

大型高速増殖炉要素技術設計研究(Ⅱ)

簡易熱応力評価線図(不連続熱応力の簡易解析)

1987年11月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

大型高速増殖炉要素技術設計研究(II)

簡易熱応力評価線図 (不連続熱応力の簡易解析)

古橋 一郎*, 渡土 克己**
今津 彰**

要 旨

FBR 機器設計における熱応力計算費用の低減と計算期間の短縮を目的として、軸対称シエル理論を用い不連続熱応力の簡易解析を行なった。

これにより 1) 円筒端部, 2) 材質および板厚の不連続部, 異材継手部, 3) 軸方向温度勾配, 容器の液面近傍部, 4) 容器とフランジの接続部, 5) ノズルと容器の接続部, 6) スカート構造部, ノズルのセーフエンド構造部, 7) 補強リング部, 等の定常および非定常熱応力が簡易かつ迅速に計算できる。

さらに, 9) 円筒に円周方向温度分布が生じた場合, 10) 壁面近傍にサーマルストライピングが生じた場合の簡易熱応力評価式を求めた。

これらの結果を用いることにより, 種々の形状および寸法に対する熱応力が容易に計算でき, 設計費用と設計期間の低減が期待できる。

* (株) エイ・テイ・エス

** 大洗工学センター, 構造工学室

Partitioning Design Study of Large FBR

Diagram for Thermal Stress Evaluation
(Simplified Analyses of Discontinuity Thermal Stresses)

I. Furuhashi*, K. Watashi** and
A. Imazu**

Abstract

Simplified analyses of discontinuity thermal stresses were performed using axisymmetrical shell theory for the purpose of saving cost and time of thermal stress calculations in the design of FBR's components.

By these analyses, steady and unsteady thermal stresses are to be calculated easily and quickly for the following regions 1) edge of cylinder, 2) discontinuity of material properties and thickness, dissimilar metal pipe joint, 3) axial temperature distribution, cylinder near the liquid surface level, 4) junction of vessel & flange, 5) junction of nozzle and vessel, 6) skirt structures, nozzle safe end, and 7) ring reinforcement.

Also, simple formulae were proposed for estimating thermal stresses caused by 9) circumferential temperature distribution of cylinder, 10) thermal striping near the structural wall.

By using these results, one can easily evaluate thermal stresses for various shapes and dimensions, and saving of cost and time should be accomplished in the design of FBR's components.

* Atomic Energy Technical Service.

** Structural Engineering Section, OEC.

目 次

まえがき	1
1. 軸対称不連続熱応力	3
1.1 円筒端部の熱応力	3
1.2 材質および板厚の不連続部	13
1.3 異材継手	34
1.4 軸方向温度分布（端部から十分離れた位置）	51
1.5 軸方向温度分布（端部近傍）	67
1.6 円筒容器のフランジ部	85
1.7 ノズルと容器の接続部	99
1.8 スカート構造	115
1.9 円筒容器の補強リング部	141
1.10 ラプラス変換法について	145
2. そ の 他	150
2.1 円周方向温度分布による円筒の熱応力	150
2.2 サーマルストライピングによる高サイクル熱応力	158
3. ま と め	162
4. 参 考 文 献	163
付録 A1 軸対称荷重を受ける円筒	165
付録 A2 軸対称荷重を受ける円板	185
付録 A3 構造設計用複数位置温度計算プログラム	201

List of Figures

Fig. 1.1.1	Free edge of cylindrical shell	3
Fig. 1.1.2	Temperature distribution in wall	3
Fig. 1.1.3	Thermal stresses near the free edge for T_B	6
Fig. 1.1.4	Simply supported edge of cylindrical shell	7
Fig. 1.1.5	Thermal stresses near the simply supported edge for T_M .	9
Fig. 1.1.6	Thermal stresses near the simply supported edge for T_B .	10
Fig. 1.1.7	Fixed edge of cylindrical shell	11
Fig. 1.1.8	Thermal stresses near the fixed edge for T_M	12
Fig. 1.2.1	Discontinuity of thickness and material properties in cylindrical shell	13
Fig. 1.2.2	Thermal stresses near the discontinuity of thickness & T_M ($K = 1.5$, t_1 side)	26
Fig. 1.2.3	" " (K = 1.5, t_2 side)	27
Fig. 1.2.4	" " (K = 2, t_1 side)	28
Fig. 1.2.5	" " (K = 2, t_2 side)	29
Fig. 1.2.6	" " (K = 3, t_1 side)	30
Fig. 1.2.7	" " (K = 3, t_2 side)	31
Fig. 1.2.8	" " (K = 5, t_1 side)	32
Fig. 1.2.9	" " (K = 5, t_2 side)	33
Fig. 1.3.1	Dissimilar metal pipe joint (2 materials)	34
Fig. 1.3.2	Thermal stresses near the discontinuity of T_M	37
Fig. 1.3.3	Thermal stresses near the discontinuity of T_B	38
Fig. 1.3.4	Dissimilar metal pipe joint (3 materials)	40
Fig. 1.4.1	Ramp distribution of T_M	51
Fig. 1.4.2	Ramp distribution of radial load	51
Fig. 1.4.3	Step distribution of T_B	53
Fig. 1.4.4	Ramp distribution of T_B	53
Fig. 1.4.5	Thermal stresses for ramp distribution of T_M	57
Fig. 1.4.6	Thermal stresses for ramp distribution of T_B	58
Fig. 1.5.1	Ramp distribution of temperature near the edge of cylinder	67

Fig. 2.1.2	Step distribution of temperature	152
Fig. 2.1.3	Stress distribution for $\theta_1 = 0$	153
Fig. 2.1.4	Stress distribution for $\theta_1 = \pi/4$	153
Fig. 2.1.5	Ramp distribution of temperature	153
Fig. 2.1.6	Stress distribution for $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/6$	154
Fig. 2.1.7	Stress distribution for $\theta_1 = \pi/6, \pi/3$ ($\theta_2 = \pi/2$).....	156
Fig. 2.2.1	Analysis model for thermal striping	158

List of Tables

Table 1.2.1	Thermal stresses at the discontinuity of thickness ($t_1 = 20.6\text{mm}$)	20
Table 1.2.2	Thermal stresses at the discontinuity of thickness ($t_2 = 26.8\text{mm}$)	20
Table 1.2.3	$C_1, C_2, \phi_1, C_3, \phi_2, C_4$ for K	25
Table 1.4.1	Thermal stresses by ramp distribution of temperature (T_{M_1}, T_{B_1} side)	63
Table 1.4.2	Thermal stresses by ramp distribution of temperature (T_{M_2}, T_{B_2} side)	63
Table 1.7.1	Thermal stresses at the corner of nozzle	112
Table 1.7.2	Thermal stresses at the corner of crotch	112
Table 1.7.3	Thermal stresses at the taper of crotch	113
Table 1.7.4	Thermal stresses at the taper of vessel	113
Table 1.7.5	Thermal stresses at the vessel	115
Table 1.8.1	Thermal stresses at the nozzle safe end (vessel 1, $\chi = \ell_1$)	127
Table 1.8.2	Thermal stresses at the thermal liner (vessel 2, $\chi = \ell_2/4$)	127
Table 1.8.3	Thermal stresses at the nozzle safe end (vessel 3, $\chi = \ell_3/4$)	128
Table 1.8.4	Thermal stresses at the nozzle safe end (vessel 3, $\chi = \ell_3$)	128
Table 1.8.5	$C_1, C_2, C_2/K^2, \phi_1, C_3, \phi_2, C_4$ for K	134
Table 2.2.1	Dimensionless surface temperature amplitude for thermal stripping	161

ま え が き

高温で運転されるプラントにおいては、その定常運転および過渡運転の各々の状態に応じてプラント構成機器に様々な熱荷重が働く。これらの構成機器の設計では、

- 1) 機器に課せられた本来の性能についての計算
- 2) 地震、内圧等の機械荷重に対する強度計算
- 3) 熱荷重に対する強度計算 ～ 熱応力計算

が主要な技術計算項目であり、さらに

- 4) 接続機器あるいはシステムとのマッチング性
- 5) コストの計算
- 6) 使用実績
- 7) メンテナンス性

等を含めた総合判断による合理的な設計が求められる。

FBR 機器設計では A) 熱伝達特性の良い液体ナトリウムを冷却材として用い、B) 熱伝導特性の悪いステンレス鋼を主要な構造材料として用いることから、機器構造材中に大きな温度差が生じ易い。一般に熱応力は温度差に比例して大きくなり、FBR 機器設計では3)の熱応力計算が大きな比重を占める事になる。

近年、FEM汎用構造解析コードおよび大型スーパーコンピュータが普及し、複雑な構造の伝熱解析、熱応力解析が盛んに行なわれるようになった。しかしながら、適切な解析モデルの作成、入力データの作成、出力結果の後処理等には専門知識と経験を有する構造解析技術者の多大のマンパワーを必要とし、計算機システム使用料も膨大なものとなる。FBR 機器設計費用に占める熱応力計算費用は大きなものとなる。

以上の背景から、簡易熱応力評価手法を開発することが望まれている。簡易熱応力評価線図、簡易熱応力算出式、関数電卓あるいはパソコンレベルで計算できる簡易熱応力解析法などを開発する事は FBR 機器設計費用の大幅な低減と設計期間の大幅な短縮をもたらすものとする。前報では、熱応力の二つの要因の一つである「板厚内温度分布による応力」を対象として一次元非定常熱伝導理論解を用いた簡易熱応力評価線図を作成した(Ref 1)。本報では、熱応力のもう一つの要因である「構造全体における総体的な温度分布による応力」を対象として軸対称シェル理論による簡易解析その他を行なった。総体的な温度分布を求めるには前報の「一次元非定常熱伝導の理論解」を用いて構造全体における複数位置の温度応答をそれぞれ独立に求めるのが有効である。前報と本報を合わせて用いる事により

- 円筒端部
- 材質および板厚の不連続部、異材継手部

- 軸方向温度勾配，容器の液面近傍部
- 容器とフランジの接続部
- ノズルと容器の接続部
- スカート構造部，ノズルのセーフエンド構造部
- 補強リング部

等における定常および非定常熱応力の計算が簡易かつ迅速に行なえるものとする。またその他に

- 円筒に円周方向温度分布が生じた場合 ～ 水平円筒内のサーマルストラティフィケーション，あるいは垂直円筒外部の対流熱伝達など
- 壁面近傍にサーマルストライピングが生じた場合

等の熱応力を算出する簡易評価式を求めた。

これらの結果を用いる事により，形状や寸法を変えたパラメトリックな簡易熱応力評価が容易であり，FBR 機器設計費用と設計期間の低減が期待できる。

1. 軸対称不連続熱応力

軸対称構造あるいは軸対称近似が有効である構造の「不連続部」における熱応力についての理論解析を行なった。温度分布は軸対称とし、軸対称シェル理論を用いた。「不連続部」としては

- 構造の不連続 ~ 円筒とフランジ(円板)の接続など
- 形状の不連続 ~ 板厚不連続など
- 材質の不連続 ~ 異材継手など
- 温度の不連続 ~ 熱的境界条件の不連続による軸方向温度分布などを対象とした。

1.1 円筒端部の熱応力

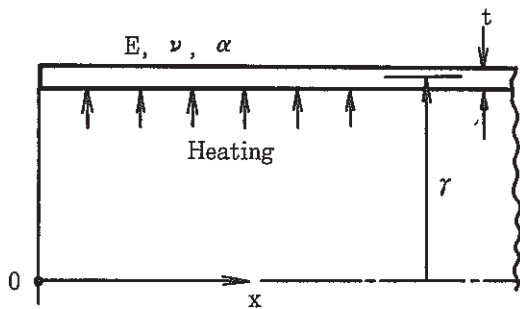


Fig. 1.1.1 Free edge of cylindrical shell

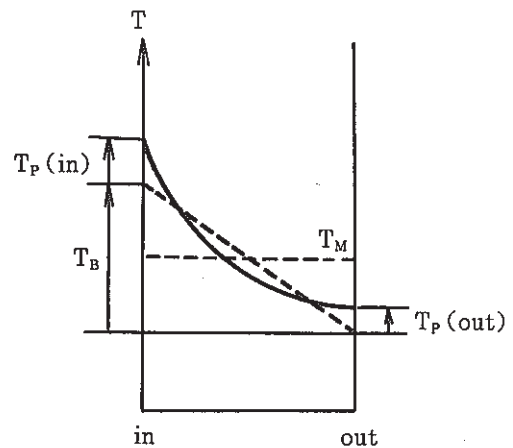


Fig. 1.1.2 Temperature distribution in wall

Fig. 1.1.1 に示すように円筒の内面が加熱され、Fig. 1.1.2 の実線で示すような板厚内温度分布が生じたとする。規準温度からの相対的な板厚平均温度を T_M とする。等価線型温度差を T_B 、ピーク温度差を T_P とする。 T_M 、 T_B 、 T_P は端部からの距離 χ によらずすべての位置で同一とする。付録 A1 の (A 1.10)、(A 1.11) 式より半径方向変位の一般解は

$$u = e^{\beta\chi} (C_1 \cos \beta\chi + C_2 \sin \beta\chi) + e^{-\beta\chi} (C_3 \cos \beta\chi + C_4 \sin \beta\chi) + r \alpha T_M$$

で与えられる。端部から十分離れた位置では $u = r \alpha T_M$ となるから $C_1 = C_2 = 0$ であり

$$u = e^{-\beta\chi} (C_3 \cos \beta\chi + C_4 \sin \beta\chi) + r \alpha T_M = C_3 \theta(\beta\chi) + C_4 \zeta(\beta\chi) + r \alpha T_M \tag{a}$$

となる。勾配は

$$i = \frac{du}{dx} = -\beta C_3 \varphi(\beta x) + \beta C_4 \phi(\beta x) \quad (b)$$

となる。(A1.4), (A1.5), (A1.8)式より

$$M_x = D \left\{ \frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{(1+\nu)\alpha T_B}{t} \right\} = 2\beta^2 D \{ C_3 \zeta(\beta x) - C_4 \theta(\beta x) \} - M^* \quad (c)$$

$$M_\theta = D \left\{ \nu \cdot \frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{(1+\nu)\alpha T_B}{t} \right\} = 2\beta^2 D \nu \{ C_3 \zeta(\beta x) - C_4 \theta(\beta x) \} - M^* \quad (d)$$

$$Q = \frac{dM_x}{dx} = 2\beta^3 D \{ C_3 \phi(\beta x) + C_4 \varphi(\beta x) \} \quad (e)$$

となる。ここに

$$M^* = \frac{D(1+\nu)\alpha T_B}{t} = \frac{Et^2 \alpha T_B}{12(1-\nu)} \quad (1.1)$$

であり、関数 φ , ϕ , θ , ζ は(A1.15)式の記法による。

(1) 自由端の場合

自由端($x=0$)でモーメント M_x , せん断力 Q が0となるから

$$M_x|_{x=0} = -2\beta^2 D C_4 - M^* = 0, \quad Q|_{x=0} = 2\beta^3 D (C_3 + C_4) = 0$$

より

$$C_3 = -C_4 = \frac{M^*}{2\beta^2 D} = \frac{r \alpha T_B}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \quad (f)$$

となる。これを(a), (b), (c), (d)式に代入して

$$\left[\begin{aligned} u &= r \alpha T_M + \frac{M^*}{2\beta^2 D} \phi(\beta x) = r \alpha T_M + \frac{r \alpha T_B}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \phi(\beta x) \\ i &= \frac{du}{dx} = -\frac{M^*}{\beta D} \theta(\beta x) = -\frac{(1+\nu)\alpha T_B}{[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \sqrt{\frac{r}{t}} \theta(\beta x) \\ M_x &= -M^* \{ 1 - \varphi(\beta x) \} = -\frac{Et^2 \alpha T_B}{12(1-\nu)} \{ 1 - \varphi(\beta x) \} \\ M_\theta &= -M^* \{ 1 - \nu \cdot \varphi(\beta x) \} = -\frac{Et^2 \alpha T_B}{12(1-\nu)} \{ 1 - \nu \varphi(\beta x) \} \\ \sigma_{\theta, M} &= \frac{E}{r} (u - r \alpha T_M) = \frac{E \alpha T_B}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \phi(\beta x) = 0.3934 E \alpha T_B \phi(\beta x) \\ &\quad (\nu=0.3) \\ \sigma_{x, B} &= \frac{6 M_x}{t^2} = -\frac{E \alpha T_B}{2(1-\nu)} \{ 1 - \varphi(\beta x) \} = -0.7143 E \alpha T_B \{ 1 - \varphi(\beta x) \} \\ &\quad (\nu=0.3) \\ \sigma_{\theta, B} &= \frac{6 M_\theta}{t^2} = -\frac{E \alpha T_B}{2(1-\nu)} \{ 1 - \nu \cdot \varphi(\beta x) \} \end{aligned} \right] \quad (1.2)$$

を得る。端部から十分離れた位置では、

$$\left[\begin{array}{l} u = r\alpha T_M, i=0, M_x = M_\theta = -M^*, \sigma_{\theta,M} = 0 \\ \sigma_{x,B} = \sigma_{\theta,B} = \frac{-6M^*}{t^2} = -\frac{E\alpha T_B}{2(1-\nu)} \equiv \alpha_{NB} \text{ (公称曲げ応力)} \\ \hspace{15em} = -0.7143 E\alpha T_B \text{ (}\nu=0.3\text{)} \end{array} \right] \quad (g)$$

となる。自由端 ($\chi=0$) では

$$\sigma_{\theta,M} = \frac{E\alpha T_B}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}}, \sigma_{x,B} = 0, \sigma_{\theta,B} = -\frac{E\alpha T_B}{2(1-\nu)} (1-\nu) \quad (h)$$

となり、外表面の円周方向応力が最大応力

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta,M+B} (\chi=0, \text{外表面}) &= \frac{E\alpha T_B}{2(1-\nu)} \left\{ \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} + (1-\nu) \right\} \\ &= 1.25 \frac{E\alpha T_B}{2(1-\nu)} = -1.25 \alpha_{NB} \text{ (}\nu=0.3\text{の時)} \end{aligned} \quad (1.3)$$

となり、端部から十分離れた位置の 1.25 倍となる。

線形応力成分 (膜応力と曲げ応力) の他に、温度分布の非線形成分 T_p により、非線形応力成分 (熱ピーク応力)

$$\sigma_{x,P} = \sigma_{\theta,P} = -\frac{E\alpha T_P}{1-\nu} \quad (i)$$

が存在するのであるが本章では省略することにする。また特に明示しない限り軸荷重 F_x は 0 とし

$$\sigma_{x,M} = \frac{F_x}{2\pi r t} = 0 \quad (j)$$

として省略する。

自由端近傍の応力分布を Fig. 1.1.3 に示す。端部からの無次元距離

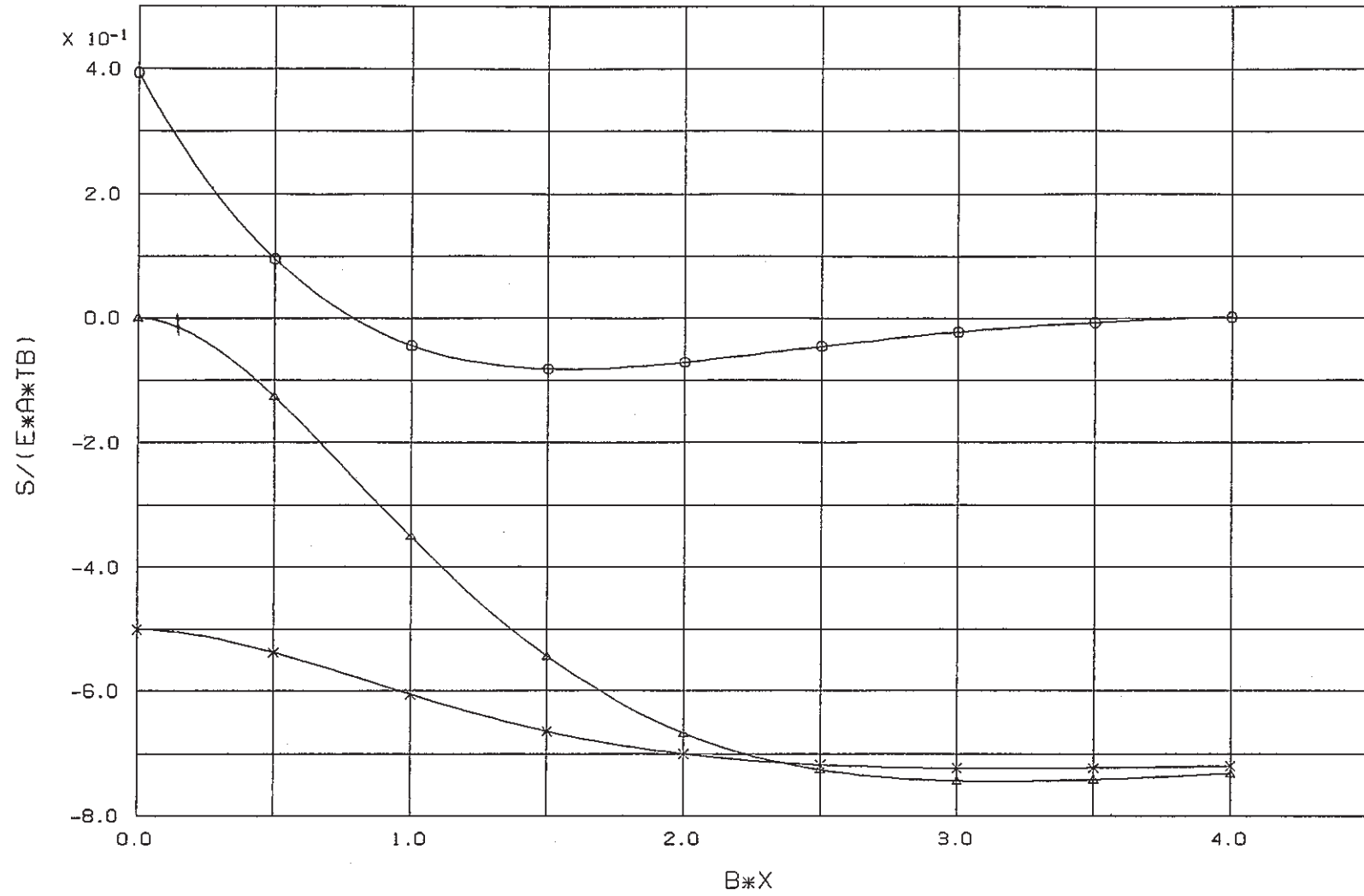
$$\beta\chi = \frac{[3(1-\nu^2)]^{1/4}}{\sqrt{r t}} \cdot \chi = 1.2854 \frac{\chi}{\sqrt{r t}} \text{ (}\nu=0.3\text{)} \quad (1.4)$$

に対して無次元応力

$$\frac{\sigma_{\theta,M}}{E\alpha T_B}, \frac{\sigma_{x,B}}{E\alpha T_B}, \frac{\sigma_{\theta,B}}{E\alpha T_B} \quad (k)$$

をプロットしたものである ($\nu=0.3$ とした)。任意位置の膜応力と曲げ応力は (1.2) 式の解を用いて計算するか、あるいは Fig. 1.1.3 の線図から容易に読み取る事ができる。

○
ST.M
—
△
SX.B
—
×
ST.B



THERMAL STRESSES NEAR FREE EDGE BY T.B

Fig. 1.1.3 Thermal stresses near the free edge for T_B

(2) 単純支持端の場合

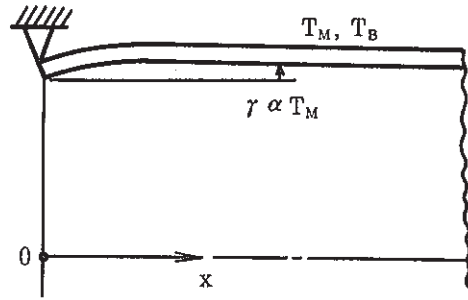


Fig. 1.1.4 Simply supported edge of cylindrical shell

単純支持端 ($\chi=0$) では

$$u|_{\chi=0} = C_3 + r\alpha T_M = 0, \quad M_x|_{\chi=0} = -2\beta^2 D C_4 - M^* = 0$$

より

$$C_3 = -r\alpha T_M, \quad C_4 = -\frac{M^*}{2\beta^2 D} \quad (l)$$

となる。これを (a), (b), (c), (d) 式に代入して

$$\left[\begin{aligned} u &= r\alpha T_M \{1 - \theta(\beta\chi)\} - \frac{M^*}{2\beta^2 D} \zeta(\beta\chi) \\ &= r\alpha T_M \{1 - \theta(\beta\chi)\} - \frac{r\alpha T_B}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \zeta(\beta\chi) \\ i &= \frac{du}{d\chi} = \beta r\alpha T_M \varphi(\beta\chi) - \frac{M^*}{2\beta D} \phi(\beta\chi) \\ M_x &= -2\beta^2 D r\alpha T_M \zeta(\beta\chi) - M^* \{1 - \theta(\beta\chi)\} \\ M_\theta &= -2\nu\beta^2 D r\alpha T_M \zeta(\beta\chi) - M^* \{1 - \nu \cdot \theta(\beta\chi)\} \\ \sigma_{\theta,M} &= \frac{E}{r} (u - r\alpha T_M) = -E \alpha T_M \theta(\beta\chi) - \frac{E \alpha T_B}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \zeta(\beta\chi) \\ \sigma_{x,B} &= \frac{6M_x}{t^2} = -E \alpha T_M \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta\chi) - \frac{E \alpha T_B}{2(1-\nu)} \{1 - \theta(\beta\chi)\} \\ \sigma_{\theta,B} &= \frac{6M_\theta}{t^2} = -E \alpha T_M \nu \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta\chi) - \frac{E \alpha T_B}{2(1-\nu)} \{1 - \nu \cdot \theta(\beta\chi)\} \end{aligned} \right] \quad (1.5)$$

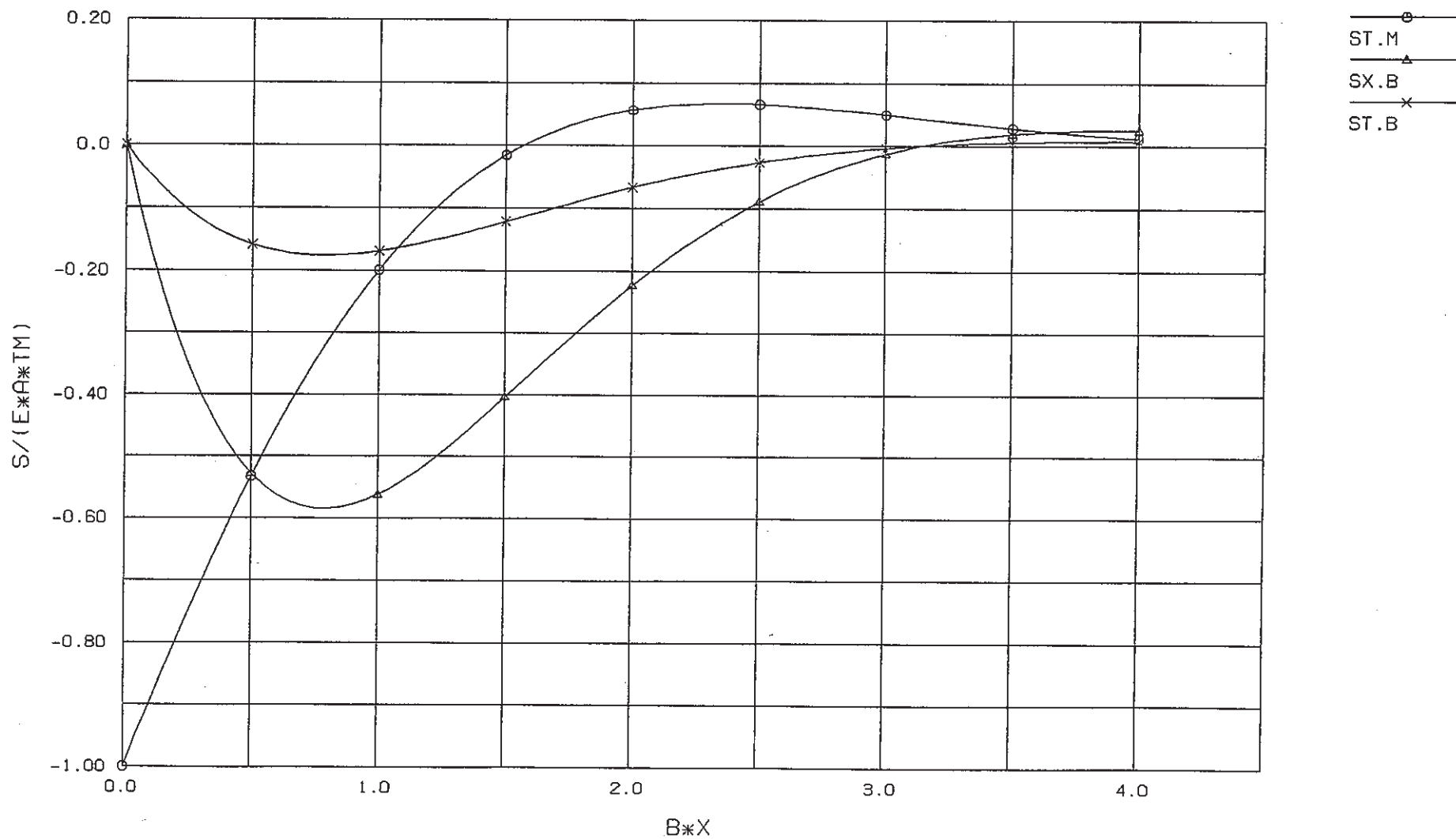
を得る。右辺第一項は T_M の寄与分、第二項は T_B の寄与分である。板厚平均温度の相対変化 T_M による無次元応力

$$\sigma \text{ (第一項, } \nu = 0.3) / E \alpha T_M \quad (m)$$

を無次元距離 $\beta\chi$ に対してプロットした応力分布図を Fig. 1.1.5 に示す。等価線形温度差 T_B による無次元応力

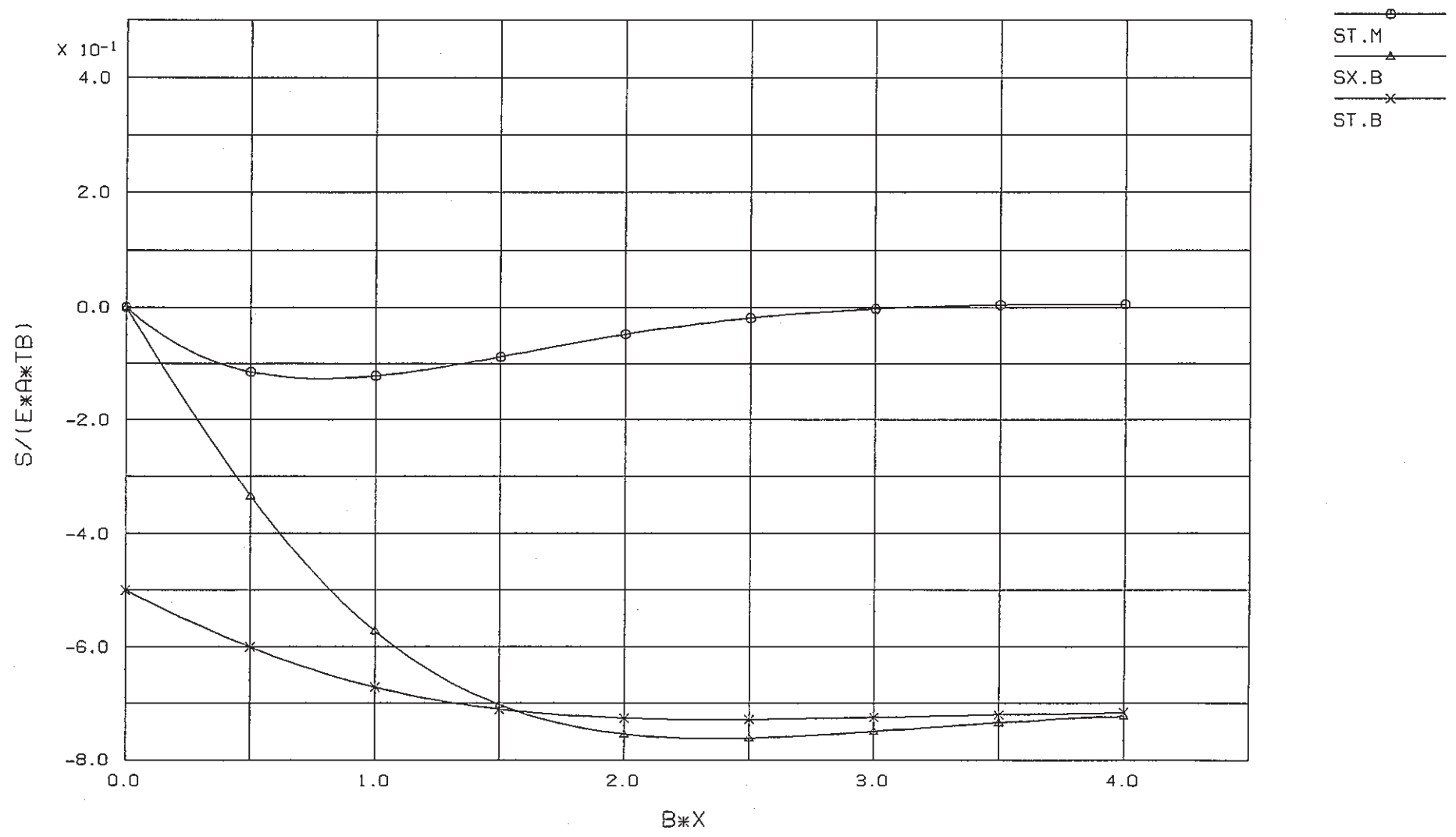
$$\sigma (\text{第二項, } \nu=0.3) / E \alpha T_B \quad (\text{n})$$

を βx に対してプロットした応力分布図を Fig. 1.1.6 に示す。任意位置の応力は解を用いて計算するか、これらの線図から容易に読み取ることができる。 T_M と T_B が重なる場合は、各々に対する応力を線図から読み取って加えれば良い。



THERMAL STRESSES NEAR SIMPLY SUPPORTED EDGE BY T.M

Fig. 1.1.5 Thermal stresses near the simply supported edge for T_M



THERMAL STRESSES NEAR SIMPLY SUPPORTED EDGE BY T.B

Fig. 1.1.6 Thermal stresses near the simply supported edge for T_B

(3) 固定支持端の場合

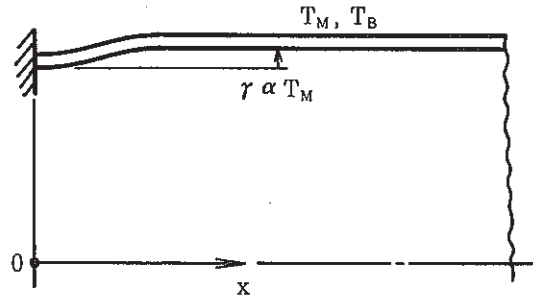


Fig. 1.1.7 Fixed edge of cylindrical shell

固定端 ($x=0$) では

$$u|_{x=0} = C_3 + r\alpha T_M = 0, \quad i|_{x=0} = \beta(-C_3 + C_4) = 0$$

より

$$C_3 = C_4 = -r\alpha T_M \tag{o}$$

となる。これを (a), (b), (c), (d) 式に代入して

$$\left[\begin{aligned} u &= r\alpha T_M \{1 - \phi(\beta x)\}, \quad i = 2\beta r\alpha T_M \zeta(\beta x) \\ M_x &= 2\beta^2 D r\alpha T_M \phi(\beta x) - M^* \\ M_\theta &= 2\nu\beta^2 D r\alpha T_M \phi(\beta x) - M^* \\ \sigma_{\theta, M} &= \frac{E}{r} (u - r\alpha T_M) = -E\alpha T_M \phi(\beta x) \\ \sigma_{x, B} &= \frac{6M_x}{t^2} = E\alpha T_M \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \phi(\beta x) - \frac{E\alpha T_B}{2(1-\nu)} \\ &= 1.8157 E\alpha T_M \phi(\beta x) - 0.7143 E\alpha T_B (\nu=0.3) \\ \sigma_{\theta, B} &= \frac{6M_\theta}{t^2} = E\alpha T_M \nu \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \phi(\beta x) - \frac{E\alpha T_B}{2(1-\nu)} \\ &= 0.5447 E\alpha T_M \phi(\beta x) - 0.7143 E\alpha T_B (\nu=0.3) \end{aligned} \right. \tag{1.6}$$

となる。 T_M による応力寄与分を無次元化した

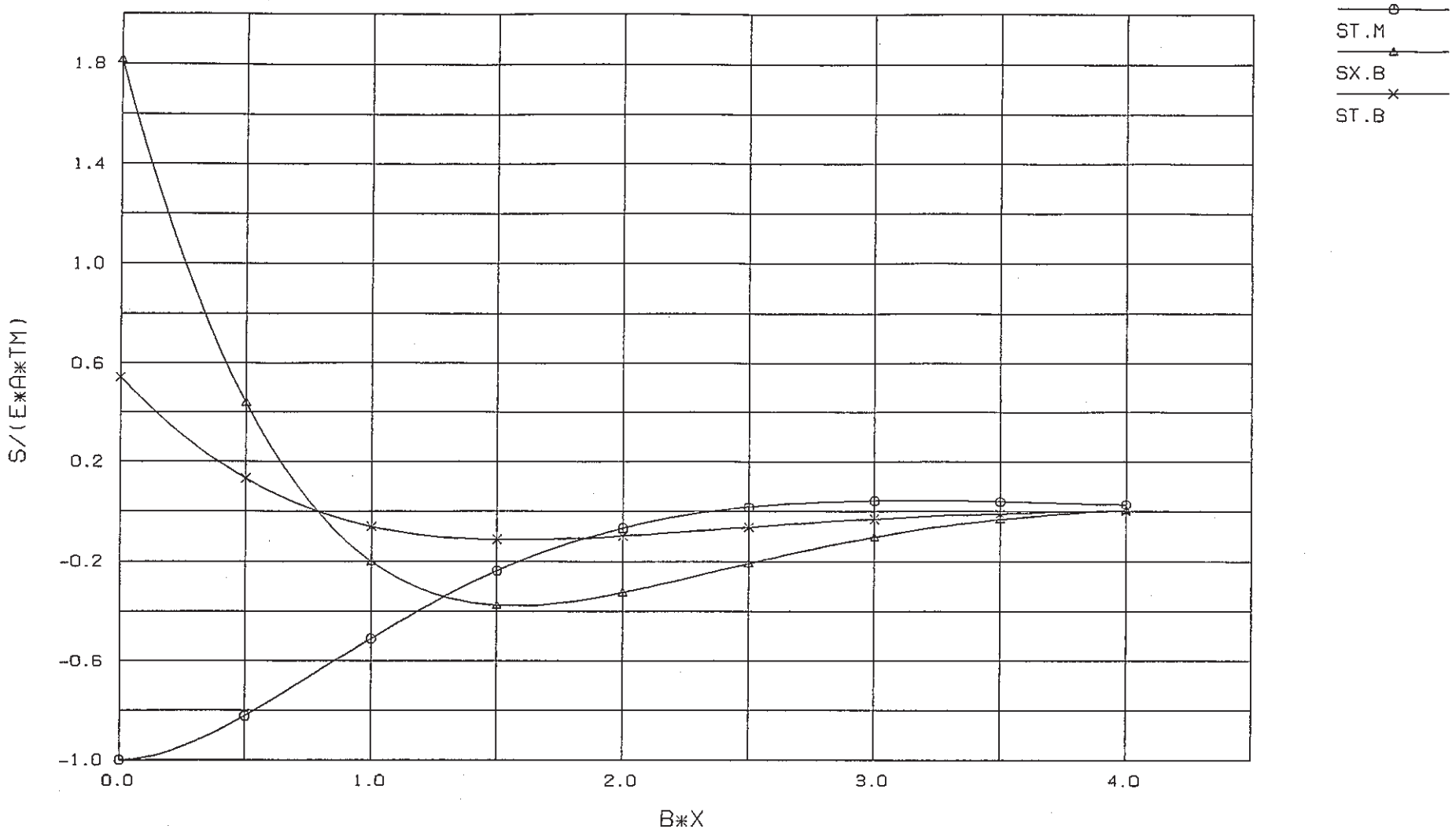
$$\sigma \text{ (第一項, } \nu=0.3) / E\alpha T_M \tag{p}$$

を βx に対してプロットした応力分布図を Fig. 1.1.8 に示す。任意位置の応力は解を用いて計算するか、あるいはこの線図から容易に読み取る事ができる。

T_B が重なる場合は曲げ応力

$$\sigma_{x, B} = \sigma_{\theta, B} = -\frac{E\alpha T_B}{2(1-\nu)} = \sigma_{NB} = -0.7143 E\alpha T_B (\nu=0.3)$$

を加えれば良い。



THERMAL STRESSES NEAR FIXED EDGE BY T.M

Fig. 1.1.8 Thermal stresses near the fixed edge for T_M

1.2 材質および板厚の不連続部

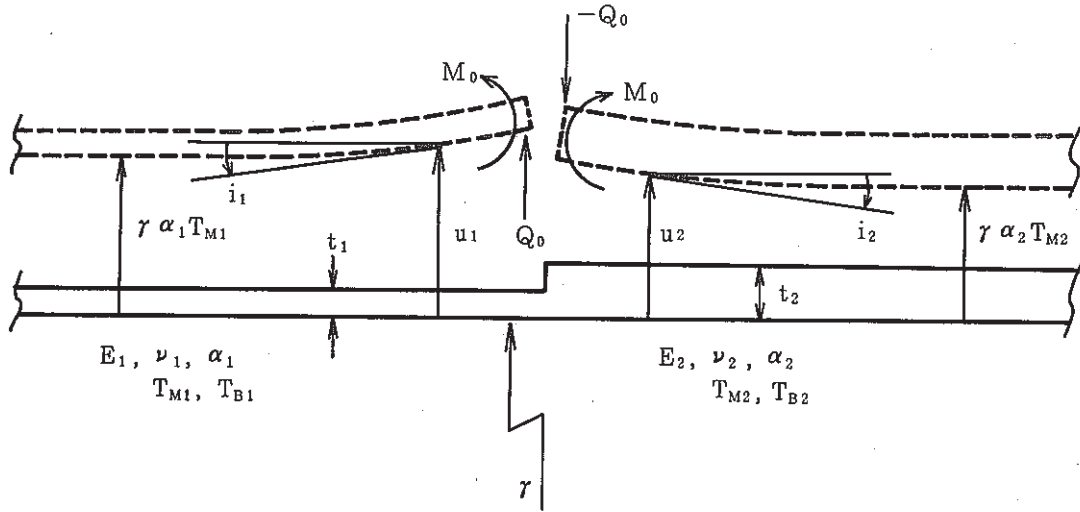


Fig. 1.2.1 Discontinuity of thickness and material properties in cylindrical shell

(1) 一般解法

Fig. 1.2.1 に示すような半径 r の円筒の材質および板厚の不連続部

$$(E_j, \nu_j, \alpha_j, t_j) \quad j = 1, 2 \quad (a)$$

において、板厚平均温度と等価線形温度差の不連続

$$(T_{Mj}, T_{Bj}) \quad j = 1, 2 \quad (b)$$

が生じたとする。不連続部を切断して自由端とした時の変位、勾配、モーメントは、不連続部からの距離を x として、1.1 節の (1.2) 式より

$$\left[\begin{aligned} u_j(x) &= r \alpha_j T_{Mj} + \frac{M_j^* \phi(\beta_j x)}{2 \beta_j^2 D_j} = r \alpha_j T_{Mj} + \frac{r \alpha_j T_{Bj}}{2(1-\nu_j)} \sqrt{\frac{1-\nu_j^2}{3}} \phi(\beta_j x) \\ i_j(x) &= -\frac{M_j^*}{\beta_j D_j} \theta(\beta_j x) = -\frac{(1+\nu_j) \alpha_j T_{Bj}}{[3(1-\nu_j^2)]^{1/4}} \sqrt{\frac{r}{t_j}} \theta(\beta_j x) \\ M_{xj} &= -M_j^* \{1 - \phi(\beta_j x)\} = -\frac{E_j \alpha_j t_j^2 T_{Bj}}{12(1-\nu_j)} \{1 - \phi(\beta_j x)\} \\ M_{\theta} &= -M_j^* \{1 - \nu \phi(\beta_j x)\} = -\frac{E_j \alpha_j t_j^2 T_{Bj}}{12(1-\nu_j)} \{1 - \nu \phi(\beta_j x)\} \end{aligned} \right] \quad (c)$$

となる ($j = 1, 2$)。ここに

$$\left[\begin{aligned} \beta_j &= \frac{[3(1-\nu_j^2)]^{1/4}}{\sqrt{r t_j}}, \quad D_j = \frac{E_j t_j^3}{12(1-\nu_j^2)} \\ M_j^* &= D_j \frac{(1+\nu_j) \alpha_j T_{Bj}}{t_j} = \frac{E_j \alpha_j t_j^2 T_{Bj}}{12(1-\nu_j)} \end{aligned} \right] \quad (d)$$

である。半径方向変位の不連続 δu と勾配の不連続 δi は次のようになる。

$$\left[\begin{aligned} \delta u &= u_1(0) - u_2(0) = (r \alpha_1 T_{M1} - r \alpha_2 T_{M2}) + \left(\frac{M_1^*}{2\beta_1^2 D_1} - \frac{M_2^*}{2\beta_2^2 D_2} \right) \\ &= r (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) + r \left\{ \frac{\alpha_1 (1+\nu_1) T_{B1}}{2\sqrt{3(1-\nu_1^2)}} - \frac{\alpha_2 (1+\nu_2) T_{B2}}{2\sqrt{3(1-\nu_2^2)}} \right\} \\ \delta i &= i_1(0) + i_2(0) = - \left(\frac{M_1^*}{\beta_1 D_1} + \frac{M_2^*}{\beta_2 D_2} \right) \\ &= - \left\{ \frac{(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{[3(1-\nu_1^2)]^{1/4}} \sqrt{\frac{r}{t_1}} + \frac{(1+\nu_2) \alpha_2 T_{B2}}{[3(1-\nu_2^2)]^{1/4}} \sqrt{\frac{r}{t_2}} \right\} \end{aligned} \right] \quad (1.7)$$

不連続部にせん断力 Q_0 と曲げモーメント M_0 が Fig. 1.2 に示した向きに生じて変位および勾配の連続性が保たれるものとする。 Q_0 と M_0 による変位、勾配および曲げモーメントは

$$\left[\begin{aligned} 1 \text{ 側} \quad u_1(x) &= \frac{1}{2\beta_1^3 D_1} \{ \beta_1 M_0 \phi(\beta_1 x) + Q_0 \theta(\beta_1 x) \} \\ i_1(x) &= \frac{du_1}{dx} = - \frac{1}{2\beta_1^2 D_1} \{ 2\beta_1 M_0 \theta(\beta_1 x) + Q_0 \varphi(\beta_1 x) \} \\ M_{x1} &= D_1 \frac{du_1^2}{dx^2} = M_0 \varphi(\beta_1 x) + \frac{Q_0}{\beta_1} \zeta(\beta_1 x) \\ M_{\theta 1} &= \nu M_{x1} \end{aligned} \right] \quad (e)$$

$$\left[\begin{aligned} 2 \text{ 側} \quad u_2(x) &= \frac{1}{2\beta_2^3 D_2} \{ \beta_2 M_0 \phi(\beta_2 x) - Q_0 \theta(\beta_2 x) \} \\ i_2(x) &= \frac{du_2}{dx} = - \frac{1}{2\beta_2^2 D_2} \{ 2\beta_2 M_0 \theta(\beta_2 x) - Q_0 \varphi(\beta_2 x) \} \\ M_{x2} &= D_2 \frac{du_2^2}{dx^2} = M_0 \varphi(\beta_2 x) - \frac{Q_0}{\beta_2} \zeta(\beta_2 x) \\ M_{\theta 2} &= \nu M_{x2} \end{aligned} \right] \quad (f)$$

となる。

(1.7) 式で与えられる変位および勾配の不連続 δu , δi を打ち消すためには

$$\left[\begin{aligned} u_1(0) - u_2(0) &= \left(\frac{1}{2\beta_1^2 D_1} - \frac{1}{2\beta_2^2 D_2} \right) M_0 + \left(\frac{1}{2\beta_1^3 D_1} + \frac{1}{2\beta_2^3 D_2} \right) Q_0 = -\delta u \\ i_1(0) + i_2(0) &= - \left(\frac{1}{\beta_1 D_1} + \frac{1}{\beta_2 D_2} \right) M_0 - \left(\frac{1}{2\beta_1^2 D_1} - \frac{1}{2\beta_2^2 D_2} \right) Q_0 = -\delta i \end{aligned} \right] \quad (1.8)$$

であれば良い。これを解いて Q_0 , M_0 が求まる。

1 側の変位、勾配、曲げモーメントおよび応力は (c) 式の $j=1$ と (e) 式を重ね合わせて

$$\left[\begin{array}{l}
 u_1(x) = r \alpha_1 T_{M1} + \frac{M_1^* + M_0}{2\beta_1^2 D_1} \phi(\beta_1 x) + \frac{Q_0}{2\beta_1^3 D_1} \theta(\beta_1 x) \\
 i_1 = \frac{du_1}{dx} = -\frac{M_1^* + M_0}{\beta_1 D_1} \theta(\beta_1 x) - \frac{Q_0}{2\beta_1^2 D_1} \phi(\beta_1 x) \\
 M_{x1} = -M_1^* + (M_1^* + M_0) \phi(\beta_1 x) + \frac{Q_0}{\beta_1} \zeta(\beta_1 x) \\
 M_{\theta 1} = -M_1^* + \nu_1 (M_1^* + M_0) \phi(\beta_1 x) + \frac{\nu_1 Q_0}{\beta_1} \zeta(\beta_1 x) \\
 \sigma_{x1,B} = \frac{6M_{x1}}{t_1^2}, \quad \sigma_{\theta 1,B} = \frac{6M_{\theta 1}}{t_1^2}, \quad \sigma_{\theta 1,M} = E_1 \frac{u_1 - r \alpha_1 T_{M1}}{r}
 \end{array} \right. \quad (1.9)$$

となる。2側については(c)式のj=2と(f)式を重ね合わせて

$$\left[\begin{array}{l}
 u_2(x) = r \alpha_2 T_{M2} + \frac{M_2^* + M_0}{2\beta_2^2 D_2} \phi(\beta_2 x) - \frac{Q_0}{2\beta_2^3 D_2} \theta(\beta_2 x) \\
 i_2 = \frac{du_2}{dx} = -\frac{M_2^* + M_0}{\beta_2 D_2} \theta(\beta_2 x) + \frac{Q_0}{2\beta_2^2 D_2} \phi(\beta_2 x) \\
 M_{x2} = -M_2^* + (M_2^* + M_0) \phi(\beta_2 x) - \frac{Q_0}{\beta_2} \zeta(\beta_2 x) \\
 M_{\theta 2} = -M_2^* + \nu_2 (M_2^* + M_0) \phi(\beta_2 x) - \frac{\nu_2 Q_0}{\beta_2} \zeta(\beta_2 x) \\
 \sigma_{x2,B} = \frac{6M_{x2}}{t_2^2}, \quad \sigma_{\theta 2,B} = \frac{6M_{\theta 2}}{t_2^2}, \quad \sigma_{\theta 2,M} = E_2 \frac{u_2 - r \alpha_2 T_{M2}}{r}
 \end{array} \right. \quad (110)$$

となる。

(2) 解易解析プログラム

以上の手順により材質および板厚の不連続部の熱応力を計算するプログラムを作成した。温度データは付録A3の「構造設計用複数位置温度計算プログラム」によりディスク上に作成された温度ファイルから読み込む。

入力データカードイメージは次のとおりである。

カード1 (F10.0) RR ~ r (mm)

カード2 (4F10.0,i5) E1, PR1, AL1, TH1, N1
 $\left. \begin{array}{l} E_1 \text{ (kg/mm}^2\text{)} \\ \nu_1 \end{array} \right\}$, $\left. \begin{array}{l} \alpha_1 \text{ (mm/mm}^\circ\text{C)} \\ t_1 \text{ (mm)} \end{array} \right\}$

カード3 (4F10.0,i5) E2, PR2, AL2, TH2, N2
 $\left. \begin{array}{l} E_2 \\ \nu_2 \end{array} \right\}$, $\left. \begin{array}{l} \alpha_2 \\ t_2 \end{array} \right\}$

N1, N2は位置識別番号であり、材質および板厚1側の温度(T_{M1}, T_{B1})として温度ファイル中の位置N1の計算結果を引用する。材質および板厚2側の温度(T_{M2}, T_{B2})として位置

N2 の計算結果を引用する。N1(N2)>0 の時は位置 N1 (N2) の母材部の温度計算結果が用いられる。N1 (N2)<0 の時は位置 |N1| (|N2|) の熱しゃへい板の温度計算結果が用いられる。

プログラムリスト，付録 A 3 のノズルのノズル側の板厚不連続部の熱応力計算例の JCL および入力データリスト，計算結果リストを次頁以降に示す。FINAS による詳細解析結果(Ref 2) との比較結果を Table. 1.2.1 ($t_1 = 20.6 \text{ mm}$ 側)，Table. 1.2.2 ($t_2 = 26.8 \text{ mm}$ 側) に示す。簡易モデルと FINAS の詳細モデルとの相異点は次の点にある。

項 目	簡 易 モ デ ル	FINAS の詳細モデル
形 状 不 連 続	ス テ ッ プ 状	テーパ状 ($1/3$ 勾配)
温 度 不 連 続	ス テ ッ プ 状	連続的に変化
境 界 条 件	無限円筒，他部からの影響なし	クロッチ，セーフエンド部からの影響あり
物 性 値	一 定	温 度 依 存

これらの相異点を考慮すれば，簡易モデルによる“板厚不連続部の非定常不連続熱応力の推定”は十分に実用的であると考えられる。

プログラムリスト(1/2)

```

C-----
C   THERMAL STRESS CALCULATION BY CYLINDRICAL SHELL THEORY
C   DISCONTINUITY OF MATERIAL PROPERTIES AND THICKNESS
C-----
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION YD(200),PTIME(200),TM(2,200),TB(2,200)
C-----
500 FORMAT(4F10.0,I5)
600 FORMAT(1H1/13X,'R(MM)',5X,'E1(KG/MM2)',4X,'PR1',2X,'AL1(/DEG)',2X,
+ 'TH1(MM)',8X,'E2(KG/MM2)',4X,'PR2',2X,'AL2(/DEG)',2X,'TH2(MM)',/,
+10X,F8.1,F15.1,F7.3,G12.4,F8.2,3X,F15.1,F7.3,G12.4,F8.2,/,
+14X,'TIME',7X,'TM1',5X,'TB1',4X,'SX1B',4X,'ST1M',4X,'ST1B'
+      10X,'TM2',5X,'TB2',4X,'SX2B',4X,'ST2M',4X,'ST2B'/)
610 FORMAT(10X,F8.1,2X,5F8.2,5X,5F8.2)
C-----
      DATA INPUT AND CONSTANT VALUE SET
      READ(5,500) RR
      READ(5,500) E1,PR1,AL1,TH1,N1
      READ(5,500) E2,PR2,AL2,TH2,N2
      IF(N1) 10,10,20
10  NN1=-10*N1+5
      GO TO 30
20  NN1= 10*N1+1
30  IF(N2) 40,40,50
40  NN2=-10*N2+5
      GO TO 60
50  NN2= 10*N2+1
60  CONTINUE
      B12=SQRT(3*(1-PR1**2))/RR/TH1
      B11=SQRT(B12)
      B13=B12*B11
      D1=E1/(12*(1-PR1**2))*TH1**3
      B22=SQRT(3*(1-PR2**2))/RR/TH2
      B21=SQRT(B22)
      B23=B22*B21
      D2=E2/(12*(1-PR2**2))*TH2**3
      C1=1/(2*B12*D1)-1/(2*B22*D2)
      C2=1/(2*B13*D1)+1/(2*B23*D2)
      C3=1/(B11*D1)+1/(B21*D2)
      CC=C1*C1-C2*C3
C-----
      READ TEMPERATURE RESULTS FILE(20)
      READ(20) NTIME,(PTIME(I),I=1,NTIME)
100 READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      IF(NY.EQ.NN1) GO TO 110
      GO TO 100
110 DO 120 I=1,NTIME
      TM(1,I)=YD(I)
120 CONTINUE
      READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      DO 130 I=1,NTIME
      TB(1,I)=YD(I)
130 CONTINUE
      REWIND(20)
150 READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      IF(NY.EQ.NN2) GO TO 160
      GO TO 150
160 DO 170 I=1,NTIME
      TM(2,I)=YD(I)
170 CONTINUE

```

プログラムリスト (2 / 2)

```

READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
DO 180 I=1,NTIME
TB(2,I)=YD(I)
180 CONTINUE
REWIND(20)
C-----          CALCULATION START
WRITE(6,600) RR,E1,PR1,AL1,TH1,E2,PR2,AL2,TH2
DO 400 IT=1,NTIME
TIME=PTIME(IT)
TM1=TM(1,IT)
TB1=TB(1,IT)
TM2=TM(2,IT)
TB2=TB(2,IT)
C-----          COMPUTE DISCONTINUITY OF DISPLACEMENT
C-----          AND ROTATION
RM1=D1*AL1*TB1*(1+PR1)/TH1
RM2=D2*AL2*TB2*(1+PR2)/TH2
DELU=RR*(AL1*TM1-AL2*TM2)+RM1/(2*B12*D1)-RM2/(2*B22*D2)
DELI=-RM1/(B11*D1)-RM2/(B21*D2)
C-----          COMPUTE DISCONTINUITY MOMENT AND SHEAR FORCE
RM=- (C1*DELU+C2*DELI)/CC
RQ=(C1*DELI+C3*DELU)/CC
C-----          COMPUTE DISCONTINUITY STRESSES
ST1M=E1*(B11*(RM1+RM)+RQ)/(2*B13*D1*RR)
SX1B=6*RM/TH1**2
ST1B=6*(-RM1+PR1*(RM1+RM))/TH1**2
ST2M=E2*(B21*(RM2+RM)-RQ)/(2*B23*D2*RR)
SX2B=6*RM/TH2**2
ST2B=6*(-RM2+PR2*(RM2+RM))/TH2**2
WRITE(6,610) TIME,TM1,TB1,SX1B,ST1M,ST1B,
+           TM2,TB2,SX2B,ST2M,ST2B
400 CONTINUE
STOP
END

```

JCL および入力データリスト

(下線部はユーザーが変更すべき箇所である。)

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6
//Q3020ST1 JOB (GENERAL),MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3020,
//  ATTR=(TO,CO,WO)
//COPY EXEC PGM=JSDGENER
//SYSPRINT DD SYSOUT=*
//SYSIN DD DUMMY
//SYSUT1 DD DSN=Q3020.N1TR2.POST,UNIT=DASD,DISP=SHR
//SYSUT2 DD DSN=&&POST,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),
//  SPACE=(TRK,(5,10),RLSE)
//*
//CLG EXEC FORT7CLG
//FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=*
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3020.TEST.FORT(ST1),DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUMMY
//GO.FT20F001 DD DSN=&&POST,UNIT=WORK,DISP=(OLD,DELETE)
//GO.FT06F001 DD SYSOUT=*
//GO.SYSIN DD *
    527.7
    1.67D4    0.298D0    19.93D-6    20.6D0    2
    1.67D4    0.298D0    19.93D-6    26.8D0    3
/*
//

```

← 温度ファイル

← プログラム

計算結果リヌ卜

R(MM)	E1(KG/MM2)	PR1	AL1(/DEG)	TH1(MM)	E2(KG/MM2)	PR2	AL2(/DEG)	TH2(MM)		
527.7	16700.0	0.298	0.1993E-04	20.60	16700.0	0.298	0.1993E-04	26.80		
TIME	TM1	TB1	SX1B	ST1M	ST1B	TM2	TB2	SX2B	ST2M	ST2B
5.0	500.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	500.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.0	499.96	-0.16	0.04	0.00	0.04	499.97	-0.13	0.03	0.00	0.03
15.0	499.81	-0.70	0.19	0.01	0.17	499.86	-0.61	0.12	-0.01	0.14
20.0	499.49	-1.67	0.48	0.02	0.42	499.61	-1.52	0.28	-0.02	0.34
25.0	498.97	-3.03	0.88	0.03	0.77	499.21	-2.86	0.52	-0.05	0.63
30.0	498.22	-4.69	1.38	0.05	1.19	498.63	-4.57	0.82	-0.08	1.00
35.0	497.22	-6.57	1.96	0.08	1.68	497.86	-6.59	1.16	-0.13	1.44
40.0	495.99	-8.60	2.60	0.12	2.21	496.91	-8.86	1.54	-0.18	1.93
45.0	494.50	-10.72	3.28	0.17	2.76	495.77	-11.32	1.94	-0.25	2.46
50.0	492.77	-12.88	3.99	0.23	3.33	494.43	-13.92	2.36	-0.33	3.02
55.0	490.80	-15.07	4.71	0.29	3.91	492.90	-16.61	2.78	-0.41	3.59
60.0	488.58	-17.26	5.44	0.36	4.49	491.18	-19.37	3.21	-0.50	4.18
65.0	486.13	-19.42	6.17	0.44	5.07	489.27	-22.17	3.65	-0.60	4.78
70.0	483.45	-21.55	6.90	0.53	5.64	487.18	-24.98	4.07	-0.71	5.37
75.0	480.58	-23.48	7.57	0.62	6.16	484.93	-27.66	4.47	-0.82	5.94
80.0	477.61	-24.99	8.13	0.72	6.58	482.58	-29.99	4.80	-0.94	6.42
85.0	474.59	-26.02	8.54	0.82	6.88	480.20	-31.85	5.05	-1.05	6.80
90.0	471.58	-26.60	8.82	0.91	7.06	477.79	-33.26	5.21	-1.15	7.09
95.0	468.59	-26.83	8.99	1.01	7.14	475.40	-34.25	5.31	-1.25	7.28
100.0	465.64	-26.80	9.05	1.10	7.16	473.02	-34.88	5.35	-1.35	7.40
110.0	459.93	-26.17	8.99	1.28	7.03	468.35	-35.34	5.31	-1.52	7.46
120.0	454.49	-25.13	8.74	1.44	6.79	463.83	-35.03	5.17	-1.67	7.37
130.0	449.35	-23.90	8.40	1.58	6.48	459.48	-34.25	4.96	-1.79	7.18
140.0	444.49	-22.60	8.01	1.71	6.15	455.31	-33.19	4.73	-1.89	6.93
150.0	439.92	-21.31	7.61	1.82	5.81	451.32	-31.98	4.49	-1.98	6.66
160.0	435.63	-20.05	7.20	1.91	5.48	447.50	-30.70	4.25	-2.04	6.38
170.0	431.59	-18.84	6.80	1.98	5.16	443.85	-29.40	4.02	-2.10	6.09
180.0	427.80	-17.70	6.41	2.04	4.86	440.38	-28.10	3.79	-2.14	5.81
190.0	424.25	-16.62	6.04	2.09	4.57	437.06	-26.84	3.57	-2.17	5.53
200.0	420.91	-15.60	5.69	2.13	4.29	433.90	-25.61	3.36	-2.19	5.26
210.0	417.78	-14.64	5.36	2.16	4.03	430.89	-24.42	3.16	-2.20	5.01
220.0	414.84	-13.74	5.04	2.18	3.79	428.01	-23.29	2.98	-2.21	4.76
230.0	412.08	-12.90	4.75	2.19	3.56	425.28	-22.20	2.80	-2.20	4.53
240.0	409.49	-12.10	4.47	2.19	3.35	422.67	-21.16	2.64	-2.19	4.31
250.0	407.06	-11.36	4.20	2.19	3.14	420.18	-20.16	2.48	-2.18	4.10
260.0	404.78	-10.66	3.95	2.18	2.95	417.82	-19.21	2.34	-2.16	3.89
270.0	402.63	-10.00	3.72	2.16	2.77	415.56	-18.31	2.20	-2.14	3.70
280.0	400.63	-9.39	3.50	2.14	2.61	413.41	-17.45	2.07	-2.11	3.52
290.0	398.74	-8.81	3.30	2.12	2.45	411.36	-16.62	1.95	-2.08	3.35
300.0	396.97	-8.27	3.10	2.09	2.30	409.41	-15.84	1.83	-2.05	3.18
350.0	389.63	-6.02	2.29	1.92	1.68	400.95	-12.44	1.35	-1.85	2.47
400.0	384.29	-4.38	1.69	1.70	1.23	394.30	-9.77	1.00	-1.63	1.92
450.0	380.40	-3.19	1.25	1.48	0.90	389.08	-7.67	0.74	-1.41	1.50
500.0	377.57	-2.32	0.93	1.27	0.66	384.99	-6.02	0.55	-1.20	1.17

Table. 1.2.1 Thermal stresses at the discontinuity of thickness ($t_1=20.6\text{mm}$) (kg/mm²)

t (SEC)	簡 易 解 析			F I N A S		
	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$
30	1.38	0.05	1.19	1.38	-0.03	1.16
60	5.44	0.36	4.49	5.60	-0.24	4.50
70	6.90	0.53	5.64	7.20	-0.34	5.70
80	8.13	0.72	6.58	8.63	-0.46	6.74
100	9.05	1.10	7.16	10.10	-0.69	7.60
120	8.74	1.44	6.79	10.40	-0.86	7.53
140	8.01	1.71	6.15	10.22	-0.98	7.16
170	6.80	1.98	5.16	9.68	-1.08	6.47
200	5.69	2.13	4.29	9.07	-1.13	5.80
250	4.20	2.19	3.14	8.10	-1.14	4.83
300	3.10	2.09	2.30	7.24	-1.11	4.05
350	2.29	1.92	1.68	6.47	-1.06	3.40
400	1.69	1.70	1.23	5.79	-1.01	2.88
500	0.93	1.27	0.66	4.65	-0.89	2.09

Table. 1.2.2 Thermal stresses at the discontinuity of thickness ($t_2=26.8\text{mm}$) (kg/mm²)

t (SEC)	簡 易 解 析			F I N A S		
	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$
30	0.82	-0.08	1.00	0.92	-0.08	0.99
60	3.21	-0.50	4.18	3.82	-0.54	4.09
70	4.07	-0.71	5.37	4.93	-0.77	5.25
80	4.80	-0.94	6.42	5.94	-1.02	6.28
100	5.35	-1.35	7.40	7.05	-1.45	7.29
120	5.17	-1.67	7.37	7.33	-1.73	7.36
140	4.73	-1.89	6.93	7.27	-1.88	7.06
170	4.02	-2.10	6.09	6.96	-1.92	6.41
200	3.36	-2.19	5.26	6.58	-1.86	5.74
250	2.48	-2.18	4.10	5.96	-1.67	4.76
300	1.83	-2.05	3.18	5.38	-1.46	3.95
350	1.35	-1.85	2.47	4.87	-1.27	3.29
400	1.00	-1.63	1.92	4.40	-1.10	2.75
500	0.55	-1.20	1.17	3.60	-0.85	1.95

(3) 板厚および板厚平均温度の不連続

$$E_1 = E_2 = E, \quad \nu_1 = \nu_2 = \nu, \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$$

と同一材質であり、板厚不連続

$$t_1 \leq t_2 \tag{g}$$

と板厚平均温度の不連続 ($T_{M1} \neq T_{M2}$) のみ考える。内外面温度差は0とする ($T_{B1} = T_{B2} = 0$)。板厚比

$$K = \frac{t_2}{t_1} \geq 1 \tag{h}$$

を用いて整理する。 $\beta_2 = \beta_1 / \sqrt{K}$, $D_2 = K^3 D_1$, $\delta u = r \alpha (T_{M1} - T_{M2})$, $\delta i = 0$ を(1.8)式に代入すると M_0 , Q_0 を求める方程式は、

$$\left[\begin{array}{l} \frac{1}{2\beta_1^2 D_1} \left(1 - \frac{1}{K^2}\right) M_0 + \frac{1}{2\beta_1^3 D_1} \left(1 + \frac{1}{K\sqrt{K}}\right) Q_0 = -r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ \frac{1}{\beta_1 D_1} \left(1 + \frac{1}{K^2\sqrt{K}}\right) M_0 + \frac{1}{2\beta_1^2 D_1} \left(1 - \frac{1}{K^2}\right) Q_0 = 0 \end{array} \right] \tag{i}$$

となる。これを解くと

$$\left[\begin{array}{l} M_0 = \frac{K^2 (K^2 - 1)}{K^4 + 2K^2\sqrt{K} + 2K^2 + 2K\sqrt{K} + 1} \cdot 2\beta_1^2 D_1 r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ Q_0 = \frac{-2(K^4 + K\sqrt{K})}{K^4 + 2K^2\sqrt{K} + 2K^2 + 2K\sqrt{K} + 1} \cdot 2\beta_1^3 D_1 r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \end{array} \right] \tag{j}$$

を得る。 M_0 , Q_0 を(1.9)式に代入し整理すると t_1 側の解

$$\left[\begin{array}{l} u_1(x) = r \alpha T_{M1} - r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \{C_1 \theta(\beta_1 x) + C_2 \zeta(\beta_1 x)\} \\ i_1 = r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \{C_1 \beta_1 \varphi(\beta_1 x) - C_2 \beta_1 \phi(\beta_1 x)\} \\ M_{x1} = 2\beta_1^2 D_1 r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \{-C_1 \zeta(\beta_1 x) + C_2 \theta(\beta_1 x)\}, M_{\theta 1} = \nu M_{x1} \\ \sigma_{\theta 1, M} = -E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \{C_1 \theta(\beta_1 x) + C_2 \zeta(\beta_1 x)\} \\ \sigma_{x1, B} = E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \{-C_1 \zeta(\beta_1 x) + C_2 \theta(\beta_1 x)\} \\ \sigma_{\theta 1, B} = \nu \sigma_{x1, B} \end{array} \right] \tag{1.11}$$

を得る。ここに

$$C_1 = \frac{K^4 + K^2 + 2K\sqrt{K}}{K^4 + 2K^2\sqrt{K} + 2K^2 + 2K\sqrt{K} + 1}, \quad C_2 = \frac{K^2 (K^2 - 1)}{K^4 + 2K^2\sqrt{K} + 2K^2 + 2K\sqrt{K} + 1} \tag{k}$$

である。 M_0 , Q_0 を(1.10)式に代入し整理すると t_2 側の解

$$\left[\begin{array}{l} u_2(x) = r \alpha T_{M2} + r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \left\{ (1 - C_1) \theta(\beta_2 x) - \frac{C_2}{K^2} \zeta(\beta_2 x) \right\} \\ i_2 = -r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \left\{ (1 - C_1) \beta_2 \varphi(\beta_2 x) + \frac{C_2}{K^2} \beta_2 \phi(\beta_2 x) \right\} \end{array} \right]$$

$$\left. \begin{aligned}
 M_{x_2} &= 2\beta_2^2 D_2 r \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) \left\{ (1 - C_1) \zeta(\beta_2 \chi) + \frac{C_2}{K^2} \theta(\beta_2 \chi) \right\}, M_{\theta_2} = \nu M_{x_2} \\
 \sigma_{\theta_2, M} &= E \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) \left\{ (1 - C_1) \theta(\beta_2 \chi) - \frac{C_2}{K^2} \zeta(\beta_2 \chi) \right\} \\
 \sigma_{x_2, B} &= E \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) \sqrt{\frac{3}{1 - \nu^2}} \left\{ (1 - C_1) \zeta(\beta_2 \chi) + \frac{C_2}{K^2} \theta(\beta_2 \chi) \right\} \\
 \sigma_{\theta_2, B} &= \nu \sigma_{x_2, B}
 \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

を得る。接続部 ($\chi = 0$) では

$$\left. \begin{aligned}
 t_1 \text{側} \quad & u_1 = r \alpha T_{M_1} - C_1 \cdot r \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) \\
 \chi = 0 \quad & i_1 = r \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) \beta_1 (C_1 - C_2) \\
 & M_{x_1} = 2\beta_1^2 D_1 r \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) C_2 = M_0, M_{\theta_1} = \nu M_{x_1} \\
 & \sigma_{\theta_1, M} = -E \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) C_1 \\
 & \sigma_{x_1, B} = E \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) \sqrt{\frac{3}{1 - \nu^2}} C_2 \\
 & \qquad \qquad \qquad = 1.8157 C_2 E \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) (\nu = 0.3 \text{の時}) \\
 & \sigma_{\theta_1, B} = \nu \cdot \sigma_{x_1, B} = 0.5447 C_2 E \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) (\nu = 0.3 \text{の時})
 \end{aligned} \right\} \quad (l)$$

$$\left. \begin{aligned}
 t_2 \text{側} \quad & u_2 = r \alpha T_{M_2} + (1 - C_1) r \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) = u_1 \\
 \chi = 0 \quad & i_2 = -r \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) \beta_2 \left\{ (1 - C_1) + \frac{C_2}{K^2} \right\} = -i_1 \\
 & M_{x_2} = 2\beta_2^2 D_2 r \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) \frac{C_2}{K^2} = M_0, M_{\theta_2} = \nu M_{x_2} \\
 & \sigma_{x_2, B} = E \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) \sqrt{\frac{3}{1 - \nu^2}} \cdot \frac{C_2}{K^2} \\
 & \qquad \qquad \qquad = 1.8157 \frac{C_2}{K^2} \cdot E \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) (\nu = 0.3 \text{の時}) \\
 & \sigma_{\theta_2, B} = \nu \cdot \sigma_{x_2, B} = 0.5447 \frac{C_2}{K^2} E \alpha (T_{M_1} - T_{M_2}) (\nu = 0.3 \text{の時})
 \end{aligned} \right\} \quad (m)$$

となる。これらの結果から

- 接続部の熱膨張差 $r \alpha (T_{M_1} - T_{M_2})$ に対する t_1 側と t_2 側の変位分担割合が C_1 対 $(1 - C_1)$ であること
- 生ずる熱応力は $E \alpha (T_{M_1} - T_{M_2})$ に比例し、 C_1, C_2 のみの関数となること。すなわち板厚比 K のみに依存し、半径には依存しないこと。接続部における膜応力 $\sigma_{\theta, M}$ は C_1 に依存し、曲げ応力 $\sigma_{x_1 B}, \sigma_{\theta_1 B}$ は C_2 に依存すること。

などが理解できる。

◦ t_1 側の任意位置 χ の応力を 2 つの線図を用いて求めるには次の様にすると良い。

$$\left(\begin{array}{l} \text{1.1 節の Fig. 1.1.5 を } \beta_1 \chi \text{ に対し読み取り } C_1 \text{ 倍する。} \\ \text{1.3 節の Fig. 1.3.3 を } \beta_1 \chi \text{ に対し読み取り} \\ 4(1-\nu) \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} C_2 = 5.084 C_2 \text{ 倍する。} \end{array} \right)$$

両者を加えて求めた無次元応力に $E \alpha (T_{M1} - T_{M2})$ を乗ずれば良い。

◦ t_2 側の任意位置 χ の応力を 2 つの線図を用いて求めるには次の様にすると良い。

$$\left(\begin{array}{l} \text{1.1 節の Fig. 1.1.5 を } \beta_2 \chi \text{ に対し読み取り } -(1-C_1) \text{ 倍する。} \\ \text{1.3 節の Fig. 1.3.3 を } \beta_2 \chi \text{ に対し読み取り} \\ 4(1-\nu) \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \cdot \frac{C_2}{K^2} = 5.084 \frac{C_2}{K^2} \text{ 倍する。} \end{array} \right)$$

両者を加えて求めた無次元応力に $E \alpha (T_{M1} - T_{M2})$ を乗ずれば良い。

◦ t_1 側の曲げ応力の極値は次の様に求める事ができる。

$$\frac{dM_{x1}}{d\chi} = -2\beta_1^3 D_1 r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \{ C_1 \phi(\beta_1 \chi) + C_2 \varphi(\beta_1 \chi) \} = 0$$

$$\text{より } (C_1 + C_2) \cos \beta_1 \chi - (C_1 - C_2) \sin \beta_1 \chi = 0$$

$$\beta_1 \chi \equiv \phi_1 = \tan^{-1} \frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} \quad (\text{n})$$

この位置で M_{x1} は極値となり、応力は

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta 1, M} = -C_3 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ \sigma_{x1, B} = -C_3 \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ \qquad \qquad \qquad = -1.8157 C_3 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) (\nu=0.3) \\ \sigma_{\theta 1, B} = \nu \sigma_{x1, B} = -0.5447 C_3 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) (\nu=0.3) \\ C_3 \equiv e^{-\phi_1} \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2}{2}} \end{array} \right] \quad (\text{o})$$

となる。接続部 ($\chi=0$) の曲げ応力とは逆符号の極値となり C_2 (接続部) と C_3 (極値) の大きい方が t_1 側の最大曲げ応力を与える。

◦ t_2 側の曲げ応力の極値は次の様に求める事ができる。

$$\frac{dM_{x2}}{d\chi} = 2\beta_2^3 D_2 r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \{ (1-C_1) \phi(\beta_2 \chi) - \frac{C_2}{K^2} \varphi(\beta_2 \chi) \} = 0$$

$$\text{より } (1-C_1 - \frac{C_2}{K^2}) \cos \beta_2 \chi - (1-C_1 + \frac{C_2}{K^2}) \sin \beta_2 \chi = 0$$

$$\beta_2 \chi \equiv \phi_2 = \tan^{-1} \frac{1 - C_1 - \frac{C_2}{K^2}}{1 - C_1 + \frac{C_2}{K^2}} \quad (p)$$

の位置で M_{x2} は極値となり、応力は

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta_2, M} = C_4 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ \sigma_{x_2, B} = C_4 \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \cdot E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) = 1.8157 C_4 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) (\nu=0.3) \\ \sigma_{\theta_2, B} = \nu \cdot \sigma_{x_2, B} = 0.5447 C_4 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) (\nu=0.3) \\ C_4 \equiv e^{-\phi_2} \sqrt{\frac{(1-C_1)^2 + (\frac{C_2}{K^2})^2}{2}} \end{array} \right] \quad (q)$$

となる。これが t_2 側の最大曲げ応力を与える。

$1 \leq K \leq 10$ の範囲の $C_1, C_2, \phi_1, C_3, \phi_2, C_4$ の値を Table. 1.2.3 に示す。

無次元位置 $\beta_j \chi$ ($j=1$ は t_1 側, $j=2$ は t_2 側)

$$\beta_j \chi = \frac{[3(1-\nu^2)]^{1/4}}{\sqrt{r t_j}} \chi = 1.2854 \frac{\chi}{\sqrt{r t_j}} \quad (\nu=0.3) \quad (r)$$

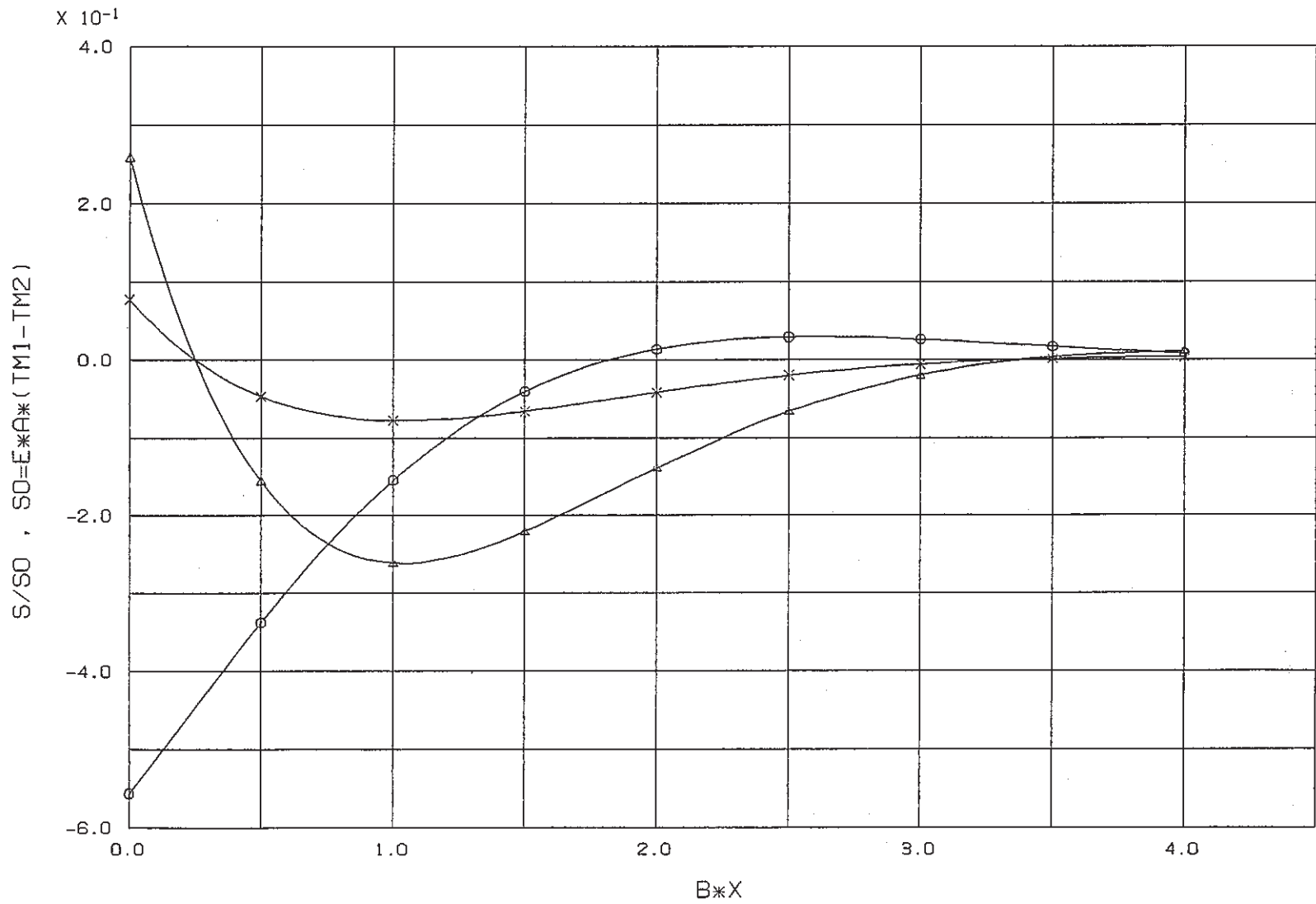
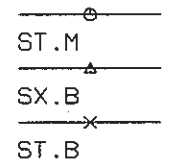
に対して無次元応力

$$\frac{\sigma_{\theta_j, M} (\nu=0.3)}{E \alpha (T_{M1} - T_{M2})}, \quad \frac{\sigma_{x_j, B} (\nu=0.3)}{E \alpha (T_{M1} - T_{M2})}, \quad \frac{\sigma_{\theta_j, B} (\nu=0.3)}{E \alpha (T_{M1} - T_{M2})} \quad (s)$$

をプロットした応力分布図を Fig. 1.2.2 ($K=1.5, t_1$ 側), Fig. 1.2.3 ($K=1.5, t_2$ 側), Fig. 1.2.4 ($K=2, t_1$ 側), Fig. 1.2.5 ($K=2, t_2$ 側), Fig. 1.2.6 ($K=3, t_1$ 側), Fig. 1.2.7 ($K=3, t_2$ 側), Fig. 1.2.8 ($K=5, t_1$ 側), Fig. 1.2.9 ($K=5, t_2$ 側) に示す。

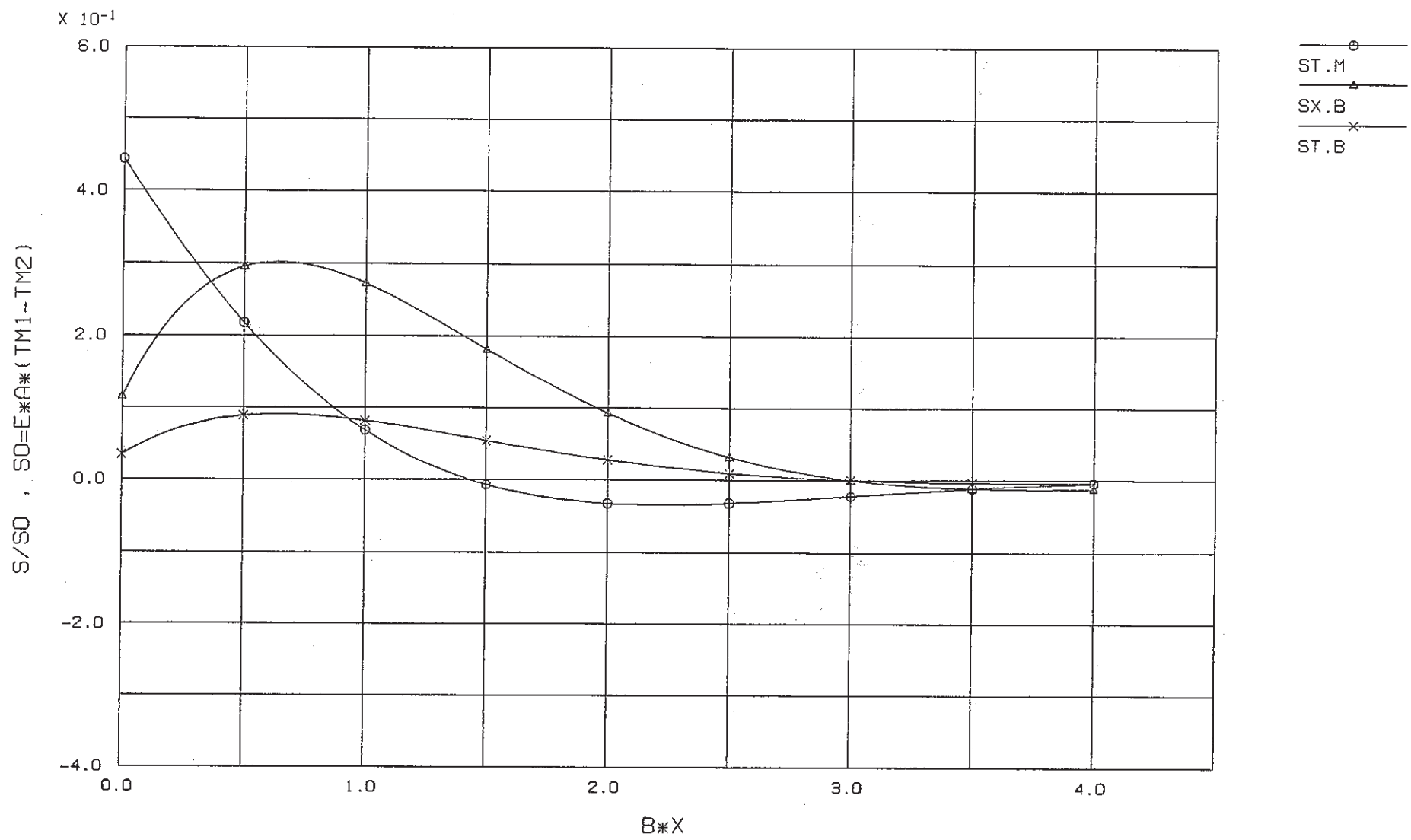
Table 1.2.3 $C_1, C_2, \phi_1, C_3, \phi_2, C_4$ for K

K	C1	C2	PHAI1	C3	PHAI2	C4
1.0	0.5000	0.0000	0.7854	0.1612	0.7854	0.1612
1.1	0.5120	0.0261	0.8364	0.1571	0.7412	0.1646
1.2	0.5233	0.0540	0.8882	0.1530	0.7069	0.1667
1.3	0.5344	0.0830	0.9394	0.1495	0.6803	0.1677
1.4	0.5454	0.1126	0.9890	0.1465	0.6597	0.1675
1.5	0.5563	0.1424	1.0360	0.1441	0.6437	0.1665
1.6	0.5674	0.1722	1.0800	0.1424	0.6312	0.1647
1.7	0.5784	0.2015	1.1207	0.1412	0.6215	0.1623
1.8	0.5894	0.2304	1.1580	0.1406	0.6139	0.1595
1.9	0.6004	0.2585	1.1920	0.1403	0.6080	0.1563
2.0	0.6113	0.2859	1.2229	0.1405	0.6035	0.1528
2.5	0.6633	0.4090	1.3379	0.1446	0.5934	0.1340
3.0	0.7091	0.5086	1.4076	0.1510	0.5935	0.1157
3.5	0.7480	0.5877	1.4513	0.1576	0.5972	0.0998
4.0	0.7805	0.6504	1.4801	0.1635	0.6023	0.0864
4.5	0.8075	0.7004	1.4999	0.1687	0.6077	0.0753
5.0	0.8299	0.7406	1.5140	0.1731	0.6130	0.0661
6.0	0.8645	0.8001	1.5321	0.1800	0.6228	0.0521
7.0	0.8894	0.8411	1.5429	0.1850	0.6314	0.0421
8.0	0.9078	0.8704	1.5498	0.1888	0.6389	0.0348
9.0	0.9218	0.8921	1.5544	0.1917	0.6455	0.0293
10.0	0.9327	0.9085	1.5577	0.1939	0.6512	0.0250



DISCONTINUITY OF THICKNESS AND T_M ($T_2/T_1=1.5$, T_1 SIDE)

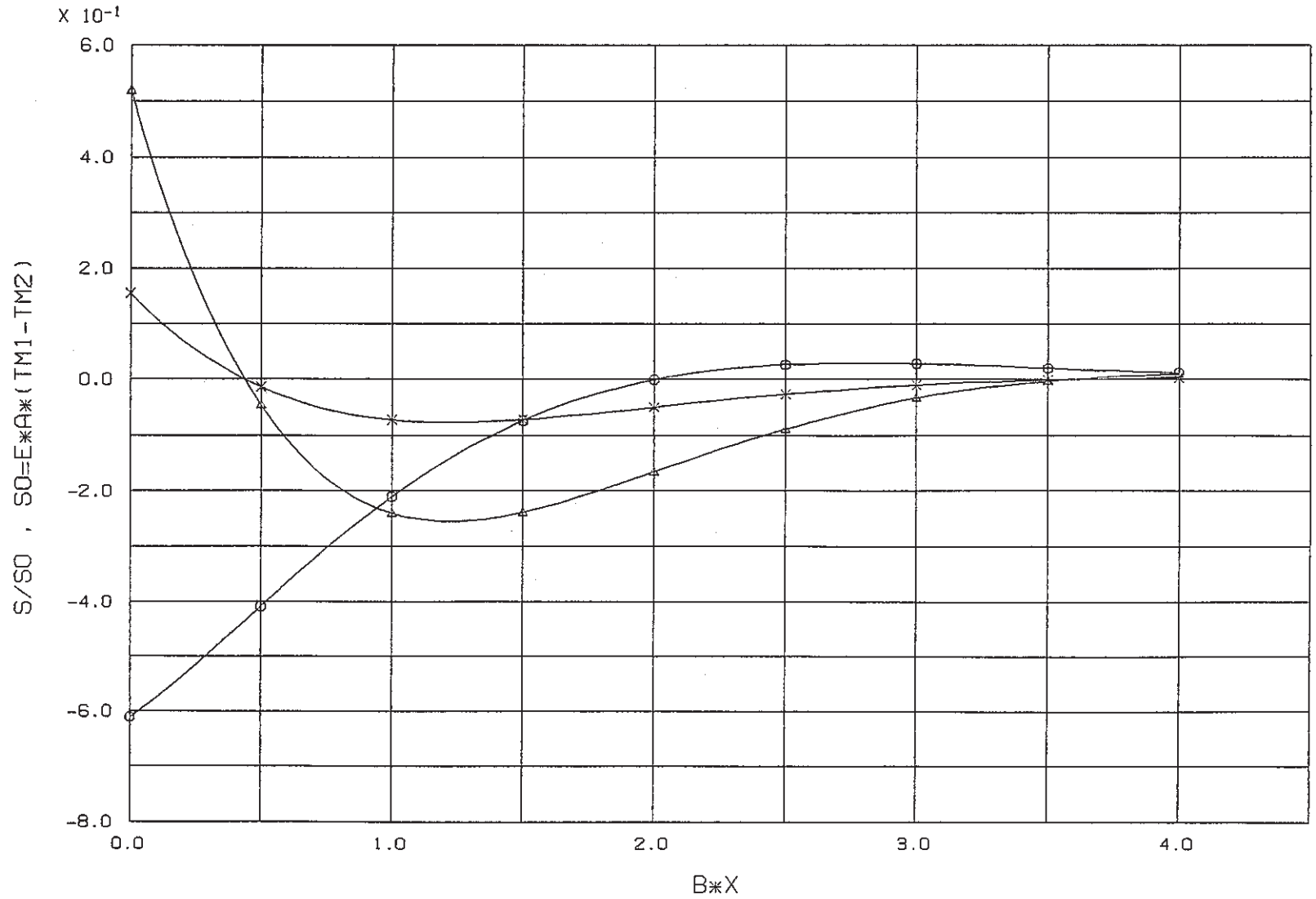
Fig. 1.2.2 Thermal stresses near the discontinuity of thickness & T_M ($k=1.5$, t_1 side)



DISCONTINUITY OF THICKNESS AND T_M (T₂/T₁=1.5 , T₂ SIDE)

Fig. 1.2.3 Thermal stresses near the discontinuity of thickness & T_M (k = 1.5 , t₂ side)

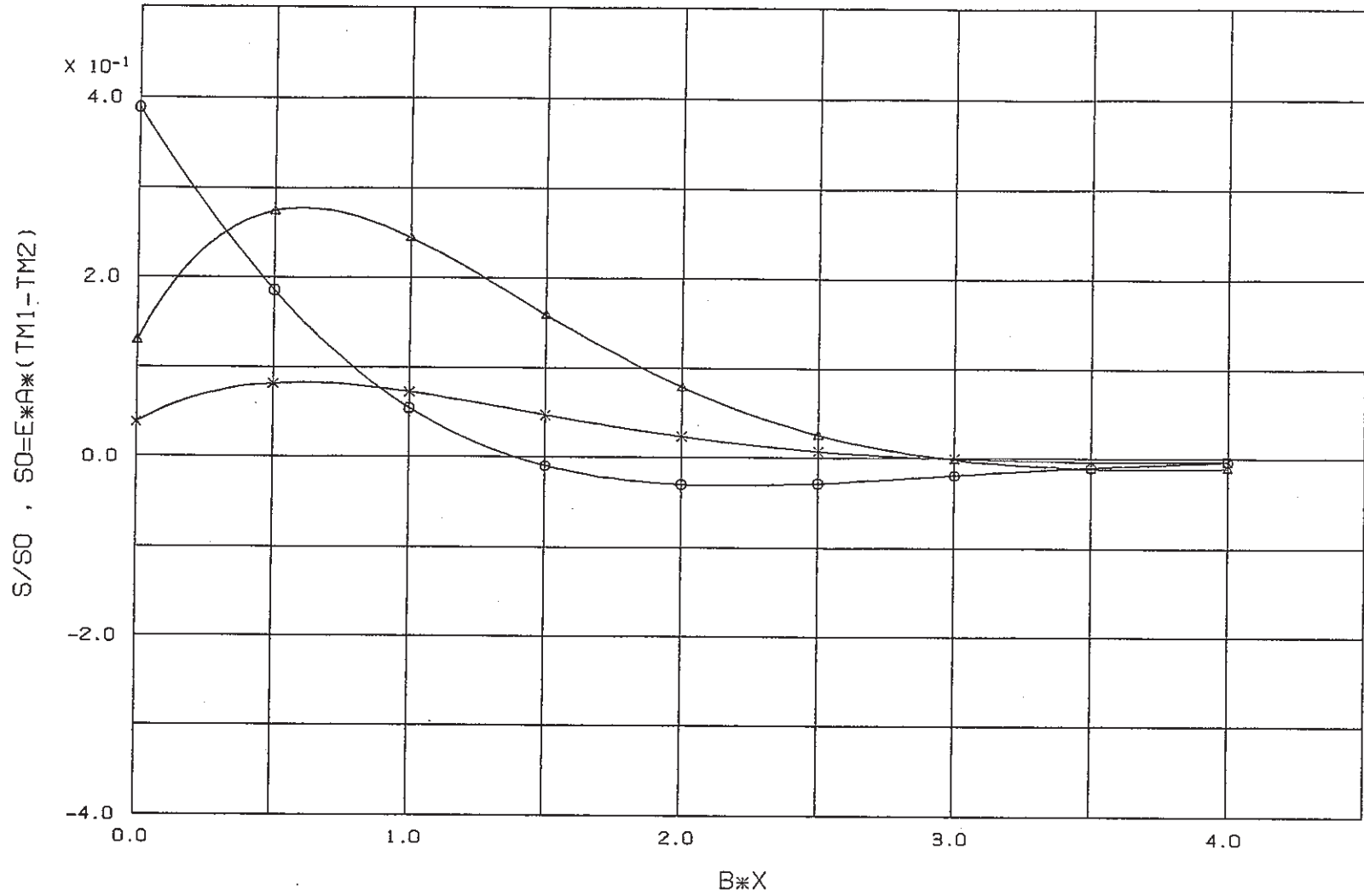
○
ST.M
—
△
SX.B
—
×
ST.B



DISCONTINUITY OF THICKNESS AND T_M ($T_2/T_1=2.0$, T_1 SIDE)

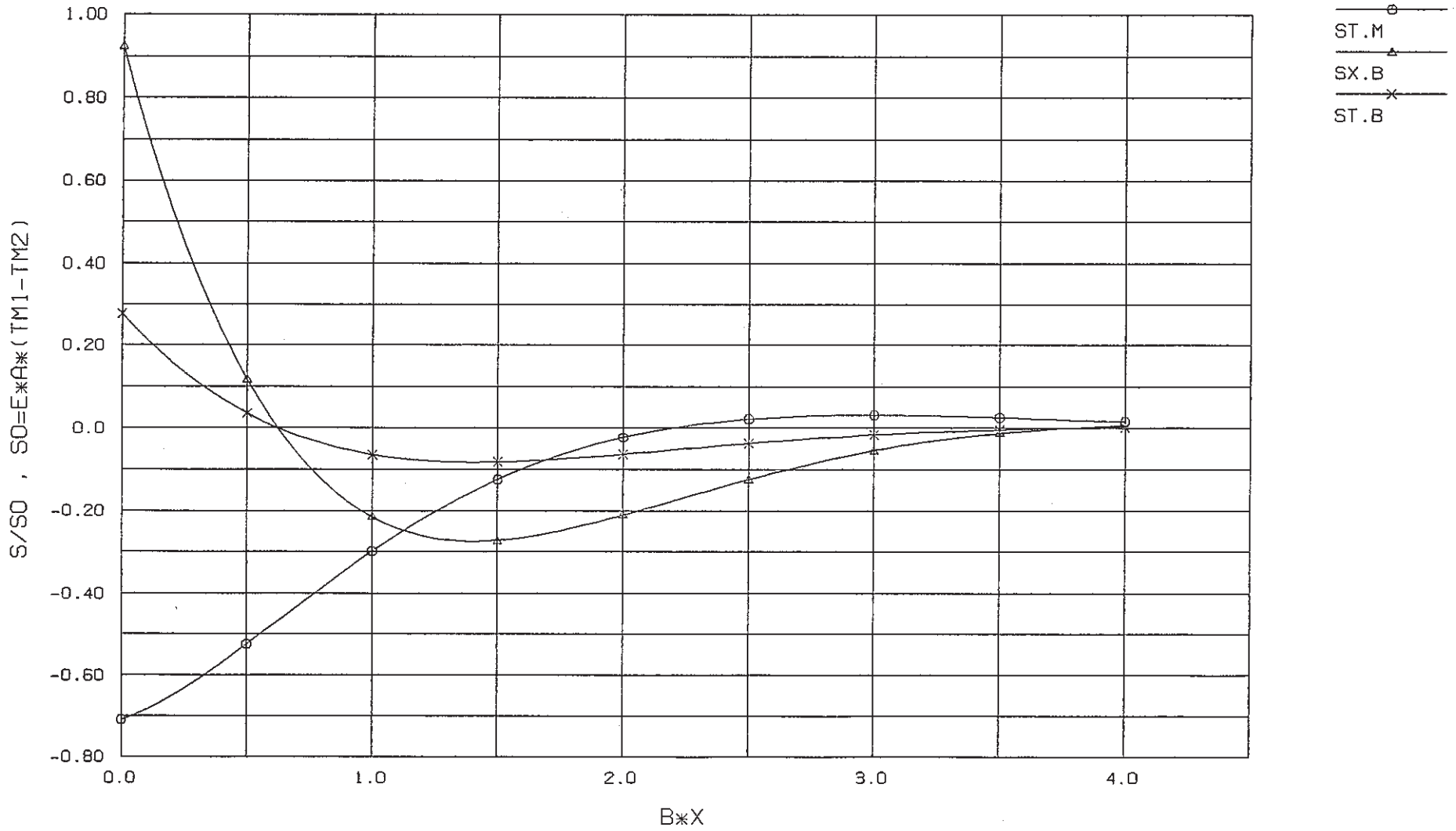
Fig. 1.2.4 Thermal stresses near the discontinuity of thickness & T_M ($k=2$, t_1 side)

○
ST.M
—
△
SX.B
—
×
ST.B



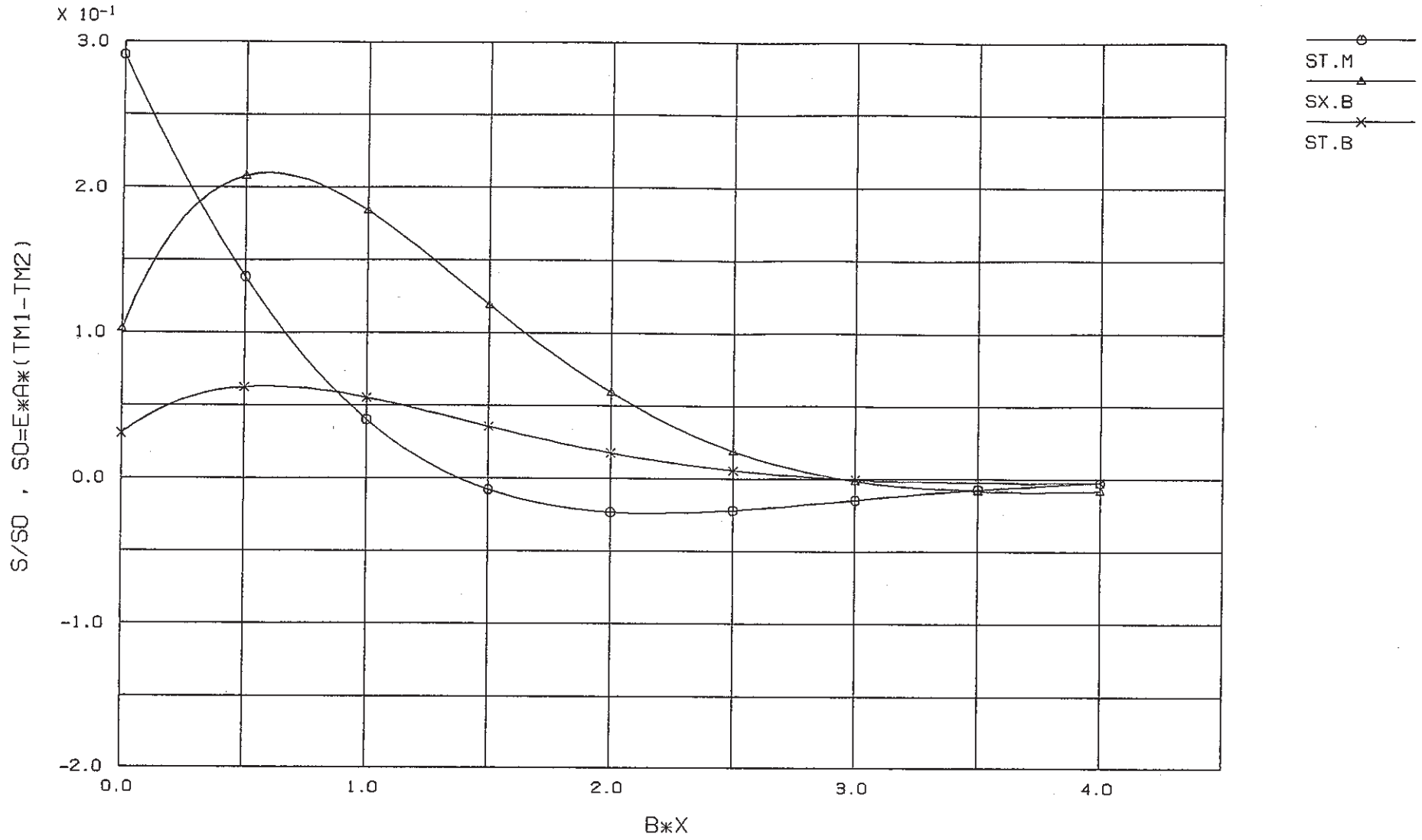
DISCONTINUITY OF THICKNESS AND T_M ($T_2/T_1=2.0$, T_2 SIDE)

Fig. 1.2.5 Thermal stresses near the discontinuity of thickness & T_M ($k=2$, t_2 side)



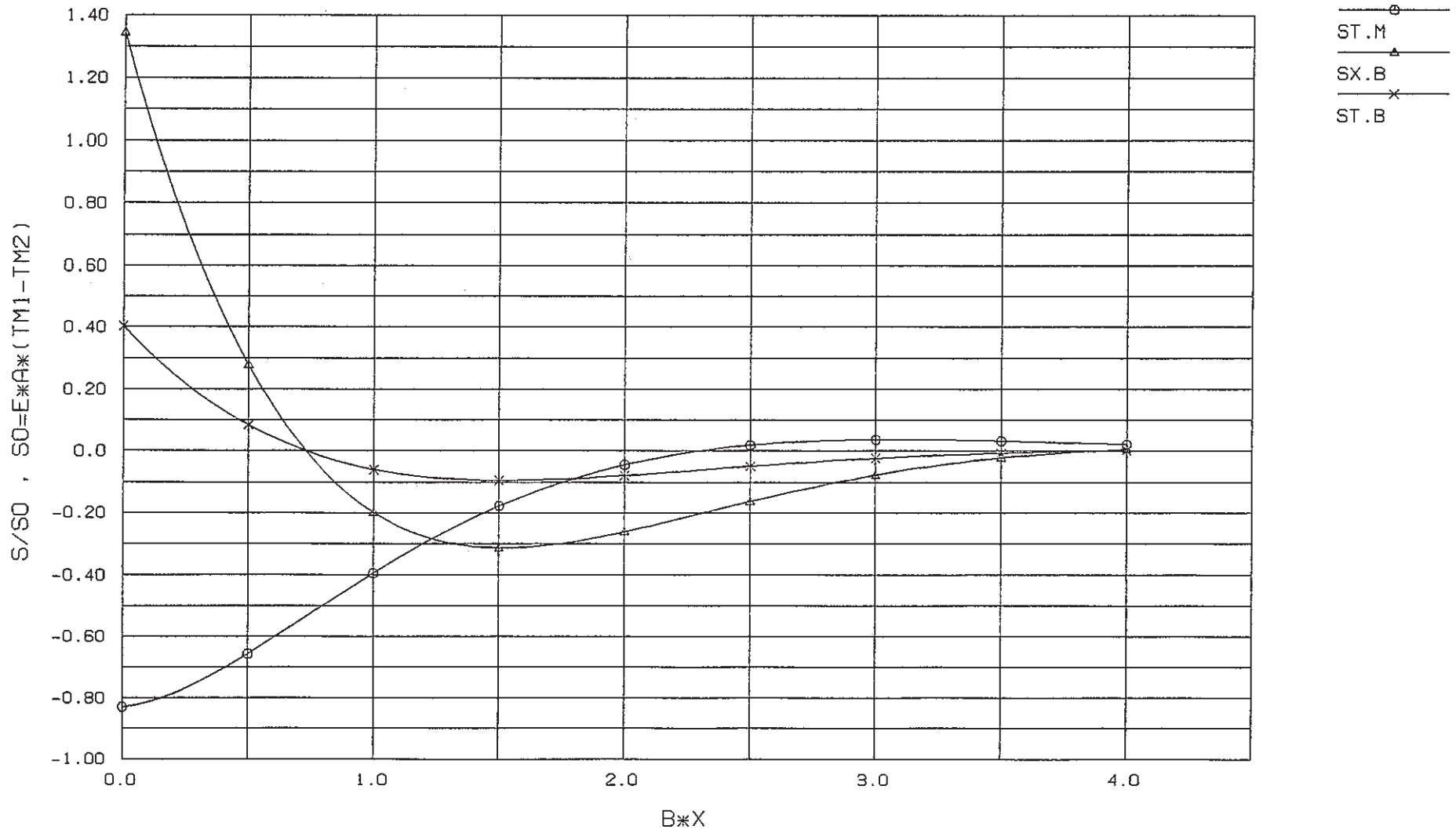
DISCONTINUITY OF THICKNESS AND T_M ($T_2/T_1=3.0$, T_1 SIDE)

Fig. 1.2.6 Thermal stresses near the discontinuity of thickness & T_M ($k=3$, t_1 side)



DISCONTINUITY OF THICKNESS AND T_M ($T_2/T_1=3.0$, T_2 SIDE)

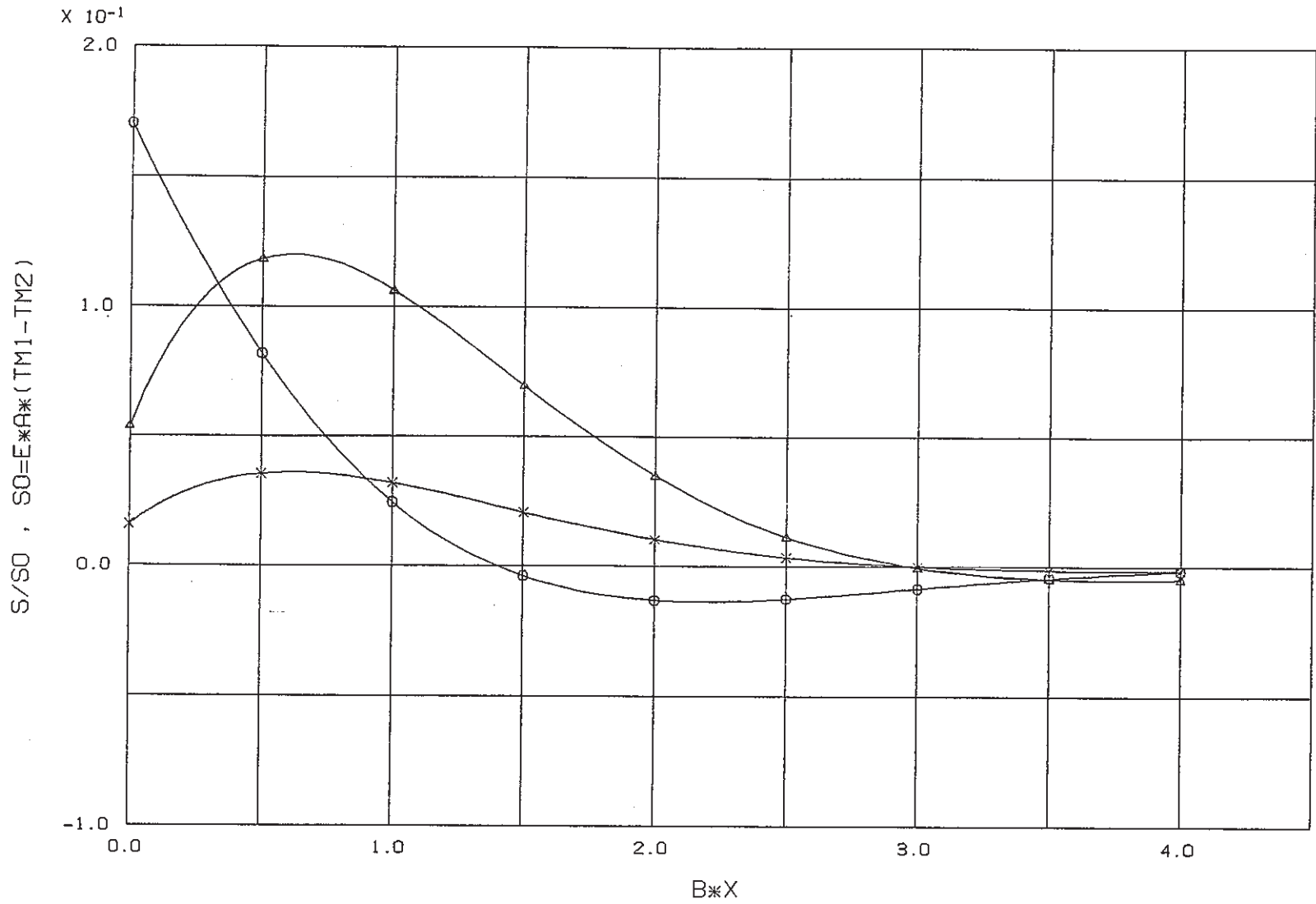
Fig. 1.2.7 Thermal stresses near the discontinuity of thickness & T_M ($k=3$, t_2 side)



DISCONTINUITY OF THICKNESS AND T_M ($T_2/T_1=5.0$, T_1 SIDE)

Fig. 1.2.8 Thermal stresses near the discontinuity of thickness & T_M ($k=5$, t_1 side)

○
ST.M
—
△
SX.B
—
×
ST.B



DISCONTINUITY OF THICKNESS AND T_M ($T_2/T_1=5.0$, T_2 SIDE)

Fig. 1.2.9 Thermal stresses near the discontinuity of thickness & T_M ($k=5$, t_2 side)

1.3 異材継手

(1) 2 材質異材継手

1.2 節の特別な場合として、E、 ν 、t が等しく、 α のみ異なる異材継手を考える。

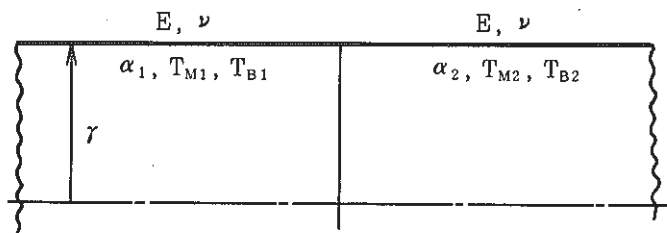


Fig. 1.3.1 Dissimilar metal pipe joint
(2 materials)

$$\left[\begin{array}{l} E_1 \rightleftharpoons E_2 = E \\ \nu_1 \rightleftharpoons \nu_2 = \nu \\ t_1 \rightleftharpoons t_2 = t \\ \alpha_1 > \alpha_2 \end{array} \right]$$

(1.7), (1.8) 式を解くと

$$M_0 = -\frac{M_1^* + M_2^*}{2}, \quad Q_0 = -\beta^3 Dr (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) - \frac{\beta}{2} (M_1^* - M_2^*) \tag{a}$$

を得る。これを (1.9) 式に代入すると材質 1 側の解

$$\left[\begin{array}{l} u_1 = r\alpha_1 T_{M1} - \frac{r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \theta(\beta x) - \frac{M_1^* - M_2^*}{4\beta^2 D} \zeta(\beta x) \\ i_1 = \frac{\beta r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \varphi(\beta x) - \frac{M_1^* - M_2^*}{4\beta D} \phi(\beta x) \\ M_{x1} = -\beta^2 Dr (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) + \frac{M_1^* - M_2^*}{2} \theta(\beta x) - M_1^* \\ M_{\theta 1} = -\nu\beta^2 Dr (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) + \frac{\nu(M_1^* - M_2^*)}{2} \theta(\beta x) - M_1^* \\ \sigma_{\theta 1, M} = -\frac{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \theta(\beta x) - \frac{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \zeta(\beta x) \tag{1.13} \\ = -0.5 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \theta(\beta x) - 0.1967 E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2}) \zeta(\beta x) (\nu=0.3) \\ \sigma_{x1, B} = -\frac{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta x) + \frac{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \theta(\beta x) - \frac{E\alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu)} \\ = -0.9078 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) + 0.3571 E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2}) \theta(\beta x) \\ \quad - 0.7143 E\alpha_1 T_{B1} (\nu=0.3) \\ \sigma_{\theta 1, B} = -\frac{\nu E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta x) + \frac{\nu E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \theta(\beta x) - \frac{E\alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu)} \\ = -0.2724 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) + 0.1071 E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2}) \theta(\beta x) \\ \quad - 0.7143 E\alpha_1 T_{B1} (\nu=0.3) \end{array} \right.$$

を得る。公称曲げ応力

$$\alpha_{NB1} = -\frac{E \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu)}, \quad \sigma_{NB2} = -\frac{E \alpha_2 T_{B2}}{2(1-\nu)} \quad (b)$$

を用いて応力表示すると、 $\nu=0.3$ の時

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta 1, M} = -0.5 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \theta(\beta x) + 0.2754(\alpha_{NB1} - \sigma_{NB2}) \zeta(\beta x) \\ \sigma_{x 1, B} = -0.9078 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) - 0.5(\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) \theta(\beta x) + \sigma_{NB1} \\ \sigma_{\theta 1, B} = -0.2724 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) - 0.15(\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) \theta(\beta x) + \sigma_{NB1} \end{array} \right] \quad (c)$$

となる。(a)式を(1.10)式に代入すると材質2側の解

$$\left[\begin{array}{l} u_2 = r \alpha_2 T_{M2} + \frac{r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \theta(\beta x) + \frac{M_1^* - M_2^*}{4\beta^2 D} \zeta(\beta x) \\ i_2 = -\frac{\beta r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \varphi(\beta x) + \frac{M_1^* - M_2^*}{4\beta D} \phi(\beta x) \\ M_{x2} = \beta^2 D r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) - \frac{M_1^* - M_2^*}{2} \theta(\beta x) - M_2^* \\ M_{\theta 2} = \nu \cdot \beta^2 D r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) - \frac{\nu(M_1^* - M_2^*)}{2} \theta(\beta x) - M_2^* \\ \sigma_{\theta 2, M} = \frac{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \theta(\beta x) + \frac{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \zeta(\beta x) \\ = 0.5 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \theta(\beta x) + 0.1967 E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2}) \zeta(\beta x) (\nu=0.3) \\ \sigma_{x 2, B} = \frac{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta x) - \frac{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \theta(\beta x) - \frac{E \alpha_2 T_{B2}}{2(1-\nu)} \\ = 0.9078 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) - 0.3571 E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2}) \theta(\beta x) \\ - 0.7143 E \alpha_2 T_{B2} (\nu=0.3) \\ \sigma_{\theta 2, B} = \frac{\nu E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta x) - \frac{\nu E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \theta(\beta x) - \frac{E \alpha_2 T_{B2}}{2(1-\nu)} \\ = 0.2724 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) - 0.1071 E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2}) \theta(\beta x) \\ - 0.7143 E \alpha_2 T_{B2} (\nu=0.3) \end{array} \right] \quad (1.14)$$

を得る。公称曲げ応力を用いて応力表示すると、 $\nu=0.3$ の時

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta 2, M} = 0.5 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \theta(\beta x) - 0.2754(\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) \zeta(\beta x) \\ \sigma_{x 2, B} = 0.9078 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) + 0.5(\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) \theta(\beta x) + \sigma_{NB2} \\ \sigma_{\theta 2, B} = 0.2724 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) + 0.15(\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) \theta(\beta x) + \sigma_{NB2} \end{array} \right] \quad (d)$$

となる。膜応力 $\sigma_{\theta 2, M}$ 、および曲げ応力から公称曲げ応力を差し引いた $\sigma_{x 2, B} - \sigma_{NB2}$ 、 $\sigma_{\theta 2, B} - \sigma_{NB2}$ は材質1側と逆符号となる。すなわち

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta 2, M} = -\sigma_{\theta 1, M} \\ (\sigma_{x 2, B} - \sigma_{NB2}) = -(\sigma_{x 1, B} - \sigma_{NB1}) \end{array} \right] \quad (1.15)$$

$$\left[(\sigma_{\theta 2, B} - \sigma_{NB2}) = -(\sigma_{\theta 1, B} - \sigma_{NB1}) \right]$$

となる。

不連続量 $(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})$ により生ずる材質 1 側の応力を無次元化した

$$\frac{\sigma_{\theta 1, M} \text{ (第一項)}}{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}, \quad \frac{\sigma_{x 1, B} \text{ (第一項)}}{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}, \quad \frac{\sigma_{\theta 1, B} \text{ (第一項)}}{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})} \quad (e)$$

を無次元距離 $\beta\chi$ に対してプロットした応力分布図を Fig. 1.3.2 に示す ($\nu=0.3$)。

不連続量 $(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2})$ により生ずる材質 1 側の応力を無次元化した

$$\frac{\sigma_{\theta 1, M} \text{ (第二項)}}{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2})}, \quad \frac{\sigma_{x 1, B} \text{ (第二項)}}{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2})}, \quad \frac{\sigma_{\theta 1, B} \text{ (第二項)}}{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_2 T_{B2})} \quad (f)$$

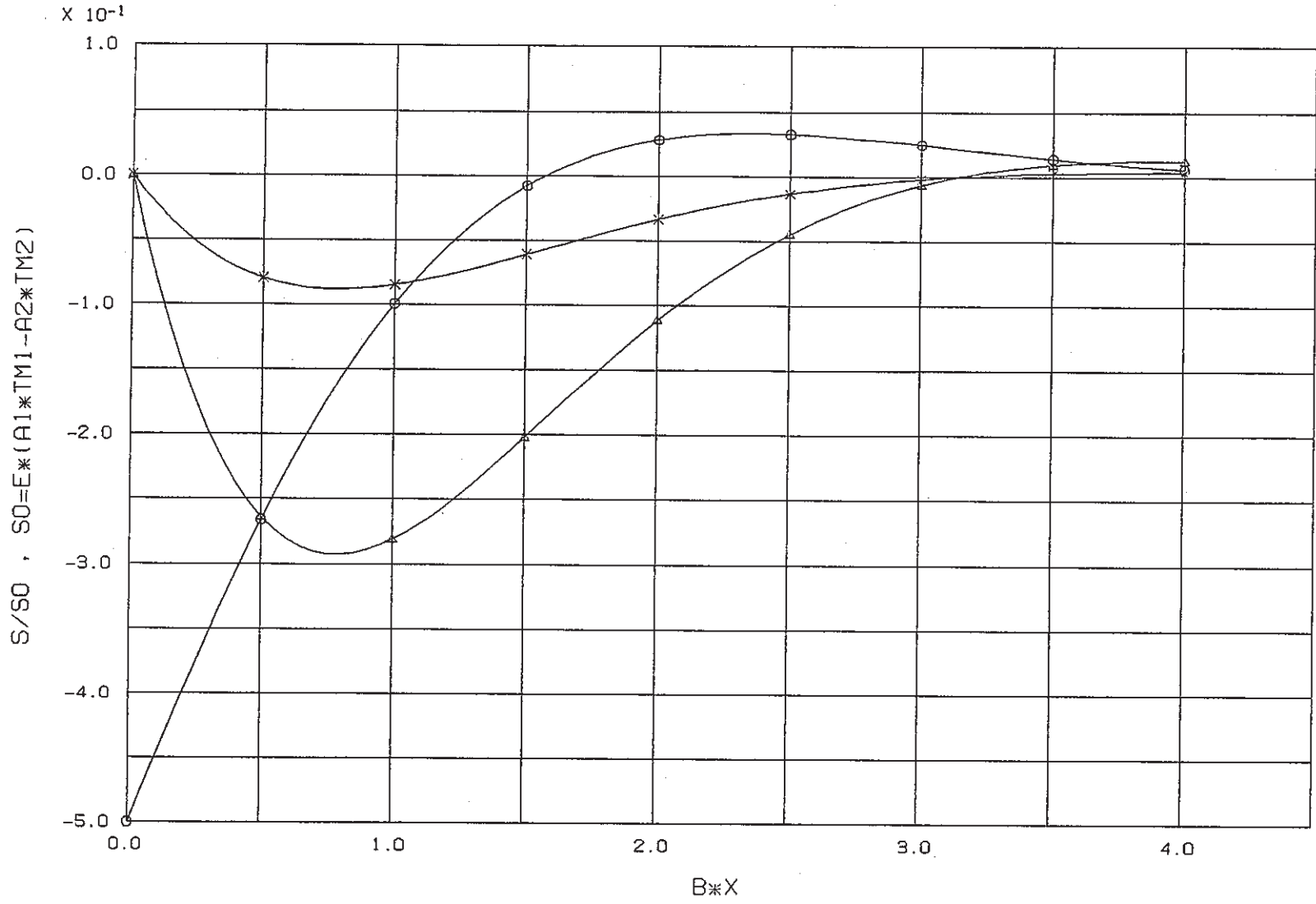
を $\beta\chi$ に対してプロットした応力分布図を Fig. 1.3.3 に示す ($\nu=0.3$)。 αT_M および αT_B の不連続に帰因する材質 1 側の応力は、これらの線図から容易に読み取る事ができる。材質 2 側では逆符号となる。求めた“不連続熱応力”に公称曲げ応力を加えれば正味の熱応力が求まる。

$T_{B1} = T_{B2} = 0$ の場合は、膜応力 $\sigma_{\theta, M}$ は $\chi = 0$ で最大となり、曲げ応力 $\sigma_{x, B}$, $\sigma_{\theta, B}$ は

$$\left[\begin{array}{l} \beta\chi = 1.2854 \frac{\chi}{\sqrt{rt}} \quad (\nu=0.3) = \frac{\pi}{4} \\ \chi = \frac{\pi}{4\beta} = 0.611 \sqrt{rt} \quad (\nu=0.3) \end{array} \right] \quad (g)$$

の位置で最大となる。

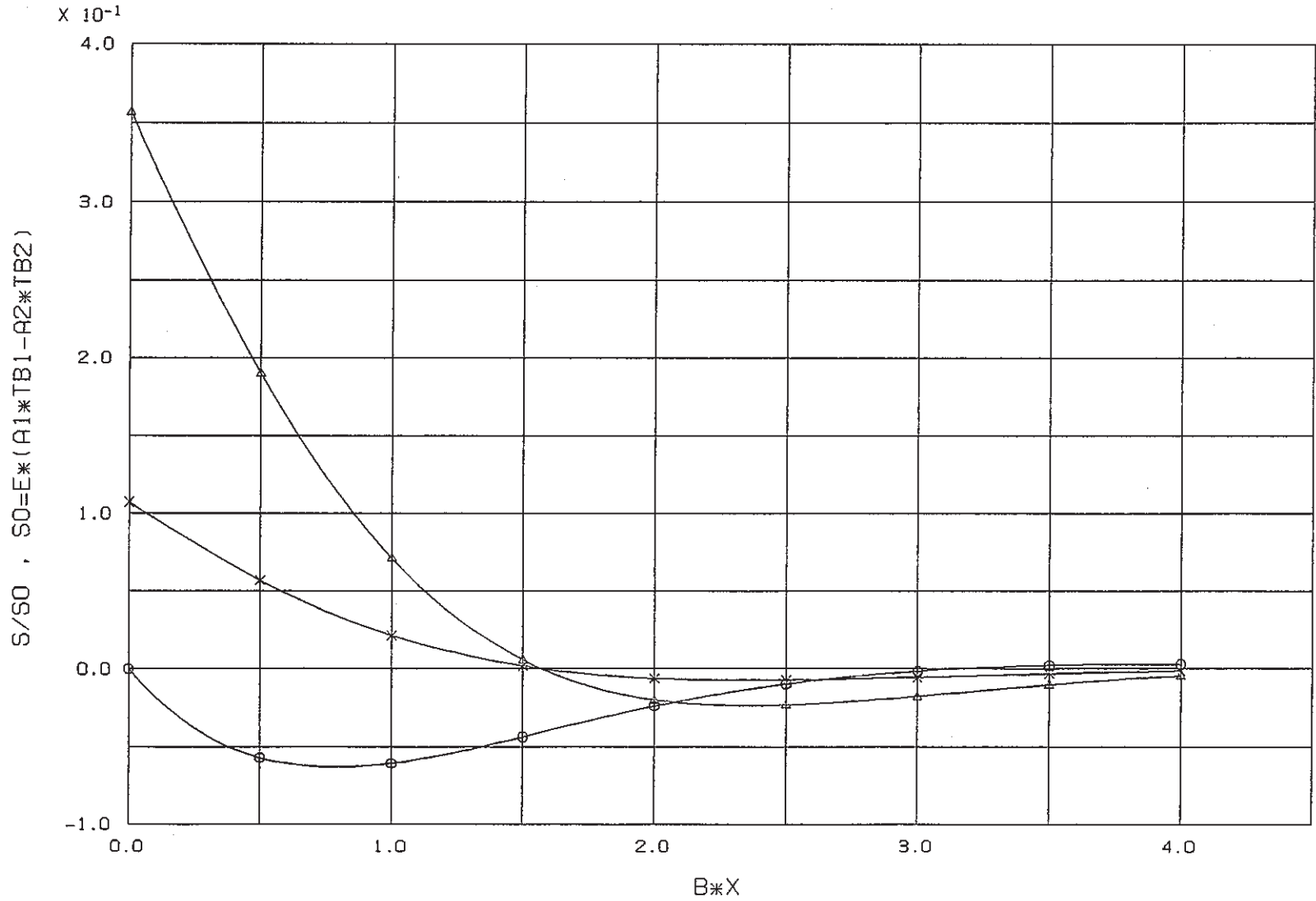
○
ST.M
—
△
SX.B
—
×
ST.B



THERMAL STRESSES BY DISCONTINUITY OF αT_M

Fig. 1.3.2 Thermal stresses near the discontinuity of αT_M

○
ST.M
—
△
SX.B
—
×
ST.B



THERMAL STRESSES BY DISCONTINUITY OF $A \cdot T_B$

Fig. 1.3.3 Thermal stresses near the discontinuity of αT_B

(例題1) SUS 304 と 2 1/4 Cr-1 M₀ の直管異材継手

$$\left(\begin{array}{l} r = 150 \text{ mm}, t = 12.7 \text{ mm}, E = 1.7 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2, \nu = 0.3 \\ \text{SUS 304} \quad \sim \alpha_1 = 1.993 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}, T_{M1} = 450 ^\circ\text{C}, T_{B1} = -30 ^\circ\text{C} \\ 2 \frac{1}{4} \text{Cr} - 1 \text{M}_0 \quad \sim \alpha_2 = 1.520 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}, T_{M2} = 420 ^\circ\text{C}, T_{B2} = -20 ^\circ\text{C} \end{array} \right)$$

接続部 ($\chi=0$) および $\chi = \pi/4 \beta$ 位置の応力を (c), (d) 式を用いて求めよ。

◦ 公称曲げ応力

$$\left[\begin{array}{l} \text{SUS 304} \quad \sim \sigma_{NB1} = -\frac{E \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu)} = 7.26 \text{ kg/mm}^2 \\ 2 \frac{1}{4} \text{Cr} - 1 \text{M}_0 \quad \sim \sigma_{NB2} = -\frac{E \alpha_2 T_{B2}}{2(1-\nu)} = 3.69 \text{ kg/mm}^2 \end{array} \right]$$

◦ 接続部の応力

$\theta(0) = 1, \zeta(0) = 0$ より

$$\text{SUS 304} \quad \left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta 1, M} = -0.5 E (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) = -21.97 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{x1, B} = 0.5 (\sigma_{NB1} + \sigma_{NB2}) = 5.48 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\theta 1, B} = \sigma_{NB1} - 0.15 (\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) = 6.72 \text{ kg/mm}^2 \end{array} \right] \quad (h)$$

$$2 \frac{1}{4} \text{Cr} - 1 \text{M}_0 \quad \left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta 2, M} = 0.5 E (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) = 21.97 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{x2, B} = 0.5 (\sigma_{NB1} + \sigma_{NB2}) = 5.48 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\theta 2, B} = \sigma_{NB2} + 0.15 (\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) = 4.23 \text{ kg/mm}^2 \end{array} \right] \quad (i)$$

◦ $\chi = \pi/4 \beta = 26.67 \text{ mm}$ 位置の応力

付録 A1 の Table. A.1.1 より $\theta(\pi/4) = \zeta(\pi/4) = 0.3224$

$$\text{SUS 304} \quad \left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta 1, M} = -0.1612 E (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \\ \quad + 0.08878 (\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) = -6.77 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{x1, B} = -0.2927 E (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \\ \quad - 0.1612 (\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) + \sigma_{NB1} = -6.18 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\theta 1, B} = -0.08781 E (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \\ \quad - 0.04836 (\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) + \sigma_{NB1} = 3.23 \text{ kg/mm}^2 \end{array} \right] \quad (j)$$

$$2 \frac{1}{4} \text{Cr} - 1 \text{M}_0 \quad \left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta 2, M} = 0.1612 E (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \\ \quad - 0.08878 (\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) = 6.77 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{x2, B} = 0.2927 E (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \\ \quad + 0.1612 (\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) + \sigma_{NB2} = 17.13 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\theta 2, B} = 0.08781 E (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \\ \quad + 0.04836 (\sigma_{NB1} - \sigma_{NB2}) + \sigma_{NB2} = 7.72 \text{ kg/mm}^2 \end{array} \right] \quad (k)$$

(2) 3材質異材継手

αT_M と αT_B の不連続に帰因する“不連続熱応力”を低減するために、 α_1 と α_2 の中間程度の線膨張係数 α_3 を有する中間材を挿入した3材質異材継手とすることがある。一般に中間材は

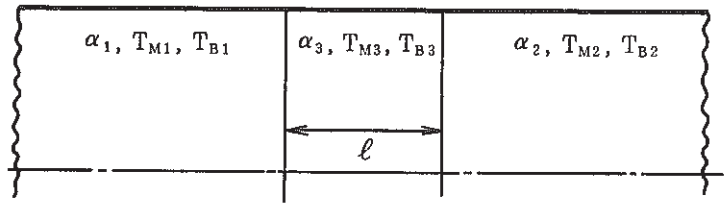


Fig. 1.3.4 Dissimilar metal pipe joint
(3 materials)

バタリング材と呼ばれる。中間材の長さを l とし $\alpha_1 > \alpha_3 > \alpha_2$ とする。材質1と3の2材質継手の解と材質3と2の2材質継手の解を重ねることにより、容易に以下の解が得られる。

・材質1の解

$$\begin{aligned}
 u_1 &= r \alpha_1 T_{M1} - \frac{r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3})}{2} \theta(\beta x) - \frac{M_1^* - M_3^*}{4\beta^2 D} \zeta(\beta x) \\
 &\quad - \frac{r(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \theta(\beta l + \beta x) - \frac{M_3^* - M_2^*}{4\beta^2 D} \zeta(\beta l + \beta x) \\
 M_D &= -\beta^2 D r (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3}) \zeta(\beta x) + \frac{M_1^* - M_3^*}{2} \theta(\beta x) \\
 &\quad - \beta^2 D r (\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta l + \beta x) + \frac{M_3^* - M_2^*}{2} \theta(\beta l + \beta x) \text{ として} \\
 M_{x1} &= M_D - M_1^*, \quad M_{\theta 1} = \nu \cdot M_D - M_1^* \\
 \sigma_{\theta 1, M} &= -\frac{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3})}{2} \theta(\beta x) - \frac{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_3 T_{B3})}{4(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \zeta(\beta x) \\
 &\quad - \frac{E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \theta(\beta l + \beta x) - \frac{E(\alpha_3 T_{B3} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \zeta(\beta l + \beta x) \\
 \sigma_{D, B} &= -\frac{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3})}{2} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta x) + \frac{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_3 T_{B3})}{4(1-\nu)} \theta(\beta x) \\
 &\quad - \frac{E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta l + \beta x) + \frac{E(\alpha_3 T_{B3} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \theta(\beta l + \beta x) \\
 \text{として } \sigma_{x1, B} &= \sigma_{D, B} - \frac{E \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu)}, \quad \sigma_{\theta 1, B} = \nu \cdot \sigma_{D, B} - \frac{E \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu)}
 \end{aligned}
 \tag{1.16}$$

Fig. 1.3.2, Fig. 1.3.3の線図から任意位置 x の応力を求めるには材質1と3の不連続による応力を βx に対して読みとり、材質3と2の不連続による応力を $\beta l + \beta x$ に対して読みとり、さらに公称曲げ応力 σ_{NB1} を加えれば良い。

・材質3の解(材質1との接続部を $x=0$ とする)

$$\begin{aligned}
 u_3 &= r \alpha_3 T_{M3} + \frac{r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3})}{2} \theta(\beta x) + \frac{M_1^* - M_3^*}{4\beta^2 D} \zeta(\beta x) \\
 &\quad - \frac{r(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \theta(\beta \ell - \beta x) - \frac{M_3^* - M_2^*}{4\beta^2 D} \zeta(\beta \ell - \beta x) \\
 M_D &= \beta^2 D r (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3}) \zeta(\beta x) - \frac{M_1^* - M_3^*}{2} \theta(\beta x) \\
 &\quad - \beta^2 D r (\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta \ell - \beta x) + \frac{M_3^* - M_2^*}{2} \theta(\beta \ell - \beta x) \text{ として} \\
 M_{x3} &= M_D - M_3^*, \quad M_{\theta 3} = \nu \cdot M_D - M_3^* \tag{1.17} \\
 \sigma_{\theta 3, M} &= \frac{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3})}{2} \theta(\beta x) + \frac{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_3 T_{B3})}{4(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \zeta(\beta x) \\
 &\quad - \frac{E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \theta(\beta \ell - \beta x) - \frac{E(\alpha_3 T_{B3} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \zeta(\beta \ell - \beta x) \\
 \sigma_{D, B} &= \frac{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3})}{2} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta x) - \frac{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_3 T_{B3})}{4(1-\nu)} \theta(\beta x) \\
 &\quad - \frac{E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta \ell - \beta x) + \frac{E(\alpha_3 T_{B3} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \theta(\beta \ell - \beta x) \\
 \text{として } \sigma_{x3, B} &= \sigma_{D, B} - \frac{E \alpha_3 T_{B3}}{2(1-\nu)}, \quad \sigma_{\theta 3, B} = \nu \cdot \sigma_{D, B} - \frac{E \alpha_3 T_{B3}}{2(1-\nu)}
 \end{aligned}$$

Fig. 1.3.2, Fig. 1.3.3 の線図から任意位置 x の応力を求めるには材質1と3の不連続による応力を βx に対して読み取り(符号が逆になる), 材質3と2の不連続による応力を $\beta \ell - \beta x$ に対して読み取り, さらに公称曲げ応力 σ_{NB3} を加えれば良い。

・材質2の解

$$\begin{aligned}
 u_2 &= r \alpha_2 T_{M2} + \frac{r(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \theta(\beta x) + \frac{M_3^* - M_2^*}{4\beta^2 D} \zeta(\beta x) \\
 &\quad + \frac{r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3})}{2} \theta(\beta \ell + \beta x) + \frac{M_1^* - M_3^*}{4\beta^2 D} \zeta(\beta \ell + \beta x) \\
 M_D &= \beta^2 D r (\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2}) \zeta(\beta x) - \frac{M_3^* - M_2^*}{2} \theta(\beta x) \\
 &\quad + \beta^2 D r (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3}) \zeta(\beta \ell + \beta x) - \frac{M_1^* - M_3^*}{2} \theta(\beta \ell + \beta x) \text{ として} \tag{1.18} \\
 M_{x2} &= M_D - M_2^*, \quad M_{\theta 2} = \nu \cdot M_D - M_2^*
 \end{aligned}$$

$$\left[\begin{aligned}
 \sigma_{\theta_{2,M}} &= \frac{E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \theta(\beta\chi) + \frac{E(\alpha_3 T_{B3} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \zeta(\beta\chi) \\
 &+ \frac{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3})}{2} \theta(\beta\ell + \beta\chi) + \frac{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_3 T_{B3})}{4(1-\nu)} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{3}} \zeta(\beta\ell + \beta\chi) \\
 \sigma_{D,B} &= \frac{E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2})}{2} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta\chi) - \frac{E(\alpha_3 T_{B3} - \alpha_2 T_{B2})}{4(1-\nu)} \theta(\beta\chi) \\
 &+ \frac{E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3})}{2} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \zeta(\beta\ell + \beta\chi) - \frac{E(\alpha_1 T_{B1} - \alpha_3 T_{B3})}{4(1-\nu)} \theta(\beta\ell + \beta\chi) \\
 \text{として } \sigma_{x_{2,B}} &= \sigma_{D,B} - \frac{E \alpha_2 T_{B2}}{2(1-\nu)}, \quad \sigma_{\theta_{2,B}} = \nu \cdot \sigma_{D,B} - \frac{E \alpha_2 T_{B2}}{2(1-\nu)}
 \end{aligned} \right.$$

Fig. 1.3.2, Fig. 1.3.3 の線図から任意位置 χ の応力を求めるには材質 3 と 2 の不連続による応力を $\beta\chi$ に対して読み取り (符号が逆になる), 材質 1 と 3 の不連続による応力を $\beta\ell + \beta\chi$ に対して読み取り (符号が逆になる), さらに公称曲げ応力 σ_{NB2} を加えれば良い。

(例題 2) 例題 1 において中間材 Alloy 800 H ($\alpha_3 = 1.807 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, $T_{M3} = 435^\circ\text{C}$, $T_{B3} = -25^\circ\text{C}$, $\ell = \pi/2\beta = 53.34\text{mm}$) を挿入した場合の応力を求めよ。

○ 公称曲げ応力

$$\text{SUS 304} \quad \sim \sigma_{NB1} = - \frac{E \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu)} = 7.26 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{Alloy 800 H} \quad \sim \sigma_{NB3} = - \frac{E \alpha_3 T_{B3}}{2(1-\nu)} = 5.49 \text{ kg/mm}^2$$

$$2 \frac{1}{4} \text{Cr-1M}_0 \sim \sigma_{NB2} = - \frac{E \alpha_2 T_{B2}}{2(1-\nu)} = 3.69 \text{ kg/mm}^2$$

付録 A 1 の Table. A 1.1 より $\theta(\pi/2) = 0$, $\zeta(\pi/2) = 0.2079$, $\theta(3\pi/4) = -0.0670$,
 $\zeta(3\pi/4) = 0.0670$

○ SUS 304 の応力

$$\left. \begin{aligned}
 \text{接続部} & \left\{ \begin{aligned}
 \sigma_{\theta_{1,M}} &= -0.5 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3}) + 0.05725(\sigma_{NB3} - \sigma_{NB2}) = -9.32 \text{ kg/mm}^2 \\
 \sigma_{x_{1,B}} &= 0.5(\sigma_{NB1} + \sigma_{NB3}) - 0.1887 E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2}) = 1.64 \text{ kg/mm}^2 \\
 \sigma_{\theta_{1,B}} &= \sigma_{NB1} - 0.15(\sigma_{NB1} - \sigma_{NB3}) - 0.05662 E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2}) \\
 &= 5.57 \text{ kg/mm}^2
 \end{aligned} \right\} (\ell) \\
 \chi = 26.67 \text{ mm} & \left\{ \begin{aligned}
 \sigma_{\theta_{1,M}} &= 0.08878(\sigma_{NB1} - \sigma_{NB3}) - 0.1612 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3}) \\
 &+ 0.01845(\sigma_{NB3} - \sigma_{NB2}) + 0.0335 E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2}) \\
 &= -2.01 \text{ kg/mm}^2 \\
 \sigma_{x_{1,B}} &= \sigma_{NB1} - 0.1612(\sigma_{NB1} - \sigma_{NB3}) - 0.2927 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3})
 \end{aligned} \right\} (m)
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} &+0.0335(\sigma_{NB3}-\sigma_{NB2})-0.06083 E(\alpha_3 T_{M3}-\alpha_2 T_{M2}) \\ &= -0.01 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\theta_{1,B}} &= \sigma_{NB1}-0.04836(\sigma_{NB1}-\sigma_{NB3})-0.08781 E(\alpha_1 T_{M1}-\alpha_3 T_{M3}) \\ &+0.01005(\sigma_{NB3}-\sigma_{NB2})-0.01825 E(\alpha_3 T_{M3}-\alpha_2 T_{M2}) \\ &= 5.08 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned} \right\}$$

◦ Alloy 800 H の応力

SUS 304 との
接続部
($\chi = 0$)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta_{3,M}} &= 0.5 E(\alpha_1 T_{M1}-\alpha_3 T_{M3})+0.05725(\sigma_{NB3}-\sigma_{NB2}) \\ &= 9.52 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\chi_{3,B}} &= 0.5(\sigma_{NB1}+\sigma_{NB3})-0.1887 E(\alpha_3 T_{M3}-\alpha_2 T_{M2}) \\ &= 1.64 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\theta_{3,B}} &= \sigma_{NB3}+0.15(\sigma_{NB1}-\sigma_{NB3})-0.05662 E(\alpha_3 T_{M3}-\alpha_2 T_{M2}) \\ &= 4.34 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned} \right\} \text{ (n)}$$

中間部
($\chi = 26.67 \text{ mm}$)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta_{3,M}} &= -0.08878(\sigma_{NB1}-\sigma_{NB3})+0.1612 E(\alpha_1 T_{M1}-\alpha_3 T_{M3}) \\ &+0.08878(\sigma_{NB3}-\sigma_{NB2})-0.1612 E(\alpha_3 T_{M3}-\alpha_2 T_{M2}) \\ &= -1.01 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\chi_{3,B}} &= \sigma_{NB3}+0.1612(\sigma_{NB1}-\sigma_{NB3})+0.2927 E(\alpha_1 T_{M1}-\alpha_3 T_{M3}) \\ &-0.1612(\sigma_{NB3}-\sigma_{NB2})-0.2927 E(\alpha_3 T_{M3}-\alpha_2 T_{M2}) \\ &= 3.65 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\theta_{3,B}} &= \sigma_{NB3}+0.04836(\sigma_{NB1}-\sigma_{NB3})+0.08781 E(\alpha_1 T_{M1}-\alpha_3 T_{M3}) \\ &-0.04836(\sigma_{NB3}-\sigma_{NB2})-0.08781 E(\alpha_3 T_{M3}-\alpha_2 T_{M2}) \\ &= 4.94 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned} \right\} \text{ (o)}$$

$2\frac{1}{4}$ Cr-1M₀
との接続部
($\chi = 53.34 \text{ mm}$)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta_{3,M}} &= -0.05725(\sigma_{NB1}-\sigma_{NB3})-0.5 E(\alpha_3 T_{M3}-\alpha_2 T_{M2}) \\ &= -12.65 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\chi_{3,B}} &= 0.5(\sigma_{NB3}+\sigma_{NB2})+0.1887 E(\alpha_1 T_{M1}-\alpha_3 T_{M3}) \\ &= 8.14 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\theta_{3,B}} &= \sigma_{NB3}-0.15(\sigma_{NB3}-\sigma_{NB2})+0.05662 E(\alpha_1 T_{M1}-\alpha_3 T_{M3}) \\ &= 6.28 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned} \right\} \text{ (p)}$$

◦ $2\frac{1}{4}$ Cr-1M₀ の応力

Alloy 800H
との接続部
($\chi = 0$)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta_{2,M}} &= 0.5 E(\alpha_3 T_{M3}-\alpha_2 T_{M2})-0.05725(\sigma_{NB1}-\sigma_{NB3}) \\ &= 12.45 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\chi_{2,B}} &= 0.5(\sigma_{NB3}+\sigma_{NB2})+0.1887 E(\alpha_1 T_{M1}-\alpha_3 T_{M3}) \\ &= 8.14 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\theta_{2,B}} &= \sigma_{NB2}+0.15(\sigma_{NB3}-\sigma_{NB2})+0.05662 E(\alpha_1 T_{M1}-\alpha_3 T_{M3}) \end{aligned} \right\} \text{ (q)}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \sigma_{\theta_{2,M}} = -0.08878(\sigma_{NB3} - \sigma_{NB2}) + 0.1612 E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2}) \\
 \quad - 0.01845(\sigma_{NB1} - \sigma_{NB3}) - 0.0335 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3}) \\
 \quad \quad \quad = 3.22 \text{ kg/mm}^2 \\
 \sigma_{\sigma_{2,B}} = \sigma_{NB2} + 0.1612(\sigma_{NB3} - \sigma_{NB2}) + 0.2927 E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2}) \\
 \quad - 0.0335(\sigma_{NB1} - \sigma_{NB3}) + 0.06083 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3}) \\
 \quad \quad \quad = 12.41 \text{ kg/mm}^2 \\
 \sigma_{\theta_{2,B}} = \sigma_{NB2} + 0.04836(\sigma_{NB3} - \sigma_{NB2}) + 0.08781 E(\alpha_3 T_{M3} - \alpha_2 T_{M2}) \\
 \quad - 0.01005(\sigma_{NB1} - \sigma_{NB3}) + 0.01825 E(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_3 T_{M3}) \\
 \quad \quad \quad = 6.31 \text{ kg/mm}^2
 \end{array} \right\} \quad (r)$$

(3) 簡易解析プログラム

(1), (2)の理論解を用いて異材継手部の熱応力を計算するプログラムを作成した。プログラムリストを次頁以降に示す。入力データカードイメージは次の通りである。

◦カード1 (4 i 5) NM, N1, N2, N3

NM~材質数, 2または3

N1, N2, N3 ~材質1, 2, 3の位置識別番号。Nj ≠ 0の時は付録A3の「構造設計用複数位置温度計算プログラム」によりディスク上に作成された非定常温度計算結果ファイル中の位置 | Nj | の計算結果が材質jの温度データ T_{Mj}, T_{Bj}として引用される。Nj > 0の時は母材部, Nj < 0の時は熱しゃへい板部の計算結果が引用される。Nj = 0の時は T_{Mj}, T_{Bj}は一定値としてカード3以下で入力する。材質j_Aの温度データは温度ファイル(非定常)から引用し, 材質j_Bの温度データは一定値(定常)としてカード入力するような組み合わせも自由である。

◦カード2 (4 F 10.0) R , TH , E , PR

r (mm), t (mm), E (kg/mm²), ν

◦カード3 (4 F 10.0) AL (j), DL (j), TM (j), TB (j)

α_j (1/°C), ℓ_j (mm), T_{Mj} (°C), T_{Bj} (°C)

材質jのα_j, ℓ_j, T_{Mj}, T_{Bj}を入力する。材質数だけ入力する。ℓ_jは材質jの応力計算範囲であり, 接続部からℓ_jの範囲を8等分する9点位置の応力値が計算されプリント出力される。NM (材質数) = 3の時ℓ₃は中間材(材質3)の長さで見なされる。Nj = 0の場合, ここで T_{Mj}, T_{Bj}を入力すれば良い。必要枚数 (NM) だけ入力すれば良い。

例題2のJCLおよび入力データリストを次頁以下に示す。温度データを温度ファイルから読み込む場合のJCLおよび入力データ例を示す。例題1と例題2の計算結果リストを示す。

プログラムリスト (1 / 3)

```

C-----
C   THERMAL STRESS CALCULATION BY CYLINDRICAL SHELL THEORY
C   DISSIMILAR METAL PIPE JOINT
C-----
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION YD(200),PTIME(200),TD(6,200),TM(3),TB(3),AL(3),DL(3),
+         NN(3)
C-----
      F3(BX)=EXP(-BX)*COS(BX)
      F4(BX)=EXP(-BX)*SIN(BX)
C-----
500 FORMAT(4I5)
510 FORMAT(4F10.0)
520 FORMAT(/10X,'INPUT DATA CHECK PRINT',//,13X,'NM',3X,'N1',3X,
+ 'N2',3X,'N3',//,10X,4I5/)
530 FORMAT(/15X,'R(MM)',4X,'TH(MM)',3X,'E(KG/MM2)',3X,'P.RATIO',
+ //,10X,2F10.2,1PE12.4,OPF10.4,///,12X,'MAT',
+ 4X,'AL( DEG)',5X,'L(MM)',3X,'TM( DEG)',3X,'TB( DEG)'/)
540 FORMAT(10X,I5,1PE12.4,OP3F10.2)
600 FORMAT(1H1/10X,'CALCULATION OF THERMAL STRESSES AT THE ',
+ 'DISSIMILAR METAL PIPE JOINT'/)
610 FORMAT(/10X,'TIME=',F7.1,'SEC')
620 FORMAT(/10X,'MATERIAL',I1,4X,'X(MM)',4X,'SX.B',4X,'ST.M',
+ 4X,'ST.B',4X,'SNB=',F6.2)
630 FORMAT(20X,4F8.2)
      WRITE(6,600)
      READ(5,500) NM,N1,N2,N3
      WRITE(6,520) NM,N1,N2,N3
      READ(5,510) R,TH,E,PR
      WRITE(6,530) R,TH,E,PR
      DO 5 J=1,NM
      READ(5,510) AL(J),DL(J),TM(J),TB(J)
      WRITE(6,540) J,AL(J),DL(J),TM(J),TB(J)
      5 CONTINUE
C-----
      SEARCH POSITION NUMBER OF TEMPERATURE FILE
      IF(N1) 15,10,20
10  NN(1)=0
      GO TO 30
15  NN(1)=-10*N1+5
      GO TO 30
20  NN(1)= 10*N1+1
30  IF(N2) 45,40,50
40  NN(2)=0
      GO TO 60
45  NN(2)=-10*N2+5
      GO TO 60
50  NN(2)= 10*N2+1
      IF(NM.EQ.3) GO TO 60
      NN(3)=0
      DL(3)=0
      AL(3)=AL(2)
      GO TO 90
60  IF(N3) 75,70,80
70  NN(3)=0
      GO TO 90
75  NN(3)=-10*N3+5
      GO TO 90
80  NN(3)= 10*N3+1

```

プログラムリスト (2 / 3)

```

90 NTT=NN(1)+NN(2)+NN(3)
   NTIME=1
   IF(NTT.EQ.0) GO TO 160
C----- READ TEMPERATURE RESULTS FILE(20)
   READ(20) NTIME,(PTIME(I),I=1,NTIME)
   DO 150 J=1,NM
   IF(NN(J).EQ.0) GO TO 150
   K=2*J-1
   REWIND 20
100 READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
   IF(NY.EQ.NN(J)) GO TO 110
   GO TO 100
110 DO 120 I=1,NTIME
   TD(K,I)=YD(I)
120 CONTINUE
   K=K+1
   READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
   DO 130 I=1,NTIME
   TD(K,I)=YD(I)
130 CONTINUE
   REWIND(20)
150 CONTINUE
160 CONTINUE
C----- CONSTANT DATA SETTING
   PP1=1+PR
   PM1=1-PR
   SQ3=SQRT(3*PP1*PM1)
   BT=SQRT(SQ3/(R*TH))
   SQ1=SQ3/3
   SQ2=3/SQ3
   BL=BT*DL(3)
C----- CALCULATION START
   DO 400 IT=1,NTIME
   WRITE(6,600)
   TIME=PTIME(IT)
   IF(NN(1).EQ.0) GO TO 200
   TM(1)=TD(1,IT)
   TB(1)=TD(2,IT)
200 IF(NN(2).EQ.0) GO TO 210
   TM(2)=TD(3,IT)
   TB(2)=TD(4,IT)
210 IF(NN(3).EQ.0) GO TO 220
   TM(3)=TD(5,IT)
   TB(3)=TD(6,IT)
220 WRITE(6,610) TIME
   IF(NM.EQ.3) GO TO 230
   TM(3)=TM(2)
   TB(3)=TB(2)
230 CONTINUE
   SNB1=-E*AL(1)*TB(1)/(2*PM1)
   SNB2=-E*AL(2)*TB(2)/(2*PM1)
   SNB3=-E*AL(3)*TB(3)/(2*PM1)
   ALT1=AL(1)*TM(1)
   ALT2=AL(2)*TM(2)
   ALT3=AL(3)*TM(3)
C----- SOLUTION FOR MATERIAL(1)
   M=1
   WRITE(6,620) M,SNB1

```

プログラムリスト (3 / 3)

```

DO 250 K=1,9
X=FLOAT(9-K)*DL(M)/8
F3BX=F3(BT*X)/2
F4BX=F4(BT*X)/2
F3BL=F3(BT*X+BL)/2
F4BL=F4(BT*X+BL)/2
STM=SQ1*(SNB1-SNB3)*F4BX-E*(ALT1-ALT3)*F3BX
+   +SQ1*(SNB3-SNB2)*F4BL-E*(ALT3-ALT2)*F3BL
SBB=(SNB1-SNB3)*F3BX+SQ2*E*(ALT1-ALT3)*F4BX
+   +(SNB3-SNB2)*F3BL+SQ2*E*(ALT3-ALT2)*F4BL
SXB=SNB1-SBB
STB=SNB1-SBB*PR
WRITE(6,630) X,SXB,STM,STB
250 CONTINUE
IF(NM.EQ.2) GO TO 310
C----- SOLUTION FOR MATERIAL(3)
M=3
WRITE(6,620) M,SNB3
DO 300 K=1,9
X=FLOAT(K-1)*DL(M)/8
F3BX=F3(BT*X)/2
F4BX=F4(BT*X)/2
F3BL=F3(BL-BT*X)/2
F4BL=F4(BL-BT*X)/2
STM=-SQ1*(SNB1-SNB3)*F4BX+E*(ALT1-ALT3)*F3BX
+   +SQ1*(SNB3-SNB2)*F4BL-E*(ALT3-ALT2)*F3BL
SBB=(SNB1-SNB3)*F3BX+SQ2*E*(ALT1-ALT3)*F4BX
+   -(SNB3-SNB2)*F3BL-SQ2*E*(ALT3-ALT2)*F4BL
SXB=SNB3+SBB
STB=SNB3+SBB*PR
WRITE(6,630) X,SXB,STM,STB
300 CONTINUE
C----- SOLUTION FOR MATERIAL(2)
310 CONTINUE
M=2
WRITE(6,620) M,SNB2
DO 350 K=1,9
X=FLOAT(K-1)*DL(M)/8
F3BX=F3(BT*X)/2
F4BX=F4(BT*X)/2
F3BL=F3(BT*X+BL)/2
F4BL=F4(BT*X+BL)/2
STM=-SQ1*(SNB3-SNB2)*F4BX+E*(ALT3-ALT2)*F3BX
+   -SQ1*(SNB1-SNB3)*F4BL+E*(ALT1-ALT3)*F3BL
SBB=(SNB3-SNB2)*F3BX+SQ2*E*(ALT3-ALT2)*F4BX
+   +(SNB1-SNB3)*F3BL+SQ2*E*(ALT1-ALT3)*F4BL
SXB=SNB2+SBB
STB=SNB2+SBB*PR
WRITE(6,630) X,SXB,STM,STB
350 CONTINUE
C----- CALCULATION END
400 CONTINUE
STOP
END

```


JCL および入力データリスト (例題2)

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6
//Q3020ST6 JOB (GENERAL),MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3020,
//  ATTR=(TO,CO,WO)
//CLG EXEC FORT7CLG
//FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=*
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3020.TEST.FORT(ST6),DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUMMY
//GO.FT20FO01 DD DUMMY
//GO.FT06FO01 DD SYSOUT=*
//GO.SYSIN DD *
      3      0      0      0
      150.0      12.7      1.7D4      0.3
      1.993D-5      53.34      450.0      -30.0
      1.520D-5      53.34      420.0      -20.0
      1.807D-5      53.34      435.0      -25.0
/*
//

```

← ユーザーが変更すべき箇所

← プログラム

JCL および入力データリスト例

(温度データを温度ファイルから読み込む場合)

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6
//Q3020ST6 JOB (GENERAL),MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3020,
//  ATTR=(TO,CO,WO)
//COPY EXEC PGM=JSDGENER
//SYSPRINT DD SYSOUT=*
//SYSIN DD DUMMY
//SYSUT1 DD DSN=Q3020.N1TR2.POST,UNIT=DASD,DISP=SHR
//SYSUT2 DD DSN=&&POST,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),
//  SPACE=(TRK,(5,10),RLSE)
/*
//CLG EXEC FORT7CLG
//FORT.SYSPRINT DD DUMMY
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3020.TEST.FORT(ST6),DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUMMY
//GO.FT20FO01 DD DSN=&&POST,UNIT=WORK,DISP=(OLD,DELETE)
//GO.FT06FO01 DD SYSOUT=*
//GO.SYSIN DD *
      3      2      4      3
      150.0      12.7      1.7D4      0.3
      1.993D-5      53.34      450.0      -30.0
      1.520D-5      53.34      420.0      -20.0
      1.807D-5      53.34      435.0      -25.0
/*
//

```

← 温度ファイル

← プログラム

← 入力不用である。

下線部はユーザーが変更すべき箇所である。

計算結果リスト (例題 1)

CALCULATION OF THERMAL STRESSES AT THE DISSIMILAR METAL PIPE JOINT

INPUT DATA CHECK PRINT

NM	N1	N2	N3
2	0	0	0

R(MM)	TH(MM)	E(KG/MM2)	P.RATIO
150.00	12.70	1.7000E+04	0.3000

MAT	AL(/DEG)	L(MM)	TM(DEG)	TB(DEG)
1	1.9930E-05	53.34	450.00	-30.00
2	1.5200E-05	53.34	420.00	-20.00

CALCULATION OF THERMAL STRESSES AT THE DISSIMILAR METAL PIPE JOINT

TIME= 0.0SEC

MATERIAL1	X(MM)	SX.B	ST.M	ST.B	SNB=
	53.34	-1.03	0.20	4.77	7.26
	46.67	-2.72	-0.84	4.26	
	40.00	-4.29	-2.31	3.79	
	33.34	-5.54	-4.27	3.42	
	26.67	-6.17	-6.76	3.23	
	20.00	-5.86	-9.83	3.32	
	13.33	-4.16	-13.45	3.83	
	6.67	-0.57	-17.55	4.91	
	0.00	5.48	-21.97	6.72	

MATERIAL2	X(MM)	SX.B	ST.M	ST.B	SNB=
	0.00	5.48	21.97	4.23	3.69
	6.67	11.52	17.55	6.04	
	13.33	15.11	13.45	7.12	
	20.00	16.81	9.83	7.63	
	26.67	17.13	6.76	7.72	
	33.34	16.49	4.27	7.53	
	40.00	15.25	2.31	7.16	
	46.67	13.68	0.84	6.69	
	53.34	11.98	-0.20	6.18	

計算結果リスト (例題 2)

CALCULATION OF THERMAL STRESSES AT THE DISSIMILAR METAL PIPE JOINT

INPUT DATA CHECK PRINT

NM	N1	N2	N3
3	0	0	0

R(MM)	TH(MM)	E(KG/MM2)	P.RATIO
150.00	12.70	1.7000E+04	0.3000

MAT	AL(/DEG)	L(MM)	TM(DEG)	TB(DEG)
1	1.9930E-05	53.34	450.00	-30.00
2	1.5200E-05	53.34	420.00	-20.00
3	1.8070E-05	53.34	435.00	-25.00

CALCULATION OF THERMAL STRESSES AT THE DISSIMILAR METAL PIPE JOINT

TIME= 0.0SEC

MATERIAL1	X(MM)	SX.B	ST.M	ST.B	SNB= 7.26
	53.34	3.74	0.64	6.21	
	46.67	2.79	0.31	5.92	
	40.00	1.79	-0.22	5.62	
	33.34	0.82	-0.97	5.33	
	26.67	-0.01	-2.00	5.08	
	20.00	-0.55	-3.34	4.92	
	13.33	-0.62	-5.01	4.90	
	6.67	0.02	-7.01	5.09	
	0.00	1.64	-9.32	5.57	

MATERIAL3	X(MM)	SX.B	ST.M	ST.B	SNB= 5.49
	0.00	1.64	9.52	4.33	
	6.67	3.24	7.02	4.81	
	13.33	3.87	4.41	5.00	
	20.00	3.88	1.74	5.00	
	26.67	3.65	-1.01	4.93	
	33.34	3.56	-3.83	4.91	
	40.00	4.01	-6.73	5.04	
	46.67	5.40	-9.69	5.46	
	53.34	8.14	-12.65	6.28	

MATERIAL2	X(MM)	SX.B	ST.M	ST.B	SNB= 3.69
	0.00	8.14	12.45	5.03	
	6.67	10.90	9.64	5.85	
	13.33	12.31	7.13	6.28	
	20.00	12.71	4.99	6.40	
	26.67	12.41	3.22	6.31	
	33.34	11.66	1.83	6.08	
	40.00	10.64	0.77	5.78	
	46.67	9.52	0.01	5.44	
	53.34	8.39	-0.51	5.10	

1.4 軸方向温度分布（端部から十分離れた位置）

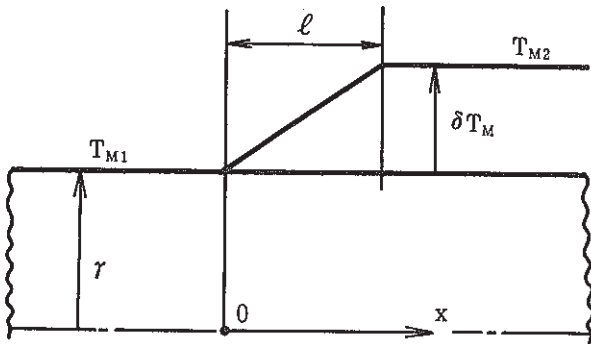


Fig. 1.4.1 Ramp distribution of T_M

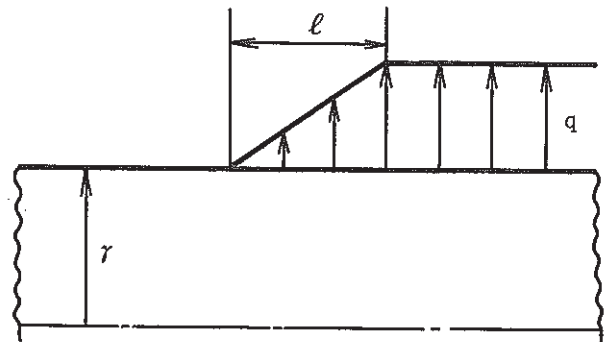


Fig. 1.4.2 Ramp distribution of radial load

(1) 軸方向温度分布と半径方向分布荷重との相似性

Fig. 1.4.1 に示すように軸方向温度分布 $T_M(x)$ が生じた時の解を求める一般的手順は付録

A.1.1 より

$$\begin{aligned} \text{変位の一般解 } u = & e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) \\ & + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + r \alpha T_M(x) \end{aligned} \quad (a)$$

を与え、

$$i = \frac{du}{dx}, \quad M_x = D \frac{d^2 u}{dx^2}, \quad Q = D \frac{d^3 u}{dx^3}$$

に境界条件を適用して積分定数 C_1, C_2, C_3, C_4 を決定することになる。Fig. 1.4.2 に示すように半径方向分布荷重 $P(x)$ が作用する時の解を求める一般的手順は (a) 式の $r \alpha T_M(x)$ が $\frac{r^2 P(x)}{Et}$ に変わるだけであり $C_1 \sim C_4$ を決定する手順は同一である。従って

$$r \alpha T_M(x) = \frac{r^2 P(x)}{Et} \quad \text{即ち} \quad P(x) = \frac{Et \alpha T_M(x)}{r} \quad (b)$$

を満たし、境界条件が同一ならば、変位、勾配、曲げモーメントおよびせん断力は同一解となる。円周方向膜力 N_θ および膜応力 $\sigma_{\theta, M}$ のみが次のように変わるだけである。

$$T_M(x) \text{ に対して } \sigma_{\theta, M} = \frac{N_\theta}{t} = \frac{E}{r} \{ u - r \alpha T_M(x) \}$$

$$P(x) \text{ に対して } \sigma_{\theta, M} = \frac{N_\theta}{t} = E \cdot \frac{u}{r}$$

従って Fig. 1.4.2 に対応する付録 A.1.8 の解の q を

$$q = \frac{Et \alpha}{r} (T_{M2} - T_{M1}) = \frac{Et \alpha \cdot \delta T_M}{r} \quad (c)$$

と置き換えれば Fig. 1.4.1 の解となる。

(2) ランプ状の軸方向温度分布

Fig. 1.4.1 に示すようなランプ状の軸方向温度分布

$$T_M(x) = \begin{cases} T_{M1} & (x < 0) \\ T_{M1} + \delta T_M \cdot \frac{x}{\ell} & (0 \leq x \leq \ell) \\ T_{M2} = T_{M1} + \delta T_M & (x > \ell) \end{cases}$$

による変位 $u(x)$ 等は付録 A.1.8 の (A.1.31) 式の $P(x)$ を (b) 式で置き換え、 q を (c) 式で置き換えて

$$\left[\begin{aligned} u(x) &= r \alpha T_M(x) + \frac{r \cdot \alpha \cdot \delta T_M}{4 \beta \ell} \{ \phi(\beta|x|) - \phi(\beta|x-\ell|) \} \\ i &= r \alpha \frac{dT_M(x)}{dx} - \frac{r \cdot \alpha \cdot \delta T_M}{2 \ell} \{ \theta(\beta|x|) \pm \theta(\beta|x-\ell|) \} \quad \left(\begin{smallmatrix} +は \\ 0 \leq x \leq \ell \end{smallmatrix} \right) \\ M_x &= D \frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{r \cdot \alpha \cdot \delta T_M \cdot D \beta}{2 \ell} \{ \phi(\beta|x|) - \phi(\beta|x-\ell|) \} \\ M_\theta &= \nu \cdot M_x \\ \sigma_{\theta, B} &= \frac{E}{r} \{ u - r \alpha T_M(x) \} = \frac{E \alpha \delta T_M}{4 \beta \ell} \{ \phi(\beta|x|) - \phi(\beta|x-\ell|) \} \\ &= \frac{E \alpha \sqrt{r t}}{4 [3(1-\nu^2)]^{1/4}} \frac{\delta T_M}{\ell} \{ \phi(\beta|x|) - \phi(\beta|x-\ell|) \} \\ \sigma_{x, B} &= \frac{6 M_x}{t^2} = \frac{3 E \alpha \sqrt{r t}}{4 [3(1-\nu^2)]^{3/4}} \frac{\delta T_M}{\ell} \{ \phi(\beta|x|) - \phi(\beta|x-\ell|) \} \\ \sigma_{\theta, B} &= \nu \cdot \sigma_{x, B} \end{aligned} \right] \quad (1.19)$$

となる。ランプ状の軸方向温度分布により生ずる熱応力は $E \alpha \sqrt{r t}$ と温度勾配 ($\delta T_M / \ell$) の積に比例する。(1.19) 式の右辺 $\{ \}$ 内第一項はランプ区間左端 ($x=0$) の効果であり、第二項はランプ区間右端 ($x=\ell$) の効果である。

解 (1.19) 式の物理的イメージは、ランプ区間両端における勾配の不連続を打消すために、両端に互いに逆向きのモーメントが生じたものと解釈できる。

(3) 内外面温度差の軸方向分布

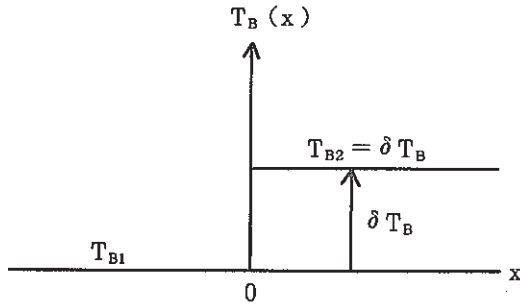


Fig. 1.4.3 Step distribution of T_B

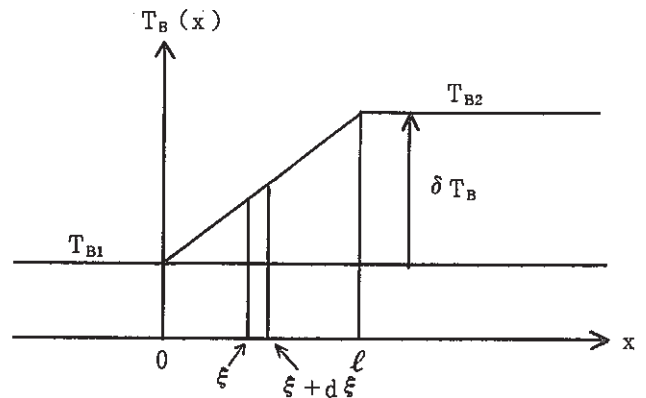


Fig. 1.4.4 Ramp distribution of T_B

◦ Fig. 1.4.3 に示すように内外面温度差 $T_B(x)$ のみステップ状に分布する場合の解は, (1.13) 式, (1.14) 式において $\alpha_1 T_{M1} = \alpha_2 T_{M2} = 0$, $M_1^* = 0$, $M_2^* = \frac{D(1+\nu)\alpha\delta T_B}{t}$ とすればよいから, 次のように求まる。

$$\left[\begin{array}{l} u_s(x) = \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t} \zeta(\beta|x|) \quad (x < 0) \\ u_s(x) = -\frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t} \zeta(\beta x) \quad (x \geq 0) \end{array} \right] \quad (d)$$

◦ Fig. 1.4.4 に示すように $T_B(x)$ がランプ状に分布する場合の解は, 付録 A 1.6 と同様の手法 (数学上はデュアメル定理と呼ばれる) により次のように求められる。

$$\begin{aligned} x > l \rightarrow u(x) &= -\frac{(1+\nu)\alpha}{4\beta^2 t} \int_0^l \zeta(\beta(x-\xi)) \frac{\delta T_B}{l} d\xi \\ &= -\frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t l} \left| \frac{\varphi(\beta(x-\xi))}{2\beta} \right|_0^l = \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{8\beta^3 t l} \{ \varphi(\beta x) - \varphi(\beta(x-l)) \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq l \rightarrow u(x) &= -\frac{(1+\nu)\alpha}{4\beta^2 t} \int_0^x \zeta(\beta(x-\xi)) \frac{\delta T_B}{l} d\xi \\ &\quad + \frac{(1+\nu)\alpha}{4\beta^2 t} \int_x^l \zeta(\beta(\xi-x)) \frac{\delta T_B}{l} d\xi \\ &= -\frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t l} \left\{ \left| \frac{\varphi(\beta(x-\xi))}{2\beta} \right|_0^x - \left| \frac{\varphi(\beta(\xi-x))}{-2\beta} \right|_x^l \right\} \\ &= \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{8\beta^3 t l} \{ \varphi(\beta x) - \varphi(\beta(l-x)) \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x < 0 \rightarrow u(x) &= \frac{(1+\nu)\alpha}{4\beta^2 t} \int_0^\ell \zeta(\beta(\xi-x)) \frac{\delta T_B}{\ell} d\xi \\
 &= \frac{(1+\nu)\alpha \delta T_B}{4\beta^2 t \ell} \left| \frac{\varphi(\beta(\xi-x))}{-2\beta} \right|_0^\ell = \frac{(1+\nu)\alpha \delta T_B}{8\beta^3 t \ell} \{ \varphi(-\beta x) - \varphi(\beta(\ell-x)) \}
 \end{aligned}$$

全区間共通表示すると

$$u(x) = \frac{(1+\nu)\alpha \delta T_B}{8\beta^3 t \ell} \{ \varphi(\beta|x|) - \varphi(\beta|x-\ell|) \}$$

となる。応力表示を含めた解は次のようになる。

$$\left[\begin{aligned}
 u(x) &= \frac{(1+\nu)\alpha \delta T_B}{8\beta^3 t \ell} \{ \varphi(\beta|x|) - \varphi(\beta|x-\ell|) \} \\
 i = \frac{du}{dx} &= - \frac{(1+\nu)\alpha \delta T_B}{4\beta^2 t \ell} \{ \zeta(\beta|x|) \pm \zeta(\beta|x-\ell|) \} \quad (+は 0 \leq x \leq \ell) \\
 M_x = D \frac{d^2 u}{dx^2} &= M^* \\
 &= - \frac{D(1+\nu)\alpha \delta T_B}{4\beta t \ell} \{ \phi(\beta|x|) - \phi(\beta|x-\ell|) \} - \frac{D(1+\nu)\alpha T_B(x)}{t} \quad (1.20) \\
 M_\theta = \nu \cdot D \frac{d^2 u}{dx^2} &= M^* \\
 &= - \frac{\nu \cdot D(1+\nu)\alpha \cdot \delta T_B}{4\beta t \ell} \{ \phi(\beta|x|) - \phi(\beta|x-\ell|) \} - \frac{D(1+\nu)\alpha \cdot T_B(x)}{t} \\
 \sigma_{\theta, M} = E \frac{u}{r} &= \frac{E(1+\nu)\alpha \sqrt{rt}}{8[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \frac{\delta T_B}{\ell} \{ \varphi(\beta|x|) - \varphi(\beta|x-\ell|) \} \\
 \sigma_{x, B} = \frac{6M_x}{t^2} &= - \frac{E\alpha \sqrt{rt} \cdot \delta T_B / \ell}{8[3(1-\nu^2)]^{1/4} (1-\nu)} \{ \phi(\beta|x|) - \phi(\beta|x-\ell|) \} - \frac{E \cdot \alpha \cdot T_B(x)}{2(1-\nu)} \\
 \sigma_{\theta, B} = \frac{6M_\theta}{t^2} &= - \frac{\nu E \alpha \sqrt{rt} \cdot \delta T_B / \ell}{8[3(1-\nu^2)]^{1/4} (1-\nu)} \{ \phi(\beta|x|) - \phi(\beta|x-\ell|) \} - \frac{E \cdot \alpha \cdot T_B(x)}{2(1-\nu)}
 \end{aligned} \right.$$

(1.20) 式の物理的イメージは、ランプ区間両端におけるせん断力 (dM_x/dx) の不連続を打消すために、両端に互いに逆向きの半径方向荷重が生じたものと解釈できる。

(4) ランプ状の $T_M(x)$ と $T_B(x)$ が重なる場合

Fig. 1. 4. 1 のランプ状 $T_M(x)$ と Fig. 1. 4. 5 のランプ状 $T_B(x)$ が重なる場合の解は (1.19) 式と (1.20) 式を重ね合わせて次のようになる。

$$\left[u(x) = r\alpha T_M(x) + \frac{r\alpha \delta T_M}{4\beta \ell} \{ \phi(\beta|x|) - \phi(\beta|x-\ell|) \} \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{8\beta^3 t \ell} \{ \varphi(\beta|x|) - \varphi(\beta|x-\ell|) \} \\
 i = & r\alpha \frac{dT_M(x)}{dx} - \frac{r\alpha\delta T_M}{2\ell} \{ \theta(\beta|x|) \pm \theta(\beta|x-\ell|) \} \quad (+\text{は } 0 \leq x \leq \ell) \\
 & - \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t \ell} \{ \zeta(\beta|x|) \pm \zeta(\beta|x-\ell|) \} \quad (1.21) \\
 M_D = & \frac{r\alpha\delta T_M D\beta}{2\ell} \{ \varphi(\beta|x|) - \varphi(\beta|x-\ell|) \} \\
 & - \frac{D(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta t \ell} \{ \varphi(\beta|x|) - \varphi(\beta|x-\ell|) \} \text{ として} \\
 M_x = & M_D - \frac{D(1+\nu)\alpha}{t} T_B(x), \quad M_\theta = \nu \cdot M_D - \frac{D(1+\nu)\alpha}{t} T_B(x) \\
 Q = & - \frac{r\alpha\delta T_M \cdot D\beta^2}{\ell} \{ \zeta(\beta|x|) \pm \zeta(\beta|x-\ell|) \} \quad (+\text{は } 0 \leq x \leq \ell) \\
 & + \frac{D(1+\nu)\alpha\delta T_B}{2t\ell} \{ \theta(\beta|x|) \pm \theta(\beta|x-\ell|) \} - \frac{D(1+\nu)\alpha}{t} \cdot \frac{dT_B(x)}{dx} \\
 \sigma_{\theta,M} = & \frac{E}{r} \{ u - r\alpha T_M(x) \}, \quad \sigma_{x,B} = \frac{6M_x}{t^2}, \quad \sigma_{\theta,B} = \frac{6M_\theta}{t^2}
 \end{aligned}$$

$x = 0$ 点の応力は次のようになる ($\nu = 0.3$)。

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\theta,M} = & \frac{E\alpha\delta T_M}{4\beta\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} + \frac{(1+\nu)E\alpha\delta T_B}{8\beta^3 r t \ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} \\
 = & \frac{E\alpha\sqrt{rt}}{4[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \frac{\delta T_M/\ell}{\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} + \frac{(1+\nu)E\alpha\sqrt{rt}}{8[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \frac{\delta T_B/\ell}{\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} \\
 = & 0.1945 E\alpha\sqrt{rt} \frac{\delta T_M}{\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} + 0.07651 E\alpha\sqrt{rt} \frac{\delta T_B}{\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} \\
 \sigma_{x,B} = & \frac{3E\alpha\sqrt{rt}}{4[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \frac{\delta T_M/\ell}{\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} - \frac{E\alpha\sqrt{rt}}{8(1-\nu)[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \frac{\delta T_B/\ell}{\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} \\
 - & \frac{E\alpha T_{B1}}{2(1-\nu)} = 0.3531 E\alpha\sqrt{rt} \frac{\delta T_M}{\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} \quad (e) \\
 - & 0.1389 E\alpha\sqrt{rt} \frac{\delta T_B}{\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} - 0.7143 E\alpha T_{B1} \\
 \sigma_{\theta,B} = & 0.1059 E\alpha\sqrt{rt} \frac{\delta T_M}{\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} \\
 - & 0.04168 E\alpha\sqrt{rt} \frac{\delta T_B}{\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} - 0.7143 E\alpha T_{B1}
 \end{aligned}$$

$x = l$ 点の応力は (e) 式において、右辺第一項 (δT_M の項) と第二項 (δT_B の項) の符号を逆にして、 T_{B1} を T_{B2} に変えれば良い。

・ $l > l_A = 2.5 \sqrt{rt}$ の場合、 $x < l - l_A$ の範囲のランプ区間左端側では、右端の効果が無視でき、応力分布は次のように近似できる。

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta, M} \approx \frac{E\alpha\sqrt{rt}\delta T_M/l}{4[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \phi(\beta x) + \frac{(1+\nu)E\alpha\sqrt{rt}\delta T_B/l}{8[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \phi(\beta x) \\ \sigma_{x, B} \approx \frac{3E\alpha\sqrt{rt}\delta T_M/l}{4[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \phi(\beta x) - \frac{E\alpha\sqrt{rt}\delta T_B/l}{8(1-\nu)[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \phi(\beta x) - \frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)} \\ \sigma_{\theta, B} \approx \frac{3\nu E\alpha\sqrt{rt}\delta T_M/l}{4[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \phi(\beta x) - \frac{\nu E\alpha\sqrt{rt}\delta T_B/l}{8(1-\nu)[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \phi(\beta x) - \frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)} \end{array} \right] \quad (1.22)$$

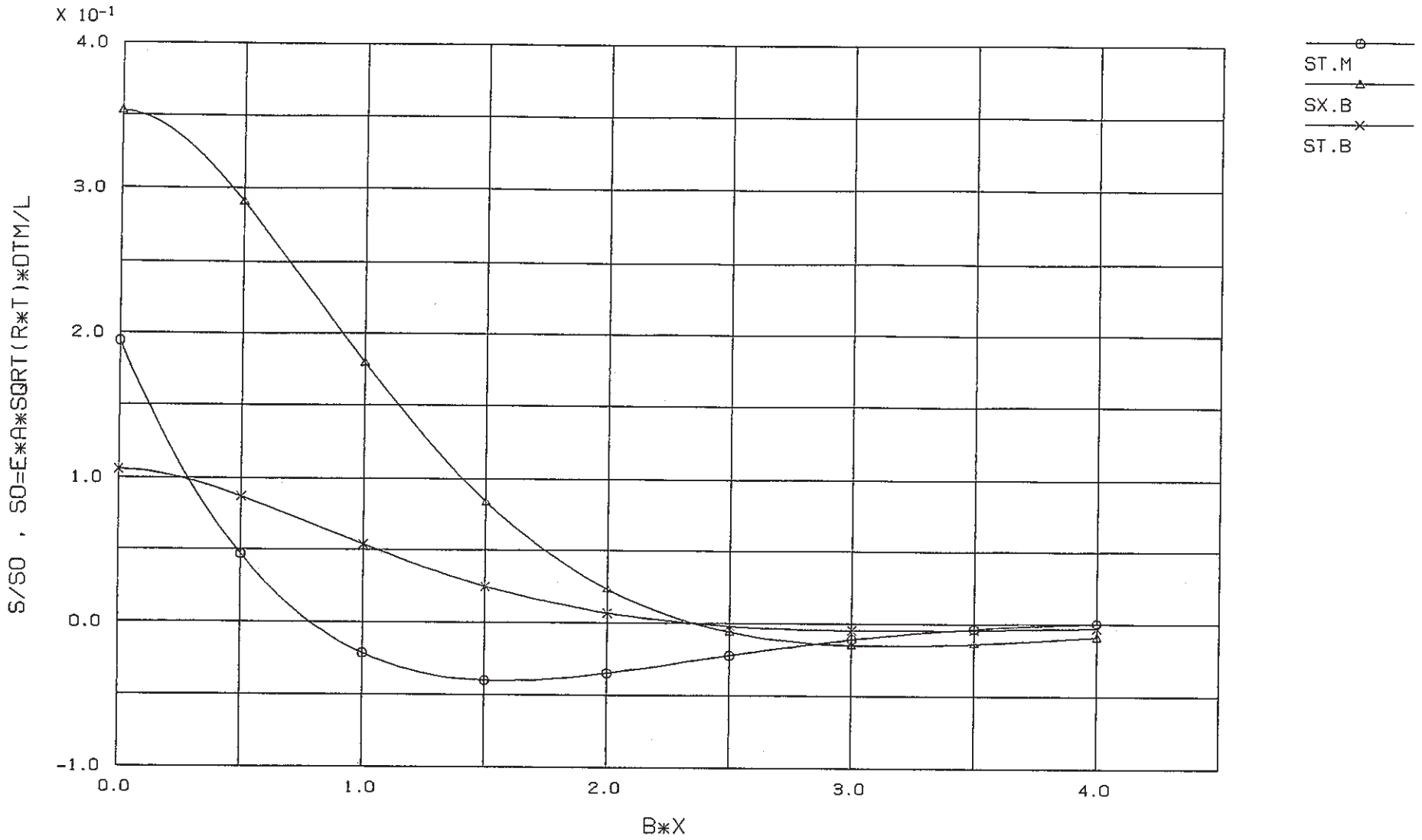
ここで x は左端からの距離とした左右両方向に正とする。右辺第一項 (δT_M の項) を $E\alpha\sqrt{rt}\delta T_M/l$ で除した無次元応力を βx に対しプロットした応力分布を Fig. 1.4.5 に示す。右辺第二項を $E\alpha\sqrt{rt}\delta T_B/l$ で除した無次元応力を βx に対しプロットした応力分布を Fig. 1.4.6 に示す。これらの線図から第一項と第二項を求め、さらに該当位置の公称曲げ応力

$$\sigma_{x, B} = \sigma_{\theta, B} = - \frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)} \quad \text{を加えれば良い。}$$

・ $l > l_A$ の場合、 $x > l_A$ の範囲の $x = l$ 点近傍のランプ区間右端側では、左端の効果が無視でき、応力分布は次のように近似できる。

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta, M} \approx - \frac{E\alpha\sqrt{rt}\delta T_M/l}{4[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \phi(\beta|x-l|) - \frac{(1+\nu)E\alpha\sqrt{rt}\delta T_B/l}{8[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \phi(\beta|x-l|) \\ \sigma_{x, B} \approx - \frac{3E\alpha\sqrt{rt}\delta T_M/l}{4[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \phi(\beta|x-l|) + \frac{E\alpha\sqrt{rt}\delta T_B/l}{8(1-\nu)[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \phi(\beta|x-l|) \\ \qquad \qquad \qquad - \frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)} \\ \sigma_{\theta, B} \approx - \frac{3\nu E\alpha\sqrt{rt}\delta T_M/l}{4[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \phi(\beta|x-l|) + \frac{\nu E\alpha\sqrt{rt}\delta T_B/l}{8(1-\nu)[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \phi(\beta|x-l|) \\ \qquad \qquad \qquad - \frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)} \end{array} \right] \quad (1.23)$$

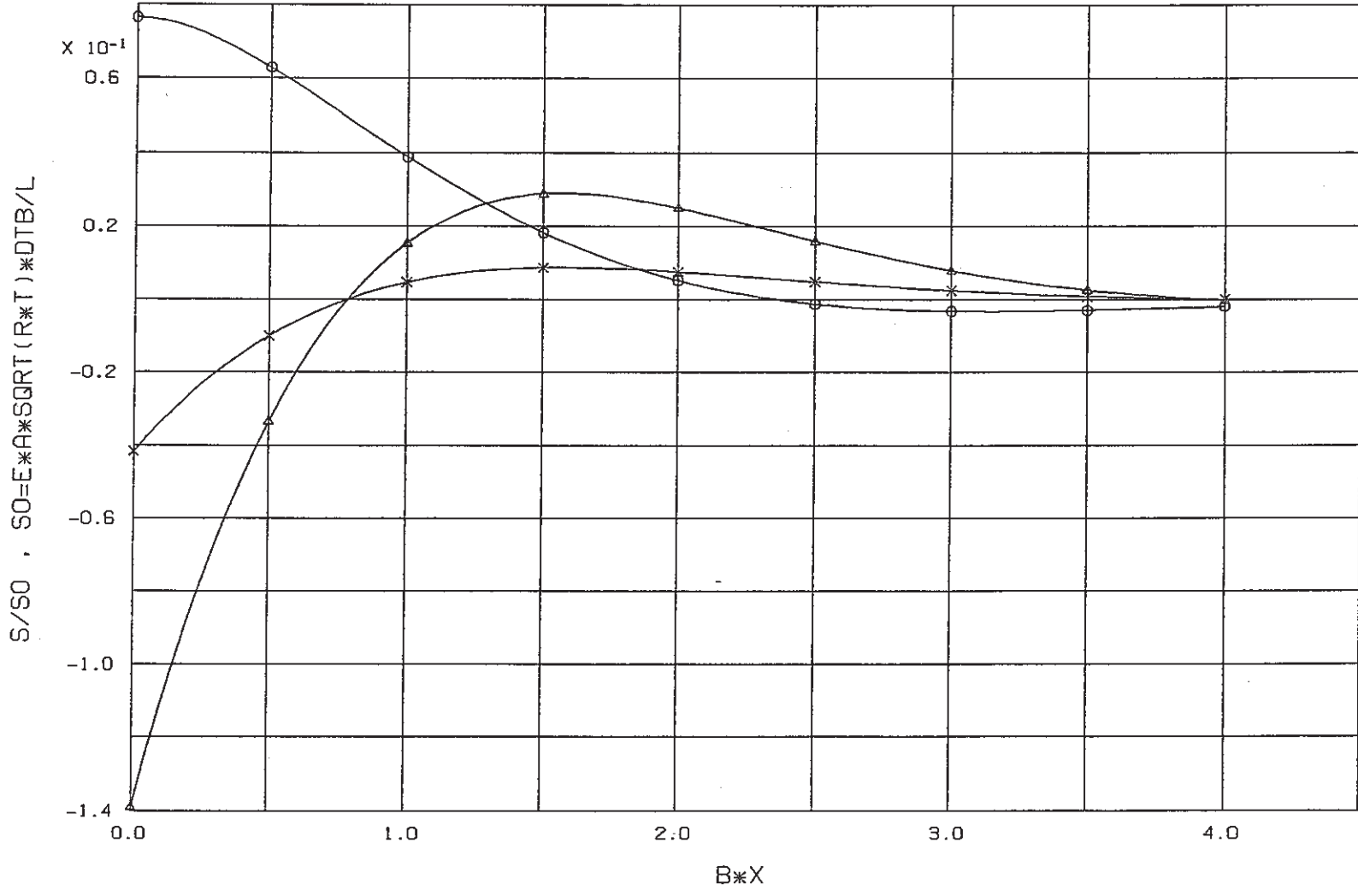
第一項と第二項は (1.22) 式と逆符号となる。Fig. 1.4.5 と Fig. 1.4.6 から無次元応力を読み取り符号を逆にして、 $E\alpha\sqrt{rt}\delta T_M/l$ と $E\alpha\sqrt{rt}\delta T_B/l$ を乗じて重ね合わせ、さらに該当位置の公称曲げ応力を加えればよい。



THERMAL STRESSES BY AXIAL RAMP TEMPERATURE

Fig. 1.4.5 Thermal stresses for ramp distribution of T_M

○
ST.M
—
▲
SX.B
—
×
ST.B



THERMAL STRESSES BY AXIAL RAMP TEMPERATURE(TB)

Fig.1.4.6 Thermal stresses for ramp distribution of T_b

(5) 簡易解析プログラム 1

板厚平均温度が Fig. 1.4.1 のように、等価線形内外面温度差が Fig. 1.4.4 のようにそれぞれランプ状に分布する場合の区間の両端 ($x=0$, $x=l$) の応力を計算するプログラムを作成した。温度データは付録 A3 の「構造設計用複数位置温度計算プログラム」によりディスク上に作成された温度ファイルから読み込む。

入力データカードイメージは次の通りである。

カード 1 (3 F 10.0) E , PR , AL
 E (kg/mm²) ν α (mm/mm°C)

カード 2 (3 F 10.0, 2 i 5) RR , TH , DL , N1, N2
 r (mm) t (mm) l (mm)

N1, N2 は位置識別番号である。T_{M1}, T_{B1} として温度ファイル中の位置 N1 の計算結果を引用し、T_{M2}, T_{B2} として位置 N2 の計算結果を引用する。N1 (N2) > 0 の時は母材の温度を用い、N1 (N2) < 0 の時は熱しゃへい板の温度を用いる。

プログラムリスト、付録 A3 のノズルの位置 1 (断面 1) と位置 2 (断面 2) の中間のセーフエンド部について熱しゃへい板の剛性を無視して、 $l = 120$ mm のテーバ部にランプ状の温度分布が生じたものと仮定した場合の熱応力計算例 (JCL および入力データリスト、計算結果リスト) を次頁以降に示す。FINAS による詳細解析結果 (Ref 2) との比較を Table. 1.4.1 (配管側)、Table. 1.4.2 (ノズル側) に示す。

温度データをカード入力とする場合は、プログラムの該当箇所を変更すれば良い。

(6) 簡易解析プログラム 2

Fig. 1.4.1 のランプ状 T_M(x) と Fig. 1.4.5 のランプ状 T_B(x) が重なる場合の $-\ell \leq x \leq 2\ell$ 区間の変位、勾配および応力分布を算出するプログラムを作成した。区間 $(-\ell, 2\ell)$ を 30 等分する 31 点について (1.21) 式による計算値を出力する。勾配は原点 ($x=0$) 側から見た勾配である。

入力データカードイメージは次の通りである。

カード 1 (5 F 10.0) R , TH , E , PR , A
 r t E ν α

カード 2 (5 F 10.0) TM1, TM2, TB1, TB2, DL
 T_{M1} T_{M2} T_{B1} T_{B2} l

プログラムリスト、JCL および入力データ例、計算結果例を 64 ~ 66 頁に示す。

プログラム1リスト(1/2)

```

C-----
C   THERMAL STRESS CALCULATION BY CYLINDRICAL SHELL THEORY
C   AXIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION - RAMP DISTRIBUTION OF T.M , T.B
C-----
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION YD(200),PTIME(200),TM(2,200),TB(2,200)
C-----
500  FORMAT(3F10.0,2I5)
600  FORMAT(1H1/14X,'E=',F8.1,'KG/MM2',3X,'PR=',F6.3,3X,'AL=',G11.4,
+ '/DEG',3X,'R=',F8.2,'MM',3X,'TH=',F6.2,'MM',3X,'L=',F6.1,'MM',
+ '//,14X,'TIME',7X,'TM1',5X,'TB1',4X,'SX1B',4X,'ST1M',4X,'ST1B'
+
+      10X,'TM2',5X,'TB2',4X,'SX2B',4X,'ST2M',4X,'ST2B'/)
610  FORMAT(10X,F8.1,2X,5F8.2,5X,5F8.2)
C-----
      DATA INPUT AND CONSTANT VALUE SET
      READ(5,500) E,PR,AL
      READ(5,500) RR,TH,DL,N1,N2
      IF(N1) 10,10,20
10   NN1=-10*N1+5
      GO TO 30
20   NN1= 10*N1+1
30   IF(N2) 40,40,50
40   NN2=-10*N2+5
      GO TO 60
50   NN2= 10*N2+1
60   CONTINUE
      SQ2=SQRT(3*(1-PR**2))
      SQ1=SQRT(SQ2)
      SQ3=SQ1*SQ2
      EART=E*AL*SQRT(RR*TH)
      CB=-E*AL/(2*(1-PR))
      BL=SQ1/SQRT(RR*TH)*DL
      F1=1-EXP(-BL)*(COS(BL)+SIN(BL))
      F2=1-EXP(-BL)*(COS(BL)-SIN(BL))
C-----
      READ TEMPERATURE RESULTS FILE(20)
      READ(20) NTIME,(PTIME(I),I=1,NTIME)
100  READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      IF(NY.EQ.NN1) GO TO 110
      GO TO 100
110  DO 120 I=1,NTIME
      TM(1,I)=YD(I)
120  CONTINUE
      READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      DO 130 I=1,NTIME
      TB(1,I)=YD(I)
130  CONTINUE
      REWIND(20)
150  READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      IF(NY.EQ.NN2) GO TO 160
      GO TO 150
160  DO 170 I=1,NTIME
      TM(2,I)=YD(I)
170  CONTINUE
      READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      DO 180 I=1,NTIME
      TB(2,I)=YD(I)
180  CONTINUE
      REWIND(20)
C-----
      CALCULATION START

```

プログラム1リスト(2/2)

```

WRITE(6,600) E,PR,AL,RR,TH,DL
DO 400 IT=1,NTIME
TIME=PTIME(IT)
TM1=TM(1,IT)
TB1=TB(1,IT)
TM2=TM(2,IT)
TB2=TB(2,IT)
C----- COMPUTE STRESSES AT X=0 , X=L
DTL=EART*(TM2-TM1)/DL
DTBL=EART*(TB2-TB1)/DL
ST1M=DTL/(4*SQ1)*F2+DTBL*(1+PR)/(8*SQ3)*F1
SXB=3*DTL/(4*SQ3)*F1-DTBL/(1-PR)/(8*SQ1)*F2
SX1B=CB*TB1+SXB
ST1B=CB*TB1+PR*SXB
ST2M=-ST1M
SX2B=CB*TB2-SXB
ST2B=CB*TB2-PR*SXB
WRITE(6,610) TIME, TM1, TB1, SX1B, ST1M, ST1B,
+ TM2, TB2, SX2B, ST2M, ST2B
400 CONTINUE
STOP
END

```

JCL および入力データリスト

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6
//Q3020ST2 JOB (GENERAL),MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3020,
// ATTR=(TO,CO,WO)
//COPY EXEC PGM=JSDGENER
//SYSPRINT DD SYSOUT=*
//SYSIN DD DUMMY ← 温度ファイル
//SYSUT1 DD DSN=Q3020.N1TR2.POST,UNIT=DASD,DISP=SHR
//SYSUT2 DD DSN=&&POST,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),
// SPACE=(TRK,(5,10),RLSE)
//*
//CLG EXEC FORT7CLG
//FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=* ← プログラム1
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3020.TEST.FORT(ST2),DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUMMY
//GO.FT20F001 DD DSN=&&POST,UNIT=WORK,DISP=(OLD,DELETE)
//GO.FT06F001 DD SYSOUT=*
//GO.SYSIN DD *
1.67D4 0.298 19.93D-6
497.7 20.6 120.0 1 2
/*
//

```

下線部はユーザーが変更すべき箇所である。

E= 16700.0KG/MM2 PR= 0.298 AL= 0.1993E-04/DEG R= 497.70MM TH= 20.60MM L= 120.0MM

TIME	TM1	TB1	SX1B	ST1M	ST1B	TM2	TB2	SX2B	ST2M	ST2B
5.0	499.42	-2.48	0.52	0.08	0.57	500.00	-0.01	0.07	-0.08	0.02
10.0	497.94	-7.29	1.55	0.25	1.67	499.96	-0.16	0.22	-0.25	0.09
15.0	495.74	-12.78	2.77	0.47	2.95	499.81	-0.70	0.42	-0.47	0.24
20.0	492.92	-18.33	4.07	0.71	4.26	499.49	-1.67	0.68	-0.71	0.48
25.0	489.54	-23.67	5.36	0.96	5.54	498.97	-3.03	0.97	-0.96	0.79
30.0	485.65	-28.69	6.64	1.23	6.75	498.22	-4.69	1.28	-1.23	1.16
35.0	481.29	-33.38	7.87	1.49	7.90	497.22	-6.57	1.60	-1.49	1.57
40.0	476.51	-37.73	9.07	1.77	8.98	495.99	-8.60	1.92	-1.77	2.00
45.0	471.33	-41.76	10.21	2.04	9.99	494.50	-10.72	2.23	-2.04	2.45
50.0	465.78	-45.49	11.32	2.32	10.94	492.77	-12.88	2.52	-2.32	2.90
55.0	459.90	-48.93	12.37	2.60	11.83	490.80	-15.07	2.80	-2.60	3.34
60.0	453.70	-52.12	13.39	2.88	12.66	488.58	-17.26	3.06	-2.88	3.78
65.0	447.21	-55.06	14.36	3.16	13.44	486.13	-19.42	3.30	-3.16	4.22
70.0	441.05	-55.30	14.77	3.35	13.60	483.45	-21.55	3.45	-3.35	4.61
75.0	435.53	-53.01	14.63	3.46	13.18	480.58	-23.48	3.51	-3.46	4.95
80.0	430.50	-49.84	14.25	3.52	12.54	477.61	-24.99	3.49	-3.52	5.20
85.0	425.88	-46.44	13.78	3.55	11.83	474.59	-26.02	3.40	-3.55	5.34
90.0	421.63	-43.09	13.26	3.57	11.12	471.58	-26.60	3.26	-3.57	5.40
95.0	417.71	-39.90	12.74	3.57	10.43	468.59	-26.83	3.08	-3.57	5.38
100.0	414.09	-36.90	12.22	3.57	9.78	465.64	-26.80	2.88	-3.57	5.32
110.0	407.65	-31.54	11.22	3.54	8.59	459.93	-26.17	2.46	-3.54	5.09
120.0	402.16	-26.94	10.31	3.48	7.55	454.49	-25.13	2.04	-3.48	4.79
130.0	397.46	-23.01	9.47	3.41	6.65	449.35	-23.90	1.65	-3.41	4.47
140.0	393.45	-19.65	8.70	3.32	5.86	444.49	-22.60	1.31	-3.32	4.15
150.0	390.03	-16.78	8.01	3.21	5.18	439.92	-21.31	1.02	-3.21	3.85
160.0	387.11	-14.33	7.38	3.10	4.58	435.63	-20.05	0.77	-3.10	3.57
170.0	384.61	-12.24	6.81	2.99	4.06	431.59	-18.84	0.56	-2.99	3.30
180.0	382.48	-10.45	6.29	2.87	3.61	427.80	-17.70	0.39	-2.87	3.06
190.0	380.66	-8.93	5.81	2.75	3.22	424.25	-16.62	0.24	-2.75	2.84
200.0	379.10	-7.62	5.38	2.62	2.87	420.91	-15.60	0.13	-2.62	2.63
210.0	377.77	-6.51	4.99	2.50	2.57	417.78	-14.64	0.03	-2.50	2.45
220.0	376.64	-5.56	4.62	2.38	2.30	414.84	-13.74	-0.05	-2.38	2.27
230.0	375.67	-4.75	4.29	2.27	2.07	412.08	-12.90	-0.11	-2.27	2.11
240.0	374.84	-4.06	3.99	2.15	1.86	409.49	-12.10	-0.16	-2.15	1.97
250.0	374.13	-3.46	3.71	2.04	1.68	407.06	-11.36	-0.20	-2.04	1.83
260.0	373.53	-2.96	3.45	1.93	1.52	404.78	-10.66	-0.22	-1.93	1.71
270.0	373.02	-2.53	3.22	1.83	1.38	402.63	-10.00	-0.25	-1.83	1.59
280.0	372.58	-2.16	3.00	1.73	1.25	400.63	-9.39	-0.26	-1.73	1.48
290.0	372.20	-1.84	2.79	1.63	1.14	398.74	-8.81	-0.27	-1.63	1.39
300.0	371.88	-1.57	2.61	1.54	1.04	396.97	-8.27	-0.27	-1.54	1.29
350.0	370.85	-0.71	1.86	1.15	0.67	389.63	-6.02	-0.26	-1.15	0.92
400.0	370.39	-0.32	1.33	0.85	0.45	384.29	-4.38	-0.22	-0.85	0.66
450.0	370.18	-0.15	0.96	0.62	0.31	380.40	-3.19	-0.17	-0.62	0.48
500.0	370.08	-0.07	0.69	0.46	0.22	377.57	-2.32	-0.13	-0.46	0.35

計算結果リスト

Table. 1.4.1 Thermal stresses by ramp distribution of temperature

(T_{M1} , T_{B1} side) (kg/mm²)

t (SEC)	簡易解析			F I N A S		
	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$
30	6.64	1.23	6.75	7.24	1.08	6.91
60	13.39	2.88	12.66	14.96	2.59	13.44
70	14.77	3.35	13.60	16.71	3.04	14.72
80	14.25	3.52	12.54	16.30	3.21	13.86
100	12.22	3.57	9.78	14.22	3.26	11.31
120	10.31	3.48	7.55	12.13	3.15	9.13
140	8.70	3.32	5.86	10.33	2.95	7.40
170	6.81	2.99	4.06	8.18	2.59	5.46
200	5.38	2.62	2.87	6.54	2.22	4.09

Table. 1.4.2 Thermal stresses by ramp distribution of temperature

(T_{M2} , T_{B2} side) (kg/mm²)

t (SEC)	簡易解析			F I N A S		
	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$
30	1.28	-1.23	1.16	1.63	-1.59	1.19
60	3.06	-2.88	3.78	4.35	-3.73	3.88
70	3.45	-3.35	4.61	5.08	-4.33	4.74
80	3.49	-3.52	5.20	5.39	-4.50	5.36
100	2.88	-3.57	5.32	4.90	-4.40	5.55
120	2.04	-3.48	4.79	3.96	-4.13	5.08
140	1.31	-3.32	4.15	3.08	-3.81	4.49
170	0.56	-2.99	3.30	2.09	-3.34	3.69
200	0.13	-2.62	2.63	1.43	-2.89	3.03

プログラム2リスト(1/2)

```

C-----
C   THERMAL STRESS CALCULATION BY CYLINDRICAL SHELL THEORY
C   AXIAL RAMP TEMPERATURE DISTRIBUTION OF INFINITE CYLINDER
C-----
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION X(31),TM(31),TB(31)
C-----
      F1(BX)=EXP(-BX)*(COS(BX)+SIN(BX))
      F2(BX)=EXP(-BX)*(COS(BX)-SIN(BX))
      F3(BX)=EXP(-BX)*COS(BX)
      F4(BX)=EXP(-BX)*SIN(BX)
C-----
500  FORMAT(5F10.0)
600  FORMAT(1H1/10X,'THERMAL STRESSES BY AXIAL RAMP TEMPERATURE ',
+ 'DISTRIBUTION ',///,10X,
+ 'INPUT DATA CHECK PRINT',///,15X,'R(MM)',4X,'TH(MM)',
+3X,'E(KG/MM2)',3X,'P.RATIO',4X,'AL(/DEG)',/,
+10X,2F10.2,1PE12.4,0PF10.4,1PE12.4,///,17X,'TM1',7X,'TM2',7X,
+ 'TB1',7X,'TB2',5X,'L(MM)',/,10X,0P5F10.2,///,15X,'X(MM)',5X,
+ 'U(MM)',4X,'I(RAD)',6X,'SX.B',6X,'ST.M',6X,'ST.B'//)
610  FORMAT(10X,0P,F10.2,2F10.6,3F10.2)
      READ(5,500) R,TH,E,PR,AL
      READ(5,500) TM1,TM2,TB1,TB2,DL
      WRITE(6,600) R,TH,E,PR,AL,TM1,TM2,TB1,TB2,DL
C-----
                                CONSTANT DATA SETTING
      PP1=1+PR
      PM1=1-PR
      BT2=SQRT(3*PP1*PM1)/(R*TH)
      BT=SQRT(BT2)
      BT3=BT*BT2
      D=E*TH**3/(12*PP1*PM1)
      DTM=TM2-TM1
      DTB=TB2-TB1
      BL=BT*DL
      F1BL=F1(BL)
      F2BL=F2(BL)
      F3BL=F3(BL)
      F4BL=F4(BL)
C-----
                                SET RAMP TEMPERATURE AND X
      DO 10 K=1,10
        TM(K)=TM1
        TB(K)=TB1
        X(K)=FLOAT(K-1)*DL/10-DL
10  CONTINUE
      DO 20 K=11,21
        TM(K)=TM1+FLOAT(K-11)*DTM/10
        TB(K)=TB1+FLOAT(K-11)*DTB/10
        X(K)=FLOAT(K-11)*DL/10
20  CONTINUE
      DO 30 K=22,31
        TM(K)=TM2
        TB(K)=TB2
        X(K)=FLOAT(K-11)*DL/10
30  CONTINUE
C-----
                                CALCULATION START
      DO 100 K=1,31
        BX=ABS(BT*X(K))
        BXL=ABS(BT*X(K)-BL)

```

プログラム 2 リスト (2 / 2)

```

U=R*AL*TM(K)+R*AL*DTM/(4*BL)*(F2(BX)-F2(BXL))
+   +PP1*AL*DTB/(8*BT3*TH*DL)*(F1(BX)-F1(BXL))
RT=-R*AL*DTM/(2*DL)*(F3(BX)-F3(BXL))
+   -PP1*AL*DTB/(4*BT2*TH*DL)*(F4(BX)-F4(BXL))
IF(K.LE.10) GO TO 50
IF(K.GE.21) GO TO 50
RT=RT+R*AL*DTM/DL*(1-F3(BXL))
+   -PP1*AL*DTB/(2*BT2*TH*DL)*F4(BXL)
50 CONTINUE
DM=D*R*AL*DTM*BT/(2*DL)*(F1(BX)-F1(BXL))
+   -D*PP1*AL*DTB/(4*TH*BL)*(F2(BX)-F2(BXL))
SXB=6*DM/TH**2-E*AL*TB(K)/(2*PM1)
STB=PR*6*DM/TH**2-E*AL*TB(K)/(2*PM1)
STM=E/R*(U-R*AL*TM(K))
WRITE(6,610) X(K),U,RT,SXB,STM,STB
100 CONTINUE
STOP
END
    
```

JCL および入力データリスト

```

-----1-----2-----3-----4-----5-----6
//Q3020ST8 JOB (GENERAL),MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3020,
//  ATTR=(TO,CO,WO)
//CLG EXEC FORT7CLG
//FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=*
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3020.TEST.FORT(ST8),DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUMMY
//GO.FTO6FOO1 DD SYSOUT=*
//GO.SYSIN DD *
      500.0      20.0      1.67D4      0.298      1.993D-5
      0.0       100.0     -100.0     -50.0       100.0
/*
//
    
```

プログラム 2

下線部はユーザーが変更すべき箇所である。

計算結果リスト

THERMAL STRESSES BY AXIAL RAMP TEMPERATURE DISTRIBUTION

INPUT DATA CHECK PRINT

R(MM)	TH(MM)	E(KG/MM2)	P.RATIO	AL(/DEG)		
500.00	20.00	1.6700E+04	0.2980	1.9930E-05		
TM1	TM2	TB1	TB2	L(MM)		
0.00	100.00	-100.00	-50.00	100.00		
X(MM)	U(MM)	I(RAD)	SX.B	ST.M	ST.B	
-100.00	-0.001967	-0.000927	28.19	-0.07	25.04	
-90.00	0.008579	-0.001188	28.78	0.29	25.22	
-80.00	0.021895	-0.001481	29.36	0.73	25.39	
-70.00	0.038294	-0.001804	29.89	1.28	25.55	
-60.00	0.058061	-0.002154	30.34	1.94	25.68	
-50.00	0.081441	-0.002525	30.67	2.72	25.78	
-40.00	0.108616	-0.002911	30.84	3.63	25.83	
-30.00	0.139676	-0.003300	30.80	4.67	25.82	
-20.00	0.174591	-0.003680	30.47	5.83	25.72	
-10.00	0.213181	-0.004032	29.79	7.12	25.52	
0.00	0.255070	0.004336	28.68	8.52	25.19	
10.00	0.299762	0.004599	27.10	6.68	23.89	
20.00	0.346933	0.004828	25.11	4.93	22.46	
30.00	0.396151	0.005006	22.83	3.25	20.95	
40.00	0.446824	0.005117	20.35	1.61	19.38	
50.00	0.498250	0.005155	17.78	0.00	17.78	
60.00	0.549676	0.005117	15.21	-1.61	16.18	
70.00	0.600349	0.005006	12.73	-3.25	14.61	
80.00	0.649567	0.004828	10.45	-4.93	13.10	
90.00	0.696738	0.004599	8.46	-6.68	11.67	
100.00	0.741430	0.004336	6.88	-8.52	10.37	
110.00	0.783319	0.004032	5.77	-7.12	10.04	
120.00	0.821909	0.003680	5.09	-5.83	9.84	
130.00	0.856824	0.003300	4.76	-4.67	9.74	
140.00	0.887884	0.002911	4.71	-3.63	9.73	
150.00	0.915059	0.002525	4.89	-2.72	9.78	
160.00	0.938439	0.002154	5.22	-1.94	9.88	
170.00	0.958206	0.001804	5.67	-1.28	10.01	
180.00	0.974605	0.001481	6.20	-0.73	10.17	
190.00	0.987921	0.001188	6.77	-0.29	10.34	
200.00	0.998467	0.000927	7.37	0.07	10.52	

1.5 軸方向温度分布 (端部近傍)

Fig. 1.5.1 のように、端部にランプ状温度分布が生じた場合とする。

(1) 自由端の場合

左側に一定温度 T_{M0} 、 T_{B0} の円筒が連続する場合の解 (1.21) 式と、端部にモーメント M_0 とせん断力 Q_0 を受ける場合の解 (付録 A 1.2) を重ね合わせると

$$\begin{aligned}
 u(x) = & r\alpha T_M(x) + \frac{r\alpha\delta T_M}{4\beta\ell} \{\phi(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|)\} \\
 & + \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{8\beta^3 t\ell} \{\phi(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|)\} \\
 & + \frac{M_0}{2\beta^2 D} \phi(\beta x) + \frac{Q_0}{2\beta^3 D} \theta(\beta x) \\
 i = r\alpha \frac{dT_M(x)}{dx} - & \frac{r\alpha\delta T_M}{2\ell} \{\theta(\beta x) \pm \theta(\beta|x-\ell|)\} \\
 & (+は 0 \leq x \leq \ell) \\
 & - \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t\ell} \{\zeta(\beta x) \pm \zeta(\beta|x-\ell|)\} \\
 & - \frac{M_0}{\beta D} \theta(\beta x) - \frac{Q_0}{2\beta^2 D} \phi(\beta x)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_x = & \frac{r\alpha\delta T_M D\beta}{2\ell} \{\phi(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|)\} - \frac{D(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta t\ell} \{\phi(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|)\} \\
 & - \frac{D(1+\nu)\alpha}{t} T_B(x) + M_0 \phi(\beta x) + \frac{Q_0}{\beta} \zeta(\beta x) \\
 Q = & - \frac{r\alpha\delta T_M D\beta^2}{\ell} \{\zeta(\beta x) \pm \zeta(\beta|x-\ell|)\} + \frac{D(1+\nu)\alpha\delta T_B}{2t\ell} \{\theta(\beta x) \pm \theta(\beta|x-\ell|)\} \\
 & (+は 0 \leq x \leq \ell) \\
 & - \frac{D(1+\nu)\alpha}{t} \frac{dT_B(x)}{dx} - 2\beta M_0 \zeta(\beta x) + Q_0 \phi(\beta x)
 \end{aligned}$$

となる。(a) 式が自由端の場合の解であるためには

$$\begin{aligned}
 M_x|_{x=0} = & \frac{r\alpha\delta T_M D\beta}{2\ell} \{1 - \phi(\beta\ell)\} - \frac{D(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta t\ell} \{1 - \phi(\beta\ell)\} \\
 & - \frac{D(1+\nu)\alpha}{t} T_{B0} + M_0 = 0
 \end{aligned}$$

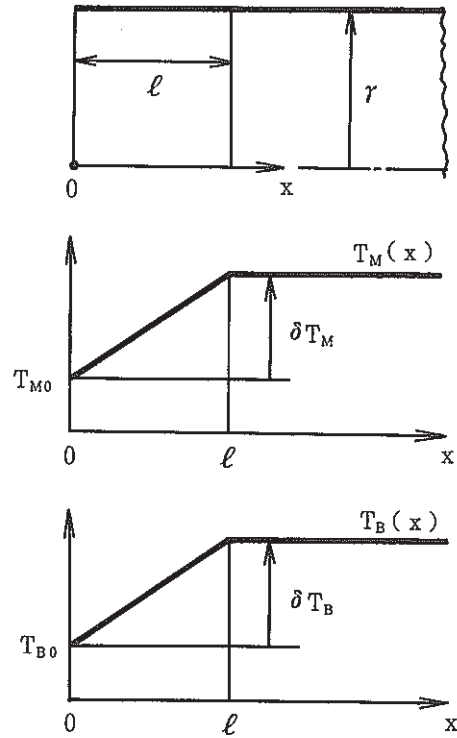


Fig. 1.5.1 Ramp distribution of temperature near the edge of cylinder

(a)

(b)

$$\left[\begin{aligned} Q|_{x=0} &= -\frac{r\alpha\delta T_M D\beta^2}{\ell} \zeta(\beta\ell) + \frac{D(1+\nu)\alpha\delta T_B}{2t\ell} (1+\theta(\beta\ell)) \\ &\quad - \frac{D(1+\nu)\alpha}{t} \frac{\delta T_B}{\ell} + Q_0 = 0 \end{aligned} \right]$$

でなければならない。(b)式を解いて M_0 , Q_0 を求め、(a)式に代入して整理すると、自由端の場合の解が次のように求まる。

$$\left[\begin{aligned} u(x) &= r\alpha T_M(x) + \frac{r\alpha\delta T_M}{4\beta\ell} \{ \varphi(\beta\ell)\phi(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|) + 2\zeta(\beta\ell)\theta(\beta x) \} \\ &\quad + \frac{(1+\nu)\alpha T_{B0}}{2\beta^2 t} \phi(\beta x) + \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{8\beta^3 t\ell} \{ 4\theta(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|) \\ &\quad \quad \quad - \phi(\beta\ell)\phi(\beta x) - 2\theta(\beta\ell)\theta(\beta x) \} \\ i &= r\alpha \frac{dT_M(x)}{dx} - \frac{r\alpha\delta T_M}{2\ell} \{ \varphi(\beta\ell)\theta(\beta x) \pm \theta(\beta|x-\ell|) + \zeta(\beta\ell)\varphi(\beta x) \} \\ &\quad - \frac{(1+\nu)\alpha T_{B0}}{\beta t} \theta(\beta x) - \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t\ell} \{ 2\varphi(\beta x) \pm \zeta(\beta|x-\ell|) \\ &\quad \quad \quad - \phi(\beta\ell)\theta(\beta x) - \theta(\beta\ell)\varphi(\beta x) \} \\ M_D &= \frac{r\alpha\delta T_M D\beta}{2\ell} \{ \varphi(\beta\ell)\varphi(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|) + 2\zeta(\beta\ell)\zeta(\beta x) \} \\ &\quad + \frac{D(1+\nu)\alpha T_{B0}}{t} \varphi(\beta x) + \frac{D(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta t\ell} \{ 4\zeta(\beta x) + \phi(\beta|x-\ell|) \\ &\quad \quad \quad - \phi(\beta\ell)\varphi(\beta x) - 2\theta(\beta\ell)\zeta(\beta x) \} \text{として} \\ M_x &= -\frac{D(1+\nu)\alpha}{t} T_B(x) + M_D, \quad M_\theta = -\frac{D(1+\nu)\alpha}{t} T_B(x) + \nu \cdot M_D \\ \sigma_{\theta, M} &= \frac{E}{r} \{ u - r\alpha T_M(x) \}, \quad \sigma_{x, B} = \frac{6M_x}{t^2}, \quad \sigma_{\theta, B} = \frac{6M_\theta}{t^2} \end{aligned} \right] \quad (1.24)$$

・ $\ell > \ell_A = 2.5\sqrt{rt}$ の場合、 $0 < x < \ell - \ell_A$ の範囲の自由端近傍では δT_M の項が無視でき、応力分布は次のように近似できる。

$$\left[\begin{aligned} \sigma_{\theta, M} &= \frac{E(1+\nu)\alpha T_{B0}}{2\sqrt{3(1-\nu^2)}} \phi(\beta x) + \frac{E(1+\nu)\alpha\sqrt{rt}}{2[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \frac{\delta T_B}{\ell} \theta(\beta x) \\ \sigma_{x, B} &= -\frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)} + \frac{E\alpha T_{B0}}{2(1-\nu)} \varphi(\beta x) + \frac{E\alpha\sqrt{rt}}{2(1-\nu)[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \frac{\delta T_B/\ell}{\ell} \zeta(\beta x) \\ &= -\frac{E\alpha T_{B0}}{2(1-\nu)} \{ 1 - \varphi(\beta x) \} + \frac{E\alpha\sqrt{rt}}{2(1-\nu)[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \frac{\delta T_B/\ell}{\ell} \zeta(\beta x) - \frac{E\alpha\delta T_B}{2(1-\nu)} \frac{x}{\ell} \\ \sigma_{\theta, B} &= -\frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)} + \frac{\nu E\alpha T_{B0}}{2(1-\nu)} \varphi(\beta x) + \frac{\nu E\alpha\sqrt{rt}}{2(1-\nu)[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \frac{\delta T_B/\ell}{\ell} \zeta(\beta x) \\ &= -\frac{E\alpha T_{B0}}{2(1-\nu)} \{ 1 - \nu \cdot \varphi(\beta x) \} + \frac{\nu E\alpha\sqrt{rt}}{2(1-\nu)[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \frac{\delta T_B/\ell}{\ell} \zeta(\beta x) - \frac{E\alpha\delta T_B}{2(1-\nu)} \frac{x}{\ell} \end{aligned} \right] \quad (1.25)$$

これを線図から求める事を考える。上式の右辺第一項を $E\alpha T_{B0}$ で除した無次元応力は1.1節の Fig. 1. 1. 3 から読み取る事ができる。右辺第二項を $E\alpha\sqrt{rt} \delta T_B / \ell$ で除した無次元応力を $\beta\chi$ に対してプロットした応力分布を Fig. 1. 5. 2 に示す。これらを重ねて、さらに曲げ応力

$$\sigma_{x,B} = \sigma_{\theta,B} = - \frac{E\alpha\delta T_B}{2(1-\nu)} \frac{\chi}{\ell} \quad \text{を加えれば良い。}$$

◦ $\ell > \ell_A = 2.5\sqrt{rt}$ の場合、 $\chi > \ell_A$ の範囲の $\chi = \ell$ 点近傍では T_{B0} の項が無視でき、応力分布は1.4節の(1.23)式で近似できる。Fig. 1. 4. 5 と Fig. 1. 4. 6 から無次元応力を読み取り符号を逆にして、 $E\alpha\sqrt{rt} \delta T_M / \ell$ と $E\alpha\sqrt{rt} \delta T_B / \ell$ を乗じ、さらに該当位置の公称曲げ応力

$$\sigma_{x,B} = \sigma_{\theta,B} = - \frac{E\alpha T_B(\chi)}{2(1-\nu)} \quad \text{を加えれば良い。}$$

(例題1) SUS 304 製円筒容器 ($r=500\text{mm}$, $t=20\text{mm}$, $E=1.67 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, $\nu=0.298$, $\alpha=1.993 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$) の自由端近傍にランプ状温度分布 ($T_{M0}=0$, $\delta T_M=100$, $T_{B0}=-20$, $\delta T_B=-30^\circ\text{C}$, $\ell=100\text{mm}$) が生じた。 $\chi=0$ および $\chi=\ell$ 位置の変位, 勾配, 応力を求めよ。

$$\beta = \frac{[3(1-\nu^2)]^{1/4}}{\sqrt{rt}} = 0.012858, \quad \beta\ell = 1.2858$$

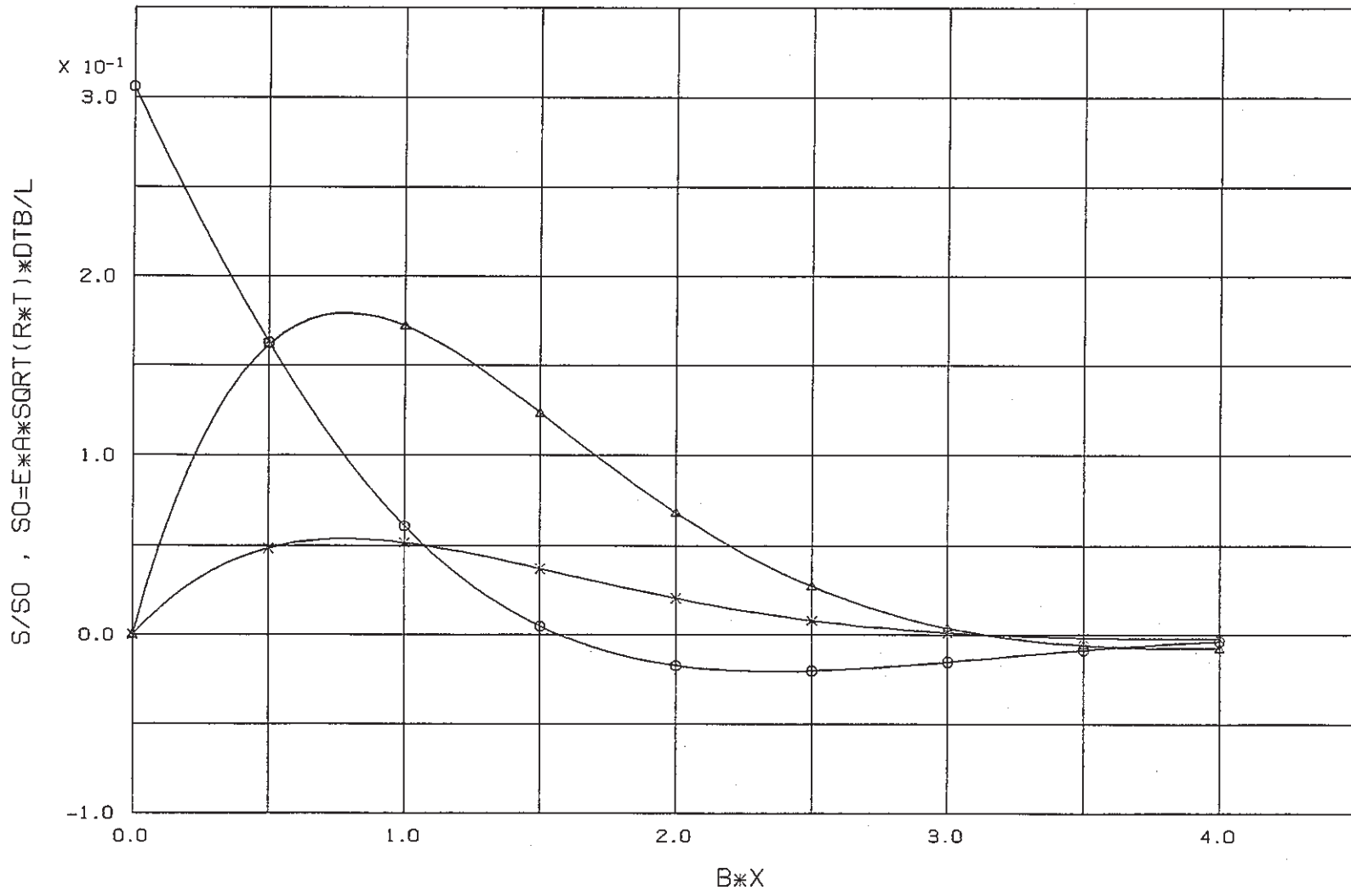
付録A1のTable.A 1.1より $\varphi(\beta\ell) = 0.3430$, $\phi(\beta\ell) = -0.1875$
 $\theta(\beta\ell) = 0.0777$, $\zeta(\beta\ell) = 0.2653$

$$\chi=0 \left[\begin{array}{l} u = 0.0432\text{mm}, \quad i = 0.009953 \text{ radian} \\ \sigma_{\theta,M} = 1.44, \quad \sigma_{x,B} = 0, \quad \sigma_{\theta,B} = 3.33 \text{ kg/mm}^2 \end{array} \right]$$

$$\chi=\ell \left[\begin{array}{l} u = 0.8298\text{mm}, \quad i = 0.004948 \text{ radian} \\ \sigma_{\theta,M} = -5.57, \quad \sigma_{x,B} = -1.36, \quad \sigma_{\theta,B} = 7.91 \text{ kg/mm}^2 \end{array} \right]$$

最大応力は外面の円周方向 $\sigma_{\theta,M+B} = -5.57 - 7.91 = -13.48 \text{ kg/mm}^2$

○
ST.M
△
SX.B
×
ST.B



THERMAL STRESSES BY AXIAL RAMP TEMP. NEAR FREE EDGE

Fig. 1.5.2 Thermal stresses near the free edge for ramp distribution of T_B

(2) 端部が単純支持される場合

(a) 式が単純支持の場合の解であるためには、(a) 式において、

$$\left[\begin{aligned} u(0) &= r\alpha T_{M_0} + \frac{r\alpha\delta T_M}{4\beta\ell} \{1-\phi(\beta\ell)\} + \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{8\beta^3 t \ell} \{1-\phi(\beta\ell)\} \\ &\quad + \frac{M_0}{2\beta^2 D} + \frac{Q_0}{2\beta^3 D} = 0 \\ M_x|_{x=0} &= \frac{r\alpha\delta T_M D\beta}{2\ell} \{1-\phi(\beta\ell)\} - \frac{D(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta t \ell} \{1-\phi(\beta\ell)\} \\ &\quad - \frac{D(1+\nu)\alpha}{t} T_{B_0} + M_0 = 0 \end{aligned} \right] \quad (c)$$

が成立すれば良い。(c) 式を解いて M_0 , Q_0 を求め、(a) 式に代入して整理すると、単純支持の場合の解が次のように求まる。

$$\left[\begin{aligned} u(x) &= r\alpha\{T_M(x) - T_{M_0}\theta(\beta x)\} + \frac{r\alpha\delta T_M}{4\beta\ell} \{\varphi(\beta\ell)\phi(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|)\} \\ &\quad - 2\zeta(\beta\ell)\theta(\beta x)\} - \frac{(1+\nu)\alpha T_{B_0}}{2\beta^2 t} \zeta(\beta x) + \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{8\beta^3 t \ell} \\ &\quad \{2\theta(\beta\ell)\cdot\theta(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|) - \phi(\beta\ell)\phi(\beta x)\} \\ i &= r\alpha \frac{dT_M(x)}{dx} + \beta r\alpha T_{M_0}\varphi(\beta x) - \frac{r\alpha\delta T_M}{2\ell} \{\varphi(\beta\ell)\theta(\beta x) \pm \theta(\beta|x-\ell|)\} \\ &\quad - \zeta(\beta\ell)\varphi(\beta x)\} - \frac{(1+\nu)\alpha T_{B_0}}{2\beta t} \phi(\beta x) - \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t \ell} \{\theta(\beta\ell)\varphi(\beta x) \\ &\quad \pm \zeta(\beta|x-\ell|) - \phi(\beta\ell)\theta(\beta x)\} \quad (+\text{は } 0 \leq x \leq \ell) \\ M_D &= -2\beta^2 D r\alpha T_{M_0} \zeta(\beta x) + \frac{r\alpha\delta T_M D\beta}{2\ell} \{\varphi(\beta\ell)\varphi(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|)\} \\ &\quad - 2\zeta(\beta\ell)\zeta(\beta x)\} + \frac{D(1+\nu)\alpha T_{B_0}}{t} \theta(\beta x) - \frac{D(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta t \ell} \{ \\ &\quad - 2\theta(\beta\ell)\zeta(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|) + \phi(\beta\ell)\varphi(\beta x)\} \quad \text{として} \\ M_x &= -\frac{D(1+\nu)\alpha}{t} T_B(x) + M_D, \quad M_\theta = -\frac{D(1+\nu)\alpha}{t} T_B(x) + \nu \cdot M_D \end{aligned} \right] \quad (1.26)$$

・ $\ell > \ell_A = 2.5\sqrt{rt}$ の場合、 $0 \leq x < \ell - \ell_A$ の範囲の単純支持端近傍では δT_M の項が無視でき、応力分布は次のように近似できる。

$$\left[\sigma_{\theta, M} = -E\alpha T_{M_0}\theta(\beta x) - \frac{E(1+\nu)\alpha T_{B_0}}{2\sqrt{3(1-\nu^2)}} \zeta(\beta x) \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \phi(\beta l) \theta(\beta x) - \theta(\beta l) \phi(\beta x) \} \\
 M_D = & \frac{r\alpha \delta T_M D \beta}{2l} \{ 2\phi(\beta x) - \phi(\beta l) \phi(\beta x) - \phi(\beta |x-l|) + 2\zeta(\beta l) \zeta(\beta x) \} \\
 & - \frac{D(1+\nu)\alpha \delta T_B}{4\beta t l} \{ 2\phi(\beta x) - \phi(\beta |x-l|) - \phi(\beta l) \phi(\beta x) + 2\theta(\beta l) \zeta(\beta x) \} \\
 \text{として} \\
 M_x = & - \frac{D(1+\nu)\alpha}{t} T_B(x) + M_D, \quad M_\theta = - \frac{D(1+\nu)\alpha}{t} T_B(x) + \nu \cdot M_D
 \end{aligned}$$

・ $l > l_A = 2.5 \sqrt{rt}$ の場合, $0 \leq x < l - l_A$ のスライド支持端近傍の応力分布は次のように近似できる。

$$\left(\begin{aligned}
 \sigma_{\theta, M} & \approx \frac{E\alpha\sqrt{rt} \delta T_M / l}{2[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \phi(\beta x) + \frac{E(1+\nu)\alpha\sqrt{rt} \delta T_B / l}{4[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \phi(\beta x) \\
 \sigma_{x, B} & \approx \frac{3E\alpha\sqrt{rt} \delta T_M / l}{2[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \phi(\beta x) - \frac{E\alpha\sqrt{rt} \delta T_B / l}{4(1-\nu)[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \phi(\beta x) - \frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)} \\
 \sigma_{\theta, B} & \approx \frac{3\nu E\alpha\sqrt{rt} \delta T_M / l}{2[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \phi(\beta x) - \frac{\nu E\alpha\sqrt{rt} \delta T_B / l}{4(1-\nu)[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \phi(\beta x) - \frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)}
 \end{aligned} \right) \quad (1.29)$$

右辺第一項を $E\alpha\sqrt{rt} \delta T_M / l$ で除した無次元応力は 1.4 節の Fig. 1. 4. 5 を 2 倍すれば容易に得られる。右辺第二項を $E\alpha\sqrt{rt} \delta T_B / l$ で除した無次元応力は Fig. 1. 4. 6 を 2 倍すれば容易に得られる。これらを重ね合わせて、さらに公称曲げ応力

$$- \frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)} \quad \text{を加えれば良い。}$$

$x = l$ 点近傍では自由端の場合と同様に (1.23) 式で近似できる。

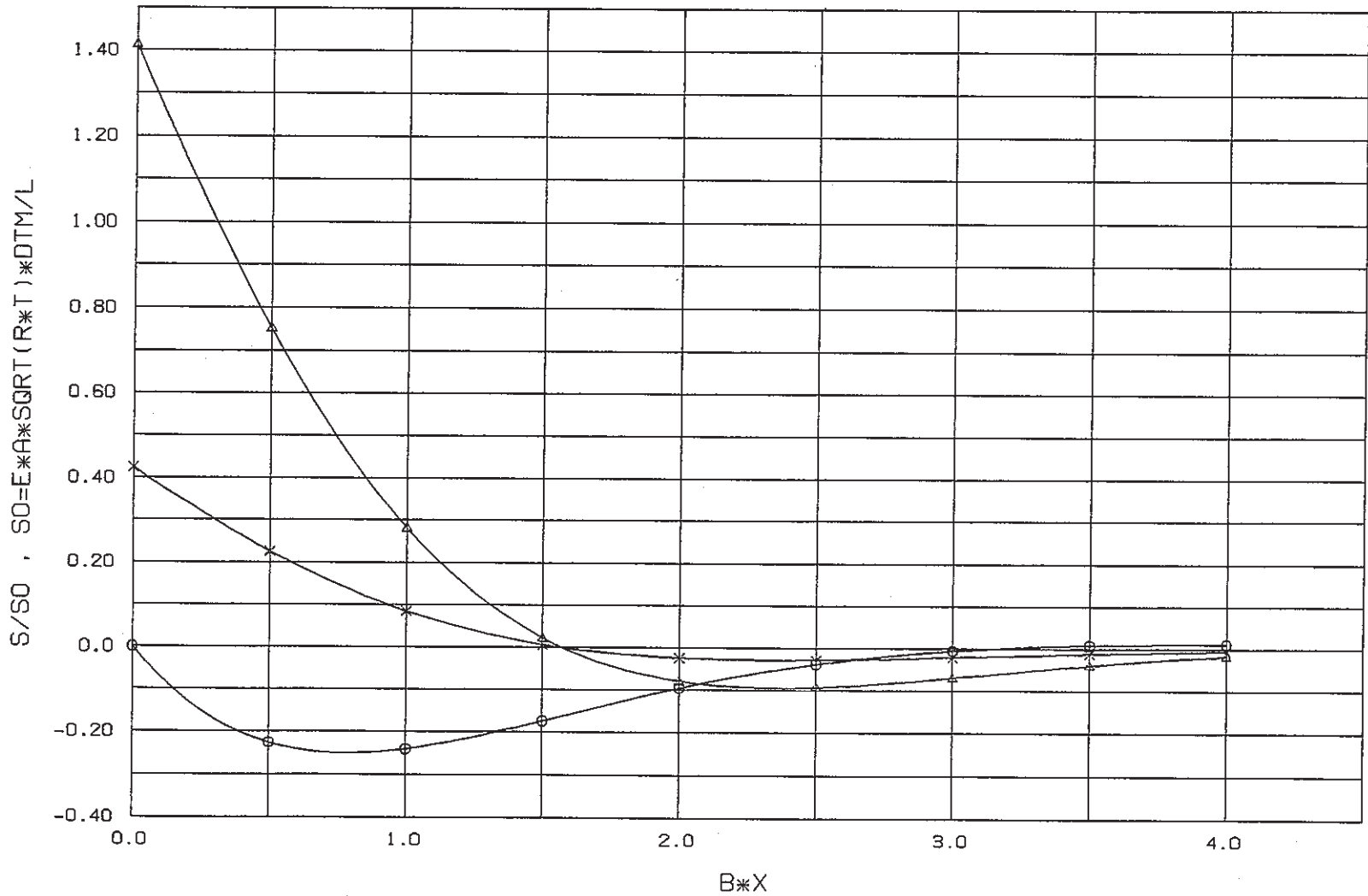
(4) 端部が完全拘束される場合

(a) 式が完全拘束の場合の解であるためには, (a) 式において

$$\left(\begin{aligned}
 u(0) = r\alpha T_{M_0} + \frac{r\alpha \delta T_M}{4\beta l} \{ 1 - \phi(\beta l) \} + \frac{(1+\nu)\alpha \delta T_B}{8\beta^3 t l} \{ 1 - \phi(\beta l) \} \\
 \qquad \qquad \qquad + \frac{M_0}{2\beta^2 D} + \frac{Q_0}{2\beta^3 D} = 0 \\
 i|_{x=0} = r\alpha \frac{\delta T_M}{l} - \frac{r\alpha \delta T_M}{2l} \{ 1 + \theta(\beta l) \} - \frac{(1+\nu)\alpha \delta T_B}{4\beta^2 t l} \zeta(\beta l) \\
 \qquad \qquad \qquad - \frac{M_0}{\beta D} - \frac{Q_0}{2\beta^2 D} = 0
 \end{aligned} \right) \quad (e)$$

が成立すれば良い。(e) 式から M_0, Q_0 を求め, (a) 式に代入して整理すると, 完全拘束の場合の解が次のように求まる。

○
— ST.M
— SX.B
— x
— ST.B



- 75 -

THERMAL STRESSES BY AXIAL RAMP TEMP. NEAR FIXED EDGE

Fig. 1.5.3 Thermal stresses near the fixed edge for ramp distribution of T_M

(例題 2) Fig. 1.5.4 に示すように SUS 304 製の炉容器の上端が固定され 50°C に保たれている。
 Na 温度が Fig. 1.5.5 に示すようにゆっくりと上昇し、510°C に保持されるものとする。規準
 温度を 50°C とし、固定端および Na 液面レベルの応力値を求めよ。

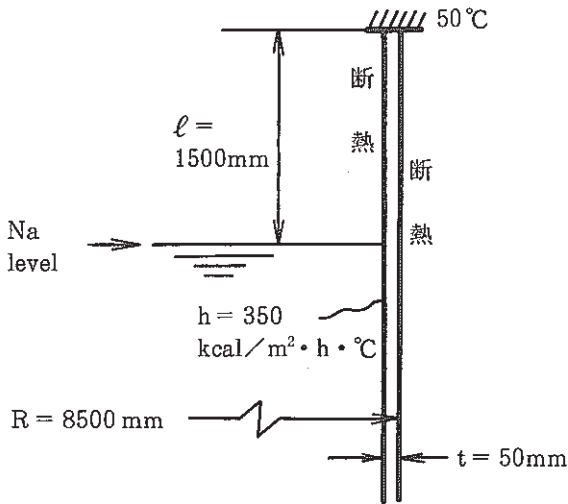


Fig. 1.5.4 Analysis model of reactor vessel

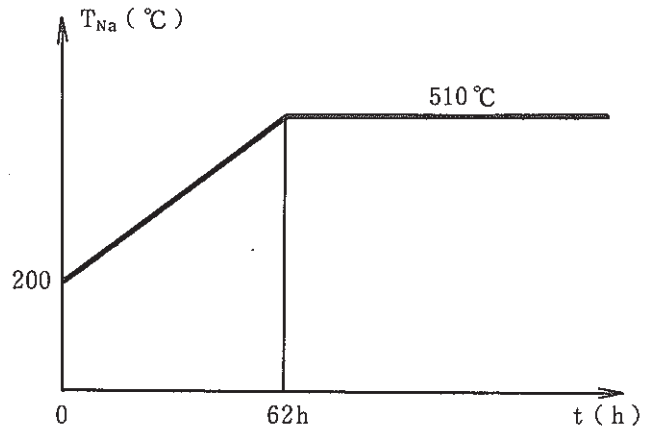


Fig. 1.5.5 Thermal transient of reactor vessel

Na の温度上昇がゆるやかであるので内外面温度差は無視する。

$T_{B0} = 0$, $\partial T_B = 0$, $T_{M0} = 50 - 50 = 0$, $\partial T_M = 510 - 50 = 460$ °C, 350 °C の物性値を用いる。

$E = 1.76 \times 10^4$ kg/mm², $\nu = 0.3$, $\alpha = 1.919 \times 10^{-5}$ /°C

計算結果を FINAS による詳細解析結果と比較して示す。

固定端の応力 (kg/mm²)

	計算値	FINAS
$\sigma_{x,B}$	100.08	92.5
$\sigma_{\theta,M}$	0.0	0.0
$\sigma_{\theta,B}$	30.03	29.1

液面レベルの応力 (kg/mm²)

	計算値	FINAS
$\sigma_{x,B}$	-28.87	-24.7
$\sigma_{\theta,M}$	-13.58	-10.3
$\sigma_{\theta,B}$	-8.66	-8.0

FINAS による解析では、QAX 8 要素を使用し、伝熱解析および応力解析とも物性値の温度依存性が考慮されている。FINAS による温度分布解析結果を Fig. 1.5.6 に示す。

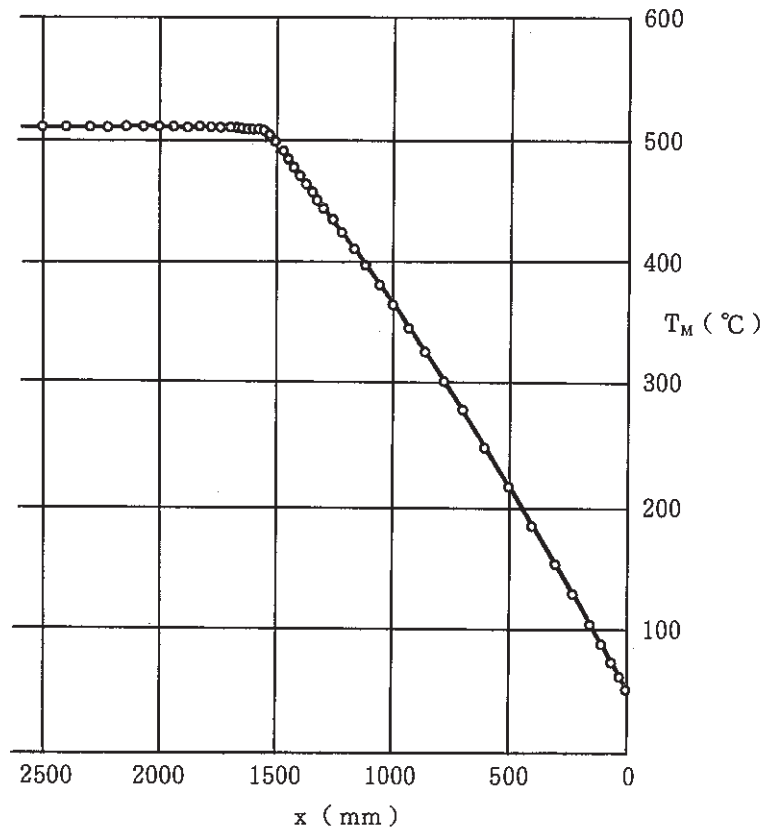


Fig. 1.5.6 Axial temperature distribution by FINAS

(4) 簡易解析プログラム

以上の理論解を用いて、端部近傍にランプ状温度分布が生じた場合の熱応力を計算するプログラムを作成した。入力データカードイメージは次のとおりである。

◦カード1 (5F10.0) R , TH , E , PR, AL

r (mm), t (mm), E(kg/mm²), ν, α(°/°C)

◦カード2 (5F10.0) TMO , DTM , TBO , DTB , DL

T_{M0}(°C), δT_M(°C), T_{B0}(°C), δT_B(°C), ℓ (mm)

x = 0 から x = 2ℓ までの区間を20等分する21点の位置の応力を計算してプリント出力する。4種類の端部拘束条件すべてについて計算する。

プログラムリスト、例題2に対するJCLおよび入力データリスト、例題1および例題2の計算結果リストを次頁以降に示す。

温度データはカード入力としたが、付録A3の「構造設計用複数位置温度計算プログラム」により作成された非定常熱伝導計算結果ファイルから引用したい場合は、1.4節、1.7節、1.8節のプログラムを参考にして、プログラムの該当箇所を修正すれば良い。

プログラムリスト (1 / 3)

```

C-----
C   THERMAL STRESS CALCULATION BY CYLINDRICAL SHELL THEORY
C   AXIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION NEAR EDGE OF CYLINDER
C-----
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION X(21),CU(21),CI(21),CM(21),TM(21),TB(21)
C-----
      F1(BX)=EXP(-BX)*(COS(BX)+SIN(BX))
      F2(BX)=EXP(-BX)*(COS(BX)-SIN(BX))
      F3(BX)=EXP(-BX)*COS(BX)
      F4(BX)=EXP(-BX)*SIN(BX)
C-----
500 FORMAT(5F10.0)
510 FORMAT(10X,'INPUT DATA CHECK PRINT',//,15X,'R(MM)',4X,'TH(MM)',
+3X,'E(KG/MM2)',3X,'P.RATIO',4X,'AL(/DEG)',/,
+10X,2F10.2,1PE12.4,OPF10.4,1PE12.4,/,17X,'TMO',7X,'DTM',7X,
+'TBO',7X,'DTB',5X,'L(MM)',/,10X,OP5F10.2)
600 FORMAT(1H1/10X,'THERMAL STRESSES BY AXIAL TEMPERATURE ',
+'DISTRIBUTION NEAR EDGE'/)
610 FORMAT(/10X,'CALCULATION FOR FREE EDGE',//,15X,
+'X(MM)',5X,'U(MM)',4X,'I(RAD)',6X,'SX.B',6X,'ST.M',6X,'ST.B')
620 FORMAT(/10X,'CALCULATION FOR SIMPLY SUPPORTED EDGE',//,15X,
+'X(MM)',5X,'U(MM)',4X,'I(RAD)',6X,'SX.B',6X,'ST.M',6X,'ST.B')
630 FORMAT(/10X,'CALCULATION FOR SLIDER SUPPORTED EDGE',//,15X,
+'X(MM)',5X,'U(MM)',4X,'I(RAD)',6X,'SX.B',6X,'ST.M',6X,'ST.B')
640 FORMAT(/10X,'CALCULATION FOR FIXED EDGE',//,15X,
+'X(MM)',5X,'U(MM)',4X,'I(RAD)',6X,'SX.B',6X,'ST.M',6X,'ST.B')
650 FORMAT(10X,F10.2,F10.4,F10.6,3F10.2)
      WRITE(6,600)
      READ(5,500) R,TH,E,PR,AL
      READ(5,500) TMO,DTM,TBO,DTB,DL
      WRITE(6,510) R,TH,E,PR,AL,TMO,DTM,TBO,DTB,DL
C-----
                                CONSTANT DATA SETTING
      PP1=1+PR
      PM1=1-PR
      BT2=SQRT(3*PP1*PM1)/(R*TH)
      BT=SQRT(BT2)
      BT3=BT*BT2
      D=E*TH**3/(12*PP1*PM1)
      BL=BT*DL
C-----
                                CALCULATION FOR INFINITE CYLINDER
      DO 50 K=1,21
      X(K)=FLOAT(K-1)*DL/10
      BX=BT*X(K)
      BLX=ABS(BX-BL)
      TM(K)=TMO+FLOAT(K-1)*DTM/10
      TB(K)=TBO+FLOAT(K-1)*DTB/10
      IF(K.LE.11) GO TO 10
      TM(K)=TMO+DTM
      TB(K)=TBO+DTB
10  CONTINUE
      CU(K)=R*AL*TM(K)+R*AL*DTM/(4*BL)*(F2(BX)-F2(BLX))
+      +PP1*AL*DTB/(8*BT3*TH*DL)*(F1(BX)-F1(BLX))
      CI(K)=R*AL*DTM/DL-R*AL*DTM/(2*DL)*(F3(BX)+F3(BLX))
+      -PP1*AL*DTB/(4*BT2*TH*DL)*(F4(BX)+F4(BLX))
      IF(K.LE.11) GO TO 20
      CI(K)=CI(K)-R*AL*DTM/DL*(1-F3(BLX))
+      +PP1*AL*DTB/(2*BT2*TH*DL)*F4(BLX)

```

プログラムリスト (2 / 3)

```

20 CONTINUE
  CM(K)=R*AL*DTM*D*BT/(2*DL)*(F1(BX)-F1(BLX))
+   -D*PP1*AL*DTB/(4*BT*TH*DL)*(F2(BX)-F2(BLX))
50 CONTINUE
  CMO=CM(1)-D*PP1*AL/TH*TBO
  CQO=-R*AL*DTM*D*BT2/DL*F4(BL)
+   -D*PP1*AL*DTB/(2*TH*DL)*(1-F3(BL))
C-----
  WRITE(6,610)
  DM=-CMO
  DQ=-CQO
  DO 100 K=1,21
  BX=BT*X(K)
  DU=CU(K)+DM/(2*BT2*D)*F2(BX)+DQ/(2*BT3*D)*F3(BX)
  DI=CI(K)-DM/(BT*D)*F3(BX)-DQ/(2*BT2*D)*F1(BX)
  DMX=CM(K)+DM*F1(BX)+DQ/BT*F4(BX)
  STM=E*(DU-R*AL*TM(K))/R
  SXB=6*DMX/TH**2-E*AL*TB(K)/(2*PM1)
  STB=6*PR*DMX/TH**2-E*AL*TB(K)/(2*PM1)
  WRITE(6,650) X(K),DU,DI,SXB,STM,STB
100 CONTINUE
C-----
  WRITE(6,620)
  DM=-CMO
  DQ=-2*BT3*D*CU(1)-BT*DM
  DO 200 K=1,21
  BX=BT*X(K)
  DU=CU(K)+DM/(2*BT2*D)*F2(BX)+DQ/(2*BT3*D)*F3(BX)
  DI=CI(K)-DM/(BT*D)*F3(BX)-DQ/(2*BT2*D)*F1(BX)
  DMX=CM(K)+DM*F1(BX)+DQ/BT*F4(BX)
  STM=E*(DU-R*AL*TM(K))/R
  SXB=6*DMX/TH**2-E*AL*TB(K)/(2*PM1)
  STB=6*PR*DMX/TH**2-E*AL*TB(K)/(2*PM1)
  WRITE(6,650) X(K),DU,DI,SXB,STM,STB
200 CONTINUE
C-----
  WRITE(6,600)
  WRITE(6,630)
  DQ=-CQO
  DM=BT*D*CI(1)-DQ/(2*BT)
  DO 300 K=1,21
  BX=BT*X(K)
  DU=CU(K)+DM/(2*BT2*D)*F2(BX)+DQ/(2*BT3*D)*F3(BX)
  DI=CI(K)-DM/(BT*D)*F3(BX)-DQ/(2*BT2*D)*F1(BX)
  DMX=CM(K)+DM*F1(BX)+DQ/BT*F4(BX)
  STM=E*(DU-R*AL*TM(K))/R
  SXB=6*DMX/TH**2-E*AL*TB(K)/(2*PM1)
  STB=6*PR*DMX/TH**2-E*AL*TB(K)/(2*PM1)
  WRITE(6,650) X(K),DU,DI,SXB,STM,STB
300 CONTINUE
C-----
  WRITE(6,640)
  DM=2*BT2*D*CU(1)+2*BT*D*CI(1)
  DQ=-4*BT3*D*CU(1)-2*BT2*D*CI(1)
  DO 400 K=1,21
  BX=BT*X(K)
  DU=CU(K)+DM/(2*BT2*D)*F2(BX)+DQ/(2*BT3*D)*F3(BX)
  DI=CI(K)-DM/(BT*D)*F3(BX)-DQ/(2*BT2*D)*F1(BX)

```


プログラムリスト (3 / 3)

```

DMX=CM(K)+DM*F1(BX)+DQ/BT*F4(BX)
STM=E*(DU-R*AL*TM(K))/R
SXB=6*DMX/TH**2-E*AL*TB(K)/(2*PM1)
STB=6*PR*DMX/TH**2-E*AL*TB(K)/(2*PM1)
WRITE(6,650) X(K),DU,DI,SXB,STM,STB
400 CONTINUE
C----- CALCULATION END
STOP
END

```

JCL および入力データリスト (例題 2)

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+
//Q3020ST7 JOB (GENERAL),MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3020,
//  ATTR=(TO,CO,WO) ←ユーザーが変更すべき箇所
//CLG EXEC FORT7CLG
//FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=*
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3020.TEST.FORT(ST7),DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUMMY ←プログラム
//GO.FTO6FOO1 DD SYSOUT=*
//GO.SYSIN DD *
      8475.0      50.0      1.76D4      0.300      1.919D-5
      0.0        460.0      0.0        0.0        1500.0
/*
//

```

計算結果リスト (例題1, 1/2)

THERMAL STRESSES BY AXIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION NEAR EDGE

INPUT DATA CHECK PRINT

R(MM)	TH(MM)	E(KG/MM ²)	P.RATIO	AL(/DEG)
500.00	20.00	1.6700E+04	0.2980	1.9930E-05
TMO	DTM	TBO	DTB	L(MM)
0.00	100.00	-20.00	-30.00	100.00

CALCULATION FOR FREE EDGE

X(MM)	U(MM)	I(RAD)	SX.B	ST.M	ST.B
0.00	0.0432	0.009953	0.00	1.44	3.33
10.00	0.1413	0.009674	-0.04	1.39	3.81
20.00	0.2365	0.009351	-0.17	1.24	4.28
30.00	0.3282	0.008981	-0.37	0.98	4.72
40.00	0.4160	0.008560	-0.63	0.58	5.14
50.00	0.4992	0.008084	-0.92	0.03	5.55
60.00	0.5775	0.007554	-1.21	-0.68	5.96
70.00	0.6501	0.006970	-1.46	-1.58	6.39
80.00	0.7167	0.006335	-1.62	-2.69	6.84
90.00	0.7767	0.005658	-1.61	-4.01	7.34
100.00	0.8298	0.004948	-1.36	-5.57	7.91
110.00	0.8757	0.004241	-0.81	-4.04	8.08
120.00	0.9147	0.003570	-0.02	-2.73	8.32
130.00	0.9472	0.002948	0.94	-1.65	8.60
140.00	0.9738	0.002382	2.00	-0.76	8.92
150.00	0.9951	0.001874	3.11	-0.05	9.25
160.00	1.0115	0.001427	4.22	0.50	9.58
170.00	1.0238	0.001040	5.30	0.91	9.90
180.00	1.0325	0.000711	6.32	1.20	10.20
190.00	1.0382	0.000435	7.27	1.39	10.49
200.00	1.0414	0.000209	8.15	1.50	10.75

CALCULATION FOR SIMPLY SUPPORTED EDGE

X(MM)	U(MM)	I(RAD)	SX.B	ST.M	ST.B
0.00	0.0000	0.010508	0.00	0.00	3.33
10.00	0.1037	0.010221	-0.34	0.13	3.73
20.00	0.2042	0.009876	-0.68	0.16	4.12
30.00	0.3010	0.009473	-1.04	0.07	4.52
40.00	0.3935	0.009012	-1.40	-0.17	4.91
50.00	0.4811	0.008493	-1.74	-0.57	5.30
60.00	0.5632	0.007917	-2.06	-1.16	5.71
70.00	0.6392	0.007287	-2.30	-1.95	6.14
80.00	0.7087	0.006608	-2.42	-2.95	6.60
90.00	0.7712	0.005888	-2.37	-4.20	7.12
100.00	0.8264	0.005139	-2.06	-5.68	7.71
110.00	0.8740	0.004395	-1.44	-4.09	7.89
120.00	0.9144	0.003692	-0.58	-2.74	8.15
130.00	0.9481	0.003042	0.45	-1.62	8.46
140.00	0.9755	0.002450	1.58	-0.70	8.79
150.00	0.9973	0.001921	2.75	0.03	9.14
160.00	1.0141	0.001457	3.92	0.59	9.49
170.00	1.0266	0.001055	5.06	1.01	9.83
180.00	1.0354	0.000714	6.13	1.30	10.15
190.00	1.0411	0.000429	7.13	1.49	10.45
200.00	1.0442	0.000197	8.04	1.59	10.72

計算結果リスト (例題1, 2/2)

THERMAL STRESSES BY AXIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION NEAR EDGE

CALCULATION FOR SLIDER SUPPORTED EDGE

X(MM)	U(MM)	I(RAD)	SX.B	ST.M	ST.B
0.00	0.4302	0.000000	23.45	14.37	10.32
10.00	0.4352	0.000994	23.06	11.21	10.70
20.00	0.4498	0.001909	21.98	8.37	10.88
30.00	0.4730	0.002711	20.41	5.81	10.91
40.00	0.5036	0.003379	18.48	3.51	10.83
50.00	0.5401	0.003896	16.34	1.40	10.69
60.00	0.5810	0.004256	14.12	-0.56	10.53
70.00	0.6247	0.004455	11.93	-2.43	10.38
80.00	0.6696	0.004500	9.89	-4.26	10.27
90.00	0.7142	0.004401	8.10	-6.10	10.24
100.00	0.7572	0.004175	6.68	-7.99	10.31
110.00	0.7974	0.003864	5.71	-6.65	10.02
120.00	0.8343	0.003511	5.13	-5.42	9.85
130.00	0.8676	0.003137	4.88	-4.31	9.78
140.00	0.8970	0.002756	4.89	-3.32	9.78
150.00	0.9227	0.002381	5.10	-2.47	9.84
160.00	0.9447	0.002022	5.46	-1.73	9.95
170.00	0.9632	0.001686	5.93	-1.11	10.09
180.00	0.9785	0.001376	6.46	-0.60	10.25
190.00	0.9908	0.001097	7.02	-0.19	10.41
200.00	1.0005	0.000850	7.60	0.13	10.59

CALCULATION FOR FIXED EDGE

X(MM)	U(MM)	I(RAD)	SX.B	ST.M	ST.B
0.00	0.0000	0.000000	49.53	0.00	18.09
10.00	0.0115	0.002242	42.85	-2.94	16.60
20.00	0.0435	0.004084	36.35	-5.20	15.16
30.00	0.0919	0.005542	30.16	-6.91	13.81
40.00	0.1531	0.006633	24.38	-8.20	12.59
50.00	0.2235	0.007384	19.10	-9.18	11.52
60.00	0.2997	0.007822	14.36	-9.96	10.60
70.00	0.3790	0.007978	10.22	-10.64	9.87
80.00	0.4585	0.007888	6.71	-11.31	9.32
90.00	0.5360	0.007585	3.89	-12.05	8.98
100.00	0.6096	0.007109	1.79	-12.92	8.85
110.00	0.6778	0.006520	0.43	-10.64	8.45
120.00	0.7398	0.005875	-0.28	-8.57	8.24
130.00	0.7952	0.005205	-0.48	-6.72	8.18
140.00	0.8439	0.004536	-0.28	-5.10	8.24
150.00	0.8860	0.003887	0.23	-3.69	8.39
160.00	0.9218	0.003272	0.96	-2.50	8.61
170.00	0.9516	0.002701	1.84	-1.50	8.87
180.00	0.9760	0.002181	2.82	-0.69	9.16
190.00	0.9954	0.001716	3.83	-0.04	9.46
200.00	1.0105	0.001306	4.85	0.47	9.77

計算結果リスト (例題2, 1/2)

THERMAL STRESSES BY AXIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION NEAR EDGE

INPUT DATA CHECK PRINT

R(MM)	TH(MM)	E(KG/MM2)	P.RATIO	AL(/DEG)
8475.00	50.00	1.7600E+04	0.3000	1.9190E-05
TMO	DTM	TBO	DTB	L(MM)
0.00	460.00	0.00	0.00	1500.00

CALCULATION FOR FREE EDGE

X(MM)	U(MM)	I(RAD)	SX.B	ST.M	ST.B
0.00	0.2334	0.051952	0.00	0.48	0.00
150.00	8.0258	0.051941	-0.11	1.13	-0.03
300.00	15.8116	0.051845	-0.58	1.76	-0.17
450.00	23.5681	0.051521	-1.61	2.34	-0.48
600.00	31.2466	0.050767	-3.39	2.74	-1.02
750.00	38.7641	0.049330	-6.02	2.82	-1.81
900.00	45.9978	0.046937	-9.54	2.31	-2.86
1050.00	52.7847	0.043334	-13.77	0.86	-4.13
1200.00	58.9295	0.038365	-18.24	-1.91	-5.47
1350.00	64.2278	0.032081	-22.06	-6.44	-6.62
1500.00	68.5076	0.024894	-23.76	-13.09	-7.13
1650.00	71.6960	0.017707	-22.06	-6.47	-6.62
1800.00	73.8658	0.011422	-18.24	-1.97	-5.47
1950.00	75.1892	0.006456	-13.75	0.78	-4.12
2100.00	75.8719	0.002868	-9.47	2.20	-2.84
2250.00	76.1111	0.000509	-5.87	2.70	-1.76
2400.00	76.0739	-0.000862	-3.11	2.62	-0.93
2550.00	75.8887	-0.001508	-1.18	2.24	-0.35
2700.00	75.6458	-0.001668	0.04	1.73	0.01
2850.00	75.4028	-0.001539	0.71	1.23	0.21
3000.00	75.1913	-0.001267	0.99	0.79	0.30

CALCULATION FOR SIMPLY SUPPORTED EDGE

X(MM)	U(MM)	I(RAD)	SX.B	ST.M	ST.B
0.00	0.0000	0.052413	0.00	0.00	0.00
150.00	7.8598	0.052369	-0.30	0.79	-0.09
300.00	15.7045	0.052199	-0.85	1.54	-0.26
450.00	23.5076	0.051788	-1.90	2.21	-0.57
600.00	31.2197	0.050950	-3.64	2.69	-1.09
750.00	38.7593	0.049444	-6.22	2.81	-1.87
900.00	46.0059	0.046998	-9.69	2.32	-2.91
1050.00	52.7988	0.043357	-13.87	0.89	-4.16
1200.00	58.9451	0.038364	-18.30	-1.88	-5.49
1350.00	64.2422	0.032067	-22.09	-6.41	-6.63
1500.00	68.5195	0.024875	-23.77	-13.07	-7.13
1650.00	71.7049	0.017687	-22.06	-6.45	-6.62
1800.00	73.8719	0.011405	-18.23	-1.95	-5.47
1950.00	75.1930	0.006442	-13.74	0.79	-4.12
2100.00	75.8738	0.002857	-9.46	2.20	-2.84
2250.00	76.1118	0.000502	-5.86	2.70	-1.76
2400.00	76.0739	-0.000866	-3.10	2.62	-0.93
2550.00	75.8882	-0.001509	-1.17	2.23	-0.35
2700.00	75.6452	-0.001668	0.04	1.73	0.01
2850.00	75.4021	-0.001539	0.71	1.22	0.21
3000.00	75.1907	-0.001266	0.99	0.79	0.30

計算結果リスト(例題2, 2/2)

THERMAL STRESSES BY AXIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION NEAR EDGE

CALCULATION FOR SLIDER SUPPORTED EDGE

X(MM)	U(MM)	I(RAD)	SX.B	ST.M	ST.B
0.00	13.3882	0.000000	49.60	27.80	14.88
150.00	14.5270	0.014990	45.93	14.63	13.78
300.00	17.7850	0.028011	37.49	5.86	11.25
450.00	22.7801	0.038051	27.08	0.70	8.12
600.00	29.0343	0.044785	16.38	-1.85	4.91
750.00	36.0529	0.048271	6.22	-2.81	1.87
900.00	43.3645	0.048738	-3.05	-3.16	-0.92
1050.00	50.5380	0.046481	-11.31	-3.80	-3.39
1200.00	57.1898	0.041846	-18.33	-5.52	-5.50
1350.00	62.9955	0.035292	-23.55	-9.00	-7.06
1500.00	67.7167	0.027538	-25.83	-14.74	-7.75
1650.00	71.2523	0.019692	-24.18	-7.39	-7.25
1800.00	73.6721	0.012783	-20.11	-2.37	-6.03
1950.00	75.1590	0.007295	-15.24	0.72	-4.57
2100.00	75.9360	0.003308	-10.55	2.33	-3.17
2250.00	76.2190	0.000671	-6.59	2.92	-1.98
2400.00	76.1920	-0.000874	-3.53	2.87	-1.06
2550.00	75.9970	-0.001615	-1.38	2.46	-0.42
2700.00	75.7346	-0.001814	-0.01	1.92	0.00
2850.00	75.4691	-0.001687	0.74	1.36	0.22
3000.00	75.2366	-0.001397	1.07	0.88	0.32

CALCULATION FOR FIXED EDGE

X(MM)	U(MM)	I(RAD)	SX.B	ST.M	ST.B
0.00	0.0000	0.000000	100.08	0.00	30.03
150.00	2.0985	0.026466	70.88	-11.18	21.26
300.00	7.5089	0.044337	45.06	-15.48	13.52
450.00	15.0352	0.054928	24.05	-15.39	7.22
600.00	23.6998	0.059765	7.89	-12.93	2.37
750.00	32.7473	0.060246	-4.18	-9.67	-1.25
900.00	41.6123	0.057490	-13.16	-6.80	-3.95
1050.00	49.8734	0.052309	-19.93	-5.18	-5.98
1200.00	57.2134	0.045296	-25.01	-5.47	-7.50
1350.00	63.3966	0.036977	-28.27	-8.17	-8.48
1500.00	68.2742	0.028026	-28.87	-13.58	-8.66
1650.00	71.8236	0.019455	-25.88	-6.21	-7.76
1800.00	74.1764	0.012177	-20.85	-1.32	-6.26
1950.00	75.5605	0.006563	-15.35	1.55	-4.61
2100.00	76.2282	0.002602	-10.31	2.94	-3.09
2250.00	76.4128	0.000072	-6.17	3.32	-1.85
2400.00	76.3059	-0.001336	-3.08	3.10	-0.92
2550.00	76.0520	-0.001941	-0.97	2.57	-0.29
2700.00	75.7497	-0.002022	0.33	1.95	0.10
2850.00	75.4603	-0.001803	1.00	1.35	0.30
3000.00	75.2156	-0.001447	1.24	0.84	0.37

1.6 円筒容器のフランジ部

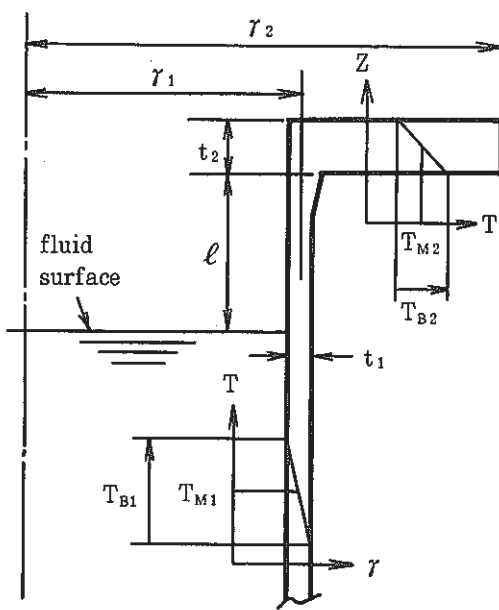


Fig. 1.6.1 Junction of cylindrical vessel and flange

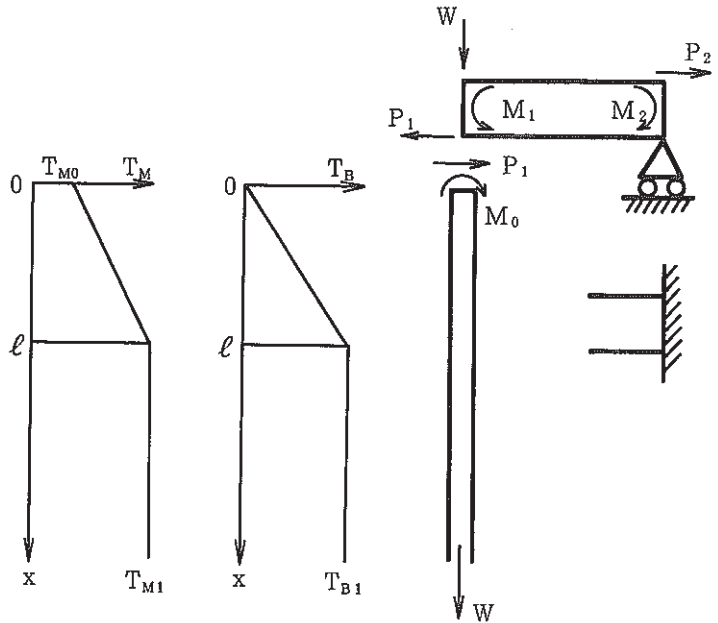


Fig. 1.6.2 Simplified analysis model for vessel and flange

円筒容器（材質 E_1 ， ν_1 ， α_1 ，半径 r_1 ，板厚 t_1 ）の端部にフランジ（材質 E_2 ， ν_2 ， α_2 ，外半径 r_2 ，板厚 t_2 ）が接続する構造とする。フランジは板厚平均温度 T_{M2} ，等価線形温度差 T_{B2} が一定に保たれるものとする（上面温度 $T_{M2} - T_{B2}/2$ ，下面温度 $T_{M2} + T_{B2}/2$ ）。容器および内部流体の初期温度は $T_{M0} = T_{M2} + T_{B2}/2$ とする。流体の過渡温度変化により，容器の液面より下部が板厚平均温度 T_{M1} ，等価線形温度差 T_{B1} になったものとする。フランジとの接続部から液面までの距離を l とし Fig. 1.6.2 に示すようなランプ状の温度分布が生じたものとする。フランジの外周は（半径方向にスライド自由な）単純支持，あるいは固定支持されるものとする。

(1) 自由熱膨張および自重に対する解

容器とフランジを切り離し，各々が自由熱膨張し鉛直荷重 W を受ける場合の解を求める。

容器については温度分布に対する解（1.24）式と軸荷重に対する解（付録 A 1.1 の (j) 式）を重ね合わせて

$$\left\{ \begin{aligned}
 u_v^i(x) &= r_1 \alpha_1 T_M(x) + \frac{r_1 \alpha_1 \partial T_M}{4\beta l} \{ \varphi(\beta l) \varphi(\beta x) - \varphi(\beta|x-l|) + 2\zeta(\beta l) \theta(\beta x) \} \\
 &+ \frac{(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{8\beta^3 t_1 l} \{ 4\theta(\beta x) - \varphi(\beta|x-l|) - \varphi(\beta l) \varphi(\beta x) - 2\theta(\beta l) \theta(\beta x) \} \\
 &- \frac{r_1 \nu_1}{E_1 t_1} \cdot \frac{W}{2\pi r_1}
 \end{aligned} \right.$$

$$\left. \begin{aligned}
 i_v^i(x) &= r_1 \alpha_1 \frac{dT_M(x)}{dx} - \frac{r_1 \alpha_1 \delta T_M}{2\ell} \{ \varphi(\beta\ell) \theta(\beta x) \pm \theta(\beta|x-\ell|) + \zeta(\beta\ell) \varphi(\beta x) \} \\
 &\quad - \frac{(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{4\beta^2 t_1 \ell} \{ 2\varphi(\beta x) \pm \zeta(\beta|x-\ell|) - \phi(\beta\ell) \theta(\beta x) - \theta(\beta\ell) \varphi(\beta x) \} \\
 \sigma_{\theta, M}^i &= \frac{E_1 \alpha_1 \delta T_M}{4\beta\ell} \{ \varphi(\beta\ell) \phi(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|) + 2\zeta(\beta\ell) \cdot \theta(\beta x) \} \\
 &\quad + \frac{E_1 (1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{8\beta\ell \sqrt{3(1-\nu_1^2)}} \{ 4\theta(\beta x) - \varphi(\beta|x-\ell|) - \phi(\beta\ell) \phi(\beta x) - 2\theta(\beta\ell) \theta(\beta x) \} \\
 \sigma_b &= \frac{3E_1 \alpha_1 \delta T_M}{4\beta\ell \sqrt{3(1-\nu_1^2)}} \{ \varphi(\beta\ell) \varphi(\beta x) - \phi(\beta|x-\ell|) + 2\zeta(\beta\ell) \zeta(\beta x) \} \\
 &\quad + \frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{8\beta\ell (1-\nu_1)} \{ 4\zeta(\beta x) + \phi(\beta|x-\ell|) - \phi(\beta\ell) \varphi(\beta x) - 2\theta(\beta\ell) \zeta(\beta x) \} \\
 \text{として } \sigma_{x, B}^i &= \sigma_D - \frac{E_1 \alpha_1 T_B(x)}{2(1-\nu_1)}, \quad \sigma_{\theta, B}^i = \nu_1 \sigma_D - \frac{E_1 \alpha_1 T_B(x)}{2(1-\nu_1)}
 \end{aligned} \right\} \tag{1.32}$$

となる。ここで (1.24) 式中の $T_{B0} = 0$, $\delta T_B = T_{B1}$ とした。

フランジについては W に対する解 (付録 A 2.4 の(1)) と温度分布に対する解 (付録 A 2.7) を重ね合わせて

$$\left[\begin{aligned}
 u_F^i(r) &= r \alpha_2 T_{M2}, \quad \sigma_{r, M}^i = 0, \quad \sigma_{\theta, M}^i = 0 \\
 i_F^i(r) &= \frac{W}{4\pi D_2} \left\{ \left(\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{1+\nu_2} \right) r + \left(\frac{1+\nu_2}{1-\nu_2} \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \frac{1}{r} \right. \\
 &\quad \left. - r \ln \frac{r}{r_1} \right\} + \frac{r \alpha_2 T_{B2}}{t_2} \\
 \sigma_{r, B}^i &= \frac{3W(1+\nu_2)}{2\pi t_2^2} \left\{ \left(\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) - \ln \frac{r}{r_1} \right\} \\
 \sigma_{\theta, B}^i &= \frac{3W(1+\nu_2)}{2\pi t_2^2} \left\{ \left(\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) - \ln \frac{r}{r_1} + \frac{1-\nu_2}{1+\nu_2} \right\}
 \end{aligned} \right] \tag{1.33}$$

となる。

接続部および支持点の変位と勾配は次のようになる。

$$\left[\begin{aligned}
 u_v^i(0) &= r_1 \alpha_1 T_{M0} + \frac{r_1 \alpha_1 \delta T_M}{\beta\ell} \zeta(\beta\ell) + \frac{(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{2\beta^2 t_1 \ell} \{ 1 - \theta(\beta\ell) \} - \frac{\nu_1 W}{2\pi E_1 t_1} \\
 i_v^i(0) &= \frac{r_1 \alpha_1 \delta T_M}{\ell} \{ 1 - \varphi(\beta\ell) \} - \frac{(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{2\beta^2 t_1 \ell} \{ 1 - \phi(\beta\ell) \}
 \end{aligned} \right] \tag{a)$$

$$\left[\begin{aligned}
 \text{フランジ } u_F^i(r_1) &= r_1 \alpha_2 T_{M2} \\
 \text{接続部 } i_F^i(r_1) &= \frac{W r_1}{4\pi D_2} \left\{ \frac{2r_2^2}{(1-\nu_2)(r_2^2 - r_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{1+\nu_2} \right\} + \frac{r_1 \alpha_2 T_{B2}}{t_2}
 \end{aligned} \right] \tag{b)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{フランジ} \\ \text{支持点} \end{array} \right\} \left[\begin{array}{l} u_F^i(r_2) = r_2 \alpha_2 T_{M2} \\ i_F^i(r_2) = \frac{W r_2}{4\pi D_2} \left\{ \frac{2r_1^2}{(1-\nu_2)(r_2^2-r_1^2)} \ell n \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{1+\nu_2} \right\} + \frac{r_2 \alpha_2 T_{B2}}{t_2} \end{array} \right] \quad (c)$$

接続部に生ずる変位と勾配の不連続量は

$$\left[\begin{array}{l} \delta u_1 = u_v^i(0) - \left\{ u_F^i(r_1) + \frac{t_2}{2} i_F^i(r_1) \right\} \\ \delta i_1 = i_v^i(0) - i_F^i(r_1) \end{array} \right] \quad (d)$$

となる。

(2) 接続部および支持点の反力とモーメント

容器の接続部に P_1, M_0 が生じ、フランジの接続部に P_1, M_1 が生じ、フランジの支持点に P_2, M_2 が生じて、接続部の変位と勾配の連続性および支持点の境界条件が満たされるものとする。 P_1, P_2, M_0, M_1, M_2 は Fig. 1.6.2 の向きを正とする。フランジの下面に容器が接続されるものとする。接続部のモーメントのつり合い式は

$$M_0 = \frac{t_2}{2} P_1 + M_1 \quad (e)$$

となる。 M_0, P_1 による容器の解は付録 A 1.2 より

$$\left[\begin{array}{l} u_v^i(x) = \frac{1}{2\beta^3 D_1} \{ \beta M_0 \phi(\beta x) + P_1 \theta(\beta x) \} \\ i_v^i(x) = -\frac{1}{2\beta^2 D_1} \{ 2\beta M_0 \theta(\beta x) + P_1 \varphi(\beta x) \} \\ \sigma_{\chi, M}^i = 0, \quad \sigma_{\theta, M}^i = \frac{E_1}{2\beta^3 D_1 r_1} \{ \beta M_0 \phi(\beta x) + P_1 \theta(\beta x) \} \\ \sigma_{z, B}^i = \frac{6}{t_1^2} \{ M_0 \varphi(\beta x) + \frac{P_1}{\beta} \zeta(\beta x) \}, \quad \sigma_{\theta, B}^i = \nu_1 \cdot \sigma_{z, B}^i \end{array} \right] \quad (1.34)$$

となる。 P_1, P_2, M_1, M_2 によるフランジの解は付録 A 2.5 と A 2.6 を重ね合わせて

$$\left[\begin{array}{l} u_F^i(r) = \frac{1}{E_2 t_2 (r_2^2 - r_1^2)} \left\{ (1-\nu_2)(r_2^2 P_2 - r_1^2 P_1)r + (1+\nu_2)r_1^2 r_2^2 (P_2 - P_1) \frac{1}{r} \right\} \\ i_F^i(r) = \frac{1}{D_2 (r_2^2 - r_1^2)} \left\{ \frac{r_1^2 M_1 - r_2^2 M_2}{1+\nu_2} r + \frac{r_1^2 r_2^2 (M_1 - M_2)}{1-\nu_2} \frac{1}{r} \right\} \\ \sigma_{r, M}^i = \frac{1}{t_2 (r_2^2 - r_1^2)} \left\{ (r_2^2 P_2 - r_1^2 P_1) - r_1^2 r_2^2 (P_2 - P_1) \frac{1}{r^2} \right\} \\ \sigma_{\theta, M}^i = \frac{1}{t_2 (r_2^2 - r_1^2)} \left\{ (r_2^2 P_2 - r_1^2 P_1) + r_1^2 r_2^2 (P_2 - P_1) \frac{1}{r^2} \right\} \end{array} \right] \quad (1.35)$$

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{r,B}^{\text{II}} = \frac{6}{t_2^2(r_2^2-r_1^2)} \{ r_1^2 M_1 - r_2^2 M_2 - r_1^2 r_2^2 (M_1 - M_2) \frac{1}{r^2} \} \\ \sigma_{\theta,B}^{\text{II}} = \frac{6}{t_2^2(r_2^2-r_1^2)} \{ r_1^2 M_1 - r_2^2 M_2 + r_1^2 r_2^2 (M_1 - M_2) \frac{1}{r^2} \} \end{array} \right]$$

となる。接続部の変位と勾配の不連続量を打消すためには

$$\left[\begin{array}{l} u_v^{\text{II}}(0) - \{ u_F^{\text{II}}(r_1) + \frac{t_2}{2} i_F^{\text{II}}(r_1) \} = -\delta u_1 \\ i_v^{\text{II}}(0) - i_F^{\text{II}}(r_1) = -\delta i_1 \end{array} \right] \quad (f)$$

でなければならない。

フランジ外周が(半径方向スライド自由な)単純支持される場合は半径方向反力 P_2 およびモーメント M_2 は 0 となる。

$$P_2 = 0, \quad M_2 = 0 \quad (g)$$

(e), (f), (g) 式を連立させて解けば残りの未知数 M_0, P_1, M_1 が求まる。

フランジ外周が固定される場合は支持点の変位と勾配は 0 となる。すなわち解 II の変位と勾配が解 I の変位と勾配を打ち消し

$$u_F^{\text{II}}(r_2) = -u_F^{\text{I}}(r_2), \quad i_F^{\text{II}}(r_2) = -i_F^{\text{I}}(r_2) \quad (h)$$

となる。(e), (f), (h) 式を連立させて解けば未知数 M_0, P_1, M_1, P_2, M_2 が求まる。

未知数 M_0, P_1, M_1, P_2, M_2 に対する連立一次方程式を

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_0 \\ P_1 \\ M_1 \\ P_2 \\ M_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{pmatrix} \quad (i)$$

とすると各係数は

$$\left[\begin{array}{l} a_{11} = 1, \quad a_{12} = -t_2/2, \quad a_{13} = -1, \quad a_{14} = a_{15} = 0, \quad b_1 = 0, \\ a_{21} = \frac{1}{2\beta^2 D_1}, \quad a_{22} = \frac{1}{2\beta^3 D_1} + \frac{r_1}{E_2 t_2 (r_2^2 - r_1^2)} \{ (1-\nu_2)r_1^2 + (1+\nu_2)r_2^2 \}, \\ a_{23} = -\frac{t_2 r_1}{2D_2 (r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{r_1^2}{1+\nu_2} + \frac{r_2^2}{1-\nu_2} \right), \quad a_{24} = -\frac{2r_1 r_2^2}{E_2 t_2 (r_2^2 - r_1^2)}, \\ a_{25} = \frac{t_2 r_1 r_2^2}{2D_2 (r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{1}{1+\nu_2} + \frac{1}{1-\nu_2} \right), \quad b_2 = -\delta u_1, \\ a_{31} = -\frac{1}{\beta D_1}, \quad a_{32} = -\frac{1}{2\beta^2 D_1}, \quad a_{33} = -\frac{r_1}{D_2 (r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{r_1^2}{1+\nu_2} + \frac{r_2^2}{1-\nu_2} \right), \end{array} \right]$$

$$a_{34} = 0, \quad a_{35} = \frac{r_1 r_2^2}{D_2(r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{1}{1 + \nu_2} + \frac{1}{1 - \nu_2} \right), \quad b_3 = -\delta i_1, \quad (j)$$

単純支持の場合

$$a_{41} = a_{42} = a_{43} = 0, \quad a_{44} = 1, \quad a_{45} = 0, \quad b_4 = 0$$

$$a_{51} = a_{52} = a_{53} = a_{54} = 0, \quad a_{55} = 1, \quad b_5 = 0$$

固定支持の場合

$$a_{41} = 0, \quad a_{42} = \frac{-2r_1^2 r_2}{E_2 t_2 (r_2^2 - r_1^2)}, \quad a_{43} = 0, \quad a_{44} = \frac{r_2}{E_2 t_2 (r_2^2 - r_1^2)} \{ (1 + \nu_2) r_1^2 + (1 - \nu_2) r_2^2 \},$$

$$a_{45} = 0, \quad b_4 = -u_F^i(r_2), \quad a_{51} = a_{52} = 0,$$

$$a_{53} = \frac{r_1^2 r_2}{D_2(r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{1}{1 + \nu_2} + \frac{1}{1 - \nu_2} \right), \quad a_{54} = 0,$$

$$a_{55} = -\frac{r_2}{D_2(r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{r_1^2}{1 - \nu_2} + \frac{r_2^2}{1 + \nu_2} \right), \quad b_5 = -i_F^i(r_2)$$

となる。

求めた M_0, P_1, M_1, P_2, M_2 を (1.34), (1.35) 式に代入すれば解 II が確定する。解 I と解 II を重ね合わせれば各点の応力を求める事ができる。

(3) 簡易解析プログラム

以上の計算法により容器とフランジの応力を求めるプログラムを作成した。重量 W のみ負荷された時の解と、重量 W と温度荷重が重なる時の解の両方を求める。温度荷重のみ負荷された時の解を求めたい場合は $W = 0$ を入力すれば良い。温度データ $T_{M1}, T_{B1}, T_{M2}, T_{B2}$ はカード入力としたが、付録 A3 の「構造設計用複数位置温度計算プログラム」により作成された非定常熱伝導計算結果ファイルから引用したい場合は、1.4 節、1.7 節、1.8 節のプログラムを参考にし、プログラムの該当箇所を修正すれば良い。

入力データカードイメージは次の通りである。

カード 1 (7F10.0) E1, PR1, AL1, R1, TH1, TM1, TB1

$E_1 \quad \nu_1 \quad \alpha_1 \quad r_1 \quad t_1 \quad T_{M1} \quad T_{B1}$

カード 2 (7F10.0) E2, PR2, AL2, R2, TH2, TM2, TB2

$E_2 \quad \nu_2 \quad \alpha_2 \quad r_2 \quad t_2 \quad T_{M2} \quad T_{B2}$

カード 3 (i5, 5X, 2F10.0) NFIX, W, DL

W ℓ

フランジ外周の支持条件を NFIX により指定する。NFIX = 0 ならば (半径方向スライド自由な) 単純支持, NFIX \neq 0 ならば固定支持となる。

容器については $x=0$ から $x=2\ell$ までの区間を 20 等分する 21 点の応力値を求める。フランジについては内周 (r_1) と外周 (r_2) の応力値を求める。

プログラムリスト，次の例題1と2の計算結果リスト，例題1に対するJCLおよび入力データリストを次頁以降に示す。

(例題1) ループ型FBR炉容器 ($r_1 = 4\text{ m}$, $t_1 = 40\text{ mm}$) の上部フランジ ($r_2 = 4.3\text{ m}$, $t_2 = 200\text{ mm}$) の外周が半径方向にスライド自由な単純支持され上面が 50°C ，下面が 100°C に保たれている ($T_{M2} = 75^\circ\text{C}$, $T_{B2} = 50^\circ\text{C}$)。容器の液面 ($\ell = 2\text{ m}$) より下部は内面が 440°C ，外面が 500°C とし ($T_{M1} = 470^\circ\text{C}$, $T_{B1} = -60^\circ\text{C}$)，フランジ下面から液面までは直線温度分布とする ($T_{M0} = 100^\circ\text{C}$, $T_{B0} = 0$)。炉心および流体を含む容器の総重量を 500 ton とし，各点の応力を求めよ。

$$E_1 = E_2 = 1.67 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2, \nu_1 = \nu_2 = 0.298, \alpha_1 = \alpha_2 = 1.993 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C} \text{ とせよ。}$$

(例題2) タンク型FBR炉容器 ($r_1 = 8.475\text{ m}$, $t_1 = 50\text{ mm}$) の上部フランジ ($r_2 = 8.8\text{ m}$, $t_2 = 200\text{ mm}$) の外周が半径方向にスライド自由な単純支持され上面が 50°C ，下面が 100°C に保たれている ($T_{M2} = 75^\circ\text{C}$, $T_{B2} = 50^\circ\text{C}$)。容器の液面 ($\ell = 1.5\text{ m}$) より下部は内外面とも 510°C とし ($T_{M1} = 510^\circ\text{C}$, $T_{B1} = 0$)，フランジ下面から液面までは直線温度分布とする ($T_{M0} = 100^\circ\text{C}$, $T_{B0} = 0$)。炉心および流体を含む容器の総重量を 3000 ton とし，各点の応力を求めよ。

$E_1 = E_2 = 1.76 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.919 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ とせよ。本例題は1.5節の例題2 (容器上端固定条件) を上部フランジ構造に変更し，容器の総重量を考慮した場合の計算例である。

プログラムリスト(1/4)

```

C-----
C   THERMAL STRESS CALCULATION BY CYLINDRICAL SHELL THEORY
C   DISCONTINUITY OF VESSEL AND FLANGE JUNCTION
C-----
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION A(5,5),B(5),X(5),AX(21),SXM(21),SXB(21),STM(21),STB(21)
C-----
      F1(BX)=EXP(-BX)*(COS(BX)+SIN(BX))
      F2(BX)=EXP(-BX)*(COS(BX)-SIN(BX))
      F3(BX)=EXP(-BX)*COS(BX)
      F4(BX)=EXP(-BX)*SIN(BX)
C-----
500  FORMAT(7F10.0)
510  FORMAT(I5,5X,2F10.0)
600  FORMAT(1H1//10X,'(WEIGHT+THERMAL) STRESSES AT THE ',
+ 'JUNCTION OF VESSEL AND FLANGE',///,19X,'E(KG/MM2)',1X,
+ 'P.RATIO',2X,'AL(/DEG)',3X,'R(MM)',2X,
+ 'TH(MM)',1X,'TM(DEG)',1X,'TB(DEG)',///,
+ 10X,'VESSEL',1X,1PE10.3,OPF9.4,1PE10.3,OP4F8.2)
610  FORMAT(10X,'FLANGE',1X,1PE10.3,OPF9.4,1PE10.3,OP4F8.2//)
620  FORMAT(10X,'NFIX=',I2,5X,'WEIGHT(KG)=' ,1PE12.4,5X,
+ 'L(MM)=' ,OPF8.2/)
630  FORMAT(/10X,'** SOLUTION FOR WEIGHT LOAD **'//)
640  FORMAT(10X,'M0(KG.MM/MM)=' ,1PE10.3,2X,'P1(KG/MM)=' ,E10.3,2X,
+ 'M1(KG.MM/MM)=' ,E10.3,/,35X,'P2(KG/MM)=' ,E10.3,2X,
+ 'M2(KG.MM/MM)=' ,E10.3,///,28X,'DISP(MM)',
+ 3X,'I(RADIAN)')
650  FORMAT(10X,'VESSEL(X=0) ',2X,1P2E12.4,/,
+ 10X,'FLANGE(R=R1)',2X,1P2E12.4,/,
+ 10X,'FLANGE(R=R2)',2X,1P2E12.4,///,
+ 20X,'X(MM)',2X,'SXM(KG/MM2)',1X,'SXB(KG/MM2)',1X,
+ 'STM(KG/MM2)',1X,'STB(KG/MM2)')
660  FORMAT(10X,'VESSEL',OPF10.2,4F12.3)
670  FORMAT(/10X,'FLANGE(R=R1)',4X,4F12.3)
680  FORMAT(10X,'FLANGE(R=R2)',4X,4F12.3)
690  FORMAT(1H1//10X,'** SOLUTION FOR (WEIGHT+TEMPERATURE) LOAD **'//)
C-----
      DATA INPUT AND CONSTANT VALUE SET
      READ(5,500) E1,PR1,AL1,R1,TH1,TM1,TB1
      READ(5,500) E2,PR2,AL2,R2,TH2,TM2,TB2
      READ(5,510) NFIX,W,DL
      WRITE(6,600) E1,PR1,AL1,R1,TH1,TM1,TB1
      WRITE(6,610) E2,PR2,AL2,R2,TH2,TM2,TB2
      WRITE(6,620) NFIX,W,DL
      PAI=3.14159265DO
      PP1=1+PR1
      PM1=1-PR1
      SQ3=SQRT(3.0DO*PP1*PM1)
      BT2=SQ3/R1/TH1
      BT=SQRT(BT2)
      BT3=BT*BT2
      BL=BT*DL
      D1=E1*TH1**3/(12*PP1*PM1)
      PP2=1+PR2
      PM2=1-PR2
      D2=E2*TH2**3/(12*PP2*PM2)
      RR1=R1*R1
      RR2=R2*R2
      RR21=RR2-RR1

```

プログラムリスト (2 / 4)

```

ET2=E2*TH2*RR21
D21=D2*RR21
ALN21=LOG(R2/R1)
SS1=6/TH1**2
SS2=6/TH2**2
DO 100 K=1,21
AX(K)=FLOAT(K-1)*DL/10
100 CONTINUE
C----- SET FOR ONLY WEIGHT LOAD CALCULATION
WRITE(6,630)
NCASE=1
TM1D=0
TB1D=0
TM2D=0
TB2D=0
800 CONTINUE
C----- CALCULATION START
TMO=TM2D+TB2D/2
DTM=TM1D-TMO
C----- SET MATRIX ELEMENT
DO 200 J=1,5
DO 200 I=1,5
A(I,J)=0
200 CONTINUE
A(1,1)=1
A(1,2)=-TH2/2
A(1,3)=-1
A(2,1)=1/(2*BT2*D1)
A(2,2)=1/(2*BT3*D1)
+ +R1/ET2*(PM2*RR1+PP2*RR2)
A(2,3)=-TH2*R1/(2*D21)*(RR1/PP2+RR2/PM2)
A(2,4)=-2*R1*RR2/ET2
A(2,5)=TH2*R1*RR2/(2*D21)*(1/PP2+1/PM2)
A(3,1)=-1/(BT*D1)
A(3,2)=-1/(2*BT2*D1)
A(3,3)=-R1/D21*(RR1/PP2+RR2/PM2)
A(3,5)=R1*RR2/D21*(1/PP2+1/PM2)
IF(NFIX.NE.0) GO TO 250
A(4,4)=1
A(5,5)=1
GO TO 300
250 A(4,2)=-2*RR1*R2/ET2
A(4,4)=R2/ET2*(PP2*RR1+PM2*RR2)
A(5,3)=RR1*R2/D21*(1/PP2+1/PM2)
A(5,5)=-R2/D21*(RR1/PM2+RR2/PP2)
300 CONTINUE
C----- SOLVE FREE EXPANSION AND WEIGHT LOAD
C----- SOLUTION FOR VESSEL
UO=R1*AL1*TMO+R1*AL1*DTM/BL*F4(BL)
+ +PP1*AL1*TB1D/(2*BT3*TH1*DL)*(1-F3(BL))-PR1*W/(2*PAI*E1*TH1)
GO=R1*AL1*DTM/DL*(1-F1(BL))
+ -PP1*AL1*TB1D/(2*BT2*TH1*DL)*(1-F2(BL))
DO 350 K=1,21
BX=AX(K)*BT
BLX=ABS(BX-BL)
TB=FLOAT(K-1)*TB1D/10
IF(K.GE.11) TB=TB1D
SXM(K)=W/(2*PAI*R1*TH1)

```

プログラムリスト (3 / 4)

```

SD=3*E1*AL1*DTM/(4*BL*SQ3)*(F1(BL)*F1(BX)-F1(BLX)
+ +2*F4(BL)*F4(BX))+E1*AL1*TB1D/(8*PM1*BL)*(4*F4(BX)
+ +F2(BLX)-F2(BL)*F1(BX)-2*F3(BL)*F4(BX))
SXB(K)=-E1*AL1*TB/(2*PM1)+SD
STB(K)=-E1*AL1*TB/(2*PM1)+SD*PR1
STM(K)=E1*AL1*DTM/(4*BL)*(F1(BL)*F2(BX)-F2(BLX)+2*F4(BL)*F3(BX))
+ +E1*AL1*PP1*TB1D/(8*BL*SQ3)*(4*F3(BX)-F1(BLX)-F2(BL)*F2(BX)
+ -2*F3(BL)*F3(BX))
350 CONTINUE
C----- SOLUTION FOR FLANGE AT JUNCTION (R=R1)
U1=R1*AL2*TM2D
G1=W*R1/(4*PAI*D2)*(2*RR2/(PM2*RR21)*ALN21+1/PP2)
+ +R1*AL2*TB2D/TH2
SRM1=0
SRB1=0
STM1=0
STB1=3*W*PP2/(2*PAI*TH2**2)*(2*RR2/RR21*ALN21+PM2/PP2)
C----- SOLUTION FOR FLANGE AT SUPPORT (R=R2)
U2=R2*AL2*TM2D
G2=W*R2/(4*PAI*D2)*(2*RR1/(PM2*RR21)*ALN21+1/PP2)
+ +R2*AL2*TB2D/TH2
SRM2=0
SRB2=0
STM2=0
STB2=3*W*PP2/(2*PAI*TH2**2)*(2*RR1/RR21*ALN21+PM2/PP2)
C----- SOLVE DISCONTINUITY REACTION AND MOMENT
B(1)=0
B(2)=-U0+U1+TH2/2*G1
B(3)=-G0+G1
IF(NFIX.NE.0) GO TO 850
B(4)=0
B(5)=0
GO TO 900
850 B(4)=-U2
B(5)=-G2
900 CALL GAUSE(A,B,X,5)
RMO=X(1)
P1=X(2)
RM1=X(3)
P2=X(4)
RM2=X(5)
WRITE(6,640) (X(I),I=1,5)
C----- ADD DISCONTINUITY STRESSES TO SOLUTION1
C----- SOLUTION FOR VESSEL
U0=U0+(BT*RMO+P1)/(2*BT3*D1)
G0=G0-(2*BT*RMO+P1)/(2*BT2*D1)
DO 400 K=1,21
BX=AX(K)*BT
SXB(K)=SXB(K)+SS1*(RMO*F1(BX)+P1/BT*F4(BX))
STB(K)=STB(K)+SS1*(RMO*F1(BX)+P1/BT*F4(BX))*PR1
STM(K)=STM(K)+E1*(BT*RMO*F2(BX)+P1*F3(BX))/(2*BT3*D1*R1)
400 CONTINUE
C----- SOLUTION FOR FLANGE AT JUNCTION (R=R1)
U1=U1+R1/ET2*(-(PM2*RR1+PP2*RR2)*P1+2*RR2*P2)
G1=G1+R1/D21*((RR1/PP2+RR2/PM2)*RM1-RR2*(1/PP2+1/PM2)*RM2)
SRM1=SRM1+P1/TH2
STM1=STM1+(-(RR1+RR2)*P1+2*RR2*P2)/(RR21*TH2)
SRB1=SRB1-SS2*RM1

```

プログラムリスト(4/4)

```

      STB1=STB1+SS2*((RR1+RR2)*RM1-2*RR2*RM2)/RR21
C----- SOLUTION FOR FLANGE AT SUPPORT (R=R2)
      U2=U2+R2/ET2*(-2*RR1*P1+(PP2*RR1+PM2*RR2)*P2)
      G2=G2+R2/D21*(RR1*(1/PP2+1/PM2)*RM1-(RR1/PM2+RR2/PP2)*RM2)
      SRM2=SRM2+P2/TH2
      STM2=STM2+(-2*RR1*P1+(RR1+RR2)*P2)/(RR21*TH2)
      SRB2=SRB2-SS2*RM2
      STB2=STB2+SS2*(2*RR1*RM1-(RR1+RR2)*RM2)/RR21
C----- PRINT OUT CALCULATION RESULTS
      WRITE(6,650) UO,GO,U1,G1,U2,G2
      DO 450 K=1,21
      WRITE(6,660) AX(K),SXM(K),SXB(K),STM(K),STB(K)
450 CONTINUE
      WRITE(6,670) SRM1,SRB1,STM1,STB1
      WRITE(6,680) SRM2,SRB2,STM2,STB2
      IF(NCASE.EQ.2) GO TO 999
C----- SET FOR (WEIGHT+TEMPERATURE) LOAD
      WRITE(6,690)
      NCASE=NCASE+1
      TM1D=TM1
      TB1D=TB1
      TM2D=TM2
      TB2D=TB2
      GO TO 800
C----- CALCULATION END FOR ALL CASES
999 CONTINUE
      STOP
      END

C-----
C----- SUBROUTINE GAUSE - SOLVE EQUATION BY GAUSE SWEEP OUT METHOD -----
C-----
      SUBROUTINE GAUSE(A,B,X,N)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(N,N),B(N),X(N)
      NM1=N-1
      DO 10 K=1,NM1
      KP1=K+1
      DO 20 J=KP1,N
20 A(K,J)=A(K,J)/A(K,K)
      B(K)=B(K)/A(K,K)
      DO 30 I=KP1,N
      DO 40 J=KP1,N
40 A(I,J)=A(I,J)-A(I,K)*A(K,J)
30 B(I)=B(I)-A(I,K)*B(K)
10 CONTINUE
      X(N)=B(N)/A(N,N)
      DO 50 K=1,NM1
      L=N-K
      LP1=L+1
      X(L)=B(L)
      DO 60 J=LP1,N
60 X(L)=X(L)-A(L,J)*X(J)
50 CONTINUE
      RETURN
      END

```

計算結果リスト (例題1, 1/2)

(WEIGHT+THERMAL) STRESSES AT THE JUNCTION OF VESSEL AND FLANGE

	E(KG/MM2)	P.RATIO	AL(/DEG)	R(MM)	TH(MM)	TM(DEG)	TB(DEG)
VESSEL	1.670E+04	0.2980	1.993E-05	4000.00	40.00	470.00	-60.00
FLANGE	1.670E+04	0.2980	1.993E-05	4300.00	200.00	75.00	50.00

NFIX= 0 WEIGHT(KG)= 5.0000E+05 L(MM)= 2000.00

** SOLUTION FOR WEIGHT LOAD **

MO(KG.MM/MM)=-3.603E+03 P1(KG/MM)= 1.345E+01 M1(KG.MM/MM)=-4.949E+03
 P2(KG/MM)= 0.000E+00 M2(KG.MM/MM)= 0.000E+00

	DISP(MM)	I(RADIAN)
VESSEL(X=0)	2.5273E-01	4.8073E-03
FLANGE(R=R1)	-2.2800E-01	4.8073E-03
FLANGE(R=R2)	-2.2261E-01	4.7636E-03

	X(MM)	SXM(KG/MM2)	SXB(KG/MM2)	STM(KG/MM2)	STB(KG/MM2)
VESSEL	0.00	0.497	-13.512	1.203	-4.027
VESSEL	200.00	0.497	-4.998	2.854	-1.489
VESSEL	400.00	0.497	-0.471	2.069	-0.140
VESSEL	600.00	0.497	0.985	0.952	0.294
VESSEL	800.00	0.497	0.959	0.230	0.286
VESSEL	1000.00	0.497	0.535	-0.070	0.159
VESSEL	1200.00	0.497	0.185	-0.122	0.055
VESSEL	1400.00	0.497	0.008	-0.084	0.002
VESSEL	1600.00	0.497	-0.045	-0.037	-0.013
VESSEL	1800.00	0.497	-0.040	-0.008	-0.012
VESSEL	2000.00	0.497	-0.021	0.004	-0.006
VESSEL	2200.00	0.497	-0.007	0.005	-0.002
VESSEL	2400.00	0.497	0.000	0.003	0.000
VESSEL	2600.00	0.497	0.002	0.001	0.001
VESSEL	2800.00	0.497	0.002	0.000	0.000
VESSEL	3000.00	0.497	0.001	0.000	0.000
VESSEL	3200.00	0.497	0.000	0.000	0.000
VESSEL	3400.00	0.497	0.000	0.000	0.000
VESSEL	3600.00	0.497	0.000	0.000	0.000
VESSEL	3800.00	0.497	0.000	0.000	0.000
VESSEL	4000.00	0.497	0.000	0.000	0.000
FLANGE(R=R1)		0.067	0.742	-0.932	2.228
FLANGE(R=R2)		0.000	0.000	-0.865	1.850

計算結果リスト (例題1, 2/2)

** SOLUTION FOR (WEIGHT+TEMPERATURE) LOAD **

MO(KG.MM/MM)=-4.118E+03 P1(KG/MM)= 1.473E+01 M1(KG.MM/MM)=-5.591E+03
 P2(KG/MM)= 0.000E+00 M2(KG.MM/MM)= 0.000E+00

	DISP(MM)	I(RADIAN)
VESSEL(X=0)	7.8764E+00	2.1471E-02
FLANGE(R=R1)	5.7293E+00	2.1471E-02
FLANGE(R=R2)	6.1837E+00	2.2999E-02

	X(MM)	SXM(KG/MM2)	SXB(KG/MM2)	STM(KG/MM2)	STB(KG/MM2)
VESSEL	0.00	0.497	-15.442	-0.251	-4.602
VESSEL	200.00	0.497	-5.222	2.557	-0.558
VESSEL	400.00	0.497	1.549	2.198	2.459
VESSEL	600.00	0.497	5.102	1.125	4.516
VESSEL	800.00	0.497	6.924	0.367	6.057
VESSEL	1000.00	0.497	8.125	0.150	7.414
VESSEL	1200.00	0.497	9.045	0.385	8.686
VESSEL	1400.00	0.497	9.360	0.830	9.779
VESSEL	1600.00	0.497	8.467	0.957	10.511
VESSEL	1800.00	0.497	6.307	-0.294	10.866
VESSEL	2000.00	0.497	4.957	-4.482	11.462
VESSEL	2200.00	0.497	7.761	-0.276	12.298
VESSEL	2400.00	0.497	11.346	1.006	13.366
VESSEL	2600.00	0.497	13.588	0.923	14.034
VESSEL	2800.00	0.497	14.484	0.499	14.301
VESSEL	3000.00	0.497	14.619	0.165	14.341
VESSEL	3200.00	0.497	14.484	0.001	14.301
VESSEL	3400.00	0.497	14.333	-0.045	14.256
VESSEL	3600.00	0.497	14.244	-0.038	14.230
VESSEL	3800.00	0.497	14.210	-0.020	14.220
VESSEL	4000.00	0.497	14.207	-0.006	14.219
FLANGE(R=R1)		0.074	0.839	-1.020	0.893
FLANGE(R=R2)		0.000	0.000	-0.947	0.611

JCL および入力データリスト (例題1)

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----
//Q3020ST3 JOB (GENERAL),MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3020,
//  ATTR=(TO,CO,WO)
//CLG EXEC FORT7CLG
//FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=*
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3020.TEST.FORT(ST3),DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUMMY
//GO.FT06F001 DD SYSOUT=*
//GO.SYSIN DD *
    1.67D4      0.298  19.93D-6      4.0D3      4.0D1      470.0      -60.0
    1.67D4      0.298  19.93D-6      4.3D3      2.0D2      75.0       50.0
    0           5.0D5      2.0D3
/*
//
    
```

← ユーザーが変更すべき箇所

← プログラム

計算結果リスト (例題 2 , 1 / 2)

(WEIGHT+THERMAL) STRESSES AT THE JUNCTION OF VESSEL AND FLANGE

	E(KG/MM2)	P.RATIO	AL(/DEG)	R(MM)	TH(MM)	TM(DEG)	TB(DEG)
VESSEL	1.760E+04	0.3000	1.919E-05	8475.00	50.00	510.00	0.00
FLANGE	1.760E+04	0.3000	1.919E-05	8800.00	200.00	75.00	50.00

NFIX= 0 WEIGHT(KG)= 3.0000E+06 L(MM)= 1500.00

** SOLUTION FOR WEIGHT LOAD **

MO(KG.MM/MM)=-1.440E+04 P1(KG/MM)= 2.873E+01 M1(KG.MM/MM)=-1.728E+04
 P2(KG/MM)= 0.000E+00 M2(KG.MM/MM)= 0.000E+00

	DISP(MM)	I(RADIAN)
VESSEL(X=0)	-6.8400E-02	1.7916E-02
FLANGE(R=R1)	-1.8600E+00	1.7916E-02
FLANGE(R=R2)	-1.8379E+00	1.7928E-02

	X(MM)	SXM(KG/MM2)	SXB(KG/MM2)	STM(KG/MM2)	STB(KG/MM2)
VESSEL	0.00	1.127	-34.566	0.196	-10.370
VESSEL	150.00	1.127	-24.508	4.272	-7.353
VESSEL	300.00	1.127	-15.748	5.968	-4.725
VESSEL	450.00	1.127	-8.849	6.128	-2.655
VESSEL	600.00	1.127	-3.879	5.416	-1.164
VESSEL	750.00	1.127	-0.625	4.316	-0.187
VESSEL	900.00	1.127	1.257	3.144	0.377
VESSEL	1050.00	1.127	2.133	2.086	0.640
VESSEL	1200.00	1.127	2.339	1.229	0.702
VESSEL	1350.00	1.127	2.148	0.594	0.644
VESSEL	1500.00	1.127	1.762	0.166	0.529
VESSEL	1650.00	1.127	1.319	-0.093	0.396
VESSEL	1800.00	1.127	0.902	-0.224	0.270
VESSEL	1950.00	1.127	0.553	-0.267	0.166
VESSEL	2100.00	1.127	0.288	-0.256	0.086
VESSEL	2250.00	1.127	0.104	-0.216	0.031
VESSEL	2400.00	1.127	-0.011	-0.166	-0.003
VESSEL	2550.00	1.127	-0.074	-0.117	-0.022
VESSEL	2700.00	1.127	-0.098	-0.074	-0.030
VESSEL	2850.00	1.127	-0.099	-0.041	-0.030
VESSEL	3000.00	1.127	-0.087	-0.017	-0.026
FLANGE(R=R1)		0.144	2.591	-3.819	4.498
FLANGE(R=R2)		0.000	0.000	-3.676	3.586

計算結果リスト (例題 2 , 2 / 2)

** SOLUTION FOR (WEIGHT+TEMPERATURE) LOAD **

MO(KG.MM/MM)=-1.413E+04 P1(KG/MM)= 2.899E+01 M1(KG.MM/MM)=-1.703E+04
 P2(KG/MM)= 0.000E+00 M2(KG.MM/MM)= 0.000E+00

	DISP(MM)	I(RADIAN)
VESSEL(X=0)	1.6659E+01	6.3374E-02
FLANGE(R=R1)	1.0321E+01	6.3374E-02
FLANGE(R=R2)	1.0811E+01	6.4889E-02

	X(MM)	SXM(KG/MM2)	SXB(KG/MM2)	STM(KG/MM2)	STB(KG/MM2)
VESSEL	0.00	1.127	-33.912	1.158	-10.174
VESSEL	150.00	1.127	-23.934	5.579	-7.180
VESSEL	300.00	1.127	-15.671	7.672	-4.701
VESSEL	450.00	1.127	-9.812	8.231	-2.943
VESSEL	600.00	1.127	-6.549	7.822	-1.965
VESSEL	750.00	1.127	-5.762	6.759	-1.729
VESSEL	900.00	1.127	-7.113	5.122	-2.134
VESSEL	1050.00	1.127	-10.077	2.785	-3.023
VESSEL	1200.00	1.127	-13.903	-0.534	-4.171
VESSEL	1350.00	1.127	-17.523	-5.194	-5.257
VESSEL	1500.00	1.127	-19.443	-11.534	-5.833
VESSEL	1650.00	1.127	-18.375	-5.879	-5.512
VESSEL	1800.00	1.127	-15.386	-1.985	-4.616
VESSEL	1950.00	1.127	-11.726	0.427	-3.518
VESSEL	2100.00	1.127	-8.172	1.706	-2.452
VESSEL	2250.00	1.127	-5.140	2.190	-1.542
VESSEL	2400.00	1.127	-2.793	2.172	-0.838
VESSEL	2550.00	1.127	-1.130	1.879	-0.339
VESSEL	2700.00	1.127	-0.063	1.471	-0.019
VESSEL	2850.00	1.127	0.535	1.054	0.160
VESSEL	3000.00	1.127	0.796	0.686	0.239
FLANGE(R=R1)		0.145	2.554	-3.853	5.483
FLANGE(R=R2)		0.000	0.000	-3.708	4.534

1.7 ノズルと容器の接続部

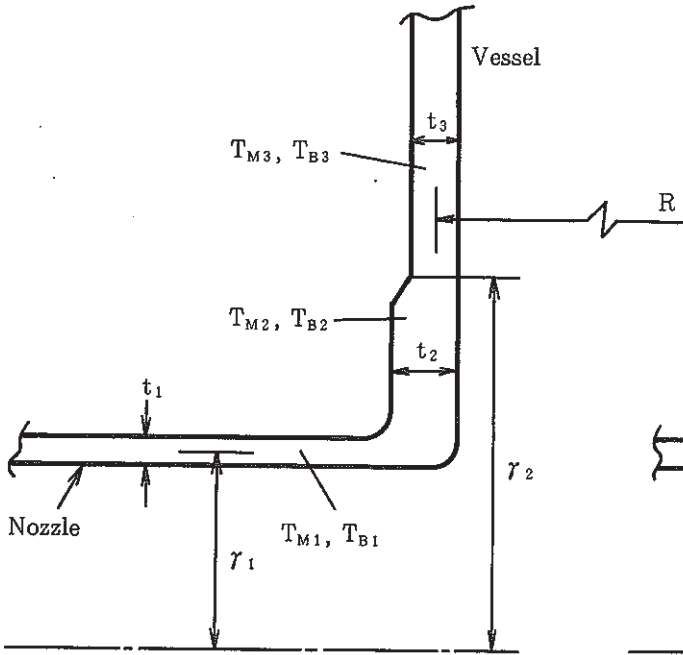


Fig. 1.7.1 Junction of cylindrical nozzle and vessel

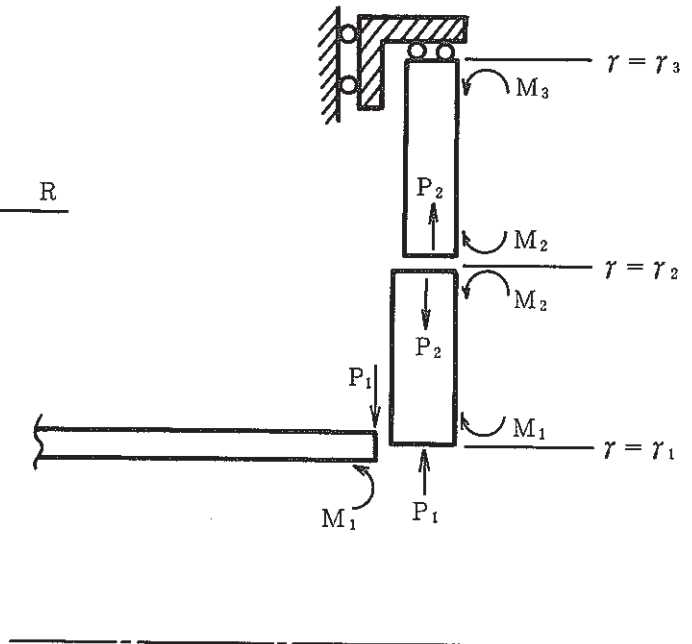


Fig. 1.7.2 Simplified analysis model for nozzle and vessel

球または円筒の容器と円筒ノズルとの接続部，大口径主管と小口径分岐管とのT管継手部などにおける熱応力を軸対称シェル近似により求める。

Fig. 1.7.1 に示すようにノズルの半径を r_1 ，容器側補強部の外半径を r_2 とする。各部の板厚を t_i ，板厚平均温度を T_{Mi} ，等価線形内外面温度差を T_{Bi} とする。ここで $i=1$ はノズル， $i=2$ は容器補強部， $i=3$ は容器一般部とする。Fig. 1.7.2 に示すように要素1（ノズル～円筒シェル），要素2（容器補強部～円板），要素3（容器一般部～円板）に分割する。各要素が自由熱膨張した時の変位，勾配，膜力および曲げモーメントの解を求める（解Ⅰ）。解Ⅰより各要素の接続部における変位と勾配の不連続量を求める。接続部の不連続量を打消すような半径方向反力と曲げモーメントを境界条件を考慮して求める。各要素に接続部の反力と曲げモーメントを負荷した時の解を求める（解Ⅱ）。解Ⅰと解Ⅱを重ね合わせることにより，各要素が剛結合された場合の解を求める。容器一般部の境界半径 r_3 は接続部の影響が無視できる程度にとる。例えば半径 R の円筒容器の場合は

$$r_3 > r_2 + \ell_A = r_2 + 2.5 \sqrt{Rt_3} \quad (a)$$

にとれば十分である。

(1) 自由熱膨張の解

要素1（ノズル）は1.1節より

$$\left[\begin{array}{l} M_1^* = \frac{D_1(1+\nu)\alpha T_{B1}}{t_1} \text{ として } u_1^i(x) = r_1 \alpha T_{M1} + \frac{M_1^*}{2\beta^2 D_1} \phi(\beta x) \\ i_1^i(x) = -\frac{M_1^*}{\beta D_1} \theta(\beta x) \quad , \quad N_{\theta 1}^i = \frac{Et_1 M_1^*}{2\beta^2 D_1 r_1} \phi(\beta x) \\ M_{x1}^i = -M_1^* \{1 - \varphi(\beta x)\} \quad , \quad M_{\theta 1}^i = -M_1^* \{1 - \nu \varphi(\beta x)\} \end{array} \right] \quad (b)$$

要素 2 (容器補強部) は付録 A 2.7 節より

$$\left[\begin{array}{l} u_2^i(r) = r \alpha T_{M2} \quad , \quad i_2^i(r) = r \alpha \frac{T_{B2}}{t_2} \\ N_{r2}^i = 0 \quad , \quad N_{\theta 2}^i = 0 \quad , \quad M_{r2}^i = 0 \quad , \quad M_{\theta 2}^i = 0 \end{array} \right] \quad (c)$$

要素 3 (容器一般部) は同様に

$$\left[\begin{array}{l} u_3^i(r) = r \alpha T_{M3} \quad , \quad i_3^i(r) = r \alpha \frac{T_{B3}}{t_3} \\ N_{r3}^i = 0 \quad , \quad N_{\theta 3}^i = 0 \quad , \quad M_{r3}^i = 0 \quad , \quad M_{\theta 3}^i = 0 \end{array} \right] \quad (d)$$

となる。

(2) 不連続量

要素 1 と 2 の接続部の不連続量 δu_1 , δi_1 は

$$\left[\begin{array}{l} \delta u_1 = u_1^i(0) - u_2^i(r_1) = r_1 \alpha (T_{M1} - T_{M2}) + \frac{M_1^*}{2\beta^2 D_1} \\ \delta i_1 = i_1^i(0) + i_2^i(r_1) = -\frac{M_1^*}{\beta D_1} + r_1 \alpha \frac{T_{B2}}{t_2} \end{array} \right] \quad (e)$$

となり, 要素 2 と 3 の接続部の不連続量 δu_2 , δi_2 は

$$\left[\begin{array}{l} \delta u_2 = u_2^i(r_2) - u_3^i(r_2) = r_2 \alpha (T_{M2} - T_{M3}) \\ \delta i_2 = i_2^i(r_2) - i_3^i(r_2) = r_2 \alpha \left(\frac{T_{B2}}{t_2} - \frac{T_{B3}}{t_3} \right) \end{array} \right] \quad (f)$$

となる。要素 3 の境界部の勾配 δi_3 は

$$\delta i_3 = i_3^i(r_3) = r_3 \alpha \frac{T_{B3}}{t_3} \quad (g)$$

となる。

(3) 接続部の反力および曲げモーメント

Fig. 1.7.2 に示す向きに反力 P_1 , P_2 および曲げモーメント M_1 , M_2 , M_3 が生じたとする。

M_1 , P_1 による要素 1 の解は付録 A 1.2 節より

$$\left[u_1^i(x) = \frac{1}{2\beta^3 D_1} \{ \beta M_1 \phi(\beta x) - P_1 \theta(\beta x) \} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} i_1^I(x) = -\frac{1}{2\beta^2 D_1} \{ 2\beta M_1 \theta(\beta x) - P_1 \varphi(\beta x) \} \\ N_{\theta_1^I} = \frac{Et_1}{2\beta^3 D_1 r_1} \{ \beta M_1 \phi(\beta x) - P_1 \theta(\beta x) \} \\ M_{x_1^I} = M_1 \varphi(\beta x) - \frac{P_1}{\beta} \zeta(\beta x), \quad M_{\theta_1^I} = \nu \cdot M_{x_1^I} \end{array} \right] \quad (h)$$

となる。P₁, P₂およびM₁, M₂による要素2の解は付録A 2.5, A 2.6節より

$$\left[\begin{array}{l} u_2^I(r) = \frac{1}{Et_2(r_2^2 - r_1^2)} \{ (1-\nu)(r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2)r + (1+\nu)r_1^2 r_2^2 (P_1 - P_2) \frac{1}{r} \\ i_2^I(r) = \frac{1}{D_2(r_2^2 - r_1^2)} \left\{ \frac{r_2^2 M_2 - r_1^2 M_1}{1+\nu} r + \frac{r_1^2 r_2^2 (M_2 - M_1)}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r} \right. \\ N_{r_2^I} = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \{ (r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2) - r_1^2 r_2^2 (P_1 - P_2) \frac{1}{r^2} \} \\ N_{\theta_2^I} = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \{ (r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2) + r_1^2 r_2^2 (P_1 - P_2) \frac{1}{r^2} \} \\ M_{r_2^I} = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \{ (r_2^2 M_2 - r_1^2 M_1) - r_1^2 r_2^2 (M_2 - M_1) \frac{1}{r^2} \} \\ M_{\theta_2^I} = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \{ (r_2^2 M_2 - r_1^2 M_1) + r_1^2 r_2^2 (M_2 - M_1) \frac{1}{r^2} \} \end{array} \right] \quad (1.36)$$

となる。P₂およびM₂, M₃による要素3の解は同様に

$$\left[\begin{array}{l} u_3^I(r) = \frac{P_2}{Et_3(r_3^2 - r_2^2)} \{ (1-\nu)r_2^2 \cdot r + (1+\nu)r_2^2 r_3^2 \cdot \frac{1}{r} \} \\ i_3^I(r) = \frac{1}{D_3(r_3^2 - r_2^2)} \left\{ \frac{r_3^2 M_3 - r_2^2 M_2}{1+\nu} r + \frac{r_2^2 r_3^2 (M_3 - M_2)}{1-\nu} \frac{1}{r} \right. \\ N_{r_3^I} = \frac{P_2}{r_3^2 - r_2^2} \left\{ r_2^2 - r_2^2 r_3^2 \cdot \frac{1}{r^2} \right\} \\ N_{\theta_3^I} = \frac{P_2}{r_3^2 - r_2^2} \left\{ r_2^2 + r_2^2 r_3^2 \cdot \frac{1}{r^2} \right\} \\ M_{r_3^I} = \frac{1}{r_3^2 - r_2^2} \{ (r_3^2 M_3 - r_2^2 M_2) - r_2^2 r_3^2 (M_3 - M_2) \cdot \frac{1}{r^2} \} \\ M_{\theta_3^I} = \frac{1}{r_3^2 - r_2^2} \{ (r_3^2 M_3 - r_2^2 M_2) + r_2^2 r_3^2 (M_3 - M_2) \cdot \frac{1}{r^2} \} \end{array} \right] \quad (1.37)$$

となる。不連続量を打消すためには

$$\left[u_1^I(0) - u_2^I(r_1) = -\delta u_1, \quad i_1^I(0) + i_2^I(r_1) = -\delta i_1 \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} u_2^{\text{II}}(r_2) - u_3^{\text{I}}(r_2) = -\delta u_2 \quad , \quad i_2^{\text{I}}(r_2) - i_3^{\text{I}}(r_2) = -\delta i_2 \\ i_3^{\text{I}}(r_3) = -\delta i_3 \end{array} \right] \quad (\text{i})$$

でなければならない。(i)式は未知数 P_1, P_2, M_1, M_2, M_3 に対する5元連立一次方程式

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\delta u_1 \\ -\delta i_1 \\ -\delta u_2 \\ -\delta i_2 \\ -\delta i_3 \end{pmatrix} \quad (\text{j})$$

となる。ここに左辺の行列の各成分は次のようになる。

$$\left[\begin{array}{l} a_{11} = -\frac{1}{2\beta^3 D_1} - \frac{r_1}{Et_2(r_2^2 - r_1^2)} \{ (1-\nu)r_1^2 + (1+\nu)r_2^2 \}, \quad a_{12} = \frac{2r_1 r_2^2}{Et_2(r_2^2 - r_1^2)}, \\ a_{13} = \frac{1}{2\beta^2 D_1}, \quad a_{14} = a_{15} = 0, \quad a_{21} = \frac{1}{2\beta^2 D_1}, \quad a_{22} = 0, \\ a_{23} = -\frac{1}{\beta D_1} - \frac{r_1}{D_2(r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{r_1^2}{1+\nu} + \frac{r_2^2}{1-\nu} \right), \\ a_{24} = \frac{r_1 r_2^2}{D_2(r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{1}{1+\nu} + \frac{1}{1-\nu} \right), \quad a_{25} = 0, \quad a_{31} = \frac{2r_1 r_2}{Et_2(r_2^2 - r_1^2)}, \\ a_{32} = -\frac{r_2}{Et_2(r_2^2 - r_1^2)} \{ (1-\nu)r_2^2 + (1+\nu)r_1^2 \} - \frac{r_2}{Et_3(r_3^2 - r_2^2)} \{ (1-\nu)r_2^2 + (1+\nu)r_3^2 \}, \quad (\text{k}) \\ a_{33} = a_{34} = a_{35} = 0, \quad a_{41} = a_{42} = 0, \quad a_{43} = -\frac{r_2 r_1^2}{D_2(r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{1}{1+\nu} + \frac{1}{1-\nu} \right), \\ a_{44} = \frac{r_2}{D_2(r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{r_2^2}{1+\nu} + \frac{r_1^2}{1-\nu} \right) + \frac{r_2}{D_3(r_3^2 - r_2^2)} \left(\frac{r_2^2}{1+\nu} + \frac{r_3^2}{1-\nu} \right), \\ a_{45} = -\frac{r_2 r_3^2}{D_3(r_3^2 - r_2^2)} \left(\frac{1}{1+\nu} + \frac{1}{1-\nu} \right), \quad a_{51} = a_{52} = a_{53} = 0 \\ a_{54} = -\frac{r_3 r_2^2}{D_3(r_3^2 - r_2^2)} \left(\frac{1}{1+\nu} + \frac{1}{1-\nu} \right), \quad a_{55} = \frac{r_3}{D_3(r_3^2 - r_2^2)} \left(\frac{r_3^2}{1+\nu} + \frac{r_2^2}{1-\nu} \right) \end{array} \right]$$

(4) 重ね合わせ

連立一次方程式(j)を解けば P_1, P_2, M_1, M_2, M_3 が求まり、それを(h), (1.36),

(1.37)式に代入すれば解IIが求まる。解Iと解IIを重ね合わせれば熱応力が求まる。

要素1については

$$\left[\begin{array}{l} N_{\theta 1} = N_{\theta 1}^{\text{I}} + N_{\theta 1}^{\text{II}} = \frac{Et_1}{2\beta^3 D_1 r_1} \{ \beta (M_1^* + M_1) \phi(\beta r) - P_1 \theta(\beta r) \} \\ M_{x1} = M_{x1}^{\text{I}} + M_{x1}^{\text{II}} = -M_1^* + (M_1^* + M_1) \phi(\beta r) - \frac{P_1}{\beta} \zeta(\beta r) \end{array} \right] \quad (\text{1.38})$$

$$\left[\begin{array}{l} M_{\theta 1} = M_{\theta 1}^I + M_{\theta 1}^{\text{II}} = -M_1^* + \nu \cdot (M_1^* + M_1) \varphi(\beta x) - \frac{\nu \cdot P_1}{\beta} \zeta(\beta x) \\ \sigma_{\theta 1, M} = N_{\theta 1} / t_1, \quad \sigma_{x 1, B} = 6 M_{x 1} / t_1^2, \quad \sigma_{\theta 1, B} = 6 M_{\theta 1} / t_1^2 \end{array} \right]$$

となる。要素 2, 3 については解 I は無応力状態であるから解 II が熱応力を与える。

$$\text{要素 2} \quad \left[\begin{array}{l} \sigma_{r 2, M} = N_{r 2}^{\text{II}} / t_2, \quad \sigma_{\theta 2, M} = N_{\theta 2}^{\text{II}} / t_2 \\ \sigma_{r 2, B} = 6 M_{r 2}^{\text{II}} / t_2^2, \quad \sigma_{\theta 2, B} = 6 M_{\theta 2}^{\text{II}} / t_2^2 \end{array} \right] \quad (l)$$

$$\text{要素 3} \quad \left[\begin{array}{l} \sigma_{r 3, M} = N_{r 3}^{\text{II}} / t_3, \quad \sigma_{\theta 3, M} = N_{\theta 3}^{\text{II}} / t_3 \\ \sigma_{r 3, B} = 6 M_{r 3}^{\text{II}} / t_3^2, \quad \sigma_{\theta 3, B} = 6 M_{\theta 3}^{\text{II}} / t_3^2 \end{array} \right] \quad (m)$$

(6) 簡易解析プログラム

以上の手順によりノズルと容器の熱応力を計算するプログラムを作成した。温度データは付録 A 3 の「構造設計用複数位置温度計算プログラム」により作成された非定常熱伝導計算結果ファイルから引用する。

入力データカードイメージは次のとおりである。

カード 1 (5 F 10.0) E, PR, AL, RC1, RC2
 $\left\{ \begin{array}{l} E(\text{kg/mm}^2) \\ \nu \\ \alpha(\text{mm/mm}^\circ\text{C}) \end{array} \right\}$ $\left\{ \begin{array}{l} r_{c1}(\text{mm}) \\ r_{c2}(\text{mm}) \end{array} \right\}$

カード 2 (2 F 10.0, i5) R1, TH1, N1
 r_1 t_1
 カード 3 (2 F 10.0, i5) R2, TH2, N2
 r_2 t_2
 カード 4 (2 F 10.0, i5) R3, TH3, N3
 r_3 t_3

} 位置識別番号

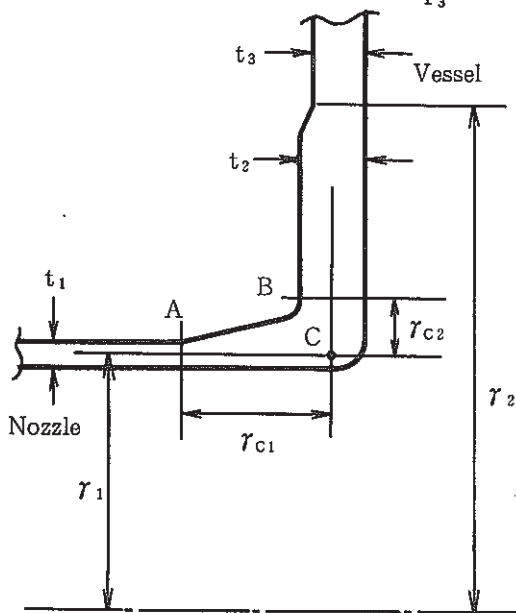


Fig. 1.7.3 Tapered crotch

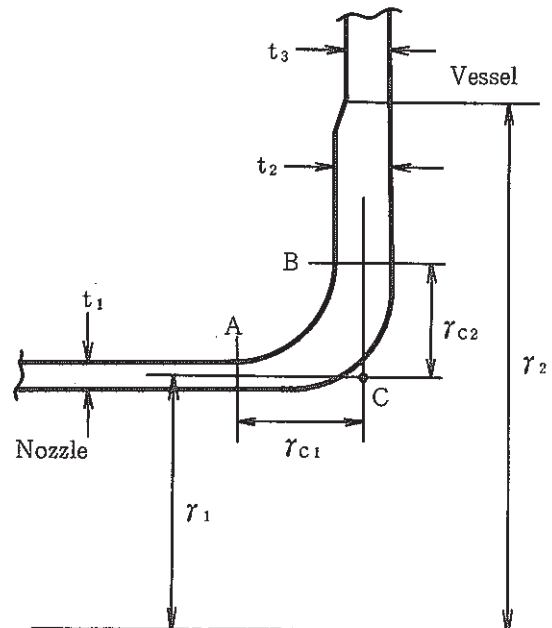


Fig. 1.7.4 Curved crotch

計算モデルは Fig. 1.7.2 に示したように容器とノズルが直角に接続された場合（突合わせ溶接）としている。実際のノズルでは Fig. 1.7.3, 1.7.4 に示すように応力集中を避けるためにテーパあるいはコーナーを組み合わせた構造となっているのが普通である。テーパあるいはコーナー始点（ノズル側は上図中の A 点, 容器クロッチ側は B 点）における熱応力は計算モデルにおける同位置の応力で近似する。 r_{c1} , r_{c2} は計算モデルにおける交差位置（上図中の C 点）から A, B 点までの距離である。

N1, N2, N3 は位置識別番号である。温度ファイルには複数位置の温度計算結果が入っている。その位置番号を指定する。位置 N1 の温度計算結果がノズルの温度 (T_{M1} , T_{B1}) として引用される。位置 N2 の温度計算結果が容器クロッチ部の温度 (T_{M2} , T_{B2}) として引用される。位置 N3 の温度計算結果が容器一般部の温度 (T_{M3} , T_{B3}) として引用される。プログラムリスト, 付録 A3 のノズルに対する熱応力計算例の JCL および入力データリスト, 計算結果リストの一部を次頁以降に示す。FINAS による詳細解析結果 (Ref 2) との比較結果を Table. 1.7.1 (ノズル側コーナー始点), Table. 1.7.2 (容器クロッチ側コーナー始点), Table. 1.7.4 (一般容器側テーパ始点), Table. 1.7.5 (一般容器部) に示す。出力リストの SX.M はクロッチおよび容器の $\sigma_{r,M}$ を表わし, SX.B はノズルの $\sigma_{x,B}$ あるいはクロッチおよび容器の $\sigma_{r,B}$ を表わす。ST.M は $\sigma_{\theta,M}$ を表わし, ST.B は $\sigma_{\theta,B}$ を表わす。T.M は T_M を表わし, T.B は T_B を表わす。

温度データ (T_{M1} , T_{B1} , T_{M2} , T_{B2} , T_{M3} , T_{B3}) の一部あるいは全てをカード入力とする場合は, 1.8 節のプログラムを参考にして, プログラムの該当箇所を変更すれば良い。

ノズルおよびクロッチ部の任意位置の応力を求めたい場合は, r_{c1} , r_{c2} として交差点 C から該当位置までの距離を入力するとよい。

プログラムリスト(1/4)

```

C-----
C   THERMAL STRESS CALCULATION BY CYLINDRICAL SHELL THEORY
C   DISCONTINUITY OF NOZZLE AND VESSEL JUNCTION
C-----
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION YD(200),PTIME(200),TM(3,200),TB(3,200),A(5,5),B(5),X(5)
C-----
      F1(BX)=EXP(-BX)*(COS(BX)+SIN(BX))
      F2(BX)=EXP(-BX)*(COS(BX)-SIN(BX))
      F3(BX)=EXP(-BX)*COS(BX)
      F4(BX)=EXP(-BX)*SIN(BX)
C-----
500 FORMAT(5F10.0)
510 FORMAT(2F10.0,I5)
600 FORMAT(1H1/10X,'CALCULATION OF THERMAL STRESSES AT THE ',
+ 'JUNCTION OF NOZZLE AND VESSEL '/')
610 FORMAT(/10X,'TIME=',F7.1,'SEC',/,35X,'T.M',5X,'T.B',4X,
+ 'SX.M',4X,'SX.B',4X,'ST.M',4X,'ST.B')
620 FORMAT(10X,'NOZZLE FAR FROM JUNC',2F8.2,8X,3F8.2)
625 FORMAT(10X,'NOZZLE SMOOTH CORNER',24X,3F8.2)
630 FORMAT(10X,'NOZZLE BUTT-WELDED ',24X,3F8.2)
640 FORMAT(10X,'CROTCH BUTT-WELDED ',6F8.2)
645 FORMAT(10X,'CROTCH SMOOTH CORNER',16X,4F8.2)
650 FORMAT(10X,'CROTCH AT TAPER ',16X,4F8.2)
660 FORMAT(10X,'VESSEL AT TAPER ',6F8.2)
670 FORMAT(10X,'VESSEL FAR FROM JUNC',16X,4F8.2)
C-----
      DATA INPUT AND CONSTANT VALUE SET
      READ(5,500) E,PR,AL,RC1,RC2
      READ(5,510) R1,TH1,N1
      READ(5,510) R2,TH2,N2
      READ(5,510) R3,TH3,N3
      IF(N1) 10,10,20
10  NN1=-10*N1+5
      GO TO 30
20  NN1= 10*N1+1
30  IF(N2) 40,40,50
40  NN2=-10*N2+5
      GO TO 60
50  NN2= 10*N2+1
60  IF(N3) 70,70,80
70  NN3=-10*N3+5
      GO TO 90
80  NN3= 10*N3+1
90  CONTINUE
C-----
      READ TEMPERATURE RESULTS FILE(20)
      READ(20) NTIME,(PTIME(I),I=1,NTIME)
100 READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      IF(NY.EQ.NN1) GO TO 110
      GO TO 100
110 DO 120 I=1,NTIME
      TM(1,I)=YD(I)
120 CONTINUE
      READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      DO 130 I=1,NTIME
      TB(1,I)=YD(I)
130 CONTINUE
      REWIND(20)
150 READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)

```

プログラムリスト(2/4)

```

      IF(NY.EQ.NN2) GO TO 160
      GO TO 150
160 DO 170 I=1,NTIME
      TM(2,I)=YD(I)
170 CONTINUE
      READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      DO 180 I=1,NTIME
      TB(2,I)=YD(I)
180 CONTINUE
      REWIND(20)
200 READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      IF(NY.EQ.NN3) GO TO 210
      GO TO 200
210 DO 220 I=1,NTIME
      TM(3,I)=YD(I)
220 CONTINUE
      READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
      DO 230 I=1,NTIME
      TB(3,I)=YD(I)
230 CONTINUE
      REWIND 20
      PP1=1.0D0+PR
      PM1=1.0D0-PR
      BT=SQRT(3.0D0*PP1*PM1)
      BT2=BT/R1/TH1
      BT=SQRT(BT2)
      BT3=BT*BT2
      BX=BT*RC1
      RV=(R1+RC2)**2
      DD=E/12.0D0/(PP1*PM1)
      D1=DD*TH1**3
      D2=DD*TH2**3
      D3=DD*TH3**3
      RR1=R1*R1
      RR2=R2*R2
      RR3=R3*R3
      RR21=RR2-RR1
      RR32=RR3-RR2
      ET2=E*TH2*RR21
      D21=D2*RR21
      ET3=E*TH3*RR32
      D32=D3*RR32
      SS1=6/TH1**2
      SS2=6/TH2**2
      SS3=6/TH3**2
C-----          CALCULATION START
      DO 400 IT=1,NTIME
      IF(MOD(IT,5).EQ.1) WRITE(6,600)
      TIME=PTIME(IT)
      TM1=TM(1,IT)
      TM2=TM(2,IT)
      TM3=TM(3,IT)
      TB1=TB(1,IT)
      TB2=TB(2,IT)
      TB3=TB(3,IT)
      WRITE(6,610) TIME
C-----          COMPUTE DISCONTINUITY OF DISPLACEMENT AND
C-----          ROTATION

```

プログラムリスト (3 / 4)

```

RM1S=D1*AL*TB1*PP1/TH1
DELU1=R1*AL*(TM1-TM2)+RM1S/(2*BT2*D1)
DELI1=-RM1S/(BT*D1)+R1*AL*TB2/TH2
DELU2=R2*AL*(TM2-TM3)
DELI2=R2*AL*(TB2/TH2-TB3/TH3)
DELI3=R3*AL*TB3/TH3
C-----          COMPUTE DISCONTINUITY REACTION AND MOMENT
C-----          SET MATRIX AND VECTOR
DO 250 J=1,5
DO 250 I=1,5
A(I,J)=0.0
250 CONTINUE
A(1,1)=-1/(2*BT3*D1)-R1*(PM1*RR1+PP1*RR2)/ET2
A(1,2)=2*R1*RR2/ET2
A(1,3)=1/(2*BT2*D1)
B(1)=-DELU1
A(2,1)=1/(2*BT2*D1)
A(2,3)=-1/(BT*D1)
+      -R1/D21*(RR1/PP1+RR2/PM1)
A(2,4)=R1*RR2/D21*(1/PP1+1/PM1)
B(2)=-DELI1
A(3,1)=2*RR1*R2/ET2
A(3,2)=-R2*(PM1*RR2+PP1*RR1)/ET2
+      -R2*(PM1*RR2+PP1*RR3)/ET3
B(3)=-DELU2
A(4,3)=-R2*RR1/D21*(1/PP1+1/PM1)
A(4,4)=R2/D21*(RR2/PP1+RR1/PM1)
+      +R2/D32*(RR2/PP1+RR3/PM1)
A(4,5)=-R2*RR3/D32*(1/PP1+1/PM1)
B(4)=-DELI2
A(5,4)=-R3*RR2/D32*(1/PP1+1/PM1)
A(5,5)=R3/D32*(RR3/PP1+RR2/PM1)
B(5)=-DELI3
CALL GAUSE(A,B,X,5)
P1=X(1)
P2=X(2)
RM1=X(3)
RM2=X(4)
RM3=X(5)
C-----          COMPUTE DISCONTINUITY STRESSES
C-----
C-----          NOZZLE FAR AWAY FROM JUNCTION
SXB1=-SS1*RM1S
STM1=0.0
STB1=SXB1
WRITE(6,620) TM1,TB1,SXB1,STM1,STB1
C-----          NOZZLE - SMOOTH CORNER JUNCTION
STM1=E*(BT*(RM1S+RM1)*F2(BX)-P1*F3(BX))/(2*BT3*D1*R1)
SXB1=SS1*(-RM1S+(RM1S+RM1)*F1(BX)-P1/BT*F4(BX))
STB1=SS1*(-RM1S+PR*((RM1S+RM1)*F1(BX)-P1/BT*F4(BX)))
WRITE(6,625) SXB1,STM1,STB1
C-----          NOZZLE - 90 DEG BUTT-WELDED JUNCTION
STM1=E*(BT*(RM1S+RM1)-P1)/(2*BT3*D1*R1)
SXB1=SS1*RM1
STB1=SS1*(-RM1S*PM1+PR*RM1)
WRITE(6,630) SXB1,STM1,STB1
C-----          CROTCH - VESSEL REINFORCED REGION
C-----          CROTCH - 90 DEG BUTT-WELDED JUNCTION

```

プログラムリスト (4 / 4)

```

SRM2=-P1/TH2
STM2=(RR1*P1-RR2*P2+RR2*(P1-P2))/RR21/TH2
SRB2=SS2*RM1
STB2=SS2*(RR2*RM2-RR1*RM1+RR2*(RM2-RM1))/RR21
WRITE(6,640) TM2,TB2,SRM2,SRB2,STM2,STB2
C----- CROTCH - SMOOTH CORNER JUNCTION
SRM2=(RR1*P1-RR2*P2-RR1*RR2*(P1-P2)/RV)/RR21/TH2
STM2=(RR1*P1-RR2*P2+RR1*RR2*(P1-P2)/RV)/RR21/TH2
SRB2=SS2*(RR2*RM2-RR1*RM1-RR1*RR2*(RM2-RM1)/RV)/RR21
STB2=SS2*(RR2*RM2-RR1*RM1+RR1*RR2*(RM2-RM1)/RV)/RR21
WRITE(6,645) SRM2,SRB2,STM2,STB2
C----- END OF REINFORCEMENT - TAPER
SRM2=-P2/TH2
STM2=(RR1*P1-RR2*P2+RR1*(P1-P2))/RR21/TH2
SRB2=SS2*RM2
STB2=SS2*(RR2*RM2-RR1*RM1+RR1*(RM2-RM1))/RR21
WRITE(6,650) SRM2,SRB2,STM2,STB2
C----- VESSEL NO REINFORCED REGION - TAPER
SRM3=-P2/TH3
STM3=(RR2+RR3)*P2/RR32/TH3
SRB3=SS3*RM2
STB3=SS3*(RR3*RM3-RR2*RM2+RR3*(RM3-RM2))/RR32
WRITE(6,660) TM3,TB3,SRM3,SRB3,STM3,STB3
C----- VESSEL FAR AWAY FROM JUNCTION
SRM3=0.0
STM3=2*RR2*P2/RR32/TH3
SRB3=SS3*RM3
STB3=SS3*(RR3*RM3-RR2*RM2+RR2*(RM3-RM2))/RR32
WRITE(6,670) SRM3,SRB3,STM3,STB3
C----- CALCULATION END
400 CONTINUE
STOP
END

C-----
C----- SUBROUTINE GAUSE - SOLVE EQUATION BY GAUSE SWEEP OUT METHOD -----
C-----
SUBROUTINE GAUSE(A,B,X,N)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(N,N),B(N),X(N)
NM1=N-1
DO 10 K=1,NM1
  KP1=K+1
  DO 20 J=KP1,N
    20 A(K,J)=A(K,J)/A(K,K)
    B(K)=B(K)/A(K,K)
    DO 30 I=KP1,N
      DO 40 J=KP1,N
        40 A(I,J)=A(I,J)-A(I,K)*A(K,J)
      30 B(I)=B(I)-A(I,K)*B(K)
    10 CONTINUE
  X(N)=B(N)/A(N,N)
  DO 50 K=1,NM1
    L=N-K
    LP1=L+1
    X(L)=B(L)
    DO 60 J=LP1,N
      60 X(L)=X(L)-A(L,J)*X(J)
    50 CONTINUE
  RETURN
END

```

JCL および入力データリスト

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6
//Q302OST5 JOB (GENERAL),MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3020,
//  ATTR=(TO,CO,W1)
//COPY EXEC PGM=JSDGENER
//SYSPRINT DD SYSOUT=*
//SYSIN DD DUMMY           ← 温度ファイル
//SYSUT1 DD DSN=Q3020.N1TR2.POST,UNIT=DASD,DISP=SHR
//SYSUT2 DD DSN=Q3020.POST,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),
//      SPACE=(TRK,(5,10),RLSE)
//*
//CLG EXEC FORT7CLG
//FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=*           ← プログラム
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3020.TEST.FORT(ST5),DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUMMY
//GO.FT20F001 DD DSN=Q3020.POST,UNIT=WORK,DISP=(OLD,DELETE)
//GO.FT06F001 DD SYSOUT=*
//GO.SYSIN DD *
      1.67D4      0.298D0      19.93D-6      1.0D2      1.0D2
      527.7D0      26.8D0      3
      838.0D0      52.0D0      4
      1838.0D0      40.0D0      5
/*
//

```

下線部はユーザーが変更すべき箇所である。

計算結果リスト (1/2)

CALCULATION OF THERMAL STRESSES AT THE JUNCTION OF NOZZLE AND VESSEL

TIME= 30.0SEC

	T.M	T.B	SX.M	SX.B	ST.M	ST.B
NOZZLE FAR FROM JUNC	498.63	-4.57		1.08	0.00	1.08
NOZZLE SMOOTH CORNER				1.21	0.07	1.12
NOZZLE BUTT-WELDED				0.95	0.27	1.04
CROTCH BUTT-WELDED	499.62	-1.78	0.02	0.25	-0.05	0.43
CROTCH SMOOTH CORNER			0.01	0.28	-0.04	0.40
CROTCH AT TAPER			0.00	0.30	-0.03	0.37
VESSEL AT TAPER	499.50	-2.11	-0.01	0.51	0.01	0.49
VESSEL FAR FROM JUNC			0.00	0.51	0.00	0.50

TIME= 35.0SEC

	T.M	T.B	SX.M	SX.B	ST.M	ST.B
NOZZLE FAR FROM JUNC	497.86	-6.59		1.56	0.00	1.56
NOZZLE SMOOTH CORNER				1.77	0.09	1.62
NOZZLE BUTT-WELDED				1.41	0.42	1.52
CROTCH BUTT-WELDED	499.39	-2.75	0.02	0.38	-0.08	0.67
CROTCH SMOOTH CORNER			0.01	0.42	-0.06	0.62
CROTCH AT TAPER			-0.01	0.46	-0.05	0.58
VESSEL AT TAPER	499.20	-3.22	-0.01	0.78	0.01	0.76
VESSEL FAR FROM JUNC			0.00	0.77	0.00	0.77

TIME= 40.0SEC

	T.M	T.B	SX.M	SX.B	ST.M	ST.B
NOZZLE FAR FROM JUNC	496.91	-8.86		2.10	0.00	2.10
NOZZLE SMOOTH CORNER				2.41	0.12	2.19
NOZZLE BUTT-WELDED				1.96	0.61	2.06
CROTCH BUTT-WELDED	499.10	-3.95	0.03	0.52	-0.11	0.96
CROTCH SMOOTH CORNER			0.01	0.59	-0.09	0.90
CROTCH AT TAPER			-0.01	0.65	-0.07	0.83
VESSEL AT TAPER	498.83	-4.56	-0.01	1.10	0.02	1.07
VESSEL FAR FROM JUNC			0.00	1.09	0.01	1.08

TIME= 45.0SEC

	T.M	T.B	SX.M	SX.B	ST.M	ST.B
NOZZLE FAR FROM JUNC	495.77	-11.32		2.68	0.00	2.68
NOZZLE SMOOTH CORNER				3.12	0.15	2.81
NOZZLE BUTT-WELDED				2.58	0.83	2.65
CROTCH BUTT-WELDED	498.74	-5.35	0.04	0.69	-0.15	1.31
CROTCH SMOOTH CORNER			0.01	0.78	-0.12	1.22
CROTCH AT TAPER			-0.02	0.87	-0.09	1.12
VESSEL AT TAPER	498.37	-6.11	-0.02	1.48	0.03	1.44
VESSEL FAR FROM JUNC			0.00	1.46	0.01	1.45

TIME= 50.0SEC

	T.M	T.B	SX.M	SX.B	ST.M	ST.B
NOZZLE FAR FROM JUNC	494.43	-13.92		3.30	0.00	3.30
NOZZLE SMOOTH CORNER				3.88	0.18	3.47
NOZZLE BUTT-WELDED				3.26	1.09	3.29
CROTCH BUTT-WELDED	498.32	-6.96	0.05	0.87	-0.19	1.72
CROTCH SMOOTH CORNER			0.01	0.99	-0.16	1.59
CROTCH AT TAPER			-0.02	1.12	-0.12	1.46
VESSEL AT TAPER	497.82	-7.85	-0.03	1.90	0.05	1.85
VESSEL FAR FROM JUNC			0.00	1.88	0.02	1.87

計算結果リスト (2/2)

CALCULATION OF THERMAL STRESSES AT THE JUNCTION OF NOZZLE AND VESSEL

TIME= 160.0SEC

	T.M	T.B	SX.M	SX.B	ST.M	ST.B
NOZZLE FAR FROM JUNC	447.50	-30.70		7.28	0.00	7.28
NOZZLE SMOOTH CORNER				12.67	0.82	8.89
NOZZLE BUTT-WELDED				10.88	8.88	8.35
CROTCH BUTT-WELDED	480.13	-43.54	0.31	2.89	-1.89	11.16
CROTCH SMOOTH CORNER			-0.01	4.10	-1.57	9.95
CROTCH AT TAPER			-0.35	5.39	-1.23	8.67
VESSEL AT TAPER	474.25	-37.59	-0.46	9.10	0.70	8.83
VESSEL FAR FROM JUNC			0.00	8.99	0.24	8.94

TIME= 170.0SEC

	T.M	T.B	SX.M	SX.B	ST.M	ST.B
NOZZLE FAR FROM JUNC	443.85	-29.40		6.97	0.00	6.97
NOZZLE SMOOTH CORNER				12.62	0.90	8.65
NOZZLE BUTT-WELDED				10.56	9.35	8.04
CROTCH BUTT-WELDED	478.40	-44.60	0.33	2.81	-2.04	11.45
CROTCH SMOOTH CORNER			-0.02	4.07	-1.69	10.18
CROTCH AT TAPER			-0.38	5.41	-1.33	8.84
VESSEL AT TAPER	472.02	-37.72	-0.50	9.15	0.76	8.85
VESSEL FAR FROM JUNC			0.00	9.03	0.26	8.97

TIME= 180.0SEC

	T.M	T.B	SX.M	SX.B	ST.M	ST.B
NOZZLE FAR FROM JUNC	440.38	-28.10		6.66	0.00	6.66
NOZZLE SMOOTH CORNER				12.54	0.98	8.41
NOZZLE BUTT-WELDED				10.20	9.79	7.72
CROTCH BUTT-WELDED	476.68	-45.39	0.35	2.71	-2.19	11.66
CROTCH SMOOTH CORNER			-0.02	4.02	-1.82	10.35
CROTCH AT TAPER			-0.41	5.41	-1.42	8.96
VESSEL AT TAPER	469.83	-37.67	-0.54	9.14	0.82	8.83
VESSEL FAR FROM JUNC			0.00	9.02	0.28	8.96

TIME= 190.0SEC

	T.M	T.B	SX.M	SX.B	ST.M	ST.B
NOZZLE FAR FROM JUNC	437.06	-26.84		6.36	0.00	6.36
NOZZLE SMOOTH CORNER				12.44	1.06	8.17
NOZZLE BUTT-WELDED				9.81	10.18	7.39
CROTCH BUTT-WELDED	474.99	-45.95	0.37	2.60	-2.33	11.82
CROTCH SMOOTH CORNER			-0.02	3.96	-1.93	10.47
CROTCH AT TAPER			-0.44	5.38	-1.52	9.04
VESSEL AT TAPER	467.68	-37.46	-0.57	9.10	0.88	8.78
VESSEL FAR FROM JUNC			0.00	8.97	0.30	8.91

TIME= 200.0SEC

	T.M	T.B	SX.M	SX.B	ST.M	ST.B
NOZZLE FAR FROM JUNC	433.90	-25.61		6.07	0.00	6.07
NOZZLE SMOOTH CORNER				12.32	1.13	7.93
NOZZLE BUTT-WELDED				9.39	10.53	7.06
CROTCH BUTT-WELDED	473.32	-46.32	0.39	2.50	-2.47	11.93
CROTCH SMOOTH CORNER			-0.03	3.88	-2.05	10.54
CROTCH AT TAPER			-0.47	5.34	-1.60	9.08
VESSEL AT TAPER	465.57	-37.13	-0.61	9.03	0.93	8.70
VESSEL FAR FROM JUNC			0.00	8.90	0.32	8.83

Table 1.7.1 Thermal stresses at the corner of nozzle

(kg/mm²)

t (SEC)	簡 易 解 析			F I N A S		
	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$
30	1.21	0.07	1.12	1.16	0.07	1.07
60	5.55	0.24	4.88	5.31	0.28	4.67
70	7.33	0.31	6.34	7.03	0.35	6.08
80	9.04	0.37	7.69	8.69	0.41	7.38
100	11.29	0.46	9.17	10.90	0.47	8.88
120	12.29	0.55	9.49	11.89	0.50	9.27
140	12.64	0.68	9.29	12.21	0.53	9.15
170	12.62	0.90	8.65	12.09	0.60	8.61
200	12.32	1.13	7.93	11.67	0.68	7.95
250	11.60	1.47	6.81	10.77	0.80	6.89
300	10.80	1.71	5.86	9.85	0.88	5.96
350	10.00	1.85	5.05	9.00	0.93	5.16
400	9.21	1.92	4.37	8.21	0.94	4.49
500	7.75	1.90	3.31	6.84	0.91	3.43

Table 1.7.2 Thermal stresses at the corner of crotch

(kg/mm²)

t (SEC)	簡 易 解 析				F I N A S			
	$\sigma_{r,M}$	$\sigma_{r,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{r,M}$	$\sigma_{r,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$
30	0.01	0.28	-0.04	0.40	0.03	0.34	-0.03	0.40
60	0.02	1.47	-0.25	2.46	0.13	1.80	-0.17	2.40
70	0.02	2.01	-0.36	3.49	0.17	2.47	-0.24	3.39
80	0.02	2.56	-0.49	4.61	0.21	3.16	-0.31	4.46
100	0.01	3.41	-0.76	6.66	0.27	4.25	-0.45	6.41
120	0.00	3.88	-1.03	8.21	0.31	4.87	-0.57	7.86
140	0.00	4.08	-1.31	9.27	0.34	5.15	-0.69	8.84
170	-0.02	4.07	-1.69	10.18	0.37	5.18	-0.85	9.65
200	-0.03	3.88	-2.05	10.54	0.38	4.96	-1.00	9.94
250	-0.05	3.41	-2.55	10.50	0.39	4.40	-1.21	9.80
300	-0.07	2.93	-2.93	10.06	0.39	3.81	-1.37	9.30
350	-0.10	2.50	-3.21	9.47	0.39	3.27	-1.48	8.68
400	-0.13	2.14	-3.41	8.84	0.38	2.80	-1.54	8.03
500	-0.18	1.57	-3.61	7.58	0.35	2.05	-1.58	6.76

Table. 1.7.3 Thermal stresses at the taper of crotch

(kg/mm²)

t (SEC)	簡 易 解 析				F I N A S			
	$\sigma_{r,M}$	$\sigma_{r,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{r,M}$	$\sigma_{r,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$
30	0.00	0.30	-0.03	0.37	-0.01	0.34	-0.04	0.35
60	-0.04	1.69	-0.19	2.25	0.04	1.86	-0.24	2.04
70	-0.06	2.33	-0.27	3.17	0.05	2.57	-0.35	2.87
80	-0.09	3.01	-0.37	4.16	0.06	3.30	-0.47	3.75
100	-0.15	4.12	-0.59	5.95	0.05	4.51	-0.73	5.33
120	-0.22	4.83	-0.81	7.26	0.03	5.26	-0.97	6.52
140	-0.29	5.22	-1.02	8.13	0.00	5.66	-1.20	7.22
170	-0.38	5.41	-1.33	8.84	-0.04	5.83	-1.50	7.81
200	-0.47	5.34	-1.60	9.08	-0.09	5.71	-1.76	8.00
250	-0.60	4.97	-2.00	8.94	-0.17	5.25	-2.09	7.85
300	-0.70	4.50	-2.30	8.50	-0.23	4.71	-2.31	7.46
350	-0.78	4.03	-2.53	7.94	-0.27	4.18	-2.47	6.99
400	-0.85	3.61	-2.69	7.37	-0.31	3.70	-2.56	6.49
500	-0.93	2.89	-2.86	6.26	-0.35	2.89	-2.61	5.54

Table. 1.7.4 Thermal stresses at the taper of vessel

(kg/mm²)

t (SEC)	簡 易 解 析				F I N A S			
	$\sigma_{r,M}$	$\sigma_{r,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{r,M}$	$\sigma_{r,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$
30	-0.01	0.51	0.01	0.49	0.01	0.54	-0.02	0.48
60	-0.05	2.85	0.08	2.79	0.04	3.02	-0.07	2.66
70	-0.08	3.95	0.12	3.86	0.05	4.17	-0.09	3.67
80	-0.12	5.09	0.18	4.98	0.06	5.38	-0.11	4.73
100	-0.20	6.97	0.31	6.82	0.05	7.38	-0.13	6.48
120	-0.29	8.16	0.44	7.98	0.02	8.65	-0.13	7.59
140	-0.38	8.82	0.57	8.59	-0.02	9.34	-0.13	8.20
170	-0.50	9.15	0.76	8.85	-0.08	9.68	-0.14	8.53
200	-0.61	9.03	0.93	8.70	-0.15	9.55	-0.16	8.47
250	-0.77	8.39	1.18	8.08	-0.25	8.89	-0.21	8.02
300	-0.91	7.60	1.39	7.33	-0.33	8.08	-0.28	7.42
350	-1.02	6.82	1.55	6.61	-0.40	7.27	-0.36	6.81
400	-1.10	6.09	1.68	5.93	-0.44	6.52	-0.43	6.22
500	-1.21	4.88	1.85	4.76	-0.50	5.24	-0.55	5.18

Table. 1.7.5 Thermal stresses at the vessel

(kg/mm²)

t (SEC)	簡易解析*				F I N A S**			
	$\sigma_{r,M}$	$\sigma_{r,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{r,M}$	$\sigma_{r,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$
30		0.51	0.00	0.50		0.53	0.00	0.50
60		2.83	0.03	2.81		2.93	-0.01	2.77
70		3.91	0.04	3.89		4.05	-0.02	3.82
80		5.04	0.06	5.02		5.22	-0.01	4.92
100		6.91	0.11	6.88		7.16	0.00	6.73
120		8.09	0.15	8.05		8.38	0.02	7.86
140		8.73	0.20	8.68		9.04	0.05	8.46
170		9.03	0.26	8.97		9.35	0.10	8.73
200		8.90	0.32	8.83		9.22	0.15	8.60
250		8.27	0.41	8.20		8.59	0.23	8.02
300		7.49	0.48	7.44		7.82	0.30	7.32
350		6.73	0.53	6.69		7.06	0.35	6.62
400		6.03	0.58	6.00		6.35	0.39	5.97
500		4.83	0.64	4.81		5.12	0.44	4.84

* テーパーから 1000 mm の位置
($r_3 = 1838$ mm)

** テーパーから 500 mm の位置

1.8 スカート構造

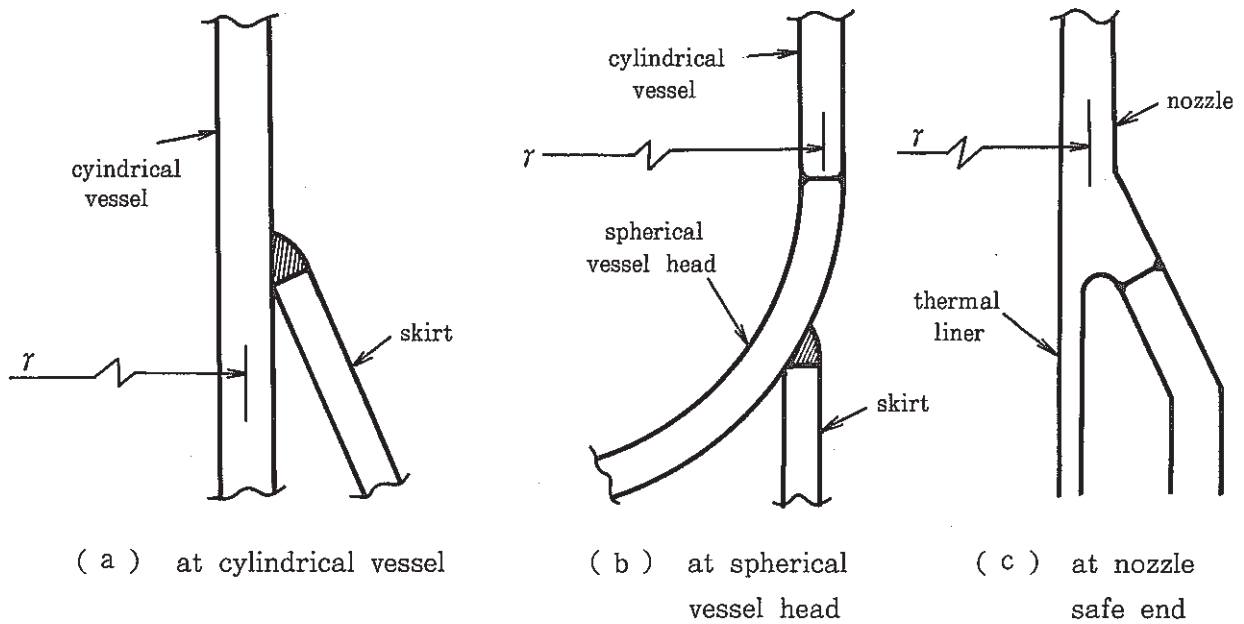


Fig. 1.8.1 Various types of skirt structures.

円筒容器とスカートの接続部，球形鏡板とスカートの接続部，あるいはノズルのセーフエンド部のような構造に温度分布が生じた場合を考える。

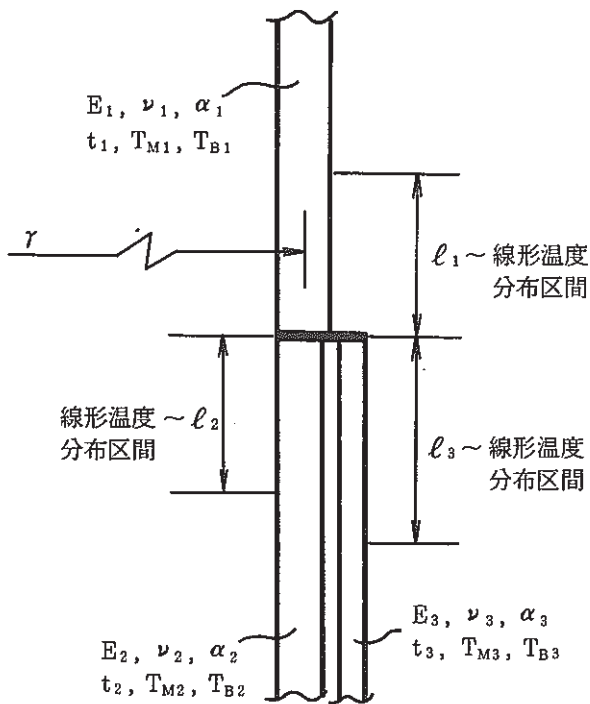


Fig. 1.8.2 Simplified analysis model for skirt structure

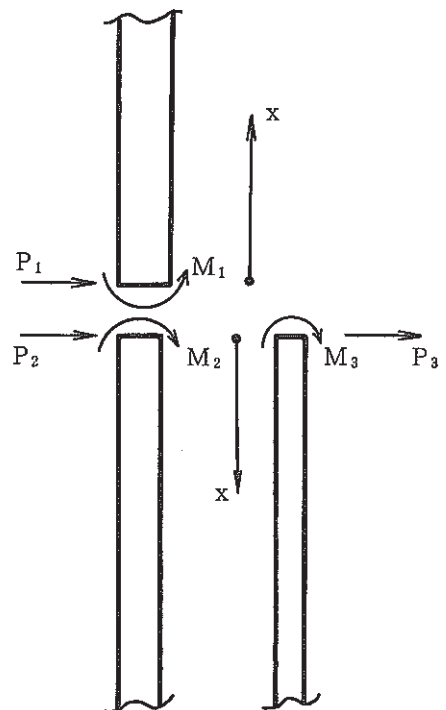


Fig. 1.8.3 Reactions and moments at junction

(1) 解析モデル

Fig. 1.8.2 に示すように 3 つの円筒を剛結合したモデルとする。円筒 1 を $j=1$ で、円筒 2 を $j=2$ で、円筒 3 を $j=3$ で表わすものとする。円筒 1 は容器を表わし、円筒 2 と円筒 3 の一方が容器を他方がスカートを表わすものとする。各円筒の物性値を E_j, ν_j, α_j 、板厚を t_j とする。接続部から距離 ℓ_j の範囲を線形温度分布区間とし

$$\left[\begin{array}{l} \text{板厚平均温度} \\ T_{Mj}(x) = T_{M0j} + \frac{\delta T_{Mj}}{\ell_j} x \quad (0 \leq x \leq \ell_j) \\ T_{Mj}(x) = T_{Mj} \text{ 一定} \quad (x > \ell_j) \end{array} \right] \quad (a)$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{等価線形内外} \\ \text{面温度差} \\ T_{Bj}(x) = T_{B0j} + \frac{\delta T_{Bj}}{\ell_j} x \quad (0 \leq x \leq \ell_j) \\ T_{Bj}(x) = T_{Bj} \text{ 一定} \quad (x > \ell_j) \end{array} \right] \quad (b)$$

で表わされるランプ状温度分布が生じたものとする。ここに T_{M0j}, T_{B0j} は接続部の温度、 T_{Mj}, T_{Bj} は接続部から ℓ_j 以上離れた位置の温度とし、 $\delta T_{Mj} = T_{Mj} - T_{M0j}, \delta T_{Bj} = T_{Bj} - T_{B0j}$ とする。各円筒の半径の差は無視できるものとし共通半径 r で表わすことにする。

(2) 自由熱膨張の解

3 円筒を切り離した場合の自由熱膨張の解は 1.5 節より、区間 $0 \leq x \leq \ell_j$ で次のようになる。

$$\left[\begin{array}{l} u_j^I(x) = r\alpha_j T_{Mj}(x) + \frac{r\alpha_j \delta T_{Mj}}{4\beta_j \ell_j} \{ \varphi(\beta_j \ell_j) \phi(\beta_j x) - \phi(\beta_j \ell_j - \beta_j x) \\ + 2\zeta(\beta_j \ell_j) \theta(\beta_j x) \} + \frac{(1+\nu_j)\alpha_j T_{B0j}}{2\beta_j^2 t_j} \phi(\beta_j x) + \frac{(1+\nu_j)\alpha_j \delta T_{Bj}}{8\beta_j^3 t_j \ell_j} \{ \\ 4\theta(\beta_j x) - \varphi(\beta_j \ell_j - \beta_j x) - \phi(\beta_j \ell_j) \phi(\beta_j x) - 2\theta(\beta_j \ell_j) \theta(\beta_j x) \} \\ u_j^I(0) = r\alpha_j T_{Mj0} + \frac{r\alpha_j \delta T_{Mj}}{\beta_j \ell_j} \zeta(\beta_j \ell_j) + \frac{(1+\nu_j)\alpha_j T_{B0j}}{2\beta_j^2 t_j} + \frac{(1+\nu_j)\alpha_j \delta T_{Bj}}{2\beta_j^3 t_j \ell_j} \{ \\ 1 - \theta(\beta_j \ell_j) \} \\ i_j^I(x) = r\alpha_j \frac{\delta T_{Mj}}{\ell_j} - \frac{r\alpha_j \delta T_{Mj}}{2\ell_j} \{ \varphi(\beta_j \ell_j) \theta(\beta_j x) + \theta(\beta_j \ell_j - \beta_j x) + \zeta(\beta_j \ell_j) \varphi(\beta_j x) \} \\ - \frac{(1+\nu_j)\alpha_j T_{B0j}}{\beta_j t_j} \theta(\beta_j x) - \frac{(1+\nu_j)\alpha_j \delta T_{Bj}}{4\beta_j^2 t_j \ell_j} \{ 2\varphi(\beta_j x) + \zeta(\beta_j \ell_j - \beta_j x) \\ - \phi(\beta_j \ell_j) \theta(\beta_j x) - \theta(\beta_j \ell_j) \varphi(\beta_j x) \} \\ i_j^I(0) = \frac{r\alpha_j \delta T_{Mj}}{\ell_j} \{ 1 - \varphi(\beta_j \ell_j) \} - \frac{(1+\nu_j)\alpha_j T_{B0j}}{\beta_j t_j} - \frac{(1+\nu_j)\alpha_j \delta T_{Bj}}{2\beta_j^2 t_j \ell_j} \{ 1 - \phi(\beta_j \ell_j) \} \\ \sigma_{\theta_j, M}^I = \frac{E_j \alpha_j \delta T_{Mj}}{4\beta_j \ell_j} \{ \varphi(\beta_j \ell_j) \phi(\beta_j x) - \phi(\beta_j \ell_j - \beta_j x) + 2\zeta(\beta_j \ell_j) \theta(\beta_j x) \} \end{array} \right] \quad (139)$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{E_j (1+\nu_j) \alpha_j T_{B0j}}{2 \sqrt{3(1-\nu_j^2)}} \phi(\beta_j x) + \frac{E_j (1+\nu_j) \alpha_j \delta T_{Bj}}{8 \beta_j l_j \sqrt{3(1-\nu_j^2)}} \{ 4 \theta(\beta_j x) - \\
 & \quad \varphi(\beta_j l_j - \beta_j x) - \phi(\beta_j l_j) \phi(\beta_j x) - 2 \theta(\beta_j l_j) \theta(\beta_j x) \} \\
 \sigma_{\theta B j} = & \frac{3 E_j \alpha_j \delta T_{Mj}}{4 \beta_j l_j \sqrt{3(1-\nu_j^2)}} \{ \varphi(\beta_j l_j) \varphi(\beta_j x) - \varphi(\beta_j l_j - \beta_j x) + 2 \zeta(\beta_j l_j) \zeta(\beta_j x) \} \\
 & + \frac{E_j \alpha_j T_{B0j}}{2(1-\nu_j)} \varphi(\beta_j x) + \frac{E_j \alpha_j \delta T_{Bj}}{8 \beta_j l_j (1-\nu_j)} \{ 4 \zeta(\beta_j x) + \phi(\beta_j l_j - \beta_j x) \\
 & \quad - \phi(\beta_j l_j) \varphi(\beta_j x) - 2 \theta(\beta_j l_j) \zeta(\beta_j x) \} \\
 \sigma_{NB j} = & - \frac{E_j \alpha_j}{2(1-\nu_j)} T_{Bj}(x) \quad \text{を用いて} \\
 \sigma_{x j, B}^I = & \sigma_{\theta B j} + \sigma_{NB j}, \quad \sigma_{\theta j, B}^I = \nu_j \sigma_{\theta B j} + \sigma_{NB j}
 \end{aligned}$$

となる。ここに $\sigma_{\theta B j}$ はランプ状温度分布と自由端効果の相乗作用による曲げ応力を表わし、 $\sigma_{NB j}$ は内外面温度差による公称曲げ応力を表わす。

円筒 1 と 2 の間の不連続量 δu_{12} , δi_{12} は

$$\delta u_{12} = u_1^I(0) - u_2^I(0), \quad \delta i_{12} = i_1^I(0) + i_2^I(0) \tag{c}$$

となり、円筒 2 と 3 の間の不連続量 δu_{23} , δi_{23} は

$$\delta u_{23} = u_2^I(0) - u_3^I(0), \quad \delta i_{23} = i_2^I(0) - i_3^I(0) \tag{d}$$

となる。

(3) 接続部の反力と曲げモーメント

Fig. 1. 8. 3 に示す向きに反力 P_j と曲げモーメント M_j が生ずるものとする。 P_j , M_j による円筒 j の解は付解 A 1・2 より

$$\begin{aligned}
 u_j^{\text{II}}(x) &= \frac{1}{2 \beta_j^3 D_j} \{ \beta_j M_j \phi(\beta_j x) + P_j \theta(\beta_j x) \} \\
 i_j^{\text{II}}(x) &= - \frac{1}{2 \beta_j^2 D_j} \{ 2 \beta_j M_j \theta(\beta_j x) + P_j \varphi(\beta_j x) \} \\
 \sigma_{\theta j, M}^{\text{II}} &= \frac{E_j}{2 \beta_j^3 D_j r} \{ \beta_j M_j \phi(\beta_j x) + P_j \theta(\beta_j x) \} \\
 \sigma_{x j, B}^{\text{II}} &= \frac{6}{t_j^2} \left\{ M_j \varphi(\beta_j x) + \frac{P_j}{\beta_j} \zeta(\beta_j x) \right\}, \quad \sigma_{\theta j, B}^{\text{II}} = \nu_j \cdot \sigma_{x j, B}^{\text{II}}
 \end{aligned} \tag{1.40}$$

となる。反力および曲げモーメントのつり合い条件は

$$\begin{cases} P_1 + P_2 + P_2 = 0 \\ M_1 - M_2 - M_3 = 0 \end{cases} \tag{e}$$

である。円筒 1 と 2 の不連続量を打ち消すためには

$$\left[\begin{array}{l} u_1^i(0) - u_2^i(0) = \frac{\beta_1 M_1 + P_1}{2\beta_1^3 D_1} - \frac{\beta_2 M_2 + P_2}{2\beta_2^3 D_2} = -\delta_{u_{12}} = -u_1^f(0) + u_2^f(0) \\ i_1^i(0) + i_2^i(0) = -\frac{2\beta_1 M_1 + P_1}{2\beta_1^2 D_1} - \frac{2\beta_2 M_2 + P_2}{2\beta_2^2 D_2} = -\delta_{i_{12}} = -i_1^f(0) - i_2^f(0) \end{array} \right] \quad (f)$$

でなければならない。円筒 2 と 3 の不連続量を打ち消すためには

$$\left[\begin{array}{l} u_2^i(0) - u_3^i(0) = \frac{\beta_2 M_2 + P_2}{2\beta_2^3 D_2} - \frac{\beta_3 M_3 + P_3}{2\beta_3^3 D_3} = -\delta_{u_{23}} = -u_2^f(0) + u_3^f(0) \\ i_2^i(0) - i_3^i(0) = -\frac{2\beta_2 M_2 + P_2}{2\beta_2^2 D_2} + \frac{2\beta_3 M_3 + P_3}{2\beta_3^2 D_3} = -\delta_{i_{23}} = -i_2^f(0) + i_3^f(0) \end{array} \right] \quad (g)$$

でなければならない。(e), (f), (g)式を連立させて解けば P_j, M_j が求まる。 P_j, M_j を (1.40)式に代入すれば解 II が求まる。解 I と解 II を重ね合わせれば各点の応力が求まる。

(4) 簡易解析プログラム

以上の計算法により、 $\chi = 0$ (接続部), $\ell_j/4, \ell_j/2, 3\ell_j/4, \ell_j$ 点における各円筒の応力を求めるプログラムを作成した。

入力データカードイメージは次のとおりである。

カード 1 (F 10.0, 5 i 5) R, N1, N2, N3, JUNC, ICHK
r (mm)

カード 2, 3, 4 (7 F 10.0)

E(j), PR(j), AL(j), TH(j), DL(j), TM(j), TB(j)
E_j (kg/mm), ν_j, α_j (°C), t_j (mm), ℓ_j (mm), T_{Mj} (°C), T_{Bj} (°C)

N_j ($j=1\sim 3$) は位置識別番号である。 $N_j \neq 0$ の時は円筒 j の温度データとして、付録 A 3 の「構造設計用複数位置温度計算プログラム」によりディスク上に作成された温度ファイル (非定常熱伝導解析結果) の位置 $|N_j|$ の計算結果が引用される。 $N_j > 0$ の時は位置 N_j の母材部の計算結果が、 $N_j < 0$ の時は位置 $|N_j|$ の熱しゃへい板の計算結果が引用される。 $N_j = 0$ の時は温度データ T_{Mj}, T_{Bj} を、時間に依存しない一定値として、カード 2~4 の指定位置に入力する。円筒 j_A は温度ファイル (非定常) から読みとり、円筒 j_B はカード入力 (定常) とする任意の組み合わせが可能である。

JUNC は接続部温度 T_{M0j}, T_{B0j} の推定法を指定するためのデータであり、次の 5 種類の推定法が組み込まれている。

推定法 1 (JUNC = 1)

$$T_{M0j} = T_{Mj}, T_{B0j} = T_{Bj}, \text{ for all } j \quad (h)$$

推定法 2 (JUNC = 2)

$$\left[\begin{array}{l} T_{M01} = T_{M02} = (T_{M1} + T_{M2}) / 2, T_{B01} = T_{B02} = (T_{B1} + T_{B2}) / 2 \\ T_{M03} = T_{M3}, T_{B03} = T_{B3} \end{array} \right] \quad (i)$$

推定法 3 (JUNC = 3)

$$\left[\begin{array}{l} T_{M01} = T_{M03} = (T_{M1} + T_{M3}) / 2, \quad T_{B01} = T_{B03} = (T_{B1} + T_{B3}) / 2 \\ T_{M02} = T_{M2}, \quad T_{B02} = T_{B2} \end{array} \right] \quad (j)$$

推定法 4 (JUNC = 4)

$$\left[\begin{array}{l} T_{M01} = \frac{t_1 T_{M1} + t_2 T_{M2} + t_3 T_{M3}}{t_1 + t_2 + t_3}, \quad T_{B01} = \frac{t_1 T_{B1} + t_2 T_{B2} + t_3 T_{B3}}{t_1 + t_2 + t_3} \\ T_{M02} = T_{M01} + \frac{t_3}{2(t_2 + t_3)} T_{B01}, \quad T_{B02} = \frac{t_2}{t_2 + t_3} T_{B01} \\ T_{M03} = T_{M01} - \frac{t_2}{2(t_2 + t_3)} T_{B01}, \quad T_{B03} = \frac{t_3}{t_2 + t_3} T_{B01} \end{array} \right] \quad (k)$$

推定法 5 (JUNC = 5)

$$\left[\begin{array}{l} T_{M02} = \frac{t_1 T_{M1} + t_2 T_{M2}}{t_1 + t_2}, \quad T_{B02} = \frac{t_1 T_{B1} + t_2 T_{B2}}{t_1 + t_2} \\ T_{M03} = \frac{t_1 T_{M1} + t_3 T_{M3}}{t_1 + t_3}, \quad T_{B03} = \frac{t_1 T_{B1} + t_3 T_{B3}}{t_1 + t_3} \\ T_{M01} = \frac{t_2 T_{M02} + t_3 T_{M03}}{t_2 + t_3}, \quad T_{B01} = T_{B02} + T_{B03} \end{array} \right] \quad (l)$$

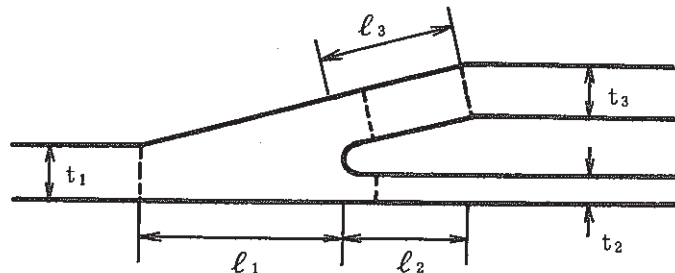
これらの推定法以外の推定法, あるいは接続部温度のカードによる入力などを採用したい場合は, ユーザーがプログラムの該当箇所を変更すれば良い。

ICCHK は変位 u_j と勾配 i_j および反力 P_j と曲げモーメント M_j のプリント出力を指示するデータである。ICCHK = 0 ならば応力値のみプリント出力される。ICCHK ≠ 0 ならば, 応力値以外に $u_j^I, i_j^I, P_j, M_j, u_j^{I+II}, i_j^{I+II}$ がプリント出力される。プログラムリスト, 次の例題に対する JCL および入力データリスト, 計算結果リストの一部を次頁以降に示す。

(例題) 付録 A 3 のノズルのセーフエンド部をスカート構造と見なして熱応力を求めよ。 $r = 497.7\text{mm}$

$$\left[\begin{array}{ll} \text{円筒 1 (配管側)} & \sim \text{位置番号 1, } t_1 = 20.6\text{mm}, \ell_1 = 70\text{mm} \\ \text{" 2 (熱しゃへい板)} & \sim \text{" - 2, } t_2 = 10\text{mm}, \ell_2 = 50\text{mm} \\ \text{" 3 (ノズル側)} & \sim \text{" 2, } t_3 = 20.6\text{mm}, \ell_3 = 50\text{mm} \end{array} \right]$$

とせよ。下図の破線位置 ($\chi = \ell_1, \chi = \ell_2/4, \chi = \ell_3/4, \ell_3$) の膜応力 $\sigma_{\theta, M}$ と曲げ応力 $\sigma_{\chi, B}, \sigma_{\theta, B}$ を FINAS による解析結果と比較せよ。接続部の温度は推定法 1 と 3 により推定するものとする。物性値は SUS 304 の 450°C の値を用いよ。



FINASによる解析結果との比較を Table. 1.8.1 (セーフエンド端部, $x=l_1$), Table. 1.8.2 (熱しゃへい板, $x=l_2/4$), Table. 1.8.3 (セーフエンド, $x=l_3/4$), Table. 1.8.4 (セーフエンド, $x=l_3$)に示す。なお FINAS による解析は、物性値温度依存であり、使用要素は QAX8 である。

プログラムリスト (1 / 5)

```

C-----
C   THERMAL STRESS CALCULATION BY CYLINDRICAL SHELL THEORY
C   DISCONTINUITY OF VESSEL AND SKIRT JUNCTION
C-----
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION YD(200),PTIME(200),TD(6,200),TM(3),TB(3),E(3),PR(3),
+         AL(3),TH(3),DL(3),AM(6,6),A(6,6),B(6),X(6),NN(3),
+         PP1(3),PM1(3),SQ3(3),BT(3),BT2(3),BT3(3),BL(3),D(3),
+         TMO(3),DTM(3),TBO(3),DTB(3),XM(3),DU(3),DI(3),
+         STM(5,3),SXB(5,3),STB(5,3),SNB(5,3),TMX(5,3),TBX(5,3)
C-----
      F1(BX)=EXP(-BX)*(COS(BX)+SIN(BX))
      F2(BX)=EXP(-BX)*(COS(BX)-SIN(BX))
      F3(BX)=EXP(-BX)*COS(BX)
      F4(BX)=EXP(-BX)*SIN(BX)
C-----
500 FORMAT(F10.0,5I5)
510 FORMAT(7F10.0)
520 FORMAT(/10X,'INPUT DATA CHECK PRINT',//,13X,'R(MM)',3X,'N1',3X,
+ 'N2',3X,'N3',3X,'JUNC',3X,'ICLK',//,10X,F8.2,3I5,2I7,///,13X,
+ 'E(KG/MM2)',5X,'P.RATIO',4X,'AL(/DEG)',6X,'TH(MM)',7X,'L(MM)',
+ 5X,'TM(DEG)',5X,'TB(DEG)'/)
530 FORMAT(10X,1PE12.4,OPF12.4,1PE12.4,OP4F12.2)
600 FORMAT(1H1/10X,'CALCULATION OF THERMAL STRESSES AT THE ',
+ 'JUNCTION OF VESSEL AND SKIRT'/)
610 FORMAT(/10X,'TIME=',F7.1,'SEC',/,36X,'T.M',5X,'T.B',4X,
+ 'SXB',4X,'ST.M',4X,'ST.B',3X,'NOM.B')
620 FORMAT(10X,'VESSEL',I1,' AT X=(',I1,')/4)*L ',6F8.2)
630 FORMAT(/8X,'CHECK(U1,U2,U3,I1,I2,I3)',6G10.3)
640 FORMAT( 8X,'CHECK(P1,P2,P3,M1,M2,M3)',6G10.3)
650 FORMAT( 8X,'CHECK(U1,U2,U3,I1,I2,I3)',6G10.3/)
C-----
                                READ INPUT DATA CARD IMAGE
      WRITE(6,600)
      READ(5,500) R,N1,N2,N3,JUNC,ICLK
      WRITE(6,520) R,N1,N2,N3,JUNC,ICLK
      DO 5 J=1,3
      READ(5,510) E(J),PR(J),AL(J),TH(J),DL(J),TM(J),TB(J)
      WRITE(6,530) E(J),PR(J),AL(J),TH(J),DL(J),TM(J),TB(J)
5 CONTINUE
C-----
                                SEARCH POSITION NUMBER OF TEMPERATURE FILE
      IF(N1) 15,10,20
10 NN(1)=0
   GO TO 30
15 NN(1)=-10*N1+5
   GO TO 30
20 NN(1)= 10*N1+1
30 IF(N2) 45,40,50
40 NN(2)=0
   GO TO 60
45 NN(2)=-10*N2+5
   GO TO 60
50 NN(2)= 10*N2+1
60 IF(N3) 75,70,80
70 NN(3)=0
   GO TO 90
75 NN(3)=-10*N3+5
   GO TO 90
80 NN(3)= 10*N3+1

```

プログラムリスト (2 / 5)

```

90 NTT=NN(1)+NN(2)+NN(3)
   NTIME=1
   IF(NTT.EQ.0) GO TO 160
C----- READ TEMPERATURE RESULTS FILE(20)
   READ(20) NTIME,(PTIME(I),I=1,NTIME)
   DO 150 J=1,3
   IF(NN(J).EQ.0) GO TO 150
   K=2*J-1
   REWIND 20
100 READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
   IF(NY.EQ.NN(J)) GO TO 110
   GO TO 100
110 DO 120 I=1,NTIME
   TD(K,I)=YD(I)
120 CONTINUE
   K=K+1
   READ(20) NY,(YD(I),I=1,NTIME)
   DO 130 I=1,NTIME
   TD(K,I)=YD(I)
130 CONTINUE
   REWIND(20)
150 CONTINUE
160 CONTINUE
C----- CONSTANT DATA SETTING
   DO 170 J=1,3
   PP1(J)=1+PR(J)
   PM1(J)=1-PR(J)
   SQ3(J)=SQRT(3*PP1(J)*PM1(J))
   BT2(J)=SQ3(J)/R/TH(J)
   BT(J)=SQRT(BT2(J))
   BT3(J)=BT(J)*BT2(J)
   BL(J)=BT(J)*DL(J)
   D(J)=E(J)*TH(J)**3/(12*PP1(J)*PM1(J))
170 CONTINUE
   NLP=3
   IF(ICK.NE.0) NLP=2
C----- MATRIX ELEMENT SETTING
   DO 180 J=1,6
   DO 180 I=1,6
   AM(I,J)=0
180 CONTINUE
   AM(1,1)=1
   AM(1,2)=1
   AM(1,3)=1
   AM(2,1)= 1/(2*BT3(1)*D(1))
   AM(2,2)=-1/(2*BT3(2)*D(2))
   AM(2,4)= 1/(2*BT2(1)*D(1))
   AM(2,5)=-1/(2*BT2(2)*D(2))
   AM(3,2)= 1/(2*BT3(2)*D(2))
   AM(3,3)=-1/(2*BT3(3)*D(3))
   AM(3,5)= 1/(2*BT2(2)*D(2))
   AM(3,6)=-1/(2*BT2(3)*D(3))
   AM(4,4)= 1
   AM(4,5)=-1
   AM(4,6)=-1
   AM(5,1)=-1/(2*BT2(1)*D(1))
   AM(5,2)=-1/(2*BT2(2)*D(2))
   AM(5,4)=-1/(BT(1)*D(1))

```

プログラムリスト (3 / 5)

```

AM(5,5)=-1/(BT(2)*D(2))
AM(6,2)=-1/(2*BT2(2)*D(2))
AM(6,3)= 1/(2*BT2(3)*D(3))
AM(6,5)=-1/(BT(2)*D(2))
AM(6,6)= 1/(BT(3)*D(3))
C-----                                CALCULATION START
DO 400 IT=1,NTIME
IF(MOD(IT,NLP).EQ.1) WRITE(6,600)
TIME=PTIME(IT)
IF(NN(1).EQ.0) GO TO 200
TM(1)=TD(1,IT)
TB(1)=TD(2,IT)
200 IF(NN(2).EQ.0) GO TO 210
TM(2)=TD(3,IT)
TB(2)=TD(4,IT)
210 IF(NN(3).EQ.0) GO TO 220
TM(3)=TD(5,IT)
TB(3)=TD(6,IT)
220 WRITE(6,610) TIME
C-----                                ESTIMATION OF JUNCTION TEMPERATURE
GO TO (310,320,330,340,350),JUNC
C-----                                JUNC=1
310 DO 315 J=1,3
    TM(J)=TM(J)
    TB(J)=TB(J)
315 CONTINUE
GO TO 360
C-----                                JUNC=2
320 TM(1)=(TM(1)+TM(2))/2
    TB(1)=(TB(1)+TB(2))/2
    TM(2)=TM(1)
    TB(2)=TB(1)
    TM(3)=TM(3)
    TB(3)=TB(3)
GO TO 360
C-----                                JUNC=3
330 TM(1)=(TM(1)+TM(3))/2
    TB(1)=(TB(1)+TB(3))/2
    TM(3)=TM(1)
    TB(3)=TB(1)
    TM(2)=TM(2)
    TB(2)=TB(2)
GO TO 360
C-----                                JUNC=4
340 TM(1)=(TM(1)*TH(1)+TM(2)*TH(2)+TM(3)*TH(3))/
+      (TH(1)+TH(2)+TH(3))
    TB(1)=(TB(1)*TH(1)+TB(2)*TH(2)+TB(3)*TH(3))/
+      (TH(1)+TH(2)+TH(3))
    TM(2)=TM(1)+TH(3)/(2*(TH(2)+TH(3)))*TB(1)
    TB(2)=TH(2)/(TH(2)+TH(3))*TB(1)
    TM(3)=TM(1)-TH(2)/(2*(TH(2)+TH(3)))*TB(1)
    TB(3)=TH(3)/(TH(2)+TH(3))*TB(1)
GO TO 360
C-----                                JUNC=5
350 TM(2)=(TM(1)*TH(1)+TM(2)*TH(2))/(TH(1)+TH(2))
    TB(2)=(TB(1)*TH(1)+TB(2)*TH(2))/(TH(1)+TH(2))
    TM(3)=(TM(1)*TH(1)+TM(3)*TH(3))/(TH(1)+TH(3))
    TB(3)=(TB(1)*TH(1)+TB(3)*TH(3))/(TH(1)+TH(3))

```

プログラムリスト(4/5)

```

      TMO(1)=(TMO(2)*TH(2)+TMO(3)*TH(3))/(TH(2)+TH(3))
      TBO(1)=TBO(2)+TBO(3)
C-----                               SET DTM,DTB
      360 CONTINUE
      DO 230 J=1,3
      DTM(J)=TM(J)-TMO(J)
      DTB(J)=TB(J)-TBO(J)
      230 CONTINUE
C-----                               SOLUTION FOR FREE EXPANSION
      DO 240 J=1,3
      BLL=BL(J)
      DU(J)=R*AL(J)*TMO(J)+R*AL(J)*DTM(J)*F4(BLL)/BLL
+      +R*PP1(J)*AL(J)*TBO(J)/(2*SQ3(J))
+      +R*PP1(J)*AL(J)*DTB(J)/(2*SQ3(J)*BLL)*(1-F3(BLL))
      DI(J)=R*AL(J)*DTM(J)*(1-F1(BLL))/DL(J)
+      -PP1(J)*AL(J)*TBO(J)/(BT(J)*TH(J))
+      -PP1(J)*AL(J)*DTB(J)/(2*BT(J)*TH(J)*BLL)*(1-F2(BLL))
      DO 245 K=1,5
      BX=FLOAT(K-1)*BLL/4
      TMX(K,J)=TMO(J)+FLOAT(K-1)*DTM(J)/4
      TBX(K,J)=TBO(J)+FLOAT(K-1)*DTB(J)/4
      STM(K,J)=E(J)*AL(J)*DTM(J)/(4*BLL)*(F1(BLL)*F2(BX)
+      -F2(BLL-BX)+2*F4(BLL)*F3(BX))
+      +E(J)*PP1(J)*AL(J)*TBO(J)/(2*SQ3(J))*F2(BX)
+      +E(J)*PP1(J)*AL(J)*DTB(J)/(8*SQ3(J)*BLL)*(4*F3(BX)
+      -F1(BLL-BX)-F2(BLL)*F2(BX)-2*F3(BLL)*F3(BX))
      SBB=3*E(J)*AL(J)*DTM(J)/(4*BLL*SQ3(J))*(F1(BLL)*F1(BX)
+      -F1(BLL-BX)+2*F4(BLL)*F4(BX))
+      +E(J)*AL(J)*TBO(J)/(2*PM1(J))*F1(BX)
+      +E(J)*AL(J)*DTB(J)/(8*PM1(J)*BLL)*(4*F4(BX)+F2(BLL-BX)
+      -F2(BLL)*F1(BX)-2*F3(BLL)*F4(BX))
      SNB(K,J)=-E(J)*AL(J)/(2*PM1(J))*TBX(K,J)
      SXB(K,J)=SNB(K,J)+SBB
      STB(K,J)=SNB(K,J)+SBB*PR(J)
      245 CONTINUE
      240 CONTINUE
      IF(ICHK.EQ.0) GO TO 250
      WRITE(6,630) (DU(J),J=1,3),(DI(J),J=1,3)
C-----                               COMPUTE DISCONTINUITY REACTION AND MOMENT
      250 CONTINUE
      DO 260 J=1,6
      DO 260 I=1,6
      A(I,J)=AM(I,J)
      260 CONTINUE
      B(1)=0
      B(2)=-DU(1)+DU(2)
      B(3)=-DU(2)+DU(3)
      B(4)=0
      B(5)=-DI(1)-DI(2)
      B(6)=-DI(2)+DI(3)
      CALL GAUSE(A,B,X,6)
      XM(1)=X(4)
      XM(2)=X(5)
      XM(3)=X(6)
      IF(ICHK.EQ.0) GO TO 270
      WRITE(6,640) (X(J),J=1,6)
C-----                               COMPUTE DISCONTINUITY STRESSES AND
C-----                               ADD TO FREE EXPANSION SOLUTION

```

プログラムリスト (5 / 5)

```

270 CONTINUE
  DO 280 J=1,3
    BLL=BL(J)
    DU(J)=DU(J)+(BT(J)*XM(J)+X(J))/(2*BT3(J)*D(J))
    DI(J)=DI(J)-(2*BT(J)*XM(J)+X(J))/(2*BT2(J)*D(J))
    DO 285 K=1,5
      BX=FLOAT(K-1)*BLL/4
      STM(K,J)=STM(K,J)+E(J)/(2*BT3(J)*D(J)*R)
      +      *(BT(J)*XM(J)*F2(BX)+X(J)*F3(BX))
      SBB=6/TH(J)**2*(XM(J)*F1(BX)+X(J)/BT(J)*F4(BX))
      SXB(K,J)=SXB(K,J)+SBB
      STB(K,J)=STB(K,J)+SBB*PR(J)
    285 CONTINUE
  280 CONTINUE
  IF(ICHK.EQ.0) GO TO 290
  WRITE(6,650) (DU(J),J=1,3),(DI(J),J=1,3)
C----- PRINT RESULTS
  290 CONTINUE
  DO 390 J=1,3
  DO 380 K=1,5
    KX=K-1
    WRITE(6,620) J,KX,TMX(K,J),TBX(K,J),
  +      SXB(K,J),STM(K,J),STB(K,J),SNB(K,J)
  380 CONTINUE
  390 CONTINUE
C----- CALCULATION END
  400 CONTINUE
  STOP
  END

```

SUBROUTINE GAUSE は 1.7 節のプログラムと共通なので省略する。

JCL および入力データリスト (計算例, JUNC = 3)

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6
//Q3020ST4 JOB (GENERAL),MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3020,
//  ATTR=(TO,CO,WO)
//COPY EXEC PGM=JSDGENER
//SYSPRINT DD SYSOUT=*
//SYSIN DD DUMMY
//SYSUT1 DD DSN=Q3020.N1TR2.POST,UNIT=DASD,DISP=SHR
//SYSUT2 DD DSN=&&POST,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),
//  SPACE=(TRK,(5,10),RLSE)
//*
//CLG EXEC FORT7CLG
//FORT.SYSPRINT DD DUMMY
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3020.TEST.FORT(ST4),DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUMMY
//GO.FT20F001 DD DSN=&&POST,UNIT=WORK,DISP=(OLD,DELETE)
//GO.FT06F001 DD SYSOUT=*
//GO.SYSIN DD *
      497.7      1      -2      2      3      0
      1.67D4      0.298  19.93D-6      20.6      70.0
      1.67D4      0.298  19.93D-6      10.0      50.0
      1.67D4      0.298  19.93D-6      20.6      50.0
/*
//

```

下線部はユーザーが変更すべき箇所である。

計算結果リストの一部(計算例, JUNC = 3)

CALCULATION OF THERMAL STRESSES AT THE JUNCTION OF VESSEL AND SKIRT

TIME= 80.0SEC

	T.M	T.B	SX.B	ST.M	ST.B	NOM.B
VESSEL1 AT X=(0/4)*L	454.05	-37.42	10.23	-1.39	9.28	8.87
VESSEL1 AT X=(1/4)*L	448.17	-40.52	11.15	-0.58	10.07	9.61
VESSEL1 AT X=(2/4)*L	442.28	-43.63	12.17	0.33	10.89	10.34
VESSEL1 AT X=(3/4)*L	436.39	-46.73	13.13	1.33	11.69	11.08
VESSEL1 AT X=(4/4)*L	430.50	-49.84	13.84	2.44	12.42	11.81
VESSEL2 AT X=(0/4)*L	423.97	-41.99	-12.39	8.62	3.30	9.96
VESSEL2 AT X=(1/4)*L	423.97	-41.99	-4.57	8.90	5.63	9.96
VESSEL2 AT X=(2/4)*L	423.97	-41.99	1.59	8.34	7.46	9.96
VESSEL2 AT X=(3/4)*L	423.97	-41.99	6.19	7.30	8.83	9.96
VESSEL2 AT X=(4/4)*L	423.97	-41.99	9.42	6.04	9.80	9.96
VESSEL3 AT X=(0/4)*L	454.05	-37.42	13.15	-1.39	10.15	8.87
VESSEL3 AT X=(1/4)*L	459.94	-34.31	10.61	-2.46	8.87	8.13
VESSEL3 AT X=(2/4)*L	465.83	-31.21	8.30	-3.46	7.67	7.40
VESSEL3 AT X=(3/4)*L	471.72	-28.10	6.30	-4.43	6.55	6.66
VESSEL3 AT X=(4/4)*L	477.61	-24.99	4.70	-5.41	5.56	5.93

TIME= 85.0SEC

	T.M	T.B	SX.B	ST.M	ST.B	NOM.B
VESSEL1 AT X=(0/4)*L	450.24	-36.23	9.88	-1.34	8.97	8.59
VESSEL1 AT X=(1/4)*L	444.15	-38.78	10.77	-0.53	9.66	9.19
VESSEL1 AT X=(2/4)*L	438.06	-41.33	11.76	0.36	10.38	9.80
VESSEL1 AT X=(3/4)*L	431.97	-43.89	12.67	1.36	11.08	10.40
VESSEL1 AT X=(4/4)*L	425.88	-46.44	13.35	2.49	11.71	11.01
VESSEL2 AT X=(0/4)*L	421.27	-40.32	-12.64	8.30	2.94	9.56
VESSEL2 AT X=(1/4)*L	421.27	-40.32	-4.95	8.64	5.23	9.56
VESSEL2 AT X=(2/4)*L	421.27	-40.32	1.12	8.14	7.04	9.56
VESSEL2 AT X=(3/4)*L	421.27	-40.32	5.67	7.15	8.40	9.56
VESSEL2 AT X=(4/4)*L	421.27	-40.32	8.87	5.93	9.35	9.56
VESSEL3 AT X=(0/4)*L	450.24	-36.23	12.86	-1.34	9.86	8.59
VESSEL3 AT X=(1/4)*L	456.33	-33.68	10.37	-2.42	8.69	7.98
VESSEL3 AT X=(2/4)*L	462.42	-31.12	8.10	-3.43	7.59	7.38
VESSEL3 AT X=(3/4)*L	468.51	-28.57	6.15	-4.43	6.59	6.77
VESSEL3 AT X=(4/4)*L	474.59	-26.02	4.60	-5.44	5.70	6.17

TIME= 90.0SEC

	T.M	T.B	SX.B	ST.M	ST.B	NOM.B
VESSEL1 AT X=(0/4)*L	446.61	-34.85	9.48	-1.28	8.62	8.26
VESSEL1 AT X=(1/4)*L	440.36	-36.91	10.35	-0.49	9.23	8.75
VESSEL1 AT X=(2/4)*L	434.12	-38.97	11.30	0.40	9.85	9.24
VESSEL1 AT X=(3/4)*L	427.88	-41.03	12.19	1.39	10.46	9.73
VESSEL1 AT X=(4/4)*L	421.63	-43.09	12.82	2.52	10.99	10.21
VESSEL2 AT X=(0/4)*L	418.94	-38.77	-12.69	7.93	2.67	9.19
VESSEL2 AT X=(1/4)*L	418.94	-38.77	-5.20	8.32	4.90	9.19
VESSEL2 AT X=(2/4)*L	418.94	-38.77	0.75	7.88	6.67	9.19
VESSEL2 AT X=(3/4)*L	418.94	-38.77	5.21	6.95	8.01	9.19
VESSEL2 AT X=(4/4)*L	418.94	-38.77	8.37	5.78	8.95	9.19
VESSEL3 AT X=(0/4)*L	446.61	-34.85	12.47	-1.28	9.52	8.26
VESSEL3 AT X=(1/4)*L	452.85	-32.78	10.04	-2.37	8.45	7.77
VESSEL3 AT X=(2/4)*L	459.09	-30.72	7.83	-3.39	7.45	7.28
VESSEL3 AT X=(3/4)*L	465.33	-28.66	5.93	-4.40	6.54	6.79
VESSEL3 AT X=(4/4)*L	471.58	-26.60	4.43	-5.43	5.75	6.31

Table 1.8.1 Thermal stresses at the nozzle safe end (vessel 1, $\chi = \ell_1$)

(kg/mm²)

t (SEC)	簡易解析(JUNC=1)			簡易解析(JUNC=3)			F I N A S		
	$\sigma_{\chi, B}$	$\sigma_{\theta, M}$	$\sigma_{\theta, B}$	$\sigma_{\chi, B}$	$\sigma_{\theta, M}$	$\sigma_{\theta, B}$	$\sigma_{\chi, B}$	$\sigma_{\theta, M}$	$\sigma_{\theta, B}$
30	7.15	0.69	6.91	6.61	0.79	6.74	7.24	1.08	6.91
60	14.24	1.52	12.92	13.15	1.93	12.59	14.96	2.59	13.44
70	15.66	1.76	13.87	14.44	2.28	13.51	16.71	3.04	14.72
80	15.04	1.80	12.78	13.84	2.44	12.42	16.30	3.21	13.86
100	12.85	1.80	9.97	11.76	2.57	9.65	14.22	3.26	11.31
120	10.87	1.77	7.72	9.88	2.59	7.43	12.13	3.15	9.13
140	9.22	1.71	6.02	8.31	2.53	5.75	10.33	2.95	7.40
170	7.27	1.57	4.20	6.48	2.34	3.97	8.18	2.59	5.46
200	5.78	1.39	2.99	5.11	2.09	2.79	6.54	2.22	4.09

Table 1.8.2 Thermal stresses at the thermal liner (vessel 2, $\chi = \ell_2/4$)

(kg/mm²)

t (SEC)	簡易解析(JUNC=1)			簡易解析(JUNC=3)			F I N A S		
	$\sigma_{\chi, B}$	$\sigma_{\theta, M}$	$\sigma_{\theta, B}$	$\sigma_{\chi, B}$	$\sigma_{\theta, M}$	$\sigma_{\theta, B}$	$\sigma_{\chi, B}$	$\sigma_{\theta, M}$	$\sigma_{\theta, B}$
30	1.12	3.69	4.29	0.52	3.80	4.11	1.86	3.89	4.47
60	-1.19	7.86	6.83	-1.87	8.11	6.63	0.47	8.89	7.51
70	-2.63	8.77	6.80	-3.19	9.06	6.63	-0.68	10.20	7.75
80	-4.34	8.60	5.69	-4.57	8.90	5.63	-2.53	10.39	6.61
100	-5.69	7.31	4.30	-5.40	7.60	4.38	-4.22	9.59	5.11
120	-5.78	5.89	3.50	-5.23	6.17	3.67	-4.69	8.43	4.16
140	-5.47	4.68	2.96	-4.78	4.95	3.16	-4.68	7.30	3.47
170	-4.81	3.33	2.35	-4.06	3.56	2.58	-4.34	5.87	2.69
200	-4.14	2.40	1.89	-3.40	2.61	2.11	-3.86	4.73	2.11

Table 1.8.3 Thermal stresses at the nozzle safe and (vessel 3, $\chi = \ell_3/4$)
(kg/mm²)

t (SEC)	簡易解析(JUNC=1)			簡易解析(JUNC=3)			F I N A S		
	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$
30	4.03	-2.64	1.98	4.27	-0.98	3.55	4.28	-1.82	2.27
60	8.85	-6.73	5.51	9.43	-2.16	7.86	10.02	-4.33	6.25
70	9.95	-8.00	6.55	10.63	-2.45	8.86	11.50	-5.07	7.43
80	9.89	-8.61	7.11	10.61	-2.46	8.87	11.76	-5.30	8.05
100	8.51	-8.95	7.00	9.27	-2.24	7.85	10.56	-5.24	7.89
120	6.88	-8.76	6.23	7.63	-1.96	6.57	8.86	-4.95	7.04
140	5.47	-8.32	5.39	6.19	-1.70	5.42	7.33	-4.57	6.14
170	3.89	-7.46	4.29	4.54	-1.37	4.08	5.55	-3.97	4.95
200	2.80	-6.52	3.43	3.37	-1.10	3.10	4.28	-3.38	4.01

Table 1.8.4 Thermal stresses at the nozzle safe end (vessel 3, $\chi = \ell_3$)
(kg/mm²)

t (SEC)	簡易解析(JUNC=1)			簡易解析(JUNC=3)			F I N A S		
	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$	$\sigma_{x,B}$	$\sigma_{\theta,M}$	$\sigma_{\theta,B}$
30	1.36	-1.92	1.19	1.70	-1.88	1.29	1.63	-1.59	1.19
60	3.24	-4.46	3.84	4.07	-4.45	4.08	4.35	-3.73	3.88
70	3.65	-5.18	4.67	4.62	-5.18	4.96	5.08	-4.33	4.74
80	3.66	-5.38	5.25	4.70	-5.41	5.56	5.39	-4.50	5.36
100	2.92	-5.28	5.33	3.99	-5.36	5.65	4.90	-4.40	5.55
120	1.94	-4.98	4.76	3.00	-5.08	5.08	3.96	-4.13	5.08
140	1.12	-4.61	4.10	2.13	-4.72	4.40	3.08	-3.81	4.49
170	0.29	-4.03	3.22	1.21	-4.14	3.50	2.09	-3.34	3.69
200	-0.17	-3.46	2.55	0.64	-3.56	2.79	1.43	-2.89	3.03

(5) 円筒容器とスカート間に板厚平均温度の差だけが生じた場合

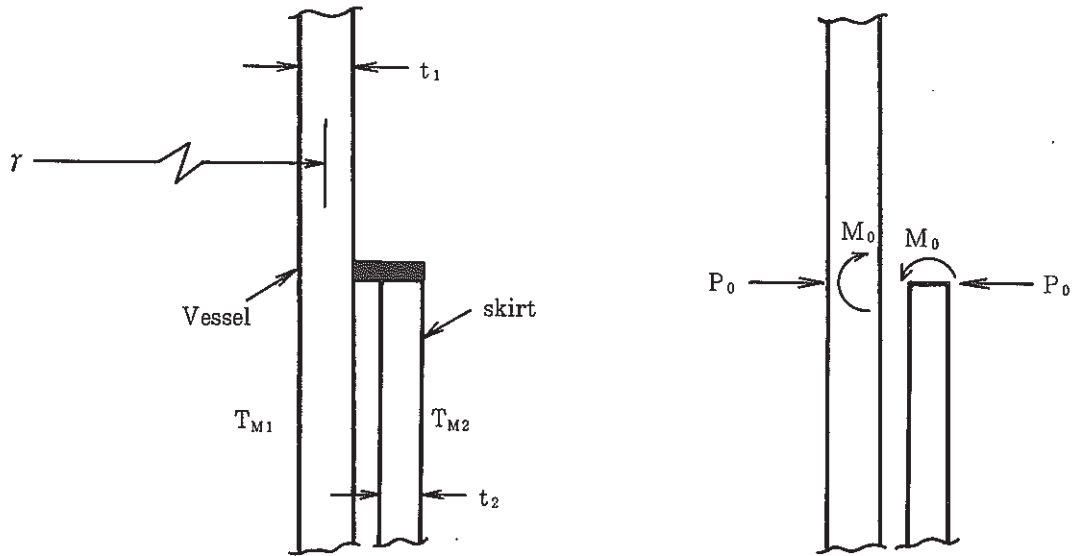


Fig. 1.8.4 Simplified analysis model for cylindrical vessel and skirt

Fig. 1.8.4 に示すように円筒容器とスカート間に板厚平均温度の差だけが生じた場合について考える。同一材質 E , ν , α とする。板厚を t_1 , t_2 , 板厚平均温度を T_{M1} , T_{M2} とする。添字 1 が容器を, 添字 2 がスカートを表わすものとする。接続部に反力 P_0 と曲げモーメント M_0 が, Fig. 1.8.4 に示す向きに生じたとする。接続部からの距離を x とし, x は上下両方向に正とする。

容器の解は付録 A 1.5 より

$$\left[\begin{array}{l} \text{スカート} \\ \text{側} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} u_1(x) = \frac{1}{8\beta_1^3 D_1} \{ -2\beta_1 M_0 \zeta(\beta_1 x) + P_0 \varphi(\beta_1 x) \} + r\alpha T_{M1} \\ i_1(x) = -\frac{1}{4\beta_1^2 D_1} \{ \beta_1 M_0 \phi(\beta_1 x) + P_0 \zeta(\beta_1 x) \} \\ M_{x1} = \frac{M_0}{2} \theta(\beta_1 x) - \frac{P_0}{4\beta_1} \phi(\beta_1 x), \quad M_{\theta 1} = \nu M_{x1} \end{array} \right] \quad (a)$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{反対側} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} u_1(x) = \frac{1}{8\beta_1^3 D_1} \{ 2\beta_1 M_0 \zeta(\beta_1 x) + P_0 \varphi(\beta_1 x) \} + r\alpha T_{M1} \\ i_1(x) = \frac{1}{4\beta_1^2 D_1} \{ \beta_1 M_0 \phi(\beta_1 x) - P_0 \zeta(\beta_1 x) \} \\ M_{x1} = -\frac{M_0}{2} \theta(\beta_1 x) - \frac{P_0}{4\beta_1} \phi(\beta_1 x), \quad M_{\theta 1} = \nu M_{x1} \end{array} \right] \quad (b)$$

となる。スカートの解は付録 A 1.2 より

$$\left[\begin{array}{l} u_2(x) = -\frac{1}{2\beta_2^3 D_2} \{ \beta_2 M_0 \phi(\beta_2 x) + P_0 \theta(\beta_2 x) \} + r \alpha T_{M2} \\ i_2(x) = \frac{1}{2\beta_2^2 D_2} \{ 2\beta_2 M_0 \theta(\beta_2 x) + P_0 \phi(\beta_2 x) \} \\ M_{x2} = -M_0 \phi(\beta_2 x) - \frac{P_0}{\beta_2} \zeta(\beta_2 x), \quad M_{\theta 2} = \nu M_{x2} \end{array} \right] \quad (c)$$

となる。接続部の連続条件

$$u_1(0) = u_2(0), \quad i_1(0) \text{ (スカート側)} = i_2(0)$$

より

$$\left[\begin{array}{l} -\frac{1}{2\beta_2^2 D_2} \cdot M_0 - \left(\frac{1}{8\beta_1^3 D_1} + \frac{1}{2\beta_2^3 D_2} \right) P_0 = r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ \left(\frac{1}{4\beta_1 D_1} + \frac{1}{\beta_2 D_2} \right) M_0 + \frac{1}{2\beta_2^2 D_2} \cdot P_0 = 0 \end{array} \right] \quad (d)$$

が得られる。板厚比 $K = t_2 / t_1$ を用いて整理すると

$$\left[\begin{array}{l} -\frac{4}{K^2} (\beta_1 M_0) - \left(\frac{K\sqrt{K} + 4}{K\sqrt{K}} \right) P_0 = 8\beta_1^3 D_1 r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ \left(\frac{K^2\sqrt{K} + 4}{K^2\sqrt{K}} \right) (\beta_1 M_0) + \frac{2}{K^2} P_0 = 0 \end{array} \right] \quad (e)$$

となり、これを解くと

$$\left[\begin{array}{l} \beta_1 M_0 = \frac{2K^2}{K^4 + 4K^2\sqrt{K} + 4K\sqrt{K} + 8} \cdot 8\beta_1^3 D_1 r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ P_0 = -\frac{K^4 + 4K\sqrt{K}}{K^4 + 4K^2\sqrt{K} + 4K\sqrt{K} + 8} 8\beta_1^3 D_1 r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \end{array} \right] \quad (f)$$

を得る。これを (a), (b), (c) 式に代入して整理すると

$$\left[\begin{array}{l} u_1(x) = r \alpha T_{M1} - r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \left\{ C_1 \theta(\beta_1 x) + \left(C_1 + \frac{C_2}{2} \right) \zeta(\beta_1 x) \right\} \\ M_{x1} = 2\beta_1^2 D_1 r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \left\{ -C_1 \zeta(\beta_1 x) + \left(C_1 + \frac{C_2}{2} \right) \theta(\beta_1 x) \right\} \\ \text{容器 (スカート側)} \quad M_{\theta 1} = \nu M_{x1} \\ \sigma_{\theta 1, M} = -E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \left\{ C_1 \theta(\beta_1 x) + \left(C_1 + \frac{C_2}{2} \right) \zeta(\beta_1 x) \right\} \\ \sigma_{x1, B} = E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \left\{ -C_1 \zeta(\beta_1 x) + \left(C_1 + \frac{C_2}{2} \right) \theta(\beta_1 x) \right\} \\ \sigma_{\theta 1, B} = \nu \sigma_{x1, B} \end{array} \right] \quad (1.41)$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{容器} \\
 \text{(反対側)} \\
 u_1(x) = r\alpha T_{M1} - r\alpha(T_{M1} - T_{M2}) \left\{ C_1 \theta(\beta_1 x) + \left(C_1 - \frac{C_2}{2} \right) \zeta(\beta_1 x) \right\} \\
 M_{x1} = 2\beta_1^2 D_1 r\alpha(T_{M1} - T_{M2}) \left\{ -C_1 \zeta(\beta_1 x) + \left(C_1 - \frac{C_2}{2} \right) \theta(\beta_1 x) \right\} \\
 M_{\theta 1} = \nu M_{x1} \\
 \sigma_{\theta 1, M} = -E\alpha(T_{M1} - T_{M2}) \left\{ C_1 \theta(\beta_1 x) + \left(C_1 - \frac{C_2}{2} \right) \zeta(\beta_1 x) \right\} \\
 \sigma_{x1, B} = E\alpha(T_{M1} - T_{M2}) \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \left\{ -C_1 \zeta(\beta_1 x) + \left(C_1 - \frac{C_2}{2} \right) \theta(\beta_1 x) \right\} \\
 \sigma_{\theta 1, B} = \nu \sigma_{x1, B}
 \end{array} \right\} \quad (1.42)$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{スカート} \\
 u_2(x) = r\alpha T_{M2} + r\alpha(T_{M1} - T_{M2}) \left\{ (1-C_1) \theta(\beta_2 x) + \frac{C_2}{K^2} \zeta(\beta_2 x) \right\} \\
 M_{x2} = 2\beta_2^2 D_2 r\alpha(T_{M1} - T_{M2}) \left\{ (1-C_1) \zeta(\beta_2 x) - \frac{C_2}{K^2} \theta(\beta_2 x) \right\} \\
 M_{\theta 2} = \nu M_{x2} \\
 \sigma_{\theta 2, M} = E\alpha(T_{M1} - T_{M2}) \left\{ (1-C_1) \theta(\beta_2 x) + \frac{C_2}{K^2} \zeta(\beta_2 x) \right\} \\
 \sigma_{x2, B} = E\alpha(T_{M1} - T_{M2}) \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \left\{ (1-C_1) \zeta(\beta_2 x) - \frac{C_2}{K^2} \theta(\beta_2 x) \right\} \\
 \sigma_{\theta 2, B} = \nu \sigma_{x2, B}
 \end{array} \right\} \quad (1.43)$$

を得る。ここに

$$C_1 = \frac{K^4 + 4K\sqrt{K}}{K^4 + 4K^2\sqrt{K} + 4K\sqrt{K} + 8}, \quad C_2 = \frac{8K^2}{K^4 + 4K^2\sqrt{K} + 4K\sqrt{K} + 8} \quad (g)$$

とした。これから、応力は $E\alpha(T_{M1} - T_{M2})$ に比例し、板厚比 K のみに依存することがわかる。
 ・容器（スカート側）の任意位置 x の応力を 2 つの線図を用いて求めるには次のようにすると良い。

- 1. 1 節の Fig. 1.1.5 を $\beta_1 x$ に対し読み取り C_1 倍する。
- 1. 3 節の Fig. 1.3.3 を $\beta_1 x$ に対し読み取り

$$4(1-\nu) \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \left(C_1 + \frac{C_2}{2} \right) = 5.084 \left(C_1 + \frac{C_2}{2} \right) \text{ 倍する。}$$

両者を加えて求めた無次元応力に $E\alpha(T_{M1} - T_{M2})$ を乗ずれば良い。

・容器（スカートと反対側）の任意位置 x の応力を 2 つの線図を用いて求めるには次のようにすると良い。

- 1. 1 節の Fig. 1.1.5 を $\beta_1 x$ に対し読み取り C_1 倍する。

1.3節の Fig. 1.3.3 を $\beta_1\chi$ に対し読み取り

$$5.084 \left(C_1 - \frac{C_2}{2} \right) \text{ 倍する。}$$

両者を加えて求めた無次元応力に $E\alpha(T_{M1}-T_{M2})$ を乗ずる。

◦ スカートの任意位置 χ の応力を 2つの線図を用いて求めるには次のようにすると良い。

1.1節の Fig. 1.1.5 を $\beta_2\chi$ に対し読み取り $-(1-C_1)$ 倍する。

1.3節の Fig. 1.3.3 を $\beta_2\chi$ に対し読み取り

$$-5.084 \frac{C_2}{K^2} \text{ 倍する。}$$

両者を加えて求めた無次元応力に $E\alpha(T_{M1}-T_{M2})$ を乗ずる。

◦ 接続部 ($\chi = 0$) の応力

$$\left[\begin{array}{l} \text{容 器} \\ \text{(スカート側)} \\ \text{(容器的最大曲げ応力)} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \sigma_{\theta 1, M} = -C_1 E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \\ \sigma_{x 1, B} = \left(C_1 + \frac{C_2}{2} \right) \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \\ \qquad \qquad \qquad = 1.8157 \left(C_1 + \frac{C_2}{2} \right) E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \\ \sigma_{\theta 1, B} = \nu \sigma_{x 1, B} = 0.5447 \left(C_1 + \frac{C_2}{2} \right) E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \end{array} \right] \quad (h)$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{容 器} \\ \text{(反対側)} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \sigma_{\theta 1, M} = -C_1 E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \\ \sigma_{x 1, B} = \left(C_1 - \frac{C_2}{2} \right) \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \\ \qquad \qquad \qquad = 1.8157 \left(C_1 - \frac{C_2}{2} \right) E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \\ \sigma_{\theta 1, B} = \nu \sigma_{x 1, B} = 0.5447 \left(C_1 - \frac{C_2}{2} \right) E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \end{array} \right] \quad (i)$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{スカート} \\ \text{(スカートの最大膜応力)} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \sigma_{\theta 2, M} = (1-C_1) E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \\ \sigma_{x 2, B} = -\frac{C_2}{K^2} \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \cdot E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \\ \qquad \qquad \qquad = -1.8157 \frac{C_2}{K^2} \cdot E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \\ \sigma_{\theta 2, B} = \nu \sigma_{x 2, B} = -0.5447 \frac{C_2}{K^2} E\alpha(T_{M1}-T_{M2}) \end{array} \right] \quad (j)$$

◦ 容器的最大膜応力

スカート側で最大変位となり、その位置は

$$i_1 = \frac{du_1}{d\chi} = \beta_{1r} \alpha(T_{M1}-T_{M2}) \{ C_1 \varphi(\beta_1\chi) - \left(C_1 + \frac{C_2}{2} \right) \psi(\beta_1\chi) \} = 0$$

$$\text{より } -\frac{C_2}{2} \cos \beta_1\chi + \left(2C_1 + \frac{C_2}{2} \right) \sin \beta_1\chi = 0$$

$$\phi_1 = \beta_1 \chi = \tan^{-1} \left(\frac{C_2}{4C_1 + C_2} \right) \quad (k)$$

となる位置であり，応力は

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta_1, M} = -C_3 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ \sigma_{x_1, B} = C_3 \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) = 1.8157 C_3 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ \sigma_{\theta_1, B} = \nu \cdot \sigma_{x_1, B} = 0.5447 C_3 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \end{array} \right] \quad (l)$$

となる。ここに

$$C_3 = e^{-\phi_1} \sqrt{C_1^2 + \frac{C_1 C_2}{2} + \frac{C_2^2}{8}} \quad (m)$$

である。

・スカートの極値曲げ応力

スカートの曲げモーメント M_{x_2} が極値となるのは

$$\frac{dM_{x_2}}{d\chi} = 2\beta_2^3 D_2 r \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \left\{ (1 - C_1) \phi(\beta_2 \chi) + \frac{C_2}{K^2} \varphi(\beta_2 \chi) \right\} = 0$$

$$\text{より } (1 - C_1 + \frac{C_2}{K^2}) \cos \beta_2 \chi - (1 - C_1 - \frac{C_2}{K^2}) \sin \beta_2 \chi = 0$$

$$\phi_2 = \beta_2 \chi = \tan^{-1} \left(\frac{1 - C_1 + \frac{C_2}{K^2}}{1 - C_1 - \frac{C_2}{K^2}} \right) \quad (n)$$

となる位置であり，応力は

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta_2, M} = C_4 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ \sigma_{x_2, B} = C_4 \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) = 1.8157 C_4 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \\ \sigma_{\theta_2, B} = \nu \sigma_{x_2, B} = 0.5447 C_4 E \alpha (T_{M1} - T_{M2}) \end{array} \right] \quad (o)$$

となる。ここに

$$C_4 = e^{-\phi_2} \sqrt{\frac{(1 - C_1)^2 + (\frac{C_2}{K^2})^2}{2}} \quad (p)$$

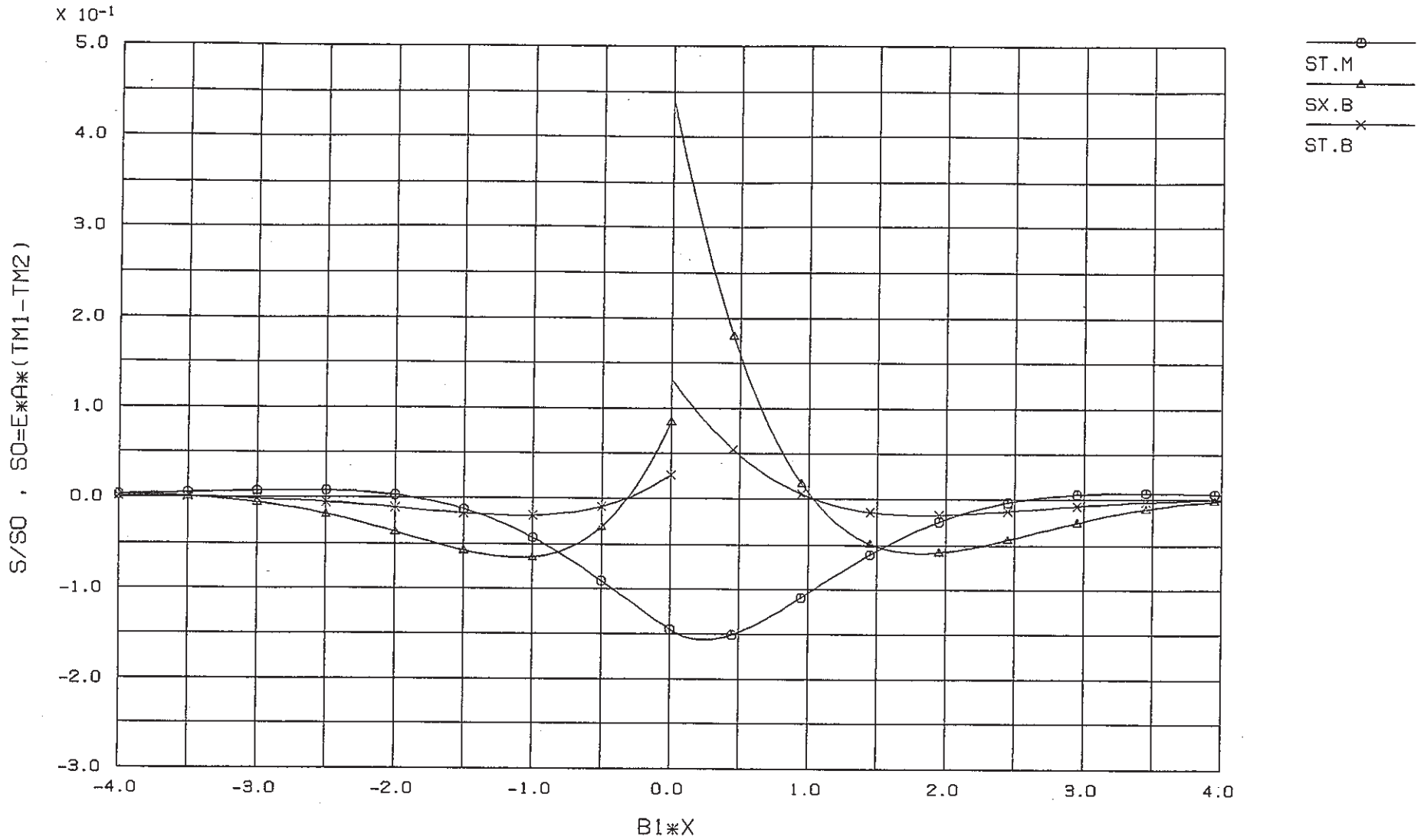
である。接続部 ($\chi = 0$) とは逆符号の曲げ応力となる。 $\frac{C_2}{K^2}$ (接続部) と C_4 (極値) の大きい方がスカートの最大曲げ応力を与える。

0.1 ≤ K ≤ 10の範囲の $C_1, C_2, C_2/K^2, \phi_1, C_3, \phi_2, C_4$ の値を Table. 1.8.5 に示す。

Table. 1.8.5 $C_1, C_2, C_2/K^2, \phi_1, C_3, \phi_2, C_4$ for K

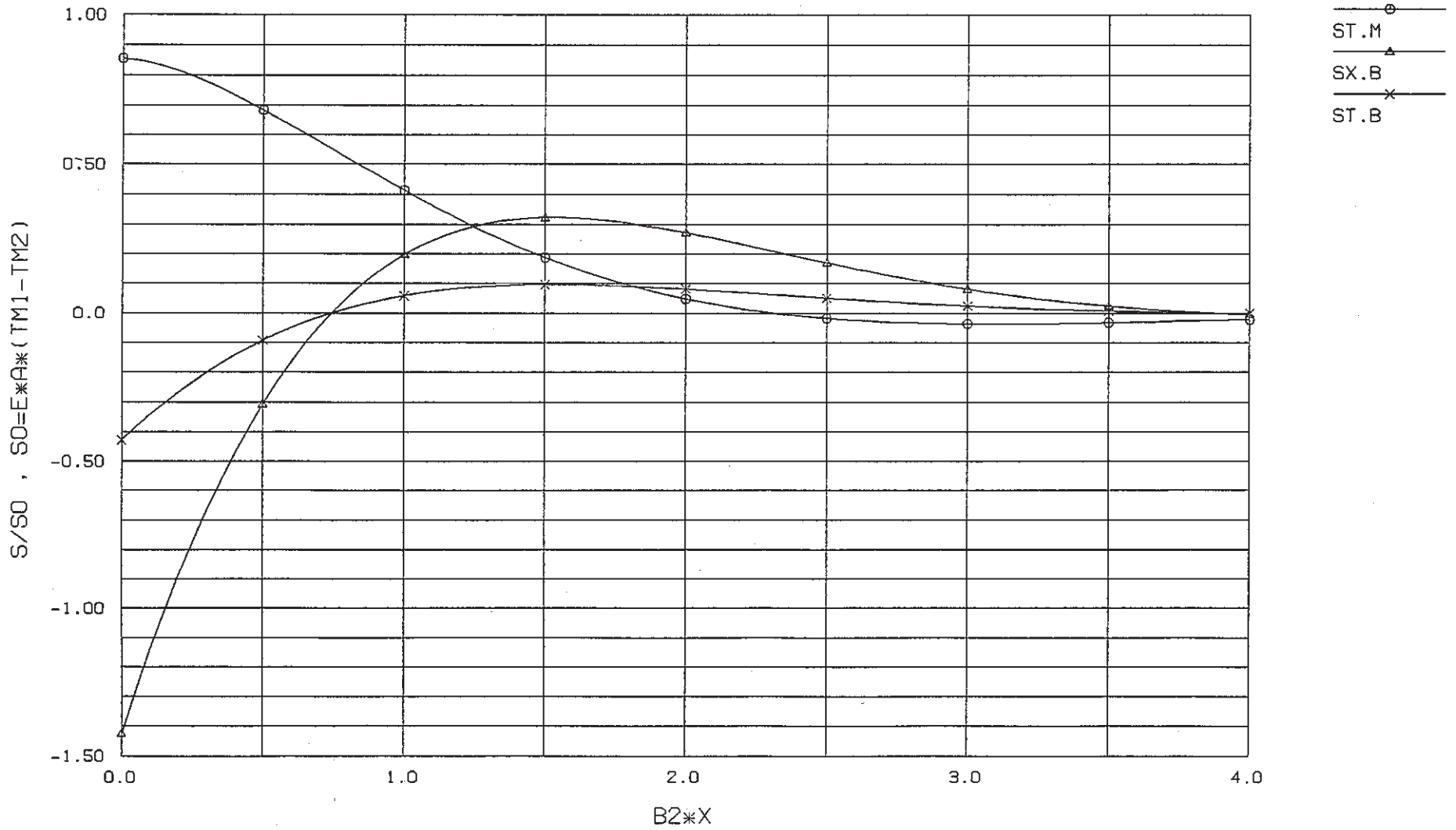
K	C1	C2	C2/KK	PHAI1	C3	PHAI2	C4
0.1	0.0156	0.0098	0.9829	0.1356	0.0159	1.5700	0.2046
0.2	0.0426	0.0380	0.9489	0.1801	0.0442	1.5663	0.1990
0.3	0.0751	0.0812	0.9027	0.2098	0.0791	1.5586	0.1923
0.4	0.1099	0.1356	0.8473	0.2315	0.1172	1.5461	0.1851
0.5	0.1450	0.1964	0.7856	0.2477	0.1563	1.5285	0.1780
0.6	0.1791	0.2594	0.7205	0.2598	0.1947	1.5057	0.1713
0.7	0.2113	0.3207	0.6545	0.2684	0.2311	1.4781	0.1653
0.8	0.2413	0.3775	0.5899	0.2741	0.2651	1.4463	0.1600
0.9	0.2688	0.4279	0.5282	0.2773	0.2961	1.4110	0.1556
1.0	0.2941	0.4706	0.4706	0.2783	0.3242	1.3734	0.1519
1.1	0.3173	0.5053	0.4176	0.2774	0.3496	1.3344	0.1490
1.2	0.3388	0.5323	0.3697	0.2749	0.3724	1.2952	0.1467
1.3	0.3587	0.5520	0.3266	0.2710	0.3931	1.2565	0.1449
1.4	0.3773	0.5652	0.2884	0.2660	0.4120	1.2191	0.1434
1.5	0.3948	0.5726	0.2545	0.2601	0.4292	1.1835	0.1421
1.6	0.4115	0.5753	0.2247	0.2534	0.4452	1.1501	0.1410
1.7	0.4274	0.5738	0.1986	0.2462	0.4601	1.1192	0.1400
1.8	0.4426	0.5691	0.1757	0.2386	0.4741	1.0907	0.1389
1.9	0.4572	0.5617	0.1556	0.2308	0.4874	1.0646	0.1377
2.0	0.4714	0.5523	0.1381	0.2228	0.5001	1.0409	0.1364
2.5	0.5359	0.4883	0.0781	0.1834	0.5570	0.9522	0.1284
3.0	0.5913	0.4183	0.0465	0.1492	0.6062	0.8986	0.1184
3.5	0.6388	0.3552	0.0290	0.1214	0.6491	0.8655	0.1078
4.0	0.6792	0.3019	0.0189	0.0997	0.6865	0.8442	0.0977
4.5	0.7137	0.2579	0.0127	0.0827	0.7189	0.8299	0.0884
5.0	0.7430	0.2219	0.0089	0.0694	0.7468	0.8199	0.0801
6.0	0.7897	0.1679	0.0047	0.0504	0.7918	0.8076	0.0663
7.0	0.8246	0.1306	0.0027	0.0381	0.8258	0.8006	0.0557
8.0	0.8512	0.1041	0.0016	0.0297	0.8519	0.7963	0.0475
9.0	0.8719	0.0847	0.0010	0.0237	0.8724	0.7936	0.0410
10.0	0.8883	0.0702	0.0007	0.0194	0.8887	0.7917	0.0358

$E\alpha(T_{M1} - T_{M2})$ で除した無次元応力を βX に対しプロットした応力分布を Fig. 1.8.5 ($k=0.5$, 容器側), Fig. 1.8.6 ($k=0.5$, スカート側), Fig. 1.8.7 ($k=1$, 容器側), Fig. 1.8.8 ($k=1$, スカート側), Fig. 1.8.9 ($k=2$, 容器側), Fig. 1.8.10 ($k=2$, スカート側) に示す。容器側の応力分布線図において, $\beta_1 X \geq 0$ はスカートと同じ側, $\beta_1 X < 0$ はスカートの反対側とした。



VESSEL(T1, TM1) AND SKIRT(T2, TM2) (T2/T1=0.5 , VESSEL)

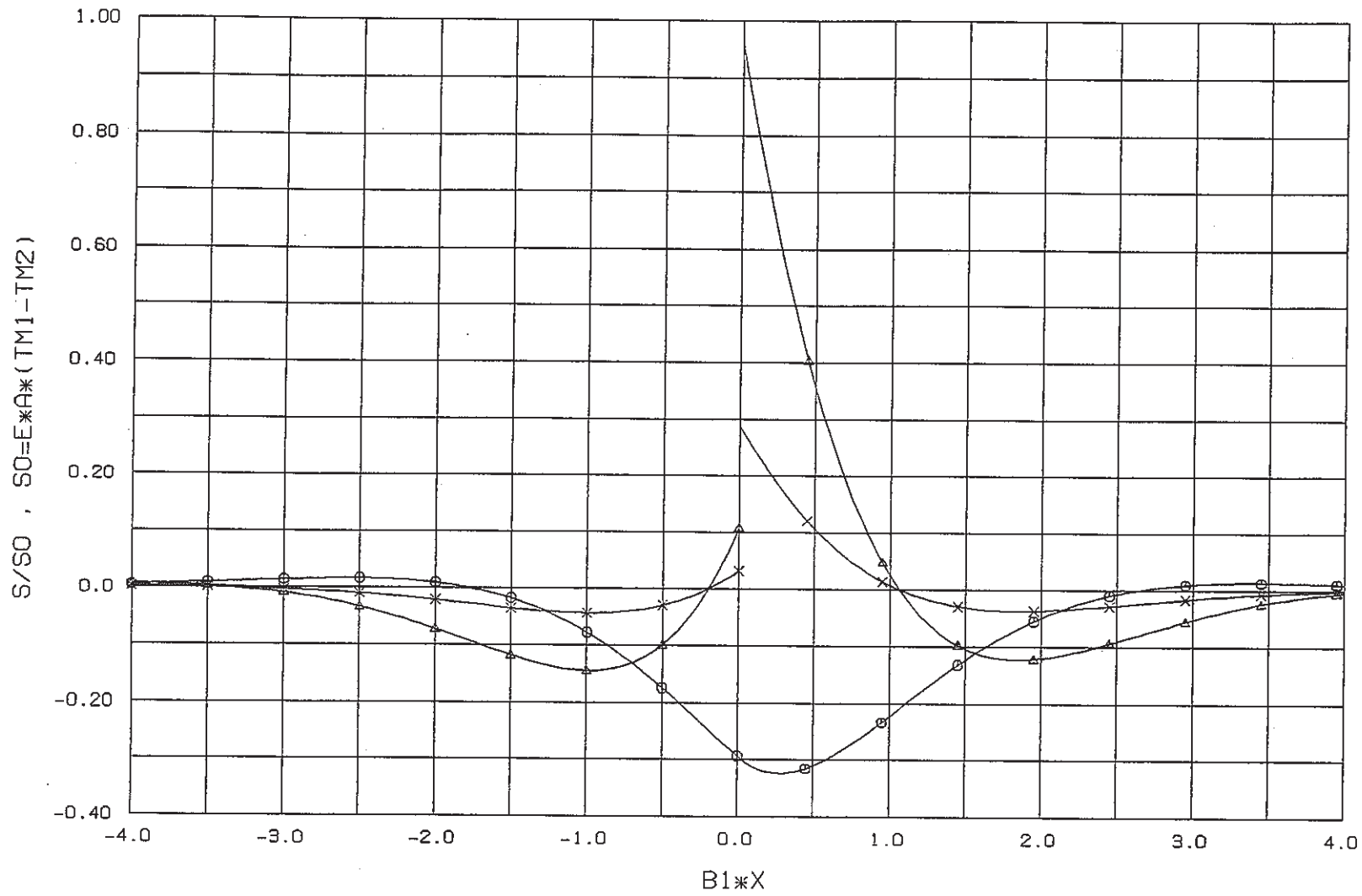
Fig. 1.8.5 Thermal stresses near the junction of vessel & skirt (k=0.5, vessel side)



VESSEL(T1, TM1) AND SKIRT(T2, TM2) (T2/T1=0.5 , SKIRT)

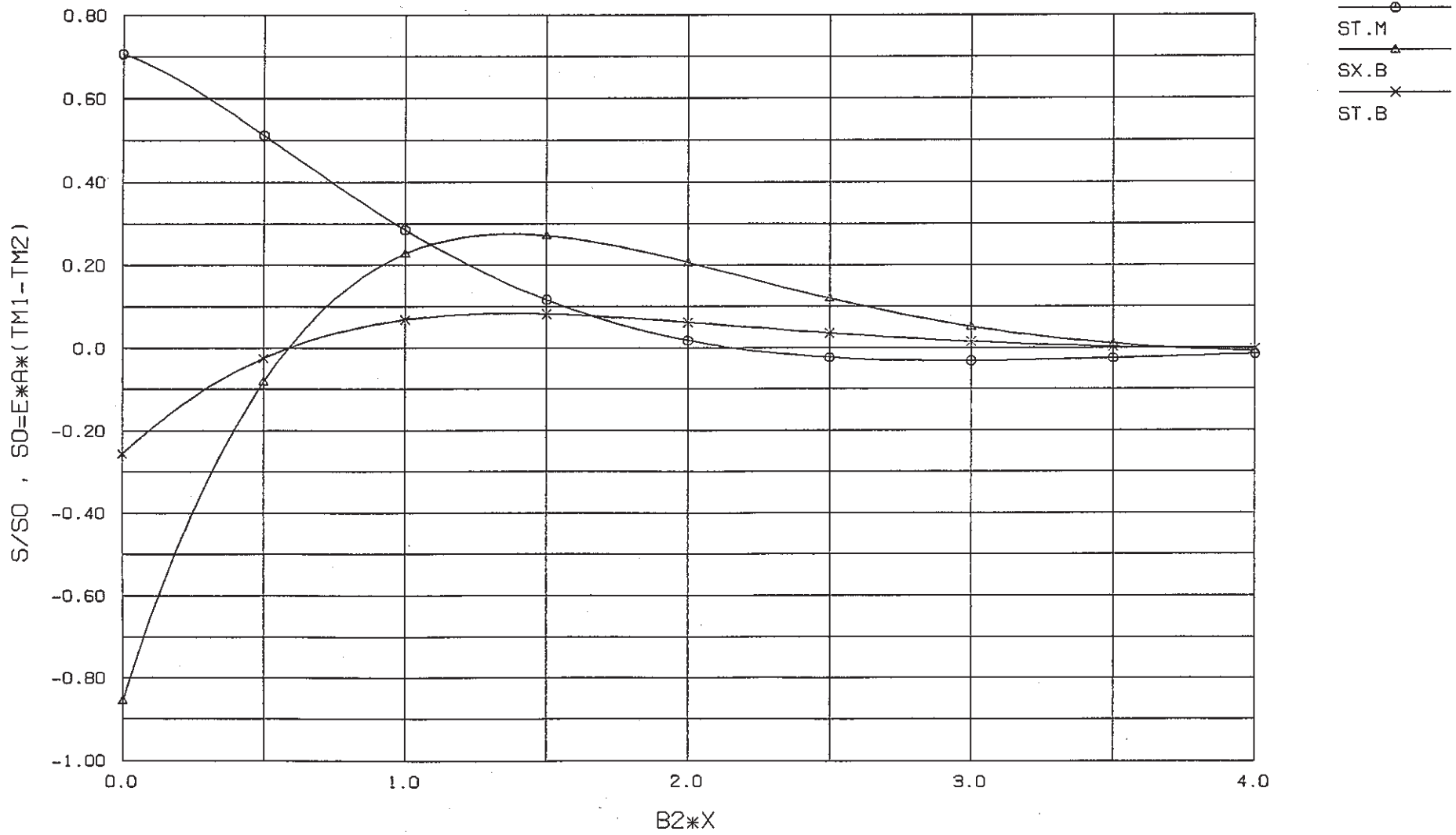
Fig. 1.8.6 Thermal stresses near the junction of vessel & skirt (k=0.5, skirt side)

○ ST.M
 ▲ SX.B
 × ST.B



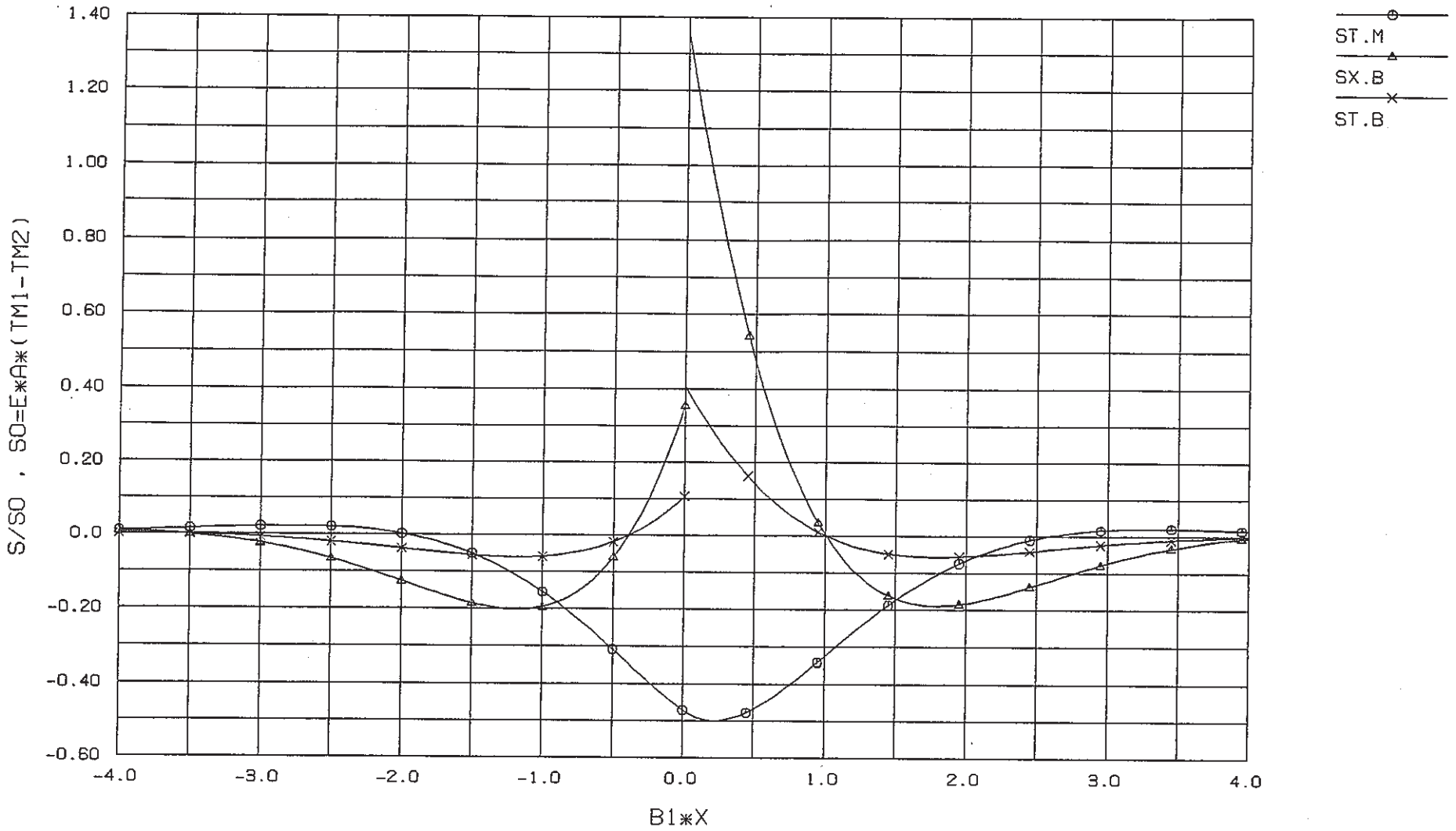
VESSEL(T1, TM1) AND SKIRT(T2, TM2) (T2/T1=1.0 , VESSEL)

Fig. 1.8.7 Thermal stresses near the junction of vessel & skirt (k=1.0, vessel side)



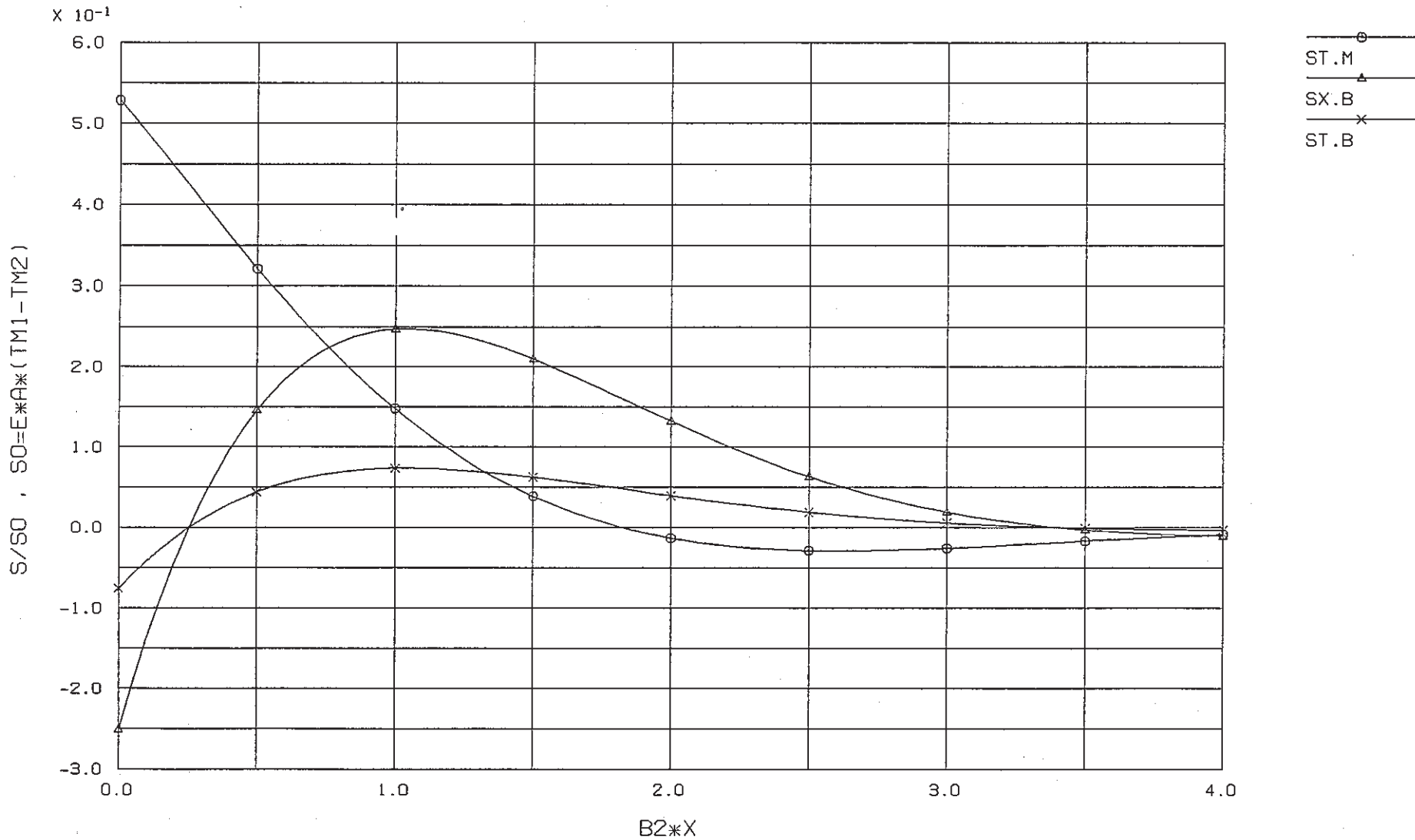
VESSEL(T1, TM1) AND SKIRT(T2, TM2) (T2/T1=1.0 , SKIRT)

Fig. 1.8.8 Thermal stresses near the junction of vessel & skirt (k=1.0, skirt side)



VESSEL(T1, TM1) AND SKIRT(T2, TM2) (T2/T1=2.0 , VESSEL)

Fig. 1.8.9 Thermal stresses near the junction of vessel & skirt (k=2.0, vessel side)



VESSEL(T1, TM1) AND SKIRT(T2, TM2) (T2/T1=2.0 , SKIRT)

Fig. 1.8.10 Thermal stresses near the junction of vessel & skirt (k = 2.0 , skirt side)

1.9 円筒容器の補強リング部

円筒 ($E_1, \nu_1, \alpha_1, r, t$) と補強リング (E_2, ν_2, α_2, A) の接続部の応力を求める。 A は補強リングの断面積とする。円筒の平均温度を T_{M1} 、内外面温度差を T_{B1} とする。補強リングの平均温度を T_{M2} とする。

(1) 円筒中間部

円筒と補強リングの反力を P とする。円筒に対しては半径方向外向きに、補強リングに対しては内向きに作用するものとする。

円筒の解は付録 A 1.3 と自由熱膨張の解を重ねて

$$\left[\begin{array}{l} u_1(x) = r\alpha_1 T_{M1} + \frac{P}{8\beta^3 D} \cdot \phi(\beta x) \\ M_x = -\frac{P}{4\beta} \phi(\beta x) - \frac{D(1+\nu_1)\alpha_1 T_{B1}}{t} \\ M_\theta = -\frac{\nu_1 P}{4\beta} \phi(\beta x) - \frac{D(1+\nu_1)\alpha_1 T_{B1}}{t} \end{array} \right] \quad (a)$$

となる。補強リングの解は、リングの巾を b 、高さを h とし、両端開の内圧 $-P/b$ を受ける円筒の解を用いて

$$\left[\begin{array}{l} u_2 = r\alpha_2 T_{M2} + \frac{r^2}{E_2 h} \left(\frac{-P}{b} \right) = r\alpha_2 T_{M2} - \frac{r^2 P}{E_2 A} \\ \sigma_{\theta 2, M} = \frac{r}{h} \left(\frac{-P}{b} \right) = \frac{-rP}{A} \end{array} \right] \quad (b)$$

となる。 $u_1(0) = u_2$ より

$$\left(\frac{1}{8\beta^3 D} + \frac{r^2}{E_2 A} \right) P = -r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \quad (c)$$

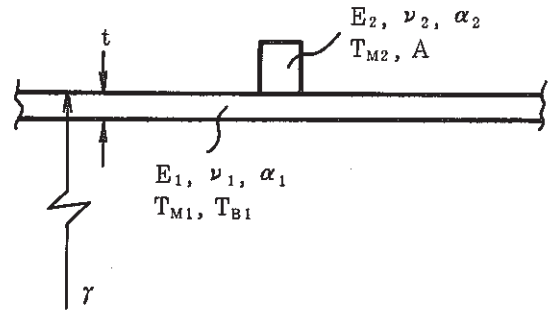
でなければならない。

$$C_1 = \frac{r^2}{E_2 A} \Big/ \frac{1}{8\beta^3 D} = \frac{2E_1 t \sqrt{rt}}{E_2 A [3(1-\nu_1^2)]^{1/4}} = 1.556 \frac{E_1 t \sqrt{rt}}{E_2 A} \quad (\nu_1 = 0.3) \quad (1.44)$$

とすると反力 P は (c) 式より

$$P = -\frac{8\beta^3 D r}{1+C_1} (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \quad (d)$$

となる。(a) 式に P を代入すると円筒の解は



(a) at the intermediate



(b) at the edge

Fig. 1.9.1 Ring reinforcement of cylindrical vessel

$$\left[\begin{aligned}
 u_1(x) &= r \alpha_1 T_{M1} - \frac{r}{1+C_1} (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \phi(\beta x) \\
 M_x &= \frac{2\beta^2 D r}{1+C_1} (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \phi(\beta x) - \frac{D(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{t} \\
 M_\theta &= \frac{2\nu_1 \beta^2 D r}{1+C_1} (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \phi(\beta x) - \frac{D(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{t} \\
 \sigma_{\theta 1, M} &= \frac{E_1}{r} (u_1 - r \alpha_1 T_{M1}) = - \frac{E_1}{1+C_1} (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \phi(\beta x) \\
 \sigma_{x 1, B} &= \frac{6M_x}{t^2} = \frac{E_1 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{1+C_1} \sqrt{\frac{3}{1-\nu_1^2}} \phi(\beta x) - \frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)} \\
 \sigma_{\theta 1, B} &= \frac{6M_\theta}{t^2} = \frac{\nu_1 E_1 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{1+C_1} \sqrt{\frac{3}{1-\nu_1^2}} \phi(\beta x) - \frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)}
 \end{aligned} \right. \quad (1.45)$$

となる。(b)式にPを代入すると補強リングの解は

$$\left[\begin{aligned}
 u_2 &= r \alpha_2 T_{M2} + \frac{C_1}{1+C_1} r (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \\
 \sigma_{\theta 2} &= \frac{C_1}{1+C_1} E_2 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})
 \end{aligned} \right. \quad (1.46)$$

となる。円筒の任意位置の応力は、1.1節の Fig. 1.1.8 から読み取った無次元応力に $E_1 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) / (1+C_1)$ を乗じて公称曲げ応力 $-E_1 \alpha_1 T_{B1} / 2(1-\nu_1)$ を加えればよい。

(2) 円筒端部

円筒端部に補強リングが接続される場合は、一般に端部の勾配が0とならず接続部に曲げモーメントが生ずる。その様な一般的な解は補強リングをフランジと見なして1.6節の解法を用いると良い。ここでは補強リングの回転剛性が円筒端部の回転剛性よりも相対的に小さく、接続部曲げモーメントが無視できる場合とする。

円筒の解は1.1節と付録A1.2の解を重ね合わせて

$$\left[\begin{aligned}
 u_1(x) &= r \alpha_1 T_{M1} + \frac{(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{2\beta^2 t} \phi(\beta x) + \frac{P}{2\beta^3 D} \theta(\beta x) \\
 M_x &= - \frac{D(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{t} \{1 - \phi(\beta x)\} + \frac{P}{\beta} \zeta(\beta x) \\
 M_\theta &= - \frac{D(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{t} \{1 - \nu_1 \phi(\beta x)\} + \frac{\nu_1 P}{\beta} \zeta(\beta x)
 \end{aligned} \right. \quad (e)$$

となる。 $u_1(0) = u_2$ より

$$r_1 \alpha_1 T_{M1} + \frac{(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{2\beta^2 t} + \frac{P}{2\beta^3 D} = r \alpha_2 T_{M2} - \frac{r^2 P}{E_2 A}$$

$$\left(\frac{1}{2\beta^3 D} + \frac{r^2}{E_2 A} \right) P = -r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) - \frac{(1+\nu_1)\alpha_1 T_{B1}}{2\beta^2 t} \quad (f)$$

でなければならない。

$$C_2 = \frac{r^2}{E_2 A} \frac{1}{2\beta^3 D} = \frac{E_1 t \sqrt{rt}}{2 E_2 A [3(1-\nu_1^2)]^{3/4}} = 0.3890 \frac{E_1 t \sqrt{rt}}{E_2 A} \quad (\nu_1 = 0.3) \quad (1.47)$$

とすると反力Pは(f)式より

$$P = -\frac{2\beta^3 D r}{1+C_2} (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) - \frac{\beta D (1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{(1+C_2)t} \quad (g)$$

となる。(e)式にPを代入すると円筒の解は

$$\left[\begin{aligned} u_1(\chi) &= r\alpha_1 T_{M1} + \frac{(1+\nu_1)\alpha_1 T_{B1}}{2\beta^2 t} \phi(\beta\chi) \\ &\quad - \frac{1}{1+C_2} \left\{ r(\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) + \frac{(1+\nu_1)\alpha_1 T_{B1}}{2\beta^2 t} \right\} \theta(\beta\chi) \\ M_x &= -\frac{D(1+\nu_1)\alpha_1 T_{B1}}{t} \{1 - \phi(\beta\chi)\} \\ &\quad - \frac{1}{1+C_2} \left\{ 2\beta^2 D r (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) + \frac{D(1+\nu_1)\alpha_1 T_{B1}}{t} \right\} \zeta(\beta\chi) \\ M_\theta &= -\frac{D(1+\nu_1)\alpha_1 T_{B1}}{t} \{1 - \nu_1 \phi(\beta\chi)\} \\ &\quad - \frac{\nu_1}{1+C_2} \left\{ 2\beta^2 D r (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) + \frac{D(1+\nu_1)\alpha_1 T_{B1}}{t} \right\} \zeta(\beta\chi) \\ \sigma_{\theta 1, M} &= \frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1) \sqrt{\frac{1-\nu_1^2}{3}}} \phi(\beta\chi) \\ &\quad - \frac{1}{1+C_2} \left\{ E_1 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) + \frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1) \sqrt{\frac{1-\nu_1^2}{3}}} \right\} \theta(\beta\chi) \\ \sigma_{x 1, B} &= -\frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)} \{1 - \phi(\beta\chi)\} \\ &\quad - \frac{1}{1+C_2} \left\{ E_1 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \sqrt{\frac{3}{1-\nu_1^2}} + \frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)} \right\} \zeta(\beta\chi) \\ \sigma_{\theta 1, B} &= -\frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)} \{1 - \nu_1 \phi(\beta\chi)\} \\ &\quad - \frac{\nu_1}{1+C_2} \left\{ E_1 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) \sqrt{\frac{3}{1-\nu_1^2}} + \frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)} \right\} \zeta(\beta\chi) \end{aligned} \right] \quad (1.48)$$

となる。任意位置の応力を線図から求めるには次のようにすると良い。上式の下線部は1.1節

の Fig. 1.1.3 から読み取った無次元応力に $E_1 \alpha_1 T_{B1}$ を乗ずれば求められる。上式の下線部は 1.1 節の Fig. 1.1.5 から読み取った無次元応力に

$$\frac{1}{1+C_2} \left\{ E_1 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) + \frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)} \sqrt{\frac{1-\nu_1^2}{3}} \right\}$$

を乗ずれば求められる。それらを重ね合わせれば良い。

(b) 式に P を代入すると補強リングの解は

$$\left[\begin{array}{l} u_2 = r \alpha_2 T_{M2} + \frac{C_2}{1+C_2} \left\{ r (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) + \frac{(1+\nu_1) \alpha_1 T_{B1}}{2\beta^2 t} \right\} \\ \sigma_{\theta 2, M} = \frac{C_2}{1+C_2} \left\{ E_2 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) + \frac{E_2 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)} \sqrt{\frac{1-\nu_1^2}{3}} \right\} \end{array} \right] \quad (1.49)$$

となる。

(例題) $r = 500 \text{ mm}$, $t = 20 \text{ mm}$, $E_1 = E_2 = 1.67 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, $\nu_1 = \nu_2 = 0.298$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.993 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, $T_{M1} = 450 ^\circ\text{C}$, $T_{B1} = -40 ^\circ\text{C}$, $T_{M2} = 480 ^\circ\text{C}$, $A = 800 \text{ mm}^2$ して補強リング接続部の応力を求めよ。

○ 円筒中間部の場合

$$C_1 = \frac{2 E_1 t \sqrt{rt}}{E_2 A [3(1-\nu_1^2)]^{1/4}} = 3.889$$

$$x=0 \left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta 1, M} = -\frac{E_1}{1+C_1} (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) = 2.04 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{x 1, B} = \frac{E_1 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{1+C_1} \sqrt{\frac{3}{1-\nu_1^2}} - \frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)} = 5.78 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{\theta 1, B} = \frac{\nu_1 E_1 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{1+C_1} \sqrt{\frac{3}{1-\nu_1^2}} - \frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)} = 8.38 \text{ kg/mm}^2 \end{array} \right] \quad (h)$$

$$\sigma_{\theta 2, M} = \frac{C_1}{1+C_1} E_2 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) = -7.94 \text{ kg/mm}^2$$

○ 円筒端部の場合

$$C_2 = \frac{E_1 t \sqrt{rt}}{2 E_2 A [3(1-\nu_1^2)]^{1/4}} = 0.972$$

$$x=0 \left[\begin{array}{l} \sigma_{\theta 1, M} = \frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)} \sqrt{\frac{1-\nu_1^2}{3}} \left(1 - \frac{1}{1+C_2}\right) - \frac{E_1 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2})}{1+C_2} \\ \hspace{10em} = 2.49 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{x 1, B} = 0 \\ \sigma_{\theta 1, B} = -\frac{E_1 \alpha_1 T_{B1}}{2} = 6.66 \text{ kg/mm}^2 \end{array} \right] \quad (i)$$

$$\sigma_{\theta_2, M} = \frac{C_2}{1+C_2} \left\{ E_2 (\alpha_1 T_{M1} - \alpha_2 T_{M2}) + \frac{E_2 \alpha_1 T_{B1}}{2(1-\nu_1)} \sqrt{\frac{1-\nu_1^2}{3}} \right\}$$

$$= -7.50 \text{ kg/mm}^2$$

1.10 ラプラス変換法について

本報における円筒および円板の解はすべて初等微積分および重ね合わせ法を用いて求めた。手間はかかるけれども物理的イメージが得られ易いと考えたからである。

本節では変位の微分方程式にラプラス変換法を適用して解を得る事を試みる。より一般的な荷重条件について、より迅速に機械的処理により解を得たい場合にはラプラス変換法が適している。

(1) 半径方向集中荷重 P

変位の微分方程式は付録 (A 1.9) 式より

$$\frac{d^4 u}{d\chi^4} + 4\beta^4 u = \frac{P(\chi)}{D} = \frac{P}{2D} \Delta(\chi) \quad (\text{a})$$

となる。ここで $\Delta(\chi)$ はディラックのデルタ関数であり、 $1/2$ を乗じたのは $\chi \geq 0$ 側に $P/2$, $\chi < 0$ 側に $P/2$ が負荷されるとした。(a) 式をラプラス変換

$$u(\chi) \rightarrow \tilde{u}(s) = \int_0^{\infty} e^{-s\chi} u(\chi) d\chi$$

すると

$$s^4 \tilde{u} - s^3 u(0) - s^2 u'(0) - s u''(0) - u'''(0) + 4\beta^4 \tilde{u} = \frac{P}{2D} \quad (\text{b})$$

となる。対称性より $u'(0) = u''(0) = 0$ となり、(b) 式を \tilde{u} について解くと、

$$\tilde{u}(s) = \frac{u(0)s^3}{s^4 + 4\beta^4} + \frac{u''(0)s}{s^4 + 4\beta^4} + \frac{P}{2D} \frac{1}{s^4 + 4\beta^4} \quad (\text{c})$$

を得る。(c) 式をラプラス逆変換すると

$$u(\chi) = u(0) \cos \beta\chi \cdot \text{ch } \beta\chi + \frac{u''(0)}{2\beta^2} \sin \beta\chi \cdot \text{sh } \beta\chi$$

$$+ \frac{P}{8\beta^3 D} (\sin \beta\chi \cdot \text{ch } \beta\chi - \cos \beta\chi \cdot \text{sh } \beta\chi)$$

$$= \frac{e^{\beta\chi}}{2} \cos \beta\chi \left\{ u(0) - \frac{P}{8\beta^3 D} \right\} + \frac{e^{-\beta\chi}}{2} \cos \beta\chi \left\{ u(0) - \frac{P}{8\beta^3 D} \right\}$$

$$+ \frac{e^{\beta\chi}}{2} \sin \beta\chi \left\{ -\frac{u''(0)}{2\beta^2} + \frac{P}{8\beta^3 D} \right\} + \frac{e^{-\beta\chi}}{2} \sin \beta\chi \left\{ -\frac{u''(0)}{2\beta^2} + \frac{P}{8\beta^3 D} \right\} \quad (\text{d})$$

を得る。ここで $\text{ch } \beta\chi = \cosh \beta\chi$, $\text{sh } \beta\chi = \sinh \beta\chi$ とした。 $\chi \rightarrow \infty$ で $u \rightarrow 0$ となるから (d) 式で $e^{\beta\chi}$ の項は 0 でなければならない。これから、

$$u(0) = \frac{P}{8\beta^3 D}, \quad \frac{u''(0)}{2\beta^2} = -\frac{P}{8\beta^3 D}$$

となり、これを (d) 式に代入して結局

$$u(x) = \frac{P}{8\beta^3 D} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) = \frac{P}{8\beta^3 D} \varphi(\beta x) \quad (d)$$

を得る。

(2) 板厚平均温度の不連続

変位の微分方程式は付録 (A 1.9) 式より

$$\frac{d^4 u}{dx^4} + 4\beta^4 u = \frac{Et\alpha}{Dr} T_M(x) \quad (e)$$

となる。

$$T_M(x) = \begin{cases} -\frac{\delta T_M}{2} & (x < 0) \\ +\frac{\delta T_M}{2} & (x > 0) \end{cases}$$

と左右反対称とする。(e) 式をラプラス変換すると

$$s^4 \tilde{u} - s^3 u(0) - s^2 u'(0) - s u''(0) - u'''(0) + 4\beta^4 \tilde{u} = \frac{Et\alpha \delta T_M}{2 Dr s} \quad (f)$$

となる。反対称性より $u(0) = u''(0) = 0$ となり (f) 式を \tilde{u} について解くと

$$\tilde{u}(s) = \frac{u'(0) s^2}{s^4 + 4\beta^4} + \frac{u'''(0)}{s^4 + 4\beta^4} + \frac{Et\alpha \delta T_M}{2 Dr} \cdot \frac{1}{s(s^4 + 4\beta^4)} \quad (g)$$

を得る。(g) 式をラプラス逆変換すると

$$\begin{aligned} u(x) &= \frac{u'(0)}{2\beta} (\sin \beta x \cdot \operatorname{ch} \beta x + \cos \beta x \cdot \operatorname{sh} \beta x) \\ &+ \frac{u'''(0)}{4\beta^3} (\sin \beta x \cdot \operatorname{ch} \beta x - \cos \beta x \cdot \operatorname{sh} \beta x) \\ &+ \frac{Et\alpha \delta T_M}{2 Dr \cdot 4\beta^3} \int_0^x (\sin \beta \xi \cdot \operatorname{ch} \beta \xi - \cos \beta \xi \cdot \operatorname{sh} \beta \xi) d\xi \\ &= \frac{u'(0)}{2\beta} (\sin \beta x \cdot \operatorname{ch} \beta x + \cos \beta x \cdot \operatorname{sh} \beta x) \\ &+ \frac{u'''(0)}{4\beta^3} (\sin \beta x \cdot \operatorname{ch} \beta x - \cos \beta x \cdot \operatorname{sh} \beta x) \\ &+ \frac{Et\alpha \delta T_M}{8\beta^4 Dr} (1 - \cos \beta x \cdot \operatorname{ch} \beta x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{r\alpha\delta T_M}{2} + \frac{e^{\beta x} + e^{-\beta x}}{2} \sin\beta x \left\{ \frac{u'(0)}{2\beta} + \frac{u''(0)}{4\beta^3} \right\} \\
 &\quad + \frac{e^{\beta x}}{2} \cos\beta x \left\{ \frac{u'(0)}{2\beta} - \frac{u''(0)}{4\beta^3} - \frac{r\alpha\delta T_M}{2} \right\} \\
 &\quad + \frac{e^{-\beta x}}{2} \cos\beta x \left\{ -\frac{u'(0)}{2\beta} + \frac{u''(0)}{4\beta^3} - \frac{r\alpha\delta T_M}{2} \right\} \tag{h}
 \end{aligned}$$

を得る。 $x \rightarrow \infty$ で $u \rightarrow \frac{r\alpha\delta T_M}{2}$ だから $e^{\beta x}$ の項は 0 でなければならない。これから

$$\frac{u'(0)}{2\beta} + \frac{u''(0)}{4\beta^3} = 0, \quad \frac{u'(0)}{2\beta} - \frac{u''(0)}{4\beta^3} = \frac{r\alpha\delta T_M}{2}$$

となり、これを (h) 式に代入して結局

$$u(x) = \frac{r\alpha\delta T_M}{2} - \frac{r\alpha\delta T_M}{2} e^{-\beta x} \cos\beta x = \frac{r\alpha\delta T_M}{2} \{ 1 - \theta(\beta x) \} \tag{i}$$

を得る。

(3) 内外面温度差の不連続

変位の微分方程式は付録 (A 1.9) 式より

$$\frac{d^4 u}{dx^4} + 4\beta^4 u = \frac{(1+\nu)\alpha}{t} \frac{d^2 T_B(x)}{dx^2} \tag{j}$$

となる。

$$T_B(x) = \begin{cases} -\frac{\delta T_B}{2} & (x < 0) \\ 0 & (x = 0) \\ +\frac{\delta T_B}{2} & (x > 0) \end{cases}$$

と左右反対称とする。(j) 式をラプラス変換すると

$$\begin{aligned}
 &s^4 \tilde{u} - s^3 u(0) - s^2 u'(0) - s u''(0) + 4\beta^4 \tilde{u} \\
 &= \frac{(1+\nu)\alpha}{t} \{ s^2 \tilde{T}_B - s T_B(0) - T_B'(+0) \} \\
 &= \frac{(1+\nu)\alpha}{t} \left\{ s^2 \cdot \frac{\delta T_B}{2s} \right\} = \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{2t} s \tag{k}
 \end{aligned}$$

となる。反対称性より $u(0) = u'(0) = 0$ となり (k) 式を \tilde{u} について解くと

$$\tilde{u}(s) = \frac{u'(0)s^2}{s^4 + 4\beta^4} + \frac{u''(0)}{s^4 + 4\beta^4} + \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{2t} \frac{s}{s^4 + 4\beta^4} \tag{l}$$

を得る。(l) 式をラプラス逆変換すると

$$u(x) = \frac{u'(0)}{2\beta} (\sin\beta x \cdot \operatorname{ch}\beta x + \cos\beta x \cdot \operatorname{sh}\beta x)$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{u'''(0)}{4\beta^3} (\sin\beta\chi \cdot \text{ch}\beta\chi - \cos\beta\chi \cdot \text{sh}\beta\chi) \\
 & + \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{2t \cdot 2\beta^2} \sin\beta\chi \cdot \text{sh}\beta\chi \\
 = & \frac{e^{\beta\chi}}{2} \sin\beta\chi \left\{ \frac{u'(0)}{2\beta} + \frac{u'''(0)}{4\beta^3} + \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t} \right\} \\
 & + \frac{e^{-\beta\chi}}{2} \sin\beta\chi \left\{ \frac{u'(0)}{2\beta} + \frac{u'''(0)}{4\beta^3} - \frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t} \right\} \\
 & + \frac{e^{\beta\chi}}{2} \cos\beta\chi \left\{ -\frac{u'(0)}{2\beta} - \frac{u'''(0)}{4\beta^3} \right\} + \frac{e^{-\beta\chi}}{2} \cos\beta\chi \left\{ -\frac{u'(0)}{2\beta} + \frac{u'''(0)}{4\beta^3} \right\} \quad (m)
 \end{aligned}$$

を得る。 $\chi \rightarrow \infty$ で $u \rightarrow 0$ より

$$\frac{u'(0)}{2\beta} = \frac{u'''(0)}{4\beta^3} = -\frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{8\beta^2 t}$$

となり、これを (m) 式に代入して結局

$$u(\chi) = -\frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t} e^{-\beta\chi} \sin\beta\chi = -\frac{(1+\nu)\alpha\delta T_B}{4\beta^2 t} \zeta(\beta\chi) \quad (n)$$

を得る。

(4) ランプ状温度分布

左右反対称のランプ状温度分布

$$T_M(\chi) = \begin{cases} -\delta T_M/2 & (\chi < -\frac{\ell}{2}) \\ \delta T_M \cdot \chi/\ell & (-\frac{\ell}{2} < \chi < \frac{\ell}{2}) \\ \delta T_M/2 & (\chi > \frac{\ell}{2}) \end{cases}$$

とする。変位の微分方程式 (e) をラプラス変換すると

$$\begin{aligned}
 s^4 \tilde{u} - s^3 u(0) - s^2 u'(0) - s u''(0) - u'''(0) + 4\beta^4 \tilde{u} \\
 = \frac{Et\alpha}{Dr} \tilde{T}_M = \frac{Et\alpha}{Dr} \int_0^\infty e^{-s\chi} T_M(\chi) d\chi \\
 = \frac{Et\alpha\delta T_M}{Dr\ell s^2} \left(1 - e^{-\frac{\ell s}{2}} \right) \quad (o)
 \end{aligned}$$

となる。反対称性より $u(0) = u'(0) = 0$ となり (o) 式を \tilde{u} について解くと

$$\tilde{u}(s) = \frac{u'(0)s^2}{s^4 + 4\beta^4} + \frac{u'''(0)}{s^4 + 4\beta^4} + \frac{Et\alpha\delta T_M}{Dr\ell} \frac{1 - e^{-\frac{\ell s}{2}}}{s^2(s^4 + 4\beta^4)} \quad (p)$$

を得る。(P)式をラプラス逆変換すると次のようになる。

・ $0 < x < l/2$ で

$$\begin{aligned}
 u(x) &= \frac{u'(0)}{2\beta} (\sin\beta x \cdot \operatorname{ch}\beta x + \cos\beta x \cdot \operatorname{sh}\beta x) \\
 &\quad + \frac{u''(0)}{4\beta^3} (\sin\beta x \cdot \operatorname{ch}\beta x - \cos\beta x \cdot \operatorname{sh}\beta x) \\
 &\quad + \frac{Et\alpha\delta T_M}{4\beta^3 \operatorname{Dr} l} \int_0^x (x-\xi) (\sin\beta\xi \operatorname{ch}\beta\xi - \cos\beta\xi \operatorname{sh}\beta\xi) d\xi \\
 &= \frac{u'(0)}{2\beta} (\sin\beta x \operatorname{ch}\beta x + \cos\beta x \cdot \operatorname{sh}\beta x) \\
 &\quad + \frac{u''(0)}{4\beta^3} (\sin\beta x \cdot \operatorname{ch}\beta x - \cos\beta x \cdot \operatorname{sh}\beta x) \\
 &\quad + \frac{Et\alpha\delta T_M}{4\beta^3 \operatorname{Dr} l} \left\{ \frac{x}{\beta} - \frac{1}{2\beta^2} (\sin\beta x \cdot \operatorname{ch}\beta x + \cos\beta x \cdot \operatorname{sh}\beta x) \right\} \quad (q)
 \end{aligned}$$

・ $x > l/2$ で

$$\begin{aligned}
 u(x) &= \frac{u'(0)}{2\beta} (\sin\beta x \cdot \operatorname{ch}\beta x + \cos\beta x \cdot \operatorname{sh}\beta x) \\
 &\quad + \frac{u''(0)}{4\beta^3} (\sin\beta x \cdot \operatorname{ch}\beta x - \cos\beta x \cdot \operatorname{sh}\beta x) \\
 &\quad + \frac{Et\alpha\delta T_M}{4\beta^3 \operatorname{Dr} l} \left\{ \frac{x}{\beta} - \frac{1}{2\beta^2} (\sin\beta x \cdot \operatorname{ch}\beta x + \cos\beta x \cdot \operatorname{sh}\beta x) \right\} \\
 &\quad - \frac{Et\alpha\delta T_M}{4\beta^3 \operatorname{Dr} l} \left[\frac{x-l/2}{\beta} - \frac{1}{2\beta^2} \{ \sin\beta(x-l/2) \operatorname{ch}\beta(x-l/2) \right. \\
 &\quad \quad \quad \left. + \cos\beta(x-l/2) \operatorname{sh}\beta(x-l/2) \} \right] \\
 &= \frac{r\alpha\delta T_M}{2} + \left\{ \frac{u'(0)}{2\beta} + \frac{u''(0)}{4\beta^3} - \frac{r\alpha\delta T_M}{2\beta l} \right\} \cdot \sin\beta x \cdot \operatorname{ch}\beta x \\
 &\quad + \left\{ \frac{u'(0)}{2\beta} - \frac{u''(0)}{4\beta^3} - \frac{r\alpha\delta T_M}{2\beta l} \right\} \cos\beta x \cdot \operatorname{sh}\beta x \\
 &\quad + \frac{r\alpha\delta T_M}{2\beta l} \{ \sin\beta(x-l/2) \operatorname{ch}\beta(x-l/2) \\
 &\quad \quad \quad + \cos\beta(x-l/2) \operatorname{sh}\beta(x-l/2) \} \quad (r)
 \end{aligned}$$

$x \rightarrow \infty$ で $u \rightarrow \frac{r\alpha\delta T_M}{2}$ より $u'(0)$, $u''(0)$ を求めれば解が定まる。

2. そ の 他

1章の軸対称不連続熱応力以外で、近年FBR機器の熱応力として注目されている「円周方向温度分布による円筒の熱応力」と「サーマルストライピングによる高サイクル熱応力」をとりあげる。

円周方向温度分布の例としては 1) 水平円筒内部の流体にサーマルストラティフィケーション（温度成層化）が生じた場合、2) 炉容器等の大型垂直円筒外部のガス層において自然対流熱伝達が生じた場合、などが着目されている。

サーマルストライピングの例としては炉心出口近傍における高温ナトリウムと低温ナトリウムの高流速混合による温度ゆらぎ（サーマルストライピング）などが着目されている。

2.1 円周方向温度分布による円筒の熱応力

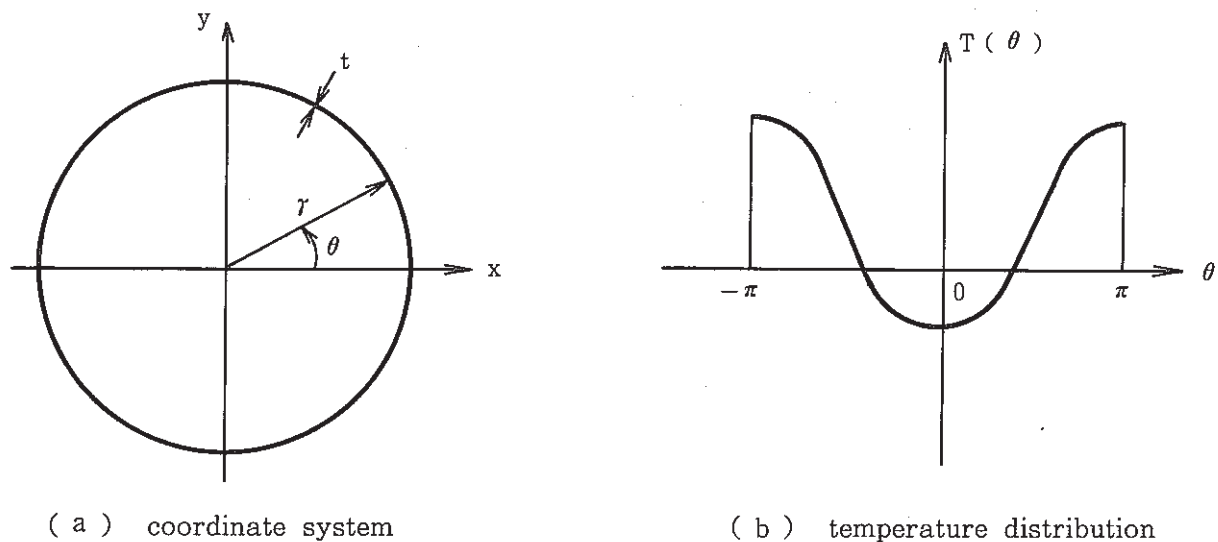


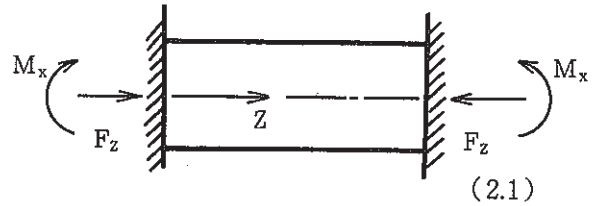
Fig. 2.1.1 Circumferential temperature distribution in cylinder

(1) 軸方向膜応力

Fig. 2.1 (a)のように座標系を定める。円筒の軸方向にZ軸をとる。円筒断面の基準温度からの温度変化 T が θ のみの関数で $T=T(\theta)$ と与えられるものとする。円周方向応力、板厚方向応力は無視して軸方向応力のみ求めることにする。曲げ応力成分は無視し、膜応力成分(板厚平均応力)についてのみ論ずる。

◦ 両端完全固定

右図に示すように両端が完全固定される時は軸方向熱膨張が完全に拘束されるから
 $\sigma_z = -E\alpha T(\theta)$



が生じ、軸力 F_z , x 軸まわりのモーメント M_x , y 軸まわりのモーメント M_y が生ずる。

$$F_z = \int \sigma_z \cdot dA = -E\alpha r t \int_{-\pi}^{\pi} T(\theta) \cdot d\theta \quad (2.2)$$

$$M_x = \int \sigma_z \cdot y \cdot dA = -E\alpha r^2 t \int_{-\pi}^{\pi} T(\theta) \cdot \sin\theta \cdot d\theta \quad (2.3)$$

$$M_y = \int \sigma_z \cdot x \cdot dA = -E\alpha r^2 t \int_{-\pi}^{\pi} T(\theta) \cdot \cos\theta \cdot d\theta \quad (2.4)$$

◦ 回転のみ拘束, 伸縮自由

右図に示すように回転のみ拘束され、伸縮自由な場合は軸力が0となる。 $-F_z$ を加えて合計軸力を0とすれば良いから、 $-F_z$ による一定応力 $-F_z/A$ を(2.1)式に加えればよい。ここで $A = 2\pi r t$ は円筒の断面積である。

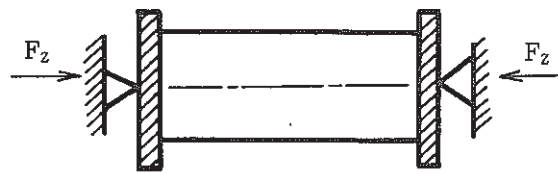


$$\sigma_z = -E\alpha T(\theta) - \frac{F_z}{A} = E\alpha \left\{ -T(\theta) + \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} T(\theta) \cdot d\theta \right\} \quad (2.5)$$

となる。

◦ 伸縮のみ拘束, 回転自由

右図に示すように伸縮のみ拘束され、回転自由な場合はモーメントが0となる。 $-M_x$, $-M_y$ を加えてモーメントを0にすれば良い。



$$\left\{ \begin{array}{l} -M_x \text{ による応力} \sim -\frac{y M_x}{I} = \frac{-r \sin\theta M_x}{I} \\ -M_y \text{ による応力} \sim -\frac{x M_y}{I} = \frac{-r \cos\theta M_y}{I} \end{array} \right\} \quad (a)$$

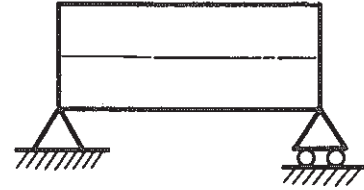
を(2.1)式に加えれば良い。ここで $I = \pi r^3 t$ は円筒の断面二次モーメントである。(a)を(2.1)式に加えます

$$\sigma_z = E\alpha \left\{ -T(\theta) + \frac{\sin\theta}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} T(\theta) \cdot \sin\theta \cdot d\theta + \frac{\cos\theta}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} T(\theta) \cdot \cos\theta \cdot d\theta \right\} \quad (2.6)$$

となる。

◦他端自由

右図に示すように他端が自由な場合は軸力、モーメントとも0となる。



$-F_z/A$ および (a) 式を (2.1) 式に加えて

$$\sigma_z = E\alpha \left\{ -T(\theta) + \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} T(\theta) \cdot d\theta + \frac{\sin\theta}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} T(\theta) \cdot \sin\theta \cdot d\theta + \frac{\cos\theta}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} T(\theta) \cdot \cos\theta \cdot d\theta \right\} \quad (2.7)$$

となる。

(2) ステップ状温度分布

$y_1 = r \sin \theta_1$ より下部が T_1 , y_1 より上部が T_2 とステップ状の温度分布が生じたものとする。

このような現象は上部にガス層が生じた場合とか、温度差（密度差）のある流体が混入して、浮力効果により上部に高温流体が下部に低温流体が

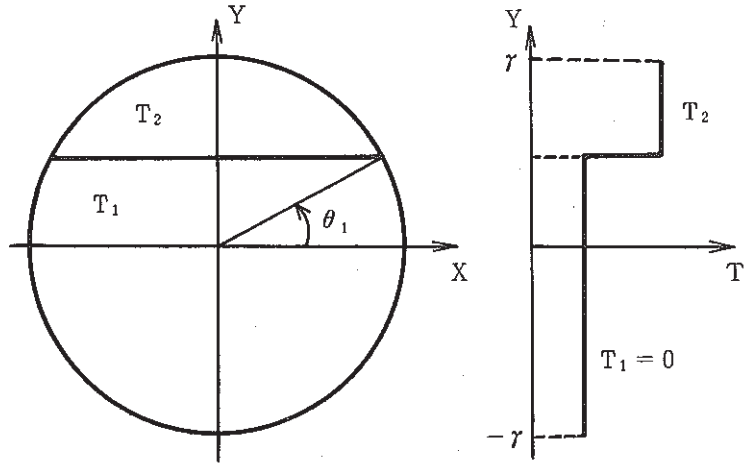


Fig. 2.1.2 Step distribution of temperature

分離するサーマルストラティフィケーション現象などにより起こり得る。直射日光により上部のみ高温となる場合なども考えられる。

温度分布は y 軸に関し対称だから $M_y = 0$ となり (2.7) 式の右辺第4項は0となる。また積分範囲を半分 $[-\pi/2, \pi/2]$ にとり $\int_{-\pi}^{\pi} = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2}$ とすれば良い。

$\Delta T = T_2 - T_1$, $T_1 = 0$ とすると

$$T(\theta) = \begin{cases} 0 & (-\pi/2 \leq \theta \leq \theta_1) \\ \Delta T & (\theta_1 \leq \theta \leq \pi/2) \end{cases} \quad (b)$$

となる。

$$\left\{ \begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} T d\theta &= 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} T d\theta = \Delta T (\pi - 2\theta_1) \\ \int_{-\pi}^{\pi} T \sin\theta \cdot d\theta &= 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} T \sin\theta \cdot d\theta = 2 \Delta T \cos\theta_1 \end{aligned} \right\} \quad (c)$$

を (2.7) 式に代入すると他端自由の応力は

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_z = E \alpha \Delta T \left\{ 0 + \frac{\pi - 2\theta_1}{2\pi} + \frac{2 \cos \theta_1}{\pi} \sin \theta \right\} \quad (-\pi/2 \leq \theta \leq \theta_1) \\ \sigma_z = E \alpha \Delta T \left\{ -1 + \frac{\pi - 2\theta_1}{2\pi} + \frac{2 \cos \theta_1}{\pi} \sin \theta \right\} \quad (\theta_1 \leq \theta \leq \pi/2) \end{array} \right] \quad (2.8)$$

となる。伸縮が拘束される時は { } 内の第2項 $\frac{\pi - 2\theta_1}{2\pi}$ を省けば良い。回転が拘束される時は { } 内第3項 $\frac{2 \cos \theta_1}{\pi} \sin \theta$ を省けば良い。

$\theta_1 = 0$ の場合の応力分布を Fig. 2.1.3 に示す。 $\theta_1 = \pi/4$ の場合の応力分布を Fig. 2.1.4 に示す。

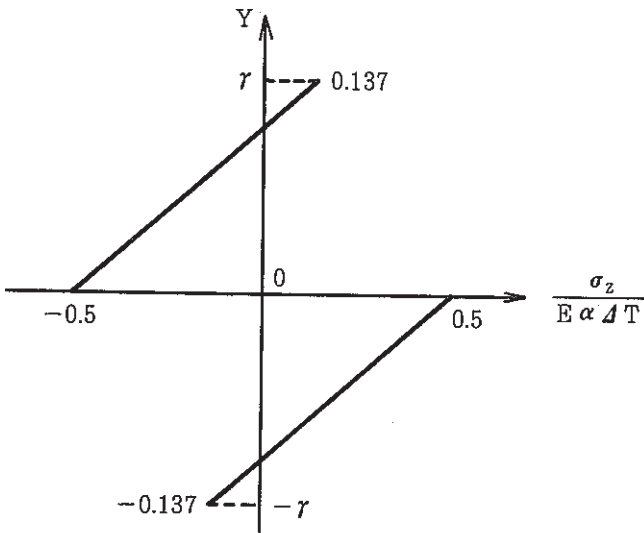


Fig. 2.1.3 Stress distribution for $\theta_1 = 0$

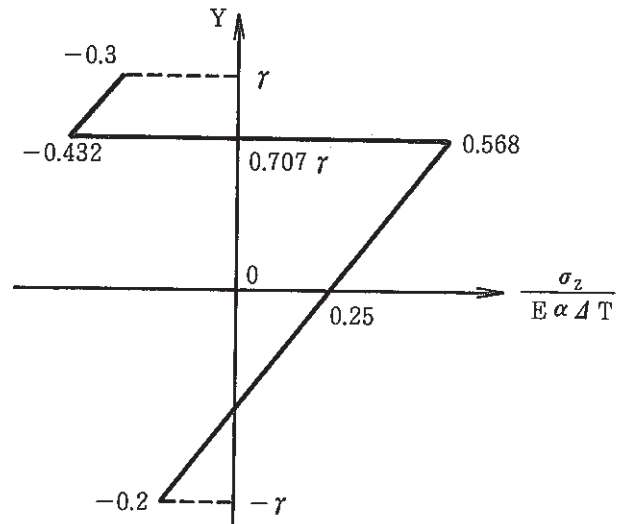


Fig. 2.1.4 Stress distribution for $\theta_1 = \pi/4$

(3) ランプ状温度分布

Fig. 2.1.5 に示すようにランプ状温度分布が生じた場合とする。

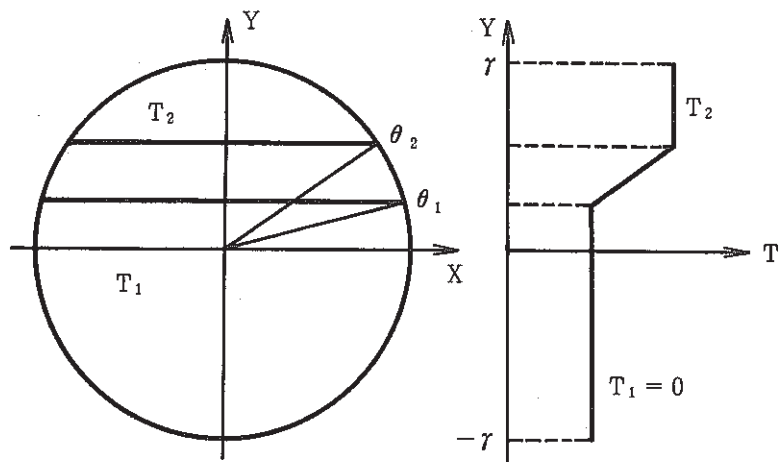


Fig. 2.1.5 Ramp distribution of temperature

温度分布は次式で表わされる。

$$T(\theta) = \begin{cases} 0 & (-\pi/2 \leq \theta \leq \theta_1) \\ \Delta T (\sin \theta - \sin \theta_1) / (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) & (\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2) \\ \Delta T & (\theta_2 \leq \theta \leq \pi/2) \end{cases} \quad (d)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} T d\theta &= 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} T d\theta = 2 \Delta T \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\cos \theta_1 - \cos \theta_2 + \theta_1 \sin \theta_1 - \theta_2 \sin \theta_2}{\sin \theta_2 - \sin \theta_1} \right) \\ \int_{-\pi}^{\pi} T \sin \theta \cdot d\theta &= 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} T \sin \theta \cdot d\theta = \Delta T \frac{\cos \theta_2 \sin \theta_2 - \sin \theta_1 \cos \theta_1 + \theta_2 - \theta_1}{\sin \theta_2 - \sin \theta_1} \end{aligned} \right\} (e)$$

を(2.7)式に代入すると他端自由の応力は

$$\frac{\sigma_z}{E \alpha \Delta T} = -\frac{T(\theta)}{\Delta T} + \left\{ \frac{1}{2} + \frac{\cos \theta_1 - \cos \theta_2 + \theta_1 \sin \theta_1 - \theta_2 \sin \theta_2}{\pi (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)} \right\} + \sin \theta \frac{\cos \theta_2 \sin \theta_2 - \sin \theta_1 \cos \theta_1 + \theta_2 - \theta_1}{\pi (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)} \quad (2.9)$$

となる。伸縮が拘束される場合は右辺第2項{ }を省けば良い。回転が拘束される場合は右辺第3項(sin θ の項)を省けば良い。

θ₁ = 0, θ₂ = π/6 の場合は

$$\frac{\sigma_z}{E \alpha \Delta T} = \begin{cases} 0 & + 0.419 + 0.609 \sin \theta \quad (-\pi/2 \leq \theta \leq 0) \\ -2 \sin \theta + 0.419 + 0.609 \sin \theta & (0 \leq \theta \leq \pi/6) \\ -1 & + 0.419 + 0.609 \sin \theta \quad (\pi/6 \leq \theta \leq \pi/2) \end{cases} \quad (f)$$

となる。これを Fig. 2.1.6 に示す。

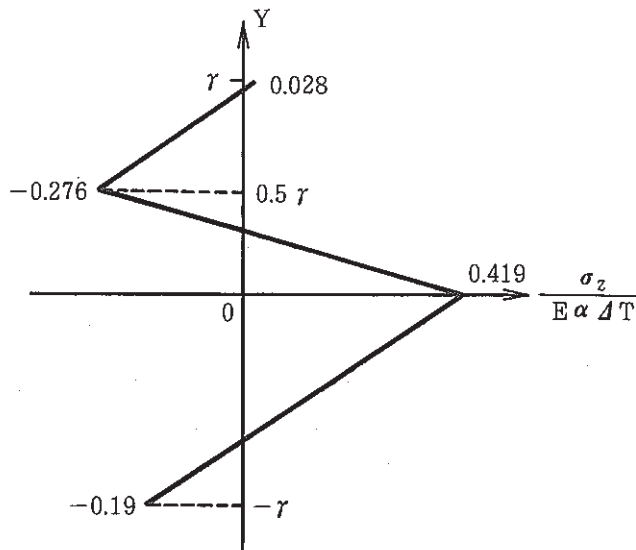


Fig. 2.1.6 Stress distribution for θ₁ = 0, θ₂ = π/6

$\theta_1 = \pi/6, \theta_2 = \pi/2$ の場合は

$$\frac{\sigma_z}{E\alpha\Delta T} = -\frac{T}{\Delta T} + 0.218 + 0.391 \sin\theta \quad (\text{g})$$

$\theta_1 = \pi/3, \theta_2 = \pi/2$ の場合は

$$\frac{\sigma_z}{E\alpha\Delta T} = -\frac{T}{\Delta T} + 0.111 + 0.215 \sin\theta \quad (\text{h})$$

となる。これらを Fig. 2.1.7 に示す。

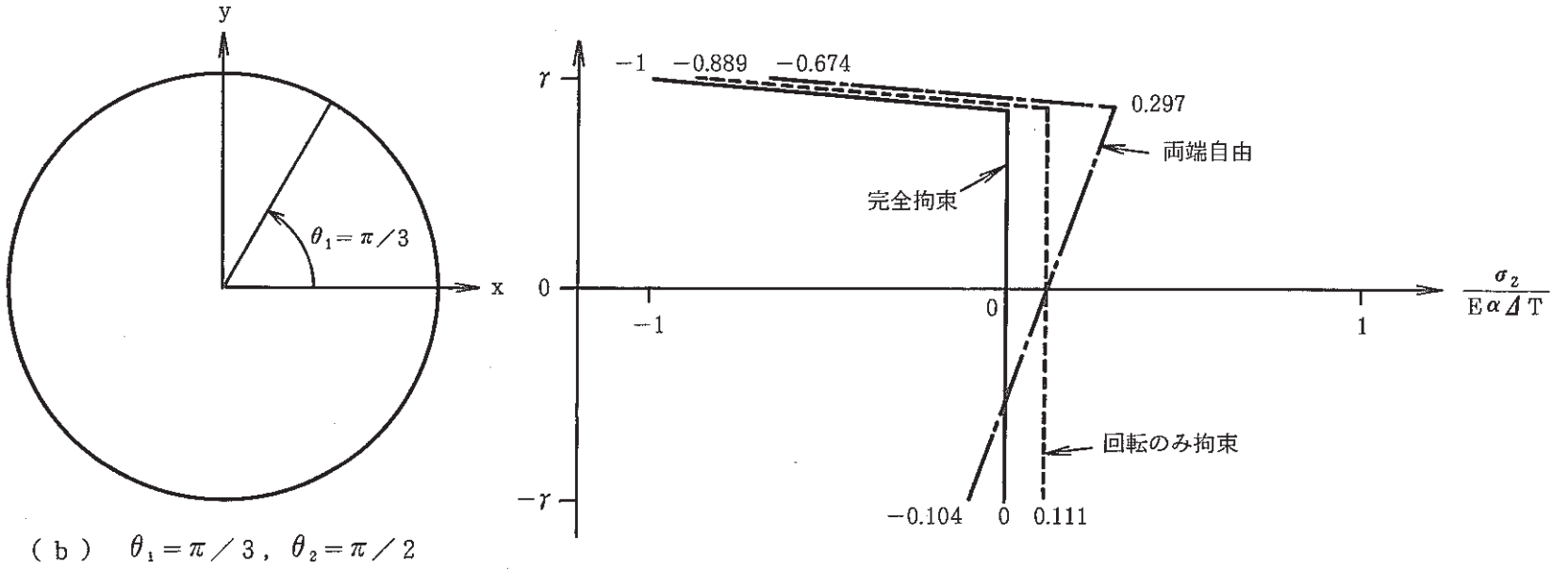
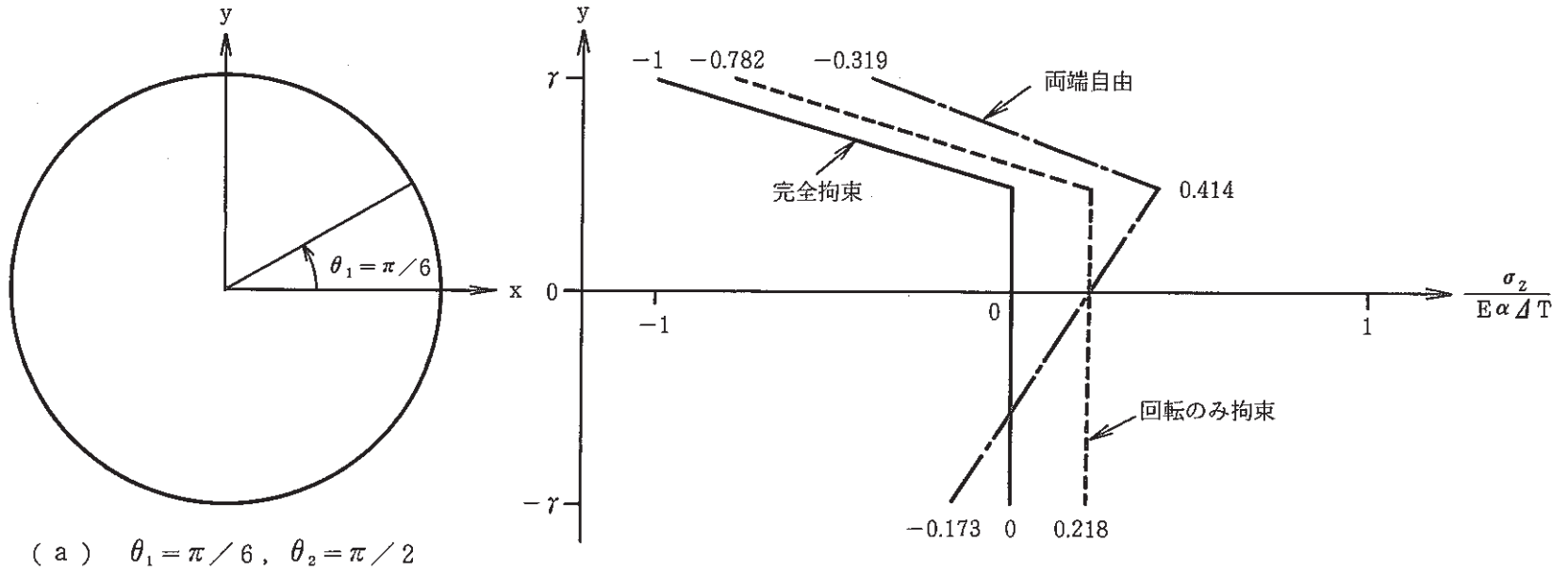


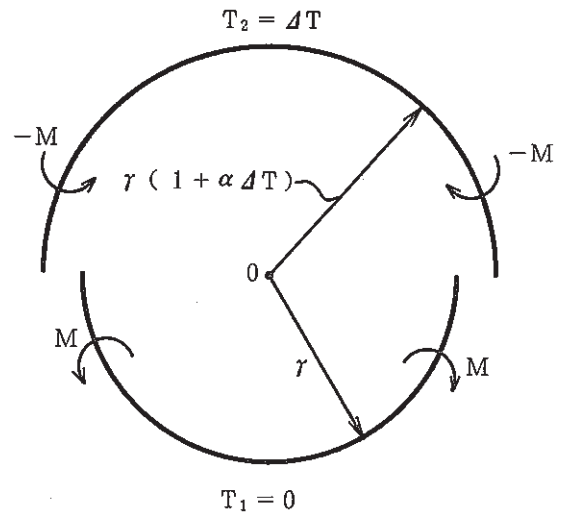
Fig. 2.1.7 Stress distribution for $\theta_1 = \pi/6, \pi/3$ ($\theta_2 = \pi/2$)

(4) 円周方向曲げ応力の概略値

$\theta_1 = 0$ のステップ状温度分布 (下半分が $T_1 = 0$, 上半分が $T_2 = \Delta T$) を考える。軸方向膜応力は Fig. 2.1.3 に示すように最大値が $0.5 E\alpha \Delta T$ となる。

右図に示すように円筒断面を上下に2分した場合, 自由熱膨張により上半分の半径は $r(1 + \alpha \Delta T)$ となり下半分とギャップが生ずる。

下半分に円筒の単位長さあたり M の円周方向モーメントが生じて半径 r^* に変形したものとすると



$$\frac{1}{r} - \frac{1}{r^*} \doteq \frac{M}{EI} \tag{g}$$

となる (Ref 4)。同様に上半分に $-M$ が生じて半径 r^* に変形し, 下半分とのギャップが解消されるものとすると

$$\frac{1}{r(1 + \alpha \Delta T)} - \frac{1}{r^*} \doteq \frac{-M}{EI} \tag{h}$$

となる。ここに $I = \frac{bt^3}{12} = \frac{t^3}{12}$ は円筒の単位長さあたりの断面二次モーメントである。

(g), (h) 式を解くと

$$\left[\begin{array}{l} r^* \doteq r(1 + 0.5 \alpha \Delta T) \\ M \doteq \frac{EI \alpha \Delta T}{2r} = \frac{Et^3 \alpha \Delta T}{24r} \end{array} \right] \tag{i}$$

を得る。これより, 円周方向曲げ応力

$$\sigma_{\theta, B} = \frac{6M}{t^2} = \frac{t}{4r} E \alpha \Delta T \tag{j}$$

を得る。 $t \ll r$ であるから, これは軸方向膜応力 ($0.5 E \alpha \Delta T$) に比べて無視して良い。実際にはギャップ部にせん断力が生じて, モーメント分布は本計算例のように均一とはならないのであるが, 円周方向曲げモーメントの概略値はこの程度である。

2.2 サーマルストライピングによる高サイクル熱応力

炉心出口近傍などでは温度差のある流体が混合する事により流体温度が高サイクルで不規則に変動する現象が生ずる。この現象は「サーマルストライピング」あるいは「温度ゆらぎ」と呼ばれる。流体温度が高サイクルで変動すれば、流体に接する構造物の表面近傍の温度も高サイクルで変動し、高サイクル熱応力が生ずる。流体温度変動を正弦波で近似し、表面の応力範囲を求め

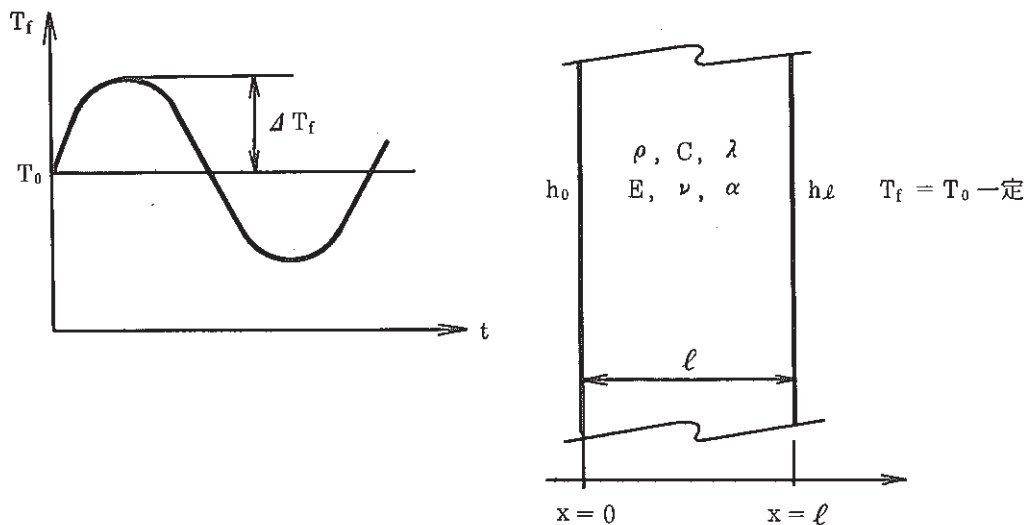


Fig. 2.2.1 Analysis model for thermal striping

Fig. 2.2.1 に示した厚さ ℓ の板 (物性値 $(\rho, C, \lambda, E, \nu, \alpha)$ の $x = 0$ 面の流体温度 T_f が温度振巾 ΔT_f 、周波数 f で

$$T_f = T_0 + \Delta T_f \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) \tag{a}$$

のように周期変動し、 $x = \ell$ 面の流体温度が $T_f = T_0$ と一定に保たれた場合、両面の熱伝達率を h_0, h_ℓ とすると、時間が十分経過した後の板厚内温度 T は次式で与えられる。(「伝熱工学資料」改訂第3版, 1975, 日本機械学会)

$$T = T_0 + \frac{\Delta T_f \cdot B_{i0}}{u^2 + v^2} \{ (u\eta - v\xi) \cos(2\pi ft + \varphi) + (u\xi + v\eta) \sin(2\pi ft + \varphi) \} \tag{2.10}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u = -2K^2 \cosh K \cdot \sin K + B_{i0} \cdot B_{i\ell} \cdot \sinh K \cdot \cos K \\ \quad + K(B_{i0} + B_{i\ell}) (\cosh K \cdot \cos K - \sinh K \cdot \sin K) \\ v = 2K^2 \sinh K \cdot \cos K + B_{i0} \cdot B_{i\ell} \cdot \cosh K \cdot \sin K \\ \quad + K(B_{i0} + B_{i\ell}) (\sinh K \cdot \sin K + \cosh K \cdot \cos K) \\ \xi = K \cdot \cosh KY \cdot \cos KY - K \cdot \sinh KY \cdot \sin KY + B_{i\ell} \cdot \sinh KY \cdot \cos KY \\ \eta = K \cdot \cosh KY \cdot \cos KY + K \cdot \sinh KY \cdot \sin KY + B_{i\ell} \cdot \cosh KY \cdot \sin KY \end{array} \right. \tag{b}$$

$$\left[K = \ell \sqrt{\frac{\pi f}{a}}, \quad B_{io} = \frac{h_0 \cdot \ell}{\lambda}, \quad B_{i,\ell} = \frac{h_\ell \cdot \ell}{\lambda}, \quad Y = 1 - \frac{x}{\ell} \right]$$

(2.10)式を変形すれば

$$\begin{aligned} T &= T_0 + \frac{\Delta T_f \cdot B_{io}}{u^2 + v^2} \sqrt{(u^2 + v^2)(\xi^2 + \eta^2)} \cdot \sin(2\pi ft + \varphi + \delta) \\ &= T_0 + \Delta T \cdot \sin(2\pi ft + \varphi + \delta) \end{aligned} \tag{2.11}$$

となる。ここで

$$\Delta T = \Delta T_f \cdot B_{io} \sqrt{\frac{\xi^2 + \eta^2}{u^2 + v^2}}, \quad \delta = \tan^{-1} \left(\frac{u\eta - v\xi}{u\xi + v\eta} \right) \tag{c}$$

は板内任意位置の温度振巾と位相遅れである。

板が曲げ拘束を受ける時の熱応力 σ は、板厚平均温度を T_m として

$$\sigma = \frac{-E\alpha(T - T_m)}{1 - \nu}, \quad T_m = \frac{1}{\ell} \int_0^\ell T \cdot dx \tag{d}$$

から計算できる。室内が一定温度に空調され、外面で一日周期に温度変動がある、陽にあたるコンクリート壁の熱応力などは (d) 式により計算される。

FBR のサーマルストライピング現象は、温度差のある流体の混合に原因し、とくに位相 φ が不規則であること、また周波数が 0.2 ~ 10 cycle/S と大きく板厚内での温度振巾の減衰が大きいことから、板厚平均温度が T_0 一定であり、 $\chi = 0$ の表面近傍のみ温度変動があると見なして良いであろう。生ずる熱応力は、曲げ応力成分は無視でき、すべて熱ピーク応力と見なして良いであろう。

$\chi = \ell$ 面が断熱されている場合 ($h_\ell = 0$) の温度振巾は、 $B_{i,\ell} = 0$ を (b) 式に代入して (C) 式を計算すると

$$\Delta T = \frac{\Delta T_f \cdot B_{io} \sqrt{\cosh 2KY + \cos 2KY}}{\sqrt{2K^2(\cosh 2K - \cos 2K) + B_{io}^2(\cosh 2K + \cos 2K) + 2K \cdot B_{io} \cdot \sinh 2K}} \tag{2.12}$$

となる。 $K > 4.0$ として $\cosh K \doteq \frac{e^K}{2}$, $\cosh 2K = \sinh 2K \doteq \frac{e^{2K}}{2} \gg 1$ と近似すると

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_s &\equiv \Delta T(x=0) = \Delta T(Y=1) \doteq \frac{\Delta T_f \cdot B_{io}}{\sqrt{K^2 + (K + B_{io})^2}} \\ \Delta T(x=\ell/2) &= \Delta T\left(Y=\frac{1}{2}\right) \doteq \frac{\Delta T_f \cdot B_{io} \cdot e^{-K/2}}{\sqrt{K^2 + (K + B_{io})^2}} < 0.024 \cdot \Delta T_s \\ \Delta T(x=\ell) &= \Delta T(Y=0) \doteq \frac{2 \cdot \Delta T_f \cdot B_{io} \cdot e^{-K}}{\sqrt{K^2 + (K + B_{io})^2}} < 0.0065 \cdot \Delta T_s \end{aligned} \right\} \tag{e}$$

となり、板厚中央位置、断熱面位置の温度変動は、熱伝達面表面の温度振巾 ΔT_s に比べ無視できる程度に減衰することがわかる。 $K = 4.0 \sim 300.0$, $Bio = 0.2 \sim 100.0$ をパラメータとして(2.12)式により求めた無次元表面温度振巾

$$S = \Delta T_s / \Delta T_f \quad (2.13)$$

をTable.2.2.1に示す。このパラメータ範囲では近似式(e)は0.1%以内の精度があり、手計算する場合は(e)式を用いる方が便利である。表面の熱ピーク応力範囲は

$$|\sigma_P| = \frac{2E\alpha\Delta T_s}{1-\nu} = \frac{2E\alpha\Delta T_f}{1-\nu} \cdot S \quad (2.14)$$

となる。平均温度450°CのSUS304板($\rho = 7.83 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, $C = 0.133 \text{ kcal/kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 4.86 \times 10^{-6} \text{ kcal/mm} \cdot \text{S} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$, $a = \lambda / \rho C = 4.67 \text{ mm}^2/\text{S}$)に対して、Table 2.2.1は

板厚 $\ell = 10 \text{ mm}$ の場合

$$\begin{aligned} h_0 &= 9.72 \times 10^{-8} \sim 4.86 \times 10^{-5} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{S} \cdot \text{ }^\circ\text{C} \\ &= 350 \sim 175000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{ }^\circ\text{C} \\ f &= 0.238 \sim 1340 \text{ cycle/S} \end{aligned}$$

板厚 $\ell = 100 \text{ mm}$ の場合

$$\begin{aligned} h_0 &= 9.72 \times 10^{-9} \sim 4.86 \times 10^{-6} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{S} \cdot \text{ }^\circ\text{C} \\ &= 35 \sim 17500 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{ }^\circ\text{C} \\ f &= 0.00238 \sim 13.4 \text{ cycle/S} \end{aligned}$$

の範囲をカバーする。

(例題)

平均温度450°C, $\ell = 30 \text{ mm}$ のSUS304板の表面近傍の流体で $\Delta T_f = 25^\circ\text{C}$, $f = 2 \text{ cycle/S}$ のサーマルストライピングが生じている。他面は断熱されている。 $h_0 = 3000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{ }^\circ\text{C} = 0.833 \times 10^{-6} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{S} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ として、熱ピーク応力範囲を求めよ。 $E = 1.67 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, $\nu = 0.298$, $\alpha = 1.993 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ とする。

$$K = \ell \sqrt{\frac{\pi f}{a}} = 30 \sqrt{\frac{\pi \times 2}{4.67}} = 34.8$$

$$B_{io} = \frac{h_0 \cdot \ell}{\lambda} = \frac{0.833 \times 10^{-6} \times 30}{4.86 \times 10^{-6}} = 5.14$$

Table 2.2.1を補間して、 $S = \Delta T_s / \Delta T_f = 0.098$

$$\begin{aligned} |\sigma_P| &= \frac{2 \cdot E \alpha \Delta T_f}{1 - \nu} \cdot S = \frac{2 \times 1.67 \times 10^4 \times 1.993 \times 10^{-5} \times 25}{1 - 0.298} \times 0.098 \\ &= 2.32 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

Table. 2.2.1 Dimensionless surface temperature amplitude
for thermal striping

$$(S = \Delta T_s / \Delta T_f)$$

Bio ↓	K →									
	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.0	15.0	20.0	25.0	30.0
0.2	0.0345	0.0277	0.0232	0.0175	0.0140	0.0117	0.0094	0.0070	0.0056	0.0047
0.3	0.0511	0.0412	0.0345	0.0260	0.0209	0.0175	0.0140	0.0105	0.0084	0.0070
0.4	0.0673	0.0543	0.0456	0.0345	0.0277	0.0232	0.0186	0.0140	0.0112	0.0094
0.5	0.0830	0.0673	0.0565	0.0428	0.0345	0.0289	0.0232	0.0175	0.0140	0.0117
0.6	0.0984	0.0799	0.0673	0.0511	0.0412	0.0345	0.0277	0.0209	0.0168	0.0140
0.8	0.1280	0.1045	0.0882	0.0673	0.0544	0.0456	0.0367	0.0277	0.0223	0.0186
1.0	0.1562	0.1280	0.1085	0.0830	0.0673	0.0565	0.0456	0.0345	0.0277	0.0232
1.2	0.1829	0.1507	0.1280	0.0984	0.0799	0.0673	0.0544	0.0412	0.0331	0.0277
1.5	0.2205	0.1829	0.1562	0.1208	0.0984	0.0830	0.0673	0.0511	0.0412	0.0345
2.0	0.2773	0.2325	0.2000	0.1562	0.1280	0.1085	0.0882	0.0673	0.0544	0.0456
3.0	0.3721	0.3180	0.2774	0.2206	0.1829	0.1562	0.1280	0.0984	0.0799	0.0673
4.0	0.4472	0.3885	0.3430	0.2774	0.2325	0.2000	0.1652	0.1280	0.1045	0.0882
5.0	0.5076	0.4472	0.3990	0.3276	0.2774	0.2403	0.2000	0.1562	0.1280	0.1085
6.0	0.5571	0.4965	0.4472	0.3721	0.3180	0.2774	0.2325	0.1829	0.1507	0.1280
8.0	0.6324	0.5743	0.5252	0.4472	0.3885	0.3430	0.2913	0.2325	0.1932	0.1652
10.0	0.6868	0.6324	0.5852	0.5077	0.4472	0.3990	0.3430	0.2774	0.2325	0.2000
12.0	0.7276	0.6772	0.6325	0.5571	0.4966	0.4472	0.3885	0.3180	0.2687	0.2325
15.0	0.7725	0.7276	0.6868	0.6160	0.5571	0.5077	0.4472	0.3721	0.3180	0.2774
20.0	0.8220	0.7845	0.7495	0.6868	0.6325	0.5852	0.5252	0.4472	0.3885	0.3430
30.0	0.8763	0.8485	0.8220	0.7725	0.7276	0.6868	0.6325	0.5571	0.4966	0.4472
40.0	0.9053	0.8834	0.8623	0.8220	0.7845	0.7495	0.7016	0.6325	0.5744	0.5252
50.0	0.9234	0.9054	0.8878	0.8540	0.8220	0.7918	0.7495	0.6868	0.6325	0.5852
60.0	0.9357	0.9204	0.9054	0.8763	0.8485	0.8220	0.7845	0.7276	0.6772	0.6325
80.0	0.9513	0.9395	0.9280	0.9054	0.8835	0.8623	0.8318	0.7845	0.7412	0.7016
100.0	0.9608	0.9513	0.9419	0.9234	0.9054	0.8878	0.8623	0.8220	0.7845	0.7495

$$Bio = \frac{h \cdot \ell}{\lambda}, \quad K = \ell \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot f}{a}}$$

Bio ↓	K →									
	40.0	50.0	60.0	80.0	100.0	120.0	150.0	200.0	250.0	300.0
0.2	0.0035	0.0028	0.0024	0.0018	0.0014	0.0012	0.0009	0.0007	0.0006	0.0005
0.3	0.0053	0.0042	0.0035	0.0026	0.0021	0.0018	0.0014	0.0011	0.0008	0.0007
0.4	0.0070	0.0056	0.0047	0.0035	0.0028	0.0024	0.0019	0.0014	0.0011	0.0009
0.5	0.0088	0.0070	0.0059	0.0044	0.0035	0.0029	0.0024	0.0018	0.0014	0.0012
0.6	0.0105	0.0084	0.0070	0.0053	0.0042	0.0035	0.0028	0.0021	0.0017	0.0014
0.8	0.0140	0.0112	0.0094	0.0070	0.0056	0.0047	0.0038	0.0028	0.0023	0.0019
1.0	0.0175	0.0140	0.0117	0.0088	0.0070	0.0059	0.0047	0.0035	0.0028	0.0024
1.2	0.0209	0.0168	0.0140	0.0105	0.0084	0.0070	0.0056	0.0042	0.0034	0.0028
1.5	0.0260	0.0209	0.0175	0.0131	0.0105	0.0088	0.0070	0.0053	0.0042	0.0035
2.0	0.0345	0.0277	0.0232	0.0175	0.0140	0.0117	0.0094	0.0070	0.0056	0.0047
3.0	0.0511	0.0412	0.0345	0.0260	0.0209	0.0175	0.0140	0.0105	0.0084	0.0070
4.0	0.0673	0.0544	0.0456	0.0345	0.0277	0.0232	0.0186	0.0140	0.0112	0.0094
5.0	0.0830	0.0673	0.0565	0.0428	0.0345	0.0289	0.0232	0.0175	0.0140	0.0117
6.0	0.0984	0.0799	0.0673	0.0511	0.0412	0.0345	0.0277	0.0209	0.0168	0.0140
8.0	0.1280	0.1045	0.0882	0.0673	0.0544	0.0456	0.0367	0.0277	0.0223	0.0186
10.0	0.1562	0.1280	0.1085	0.0830	0.0673	0.0565	0.0456	0.0345	0.0277	0.0232
12.0	0.1829	0.1507	0.1280	0.0984	0.0799	0.0673	0.0544	0.0412	0.0331	0.0277
15.0	0.2206	0.1829	0.1562	0.1208	0.0984	0.0830	0.0673	0.0511	0.0412	0.0345
20.0	0.2774	0.2325	0.2000	0.1562	0.1280	0.1085	0.0882	0.0673	0.0544	0.0456
30.0	0.3721	0.3180	0.2774	0.2206	0.1829	0.1562	0.1280	0.0984	0.0799	0.0673
40.0	0.4472	0.3885	0.3430	0.2774	0.2325	0.2000	0.1652	0.1280	0.1045	0.0882
50.0	0.5077	0.4472	0.3990	0.3276	0.2774	0.2403	0.2000	0.1562	0.1280	0.1085
60.0	0.5571	0.4966	0.4472	0.3721	0.3180	0.2774	0.2325	0.1829	0.1507	0.1280
80.0	0.6325	0.5744	0.5252	0.4472	0.3885	0.3430	0.2913	0.2325	0.1932	0.1652
100.0	0.6868	0.6325	0.5852	0.5077	0.4472	0.3990	0.3430	0.2774	0.2325	0.2000

3. ま と め

軸対称シェル理論を用い不連続熱応力の簡易解析を行なった。前報（一次元非定常熱伝導および熱応力の理論解析）と合わせて用いる事により

- 円筒端部
- 材質および板厚の不連続部，異材継手部
- 軸方向温度勾配，容器の液面近傍部
- 容器とフランジの接続部
- ノズルと容器の接続部
- スカート構造部，ノズルのセーフエンド構造部
- 補強リング部

などにおける定常および非定常熱応力の計算が簡易かつ迅速に行なえるようになった。また

- 円筒に円周方向温度分布が生じた場合
- 壁面近傍にサーマルストライピングが生じた場合

などの簡易熱応力評価式を求めた。

これらの結果を用いる事により，形状や寸法を変えたパラメトリックな簡易熱応力評価が容易であり，FBR 機器設計費用と設計期間の低減が期待できる。

4. 参 考 文 献

- Ref 1 渡士他「簡易熱応力評価線図（第一報）平板の非定常熱応力の理論解析」動燃社内報告書，
PNC SN9410 87-028，1987年2月
- Ref 2 渡士他「IHXフローティングサポート方式の成立性に関する検討 第一報 ノズルの解析」
動燃社内報告書，PNC SN9410 87-094，1987年5月
- Ref 3 チモシエンコ・ヴォアノフスキー共著「板とシェル理論」長谷川節訳，ブレ
イン図書出版，1973年7月
- Ref 4 「機械工学便覧 改訂第6版 材料力学」
日本機械学会編，1976年1月

付録 A 1 軸対称荷重を受ける円筒

付録 A 1 軸対称荷重を受ける円筒

記号

- E ; 円筒シェルの縦弾性係数 (kg/mm^2)
 ν ; " ポアソン比
 α ; " 線膨張係数 ($\text{mm}/\text{mm}\cdot^\circ\text{C}$)
 r ; " 平均半径 (mm)
 t ; " 板厚 (mm)
 χ ; 軸方向位置を表わす変数 (mm)
 n ; 板厚方向位置を表わす変数 (mm) $-t/2 \leq n \leq t/2$
 $P(x)$; 単位面積あたりの半径方向荷重 (kg/mm^2) ~ 内圧
 $T(n, x)$; 温度分布 ($^\circ\text{C}$) ~ 規準温度からの相対温度
 $T_M(x)$; 板厚平均温度 ($^\circ\text{C}$)
 $T_B(x)$; 等価線形内外面温度差 ($^\circ\text{C}$)
 $u(x)$; 板厚中央面の半径方向変位 (mm)
 i ; " χ 軸に対する勾配 $i = \frac{du}{dx}$
 σ_x ; 軸方向応力 (kg/mm^2)
 σ_θ ; 円周方向応力 (kg/mm^2)
 ϵ_x ; 軸方向弾性ひずみ (mm/mm)
 ϵ_θ ; 円周方向弾性ひずみ (mm/mm)
 N_x ; 単位円周長さあたりの軸方向膜力 (kg/mm)
 N_θ ; 単位軸長さあたりの円周方向膜力 (kg/mm)
 M_o, M_x ; 単位円周長さあたりの軸方向曲げモーメント ($\text{kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}$)
 M_θ ; 単位軸長さあたりの円周方向曲げモーメント ($\text{kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}$)
 Q_o, Q ; 単位円周長さあたりの半径方向せん断力 (kg/mm)
 D ; 板の曲げ剛性 ($\text{kg}\cdot\text{mm}$) $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ (A 1.1)
 β ; 減衰係数 ($1/\text{mm}$) $\beta = \left(\frac{Et}{4D r^2}\right)^{1/4} = \left\{\frac{3(1-\nu^2)}{r^2 t^2}\right\}^{1/4}$ (A 1.2)

A 1.1 軸対称シェル理論による円筒の熱弾性

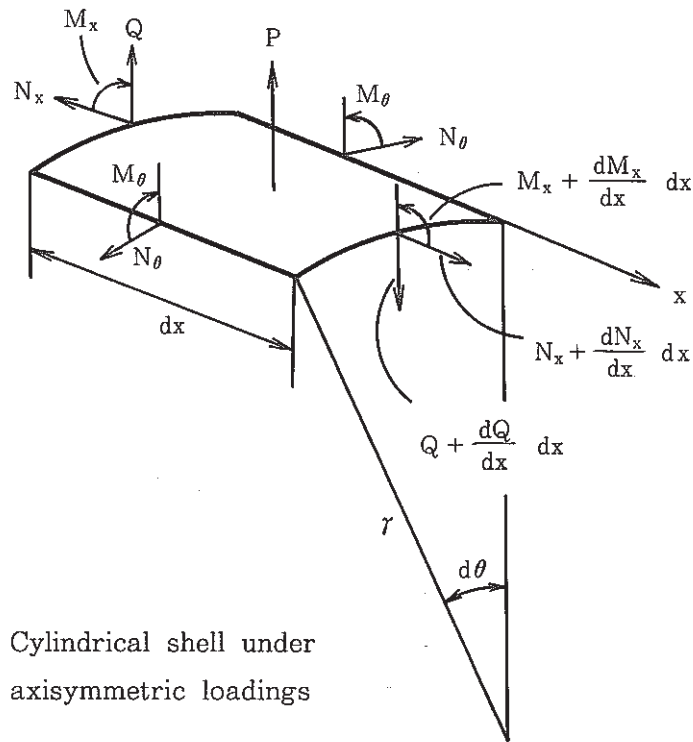


Fig. A 1.1 Cylindrical shell under axisymmetric loadings

半径 r 、板厚 t の円筒シェルに軸対称荷重が作用するものとする。外力としてシェル表面に垂直な内圧 $P(x)$ を考えると、Fig. A 1.1 に示した要素のつり合いは

$$\left[\begin{array}{l} \frac{dN_x}{dx} r \cdot dx \cdot d\theta = 0 \\ \frac{dQ}{dx} r \cdot dx \cdot d\theta + N_\theta \cdot dx \cdot d\theta - P \cdot r \cdot dx \cdot d\theta = 0 \\ \frac{dM_x}{dx} r \cdot dx \cdot d\theta - Q \cdot r \cdot dx \cdot d\theta = 0 \end{array} \right] \quad (a)$$

で与えられる。第1式は軸方向膜力 N_x が一定であることを示す。(a) 式を整理すると次式を得る。

$$\left[\begin{array}{l} N_x = \text{const} \\ \frac{dQ}{dx} + \frac{1}{r} N_\theta = P(x) \\ \frac{dM_x}{dx} - Q = 0 \end{array} \right] \quad (b)$$

板厚方向位置を n で表わすことにし、 $-t/2 \leq n \leq t/2$ とする。 $n = -t/2$ が内面を表わし、 $n = t/2$ が外面を表わすものとする。板厚内任意位置 (n, x) の半径方向変位を $u_r(n, x)$ 、軸方向変位を $u_x(n, x)$ 、規準温度からの相対温度を $T(n, x)$ とする。

軸方向および円周方向の応力とひずみに比べて、板厚方向の応力とひずみが相対的に無視できる程度に小さいものとする（平面応力場）、Hookeの法則は次のようになる。

$$\left[\begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} - \alpha T = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu \sigma_\theta) \\ \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} - \alpha T = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu \sigma_x) \end{array} \right] \quad (c)$$

または上式を応力について解いて

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu \varepsilon_\theta) = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \nu \frac{u_r}{r} - (1+\nu)\alpha T \right\} \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_x) = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \frac{u_r}{r} + \nu \frac{\partial u_x}{\partial x} - (1+\nu)\alpha T \right\} \end{array} \right] \quad (d)$$

となる。半径方向変位 $u_r(n, x)$ は板厚方向位置 n に依存せず板厚中央面の半径方向変位 $u(x)$ に等しいものとする。

$$u_r(n, x) = u(x) \quad (e)$$

軸方向変位 $u_x(n, x)$ は板厚中央面の軸方向変位 $v(x)$ と x 軸に対する勾配 $i = du/dx$ を用いて

$$u_x(n, x) = v(x) - n \cdot i = v(x) - n \cdot \frac{du}{dx} \quad (f)$$

と表わされるものとする。 $t \ll r$ の円筒シェルではこれらの近似は十分正確に成り立つ。

(e), (f) 式を (d) 式に代入すると

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \frac{dv}{dx} - n \cdot \frac{d^2 u}{dx^2} + \nu \frac{u}{r} - (1+\nu)\alpha T \right\} \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \frac{u}{r} + \nu \left(\frac{dv}{dx} - n \frac{d^2 u}{dx^2} \right) - (1+\nu)\alpha T \right\} \end{array} \right] \quad (g)$$

となる。(g) 式を板厚方向に積分すると次式を得る。

$$\left[\begin{array}{l} N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x \, dn = \frac{Et}{1-\nu^2} \left\{ \frac{dv}{dx} + \nu \frac{u}{r} - (1+\nu)\alpha T_M(x) \right\} \\ N_\theta = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_\theta \, dn = \frac{Et}{1-\nu^2} \left\{ \frac{u}{r} + \nu \frac{dv}{dx} - (1+\nu)\alpha T_M(x) \right\} \end{array} \right] \quad (h)$$

ここに

$$T_M(x) = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} T(n, x) \, dn \quad (A1.3)$$

は板厚平均温度である。(g) 式に $(-n)$ を乗じて板厚方向に積分すると次式を得る。

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x \cdot (-n) \, dn = D \left\{ \frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{(1+\nu)\alpha T_B(x)}{t} \right\} \quad (A1.4)$$

$$M_\theta = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_\theta \cdot (-n) \, dn = D \left\{ \nu \frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{(1+\nu)\alpha T_B(x)}{t} \right\} \quad (A1.5)$$

ここに

$$T_B(x) = \frac{12}{t^2} \int_{-t/2}^{t/2} T(n, x) (-n) \cdot dn \quad (A1.6)$$

は等価線形内外面温度差であり、 x 位置の板厚方向温度分布を板厚中心まわりの温度モーメントが等しい等価線形温度分布により線形近似した時の内面温度—外面温度である。

(h)の第1式より

$$\frac{dv}{dx} = -\nu \frac{u}{r} + (1+\nu)\alpha T_M(x) + \frac{1-\nu^2}{Et} N_x \quad (i)$$

となり、これを第2式に代入すると

$$N_\theta = Et \left\{ \frac{u}{r} - \alpha T_M(x) \right\} + \nu \cdot N_x \quad (A1.7)$$

を得る。(b)の第3式と(A1.4)式より

$$Q = \frac{dM_x}{dx} = D \left\{ \frac{d^3 u}{dx^3} - \frac{(1+\nu)\alpha}{t} \cdot \frac{dT_B(x)}{dx} \right\} \quad (A1.8)$$

を得る。(A1.7), (A1.8)式を(b)の第2式に代入すると

$$D \left\{ \frac{d^4 u}{dx^4} - \frac{(1+\nu)\alpha}{t} \cdot \frac{d^2 T_B(x)}{dx^2} \right\} + \frac{Et}{r} \left\{ \frac{u}{r} - \alpha T_M(x) \right\} + \frac{\nu}{r} N_x = P(x)$$

となり、整理すると

$$\frac{d^4 u}{dx^4} + 4\beta^4 u = \frac{P(x)}{D} + \frac{Et\alpha}{Dr} T_M(x) + \frac{(1+\nu)\alpha}{t} \cdot \frac{d^2 T_B(x)}{dx^2} - \frac{\nu \cdot N_x}{Dr} \quad (A1.9)$$

を得る。(A1.9)式は u に関する微分方程式であり、一般解は次式で与えられる。

$$u(x) = e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + f_p(x) \quad (A1.10)$$

ここに C_1, C_2, C_3, C_4 は積分定数でありシェル端部の境界条件により定まる。 $f_p(x)$ は(A1.9)式の特解であり、(A1.9)式の右辺が x の3次以下の多項式で表わされる場合は次式により容易に求めることができる。

$$\begin{aligned} f_p(x) &= \frac{P(x)}{4\beta^4 D} + \frac{Et\alpha}{4\beta^4 Dr} T_M(x) + \frac{(1+\nu)\alpha}{4\beta^4 t} \cdot \frac{d^2 T_B(x)}{dx^2} - \frac{\nu \cdot N_x}{4\beta^4 Dr} \\ &= \frac{r^2 P(x)}{Et} + r\alpha T_M(x) + \frac{r^2 t \alpha}{12(1-\nu)} \cdot \frac{d^2 T_B(x)}{dx^2} - \frac{r \cdot \nu}{Et} N_x \end{aligned} \quad (A1.11)$$

$u(x)$ が求めれば(A1.7)式より N_θ , (A1.4)式より M_x , (A1.5)式より M_θ , (A

1.8) 式より Q がそれぞれ求まる。軸方向変位 $v(x)$ は (i) 式を積分して次式から求めることができる。

$$v(x) - v(0) = -\frac{\nu}{r} \int_0^x u(x) dx + (1 + \nu) \alpha \int_0^x T_M(x) dx + \frac{1 - \nu^2}{Et} N_x \cdot x \tag{A1.12}$$

膜応力 $\sigma_{x,M}$, $\sigma_{\theta,M}$ と曲げ応力 $\sigma_{x,B}$, $\sigma_{\theta,B}$ は次式から求めることができる。

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{x,M} = \frac{N_x}{t} \quad \text{一定値} \\ \sigma_{\theta,M} = \frac{N_\theta}{t} = E \left\{ \frac{u}{r} - \alpha T_M(x) \right\} + \nu \cdot \frac{N_x}{t} \end{array} \right] \tag{A1.13}$$

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{x,B} = \frac{6M_x}{t^2} = \frac{6D}{t^2} \left\{ \frac{d^2u}{dx^2} - \frac{(1+\nu)\alpha T_B(x)}{t} \right\} = \frac{Et}{2(1-\nu^2)} \cdot \frac{d^2u}{dx^2} - \frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)} \\ \sigma_{\theta,B} = \frac{6M_\theta}{t^2} = \frac{6D}{t^2} \left\{ \nu \cdot \frac{d^2u}{dx^2} - \frac{(1+\nu)\alpha T_B(x)}{t} \right\} = \frac{Et\nu}{2(1-\nu^2)} \cdot \frac{d^2u}{dx^2} - \frac{E\alpha T_B(x)}{2(1-\nu)} \end{array} \right] \tag{A1.14}$$

シェル内が一温度であり温度荷重 $T_M(x)$, $T_B(x)$ が 0 の場合について軸荷重、一定内圧による、端部から十分離れた位置の変位と応力を求める。

1) 軸荷重 F_x

$$\left[\begin{array}{l} N_x = \frac{F_x}{2\pi r}, \quad u(x) = -\frac{r\nu}{Et} N_x \\ v(x) - v(0) = -\frac{\nu}{r} \left(-\frac{r\nu}{Et} N_x \right) \cdot x + \frac{1 - \nu^2}{Et} N_x \cdot x = \frac{N_x \cdot x}{Et} \\ \sigma_{x,M} = \frac{N_x}{t}, \quad \sigma_{\theta,M} = E \cdot \frac{u}{r} + \nu \frac{N_x}{t} = 0 \end{array} \right] \tag{j}$$

2) 一定内圧 P

両端開の場合は軸荷重が 0 だから

$$\left[\begin{array}{l} N_x = 0, \quad u(x) = \frac{r^2 P}{Et} \\ v(x) - v(0) = -\frac{\nu}{r} \cdot \frac{r^2 P}{Et} x = -\frac{\nu \cdot r P}{Et} x \\ \sigma_{x,M} = 0, \quad \sigma_{\theta,M} = E \cdot \frac{u}{r} = \frac{rP}{t} \end{array} \right] \tag{k}$$

両端閉の場合は軸荷重 $F_x = \pi r^2 P$ が働らくから

$$\left[\begin{array}{l} N_x = \frac{\pi r^2 P}{2\pi r} = \frac{rP}{2}, \quad u(x) = \frac{r^2 P}{Et} - \frac{r \cdot \nu}{Et} \cdot \frac{rP}{2} = \left(1 - \frac{\nu}{2}\right) \frac{r^2 P}{Et} \\ v(x) - v(0) = -\frac{\nu \cdot r \cdot P}{Et} x + \frac{rP}{2} \cdot \frac{x}{Et} = \left(\frac{1}{2} - \nu\right) \frac{r \cdot P x}{Et} \\ \sigma_{x, M} = \frac{N_x}{t} = \frac{rP}{2t}, \quad \sigma_{\theta, M} = E \cdot \frac{u}{r} + \nu \frac{N_x}{t} = \frac{rP}{t} \end{array} \right] \quad (1)$$

このように軸荷重、一定内圧による変位と応力は容易に求めることができる。端部あるいは拘束点近傍についても次節以降と同様の手法で比較的容易に変位および応力を求めることができる。従って以後は特に明示しない限り、軸荷重、一定内圧は0とし $N_x = \sigma_{x, M} = 0$ の場合のみ論ずることとする。軸荷重、一定内圧が重なる場合は、それらの解を別途求めて重ね合わせれば良い。

A 1.2 端部荷重を受ける半無限長円筒シェル

Fig.A 1.2 に示すように端部にせん断力 Q_0 と曲げモーメント M_0 を受ける半無限長円筒シェルを考える。シェル内は均一温度とする。

端部からの距離を x とすると、端部から十分離れた位置 ($x \rightarrow \infty$) では $u \rightarrow 0$ となるのは明らかであるから一般解 (A 1.10) 式において

$$C_1 = C_2 = 0 \text{ となる。}$$

また分布荷重 $P(x)$ 、温度荷重 $T_M(x)$ 、 $T_B(x)$ および軸方向膜力 N_x がないので特解 $f_p(x)$ も0となる。従って一般解は

$$u = e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) \quad (a)$$

となる。微分すると

$$i = \frac{du}{dx} = -\beta e^{-\beta x} \left\{ (C_3 - C_4) \cos \beta x + (C_3 + C_4) \sin \beta x \right\}$$

$$M_x = D \frac{d^2 u}{dx^2} = 2 \beta^2 D e^{-\beta x} (-C_4 \cos \beta x + C_3 \sin \beta x)$$

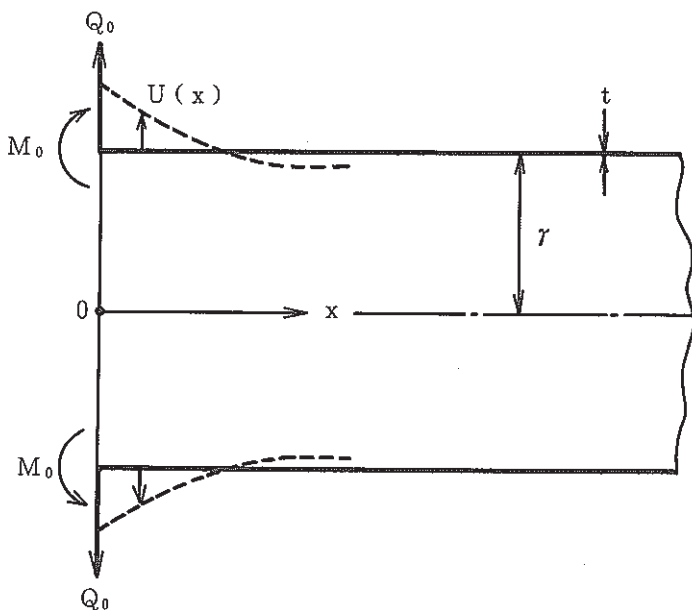


Fig. A 1.2 Cylindrical shell under edge loads

$$Q = D \frac{d^3 u}{dx^3} = 2 \beta^3 D e^{-\beta x} \left\{ (C_3 + C_4) \cos \beta x + (C_4 - C_3) \sin \beta x \right\}$$

となり,

$$M_x|_{x=0} = -2 \beta^2 D C_4 = M_0 \text{ より } C_4 = -\frac{M_0}{2 \beta^2 D} \quad (b)$$

$$Q|_{x=0} = 2 \beta^3 D (C_3 + C_4) = Q_0 \text{ より } C_3 = \frac{Q_0}{2 \beta^3 D} + \frac{M_0}{2 \beta^2 D} \quad (c)$$

が定まる。(b), (c)式を(a)式に代入して

$$u(x) = \frac{e^{-\beta x}}{2 \beta^3 D} \{ \beta M_0 (\cos \beta x - \sin \beta x) + Q_0 \cos \beta x \} \quad (d)$$

を得る。Ref 3の記法により関数 $\varphi, \psi, \theta, \zeta$ を

$$\left[\begin{array}{l} \varphi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \\ \psi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) \\ \theta(\beta x) = e^{-\beta x} \cos \beta x \\ \zeta(\beta x) = e^{-\beta x} \sin \beta x \end{array} \right] \quad (A1.15)$$

と定めて導入する。u, i, M_x, M_θ, Q は $\varphi, \psi, \theta, \zeta$ を用いて次のように表わされる。

$$\left[\begin{array}{l} u(x) = \frac{1}{2 \beta^3 D} \{ \beta M_0 \psi(\beta x) + Q_0 \theta(\beta x) \} \\ i = \frac{du}{dx} = -\frac{1}{2 \beta^2 D} \{ 2 \beta M_0 \theta(\beta x) + Q_0 \varphi(\beta x) \} \\ M_x = D \frac{d^2 u}{dx^2} = M_0 \varphi(\beta x) + \frac{Q_0}{\beta} \zeta(\beta x) \\ M_\theta = \nu \cdot M_x \\ Q = D \frac{d^3 u}{dx^3} = -2 \beta M_0 \zeta(\beta x) + Q_0 \psi(\beta x) \end{array} \right] \quad (A1.16)$$

$\varphi, \psi, \theta, \zeta$ の間に次の関係式

$$\left[\begin{array}{l} \varphi = \theta + \zeta, \quad \psi = \theta - \zeta \\ \varphi + \psi = 2\theta, \quad \varphi - \psi = 2\zeta \\ \frac{d\varphi}{dx} = -2\beta \cdot \zeta, \quad \frac{d\psi}{dx} = -2\beta \cdot \theta \\ \frac{d\theta}{dx} = -\beta \cdot \varphi, \quad \frac{d\zeta}{dx} = \beta \cdot \psi \end{array} \right] \quad (A1.17)$$

が成立し、これを用いると微分、積分の際に便利である。 $0 \leq \beta x \leq 4$ の範囲の $\varphi, \psi, \theta, \zeta$ の値を Table.A 1.1 に示す。(A 1.15) 式から明らかなように $\varphi, \psi, \theta, \zeta$ は波長 λ が

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi\sqrt{rt}}{[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \doteq 4.89\sqrt{rt} \quad (\nu = 0.3 \text{ の時}) \tag{A1.18}$$

である減衰周期関数であり、半波長 $\lambda/2$ で $e^{-\pi} \doteq 0.0432$ 倍に、1波長 λ で $e^{-2\pi} \doteq 0.00187$ 倍に減衰する。円筒の長さ l が λ 以上であれば一端の荷重の効果は他端で無視してよく半無限長円筒と見なしてよい。多くの設計基準では、荷重の影響範囲 l_A を

$$l_A = \frac{\lambda}{2} = \frac{\pi}{\beta} = \frac{\pi\sqrt{rt}}{[3(1-\nu^2)]^{1/4}} = 2.44\sqrt{rt} \quad (\nu = 0.3 \text{ の時})$$

$$= 2.5\sqrt{rt} \quad (\text{余裕をもたせ}) \tag{A1.19}$$

として、円筒シェル上の2点間の距離が l_A 以上の時は一点における荷重が他点に及ぼす効果は無視してよいものとしている。

A 1.3 半径方向線荷重を受ける無限長円筒シェル

Fig. A.1.3 に示した無限長円筒シェルに単位円周長あたり P (kg/mm) の線荷重が作用する場合を考える。対称性より右半分について考えれば十分である。右半分に作用する荷重は $P/2$ であるから (A.1.16) 式で

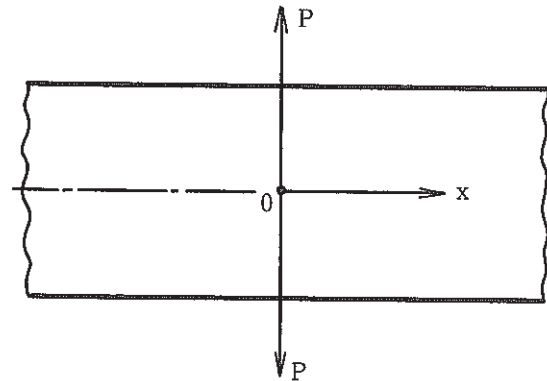


Fig. A.1.3 Cylindrica shell under line load

$Q_0 = P/2$ とおいて

$$\left[\begin{array}{l} u = \frac{1}{2\beta^3 D} \left\{ \beta M_0 \psi(\beta x) + \frac{P}{2} \theta(\beta x) \right\} \\ i = \frac{du}{dx} = -\frac{1}{2\beta^2 D} \left\{ 2\beta \cdot M_0 \theta(\beta x) + \frac{P}{2} \varphi(\beta x) \right\} \end{array} \right] \tag{a}$$

となる。対称性より $x = 0$ で $i = 0$ であるから

$$i|_{x=0} = -\frac{1}{2\beta^2 D} \left\{ 2\beta \cdot M_0 + \frac{P}{2} \right\} = 0$$

より、荷重位置に生ずる曲げモーメント M_0 は

$$M_0 = -\frac{P}{4\beta} \tag{b}$$

となる。(a) 式に (b) 式を代入して

$$\left[\begin{array}{l} u(x) = \frac{1}{8\beta^3 D} \left\{ -P \cdot \psi(\beta x) + 2P \cdot \theta(\beta x) \right\} = \frac{P}{8\beta^3 D} \varphi(\beta x) \\ i = \frac{du}{dx} = -\frac{P}{4\beta^2 D} \zeta(\beta x) \end{array} \right] \tag{A1.20}$$

$$\left[\begin{array}{l} M_x = D \frac{d^2 u}{dx^2} = -\frac{P}{4\beta} \cdot \psi(\beta x) \\ Q = \frac{dM_x}{dx} = D \frac{d^3 u}{dx^3} = \frac{P}{2} \theta(\beta x) \end{array} \right]$$

を得る。

A 1.4 曲げモーメントを受ける無限長円筒シェル

Fig. A 1.4 に示した無限長円筒シェルに単位円周長あたり M_0 の曲げモーメントが作用する場合を考える。

反対称性より右半分に $M_0/2$ 、左半分に $-M_0/2$ が作用すると考えれば、右半分については (A 1.16) 式の M_0 を $M_0/2$ とおいて、

$$u(x) = \frac{1}{2\beta^3 D} \left\{ \beta \cdot \frac{M_0}{2} \cdot \psi(\beta x) + Q_0 \cdot \theta(\beta x) \right\} \tag{a}$$

となる。反対称性より $x = 0$ で $u = 0$ であるから

$$u(0) = \frac{1}{2\beta^3 D} \left(\frac{\beta \cdot M_0}{2} + Q_0 \right) = 0$$

より、荷重位置に生ずるせん断力 Q_0 は

$$Q_0 = -\frac{\beta \cdot M_0}{2} \tag{b}$$

となる。(a) 式に (b) 式を代入して

$$\left[\begin{array}{l} u(x) = \frac{1}{4\beta^2 D} \left\{ M_0 \cdot \psi(\beta x) - M_0 \cdot \theta(\beta x) \right\} = -\frac{M_0}{4\beta^2 D} \zeta(\beta x) \\ i = \frac{du}{dx} = -\frac{M_0}{4\beta D} \psi(\beta x) \\ M_x = D \frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{M_0}{2} \cdot \theta(\beta x) \\ Q = D \frac{d^3 u}{dx^3} = -\frac{\beta \cdot M_0}{2} \varphi(\beta x) \end{array} \right] \tag{A1.21}$$

を得る。左半分については x 軸を左向きにとり M_0 の符号を逆にすれば良い。

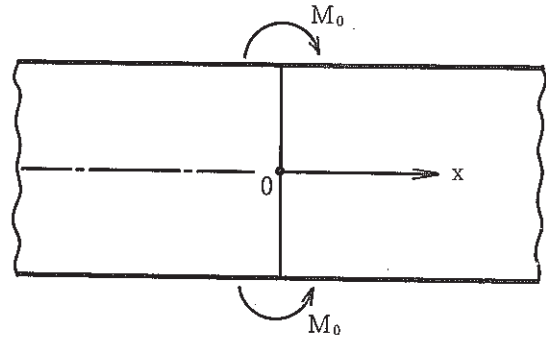


Fig. A 1.4 Cylindrical shell under bending load

A 1.5 半径方向線荷重と曲げモーメントを受ける無限長円筒シェル

Fig. A 1.5 に示すように半径方向線荷重 P と曲げモーメント M_0 が作用する時は (A 1.20) 式と (A 1.21) 式を重ね合せれば良い。
右半分については

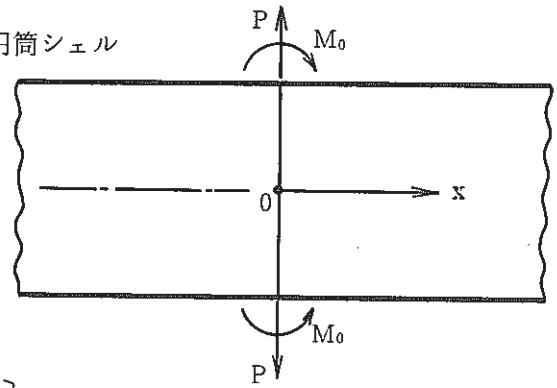


Fig. A 1.5 Cylindrical shell under line load and bending load

$$\left[\begin{array}{l} u(x) = \frac{1}{8\beta^3 D} \left\{ -2\beta \cdot M_0 \cdot \zeta(\beta x) + P \cdot \varphi(\beta x) \right\} \\ i = \frac{du}{dx} = -\frac{1}{4\beta^2 D} \left\{ \beta \cdot M_0 \cdot \psi(\beta x) + P \cdot \zeta(\beta x) \right\} \\ M_x = D \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{M_0}{2} \theta(\beta x) - \frac{P}{4\beta} \psi(\beta x) \\ Q = D \frac{d^3u}{dx^3} = -\frac{\beta \cdot M_0}{2} \varphi(\beta x) + \frac{P}{2} \theta(\beta x) \end{array} \right] \quad (A1.22)$$

を得る。左半分については x 軸を左向きにとり, M_0 の符号を逆にすれば良い。

A 1.6 有限区間で均一な分布荷重を受ける無限長円筒シェル

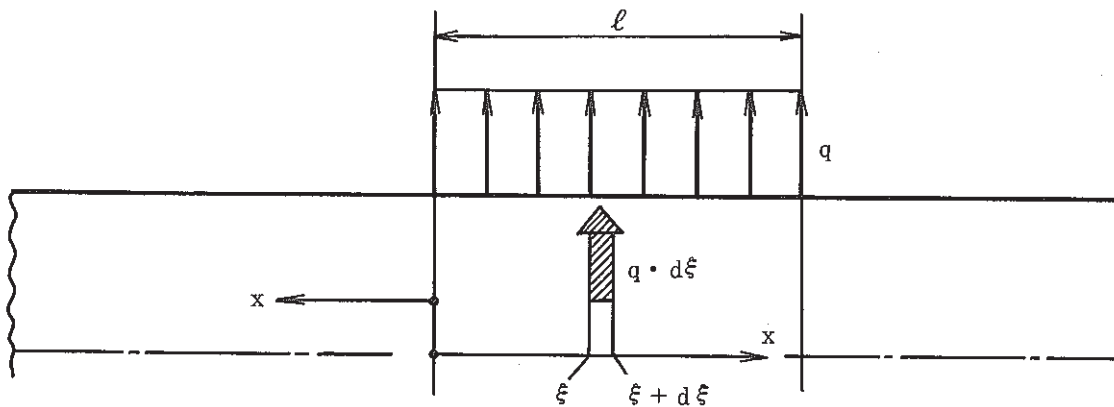


Fig. A 1.6 Cylindrical shell under uniform distributed load over a patch of length l .

Fig. A 1.6 に示すように有限区間 $[0, l]$ で均一な分布荷重 q (kg/mm^2) を受ける無限長円筒シェルを考える。

微小区間 $[\xi, \xi + d\xi]$ の荷重 $q \cdot d\xi$ によって x 位置に生ずる変位 du は (A 1.20) 式より

$$du = \frac{q \cdot d\xi}{8\beta^3 D} \cdot \varphi(\beta|x - \xi|) \quad (a)$$

であるから, 区間内の全荷重による x 位置の変位 $u(x)$ は

$$u(x) = \int_0^{\ell} du = \frac{q}{8\beta^3 D} \int_0^{\ell} \varphi(\beta|x-\xi|) \cdot d\xi \quad (b)$$

となる。

(1) 区間内 ($0 \leq x \leq \ell$)

$$\begin{aligned} u(x) &= \frac{q}{8\beta^3 D} \left\{ \int_0^x \varphi(\beta\xi) \cdot d\xi + \int_0^{\ell-x} \varphi(\beta\xi) \cdot d\xi \right\} \\ &= \frac{q}{8\beta^3 D} \left\{ \left[-\frac{\theta(\beta\xi)}{\beta} \right]_0^x + \left[-\frac{\theta(\beta\xi)}{\beta} \right]_0^{\ell-x} \right\} \\ &= \frac{q}{8\beta^4 D} \{ 2 - \theta(\beta x) - \theta(\beta(\ell-x)) \} \quad (c) \end{aligned}$$

となり、(A 1.1) 式と (A 1.2) 式を用いて

$$\left[\begin{aligned} u(x) &= \frac{q \cdot r^2}{2Et} \cdot \{ 2 - \theta(\beta x) - \theta(\beta(\ell-x)) \} \\ i = \frac{du}{dx} &= \frac{q \cdot r^2 \beta}{2Et} \cdot \{ \varphi(\beta x) - \varphi(\beta(\ell-x)) \} \\ M_x = D \frac{d^2u}{dx^2} &= -\frac{q \cdot r^2 \beta^2 D}{Et} \cdot \{ \zeta(\beta x) + \zeta(\beta(\ell-x)) \} \\ &= -\frac{q \cdot r \cdot t}{4\sqrt{3}(1-\nu^2)} \cdot \{ \zeta(\beta x) + \zeta(\beta(\ell-x)) \} \\ Q = D \frac{d^3u}{dx^3} &= -\frac{q \cdot r^2 \beta^3 D}{Et} \cdot \{ \psi(\beta x) - \psi(\beta(\ell-x)) \} \\ &= -\frac{q\sqrt{r \cdot t}}{4[3(1-\nu^2)]^{1/4}} \cdot \{ \psi(\beta x) - \psi(\beta(\ell-x)) \} \end{aligned} \right] \quad (A1.23)$$

を得る。 $\ell \rightarrow \infty$ の時、区間端から十分離れた位置では

$$U \rightarrow \frac{qr^2}{Et}, \quad i, M_x, Q \rightarrow 0$$

となり、一定内圧 q を受ける円筒の変位に一致するのは当然である。

(2) 区間外 (x 軸を左向きにとり、 $x > 0$ とする)

$$u(x) = \frac{q}{8\beta^3 D} \cdot \int_x^{\ell+x} \varphi(\beta\xi) \cdot d\xi = \frac{q}{8\beta^3 D} \left[-\frac{\theta(\beta\xi)}{\beta} \right]_x^{\ell+x}$$

より

$$\left[u(x) = \frac{q \cdot r^2}{2Et} \cdot \{ \theta(\beta x) - \theta(\beta(\ell+x)) \} \right]$$

$$\left. \begin{aligned}
 i &= \frac{du}{dx} = \frac{q \cdot r^2 \beta}{2 E t} \cdot \{-\varphi(\beta x) + \varphi(\beta(\ell + x))\} \\
 M_x &= D \frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{q \cdot r^2 \beta^2 D}{E t} \cdot \{\zeta(\beta x) - \zeta(\beta(\ell + x))\} \\
 &= \frac{q \cdot r \cdot t}{4 \sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \{\zeta(\beta x) - \zeta(\beta(\ell + x))\} \\
 Q &= D \frac{d^3 u}{dx^3} = \frac{q \cdot r^2 \beta^3 D}{E t} \cdot \{\psi(\beta x) - \psi(\beta(\ell + x))\} \\
 &= \frac{q \sqrt{r \cdot t}}{4 [3(1-\nu^2)]^{1/4}} \cdot \{\psi(\beta x) - \psi(\beta(\ell + x))\}
 \end{aligned} \right\} \quad (A1.24)$$

A 1.7 有限区間で線形分布荷重を受ける無限長円筒シェル

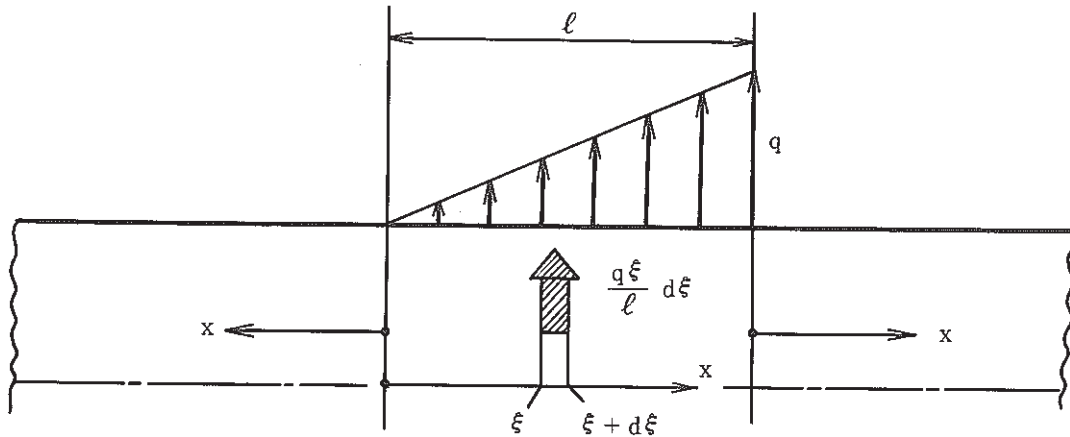


Fig. A 1.7 Cylindrical shell under linearly distributed load over a patch of length ℓ .

Fig. A 1.7 に示すように有限区間 $[0, \ell]$ で線形に分布する荷重を受ける無限長円筒シェルを考える。

微小区間 $[\xi, \xi + d\xi]$ の荷重 $q \cdot \xi \cdot d\xi / \ell$ によって x 位置に生ずる変位 du は (A 1.20) 式より

$$du = \frac{q \cdot \xi \cdot d\xi}{8 \beta^3 D \ell} \cdot \varphi(\beta|x - \xi|) \quad (a)$$

であるから、区間内の全荷重による x 位置の変位 $u(x)$ は

$$u(x) = \int_0^\ell du = \frac{q}{8 \beta^3 D \ell} \int_0^\ell \xi \cdot \varphi(\beta|x - \xi|) \cdot d\xi \quad (b)$$

となる。

(1) 区間内 ($0 \leq x \leq \ell$)

$$\begin{aligned}
 u(x) &= \frac{q}{8\beta^3 D \ell} \cdot \left\{ \int_0^x \xi \cdot \varphi(\beta(x-\xi)) \cdot d\xi + \int_x^\ell \xi \cdot \varphi(\beta(\xi-x)) \cdot d\xi \right\} \\
 &= \frac{q}{8\beta^3 D \ell} \cdot \left\{ \left[\frac{\xi \cdot \theta(\beta(x-\xi))}{\beta} \right]_0^x - \int_0^x \frac{\theta(\beta(x-\xi))}{\beta} \cdot d\xi \right. \\
 &\quad \left. + \left[\frac{-\xi \cdot \theta(\beta(\xi-x))}{\beta} \right]_x^\ell - \int_x^\ell \frac{-\theta(\beta(\xi-x))}{\beta} \cdot d\xi \right\} \\
 &= \frac{q}{8\beta^4 D \ell} \cdot \left\{ 2x - \ell \cdot \theta(\beta(\ell-x)) - \left[\frac{\psi(\beta(x-\xi))}{2\beta} \right]_0^x - \left[\frac{\psi(\beta(\xi-x))}{2\beta} \right]_x^\ell \right\} \\
 &= \frac{q}{8\beta^4 D} \cdot \left\{ \frac{2x}{\ell} - \theta(\beta(\ell-x)) + \frac{\psi(\beta x) - \psi(\beta(\ell-x))}{2\beta \ell} \right\} \\
 &= \frac{q \cdot r^2}{2Et} \left\{ \frac{2x}{\ell} - \theta(\beta(\ell-x)) + \frac{\psi(\beta x) - \psi(\beta(\ell-x))}{2\beta \ell} \right\} \tag{A1.25}
 \end{aligned}$$

となる。区間両端の変位は

$$\left[\begin{array}{l} \text{左端 } u(0) = \frac{q \cdot r^2}{2Et} \left\{ -\theta(\beta \ell) + \frac{1 - \psi(\beta \ell)}{2\beta \ell} \right\} \\ \text{右端 } u(\ell) = \frac{q \cdot r^2}{2Et} \left\{ 1 - \frac{1 - \psi(\beta \ell)}{2\beta \ell} \right\} \end{array} \right] \tag{c}$$

となる。

(2) 区間外左側 (x 軸を左向きにとり, $x > 0$ とする)

$$\begin{aligned}
 u(x) &= \frac{q}{8\beta^3 D \ell} \int_0^\ell \xi \cdot \varphi(\beta(\xi+x)) \cdot d\xi \\
 &= \frac{q}{8\beta^3 D \ell} \left\{ \left[\frac{-\xi \cdot \theta(\beta(\xi+x))}{\beta} \right]_0^\ell - \int_0^\ell \frac{-\theta(\beta(\xi+x))}{\beta} \cdot d\xi \right\} \\
 &= \frac{q}{8\beta^4 D \ell} \left\{ -\ell \cdot \theta(\beta(\ell+x)) - \left[\frac{\psi(\beta(\xi+x))}{2\beta} \right]_0^\ell \right\} \\
 &= \frac{q \cdot r^2}{2Et} \left\{ -\theta(\beta(\ell+x)) + \frac{\psi(\beta x) - \psi(\beta(\ell+x))}{2\beta \ell} \right\} \tag{A1.26}
 \end{aligned}$$

となる。

(3) 区間外右側 (区間右端を原点に右向きに x 軸をとる $x > 0$ とする)

$$\begin{aligned}
 u(x) &= \frac{q}{8\beta^3 D \ell} \int_0^\ell \xi \cdot \varphi(\beta(\ell+x-\xi)) \cdot d\xi \\
 &= \frac{q \cdot r^2}{2Et} \left\{ \theta(\beta x) - \frac{\psi(\beta x) - \psi(\beta(\ell+x))}{2\beta \ell} \right\} \tag{A1.27}
 \end{aligned}$$

となる。(A 1.25), (A 1.26), (A 1.27) 式を微分することにより任意位置のたわみ角 i , 曲げモーメント M_x , せん断力 Q を求めることができる。

A 1.8 ランプ状の分布荷重を受ける無限長円筒シェル

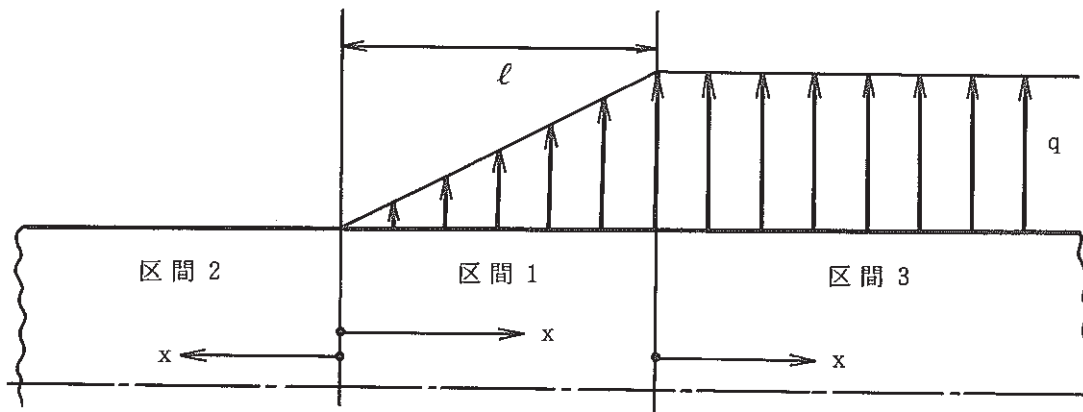


Fig. A 1.8 Cylindrical shell under ramp distributed load

Fig. A 1.8 に示すようなランプ状の分布荷重を受ける場合は, A 1.6 節で $l \rightarrow \infty$ とした時の解と A 1.7 節の解を重ね合わせればよい。

(1) 区間 1 ($0 \leq x \leq l$)

(A 1.24) 式で $l \rightarrow \infty$ として l を含む項を消去した後に x を $l - x$ で置き換えた式と, (A 1.25) 式を重ねれば良いから

$$u(x) = \frac{q \cdot r^2}{2Et} \cdot \left\{ \theta(\beta(l-x)) + \frac{2x}{l} - \theta(\beta(l-x)) + \frac{\psi(\beta x) - \psi(\beta(l-x))}{2\beta l} \right\}$$

より

$$\left[\begin{aligned} u(x) &= \frac{q \cdot r^2}{Et} \left\{ \frac{x}{l} + \frac{\psi(\beta x) - \psi(\beta(l-x))}{4\beta l} \right\} \\ i = \frac{du}{dx} &= \frac{q \cdot r^2}{Et l} \cdot \left\{ 1 - \frac{\theta(\beta x) + \theta(\beta(l-x))}{2} \right\} \\ M_x = D \frac{d^2u}{dx^2} &= \frac{D \cdot q \cdot r^2 \cdot \beta}{2Et l} \cdot \{ \varphi(\beta x) - \varphi(\beta(l-x)) \} \\ &= \frac{q (r \cdot t)^{3/2}}{8l [3(1-\nu^2)]^{3/4}} \cdot \{ \varphi(\beta x) - \varphi(\beta(l-x)) \} \end{aligned} \right] \quad (A1.28)$$

を得る。区間中央 ($x = l/2$) で $M_x = 0$ となり, 両端で M_x は逆符号の最大値をとり曲げ応力が最大となる。

(2) 区間2 ($\chi > 0$)

(A1.24) 式で l を含む項を消去してから χ を $l + \chi$ で置き換えた式と, (A1.26) 式を重ね合わせれば良いから

$$u(x) = \frac{q \cdot r^2}{2Et} \cdot \left\{ \theta(\beta(l+x)) - \theta(\beta(l+x)) + \frac{\psi(\beta x) - \psi(\beta(l+x))}{2\beta l} \right\}$$

より

$$\left[\begin{array}{l} u(x) = \frac{q \cdot r^2}{Et} \cdot \frac{\psi(\beta x) - \psi(\beta(l+x))}{4\beta l} \\ i = \frac{du}{dx} = -\frac{q \cdot r^2}{2Et l} \cdot \{\theta(\beta x) - \theta(\beta(l+x))\} \\ M_x = D \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{D \cdot q \cdot r^2 \cdot \beta}{2Et l} \cdot \{\varphi(\beta x) - \varphi(\beta(l+x))\} \\ \quad = \frac{q (r \cdot t)^{3/2}}{8l [3(1-\nu^2)]^{3/4}} \cdot \{\varphi(\beta x) - \varphi(\beta(l+x))\} \end{array} \right] \quad (A1.29)$$

を得る。

(3) 区間3 ($\chi > 0$)

(A1.23) 式で $l \rightarrow \infty$ として l を含む項を消去した式と, (A1.27) 式を重ね合わせれば良いから

$$u(x) = \frac{q \cdot r^2}{2Et} \cdot \left\{ 2 - \theta(\beta x) + \theta(\beta x) - \frac{\psi(\beta x) - \psi(\beta(l+x))}{2\beta l} \right\}$$

より

$$\left[\begin{array}{l} u(x) = \frac{q \cdot r^2}{Et} \cdot \left\{ 1 - \frac{\psi(\beta x) - \psi(\beta(l+x))}{4\beta l} \right\} \\ i = \frac{du}{dx} = \frac{q \cdot r^2}{2Et l} \cdot \{\theta(\beta x) - \theta(\beta(l+x))\} \\ M_x = D \frac{d^2u}{dx^2} = -\frac{D \cdot q \cdot r^2 \cdot \beta}{2Et l} \cdot \{\varphi(\beta x) - \varphi(\beta(l+x))\} \\ \quad = -\frac{q (r \cdot t)^{3/2}}{8l [3(1-\nu^2)]^{3/4}} \cdot \{\varphi(\beta x) - \varphi(\beta(l+x))\} \end{array} \right] \quad (A1.30)$$

を得る。勾配 i と M_x は区間2 と逆符号となる。

(4) 全区間表示 ($-\infty < \chi < \infty$)

区間1の χ 軸を延長して全区間に共通に用いる。ランプ状の分布荷重を次式で表わす。

$$P(x) = \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ \frac{q}{\ell} x & (0 \leq x \leq \ell) \\ q & (x > \ell) \end{cases}$$

変位 $u(x)$ 等は全区間共通に次のように表示できる。

$$\left[\begin{aligned} u(x) &= \frac{r^2}{Et} \cdot P(x) + \frac{q \cdot r^2}{Et} \cdot \frac{\psi(\beta|x|) - \psi(\beta|x-\ell|)}{4\beta\ell} \\ i &= \frac{du}{dx} = \frac{r^2}{Et} \cdot \frac{dP}{dx} - \frac{q \cdot r^2}{Et} \cdot \frac{\theta(\beta|x|) \pm \theta(\beta|x-\ell|)}{2\ell} \quad (+ \text{は } 0 \leq x \leq \ell) \\ M_x &= D \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{D \cdot q \cdot r^2 \cdot \beta}{2Et\ell} \cdot \{\varphi(\beta|x|) - \varphi(\beta|x-\ell|)\} \\ &= \frac{q(r \cdot t)^{3/2}}{8\ell[3(1-\nu^2)]^{3/4}} \cdot \{\varphi(\beta|x|) - \varphi(\beta|x-\ell|)\} \\ Q &= \frac{dM_x}{dx} = -\frac{D \cdot q \cdot r^2 \cdot \beta^2}{Et\ell} \cdot \{\zeta(\beta|x|) \pm \zeta(\beta|x-\ell|)\} \quad (+ \text{は } 0 \leq x \leq \ell) \\ &= -\frac{q \cdot r \cdot t}{4\ell\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \{\zeta(\beta|x|) \pm \zeta(\beta|x-\ell|)\} \end{aligned} \right] \quad (A1.31)$$

ここに i は原点 ($x=0$) 側から見た勾配であり、 Q は原点側から見たせん断力であり、双方共 $x > 0$ と $x < 0$ とでは正の方向が逆になるものとする。

A 1.9 端部荷重を受ける有限長円筒

円筒長さ ℓ が

$$\ell < \ell_A = 2.5\sqrt{r \cdot t} \quad (a)$$

であり、一端の他端への影響が無視できない場合とする。

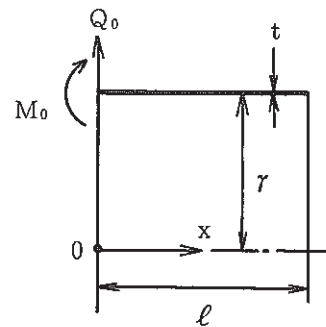
このような場合は一般解として (A 1.10) 式の表示法より

も、次の表示法を用いた方が便利である。

$$\begin{aligned} u(x) &= \cosh \beta x (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) \\ &\quad + \sinh \beta x (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + f_p(x) \end{aligned} \quad (A1.32)$$

端部 ($x=0$) でモーメント M_0 とせん断力 Q_0 を受けるものとする。分布荷重と温度荷重はないものとし特解 f_p

(x) = 0 とする。(A 1.32) 式を微分して



(a) free edge



(b) simply supported



(c) slider supported

$$i(x) = \frac{du}{dx} = \beta \{ (C_2 + C_3) \cosh \beta x \cdot \cos \beta x - (C_1 - C_4) \cosh \beta x \cdot \sin \beta x + (C_1 + C_4) \sinh \beta x \cdot \cos \beta x + (C_2 - C_3) \sinh \beta x \cdot \sin \beta x \} \quad (b)$$

$$M_x = D \frac{d^2 u}{dx^2} = 2 \beta^2 D \cdot \{ C_4 \cosh \beta x \cdot \cos \beta x - C_3 \cosh \beta x \cdot \sin \beta x + C_2 \sinh \beta x \cdot \cos \beta x - C_1 \sinh \beta x \cdot \sin \beta x \} \quad (c)$$

$$Q = \frac{dM_x}{dx} = 2 \beta^3 D \cdot \{ (C_2 - C_3) \cosh \beta x \cdot \cos \beta x - (C_1 + C_4) \cosh \beta x \cdot \sin \beta x - (C_1 - C_4) \sinh \beta x \cdot \cos \beta x - (C_2 + C_3) \sinh \beta x \cdot \sin \beta x \} \quad (d)$$

を得る。荷重端 ($x=0$) の条件

$$M_x|_{x=0} = 2 \beta^2 D C_4 = M_0, \quad Q|_{x=0} = 2 \beta^3 D (C_2 - C_3) = Q_0$$

より

$$C_4 = \frac{M_0}{2 \beta^2 D}, \quad C_3 = C_2 - \frac{Q_0}{2 \beta^3 D} \quad (A1.33)$$

となる。

(1) 他端が自由の時

$$M_x|_{x=l} = 0, \quad Q|_{x=l} = 0 \text{ より}$$

$$\left[\begin{array}{l} f_1 \cdot C_4 - f_2 \cdot C_3 + f_3 \cdot C_2 - f_4 \cdot C_1 = 0 \\ f_1 (C_2 - C_3) - f_2 (C_1 + C_4) - f_3 (C_1 - C_4) - f_4 (C_2 + C_3) = 0 \end{array} \right] \quad (e)$$

となる。ここに $f_1 = \cosh \beta l \cos \beta l$, $f_2 = \cosh \beta l \sin \beta l$, $f_3 = \sinh \beta l \cos \beta l$, $f_4 = \sinh \beta l \sin \beta l$ とする。

(A1.33) 式を (e) 式に代入して C_1, C_2 を求めると

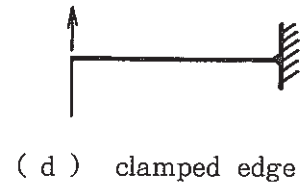
$$\left[\begin{array}{l} C_1 = \frac{(f_2^2 + f_3^2)}{(2f_4^2 - f_2^2 + f_3^2)} \cdot \frac{M_0}{2 \beta^2 D} + \frac{(f_2 f_4 - f_1 f_2 + f_1 f_3 + f_3 f_4)}{(2f_4^2 - f_2^2 + f_3^2)} \cdot \frac{Q_0}{2 \beta^3 D} \\ C_2 = \frac{(f_4 f_3 - f_4 f_2 - f_1 f_2 - f_1 f_3)}{(2f_4^2 - f_2^2 + f_3^2)} \cdot \frac{M_0}{2 \beta^2 D} + \frac{(f_4^2 - f_2^2)}{(2f_4^2 - f_2^2 + f_3^2)} \cdot \frac{Q_0}{2 \beta^3 D} \end{array} \right] \quad (A1.34)$$

を得る。

(2) 他端が単純支持の時

$$u(l) = 0, \quad M_x|_{x=l} = 0 \text{ より}$$

$$\left[\begin{array}{l} f_1 \cdot C_1 + f_2 \cdot C_2 + f_3 \cdot C_3 + f_4 \cdot C_4 = 0 \\ f_1 \cdot C_4 - f_2 \cdot C_3 + f_3 \cdot C_2 - f_4 \cdot C_1 = 0 \end{array} \right] \quad (f)$$



(d) clamped edge
Fig. A 1.9 Short length cylinder

となる。(A1.33)式を(f)式に代入して C_1, C_2 を求めると

$$\left[\begin{array}{l} C_1 = \frac{(f_1 f_2 + f_1 f_3 + f_2 f_4 - f_3 f_4)}{(f_1 f_3 + f_2 f_4 + f_3 f_4 - f_1 f_2)} \cdot \frac{M_0}{2\beta^2 D} + \frac{(f_2^2 + f_3^2)}{(f_1 f_3 + f_2 f_4 + f_3 f_4 - f_1 f_2)} \cdot \frac{Q_0}{2\beta^3 D} \\ C_2 = \frac{-(f_1^2 + f_4^2)}{(f_1 f_3 + f_2 f_4 + f_3 f_4 - f_1 f_2)} \cdot \frac{M_0}{2\beta^2 D} + \frac{(f_3 f_4 - f_1 f_2)}{(f_1 f_3 + f_2 f_4 + f_3 f_4 - f_1 f_2)} \cdot \frac{Q_0}{2\beta^3 D} \end{array} \right] \quad (\text{A1.35})$$

を得る。

(3) 他端がスライド支持の時

$$i(\ell) = 0, \quad Q|_{x=\ell} = 0 \text{ より}$$

$$\left[\begin{array}{l} f_1(C_2 + C_3) - f_2(C_1 - C_4) + f_3(C_1 + C_4) + f_4(C_2 - C_3) = 0 \\ f_1(C_2 - C_3) - f_2(C_1 + C_4) - f_3(C_1 - C_4) - f_4(C_2 + C_3) = 0 \end{array} \right] \quad (\text{g})$$

となる。(A1.33)式を(g)式に代入して C_1, C_2 を求めると

$$\left[\begin{array}{l} C_1 = \frac{(f_1 f_3 + f_2 f_4 + f_3 f_4 - f_1 f_2)}{(f_1 f_2 + f_1 f_3 + f_2 f_4 - f_3 f_4)} \cdot \frac{M_0}{2\beta^2 D} + \frac{(f_1^2 + f_4^2)}{(f_1 f_2 + f_1 f_3 + f_2 f_4 - f_3 f_4)} \cdot \frac{Q_0}{2\beta^3 D} \\ C_2 = \frac{-(f_2^2 + f_3^2)}{(f_1 f_2 + f_1 f_3 + f_2 f_4 - f_3 f_4)} \cdot \frac{M_0}{2\beta^2 D} + \frac{f_1 f_2 - f_3 f_4}{(f_1 f_2 + f_1 f_3 + f_2 f_4 - f_3 f_4)} \cdot \frac{Q_0}{2\beta^3 D} \end{array} \right] \quad (\text{A1.36})$$

を得る。

(4) 他端が固定支持の時

$$u(\ell) = 0, \quad i(\ell) = 0 \text{ より}$$

$$\left[\begin{array}{l} f_1 \cdot C_1 + f_2 \cdot C_2 + f_3 \cdot C_3 + f_4 \cdot C_4 = 0 \\ f_1(C_2 + C_3) - f_2(C_1 - C_4) + f_3(C_1 + C_4) + f_4(C_2 - C_3) = 0 \end{array} \right] \quad (\text{h})$$

となる。(A1.33)式を(h)式に代入して C_1, C_2 を求めると

$$\left[\begin{array}{l} C_1 = \frac{(f_2^2 + f_3^2)}{(2f_1^2 + f_2^2 - f_3^2)} \cdot \frac{M_0}{2\beta^2 D} + \frac{(f_1 f_3 + f_2 f_4 + f_3 f_4 - f_1 f_2)}{(2f_1^2 + f_2^2 - f_3^2)} \cdot \frac{Q_0}{2\beta^3 D} \\ C_2 = \frac{-(f_1 f_2 + f_1 f_3 + f_2 f_4 - f_3 f_4)}{(2f_1^2 + f_2^2 - f_3^2)} \cdot \frac{M_0}{2\beta^2 D} + \frac{(f_1^2 - f_3^2)}{(2f_1^2 + f_2^2 - f_3^2)} \cdot \frac{Q_0}{2\beta^3 D} \end{array} \right] \quad (\text{A1.37})$$

を得る。

Table. A 1.1 Function $\varphi, \Psi, \theta, \zeta$

βx	φ	Ψ	θ	ζ	βx	φ	Ψ	θ	ζ	βx	φ	Ψ	θ	ζ	βx	φ	Ψ	θ	ζ
0.00	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.51	0.8172	0.2309	0.5241	0.2931	1.01	0.5021	-0.1147	0.1937	0.3084	1.51	0.2339	-0.2071	0.0134	0.2205
0.01	0.9999	0.9801	0.9900	0.0099	0.52	0.8113	0.2205	0.5159	0.2954	1.02	0.4960	-0.1185	0.1887	0.3073	1.52	0.2295	-0.2073	0.0111	0.2184
0.02	0.9996	0.9604	0.9800	0.0196	0.53	0.8054	0.2103	0.5079	0.2976	1.03	0.4899	-0.1223	0.1838	0.3061	1.53	0.2252	-0.2075	0.0088	0.2164
0.03	0.9991	0.9409	0.9700	0.0291	0.54	0.7994	0.2002	0.4998	0.2996	1.04	0.4837	-0.1259	0.1789	0.3048	1.54	0.2209	-0.2077	0.0066	0.2143
0.04	0.9984	0.9216	0.9600	0.0384	0.55	0.7934	0.1903	0.4919	0.3016	1.05	0.4777	-0.1294	0.1741	0.3035	1.55	0.2166	-0.2078	0.0044	0.2122
0.05	0.9976	0.9025	0.9500	0.0475	0.56	0.7874	0.1805	0.4840	0.3034	1.06	0.4716	-0.1329	0.1694	0.3022	1.56	0.2124	-0.2079	0.0023	0.2101
0.06	0.9965	0.8836	0.9401	0.0565	0.57	0.7813	0.1709	0.4761	0.3052	1.07	0.4656	-0.1362	0.1647	0.3009	1.57	0.2082	-0.2079	0.0002	0.2080
0.07	0.9953	0.8649	0.9301	0.0652	0.58	0.7752	0.1615	0.4683	0.3068	1.08	0.4596	-0.1394	0.1601	0.2995	1.58	0.2041	-0.2079	-0.0019	0.2060
0.08	0.9939	0.8464	0.9202	0.0738	0.59	0.7690	0.1522	0.4606	0.3084	1.09	0.4536	-0.1426	0.1555	0.2981	1.59	0.2000	-0.2078	-0.0039	0.2039
0.09	0.9924	0.8281	0.9102	0.0821	0.60	0.7628	0.1431	0.4530	0.3099	1.10	0.4476	-0.1457	0.1510	0.2967	1.60	0.1959	-0.2077	-0.0059	0.2018
0.10	0.9907	0.8100	0.9003	0.0903	0.61	0.7566	0.1341	0.4454	0.3113	1.11	0.4417	-0.1486	0.1465	0.2952	1.61	0.1919	-0.2076	-0.0078	0.1997
0.11	0.9888	0.7921	0.8904	0.0983	0.62	0.7504	0.1253	0.4378	0.3126	1.12	0.4358	-0.1515	0.1422	0.2937	1.62	0.1879	-0.2074	-0.0097	0.1977
0.12	0.9867	0.7744	0.8805	0.1062	0.63	0.7441	0.1166	0.4303	0.3138	1.13	0.4300	-0.1543	0.1378	0.2922	1.63	0.1840	-0.2072	-0.0116	0.1956
0.13	0.9845	0.7569	0.8707	0.1138	0.64	0.7378	0.1080	0.4229	0.3149	1.14	0.4242	-0.1570	0.1336	0.2906	1.64	0.1801	-0.2069	-0.0134	0.1935
0.14	0.9822	0.7395	0.8609	0.1213	0.65	0.7315	0.0997	0.4156	0.3159	1.15	0.4184	-0.1597	0.1293	0.2890	1.65	0.1763	-0.2066	-0.0152	0.1914
0.15	0.9797	0.7224	0.8510	0.1286	0.66	0.7252	0.0914	0.4083	0.3169	1.16	0.4126	-0.1622	0.1252	0.2874	1.66	0.1724	-0.2063	-0.0169	0.1894
0.16	0.9770	0.7055	0.8413	0.1358	0.67	0.7189	0.0833	0.4011	0.3178	1.17	0.4069	-0.1647	0.1211	0.2858	1.67	0.1687	-0.2060	-0.0186	0.1873
0.17	0.9742	0.6888	0.8315	0.1427	0.68	0.7125	0.0754	0.3939	0.3188	1.18	0.4012	-0.1671	0.1171	0.2841	1.68	0.1650	-0.2056	-0.0203	0.1853
0.18	0.9713	0.6722	0.8218	0.1495	0.69	0.7061	0.0676	0.3868	0.3193	1.19	0.3955	-0.1694	0.1131	0.2824	1.69	0.1613	-0.2052	-0.0219	0.1832
0.19	0.9683	0.6559	0.8121	0.1562	0.70	0.6997	0.0599	0.3798	0.3199	1.20	0.3899	-0.1716	0.1091	0.2807	1.70	0.1576	-0.2047	-0.0235	0.1812
0.20	0.9651	0.6398	0.8024	0.1627	0.71	0.6933	0.0524	0.3728	0.3205	1.21	0.3843	-0.1737	0.1053	0.2790	1.71	0.1540	-0.2042	-0.0251	0.1791
0.21	0.9618	0.6238	0.7928	0.1690	0.72	0.6869	0.0450	0.3659	0.3210	1.22	0.3787	-0.1758	0.1015	0.2773	1.72	0.1505	-0.2037	-0.0266	0.1771
0.22	0.9583	0.6080	0.7832	0.1751	0.73	0.6805	0.0377	0.3591	0.3214	1.23	0.3732	-0.1778	0.0977	0.2755	1.73	0.1469	-0.2031	-0.0281	0.1750
0.23	0.9547	0.5925	0.7736	0.1811	0.74	0.6740	0.0306	0.3523	0.3217	1.24	0.3677	-0.1797	0.0940	0.2737	1.74	0.1435	-0.2026	-0.0296	0.1730
0.24	0.9511	0.5771	0.7641	0.1870	0.75	0.6676	0.0236	0.3456	0.3220	1.25	0.3622	-0.1815	0.0903	0.2719	1.75	0.1400	-0.2020	-0.0310	0.1710
0.25	0.9473	0.5619	0.7546	0.1927	0.76	0.6612	0.0168	0.3390	0.3222	1.26	0.3568	-0.1833	0.0867	0.2701	1.76	0.1366	-0.2013	-0.0324	0.1690
0.26	0.9434	0.5469	0.7451	0.1982	0.77	0.6547	0.0101	0.3324	0.3223	1.27	0.3514	-0.1850	0.0832	0.2682	1.77	0.1333	-0.2007	-0.0337	0.1670
0.27	0.9393	0.5321	0.7357	0.2036	0.78	0.6483	0.0035	0.3259	0.3224	1.28	0.3461	-0.1866	0.0797	0.2664	1.78	0.1299	-0.2000	-0.0350	0.1650
0.28	0.9352	0.5175	0.7264	0.2089	0.79	0.6418	-0.0030	0.3194	0.3224	1.29	0.3408	-0.1882	0.0763	0.2645	1.79	0.1267	-0.1993	-0.0363	0.1630
0.29	0.9310	0.5031	0.7170	0.2140	0.80	0.6354	-0.0093	0.3131	0.3223	1.30	0.3355	-0.1897	0.0729	0.2626	1.80	0.1234	-0.1985	-0.0376	0.1610
0.30	0.9267	0.4888	0.7077	0.2189	0.81	0.6289	-0.0155	0.3067	0.3222	1.31	0.3303	-0.1911	0.0696	0.2607	1.81	0.1202	-0.1978	-0.0388	0.1590
0.31	0.9222	0.4747	0.6985	0.2237	0.82	0.6225	-0.0215	0.3005	0.3220	1.32	0.3251	-0.1925	0.0663	0.2588	1.82	0.1171	-0.1970	-0.0400	0.1570
0.32	0.9177	0.4609	0.6893	0.2284	0.83	0.6161	-0.0275	0.2943	0.3218	1.33	0.3199	-0.1938	0.0631	0.2568	1.83	0.1139	-0.1962	-0.0411	0.1551
0.33	0.9131	0.4472	0.6801	0.2330	0.84	0.6096	-0.0333	0.2882	0.3215	1.34	0.3148	-0.1950	0.0599	0.2549	1.84	0.1109	-0.1953	-0.0422	0.1531
0.34	0.9084	0.4337	0.6710	0.2374	0.85	0.6032	-0.0390	0.2821	0.3211	1.35	0.3097	-0.1962	0.0568	0.2529	1.85	0.1078	-0.1945	-0.0433	0.1511
0.35	0.9036	0.4203	0.6620	0.2416	0.86	0.5968	-0.0446	0.2761	0.3207	1.36	0.3047	-0.1973	0.0537	0.2510	1.86	0.1048	-0.1936	-0.0444	0.1492
0.36	0.8987	0.4072	0.6530	0.2458	0.87	0.5904	-0.0501	0.2702	0.3202	1.37	0.2997	-0.1983	0.0507	0.2490	1.87	0.1018	-0.1927	-0.0454	0.1473
0.37	0.8938	0.3942	0.6440	0.2498	0.88	0.5840	-0.0554	0.2643	0.3197	1.38	0.2947	-0.1993	0.0477	0.2470	1.88	0.0989	-0.1918	-0.0464	0.1454
0.38	0.8887	0.3814	0.6351	0.2537	0.89	0.5776	-0.0606	0.2585	0.3191	1.39	0.2898	-0.2002	0.0448	0.2450	1.89	0.0960	-0.1908	-0.0474	0.1434
0.39	0.8836	0.3688	0.6262	0.2574	0.90	0.5712	-0.0657	0.2527	0.3185	1.40	0.2849	-0.2011	0.0419	0.2430	1.90	0.0932	-0.1899	-0.0484	0.1415
0.40	0.8784	0.3564	0.6174	0.2610	0.91	0.5648	-0.0707	0.2470	0.3178	1.41	0.2801	-0.2019	0.0391	0.2410	1.91	0.0904	-0.1889	-0.0493	0.1396
0.41	0.8732	0.3441	0.6086	0.2645	0.92	0.5585	-0.0756	0.2414	0.3171	1.42	0.2753	-0.2027	0.0363	0.2390	1.92	0.0876	-0.1879	-0.0502	0.1378
0.42	0.8679	0.3320	0.5999	0.2679	0.93	0.5522	-0.0804	0.2359	0.3163	1.43	0.2705	-0.2034	0.0336	0.2369	1.93	0.0849	-0.1869	-0.0510	0.1359
0.43	0.8625	0.3201	0.5913	0.2712	0.94	0.5458	-0.0851	0.2304	0.3155	1.44	0.2658	-0.2040	0.0309	0.2349	1.94	0.0822	-0.1859	-0.0519	0.1340
0.44	0.8570	0.3084	0.5827	0.2743	0.95	0.5395	-0.0896	0.2250	0.3146	1.45	0.2611	-0.2046	0.0283	0.2329	1.95	0.0795	-0.1848	-0.0527	0.1322
0.45	0.8515	0.2968	0.5742	0.2773	0.96	0.5333	-0.0941	0.2196	0.3137	1.46	0.2565	-0.2051	0.0257	0.2308	1.96	0.0769	-0.1838	-0.0534	0.1303
0.46	0.8459	0.2854	0.5657	0.2803	0.97	0.5270	-0.0984	0.2143	0.3127	1.47	0.2519	-0.2056	0.0231	0.2288	1.97	0.0743	-0.1827	-0.0542	0.1285
0.47	0.8403	0.2742	0.5572	0.2831	0.98	0.5208	-0.1026	0.2091	0.3117	1.48	0.2473	-0.2061	0.0206	0.2267	1.98	0.0717	-0.1816	-0.0549	0.1267
0.48	0.8346	0.2631	0.5489	0.2857	0.99	0.5145	-0.1068	0.2039	0.3106	1.49	0.2428	-0.2064	0.0182	0.2246	1.99	0.0692	-0.1805	-0.0556	0.1249
0.49	0.8289	0.2522	0.5405	0.2883	1.00	0.5083	-0.1108	0.1988	0.3096	1.50	0.2384	-0.2068	0.0158	0.2226	2.00	0.0667	-0.1794	-0.0563	0.1231

Table. A 1.1 (Continued)

$\beta\chi$	φ	ψ	θ	ζ	$\beta\chi$	φ	ψ	θ	ζ	$\beta\chi$	φ	ψ	θ	ζ	$\beta\chi$	φ	ψ	θ	ζ
2.01	0.0643	-0.1782	-0.0570	0.1213	2.51	-0.0176	-0.1136	-0.0656	0.0480	3.01	-0.0424	-0.0553	-0.0489	0.0065	3.51	-0.0387	-0.0171	-0.0279	-0.0108
2.02	0.0619	-0.1771	-0.0576	0.1195	2.52	-0.0186	-0.1123	-0.0654	0.0469	3.02	-0.0425	-0.0544	-0.0484	0.0059	3.52	-0.0384	-0.0166	-0.0275	-0.0109
2.03	0.0595	-0.1759	-0.0582	0.1177	2.53	-0.0195	-0.1110	-0.0652	0.0457	3.03	-0.0426	-0.0534	-0.0480	0.0054	3.53	-0.0382	-0.0160	-0.0271	-0.0111
2.04	0.0572	-0.1748	-0.0588	0.1160	2.54	-0.0204	-0.1097	-0.0650	0.0446	3.04	-0.0427	-0.0524	-0.0476	0.0049	3.54	-0.0380	-0.0155	-0.0267	-0.0113
2.05	0.0549	-0.1736	-0.0594	0.1142	2.55	-0.0213	-0.1084	-0.0648	0.0435	3.05	-0.0428	-0.0515	-0.0472	0.0043	3.55	-0.0378	-0.0150	-0.0264	-0.0114
2.06	0.0526	-0.1724	-0.0599	0.1125	2.56	-0.0221	-0.1071	-0.0646	0.0425	3.06	-0.0429	-0.0506	-0.0467	0.0038	3.56	-0.0375	-0.0144	-0.0260	-0.0116
2.07	0.0504	-0.1712	-0.0604	0.1108	2.57	-0.0230	-0.1058	-0.0644	0.0414	3.07	-0.0430	-0.0496	-0.0463	0.0033	3.57	-0.0373	-0.0139	-0.0256	-0.0117
2.08	0.0482	-0.1700	-0.0609	0.1091	2.58	-0.0238	-0.1045	-0.0641	0.0404	3.08	-0.0430	-0.0487	-0.0459	0.0028	3.58	-0.0371	-0.0134	-0.0252	-0.0118
2.09	0.0460	-0.1688	-0.0614	0.1074	2.59	-0.0246	-0.1032	-0.0639	0.0393	3.09	-0.0431	-0.0478	-0.0454	0.0023	3.59	-0.0368	-0.0129	-0.0249	-0.0120
2.10	0.0439	-0.1675	-0.0618	0.1057	2.60	-0.0254	-0.1019	-0.0636	0.0383	3.10	-0.0431	-0.0469	-0.0450	0.0019	3.60	-0.0366	-0.0124	-0.0245	-0.0121
2.11	0.0418	-0.1663	-0.0622	0.1040	2.61	-0.0261	-0.1007	-0.0634	0.0373	3.11	-0.0432	-0.0460	-0.0446	0.0014	3.61	-0.0364	-0.0119	-0.0241	-0.0122
2.12	0.0397	-0.1650	-0.0627	0.1024	2.62	-0.0268	-0.0994	-0.0631	0.0363	3.12	-0.0432	-0.0451	-0.0441	0.0010	3.62	-0.0361	-0.0114	-0.0238	-0.0123
2.13	0.0377	-0.1638	-0.0630	0.1007	2.63	-0.0276	-0.0981	-0.0628	0.0353	3.13	-0.0432	-0.0442	-0.0437	0.0005	3.63	-0.0359	-0.0110	-0.0234	-0.0124
2.14	0.0357	-0.1625	-0.0634	0.0991	2.64	-0.0283	-0.0969	-0.0626	0.0343	3.14	-0.0432	-0.0434	-0.0433	0.0001	3.64	-0.0356	-0.0105	-0.0231	-0.0125
2.15	0.0337	-0.1612	-0.0638	0.0975	2.65	-0.0289	-0.0956	-0.0623	0.0333	3.15	-0.0432	-0.0425	-0.0429	-0.0004	3.65	-0.0354	-0.0101	-0.0227	-0.0127
2.16	0.0318	-0.1600	-0.0641	0.0959	2.66	-0.0296	-0.0944	-0.0620	0.0324	3.16	-0.0432	-0.0416	-0.0424	-0.0008	3.66	-0.0351	-0.0096	-0.0224	-0.0128
2.17	0.0299	-0.1587	-0.0644	0.0943	2.67	-0.0302	-0.0932	-0.0617	0.0315	3.17	-0.0432	-0.0408	-0.0420	-0.0012	3.67	-0.0348	-0.0092	-0.0220	-0.0128
2.18	0.0280	-0.1574	-0.0647	0.0927	2.68	-0.0309	-0.0919	-0.0614	0.0305	3.18	-0.0432	-0.0400	-0.0416	-0.0016	3.68	-0.0346	-0.0087	-0.0217	-0.0129
2.19	0.0262	-0.1561	-0.0650	0.0911	2.69	-0.0315	-0.0907	-0.0611	0.0296	3.19	-0.0431	-0.0391	-0.0411	-0.0020	3.69	-0.0343	-0.0083	-0.0213	-0.0130
2.20	0.0244	-0.1548	-0.0652	0.0896	2.70	-0.0320	-0.0895	-0.0608	0.0287	3.20	-0.0431	-0.0383	-0.0407	-0.0024	3.70	-0.0341	-0.0079	-0.0210	-0.0131
2.21	0.0226	-0.1535	-0.0654	0.0880	2.71	-0.0326	-0.0883	-0.0604	0.0278	3.21	-0.0430	-0.0375	-0.0403	-0.0028	3.71	-0.0338	-0.0075	-0.0206	-0.0132
2.22	0.0209	-0.1522	-0.0657	0.0865	2.72	-0.0331	-0.0871	-0.0601	0.0270	3.22	-0.0430	-0.0367	-0.0398	-0.0031	3.72	-0.0335	-0.0070	-0.0203	-0.0132
2.23	0.0191	-0.1509	-0.0659	0.0850	2.73	-0.0337	-0.0859	-0.0598	0.0261	3.23	-0.0429	-0.0359	-0.0394	-0.0035	3.73	-0.0333	-0.0066	-0.0200	-0.0133
2.24	0.0175	-0.1495	-0.0660	0.0835	2.74	-0.0342	-0.0847	-0.0594	0.0252	3.24	-0.0428	-0.0351	-0.0390	-0.0038	3.74	-0.0330	-0.0062	-0.0196	-0.0134
2.25	0.0158	-0.1482	-0.0662	0.0820	2.75	-0.0347	-0.0835	-0.0591	0.0244	3.25	-0.0427	-0.0344	-0.0385	-0.0042	3.75	-0.0327	-0.0059	-0.0193	-0.0134
2.26	0.0142	-0.1469	-0.0664	0.0805	2.76	-0.0352	-0.0823	-0.0587	0.0236	3.26	-0.0427	-0.0336	-0.0381	-0.0045	3.76	-0.0325	-0.0055	-0.0190	-0.0135
2.27	0.0126	-0.1456	-0.0665	0.0791	2.77	-0.0356	-0.0811	-0.0584	0.0228	3.27	-0.0426	-0.0328	-0.0377	-0.0049	3.77	-0.0322	-0.0051	-0.0186	-0.0136
2.28	0.0110	-0.1442	-0.0666	0.0776	2.78	-0.0361	-0.0800	-0.0580	0.0219	3.28	-0.0425	-0.0321	-0.0373	-0.0052	3.78	-0.0319	-0.0047	-0.0183	-0.0136
2.29	0.0095	-0.1429	-0.0667	0.0762	2.79	-0.0365	-0.0788	-0.0577	0.0212	3.29	-0.0424	-0.0313	-0.0368	-0.0055	3.79	-0.0317	-0.0044	-0.0180	-0.0136
2.30	0.0080	-0.1416	-0.0668	0.0748	2.80	-0.0369	-0.0777	-0.0573	0.0204	3.30	-0.0422	-0.0306	-0.0364	-0.0058	3.80	-0.0314	-0.0040	-0.0177	-0.0137
2.31	0.0065	-0.1402	-0.0669	0.0734	2.81	-0.0373	-0.0765	-0.0569	0.0196	3.31	-0.0421	-0.0299	-0.0360	-0.0061	3.81	-0.0311	-0.0037	-0.0174	-0.0137
2.32	0.0050	-0.1389	-0.0669	0.0720	2.82	-0.0377	-0.0754	-0.0566	0.0188	3.32	-0.0420	-0.0292	-0.0356	-0.0064	3.82	-0.0308	-0.0033	-0.0171	-0.0138
2.33	0.0036	-0.1375	-0.0670	0.0706	2.83	-0.0381	-0.0743	-0.0562	0.0181	3.33	-0.0419	-0.0285	-0.0352	-0.0067	3.83	-0.0306	-0.0030	-0.0168	-0.0138
2.34	0.0022	-0.1362	-0.0670	0.0692	2.84	-0.0384	-0.0731	-0.0558	0.0174	3.34	-0.0417	-0.0278	-0.0347	-0.0070	3.84	-0.0303	-0.0026	-0.0165	-0.0138
2.35	0.0008	-0.1349	-0.0670	0.0679	2.85	-0.0388	-0.0720	-0.0554	0.0166	3.35	-0.0416	-0.0271	-0.0343	-0.0073	3.85	-0.0300	-0.0023	-0.0162	-0.0138
2.36	-0.0005	-0.1335	-0.0670	0.0665	2.86	-0.0391	-0.0709	-0.0550	0.0159	3.36	-0.0414	-0.0264	-0.0339	-0.0075	3.86	-0.0297	-0.0020	-0.0159	-0.0139
2.37	-0.0018	-0.1322	-0.0670	0.0652	2.87	-0.0394	-0.0698	-0.0546	0.0152	3.37	-0.0413	-0.0257	-0.0335	-0.0078	3.87	-0.0295	-0.0017	-0.0156	-0.0139
2.38	-0.0031	-0.1308	-0.0670	0.0639	2.88	-0.0397	-0.0687	-0.0542	0.0145	3.38	-0.0411	-0.0250	-0.0331	-0.0080	3.88	-0.0292	-0.0014	-0.0153	-0.0139
2.39	-0.0044	-0.1295	-0.0669	0.0626	2.89	-0.0400	-0.0677	-0.0538	0.0138	3.39	-0.0410	-0.0244	-0.0327	-0.0083	3.89	-0.0289	-0.0011	-0.0150	-0.0139
2.40	-0.0056	-0.1282	-0.0669	0.0613	2.90	-0.0403	-0.0666	-0.0534	0.0132	3.40	-0.0408	-0.0237	-0.0323	-0.0085	3.90	-0.0286	-0.0008	-0.0147	-0.0139
2.41	-0.0068	-0.1268	-0.0668	0.0600	2.91	-0.0405	-0.0655	-0.0530	0.0125	3.41	-0.0406	-0.0231	-0.0319	-0.0088	3.91	-0.0283	-0.0005	-0.0144	-0.0139
2.42	-0.0080	-0.1255	-0.0668	0.0587	2.92	-0.0408	-0.0645	-0.0526	0.0119	3.42	-0.0404	-0.0225	-0.0315	-0.0090	3.92	-0.0281	-0.0002	-0.0141	-0.0139
2.43	-0.0092	-0.1242	-0.0667	0.0575	2.93	-0.0410	-0.0634	-0.0522	0.0112	3.43	-0.0403	-0.0218	-0.0310	-0.0092	3.93	-0.0278	0.0001	-0.0138	-0.0139
2.44	-0.0103	-0.1228	-0.0666	0.0563	2.94	-0.0412	-0.0624	-0.0518	0.0106	3.44	-0.0401	-0.0212	-0.0306	-0.0094	3.94	-0.0275	0.0004	-0.0136	-0.0139
2.45	-0.0114	-0.1215	-0.0665	0.0550	2.95	-0.0414	-0.0613	-0.0514	0.0100	3.45	-0.0399	-0.0206	-0.0302	-0.0096	3.95	-0.0272	0.0006	-0.0133	-0.0139
2.46	-0.0125	-0.1202	-0.0663	0.0538	2.96	-0.0416	-0.0603	-0.0510	0.0094	3.46	-0.0397	-0.0200	-0.0298	-0.0098	3.96	-0.0269	0.0009	-0.0130	-0.0139
2.47	-0.0136	-0.1188	-0.0662	0.0526	2.97	-0.0418	-0.0593	-0.0505	0.0088	3.47	-0.0395	-0.0194	-0.0295	-0.0100	3.97	-0.0267	0.0011	-0.0128	-0.0139
2.48	-0.0146	-0.1175	-0.0661	0.0514	2.98	-0.0420	-0.0583	-0.0501	0.0082	3.48	-0.0393	-0.0188	-0.0291	-0.0102	3.98	-0.0264	0.0014	-0.0125	-0.0139
2.49	-0.0156	-0.1162	-0.0659	0.0503	2.99	-0.0421	-0.0573	-0.0497	0.0076	3.49	-0.0391	-0.0183	-0.0287	-0.0104	3.99	-0.0261	0.0016	-0.0122	-0.0139
2.50	-0.0166	-0.1149	-0.0658	0.0491	3.00	-0.0423	-0.0563	-0.0493	0.0070	3.50	-0.0389	-0.0177	-0.0283	-0.0106	4.00	-0.0258	0.0019	-0.0120	-0.0139

付録A 2 軸対称荷重を受ける円板

付録A 2 軸対称荷重を受ける円板

位置変数が次のように変わる以外は付録A1と同様の記号を用いる。

A 1 (円筒) ~ 位置変数 x ~ 規準点からの軸方向距離

A 2 (円板) ~ 位置変数 r ~ 円板中心からの半径

A 2.1 軸対称シェル理論による円板の熱弾性

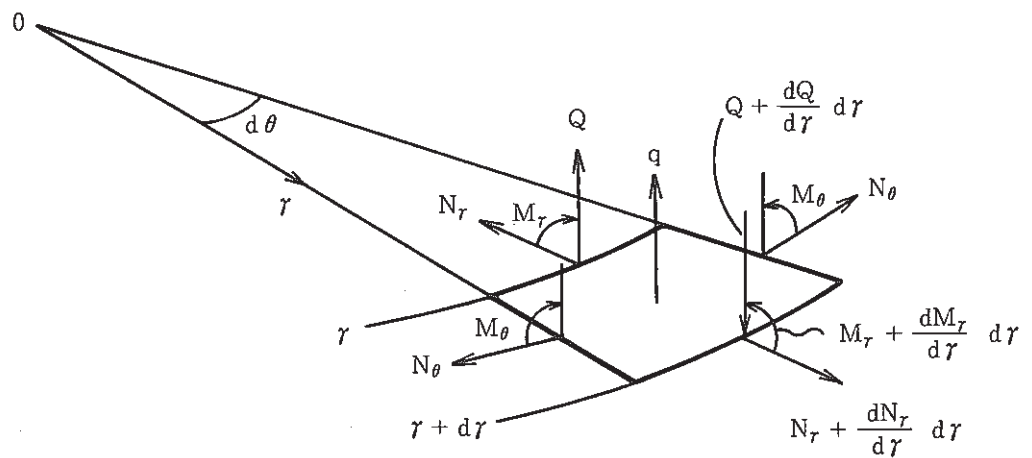


Fig. A 2.1 (a) Circular plate under axisymmetric loadings

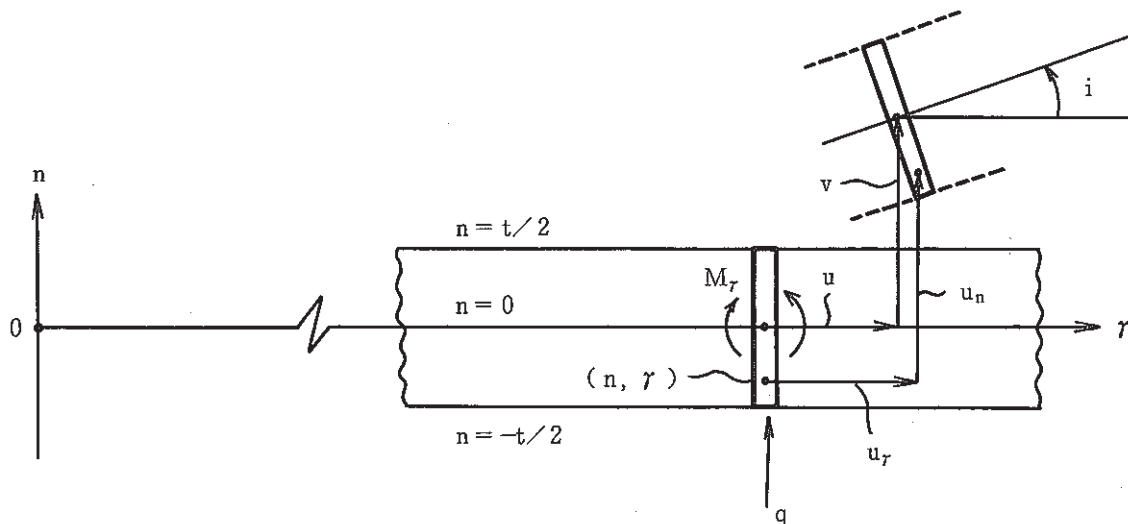


Fig. A 2.1 (b) Coordinates and displacements of circular plate

板厚 t の円板に軸対称荷重が作用するものとする。外力として円板に垂直な圧力 $q(r)$ を考えると、Fig.A 2.1 (a) に示す要素のつり合いは

$$\left[\begin{array}{l} \left(N_r + \frac{dN_r}{dr} \cdot dr \right) (r+dr) \cdot d\theta - N_r \cdot r \cdot d\theta - N_\theta \cdot dr \cdot d\theta = 0 \\ \left(Q + \frac{dQ}{dr} \cdot dr \right) (r+dr) \cdot d\theta - Q \cdot r \cdot d\theta - q \cdot dr \cdot r \cdot d\theta = 0 \\ \left(M_r + \frac{dM_r}{dr} \cdot dr \right) (r+dr) \cdot d\theta - M_r \cdot r \cdot d\theta - M_\theta \cdot dr \cdot d\theta - Q \cdot r \cdot d\theta \cdot dr = 0 \end{array} \right] \quad (a)$$

で与えられる。高次の微小項を無視して整理すると

$$\left[\begin{array}{l} \frac{d}{dr}(r \cdot N_r) - N_\theta = 0 \\ \frac{d}{dr}(r \cdot Q) - r \cdot q(r) = 0 \\ \frac{d}{dr}(r \cdot M_r) - M_\theta - r \cdot Q = 0 \end{array} \right] \quad (b)$$

となる。Fig.A 2.1 (b) に示すように板厚方向に n 軸をとり板厚内任意位置を (n, r) で表わす。任意位置の半径方向変位を $u_r(n, r)$ 、 n 方向変位を $u_n(n, r)$ 、規準温度からの相対温度を $T(n, r)$ とする。

半径方向および円周方向の応力とひずみに対し、板厚方向の応力とひずみが相対的に無視できる程度に小さいものとする(平面応力場)、Hookeの法則は次のようになる。

$$\left[\begin{array}{l} \epsilon_n = \frac{\partial u_n}{\partial n} = 0 \\ \epsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} - \alpha T = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu \sigma_\theta) \\ \epsilon_\theta = \frac{u_r}{r} - \alpha T = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu \sigma_r) \end{array} \right] \quad (c)$$

(C) の第1式は n 方向変位 u_n が n によらない事を示し、板厚中央面(シェル面)の n 方向変位を $v(r)$ として、

$$u_n(n, r) = v(r) \quad (d)$$

となる。(C) の残りの式を応力表示式に変形すると

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \frac{\partial u_r}{\partial r} + \nu \cdot \frac{u_r}{r} - (1+\nu) \alpha T \right\} \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \frac{u_r}{r} + \nu \cdot \frac{\partial u_r}{\partial r} - (1+\nu) \alpha T \right\} \end{array} \right] \quad (e)$$

任意位置の半径方向変位 $u_r(n, r)$ が, シェル面の半径方向変位 $u(r)$ と r 軸に対する勾配 $i = dv/dr$ を用いて

$$u_r(n, r) = u(r) - n \cdot i = u(r) - n \cdot \frac{dv}{dr} \quad (f)$$

と表わされるものとする。(f) 式を (e) 式に代入すると

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \frac{du}{dr} + \nu \cdot \frac{u}{r} - n \left(\frac{di}{dr} + \nu \cdot \frac{i}{r} \right) - (1+\nu) \alpha T \right\} \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \frac{u}{r} + \nu \cdot \frac{du}{dr} - n \left(\frac{i}{r} + \nu \cdot \frac{di}{dr} \right) - (1+\nu) \alpha T \right\} \end{array} \right] \quad (g)$$

となる。(g) 式を板厚方向に積分すると次式を得る。

$$N_r = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_r \cdot dn = \frac{Et}{1-\nu^2} \left\{ \frac{du}{dr} + \nu \cdot \frac{u}{r} - (1+\nu) \alpha T_M(r) \right\} \quad (A2.1)$$

$$N_\theta = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_\theta \cdot dn = \frac{Et}{1-\nu^2} \left\{ \frac{u}{r} + \nu \cdot \frac{du}{dr} - (1+\nu) \alpha T_M(r) \right\} \quad (A2.2)$$

ここに

$$T_M(r) = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} T(n, r) dn \quad (h)$$

は板厚平均温度である。(g) 式に $(-n)$ を乗じて積分すると次式を得る。

$$M_r = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_r (-n) dn = D \left\{ \frac{di}{dr} + \nu \cdot \frac{i}{r} - \frac{(1+\nu) \alpha T_B(r)}{t} \right\} \quad (A2.3)$$

$$M_\theta = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_\theta (-n) dn = D \left\{ \frac{i}{r} + \nu \cdot \frac{di}{dr} - \frac{(1+\nu) \alpha T_B(r)}{t} \right\} \quad (A2.4)$$

ここに

$$T_B(r) = \frac{12}{t^2} \int_{-t/2}^{t/2} T(n, r) (-n) dn \quad (i)$$

は等価線形内外面温度差である。(A2.1), (A2.2) 式を (b) の第1式に代入すると

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} - (1+\nu) \alpha \cdot \frac{dT_M}{dr} = 0 \text{ より}$$

$$\frac{d}{dr} \left\{ \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (ru) \right\} = (1+\nu) \alpha \cdot \frac{dT_M}{dr} \quad (A2.5)$$

を得る。(A2.5) 式は容易に積分でき

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (ru) = 2C_1 + (1+\nu) \alpha T_M(r)$$

$$ru = C_1 r^2 + C_2 + (1+\nu) \alpha \int^r r T_M(r) dr$$

$$u = C_1 r + C_2 \cdot \frac{1}{r} + \frac{(1+\nu) \alpha}{r} \int^r r T_M(r) dr \quad (A2.6)$$

を得る。(b)の第2式は容易に積分でき

$$rQ = C_3 + \int^r r \cdot q(r) \cdot dr \text{ より}$$

$$Q = C_3 \cdot \frac{1}{r} + \frac{1}{r} \int^r r \cdot q(r) \cdot dr \quad (\text{A2.8})$$

を得る。(A2.3), (A2.4)式を(b)の第3式に代入すると

$$\frac{d^2 i}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{di}{dr} - \frac{i}{r^2} - \frac{(1+\nu)\alpha}{t} \frac{dT_B}{dr} - \frac{Q}{D} = 0 \text{ より}$$

$$\frac{d}{dr} \left\{ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \cdot i) \right\} = \frac{(1+\nu)\alpha}{t} \frac{dT_B}{dr} + \frac{Q}{D} \quad (\text{A2.9})$$

を得る。(A2.9)式は容易に積分でき

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \cdot i) = 2C_4 + \frac{(1+\nu)\alpha}{t} T_B(r) + \frac{1}{D} \int^r Q \cdot dr$$

$$r \cdot i = C_4 r^2 + C_5 + \frac{(1+\nu)\alpha}{t} \int^r r \cdot T_B(r) dr + \frac{1}{D} \int^r [r \int^r Q \cdot dr] dr$$

より

$$i = C_4 \cdot r + C_5 \cdot \frac{1}{r} + \frac{(1+\nu)\alpha}{t \cdot r} \int^r r \cdot T_B(r) dr + \frac{1}{D \cdot r} \int^r [r \int^r Q \cdot dr] dr \quad (\text{A2.10})$$

を得る。(A2.10)式を積分すれば

$$v = C_6 + \int^r i \cdot dr = \frac{C_4}{2} r^2 + C_5 \cdot \ln r + C_6 + (T_B \text{ の項}) + (Q \text{ の項}) \quad (\text{j})$$

が得られる。 $C_1 \sim C_6$ は積分定数であり境界条件から決定される。以上の式で積分範囲の下限は明示していないが中実円板では \int_0^r , 内半径 r_1 の中実円板では $\int_{r_1}^r$ とする。

膜応力 $\sigma_{r,M}$, $\sigma_{\theta,M}$ および曲げ応力 $\sigma_{r,B}$, $\sigma_{\theta,B}$ は次式から求める。

$$\sigma_{r,M} = N_r/t, \quad \sigma_{\theta,M} = N_\theta/t \quad (\text{A2.11})$$

$$\sigma_{r,B} = 6M_r/t^2, \quad \sigma_{\theta,B} = 6M_\theta/t^2 \quad (\text{A2.12})$$

中実あるいは中空の円板に, 等分布荷重, 中心に集中荷重, 同心円上に輪形荷重を受ける場合の, 種々の境界条件に応じた18ケースの解がRef 3, Ref 4等に与えられている。ここではA2.2~A2.4節で6ケースの解を求めて紹介する。他ケースについては必要に応じて上記文献を参照されたい。

A2.2 中実円板に等分布荷重が作用する場合

等分布荷重 q が作用する時の解を求める。均一温度とする。

(A 2.8) 式より

$$Q = C_3 \frac{1}{r} + \frac{1}{r} \int^r r \cdot q \cdot dr = C_3 \frac{1}{r} + \frac{q \cdot r}{2}$$

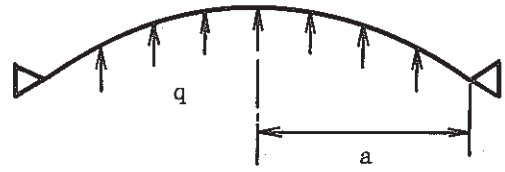
$$Q|_{r=0} = 0 \text{ より } C_3 = 0$$

(A 2.10) 式に Q を代入して

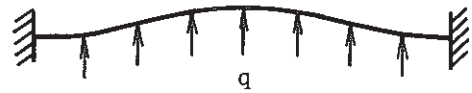
$$i = C_4 r + C_5 \frac{1}{r} + \frac{qr^3}{16D}$$

対称性より $i|_{r=0} = 0$ より $C_5 = 0$ となり

$$i = C_4 r + \frac{qr^3}{16D} \quad (a)$$



(a) simply supported edge



(b) clamped edge

Fig. A 2.2 Circular plate under uniform load

を得る。

(1) 外周単純支持

(a) 式を (A 2.3) 式に代入すると

$$M_r = D \left(\frac{di}{dr} + \nu \frac{i}{r} \right) = D \left\{ (1 + \nu) C_4 + (3 + \nu) \frac{qr^2}{16D} \right\}$$

$$M_r|_{r=a} = 0 \text{ より } C_4 = - \frac{3 + \nu}{1 + \nu} \cdot \frac{qa^2}{16D}$$

$$i = \frac{-qa^2 r}{16D} \left(\frac{3 + \nu}{1 + \nu} - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad (A2.13)$$

$$M_r = \frac{-qa^2}{16} (3 + \nu) \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right), \quad \sigma_{r,B} = \frac{6M_r}{t^2} = \frac{-3qa^2}{8t^2} (3 + \nu) \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad (A2.14)$$

を得る。(A 2.13) 式を (A 2.4) 式に代入して

$$M_\theta = \frac{-qa^2}{16} \left\{ (3 + \nu) - (1 + 3\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\},$$

$$\sigma_{\theta,B} = \frac{6M_\theta}{t^2} = \frac{-3qa^2}{8t^2} \left\{ (3 + \nu) - (1 + 3\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\} \quad (A2.15)$$

を得る。(A 2.13) 式を積分して

$$v = C_6 + \int^r i dr = C_6 + \frac{q}{64D} \left(-\frac{3 + \nu}{1 + \nu} 2a^2 r^2 + r^4 \right)$$

$$v|_{r=a} = C_6 - \frac{qa^4}{64D} \frac{5 + \nu}{1 + \nu} = 0 \text{ より } C_6 = \frac{qa^4}{64D} \frac{5 + \nu}{1 + \nu}$$

$$v = \frac{qa^4}{64D} \left\{ \frac{5 + \nu}{1 + \nu} - \frac{6 + 2\nu}{1 + \nu} \frac{r^2}{a^2} + \frac{r^4}{a^4} \right\} = \frac{qa^4}{64D} \left(\frac{5 + \nu}{1 + \nu} - \frac{r^2}{a^2} \right) \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad (A2.16)$$

を得る。中央の最大たわみは

$$v_{\max} = v|_{r=0} = \frac{qa^4}{64D} \frac{5+\nu}{1+\nu} = 0.6956 \frac{qa^4}{Et^3} \quad (\nu = 0.3 \text{ の時}) \quad (b)$$

となる。

(2) 外周固定

$$i|_{r=a} = C_4 \cdot a + \frac{qa^3}{16D} = 0 \text{ より } C_4 = -\frac{qa^2}{16D}$$

$$i = \frac{q}{16D} (r^3 - a^2 r) = \frac{-qa^2 r}{16D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) \quad (A2.17)$$

(A2.17) 式を (A2.3) 式, (A2.4) 式に代入して

$$M_r = \frac{-qa^2}{16} \left\{ (1+\nu) - (3+\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\},$$

$$\sigma_{r, \theta} = \frac{6M_r}{t^2} = \frac{-3qa^2}{8t^2} \left\{ (1+\nu) - (3+\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\} \quad (A2.18)$$

$$M_\theta = \frac{-qa^2}{16} \left\{ (1+\nu) - (1+3\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\},$$

$$\sigma_{\theta, \theta} = \frac{6M_\theta}{t^2} = \frac{-3qa^2}{8t^2} \left\{ (1+\nu) - (1+3\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\} \quad (A2.19)$$

を得る。(A2.17) 式を積分して

$$v = C_6 + \int^r i dr = C_6 + \frac{q}{64D} (r^4 - 2a^2 r^2)$$

$$v|_{r=a} = C_6 - \frac{qa^4}{64D} = 0 \text{ より } C_6 = \frac{qa^4}{64D}$$

$$v = \frac{q}{64D} (a^4 + r^4 - 2a^2 r^2) = \frac{qa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad (A2.20)$$

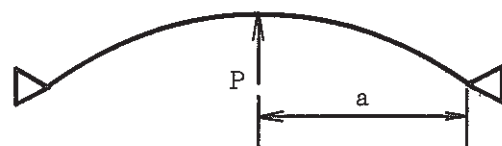
中央の最大たわみは

$$v_{\max} = v|_{r=0} = \frac{qa^4}{64D} = 0.1706 \frac{qa^4}{Et^3} \quad (\nu = 0.3 \text{ の時}) \quad (c)$$

となり, 単純支持の約 1/4 となる ($\nu = 0.3$ の時)

A 2.3 中実円板の中央に集中荷重が作用する場合

分布荷重 $q(r) = 0$ だから (A2.8) 式より
 $Q = C_3 \cdot \frac{1}{r}$ となる。円周長 $2\pi r$ で荷重 P
 を負担するから



(a) simply supported edge

$$Q = \frac{P}{2\pi r} \quad (a)$$

となる ($C_3 = 1/2\pi$)。

$$\int^r Q dr = \frac{P}{2\pi} \ell_{nr}$$

$$\begin{aligned} \int^r [r \int^r Q dr] dr &= \frac{P}{2\pi} \int^r r \ell_{nr} dr \\ &= \frac{P}{2\pi} \left(\frac{r^2}{2} \ell_{nr} - \frac{r^2}{4} \right) \quad (b) \end{aligned}$$

(b) 式を (A 2.10) 式に代入すると

$$i = C_4 r + C_5 \frac{1}{r} + \frac{P}{8\pi D} (2r \ell_{nr} - r)$$

となり $i|_{r=0} = 0$ より $C_5 = 0$ となり

$$i = C_4 r + \frac{P}{8\pi D} (2r \ell_{nr} - r) \quad (c)$$

を得る。

(1) 外周単純支持

(C) 式を (A 2.3) 式に代入して

$$M_r = D \left(\frac{di}{dr} + \nu \frac{i}{r} \right) = D \left[(1+\nu) C_4 + \frac{P}{8\pi D} \{ 2(1+\nu) \ell_{nr} + (1-\nu) \} \right]$$

$$M_r|_{r=a} = D \left[(1+\nu) C_4 + \frac{P}{8\pi D} \{ 2(1+\nu) \ell_{na} + (1-\nu) \} \right] = 0 \text{ より}$$

$$C_4 = -\frac{P}{8\pi D (1+\nu)} \{ 2(1+\nu) \ell_{na} + (1-\nu) \} \text{ となり}$$

$$i = \frac{Pr}{4\pi D} \left(\ell_n \frac{r}{a} - \frac{1}{1+\nu} \right) \quad (A2.21)$$

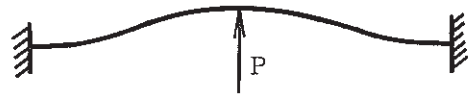
$$M_r = \frac{P}{4\pi} (1+\nu) \ell_n \frac{r}{a}, \quad \sigma_r = \frac{6M_r}{t^2} = \frac{3P}{2\pi t^2} (1+\nu) \ell_n \frac{r}{a} \quad (A2.22)$$

を得る。(A 2.21) 式を (A 2.4) 式に代入して

$$M_\theta = \frac{P}{4\pi} \left\{ (1+\nu) \ell_n \frac{r}{a} - (1-\nu) \right\}, \quad \sigma_{\theta, B} = \frac{6M_\theta}{t^2} = \frac{3P}{2\pi t^2} \left\{ (1+\nu) \ell_n \frac{r}{a} - (1-\nu) \right\}$$

を得る。(A 2.21) 式を積分し, $v|_{r=a} = 0$ を用いて

$$v = \frac{P}{16\pi D} \left(2r^2 \ell_n \frac{r}{a} - r^2 - \frac{2r^2}{1+\nu} + \frac{3+\nu}{1+\nu} a^2 \right) \quad (A2.23)$$



(b) clamped edge

Fig. A 2.3 Circular plate under concentrated load

$$= \frac{Pa^2}{16\pi D} \left\{ \frac{3+\nu}{1+\nu} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) + 2 \frac{r^2}{a^2} \ell_n \frac{r}{a} \right\} \quad (A2.24)$$

を得る。中央の最大たわみは

$$v_{\max} = v|_{r=0} = \frac{Pa^2}{16\pi D} \left(\frac{3+\nu}{1+\nu} \right) = 0.5515 \frac{Pa^2}{Et^3} \quad (\nu = 0.3 \text{ の時}) \quad (d)$$

となる。

(2) 外周固定

$$i|_{r=a} = C_4 a + \frac{P}{8\pi D} (2a \ell_n a - a) = 0 \text{ より } C_4 = -\frac{P}{8\pi D} (2 \ell_n a - 1)$$

$$i = \frac{Pr}{4\pi D} \ell_n \frac{r}{a} \quad (A2.25)$$

を得る。(A 2.25) 式を (A 2.3) 式, (A 2.4) 式に代入して

$$M_r = \frac{P}{4\pi} \left\{ (1+\nu) \ell_n \frac{r}{a} + 1 \right\}, \quad \sigma_{r,b} = \frac{6M_r}{t^2} = \frac{3P}{2\pi t^2} \left\{ (1+\nu) \ell_n \frac{r}{a} + 1 \right\} \quad (A2.26)$$

$$M_\theta = \frac{P}{4\pi} \left\{ (1+\nu) \ell_n \frac{r}{a} + \nu \right\}, \quad \sigma_{\theta,b} = \frac{6M_\theta}{t^2} = \frac{3P}{2\pi t^2} \left\{ (1+\nu) \ell_n \frac{r}{a} + \nu \right\} \quad (A2.27)$$

を得る。(A 2.25) 式を積分し, $v|_{r=a} = 0$ を用いて

$$v = \frac{Pa^2}{16\pi D} \left\{ (2 \ell_n \frac{r}{a} - 1) \frac{r^2}{a^2} + 1 \right\} \quad (A2.28)$$

を得る。中央の最大たわみは

$$v_{\max} = v|_{r=0} = \frac{Pa^2}{16\pi D} = 0.2172 \frac{Pa^2}{Et^3} \quad (\nu = 0.3 \text{ の時}) \quad (e)$$

となる。

A 2.4 中空円板の内周に円荷重が作用する場合

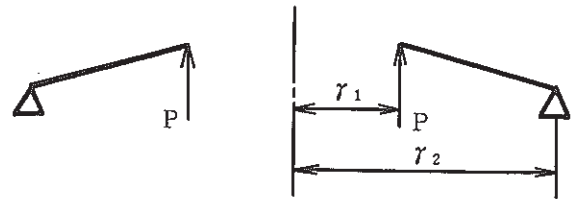
半径 r_2 の外周が支持され, 半径 r_1 の内周に均等に分布した総荷重 P が作用する場合とする。

$$Q = \frac{P}{2\pi r}$$

$$\int_{r_1}^r Q dr = \frac{P}{2\pi} \ell_n \frac{r}{r_1}$$

$$\int_{r_1}^r [r \int_{r_1}^r Q dr] dr = \frac{P}{2\pi} \int_{r_1}^r r \ell_n \frac{r}{r_1} dr$$

$$= \frac{P}{8\pi} \left(2r^2 \ell_n \frac{r}{r_1} - r^2 + r_1^2 \right)$$



(a) simply supported edge



(b) clamped edge

Fig. A 2.4 Circular plate under edge load

を (A 2.10) 式に代入すると

$$i = C_4 r + C_5 \frac{1}{r} + \frac{P}{8\pi D} \left(2r \ell_n \frac{r}{r_1} - r + \frac{r_1^2}{r} \right)$$

となる。()内の第2項を $C_4 r$ の項に含め、()内の第3項を $C_5 \frac{1}{r}$ の項に含めれば上式は

$$i = C_4 r + C_5 \frac{1}{r} + \frac{P}{4\pi D} r \ell_n \frac{r}{r_1} \quad (a)$$

としてよい。

(1) 外周単純支持

(a) 式を (A 2.3) 式に代入して

$$M_r = D \left\{ C_4 (1 + \nu) - C_5 (1 - \nu) \frac{1}{r^2} + \frac{P(1 + \nu)}{4\pi D} \ell_n \frac{r}{r_1} + \frac{P}{4\pi D} \right\} \quad (b)$$

$$\left[\begin{array}{l} M_r|_{r=r_1} = D \left\{ C_4 (1 + \nu) - C_5 (1 - \nu) \frac{1}{r_1^2} + \frac{P}{4\pi D} \right\} = 0 \\ M_r|_{r=r_2} = D \left\{ C_4 (1 + \nu) - C_5 (1 - \nu) \frac{1}{r_2^2} + \frac{P(1 + \nu)}{4\pi D} \ell_n \frac{r_2}{r_1} + \frac{P}{4\pi D} \right\} = 0 \end{array} \right]$$

を解くと

$$\left[\begin{array}{l} C_4 = -\frac{P}{4\pi D} \left(\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ell_n \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{1 + \nu} \right) \\ C_5 = -\frac{P(1 + \nu)}{4\pi D(1 - \nu)} \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ell_n \frac{r_2}{r_1} \end{array} \right] \quad (c)$$

を得る。(c) 式を (a), (b) 式に代入して

$$i = -\frac{P}{4\pi D} \left\{ \left(\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ell_n \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{1 + \nu} \right) r + \left(\frac{1 + \nu}{1 - \nu} \cdot \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ell_n \frac{r_2}{r_1} \right) \frac{1}{r} - r \ell_n \frac{r}{r_1} \right\} \quad (A2.21)$$

$$M_r = \frac{P(1 + \nu)}{4\pi} \left\{ -\left(\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ell_n \frac{r_2}{r_1} \right) \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) + \ell_n \frac{r}{r_1} \right\} \quad (A2.22)$$

を得る。(A 2.21) 式を (A 2.4) 式に代入して

$$M_\theta = \frac{P(1 + \nu)}{4\pi} \left\{ -\left(\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ell_n \frac{r_2}{r_1} \right) \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) + \ell_n \frac{r}{r_1} - \frac{1 - \nu}{1 + \nu} \right\} \quad (A2.23)$$

を得る。

(2) 外周固定

$$\left[\begin{array}{l} M_r|_{r=r_1} = D \left\{ C_4 (1 + \nu) - C_5 (1 - \nu) \frac{1}{r_1^2} + \frac{P}{4\pi D} \right\} = 0 \\ i|_{r=r_2} = C_4 r_2 + C_5 \frac{1}{r_2} + \frac{P}{4\pi D} r_2 \ell_n \frac{r_2}{r_1} = 0 \end{array} \right]$$

を解くと

$$\left[\begin{array}{l} C_4 = -\frac{P}{4\pi D} \frac{r_1^2 + (1-\nu)r_2^2 \ell_n \frac{r_2}{r_1}}{(1+\nu)r_1^2 + (1-\nu)r_2^2} \\ C_5 = -\frac{P}{4\pi D} \frac{r_1^2 r_2^2 \left\{ -1 + (1+\nu) \ell_n \frac{r_2}{r_1} \right\}}{(1+\nu)r_1^2 + (1-\nu)r_2^2} \end{array} \right] \quad (d)$$

を得る。(d) 式を (a), (b) 式に代入して

$$i = -\frac{P}{4\pi D} \left[\frac{\left\{ r_1^2 + (1-\nu)r_2^2 \ell_n \frac{r_2}{r_1} \right\} r + r_1^2 r_2^2 \left\{ -1 + (1+\nu) \ell_n \frac{r_2}{r_1} \right\} \frac{1}{r}}{(1+\nu)r_1^2 + (1-\nu)r_2^2} - r \ell_n \frac{r}{r_1} \right] \quad (A2.24)$$

$$M_r = \frac{P}{4\pi} \left[\frac{-n^2 \left\{ (1+\nu) + (1-\nu) \frac{r_2^2}{r^2} \right\} - (1-\nu^2) r_2^2 \ell_n \frac{r_2}{r_1} \cdot \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right)}{(1+\nu)r_1^2 + (1-\nu)r_2^2} + (1+\nu) \ell_n \frac{r}{r_1} + 1 \right] \quad (A2.25)$$

を得る。(A2.24) 式を (A2.4) 式に代入して

$$M_\theta = \frac{P}{4\pi} \left[\frac{r_1^2 \left\{ -(1+\nu) + (1-\nu) \frac{r_2^2}{r^2} \right\} - (1-\nu^2) r_2^2 \ell_n \frac{r_2}{r_1} \cdot \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right)}{(1+\nu)r_1^2 + (1-\nu)r_2^2} + (1+\nu) \ell_n \frac{r}{r_1} + \nu \right] \quad (A2.26)$$

を得る。

A 2.5 円板に半径方向荷重が作用する場合

内半径 r_1 、外半径 r_2 の中空円板に、内周の単位長さあたり P_1 、外周の単位長さあたり P_2 の半径方向荷重が作用する場合とする。

(A 2.6) 式より

$$u = C_1 r + C_2 \frac{1}{r} \quad (a)$$

これを (A 2.1) 式に代入すると

$$N_r = \frac{Et}{1-\nu^2} \left\{ \frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} \right\} = \frac{Et}{1-\nu^2} \left\{ (1+\nu) C_1 - (1-\nu) C_2 \frac{1}{r^2} \right\} \quad (b)$$

を得る。

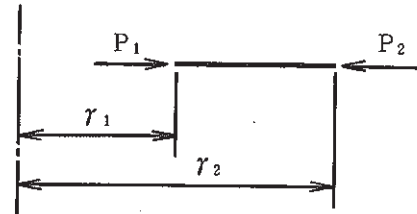


Fig. A 2.5 Circular plate under radial load

$$\left\{ \begin{array}{l} N_r|_{r=r_1} = \frac{Et}{1-\nu^2} \left\{ (1+\nu)C_1 - (1-\nu)C_2 \frac{1}{r_1^2} \right\} = -P_1 \\ N_r|_{r=r_2} = \frac{Et}{1-\nu^2} \left\{ (1+\nu)C_1 - (1-\nu)C_2 \frac{1}{r_2^2} \right\} = -P_2 \end{array} \right.$$

と解くと

$$C_1 = \frac{(1-\nu)(r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2)}{Et(r_2^2 - r_1^2)}, \quad C_2 = \frac{(1+\nu)r_1^2 r_2^2 (P_1 - P_2)}{Et(r_2^2 - r_1^2)}$$

を得る。これを (a), (b) 式に代入して

$$u = \frac{1}{Et(r_2^2 - r_1^2)} \left\{ (1-\nu)(r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2)r + (1+\nu)r_1^2 r_2^2 (P_1 - P_2) \frac{1}{r} \right\} \quad (A2.27)$$

$$N_r = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left\{ (r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2) - r_1^2 r_2^2 (P_1 - P_2) \cdot \frac{1}{r^2} \right\} \quad (A2.28)$$

(A2.27) 式を (A2.2) 式に代入して

$$N_\theta = \frac{Et}{1-\nu^2} \left(\frac{u}{r} + \nu \cdot \frac{du}{dr} \right) = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left\{ (r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2) + r_1^2 r_2^2 (P_1 - P_2) \cdot \frac{1}{r^2} \right\}$$

を得る。膜応力は

$$(A2.29)$$

$$\sigma_{r,M} = \frac{N_r}{t}, \quad \sigma_{\theta,M} = \frac{N_\theta}{t}$$

から求めればよい。

$P_1 = P_2 = P$ の場合は

$$u = \frac{-(1-\nu)Pr}{Et}, \quad N_r = N_\theta = -P \text{ (一定)} \quad (A2.30)$$

となる。

A2.6 円板にモーメント荷重が作用する場合

内周の単位長さあたり M_1 , 外周の単位長さあたり M_2 の曲げモーメントが作用する場合とする。

$Q = 0$ だから (A2.10) 式より

$$i = C_4 \cdot r + C_5 \cdot \frac{1}{r} \quad (a)$$

これを (A2.3) 式に代入すると

$$M_r = D \left\{ (1+\nu)C_4 - (1-\nu)C_5 \frac{1}{r^2} \right\} \quad (b)$$

を得る。

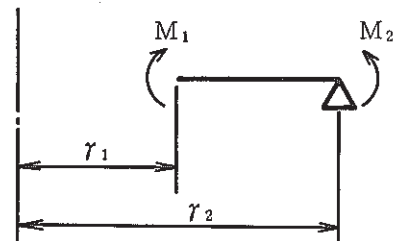


Fig. A 2.6 Circular plate under moment load

$$\left[\begin{array}{l} M_r|_{r=r_1} = D \left\{ (1+\nu) C_4 - (1-\nu) C_5 \cdot \frac{1}{r_1^2} \right\} = M_1 \\ M_r|_{r=r_2} = D \left\{ (1+\nu) C_4 - (1-\nu) C_5 \cdot \frac{1}{r_2^2} \right\} = M_2 \end{array} \right]$$

を解くと

$$C_4 = \frac{(r_2^2 M_2 - r_1^2 M_1)}{(1+\nu) D (r_2^2 - r_1^2)}, \quad C_5 = \frac{r_1^2 r_2^2 (M_2 - M_1)}{(1+\nu) D (r_2^2 - r_1^2)}$$

を得る。これを (a), (b) 式に代入して

$$i = \frac{1}{D (r_2^2 - r_1^2)} \left\{ \frac{r_2^2 M_2 - r_1^2 M_1}{1+\nu} \cdot r + \frac{r_1^2 r_2^2 (M_2 - M_1)}{1-\nu} \frac{1}{r} \right\} \quad (A2.31)$$

$$M_r = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left\{ (r_2^2 M_2 - r_1^2 M_1) - r_1^2 r_2^2 (M_2 - M_1) \frac{1}{r^2} \right\} \quad (A2.32)$$

を得る。(A2.31) 式を (A2.4) 式に代入して

$$M_\theta = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left\{ (r_2^2 M_2 - r_1^2 M_1) + r_1^2 r_2^2 (M_2 - M_1) \frac{1}{r^2} \right\} \quad (A2.33)$$

を得る。曲げ応力は $\sigma_{r,B} = 6 M_r / t^2$, $\sigma_{\theta,B} = 6 M_\theta / t^2$ から求めれば良い。(A2.31) 式を積分し, $v|_{r=r_2} = 0$ を用いて

$$v = \frac{1}{D (r_2^2 - r_1^2)} \left\{ \frac{r_2^2 M_2 - r_1^2 M_1}{2(1+\nu)} (r^2 - r_2^2) + \frac{r_1^2 r_2^2 (M_2 - M_1)}{1-\nu} \ell_n \frac{r}{r_2} \right\} \quad (A2.34)$$

を得る。

$M_1 = M_2 = M$ の場合

$$i = \frac{M \cdot r}{D (1+\nu)}, \quad M_r = M_\theta = M \text{ (一定)}, \quad v = \frac{M}{2D(1+\nu)} (r^2 - r_2^2) \quad (A2.35)$$

となる。

A 2.7 温度分布

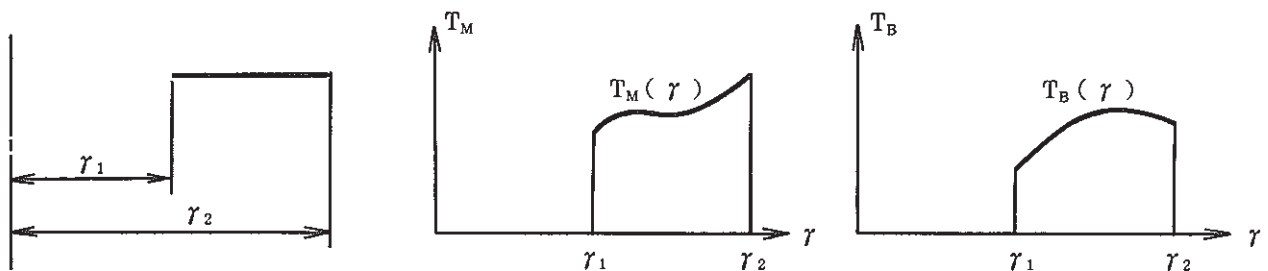


Fig. A 2.7 Circular plate under temperature load

内半径 r_1 , 外半径 r_2 の中空円板に任意の軸対称温度分布が生じた場合とする。半径 r 位置の板厚平均温度を $T_M(r)$ とし等価線形温度差を $T_B(r)$ とする。円板の内外周は自由境界とし、円板の自由熱変形および応力を求める。

(1) $\{T_M(r) \sim u, N_r, N_\theta\}$ 系と $\{T_B(r) \sim i, M_r, M_\theta\}$ 系の相似性

(A2.6) 式より u の一般解は

$$u = C_1 r + C_2 \frac{1}{r} + \frac{(1+\nu)\alpha}{r} \int_{r_1}^r r \cdot T_M(r) dr$$

(A2.1), (A2.2) 式より

$$\frac{1-\nu^2}{Et} N_r = \frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} - (1+\nu)\alpha T_M(r)$$

$$\frac{1-\nu^2}{Et} N_\theta = \frac{u}{r} + \nu \frac{du}{dr} - (1+\nu)\alpha T_M(r)$$

(A2.10) 式より i の一般解は

$$i = C_4 r + C_5 \frac{1}{r} + \frac{(1+\nu)\alpha}{tr} \int_{r_1}^r r \cdot T_B(r) dr$$

(A2.3), (A2.4) 式より

$$\frac{1}{D} M_r = \frac{di}{dr} + \nu \frac{i}{r} - \frac{(1+\nu)\alpha}{t} T_B(r)$$

$$\frac{1}{D} M_\theta = \frac{i}{r} + \nu \frac{di}{dr} - \frac{(1+\nu)\alpha}{t} T_B(r)$$

となり、 $\{T_M(r) \sim u, N_r, N_\theta\}$ 系と $\{T_B(r) \sim i, M_r, M_\theta\}$ 系に相似関係が成り立つことがわかる。対応関係は次のとおりである。

$$\left. \begin{array}{l} T_M(r), \\ \left\{ \begin{array}{l} u, \\ \frac{1-\nu^2}{Et} N_r, \\ \frac{1-\nu^2}{Et} N_\theta, \end{array} \right\} \\ C_1, C_2 \end{array} \right\} \sim \left. \begin{array}{l} T_B(r), \\ \left\{ \begin{array}{l} i, \\ \frac{1}{D} M_r, \\ \frac{1}{D} M_\theta, \end{array} \right\} \\ C_4, C_5 \end{array} \right\}$$

したがって $T_M(r)$ に対する u, N_r, N_θ の解は、上記の対応関係により変換すれば $T_B(r)$ に対する i, M_r, M_θ の解となる。

(2) $T_M(r) \sim u, N_r, N_\theta$

u の一般解を N_r, N_θ の式に代入すると

$$\frac{1-\nu^2}{Et} N_r = (1+\nu)C_1 - (1-\nu)\frac{C_2}{r^2} - \frac{(1-\nu^2)\alpha}{r^2} \int_{r_1}^r r \cdot T_M(r) dr \quad (a)$$

$$\frac{1-\nu^2}{Et} N_\theta = (1+\nu)C_1 + (1-\nu)\frac{C_2}{r^2} + \frac{(1-\nu^2)\alpha}{r^2} \int_{r_1}^r r \cdot T_M(r) dr - (1-\nu^2)\alpha T_M(r)$$

となる。境界条件

(b)

$$\left\{ \begin{array}{l} N_r|_{r=r_1} = 0 \text{ より } (1+\nu)C_1 - (1-\nu)\frac{C_2}{r_1^2} = 0 \\ N_r|_{r=r_2} = 0 \text{ より } (1+\nu)C_1 + (1-\nu)\frac{C_2}{r_2^2} + \frac{(1-\nu^2)\alpha}{r_2^2} \int_{r_1}^{r_2} r \cdot T_M(r) dr = 0 \end{array} \right.$$

と解くと

$$\left[\begin{aligned} C_1 &= \frac{(1-\nu)\alpha}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} r \cdot T_M(r) dr = \frac{(1-\nu)\alpha}{2} \bar{T}_M \\ C_2 &= \frac{(1+\nu)r_1^2\alpha}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} r \cdot T_M(r) dr = \frac{(1+\nu)r_1^2\alpha}{2} \bar{T}_M \end{aligned} \right] \quad (c)$$

を得る。ここに

$$\bar{T}_M = \frac{2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} r \cdot T_M(r) dr \quad (d)$$

は円板全体の平均温度である。C₁, C₂を代入すると

$$u(r) = \frac{(1-\nu)r^2 + (1+\nu)r_1^2}{2r} \alpha \bar{T}_M + \frac{(1+\nu)\alpha}{r} \int_{r_1}^r r \cdot T_M(r) dr \quad (A2.36)$$

$$N_r = Et\alpha \left\{ \frac{r^2 - r_1^2}{2r^2} \bar{T}_M - \frac{1}{r^2} \int_{r_1}^r r \cdot T_M(r) dr \right\} \quad (A2.37)$$

$$N_\theta = Et\alpha \left\{ \frac{r^2 + r_1^2}{2r^2} \bar{T}_M + \frac{1}{r^2} \int_{r_1}^r r \cdot T_M(r) dr - T_M(r) \right\} \quad (A2.38)$$

を得る。内周 ($r = r_1$) では

$$\left[\begin{aligned} u(r_1) &= r_1 \alpha \bar{T}_M, \quad N_r = 0, \quad \sigma_{r,M} = 0 \\ N_\theta &= Et\alpha \{ \bar{T}_M - T_M(r_1) \}, \quad \sigma_{\theta,M} = E\alpha \{ \bar{T}_M - T_M(r_1) \} \end{aligned} \right] \quad (e)$$

となり、外周 ($r = r_2$) では

$$\left[\begin{aligned} u(r_2) &= r_2 \alpha \bar{T}_M, \quad N_r = 0, \quad \sigma_{r,M} = 0 \\ N_\theta &= Et\alpha \{ \bar{T}_M - T_M(r_2) \}, \quad \sigma_{\theta,M} = E\alpha \{ \bar{T}_M - T_M(r_2) \} \end{aligned} \right] \quad (f)$$

となる。

(3) $T_B(r) \sim i, M_r, M_\theta$

相似関係を用いれば

$$i(r) = \frac{(1-\nu)r^2 + (1+\nu)r_1^2}{2rt} \alpha \bar{T}_B + \frac{(1+\nu)\alpha}{rt} \int_{r_1}^r r \cdot T_B(r) dr \quad (A2.39)$$

$$M_r = \frac{Et^2\alpha}{12} \left\{ \frac{r^2 - r_1^2}{2r^2} \bar{T}_B - \frac{1}{r^2} \int_{r_1}^r r \cdot T_B(r) dr \right\} \quad (A2.40)$$

$$M_\theta = \frac{Et^2\alpha}{12} \left\{ \frac{r^2 + r_1^2}{2r^2} \bar{T}_B + \frac{1}{r^2} \int_{r_1}^r r \cdot T_B(r) dr - T_B(r) \right\} \quad (A2.41)$$

を得る。ここに

$$\bar{T}_B = \frac{2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^r r \cdot T_B(r) dr \quad (g)$$

は円板全体の平均等価線形温度差である。

内周 ($r = r_1$) では

$$\left[\begin{array}{l} i(r_1) = r_1 \alpha \bar{T}_B / t, \quad M_r = 0, \quad \sigma_{r,B} = 0 \\ M_\theta = \frac{Et^2 \alpha}{12} \{ \bar{T}_B - T_B(r_1) \}, \quad \sigma_{\theta,B} = \frac{E\alpha}{2} \{ \bar{T}_B - T_B(r_1) \} \end{array} \right] \quad (h)$$

となり, 外周 ($r = r_2$) では

$$\left[\begin{array}{l} i(r_2) = r_2 \alpha \bar{T}_B / t, \quad M_r = 0, \quad \sigma_{r,B} = 0 \\ M_\theta = \frac{Et^2 \alpha}{12} \{ \bar{T}_B - T_B(r_2) \}, \quad \sigma_{\theta,B} = \frac{E\alpha}{2} \{ \bar{T}_B - T_B(r_2) \} \end{array} \right] \quad (i)$$

となる。

(4) $T_B(r)$ が一定の場合

$T_B(r) = T_B$ (一定) の場合は

$$i = \frac{r \alpha T_B}{t}, \quad M_r = M_\theta = 0 \quad (A2.42)$$

となる。内外周にモーメント M が作用する場合は (A.2.35) 式を重ねて

$$i = \frac{r \alpha T_B}{t} + \frac{M \cdot r}{D(1+\nu)}, \quad M_r = M_\theta = M \quad (j)$$

となる。

$$M = -M^* = \frac{-D(1+\nu)\alpha T_B}{t} = \frac{-Et^2 \alpha T_B}{12(1-\nu)} \quad (A2.43)$$

とすると $i = 0$ となり円板の曲げ変形を拘束することができる。この時

$$\sigma_{r,B} = \sigma_{\theta,B} = \frac{-6M^*}{t^2} = \frac{-E\alpha T_B}{2(1-\nu)} \quad (A2.44)$$

の曲げ応力が生ずる。

付録A 3 構造設計用複数位置温度計算プログラム

付録A 3 構造設計用複数位置温度計算プログラム

前報 (Ref 1) で作成された「構造設計用複数位置温度計算プログラム」の使用法, 計算例を紹介する。

A 3.1 計算モデル

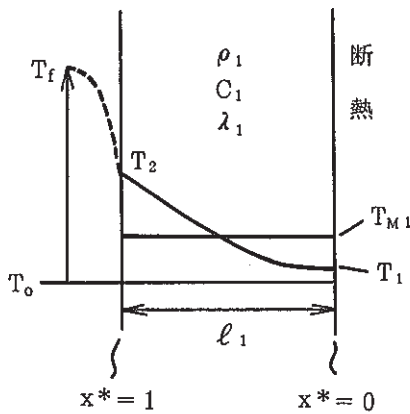


Fig. A 3.1 (a) Non Liner Model

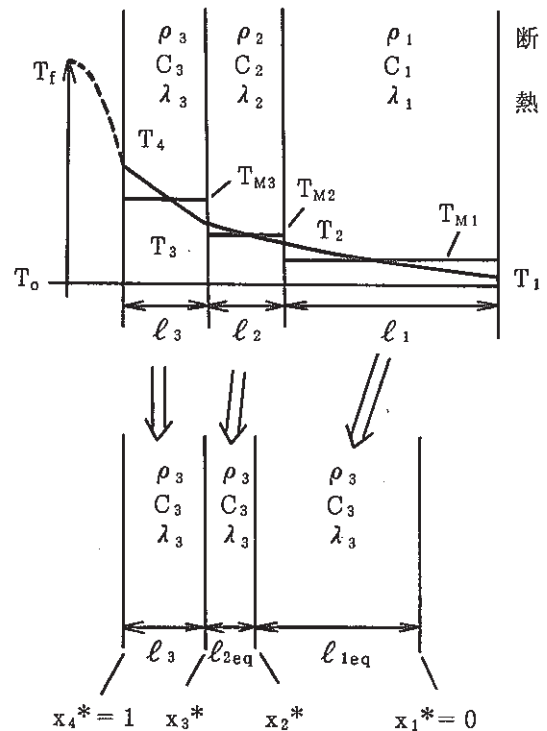


Fig. A 3.1 (b) Thermal Liner Model

形状および材質の不連続を含む構造に内部流体温度変化等の熱過渡が生じた場合の複数断面 (位置番号 j , $j = 1 \sim j_{max}$) の温度 (T_M , T_B , T_{PH} , T_{PI}) の時間応答を計算するものである。 T_M は板厚平均温度, T_B は等価線形温度差 (熱伝達面側 - 断熱面側), T_{PH} は熱伝達面側のピーク温度, T_{PI} は断熱面側のピーク温度である。

計算式は「片面で流体との熱伝達があり, 他面が断熱された平板の非定常熱伝導の理論解」を用いている (Fig. A 3.1 (a) のモデル)。Fig. A 3.1 (b) に示すような母材, 中間層, 熱しゃへい板から成る 3 層構造については, 母材と中間層を温度応答が等しく熱しゃへい板と同一物性を有する等価板で置き換える事により (a) 図の単層構造と同様に計算する。任意の流体温度変化, 材質不連続, 形状不連続, 熱しゃへい板の有無, 熱伝達率の位置による変化すべてに対応できる。

A3.2 使用法

入力データカードイメージは次の通りである。

カード1 (i 5) NHIST ~ 流体温度変化を多直線近似するデータ ≤ 50

カード2 (5 F 10.0) FTIME (i), i = 1, NHIST ~ 必要枚数だけ。
多直線近似点の時刻データ

カード3 (5 F 10.0) FTEMP (i), i = 1, NHIST ~ 必要枚数だけ。
多直線近似点の流体温度データ

カード4 (i 5, 5 X, F 10.0) Ni, TIMEi ~ 必要な枚数だけ。
非定常計算時刻をジェネレートするためのデータであり TIME_{i-1} ~
TIME_i 間を Ni 等分割する。
但し TIME₀ は 0.0 である。

カード5 (ブランクカード) ~ 計算時刻ジェネレートの終わり。

以下のカード6~10を1セットとして1断面について1セットを入力する。必要な断面数 (j = 1, j_{max}) だけくり返し入力する。

カード6 (i 5, 5 X, F 10.0) LINER, HFILMj
LINER ~ 熱しゃへい板の有無, 1 (有), 0 (無)
HFILMj ~ 断面jの熱伝達係数 (kcal/m² · hr · °C)

カード7 (3 F 10.0) SLŌ(i), i = 1, 3
母材, 中間層, 熱しゃへい板の ρ (kg/mm³)

カード8 (3 F 10.0) SC(i), i = 1, 3
母材, 中間層, 熱しゃへい板の C (kcal/kg · °C)

カード9 (3 F 10.0) SRAM (i), i = 1, 3
母材, 中間層, 熱しゃへい板の λ (kcal/mm · sec · °C)

カード10 (3 F 10.0) THICK (i), i = 1, 3
母材, 中間層, 熱しゃへい板の ℓ (mm)

熱しゃへい板無しの場合はカード7~10は母材のデータ1個のみ入力すれば良い。

母材および熱しゃへい板のそれぞれについて T_M, T_B, T_{PH}, T_{PI} がプリント出力される。

FINASのプロット機能を使用するために外部ファイル(論理番号10)に出力されるカードイメージは次の通りである。

XVALU カード ~ 識別番号1, 流体温度多直線近似点の時間データ。

識別番号2, 計算時間データ。

YVALU カード ~ 識別番号1, 流体温度多直線近似点の流体温度データ。

識別番号 10*j + K ~ 断面jの計算結果時系列データ。

K = 1 (T_M), K = 2 (T_B), K = 3 (T_{PH}), K = 4 (T_{PI}) は母材, K = 5 (T_M), K = 6 (T_B),

$K = 7 (T_{PH})$, $K = 8 (T_{PI})$ は熱しゃへい板の計算結果である。

設計計算用には計算結果温度ファイル(論理番号 20, 書式なしの直接書き込み)を作成する。内容は次の通りである。

レコード 1 ~ NTIME, (PTIME (i), i = 1, NTIME)

計算時間点数 計算時間データ

レコード 2 ~ NK, (YDATA (i), i = 1, NTime)

$NK = 10 * j + K$ はファイル 10 と同様の識別番号であり, 意味も同じである。

熱しゃへい板無しでは $K = 1 \sim 4$, 熱しゃへい板有りでは $K = 1 \sim 8$ である。

レコード 2 が所定の数だけ続いている。

A 3.3 計算例

Fig. A 3.3 (a) に示したノズルと容器の内部流体温度が Fig. A 3.3 (b) のようにランプ変化した場合の断面 1 ~ 断面 5 の温度時間応答を計算する。物性値は 450 °C における SUS 304, 液体ナトリウムの値を用いる。

JCL および入力データリスト, 計算結果リスト, プロット用 JCL および入力データリスト, プロット図を示す。比較参考のために, Ref 2 における FINAS による解析結果を示す。その有限要素モデルを Fig. A 3.3 (C) に示す。FINAS による解析は HQAX 8 要素を用い, 物性値の温度依存が考慮されている。

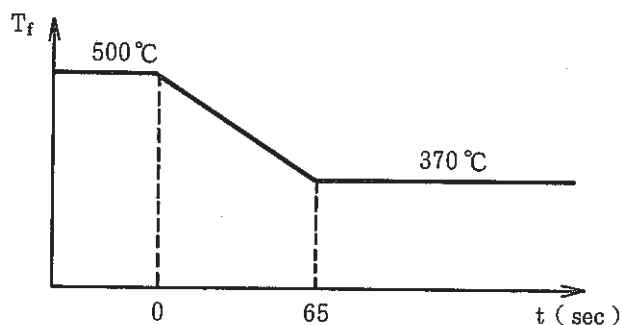


Fig. A 3.3 (b) Thermal transient of nozzle and vessel

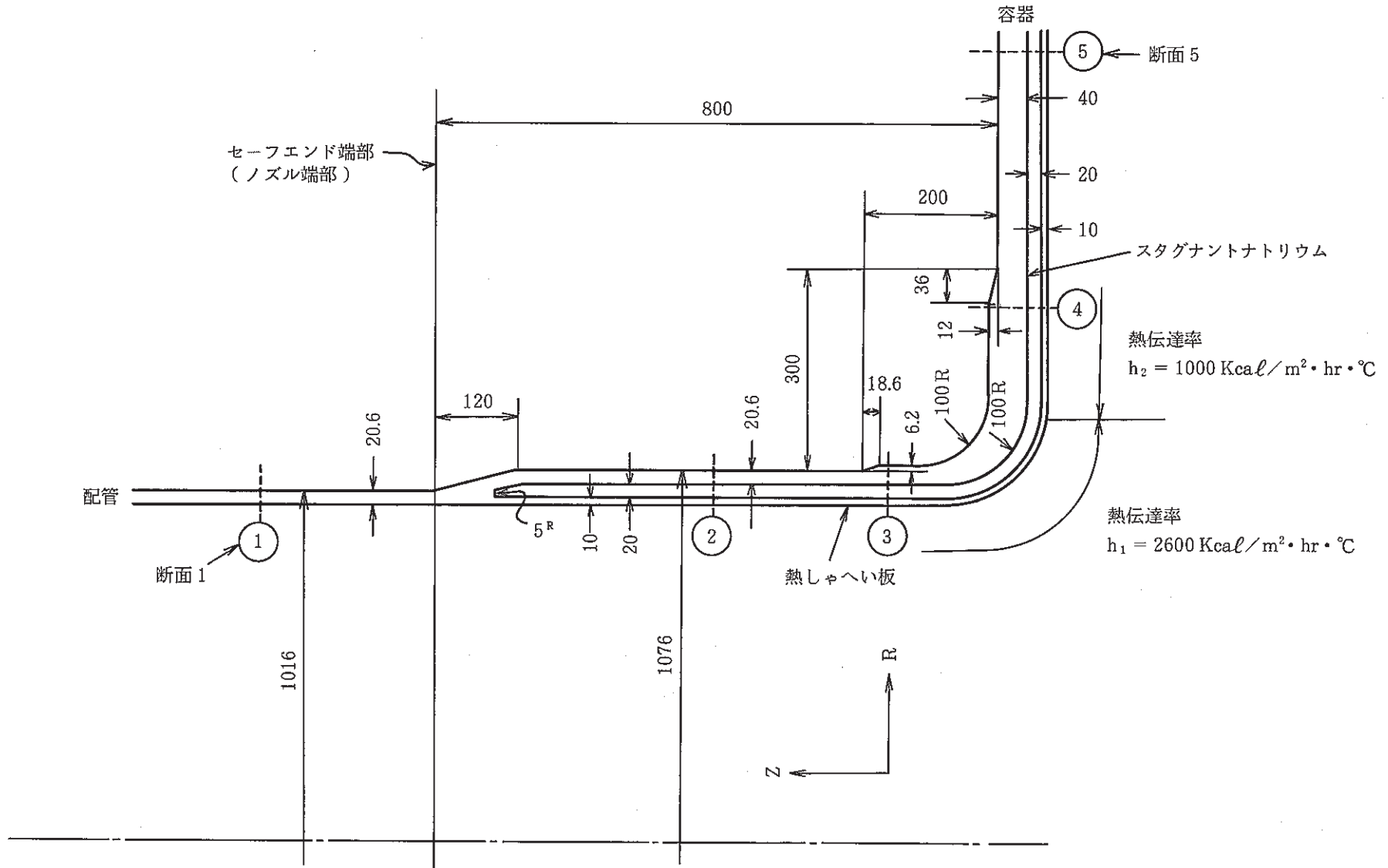


Fig. A 3.3 (a) Analysis Model of Nozzle and Vessel

JCL および入力データリスト

```
//Q3020X12 JOB (GENERAL),MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3020,
//  ATTR=(T1,CO,W1)
//CLG EXEC FORT7CLG
//FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=*
//FORT.SYSIN DD DSN=Q3020.TEST.FORT(TX12),DISP=SHR
//LKED.SYSPRINT DD DUMMY
//SYSPRINT DD SYSOUT=*
//GO.FT10F001 DD DSN=Q3020.N1TR2.PLOT,UNIT=DASD,
//      SPACE=(TRK,(5,15),RLSE),DISP=(NEW,CATLG),
//      DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=80,BUFNO=1)
//GO.FT20F001 DD DSN=Q3020.N1TR2.POST,UNIT=DASD,
//      SPACE=(TRK,(5,15),RLSE),DISP=(NEW,CATLG)
//GO.SYSIN DD *
```

2				
0.000	65.000			} 流体温度の多直線データ
500.000	370.000			
20	100.000			} 計算時刻のジェネレートデータ
20	300.000			
4	500.000			} ブランクカード
0				
0	2.603			} 断面1 データ
7.83D-6				
0.133D0				
4.86D-6				
20.6D0				
1	2.603			} 断面2 データ
7.83D-6	8.44D-7	7.83D-6		
0.133D0	0.303D0	0.133D0		
4.86D-6	1.65D-5	4.86D-6		
20.6D0	20.000	10.000		
1	2.603			} 断面3 データ
7.83D-6	8.44D-7	7.83D-6		
0.133D0	0.303D0	0.133D0		
4.86D-6	1.65D-5	4.86D-6		
26.8D0	20.000	10.000		
1	1.003			} 断面4 データ
7.83D-6	8.44D-7	7.83D-6		
0.133D0	0.303D0	0.133D0		
4.86D-6	1.65D-5	4.86D-6		
52.0D0	20.000	10.000		
1	1.003			} 断面5 データ
7.83D-6	8.44D-7	7.83D-6		
0.133D0	0.303D0	0.133D0		
4.86D-6	1.65D-5	4.86D-6		
40.0D0	20.000	10.000		

```
/*
//
```

下線部はユーザーが変更すべき箇所である。

計算結果リスト (1 / 6)
(流体温度変化データ, 計算時間データ)

NHIST= 2

F.TIME (SEC) =

0.0000E+00 65.00

F.TEMP (DEG) =

500.0 370.0

P.TIME (SEC) =

5.000	10.00	15.00	20.00	25.00
30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
55.00	60.00	65.00	70.00	75.00
80.00	85.00	90.00	95.00	100.0
110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
160.0	170.0	180.0	190.0	200.0
210.0	220.0	230.0	240.0	250.0
260.0	270.0	280.0	290.0	300.0
350.0	400.0	450.0	500.0	

計算結果リスト (2 / 6)

(断面 1)

NCASE= 1 LINER= 0

HFILM (KCAL/M**2.H.DEG) = 2600.

	1(BASE METAL)	LAYER2	3(LINER)
LD (KG/MM**3)	= 0.7830E-05	0.0000E+00	0.0000E+00
C (KCAL/KG.DEG)	= 0.1330	0.0000E+00	0.0000E+00
RAM(KCAL/MM.SEC.DEG)	= 0.4860E-05	0.0000E+00	0.0000E+00
THICK(MM)	= 20.60	0.0000E+00	0.0000E+00

BASE METAL TEMPERATURE

TIME	MEAN	DELT1	DT2H	DT2I
5.00	499.42	-2.48	-1.79	-0.66
10.00	497.94	-7.29	-3.25	-1.68
15.00	495.74	-12.78	-4.36	-2.68
20.00	492.92	-18.33	-5.28	-3.61
25.00	489.54	-23.67	-6.07	-4.48
30.00	485.65	-28.69	-6.78	-5.29
35.00	481.29	-33.38	-7.42	-6.04
40.00	476.51	-37.73	-8.01	-6.73
45.00	471.33	-41.76	-8.56	-7.37
50.00	465.78	-45.49	-9.06	-7.96
55.00	459.90	-48.93	-9.52	-8.51
60.00	453.70	-52.12	-9.95	-9.01
65.00	447.21	-55.06	-10.34	-9.48
70.00	441.05	-55.30	-8.92	-9.25
75.00	435.53	-53.01	-7.79	-8.63
80.00	430.50	-49.84	-6.99	-8.00
85.00	425.88	-46.44	-6.37	-7.40
90.00	421.63	-43.09	-5.84	-6.84
95.00	417.71	-39.90	-5.38	-6.33
100.00	414.09	-36.90	-4.96	-5.85
110.00	407.65	-31.54	-4.23	-4.99
120.00	402.16	-26.94	-3.61	-4.27
130.00	397.46	-23.01	-3.09	-3.64
140.00	393.45	-19.65	-2.64	-3.11
150.00	390.03	-16.78	-2.25	-2.66
160.00	387.11	-14.33	-1.92	-2.27
170.00	384.61	-12.24	-1.64	-1.94
180.00	382.48	-10.45	-1.40	-1.65
190.00	380.66	-8.93	-1.20	-1.41
200.00	379.10	-7.62	-1.02	-1.21
210.00	377.77	-6.51	-0.87	-1.03
220.00	376.64	-5.56	-0.75	-0.88
230.00	375.67	-4.75	-0.64	-0.75
240.00	374.84	-4.06	-0.54	-0.64
250.00	374.13	-3.46	-0.46	-0.55
260.00	373.53	-2.96	-0.40	-0.47
270.00	373.02	-2.53	-0.34	-0.40
280.00	372.58	-2.16	-0.29	-0.34
290.00	372.20	-1.84	-0.25	-0.29
300.00	371.88	-1.57	-0.21	-0.25
350.00	370.85	-0.71	-0.10	-0.11
400.00	370.39	-0.32	-0.04	-0.05
450.00	370.18	-0.15	-0.02	-0.02
500.00	370.08	-0.07	-0.01	-0.01

計算結果リスト (3 / 6)

(断面 2)

NCASE= 2 LINER= 1

HFILM (KCAL/M**2.H.DEG) = 2600.

	1(BASE METAL)	LAYER2	3(LINER)
LO (KG/MM**3)	= 0.7830E-05	0.8440E-06	0.7830E-05
C (KCAL/KG.DEG)	= 0.1330	0.3030	0.1330
RAM(KCAL/MM.SEC.DEG)	= 0.4860E-05	0.1650E-04	0.4860E-05
THICK(MM)	= 20.60	20.00	10.00

TIME	BASE METAL TEMPERATURE				THERMAL LINER TEMPERATURE			
	MEAN	DELT1	DT2H	DT2I	MEAN	DELT1	DT2H	DT2I
5.00	500.00	-0.01	-0.01	0.00	498.83	-3.17	-0.86	-0.55
10.00	499.96	-0.16	-0.13	-0.04	496.13	-7.60	-1.29	-0.97
15.00	499.81	-0.70	-0.38	-0.17	492.51	-11.96	-1.55	-1.25
20.00	499.49	-1.67	-0.72	-0.37	488.27	-16.10	-1.74	-1.45
25.00	498.97	-3.03	-1.09	-0.64	483.57	-20.04	-1.88	-1.60
30.00	498.22	-4.69	-1.48	-0.95	478.49	-23.79	-1.99	-1.73
35.00	497.22	-6.57	-1.87	-1.28	473.12	-27.36	-2.08	-1.83
40.00	495.99	-8.60	-2.26	-1.64	467.50	-30.78	-2.16	-1.92
45.00	494.50	-10.72	-2.65	-2.00	461.67	-34.07	-2.23	-2.00
50.00	492.77	-12.88	-3.03	-2.37	455.64	-37.22	-2.29	-2.07
55.00	490.80	-15.07	-3.40	-2.73	449.46	-40.26	-2.34	-2.13
60.00	488.58	-17.26	-3.76	-3.10	443.12	-43.19	-2.39	-2.18
65.00	486.13	-19.42	-4.11	-3.46	436.64	-46.02	-2.43	-2.23
70.00	483.45	-21.55	-4.44	-3.81	431.21	-48.58	-1.61	-1.73
75.00	480.58	-23.48	-4.66	-4.11	427.19	-43.79	-1.23	-1.36
80.00	477.61	-24.99	-4.72	-4.32	423.97	-41.99	-1.00	-1.12
85.00	474.59	-26.02	-4.70	-4.44	421.27	-40.32	-0.84	-0.96
90.00	471.58	-26.60	-4.63	-4.50	418.94	-38.77	-0.73	-0.84
95.00	468.59	-26.83	-4.54	-4.50	416.87	-37.34	-0.65	-0.75
100.00	465.64	-26.80	-4.43	-4.46	415.01	-36.01	-0.59	-0.68
110.00	459.93	-26.17	-4.20	-4.32	411.75	-33.59	-0.50	-0.58
120.00	454.49	-25.13	-3.96	-4.13	408.90	-31.40	-0.44	-0.52
130.00	449.35	-23.90	-3.73	-3.92	406.36	-29.40	-0.40	-0.47
140.00	444.49	-22.60	-3.50	-3.70	404.04	-27.56	-0.37	-0.43
150.00	439.92	-21.31	-3.29	-3.49	401.90	-25.84	-0.34	-0.40
160.00	435.63	-20.05	-3.09	-3.28	399.91	-24.24	-0.32	-0.37
170.00	431.59	-18.84	-2.90	-3.08	398.05	-22.74	-0.29	-0.35
180.00	427.80	-17.70	-2.72	-2.89	396.32	-21.34	-0.28	-0.32
190.00	424.25	-16.62	-2.56	-2.72	394.70	-20.02	-0.26	-0.30
200.00	420.91	-15.60	-2.40	-2.55	393.17	-18.79	-0.24	-0.29
210.00	417.78	-14.64	-2.25	-2.39	391.75	-17.63	-0.23	-0.27
220.00	414.84	-13.74	-2.11	-2.25	390.41	-16.55	-0.21	-0.25
230.00	412.08	-12.90	-1.98	-2.11	389.15	-15.53	-0.20	-0.24
240.00	409.49	-12.10	-1.86	-1.98	387.97	-14.57	-0.19	-0.22
250.00	407.06	-11.36	-1.75	-1.86	386.87	-13.68	-0.18	-0.21
260.00	404.78	-10.66	-1.64	-1.74	385.83	-12.83	-0.17	-0.19
270.00	402.63	-10.00	-1.54	-1.63	384.85	-12.04	-0.16	-0.18
280.00	400.63	-9.39	-1.44	-1.53	383.94	-11.30	-0.15	-0.17
290.00	398.74	-8.81	-1.35	-1.44	383.08	-10.61	-0.14	-0.16
300.00	396.97	-8.27	-1.27	-1.35	382.28	-9.95	-0.13	-0.15
350.00	389.63	-6.02	-0.93	-0.98	378.93	-7.25	-0.09	-0.11
400.00	384.29	-4.38	-0.67	-0.72	376.50	-5.27	-0.07	-0.08
450.00	380.40	-3.19	-0.49	-0.52	374.73	-3.84	-0.05	-0.06
500.00	377.57	-2.32	-0.36	-0.38	373.45	-2.79	-0.04	-0.04

計算結果リスト (4 / 6)

(断面 3)

NCASE= 3 LINER= 1

HFILM (KCAL/M**2.H.DEG) = 2600.

	1(BASE METAL)	LAYER2	3(LINER)
LO (KG/MM**3)	= 0.7830E-05	0.8440E-06	0.7830E-05
C (KCAL/KG.DEG)	= 0.1330	0.3030	0.1330
RAM(KCAL/MM.SEC.DEG)	= 0.4860E-05	0.1650E-04	0.4860E-05
THICK(MM)	= 26.80	20.00	10.00

TIME	BASE METAL TEMPERATURE				THERMAL LINER TEMPERATURE			
	MEAN	DELT1	DT2H	DT2I	MEAN	DELT1	DT2H	DT2I
5.00	500.00	0.00	-0.01	0.00	498.83	-3.17	-0.86	-0.55
10.00	499.97	-0.13	-0.15	-0.04	496.13	-7.60	-1.29	-0.97
15.00	499.86	-0.61	-0.47	-0.16	492.51	-11.96	-1.55	-1.25
20.00	499.61	-1.52	-0.91	-0.38	488.27	-16.10	-1.74	-1.45
25.00	499.21	-2.86	-1.42	-0.67	483.57	-20.04	-1.88	-1.60
30.00	498.63	-4.57	-1.95	-1.02	478.49	-23.79	-1.99	-1.73
35.00	497.86	-6.59	-2.50	-1.42	473.12	-27.36	-2.08	-1.83
40.00	496.91	-8.86	-3.04	-1.84	467.50	-30.79	-2.16	-1.92
45.00	495.77	-11.32	-3.57	-2.29	461.67	-34.08	-2.23	-2.00
50.00	494.43	-13.92	-4.10	-2.75	455.66	-37.24	-2.29	-2.06
55.00	492.90	-16.61	-4.61	-3.22	449.48	-40.30	-2.34	-2.12
60.00	491.18	-19.37	-5.12	-3.69	443.16	-43.25	-2.38	-2.17
65.00	489.27	-22.17	-5.61	-4.17	436.71	-46.11	-2.42	-2.22
70.00	487.18	-24.98	-6.08	-4.64	431.31	-45.72	-1.60	-1.71
75.00	484.93	-27.66	-6.41	-5.07	427.34	-43.98	-1.21	-1.34
80.00	482.58	-29.99	-6.54	-5.42	424.18	-42.25	-0.98	-1.10
85.00	480.20	-31.85	-6.55	-5.66	421.55	-40.65	-0.82	-0.93
90.00	477.79	-33.26	-6.48	-5.82	419.29	-39.19	-0.71	-0.81
95.00	475.40	-34.25	-6.36	-5.91	417.32	-37.85	-0.62	-0.71
100.00	473.02	-34.88	-6.23	-5.95	415.57	-36.63	-0.55	-0.64
110.00	468.35	-35.34	-5.95	-5.93	412.55	-34.44	-0.46	-0.53
120.00	463.83	-35.03	-5.68	-5.81	410.00	-32.53	-0.39	-0.46
130.00	459.48	-34.25	-5.41	-5.64	407.76	-30.80	-0.35	-0.41
140.00	455.31	-33.19	-5.15	-5.44	405.76	-29.23	-0.32	-0.37
150.00	451.32	-31.98	-4.91	-5.23	403.93	-27.77	-0.29	-0.34
160.00	447.50	-30.70	-4.68	-5.01	402.24	-26.41	-0.27	-0.32
170.00	443.85	-29.40	-4.45	-4.79	400.66	-25.13	-0.25	-0.30
180.00	440.38	-28.10	-4.24	-4.57	399.17	-23.93	-0.24	-0.28
190.00	437.06	-26.84	-4.04	-4.36	397.77	-22.79	-0.22	-0.26
200.00	433.90	-25.61	-3.85	-4.16	396.45	-21.70	-0.21	-0.25
210.00	430.89	-24.42	-3.67	-3.97	395.19	-20.67	-0.20	-0.24
220.00	428.01	-23.29	-3.50	-3.78	393.99	-19.69	-0.19	-0.23
230.00	425.28	-22.20	-3.33	-3.61	392.86	-18.76	-0.18	-0.21
240.00	422.67	-21.16	-3.17	-3.44	391.78	-17.88	-0.17	-0.20
250.00	420.18	-20.16	-3.03	-3.28	390.75	-17.03	-0.16	-0.19
260.00	417.82	-19.21	-2.88	-3.12	389.77	-16.23	-0.16	-0.19
270.00	415.56	-18.31	-2.75	-2.97	388.83	-15.46	-0.15	-0.18
280.00	413.41	-17.45	-2.62	-2.83	387.94	-14.73	-0.14	-0.17
290.00	411.36	-16.62	-2.49	-2.70	387.10	-14.04	-0.14	-0.16
300.00	409.41	-15.84	-2.38	-2.57	386.29	-13.37	-0.13	-0.15
350.00	400.95	-12.44	-1.87	-2.02	382.79	-10.50	-0.10	-0.12
400.00	394.30	-9.77	-1.46	-1.59	380.05	-8.25	-0.08	-0.09
450.00	389.08	-7.67	-1.15	-1.25	377.89	-6.48	-0.06	-0.07
500.00	384.99	-6.02	-0.90	-0.98	376.19	-5.09	-0.05	-0.06

計算結果リスト (5/6)

(断面4)

NCASE= 4 LINER= 1

HFILM (KCAL/M**2.H.DEG) = 1000.

	1(BASE METAL)	LAYER2	3(LINER)
LO (KG/MM**3)	= 0.7830E-05	0.8440E-06	0.7830E-05
C (KCAL/KG.DEG)	= 0.1330	0.3030	0.1330
RAM(KCAL/MM.SEC.DEG)	= 0.4860E-05	0.1650E-04	0.4860E-05
THICK(MM)	= 52.00	20.00	10.00

TIME	BASE METAL TEMPERATURE				THERMAL LINER TEMPERATURE			
	MEAN	DELTA1	DT2H	DT2I	MEAN	DELTA1	DT2H	DT2I
5.00	500.00	0.00	0.00	0.00	499.44	-1.53	-0.43	-0.27
10.00	499.99	-0.04	-0.09	-0.01	498.03	-3.95	-0.70	-0.52
15.00	499.96	-0.19	-0.33	-0.06	496.01	-6.53	-0.89	-0.70
20.00	499.90	-0.51	-0.72	-0.15	493.54	-9.13	-1.04	-0.85
25.00	499.78	-1.04	-1.23	-0.30	490.69	-11.71	-1.16	-0.98
30.00	499.62	-1.78	-1.84	-0.51	487.54	-14.24	-1.26	-1.08
35.00	499.39	-2.75	-2.51	-0.77	484.11	-16.73	-1.35	-1.17
40.00	499.10	-3.95	-3.24	-1.07	480.46	-19.17	-1.43	-1.25
45.00	498.74	-5.35	-4.00	-1.42	476.60	-21.56	-1.49	-1.32
50.00	498.32	-6.96	-4.78	-1.81	472.55	-23.90	-1.56	-1.39
55.00	497.83	-8.76	-5.58	-2.24	468.34	-26.20	-1.61	-1.45
60.00	497.27	-10.74	-6.39	-2.69	463.97	-28.45	-1.66	-1.50
65.00	496.64	-12.89	-7.20	-3.17	459.47	-30.66	-1.71	-1.55
70.00	495.94	-15.20	-8.01	-3.67	455.39	-31.30	-1.32	-1.33
75.00	495.18	-17.62	-8.72	-4.17	452.05	-31.02	-1.09	-1.12
80.00	494.37	-20.05	-9.28	-4.66	449.20	-30.54	-0.94	-0.98
85.00	493.53	-22.43	-9.69	-5.12	446.71	-30.01	-0.82	-0.86
90.00	492.66	-24.72	-9.96	-5.53	444.49	-29.47	-0.74	-0.77
95.00	491.78	-26.90	-10.13	-5.90	442.49	-28.93	-0.67	-0.70
100.00	490.89	-28.94	-10.21	-6.22	440.68	-28.42	-0.61	-0.64
110.00	489.08	-32.60	-10.22	-6.74	437.47	-27.45	-0.51	-0.55
120.00	487.27	-35.71	-10.10	-7.13	434.72	-26.57	-0.45	-0.48
130.00	485.47	-38.31	-9.90	-7.42	432.31	-25.77	-0.39	-0.42
140.00	483.67	-40.45	-9.66	-7.63	430.17	-25.03	-0.35	-0.37
150.00	481.89	-42.18	-9.41	-7.77	428.26	-24.35	-0.31	-0.34
160.00	480.13	-43.54	-9.17	-7.87	426.52	-23.72	-0.29	-0.31
170.00	478.40	-44.60	-8.93	-7.92	424.94	-23.14	-0.26	-0.28
180.00	476.68	-45.39	-8.70	-7.95	423.49	-22.59	-0.24	-0.26
190.00	474.99	-45.95	-8.48	-7.95	422.14	-22.08	-0.22	-0.24
200.00	473.32	-46.32	-8.28	-7.94	420.89	-21.60	-0.21	-0.22
210.00	471.67	-46.52	-8.09	-7.90	419.73	-21.15	-0.19	-0.21
220.00	470.05	-46.58	-7.90	-7.85	418.63	-20.72	-0.18	-0.20
230.00	468.46	-46.52	-7.73	-7.80	417.59	-20.31	-0.17	-0.19
240.00	466.88	-46.36	-7.57	-7.73	416.61	-19.91	-0.16	-0.18
250.00	465.33	-46.12	-7.42	-7.65	415.68	-19.54	-0.16	-0.17
260.00	463.81	-45.81	-7.27	-7.57	414.78	-19.17	-0.15	-0.16
270.00	462.31	-45.44	-7.13	-7.49	413.93	-18.82	-0.14	-0.16
280.00	460.83	-45.02	-6.99	-7.40	413.11	-18.49	-0.14	-0.15
290.00	459.37	-44.57	-6.86	-7.30	412.32	-18.16	-0.13	-0.14
300.00	457.94	-44.08	-6.74	-7.21	411.55	-17.84	-0.13	-0.14
350.00	451.11	-41.35	-6.16	-6.71	408.06	-16.37	-0.11	-0.12
400.00	444.80	-38.45	-5.66	-6.22	404.98	-15.06	-0.10	-0.11
450.00	438.98	-35.61	-5.21	-5.75	402.20	-13.87	-0.09	-0.10
500.00	433.61	-32.90	-4.80	-5.31	399.67	-12.79	-0.08	-0.09

計算結果リスト (6/6)
(断面5)

NCASE= 5 LINER= 1

HFILM (KCAL/M**2.H.DEG) = 1000.

	1(BASE METAL)	LAYER2	3(LINER)
LD (KG/MM**3)	= 0.7830E-05	0.8440E-06	0.7830E-05
C (KCAL/KG.DEG)	= 0.1330	0.3030	0.1330
RAM(KCAL/MM.SEC.DEG)	= 0.4860E-05	0.1650E-04	0.4860E-05
THICK(MM)	= 40.00	20.00	10.00

TIME	BASE METAL TEMPERATURE				THERMAL LINER TEMPERATURE			
	MEAN	DELT1	DT2H	DT2I	MEAN	DELT1	DT2H	DT2I
5.00	500.00	0.00	0.00	0.00	499.44	-1.53	-0.43	-0.27
10.00	499.99	-0.05	-0.08	-0.01	498.03	-3.95	-0.70	-0.52
15.00	499.95	-0.23	-0.30	-0.07	496.01	-6.53	-0.89	-0.70
20.00	499.87	-0.62	-0.63	-0.18	493.54	-9.13	-1.04	-0.85
25.00	499.72	-1.24	-1.06	-0.34	490.69	-11.71	-1.16	-0.98
30.00	499.50	-2.11	-1.56	-0.56	487.54	-14.24	-1.26	-1.08
35.00	499.20	-3.22	-2.09	-0.83	484.11	-16.73	-1.35	-1.17
40.00	498.83	-4.56	-2.66	-1.13	480.46	-19.17	-1.43	-1.25
45.00	498.37	-6.11	-3.24	-1.47	476.60	-21.56	-1.49	-1.32
50.00	497.82	-7.85	-3.83	-1.84	472.55	-23.90	-1.55	-1.39
55.00	497.18	-9.77	-4.43	-2.24	468.34	-26.20	-1.61	-1.45
60.00	496.45	-11.84	-5.02	-2.65	463.97	-28.45	-1.66	-1.50
65.00	495.64	-14.06	-5.61	-3.09	459.47	-30.66	-1.71	-1.55
70.00	494.73	-16.39	-6.19	-3.53	455.39	-31.30	-1.32	-1.33
75.00	493.74	-18.79	-6.69	-3.98	452.05	-31.02	-1.09	-1.12
80.00	492.68	-21.14	-7.05	-4.39	449.20	-30.54	-0.94	-0.98
85.00	491.59	-23.37	-7.28	-4.76	446.71	-30.01	-0.82	-0.86
90.00	490.46	-25.42	-7.41	-5.07	444.49	-29.46	-0.74	-0.78
95.00	489.31	-27.29	-7.47	-5.34	442.49	-28.93	-0.67	-0.70
100.00	488.15	-28.97	-7.48	-5.56	440.67	-28.42	-0.61	-0.64
110.00	485.81	-31.77	-7.40	-5.90	437.46	-27.44	-0.52	-0.55
120.00	483.46	-33.89	-7.25	-6.13	434.70	-26.55	-0.45	-0.48
130.00	481.13	-35.44	-7.08	-6.27	432.28	-25.74	-0.40	-0.42
140.00	478.81	-36.52	-6.90	-6.35	430.12	-24.98	-0.35	-0.38
150.00	476.51	-37.21	-6.73	-6.38	428.17	-24.28	-0.32	-0.34
160.00	474.25	-37.59	-6.55	-6.38	426.39	-23.63	-0.29	-0.32
170.00	472.02	-37.72	-6.39	-6.34	424.76	-23.01	-0.27	-0.29
180.00	469.83	-37.67	-6.23	-6.29	423.24	-22.43	-0.25	-0.27
190.00	467.68	-37.46	-6.08	-6.22	421.82	-21.87	-0.24	-0.26
200.00	465.57	-37.13	-5.94	-6.14	420.48	-21.34	-0.22	-0.24
210.00	463.50	-36.71	-5.80	-6.05	419.21	-20.83	-0.21	-0.23
220.00	461.47	-36.22	-5.66	-5.95	418.00	-20.34	-0.20	-0.22
230.00	459.48	-35.68	-5.53	-5.85	416.84	-19.87	-0.19	-0.21
240.00	457.53	-35.10	-5.41	-5.74	415.73	-19.41	-0.19	-0.20
250.00	455.62	-34.49	-5.29	-5.64	414.67	-18.97	-0.18	-0.20
260.00	453.76	-33.86	-5.17	-5.53	413.63	-18.54	-0.17	-0.19
270.00	451.93	-33.22	-5.05	-5.42	412.63	-18.13	-0.17	-0.18
280.00	450.14	-32.58	-4.94	-5.31	411.67	-17.72	-0.16	-0.18
290.00	448.38	-31.93	-4.83	-5.20	410.73	-17.33	-0.16	-0.17
300.00	446.67	-31.28	-4.72	-5.09	409.81	-16.94	-0.15	-0.17
350.00	438.64	-28.14	-4.22	-4.57	405.58	-15.15	-0.14	-0.15
400.00	431.44	-25.23	-3.78	-4.10	401.83	-13.56	-0.12	-0.13
450.00	425.00	-22.60	-3.38	-3.67	398.49	-12.13	-0.11	-0.12
500.00	419.24	-20.23	-3.03	-3.29	395.50	-10.86	-0.10	-0.11

プロット用 JCL および入力データリスト (1 / 2)

```

//Q3020P12 JOB (GENERAL),MSGCLASS=S,NOTIFY=Q3020,
//  SYSTEM=BEP1,
//  ATTR=(TO,C4,W3)
//JOBPROC DD DSN=Q3050.PROCLIB,DISP=SHR
//COPY EXEC PGM=JSDGENER
//SYSPRINT DD SYSOUT=*
//SYSIN DD DUMMY
//SYSUT1 DD DSN=Q3020.N1TR2.PLOT,UNIT=DASD,DISP=SHR
//SYSUT2 DD DSN=&&TP21,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),
//  SPACE=(TRK,(5,10),RLSE),
//  DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=800,BUFNO=1)
//*
//PLOT EXEC FINAS,FL=2048K
//FT21FOO1 DD DSN=&&TP21,UNIT=WORK,DISP=(OLD,DELETE)
//FT06FOO1 DD SYSOUT=*
//SYSIN DD *
FINAS
PLOT
OUTPUT
XYPLOT
FRAME      A4H
=READ      21
XTITLE     TIME(SEC)
YTITLE     TEMPERATURE(DEG)
PTITLE     MEAN TEMPERATURE (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION1,2,3)
CURVE      1 1 1 T.FLUID
CURVE      2 1 2 P1.BASE
CURVE      3 1 3 P2.BASE
CURVE      4 1 4 P2.LINER
CURVE      5 1 5 P3.BASE
CURVE      6 1 6 P3.LINER
PLOT3      XVALU 1 YVALU 1 XVALU 2 YVALU 11
           XVALU 2 YVALU 21 XVALU 2 YVALU 25
           XVALU 2 YVALU 31 XVALU 2 YVALU 35
PTITLE     MEAN TEMPERATURE (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION4,5)
CURVE      1 1 1 T.FLUID
CURVE      2 1 2 P4.BASE
CURVE      3 1 3 P4.LINER
CURVE      4 1 4 P5.BASE
CURVE      5 1 5 P5.LINER
PLOT3      XVALU 1 YVALU 1 XVALU 2 YVALU 41
           XVALU 2 YVALU 45 XVALU 2 YVALU 51
           XVALU 2 YVALU 55
CURVE      1 1 1 DELT1
CURVE      2 1 2 DELT2H
CURVE      3 1 3 DELT2I
PTITLE     DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION1,BASE METAL)
PLOT3      XVALU 2 YVALU 12 XVALU 2 YVALU 13
           XVALU 2 YVALU 14
PTITLE     DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION2,BASE METAL)
PLOT3      XVALU 2 YVALU 22 XVALU 2 YVALU 23
           XVALU 2 YVALU 24
PTITLE     DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION3,BASE METAL)

```

下線部はユーザーが変更すべき箇所である。

プロット用JCLおよび入力データリスト(2/2)

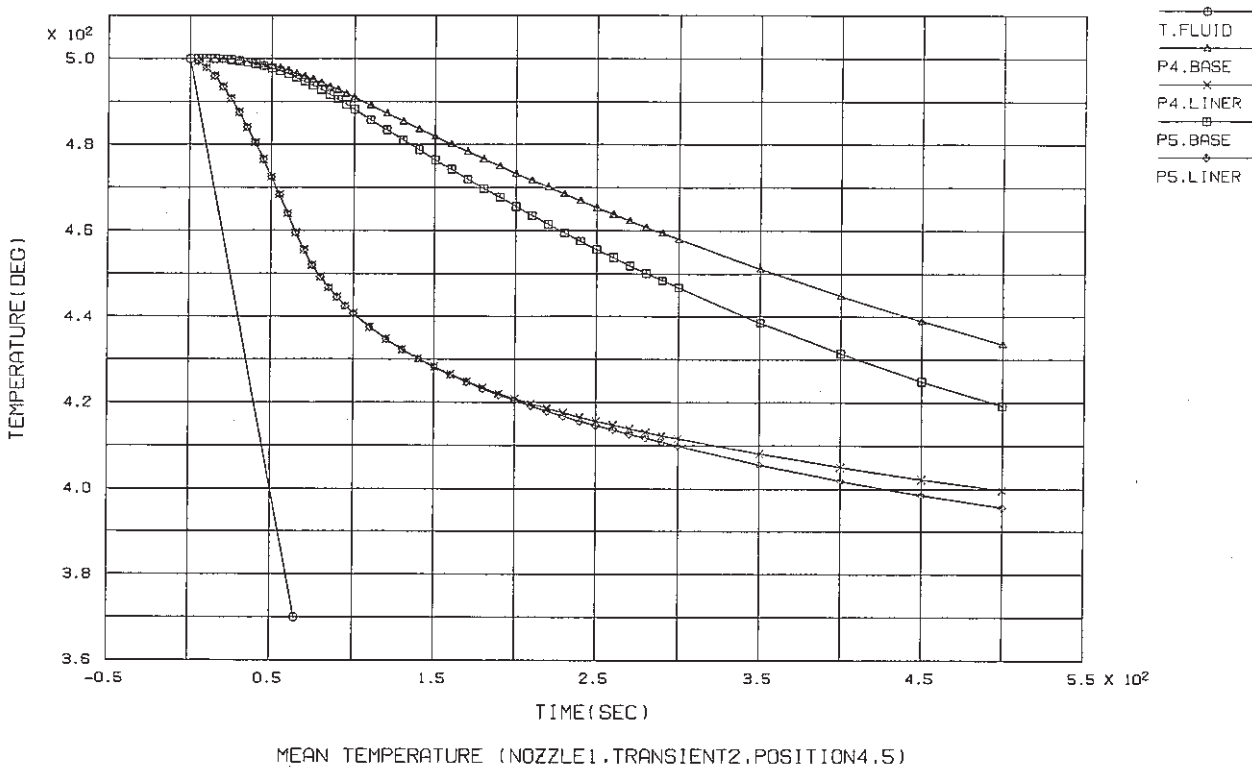
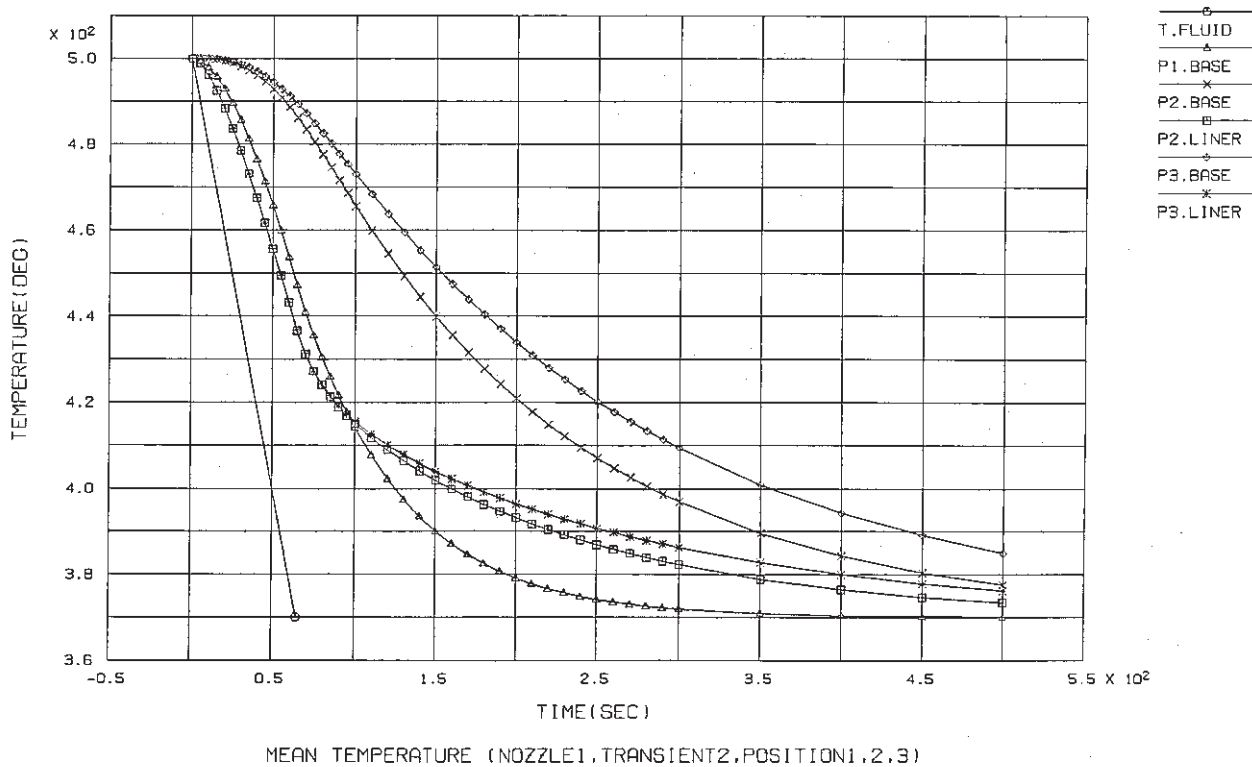
```

PLOT3      XVALU      2      YVALU      32      XVALU      2      YVALU      33
           XVALU      2      YVALU      34
PTITLE     DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION4,BASE METAL)
PLOT3      XVALU      2      YVALU      42      XVALU      2      YVALU      43
           XVALU      2      YVALU      44
PTITLE     DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION5,BASE METAL)
PLOT3      XVALU      2      YVALU      52      XVALU      2      YVALU      53
           XVALU      2      YVALU      54
PTITLE     DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION2,LINER)
PLOT3      XVALU      2      YVALU      26      XVALU      2      YVALU      27
           XVALU      2      YVALU      28
PTITLE     DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION3,LINER)
PLOT3      XVALU      2      YVALU      36      XVALU      2      YVALU      37
           XVALU      2      YVALU      38
PTITLE     DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION4,LINER)
PLOT3      XVALU      2      YVALU      46      XVALU      2      YVALU      47
           XVALU      2      YVALU      48
PTITLE     DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION5,LINER)
PLOT3      XVALU      2      YVALU      56      XVALU      2      YVALU      57
           XVALU      2      YVALU      58

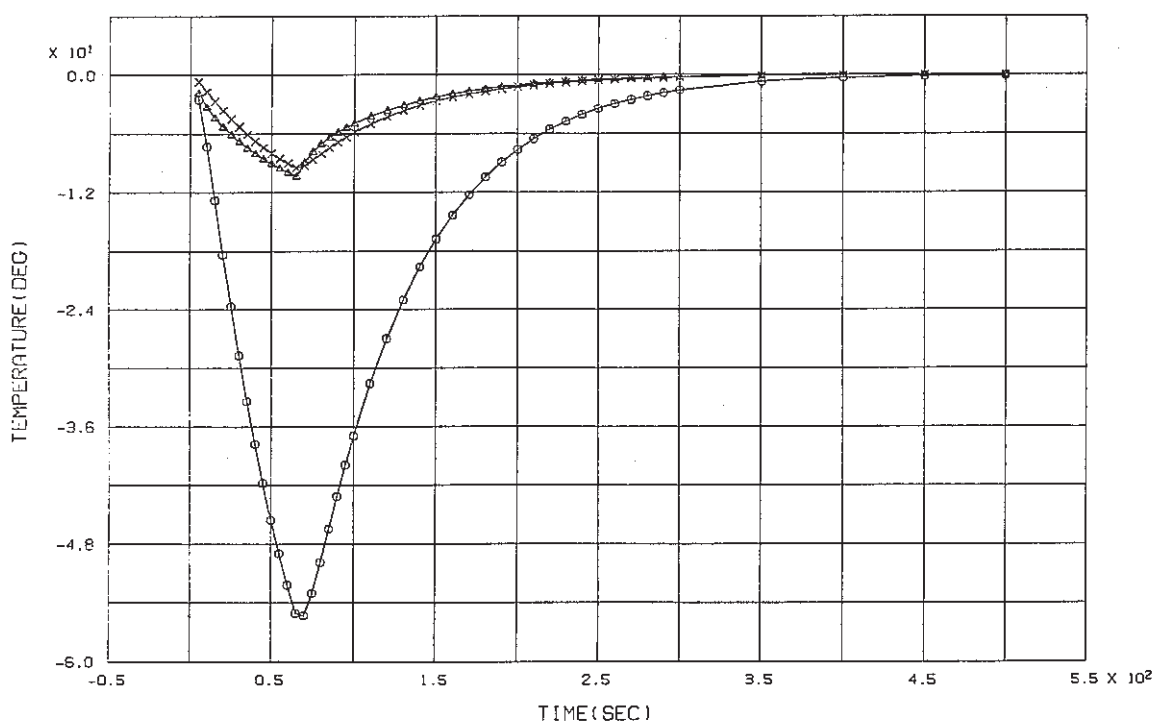
END OUTPUT
END FINAS
/*
/**
//      EXEC FNSNLP
//GDFILE DD SYSOUT=**
//

```

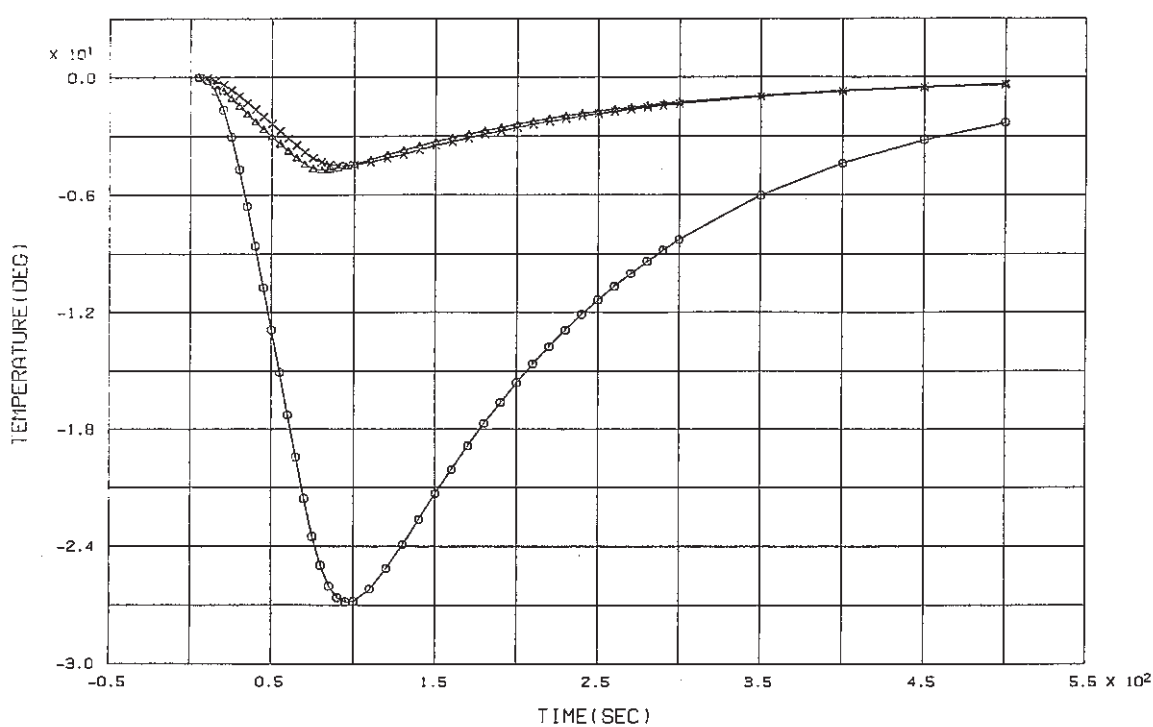
プロット図(1/6)



プロット図 (2 / 6)

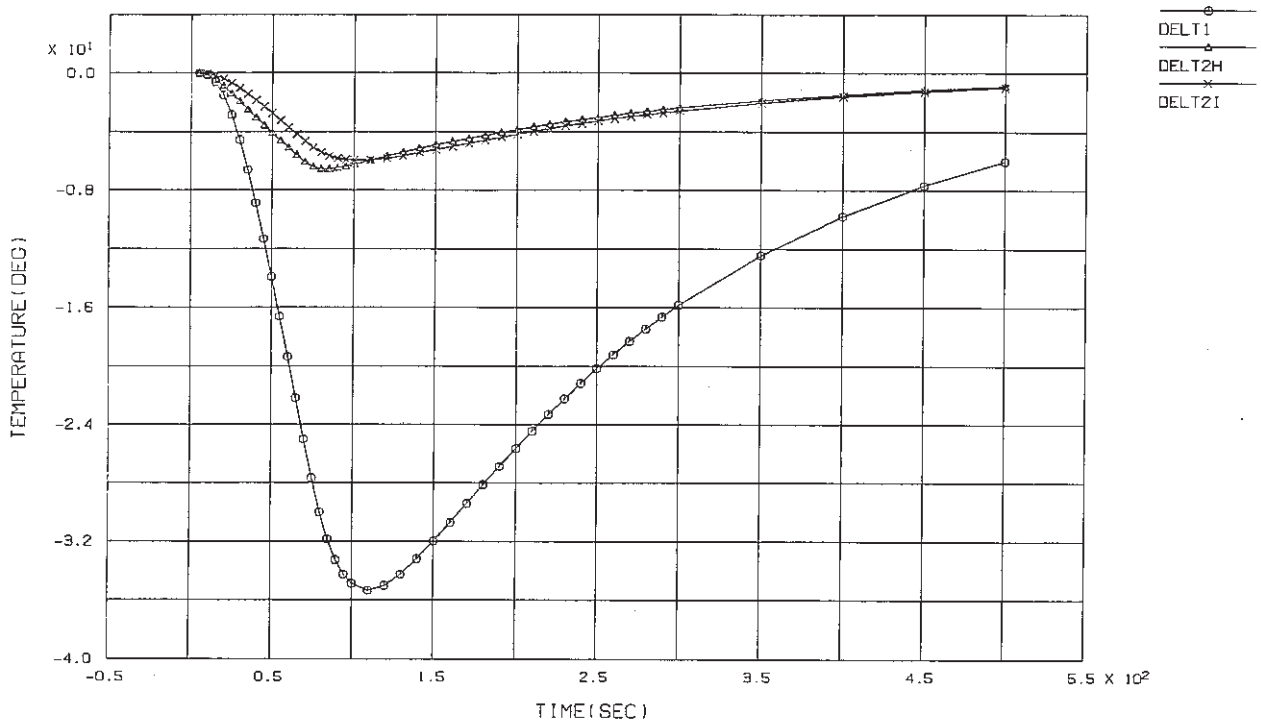


DEL T1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION1,BASE METAL)

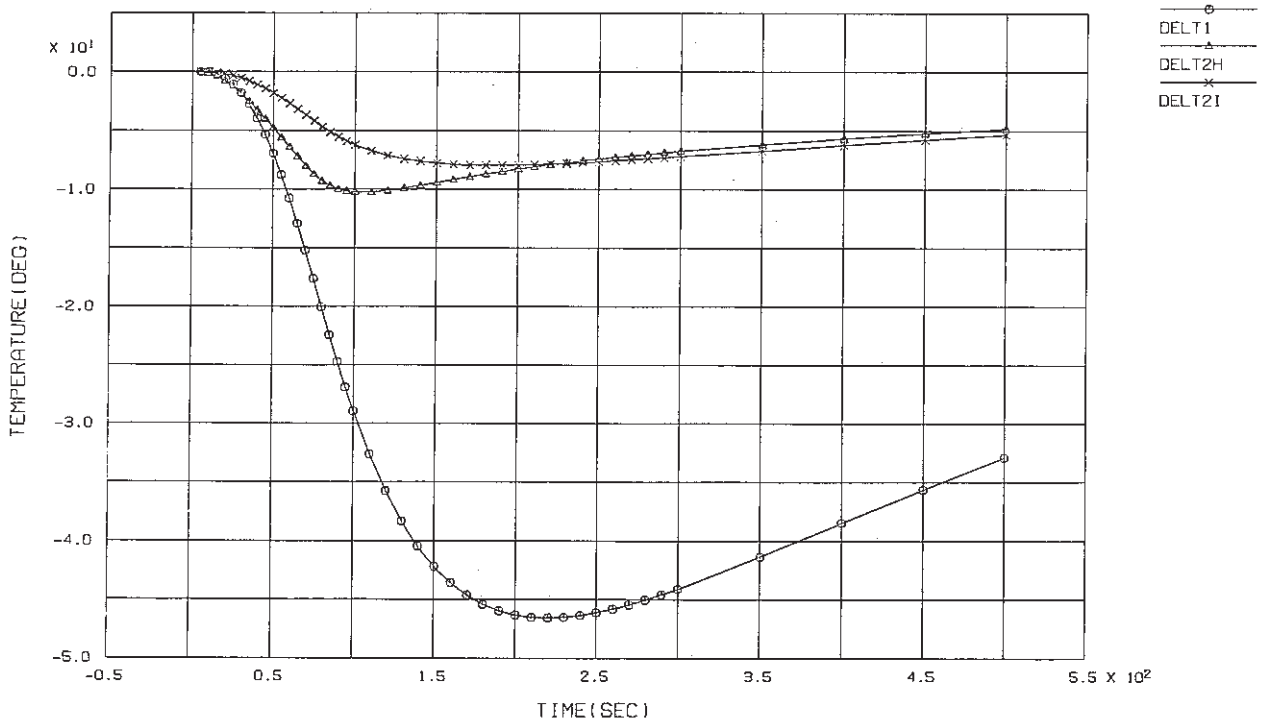


DEL T1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION2,BASE METAL)

プロット図 (3 / 6)

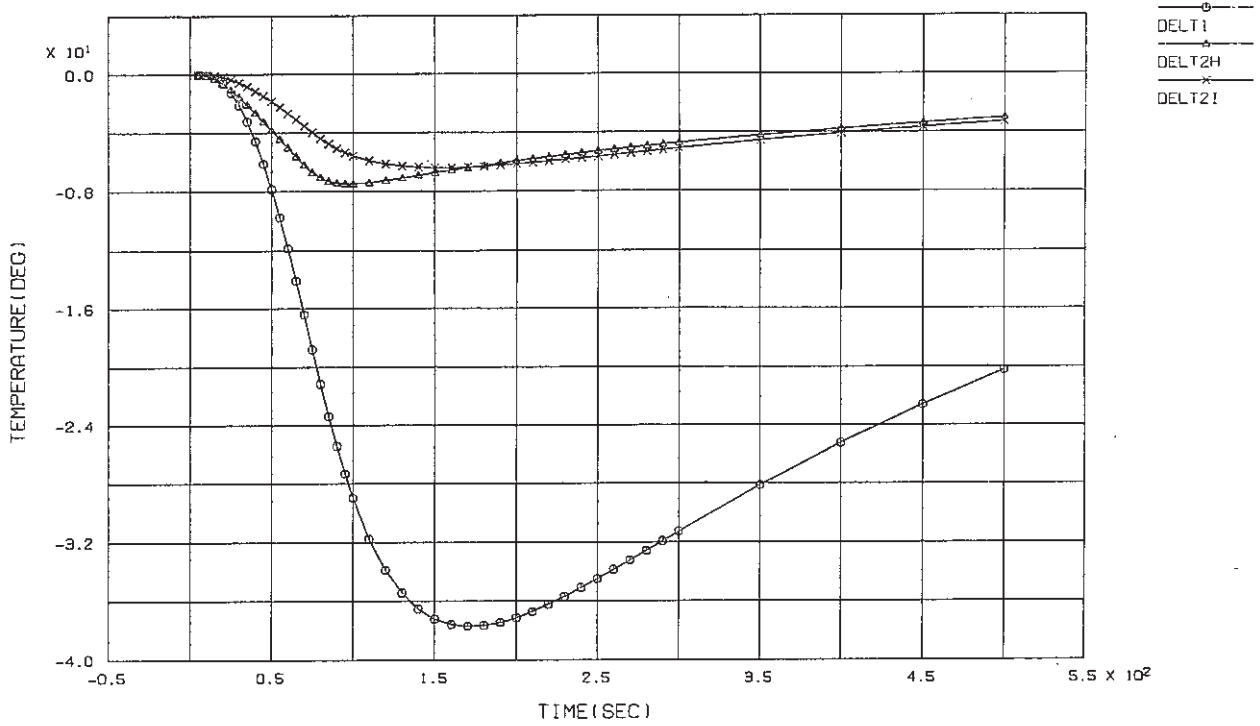


DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION3,BASE METAL)

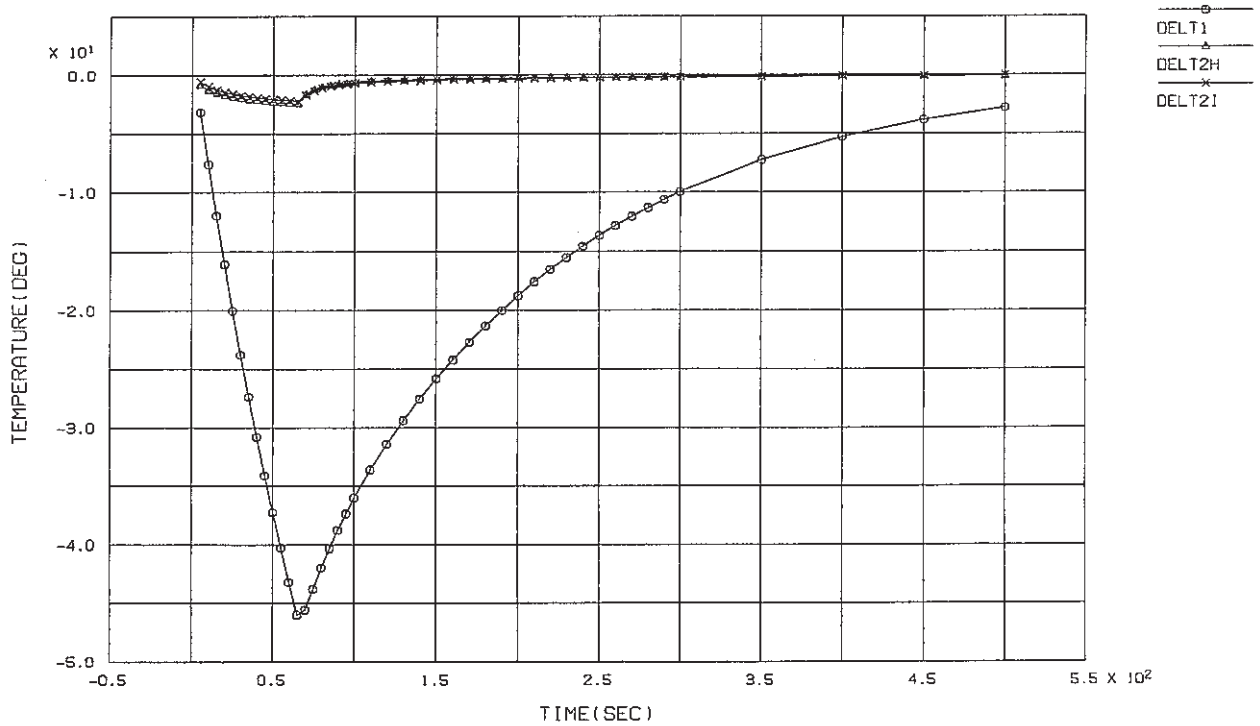


DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION4,BASE METAL)

プロット (4 / 6)

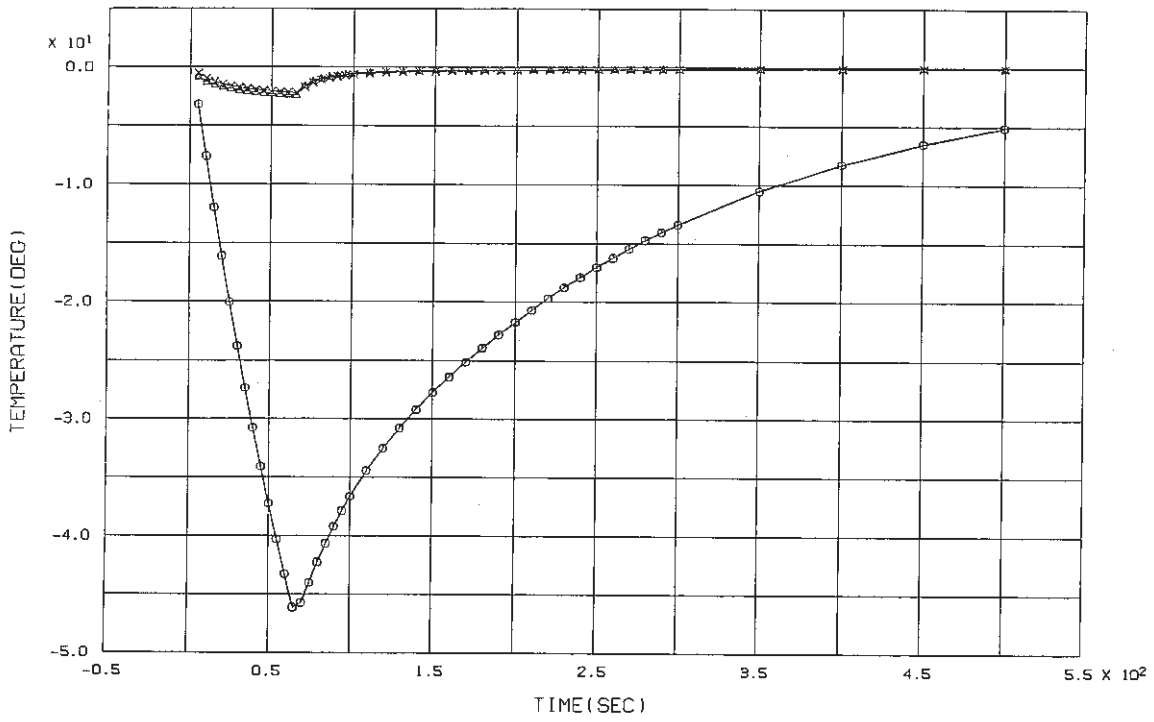


DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION5,BASE METAL)

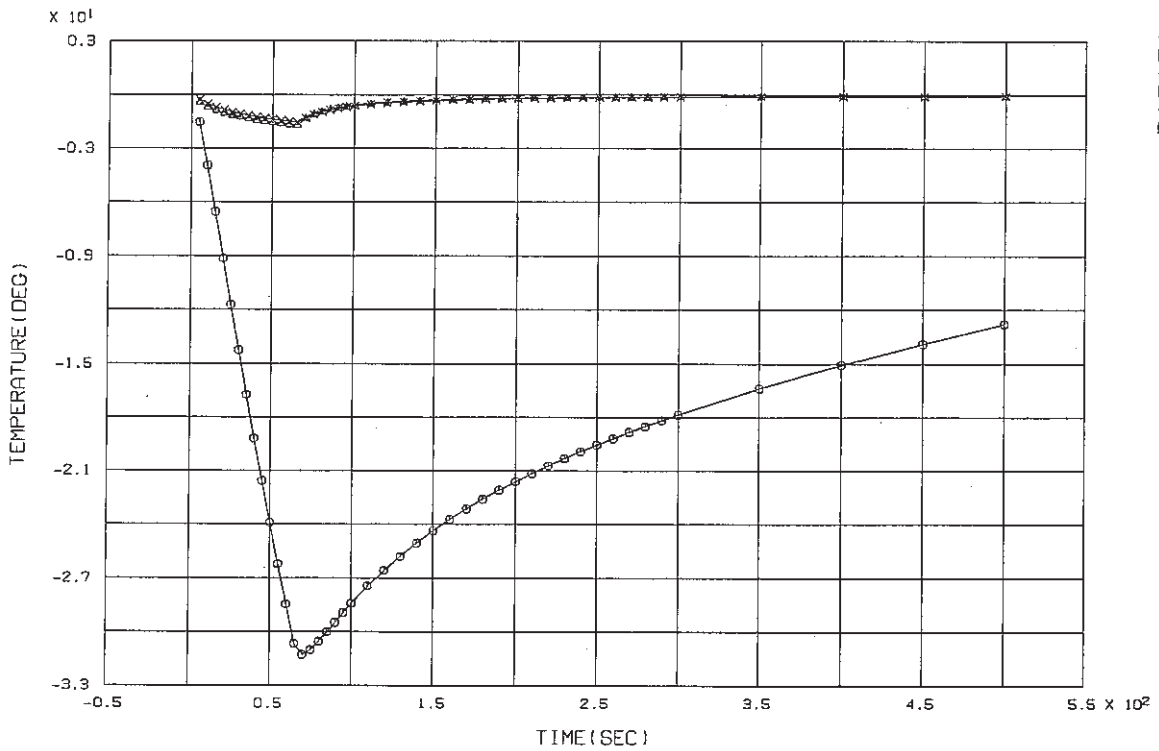


DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION2,LINER)

プロット図(5/6)

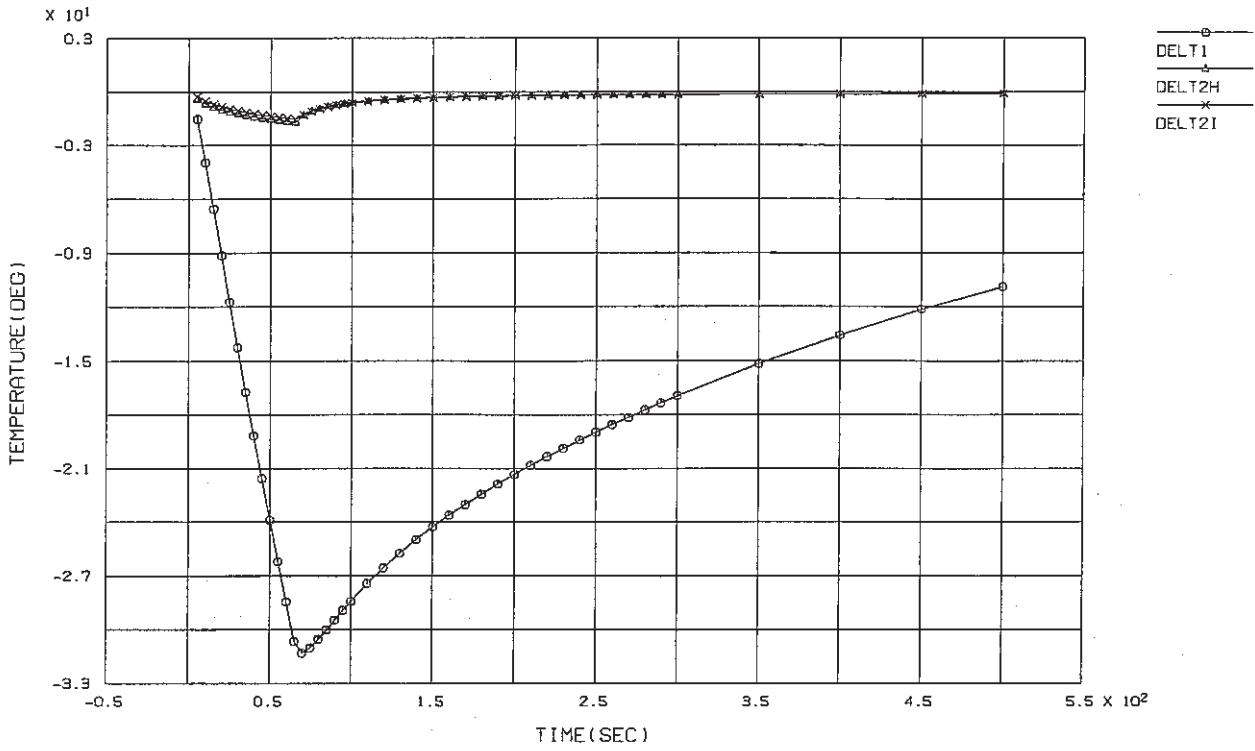


DELT1.DT2H.DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION3,LINER)



DELT1.DT2H.DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITION4,LINER)

プロット図(6/6)



DELT1,DT2H,DT2I (NOZZLE1,TRANSIENT2,POSITIONS,LINER)

FINASによる解析結果(参考)

断面1(母材)

TIME(SEC)	T-AVE.	DT1	IN DT2	OUT DT2
30.000	485.732	28.153	-6.797	-5.131
60.000	454.104	51.562	-10.316	-8.847
70.000	441.601	55.195	-9.545	-9.209
80.000	431.232	49.967	-7.518	-7.952
100.000	415.043	37.509	-5.389	-5.892
120.000	403.177	27.778	-3.962	-4.354
140.000	394.458	20.561	-2.917	-3.218
170.000	385.499	13.084	-1.824	-2.045
200.000	379.830	8.322	-1.173	-1.300
250.000	374.608	3.911	-0.537	-0.611
300.000	372.161	1.837	-0.261	-0.288
350.000	371.014	0.862	-0.114	-0.136
400.000	370.476	0.405	-0.061	-0.065
500.000	370.098	0.083	-0.017	-0.015

断面2(母材)

(熱しゃへい板)

TIME(SEC)	T-AVE.	DT1	IN DT2	OUT DT2	T-AVE.	DT1	IN DT2	OUT DT2
30.000	498.250	4.472	-1.406	-0.891	478.441	23.048	-2.105	-1.636
60.000	488.955	16.377	-3.621	-2.900	443.148	42.532	-2.705	-2.079
70.000	484.039	20.411	-4.289	-3.559	431.289	45.555	-1.996	-1.703
80.000	478.454	23.696	-4.622	-4.052	424.233	41.992	-1.360	-1.057
100.000	467.009	25.535	-4.387	-4.208	415.645	36.460	-0.886	-0.615
120.000	456.323	24.142	-3.972	-3.928	409.798	32.145	-0.701	-0.457
140.000	446.691	21.927	-3.553	-3.553	405.121	28.504	-0.596	-0.378
170.000	434.177	18.590	-2.986	-3.006	399.306	23.869	-0.465	-0.306
200.000	423.704	15.661	-2.509	-2.530	394.503	20.009	-0.402	-0.250
250.000	409.923	11.730	-1.872	-1.894	388.204	14.910	-0.281	-0.183
300.000	399.693	8.771	-1.397	-1.415	383.534	11.112	-0.218	-0.133
350.000	392.094	6.553	-1.041	-1.057	380.068	8.280	-0.152	-0.098
400.000	386.447	4.891	-0.777	-0.788	377.493	6.171	-0.121	-0.072
500.000	379.085	2.710	-0.429	-0.437	374.139	3.417	-0.068	-0.039

断面3(母材)

断面4(母材)

TIME(SEC)	T-AVE.	DT1	IN DT2	OUT DT2	TIME(SEC)	T-AVE.	DT1	IN DT2	OUT DT2
30.000	498.636	4.378	-1.836	-0.969	30.000	499.603	1.809	-1.776	-0.507
60.000	491.255	18.161	-4.878	-3.441	60.000	497.219	10.753	-6.214	-2.655
70.000	487.276	23.255	-5.807	-4.298	70.000	495.872	15.164	-7.784	-3.608
80.000	482.700	27.768	-6.324	-4.998	80.000	494.279	19.936	-9.061	-4.575
100.000	473.080	32.013	-6.100	-5.448	100.000	490.741	28.602	-10.022	-6.074
120.000	463.747	31.961	-5.601	-5.282	120.000	487.056	35.067	-9.968	-6.938
140.000	455.037	30.220	-5.099	-4.922	140.000	483.354	39.445	-9.599	-7.385
170.000	443.314	26.807	-4.406	-4.316	170.000	477.872	43.054	-8.956	-7.623
200.000	433.153	23.428	-3.803	-3.746	200.000	472.532	44.318	-8.373	-7.583
250.000	419.251	18.527	-2.963	-2.937	250.000	464.045	43.651	-7.551	-7.236
300.000	408.454	14.586	-2.309	-2.296	300.000	456.133	41.429	-6.862	-6.756
350.000	400.084	11.470	-1.800	-1.793	350.000	448.815	38.683	-6.258	-6.247
400.000	393.593	9.021	-1.405	-1.402	400.000	442.074	35.840	-5.716	-5.751
500.000	384.601	5.586	-0.857	-0.858	500.000	430.189	30.426	-4.774	-4.840

断面5(母材)

TIME(SEC)	T-AVE.	DT1	IN DT2	OUT DT2
30.000	499.486	2.123	-1.502	-0.552
60.000	496.406	11.770	-4.893	-2.595
70.000	494.669	16.246	-6.041	-3.443
80.000	492.617	20.903	-6.918	-4.269
100.000	488.077	28.563	-7.392	-5.397
120.000	483.391	33.335	-7.218	-5.929
140.000	478.744	35.849	-6.907	-6.133
170.000	471.995	36.979	-6.438	-6.126
200.000	465.585	36.396	-6.013	-5.933
250.000	455.714	33.894	-5.381	-5.460
300.000	446.835	30.869	-4.827	-4.951
350.000	438.870	27.896	-4.332	-4.466
400.000	431.734	25.134	-3.889	-4.019
500.000	419.599	20.321	-3.134	-3.246

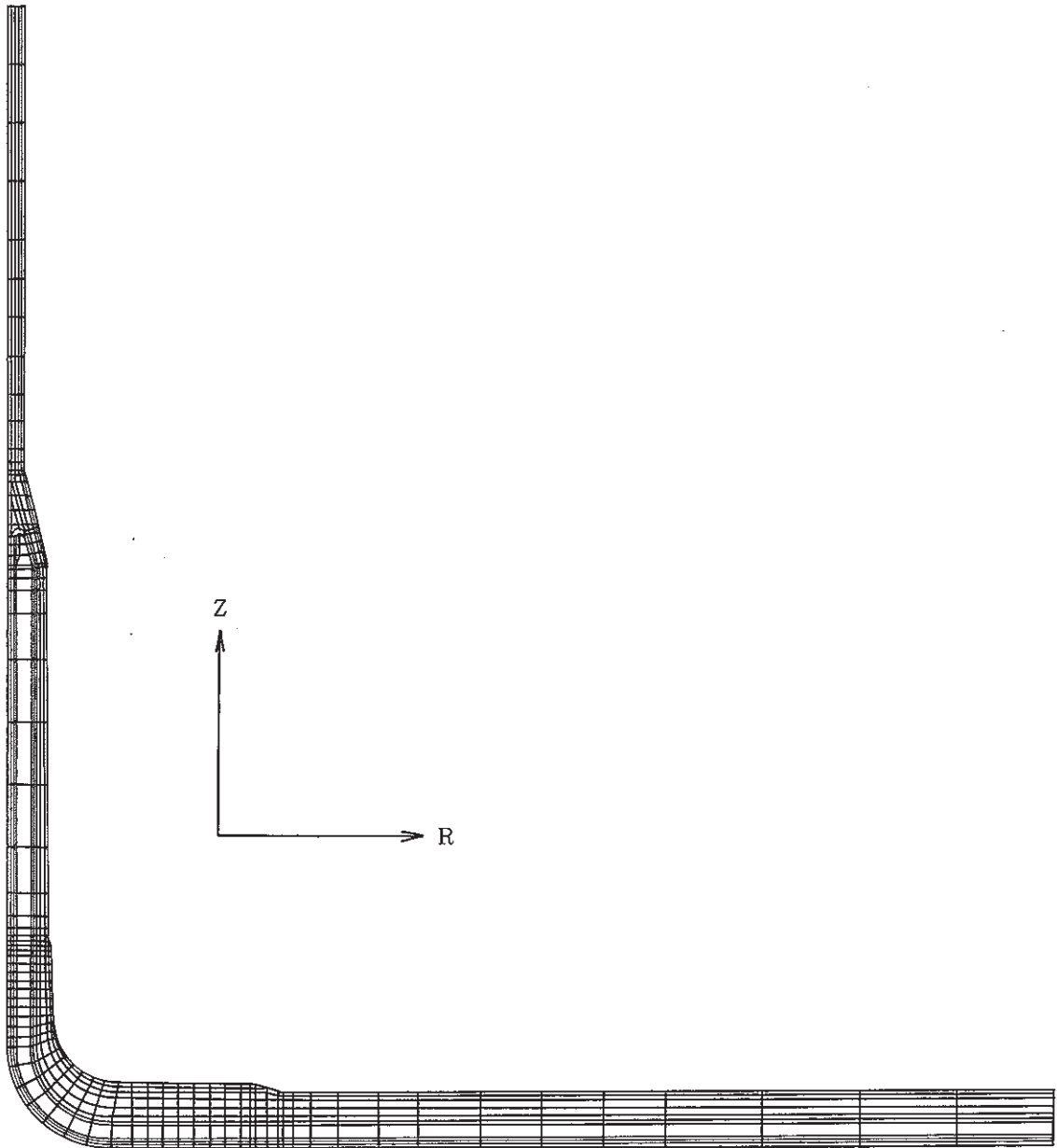


Fig. A 3.3 (c) Finite element model of nozzle and vessel