

攪拌槽内流動

1. 流体の性質

気体と液体をあわせて流体という。流体は、気体のように圧力によって容積が変化する**圧縮性流体**と、液体のように容積が変化しない**非圧縮性流体**に分類される。厳密には、液体も多少は圧縮性を有するが、きわめて小さいことから、非圧縮性とみなしてよい。流体に外力を加えて動かそうとすると、それを妨げる力が内部で働く。この性質を**粘性**という。

1. 1 ニュートン流体

平行に置かれた2枚の板の中に流体を入れる。下の板を固定して、上の板を水平方向に引っ張ると、板に接している流体塊が板に引きずられて水平方向に動き出す。同様にして、そのすぐ下の流体塊も引きずられて動き出し、順次、下方へ伝播してゆく。固定板と接する流体塊の速度は、ゼロとなる。このように、流体の内部で作用する力を**応力**といい、単位は圧力と同じ[Pa]または[N/m²]で表される。とくに、外力に対して水平方向に作用する応力を**せん断応力**、鉛直方向に作用する応力を**鉛直応力**という。せん断応力 τ [Pa]は、その位置における流体の速度勾配 du/dy に比例し、その比例定数 μ [Pa·s]を**粘性係数**または**粘度**という。速度分布が直線で表される場合は、流体の速度勾配 du/dy がどこも同じになるため、位置 y に関わらずせん断応力 τ も一定の値となる。しかし、通常の流速分布は曲線で表されるため、位置 y が変化すると流体の速度勾配 du/dy が変化し、せん断応力 τ も変化する。せん断応力 τ と流体の速度勾配 du/dy が直線関係にある流体を**ニュートン流体**といい、その関係は、**ニュートン粘性法則**の式で表される。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \cdots(1.1.1)$$

上式は、次のようにして導くことができる。板の速度 U [m/s]は、外力 F [N]と板の間隔 Y [m]に比例し、板の面積 A [m²]に反比例する。なお、板速 U が間隔 Y に比例することの理解については、たとえば濡れた下敷きを動く板と見なし、それを机の上に置くことを想像してみるとよい。この場合、間隔 Y はゼロであり、下敷きは張り付いて水平方向に動かすことは困難であろう。反対に、下敷きが水面に浮いている状況であれば、すなわち間隔を大きく取れば、下敷きを水平方向に動かすことは容易であろう。同様にして、板速 U が面積 A に反比例することも想像がつくであろう。以上より、次の比例式が成り立つ。

$$U \propto F, Y, (1/A) \quad \cdots(1.1.2)$$

工学的には、右辺の因子をすべて乗じて適当な比例定数 μ' を作用させることで方程式とする。

$$U = \mu' \frac{FY}{A} \quad \cdots(1.1.3)$$

上式を変形して、比例定数を粘度 μ [Pa·s]に変更すると、ニュートン粘性法則の式が積分形で得られる。

$$\boxed{\tau = \mu \frac{U}{Y}} \quad \left[\tau \equiv \frac{F}{A} \right] \quad \cdots(1.1.4)$$

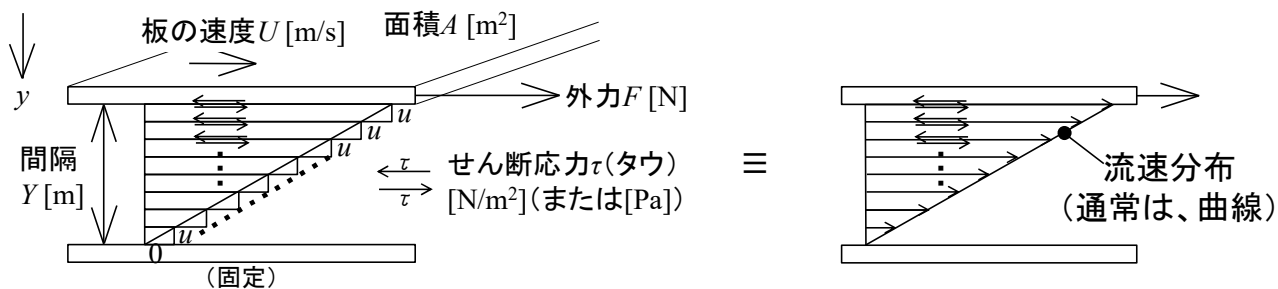


図 1.1.1 平行板間の流速分布 (ケット流れ)

1. 2 非ニュートン流体

流体のせん断応力 τ とせん断速度 du/dy が直線関係にある流体をニュートン流体といい、直線の傾きに相当する粘度 μ は一定である。一方、せん断速度によってせん断応力の増加または減少の割合が変化する流体を非ニュートン流体といい、粘度はせん断速度によって変化する。せん断速度は場所によって異なるため、粘度も場所ごとで異なる。便宜上は、平均せん断速度を用いる。平均せん断速度は、攪拌速度と装置形状に依存する。

非ニュートン流体のせん断応力 τ は、せん断速度 du/dy のべき乗で表される。

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad \left[\dot{\gamma} \equiv \frac{du}{dy} \right] \quad \dots(1.2.1)$$

ただし、 τ_0 は降伏応力[Pa]。

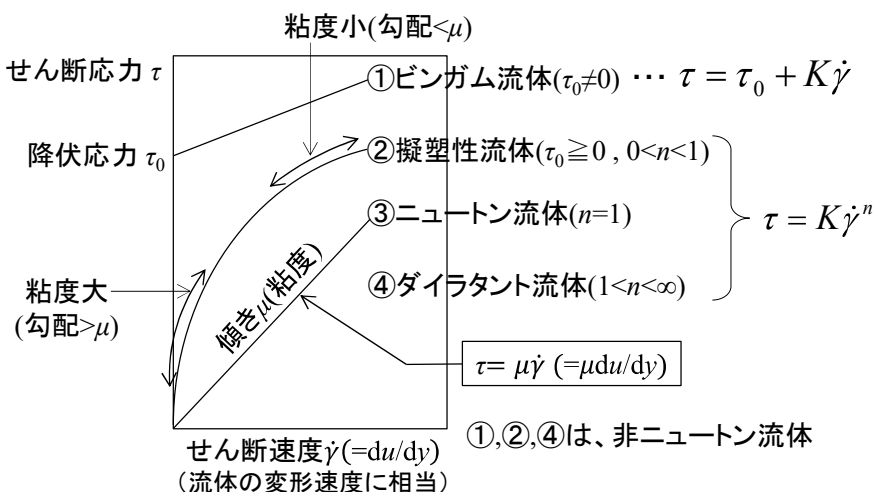


図 1.2.1 流体の変形速度とせん断応力の関係

①ビンガム流体($\tau_0 \neq 0, n=1$) (例)ホイップクリーム、練りハミガキ

降伏応力まで力を加えないと(押す、塗る)、流れない。

②擬塑性流体($\tau_0 \geq 0, 0 < n < 1$) (例)ペンキ、高分子溶液

攪拌がゆるやかだと(せん断速度小)、流れにくい(粘度大)。

攪拌を強めると(せん断速度大)、流れやすくなる(粘度小)。

③ニュートン流体($\tau_0=0, n=1$) (例)水、シリコン油

素早く攪拌しようとする(せん断速度大)、強い力が必要(粘度大)。

ゆるやかに攪拌しようとする(せん断速度小)、弱い力で済む(粘度小)。

※お風呂の水を腕でかき混ぜてみよ。

④ダイラタント流体($\tau_0=0, 1 < n < \infty$) (例)水あめ

攪拌がゆるやかだと(せん断速度小)、流れやすい(粘度小)。

攪拌を強めると(せん断速度大)、流れにくくなる(粘度大)。

2. 攪拌操作

2. 1 攪拌作用

攪拌とは、流体に機械的なエネルギーを与える操作のことをいう。攪拌のおもな役割は、液の分散(分散作用)と液の循環(吐出作用)に大別される。前者は液滴や気泡の微細化、後者は伝熱・反応・粒子浮遊の促進に効果がある。原動機は、電気エネルギーを力学的エネルギーに変換し、攪拌軸に動力を伝達する。その際、変速機・減速機で原動機からの回転数を適切な回転数に調節している。攪拌軸から攪拌翼へと動力が伝達され、攪拌翼が回転すると、翼近傍の液が流動し始める。このとき、翼から離れた液はまだ動いていないので、翼の近傍とその遠方とで流速差が生じる。それにより流体を変形させるせん断応力が発生し、翼近傍から遠方へと運動量が伝わって、液全体が流動するようになる。軸封部では、グランドパッキンやメカニカルシールなどの軸封装置により液漏れを防止している。グランドパッキンは、リング状の詰め物であり、安価だがある程度の液漏れは起こる。また、回転軸と接触するため、攪拌軸の摩耗も起こる。メカニカルシールは、回転軸とともに回転するため、攪拌軸の摩耗が起こりにくい。高価だが液漏れは少ない。邪魔板(じゃまいた)は、混合不良の元となる旋回渦流を抑止して混合を良好にしている。ジャケットは、内部に熱媒や冷媒を通じて、攪拌液との熱交換を行う。

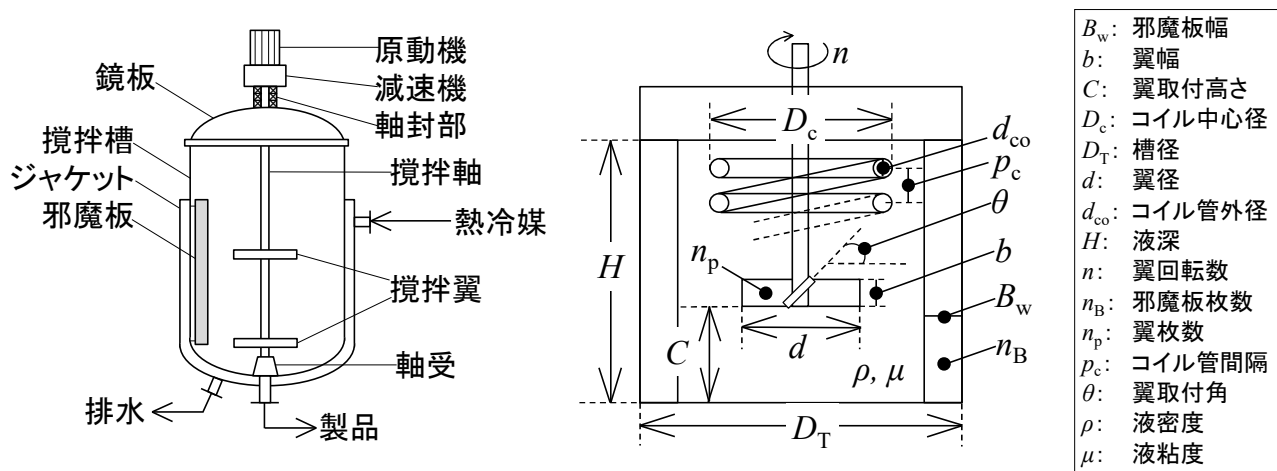


図 2. 1. 1 攪拌槽の基本構造とおもな条件因子

2. 2 攪拌翼

攪拌翼は、液を底面方向へ流動させる**軸流翼**と側面方向へ流動させる**輻射流(放射流)翼**に大別され、液の粘性や気泡・液滴・固体粒子の有無などによって使い分ける。代表例を下記に示す。

(ア) **プロペラ翼**は、吐出作用は高いが、せん断作用は低い。攪拌軸に対して垂直な軸流を与え、槽内に大きな循環流を形成する。

(イ) **平板(ひらいた)パドル翼**は、構造が単純であることから、翼径を大きくして低い回転数で用いることが多い。吐出作用が高いため、槽内の液循環は良好だが、せん断作用は低い。攪拌軸に対して水平な輻射流を与え、槽内で四つ葉様のフローパターンを形成する。

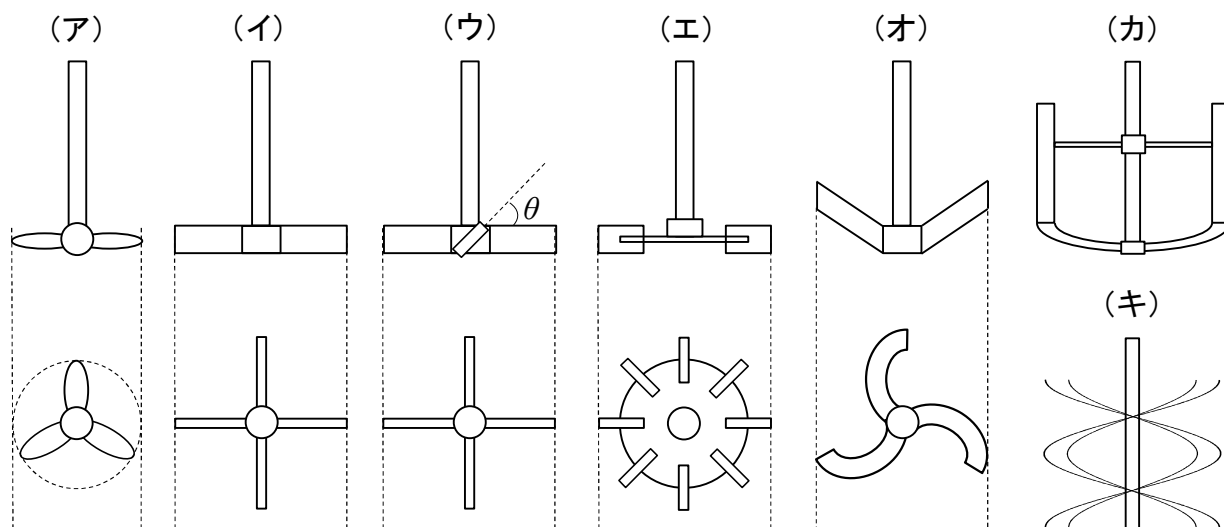
(ウ) **傾斜パドル翼**は、ひねりの部分で液を底面方向へ押し出す為、軸流を与えることができる。

(エ) **平板タービン翼**は、吐出作用とせん断作用ともに高く、輻射流型のフローパターンを形成する。スラリー攪拌や通気攪拌などで用いられる。傾斜タービン翼は、輻射流に加えて軸流を形成する。

(オ) **ファウドラ翼**は、横から見てV字型の形状になっているため、槽底近くまで攪拌翼を下げることができる。スラリー粒子の沈降抑止に効果がある。

(カ) **アンカー翼**は、高粘性液体や高濃度スラリーの攪拌に用いる。槽の壁面をかき取る形状をしている為、槽壁近傍の流速が大きくなり、境膜厚みが薄くなる結果、ジャケットの伝熱効率が向上する。ただし、ほぼ水平方向のみの攪拌であるため、上下方向の攪拌が望めず、液混合の均一性はあまり良くない。また、槽中心部の混合が悪い。

(キ) **ヘリカルリボン翼**は、アンカー翼同様、高粘性液体の攪拌に用いる。翼の高さは、槽底から液面まであり、アンカー翼にはあまり望めない、上下流の攪拌が支配的となる。



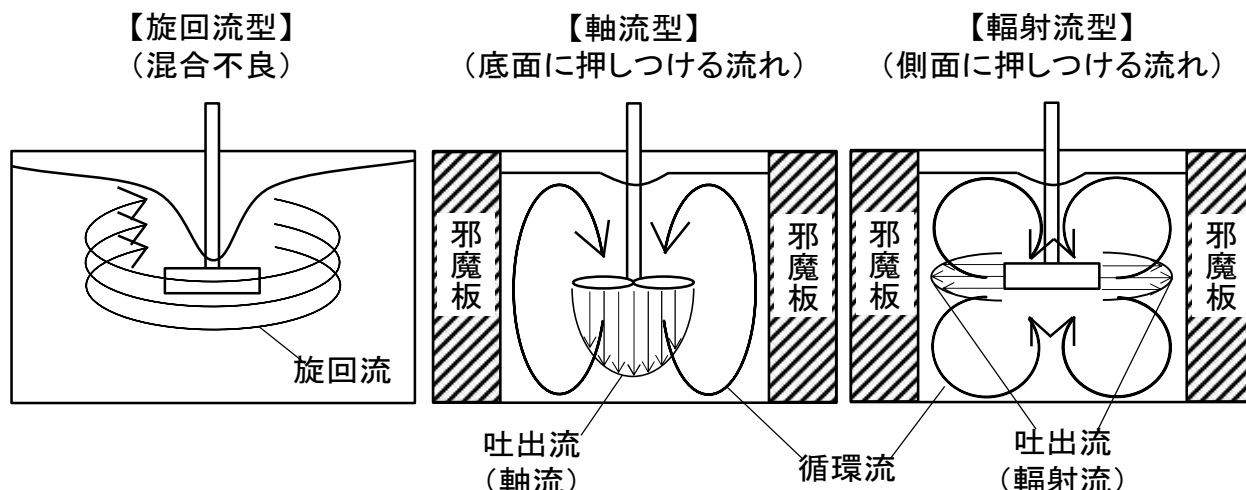


図 2.2.1 代表的な攪拌翼とフローパターン

3. 流動特性

(ア) 翼先端速度 u は、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) $1/n$ の比で定義される。たんに $u=nd$ とする場合もある。

$$u=2\pi(d/2)/(3/n)=\pi nd \quad \cdots(3.1)$$

ただし、 d は翼径[m]、 n は翼回転数[1/s]。

(イ) 攪拌レイノルズ数 Re は、攪拌槽内の流動状態を表す。粘性力 τA に対する慣性力 ma の比で定義される。

$$Re=ma/\tau A=\rho n^2 d^4/\mu nd^2=\rho nd^2/\mu \quad \cdots(3.2)$$

$$ma=\rho V(du/dt)\propto\rho d^3(u/(d/u))=\rho d^3 u/(3/n)=\rho nd^3(\pi nd)\propto\rho n^2 d^4 \quad \cdots(3.3)$$

$$\tau A=\mu(du/dy)A\propto(\mu u/d)d^2=\mu ud=\mu(\pi nd)d\propto\mu nd^2 \quad \cdots(3.4)$$

ただし、 A は流体塊の断面積[m²]、 a は流体塊の加速度[m/s²]、 m は流体塊の質量[kg]、 t は時間[s]、 V は液体積[m³]、 y は変位[m]、 μ は液粘度[Pa·s]、 τ はせん断応力[N/m²]、 ρ は液密度[kg/m³]。

(ウ) 攪拌フルード数 Fr は、攪拌により生じる旋回渦流の規模を表す。重力 mg に対する慣性力または遠心力 ma の比で定義される。

$$Fr=ma/mg=\rho V(du/dt)/\rho Vg\propto\rho n^2 d^4/\rho d^3g=n^2 d/g \quad \cdots(3.5)$$

ただし、 g は重力加速度[m/s²]。

(エ) 循環流量数 N_{qc} および吐出流量数 N_{qd} は、攪拌槽内部液および攪拌翼近傍液の無次元流量を表す。乱流条件で次式となる。

$$N_{qc}=N_{qd}[1+0.16\{(D_T/d)^2-1\}] \quad \cdots(3.6)$$

$$N_{qd}=0.32(n_p^{0.7}b/d)^{0.25}(D_T/d)^{0.34}N_p^{0.5} \quad \cdots(3.7)$$

ただし、 b は翼幅[m]、 D_T は槽径[m]、 n_p は翼枚数[-]、 N_p は動力数[-]。

N_{qc} より攪拌槽内部液の循環流量 Q_c [m³/s]と循環時間 T_c [s]と循環回数 N_c [1/s]が求まる。

$$Q_c=N_{qc}nd^3 \quad \cdots(3.8)$$

$$T_c = V/Q_c \quad \cdots(3.9)$$

$$N_c = 1/T_c \quad \cdots(3.10)$$

4. 動力特性

4. 1 攪拌所要動力

攪拌所要動力 P [W]は、液に与える単位時間あたりの機械的エネルギーを表し、翼が受ける慣性抵抗 R_f [N]と翼先端速度 u [m/s]の積で定義される。すなわち、攪拌翼が液から外力 R_f [N]を受けながら時間 t [s]の内に距離 x [m]移動するので、攪拌翼が液に対して行う仕事 W [J]は外力 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、攪拌所要動力に相当する仕事率 P [W]となる。

$$P = R_f u = C_D A (\rho u^2 / 2) u \propto \rho A u^3 = \rho d^2 (\pi n d)^3 \propto \rho d^2 (n d)^3 = \rho n^3 d^5 \rightarrow P = N_p \rho n^3 d^5 \quad \cdots(4.1.1)$$

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 ρ_{sl} に置き換える。

$$V_{sl} \rho_{sl} = V_{sl} \varepsilon \rho + V_{sl} (1 - \varepsilon) \rho_s \rightarrow \rho_{sl} = \varepsilon \rho + (1 - \varepsilon) \rho_s \quad \cdots(4.1.2)$$

ただし、 V_{sl} は懸濁液体積[m³]、 ε は空隙率[-]、 ρ_s は固体密度[kg/m³]。

4. 2 動力数

動力数 N_p の性質について調べる。攪拌槽の形状を一定として、攪拌所要動力に関する次元解析を行う。

$$P = K n^\alpha d^\beta \rho^\gamma \mu^\delta g^\varepsilon \quad \cdots(4.2.1)$$

ただし、 K 、 α 、 β 、 γ 、 δ 、 ε は定数[-]。

上式の各項の単位を M(質量)、L(長さ)、T(時間)の次元に置き換えると、次式の通りとなる。

$$P \text{ [W]} = [\text{J} \cdot \text{s}^{-1}] = [(\text{N} \cdot \text{m}) \cdot \text{s}^{-1}] = \{[(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}) \cdot \text{m}] \cdot \text{s}^{-1}\} = [\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}] = [\text{ML}^2 \text{T}^{-3}] \quad \cdots(4.2.2)$$

$$K \text{ [-]} \quad \cdots(4.2.3)$$

$$n^\alpha \text{ [s}^{-1}]^\alpha = [\text{T}^{-1}]^\alpha \quad \cdots(4.2.4)$$

$$d^\beta \text{ [m]}^\beta = [\text{L}]^\beta \quad \cdots(4.2.5)$$

$$\rho^\gamma \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]^\gamma = [\text{ML}^{-3}]^\gamma \quad \cdots(4.2.6)$$

$$\mu^\delta \text{ [Pa} \cdot \text{s}]^\delta = [(\text{N} \cdot \text{m}^{-2}) \cdot \text{s}]^\delta = \{[(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}) \cdot \text{m}^{-2}] \cdot \text{s}\}^\delta = [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]^\delta = [\text{ML}^{-1} \text{T}^{-1}]^\delta \quad \cdots(4.2.7)$$

$$g^\varepsilon \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}]^\varepsilon = [\text{LT}^{-2}]^\varepsilon \quad \cdots(4.2.8)$$

質量(M)の項について両辺を比較する。

$$1 = \gamma + \delta \quad \cdots(4.2.9)$$

長さ(L)の項について両辺を比較する。

$$2 = \beta - 3\gamma - \delta + \varepsilon \quad \cdots(4.2.10)$$

時間(T)の項について両辺を比較する。

$$-3 = -\alpha - \delta - 2\varepsilon \quad \cdots(4.2.11)$$

$1 = \gamma + \delta$ の式を γ について整理する。 δ と ε を定数と見なす。

$$\gamma = 1 - \delta \quad \cdots(4.2.12)$$

$2 = \beta - 3\gamma - \delta + \varepsilon$ の式に代入し、 β について整理する。

$$2=\beta-3(1-\delta)-\delta+\varepsilon \quad \cdots(4.2.13)$$

$$2=\beta-3+3\delta-\delta+\varepsilon \quad \cdots(4.2.14)$$

$$\beta=-2\delta-\varepsilon+5 \quad \cdots(4.2.15)$$

$-3=-\alpha-\delta-2\varepsilon$ の式を α について整理する。

$$\alpha=-\delta-2\varepsilon+3 \quad \cdots(4.2.16)$$

導かれた α と β と γ の式を最初の P の式に代入し、 δ と γ のべき乗項で整理する。

$$P=K n^{-\delta-2\varepsilon+3} d^{-2\delta-\varepsilon+5} \rho^{1-\delta} \mu^\delta g^\varepsilon \quad \cdots(4.2.17)$$

$$P=K (n^{-\delta} d^{-2\delta} \rho^{-\delta} \mu^\delta)(n^{-2\varepsilon} d^{-\varepsilon} g^\varepsilon)(\rho n^3 d^5) \quad \cdots(4.2.18)$$

$$\boxed{\frac{P}{\rho n^3 d^5} = K \left(\frac{\rho n d^2}{\mu} \right)^{-\delta} \left(\frac{n^2 d}{g} \right)^{-\varepsilon}} \quad \cdots(4.2.19)$$

$$N_p = K Re^D Fr^E \quad \cdots(4.2.20)$$

ただし、 D と E は定数[-]。

動力数は、レイノルズ数(流動状態)とフルード数(渦流の規模)の関数で表される。

4. 3 動力特性線図

動力数 N_p の関数形を導く。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。

$$P=P_L+P_T+P_G \quad \cdots(4.3.1)$$

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。

$$P_L=\tau A u=(\mu n d^2)(\pi n d) \propto \mu n^2 d^3 \quad \cdots(4.3.2)$$

$$P_L=K_L \mu n^2 d^3 \quad \cdots(4.3.3)$$

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。

$$P_T=R_f u=C_D A(\rho u^2/2) u \propto \rho A u^3=\rho d^2(\pi n d)^3 \propto \rho d^2(n d)^3=\rho n^3 d^5 \quad \cdots(4.3.4)$$

$$P_T=K_T \rho n^3 d^5 \quad \cdots(4.3.5)$$

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。

$$P_G=\rho g V u \propto \rho g d^3(\pi n d) \propto \rho g n d^4 \quad \cdots(4.3.6)$$

$$P_G=K_G \rho g n d^4 \quad \cdots(4.3.7)$$

P_L と P_T と P_G の式を P の式に代入する。

$$P=K_L \mu n^2 d^3+K_T \rho n^3 d^5+K_G \rho g n d^4 \quad \cdots(4.3.8)$$

$$N_p=P/\rho n^3 d^5=K_L(\mu n^2 d^3/\rho n^3 d^5)+K_T+K_G(\rho g n d^4/\rho n^3 d^5)=K_L/(\rho n d^2/\mu)+K_T+K_G/(n^2 d/g)=K_L/Re+K_T+K_G/Fr \quad \cdots(4.3.9)$$

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。

$$\boxed{N_p = \frac{K_L}{Re} + K_T} \quad \cdots(4.3.10)$$

乱流条件では次式となる。

$$\boxed{N_p \approx K_T} \quad (Re>10^4 \sim 10^5) \quad \cdots(4.3.11)$$

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 4.3.1 おもな攪拌翼における K_L と K_T [文献 1]

攪拌翼	K_L	K_T
平板タービン翼	65	5.75
平板パドル翼	36.5	1.70
プロペラ翼	41.0	0.32
アンカー翼	300	0.35
ヘリカルリボン翼	52	—

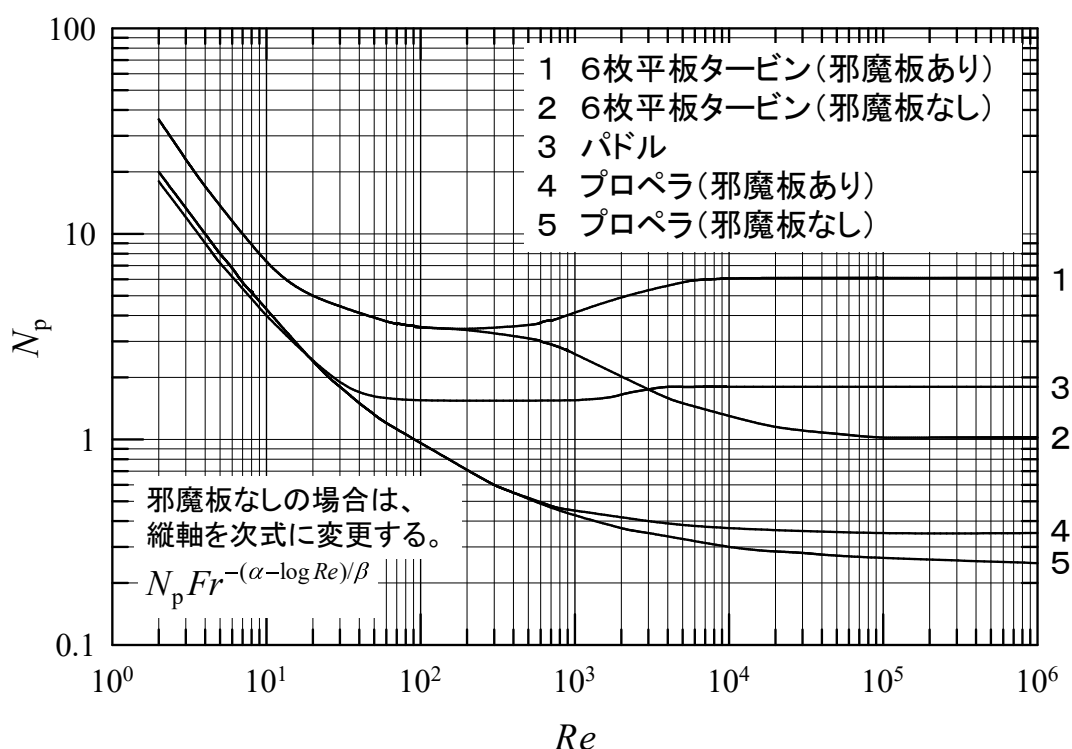


図 4.3.1 動力特性線図の例 [文献 2]

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。 [文献 3]

$$\rho_{sl} = \varepsilon\rho + (1-\varepsilon)\rho_s \quad \text{ただし、} \varepsilon \text{ は懸濁率[-]、} \rho_s \text{ は固体密度[kg/m}^3\text{]。}$$

5. 攪拌所要動力の推算

5. 1 邪魔板無しの場合

5.1.1 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、永田の式が有名である。[文献4-6]

$$N_{P0} = \frac{A}{Re} + B \left(\frac{10^3 + 1.2Re^{0.66}}{10^3 + 3.2Re^{0.66}} \right)^p \left(\frac{H}{D_T} \right)^{0.35+(b/D_T)} (\sin\theta)^{1.2} \quad \cdots(5.1.1.1)$$

$$A=14+(b/D_T)[670\{(d/D_T)-0.6\}^2+185] \quad \cdots(5.1.1.2)$$

$$B=10^{\bullet} \quad \bullet=1.3-4\{(b/D_T)-0.5\}^2-1.14(d/D_T) \quad \cdots(5.1.1.3)$$

$$p=1.1+4(b/D_T)-2.5\{(d/D_T)-0.5\}^2-7(b/D_T)^4 \quad \cdots(5.1.1.4)$$

なお、永田式で定義された以外の攪拌翼(翼枚数 $n_p \neq 2$ 、翼段数 $N \neq 1$ 、パドル翼以外)を用いる場合は、実際の翼幅 b を相当翼幅 b' に置き換えて計算する。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($n_p b N = \text{一定}$)。

$$n_p' b' N' = n_p b N \quad \cdots(5.1.1.5)$$

ただし、 n_p' と b' と N' は永田式の翼条件、 n_p と b と N は実際の翼条件。

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(2枚羽根1段パドル翼)、 $n_p' = 2$ と $N' = 1$ を上式に代入すると、相当翼幅 b' を得る。

$$b' = n_p b N / 2 \quad \cdots(5.1.1.6)$$

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。

5.1.2 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7-10]。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。

$$N_{P0} = [(1.2\pi^4 \beta^2) / \{8d^3 / (D_T^2 H)\}] f \quad \cdots(5.1.2.1)$$

$$f = C_L / Re_G + C_t \{ (C_{tr} / Re_G) + Re_G \}^{-1} + (f_\infty / C_t)^{1/m} \quad \cdots(5.1.2.2)$$

$$Re_G = [\{ \pi \eta \ln(D_T/d) \} / (4d/\beta D_T)] Re_d \quad \cdots(5.1.2.3)$$

$$Re_d = \rho n d^2 / \mu \quad \cdots(5.1.2.4)$$

$$C_L = 0.215 \eta n_p (d/H) [1 - (d/D_T)^2] + 1.83 (b \sin\theta / H) [n_p / (2 \sin\theta)]^{1/3} \quad \cdots(5.1.2.5)$$

$$C_t = [(1.96 X^{1.19})^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8} \quad \cdots(5.1.2.6)$$

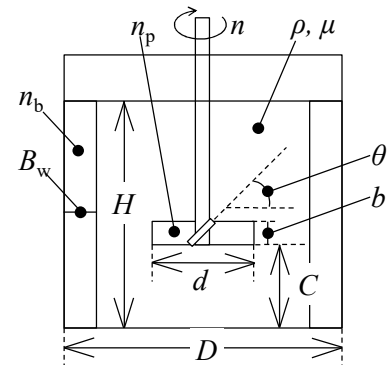
$$m = [(0.71 X^{0.373})^{-7.8} + (0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8} \quad \cdots(5.1.2.7)$$

$$C_{tr} = 23.8 (d/D_T)^{-3.24} (b \sin\theta / D_T)^{-1.18} X^{-0.74} \quad \cdots(5.1.2.8)$$

$$f_\infty = 0.0151 (d/D_T) C_t^{0.308} \quad \cdots(5.1.2.9)$$

$$X = \gamma n_p^{0.7} b \sin^{1.6} \theta / H \quad \cdots(5.1.2.10)$$

$$\beta = 2 \ln(D_T/d) / [(D_T/d) - (d/D_T)] \quad \cdots(5.1.2.11)$$



$$\gamma = [\eta \ln(D_T/d) / (\beta D_T/d)^5]^{1/3} \quad \cdots(5.1.2.12)$$

$$\eta = 0.711[0.157 + \{n_p \ln(D_T/d)\}^{0.611}] / [n_p^{0.52} \{1 - (d/D_T)^2\}] \quad \cdots(5.1.2.13)$$

加藤らは、亀井・平岡式の乱流項 C_t 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 11]

$$C_t = [(5X^{1.5})^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8} \quad \cdots(5.1.2.14)$$

$$m = [(0.8X^{0.373})^{-7.8} + (0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8} \quad \cdots(5.1.2.15)$$

多段翼の場合は、動力数 N_{P0} に羽根段数 N を乗じる。

5. 2 邪魔板有りの場合

5.2.1 完全邪魔板条件

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。

永田らは、完全邪魔板条件を次式で与えている。[文献 4-6]

$$(B_w/D_T)^{1.2} n_B = 0.35 \quad \cdots(5.2.1.1)$$

最大動力数 N_{Pmax} [ー]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。

$$R_\theta = 10^{4(1-\sin\theta)} R_c = 10^{4(1-\sin\theta)} [25/(b/D_T)] [(d/D_T) - 0.4]^2 + (b/D_T) [0.11(b/D_T) - 0.0048] \quad \cdots(5.2.1.2)$$

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 7-10]

$$(B_w/D_T) n_B^{0.8} = 0.27 (N_{Pmax})^{0.2} \quad \cdots(5.2.1.3)$$

ただし、 N_{Pmax} は最大動力数[ー]。

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。

$$\text{(平板パドル翼・平板タービン翼)} \quad N_{Pmax} = 10(n_p^{0.7} b/d)^{1.3} \quad [n_p^{0.7} b/d \leq 0.54] \quad \cdots(5.2.1.4)$$

$$\text{(平板パドル翼・平板タービン翼)} \quad N_{Pmax} = 8.3(n_p^{0.7} b/d) \quad [0.54 < n_p^{0.7} b/d \leq 1.6] \quad \cdots(5.2.1.5)$$

$$\text{(平板パドル翼・平板タービン翼)} \quad N_{Pmax} = 10(n_p^{0.7} b/d)^{0.6} \quad [1.6 < n_p^{0.7} b/d] \quad \cdots(5.2.1.6)$$

$$\text{(傾斜パドル翼)} \quad N_{Pmax} = 8.3(2\theta/\pi)^{0.9} [n_p^{0.7} b(\sin\theta)^{1.6}/d] \quad \cdots(5.2.1.7)$$

$$\text{(プロペラ翼・ファウドラ一翼)} \quad N_{Pmax} = 6.5[n_p^{0.7} b(\sin\theta)^{1.6}/d]^{1.7} \quad \cdots(5.2.1.8)$$

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。

5.2.2 部分邪魔板条件

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、邪魔板を用いる場合の一般的な条件に相当する。永田らは、次の推算式を報告している。[文献 4-6]

$$(N_{Pmax} - N_p) / (N_{Pmax} - N_{P\infty}) = [1 - 1.29(B_w/D_T)^{1.2} n_B]^2 \quad \cdots(5.2.2.1)$$

$$N_{P\infty} = B(0.6/1.6)^p \quad \cdots(5.2.2.2)$$

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 7-10]

$$N_p = [(1+x^{-3})^{-1/3}] N_{Pmax} \quad \cdots(5.2.2.3)$$

$$\text{(平板パドル翼・平板タービン翼)} \quad x = 4.5(B_w/D_T) n_B^{0.8} / (N_{Pmax})^{0.2} + N_{P0} / N_{Pmax} \quad \cdots(5.2.2.4)$$

$$(傾斜パドル翼・プロペラ翼・ファウラー翼) \quad x=4.5(B_w/D_T)n_B^{0.8}/[(2\theta/\pi)^{0.72}(N_{Pmax})^{0.2}]+N_{P0}/N_{Pmax} \quad \cdots(5.2.2.5)$$

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 8]。多段翼の場合は、動力数 N_P に羽根段数 N を乗じる。

5. 3 適正範囲

液体積あたり攪拌所要動力 P/V の適正範囲として、 $0.2\sim 4 \text{ kW/m}^3$ 程度が目安となる [文献 12]。計算値がこ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。なお、液体積あたりの原動機規格 P_M/V を指標にとる場合もある。

表 5. 3. 1 液体積あたり攪拌所要動力のおおよその目安 [文献 12]

攪拌動力	利用例	$P/V \text{ [kW/m}^3]$
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

6. 混合特性

混合時間 $\theta_M \text{ [s]}$ は、目的の均一度に達するまでの所要時間を表す。混合時間が短い程、攪拌性能は良好である。乱流条件で次式となる。

$$1/(n\theta_M)=0.092[(d/D_T)^3N_{qd}+0.21(d/D_T)(N_P/N_{qd})^{0.5}][1-\exp\{-13(d/D_T)^2\}] \quad \cdots(6.1)$$

$$N_{qd}=0.32(n_p^{0.7}b/d)^{0.25}(D_T/d)^{0.34}N_P^{0.5} \quad \cdots(6.2)$$

ただし、 b は翼幅[m]、 d は翼径[m]、 D_T は槽径[m]、 n_p は翼枚数[-]、 N_P は動力数[-]、 N_{qd} は吐出流量数[-]。 $1/(n\theta_M)$ の式の右辺第 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表す。

7. 気液系の攪拌

7. 1 攪拌所要動力

通気攪拌操作の場合、攪拌翼背面に微細気泡が生じることから攪拌作用が低下する。さらには、液が気泡に置換されることで液の見かけの密度が小さくなる。このことから、通気時の攪拌所要動力 $P_g \text{ [W]}$ は、無通気時の攪拌所要動力 $P \text{ [W]}$ よりも小さくなる。実用上は、 P_g/P を 0.6 以上に設定する。

通気時の攪拌所要動力 P_g の推算式について、平板タービン翼における Calderbank(カルダーバンク)の式が簡便である。 [文献 13]

$$\frac{P_g}{P}=1-12.6N_A \quad (N_A<0.035) \quad \cdots(7.1.1)$$

$$\frac{P_g}{P}=0.62-1.85N_A \quad (N_A>0.035) \quad \cdots(7.1.2)$$

通気数 $N_A \text{ [-]}$ は、攪拌槽内におけるガス分散状態の程度を表しており、攪拌翼からの吐出流量に対する

通気量の比で定義される。通気数が小さいほどガスの分散状態が良好であることから(攪拌支配)、通気量を抑えるか、あるいは攪拌速度を大きく取ることが推奨される。

$$N_A = \frac{Q_g}{nd^3} \quad \dots(7.1.3)$$

ただし、 Q_g は通気量[m³/s]。なお、単位体積当たりの通気量 Q_g [m³/min]/V [m³]を通気速度 Q_g/V [vvm] (gas **v**olume per liquid **v**olume per **m**inute)といい、1分間に液体積の何倍の空気が吹き込まれるかを表す。

永田らは、平板タービン翼において、装置形状や流動状態を考慮した次式を報告している。[文献 14]

$$\log \frac{P_g}{P} = -192 \left(\frac{d}{D_T} \right)^{4.38} \left(\frac{\rho nd^2}{\mu} \right)^{0.115} \left(\frac{n^2 d}{g} \right)^{1.96(d/D_T)} \left(\frac{Q_g}{nd^3} \right) \quad \dots(7.1.4)$$

右辺第2項が装置形状、第3項および第4項が流動状態(Re, Fr)、第5項が分散状態(N_A)を表している。

7. 2 完全分散通気攪拌速度

通気攪拌槽内におけるガス分散状態は、気泡の上昇力が気泡の分散を支配する状態(通気支配、望ましくない状態)と、攪拌による吐出しとせん断が気泡の分散状態を支配する状態(攪拌支配、望ましい状態)がある。攪拌支配とするのに最低限必要となるフラッディング通気攪拌速度 n_c [1/s]を与える推算式として、Nienow の式が知られている。[文献 15, 16]

$$\text{(Nienow)} \quad \frac{Q_g}{n_c d^3} = 30 \left(\frac{D_T}{d} \right)^{3.5} \left(\frac{n_c^2 d}{g} \right) \quad \dots(7.2.1)$$

ただし、 d は翼径[m]、 D_T は槽径[m]、 g は重力加速度[m/s²]。

近年の報告例では、6枚平板タービン翼に関する Sensel の式がある。[文献 17]

$$\text{(Sensel)} \quad \frac{Q_g}{n_c d^3} = 0.0675(n_c d) D_T^{-0.4} \quad \left[(n_c d) D_T^{-0.4} \leq 1.6 \right] \quad \dots(7.2.2)$$

$$\text{(Sensel)} \quad \frac{Q_g}{n_c d^3} = 0.0231[(n_c d) D_T^{-0.4}]^{3.75} \quad \left[(n_c d) D_T^{-0.4} \geq 1.6 \right] \quad \dots(7.2.3)$$

気泡の均一分散を良好な状態とするのに最低限必要な完全分散通気攪拌速度 n_{CD} [1/s]を与える推算式として Nienow(ニーナウ)の式が知られている。[文献 15, 16]

$$\text{(リングスパージャー)} \quad \frac{Q_g}{n_{CD} d^3} = 0.2 \left(\frac{D_T}{d} \right)^{0.5} \left(\frac{n_{CD}^2 d}{g} \right)^{0.5} \quad \dots(7.2.4)$$

より簡便には、次の有次元式がある。[文献 18]

$$\text{(単一孔スパージャー)} \quad n_{CD} = \frac{4Q_g^{0.5} D_T^{0.25}}{d^2} \quad \dots(7.2.5)$$

$$\text{(リングスパージャー)} \quad n_{CD} = \frac{3Q_g^{0.5} D_T^{0.25}}{d^2} \quad \dots(7.2.6)$$

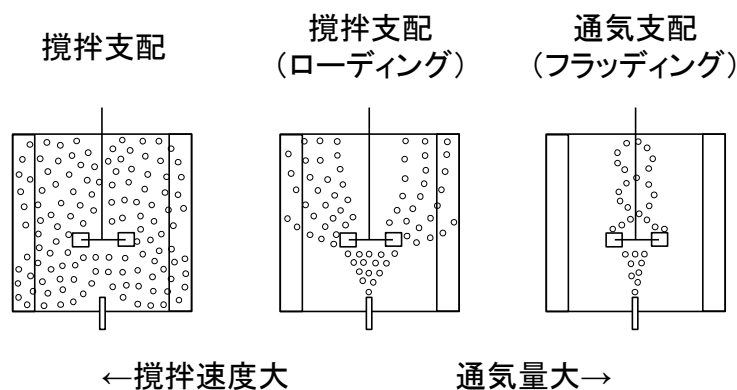


図 7.2.1 通気攪拌槽内におけるガスの分散状態 [文献 18]

8. 液液系の攪拌

8. 1 攪拌所要動力

液密度 ρ を混合液密度 ρ_M に置き換えることで、均一液相系と同様の計算ができる。

$$P = N_p \rho_M n^3 d^5 \quad \cdots(8.1.1)$$

$$\rho_M = \rho_C \phi_C + \rho_D \phi_D \quad [\phi_C + \phi_D = 1] \quad \cdots(8.1.2)$$

ただし、 d は攪拌翼径[m]、 n は攪拌速度[1/s]、 N_p は動力数[-]、 ϕ はホールドアップ[-]、添え字 C は連続相、添え字 D は分散相。

ホールドアップ ϕ [-] は、混合溶液の全体積に対する分散相または連続相の体積分率を表す。液滴が均一に分散されているものと仮定すると、分散相のホールドアップ ϕ_D [-] は、次式で表される。

$$\phi_D = \frac{V_D}{V_C + V_D} \quad (\text{batch}) \quad \cdots(8.1.3)$$

$$\phi_D = \frac{Q_D}{Q_C + Q_D} \quad (\text{continuous}) \quad \cdots(8.1.4)$$

動力数 N_p は、攪拌レイノルズ数 Re を求めて動力特性線図より読み取るか、推算式を用いる。液粘度 μ を混合液粘度 μ_M に置き換える。

$$Re = \frac{\rho_M n d^2}{\mu_M} \quad \cdots(8.1.5)$$

$$\mu_M = \frac{\mu_C}{\phi_C} \left(1 + \frac{1.5 \mu_D \phi_D}{\mu_C + \mu_D} \right) \quad (\text{baffled}) \quad \cdots(8.1.6)$$

$$\mu_M = \frac{\mu_C}{\phi_C} \left(1 + \frac{6 \mu_D \phi_D}{\mu_C + \mu_D} \right) \quad (\text{unbaffled, } \phi_C > 0.4) \quad \cdots(8.1.7)$$

$$\mu_M = \frac{\mu_D}{\phi_D} \left(1 - \frac{1.5\mu_C\phi_C}{\mu_C + \mu_D} \right) \quad (\text{unbaffled}, \phi_C < 0.4) \quad \cdots(8.1.8)$$

8. 2 相分散限界攪拌速度

液滴の均一分散に最低限必要となる相分散限界攪拌速度 n_C [1/s]は、邪魔板の有無に依存する。邪魔板有りの場合は、Skelland & Ramsay の式がある。[文献 19]

$$\frac{n_C^2 \rho_M d}{g \Delta \rho} = C'^2 \left(\frac{D_T}{d} \right)^{2\alpha} \phi_D^{0.106} \left[\left(\frac{d^3 \rho_M g \Delta \rho}{\mu_M^2} \right) \left(\frac{d^2 g \Delta \rho}{\sigma} \right) \right]^{-0.084} \quad (\text{baffled}) \quad \cdots(8.2.1)$$

邪魔板無しの場合は、4枚平板タービン翼に関する永田の式がある。[文献 20]

$$n_C = 6.0 D_T^{-2/3} \left(\frac{\mu_C}{\rho_C} \right)^{1/9} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_C} \right)^{0.26} \quad (\text{unbaffled}) \quad \cdots(8.2.2)$$

ただし、 $\Delta \rho$ は連続相と分散相の密度差[kg/m³]。

表 8. 2. 1 Skelland & Ramsay 式の定数 (一部抜粋) [文献 19]

攪拌翼	翼枚数	H/D_T	C/H	C'	α
プロペラ	3	1	1/4	4.38	0.67
	3	1	1/2	4.33	0.79
平板タービン	6	1	1/4	0.91	2.02
	6	1	1/2	0.95	1.38

H/D_T : 液深-槽径比、 C/H : 翼取付位置-液深比

9. 固液系の攪拌

9. 1 攪拌所要動力

液密度 ρ を懸濁液密度 ρ_{sl} に置き換えることで、均一液相系と同様の計算ができる。

$$P = N_p \rho_{sl} n^3 d^5 \quad \cdots(9.1.1)$$

$$\rho_{sl} = \varepsilon \rho + (1 - \varepsilon) \rho_s \quad \left[\varepsilon \equiv \frac{V_{sl} - V_s}{V_{sl}} \right] \quad \cdots(9.1.2)$$

ただし、 d は攪拌翼径[m]、 n は攪拌速度[1/s]、 N_p は動力数[-]、 P は攪拌所要動力[W]、 V_s は固体体積[m³]、 V_{sl} は懸濁液体積[m³]、 ε は空隙率[-]、 ρ_s は固体密度[kg/m³]。

動力数 N_p は、攪拌レイノルズ数 Re を求めて動力特性線図より読み取るか、推算式を用いる。(レイノルズ数は液体に対する定義式であることから、液密度 ρ を懸濁液密度 ρ_{sl} に置き換える必要はない。)

$$Re = \frac{\rho n d^2}{\mu} \quad \cdots(9.1.3)$$

液重量あたりの攪拌所要動力 ε_T [W/kg]は、次式で表される。

$$\varepsilon_T = \frac{P}{\rho_{sl}V} \quad \cdots(9.1.4)$$

液体積 V は、均一液相系の定義にしたがい、固体粒子の分散液体積を用いる。

9. 2 完全浮遊攪拌速度

攪拌槽内のすべての固体粒子が槽底から離れて流動している状態を完全浮遊状態という。Zwietering(ツビータリング、ツヴァイタリング)によれば、完全浮遊攪拌速度 N_{JS} [1/s]は、次式で与えられる。[\[文献 21\]](#)

$$N_{JS} = \frac{Sv^{0.10}d_p^{0.20}(g\Delta\rho/\rho)^{0.45}X^{0.13}}{d^{0.85}} \quad \cdots(9.2.1)$$

ただし、 d は攪拌翼径[m]、 d_p は粒径[m]、 g は重力加速度[m/s²]、 S は装置形状の幾何学的因子[-]、 X は質量百分率基準の固体粒子濃度(=(固体重量/液体重量)×100)[wt%]、 ν は動粘度(= μ/ρ)、 $\Delta\rho$ は固体と液体の密度差[kg/m³]。

表 9.2.1 Zwietering 式の幾何学的形状因子 S [\[文献 22\]](#)

J.R. Couper *et al.*; Chemical Process Equipment: Selection and Design 3rd Ed., (2012), 10 章

攪拌翼形状	d/D_T	C/D_T	S	
			平底槽底	皿形槽底
6枚平板タービン翼	1/3	1/4	7	5.2
4枚平板パドル翼	1/3	1/4	7.5	5.6
45°傾斜パドル翼	1/3	1/4	5	4.6
3枚プロペラ翼	1/3	1/4	9	8.2
アンカー翼	0.96	0.02	7	7
へリカルリボン翼	0.96	0.02	7	7

C : 槽底から攪拌翼までの距離(翼取付位置)、 d : 攪拌翼径、 D_T : 槽径

10. 高粘性流体の攪拌

高粘性流体の攪拌所要動力 P [W]は、次式で表される。

$$P = N_p^* \rho n^3 d^5 \quad \cdots(10.1)$$

ただし、 N_p^* は非ニュートン流体のみかけ動力数[-]。

N_p^* 値は、Metzner-Otto(メッツナー・オットー)の方法により求める[\[文献 23\]](#)。第一に、非ニュートン流体の動力特性(N_p^* , Re^*)とニュートン流体の動力特性(N_p , Re)は、一致するものと仮定する(ニュートン流体における動力特性線図と同じ関係性であるものとする)。

$$N_p^* Re^* = N_p Re \quad \cdots(10.2)$$

$$N_p^* = \frac{N_p Re}{Re^*} \left[Re^* \equiv \frac{\rho n d^2}{\mu^*} \right] \quad \cdots(10.3)$$

N_p と Re の積 $N_p Re$ は、動力特性曲線の近似式より見積もる。

$$N_p = \frac{K_L}{Re} + K_T \approx \frac{K_L}{Re} \quad \cdots(10.4)$$

$$N_p Re = K_L \quad \cdots(10.5)$$

ただし、 K_L は層流定数[-](タービン 65, パドル 36.5, プロペラ 41, アンカー300, リボン 52)。[文献 1] 上の近似は、高粘性流体の場合、一般に層流域での攪拌になることに基づく。

第二に、非ニュートン流体の平均せん断速度は、攪拌速度に比例するものと仮定する。

$$\dot{\gamma}_e = k_m n \quad \cdots(10.6)$$

ただし、 k_m はせん断速度定数[m/s²](リボン 30, アンカー22~25, パドル 10.5~11, タービン 11~12, プロペラ 10。

非ニュートン流体のみかけ粘度 μ^* [Pa·s]は、次式のように導かれる。

$$\mu^* \equiv \frac{\tau}{\dot{\gamma}_e} \quad \cdots(10.7)$$

$$\mu^* = K \dot{\gamma}_e^{n-1} \quad \left[\tau \equiv \tau_0 + K \dot{\gamma}_e^n \right] \quad (\tau_0=0 \text{ の場合}) \quad \cdots(10.8)$$

$$\mu^* = K (k_m n)^{n-1} \quad \left[\dot{\gamma}_e \equiv k_m n \right] \quad \cdots(10.9)$$

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] 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), p.153
- [4] 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)
- [5] S. Nagata; Mixing, John Wiley & Sons Inc. (1975), Chapter 1 Power consumption of mixing impellers
- [6] 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
- [7] 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)
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] Y. Kato, Y. Tada, Y. Takeda, Y. Hirai and Y. Nagatsu; *J. Chem. Eng. Japan*, **46**, 6-9 (2009)
- [12] J.F.Richardson, J.M. Coulson, J.R. Backhurst, J.H. Harker; Coulson & Richardson's Chemical Engineering Vol.2, 5th Ed., Butter-worth Heinemann(2002), Chapter 7 Liquid mixing (Table 7.2)
- [13] P.H. Calderbank; *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **36**, 443-463(1958)
- [14] 永田進治, 山口 巖, 西川正史, 和田謙一; 化学工学, **31**, 1016-1019(1967)
- [15] A.W. Nienow, D.J. Wisdom and J.C. Middleton; *Proc. 2nd Eur. Conf. Mixing*, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, pp.F1-1 to 16 and X54 (1977)
- [16] A.W. Nienow, M.C.G. Warmoeskerken, J.M. Smith and M. Konno; *Proc. 5th Eur. Mixing Conf.*, BHRA, Cranfield, pp.143-154 (1989)
- [17] M.E. Sensel, K.J. Myers and J.B. Fasano; *AIChE Symposium Series*, No.293, **89**, 76-84(1993)
- [18] 高橋幸司; 液体混合の最適設計と操作; テクノシステム(2012), 3 章気液混合
- [19] A.H.P. Skelland and G.G. Ramsay; *Ind. Eng. Chem. Res.*, **26**, 77-81(1987)
- [20] 永田進治ら; 化学工学と化学機械(化学機械協会年報, 8 巻), p.43 (1950)
- [21] T. N. Zwietering; *Chem. Eng. Sci.*, **8**, 244-253 (1958)

- [22] 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
- [23] A.B. Metzner and R.E Otto; *AIChE J.*, **3**, 3-10 (1957)

問 題

邪魔板付き平底円筒槽(槽径 1200 mm)に水を仕込んで 45°傾斜パドル翼により 180 rpm で攪拌操作を行う。攪拌槽形状は、別表に基づく。

水の物性値：密度 1000 kg/m³、粘度 0.001 Pa・s、平均比熱容量 4200 J/(kg・K)、熱伝導度 0.58 W/(m・K)

重力加速度：9.81 m/s²

別表 攪拌槽形状

d/D_T	C/D_T	b/D_T	B_w/D_T	d_{co}/D_T	D_c/D_T	p_c/D_T	H/D_T	n_p	n_B
1/3	1/3	1/15	1/10	1/30	0.70	1/15	1	4	4

b : 攪拌翼幅, B_w : 邪魔板幅, C : 翼取付位置, d : 攪拌翼径, d_{co} : コイル管外径, D_c : コイル中心径, D_T : 槽径, H : 液深, n_B : 邪魔板枚数, n_p : 羽根枚数, p_c : コイル管間隔

- (1) ①攪拌翼径[mm]、②槽底からの翼高さ[mm]、③翼幅[mm]、④邪魔板幅[mm]、⑤液深[mm]、⑥液体積[m³]を求めよ。
- (2) 攪拌レイノルズ数を求めて混合状態を判定せよ。
- (3) 完全邪魔板条件が成り立つ場合の攪拌所要動力[W]を線図より求めよ。
- (4) 邪魔板なしの場合の攪拌所要動力 P [W]を①永田の式、②亀井・平岡の式より求め、 P/V 値の妥当性を判定せよ。
- (5) 邪魔板ありの場合の攪拌所要動力 P [W]を①永田の式、②亀井・平岡の式より求め、原動機の市販規格 P_M [kW]を決定せよ。
- (6) インクを少量添加した場合の混合時間[s]を求めよ。動力数は、動力特性線図より読み取ること。

攪拌翼を 6 枚平板タービン翼に変更し、リングスパージャーより通気速度 1.0 vvm で空気を吹き込みながら攪拌操作を行う。($d/D_T=1/3$, $C/D_T=1/3$, $b/D_T=1/15$, $n_p=6$)

- (7) 完全分散通気攪拌速度[rpm]を Nienow の式より求めよ。
- (8) 通気時の攪拌所要動力[W]を Calderbank の式より求めよ。攪拌速度は、完全分散通気攪拌速度の値とする。動力数は、動力特性線図より読み取ること。

攪拌翼を 6 枚平板タービン翼に変更し、翼取付位置を槽径の 1/4 に下げて、槽内部液を全量排出させた後、水と油(密度 920 kg/m³、粘度 0.07 Pa・s、水に対する体積比 1)からなる混合液を仕込んで攪拌操作を行う。($d/D_T=1/3$, $C/D_T=1/4$, $b/D_T=1/15$, $H/D_T=1$, $n_p=6$)

- (9) 相分散限界攪拌速度 [rpm]を求めよ。混合液の界面張力は、25 mN/m とする。
- (10) 攪拌所要動力[W]を求めよ。攪拌速度は、相分散限界攪拌速度の値とする。動力数は、動力特性線図より読み取ること。

攪拌翼を 3 枚プロペラ翼に変更し、翼取付位置を槽径の 1/4 に下げて、槽内部液を全量排出させた後、水と砂(粒子密度 2650 kg/m³、平均粒子径 100 μm、重量 265 kg)からなる懸濁液を仕込んで攪拌操作を行う。($d/D_T=1/3$, $C/D_T=1/4$, $b/D_T=1/15$, $H/D_T=1$, $n_p=3$)

- (11) 完全浮遊攪拌速度[rpm]を求めよ。

(12) 攪拌所要動力[W]を求めよ。攪拌速度は、完全浮遊攪拌速度の10%増しとする。動力数は、動力特性線図より読み取ること。

攪拌翼を翼径750 mmのアンカー翼に変更し、槽内部液を全量排出させた後、密度1000 kg/m³の高粘性流体($K=30, n=0.5$)を仕込んで攪拌操作を行う。

(13) 攪拌速度48 rpmのときの攪拌所要動力 P [W]を求めよ。せん断速度定数 k_m は、算術平均値を用いよ。

答(1)①400 mm,②400 mm,③80 mm,④120 mm,⑤1200 mm,⑥1.36 m³,(2)480000,(3)498 W,(4)①108 W,②153 W,(5)①314 W,0.75 kW,②365 W,0.75 kW,(6)31.9 s,(7)135 rpm,(8)230 W,(9)143 rpm,(10)804 W,(11)244 rpm,(12)358 W,(13)560 W

[参考]数値の丸め方

(ア)切り捨てと切り上げの値を比較してより近い値を採用する。

12.31~~3~~ → (切り捨て)12.31 / (切り上げ)12.32 → (採用)12.31

(イ)(ア)で差が等しい場合は、偶数値を採用する。

12.30~~5~~ → (切り捨て)12.30 / (切り上げ)12.31 → (採用)12.30

単位換算

1 in (インチ) = 2.54 cm

1 ft (フィート) = 12 in = 0.3048 m

1 lb (ポンド) = 0.4536 kg

1 gal (ガロン) = 0.004546 m³

1 lb/ft³ (ポンド毎立方フィート) = 16.02 kg/m³

1 cP (センチポアズ) = 0.0006720 lb/(ft·s) = 0.001 Pa·s

1 dyn/cm (ダイン毎センチ) = 1 mN/m ※表面張力の単位。dynは、力の単位。