

JAERI-M

4798

配管応力解析コード "APS"

1972年4月

武 藤 康

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

配管応力解析コード "APS"

日本原子力研究所動力炉開発管理室 熱中性子炉設計班

武 藤 康

(1972年4月3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を生ずる。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 (The Code for the Analysis of Piping Stress) はこれらの解析を行なうためのものであり、CRCに委託して作成した。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いている。本コードでは直管、 $\frac{1}{4}$ 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。計算結果のチェックのためCDCのコードAUTOFLEXと比較した所、ほぼ一致していることが確認された。

Code "APS" for the Analysis of Piping Stress

Yasushi MUTO

Office of Power Reactor Projects, Tokai, JAERI

(Received 3 April 1972)

In nuclear reactors and other industrial plants, with high-pressure coolants, large thermal and pressure stresses are induced in the piping systems. These stresses and reaction forces at the anchors present considerable engineering problems in their design. The code "APS" (Analysis of the Piping Stress) was prepared to analyze these phenomena. The method of analysis is based on that of L.G. Peck et al., and the programming work was made by Century Research Center Company. The code is capable of calculation of the forces, stresses, deflections and reaction forces due to the thermal expansion and internal and external pressures in the piping system, which consists of given numbers of straight pipes, quarter-circular pipes, anchors and branches. The time required per such calculations 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	5
1.1.3 可撓性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	7
2. 計算式のコード化	7
2.1 熱応力計算	7
2.2 内外圧による応力の計算	12
3. 入出力	12
3.1 入力	12
3.2 出力	17
3.3 入出力例	17
4. 計算結果の検討	23
4.1 計算例	23
4.2 APS および AUTOFLEX の計算結果	31
5. 結 び	32
参 考 文 献	32

I. 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その他の固定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たと考えると，この時の外力 f による応力が熱応力に等しい。配管の変位 d と外力 f との間には，フックの法則により $d = Af$ の関係がある。したがって 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。 A は変位行列と呼ばれる 6×6 次の行列であり，その成分は配管形状，管材料に依存している。変位行列成分の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。したがって座標変換が行なわれた場合の 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] ものであり，本コード APS もこの計算法に基づいて作成された。

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。

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

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

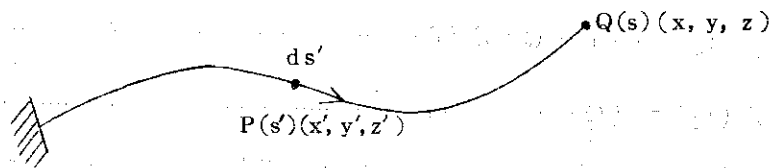


Fig. 1

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。

$$d = Af \quad \dots\dots\dots(3)$$

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

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

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

$$A \rightarrow RAR^+ \quad \dots\dots\dots(5)$$

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。

$$R = \begin{pmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$R = \begin{pmatrix} \dot{x}(s'), & \dot{y}(s'), & \dot{z}(s') \\ \dot{y}(s'), & \frac{\dot{y}(s')^2}{1+\dot{x}(s')} - 1, & \frac{\dot{y}(s')\dot{z}(s')}{1+\dot{x}(s')} \\ \dot{z}(s'), & \frac{\dot{y}(s')\dot{z}(s')}{1+\dot{x}(s')}; & \frac{\dot{z}(s')^2}{1+\dot{x}(s')} - 1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで $\dot{x}(s') = \frac{dx}{ds'}$

$$\dot{y}(s') = \frac{dy}{ds'}$$

$$\dot{z}(s') = \frac{dz}{ds'} \quad \text{の略である。}$$

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

$$d(Q) = T(P \rightarrow Q) d(P) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$f(Q) = T(Q \rightarrow P)^+ f(P) \quad \dots\dots\dots(9)$$

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。

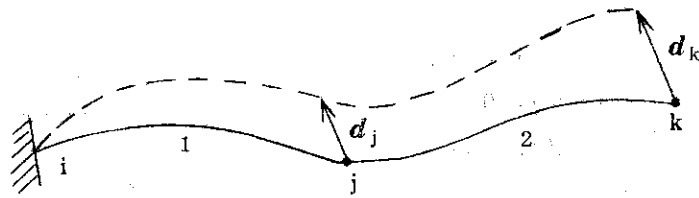


Fig. 2

$$d_k - t_k = A_k f_k \dots\dots\dots (16)$$

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 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

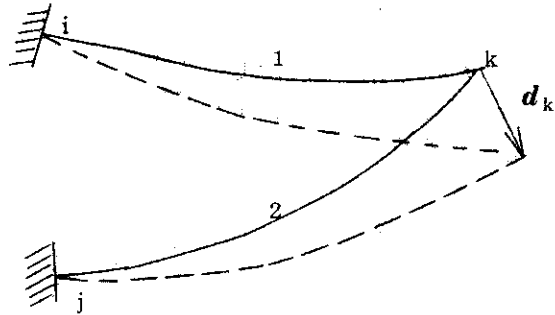


Fig. 3

$$d_k - t_k = A_k f_k \dots\dots\dots (17)$$

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(15), (16), (17)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。

$$f = A^{-1} (-t) \dots\dots\dots (18)$$

次に伝達行列 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

各点におけるカベクトル 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。

配管の考えている点の接線が x 方向を向いている場合を考える。カベクトル f の成分を次のように書く。

$$F_x = f_1$$

$$F_y = f_2$$

$$F_z = f_3$$

$$M_x = f_4$$

$$M_y = f_5$$

$$M_z = f_6$$

この時 M_y, M_z は曲げの, M_x は捩りの作用をするので

$$M_b = \sqrt{M_y^2 + M_z^2} \dots\dots\dots (19)$$

$$M_t = M_x \dots\dots\dots (20)$$

x 方向には軸力 F_x と曲げモーメント M_b による力が作用するから x 方向の応力 σ_T は

$$\sigma_T = \frac{|F_x|}{A} + \frac{i D_2 M_b}{2 I} \dots\dots\dots (21)$$

- A : 管断面積
- i : 応力集中係数
- D_2 : 管外径
- I : 断面2次モーメント

円周方向には F_y, F_z, M_t により剪断力がかかり、次の剪断応力 μ_T を生ずる。

$$\mu_T = \frac{D_2^2 + D_2 D_1 + D_1^2}{12 I} \sqrt{F_y^2 + F_z^2} + \frac{D_2 |M_t|}{4 I} \dots\dots\dots (22)$$

- D_1 : 管内径

1.1.3 可撓性係数および応力集中係数^②

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 を可撓性係数 (Flexibility Factor) と呼ぶ。可撓性係数は管の直径、肉厚、曲率の関数として次のように与えられている。

$$K = 1 + \frac{9 + \frac{0.255}{\lambda^2}}{12\lambda^2 + 1.34 + \frac{0.0075}{\lambda^2}} \dots\dots\dots (23)$$

$$\lambda = \frac{8(D_2 - D_1)R}{(D_1 + D_2)^2}$$

R: 曲率半径

この変形により管の可撓性が増す一方、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。

$$\sigma_b = \frac{i D_2 M_b}{2 I} \dots\dots\dots (24)$$

i は λ , K の関数で次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \lambda \leq 1.472 \text{ の時} & \quad i = \frac{2K}{3} \sqrt{\frac{6\lambda^2 + 5}{18}} \dots\dots\dots (25) \\ \lambda > 1.472 \text{ の時} & \quad i = K \cdot \frac{6\lambda^2 - 1}{6\lambda^2 + 5} \end{aligned}$$

APS においては以上の式を用いたが、 K, i を求めるには理論、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見られる^[3]。 K, i の値の影響は相当大きく、これらは今後理論、実験の両面から研究されねばならない問題である。

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 σ_{rP} 、軸方向の応力 σ_{tP} は以下の式で与えられる。

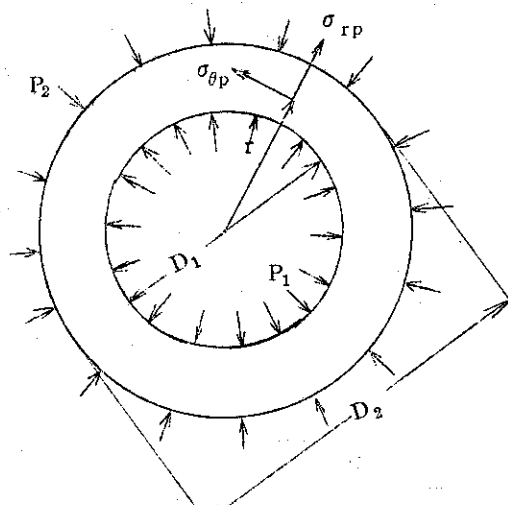


Fig. 4

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

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

$$\sigma_{tP} = \frac{1}{2} \sigma_{\theta} \dots\dots\dots (28)$$

1.3 合成応力

熱応力 σ_T, μ_T , および内外圧による応力 $\sigma_{rP}, \sigma_{\theta P}, \sigma_{tP}$ は次のように合成される。

$$\text{軸方向の合成応力} = \sigma_T + |\sigma_{tP}| \dots\dots\dots (29)$$

$$\text{円周方向の合成応力} = \mu_T + |\sigma_{\theta P}| \dots\dots\dots (30)$$

$$\text{全応力} = \sqrt{(\text{軸方向の合成応力})^2 + (\text{円周方向の合成応力})^2} \dots\dots\dots (31)$$

2. 計算式のコード化

2.1 熱応力計算

(19)式の被積分関数を K とおくと

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

となり、この成分は次のようになる。

$$\begin{aligned} k_{11} &= \beta + (\alpha - \beta) \dot{x}'^2 + (z' - z)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \} \\ &\quad + (y' - y)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} - 2(\gamma - \delta) (y' - y) (z' - z) \dot{y}' \dot{z}' \\ k_{12} &= (\alpha - \beta) \dot{x}' \dot{y}' - (\gamma - \delta) (z' - z)^2 \dot{x}' \dot{y}' + (\gamma - \delta) (z' - z) (x' - x) \dot{y}' \dot{z}' \\ &\quad + (\gamma - \delta) (y' - y) (z' - z) \dot{z}' \dot{x}' - (x' - x) (y' - y) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} \\ k_{13} &= (\alpha - \beta) \dot{z}' \dot{x}' + (\gamma - \delta) (y' - y) (z' - z) \dot{x}' \dot{y}' - (\gamma - \delta) (y' - y)^2 \dot{z}' \dot{x}' \\ &\quad - (z' - z) (x' - x) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \} + (\gamma - \delta) (x' - x) (y' - y) \dot{y}' \dot{z}' \\ k_{14} &= -(\gamma - \delta) (z' - z) \dot{x}' \dot{y}' + (\gamma - \delta) (y' - y) \dot{z}' \dot{x}' \\ k_{15} &= (\gamma - \delta) (y' - y) \dot{y}' \dot{z}' - (z' - z) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \} \\ k_{16} &= -(\gamma - \delta) (z' - z) \dot{y}' \dot{z}' + (y' - y) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} \\ k_{22} &= \beta + (\alpha - \beta) \dot{y}'^2 + (z' - z)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \} \\ &\quad + (x' - x)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} - 2(\gamma - \delta) (z' - z) (x' - x) \dot{z}' \dot{x}' \\ k_{23} &= (\alpha - \beta) \dot{y}' \dot{z}' - (y' - y) (z' - z) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \} \\ &\quad + (\gamma - \delta) (z' - z) (x' - x) \dot{x}' \dot{y}' - (\gamma - \delta) (x' - x)^2 \dot{y}' \dot{z}' \\ &\quad + (\gamma - \delta) (x' - x) (y' - y) \dot{z}' \dot{x}' \\ k_{24} &= (z' - z) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \} - (\gamma - \delta) (x' - x) \dot{x}' \dot{z}' \end{aligned}$$

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

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

$$\sigma_{tP} = \frac{1}{2} \sigma_{\theta} \dots\dots\dots (28)$$

1.3 合成応力

熱応力 σ_T, μ_T , および内外圧による応力 $\sigma_{rP}, \sigma_{\theta P}, \sigma_{tP}$ は次のように合成される。

$$\text{軸方向の合成応力} = \sigma_T + |\sigma_{tP}| \dots\dots\dots (29)$$

$$\text{円周方向の合成応力} = \mu_T + |\sigma_{\theta P}| \dots\dots\dots (30)$$

$$\text{全応力} = \sqrt{(\text{軸方向の合成応力})^2 + (\text{円周方向の合成応力})^2} \dots\dots\dots (31)$$

2. 計算式のコード化

2.1 熱応力計算

(19)式の被積分関数を K とおくと

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

となり, この成分は次のようになる。

$$\begin{aligned} k_{11} &= \beta + (\alpha - \beta) \dot{x}'^2 + (z' - z)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \} \\ &\quad + (y' - y)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} - 2(\gamma - \delta) (y' - y) (z' - z) \dot{y}' \dot{z}' \\ k_{12} &= (\alpha - \beta) \dot{x}' \dot{y}' - (\gamma - \delta) (z' - z)^2 \dot{x}' \dot{y}' + (\gamma - \delta) (z' - z) (x' - x) \dot{y}' \dot{z}' \\ &\quad + (\gamma - \delta) (y' - y) (z' - z) \dot{z}' \dot{x}' - (x' - x) (y' - y) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} \\ k_{13} &= (\alpha - \beta) \dot{z}' \dot{x}' + (\gamma - \delta) (y' - y) (z' - z) \dot{x}' \dot{y}' - (\gamma - \delta) (y' - y)^2 \dot{z}' \dot{x}' \\ &\quad - (z' - z) (x' - x) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \} + (\gamma - \delta) (x' - x) (y' - y) \dot{y}' \dot{z}' \\ k_{14} &= -(\gamma - \delta) (z' - z) \dot{x}' \dot{y}' + (\gamma - \delta) (y' - y) \dot{z}' \dot{x}' \\ k_{15} &= (\gamma - \delta) (y' - y) \dot{y}' \dot{z}' - (z' - z) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \} \\ k_{16} &= -(\gamma - \delta) (z' - z) \dot{y}' \dot{z}' + (y' - y) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} \\ k_{22} &= \beta + (\alpha - \beta) \dot{y}'^2 + (z' - z)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \} \\ &\quad + (x' - x)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} - 2(\gamma - \delta) (z' - z) (x' - x) \dot{z}' \dot{x}' \\ k_{23} &= (\alpha - \beta) \dot{y}' \dot{z}' - (y' - y) (z' - z) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \} \\ &\quad + (\gamma - \delta) (z' - z) (x' - x) \dot{x}' \dot{y}' - (\gamma - \delta) (x' - x)^2 \dot{y}' \dot{z}' \\ &\quad + (\gamma - \delta) (x' - x) (y' - y) \dot{z}' \dot{x}' \\ k_{34} &= (z' - z) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \} - (\gamma - \delta) (x' - x) \dot{x}' \dot{z}' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_{25} &= (\gamma - \delta) (z' - z) \dot{x}' \dot{y}' - (\gamma - \delta) (x' - x) \dot{y}' \dot{z}' \\
 k_{26} &= - (x' - x) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \} + (\gamma - \delta) (z' - z) \dot{z}' \dot{x}' \\
 k_{33} &= \beta + (\alpha - \beta) \dot{z}'^2 + (\dot{x}' - x)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \} \\
 &\quad + (y' - y)^2 \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \} - 2(\gamma - \delta) (x' - x) (y' - y) \dot{x}' \dot{y}' \\
 k_{34} &= - (y' - y) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \} + (\gamma - \delta) (x' - x) \dot{x}' \dot{y}' \\
 k_{35} &= (x' - x) \{ \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \} - (\gamma - \delta) (y' - y) \dot{x}' \dot{y}' \\
 k_{36} &= (\gamma - \delta) (x' - x) \dot{y}' \dot{z}' - (\gamma - \delta) (y' - y) \dot{z}' \dot{x}' \\
 k_{44} &= \delta + (\gamma - \delta) \dot{x}'^2 \\
 k_{45} &= (\gamma - \delta) \dot{x}' \dot{y}' \\
 k_{46} &= (\gamma - \delta) \dot{z}' \dot{x}' \\
 k_{55} &= \delta + (\gamma - \delta) \dot{y}'^2 \\
 k_{56} &= (\gamma - \delta) \dot{y}' \dot{z}' \\
 k_{66} &= \delta + (\gamma - \delta) \dot{z}'^2 \\
 k_{ji} &= k_{ij} \quad (i=1\sim 6, j=1\sim 6)
 \end{aligned}$$

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、通常直管と円弧管との組合せよりなっているので、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(16), (17)式を用いて合成すれば、配管の数式表示、数値積分を行な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。コードの作成過程を具体的に示すと次のようになる。

(1) Fig. 5 のように配管を部分配管①, 部材 (m, n) に分割し、固定端, 分岐点 $A(m)$ の座標, 分

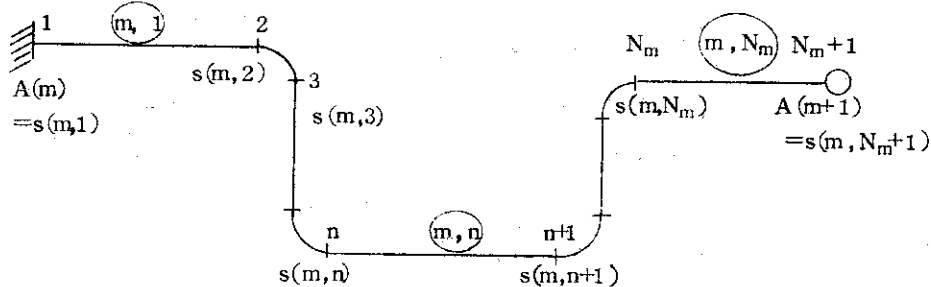
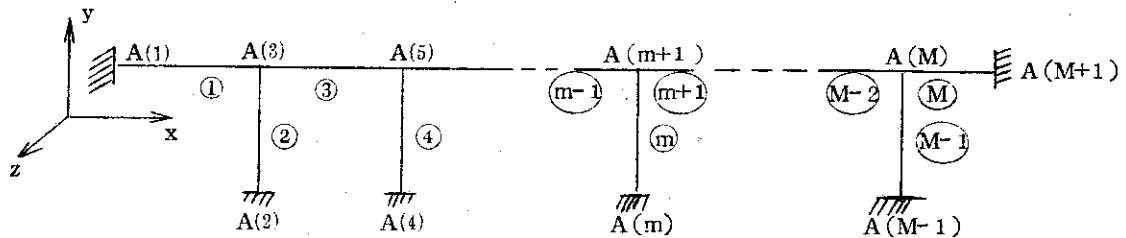


Fig. 5 配管の入力

点 $s(m, n)$ の座標, 固定端移動量 u , 部材の特性値 (ポアソン比 ν , 管内径 D_1 , 管外径 D_2 , 線膨張係数 α_T , 温度上昇度 ΔT) を読みこむ。

- (2) 円弧部材の取り扱いを簡単にするため, $\frac{1}{4}$ 円弧のみを取り扱うことにし, 円弧の両端の分点に引いた接線の交点の座標を読みこむ。
- (3) 分点間距離 X, Y, Z , 断面積 A , 断面 2 次モーメント I , 変位行列の成分定数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を計算する。(11)式により伝達行列を計算する。
- (4) 熱膨張ベクトル t の成分を計算する。

$$t_1 = \alpha_T \Delta T X$$

$$t_2 = \alpha_T \Delta T Y$$

$$t_3 = \alpha_T \Delta T Z$$

$$t_4 = 0$$

$$t_5 = 0$$

$$t_6 = 0$$

- (5) 部材の変位行列を計算する

直線部材では, $L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ として a_{ij} は次のようになる。

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

$$a_{12} = (\alpha - \beta) \frac{XY}{L} - \frac{\delta}{3} LXY$$

$$a_{13} = (\alpha - \beta) \frac{ZX}{L} - \frac{\delta}{3} LZX$$

$$a_{14} = 0$$

$$a_{15} = \frac{1}{2} \delta LZ$$

$$a_{16} = -\frac{1}{2} \delta LY$$

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

$$a_{23} = (\alpha - \beta) \frac{YZ}{L} - \frac{\delta}{3} LYZ$$

$$a_{24} = -\frac{1}{2} \delta LZ$$

$$a_{25} = 0$$

$$a_{26} = \frac{1}{2} \delta LX$$

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

$$a_{34} = \frac{1}{2} \delta LY$$

$$a_{35} = -\frac{1}{2} \delta LX$$

$$a_{36} = 0$$

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

$$a_{45} = (\gamma - \delta) \frac{XY}{L}$$

$$a_{46} = (\gamma - \delta) \frac{ZX}{L}$$

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

$$a_{56} = (\gamma - \delta) \frac{YZ}{L}$$

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

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

¼円弧部材では、 $x-y$ 平面内の x 軸回りの円弧の場合 $R=|X|$ として、 a_{ij} は次のようになる。

$$a_{11} = \frac{\pi}{4} (\alpha + \beta) R + \frac{\pi}{4} \delta R^3$$

$$a_{12} = (\alpha - \beta - \delta R^2) \frac{XY}{2R}$$

$$a_{13} = 0$$

$$a_{14} = 0$$

$$a_{15} = 0$$

$$a_{16} = -\delta RY$$

$$a_{22} = \frac{\pi}{4} (\alpha + \beta) R + \left(\frac{3}{4}\pi - 2\right) \delta R^3$$

$$a_{23} = 0$$

$$a_{24} = 0$$

$$a_{25} = 0$$

$$a_{26} = \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \delta RX$$

$$a_{33} = \frac{\pi}{2} \beta R + \left(\frac{3}{4}\pi \gamma - 2\gamma + \frac{\pi}{4}\delta\right) R^3$$

$$a_{34} = \frac{1}{2} (\gamma + \delta) RY$$

$$a_{35} = \left(-\frac{\pi}{4}\delta + \gamma - \frac{\pi}{4}\gamma\right) RX$$

$$a_{36} = 0$$

$$a_{44} = \frac{\pi}{4} (\gamma + \delta) R$$

$$a_{45} = \frac{1}{2} (\gamma - \delta) \frac{XY}{R}$$

$$a_{46} = 0$$

$$a_{55} = \frac{\pi}{4} (\gamma + \delta) R$$

$$a_{56} = 0$$

$$a_{66} = \frac{\pi}{2} \delta R$$

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

x-y 平面内の y 軸回りの円弧, y-z 平面内, z-x 平面内の円弧についても同様に読みこむ。

(6) 各部材の変位行列 A , 伝達行列 T を用い, 各点の変位行列 F を次の様に計算する。

$m = 1$ および $2, 4, 6, \dots, M-1$ の時は

$$F(m, 2) = A(m, 1)$$

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

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

$m = 3, 5, 7, \dots, M$ の時は

$$F(m, 1) = [F(m-2, N_{m-2}+1)^{-1} + F(m-1, N_{m-1}+1)^{-1}]^{-1}$$

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

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

(7) 各部材の熱膨張ベクトル t , 変位行列 F , 伝達行列 T を用いて次のように各点の熱膨張ベクトル τ を計算する。

$m = 1$ および $2, 4, 6, \dots, M-1$ の時は

$$\tau(m, 1) = u(m)$$

$$\tau(m, n+1) = t(m, n) + T(m, n, n+1) \tau(m, n)$$

$$\tau(m, N_m+1) = t(m, N_m) + T(m, N_m, N_m+1) \tau(m, N_m)$$

$m = 3, 5, 7, \dots, M$ の時は

$$\tau(m, 1) = [F(m-2, N_{m-2}+1)^{-1} + F(m-1, N_{m-1}+1)^{-1}]^{-1}$$

$$\times [F(m-2, N_{m-2}+1)^{-1} \tau(m-2, N_{m-2}+1)$$

$$+ F(m-1, N_{m-1}+1)^{-1} \tau(m-1, N_{m-1}+1)]$$

$$\tau(m, n+1) = t(m, n) + T(m, n, n+1) \tau(m, n)$$

$$\tau(m, N_m+1) = t(m, N_m) + T(m, N_m, N_m+1) \tau(m, N_m)$$

となる。

(8) 右固定端の力, 変位を求める

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

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

(9) 部分配管 \textcircled{M} の力, 変位を求める

$n = N_M, N_M-1, \dots, 2, 1$ に対し

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

$$d(M, n) = F(M, n) f(M, n) + \tau(M, n)$$

(10) 部分配管(M)を除く部分配管の各分点の力, 変位を求める。

$m = M-2, M-4, \dots, 3, 1$ に対して

$$f(m, N_m+1) = F(m, N_m+1)^{-1} [d(m+2, 1) - \tau(m, N_m+1)]$$

$$d(m, N_m+1) = d(m+2, 1)$$

$n = N_m, N_m-1, \dots, 2, 1$ に対して

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

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

但し $F(1, 1) = 0$ とする。

$m = M-1, M-3, \dots, 4, 2$ に対して

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

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

$n = N_m, N_m-1, \dots, 2, 1$ に対して

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

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

(11) 各点の接線方向を求め, (19)~(25)式を用いて応力を求める。

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, (20)~(25)式を用いてコード化する。この際内圧が大きいのか, 外圧が大きいのかにより, 管外表面, 管内表面に最大応力が現われるので, 内表面, 外表面の両者に対し応力を計算し, 大きい方をとるようにする。

3. 入出力

3.1 入力

配管の一端を原点にとり, Fig. 5 のように配管を部分配管 (固定端, 分岐点で区切られるもの), 部材 (直管または $1/4$ 円弧管) に分割し, 番号をつける。この際部分配管の番号, 部材の番号は図に示すような方向にとらなければならない。各点の座標, 部材の特性値を入力するには, 入力カードの説明で示すように番地を設けて読みこむ。この方法は番地を記入する煩雑さがあるが, 各部材の特性値が同じ場合最初の部材についてのみ記せば済み, また管の径のみを変えて連続計算するような場合にも便利である。中心角 120° のような円弧部材がある時には本コードでは計算できないが, 直管同志は 120° で交わっていても構わないので直管近似で計算することは可能である。次のデータを入力する。

- 分岐点数 (部分配管数) M
- 各部分配管の部材数 N_m
- 右固定端の座標 [cm] $x(M, N_m+1), y(M, N_m+1), Z(M, N_m+1)$
- 固定端移動量 [cm] u (m)
- 各分点の座標 [cm] $x(m, n), y(m, n), z(m, n)$

(10) 部分配管(M)を除く部分配管の各分点の力, 変位を求める。

$m=M-2, M-4, \dots, 3, 1$ に対して

$$f(m, N_m+1) = F(m, N_m+1)^{-1} [d(m+2, 1) - \tau(m, N_m+1)]$$

$$d(m, N_m+1) = d(m+2, 1)$$

$n=N_m, N_m-1, \dots, 2, 1$ に対して

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

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

但し $F(1, 1) = 0$ とする。

$m=M-1, M-3, \dots, 4, 2$ に対して

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

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

$n=N_m, N_m-1, \dots, 2, 1$ に対して

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

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

(11) 各点の接線方向を求め, (19)~(25)式を用いて応力を求める。

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, (20)~(28)式を用いてコード化する。この際内圧が大きいか, 外圧が大きいかにより, 管外表面, 管内表面に最大応力が現われるので, 内表面, 外表面の両者に対し応力を計算し, 大きい方をとるようにする。

3. 入出力

3.1 入力

配管の一端を原点にとり, Fig. 5 のように配管を部分配管(固定端, 分岐点で区切られるもの), 部材(直管または $\frac{1}{4}$ 円弧管)に分割し, 番号をつける。この際部分配管の番号, 部材の番号は図に示すような方向にとらなければならない。各点の座標, 部材の特性値を入力するには, 入力カードの説明で示すように番地を設けて読みこむ。この方法は番地を記入する煩雑さがあるが, 各部材の特性値が同じ場合最初の部材についてのみ記せば済み, また管の径のみを変えて連続計算するような場合にも便利である。中心角 120° のような円弧部材がある時には本コードでは計算できないが, 直管同志は 120° で交わっていても構わないので直管近似で計算することは可能である。次のデータを入力する。

- 分岐点数(部分配管数) M
- 各部分配管の部材数 N_m
- 右固定端の座標[cm] $x(M, N_m+1), y(M, N_m+1), Z(M, N_m+1)$
- 固定端移動量[cm] u(m)
- 各分点の座標[cm] $x(m, n), y(m, n), z(m, n)$

- 円弧管の両端の分点での接線の交点の座標 [cm]

$$x_B(m, n, n+1), y_B(m, n, n+1), z_B(m, n, n+1)$$

- ヤング率 [Kg/cm²] E (m, n)
- ポアソン比 [無次元] ν (m, n)
- 管内径 [cm] D₁ (m, n)
- 管外径 [cm] D₂ (m, n)
- 線膨張係数 [1/°C] α_T (m, n)
- 温度上昇度 [°C] ΔT (m, n)
- 内圧 [Kg/cm²] p₁ (m, n)
- 外圧 [Kg/cm²] p₂ (m, n)

固定端移動量 $u(m)$ は $m=1$ より $M+1$ まで読みこむようになっている。この中幾つかは分岐点となるのでこれについては読みこまなくてもよい。たとえば入力例の部分配管数 $M=3$ の場合、A(1), A(2) は固定端で、A(3) は分岐点、A(4) が固定端となるが、この時は A(1), A(2) を読み、A(3) の入力場所 (番地) を空けて A(4) を読みこむ。A(3) の場所に余計な数値が入っていても読まれない。円弧管の両端の分点での接線の交点の座標については、直管の場合は 0 を入力する。連続計算などの場合、単に空白にしておくとの前の値を使用してしまうので必ず 0 を記入する必要がある。

入力カードは次のようになる。

1. タイトル・カード コラム 2 ~ コラム 80 まで任意の 79 文字 (A タイプ)
2. データ・カード(1) コラム 2 ~ コラム 5 部分配管数 (I 4)
 コラム 11 ~ コラム 20 右固定端の座標 x 成分 (F 10.0)
 コラム 21 ~ コラム 30 右固定端の座標 y 成分 (F 10.0)
 コラム 31 ~ コラム 40 右固定端の座標 z 成分 (F 10.0)
3. データ・カード(2) 各部分配管の部材数 (I 5)
 5 コラムずつ 1 カードに 10 個まで
4. データ・カード(3) コラム 1 = 1 データ・カード(3) の最後のカードを示す。その他のカードは空白
 コラム 2 = 1 複写を示す (例参照)
 コラム 4 ~ コラム 7 カード中の情報の先頭番地
 コラム 8 ~ コラム 10 カード中の情報の数
 コラム 11 ~ コラム 80 情報 (7 F 10.0)

(例)

コラム1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	-----	78	79	80
	1		1015			14																						

コラム 2 が 1 なので複写を示す
 1015 番地より 14 語 (1028 番地まで) 34.51 を入れる

次に番地とそれに対応する情報の内容を示すが部分配管数(m)=10、各部材数(N_m)=20を最高とする。

番地	内 容		
1~200	各分点の x 座標		
	1~20	部分配管 m=1 の場合 n=1~20 に対して	
	21~40	" m=2	" "
	181~200	" m=10	" "
	以下の場合も同様に 20 ずつ 10 の部分配管からなる。		
201~400	各分点の y 座標		
401~600	"	z	"
601~800	円弧管の場合の x _B 座標 (直管の場合=0)		
801~1000	"	y _B	"
1001~1200	"	z _B	"
1201~1400	ヤング率		
1401~1600	ポアソン比		
1601~1800	管内径		
1801~2000	管外径		
2001~2200	線膨張係数		
2201~2400	温度上昇度		
2401~2600	内圧		
2601~2800	外圧		
2801~2910	固定端の移動量	2801~2806	m = 1
		2811~2816	m = 2
		2901~2906	m = 11

(例)

コラム1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	78	79	80		
1	2685						2	134.13						126.91																					

コラム1が1なので最後のカードであることを示す
 2685番地に134.13, 2686番地に126.91をいれた後全ての
 入力は終了し計算に移る。

5. 連続計算の場合

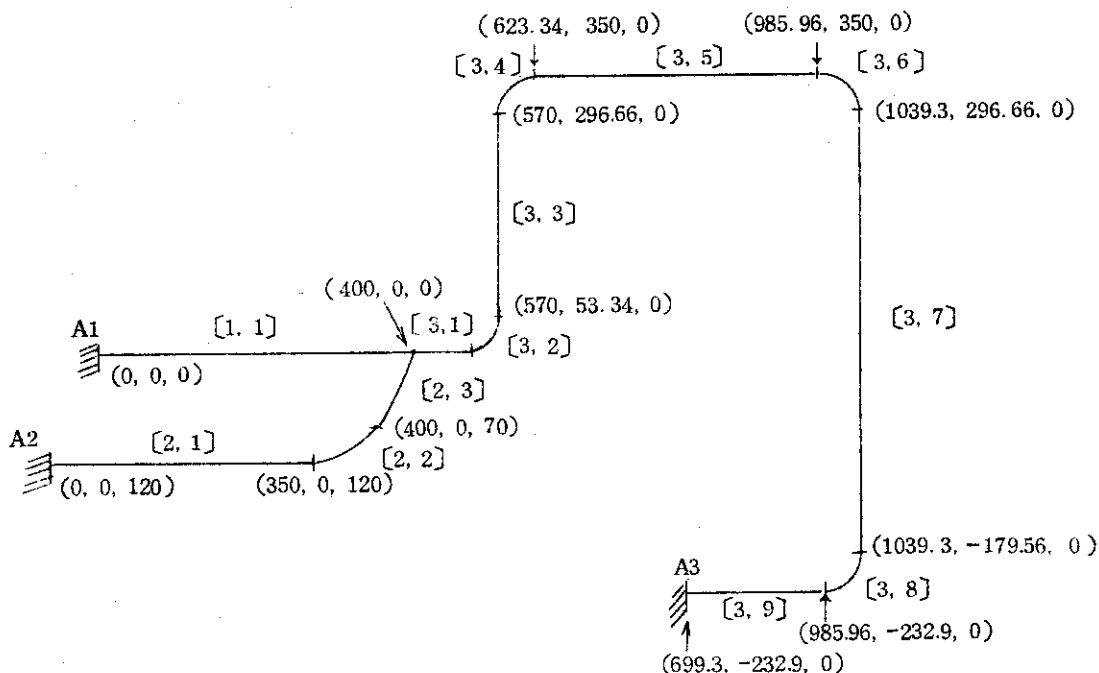
タイトル・カード、データ・カード(1)~(3)を前ケースと同じ要領で入れる。但しデータ・カード(3)については修正の必要のあるものだけを入れる。

6. 終了カード コラム 1 = 1

データ・カード(3)の最後のカードの次にこの終了カードがあれば全ての計算はここで終了する。

7. 入力作成例

次に入力作成の具体例を示す。



円弧管の接線の交点の座標

[2, 2]	(400, 0, 120)	[3, 2]	(570, 0, 0)
[3, 4]	(570, 350, 0)	[3, 6]	(1039.3, 350, 0)
[3, 8]	(1039.3, -232.9, 0)		

固定端の移動量

A 1 (2.25, 0, -2.16)	A 2 (2.25, 0, -0.83)
A 3 (0.41, 0, -3.13)	

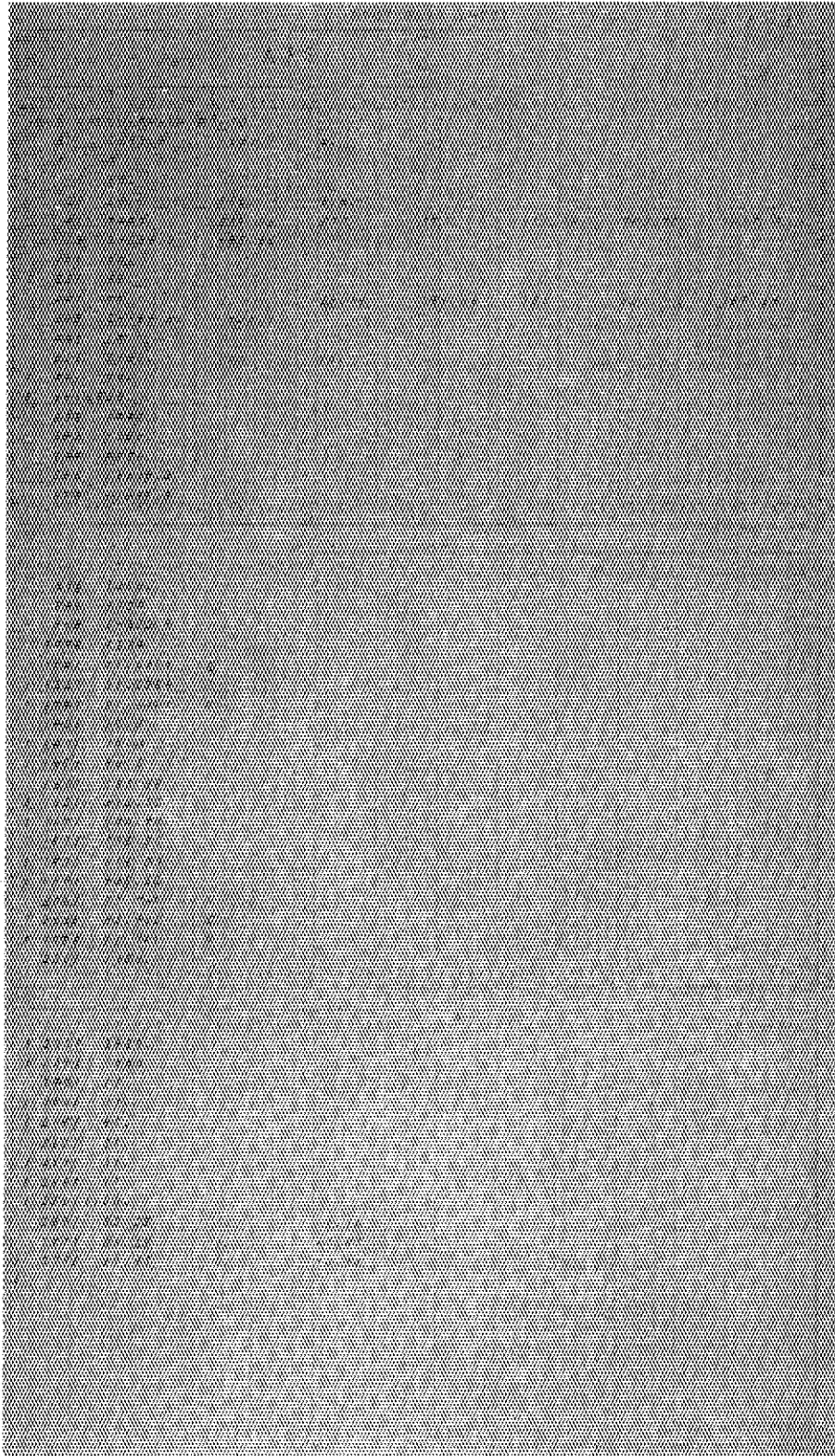
ヤング率	$1.63 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$
ポアソン比	0.3
管内径	33.98 cm [管①, ③]
	15.52 cm [管②]
管外径	35.56 cm [管①, ③]
	16.52 cm [管②]
線膨張係数	$1.76 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

温度上昇度 480°C

内 圧 1Kg/cm²

外 圧 1Kg/cm²

FORTRUM SHEET に記入すると次のようになる。



3.2 出力

次に示すような表示，単位で各分点の力，モーメント，変位，熱膨張による曲げモーメント，振りモーメント，軸方向応力，円周方向応力，内外圧による応力，熱膨張および内外圧による合成応力が出力される。

各部分配管 (PARTIAL PIPING) の各分点 (POINT) に対し，

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
回転角の x, y, z 成分	[ラジアン]	X-ANGLE , Y-ANGLE , Z-ANGLE
自由熱膨張量の x, y, z 成分	[cm]	X , Y , Z ,
応力集中係数		STRESS INTENSIFICATION FACTOR
曲げモーメント	[Kg・cm]	BENDING MOMENT
振りモーメント	[Kg・cm]	TORSIONAL MOMENT
軸方向の熱応力	[Kg/cm ²]	BENDING AND AXIAL STRESS
剪断熱応力	[Kg/cm ²]	SHEARING AND TORSIONAL STRESS
内外圧による応力 [Kg/cm ²]		
半径方向，内表面		RADIAL STRESS AT I.D.
半径方向，外表面		RADIAL STRESS AT O.D.
円周方向，内表面		CIRCUMFERENTIAL STRESS AT I.D.
円周方向，外表面		CIRCUMFERENTIAL STRESS AT O.D.
軸方向，内表面		AXIAL STRESS AT I.D.
軸方向，外表面		AXIAL STRESS AT O.D.
合成応力および固定端の反力		
固定端の反力 [Kg]		REACTION FORCES AT ANCHORS
軸方向合成応力 [Kg/cm ²]		AXIAL STRESS
半径方向合成応力 [Kg/cm ²]		HOOP STRESS
全合成応力 [Kg/cm ²]		TOTAL STRESS

3.3 入出力例

入力 of 項で取り扱った例を計算させると次頁のような出力を得る。出力には入力データも同時に示される。

***** CODE FOR THE ANALYSIS OF PIPING STRESS *****

--- CASE 1 ---

TEST CALCULATION NO-33

--- INPUT DATA ---

NUMBER OF PARTIAL PIPINGS ----- 3
 X COMPONENT ----- 699.30
 Y COMPONENT ----- -232.90
 Z COMPONENT ----- 0.0

* PARTIAL PIPING 1. * (NUMBER OF PIPE ELEMENTS --- 1)

PIPE NO.	.....COORDINATE.....			.....CORNER OF BEND.....			.....CHARACTERISTICS OF PIPES.....		DIAMETER		EXPANSION	TEMP.	PRESSURE	
	X CM	Y CM	Z CM	XB CM	YB CM	ZB CM	YOUNG'S MODULUS 1/KG*2	POISSONS RATIO	INNER CM	OUTER CM	COEFFT. 1/DEG	RISE DEG	INNER KG/CM**2GAUGE	OUTER
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.163E 07	0.300	33.98	35.56	0.18E-04	480.0	10.00	5.00

* PARTIAL PIPING 2. * (NUMBER OF PIPE ELEMENTS --- 3)

1	0.0	0.0	120.00	0.0	0.0	0.0	0.163E 07	0.300	15.52	16.52	0.18E-04	480.0	10.00	5.00
2	350.00	0.0	120.00	400.00	0.0	120.00	0.163E 07	0.300	15.52	16.52	0.18E-04	480.0	10.00	5.00
3	400.00	0.0	70.00	0.0	0.0	0.0	0.163E 07	0.300	15.52	16.52	0.18E-04	480.0	10.00	5.00

* PARTIAL PIPING 3. * (NUMBER OF PIPE ELEMENTS --- 9)

1	400.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.163E 07	0.300	33.98	35.56	0.18E-04	480.0	10.00	5.00
2	516.66	0.0	0.0	570.00	0.0	0.0	0.163E 07	0.300	33.98	35.56	0.18E-04	480.0	10.00	5.00
3	570.00	53.34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.163E 07	0.300	33.98	35.56	0.18E-04	480.0	10.00	5.00
4	570.00	296.66	0.0	570.00	350.00	0.0	0.163E 07	0.300	33.98	35.56	0.18E-04	480.0	10.00	5.00
5	623.34	350.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.163E 07	0.300	33.98	35.56	0.18E-04	480.0	10.00	5.00
6	985.96	350.00	0.0	1039.30	350.00	0.0	0.163E 07	0.300	33.98	35.56	0.18E-04	480.0	10.00	5.00
7	1039.30	296.66	0.0	0.0	0.0	0.0	0.163E 07	0.300	33.98	35.56	0.18E-04	480.0	10.00	5.00
8	1039.30	-179.56	0.0	1039.30	-232.90	0.0	0.163E 07	0.300	33.98	35.56	0.18E-04	480.0	10.00	5.00
9	985.96	-232.90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.163E 07	0.300	33.98	35.56	0.18E-04	480.0	10.00	5.00

--- INPUT DATA ---

MOVEMENTS OF ANCHORS

PARTIAL PIPING	X-DISPLT CM	Y-DISPLT CM	Z-DISPLT CM	X-ANGLE RADIAN	Y-ANGLE RADIAN	Z-ANGLE RADIAN
1.	0.22500E 01	0.0	-0.21600E 01	0.0	0.0	0.0
2.	0.22500E 01	0.0	-0.83000E 00	0.0	0.0	0.0
RIGHT	0.41000E 00	0.0	-0.31300E 01	0.0	0.0	0.0

--- PREVIOUS CALCULATION ---

* PARTIAL PIPING 1. * (NUMBER OF PIPE ELEMENTS --- 1)

PIPE NO.	.....DISTANCE.....			..CHARACTERISTICS OF PIPES..		....FLEXIBILITY....
	XX CM	YY CM	ZZ CM	CROSS SECTIONAL AREA CM**2	MOMENT OF INERTIA OF CROSS SECTION CM**4	
1	400.00	0.0	0.0	0.86294E 02	0.13047E 05	1.00000

* PARTIAL PIPING 2. * (NUMBER OF PIPE ELEMENTS --- 3)

1	350.00	0.0	0.0	0.25164E 02	0.80805E 03	1.00000
2	50.00	0.0	-50.00	0.25164E 02	0.80805E 03	4.32559
3	0.0	0.0	-70.00	0.25164E 02	0.80805E 03	1.00000

* PARTIAL PIPING 3. * (NUMBER OF PIPE ELEMENTS --- 9)

1	116.66	0.0	0.0	0.86294E 02	0.13047E 05	1.00000
2	53.34	53.34	0.0	0.86294E 02	0.13047E 05	12.29007
3	0.0	243.32	0.0	0.86294E 02	0.13047E 05	1.00000
4	53.34	53.34	0.0	0.86294E 02	0.13047E 05	12.29007
5	362.62	0.0	0.0	0.86294E 02	0.13047E 05	1.00000
6	53.34	-53.34	0.0	0.86294E 02	0.13047E 05	12.29008
7	0.0	-476.22	0.0	0.86294E 02	0.13047E 05	1.00000
8	-53.34	-53.34	0.0	0.86294E 02	0.13047E 05	12.29007
9	-286.66	0.0	0.0	0.86294E 02	0.13047E 05	1.00000

--- 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	-0.76344E 03	0.12491E 03	-0.56281E 01	-0.14843E 04	0.12100E 05	0.16247E 06
2	-0.76344E 03	0.12491E 03	-0.56281E 01	-0.14843E 04	0.98489E 04	0.11251E 06

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

1	0.17997E 03	0.25754E 02	-0.56507E 02	0.85659E 02	0.13773E 05	0.12217E 05
2	0.17997E 03	0.25754E 02	-0.56507E 02	0.85659E 02	-0.60049E 04	0.32035E 04
3	0.17997E 03	0.25754E 02	-0.56507E 02	-0.12020E 04	0.16848E 03	0.19158E 04
4	0.17997E 03	0.25754E 02	-0.56507E 02	-0.30048E 04	0.12767E 05	0.19158E 04

* PARTIAL PIPING 3. * (NUMBER OF POINTS --- 10)

1	-0.58347E 03	0.15066E 03	-0.62134E 02	-0.44892E 04	0.22616E 05	0.11443E 06
2	-0.58347E 03	0.15066E 03	-0.62134E 02	-0.44892E 04	0.15367E 05	0.96852E 05
3	-0.58347E 03	0.15066E 03	-0.62134E 02	-0.11749E 04	0.12053E 05	0.57693E 05
4	-0.58347E 03	0.15066E 03	-0.62134E 02	0.13944E 05	0.12053E 05	-0.84277E 05
5	-0.58347E 03	0.15066E 03	-0.62134E 02	0.17258E 05	0.87386E 04	-0.12344E 06
6	-0.58347E 03	0.15066E 03	-0.62134E 02	0.17258E 05	-0.13792E 05	-0.17807E 06
7	-0.58347E 03	0.15066E 03	-0.62134E 02	0.13944E 05	-0.17107E 05	-0.15498E 06
8	-0.58347E 03	0.15066E 03	-0.62134E 02	-0.15646E 05	-0.17107E 05	0.12288E 06
9	-0.58347E 03	0.15066E 03	-0.62134E 02	-0.18960E 05	-0.13792E 05	0.16204E 06
10	-0.58347E 03	0.15066E 03	-0.62134E 02	-0.18960E 05	0.40189E 04	0.20523E 06

--- 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-ANGLE RADIAN	Y-ANGLE RADIAN	Z-ANGLE RADIAN
1	0.22500E 01	0.0	-0.21600E 01	0.0	0.0	0.0
2	0.56270E 01	0.54944E 00	-0.22027E 01	-0.36293E-04	0.20641E-03	0.25860E-02

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

POINT NO.	X-DISPLT CM	Y-DISPLT CM	Z-DISPLT CM	X-ANGLE RADIAN	Y-ANGLE RADIAN	Z-ANGLE RADIAN
1	0.22500E 01	0.0	-0.83000E 00	0.0	0.0	0.0
2	0.52083E 01	0.42899E 00	-0.11651E 01	0.29591E-04	0.10320E-02	0.20489E-02
3	0.56247E 01	0.54740E 00	-0.16113E 01	0.75496E-04	-0.13731E-03	0.24536E-02
4	0.56270E 01	0.54944E 00	-0.22027E 01	-0.36293E-04	0.20641E-03	0.25860E-02

* PARTIAL PIPING 3. * (NUMBER OF POINTS --- 10)

POINT NO.	X-DISPLT CM	Y-DISPLT CM	Z-DISPLT CM	X-ANGLE RADIAN	Y-ANGLE RADIAN	Z-ANGLE RADIAN
1	0.56270E 01	0.54944E 00	-0.22027E 01	-0.36293E-04	0.20641E-03	0.25860E-02
2	0.66121E 01	0.84619E 00	-0.22334E 01	-0.68305E-04	0.31059E-03	0.31655E-02
3	0.67515E 01	0.15904E 01	-0.22744E 01	-0.32235E-03	0.72735E-03	0.70596E-02
4	0.50167E 01	0.36463E 01	-0.23477E 01	-0.24931E-03	0.90662E-03	0.69075E-02
5	0.51892E 01	0.42987E 01	-0.24003E 01	0.14333E-04	0.95919E-03	0.17262E-02
6	0.82511E 01	0.44878E 01	-0.27523E 01	0.39687E-03	0.91611E-03	-0.84417E-03
7	0.83678E 01	0.38258E 01	-0.28181E 01	0.59086E-03	0.72824E-03	-0.91661E-02
8	0.36650E 01	-0.19683E 00	-0.31218E 01	0.57180E-03	0.23027E-03	-0.95255E-02
9	0.28329E 01	-0.34947E 00	-0.31334E 01	0.33223E-03	0.65869E-04	-0.24752E-02
10	0.41000E 00	0.0	-0.31300E 01	0.0	0.0	0.0

--- MAIN CALCULATION ---

3. FREE THERMAL EXPANSION VECTORS AT POINTS

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

POINT NO.	X-EXPANSION CM	Y-EXPANSION CM	Z-EXPANSION CM
1	0.22500E 01	0.0	-0.21600E 01
2	0.56292E 01	0.0	-0.21600E 01

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

POINT NO.	X-EXPANSION CM	Y-EXPANSION CM	Z-EXPANSION CM
1	0.22500E 01	0.0	-0.83000E 00
2	0.52068E 01	0.0	-0.83000E 00
3	0.56292E 01	0.0	-0.12524E 01
4	0.56292E 01	0.0	-0.18438E 01

* PARTIAL PIPING 3. * (NUMBER OF POINTS --- 10)

POINT NO.	X-EXPANSION CM	Y-EXPANSION CM	Z-EXPANSION CM
1	0.56291E 01	0.0	-0.21191E 01
2	0.66146E 01	0.0	-0.21009E 01
3	0.70652E 01	0.44062E 00	-0.20926E 01
4	0.70652E 01	0.29062E 01	-0.20926E 01
5	0.75158E 01	0.29568E 01	-0.20843E 01
6	0.10579E 02	0.29568E 01	-0.20277E 01
7	0.11030E 02	0.29062E 01	-0.20194E 01
8	0.11030E 02	-0.19169E 01	-0.20194E 01
9	0.10579E 02	-0.19675E 01	-0.20277E 01
10	0.81575E 01	-0.19675E 01	-0.20724E 01

--- MAIN CALCULATION ---

4. THERMAL STRESS

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

POINT NO.	STRESS INTENSIFICATION FACTOR	BENDING MOMENT KG*CM	TORSIONAL MOMENT KG*CM	BENDING AND AXIAL STRESS KG/CM**2	SHEARING AND TORSIONAL STRESS KG/CM**2
1	0.10000E 01	0.16292E 06	-0.14843E 04	0.23087E 03	0.39082E 01
2	0.10000E 01	0.11244E 06	-0.14843E 04	0.16276E 03	0.39082E 01

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

1	0.10000E 01	0.18471E 05	0.85659E 02	0.19535E 03	0.53701E 01
2	0.16525E 01	0.68059E 04	0.85659E 02	0.12212E 03	0.53701E 01
3	0.16525E 01	0.12138E 04	0.19158E 04	0.22749E 02	0.24232E 02
4	0.10000E 01	0.13115E 05	0.19158E 04	0.13631E 03	0.24232E 02

* PARTIAL PIPING 3. * (NUMBER OF POINTS --- 10)

1	0.10000E 01	0.11664E 06	-0.44892E 04	0.16571E 03	0.68345E 01
2	0.43684E 01	0.98043E 05	-0.44892E 04	0.59052E 03	0.68345E 01
3	0.43684E 01	0.57705E 05	0.12053E 05	0.34526E 03	0.21807E 02
4	0.43684E 01	0.85423E 05	0.12053E 05	0.51026E 03	0.21807E 02
5	0.43684E 01	0.12374E 06	0.17258E 05	0.74339E 03	0.15539E 02
6	0.43684E 01	0.17860E 06	0.17258E 05	0.10699E 04	0.15539E 02
7	0.43684E 01	0.15561E 06	-0.17107E 05	0.92805E 03	0.25250E 02
8	0.43684E 01	0.12387E 06	-0.17107E 05	0.73913E 03	0.25250E 02
9	0.43684E 01	0.16742E 06	-0.18960E 05	0.97484E 03	0.16694E 02
10	0.10000E 01	0.20526E 06	-0.18960E 05	0.28648E 03	0.16694E 02

--- 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	CIRCUMFERENTIAL STRESS AT I.D. KG/CM**2	CIRCUMFERENTIAL STRESS AT O.D. KG/CM**2	AXIAL STRESS AT I.D. KG/CM**2	AXIAL STRESS AT O.D. KG/CM**2
1	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02
2	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02

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

1	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.75178E 02	0.70178E 02	0.37589E 02	0.35089E 02
2	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.75178E 02	0.70178E 02	0.37589E 02	0.35089E 02
3	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.75178E 02	0.70178E 02	0.37589E 02	0.35089E 02
4	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.75178E 02	0.70178E 02	0.37589E 02	0.35089E 02

* PARTIAL PIPING 3. * (NUMBER OF POINTS --- 10)

1	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02
2	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02
3	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02
4	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02
5	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02
6	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02
7	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02
8	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02
9	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02
10	-0.10000E 02	-0.50000E 01	0.10509E 03	0.10009E 03	0.52544E 02	0.50044E 02

--- MAIN CALCULATION ---

6. COMPOUND STRESS AND REACTION FORCES AT ANCHORS

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

...REACTION FORCES AT ANCHORS...(KG)...

...COMPOUND STRESS

POINT NO.	AXIAL STRESS KG/CM**2	HOOP STRESS KG/CM**2	TOTAL STRESS KG/CM**2
1	0.76344E 03	-0.12491E 03	0.56281E 01
2	0.28341E 03	0.10900E 03	0.30365E 03
3	0.21530E 03	0.10900E 03	0.24132E 03

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

...REACTION FORCES AT ANCHORS...(KG)...

...COMPOUND STRESS

POINT NO.	AXIAL STRESS KG/CM**2	HOOP STRESS KG/CM**2	TOTAL STRESS KG/CM**2
1	0.23294E 03	0.80548E 02	0.24647E 03
2	0.15971E 03	0.80548E 02	0.17887E 03
3	0.60336E 02	0.99410E 02	0.11629E 03
4	0.17390E 03	0.99410E 02	0.20031E 03

* PARTIAL PIPING 3. * (NUMBER OF POINTS --- 10)

...REACTION FORCES AT ANCHORS...(KG)...

...COMPOUND STRESS

POINT NO.	AXIAL STRESS KG/CM**2	HOOP STRESS KG/CM**2	TOTAL STRESS KG/CM**2
1	0.21825E 03	0.11192E 03	0.24328E 03
2	0.84306E 03	0.11192E 03	0.65273E 03
3	0.39780E 03	0.12690E 03	0.41755E 03
4	0.56280E 03	0.12690E 03	0.57669E 03
5	0.79594E 03	0.12062E 03	0.80303E 03
6	0.11225E 04	0.12062E 03	0.11260E 04
7	0.96060E 03	0.13034E 03	0.98922E 03
8	0.79168E 03	0.13034E 03	0.80234E 03
9	0.10274E 04	0.12176E 03	0.10346E 04
10	0.33902E 03	0.12176E 03	0.36023E 03

4. 計算結果の検討

4.1 計算例

具体的な計算例として5ケースの計算 (Test Calculation No. 31~No. 35) を行なった。以下にこれを示す。ここでヤング率, 熱膨張量についてはASME Section VIIIに示されている値を用いた。Fig. 6, Fig. 7にこれを示す。

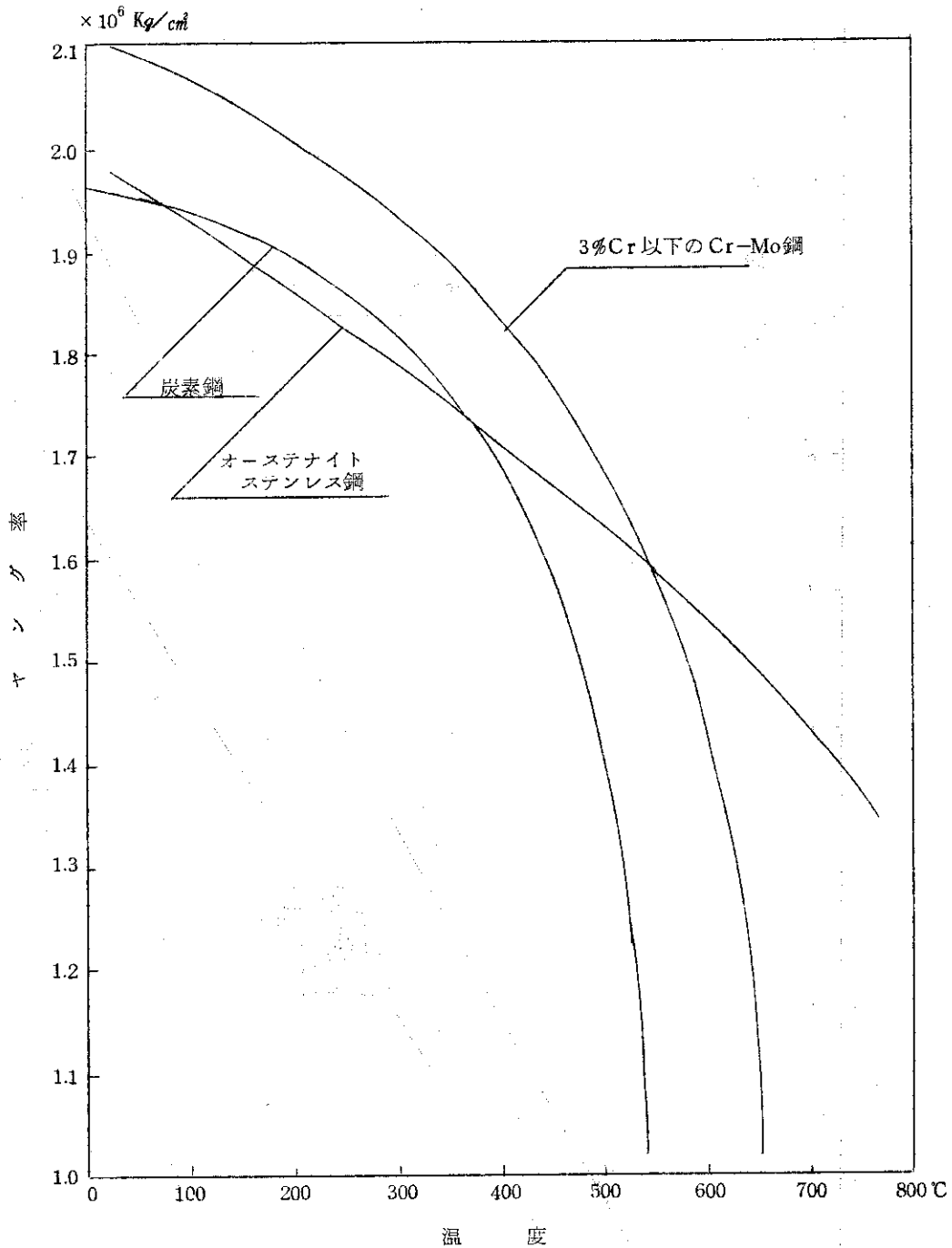


Fig. 6 配管材料のヤング率

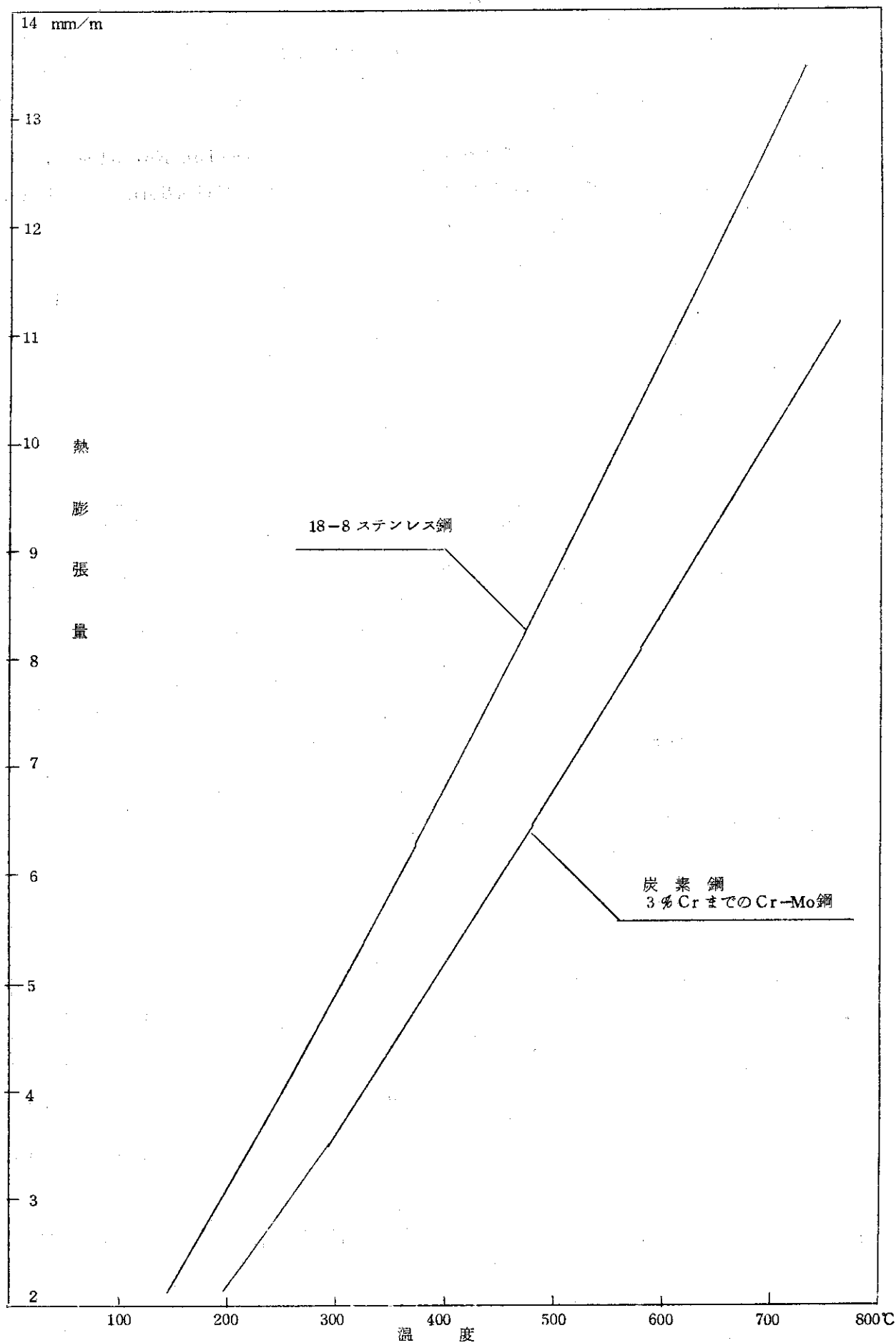
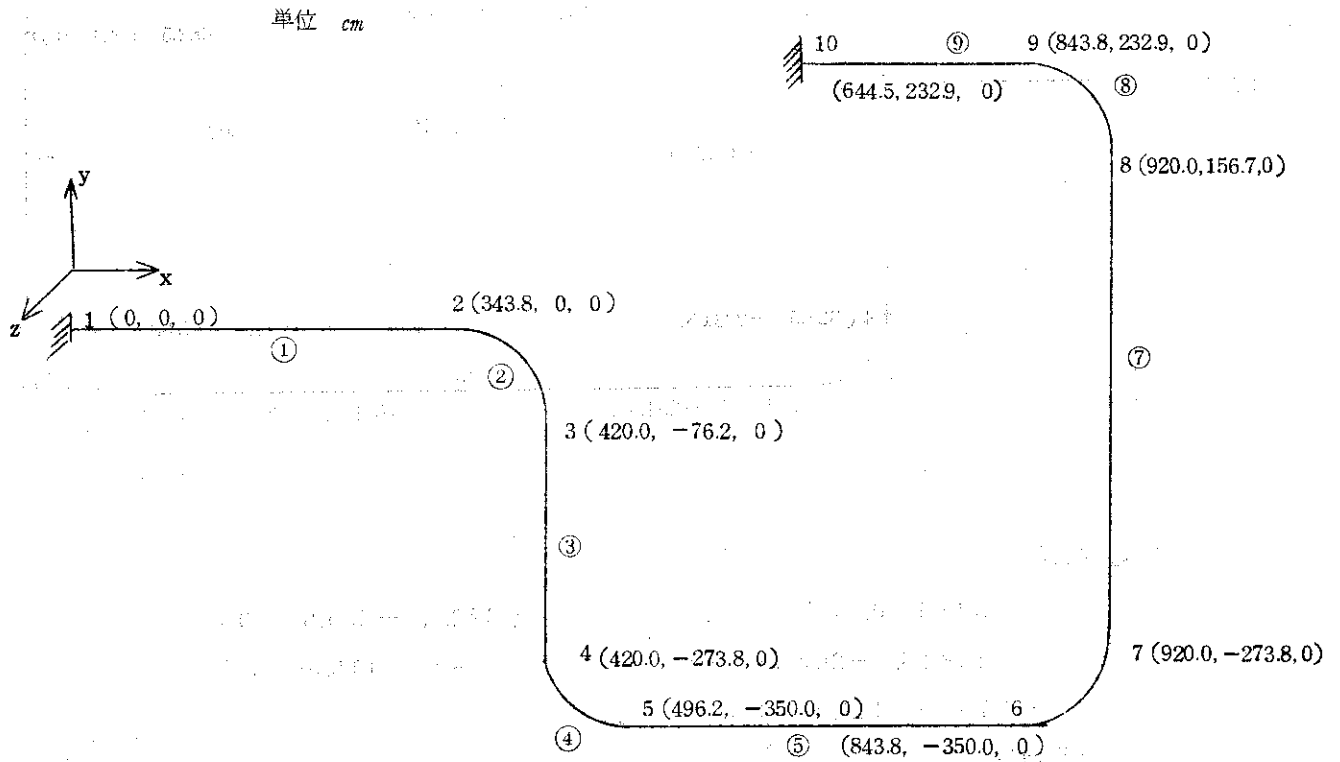


Fig. 7 配管材料の熱膨張量

Test Calculation No. 31



円弧管の接線の交点の座標

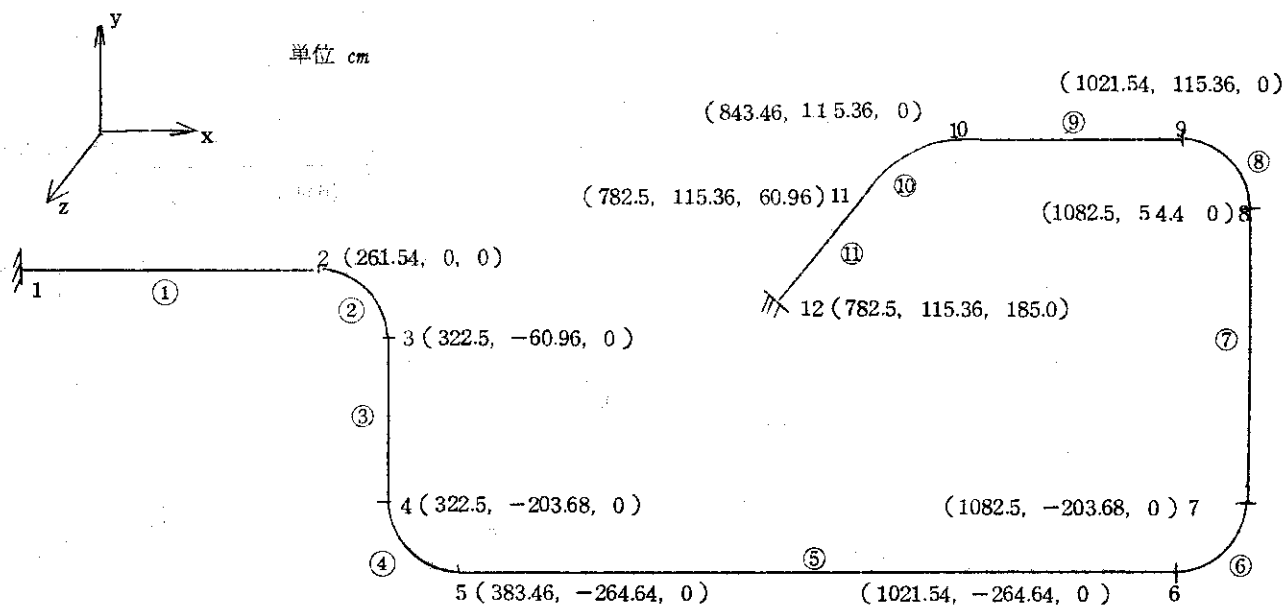
- | | |
|----------------------|----------------------|
| ② (420.0, 0, 0) | ④ (420.0, -350.0, 0) |
| ⑥ (920.0, -350.0, 0) | ⑧ (920.0, 232.9, 0) |

固定端移動量

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1 (2.25, 0, 2.16) | 2 (1.25, 0, 3.52) |
|-------------------|-------------------|

ヤング率	$1.59 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$
ポアソン比	0.3
管内径	48.9cm
管外径	50.8cm
線膨張係数	$1.782 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
温度上昇度	$55^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 35^\circ\text{C}$
内圧	1 Kg/cm^2
外圧	1 Kg/cm^2

Test Calculation No. 32



円弧管の接線の交点の座標

- ② (322.5, 0, 0)
- ④ (322.5, -264.64, 0)
- ⑥ (1082.5, -264.64, 0)
- ⑧ (1082.5, 115.36, 0)
- ⑩ (782.5, 115.36, 0)

固定端移動量

- 1 (1.25, 0, -6.32)
- 2 (0, 0, -3.81)

ヤング率

$1.59 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$

ポアソン比

0.3

管内径

39.06 cm

管外径

40.64 cm

線膨張係数

$1.782 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$

温度上昇度

$550^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 530^\circ\text{C}$

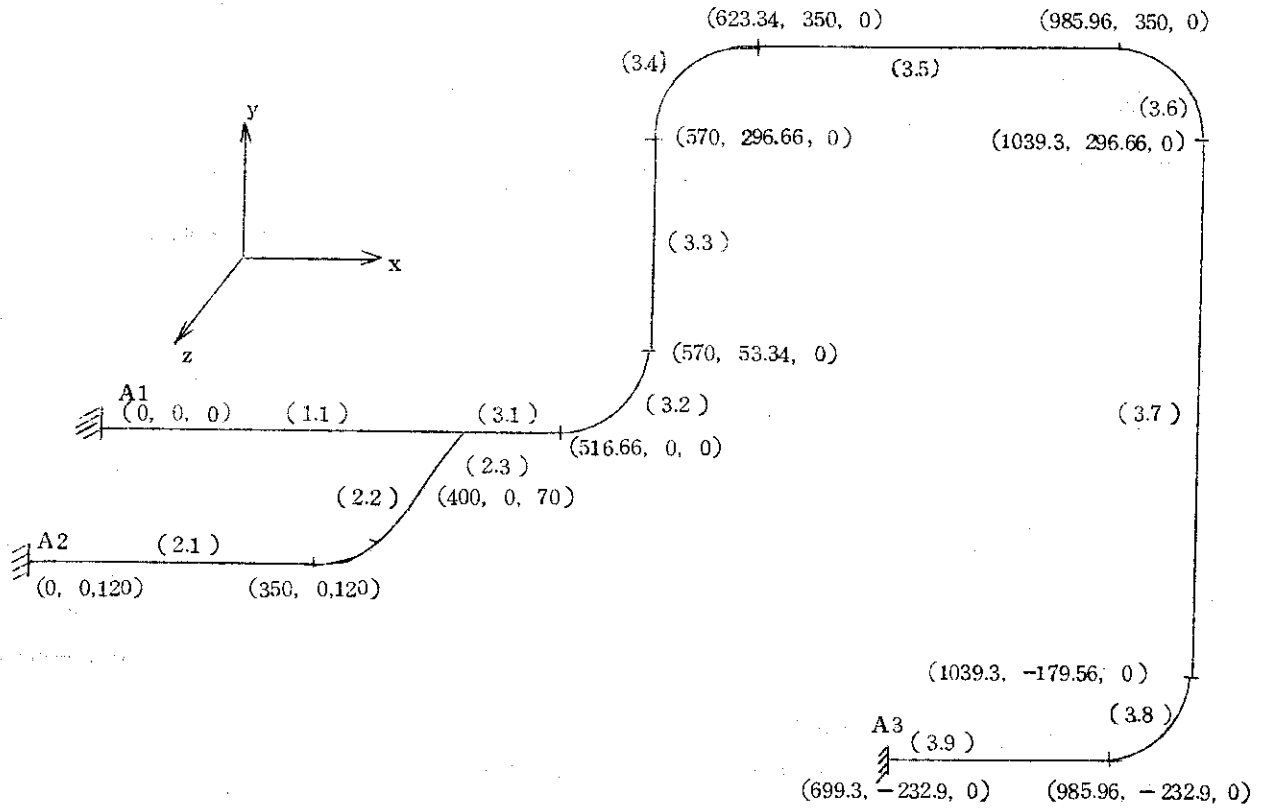
内 圧

1 Kg/cm²

外 圧

1 Kg/cm²

Test Calculation No. 33



円弧管の接線の交点の座標

(2.2)	(400, 0, 120)	(3.2)	(570, 0, 0)
(3.4)	(570, 350, 0)	(3.6)	(1039.3, 350, 0)
(3.8)	(1039.3, -232.9, 0)		

固定端の移動量

A1	(2.25, 0, -2.16)	A2	(2.25, 0, -0.83)
A3	(0.41, 0, -3.13)		

ヤング率 $1.63 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$

ポアソン比 0.30

管内径 33.98cm (管①, ③) 15.52cm (管②)

管外径 35.56cm (管①, ③) 16.52cm (管②)

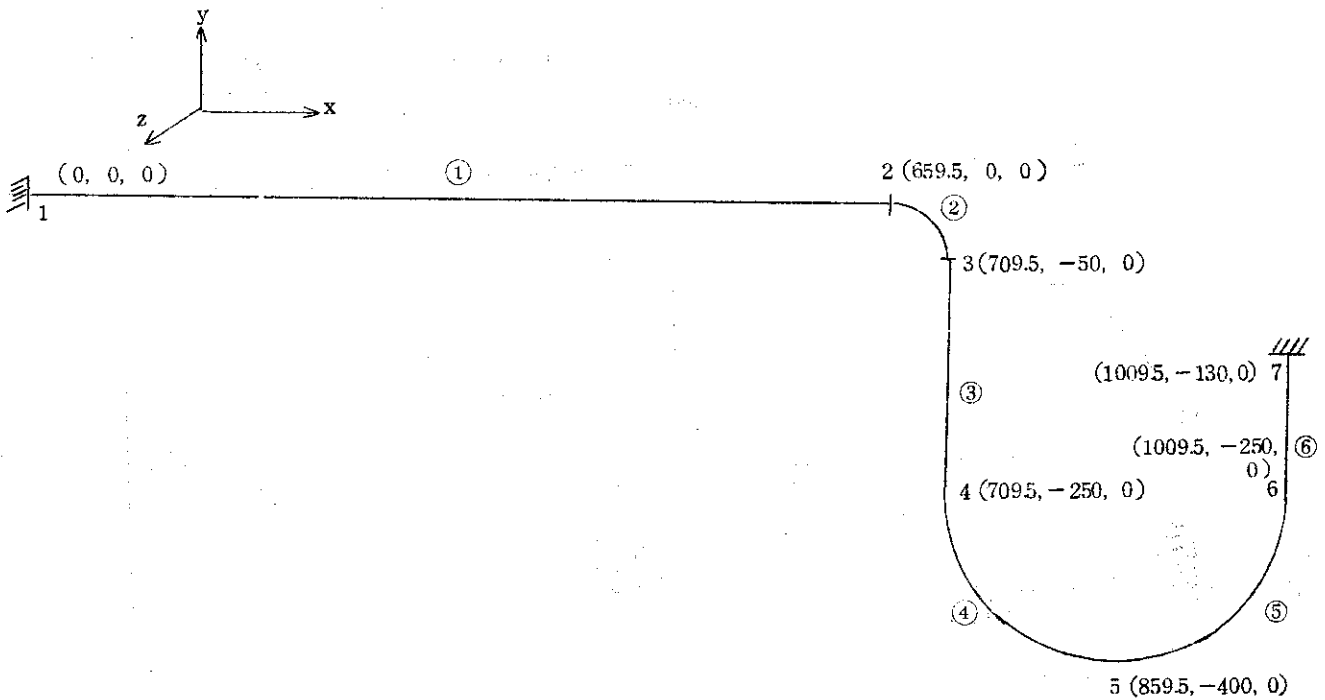
線膨張係数 $1.76 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$

温度上昇度 $500^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 480^\circ\text{C}$

内圧 1 Kg/cm^2

外圧 1 Kg/cm^2

Test Calculation No. 34



円弧管の接線の交点の座標

- ② (709.5, 0, 0) ④ (709.5, -400, 0)
- ⑤ (1009.5, -400, 0)

固定端移動量

- 1 (1.655, 0, -0.74)
- 7 (0, -0.86, 3.62)

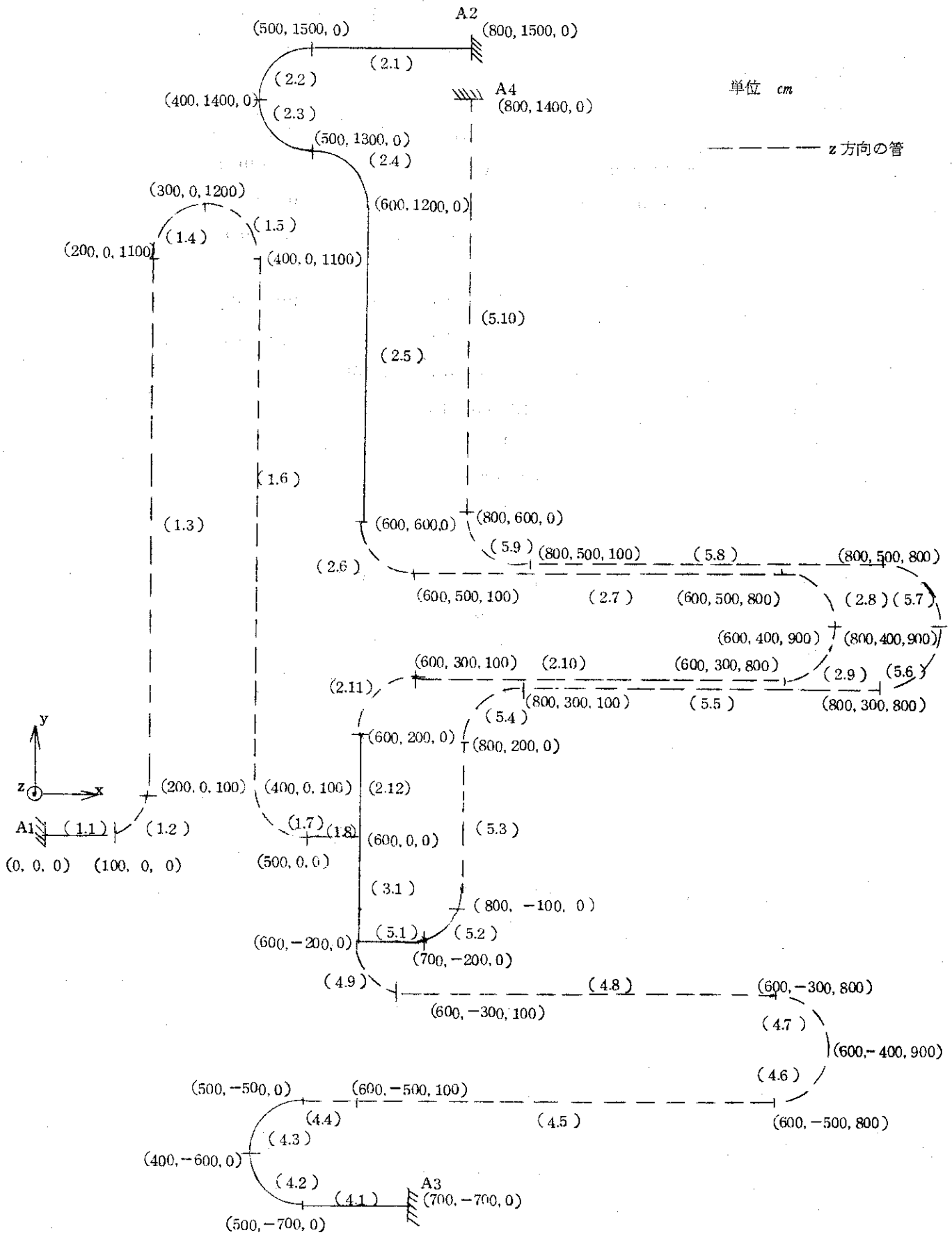
ヤング率	$1.59 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$
ポアソン比	0.30
管内径	15.52 cm
管外径	16.52 cm
線膨張係数	$1.782 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
温度上昇度	$55.0^\circ\text{C} - 20.0^\circ\text{C} = 35.0^\circ\text{C}$
内 圧	1 Kg/cm^2
外 圧	1 Kg/cm^2

Test Calculation No. 35

円弧管の接線の交点の座標 (単位 cm)

(1.2)	(200, 0, 0)	(1.4)	(200, 0, 1,200)
(1.5)	(400, 0, 1,200)	(1.7)	(400, 0, 0)
(2.2)	(600, 300, 0)	(2.4)	(600, 300, 900)
(2.5)	(600, 500, 900)	(2.7)	(600, 500, 0)
(2.9)	(600, 1,300, 0)	(2.10)	(400, 1,300, 0)
(2.11)	(400, 1,500, 0)		
(4.1)	(600, -300, 0)	(4.3)	(600, -300, 900)
(4.4)	(600, -500, 900)	(4.6)	(600, -500, 0)
(4.7)	(400, -500, 0)	(4.8)	(400, -700, 0)

ヤング率	$1.835 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$
ポアソン比	0.30
管内径	66.0 cm
管外径	83.0 cm
線膨張係数	$1.285 \times 10^{-5} 1/^\circ C$
温度上昇度	$400^\circ C - 20^\circ C = 380^\circ C$
内 圧	40.0 Kg/cm^2
外 圧	1.0 Kg/cm^2



4.2 APSおよびAUTOFLEXの計算結果

計算結果を検討するため、CDCのコードAUTOFLEXで同じ入力による計算を行なった。計算結果より、固定端反力、最大モーメント、最大変位を表示するとTable 1 のようになる。両者の値の差は、固定端の最大反力で最大3.7%、最大モーメントで最大2.3%、最大変位で最大0.5%となっている。差を生じた主要原因としては可撓性係数の式が異なっていることが考えられる。

Table 1 APSとAUTOFLEXの計算結果

計 算 例		No. 31	No. 32	No. 33	No. 34	No. 35	
固定端の最大反力	F _x	APS	-1387	-1504	-763	-568	-8224
		AUTOFLEX	-1413	-1533	-778	-590	-8093
		差	1.8	1.9	1.9	3.7	-1.6
	F _y	APS	-506	-147	151	237	-32078
		AUTOFLEX	-513	-149	152	242	-31479
		差	1.4	1.3	0.7	2.1	-1.9
	F _z	APS	241	3	-62	28	12943
		AUTOFLEX	242	3	-63	29	12622
		差	0.4	0	1.6	3.4	-2.5
最大モーメント	M _x	APS	-73600	23400	-19000	7400	-17629400
		AUTOFLEX	-74000	23500	-19100	7500	-17294663
		差	0.5	0.4	0.5	1.3	-1.9
	M _y	APS	-147000	77700	22600	-18400	-8812700
		AUTOFLEX	-147700	79300	22800	-18500	-8628300
		差	0.5	2.0	0.9	0.5	-2.1
	M _z	APS	-482200	320400	205200	-95900	5151700
		AUTOFLEX	-489300	326300	210000	-96900	5046700
		差	1.5	1.8	2.3	1.0	-2.1
最大変位	d _x	APS	8.09	8.99	8.37	7.87	-1.91
		AUTOFLEX	8.10	8.99	8.38	7.88	-1.92
		差	0.1	0	0.1	0.1	0.5
	d _y	APS	-5.23	-3.21	4.49	-3.69	-4.39
		AUTOFLEX	-5.22	-3.22	4.48	-3.65	-4.38
		差	-0.2	0.3	-0.2	-1.1	-0.2
	d _z	APS	3.53	-6.44	-3.13	3.62	6.11
		AUTOFLEX	3.53	-6.44	-3.13	3.62	6.10
		差	0	0	0	0	-0.2

$$\text{ここで 差} = \frac{(\text{AUTOFLEXの値}) - (\text{APSの値})}{(\text{AUTOFLEXの値})} \times 100 (\%)$$

5. 結 び

数年来プラント設計に従事するに際し、配管の熱応力解析コードの必要性を痛感していたが、今回、時間と予算を得、コード作成を行なうことができた。解析し得る対象の範囲、精度について改良の余地が残されているが、このコードの完成は今後のプラント設計の遂行に大いに役立つと思われる。将来また機会があれば、これらの改良、特に任意の中心角のベンドに対象を拡大することを行ないたい。本稿をまとめるにあたり御指導いただいた能澤正雄班長、安野武彦グループリーダーならびに本コードのプログラミングを行なったCRCの鎌田 稔氏に深く感謝します。

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 小河内美男

「配管工学」

③ M. W. Kellogg Co.

「Design of Piping Systems」

5. 結 び

数年来プラント設計に従事するに際し、配管の熱応力解析コードの必要性を痛感していたが、今回、時間と予算を得、コード作成を行なうことができた。解析し得る対象の範囲、精度について改良の余地が残されているが、このコードの完成は今後のプラント設計の遂行に大いに役立つと思われる。将来また機会があれば、これらの改良、特に任意の中心角のベンドに対象を拡大することを行ないたい。本稿をまとめるにあたり御指導いただいた能澤正雄班長、安野武彦グループリーダーならびに本コードのプログラミングを行なったCRCの鎌田 稔氏に深く感謝します。

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 小河内美男
「配管工学」
- ③ M. W. Kellogg Co.
「Design of Piping Systems」