

附属書 5A-2 複数の減肉部を有する円筒形圧力設備の p-M 法による評価 (規定)

1. 記号の意味^[1,2]

附属書 5A-2 で用いる記号の意味は、附属書 5A による他、次による。

$$A_{b_s} : \frac{2\{1-(1-\tau)^3\}}{\left[2\{1-(1-\tau)^3\}\cos\psi_{b_s} + \{(1-y_k\tau)^3 - 1\}\sin\theta_k\right]}, \text{ 減肉 1 又は減肉 2 の単独減肉としての参照}$$

応力における曲げ応力成分係数。ここでは添え字の $k=1$ (減肉1), 2 (減肉2)とする (以下同じ)。

$$A_{b_m} : \frac{2\{1-(1-\tau)^3\}}{2\{1-(1-\tau)^3\}\cos\psi_{b_m} - \{1-(1-\tau)^3\}\sum_{k=1}^2 \sin\theta_k \cos\alpha_k + \sum_{k=1}^2 \{(1-y_k\tau)^3 - (1-\tau)^3\}\sin\theta_k \cos\alpha_k}, \text{ 複数}$$

の減肉としての参照応力における曲げ応力成分係数

a_k : 減肉1又は減肉2の深さ (mm)

a : $\text{Max}\{a_1, a_2\}$, 複数の減肉深さの大きい方の値 (mm)

$2c_{L1}$: 減肉 1 の軸方向長さ (mm)

$2c_{L2}$: 減肉 2 の軸方向長さ (mm)

$2c_{\theta 1}$: 減肉 1 の円周方向長さ (mm)

$2c_{\theta 2}$: 減肉 2 の円周方向長さ (mm)

$\overline{2c_L} : \frac{2c_{L1} + 2c_{L2}}{2}$, 減肉 1 及び減肉 2 の軸方向の平均長さ (mm)

$\overline{2c_\theta} : \frac{2c_{\theta 1} + 2c_{\theta 2}}{2}$, 減肉 1 及び減肉 2 の円周方向の平均長さ (mm)

$2c_L : 2c_{L1} + 2c_{L2}$, 減肉 1 及び減肉 2 の軸方向長さの和 (mm)

$2c_\theta : 2c_{\theta 1} + 2c_{\theta 2}$, 減肉 1 及び減肉 2 の円周方向長さの和 (mm)

E : 材料の縦弾性係数 (N/mm^2)

H : 減肉先端間の軸方向の距離 (mm)

H_0 : アライメント処理後の減肉間の軸方向の距離 (mm)

$$H_0^{\max}: \frac{\pi \left(\sum_{k=1}^2 a_k c_{Lk} \right) M_{s_s} - (\pi t \sum_{k=1}^2 c_{Lk} + 4t^2) \{ M_{s_s} - (1 - \alpha_{_s}) M_{s_m} \}}{2t \{ M_{s_s} - (1 - \alpha_{_s}) M_{s_m} \}}, \text{ 軸方向に対して複数の減肉}$$

の相互作用を無視できる減肉先端間距離 (mm)

$M_{_s}^L$: $\text{Min}\{\text{減肉 1 の } M_{_s}^L, \text{減肉 2 の } M_{_s}^L\}$, 減肉 1 又は減肉 2 の単独減肉としての塑性崩壊モーメントのうち小さな方の値 (N・mm)

$M_{_m}^L$: 外部曲げモーメントを受ける複数減肉としての塑性崩壊モーメント (N・mm)

$$M_{s_s}: \frac{1}{\left\{ 1 - y_k + \frac{y_k}{M_t(a_k)} \right\}}, \text{ 減肉 1 又は減肉 2 の単独減肉としての軸方向表面欠陥に対するバ}$$

ルジング効果を表す係数

$$M_{s_m}: \frac{1}{\left\{ 1 - y + \frac{y}{M_t(a)} \right\}}, \text{ 複数減肉としての軸方向表面欠陥に対するバルジング効果を表す}$$

係数

$M_t(a_k): \sqrt{1 + 0.317 \lambda_{ak}^2}$, 減肉 1 又は減肉 2 の単独減肉としての軸方向貫通欠陥に対するバルジング効果を表す係数

$M_t(a) = \sqrt{1 + 0.317 \lambda_a^2}$, 複数減肉としての軸方向貫通欠陥に対するバルジング効果を表す

係数

p : 設計圧力又は常用の圧力 (MPa)

$p_{_s}^L$: $\text{Min}\{\text{減肉 1 の } p_{_s}^L, \text{減肉 2 の } p_{_s}^L\}$, 減肉 1 又は減肉 2 の単独減肉としての塑性崩壊圧力のうち小さな方の値 (MPa)

$p_{_m}^L$: $\left[2\tau(2-\tau) / (4-6\tau+3\tau^2) \right] \left[(1-\alpha_{_m}) / M_{S_m} \right] \sigma_f$, 複数の減肉としての塑性崩壊圧力 (N/mm²)

R_0 : 円筒の外半径 (mm)

R_1 : 円筒の内半径 (mm)

S : 減肉先端間の円周方向の距離 (mm)

S_0 : アライメント処理後の減肉間の円周方向の距離 (mm)

S_0^{\max} : $R_0(2\theta_s^{\max})$, 複数の減肉に対して相互作用を無視できる円周方向の減肉先端間距離 (mm)

S' : $\frac{0.6Et_m^*}{2R_0\left(1+0.004\frac{E}{\sigma_{ys}}\right)}$, 許容座屈限界 (N/mm²)

t_{-m}^* : $t - \frac{t}{\pi\{1-(1-\tau)^4\}} \sum_{k=1}^2 \left[\{1-(1-y_k\tau)^4\} \left\{ \theta_k + \frac{1}{4} \sin(2\theta_k + 2\alpha_k) + \frac{1}{4} \sin(2\theta_k - 2\alpha_k) \right\} \right]$, 複数

減肉を有する円筒の有効肉厚 (mm)

y_k : $\frac{a_k}{t}$, 減肉 1 又は減肉 2 の厚さに対する欠陥深さの比

y : $\text{Max}(y_1, y_2)$, 複数の減肉の欠陥深さ比の大なる値

α_1 : $\arctan \left[\frac{\sin \theta_s^*}{\frac{y_1 \sin \theta_1}{y_2 \sin \theta_2} + \cos \theta_s^*} \right]$, 中立軸と減肉 1 の中央との角度 (rad)

α_2 : $\theta_s^* - \alpha_1$, 中立軸と減肉 2 の中央との角度 (rad)

α_{-s} : $\frac{\pi a_k c_{Lk}}{t(\pi c_{Lk} + 2k_{pk}t)}$, 減肉 1 又は減肉 2 の単独減肉としての相当欠陥深さ比

ここに、

$$k_{pk} = \min \left\{ 2, -154.6y_k^3 + 456.3y_k^2 - 450.0y_k + 148.3 + f(\tau)(1-y_k) \right\}$$

$$f(\tau) = \frac{(0.78 - 4.15\tau)^2}{\tau}$$

α_{-m} : $\frac{\pi \sum_{k=1}^2 a_k c_{Lk}}{t(\pi \sum_{k=1}^2 c_{Lk} + 2H_0 + 4t)}$, 複数減肉としての相当欠陥深さ比

λ_{ak} : $\frac{1.428c_{Lk}}{\sqrt{R_1 a_k}}$, 減肉 1 又は減肉 2 の軸方向表面欠陥に対するシェルパラメータ

λ_a : $\frac{1.428 \sum_{k=1}^2 c_{Lk}}{\sqrt{R_1 a}}$, 複数減肉としての軸方向表面欠陥に対するシェルパラメータ

$2\theta_k$: $\frac{\pi c_{\theta k}}{\{(2 - y_k \tau) R_0\}}$, 減肉 1 又は減肉 2 の円周方向の角度 (rad)

θ_s^* : $\frac{S_0}{R_0} + \theta_1 + \theta_2 \leq \pi - (\theta_1 + \theta_2)$, 円筒断面における円周方向の減肉間の角度 (rad)

σ_{ys} : 設計温度における降伏応力 (N/mm²)

σ_{ys}^{\min} : 規定最小降伏応力 (N/mm²)

σ_f : $\text{Min}(\sigma_{ys}^{\min} / 1.5, \sigma_{ys} / 1.5)$, 許容応力 (N/mm²)

τ : $\frac{t}{R_0}$, 外半径に対する厚さの比

ψ_{b_s} : $(y_k \theta_k / 2) \{(2 - y_k \tau) / (2 - \tau)\}$, 減肉 1 又は減肉 2 の単独減肉として曲げ応力のみが作用するときの圧縮領域までの角度 (rad)

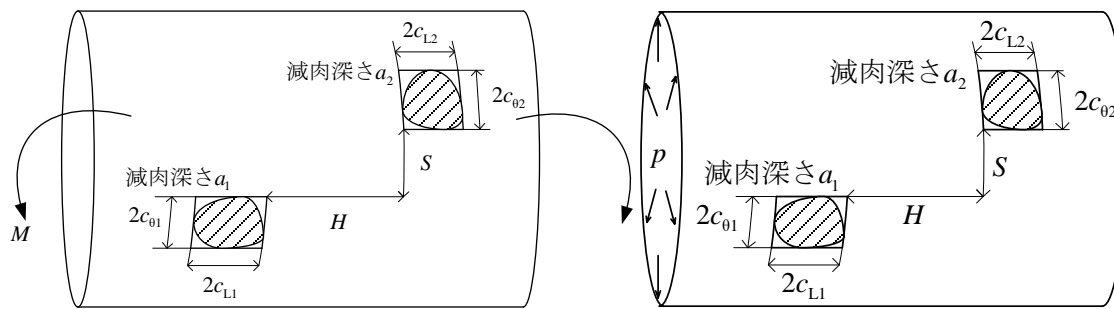
ψ_{b_m} : $\sum_{k=1}^2 [(y_k \theta_k / 2) \{(2 - y_k \tau) / (2 - \tau)\}]$, 複数減肉として曲げ応力のみが作用するときの圧縮領域までの角度 (rad)

2. p-M線図による評価

以下の各ステップに従い評価を行う。

ステップ 1: 評価する部材と減肉部の寸法及び材料特性 (材料の降伏応力) を決定する。

ステップ 2: 複数の減肉部の寸法 (a_k , $2c_{Lk}$, $2c_{\theta k}$: $k=1,2$) 及び相対関係 (H , S) を決定する (附属書5A-2図1を参照)。



Case 1: 外部曲げモーメント M

Case 2: 内圧 p

附属書 5A-2 図 1 曲げモーメント又は内圧が作用する複数の減肉を有する円筒形圧力設備 [1,2]

ステップ 3 : アライメント (整列) ルールを適用する (附属書 5A-2 図 2 参照)。

① 曲げモーメントを考慮するケース (Case1) :

$$S_0 / (2\bar{c}_\theta) = \begin{cases} S / (2\bar{c}_\theta) & : S / (2\bar{c}_\theta) > 3 \\ k_{\theta 3} \{S / (2\bar{c}_\theta)\}^3 + k_{\theta 2} \{S / (2\bar{c}_\theta)\}^2 + k_{\theta 1} \{S / (2\bar{c}_\theta)\} + k_{\theta 0} & : 0 < S / (2\bar{c}_\theta) \leq 3 \\ k_{\theta 0} & : -1 \leq S / (2\bar{c}_\theta) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、係数 $k_{\theta n}$ ($n=0,3$) は $H / (2\bar{c}_\theta)$ 及び $\bar{c}_L / \bar{c}_\theta$ の関数であり附属書 5A-2 表 1 で与えられる。

附属書 5A-2 表 1 曲げモーメントを考慮する場合 (Case1) の係数 $k_{\theta n}$ ($n=0$ to 3) ^[1,2]

$H/(2\bar{c}_\theta)$	\bar{c}_L/\bar{c}_θ	$k_{\theta 3}$	$k_{\theta 2}$	$k_{\theta 1}$	$k_{\theta 0}$
0.1	1 以上	-0.0710	0.5722	0.0429	0.4107
	0.75	-0.2756	1.3201	-0.4793	0.3888
	0.5	-0.1869	0.8118	0.1943	0.1882
	0.25	-0.0259	0.0698	1.0265	0.0020
0.5	1 以上	-0.0502	0.5926	-0.3287	0.6954
	0.75	-0.0554	0.6529	-0.2849	0.5811
	0.5	-0.0552	0.6791	-0.1880	0.4962
	0.25	-0.0956	0.8355	-0.1485	0.3944
1.0 以上	1 以上	-0.2271	1.5183	-2.1967	2.0983
	0.75	-0.1666	1.2063	-1.6115	1.7155
	0.5	-0.1284	1.0085	-1.1780	1.3855
	0.25	-0.1094	0.8895	-0.8236	1.0798

注： $-1 \leq S/(2\bar{c}_\theta) \leq 0$ のときは $k_{\theta i}$ ($i=1 \sim 3$) = 0 とする。

表中に示されていない係数は線形補間を行い求める。

② 内圧を考慮するケース (Case2)

$$H_0/(2\bar{c}_L) = \begin{cases} H/(2\bar{c}_L) & : H/(2\bar{c}_L) > 3 \\ k_{L3}\{H/(2\bar{c}_L)\}^3 + k_{L2}\{H/(2\bar{c}_L)\}^2 + k_{L1}\{H/(2\bar{c}_L)\} + k_{L0} & : 0 < H/(2\bar{c}_L) \leq 3 \\ k_{L0} & : -1 \leq H/(2\bar{c}_L) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

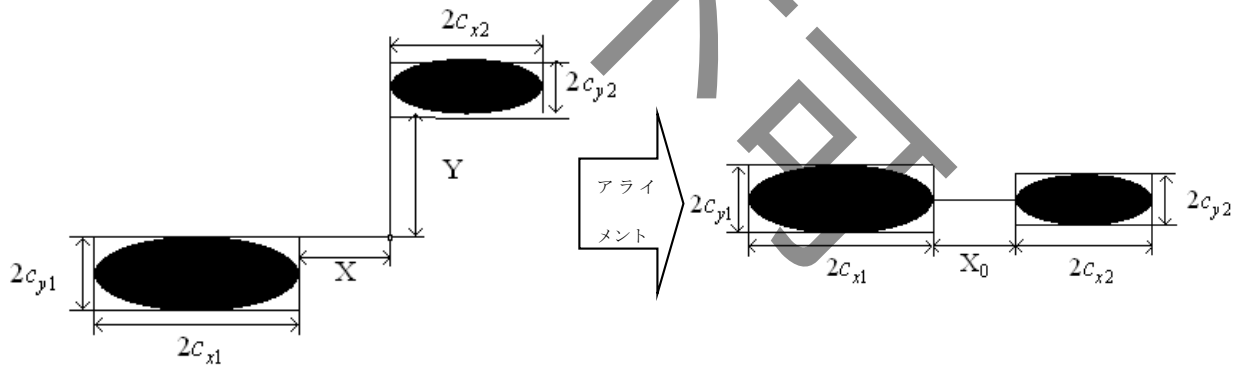
ここで、係数 k_{Ln} ($n=0,3$) は $S/(2\bar{c}_L)$ 及び \bar{c}_θ/\bar{c}_L の関数であり附属書 5A-2 表 2 で与えられる。

附属書 5A-2 表 2 内圧を考慮する場合 (Case2) の係数 k_{Ln} ($n=0$ to 3) ^[1,2]

$S/(2\bar{c}_L)$	\bar{c}_θ/\bar{c}_L	k_{L3}	k_{L2}	k_{L1}	k_{L0}
0.1	1 以上	-0.0275	0.2200	0.3748	0.6377
	0.75	-0.0477	0.3394	0.2787	0.4527
	0.5	-0.0813	0.4720	0.2893	0.2767
	0.25	-0.0753	0.3911	0.5676	0.1182
0.5	1 以上	-0.0429	0.3457	-0.0193	1.1600
	0.75	-0.0606	0.4376	-0.0491	0.8438
	0.5	-0.0756	0.5071	-0.0118	0.6003
	0.25	-0.0836	0.5274	0.1080	0.4062
1.0 以上	1 以上	-0.2340	1.4586	-2.2249	2.9599
	0.75	-0.1605	1.0538	-1.4141	2.0895
	0.5	-0.1216	0.8237	-0.8855	1.4981
	0.25	-0.1004	0.6780	-0.4944	1.0685

注： $-1 \leq H/(2c_L) \leq 0$ のとき k_{Ln} ($n=1 \sim 3$) = 0 とする。

表中に示されていない係数は線形補間を行い求める。



Case 1

X : 円周方向の欠陥間の距離

$X_0 = S_0$: 等価な円周方向の欠陥間の距離

$2c_x = 2c_\theta$: 円周方向欠陥長さ

$2c_y = 2c_L$: 軸方向欠陥長さ

Case2

X : 軸方向の欠陥間の距離

$X_0 = H_0$: 等価な軸方向の欠陥間の距離

$2c_x = 2c_L$: 軸方向欠陥長さ

$2c_y = 2c_\theta$: 円周方向欠陥長さ

附属書 5A-2 図 2 アライメント (整列) ルール ^[1,2]

附属書 5A-22

著作権法により無断での複製、転載等は禁止されております。

ステップ 4 :

(3)式及び(4)式をそれぞれ満たす場合には、 $2c_L (=2c_{L1} + 2c_{L2})$ 、 $2c_\theta (=2c_{\theta1} + 2c_{\theta2})$ 、

$a (= \text{Max}\{a_1, a_2\})$ 、 $y (= \text{Max}\{y_1, y_2\})$ を用いて、**附属書5A-1**により評価を行うことができる。

それ以外の場合には、ステップ 5 に進む。

$$H_0 \leq H_0^{\text{Max}} \quad (3)$$

$$S_0 \leq S_0^{\text{Max}} \quad (4)$$

ステップ 5 :

① 個々の減肉の塑性崩壊圧力を計算し、最小塑性崩壊圧力 p_{-s}^L を決定する。

$$p_{-s}^L = \frac{2\tau(2-\tau)}{4-6\tau+3\tau^2} \frac{1-\alpha_{-s}}{M_{s-s}} \sigma_f \quad (5)$$

② 個々の減肉の塑性崩壊モーメントを計算し、最小塑性崩壊モーメント M_{-s}^L を決定する。

$$M_{-s}^L = \frac{\pi R_o^3 \{1-(1-\tau)^4\}}{4A_{b-s}} \sigma_f \quad (6)$$

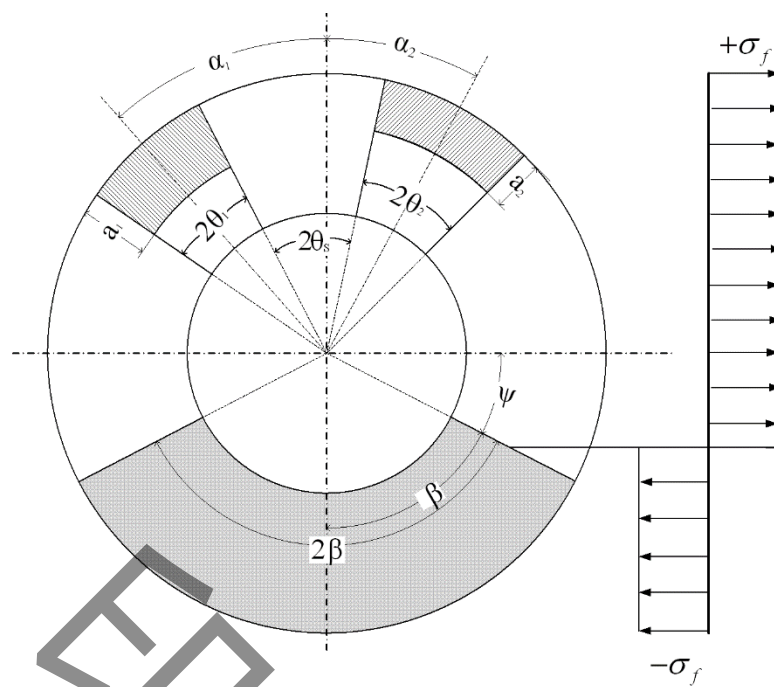
ステップ 6 :

① 複数の減肉の限界圧力 p_{-m}^L を計算する。

$$p_{-m}^L = \frac{2\tau(2-\tau)}{4-6\tau+3\tau^2} \frac{1-\alpha_{-m}}{M_{s-m}} \sigma_f \quad (7)$$

② 複数の減肉の限界モーメント M_{-m}^L を求める (**附属書5A-2図3**参照)。

$$M_{-m}^L = \frac{\pi R_o^3 \{1-(1-\tau)^4\}}{4A_{b-m}} \sigma_f \quad (8)$$



附属書5A-2図3 複数減肉を有する円筒断面^[1]

ステップ7:

- ① p-M線図の縦座標として内圧/限界圧力比 p_r を求める。

$$p_r = p / p^L \quad (9)$$

$$\text{ここで、} p^L = \min \{ p_{-s}^L, p_{-m}^L \}$$

- ② p-M線図の横座標として作用モーメント/限界モーメント比 M_r を求める。

$$M_r = |M| / M^L \quad (10)$$

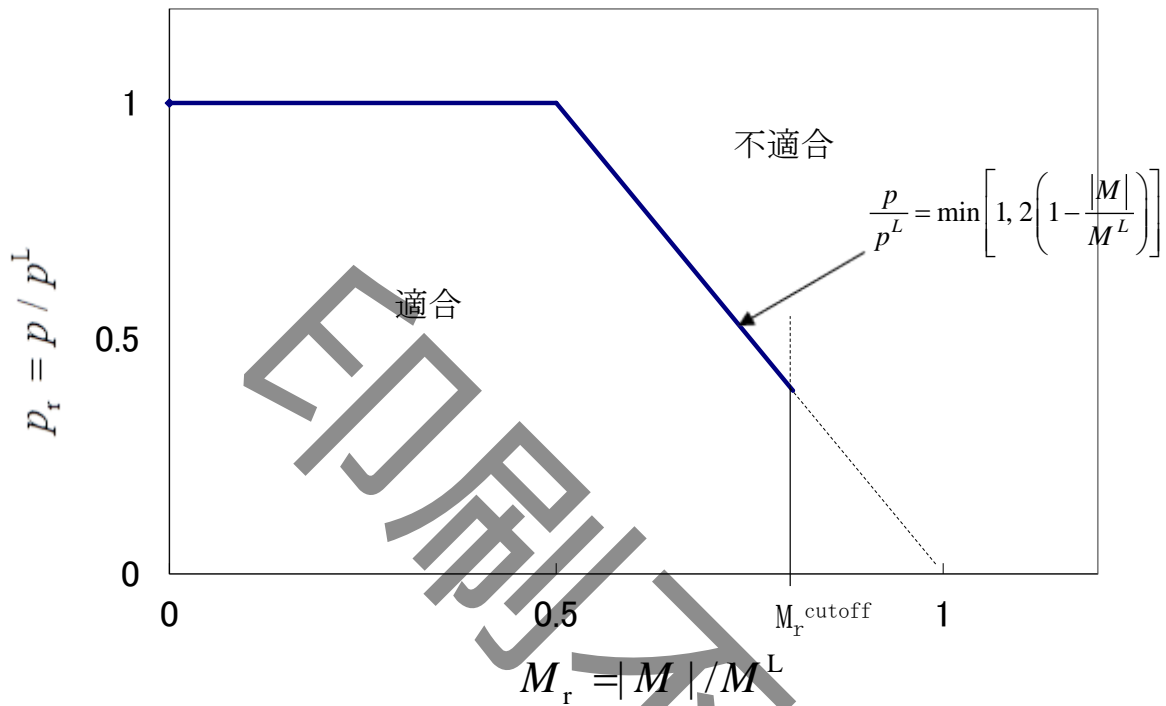
$$\text{ここで、} M^L = \min \{ M_{-s}^L, M_{-m}^L \}$$

ステップ8: 座屈限界モーメント M_r^{cutoff} を求め、1未満の場合にはp-M線図の横座標の上限とする。

$$M_r^{\text{Cutoff}} = S' / \sigma_f \quad (11)$$

ステップ 9：附属書5A-2図4に示すp-M線図により (M_r, p_r) を評価する。

(M_r, p_r) が、附属書 5A-2 図 4 の p-M 線図の適合領域にプロットされた場合、その減肉は合格したものとする。



附属書 5A-2 図 4 p-M 線図^[1,2]

<参考文献>

[1] Konosu, S., 2009, "Assessment Procedure for Multiple Volumetric Flaws in p-M Diagram," ASME J. Pressure Vessel Technol., 131, p. 031407.

[2] Konosu, S., Kano, M., Mukaimachi, N, and Kanamaru, S., 2010, "Validity of Assessment Procedure in p-M Method for Multiple Volumetric Flaws", ASME J. Pressure Vessel Technol., p. 021402