

## 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**圧力容器**と呼ばれる。圧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. 攪拌槽の寸法設計 [文献 1, 2]

鏡板付き槽型圧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。

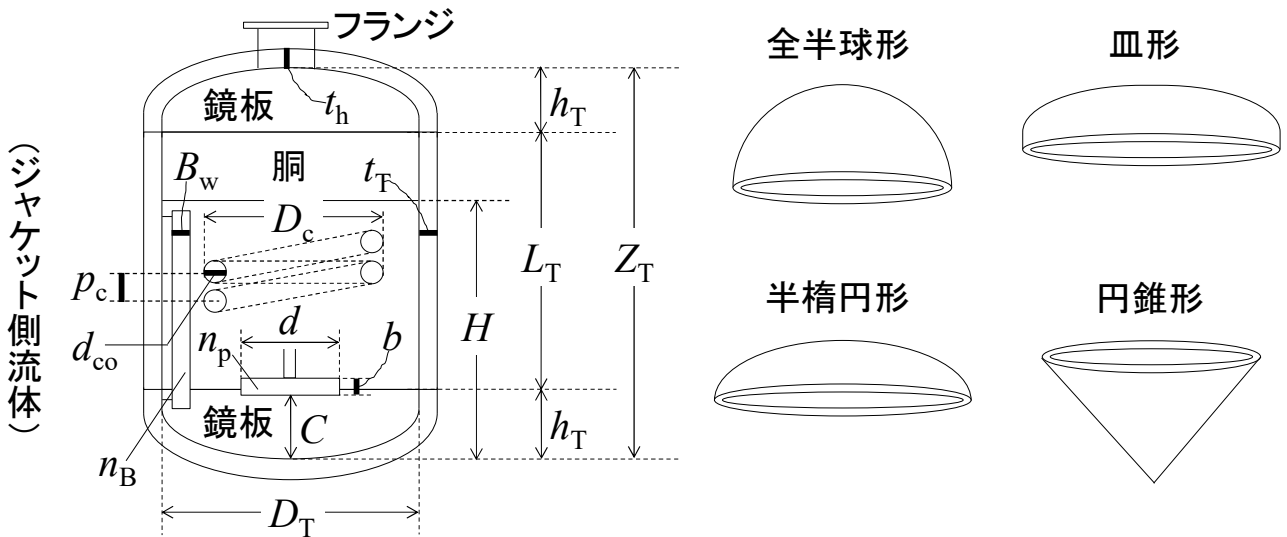


図 1.1 攪拌槽の幾何学的形状

$A_L$ : 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							3	
0.96	1/4	1/15	1/10	1/30	0.70	1/15	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、 $1.25\sim 1.67$ が目安となる【文献2】。槽径  $D_T$ が決まると、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(縦型)

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。

$$\text{(全半球形)} \quad \frac{V_T}{\pi D_T^3} = \frac{L_T}{4D_T} + \frac{1}{6} \quad \cdots(1.1.1)$$

$$\text{(全半球形)} \quad \frac{A_T}{\pi D_T^2} = \frac{L_T}{D_T} + 1 \quad \cdots(1.1.2)$$

$$\text{(全半球形)} \quad \frac{Z_T}{D_T} = \frac{L_T}{D_T} + \frac{2h_T}{D_T} \quad \cdots(1.1.3)$$

$$\text{(全半球形)} \quad \frac{h_T}{D_T} = \frac{1}{2} \quad \cdots(1.1.4)$$

胴長  $L_T$ を液深  $H$ の変数と見なして次式が成り立つ。

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

$V_T$ 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。

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

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

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

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

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

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

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。

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

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

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

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

## 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。

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

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

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

$$\text{(半楕円形)} \quad \frac{h_T}{D_T} = \frac{1}{4} \quad \cdots(1.2.4)$$

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。

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

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

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

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

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

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

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。

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

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

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

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

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。

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

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

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

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

## 2. 攪拌槽の強度設計 [文献 4-9]

### 2. 1 垂直応力と鉛直応力

部材に対して外から加わる力を**外力**という。外力の種類には、部材に負荷を与える**荷重(かじゅう)**と部材を支える**反力**がある。荷重の種類には、**引張**、**圧縮**、**せん断**などがあり、部材の一点に外力がかかる**集中荷重**と、部材全体に外力がかかる**分布荷重**とに区別される。分布荷重は、部材の自重のように位置によらずどこも等しく外力がかかる場合と、水圧のように位置によって外力の大きさが異なる場合とがある。部材に外力を加えると、部材の内部で外力につり合う力が生じる。これを**内力**といい、[N]の単位で表される。実用上は、単位面積あたりの内力、すなわち**応力**が用いられる。単位は、[N/m<sup>2</sup>]または[Pa]である。応力には、部材内部の断面に対して垂直に作用する**垂直応力**(あるいは、**鉛直応力**)と、水平に作用する**せん断応力**がある。

いま、丸棒が外力  $P$  [N] で両端から垂直方向に引っ張られているとする。この場合の丸棒に作用する外力は、**引張荷重**とよばれる。このとき、部材内部のある位置で切り出した仮想的な断面では、部材断面面積あたりの荷重、すなわち**応力**が仮想断面に対して垂直かつ一様に分布して外力とつり合いを保っている。この場合の応力は、**垂直応力**となる。上と下の仮想断面にはたらく垂直応力の方向は、それぞれ荷重と反対の方向になる。かりに同じ向きだと、仮想断面から部材が上と下とに勝手に分裂して移動してしまうことになる。そのようなことは、現実には起こらない。自分で鉛筆の両端を持って両手で引っ張って見たところで、鉛筆が自然と上と下へ分裂していくはずはないのだから。部材の断面積を  $A$  [m<sup>2</sup>] とすると、垂直応力  $\sigma$  [N/m<sup>2</sup>] は、次式で表される。

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \cdots(2.1.1)$$

引張の方向とは反対に、丸棒が上下から押さえつけられている場合の外力と部材内部に作用する応力は、それぞれ**圧縮荷重**・**圧縮応力**と呼ばれる。

いま、横たわった丸棒を上と下から外力  $P$  [N] ではさみこんで、ずらそうとしている。(部材を平行四辺形状にゆがませようとしている。ハサミで切ろうとするのと同じ状況。刃の当たる位置が外力の作用点となる。)この場合の丸棒に作用する外力は、**せん断荷重**とよばれる。このとき、部材内部のある位置で切り出した仮想的な断面では、応力が仮想断面に対して水平かつ一様に分布して外力とつり合いを保っている。この場合の応力は、**せん断応力**となる。せん断応力  $\tau$  [N/m<sup>2</sup>] は、次式で表される。

$$\tau = \frac{P}{A} \quad \cdots(2.1.2)$$

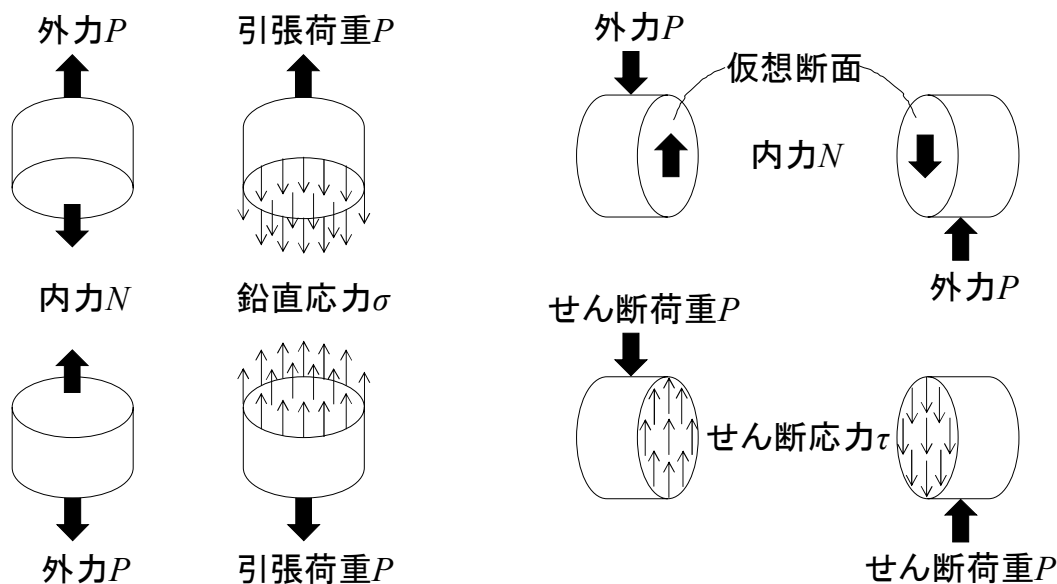


図 2.1.1 応力の説明図  
(左)垂直応力、(右)せん断応力

## 2. 2 許容応力

機械類は、使用時にかかる引張荷重に対して部材の強度が十分となるように設計される。また、荷重が解消された後も、ひずみが残らないようにしている。安全が保証される引張荷重の最大値(ここまでの荷重ならば、かけても十分に安全)を許容応力  $\sigma_a$  [Pa]という。いま、部材に生じる引張応力が  $\sigma$  [Pa]であるとき、部材が安全であるには次式が成り立つ必要がある。

$$\sigma \leq \sigma_a \quad \cdots(2.2.1)$$

許容応力  $\sigma_a$ は、降伏点や引張強さなどの基準応力  $\sigma_s$  [Pa]に基づき、それよりも十分に余裕を持たせて(値を小さくして)設定される。工学的には、余裕分に相当する安全率  $f$  [-]を基準応力より割り算して決定される。

$$\sigma_a = \frac{\sigma_s}{f} \quad [f > 1.0] \quad \cdots(2.2.2)$$

$f$ が大きいほど設計上の余裕がある(機械的強度が高い)。どの程度余裕を持たせるか( $f$ をいくりにするか)は、その製品の設計者が決める。一般には、静荷重がかかる場合は1桁、衝撃荷重がかかる場合は2桁を取る。

## 2. 3 薄肉円筒

直径  $D_T$  [mm]、高さ  $L_T$  [mm]、板厚(いたあつ)  $t_T$  [mm]の薄肉円筒容器に内圧  $P_i$  [MPa]または[N/mm<sup>2</sup>]が作用するとき、円筒容器の壁内部には軸応力  $\sigma_L$  [MPa]と円周応力(またはフープ応力)  $\sigma_\theta$  [MPa]の2種類の引張応力が生じる。このとき、内圧が円筒の断面に及ぼす力  $F_L$  [N]は、次式で表される。

$$F_L = P_i \left( \frac{\pi D_T^2}{4} \right) \quad \cdots(2.3.1)$$

この力は、軸応力  $\sigma_L$  が円筒壁内部において軸方向に作用する力に等しい。

$$F_L = \sigma_L (\pi D_T t_T) \quad \cdots(2.3.2)$$

双方の力はつりあっていることから、2式を等置すると、板厚  $t_T$  [mm]を得る。

$$\sigma_L (\pi D_T t_T) = P_i \left( \frac{\pi D_T^2}{4} \right) \quad \cdots(2.3.3)$$

$$t_T = \frac{P_i D_T}{4 \sigma_L} \quad \cdots(2.3.4)$$

一方、内圧が円筒の投影面(投影面積  $D_T L_T$ )に及ぼす力  $F_\theta$  [N]は、次式で表される。

$$F_\theta = P_i D_T L_T \quad \cdots(2.3.5)$$

この力は、円周応力  $\sigma_\theta$  が円筒壁内部において円周方向に作用する力に等しい。

$$F_\theta = 2 \sigma_\theta L_T t_T \quad \cdots(2.3.6)$$

双方の力はつりあっていることから、2式を等置すると、板厚  $t_T$  [mm]を得る。

$$2 \sigma_\theta L_T t_T = P_i D_T L_T \quad \cdots(2.3.7)$$

$$t_T = \frac{P_i D_T}{2 \sigma_\theta} \quad \cdots(2.3.8)$$

板厚  $t_T$  の2式を等置すると、次式が導かれる。

$$\frac{P_i D_T}{4 \sigma_L} = \frac{P_i D_T}{2 \sigma_\theta} \quad \cdots(2.3.9)$$

$$\sigma_\theta = 2 \sigma_L \quad \cdots(2.3.10)$$

板厚の計算には、円周応力  $\sigma_\theta$  のみを求めればよい。

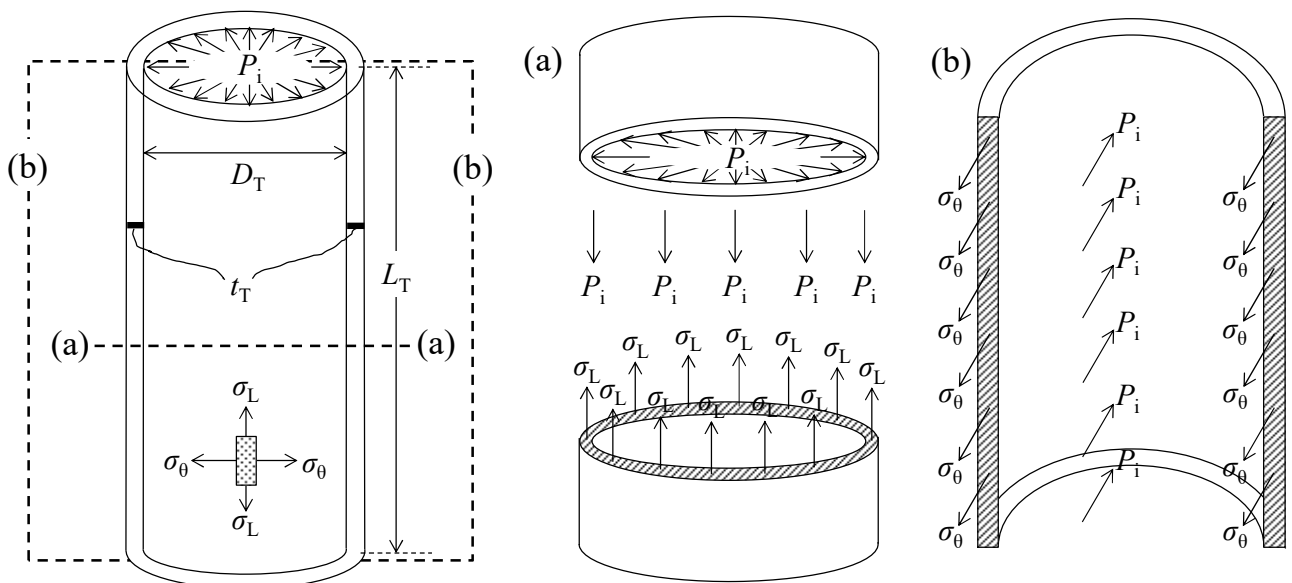


図 2.3.1 薄肉円筒にかかる引張応力 [文献 9]

## 2. 4 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。

$$\text{(円筒胴, JIS/ASME)} \quad t_T = \frac{P_i D_T}{2\sigma_a \eta - 1.2P_i} + \alpha_c \quad \cdots(2.4.1)$$

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にとる。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。

$$\text{(円錐胴, JIS/ASME)} \quad t_T = \frac{P_i D_T}{2 \cos \theta (\sigma_a \eta - 0.6P_i)} + \alpha_c \quad \cdots(2.4.2)$$

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。

$$\text{(球形胴, JIS)} \quad P_i \leq 0.665\sigma_a \eta \text{ のとき} \quad t_T = \frac{P_i D_T}{2 \cos \theta (\sigma_a \eta - 0.6P_i)} + \alpha_c \quad \cdots(2.4.3)$$

$$P_i > 0.665\sigma_a \eta \text{ のとき} \quad t_T = \frac{D_T}{2} (\sqrt[3]{Y} - 1) + \alpha_c \quad \left[ Y \equiv \frac{2(\sigma_a \eta + P_i)}{2\sigma_a \eta - P_i} \right] \quad \cdots(2.4.4)$$

## 2. 5 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。

$$\text{(全半球形, ASME)} \quad t_h = \frac{P_i D_T}{4\sigma_a \eta - 0.4P_i} + \alpha_c \quad \cdots(2.5.1)$$

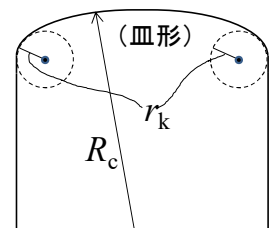
$$\text{(半楕円形, JIS)} \quad t_h = \frac{P_i D_T K_h}{2\sigma_a \eta - 0.2P_i} + \alpha_c \quad \left[ K_h \equiv \frac{1}{6} \left\{ 2 + \left( \frac{D_T}{2h_T} \right)^2 \right\} \right] \quad \cdots(2.5.2)$$

ただし、 $K_h$ は半楕円形鏡板の形状係数。

$$\text{(半楕円形, ASME)} \quad t_h = \frac{P_i D_T}{2\sigma_a \eta - 0.2P_i} + \alpha_c \quad \cdots(2.5.3)$$

$$\text{(皿形, JIS)} \quad t_h = \frac{P_i D_T M_h}{2\sigma_a \eta - 0.2P_i} + \alpha_c \quad \left[ M_h \equiv \frac{1}{4} \left( 3 + \sqrt{\frac{R_c}{r_k}} \right) \right] \quad \cdots(2.5.4)$$

$$10\% \text{皿形鏡板のとき} \quad \frac{r_k}{R_c} = 0.1$$





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]。

$$(皿形, ASME) \quad t_h = \frac{0.885P_1R_c}{\sigma_a\eta - 0.1P_1} + \alpha_c \quad \dots(2.5.5)$$

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)。

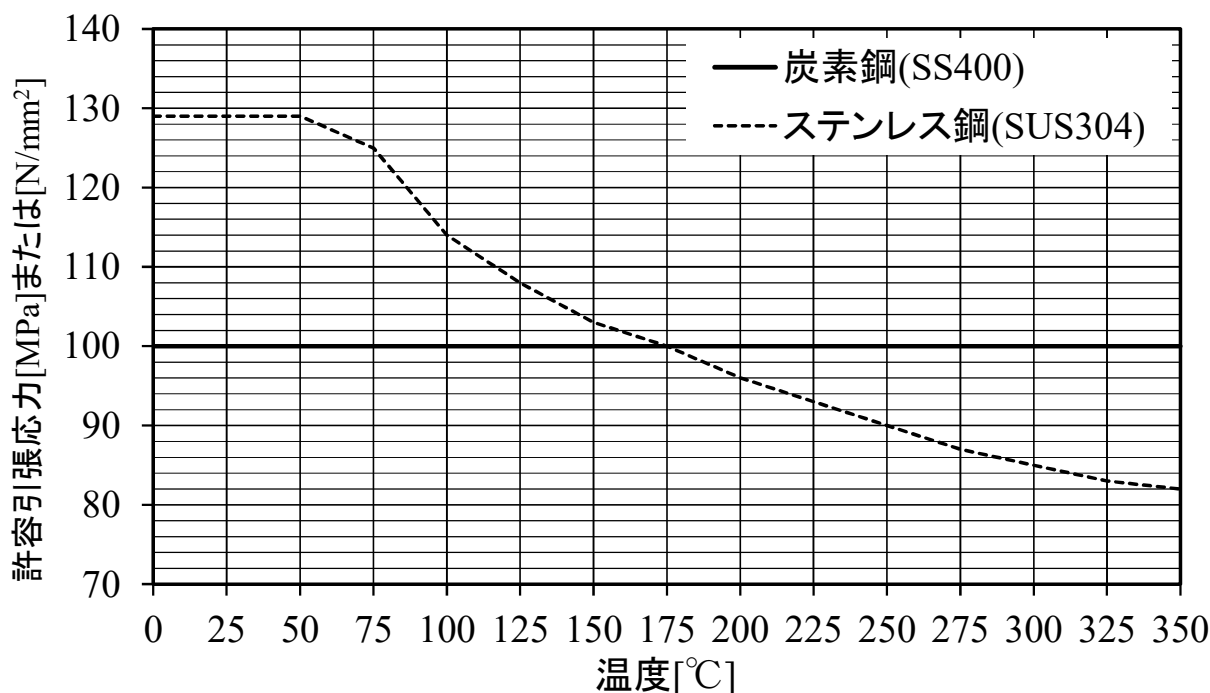


図 2.5.1 代表的な圧力容器用鉄鋼材料の許容引張応力線図 [文献 7]

表 2.5.1 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 攪拌翼とフローパターン

(ア) プロペラ翼 翼のひねりの部分で液を底面方向へ押し当てる流れ(軸流)を与え、槽内に大きな循環流を形成する。プロペラ翼や傾斜パドル翼のように、軸流型の翼は、固体粒子の沈降防止に適している。翼径は比較的小さく、回転数を高めにとることが多い。吐出作用は高いが、せん断作用は低い。

(イ) 平板(ひらいた)パドル翼 液を側面方向へ押し当てる流れ(輻射流)を与え、槽内の上部と下部で四

つ葉様のフローパターンを形成する。翼径を大きくして低めの回転数で用いることが多い。翼径を大きく取れるため、アンカー翼のように槽壁近傍の流れが良好となり、ジャケット型での伝熱促進に適している。また、液体同士の混合にもよく用いられる。吐出作用は高いが、せん断作用は低い。

(ウ) 傾斜パドル翼 プロペラ翼のようにひねりの部分で液を底面方向へ押し出すため、輻射流に加えて軸流を与えることができる。固体粒子の沈降防止に適している。

(エ) 平板タービン翼 パドル翼のような輻射流型のフローパターンを形成する。プロペラ翼やパドル翼よりもせん断作用が高いことから、通気攪拌や乳化など、気泡や液滴の分散を伴う操作に適している。翼がひねられた傾斜タービン翼は、輻射流に加えて軸流を形成する。

(オ) ファウドラ翼 横から見てV字型の形状になっている。槽底近くまで攪拌翼を下げることで、固体粒子の沈降防止に適している。

(カ) アンカー翼 高粘性液体の混合や固体粒子浮遊の目的で用いられる。翼径が大きく、槽壁をかき取る形状をしているため、槽の壁面近傍の流速を大きくとれて、流体-槽壁間の境膜厚みが薄くなる。ジャケット型での伝熱促進に適している。ほぼ水平方向のみの攪拌であり、上下方向の攪拌が望めないため、液混合の均一性はあまり良くない。槽中心部の混合も悪い。

(キ) リボン翼 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、アンカー翼の課題である上下方向の攪拌が良好となる。

代表的なフローパターンには、旋回流型、軸流型、放射流型がある。軸流型はプロペラ翼、放射流型はパドル翼やタービン翼が代表的だが、条件次第で混合挙動は異なる。なお、邪魔板(じゃまいた)が挿入されないと、旋回流が生じて、液面が大きいくぼむ。そのようなフローパターンは、ただ流れに乗ってぐるぐると回るだけであり、混ざりが悪い。邪魔板を挿入することで、旋回流と液面のくぼみが解消され、適切なフローパターンが形成されて、混合が良くなる。

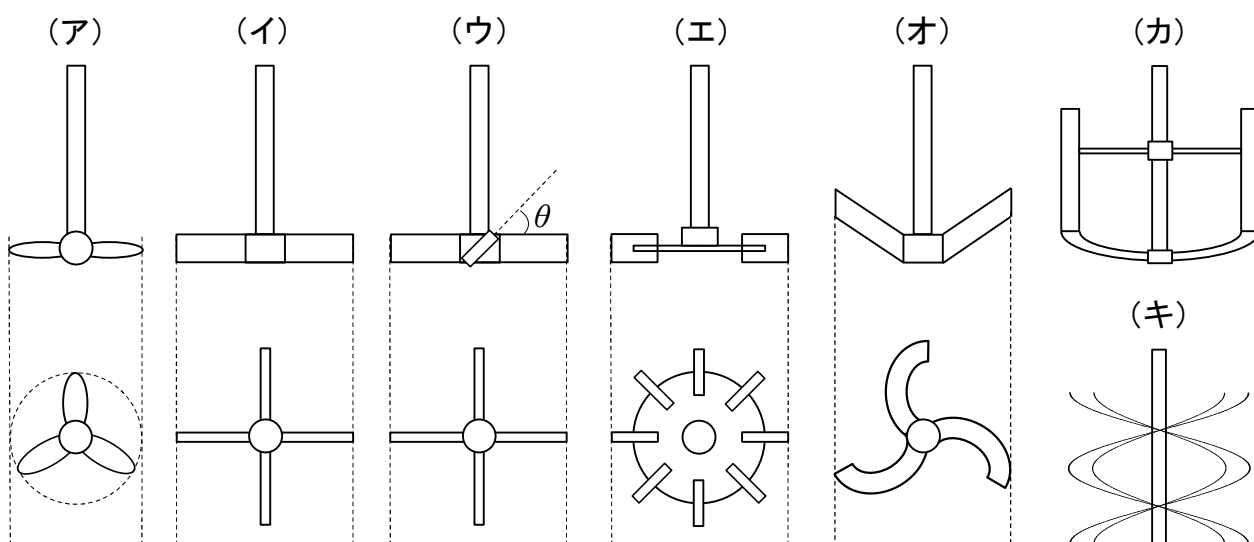


図 3.1.1 代表的な攪拌翼

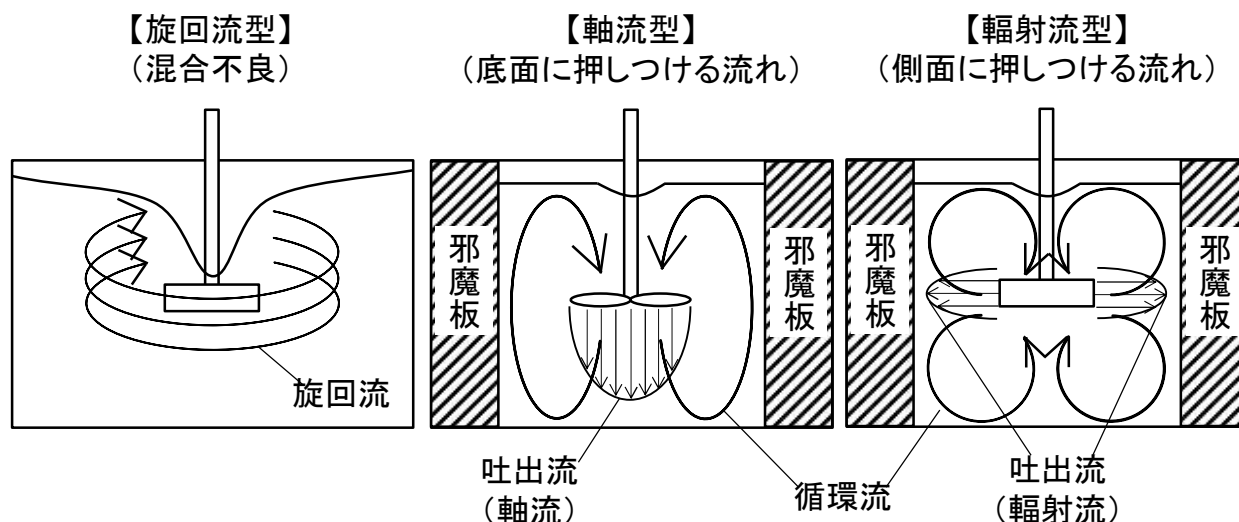


図 3.1.2 邪魔板の効果と典型的なフローパターン

### 3. 2 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。

$$\tau_{\max} = \frac{T}{Z_p} \leq \tau_a \quad \dots(3.2.1)$$

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。

$$\frac{T}{\pi D^3/16} \leq \tau_a \quad \left[ Z_p = \frac{\pi d_s^3}{16} \right] \quad \dots(3.2.2)$$

$$16T \leq \pi \tau_a d_s^3 \quad \dots(3.2.3)$$

$$d_s \geq \sqrt[3]{\frac{16T}{\pi \tau_a}} \quad \dots(3.2.4)$$

下限値を攪拌軸径の設計値とする。

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{16T}{\pi \tau_a}} \quad \dots(3.2.5)$$

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。攪拌軸の消費動力 (攪拌所要動力)  $P$  [W] は、攪拌翼が液に対して行う仕事  $W$  [J] と時間  $t$  [s] の比で定義される。仕事  $W$  は、液に及ぼす外力  $F$  [N] と翼が 1 回転する際に描く周長  $2\pi r_s$  [m] の積で表される。

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \times 2\pi r_s}{1/n} = 2\pi n (r_s \times F) = 2\pi n T \quad \dots(3.2.6)$$

ただし、 $n$  は攪拌翼の回転速度 (攪拌速度) [1/s]、 $r_s$  は攪拌軸半径 [m]、 $T$  はトルク (回転力) [N・m]。

上式より、トルク  $T$  は次式となる。

$$P = \omega T \quad \cdots(3.2.7)$$

$$\boxed{T = \frac{P}{\omega}} \quad \left[ \omega \equiv \frac{2\pi}{1/n} = 2\pi n \right] \quad \cdots(3.2.8)$$

ただし、 $\omega$  は角速度[rad/s]であり、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。攪拌操作の場合は、攪拌翼 1 回転分の角度  $2\pi$  [rad]を 1 回転の所要時間  $1/n$  [s]で割った値で表される。1 秒あたりの翼回転数である攪拌速度  $n$  [1/s]は、自由に設定することができる。

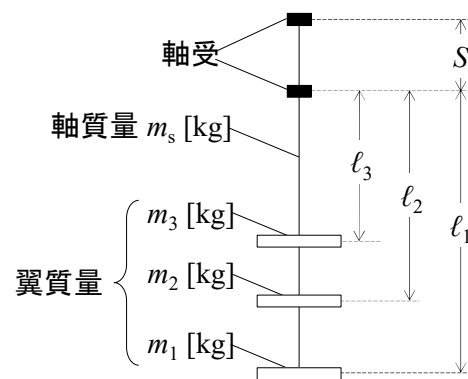
### 3. 3 危険回転数 [文献 3, 11, 12]

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。

$$N_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI\ell_1}{m\ell^3(\ell_1 + S)}} \quad \left[ I = \frac{\pi d_s^4}{64} \right] \quad \cdots(3.3.1)$$

$$m\ell^3 = \frac{33}{140} m_s \ell_1^3 + \sum_{i=1}^n (m_i \ell_i^3) \quad \cdots(3.3.2)$$

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. 4 原動機の設定

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。

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

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 13, 14]

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

### 3. 5 攪拌機の軸動力 [文献 15, 16]

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。

$$dR_f = C_1 A (\rho u^2 / 2) = C_1 (bdr) (\rho / 2) (2\pi r n)^2 \quad \cdots(3.5.1)$$

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。

$$dR_f=C_2(\rho n^2 d^4)\alpha^2 d\alpha \quad \cdots(3.5.2)$$

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。

$$dT=r dR_f \quad \cdots(3.5.3)$$

$dR_f$ 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。

$$T = \rho n^2 d^5 \left[ 2 \int_0^{1/2} C_2 \alpha^3 d\alpha \right] \quad \cdots(3.5.4)$$

$$T = \rho n^2 d^5 \int_0^1 C_2 \alpha^3 d\alpha \quad \cdots(3.5.5)$$

$T$ 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  $P$  [W]は、トルク  $T$  [N・m]を用いて次式で表される。

$$P = \omega T = 2\pi n T \quad \cdots(3.5.6)$$

$T$ の式を代入すると、攪拌条件因子を含む軸動力  $P$ を得る。

$$P = 2\pi n \left[ \rho n^2 d^5 \int_0^1 C_2 \alpha^3 d\alpha \right] \quad \cdots(3.5.7)$$

$$P \propto \rho n^3 d^5 \int_0^1 C_2 \alpha^3 d\alpha = \frac{C_2}{4} (\rho n^3 d^5) \quad \cdots(3.5.8)$$

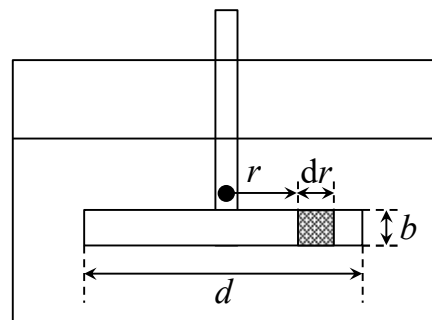
$$P = N_p \rho n^3 d^5 \quad \cdots(3.5.9)$$

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。

$$Re = \frac{\rho n d^2}{\mu} \quad \cdots(3.5.10)$$

ただし、 $\mu$ は液粘度[Pa・s]。



## 4. 伝熱部の設計

### 4. 1 伝熱面積

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]

$$\text{(全半球形鏡板槽)} \quad A_J = \pi D_T^2 \left( \frac{H}{D_T} + \frac{1}{2} \right) \quad \cdots(4.1.1)$$

$$\text{(半楕円形鏡板槽)} \quad A_J = \pi D_T^2 \left( \frac{H}{D_T} + 0.440 \right) \quad \cdots(4.1.2)$$

$$\text{(皿形鏡板槽)} \quad A_J = \pi D_T^2 \left( \frac{H}{D_T} + 0.436 \right) \quad \cdots(4.1.3)$$

(平底円筒槽) 
$$A_J = \pi D_T H + \frac{\pi D_T^2}{4} \quad \cdots(4.1.4)$$

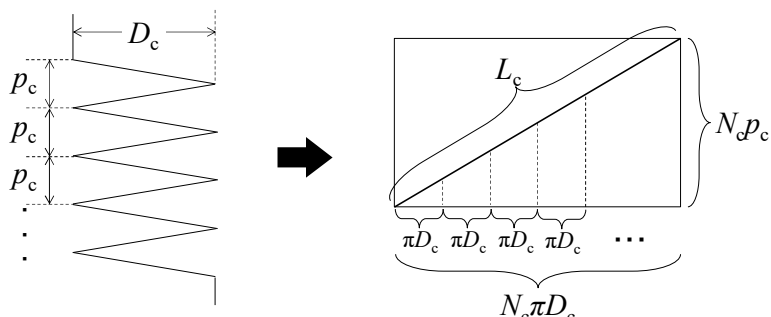
ただし、 $D_T$ は槽径[m]、 $H$ は液深[m]。

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]

$$A_c = \frac{Q}{U\Delta T_{lm}} \quad \cdots(4.1.5)$$

$$L_c = \frac{A_c}{\pi d_{ci}} \quad \cdots(4.1.6)$$

$$N_c = \frac{L_c}{\sqrt{(\pi D_c)^2 + p_c^2}} \quad \cdots(4.1.7)$$



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]。

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。

(加熱時) 
$$Q = \frac{MC_p(T_f - T_0) + \Delta H}{\tau_H} \quad \cdots(4.1.8)$$

(冷却時) 
$$Q = \frac{MC_p(T_0 - T_f) + \Delta H}{\tau_C} \quad \cdots(4.1.9)$$

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]、 $\Delta H$ は相変化に伴う潜熱[J]、 $\tau$ 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。

(加熱時) 
$$Q = W_{hc} C_{ph} (T_{10,av} - T_{1f,av}) = W_{hc} C_{ph} \Delta T \quad [\Delta T \equiv T_{10,av} - T_{1f,av}] \quad \cdots(4.1.10)$$

(冷却時) 
$$Q = W_{hc} C_{ph} (T_{1f,av} - T_{10,av}) = W_{hc} C_{ph} \Delta T \quad [\Delta T \equiv T_{1f,av} - T_{10,av}] \quad \cdots(4.1.11)$$

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

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]、 $\Delta T$ 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  $\Delta T$  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。

$$W_{hc} = \rho_h u_{hc} S_c \quad \left[ S_c \equiv \frac{\pi d_{ci}^2}{4} \right] \quad \cdots(4.1.12)$$

ただし、 $d_{ci}$ はコイル管内径[m]、 $S_c$ はコイル管断面積[m<sup>2</sup>]、 $u_{hc}$ はコイル管内を流れる伝熱媒体の平均流速[m/s]、 $\rho_h$ は伝熱媒体の密度[kg/m<sup>3</sup>]。

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。

$$Q = S\lambda_v \quad \cdots(4.1.13)$$

$$S = \rho_h u_{cs} S_c \quad \cdots(4.1.14)$$

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]、 $\lambda_v$ 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 $\Delta T$ 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  $\Delta T_{\max}$  と最小値  $\Delta T_{\min}$  をとって定数とする。

$$\Delta T_{\text{lm}} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln(\Delta T_{\max} / \Delta T_{\min})} \quad \cdots(4.1.15)$$

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。

$$\text{(加熱時)} \quad \Delta T_{\text{lm}} = \frac{(T^* - T_0) - (T^* - T_f)}{\ln[(T^* - T_0)/(T^* - T_f)]} \quad \cdots(4.1.16)$$

$$\text{(冷却時)} \quad \Delta T_{\text{lm}} = \frac{(T_0 - T^*) - (T_f - T^*)}{\ln[(T_0 - T^*)/(T_f - T^*)]} \quad \cdots(4.1.17)$$

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。

$$\text{(加熱時)} \quad \Delta T_{\text{lm}} = \frac{(T_{10,\text{av}} - T_0) - (T_{1f,\text{av}} - T_f)}{\ln[(T_{10,\text{av}} - T_0)/(T_{1f,\text{av}} - T_f)]} = \frac{\Delta T - (T_0 - T_f)}{\ln[(T_{10,\text{av}} - T_0)/(T_{1f,\text{av}} - T_f)]} \quad [\Delta T \equiv T_{10,\text{av}} - T_{1f,\text{av}}] \quad \cdots(4.1.18)$$

$$\text{(冷却時)} \quad \Delta T_{\text{lm}} = \frac{(T_0 - T_{10,\text{av}}) - (T_f - T_{1f,\text{av}})}{\ln[(T_0 - T_{10,\text{av}})/(T_f - T_{1f,\text{av}})]} = \frac{\Delta T - (T_f - T_0)}{\ln[(T_0 - T_{10,\text{av}})/(T_f - T_{1f,\text{av}})]} \quad [\Delta T \equiv T_{1f,\text{av}} - T_{10,\text{av}}] \quad \cdots(4.1.19)$$

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

ただし、 $\Delta T$ 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。

セルシウス度単位の数値を用いて $\Delta T_{\text{lm}}$ を計算する場合は、間違いを起こしやすいので注意する。すなわち、セルシウス度単位の計算結果に 273.15 を加えて絶対温度に変換してはならない。計算前に絶対温度に変換しておく、間違いが起こりにくい。

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。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2} \quad \cdots(4.1.20)$$

ただし、 $h$  は境膜伝熱係数[W/(m<sup>2</sup>・K)]、 $h_s$  は汚れ係数[W/(m<sup>2</sup>・K)]、 $k_w$  は固体壁の熱伝導度[W/(m・K)]、 $\ell_w$  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。

## 4. 2 総括伝熱係数

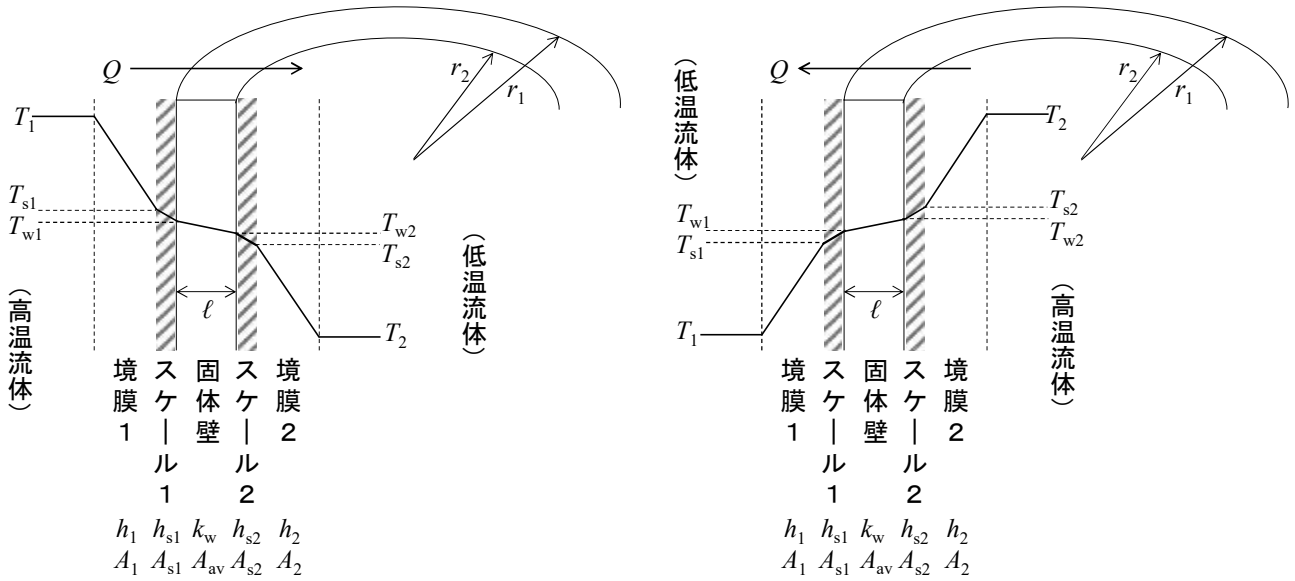


図 4.2.1 固体壁周りの温度分布  
(左：加熱時、右：冷却時)

固体壁周りの各部位における温度差は、対流伝熱速度  $Q$  [W]を用いて次のように表される。

$$\text{(境界膜 1)} \quad T_1 - T_{s1} = \frac{Q}{h_1 A_1} \quad \cdots(4.2.1)$$

$$\text{(スケール 1)} \quad T_{s1} - T_{w1} = \frac{Q}{h_{s1} A_{s1}} \quad \cdots(4.2.2)$$

$$\text{(固体壁)} \quad T_{w1} - T_{w2} = \frac{Q}{(k_w / \ell_w) A_{av}} \quad \cdots(4.2.3)$$

$$\text{(スケール 2)} \quad T_{w2} - T_{s2} = \frac{Q}{h_{s2} A_{s2}} \quad \cdots(4.2.4)$$

$$\text{(境界膜 2)} \quad T_{s2} - T_2 = \frac{Q}{h_2 A_2} \quad \cdots(4.2.5)$$

ただし、 $h$  は境界膜伝熱係数[W/(m<sup>2</sup>・K)]、 $h_s$  は汚れ係数[W/(m<sup>2</sup>・K)]、 $k_w$  は固体壁の熱伝導度[W/(m・K)]、 $\ell_w$  は固体壁の厚み[m]、 $A$  は伝熱面積[m<sup>2</sup>]、添え字 s はスケール、av と w は固体壁。

上式を辺々加えると、基準 1 の総括伝熱係数  $U_1$  [W/(m<sup>2</sup>・K)]が導かれる。

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1}{h_{s1} A_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w A_{av}} + \frac{1}{h_{s2} A_{s2}} + \frac{1}{h_2 A_2}} \quad \cdots(4.2.6)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_1} \left[ \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} \left( \frac{A_1}{A_{s1}} \right) + \frac{\ell_w}{k_w} \left( \frac{A_1}{A_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s2}} \left( \frac{A_1}{A_{s2}} \right) + \frac{1}{h_2} \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \right]} \quad [\Delta T \equiv T_1 - T_2] \quad \cdots(4.2.7)$$



$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_1} \left[ \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left( \frac{A_1}{A_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2} \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \right]} \quad [A_1/A_{s1} \approx 1, A_1/A_{s2} \approx 1] \quad \cdots(4.2.8)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_1} \left[ \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left( \frac{\pi D_1 L}{\pi D_{av} L} \right) + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2} \left( \frac{\pi D_1 L}{\pi D_2 L} \right) \right]} \quad [A = \pi DL] \quad \cdots(4.2.9)$$

ただし、 $L$  は装置長[m]。

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_1} \left[ \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left( \frac{D_1}{D_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2} \left( \frac{D_1}{D_2} \right) \right]} \quad \cdots(4.2.10)$$

$$Q = U_1 A_1 \Delta T \quad \cdots(4.2.11)$$

$$\frac{1}{U_1} \equiv \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left( \frac{D_1}{D_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2} \left( \frac{D_1}{D_2} \right) \quad \left[ D_{av} \equiv \frac{D_1 + D_2}{2} \right] \quad \cdots(4.2.12)$$

$$\boxed{\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2}} \quad [U = U_1, D_1/D_{av} \approx 1, D_1/D_2 \approx 1] \quad \cdots(4.2.13)$$

同様にして、基準 2 の総括伝熱係数  $U_2$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] が導かれる。

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1}{h_{s1} A_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w A_{av}} + \frac{1}{h_{s2} A_{s2}} + \frac{1}{h_2 A_2}} \quad \cdots(4.2.14)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_2} \left[ \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_{s2}} \left( \frac{A_2}{A_{s2}} \right) + \frac{\ell_w}{k_w} \left( \frac{A_2}{A_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s1}} \left( \frac{A_2}{A_{s1}} \right) + \frac{1}{h_1} \left( \frac{A_2}{A_1} \right) \right]} \quad [\Delta T \equiv T_1 - T_2] \quad \cdots(4.2.15)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_2} \left[ \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left( \frac{A_2}{A_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{1}{h_1} \left( \frac{A_2}{A_1} \right) \right]} \quad [A_2/A_{s2} \approx 1, A_2/A_{s1} \approx 1] \quad \cdots(4.2.16)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_2} \left[ \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left( \frac{\pi D_2 L}{\pi D_{av} L} \right) + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{1}{h_1} \left( \frac{\pi D_2 L}{\pi D_1 L} \right) \right]} \quad [A = \pi DL] \quad \cdots(4.2.17)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_2} \left[ \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left( \frac{D_2}{D_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{1}{h_1} \left( \frac{D_2}{D_1} \right) \right]} \quad \cdots(4.2.18)$$

$$Q = U_2 A_2 \Delta T \quad \cdots(4.2.19)$$

$$\frac{1}{U_2} \equiv \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{\ell_w}{k_w} \left( \frac{D_2}{D_{av}} \right) + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{1}{h_1} \left( \frac{D_2}{D_1} \right) \quad \left[ D_{av} \equiv \frac{D_1 + D_2}{2} \right] \quad \cdots(4.2.20)$$

$$\boxed{\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_{s1}} + \frac{\ell_w}{k_w} + \frac{1}{h_{s2}} + \frac{1}{h_2}} \quad [U = U_2, D_2/D_{av} \approx 1, D_2/D_1 \approx 1] \quad \cdots(4.2.21)$$

## 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] 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
- [14] 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
- [15] 大山義年; 化学工学Ⅱ, 岩波(1963), pp.186-190
- [16] 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
- [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