

クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の策定に係わる解析

第3報 Y型接合構造の解析 (1)

1990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)

1990年 1月

クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の策定に係わる解析

第3報 Y型接合構造の解析 (1)

谷川 雅之・根岸 仁・霜越 稔・
永田 敬・岩田 耕司

要 旨

クリープ疲労損傷に対する設計評価法の高度化では局所的構造不連続と総体的構造不連続が重畳する場合の非弾性挙動の評価が問題となる。弾完全塑性体を想定した基本構造要素モデルの解析により、非弾性挙動は構造不連続効果が重畳型となるタイプⅠ、最大値型となるタイプⅡの2つのタイプに分類できるという評価概念を得ている。

評価概念の実機構造に対する適用性を検討するためパラメータ解析による非弾性挙動の把握・類型化を行う必要がある。ここでは代表的な不連続構造としてY型接合構造を取り上げ、パラメータ解析を行う上での基本参照条件の設定及び基本挙動の解析を実施した。以下に得られた知見を示す。

- ① Y型接合構造は胴の板厚よりもスカートの板厚を相対的に薄くした形状でモデル化することができる。
- ② 準静的昇温に対する相当ひずみ範囲の最大値はスカート側アール止端部に生じ、弾性追従型よりもやや急峻な増大傾向を示す。
- ③ 弾塑性状態におけるひずみ増大はタイプⅡに近い挙動を示す。

今後、応力緩和挙動及びひずみ増大挙動について形状・負荷・材料因子に関するパラメータサーベイを行う予定である。

JANURY, 1990

Analysis on the Determination of Design Factors for Creep-Fatigue Damage Evaluation

3 Stress Analysis of Y-junction(1)

Masayuki Tanigawa * , Hitoshi Negishi * , Minoru Shimokoshi *
Takashi Nagata* , Kohji Iwata *

Abstract

The improvement of the creep-fatigue damage evaluation method for the structural design requires the knowledge accumulation of stress-strain behaviors at local structural discontinuities overlapped with gross structural discontinuities. As the result of the inelastic parametric analyses using the fundamental structural element models with the elastic-fully-plastic materials, structural discontinuities were found to be classified to two types, TYPE I and TYPE II. The overlap effect of the local discontinuity and the gross discontinuity is evaluated by their multiplication in TYPE I, and by the larger between them in TYPE II.

The applicability of the evaluation concept to the structural components of FBR is studied on the stress-strain behaviors obtained and classified from the inelastic parametric analysis results. In this report the reference condition for parametric analyses was decided and analysed for one of the representative discontinuous structures, Y-junction. The knowledges obtained are as follows.

- ① Y-junction could be modeled with the cylinder and the support whose thickness is smaller than that of the cylinder.
- ② The maximum value of the equivalent strain range arises at the end of the rounded corner in the root of the support under the quasi-static elevation of the fluid temperature. The equivalent strain increases steeper than the elastic follow-up type behavior.
- ③ The discontinuity type of this Y-junction could be classified to TYPE II.

In the future for behaviors of the strain concentration and the stress relaxation the inelastic parametric survey related to shapes, loads and material properties is going to be performed.

* Structural Engineering Section, Systems and Components Development Division, O-arai Engineering Center

目 次

1. 緒言	1
2. 解析検討の進め方	2
2.1 幾何学的形状不連続部の解析	2
2.2 Y型接合の構造解析	2
2.3 本報告書記載の作業範囲	3
3. リファレンス条件の設定	7
3.1 実機Y型接合構造の調査	7
3.2 幾何学的形状の単純化	7
3.3 負荷条件の単純化	10
3.4 材料特性の単純化	11
4. 基本挙動の解析	30
4.1 解析の方法	30
4.2 応力・ひずみの分析	30
4.3 ひずみ成分の挙動	32
4.4 ひずみ集中係数・弾性追従パラメータ	32
4.5 まとめ	33
5. 考察	52
5.1 評価断面の方向法	52
5.2 等価線形相当ひずみの定義	53
5.3 総体的弾性追従パラメータ	54
5.4 厚さ方向温度分布	55
5.5 まとめ	55
6. 今後の計画	70
6.1 応力緩和挙動の検討	70
6.2 ひずみ増大挙動に対する影響因子の検討	71
7. 結言	72
謝辞	73
参考文献	74
付録	

A.1 「もんじゅ」における主要なY型接合構造のリストアップ	75
A.2 ひずみ集中係数等の定義	77

表 リ ス ト

表3.1	Y型接合構造の寸法例	12
表4.1	リファレンスモデルにおける評価断面	35
表4.2	評価断面1,2 表面における成分毎のひずみ範囲 (リファレンス条件)	35
表4.3	線形成分及び膜・曲げ・ピーク成分のひずみ範囲	36
表4.4	各評価断面における弾性追従パラメータの値	44
表5.1	評価断面の方向と等価線形ひずみ・ひずみ集中係数	57
表5.2	等価線形ひずみの定義とひずみの値	57
表5.3	修正ミーゼス型等価線形ひずみの値 (ε_r , γ_{rz} 表面値使用)	57
表5.4	ひずみ成分毎の等価線形値 (単位: %)	58
表5.5	総体的構造不連続効果を表す弾性追従パラメータの値	58
表5.6	厚さ方向温度分布 (高温定常状態, アール部側表面)	58

図 リ ス ト

図2.1	幾何学的形状不連続部に対する設計評価法高度化のフロー	5
図2.2	Y型接合構造の解析検討作業流れ図	6
図3.1	Y型接合構造モデルにおける寸法・記号の定義	13
図3.2	「もんじゅ」中間熱交換器概形図	14
図3.3	形状及び要素分割(Model 1) 全体図 拡大図	15
図3.4	形状及び要素分割(Model 2) 全体図 拡大図	16
図3.5	形状及び要素分割(Model 3) 全体図 拡大図	17
図3.6(a)	熱過渡条件 (流体温度変化: 手動トリップ, IHK1次入口ノズル)	18
図3.6(b)	熱過渡条件 (流量変化: 手動トリップ, IHK1次入口ノズル)	18
図3.7(a)	熱伝導解析境界条件 (実機構造設計)	19
図3.7(b)	応力解析境界条件 (実機構造設計)	19
図3.8(a)	温度及び相当応力コンター図 (高温定常状態, 弾性解析, Model 1)	20
図3.8(b)	温度及び相当応力コンター図 (高温定常状態, 弾性解析, Model 2)	21
図3.8(c)	温度及び相当応力コンター図 (高温定常状態, 弾性解析, Model 3)	22
図3.9(a)	温度及び相当応力コンター図 (3600秒後, 弾性解析, Model 1)	23
図3.9(b)	温度及び相当応力コンター図 (1480秒後, 弾性解析, Model 2)	24
図3.9(c)	温度及び相当応力コンター図 (2200秒後, 弾性解析, Model 3)	25
図3.10(a)	交叉アール部におけるひずみ範囲の分布 (Model 1)	26
図3.10(b)	交叉アール部におけるひずみ範囲の分布 (Model 2)	27
図3.10(c)	交叉アール部におけるひずみ範囲の分布 (Model 3)	28
図3.11(a)	熱伝導解析境界条件 (パラメータ解析)	29
図3.11(b)	応力解析境界条件 (パラメータ解析)	29
図4.1(a)	要素分割全体図 (Model 3: リファレンスモデル)	38
図4.1(b)	要素分割全体図 (Model 3: リファレンスモデル)	39
図4.2(a)	相当応力コンター図 (弾性解析, 高温定常状態, リファレンスモデル)	40
図4.2(b)	相当塑性ひずみコンター図 (弾塑性解析, 高温定常状態, リファレンスモデル)	40
図4.3(a)	評価断面1におけるひずみの分布 (高温定常状態, リファレンスモデル)	41
図4.3(b)	評価断面2におけるひずみの分布 (高温定常状態, リファレンスモデル)	42
図4.4(a)	交叉アール部における相当ひずみ ϵ_t の分布 (高温定常状態, リファレンスモデル)	43
図4.4(b)	交叉アール部における修正ミーゼス型相当ひずみ ϵ_n の分布 (高温定常状態, リファレンスモデル)	43
図4.5(a)	$\epsilon_{z,}, \epsilon_{z,n}$ の $\epsilon_{t, EL} / \epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面1)	44
図4.5(b)	$\epsilon_{z,m}, \epsilon_{z,b}$ の ϵ_{zF} の $\epsilon_{t, EL} / \epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面1)	44
図4.6(a)	$\epsilon_{z,}, \epsilon_{z,n}$ の $\epsilon_{t, EL} / \epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面2)	45
図4.6(b)	$\epsilon_{z,m}, \epsilon_{z,b}$ の ϵ_{zF} の $\epsilon_{t, EL} / \epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面2)	45

図4.7(a)	$\epsilon_x, \epsilon_{zn}$ の $\epsilon_{t,EL} / \epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面1)	46
図4.7(b)	$\epsilon_{xm}, \epsilon_{xb}$ の ϵ_{xF} の $\epsilon_{t,EL} / \epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面1)	46
図4.8	$\epsilon_{\theta_m}, \epsilon_{\theta_b}, \epsilon_{\theta_F}$ の $\epsilon_{t,EL} / \epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面1)	47
図4.9	$\epsilon_{\theta_m}, \epsilon_{\theta_b}, \epsilon_{\theta_F}$ の $\epsilon_{t,EL} / \epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面2)	47
図4.10	$K\epsilon$ と S_n / δ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0 → 高温定常状態)	48
図4.11(a)	K_F と S_p / δ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0 → 高温定常状態)	49
図4.11(b)	q_F と S_p / δ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0 → 高温定常状態)	49
図4.12(a)	$K\epsilon_n$ と S_n / δ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0 → 高温定常状態)	50
図4.12(b)	q_n と S_n / δ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0 → 高温定常状態)	50
図4.13	交叉アール部における q_F, q_n の分布 (高温定常状態, リファレンスモデル)	51
図5.1(a)	評価断面11におけるひずみの分布 (リファレンスモデル, 高温定常状態)	59
図5.1(b)	評価断面12におけるひずみの分布 (リファレンスモデル, 高温定常状態)	60
図5.1(c)	評価断面13におけるひずみの分布 (リファレンスモデル, 高温定常状態)	61
図5.1(d)	評価断面14におけるひずみの分布 (リファレンスモデル, 高温定常状態)	62
図5.2(a)	$K\epsilon$ と S_n / δ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0 → 高温定常状態)	63
図5.2(b)	$K\epsilon_n$ と S_n / δ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0 → 高温定常状態)	64
図5.2(c)	q_n と S_n / δ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0 → 高温定常状態)	64
図5.3	$\epsilon_{n,EL}, \epsilon_{n,EP}$ と Φ の関係 (リファレンスモデル, 高温定常状態)	65
図5.4	$K\epsilon, K\epsilon_n, K$ と Φ の関係 (リファレンスモデル, 高温定常状態)	65
図5.5	$K^2 \epsilon_{n,EL}, K\epsilon_{n,EP}, K^2 \epsilon_{n,EP}$ と Φ の関係 (リファレンスモデル, 高温定常状態)	66
図5.6(a)	q_n と S_n / δ_Y の関係 (評価断面1: 0 → 高温定常状態)	67
図5.6(b)	q_n と S_n / δ_Y の関係 (評価断面2: 0 → 高温定常状態)	67
図5.7(a)	タイプIIに基づくひずみ集中挙動の推定 (評価断面1)	68
図5.7(b)	タイプIIに基づくひずみ集中挙動の推定 (評価断面2)	68
図5.8	評価断面1における $\epsilon_{t,EP}$ と評価断面2における $\epsilon_{t,EP}, \epsilon_{n,EP}$ との比と 評価断面2における S_n / δ_Y の関係 (0 → 高温定常状態)	69
図A.2.1	弾性追従パラメータ q_F 及び q_n の定義	82

1. 緒言

高速炉主要機器の構造設計ではクリープ疲労損傷の制限が設計支配因子となっている場合が多い。このため信頼性及び経済性に優れた構造設計を行うにはクリープ疲労損傷に対する合理的な設計評価法の策定が重要である。「もんじゅ用高温構造設計方針」は他国の類似基準と比べるとより合理的な評価法を規定しているが、構造物試験による検証では設計許容値と実際の破損発生時点とに大幅な隔たりがある場合も認められその高度化が期待されている。

クリープ疲労損傷に対する設計評価法の高度化を図るうえで特に問題となるのは切欠きのような局所的構造不連続と配管熱膨張応力に認められるような総体的構造不連続が重畳する場合の応力・ひずみ挙動の評価である。切欠付き変断面丸棒及びフィレット付き帯板（異断面部材接続部）等の基本構造要素を用いた非弾性パラメータ解析結果の検討より以下に示す評価法の概念が提示されている。

- (1) 弾塑性変形において応力集中部のひずみ増大挙動は重畳型となるタイプⅠ（切欠き付き変断面丸棒切欠き部等）と最大値型となるタイプⅡ（異断面部材接続部フィレット局部等）に分類される。材料特性として弾完全塑性体を仮定した場合、タイプⅠでは断面全体が降伏した後もひずみ集中係数が増大するのに対しタイプⅡではひずみ集中係数が低減する傾向を示す。
- (2) クリープ変形において応力集中部の応力緩和挙動は等価弾性追従パラメータで表される。応力集中係数を K ・総体的弾性追従パラメータを q_0 とした場合、等価弾性追従パラメータはタイプⅠでは $q_0 \times K^2$ 、タイプⅡでは q_0 で包絡できる。
- (3) 材料特性について弾完全塑性体を用いることにより総体的弾性追従パラメータ q_0 として保守的な値が得られる。

上述の評価概念は機械荷重を受ける構造要素モデルによる解析結果に基づいているため熱荷重を受ける実機構造不連続部に対する適用性の検討が必要となる。実機の代表的な不連続構造としてはY型接合構造等の支持構造、セーフエンド・クロッチ等のノズル構造があり後者についてはクロッチを単純化したフィレット付き円筒による解析検討が並行して行われている。⁽³⁾

Y型接合構造についてはもんじゅ主要機器形状の調査結果に基づいて解析モデルを設定し非弾性挙動の類型化・設計係数の定量化を目的とした非弾性パラメータ解析を実施している。ここではリファレンス条件の検討及び基本挙動に対する解析結果より得られた知見について報告する。

2. 解析検討の進め方

2.1 幾何学的形状不連続部の解析

局所的・総体的構造不連続重畳部位のクリープ疲労損傷に対する設計評価法高度化を目的として各種構造要素モデルを用いた非弾性パラメータ解析による検討作業を実施している。全体的な検討作業のフロー（図2.1）について以下に説明する。

(1) 基本構造要素挙動解析

非弾性挙動の把握・類型化及び設計評価法定式化方策・包絡的保守性賦与方法の概念的検討を目的として単純な基本構造要素に関する非弾性パラメータ解析を実施している。

Step1では切欠き付き変断面丸棒及びフィレット付き帯板（異断面部材接続部）モデルを使用し機械的荷重に対する解析を行った。解析結果に基づき挙動の類型化概念（タイプⅠ・タイプⅡ分類）を示し、ひずみ範囲算定式及び応力緩和評価に用いる等価弾性追従パラメータを提示している。

Step2では支持構造をモデル化したYピース及びノズルクロッチ構造をモデル化したフィレット付き円筒モデルを使用し熱荷重に対する解析を行っている。

(2) 構造要素挙動解析

実機条件における構造物の非弾性挙動の類型化及び包絡的保守性賦与に必要な設計評価法または設計係数値策定を目的として実機条件を包絡するパラメータの範囲について非弾性解析を実施する。

解析検討はYピース構造及びノズルのセーフエンド構造を中心に行うことを計画している。

(3) 設計評価法の総合的裕度確認

TTS等の構造物試験で得られた強度データを(2)で策定された設計評価法で評価することにより安全裕度を実証的に把握する。

(4) 基準化

総合的安全裕度が確認された設計評価法を高温構造設計基準に組み込む。

2.2 Y型接合構造の解析

基本構造要素挙動解析のstep2として熱荷重を受ける実機の代表的な不連続構造であるY型接合構造について非弾性パラメータ解析による検討作業を実施している。解析検討のフロー（図2.2）について以下に説明する。

(1) 実機形状調査に基づく基本参照条件（リファレンス条件）の策定

もんじゅ主要機器の支持スカート・胴接合部の形状及び負荷条件の調査を行う。調査結果及び調査結果を用いた弾性熱応力解析結果に基づき実機挙動を代表可能な基本参照条件（リファレンス条件）を定める。

(2) 基本挙動の把握

基本参照条件について非弾性解析を実施し、応力（ひずみ）集中部における非弾性ひずみ集中の定性的傾向等を把握する。

(3) 因子影響度の把握

形状・負荷・材料特性に係わる因子に対する非弾性挙動の把握・類型化を目的として非弾性パラメータ解析及び解析結果の分析を実施する。

(4) 設計評価法概念の適用性検討

切欠き付き変断面丸棒・フィレット付き帯板の機械荷重に対する解析結果に基づいて提示された設計評価法及び包絡的保守性賦与方法概念の適用性検討を目的として非弾性解析結果の分析評価を行う。

2.3 本報告書の記載範囲

本報告書は、2.2に記載した内容のうち、(1)及び(2)についての作業結果を記したものである。

検討に際しての着眼点は以下のとおりである。

(1) 実機形状調査に基づく基本参照条件の策定

実機形状及びそれを簡略化したモデルについて弾性応力解析を行い、結果を相互比較することにより、幾何学的形状・負荷条件及び材料特性を単純化し、実機形状・負荷条件における非弾性挙動の把握を行う上で基本とできるリファレンス条件を定める。

(2) 基本挙動の把握

基本参照条件について非弾性解析を行い、以下の観点についての検討を行う。

(1) [評価断面の方向] 弾性解析結果を用いた非弾性ひずみ集中評価では、特定断面についての断面内応力分布を等価線形膜応力・等価線形曲げ応力及びピーク応力に区分して評価を行う。内外表面が平行な場合には評価断面を表面の法線方向にとるのが通例であるが、ここで問題としているアール止端部近傍のように内外表面が平行でない場合には、評価断面の取り方により等価線形膜応力・等価線形曲げ応力及びピーク応力の比率が異なり、それに応じて計算されるひずみ集中係数が異なる値となる。

ここでは、評価点（最大ひずみ集中部）についていくつかの評価断面方向

を採取して計算した値を非弾性解析結果と比較することにより、評価断面採取方向についての検討を行う。

(ロ) [等価線形相当ひずみの定義] 等価線形相当ひずみの定義として修正ミーゼス型及びポアソン比効果型の2種類を考える。

前者は評価断面を基準とした各方向ひずみ成分の等価線形値をミーゼスの相当ひずみ式に代入することにより算出される。さらに単軸状態において相当応力と相当ひずみを対応させるため係数 $1.5/(1+\nu)$ が乗じられる。ここで問題となるのはシェルとして考えた場合に非線形となりうる評価ライン方向のひずみ成分についても等価線形値を用いている点及び弾性成分と非弾性成分とを分離していない点である。

後者は周方向ひずみ及び評価断面に対する法線方向ひずみの等価線形値より算出され、評価ライン方向のひずみ成分の寄与は表面での平面応力条件を仮定し全ひずみ理論に基づいて導出されるポアソン比効果型弾性追従パラメータにより考慮される。ここで問題となるのはせん断ひずみ成分の寄与を考慮していない点及び非比例負荷に適用できない点である。

本報告書では上記2種を暫定的な定義として採用し、取扱いの容易な前者を主に使用する。

(ハ) [総体的弾性追従パラメータ] 構造設計上使用すべき総体的弾性追従パラメータの算出方法として以下の3通りの方法が考えられる。

- 1) タイプⅠ型ひずみ集中傾向を示すことを仮定した場合の算出方法
- 2) タイプⅡ型ひずみ集中傾向を示すことを仮定した場合の算出方法
- 3) 非弾性解析による等価線形ひずみに対応する弾性追従パラメータ値

上記3通りの方法による値を相互比較することにより、構造設計上使用すべき総体的弾性追従パラメータの算出方法として採用すべき方法を検討する。

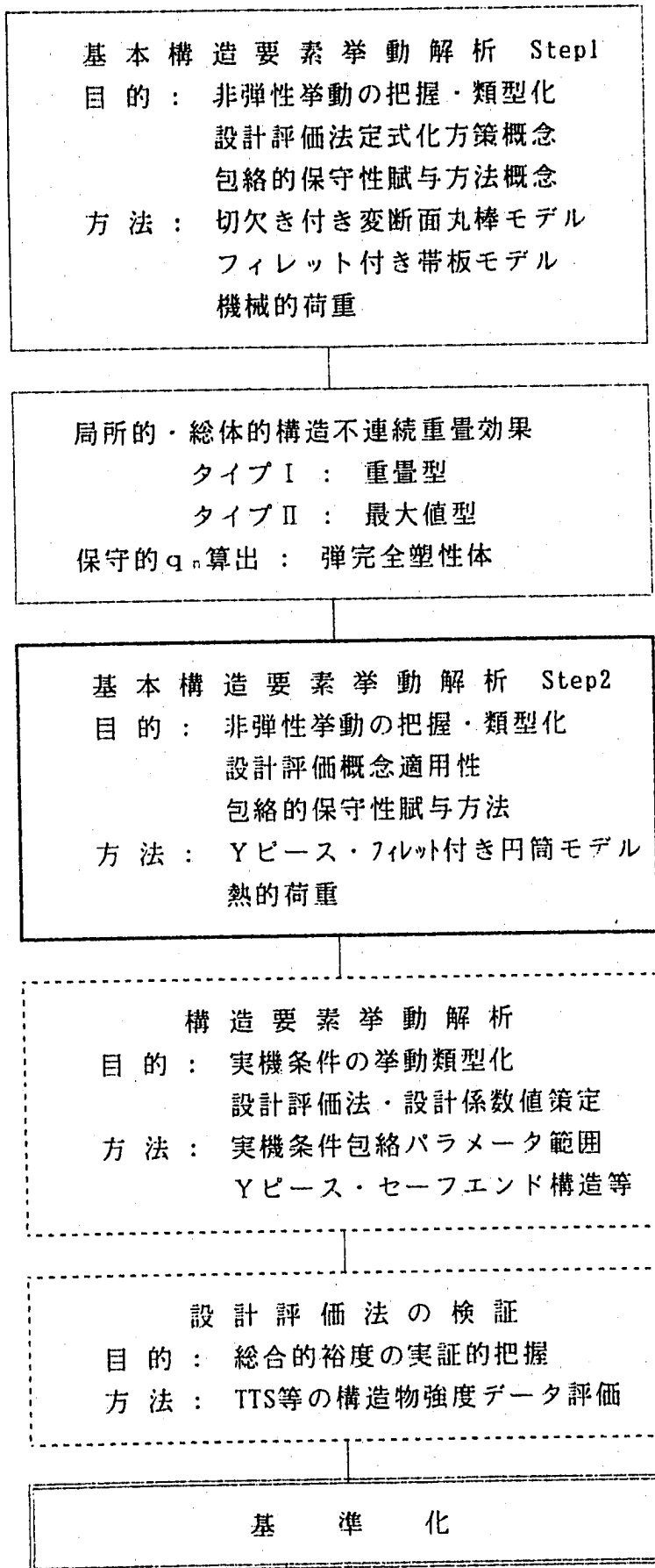


図2.1 幾何学的形状不連続部に対する設計評価法高度化のフロー

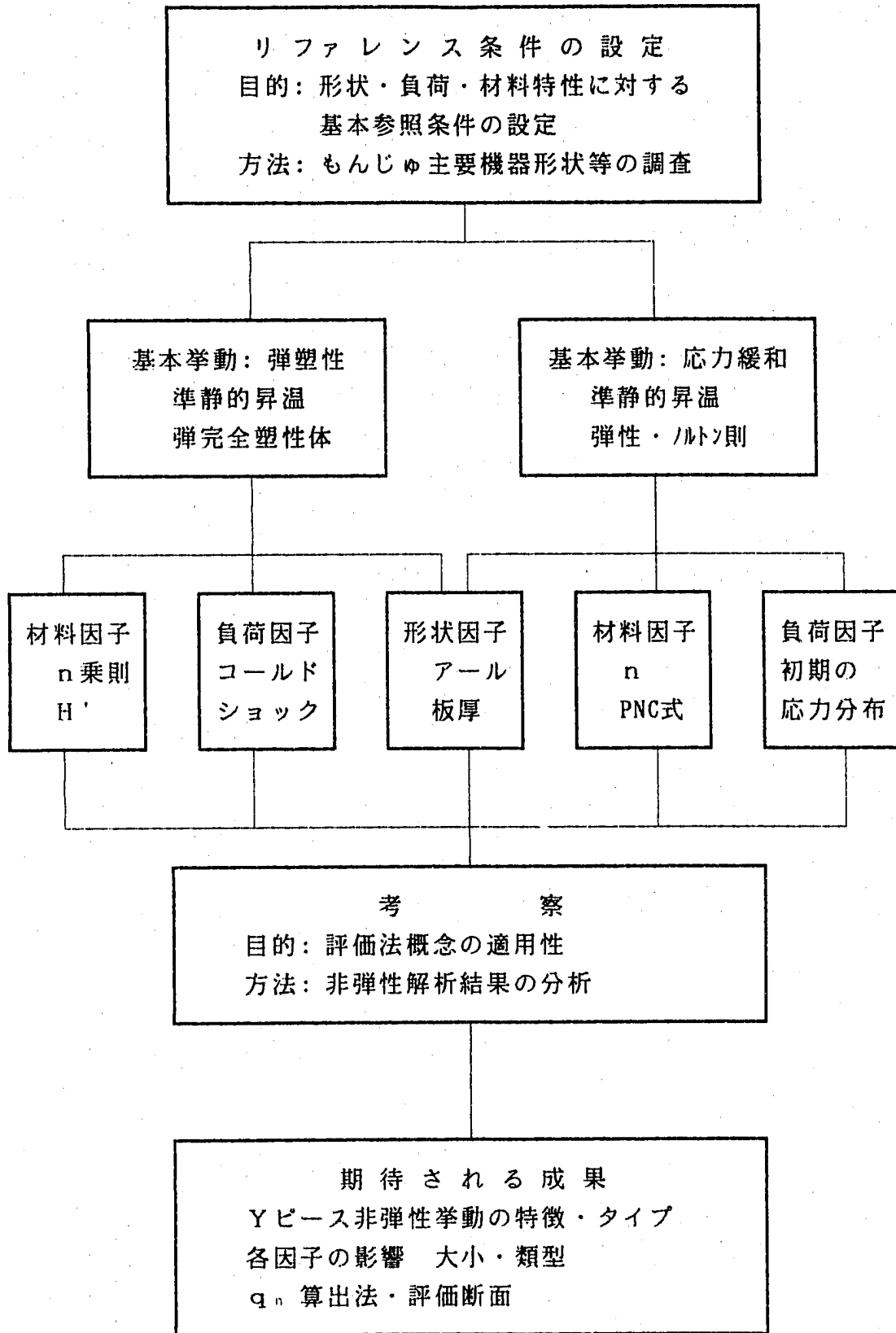


図2.2 Y型接合構造の解析検討作業流れ図

3. リファレンス条件の設定

3.1 実機 Y 型接合構造の調査

リファレンス条件及びパラメータ解析における検討範囲を定めるため、現時点で参照可能な資料に基づき「もんじゅ」主要機器の Y 型接合構造を調査した。調査には機器構造図・外形図面集⁽⁴⁾及び溶接検査申請図を用い、対象はサポートとして用いられるスカート構造とノズル等で用いられるセーフエンド構造とした。付録 A. 1 に Y 型接合構造のリストアップを示す。

ここでは Y 型接合構造としてスカート構造を考える。図面には詳細寸法の記載されていないものが多かったが、IHX 支持スカート・胴接合部及び IHX 上部管板用シュラウド・胴接合部、IHX G/V 支持スカート・胴接合部、E/V 支持スカート・胴接合部について得られた寸法値を表 3.1 に示す。ここで、寸法に関する記号の定義は図 3.1 に従うものとする。表より以下のことがわかる。

- ① 交叉角度 θ は 30° が中心で 20° の場合もある。
- ② 交叉アール部曲率半径 ρ は 30mm が中心であるが低応力部では 10mm の場合もある。
- ③ 胴の板厚は一般にスカートと同等もしくは厚くなっており、薄い場合には補強が設けられている。

もんじゅの実機構造については製作メーカーとの契約上の問題（軽水炉仕様準拠）により詳細な寸法が明らかとなっていない部分が多い。把握できる限りでは、IHX 支持スカートに基づくパラメータ解析で非弾性挙動の包絡的把握が可能と期待できる。

3.2 幾何学的形状の単純化

3.2.1 解析モデル

代表的な Y 型接合構造である IHX 支持スカート・胴接合部（図 3.2 参照）について形状の単純化を試みる。ここでは 2 種類のモデル（MODEL2, MODEL3）について弾性熱応力解析を行い、IHX の Y 型接合構造モデル（MODEL1）の解析結果と比較することによりリファレンス形状を決定する。MODEL2 は MODEL1 に対し接合部の補強を除去したモデル、MODEL3 は補強の効果を胴の板厚を相対的に厚くすることにより考慮したモデルである。各モデルの形状を図 3.3, 3.4, 3.5 に、主要寸法値を以下に示す。

	ρ (mm)	θ_1 ($^\circ$)	t_s (mm)	t (mm)	備 考
MODEL 1	30	15	50	30	IHX 相当 (接合部板厚補強)
MODEL 2	30	0	50	30	スカート板厚大
MODEL 3	30	0	30	50	胴板厚大

負荷は高温定常状態からのコールドショックを考える。ここでは I H X の代表的なコールドショック条件である手動トリップ (図 3.6 (a), (b)) をもとに温度差を加速した条件を考える。すなわち手動トリップ時の温度差約 150°C を 350°C まで増大させた条件とする。図 3.6 (a) 中に解析で用いる流体温度変化を破線で示す。熱過渡条件を以下に示す。

高温側流体温度 550°C
 低温側流体温度 200°C
 温度変化速度 0.5°C/sec

熱伝導解析境界条件 (注 1)

胴内面熱伝達率 : 500kcal/m²hr°C (注 2)
 スカート上端部温度 : 50°C
 上記以外断熱

(注 1) 図 3.7 (a) に実機構造設計で用いられている I H X 支持スカートの熱伝導解析境界条件の考え方を示す。ここでは以下の簡略化を行う。

- ・ 胴内面熱伝達率 (1次入口 Na 接液部) としてサーマルライナを考慮した熱通過率を用いる。
- ・ 保温材への伝熱は小さいと考え断熱とする。
- ・ 対面輻射は熱応力を低減する効果があると考えられるがここでは熱応力の厳しくなる断熱条件とする。
- ・ スカート上端部は自然空冷されるサポート胴に接続されている。ここでは極限值として 50°C 一定を設定する。

(注 2) Subbotin の式による⁽⁵⁾

形状 (図 3.2) : 管径 2940mm (外胴内径), 500°C 相当
 サーマライナ厚さ 10mm, スタクナントトリウム層厚さ 10mm 考慮
 流速算出時内管径 (セキ外径) 2600mm 考慮

熱伝達率 : 414kcal/m²hr°C (手動トリップ時)
 トリウム流量 512ton/hr
 982kcal/m²hr°C (定格運転時)
 トリウム流量 5120ton/hr

材料特性は SUS304 の値を用いる。詳細は 3.4 で述べる。

3.2.2 解析結果

(1) 温度・相当応力の分布

温度分布及びMises相当応力の分布を高温定常状態及びコールドショック時の最大ひずみ範囲発生時点（コールドショック側極値時点）についてコンター図の形で示す。

- 温度及び相当応力コンター図（高温定常状態, Model 1） ----- 図3.8 (a)
- 温度及び相当応力コンター図（高温定常状態, Model 2） ----- 図3.8 (b)
- 温度及び相当応力コンター図（高温定常状態, Model 3） ----- 図3.8 (c)
- 温度及び相当応力コンター図（3600秒後, Model 1） ----- 図3.9 (a)
- 温度及び相当応力コンター図（1480秒後, Model 2） ----- 図3.9 (b)
- 温度及び相当応力コンター図（2200秒後, Model 3） ----- 図3.9 (c)

Model 1について以下のことがわかる。

- ① 高温定常状態の温度分布はスカート部で長さ方向にほぼ一定の勾配を示し他の部分では一様となる。
- ② 高温定常状態の応力分布はスカートの付け根部に曲げが集中し交叉アール部のスカート側に最大ピーク値が生じる。
- ③ コールドショック側極値時点の温度分布はスカートの付け根付近で温度が最大となり交叉部で比較的急な径方向分布が生じる。
- ④ コールドショック側極値時点の応力分布は交叉アール部のスカート側にピークが集中する。

またModel 2, 3については以下のことがわかる。

- ① Model 2の応力分布は胴の付け根部にも曲げが集中し最大ピーク値は交叉アール部の胴側となる。
- ② Model 3の応力分布はModel 1と同様の傾向を示す。応力値をみると高温定常状態では低めにコールドショック側極値では高めとなる。

(2) ひずみ範囲の交叉アール部に沿った分布

相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲の交叉アール部に沿った分布を以下の図に示す。成分毎のひずみ範囲は相当ひずみ範囲の極値時点に基づいて算出している。またひずみ成分の方向は局所座標系（表面に対し接線方向をz, 法線方向をrとする）に従っている。

- 交叉アール部におけるひずみ範囲の分布 (Model 1) ----- 図3.10 (a)
- 交叉アール部におけるひずみ範囲の分布 (Model 2) ----- 図3.10 (b)

交叉アール部におけるひずみ範囲の分布 (Model 3) -----図3.10(c)

図より以下のことがわかる。

- ① Model 1では最大値が交叉アール部のスカート側止端部付近に生じひずみ成分はz方向が支配的となる。
- ② Model 2では最大値が交叉アール部の胴側止端部付近に生じひずみ成分はz方向が支配的であるが θ 方向成分の影響も多少みられる。
- ③ Model 3ではModel 1と同様の傾向がみられ最大値も同程度の値となる。

3.2.3 まとめ

Model 1の形状を単純化したModel 2及びModel 3について検討結果をまとめると以下のようなになる。Model 1の弾性応力分布はModel 2よりModel 3に近く、Model 3を用いた場合非弾性挙動の類似性が期待できる。すなわちModel 3における胴側板厚の相対的増大はModel 1の交叉部補強効果の近似になっていると考えられる。これは実機の場合胴の側を剛にして圧力バウンダリとならないスカート側にひずみ集中部を移行させていることに対応していると考えられる。

ここではModel 3の形状をリファレンスとして定める。寸法は以下の値となる。

胴外径 D	3000mm	交叉角度 θ	30°
胴板厚 t	50mm	スカート板厚	30mm
胴高さ	2250mm	スカート高さ	1500mm
交叉アール部曲率半径 ρ	30mm		
交叉止端部曲率半径 r	200mm		

スカートの高さ1500mmは $2.5\sqrt{Dt} \approx 1200\text{mm}$ ($D=4700\text{mm}$, $t=50\text{mm}$, ここで、Dはスカート上端での値)に IHXにおける交叉止端部と交叉アール部の距離300mmを加算して定めた値である。また胴の高さ2250mmは $2.5\sqrt{Dt}=750\text{mm}$ ($D=3000\text{mm}$, $t=30\text{mm}$)を交叉止端部下方に加算した値である。

また応力解析の境界条件は実機構造設計で用いられている境界条件 (図3.7(b))をもとにスカート上端部に接続するサポート胴の拘束を回転のみの拘束に置き換えたものである。なおスカート上端部とスカート・胴接合部は充分離れているため拘束条件の影響はほとんど無いと考えられる。リファレンスモデルの境界条件を図3.11(b)に示す。

3.3 負荷条件の単純化

高温定常状態とコールドショック条件とでは、前者の方がパラメータが少ない。両者の非弾性挙動の類似性は今後のパラメータサーベイによるものとし、当面はバ

ラメータ数が少なく非弾性挙動をより明確に把握することのできる高温定常状態への準静的昇温をリファレンス条件とする。以下に流体温度変化及び熱的境界条件を示す。

初期流体温度	50℃
高温側流体温度	550℃
温度変化速度	準静的昇温（起動時想定。ただし温度変化速度無限小）

熱的境界条件（図3.11(a)参照）

胴内面	: $h_1 = \infty$
胴及びスカート外面	: $h_2 = 0$ （断熱）
胴スカート対面部	: $h_3 = 0$ （断熱）
スカート上端部	: 50℃（温度指定）

ここで初期温度状態は温度分布が一様の無応力状態に相当する。

3.4材料特性の単純化

材料物性値の温度依存性を考慮した場合、パラメータが複雑化し非弾性挙動の包括的把握が困難になると予想される。このため、応力解析では当面材料物性値の温度依存性を無視した条件をリファレンスとする。

熱伝導解析については温度依存性を考慮したSUS304の値（FINASライブラリ⁽⁶⁾）を用いる。応力解析については弾完全塑性体をリファレンスとし温度依存性は考えないものとする。なお線膨張係数については熱伝導解析に準じて温度依存性を考慮したFINASライブラリの値を用いる。応力解析用の材料特性値（SUS304 500℃相当）を以下に示す。

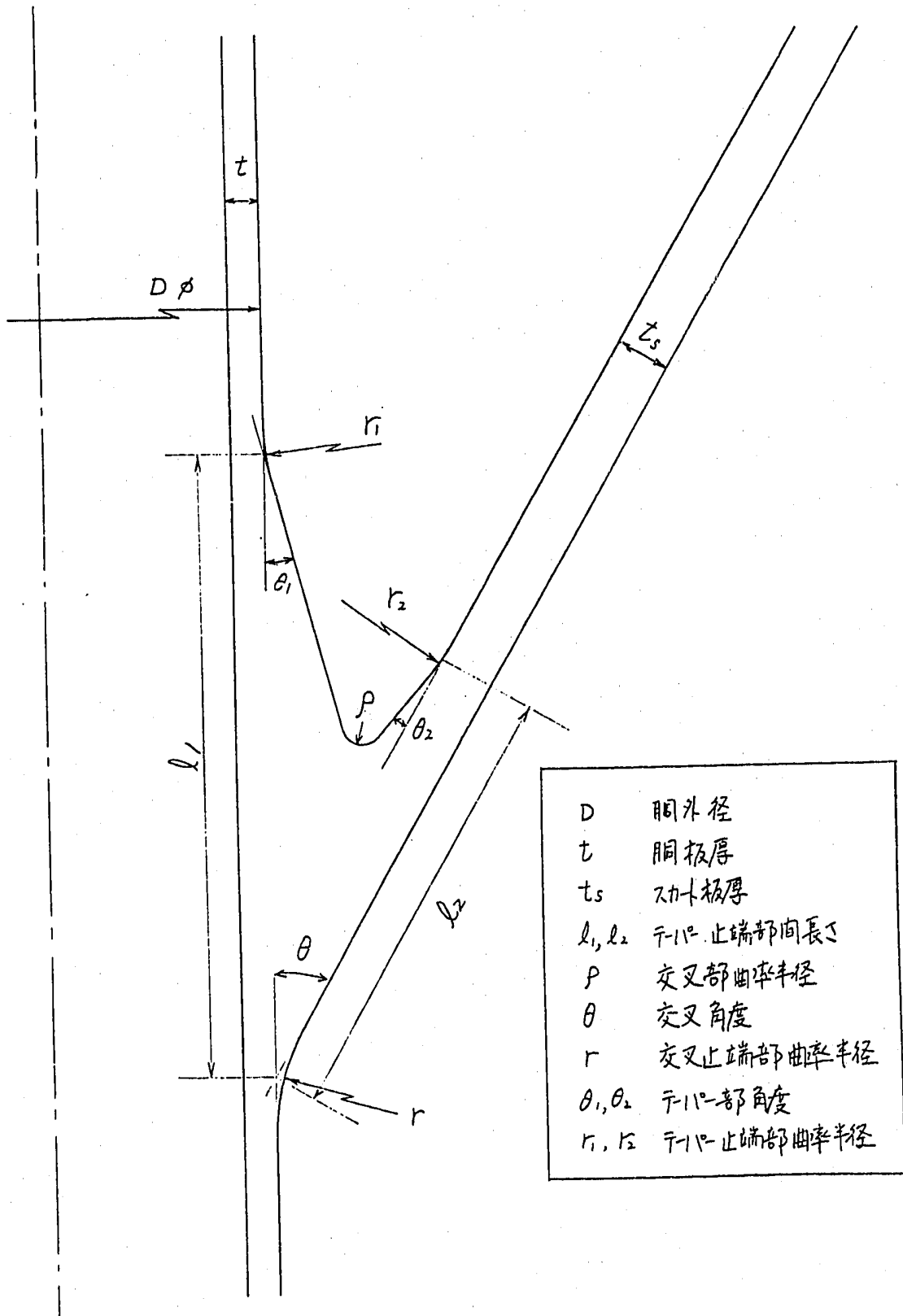
縦弾性係数 $E = 16200 \text{ kg/mm}^2$	ポアソン比 $\nu = 0.3$
降伏応力 $\sigma_0 = 16.2 \text{ kg/mm}^2$	加工硬化係数 $H' = 162 \text{ kg/mm}^2$

ここで加工硬化係数については解の乱れを防止する観点から $E/100$ の値として弾完全塑性体を近似する。

表 3.1 Y型接合構造の寸法例

	IHX支持スカート	IHX管板シユウト	IHXG/V支持スカート	E/V支持スカート
D (mm)	3000	3000	4020, 7000	3050
t (mm)	30	30	40	50
t ₃ (mm)	50	30	40	35
l ₁ (mm)	*540	-	160	-
l ₂ (mm)	*400	-	-	280
ρ (mm)	*30	*30	10	20
θ (°)	30	30	30	20
r (mm)	*200	?	50	200
θ ₁ (°)	*15	-	15	-
r ₁ (mm)	*200	-	?	-
θ ₂ (°)	10	-	-	10
r ₂ (mm)	*200	-	-	50

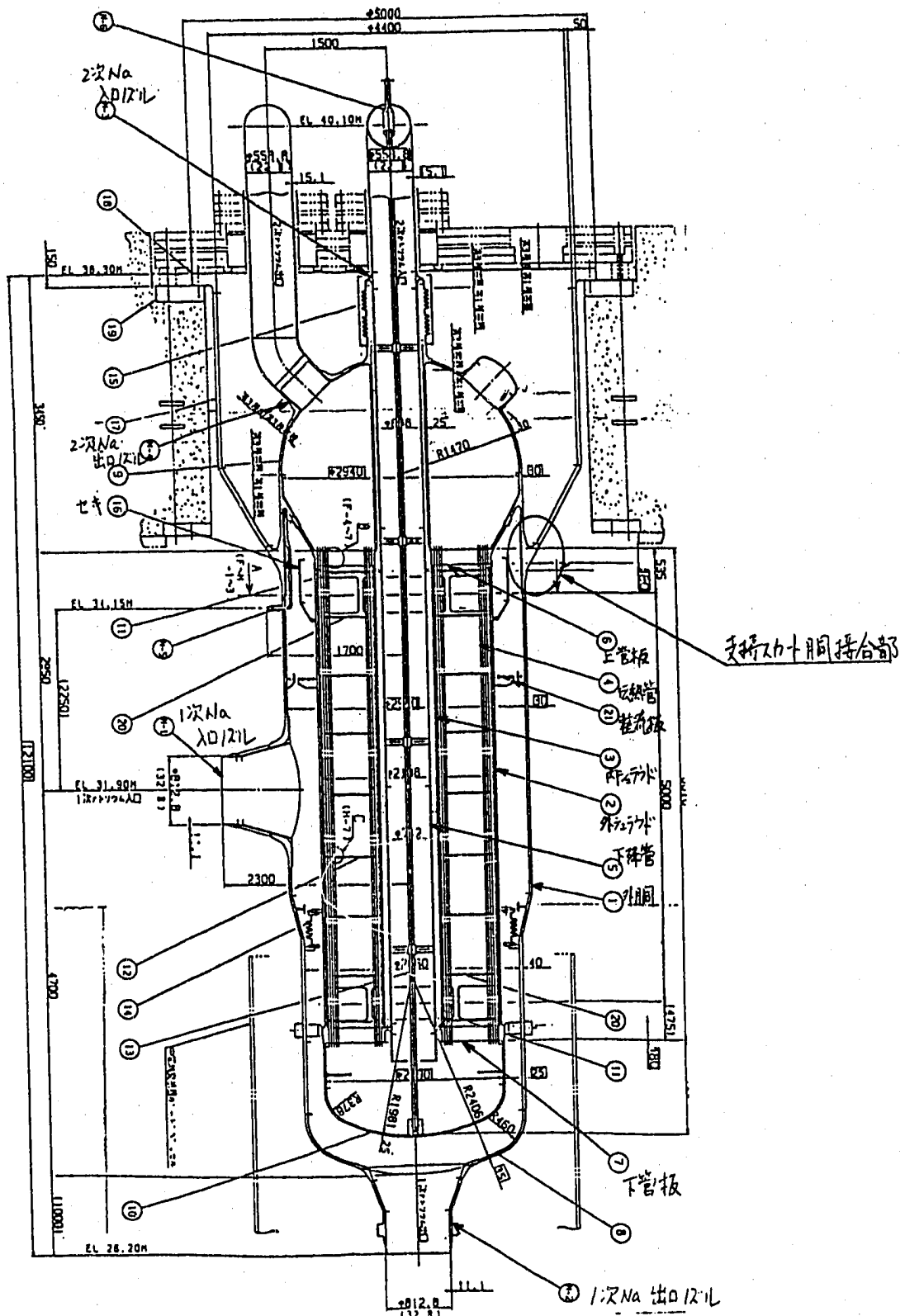
*印は推定値

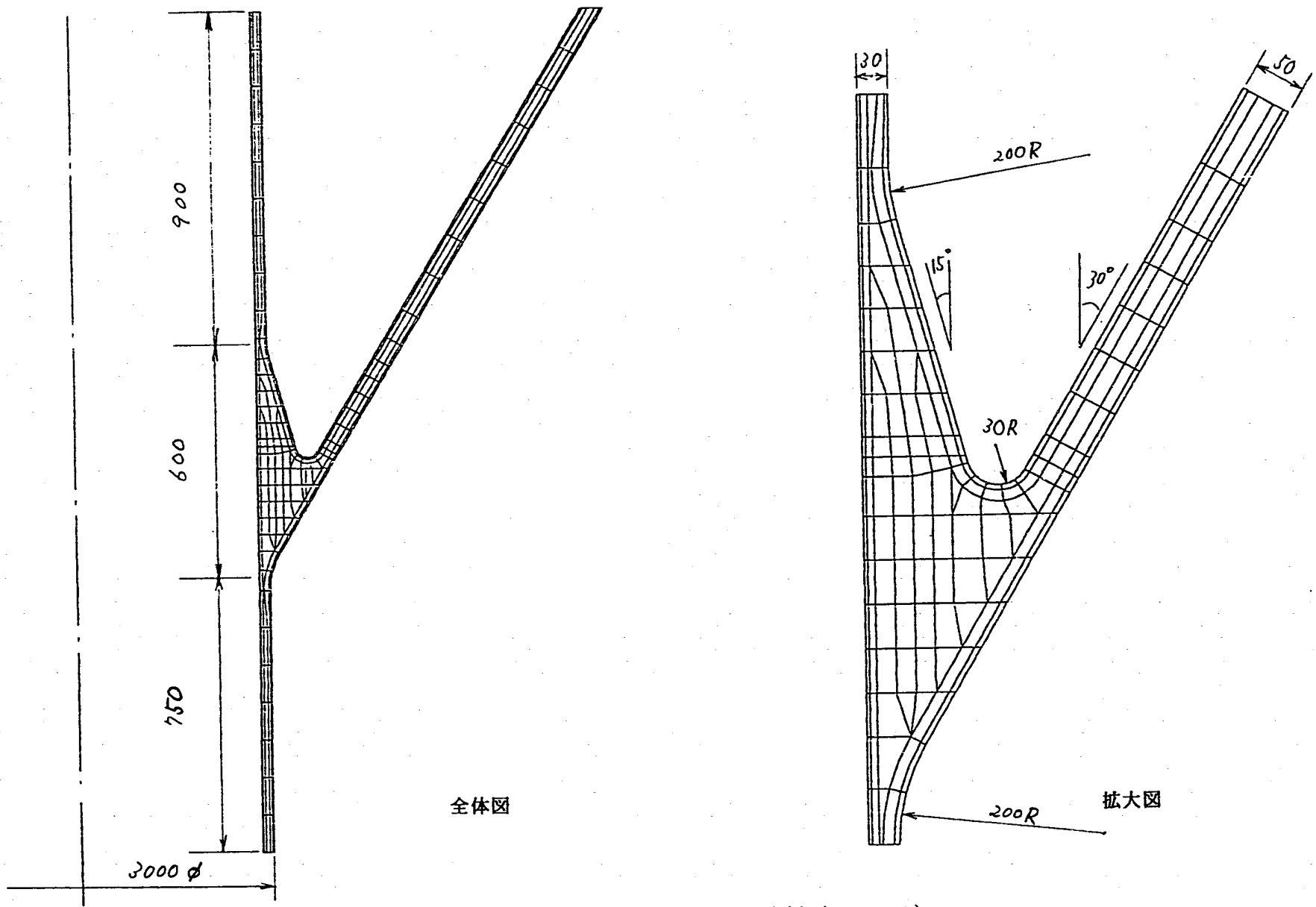


D	胴外径
t	胴板厚
t _s	スカト板厚
l ₁ , l ₂	テ-ハ-止端部間長さ
ρ	交叉部曲率半径
θ	交叉角度
r	交叉止端部曲率半径
θ ₁ , θ ₂	テ-ハ-部角度
r ₁ , r ₂	テ-ハ-止端部曲率半径

図3.1

Y型接合構造モデルにおける寸法・記号の定義

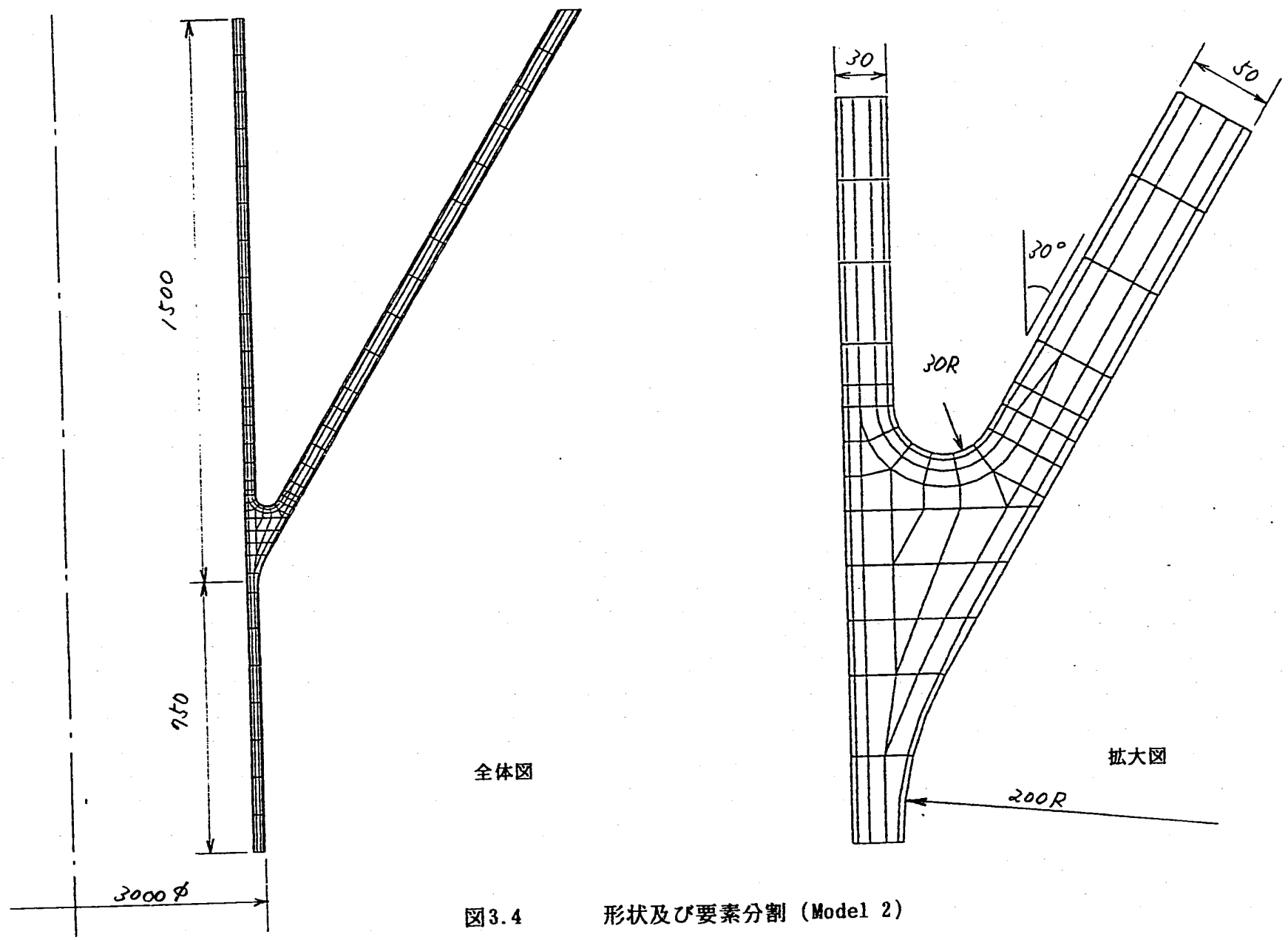




全体図

拡大図

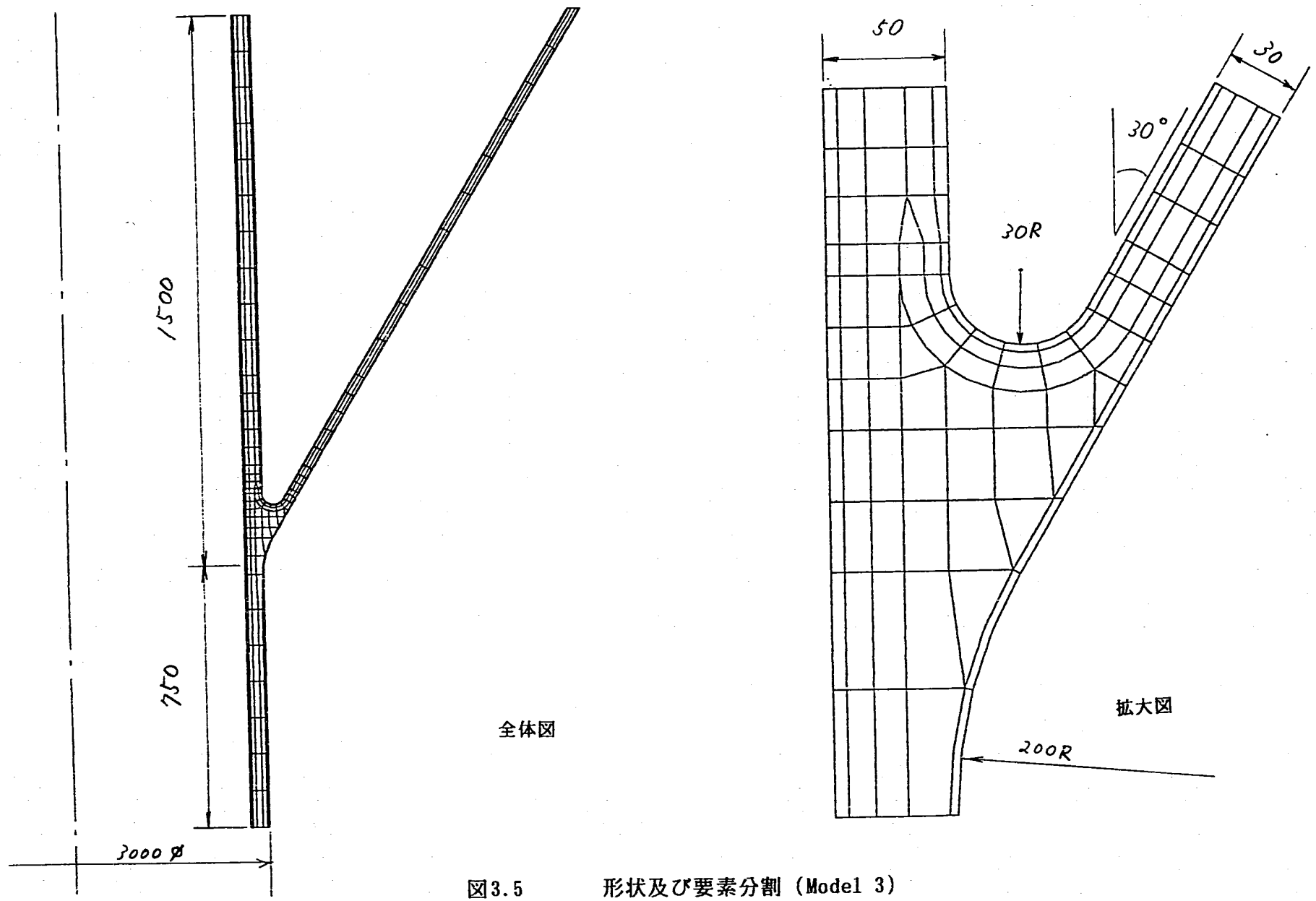
図3.3 形状及び要素分割 (Model 1)



全体図

拡大図

図3.4 形状及び要素分割 (Model 2)



全体図

拡大図

図3.5 形状及び要素分割 (Model 3)

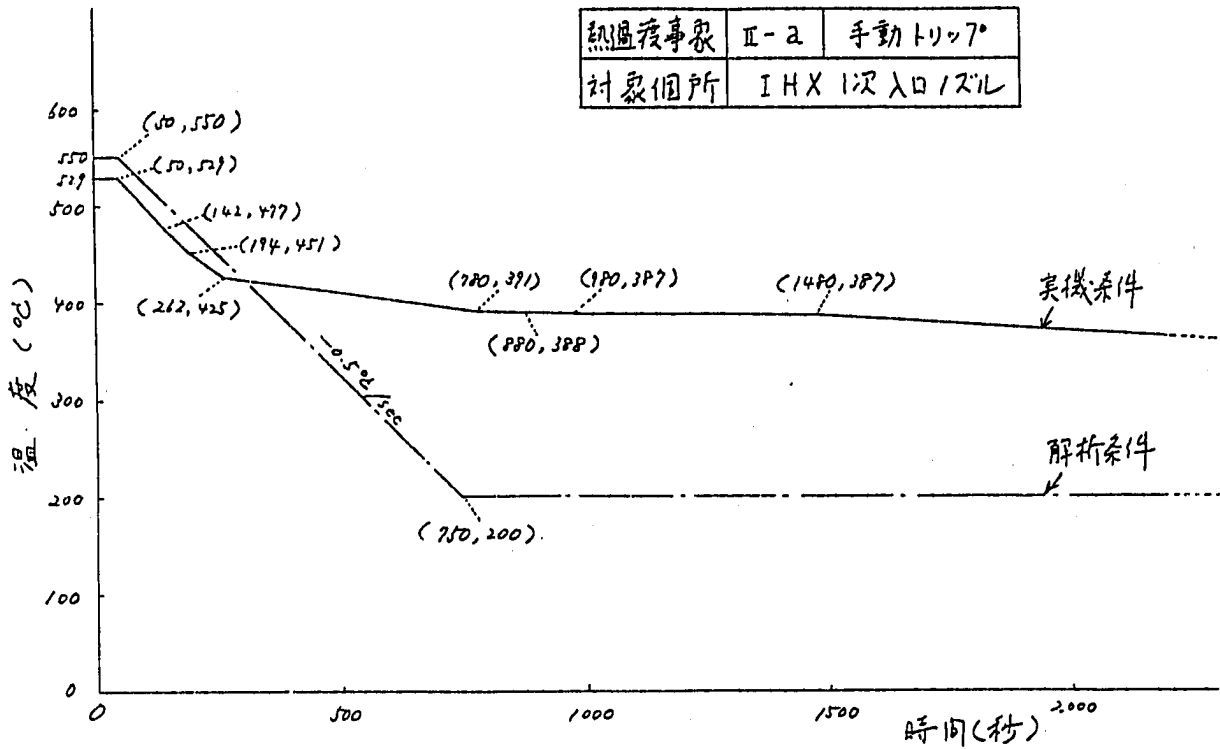


図3.6(a) 熱過渡条件 (流体温度変化:手動トリップ, IHX1次入口ノズル)

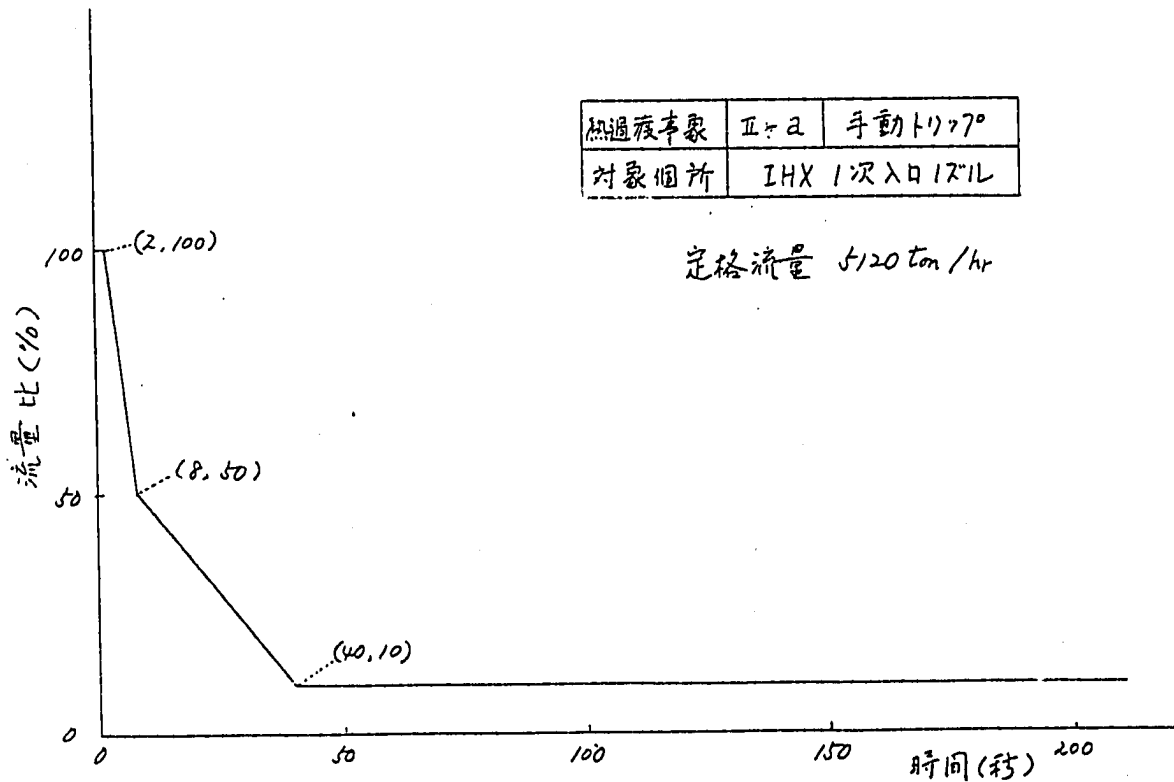


図3.6(b) 熱過渡条件 (流量変化:手動トリップ, IHX1次入口ノズル)

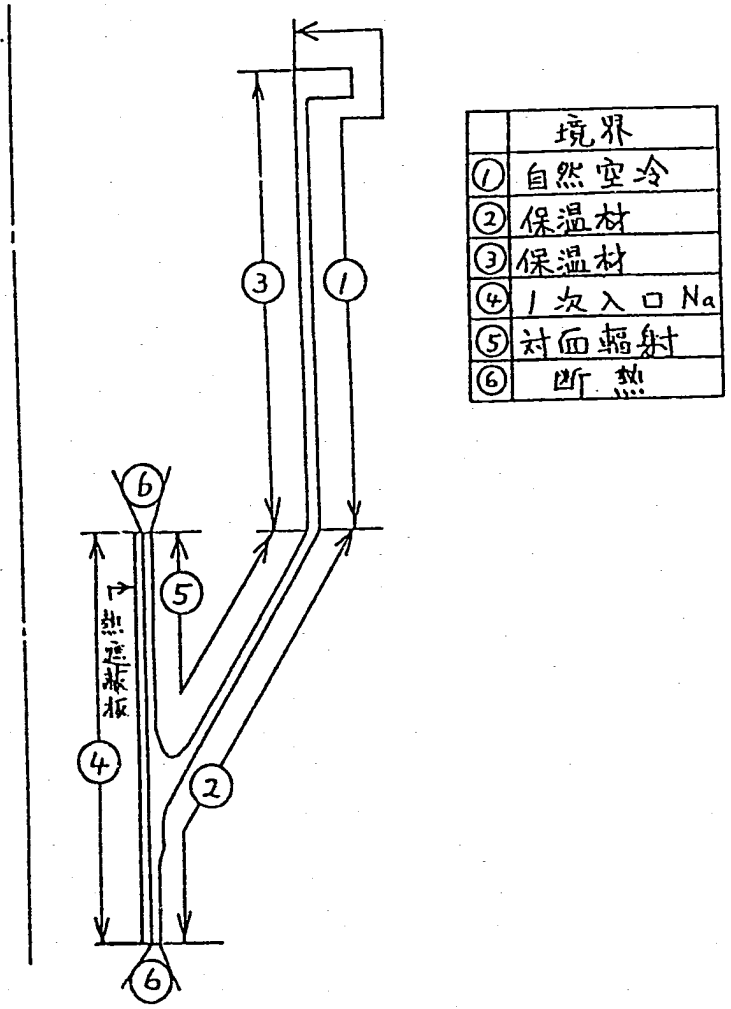


图3.7(a) 热传导解析境界条件 (实机构造设计)

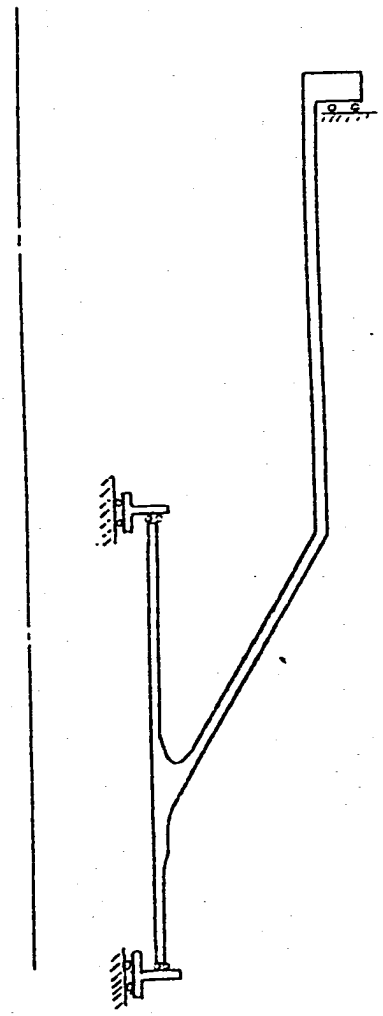
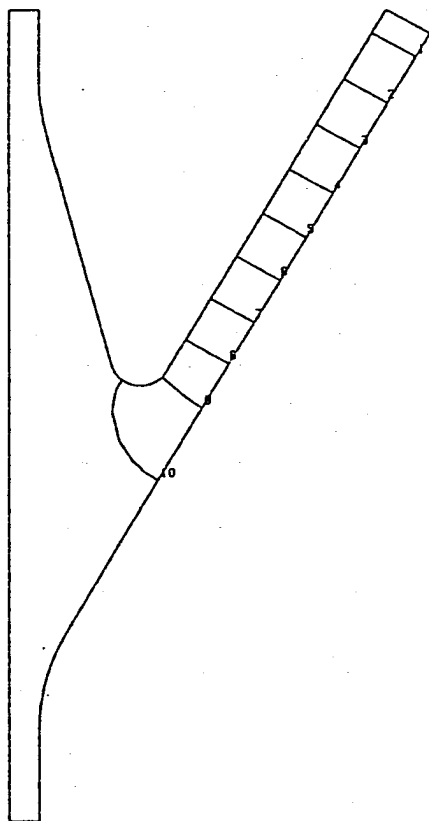


图3.7(b) 应力解析解析境界条件 (实机构造设计)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	356.0000
2	376.0000
3	396.0000
4	416.0000
5	436.0000
6	456.0000
7	476.0000
8	496.0000
9	516.0000
10	536.0000



STEP NO. 1

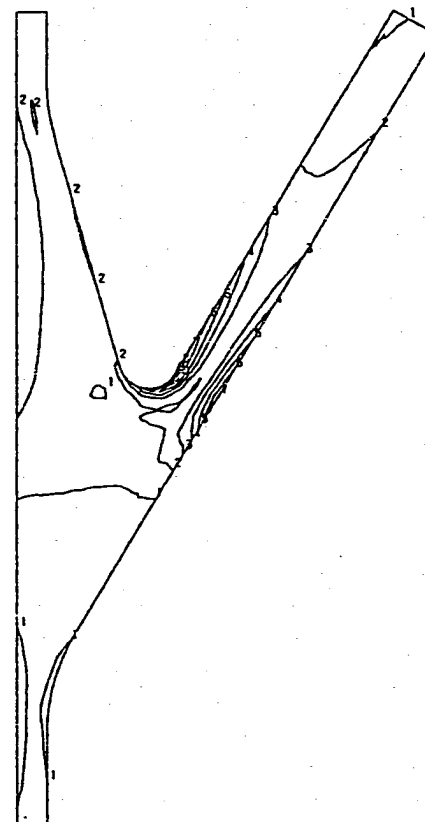
GEOM. SCALE 100.000

TEMPERATURE CONTOUR (0 SEC)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	2.700000
2	7.800000
3	12.900000
4	18.000000
5	23.100000
6	28.200000
7	33.300000
8	38.400000
9	43.500000
10	48.600000



STEP NO. 1

GEOM. SCALE 100.000

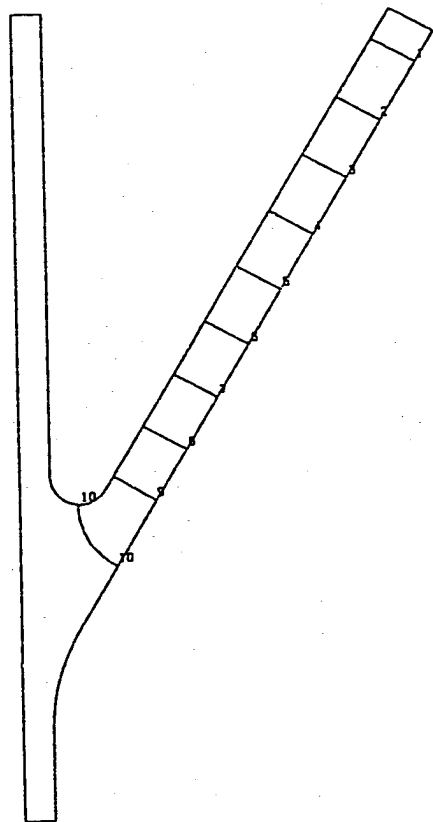
VON-MISES STRESS CONTOUR (T = 0 SEC)

図3.8(a) 温度及び相当応力コンター図 (高温定常状態, 弾性解析, Model 1)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	328.0000
2	351.0000
3	374.0000
4	397.0000
5	420.0000
6	443.0000
7	466.0000
8	489.0000
9	512.0000
10	535.0000



STEP NO. 1

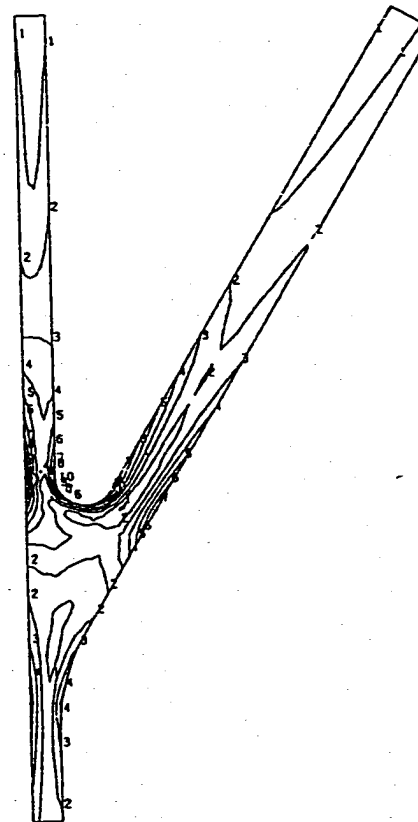
TEMPERATURE CONTOUR (0 SEC)

GEOM. SCALE 100.000

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	1.700000
2	4.500000
3	7.300000
4	10.100000
5	12.900000
6	15.700000
7	18.500000
8	21.300000
9	24.100000
10	26.900000



STEP NO. 1

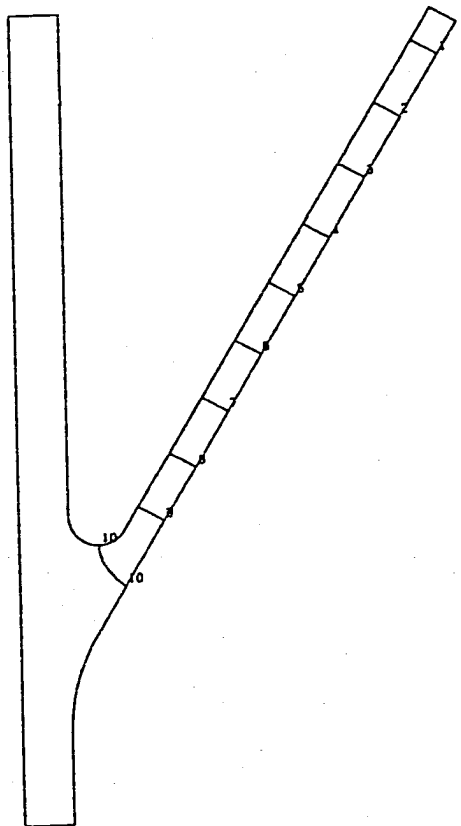
MODEL2-1 VON-MISES STRESS CONTOUR (T = 0 SEC)

GEOM. SCALE 100.000

図3.8(b) 温度及び相当応力コンター図 (高温定常状態, 弾性解析, Model 2)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES	
1	322.0000
2	346.0000
3	370.0000
4	394.0000
5	418.0000
6	442.0000
7	466.0000
8	490.0000
9	514.0000
10	538.0000



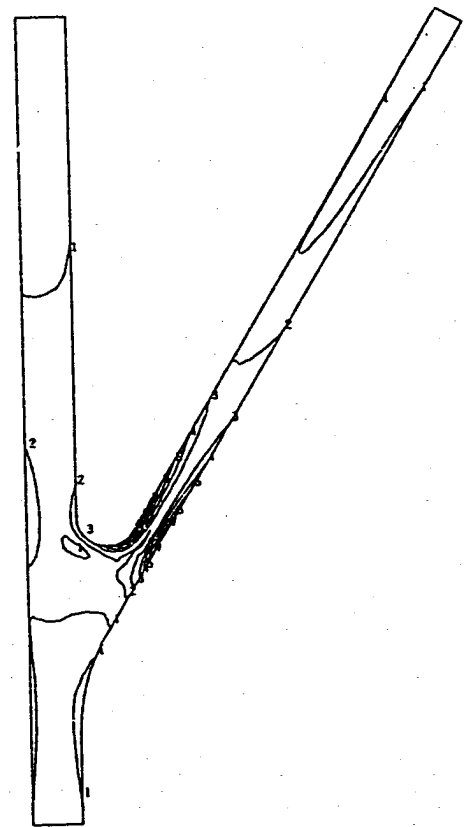
STEP NO. 1

GEOM. SCALE 100.000

MODEL3-1 TEMPERATURE CONTOUR (0 SEC)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES	
1	1.900000
2	5.400000
3	8.900000
4	12.400000
5	15.900000
6	19.400000
7	22.900000
8	26.400000
9	29.900000
10	33.400000



STEP NO. 1

GEOM. SCALE 100.000

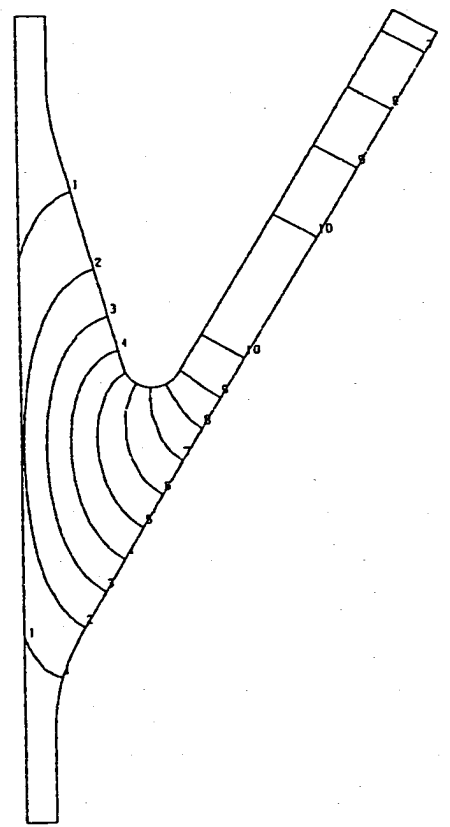
MODEL3-1 VON-MISES STRESS CONTOUR (T = 0 SEC)

図3.8(c) 温度及び相当応力コンター図 (高温定常状態, 弾性解析, Model 3)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	212.0000
2	236.0000
3	260.0000
4	284.0000
5	308.0000
6	332.0000
7	356.0000
8	380.0000
9	404.0000
10	428.0000



Y
X

STEP NO. 62

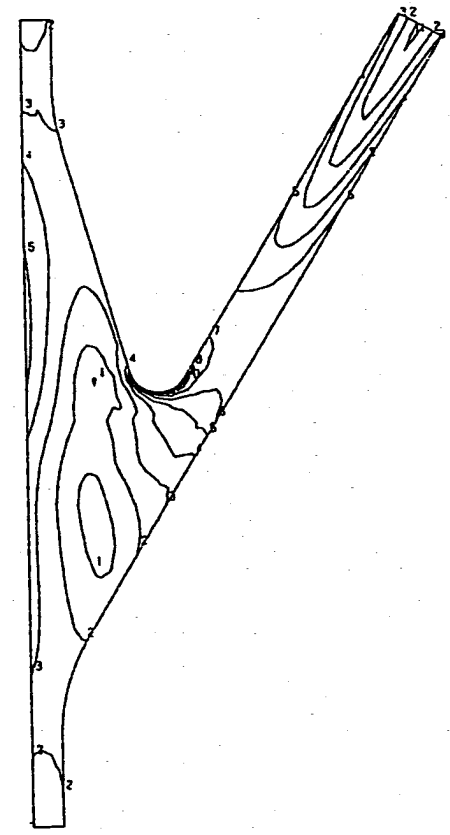
TEMPERATURE CONTOUR (3600 SEC)

GEOM. SCALE 100.000

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	3.70000
2	9.40000
3	15.10000
4	20.80000
5	26.50000
6	32.20000
7	37.90000
8	43.60000
9	49.30000
10	55.00000



Z
R

STEP NO. 18

VON-MISES STRESS CONTOUR (T = 3600 SEC)

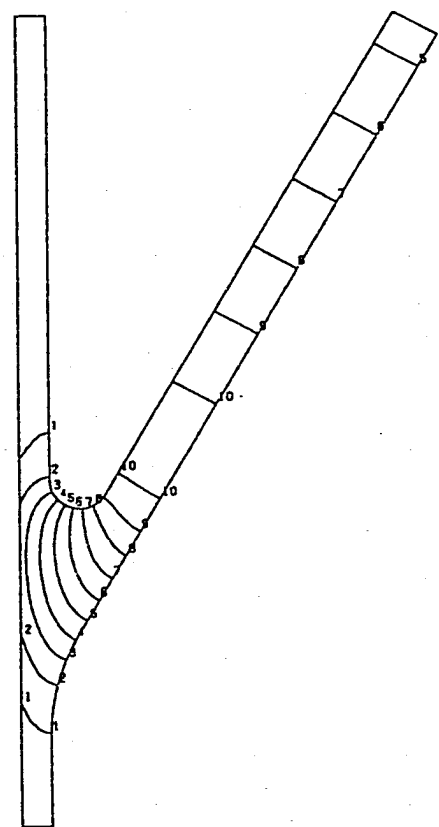
GEOM. SCALE 100.000

図3.9(a) 温度及び相当応力コンター図 (3600秒後, 弾性解析, Model 1)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	221.0000
2	248.0000
3	275.0000
4	302.0000
5	329.0000
6	356.0000
7	383.0000
8	410.0000
9	437.0000
10	464.0000



Y
X

STEP NO. 52

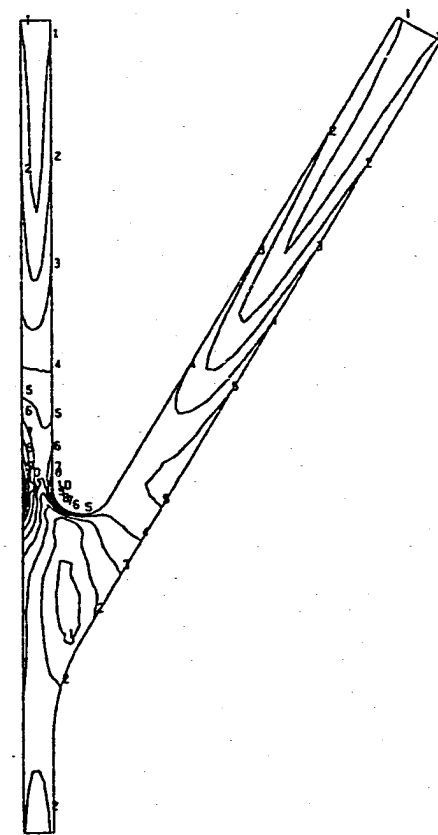
GEOM. SCALE 100.000

MODEL2-1 TEMPERATURE CONTOUR (1480 SEC)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	4.800000
2	11.900000
3	19.000000
4	26.100000
5	33.200000
6	40.300000
7	47.400000
8	54.500000
9	61.600000
10	68.700000



Z
R

STEP NO. 15

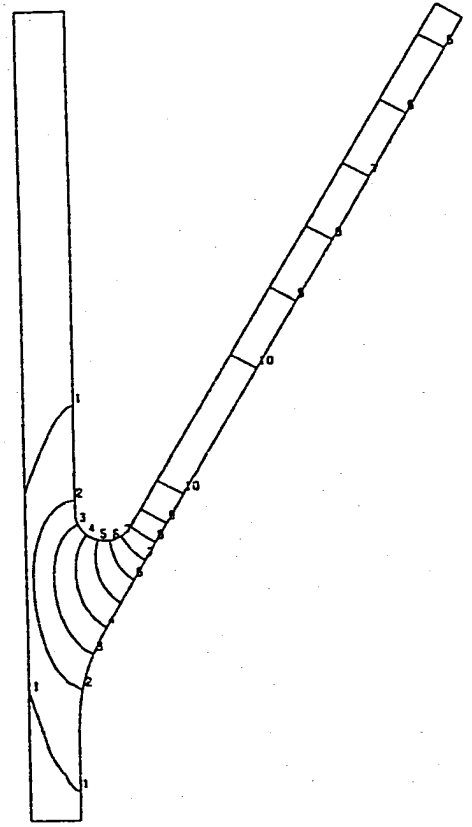
GEOM. SCALE 100.000

MODEL2-1 VON-MISES STRESS CONTOUR (T = 1480 SEC)

図3.9(b) 温度及び相当応力コンター図 (1480秒後, 弾性解析, Model 2)

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 222.0000
 - 2 247.0000
 - 3 272.0000
 - 4 297.0000
 - 5 322.0000
 - 6 347.0000
 - 7 372.0000
 - 8 397.0000
 - 9 422.0000
 - 10 447.0000



Y
X

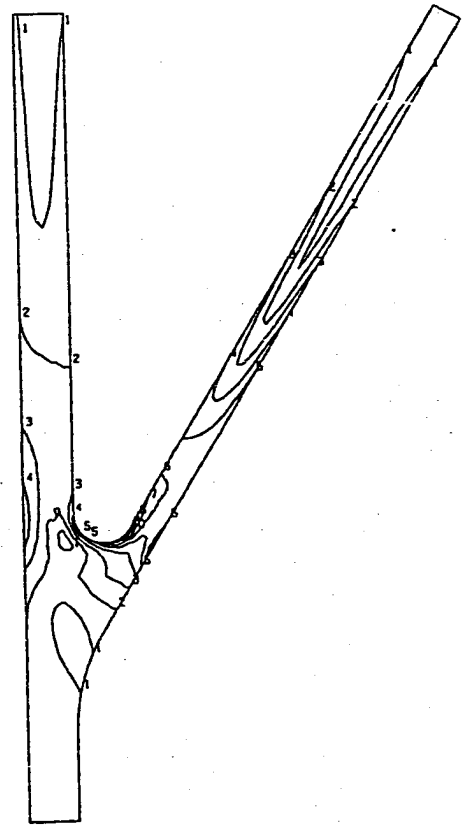
STEP NO. 58

GEOM. SCALE 100.000

MODEL3-1 TEMPERATURE CONTOUR (2200 SEC)

FINAS
VON MISES STRESS

- CONTOUR VALUES
- 1 4.40000
 - 2 11.80000
 - 3 19.20000
 - 4 26.60000
 - 5 34.00000
 - 6 41.40000
 - 7 48.80000
 - 8 56.20000
 - 9 63.60000
 - 10 71.00000



Z
R

STEP NO. 16

GEOM. SCALE 100.000

MODEL3-1 VON-MISES STRESS CONTOUR (T = 2200 SEC)

図3.9(c) 温度及び相当応力コンター図 (2200秒後, 弾性解析, Model 3)

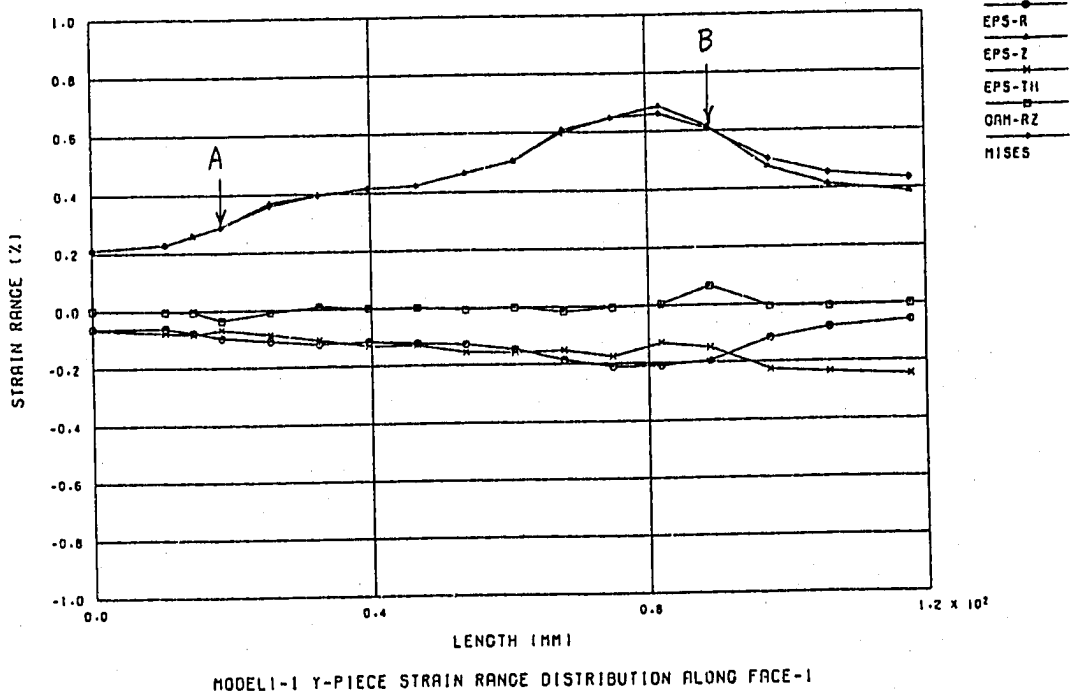
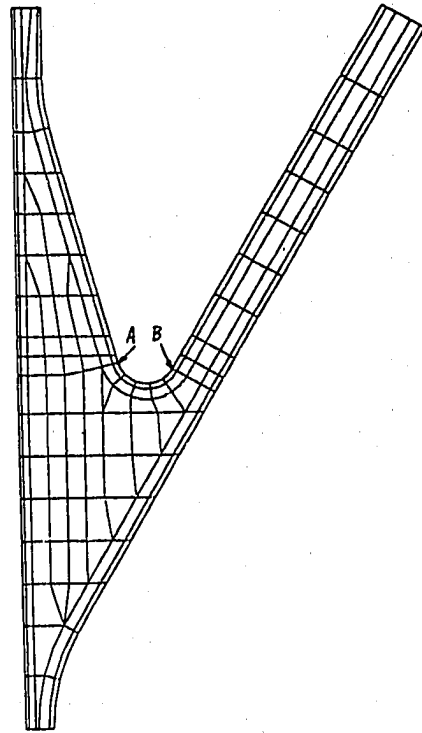
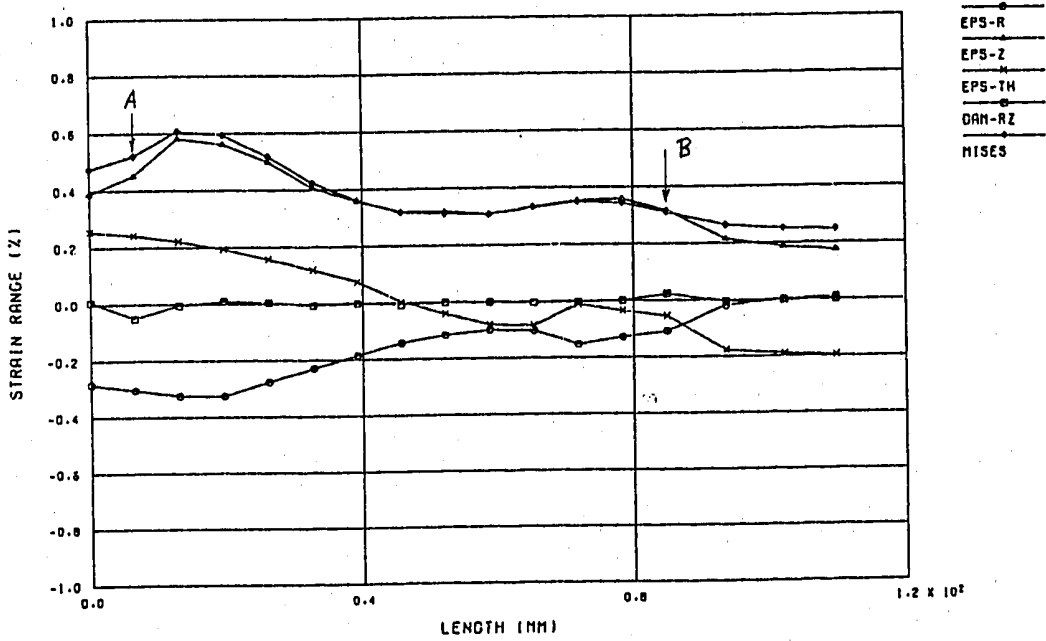
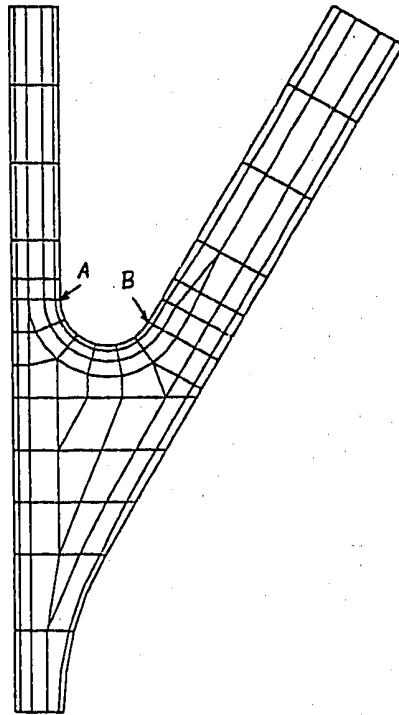


図3.10(a) 交叉アール部におけるひずみ範囲の分布 (Model 1)



MODEL 2-1 Y-PIECE STRAIN RANGE DISTRIBUTION ALONG FACE-1

図3.10(b) 交叉アール部におけるひずみ範囲の分布 (Model 2)

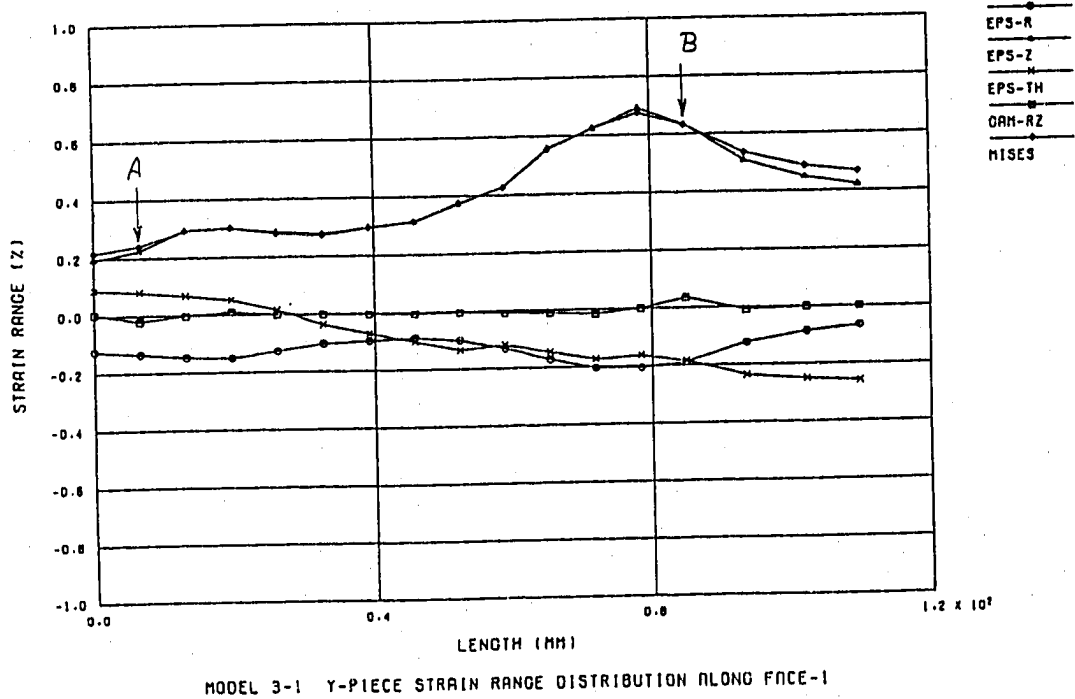
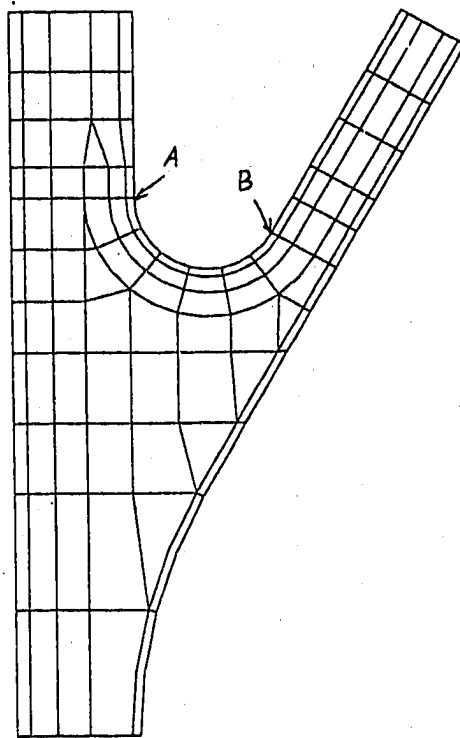


図3.10(c) 交叉アール部におけるひずみ範囲の分布 (Model 3)

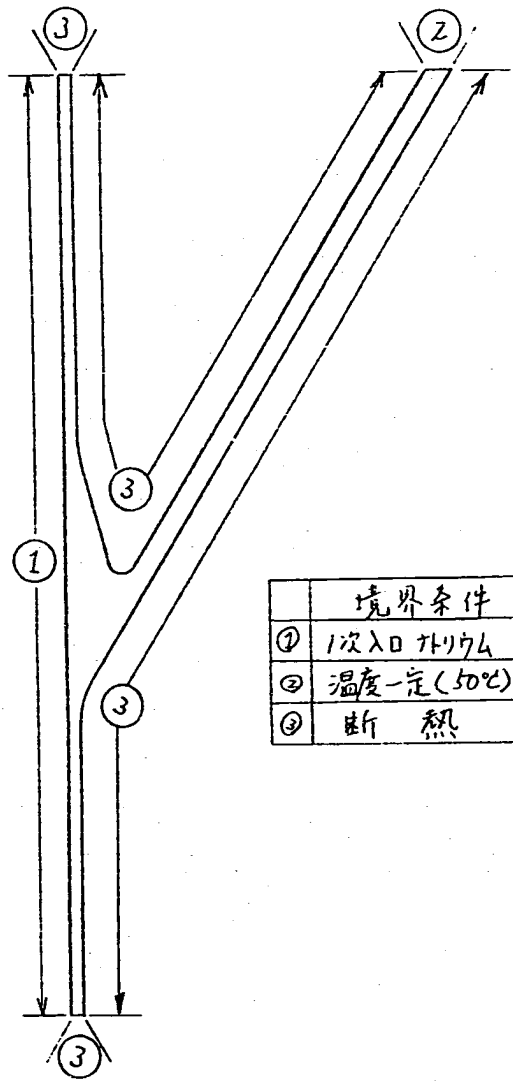


図3.11(a) 熱伝導解析境界条件 (パラメータ解析)

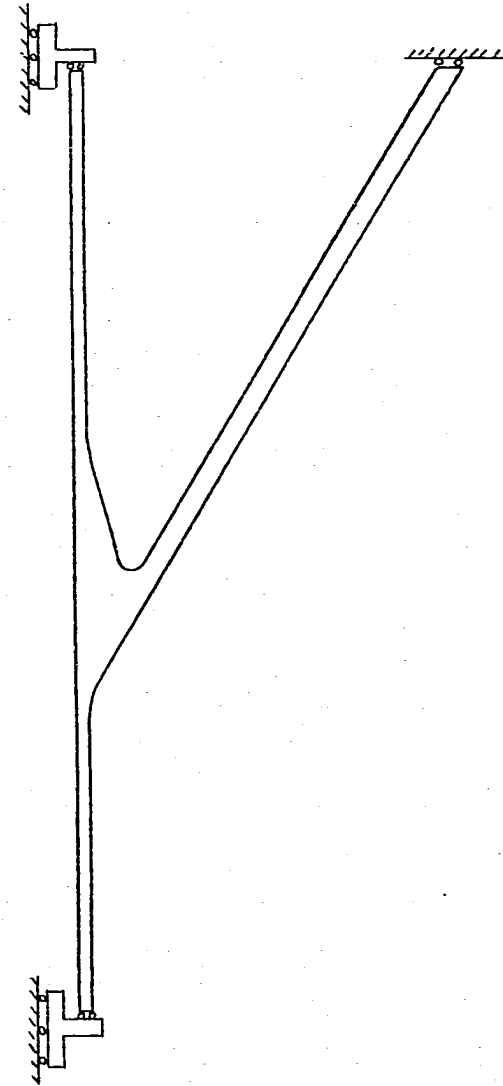


図3.11(b) 応力解析境界条件 (パラメータ解析)

4. 基本挙動の解析

熱荷重を受ける Y 型接合構造の基本的な非弾性挙動を把握しその特徴を類型化することを目的としてリファレンス条件に対する弾塑性解析を行う。

4.1 解析の方法

リファレンス条件の項で記載されている解析条件等は省略する。

4.1.1 使用要素

解析で使用する FINAS の要素は以下のとおりである。

温度応答解析	HQAX8 : 熱伝導 8 節点四辺形軸対称要素
	FCAX3 : 熱伝達 3 節点軸対称要素
応力解析	QAX8 : 8 節点四辺形軸対称要素

4.1.2 ひずみ集中係数

ひずみ範囲・ひずみ集中係数・弾性追従パラメータ等の定義は付録 A.2 に示す。なお等価線形相当ひずみの定義は修正ミーゼス型をリファレンスとして検討を進める。

4.1.3 要素分割及び評価断面

図 4.1 (a) に全体の要素分割を、図 4.1 (b) に接合部周辺の拡大図を示す。図には評価断面の位置をあわせて示している。また表 4.1 に各評価断面の説明を記す。

4.1.4 塑性硬化則

リファレンス条件の場合は単調負荷であるため硬化則は直接関係はしないが一般的には移動硬化則を用いる。

4.2 応力・ひずみの分布

4.2.1 等高線図

高温定常状態における相当応力及び相当塑性ひずみの分布を以下の図に示す。

相当応力コンター図 (弾性解析, 高温定常状態) ----- 図 4.2 (a)
 相当塑性ひずみコンター図 (弾塑性解析, 高温定常状態) ---- 図 4.2 (b)

図より以下のことがわかる。

- ① 弾性状態ではスカート付け根部付近に応力が集中し最大ピーク値は交叉アール部のスカート側止端部寄りに生じる。
- ② 弾塑性状態では塑性ひずみはスカート付け根部付近のみに生じ塑性域はアール止端部付近で板厚内部へ最も深く進展する。

4.2.2 評価断面におけるひずみ分布

弾性解析及び弾塑性解析で得られた高温定常状態における各評価断面のひずみ $\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \gamma_{rz}$ の分布を以下の図に示す。ここで r, z は評価断面を基準とする局所座標系の方向を表す (r は評価断面の方向, z は評価断面に垂直方向)。また初期状態は無応力状態であることからひずみの分布はひずみ範囲の分布と考えることもできる。図で横軸は評価断面表面の点 (評価点) を基準とした距離を表す。また表4.2には各評価断面の評価点における相当ひずみ及び各ひずみ成分の値を示す。

評価断面 1におけるひずみの分布 (高温定常状態) ----- 図4.3(a)
 評価断面 2におけるひずみの分布 (高温定常状態) ----- 図4.3(b)

図及び表より以下のことがわかる。

- ① 弾塑性状態では評価断面1,2とも ε_z の曲げ成分の増大が支配的で、 ε_z によるポアソン比の効果により ε_r も増大する。
- ② ε_θ は膜成分が主体で評価断面1,2とも弾塑性状態において増大は見られない。
- ③ 評価断面1の外面側 (評価点の反対側) で γ_{rz} が大きくなっているのは評価断面と外表面が垂直でないことから、外表面に対する接線方向ひずみ成分の一部が γ_{rz} としてカウントされるためと考えられる。
- ④ 内表面での面内ひずみ比 $\varepsilon_\theta / \varepsilon_z$ は評価断面1,2とも弾性で -0.1 程度、弾塑性で -0.06 程度となりひずみ比の変化は小さい。これは ε_θ が ε_z に対し充分小さいことによる。
- ⑤ 評価断面2の表面で γ_{rz} が0とならず有意な値をとるのは交叉アール部側の要素の表面が評価断面の法線方向に対し多少の傾きを持っていること、外挿時に数値計算上の誤差が生じること等が原因と考えられる。

4.2.3 交叉アール部のひずみ分布

弾性解析及び弾塑性解析で得られた相当ひずみ (範囲) の分布を以下の図に示す。ここで ε_θ を算出するための評価断面はアール部表面に対し法線方向にとっている。

交叉アール部における相当ひずみ ε_t の分布 ----- 図4.4(a)
 交叉アール部における修正ミーゼス型相当ひずみ ε_e の分布 ----- 図4.4(b)

図より以下のことがわかる。

- ① ε_t の最大値は弾性解析では止端部よりややアール部に入った位置に生じるが弾塑性解析では止端部に生じる。
- ② ε_e 最大値は弾性、弾塑性とも止端部に生じる。なおアール部で ε_t が0に近くなる部分がみられるのは評価断面の方向を便宜上表面の法線方向としているため

め場所によっては低応力域の占める割合が大きくなることが原因と考えられる。

4.3 ひずみ成分の挙動

評価断面1~2における ε_{\pm} 、 ε_{θ} の膜・曲げ・ピーク成分の挙動を弾性解析及び弾塑性解析結果についてプロットしたものを以下に示す。横軸は表面における局部相当ひずみの弾性解析結果 $\varepsilon_{t,EL}$ を降伏ひずみ ε_Y で無次元化した負荷レベルである。評価断面1については横軸を弾性解析による等価線形ひずみの無次元値とした図も併せて示す。また表4.3には ε_{\pm} 、 ε_{θ} 、 ε_F 、 γ_{rz} の表面値、等価線形値、膜・曲げ・ピーク成分値について高温定常状態における値を示す。

- ε_{\pm} 、 $\varepsilon_{\pm n}$ の $\varepsilon_{t,EL}/\varepsilon_Y$ に対する挙動(評価断面1)-----図4.5(a)
- $\varepsilon_{\pm m}$ 、 $\varepsilon_{\pm b}$ 、 $\varepsilon_{\pm F}$ の $\varepsilon_{t,EL}/\varepsilon_Y$ に対する挙動(評価断面1)-----図4.5(b)
- ε_{\pm} 、 $\varepsilon_{\pm n}$ の $\varepsilon_{n,EL}/\varepsilon_Y$ に対する挙動(評価断面2)-----図4.6(a)
- $\varepsilon_{\pm m}$ 、 $\varepsilon_{\pm b}$ 、 $\varepsilon_{\pm F}$ の $\varepsilon_{n,EL}/\varepsilon_Y$ に対する挙動(評価断面2)-----図4.6(b)
- ε_{θ} 、 $\varepsilon_{\theta n}$ の $\varepsilon_{t,EL}/\varepsilon_Y$ に対する挙動(評価断面1)-----図4.7(a)
- $\varepsilon_{\theta m}$ 、 $\varepsilon_{\theta b}$ 、 $\varepsilon_{\theta F}$ の $\varepsilon_{t,EL}/\varepsilon_Y$ に対する挙動(評価断面1)-----図4.7(b)
- ε_{θ} 、 $\varepsilon_{\theta n}$ の $\varepsilon_{n,EL}/\varepsilon_Y$ に対する挙動(評価断面1)-----図4.8
- $\varepsilon_{\theta m}$ 、 $\varepsilon_{\theta b}$ 、 $\varepsilon_{\theta F}$ の $\varepsilon_{n,EL}/\varepsilon_Y$ に対する挙動(評価断面2)-----図4.9

添字の定義

- m : 膜成分
- b : 曲げ成分
- F : ピーク成分
- n : 等価線形成分
- ± : 表面値

図及び表より以下のことがわかる。

- ① 弾性解析による ε_{\pm} 、 ε_{θ} は負荷レベルに対し比例的に増大する。
- ② 弾塑性状態では弾性状態に比較して ε_{\pm} は増大するが ε_{θ} はほとんど変化しない。また ε_{θ} は大部分が膜成分である。
- ③ ε_{\pm} の増大は曲げ・ピーク・膜の順に大きく、増大量に占める割合は評価断面1の場合それぞれ62%・23%・15%程度となる。また評価断面2では曲げ成分の増大量に占める割合が大きく約73%となる。
- ④ 弾塑性状態における $\varepsilon_{\pm n}$ の増大の始まりは等価線形相当ひずみの降伏とほぼ対応しており $\varepsilon_{\pm F}$ の増大はそれより多少早めに開始する。
- ⑤ 評価断面としては弾性解析による局所ひずみ範囲が最大となる位置(評価断面1)だけでなく、弾性解析による等価線形相当ひずみ範囲が大きくなる位置(評価断面2)も考慮する必要がある。

4.4 ひずみ集中係数・弾性追従パラメータ

評価断面1～5におけるひずみ集中係数・弾性追従パラメータと負荷レベルの関係を以下の図に示す。また表4.4には相当ひずみ、等価線形ひずみ、 ε_{-} の膜成分・曲げ成分、 ε_{θ} 膜成分に関する弾性追従パラメータ q_{ε_m} 、 q_{ε_r} 、 $q_{\varepsilon_{\theta}}$ の値を高温定常状態について示す。

K_{ε} と $S_{\varepsilon}/\sigma_{\varepsilon}$ の関係	-----	図4.10
K_{ε} と $S_{\varepsilon}/\sigma_{\varepsilon}$ の関係	-----	図4.11(a)
q_{ε} と $S_{\varepsilon}/\sigma_{\varepsilon}$ の関係	-----	図4.11(b)
K_{ε_n} と $S_{\varepsilon}/\sigma_{\varepsilon}$ の関係	-----	図4.12(a)
q_{ε_n} と $S_{\varepsilon}/\sigma_{\varepsilon}$ の関係	-----	図4.12(b)

また交叉アール部表面における q_{ε} 、 q_{ε_n} の分布を図4.13に示す。図にはポアソン比効果タイプの q_{ε_n} も併せて示した。

図及び表より以下のことがわかる。

- ① 弾性時のひずみ集中係数 K は評価点1で1.28、評価点2で1.18であるが弾塑性時のひずみ集中係数 K_{ε} は負荷レベルが大きくなると評価点2のほうが大きくなる。
- ② 評価点1～4では負荷レベルとともに K_{ε} は増大するが評価点5では減少する。このことから弾塑性時のひずみ再配分によりひずみの増大する領域はアール止端部より30mm以内の狭い範囲に限定されることがわかる。
- ③ K_{ε} 、 K_{ε_n} は評価断面2で最も大きな増大傾向を示す。
- ④ q_{ε} 、 q_{ε_n} は負荷レベルとともに増大することからひずみの増大は弾性追従型（ q 一定）より急峻となり増大傾向は評価断面2で最大となる。高温定常状態における値はそれぞれ2.5、2.9程度となる。
- ⑤ q_{ε} 、 q_{ε_n} の分布はアール止端部（評価断面2）でピークを持ち、1より大きな値となるのはアール側約20mm（40°）、スカート側約30mmの範囲に限定される。
- ⑥ q_{ε_n} は q_{ε} よりも大きめの値となり、評価断面1.2において q_{ε_n} は q_{ε} に対し15～20%程度大きくなる。
- ⑦ q_{ε_r} は q_{ε} より小さめの値となり、評価断面1.2において q_{ε_r} は q_{ε} に対し15～20%程度小さくなる。
- ⑧ q_{ε_m} は大きな値となるが ε_{θ_m} 自体が小さいため挙動への影響度は少ないと考えられる。
- ⑨ $q_{\varepsilon_{\theta}}$ は1に近く ε_{θ_m} はほとんど増大しないことと対応している。

4.5 まとめ

リファレンスモデルによる弾性及び弾塑性解析を行った結果、準静的昇温に対するY型接合構造の基本挙動について以下の知見が得られた。

- ① 最大ひずみ範囲発生位置は弾性解析の場合スカート側アール止端部よりやや

アール部寄りとなるのに対し、弾塑性解析の場合はアール止端部となる。

- ② 弾性解析による ε_n が最大となる位置はアール止端部となり弾塑性解析による最大ひずみ範囲発生位置に一致する。
- ③ 弾性解析の結果に基づき評価断面を設定する場合、局部ひずみ範囲が最大となる位置だけでなく ε_n が最大となる位置も選ぶ必要がある。
- ④ 弾性追従パラメータは負荷レベルとともに増大し、ひずみの増大は弾性追従型よりも急峻な挙動を示す。
- ⑤ 弾塑性状態における相当ひずみ範囲の増大は ε_z の曲げ成分の増大に支配され ε_θ は膜成分が主体であるが値は小さく弾塑性時の増大も見られない。
- ⑥ 弾塑性状態においてひずみ範囲の増大する領域はアール止端部周辺の極く狭い範囲に限られる。
- ⑦ 最大ひずみ範囲発生位置における弾性追従パラメータの値は高温定常状態において q_F が 2.5、 q_n が 2.9 程度となる。

なおここで検討した条件のように非弾性解析でひずみ範囲が最大となる部位と弾性解析で最大となる部位が異なる場合以下の点に留意する必要がある。すなわち横軸を負荷レベルとし縦軸をひずみ集中係数等としてプロットする場合、縦軸にプロットすべき値は負荷レベルに応じて異なる部位での値となる。このようにすれば必要以上に大きい弾性追従パラメータが設計に使用されることは無くなると考えられる。今後の検討課題としたい。

表4.1 リファレンスモデルにおける評価断面

評価断面 No.	評価点位置	方向	目的
1	$\Delta \varepsilon_{t,EL}$ 最大位置	7-ル部表面に垂直	リファレンス
2	スカート内面 (7-ル止端)	表面に垂直	スカート部の挙動
3	スカート内面	表面に垂直	スカート部の挙動
4	スカート内面	表面に垂直	スカート部の挙動
5	スカート内面	表面に垂直	スカート部の挙動
6	胴内面 (7-ル止端)	表面に垂直	胴部の挙動
7	胴内面 (交叉止端)	表面に垂直	胴部の挙動
8	胴内面 (厚肉部)	内表面に垂直	胴部の挙動
11	$\Delta \varepsilon_{t,EL}$ 最大位置	対称軸 0°	評価断面の方向
12	$\Delta \varepsilon_{t,EL}$ 最大位置	対称軸 30°	評価断面の方向
13	$\Delta \varepsilon_{t,EL}$ 最大位置	対称軸 60°	評価断面の方向
14	$\Delta \varepsilon_{t,EL}$ 最大位置	対称軸 90°	評価断面の方向

表4.2 評価断面1,2表面における成分毎のひずみ範囲 (リファレンス条件)

(単位: %)

	評価断面 1			評価断面 2		
	弾性	弾塑性	増大率	弾性	弾塑性	増大率
ε_t	.2185	.3463	1.5849	.2082	.3653	1.7546
ε_z	-.2281	-.3319	1.4551	-.2141	-.3536	1.6516
ε_θ	.0174	.0190	1.0920	.0214	.0225	1.0514
ε_r	.0830	.2385	2.8735	.0812	.2468	3.0394
γ_{rz}	.0009	.0019	2.1111	-.0118	-.0376	3.1864

表4.3 線形成分及び膜・曲げ・ピーク成分のひずみ範囲

(単位: %)

	評価断面 1			評価断面 2		
	弾 性	弾塑性	増大率	弾 性	弾塑性	増大率
ε_n	.1706	.2778	1.6284	.1763	.3242	1.8389
ε_z	-.2281	-.3319	1.4551	-.2141	-.3536	1.6516
ε_{zn}	-.1831	-.2627	1.4347	-.1833	-.2974	1.6225
ε_{zm}	-.0137	-.0293	2.1387	-.0085	-.0207	2.4353
ε_{zb}	-.1694	-.2334	1.3778	-.1747	-.2767	1.5839
ε_{zF}	-.0451	-.0693	1.5366	-.0308	-.0562	1.8247
ε_θ	.0174	.0190	1.0920	.0214	.0225	1.0514
$\varepsilon_{\theta n}$	.0177	.0195	1.1017	.0213	.0227	1.0657
$\varepsilon_{\theta m}$	.0199	.0216	1.0854	.0245	.0261	1.0653
$\varepsilon_{\theta b}$	-.0022	-.0021	.9545	-.0032	-.0034	1.0625
$\varepsilon_{\theta F}$	-.0003	-.0006	2.0	.0001	-.0002	-2.0
ε_r	.0830	.2385	2.8735	.0812	.2468	3.0394
ε_{rn}	.0527	.1419	2.6926	.0613	.1769	2.8858
ε_{rm}	-.0116	.0015	-.1293	-.0117	-.0036	.3077
ε_{rb}	.0643	.1404	2.1835	.0730	.1805	2.4726
ε_{rF}	.0302	.0967	3.2020	.0199	.0700	3.5176
γ_{rz}	.0009	.0019	2.1111	-.0118	-.0376	3.1864
γ_{rzn}	.0283	.0409	1.4552	-.0342	-.0515	1.5058
γ_{rzm}	-.0172	-.0286	1.6628	-.0153	-.0228	1.4902
γ_{rzb}	.0455	.0695	1.5275	-.0189	-.0287	1.5185
γ_{rF}	-.0274	-.0390	1.4234	.0224	.0139	.6205

表4.4 各評価断面における弾性追従パラメータの値

評価断面	1	2	3	4	5
q_F	2.1051	2.5139	2.1622	1.3784	0.8583
q_n	2.5186	2.9390	2.2489	1.4844	0.9489
$q_{=m}$	3.1612	3.8675	2.4176	1.6922	1.5253
$q_{=E}$	1.7135	2.1697	1.8868	1.3160	0.8195
q_{θ}	1.1648	1.1334	1.1118	1.0710	1.0012

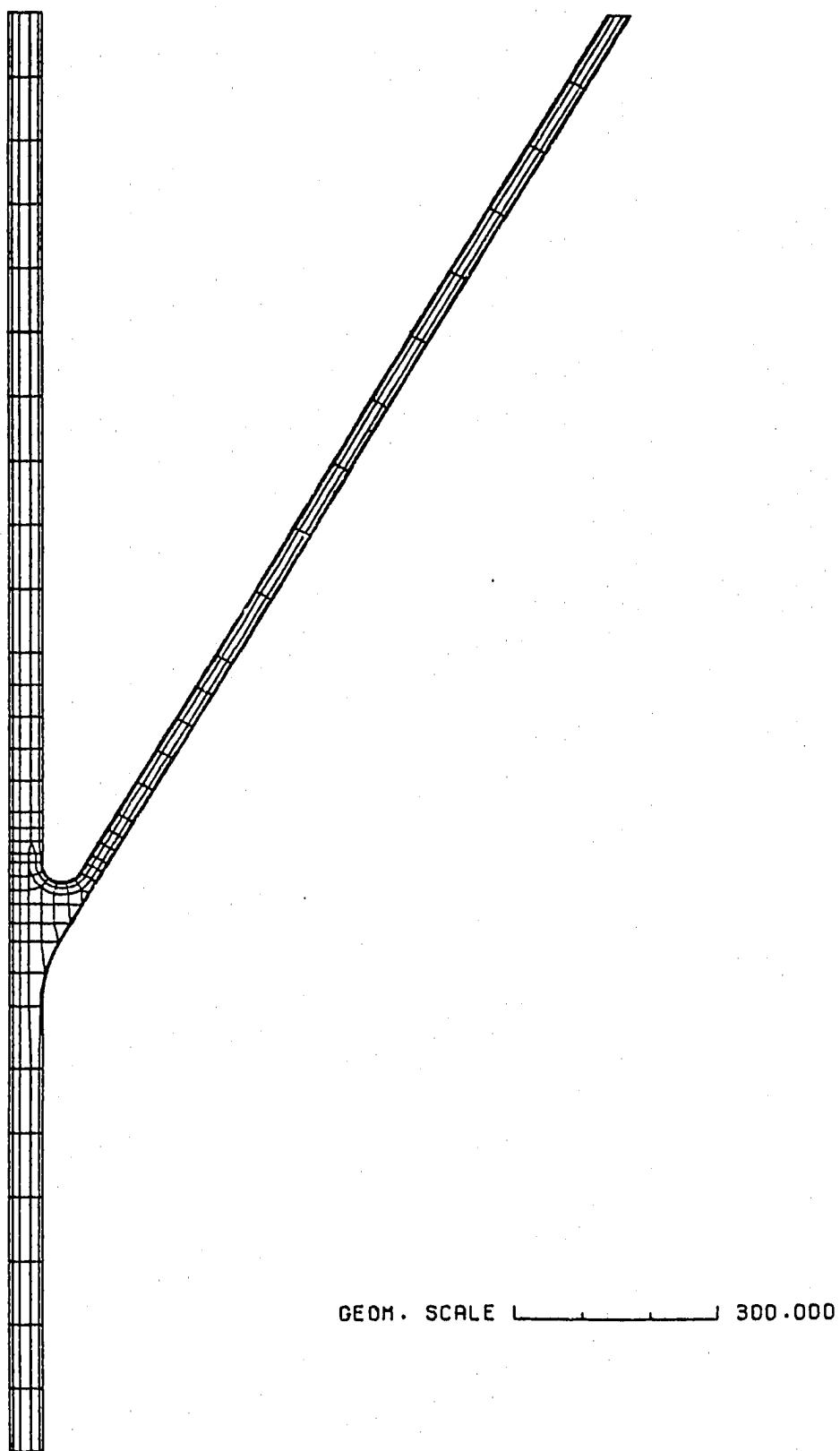
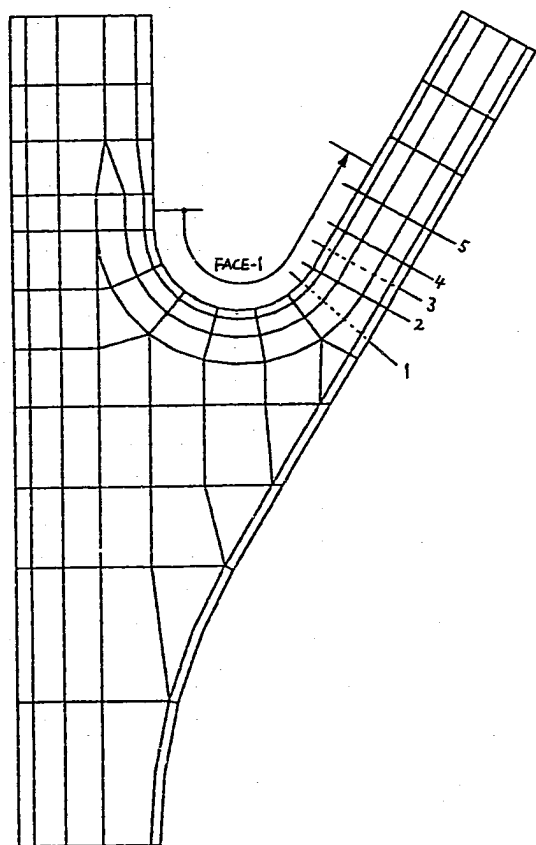
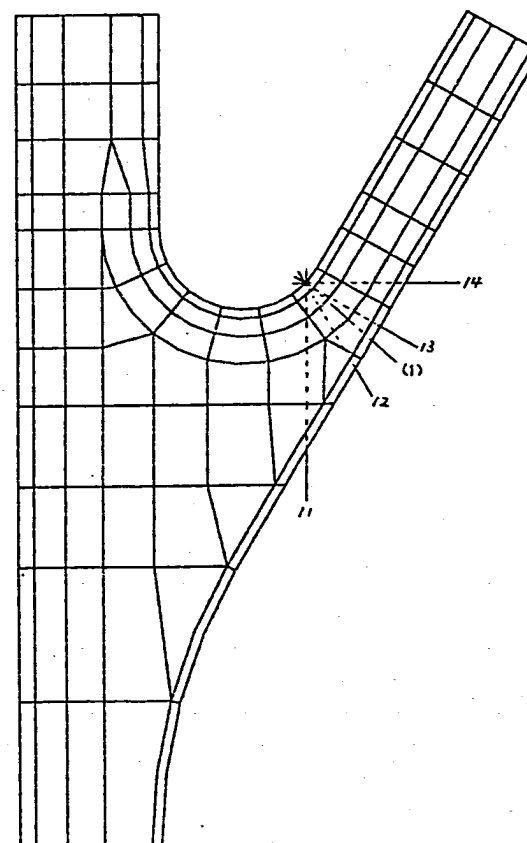


図4.1(a) 要素分割全体図 (Model 3:リファレンスモデル)



評価断面 1~5



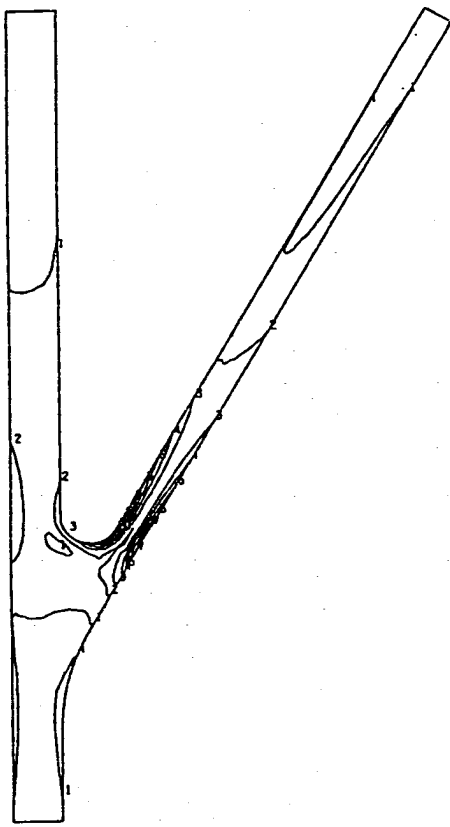
評価断面 11~14

図4.1(b) 要素分割拡大図 (Model 3:リファレンスモデル)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	1.900000
2	5.400000
3	6.900000
4	12.400000
5	15.900000
6	19.400000
7	22.900000
8	26.400000
9	29.900000
10	33.400000



STEP NO. 1 GEOM. SCALE 100.000

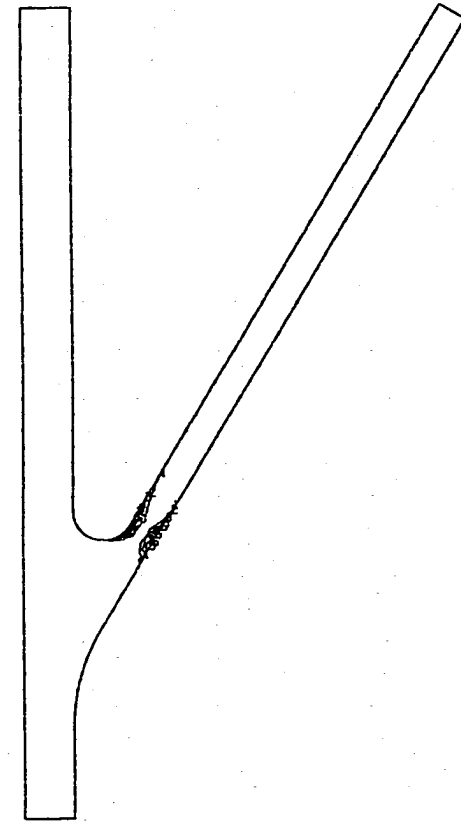
MODEL3-1 VON-MISES STRESS CONTOUR (T = 0 SEC)

図4.2(a) 相当応力コンター図
(弾性解析, 高温定常状態, リファレンスモデル)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

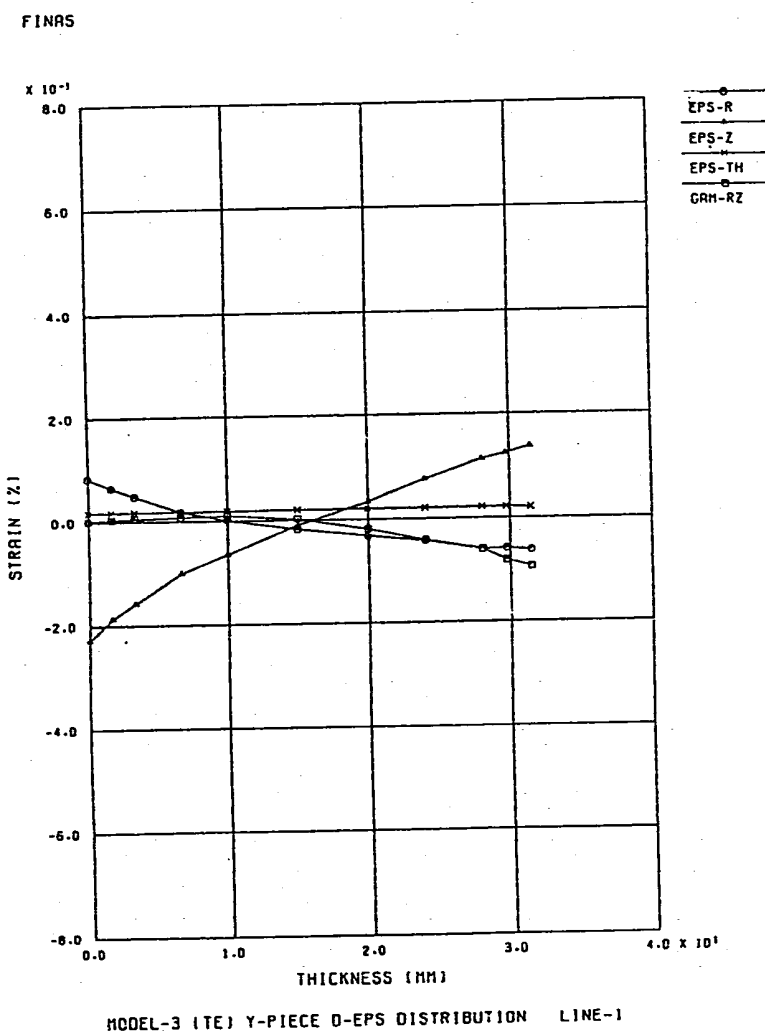
1	6.000-05
2	3.100-04
3	5.600-04
4	6.100-04
5	1.060-03
6	1.310-03
7	1.560-03
8	1.810-03
9	2.060-03
10	2.310-03



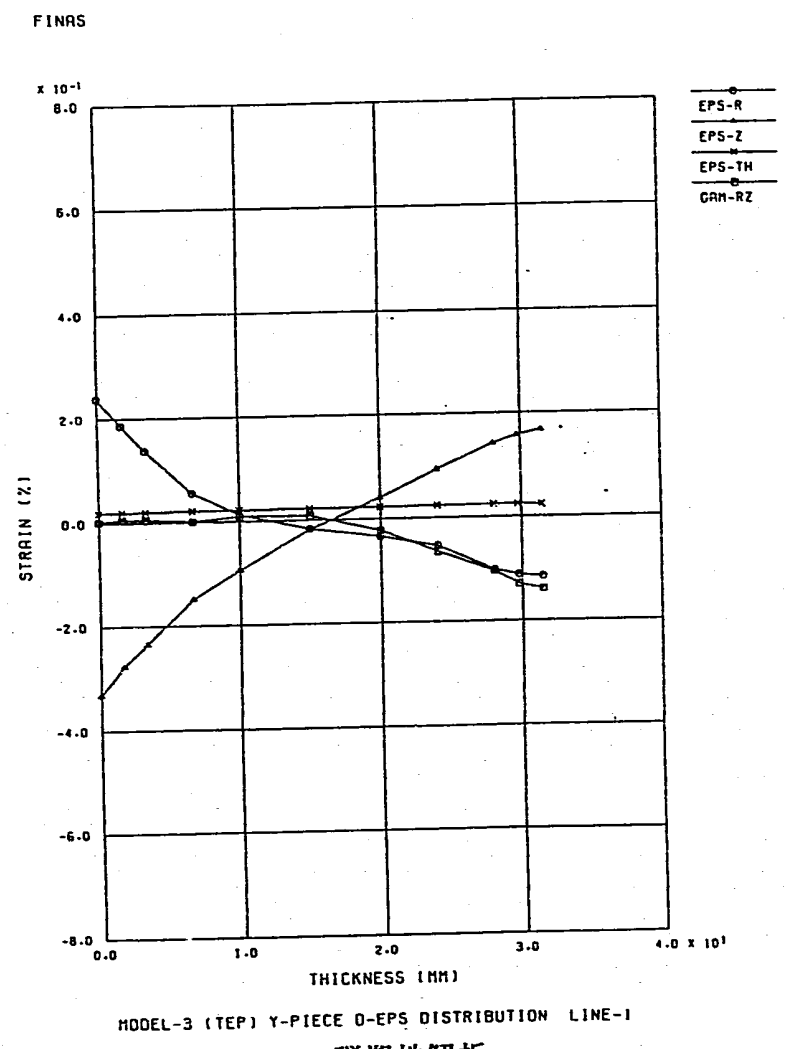
STEP NO. 25 GEOM. SCALE 100.000

CASE 3-1 EQ.PLASTIC STRAIN CONTOUR (HOT)

図4.2(b) 相当塑性ひずみコンター図
(弾塑性解析, 高温定常状態, リファレンスモデル)

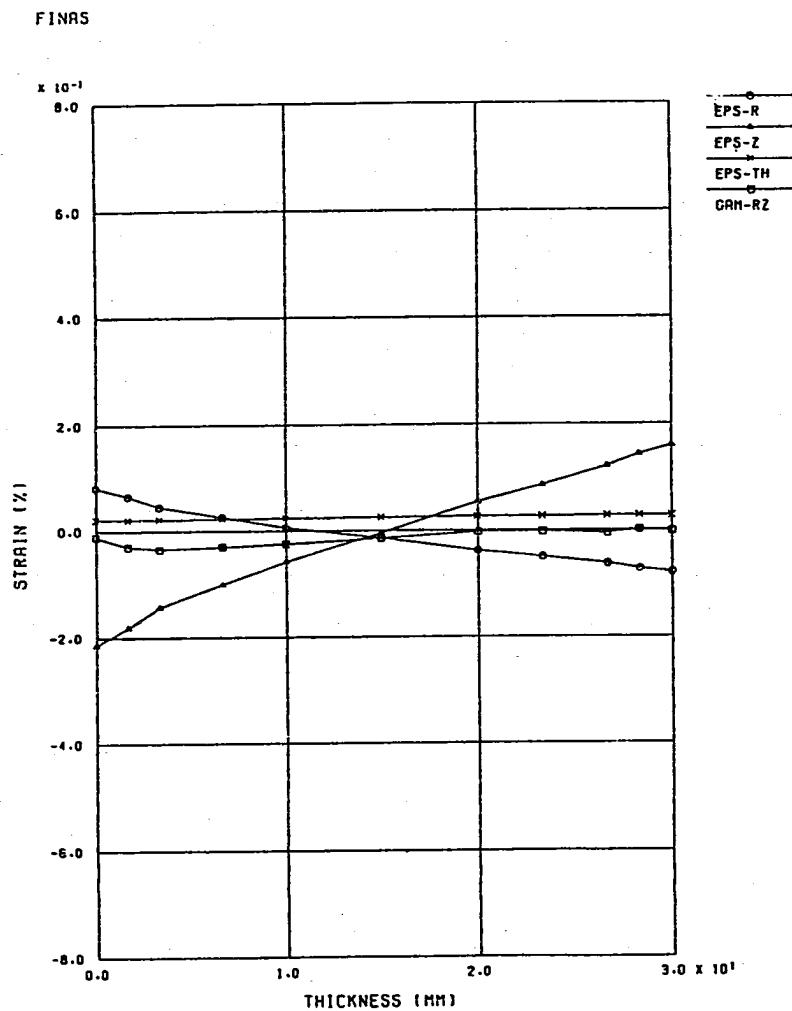


弾性解析



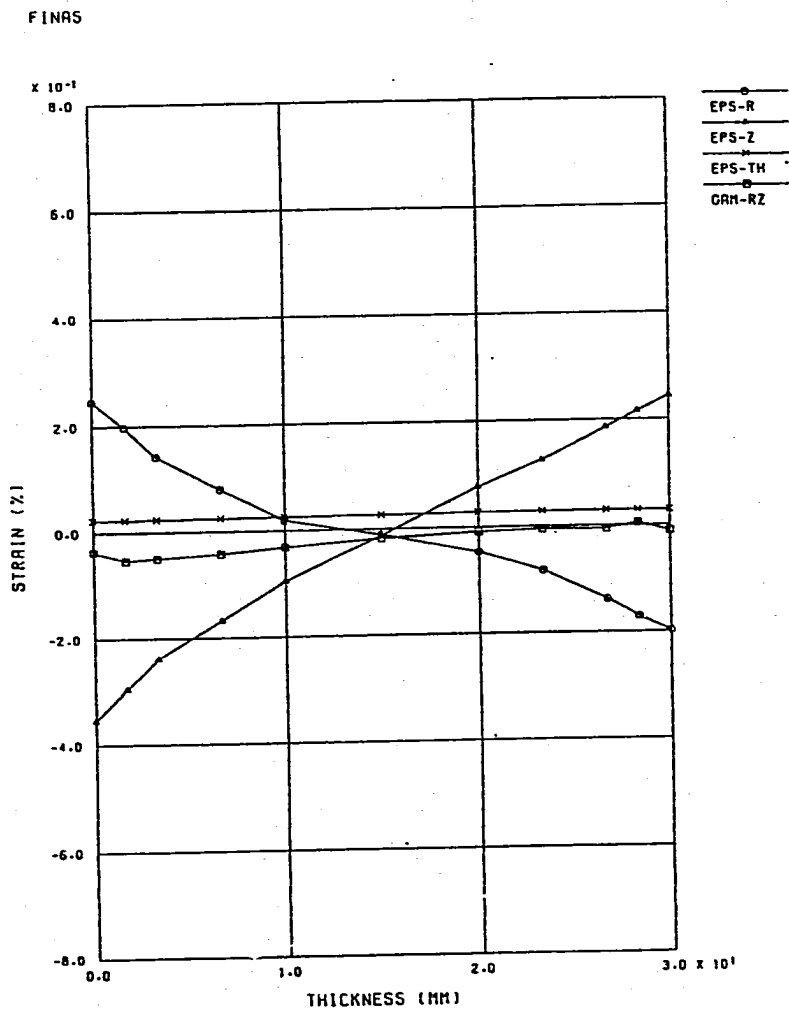
弾塑性解析

図4.3(a) 評価断面 1におけるひずみの分布 (高温定常状態, リファレンステル)



MODEL-3 (TE) Y-PIECE D-EPS DISTRIBUTION LINE-2

弾性解析



MODEL-3 (TEP) Y-PIECE D-EPS DISTRIBUTION LINE-2

弾塑性解析

図4.3(b) 評価断面 2におけるひずみの分布 (高温定常状態, リファレンスモデル)

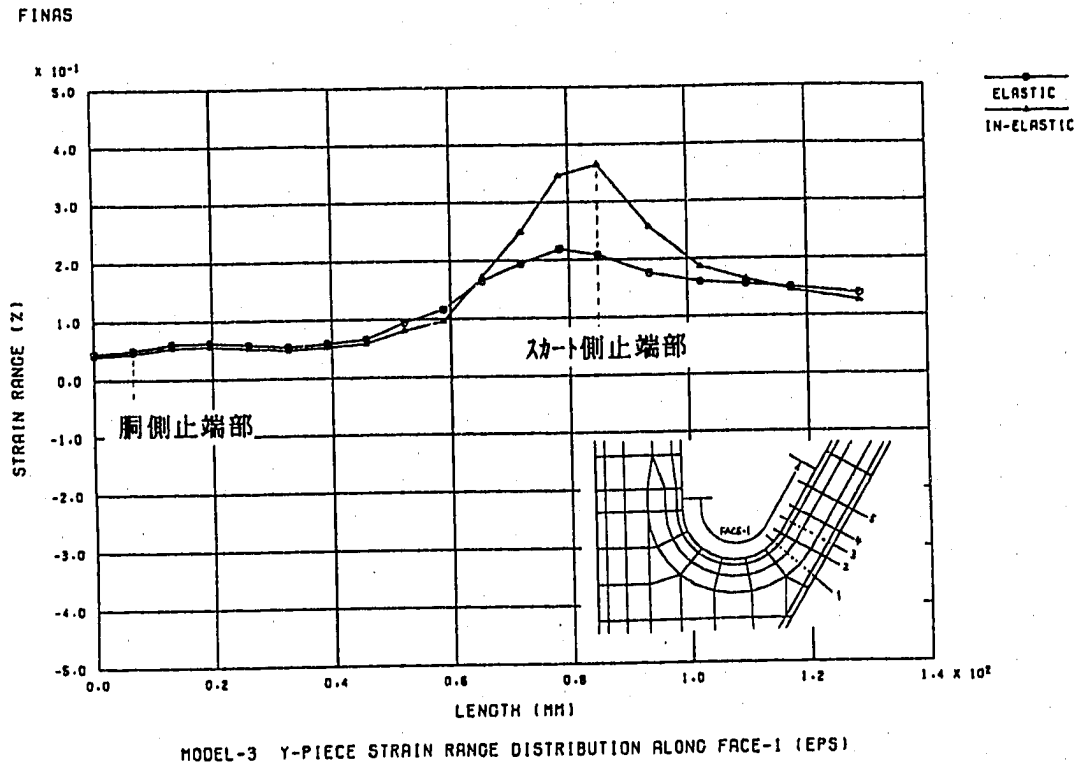


図4.4(a) 交叉アル部における相当ひずみ ϵ_t の分布 (高温定常状態, リファレンスモデル)

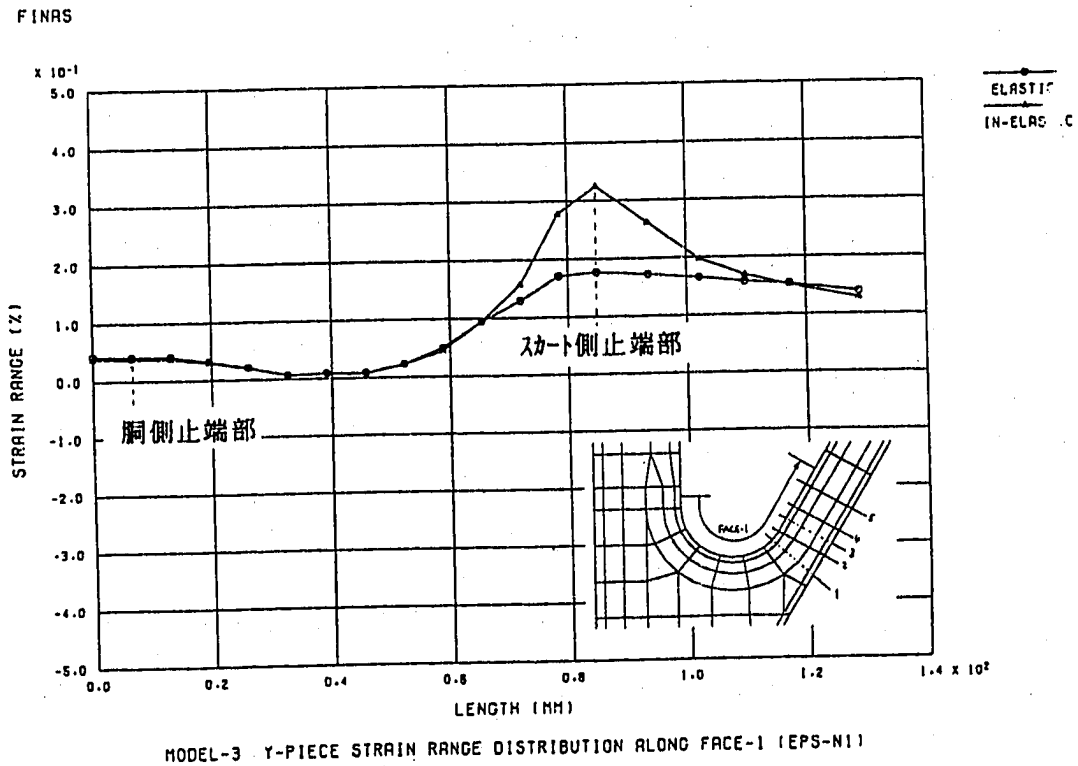


図4.4(b) 交叉アル部における修正ミーゼス型相当ひずみ ϵ_n の分布
(高温定常状態, リファレンスモデル)

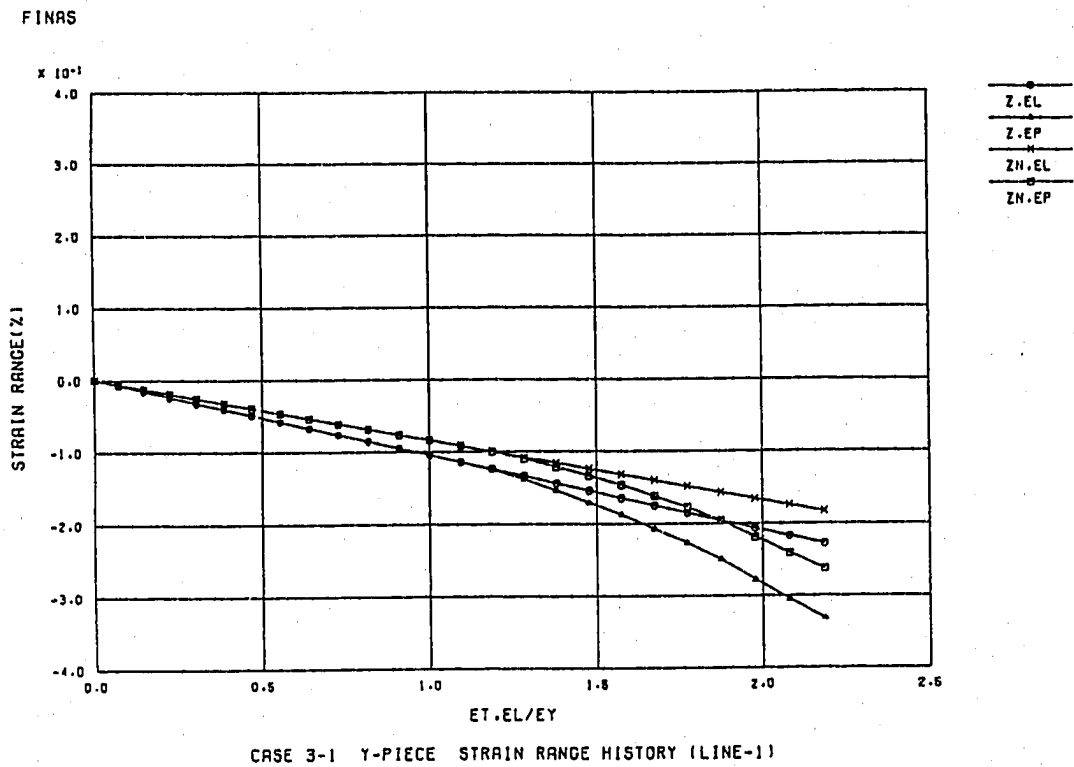


図4.5(a) $\epsilon_z, \epsilon_{zn}$ の $\epsilon_{t,EL}/\epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面1)

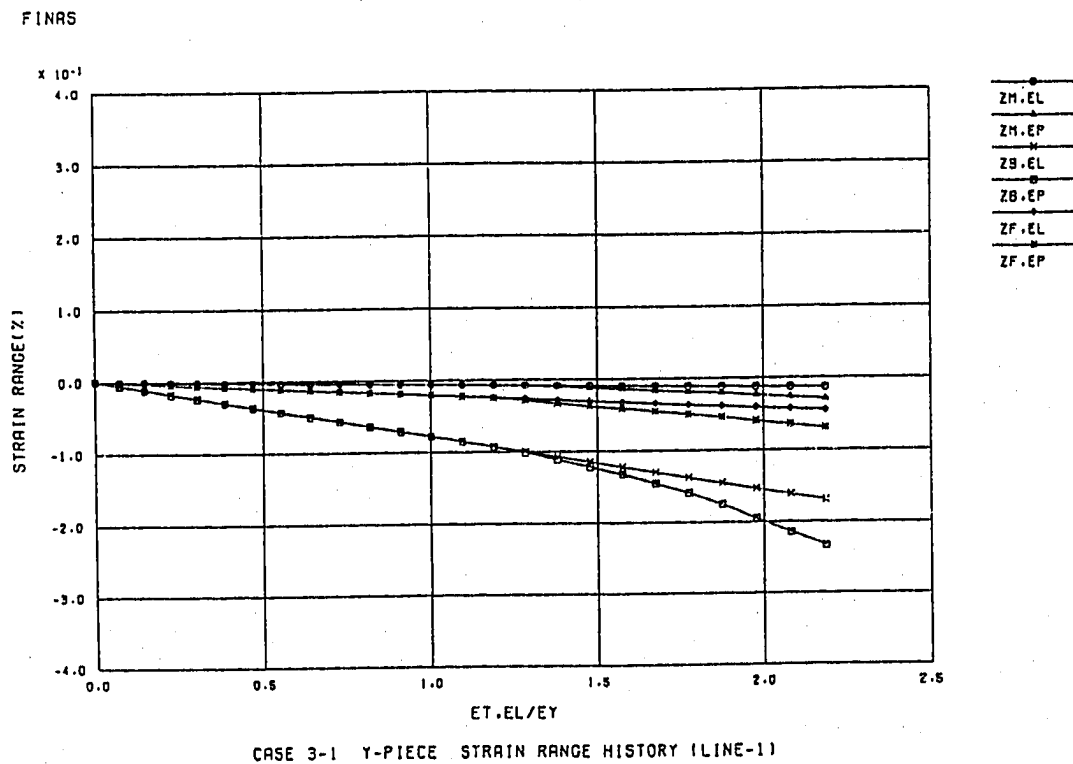


図4.5(b) $\epsilon_{zm}, \epsilon_{zb}, \epsilon_{zf}$ の $\epsilon_{t,EL}/\epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面1)

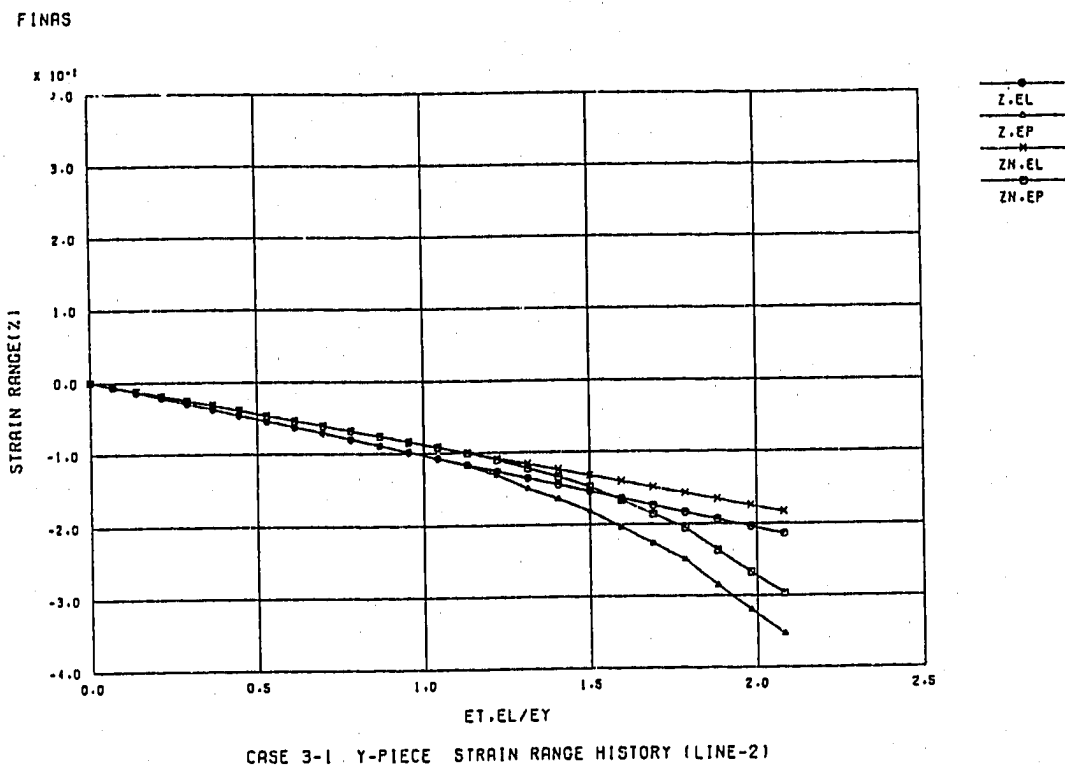


図4.6(a) $\epsilon_z, \epsilon_{zn}$ の $\epsilon_{t,EL}/\epsilon_Y$ に対する挙動(評価断面2)

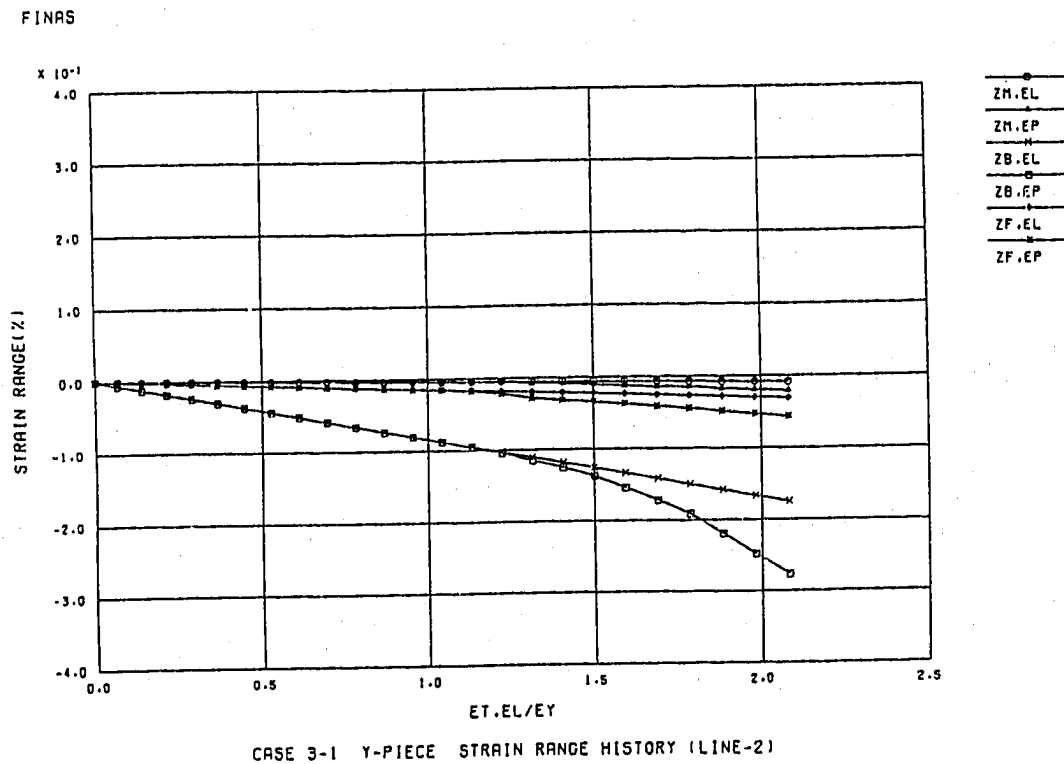
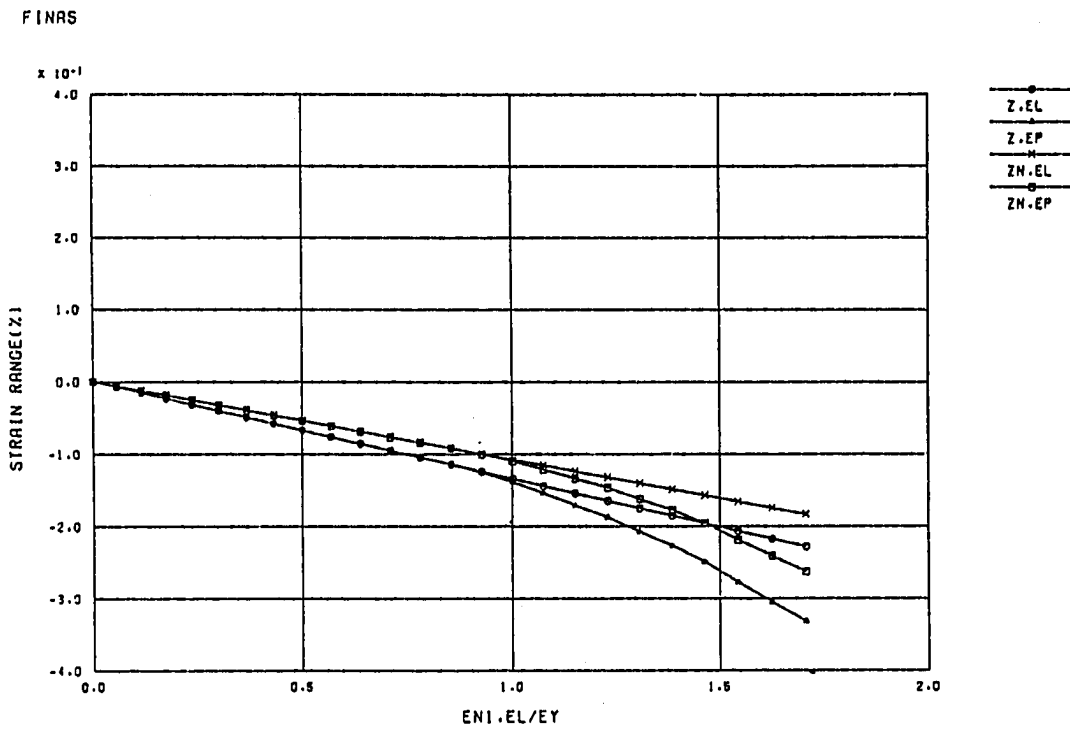
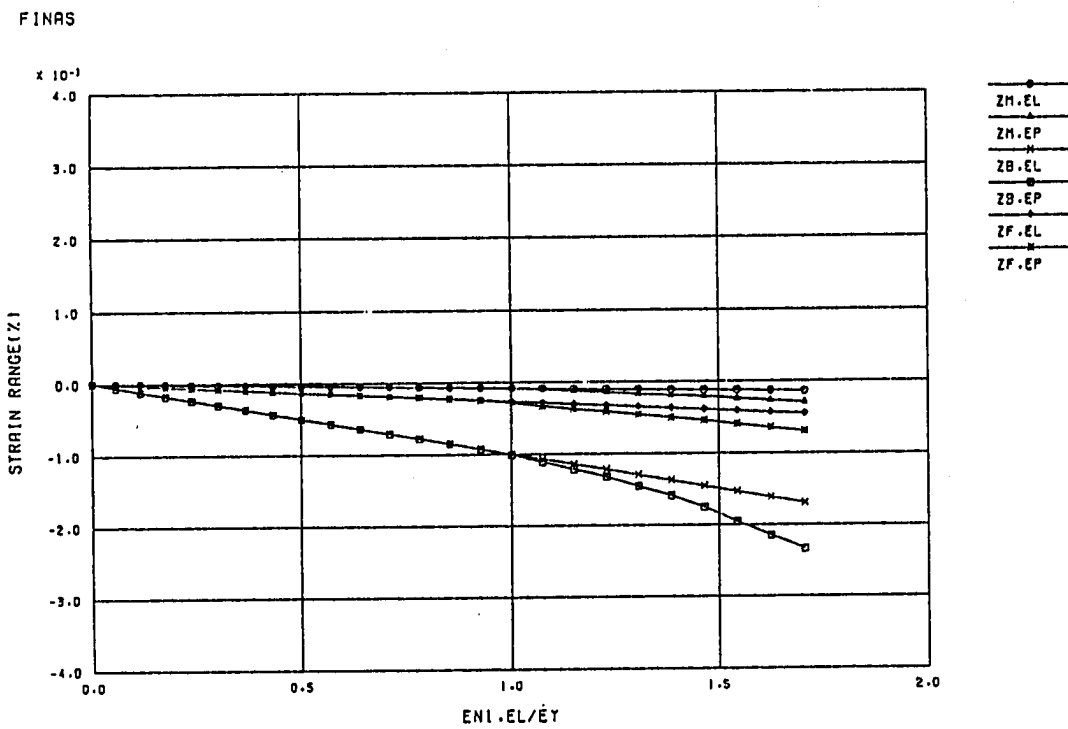


図4.6(b) $\epsilon_{zm}, \epsilon_{zb}, \epsilon_{zf}$ の $\epsilon_{t,EL}/\epsilon_Y$ に対する挙動(評価断面2)



CASE 3-1 Y-PIECE STRAIN RANGE HISTORY (LINE-1)

図4.7(a) $\epsilon_z, \epsilon_{zn}$ の $\epsilon_{n,EL}/\epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面1)



CASE 3-1 Y-PIECE STRAIN RANGE HISTORY (LINE-1)

図4.7(b) $\epsilon_{zm}, \epsilon_{zb}, \epsilon_{zf}$ の $\epsilon_{n,EL}/\epsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面1)

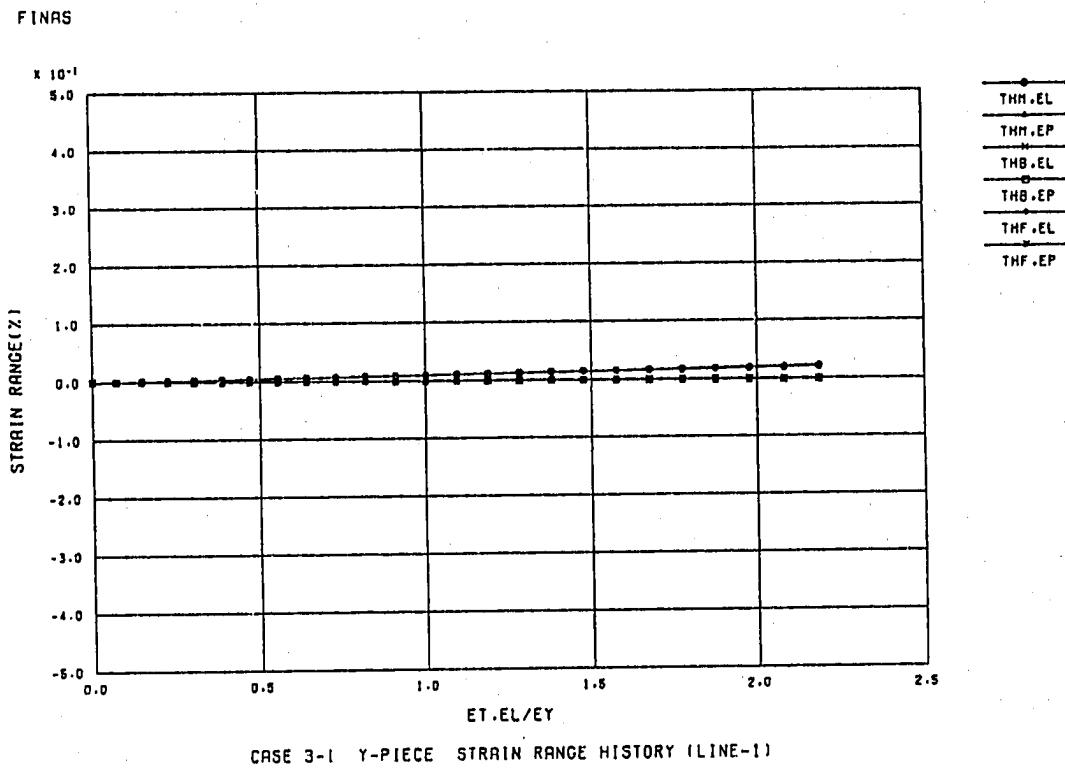


図4.8 $\varepsilon_{\theta m}, \varepsilon_{\theta b}, \varepsilon_{\theta F}$ の $\varepsilon_{t, EL} / \varepsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面1)

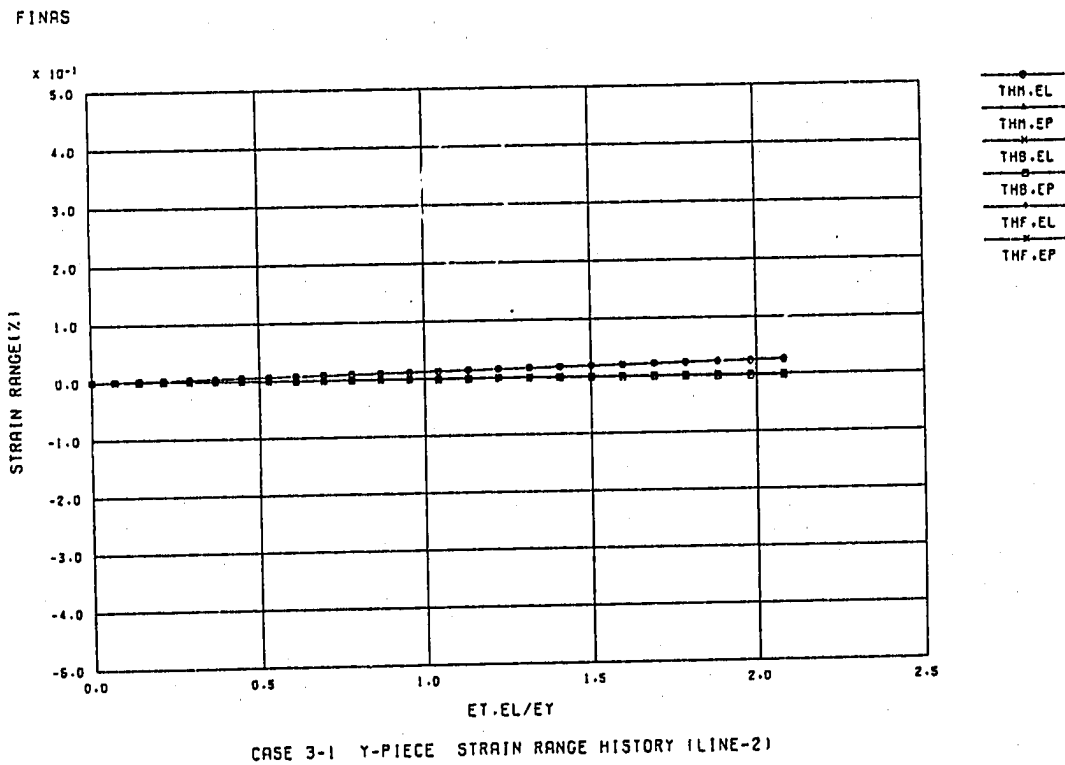
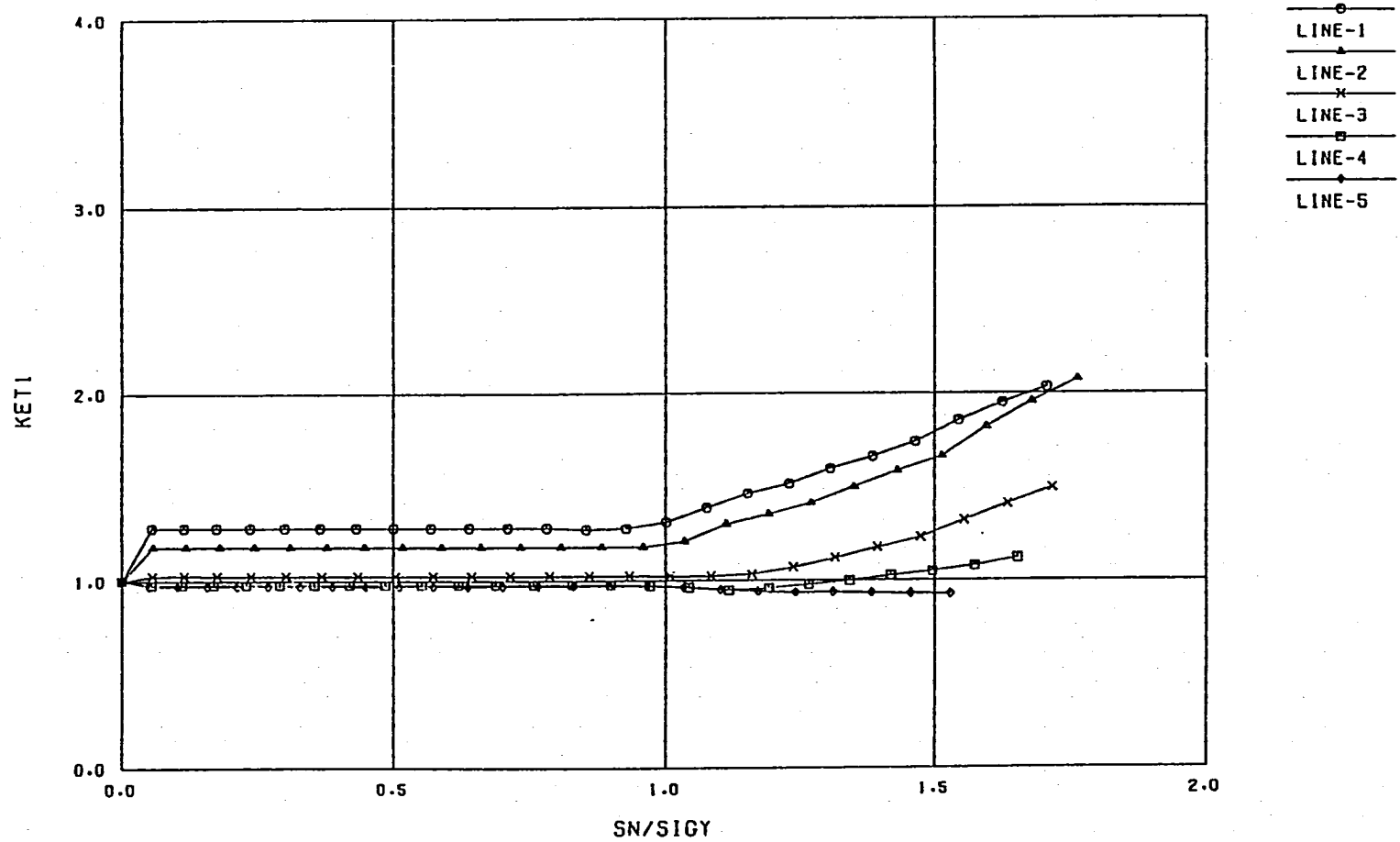


図4.9 $\varepsilon_{\theta m}, \varepsilon_{\theta b}, \varepsilon_{\theta F}$ の $\varepsilon_{t, EL} / \varepsilon_Y$ に対する挙動 (評価断面2)

FINAS



MODEL-3 Y-PIECE STRAIN CONCENTRATION FACTOR (KET1)

図4.10 K_E と S_n/σ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0→高温定常状態)

FINAS

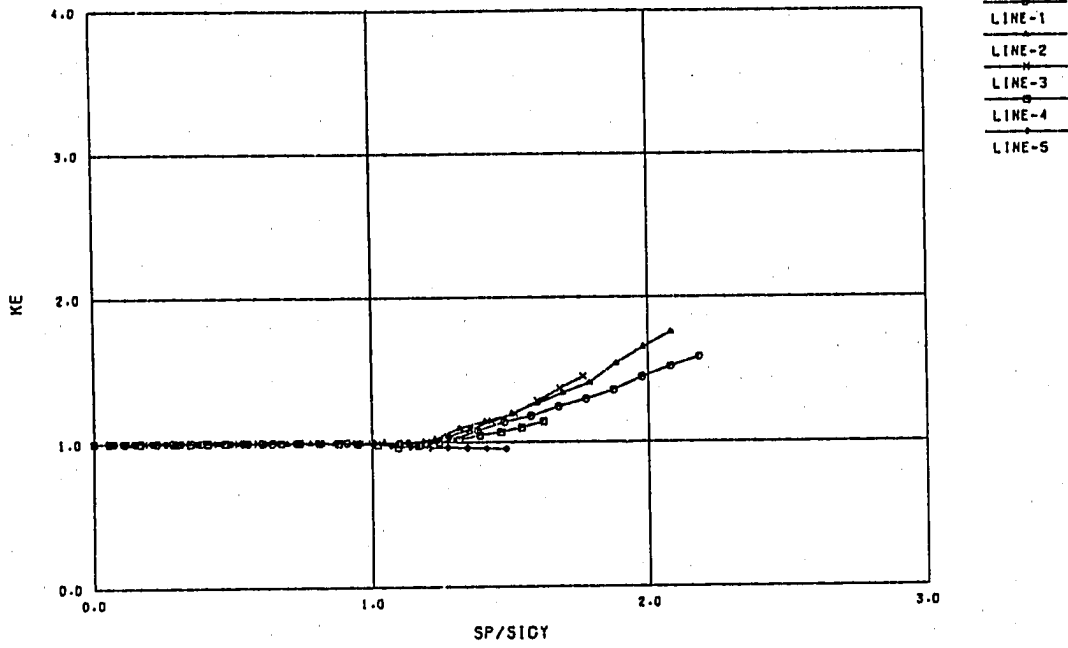


図4.11(a) K_F と S_p/σ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0→ 高温定常状態)

FINAS

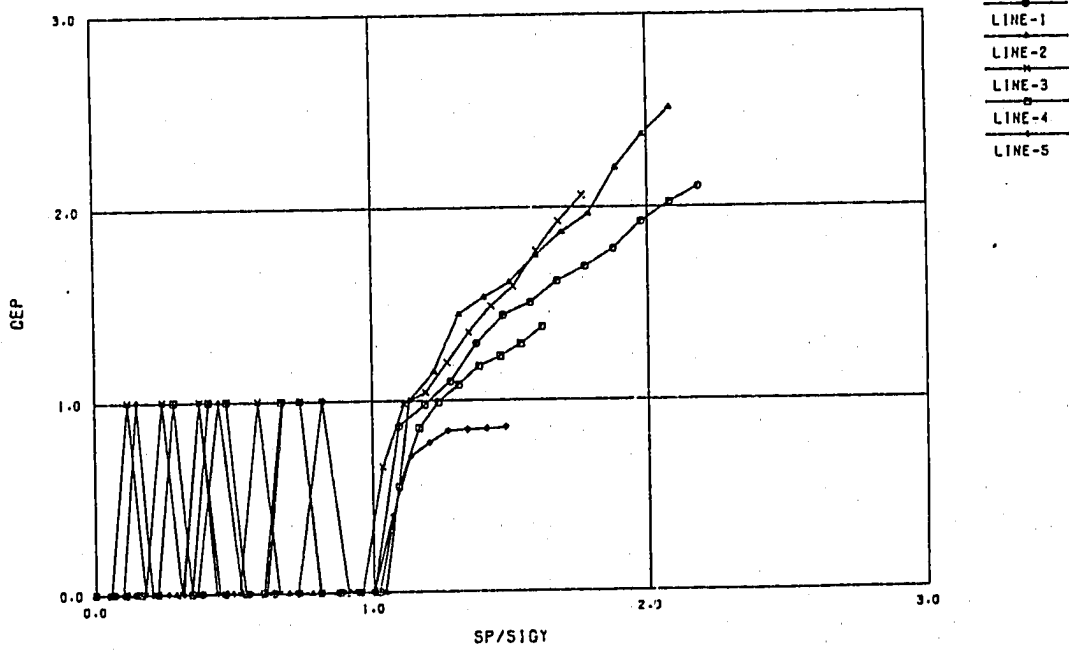


図4.11(b) q_F と S_p/σ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0→ 高温定常状態)

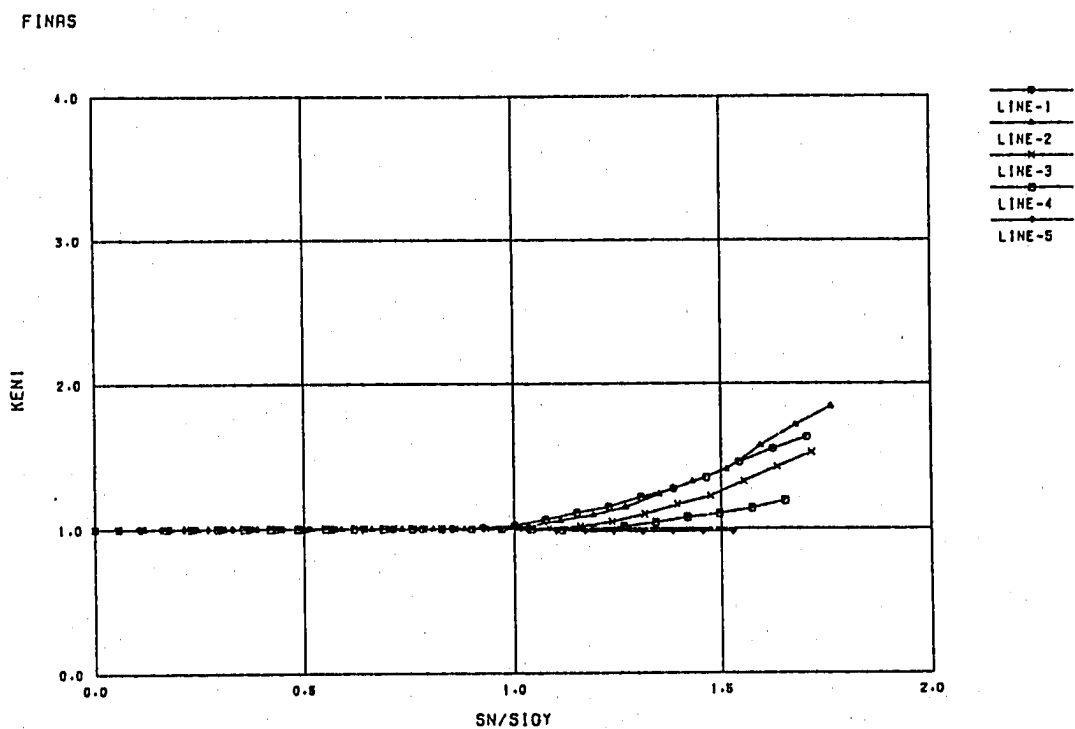


図4.12(a) K_{en} と S_n/σ_y の関係 (リファレンスモデル: 0→ 高温定常状態)

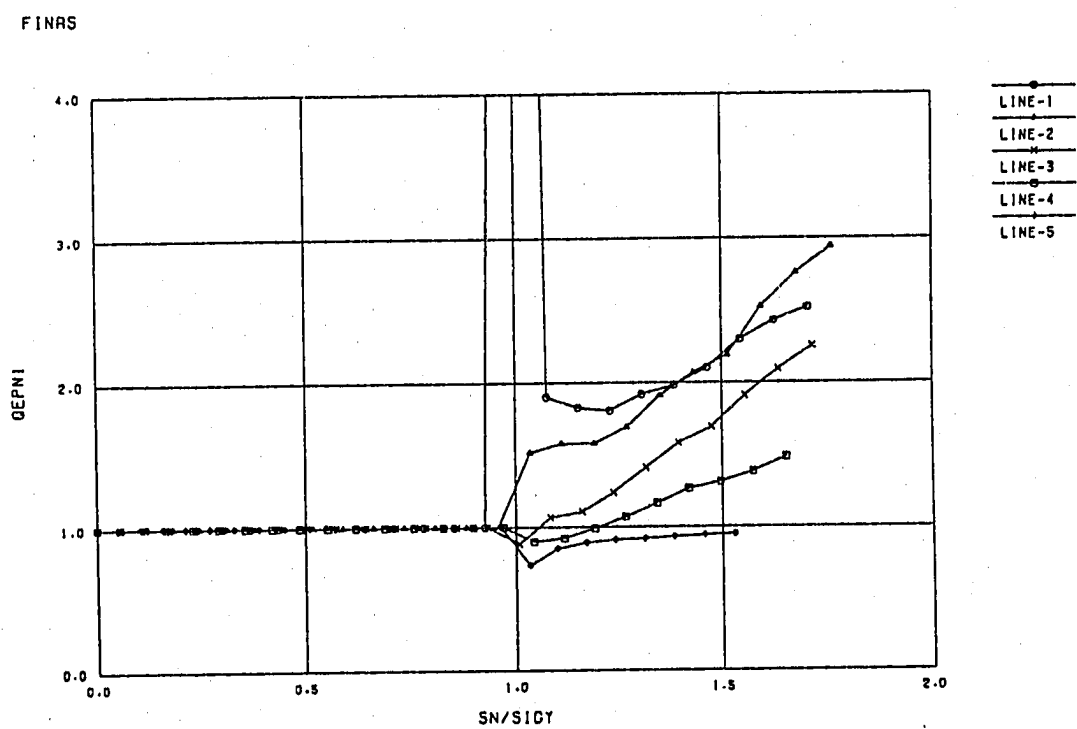


図4.12(b) q_n と S_n/σ_y の関係 (リファレンスモデル: 0→ 高温定常状態)

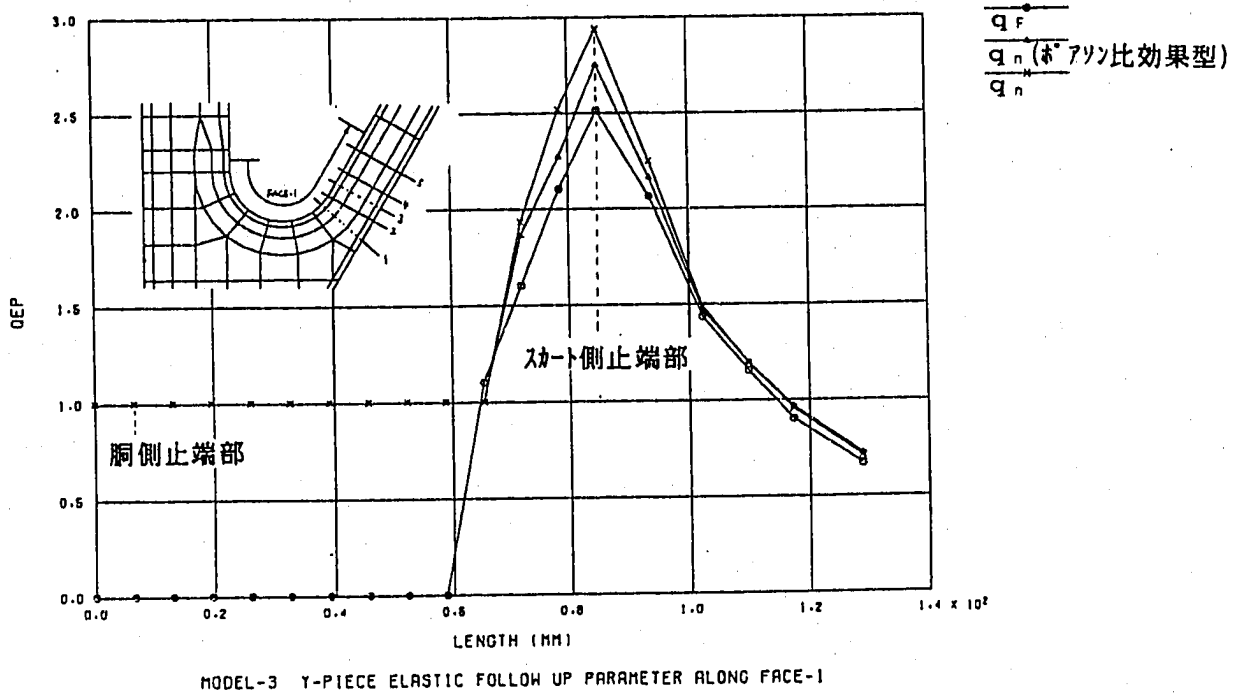


図4.13 交叉アール部における q_F, q_n の分布 (高温定常状態, リファレンスモデル)

5. 考察

リファレンス条件に対する解析結果について考察した結果を述べる。

5.1 評価断面の方向

評価断面の方向を定める一つの指針を与えることを目的として評価断面の方向が等価線形相当ひずみ範囲、ひずみ集中係数等に及ぼす影響を調べる。

評価点として弾性解析による相当ひずみ範囲が最大となる点を選ぶ。リファレンスを評価断面1とし胴の回転軸に対し 0° 、 30° 、 60° 、 90° 方向の断面11、12、13、14を考える。ここで評価断面1の方向は回転軸に対し約 47.5° である。また評価断面13はスカート表面に垂直な方向である。

弾性解析及び弾塑性解析で得られた高温定常状態における各評価断面のひずみ ε_r 、 ε_θ 、 ε_ϕ 、 γ_{rz} の分布を以下の図に示す。

- 評価断面11におけるひずみの分布（高温定常状態）-----図5.1(a)
 評価断面12におけるひずみの分布（高温定常状態）-----図5.1(b)
 評価断面13におけるひずみの分布（高温定常状態）-----図5.1(c)
 評価断面14におけるひずみの分布（高温定常状態）-----図5.1(d)

各評価断面におけるひずみ集中係数・弾性追従パラメータと負荷レベルの関係を以下の図に示す。

- K_ε と S_n/σ_y の関係-----図5.2(a)
 K_{ε_n} と S_n/σ_y の関係-----図5.2(b)
 q_n と S_n/σ_y の関係-----図5.2(c)

また高温定常状態における等価線形相当ひずみ等の値を表5.1に示す。評価断面の方向 ϕ は対称軸に対する角度を表す。

評価断面の方向 ϕ と弾性解析および弾塑性解析により得られた等価線形相当ひずみ $\varepsilon_{n,EL}$ 、 $\varepsilon_{n,EP}$ の関係を図5.3に、ひずみ集中係数 K_ε 、 K_{ε_n} 、 K との関係を図5.4に示す。また図5.5にはノイバー則に基づく局所ひずみ範囲 $K^2 \varepsilon_{n,EL}$ 、弾性追従に基づく局所ひずみ範囲 $K \times K e' \varepsilon_{n,EL}$ 及びノイバー則と弾性追従の乗算値 $K^2 \times K e' \varepsilon_{n,EL}$ を示す。ここでは $K e' \varepsilon_{n,EL}$ として $\varepsilon_{n,EP}$ を用いた。

これらの図及び数値より以下のことがわかる。

- ① 評価断面の方向 ϕ が内表面(アール側表面)に対する法線方向($\phi = 47.5^\circ$)から傾くと内表面に対する接線方向ひずみの一部がせん断ひずみとして評価され γ_{rz} のピーク成分が大きくなる。外表面側についても同様のことが云える。
- ② ひずみ集中係数 K 、 K_ε は ϕ の増大に対し減少する傾向がみられる。 ϕ が小さい場合評価断面は低応力部を通ることになり等価線形ひずみが小さく評価されることからひずみ集中係数 K 、 K_ε 等が大きくなる値になると考えられる。

- ③ 等価線形値に対するひずみ集中係数 K_{ε_n} は ϕ とともに増大する傾向がみられるが ϕ の影響は比較的小さい。
- ④ $K, K_{\varepsilon}, \varepsilon_n$ は ϕ の増大とともに一定値に漸近し $\phi = 47.5^\circ$ (評価断面1)ではほぼ収束している。 $\phi > 47.5^\circ$ で ε_n が多少増大するのは ε_n の大きい評価断面2を多く含むようになるためと考えられる。
- ⑤ 評価断面の等価線形ひずみをもとに表面の局所ひずみを推定した場合、ノイバー型及びノイバー・弾性追従乗算型の推定値は ϕ が小さいと K^2 が効きかなり大きめの値となる。弾性追従型の推定値は ϕ とともに増大するが ϕ の影響は比較的小さく $\phi > 30^\circ$ でノイバー型の推定値を上回る。

以上をまとめるとリファレンス条件については表面に垂直方向の評価断面1はもう一方の表面(外表面)に対しても垂直に近く、概ね妥当な結果を与えられられる。ただし応力集中部がアール止端から相当離れるような場合にはアール側表面と外表面のそれぞれの法線方向が大きく異なることになり、別途検討が必要と考えられる。

5.2 等価線形相当ひずみの定義

弾塑性状態における等価線形相当ひずみの算出方法を検討するため修正ミーゼス型及びポアソン比効果型による相当ひずみの値を比較する。各評価断面におけるそれぞれの定義による相当ひずみの値は表5.2のようになる。評価断面としては1,2の他、評価断面の方向が特殊な場合として評価断面11を選んだ。また修正ミーゼス型の定義において $\varepsilon_r, \gamma_{rz}$ として表面値を使用した場合(構造設計で用いられることが多い)の相当ひずみ値を表5.3に示す。またひずみ成分毎の等価線形値を表5.4に示す。これらの表より以下のことがわかる。

- ① 弾性ではポアソン比効果型のひずみ値が大きくなり弾塑性では修正ミーゼス型が大きくなる傾向がみられるが両者の差違は小さく相対的な差は5%以内である。
- ② 弾性追従パラメータ q_n は修正ミーゼス型の方が10%程度大きくなる。なお評価断面11で q_n が大きくなっているのは ε_n が降伏ひずみをわずかに超えたところにあつて解が安定していないためと考えられる。
- ③ 修正ミーゼス型で $\varepsilon_r, \gamma_{rz}$ について表面値を用いると評価断面1,2におけるひずみ値は弾性で5~8%、弾塑性で10~20%程度大きく算出される。 γ_{rz} の表面値は等価線形値より小さくなる傾向を示すが ε_r の表面値は大きくなる。特に弾塑性状態においてポアソン比の効果による ε_r 表面値の増大が大きい。
- ④ 修正ミーゼス型で $\varepsilon_r, \gamma_{rz}$ について表面値を用いると評価断面11のひずみは2倍を超える値となる。原因は評価断面が表面ピーク値が大きくなるように設定されているため考えられる。

以上をまとめると修正ミーゼス型は等価線形相当ひずみ及び弾性追従パラメータ q_n を適度に保守的に推定でき定義として推奨できる。ただし $\varepsilon_r, \gamma_{rz}$ の表面値を用いる場合 $\varepsilon_{n,EP}$ は過度に保守的な値となり、評価断面のとりかたによっても $\varepsilon_{n,EL}$ 、 $\varepsilon_{n,EP}$ が過度に保守的な値となることに留意する必要がある。また塑性変形量が小さい場合の修正ミーゼス型の過大評価傾向を補正するには修正ポアソン比を用いる等の方法も考えられる。

5.3 総体的弾性追従パラメータ

総体的構造不連続効果を表す弾性追従パラメータ q_n の算出方法を検討するため弾塑性挙動のタイプを仮定して定めた値と等価線形相当ひずみから直接定めた値を比較する。

タイプ I を仮定した場合弾塑性解析における局所ひずみ範囲 $\varepsilon_{t,EP}$ は次式で表される。⁽¹⁾

$$\varepsilon_{t,EP} = K^2 [1 + (q_n - 1) \{1 - \sigma_Y / (E \varepsilon_{n,EL})\}] \varepsilon_{n,EL}$$

$$\text{ただし、} \varepsilon_{n,EL} \geq \sigma_Y / E$$

弾性追従パラメータ q_n は以下のようになる。

$$q_n = (\varepsilon_{t,EP} / K^2 - \sigma_Y / E) / (\varepsilon_{n,EL} - \sigma_Y / E)$$

タイプ II で弾性追従型を仮定した場合弾塑性解析における局所ひずみ範囲 $\varepsilon_{t,EP}$ は次式で表される。⁽¹⁾

$$\varepsilon_{t,EP} = K [1 + (q_n - 1) \{1 - \sigma_Y / (E \varepsilon_{n,EL})\}] \varepsilon_{n,EL}$$

弾性追従パラメータ q_n は以下のようになる。

$$q_n = (\varepsilon_{t,EP} / K - \sigma_Y / E) / (\varepsilon_{n,EL} - \sigma_Y / E)$$

また解析で得られた等価線形相当ひずみより直接 q_n を求める式を以下に示す。

$$q_n = (\varepsilon_{n,EP} - \sigma_Y / E) / (\varepsilon_{n,EL} - \sigma_Y / E)$$

各方法で得られた q_n の値を横軸を S_n / σ_Y (ここで、 $S_n = E \varepsilon_{n,EL}$) としてプロットしたものを以下に示す。

$$q_n \text{ と } S_n / \sigma_Y \text{ の関係 (評価断面1) ----- } \text{図 5.6 (a)}$$

$$q_n \text{ と } S_n / \sigma_Y \text{ の関係 (評価断面2) ----- } \text{図 5.6 (b)}$$

またタイプIIを仮定して得られた q_n （最大値：高温定常状態における値）を用いた最大値型のひずみ集中係数と解析結果との比較を以下の図に示す。図で K 、 q_n は以下の値としている。なお図中でノイバー型のひずみ集中係数が曲線的に描かれているのは変曲点に対応するデータが欠落していることによる。

評価断面1: $K = 1.28$, $q_n = 2.4134$

評価断面2: $K = 1.18$, $q_n = 2.7435$

タイプIIに基づくひずみ集中挙動の推定（評価断面1）-----図5.7(a)

タイプIIに基づくひずみ集中挙動の推定（評価断面2）-----図5.7(b)

図より以下のことがわかる。

- ① タイプIIを仮定した場合の q_n 値は解析結果より直接算出した値より多少小さめとなるが両者の差は小さい。
- ② タイプIを仮定した場合の q_n 値は解析結果より直接算出した値よりかなり小さく負荷レベルの小さいところでは1.0を下回る。
- ③ K_e はノイバー型の急激な立ち上がりを示さず、弾性追従型のひずみ集中係数のみで包絡される。

以上より応力集中部の挙動はタイプIIに近いと考えられる。

5.4 厚さ方向温度分布

評価断面 1, 2, 11の高温定常状態における厚さ方向温度分布を表5.6に示す。表より以下のことがわかる。

- ① 評価断面 1, 2では ΔT_1 , ΔT_2 は充分小さく応力・ひずみ挙動に対する厚さ方向温度分布の影響はほとんどないと考えられる。
- ② 評価断面 11では ΔT_1 が多少大きくなるが応力値に変換しても 2kg/mm^2 程度で影響は小さい。

5.5 まとめ

総体的及び局所的構造不連続が重畳する場合の弾塑性挙動はタイプI・タイプIIの2種類に分類され材料特性として弾完全塑性体を想定した場合、挙動の特徴として以下の知見が得られている。

- ① タイプIの場合弾性解析による局所相当ひずみ範囲 ε_p 、 ε_L と等価線形相当ひずみ範囲 ε_n 、 ε_L の最大となる位置が一致し、弾塑性解析による局所相当ひずみ

範囲 $\varepsilon_{1,EP}$ が最大となる位置は全断面降伏後も弾性状態と同じである。

ひずみ集中係数 K_ε はノイバー型と弾性追従型の乗算で表される。

- ② タイプⅡの場合 $\varepsilon_{1,EL}$ と $\varepsilon_{n,EL}$ の最大となる位置は異なり、弾塑性解析による $\varepsilon_{1,EP}$ が最大となる位置は全断面降伏後 $\varepsilon_{1,EL}$ が最大となる位置から $\varepsilon_{n,EL}$ が最大となる位置へ移行する。

ひずみ集中係数 K_ε はノイバー型または弾性追従型の最大値で包絡される。

これらの知見を踏まえてリファレンス条件による解析結果を眺めてみると以下のことがいえる。

- ① 弾塑性変形が進むとともにひずみ範囲 $\varepsilon_{1,EP}$ が最大となる位置は $\varepsilon_{1,EL}$ が最大となる評価断面1から $\varepsilon_{n,EL}$ の最大となる評価断面2へ移行する傾向がみられる。
- ② 弾塑性状態において評価断面1の局所相当ひずみは評価断面2の局所相当ひずみ及び等価線形相当ひずみに対し相対的に減少する。(図5.8)
- ③ ひずみ増大においてノイバー型の増大挙動は観察されず弾性追従型のみで包絡することができる。
- ④ タイプⅡを仮定した q_n と ε_n より直接算出した q_n が良く対応する。

以上のことからリファレンス条件のもとではY型接合構造の不連続部における弾塑性挙動はタイプⅡとして分類することが可能と考えられる。

表5.1 評価断面の方向と等価線形ひずみ・ひずみ集中係数

評価断面	方向 ϕ (°)	$\epsilon_{n,EL}$ %	$\epsilon_{n,EP}$ %	K	K_{ϵ}	$K_{\epsilon r}$
11	0	.1025	.1479	2.1317	3.3785	1.4428
12	30	.1564	.2407	1.3971	2.2142	1.5385
1	47.5	.1706	.2778	1.2808	2.0299	1.6283
13	60	.1759	.2907	1.2422	1.9687	1.6533
14	90	.1764	.3063	1.2387	1.9632	1.7365

表5.2 等価線形ひずみの定義とひずみの値

評価断面	修正ミーゼス型			ポアソン比効果型		
	弾性 %	弾塑性%	q_n	弾性 %	弾塑性%	q_n
1	.1706	.2778	2.5184	.1784	.2783	2.2742
2	.1763	.3242	2.9384	.1788	.3168	2.7513
11	.1025	.1479	19.16	.1079	.1462	5.8481

表5.3 修正ミーゼス型等価線形ひずみの値 (ϵ_r , γ_{rr} :表面値使用)

評価断面	弾性 (%)	弾塑性 (%)	q_n 値
1	.1848	.3348	2.7689
2	.1850	.3653	3.1212
11	.2177	.3833	2.4070

表5.4 ひずみ成分毎の等価線形値 (単位: %)

評価断面		ϵ_{rn}	ϵ_{zn}	$\epsilon_{\theta n}$	γ_{rzn}	ϵ_r	γ_{rz}
1	弾性	.0527	-.1831	.0177	.0283	.0830	.0009
	弾塑性	.1419	-.2627	.0195	.0409	.2385	.0019
2	弾性	.0613	-.1833	.0213	-.0342	.0812	-.0118
	弾塑性	.1769	-.2974	.0227	-.0515	.2468	-.0376
11	弾性	-.0587	-.0258	.0169	.1339	-.0866	.3098
	弾塑性	-.0517	-.0266	.0188	.2102	-.0725	.5681

表5.5 総体的構造不連続効果を表す弾性追従パラメータの値

評価断面	タイプ I	タイプ II	$\epsilon_{n,EP}$ ベース
1	1.5738	2.4134	2.5255
2	2.1223	2.7435	2.8414

表5.6 厚さ方向温度分布 (高温定常状態, γ -ル部側表面)

評価断面	$\Delta T_1/2$ (°C)	ΔT_2 (°C)	平均温度 (°C)
1	-0.116	0.000	528.075
2	0.571	-0.144	524.530
11	-5.651	-0.987	534.597

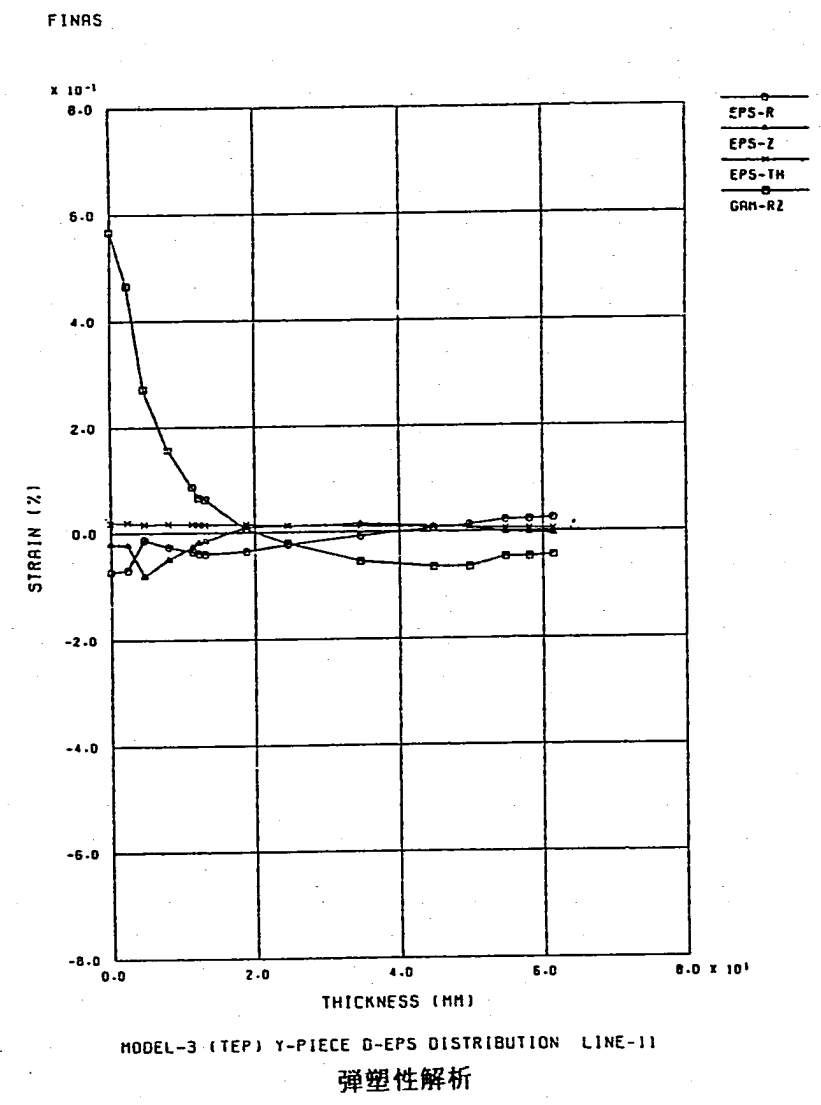
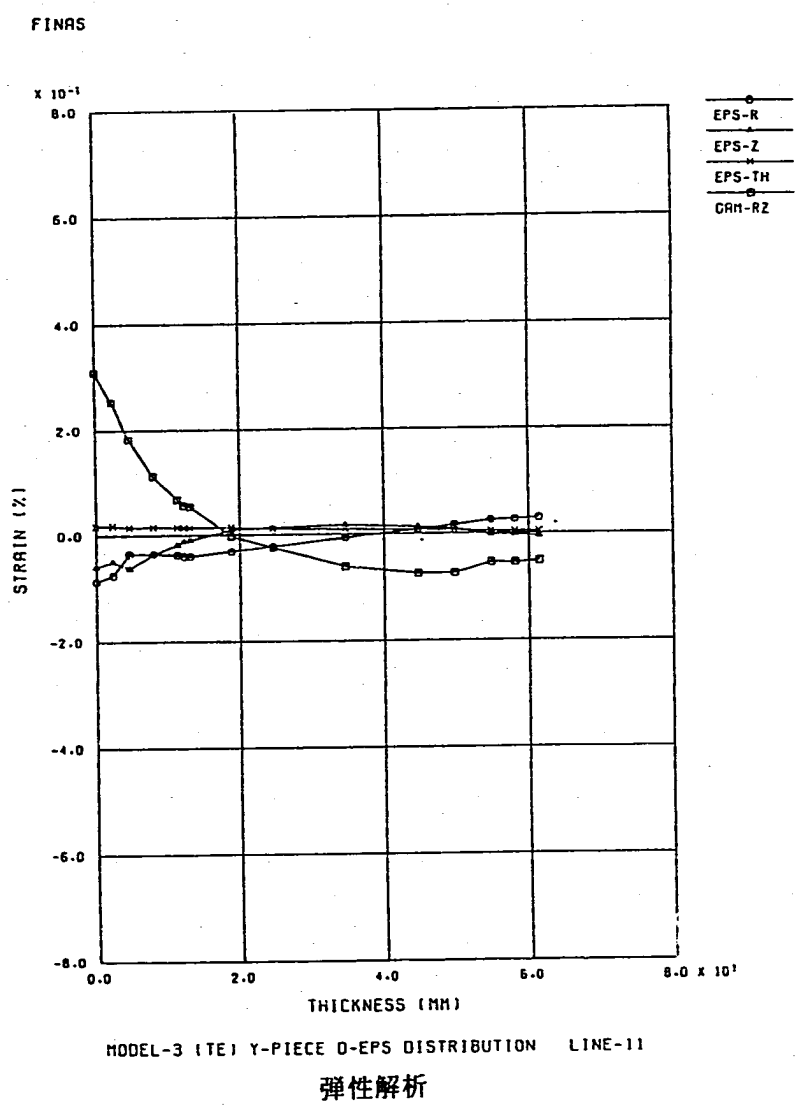
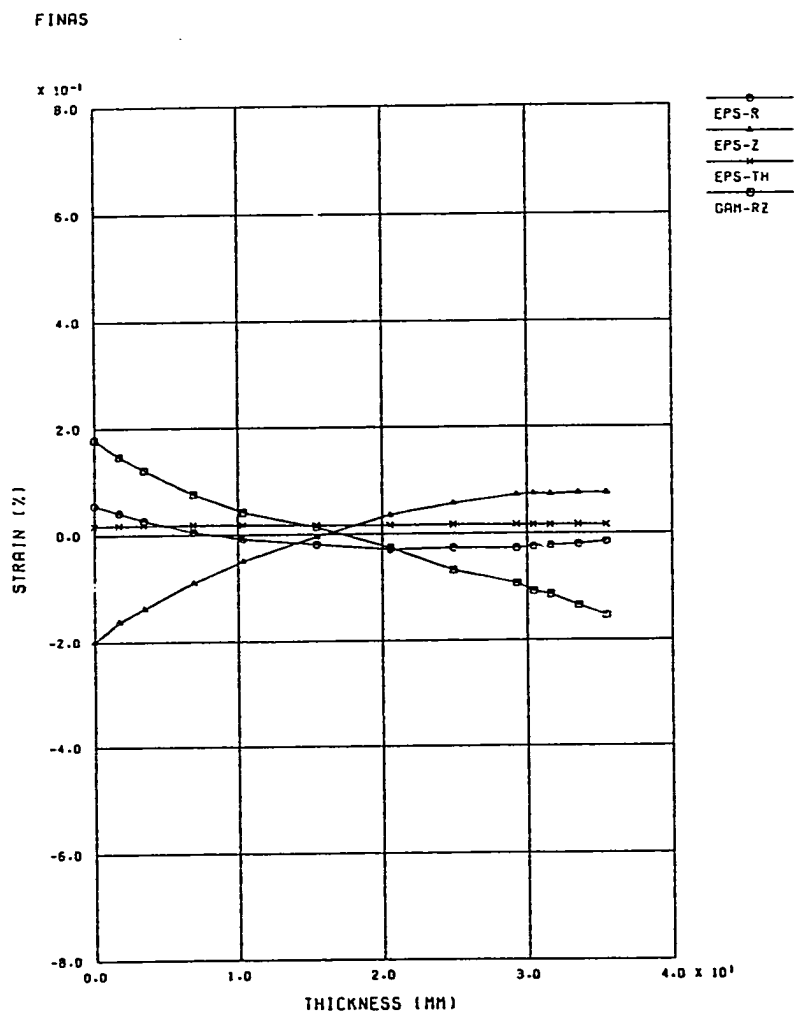
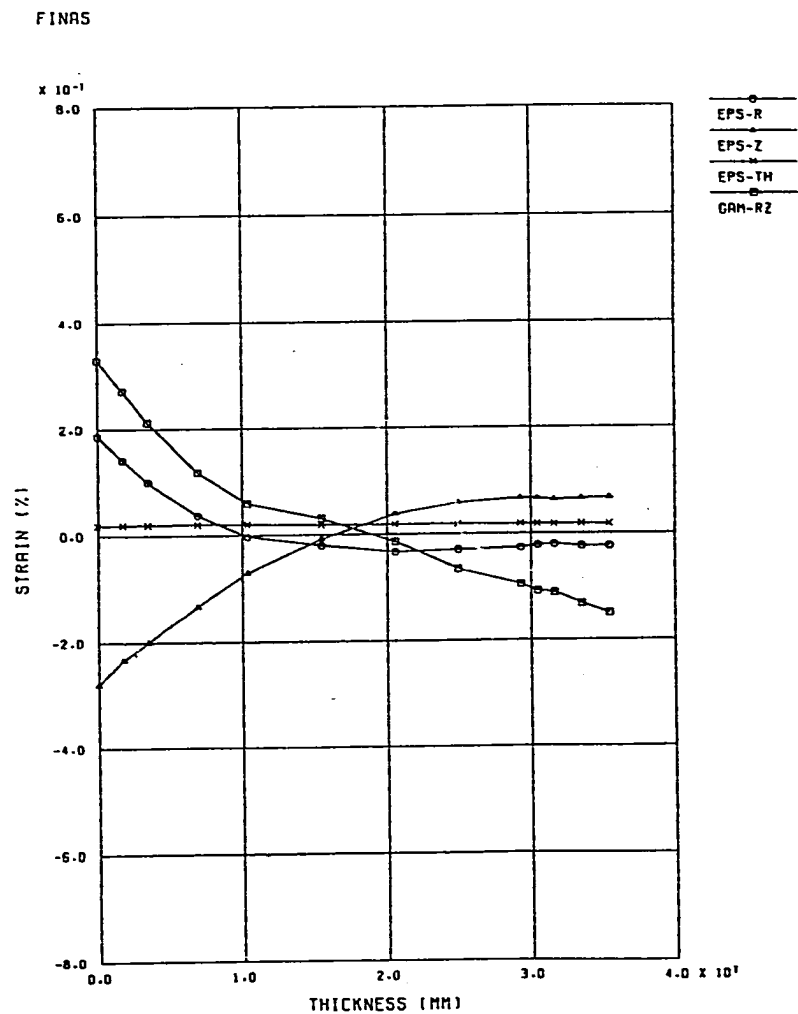


図5.1(a) 評価断面11におけるひずみの分布 (リァルスフェル, 高温定常状態)



MODEL-3 (TE) Y-PIECE D-EPS DISTRIBUTION LINE-12

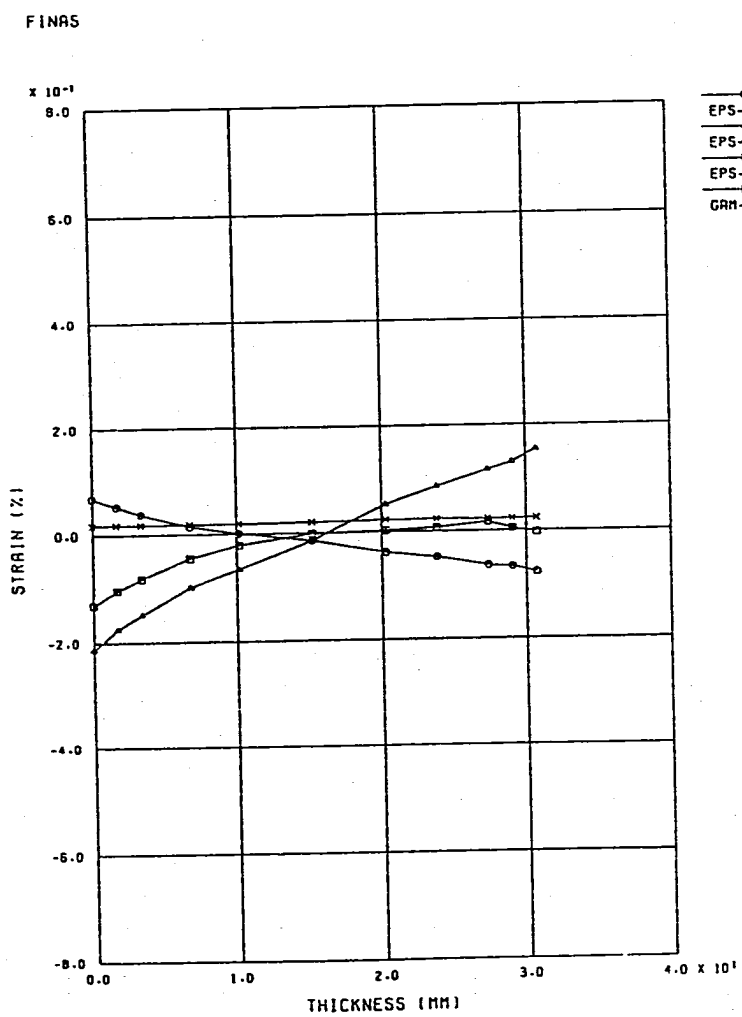
弾性解析



MODEL-3 (TEP) Y-PIECE D-EPS DISTRIBUTION LINE-12

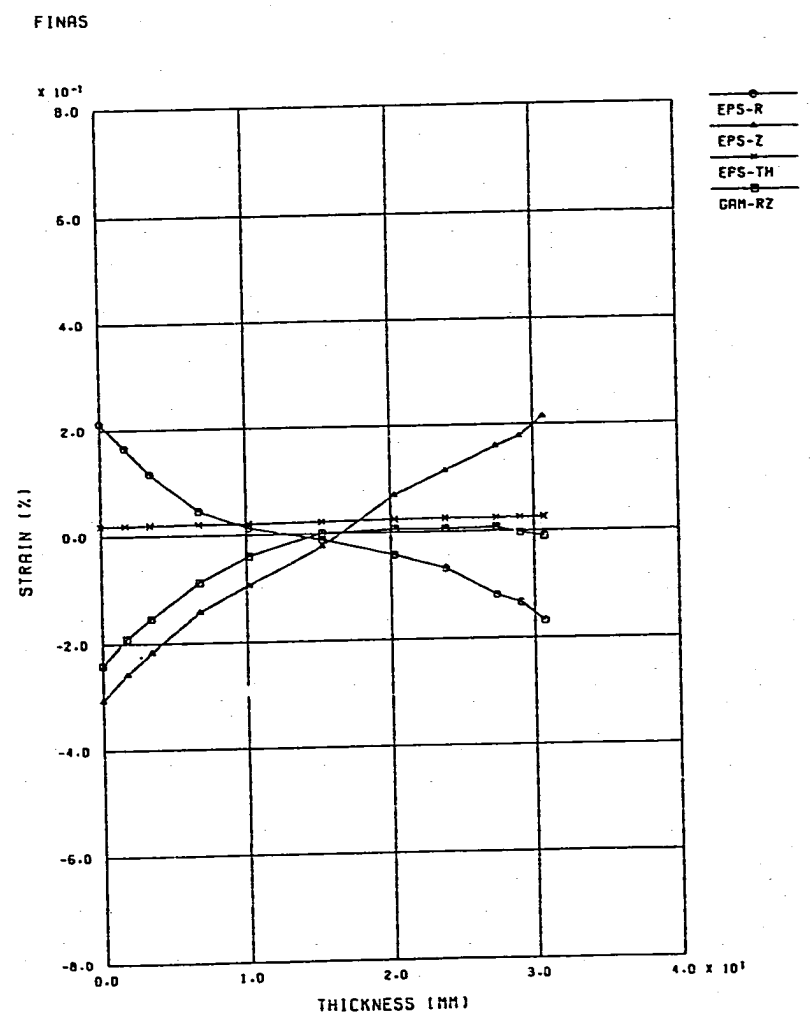
弾塑性解析

図5.1(b) 評価断面12におけるひずみの分布 (リアレンスゲル, 高温定常状態)



MODEL-3 (TE) Y-PIECE D-EPS DISTRIBUTION LINE-13

弾性解析

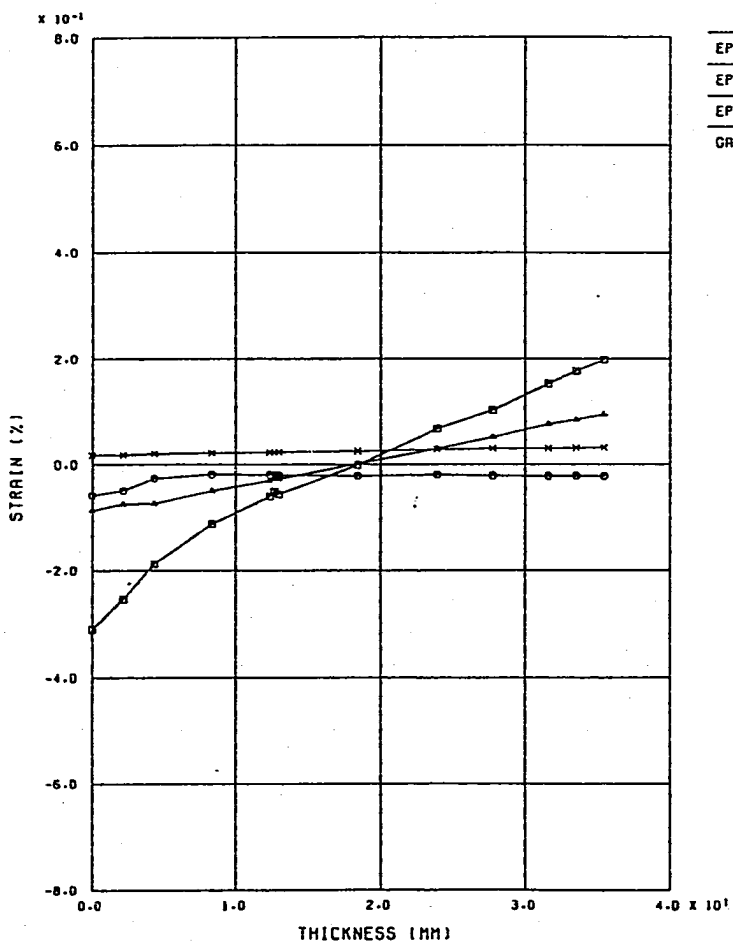


MODEL-3 (TEP) Y-PIECE D-EPS DISTRIBUTION LINE-13

弾塑性解析

図5.1(c) 評価断面13におけるひずみの分布 (リファレンスモデル, 高温定常状態)

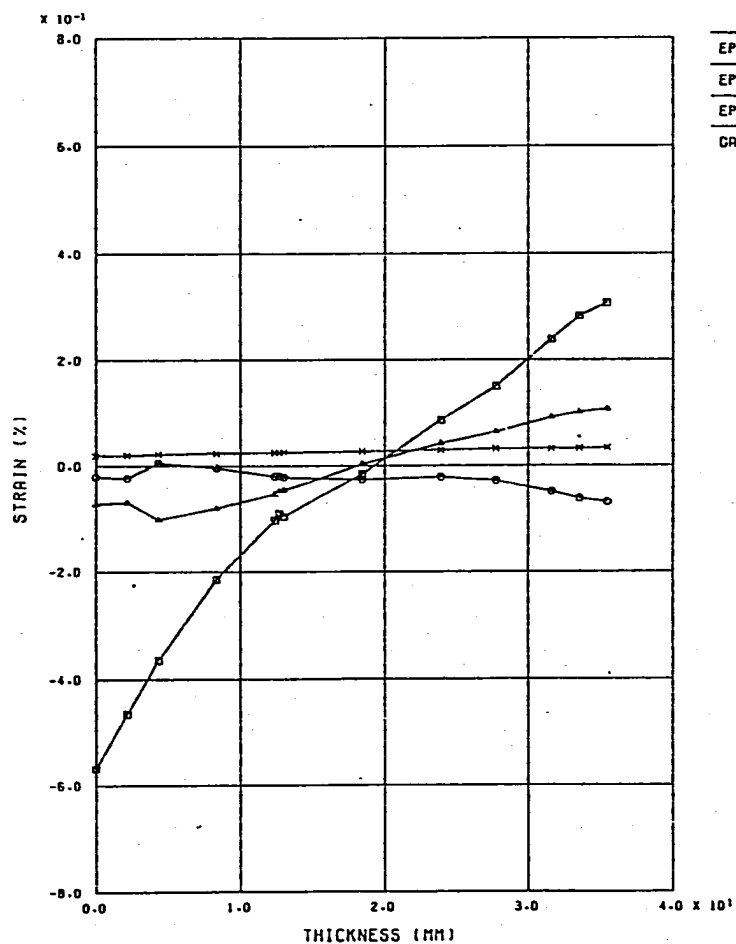
FINAS



MODEL-3 (TE) Y-PIECE O-EPS DISTRIBUTION LINE-14

弾性解析

FINAS



MODEL-3 (TEP) Y-PIECE O-EPS DISTRIBUTION LINE-14

弾塑性解析

図5.1(d) 評価断面14におけるひずみの分布 (リフレクセル, 高温定常状態)

FINAS

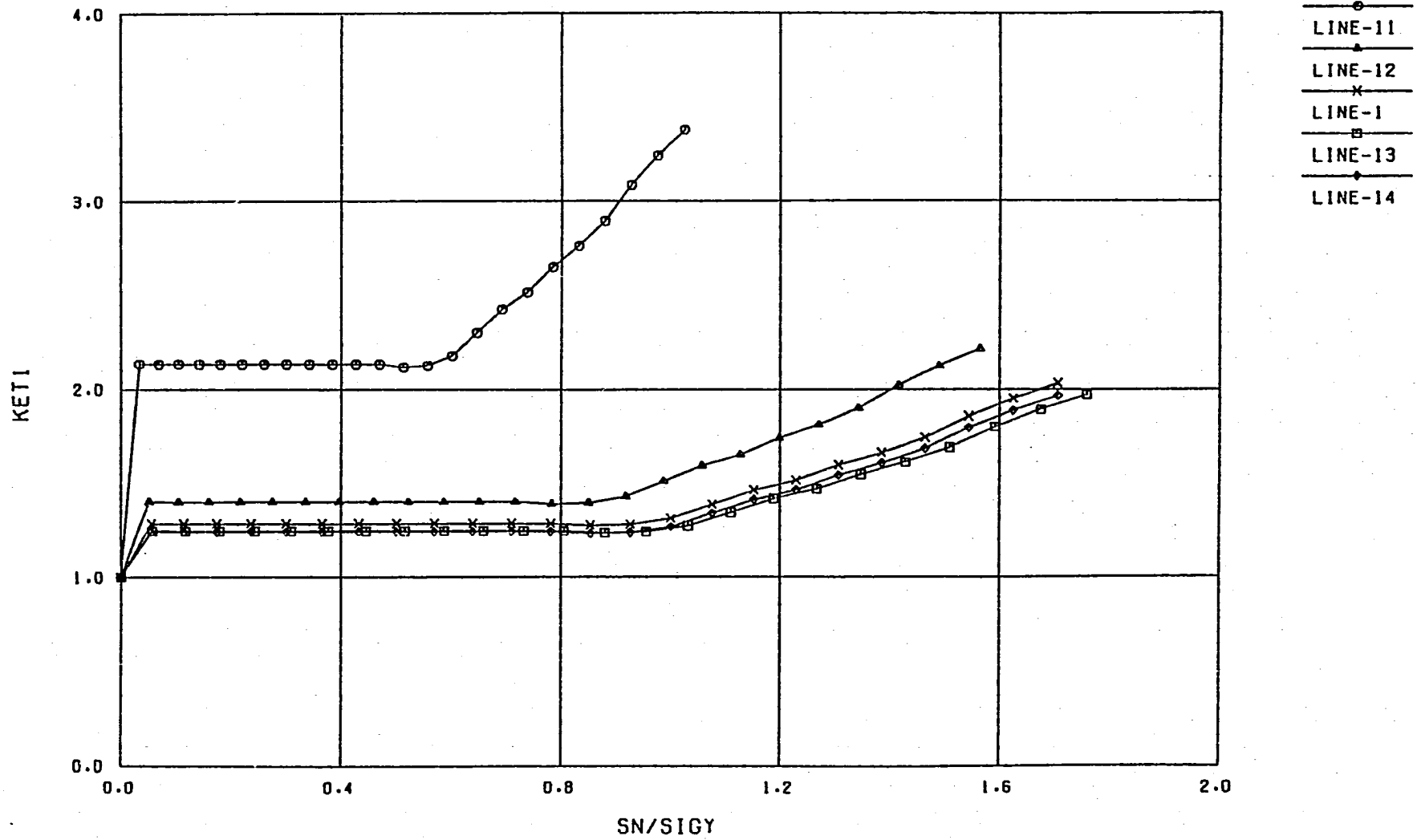


図5.2(a) K_ϵ と S_n/σ_Y の関係 (リアレスモデル: 0 → 高温定常状態)

FINAS

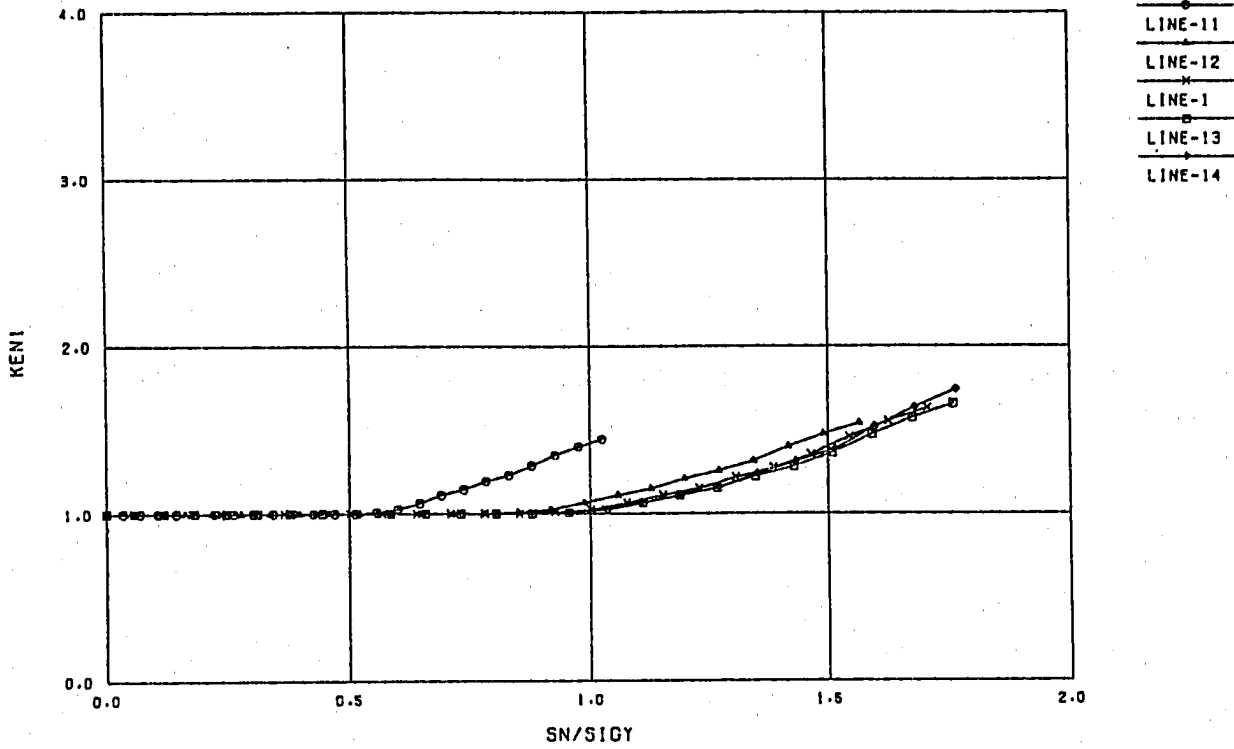


図5.2(b) K_{en} と S_n/σ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0→ 高温定常状態)

FINAS

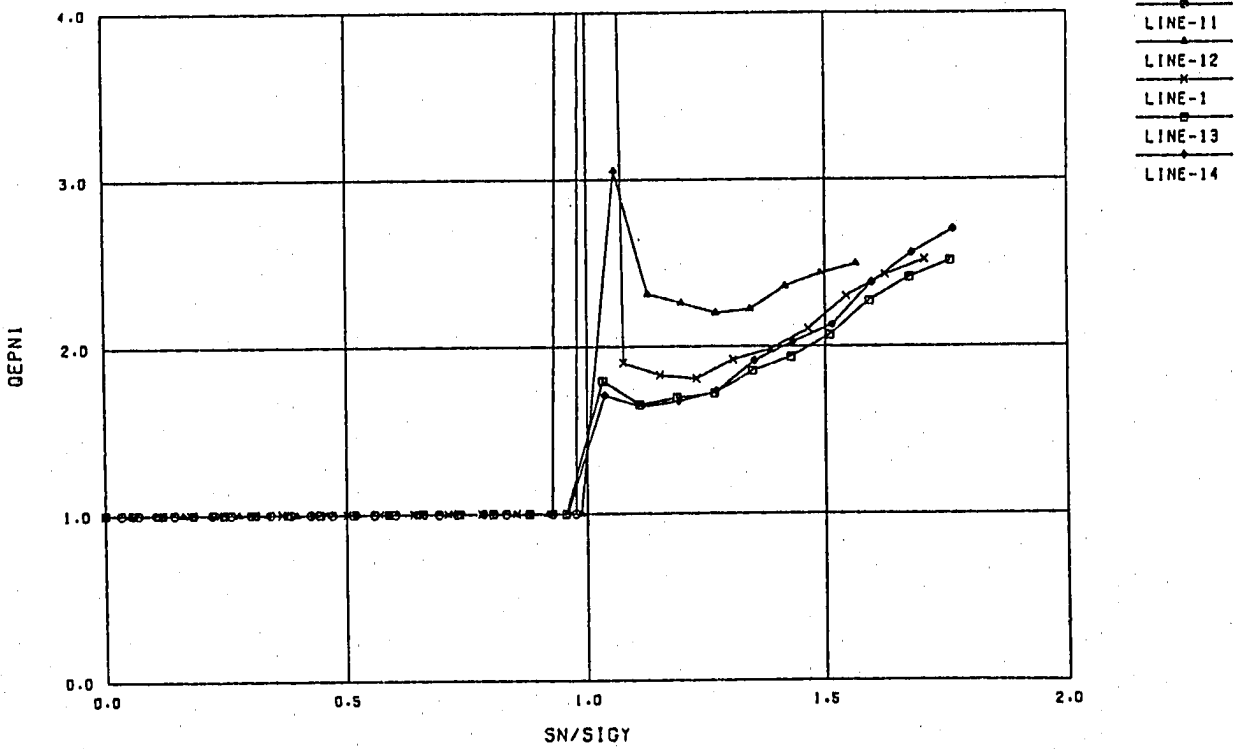


図5.2(c) q_n と S_n/σ_Y の関係 (リファレンスモデル: 0→ 高温定常状態)

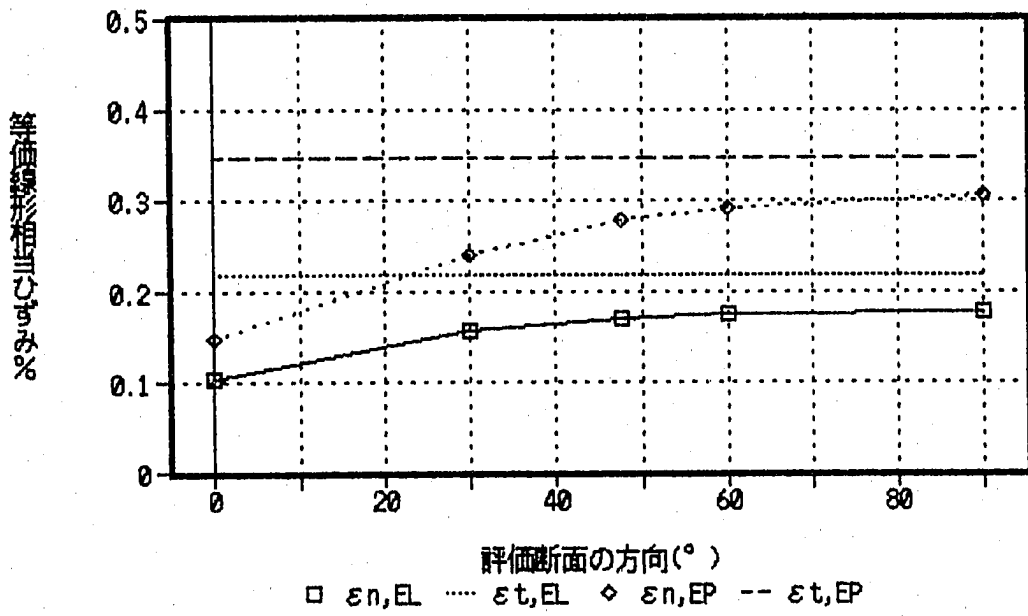


図5.3 $\epsilon_{n,EL}$, $\epsilon_{n,EP}$ と ϕ の関係 (リアレンスモデル, 高温定常状態)

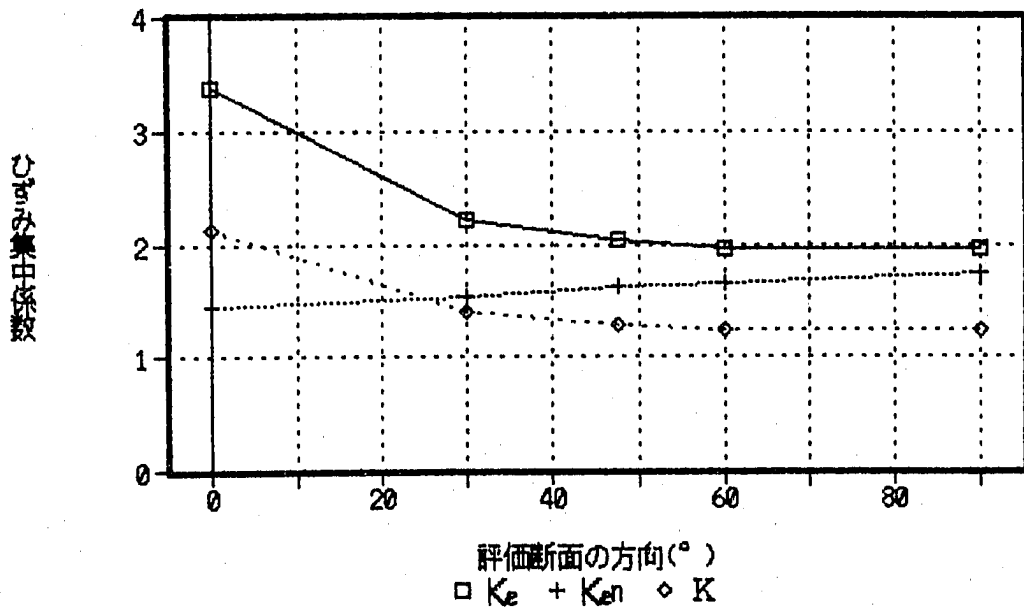


図5.4 K_e , K_{en} , K と ϕ の関係 (リアレンスモデル, 高温定常状態)

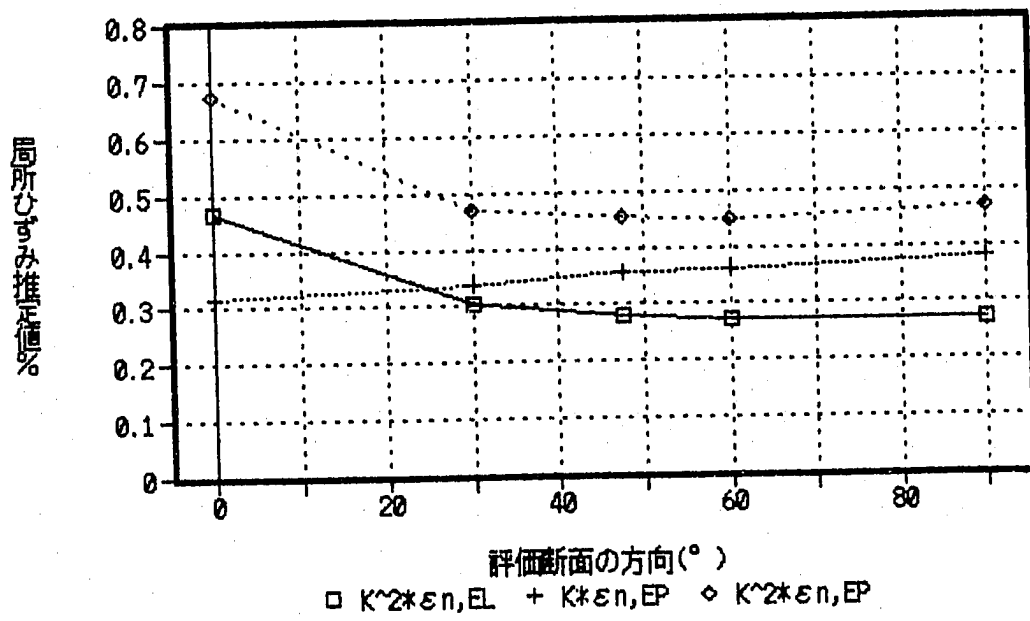


図5.5 $K^2 \cdot \epsilon_{n,EL}$, $K \cdot \epsilon_{n,EP}$, $K^2 \cdot \epsilon_{n,EP}$ と ϕ の関係
(リファレンスモデル, 高温定常状態)

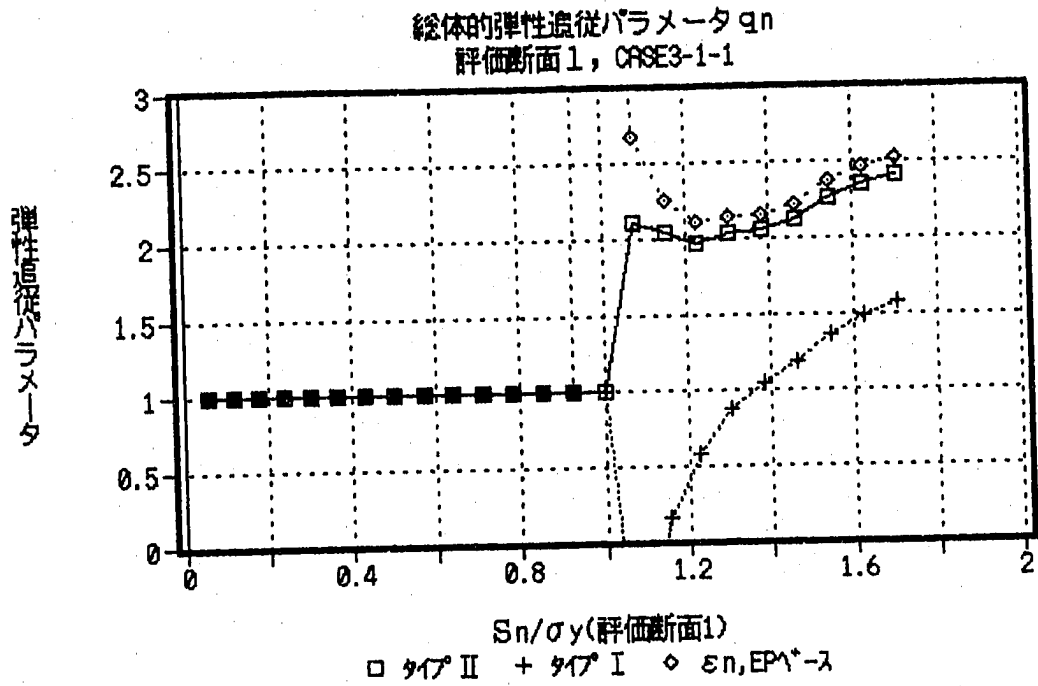


図5.6(a) q_n と S_n/σ_y の関係 (評価断面1: 0 → 高温定常状態)

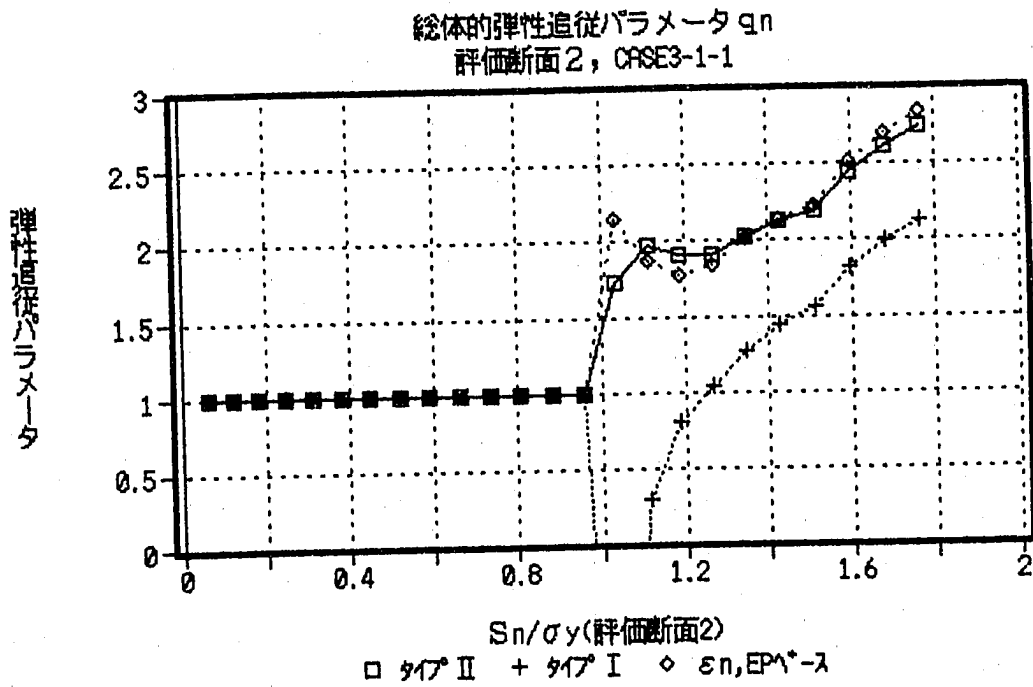


図5.6(b) q_n と S_n/σ_y の関係 (評価断面2: 0 → 高温定常状態)

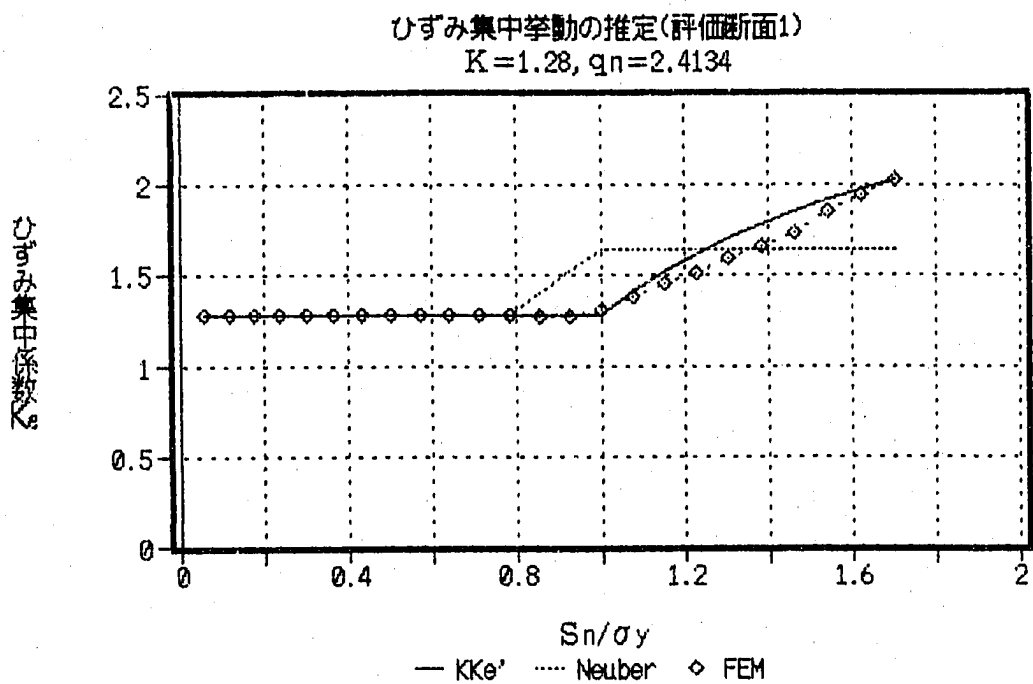


図5.7(a) タイプIIに基づくひずみ集中挙動の推定(評価断面1)

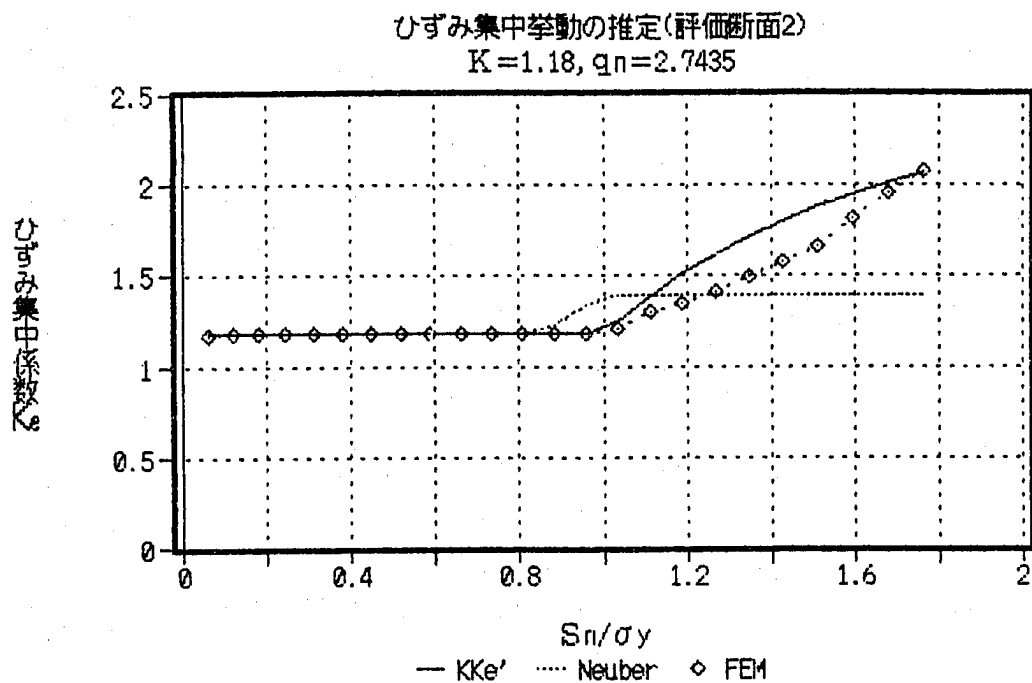


図5.7(b) タイプIIに基づくひずみ集中挙動の推定(評価断面2)

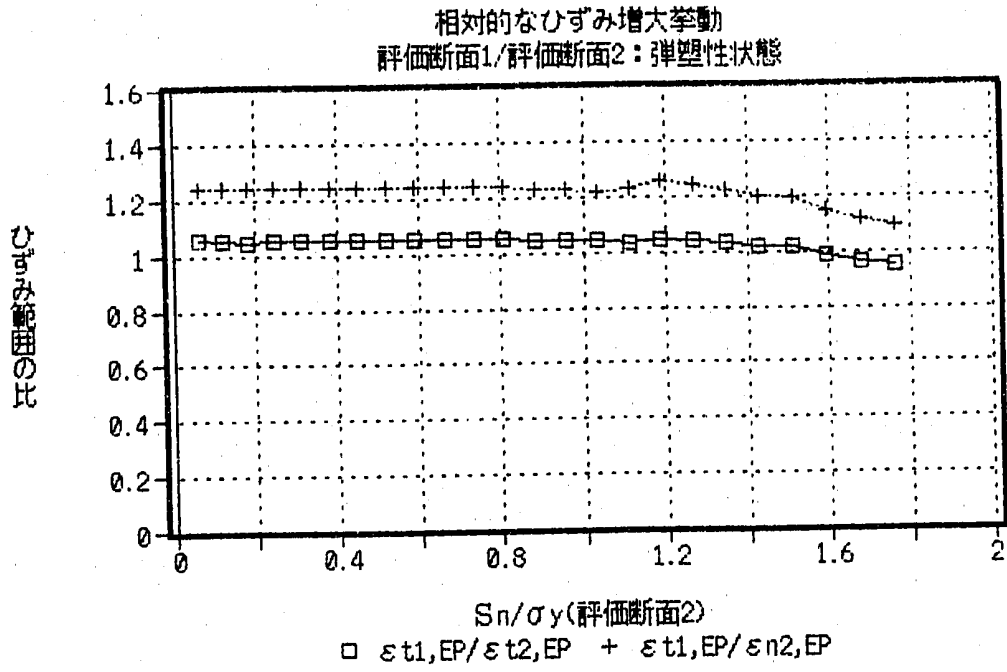


図5.8 評価断面1における $\epsilon_{t,EP}$ と評価断面2における $\epsilon_{t,EP}$, $\epsilon_{n,EP}$ との比と評価断面2における S_n/σ_y の関係 (0 → 高温定常状態)

6. 今後の計画

Y型接合構造の非弾性挙動を把握・類型化するため以下の因子について解析を行いリファレンス条件による解析結果と比較検討することを計画している。

6.1 応力緩和挙動の検討

6.1.1 基本挙動

ノルトン則を仮定した弾性状態からの応力緩和解析を行う。解析条件として以下を考える。

ノルトン則定数: $\dot{\epsilon}_0 = B\sigma^n$ $n=7$ $B=10^{-13}$
 初期状態 : 高温定常状態 (弾性応力状態)
 保持時間 : 3×10^5 時間

6.1.2 負荷因子

初期応力状態が応力緩和挙動に及ぼす影響についても検討を行う。弾塑性特性としてn乗硬化則を仮定し負荷レベルを変えた応力緩和解析を行う。

6.1.3 形状因子

(1) 交叉アール部曲率半径

交叉アール部曲率半径を変化させた場合について弾塑性解析を行う。解析条件として以下を考える。

交叉アール部曲率半径: 5mm (リファレンス条件は30mm)

(2) 板厚

胴部板厚を相対的に薄くした場合について弾塑性解析を行う。解析条件として以下を考える。

胴板厚 : 30mm (リファレンス条件は50mm)
 スカート板厚: 50mm (リファレンス条件は30mm)

6.1.4 材料因子

ノルトン則指数nの影響を調べる。またPNCクリープひずみ式を用いた解析結果との比較を行う。

6.2 ひずみ増大挙動に対する影響因子の検討

6.2.1 負荷因子

コールドショックについて弾塑性解析を行う。解析条件として以下を考える。

負荷サイクル : 一様温度→高温定常→コールドショック→低温定常
 高温側定常状態: 流体温度 550℃
 低温側定常状態: 流体温度 200℃
 温度変化速度 : -0.5℃/sec
 熱伝達率 : 500kcal/m²hr℃
 降伏応力 : 16.2kg/mm², 24.3kg/mm²の2ケース

6.2.2 形状因子

(1) 交叉アール部曲率半径

交叉アール部曲率半径を変化させた場合について弾塑性解析を行う。解析条件として以下を考える。

交叉アール部曲率半径: 5mm (リファレンス条件は30mm)

(2) 板厚

胴部板厚を相対的に薄くした場合について弾塑性解析を行う。解析条件として以下を考える。

胴板厚 : 30mm (リファレンス条件は50mm)

スカート板厚: 50mm (リファレンス条件は30mm)

6.2.3 材料因子

(1) n乗硬化則

弾塑性特性としてn乗硬化則を考えた場合について弾塑性解析を行う。解析条件として以下を考える。ノルトン則との類似性についても留意する。

弾塑性特性: $\epsilon_t = \sigma/E + B\sigma^n$ $n=7$ $B=10^{-8}$

(2) 加工硬化係数

弾塑性特性において加工硬化係数を考慮した場合について弾塑性解析を行う。解析条件として以下を考える。

加工硬化係数: $H' = E/10$

7. 結言

Y型接合構造の基本的な挙動を把握するため材料特性として弾完全塑性体を仮定し高温定常状態への準静的昇温に対する弾塑性解析を行った結果以下の知見が得られた。

- (1) 最大ひずみ範囲はスカート付け根部の交叉アール止端部に生じる。
- (2) ひずみの増大はスカート長さ方向の曲げひずみの増大が主な原因で弾性追従型よりも増大傾向は大きくなる。
- (3) 弾性追従パラメータとしてタイプⅡを仮定して算出した値と等価線形ひずみより直接算出した値とが同程度となることから弾塑性挙動はタイプⅡに分類できると考えられる。
- (4) 総体的構造不連続効果を表す弾性追従パラメータ q_n は負荷レベル S_n/σ_Y が1.8で2.8程度となる。

謝 辞

本検討を進めるにあたり材料開発室 香川裕之氏・浅山 泰氏、構造工学室 笠原直人氏には有益なご意見をいただきました。本社動力炉建設運転本部電機課 大矢哲夫氏にはもんじゅ機器形状の調査でご助力いただきました。またセンチュリ
リサーチセンタ(株) 吉田博治氏には解析作業でご協力いただきました。
ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 根岸他,「クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の策定に係わる解析 第1報
切欠付き丸棒・フレット付き帯板の解析」.PNC SN9410 89-164, 1989年6月 印刷中
- (2) 谷川他,「クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の策定に係わる解析 第2報
応力緩和評価に用いる設計係数の検討」.PNC SN9410 89-165, 1989年6月
- (3) 根岸他,「クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数の策定に係わる解析 第4報
フレット付き円筒の解析(1)」.PNC SN9410 90-XXX, 1990年2月発行予定
- (4) 動力炉建設運転本部,「高速増殖炉もんじゅ発電所機器構造図・外形図図面集」
内部資料
- (5) 日本機械学会編,「伝熱工学資料」
- (6) 動燃事業団,「汎用非線形構造解析システムFINAS VERSION 11.0 使用説明書」
PNC N9520 89-019, 1989年11月
- (7) 谷川他,「高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(Ⅱ) 原子炉容器液面近傍
縦溶接継手の解析(2)」.PNC SN9410 88-081, 1988年6月
- (8) 構造工学室,「溶接継手クリープ疲労強度評価法の開発 関連技術資料のまとめ
(1)」.PNC I9430 89-003, 1989年4月

A.1 「もんじゅ」における主要なYピース構造のリストアップ

※印 「もんじゅ」運用法検討の対象部位

*印 優先度の高い部位

A.1.1 サポート構造

(1) R/V-----MHI

※*バケット構造部

*G/V支持スカート胴接合部

(2) I H X-----Hitachi

※*支持スカート胴接合部

*上部管板用シュラウド胴接合部

*G/V支持スカート胴接合部

(3) 1次系その他-----Hitachi

ポンプG/V支持スカート胴接合部

ポンプO/Fコラム支持スカート胴接合部

純化系エコノマイザ支持スカート胴接合部

メンテナンス冷却系I H X支持スカート胴接合部

メンテナンス冷却系I H X上部管板用シュラウド胴接合部

(4) E/V-----MHI

*支持スカート胴接合部

(5) S/H-----Hitachi

*支持スカート胴接合部

A.1.2 セーフエンド構造

(1) R/V-----MHI

※*出口ノズル(N-2, 32B)

※*1次O/F系汲上ノズル(N-4, 4B)

1次O/F系出口ノズル(N-3, 4B)

1次O/F系補助出口ノズル(N-5, 3B)

メンテナンス冷却系出口ノズル(N-6, 4B)

メンテナンス冷却系入口ノズル(N-7, 4B)

(2) I H X-----Hitachi

- ※ * 入口ノズル (N-1, 32B)
- 2次側入口ノズル (N-3, 22B)
- 2次側出口ノズル (N-4, 22B)

(3) 1次系その他-----Hitachi

- ※ * 1次O/F系O/Fタンク炉容器O/Fノズル (N-1, 8B)
- 1次O/F系O/Fタンク炉容器汲上ノズル (N-2, 4B)

(4) E/V -----MHI

- * 蒸気出口管板シュラウド部
- * 蒸気入口管板シュラウド部
- * ナトリウム入口ノズル (N-1, 16B-20S)
- O/F系ノズル (N-5, 3B-20S)

(5) S/H -----Hitachi

- * 蒸気出口管板シュラウド部
- * 蒸気入口管板シュラウド部
- * ナトリウム入口ノズル (N-1, 10B)

(6) 2次系その他-----Toshiba

- * 2次系配管 C/V 貫通部
- ミキシングティ

A.2 ひずみ集中係数等の定義

解析のアウトプットとして得られるひずみ範囲・ひずみ集中係数等の定義を以下に示す。

A.2.1 相当ひずみ範囲・相当ひずみ増分

相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ は次式で定義される。

$$\Delta \varepsilon = \Delta \sigma / E + \Delta \varepsilon_p$$

$\Delta \sigma$: 相当応力範囲 (Mises型)

$\Delta \varepsilon_p$: 相当塑性ひずみ範囲 (Mises型)

E : 縦弾性係数

相当ひずみ増分は相当ひずみ範囲が最大となるように選ばれた極値時点の一つを基準とし任意時点について算出され、相当ひずみ増分の最大値が相当ひずみ範囲となる。相当ひずみ増分は負荷レベルの増大に伴うひずみ集中係数等の算出に用いられる。相当ひずみ増分 $\delta \varepsilon$ は次式で定義される。

$$\delta \varepsilon = \delta \sigma / E + \delta \varepsilon_p$$

$\delta \sigma$: 相当応力増分 (Mises型)

$\delta \varepsilon_p$: 相当塑性ひずみ増分 (Mises型)

A.2.2 ひずみ集中係数

ひずみ集中係数は相当ひずみ増分における非弾性解析結果の弾性解析結果に対する比として定義される。

(1) ひずみ集中係数 K_ε

K_ε は非弾性解析による局所ひずみと弾性解析による等価線形ひずみの比として次式で定義される。

$$K_\varepsilon = \delta \varepsilon_{I,EP} / \delta \varepsilon_{R,EL}$$

$\delta \varepsilon_{I,EP}$: 非弾性解析による局所相当ひずみ増分

$\delta \varepsilon_{R,EL}$: 弾性解析による等価線形相当ひずみ増分

(2) ひずみ集中係数 K_F

K_F は非弾性解析による局所ひずみと弾性解析による局所ひずみの比として次式で定義される。

$$K_F = \delta \varepsilon_{t,EP} / \delta \varepsilon_{t,EL}$$

$\delta \varepsilon_{t,EP}$: 非弾性解析による局所相当ひずみ増分

$\delta \varepsilon_{t,EL}$: 弾性解析による局所相当ひずみ増分

(3) ひずみ集中係数 K_n

K_n は非弾性解析による局所ひずみと弾性解析による局所ひずみの比として次式で定義される。

$$K_n = \delta \varepsilon_{n,EP} / \delta \varepsilon_{n,EL}$$

$\delta \varepsilon_{n,EP}$: 非弾性解析による等価線形相当ひずみ増分

$\delta \varepsilon_{n,EL}$: 弾性解析による等価線形相当ひずみ増分

A.2.3 弾性追従パラメータ

弾性追従パラメータは“相当塑性ひずみ増分”の“弾性・非弾性解析による相当応力増分に対応する弾性相当ひずみ増分の差”に対する比として定義される。図A.2.1に q_F 及び q_n の定義の説明図を示す。

(1) 弾性追従パラメータ q_F

q_F は局所ひずみに関する弾性追従パラメータで次式により定義される。

$$q_F = [\delta \varepsilon_{t,EP} - S(\delta \varepsilon_{t,EP})/E] / [\delta \varepsilon_{t,EL} - S(\delta \varepsilon_{t,EP})/E]$$

$$= \delta \varepsilon_{t,p} / [\delta \varepsilon_{t,EL} - S(\delta \varepsilon_{t,EP})/E]$$

$\delta \varepsilon_{t,p}$: 非弾性解析による局所相当塑性ひずみ増分

$\delta \varepsilon_{t,EP}$: 非弾性解析による局所相当ひずみ増分

$\delta \varepsilon_{t,EL}$: 弾性解析による局所相当ひずみ増分

$S(\delta \varepsilon_{t,EP})$: 非弾性解析による局所相当応力増分

E : 縦弾性係数

(2) 弾性追従パラメータ q_n

q_n は等価線形ひずみに関する弾性追従パラメータで次式により定義される。

$$q_n = [\delta \varepsilon_{n,EP} - S(\delta \varepsilon_{n,EP})/E] / [\delta \varepsilon_{n,EL} - S(\delta \varepsilon_{n,EP})/E]$$

$\delta \varepsilon_{n,EP}$: 非弾性解析による等価線形相当ひずみ増分

$\delta \varepsilon_{n,EL}$: 弾性解析による等価線形相当ひずみ増分

$S(\delta \varepsilon_{n,EP})$: 非弾性解析による等価線形相当応力増分

ここで $S(\varepsilon)$ は想定した応力・ひずみ関係である。

(3) 弾性追従パラメータ q

q_i はひずみ成分 i に関する弾性追従パラメータ⁽⁷⁾ で次式で定義される。

$$q_i = \frac{[\delta \varepsilon_{i,EL} - \delta \varepsilon_{i,EP} (\delta \sigma_{t,EP} / \delta \sigma_{t,EL})]}{[\delta \varepsilon_{i,EP} (1 - \delta \sigma_{t,EP} / \delta \sigma_{t,EL})]}$$

ここで、 $i = z_m, z_b, \theta_m, \theta_b$

z_m, z_b : 評価断面垂直方向膜・曲げ

θ_m, θ_b : 円周方向膜・曲げ

$\delta \varepsilon_{i,EL}$: 弾性解析によるひずみ成分 i の増分

$\delta \varepsilon_{i,EP}$: 弾塑性解析によるひずみ成分 i の増分

$\delta \sigma_{t,EL}$: 弾性解析による表面での相当応力増分

$\delta \sigma_{t,EP}$: 弾塑性解析による表面での相当応力増分

A.2.4 等価線形値

相当応力・相当ひずみの等価線形値は評価断面を基準とした局所座標系（断面の接線方向を r 、法線方向を z とする）に従って座標変換されたひずみ成分毎の等価線形値 $\varepsilon_{z,n}, \varepsilon_{\theta,n}, \varepsilon_{r,n}, \gamma_{r,n}$ をもとに算出している。非弾性状態における等価線形相当ひずみの定義が確立されていないため暫定的に以下の2通りの定義を用いる。

(1) 修正ミーゼスタイプ

各ひずみ成分の等価線形値よりミーゼスの式を用いて相当ひずみを算出する。ここで弾性状態における単軸との対応性から係数 $1.5/(1+\nu)$ を乗じる。また負荷レベルが増大し塑性ひずみの割合が大きくなると ν として弾性ポアソン比を用いた場合相当ひずみが過大に評価される。将来的には塑性変形の程度に応じた修正ポアソン比の導入も考えられる。

① 弾性解析

$$\varepsilon_{n,EL} = \varepsilon_{eqn,EL}$$

$$\varepsilon_{eqn,EL} = \sqrt{2/3 \times [(\varepsilon_{z,n,EL} - \varepsilon_{zn,EL})^2 + (\varepsilon_{\theta,n,EL} - \varepsilon_{\theta n,EL})^2 + (\varepsilon_{r,n,EL} - \varepsilon_{rn,EL})^2 + 3/2 \gamma_{r,n,EL}^2]} \times 1.5/(1+\nu)$$

② 弾塑性解析

$$\varepsilon_{n,EP} = \varepsilon_{eqn,EP}$$

$$\varepsilon_{eqn,EP} = \sqrt{2/3 \times [(\varepsilon_{z,n,EP} - \varepsilon_{zn,EP})^2 + (\varepsilon_{\theta,n,EP} - \varepsilon_{\theta n,EP})^2 + (\varepsilon_{r,n,EP} - \varepsilon_{rn,EP})^2 + 3/2 \gamma_{r,n,EP}^2]}$$

$$+ (\varepsilon_{\theta n, EP} - \varepsilon_{r n, EP})^2 + 3/2 \gamma_{rzn, EP}^2]^{1/2} \times 1.5 / (1 + \nu)$$

(2) ポアソン比効果タイプ

平面応力・面内ひずみ一定条件における弾塑性状態の相当ひずみに対する面外ひずみ成分の寄与はポアソン比効果を表す弾性追従パラメータを用いると面内ひずみ成分のみで表される。等価線形値として理解の容易な面内2成分を用いて等価線形相当ひずみを表す。

① 弾性解析

構造物の表面は圧力等が作用しないかぎり平面応力状態にある。また軸対称体の場合表面ではせん断ひずみは生じないことから相当ひずみ $\varepsilon_{t, EL}$ は面内方向成分 $\varepsilon_{x, EL}$, $\varepsilon_{\theta, EL}$ により次式で表される。ここで x は表面に対する接線方向を表す。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{t, EL} &= [(1 - \nu + \nu^2) (\varepsilon_{x, EL}^2 + \varepsilon_{\theta, EL}^2) \\ &\quad - (1 - 4\nu + \nu^2) \varepsilon_{x, EL} \varepsilon_{\theta, EL}]^{1/2} / (1 - \nu^2) \\ \therefore \varepsilon_{x, EL} &= -\nu (\varepsilon_{x, EL} + \varepsilon_{\theta, EL}) / (1 - \nu) \\ &\quad y \text{ は表面に対する法線方向} \end{aligned}$$

等価線形成分についても同じ条件が成立することを仮定すれば等価線形相当ひずみ $\varepsilon_{n, EL}$ は次式で表される。ここで $\varepsilon_{xn, EL}$, $\varepsilon_{\theta n, EL}$ は x 方向, θ 方向の等価線形ひずみ成分である。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{n, EL} &= [(1 - \nu + \nu^2) (\varepsilon_{xn, EL}^2 + \varepsilon_{\theta n, EL}^2) \\ &\quad - (1 - 4\nu + \nu^2) \varepsilon_{xn, EL} \varepsilon_{\theta n, EL}]^{1/2} / (1 - \nu^2) \end{aligned}$$

② 弾塑性解析

平面応力状態・面内ひずみ一定条件下で降伏が生じる場合、面外ひずみの挙動が原因で相当ひずみが弾性解析解に対し増減する現象がみられる。この現象はポアソン比効果と呼ばれ弾完全塑性体を仮定した場合相当ひずみの増減する挙動は弾性追従パラメータ q_v を用いて近似的に表すことができる。⁽⁸⁾ q_v を用いて等価線形相当ひずみ $\varepsilon_{n, EP}$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{n, EP} &= [1 + (q_v - 1) \{1 - 2\sigma_y / (E \varepsilon_{eqn})\}] \varepsilon_{eqn} \\ \varepsilon_{eqn} &= [(1 - \nu + \nu^2) (\varepsilon_{xn, EP}^2 + \varepsilon_{\theta n, EP}^2) \\ &\quad - (1 - 4\nu + \nu^2) \varepsilon_{xn, EP} \varepsilon_{\theta n, EP}]^{1/2} / (1 - \nu^2) \\ q_v &= 2(1 + \nu) / 3 \times [\{(3\mu)^2 + 3\mu^2 \delta^2\} / (1 + 3\mu^2 \delta^2)]^{1/2} \end{aligned}$$

$$\text{ここで、 } \mu = (1-\nu)/(1+\nu)$$

$$\delta = (1-\beta)/(1+\beta)$$

$$\beta = \varepsilon_{\perp n, EP} / \varepsilon_{\theta n, EP} \text{ or } \varepsilon_{\theta n, EP} / \varepsilon_{\perp n, EP}$$

$$(-1 < \beta < 1)$$

なお評価断面が表面に垂直でない場合は各ひずみ成分の等価線形値の表面での値 ($\varepsilon_{rn}, \varepsilon_{\theta n}, \gamma_{r\theta n}$) を用いて座標変換を行い $\varepsilon_{\perp n}$ を得る。

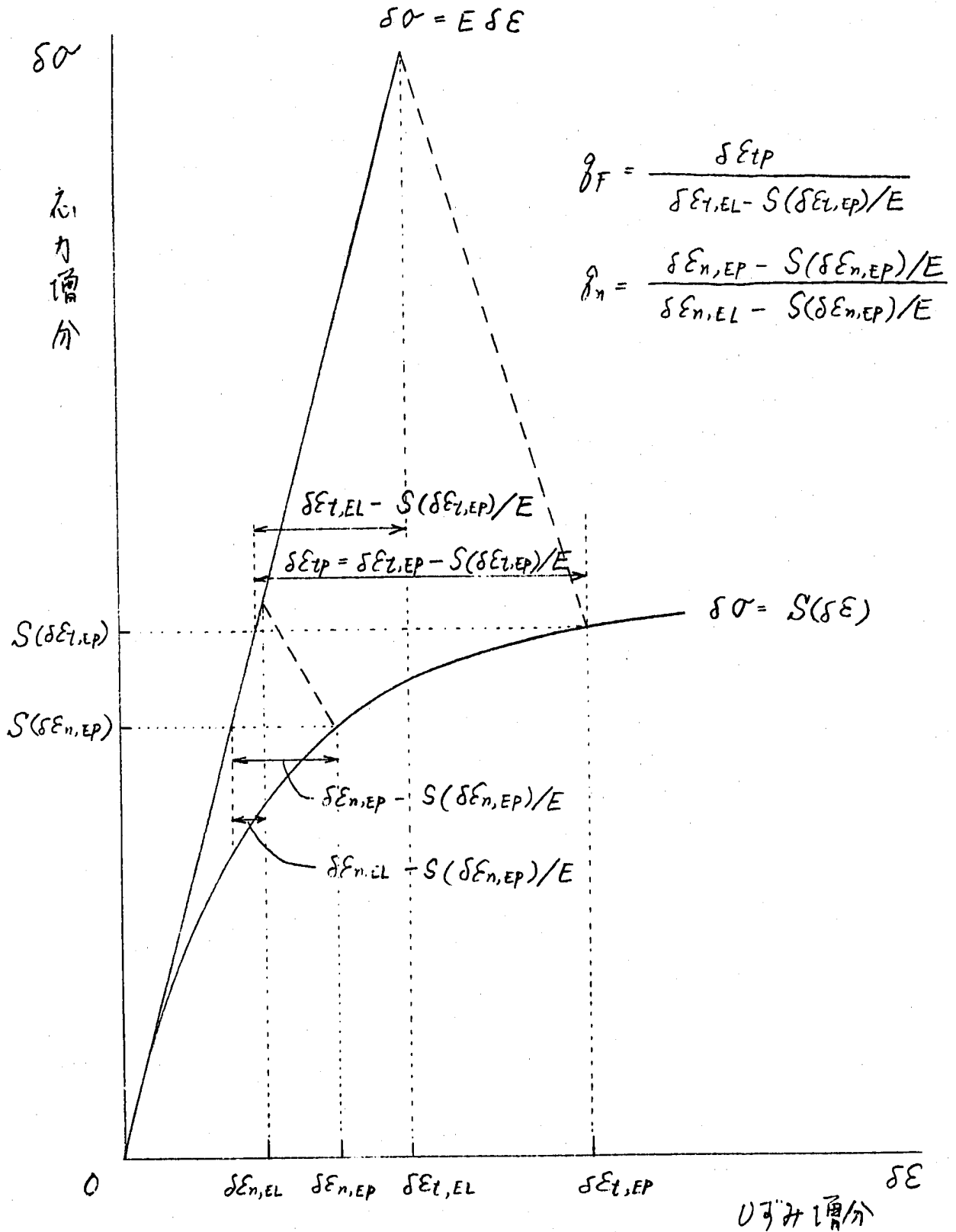


図 A.2.1 弾性追従ひき増分 $\delta \epsilon$, $\delta \epsilon_n$ の定義