=250 mm, L_1=1250 mm, L_2=250 mm）により給液量 36.0 m^3/h、回転数 2400 rpm で固液分離する場合の①遠心沈降面積 S [m^2]と②分離限界粒子径 D_{pc} [μm]を求めよ。液の密度 1000 kg/m^3、粘度 1.00 mPa･s、重力加速度 9.81 m/s^2 とする。(①2796 m^2, ②1.99 μm)

(11) ［スケールアップ］円筒型遠心機（$r_{1,1}$=30.0 mm, $r_{2,1}$=40.0 mm, L_1=700 mm, 処理性能 30.0 L/min, 回転速度 9000 rpm, 遠心沈降面積 500 m^2, 分離限界粒子径 1.00 μm）を寸法比一定の下で 1.5 倍にスケールアップして処理性能 300 L/min, 分離限界粒子径 2.00 μm とする。スケールアップ後の①遠心機寸法 $r_{1,2}$ [mm], $r_{2,2}$ [mm], L_2 [mm]、②回転速度 n_2 [rpm]、③遠心沈降面積 S_2 [m^2]を求めよ。(①$r_{1,2}$=45.0 mm, $r_{2,2}$=60.0 mm, L_2=1050 mm, ②7746 rpm, ③1250 m^2)

(12) ［スケールアップ］円筒型遠心機（$r_{1,1}$=30.0 mm, $r_{2,1}$=40.0 mm, L_1=700 mm, 処理性能 30.0 L/min, 回転速度 9000 rpm, 遠心沈降面積 500 m^2, 分離限界粒子径 1.00 μm）を寸法比一定の下で 1 倍にスケールアップして処理性能 30.0 L/min, 分離限界粒子径 0.500 μm とする。スケールアップ後の①遠心機寸法 $r_{1,2}$ [mm], $r_{2,2}$ [mm], L_2 [mm]、②回転速度 n_2 [rpm]、③遠心沈降面積 S_2 [m^2]を求めよ。(①$r_{1,2}$=30.0 mm, $r_{2,2}$=40.0 mm, L_2=700 mm, ②18000 rpm, ③2000 m^2)