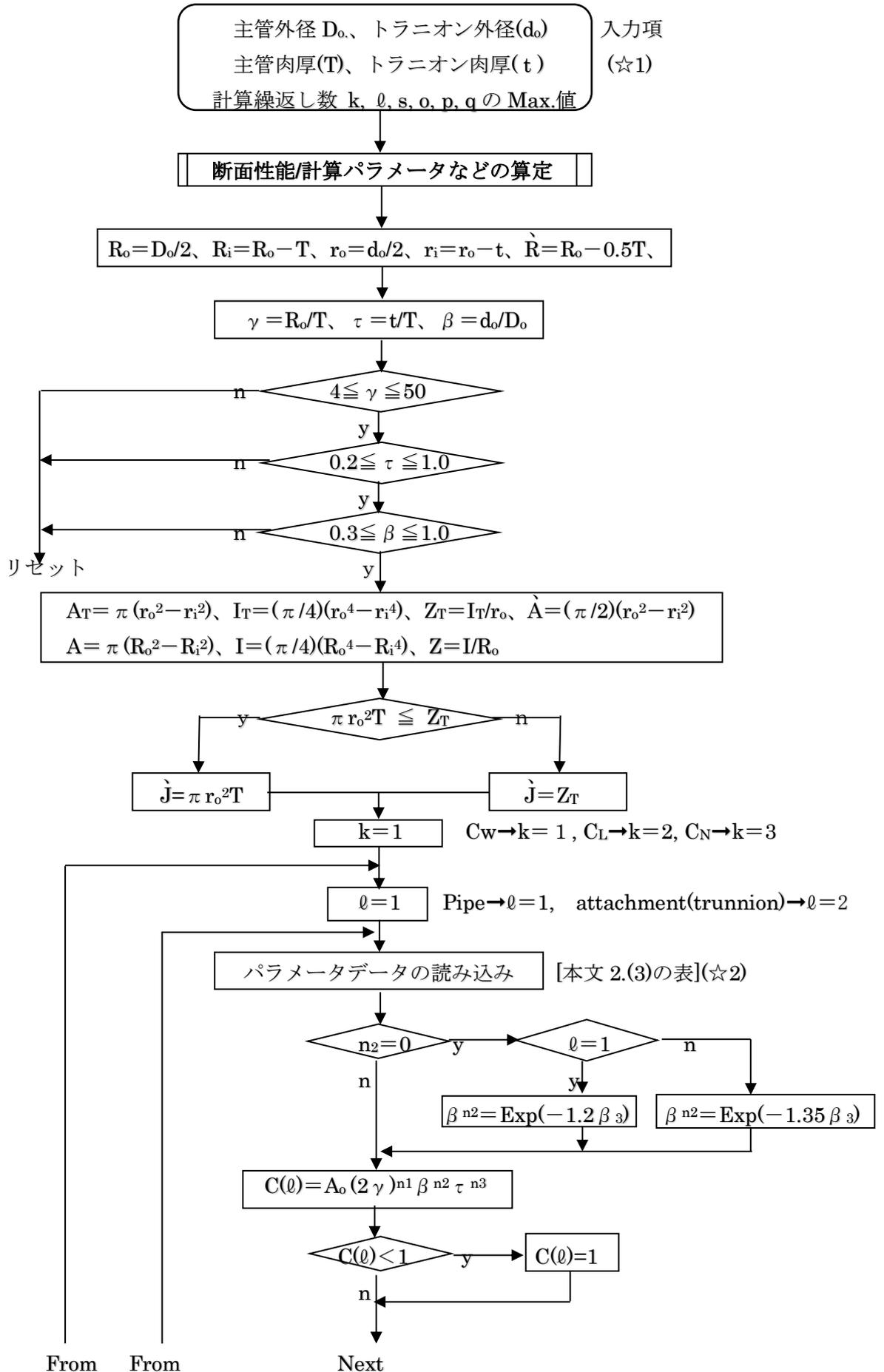
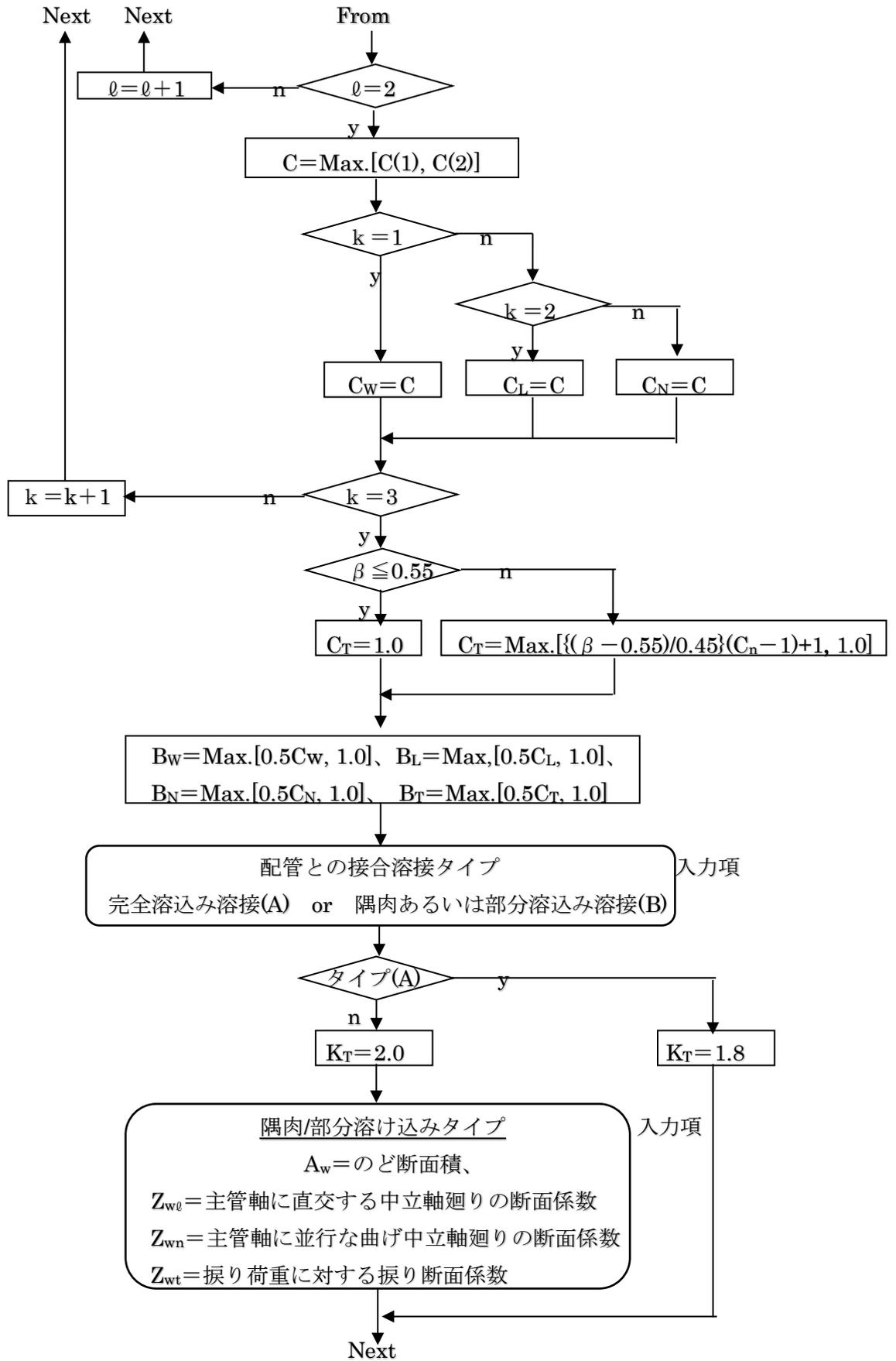
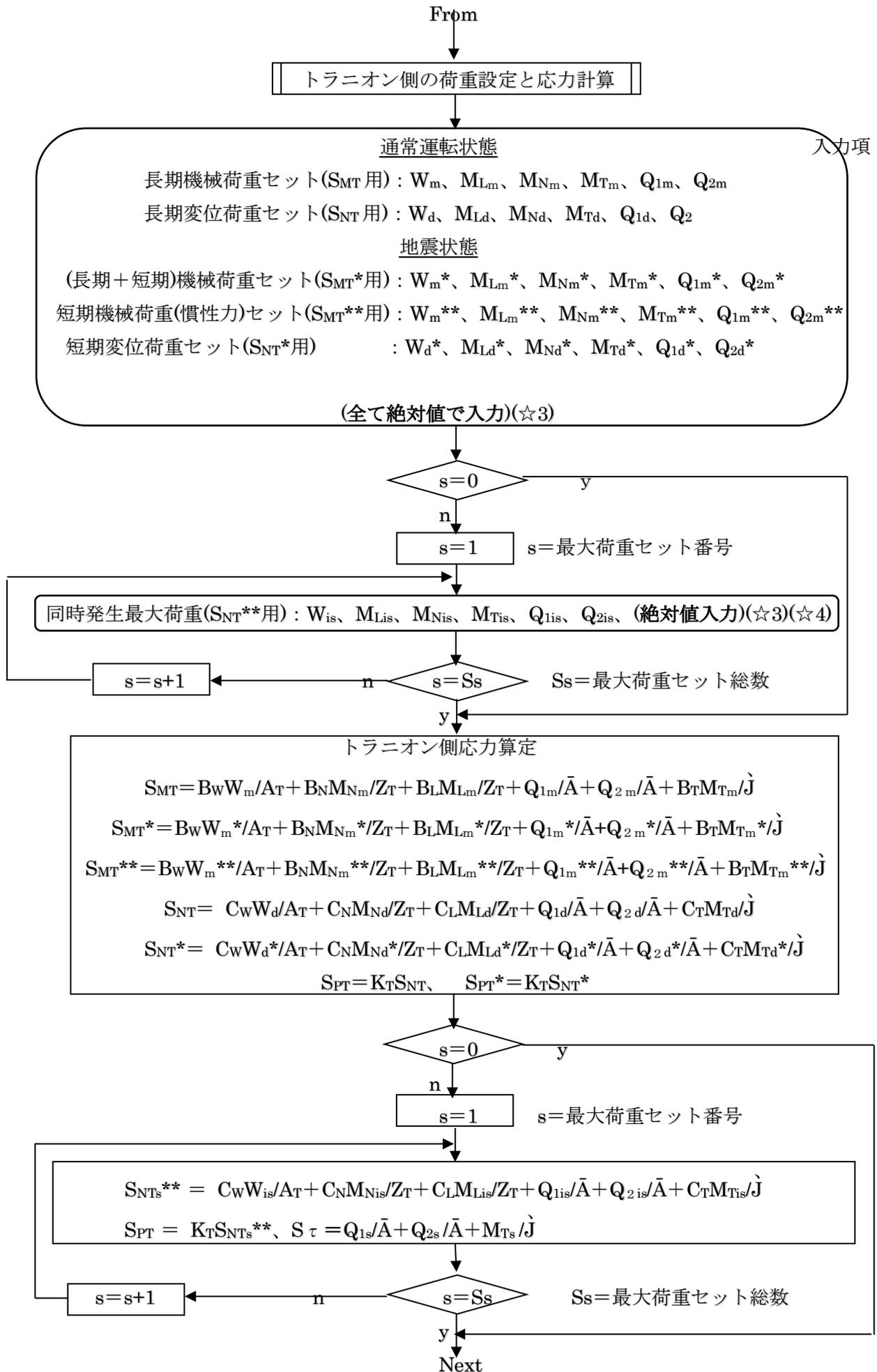


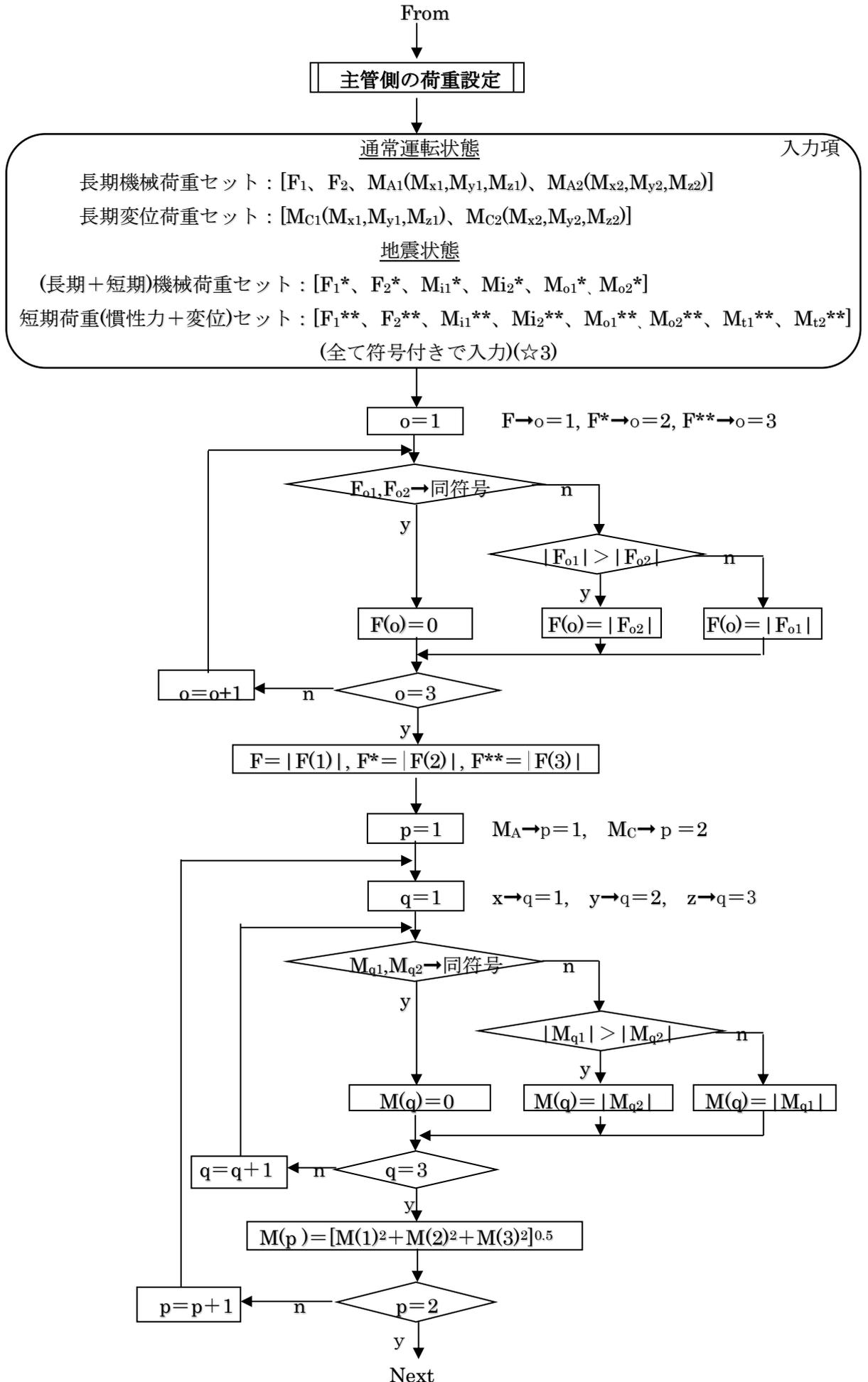
【 2/2 分冊 】

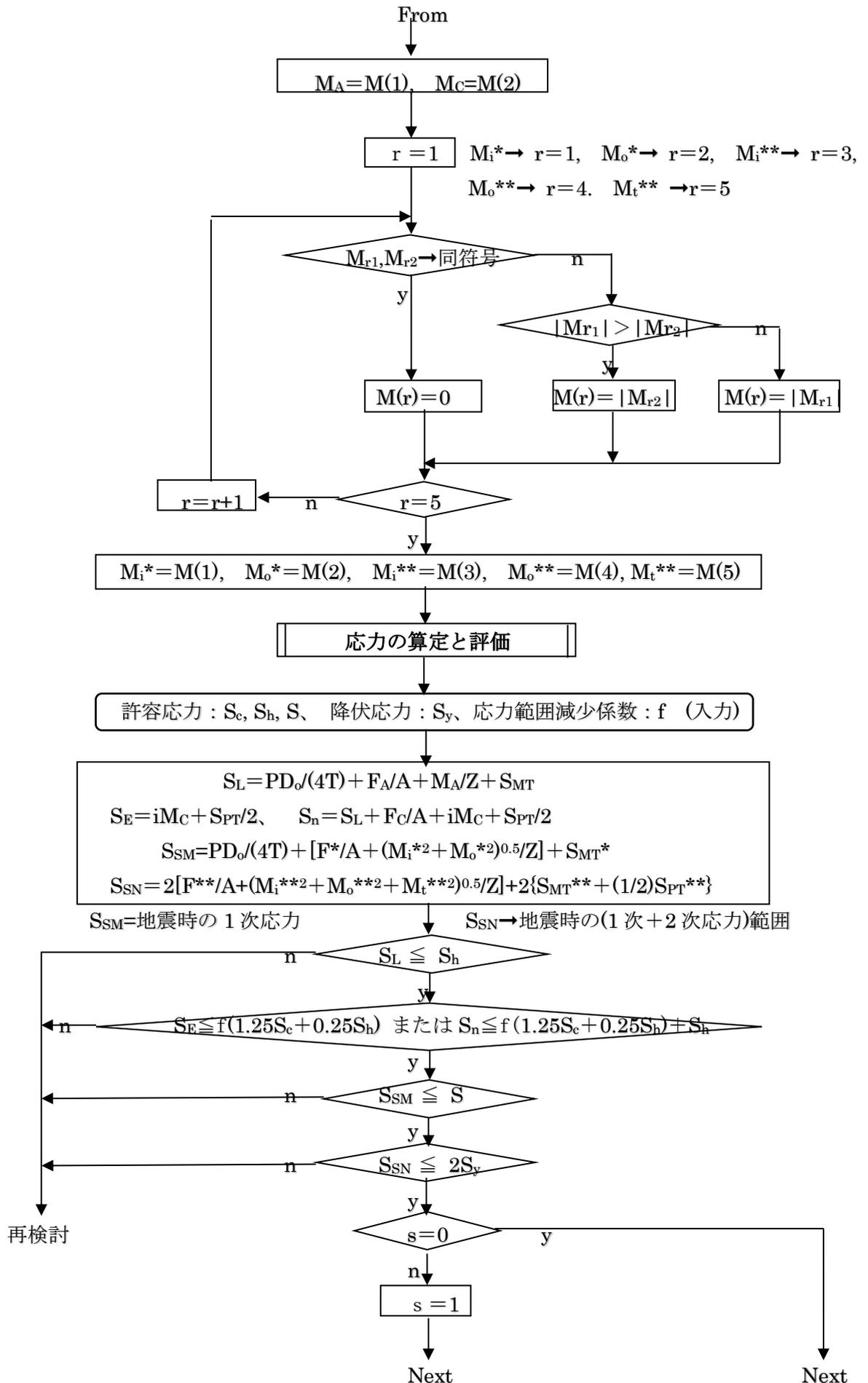
補足 C トラニオン-主管交叉部の強度評価手順













補足 D トラニオン-主管交叉部の強度計算例

例 1. 下記の条件のもとで CC 392-3 に基づきトラニオン-直管交叉部の長期応力を評価してみる。

直管) サイズ : 200A Sch40 ( $\phi$  216.3x8.2)、材質 : SUS304TP、温度 110°C

トラニオン) サイズ : 150A Sch40 ( $\phi$  165.2x7.1)、材質 : SUS304TP

荷重データ) 設計圧力  $P=2\text{MPa}$ 、モーメント・フォース=下記、(単位 : N, N·m)

トラニオン側	長期機械	$W_m$	$M_{Lm}$	$M_{Nm}$	$M_{Tm}$	$Q_{1m}$	$Q_{2m}$
	荷重		3500	1250	570	320	1.250
	長期変位	$W_d$	$M_{Ld}$	$M_{Nd}$	$M_{Td}$	$Q_{1d}$	$Q_{2d}$
	荷重		4000	2850	2380	960	4800
主管側	長期機械	$F=520$ 、 $M_i=2670$ 、 $M_o=1830$ 、 $M_t=470$					
	長期変位	$F=3400$ 、 $M_i=4490$ 、 $M_o=4200$ 、 $M_t=1090$					

適用チェック :  $\gamma = R_o/T = 108.2/8.2 = 13.2 \quad \rightarrow 4 \leq \gamma \leq 50$  なので OK  
 $\tau = t/T = 7.1/8.2 = 0.866 \quad \rightarrow 0.2 \leq \tau \leq 1.0$  なので OK、  
 $\beta = d_o/D_o = 216.3/165.2 = 0.764 \quad \rightarrow 0.3 \leq \beta \leq 1$  なので OK

断面性能算定 :  $R_o=108.2$ 、 $R_i=100$ 、 $r_o=82.6$ 、 $r_i=75.5$ 、 $\bar{R}=104.1$  mm  
 トラニオン断面積  $A_T = \pi(r_o^2 - r_i^2) = 3525$  mm<sup>2</sup>  
 トラニオン断面係数  $Z_T = (\pi/4)(r_o^4 - r_i^4)/r_o = 11034905/82.6 = 133595$  mm<sup>4</sup>  
 トラニオンせん断面積  $\bar{A} = A_T/2 = 1762$  mm<sup>2</sup>  
 主管断面積  $A = \pi(R_o^2 - R_i^2) = 5361$  mm<sup>2</sup>  
 主管断面係数  $Z = (\pi/4)(R_o^4 - R_i^4)/R_o = 29091682/108.2 = 268870$  mm<sup>3</sup>  
 $(\pi r_o^2 T = 175672) > (Z_T = 133595)$  なので  $\bar{J} = 133595$  mm<sup>3</sup>

応力係数 :  $C_w = A_o (2\gamma)^{n1} \beta^{n2} \tau^{n3} = 1.4x(26.4)^{0.81}x0.5856x0.866^{1.33} = 9.597$  (Pipe)  
 $= 4.0x(26.4)^{0.55}x0.5477x0.866^{1.0} = 11.482$  (Trunnion)  
 $C_L = A_o (2\gamma)^{n1} \beta^{n2} \tau^{n3} = 0.46x(26.4)^{0.60}x0.764^{-0.04}x0.866^{0.86} = 2.929$  (Pipe)  
 $= 1.10x(26.4)^{0.23}x0.764^{-0.38}x0.866^{0.38} = 2.449$  (Trunnion)  
 $C_N = A_o (2\gamma)^{n1} \beta^{n2} \tau^{n3} = 0.23x(26.4)^{1.01}x0.764^{-0.62}x0.866^{0.89} = 6.523$  (Pipe)  
 $= 0.44x(26.4)^{0.85}x0.764^{-0.28}x0.866^{0.54} = 7.093$  (Trunnion)  
 大きい方を選んで  $C_w=11.5$ 、 $C_L=2.93$ 、 $C_N=7.09$  ( $\geq 1$ )  
 $\beta > 0.55$  なので  $C_T = \{(\beta - 0.55)/0.45\}(C_N - 1) + 1 = 5.28$  ( $\geq 1$ )

$B_w = 0.5C_w = 5.75$ 、 $B_L = 0.5C_L = 1.49$ 、 $B_N = 0.5C_N = 3.54$ 、 $B_T = 0.5C_T = 2.64$  ( $\geq 1$ )  
 $K_T = 1.8$  (完全溶込み溶接)

応力算定 :  $S_{MT} = B_w W_m / A_T + B_N M_{Nm} / Z_T + B_L M_{Lm} / Z_T + Q_{1m} / \bar{A} + Q_{2m} / \bar{A} + B_T M_{Tm} / \bar{J}$   
 $= 5.75x3500/3525 + 3.54x570000/133595 + 1.49x1250000/133595$   
 $+ 1250/1762 + 2080/1762 + 2.64x320000/133595$   
 $= 5.71 + 15.1 + 13.94 + 0.71 + 1.18 + 6.32 = 43.0$  N/mm<sup>2</sup>

$$\begin{aligned}
S_{NT} &= C_W W_d / A_T + C_N M_{Nd} / Z_T + C_L M_{Ld} / Z_T + Q_{1d} / \bar{A} + Q_{2d} / \bar{A} + C_T M_{Td} / J \\
&= 11.5 \times 4000 / 3525 + 7.09 \times 2850000 / 133595 + 2.93 \times 2380000 / 133595 \\
&\quad + 4800 / 1762 + 3400 / 1762 + 5.28 \times 960000 / 133595 \\
&= 13.0 + 151.3 + 52.1 + 2.7 + 1.9 + 37.9 = 258.9 \text{ N/mm}^2 \\
S_{PT} &= K_T S_{NT} = 1.8 \times 258.9 = 466 \text{ N/mm}^2
\end{aligned}$$

全応力算定:  $S_L = PD_o / (4T) + F/A + M_A / Z + S_{MT}$

$$\begin{aligned}
&= 2 \times 216.3 / (4 \times 8.2) + 520 / 5361 + (2670^2 + 1830^2 + 470^2)^{0.5} \times 1000 / 268870 + 43 \\
&= 13.2 + 0.1 + 12.2 + 43 = 68.5 \text{ N/mm}^2, \\
S_n &= S_L + F_C / A + i M_C + S_{PT} / 2 \\
&= 68.5 + 3400 / 5361 + 1 \times (4490^2 + 4200^2 + 1090^2)^{0.5} \times 1000 / 268870 + 466 / 2 \\
&= 68.5 + 0.63 + 23.2 + 233 = 325.3 \text{ N/mm}^2,
\end{aligned}$$

応力評価:  $S_h = 137 \text{ N/mm}^2$ ,  $S_c = 137 \text{ N/mm}^2$ ,  $1.25(S_c + S_h) = 342.5 \text{ N/mm}^2$  ( $f=1$ ),  
長期 1 次応力:  $[S_L = 68.5] \leq [S_h = 137]$  OK  
長期 1 次 + 2 次応力:  $[S_n = 325.3] \leq [1.25(S_c + S_h) = 342.5]$  OK

例 2. 上記と同じ条件で Sadd & Avent の応力指数法により トラニオン-主管交叉部の長期応力を評価してみる。

応力係数:  $B_1 = 1.05(0.764)^{-0.23}(26.4)^{0.008} = 1.15$ ,  $B_{2t} = 2.0(0.866)^{0.1}(0.764)^{-2} = 3.38$ ,  
 $B_{2r} = 1.5$ ,  $C_{2t} = 36.0(1.5 - 0.764)^2 - 6.0 = 13.5$ ,  $C_{2r} = 1.7$ ,  
 $K_{2t} = K_{2r} = 2.0$ (仕上げ無し),  $i_t = 2 \times 13.5 / 2 = 13.5$ ,  $i_{ir} = 2 \times 1.7 / 2 = 1.7$

全応力算定:  $S_L = B_1(PD/4T) + B_w |F_t| / A_t + (B_{2t}^2 M_{it}^2 + B_{2t}^2 M_{ot}^2 + M_{tt}^2)^{0.5} / Z_t$   
 $+ (B_{2r}^2 M_{ir}^2 + B_{2r}^2 M_{or}^2 + M_{tr}^2)^{0.5} / Z_r$

$$\begin{aligned}
&= 1.15 \times 2 \times 216.3 / (4 \times 8.2) + 5.75 \times 3500 / 3525 \\
&\quad + (3.38^2 \times 1250^2 + 3.38^2 \times 570^2 + 320^2)^{0.5} \times 1000 / 133595 \\
&\quad + (1.5^2 \times 2670^2 + 1.5^2 \times 1830^2) \times 1000 / 268870 \\
&= 15.2 + 5.7 + 34.8 + 18.2 = 73.9 \text{ N/mm}^2 \\
S_E &= C_W |F_t| / A_t + (i_t^2 M_{it}^2 + i_t^2 M_{ot}^2 + M_{tt}^2)^{0.5} / Z_t + (i_r^2 M_{ir}^2 + i_r^2 M_{or}^2 + M_{tr}^2)^{0.5} / Z_r \\
&= 11.5 \times 4000 / 3525 + (13.5^2 \times 2850^2 + 13.5^2 \times 2380^2 + 960^2) \times 1000 / 133595 \\
&\quad + (1.7^2 \times 4490^2 + 1.7^2 \times 4200^2 + 1090^2) \times 1000 / 268870 \\
&= 13.1 + 373.3 + 39 = 425.4 \text{ N/mm}^2
\end{aligned}$$

応力評価:  $S_h = 137 \text{ N/mm}^2$ ,  $S_c = 137 \text{ N/mm}^2$ ,  $1.25(S_c + S_h) = 342.5 \text{ N/mm}^2$  ( $f=1$ ),  
長期 1 次応力:  $[S_L = 73.9] \leq [S_h = 137]$  OK  
長期 (1 次 + 2 次) 応力:

$$[S_L + S_E = 73.9 + 425.4 = 499.3] \leq [1.25(S_c + S_h) = 342.5] \text{ NO !}$$

例 3. 例 1 と同じ条件で EPRI の方法で トラニオンエルボ交叉部の長期応力を評価してみる。

応力係数:  $C_W = A_o (2\gamma)^{n1} \beta^{n2} \tau^{n3} = 0.75 \times (26.4)^{0.229} \times 0.764^{-0.42} \times 0.866^{0.85} = 1.57$   
 $C_L = A_o (2\gamma)^{n1} \beta^{n2} \tau^{n3} = 1.68 \times (26.4)^{0.0734} \times 0.764^{-0.01} \times 0.866^{0.769} = 1.92$   
 $C_N = A_o (2\gamma)^{n1} \beta^{n2} \tau^{n3} = 0.72 \times (26.4)^{0.21} \times 0.764^{-0.355} \times 0.866^{0.84} = 1.395$

$$C_T = A_o (2\gamma)^{n1} \beta^{n2} \tau^{n3} = 1.25 \times (26.4)^{0.158} \times 0.764^{0.158} \times 0.866^{0.714} = 1.81$$

$$\begin{aligned} \text{応力算定 : } S_{MT} &= B_W W_m / A_T + B_N M_{Nm} / Z_T + B_L M_{Lm} / Z_T + Q_{1m} / \bar{A} + Q_{2m} / \bar{A} + B_T M_{Tm} / \bar{J} \\ &= 1 \times 3500 / 3525 + 1 \times 570000 / 133595 + 1 \times 1250000 / 133595 \\ &\quad + 1250 / 1762 + 2080 / 1762 + 1 \times 320000 / 133595 \\ &= 1 + 4.26 + 9.35 + 0.71 + 1.18 + 2.4 = 18.9 \text{ N/mm}^2 \\ S_{NT} &= C_W W_d / A_T + C_N M_{Nd} / Z_T + C_L M_{Ld} / Z_T + Q_{1d} / \bar{A} + Q_{2d} / \bar{A} + C_T M_{Td} / \bar{J} \\ &= 1.57 \times 4000 / 3525 + 1.395 \times 2850000 / 133595 + 1.92 \times 2380000 / 133595 \\ &\quad + 4800 / 1762 + 3400 / 1762 + 1.81 \times 960000 / 133595 \\ &= 1.78 + 29.7 + 34.2 + 2.72 + 1.93 + 13 = 83.3 \text{ N/mm}^2 \\ S_{PT} &= 2 \times 83.3 = 166.6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{全応力算定 : } S_L &= PD_o / (4T) + F/A + 0.75ixM_A / Z + S_{MT} \\ &= 2 \times 216.3 / (4 \times 8.2) + 520 / 5361 + 3.75(2670^2 + 1830^2 + 470^2)^{0.5} \times 1000 / 268870 + 18.9 \\ &= 13.2 + 0.1 + 45.8 + 18.9 = 78 \text{ N/mm}^2 \\ S_n &= S_L + F_c / A + iM_c + S_{PT} / 2 \\ &= 78 + 3400 / 5361 + 5(4490^2 + 4200^2 + 1090^2)^{0.5} \times 1000 / 268870 + 466 / 2 \\ &= 78 + 0.63 + 116 + 83.3 = 278 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{応力評価 : } S_h &= 137 \text{ N/mm}^2, S_c = 137 \text{ N/mm}^2, 1.25(S_c + S_h) = 342.5 \text{ N/mm}^2 (f=1), \\ \text{長期 1 次応力 : } [S_L = 78] &\leq [S_h = 137] \text{ OK} \\ \text{長期 (1 次 + 2 次) 応力 :} \\ [S_n = 278] &\leq [1.25(S_c + S_h) = 342.5] \text{ OK} \end{aligned}$$

例 4. 上記と同じ条件で Williams & Lewis の応力指数法により トラニオンエルボ交叉部の長期応力を評価してみる。

$$\begin{aligned} \text{応力係数 : } B_1 &= 1.257, \\ B_{2t} &= B_{2r} = \{-0.022 \times 1.31 + 0.091\} \times (26.4) + 0.973 \times (26.4)^{-0.528} = 1.81 \\ C_1 &= \{8.75 \times 10^{-3} \times (26.4) + 1.18\} \times \{-19.81 \times (1.31)^{-0.015} + 20.67\} = 1.33 \\ C_{2t} &= C_{2r} = \{-0.071 \times 1.31 + 0.271\} \times 26.4 + 4.913 \times 26.4^{-5.961} = 4.67 \\ K_{2t} &= K_{2r} = 2.0 (\text{仕上げ無し}), i = 2 \times 4, 67/2 = 4.67 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{全応力算定 : } S_L &= B_1 (PD/4T) + B_w |F_t| / A_t \\ &\quad + (B_{2t}^2 M_{it}^2 + B_{2t}^2 M_{ot}^2 + M_{tt}^2)^{0.5} / Z_t + (B_{2r}^2 M_{ir}^2 + B_{2r}^2 M_{or}^2 + M_{tr}^2)^{0.5} / Z_r \\ &= 1.257 \times (2 \times 216.3 / (4 \times 8.2)) + 1.0 \times 3500 / 3525 \\ &\quad + (1.81^2 \times 1250^2 + 1.81^2 \times 570^2 + 320^2)^{0.5} \times 1000 / 133596 \\ &\quad + (1.81^2 \times 2670^2 + 1.81^2 \times 1830^2)^{0.5} \times 1000 / 268870 \\ &= 16.6 + 1 + 18.8 + 21.8 = 58.2 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_E &= C_w |F_t| / A_t + (i_t^2 M_{it}^2 + i_t^2 M_{ot}^2 + M_{tt}^2)^{0.5} / Z_t + (i_r^2 M_{ir}^2 + i_r^2 M_{or}^2 + M_{tr}^2)^{0.5} / Z_r \\ &= 1.57 \times 4000 / 3525 + (4.67^2 \times 2850^2 + 4.67^2 \times 2380^2 + 960^2)^{0.5} \times 1000 / 133595 \\ &\quad + (4.67^2 \times 4490^2 + 4.67^2 \times 4200^2 + 1090^2)^{0.5} \times 1000 / 268870 \\ &= 1.8 + 130 + 106.9 = 239 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

応力評価： $S_h=137\text{N/mm}^2$ 、 $S_c=137\text{N/mm}^2$ 、 $1.25(S_c+S_h)=342.5\text{ N/mm}^2$  ( $f=1$ )、

長期 1 次応力： $[S_L=58.2] \leq [S_h=137]$  OK

長期 (1 次+2 次) 応力：

$[S_L+S_E=58.2+239=297] \leq [1.25(S_c+S_h)=342.5]$  OK

計算結果の比較)

- ① CC N-392-3 と Sadd-Avent の結果は、1 次応力でほぼ合致するものの、(1 次+2 次) 応力でかなり差異がある。これは Sadd-Avent のトラニオン側の係数  $i_t$  が 13.5 と著しく高くなるからである。Sadd-Avent 文献の Table 2 Stress Index result では面外曲げにくらべ面内曲げは半分以下になっているので実際は、 $300\text{N/mm}^2$  レベルまで減少するのではないかと思われる(Class 1 適用を考えて文献の  $C_2$  はかなり安全側にセットされているようだ)。
- ② トラニオンエルボの結果は直管付きトラニオンの CC N-392-3 とあまりかわらない。また BPRI と Williams & Lewis もあまり変わらない。またエルボ自身の応力指数  $[C_2=1.95/(tR/r^2)^{2/3}]$  はこの場合 5.0 になるが、例 3. の計算でも 4.67 と余り差がないのでトラニオンが付いても 2 次応力はほとんど変化しないということになる。

#### 補足 E トラニオンエルボの撓み性係数

1. 配管にモーメントが作用するとエルボやバンドなどは楕円化して配管の撓みは増加する。従って配管構造解析では曲管部に適正な撓み係数(フレキシビリティ係数)を与える必要がある。この撓み係数は曲管の拘束具合によって変化する。例えば両端にフランジを付けたエルボの撓み性係数は拘束フリーのエルボの撓み係数の 60% 近くまでダウンする。エルボにトラニオンを付着した場合も同様の撓み性係数の現象が起きて配管の熱膨張吸収能力が低下する。エルボ断面の楕円化が阻害されるからである。一般にトラニオン付着によるロングエルボの撓み性低下はフリーエルボの ~70% 程度になるのでこれを無視すると解析結果に影響がでる。この問題については幾つかのスタディがあるがここでは EPRI<sup>(7)</sup> と Lewis & Chao<sup>(8)</sup> が提示した撓み性係数の推算式を紹介しておく。

2. EPRI は解析/実験をベースに下記の推算式を提案している( 図 E1 参照 )。

- (a) エルボの面外モーメントに対し  $k=1.3/h$
- (b) エルボの面内曲げに対し  $k=1.01(d/D)^{-0.372}(t/T)^{-0.12}/h$
- (c) トラニオンの面内曲げに対し  $k=0.142(D/T)^{1.11}(d/D)^{-0.22}(d/t)^{-0.55}$
- (d) トラニオンの面外曲げに対し  $k=0.146(D/T)^{1.41}(d/D)^{0.36}(d/t)^{-0.61}$

ここで  $h=TR/R_m^2$  (特性値)、 $D$ =エルボ管外径(mm)、 $R_m$ =エルボ管平均半径(mm)、 $R$ =エルボ曲がり半径(mm)、 $T$ =エルボ公称肉厚(mm)、 $d$ =トラニオン外径(mm)、 $t$ =トラニオン公称肉厚(mm)

これらの式はいずれも曲管側 1 端固定モデルによるもので、下記の範囲にある  $90^\circ$  エルボ(ロングないしショートエルボ)に適用できる。

$$19 \leq Ro/T \leq 33, 0.34 \leq d/D \leq 0.85, 9 \leq d/t \leq 49$$

なお、曲管側 1 端固定モデルは、トラニオン無しエルボの撓み性係数の定義モデルに同じ。

3. Lewis & Chao は FEM 解析によって下記の推算式を与えている( 図 E2 参照 )。

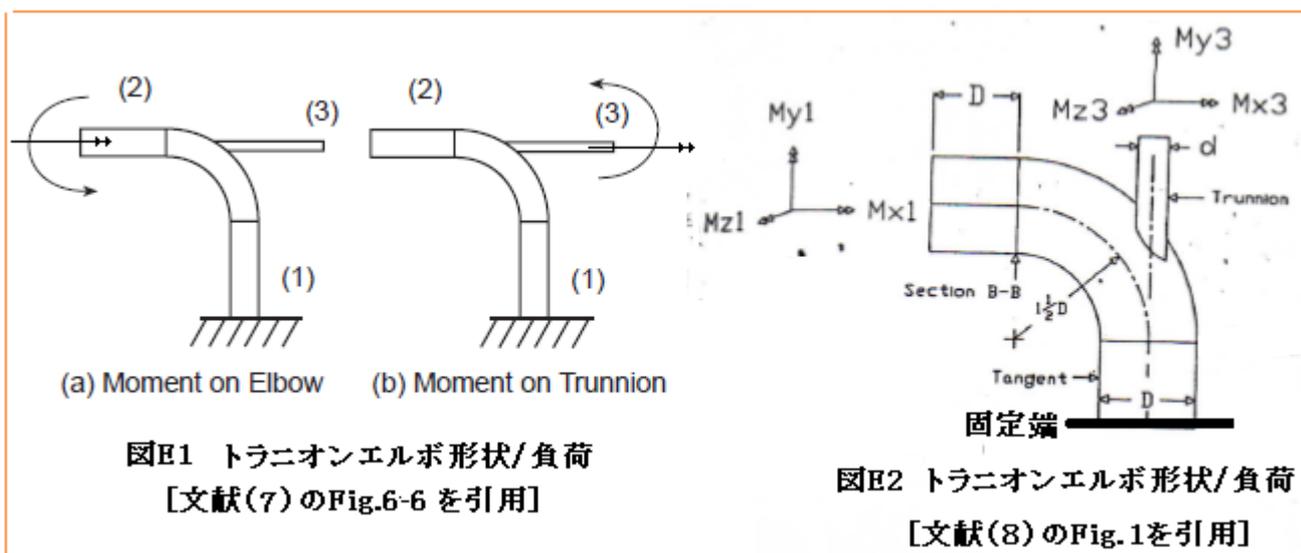
- $k_x = 0.871k_{\text{elbow}} - 0.425$
- $k_y = -0.014(k_{\text{elbow}})^2 + 1.14 k_{\text{elbow}} - 0.509$
- $k_z = 0.81 k_{\text{elbow}} - (d/D)$

ここで  $k_x, k_y$  = 面外モーメントに対する撓み性係数、 $k_z$  = 面内モーメントに対する撓み性係数、 $k_{\text{elbow}}$  = トラニオン無しエルボの撓み性係数(= 1.65/h)

$h = TR/R_m^2$  (特性値)、 $R_m$  = エルボ管平均半径(mm)、 $R$  = エルボ曲がり半径(mm)、 $T$  = エルボ公称肉厚(mm)、 $D$  = エルボ管外径(mm)、 $d$  = トラニオン外径(mm)

これらの式はいずれも曲管側 1 端固定モデルによるもので、下記の範囲にある 90° ロングエルボに適用できる(多分ショートエルボにも適用できると思う)。

$$0.5 \leq d/D \leq 1, 1 \leq t/T \leq 2 \text{ (誤記?)}$$



図E1 トラニオンエルボ形状/負荷  
[文献(7)のFig.6-6を引用]

図E2 トラニオンエルボ形状/負荷  
[文献(8)のFig.1を引用]

引用文献・テキスト)

- (1) ASME Code Case N-391-2 :  
Procedure for Evaluation of the Design of Hollow Circular Cross Section Welded Attachments on Class 1 piping Section III Division 1
- (2) ASME Code Case N-392-3 :  
Procedure for Evaluation of the Design of Hollow Circular Cross Section Welded Attachments on Class 2 or 3 piping Section III Division 1
- (3) CEB-79-22 “Stress Index Development for Trunnion Support” by R.R.Avent & M.H.Sadd  
(Tennessee Authority Div. of Eng. Design Civil Eng. Branch)
- (4) “Development of  $B_1$  and  $C_1$  Stress indices for Trunnion Elbow Support”  
by D. K. Williams & G. D. Lewis (Trans. of ASME Vol.106 May 1984)
- (5) “Development of Primary and Secondary Moment Load Stress Indices for Trunnion Elbow”  
by D. K. Williams & G. D. Lewis (84-PVP-98 (1984))
- (6) 「解説・原子力設備の技術基準」通産省資源エネルギー庁編 (電力新報社)
- (7) EPRI TR-107453 “Stress Indices for Elbows with Trunnion Attachments “ (1998)
- (8) “Flexibility of Trunnion piping Elbows” by G.D.Lewis and Y.J.Cho  
(Trans. of the ASME Vol.112 May 1980)
- (9) KHK E012-2-1997 高圧ガス設備等耐震設計指針 レベル1 耐震性能評価 (配管系) 編