

攪拌

攪拌とは、流体にエネルギーを与える操作のことをいう。攪拌のエネルギーは、流体を循環させる吐
出(はきだし)作用と、気泡や液滴を分散させるせん断作用に消費される。原動機(モーター)で電力が回
転動力に変換されて攪拌軸に伝わり、攪拌翼が回転する。翼近傍の液が吐き出されて流動し、翼からの
距離に応じて流体塊の間で速度差を生じる。速度差の大きいところから小さいところへ向かって流体の
流れ、すなわち運動量が伝わる。これにより、液全体が流動する。一方、速度差のある流体塊どうしが
接する断面では、速度勾配と流体粘度に応じたせん断応力が作用し、流体摩擦に伴う微小な乱流渦が発
生する。これにより、流体塊の細分化と混合が起こる。

1. 攪拌特性

①翼先端速度 u [m/s] 攪拌翼が1回転する際に描く円の長さ(周長) πd と、攪拌翼が1回転するのにかかる
時間(周期) $1/n$ との比で定義される。たんに $u=nd$ とする場合もよくある。

$$u \equiv \frac{2\pi(d/2)}{1/n} \quad \cdots(1.1)$$

$$\boxed{u=\pi nd} \quad \cdots(1.2)$$

ただし、 d は翼径[m]、 n は翼回転数[1/s]。

②レイノルズ数 Re 粘性力 τA に対する慣性力 ma の比で定義される。

$$Re \equiv \frac{ma}{\tau A} \quad \cdots(1.3)$$

ただし、 τ はせん断応力[N/m²]、 A は流体塊の断面積[m²]、 m は液質量[kg]、 a は流体塊の加速度[m/s²]。
慣性力の項を攪拌翼の因子に置き換える。

$$ma = \rho V \left(\frac{du}{dt} \right) \propto \rho d^3 \left(\frac{u}{d/u} \right) = \rho d^3 \frac{u}{(1/n)} = \rho n d^3 (\pi n d) \propto \rho n^2 d^4 \quad \cdots(1.4)$$

ただし、 t は時間[s]、 V は液体積[m³]、 ρ は液密度[kg/m³]。

粘性力の項を攪拌翼の因子に置き換える。

$$\tau A = \left(\mu \frac{du}{dy} \right) A \propto \left(\mu \frac{u}{d} \right) d^2 = \mu u d = \mu (\pi n d) d \propto \mu n d^2 \quad \cdots(1.5)$$

ただし、 y は変位[m]、 μ は液粘度[Pa·s]。

ma の式と τA の式を Re の式に代入する。

$$Re = \frac{\rho n^2 d^4}{\mu n d^2} \quad \cdots(1.6)$$

$$\boxed{Re = \frac{\rho n d^2}{\mu}} \quad \cdots(1.7)$$

③フルード数 Fr 攪拌によって生じる旋回渦流の形状を表す。重力 mg に対する慣性力(遠心力) ma の比
で定義される。

$$Fr \equiv \frac{ma}{mg} \quad \cdots(1.8)$$

ただし、 g は重力加速度[m/s²].

重力の項を攪拌翼の因子に置き換える。

$$mg = \rho V g \propto \rho d^3 g \quad \cdots(1.9)$$

ma の式と mg の式を Fr の式に代入する。

$$Fr = \frac{\rho n^2 d^4}{\rho d^3 g} \quad \cdots(1.10)$$

$$\boxed{Fr = \frac{n^2 d}{g}} \quad \cdots(1.11)$$

④循環流量数 N_{qc} ・吐出流量数 N_{qd} 循環流量 Q_c [m³/s]と吐出流量 Q_d [m³/s]を用いて次式で定義される。

$$N_{qc} = Q_c / nd^3 \quad \cdots(1.12)$$

$$N_{qd} = Q_d / nd^3 \quad \cdots(1.13)$$

流体の循環時間 T_c [s]は、循環流量 Q_c [m³/s]と攪拌槽内の液体積 V [m³]を用いて次式で表される。

$$T_c = V / Q_c \quad \cdots(1.14)$$

Q_c の代わりに Q_d を用いる場合もある。

流体の循環回数 N_c [1/s]は、次式で表される。

$$N_c = Q_c / V (=1/T_c) \quad \cdots(1.15)$$

Q_c の代わりに Q_d を用いる場合もある。

乱流条件下では、 N_{qc} と N_{qd} の間におおよそ次の関係式が成り立つ。

$$N_{qc} = N_{qd} [1 + 0.16 \{(D/d)^2 - 1\}] \quad \cdots(1.16)$$

N_{qd} と動力数 N_p [－]との間におおよそ次の関係式が成り立つ。

$$N_{qd} = 0.32 (n_p^{0.7} b/d)^{0.25} (D/d)^{0.34} N_p^{0.5} \quad \cdots(1.17)$$

⑤混合時間 θ_M [s] 攪拌槽に複数の異なる液体を供給した後、目的の均一度に達するまでに要する時間のことである。混合時間が短い程、攪拌性能は良好である。乱流条件下の場合、次式で計算される。

$$1/(n\theta_M) = 0.092 [(d/D)^3 N_{qd} + 0.21 (d/D) (N_p/N_{qd})^{0.5}] [1 - \exp\{-13(d/D)^2\}] \quad \cdots(1.18)$$

ただし、右辺第1項は循環流の混合作用、第2項は乱流による混合作用を意味する。

⑥攪拌所要動力 P [W] 攪拌翼が受ける抵抗力 R_f [N]と翼先端速度 u の積で表される。

$$P = R_f u \quad \cdots(1.19)$$

$$P = R_f u = C_D A (\rho u^2 / 2) u \propto \rho A u^3 = \rho d^2 (\pi n d)^3 \propto \rho d^2 (n d)^3 = \rho n^3 d^5 \quad \cdots(1.20)$$

$$\boxed{P = N_p \rho n^3 d^5} \quad \cdots(1.21)$$

ただし、 N_p は動力数[－]。

液体中に固体粒子が含まれる場合は、上式の液密度 ρ を懸濁液密度 ρ_{sl} に置き換える。

$$V \rho_{sl} = V \varepsilon \rho + V(1 - \varepsilon) \rho_s \quad \cdots(1.22)$$

$$\rho_{sl} = \varepsilon \rho + (1 - \varepsilon) \rho_s \quad \cdots(1.23)$$

ただし、 ε は懸濁率[－]、 ρ_s は固体密度[kg/m³]。

上式の成り立ちについて考える。攪拌翼が抵抗力 R_f [N]に抗って時間 t [s]で距離 x [m]移動することから、攪拌翼が液に対して行う仕事 W [J]は、抵抗力 R_f [N]と距離 x [m]の積で表される。これを時間 t [s]で割り

算すると、単位時間当たりの仕事、すなわち攪拌所要動力に相当する仕事率 P [W] を得る。

2. 動力特性

攪拌所要動力 P の一般式は、粘性項 P_L と慣性項 P_T と重力項 P_G の和で表される。

$$P = P_L + P_T + P_G \quad \cdots(2.1)$$

粘性項 P_L は、翼が受ける粘性抵抗 τA と翼先端速度 u の積で与えられる。

$$P_L = \tau A u = (\mu n d^2)(\pi n d) \propto \mu n^2 d^3 \quad \cdots(2.2)$$

$$P_L = K_L \mu n^2 d^3 \quad \cdots(2.3)$$

慣性項 P_T は、翼が受ける慣性抵抗 R_f と翼先端速度 u の積で与えられる。

$$P_T = R_f u = C_D A (\rho u^2 / 2) u \propto \rho A u^3 = \rho d^2 (\pi n d)^3 \propto \rho d^2 (n d)^3 = \rho n^3 d^5 \quad \cdots(2.4)$$

$$P_T = K_T \rho n^3 d^5 \quad \cdots(2.5)$$

重力項 P_G は、翼が受ける重力抵抗 $\rho g V$ と翼先端速度 u の積で与えられる。

$$P_G = \rho g V u \propto \rho g d^3 (\pi n d) \propto \rho g n d^4 \quad \cdots(2.6)$$

$$P_G = K_G \rho g n d^4 \quad \cdots(2.7)$$

P_L と P_T と P_G の式を P の式に代入する。

$$P = K_L \mu n^2 d^3 + K_T \rho n^3 d^5 + K_G \rho g n d^4 \quad \cdots(2.8)$$

$$N_p = P / \rho n^3 d^5 = K_L (\mu n^2 d^3 / \rho n^3 d^5) + K_T + K_G (\rho g n d^4 / \rho n^3 d^5) = K_L / (\rho n d^2 / \mu) + K_T + K_G / (n^2 d / g) = K_L / Re + K_T + K_G / Fr \quad \cdots(2.9)$$

フルード数無視の条件（邪魔板が装着されて、内部液の旋回渦流が抑止される条件）では次式となる。

$$\boxed{N_p = K_L / Re + K_T} \quad \cdots(2.10)$$

乱流条件では次式となる。

$$\boxed{N_p \doteq K_T} \quad (Re > 10^4 \sim 10^5) \quad \cdots(2.11)$$

ただし、 K_L は層流定数、 K_T は乱流定数。

多段翼の場合は、動力数 N_p に翼段数を乗じる。液体中に固体粒子が含まれる場合は、液密度 ρ を懸濁液密度 $\rho_{sl} = \varepsilon \rho + (1 - \varepsilon) \rho_s$ に置き換える。

表 2.1 層流定数 K_L と乱流定数 K_T [文献 1]

| 攪拌翼 | K_L | K_T |
|------------|-------|-------|
| 6 枚平板タービン翼 | 65 | 5.75 |
| 2 枚平板パドル翼 | 36.5 | 1.70 |
| 3 枚プロペラ翼 | 41.0 | 0.32 |
| アンカー翼 | 300 | 0.35 |

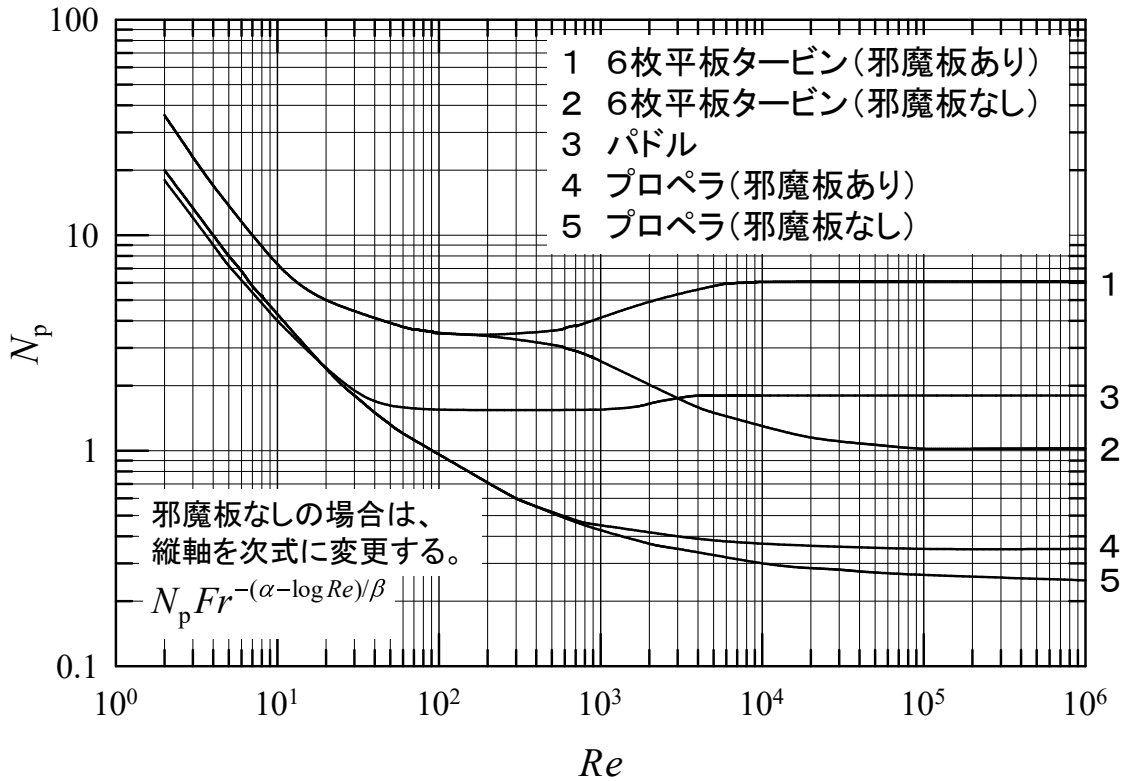


図 2.1 動力特性曲線の例 [文献 2]

-
- ① 攪拌レイノルズ数 Re を求める。
 - ② 攪拌翼の種類と邪魔板の有無をもとに曲線の番号を決める。
 - ③ 動力数 N_p を読み取る。***
 - ④ 攪拌所要動力 P を求める。 ($P=N_p \rho n^3 d^5$) ***
- * 邪魔板なしの場合は、 N_p を動力関数 $\Phi=N_p Fr^{-(\alpha - \log_{10} Re)\beta}$ に置き換える。 $\alpha=1, \beta=40$ (タービン翼)
- ** 羽根段数が複数段となる場合は、動力数 N_p に羽根段数を乗じる。
- *** 液中に固体粒子が含まれる場合は、液密度 ρ を懸濁液密度 ρ_{sl} に置き換える。
- $\rho_{sl}=\varepsilon\rho+(1-\varepsilon)\rho_s$ ただし、 ε は懸濁率[-]、 ρ_s は固体密度[kg/m³]。
-

3. 攪拌所要動力の推算

3. 1 邪魔板無しの場合

3.1.1 永田の式

邪魔板無し 2 枚羽根パドル翼(羽根段数 1 段)の動力数 N_{p0} [-]に関する推算式として、永田の式がある。

[文献 3-5]

$$N_{P0} = \frac{A}{Re} + B \left(\frac{10^3 + 1.2Re^{0.66}}{10^3 + 3.2Re^{0.66}} \right)^p \left(\frac{H}{D} \right)^{\{0.35+(b/D)\}} (\sin \theta)^{1.2} \quad \cdots(3.1.1.1)$$

$$A=14+(b/D)[670\{(d/D)-0.6\}^2+185] \quad \cdots(3.1.1.2)$$

$$B=10^{[1.3-4\{(b/D)-0.5\}^2-1.14(d/D)]} \quad \cdots(3.1.1.3)$$

$$p=1.1+4(b/D)-2.5[(d/D)-0.5]^2-7(b/D)^4 \quad \cdots(3.1.1.4)$$

永田式で定義された以外の攪拌翼、すなわち、①翼枚数 $n_p \neq 2$ 、②翼段数 $N \neq 1$ 、③パドル以外の翼形状、を用いる場合は、実際の攪拌翼幅 b を相当翼幅 b' に置き換えて計算する。低～中粘度の攪拌液において、翼の枚数と幅と段数の積($n_p b N$)が等しくなる条件では、パドル翼とタービン翼の別に関わらず、攪拌所要動力はほぼ等しくなる($n_p b N = \text{一定}$)。

$$n_p' b' N' = n_p b N \quad \cdots(3.1.1.5)$$

ただし、 n_p' と b' と N' は置換後の値。

永田式で定義されている翼枚数は 2、翼段数は 1 であることから、置換後の翼枚数 $n_p' = 2$ 、翼段数 $N' = 1$ となる。上式に代入すると、置換後の相当翼幅 b' を得る。

$$b' = n_p b N / 2 \quad \cdots(3.1.1.6)$$

なお、プロペラ翼の場合は、上記とは別の手順にしたがう。化学工学便覧を参照のこと。

3.1.2 亀井・平岡の式

幅広い条件に対応した推算式として、平板パドル翼および傾斜パドル翼に関する亀井・平岡の式がある【文献 6-9】。式中に羽根枚数 n_p が含まれており、永田式の如き翼の置換計算は不要である。なお、傾斜角の項 $\sin \theta = 1$ と置くことで、平板タービン翼に対しても適用できる。

$$N_{P0} = [(1.2\pi^4 \beta^2) / \{8d^3 / (D^2 H)\}] f \quad \cdots(3.1.2.1)$$

$$f = C_L / Re_G + C_L \{ (C_{Tr} / Re_G) + Re_G \}^{-1} + (f_\infty / C_L)^{1/m} \quad \cdots(3.1.2.2)$$

$$Re_G = [\{ \pi \eta \ln(D/d) \} / (4d / \beta D)] Re_d \quad \cdots(3.1.2.3)$$

$$Re_d = \rho n d^2 / \mu \quad \cdots(3.1.2.4)$$

$$C_L = 0.215 \eta n_p (d/H) [1 - (d/D)^2] + 1.83 (b \sin \theta / H) [n_p / (2 \sin \theta)]^{1/3} \quad \cdots(3.1.2.5)$$

$$C_L = [(1.96 X^{1.19})^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8} \quad \cdots(3.1.2.6)$$

$$m = [(0.71 X^{0.373})^{-7.8} + (0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8} \quad \cdots(3.1.2.7)$$

$$C_{Tr} = 23.8 (d/D)^{-3.24} (b \sin \theta / D)^{-1.18} X^{-0.74} \quad \cdots(3.1.2.8)$$

$$f_\infty = 0.0151 (d/D) C_L^{0.308} \quad \cdots(3.1.2.9)$$

$$X = \gamma n_p^{0.7} b \sin^{1.6} \theta / H \quad \cdots(3.1.2.10)$$

$$\beta = 2 \ln(D/d) / [(D/d) - (d/D)] \quad \cdots(3.1.2.11)$$

$$\gamma = [\eta \ln(D/d) / (\beta D / d)^5]^{1/3} \quad \cdots(3.1.2.12)$$

$$\eta = 0.711 [0.157 + \{ n_p \ln(D/d) \}^{0.611}] / [n_p^{0.52} \{ 1 - (d/D)^2 \}] \quad \cdots(3.1.2.13)$$

加藤らは、亀井・平岡式の乱流項 C_L と m を次式のように修正することで、プロペラ翼およびファウドラ一翼に対しても適用できるようにした。【文献 10】

$$C_L = [(3X^{1.5})^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8} \quad \cdots(3.1.2.14)$$

$$m = [(0.8X^{0.373})^{-7.8} + (0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8} \quad \cdots(3.1.2.15)$$

多段翼の場合は、動力数 N_{P0} に羽根段数 N を乗じる。

3. 2 邪魔板有りの場合

乱流条件において邪魔板が挿入される場合、次式を満たすような邪魔板条件(板幅 B_w 、枚数 n_B)が選定されると、攪拌所要動力が最大となる。これを**完全邪魔板条件**という。一方、完全邪魔板条件未達の邪魔板条件を**部分邪魔板条件**といい、邪魔板有りの場合の一般式に相当する。

3.2.1 完全邪魔板条件

永田らは、完全邪魔板条件を次式で与えている。[文献 3-5]

$$(B_w/D)^{1.2}n_B=0.35 \quad \cdots(3.2.1.1)$$

最大動力数 N_{Pmax} [-]は、邪魔板無しの推算式における Re を次式で置き換えることで求められる。

$$R_c=[25/(b/D)][(d/D)-0.4]^2+(b/D)/[0.11(b/D)-0.0048] \quad \cdots(3.2.1.2)$$

上式は、平板翼で成り立つ。翼のひねり角を考慮する場合は、次式を Re と置き換える。

$$R_\theta=10^{4(1-\sin\theta)}R_c \quad \cdots(3.2.1.3)$$

亀井らは、攪拌翼の条件を含めた完全邪魔板条件を報告している。[文献 6-9]

$$(B_w/D)n_B^{0.8}=0.27(N_{Pmax})^{0.2} \quad \cdots(3.2.1.4)$$

完全邪魔板条件における最大動力数 N_{Pmax} は、次式で与えられる。

$$\text{(平板パドル翼・平板タービン翼)} \quad N_{Pmax}=10(n_p^{0.7}b/d)^{1.3} \quad \text{ただし} \quad n_p^{0.7}b/d \leq 0.54 \quad \cdots(3.2.1.5)$$

$$\text{(平板パドル翼・平板タービン翼)} \quad N_{Pmax}=8.3(n_p^{0.7}b/d) \quad \text{ただし} \quad 0.54 < n_p^{0.7}b/d \leq 1.6 \quad \cdots(3.2.1.6)$$

$$\text{(平板パドル翼・平板タービン翼)} \quad N_{Pmax}=10(n_p^{0.7}b/d)^{0.6} \quad \text{ただし} \quad 1.6 < n_p^{0.7}b/d \quad \cdots(3.2.1.7)$$

$$\text{(傾斜パドル翼)} \quad N_{Pmax}=8.3(2\theta/\pi)^{0.9}[n_p^{0.7}b(\sin\theta)^{1.6}/d] \quad \cdots(3.2.1.8)$$

$$\text{(プロペラ翼・ファウドラ翼)} \quad N_{Pmax}=6.5[n_p^{0.7}b(\sin\theta)^{1.6}/d]^{1.7} \quad \cdots(3.2.1.9)$$

ただし、傾斜パドル翼の $(2\theta/\pi)$ における θ の単位は[rad]。多段翼の場合は、動力数 N_{Pmax} に羽根段数 N を乗じる。

3.2.2 部分邪魔板条件

永田らは、次の推算式を報告している。[文献 3-5]

$$(N_{Pmax}-N_P)/(N_{Pmax}-N_{P\infty})=[1-1.29(B_w/D)^{1.2}n_B]^2 \quad \cdots(3.2.2.1)$$

$$N_{P\infty}=B(0.6/1.6)^p \quad \cdots(3.2.2.2)$$

N_{Pmax} , A , B , p は、前出の式を用いる。

亀井らは、完全邪魔板条件を含む次の推算式を報告している。[文献 6-9]

$$N_P=[(1+x^{-3})^{-1/3}]N_{Pmax} \quad \cdots(3.2.2.3)$$

$$\text{(平板パドル翼・平板タービン翼)} \quad x=4.5(B_w/D)n_B^{0.8}/(N_{Pmax})^{0.2}+N_{P0}/N_{Pmax} \quad \cdots(3.2.2.4)$$

$$\text{(傾斜パドル翼・プロペラ翼・ファウドラ翼)} \quad x=4.5(B_w/D)n_B^{0.8}/\{(2\theta/\pi)^{0.72}(N_{Pmax})^{0.2}\}+N_{P0}/N_{Pmax} \quad \cdots(3.2.2.5)$$

N_{P0} と N_{Pmax} は、前出の式を用いる。なお、上式で求めた N_P が N_{P0} よりも小さい場合は、 N_{P0} 値を動力数 N_P として採用する[文献 7]。多段翼の場合は、動力数 N_P に羽根段数 N を乗じる。

液体積あたり攪拌所要動力 P/V の適正範囲として、0.2~4 kW/m³ が目安となる。上の推算値がこれら

の範囲を大きく逸脱する場合は、攪拌条件を変更して再度計算を試みるとよい。

3. 3 原動機の選定

原動機の所要動力 P_M [W]は、攪拌所要動力 P [W]と原動機や減速機の機械的損失分と操作上の余裕を含めた総合効率 η_{MT} [-]を用いて次式で表される。[文献 11, 12]

$$P_M = P / \eta_{MT} \quad \cdots(3.3.1)$$

原動機の市販規格 P_{MC} [kW]を以下に示す。計算値よりもひとまわり大きい規格を選定する。

0.2, 0.4, 0.75, 1.5, 2.2, 3.7, 5.5, 7.5, 11, 15, 18.5, 22, 30, 37, 45, 55, 75, 90, 110, 132, 160 kW

液体積あたり攪拌所要動力 P/V の適正範囲として、0.2~4 kW/m³程度が目安となる[文献 13]。なお、液体積あたりの市販規格 P_{MC}/V を指標にとる場合もある。

表 3.3.1 液体積あたり攪拌所要動力のおおよその目安[文献 13]

| 攪拌動力 | 利用例 | P/V [kW/m ³] |
|------|---------------------------|----------------------------|
| 小 | 軽い固体粒子の分散、低粘性液体の混合 | 0.2 |
| 中 | 気液混合、液液混合、伝熱操作 | 0.6 |
| 大 | 重い固体粒子の分散、乳化操作、気液混合 | 2 |
| 特大 | ペースト(チューブ入りわさびの如き糊状物質)の混練 | 4 |

4. 伝熱時間[文献 14-17]

4. 1 伝熱媒体の出口温度が操作中に変化しない場合

スチームの潜熱で加熱する場合、外気にさらして冷却する場合、恒温槽を用いる場合、伝熱媒体の温度変化が小さく無視できる場合などがこれにあたる。

①加熱の場合 伝熱速度式は、次式で表される。

$$Q = MC_p \frac{dT}{dt} = UA(T^* - T) \quad [T^* > T] \quad \cdots(4.1.1)$$

ただし、 A は伝熱面積[m²]、 C_p は攪拌液の平均比熱容量[J/(kg·K)]、 M は液重量[kg]、 T は時間 t における攪拌液温度[K]、 T^* は伝熱媒体の平衡温度[K](スチームの凝縮温度や恒温槽温度。時間に関わらず一定)、 U は総括伝熱係数[W/(m²·K)]。

攪拌液温度 T_0 から T_f ($T_0 < T_f$)までの加熱時間 τ_H [s]は、次式のように導かれる。

$$\int_{T_0}^{T_f} \frac{dT}{T^* - T} = \frac{UA}{MC_p} \int_0^{\tau_H} dt \quad \cdots(4.1.2)$$

$$\ln \frac{T^* - T_0}{T^* - T_f} = \frac{UA}{MC_p} \tau_H \quad \cdots(4.1.3)$$

$$\tau_H = \frac{\ln[(T^* - T_0)/(T^* - T_f)]}{UA/(MC_p)} \quad \cdots(4.1.4)$$

②冷却の場合 伝熱速度式は、次式で表される。

$$Q = -MC_p \frac{dT}{dt} = UA(T - T^*) \quad [T > T^*] \quad \cdots(4.1.6)$$

ただし、 T^* は伝熱媒体の平衡温度[K](外気温や恒温槽温度。時間に関わらず一定)。

攪拌液温度 T_0 から T_f ($T_0 > T_f$) までの冷却時間 τ_c [s] は、次式のように導かれる。

$$\int_{T_0}^{T_f} \frac{-dT}{T - T^*} = \frac{UA}{MC_p} \int_0^{\tau_c} dt \quad \cdots(4.1.7)$$

$$\ln \frac{T_0 - T^*}{T_f - T^*} = \frac{UA}{MC_p} \tau_c \quad \cdots(4.1.8)$$

$$\tau_c = \frac{\ln[(T_0 - T^*)/(T_f - T^*)]}{UA/(MC_p)} \quad \cdots(4.1.9)$$

4. 2 伝熱媒体の出口温度が操作中に変化する場合

加熱油や冷却水を伝熱媒体に用いる場合がこれにあたる。ただし、伝熱媒体の温度変化が小さく無視できる場合や、出入口での温度差を平均する場合は、上で導いた式を用いることもできる。

①加熱の場合 伝熱速度式は、次式で表される。

$$Q = MC_p \frac{dT}{dt} = UA \Delta T_{lm,t} \quad \left[\Delta T_{lm,t} \equiv \frac{(T_{in} - T) - (T_{out,t} - T)}{\ln[(T_{in} - T)/(T_{out,t} - T)]} \right] \quad \cdots(4.2.1)$$

ただし、 T は時間 t における攪拌液温度[K]、 T_{in} は熱媒の入口側温度[K](時間に関わらず一定)、 $T_{out,t}$ は時間 t における熱媒の出口側温度[K]、 $\Delta T_{lm,t}$ は時間 t における対数平均温度差[K]。

一般に、(攪拌液の加熱速度)=(熱媒の冷却速度)が成り立つ。

$$UA \Delta T_{lm,t} = W_h C_{ph} (T_{in} - T_{out,t}) [=Q] \quad \cdots(4.2.2)$$

ただし、 C_{ph} は伝熱媒体(熱媒)の平均比熱容量[J/(kg·K)]、 W_h は伝熱媒体(熱媒)の質量流量[kg/s]。

$$UA \frac{(T_{in} - T) - (T_{out,t} - T)}{\ln[(T_{in} - T)/(T_{out,t} - T)]} = W_h C_{ph} (T_{in} - T_{out,t}) \quad \cdots(4.2.3)$$

$$UA \frac{T_{in} - T_{out,t}}{\ln[(T_{in} - T)/(T_{out,t} - T)]} = W_h C_{ph} (T_{in} - T_{out,t}) \quad \cdots(4.2.4)$$

$$UA \frac{1}{\ln[(T_{in} - T)/(T_{out,t} - T)]} = W_h C_{ph} \quad \cdots(4.2.5)$$

$$\ln \frac{T_{in} - T}{T_{out,t} - T} = \frac{UA}{W_h C_{ph}} \quad \cdots(4.2.6)$$

$$\frac{T_{in} - T}{T_{out,t} - T} = \exp \frac{UA}{W_h C_{ph}} \quad \cdots(4.2.7)$$

$$\frac{T_{in} - T}{T_{out,t} - T} = K \quad \cdots(4.2.8)$$

$$T_{\text{out},t} - T = \frac{T_{\text{in}} - T}{K} \quad \cdots(4.2.9)$$

$$\boxed{T_{\text{out},t} = T + \frac{T_{\text{in}} - T}{K}} \quad \left[K \equiv \exp \frac{UA}{W_h C_{\text{ph}}} \right] \quad \cdots(4.2.10)$$

$UA\Delta T_{\text{lm},t}$ の式の右辺に代入して $T_{\text{out},t}$ を消去した式をはじめの Q の式の右辺に代入する。

$$MC_p \frac{dT}{dt} = W_h C_{\text{ph}} \left[T_{\text{in}} - \left(T + \frac{T_{\text{in}} - T}{K} \right) \right] \quad \cdots(4.2.11)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W_h C_{\text{ph}}}{MC_p} \left[(T_{\text{in}} - T) - \frac{(T_{\text{in}} - T)}{K} \right] \quad \cdots(4.2.12)$$

$$\frac{dT}{T_{\text{in}} - T} = \frac{W_h C_{\text{ph}}}{MC_p} \left(1 - \frac{1}{K} \right) dt \quad \cdots(4.2.13)$$

$$\int_{T_0}^{T_f} \frac{dT}{T_{\text{in}} - T} = \frac{W_h C_{\text{ph}}}{MC_p} \left(1 - \frac{1}{K} \right) \int_0^{\tau_H} dt \quad \cdots(4.2.14)$$

$$\ln \frac{T_{\text{in}} - T_0}{T_{\text{in}} - T_f} = \frac{W_h C_{\text{ph}}}{MC_p} \left(1 - \frac{1}{K} \right) \tau_H \quad \cdots(4.2.15)$$

$$\boxed{\tau_H = \ln \frac{T_{\text{in}} - T_0}{T_{\text{in}} - T_f} \left/ \left[\frac{W_h C_{\text{ph}}}{MC_p} \left(1 - \frac{1}{K} \right) \right] \right.} \quad \left[K \equiv \exp \frac{UA}{W_h C_{\text{ph}}} \right] \quad \cdots(4.2.16)$$

②冷却の場合 伝熱速度式は、次式で表される。

$$Q = -MC_p \frac{dT}{dt} = UA\Delta T_{\text{lm},t} \left[\Delta T_{\text{lm},t} \equiv \frac{(T - T_{\text{in}}) - (T - T_{\text{out},t})}{\ln \left[(T - T_{\text{in}}) / (T - T_{\text{out},t}) \right]} \right] \quad \cdots(4.2.17)$$

ただし、 T は時間 t における攪拌液温度[K]、 T_{in} は冷媒の入口側温度[K](時間に関わらず一定)、 $T_{\text{out},t}$ は時間 t における冷媒の出口側温度[K]、 $\Delta T_{\text{lm},t}$ は時間 t における対数平均温度差[K]。

一般に、(攪拌液の冷却速度)=(冷媒の加熱速度)が成り立つ。

$$UA\Delta T_{\text{lm},t} = W_h C_{\text{ph}} (T_{\text{out},t} - T_{\text{in}}) [=Q] \quad \cdots(4.2.18)$$

ただし、 C_{ph} は伝熱媒体(冷媒)の平均比熱容量[J/(kg·K)]、 W_h は伝熱媒体(冷媒)の質量流量[kg/s]。

$$UA \frac{(T - T_{\text{in}}) - (T - T_{\text{out},t})}{\ln \left[(T - T_{\text{in}}) / (T - T_{\text{out},t}) \right]} = W_h C_{\text{ph}} (T_{\text{out},t} - T_{\text{in}}) \quad \cdots(4.2.19)$$

$$UA \frac{T_{\text{out},t} - T_{\text{in}}}{\ln \left[(T - T_{\text{in}}) / (T - T_{\text{out},t}) \right]} = W_h C_{\text{ph}} (T_{\text{out},t} - T_{\text{in}}) \quad \cdots(4.2.20)$$

$$UA \frac{1}{\ln\left[\frac{T - T_{\text{in}}}{T - T_{\text{out,t}}}\right]} = W_h C_{\text{ph}} \quad \cdots(4.2.21)$$

$$\ln \frac{T - T_{\text{in}}}{T - T_{\text{out,t}}} = \frac{UA}{W_h C_{\text{ph}}} \quad \cdots(4.2.22)$$

$$\frac{T_{\text{in}} - T}{T_{\text{out,t}} - T} = \exp \frac{UA}{W_h C_{\text{ph}}} \quad \cdots(4.2.23)$$

$$\frac{T_{\text{in}} - T}{T_{\text{out,t}} - T} = K \quad \cdots(4.2.24)$$

$$T_{\text{out,t}} - T = \frac{T_{\text{in}} - T}{K} \quad \cdots(4.2.25)$$

$$\boxed{T_{\text{out,t}} = T + \frac{T_{\text{in}} - T}{K}} \quad \left[K \equiv \exp \frac{UA}{W_h C_{\text{ph}}} \right] \quad \cdots(4.2.26)$$

$UA\Delta T_{\text{lm,t}}$ の式の右辺に代入して変数 $T_{\text{out,t}}$ を消去した式をはじめの Q の式の右辺に代入する。

$$-MC_p \frac{dT}{dt} = W_h C_{\text{ph}} \left[\left(T + \frac{T_{\text{in}} - T}{K} \right) - T_{\text{in}} \right] \quad \cdots(4.2.27)$$

$$-\frac{dT}{dt} = \frac{W_h C_{\text{ph}}}{MC_p} \left[(T - T_{\text{in}}) - \frac{T - T_{\text{in}}}{K} \right] \quad \cdots(4.2.28)$$

$$-\frac{dT}{T - T_{\text{in}}} = \frac{W_h C_{\text{ph}}}{MC_p} \left(1 - \frac{1}{K} \right) dt \quad \cdots(4.2.29)$$

$$\int_{T_0}^{T_f} \frac{-dT}{T - T_{\text{in}}} = \frac{W_h C_{\text{ph}}}{MC_p} \left(1 - \frac{1}{K} \right) \int_0^{\tau_c} dt \quad \cdots(4.2.30)$$

$$\ln \frac{T_0 - T_{\text{in}}}{T_f - T_{\text{in}}} = \frac{W_h C_{\text{ph}}}{MC_p} \left(1 - \frac{1}{K} \right) \tau_c \quad \cdots(4.2.31)$$

$$\boxed{\tau_c = \ln \frac{T_{\text{in}} - T_0}{T_{\text{in}} - T_f} \left/ \left[\frac{W_h C_{\text{ph}}}{MC_p} \left(1 - \frac{1}{K} \right) \right] \right.} \quad \left[K \equiv \exp \frac{UA}{W_h C_{\text{ph}}} \right] \quad \cdots(4.2.32)$$

4. 3 総括伝熱係数

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_1} \left[\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left(\frac{A_1}{A_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2} \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right]} \quad [A_1/A_{s1} \approx 1, A_1/A_{s2} \approx 1] \quad \cdots(4.3.8)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_1} \left[\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left(\frac{\pi D_1 L}{\pi D_{av} L} \right) + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2} \left(\frac{\pi D_1 L}{\pi D_2 L} \right) \right]} \quad [A = \pi DL] \quad \cdots(4.3.9)$$

ただし、 L は装置長[m]。

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_1} \left[\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left(\frac{D_1}{D_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2} \left(\frac{D_1}{D_2} \right) \right]} \quad \cdots(4.3.10)$$

$$Q = U_1 A_1 \Delta T \quad \cdots(4.3.11)$$

$$\frac{1}{U_1} \equiv \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left(\frac{D_1}{D_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2} \left(\frac{D_1}{D_2} \right) \quad \left[D_{av} \equiv \frac{D_1 + D_2}{2} \right] \quad \cdots(4.3.12)$$

$$\boxed{\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2}} \quad [U = U_1, D_1/D_{av} \approx 1, D_1/D_2 \approx 1] \quad \cdots(4.3.13)$$

同様にして、基準2の総括伝熱係数 U_2 [W/(m²・K)]が導かれる。

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1}{h_{s1} A_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w A_{av}} + \frac{1}{h_{s2} A_{s2}} + \frac{1}{h_2 A_2}} \quad \cdots(4.3.14)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_2} \left[\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_{s2}} \left(\frac{A_2}{A_{s2}} \right) + \frac{\ell_w}{k_w} \left(\frac{A_2}{A_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s1}} \left(\frac{A_2}{A_{s1}} \right) + \frac{1}{h_1} \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \right]} \quad [\Delta T \equiv T_1 - T_2] \quad \cdots(4.3.15)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_2} \left[\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left(\frac{A_2}{A_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{1}{h_1} \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \right]} \quad [A_2/A_{s2} \approx 1, A_2/A_{s1} \approx 1] \quad \cdots(4.3.16)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_2} \left[\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left(\frac{\pi D_2 L}{\pi D_{av} L} \right) + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{1}{h_1} \left(\frac{\pi D_2 L}{\pi D_1 L} \right) \right]} \quad [A = \pi DL] \quad \cdots(4.3.17)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_2} \left[\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left(\frac{D_2}{D_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{1}{h_1} \left(\frac{D_2}{D_1} \right) \right]} \quad \cdots(4.3.18)$$

$$Q = U_2 A_2 \Delta T \quad \cdots(4.3.19)$$

$$\frac{1}{U_2} \equiv \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left(\frac{D_2}{D_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{1}{h_1} \left(\frac{D_2}{D_1} \right) \quad \left[D_{av} \equiv \frac{D_1 + D_2}{2} \right] \quad \cdots(4.3.20)$$

$$\boxed{\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2}} \quad [U = U_2, D_2/D_{av} \approx 1, D_2/D_1 \approx 1] \quad \cdots(4.3.21)$$

4. 4 境膜伝熱係数

4. 4. 1 攪拌液側

攪拌液側の境膜伝熱係数に関する一般的な推算式は、次式で表される。

$$\frac{hD_T}{k} = K \left(\frac{\rho n d^2}{\mu} \right)^\alpha \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^\beta \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^\gamma f \quad \dots(4.4.1.1)$$

ただし、 h は攪拌液側の境膜伝熱係数[W/(m²・K)](ジャケットの場合は $h=h_2$ 、コイルの場合は $h=h_1$)、 d は翼径[m]、 D_T は槽径[m]、 n は攪拌回転数[1/s]、 C_p は攪拌液の比熱容量[J/(kg・K)]、 k は攪拌液の熱伝導度[W/(m・K)]、 ρ は攪拌液密度[kg/m³]、 μ は攪拌液粘度[Pa・s]、 μ_w は槽壁温度における攪拌液粘度[Pa・s]、 f は装置形状に関する因子。

表 4. 4. 1. 1 攪拌槽伝熱式の定数項[文献 18-24]

| 攪拌翼 | 伝熱面 | 邪魔板 | K | α | B | γ | f | 備考 |
|------|-------|------|------|----------|-----|----------|-----|-------------|
| パドル | ジャケット | 併用可 | 0.36 | 2/3 | 1/3 | 0.14 | 1 | |
| | コイル | (不明) | 0.87 | 0.62 | 1/3 | 0.14 | 1 | |
| タービン | ジャケット | 無し | 0.54 | 2/3 | 1/3 | 0.14 | 1 | |
| | | 有り | 0.74 | 2/3 | 1/3 | 0.14 | 1 | |
| プロペラ | ジャケット | 無し | 0.37 | 2/3 | 1/3 | 0.14 | 1 | |
| | | 有り | 0.5 | 2/3 | 1/3 | 0.14 | 1 | |
| アンカー | ジャケット | 無し | 1.0 | 2/3 | 1/3 | 0.14 | 1 | 30<Re<300 |
| | | | 0.38 | 2/3 | 1/3 | 0.14 | 1 | 300<Re<4000 |
| | | | 0.55 | 2/3 | 1/4 | 0.14 | 1 | 4000<Re |

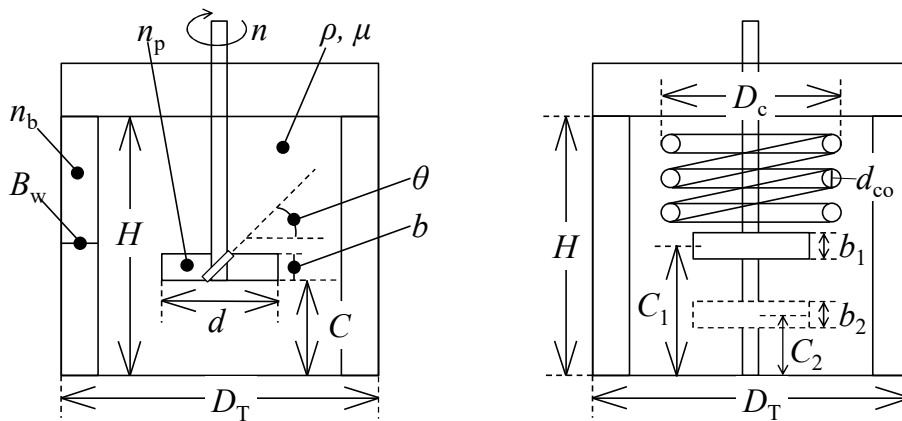


図 4. 4. 1. 1 攪拌槽の形状因子

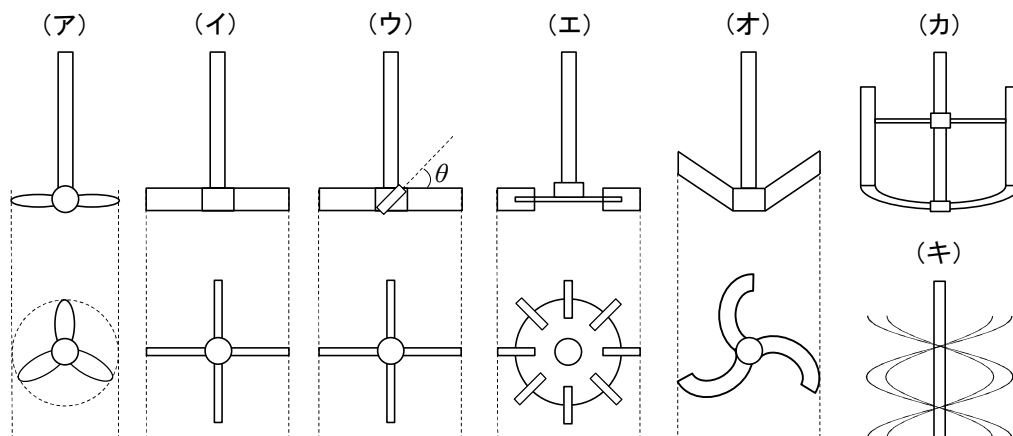


図 4.4.1.2 代表的な攪拌翼

(ア) プロペラ翼、(イ) 平板パドル翼、(ウ) 傾斜パドル翼、(エ) タービン翼、(オ) ファウドラー翼、
(カ) アンカー翼、(キ) ヘリカルリボン翼

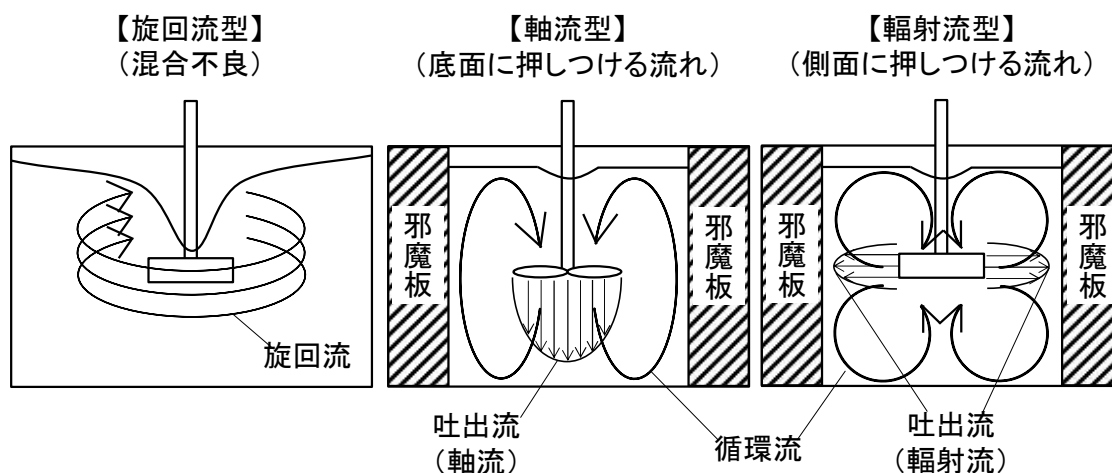


図 4.4.1.3 邪魔板の効果と典型的なフローパターン

4.4.2 伝熱媒体側(相変化が起こらない場合)

コイルの場合は、直円管対流伝熱の式を用いる。ただし、乱流の場合は、流路の曲率を考慮した補正係数を乗じる。

$$(Re > 10000) \quad Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_h}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(1 + 3.5 \frac{d_{ci}}{D_c} \right) \quad \dots(4.4.2.1) \quad \text{[文献 25, 26]}$$

$$(Re < 2100) \quad Nu = 1.86 Re^{1/3} Pr^{1/3} \left(\frac{d_{ci}}{L_c} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_h}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \dots(4.4.2.2) \quad \text{[文献 26]}$$

$$(2100 < Re < 10000) \quad Nu = 0.116 (Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} \left[1 + \left(\frac{d_{ci}}{L_c} \right)^{2/3} \right] \left(\frac{\mu_h}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \dots(4.4.2.3) \quad \text{[文献 27]}$$

$$\left[Nu \equiv \frac{h_2 d_{ci}}{k_h}, Re \equiv \frac{d_{ci} u_{hc} \rho_h}{\mu_h}, Pr \equiv \frac{C_{ph} \mu_h}{k_h} \right]$$

ただし、 C_p は平均比熱容量[J/(kg・K)]、 d_{ci} はコイル管内径[m]、 D_c はコイル中心径[m]、 g は重力加速度[m/s²]、 h_2 は伝熱媒体側(コイル管内)の境膜伝熱係数[W/(m²・K)]、 k は熱伝導度[W/(m・K)]、 L_c はコイル管長[m]、 u_{hc} はコイル管内を流れる伝熱媒体の平均流速[m/s]、 μ は液粘度[Pa・s]、添え字 h は伝熱媒体、w は固体壁。コイル管長 L_c [m]は、次式で与えられる。[文献 28]

$$L_c = \frac{A_c}{\pi d_{ci}} \quad \dots(4.4.2.4)$$

ただし、 A_c はコイルの伝熱面積[m²]。

平板ジャケットの場合は、次式で与えられる。[文献 29]

$$(Re > 10000) \quad Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_h}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(1 + 3.5 \frac{D_{eq}}{D_2} \right) \left[D_{eq} = \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_1} \right] \quad \dots(4.4.2.5)$$

$$(Re < 10000) \quad Nu = 1.02 Re^{0.45} Pr^{1/3} \left(\frac{D_{eq}}{L_j} \right)^{0.4} \left(\frac{\mu_h}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0.8} Gr^{0.05} \left[D_{eq} = D_2 - D_1 \right] \quad \dots(4.4.2.6)$$

$$\left[Nu \equiv \frac{h_1 D_{eq}}{k_h}, Re \equiv \frac{D_{eq} u_{hj} \rho_h}{\mu_h}, Pr \equiv \frac{C_{ph} \mu_h}{k_h}, Gr \equiv \frac{L_j^3 \rho_h^2 g \beta \Delta T_{lm}}{\mu_h^2} \right]$$

ただし、 D_{eq} は相当直径[m]、 D_1 はジャケット内径[m]、 D_2 はジャケット外径[m]、 h_1 は伝熱媒体側の境膜伝熱係数[W/(m²・K)]、 L_j はジャケット長[m](液深 H に等しい)、 u_{hj} はジャケット内を流れる伝熱媒体の流速[m/s]、 β は伝熱媒体の体積膨張率[1/K]、 ΔT_{lm} は伝熱媒体温度 T_1 と槽壁外面温度 T_{w1} の対数平均温度差[K]、 μ は液粘度[Pa・s]、添え字 h は伝熱媒体、w は固体壁。

ジャケット内径 D_1 と外径 D_2 [m]は、次式で表される。

$$D_1 = D_T + 2t_T \quad \dots(4.4.2.7)$$

$$D_2 = D_1 + 2\Delta X_j \quad \dots(4.4.2.8)$$

ただし、 t_T は槽壁の厚み[m]、 ΔX_j はジャケット間隔[m]。

ジャケット内の流路は、直円管ではないため、相当直径に換算したものを計算に用いる。相当直径 D_{eq} [m]は、流体と接している壁面周辺の長さ、すなわちぬれ辺長 l_w [m]と流路断面積 A_w [m²]の比で表される動水半径 r_H [m]の4倍で定義される。

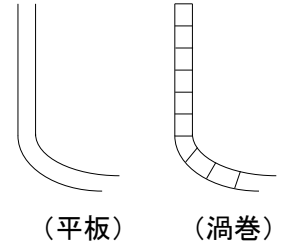
$$D_{eq} = 4r_H \quad \dots(4.4.2.9)$$

$$D_{eq} = \frac{4A_w}{l_w} \quad \dots(4.4.2.10)$$

伝熱基準の場合は、ぬれ辺長 l_w を伝熱辺長 l_h [m]に置き換える。

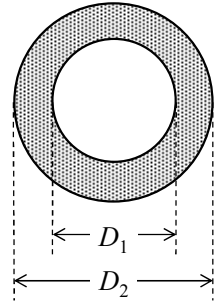
$$D_{eq} = \frac{4A_w}{l_h} \quad \dots(4.4.2.11)$$

平板ジャケット内の流路形状を環状とみなすときの相当直径は、次式で表される。



(流動基準) $D_{eq} \equiv \frac{4A_w}{l_w} = \frac{4\pi[(D_2/2)^2 - (D_1/2)^2]}{2\pi(D_2/2 + D_1/2)} = \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_2 + D_1} = D_2 - D_1 \quad \dots(4.4.2.12)$

(伝熱基準) $D_{eq} \equiv \frac{4A_w}{l_h} = \frac{4\pi[(D_2/2)^2 - (D_1/2)^2]}{2\pi(D_1/2)} = \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_1} \quad \dots(4.4.2.13)$



相当直径の定義は、推算式ごとに確認する必要がある。

ジャケット内を流れる伝熱媒体の流速 u_{hj} [m/s]は、次式で表される。

$$u_{hj} = \frac{W_{hj}}{\rho_h A_w} \left[A_w = (D_2/2)^2 - (D_1/2)^2 \right] \quad \dots(4.4.2.14)$$

ただし、 W_{hj} はジャケット内を流れる伝熱媒体の質量流量[kg/s]、 ρ_h は伝熱媒体の液密度[kg/m³]。

グラスホッフ数 Gr の対数平均温度差 ΔT_{lm} は、次式で求める。

(加熱時) $\Delta T_{lm} = \frac{(T_{10,av} - T_{w1}) - (T_{1f,av} - T_{w1})}{\ln[(T_{10,av} - T_{w1}) / (T_{1f,av} - T_{w1})]} = \Delta T / \ln \frac{T_{10,av} - T_{w1}}{T_{1f,av} - T_{w1}} \quad [\Delta T \equiv T_{10,av} - T_{1f,av}] \quad \dots(4.4.2.15)$

(冷却時) $\Delta T_{lm} = \frac{(T_{w1} - T_{10,av}) - (T_{w1} - T_{1f,av})}{\ln[(T_{w1} - T_{10,av}) / (T_{w1} - T_{1f,av})]} = \Delta T / \ln \frac{T_{w1} - T_{10,av}}{T_{w1} - T_{1f,av}} \quad [\Delta T \equiv T_{1f,av} - T_{10,av}] \quad \dots(4.4.2.16)$

$$\left[T_{10,av} \equiv \frac{T_{in} + T_{out,0}}{2}, T_{1f,av} \equiv \frac{T_{in} + T_{out,f}}{2} \right]$$

ただし、 ΔT は装置出入口における伝熱媒体の平均温度変化(定数扱い)[K]。

槽壁外面温度 T_{w1} は、次の熱収支式より求める。

(加熱時) $U(T_{1,av} - T_{w1}) = h'(T_{w1} - T_{2,av}) \quad \dots(4.4.2.17)$

(冷却時) $U(T_{w1} - T_{1,av}) = h'(T_{2,av} - T_{w1}) \quad \dots(4.4.2.18)$

$$\left[T_{1,av} = \frac{T_{10,av} + T_{1f,av}}{2}, T_{2,av} = \frac{T_0 + T_f}{2}, \frac{1}{h'} = \frac{\ell_w}{k_w} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2} \right]$$

ただし、添え字 1 は伝熱媒体側、2 は攪拌液側、in は入口側、out は出口側、0 は初期、f は最終、av は算術平均。総括伝熱係数 U [W/(m²・K)]は、さしあたり適当な値を仮定しておく。 U の計算値 ($1/U=1/h_1+1/h_{s1}+\ell_w/k_w+1/h_{s2}+1/h_2$)とここでの仮定値が一致するまで仮定と計算を試行錯誤的に繰り返す。適当な U 値が与えられている場合は、その値を仮定値として用いる。

4.4.3 伝熱媒体側(相変化が起こる場合)

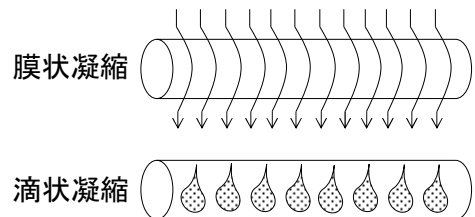
単一飽和蒸気の膜状凝縮伝熱式を用いる。熱媒にスチームを用いる場合は、飽和状態の凝縮水が伝熱面の外側または内側を膜状に濡らして熱を伝えるものとする。

凝縮液膜のレイノルズ数 Re_f は、次式で表される。

$$Re_f = \frac{D_{eq}(W_{cl}/A_w)}{\mu_{cl}} \quad \dots(4.4.3.1)$$

$$Re_f = \frac{(4A_w/l_w)(W_{cl}/A_w)}{\mu_{cl}} \left[D_{eq} \equiv \frac{4A_w}{l_w} \right] \quad \dots(4.4.3.2)$$

$$Re_f = \frac{4W_{cl}/l_w}{\mu_{cl}} \quad \dots(4.4.3.3)$$



$$Re_f = \frac{4\Gamma}{\mu_{cl}} \left[\Gamma \equiv \frac{W_{cl}}{l_w} \right] \quad \cdots(4.4.3.4)$$

$$(\text{ジャケット}) \quad \Gamma = \frac{W_{cl}}{\pi(D_T + 2t_T)} \quad \cdots(4.4.3.5)$$

$$(\text{コイル}) \quad \Gamma = \frac{W_{cl}}{L_c} \quad \cdots(4.4.3.6)$$

ただし、 D_T は槽径(槽内径)[m]、 t_T は槽壁厚み[m]、 L_c はコイル管長[m]、 W_{cl} は凝縮量[kg/s]、 Γ (ガンマ)はぬれ辺長あたりの凝縮液膜の質量流量[kg/(m·s)]、 μ_{cl} は凝縮液粘度[Pa·s]。

ジャケットの場合は垂直管外の凝縮伝熱式、コイルの場合は水平管内の凝縮伝熱式を用いる。[文献 30. 31]

$$(\text{ジャケット}, Re < 2100) \quad \frac{h}{k_{cl}} \left[\frac{\mu_{cl}^2}{\rho_{cl}(\rho_{cl} - \rho_v)g} \right]^{1/3} = 1.88 \left(\frac{4\Gamma}{\mu_{cl}} \right)^{-1/3} \quad \cdots(4.4.3.7)$$

$$(\text{ジャケット}, Re > 2100) \quad \frac{h}{k_{cl}} \left[\frac{\mu_{cl}^2}{\rho_{cl}(\rho_{cl} - \rho_v)g} \right]^{1/3} = 0.0077 \left(\frac{4\Gamma}{\mu_{cl}} \right)^{0.4} \quad \cdots(4.4.3.8)$$

$$(\text{コイル}) \quad \frac{h}{k_{cl}} \left[\frac{\mu_{cl}^2}{\rho_{cl}(\rho_{cl} - \rho_v)g} \right]^{1/3} = 0.76 \left(\frac{4\Gamma}{\mu_{cl}} \right)^{-1/3} \quad \cdots(4.4.3.9)$$

ただし、 h は凝縮伝熱係数[W/(m²·K)]、 k_{cl} 、 ρ_{cl} 、 μ_{cl} は凝縮温度における凝縮液の熱伝導度[W/(m·K)]、密度[kg/m³]、粘度[Pa·s]、 ρ_v は凝縮温度における蒸気密度[kg/m³]。各推算式の左辺を凝縮数という。なお、ジャケット層流条件式の右辺の係数 1.88 について、Nusselt(ヌッセルト)の理論式では 1.47 であるが、実用上は 1.28 倍した 1.88 を用いる[文献 31]。飽和スチームの凝縮温度は、ジャケットまたはコイルに導入された飽和スチーム圧と水の蒸気圧曲線との交点より読み取る。

4. 5 伝熱面積

ジャケットの伝熱面積 A_J [m²]は、攪拌槽の接液面積 A_L [m²]に等しいものとする。[文献 14. 32]

$$(\text{皿形鏡板槽}) \quad A_J = \pi D_T^2 \left(\frac{H}{D_T} + 0.436 \right) \quad \cdots(4.5.1)$$

$$(\text{平底円筒槽}) \quad A_J = \pi D_T H + \frac{\pi D_T^2}{4} \quad \cdots(4.5.2)$$

ただし、 D_T は槽径[m]、 H は液深[m]。

コイルの伝熱面積 A_c [m²]は、総括の伝熱速度式より求める。

$$A_c = \frac{Q}{U\Delta T_{lm}} \quad \cdots(4.5.3)$$

①伝熱量 熱収支式より求める。攪拌液側を基準とする場合は、次式となる。

$$(\text{加熱時}) \quad Q = \frac{MC_p(T_f - T_0)}{\tau_H} \quad \cdots(4.5.4)$$

$$(\text{冷却時}) \quad Q = \frac{MC_p(T_0 - T_f)}{\tau_C} \quad \cdots(4.5.5)$$

ただし、 C_p は攪拌液の比熱容量[J/(kg・K)]、 M は攪拌液の質量[kg]、 Q は伝熱量[W]、 τ は伝熱時間[s]。伝熱媒体側を基準とする場合は、伝熱媒体の温度変化に着目する。

$$\text{(加熱時)} \quad Q = W_{hc} C_{ph} (T_{10,av} - T_{1f,av}) = W_{hc} C_{ph} \Delta T \quad [\Delta T \equiv T_{10,av} - T_{1f,av}] \quad \cdots(4.5.6)$$

$$\text{(冷却時)} \quad Q = W_{hc} C_{ph} (T_{1f,av} - T_{10,av}) = W_{hc} C_{ph} \Delta T \quad [\Delta T \equiv T_{1f,av} - T_{10,av}] \quad \cdots(4.5.7)$$

$$\left[T_{10,av} \equiv \frac{T_{in} + T_{out,0}}{2}, T_{1f,av} \equiv \frac{T_{in} + T_{out,f}}{2} \right]$$

ただし、 C_{ph} は伝熱媒体の比熱容量[J/(kg・K)]、 W_{hc} はコイル管内を流れる伝熱媒体の質量流量[kg/s]、 ΔT は伝熱媒体の装置出入口における平均温度変化[K]、添え字1は伝熱媒体側、inは入口側、outは出口側、0は初期、fは最終、avは算術平均。

回分操作の場合、攪拌液温度 T が時間変化するため、伝熱媒体の出口温度 T_{out} も時間変化する。ここでは、1バッチ中の平均温度変化 ΔT を用いて、近似的に定数扱いとする。

コイル管内を流れる伝熱媒体の質量流量 W_{hc} [kg/s]は、次式で表される。

$$W_{hc} = \rho_h u_{hc} S_c \quad \left[S_c \equiv \frac{\pi d_{ci}^2}{4} \right] \quad \cdots(4.5.8)$$

ただし、 d_{ci} はコイル管内径[m]、 S_c はコイル管断面積[m²]、 u_{hc} はコイル管内を流れる伝熱媒体の平均流速[m/s]、 ρ_h は伝熱媒体の密度[kg/m³]。

コイル管内にスチームを流して加熱する場合のコイルの伝熱速度 Q [W]は、次式で表される。

$$Q = S \lambda_v \quad \cdots(4.5.9)$$

$$S = \rho_h u_{cs} S_c \quad \cdots(4.5.10)$$

ただし、 S はスチーム流量[kg/s]、 u_{cs} はコイル管内のスチーム流速[m/s]、 λ_v は蒸発潜熱[J/kg]。

②対数平均温度差 伝熱の推進力である温度差 ΔT が時間や場所によって変化する場合に用いる。次式のように、温度差の最大値 ΔT_{max} と最小値 ΔT_{min} をとって定数とする。

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln(\Delta T_{max}/\Delta T_{min})} \quad \cdots(4.5.11)$$

伝熱媒体の出口温度が操作中に変化しない場合は、次式となる。

$$\text{(加熱時)} \quad \Delta T_{lm} = \frac{(T^* - T_0) - (T^* - T_f)}{\ln[(T^* - T_0)/(T^* - T_f)]} \quad \cdots(4.5.12)$$

$$\text{(冷却時)} \quad \Delta T_{lm} = \frac{(T_0 - T^*) - (T_f - T^*)}{\ln[(T_0 - T^*)/(T_f - T^*)]} \quad \cdots(4.5.13)$$

伝熱媒体の出口温度が操作中に変化する場合は、次式となる。

$$\text{(加熱時)} \quad \Delta T_{lm} = \frac{(T_{10,av} - T_0) - (T_{1f,av} - T_f)}{\ln[(T_{10,av} - T_0)/(T_{1f,av} - T_f)]} = \frac{\Delta T - (T_0 - T_f)}{\ln[(T_{10,av} - T_0)/(T_{1f,av} - T_f)]} \quad [\Delta T \equiv T_{10,av} - T_{1f,av}] \quad \cdots(4.5.14)$$

$$\text{(冷却時)} \quad \Delta T_{lm} = \frac{(T_0 - T_{10,av}) - (T_f - T_{1f,av})}{\ln[(T_0 - T_{10,av})/(T_f - T_{1f,av})]} = \frac{\Delta T - (T_f - T_0)}{\ln[(T_0 - T_{10,av})/(T_f - T_{1f,av})]} \quad [\Delta T \equiv T_{1f,av} - T_{10,av}] \quad \cdots(4.5.15)$$

$$\left[T_{10,av} \equiv \frac{T_{in} + T_{out,0}}{2}, T_{1f,av} \equiv \frac{T_{in} + T_{out,f}}{2} \right]$$

ただし、 ΔT は装置出入口における伝熱媒体の平均温度変化(定数扱い)[K]、 T^* は伝熱媒体の平衡温度[K](スチームの凝縮温度や恒温槽温度)、添え字 1 は伝熱媒体側、in は入口側、out は出口側、0 は初期、f は最終、av は算術平均。

③総括伝熱係数 次式より求める。境膜伝熱係数 h_1 および h_2 は、推算式より求める。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2} \quad \cdots(4.5.16)$$

ただし、 h は境膜伝熱係数[W/(m²·K)]、 h_s は汚れ係数[W/(m²·K)]、 k_w は固体壁の熱伝導度[W/(m·K)]、 ℓ_w は固体壁の厚み[m]、添え字 1 は伝熱媒体液側、2 は攪拌液側、s はスケール。

5. スケールアップ

5. 1 基本的な考え方

小型の円筒攪拌槽で最適な成果が得られたとする。たとえば、混合完了までの所要時間を短縮できた、析出した固体粒子の寸法を揃えることができたなど。これを大型の攪拌槽にスケールアップする際、小型槽で得られる現象や成果を大型槽でも実現したいと思うであろう。そうすると、大型槽は小型槽と相似の装置形状を選定するであろうし、小型槽での操作条件を参考に適切な攪拌条件を採用するであろう。しかし、「相似の装置形状」や「適切な攪拌条件」だけでは、具体的にいくりにすればよいのかの数字の部分が分からない。そこで、この数字の部分を工学の視点で考えてみる。

はじめに、大型槽の装置形状について考える。たとえば、小型槽を 10 倍にスケールアップするとして、小型槽のどの部分の寸法を 10 倍するかは複数考えられる。ここでは、槽径 D をスケールアップの基準に取り、それを 10 倍する。すなわち、大型槽の槽径は $10D$ と決まる。 D の値は、小型槽の槽径を測れば求まる。次に、大型槽の液深(えきしん)はいくりにすればよいだろうか。小型槽の液深 H の 10 倍となるであろうことは、想像がつく。答えは $10H$ でよいが、なぜそうなるのかの工学的根拠を与える必要がある。ところでいま、小型槽と相似の装置形状を大型槽で実現することを考えているが、具体的にどのようなことをすれば、それを実現したことになるだろうか。それは、**装置の寸法比を一定に保ってスケールアップすること**である。なぜ寸法比を一定に保つと相似の形状が保たれるのか。その直感的なイメージについて、たとえばテレビ画面の大きさは、何インチ～とか何型～で定義されるが、画面の縦と横の寸法比は、インチ数に関わらずほぼすべて同じになっている。それでいて、画面の形状は、インチ数が変わってもみな同じ長方形を保っている。正方形に近づくことはない。話を攪拌槽に戻す。どことどの寸法の比を取るかは複数考えられるが、ここでは、すでに分かっている槽径 D と現在検討中の液深 H の寸法比 H/D をスケールアップの基準に取る。なぜ D が分母なのかは、 D がおおもとのスケールアップ基準 ($D \rightarrow 10D$) になっているからと考えてよい。このことから、小型槽の寸法比 H/D 一定の条件下で大型槽の槽径を $10D$ に取ると、大型槽の液深は $10H$ と決まる。工学的根拠は、「小型槽の相似形状を大型槽で実現するには、装置の寸法比を一定に取る必要があるから」である。

次に、大型槽の攪拌条件について考える。翼径は、上と同じ考え方で決める。すなわち、寸法比 d/D をスケールアップの基準にとると、大型槽の翼径は $10d$ に決まる。攪拌速度については、また別の考え方になる。10倍にスケールアップすると、攪拌速度も10倍必要と思うかもしれないが、逆である。スケールアップすると、翼径が大きくなるので、ひとかきするだけでかなりの量の液が動く。したがって、**大型槽の攪拌速度は、小型槽よりも小さくて済む。**なお、攪拌速度をあえて一定にしてスケールアップする場合もある。攪拌速度 n [1/s]と翼径 d [m]を乗じた nd は、速度の単位[m/s]であり、攪拌翼の先端速度を表している(正確には、 πnd)。これをスケールアップの基準にとる。すなわち、翼先端速度 nd 一定の条件下で大型槽の槽径を $10D$ に取ると、大型槽の攪拌速度は $(1/10)n$ と決まる。工学的根拠は、「小型槽の攪拌条件を大型槽で実現するには、**翼先端速度を一定に取る**必要があるから」となる。翼先端速度のほか、液体積あたりの攪拌所要動力も基準となる。

最後に、大型槽の装置容積あたり伝熱面積[m²/m³]について考える。工業反応装置における伝熱の重要性は、加熱よりも除熱にある。たとえば、重合反応の場合、反応が進むにつれ粘度が増大し、熱が槽内でこもりやすくなるので、除熱速度 Q を大きく取る必要がある。そうするには、総括伝熱速度の式 $Q=UA\Delta T$ から分かるように、伝熱面積 A をなるべく大きく取ることが肝要となる。いまスケールアップするのだから、伝熱面積も必然的に大きくなり、とくに差支えがないように思われるかもしれない。たしかに**伝熱面積自体は大きくなるが、装置容積あたりでは減少する。**たとえば、槽径 D の小型槽の伝熱面積は、 D^2 に比例する。一方、10倍にスケールアップした大型槽の伝熱面積は、 $(10D)^2=100D^2$ に比例する。 $10D^2$ ではない。装置容積も同様にして、小型槽では D^3 に、大型槽では $(10D)^3=1000D^3$ にそれぞれ比例する。あくまで「比例する」とした理由は、様々な装置形状が考えられるからである。たとえ容器自体が単純な円筒形であっても、邪魔板やコイルなど付属品が挿入されると、正確には円筒形でなくなる。以上を踏まえ、単位装置容積あたりの伝熱面積は、小型槽では $D^2/D^3=1/D$ に、大型槽では $100D^2/1000D^3=(1/10)(1/D)$ に比例する。いま、装置由来の形状係数、すなわち比例定数の部分と同じであるとして、大型槽の装置容積あたり伝熱面積は、小型槽の10分の1に減少する。以上のことから、反応や晶析など、伝熱操作が重要となる工程では、いかに伝熱面積を稼ぐかが課題となる。

表 5.1.1 攪拌槽のスケールアップ

| 装置または操作条件 | 単位 | 小型槽 | 大型槽 | 根拠 |
|-------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| 槽径 | [m] | D | $10D$ | 定義(10倍にスケールアップ) |
| 液深 | [m] | H | $10H$ | 液深-槽径比 H/D 一定 |
| 攪拌翼径 | [m] | d | $10d$ | 翼径-槽径比 d/D 一定 |
| 攪拌速度 | [1/s] | n | $(1/10)n$ | 翼先端速度 nd 一定 |
| 伝熱面積 | [m ²] | $\propto D^2$ | $\propto 100D^2$ | 槽径の2乗 |
| 装置容積 | [m ³] | $\propto D^3$ | $\propto 1000D^3$ | 槽径の3乗 |
| 装置容積あたり伝熱面積 | [m ² /m ³] | $\propto 1/D$ | $\propto (1/10)(1/D)$ | (伝熱面積)/(装置容積) |

5. 2 スケールアップの基準

装置寸法比一定の基準①を満たすことが原則となる。その上で、他のスケールアップ基準②～⑦から一つを採用する。下記以外にも基準は存在する。条件次第では、複数の基準を採用できることもある。以下、添え字1を小型槽、2を大型槽とする。

①装置寸法比一定(幾何学的相似) 装置形状を相似にする考え方である。最優先で採用する。

$$d_2/d_1=b_2/b_1=D_2/D_1=H_2/H_1=\dots=\alpha \quad \dots(5.2.1)$$

ただし、 α はスケールアップの倍数(スケールアップファクター)であり、何倍にスケールアップしたいかで任意に設定することができる。

②レイノルズ数一定(力学的相似) 流動状態を相似にする考え方であるが、スケールアップすると液体積あたりの攪拌所要動力 P/V が大幅に低下するため、液に十分なエネルギーを与えることが難しくなる。スケールアップの基準としては、あまり用いられない。

$$Re_1 = Re_2 \quad \dots(5.2.2) \quad [1=小型槽、2=大型槽]$$

$$\frac{\rho_1 n_1 d_1^2}{\mu_1} = \frac{\rho_2 n_2 d_2^2}{\mu_2} \quad \dots(5.2.3)$$

$$n_1 d_1^2 = n_2 d_2^2 \quad [\rho_1=\rho_2, \mu_1=\mu_2] \quad \dots(5.2.4)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2} \quad \dots(5.2.5)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{(6-5)} = \frac{d_1}{d_2} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \dots(5.2.6)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \frac{d_1}{d_2}} \quad \dots(5.2.7)$$

③フルード数一定(力学的相似) 渦流の寸法や形状を相似にする考え方である。邪魔板を用いない場合に相当するが、実際的ではないため、スケールアップの基準としては、あまり用いられない。

$$Fr_1 = Fr_2 \quad \dots(5.2.8)$$

$$\frac{n_1^2 d_1}{g} = \frac{n_2^2 d_2}{g} \quad \dots(5.2.9)$$

$$n_1^2 d_1 = n_2^2 d_2 \quad \dots(5.2.10)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{1/2}} \quad \dots(5.2.11)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{1/2}\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\{(3/2)-5\}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-7/2} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \dots(5.2.12)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-7/2}} \quad \dots(5.2.13)$$

液の種類(ρ と μ)が変更されない限り、 Re と Fr の両方を基準に用いることはできない。

④液体積あたり攪拌所要動力一定(運動学的相似) スケールアップの一般的な基準としてよく用いられる。ただし、攪拌がもたらす吐出作用(循環させる)とせん断作用(分散させる)の比率に差が生じることが問題である。

$$\left(\frac{P}{V}\right)_1 = \left(\frac{P}{V}\right)_2 \quad \cdots(5.2.14)$$

$$\frac{P_1}{(\pi/4)D_1^2 H_1} = \frac{P_2}{(\pi/4)D_2^2 H_2} \quad \cdots(5.2.15)$$

動力比を取り、装置寸法比一定の条件($D_2/D_1=d_2/d_1$ および $H_2/H_1=d_2/d_1$)を用いる。

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \left(\frac{H_2}{H_1}\right) = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-3} \quad \cdots(5.2.16)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-3}} \quad \cdots(5.2.17)$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\rho_1^{1/3} d_1^{5/3} P_2^{1/3}}{\rho_2^{1/3} d_2^{5/3} P_1^{1/3}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{5/3} \left[\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^3\right]^{1/3} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{5/3} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{(5/3)-1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2/3} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \cdots(5.2.18)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2/3}} \quad \cdots(5.2.19)$$

⑤翼先端速度一定(運動学的相似) 液体積あたり攪拌所要動力 P/V 一定に次いでよく用いられる。とくに、気泡・液滴・微粒子の分散等、高いせん断力を要する場合に用いられる。

$$u_1 = u_2 \quad \cdots(5.2.20)$$

$$\pi n_1 d_1 = \pi n_2 d_2 \quad \cdots(5.2.21)$$

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 \quad \cdots(5.2.22)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \frac{d_1}{d_2}} \quad \cdots(5.2.23)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^1\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{(3-5)} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-2} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \cdots(5.2.24)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-2}} \quad \cdots(5.2.25)$$

⑥攪拌速度一定(運動学的相似) 混合時間をほぼ一定にすることができるが、スケールアップに伴い液体積あたりの攪拌所要動力 P/V が大幅に増大するため、かなり激しい攪拌が必要となる。経済面の問題から、あまり用いられない。

$$n_1 = n_2 \quad \cdots(5.2.26)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^0} \quad \cdots(5.2.27)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^0\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{(0-5)} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} \quad [\rho_1 = \rho_2] \quad \cdots(5.2.28)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5}} \quad \cdots(5.2.29)$$

⑦液体積あたり伝熱量一定(運動学的相似) ジャケット内の伝熱媒体側から攪拌液側へ与えられる液体積あたりの伝熱量 Q/V をスケールアップの基準にする。スケールアップすると、液体積あたりの攪拌所要動力 P/V が大幅に増大するため、現実的ではない。

$$\left(\frac{Q}{V}\right)_1 = \left(\frac{Q}{V}\right)_2 \quad \cdots(5.2.30)$$

対流伝熱式 $Q=hA\Delta T$ を用いる。

$$\frac{h_1 A_1 \Delta T_1}{(\pi/4)D_1^2 H_1} = \frac{h_2 A_2 \Delta T_2}{(\pi/4)D_2^2 H_2} \quad \cdots(5.2.31)$$

ただし、 h は境膜伝熱係数[W/(m \cdot K)]、 A は伝熱面積[m 2]、 ΔT は温度差[K]。

境膜伝熱係数 h は、次の無次元式で表される。

$$\frac{hD}{k} = K \left(\frac{\rho n d^2}{\mu}\right)^\alpha \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^\beta \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^\gamma \quad \cdots(5.2.32)$$

ただし、 C_p は比熱容量[J/(kg \cdot K)]、 k は流体の熱伝導度[W/(m \cdot K)]、 μ_w は槽壁温度における粘度[Pa \cdot s]。

上式をさらにその上の式の h_1 と h_2 に代入する。

$$\begin{aligned} & \frac{[K(k_1/D_1)(\rho_1 n_1 d_1^2/\mu_1)^\alpha (C_{p1} \mu_1/k_1)^\beta (\mu/\mu_w)^\gamma](\pi D_1 H_1) \Delta T_1}{(\pi/4)D_1^2 H_1} \\ & = \frac{[K(k_2/D_2)(\rho_2 n_2 d_2^2/\mu_2)^\alpha (C_{p2} \mu_2/k_2)^\beta (\mu/\mu_w)^\gamma](\pi D_2 H_2) \Delta T_2}{(\pi/4)D_2^2 H_2} \end{aligned} \quad \cdots(5.2.33)$$

スケールアップ前後で同じ流体を用いる場合は、流体の物性値(C_p, k, ρ, μ)が等しくなる。

$$\frac{[(1/D_1)(n_1 d_1^2)^\alpha] \Delta T_1}{D_1} = \frac{[(1/D_2)(n_2 d_2^2)^\alpha] \Delta T_2}{D_2} \quad \cdots(5.2.34)$$

スケールアップ前後で同じ温度差 ΔT とする。

$$\frac{(n_1 d_1^2)^\alpha}{D_1^2} = \frac{(n_2 d_2^2)^\alpha}{D_2^2} \quad \cdots(5.2.35)$$

装置寸法比一定の条件($D_2/D_1=d_2/d_1$)を用いる。

$$\frac{(n_1 d_1^2)^\alpha}{d_1^2} = \frac{(n_2 d_2^2)^\alpha}{d_2^2} \quad \cdots(5.2.36)$$

$$n_1^\alpha d_1^{2\alpha-2} = n_2^\alpha d_2^{2\alpha-2} \quad \cdots(5.2.37)$$

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^\alpha = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2\alpha-2} \quad \cdots(5.2.38)$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2-(2/\alpha)} \quad \cdots(5.2.39)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-1}} \quad [\alpha \approx 2/3(\text{代表値})] \quad \cdots(5.2.40)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-1}\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^5 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-3-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-8} \quad [\rho_1 = \rho_2] \quad \cdots(5.2.41)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-8}} \quad \cdots(5.2.42)$$

5. 3 スケールアップ基準式の使い方

はじめに、スケールアップの倍数 α を決める。たとえば、小型槽の槽径 D_1 を 8 倍にスケールアップして ($\alpha=8$)、大型槽の槽径を D_2 にすることを考える。 D_1 と α は既知なので、装置寸法比一定の条件式 ($d_2/d_1=b_2/b_1=D_2/D_1=H_2/H_1=\cdots=\alpha$) より、ただちに $D_2(=8D_1)$ が決まる。槽径 D のかわりに、翼径 d や翼幅 b を倍数の基準に取ってもよい。次に、どの基準を一定に保つのかを決める。たとえば、液体積あたり攪拌所要動力一定の条件を採用するものとする。スケールアップ前後で用いる流体の種類は同じであるとして、攪拌速度の比 (n_2/n_1) と翼径比 (d_1/d_2) の間には、 $(n_2/n_1)=(d_1/d_2)^{2/3}$ の関係式が成り立つ。このうち、 n_1 と d_1 については、自分の小型槽に関する情報なので、既知である。たとえば、 $n_1=300$ rpm、 $d_1=5$ cm であったとしよう。もう一つ、大型槽の n_2 または d_2 のいずれかが既知でなければならないが、いま $D_2=8D_1$ の関係式があるので、装置寸法比一定の条件より $d_2=8d_1$ となって、 d_2 は消去できる。 $(n_2/n_1)=(d_1/d_2)^{2/3}$ の関係式は、 $(n_2/n_1)=(1/8)^{2/3} \rightarrow (n_2/n_1)=(2^{-3})^{2/3} \rightarrow (n_2/n_1)=1/4 \rightarrow n_2=(1/4)n_1=(1/4)(300)=75$ rpm となり、スケールアップ後の攪拌速度 n_2 は、もとの 1/4 倍の 75 rpm に設定すればよいことが分かる。とくに回分式装置の場合、ある製品の生産終了後、別製品の生産で同じ装置を使い回すことがよくある。この場合、翼径や翼の種類は、余程の事情が無い限り変更できない。変更できるのは、原則として攪拌速度のみである。したがって、スケールアップ時に n_2 を如何ほどに設定すればよいのかが、往々にして知りたい情報となる。動力比 (P_2/P_1) も同様の考え方で用いる。たとえば今、既存の攪拌装置で、所要動力をもとの 8 倍にしたいとする。翼径は変更できないから、攪拌速度をいくらに変更すればよいか、ということになる。この場合は、動力数 $N_p(=P/\rho n^3 d^5)$ 一定の下で検討すればよい。すなわち、 $P_1/\rho n_1^3 d_1^5 = P_2/\rho n_2^3 d_2^5$ において、 $P_2=8P_1$ かつ $d_2=d_1$ とおけば、 $n_2=8^{1/3}n_1$ となる。変更前の攪拌速度 $n_1=100$ rpm であれば、 $n_2=(2^3)^{1/3}(100)=200$ rpm に変更すればよい。

設計計算

| | | | |
|----------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------------------------|
| 攪拌液 | 水 | 攪拌速度 n | 小型機のスケールアップ ^o に基づく(P/V 一定) |
| 攪拌液の密度 ρ | 1000 kg/m ³ | 原動機総合効率 η_{MT} | 0.7 |
| 攪拌液の粘度 μ | 0.001 Pa·s | 小型機の翼径 d_1 | 50 mm |
| 攪拌液の平均比熱容量 C_p | 4200 J/(kg·K) | 小型機の攪拌速度 n_1 | 480 rpm |
| 攪拌液の熱伝導度 k | 0.60 W/(m·K) | 伝熱形式 | 平板ジャケット |
| 攪拌液の初期温度 T_0 | 20°C | ジャケット間隔 ΔX_j | 100 mm |
| 攪拌液の最終温度 T_f | 60°C | 槽壁の厚み ℓ_w | 25 mm |
| 攪拌槽形状 | 平底円筒槽 | 槽壁の熱伝導度 k_w | 20 W/(m·K) |
| 槽径 D_T | 1200 mm | 伝熱媒体 | 温水 |
| 翼径-槽径比 d/D_T | 1/3 | 伝熱媒体の入口温度 T_{in} | 70°C |
| 槽底からの翼高さ-槽径比 C/D_T | 1/4 | 伝熱媒体の密度 ρ_h | 1000 kg/m ³ |
| 翼幅-槽径比 b/D_T | 1/15 | 伝熱媒体の粘度 μ_h | 0.001 Pa·s |
| 邪魔板幅-槽径比 B_w/D_T | 1/10 | 伝熱媒体の平均比熱容量 C_{ph} | 4200 J/(kg·K) |
| 液深-槽径比 H/D_T | 1 | 伝熱媒体の熱伝導度 k_h | 0.60 W/(m·K) |
| 邪魔板枚数 n_B | 4 | 伝熱媒体の質量流量 W_{hj} | 20 kg/s |
| 攪拌翼形状 | 傾斜パドル | 粘度補正項 $\mu/\mu_w, \mu_h/\mu_w$ | 1 |
| 翼枚数 n_p | 4 | 汚れ係数 h_{s1}, h_{s2} | 5000 W/(m ² ·K) |
| 翼ひねり角 θ | 45° | 重力加速度 g | 9.81 m/s ² |
| 翼段数 N | 1 | | |

①攪拌翼径 d

$$d=(1/3)D_T=(1/3)(1200)=\boxed{400 \text{ mm}}$$

②槽底からの翼高さ C

$$C=(1/4)D_T=(1/4)(1200)=\boxed{300 \text{ mm}}$$

③翼幅 b

$$b=(1/15)D_T=(1/15)(1200)=\boxed{80 \text{ mm}}$$

④邪魔板幅 B_w

$$B_w=(1/10)D_T=(1/10)(1200)=\boxed{120 \text{ mm}}$$

⑤液深 H

$$H=D_T=\boxed{1200 \text{ mm}}$$

⑥液体積 V

$$V=\pi(D_T/2)^2H=\pi(1.2/2)^2(1.2)=1.3571 \text{ m}^3 \approx \boxed{1.36 \text{ m}^3}$$

⑦攪拌速度 n

$$(P/V \text{ 一定})n_2=n_1(d_1/d_2)^{2/3}=(480)(50/400)^{2/3}=\boxed{120 \text{ rpm}} (=2 \text{ rps})$$

⑧攪拌レイノルズ数 Re

$$Re=\rho n d^2/\mu=(1000)(2)(0.400)^2/0.001=320000$$

⑩動力数 N_P

(動力特性線図) $N_P \doteq 1.7$

(永田の式)

$$b' = n_p b N / 2 = (4)(b)(1) / 2 = 2b$$

$$b' / D_T = 2b / D_T = 2(b / D_T) = (2)(1/15) = 2/15$$

$$d / D_T = 1/3$$

$$B_w / D_T = 1/10$$

$$H / D_T = 1$$

$$(B_w / D_T)^{1.2} n_B = (1/10)^{1.2} (4) = 0.25 \neq 0.35 \text{ (部分邪魔板条件)}$$

$$A = 14 + (b / D_T) [670 \{ (d / D_T) - 0.6 \}^2 + 185] = 14 + (2/15) [670 \{ (1/3) - 0.6 \}^2 + 185] = 45.019$$

$$B = 10^{[1.3 - 4 \{ (b / D_T) - 0.5 \}^2 - 1.14 (d / D_T)]} = 10^{[1.3 - 4 \{ (2/15) - 0.5 \}^2 - 1.14 (1/3)]} = 2.4111$$

$$p = 1.1 + 4(b / D_T) - 2.5[(d / D_T) - 0.5]^2 - 7(b / D_T)^4 = 1.1 + (4)(2/15) - (2.5)\{ (1/3) - 0.5 \}^2 - (7)(2/15)^4 = 1.5616$$

$$R_c = [25 / (b / D_T)] [(d / D_T) - 0.4]^2 + (b / D_T) / [0.11 (b / D_T) - 0.0048]$$

$$= [25 / (2/15)] [(1/3) - 0.4]^2 + (2/15) / [(0.11)(2/15) - 0.0048] = 14.346$$

$$R_\theta = 10^{4(1 - \sin \theta)} R_c = 10^{4(1 - \sin 45^\circ)} (14.346) = 212.96$$

$$N_{P_{\max}} = A / R_\theta + B \{ (10^3 + 1.2 R_\theta^{0.66}) / (10^3 + 3.2 R_\theta^{0.66}) \}^p (H / D_T)^{(0.35 + (b / D_T))} (\sin \theta)^{1.2}$$

$$= (45.019 / 212.96) + (2.4111) [\{ 1000 + (1.2)(212.96)^{0.66} \} / \{ 1000 + (3.2)(212.96)^{0.66} \}]^{1.5616} (1)^{0.35 + (2/15)} (\sin 45^\circ)^{1.2} = 1.6508$$

$$N_{P_\infty} = B (0.6 / 1.6)^p = (2.4111) (0.6 / 1.6)^{1.5616} = 0.52122$$

$$N_P = N_{P_{\max}} - (N_{P_{\max}} - N_{P_\infty}) [1 - 1.29 (B_w / D_T)^{1.2} n_B]^2 = 1.6508 - (1.6508 - 0.52122) [1 - 1.29 (1/10)^{1.2} (4)]^2 = 1.1370 \doteq 1.14$$

(亀井・平岡の式)

$$b/d = 1/5$$

$$b/D_T = 1/15$$

$$d/D_T = 1/3$$

$$B_w/D_T = 1/10$$

$$H/D_T = 1$$

$$b/H = b/D_T = 1/15$$

$$d/H = d/D_T = 1/3$$

$$\beta = 2[\ln(D_T/d)] / [(D_T/d) - (d/D_T)] = 2\ln 3 / [3 - (1/3)] = 0.82395$$

$$\eta = 0.711 [0.157 + \{ n_p \ln(D_T/d) \}^{0.611}] / [n_p^{0.52} \{ 1 - (d/D_T)^2 \}]$$

$$= 0.711 [0.157 + \{ 4\ln 3 \}^{0.611}] / [4^{0.52} \{ 1 - (1/3)^2 \}] = 1.02216$$

$$C_L = 0.215 \eta n_p (d/H) [1 - (d/D_T)^2] + 1.83 (b \sin \theta / H) [n_p / (2 \sin \theta)]^{1/3}$$

$$= (0.215)(1.02216)(4)(1/3) [1 - (1/3)^2] + (1.83)(\sin 45^\circ / 15) [4 / (2 \sin 45^\circ)]^{1/3} = 0.38246$$

$$Re_d = \rho n d^2 / \mu = (1000)(2)(0.400)^2 / 0.001 = 320000$$

$$Re_G = [\{ \pi \eta \ln(D_T/d) \} / (4d/\beta D_T)] Re_d = [\{ \pi (1.02216) \ln 3 \} / \{ (4)(1/3) / 0.82395 \}] (320000) = 697630$$

$$\gamma = [\eta \{ \ln(D_T/d) \} / (\beta D_T/d)^5]^{1/3} = [(1.02216) (\ln 3) / \{ (0.8239)(3) \}^5]^{1/3} = 0.23003$$

$$X = \gamma n_p^{0.7} b \sin^{1.6} \theta / H = (0.23003)(4^{0.7})(1/15)(\sin 45^\circ)^{1.6} = 0.023244$$

$$C_i = [(1.96 X^{1.19})^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8} = [\{ (1.96)(0.023244)^{1.19} \}^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8} = 0.022292$$

$$C_r = 23.8 (d/D_T)^{-3.24} (b \sin \theta / D_T)^{-1.18} X^{0.74} = (23.8)(1/3)^{-3.24} (\sin 45^\circ / 15)^{-1.18} (0.023244)^{0.74} = 497479$$

$$f_{\infty}=0.0151(d/D_T)C_i^{0.308}=(0.0151)(1/3)(0.022292)^{0.308}=0.0015598$$

$$m=[(0.71X^{0.373})^{-7.8}+(0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8}=[\{(0.71)(0.023244)^{0.373}\}^{-7.8}+(0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8}=0.17439$$

$$f=C_i/Re_G+C_i\{(C_{tr}/Re_G)+Re_G\}^{-1}+(f_{\infty}/C_i)^{1/m}]^m$$

$$f=(0.38246/697630)+(0.022292)[\{(497479/697630)+697630\}^{-1}+(0.0015598/0.022292)^{1/0.17439}]^{0.17439}=0.0021918$$

$$N_{P0}=[(1.2\pi^4\beta^2)/\{8d^3/(D_T^2H)\}]f=[(1.2\pi^4\beta^2)/\{8(d/D_T)^3\}]f=[(1.2)(\pi^4)(0.82395)^2/\{(8)(1/3)^3\}](0.0021918)=0.58702$$

(傾斜ノドル) $N_{Pmax}=8.3(2\theta/\pi)^{0.9}n_p^{0.7}b(\sin\theta)^{1.6}/d=(8.3)[(2)(45\pi/180)/\pi]^{0.9}(4^{0.7})(1/5)(\sin 45^\circ)^{1.6}=1.3483$

(完全邪魔板条件) $(B_w/D_T)n_B^{0.8}=0.27(N_{Pmax})^{0.2}$

$$(B_w/D_T)n_B^{0.8}=(1/10)(4^{0.8})=0.30314$$

$$0.27N_{Pmax}^{0.2}=(0.27)(1.3483)^{0.2}=0.2866\neq 0.30314(\text{部分邪魔板条件})$$

(傾斜ノドル) $x=4.5(B_w/D_T)n_B^{0.8}/\{(2\theta/\pi)^{0.72}(N_{Pmax})^{0.2}\}+N_{P0}/N_{Pmax}$

$$=(4.5)(1/10)(4^{0.8})/[\{(2)(45\pi/180)/\pi\}^{0.72}(1.3483)^{0.2}]+0.58702/1.3483=2.3168$$

$$N_P=(1+x^{-3})^{-1/3}N_{Pmax}=\{1+(2.3168)^{-3}\}^{-1/3}(1.3483)=1.3139\approx \boxed{1.31}$$

⑪攪拌所要動力 P

(動力特性線図) $P=N_P\rho n^3 d^5=(1.7)(1000)(2)^3(0.400)^5=139.26 \text{ W} \approx \boxed{139 \text{ W}}$

(永田式) $P=N_P\rho n^3 d^5=(1.1370)(1000)(2)^3(0.400)^5=93.143 \text{ W} \approx \boxed{93.1 \text{ W}}$

(亀井・平岡式) $P=N_P\rho n^3 d^5=(1.3139)(1000)(2)^3(0.400)^5=107.63 \text{ W} \approx \boxed{107 \text{ W}}$

⑫原動機規格 P_{MC}

(動力特性線図) $P_M=P/\eta_{MT}=0.13926/0.7=0.19894 \text{ kW}$

(永田式) $P_M=P/\eta_{MT}=0.093143/0.7=0.13306 \text{ kW}$

(亀井・平岡式) $P_M=P/\eta_{MT}=0.10763/0.7=0.15375 \text{ kW}$

$P_{MC}=0.2 \text{ kW}$ の原動機を採用すると、 $P_{MC}/V=0.2/1.36\approx 0.147 \text{ kW/m}^3$ より妥当な範囲内 $0.2\sim 4 \text{ kW/m}^3$ からは外れる。もうひとまわり大きい $\boxed{P_{MC}=0.4 \text{ kW}}$ の原動機を採用する。 $(P_{MC}/V=0.4/1.36\approx 0.294 \text{ kW/m}^3)$

⑬伝熱媒体側境膜伝熱係数 h_1

$$D_1=D_T+2t_T=D_T+2\ell_w=1200+(2)(25)=1250 \text{ mm}=1.25 \text{ m}$$

$$D_2=D_1+2\Delta X_j=1250+(2)(100)=1450 \text{ mm}=1.45 \text{ m}$$

$$A_w=\pi(D_2/2)^2-\pi(D_1/2)^2=\pi(1.45/2)^2-\pi(1.25/2)^2=0.135\pi \text{ m}^2$$

$$u_{hj}=W_{hj}/(\rho_h A_w)=20/[(1000)(0.135\pi)]=0.047157 \text{ m/s}$$

$$D_{eq,h}=(D_2^2-D_1^2)/D_1=[(1.45)^2-(1.25)^2]/1.25=0.432 \text{ m}$$

$$D_{eq}=D_2-D_1=1.45-1.25=0.20 \text{ m}$$

$$Re=D_{eq,h}u_{hj}\rho_h/\mu_h=(0.432)(0.047157)(1000)/0.001=20371(>10000)$$

$$Re=D_{eq}u_{hj}\rho_h/\mu_h=(0.20)(0.047157)(1000)/0.001=9431(<10000)$$

$$Pr=C_{ph}\mu_h/k_h=(4200)(0.001)/0.60=7$$

$$Nu=0.023Re^{0.8}Pr^{1/3}(\mu/\mu_w)^{0.14}[1+3.5D_{eq,h}/D_2]=(0.023)(20371)^{0.8}(7)^{1/3}(1)^{0.14}[1+(3.5)(0.432/1.45)]=251.68$$

$$h_1=Nu(k_h/D_{eq,h})=(251.68)(0.60/0.432)=349.55\approx \boxed{350 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}}$$

⑭攪拌液側境膜伝熱係数 h_2

$$Re=pnd^2/\mu=(1000)(2)(0.400)^2/0.001=320000$$

$$Pr=C_p\mu/k=(4200)(0.001)/0.60=7$$

(ノドル・ジャケットの伝熱式) $Nu=0.36Re^{2/3}Pr^{1/3}(\mu/\mu_w)^{0.14}f=(0.36)(320000)^{2/3}(7)^{1/3}(1)^{0.14}(1)=3221.8$

$$h_2 = Nu(k/D_T) = (3221.8)(0.60/1.2) = 1610.9 \doteq \boxed{1611 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

⑮総括伝熱係数 U

$$1/U = 1/h_1 + 1/h_{s1} + \ell_w/k_w + 1/h_{s2} + 1/h_2 = (1/349.55) + (1/5000) + (0.025/20) + (1/5000) + (1/1610.9) = 0.0051315$$

$$U = 194.87 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \doteq \boxed{195 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

⑯ジャケット伝熱面積 A_J

$$A_J = \pi D_T H + \pi D_T^2/4 = \pi D_T^2 + \pi D_T^2/4 = (5/4)\pi D_T^2 = (1.25\pi)(1.200)^2 = 5.6548 \text{ m}^2 \doteq \boxed{5.65 \text{ m}^2}$$

⑰伝熱時間 τ_H

$$M = \rho V = (1000)(1.3571) = 1357.1 \text{ kg}$$

$$K = \exp[(UA_J)/(W_{hj}C_{ph})] = \exp[(194.87)(5.6548)/\{(20)(4200)\}] = 1.0132$$

$$\tau_H = \ln[(T_{in} - T_0)/(T_{in} - T_f)] / [(W_{hj}C_{ph}/MC_p)\{1 - (1/K)\}]$$

$$= \ln[(70 - 20)/(70 - 60)] / [(20/1357.1)(4200/4200)\{1 - (1/1.0132)\}]$$

$$= 8382.5 \text{ s} = 2.3284 \text{ h} \doteq \boxed{2.33 \text{ h}}$$

参考文献

- [1] W.L.McCabe, J.C. Smith, P. Harriott; Unit Operations of Chemical Engineering 7th Ed. McGraw-Hill(2004), Chapter 9 Agitation and Mixing of Liquids (Table 9.2)
- [2] 化学工学協会編; 化学工学便覧 改訂四版, 丸善(1978), 18章 攪拌および混合
- [3] 永田進治, 山本一夫, 横山藤平, 志賀周次郎; 化学工学, **21**, 708-715(1957)
- [4] S. Nagata; Mixing, John Wiley & Sons Inc. (1975), Chapter 1 Power consumption of mixing impellers
- [5] 山本一夫; 攪拌装置(化学装置設計・操作シリーズ), 化学工業社(1984), 3章 攪拌所要動力と攪拌槽の伝熱
- [6] 亀井 登, 平岡節郎, 加藤禎人, 多田 豊, 仕田裕貴, 李 泳世, 山口隆生, 高 承台; 化学工学論文集, **21**, 41-48(1995)
- [7] 化学工学会監修; 最新ミキシング技術の基礎と応用(化学工学の進歩 42), 三恵社(2008), 1.基礎編
- [8] 化学工学会編; 化学工学便覧 改訂七版, 丸善(2011), I-6 攪拌・混合
- [9] 加藤禎人; 攪拌槽の操作・設計のための計算法と実験法 改訂増補版, 情報機構(2015), 5章 動力特性
- [10] Y. Kato, Y. Tada, Y. Takeda, Y. Hirai and Y. Nagatsu; *J. Chem. Eng. Japan*, **46**, 6-9 (2009)
- [11] 山本一夫, 西野宏; 攪拌技術, 佐竹化学機械工業(1992), 6章
- [12] 寺尾昭二; 化学装置, **50**(4), 工業調査会(2008), pp.17-59
- [13] J.F.Richardson, J.M. Coulson, J.R. Backhurst, J.H. Harker; Coulson & Richardson's Chemical Engineering Vol.2, 5th Ed., Butterworth Heinemann(2002), Chapter 7 (Table 7.2)
- [14] 大野光之; 初歩から学ぶ化学装置設計, 工業調査会(2009), 9章 攪拌装置
- [15] D.Q. Kern; Process heat transfer, McGraw-Hill(1950), Chapter 18 Batch and unsteady-state processes
- [16] 尾花英朗; 熱交換器設計ハンドブック, 工学図書(1974), 6章 非定常プロセス
- [17] J.F.Richardson, J.M. Coulson, J.R. Backhurst, J.H. Harker; Coulson & Richardson's Chemical Engineering Vol.2, 5th Ed., Butterworth Heinemann(2002), Chapter 9.8 Heat transfer in reaction vessels
- [18] J.R. Couper, W.R. Penny, J.R. Fair; Chemical Process Equipment: Selection and Design 3rd Ed., Butterworth-Heinemann(2012), Chapter 10 Mixing and Agitation
- [19] J.F.Richardson, J.M. Coulson, J.R. Backhurst, J.H. Harker; Coulson & Richardson's Chemical Engineering Vol.2, 5th Ed., Butterworth Heinemann(2002), Chapter 9.8 Heat transfer in reaction vessels
- [20] W.R. Penney (G.F. Hewitt Eds.); Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere Publishing(1983), Chapter 3.14 Agitated vessels
- [21] N.P. Chopey; Handbook of Chemical Engineering Calculations 3rd Ed., McGraw-Hill Inc.(2003), Section 7.16 Heat transfer in agitated vessels
- [22] A.K. Coker; Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, Volume 3 (4th Ed.), Gulf Professional Publishing (2015), Chapter 15 (Table 15-98)
- [23] S. Nagata; Mixing, John Wiley & Sons Inc. (1975), Chapter 2 Heat transfer in agitated vessels
- [24] 藤田重文, 田原浩一, 吉田五一編; 化学装置・機械ハンドブック, 朝倉書店(1967), 9章 攪拌装置

- [25] W.H. McAdams; Heat transmission 3rd Ed., McGraw-Hill Education (1973), p.228
- [26] E.N. Sieder and G.E. Tate; *Ind. Eng. Chem.*, **28**, 1429-1436(1936)
- [27] H. Hausen; Verfahrenstechnik, Beih. Z. Ver. Deut. Ing. 4 (1943) p.91
- [28] D.R. Moss, M.M. Basic; Pressure Vessel Design Manual 4th Ed., Butterworth-Heinemann (2013), Procedure 5-6 Design pipe coils for heat transfer
- [29] A.K. Coker; Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, Volume 3 (4th Ed.), Gulf Professional Publishing (2015), Chapter 15 (Table 15-99)
- [30] G. Towler, R. Sinnott; Chemical Engineering Design 2nd Ed., Butterworth-Heinemann (2012), Chapter 19 Heat-transfer equipment
- [31] 尾花英朗; 熱交換器設計ハンドブック, 工学図書(1974), 8章 凝縮伝熱
- [32] 大野光之; 円筒容器内の液容量と接液面積, 化学装置 **32**(10), 55-67(1990)