

フイル付容器熱曲げ供試体熱過渡強度試験

—第2報 ひずみ範囲評価法の高度化に関する検討—

1992年1月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

フィルム付容器熱曲げ供試体熱過渡強度試験

第2報 ひずみ範囲評価法の高度化に関する検討

町田秀夫* 渡士克己* 岩田耕司*

要 旨

従来、構造物熱過渡強度試験施設(TTS)を用いた強度試験に供される供試体の耐クリープ疲労設計は、TTS専用設計基準(TTS-DS)を用いて評価されてきた。本報告は、TTS-DSの弾性解析を用いた評価法における、ひずみ範囲を算出する際に用いられるひずみ集中係数の設定方法に関する検討結果をまとめたものである。

本検討では、ひずみ集中係数を塑性の効果とクリープの効果に伴うひずみ集中係数に分類して評価した。塑性の効果としては、ポアソン比の変化に伴うひずみ集中と弾性追従に伴うひずみ集中を考慮した。また、クリープの効果としては、クリープひずみによるひずみ増分を簡易的に考慮した。これらのひずみ集中を考慮することにより、ひずみ範囲の算出精度の向上が図れることがわかった。

* 大洗工学センター、機器構造開発部、構造工学室

Jan. 1992

Thermal Transient Strength Test of a Filletted Vessel Thermal Bending Model

No.2 Improvement of Strain Range Evaluation Method

H.Machida* ,K.Watashi* ,K.Iwata *

Abstract

Creep-fatigue strength of the structural model, tested at the Thermal Transient Strength Test Facility for Structures (TTS), has been evaluated with TTS Design Standard (TTS-DS). This report presents the strain concentration factor evaluation method which is utilized for calculation of strain range in TTS-DS with elastic analysis.

The effects of plasticity and creep are considered separately in the evaluation of strain concentration factor. As the effect of plasticity, both strain concentrations due to variation of Poisson's ratio and elastic follow-up are considered. As the effect of creep, the increase in creep strain due to relaxation is considered in a simplified manner. The accuracy of strain range evaluation is improved by introducing these strain concentration factor.

* Structural Engineering Section, OEC

目 次

1. まえがき	1
2. ひずみ集中係数	2
2.1 従来の算出方法	2
2.2 ひずみ集中係数の設定	5
2.3 塑性の効果によるひずみ集中	6
2.4 クリープの効果によるひずみ集中	12
3. 伝熱応力解析	16
3.1 解析概要	16
3.2 解析条件	17
3.3 解析結果	26
4. 考 察	43
4.1 塑性の効果	43
4.2 クリープの効果	52
4.3 従来の計算結果に基づく検証	56
5. 結 論	62
6. 参考文献	63

T a b l e L i s t

Table 2.4-1	Relation between stress and creep strain rate	14
Table 3.2-1	Material properties for heat transfer analysis (Type 304 stainless steel)	19
Table 3.2-2	Material properties for heat transfer analysis(Sodium)	19
Table 3.2-3	Material properties for thermal stress analysis (Type 304 stainless steel)	20
Table 3.3-1	Results of thermal stress analysis (Model-1,elastic)	27
Table 3.3-2	Results of thermal stress analysis (Model-1,elasto-plastic)	28
Table 3.3-3	Results of thermal stress analysis (Model-1,elastic-plastic-creep)	29
Table 3.3-4	Results of thermal stress analysis (Model-2,elastic)	30
Table 3.3-5	Results of thermal stress analysis (Model-2,elasto-plastic)	31
Table 3.3-6	Results of thermal stress analysis (Model-2,elastic-plastic-creep)	32
Table 3.3-7	Results of thermal stress analysis (Model-3,elastic)	33
Table 3.3-8	Results of thermal stress analysis (Model-3,elasto-plastic)	34
Table 3.3-9	Results of thermal stress analysis (Model-3,elastic-plastic-creep)	35

F i g u r e L i s t

Fig.2.1-1	Flow of TTS-DS	4
Fig.2.3-1	Strain concentration due to variation of Poisson's ratio	11
Fig.2.4-1	Stress history of various models	15
Fig.3.2-1	FEM models for heat transfer analysis	21
Fig.3.2-2	FEM models for thermal stress analysis	22
Fig.3.2-3	Boundary condition of Model-1	23
Fig.3.2-4	Boundary condition of Model-2	24
Fig.3.2-5	Boundary condition of Model-3	25
Fig.3.3-1	Evaluation points of temperature history	36
Fig.3.3-2	Temperature history of Model-1	37
Fig.3.3-3	Temperature history of Model-2	38
Fig.3.3-4	Temperature history of Model-3	39
Fig.3.3-5	Evaluation line of strain range	40
Fig.3.3-6	Equivalent strain range of Model-1	41
Fig.3.3-7	Equivalent strain range of Model-2	41
Fig.3.3-8	Equivalent strain range of Model-3	42
Fig.4.1-1	Strain concentration due to variation of Poisson's ratio of Model-1	45
Fig.4.1-2	Strain concentration due to variation of Poisson's ratio of Model-2	45
Fig.4.1-3	Strain concentration due to variation of Poisson's ratio of Model-3	46
Fig.4.1-4	Distribution of elastic follow-up parameter	46
Fig.4.1-5	Strain concentration due to elastic follow-up of Model-1	47
Fig.4.1-6	Strain concentration due to elastic follow-up of Model-2	47
Fig.4.1-7	Strain concentration due to elastic follow-up of Model-3	48
Fig.4.1-8	Strain concentration due to plasticity of Model-1	48
Fig.4.1-9	Strain concentration due to plasticity of Model-2	49
Fig.4.1-10	Strain concentration due to plasticity of Model-3	49
Fig.4.1-11	Elastic follow-up parameter along evaluation line of Model-1	50
Fig.4.1-12	Elastic follow-up parameter along evaluation line of Model-2	50
Fig.4.1-13	Elastic follow-up parameter along evaluation line of Model-3	51
Fig.4.2-1	Strain concentration due to creep of Model-1	53
Fig.4.2-2	Strain concentration due to creep of Model-2	53
Fig.4.2-3	Strain concentration due to creep of Model-3	54

Fig.4.2-4	Comparison of strain range between estimation and analysis of Model-1	54
Fig.4.2-5	Comparison of strain range between estimation and analysis of Model-2	55
Fig.4.2-6	Comparison of strain range between estimation and analysis of Model-3	55
Fig.4.3-1	STST nozzle model	57
Fig.4.3-2	FEM models of STST nozzle model	58
Fig.4.3-3	Evaluation line and points of STST nozzle model	59
Fig.4.3-4	Comparison of strain range between estimation and analysis of STST nozzle Model-1	60
Fig.4.3-5	Comparison of strain range between estimation and analysis of STST nozzle Model-2	60
Fig.4.3-6	Comparison of strain range between estimation and analysis of STST nozzle Model-3	61

使用記号一覧表

$\Delta \varepsilon_{e,q}$;	弾性条件で計算されるミーゼスの相当ひずみ範囲
$\Delta \varepsilon_{e,p}$;	弾塑性条件で計算されるミーゼスの相当ひずみ範囲
$\Delta \varepsilon_{e,q,c}$;	弾塑性クリープ条件で計算されるミーゼスの相当ひずみ範囲
$\Delta \sigma_{e,q}$;	弾性条件で計算されるミーゼスの相当応力範囲
$\Delta \varepsilon$;	ひずみの変化量
$\Delta \gamma$;	せん断ひずみの変化量
ε_n	;	公称ひずみ範囲
ε_t	;	ひずみ範囲
ε	;	ひずみ成分
γ	;	せん断ひずみ成分
σ	;	応力成分
τ	;	せん断応力成分
D_f	;	疲労損傷損傷
D_c	;	クリープ損傷
K_ε	;	ひずみ集中係数
K_p	;	塑性の効果によるひずみ集中係数
K_c	;	クリープの効果によるひずみ集中係数
K_ν	;	ポアソン比の効果によるひずみ集中係数
K_e	;	弾性追従に伴うひずみ集中係数
ν'	;	修正ポアソン比
ν	;	ポアソン比
E	;	縦弾性係数
G	;	横弾性係数
q	;	弾性追従パラメータ
H'	;	加工硬化係数
t_m	;	熱過渡開始から相当ひずみが最大となるまでの時間
T_{max}	;	熱過渡サイクル中の最高温度
t	;	クリープひずみを算出するための有効時間
ε_c	;	クリープひずみ
$\dot{\varepsilon}_m$;	定常クリープ速度

応力、ひずみに用いた添字

- 1, 2 ; ミーゼスの相当ひずみ範囲を定める 2 時点
- r ; 要素座標系の径(r)方向応力・ひずみ成分
- h ; 要素座標系の周(h)方向応力・ひずみ成分
- z ; 要素座標系の周(z)方向応力・ひずみ成分
- hz ; h 軸に垂直な面の z 方向応力・ひずみ成分
- zr ; z 軸に垂直な面の r 方向応力・ひずみ成分
- rh ; r 軸に垂直な面の h 方向応力・ひずみ成分
- e ; 弾性的に計算される応力・ひずみ成分
- y ; 降伏点における応力・ひずみ成分
- p ; 弾塑性応力-ひずみ曲線上の応力・ひずみ成分

1. ま え が き

従来より、構造物強度確性試験施設（以降、TTSと略す）で試験される供試体のクリープ疲労強度評価には、TTS専用設計基準（以降、TTS-DSと略す）が準用されている。弾性解析に基づく強度評価は、熱過渡サイクル中のミーゼス型の相当ひずみ範囲の最大値を補正したひずみ範囲を用いて行われる。ここで用いられるひずみ範囲は、ミーゼス型の相当ひずみ範囲に多軸の効果を考慮し、更に、ひずみ集中係数を乗じたものである。疲労強度及びクリープ強度は、ひずみ範囲、又はこれから求まる初期応力を用いて計算されるため、ひずみ範囲の予測精度が寿命予測法の精度を大きく左右する。ひずみ集中係数は、弾性解析では考慮できない非弾性挙動、換言すれば、塑性ひずみやクリープひずみによるひずみの増分を考慮するものであり、ひずみ範囲が大きい部位や高温で応力の保持時間が長くなる部位ほど大きくなることは簡単に予想できる。しかし、従来からTTS-DSに用いられているひずみ集中係数は、構造物の形状やひずみ挙動とは関係なく一律1.2が用いられているため、全ひずみに対する非弾性ひずみの占める割合によって、ひずみ範囲の予測精度にばらつきを生じる。また、塑性とクリープによる非弾性ひずみに目を向けると、前者はひずみ範囲やひずみ成分比に依存し、後者はひずみ範囲に加え応力及び高温保持時間にも依存する。現行のひずみ集中係数は、互いに異なる要因を持つこれらのひずみを1つの係数で代表させている点においても、ひずみ範囲の予測精度の向上に対して不都合がある。

本報告は、従来のひずみ集中係数に替えて塑性の効果に伴うひずみの集中係数とクリープの効果に伴うひずみの集中係数を用いたひずみ範囲の算出方法についての検討を示すものである。塑性の効果に伴うひずみ集中は、塑性領域におけるポアソン比の変化に伴うひずみ集中係数と弾性追従に伴うひずみ集中係数の積として設定した。ポアソン比の変化に伴うひずみ集中係数は、弾性解析の極2時点の面内ひずみ成分のバランスと修正ポアソン比を用いて設定した。また、弾性追従に伴うひずみ集中係数は、本検討で実施した解析結果を用いて設定した弾性追従パラメータを用いて算出した。また、クリープによるひずみ集中係数は、実効的な係数を設定するために、クリープひずみの発生に有効な時間を熱過渡開始時点から最大相当ひずみ範囲が発生するまでの時間から設定し、これから計算されるクリープひずみをクリープによるひずみ集中係数とした。

2. ひずみ集中係数

2.1 従来の算出方法

従来より、当室の構造物クリープ疲労損傷評価には構造物熱過渡強度試験施設専用設計基準(TTS-DS)¹⁾が用いられている。TTS-DSは、従来の設計評価手法に含まれている安全裕度を合理的に切り詰めた設計評価手法である。Fig.2.1-1 にTTS-DSの評価手法の流れを示す。弾性解析を用いて算出されるミーゼス型の相当ひずみ範囲($\Delta \varepsilon_{e,q}$)は、このTTS-DSのフローに従ってひずみ範囲(ε_t)に補正される。

TTS-DSでは、軸対称ソリッド要素を用いた解析のから求まるひずみ4成分 ($\varepsilon_r, \varepsilon_h, \varepsilon_z, \gamma_{rz}$) より、熱過渡サイクル中の最大相当ひずみ範囲を (2.1)式で求める。

$$\Delta \varepsilon_{e,q} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta \varepsilon_r - \Delta \varepsilon_z)^2 + (\Delta \varepsilon_r - \Delta \varepsilon_h)^2 + (\Delta \varepsilon_h - \Delta \varepsilon_z)^2 + 1.5 \Delta \gamma_{rz}^2} \quad (2.1)$$

$$\Delta \varepsilon_r = \varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2}$$

$$\Delta \varepsilon_h = \varepsilon_{h1} - \varepsilon_{h2}$$

$$\Delta \varepsilon_z = \varepsilon_{z1} - \varepsilon_{z2}$$

$$\Delta \varepsilon_z = \varepsilon_{z1} - \varepsilon_{z2}$$

$$\Delta \gamma_{rz} = \gamma_{rz1} - \gamma_{rz2}$$

ミーゼス型の相当ひずみ範囲とミーゼス型の相当応力範囲は以下の関係がある。

$$\frac{\Delta \sigma_{e,q}}{E} = \frac{3}{2} \frac{1}{1+\nu} \Delta \varepsilon_{e,q} = \frac{1.5}{1+\nu} \Delta \varepsilon_{e,q} \quad (2.2)$$

ミーゼス型の相当ひずみ-相当応力の関係では、弾性の効果が大きいほど、換言すれば、修正ポアソン比が弾性ポアソン比に近いほど単軸の応力-ひずみ関係から求まるひずみ ($\varepsilon = \sigma/E$) よりもひずみを小さく見積もることになる。十分に塑性の効果が大きければ、修正ポアソン比は0.5となるため、ミーゼスの相当ひずみと相当応力の関係は単軸の応力-ひずみ関係と同等となる。TTS-DSではこの効果を保守的に見込み、公称ひず

み範囲を弾性ポアソン比を用いて次式で求める。

$$\varepsilon_n = \frac{1.5}{1+\nu} \Delta \varepsilon_{e,q} \quad (2.3)$$

更に、ひずみ範囲を次式で求める。

$$\varepsilon_t = K_e \cdot \varepsilon_n \quad (2.4)$$

ここで、 K_e がひずみ集中係数と呼ばれ、弾性解析で得られたひずみ範囲に非弾性効果、つまり、塑性の効果とクリープの効果によるひずみ増分を考慮するための係数である。従

としている。これは、上記の非弾性効果によるひずみ増分と疲労強度減少係数を経験的に見込んだ数値である。

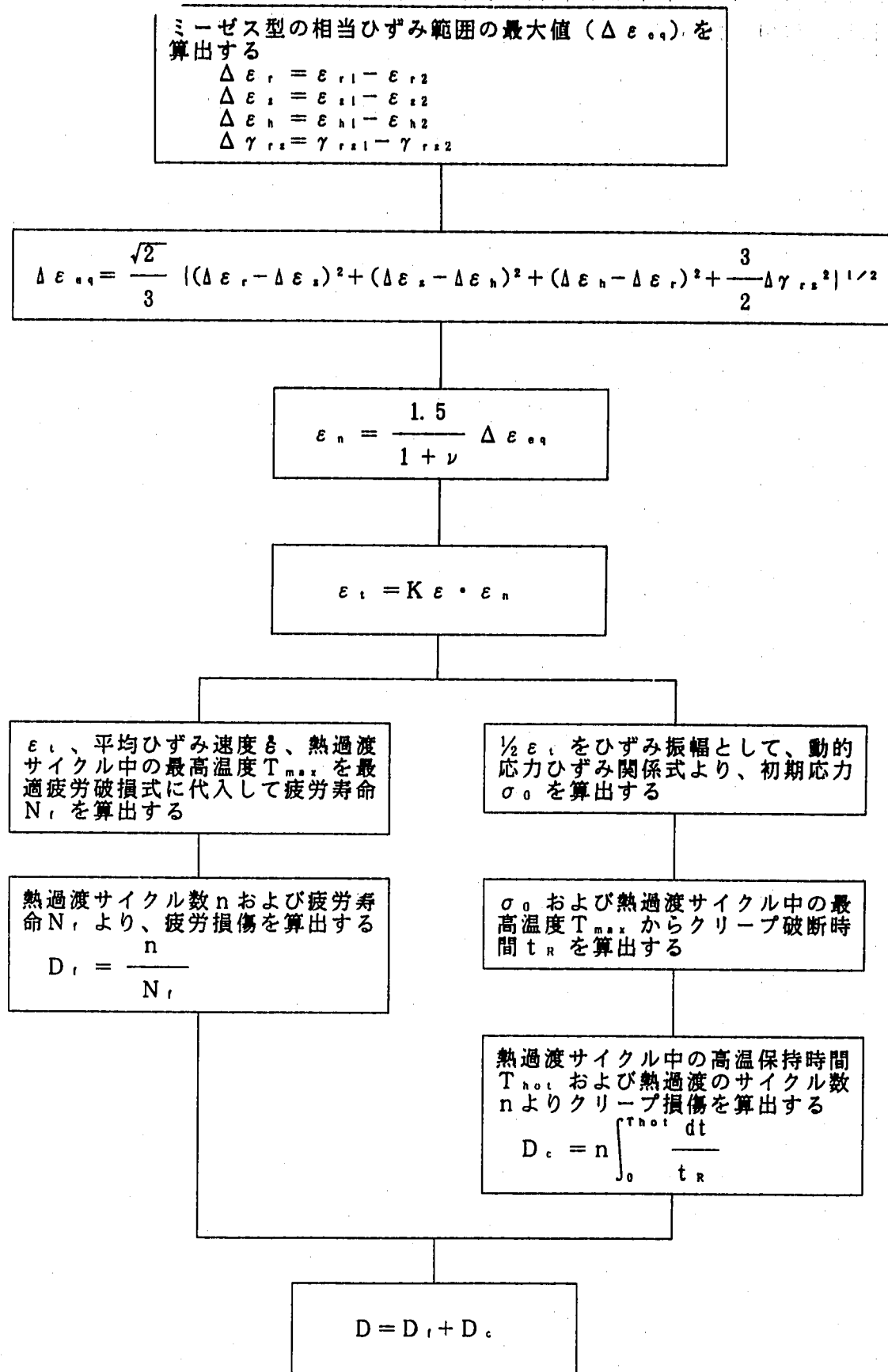


Fig.2.1-1 Flow of TTS-DS

2.2 ひずみ集中係数の設定

ひずみ集中係数は、弾性解析によって求めた相当ひずみ範囲に非弾性挙動によるひずみ増分を考慮するための係数として用いられている。本検討では、弾性解析結果に対する非弾性挙動分の補正として、塑性の効果によるひずみ集中およびクリープの効果によるひずみ集中係数を検討することとした。塑性の効果によるひずみ集中は、塑性におけるポアソン比の増大に伴うひずみ集中と弾性追従に伴うひずみの再配分効果によるひずみ集中を考慮した。ここでは、ノイバー型のひずみ集中は、弾性解析を用いたTTS-DSの評価対称が、一般にノッチ等によるひずみ集中の発生しない平滑部に限られるため考慮していない。また、クリープによるひずみ集中は、リラクゼーションによるクリープひずみの増分を考慮する。

ひずみ集中係数 (K_e) は下式で定義する。

$$K_e = K_p \cdot K_c$$

$$K_p = K_v \cdot K_e'$$

ここで、 K_e : ひずみ集中係数

K_p : 塑性の効果によるひずみ集中係数

K_c : クリープの効果によるひずみ集中係数

K_v : ポアソン比の効果によるひずみ集中係数

K_e' : 弾性追従に伴うひずみ集中係数

以下に各ひずみ集中係数の設定について述べる。

2.3 塑性の効果によるひずみ集中

塑性の効果によるひずみ集中は、弾性状態と塑性状態においてポアソン比が変化することによるひずみ集中と弾性追従に伴うひずみ集中に大別され、それらを以下の関係で定義する。

$$K_p = K_v \cdot Ke' \quad (2.6)$$

ここで、 K_p : 塑性の効果によるひずみ集中係数

K_v : ポアソン比の効果によるひずみ集中係数

Ke' : 弾性追従を考慮したひずみの再配分効果係数

以下にポアソン比の効果によるひずみ集中係数集中係数とひずみの再配分効果によるひずみ集中係数を定義する。

2.3.1 ポアソン比の効果²⁾

熱過渡を受ける構造物において、弾性解析から求まるひずみ範囲は弾塑性解析から求まるひずみ範囲に対して小さくなる場合がある。この原因の一つとして、弾性解析において塑性状態におけるポアソン比の変化（弾性状態で約0.3、完全塑性状態で0.5）を考慮していないことが挙げられる。ここでは、このポアソン比の変化に伴うひずみの増加を考慮するために弾性解析結果に乗じるひずみ集中係数（ K_v ）を定義する。

軸対称構造物に対して平面応力を仮定すると、3軸状態に対して一般化されたフックの法則より構造物に発生するひずみは (2.7)式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} \{ \sigma_r - \nu (\sigma_h + \sigma_z) \} & , \quad \tau_{hz} &= G \gamma_{hz} \\ \varepsilon_h &= \frac{1}{E} \{ \sigma_h - \nu (\sigma_z + \sigma_r) \} & , \quad \tau_{zr} &= G \gamma_{zr} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \{ \sigma_z - \nu (\sigma_r + \sigma_h) \} & , \quad \tau_{rh} &= G \gamma_{rh} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

ここで、縦弾性係数、横弾性係数、弾性ポアソン比の間には以下の関係がある。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.8)$$

(2.7)式を応力に対して解くと、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \lambda e + 2G \varepsilon_r \\ \sigma_h &= \lambda e + 2G \varepsilon_h \\ \sigma_z &= \lambda e + 2G \varepsilon_z \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

ここで、

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)}, \quad e = \varepsilon_r + \varepsilon_h + \varepsilon_s \quad (2.10)$$

が得られる。ここで、構造物表面における面内のひずみ2成分が添字h, z（それぞれ周方向、軸方向）、面に垂直方向の成分が添字r（径方向）を用いて定義しているので、平面応力では(2.9)式において $\sigma_r = 0$ となり、面と垂直方向のひずみの変化量は(2.9)式に(2.8)式と(2.10)式を代入して、(2.11)式で表される。

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\nu E (\Delta \varepsilon_r + \Delta \varepsilon_h + \Delta \varepsilon_s)}{(1-2\nu)(1+\nu)} + \frac{E}{(1+\nu)} \Delta \varepsilon_r \\ &= 0 \\ \Delta \varepsilon_r &= \frac{-\nu}{1-\nu} (\Delta \varepsilon_h + \Delta \varepsilon_s) \end{aligned} \quad (2.11)$$

ここで、

$$\Delta \varepsilon_h + \Delta \varepsilon_s = a, \quad \Delta \varepsilon_h - \Delta \varepsilon_s = b$$

と置くと(2.1)式に示されるミーゼス型の相当ひずみ範囲は、

$$\Delta \varepsilon_{eq} = \frac{1}{3} \sqrt{3b^2 + \left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\right)^2 a^2 + 3\Delta\gamma_{rz}^2} \quad (2.12)$$

と書き表せる。弾性解析結果を用いて計算される相当ひずみ範囲は(2.12)式を用いて計算されるが、塑性状態ではポアソン比が弾性状態に比べて増大するため、真のひずみ範囲は(2.12)式で計算される値よりも大きくなる。これは修正ポアソン比を用いて(2.13)式で表される。

$$\Delta \varepsilon_{eq,p} = \frac{1}{3} \sqrt{3b^2 + \left(\frac{1+\nu'}{1-\nu'}\right)^2 a^2 + 3\Delta\gamma_{rz}^2} \quad (2.13)$$

ここで、修正ポアソン比は、動的応力-ひずみ関係のセカントモジュラス (E')を用いて以下の通り求められる。

$$\nu' = 0.5 \left(1 - \frac{E'}{E}\right) + \nu \frac{E'}{E} \quad (2.14)$$

$$\text{ここで、 } E' = \frac{\Delta \sigma_{eq}}{\Delta \varepsilon_{eq}}$$

(2.12)式で弾性的に計算されるひずみ範囲と、(2.13)式で弾塑性的に計算されるひずみ範囲の比がポアソン比の効果によるひずみ集中係数(K_ν)であり、次式で表される。

$$K_{\nu} = \frac{\Delta \varepsilon_{app}}{\Delta \varepsilon_{eq}} = \sqrt{\frac{3b^2 + c'^2 a^2 + 3\Delta \gamma_{rs}^2}{3b^2 + c^2 a^2 + 3\Delta \gamma_{rs}^2}} \quad (2.15)$$

$$\text{ここで } a = \Delta \varepsilon_h + \Delta \varepsilon_r, \quad b = \Delta \varepsilon_h - \Delta \varepsilon_r, \quad c = \frac{1+\nu}{1-\nu}, \quad c' = \frac{1+\nu'}{1-\nu'}$$

ここで、(2.15)式の特徴を把握するため、以下の条件でひずみ集中係数 (K_{ν}) を算出する。

材 質	SUS304
温 度	425 °C
ひずみ範囲	≤ 2 %
応力-ひずみ関係	動的応力-ひずみ式 ³⁾

面内のひずみ2成分の比(b/a)をパラメータとして、ミーゼス型の相当ひずみ範囲とポアソン比の効果によるひずみ集中係数の関係を求め Fig. 2.3-1に示す。図より二つのことが明らかになる。一つは、ひずみ範囲の増加に伴ってひずみ集中係数も増加することである。ひずみ集中係数は比例限以下で1となり、ひずみの増加とともに(2.15)式における ν' を完全塑性、 ν を完全弾性とした値($b=0$ の場合、 $\nu'=0.5$ 、 $\nu=0.3$ で1.62)に漸近する。また、弾性状態から塑性状態に移行した近傍でひずみ集中係数の変化率が最も大きくなるため、この領域ではひずみ範囲並びに各ひずみ成分のばらつきがひずみ集中係数のばらつきに対して影響が大きい。

もう一つは、ひずみ集中係数が面内のひずみ2成分の構成比に大きく左右されることである。ひずみ集中係数は(2.15)式において $b=0$ となるときに最大となり、 b/a の増加に伴って減少する。特に、 $b/a \geq 10$ ではポアソン比の変化に伴うひずみ集中は殆ど生じない。 $b/a=0$ となる状態は、板厚内温度勾配によって発生するひずみに代表されるように面内のひずみ2成分が等しい場合であり、 b/a が大きくなるのは面内ひずみ2成分の非等2軸性が大きくなる場合である。

2.3.2 弾性追従に伴うひずみ集中

2直線近似した応力-ひずみ関係および弾性追従パラメータを用いて、弾性追従によるひずみの集中係数 (Ke') を定義する。

弾性応力-ひずみと2直線近似された弾塑性応力-ひずみは、弾性追従パラメータ (q) を介して下図の関係にある。これより、弾性追従パラメータは(2.16)式に示すとおり表される。

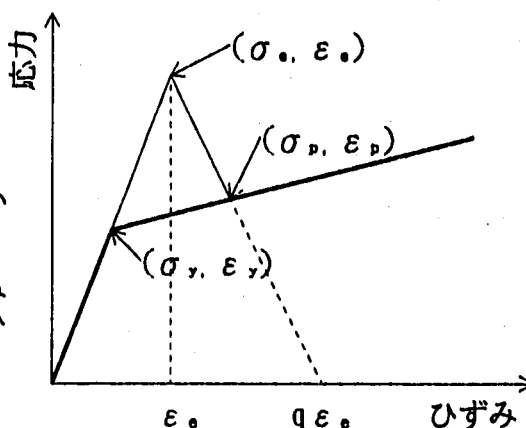
$$q = 1 + \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_o}{\sigma_o - \sigma_p} E \quad (2.16)$$

q : 弾性追従パラメータ

σ_o, ε_o : 弾性応力-ひずみ関係から求めた応力・ひずみ

σ_p, ε_p : 2直線近似応力-ひずみ曲線上の弾塑性応力・ひずみ

σ_y, ε_y : 降伏応力・ひずみ



加工効果係数を H' とすると $\sigma_o > \sigma_y$ では、弾塑性ひずみは次式で表される。

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_y}{E} + (\sigma_p - \sigma_y) \frac{E + H'}{EH'} \quad (2.17)$$

(2.16)式を(2.17)式に代入すると、(2.17)式は以下に書き表せる。

$$\varepsilon_p = \frac{(\xi - 1)\varepsilon_y + \left(1 + \frac{1}{q-1}\right)\varepsilon_o}{\left(\xi + \frac{1}{q-1}\right)} \quad (2.18)$$

$$\xi = \frac{H'}{E + H'}$$

これより、弾性追従に伴うひずみ集中は、以下のとおり表される。

$$Ke' = \frac{(\xi - 1)\varepsilon_y + \left(1 + \frac{1}{q-1}\right)\varepsilon_o}{\left(\xi + \frac{1}{q-1}\right)\varepsilon_o} \quad (2.19)$$

ここで、弾性追従パラメータは、荷重の負荷状態や構造物の形状によって定まる係数であり、別途、4章で定める。

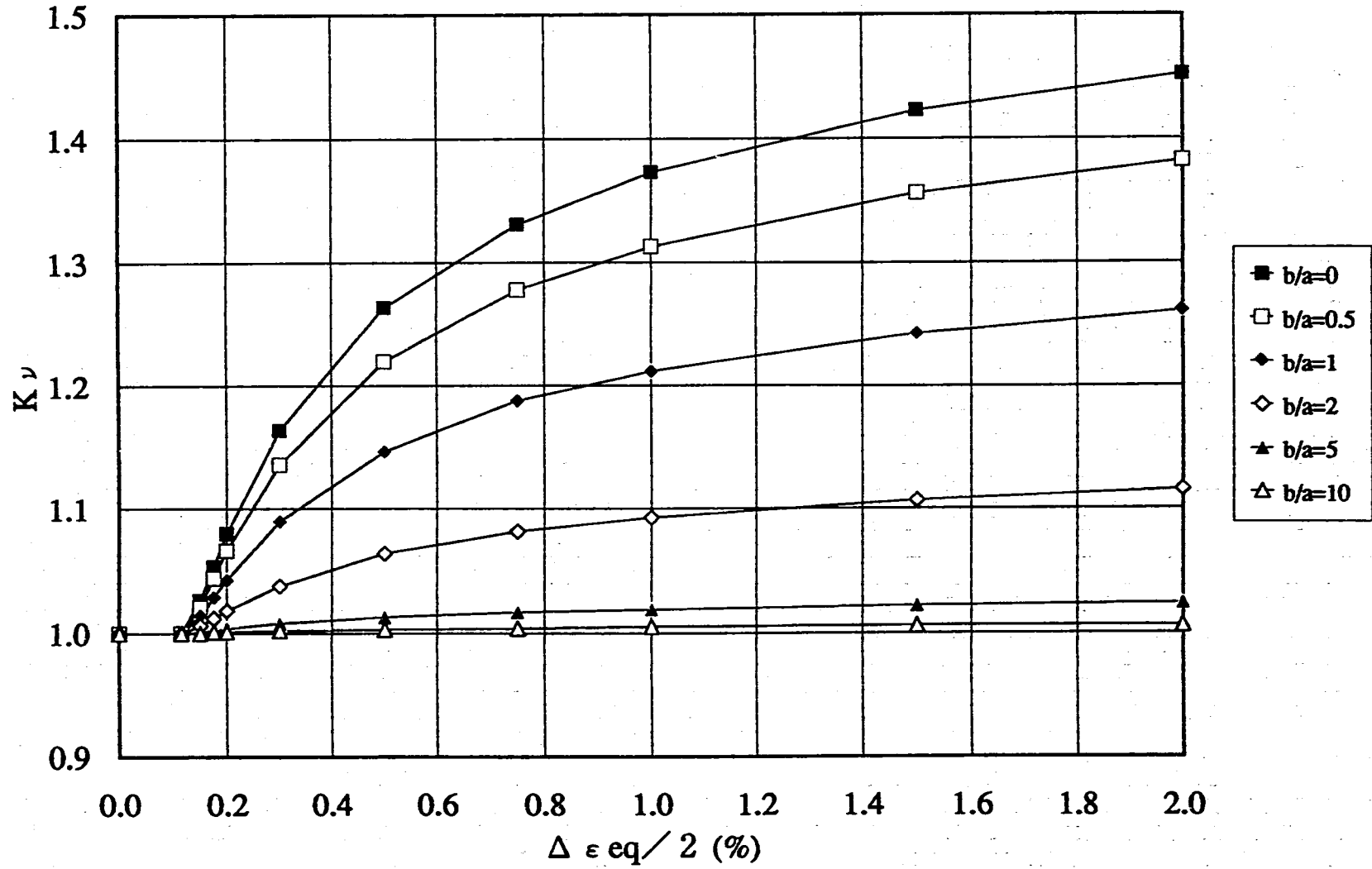


Fig.2.3-1 Strain concentration due to variation of Poisson's ratio

2.4 クリープによるひずみ集中

クリープによるひずみの集中は、クリープによるリラクゼーションに伴うクリープひずみの増分である。このクリープによるひずみ集中は、塑性の効果によるひずみ集中に対して小さく、また、過去の研究成果から、たが締めや部材間の相対的温度差等を要因とした比較的保持時間の長い応力が発生する部位以外では、クリープひずみは殆ど発生しないことがわかっている。

弾性解析結果を用いてクリープひずみを算出する方法として、弾性解析から求まるひずみ範囲に対応した初期応力を動的応力-ひずみ曲線を用いて算出し、高温時間に相当するリラクゼーション解析を実施する方法があるが、この方法は実際に生じるクリープひずみに対して過度なクリープひずみを与える可能性がある。また、より実質的な評価としては、弾性解析から求まる応力履歴を用いてリラクゼーション解析を実施しクリープひずみを算出する方法が考えられるが、応力・ひずみの多軸性や塑性の影響を考えると簡便ではない。

本検討では、TTSの設計基準としての適応性を踏まえ、ミーゼス型の相当ひずみ範囲に基づいたクリープによるひずみ集中係数の算出法を以下のとおりとした。

クリープひずみを算出するための有効時間 (t) を熱過渡開始から相当ひずみが最大となるまでの時間 (t_m) から次式で求める。

$$t = 3 t_m \quad (2.20)$$

有効時間は、以下の理由から(2.20)に示す設定とした。

【応力とクリープひずみ】

Table 2.4-1 にTTSを用いた熱過渡強度試験に用いられる供試体の主要材料であるSUS304の応力と定常クリープ速度の関係³⁾を示す。これより、応力が2/3程度になれば、定常クリープ速度は1桁以上小さくなり、クリープひずみの算出上有効でなくなる。これより、クリープひずみの発生によるひずみ増分を算出する有効時間は、応力が最大値から2/3に減少するまでの時間と設定することで、実際に発生するクリープひずみを概ね算出できると考えられる。

【最大ひずみ範囲の発生時刻と減衰】

熱過渡試験で構造物の評価部位に発生する代表的な応力は、以下に3つに大別される。

- ① たが締めによる非等2軸応力
- ② 構造不連続部の相対的温度差に伴う非等2軸応力
- ③ 板厚内温度勾配に伴う等2軸応力

これらの3つの代表部位に相当する試験対象部の応力をTTSの供試体である溶接容器型モデル⁴⁾の応力解析結果を引用し、Fig.2.4-1に示す。尚、これらの解析は、同一熱過渡条件で解析されたものである。

これらの解析結果から以下のことがわかる。

- ① 熱過渡開始から最大応力が発生する時点（ミーゼスの相当ひずみ範囲を定める時点）までに要する時間は、板厚内温度勾配に伴う応力⇒構造不連続部の相対的

温度差に伴う応力⇒たが締めによる応力の順に長くなる。

② 熱過渡開始から最大応力が発生するまでの時間と最大応力が 2/3に緩和するまでの時間の比は、板厚内温度勾配に伴う応力⇒構造不連続部の相対的溫度差に伴う応力⇒たが締めによる応力の順に大きくなる。

③ 最大応力は、最も緩和の遅いたが締めによる応力の場合においても、熱過渡開始から最大応力が発生する時点までに要する時間の約 3 倍で 2/3に緩和する。

これらに併せ、Fig.2.4-1 に示した解析結果は、構造物の外表面を断熱として実施した解析であるため、外表面からの放熱を考えた場合、応力の緩和（温度分布の緩和と等価）は早くなることが予想される。これらのことから、クリープひずみによるひずみ集中挙動は、最大応力が 2/3に減少するまでの時間（熱過渡開始から最大応力の発生するまでの時間の 3 倍の時間）で包絡できることがわかる。これより、有効時間は、熱過渡開始から最大ひずみの発生するまでの時間の 3 倍と想定した。

熱過渡サイクル中の最高温度(T_{max})と塑性によるひずみ集中を考慮した相当ひずみ範囲($K_P \cdot \Delta \epsilon_{0.2}$)を動的応力-ひずみ関係式に代入し、相当応力範囲($\Delta \sigma_{0.2}$)を求める。 $\sigma = \Delta \sigma_{0.2} / 2$ とし、クリープひずみ式に代入し、定常クリープによるクリープひずみ(ϵ_c)を求める。

$$\epsilon_c = \dot{\epsilon}_m \cdot t \quad (2.21)$$

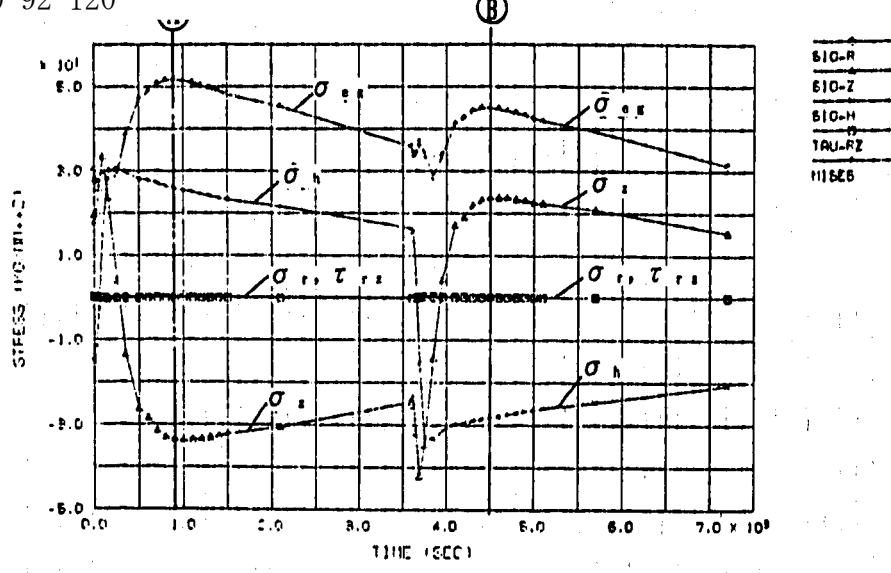
ここで、 $\dot{\epsilon}_m$: 定常クリープ速度

クリープの効果によるひずみ集中係数(K_c)は次式で表される。

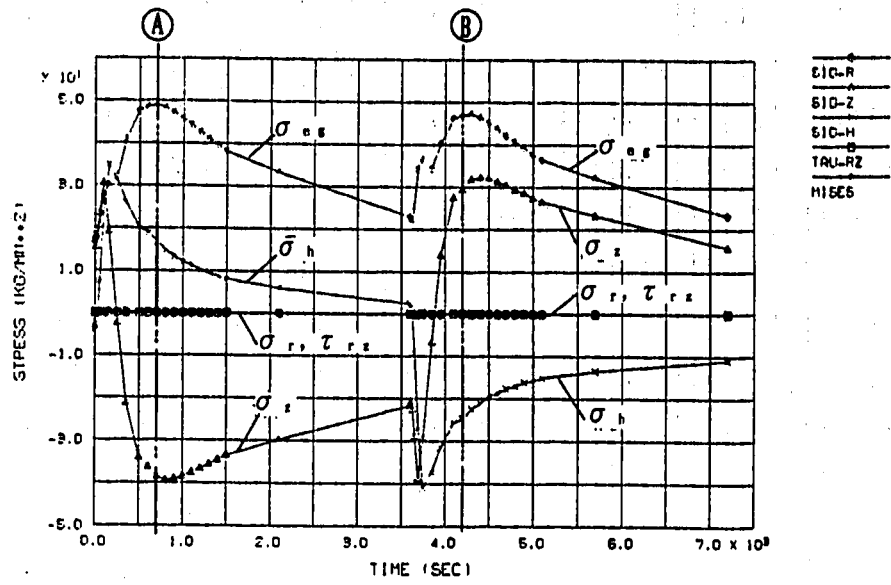
$$K_c = 1 + \epsilon_c / (K_P \cdot \Delta \epsilon_{0.2}) \quad (2.22)$$

Table 2.4-1 Relation between stress and creep strain rate

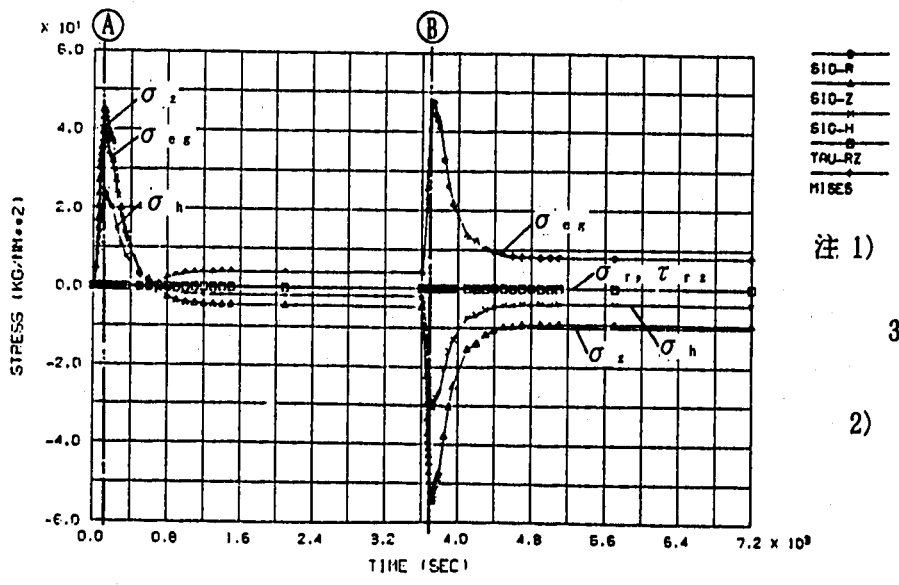
応力 (kg/mm ²)	定常クリープ速度 (mm/mm/hr)		
	425 (°C)	500 (°C)	600 (°C)
1	1.02×10^{-24}	2.75×10^{-20}	1.45×10^{-15}
5	1.88×10^{-17}	9.98×10^{-14}	9.36×10^{-10}
10	4.07×10^{-14}	1.03×10^{-10}	4.35×10^{-7}
15	4.17×10^{-12}	6.71×10^{-9}	1.76×10^{-5}
20	1.18×10^{-10}	1.37×10^{-7}	2.55×10^{-4}
25	1.63×10^{-9}	1.47×10^{-6}	2.08×10^{-3}
30	1.43×10^{-8}	1.04×10^{-5}	1.18×10^{-2}
35	9.07×10^{-8}	5.54×10^{-5}	5.18×10^{-2}
40	4.55×10^{-7}	2.38×10^{-4}	1.88×10^{-1}
45	1.91×10^{-6}	8.67×10^{-4}	5.91×10^{-1}
50	6.91×10^{-6}	2.77×10^{-3}	1.66×10^0



たが締め部の応力履歴



相対的構造不連続塗部（スカート構造）の応力履歴



- 注 1) 0 sec : コールドランジェント
開始時間
3600sec : ホットランジェント
開始時間
- 2) ①, ②はミーゼス型の
相当ひずみ範囲が最大
となる2時点を示す。

板厚内温度勾配による応力履歴

Fig.2.4-1 · Stress history of various models

3. 伝熱応力解析

3.1 解析概要

熱過渡荷重下の構造物に発生する応力は、形状や熱過渡条件によって様相が異なる。代表的なものでは、円筒の板厚温度勾配やたが締めによる等2軸応力、および円筒の軸方向温度勾配やスカート構造の相対的温度差による非等2軸応力などがある。

本検討では、熱過渡によって発生する応力の挙動が異なる3種類の構造を選定し、それぞれに発生する応力・ひずみ挙動や解析手法の違いによるひずみ挙動の変化を調べるため、これらのモデルを用いた伝熱解析並びに弾性、弾塑性および弾塑性クリープ応力解析を実施した。

本検討で選定した3種類の構造は、円筒の外面に円盤を設けたモデル1、円筒の外面にフルードヘッド型のスカートを設けたモデル2、円筒を一部厚肉化したモデル3である。モデル1は、円盤の径方向温度分布によるたが締め応力をモデル化した構造である。モデル2は、円筒とスカートの相対的温度差による非等2軸応力をモデル化した構造である。モデル3は、径方向温度勾配に伴う等2軸応力をモデル化した構造である。

荷重は、各モデルとも内面に熱過渡（コールドトランジェントおよびホットトランジェント）を与え、外面は断熱とした。これらのモデルを用い、同一条件下の伝熱解析を実施し、更に、この解析結果に基づく弾性、弾塑性および弾塑性クリープ熱応力解析を実施した。解析結果からひずみ範囲を計算し、応力発生パターンが異なる構造物において、各解析間のひずみ範囲を比較した。

3.2 解析条件

(1) 解析プログラム

解析プログラムは、伝熱解析、熱応力解析ともに汎用非線型構造解析システム『FINAS V11.0』⁵⁾を用いた。使用要素は以下のとおりである。

〔熱伝導解析〕

- ・ 熱伝導 8 節点四辺形軸対称要素 HQAX8
- ・ 熱伝導 3 節点軸対称要素 FCAX3

〔熱応力解析〕

- ・ 8 節点四辺形軸対称要素 QAX8

(2) 解析モデル

伝熱解析に用いた解析モデルをFig.3.2-1 に示す。各解析モデルは、内径φ800mm、円筒板厚25mm、高さ600mmに統一しており、内部には、板厚12mmの熱遮蔽板を設け、熱遮蔽板と胴の間には12mmのナトリウム層をモデル化した。熱遮蔽板と胴に挟まれたナトリウム層はスタグナントと仮定し、その熱伝導のみを考慮した。モデル2を除く2つの解析モデルは、構造および荷重の対称性を考慮して軸方向に2分割した対称モデルとした。胴および熱遮蔽板材質は、SUS304とした。

熱応力解析モデルをFig.3.2-2 に示す。熱応力解析モデルは、伝熱解析モデルから熱遮蔽板、ナトリウムおよび熱伝達要素を取り除いたものである。

(3) 熱過渡条件

熱過渡条件は、高温側温度を 600℃、低温側温度を 250℃として、温度変化速度を±5℃/sec（一定）とした。また、ホット・コールドトランジェントともに熱過渡開始から終了迄を1時間とした。

(4) 境界条件

伝熱解析では、熱荷重としてサーマルライナ内面に熱過渡及び熱伝達を与えた。解析モデルの外表面は断熱とした。

幾何学的境界条件は全ての熱応力解析に対して共通であり、モデル上部に連続条件、モデル下端に対称条件を設定した。Fig.3.2-3～5に熱的境界条件および幾何学的境界条件を示す。

(5) 材料定数

伝熱・応力解析に用いた材料定数をTable 3.2-1～3に示す。解析では、これらの材料定数の温度依存性を考慮した。

(6) 応力-ひずみ関係

応力-ひずみ関係は、FINASの材料ライブラリを用いた。弾塑性及び弾塑性クリープ解析においては、応力-ひずみ関係をひずみ範囲0.6%の条件で2直線近似したものを温度依存性を考慮して用いた。

(7) 塑性に関する硬化則

塑性に関する硬化則はORNL推奨の硬化則を用いた。ORNL推奨の硬化則をは定常

繰返し硬化則と呼ばれ、降伏面の移動の他に2サイクル目以降の降伏面の膨張を10サイクル目の降伏応力を用いて考慮するものである。

(8) クリープに関する硬化則

クリープに関する硬化則はひずみ硬化を用いた。ひずみ硬化則では、クリープひずみの増分が、解析しようとする負荷ステップ前までの応力、温度および相当クリープひずみ（クリープ開始から累積されたクリープひずみ量）によって計算される。

(9) 解析方法

(a) 伝熱解析

熱応力解析の入力として、熱過渡に対する構造物の温度応答が定常に達した後の温度分布を用いるため、熱過渡をコールド⇒ホットの順で4サイクルを繰返し入力し、最終サイクルの温度応答を熱応力解析の入力として用いた。

(b) 熱応力解析

熱応力解析は、伝熱解析で求めた構造物の温度分布を入力として実施した。弾性熱応力解析では、コールド⇒ホットの順で熱過渡1サイクル分を解析した。弾塑性解析では、伝熱解析の最終サイクルの全ステップを熱荷重条件としてコールド⇒ホット⇒コールドの順で1.5サイクル分の熱応力解析を実施した。また、弾塑性クリープ解析では、弾塑性解析と同様に伝熱解析の最終1サイクルの全ステップを熱荷重条件として伝熱解析1ステップに対して3ステップの弾塑性クリープ解析を1.5サイクル分実施した。

Table 3.2-1 Material properties for heat transfer analysis
(Type 304 stainless steel)

温度 T (°C)	熱伝導率 λ (kcal/mm-sec-°C)	比熱 C _p (kcal/kg-°C)	密度 γ (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}

Table 3.2-2 Material properties for heat transfer analysis (Sodium)

温度 T (°C)	熱伝導率 λ (kcal/mm-sec-°C)	比熱 C _p (kcal/kg-°C)	密度 γ (kg/mm ³)
100	2.087×10^{-5}	0.3305	9.270×10^{-7}
150	2.027×10^{-5}	0.3249	9.153×10^{-7}
200	1.956×10^{-5}	0.3199	9.036×10^{-7}
250	1.893×10^{-5}	0.3155	8.918×10^{-7}
300	1.831×10^{-5}	0.3116	8.800×10^{-7}
350	1.771×10^{-5}	0.3082	8.681×10^{-7}
400	1.712×10^{-5}	0.3054	8.562×10^{-7}
450	1.655×10^{-5}	0.3032	8.443×10^{-7}
500	1.599×10^{-5}	0.3015	8.323×10^{-7}
550	1.544×10^{-5}	0.3004	8.203×10^{-7}
600	1.491×10^{-5}	0.2998	8.082×10^{-7}
650	1.439×10^{-5}	0.2998	7.961×10^{-7}

Table 2.2-3 Material properties for thermal stress analysis
(Type 304 stainless steel)

温度 T (°C)	縦弾性係数 E (kg/mm ²)	ポアソン比 ν	線膨張係数 α (1/°C)
20	1.98 × 10 ⁴	0.266	15.15 × 10 ⁻⁶
50	1.96 × 10 ⁴	0.268	15.65 × 10 ⁻⁶
100	1.94 × 10 ⁴	0.272	16.48 × 10 ⁻⁶
150	1.91 × 10 ⁴	0.275	17.22 × 10 ⁻⁶
200	1.88 × 10 ⁴	0.279	17.85 × 10 ⁻⁶
250	1.84 × 10 ⁴	0.283	18.36 × 10 ⁻⁶
300	1.80 × 10 ⁴	0.287	18.79 × 10 ⁻⁶
350	1.76 × 10 ⁴	0.291	19.19 × 10 ⁻⁶
400	1.72 × 10 ⁴	0.295	19.57 × 10 ⁻⁶
450	1.67 × 10 ⁴	0.298	19.93 × 10 ⁻⁶
500	1.62 × 10 ⁴	0.302	20.28 × 10 ⁻⁶
550	1.57 × 10 ⁴	0.306	20.60 × 10 ⁻⁶
600	1.52 × 10 ⁴	0.310	20.87 × 10 ⁻⁶
650	1.47 × 10 ⁴	0.314	21.09 × 10 ⁻⁶

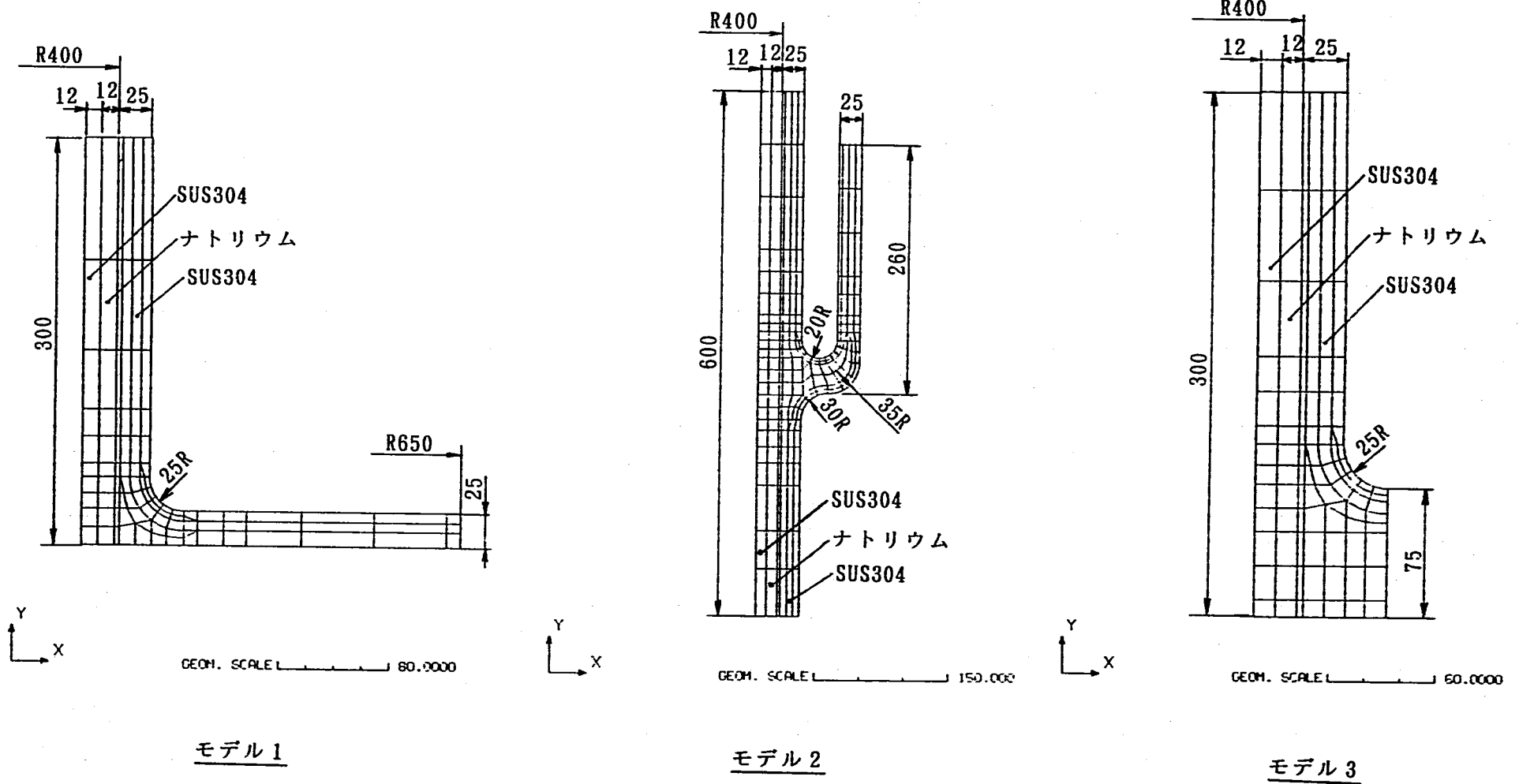
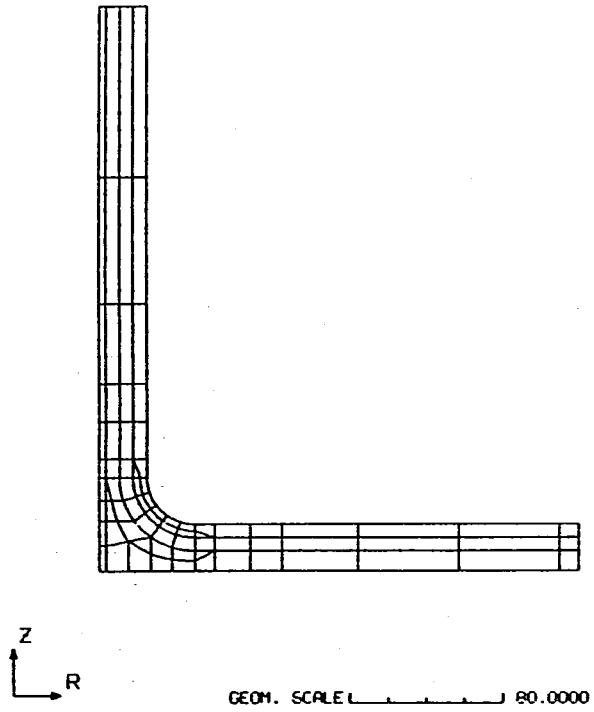
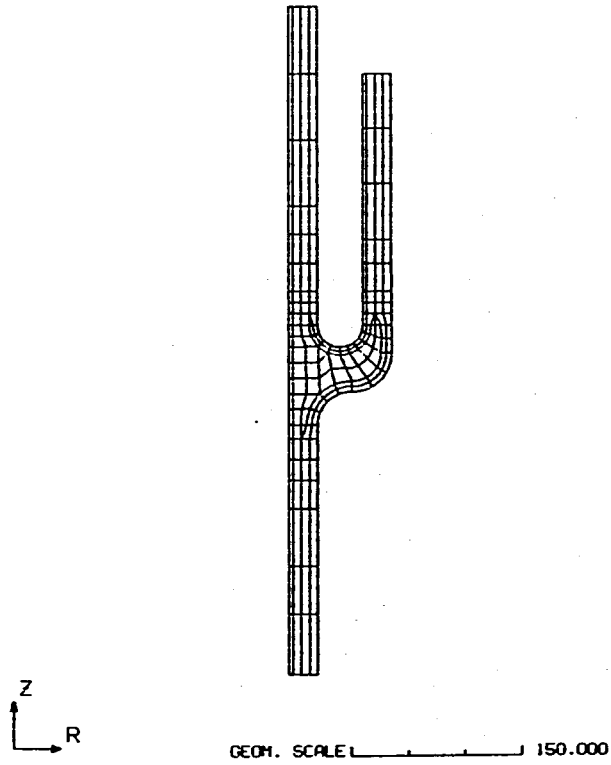


Fig.3.2-1 FEM models for heat transfer analysis

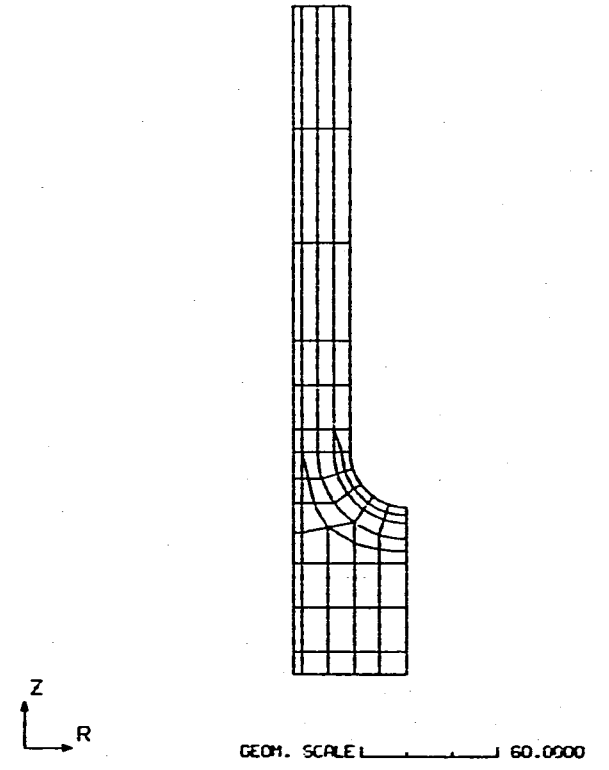
(注) 寸法は Fig3.2-1 参照



モデル 1

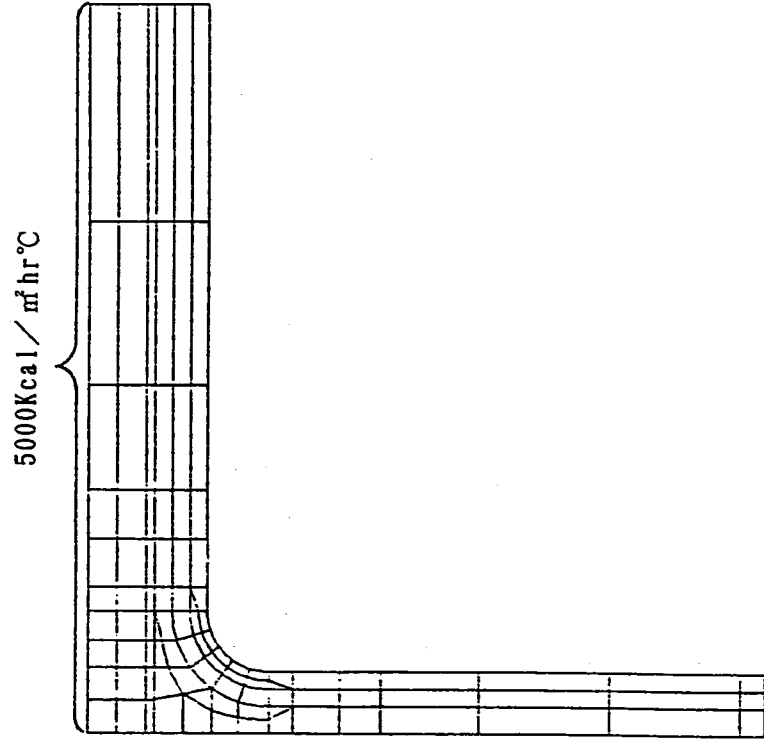


モデル 2

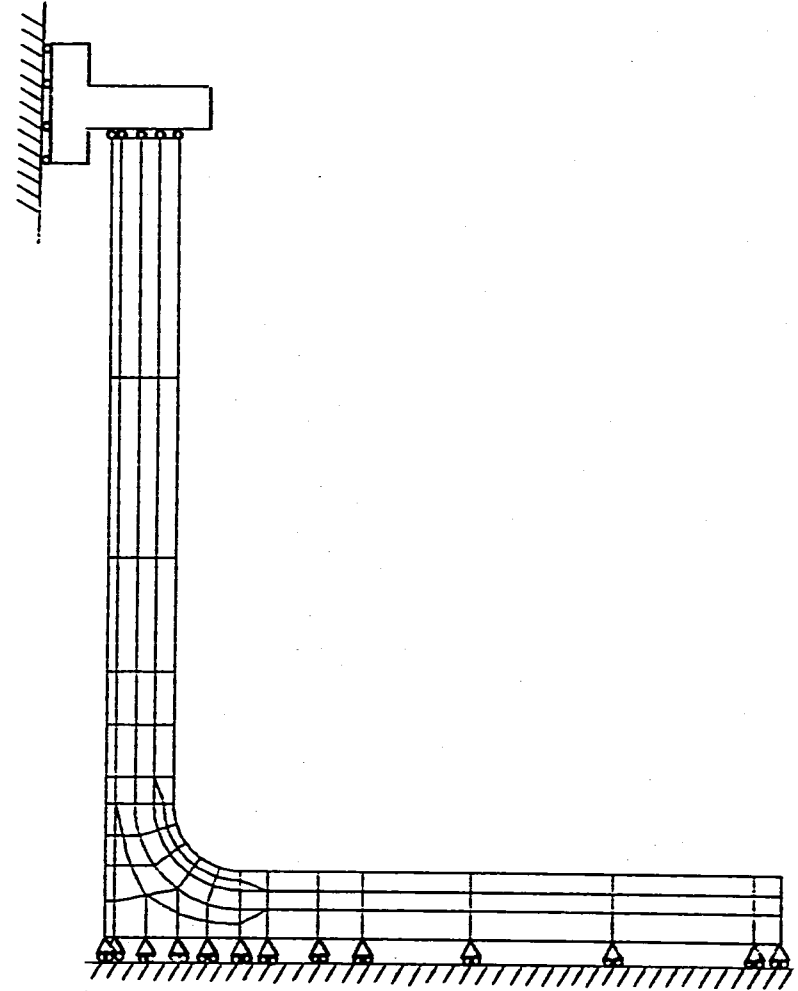


モデル 3

Fig.3.2-2 FEM models for thermal stress analysis

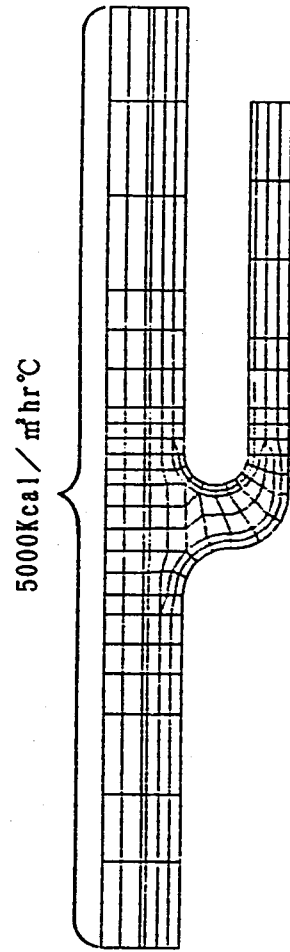


Heat Transfer Analysis

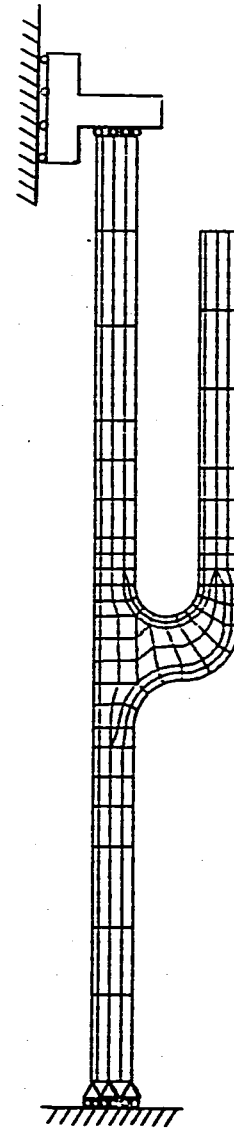


Thermal Stress Analysis

Fig.3.2-3 Boundary condition of Model-1

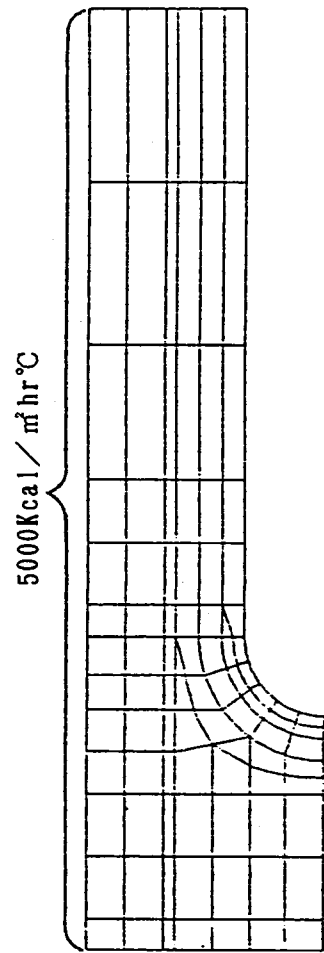


Heat Transfer Analysis

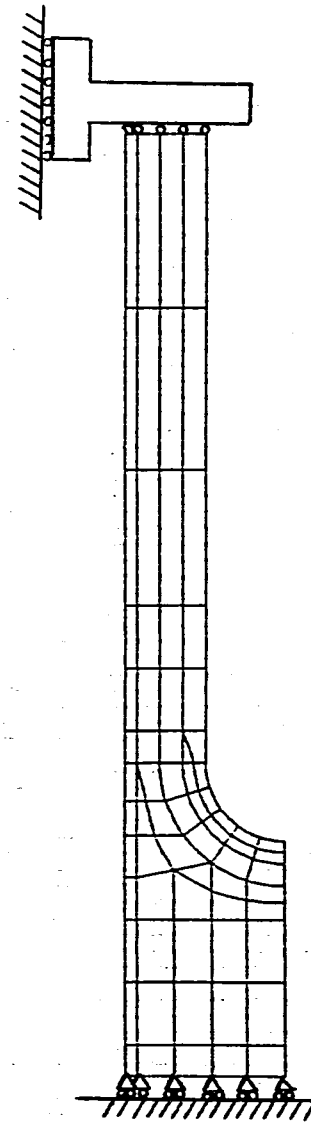


Thermal Stress Analysis

Fig.3.2-4 Boundary condition of Model-2



Heat Transfer Analysis



Thermal Stress Analysis

Fig.3.2-5 Boundary condition of Model-3

3.3 解析結果

(1) 伝熱解析結果

Fig.3.3-1 に示す代表点の温度履歴をFig.3.3-2~4に示す。

- 胴には、過渡初期に板厚内温度勾配が見られるが、比較的早い時間で温度勾配がなくなる。
- モデル1の円盤やモデル2のスカートは胴に対して温度追従が悪く、胴とこれらの部位との間に相対的な温度分布が生じることがわかる。
- モデル3の厚肉部外面は、胴の一般部に比べて若干温度追従が遅れるが、モデル1や2に比べて部材間の相対的溫度差は小さい。

(2) 熱応力解析結果

Fig.3.3-5 に示す評価ラインに沿ったミーゼス型のひずみ範囲を各解析に対して算出し、Fig.3.3-6~8に示す。また、Table 3.3-1~9に、各解析においてミーゼス型のひずみ範囲が最大となる極2時点の時刻、温度、ひずみ及び応力を示す。

- モデル1、2のスカートや円板の付け根のように、構造物間の相対的溫度差による熱曲げやたが締め状態においてひずみ範囲が決定される部位（非等2軸応力場が形成される部位）と一般胴部のように熱過渡初期の板厚内溫度勾配が要因でひずみ範囲が決定される部位（等2軸応力場が形成される部位）では弾性解析と弾塑性解析のひずみ範囲の比率が異なる。
- 弾塑性クリープ解析によるひずみ範囲は、構造物間の相対的溫度差による熱曲げやたが締めが生じる部位で弾塑性解析に対して1割弱大きくなるが、その他の部位では、クリープによるひずみの増加は殆ど見られない。
- 弾塑性解析と弾塑性クリープ解析において、極2時点を形成する時間のずれはほとんどないが、弾性解析と弾塑性解析では極2時点を形成する時間のずれが大きい部位が目立つ。この傾向は、たが締めや熱曲げによる応力が発生するモデル1や2に多く、板厚内溫度勾配による応力が支配的なモデル3では少ない。

Table 3.3-1 Results of thermal stress analysis (Model-1,elastic)

No.	熱過渡	時間 (sec)	温度 (°C)	ϵ_{eq} (%)	ϵ_r (%)	ϵ_z (%)	ϵ_h (%)	γ_{rz} (%)	σ_{eq} (kg/mm ²)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
1	COLD	150	416.8	0.3125	-0.1070	0.1342	0.1173	0.0005	64.38	0.17	30.32	29.00	0.02
	HOT	150	440.0		0.1021	-0.1425	-0.1230	-0.0005		-0.21	-36.88	-33.01	-0.05
2	COLD	150	416.2	0.3220	-0.1109	0.1371	0.1223	0.0003	66.32	0.15	30.58	30.30	0.00
	HOT	150	440.8		0.1048	-0.1468	-0.1263	-0.0003		-0.18	-38.52	-33.61	-0.05
3	COLD	800	271.4	0.3793	-0.0319	-0.1225	0.1827	-0.0053	73.71	-0.06	-17.29	27.36	-0.39
	HOT	800	581.8		0.0072	0.1459	-0.1965	0.0061		0.02	8.18	-30.20	0.34
4	COLD	900	270.6	0.4526	-0.0131	-0.1797	0.1920	-0.0042	87.33	-0.13	-28.22	25.91	-0.30
	HOT	900	581.6		-0.0159	0.2073	-0.2049	0.0046		0.12	18.22	-28.37	0.27
5	COLD	900	274.7	0.5063	-0.0017	-0.2174	0.2013	-0.0003	97.80	-0.20	-34.94	25.59	0.00
	HOT	900	577.6		-0.0266	0.2430	-0.2136	-0.0003		0.21	24.46	-27.89	0.01
6	COLD	900	278.1	0.4980	-0.0048	-0.2106	0.2053	0.0023	96.60	-0.08	-32.92	26.84	0.18
	HOT	900	574.3		-0.0186	0.2295	-0.2167	-0.0031		0.09	22.66	-29.12	-0.16
7	COLD	900	281.1	0.4589	-0.0174	-0.1786	0.2066	0.0019	89.46	0.00	-26.22	28.96	0.14
	HOT	900	571.4		-0.0011	0.1908	-0.2171	-0.0023		0.00	16.36	-31.26	-0.13
8	COLD	900	282.1	0.4427	-0.0230	-0.1644	0.2067	-0.0011	86.47	0.01	-23.31	29.79	-0.07
	HOT	900	570.4		0.0063	0.1741	-0.2169	0.0014		-0.02	13.60	-32.11	0.09

Table 3.3-2 Results of thermal stress analysis (Model-1,elasto-plastic)

No.	熱過渡	時間 (sec)	温度 (°C)	ϵ_{eq} (%)	ϵ_r (%)	ϵ_z (%)	ϵ_h (%)	γ_{rz} (%)	σ_{eq} (kg/mm ²)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
1	HOT	130	419.4	0.3899	0.1632	-0.1538	-0.1290	0.0042	42.03	-0.70	-25.33	-25.83	0.09
	COLD	130	437.5		-0.1571	0.1180	0.1280	0.0037		-0.58	15.22	17.75	0.04
2	HOT	130	420.4	0.4107	0.2022	-0.1864	-0.1282	-0.0047	42.43	-0.68	-23.73	-24.66	-0.08
	COLD	130	436.6		-0.1383	0.1082	0.1263	-0.0066		-0.53	14.98	20.93	-0.17
3	HOT	130	421.7	0.4964	0.1536	-0.1591	-0.1284	0.0015	42.60	-0.93	-23.67	-33.00	0.03
	COLD	130	435.6		-0.2705	0.2135	0.1255	0.0125		-1.06	11.75	14.09	0.03
4	HOT	130	422.4	0.5370	0.2039	-0.1985	-0.1295	-0.0009	44.79	-0.12	-20.22	-33.29	0.12
	COLD	130	435.2		-0.2557	0.2148	0.1253	0.0089		-0.16	14.30	17.26	0.08
5	HOT	700	568.0	0.6040	0.0064	0.2896	-0.2354	-0.0027	58.35	0.34	28.65	-6.85	-0.04
	COLD	700	285.7		-0.0421	-0.2811	0.2401	-0.0028		-0.07	-30.56	-8.16	0.03
6	HOT	700	564.1	0.5897	0.0219	0.2663	-0.2392	-0.0049	54.90	0.10	26.02	-8.59	-0.22
	COLD	700	289.6		-0.0484	-0.2701	0.2446	0.0042		-0.10	-27.92	-6.57	0.25
7	HOT	700	560.7	0.5297	0.0558	0.2068	-0.2393	-0.0086	48.69	0.04	19.84	-12.83	-0.20
	COLD	700	293.0		-0.1011	-0.1969	0.2458	-0.0026		0.03	-22.89	-2.55	0.14
8	HOT	700	559.5	0.5117	0.0670	0.1821	-0.2388	0.0073	47.36	-0.22	17.01	-15.00	0.13
	COLD	700	294.3		-0.1204	-0.1699	0.2456	0.0041		-0.24	-21.44	-0.54	-0.13

Table 3.3-3 Results of thermal stress analysis (Model-1,elastic-plastic-creep)

No.	熱過渡	時間 (sec)	温度 (°C)	ϵ_{eq} (%)	ϵ_r (%)	ϵ_z (%)	ϵ_h (%)	γ_{rz} (%)	σ_{eq} (kg/mm ²)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
1	HOT	129.99	419.4	0.3884	0.1635	-0.1533	-0.1290	0.0053	41.27	-0.81	-25.15	-25.57	0.10
	COLD	129.77	437.4		-0.1562	0.1194	0.1235	0.0043		-0.61	15.20	16.93	0.06
2	HOT	129.99	420.4	0.4105	0.2043	-0.1867	-0.1285	-0.0050	41.60	-0.72	-23.71	-24.05	-0.10
	COLD	129.77	436.6		-0.1367	0.1119	0.1196	-0.0055		-0.49	15.02	20.31	-0.16
3	HOT	129.99	421.7	0.4970	0.1522	-0.1574	-0.1288	0.0018	42.35	-1.03	-23.92	-32.68	0.01
	COLD	129.77	435.6		-0.2708	0.2237	0.1164	0.0114		-0.95	11.79	14.22	0.03
4	HOT	129.99	422.4	0.5547	0.2040	-0.1977	-0.1299	-0.0011	43.27	-0.13	-20.47	-32.81	0.10
	COLD	129.77	435.2		-0.2722	0.2364	0.1151	0.0076		0.08	13.01	16.31	0.02
5	HOT	799.98	574.1	0.6130	-0.0186	0.3138	-0.2347	-0.0025	49.99	0.54	24.17	-2.57	-0.03
	COLD	699.70	285.7		-0.0360	-0.2765	0.2356	-0.0021		-0.24	-28.40	-7.17	0.04
6	HOT	699.98	564.1	0.5981	0.0088	0.2802	-0.2432	-0.0056	49.36	0.10	23.11	-6.85	-0.20
	COLD	699.70	289.6		-0.0363	-0.2723	0.2402	0.0052		-0.21	-25.90	-5.88	0.21
7	HOT	699.98	560.7	0.5320	0.0497	0.2151	-0.2435	-0.0089	45.03	0.04	17.87	-11.59	-0.18
	COLD	699.70	293.0		-0.0914	-0.1985	0.2415	-0.0024		0.04	-21.65	-2.09	0.12
8	HOT	666.65	556.6	0.5128	0.0666	0.1847	-0.2450	0.0078	44.06	-0.20	15.00	-14.58	0.12
	COLD	699.70	294.2		-0.1115	-0.1716	0.2413	0.0040		-0.22	-20.23	-0.40	-0.13

Table 3.3-4 Results of thermal stress analysis (Model-2,elastic)

No.	熱過渡	時間 (sec)	温度 (°C)	ϵ_{eq} (%)	ϵ_r (%)	ϵ_z (%)	ϵ_h (%)	γ_{rz} (%)	σ_{eq} (kg/mm ²)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
1	COLD	150	417.7	0.3326	-0.1149	0.1397	0.1277	0.0003	68.82	0.15	31.75	30.54	0.01
	HOT	150	439.0		0.1077	-0.1491	-0.1350	-0.0003		-0.18	-39.16	-36.71	-0.03
2	COLD	150	417.4	0.3423	-0.1187	0.1369	0.1390	-0.0002	70.81	0.16	31.60	32.60	-0.02
	HOT	150	439.4		0.1107	-0.1477	-0.1445	0.0001		-0.19	-39.67	-38.47	0.00
3	COLD	150	417.1	0.3477	-0.1205	0.1250	0.1539	-0.0004	71.86	0.14	29.78	34.74	-0.04
	HOT	150	440.0		0.1120	-0.1384	-0.1576	0.0004		-0.17	-38.88	-40.51	0.02
4	COLD	150	417.1	0.3472	-0.1197	0.1160	0.1604	-0.0005	71.70	0.18	28.26	35.46	-0.04
	HOT	150	440.1		0.1112	-0.1311	-0.1637	0.0005		-0.20	-37.96	-41.31	0.03
5	COLD	700	278.6	0.4068	-0.0076	-0.1664	0.1644	-0.0041	79.55	-0.01	-26.48	20.12	-0.29
	HOT	700	574.7		-0.0260	0.1968	-0.1761	0.0048		0.00	19.07	-26.17	0.29
6	COLD	700	282.4	0.4740	0.0106	-0.2153	0.1678	-0.0042	92.47	-0.12	-35.78	17.91	-0.28
	HOT	700	570.9		-0.0464	0.2486	-0.1784	0.0043		0.13	28.47	-23.85	0.28
7	COLD	700	286.3	0.5021	0.0207	-0.2389	0.1666	-0.0002	98.17	-0.19	-40.15	16.27	0.00
	HOT	700	567.0		-0.0551	0.2690	-0.1756	-0.0005		0.21	32.96	-22.29	-0.01
8	COLD	700	289.8	0.4607	0.0150	-0.2173	0.1611	0.0041	90.62	-0.15	-35.75	16.41	0.30
	HOT	700	563.4		-0.0442	0.2386	-0.1682	-0.0052		0.15	28.82	-22.65	-0.30
9	COLD	500	309.5	0.3597	-0.0173	-0.1379	0.1651	0.0050	72.03	0.01	-19.44	21.71	0.36
	HOT	500	544.7		-0.0034	0.1480	-0.1702	-0.0055		-0.02	13.55	-27.90	-0.32
10	COLD	150	420.0	0.3287	-0.0962	0.0352	0.1875	-0.0006	67.59	0.13	15.76	35.78	-0.03
	HOT	150	439.1		0.0925	-0.0492	-0.1929	0.0008		-0.14	-21.90	-42.52	0.08
11	COLD	150	419.7	0.3248	-0.0935	0.0301	0.1862	0.0000	66.83	0.03	15.06	35.18	0.01
	HOT	150	439.1		0.0902	-0.0421	-0.1918	-0.0001		-0.04	-19.93	-41.94	0.00
12	COLD	150	418.7	0.3254	-0.0978	0.0456	0.1827	0.0023	67.01	0.18	17.87	35.40	0.15
	HOT	150	439.5		0.0946	-0.0585	-0.1882	-0.0025		-0.22	-22.92	-42.35	-0.18
13	COLD	150	417.9	0.3342	-0.1077	0.0758	0.1760	0.0027	68.86	0.23	23.04	35.78	0.17
	HOT	150	439.8		0.1036	-0.0898	-0.1815	-0.0026		-0.28	-28.93	-42.95	-0.20
14	COLD	150	417.4	0.3422	-0.1146	0.0976	0.1688	0.0014	70.60	0.10	26.56	35.54	0.09
	HOT	150	439.9		0.1094	-0.1111	-0.1744	-0.0013		-0.13	-32.93	-42.80	-0.10
15	COLD	150	417.2	0.3445	-0.1178	0.1178	0.1567	0.0009	71.18	0.18	29.59	34.38	0.06
	HOT	150	439.7		0.1114	-0.1299	-0.1630	-0.0008		-0.21	-36.33	-41.74	-0.06
16	COLD	150	417.4	0.3428	-0.1184	0.1299	0.1451	0.0003	70.92	0.15	31.11	32.84	0.02
	HOT	150	439.3		0.1112	-0.1409	-0.1524	-0.0003		-0.18	-38.12	-40.28	-0.03
17	COLD	150	417.7	0.3347	-0.1158	0.1367	0.1318	-0.0002	69.31	0.17	31.55	30.72	-0.02
	HOT	150	438.9		0.1084	-0.1466	-0.1406	0.0002		-0.20	-38.83	-38.24	0.01

Table 3.3-5 Results of thermal stress analysis (Model-2,elasto-plastic)

No.	熱過渡	時間 (sec)	温度 (°C)	ϵ_{eq} (%)	ϵ_r (%)	ϵ_z (%)	ϵ_h (%)	γ_{rz} (%)	σ_{eq} (kg/mm ²)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
1	HOT	130	418.3	0.4616	0.1745	-0.1599	-0.1498	0.0012	42.68	-0.46	-29.12	-28.77	0.02
	COLD	130	438.4		-0.2159	0.1538	0.1396	0.0013		-0.21	13.84	14.13	0.00
2	HOT	130	418.8	0.4737	0.1889	-0.1583	-0.1605	0.0085	43.33	0.88	-28.03	-28.96	0.26
	COLD	130	438.0		-0.2138	0.1526	0.1442	0.0101		0.82	13.42	15.92	0.16
3	HOT	130	419.6	0.5053	0.1994	-0.1495	-0.1743	-0.0086	45.10	1.75	-24.46	-31.13	-0.18
	COLD	130	437.5		-0.2346	0.1722	0.1518	-0.0028		1.15	14.52	17.37	-0.10
4	HOT	130	419.9	0.5111	0.1760	-0.1349	-0.1803	-0.0038	47.46	-0.51	-24.42	-35.12	-0.04
	COLD	130	437.3		-0.2602	0.1896	0.1561	0.0005		-0.67	14.50	17.53	-0.01
5	HOT	130	420.3	0.5227	0.1891	-0.1375	-0.1864	0.0019	49.68	-0.20	-21.55	-36.36	0.08
	COLD	130	437.2		-0.2565	0.1917	0.1610	0.0073		-0.18	16.23	19.94	0.06
6	HOT	130	420.5	0.5300	0.2135	-0.1488	-0.1924	-0.0016	51.77	-0.36	-17.69	-37.03	0.15
	COLD	130	437.2		-0.2378	0.1792	0.1661	-0.0005		0.29	17.53	23.14	-0.01
7	HOT	130	420.8	0.5228	0.2238	-0.1416	-0.1991	0.0021	52.12	-0.18	-13.93	-36.32	0.08
	COLD	130	437.2		-0.2231	0.1564	0.1723	-0.0022		0.27	15.91	24.31	-0.07
8	HOT	130	420.8	0.4813	0.1913	-0.0988	-0.2046	0.0008	49.91	-0.24	-12.63	-35.47	0.00
	COLD	130	437.5		-0.2133	0.1265	0.1786	-0.0062		-0.01	12.77	22.24	-0.08
9	HOT	130	421.0	0.4528	0.1613	-0.0650	-0.2108	0.0004	44.44	0.05	-15.48	-33.94	-0.06
	COLD	130	437.6		-0.2081	0.0887	0.1873	-0.0104		-0.13	8.07	17.15	-0.12
10	HOT	130	420.9	0.4242	0.1469	-0.0468	-0.2139	0.0004	42.18	-0.15	-17.06	-31.91	-0.03
	COLD	130	437.7		-0.1775	0.0502	0.1935	-0.0035		0.00	7.23	16.95	-0.03
11	HOT	130	420.6	0.4075	0.1382	-0.0371	-0.2137	0.0010	41.63	-0.12	-17.03	-31.35	0.00
	COLD	130	437.9		-0.1574	0.0285	0.1964	-0.0011		0.09	7.72	16.92	0.00
12	HOT	130	420.5	0.4089	0.1375	-0.0444	-0.2104	-0.0020	41.78	-0.26	-18.90	-31.37	-0.07
	COLD	130	437.5		-0.1631	0.0398	0.1964	0.0019		0.21	9.54	17.13	0.08
13	HOT	130	420.1	0.4322	0.1524	-0.0755	-0.2033	-0.0035	42.37	-0.31	-22.78	-31.41	-0.15
	COLD	130	437.5		-0.1871	0.0725	0.1928	0.0048		0.22	11.82	16.57	0.10
14	HOT	130	419.8	0.4556	0.1681	-0.1035	-0.1957	-0.0023	42.87	-0.12	-25.36	-31.04	-0.07
	COLD	130	437.5		-0.2049	0.0955	0.1880	0.0012		0.07	12.87	15.60	0.03
15	HOT	130	419.2	0.4712	0.1811	-0.1342	-0.1831	-0.0040	43.04	-0.21	-28.18	-30.35	-0.08
	COLD	130	437.8		-0.2141	0.1126	0.1791	-0.0011		0.03	13.43	14.44	0.01
16	HOT	130	418.7	0.4795	0.1863	-0.1528	-0.1710	-0.0011	43.14	-0.17	-29.61	-29.52	-0.02
	COLD	130	438.1		-0.2205	0.1277	0.1694	0.0025		-0.01	13.83	13.64	0.03
17	HOT	130	418.3	0.4827	0.1850	-0.1644	-0.1576	-0.0002	43.11	-0.19	-30.26	-28.64	0.00
	COLD	130	438.5		-0.2265	0.1465	0.1566	0.0019		-0.02	14.41	13.11	0.01

Table 3.3-6 Results of thermal stress analysis (Model-2,elastic-plastic-creep)

No.	熱過渡	時間 (sec)	温度 (°C)	ϵ_{eq} (%)	ϵ_r (%)	ϵ_z (%)	ϵ_h (%)	γ_{rz} (%)	σ_{eq} (kg/mm ²)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
1	HOT	129.99	418.3	0.4560	0.1740	-0.1595	-0.1496	0.0013	42.62	-0.48	-29.07	-28.80	0.02
	COLD	129.77	438.4		-0.2110	0.1496	0.1389	0.0007		-0.18	13.87	14.09	0.00
2	HOT	129.99	418.8	0.4692	0.1883	-0.1576	-0.1605	0.0091	43.18	0.87	-28.02	-28.90	0.26
	COLD	129.77	438.0		-0.2102	0.1504	0.1423	0.0098		0.81	13.56	15.61	0.14
3	HOT	129.99	419.5	0.5042	0.1985	-0.1480	-0.1744	-0.0086	44.64	1.74	-24.49	-30.87	-0.18
	COLD	129.77	437.5		-0.2346	0.1759	0.1482	-0.0049		1.35	14.61	17.16	-0.10
4	HOT	129.99	419.9	0.5142	0.1760	-0.1340	-0.1804	-0.0038	47.30	-0.52	-24.39	-34.83	-0.04
	COLD	129.77	437.3		-0.2635	0.1974	0.1517	-0.0002		-0.62	14.38	17.74	0.00
5	HOT	129.99	420.3	0.5299	0.1897	-0.1365	-0.1864	0.0019	49.58	-0.18	-21.35	-35.90	0.08
	COLD	129.77	437.1		-0.2638	0.2038	0.1559	0.0073		-0.03	15.35	20.69	0.05
6	HOT	129.99	420.5	0.5666	0.2148	-0.1483	-0.1925	-0.0015	50.81	-0.33	-17.57	-36.45	0.15
	COLD	129.77	437.2		-0.2766	0.2154	0.1608	-0.0003		0.31	14.74	22.80	-0.06
7	HOT	129.99	420.8	0.5647	0.2248	-0.1412	-0.1991	0.0020	50.05	-0.16	-13.93	-35.74	0.07
	COLD	129.77	437.2		-0.2709	0.1945	0.1672	-0.0040		0.23	12.13	22.33	-0.08
8	HOT	129.99	420.8	0.4966	0.1920	-0.0988	-0.2046	0.0008	47.44	-0.26	-12.83	-34.93	-0.01
	COLD	129.77	437.5		-0.2348	0.1391	0.1736	-0.0068		-0.05	9.82	19.77	-0.06
9	HOT	129.99	421.0	0.4459	0.1605	-0.0634	-0.2107	0.0002	43.22	0.01	-15.49	-33.54	-0.06
	COLD	129.77	437.6		-0.2027	0.0850	0.1830	-0.0065		0.03	7.74	16.35	-0.06
10	HOT	129.99	420.9	0.4189	0.1464	-0.0464	-0.2138	0.0003	41.75	-0.17	-17.27	-31.63	-0.02
	COLD	129.77	437.7		-0.1727	0.0491	0.1900	-0.0032		0.01	7.53	16.77	-0.03
11	HOT	129.99	420.6	0.4043	0.1383	-0.0368	-0.2134	0.0012	41.26	-0.14	-16.99	-31.12	0.01
	COLD	129.77	437.9		-0.1548	0.0282	0.1936	-0.0011		0.04	7.82	16.70	0.00
12	HOT	129.99	420.5	0.4063	0.1382	-0.0444	-0.2101	-0.0019	41.27	-0.27	-18.72	-31.10	-0.07
	COLD	129.77	437.5		-0.1602	0.0379	0.1944	0.0017		0.21	9.50	16.81	0.08
13	HOT	129.99	420.1	0.4290	0.1526	-0.0752	-0.2029	-0.0035	41.93	-0.32	-22.56	-31.21	-0.15
	COLD	129.77	437.5		-0.1840	0.0697	0.1914	0.0047		0.24	11.71	16.29	0.10
14	HOT	129.99	419.8	0.4515	0.1675	-0.1028	-0.1951	-0.0024	42.55	-0.14	-25.16	-30.94	-0.08
	COLD	129.77	437.4		-0.2015	0.0921	0.1871	0.0012		0.09	12.75	15.43	0.03
15	HOT	129.99	419.2	0.4681	0.1808	-0.1348	-0.1821	-0.0041	42.90	-0.23	-28.18	-30.28	-0.09
	COLD	129.77	437.7		-0.2113	0.1100	0.1787	-0.0007		0.07	13.35	14.42	0.01
16	HOT	129.99	418.7	0.4797	0.1874	-0.1551	-0.1699	-0.0010	43.17	-0.18	-29.78	-29.41	-0.01
	COLD	129.77	438.1		-0.2197	0.1273	0.1693	0.0025		0.03	13.86	13.72	0.03
17	HOT	129.99	418.3	0.4797	0.1829	-0.1629	-0.1566	0.0001	43.09	-0.22	-30.13	-28.64	0.02
	COLD	129.77	438.4		-0.2256	0.1460	0.1568	0.0018		0.01	14.46	13.31	0.01

Table 3.3-7 Results of thermal stress analysis (Model-3, elastic)

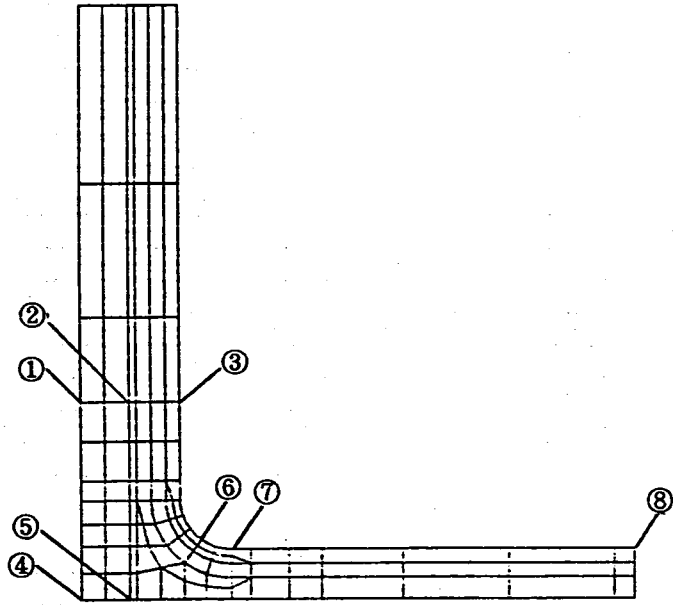
No.	熱過渡	時間 (sec)	温度 (°C)	ϵ_{eq} (%)	ϵ_r (%)	ϵ_z (%)	ϵ_h (%)	γ_{rz} (%)	σ_{eq} (kg/mm ²)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
1	COLD	130	438.2	0.2912	-0.0974	0.1459	0.0784	0.0019	60.32	0.24	29.67	21.55	0.11
	HOT	130	418.3		0.0911	-0.1512	-0.0936	-0.0017		-0.26	-37.92	-28.68	-0.13
2	COLD	125	444.9	0.3305	-0.1073	0.1789	0.0672	0.0024	68.53	0.17	34.80	21.33	0.15
	HOT	130	419.3		0.0987	-0.1810	-0.0837	-0.0022		-0.18	-43.81	-28.27	-0.17
3	COLD	110	465.6	0.3915	-0.1230	0.2229	0.0602	0.0027	81.25	0.29	42.14	22.49	0.16
	HOT	130	421.8		0.1111	-0.2198	-0.0792	-0.0024		-0.21	-52.02	-29.59	-0.19
4	COLD	110	463.4	0.4252	-0.1332	0.2447	0.0619	0.0011	88.30	0.31	46.06	23.97	0.06
	HOT	130	424.3		0.1189	-0.2391	-0.0810	-0.0008		-0.22	-56.34	-31.14	-0.07
5	COLD	110	458.3	0.4311	-0.1382	0.2465	0.0713	-0.0008	89.55	0.26	46.89	25.70	-0.05
	HOT	130	429.4		0.1218	-0.2380	-0.0896	0.0011		-0.16	-56.65	-32.89	0.08
6	COLD	110	449.8	0.4163	-0.1383	0.2296	0.0898	-0.0021	86.44	0.37	45.05	28.14	-0.13
	HOT	110	405.2		0.1202	-0.2251	-0.1004	0.0019		-0.58	-54.43	-34.67	0.15
7	COLD	110	431.7	0.3909	-0.1390	0.1876	0.1298	-0.0005	81.07	-0.04	39.74	32.83	-0.04
	HOT	110	421.2		0.1206	-0.1859	-0.1349	0.0011		0.08	-47.70	-39.51	0.07
8	COLD	110	408.4	0.3357	-0.1138	0.0822	0.1808	-0.0089	69.53	0.18	24.23	36.45	-0.53
	HOT	110	440.6		0.0987	-0.0869	-0.1773	0.0076		-0.24	-28.86	-42.75	0.61
9	COLD	110	390.0	0.3839	-0.1235	0.0661	0.2203	0.0017	79.46	0.15	23.69	42.71	0.11
	HOT	110	456.0		0.1089	-0.0790	-0.2101	-0.0017		-0.21	-28.75	-49.10	-0.13
10	COLD	110	380.1	0.4234	-0.1381	0.0784	0.2401	0.0014	87.61	-0.04	26.96	46.94	0.09
	HOT	110	465.0		0.1228	-0.0941	-0.2281	-0.0013		0.04	-32.74	-53.55	-0.10
11	COLD	110	379.0	0.4274	-0.1394	0.0805	0.2422	0.0004	88.42	0.06	27.51	47.48	0.02
	HOT	110	466.0		0.1239	-0.0963	-0.2300	-0.0003		-0.09	-33.35	-54.12	-0.02

Table 3.3-8 Results of thermal stress analysis (Model-3,elasto-plastic)

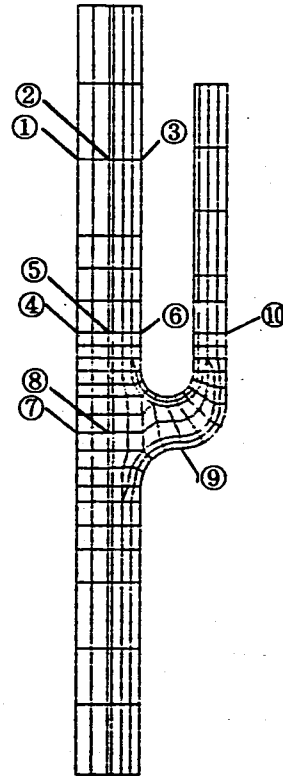
No.	熱過渡	時間 (sec)	溫度 (°C)	ϵ_{eq} (%)	ϵ_r (%)	ϵ_z (%)	ϵ_h (%)	γ_{rz} (%)	σ_{eq} (kg/mm ²)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
1	HOT	130	418.3	0.3214	0.1398	-0.1602	-0.0932	-0.0027	38.23	-0.40	-26.59	-22.18	-0.12
	COLD	130	438.4		-0.1134	0.1050	0.0884	-0.0012		0.52	14.95	14.03	0.00
2	HOT	130	419.3	0.3842	0.1676	-0.2036	-0.0838	-0.0038	39.89	-0.26	-29.79	-21.71	-0.20
	COLD	130	437.5		-0.1371	0.1380	0.0716	0.0012		0.05	14.88	11.48	0.11
3	HOT	130	421.8	0.5353	0.1708	-0.2264	-0.0804	-0.0011	44.88	-0.22	-35.28	-23.13	-0.17
	COLD	115	458.1		-0.2532	0.2693	0.0571	0.0085		0.32	16.49	9.75	0.18
4	HOT	130	424.3	0.6463	0.1570	-0.2214	-0.0828	-0.0011	48.63	-0.30	-38.54	-24.61	-0.08
	COLD	115	455.8		-0.3575	0.3779	0.0566	0.0029		0.26	17.72	9.89	0.02
5	HOT	115	405.4	0.6465	0.1609	-0.2212	-0.0882	-0.0006	48.66	-0.29	-38.66	-25.02	0.04
	COLD	115	450.6		-0.3584	0.3711	0.0650	-0.0022		0.32	17.61	10.19	-0.06
6	HOT	110	405.2	0.5767	0.1913	-0.2333	-0.1042	-0.0003	46.33	-0.47	-36.46	-26.04	0.12
	COLD	110	450.0		-0.2810	0.2735	0.0839	-0.0070		0.26	16.50	10.89	-0.16
7	HOT	110	421.2	0.5093	0.1981	-0.1996	-0.1389	0.0025	44.06	-0.01	-32.10	-28.41	0.03
	COLD	110	431.9		-0.2348	0.1839	0.1257	0.0054		-0.08	14.04	13.06	0.01
8	HOT	110	440.6	0.3930	0.1498	-0.0858	-0.1815	0.0080	40.48	-0.14	-20.53	-30.07	0.43
	COLD	110	408.4		-0.1583	0.0483	0.1795	-0.0135		-0.09	9.09	16.10	-0.24
9	HOT	110	456.0	0.4654	0.1658	-0.0762	-0.2147	-0.0010	42.70	-0.15	-20.90	-32.95	-0.11
	COLD	110	389.9		-0.1974	0.0469	0.2219	0.0035		0.08	9.60	16.12	0.11
10	HOT	110	465.0	0.5298	0.1874	-0.0894	-0.2329	-0.0011	44.96	0.04	-23.32	-34.86	-0.06
	COLD	110	380.0		-0.2402	0.0710	0.2435	0.0018		0.00	10.83	16.02	0.04
11	HOT	110	466.0	0.5364	0.1889	-0.0912	-0.2349	-0.0005	45.19	-0.10	-23.78	-35.21	-0.02
	COLD	110	378.9		-0.2450	0.0742	0.2458	0.0004		0.04	11.01	16.04	0.00

Table 3.3-9 Results of thermal stress analysis (Model-3,elastic-plastic-creep)

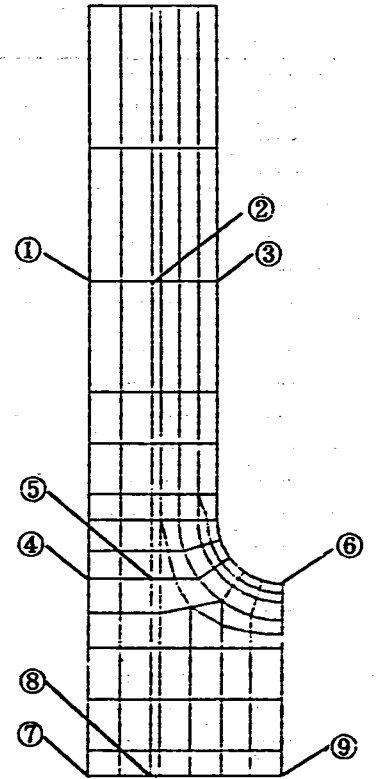
No.	熱過渡	時間 (sec)	温度 (°C)	ϵ_{eq} (%)	ϵ_r (%)	ϵ_z (%)	ϵ_h (%)	γ_{rz} (%)	σ_{eq} (kg/mm ²)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
1	HOT	129.99	418.3	0.3218	0.1400	-0.1602	-0.0933	-0.0028	38.12	-0.41	-26.58	-22.13	-0.12
	COLD	129.77	438.4		-0.1138	0.1050	0.0885	-0.0012		0.53	14.87	13.98	0.00
2	HOT	129.99	419.3	0.3837	0.1678	-0.2037	-0.0838	-0.0039	39.88	-0.26	-29.78	-21.69	-0.20
	COLD	129.77	437.5		-0.1366	0.1374	0.0716	0.0011		0.04	14.89	11.47	0.11
3	HOT	129.99	421.8	0.5357	0.1709	-0.2265	-0.0804	-0.0012	44.91	-0.22	-35.29	-23.15	-0.17
	COLD	116.44	455.5		-0.2534	0.2695	0.0571	0.0087		0.31	16.52	9.75	0.18
4	HOT	116.66	403.1	0.6469	0.1557	-0.2231	-0.0795	-0.0012	48.71	-0.37	-38.74	-24.16	-0.08
	COLD	116.44	453.1		-0.3581	0.3785	0.0566	0.0028		0.24	17.76	9.89	0.01
5	HOT	116.66	408.0	0.6473	0.1612	-0.2215	-0.0883	-0.0006	48.74	-0.29	-38.65	-25.05	0.04
	COLD	116.44	447.9		-0.3588	0.3715	0.0650	-0.0022		0.29	17.66	10.20	-0.06
6	HOT	109.99	405.2	0.5769	0.1914	-0.2335	-0.1041	-0.0003	46.38	-0.47	-36.47	-26.04	0.12
	COLD	109.78	450.0		-0.2810	0.2737	0.0839	-0.0072		0.28	16.56	10.91	-0.16
7	HOT	109.99	421.2	0.5089	0.1982	-0.1997	-0.1389	0.0025	44.10	-0.01	-32.11	-28.41	0.03
	COLD	109.78	431.9		-0.2343	0.1835	0.1257	0.0056		-0.08	14.08	13.09	0.02
8	HOT	109.99	440.6	0.3932	0.1497	-0.0857	-0.1814	0.0081	40.46	-0.14	-20.52	-30.06	0.43
	COLD	109.78	408.4		-0.1586	0.0485	0.1795	-0.0135		-0.08	9.08	16.09	-0.23
9	HOT	109.99	456.0	0.4652	0.1657	-0.0762	-0.2147	-0.0010	42.76	-0.15	-20.88	-32.95	-0.11
	COLD	109.78	389.9		-0.1973	0.0469	0.2219	0.0034		0.08	9.63	16.19	0.10
10	HOT	109.99	465.0	0.5296	0.1875	-0.0895	-0.2329	-0.0011	45.02	0.04	-23.33	-34.86	-0.06
	COLD	109.78	380.0		-0.2399	0.0709	0.2435	0.0018		-0.01	10.85	16.08	0.04
11	HOT	109.99	466.0	0.5363	0.1890	-0.0913	-0.2349	-0.0005	45.25	-0.10	-23.79	-35.21	-0.02
	COLD	109.78	378.9		-0.2447	0.0742	0.2458	0.0006		0.04	11.04	16.11	0.00



モデル 1



モデル 2



モデル 3

Fig.3.3-1 Evaluation points of temperature history

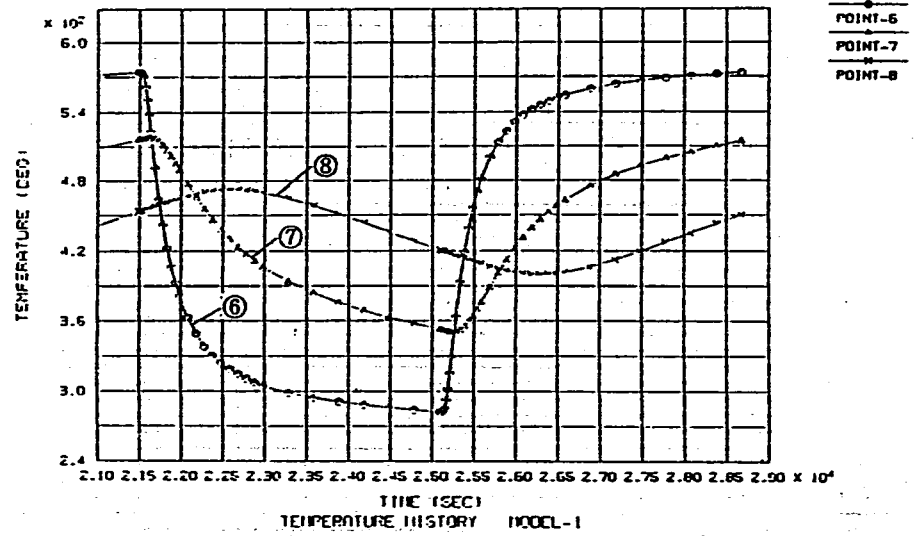
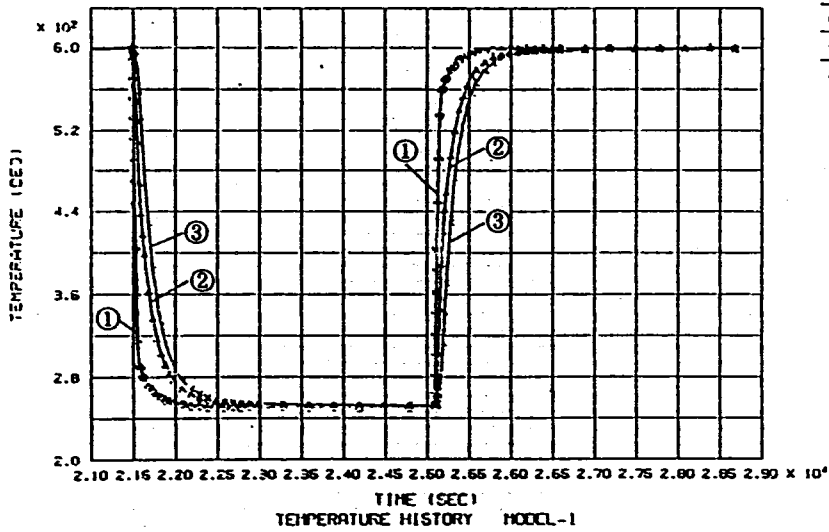
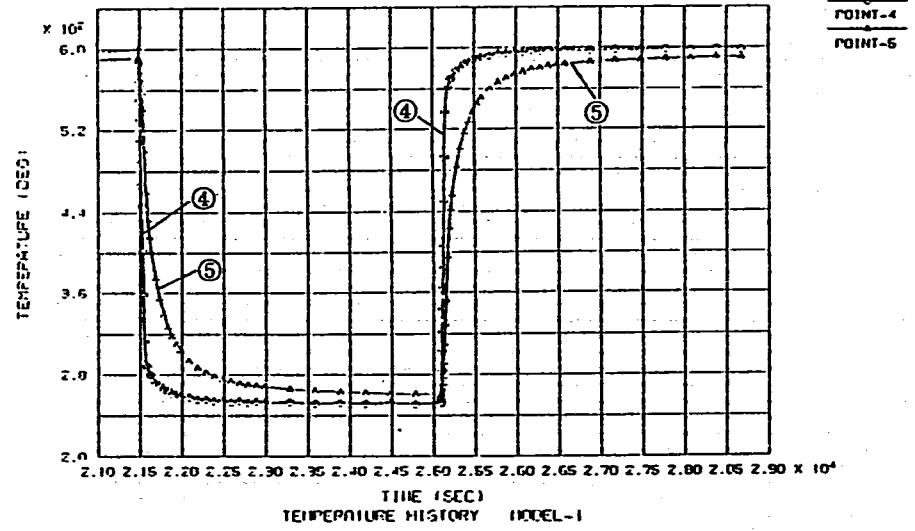
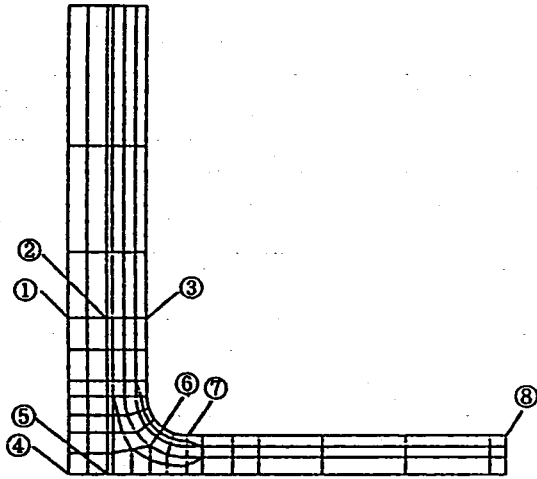


Fig.3.3-2 Temperature history of Model-1

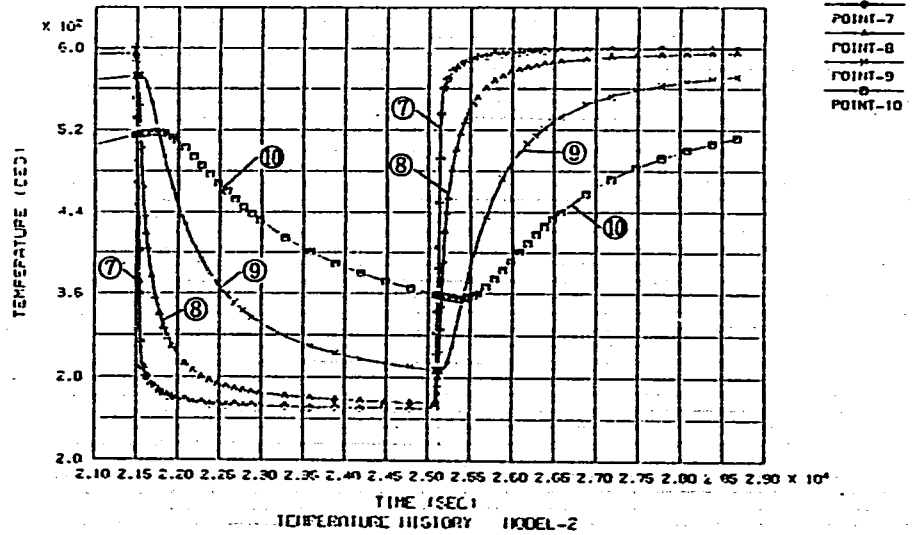
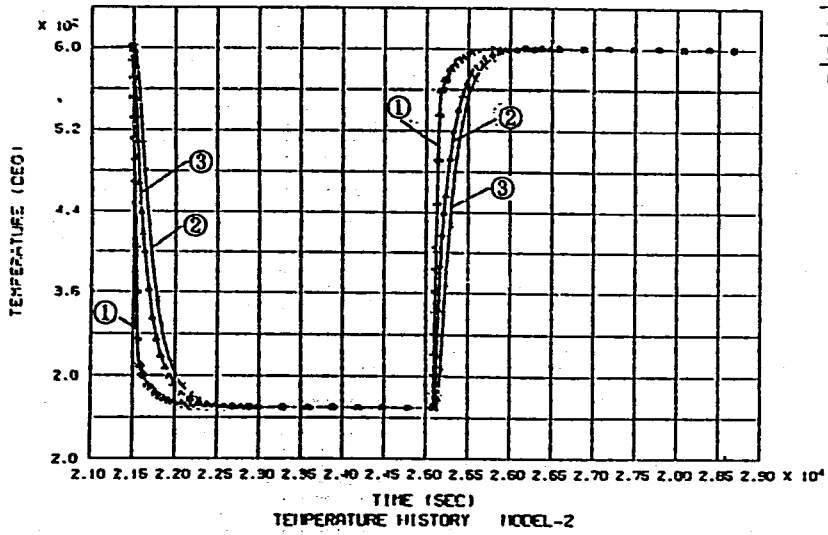
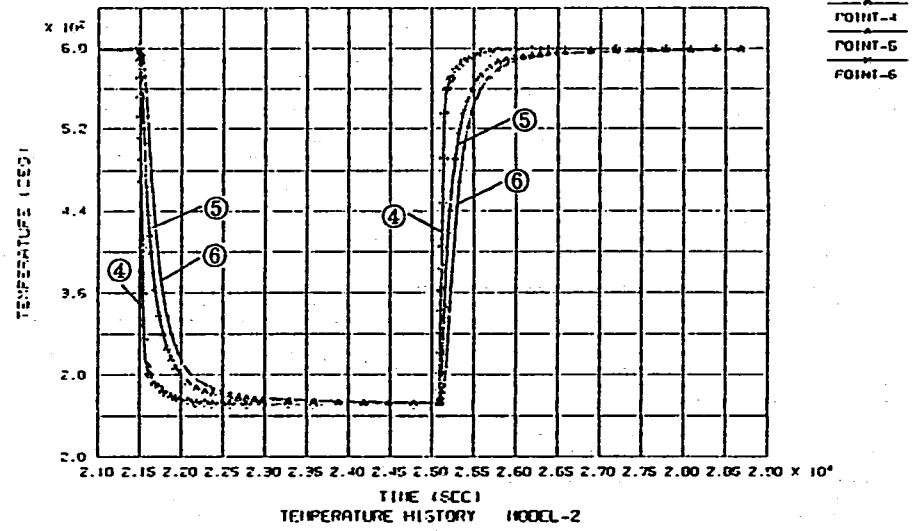
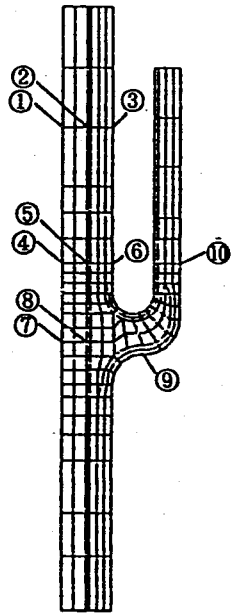


Fig.3.3-3 Temperature history of Model-2

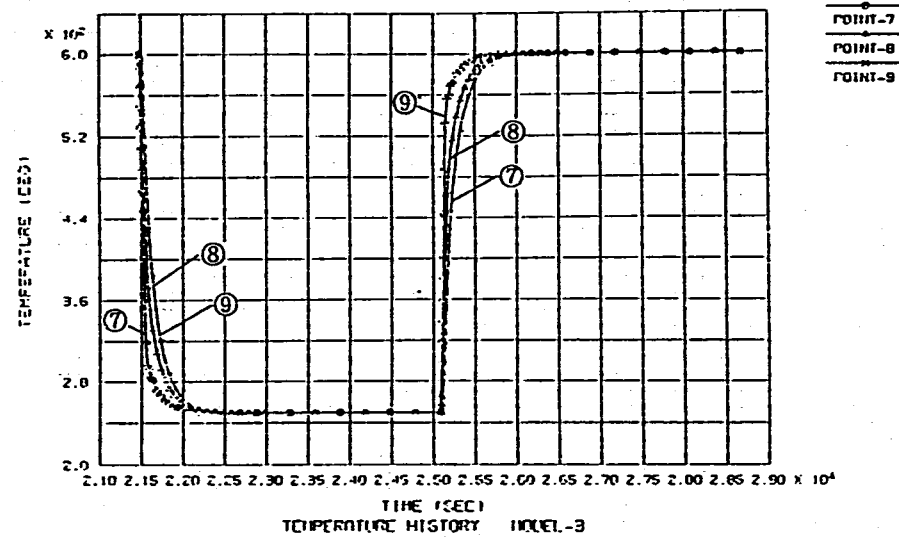
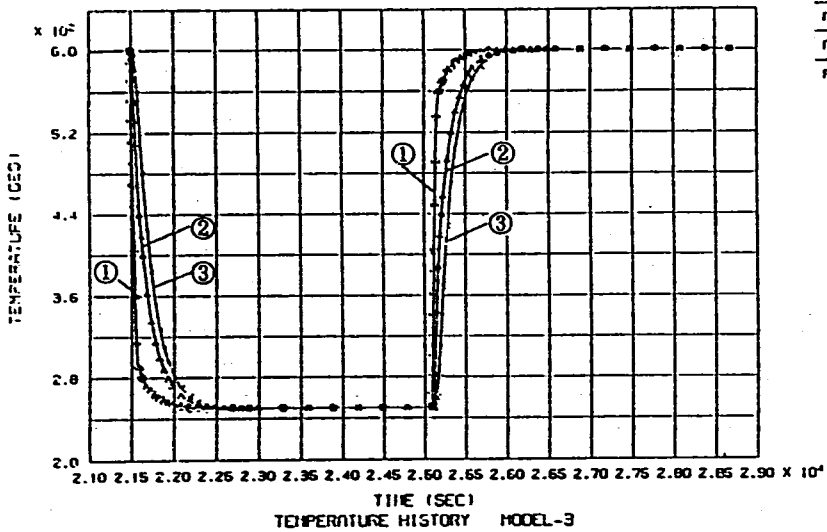
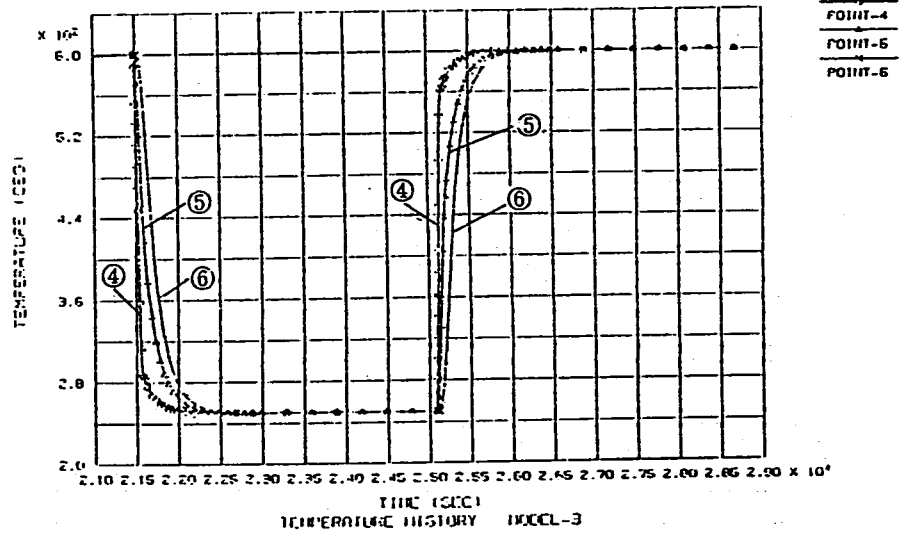
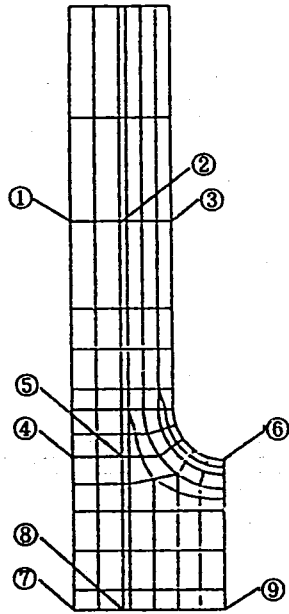
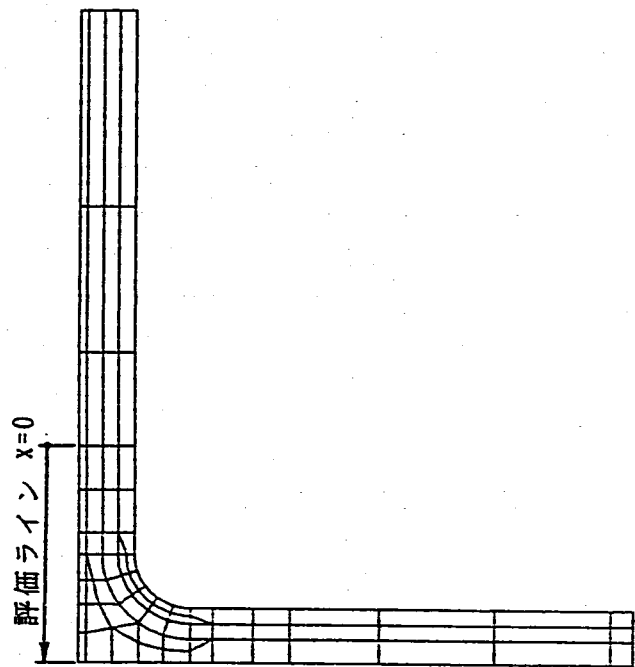
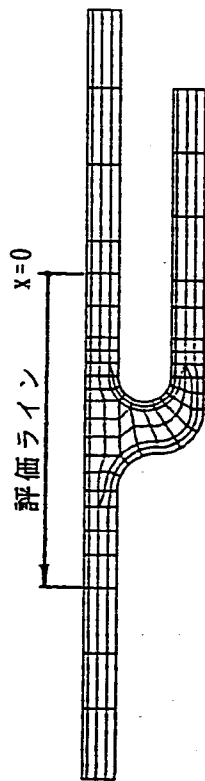


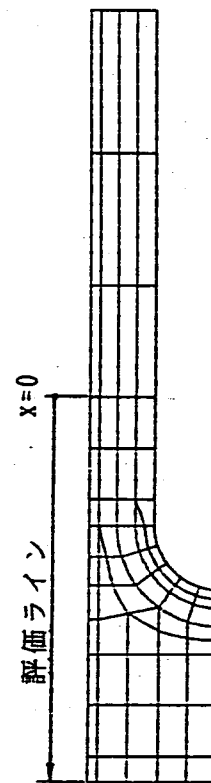
Fig.3.3-4 Temperature history of Model-3



モデル 1



モデル 2



モデル 3

Fig.3.3-5 Evaluation line of strain range

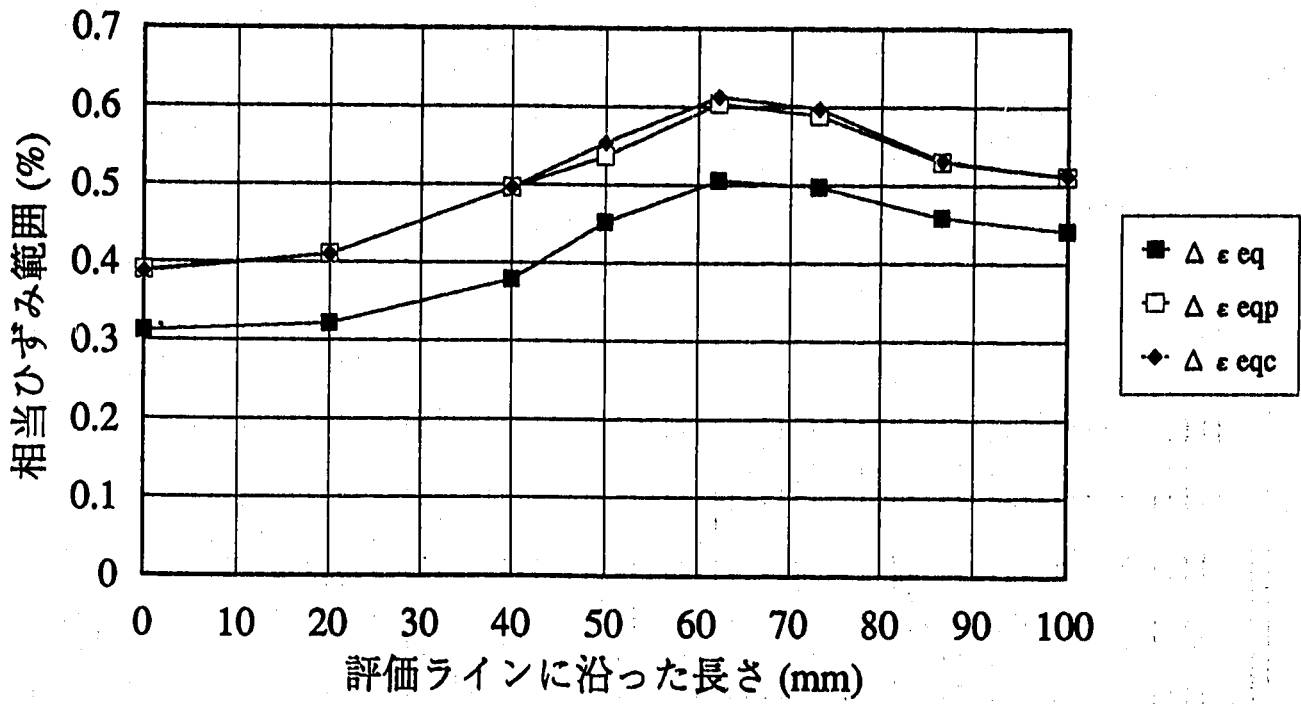


Fig.3.3-6 Equivalent strain range of Model-1

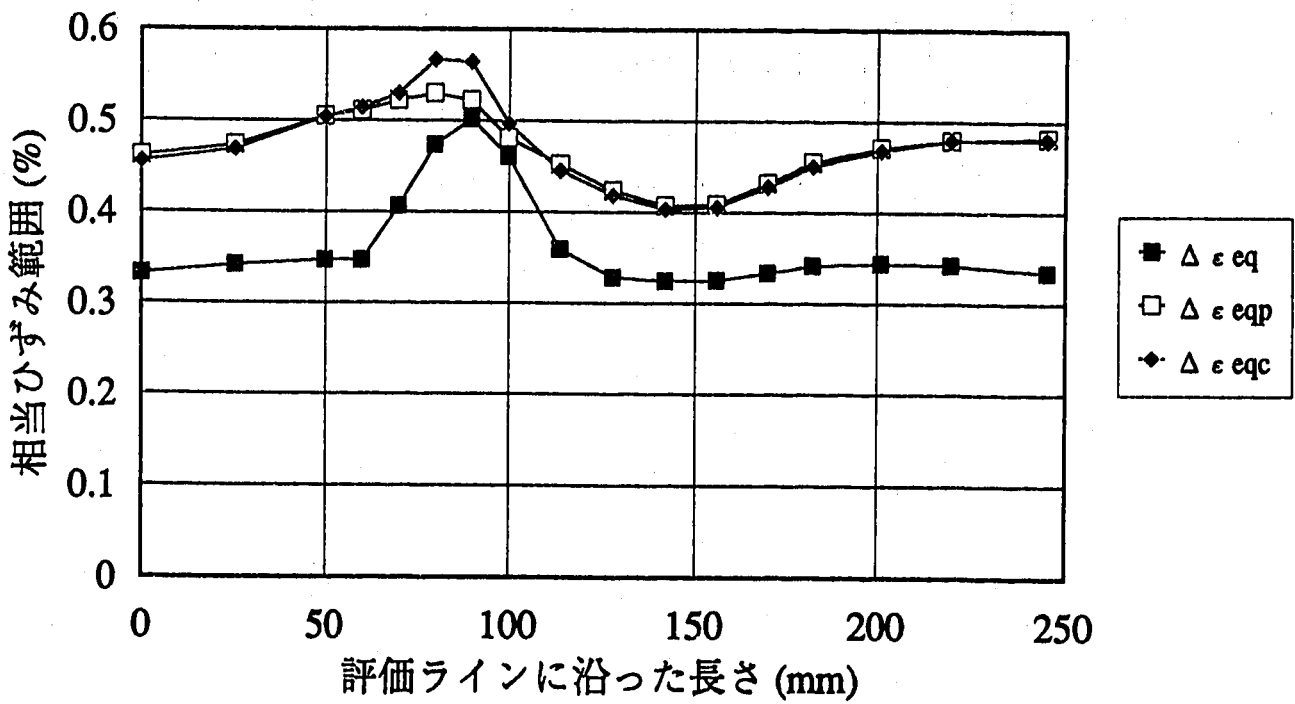


Fig.3.3-7 Equivalent strain range of Model-2

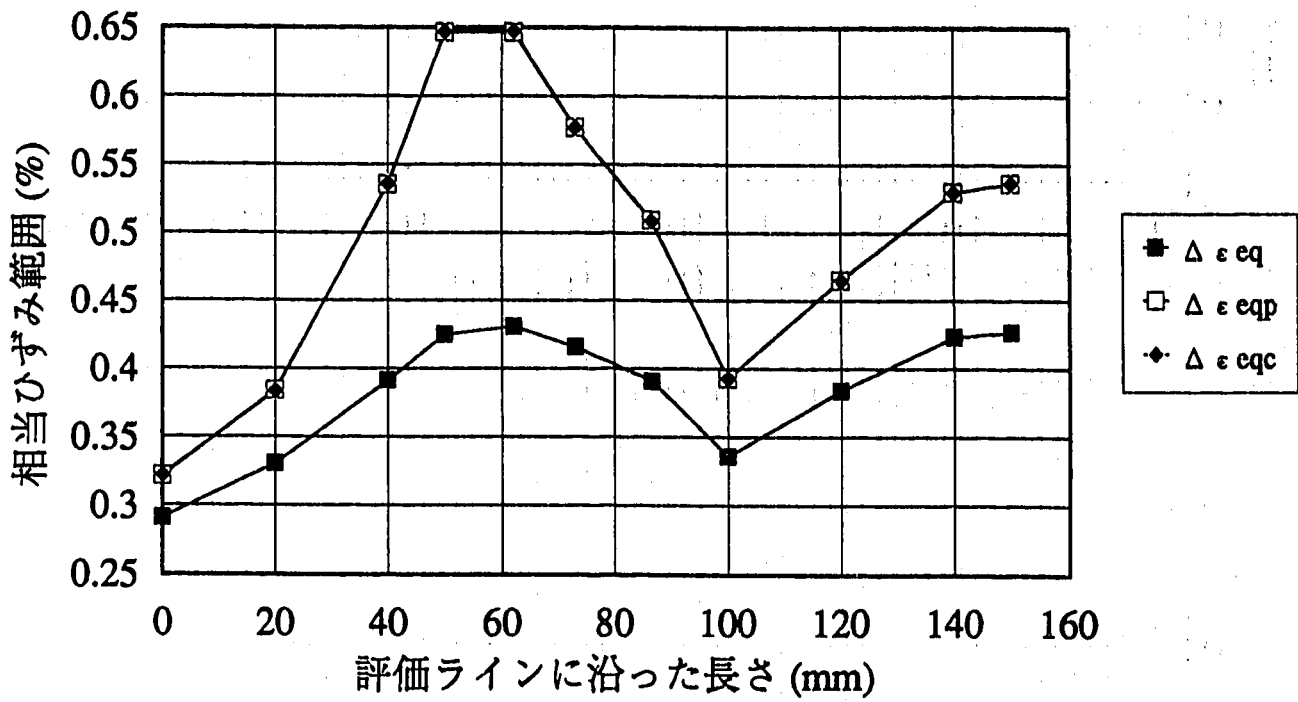


Fig.3.3-8 Equivalent strain range of Model-3

4. 考 察

4.1 塑性の効果に伴うひずみ集中

4.1.1 ポアソン比効果

モデル1～3の評価ラインに対し、弾塑性解析と弾性解析から求めた相当ひずみ範囲の比 ($\Delta \varepsilon_{\text{eqp}} / \Delta \varepsilon_{\text{eq}}$) と(4.12)式から算出したポアソン比の効果によるひずみ集中係数(K_{ν})を求め、弾性解析並びに弾塑性解析から求めた相当ひずみ範囲と共にFig.4.1-1～3に示す。

ポアソン比の効果によるひずみ集中の割合は、ひずみ範囲よりも極2時点のひずみの分布に敏感であり、板厚内温度勾配による等2軸応力状態でひずみ範囲が定まるモデル3やその他のモデルの胴一般部で大きく、熱曲げやたが締めによる応力が主体となるモデル1、2の円板やスカートの付け根で大きくなっていることがわかる。ポアソン比の効果によるひずみ集中係数は、弾性追従に伴うひずみ集中を考慮していないため、解析結果に対して相対的に小さな値となっているが、その分布形状は、解析結果と類似しており、本手法を用いたひずみ集中の推定が有効であることを示唆している。

4.1.2 弾性追従の効果

(1) 弾性追従パラメータの設定

弾性追従に伴うひずみ集中を表す係数($K_{e'}$)を定めるためには、適切な弾性追従パラメータを設定する必要がある。弾性追従パラメータは、荷重の種類や構造によって異なるので、これを定めるためには、荷重および構造をパラメータとした多岐にわたるデータの蓄積を要するが、このようなデータの蓄積には膨大な時間と計算を要する。TTS-DSを用いた弾性解析に基づくクリープ疲労強度評価が、簡易的評価であるという観点から、弾性追従パラメータは、妥当な結果が得られる一定値として設定することが得策であると考えられる。そこで、3章で実施した弾性および弾塑性解析結果から弾性追従パラメータを算出することとした。

弾性追従パラメータは、ポアソン比の効果によるひずみ集中係数(K_{ν})と弾性解析および弾塑性解析から求めた相当ひずみ範囲の関係から、次式で表される。

$$q = \frac{\varepsilon_o - \varepsilon_p}{\varepsilon_p \xi - (\xi - 1) \varepsilon_y - \varepsilon_o} + 1 \quad (4.1)$$

塑性の効果弾性追従パラメータに与える影響を調べるため、ひずみ範囲と弾性追従パラメータの関係をFig.4.1-4に示した。図に示すように弾性追従パラメータは、ひずみ範囲と明らかな相関は持たないが、ひずみ範囲が大きい領域、換言すれば強度評

価上問題となる領域においては、弾性追従パラメータは1.5程度になることがわかった。そこで、本評価では、弾性追従パラメータを1.5とし、ポアソン比の効果によるひずみ集中係数と併せて、その妥当性を確認する。

(2) 追従弾性によるひずみ集中

モデル1～3の各評価ラインに対し、弾塑性解析と弾性解析から求めた相当ひずみ範囲の比 ($\Delta \epsilon_{eqp} / \Delta \epsilon_{eq}$) と(2.19)式から算出した追従弾性によるひずみ集中係数 (K_e') を求め、弾性解析並びに弾塑性解析から求めた相当ひずみ範囲と共にFig. 4.1-5～7に示す。弾性追従に伴うひずみの集中は、ポアソン比の効果によるひずみ集中と異なり、相当ひずみ範囲の分布形状に類似していることがわかる。

4.1.3 塑性の効果

塑性の効果によるひずみ集中は、ポアソン比の効果と弾性追従の効果の積で表される。Fig. 4.1-8～10に弾塑性解析と弾性解析から求めた相当ひずみ範囲と(2.5)式を用いて算出したひずみ集中係数を用いて補正した相当ひずみ範囲を示す。図に示すように、本手法を用いて評価したひずみ集中係数は、弾塑性解析の相当ひずみ範囲の分布形状と概ね一致しており、ひずみ集中係数を一律1.2としていた従来の評価に比べてひずみ集中の予測精度が向上していることがわかる。

モデル2のひずみ集中部やモデル3の厚肉部において、本手法を用いて修正した弾性解析結果が弾塑性解析結果を若干上回る等の差異が見られるが、これは、弾性追従の効果における弾性追従パラメータの設定に問題があるものと考えられる。Fig. 4.1-11～13に(4.1)式を用いて算出した弾性追従パラメータの分布を示す。これより、モデル2のスカート付け根やモデル3の厚肉部では、弾性追従パラメータは1～1.1であり、これを1.5に設定した本評価ではひずみを大きく見積もっていることがわかる。また、モデル3の構造不連続部では、逆にひずみを小さく見積もることがわかる。このように局所に目を向ければ弾性解析結果と弾塑性解析結果の差異は見られるが、これらは、弾性追従パラメータに関する情報を更に収集、整理し、適切な値を設定することで解決されると考えられる。

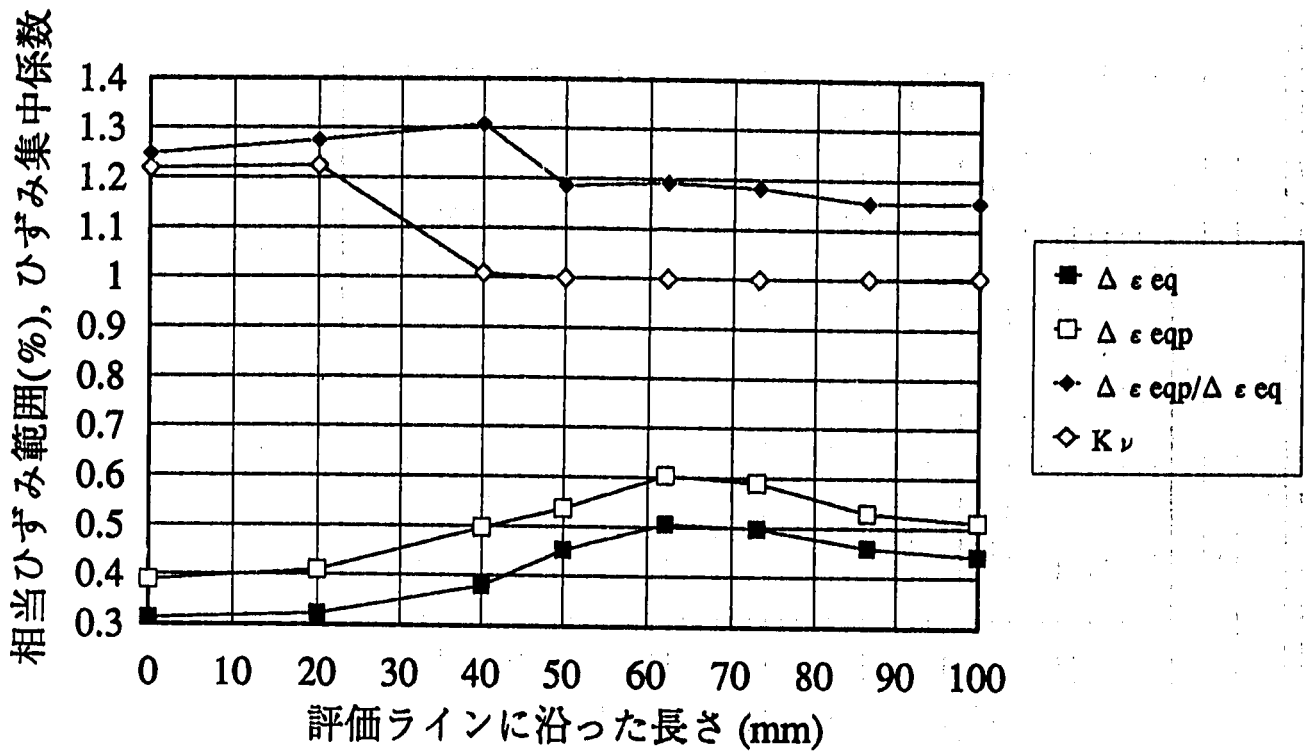


Fig.4.1-1 Strain concentration due to variation of Poisson's ratio of Model-1

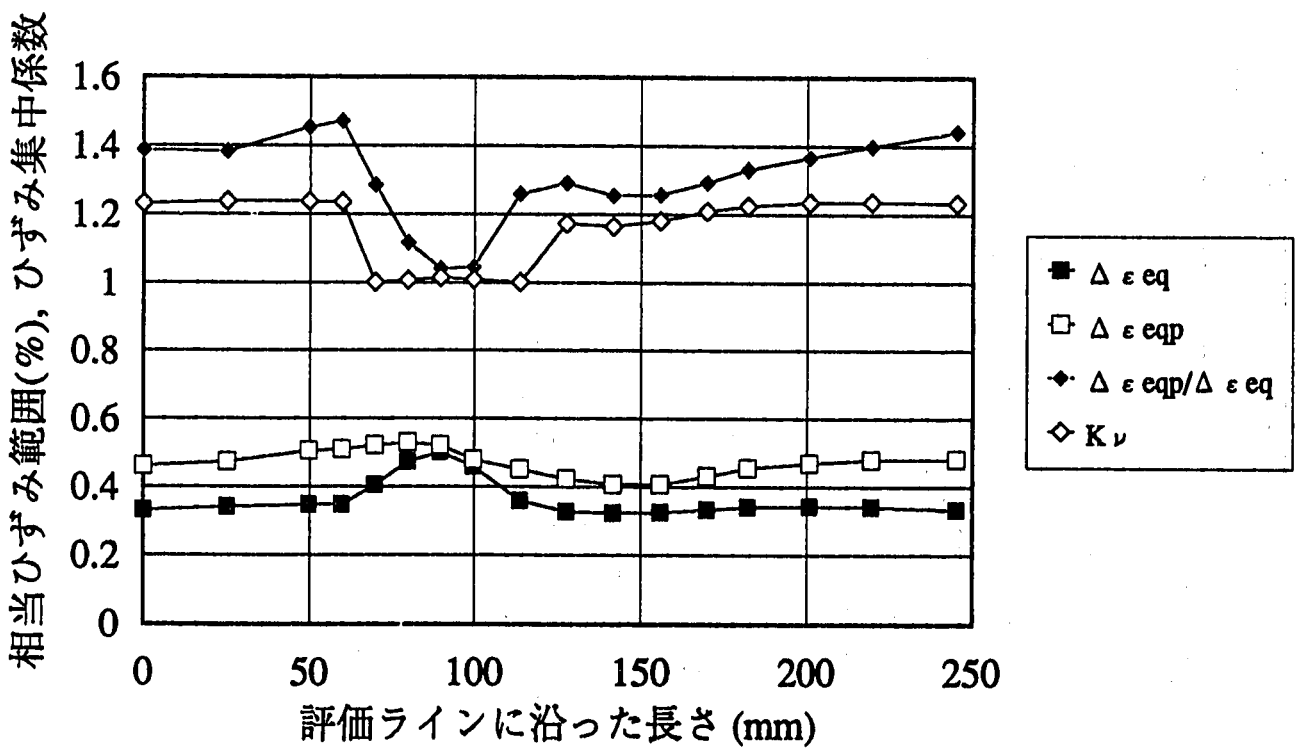


Fig.4.1-2 Strain concentration due to variation of Poisson's ratio of Model-2

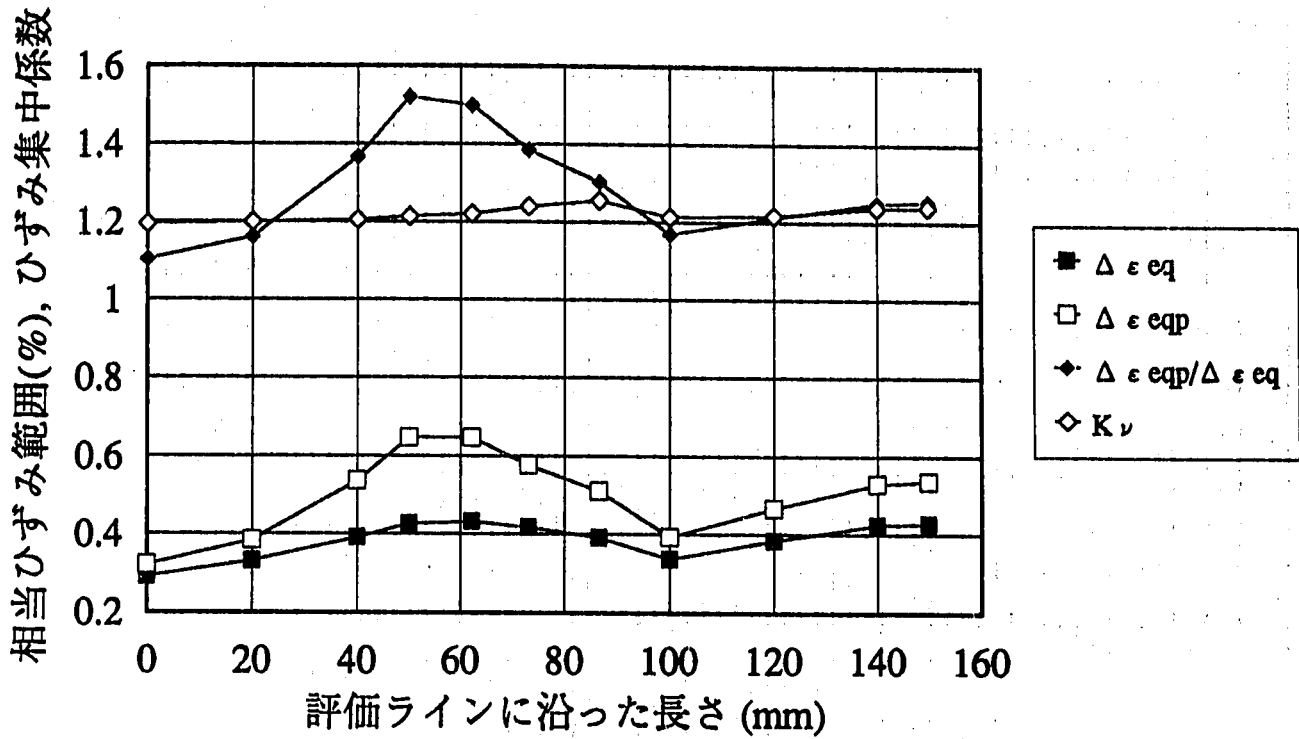


Fig.4.1-3 Strain concentration due to variation of Poisson's ratio of Model-3

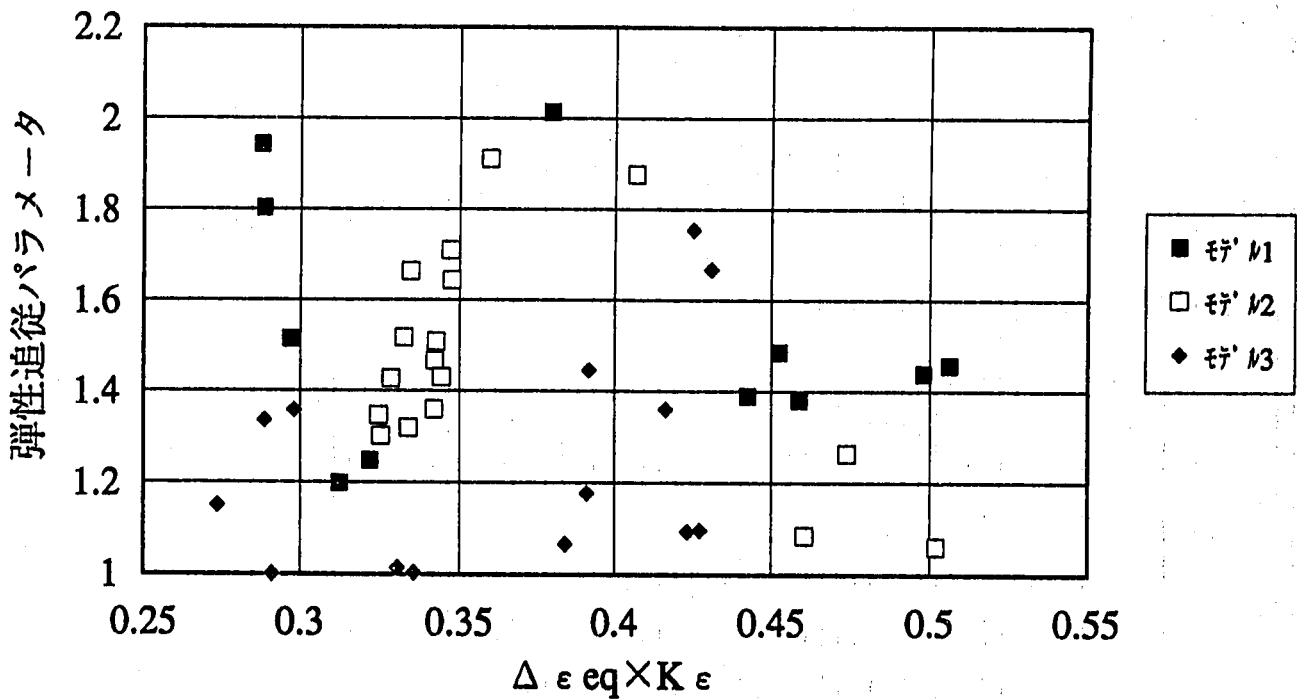


Fig.4.1-4 Distribution of elastic follow-up parameter

相当ひずみ範囲(%), ひずみ集中係数

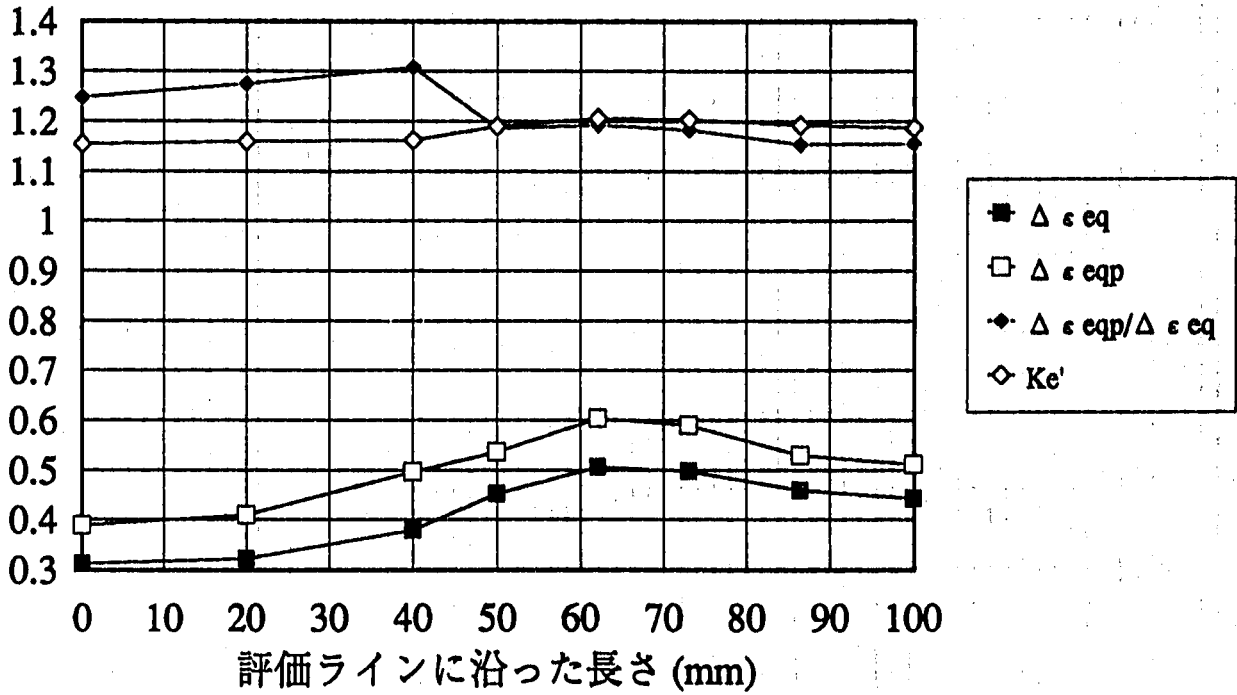


Fig.4.1-5 Strain concentration due to elastic follow-up of Model-1

相当ひずみ範囲(%), ひずみ集中係数

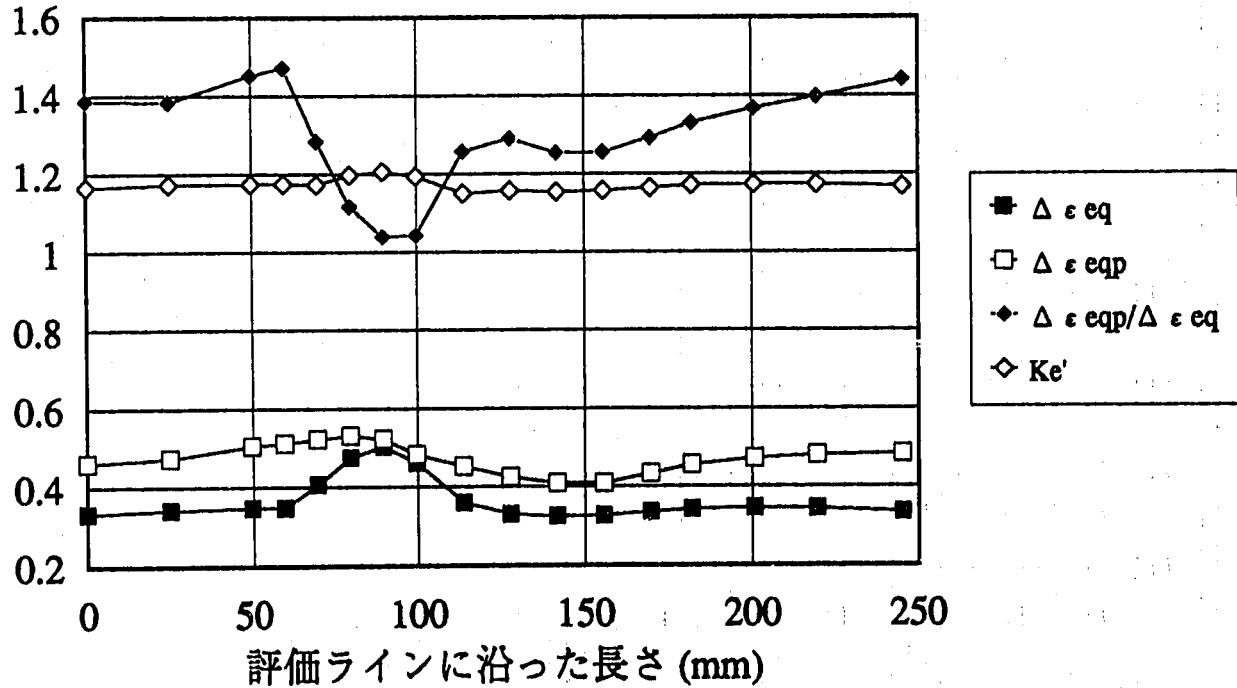


Fig.4.1-6 Strain concentration due to elastic follow-up of Model-2

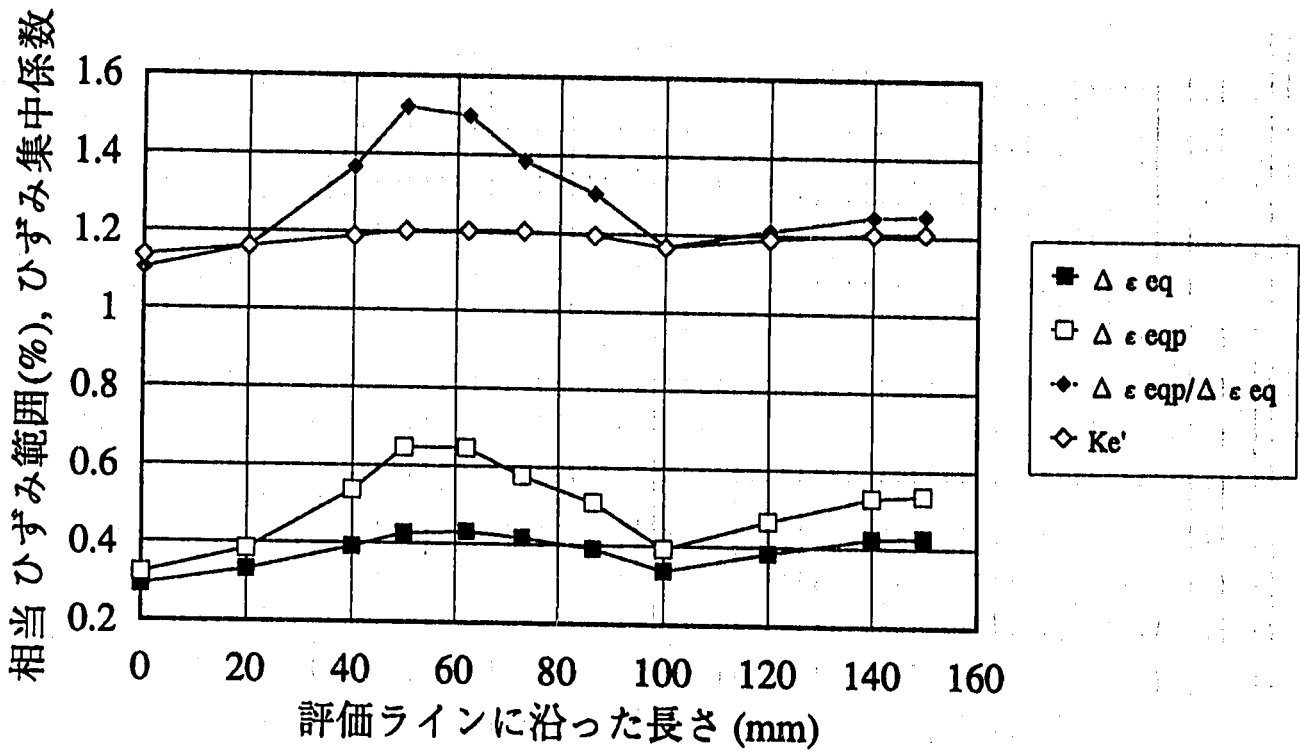


Fig.4.1-7 Strain concentration due to elastic follow-up of Model-3

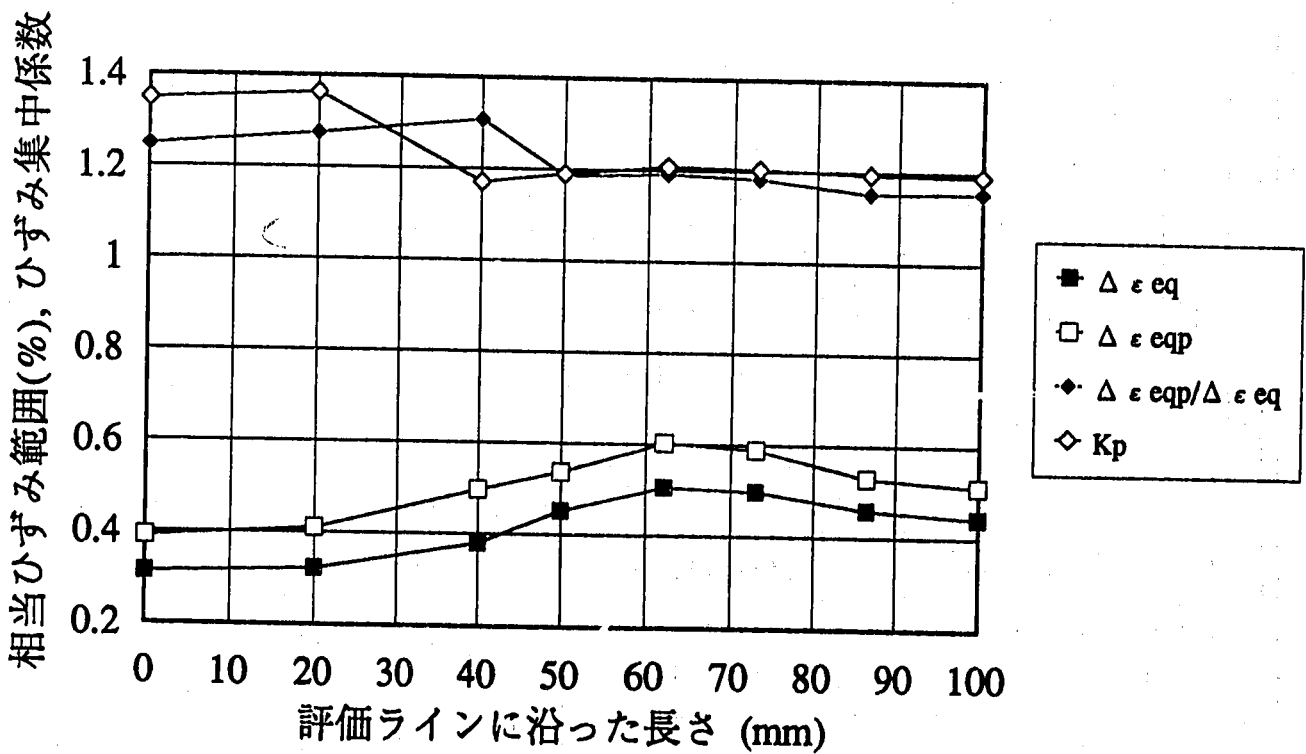


Fig.4.1-8 Strain concentration due to plasticity of Model-1

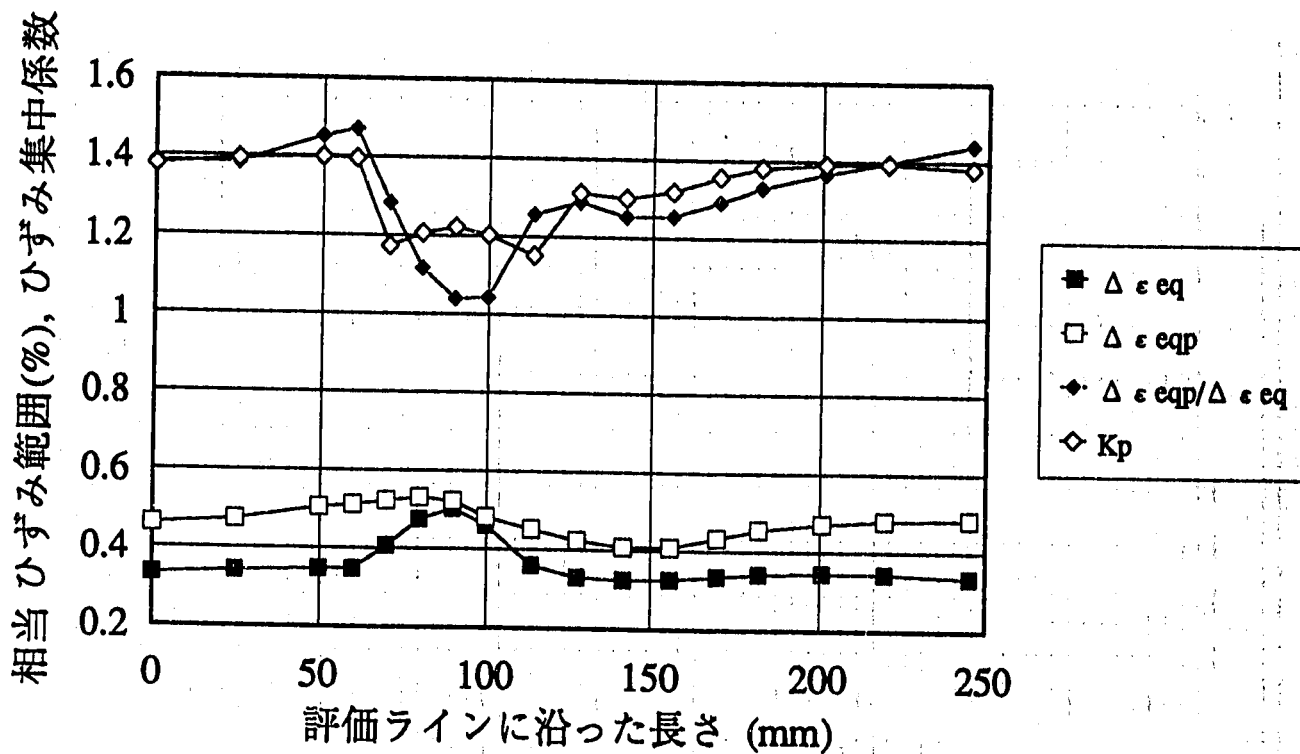


Fig.4.1-9 Strain concentration due to plasticity of Model-2

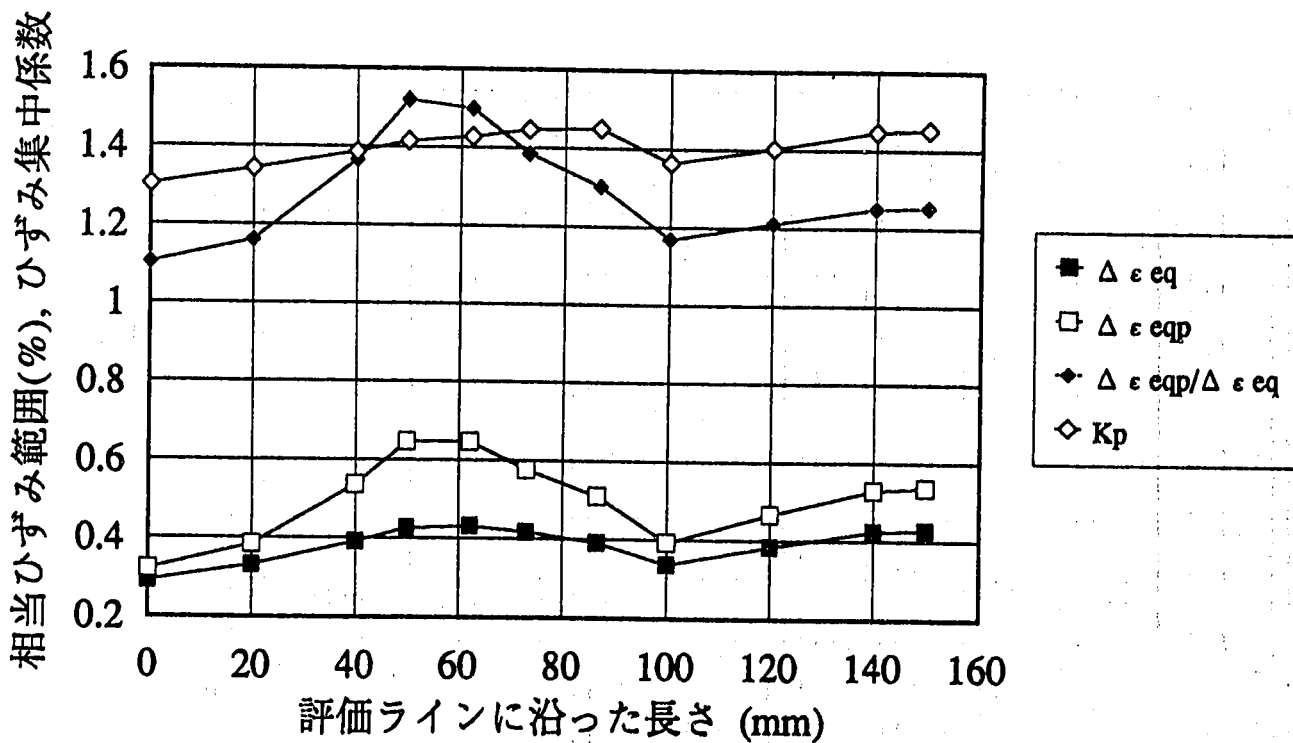


Fig.4.1-10 Strain concentration due to plasticity of Model-3

相当ひずみ範囲(%), 弾性追従パラメータ

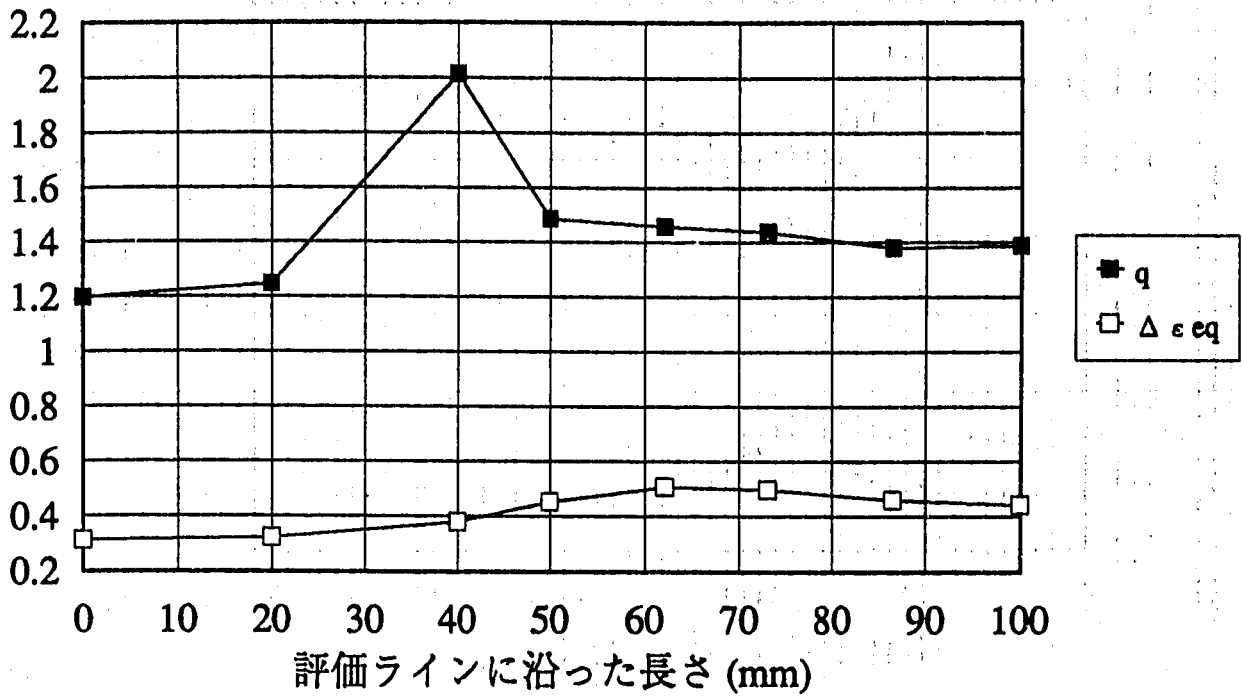


Fig.4.1-11 Elastic follow-up parameter along evaluation line of Model-1

相当ひずみ範囲(%), 弾性追従パラメータ

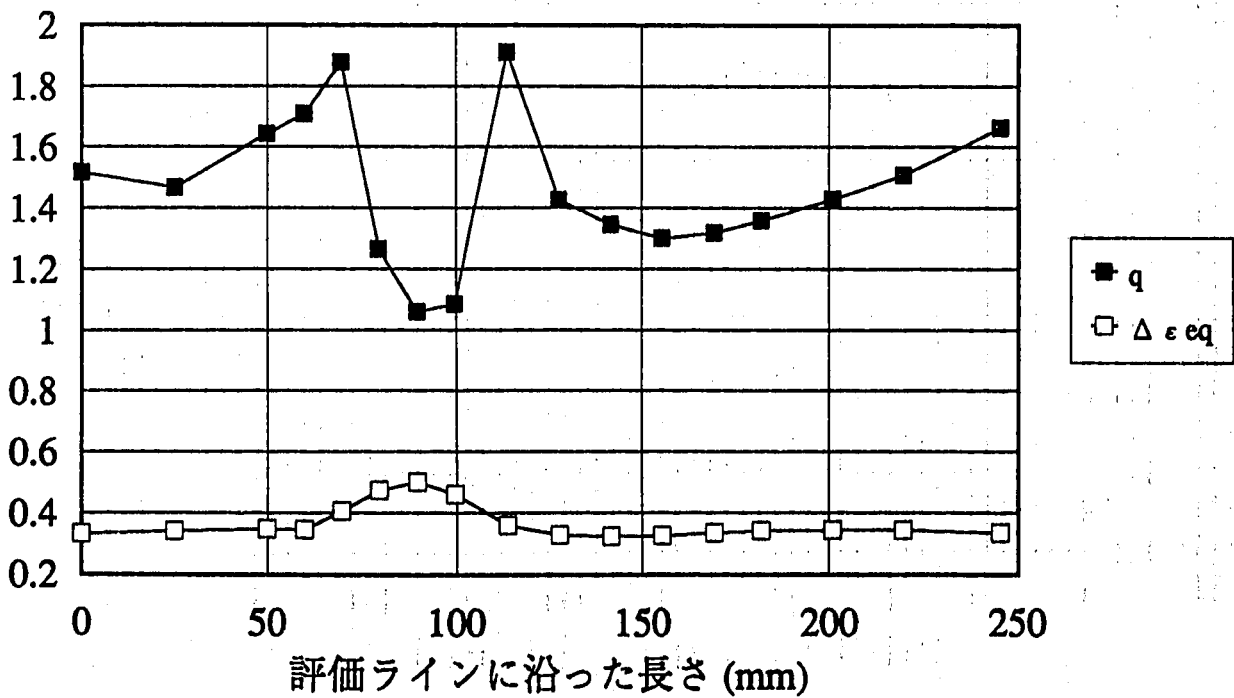


Fig.4.1-12 Elastic follow-up parameter along evaluation line of Model-2

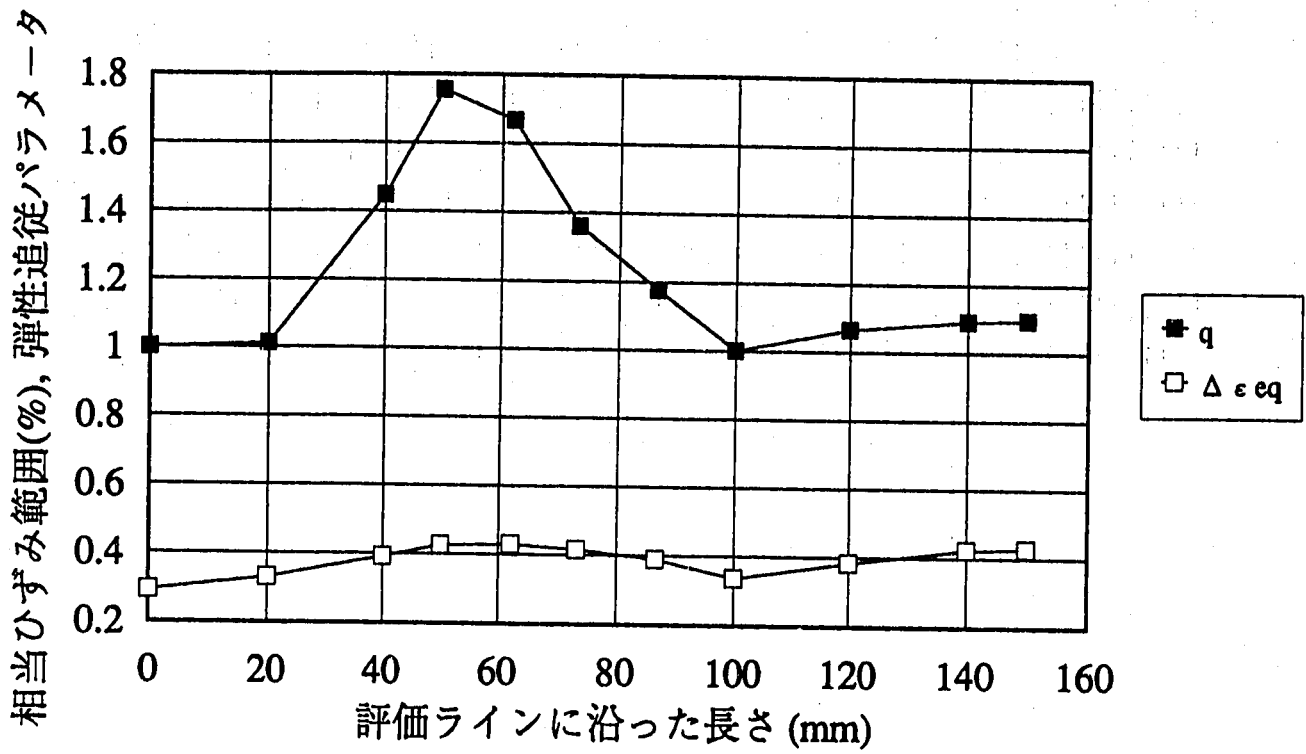


Fig.4.1-13 Elastic follow-up parameter along evaluation line of Model-3

4.2 クリープの効果

モデル1～3の各評価ラインに対し、弾塑性クリープ解析と弾塑性解析から求めた相当ひずみ範囲の比 ($\Delta \varepsilon_{e,c} / \Delta \varepsilon_{e,p}$) と(2.22)式から算出したクリープによるひずみ集中係数 (K_c)を求め、弾塑性解析並びに弾塑性クリープ解析から求めた相当ひずみ範囲と共にFig. 4.2-1～3に示す。3章で述べたように、クリープに伴うひずみ集中は、塑性の効果に伴うひずみ集中に比べて効果が小さい。特に板厚内の温度勾配を応力の主要因とするモデル3やその他のモデルの容器胴一般部では、クリープによるひずみの増分は殆ど見られない。(2.22)式では、弾塑性解析と弾塑性クリープ解析の相当ひずみ範囲の比に見られるような局所的な集中は評価できないが、相当ひずみ範囲の大小および応力保持時間の大小に対応したひずみの増分を算出できており、弾性解析による相当ひずみ範囲と(2.20)式に示す有効時間を用いた本手法が妥当であることを示している。

Fig. 4.2-4～6に塑性の効果とクリープの効果によるひずみ集中を考慮して修正した相当ひずみ範囲を弾性解析および弾塑性クリープ解析から求めた相当ひずみ範囲とともに示す。図に示すように、本検討による手法を用いて修正した相当ひずみ範囲は、弾塑性クリープ解析結果と概ね一致しており、本手法に基づく修正が妥当であることを示している。

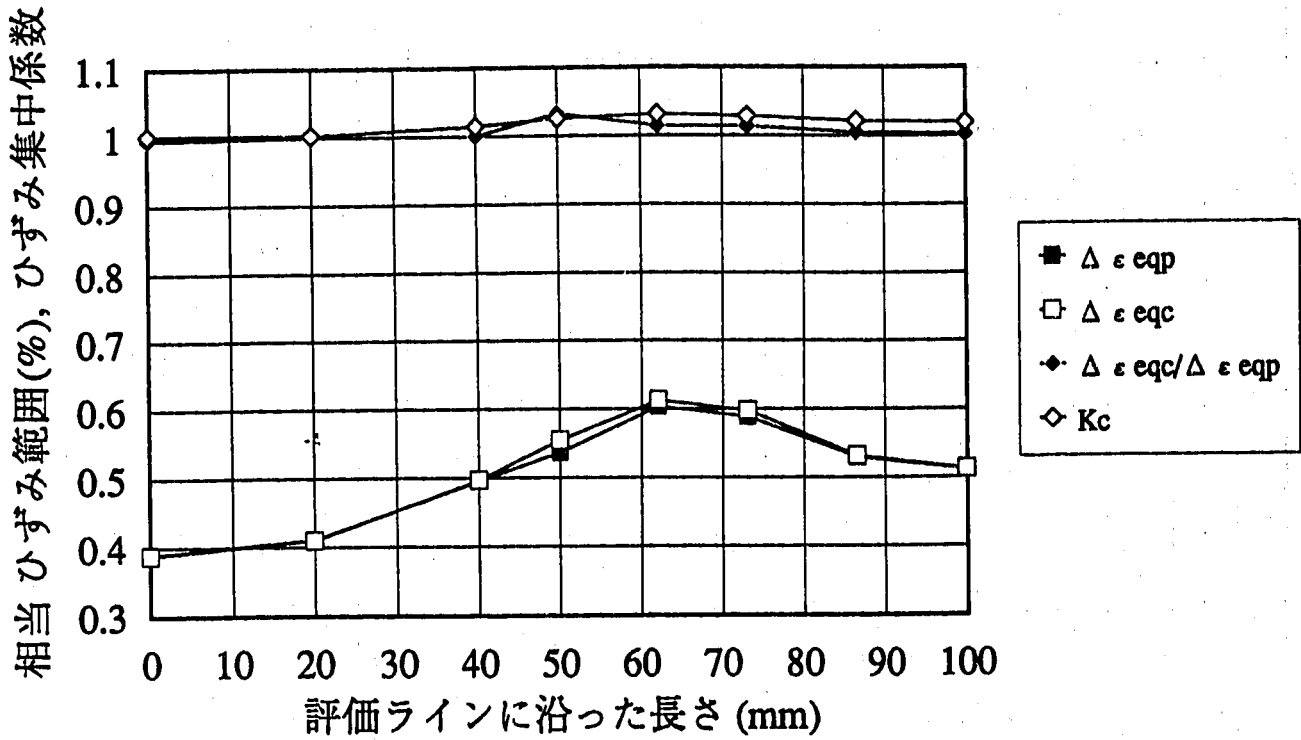


Fig.4.2-1 Strain concentration due to creep of Model-1

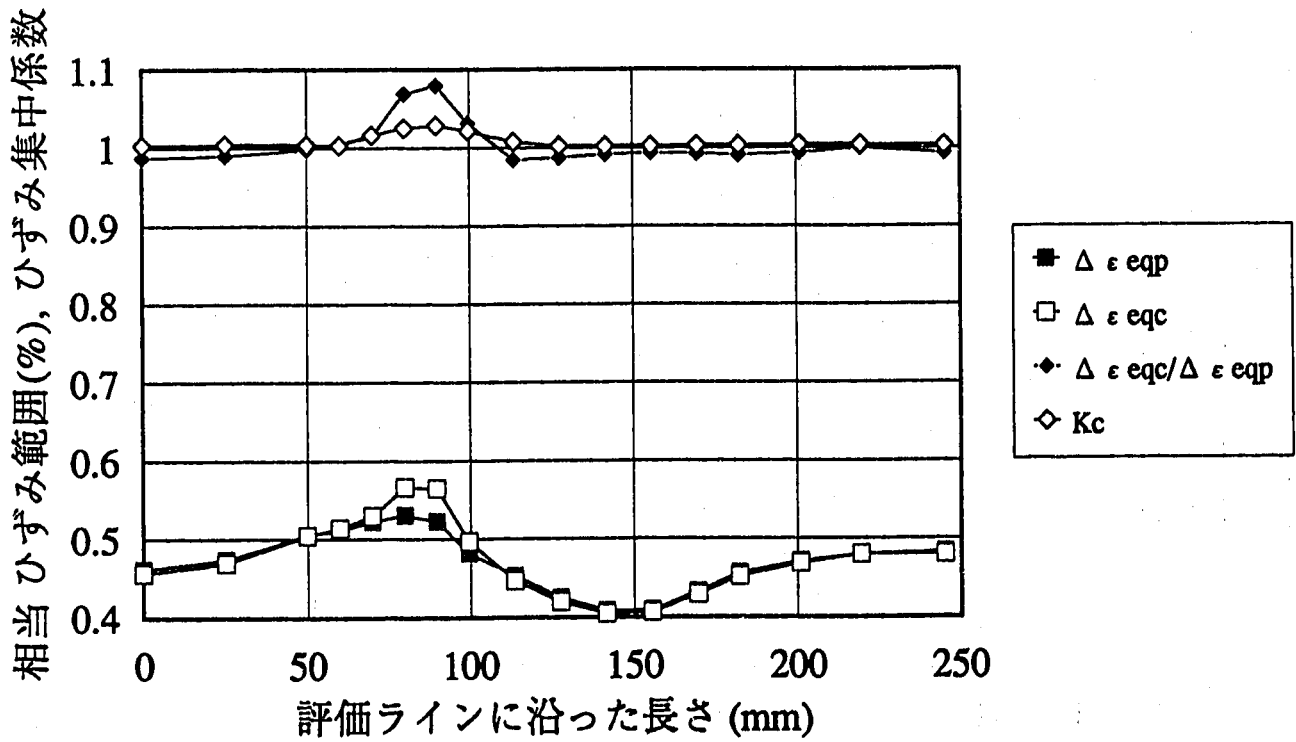


Fig.4.2-2 Strain concentration due to creep of Model-2

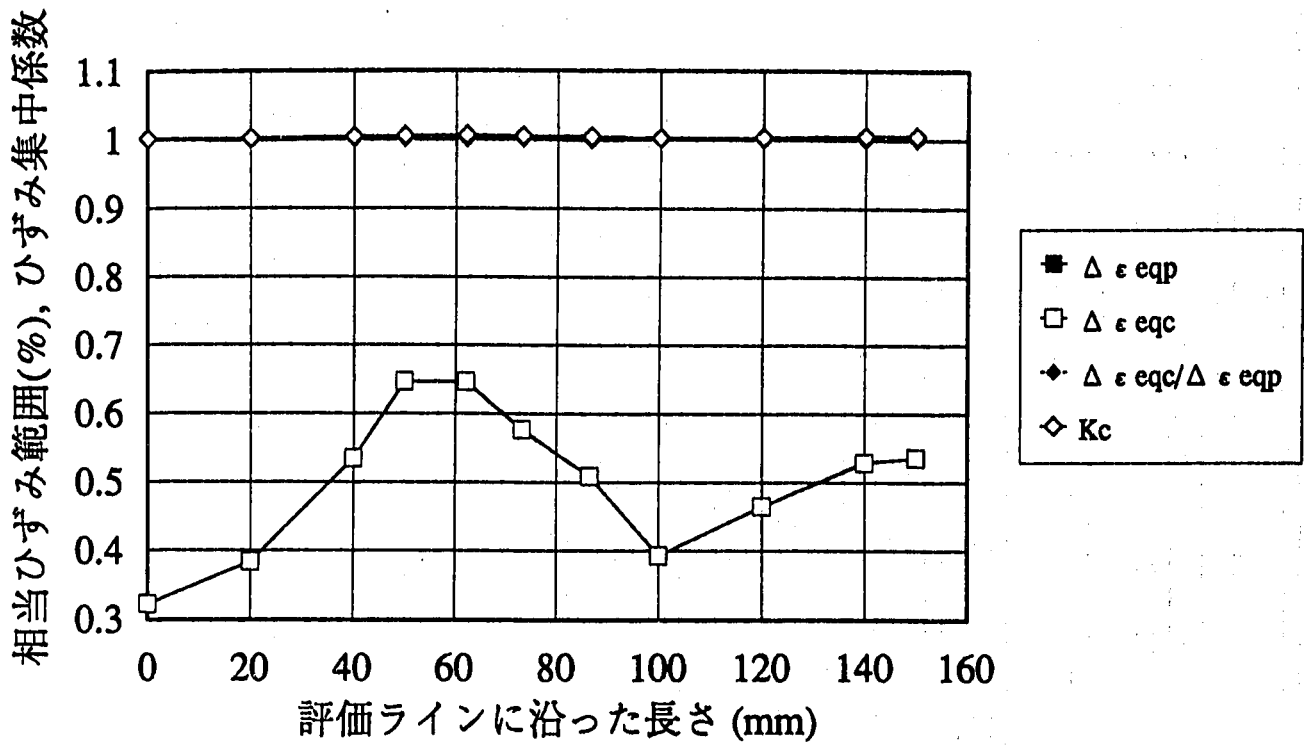


Fig.4.2-3 Strain concentration due to creep of Model-3

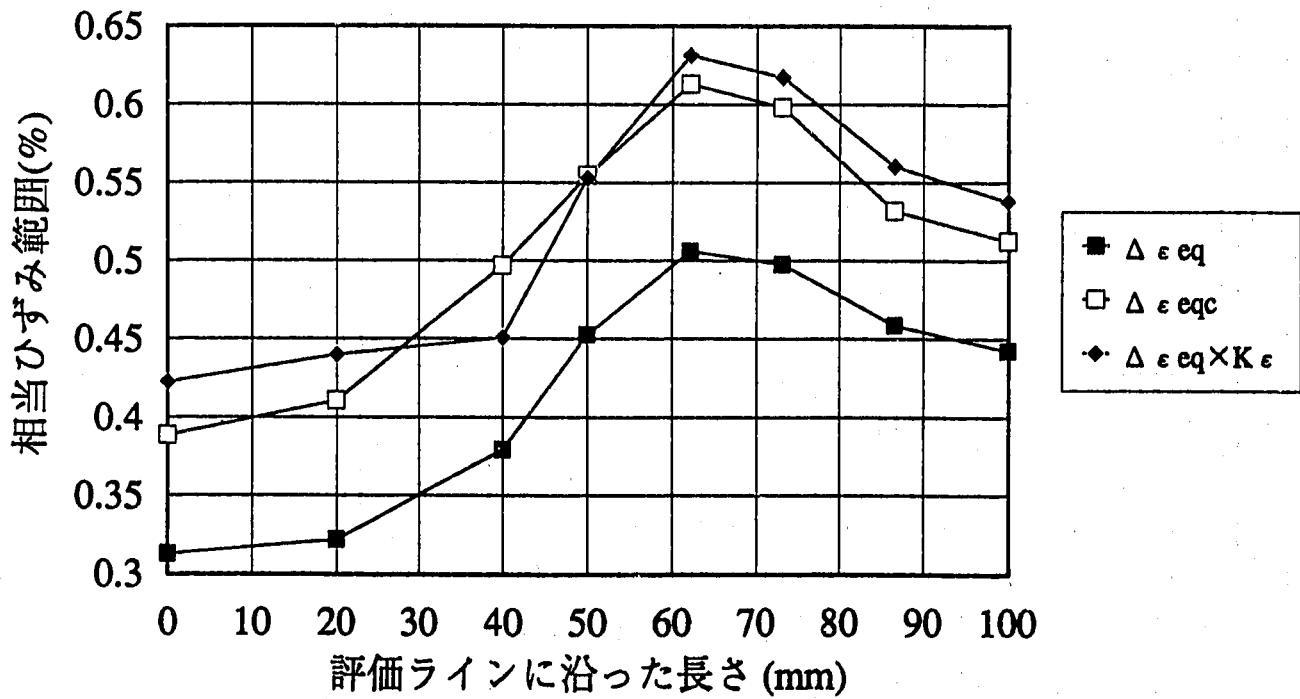


Fig.4.2-4 Comparison of strain range between estimation and analysis of Model-1

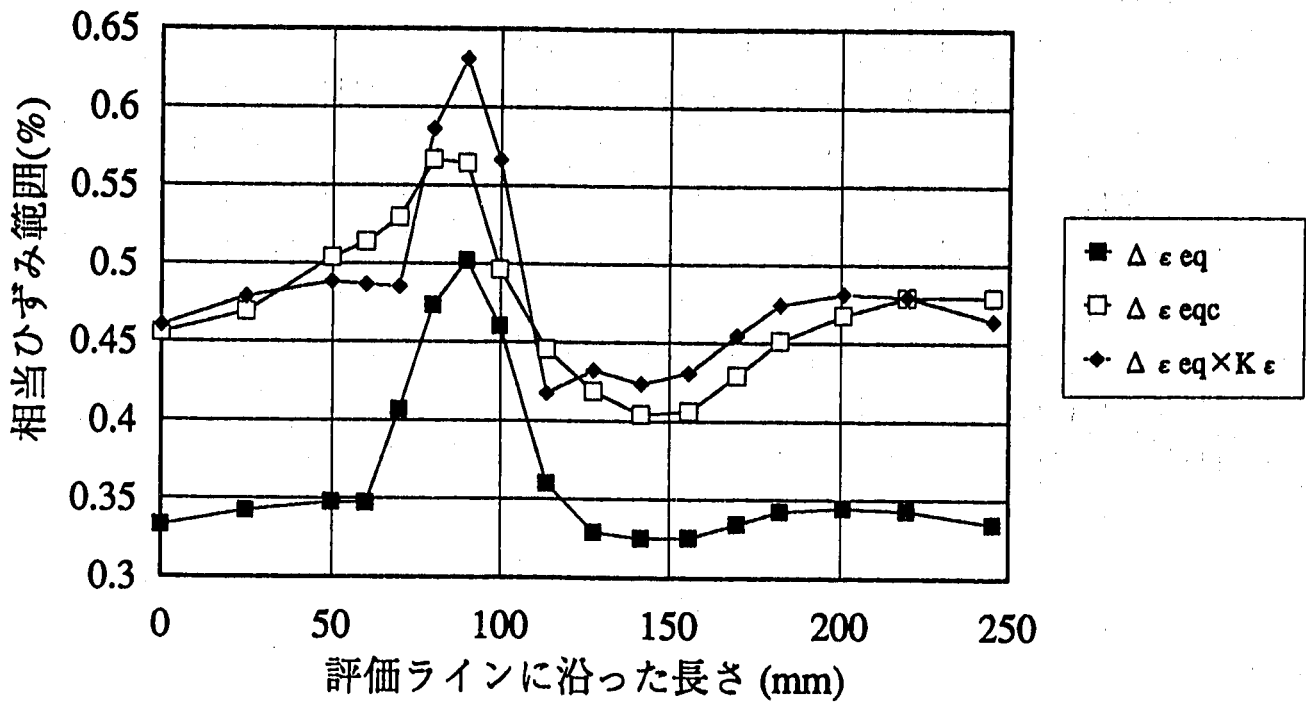


Fig.4.2-5 Comparison of strain range between estimation and analysis of Model-2

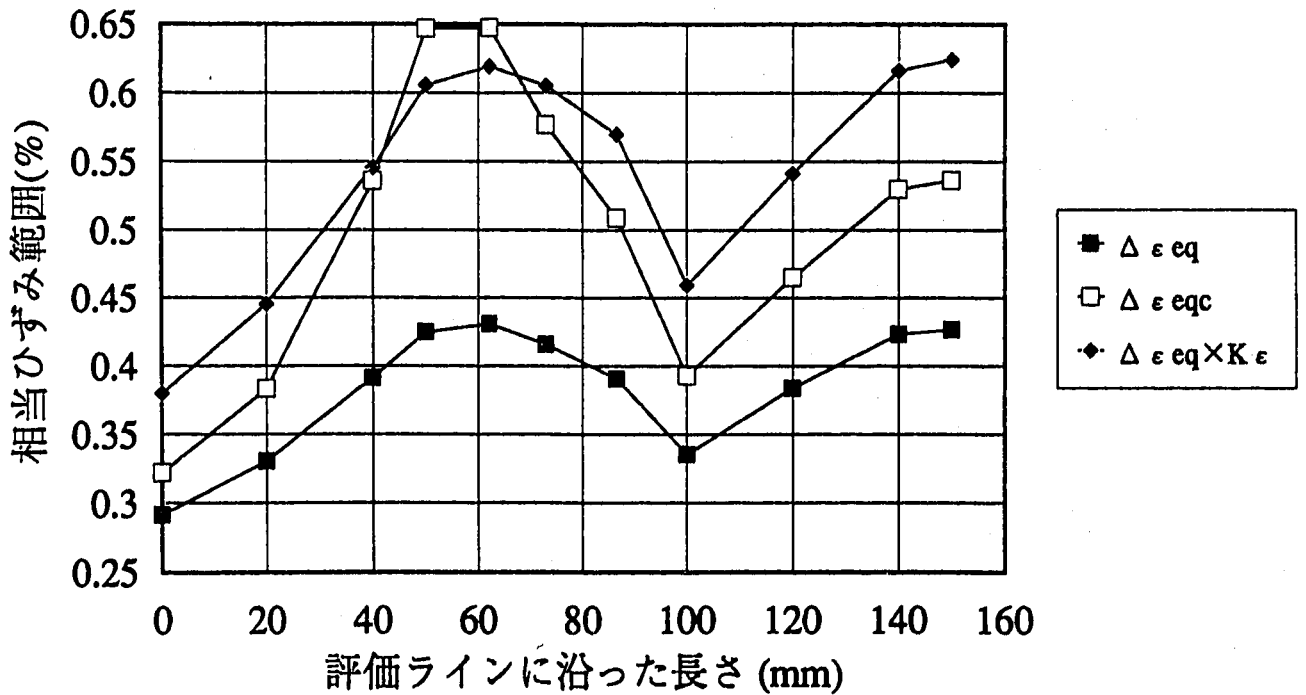
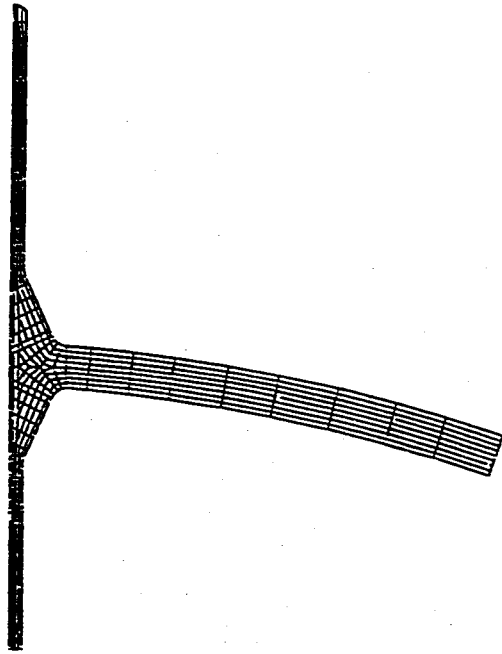


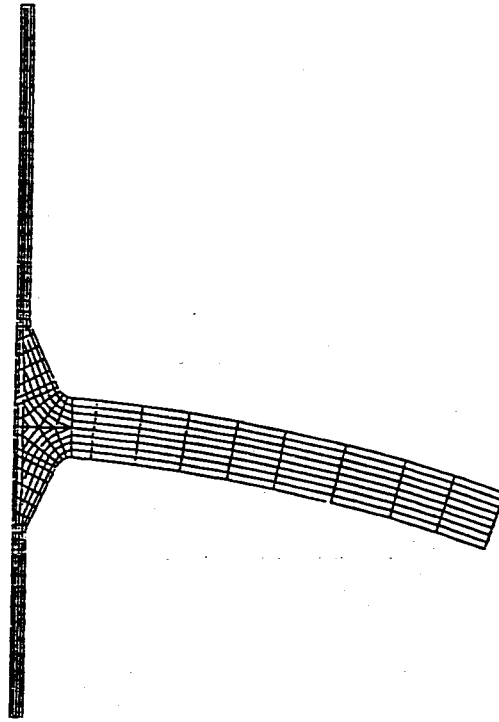
Fig.4.2-6 Comparison of strain range between estimation and analysis of Model-3

4.3 従来の計算結果に基づく検証

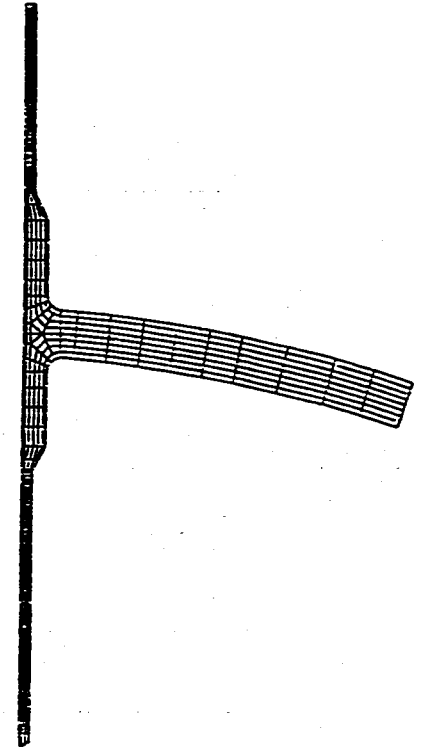
本検討結果をSTSTノズルモデルに対する解析結果⁹⁾を用いて検証した。STSTノズルモデルは、ノズルの熱過渡強度データを取得することを目的に製作された供試体で、Fig.4.3-1に示すように3種類のノズル構造を模擬した供試体である。供試体は、ノズルが取付けられる胴の板厚を変えた一体削り出しのモデル1と2、溶接ノズルをモデル化したモデル3の3種類のモデルで構成される。STSTノズル形状モデルのFEM解析モデルをFig.4.3-2に示す。これら3種類のモデルについて、評価ラインをFig.4.3-3のとおり設定した。弾性追従パラメータを1.5とし、本手法を用いて修正した弾性解析の相当ひずみ範囲と弾塑性クリープ解析の相当ひずみ範囲をFig.4.3-4~6に示す。弾塑性クリープ解析結果は、関連資料5)に基づいた。図に示すように、本手法を用いて修正された弾性解析結果は、弾塑性クリープ解析結果と良く一致しており、本手法の妥当性が示された。



モデル 1



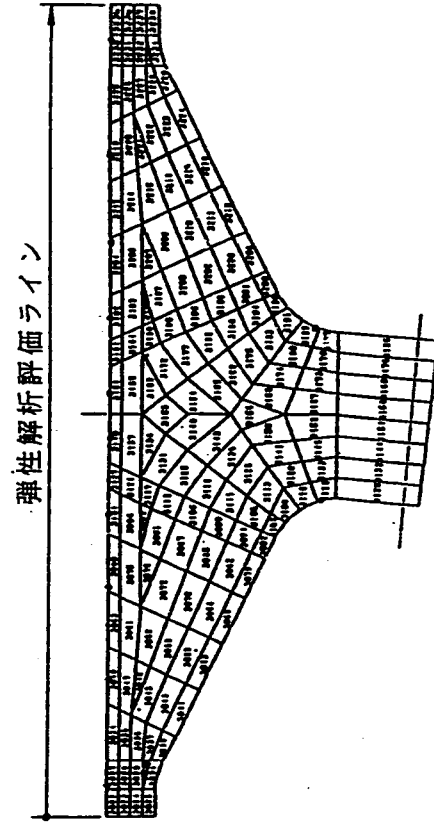
モデル 2



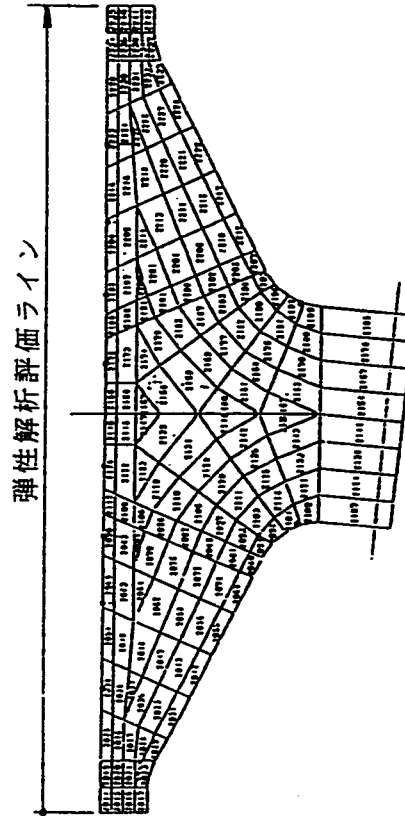
モデル 3

Fig.4.3-2 FEM model of STST nozzle model

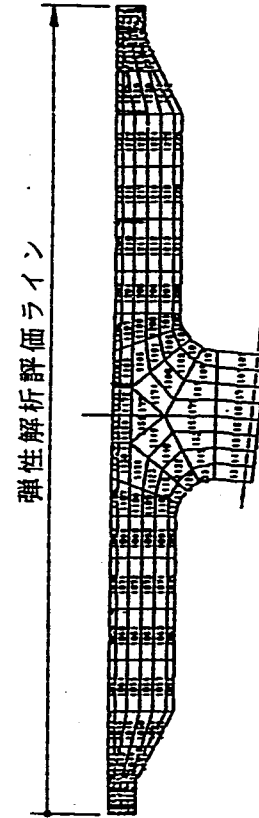
A～J：弾塑性クリープ解析の評価点



モデル 1



モデル 2



モデル 3

Fig.4.3-3 Evaluation line and points of STST nozzle model

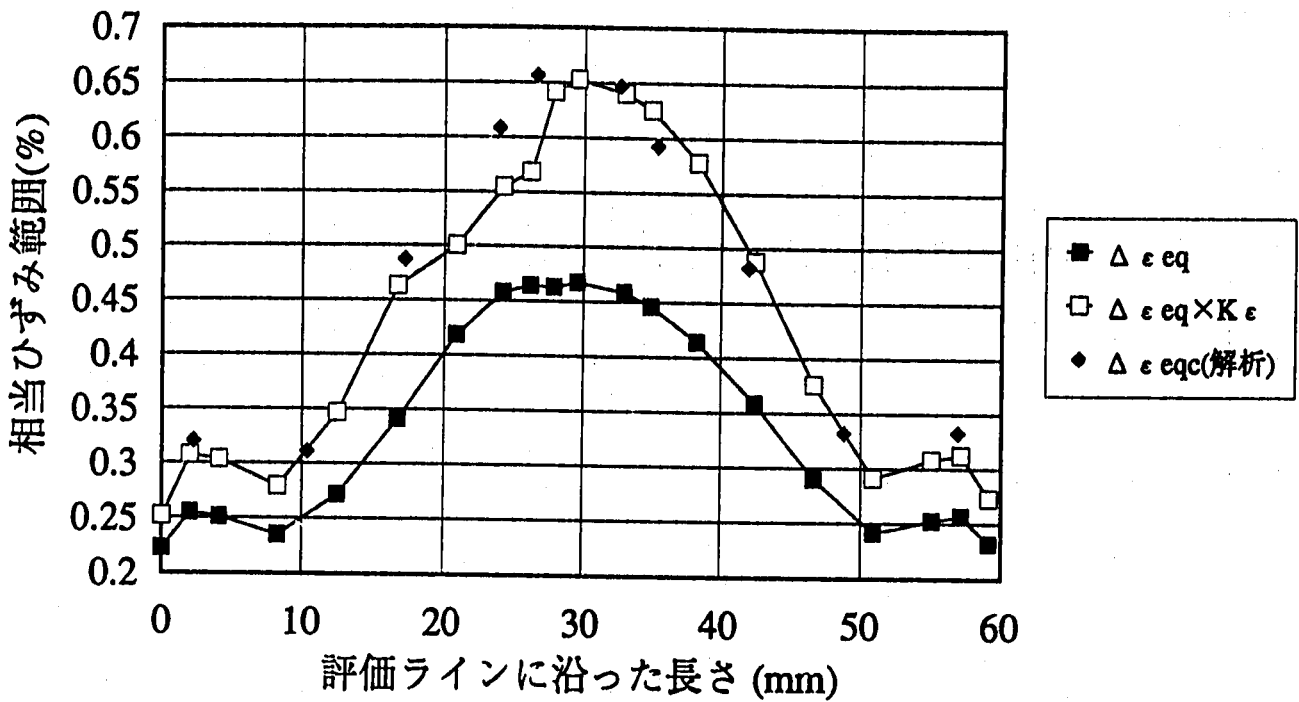


Fig.4.3-4 Comparison of strain range between estimation and analysis of STST nozzle Model-1

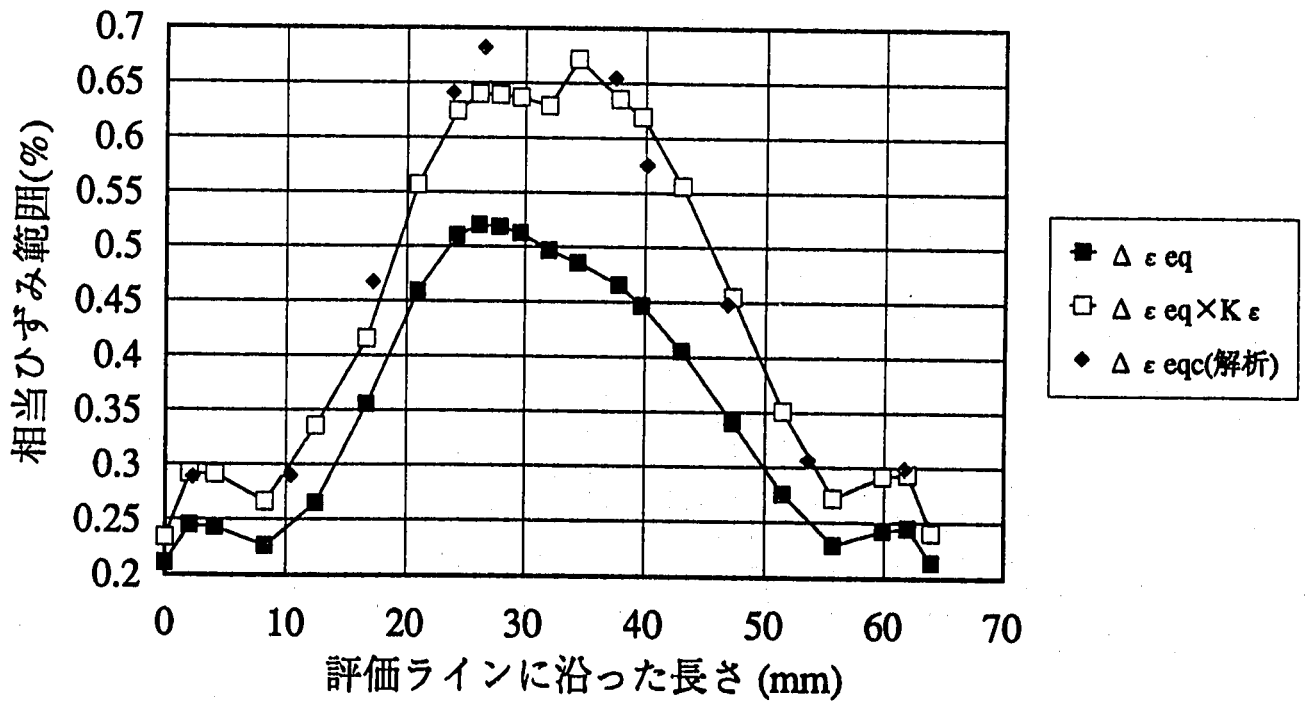


Fig.4.3-5 Comparison of strain range between estimation and analysis of STST nozzle Model-2

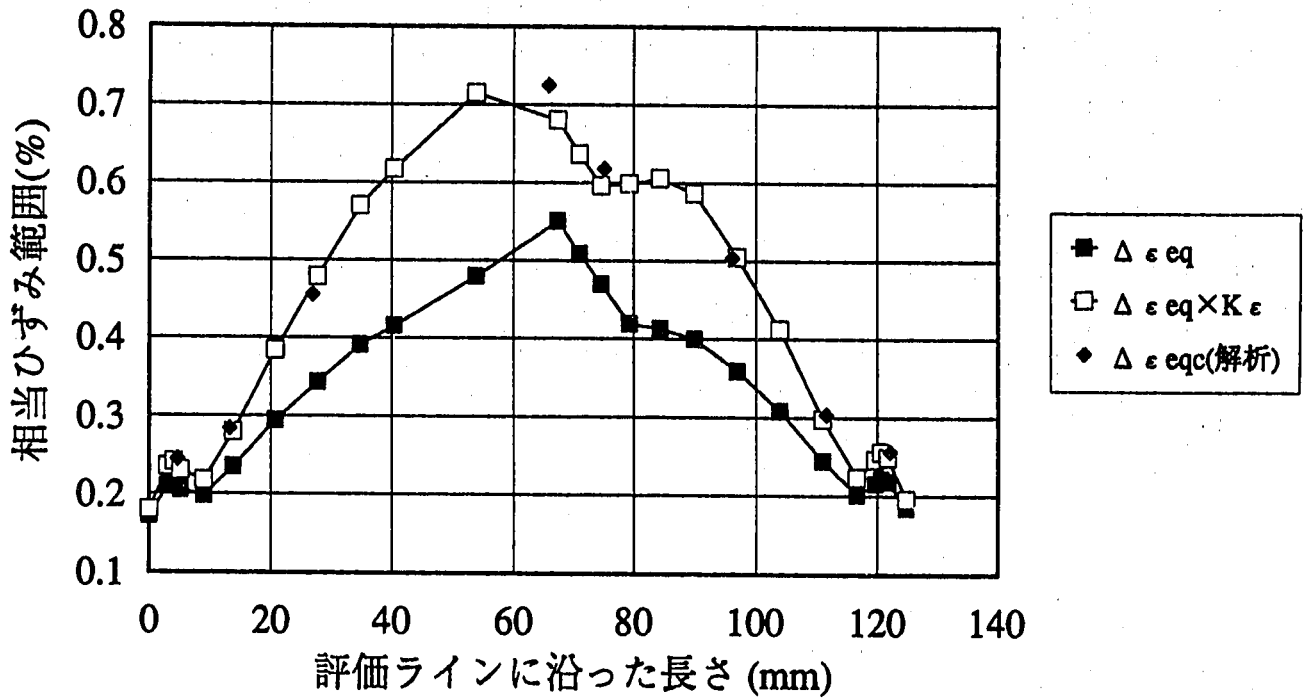


Fig.4.3-6 Comparison of strain range between estimation and analysis of STST nozzle Model-3

5. 結 論

弾性解析を用いたTTS-DSにおいて、ひずみ範囲を算出する際に用いるひずみ集中係数の評価法について検討し、以下の結論が得られた。

- (1) ひずみ集中は、塑性の効果とクリープの効果に伴うひずみ集中係数の積とする。
- (2) 塑性の効果は、ポアソン比の変化によるひずみ集中係数と弾性追従によるひずみ集中係数の積とすることで、ひずみ範囲の予測精度が向上することが明らかになった。
- (3) クリープの効果は、クリープの発生に有効な時間を熱過渡開始時点から最大相当ひずみ範囲が発生するまでの時間の3倍とし、この有効時間に対するクリープひずみの増分をクリープによるひずみ集中とすることで、クリープによるひずみ集中を簡易的に求められることが明らかになった。
- (4) 長期1次応力の負荷されない熱過渡試験では、クリープによるひずみ集中は塑性の効果に伴うひずみ集中に比べて効果の小さいことが明らかになった。
- (5) 塑性の効果に伴うひずみ集中の予測精度を更に向上させるには、弾性追従パラメータの設定が重要であることが明らかになった。

6. 参考文献

- 1) 原子炉容器モデル熱過渡強度試験
第1報 クリープ疲労損傷損傷評価法 ; PNC SN9410 86-059
- 2) POISSON'S Ratio Correction in Elastic Analysis of Low Cycle Fatigue;
D. Moulin, R. L. Roche, B. Atrussen, 7th SMIRT G/F 7/3
- 3) 解説 高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等 ; PNC SN 241 85-08
- 4) 溶接容器型モデル熱過渡強度試験
第2報 予備弾性解析と強度評価 ; PNC SN9410 90-103
- 5) 非線形汎用構造解析システム F I N A S 使用説明書 ; PNC N9520 89-019
- 6) STSTノズル形状モデルおよびSUS316LNP 溶接継手モデルの熱応力き裂発生試験
第3報 非弾性解析と強度評価 ; 田中ら ; 査読中