

JAERI-M

5616

配管応力解析コード "APS-II"

1974年3月

武藤 康

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

配管応力解析コード“APS-II”

日本原子力研究所動力炉開発管理室

武藤 康

(1974年2月8日受理)

高温ガス炉の配管は常温で設置された後、高温高圧のガスが通され熱膨張するが、配管は機器との接続点で固定され自由に膨張できないので内部に著しい熱応力が生じる。また高圧ガスの封じこめによるたが応力も非常に大きい。これらの応力および熱膨張による変位は設計上の大きな問題である。本コードAPS-II(The Code for the Analysis of Piping Stress-II)はこれらの解析を行うためのものであり、CRCに委託して作成された。計算方法はL.G.Peckらによって提唱された変位行列を用いる方法に基づいている。本コードは真直管、1/4円弧管より構成される配管系の応力解析コードであるAPSを改良したものである。直径の変化する真直管、任意の中心角の円弧管より構成される任意の数の固定端、分岐点を有する配管系の熱膨張による応力、変位、固定端への反力、内部あるいは外部のガス圧による応力を計算することが可能である。計算時間は1分程度である。

Code APS-II for Analysis of the Piping Stresses

Yasushi MUTO

Office of Power Reactor Projects, Tokai, JAERI

(Received February 8, 1974)

In nuclear reactors and other industrial plants with high-pressure coolants, considerable thermal and pressure stresses are caused in the pipings. The stresses and reaction forces at anchors then present large problems in engineering. The code APS-II (Analysis of the Piping Stress-II) was prepared to study these phenomena. The method of analysis is based on that of L.G.Peck et al., and the programming was made by Century Research Center Company. It is an advanced version of the code APS which calculates stresses in the straight and quarter-circular pipings. APS-II is capable of calculation of the forces, stresses, deflections and reaction forces due to thermal expansion and internal and external pressures in the pipings with given numbers of straight pipes, circular pipes, anchors and branches. The time required per calculation is about 1 minute.

目 次

1. 基礎概念	1
1.1 熱応力	1
1.1.1 L.G. Peckの方法による力, 変位の計算	1
1.1.2 熱応力の計算	4
1.1.3 撓み係数および応力集中係数	5
1.2 内外圧による応力	6
1.3 合成応力	6
2. 計算式のコード化	8
2.1 熱応力計算	8
2.1.1 配管の特性の読みこみ	8
2.1.2 伝達行列および熱膨張ベクトル	10
2.1.3 変位行列積分核の計算	10
2.1.4 管径が一定の真直管に対する変位行列	12
2.1.5 管径が変化する真直管に対する変位行列	13
2.1.6 円弧管に対する変位行列	17
2.1.7 分点における変位行列, 熱膨張, 力, 変位, 応力の計算	24
2.2 内外圧による応力の計算	25
2.3 合成応力の計算	25
3. 計算コード	26
3.1 構 成	26
3.2 入力準備	26
3.3 入力形式	28
3.4 出力形式	33
3.5 入出力例	37
4. 計算例	45
5. 結 び	52
6. 謝 辞	52
参考文献	52

1. 基礎概念

1.1 熱応力

原子炉，熱交換器，ポンプ等を連結する配管は常温で設置された後，運転温度まで温度上昇を受け熱膨張を生じる。これらの機器は基礎に固定されており，配管は機器との接続点において自由に熱膨張できないため内部に熱応力を生じる。配管の一端が固定され，もう一方の端が自由に熱膨張した後，外力 f によって元の位置まで戻されるとすると，この時の外力 f により生ずる応力が熱応力に等しいと考えられる。配管の変位 d と外力 f との間には，フックの法則により $d = A f$ の関係がある。ここで d ， f は 6 次元ベクトルであり， A は 6×6 次の行列であって変位行列 (Flexibility Matrix) と呼ばれる。従って変位行列 A が知られていると $f = A^{-1} d$ より f が知られ，これに対応する応力が求められる。変位行列 A の成分は配管形状，材料に依存しており，これらの因子との関係は一般には複雑であるが，一端固定の直管に対しては容易に求められる。従って座標変換が行われた場合の A の変化および配管内の任意の点の力および変位の他の点への影響が知られるならば，微小部分の変位行列 A より座標変換と順次加え合わせる方法とによって任意の形状の配管の変位行列 A を求めることができる。この方法は L.G. Peck らによって 1958 年 1 月に発表された [1] ものもであり，本コード APS-II もこの計算法に基いて作成された。

1.1.1 L.G. Peck の方法による力，変位の計算

Fig. 1 に示すような左端を固定した任意の配管を考える。配管上に点 P ， Q を考え，配管に沿う左端よりの距離を s' ， s とする。 Q 点に作用する力 f および変位 d は次のように表わされる。

$$f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$d = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{pmatrix} \quad (2)$$

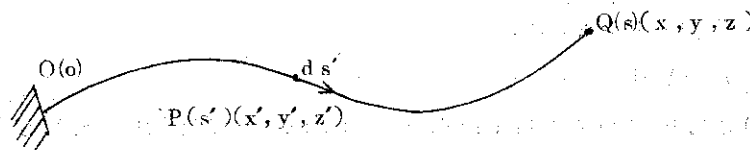


Fig. 1

ここで f_1, f_2, f_3 は x, y, z 方向の力， f_4, f_5, f_6 は x, y, z 軸回りのモーメントを表わす。 d_1, d_2, d_3 は x, y, z 方向の変位， d_4, d_5, d_6 は x, y, z 軸回りの回転角を表わす。フックの

法則により f , d 間には次の関係が成り立つ。

$$d = A f \tag{3}$$

ここで A は変位行列 (Flexibility Matrix) と呼ばれ、 6×6 次の行列である。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{pmatrix} \tag{4}$$

座標軸の平行移動は A に影響しないが、回転は影響し、軸の回転を表わす行列を R とすると

$$A \rightarrow R A R^+ \tag{5}$$

の変化を受ける (R^+ は R の転置行列)。x 軸より s' における接線方向への座標変換の際には R は次式で表わされる。

$$R = \begin{pmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$R = \begin{pmatrix} \dot{x}(s'), & \dot{y}(s'), & \dot{z}(s') \\ \dot{y}(s'), & \frac{\dot{y}(s')^2}{1+\dot{x}(s')} - 1, & \frac{\dot{y}(s')\dot{z}(s')}{1+\dot{x}(s')} \\ \dot{z}(s'), & \frac{\dot{y}(s')\dot{z}(s')}{1+\dot{x}(s')}, & \frac{\dot{z}(s')^2}{1+\dot{x}(s')} - 1 \end{pmatrix}$$

ここで

$$\begin{aligned} \dot{x}(s') &= \frac{dx}{ds'} \\ \dot{y}(s') &= \frac{dy}{ds'} \\ \dot{z}(s') &= \frac{dz}{ds'} \quad \text{の略である。} \end{aligned}$$

次に P 点の変位 d , 力 f の Q 点への影響を考える。P Q 間の管が剛体の場合には次のようになる。

$$d(Q) = T(P \rightarrow Q) d(P) \tag{7}$$

$$f(Q) = T(Q \rightarrow P)^+ f(P) \tag{8}$$

ここで $T(P \rightarrow Q)$ は伝達行列 (Transfer Matrix) と呼ばれ次式で与えられる。

$$T(P \rightarrow Q) = \begin{pmatrix} E & T \\ 0 & E \end{pmatrix} \tag{9}$$

$$T = \begin{pmatrix} 0 & z(s) - z(s'), & y(s') - y(s) \\ z(s') - z(s), & 0 & x(s) - x(s') \\ y(s) - y(s'), & x(s') - x(s), & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

E は単位行列

P Q間の管が剛体でない実際の管では、Q点の変位は、管P Qを剛体とした時のP点の変位の影響 $T(P \rightarrow Q) d(P)$ と管P Qの撓み $A f(Q)$ の和として表わされる。

次に点Pより微小区間 ds' をとったとすると、この区間は真直管と考えられる。 ds' を x 軸に平行におき、P点を固定したとし、この時の変位行列を $A ds'$ とすると A は次のようになる。

$$A = \begin{pmatrix} \alpha & & & & & 0 \\ & \beta & & & & \\ & & \beta & & & \\ & & & \gamma & & \\ & & & & \delta & \\ 0 & & & & & \delta \end{pmatrix} \quad (11)$$

ここで

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{EA} & E &: \text{ヤング率} \\ \beta &= \frac{2}{EA} \kappa (1 + \nu) & A &: \text{管断面積} \\ \gamma &= \frac{1}{EI} (1 + \nu) & \kappa &: \text{剪断分布係数} \\ \delta &= \frac{K}{EI} & \nu &: \text{ポアソン比} \\ & & I &: \text{断面2次モーメント} \\ & & K &: \text{撓み係数 (1.1.3 参照)} \end{aligned}$$

これを ds' 方向に変換すると

$$R(s') A ds' R(s')^+ \quad (12)$$

更にQ点への影響は(7), (8)式より

$$K(s, s') ds' = T(P \rightarrow Q) R(s') A R(s')^+ T^+(P \rightarrow Q) ds' \quad (13)$$

従ってQ点の変位行列は、 $s' = 0$ から $s' = s$ まで重ね合せて

$$\begin{aligned} A(s) &= \int_0^s K(s, s') ds' \\ &= \int_0^s T(P \rightarrow Q) R(s') A R(s')^+ T^+(P \rightarrow Q) ds' \end{aligned} \quad (14)$$

となる。この式を用いて左端を固定された任意の(但し分岐の無い)管の変位行列が求められる。

次に管を結合した場合の変位行列について考える。Fig. 2 に示すように管1, 2を直列に結合する。温度上昇により管が各々 t_{j1} , t_{k2} だけ膨張した後、拘束を受けて最終的に d_j, d_k

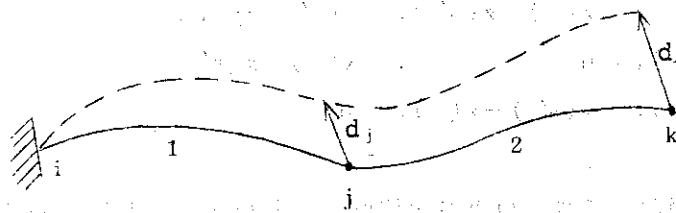


Fig. 2

の変位をしたとすると;

$$d_k - t_k = A_k f_k \tag{15}$$

ここで $A_k = A_{2k} + T_{jk} A_{1j} T_{jk}^+$

$$t_k = t_{k2} + T_{jk} t_{j1}$$

となる。

Fig. 3 に示すように管 1, 2 を k 点で結合したとする。管が自由熱膨張により各々 t_{k1}, t_{k2} だけ膨張し、拘束を受けて最終的に d_k の変位をしたとすると

(16)

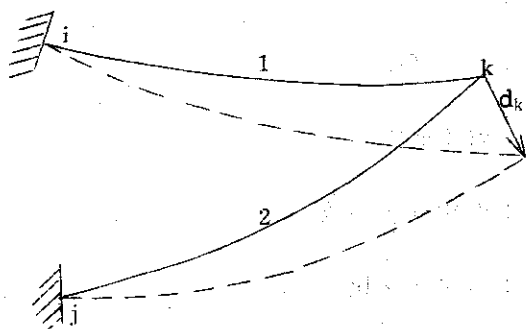


Fig. 3

$$d_k - t_k = A_k f_k$$

ここで $A_{k1} = (A_{k1}^{-1} + A_{k2}^{-1})^{-1}$

$$t_k = (A_{k1}^{-1} + A_{k2}^{-1})^{-1} (A_{k1}^{-1} t_{k1} + A_{k2}^{-1} t_{k2})$$

となる。

以上(14), (15), (16)式を用いて任意の配管の左端を固定した時の右端における自由熱膨張ベクトル t , 変位行列 A が求められ、右端の変位量を 0 とおくことにより逆行列を用いて次式のように力 f が求められる。

$$f = A^{-1} (-t) \tag{17}$$

続いて伝達行列 T を用いて各点の力および変位が計算される。

1.1.2 熱応力の計算

各点における力ベクトル f が求められると、これから曲げモーメント M_b , 捩りモーメント M_t が求められ、以下に記すように応力が求められる。

力ベクトル f の成分は次のようなものである。

$$f_1 = F_x \quad f_4 = M_x$$

$$f_2 = F_y \quad f_5 = M_y$$

$$f_3 = F_z \quad f_6 = M_z$$

配管の考えている点における接線と x, y, z 軸とのなす角を $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ とすると力およびモーメントは次のように表わされる。

$$F_a = f_1 \cos \varphi_x + f_2 \cos \varphi_y + f_3 \cos \varphi_z \quad (18)$$

管軸に垂直方向の力

$$F_r = \sqrt{(f_1 \sin \varphi_x)^2 + (f_2 \sin \varphi_y)^2 + (f_3 \sin \varphi_z)^2} \quad (19)$$

曲げモーメント

$$M_b = \sqrt{(f_4 \sin \varphi_x)^2 + (f_5 \sin \varphi_y)^2 + (f_6 \sin \varphi_z)^2} \quad (20)$$

捩りモーメント

$$M_t = f_4 \cos \varphi_x + f_5 \cos \varphi_y + f_6 \cos \varphi_z \quad (21)$$

引張および曲げによる応力は

$$\sigma = \frac{F_a}{A} + \frac{i D_2 M_b}{2 I} \quad (22)$$

剪断による応力は

$$\mu = \frac{D_2^2 + D_2 D_1 + D_1^2}{12 I} F_r + \frac{D_2 M_t}{4 I} \quad (23)$$

ここで

A : 管断面積

i : 応力集中係数 (1.1.3 参照)

D_2 : 管外径

D_1 : 管内径

I : 断面 2 次モーメント

1.1.3 撓み係数および応力集中係数

曲り管が曲げを受ける場合、管断面が変形して楕円形となるため管が曲り易くなる。換言すれば管の剛性を示す断面 2 次モーメント I が減少することになる。 I が $1/K$ に減少するとし、この係数 K を撓み係数 (Flexibility Factor) と呼ぶ。撓み係数は管の直径、肉厚、曲率の関数として次のように与えられている。

$$\text{真直管に対して} \quad K = 1.0 \quad (24)$$

$$\text{曲り管に対して} \quad K = \frac{1.65}{h} \quad (\text{但し } K < 1 \text{ の時は } K = 1 \text{ とする。})$$

$$\text{ここで} \quad h = \frac{8(D_2 - D_1)R}{(D_2 + D_1)^2}$$

D_2 : 管外径

D_1 : 管内径

R : 管軸の曲率半径

この変形により管の撓み係数が増し、撓み易くなる一方、管断面内の応力分布が変化し、最大応力の生ずる位置が中立軸より最も遠い点から近くに移動するとともに最大応力の値も変ってくる。この応力変化の割合を応力集中係数 (Stress Intensification Factor) i を用いて表わす。 i の値は次のようになる。

$$\text{真直管に対して} \quad i = 1.0$$

曲り管に対して $i = \frac{0.9}{h^{2/3}}$ (但し $i < 1$ の時は $i = 1$ とする)

撓み係数 K は、前述の変位行列の成分 δ に影響し、応力集中係数 i は曲げ応力に対し次のように影響する。

$$\sigma = \frac{i D_2 M_b}{2 I} \quad (25)$$

k, i の式については、理論、実験の多くの式が提唱されており、その間にはかなりの差がみられる[2]。本コード APS-II では、USAS B31.3 で規定されている[3]上記の式を用いることとした。なお APS では他の式を用いており、APS-II と APS の計算結果の差はここから生じている。

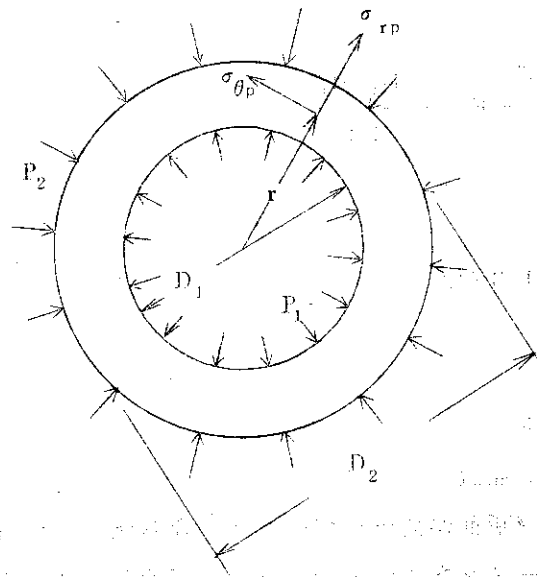


Fig. 4

1.2 内外圧による応力

Fig. 4 に示すような内圧 P_1 、外圧 P_2 を受ける円管において、円周方向の応力 $\sigma_{\theta p}$ 、半径方向の応力 $\sigma_{r p}$ 、軸方向の応力 $\sigma_{t p}$ は以下の式で与えられる。

$$\sigma_{r p} = \frac{P_1 D_1^2 - P_2 D_2^2}{D_2^2 - D_1^2} + \frac{(P_2 - P_1) D_1^2 D_2^2}{4(D_2^2 - D_1^2) r^2} \quad (26)$$

$$\sigma_{\theta p} = \frac{P_1 D_1^2 - P_2 D_2^2}{D_2^2 - D_1^2} - \frac{(P_2 - P_1) D_1^2 D_2^2}{4(D_2^2 - D_1^2)} \quad (27)$$

$$\sigma_{t p} = \frac{1}{2} \sigma_{\theta} \quad (28)$$

1.3 合成応力

熱応力 σ_T 、 μ_T および内外圧による応力 $\sigma_{r p}$ 、 $\sigma_{\theta p}$ 、 $\sigma_{t p}$ は次のように合成される。

$$\text{軸方向合成応力} = \sigma_T + \text{Max} \{ |\sigma_{t p}(D_1)|, |\sigma_{t p}(D_2)| \} \quad (29)$$

軸に垂直方向の合成応力

$$= \mu_T + \text{Max} \{ |\sigma_{rP}(D_1)|, |\sigma_{rP}(D_2)|, |\sigma_{\theta P}(D_1)|, |\sigma_{\theta P}(D_2)| \} \quad (30)$$

ここで $\text{Max} \{ \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_j \}$ は σ_j のうち最大のものを表わす。

2. 計算式のコード化

2.1 熱応力計算

2.1.1 配管の特性の読みこみ

以下に述べるような手順で、配管の座標および直径、材質、温度、圧力などをコードに読みこむ。

- (1) 配管と機器との接続点を端点 (Anchor Point) と呼び、このうち位置、方向を完全に拘束されている点を固定端 (Rigid Anchor)、位置の代わりに力を拘束されている点を拘束端 (Force Restrained Anchor) と呼ぶ。拘束端の数は各々 1 個とする。
- (2) 配管が分岐する点を分岐点 (Branch Point) と呼ぶ。
- (3) 配管は真直管または円弧管より構成されるものとし、これらの単位構成部分を部材 (Member) と呼ぶ。任意の個数の部材の集りで、枝管の出ていないものを部分配管 (Partial Piping) と呼ぶ。
- (4) Fig. 8 に示すように、任意の 1 つの端点を始点 (Start Point)、別の端点を終点 (End Point) とする。この際拘束端があれば、拘束端を終点とするように選ぶ。
- (5) 部分配管に連続番号をつける。始点を有する部分配管の番号は 1 とする。部分配管数を M とする。終点を有する部分配管の番号は M とする。始点、終点以外の部分配管については $2 \sim M-1$ の任意の番号でよい。
- (6) 部材の区切りを分点と呼ぶ。分点に終点より遠い方から連続番号をつける。
- (7) 第 m 番目の部分配管の部材数を N_m とする。従って分点の数は N_m+1 となる。
- (8) 第 m 番目の部分配管の n 番目の部材を (m, n) 、 n 番目の分点を (m, n) と表わす。ある部材の小さい方の分点番号は部材番号に一致することになる。
- (9) 端点の数を N_A 、分岐点の数を N_B とする。部分配管数 M との間には、 $N_A + 3N_B = 2M$ の関係がある。
- (10) 分岐点に集っている部分配管を $B_i (b_{1i}, b_{2i}, b_{3i}) i = 1 \sim N_B$ とする。
- (11) 任意の点を原点として座標系を定める。

以上の手順により、分点番号に対応して座標、管外径、管内径、内圧、外圧が読みこまれる。また部材番号に対応して、ヤング率、ポアソン比、設置温度、運転温度、熱膨張率が読みこまれる。

変位行列の計算は、1.1.1 で述べたように、ある固定端から始まり、分岐点に達すると 2 つの部分配管の変位行列を合成し、順次終点まで行われる。終点において $f = A^{-1} d$ の関係より f が求められた後、経路を逆にたどって全部の分点における力、変位が求められる。このためには、00 に記したように部分配管のつながり方が知られており、さらに計算経路が計算機に記憶されることが必要になる。

これにはまず、終点を除く端点を有する部分配管の番号群 $N_{CAi} (i = 1 \sim N_A - 1)$ を考える。CA は計算上の端点 (Calculative Anchor) の意味である。また分岐点に集る部分配管の番号群を $N_{CBi} (i = 1, N_B)$ とおく。次に N_{CAi} のうちの最小値 p をとり出す。 p を含む N_{CBi} を探し、

N_{CRi} に含まれる他の部分配管のうち、端点をもつものを q 、他を r とする。ここで p, q, r を記憶し、 p, q を N_{CAi} より除き、 r を N_{CAi} に加える。次に再び N_{CAi} のうちの最小値を求める。こうして、端点を有す番号の小さい部分配管から始めて、計算済みの部分配管を除きながら終点まで計算を行うようにする。計算順序は計算機に記憶されるから、終点の力、変位が求められた後の各点の計算は、この逆の順序に従ってとどこおりなく行われる。

断面積 $A(m, n)$ 、断面 2 次モーメント $I(m, n)$ が次式で計算される。

$$\text{断面積 } A(m, n) = \frac{\pi}{4} [D_2(m, n)^2 - D_1(m, n)^2]$$

$$\text{断面 2 次モーメント } I(m, n) = \frac{\pi}{64} [D_2(m, n)^4 - D_1(m, n)^4]$$

$$(m=1 \sim M, n=1 \sim N_m + 1)$$

部材 (m, n) の撓み係数 $K(m, n)$ が次式で計算される。

撓み係数 $K(m, n) = 1.0$: 直管および $K < 1.0$ に対して

$$= \frac{1.65}{h(m, n)} : \text{円弧管に対して}$$

ここで

$$h(m, n) = \frac{8 \{D_2(m, n) - D_1(m, n)\} R(m, n)}{\{D_2(m, n) + D_1(m, n)\}^2}$$

管外径 $D_2(m, n)$ 、内径 $D_1(m, n)$ は分点に対する値であるが、円弧管では部材の両端で等しい値をとるので、どちらの分点の値をとっても同じである。

分点 (m, n) の応力集中係数 $i(m, n)$ が次式で計算される。

応力集中係数 $i(m, n) = 1.0$: 直管および $i < 1.0$ に対して

$$= \frac{0.9}{h(m, n)^{2/3}} : \text{円弧管に対して}$$

ここで $h(m, n)$ は撓み係数に用いた $h(m, n)$ と同じ式によるが、 $R(m, n)$ は部材に対する値であるから、計算に際しては分点の両側の部材の R を比較し小さい方をとるものとする。

変位行列の成分定数を次式で計算する。

$$\alpha(m, n) = \frac{1}{E(m, n) A(m, n)}$$

$$\beta(m, n) = \frac{2[1 + \nu(m, n)]}{E(m, n) A(m, n)}$$

$$\gamma(m, n) = \frac{1 + \nu(m, n)}{E(m, n) I(m, n)}$$

$$\delta(m, n) = \frac{K(m, n)}{E(m, n) I(m, n)}$$

これらの定数は、管径が一定な真直管の場合および円弧管の場合に用いられる。

2.1.2 伝達行列および熱膨張ベクトルの計算

分点 (m, n) より $(m, n+1)$ への伝達行列 $T(m, n)$ の成分を次式で計算する。

$$T(m, n) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & Z(m, n) & -Y(m, n) \\ 0 & 1 & 0 & -Z(m, n) & 0 & X(m, n) \\ 0 & 0 & 1 & Y(m, n) & -X(m, n) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$(m=1 \sim M, n=1 \sim N_m)$$

部材 (m, n) の熱膨張ベクトル $t(m, n)$ の成分を次式で計算する。

$$t(m, n)_1 = \alpha_T(m, n) \Delta T(m, n) X(m, n)$$

$$t(m, n)_2 = \alpha_T(m, n) \Delta T(m, n) Y(m, n)$$

$$t(m, n)_3 = \alpha_T(m, n) \Delta T(m, n) Z(m, n)$$

$$t(m, n)_4 = 0$$

$$t(m, n)_5 = 0$$

$$t(m, n)_6 = 0$$

$$(m=1 \sim M, n=1 \sim N_m)$$

2.1.3 変位行列積分核の計算

(14式より変位行列積分核は

$$K(s, s') = T(P \rightarrow Q) R(s') A R(s')^+ T^+(P \rightarrow Q)$$

である。

$T(P \rightarrow Q)$, $T^+(P \rightarrow Q)$ は (9) 式で, $R(s')$, $R(s')^+$ は (6) 式で, A は (11) 式で与えられているから, これを代入して計算すると次式を得る。ここで x, y, z は Q 点の座標, x', y', z' は O

Q 間の任意の点 P の座標であり, $\dot{x}', \dot{y}', \dot{z}'$ はそれぞれ $\frac{dx'}{ds'}$, $\frac{dy'}{ds'}$, $\frac{dz'}{ds'}$ を表わして

いる。

$$k_{11} = \beta + (\alpha - \beta) \dot{x}'^2 + (z' - z)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \}$$

$$+ (y' - y)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} - 2(\gamma - \delta)(y' - y)(z' - z) \dot{y}' \dot{z}'$$

$$k_{12} = (\alpha - \beta) \dot{x}' \dot{y}' - (\gamma - \delta)(z' - z)^2 \dot{x}' \dot{y}'$$

$$+ (\gamma - \delta)(z' - z)(x' - x) \dot{y}' \dot{z}' + (\gamma - \delta)(y' - y)(z' - z) \dot{z}' \dot{x}'$$

$$- (x' - x)(y' - y) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \}$$

$$k_{13} = (\alpha - \beta) \dot{z}' \dot{x}' + (\gamma - \delta) (y' - y) (z' - z) \dot{x}' \dot{y}' \\ - (\gamma - \delta) (y' - y)^2 \dot{z}' \dot{x}' - (z' - z) (x' - x) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \} \\ + (\gamma - \delta) (x' - x) (y' - y) \dot{y}' \dot{z}'$$

$$k_{14} = -(\gamma - \delta) (z' - z) \dot{x}' \dot{y}' + (\gamma - \delta) (y' - y) \dot{z}' \dot{x}'$$

$$k_{15} = (\gamma - \delta) (y' - y) \dot{y}' \dot{z}' - (z' - z) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \}$$

$$k_{16} = -(\gamma - \delta) (z' - z) \dot{y}' \dot{z}' + (y' - y) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \}$$

$$k_{22} = \beta + (\alpha - \beta) \dot{y}'^2 + (z' - z)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \}$$

$$+ (x' - x)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} - 2(\gamma - \delta) (z' - z) (x' - x) \dot{z}' \dot{x}'$$

$$k_{23} = (\alpha - \beta) \dot{y}' \dot{z}' - (y' - y) (z' - z) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \}$$

$$+ (\gamma - \delta) (z' - z) (x' - x) \dot{x}' \dot{y}' - (\gamma - \delta) (x' - x)^2 \dot{y}' \dot{z}'$$

$$+ (\gamma - \delta) (x' - x) (y' - y) \dot{z}' \dot{x}'$$

$$k_{24} = (z' - z) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \} - (\gamma - \delta) (x' - x) \dot{x}' \dot{z}'$$

$$k_{25} = (\gamma - \delta) (z' - z) \dot{x}' \dot{y}' - (\gamma - \delta) (x' - x) \dot{y}' \dot{z}'$$

$$k_{26} = -(x' - x) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} + (\gamma - \delta) (z' - z) \dot{z}' \dot{x}'$$

$$k_{33} = \beta + (\alpha - \beta) \dot{z}'^2 + (x' - x)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \}$$

$$+ (y' - y)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \} - 2(\gamma - \delta) (x' - x) (y' - y) \dot{x}' \dot{y}'$$

$$k_{34} = -(y' - y) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \} + (\gamma - \delta) (x' - x) \dot{x}' \dot{y}'$$

$$k_{35} = (x' - x) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \} - (\gamma - \delta) (y' - y) \dot{x}' \dot{y}'$$

$$k_{36} = (\gamma - \delta) (x' - x) \dot{y}' \dot{z}' - (\gamma - \delta) (y' - y) \dot{z}' \dot{x}'$$

$$k_{44} = \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2$$

$$k_{45} = (\gamma - \delta) \dot{x}' \dot{y}'$$

$$k_{46} = (\gamma - \delta) \dot{z}' \dot{x}'$$

$$k_{55} = \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2$$

$$k_{56} = (\gamma - \delta) \dot{y}' \dot{z}'$$

$$k_{66} = \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2$$

$$k_{ji} = k_{ij} \quad (i=1\sim 6, j=1\sim 6)$$

従って配管が座標 (x', y', z') の関数として表わされれば $K(s, s')$ の成分 k_{ij} が計算され、 $K(s, s')$ を積分して変位行列 $A(s)$ が求められる。しかし配管形状を数式で与えることは煩雑であるし、数値積分の実行には誤差を伴う。ところがプラントで実用に供される配管は、通常真直管と円弧管との組合せより成っているので、直線部材と円弧部材とについて予め変位行列を求めておき、これを(9)、(10)式を用いて合成すれば、配管の数式表示、数値積分を行うことなしに配管の変位行列を求めることができ、実用上もこれで十分である。次節以下に真直管円弧管の変位行列を示す。

2.1.4 管径が一定の真直管に対する変位行列

分点 (m, n) の内径、外径を $D_1(m, n)$ 、 $D_2(m, n)$ とすると、 $D_1(m, n) = D_1(m, n+1)$ 、 $D_2(m, n) = D_2(m, n+1)$ が同時に成り立つ場合である。

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は、ヤング率 E 、ポアソン比 ν 、断面積 A 、断面 2 次モーメント I 、撓み係数 $K(=1)$ のいずれも分点間で一定であるから次のようになる。

$$\alpha(m, n) = \frac{1}{E(m, n)A(m, n)}$$

$$\beta(m, n) = \frac{2[1+\nu(m, n)]}{E(m, n)A(m, n)}$$

$$\gamma(m, n) = \frac{1+\nu(m, n)}{E(m, n)I(m, n)}$$

$$\delta(m, n) = \frac{K(m, n)}{E(m, n)I(m, n)}$$

分点間の座標差を $X(m, n)$ 、 $Y(m, n)$ 、 $Z(m, n)$ とし距離を $L(m, n)$ とする。

(m, n) を省略すると部材 (m, n) の変位行列成分 $a_{ij}(m, n)$ は次のように表わされる。

$$a_{11} = \beta L + (\alpha - \beta) \frac{X^2}{L} + \frac{\delta}{3} (Y^2 + Z^2) L$$

$$a_{21} = (\alpha - \beta) \frac{XL}{L} - \frac{\delta}{3} XY L$$

$$a_{31} = (\alpha - \beta) \frac{ZX}{L} - \frac{\delta}{3} ZX L$$

$$a_{41} = 0$$

$$a_{51} = \frac{1}{2} \delta Z L$$

$$a_{61} = -\frac{1}{2} \delta Y L$$

$$a_{22} = \beta L + (\alpha - \beta) \frac{Y^2}{L} + \frac{\delta}{3} (Z^2 + X^2) L$$

$$a_{32} = (\alpha - \beta) \frac{YZ}{L} - \frac{\delta}{3} YZ L$$

$$a_{42} = -\frac{1}{2} \delta Z L$$

$$a_{52} = 0$$

$$a_{62} = \frac{1}{2} \delta X L$$

$$a_{33} = \beta L + (\alpha - \beta) \frac{Z^2}{L} + \frac{\delta}{3} (X^2 + Y^2) L$$

$$a_{43} = \frac{1}{2} \delta Y L$$

$$a_{53} = -\frac{1}{2} \delta X L$$

$$a_{63} = 0$$

$$a_{44} = \delta L + (\gamma - \delta) \frac{X^2}{L}$$

$$a_{54} = (\gamma - \delta) \frac{XY}{L}$$

$$a_{64} = (\gamma - \delta) \frac{ZX}{L}$$

$$a_{55} = \delta L + (\gamma - \delta) \frac{Y^2}{L}$$

$$a_{65} = (\gamma - \delta) \frac{YZ}{L}$$

$$a_{66} = \delta L + (\gamma - \delta) \frac{Z^2}{L}$$

$$a_{ji} = a_{ij} \quad (i=1 \sim 6, j=1 \sim 6)$$

2.1.5 管径が変化する真直管に対する変位行列

分点 (m, n) の内径, 外径を $D_1(m, n), D_2(m, n)$ とすると, $D_1(m, n) \cong D_1(m, n+1), D_2(m, n) \cong D_2(m, n+1)$ のどちらかまたは両方が成り立つ場合である。この場合ヤング率 E , ポアソン比 ν は変らないが, 断面積 A , 断面 2 次モーメント I は分点間で変化する。

次のような記号を用いる。

$$h_1(m, n) = D_1(m, n+1) - D_1(m, n)$$

$$h_2(m, n) = D_2(m, n+1) - D_2(m, n)$$

以下 (m, n) を省略する。

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$$P = \frac{D_2 + D_1}{h_2 + h_1}$$

$$q = \frac{2D_2 h_2 + 2D_1 h_1}{h_2^2 + h_1^2}$$

$$\rho = \frac{D_2^2 + D_1^2}{h_2^2 + h_1^2}$$

$$\pi_1 = \frac{|h_2 + h_1 + D_2 + D_1|}{D_2 + D_1}$$

$$\pi_2 = \frac{|h_2 - h_1 + D_2 - D_1|}{D_2 - D_1}$$

$$A_0 = \frac{16(h_2 + h_1)^2 L}{\pi(D_2 h_1 - D_1 h_2)} \quad (D_2 h_1 - D_1 h_2 \neq 0 \text{ とする})$$

$$B_0 = \frac{-16(h_2 - h_1)^2 L}{\pi(D_2 h_1 - D_1 h_2)^3}$$

$$C_0 = \frac{-64 h_2 h_1 L}{\pi(D_2 h_1 - D_1 h_2)^3}$$

$$D_0 = \frac{32(D_2 h_1^3 - 3D_2 h_1 h_2^2 - 3D_1 h_2 h_1^2 + D_1 h_2^3) L}{\pi(D_2 h_1 - D_1 h_2)^3 (h_2^2 + h_1^2)}$$

$$E_0 = \frac{2L}{\pi(D_2 h_1 - D_1 h_2)}$$

$$B_1 = \frac{-16(h_2 - h_1)(D_2 - D_1)L}{\pi(D_2 h_1 - D_1 h_2)^3}$$

$$B_2 = \frac{-16(h_2 - h_1 + D_2 - D_1)^2 L}{\pi(D_2 h_1 - D_1 h_2)^3}$$

$$\varepsilon = \frac{2|D_2 h_1 - D_1 h_2|}{h_2^2 + h_1^2}$$

$$G = \frac{2}{\varepsilon} \left\{ t_{an}^{-1} \frac{2+q}{\varepsilon} - t_{an}^{-1} \frac{q}{\varepsilon} \right\}$$

$$H = \frac{1}{2} \log_e \left| \frac{1+q+\rho}{\rho} \right| - \frac{q}{\varepsilon} \left\{ t_{an}^{-1} \frac{2+q}{\varepsilon} - t_{an}^{-1} \frac{q}{\varepsilon} \right\}$$

これらを用いて変位行列成分 a_{ij} (m, n) は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left[2(1+\nu) - (1+2\nu) \frac{X^2}{L^2} \right] \frac{E_0}{E} \log_e \frac{\pi_1}{\pi_2} \\ &+ \frac{(Y^2+Z^2)}{E} \left\{ A_0 \left[-\frac{3}{2} - p + (p+1)^2 \log_e \pi_1 \right] - \frac{3}{2} B_0 \right. \\ &- B_1 + B_2 \log_e \pi_2 + D_0 - \left(q + \frac{3}{2} \right) C_0 + \left[(q^2 + 2q + 1 - \rho) C_0 \right. \\ &\left. \left. - (q+2) D_0 \right] H + \left[(q+2) C_0 \rho + (1-\rho) D_0 \right] G \right\} \\ a_{12} &= -\frac{(1+2\nu) E_0}{L^2 E} XY \log_e \frac{\pi_1}{\pi_2} - \frac{XY}{E} \left\{ A_0 \left[-\frac{3}{2} - p + (p+1)^2 \log_e \pi_1 \right] \right. \\ &- \frac{3}{2} B_0 - B_1 + B_2 \log_e \pi_2 + D_0 - \left(q + \frac{3}{2} \right) C_0 \\ &+ \left[(q^2 + 2q + 1 - \rho) C_0 - (q+2) D_0 \right] H \\ &\left. + \left[(q+2) C_0 \rho + (1-\rho) D_0 \right] G \right\} \\ a_{13} &= -\frac{(1+2\nu) E_0}{L^2 E} ZX \log_e \frac{\pi_1}{\pi_2} - \frac{ZX}{E} \left\{ A_0 \left[-\frac{3}{2} - p \right. \right. \\ &\left. \left. + (p+1)^2 \log_e \pi_1 \right] - \frac{3}{2} B_0 - B_1 + B_2 \log_e \pi_2 + D_0 \right. \\ &- \left(q + \frac{3}{2} \right) C_0 + \left[(q^2 + 2q + 1 - \rho) C_0 - (q+2) D_0 \right] H \\ &\left. + \left[(q+2) C_0 \rho + (1-\rho) D_0 \right] G \right\} \\ a_{14} &= 0 \\ a_{15} &= \frac{Z}{E} \left\{ A_0 (1+p) \log_e \pi_1 + (B_0 + B_1) \log_e \pi_2 \right. \\ &\left. + (C_0 q + C_0 - D_0) H + (C_0 \rho + D_0) G \right\} \\ a_{16} &= -\frac{Y}{E} \left\{ A_0 (1+p) \log_e \pi_1 + (B_0 + B_1) \log_e \pi_2 \right. \\ &\left. + (C_0 q + C_0 - D_0) H + (C_0 \rho + D_0) G \right\} \end{aligned}$$

$$a_{22} = \left[2(1+\nu) - (1+2\nu) \frac{Y^2}{L^2} \right] \frac{E_0}{E} \log_e \frac{\pi_1}{\pi_2} + \frac{(Z^2 + X^2)}{E}$$

$$\times \{ A_0 [-p + (p+1)^2 \log_e \pi_1] - B_1 + B_2 \log_e \pi_2 + D_0 - q C_0$$

$$+ [(q^2 + 2q + 1 - \rho) C_0 - (q+2) D_0] H + [(q+2) C_0 \rho + (1-\rho) D_0] G \}$$

$$a_{23} = - \frac{(1+2\nu) E_0}{L^2 E} Y Z \log_e \frac{\pi_1}{\pi_2} - \frac{Y Z}{E} \{ A_0 [-p + (p+1)^2 \log_e \pi_1]$$

$$- B_1 + B_2 \log_e \pi_2 + D_0 - q C_0 + [(q^2 + 2q + 1 - \rho) C_0$$

$$- (q+2) D_0] H + [(q+2) C_0 \rho + (1-\rho) D_0] G \}$$

$$a_{24} = - \frac{Z}{E} \{ A_0 (1+p) \log_e \pi_1 + (B_0 + B_1) \log_e \pi_2$$

$$+ (C_0 q + C_0 - D_0) H + (C_0 \rho + D_0) G \}$$

$$a_{25} = 0$$

$$a_{26} = \frac{X}{E} \{ A_0 (1+p) \log_e \pi_1 + (B_0 + B_1) \log_e \pi_2$$

$$+ (C_0 q + C_0 - D_0) H + (C_0 \rho + D_0) G \}$$

$$a_{33} = \left[2(1+\nu) - (1+2\nu) \frac{Z^2}{L^2} \right] \frac{E_0}{E} \log_e \frac{\pi_1}{\pi_2}$$

$$+ \frac{(X^2 + Y^2)}{E} \{ A_0 [-p + (p+1)^2 \log_e \pi_1] - B_1 + B_2 \log_e \pi_2$$

$$+ D_0 - q C_0 + [(q^2 + 2q + 1 - \rho) C_0 - (q+2) D_0] H$$

$$+ [(q+2) C_0 \rho + (1-\rho) D_0] G \}$$

$$a_{34} = \frac{Y}{E} \{ A_0 (1+p) \log_e \pi_1 + (B_0 + B_1) \log_e \pi_2$$

$$+ (C_0 q + C_0 - D_0) H + (C_0 \rho + D_0) G \}$$

$$a_{35} = - \frac{X}{E} \{ A_0 (1+p) \log_e \pi_1 + (B_0 + B_1) \log_e \pi_2$$

$$+ (C_0 q + C_0 - D_0) H + (C_0 \rho + D_0) G \}$$

$$a_{36} = 0$$

$$a_{44} = \frac{(1 + \nu \frac{X^2}{L^2})}{E} \{A_0 \log_e \pi_1 + B_0 \log_e \pi_2 + C_0 H + D_0 G\}$$

$$a_{45} = \frac{\nu XY}{L^2 E} \{A_0 \log_e \pi_1 + B_0 \log_e \pi_2 + C_0 H + D_0 G\}$$

$$a_{46} = \frac{\nu ZX}{EL^2} \{A_0 \log_e \pi_1 + B_0 \log_e \pi_2 + C_0 H + D_0 G\}$$

$$a_{55} = \frac{(1 + \nu \frac{Y^2}{L^2})}{E} \{A_0 \log_e \pi_1 + B_0 \log_e \pi_2 + C_0 H + D_0 G\}$$

$$a_{56} = \frac{\nu YZ}{L^2 E} \{A_0 \log_e \pi_1 + B_0 \log_e \pi_2 + C_0 H + D_0 G\}$$

$$a_{66} = \frac{(1 + \nu \frac{Z^2}{L^2})}{E} \{A_0 \log_e \pi_1 + B_0 \log_e \pi_2 + C_0 H + D_0 G\}$$

2.1.6 円弧管に対する変位行列

円弧の曲率中心および中心角を、分点の座標 $x(m, n)$, $y(m, n)$, $z(m, n)$ および分点における接線の交点の座標 $x_R(m, n)$, $y_R(m, n)$, $z_R(m, n)$ より求める。

$$X(m, n) = x(m, n+1) - x(m, n)$$

$$Y(m, n) = y(m, n+1) - y(m, n)$$

$$Z(m, n) = z(m, n+1) - z(m, n)$$

$$X_R(m, n) = x_R(m, n) - x(m, n)$$

$$Y_R(m, n) = y_R(m, n) - y(m, n)$$

$$Z_R(m, n) = z_R(m, n) - z(m, n)$$

$X(m, n)$, $Y(m, n)$, $Z(m, n)$, $X_R(m, n)$, $Y_R(m, n)$, $Z_R(m, n)$ の (m, n) を省略する。

曲率中心の座標 $x_C(m, n)$, $y_C(m, n)$, $z_C(m, n)$ は次のようになる。

$$x_C(m, n) = C \{ (XY_R - YX_R) Y_R - (ZX_R - XZ_R) Z_R \} + x(m, n)$$

$$y_C(m, n) = C \{ (YZ_R - ZY_R) Z_R - (XY_R - YX_R) X_R \} + y(m, n)$$

$$z_C(m, n) = C \{ (ZX_R - XZ_R) X_R - (YZ_R - ZY_R) Y_R \} + z(m, n)$$

ここで

$$C = \frac{X^2 + Y^2 + Z^2 - XX_R - YY_R - ZZ_R}{(YZ_R - ZY_R)^2 + (ZX_R - XZ_R)^2 + (XY_B - YX_B)^2}$$

曲率半径 $R(m, n)$ は次の通り。

$$R(m, n) = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \sqrt{X_R^2 + Y_R^2 + Z_R^2}}{\sqrt{(X - 2X_R)^2 + (Y - 2Y_R)^2 + (Z - 2Z_R)^2}}$$

中心角 $\theta(m, n)$ は次の通り。

$$\cos \frac{\theta(m, n)}{2} = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}{2\sqrt{X_B^2 + Y_B^2 + Z_B^2}}$$

$$\theta(m, n) = 2 \cos^{-1} \frac{\theta(m, n)}{2}$$

分点 (m, n) を起点とした曲率中心の座標 $X_C(m, n)$, $Y_C(m, n)$, $Z_C(m, n)$ は次のようになる。

$$X_C(m, n) = x_C(m, n) - x(m, n)$$

$$Y_C(m, n) = y_C(m, n) - y(m, n)$$

$$Z_C(m, n) = z_C(m, n) - z(m, n)$$

これについても (m, n) を省略し, A, M_1, M_2, M_3 の定数を次のように定める。

$$A = \sqrt{(XY_C - YX_C)^2 + (ZX_C - XZ_C)^2 + (YZ_C - ZY_C)^2}$$

$$M_1 = \frac{1}{A} \{X(Y_C^2 + Z_C^2) - X_C(YY_C + ZZ_C)\}$$

$$M_2 = \frac{1}{A} \{Y(Z_C^2 + X_C^2) - Y_C(ZZ_C + XX_C)\}$$

$$M_3 = \frac{1}{A} \{Z(X_C^2 + Y_C^2) - Z_C(XX_C + YY_C)\}$$

以上の記号を用いると変位行列成分 $a(m, n)_{ij}$ は次のように表わされる。但し $\alpha(m, n)$, $\beta(m, n)$, $\gamma(m, n)$, $\delta(m, n)$ は各部材で一定, 即ち円弧管の直径は部材の途中では変らないものとする。

$$\begin{aligned} a(m, n)_{11} = & \{ \beta + \delta(Y_C - Y)^2 + \delta(Z_C - Z)^2 \} R \theta \\ & - 2\delta \{ (Y_C - Y)Y_C + (Z_C - Z)Z_C \} R \sin \theta \\ & + 2\delta \{ (Y_C - Y)M_2 + (Z_C - Z)M_3 \} R (1 - \cos \theta) \\ & + \left[(\alpha - \beta) \frac{M_1^2}{R} + \delta R(Y_C^2 + Z_C^2) + \frac{(r - \delta)}{R} \{ (Y_C - Y)M_3 \right. \\ & \left. - (Z_C - Z)M_2 \}^2 \right] \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \\ & + \left[(\alpha - \beta) \frac{X_C M_1}{R} - \delta R(Y_C M_2 + Z_C M_3) \right. \\ & \left. + \frac{(r - \delta)}{R} (YZ_C - Y_C Z) \{ (Z_C - Z)M_2 - (Y_C - Y)M_3 \} \right] \sin^2 \theta \\ & + \left[(\alpha - \beta) \frac{X_C^2}{R} + \delta R(M_2^2 + M_3^2) + \frac{(r - \delta)}{R} (ZY_C - YZ_C)^2 \right] \\ & \times \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2(\gamma - \delta)}{R} \{ (Y_C - Y)M_3 - (Z_C - Z)M_2 \} (Z_C M_2 - Y_C M_3) \sin \theta \\
 & + \frac{2(\gamma - \delta)}{R} (Z_C M_2 - Y_C M_3) \{ (Y_C - Y)Z_C - (Z_C - Z)Y_C \} \\
 & \times (1 - \cos \theta) + \frac{(\gamma - \delta)}{R} (Z_C M_2 - Y_C M_3)^2 \theta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a(m, n)_{21} = & -\delta R (X_C - X)(Y_C - Y)\theta + \delta R (2X_C Y_C - XY_C - X_C Y)\sin \theta \\
 & -\delta R \{ (X_C - X)M_2 + (Y_C - Y)M_1 \} (1 - \cos \theta) \\
 & + \left[\frac{1}{R^2} (\alpha - \beta) M_1 M_2 + (\gamma - \delta) \frac{R^2}{A^2} (ZX_C - Z_C X)(YZ_C - Y_C Z) \right. \\
 & \left. \times \cos^2 \theta - \delta X_C Y_C \right] \frac{R}{2} (\theta + \sin \theta \cos \theta) \\
 & + \left[\frac{1}{R^2} (\alpha - \beta) (X_C M_2 + Y_C M_1) + 2(\gamma - \delta) (ZX_C - XZ_C) \right. \\
 & \left. \times (YZ_C - Y_C Z) \frac{\cos \theta}{A} + \delta (X_C M_2 + Y_C M_1) \right] \frac{R}{2} \sin^2 \theta \\
 & + \left[\frac{1}{R^2} (\alpha - \beta) X_C Y_C + \frac{1}{R^2} (\gamma - \delta) (YZ_C - ZY_C) (ZX_C - XZ_C) \right. \\
 & \left. - \delta M_1 M_2 \right] \frac{R}{2} (\theta - \sin \theta \cos \theta) \\
 & - \frac{2(\gamma - \delta) R^3}{A^2} (ZX_C - Z_C X)(YZ_C - Y_C Z) \cos \theta \\
 & + \frac{2(\gamma - \delta) R}{A} (ZX_C - Z_C X)(ZY_C - YZ_C) (1 - \cos \theta) \\
 & + (\gamma - \delta) (YZ_C - Y_C Z)(ZX_C - Z_C X) \frac{R^3}{A^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a(m, n)_{31} = & -\delta R (Z_C - Z)(X_C - X)\theta + \delta R (2Z_C X_C - ZX_C - Z_C X)\sin \theta \\
 & -\delta R \{ (Z_C - Z)M_1 + (X_C - X)M_3 \} (1 - \cos \theta) \\
 & + \left[\frac{1}{R^2} (\alpha - \beta) M_3 M_1 + (\gamma - \delta) \frac{R^2}{A^2} (YZ_C - Y_C Z)(XY_C - X_C Y) \right. \\
 & \left. \times \cos^2 \theta - \delta Z_C X_C \right] \frac{R}{2} (\theta + \sin \theta \cos \theta) \\
 & + \left[\frac{1}{R^2} (\alpha - \beta) (Z_C M_1 + X_C M_3) + 2(\gamma - \delta) (YZ_C - ZY_C) \right. \\
 & \left. \times (XY_C - X_C Y) \frac{\cos \theta}{A} + \delta (Z_C M_1 + X_C M_3) \right] \frac{R}{2} \sin^2 \theta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left[\frac{1}{R^2} (\alpha - \beta) Z_C X_C + \frac{1}{R^2} (\gamma - \delta) (XY_C - YX_C) (YZ_C - ZY_C) \right. \\
 & \quad \left. - \delta M_3 M_1 \right] \frac{R}{2} (\theta - \sin \theta \cos \theta) \\
 & - \frac{2(\gamma - \delta) R^3}{A^2} (YZ_C - Y_C Z) (XY_C - X_C Y) \cos \theta \\
 & + \frac{2(\gamma - \delta) R}{A} (YZ_C - Y_C Z) (YX_C - XY_C) (1 - \cos \theta) \\
 & + (\gamma - \delta) (XY_C - X_C Y) (YZ_C - Y_C Z) \frac{R^3}{A^2} \\
 a(m, n)_{41} = & \frac{(\gamma - \delta)}{R} (YZ_C - Y_C Z) \left[-\frac{M_1 R^2}{A} \cos \theta \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \right. \\
 & - X_C \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) + \frac{X_C R^2}{2A} (2 - 2 \cos \theta - \cos \theta \sin^2 \theta) \\
 & \left. - \frac{M_1}{2} \sin^2 \theta + \frac{M_1 R^2}{A} \sin \theta \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a(m, n)_{51} = & -\delta R (Z_C - Z) \theta + \delta R Z_C \sin \theta - \delta R M_3 (1 - \cos \theta) \\
 & + \frac{(\gamma - \delta)}{R} (YZ_C - Y_C Z) \left[-\frac{M_2}{A} R^2 \cos \theta \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \right. \\
 & - \left(M_2 + \frac{Y_C}{A} R^2 \cos \theta \right) \frac{1}{2} \sin^2 \theta - Y_C \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \\
 & \left. + \frac{M_2}{A} R^2 \sin \theta + \frac{Y_C}{A} R^2 (1 - \cos \theta) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a(m, n)_{61} = & \delta R (Y_C - Y) \theta - \delta R Y_C \sin \theta + \delta R M_2 (1 - \cos \theta) \\
 & + \frac{(\gamma - \delta)}{R} (YZ_C - Y_C Z) \left[-\frac{M_3}{A} R^2 \cos \theta \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \right. \\
 & - \left(\frac{Z_C}{A} R^2 \cos \theta + M_3 \right) \frac{1}{2} \sin^2 \theta - Z_C \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \\
 & \left. + \frac{M_3}{A} R^2 \sin \theta + \frac{Z_C}{A} R^2 (1 - \cos \theta) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a(m, n)_{22} = & \{ \beta + \delta (Z_C - Z)^2 + \delta (X_C - X)^2 \} R \theta \\
 & - 2 \delta \{ (Z_C - Z) Z_C + (X_C - X) X_C \} R \sin \theta \\
 & + 2 \delta \{ (Z_C - Z) M_3 + (X_C - X) M_1 \} R (1 - \cos \theta) \\
 & + \left[(\alpha - \beta) \frac{M_2^2}{R} + \delta R (Z_C^2 + X_C^2) + \frac{(\gamma - \delta)}{R} \{ (Z_C - Z) M_1 \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - (X_C - X) M_3^2 \} \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin\theta \cos\theta \right) \\
 & + \left[(\alpha - \beta) \frac{Y_C M_2}{R} - \delta R (Z_C M_3 + X_C M_1) \right. \\
 & + \frac{(\gamma - \delta)}{R} (Z X_C - Z_C X) \{ (X_C - X) M_3 - (Z_C - Z) M_1 \} \left. \right] \sin^2\theta \\
 & + \left[(\alpha - \beta) \frac{Y_C^2}{R} + \delta R (M_3^2 + M_1^2) + \frac{(\gamma - \delta)}{R} \{ (Z_C - Z) X_C \right. \\
 & - (X_C - X) Z_C \}^2 \left. \right] \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin\theta \cos\theta \right) \\
 & + \frac{2(\gamma - \delta)}{R} \{ (Z_C - Z) M_1 - (X_C - X) M_3 \} (X_C M_3 - Z_C M_1) \sin\theta \\
 & + \frac{2(\gamma - \delta)}{R} (X_C M_3 - Z_C M_1) \{ (Z_C - Z) X_C - (X_C - X) Z_C \} \\
 & \times (1 - \cos\theta) + \frac{(\gamma - \delta)}{R} (X_C M_3 - Z_C M_1)^2 \theta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a(m, n)_{32} &= -\delta R (Y_C - Y) (Z_C - Z) \theta + \delta R (2 Y_C Z_C - Y Z_C - Y_C Z) \sin\theta \\
 & - \delta R \{ (Y_C - Y) M_3 + (Z_C - Z) M_2 \} (1 + \cos\theta) \\
 & + \left[\frac{1}{R^2} (\alpha - \beta) M_2 M_3 + (\gamma - \delta) \frac{R^2}{A^2} (X Y_C - X_C Y) (Z X_C - Z_C X) \right. \\
 & \times \cos^2\theta - \delta Y_C Z_C \left. \right] \frac{R}{2} (\theta + \sin\theta \cos\theta) \\
 & + \left[\frac{1}{R^2} (\alpha - \beta) (Y_C M_3 + Z_C M_2) + 2(\gamma - \delta) (X Y_C - Y X_C) \right. \\
 & \times (Z X_C - Z_C X) \frac{\cos\theta}{A} + \delta (Y_C M_3 + Z_C M_2) \left. \right] \frac{R}{2} \sin^2\theta \\
 & + \left[\frac{1}{R^2} (\alpha - \beta) Y_C Z_C + \frac{1}{R^2} (\gamma - \delta) (Z X_C - X Z_C) (X Y_C - Y X_C) \right. \\
 & - \delta M_2 M_3 \left. \right] \frac{R}{2} (\theta - \sin\theta \cos\theta) \\
 & - \frac{2(\gamma - \delta) R^3}{A^2} (X Y_C - X_C Y) (Z X_C - Z_C X) \cos\theta \\
 & + \frac{2(\gamma - \delta) R}{A} (X Y_C - X_C Y) (X Z_C - Z X_C) (1 - \cos\theta) \\
 & + (\gamma - \delta) (Z X_C - Z_C X) (X Y_C - X_C Y) \frac{R^3}{A^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a(m, n)_{42} = & \delta R(Z_G - Z)\theta - \delta R Z_C \sin\theta + \delta R M_3 (1 - \cos\theta) \\
 & + \frac{(r - \delta)}{R} (Z X_C - Z_C X) \left[-\frac{M_1}{A} R^2 \cos\theta \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin\theta \cos\theta \right) \right. \\
 & - \left. \left(\frac{X_C}{A} R^2 \cos\theta + M_1 \right) \frac{1}{2} \sin^2\theta - X_C \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin\theta \cos\theta \right) \right. \\
 & \left. + \frac{M_1}{A} R^2 \sin\theta + \frac{X_C}{A} R^2 (1 - \cos\theta) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a(m, n)_{52} = & \frac{(r - \delta)}{R} (Z X_C - Z_C X) \left[-\frac{M_2}{A} R^2 \cos\theta \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin\theta \cos\theta \right) \right. \\
 & - Y_C \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin\theta \cos\theta \right) + \frac{Y_C R^2}{2A} (2 - 2\cos\theta - \cos\theta \sin^2\theta) \\
 & \left. - \frac{M_2}{2} \sin^2\theta + \frac{M_2 R^2}{A} \sin\theta \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a(m, n)_{62} = & -\delta R(X_C - X)\theta + \delta R X_C \sin\theta - \delta R M_3 (1 - \cos\theta) \\
 & + \frac{(r - \delta)}{R} (Z X_C - Z_C X) \left[-\frac{M_3}{A} R^2 \cos\theta \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin\theta \cos\theta \right) \right. \\
 & - \left. \left(M_3 + \frac{Z_C}{A} R^2 \cos\theta \right) \frac{1}{2} \sin^2\theta - Z_C \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin\theta \cos\theta \right) \right. \\
 & \left. + \frac{M_3}{A} R^2 \sin\theta + \frac{Z_C}{A} R^2 (1 - \cos\theta) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a(m, n)_{33} = & \{ \beta + \delta (X_C - X)^2 + \delta (Y_C - Y)^2 \} R \theta \\
 & - 2\delta \{ (X_C - X) X_C + (Y_C - Y) Y_C \} R \sin\theta \\
 & + 2\delta \{ (X_C - X) M_1 + (Y_C - Y) M_2 \} R (1 - \cos\theta) \\
 & + \left[(\alpha - \beta) \frac{M_3^2}{R} + \delta R (X_C^2 + Y_C^2) + \frac{(r - \delta)}{R} \{ (X_C - X) M_2 \right. \\
 & \left. - (Y_C - Y) M_1 \}^2 \right] \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin\theta \cos\theta \right) \\
 & + \left[(\alpha - \beta) \frac{Z_C M_3}{R} - \delta R (X_C M_1 + Y_C M_2) \right. \\
 & \left. + \frac{(r - \delta)}{R} (X Y_C - X_C Y) \{ (Y_C - Y) M_1 - (X_C - X) M_2 \} \right] \sin^2\theta \\
 & + \left[(\alpha - \beta) \frac{Z_C^2}{R} + \delta R (M_1^2 + M_2^2) + \frac{(r - \delta)}{R} \{ (X_C - X) Y_C \right. \\
 & \left. - (Y_C - Y) X_C \}^2 \right] \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin\theta \cos\theta \right) \\
 & + \frac{2(r - \delta)}{R} \{ (X_C - X) M_2 - (Y_C - Y) M_1 \} (Y_C M_1 - X_C M_2) \sin\theta
 \end{aligned}$$

$$+ \frac{2(\gamma - \delta)}{R} (Y_C M_1 - X_C M_2) \{ (X_C - X) Y_C - (Y_C - Y) X_C \} \\ \times (1 - \cos \theta) + \frac{(\gamma - \delta)}{R} (Y_C M_1 - X_C M_2)^2 \theta$$

$$a(m, n)_{43} = -\delta R (Y_C - Y) \theta + \delta R Y_C \sin \theta - \delta R M_2 (1 - \cos \theta) \\ + \frac{(\gamma - \delta)}{R} (X Y_C - X_C Y) \left[-\frac{M_1}{A} R^2 \cos \theta \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \right. \\ \left. - \left(M_1 + \frac{X_C}{A} R^2 \cos \theta \right) \frac{1}{2} \sin^2 \theta - X_C \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \right. \\ \left. + \frac{M_1}{A} R^2 \sin \theta + \frac{X_C}{A} R^2 (1 - \cos \theta) \right]$$

$$a(m, n)_{53} = \delta R (X_C - X) \theta - \delta R X_C \sin \theta + \delta R M_1 (1 - \cos \theta) \\ + \frac{(\gamma - \delta)}{R} (X Y_C - X_C Y) \left[-\frac{M_2}{A} R^2 \cos \theta \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \right. \\ \left. - \left(\frac{Y_C}{A} R^2 \cos \theta + M_2 \right) \frac{1}{2} \sin^2 \theta - Y_C \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \right. \\ \left. + \frac{M_2}{A} R^2 \sin \theta + \frac{Y_C}{A} R^2 (1 - \cos \theta) \right]$$

$$a(m, n)_{63} = \frac{(\gamma - \delta)}{R} (X Y_C - X_C Y) \left[-\frac{M_3 R^2}{A} \cos \theta \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) \right. \\ \left. - Z_C \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta \right) + \frac{Z_C R^2}{2A} (2 - 2 \cos \theta - \cos \theta \sin^2 \theta) \right. \\ \left. - \frac{M_3}{2} \sin^2 \theta + \frac{M_3 R^2}{A} \sin \theta \right]$$

$$a(m, n)_{44} = \delta R \theta + \frac{(\gamma - \delta)}{2R} \left[(X_C^2 + M_1^2) \theta + (M_1^2 - X_C^2) \sin \theta \cos \theta \right. \\ \left. + 2X_C M_1 \sin^2 \theta \right]$$

$$a(m, n)_{54} = \frac{(\gamma - \delta)}{2R} \left[(X_C Y_C + M_1 M_2) \theta + (M_1 M_2 - X_C Y_C) \cos \theta \sin \theta \right. \\ \left. + (X_C M_2 + Y_C M_1) \sin^2 \theta \right]$$

$$a(m, n)_{64} = \frac{(\gamma - \delta)}{2R} \left[(Z_C X_C + M_3 M_1) \theta + (M_3 M_1 - Z_C X_C) \cos \theta \sin \theta \right. \\ \left. + (Z_C M_1 + X_C M_3) \sin^2 \theta \right]$$

$$a(m, n)_{55} = \delta R \theta + \frac{(\gamma - \delta)}{2R} \left[(Y_C^2 + M_2^2) \theta + (M_2^2 - Y_C^2) \sin \theta \cos \theta \right. \\ \left. + 2Y_C M_2 \sin^2 \theta \right]$$

$$a(m, n)_{65} = \frac{(\gamma - \delta)}{2R} \left[(Y_C Z_C + M_2 M_3) \theta + (M_2 M_3 - Y_C Z_C) \cos \theta \sin \theta \right. \\ \left. + (Y_C M_3 + Z_C M_2) \sin^2 \theta \right]$$

$$a(m, n)_{66} = \delta R \theta + \frac{(\gamma - \delta)}{2R} \left[(Z_C^2 + M_3^2) \theta + (M_3^2 - Z_C^2) \sin \theta \cos \theta \right. \\ \left. + 2Z_C M_3 \sin^2 \theta \right]$$

$$a(m, n)_{ji} = a(m, n)_{ij} \quad (i=1 \sim 6, j=1 \sim 6)$$

2.1.7 分点における変位行列, 熱膨張, 力, 変位, 応力の計算

(1) 各点における変位行列 $F(m, n)$ の計算

2.1.2 で求めた伝達行列と 2.1.4 ~ 6 で求めた部材の変位行列および(16)式, (17)式を用いて各点の変位行列 $F(m, n)$ を次式のように計算する。

$$m = N_{A_i} \quad (i=1 \sim N_A), n=1 \text{ 即ち端点では,}$$

$$F(m, n) = F(m, 1) = 0$$

$$m=1 \sim M, n=2 \sim N_m + 1 \text{ 即ち, 部分配管内部の分点では}$$

$$F(m, n) = A(m, n-1) + T(m, n-1)F(m, n-1)T(m, n-1)^+$$

$$m=1 \sim M \quad (m \approx N_{A_i}), n=1 \text{ 即ち分岐点では}$$

$$F(m, n) = F(m, 1) = \{ F(p, N_p + 1)^{-1} + F(q, N_q + 1)^{-1} \}^{-1}$$

(2) 各点の熱膨張量の計算

変位行列, 伝達行列および 2.1.2 で求めた部材の熱膨張量を用いて熱膨張ベクトル $\underline{\tau}(m, n)$ を次式のように計算する。

$$m = N_{A_i} \quad (i=1 \sim N_A) \text{ 即ち端点では,}$$

$$\underline{\tau}(m, 1) = \underline{u}(m) \quad \underline{u}(m) \text{ は端点の移動量}$$

$$m=1 \sim M, n=2 \sim N_m + 1 \text{ では}$$

$$\underline{\tau}(m, n) = \underline{t}(m, n-1) + T(m, n-1) \underline{\tau}(m, n-1)$$

$$m=1 \sim M \quad (m \approx N_{A_i}), n=1 \text{ に対しては,}$$

$$\underline{\tau}(m, 1) = F(m, 1) \{ F(p, N_p + 1)^{-1} \underline{\tau}(p, N_p + 1) \\ + F(q, N_q + 1)^{-1} \underline{\tau}(q, N_q + 1) \}$$

(3) 各点の力, 変位の計算

終点における変位行列 $F(M, N_M + 1)$, 熱膨張ベクトル $\underline{\tau}(M, N_M + 1)$ が計算されると, 終点の変位 $\underline{d}(M, N_M + 1)$ が 0 となるように次式を用いて力ベクトル $\underline{f}(M, N_M + 1)$ が計算される。

$$\underline{f}(M, N_M + 1) = -F(M, N_M + 1)^{-1} [\underline{\tau}(M, N_M + 1) - \underline{u}(M)]$$

ここで $\underline{u}(M)$ は終点の移動量である。

もし終点が固定端でなく拘束端である場合には, 第 k 成分が変位の代りに力が与えられているとすると, 次式より変位の第 k 成分 u_k を求め, 前述の式を用いて \underline{f} が求められる。

$$u_k = \tau_k + \frac{f_k + \sum_{j=1, j \neq k}^6 f_{kj}^{-1} (\tau_j - u_j)}{f_{kk}^{-1}}$$

ここで f_{ij}^{-1} は行列 $F(M, N_M + 1)$ の逆行列の ij 成分を示し、 f_i はベクトル $f(M, N_M + 1)$ の i 成分を示す。

終点の変位は次のようになる。

$$d(M, N_M + 1) = u(M)$$

拘束端の場合 k 成分は新しく求めた値となる。

部分配管の内部の分点即ち $m = 1 \sim M, n = 1 \sim N_m$ に対しては次式で力、変位が求められる。

$$f(m, n) = T(m, n)^+ f(m, n+1)$$

$$d(m, n) = F(m, n) f(m, n) + \varepsilon(m, n)$$

分岐点即ち $m = 1 \sim M-1, n = N_m + 1$ に対しては次式で力、変位が求められる。

$$f(m, N_m + 1) = F(m, N_m + 1)^{-1} [d(r, 1) - \varepsilon(m, N_m + 1)]$$

$$d(m, N_m + 1) = d(r, 1)$$

(4) 各点の熱応力

力ベクトル f および管軸と座標軸とのなす角 ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z より 1.1.2 に示した式を用いて曲げモーメント M_b , 捩りモーメント M_t , 軸方向の力, 軸に垂直方向の力が求められる。

(5) 端点における反力

反力を f_R とすると, 終点以外の端点では, その点に作用する力の符号を変えたものが反力に等しいから,

$$m = M, n = 1 \text{ では } f_R(M, 1) = f(M, 1)$$

$$m = 1 \sim M-1, n = 1 \text{ では } f_R(m, 1) = -f(m, 1)$$

となる。

2.2 内外圧による応力の計算

これについては内圧 p_1 , 外圧 p_2 を各部材ごとに読みこみ, (26) ~ (28) 式を用いてコード化する。

2.3 合成応力の計算

これについては式 (29), (30) を用いてコード化する。

3. 計算コード

3.1 構成

第1章に述べた理論に基き第2章に述べたような方法でプログラミングが行なわれる。

本コードは、配管系を部分配管、部材に分割し、座標、管内外径、温度、圧力、ヤング率、ポアソン比、熱膨張率を入力して、モーメント、応力、変位、固定端の反力等を計算するものであり、Fig.5 に示すように構成されている。

部分配管数および部材数はともに20までとることが可能である。

本コードに必要なコアの大きさは次のように計算される。

本コードは Blank Common を使用し配管と部材の数に合わせてメモリーの大きさを決める。

Blank Common は最大時で次のように使われる。

A(n,m,6,6)	TR(n,m,6,6)	TEX1(n,m,6,6)	F(n,m,6,6)
------------	-------------	---------------	------------

部分配管の数をMPIPE、各部分配管の部材の数のうち最大数をNMAX とすると、最大時の Blank Common の使用word 数は次のようになる。

$$w = NMAX \times MPIPE \times 6 \times 6 \times 2 + NMAX \times MPIPE \times 6 + (NMAX + 1) \times MPIPE \times 6 \times 6$$

これを整理すると次のようになり、これから必要なコアの大きさが決まる。

$$w = MPIPE (NMAX \times 114 + 36)$$

$w \leq 8410$ の時	32K
$w > 8410$ の時	$32K + (w - 8410)$

3.2 入力準備

計算を行りにあたっては、以下に述べるように配管系を部分配管、部材に分割し、番号づけを行い、座標を定める必要がある。

(1) 名称

部材：配管の単位構成部分であり、真直管または円弧管より成る。

分点：配管を分割した区切り。部材の両端。

端点：配管の端の点。

固定端：変位、回転ともに固定された端点。

拘束端：変位、回転のどれか1成分が自由で、代りに力、モーメントが一定に保たれる端点。

分岐点：配管の分岐する点。

部分配管：部材の集りて分岐点をもたないもの。

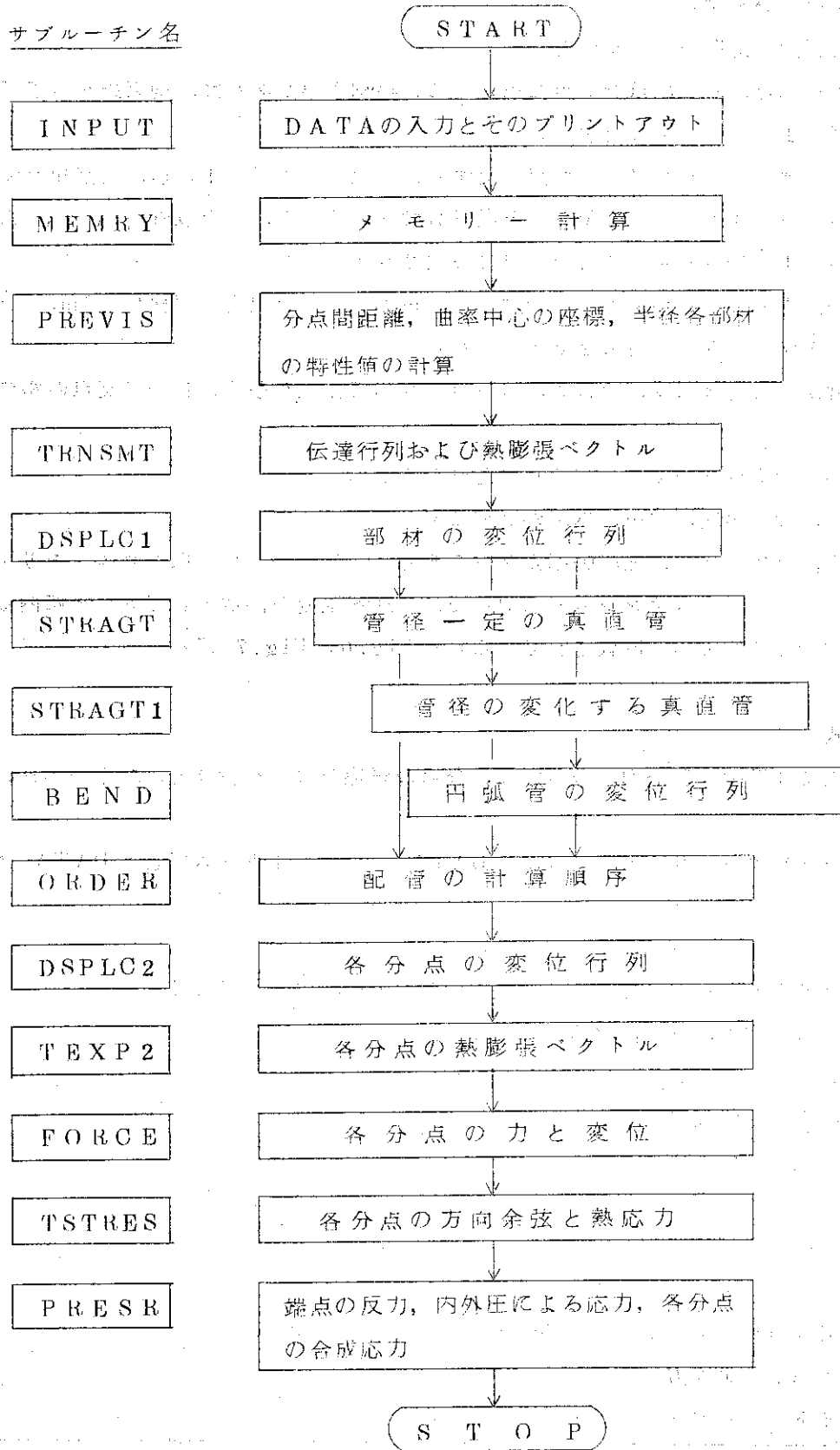


Fig.5 フローシート
(Program Flow Chart)

- (2) 配管を部材に分割する。
- (3) 座標系を任意に選び分点の座標を求める。
- (4) ある端点を始点、別の端点を終点に選ぶ。この際拘束端があれば、拘束端を終点に選ぶ。拘束端は高々1個であるものとする。
- (5) 部分配管に連続番号をつける。始点を有する部分配管の番号は1とし、終点を有する部分配管番号をMとする。ここでMは部分配管数である。始点、終点以外の部分配管については2~M-1の任意の番号でよい。Mは最大20までとれる。
- (6) 分点に終点より遠い方から番号をつける。第m番目の部分配管の部材数を N_m 、分点数を N_{m+1} とする。 N_m は最大20までとれる。
- (7) 円弧部材があるときには、その両端の分点において接線をひき、接線の交点の座標を求める。
- (8) 端点の移動量（機器の変位）があればそれを求める。
- (9) 運転温度、設置温度、内圧、外圧が必要である。
- (10) ヤング率、ポアソン比、熱膨張率が必要である。但し低炭素鋼、低クロム・モリブデン鋼、オーステナイト系ステンレス鋼に対しては、運転温度の関数としてコードに内蔵されているので無くてもよい。内蔵されている値をFig.6, Fig.7に示す。

3.3 入力形式

3.2に記したように配管の分割、番号づけ、分点の座標の算出を行うと、以下の形式により入力できる。

DATA カードを以下の9種類に分け、各DATAカードの1カラムにどのDATAカードかを示すシンボルを記入する。

シンボル

- T タイトルカード。任意の74文字。各DATA群の最初にくる。
- G 配管の位置、形状、材質。
- B 分岐点のデータ。
- U 終点でない固定端の変位。
- D 終点の変位。
- F 終点の外力。
- M 部材の物性値。
- P 分点の物性値。
- E ENDカード。1ケース分のデータの終りを示す。

(1) データカードの書き方

T (タイトルカード)

T	50	/	任意の74文字
1	5	6	7

1カラム カードの種類を示すシンボルT

2~5カラム ケースNo.を自由な表現で4文字(ブランクでもよい)

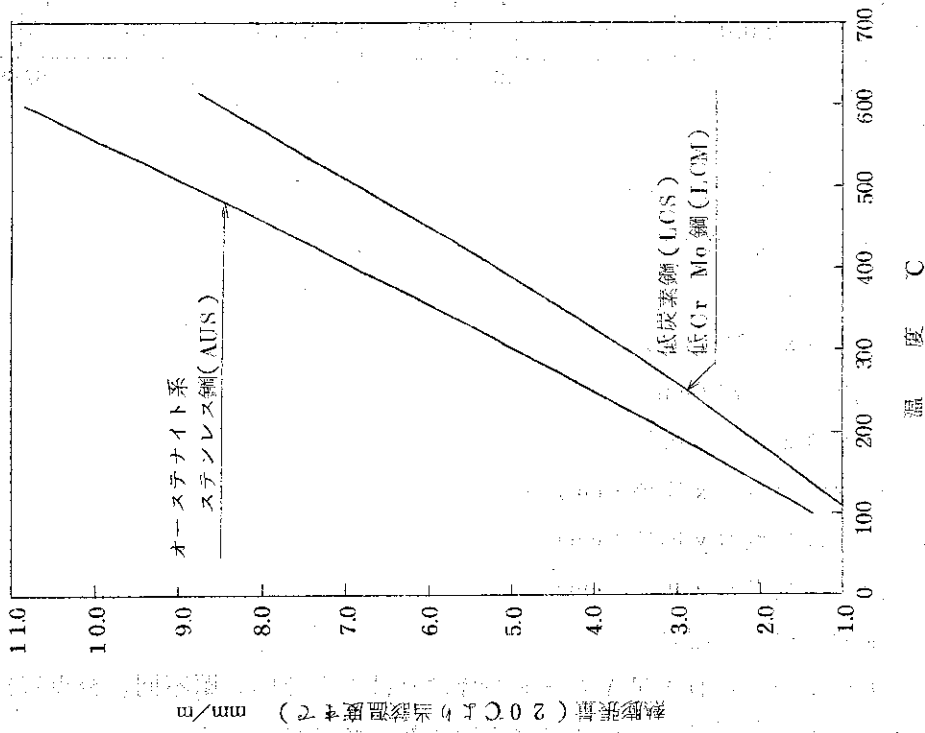


Fig.7 配管材料の熱膨張量 (内蔵データ)
(Thermal Expansion of Piping Material)

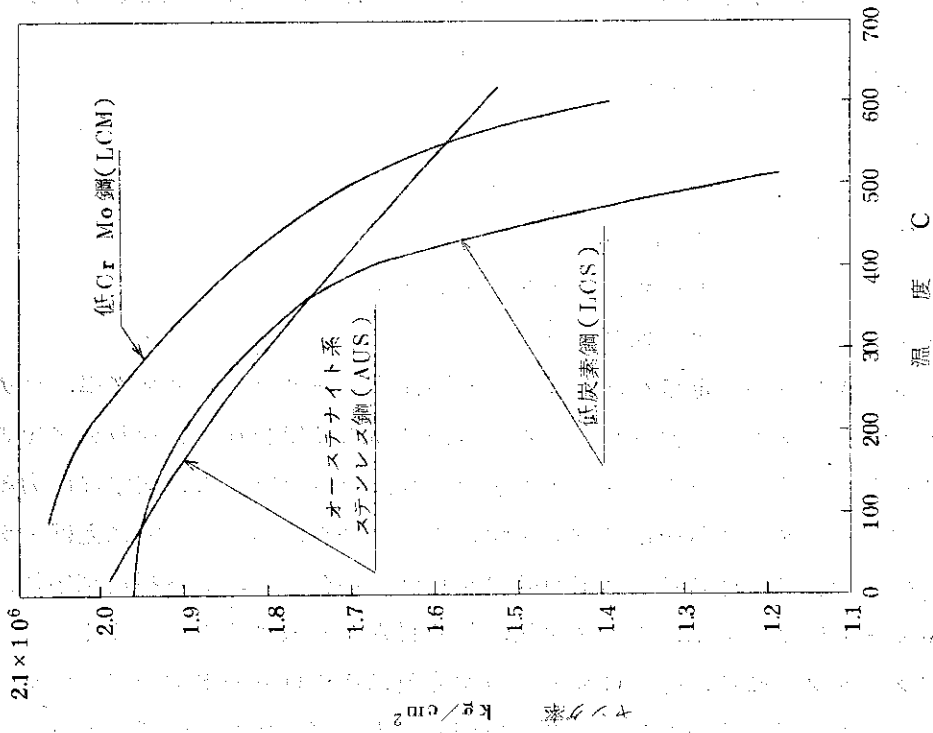


Fig.6 配管材料のヤング率 (内蔵データ)
(Young's Modulus of Piping Material)

6 カラム ブランク
 7 カラム～ 任意の 7 4 文字

G (Geometry Data)

G	0	2	0	3		10.0	20.0	0.0	10.0	25.0	0.0	A	U	S
1	2	3	4	5	6	7	17	27	37	47	57	67	68	69

- 1 カラム シンボル G
- 2, 3 カラム 部分配管番号 (≤ 20)
- 4, 5 カラム 分点番号 (≤ 20)
- 6 カラム ブランク
- 7~16カラム 分点の x 座標 (cm)
- 17~26カラム 分点の y 座標 (cm)
- 27~36カラム 分点の z 座標 (cm)
- 37~46カラム 接線の交点の x 座標 (cm)
- 47~56カラム 接線の交点の y 座標 (cm)
- 57~66カラム 接線の交点の z 座標 (cm)
- 67~69カラム 部材の材質の記号

注 1. 各分点に対して 1 枚ずつこの DATA カードがなければならない。順不同。分点には部分配管の両端の点も含まれる。従って分岐点は 3 度重複して読まれる。

注 2. 接線の交点の座標のデータは、その左側 (若い番号) の分点のカード上に記入する。右側が直管であればブランクになる。たとえば分点 (m, n) と (m, n+1) との間の部材が円弧管であれば、分点 (m, n) と (m, n+1) で接線を引き交点の座標を分点 (m, n) のカード上に記入する。

注 3. 部材の材質は次の四種類で区別する。

シンボル	材 質
LCS	低炭素鋼
LCM	低 Cr Mo 鋼
AUS	オーステナイト系ステンレス鋼
その他の文字	その他の材質

LCS, LCM, AUS が指定されると後にある物性値データのうちヤング率, ポアソン比, 熱膨張率はプログラムに内蔵されているものが自動的に使われる。他の文字を書いた場合には、これらの物性値を M データに記入しなければならない。この文字は出力紙上に印刷される。内蔵データのうち一部だけ使用することは出来ない。従って例えばステンレス鋼で熱膨張率の少し異なる材料についての計算をしたい場合には、この指定文字例えば SUS として M カードにヤング率, ポアソン比, 熱膨張率を記入することになる。

注 4. 材質データがブランクの時は、その G カードのすぐ前にある G カードでの材質がその部材の材質とされる。よっていくつかの部材の材質が同じならば、それらのデータカードを並べて一枚目のカードの材質だけデータを入れ残りのカードの材質のデータはブランクに

してもすべて同一の材質とされる。

B (分岐点のデータ)

B				5		(1, 2, 3)(2, 3, 5)(7, 9, 8)(8, 5, 4)(3, 7, 10)
1	2	3	4	5	6	7

- 1 カラム シンボル B
- 2 ~ 5 カラム 7 カラム以降に書く分岐点のデータの数
- 6 カラム ブランク
- 7 カラム ~ 分岐点に集る 3 本の部分配管番号を m_1, m_2, m_3 とすると (m_1, m_2, m_3) と書く。

注 1. 2 個の分岐点データの間は 5 個以内のブランクでなければならぬ。同様に 7 ~ 11 カラムはブランクでもよい。

注 2. (1, 2, 3) において 1 と , の間, 2 と , の間, 3 と) の間にブランクがある時そのブランクは 0 とみなされる。

U (固定端の変位)

U				1.0	0.0	0.0						
1	2	3	4	5	6	7	17	27	37	47	57	67

- 1 カラム シンボル U
- 2, 3 カラム ブランク
- 4, 5 カラム 固定端を有する部分配管番号
- 6 カラム ブランク
- 7 ~ 16 カラム 固定端の変位の x 成分 (cm)
- 17 ~ 26 カラム 固定端の変位の y 成分 (cm)
- 27 ~ 36 カラム 固定端の変位の z 成分 (cm)

注 1. 固定端の変位が 0 の時でも DATA カードは必要。つまり固定端 (終点を除く) の数だけ DATA カードが必要である。

D (終点の変位)

D			1	3		2.0	3.0	1.0		
1	2	3	4	5	6	7	17	27		

- 1 カラム シンボル D
- 2, 3 カラム ブランク
- 4, 5 カラム 終点を有する部分配管番号 (部分配管の数に等しい)
- 6 カラム ブランク
- 7 ~ 16 カラム 終点の変位の x 成分
- 17 ~ 26 カラム 終点の変位の y 成分
- 27 ~ 36 カラム 終点の変位の z 成分

F (終点の外力)

F	/	/	/	2	/	500.0	
1	2	3	4	5	6	7	16

- 1 カラム シンボル F
- 2~4 カラム ブランク
- 5 カラム 力の方向 (1 : x 方向, 2 : y 方向, 3 : z 方向, 4 : x 軸回り, 5 : y 軸回り, 6 : z 軸回り)
- 7~16 カラム 終点に加わる力またはモーメントの大きさ (kg または kg·cm)

注1. 外力がない場合このカードは不要。

M (部材の物性値)

M	0	1	0	2	E=1.59E6, NU=0.3, TMP1=20.0, TMP2=500.0, ALP=1.782E-5		
1	2	3	4	5	6	7	

- 1 カラム シンボル M
- 2, 3 カラム 部分配管番号
- 4, 5 カラム 部材番号
- 7~カラム フリーフォーマットで物性値データを書く。
E : ヤング率 (kg/cm²), NU : ポアソン比, TMP1 : 設置温度 (°C), TMP2 : 運転温度 (°C), ALP : 熱膨張率 (1/°C)。

注1. データとデータの区切りは・(・がないとエラー)。

注2. 連続のブランクは5個まで許される。

注3. 上の例で E=1.59E6, において、1 から、までの間にブランクがある時は 0 と解釈される。

注4. このデータカードに5つの全部のデータがない場合は、そのすぐ前の部材に対する値が不足分のデータとして埋められる。例えば部材 (m, n) に相当するデータカードがブランクであれば、(m, n-1) の部材のデータが用いられる。

P (分点の特性値)

P	0	1	0	2	/	ID=15.52, OD=16.52, IP=1.0, OP=1.0
1	2	3	4	5	6	7

- 1 カラム シンボル P
- 2, 3 カラム 部分配管番号
- 4, 5 カラム 部材番号
- 7~カラム フリーフォーマットで特性値データを書く。
ID : 管の内径 (cm), OD : 管の外径 (cm), IP : 管の内圧 (kg/cm²A), OP : 管の外圧 (kg/cm²A)

注1. このカードの形式はMカードと全く同様である。

E (ENDカード)

E	N	D	
1	2	3	

1～3カラム シンボル END

注1. このカードは1組のデータの終りを示す。

注2. 数ケース続けて計算する場合は、これらのカードを単に重ねればよい。

(2) データカードの書き方の例

Fig. 8 に示すような配管の応力計算について考える。特性は次の通りである。

材料 低Cr Mo 鋼

部 分 配 管	1	2	3
管 外 径 cm	73.0	73.0	102.3
管 内 径 cm	69.4	69.4	97.5
運 転 温 度 °C	400	400	400
設 置 温 度 °C	20	20	20
内 圧 kg/cm ² A	41	17	41
外 圧 kg/cm ² A	1	1	1

固定端の変位

(1, 1) (0.0, 0.0, 0.0) (cm)

(2, 1) (1.0, 5.0, 0.0) (cm)

終点の外力 y方向に500kg

入力カード形式は Fig. 9 に示すようになる。

3.4 出力形式

出力データは次の分類により打ち出される。

- (1) 入力データ (Card Images)
- (2) 入力データ 分点, 部材番号ごとにそろえ直したもの。
- (3) 予備計算結果 (Previous Calculation)

分点間距離, 曲率中心, 曲率半径, 中心角, 撓み係数, 管断面積, 断面2次モーメントの値で, 計算を始める前に必要を値。

- (4) 計算結果 (Main Calculation)
 - i) カベクトル (Force Vectors)
各点の力, モーメントの値。
 - ii) 変位ベクトル (Displacement Vectors)
各点の変位, 回転角。
 - iii) 方向余弦 (Direction Cosine)
各点の方向余弦

FORTRAN DATA SHEET									
1	56.7	10	20	30	40	50	60	70	80
T	50		SAMPLE	OF	INPUT	FORM			
G0101		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		LCM	
G0102		0.0	0.0	-400.0					
G0201		700.0	0.0	-700.0					
G0202		100.0	0.0	-700.0	0.0	0.0	-700.0		
G0203		0.0	0.0	-600.0					
G0204		0.0	0.0	-400.0					
G0301		0.0	0.0	-400.0					
G0302		-400.0	0.0	-400.0	-500.0	0.0	-400.0		
G0303		-500.0	0.0	-500.0					
G0304		-500.0	0.0	-1000.0	-500.0	0.0	-1100.0		
G0305		-500.0	100.0	-1100.0					
G0306		-500.0	500.0	-1100.0					
B	1	(1,2,3)							
U	1	0.0	0.0	0.0					
U	2	1.0	5.0	0.0					
F	1	500.0							
M0101		TMPI=20.0,	TMPI=20.0,	TMPI=20.0,					
P0101		ID=69.4,	OD=73.0,	IP=41.0,	OP=1.0				
P0201		ID=69.4,	OD=73.0,	IP=17.0,	OP=1.0				
P0301		ID=97.5,	OD=102.3,	IP=41.0					
END									

Fig. 9 入力データの書き方の例
(Sample of Input Data Formula)

IV) 熱応力 (Thermal Stress)

各点の応力集中係数, 曲げモーメント, 捩りモーメント, 曲げ+軸応力, 剪断+捩り
応力。

V) 内外圧による応力 (Stresses by Inner and Outer Pressure)

各点の半径方向応力 (内側および外側), 円周方向応力 (内側および外側), 軸方向
応力 (内側および外側)。

VI) 合成応力および固定端の反力 (Compound Stress and Reaction Forces at
Anchors)

軸方向, 円周方向の合成応力および固定端の反力。

合成応力の定義は次の通りである。

軸方向合成応力 (Axial Compound Stress)

= 軸方向熱応力 + 曲げ応力 + 内外圧による軸方向応力

円周方向合成応力 (Hoop Compound Stress)

= 剪断応力 + 捩りによる剪断応力 + 内外圧による円周方向応力

以上の各出力データは次の表示, 単位により表わされる。

各部分配管 (PARTIAL PIPING) の各部材 (MEMBER) に対し,

接線の交点の座標の x, y, z 成分 [cm]	CORNER OF BEND X_B, Y_B, Z_B
ヤング率 [kg/cm ²]	YOUNG'S MODULUS
ポアソン比	POISSONS RATIO
温度上昇度 [°C]	TEMP. RISE
熱膨張量 [m/m]	EXPANSION
分点間距離の x, y, z 成分 [cm]	DISTANCE X, Y, Z
曲率中心の x, y, z 成分 [cm]	CURVATURE CENTER X, Y, Z
曲率半径 [cm]	CURVATURE RADIUS
曲率中心の中心角 [度]	CURVATURE ANGLE
管断面積 [cm ²]	CROSS SECTIONAL AREA
断面 2 次モーメント [cm ⁴]	MOMENT OF INERTIA OF CROSS SECTION

各部分配管の各分点 (POINT) に対し,

分点座標の x, y, z 成分 [cm]	CO-ORDINATE x, y, z
管内径 [cm]	INNER DIAMETER
管外径 [cm]	OUTER DIAMETER
内圧 [kg/cm ² A]	INNER PRESSURE
外圧 [kg/cm ² A]	OUTER PRESSURE
力の x, y, z 成分 [kg]	X-FORCE, Y-FORCE, Z-FORCE
モーメントの x, y, z 成分 [kg·cm]	X-MOMENT, Y-MOMENT, Z-MOMENT
変位の x, y, z 成分 [cm]	X-DISPLT, Y-DISPLT, Z-DISPLT
角度変位の x, y, z 成分 [Radian]	X-ANGLE, Y-ANGLE, Z-ANGLE

管軸が座標軸となす角の方向余弦の x, y, z成分	X-COSINE, Y-COSINE, Z-COSINE
管軸が座標軸となす角〔Radian〕	X-ANGLE, Y-ANGLE, Z-ANGLE
応力集中係数	STRESS, INTENSIFICATION FACTOR
曲げモーメント〔kg・cm〕	BENDING MOMENT
捩りモーメント〔kg・cm〕	TORSIONAL MOMENT
曲げ及び軸応力〔kg/cm ² 〕	BENDING AND AXIAL STRESS
剪断および捩り応力〔kg/cm ² 〕	SHEARING AND TORSIONAL STRESS
管の内壁における半径方向応力〔kg/cm ² 〕	RADIAL STRESS AT I.D.
管の外壁における半径方向応力〔kg/cm ² 〕	RADIAL STRESS AT O.D.
管の内壁における円周方向応力〔kg/cm ² 〕	CIRCUMFERENTIAL STRESS AT I.D.
管の外壁における円周方向応力〔kg/cm ² 〕	CIRCUMFERENTIAL STRESS AT O.D.
管の内壁における軸方向応力〔kg/cm ² 〕	AXIAL STRESS AT I.D.
管の外壁における軸方向応力〔kg/cm ² 〕	AXIAL STRESS AT O.D.
その他	
固定端移動量 変位〔cm〕	MOVEMENT OF ANCHORS
回転角〔Radian〕	
軸方向合成応力〔kg/cm ² 〕	COMPOUND AXIAL STRESS
円周方向合成応力〔kg/cm ² 〕	COMPOUND HOOP STRESS
固定端における反力〔kg〕	REACTION FORCES AT ANCHOR

3.5 入出力形式

入力の説明で用いた例 (Fig. 8, Fig. 9) についての出力データを Fig. 10 に示す。3.4 で説明した通り INPUT CARD IMAGE として入力データも同時にそのまま示されている。

Fig.10 出力データ例 (Fig.8 の配管, Fig.9 の入力)
 (Sample of Out Put Data; Piping in Fig.8, Input in Fig.9)

```

*****
*
*                               ANALYSIS OF PIPING STRESS
*                               -----
*
*                               SAMPLE OF INPUT FORM
*
*                               CASE NO. 50
*
*
*                               74-01-31
*
*****
    
```

--- INPUT DATA - (CARD IMAGES) ---

```

.....EXPLANATION OF DATA CARDS.....
. T - TITLE CARD                      F - FORCE DATA AT END POINT
. G - GEOMETRY AND MATERIAL DATA     M - MATERIAL PROPERTY OF MEMBER
. B - BRANCH POINT DATA              P - MATERIAL PROPERTY OF POINT
. U - DISPLACEMENT AT ANCHOR         E - END CARD
. D - DISPLACEMENT AT END POINT
.....
    
```

I 1	I 2	I 7	I 17	I 27	I 37	I 47	I 57	I 67	I 73	I
ITYP	LOC	X	Y	Z	XC	YC	ZC	IMAT	COMMENT	
I	I NO.									
T	50	SAMPLE OF INPUT FORM								
G	10101	0.0	0.0	0.0					ILCM	
G	10102	0.0	0.0	-400.0						
G	10201	700.0	0.0	-700.0						
G	10202	100.0	0.0	-700.0	0.0	0.0	-700.0			
G	10203	0.0	0.0	-600.0						
G	10204	0.0	0.0	-400.0						
G	10301	0.0	0.0	-400.0						
G	10302	-400.0	0.0	-400.0	-500.0	0.0	-400.0			
G	10303	-500.0	0.0	-500.0						
G	10304	-500.0	0.0	-1000.0	-500.0	0.0	-1100.0			
G	10305	-500.0	100.0	-1100.0						
G	10306	-500.0	500.0	-1100.0						
S	1	(1,2,3)								
U	11	0.0	0.0	0.0						
U	21	1.0	5.0	0.0						
F	1	500.0								
M	10101	TMP1=20.0, TMP2=400.10								
P	10101	ID=69.4, OIC=73.0, IPI=41.0, OP=11.0								
P	10201	ID=69.4, OIC=73.0, IPI=17.0, OP=11.0								
P	10301	ID=97.5, OIC=102.3, IPI=41.0								
E	END									

--- INPUT DATA ---

PARTIAL PIPINGS ----- TOTAL NUMBER 3

MEMBER NO	COORDINATE			CORNER OF REF.			CHARACTERISTICS OF MEMBERS			PRESSURE					
	X (CM)	Y (CM)	Z (CM)	XB (CM)	YB (CM)	ZB (CM)	YOUNG'S MODULUS (KG/CM**2)	POISSON'S RATIO	TEMP. RISE (DEG)	EXPANSION MATL.	INNER DIAMETER (CM)	OUTER DIAMETER (CM)			
* PARTIAL PIPING 1 * (NUMBER OF MEMBERS --- 1)															
1	0.0	0.0	0.0	--	--	--	0.184E 07	0.300	380.0	0.518E-02	LCM	69.400	73.000	41.0	1.0
2	0.0	0.0	-400.00	--	--	--	0.184E 07	0.300	380.0	0.518E-02	LCM	69.400	73.000	41.0	1.0

* PARTIAL PIPING 2 * (NUMBER OF MEMBERS --- 3)

1	700.00	0.0	-700.00	--	--	--	0.184E 07	0.300	380.0	0.518E-02	LCM	69.400	73.000	17.0	1.0
2	100.00	0.0	-700.00	0.0	0.0	-700.00	0.184E 07	0.500	380.0	0.518E-02	LCM	69.400	73.000	17.0	1.0
3	0.0	0.0	-600.00	--	--	--	0.184E 07	0.300	380.0	0.518E-02	LCM	69.400	73.000	17.0	1.0
4	0.0	0.0	-400.00	--	--	--	0.184E 07	0.300	380.0	0.518E-02	LCM	69.400	73.000	17.0	1.0

* PARTIAL PIPING 3 * (NUMBER OF MEMBERS --- 5)

1	0.0	0.0	-900.00	--	--	--	0.184E 07	0.300	380.0	0.518E-02	LCM	97.500	102.300	41.0	1.0
2	-400.00	0.0	-900.00	-400.00	0.0	-400.00	0.184E 07	0.300	380.0	0.518E-02	LCM	97.500	102.300	41.0	1.0
3	-500.00	0.0	-500.00	--	--	--	0.184E 07	0.300	380.0	0.518E-02	LCM	97.500	102.300	41.0	1.0
4	-500.00	0.0	-1000.00	--	--	--	0.184E 07	0.300	380.0	0.518E-02	LCM	97.500	102.300	41.0	1.0
5	-500.00	100.00	-1100.00	-500.00	0.0	-1100.00	0.184E 07	0.300	380.0	0.518E-02	LCM	97.500	102.300	41.0	1.0
6	-500.00	500.00	-1100.00	--	--	--	0.184E 07	0.300	380.0	0.518E-02	LCM	97.500	102.300	41.0	1.0

--- INPUT DATA ---

MOVEMENTS OF ANCHORS' ----- NUMBER OF ANCHORS 3

PARTIAL PIPING NO.	ANCHOR POINT	X-DISPLT (CM)	Y-DISELT (CM)	Z-DISPLT (CM)	Y-ANGLE (RADIAN)	Y-ANGLE (RADIAN)	Z-ANGLE (RADIAN)
1	(1, 1)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	(2, 1)	0.10000E 01	0.50000E 01	0.0	0.0	0.0	0.0

FORCE DATA AT THE END POINT ----- YES

X-FORCE 0.50000E 03 (KG)

BRANCH POINT

NO. THREE PIPINGS NO.

1 (1, 2, 3)

--- PREVIOUS CALCULATION ---

* PARTIAL PIPING 1 * (NUMBER OF MEMBERS --- 1)

MEMBER NO.	X (CM)	Y (CM)	Z (CM)	CURVATURE CENTER X (CM)	Y (CM)	Z (CM)	RADIUS (CM)	ANGLE (DEG)	FLEXIBILITY FACTOR	POINT NO.	CROSS SECTIONAL AREA (CM**2)	MOMENT OF INERTIA OF CROSS SECTION (CM**4)
1	0.0	0.0	-400.00	---	---	---	---	---	1.000	ANCHOR	0.40263E 03	0.25530E 06
2	-600.00	0.0	0.0	---	---	---	---	---	1.000	1	0.40263E 03	0.25530E 06
3	-100.00	0.0	100.00	0.0	-600.00	100.00	90.00	11.617	1.000	2	0.40263E 03	0.25530E 06
4	0.0	100.00	-100.00	---	---	---	---	---	1.000	3	0.40263E 03	0.25530E 06
5	0.0	400.00	0.0	---	---	---	---	---	1.000	ANCHOR	0.40263E 03	0.25530E 06

* PARTIAL PIPING 2 * (NUMBER OF MEMBERS --- 3)

MEMBER NO.	X (CM)	Y (CM)	Z (CM)	CURVATURE CENTER X (CM)	Y (CM)	Z (CM)	RADIUS (CM)	ANGLE (DEG)	FLEXIBILITY FACTOR	POINT NO.	CROSS SECTIONAL AREA (CM**2)	MOMENT OF INERTIA OF CROSS SECTION (CM**4)
1	-400.00	0.0	0.0	---	---	---	---	---	1.000	1	0.75323E 03	0.94020E 06
2	-100.00	0.0	-100.00	0.0	-500.00	100.00	90.00	17.153	1.000	2	0.75323E 03	0.94020E 06
3	0.0	0.0	-100.00	---	---	---	---	---	1.000	3	0.75323E 03	0.94020E 06
4	0.0	100.00	-100.00	---	---	---	---	---	1.000	4	0.75323E 03	0.94020E 06
5	0.0	400.00	0.0	---	---	---	---	---	1.000	ANCHOR	0.75323E 03	0.94020E 06

* PARTIAL PIPING 3 * (NUMBER OF MEMBERS --- 5)

MEMBER NO.	X (CM)	Y (CM)	Z (CM)	CURVATURE CENTER X (CM)	Y (CM)	Z (CM)	RADIUS (CM)	ANGLE (DEG)	FLEXIBILITY FACTOR	POINT NO.	CROSS SECTIONAL AREA (CM**2)	MOMENT OF INERTIA OF CROSS SECTION (CM**4)
1	-400.00	0.0	0.0	---	---	---	---	---	1.000	1	0.75323E 03	0.94020E 06
2	-100.00	0.0	-100.00	0.0	-500.00	100.00	90.00	17.153	1.000	2	0.75323E 03	0.94020E 06
3	0.0	0.0	-100.00	---	---	---	---	---	1.000	3	0.75323E 03	0.94020E 06
4	0.0	100.00	-100.00	---	---	---	---	---	1.000	4	0.75323E 03	0.94020E 06
5	0.0	400.00	0.0	---	---	---	---	---	1.000	ANCHOR	0.75323E 03	0.94020E 06

--- MAIN CALCULATION ---

1. FORCE VECTORS AT POINTS

* PARTIAL PIPING 1 * (NUMBER OF POINTS --- 2)

POINT NO.	X FORCE (KG)	Y FORCE (KG)	Z FORCE (KG)	X MOMENT (KG*CM)	Y MOMENT (KG*CM)	Z MOMENT (KG*CM)
1	0.13658E 05	0.83946E 04	0.70792E 05	0.38664E 07	0.65593E 07	0.48601E 07
2	0.13658E 05	0.83946E 04	0.70792E 05	0.50773E 06	0.12023E 08	0.48601E 07

* PARTIAL PIPING 2 * (NUMBER OF POINTS --- 4)

POINT NO.	X FORCE (KG)	Y FORCE (KG)	Z FORCE (KG)	X MOMENT (KG*CM)	Y MOMENT (KG*CM)	Z MOMENT (KG*CM)
1	-0.13158E 05	-0.10913E 05	-0.23432E 05	0.16922E 07	-0.12745E 08	0.11547E 08
2	-0.13158E 05	-0.10913E 05	-0.23432E 05	0.16922E 07	0.64311E 06	-0.14748E 07
3	-0.13158E 05	-0.10913E 05	-0.23432E 05	-0.23881E 06	-0.12745E 07	-0.35546E 05
4	-0.13158E 05	-0.10913E 05	-0.23432E 05	-0.41008E 07	0.49331E 07	-0.19695E 07

* PARTIAL PIPING 3 * (NUMBER OF POINTS --- 6)

POINT NO.	X FORCE (KG)	Y FORCE (KG)	Z FORCE (KG)	X MOMENT (KG*CM)	Y MOMENT (KG*CM)	Z MOMENT (KG*CM)
1	0.50000E 03	-0.10913E 05	0.47361E 05	-0.35931E 07	0.19587E 08	0.28906E 07
2	0.50000E 03	-0.10913E 05	0.47361E 05	-0.35931E 07	0.64311E 06	-0.14748E 07
3	0.50000E 03	-0.10913E 05	0.47361E 05	-0.25017E 07	-0.40430E 07	-0.25661E 07
4	0.50000E 03	-0.10913E 05	0.47361E 05	0.29552E 07	-0.37930E 07	-0.25661E 07
5	0.50000E 03	-0.10913E 05	0.47361E 05	-0.88977E 06	-0.37430E 07	-0.25161E 07
6	0.50000E 03	-0.10913E 05	0.47361E 05	-0.19634E 08	-0.37430E 07	-0.23161E 07

--- MAIN CALCULATION ---

2. DISPLACEMENT VECTORS AT POINTS

* PARTIAL PIPING 1 * (NUMBER OF POINTS --- 2)

POINT NO.	X-DISPLT (CM)	Y-DISPLT (CM)	Z-DISPLT (CM)	X-ANGLF (RADIAN)	Y-ANGLF (RADIAN)	Z-ANGLF (RADIAN)
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	-0.14114E 01	0.48073E 00	-0.20325E 01	0.18688E-02	0.79304E-02	0.59929E-02

* PARTIAL PIPING 2 * (NUMBER OF POINTS --- 4)

1	0.10000E 01	0.50000E 01	0.0	0.0	0.0	0.0
2	-0.21170E 01	0.20072E 01	-0.31601E 01	0.28164E-02	-0.73688E-02	0.0
3	-0.27028E 01	0.98775E 00	-0.30616E 01	0.27928E-02	0.52635E-02	0.64857E-02
4	-0.14114E 01	0.48073E 00	-0.20325E 01	0.18688E-02	0.79304E-02	0.59929E-02

* PARTIAL PIPING 3 * (NUMBER OF POINTS --- 6)

1	-0.14114E 01	0.48073E 00	-0.20325E 01	0.16688E-02	0.79304E-02	0.59929E-02
2	-0.34821E 01	-0.17072E 01	0.17905E 01	0.78416E-03	0.10275E-02	0.55570E-02
3	-0.48594E 01	-0.22574E 01	0.22457E 01	-0.72160E-03	0.66000E-02	0.53853E-02
4	-0.78723E 01	-0.25779E 01	-0.32570E 00	-0.55955E-03	0.54649E-02	0.44189E-02
5	-0.84359E 01	-0.20677E 01	-0.65304E 00	0.23533E-02	0.11278E-02	0.56000E-03
6	-0.85440E 01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

--- MAIN CALCULATION ---

3. DIRECTION COSINE AT POINTS

* PARTIAL PIPING 1 * (NUMBER OF POINTS --- 2)

POINT NO.	X-COSINE	Y-COSINE	Z-COSINE	X-ANGLF (RADIAN)	Y-ANGLF (RADIAN)	Z-ANGLF (RADIAN)
1	0.0	0.0	-0.10000E 01	0.15708E 01	0.15708E 01	0.31416E 01
2	0.0	0.0	-0.10000E 01	0.15708E 01	0.15708E 01	0.31416E 01

* PARTIAL PIPING 2 * (NUMBER OF POINTS --- 4)

1	-0.10000E 01	0.0	0.0	0.31416E 01	0.15708E 01	0.15708E 01
2	-0.10000E 01	0.0	0.0	0.31416E 01	0.15708E 01	0.15708E 01
3	0.0	0.0	0.10000E 01	0.15708E 01	0.15708E 01	0.0
4	0.0	0.0	0.10000E 01	0.15708E 01	0.15708E 01	0.0

* PARTIAL PIPING 3 * (NUMBER OF POINTS --- 6)

1	-0.10000E 01	0.0	0.0	0.31416E 01	0.15708E 01	0.15708E 01
2	-0.10000E 01	0.0	0.0	0.31416E 01	0.15708E 01	0.15708E 01
3	0.0	0.0	-0.10000E 01	0.15708E 01	0.15708E 01	0.31416E 01
4	0.0	0.0	-0.10000E 01	0.15708E 01	0.15708E 01	0.31416E 01
5	0.0	0.0	0.10000E 01	0.15708E 01	0.0	0.15708E 01
6	0.0	0.0	0.10000E 01	0.15708E 01	0.0	0.15708E 01

--- MAIN CALCULATION ---

4. THERMAL STRESS

* PARTIAL PIPING 1 * (NUMBER OF POINTS --- 2)

POINT NO.	STRESS INTENSIFI- CATION FACTOR	BENDING MOMENT (KG*CM)	TORSIONAL MOMENT (KG*CM)	BENDING AND AXIAL STRESS (KG/CM**2)	AXIAL STRESS (KG/CM**2)	SHEARING AND TORSIONAL STRESS (KG/CM**2)
1	0.10000E 01	0.76140E 07	-0.48601E 07	0.12644E 04	0.42703E 03	0.42703E 03
2	0.10000E 01	0.12013F 08	-0.48601E 07	0.18962E 04	0.42703E 03	0.42703E 03

* PARTIAL PIPING 2 * (NUMBER OF POINTS --- 4)

1	0.10000E 01	0.17228F 08	-0.16922E 07	0.24957E 04	0.27173E 03	0.27173E 03
2	0.33062F 01	0.12747E 07	-0.16922E 07	0.63521E 03	0.27173E 03	0.27173E 03
3	0.33062F 01	0.49389E 07	-0.19695E 07	0.23927E 04	0.25662E 03	0.25662E 03
4	0.10000E 01	0.86049E 07	-0.19695E 07	0.12884E 04	0.25662E 03	0.25662E 03

* PARTIAL PIPING 3 * (NUMBER OF POINTS --- 6)

1	0.10000E 01	0.19800E 0P	0.35531E 07	0.10779E 04	0.22674E 03	0.22674E 03
2	0.42870E 01	0.16089E 07	0.35531E 07	0.37550E 03	0.22674E 03	0.22674E 03
3	0.42870E 01	0.47544E 07	0.23661E 07	0.11717E 04	0.98800E 02	0.98800E 02
4	0.42870E 01	0.48081E 07	0.23661E 07	0.11843E 04	0.98800E 02	0.98800E 02
5	0.42870E 01	0.26099E 07	-0.37430E 07	0.62297E 03	0.22753E 03	0.22753E 03
6	0.10000E 01	0.19770E 08	-0.37430E 07	0.10901E 04	0.22753E 03	0.22753E 03

--- MAIN CALCULATION ---

5. STRESSES BY INNER AND OUTER PRESSURE

* PARTIAL PIPING 1 * (NUMBER OF POINTS --- 2)

POINT NO.	RADIAL STRESS AT I.D. (KG/CM**2)	RADIAL STRESS AT O.D. (KG/CM**2)	CIRCUMFREN- TIAL STRESS AT I.D. (KG/CM**2)	CIRCUMFREN- TIAL STRESS AT O.D. (KG/CM**2)	AXIAL STRESS AT I.D. (KG/CM**2)	AXIAL STRESS AT O.D. (KG/CM**2)
1	-0.41000E 02	-0.10000E 01	0.79052E 03	0.75062E 03	0.39531E 03	0.37531E 03
2	-0.41000E 02	-0.10000E 01	0.74052E 03	0.75062E 03	0.39531E 03	0.37531E 03

* PARTIAL PIPING 2 * (NUMBER OF POINTS --- 4)

1	-0.17000E 02	-0.10000E 01	0.31565E 03	0.29965E 03	0.15782E 03	0.14982E 03
2	-0.17000E 02	-0.10000E 01	0.31565E 03	0.29965E 03	0.15782E 03	0.14982E 03
3	-0.17000E 02	-0.10000E 01	0.31565E 03	0.29965E 03	0.15782E 03	0.14982E 03
4	-0.17000E 02	-0.10000E 01	0.31565E 03	0.29965E 03	0.15782E 03	0.14982E 03

* PARTIAL PIPING 3 * (NUMBER OF POINTS --- 6)

1	-0.41000E 02	-0.10000E 01	0.43198E 03	0.79198E 03	0.41599E 03	0.39599E 03
2	-0.41000E 02	-0.10000E 01	0.43198E 03	0.79198E 03	0.41599E 03	0.39599E 03
3	-0.41000E 02	-0.10000E 01	0.43198E 03	0.79198E 03	0.41599E 03	0.39599E 03
4	-0.41000E 02	-0.10000E 01	0.43198E 03	0.79198E 03	0.41599E 03	0.39599E 03
5	-0.41000E 02	-0.10000E 01	0.43198E 03	0.79198E 03	0.41599E 03	0.39599E 03
6	-0.41000E 02	-0.10000E 01	0.43198E 03	0.79198E 03	0.41599E 03	0.39599E 03

```

--- MAIN CALCULATION ---
6. COMPOUND STRESS AND REACTION FORCES AT ANCHORS

* PARTIAL PIPING 1 * ( NUMBER OF POINTS --- 2 )
...REACTION FORCES AT ANCHOR....(KG)
-0.13678E 05 -0.63946E 04 -0.70792E 05 -0.38664E 07 -0.65593E 07 -0.48860E 07
...COMPOUND STRESS
POINT AXIAL HOOP
NO. STRESS STRESS
(KG/CM**2) (KG/CM**2)
1 0.16997E 04 0.12176E 04
2 0.22915E 04 0.12176E 04

* PARTIAL PIPING 2 * ( NUMBER OF POINTS --- 4 )
...REACTION FORCES AT ANCHOR....(KG)
0.13198E 05 0.19310E 05 0.29432E 05 -0.16922E 07 0.12785E 08 -0.11547E 08
...COMPOUND STRESS
POINT AXIAL HOOP
NO. STRESS STRESS
(KG/CM**2) (KG/CM**2)
1 0.26935E 04 0.48731E 03
2 0.79303E 03 0.98747E 03
3 0.25503E 04 0.57246E 03
4 0.14462E 04 0.47246E 03

* PARTIAL PIPING 3 * ( NUMBER OF POINTS --- 6 )
...REACTION FORCES AT ANCHOR....(KG)
0.50000E 03 -0.10913E 05 0.47341E 05 -0.19634E 08 -0.37430E 07 -0.23161E 07
...COMPOUND STRESS
POINT AXIAL HOOP
NO. STRESS STRESS
(KG/CM**2) (KG/CM**2)
1 0.14938E 04 0.10587E 04
2 0.79169E 03 0.10587E 04
3 0.15877E 04 0.93074E 03
4 0.16003E 04 0.93074E 03
5 0.10390E 04 0.10595E 04
6 0.15060E 04 0.10595E 04
* END OF FORTRAN *

```


4. 計算例

本コードを用いたいくつかの計算例を以下に示す。

(1) 高温ガス実験炉の改質器ループ
 高温ガス実験炉第2次予備設計の改質器ループの計算である。主な特性は次の通り。

配管形状, 寸法, 固定端移動量	Fig. 11
運転温度	460°C
運転圧力	40 kg/cm ² A
管内径, 外径	70.0 cm, 76.0 cm
管材料	2 1/4 Cr Mo鋼

主な計算結果は次の通り。

固定端反力の最大値(改質器出口にて)

$$F_x = 314.3 \text{ kg}, F_y = -132.97 \text{ kg}, F_z = -116.36 \text{ kg}, M_x = 433.32 \text{ kgm},$$

$$M_y = -295.84 \text{ kgm}, M_z = 409.21 \text{ kgm}$$

最大変位 原子炉出口配管の分点(5, 3)にて x 方向に -5.9 cm

最大曲げモーメント 原子炉出口配管の分点(5, 7)で, 8561.9 kgm

曲げおよび軸方向熱応力の最大値

No. 3 の部分配管の分点(3, 2)で, 945 kg/cm²

内外圧による応力 管内壁の円周応力, 474 kg/cm²

合成応力の最大値 軸方向応力 分点(3, 2)で 1182 kg/cm²

円周応力 分点(1, 1), (1, 2)で 678 kg/cm²

(2) 高温ガス実験炉のガスタービンループ
 高温ガス実験炉第2次予備設計のガスタービンループの計算である。主な特性は次の通り。

配管形状, 寸法, 固定端移動量	Fig. 12
運転温度	部分配管 No. 1~8 : 400°C, No. 9 : 500°C
運転圧力	部分配管 No. 1~8 : 40 kg/cm ² A, No. 9 : 17 kg/cm ² A
管内径, 外径	部分配管 No. 1 : 69.4 cm, 73.0 cm No. 2~No. 5 : 82.4 cm, 86.6 cm No. 6~No. 7 : 97.5 cm, 102.3 cm No. 8 : 66.3 cm, 69.5 cm No. 9 : 60.0 cm, 68.0 cm
管材料	2 1/4 Cr Mo鋼

主な計算結果は次の通り。

固定端反力の最大値

再生熱交換器の所で $F_X = 28498 \text{ kg}$, $F_Y = -15434 \text{ kg}$, $F_Z = 53724 \text{ kg}$,
 $M_X = 122740 \text{ kgm}$, $M_Y = 134970 \text{ kgm}$,
 $M_Z = -16287 \text{ kgm}$

最大変位 部分配管 No. 9, 分点 (9, 3) で z 方向に 6.4 cm

最大曲げモーメント

部分配管 No. 5, 分点 (5, 4) で 186700 kg·m

曲げおよび軸方向応力の最大値

部分配管 No. 5, 分点 (5, 4) で 1654 kg/cm²

内外圧による応力の最大値

部分配管 No. 8 の内壁で 827 kg/cm²

合成応力の最大値

軸方向応力 分点 (3, 3) で 1064 kg/cm²

円周方向応力 分点 (3, 3) 及び (3, 4) で 1021 kg/cm²

(3) Na 冷却高速実験炉の配管

Na 冷却高速実験炉 (JFER) の主循環ポンプの主循環ポンプより原子炉への配管である。

主要特性は次の通り。

配管形状, 寸法, 固定端移動量	Fig. 13
設計温度	500°C
運転圧力	1 ata
管内径, 外径	部分配管 No. 1, No. 3: 33.98 cm, 35.56 cm 部分配管 No. 2: 15.52 cm, 16.52 cm
管材料	SUS27TP

主な計算結果は次の通り。

固定端反力の最大値

原子炉容器の所で $F_X = 792 \text{ kg}$, $F_Y = -132 \text{ kg}$, $F_Z = 11 \text{ kg}$,
 $M_X = 14 \text{ kg} \cdot \text{m}$, $M_Y = -141 \text{ kg} \cdot \text{m}$, $M_Z = -1711 \text{ kg} \cdot \text{m}$

最大変位 部分配管 No. 3, 分点 (3, 7) で x 方向に 8.66 cm

最大曲げモーメント

部分配管 No. 3, 分点 (3, 10) で 2173 kg·m

曲げおよび軸方向応力の最大値

部分配管 No. 3, 分点 (3, 6) で 872 kg/cm²

(4) 拡大管

管の直径が変化する場合の例。主要特性は次の通り。

配管形状, 寸法, 固定端移動量	Fig. 14
運転温度	500°C
運転圧力	10 kg/cm ² G
管外径	分点 1 ~ 4 16.52 cm

分点 5 ~ 6	18.52 cm
分点 7	20.52 cm
分点 8	22.52 cm
分点 9	24.52 cm
分点 10	26.52 cm
分点 11	28.52 cm
分点 12	30.52 cm
分点 13	32.52 cm
分点 14 ~ 15	34.52 cm

管肉厚

0.5 cm

管材料

銅

主な計算結果は次の通り。

固定端反力

$$F_x = 1034 \text{ kg}, F_y = -466 \text{ kg}, F_z = 94 \text{ kg}$$

$$M_x = 208 \text{ kg}\cdot\text{m}, M_y = 317 \text{ kg}\cdot\text{m}, M_z = 556 \text{ kg}\cdot\text{m}$$

最大変位

分点 (1, 10) で y 方向に -5.1 cm

最大曲げモーメント

分点 (1, 15) で 3465 kg·m

曲げ及び軸方向応力の最大値

分点 (1, 4) で 956 kg/cm²

内外圧による応力の最大値

部材 (1, 14) で 339 kg/cm²

合成応力の最大値

軸方向 分点 (1, 9) で 1051 kg/cm²円周方向 部材 (1, 14) で 403 kg/cm²

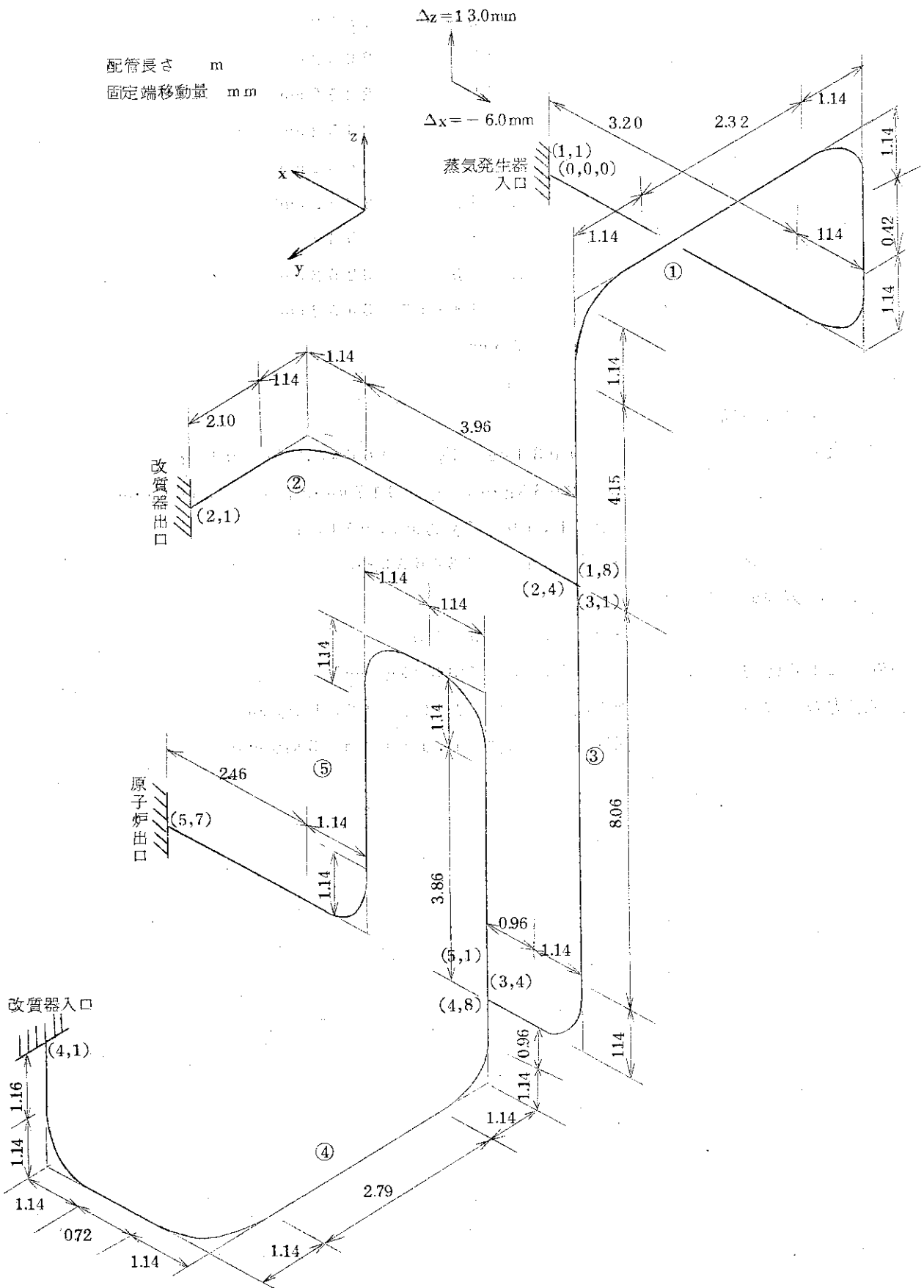


Fig. 11 HTGR還元ガスループ配管
(Piping of HTGR-Reducing Gas Loop)

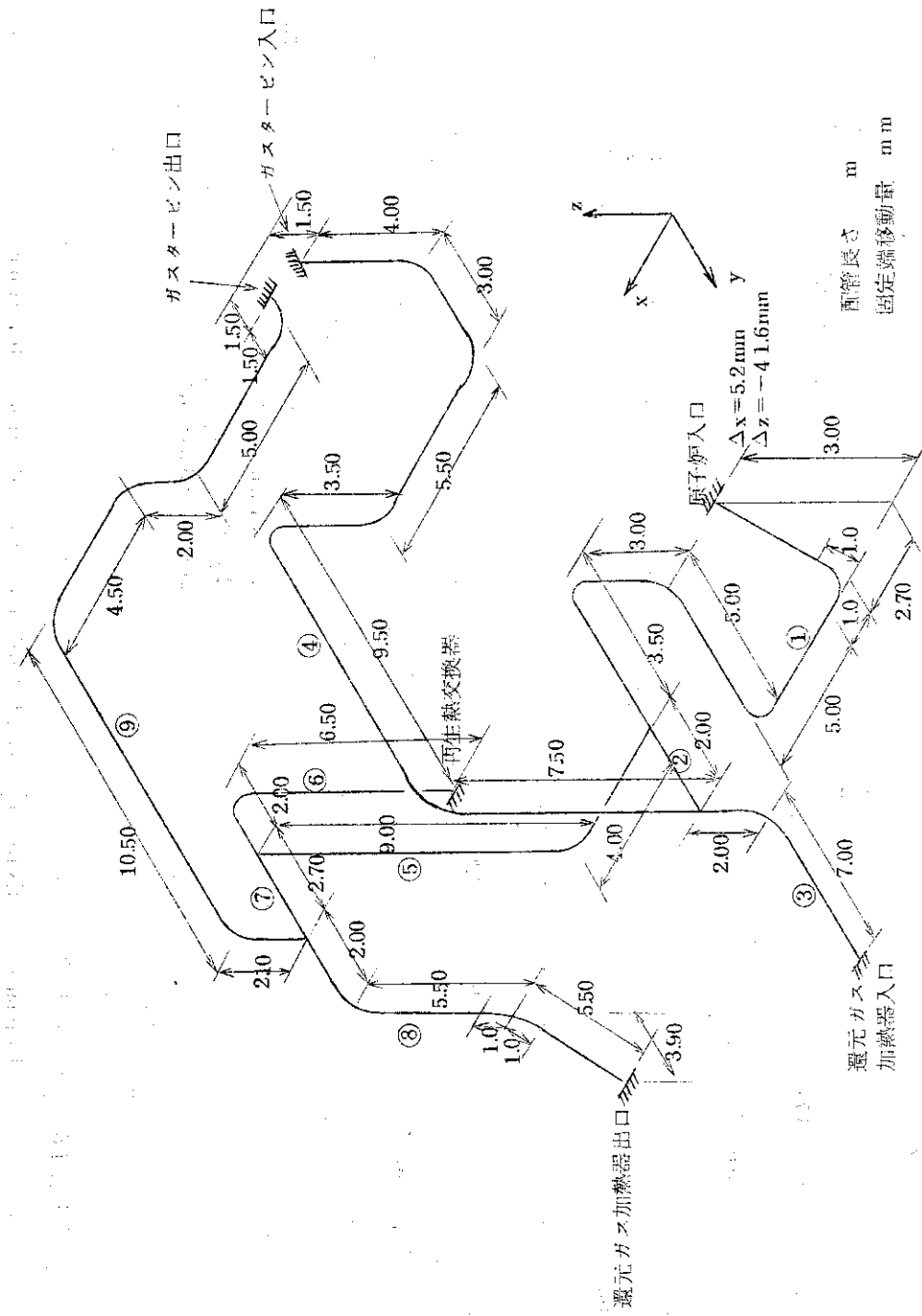


Fig. 12 HTGR ガスタービンループ (Piping of HTGR-Gas Turbine Loop)

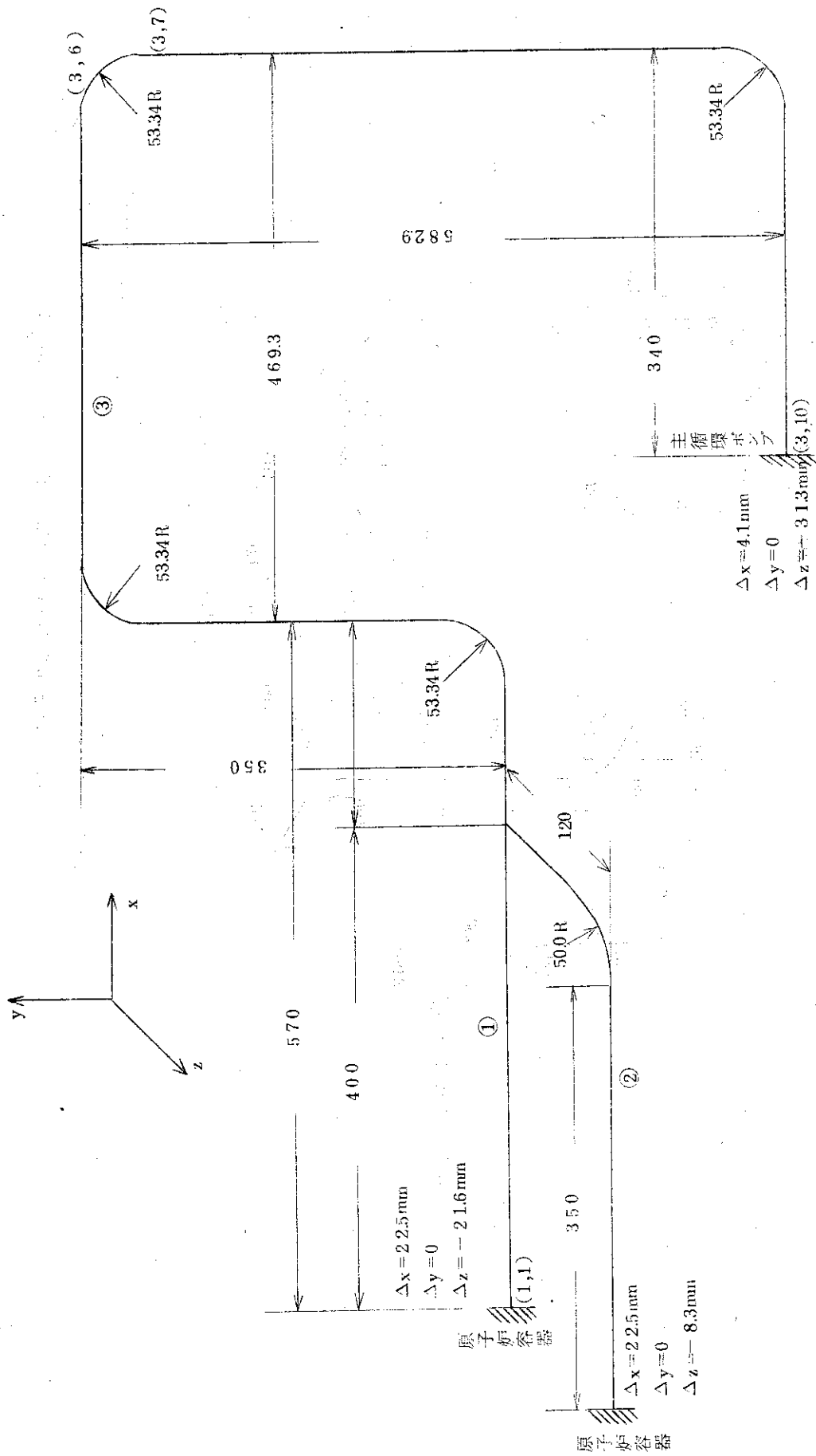


Fig. 13 Na 冷却高速実験炉の配管 (Piping of Experimental Sodium Cooled Fast Reactor)

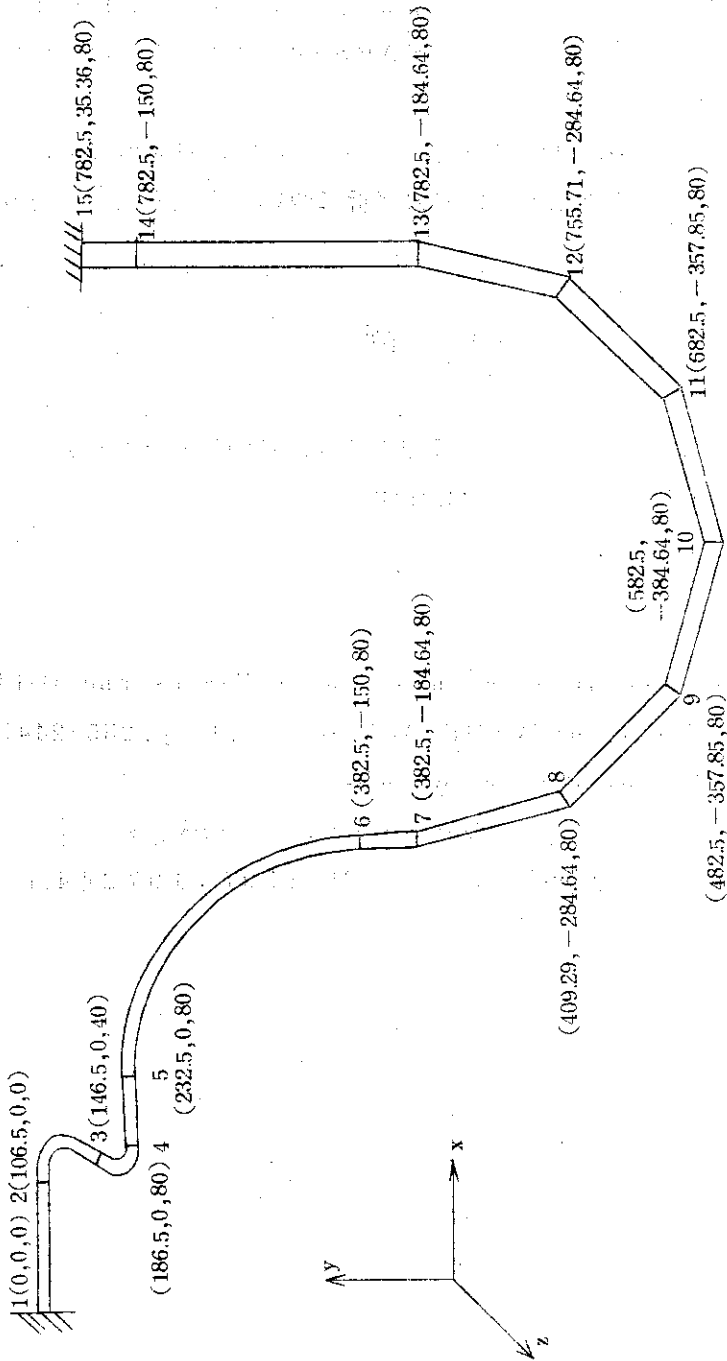


Fig. 14 拡大管
(Piping of Enlarging Diameter)

5. 結 び

高温ガス実験炉の設計遂行にあたり、改質器、ガスタービン等が連結されており配管系が複雑となっていること、曲り管も直角でない部分があることのためにコードAPS〔4〕ではまに合わなくなり改良に着手することとなった。本コードAPS-IIではこれらの計算が可能となり当初の目的は達成することが出来た。

今後機会があれば、ハンガーの効果、2個以上拘束端がある場合、自重の効果、ループの計算等を加え、更に改良を進めたい。また二重管の応力解析についても試みたいと思う。

6. 謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、本コードを実際に作成されたORC（センチュリー・リサーチ・センターK.K.）の河井美和子氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) L.G. Peck et al. "The Automatic Calculation of Forces and Deflections in Piping Systems" Trans. of ASME, Vol. 80, No. 1, p. 235-244 (Jan. 1958)
- (2) M.W. Kellogg Co. "Design of Piping Systems"
- (3) 化学工学協会編「配管」プロセス機器構造設計シリーズ, 丸善株式会社
- (4) 武藤 康「配管応力解析コード"APS"」JAERI-M 4798, 1972年4月

5. 結 び

高温ガス実験炉の設計遂行にあたり、改質器、ガスタービン等が連結されており配管系が複雑となっていること、曲り管も直角でない部分があることのためにコードAPS〔4〕ではまに合わなくなり改良に着手することとなった。本コードAPS-IIではこれらの計算が可能となり当初の目的は達成することが出来た。

今後機会があれば、ハンガーの効果、2個以上拘束端がある場合、自重の効果、ループの計算等を加え、更に改良を進めたい。また二重管の応力解析についても試みたいと思う。

6. 謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、本コードを実際に作成されたORC（センチュリー・リサーチ・センターK.K.）の河井美和子氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) L.G. Peck et al. "The Automatic Calculation of Forces and Deflections in Piping Systems" Trans. of ASME, Vol. 80, No. 1, p. 235-244 (Jan. 1958)
- (2) M.W. Kellogg Co. "Design of Piping Systems"
- (3) 化学工学協会編「配管」プロセス機器構造設計シリーズ, 丸善株式会社
- (4) 武藤 康「配管応力解析コード“APS”」JAERI-M 4798, 1972年4月

5. 結 び

高温ガス実験炉の設計遂行にあたり、改質器、ガスタービン等が連結されており配管系が複雑となっていること、曲り管も直角でない部分があることのためにコードAPS〔4〕ではまに合わなくなり改良に着手することとなった。本コードAPS-IIではこれらの計算が可能となり当初の目的は達成することが出来た。

今後機会があれば、ハンガーの効果、2個以上拘束端がある場合、自重の効果、ループの計算等に加え、更に改良を進めたい。また二重管の応力解析についても試みたいと思う。

6. 謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、本コードを実際に作成されたCRC（センチュリー・リサーチ・センターK.K.）の河井美和子氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) L.G. Peck et al. "The Automatic Calculation of Forces and Deflections in Piping Systems" Trans. of ASME, Vol. 80, No. 1, p. 235-244 (Jan. 1958)
- (2) M.W. Kellogg Co. "Design of Piping Systems"
- (3) 化学工学協会編「配管」プロセス機器構造設計シリーズ, 丸善株式会社
- (4) 武藤 康「配管応力解析コード“APS”」JAERI-M 4798, 1972年4月