

SUS304繰返し塑性構成モデルの検討

——非線形繰返し非硬化領域モデルの評価——

1990年6月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱いには十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

SUS304繰返し塑性構成モデルの検討

——非線形繰返し非硬化領域モデルの評価——

柄谷 和輝*, 岩田 耕司*, 月森 和之*

要 旨

高精度の非弾性解析を行うためには、材料の挙動を正確に表わし得る構成モデルが不可欠である。大野らによって提案された非線形繰返し非硬化領域モデル¹⁾はSUS304鋼の繰返し塑性挙動を精度よく表現できるモデルとして注目されている。本報告書はSUS304鋼を対象に、この構成モデルのモデル定数決定法の検討と単軸ならびに構造問題への適用を通じて、モデルの評価を行うものである。

以下に本報の主な成果をまとめる。

- (1) SUS304鋼に対する非線形繰返し非硬化領域モデルのモデル定数決定方法を提案し、モデル定数決定プログラムを作成した。また事業団で得られたSUS304鋼に対する平均的な材料特性データに基づき、室温から600℃に至るモデル定数の決定を行った。
- (2) 単軸定ひずみ範囲繰返し問題の解析を行い、一定温度下ではこのモデルが実験結果によく合うことを示した。
- (3) 汎用非線形構造解析システムFINASにこの構成モデルを組み込み、繰返し負荷を受ける切欠き丸棒、及び繰返し熱過渡を受ける直管の解析を行った。これによりSUS304鋼の繰返し塑性挙動を詳細に解析できることを示した。
- (4) 今後の課題としてはさらなるモデルの精度向上と温度変動下や多軸問題への適用を検討する必要がある。

* 機器構造開発部・構造工学室

AN INVESTIGATION OF THE CYCLIC PLASTICITY CONSTITUTIVE MODEL
FOR 304 TYPE STAINLESS STEEL

- Evaluation of The Nonlinear Cyclic Hardening Model
Using Nonhardening Strain Region -

Kazuteru Garatani*, Koji Iwata*, Kazuyuki Tsukimori*

Abstract

A constitutive model which can express material behavior accurately is needed to perform inelastic analysis with high precision. The nonlinear cyclic hardening model using nonhardening strain region¹⁾ developed by Ohno and his co-workers, is worthy of notice because it can express fundamental aspects of cyclic plasticity behavior of 304 type stainless steel.

The purpose of this report is to evaluate their model through the determination of model constants and inelastic structural analyses for practical problems. The following results were obtained.

- (1) The determination procedure of model constants was proposed, and its computer program was developed. Then the model constants for 304 type stainless steel was decided from experimental data obtained at PNC.
- (2) For uniaxial and constant strain range cyclic problem, this model agree well with the experimental result under isothermal condition.
- (3) Analysis for the notched bar under cyclic loading and the straight pipe under cyclic thermal transients were performed by using the present constitutive model implemented in FINAS**. It can be said that this model is applicable to the practical structural analysis under cyclic loadings.
- (4) It was shown that further investigation should be required for this model to improve the precision, under temperature changing condition and multi-axial problem.

* Structural Engineering Section, Oarai engineering Center, PNC

** General Purpose Finite Element Nonlinear Structural Analysis System

目 次

1. 緒言	1
2. 非線形繰返し非硬化領域モデルの概要	2
3. SUS304鋼に対するモデル定数の決定	4
3.1 モデル定数決定手順	9
3.2 SUS304鋼に対するモデル定数	13
4. 単軸問題での繰返し硬化特性の検討	16
4.1 温度一定下における繰返し硬化特性	17
4.2 温度変動下における繰返し硬化特性	22
5. FINASによる構造問題への適用	27
5.1 繰返し負荷を受ける切欠き丸棒の解析	27
5.2 繰返し熱過渡荷重を受ける直管モデルの解析	33
6. 緒言	51
参考文献	52
付録 モデル定数決定プログラム	53

図表リスト

図 2-1	降伏曲面と限界曲面	2
図 3-1	繰返し応力-塑性ひずみヒステリシスループ	7
図 3-2	P点通過条件	7
図 3-3	各種応力ひずみ関係	8
図 4.1-1(a)	各種応力-ひずみ関係の実験値との比較($\Delta\varepsilon = 2\%$, 20°C)	17
(b)	" (" , 50°C)	17
(c)	" (" , 100°C)	17
(d)	" (" , 150°C)	17
(e)	" (" , 200°C)	18
(f)	" (" , 250°C)	18
(g)	" (" , 300°C)	18
(h)	" (" , 350°C)	18
(i)	" (" , 400°C)	19
(j)	" (" , 450°C)	19
(k)	" (" , 500°C)	19
(l)	" (" , 550°C)	19
図 4.1-2(a)	各ひずみ振幅における繰返し応力-ひずみヒステリシスループ (20°C)	20
(b)	" (300°C)	20
(c)	" (500°C)	20
図 4.1-3	繰返し応力-ひずみヒステリシスループ (550°C) 文献1)より	21
図 4.1-4	繰返し応力-ひずみヒステリシスループ (550°C)	21
図 4.2-1	構造モデル	22
図 4.2-2	有限要素モデル	22
図 4.2-3	温度ひずみ制御繰返し変形	23
図 4.2-4(a)	解析による応力ひずみヒステリシスループ(10サイクル)	25
(b)	" (50サイクル)	25
図 4.2-5	$\kappa_0, \kappa_0^*, \kappa_0^*$ の温度依存性	26
図 5.1-1	構造モデル(1/4断面)	27
図 5.1-2	サイクリックな負荷条件	28
図 5.1-3(a)	有限要素モデル(全体図)	30
(b)	" (部分拡大図1)	31
(c)	" (部分拡大図2)	31
図 5.1-4	切欠先端におけるZ方向の応力-ひずみ履歴	32

図 5.1-5	切欠近傍におけるミーゼス応力分布	32
図 5.2.1-1	モデル形状及びメッシュ分割	35
図 5.2.2-1	熱伝導解析における境界条件	37
図 5.2.2-2	ナトリウムより管内部への熱過渡条件	37
図 5.2.2-3	熱伝導解析における温度出力点	38
図 5.2.2-4	温度履歴	38
図 5.2.2-5(a)	温度分布(コールドショック)	39
(b)	(ホットショック)	39
図 5.2.3-1	応力解析における境界条件	41
図 5.2.3-2	応力解析における出力点	41
図 5.2.3-3(a)	応力ひずみヒステリシスループ(軸方向,内面)	43
(b)	”(周方向,内面)	43
(c)	”(軸方向,中央)	44
(d)	”(周方向,中央)	44
(e)	”(軸方向,外面)	45
(f)	”(周方向,外面)	45
図 5.2.3-4(a)	応力分布(第1サイクル内面引張応力ピーク時)	46
(b)	”(0.5サイクル時)	46
(c)	”(第1サイクル内面圧縮応力ピーク時)	46
(d)	”(1サイクル終了時)	46
(e)	”(第10サイクル内面引張応力ピーク時)	47
(f)	”(9.5サイクル時)	47
(g)	”(第10サイクル内面圧縮応力ピーク時)	47
(h)	”(10サイクル終了時)	47
(i)	”(第20サイクル内面引張応力ピーク時)	48
(j)	”(19.5サイクル時)	48
(k)	”(第20サイクル内面圧縮応力ピーク時)	48
(l)	”(20サイクル終了時)	48
図 5.2.3-5(a)	応力履歴(軸方向,内面)	49
(b)	”(周方向,内面)	49
(c)	”(軸方向,外面)	50
(d)	”(周方向,外面)	50

表 3.3-1	大野らによるSUS304鋼のモデル定数	14
表 3.3-2	SUS304鋼における非線形繰返し非硬化領域モデルのモデル定数	15
表 5.2.2-1	熱伝導解析に使用した物性値	36
表 5.2.2-2	熱伝導解析の解析ステップ	36
表 5.2.3-1	応力解析における解析ステップ	42

1. 緒言

近年、各種構造物や産業機器は高温、高圧、腐食環境等、より過酷な条件のもとで使用される機会が増えてきている。このような構造物の設計を合理的に行うためには非弾性解析手法を確立し、構造部材に発生する応力ひずみ挙動を精度よく予測する必要がある。

さて、有限要素法による非弾性解析の精度は使用する要素の特性、数値計算上の技法の他に変形、損傷等の力学的現象とその境界条件のモデル化に左右される。特に現象のモデル化における精度については材料の力学的特性を記述する構成モデルの妥当性に大きく依存している。

高速増殖炉の高温機器設計における非弾性解析においても、材料が繰返し熱負荷によって硬化や軟化を生じるにもかかわらず、従来これを考慮しない弾完全塑性モデル等により保守的な解析がなされてきた。従ってより合理的な構造設計を実現するためには高温挙動を精度よく予測できる非弾性構成モデルが必要となる。

このような高精度の非弾性構成モデルは近年種々提案されているが、これらのうち大野らによる非線形繰返し非硬化領域モデル¹⁾は高速増殖炉の主要構造材料であるSUS304の繰返し塑性挙動をかなり精度よく表現できるモデルとして注目されている。しかしこのモデルはモデル定数の決定に困難を伴うため、大野ら以外にこのモデルによる解析を行ったという報告はない。

本研究は非弾性解析法確立の一環として、非線形繰返し非硬化領域モデルを試用し、このモデルの実用性を評価することを目標にしている。このためにまずこのモデルに対するモデル定数決定手順を確立し、この計算機プログラムを作成する。次に事業団において得られているSUS304鋼に対する材料データより、室温から600°Cに至るモデル定数を決定し、単純な問題においてモデルの特性を確認する。最後に汎用非線形構造解析システムFINASにこの構成モデルを組み込み^{2), 3)}構造問題の解析を行う。本報告は以上のことを通じてモデルの実用性に関する評価を行うものである。

2. 非線形繰返し非硬化領域モデルの概要

大野らによって提案された非線形繰返し非硬化領域モデルはKrieg⁶⁾あるいはDafaliasとPopov⁷⁾による二曲面モデルに繰返し非硬化ひずみ領域の概念を⁴⁾を組み入れたものとして捉えることができる。従ってこのモデルでは塑性初期における過渡的非線形硬化と繰返し塑性による硬化の増大及びその飽和を表現することができる。

二曲面モデルは降伏曲面の他にこれを取り囲む限界曲面を設け、塑性硬化係数を二曲面間の距離の関数とするものである。一般にこの関数は硬化係数が二曲面間距離とともに増大するようにとられるため、塑性初期では硬化係数が大きく、塑性の進行に従う二曲面間距離の減少とともに硬化係数が小さくなり最終的には限界曲面の挙動に支配される。これによって現実の応力-ひずみ関係にかなり近い非線形硬化を表現することができる。

また繰返し非硬化ひずみ領域は塑性ひずみ空間上の曲面であり、塑性ひずみがこの内部を動くときには繰返し硬化が進行せず、塑性ひずみが曲面上にあり曲面の外向きに動く場合のみ硬化が起こると仮定するものである。そして硬化に寄与した塑性ひずみの一定割合だけこの領域が膨張し、最終的に一定になるため、繰返し硬化の進行から飽和に至る過程を表現することができる。さらに繰返し硬化量が硬化変数の関数となっているためにひずみ範囲を設定する必要がない。

このように非線形繰返し非硬化領域モデルは繰返し変形下で、SUS304鋼の応力-ひずみ関係を簡単かつ精度よく表現することができ、このモデルにより高精度の非弾性解析が可能となる。

以下にモデルの基礎式を掲げる

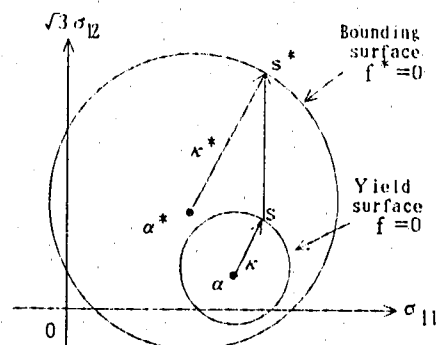


図 2-1 降伏曲面と限界曲面

非線形繰返し非効果領域モデルの基礎式

・降伏曲面とその発展式

$$f = \frac{3}{2}(S - \alpha) : (S - \alpha) - \kappa_0^2 = 0 \quad (2-1)$$

$$\dot{\alpha} = A(S^* - S) \dot{\varepsilon}^p + \frac{\partial \kappa^* / \partial T - \partial \kappa_0 / \partial T}{\kappa^* - \kappa_0} T (\alpha - \alpha^*) \quad (2-2)$$

・限界曲面とその発展式

$$f^* = \frac{3}{2}(S^* - \alpha^*) : (S^* - \alpha^*) - \kappa^{*2} = 0 \quad (2-3)$$

$$\kappa^* = \kappa^*(q), \quad \dot{q} = \Gamma \dot{\varepsilon}^p \quad (2-4)$$

$$\dot{\alpha}^* = \frac{2}{3} \{H_1 + (1-\Gamma)H_2\} \dot{\varepsilon}^p \quad (2-5)$$

・非硬化ひずみ領域とその発展式

$$g = \frac{2}{3}(\varepsilon^p - \alpha^p) : (\varepsilon^p - \alpha^p) - \rho^2 = 0 \quad (2-6)$$

$$\dot{\rho} = c \Gamma \dot{\varepsilon}^p \quad (2-7)$$

$$\dot{\alpha}^p = (3/2)^{0.5} (1-c) \Gamma \dot{\varepsilon}^p n^* \quad (2-8)$$

ただし

$$\Gamma = H(g) \langle n : n^* \rangle \quad (2-9)$$

$$n = \frac{\partial f}{\partial S} / \left\| \frac{\partial f}{\partial S} \right\|, \quad n^* = \frac{\partial g}{\partial \varepsilon^p} / \left\| \frac{\partial g}{\partial \varepsilon^p} \right\| \quad (2-10)$$

(解説)

・(2-2)式右辺第二項は温度依存項を表す。

・限界応力 S^* は、 $\partial f^* / \partial S^*$ と $\partial f / \partial S$ が同方向になるようにとる。

$$S^* = \alpha^* + (S - \alpha) \kappa^* / \kappa_0 \quad (2-11)$$

・実際問題への適用において(2-4)式は以下のような関数形を用いる。

$$\kappa^*(q) = \kappa_0^* \left(1 + \frac{Lq}{m \kappa_0^*}\right)^m \quad (2-12)$$

・今回は実質上 $H_2 = L$ としている。

・ $H()$ は、Heaviside Function: $H(g) = 0$ if $g \leq 0$ 、 $H(g) = 1$ if $g > 0$

・ $\langle \rangle$ は、Macaulayの括弧: $\langle x \rangle = 0$ if $x \leq 0$ 、 $\langle x \rangle = x$ if $x > 0$

・モデル定数は、 κ_0 、 κ_0^* 、 A 、 H_1 、 H_2 、 c 、 $\{L (=H_2), m\}$

3. SUS304鋼に対するモデル定数の決定

非線形繰返し非硬化モデルに関するモデル定数の決定手順については文献(2)または(4)に示されているが、手法の詳細は明確でなく、またある手順を計算結果と実験結果が一致するまで繰返すことが要求されている。従ってこの手順により正確なモデル定数を一意に求めるのは困難で、今回これを試みたが上手く定数の決定ができなかった。

そこで大野らの手順を参考にして独自にSUS304鋼に対する非線形繰返し非硬化モデルのモデル定数決定手順を定め、この計算機プログラムを作成した。これにより単調、繰返し応力ひずみ関係及び繰返し応力ひずみヒステリシスループを入力すれば容易にモデル定数を得ることができる。次に事業団で得られているSUS304鋼に対する平均的な材料特性データに基づき、室温から600°Cまでのモデル定数をこのプログラムにより決定した。

ここではモデル定数決定手順を示す準備として、まず単軸問題における非線形繰返し非硬化モデルの応力-ひずみ関係の解析式と補足条件、及び事業団によるなSUS304鋼に対する平均的な応力-ひずみ関係の実験式を示す。

○非線形繰返し非硬化モデルにおける応力-ひずみ関係の解析式

単軸等温下における一定ひずみ範囲繰返し変形問題に対する応力-ひずみ関係の解析的表現を示す。この式を導く手順については文献(1)に詳しく述べられているため、ここでは式のみを掲げる。

・単調応力-ひずみ関係

$$\sigma = \kappa_0 + (H_1 + L) \varepsilon^p + [\kappa^* - \kappa_0 - (H_1 + L)/\Lambda] [1 - \exp(-A \varepsilon^p)] \quad (3-1)$$

ただし上式を得るために $\kappa^*(q)$ 関数を原点においてテイラー展開し、第一項のみによって近似している。

・繰返し応力-ひずみヒステリシスループ

$$\sigma' = 2\kappa_0 + H \varepsilon^{p'} + (\kappa^* - H \Delta \varepsilon^p / 2 + \Delta \sigma / 2 - 2\kappa_0 - H/\Lambda) [1 - \exp(-A \varepsilon^{p'})] \quad (3-2)$$

ただし σ^* , ε^* は繰返し硬化が飽和した状態で圧縮側ピークより測った応力, 塑性ひずみである。(図. 3-1参照)

$$H = H_1 + H_2$$

$$\kappa^* = \kappa^*(q_*) = \kappa^*(\Delta\varepsilon^*/(2C)) : \text{飽和時の } \kappa^* \text{ の値}$$

・繰返し応力-ひずみ(範囲)関係

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{2\kappa_0 + H\Delta\varepsilon^* + G(\Delta\varepsilon^*)[1 - \exp(-A\Delta\varepsilon^*)]}{1 + \exp(-A\Delta\varepsilon^*)} \quad (3-3)$$

ただし

$$G(\Delta\varepsilon^*) = \kappa^* - H\Delta\varepsilon^*/2 + 2\kappa_0 - H/A$$

さて、次節3.1に示すモデル定数決定手順では簡単のためにこれらの解析式を次のように表わす。(サフィックス:mはモデルを意味する)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sigma_m(\varepsilon^*) & : \text{単調応力-ひずみ関係式} \\ \sigma_m(\varepsilon^*, \Delta\varepsilon^*) & : \text{繰返し応力-ひずみヒステリシスループ} \\ \sigma_m(\Delta\varepsilon^*) & : \text{繰返し応力-ひずみ関係} \end{array} \right. \quad (3-4)$$

同様に実験式も次のように表わす。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sigma_{ex}(\varepsilon^*) & : \text{単調応力-ひずみ関係式} \\ \sigma_{ex}(\varepsilon^*, \Delta\varepsilon^*) & : \text{繰返し応力-ひずみヒステリシスループ} \\ \sigma_{ex}(\Delta\varepsilon^*) & : \text{繰返し応力-ひずみ関係} \end{array} \right. \quad (3-4)'$$

さらに、モデル定義の決定においては、繰返し応力-ひずみ関係と繰返し応力-ひずみヒステリシスループが、その終点において実験値によるP点(図3-2参照)を通る条件を使う。この補足条件は、以下の式によって求まる。

繰返し応力-ひずみ関係式(3-3)は、 $e^{-A\Delta\varepsilon^*} \ll 1$ であれば以下の式で近似できる。

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = H \frac{\Delta\varepsilon^*}{2} + \kappa^* - \frac{H}{A}$$

ただし

$$\kappa_s^* = \kappa_0^* \left(1 + \frac{L}{m \kappa_0^*} \cdot \frac{\Delta \varepsilon^p}{2c} \right)^m \quad : \kappa^* \text{の飽和値}$$

よって

$$L/c = \left[\left(\frac{\kappa_s^*}{\kappa_0^*} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right] \cdot \frac{m \kappa_0^*}{\Delta \varepsilon^p / 2} \quad (3-5)$$

ただし

$$\kappa_s^* = \Delta \sigma / 2 + H/A - H \Delta \varepsilon^p / 2 \quad (3-6)$$

(3-6)式の $\Delta \sigma / 2$ を一定ひずみ範囲繰返し変形の実験値より与え、(3-5)式を満足するなら、繰返し応力-ひずみ関係(3-3)式、及び繰返し応力-ひずみヒステリループ(3-2)式は、同じ $\Delta \sigma$ 上のP点を通る。

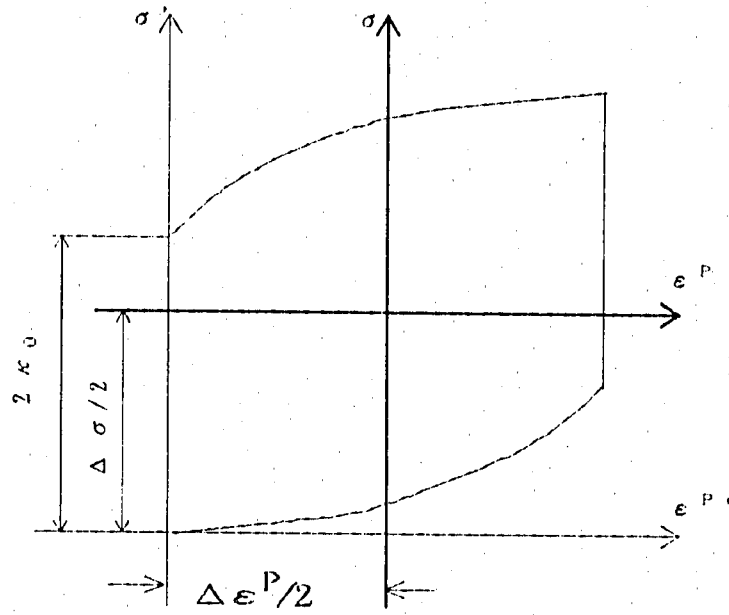


図 3-1 繰返し応力-塑性ひずみヒステリシスループ

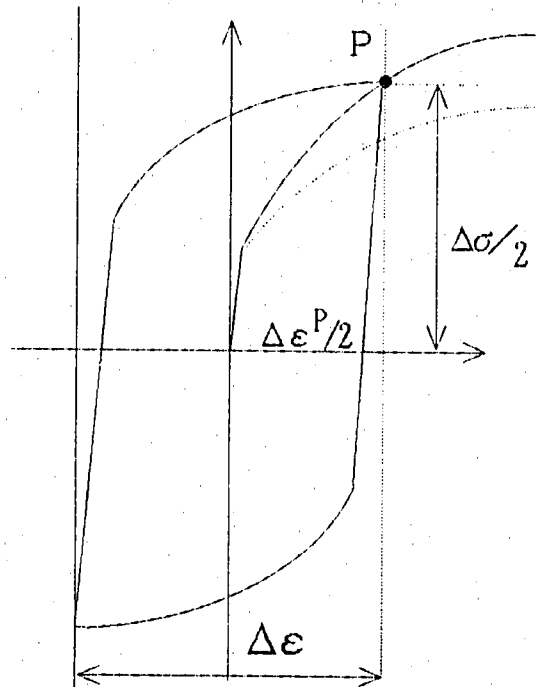


図 3-2 P点の通過条件

○ SUS304鋼の各種応力-ひずみ関係の実験式
 (繰り返し応力範囲-ひずみ範囲関係式、1988.7/14材料室提供資料より)

- (a) Equation for the monotonic stress-strain curve : $\sigma_{ex}(\epsilon^p)$
 (1) When $\sigma \leq \sigma_p$: $\epsilon_e = \sigma/E$, $\epsilon_p = 0$
 (2) When $\sigma > \sigma_p$: $\epsilon_e = \sigma/E$, $\epsilon_p = \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{K^*}\right)^{1/m^*}$
- (b) Equation for the cyclic stress-strain curve : $\Delta\sigma_{ex}(\Delta\epsilon^p)$
 (1) When $\Delta\sigma/2 \leq \sigma_p$: $\Delta\sigma = E \cdot \Delta\epsilon_e$
 (2) When $\Delta\sigma/2 > \sigma_p$: $\log(\Delta\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \cdot \log(\Delta\epsilon_p - \Delta\sigma/E)$
- (c) Analytical representation for the cyclic stress-strain hysteresis loop : $\sigma'_{ex}(\epsilon^p, \Delta\epsilon^p)$
 (1) When $\sigma' \leq 2\sigma_p$: $\epsilon_e = \sigma'/E$, $\epsilon_p = 0$
 (2) When $\sigma' > 2\sigma_p$: $\epsilon_e = \sigma'/E$, $\epsilon_p = \left(\frac{\sigma' - 2\sigma_p}{\kappa}\right)^{1/m}$

Units used in the above equation:

Elastic strain ϵ_e , Plastic strain ϵ_p (mm/mm), and stress σ (kg/mm²)

Temperature	20 °C < T < 650 °C
σ_p (kg/mm ²)	$\sigma_p = K^*(0.002)^{m^*}$
σ_y (kg/mm ²)	$25.5655 - 5.58937 \cdot 10^{-2}T + 1.04384 \cdot 10^{-4}T^2$ $- 7.42535 \cdot 10^{-7}T^3$
K^* (kg/mm ²)	$44.3068 - 1.78933 \cdot 10^{-2}T$
m^*	$0.279395 + 7.749 \cdot 10^{-5}T$
A_0	$3.218674 - 0.2113719 \cdot 10^{-2}T + 0.4238614$ $\cdot 10^{-6}T^2 - 0.5232357 \cdot 10^{-8}T^3$
A_1	$0.8186063 - 0.1850484 \cdot 10^{-3}T - 0.2091038$ $\cdot 10^{-6}T^2 + 0.2001210 \cdot 10^{-8}T^3$
K (kg/mm ²)	10^a ; $a = A_0 + (A_1 - m) \cdot \log \Delta\epsilon_p$
m	$0.1963338 + 0.01592084 \cdot \log \Delta\epsilon_p - 0.05793573 \cdot (\log \Delta\epsilon_p)^2$ $- 0.04325001 \cdot (\log \Delta\epsilon_p)^3 - 0.0002661293 \cdot T$

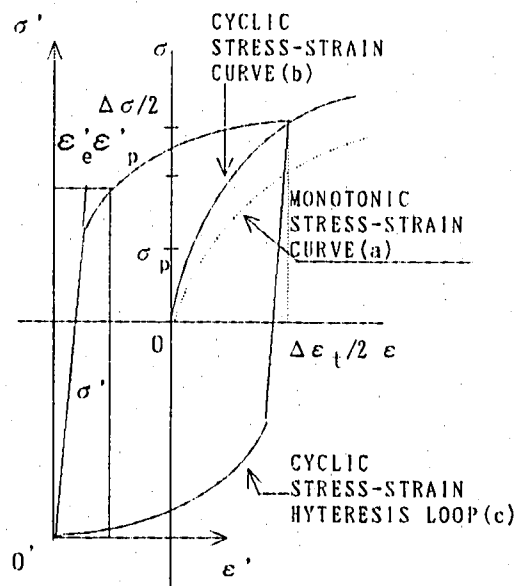


図 3-3 各種応力ひずみ関係

3.1 モデル定数決定手順

前節において示した非線形繰返し非硬化モデルの基礎式によると定めるべきモデル定数は $\kappa_0, A, \kappa_0^*, L, m, H_1, H_2, c$ の8個である。ここで大野らによる以前の定式化²⁾に従い $L=H_2$ と仮定する。また解析式によれば H_1, L, c は $(H_1+L), L/c$ の二つにまとめることができる。従って独立に定めるべきモデル定数は $\kappa_0, A, \kappa_0^*, m, (H_1+L), L/c$ の6個であり、さらに H_1, L, c のうち一つが定めれば上記8個のモデル定数が全て決まる。

以下に実際のモデル定数決定手順を示す。

(0) 繰返しひずみ範囲の決定

まずモデル定数決定の基準となるひずみ範囲を設定する。今回は $\varepsilon=0.02$ とする。またこの範囲に対応する塑性ひずみの範囲を求める。つまり単調応力-ひずみ関係から全ひずみ： $\varepsilon=0.01$ となる時点の塑性ひずみ： ε_1 、繰返し応力ひずみ関係または繰返し応力-ひずみヒステリシスループより全ひずみ範囲： $\Delta\varepsilon=0.02$ に対応する塑性ひずみ： $\Delta\varepsilon_2, \Delta\varepsilon_3$ ($\Delta\varepsilon_2=\Delta\varepsilon_3$)を定める。

(1) H_1+H_2 の決定 (単調及び繰返し硬化が飽和した状態での硬化係数)

H_1+H_2 の値はひずみ範囲： $\varepsilon=0.02, 500^\circ\text{C}$ における繰返し応力-ひずみヒステリシスループの実験値において $\Delta\varepsilon^p/2 \sim \Delta\varepsilon^p$ 間のデータを最小自乗法によって直線回帰したときの傾きとし、全ての温度においてこの値を用いる。

またここまでの手順は温度に依存しないことに注意。従って各温度におけるモデル定数を決めるには、以下の(2)~(6)を繰返せばよい。ただし(0)における $\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_2, \Delta\varepsilon_3$ は温度毎に定める必要がある。

(2) κ_0 の決定 (降伏応力)

$\varepsilon^p=0.00005$ に対応する単調応力ひずみ関係の実験値とする。

(3) A の決定 (過渡的非線形領域の形状)

以下の Φ_3 関数の最小値問題として数値的に定める。

$$\Phi_3 = \int_{\Delta \varepsilon^{p_3}/20}^{\Delta \varepsilon^{p_3}} [\sigma'_{.m}(\varepsilon^{p'}, \Delta \varepsilon^{p_3}) - \sigma'_{.ex}(\varepsilon^{p'}, \Delta \varepsilon^{p_3})]^2 d\varepsilon^{p'}$$

ただし

$\Delta \varepsilon^{p_3}$: $\sigma'_{.ex}$ において $\Delta \varepsilon = 0.02$ に対応する塑性ひずみ

$\sigma'_{.m}$: 繰返し応力-ひずみヒステリシスループの解析的表現式

ただしこれはP点通過条件(3-6)によって κ^* が定まりAのみの関数となっている。

$\sigma'_{.ex}$: 繰返し応力-ひずみヒステリシスループの実験値 (curve-c)

(4) κ^* の決定 (限界曲面の初期半径)

以下の Φ_4 関数の最小値問題として数値的に求める。

$$\Phi_4 = \int_0^{\Delta \varepsilon^{p_1}} [\sigma_m(\varepsilon^p) - \sigma_{.ex}(\varepsilon^p)]^2 d\varepsilon^p$$

ただし

$\Delta \varepsilon^{p_1}$: $\sigma_{.ex}$ において $\varepsilon = 0.02/2$ に対応する塑性ひずみ

σ_m : 単調応力-ひずみ関係の解析的表現式

ただしこれは既に κ^* のみの関数となっている。

$\sigma_{.ex}$: 単調応力-ひずみ関係の実験値 (curve-a)

(5) $m, L/c$ (繰返し硬化量)

以下の Φ_5 関数の最小値問題として数値的に求める。

$$\Phi_5 = \int_0^{\Delta \varepsilon^{p_3}} [\sigma_m(\Delta \varepsilon^p) - \sigma_{.ex}(\Delta \varepsilon^p)]^2 d\Delta \varepsilon^p$$

ただし

$\Delta \sigma_m$: 繰返し応力-ひずみ関係の解析的表現式

ただしこれはP点通過条件によって m のみの関数となっている。

$\Delta \sigma_{.ex}$: 繰返し応力-ひずみ関係の実験値 (curve-b)

m が定まるとP点通過条件によって L/c も決まる。

(6) m の修正 ($m > 1$ の場合)

もし(5)の手順で得られた m が1以下であればここでは何もしない。しかし m が1を越えているなら m の値を1とし、P点通過条件を使って再び L/c を決め直す。

以上の手順によって κ_0 , H_1+H_2 , A , κ_0^* , H_2/c , m の6個のモデル定数が決まり、さらに H_1 , L , c のうち一つが定まれば $L=H_2$ の仮定より上記8個のモデル定数が全て定まる。

○モデル定数決定手順の解説

ここでは前記の決定手順について補足説明をおこなう。

①モデル定数決定手順の方針

方針としては定数が一意に定まることを目的とした。従って手順に繰返しはなく各々の定数が与えられた応力ひずみ関係の各部に最もよく合うように定められる。

② $H_1=L$ としたことについて

これは文献4)以前の定式化でこの分離がなされていなかったことによる。ただし、大野らが定めたSUS304鋼のモデル定数(表3.3-2)においても結局 $H_1=L$ を得ている。

また単調応力ひずみ関係と繰返し応力ひずみヒステリシスループの傾きは十分にひずみ範囲が大きければ各々 H_1+L , H_1+H_2 となる。従って $H_1=L$ の条件はこれら両者の傾きが等しいことを意味する。さて事業団の実験式(3節)によると550℃ではひずみ範囲約2%でこれらが等しくなり、これよりひずみ範囲が小さければ繰返しの傾きが大きく、ひずみ範囲が大きければ単調の傾きが大きい。

③ ひずみ範囲を2%としたことについて(手順:0)

前述の②の理由により単調応力ひずみ関係と繰返し応力ひずみヒステリシスループの傾きが2%ではほぼ等しいことによる。ただしこれ以外のひずみ範囲での定数決定も行ったがそれらはひずみ範囲を変化させたときの繰返し応力ひずみヒステリシスループの形状に実験式との差が大きく実用的ではなかった。

④ H_1+H_2 を温度依存としないことについて

H_1+H_2 は十分にひずみ範囲が大きいときの繰返し応力ひずみヒステリシスループの傾きとなる。従ってこれに温度依存性を持たせると一定の温度範囲とひずみ範囲での繰返し変形(4.2参照)で応力のドリフト⁴⁾が発生し、 H_1+H_2 を一定にする必要があった。

⑤ κ_0 を $\varepsilon^p=0.00005$ に対応する単調応力とすることについて(手順:2)

このモデルでは塑性初期の単調応力ひずみ関係の傾き H' は $A(\kappa_0^*-\kappa_0)$ で表される。従って弾性から塑性への遷移時にその傾きが不連続に変化し、 κ_0 を比例限とすることができない。ただし $\varepsilon^p=0.00005$ 自体には明確な意味はなくこの位が最もよく今回の実験値に合うからである。

⑥ A の最適化において $0 \sim \Delta \varepsilon^p_3/20$ のデータを使わないことについて(手順:3)

前述の⑤に関連し、塑性初期ではもともとモデルと実験式の差が大きくこの領域を除くためである。またこの $\Delta \varepsilon^p_3/20$ にも明確な意味はない。

⑦ m の修正について(手順:6)

今回の決定手順に従って定数決定を行うと低温域の m が異常に大きくなる。この原因は決定に用いた実験式が低温域の微小ひずみ範囲で加工軟化を起こすためであるが、このままではひずみ範囲 2% 以上で応力が異常に大きくなる。そこで m の最大値を 1 とし、これを防いでいる。また m が 1 より大きいことはひずみ範囲の増大に従って硬化係数が増大することを意味し、現実には考え難い。

⑧ $H_1, H_2(L), c$ の依存関係について

このモデルでは繰返し硬化が飽和するまでの回数が $1/c$ で表されるが⁴⁾、モデル定数決定手順ではこの回数を一切使用しない。これは $H_1, H_2(L), c$ の依存関係があるためで、 $H_2=L$ としていることも一因ではあるものの、モデルの本質的な問題点と考える。ただし、今回の定数決定においては結果として得られた c 値は実験値と遠くない値であった。

以上 SUS304 鋼以外の材料についてモデル定数の決定を行うためには上記②～⑦を見直す必要があることに注意しなくてはならない。

3.2 SUS304鋼に対するモデル定数

付録のプログラムを用い、事業団によって得られたSUS304鋼に対する平均的な材料特性データより、非線形繰返し非硬化モデルのモデル定数を20°C~600°Cの範囲において定めた。また定数決定において前述の手順以外に以下の方針をとった。これは基本的に大野らの方法にならったもので文献4)ではA.が550°Cを基準、B.については同一であり、その決定方法が示されている。

A. H_1+H_2 の決定には500°Cにおけるデータを用いる。

B. Lについては温度と無関係に200kg/mm²とする。

定まったSUS-304のモデル定数を表3.3-2に掲げる。ただし表中のヤング率:E, ポアソン比: ν , 線膨張係数: α は文献6)による。また参考のため表3.3-1には文献4)による大野らが定めたモデル定数も示す。両者を比較しその相違点について以下に考察を加える。

① A値が大きいことについて

大野ら⁴⁾よるとA値は700で一定としている。しかし今回定まったモデル定数ではA値は温度依存性を持ち高温域で特に大きな値となっている。A値が大きいことは繰返し応力-ひずみヒステリシスループにおいて過渡的非線形領域の丸み(Rounding Effect)が小さくなることを意味する。またこれは解析においても不安定(オーバーシュート)になりやすく安定した解析のためには、細かな増分が必要となり、実用上は不利である。しかしこの値は、最小値問題の解として実験値に最もよく合うように定められており、事実この値でも実験値にはよく一致するので問題はないものと考えらる。

② $H_1(=L)$ が大きいことについて

Lについては大野ら⁴⁾の値と同じ200kg/mm²を採用しているが、今回定まった H_1 は285.7kg/mm²で大野氏の180kg/mm²よりかなり大きい。この原因となっているのは手順(2)において500°Cの実験値より H_1+H_2 の値を定めた(前述Aの条件)ことにある。これを大野らと同じく550°Cの実験値より定めるなら H_2 は187.2kg/mm²となりほぼ同じ値が得られたはずである。またこうしても他の値はそれほど変化しない。

③ mについて

大野氏は、mに温度依存性を持たせず0.25で一定としている。しかし今回定まったm値は1.0~0.197と大きく変化する。とはいえこの値でも実験値にはよく一致しており特に問題はないと考える。

④ cが大きいことについて

今回定まったc値は大野らの値に較べ若干大きな値となっている。このことは繰返し硬化が速く飽和する事を意味し、解析には有利であるものの実験事実には合わない。しかし、もともとこのモデルではc値が繰返し応力-ひずみ関係の形状にも依存するため、これを自由に選ぶことができない。このことはモデルの適用性の限界を示唆するものと考えられる。

表3.3-1 大野ら¹⁾によるSUS304鋼の材料定数

T (°C)	R. T.	200	300	400	500	550	600
E/10 ⁵ (MPa)	1.94	1.84	1.76	1.69	1.59	1.54	1.49
κ_0 (MPa)	212	133	123	113	103	98	93
A	700						
κ_0^* (MPa)	265	167	154	141	128	123	117
L (MPa)	1960						
m	.25						
H ₁ (MPa)	1760						
H ₂ (MPa)	1960						
c	0.08	0.06	0.023	0.012	0.008	0.008	0.0085

表 3.3-2 SUS304鋼における非線形繰返し非硬化領域モデルのモデル定数

	20℃	50℃	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃	350℃	400℃	450℃	500℃	550℃	600℃
E [kg/mm ²]	1.99E4	1.97E4	1.94E4	1.90E4	1.87E4	1.84E4	1.80E4	1.76E4	1.72E4	1.67E4	1.62E4	1.57E4	1.52E4
ν	0.264	0.267	0.272	0.276	0.280	0.284	0.288	0.292	0.295	0.300	0.302	0.306	0.310
α [1/℃]	15.15E-6	15.65E-6	16.48E-6	17.22E-6	17.85E-6	18.36E-6	18.79E-6	19.19E-6	19.57E-6	19.93E-6	20.28E-6	20.60E-6	20.87E-6
κ_0 [kg/mm ²]	19.54	18.18	16.28	14.79	13.65	12.80	12.19	11.77	11.48	11.25	11.05	10.81	10.47
A	451	498	588	683	773	859	946	1046	1173	1351	1628	2142	3814
κ_0^* [kg/mm ²]	26.04	24.28	21.79	19.81	18.27	17.07	16.15	15.42	14.83	14.32	13.82	13.28	12.61
H ₁ [kg/mm ²]	285.7												
H ₂ (L) [kg/mm ²]	200												
m	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5866	0.4365	0.3589	0.3072	0.2662	0.2293	0.1927
c	0.1149	0.1311	0.1468	0.1468	0.1354	0.1192	0.07850	0.04989	0.03185	0.02101	0.01485	0.01179	0.01113

4. 単軸応力状態における硬化特性の検討

非線形繰返し非硬化領域モデルの基本特性を評価するために単軸応力状態にて各種応力ひずみ関係の調査と温度変動下における解析を行った。

4.1 温度一定下における繰返し硬化特性

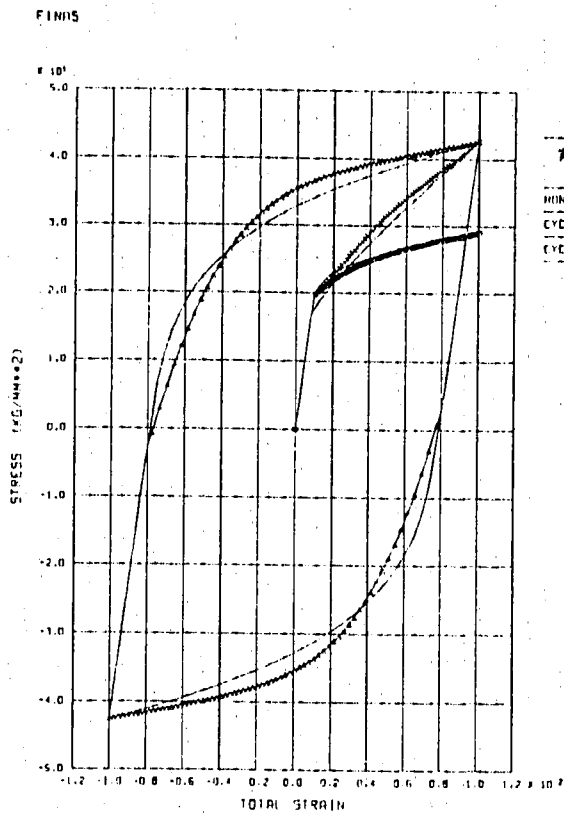
前節にて定めたモデル定数を検証するために、非線形繰返し非硬化領域モデルの各種応力-ひずみ関係を3.1の解析解より求め、これを定数決定に用いた実験式と共に示す。

図4.1-1(a)~(l)は単調および繰返し応力ひずみ関係とひずみ範囲2%での繰返し応力-ひずみヒステリシスループを各温度について示したものである。実験値とモデルには若干の差があるが、これはモデルの応力-ひずみ関係に対する自由度に制限があるためで現状のモデルでこの差をなくすことはできない。しかしこれらは高々数 kg/mm^2 の差であり、十分許容できる範囲と考える。

図4.1-2(a)~(c)には各ひずみ振幅における繰返し応力-ひずみヒステリシスループを示す。モデル定数の決定においてはひずみ範囲2%までのデータに依っているため、特に500°Cにおいては2%以上で大きな差が生じている。しかしヒステリシスループの形状が異なるものの応力振幅については高々数 kg/mm^2 の差に収まっている。

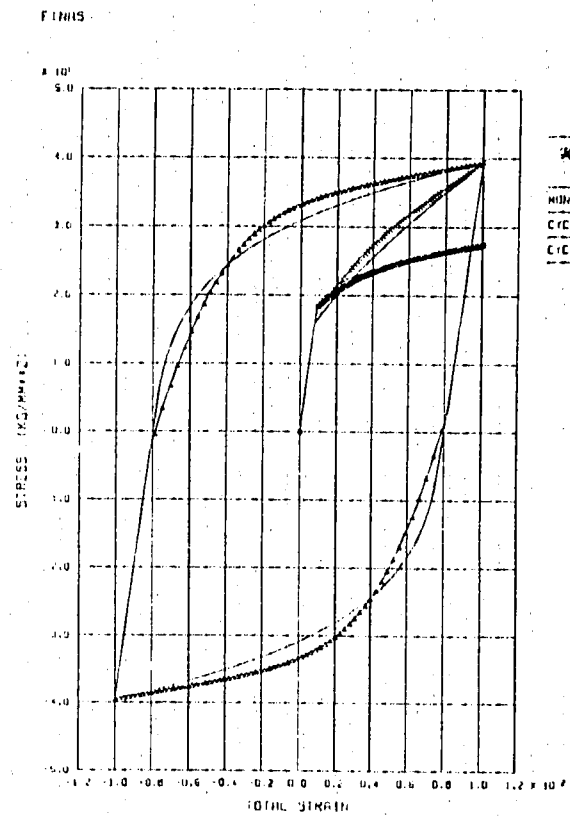
また図4.1-1には繰返し応力-ひずみヒステリシスループについて大野ら⁴⁾の解析および実験結果との比較を示すが、実験値とモデルの比較においては前述の問題が残っているものの大野らの値とはよく一致している。

以上のことより、今回定めたモデル定数を用いた非線形繰返し非硬化領域モデルは、温度:20°C~600°C, ひずみ範囲:4%までについて誤差数 kg/mm^2 で実験値(平均)と同様な繰返し硬化特性を表現することが可能である。



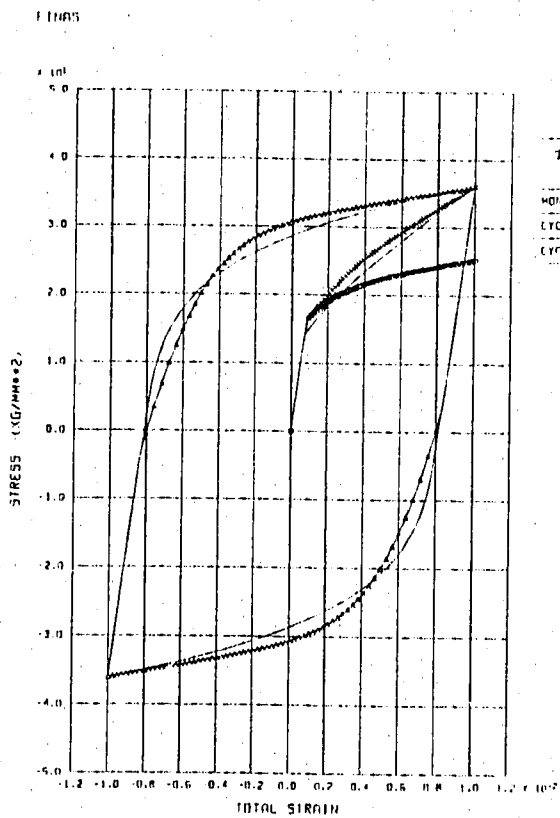
SUS-304 T=20 (DELTA-EPS = 0.02)

(a) T = 20 °C



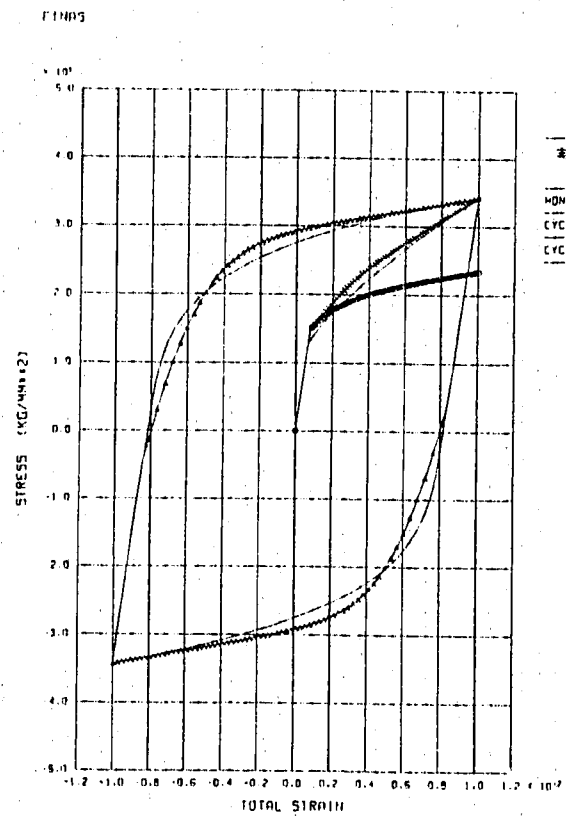
SUS-304 T=50 (DELTA-EPS = 0.02)

(b) T = 50 °C



SUS-304 T=100 (DELTA-EPS = 0.02)

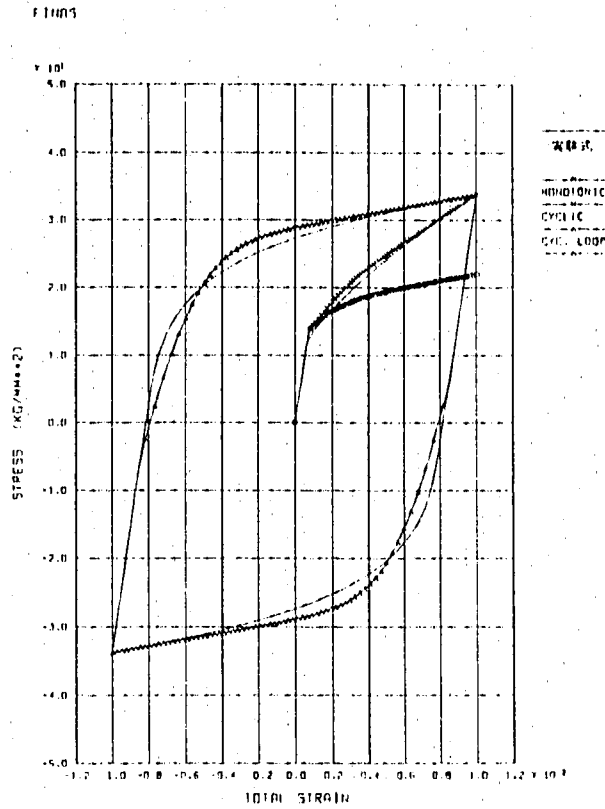
(c) T = 100 °C



SUS-304 T=150 (DELTA-EPS = 0.02)

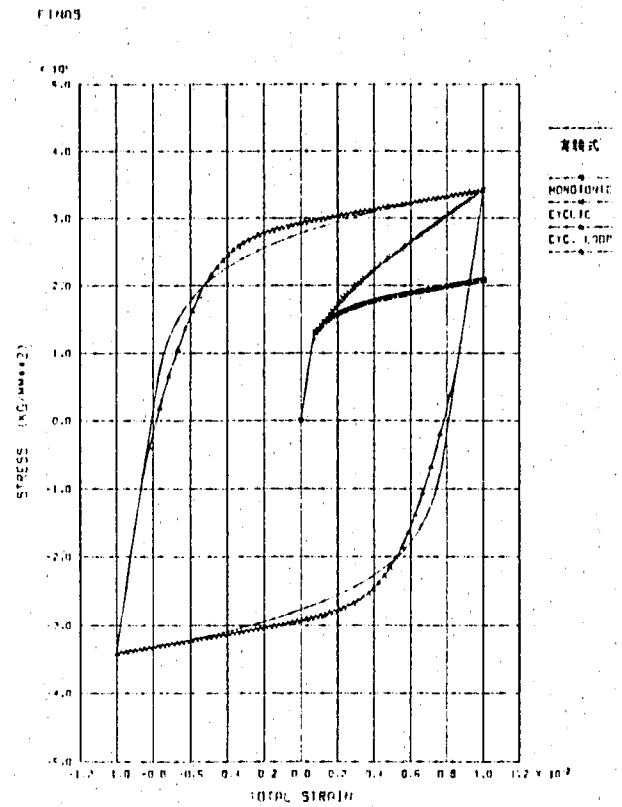
(d) T = 150 °C

図 4.4 - 1 各種応力・ひずみ関係の実験値との比較 (Δε = 2%)



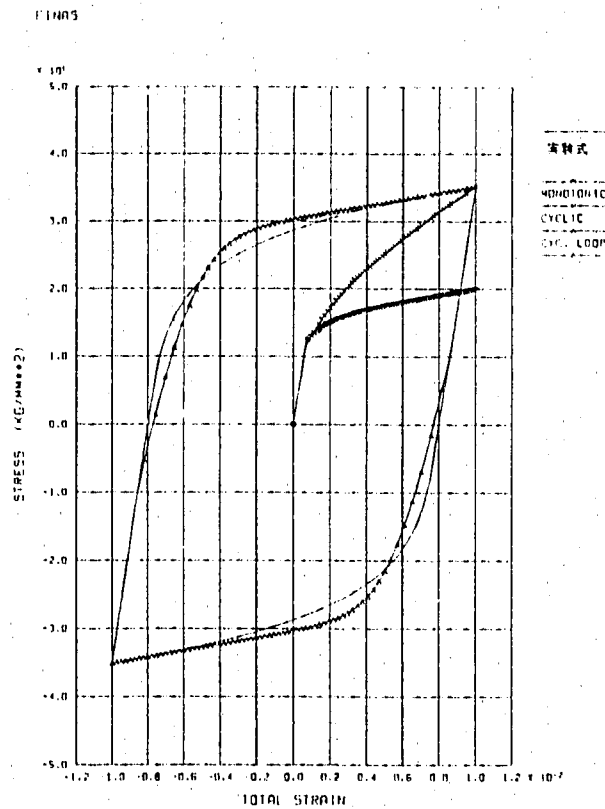
SUS-304 1-200 (DELTA-EPS = 0.02)

(e) T = 200 °C



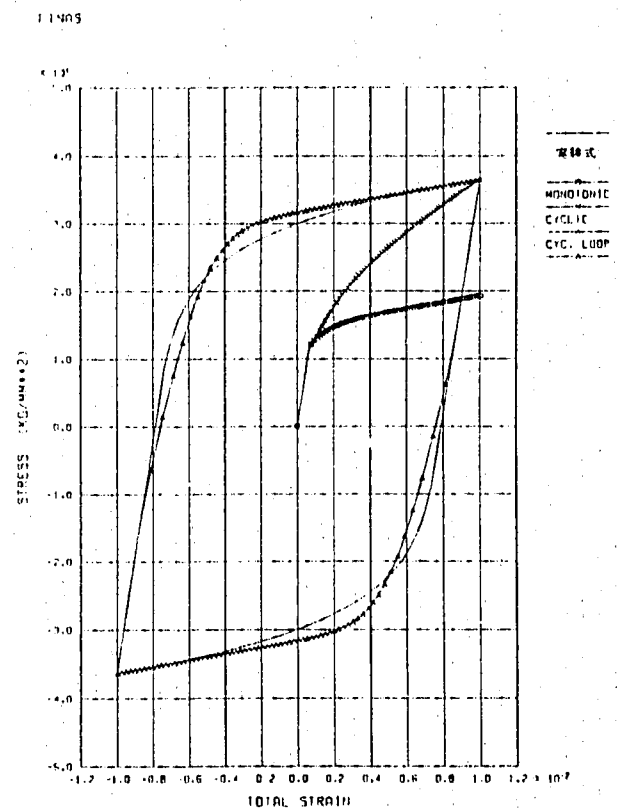
SUS-304 1-250 (DELTA-EPS = 0.02)

(f) T = 250 °C



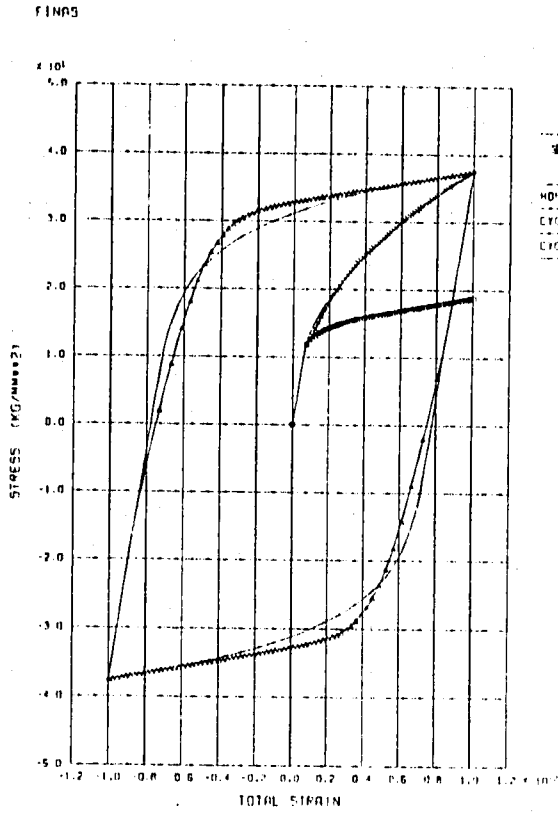
SUS-304 1-300 (DELTA-EPS = 0.02)

(g) T = 300 °C



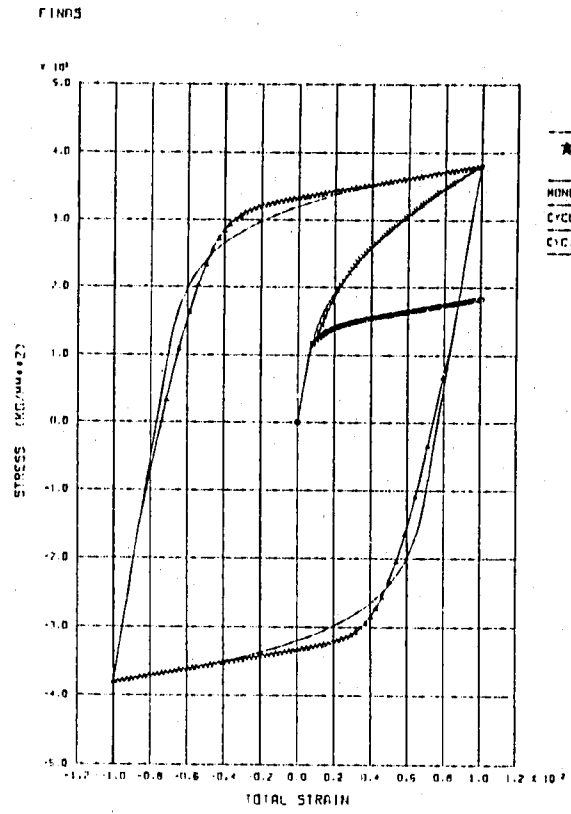
SUS-304 1-350 (DELTA-EPS = 0.02)

(h) T = 350 °C



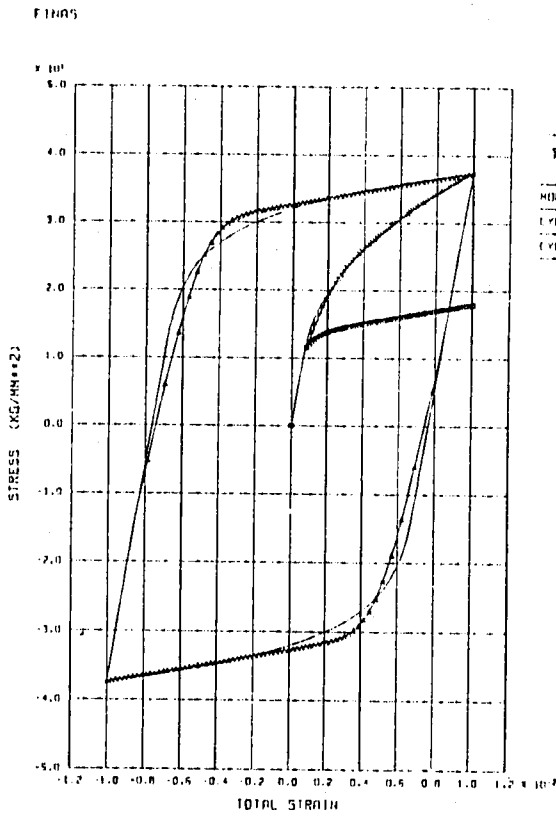
SUS-304 1-400 (DELTA-EPS = 0.02)

(i) T = 400 °C



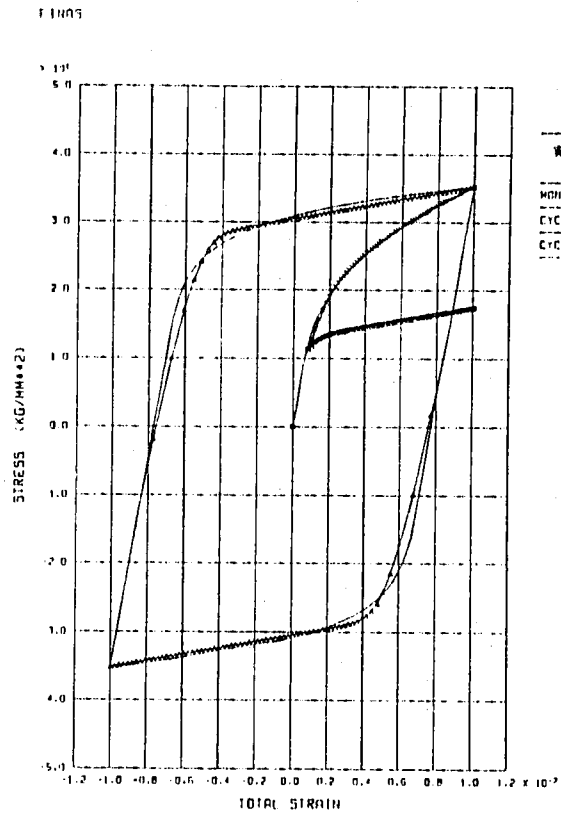
SUS-304 1-450 (DELTA-EPS = 0.02)

(j) T = 450 °C



SUS-304 1-500 (DELTA-EPS = 0.02)

(k) T = 500 °C



SUS-304 1-550 (DELTA-EPS = 0.02)

(l) T = 550 °C

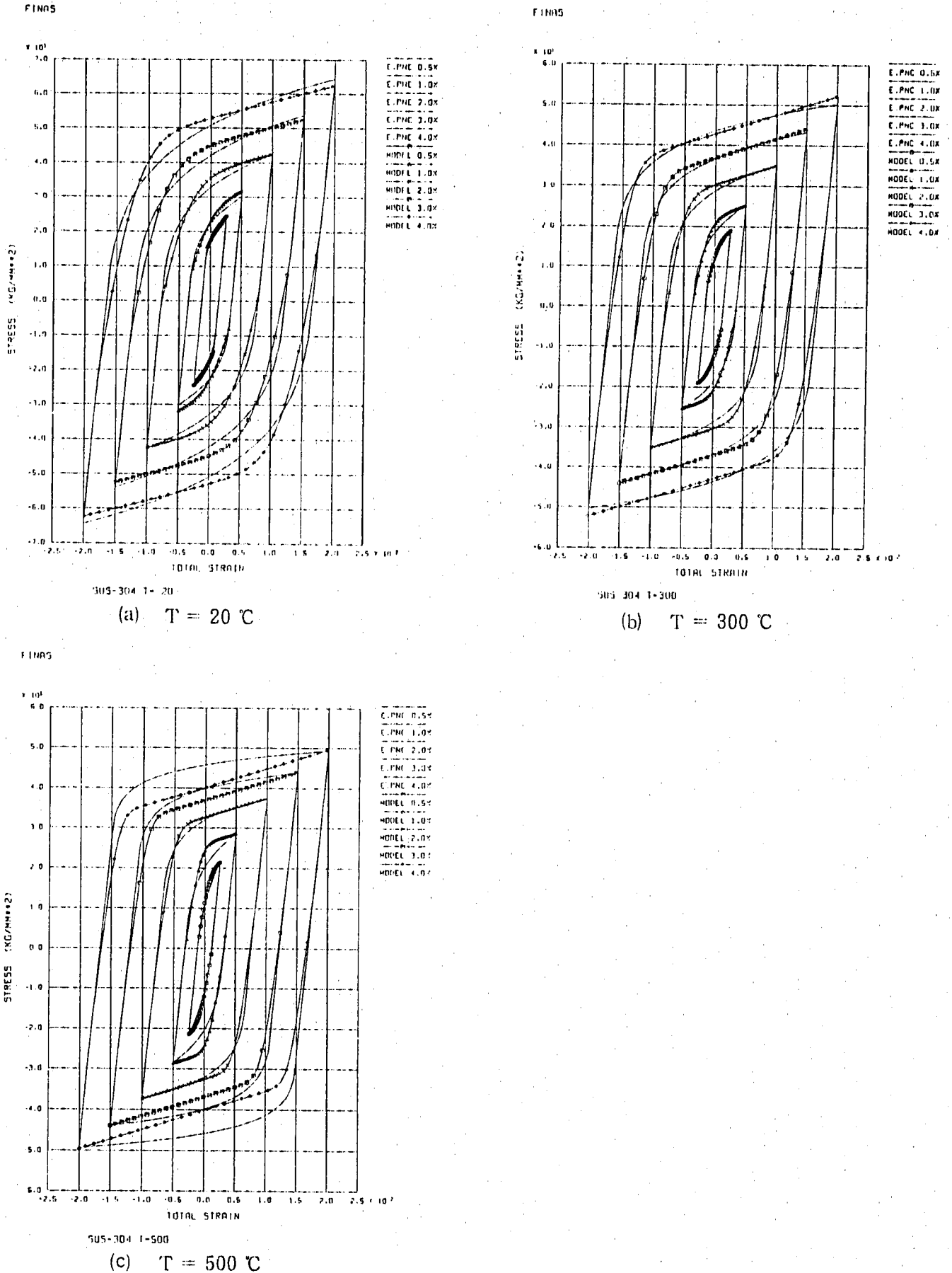


図 4.1 - 2 各ひずみ振幅における繰返し応力・ひずみヒステリシスループ

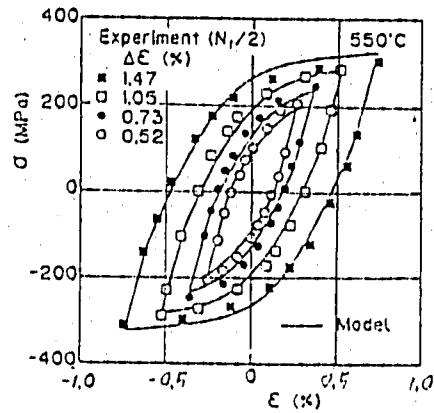
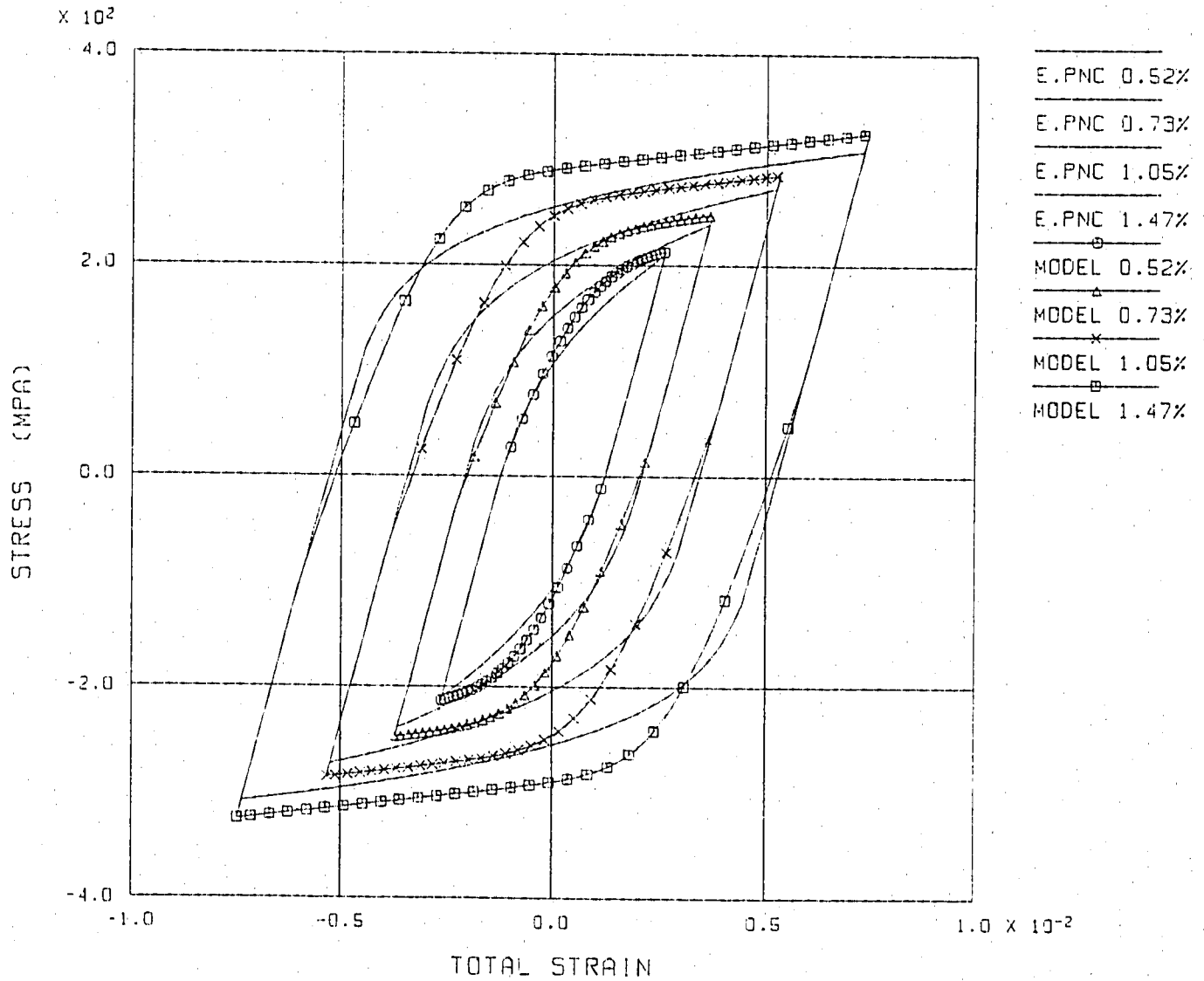


図 4.1 - 3 繰り返し応力ひずみヒステリシスループ
(550 °C, 飽和状態) 文献(1)より

FINAS



SUS-304 T= 550

図 4.1 - 4 繰り返し応力・ひずみヒステリシスループ

4.2 温度変動下における繰返し硬化特性

非線形繰返し非硬化領域モデルにおいて前節で定められたモデル定数による温度変動下での硬化特性を検討するためにFINASにこのモデルを組み込み温度変動下での単軸引張り、圧縮のサイクリックな弾塑性解析を行った。

また同様の実験及び解析は、大野ら⁴⁾によって取り上げられており、これとの比較も併せて行う。

4.2.1 解析モデル

- ・構造モデル

断面積 1.0mm^2 、長さ 10mm の棒

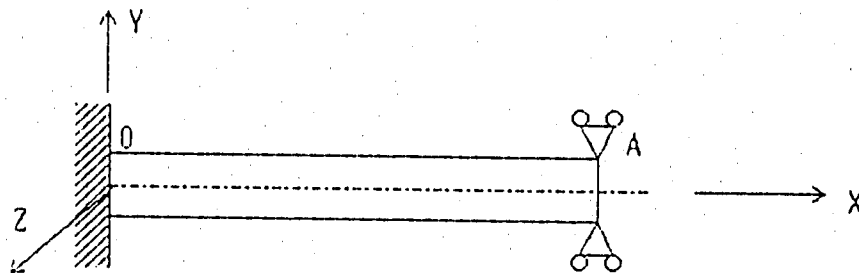


図 4.2-1 構造モデル

- ・使用要素

ROD2 : 3次元棒要素

- ・有限要素モデル

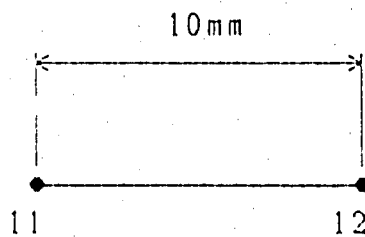


図 4.2-2 有限要素モデル

4.2.2 解析条件

(a) 材料定数

- ・材料はSUS304 (550°C)を仮定

材料定数については表3.3-2参照。ただし線膨長係数： α は0とした。

・塑性に関する硬化則

非線形繰返し非硬化領域モデルを用いる。

(b) 境界条件

点0において $U_x=U_y=U_z=0$

点Aにおいて $U_y=U_z=0$

X方向に図4.2-3に示す規程変位を与える。

(c) 負荷条件

図4.2-3に示される温度・ひずみ制御繰返し変形を50サイクル与える。

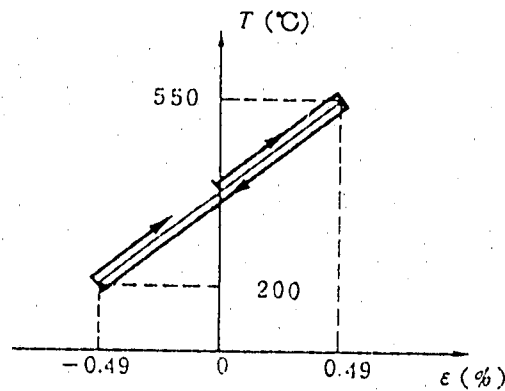


図 4.2-3 温度ひずみ制御繰返し変形

ひずみ範囲： $\Delta \epsilon$ は0.98%，解析は50サイクルまで行った。

4.2.3 解析結果

解析により得られた応力とひずみの履歴を10サイクルについて図4.2-4に、50サイクルについて図4.2-5に各々示す。50サイクル（4000ステップ）の解析には、CRAY X-MP/18にて259秒を要した。（解析にはメモリーレジデントファイルの使用とオーバレイ構造の見直しを行い計算時間の短縮を図っている。）

4.2.4 考察

10サイクルについての解析結果は、大野らによる解析結果とその傾向はよく一致するものの応力が若干高めとなる。これは繰返し硬化が速く起こっているためと考えられ、材料定数の c 値が大きいことによる。

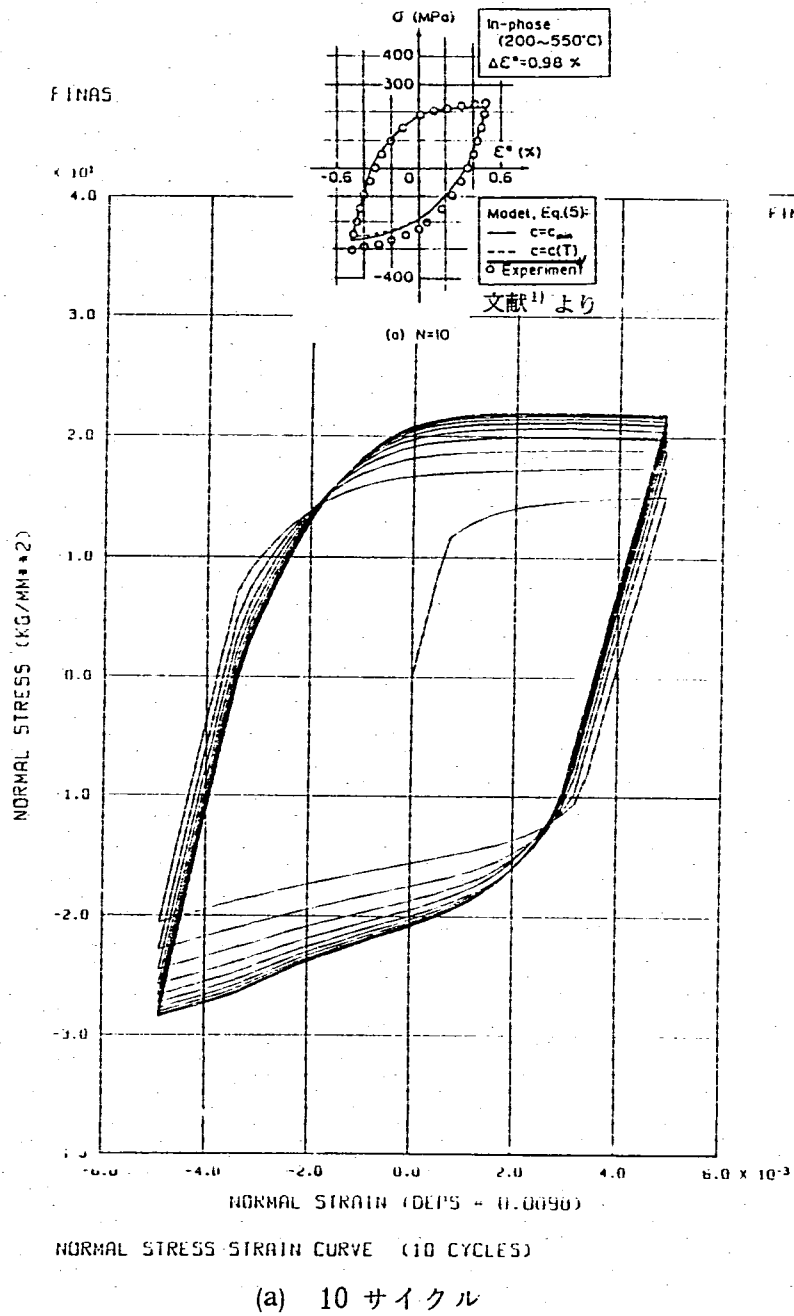
さらに50サイクルの解析結果は、大野らによる解析結果とよく一致してい

る。またこの問題において繰返し硬化の飽和は20サイクル弱で起こっている。これは200°C~550°Cにおける c の平均(0.578)の逆数(17.3)に対応する。しかし解析結果を詳細に見ると圧縮(低温)側において若干応力が波打っているのが観察される。この領域の応力は繰返し硬化が飽和しているために限界面の挙動に支配されており、かつ今回の解析においては限界曲面の移動量： H_1+H_2 を一定としているため、この原因が限界曲面の半径： κ^* によるものと想像される。

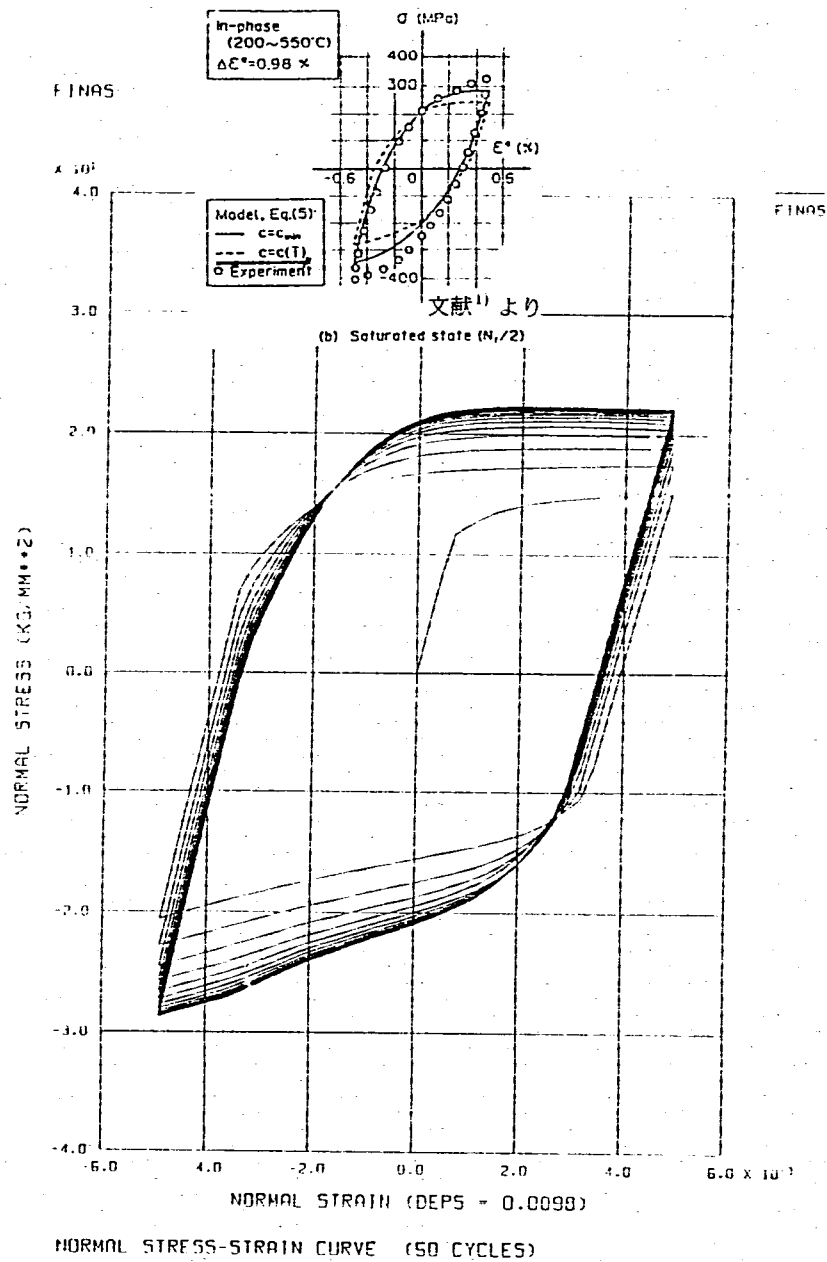
さて、図4.2-6にこの問題において繰返し硬化が飽和した状態での限界面半径： κ^* の温度依存性を示す。このように κ^* は、250°C近傍において凸部をもっており、これが応力の凹凸の原因になっていると考えられる。とはいえ、この凹凸は小さく解析においては、ほとんど問題にならない。また事実解析において、このような凹凸は観察されない。

ただし、今回の温度変動下の解析結果は、大野らの解析結果にはよく一致するものの、実験結果には一致せず、かなり低めの値となる。(図4.2-4(b)参照)この点については、大野らが温度変動下において何らかの付加的な硬化の存在を示唆している。¹⁾

つまり、現状では温度一定下における実験より定めた各温度における材料定数を用い、温度変動下における非線形繰返し非硬化領域モデルの解析を行うことができるが、得られる値はかなり硬化量を低く見積るようであり、温度変動のある場合の精度向上についてさらにモデルの検討が必要であろう。



(a) 10 サイクル



(b) 50 サイクル

図 4.2 - 4 解析による応力ひずみヒステリシスループ

ただし、 κ_s^* は繰り返し硬化が飽和したときの限界面半径であり、以下の式によって求めた。

$$\kappa_s^* = \kappa_0^* \left(1 + \frac{L q_s}{m \kappa_0^*}\right)^m$$

$$q_s = \frac{\Delta \epsilon P}{2 C} \quad (\Delta \epsilon P = 0.66 \%)$$

$$C = 0.0578 \quad (250 \text{ }^\circ\text{C} \sim 550 \text{ }^\circ\text{C} \text{の平均値})$$

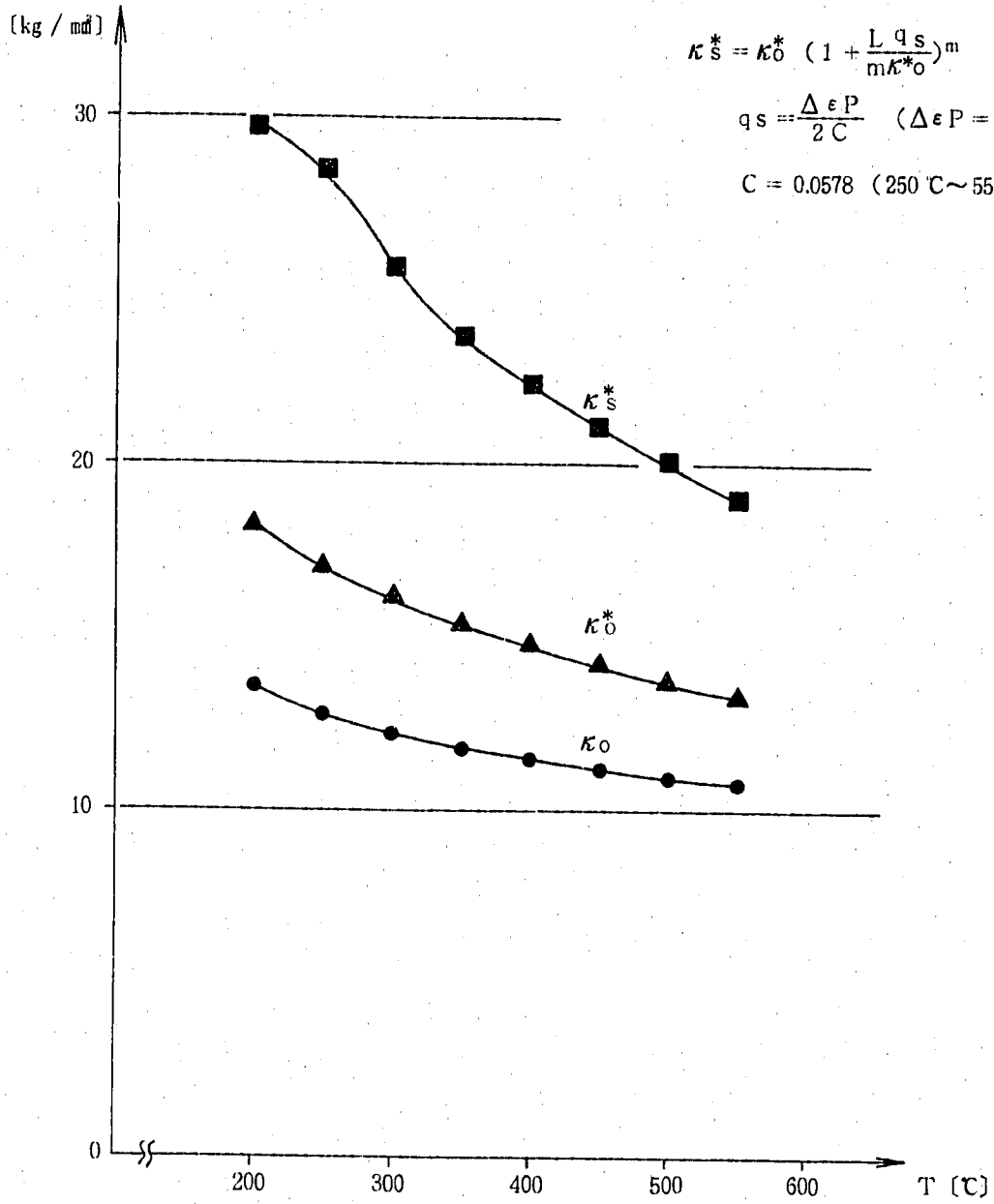


図 4.2 - 5 κ_0 , κ_0^* , κ_s^* の温度依存性

5. FINASによる構造問題への適用

5.1 繰り返し負荷を受ける切欠丸棒の解析

非線形繰返し非硬化領域モデルを切欠丸棒の弾塑性問題に適用し解析を行い、大野等の解³⁾と比較することにより、FINASに組み込まれた同モデル解析機能の検証とする。

従って本問題の設定、解析条件、材料定数は、全て文献3)に基づくものである。

5.1.1 解析モデル

・構造モデル

構造は軸対称切欠丸棒の1/4断面とし、その形状と寸法を図5.1-1に示す。

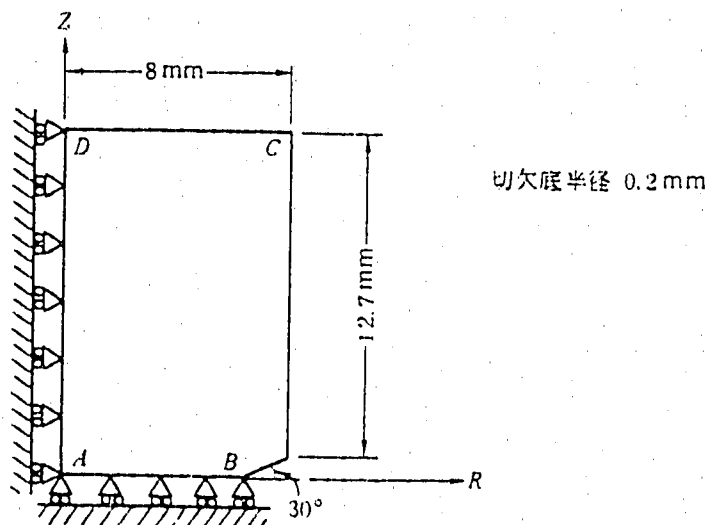


図 5.1-1 構造モデル(1/4断面)

・使用要素

Q A X 8 : 8節点四辺形軸対称要素

・有限要素モデル

図5.1-3, 5.1-4, 5.1-5参照

5.1.2 解析条件

・材料はSUS304と仮定

弾性係数 $E = 1.94 \times 10^5 \text{ MPa}$

ポアソン比 $\nu = 0.264$

降伏応力 $\sigma_Y = 185\text{MPa}$

・塑性に関する硬化則

非線形繰り返し非硬化領域モデルとして以下の材料特性を与える。

材料パラメータ $A = 500, \quad \kappa = 1456\text{MPa},$

非硬化領域の発達速度 $c = 0.08$

限界面の大きさ κ^* は次式とし、テーブル形式で与える。

$$\kappa^* = \kappa_0^* + Lq$$

ここで、 $\kappa_0^* = 255\text{MPa}, \quad L = 1044\text{MPa}$

境界条件 (図5.1-1参照)

ABに沿って $U_z = 0.0$

ADに沿って $U_R = 0.0$

負荷条件

モデルの上端部 (図5.1-1のDC面) に図5.1-2に示されるサイクリックな負荷を与える。

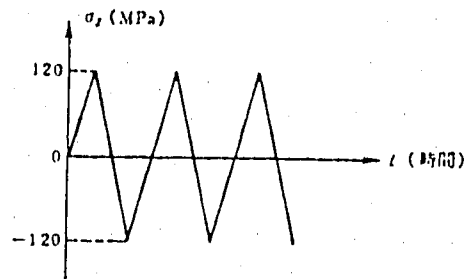


図 5.1-2 サイクリックな負荷条件

5.1.3 解析結果

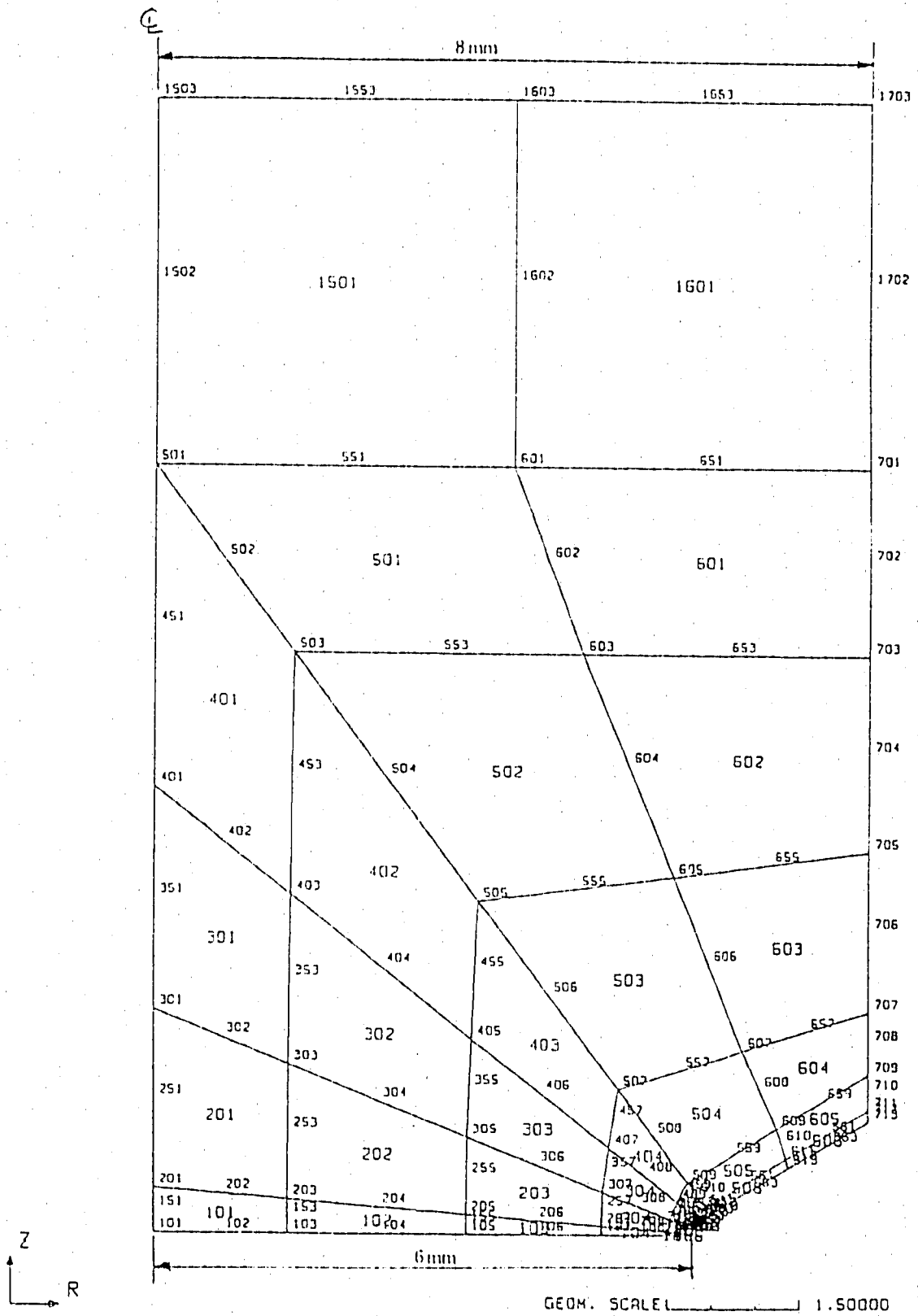
図5.1-6は、切欠き先端に最も近い積分点におけるZ方向の応力-ひずみ履歴を示したものである。また、図5.1-7は3サイクル目 ($\sigma_z = -120\text{MPa}$) における切欠き近傍のMisesの相当応力分布を示したものである。

5.1.4 考 察

FINASによる解は参考文献3)に示されている大野等の解と一致しており、サイクリックな弾塑性問題において、非線形繰返し非硬化領域モデルが正しく機能することが確認された。

また、図5.1-6によると除荷が起こる後に若干の応力の乱れが観察されるが、これは、この部分の増分を小さくするか、または繰返し計算することによって防止することができる。

FINAS STATIC ANALYSIS



/// NOTCHED BAR ANALYSIS BY OHNO-MURAKAMI HARDENIG RULE ///

図 5.1 - 3(a) 有限要素モデル (全体図)

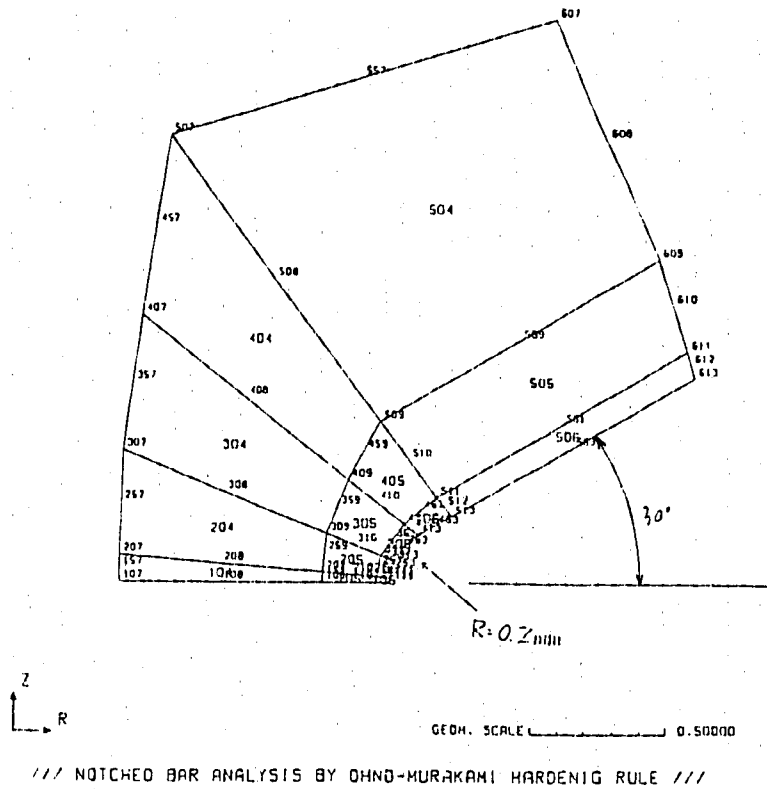


図 5.1 - 3(b) 有限要素モデル (部分拡大図 1)

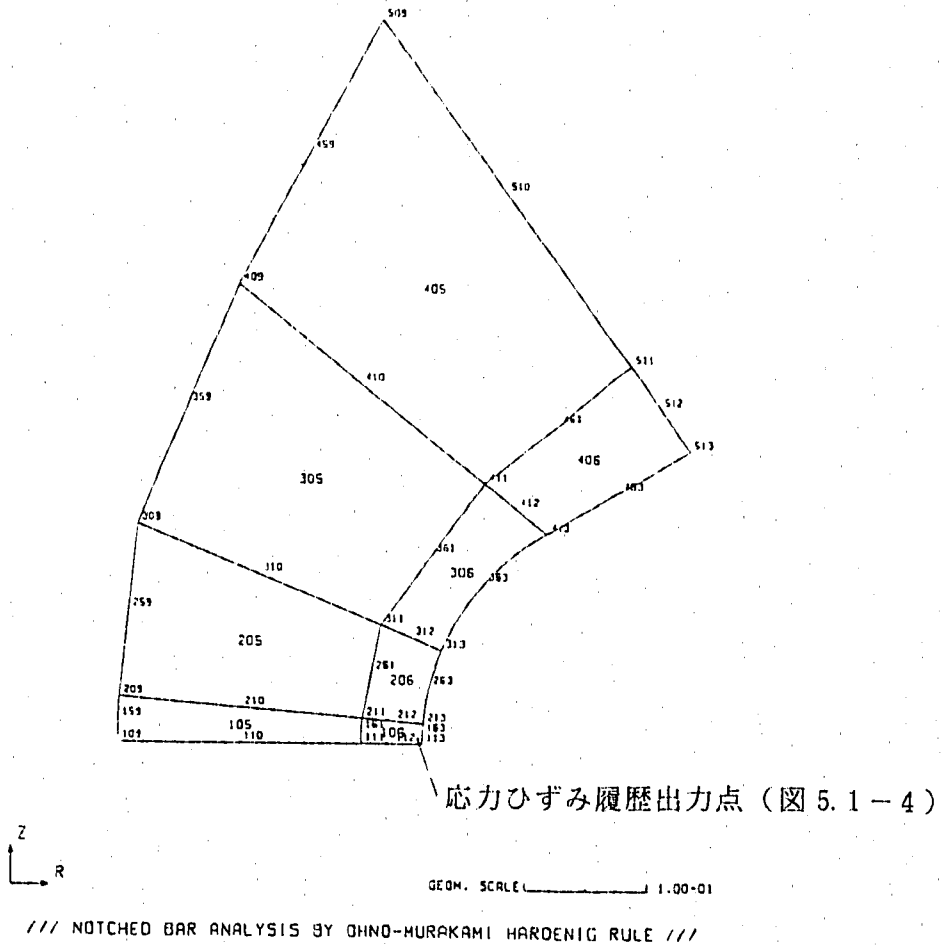
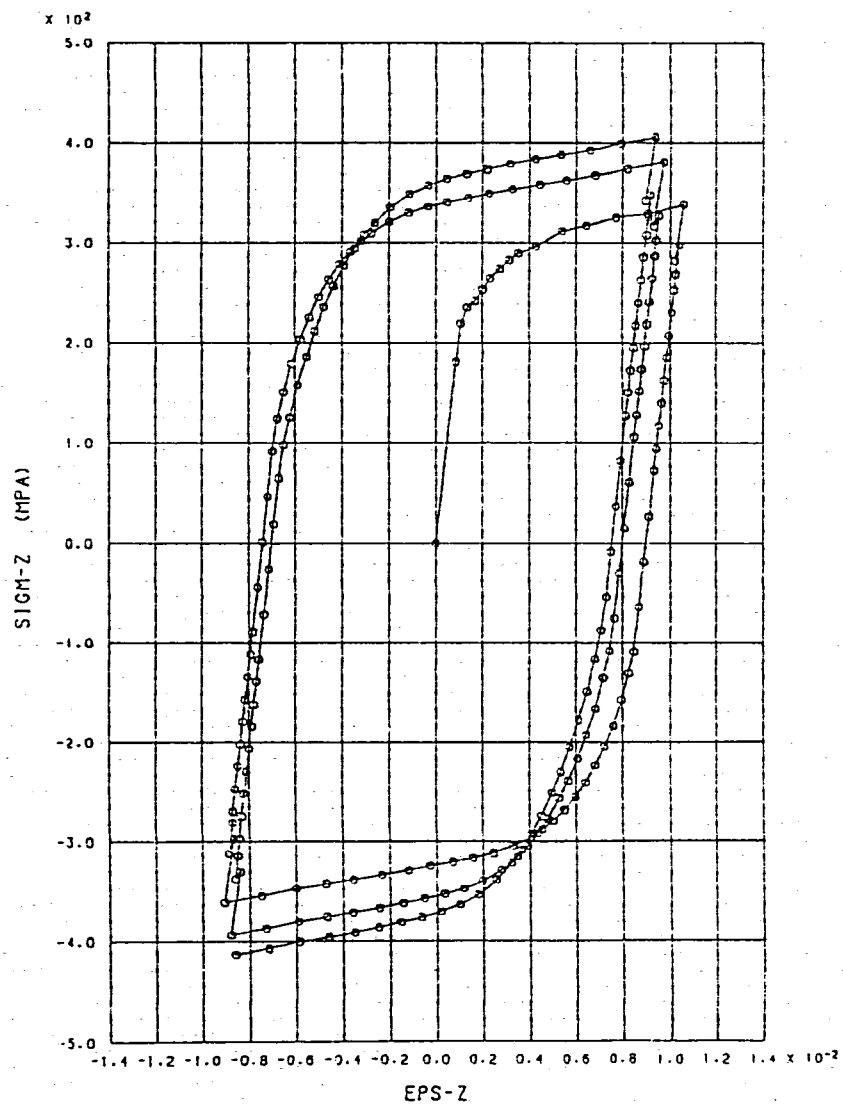


図 5.1 - 3(c) 有限要素モデル (部分拡大図 2)

FINAS STATIC ANALYSIS



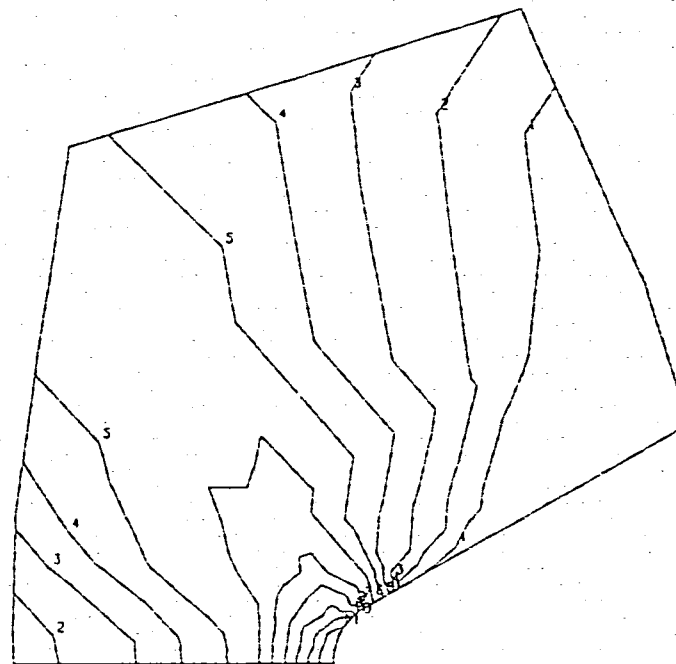
/// NOTCHED BAR ANALYSIS BY OHNO-MURAKAMI HARDENIG RULE ///

図 5.1 - 4 切欠先端における Z 方向 - ひずみ履歴

FINAS STATIC ANALYSIS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

- 1 104.9999
- 2 125.0000
- 3 144.9999
- 4 164.9999
- 5 184.9999
- 6 205.0000
- 7 225.0000
- 8 244.9999
- 9 264.9999
- 10 285.0000
- 11 305.0000



STEP NO. 211

GEOM. SCALE 0.50000

/// NOTCHED BAR ANALYSIS BY OHNO-MURAKAMI HARDENIG RULE ///

図 5.1 - 5 切欠近傍におけるミーゼスの相当応力分布

5.2 熱過渡荷重を受ける直管モデルの解析

管内部を流れるナトリウムの繰り返し温度変化による熱過渡を受ける直管（内径33.5mm、肉厚13mm）の熱伝導、応力解析をFINASに組込んだ非線形繰り返し非硬化領域モデルを用いて行い、同モデルの実用性を検討した。

なお本解析は配管熱過渡試験装置（略称SPTT）で実施した熱疲労試験における供試体TF-7のW1部を対象としている。

5.2.1 解析モデル

図5.2.1-1にモデル形状及びメッシュ分割図を示す。熱伝導解析においては、モデル全体を軸対称熱伝導要素(HQAX4)にてモデル化を行ない、ナトリウムと管内面との間で熱伝達を考慮する。また熱応力解析では、熱伝達要素を除いたモデル化を行う。

使用要素（熱伝導解析）

HQAX4 : 熱伝導4節点4辺形軸対称要素

FLAX2 : 熱伝達3節点軸対称要素

（熱応力解析）

QAX4 : 4節点4辺形軸対称要素

要素数 : 21

節点数 : 44

自由度数 : 45

5.2.2 熱伝導解析

I. 物性値

構造材料は、SUS-304とし物性値はFINASの材料ライブラリの値を用いた。この物性値を表5.2.2-1に示す。

II. 境界条件及び熱過渡条件

熱伝達境界は、管内面のみとし、他は断熱とする。

図5.2.2-1に境界条件

図5.2.2-2に管内面への熱過渡条件

表5.2.2-2に解析ステップ

を各々示す。また熱伝導解析のステップの大きさは、各節点における温度増分の最大値が約5°Cになるように決めている。

III. 熱伝導解析結果

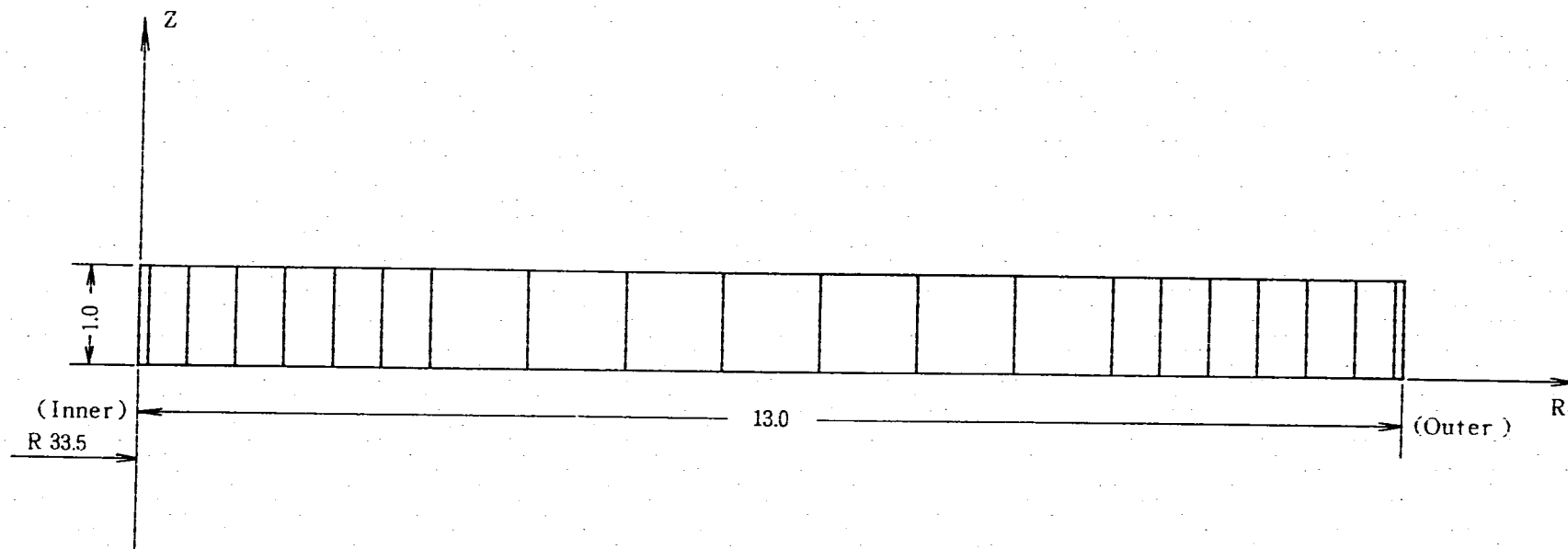
熱伝導解析は、CRAY X-MP/18で46.7秒を要した。(266ステップ)

図5.2.2-3に温度出力点

図5.2.2-4に温度履歴

図5.2.2-5(a)(b)に温度分布

を各々示す。



熱伝導解析使用要素：HQAX4, FLAX2

熱応力解析使用要素：QAX4

GEOM. SCALE 2.00000

STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1)

初期応力： $\sigma_z = 1.54\text{kg}/\text{mm}^2$

図 5.2.1 - 1 モデル形状及びメッシュ分割

表 5.2.2-1 熱伝導解析に使用した物性値

オーステナイトステンレス鋼 SUS304

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	熱伝導係数 ($\text{kcal}\cdot\text{mm}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}$)	比 熱 ($\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	密 度 (kg/mm^3)
20	3.48×10^{-6}	0.108	8.03×10^{-6}
50	3.53×10^{-6}	0.112	8.02×10^{-6}
100	3.73×10^{-6}	0.118	8.00×10^{-6}
150	3.89×10^{-6}	0.122	7.97×10^{-6}
200	4.05×10^{-6}	0.125	7.95×10^{-6}
250	4.21×10^{-6}	0.128	7.93×10^{-6}
300	4.37×10^{-6}	0.129	7.90×10^{-6}
350	4.53×10^{-6}	0.131	7.88×10^{-6}
400	4.70×10^{-6}	0.132	7.86×10^{-6}
450	4.86×10^{-6}	0.133	7.83×10^{-6}
500	5.02×10^{-6}	0.134	7.81×10^{-6}
550	5.18×10^{-6}	0.136	7.79×10^{-6}
600	5.34×10^{-6}	0.138	7.76×10^{-6}
650	5.51×10^{-6}	0.140	7.74×10^{-6}
700	5.67×10^{-6}	0.142	7.72×10^{-6}
750	5.83×10^{-6}	0.145	7.70×10^{-6}
800	5.98×10^{-6}	0.147	7.67×10^{-6}

(上記データは、FINASの材料データライブラリより転用)
 ナトリウムと管内面の熱伝達係数: $h = 9344 \text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$
 (= $2.5956 \times 10^{-6} \text{kcal}/\text{mm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

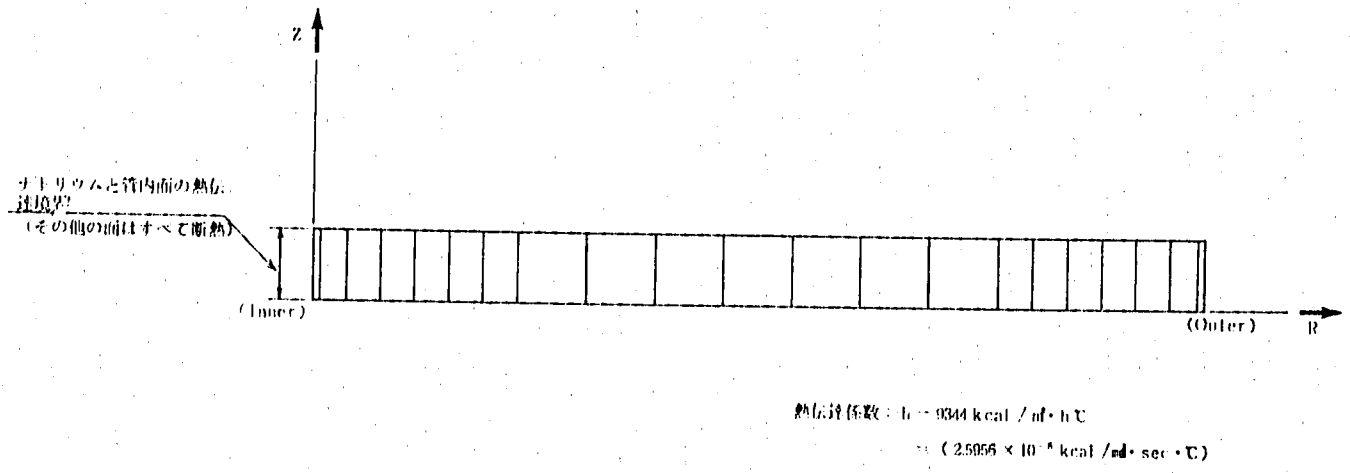
表 5.2.2-2 熱伝導解析の解析ステップ

ステップ番号	通算時刻 (秒)	管内面温度 ($^{\circ}\text{C}$)	ステップ分割数	時間増分 (秒)
0	0.0	550.0		
1	1.2	550.0	1	1.2
21	2.2	435.0	20	0.05
31	3.0	382.0	10	0.08
41	4.0	335.0	10	0.1
51	6.0	293.0	10	0.2
59	8.0	275.0	8	0.25
63	10.0	267.0	4	0.5
69	13.0	261.0	6	0.5
83	20.0	257.0	14	0.5
113	50.0	250.0	30	1.0
123	70.0	250.0	10	2.0
127	90.0	250.0	4	5.0
134	300.0	250.0	7	30.0
135	301.7	250.0	1	1.7
145	302.2	326.0	10	0.05
155	303.0	397.0	10	0.08
165	304.0	441.0	10	0.1
173	305.0	472.0	8	0.125
178	306.0	491.0	5	0.2
186	308.0	514.0	8	0.25
191	310.0	522.0	5	0.4
201	315.0	529.0	10	0.5
211	320.0	534.0	10	0.5
246	355.0	550.0	35	1.0
248	360.0	550.0	2	2.5
260	420.0	550.0	12	5.0
266	600.0	550.0	6	30.0

↑ cold shock

↓ hot shock

FINAS

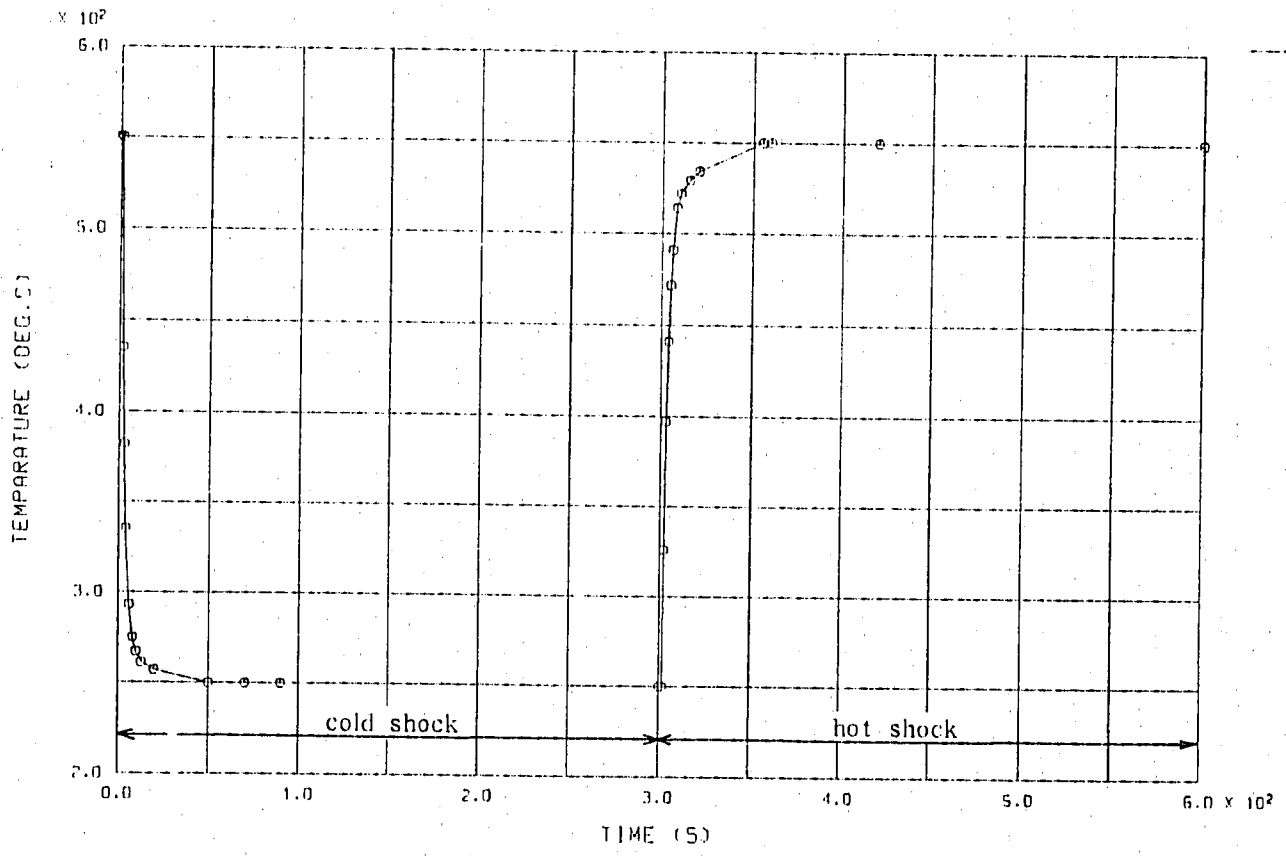


STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1)

GEOM. SCALE 1 2.00000

図 5.2.2 - 1 熱伝導解析の境界条件

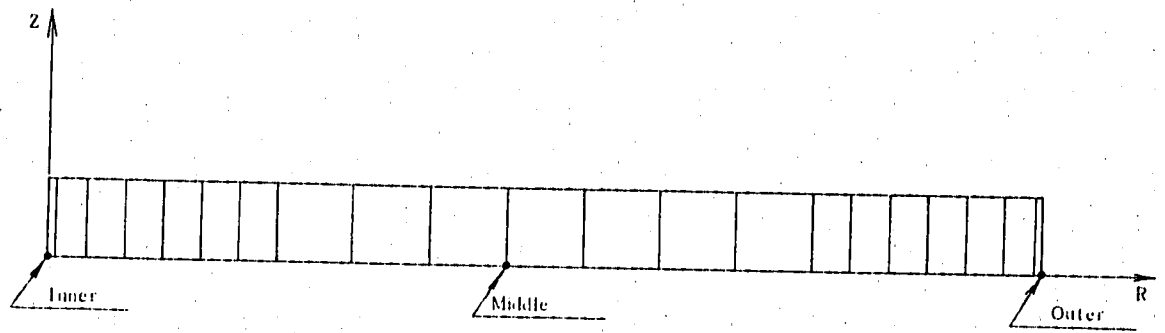
FINAS



THERMAL CONDITION OF STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1)

図 5.2.2 - 2 ナトリウムより管内面への熱過度条件

FINAS

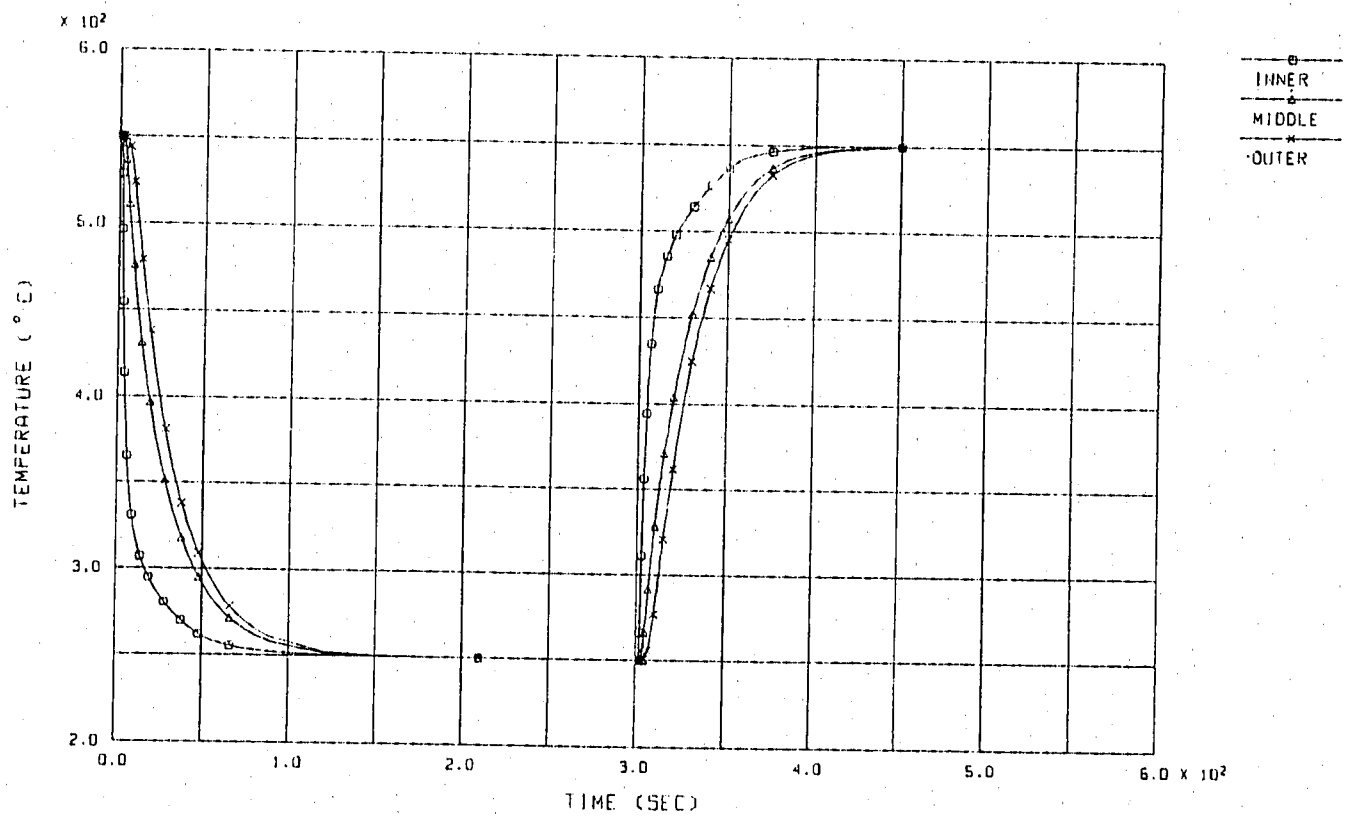


GEOM. SCALE 2.00000

STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1)

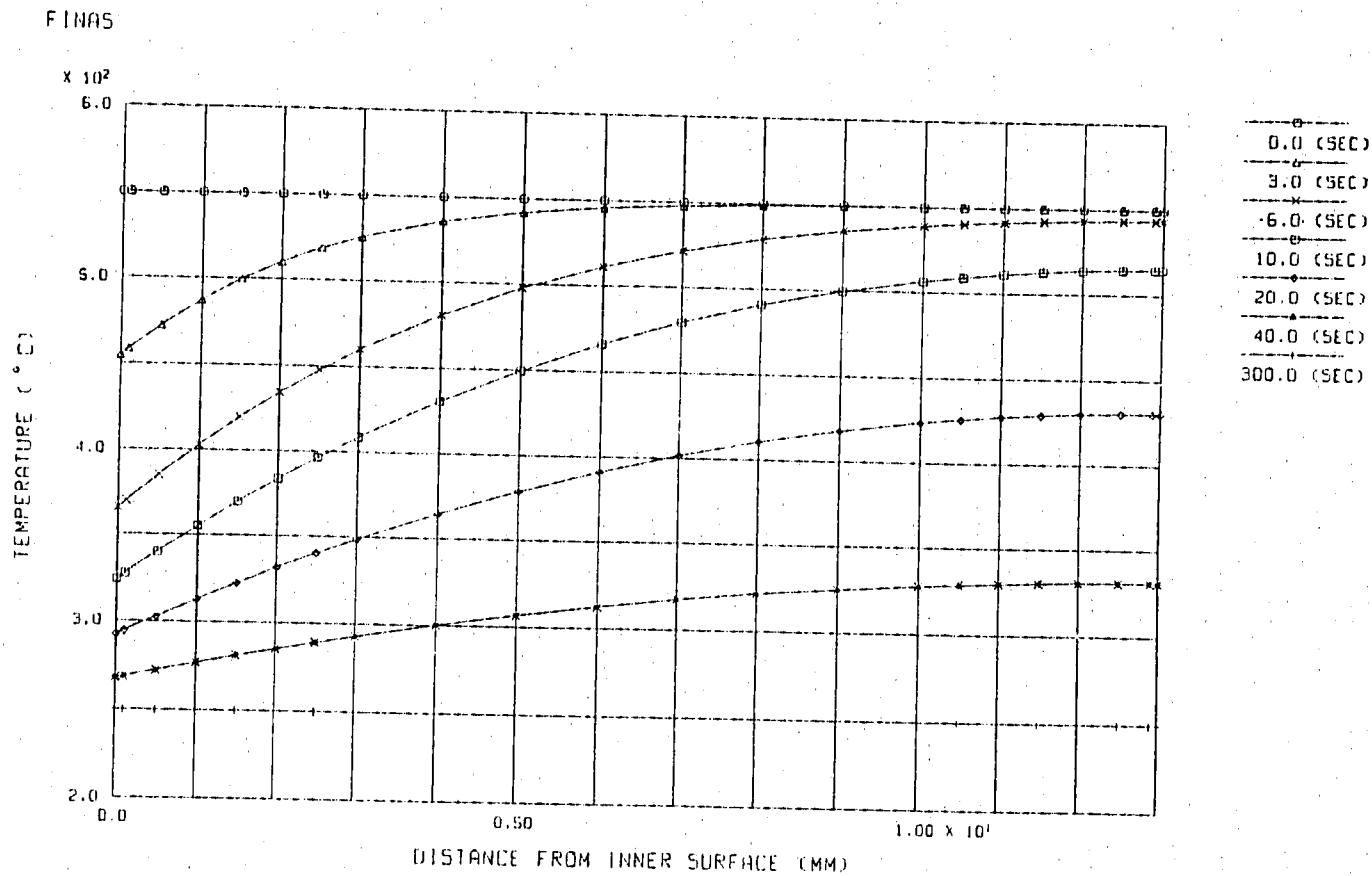
図 5.2.2 - 3 熱伝導解析における温度出力点

FINAS



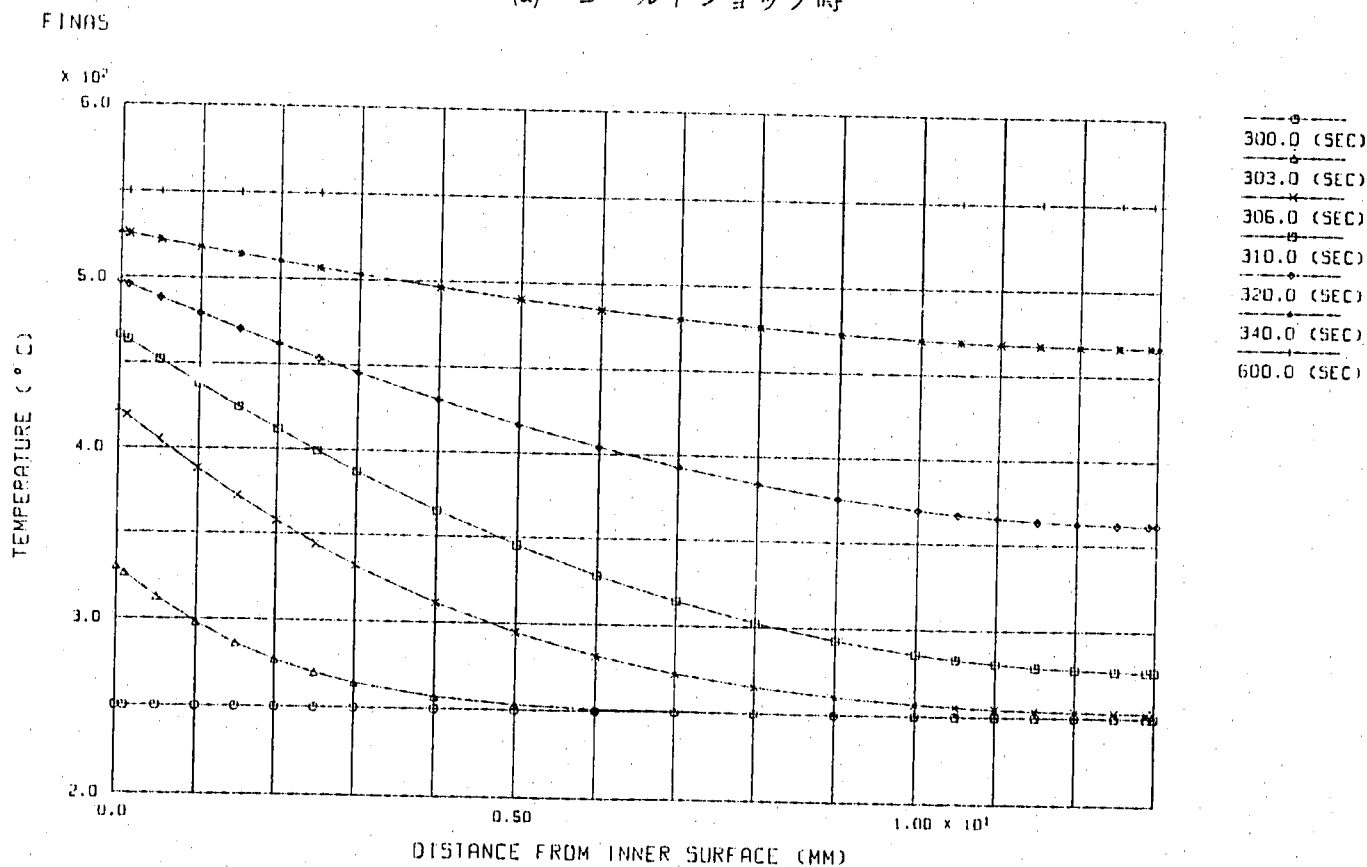
STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) TEMP. HISTORY (COLD-HOT SHOCK)

図 5.2.2 - 4 温度履歴



STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) COLD SHOCK

(a) コールドショック時



STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) HOT SHOCK

(b) ホットショック時

図 5.2.2 - 5 温度分布

5.2.3 非弾性解析

5.2.3.1 材料モデル

構造材料はSUS-304であり、構成モデルとして非線形繰返し非硬化領域モデル（大野・加智・村上モデル）を採用し、材料定数は表3.3-1に示すものとした。

5.2.3.2 境界条件及び温度条件

図5.2.3-1に境界条件

表5.2.3-1に1サイクルについての解析ステップの大きさを各々示す。

この解析は繰返し硬化問題であるため、熱伝導解析で得られたCold Shock～hot Shockを1サイクルとし20サイクル（1701ステップ）の解析を行った。また増分ステップの取り方については以下の点に留意した。

- 1) 各節点における最大温度増分が 10°C になるように熱伝導解析の結果をピックアップする。
- 2) 1/2サイクル時（Cold Shock終了時で全体が 250°C になったとき）は1ステップとする。
- 3) 1サイクル終了時（全体が 550°C になったとき）は1ステップをとるが、このとき完全に 550°C に戻るよう温度の修正を行う。

5.2.3.3 非弾性解析結果

図5.2.3-2に非弾性解析結果出力点を示す。

図5.2.3-3(a)～(f)に内、中、外側の要素中心における z 、 θ 方向の応力・ひずみヒステリシスループを示す。

5.2.3.3 非弾性解析結果

図5.2.3-2に非弾性解析結果出力点を示す。

図5.2.3-3(a)～(f)に内、中、外側の要素中心における軸、周方向の応力・ひずみヒステリシスループを示す。

図5.2.3-4(a)～(1)に

内側要素の軸、周方向の引張応力最大時(19,359,784,1634ステップ) 1/2サイクル 内側要素の軸、周方向の圧縮応力最大時(62,402,827,1677ステップ) サイクル終了時	(44,384,809,1659ステップ)	
	(86,426,851,1701ステップ)	
	の応力分布を1, 10, 20サイクルについて示す。	

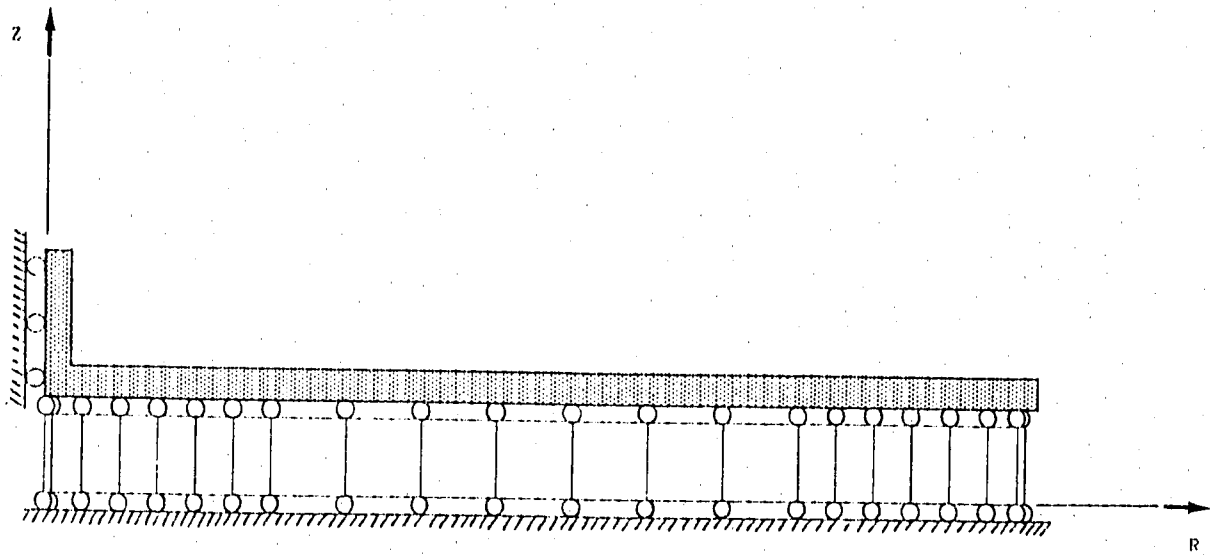
図5.2.3-5(a)～(d)に軸、周方向応力の内外面における履歴を示す。

解析には、FINAS V10.0においてオーバーレイ構造の改良とメモリーレジデントファイルを使用することによって加速化を図り、1701ステップをCRAY X/MP-18にて771秒で解いている。

5.2.3.4 考察

本解析によって非線形繰返し非硬化領域モデルを用いれば繰返し熱過渡荷重によるSUS304の繰返し硬化の飽和過程を追跡し、精度のよい応力・ひずみ分布を得ることが可能であることを示した。しかし本資料の4.2節にて述べたように、温度変動下では、単軸問題でさえ非線形繰返し非硬化領域モデルの解析結果が実験に一致していない。従って今回得られた結果が実験に対応するものかという問いには否定的にならざるをえず、今後の当モデルの発展が待たれる。

FINNS

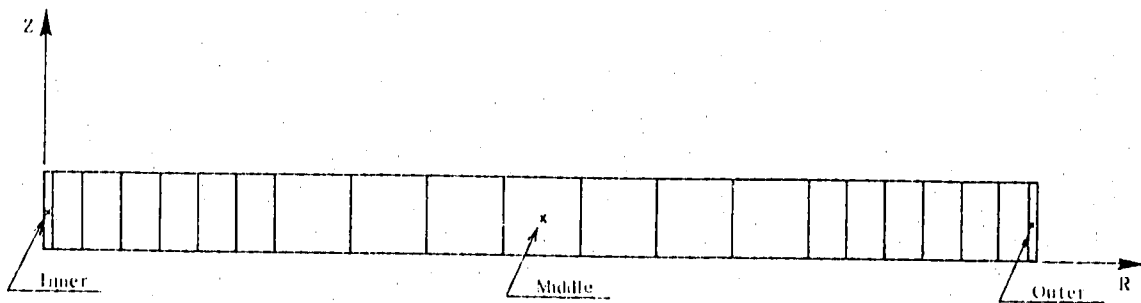


GEOM. SCALE 1 2.00000

STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1)

図 5.2.3 - 1 応力解析における境界条件

FINNS



GEOM. SCALE 1 2.00000

STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1)

図 5.2.3 - 2 応力解析における出力点 (各要素図心)

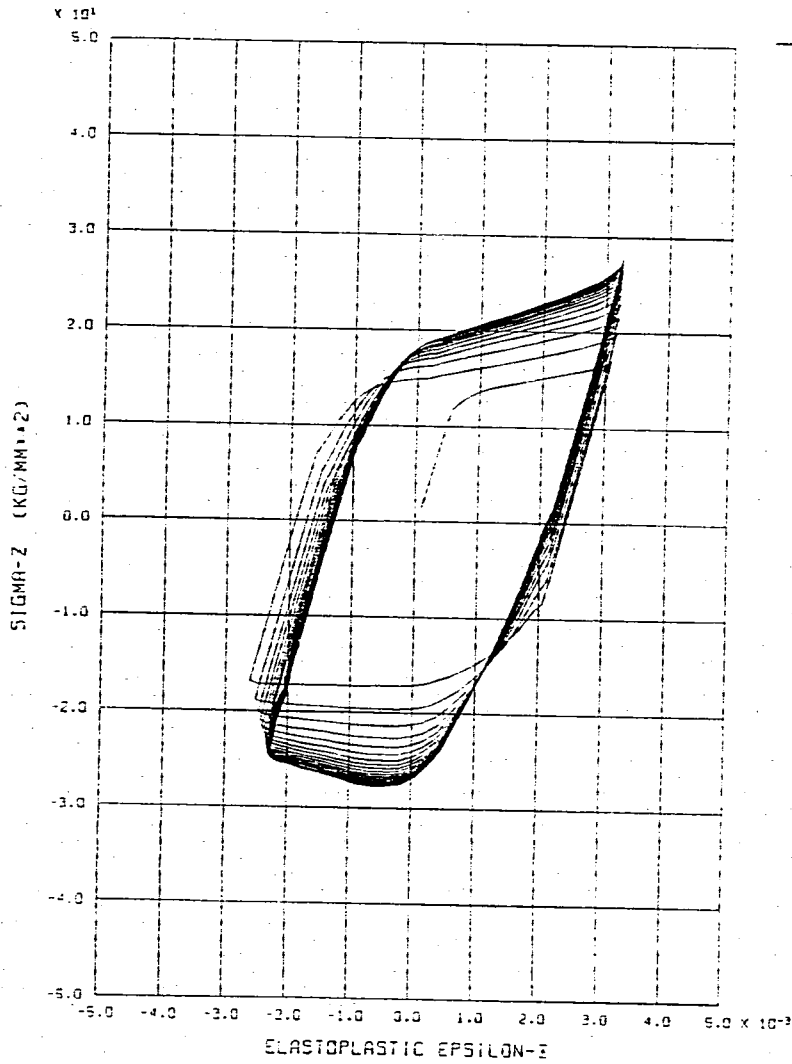
表5.2.3 応力解析における解析ステップ

Cold Shock

Hot Shock

ステップ番号	時刻 (秒)	熱伝導解析の ステップ番号
1	1.3	3
2	1.55	8
3	1.75	12
4	1.95	16
5	2.15	20
6	2.36	23
7	2.6	26
8	2.84	29
9	3.1	32
10	3.4	35
11	3.7	38
12	4.0	41
13	4.4	43
14	4.8	45
15	5.4	48
16	6.0	51
17	6.75	54
18	7.5	57
19	8.5	60
20	9.5	62
21	11.0	65
22	12.5	68
23	14.0	71
24	15.5	74
25	17.0	77
26	18.5	80
27	20.0	83
28	22.0	85
29	24.0	87
30	26.0	89
31	28.0	91
32	30.0	93
33	33.0	96
34	36.0	99
35	39.0	102
36	43.0	106
37	47.0	110
38	52.0	114
39	58.0	117
40	66.0	121
41	80.0	125
42	120.0	128
43	300.0	134

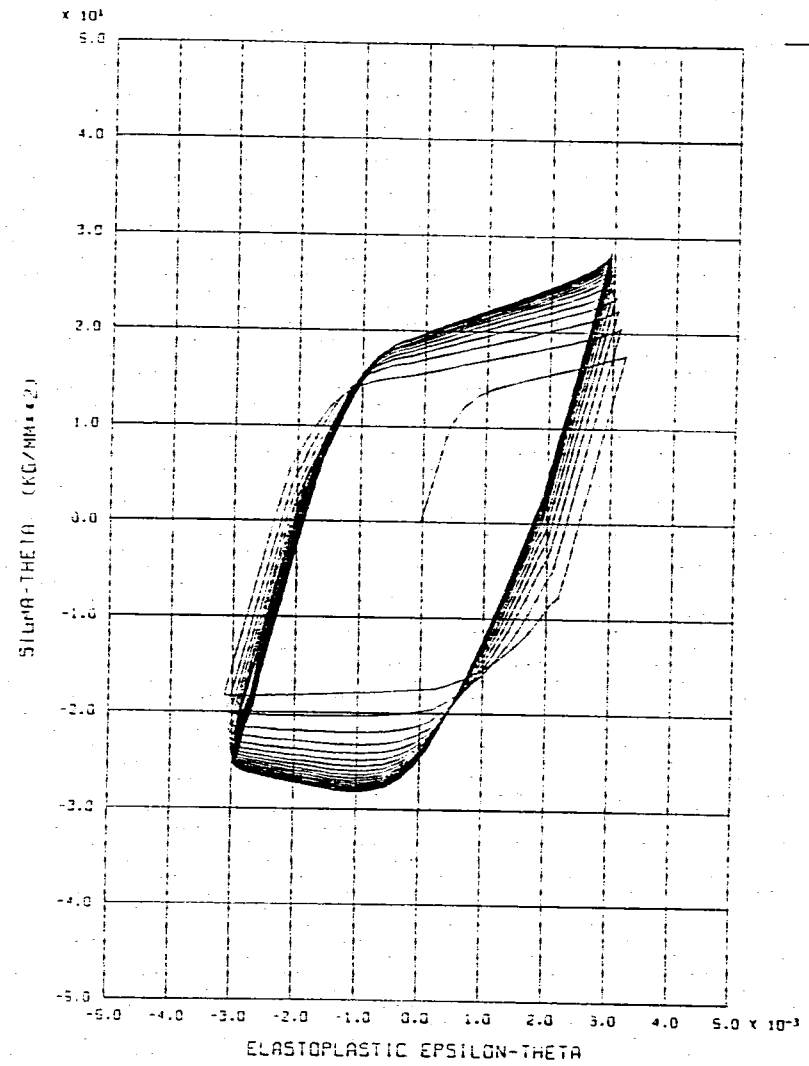
ステップ番号	時刻 (秒)	熱伝導解析の ステップ番号
44	301.75	136
45	301.95	140
46	302.1	143
47	302.28	146
48	302.52	149
49	302.76	152
50	303.0	155
51	303.3	158
52	303.6	161
53	303.9	164
54	304.25	167
55	304.625	170
56	305.0	173
57	305.6	176
58	306.25	179
59	307.0	182
60	307.75	185
61	308.8	188
62	310.0	191
63	311.5	194
64	313.0	197
65	314.5	200
66	316.0	203
67	317.5	206
68	319.0	209
69	321.0	212
70	323.0	214
71	325.0	216
72	327.0	218
73	329.0	220
74	331.0	222
75	334.0	225
76	337.0	228
77	340.0	231
78	344.0	235
79	348.0	239
80	353.0	244
81	360.0	248
82	370.0	250
83	385.0	253
84	450.0	261
85	600.0	266



STRESS STRAIN RELATIONSHIP (INNER ELEMENT)

STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) (2-2)

(a) 内面要素図心軸方向



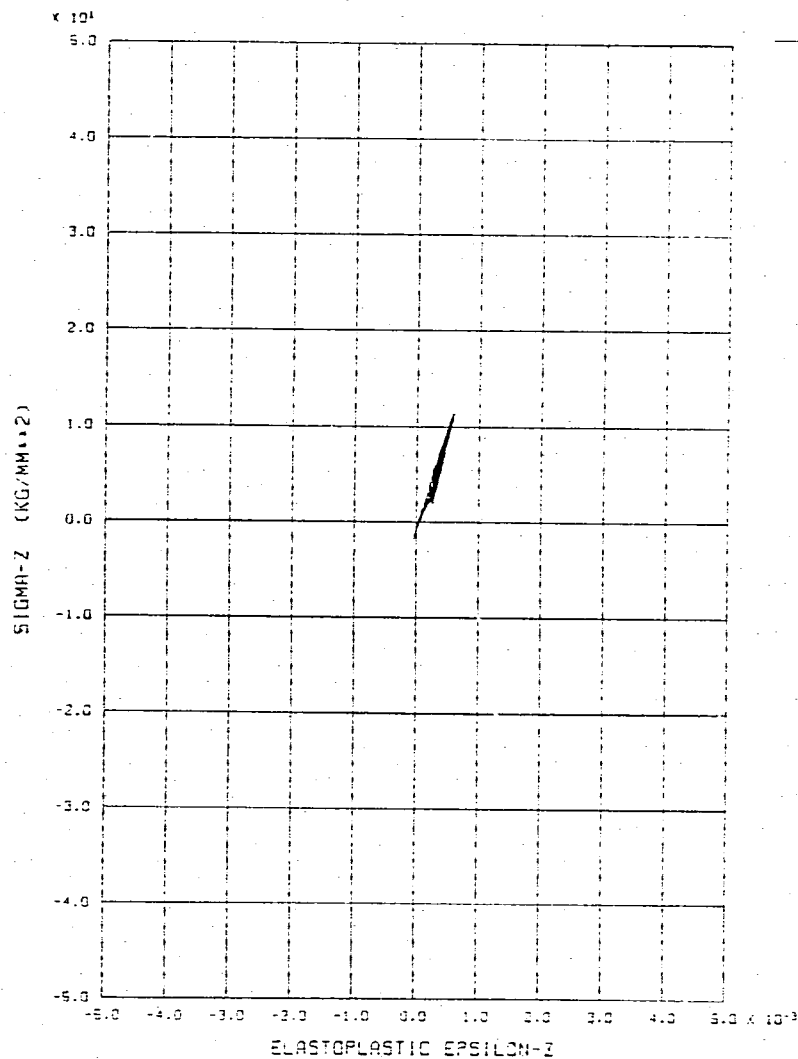
STRESS STRAIN RELATIONSHIP (INNER ELEMENT)

STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) (2-2)

(b) 内面要素図心周方向

図 5.2.3 - 3(a) 応力・ひずみヒステリシスループ

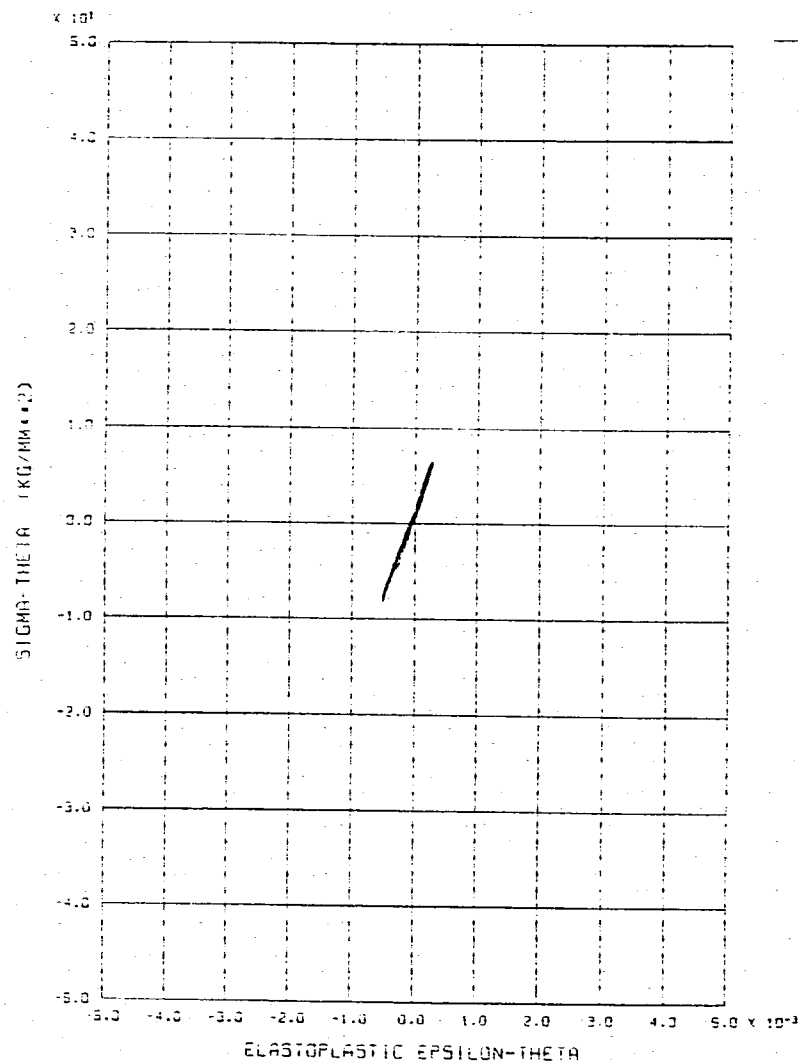
FINAS STATIC ANALYSIS



STRESS STRAIN RELATIONSHIP (MIDDLE ELEMENT)
 STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) (2-2)

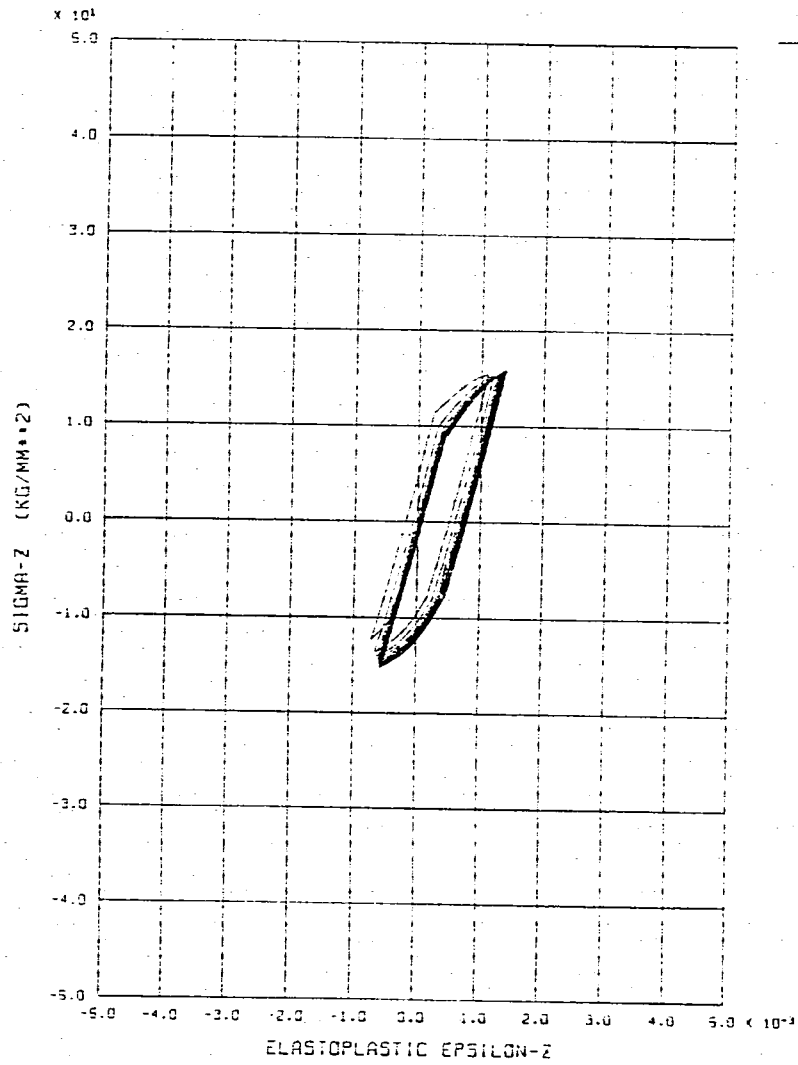
(c) 中央要素図心軸方向

FINAS STATIC ANALYSIS



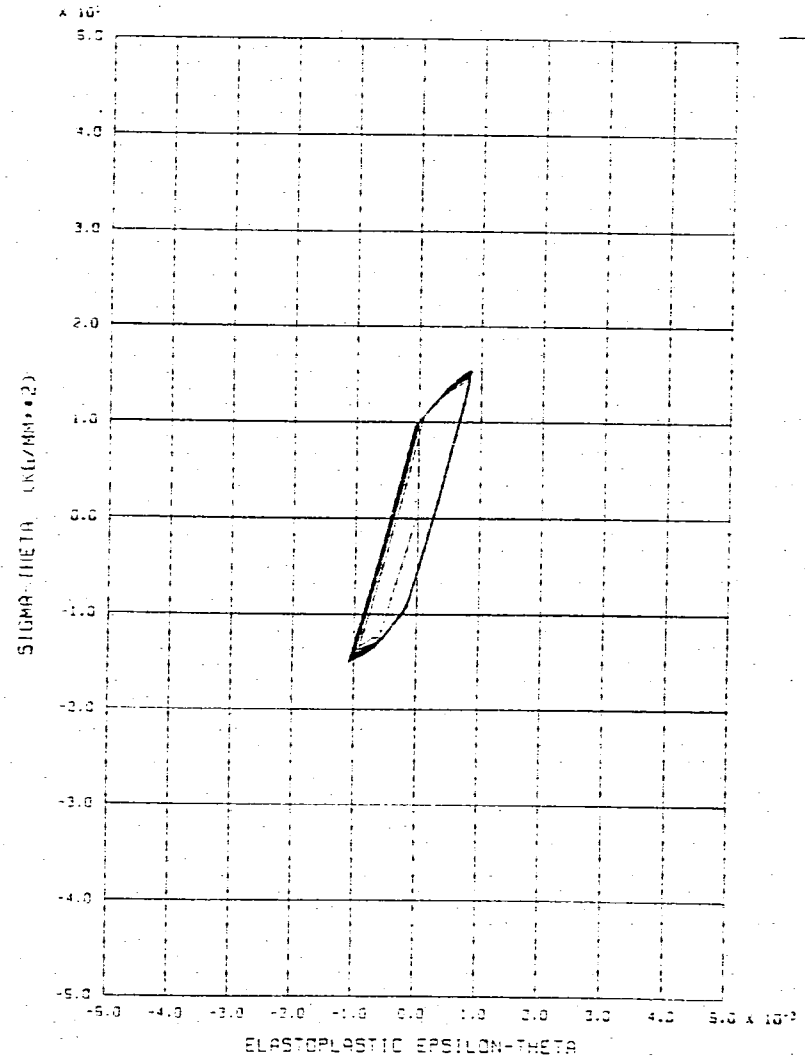
STRESS STRAIN RELATIONSHIP (MIDDLE ELEMENT)
 STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) (2-2)

(d) 中央要素図心周方向



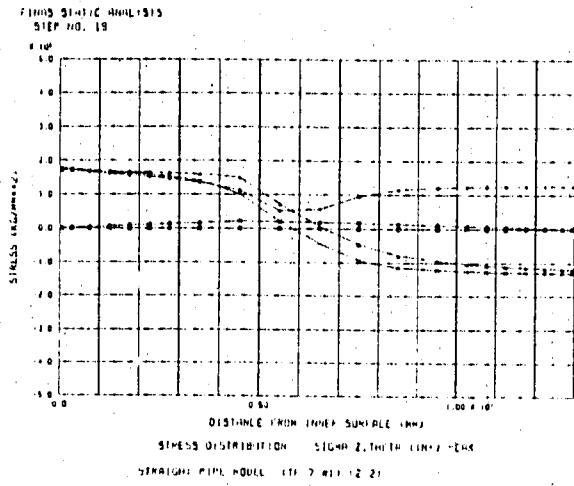
STRESS STRAIN RELATIONSHIP (OUTER ELEMENT)
 STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) (2-2)

(e) 外側要素図心軸方向

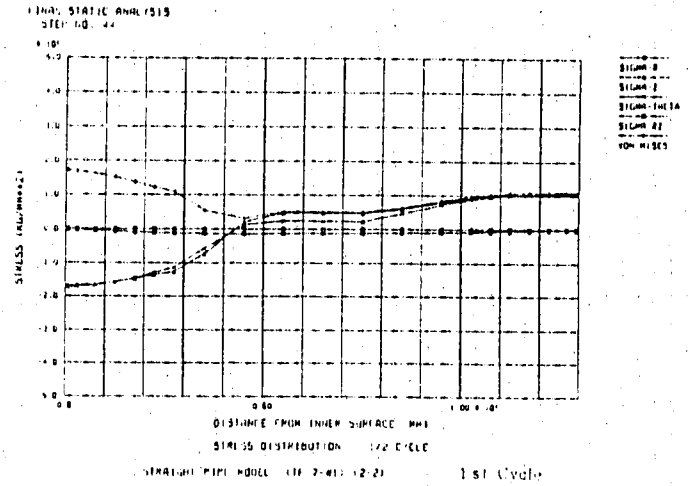


STRESS STRAIN RELATIONSHIP (OUTER ELEMENT)
 STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) (2-2)

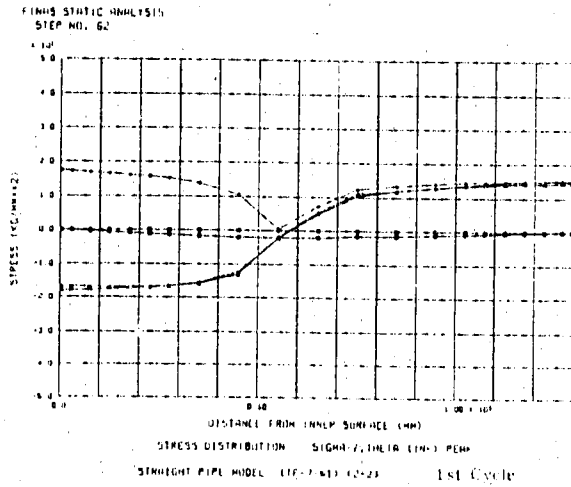
(f) 外側要素図心周方向



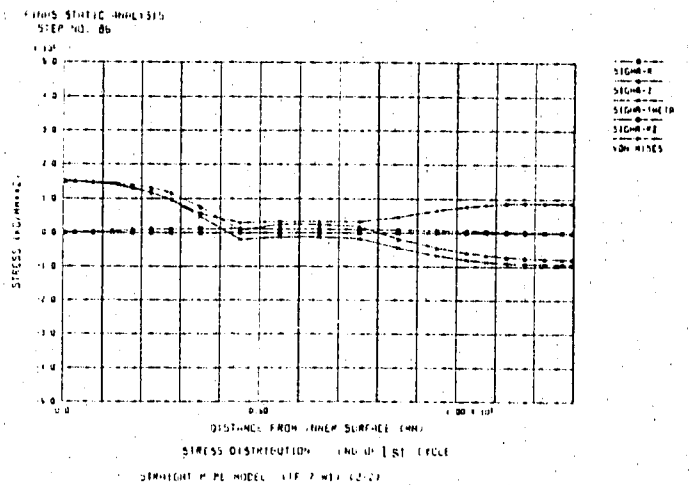
(a) 内面引張ピーク時



(b) 0.5 サイクル時



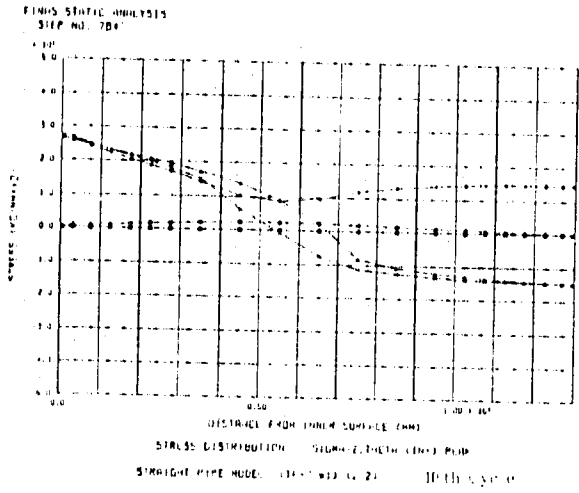
(c) 内面圧縮ピーク時



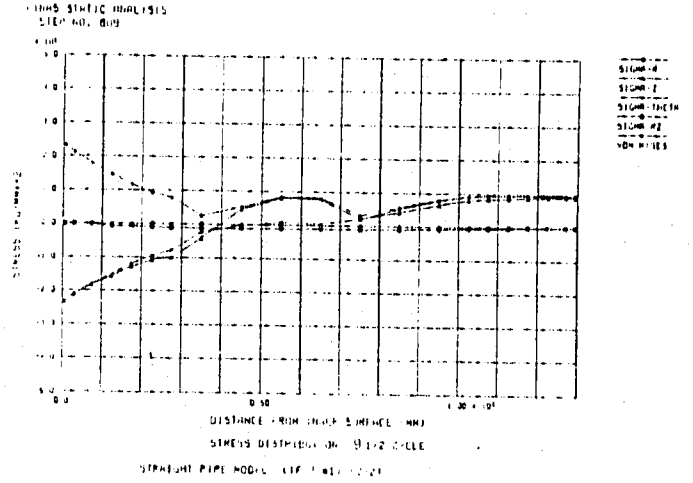
(d) 1 サイクル時

第 1 サイクル

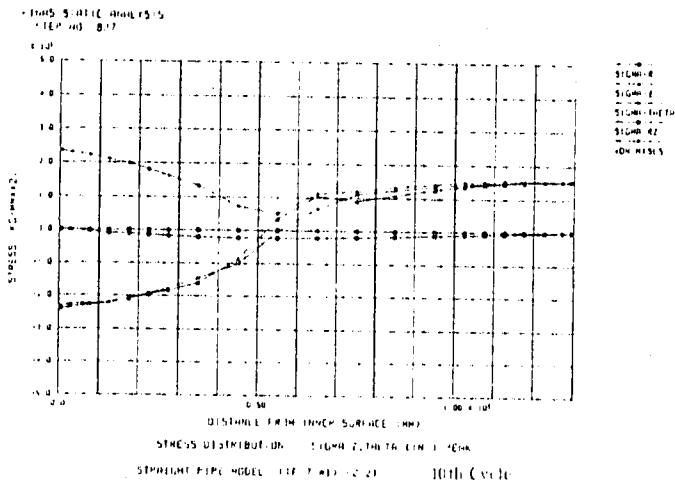
図 5.2.3 - 4 応 力 分 布



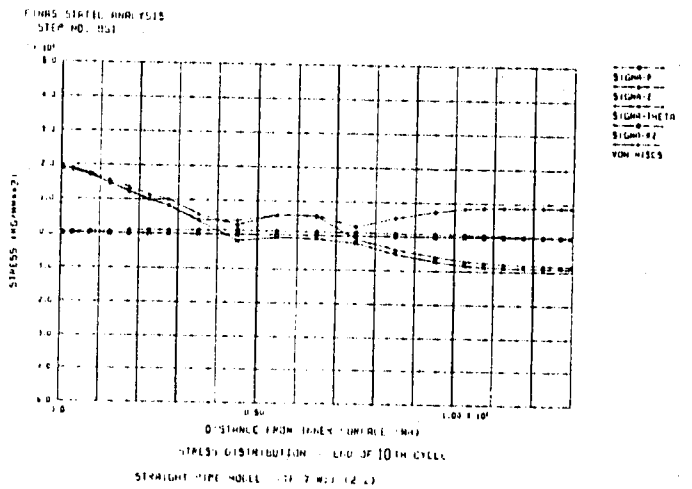
(e) 内面引張ピーク時



(f) 9.5 サイクル時

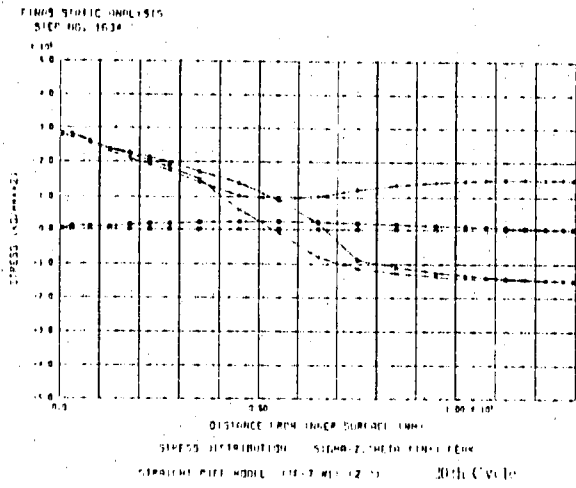


(g) 内面圧縮ピーク時

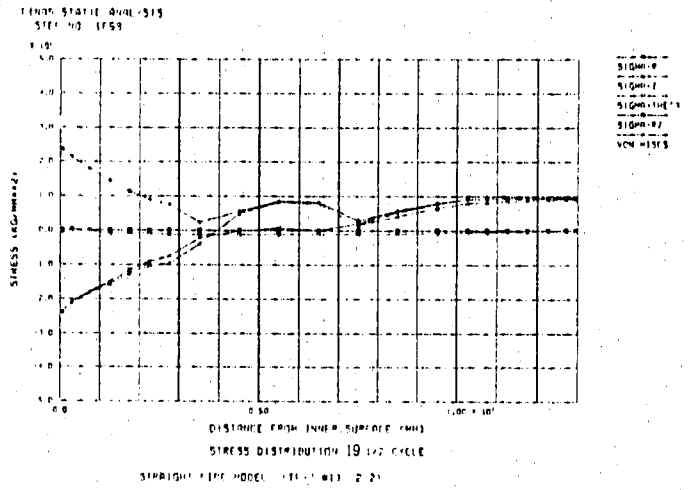


(h) 10 サイクル時

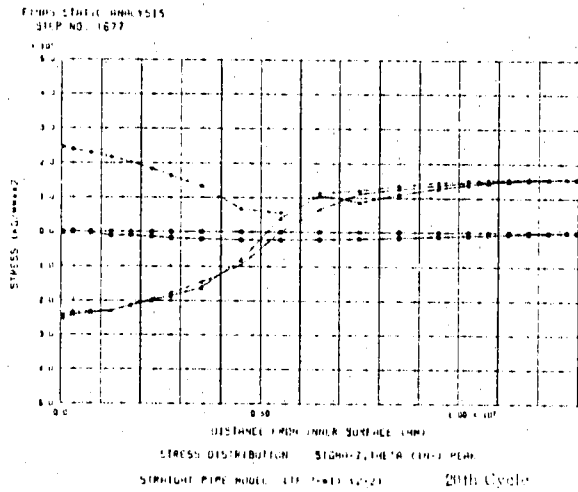
第10サイクル



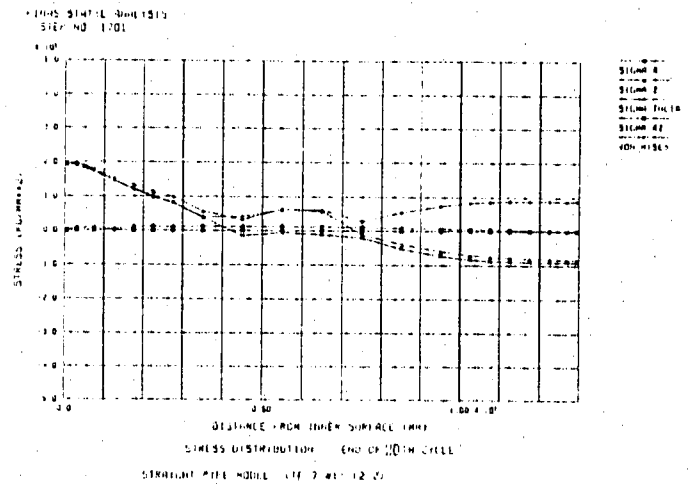
(i) 内面引張ピーク時



(j) 19.5 サイクル時



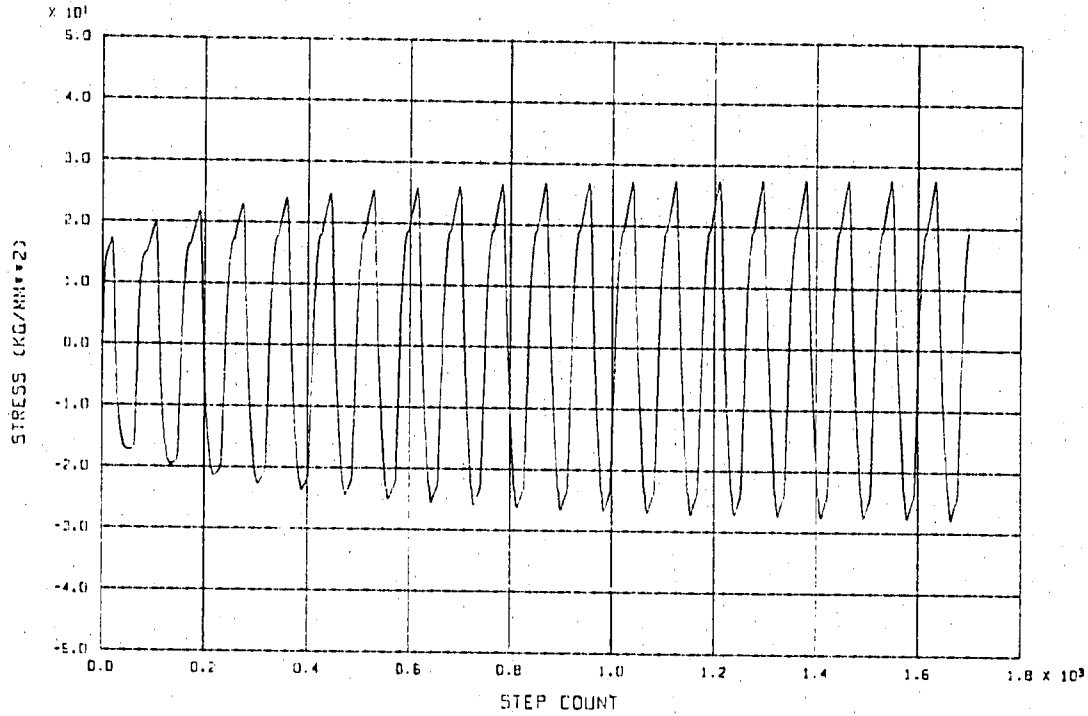
(k) 内面圧縮ピーク時



(l) 20 サイクル時

第20 サイクル

FINAS STATIC ANALYSIS

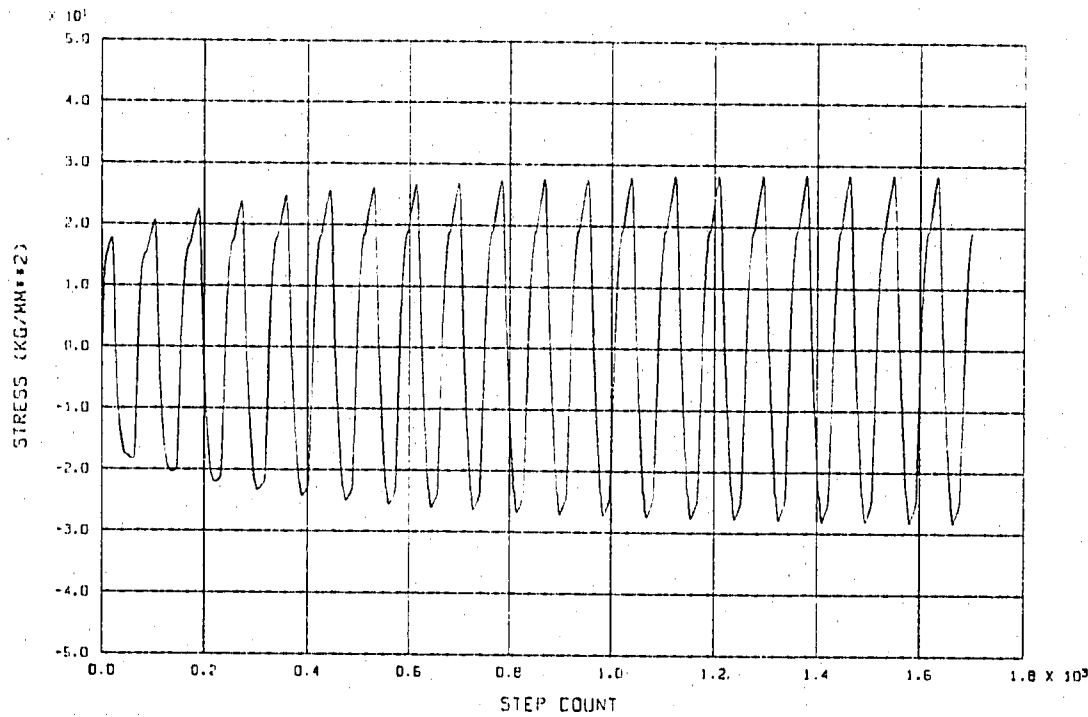


SIGMA-Z HISTORY OF INNER ELEMENT

STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) (2-2)

(a) 内面要素図心軸方向

FINAS STATIC ANALYSIS



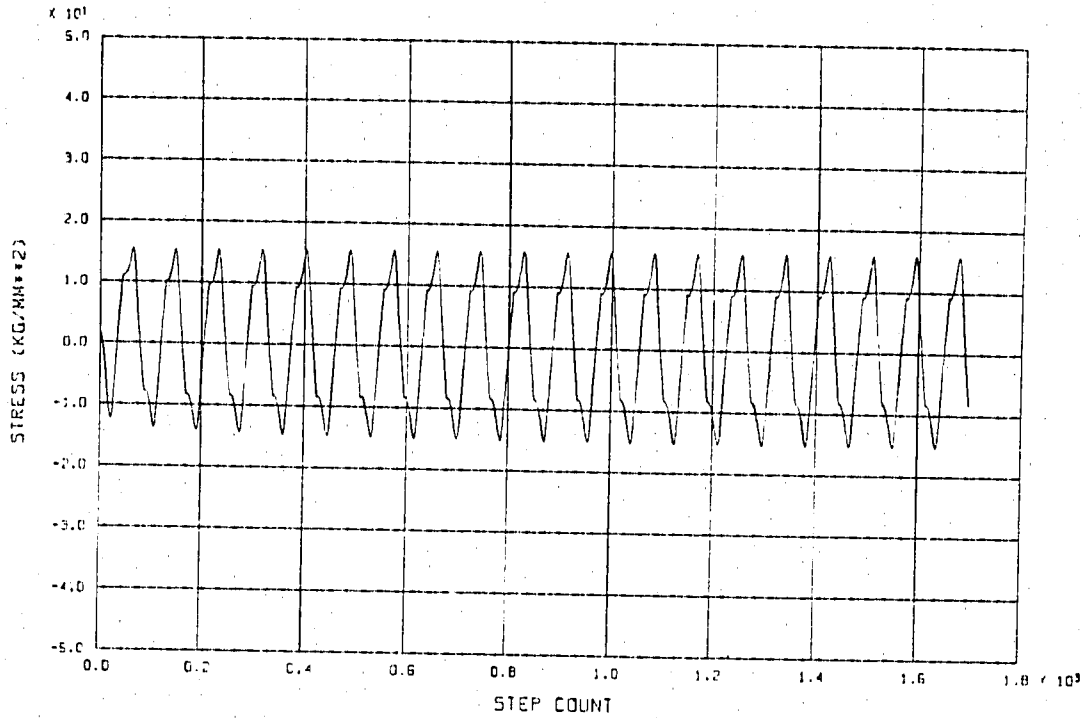
SIGMA-THETA HISTORY OF INNER ELEMENT

STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) (2-2)

(b) 内面要素図心周方向

图 5.2.3 - 5 应力履歴

FINAS STATIC ANALYSIS

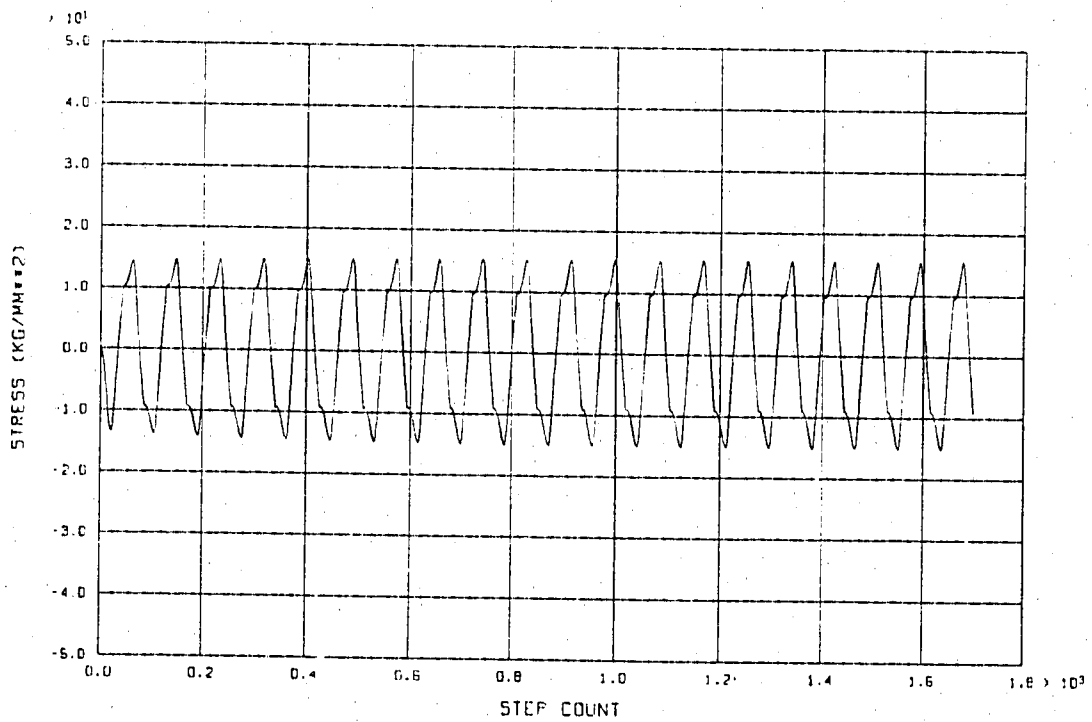


SIGMA-Z HISTORY OF OUTER ELEMENT

STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) (2-2)

(c) 外側要素図心軸方向

FINAS STATIC ANALYSIS



SIGMA-THETA HISTORY OF OUTER ELEMENT

STRAIGHT PIPE MODEL (TF-7-W1) (2-2)

(d) 外側要素図心周方向

6. 結言

本報では高精度非弾性構成モデルとして非線形繰返し非硬化領域モデルを取り上げ、そのモデル定数の決定と実用問題に対する試用を行った。その結果以下の結論を得た。

(1) SUS304鋼に対する非線形繰返し非硬化領域モデルのモデル定数は室温から600℃までについて本報において示した手法により定めることができた。

ただし、このモデルはモデル定数と実際の応力-ひずみ関係との対応が明確でないために決定手順が複雑であり、またモデルの自由度に制限があるため任意の応力-ひずみ関係に完全に適合させることは困難である。また全てのひずみ範囲において繰返し硬化が飽和するまでのサイクル数が一定であり、実験に対応しない。

(2) このモデルは単軸、温度一定下におけるSUS304鋼の繰返し弾塑性挙動をある程度精度よく表現することができる。

今回定めたモデル定数を用いればひずみ範囲4%以内、室温から600℃までの範囲においてSUS304鋼の各種応力ひずみ関係の実験式に高々数 kg/mm^2 程度の差で一致させることができる。

(3) SUS304鋼の温度変動下におけるこのモデルの解析値は実験値より低めとなる。

これはSUS304鋼の場合温度変動に伴うなんらかの付加的な硬化が存在していると考えられ、今後の検討が必要である。

(4) 事業団によって開発された汎用構造解析コードFINASに組み込まれた非線形繰返し非硬化領域モデルを実際の構造問題へ適用して解析を行うことができるようになった。しかしSUS304鋼について繰返し硬化が飽和するまでを解析するには数十から数百サイクル、つまり数千から数万ステップを要する。これは単調問題の非弾性解析に較べれば、数十から数百倍の計算量となる。

SUS304鋼における繰返し塑性問題を詳細に解析することは非線形繰返し非硬化領域モデルによって初めて可能になったと考えられ、この意味で本モデルの持つ意義は大きい。しかしこのモデルは自由度が少ないため任意の応力ひずみ関係に対応できず、繰返し硬化が飽和するまでの繰返し数もひずみ範囲に無関係に一定となる問題がある。また実際の問題に適用させた場合の解析精度を議論するとすれば、温度変動下や多軸(非比例負荷)問題についてさらに検討を行う必要がある。

上述の繰返し塑性問題の解析には膨大な計算量が必要であった。従って現状でこのような解析を行うためには硬化を加速し、繰返し硬化が飽和するまでのサイクル数を減らす必要があり、この影響についても今後検討する必要がある。

参 考 文 献

- (1) 大野, 佐藤, 高橋, 桑原: 温度変動下のSUS304の繰返し塑性構成方程式 日本機械学会論文集(A編), 54巻, 501号, 1140-1150 (昭63)
- (2) Milan Satra, 大野: 繰返し負荷を受ける切り欠き丸棒の詳細および簡易団塑性解析 日本機械学会論文集(A編), 52巻, 483号, 2529-2537 (昭61)
- (3) 大野, 加智, 村上: 非線形硬化材料の繰返し塑性構成式 日本機械学会論文集(A編), 51巻, 470号, 2349-2358 (昭60)
- (4) 大野信忠: 非硬化ひずみ領域を考慮した繰返し塑性構成式 日本機械学会論文集(A編), 48巻, 434号, 1342-1350 (昭57)
- (5) 高速炉機器の非弾性解析に関する指針, PNC SN9410 86-132 動燃事業団, 昭和61年
- (6) R. D. Krieg: A Practical Two Surface Plasticity Theory, ASME J. Appl. Mech, 42, 641-646(1975)
- (7) Y. F. Dafalias, E. P. Popov: Plastic Internal Variables Formalism in Cyclic Plasticity, ASME J. Appl. Mech, 98, 645-651(1976)
- (8) 汎用構造解析システム"FINAS"拡張・整備報告書(I), PNC SJ9270 88-002 昭和62年2月
- (9) 汎用構造解析システムFINAS VERSION 11.0 使用説明書, PNC N9520 89-019 平成元年11月

付録 モデル定数決定プログラム

作成したモデル定数決定プログラムは、3節(3-4)の各種応力ひずみ関係式を入力すれば3.1節の手順に従ってこれに最も合う非線形繰返し非硬化領域モデルのモデル定数を計算し出力する。ただし今回は事業団によるSUS304鋼の実験式よりモデル定数の決定を行ったのでこの応力-ひずみ関係を既に組み込んだ形でプログラムが用意されている。

プログラムの入力データとしては温度: T [$^{\circ}\text{C}$]; モデル定数: L , 手順(0)による繰返しひずみ範囲: ϵ と必要に応じて H_1+H_2 を与える。入力データとして L 値が要求されるのは前述のモデル定数決定手順では $H_1, H_2 (=L), c$ について $H_1+H_2, L/c$ の値のみが得られ、これら3つの定数のうちひとつを定める(3.2節A参照)ためである。

各温度におけるSUS304鋼のモデル定数決定は大きく二つのステップより成る。最初のステップはある温度において3.1節の手順(0)~(6)を用い全ての定数を決定する。次のステップでは既に H_1+H_2 が決定されているので手順(3)~(6)のみで定数が決定される。従って最初のステップで H_1+H_2 の決定を行う場合はAカードのみ入力し、Bカードを入力してはならない。次に H_1+H_2 が既に決定され他の温度における定数を決定する場合はAカードと共にBカードを入力し、 H_1+H_2 の値を指定する。

(3), (4), (5)の手順において関数の最小値問題の解法として、Simplex法を用い有効数字を5桁としている。

(注)プログラムはFORTRANで組まれており入力する各種応力ひずみ関係式はファンクション副プログラムによって行う。よって基本的にはこれが式で与えられる必要はなく、表形式であっても構わない。

プログラム中では大野らの以前の定式化に³⁾従い H_1 と L を同一とし、 $H_1=L, H_2=K$ と表している。

○ 入力データ

入力データは、'FT05'より読み込まれ、AカードとBカードがある。Bカードは必要に応じて入力する。

	10	20	30
A	T	L	$\Delta \epsilon$

データの 種類	カラム	タイプ	変数		無記入の 場合
A	1~10	実数	T	温度	*
	11~20	"	L	材料定数 L 値	200.0
	21~30	"	$\Delta \epsilon$	材料定数決定を行う繰返し ひずみ範囲 (3.1節の手順(0))	0.02

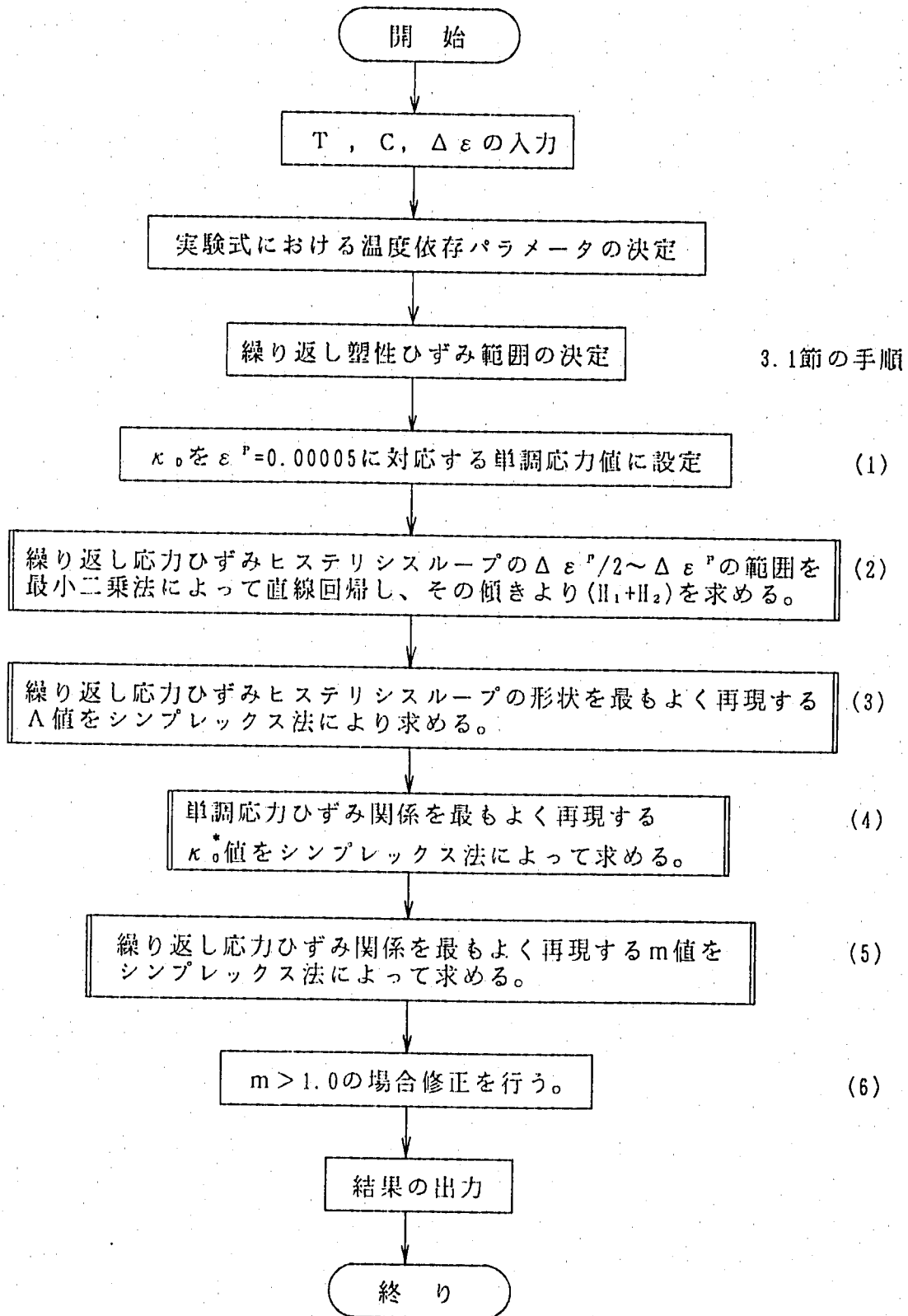
一般の使用において、Aカードでは、Tのみを入力し、L、 $\Delta \epsilon$ については、無記入でよい。

	10
B	H_1+H_2

データの 種類	カラム	タイプ	変数		無記入の 場合
B	1~10	実数	AKPL	H_1+H_2 の値	H_1+H_2 の値 を内部で決 定する。

Bカードは H_1+H_2 の値が既に決っており、他の温度における材料定数を手順(2)~(6)により定める場合に H_1+H_2 の値を入力する。従って、 H_1+H_2 の値を手順(1)により決める場合はこのカードを入力してはならない。

○モデル定数決定プログラムフローチャート



○各副プログラムの機能

	ル-チン名	機 能		
M	OMAT	モデル定数決定プログラムメインルーチン		
S	TPRM1	実験式における温度依存パラメータの設定1		
S	TPRM2	実験式における温度依存パラメータの設定2		
S	YE304	ヤング率の設定		
S	EPRAN	繰返しひずみ範囲より対応する塑性ひずみ範囲を設定する		
S	GETKPL	手順(2) (H_1+H_2) を決定する	手順(0)~(6)の場合	
S	GETKP2	入力された (H_1+H_2) を設定する	手順(3)~(6)の場合	
S	GETA	手順(3) A を決定する		
S	GETKSO	手順(4) κ^* を決定する		
S	GETML	手順(5) $m, (L)$ を決定する		
S	NLIT	セカント法による方程式の求解		
S	REGLIN	シンプレックス法による関数の極小化		
S	GETA	手順(3) A を決定する		
F	FUNCCH	手順(3)における Φ_3 関数		
F	FUNCCM	手順(4)における Φ_4 関数		
F	FUNCCC	手順(5)における Φ_5 関数		
F	ASGM	単調応力ひずみ関係	$\sigma_m(\epsilon^p)$	解 析 解
F	ADLSGM	繰返し応力ひずみ(範囲)関係	$\Delta\sigma_m(\Delta\epsilon^p)$	
F	ASGMD	繰返し応力ひずみヒステリシスループ	$\sigma'_m(\epsilon^{p'}, \Delta\epsilon^p)$	
F	ESGM	単調応力ひずみ関係	$\sigma_{ex}(\epsilon^p)$	実 験 式
F	EDLSGM	繰返し応力ひずみ(範囲)関係	$\Delta\sigma_{ex}(\Delta\epsilon^p)$	
F	ESGMST	繰返し応力ひずみヒステリシスループ	$\sigma'_{ex}(\epsilon^{p'}, \Delta\epsilon^p)$	
F	FSGM	単調応力の関数	繰返しひずみ範囲より対応する 塑性ひずみ範囲を求めるのに用いる	
F	FDLSGM	繰返し応力の関数		

第一列の記号はM:メインルーチン, S:サブルーチン, F:ファンクションを意味する。

○共通ブロック, 変数名

/VALUE/ AKPO, AA, AKPSO, AL, AM, AK, AC, AKPL

大野・加智・村上モデルのモデル定数

AKPO ; κ_{10}

AA ; A

AKPSO ; κ_{10}^*

AL ; L

AM ; m

AK ; K

AC ; C

AKPL ; K+L

/TPARM/ TE, TSIGY, TKS, TMS, TSIGP, TAO, TA1, TM, TK

実験式中の温度依存パラメータ (単位は、kg, mm, °C)

TE ; E

TSIGY ; σ_y TKS ; K^* TMS ; m^* TSIGP ; σ_F TAO ; A_0 TA1 ; A_1

TM ; m

TK ; K

/WT/ WW(3)

Φ関数についての積分の重み (今回の手法では1.0に固定)

/RANGE/ DLEP(3), IDIV(3)

繰り返し塑性ひずみ範囲と積分のサンプル点数, 添字, 1~3は各々単調, 繰り返し, 繰り返しヒステリシスループを示す。

/RANGE0/ DLE

繰り返しひずみ範囲

/TEMP/ TEM

温度

モデル定数決定プログラムソースリスト

```

PROGRAM QMAT
C .....
C MODEL CONSTANTS DETERMINATION PROGRAM FOR NONLINEAR CYCLIC
C   HARDENING MODEL USING NONHARDENING STRAIN REGION
C .....
C           WRITTEN BY K. SARATANI, ON AUG. 1983
C .....
C   ... IN THIS PROGRAM FOLLOWING EXPRESSION USED ...
C           H1 = K , H2 = L
C .....
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C
COMMON /VALUE/ AKPO, AA, AKPSO, AL, AM, AK, AC, AKPL
COMMON /TPARM/ TE, TSIGY, TKS, TMS, TSIGP, TAO, TAI, TW, TK
COMMON /WT/   WW(S)
COMMON /RANGE/ DLEP(S), (DIV(S))
COMMON /RANGE0/ DLE
COMMON /TEMP/ TEM
C
DATA IUN / 5 /
C
C           .. ASSUME 'C' VALUE FOR CALCULATION
C   AC = 0.01
C
C ***** DATA INPUT   T: TEMP , ALX: 'L'-VALUE , DLE: CYCLIC STRAIN RANGE
C                       AND 'K' + 'L' VALUE
C
READ(IUN, 501) T, ALX, DLE
501 FORMAT(2F10.0)
C
C           .. ITYPE=1:STEP1 TO 6
C           .. ITYPE=2:STEP3 TO 6 (K+L GIVEN)
C
ITYPE = 1
READ(IUN, 501, END=9) AKPLX
ITYPE = 2
9 CONTINUE
C
IF ((T.LT.0.0).OR.(T.GT.350.0)) THEN
WRITE(6, 9010) T
STOP
ENDIF
C
IF (ALX.EQ.0.0) ALX = 200.000
IF (ALX.LT.0.0) THEN
WRITE(6, 9020) ALX
STOP
ENDIF
C
IF (DLE.EQ.0.0) DLE = 0.0200
IF (AC.LT.0.0) THEN
WRITE(6, 9030) DLE
STOP

```

```

ENDIF
C
C ***** TITLE
C
WRITE(6, '(1H, A, 4//)')
+ '***** MATERIAL CONSTANTS FOR OHNO-KACH-MURAKAMI MODEL'
+ '***** (REPORT-9 TYPE) MODIFIED MAT. DATA JULY 1983'
WRITE(6, '(1H, 5X, A30, F10.3)') TEMPERATURE = T
WRITE(6, '(1H, 5X, A20, F10.3)') C = AC
WRITE(6, '(1H, 5X, A30, F10.3)') CYCLIC STRAIN RANGE = DLE
C
C ***** SET TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETERS FOR EXPERIMENTAL DATA
C   AND CALCULATE PLASTIC STRAIN RANGE
C
TEM = T
C
CALL TPRM1(T)
CALL EPRAN
DLEPD = DLEP(S)
CALL TPRM2(T, DLEPD)
C
C ***** STEP:1 GET 'KAPPA*0' FROM MON. STRESS WHERE P. STRAIN IS 'EPSKP0'
C
EPSKP0 = 0.00005
C
AKPO = ESMG(TKS, TMS, TSIGP, EPSKP0)
WRITE(6, '(1H0, 3X, A, A, F10.5, A)')
+ '*** STEP 1: (KPO) IS MONOTONIC STRESS WHERE'
+ 'PLASTIC STRAIN = ' EPSKP0, ' ***'
WRITE(6, '(1H0, 5X, A22, 2F15.3//)')
+ ' > CALCULATED (KPO) = ' AKPO
C
C ***** STEP:2 GET 'K'+ 'L' FROM TANGENT OF CYCLIC HYSTERESIS LOOP
C
IF (ITYPE.EQ.1) THEN
CALL GETKPL
ELSE
CALL GETKPL2(AKPLX)
ENDIF
C
C ***** STEP:3 GET 'A' FROM CYCLIC HYSTERESIS LOOP
C
CALL GETA
C
C ***** STEP:4 GET 'KAPPA*0' FROM MONOTONIC S-S CURVE
C
CALL GETKSO
C
C ***** STEP:5 GET 'M' FROM CYCLIC S-S CURVE AND CAL. 'L'
C

```

```

C      CALL GETML
C
C ***** STEP:5 MODIFY 'M' WHEN THE VALUE EXCEED 1.0
C
C      IF (AM.GT.1.0) THEN
C          AM = 1.0
C          DLEPX = DLEP(2)
C          DLEPX2 = DLEP(2)/2.0
C
C          ***** THROU P POINT CONDITION USED
C          AKST = EDLSGM(TAO, TAL, TSIGP, DLEPX)/2.0 + AKPL/AA
C          - AKPL * DLEPX2
C          ALC = ((AKST/AKPSO)**(1.0/AM)-1.0) * AM*AKPSO /DLEPX2
C          AL = ALC * AC
C
C          WRITE(6, '(1H0, 3X, A)') ***** FIX (M) TO 1.0 ***
C          WRITE(6, '(1H0, 5X, A22, F15.3)') > MODIFIED (M) = ,AM
C          WRITE(6, '(1H, 5X, A22, F15.3, A)') CALCULATED (L) = ,AL
C
C          (C=0.01)
C
C      ENDIF
C
C      AK = AKPL - AL
C
C ***** PRINT OUT
C
C      *WRITE(6, '(1H0, A, F8.2, A, F6.0)')
C      *//// OPTIMIZED MATERIAL CONSTANTS (L='ALX') // F='F
C      WRITE(6, '(1H, 3X, A14, F12.2)') ** KAPPA0 = ,AKPO
C      WRITE(6, '(1H, 3X, A14, F10.0)') ** A = ,AA
C      WRITE(6, '(1H, 3X, A14, F12.2)') ** KAPPA*0 = ,AKPSO
C      WRITE(6, '(1H, 3X, A14, F11.1)') ** H1(K) = ,AKPL-ALX
C      WRITE(6, '(1H, 3X, A14, F11.1)') ** H2(L) = ,ALX
C      WRITE(6, '(1H, 3X, A14, F14.4)') ** M = ,AM
C      WRITE(6, '(1H, 3X, A14, F15.5)') ** C = ,ALX/(AL/AC)
C
C      IF (ITYPE.EQ.1) THEN
C          WRITE(6, '(1H0, 3X, A14, 3PE15.8)') ** K + L = ,AKPL
C      ELSE
C          WRITE(6, '(1H0, 3X, A14, 3PE15.8, A)') ** K + L = ,AKPL (GIVEN)
C      ENDIF
C      WRITE(6, '(1H, 3X, A14, 2PE15.5)') ** L / C = ,AL/AC
C
C      STOP
C      9010 FORMAT(1H0, ' *** MAIN : ILLEGAL INPUT DATA T = ,E15.7)
C      9020 FORMAT(1H0, ' *** MAIN : ILLEGAL INPUT DATA ALX = ,E15.7)
C      9030 FORMAT(1H0, ' *** MAIN : ILLEGAL INPUT DATA DLE = ,E15.7)
C      END
C      FUNCTION ADLSGM(XKS, AA, XKPS, AKPO, DLEP)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C GET ANALITICAL CYCLIC STRESS AT GIVEN CYCLIC PLASTIC STRAIN
C BY OHNO-MURAKAMI MODEL
C (SIGMA-DASH)-(EPSILON-P-DASH) RELATION EQ.(5.3)
C WRITTEN BY K.GARATANI ON MAY. 08 1987
C *INPUT VARIABLES
C XKS : 'KS'-VALUE (FUNCTION OF 'DLEP')
C AA : MATERIAL PARAMETER 'A'
C XKPS : 'KAPPA-STAR' VALUE (FUNCTION OF 'DLEP')
C AKPO : INITIAL RADIUS OF YIELD SURFACE
C DLEP : CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE (DELTA-DLEP)
C
C *VALUE OF FUNCTION
C CYCLIC STRESS
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C ADLSGM=2.0*(2.0*AKPO-AA*DLEP+(AKPS-XKS*DLEP/2.0-2.0*AKPO-XKS-AA)*
C * (1.0-EXP(-AA*DLEP)))/(1.0+EXP(-AA*DLEP))
C
C RETURN
C END
C FUNCTION ASGM(AKPL, AA, AKPSO, AKPO, EP)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C GET ANALITICAL MONOTONIC STRESS AT GIVEN PLASTIC STRAIN
C BY OHNO-MURAKAMI MODEL EQ.(5.6)
C WRITTEN BY K.GARATANI ON MAY. 08 1987
C *INPUT VARIABLES
C AA : MATERIAL PARAMETERS 'A'
C AKPL : MATERIAL PARAMETERS 'K'-'L'
C AKPO : INITIAL RADIUS OF YIELD SURFACE
C AKPSO : INITIAL RADIUS OF LIMIT SURFACE
C EP : PLASTIC STRAIN
C
C *VALUE OF FUNCTION
C MONOTONIC STRESS
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C A S G M = (AKPL)*EP+((AKPSO-AKPO)-(AKPL)/AA)*
C * (1.0-EXP(-AA*EP))+AKPO
C
C RETURN
C END
C FUNCTION ASGMD(FKS, AA, FKPS, AKPO, EPSP, DLEP, DLSGM)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C GET ANALITICAL CYCLIC HYSTERESIS STRESS AT GIVEN PLASTIC STRAIN
C BY OHNO-MURAKAMI MODEL
C (SIGMA-DASH)-(EPSILON-P-DASH) RELATION EQ.(5.3)
C WRITTEN BY K.GARATANI ON MAY. 08 1987
C *INPUT VARIABLES
C FKS : 'KS'-VALUE (FUNCTION OF CYCLIC P. STRAIN RANGE)

```

```

C      AA      : MATERIAL PARAMETER 'A'
C      FKPS    : RADIUS OF LIMIT SURFACE WHEN SATURATED
C      FKPS    : 'KAPPA-STAR' VALUE
C              (FUNCTION OF CYCLIC P. STRAIN RANGE)
C      AKPO    : INITIAL RADIUS OF YIELD SURFACE
C      EPSP    : PLASTIC STRAIN
C      DLEP    : CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE
C      DLSGM   : STRESS RANGE CORRESPONDING TO 'DLEP'
C
C *VALUE OF FUNCTION
C   CYCLIC HYSTERESIS STRESS
C
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C   ASGMD=2.0*AKPO+FKS*EPSP+(FKPS-FKS*DLEP/2.0+DLSGM/2.0-2.0*AKPO-
C   - FKS/AA)*(1.0-EXP(-AA*EPSP))
C
C   RETURN
C   END
C   FUNCTION EDLSGM(TAO,TAI,TSIGP,DLEP)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C   GET EXPERIMENTAL CYCLIC STRESS AT GIVEN PLASTIC STRAIN RANGE
C   (DELTA-SIGMA)-(DELTA-EPSP) RELATION << CURVE (B) >> FROM P.N.C.
C   WRITTEN BY K.GARATANI ON MAY. 08 1987
C
C *INPUT VARIABLES
C   TAO,TAI,TSIGP : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETERS
C   DLEP          : CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE
C
C *VALUE OF FUNCTION
C   CYCLIC STRESS (DELTA-SIGMA)
C
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C   E D L S G M = (10.000**TAO)*(DLEP**TAI) + 2.0*TSIGP
C
C   RETURN
C   END
C   SUBROUTINE EPRAN
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C   CALCULATE CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE FROM CYCLIC TOTAL STRAIN RANGE
C   WRITTEN BY K.GARATANI ON MAY. 08 1987
C
C *INPUT VARIABLES
C   DLE /RANGE/ : CYCLIC TOTAL STRAIN RANGE
C   * /TRARM/ : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETERS
C
C *OUTPUT VARIABLES
C   DLEP(1) /RANGE/ : MONOTONIC PLASTIC STRAIN RANGE
C   DLEP(2) /RANGE/ : CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE
C   DLEP(3) /RANGE/ : CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE
C
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

```

```

EXTERNAL FSGM,FDSLGM
C
COMMON /TPARM/ TE,TSIGY,TKS,TMS,TSIGP,TAO,TAI,TM,TK
COMMON /RANGE/ DLEP(3),IDIV(3)
COMMON /RANGE0/ DLE
C
C ***** EPS IS TOLERANCE , ITEND IS MAX ITERATION
C
C   EPS = 1E-4
C   ITEND = 1000
C
C ***** CAL. PLASTIC STRAIN
C   ** FOR MONOTONIC **
C   X1 = TSIGY
C   X2M = TSIGY-1.0
C
C   CALL NLIT(X1,X2M,FSGM,EPS,ITEND,ITER)
C
C   ** FOR CYCLIC **
C   X1 = TSIGY
C   X2C = TSIGY+1.0
C
C   CALL NLIT(X1,X2C,FDSLGM,EPS,ITEND,ITER)
C
C ***** SET VALUES
C
C   DLEP(1) = DLE/2.0-X2M/TE
C   DLEP(2) = DLE -X2C/TE
C   DLEP(3) = DLEP(2)
C
C   RETURN
C   END
C   FUNCTION ESGM(TKS,TMS,TSIGP,EP)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C   GET EXPERIMENTAL MONOTONIC STRESS AT GIVEN PLASTIC STRAIN
C   << CURVE (A) >> FROM P.N.C.
C   WRITTEN BY K.GARATANI ON MAY. 08 1987
C
C *INPUT VARIABLES
C   TKS,TMS,TSIGP : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETERS
C   EP            : PLASTIC STRAIN
C
C *VALUE OF FUNCTION
C   MONOTONIC STRESS
C
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C   E S G M = TKS*(EP**TMS)+TSIGP
C
C   RETURN
C   END

```

```

FUNCTION ESGMST(TK, TM, TSIGP, EPST)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C GET EXPERIMENTAL CYCLIC HYSTERESIS STRESS AT GIVEN PLASTIC STRAIN
C (SIGMA-STAR)-(EPSILON-P-STAR) RELATION (( CURVE-(C) )) FROM P.N.C.
C WRITTEN BY K.GARATANI ON MAY 08 1987
C
C *INPUT VARIABLES
C TK, TM : PLSTIC STRAIN RANGE AND TEMPERATURE
C DEPENDENT PARAMETERS
C TSIGP : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETERS
C EPST : PLASTIC STRAIN
C
C *VALUE OF FUNCTION
C CYCLIC HYSTERESIS STRESS
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
C B S G M S T = TK *(EPST**TM ) + 2.0*TSIGP
C
C RETURN
C END
C FUNCTION FDLSGM(DLSCM)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C EXPERIMENTAL CYCLIC STRESS FUNCTION ( F(DLSCM) - DLSCM = 0 )
C WRITTEN BY K.GARATANI ON MAY 08 1987
C
C *INPUT VARIABLES
C DLSCM : CYCLIC STRESS RANGE (DELTA-SIGMA)
C TAO, TAI, TSIGP, TE, /TPARM/ : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETERS
C DLE /RANGE0/ : CYCLIC TOTAL STRAIN RANGE
C
C *EXTERNALS
C EDLSGM : EXPERIMENTAL CYCLIC STRESS
C
C *VALUE OF FUNCTION
C ERROR VALUE
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
C COMMON /TPARM/ TE, TSIGP, TKS, TMS, TSIGP, TAO, TAI, TM, TK
C COMMON /RANGE0/ DLE
C
C DLEP = DLE - DLSCM / TE
C F D L S G M = EDLSGM(TAO, TAI, TSIGP, DLEP) - DLSCM
C
C RETURN
C END
C FUNCTION FSGM(SGM)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C EXPERIMENTAL MONOTONIC STRESS FUNCTION ( F(SGM) - SGM = 0 )
C WRITTEN BY K.GARATANI ON MAY 08 1987
C
C *INPUT VARIABLES
C TKS, TMS, TSIGP /TPARM/ : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETERS

```

```

C DLE /RANGE0/ : CYCLIC TOTAL STRAIN RANGE
C *EXTERNALS
C ESGM : EXPERIMENTAL MONOTONIC STRESS
C *VALUE OF FUNCTION
C ERROR VALUE
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
C COMMON /TPARM/ TE, TSIGP, TKS, TMS, TSIGP, TAO, TAI, TM, TK
C COMMON /RANGE0/ DLE
C
C EP = DLE/2.0 - SGM/TE
C F S G M = ESGM(TKS, TMS, TSIGP, EP) - SGM
C
C RETURN
C END
C FUNCTION FUNCC(X)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C CALCULATE INTEGRATION VALUE BETWEEN EXPERIMENTAL AND ANALITICAL
C STRESS (FOR SLS-304 BY P.N.C.)
C FOR REPORT-7 'HOW TO DECIDE MATERIAL CONSTANT' STEP 1
C CYCLIC S-S CURVE
C WRITTEN BY K.GARATANI ON SEP. 14 1987
C
C *INPUT VARIABLES
C X(3) ARG. : VALUES TO BE OPTIMIZE
C * /VALUE/ : MATERIAL CONSTANT AT ANALITICAL EXPRESSION
C * /TPARM/ : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETER FOR EXPERIMENT
C ** (1) /WT/ : WEIGHT FOR EACH VALUE
C DLEP(1)/RANGE/ : CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE (DELTA-EPSILON-P)
C IDIV(1)/RANGE/ : DIVIDE NUMBER FOR INTEGRATION
C WHERE I=1 : MONOTONIC
C I=2 : CYCLIC
C I=3 : CYCLIC HYSTERESIS
C
C *VALUE OF FUNCTION
C INTEGRATION VALUE BETWEEN EXPERIMENTAL AND ANALITICAL STRESS
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
C DIMENSION X(1)
C COMMON /VALUE/ AKPO, AA, AKPSO, AL, AM, AN, AC, AKPL
C COMMON /TPARM/ TE, TSIGP, TKS, TMS, TSIGP, TAO, TAI, TM, TK
C COMMON /WT/ ** (3)
C COMMON /RANGE/ DLEP(3), IDIV(3)
C COMMON /TEMP/ TEM
C
C ***** SET OPTIMIZE VALUES
C
C AM = X(1)
C
C * * * CAL. INTEGRATION VALUE-I FOR MONOTONIC STRESS PASSED

```

```

C
C ***** CAL. INTEGRATION VALUE-2 FOR CYCLIC STRESS
C
C
C
DEPSP = DLEP(2)/IDIV(2)
EPSP = DEPSP/2.0
SS = 0.0
C
DLEPX = DLEP(2)
DLEPX2 = DLEP(2)/2.0
C
DO 200 I=1, IDIV(2)
C
C          +---+ THROU P POINT CONDITION USED
AKST = EDLSGM(TAO, TAL, TSIGP, DLEPX)/2.0 + AKPL/AA
+
- AKPL * DLEPX2
ALC = ((AKST/AKPSO)**(1.0/AM)-1.0) * AM*AKPSO /DLEPX2
AL = ALC * AC
C
XQS = EPSP/2.0/AC
AKPS = AKPSO*(1.0+AL*XQS/AM/AKPSO)**AM
C C C XKS = AK+AL*(1.0+AL*XQS/AM/AKPSO)**(AM-1.0) <== REPORT.5
XKS = AKPL
C
DIS = ADLSGM(XKS, AA, XKPS, AKPO, EPSP)
-EDLSGM(TAO, TAL, TSIGP, EPSP)
SS = SS+DIS**2
EPSP = EPSP + DEPSP
200 CONTINUE
C
VAL2 = SS * DLEP(2)
C
C ***** CAL. INTEGRATION VALUE-3 FOR CYCLIC HYSTERESIS ... PASSED
C
C ***** SUM UP
C
F U N C C = WW(2)*VAL2
C
RETURN
END
FUNCTION FUNCCH(X)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C CALCULATE INTEGRATION VALUE BETWEEN EXPERIMENTAL AND ANALITICAL
C STRESS (FOR SUS-304 BY P. N. C.)
C FOR REPORT-7 'HOW TO DECIDE MATERIAL CONSTANT' STEP 3
C CYCLIC HYSTERESIS LOOP, USED RANGE 0.05*DLEP(3) TO DLEP(3)
C WRITTEN BY K.GARATANI ON SEP. 24 1987
C
C *INPUT VARIABLES
C X(J) ARG. : VALUES TO BE OPTIMIZE
C * /VALUE/ : MATERIAL CONSTANT AT ANALITICAL EXPRESSION

```

```

C
C * /TPARAM/ : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETER FOR EXPERIMENT
C WW(1) /WT/ : WEIGHT FOR EACH VALUE
C DLEP(1)/RANGE/ : CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE (DELTA-EPSILON-P)
C IDIV(1)/RANGE/ : DIVIDE NUMBER FOR INTEGRATION
C
C *HERE I=1 : MONOTONIC
C I=2 : CYCLIC
C I=3 : CYCLIC HYSTERESIS
C
C *VALUE OF FUNCTION
C INTEGRATION VALUE BETWEEN EXPERIMENTAL AND ANALITICAL STRESS
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C DIMENSION X(1)
C COMMON /VALUE/ AKPO, AA, AKPSO, AL, AM, AK, AC, AKPL
C COMMON /TPARM/ TE, TSIGY, TKS, TMS, TSIGP, TAO, TAL, TM, TK
C COMMON /WT/ WW(3)
C COMMON /RANGE/ DLEP(3), IDIV(3)
C COMMON /TEMP/ TEM
C
C ***** SET OPTIMIZE VALUES
C
C AA = X(1)
C
C * * * CAL. INTEGRATION VALUE-1 FOR MONOTONIC STRESS ... PASSED
C * * * CAL. INTEGRATION VALUE-2 FOR CYCLIC STRESS ... PASSED
C
C ***** CAL. INTEGRATION VALUE-3 FOR CYCLIC HYSTERESIS
C
C
C -----
C
C DLEPX = DLEP(3)
C
C
C          +---+ INTEGRATION RANGE 0.05 TO 1.0
DEPSP = 0.0500*DLEPX /IDIV(3)
EPSP = DLEPX*0.0500 + DEPSP/2.0
SS = 0.0
C
C C C FQS = DLEPX /2.0/AC
C C C FKPS = AKPSO*(1.0+AL*FQS/AM/AKPSO)**AM <== REPORT-5
C
C          +---+ THROU P POINT CONDITION USED
DLEPX2 = DLEPX/2.0
FKPS = EDLSGM(TAO, TAL, TSIGP, DLEPX)/2.0 + AKPL/AA
+
- AKPL * DLEPX2
C C C FKS = AK+AL*(1.0+AL*FQS/AM/AKPSO)**(AM-1.0) <== REPORT-5
C
C          +---+ REPORT-7 TYPE
FKS = AKPL
DLSGM = EDLSGM(TAO, TAL, TSIGP, DLEPX)
C
DO 340 I=1, IDIV(3)
C
DIS = ASGMD(FKS, AA, FKPS, AKPO, EPSP, DLEPX, DLSGM)

```

```

      -ESGMST(TK, TM, TSI GP, EPSP)
      SS = SS+DIS**2
      EPSP = EPSP + DEPSP
340 CONTINUE
C
      VAL3 = SS * DLEPX
C
C ***** SUM UP
C
      F U N C C H = ***(3)*VAL3
C
      RETURN
      END
      FUNCTION FUNC(X)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C CALCULATE INTEGRATION VALUE BETWEEN EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL
C STRESS (FOR SUS-304 BY P. N. C.)
C FOR REPORT-7 'HOW TO DECIDE MATERIAL CONSTANT' STEP 4
C MONOTONIC S-S CURVE
C WRITTEN BY K. GARATANI ON SEP. 24 1987
C *INPUT VARIABLES
C X(I) ARG. : VALUES TO BE OPTIMIZE
C * /VALUE/ : MATERIAL CONSTANT AT ANALYTICAL EXPRESSION
C * /TPARM/ : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETER FOR EXPERIMENT
C WW(I) /WT/ : WEIGHT FOR EACH VALUE
C DLEP(I)/RANGE/ : CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE (DELTA-EPSILON-P)
C IDIV(I)/RANGE/ : DIVIDE NUMBER FOR INTEGRATION
C #HERE I=1 : MONOTONIC
C I=2 : CYCLIC
C I=3 : CYCLIC HYSTERESYS
C *VALUE OF FUNCTION
C INTEGRATION VALUE BETWEEN EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STRESS
C
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION X(1)
      COMMON /VALUE/ AKPO, AA, AKPSO, AL, AM, AK, AC, AKPL
      COMMON /TPARM/ TE, TSI GY, TKS, TMS, TSI GP, TAG, TAL, TM, TK
      COMMON /WT/ WW(3)
      COMMON /RANGE/ DLEP(3), IDIV(3)
      COMMON /TEMP/ TEM
C
C ***** SET OPTIMIZE VALUES
C
      AKPSO = X(1)
C
C ***** CAL. INTEGRATION VALUE-1 FOR MONOTONIC STRESS
C
      DEPSP = DLEP(1)/IDIV(1)

```

```

      EPSP = DEPSP/2.0
      SS = 0.0
C
      DO 100 I=1, IDIV(1)
      DIS = ASGM(AKPL, AA, AKPSO, AKPO, EPSP)
      -ESGM(TKS, TMS, TSI GP, EPSP)
      SS = SS+DIS**2
      EPSP = EPSP - DEPSP
100 CONTINUE
C
      VAL1 = SS * DLEP(1)
C
C * * * CAL. INTEGRATION VALUE-2 FOR CYCLIC STRESS ..... PASSED
C
C * * * CAL. INTEGRATION VALUE-3 FOR CYCLIC HYSTERESIS ..... PASSED
C
C ***** SUM UP
C
      F U N C M = ***(1)*VAL1
C
      RETURN
      END
      SUBROUTINE GETA
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C OPTIMIZE 'A' VALUE FROM CYCLIC HYTERESYS LOOP
C FOR REPORT-7 'HOW TO DECIDE MATERIAL CONSTANT' STEP 2.
C (PLASTIC STRAIN RANGE IS DLEP(3)*0.05 TO DLEP(3) IN SUB. FUNCCH)
C WRITTEN BY K. GARATANI ON SEP. 24 1987
C *INPUT VARIABLES
C * /TPARM/ : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETERS
C DLEP(3) /RANGE/ : CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE (SAME TO DLEP(2))
C DLE /RANGE/ : CYCLIC STRAIN RANGE
C AKPO /VALUE/ : KAPPA-0 VALUE (DECIDED IN STEP 1)
C AKPL /VALUE/ : 'K' + 'L' VALUE (DECIDED IN STEP 2)
C *OUTPUT VARIABLES
C AA /VALUE/ : OPTIMIZED 'A' VALUE
C
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      PARAMETER (NPA= 1)
C
      EXTERNAL FUNCCH
C
      COMMON /VALUE/ AKPO, AA, AKPSO, AL, AM, AK, AC, AKPL
      COMMON /TPARM/ TE, TSI GY, TKS, TMS, TSI GP, TAG, TAL, TM, TK
      COMMON /WT/ ***(3)
      COMMON /RANGE/ DLEP(3), IDIV(3)
      COMMON /RANGE/ DLE
      COMMON /TEMP/ TEM

```

```

C
C   DIMENSION X(NPA,NPA+1),XMIN(NPA),
+           ALPHA(3),EPS(2)
C
C ***** SET INTEGRATION DIVISION AND WEIGHT FOR EACH EQ.
C           ** MONOTONIC **
C   IDIV(1) = 0
C   WW (1) = 0.0
C           ** CYCLIC **
C   IDIV(2) = 0
C   WW (2) = 0.0
C           ** CYCLIC HYSTERESIS **
C   IDIV(3) = 100
C   WW (3) = 1.0
C
C ***** INITIAL VALUES FOR OPTIMIZE
C
C   X(1,1) = 1000.0
C
C   X(1,NPA+1) = X(1,1)/11.0
C
C ***** CONTROL PARAMETERS FOR SUB.SIPLX
C   ... TOLERANCE ...
C   EPS(1)=1.0E-5
C   EPS(2)=1.0E-5
C   ... MAX. CALL ...
C   ITR=1000
C
C   N=NPA
C   M=NPA
C
C   ALPHA(1)=0.0
C   ALPHA(2)=0.0
C   ALPHA(3)=0.0
C
C   MIN=0
C
C ***** CALL SIMPLEX
C
C   CALL SIPLX(FUNCCH,X,N,M,ALPHA,EPS,MIN,ITR,XMIN,FMIN,IER)
C
C ***** PRINT OUT
C
C   WRITE(6, '(1H, 3X, A)')
+   *** STEP 3: OPTIMIZE (A) FROM CYCLIC HYTERESYS LOOP ***
C   WRITE(6, '(1H, 5X, A20, F10. 3, IPE15. 6)')
+   WEIGHT AND DLEPS : WW(3), DLEP(3)
C   WRITE(6, '(1H, 5X, A, A/)') SIMPLEX METHOD ...
+   (HYSTERESIS LOOP) USED THROU P POINT CONDITION
C   WRITE(6, '(1H, 7X, 5(A5, 15, 3X)')

```

```

C
C   N=NPA, M=NPA, ITR=ITR, IER=IER
C   WRITE(6, '(1H, 10X, 2H( 13, 2H ), 5X, IPE15. 5)') (1,XMIN(1),I=1,N)
C   WRITE(6, '(1H, 10X, A, IPE15. 5)') MIN. VALUE = FMIN
C   WRITE(6, '(1H, 5X, A22, 2F15. 3//)')
+   > OPTIMIZED (A) = .AA
C
C   RETURN
C   END
C   SUBROUTINE GETEPE(AKPLX)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C   SET 'K' = 'L' VALUE
C
C WRITTEN BY K.GARATANI ON AUG. 04 1989
C
C *INPUT VARIABLES
C   AKPLX D. ARG. : INPUTED 'K' + 'L' VALUE
C *OUTPUT VARIABLES
C   AKPL /VALUE/ : 'K' + 'L' VALUE
C
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C   COMMON /VALUE/ AKPO, AA, AKPSO, AL, AM, AN, AC, AKPL
C
C ***** SET VALUE
C
C   AKPL = AKPLX
C
C ***** PRINT OUT
C
C   WRITE(6, '(1H, 3X, A)')
+   *** STEP 2: SET (K+L) VALUE FROM INPUT ***
C   WRITE(6, '(1H, 5X, A22, 2F15. 3//)')
+   > SETED (K+L) = AKPL
C
C   RETURN
C   END
C   SUBROUTINE GETKPL
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C   CALCULATE TANGENT OF EXPERIMENTAL CYCLIC HYTERESYS LOOP (AKPL)
C   FOR REPORT-7 'HOW TO DECIDE MATERIAL CONSTANT' STEP 2.
C   (PLASTIC STRAIN RANGE IS DLEP(3)/2 TO DLEP(3))
C
C WRITTEN BY K.GARATANI ON SEP. 24 1987
C
C *INPUT VARIABLES
C   * /TRARM/ : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETERS
C   DLEP(3) /RANGE/ : CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE (SAME TO DLEP(2))
C *OUTPUT VARIABLES
C   AKPL /VALUE/ : 'K' + 'L' VALUE
C
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C   PARAMETER (NSPA = 200)
C
C   COMMON /TPARM/ TE, TSIQY, TKS, TMS, TSIQP, TAO, TAI, TM, TT
C   COMMON /RANGE/ DLEP(3), IDIV(3)

```



```

COMMON /VALUE/ AKPO, AA, AKPS0, AL, AM, AK, AC, AKPL
C
DIMENSION EP(NSPA), SGMCH(NSPA)
C
DATA NSAMP / 101 /
C
C ***** SET SAMPLING PLASTIC STRAIN VALUE
C          (PLASTIC STRAIN RANGE IS DLEP(3) TO DLEP(3))
C
EPSP = DLEP(3)/2.0
DEPSP = (DLEP(3)-EPSP)/(NSAMP-1)
DO 10 I=1, NSAMP
  EP(I) = EPSP
  EPSP = EPSP + DEPSP
10 CONTINUE
C
C ***** GET EXPERIMENTAL CYCLIC HYSTERESIS LOOP STRESS
C
DO 20 I=1, NSAMP
  SGMCH(I) = ESO MST(TK, TM, TSIQP, EP(I))
20 CONTINUE
C
C ***** CAL. REGRESSION LINE
C
CALL REGLIN(EP, SGMCH, NSAMP, XM, XBH)
C
C ***** SET VALUE
C
AKPL = XM
C
C ***** PRINT OUT
C
WRITE(6, '(1H0, 3X, A)')
+   *** STEP 2: CALCULATE (K+L) FROM CYCLIC HYSTERESIS LOOP ***
WRITE(6, '(1H0, 5X, A, 1PE15.6, A4, 1PE15.6//)')
+   PLASTIC STRAIN RANGE , EP(1), TO , EP(NSAMP)
WRITE(6, '(1H , 5X, A22, 2F15.3//)')
+   > CALCULATED (K+L) = , AKPL
RETURN
END
SUBROUTINE GETXS0
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C OPTIMIZE 'KAPPA-STAR-0' VALUE FROM CYCLIC HYSTERESIS LOOP
C FOR REPORT-7 'HOW TO DECIDE MATERIAL CONSTANT' STEP 4.
C          WRITTEN BY K. GARATANI ON SEP. 24 1987
C
C #INPUT VARIABLES
C * /TRARW/ : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETERS
C DLEP(1) /RANGE/ : MONOTONIC PLASTIC STRAIN RANGE
C AKPO /VALUE/ : KAPPA-0 VALUE (DECIDED IN STEP 1)

```

```

C AKPL /VALUE/ : 'K+L' VALUE (DECIDED IN STEP 2)
C AA /VALUE/ : 'A' VALUE (DECIDED IN STEP 3)
C #OUTPUT VARIABLES
C AKPS0 /VALUE/ : OPTIMIZED 'KAPPA-STAR-0' VALUE
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
PARAMETER (NSPA= 1)
C
EXTERNAL FUNCN
C
COMMON /VALUE/ AKPO, AA, AKPS0, AL, AM, AK, AC, AKPL
COMMON /TPARM/ TE, TSIQY, TKS, TMS, TSIQP, TAO, TAI, TM, TA
COMMON /WT/ WW(3)
COMMON /RANGE/ DLEP(3), IDIV(3)
COMMON /RANGE2/ DLE
COMMON /TEMP/ TEM
C
DIMENSION X(NSPA, NSPA+1), YMIN(NSPA),
+          ALPHA(3), EPS(2)
C
C ***** SET INTEGRATION DIVISION AND #RIGHT FOR EACH EQ.
C          ** MONOTONIC **
IDIV(1) = 100
WR (1) = 1.0
C          ** CYCLIC **
IDIV(2) = 0
WR (2) = 0.0
C          ** CYCLIC HYSTERESIS **
IDIV(3) = 0
WR (3) = 0.0
C
C ***** INITIAL VALUES FOR OPTIMIZE
C
X(1, 1) = 11.0
X(1, NSPA+1) = X(1, 1)/10.0
C
C ***** CONTROL PARAMETERS FOR SUB. SIPLA
C ... TOLERANCE ...
EPS(1)=1.0E-5
EPS(2)=1.0E-5
C ... MAX. CALL ...
ITR=1000
C
N=NSPA
M=NSPA
C
ALPHA(1)=0.0
ALPHA(2)=0.0

```

```

      ALPHA(3)=0.0
C
      MIN=0
C
C ***** CALL SIMPLEX
C
      CALL SIPLX(FUNCM, X, N, M, ALPHA, EPS, MIN, ITR, XMIN, FMIN, IER)
C
C ***** PRINT OUT
C
      *WRITE(6, '(1H0, 3X, A)')
      +   *** STEP 4: OPTIMIZE (KPS0) FROM MONOTONIC S-S CURVE ***
      WRITE(6, '(1H0, 5X, A20, F10.3, IPE15.6)')
      +   WEIGHT AND DLEP1 ' , ***(1), DLEP(1)
      WRITE(6, '(1H0, 5X, A, A/)') ' ..... SIMPLEX METHOD .....
      +   (MONOTONIC)
      WRITE(5, '(1H , 7X, 5(A5, 15, 2X))')
      +   N=' , N, ' M=' , M, ' ITR=' , ITR, ' IER=' , IER
      WRITE(6, '((1H , 10X, 2H( , 13, 2H ) , 5X, IPE15.6)') (1, XMIN(i), i=1, N)
      WRITE(6, '(1H , 10X, A, IPE15.6)') 'MIN. VALUE = ' , FMIN
      WRITE(6, '(1H0, 5X, A22, 2F15.3//)')
      +   > OPTIMIZED (KPS0) = ' , AKPS0
      RETURN
      END
      SUBROUTINE GETML
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C   OPTIMIZE CYCLIC HARDENING CONSTANT 'M' , 'L' FROM CYCLIC S-S CURVE
C   FOR REPORT-7 'HOW TO DECIDE MATERIAL CONSTANT' STEP 5.
C   ('L/C' IS THE FUNCTION OF 'M' BY THROU P POINT CONDITION
C   AND 'C' IS GIVEN , SO OPTIMIZE ONLY 'M' )
C   WRITTEN BY K. GARATANI ON SEP. 24 1987
C
C *INPUT VARIABLES
C   *   /TRARM/ : TEMPERATURE DEPENDENT PARAMETERS
C   DLEP(1) /RANGE/ : MONOTONIC PLASTIC STRAIN RANGE
C   AKPO   /VALUE/ : KAPPA-0 VALUE (DECIDED IN STEP 1)
C   AKPL   /VALUE/ : 'K'+ 'L' VALUE (DECIDED IN STEP 2)
C   AA     /VALUE/ : 'A' VALUE (DECIDED IN STEP 3)
C   AKPS0  /VALUE/ : 'K*-0' VALUE (DECIDED IN STEP 4)
C   AC     /VALUE/ : 'C' VALUE (INPGT)
C
C *OUTPUT VARIABLES
C   AM     /VALUE/ : OPTIMIZED 'M' PPA-STAR-0' VALUE
C   AL     /VALUE/ : OPTIMIZED 'L' PPA-STAR-0' VALUE
C
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      PARAMETER (NPA= 1)
C
      EXTERNAL FUNCC
C
      COMMON /VALUE/ AKPO, AA, AKPS0, AL, AM, AK, AC, AKPL

```

```

      COMMON /TPARM/ TE, TSIGY, TAs, TMS, TSIGP, IAO, IAI, IM, IA
      COMMON /WT/   ***(3)
      COMMON /RANGE/ DLEP(3), IDIV(3)
      COMMON /RANGE0/ DLE
      COMMON /TEMP/ TEM
C
      DIMENSION X(NPA, NPA+1), XMIN(NPA),
      +   ALPHA(3), EPS(2)
C
C ***** SET INTEGRATION DIVISION AND WEIGHT FOR EACH EQ.
C   ** MONOTONIC **
      IDIV(1) = 0
      ** (1) = 0.0
C   ** CYCLIC **
      IDIV(2) = 100
      ** (2) = 1.0
C   ** CYCLIC HYSTERESIS **
      IDIV(3) = 0
      ** (3) = 0.0
C
C ***** INITIAL VALUES FOR OPTIMIZE 'AM'
C
      X(1, 1) = 0.20
C
      X(1, NPA+1) = X(1, 1)/10.0
C
C ***** CONTROL PARAMETERS FOR SUB. SIPLX
C   ... TOLERANCE ...
      EPS(1)=1.0E-5
      EPS(2)=1.0E-5
C   ... MAX. CALL ...
      ITR=1000
C
      N=NPA
      M=NPA
C
      ALPHA(1)=0.0
      ALPHA(2)=0.0
      ALPHA(3)=0.0
C
      MIN=0
C
C ***** CALL SIMPLEX
C
      CALL SIPLX(FUNCC, X, N, M, ALPHA, EPS, MIN, ITR, XMIN, FMIN, IER)
C
C ***** PRINT OUT
C
      WRITE(6, '(1H0, 3X, A)')
      +   *** STEP 5: OPTIMIZE (M) FROM CYCLIC S-S CURVE ***

```

```

WRITE(6, '(1H, 5X, A20, F10.3, 1PE15.6)')
+      WEIGHT AND DLEP2 = WW(2), DLEP(2)
WRITE(6, '(1H, 5X, A, A/)') '..... SIMPLEX METHOD .....
+      (CYCLIC)
WRITE(6, '(1H, 7X, 5(A5, 15, 5X)) )
+      N=' N, ' M=' M, ' ITR=' ITR, ' IER=' IER
WRITE(6, '((1H, 10X, 2H(, 13, 2H), 5X, 1PE15.6)') (1, XMN(1), I=1, N)
WRITE(6, '(1H, 10X, A, 1PE15.6)') 'MIN. VALUE = ' FMIN
WRITE(6, '(1H, 5X, A22, F15.3)')
+      > OPTIMIZED (M) = 'AM
WRITE(6, '(1H, 5X, A22, F15.3, A/)')
+      CALCULATED (L) = 'AL' (C=0.01)
RETURN
END
SUBROUTINE NLIT(X1, X2, FUNC, EPS, ITEND, IER)
C
C..... THIS PROGRAM COPY FORM
C 'SUUCHIKAISEKI TO FORTRAN' DAI-3-PAN MARUZEN P470
C
CC DOUBLE PRECISION DX, DY
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
IER = 0
X = X1
Y1 = FUNC(X)
IF( Y1 ) 20, 10, 20
10 X2 = X1
GO TO 100
C
20 X = X2
Y2 = FUNC(X)
IF( Y2 ) 30, 100, 30
30 CONTINUE
C
DO 90 N=1, ITEND
IF( Y2-Y1 ) 55, 40, 55
40 Y = ABS(Y2)
IF( Y-1.0E-5 ) 100, 100, 50
50 IER = 2
WRITE(6, 620)
STOP
C
55 DY = Y2-Y1
DX = (X1-X2)*Y2
DX = DX/DY
X = X2+DX
Y1 = Y2
X2 = X
Y = FUNC(X)
IF( X ) 60, 70, 60
60 DX = DX/X

```

```

SX = DABS(DX)
IF( SX-EPS ) 70, 70, 30
70 Y = FUNC(X)
ABSY= ABS(Y)
IF( ABSY-1.0E-5 ) 100, 100, 30
30 Y1 = Y2
Y2 = Y
90 CONTINUE
IER = 1
WRITE(6, 610)
100 RETURN
610 FORMAT(1H, '(SUB. NLIT) REQUIRED ACCURACY IS NOT SATISFIED
+      AT APPPOINTED TIMES. )
620 FORMAT(1H, '(SUB. NLIT) ZERO DEVIDES ENCOUNTERED WITH CAL. )
C
C * IER = 0 : NORMAL TERMINATION
C * IER = 1 : NOT SATISFIED 'EPS'
C * IER = 2 : ZERO DEVIDES FOR Y2=Y1
C
END
SUBROUTINE REGLIN (X, Y, X, A, B)
C
C #PURPOSE OF THIS SUBROUTINE
C GET REGRESSION LINE << SAISHOU JIJYUO HOU >>
C WRITTEN BY K. GARATANI ON JULY 02 1987
C FROM 'TOUKEIGAKU' P117
C
C #INPUT VARIABLES
C X(I) ARG. : SAMPLING 'X' COORDINATES VALUE
C Y(I) ARG. : SAMPLING 'Y' COORDINATES VALUE
C N ARG. : NUMBER OF SAMPLING
C #OUTPUT VARIABLES
C A ARG. : REGRESSION LINE VALUE : A
C B ARG. : REGRESSION LINE VALUE : B
C << REGRESSION LINE IS Y = A * X + B >>
C
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
DIMENSION X(1), Y(1)
C
C ***** GET MEAN VALUE
C
SX = 0.0
SY = 0.0
DO 10 I=1, N
SX = SX + X(I)
SY = SY + Y(I)
10 CONTINUE
XM = SX / N
YM = SY / N
C
C ***** GET REGRESSION LINE

```

```

C
  BUNSHI = 0.0
  BUNBO = 0.0
  DO 20 I=1, N
    BUNSHI = BUNSHI + (X(I)-XM)*(Y(I)-YM)
    BUNBO = BUNBO + (X(I)-XM)**2
20 CONTINUE
C
  A = BUNSHI / BUNBO
  B = YM - A * XM
C
  RETURN
  END
  SUBROUTINE SIPLX(FUNC, X, N, M, ALPHA, EPS, MIN, ITR, XMIN, FMIN, IER)
C
C..... THIS PROGRAM COPY FORM
C 'SUUCHIKAISEKI TO FORTRAN' DAI-3-PAN MARUZEN P647
C
C
C *** TO FIND A LOCAL MINIMUM OR MAXIMUM OF A FUNCTION BY USE OF
C SIMPLEX METHOD PROPOSED BY J. A. NELDER & R. MEAD ***
C
  IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
  DIMENSION X(M, 1), ALPHA(3), EPS(2), XMIN(1), XR(100), F(101)
  REAL*8 ALP, ALP1, BET, BET1, GAM, GAMI, WORK1, WORK2
C
  *** ARGUMENT CHECK AND PREPARATION ***
  IER = 0
  IF( N.GT.0 .AND. N.LE.100 ) GO TO 10
  WRITE(6, 1000) N
  IER = 3
10 NI = N+1
  IF( M.GE.N .AND. M.GE.1 ) GO TO 20
  WRITE(6, 1010) M
  IER = 3
20 DO 30 I=1, 3
30 IF( ALPHA(I).LT. -1E-70 ) IER = 4
  IF( IER.NE.4 ) GO TO 50
40 WRITE(6, 1020) ALPHA
  IER = 3
  GO TO 60
50 IF( ALPHA(2).GE.1.0 ) GO TO 40
  IF( ALPHA(3).LE.1.0 .AND. ALPHA(3).GT.1E-70 ) GO TO 40
  ALP = ALPHA(1)
  BET = ALPHA(2)
  GAM = ALPHA(3)
  IF(ABS(ALPHA(1)).LE.1.E-70) ALP=1. DO
  IF(ABS(ALPHA(2)).LE.1E-70) BET=5D-1
  IF(ABS(ALPHA(3)).LE.1E-70) GAM=2. DO
60 IF( EPS(1).GT. -1E-70 .AND. EPS(2).GT. -1E-70 ) GO TO 80

```

```

70 WRITE(6, 1030) EPS
  IER = 3
  GO TO 140
80 IF( ABS(EPS(1))-1E-70 ) 90, 90, 110
90 IF( ABS(EPS(1))-1E-70 ) 70, 70, 100
100 EPS = 2
  GO TO 140
110 IF( ABS(EPS(2))-1E-70 ) 120, 120, 130
120 EPS = 1
  GO TO 140
130 EPS = 3
140 IF( ITR ) 150, 150, 170
150 WRITE(6, 1040) ITR
  IER = 3
  GO TO 180
160 NSTOP = 500
  GO TO 180
170 NSTOP = ITR
180 IF( N.LE.0 .OR. N.GT.100 ) GO TO 195
  DO 190 I=1, N
  IF( ABS( X(I, NI) ).GT.1E-70 ) GO TO 190
  WRITE(6, 1050) I, X(I, NI)
  IER = 3
190 CONTINUE
195 IF( IER.NE.3 ) GO TO 197
  RETURN
C
C
C *** SET THE VERTICES OF THE INITIAL SIMPLEX ***
197 DO 210 I=2, NI
  II = I-1
  DO 210 J=1, N
  IF( II.EQ.J ) GO TO 230
  X(J, I) = X(J, II)
  GO TO 210
200 X(J, I) = X(J, II) + X(J, NI)
210 CONTINUE
  ICODE = 1
  NIT = 1
C
C *** BEGINNING OF THE LOOP FOR THE SIMPLEX METHOD ***
220 IF( NIT.LE.NSTOP ) GO TO 230
  NIT = NIT-1
  IER = 1
  IF( ICODE ) 540, 640, 235
C
C *** VALUES OF THE FUNCTION AT THE VERTICES ***
230 IF( ICODE.EQ.0 ) GO TO 300
235 DO 270 I=1, NI
  DO 240 J=1, N

```

```

240 XMIN(J) = X(J,1)
    IF( MIN ) 250, 260, 260
250 F(I) = FUNC(XMIN)
    GO TO 270
260 F(I) = -FUNC(XMIN)
270 CONTINUE
    ICODE = 0
C
C *** FIND THE MAXIMUM AND MINIMUM POINTS ***
300 IMAX = 1
    IMIN = 1
    FMAX = F(I)
    FMIN = F(I)
    DO 340 I=2, N1
        IF( F(I)-FMAX ) 320, 320, 310
310 FMAX = F(I)
    IMAX = I
    GO TO 340
320 IF( F(I)-FMIN ) 330, 340, 340
330 FMIN = F(I)
    IMIN = I
340 CONTINUE
    IF( IER.EQ.1 ) GO TO 545
C
C *** CALCULATE THE CENTROID OF THE POINTS WITH I.NE.IMAX ***
DO 350 J=1, N
    SUM = 0.0
    DO 350 I=1, N1
350 SUM = SUM + X(J,1)
    XMIN(J) = (SUM - X(J,IMAX)) / N
360 CONTINUE
C
C *** REFLECTION OF THE MAXIMUM POINT ***
ALP1 = ALP+1.0
DO 370 J=1, N
    WORK1 = XMIN(J)
    WORK2 = X(J,IMAX)
    XR(J) = ALP1*WORK1 - ALP*WORK2
370 CONTINUE
    FR = FUNC(XR)
    IF( MIN.GT.0 ) FR = -FR
C
C *** SEE IF FUNC(REFLEC)<FMIN ***
IF( FR-FMIN ) 420, 380, 380
C
C *** FIND THE NEXT MAXIMUM POINT (WHEN FUNC(REFLEC).GE.FMIN) ***
390 FSMAX = -1D75
DO 390 I=1, N1
    IF( I.EQ.IMAX ) GO TO 390
    IF( F(I).LE.FSMAX ) GO TO 390

```

```

    FSMAX = F(I)
390 CONTINUE
C
C *** SEE IF FUNC(REFLEC)>FSMAX ***
IF( FR-FSMAX ) 400, 400, 480
400 F(IMAX) = FR
    DO 410 J=1, N
410 XMIN(J) = XR(J)
    GO TO 445
C
C *** EXPANSION OF THE REFLECTION (WHEN FUNC(REFLEC).LT.FMIN) ***
420 GAM1 = 1.0-GAM
    DO 430 J=1, N
    WORK1 = XR(J)
    WORK2 = XMIN(J)
    XMIN(J) = GAM**WORK1 - GAM1**WORK2
430 CONTINUE
    FE = FUNC(XMIN)
    IF( MIN.GT.0 ) FE = -FE
C
C *** SEE IF FUNC(EXPANS)<FUNC(REFLEC) ***
IF( FE-FR ) 440, 400, 400
440 F(IMAX) = FE
C
C *** REPLACE THE MAXIMUM POINT WITH A NEW VERTEX ***
445 DO 450 J=1, N
450 X(J,IMAX) = XMIN(J)
    GO TO 500
C
C *** IN CASE OF FUNC(REFLEC)>FSMAX ***
460 IF( FR.GE.FMAX ) GO TO 480
    DO 470 J=1, N
470 X(J,IMAX) = XR(J)
C
C *** CONTRACTION OF THE MAXIMUM POINT OR OF ITS REFLECTION ***
480 BET1 = 1.0-BET
    DO 490 J=1, N
    WORK1 = X(J,IMAX)
    WORK2 = XMIN(J)
    XMIN(J) = BET*WORK1 + BET1*WORK2
490 CONTINUE
    FC = FUNC(XMIN)
    IF( MIN.GT.0 ) FC = -FC
C
C *** SEE IF FUNC(CONTRAC)>FMAX ***
IF( FC-FMAX ) 495, 520, 520
495 F(IMAX) = FC
    GO TO 445
C
C *** CONVERGENCE CHECK ***

```

```

500 GO TO (520, 550, 520), IEPS
520 SUM2=0.0
    SUM=0.0
    DO 530 I=1, N1
        SUM=SUM+F(I)
530 CONTINUE
    SUM=SUM/N1
    DO 535 I=1, N1
        SUM2=(F(I)-SUM)**2+SUM2
535 CONTINUE
    SD=SQRT(SUM2/N1)
    IF( SD-EPS(1) ) 540, 540, 550
540 IF( IEPS.EQ.1 ) GO TO 640
    IEPS = 4
550 AINTM = -1D75
    DO 560 I=1, N
        I1 = I+1
        DO 570 K=I1, N1
            DO 580 J=1, N
                AINT = ABS( X(J, I)-X(J, K) )
560 IF( AINT.GT.AINTM ) AINTM = AINT
570 CONTINUE
580 CONTINUE
    GO TO ( 600, 590, 600, 590 ), IEPS
590 IF( AINTM.LE.EPS(2) ) GO TO 640
600 IF( AINTM.GT.1E15 ) GO TO 680
    IF( IEPS.EQ.4 ) IEPS = 3
610 NIT = NIT+1
    GO TO 220
C
C *** REDUCE THE SIMPLEX SIZE ***
520 ICODE = 1
    DO 630 I=1, N1
        DO 630 J=1, N
630 X(J, I) = 5E-1*( X(J, I)+X(J, IMIN) )
        GO TO 610
C
C *** TERMINATE ***
640 IF( FMIN.GT.F(IMAX) ) GO TO 660
645 DO 650 J=1, N
650 XMIN(J) = X(J, IMIN)
    GO TO 690
660 FMIN = F(IMAX)
    GO TO 690
680 IER = 2
690 ITR = NIT
    IF( MIN.GT.0 ) FMIN = -FMIN
    RETURN
C
C * ERROR MESSAGES *

```

```

1000 FORMAT(1HO, '(SUBR. SIPLX) THE ARGUMENT N IS INVALID.', 5X,
* ' N=', I7)
1010 FORMAT(1HO, '(SUBR. SIPLX) THE ARGUMENT M IS INVALID.', 5X,
* ' M=', I7)
1020 FORMAT(1HO, '(SUBR. SIPLX) THE ARGUMENT ALPHA IS INVALID.', 5X,
* ' ALPHA=', 1P3E16, 7)
1030 FORMAT(1HO, '(SUBR. SIPLX) THE ARGUMENT EPS IS INVALID.', 5X,
* ' EPS=', 1P2E15, 7)
1040 FORMAT(1HO, '(SUBR. SIPLX) THE ARGUMENT ITR IS INVALID.', 5X,
* ' ITR=', I7)
1050 FORMAT(1HO, '(SUBR. SIPLX) THE ARGUMENT X IS INVALID.', 5X,
* ' X(', I2, '.N+1 )=', 1PE16, 7)
    END
    SUBROUTINE TPRM1 (7)
C
C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C CALCULATE TEMPERATURE DEPENDING PARAMETERS FOR MONOTONIC AND
C CYCLIC STRESS-STRAIN RELATIONSHIP. (FOR SUS-304 BY P.N.C.)
C WRITTEN BY K.GARATANI ON MAY. 08 1987
C <<<< MODIFIED FOR NEW MAT. ON JUL. 25 1988 >>>>
C *INPUT VARIABLES
C T ARG. TEMPERATURE
C FOR CYCLIC HYSTERESIS LOOP
C *OUTPUT VARIABLES
C BLOCK COMMON /TPARM/ DATA
C
    IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
    COMMON /TPARM/ TE, TSIQY, TKS, TMS, TSIQP, TAO, TAL, TM, TK
C
CC TE = 2.10236D4-9.71895D0*T
CC TSIQY = 25.5555D0-5.58937D0/100D0*T+1.04384D-4*(T**2)-
CC - 7.42535D-8*(T**3)
CC TKS = 44.3068D0-1.78933D0/100D0*T
CC TMS = 0.279395D0+7.749D-5*T
CC TSIQP = TSIQY-TKS*(0.002D0**TMS)
CC TAO = 0.9772687D0+0.5445708D0/100D0*T-3.4675557D-5*(T**2)-
CC - 0.3724201D-8*(T**3)
CC TAL = 3.690128D0-0.1847963D0/100D0*T+0.3544927D-4*(T**2)-
CC - 0.2297822D-7*(T**3)
C
CC IF ((T.LT.0.0).OR.(T.GT.650.0)) GOTO 9000
CC IF (T.LE.400.0) THEN
CC TE = 2.040D4 - 8.000D0*T
CC ELSE
CC TE = 2.126D4 - 1.0125D0*10.0D0*T
CC ENDIF
C
    CALL YE304(T, TE, DUM, DUM)
C

```

```

TSIGY = 25.5635D0-5.56937D-2*T+1.04384D-4*(T**2)-
      7.42535D-8*(T**3)
TKS = 44.3068D0-1.73933D0/100D0*T
TMS = 0.279395D0+7.749D-5*T
TSIGP = TSIGY-TKS*(0.002D0**TMS)
TAO = 3.213674D0-0.2113713D-2*T+0.4238614D-5*(T**2)-
      0.5232357D-8*(T**3)
TAI = 0.3186063D0-0.1850484D-3*T-0.2091033D-5*(T**2)+
      0.2001210D-8*(T**3)

```

```

C
RETURN
9000 CONTINUE
WRITE(6,*) '***** ERROR SUB.TPRM1 ILLEGAL TEMP. DATA ' T
STOP
END
SUBROUTINE TPRM2 (T,DLEP)

```

```

C *PURPOSE OF THIS ROUTINE
C CALCULATE TEMPERATURE DEPENDING PARAMETERS FOR SATURATED CYCLIC
C STRESS-STRAIN RELATIONSHIP. (FOR SUS-304 BY P.M.C.)
C WRITTEN BY K.GARATANI ON MAY. 08 1987

```

```

C *INPUT VARIABLES
C T ARG. : TEMPERATURE
C DLEP ARG. : CYCLIC PLASTIC STRAIN RANGE
C *OUTPUT VARIABLES
C BLOCK COMMON /TPARM/ DATA

```

```

C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON /TPARM/ TE,TSIGY,TKS,TMS,TSIGP,TAO,TAI,TK

```

```

ALEP = (LOG(DLEP))/(LOG(10.0D0))
TM = 0.1963338D0+0.31592024D0*ALEP-
    0.05793573D0*(ALEP**2)-
    0.04325001D0*(ALEP**3)-0.0002661293D0*T
TK = 10.0D0**((TAO+(TAI-TM)*ALEP)

```

```

C
RETURN
END
SUBROUTINE YE304(T,E,POI,ALT)

```

```

-----
C * FUNCTION OF THIS SUBROUTINE
C SET YOUNG'S MODULUS:E, POISSON'S RATIO:POI AND INSTANTANEOUS
C THERMAL EXPANSION RATIO:ALT FOR SUS304 STAINLESS STEEL
C
C FROM
C GUIDELINES ON INELASTIC ANALYSIS METHODS FOR DESIGN
C OF FAST BREEDER REACTOR COMPONENTS TABLE 4-1
C PNC SN9410 35-132
C PROGRAMED BY K.GARATANI ON APR. 1990 (VER 1.0)
-----

```

```

C * INPUT VARIABLES
C T D.ARG (REAL*8) : TEMPERATURE (C)
-----
C * OUTPUT VARIABLES
C E D.ARG (REAL*8) : YOUNG'S MODULAS (KG/MM**2)
C POI D.ARG (REAL*8) : POISSON'S RATIO
C ALT D.ARG (REAL*8) : THERMAL EXPANSION RATIO (/DEG.C)
-----

```

```

C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C PARAMETER (NP = 26)
C DIMENSION TT(NP), ET(NP), PT(NP), AT(NP)

```

```

C ***** E,POI,ALT-TEMP TABLE

```

DATA TT	20.0	50.0	75.0	100.0
E	125.0	150.0	175.0	200.0
POI	225.0	250.0	275.0	300.0
ALT	325.0	350.0	375.0	400.0
	425.0	450.0	475.0	500.0
	525.0	550.0	575.0	600.0
	625.0	650.0		

DATA ET	19900.0	19700.0	19500.0	19400.0
	19200.0	19000.0	18900.0	18700.0
	13600.0	13400.0	13200.0	13000.0
	17800.0	17600.0	17400.0	17200.0
	17000.0	16700.0	16400.0	16200.0
	15900.0	15700.0	15400.0	15200.0
	14900.0	14700.0		

DATA PT	0.264	0.267	0.269	0.272
	0.274	0.275	0.276	0.280
	0.282	0.284	0.286	0.288
	0.290	0.292	0.293	0.295
	0.297	0.300	0.301	0.302
	0.304	0.306	0.308	0.310
	0.312	0.314		

DATA AT	15.15E-6	15.65E-6	16.07E-6	16.45E-6
	16.86E-6	17.22E-6	17.55E-6	17.85E-6
	18.12E-6	18.36E-6	18.58E-6	18.79E-6
	19.99E-6	19.13E-6	19.33E-6	19.57E-6
	19.75E-6	19.93E-6	20.11E-6	20.28E-6
	20.45E-6	20.60E-6	20.74E-6	20.87E-6
	20.99E-6	21.09E-6		

```

C ***** INTERPOLATION

```

```

C IF (T.LE.TT(1)) THEN
      T<IT(1)

```

```

RATIO = ( T-TT( 1) ) / ( TT( 2)-TT( 1) )
E      = ET( 1) + ( ET( 2)-ET( 1) )*RATIO
POI    = PT( 1) + ( PT( 2)-PT( 1) )*RATIO
ALT    = AT( 1) + ( AT( 2)-AT( 1) )*RATIO
GOTO 900

```

```

ENDIF

```

```

C      .. T>TT(NP)

```

```

IF (T.GE.TT(NP)) THEN

```

```

RATIO = ( T-TT(NP) ) / ( TT(NP)-TT(NP-1) )
E      = ET(NP) + ( ET(NP)-ET(NP-1) )*RATIO
POI    = PT(NP) + ( PT(NP)-PT(NP-1) )*RATIO
ALT    = AT(NP) + ( AT(NP)-AT(NP-1) )*RATIO
GOTO 900

```

```

ENDIF

```

```

C

```

```

C ***** INTERPOLATION

```

```

C      .. TT(1)<T<TT(NP)

```

```

DO 100 I=2,NP

```

```

IF (T.LE.TT(I)) THEN

```

```

RATIO = ( T-TT(I-1) ) / ( TT(I)-TT(I-1) )
E      = ET(I-1) + ( ET(I)-ET(I-1) )*RATIO
POI    = PT(I-1) + ( PT(I)-PT(I-1) )*RATIO
ALT    = AT(I-1) + ( AT(I)-AT(I-1) )*RATIO
GOTO 900

```

```

ENDIF

```

```

100 C

```

```

C

```

```

WRITE(6,*) 'ERROR ON SUB.YE304 : ILLEGAL TEMP .T
STOP

```

```

C

```

```

900 CONTINUE

```

```

RETURN

```

```

END

```