

## 攪拌槽の構造設計

攪拌槽や分離塔などの塔槽類は、胴(シェル)と鏡板(ヘッド)からなる円筒容器であり、これらは**压力容器**と呼ばれる。压力容器の基本的な役割は、容器が内側と外側から圧力を受ける中、内部液が外部に漏れるのを防ぐことにある。そのためには、塔槽類に必要とされる機械的強度、たとえばプラント部材の板厚や攪拌軸の強度を見積もることが肝要となる。塔型の場合は、耐風設計や耐震設計も重要となる。

### 1. 攪拌槽の形状 [文献 1, 2]

鏡板付き槽型压力容器の設計式を用いる。鏡板(かがみいた)には、全半球形、半楕円形、皿形、円錐形などがあり、それぞれに対応した設計式がある。

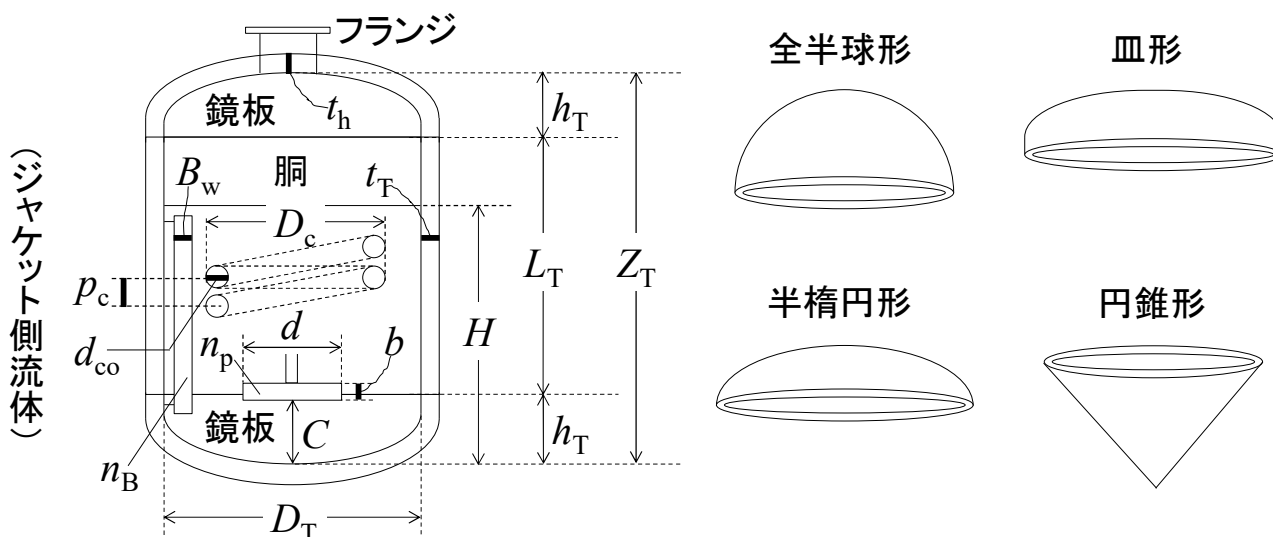


図 1.1 攪拌槽の幾何学的形状

$A_L$ : 接液面積,  $A_T$ : 満水時接液面積,  $b$ : 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,  $h_T$ : 鏡板高さ,  $L_T$ : 胴長,  $n_B$ : 邪魔板枚数,  $n_p$ : 羽根枚数,  $p_c$ : コイル管間隔,  $t_h$ : 鏡板の板厚,  $t_T$ : 胴の板厚,  $V_L$ : 液体積,  $V_T$ : 満水時液体積 (槽容積),  $Z_T$ : 槽深

表 1.1a 鏡板付き円筒攪拌槽の標準寸法 (槽容積/液体積比=1.5, 液深/槽径比=1 の場合)

鏡板の別	$V_L/\pi D_T^3$	$A_L/\pi D_T^2$	$V_T/\pi D_T^3$	$A_T/\pi D_T^2$	$Z_T/D_T$	$L_T/D_T$	$h_T/D_T$
全半球形	0.29166	1.500	0.43749	2.0832	2.0832	1.0833	0.500
半楕円形	0.27083	1.440	0.40624	1.9816	1.7916	1.2916	0.250
皿形	0.26450	1.436	0.39675	1.9650	1.7230	1.3350	0.194

表 1.1b 鏡板付き円筒攪拌槽の標準寸法 (続き。鏡板の種類には依存しない。) [文献 3]

$d/D_T^{*1}$	$C/D_T^{*2}$	$b/D_T$	$B_w/D_T$	$d_{co}/D_T$	$D_c/D_T$	$p_c/D_T$	$H/D_T$	$n_p^{*3}$	$n_B$
1/3	1/3	1/15	1/10	1/30	0.70	1/15	1	3	4
0.96	1/4							4	

	0.02							6	
--	------	--	--	--	--	--	--	---	--

- \*1  $d/D_T=1/3$ (代表値)、0.96(アンカー翼・ヘリカルリボン翼)
- \*2  $C/D_T=1/3$ (代表値)、1/4(固液系)、0.02(アンカー翼・ヘリカルリボン翼)
- \*3  $n_p=3$ (プロペラ翼)、4(パドル翼)、6(タービン翼)

槽容積－液体積比  $\alpha(=V_T/V_L)$  と液深－槽径比  $(H/D_T)$  は、設計値として与えられる。 $\alpha$  は、1.25～1.67 が目安となる【文献2】。槽径  $D_T$  が与えられると、表中の各寸法が求まる。接液面積  $A_L$  は、ジャケットの伝熱面積に相当する。

### 1. 1 全半球形鏡板槽(豎型)

満水時液体積(槽容積) $V_T$ 、満水時接液面積(全接液面積) $A_T$ 、槽深  $Z_T$ 、鏡板高さ  $h_T$  は、胴長－槽径比  $(L_T/D_T)$  を用いて次式で与えられる。

$$\frac{V_T}{\pi D_T^3} = \frac{L_T}{4D_T} + \frac{1}{6} \quad \dots(1.1.1)$$

$$\frac{A_T}{\pi D_T^2} = \frac{L_T}{D_T} + 1 \quad \dots(1.1.2)$$

$$\frac{Z_T}{D_T} = \frac{L_T}{D_T} + \frac{2h_T}{D_T} \quad \dots(1.1.3)$$

$$\frac{h_T}{D_T} = \frac{1}{2} \quad \dots(1.1.4)$$

胴長  $L_T$  を液深  $H$  の変数と見なして次式が成り立つ。

$$h_T + L_T = H \quad \dots(1.1.5)$$

$V_T$  の式に代入すると液体積  $V_L$ 、 $A_T$  の式に代入すると接液面積  $A_L$  がそれぞれ導かれる。

$$\frac{V_L}{\pi D_T^3} = \frac{H - h_T}{4D_T} + \frac{1}{6} \quad \dots(1.1.6)$$

$$\frac{V_L}{\pi D_T^3} = \frac{H}{4D_T} - \frac{1}{8} + \frac{1}{6} \left[ \frac{h_T}{D_T} = \frac{1}{2} \right] \quad \dots(1.1.7)$$

(全半球形)  $\boxed{\frac{V_L}{\pi D_T^3} = \frac{H}{4D_T} + \frac{1}{24}} \quad \dots(1.1.8)$

$$\frac{A_L}{\pi D_T^2} = \frac{H - h_T}{D_T} + 1 \quad \dots(1.1.9)$$

$$\frac{A_L}{\pi D_T^2} = \frac{H}{D_T} - \frac{1}{2} + 1 \left[ \frac{h_T}{D_T} = \frac{1}{2} \right] \quad \dots(1.1.10)$$

(全半球形)  $\boxed{\frac{A_L}{\pi D_T^2} = \frac{H}{D_T} + \frac{1}{2}} \quad \dots(1.1.11)$

槽容積と液体積の比を取ると、胴長－槽径比  $(L_T/D_T)$  が導かれる。

$$\frac{V_T}{\pi D_T^3} \bigg/ \frac{V_L}{\pi D_T^3} = \left( \frac{L_T}{4D_T} + \frac{1}{6} \right) \bigg/ \left( \frac{H}{4D_T} + \frac{1}{24} \right) \quad \dots(1.1.12)$$

$$\alpha \left( \frac{H}{4D_T} + \frac{1}{24} \right) = \frac{L_T}{4D_T} + \frac{1}{6} \quad \left[ \frac{V_T}{V_L} \equiv \alpha \right] \quad \cdots(1.1.13)$$

$$\frac{L_T}{4D_T} = \alpha \left( \frac{H}{4D_T} + \frac{1}{24} \right) - \frac{1}{6} \quad \cdots(1.1.14)$$

(全半球形) 
$$\boxed{\frac{L_T}{D_T} = \alpha \left( \frac{H}{D_T} + \frac{1}{6} \right) - \frac{2}{3}} \quad \cdots(1.1.15)$$

## 1. 2 半楕円形鏡板槽(豎型)

満水時液体積(槽容積) $V_T$ 、満水時接液面積(全接液面積) $A_T$ 、槽深 $Z_T$ 、鏡板高さ $h_T$ は、胴長-槽径比( $L_T/D_T$ )を用いて次式で与えられる。

$$\frac{V_T}{\pi D_T^3} = \frac{L_T}{4D_T} + \frac{1}{12} \quad \cdots(1.2.1)$$

$$\frac{A_T}{\pi D_T^2} = \frac{L_T}{D_T} + 0.690 \quad \cdots(1.2.2)$$

$$\frac{Z_T}{D_T} = \frac{L_T}{D_T} + \frac{2h_T}{D_T} \quad \cdots(1.2.3)$$

$$\frac{h_T}{D_T} = \frac{1}{4} \quad \cdots(1.2.4)$$

胴長 $L_T$ を液深 $H$ の変数と見なして次式が成り立つ。

$$h_T + L_T = H \quad \cdots(1.2.5)$$

$V_T$ の式に代入すると液体積 $V_L$ 、 $A_T$ の式に代入すると接液面積 $A_L$ がそれぞれ導かれる。

$$\frac{V_L}{\pi D_T^3} = \frac{H - h_T}{4D_T} + \frac{1}{12} \quad \cdots(1.2.6)$$

$$\frac{V_L}{\pi D_T^3} = \frac{H}{4D_T} - \frac{1}{16} + \frac{1}{12} \quad \left[ \frac{h_T}{D_T} = \frac{1}{4} \right] \quad \cdots(1.2.7)$$

(半楕円形) 
$$\boxed{\frac{V_L}{\pi D_T^3} = \frac{H}{4D_T} + \frac{1}{48}} \quad \cdots(1.2.8)$$

$$\frac{A_L}{\pi D_T^2} = \frac{H - h_T}{D_T} + 0.690 \quad \cdots(1.2.9)$$

$$\frac{A_L}{\pi D_T^2} = \frac{H}{D_T} - \frac{1}{4} + 0.690 \quad \left[ \frac{h_T}{D_T} = \frac{1}{4} \right] \quad \cdots(1.2.10)$$

(半楕円形) 
$$\boxed{\frac{A_L}{\pi D_T^2} = \frac{H}{D_T} + 0.440} \quad \cdots(1.2.11)$$

槽容積と液体積の比を取ると、胴長-槽径比( $L_T/D_T$ )が導かれる。

$$\frac{V_T}{\pi D_T^3} \bigg/ \frac{V_L}{\pi D_T^3} = \left( \frac{L_T}{4D_T} + \frac{1}{12} \right) \bigg/ \left( \frac{H}{4D_T} + \frac{1}{48} \right) \quad \cdots(1.2.12)$$

$$\alpha \left( \frac{H}{4D_T} + \frac{1}{48} \right) = \frac{L_T}{4D_T} + \frac{1}{12} \quad \left[ \frac{V_T}{V_L} \equiv \alpha \right] \quad \cdots(1.2.13)$$

$$\frac{L_T}{4D_T} = \alpha \left( \frac{H}{4D_T} + \frac{1}{48} \right) - \frac{1}{12} \quad \cdots(1.2.14)$$

$$\text{(半楕円形)} \quad \boxed{\frac{L_T}{D_T} = \alpha \left( \frac{H}{D_T} + \frac{1}{12} \right) - \frac{1}{3}} \quad \cdots(1.2.15)$$

### 1. 3 皿形鏡板槽(豎型)

満水時液体積(槽容積) $V_T$ 、満水時接液面積(全接液面積) $A_T$ 、槽深 $Z_T$ 、鏡板高さ $h_T$ は、胴長-槽径比( $L_T/D_T$ )を用いて次式で与えられる。

$$\frac{V_T}{\pi D_T^3} = \frac{L_T}{4D_T} + 0.063 \quad \cdots(1.3.1)$$

$$\frac{A_T}{\pi D_T^2} = \frac{L_T}{D_T} + 0.630 \quad \cdots(1.3.2)$$

$$\frac{Z_T}{D_T} = \frac{L_T}{D_T} + \frac{2h_T}{D_T} \quad \cdots(1.3.3)$$

$$\frac{h_T}{D_T} = 0.194 \quad \cdots(1.3.4)$$

胴長 $L_T$ を液深 $H$ の変数と見なして次式が成り立つ。

$$h_T + L_T = H \quad \cdots(1.3.5)$$

$V_T$ の式に代入すると液体積 $V_L$ 、 $A_T$ の式に代入すると接液面積 $A_L$ がそれぞれ導かれる。

$$\frac{V_L}{\pi D_T^3} = \frac{H - h_T}{4D_T} + 0.063 \quad \cdots(1.3.6)$$

$$\frac{V_L}{\pi D_T^3} = \frac{H}{4D_T} - 0.0485 + 0.063 \quad \left[ \frac{h_T}{D_T} = 0.194 \right] \quad \cdots(1.3.7)$$

$$\text{(皿形)} \quad \boxed{\frac{V_L}{\pi D_T^3} = \frac{H}{4D_T} + 0.0145} \quad \cdots(1.3.8)$$

$$\frac{A_L}{\pi D_T^2} = \frac{H - h_T}{D_T} + 0.630 \quad \cdots(1.3.9)$$

$$\frac{A_L}{\pi D_T^2} = \frac{H}{D_T} - 0.194 + 0.630 \quad \left[ \frac{h_T}{D_T} = 0.194 \right] \quad \cdots(1.3.10)$$

$$\text{(皿形)} \quad \boxed{\frac{A_L}{\pi D_T^2} = \frac{H}{D_T} + 0.436} \quad \cdots(1.3.11)$$

槽容積と液体積の比を取ると、胴長-槽径比( $L_T/D_T$ )が導かれる。

$$\frac{V_T}{\pi D_T^3} \bigg/ \frac{V_L}{\pi D_T^3} = \left( \frac{L_T}{4D_T} + 0.063 \right) \bigg/ \left( \frac{H}{4D_T} + 0.0145 \right) \quad \cdots(1.3.12)$$

$$\alpha \left( \frac{H}{4D_T} + 0.0145 \right) = \frac{L_T}{4D_T} + 0.063 \quad \left[ \frac{V_T}{V_L} \equiv \alpha \right] \quad \cdots(1.3.13)$$

$$\frac{L_T}{4D_T} = \alpha \left( \frac{H}{4D_T} + 0.0145 \right) - 0.063 \quad \cdots(1.3.14)$$

$$\text{(皿形)} \quad \boxed{\frac{L_T}{D_T} = \alpha \left( \frac{H}{D_T} + 0.0580 \right) - 0.252} \quad \cdots(1.3.15)$$

## 2. 攪拌槽の強度設計 [文献 4-9]

### 2. 1 胴の板厚

内圧を保持する円筒胴の板厚  $t_T$  [mm] について、JIS 規格(日本産業規格)と ASME 規格(米国機械学会規格)では、円周応力基準の板厚式を修正した次式を規定している。

$$\text{(円筒胴, JIS/ASME)} \quad t_T = \frac{P_i D_T}{2\sigma_a \eta - 1.2P_i} + \alpha_c \quad \cdots(2.1.1)$$

ただし、 $D_T$  は槽内径[mm]、 $P_i$  は設計圧力[MPa]、 $t_T$  は板厚[mm]、 $\alpha_c$  は腐れ代(くされしろ)[mm]、 $\eta$  は溶接継手(つぎて)効率[-]、 $\sigma_a$  は許容引張(ひっぱり)応力[MPa]または[N/mm<sup>2</sup>]。

溶接による継ぎ目がない場合は、 $\eta$  を 1 と取る。腐れ代は、腐食や摩耗に対する板厚の余裕であり、1 mm 以上取る。

円錐胴の板厚は、次式で与えられる。

$$\text{(円錐胴, JIS/ASME)} \quad t_T = \frac{P_i D_T}{2 \cos \theta (\sigma_a \eta - 0.6P_i)} + \alpha_c \quad \cdots(2.1.2)$$

ただし、 $\theta$  は円錐の頂角の 2 分の 1 の角度。

球形胴の板厚は、次式で与えられる。

$$\text{(球形胴, JIS)} \quad P_i \leq 0.665\sigma_a \eta \text{ のとき} \quad t_T = \frac{P_i D_T}{2 \cos \theta (\sigma_a \eta - 0.6P_i)} + \alpha_c \quad \cdots(2.1.3)$$

$$P_i > 0.665\sigma_a \eta \text{ のとき} \quad t_T = \frac{D_T}{2} (\sqrt[3]{Y} - 1) + \alpha_c \quad \left[ Y \equiv \frac{2(\sigma_a \eta + P_i)}{2\sigma_a \eta - P_i} \right] \quad \cdots(2.1.4)$$

### 2. 2 鏡板の板厚

内圧を保持する鏡板の板厚  $t_h$  は、次式で与えられる。

$$\text{(全半球形, ASME)} \quad t_h = \frac{P_i D_T}{4\sigma_a \eta - 0.4P_i} + \alpha_c \quad \cdots(2.2.1)$$

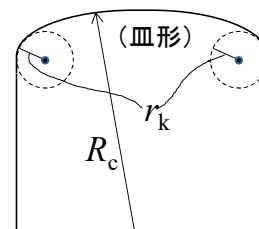
$$\text{(半楕円形, JIS)} \quad t_h = \frac{P_i D_T K_h}{2\sigma_a \eta - 0.2P_i} + \alpha_c \quad \left[ K_h \equiv \frac{1}{6} \left\{ 2 + \left( \frac{D_T}{2h_T} \right)^2 \right\} \right] \quad \cdots(2.2.2)$$

ただし、 $K_h$  は半楕円形鏡板の形状係数。

(半楕円形, ASME)  $t_h = \frac{P_i D_T}{2\sigma_a \eta - 0.2P_i} + \alpha_c \quad \dots(2.2.3)$

(皿形, JIS)  $t_h = \frac{P_i D_T M_h}{2\sigma_a \eta - 0.2P_i} + \alpha_c \quad \left[ M_h \equiv \frac{1}{4} \left( 3 + \sqrt{\frac{R_c}{r_k}} \right) \right] \quad \dots(2.2.4)$

10%皿形鏡板のとき  $\frac{r_k}{R_c} = 0.1$



ただし、 $M_h$  は皿形鏡板の形状係数、 $R_c$  は皿形鏡板の中央球形部の内半径(クラウン径)[mm]、 $r_k$  は皿形鏡板のすみの丸みの内半径(ナックル径)[mm]。

(皿形, ASME)  $t_h = \frac{0.885P_i R_c}{\sigma_a \eta - 0.1P_i} + \alpha_c \quad \dots(2.2.5)$

10%皿形鏡板のとき  $R_c = D_T$

許容引張応力  $\sigma_a$  は、装置材質と使用温度によって異なる。

溶接継手効率  $\eta [-]$  は、継手形式と放射線透過試験区分によって異なる(JIS)。

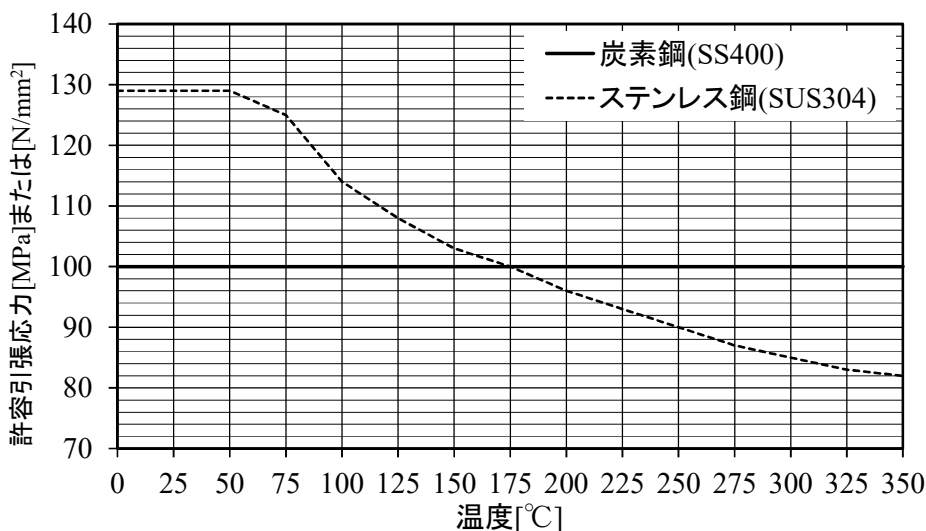


図 2.2.1 代表的な圧力容器用鉄鋼材料の許容引張応力線図 [文献 7]

表 2.2.1 溶接継手効率 [文献 7]

継手形式	放射線透過試験区分			
	100%	20%	スポット	なし
片側突合せ溶接	1.00	0.95	0.85	0.70
両側突合せ溶接	0.90	0.85	0.80	0.65

### 3. 攪拌部の設計

#### 3.1 攪拌軸径 [文献 10]

最大ねじり応力  $\tau_{max}$  が許容せん断応力  $\tau_a$  以下を満たすような攪拌軸径  $d_s$  を求める。

$$\tau_{\max} = \frac{T}{Z_p} \leq \tau_a \quad \cdots(3.1.1)$$

ただし、 $T$ はトルク(回転力)[N・m]、 $Z_p$ は断面係数。

中実丸棒の場合、攪拌軸径  $d_s$  は次式のように導かれる。

$$\frac{T}{\pi D^3/16} \leq \tau_a \quad \left[ Z_p = \frac{\pi d_s^3}{16} \right] \quad \cdots(3.1.2)$$

$$16T \leq \pi \tau_a d_s^3 \quad \cdots(3.1.3)$$

$$d_s \geq \sqrt[3]{\frac{16T}{\pi \tau_a}} \quad \cdots(3.1.4)$$

下限値を攪拌軸径の設計値とする。

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{16T}{\pi \tau_a}} \quad \cdots(3.1.5)$$

許容せん断応力  $\tau_a$  は、許容引張応力  $\sigma_a$  の 0.8 倍とする。[文献 7]

トルク  $T$  は、次式のようにして導かれる。軸動力  $P$  [W] は、軸仕事  $W$  [J] と時間  $t$  [s] の比で定義される。

$$P = \frac{W}{t} \quad \cdots(3.1.6)$$

軸仕事  $W$  は、液に及ぼす外力  $F$  [N] と軸が 1 回転する際に描く周長  $2\pi r_s$  [m] の積で表される。

$$P = \frac{F \times 2\pi r_s}{1/n} \quad \cdots(3.1.7)$$

$$P = 2\pi n(r_s \times F) \quad \cdots(3.1.8)$$

トルク  $T$  [N・m] は、力と距離の積で表される。

$$P = 2\pi nT \quad \cdots(3.1.9)$$

$$P = \omega T \quad \left[ \omega \equiv \frac{2\pi}{1/n} = 2\pi n \right] \quad \cdots(3.1.10)$$

$$T = \frac{P}{\omega} \quad \cdots(3.1.11)$$

ただし、 $n$  は軸の回転速度[1/s]、 $r_s$  は軸半径[m]、 $\omega$  は角速度[rad/s]。

角速度は、単位時間あたりの角度変化を表す( $\omega = \Delta\theta/\Delta t$ )。たとえば、観覧車が一周するまでの所要時間を測定して、それを  $360^\circ = 2\pi$  [rad] から割り算すると、その観覧車の角速度が分かる。

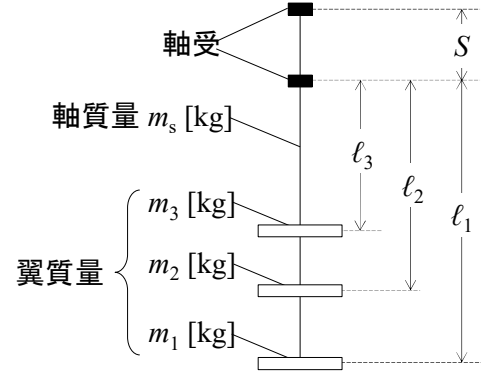
### 3. 2 攪拌回転数 [文献 3, 11, 12]

回転中の攪拌軸には、たわみが生じる。軸の固有振動数と攪拌機の回転数が合致する**危険回転数**になると、共振を起こして振動が激しくなり、軸を破損する危険性が高まる。したがって、攪拌回転数  $n$  [1/s] は、危険回転数  $N_c$  [1/s] 以下となるように設定される必要がある。

$$N_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI\ell_1}{m\ell^3(\ell_1+S)}} \left[ I = \frac{\pi d_s^4}{32} \right] \quad \cdots(3.2.1)$$

$$m\ell^3 = \frac{33}{140} m_s \ell_1^3 + \sum_{i=1}^n (m_i \ell_i^3) \quad \cdots(3.2.2)$$

ただし、 $E$ は縦弾性係数(ヤング率)[Pa]、 $I$ は断面二次モーメント[m<sup>4</sup>]、 $m_i$ は槽底から*i*段目にある攪拌翼の質量[kg]、 $m_s$ は攪拌軸質量[kg]、 $\ell_i$ は軸受と槽底から*i*段目にある攪拌翼の間隔[m]、 $S$ は軸受間隔[m]。



### 3. 3 攪拌機の軸動力 [文献 13, 14]

円筒容器に液体を入れて機械的な攪拌操作を行う。このとき、攪拌翼の微小部分が受ける微小抗力  $dR_f$  [N]は、次式で表される。

$$dR_f = C_1 A (\rho u^2 / 2) = C_1 (b dr) (\rho / 2) (2\pi r n)^2 \quad \cdots(3.3.1)$$

ただし、 $C_1$ は定数[-]、 $b$ は翼幅[m]、 $r$ は攪拌軸中心からの距離[m]、 $\rho$ は液密度[kg/m<sup>3</sup>]。

$r = \alpha d$ 、 $b = \beta d$  ( $0 \leq \alpha, \beta \leq 1/2$ )と置くと、上式は次式のように表される。

$$dR_f = C_2 (\rho n^2 d^4) \alpha^2 d\alpha \quad \cdots(3.3.2)$$

ただし、 $\alpha$ と $\beta$ は定数[-]。

攪拌翼の微小部分に作用する微小トルク  $dT$ は、次式で表される。

$$dT = r dR_f \quad \cdots(3.3.3)$$

$dR_f$ の式を代入して積分すると、翼全体に作用するトルクを得る。

$$T = \rho n^2 d^5 \left[ 2 \int_0^{1/2} C_2 \alpha^3 d\alpha \right] \quad \cdots(3.3.4)$$

$$T = \rho n^2 d^5 \int_0^1 C_2 \alpha^3 d\alpha \quad \cdots(3.3.5)$$

$T$ の式の積分項に2を乗じる理由は、攪拌軸を中心に左右両側の羽根にトルクが作用するためである。

攪拌機の軸動力(攪拌所要動力) $P$  [W]は、トルク  $T$  [N・m]を用いて次式で表される。

$$P = \omega T = 2\pi n T \quad \cdots(3.3.6)$$

$T$ の式を代入すると、攪拌条件因子を含む軸動力  $P$ を得る。

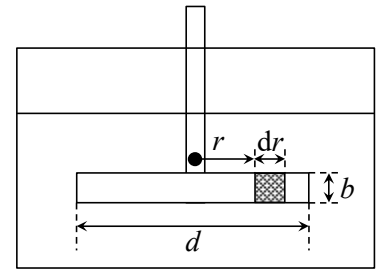
$$P = 2\pi n \left[ \rho n^2 d^5 \int_0^1 C_2 \alpha^3 d\alpha \right] \quad \cdots(3.3.7)$$

$$P \propto \rho n^3 d^5 \int_0^1 C_2 \alpha^3 d\alpha = \frac{C_2}{4} (\rho n^3 d^5) \quad \cdots(3.3.8)$$

$$P = N_p \rho n^3 d^5 \quad \cdots(3.3.9)$$

ただし、 $N_p$ は動力数[-]。

動力数  $N_p$ は、攪拌レイノルズ数  $Re$ を求めて、動力特性曲線より読み取る。





$$Re = \frac{\rho n d^2}{\mu} \quad \dots(3.3.10)$$

ただし、 $\mu$  は液粘度[Pa・s]。

### 3. 4 原動機を選定

原動機の所要動力  $P_M$  [W]は、攪拌機の軸動力(攪拌所要動力) $P$  [W]を用いて次式で表される。

$$P_M = \frac{P}{\eta_{MT}} \quad \dots(3.4.1)$$

ただし、 $\eta_{MT}$  は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[-]であり、機械的損失10%と操作上の余裕20%を見込んで0.7とする。[文献 15, 16]

原動機の市販規格を以下に示す。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

### 4. 伝熱部の設計

ジャケットの伝熱面積  $A_J$  [m<sup>2</sup>]は、攪拌槽の接液面積  $A_L$  [m<sup>2</sup>]に等しいものとする。[文献 17, 18]

$$\text{(全半球形鏡板槽)} \quad A_J = \pi D_T^2 \left( \frac{H}{D_T} + \frac{1}{2} \right) \quad \dots(4.1)$$

$$\text{(半楕円形鏡板槽)} \quad A_J = \pi D_T^2 \left( \frac{H}{D_T} + 0.440 \right) \quad \dots(4.2)$$

$$\text{(皿形鏡板槽)} \quad A_J = \pi D_T^2 \left( \frac{H}{D_T} + 0.436 \right) \quad \dots(4.3)$$

$$\text{(平底円筒槽)} \quad A_J = \pi D_T H + \frac{\pi D_T^2}{4} \quad \dots(4.4)$$

ただし、 $D_T$  は槽径[m]、 $H$  は液深[m]。

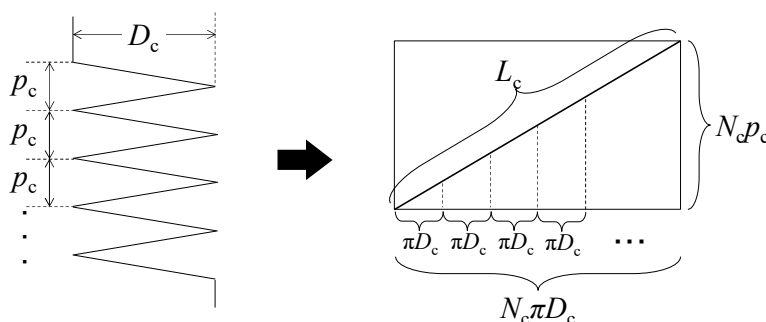
コイルの伝熱面積  $A_c$  [m<sup>2</sup>]、長さ  $L_c$  [m]、巻き数  $N_c$  [-]は、次式で表される。[文献 19]

$$A_c = \frac{Q}{U \Delta T_{lm}} \quad \dots(4.5)$$

$$L_c = \frac{A_c}{\pi d_{ci}} \quad \dots(4.6)$$

$$N_c = \frac{L_c}{\sqrt{(\pi D_c)^2 + p_c^2}} \quad \dots(4.7)$$

ただし、 $d_{ci}$  はコイル管内径[m]、 $D_c$  はコイル中心径[m]、 $p_c$  はコイル管間隔[m]。



### 参考文献

[1] 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)

- [2] 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
- [3] J.R. Couper, W.R. Penny, J.R. Fair; Chemical Process Equipment: Selection and Design 3<sup>rd</sup> Ed., Butterworth-Heinemann(2012), Chapter 10 Mixing and Agitation
- [4] 大原良友; トコトンやさしい圧力容器の本, 日刊工業新聞社(2015), 4章 圧力容器の設計
- [5] 紙屋 保; 化学装置構造設計法, 工学図書(1965), 3章 圧力容器
- [6] 小林 英男; 圧力容器の構造と設計, 日本規格協会(2011), 10.1章 圧力容器の胴及び鏡板
- [7] 日本規格協会; JIS ハンドブック 17 圧力容器・ボイラ, 日本規格協会(2016), B8265
- [8] G. Towler, R. Sinnott; Chemical Engineering Design 2<sup>nd</sup> Ed., Butterworth-Heinemann (2012), Chapter 14 Design of pressure vessels
- [9] E.F. Megyesy, P. Buthod; Pressure Vessel Handbook 14<sup>th</sup> Ed., PV Publishing(2008), PART1 1. Vessels under internal pressure
- [10] 有光 隆; これならわかる図解でやさしい入門材料力学(第2版), 技術評論社(2020)
- [11] 山本一夫, 西野宏; 攪拌技術, 佐竹化学機械工業(1992), 7章 攪拌機の構造設計
- [12] 化学工業社編; 化学装置の構造設計 別冊化学工業 17-6, 化学工業社(1973), pp.109-127
- [13] 大山義年; 化学工学Ⅱ, 岩波(1963), pp.186-190
- [14] 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
- [15] 山本一夫, 西野宏; 攪拌技術, 佐竹化学機械工業(1992), 6章 攪拌機の選定手法
- [16] 寺尾昭二; 攪拌技術の基礎と実際(月刊・化学装置 2008年4月号), 工業調査会(2008), pp.17-59
- [17] 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)
- [18] 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
- [19] D.R. Moss, M.M. Basic; Pressure Vessel Design Manual 4<sup>th</sup> Ed., Butterworth-Heinemann (2013), Procedure 5-6 Design pipe coils for heat transfer

## 問 題

10%皿型鏡板付き炭素鋼(SS400)製攪拌槽に水を 3 m<sup>3</sup> 仕込んで平板タービン翼(動力数 6)による攪拌操作を 120 rpm(=1/min)で行う。攪拌槽形状は、別表に基づく。槽容積は、仕込み液体積の 1.5 倍をとる。水の物性値：密度 1000 kg/m<sup>3</sup>、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/s<sup>2</sup>

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	6	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槽容積[m<sup>3</sup>]、②槽径[mm]、③胴長[mm]、④槽深[mm]、⑤鏡板高さ[mm]、⑥攪拌翼径[mm]、⑦邪魔板幅[mm]を求めよ。
- (2) 胴の板厚[mm]を JIS 規格で求めよ。ただし、設計圧力 1 MPa、装置材料の設計温度 100℃、溶接接手効率 1、腐れ代 2 mm とする。
- (3) 鏡板の板厚[mm]を JIS 規格と ASME 規格の両方で求め、より安全側にある設計値を報告せよ。
- (4) 攪拌の軸動力(攪拌所要動力)[kW]と原動機の市販規格[kW]を求めよ。攪拌機の総合効率は 0.7 とする。
- (5) 攪拌軸径[mm]を求めよ。ただし、軸材の許容せん断応力を 100 N/mm<sup>2</sup> とする。
- (6) 軸受間隔 0.5 m、軸受と攪拌翼の間隔 2.0 m、軸材の縦弾性係数 193 GPa、攪拌軸の質量 40 kg、攪拌翼の質量 10 kg のとき、①攪拌回転数が危険であるかどうかを判定せよ。②危険となる場合は、攪拌軸径を変更する。このとき、最低限必要となる攪拌軸径[mm]を求めよ。ただし、変更の前後で攪拌軸の質量は変わらないものとする。
- (7) ①ジャケットを用いる場合の伝熱面積[m<sup>2</sup>]、②ジャケットと同じ伝熱面積を持つコイルを用いる場合のコイル巻き数[-]を求めよ。ただし、コイル管の内径と外径は近似的に等しいものとみなす。

(答)(1)①4.5 m<sup>3</sup>,②1534 mm,③2048 mm,④2643 mm,⑤298 mm,⑥511 mm,⑦153 mm, (2)9.72 mm, (3)(JIS)13.8 mm,(ASME)15.6 mm,(4)①1.68 kW,②3.7 kW,(5)20.4 mm,(6)①68 rpm(危険),②27.1 mm,(7)①10.6 m<sup>2</sup>,②20 巻

### [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 $\underline{3}$  → (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 $\underline{5}$  → (切り捨て)12.30 / (切り上げ)12.31 → (採用)12.30