

溶接容器型モデル熱過渡強度試験供試体

第3報 上部Yピースの熱応力解析とクリープ疲労強度評価

1991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)

溶接容器型モデル熱過渡強度試験供試体

第3報 上部Yピースの熱応力解析とクリープ疲労強度評価

町田秀夫* 渡士克己* 岩田耕司*

要 旨

熱過渡を受けるスカート構造では、初期に容器胴の板厚方向温度分布を主要因とする周方向応力と、それに引き続き、容器胴とスカート胴の相対的温度差を主要因とする軸方向応力が発生することが知られている。

本報は、スカート部に発生する応力（ひずみ）と物理的・解析的条件との因果関係を明らかにすることを目的とした伝熱・応力解析とクリープ疲労損傷評価結果について示すものである。評価対象は、構造物強度確性試験施設（TTS）による熱過渡強度試験に供され、現在、試験準備が進められている溶接容器型モデル供試体の上部Yピースを選択した。構造物の伝熱・応力解析には、汎用構造解析プログラム「FINAS V11.0」を用いた。合わせて、一部の解析ケースに関してはシェル理論に基づく簡易評価を行い、その適用性の検討を試みた。クリープ疲労損傷評価は、これらの伝熱・応力解析結果に基づき、構造物強度確性試験施設専用設計基準（TTS-DS）を用いて実施した。

評価結果の概要は、以下のとおりである。

- (1) 弾性解析に基づくクリープ疲労損傷評価結果は、弾塑性クリープ解析に基づく評価結果と概ね一致する。
- (2) 供試体外面の熱伝達率、温度変化幅（ $T_{max} - T_{min}$ ）、容器の板厚は、スカート付け根近傍胴部内面に発生する応力に対して影響が大きい。
- (3) 熱過渡の変化速度（ dT/dt ）は、スカート付け根近傍胴部内面に発生する応力に対して影響が小さい。
- (4) シェル理論に基づく簡易評価法は、温度分布を適切に入力することで、スカート構造に発生する応力の評価に適用できる。

* 大洗工学センター、機器構造開発部、構造工学室

Welded Vessel Model for Thermal Transient Strength Test

No.3 The Thermal Stress Analysis and Creep-fatigue Strength Evaluation of the Upper Y-junction Structure

(Consideration on several factors affecting stress-strain behavior)

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

Abstract

As is well-known, the skirt structure which suffers thermal transients has both the circumferential stress due to the radial thermal distribution along the vessel thickness in the early stage and subsequently the axial stress due to the relative temperature difference between the main vessel body and the skirt portion.

This report describes the results of the heat transfer and thermal stress analysis of the skirt structure to clarify the relationship between physical or analytical conditions and the stress (or strain) which appears on the skirt structure.

The Upper Y-junction of the Welded Vessel Model was selected for evaluation which is to be tested at Thermal Transient Test Facility for Structures (TTS). The Finite Element Nonlinear Structural Analysis System (FINAS) Version 11.0 was applied for the heat transfer and thermal stress analyses. For some analysis case, the simplified method based on shell theory was applied to investigate the adaptability for skirt structure. The TTS design standard (TTS-DS) was applied for creep-fatigue damage evaluation.

The results are roughly as follows;

- (1) Creep-fatigue evaluation results based on elastic analysis generally corresponded to that based on elastic-plastic creep analysis.
- (2) Heat transfer coefficient on the outer surface of the model, temperature range ($T_{max} - T_{min}$) and thickness of the vessel affects strongly to the stress which appears on the inner surface near the root of Y-junction.
- (3) Temperature change rate (dT/dt) scarcely affects to the stress which appears on the inner surface near the root of Y-junction.
- (4) Simplified thermal stress analysis method based on the shell theory is capable for stress evaluation of skirt structure, if temperature distribution is provided appropriately.

* Structure Engineering Section, OEC

目 次

1. まえがき	1
2. 伝熱応力解析	3
2.1 解析概要	3
2.2 解析条件	8
2.3 解析方法	24
2.4 解析結果	31
3. クリープ疲労強度評価	76
3.1 評価手法	76
3.2 損傷評価結果	79
4. 考 察	101
4.1 弾性解析と弾塑性解析	101
4.2 クリープ効果	112
4.3 塑性に対する硬化則	117
4.4 応力-ひずみ関係	124
4.5 クリープひずみ式	135
4.6 外面の熱伝達率	142
4.7 熱過渡温度変化幅	150
4.8 熱過渡温度変化速度	156
4.9 容器胴の板厚	164
4.10 簡易評価法	171
5. 結 論	181
6. 今後の課題	183
7. 参考文献	185
[付 録]	
A. 熱電対位置の温度履歴	187
B. 応力評価ラインの応力分布	216

T a b l e L i s t

Table 2.1-1	Realized analytical parameter	5
Table 2.1-2	Contents of analysis	6
Table 2.2-1	Material properties for heat transfer analysis (SUS304)	11
Table 2.2-2	Material properties for heat transfer analysis (Sodium)	11
Table 2.2-3	Material properties for thermal stress analysis (SUS304)	12
Table 2.2-4	Dynamic stress-strain curve for Case B-1	13
Table 2.2-5	Thermal transient condition (Standard Case)	14
Table 2.2-6	Thermal transient condition (Case E-1)	15
Table 2.2-7	Thermal transient condition (Case E-2)	16
Table 2.2-8	Thermal transient condition (Case F-1)	17
Table 2.2-9	Thermal transient condition (Case F-2)	18
Table 2.3-1	Steps of heat transfer analysis (Standard Case)	25
Table 2.3-2	Steps of heat transfer analysis (Case E-1)	26
Table 2.3-3	Steps of heat transfer analysis (Case E-2)	27
Table 2.3-4	Steps of heat transfer analysis (Case F-1)	28
Table 2.3-5	Steps of heat transfer analysis (Case F-2)	29
Table 2.3-6	Steps of thermal stress analysis	30
Table 2.4-1	Results of thermal stress analysis (Section-A : Inner surface)	37
Table 2.4-2	Results of thermal stress analysis (Section-A : Outer surface)	38
Table 2.4-3	Results of thermal stress analysis (Section-B : Inner surface)	39
Table 2.4-4	Results of thermal stress analysis (Section-B : Outer surface)	40

Table 3.2-1	Results of creep-fatigue damage evaluation (Section-A : Inner surface)	81
Table 3.2-2	Results of creep-fatigue damage evaluation (Section-A : Outer surface)	82
Table 3.2-3	Results of creep-fatigue damage evaluation (Section-B : Inner surface)	83
Table 3.2-4	Results of creep-fatigue damage evaluation (Section-B : Outer surface)	84
Table 4.10-1	Analytical condition for simplified method (Vessel-Cold transient)	173
Table 4.10-2	Analytical condition for simplified method (Skirt-Cold transient)	173
Table 4.10-3	Analytical condition for simplified method (Vessel-Hot transient)	173
Table 4.10-4	Analytical condition for simplified method (Skirt-Hot transient)	173

F i g u r e L i s t

Fig.2.1-1	Configuration of Welded Vessel Model	7
Fig.2.2-1	FEM model for heat transfer analysis	19
Fig.2.2-2	Layout of thermocouples	20
Fig.2.2-3	FEM model for thermal stress analysis	21
Fig.2.2-4	Boundary condition for heat transfer analysis	22
Fig.2.2-5	Boundary condition for thermal stress analysis	23
Fig.2.4-1	Stress estimation sections	41
Fig.2.4-2	Temperature contour (Standard Case)	42
Fig.2.4-3	Temperature contour (Case D-1)	44
Fig.2.4-4	Temperature contour (Case D-2)	46
Fig.2.4-5	Temperature contour (Case D-3)	48
Fig.2.4-6	Temperature contour (Case E-1)	50
Fig.2.4-7	Temperature contour (Case E-2)	52
Fig.2.4-8	Temperature contour (Case F-1)	54
Fig.2.4-9	Temperature contour (Case F-2)	56
Fig.2.4-10	Temperature contour (Case G-1)	58
Fig.2.4-11	Stress history at surface of estimation section (Standard Case - Elastic)	60
Fig.2.4-12	Stress history at surface of estimation section (Standard Case - Elasto-plastic)	61
Fig.2.4-13	Stress history at surface of estimation section (Standard Case - Elastic-plastic-creep)	62
Fig.2.4-14	Stress history at surface of estimation section (Case A-1)	63
Fig.2.4-15	Stress history at surface of estimation section (Case B-1)	64

Fig.2.4-16	Stress history at surface of estimation section (Case C-1)	66
Fig.2.4-17	Stress history at surface of estimation section (Case C-2)	67
Fig.2.4-18	Stress history at surface of estimation section (Case D-1)	68
Fig.2.4-19	Stress history at surface of estimation section (Case D-2)	69
Fig.2.4-20	Stress history at surface of estimation section (Case D-3)	70
Fig.2.4-21	Stress history at surface of estimation section (Case E-1)	71
Fig.2.4-22	Stress history at surface of estimation section (Case E-2)	72
Fig.2.4-23	Stress history at surface of estimation section (Case F-1)	73
Fig.2.4-24	Stress history at surface of estimation section (Case F-2)	74
Fig.2.4-25	Stress history at surface of estimation section (Case G-1)	75
Fig.3.1-1	Flow of TTS-DS	78
Fig.3.2-1	Creep-fatigue damage estimation lines	85
Fig.3.2-2	Creep-fatigue damage distribution (Standard Case - Elastic)	86
Fig.3.2-3	Creep-fatigue damage distribution (Standard Case - Elasto-plastic)	87
Fig.3.2-4	Creep-fatigue damage distribution (Standard Case - Elastic-plastic-creep)	88

Fig.3.2-5	Creep-fatigue damage distribution (Case A-1)	89
Fig.3.2-6	Creep-fatigue damage distribution (Case B-1)	90
Fig.3.2-7	Creep-fatigue damage distribution (Case C-1)	91
Fig.3.2-8	Creep-fatigue damage distribution (Case C-2)	92
Fig.3.2-9	Creep-fatigue damage distribution (Case D-1)	93
Fig.3.2-10	Creep-fatigue damage distribution (Case D-2)	94
Fig.3.2-11	Creep-fatigue damage distribution (Case D-3)	95
Fig.3.2-12	Creep-fatigue damage distribution (Case E-1)	96
Fig.3.2-13	Creep-fatigue damage distribution (Case E-2)	97
Fig.3.2-14	Creep-fatigue damage distribution (Case F-1)	98
Fig.3.2-15	Creep-fatigue damage distribution (Case F-2)	99
Fig.3.2-16	Creep-fatigue damage distribution (Case G-1)	100
Fig.4.1-1	Comparison of stress history between elastic and elasto- plastic analysis	104
Fig.4.1-2	Stress Behavior based on Von-Mises yield condition	106
Fig.4.1-3	Comparison of strain history between elastic and elasto- prastic analysis	107
Fig.4.1-4	Comparison of strain range and creep-fatigue damage among elastic, elasto-prastic and elastic-plastic-creep analysis	109
Fig.4.2-1	Comparison of stress history between elasto-plastic and elastic-plastic creep analysis	115
Fig.4.3-1	Comparison of stress history between kinematic and isotropic hardening rule	119
Fig.4.3-2	Comparison of strain range and creep-fatigue damage between kinematic and isotropic hardening rule	121
Fig.4.4-1	Influence of stress/strain curve on stress history	127
Fig.4.4-2	Comparison of bilinear and dynamic stress/strain curve	131

Fig.4.4-3	Influence of stress/strain curve on strain range and creep-fatigue damage	132
Fig.4.5-1	Influence of creep-strain equation on stress history	137
Fig.4.5-2	Influence of creep-strain equation on strain range and creep-fatigue damage	139
Fig.4.6-1	Influence of heat transfer coefficient on stress history	145
Fig.4.6-2	Influence of heat transfer coefficient on strain range and creep-fatigue damage	147
Fig.4.7-1	Influence of temperature range on stress history	151
Fig.4.7-2	Influence of temperature range on strain range and creep-fatigue damage	153
Fig.4.8-1	Influence of temperature change rate on stress history	159
Fig.4.8-2	Influence of temperature change rate on strain range and creep-fatigue damage	161
Fig.4.9-1	Influence of vessel thickness on stress history	166
Fig.4.9-2	Influence of vessel thickness on strain range and creep-fatigue damage	168
Fig.4.10-1	Analytical model for simplified method	174
Fig.4.10-2	Thermal distribution on surface of model	175
Fig.4.10-3	Arrangement for input of thermal loading	176
Fig.4.10-4	Results of simplified method (Cold transient)	177
Fig.4.10-5	Results of simplified method (Hot transient)	179
Fig.A-1	Layout of thermocouples	188
Fig.A-2	Temperature history at thermocouples location (Standard Case)	189
Fig.A-3	Temperature history at thermocouples location (Case D-1)	192
Fig.A-4	Temperature history at thermocouples location (Case D-2)	195
Fig.A-5	Temperature history at thermocouples location (Case D-3)	198

Fig.A-6	Temperature history at thermocouples location (Case E-1)	201
Fig.A-7	Temperature history at thermocouples location (Case E-1)	204
Fig.A-8	Temperature history at thermocouples location (Case F-1)	207
Fig.A-9	Temperature history at thermocouples location (Case F-1)	210
Fig.A-10	Temperature history at thermocouples location (Case G-1)	213
Fig.B-1	Stress estimation surfaces	217
Fig.B-2	Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic)	218
Fig.B-3	Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elasto-plastic)	224
Fig.B-4	Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic-plastic-creep)	230
Fig.B-5	Stress distribution on estimation surfaces (Case A-1)	236
Fig.B-6	Stress distribution on estimation surfaces (Case B-1)	242
Fig.B-7	Stress distribution on estimation surfaces (Case C-1)	248
Fig.B-8	Stress distribution on estimation surfaces (Case C-2)	254
Fig.B-9	Stress distribution on estimation surfaces (Case D-1)	260
Fig.B-10	Stress distribution on estimation surfaces (Case D-2)	266
Fig.B-11	Stress distribution on estimation surfaces (Case D-3)	272
Fig.B-12	Stress distribution on estimation surfaces (Case E-1)	278
Fig.B-13	Stress distribution on estimation surfaces (Case E-2)	284
Fig.B-14	Stress distribution on estimation surfaces (Case F-1)	290
Fig.B-15	Stress distribution on estimation surfaces (Case F-2)	296
Fig.B-16	Stress distribution on estimation surfaces (Case G-1)	302

1. ま え が き

従来より実施されてきた種々の検討により、熱過渡を受けるスカート構造において、スカート付け根の容器胴内面には、容器胴の板厚方向温度分布を主要因とする周方向応力及び容器胴とスカート胴の相対的温度差を主要因とする軸方向応力の発生することが知られている。面内2成分（軸方向及び周方向）の応力は、それぞれの応力発生要因が異なるために非等2軸応力場を形成する。スカート構造では、容器胴及びスカート胴自身の板厚内温度分布や軸方向温度分布に加え、容器胴とスカート胴とのモーメントの釣り合いによって応力が定まる。このため、解析的評価によって求められる応力の挙動（応力比、応力レンジ等）は、

- 熱過渡条件
- 構造物の熱通過率
- 構造物の剛性分布

等の物理的条件に加え、

- 解析の種類（弾性、非弾性）
- 解析条件（硬化則、応力-ひずみ関係、クリープひずみ速度式）

等の解析的条件によって変化する。これは、これらの条件が変化することによって容器胴とスカート胴の熱的バランス、剛性バランス、又はモーメントバランスが変化するためである。スカート構造ではこれらのバランスが複雑に関係しあって応力が定まるため、各々の条件と応力の挙動を定量的に結び付けることは非常に難しい。しかし、各々の条件が、スカート構造に発生する応力の挙動に対して潜在的に有している感度は、パラメータを適切に設定した解析、又は実験によって明らかにすることが可能である。

本報告は、これらの物理的・解析的条件をパラメータとしたスカート構造の伝熱・応力解析、及びこれらの条件とスカート構造に発生する応力の挙動についてまとめたものである。解析対象は、構造物強度確性試験施設（以下、TTSと略す）に供され、現在、試験準備が進められている溶接容器型モデル熱過渡強度試験用供試体（以下、溶接容器型モデルと呼ぶ）の上部Yピースを選択し、本供試体の設計時に設定した解析条件を基に、パラメータサーベイを実施した。

伝熱・応力解析には、汎用非線型構造解析システム『FINAS V11.0』を用いた。
解析パラメータは、上述の物理的・解析的条件を踏まえて以下のとおり設定した。

- 硬化側
- 応力-ひずみ曲線
- クリープひずみ速度式
- 供試体外面の熱伝達率
- 熱過渡温度変化幅
- 熱過渡温度変化速度
- 供試体板厚

上記パラメータに基づく解析結果から、スカート構造の伝熱特性、又は応力の挙動に対し、個々の解析パラメータが有している感度について比較・検討した。更に、これらの解析結果に基づいて、TTS専用設計基準（以下、TTS-DSと略す）を用いたクリープ疲労損傷評価を実施し、この結果に対する考察も加えた。

また、供試体の伝熱解析結果を用いてシェル理論に基づく簡易応力評価を実施した。この結果をソリッド解析結果と比較し、設計への適用性を検討した。

2. 伝熱応力解析

2.1 解析概要

熱過渡を受けるスカート構造に発生する応力に着目し、種々の物理的・解析的条件をパラメータとした伝熱・応力解析を実施した。解析対象は、TTSを用いた熱過渡強度試験の準備が進められている溶接容器型モデルの上部Yピースを選択した。溶接容器型モデルは、FBRの構造設計において課題となる典型的な形状及び応力分布をモデル化した供試体である。溶接容器型モデルの構造をFig. 2.1-1に示す。上部Yピース部はFBR原子炉構造機器の液面近傍に見られる周方向膜応力と軸方向曲げ応力から成る非等2軸応力場における、クリープ疲労に対する構造強度データを取得することを目的に設計された供試体である。

解析パラメータは、溶接容器型モデルの設計時に設定した解析条件^{1) 2)}を踏まえ、応力の発生パターンに影響を与えると考えられる物理的・解析的条件の中から以下の項目を選定した。

- ① 硬化側
- ② 応力-ひずみ曲線
- ③ クリープひずみ速度式
- ④ 供試体外面の熱伝達率
- ⑤ 熱過渡温度変化巾
- ⑥ 熱過渡温度変化速度
- ⑦ 供試体板厚

上記の解析パラメータを溶接容器型モデルの設計時に用いた解析条件を基準ケースとし、Table 2.1-1に示すように具体化した。各解析ケースと解析の実施内容をTable 2.1-2にまとめる。

伝熱解析は、基準ケース及びケースD-1～G-1に対して実施した。ケースA-1～C-2は、応力解析条件とスカート構造に発生する応力の関係を確認することを目的としたため、個々のケースに対する伝熱解析は実施せず、基準ケースの伝熱解析結果を熱応力解析の荷重条件として用いた。熱応力解析の内、ケースA-1～C-2について

は弾塑性クリープ解析のみ実施し、ケースD-1～G-1については弾性解析のみ実施した。また、基準ケースについては、弾性、弾塑性、弾塑性クリープ解析を実施した。

Table 2.1-1 Realized analytical parameter

解析ケース	硬化則	応力-歪曲線	クリープ歪速度式	外面の熱伝達率 (kcal/m-h-°C)	温度変化巾 (°C)	温度変化速度 (°C/秒)	板厚 (mm)
基準ケース	移動硬化則	バイリニア*	$\alpha_c = 1$	断熱	350	$\pm 40^{**}$	平均値
A-1	等方硬化則	"	"	"	"	"	"
B-1	移動硬化則	動的応力歪曲線	"	"	"	"	"
C-1	"	バイリニア	$\alpha_c = 3$	"	"	"	"
C-2	"	"	$\alpha_c = 5$	"	"	"	"
D-1	————	————	————	$\alpha = 0.5$	"	"	"
D-2	————	————	————	$\alpha = 1$	"	"	"
D-3	————	————	————	$\alpha = 3$	"	"	"
E-1	————	————	————	断熱	200	"	"
E-2	————	————	————	"	50	"	"
F-1	————	————	————	"	350	± 20	"
F-2	————	————	————	"	"	± 5	"
G-1	————	————	————	"	"	± 40	+1.5

* $d\varepsilon/dt = 10^{-3}/\text{sec}$ のときの応力ひずみ曲線 (FINASの材料ライブラリ)

** 入口ノズル部構造材表面の熱過渡条件

Table 2.1-2 Contents of analysis

解析ケース	伝熱 解析	熱応力解析		
		弾性	弾塑性	弾塑性クリープ
基準ケース	○	○	○	○
A-1	—	—	—	○
B-1	—	—	—	○
C-1	—	—	—	○
C-2	—	—	—	○
D-1	○	○	—	—
D-2	○	○	—	—
D-3	○	○	—	—
E-1	○	○	—	—
E-2	○	○	—	—
F-1	○	○	—	—
F-2	○	○	—	—
G-1	○	○	—	—

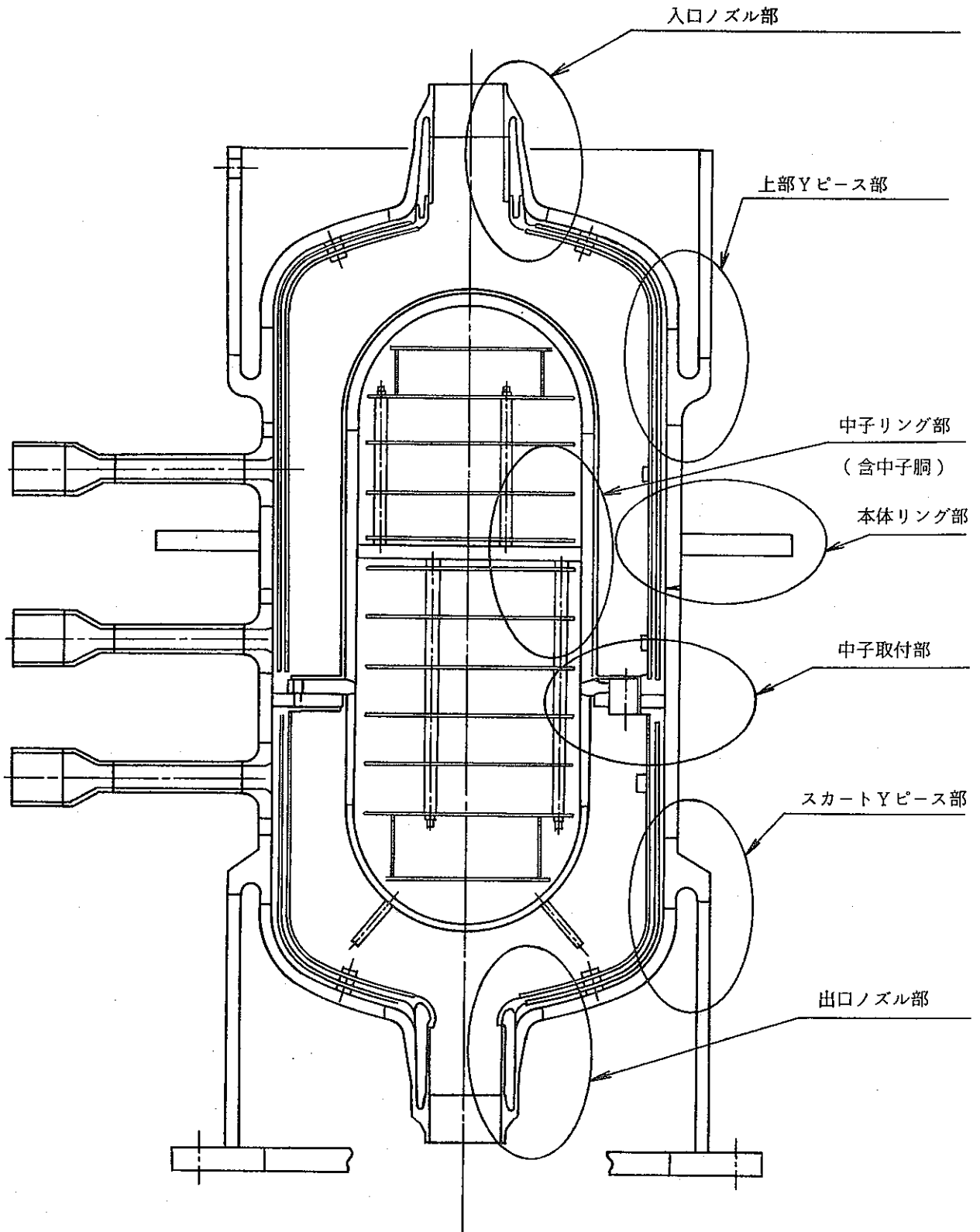


Fig.2.1-1 Configuration of Welded Vessel Model

2.2 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』を用いる。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 HQAX 8
- ・ 熱伝導 6 節点三角形軸対称要素 HTAX 6
- ・ 熱伝達 3 節点軸対称要素 FCAX 3

〔熱応力解析〕

- ・ 8 節点四辺形軸対称要素 QAX 8
- ・ 6 節点三角形軸対称要素 TAX 6

(2) 解析モデル

Fig. 2.1-1 に示す溶接容器型モデルの内、上部 Y ピースを含む上部鏡から本体リングの上部までを解析対象とした。

伝熱解析に用いた解析モデルを Fig. 2.2-1 に示す。溶接容器型モデルには、熱過渡強度試験中の温度応答を計測するために、Fig. 2.2-2 に示す通り熱電対が設置されている。伝熱解析モデルは、荷重及び構造の対称性から軸対称ソリッド要素を用いてモデル化し、熱電対設置位置に相当する点に節点を設けるようにメッシュを作成した。溶接容器型モデルのサーマルライナは板厚 6 mm × 2 枚の SUS304 製板材で、本体胴及びサーマルライナ間ギャップが、各々 6 mm となるように取付けられている。解析モデルでは、容器胴内面までの熱抵抗がこれらの構造と等価となるように、サーマルライナを板厚 12 mm × 1 枚の SUS304 の板材とし、これと容器胴の間に厚さ 12 mm のナトリウム層をモデル化した。サーマルライナと容器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。伝熱解析モデルはケース G-1 以外の全てのケースに対して共通である。ケース G-1 は、溶接容器型モデルの製作公差の上限を取って、容器胴の板厚（内径固定）のみ基準ケースの 1.5 mm 増とし、その他の寸法は基準ケースと同様とした。解析モデルの要素総数は 373（内、熱伝達要素 99）、節点総数は 929 である。

熱応力解析モデルは、伝熱解析モデルからサーマルライナ、ナトリウム及び熱伝達要素を取り除いたモデルである。熱応力解析モデルをFig.2.2-3に示す。解析モデルの要素総数は216、節点総数は751である。

(3) 材料定数

評価対象部の構造材料をSUS304とし、FINASの材料ライブラリ³⁾を用いた。また、ナトリウムについては、従来よりTTS供試体設計に用いられている材料定数⁴⁾を用いた。伝熱・応力解析に用いた材料定数をTable 2.2-1～3に示す。

尚、解析では、これらの材料定数の温度依存性を考慮している。

(4) 応力-ひずみ関係

応力-ひずみ関係は、ケースB-1の動的応力-ひずみ関係を除き、FINASのライブラリに登録されている2直線近似した応力-ひずみ関係(単調)を最大想定ひずみレベルを1%として用いた。ケースB-1の解析に用いた動的応力-ひずみ関係⁵⁾は熱過渡の平均温度である425°Cの条件で算出したものを多直線近似して用いた。解析の入力とした動的応力-ひずみ関係をTable 2.2-4に示す。

(5) クリープに関する硬化則

クリープに関する硬化則は、弾塑性クリープ解析を実施するすべての解析ケースに対してひずみ硬化則を用いた。

(6) 熱過渡条件

熱過渡条件は、溶接容器型モデルの設計時に設定した上部Yピース部の熱過渡条件を基準ケースとした。ケースE-1、2及びF-1、2以外の伝熱解析で用いる熱過渡条件は、この基準ケースの熱過渡条件と同様である。

ケースE-1、E-2は、基準ケースにおける熱過渡の温度落差350°Cを、それぞれ200°C、及び50°Cに変更したケースである。これらの熱過渡は、時間軸を基準ケースと同様とし、温度変化を次式で補正したものである。

$$T_E = 600 - \{ (600 - T_N) \Delta T_E / 350 \}$$

ここで、 T_E : ケースEのトランジェント温度 (°C)

T_N : 基準ケースのトランジェント温度 (°C)

ΔT_E : ケースEの温度落差 (°C)

また、ケースF-1、F-2は基準ケースにおける熱過渡の温度変化速度を、それぞれ1/2、1/8としたケースである。これらの熱過渡は、温度落差については基準ケースと同様とし、時間軸を基準ケースの2倍及び8倍に補正した。また、熱過渡の保持時間も、時間軸の補正に合わせ、それぞれ基準ケースの2倍及び8倍とした。上記の要領で設定した熱過渡条件をTable 2.2-5~9に示す。表中の熱過渡領域は、Fig. 2.2-4に示す熱過渡領域と対応している。

(7) 境界条件

a. 熱的境界条件

Fig. 2.2-4 に伝熱解析に用いた熱的境界条件を示す。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。供試体外面は、ケースD-1~3を除いて断熱とした。ケースD-1~3では、供試体外部の雰囲気温度を50℃一定とし、供試体外面からこの雰囲気への熱伝達を入力した。

b. 幾何学的境界条件

Fig. 2.2-5 に熱応力解析に用いた幾何学的境界条件を示す。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、上部鏡側端部に連続条件、モデル下端に対称条件を設定した。

Table 2.2-1 Material properties for heat transfer analysis (SUS304)

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 2.2-2 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 (SUS304)

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

Table 2.2-4 Dynamic stress-strain curve for Case B-1

Temp=425°C

応力 (kg/mm ²)	塑性ひずみ (mm/mm)	H' (kg/mm ²)
9.70	0.00000	48453
12.12	0.00005	18909
13.06	0.00010	14319
13.78	0.00015	11969
14.38	0.00020	9953
15.37	0.00030	8320
16.21	0.00040	7285
16.93	0.00050	6553
17.59	0.00060	6001
18.19	0.00070	5566
18.75	0.00080	5212
19.27	0.00090	4916
19.76	0.00100	4555
20.67	0.00120	4172
21.50	0.00140	3869
22.28	0.00160	3623
23.00	0.00180	3417
23.69	0.00200	3131
25.25	0.00250	2817
26.66	0.00300	2579
27.95	0.00350	2392
29.15	0.00400	2176
31.32	0.00500	1958
33.28	0.00600	1793
35.07	0.00700	1663
36.74	0.00800	1557
38.29	0.00900	1469
39.76	0.01000	1393
41.16	0.01100	1328
42.48	0.01200	1272
43.76	0.01300	1221
44.98	0.01400	1176
46.15	0.01500	1136
47.29	0.01600	1082
49.45	0.01800	1021
51.50	0.02000	969
53.43	0.02200	913
56.17	0.02500	842
60.38	0.03000	771
64.23	0.03500	715
67.81	0.04000	650

Table 2.2-5 Thermal transient condition (Standard Case)

熱過渡領域①*		熱過渡領域②*	
経過時間 (sec)	温度 (°C)	経過時間 (sec)	温度 (°C)
Cold	0	0	600.000
	6	6	600.000
	14	10	550.000
	40	40	430.000
	86	90	355.000
	140	140	320.000
	190	190	305.000
	266	265	290.000
	465	465	270.000
	800	800	260.000
	1023	1135	250.000
	3600	3600	250.000
	Hot	5	8
8		25	395.000
15		60	500.000
25		84	533.000
30		135	552.000
40		184	560.000
58		360	568.000
85		460	580.000
136		800	593.000
200		983	600.000
400		7200	600.000
600			
800			
1200			
7200			

* Fig. 2.2-4に定義する熱過渡領域番号に対応する

Table 2.2-6 Thermal transient condition (Case E-1)

熱過渡領域①*		熱過渡領域②*		
経過時間 (sec)	温度 (°C)	経過時間 (sec)	温度 (°C)	
Cold	0	0	600.000	
	6	6	600.000	
	14	10	571.429	
	40	40	502.857	
	86	90	460.000	
	140	140	440.000	
	190	190	431.429	
	266	265	422.857	
	465	465	411.429	
	800	800	405.714	
	1023	400.000	1135	400.000
	3600	400.000	3600	400.000
	Hot	5	Hot 8	400.000
8		25	436.571	
15		60	457.143	
25		84	485.714	
30		135	500.000	
40		184	520.000	
58		360	542.857	
85		460	560.000	
136		800	568.571	
200		983	574.286	
400		7200	582.857	
600			591.429	
800			594.286	
1200			600.000	
7200			600.000	

* Fig. 2.2-4に定義する熱過渡領域番号に対応する

Table 2.2-7 Thermal transient condition (Case E-2)

熱過渡領域①*		熱過渡領域②*		
経過時間 (sec)	温度 (°C)	経過時間 (sec)	温度 (°C)	
Cold	0	600.000	0	600.000
	6	600.000	Cold 6	600.000
	14	592.857	10	592.857
	40	578.571	40	575.714
	86	567.143	90	565.000
	140	561.429	140	560.000
	190	558.571	190	557.857
	266	556.429	265	555.714
	465	553.571	465	552.857
	800	551.429	800	551.429
	1023	550.000	1135	550.000
Hot	3600	550.000	3600	550.000
	5	550.000	Hot 8	550.000
	8	559.143	25	570.714
	15	564.286	60	585.714
	25	571.429	84	590.429
	30	575.000	135	593.143
	40	580.000	184	594.286
	58	585.714	360	595.429
	85	590.000	460	597.143
	136	592.143	800	599.000
	200	593.571	983	600.000
	400	595.714	7200	600.000
	600	597.857		
	800	598.571		
	1200	600.000		
	7200	600.000		

* Fig. 2.2-4に定義する熱過渡領域番号に対応する

Table 2.2-8 Thermal transient condition (Case F-1)

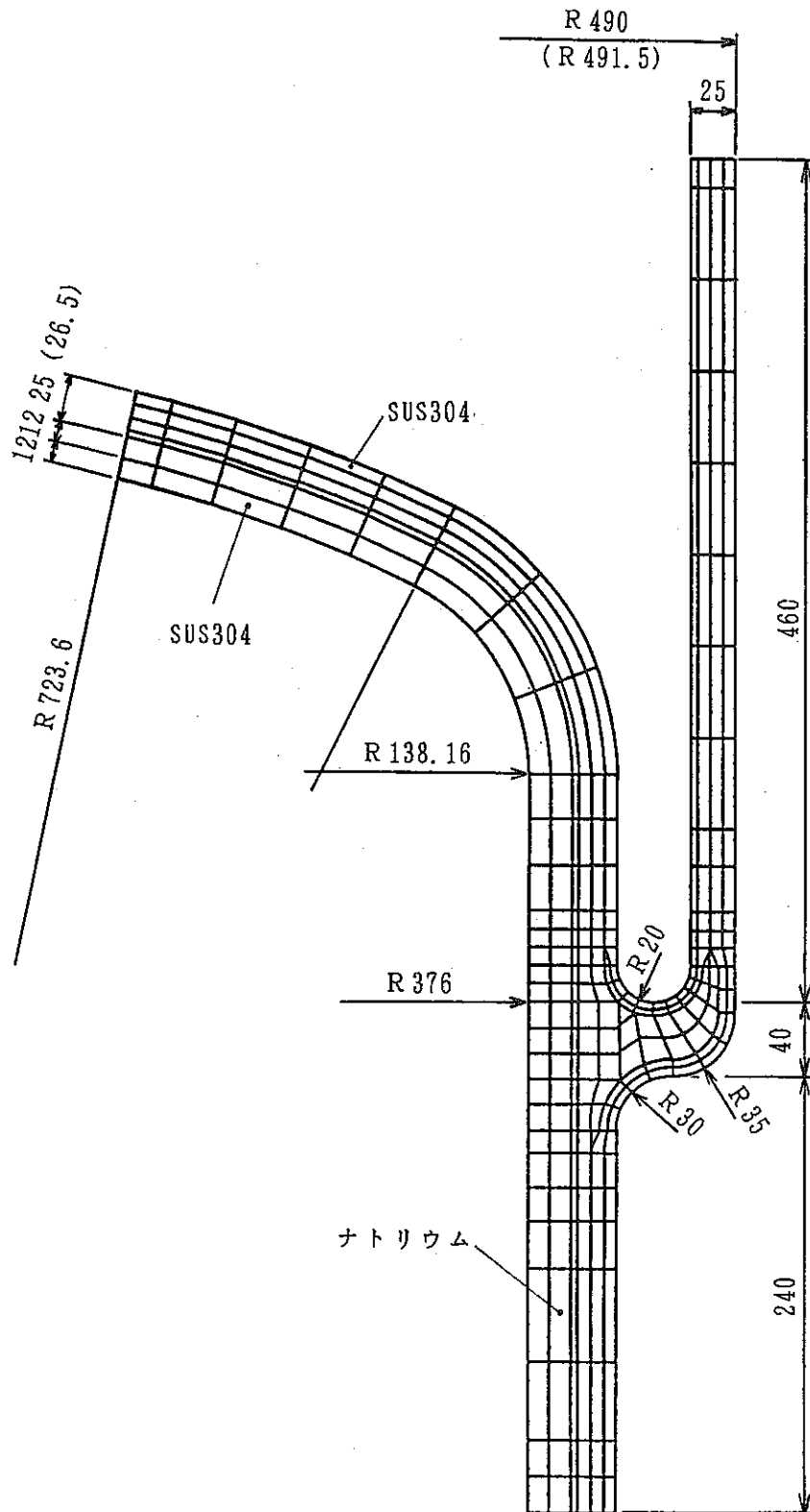
熱過渡領域 ①*		熱過渡領域 ②*		
経過時間 (sec)	温度 (°C)	経過時間 (sec)	温度 (°C)	
Cold	0	600.000	0	600.000
	12	600.000	Cold 12	600.000
	28	550.000	20	550.000
	80	450.000	80	430.000
	172	370.000	180	355.000
	280	330.000	280	320.000
	380	310.000	380	305.000
	532	295.000	530	290.000
	930	275.000	930	270.000
	1600	260.000	1600	260.000
	2046	250.000	2270	250.000
	7200	250.000	7200	250.000
	Hot	10	250.000	Hot 16
16		314.000	50	395.000
30		350.000	120	500.000
50		400.000	168	533.000
60		425.000	270	552.000
80		460.000	368	560.000
116		500.000	720	568.000
170		530.000	920	580.000
272		545.000	1600	593.000
400		555.000	1966	600.000
800		570.000	14400	600.000
1200		585.000		
1600		590.000		
2400		600.000		
14400		600.000		

* Fig. 2.2-4に定義する熱過渡領域番号に対応する

Table 2.2-9 Thermal transient condition (Case F-2)

熱過渡領域①*		熱過渡領域②*	
経過時間 (sec)	温度 (°C)	経過時間 (sec)	温度 (°C)
	600.000		600.000
Cold 0		Cold 0	
48	600.000	48	600.000
112	550.000	80	550.000
320	450.000	320	430.000
688	370.000	720	355.000
1120	330.000	1120	320.000
1520	310.000	1520	305.000
2128	295.000	2120	290.000
3720	275.000	3720	270.000
6400	260.000	6400	260.000
8184	250.000	9080	250.000
28800	250.000	28800	250.000
Hot 40	250.000	Hot 64	250.000
64	314.000	200	395.000
120	350.000	480	500.000
200	400.000	672	533.000
240	425.000	1080	552.000
320	460.000	1472	560.000
464	500.000	2880	568.000
680	530.000	3680	580.000
1088	545.000	6400	593.000
1600	555.000	7864	600.000
3200	570.000	57600	600.000
4800	585.000		
6400	590.000		
9600	600.000		
57600	600.000		

* Fig. 2.2-4に定義する熱過渡領域番号に対応する



() 内の寸法はCASE G-1の値

Fig.2.2-1 FEM model for heat transfer analysis

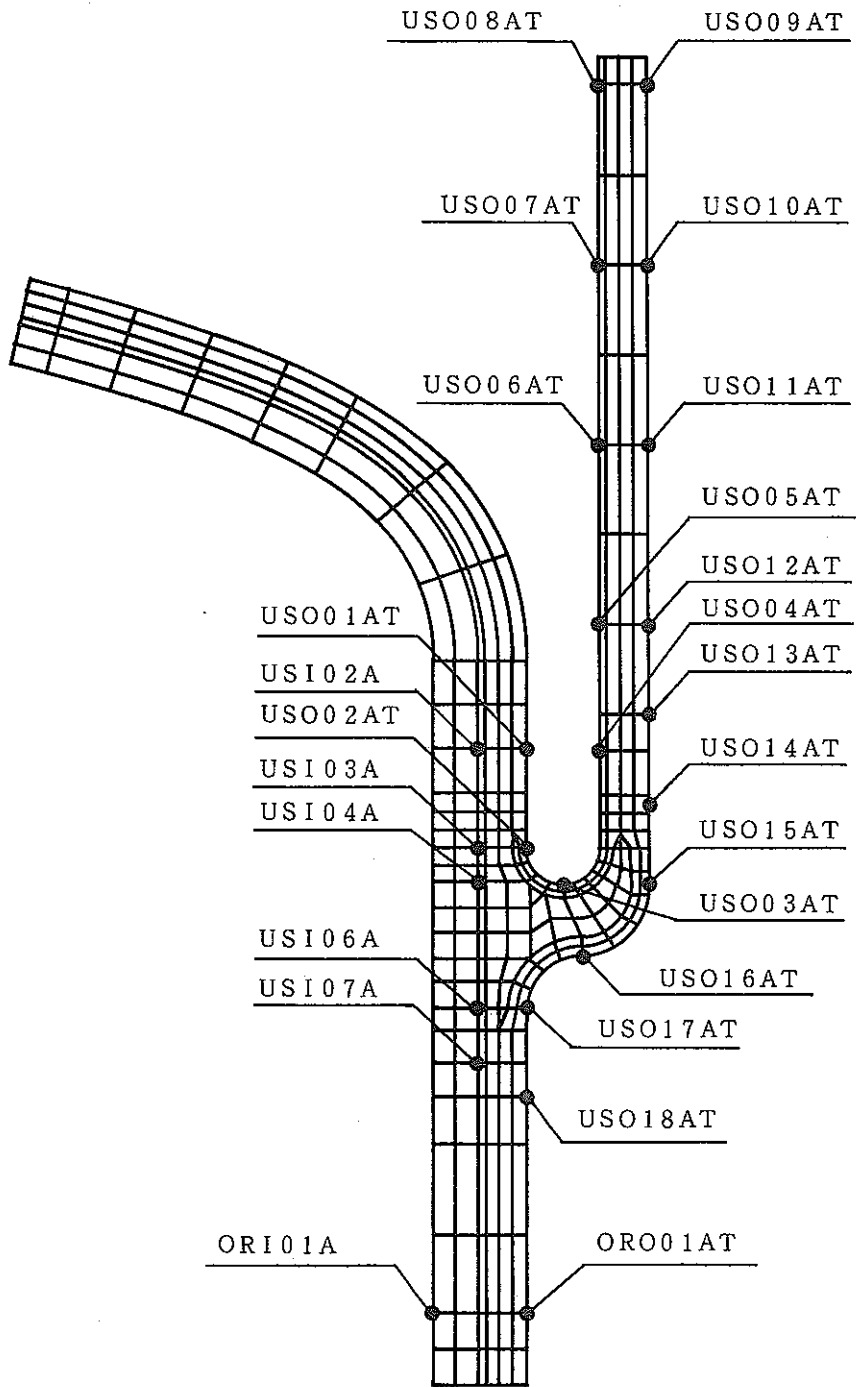
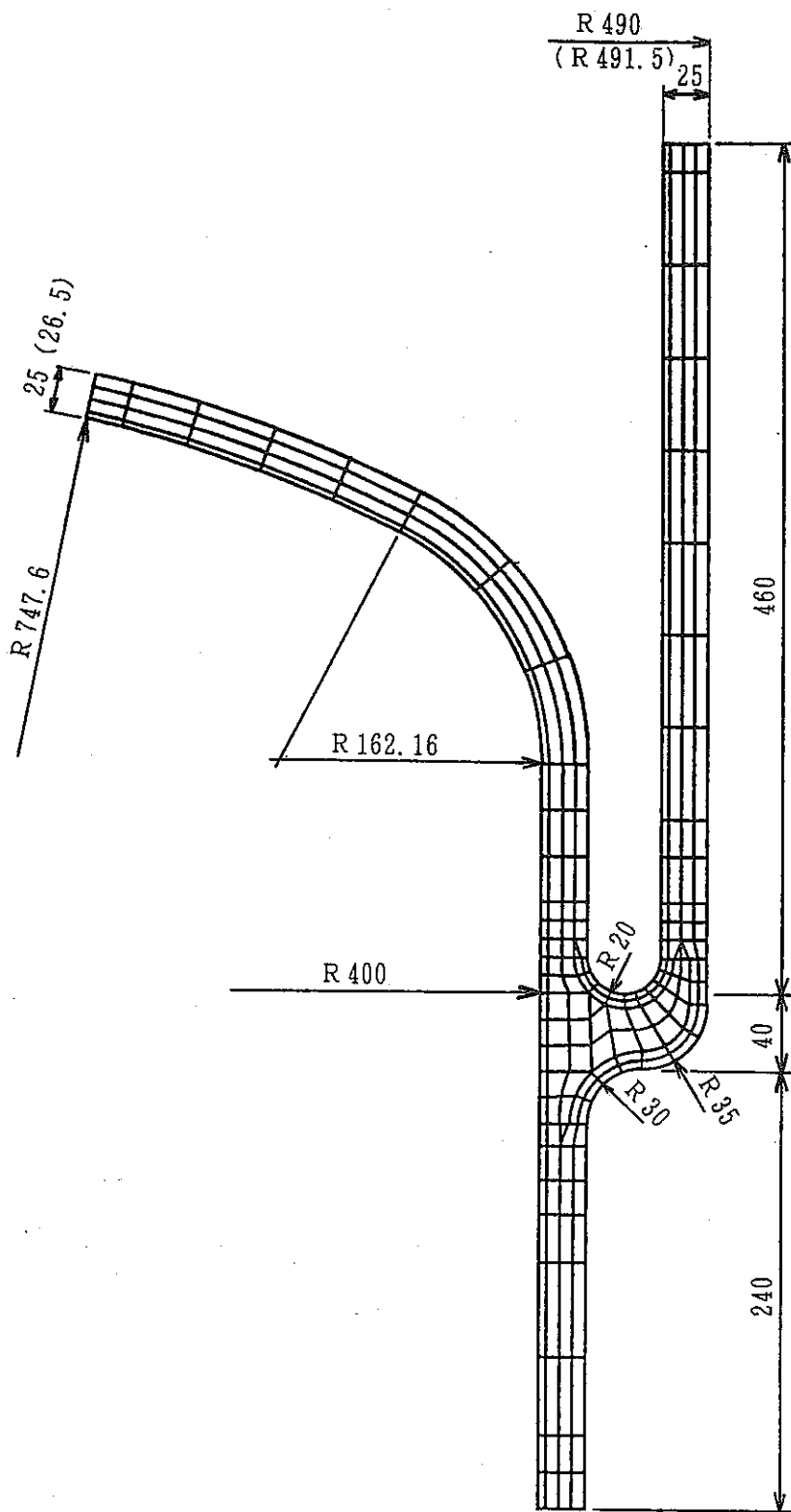
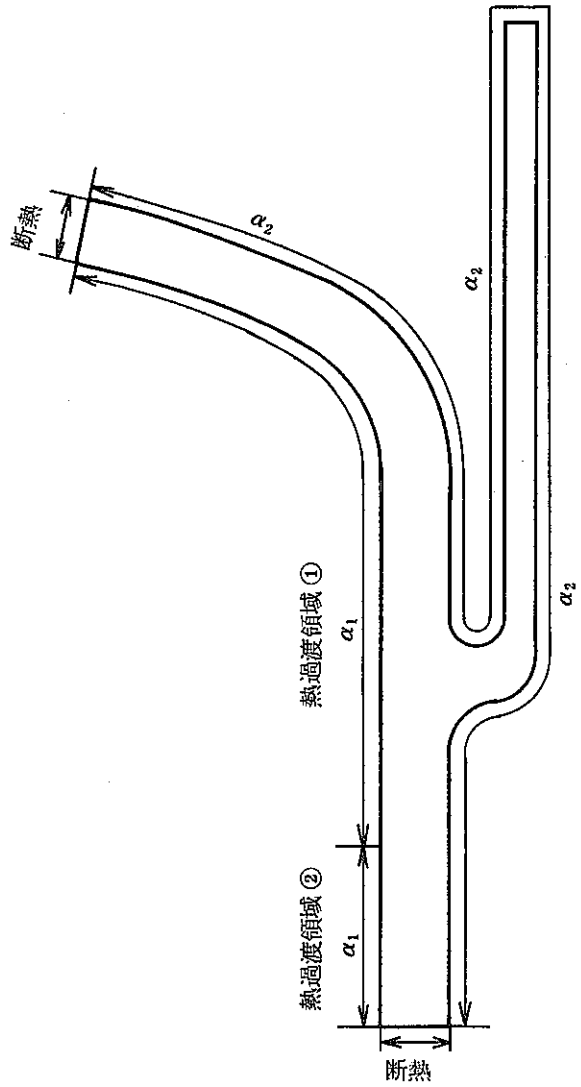


Fig. 2.2-2 Layout of thermocouples



() 内の寸法はCASE G-1の値

Fig.2.2-3 FEM model for thermal stress analysis



熱 伝 達 率

(kcal/m²-hr-°C)

	α_1	α_2			
		D-1	D-2	D-3	それ以外
熱伝達率	5000	0.5	1.0	3.0	0.0

Fig.2.2-4 Boundary condition for heat transfer analysis

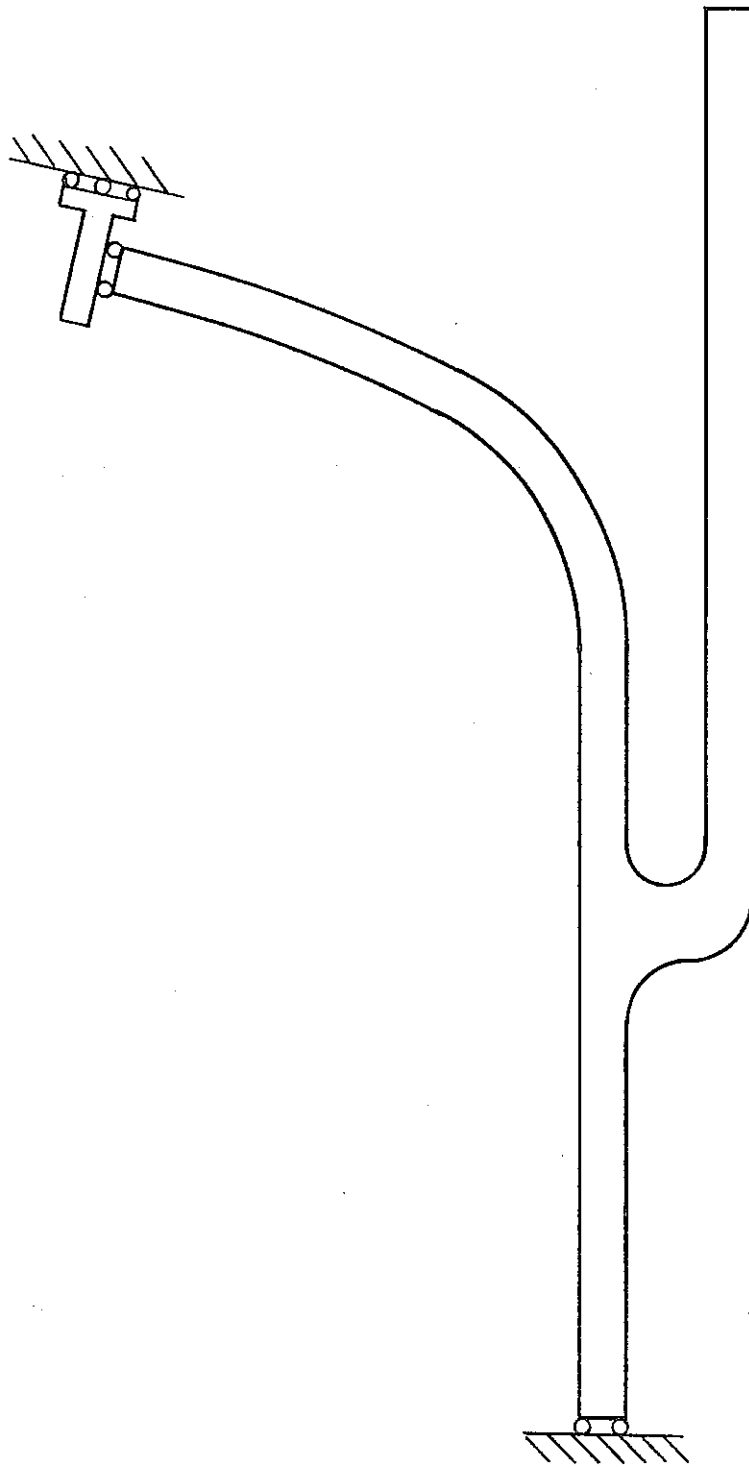


Fig. 2.2-5 Boundary condition for thermal stress analysis

2.3 解析方法

(1) 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、Table 2.2-4~8に示す熱過渡をコールド→ホットの順で4サイクル（計 287ステップ）繰り返し入力した。最終サイクルの解析ステップと経過時間及び熱過渡のデジタル値をTable 2.3-1~5に示す。

(2) 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荷重条件として用いる。

弾性熱応力解析では、伝熱解析の最終サイクル（119 ステップ）の構造物の温度分布から24ステップの伝熱解析結果を選択し、これらを熱荷重条件とした熱応力解析をコールド⇒ホットの順で熱過渡1サイクル分実施した。伝熱解析の計算ステップと熱応力解析の計算ステップの対応をTable 2.3-6に示す。

ケースB-1を除く弾塑性及び弾塑性クリープ解析では、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。FINASでは、動的応力ひずみ曲線を用いた場合には、除荷過程の応力-ひずみ関係が適切でなくなるため（負荷時の塑性ひずみに対する応力-ひずみ曲線の加工硬化係数 H' が除荷時の塑性ひずみに対してそのまま用いられる）、ケースB-1では、コールドトランジェントとホットトランジェント時の熱応力を別々に解析した。

弾塑性クリープ解析において、コールドトランジェント開始からホットトランジェント開始後 100秒間は、クリープ効果が顕著でないことからクリープ解析は実施せずに弾塑性解析のみ実施した。ホットトランジェント開始後 100秒からコールドトランジェント開始までは、伝熱解析1ステップに対して5ステップの弾塑性クリープ解析を実施した。

Table 2.3-1 Steps of heat transfer analysis (Standard Case)

解析ステップ	経過時間		熱 過 渡	熱 過 渡
	(sec)		領 域 ①	領 域 ②
		(°C)	(°C)	
169	Cold	0.0	600.000	600.000
170		6.0	600.000	600.000
175		10.0	575.000	550.000
178		14.0	550.000	534.000
189		40.0	450.000	430.000
193		60.0	415.217	400.000
198		86.0	370.000	361.000
199		90.0	367.037	355.000
202		120.0	344.814	334.000
204		140.0	330.000	320.000
206		190.0	310.000	305.000
208		265.0	295.197	290.000
209		266.0	295.000	289.900
210		300.0	291.583	286.500
212		465.0	275.000	270.000
213		600.0	268.955	265.970
214		800.0	260.000	260.000
215		1023.0	250.000	253.343
216		1135.0	250.000	250.000
217		1200.0	250.000	250.000
219		1800.0	250.000	250.000
222		3600.0	250.000	250.000
223	Hot	5.0	250.000	250.000
230		8.0	314.000	250.000
236		15.0	350.000	309.706
245		25.0	400.000	395.000
248		30.0	425.000	410.000
252		40.0	460.000	440.000
258		58.0	500.000	494.000
259		60.0	502.222	500.000
263		85.0	530.000	530.555
264		87.0	530.588	533.000
266		120.0	540.294	546.062
267		135.0	544.706	552.000
268		136.0	545.000	552.163
269		184.0	552.500	560.000
270		200.0	555.000	560.727
271		300.0	562.500	565.272
272		360.0	567.000	568.000
273		400.0	570.000	572.800
274		460.0	574.000	580.000
276		600.0	585.000	585.353
277		800.0	590.000	593.000
278		983.0	594.575	600.000
279		1200.0	600.000	600.000
281		1800.0	600.000	600.000
284		3600.0	600.000	600.000
287		7200.0	600.000	600.000

(注) 熱過渡領域番号はFig. 2.2-4に対応する

Table 2.3-2 Steps of heat transfer analysis (Case E-1)

解析ステップ	経過時間 (sec)	熱 領	過 域 (°C)	渡 ①	熱 領	過 域 (°C)	渡 ②
169	Cold 0.0	600.000			600.000		
170	6.0	600.000			600.000		
175	10.0	585.714			571.429		
178	14.0	571.429			562.286		
189	40.0	514.286			502.857		
193	60.0	494.410			485.714		
198	86.0	468.571			463.429		
199	90.0	466.878			460.000		
202	120.0	454.179			448.000		
204	140.0	445.714			440.000		
206	190.0	434.286			431.429		
208	265.0	425.827			422.857		
209	266.0	425.714			422.800		
210	300.0	423.762			420.857		
212	465.0	414.286			411.429		
213	600.0	410.831			409.126		
214	800.0	405.714			405.714		
215	1023.0	400.000			401.910		
216	1135.0	400.000			400.000		
217	1200.0	400.000			400.000		
219	1800.0	400.000			400.000		
222	3600.0	400.000			400.000		
223	Hot 5.0	400.000			400.000		
230	8.0	436.571			400.000		
236	15.0	457.143			434.118		
245	25.0	485.714			482.857		
248	30.0	500.000			491.429		
252	40.0	520.000			508.571		
258	58.0	542.857			539.429		
259	60.0	544.127			542.857		
263	85.0	560.000			560.317		
264	87.0	560.336			561.714		
266	120.0	565.877			569.178		
267	135.0	568.403			572.571		
268	136.0	568.571			572.665		
269	184.0	572.857			577.143		
270	200.0	574.286			577.558		
271	300.0	578.571			580.155		
272	360.0	581.143			581.714		
273	400.0	582.857			584.457		
274	460.0	585.429			588.571		
276	600.0	591.429			591.630		
277	800.0	594.286			596.000		
278	983.0	596.900			600.000		
279	1200.0	600.000			600.000		
281	1800.0	600.000			600.000		
284	3600.0	600.000			600.000		
287	7200.0	600.000			600.000		

(注) 熱過渡領域番号はFig. 2.2-4に対応する

Table 2.3-3 Steps of heat transfer analysis (Case E-2)

解析ステップ	経過時間 (sec)	熱過渡 領域① (°C)	熱過渡 領域② (°C)
169	Cold 0.0	600.000	600.000
170	6.0	600.000	600.000
175	10.0	596.429	592.857
178	14.0	592.857	590.571
189	40.0	578.571	575.714
193	60.0	573.602	571.429
198	86.0	567.143	565.857
199	90.0	566.720	565.000
202	120.0	563.545	562.000
204	140.0	561.429	560.000
206	190.0	558.571	557.857
208	265.0	556.467	555.714
209	266.0	556.429	555.700
210	300.0	555.940	555.214
212	465.0	553.571	552.857
213	600.0	552.708	552.281
214	800.0	551.429	551.429
215	1023.0	550.000	550.478
216	1135.0	550.000	550.000
217	1200.0	550.000	550.000
219	1800.0	550.000	550.000
222	3600.0	550.000	550.000
223	Hot 5.0	550.000	550.000
230	8.0	559.143	550.000
236	15.0	564.286	558.529
245	25.0	571.429	570.714
248	30.0	575.000	572.857
252	40.0	580.000	577.143
258	58.0	585.714	584.857
259	60.0	586.032	585.714
263	85.0	590.000	590.079
264	87.0	590.084	590.429
266	120.0	591.469	592.295
267	135.0	592.101	593.143
268	136.0	592.143	593.166
269	184.0	593.214	594.286
270	200.0	593.571	594.390
271	300.0	594.643	595.039
272	360.0	595.286	595.429
273	400.0	595.714	596.114
274	460.0	596.357	597.143
276	600.0	597.857	597.908
277	800.0	598.571	599.000
278	983.0	599.225	600.000
279	1200.0	600.000	600.000
281	1800.0	600.000	600.000
284	3600.0	600.000	600.000
287	7200.0	600.000	600.000

(注) 熱過渡領域番号はFig. 2.2-4に対応する

Table 2.3-4 Steps of heat transfer analysis (Case F-1)

解析ステップ	経過時間 (sec)	熱 過 渡 領 域 ① (°C)	熱 過 渡 領 域 ② (°C)
169	Cold 0.0	600.000	600.000
170	12.0	600.000	600.000
175	20.0	585.714	571.429
178	28.0	571.429	562.286
189	80.0	514.286	502.857
193	120.0	494.410	485.714
198	172.0	468.571	463.429
199	180.0	466.878	460.000
202	240.0	454.179	448.000
204	280.0	445.714	440.000
206	380.0	434.286	431.429
208	530.0	425.827	422.857
209	532.0	425.714	422.800
210	600.0	423.762	420.857
212	930.0	414.286	411.429
213	1200.0	410.831	409.126
214	1600.0	405.714	405.714
215	2046.0	400.000	401.910
216	2270.0	400.000	400.000
217	2400.0	400.000	400.000
219	3600.0	400.000	400.000
222	7200.0	400.000	400.000
223	Hot 10.0	400.000	400.000
230	16.0	436.571	400.000
236	30.0	457.143	434.118
245	50.0	485.714	482.857
248	60.0	500.000	491.429
252	80.0	520.000	508.571
258	116.0	542.857	539.429
259	120.0	544.127	542.857
263	170.0	560.000	560.317
264	174.0	560.336	561.714
266	240.0	565.877	569.178
267	270.0	568.403	572.571
268	272.0	568.571	572.665
269	368.0	572.857	577.143
270	400.0	574.286	577.558
271	600.0	578.571	580.155
272	720.0	581.143	581.714
273	800.0	582.857	584.457
274	920.0	585.429	588.571
276	1200.0	591.429	591.630
277	1600.0	594.286	596.000
278	1966.0	596.900	600.000
279	2400.0	600.000	600.000
281	3600.0	600.000	600.000
284	7200.0	600.000	600.000
287	14400.0	600.000	600.000

(注) 熱過渡領域番号はFig. 2.2-4に対応する

Table 2.3-5 Steps of heat transfer analysis (Case F-2)

解析ステップ	経過時間 (sec)	熱 領 過 域 ① (°C)	熱 領 過 域 ② (°C)
169	Cold 0.0	600.000	600.000
170	48.0	600.000	600.000
175	80.0	585.714	571.429
178	112.0	571.429	562.286
189	320.0	514.286	502.857
193	480.0	494.410	485.714
198	688.0	468.571	463.429
199	720.0	466.878	460.000
202	960.0	454.179	448.000
204	1120.0	445.714	440.000
206	1520.0	434.286	431.429
208	2100.0	425.827	422.857
209	2128.0	425.714	422.800
210	2400.0	423.762	420.857
212	3720.0	414.286	411.429
213	4800.0	410.831	409.126
214	6400.0	405.714	405.714
215	8184.0	400.000	401.910
216	9080.0	400.000	400.000
217	9600.0	400.000	400.000
219	14400.0	400.000	400.000
222	28800.0	400.000	400.000
223	Hot 40.0	400.000	400.000
230	64.0	436.571	400.000
236	120.0	457.143	434.118
245	200.0	485.714	482.857
248	240.0	500.000	491.429
252	320.0	520.000	508.571
258	464.0	542.857	539.429
259	480.0	544.127	542.857
263	680.0	560.000	560.317
264	696.0	560.336	561.714
266	960.0	565.877	569.178
267	1080.0	568.403	572.571
268	1088.0	568.571	572.665
269	1472.0	572.857	577.143
270	1600.0	574.286	577.558
271	2400.0	578.571	580.155
272	2880.0	581.143	581.714
273	3200.0	582.857	584.457
274	3680.0	585.429	588.571
276	4800.0	591.429	591.630
277	6400.0	594.286	596.000
278	7864.0	596.900	600.000
279	9600.0	600.000	600.000
281	14400.0	600.000	600.000
284	28800.0	600.000	600.000
287	57600.0	600.000	600.000

(注) 熱過渡領域番号はFig. 2.2-4に対応する

Table 2.3-6 Steps of thermal stress analysis

応力解析 ステップ番号	伝熱解析 ステップ番号	経過時間 基準ケース (sec)	経過時間 ケースF-1 (sec)	経過時間 ケースF-2 (sec)
1	169	Cold 0.0	Cold 0.0	Cold 0.0
2	191	50.0	100.0	400.0
3	200	100.0	200.0	800.0
4	204	140.0	280.0	1120.0
5	206	190.0	380.0	1520.0
6	208	265.0	530.0	2120.0
7	210	300.0	600.0	2400.0
8	213	600.0	1200.0	4800.0
9	215	1023.0	2046.0	8184.0
10	217	1200.0	2400.0	9600.0
11	219	1800.0	3600.0	14400.0
12	221	3000.0	6000.0	24000.0
13	222	3600.0	7200.0	28800.0
14	252	Hot 40.0	Hot 80.0	Hot 320.0
15	263	85.0	170.0	680.0
16	266	120.0	240.0	960.0
17	268	136.0	272.0	1088.0
18	270	200.0	400.0	1600.0
19	272	360.0	720.0	2880.0
20	274	460.0	920.0	3680.0
21	276	600.0	1200.0	4800.0
22	279	1200.0	2400.0	9600.0
23	281	1800.0	3600.0	14400.0
24	283	3000.0	6000.0	24000.0

2.4 解析結果

応力解析結果から、解析モデルの内外表面においてひずみが集中する点を結び、Fig. 2.4-1 に示す評価断面を設定した。以下にこれらの評価断面に着目した、伝熱・応力解析結果をまとめる。

(1) 伝熱解析結果

伝熱解析結果として、各解析ケースの温度コンタをFig. 2.4-2 ～10に示す。尚、熱電対布設位置における温度応答を参考として付録Aにまとめる。

伝熱解析結果の概要を以下に示す。

a. 基準ケース

- コールドトランジェント開始時
 - ・ 容器胴一般部の温度は、ほぼ一定となっている。
 - ・ スカート胴には若干の軸方向温度勾配が残っている。
- コールドトランジェント開始後100秒
 - ・ 容器胴に板厚方向の温度勾配が発生する。特に、スカート付け根部で顕著となる。
 - ・ スカート胴の温度は殆ど応答していない。
- コールドトランジェント開始後600秒
 - ・ 容器胴一般部の板厚方向温度勾配は緩和する。
 - ・ スカート付け根部の温度勾配は100秒後に比べて大きくなる。
 - ・ スカート胴の温度も若干応答している。
 - ・ 容器胴とスカート胴の相対的温度差が大きくなる。
- コールドトランジェント開始後1,023秒
 - ・ 容器胴の板厚方向温度勾配は、ほぼ解消する。
 - ・ スカート付け根部の温度勾配は 600秒後に比べて緩和するが、容器胴に比べて緩和速度が遅い。
- ホットトランジェント開始時
 - ・ コールドトランジェント開始時と同様に、容器胴には板厚方向温度勾配は残らない。

- スカート胴には、コールドトランジェント開始時に比べて大きな軸方向温度勾配が残る。
- ホットトランジェント開始後120秒
 - 容器胴の板厚方向に大きな温度勾配が見られる。
 - スカート付け根部には、コールドトランジェントと違い大きな温度勾配が見られない。
- ホットトランジェント開始後600秒
 - コールドトランジェントの場合と同様に、容器胴の板厚方向温度勾配は緩和する。
 - 温度勾配はスカートの付け根に大きく発生する。ただし、この温度勾配もコールドトランジェントの場合に比べて小さい。
- ホットトランジェント開始後1,000秒
 - 容器胴の板厚方向温度勾配はほぼ解消する。
 - スカート付け根の温度勾配も600秒後に比べて緩和する。
- b. ケースD-1～D-3
 - コールドトランジェント時
 - 容器胴の温度推移は基準ケースと同等である。
 - スカート胴の軸方向温度勾配は外面の熱伝達率に従って大きくなり、スカート胴の絶対的溫度は低下する。
 - スカート付け根部の温度勾配は、外面の熱伝達率に従って減少する。
 - ホットトランジェント時
 - コールドトランジェント時と同様に、容器胴の温度推移は基準ケースと同等である。
 - スカート胴の軸方向温度勾配は外面の熱伝達率に従って小さくなり、スカートの絶対的溫度は低下する。
 - スカート付け根部の温度勾配は、外面の熱伝達率に従って増加する。
 - 上記結果は以下の2点に集約される。
 - 容器胴の温度推移は、外面の熱伝達率に敏感でない。

- ・ スカート付け根部の温度勾配は、コールドトランジェント時には外面の熱伝達率に従って小さくなり、ホットトランジェント時には熱伝達率に従って大きくなる。

c. ケースE-1、E-2

- 容器胴、スカート胴の温度推移は基準ケースと同様である。
- 強いて相違点を挙げれば、スカート胴の温度応答が基準ケースに比べて若干早くなる。これは、単位時間あたりの熱過渡の温度変化が小さいために、容器胴への入熱量に対するスカート胴への伝熱量が基準ケースに比べて大きくなるため、温度変化幅の小さいケース程この傾向が大きい。

d. ケースF-1、F-2

ケースF-1及びF-2は基準ケースの温度変化速度をそれぞれ $1/2$ 、 $1/8$ にしたケースである。温度コンタは、Fig.2.4-3に示す基準ケースの温度コンタと同じ熱過渡温度、言い換えれば、熱過渡開始からの時間を基準ケースに対して、それぞれ2倍、8倍した時点での解析結果である。

- 容器胴内面からスカート胴、又は容器胴外面への伝熱量は、基準ケースと変わらないため、内部ナトリウム温度が同一となる時点を比べると熱過渡の温度変化速度の減少に伴い、容器胴の温度勾配が緩やかになる。
- スカート胴の温度分布は容器胴に比べて熱過渡の温度変化速度及び保持時間に敏感ではない。これは、容器胴内面からスカート胴への熱抵抗が大きいためと考えられる。

e. ケースG-1

- 基準ケースとほぼ同等の温度履歴となるが、容器胴の温度追従は基準ケースに比べて若干遅れる。

(2) 熱応力解析結果

評価断面の内外表面における応力の時刻歴をFig.2.4-11~23に示す。また、評価断面の内外表面で、ひずみ範囲が最大となる極2時点に着目した応力解析結果をまとめTable 2.4-1~4に示す。更に、解析モデルの表面に沿った応力分布を付録Bにまとめる。

Fig. 2.4-11～23に示す応力は、評価断面の内外表面に最も近い積分点の応力で代表させたものである。また、Table 2.4-1 に示す応力は評価断面の内外表面への外挿値である。これらの応力は、全て全体座標系で表されており、図中の凡例に用いた記号の意味は以下のとおりである。

- S I G - R : 径方向応力 (以降 σ_r と略す)
- S I G - Z : 軸方向応力 (以降 σ_z と略す)
- S I G - T H : 周方向応力 (以降 σ_h と略す)
- T A U - R Z : せん断応力 (以降 τ_{rz} と略す)
- M I S E S : ミーゼス型の相当応力

各ケースの解析結果の比較は、後述の4章に詳細を示すこととし、以下に基準ケースの弾性解析に対する熱応力解析結果の概要を示す。

a. 評価断面A-内面

- 本部位では、 σ_z と σ_h の非等2軸応力場が形成されている。
- コールドトランジェント
 - ・ 熱過渡開始直後に容器胴の板厚方向温度勾配によって、 σ_z 、 σ_h ともに引張応力が発生する。
 - ・ 時間の経過とともに容器胴とスカート胴に温度差が生じ、 σ_z は約100秒後から圧縮側に反転する。
 - ・ σ_h は約200秒後に最大となる。
 - ・ σ_z は約1,000秒後に最大となる。
 - ・ ミーゼス型の相当応力は、 σ_z とほぼ同時間の約1,000秒後に最大となる。
- ホットトランジェント
 - ・ 熱過渡開始直後は、容器胴の板厚方向温度勾配によって、 σ_z 、 σ_h ともにコールドトランジェントとは逆の圧縮応力が発生する。
 - ・ 時間経過とともに、容器胴とスカート胴の温度差が生じ、 σ_z は約100秒後から引張側に転じる。
 - ・ σ_h は約150秒後に最大となり、そのレベルはコールドトランジェントと同等である。

- σ_z は約 1,000秒後に最大となり、そのレベルはコールドトランジェントに比べて小さい。
- ミーゼス型の相当応力は約 1,250秒後に最大となり、その大きさは σ_z が小さくなっている分コールドトランジェントに比べて小さくなる。

b. 評価断面A－外面

○ コールドトランジェント

- 熱過渡開始直後に容器胴に生じる板厚内温度勾配の影響は、内面に比べて大きく現れない。
- 評価部位がR止端部より内側に入るため、外面では現れなかった σ_r 及び τ_{rz} が発生している。
- σ_z 及び σ_θ は、板厚方向温度勾配に大きく影響しないため、双方とも引張応力となる。
- 各応力成分は、容器胴とスカート胴の温度差によって生じると考えられ、全ての成分が約1,000秒後で最大となる。

○ ホットトランジェント

- コールドトランジェントと同様に、板厚内温度勾配の影響は大きく現れない。
- 応力はコールドトランジェントと正負が逆の挙動を見せるが、内面と同様に応力のレベルはコールドトランジェントにおいて大きい。これは、ホットトランジェント開始時のスカート温度がコールドトランジェントに対して十分に追従しきっていないためである。
- コールドトランジェントと同様に、各応力成分とも約 1,000秒後に最大となる。

c. 評価断面B－内面

○ コールドトランジェント

- 評価断面Aに比べ、容器胴内面からの距離が大きいため、板厚方向温度勾配の影響は σ_θ 以外には顕著に現れない。また、この温度勾配によって生じる応力が最大となる時間は、評価断面Aに比べて若干遅くなる。
- 評価部位がR止端部に近いため、容器胴とスカート胴の相対的温度差による

股裂き効果によって σ_r が卓越する。

- ・ ミーゼス型の相当応力は σ_r に支配され、熱過渡開始から約 1,000秒後に最大となる。

○ ホットランジェント

- ・ コールドランジェント同様、板厚方向温度勾配の影響は σ_h 以外には顕著に見られない。
- ・ 各応力成分は、コールドランジェントと正負を逆転した挙動を示す。コールドランジェントで最も卓越した応力成分である σ_r は、コールドランジェントに比べてほぼ半減する。これに対し、 σ_h は容器胴とスカート胴との相対的温度差による股裂き効果による応力と板厚方向温度勾配による応力とが重畳されるためにコールドランジェントに比べて大きくなる。
- ・ ミーゼス型の相当応力はこの σ_h に影響され、熱過渡開始から約 600秒後に最大となり、コールドランジェントに比べて早くなる。

d. 評価断面B－外面

○ コールドランジェント

- ・ スカート付け根部に発生する径方向温度勾配によって σ_h （圧縮応力）が卓越する。評価断面の内面で卓越していた σ_r は内面では顕著に現れない。これは、評価点がスカート寄りに偏っているためである。
- ・ σ_h はスカート付け根の径方向温度勾配によって生じるため、内面の股裂きによって生じる σ_r が最大になる時間よりも早く、熱過渡開始から約 600秒後に最大となる。
- ・ ミーゼス型の相当応力は σ_h に支配された状態で挙動する。

○ ホットランジェント

- ・ コールドランジェントと同様、スカート付け根の径方向温度勾配による σ_h 以外の応力は顕著ではない。
- ・ 各応力成分はコールドランジェントと正負を逆転した挙動を示すが、その絶対値はコールドランジェントに比べて小さい。
- ・ コールドランジェント同様、ミーゼス型の相当応力はこの σ_h に影響され、熱過渡開始から約 600秒後に最大となる。

Table 2.4-1 Results of thermal stress analysis (Section-A : Inner surface)

解析 ケース	最 高 温 度 (°C)	時 刻 (秒)	温 度 (°C)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
基 準 弾 性	598.8	600.0	313.9	-0.529	-40.419	21.685	-3.573
		600.0	546.3	0.298	23.743	-15.533	2.092
基 準 弾 塑 性	598.5	800.0	293.8	-0.598	-29.736	-10.773	-2.592
		800.0	565.0	0.559	29.748	13.332	2.600
基 準 弾 塑 性 ク リ フ	598.5	800.0	293.8	-0.622	-22.546	-13.457	-1.905
		800.0	565.0	0.576	24.597	12.276	2.090
A-1	598.5	120.0	484.5	0.146	4.873	19.652	0.355
		103.5	387.0	-0.467	-8.911	-25.486	-0.659
B-1	598.5	800.0	294.0	-0.545	-30.787	-11.230	-2.640
		1026.4	568.3	0.732	30.572	15.742	2.590
C-1	598.5	800.0	293.8	-0.558	-20.714	-12.601	-1.719
		800.0	565.0	0.575	24.595	12.289	2.089
C-2	598.5	800.0	293.8	-0.507	-19.837	-12.148	-1.641
		909.8	570.2	0.687	24.220	13.394	2.057
D-1	596.7	600.0	311.8	-0.402	-32.140	19.760	-2.849
		600.0	544.4	0.445	32.022	-17.318	2.809
D-2	595.2	600.0	310.3	-0.335	-26.616	18.422	-2.363
		600.0	543.1	0.521	37.393	-18.546	3.278
D-3	591.2	600.0	306.4	-0.193	-14.480	15.091	-1.296
		600.0	539.9	0.673	48.550	-21.419	4.252
E-1	599.2	600.0	435.8	-0.305	-23.328	10.642	-2.053
		600.0	569.2	0.193	13.732	-10.714	1.212
E-2	599.8	600.0	558.8	-0.076	-5.698	2.615	-0.501
		600.0	592.2	0.048	3.485	-2.243	0.307
F-1	598.9	600.0	339.3	-0.473	-36.058	21.148	-3.189
		720.0	537.1	0.480	30.933	-14.054	2.704
F-2	599.7	1520.0	333.4	-0.515	-38.011	13.733	-3.334
		960.0	512.6	0.449	34.939	-14.375	3.055
G-1	598.8	600.0	315.6	-0.483	-37.153	21.965	-3.123
		600.0	544.8	0.263	21.472	-15.905	1.805

(注) 時刻は、上段がコールドトランジェント開始からの時間、下段がホットトランジェント開始からの時間を示す。

Table 2.4-2 Results of thermal stress analysis (Section-A : Outer surface)

解析 ケース	最 高 温 度 (°C)	時 刻 (秒)	温 度 (°C)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_b (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
基 準 弾 性	597.9	1023.0	294.4	-0.265	45.608	34.891	-1.462
		1200.0	574.3	0.180	-26.881	-21.361	0.865
基 準 弾 塑性	597.5	800.0	313.2	-0.567	16.566	9.062	-0.441
		800.0	550.9	-0.399	-17.425	-9.831	0.350
基 準 弾 塑性 ク リ ープ	597.5	800.0	313.2	-0.377	16.732	9.156	-0.448
		946.4	561.1	-0.176	-17.391	-9.654	0.376
A - 1	597.5	946.4	561.1	0.231	-20.150	-11.158	0.548
		66.3	274.0	0.376	3.906	-3.911	0.114
B - 1	597.5	800.0	313.5	-0.090	26.860	17.213	-0.705
		1500.0	571.6	-0.024	-25.911	-14.992	0.683
C - 1	597.5	800.0	313.1	0.146	17.212	9.670	-0.393
		983.0	563.7	-0.183	-17.406	-9.602	0.372
C - 2	597.5	800.0	313.1	-0.077	16.957	9.389	-0.445
		1026.4	565.8	-0.183	-17.137	-9.352	0.374
D - 1	594.4	1023.0	290.9	-0.223	37.012	28.778	-1.183
		1200.0	571.0	0.217	-35.361	-27.631	1.147
D - 2	591.9	1023.0	288.5	-0.191	31.276	24.674	-0.999
		1200.0	568.7	0.249	-40.868	-31.726	1.325
D - 3	584.9	1023.0	282.2	-0.124	18.678	15.535	-0.591
		1200.0	562.6	0.325	-52.239	-40.283	1.692
E - 1	598.7	1023.0	424.2	-0.151	25.186	19.308	-0.811
		1200.0	585.1	0.105	-16.498	-13.401	0.531
E - 2	599.7	1023.0	555.8	-0.038	6.208	4.815	-0.200
		1200.0	596.2	0.025	-3.928	-3.119	0.127
F - 1	598.6	1200.0	304.3	-0.251	43.259	32.826	-1.392
		920.0	538.2	0.207	-32.015	-25.813	1.029
F - 2	599.7	1520.0	346.3	-0.230	39.262	29.795	-1.260
		1088.0	508.0	0.232	-36.899	-29.187	1.191
G - 1	597.7	1023.0	297.4	-0.340	43.329	32.739	-1.523
		1200.0	572.6	0.217	-25.781	-20.263	0.915

(注) 時刻は、上段がコールドトランジェント開始からの時間、下段がホットトランジェント開始からの時間を示す。但し、ケースA-1については、上下段共ホットトランジェント開始からの時間を示す。

Table 2.4-3. Results of thermal stress analysis (Section-B : Inner surface)

解析 ケース	最 高 温 度 (°C)	時 刻 (秒)	温 度 (°C)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
基 準 弾 性	587.8	600.0	475.7	8.981	39.728	-5.231	18.435
		600.0	420.4	-4.675	-20.619	10.164	-9.571
基 準 弾 塑 性	586.7	800.0	438.9	4.274	18.497	10.253	8.317
		600.0	420.3	-4.245	-17.793	-7.009	-8.234
基 準 弾 塑 性 ク リ プ	586.7	1023.0	408.4	3.913	16.427	14.077	7.419
		800.0	455.6	-4.016	-16.835	-10.561	-7.718
A-1	586.7	800.0	438.9	4.557	18.406	11.143	8.354
		800.0	455.6	-4.406	-19.372	-11.025	-8.947
B-1	586.7	800.0	440.1	5.421	22.813	10.264	10.462
		836.6	395.7	-6.044	-25.315	-14.398	-11.573
C-1	586.7	1023.0	408.4	3.554	14.601	13.977	6.601
		800.0	455.6	-4.016	-16.835	-10.568	-7.718
C-2	586.7	1023.0	408.4	3.557	14.028	13.896	6.361
		800.0	455.6	-4.009	-16.828	-10.568	-7.717
D-1	571.4	600.0	458.8	6.850	30.214	-8.133	14.031
		600.0	404.0	-6.861	-30.312	7.088	-14.058
D-2	556.0	1023.0	380.8	6.353	28.137	-2.520	13.050
		1200.0	476.0	-8.963	-39.888	-5.955	-18.466
D-3	532.4	1023.0	352.9	3.273	14.377	-6.207	6.670
		1200.0	451.3	-11.796	-52.620	-9.982	-24.354
E-1	592.8	600.0	526.8	5.000	22.126	-2.075	10.259
		600.0	497.6	-3.052	-13.421	6.305	-6.241
E-2	598.1	600.0	581.2	1.243	5.498	-0.482	2.549
		600.0	574.3	-0.714	-3.139	1.278	-1.458
F-1	590.1	600.0	493.4	8.159	36.065	-5.602	16.738
		720.0	415.2	-6.077	-26.924	5.713	-12.487
F-2	598.1	1520.0	437.1	8.747	38.957	4.280	18.058
		1088.0	411.4	-7.769	-34.463	-1.115	-15.951
G-1	587.7	600.0	479.3	9.134	40.419	-5.929	18.759
		1200.0	500.3	-5.676	-25.088	-0.221	-11.621

(注) 時刻は、上段がコールドトランジェント開始からの時間、下段がホットトランジェント開始からの時間を示す。

Table 2.4-4 Results of thermal stress analysis (Section-B : Outer surface)

解析 ケース	最 温 高 度 (°C)	時 刻 (秒)	温 度 (°C)	σ_r (kg/mm ²)	σ_z (kg/mm ²)	σ_h (kg/mm ²)	τ_{rz} (kg/mm ²)
基 準 弾 性	587.4	600.0	506.0	0.396	-7.580	-32.757	0.208
		460.0	364.8	-0.315	-1.092	26.946	-0.088
基 準 弾 塑性	586.2	465.0	519.5	0.362	-3.652	-14.513	0.124
		400.0	358.5	-0.464	3.063	16.708	-0.156
基 準 弾 塑性 ク リ フ	586.2	465.0	519.5	0.368	-3.688	-14.502	0.124
		400.0	358.5	-0.442	2.710	16.413	-0.137
A-1	586.2	465.0	519.5	0.360	-3.419	-16.317	0.133
		400.0	358.5	-0.453	2.740	17.587	-0.147
B-1	586.2	465.0	520.7	0.382	-4.774	-20.403	0.148
		460.0	305.9	-0.483	6.003	22.757	-0.198
C-1	586.2	465.0	519.5	0.365	-3.711	-14.507	0.124
		400.0	358.5	-0.442	2.710	16.413	-0.137
C-2	586.2	465.0	519.5	0.363	-3.725	-14.512	0.125
		400.0	358.5	-0.442	2.710	16.413	-0.137
D-1	570.2	600.0	472.9	0.346	-4.331	-29.086	0.163
		460.0	356.1	-0.386	2.001	30.746	-0.137
D-2	558.2	600.0	460.8	0.308	-2.198	-26.597	0.132
		460.0	344.5	-0.427	4.036	33.524	-0.173
D-3	528.9	600.0	431.4	0.232	2.322	-20.808	0.064
		460.0	318.0	-0.494	8.292	39.032	-0.242
E-1	592.6	600.0	535.2	0.226	-4.235	-17.832	0.121
		360.0	456.6	-0.184	-1.251	16.408	-0.030
E-2	598.1	600.0	583.3	0.057	-1.040	-4.457	0.030
		360.0	564.2	-0.045	-0.274	3.674	-0.007
F-1	589.8	530.0	522.1	0.364	-5.604	-30.465	0.163
		400.0	330.7	-0.315	-0.710	28.489	-0.068
F-2	598.0	800.0	529.5	0.284	-6.204	-23.620	0.150
		680.0	334.1	-0.340	4.176	27.232	-0.154
G-1	587.3	600.0	493.7	0.392	-7.823	-33.313	0.209
		460.0	370.8	-0.313	-1.142	27.113	-0.081

(注) 時刻は、上段がコールドトランジェント開始からの時間、下段がホットトランジェント開始からの時間を示す。

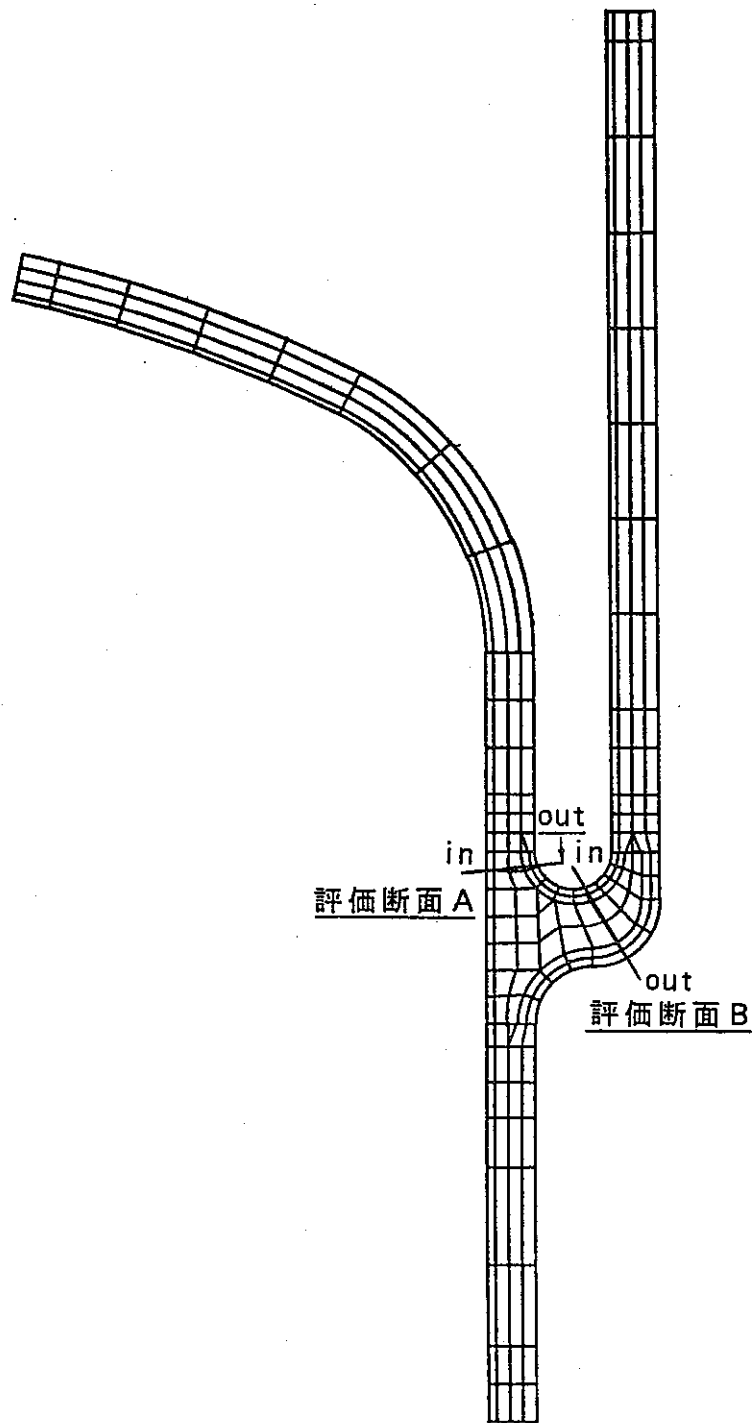
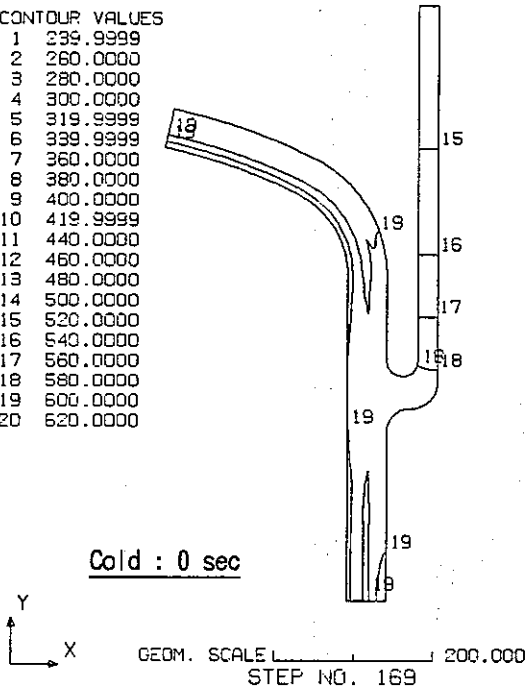


Fig. 2.4-1 Stress estimation sections

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

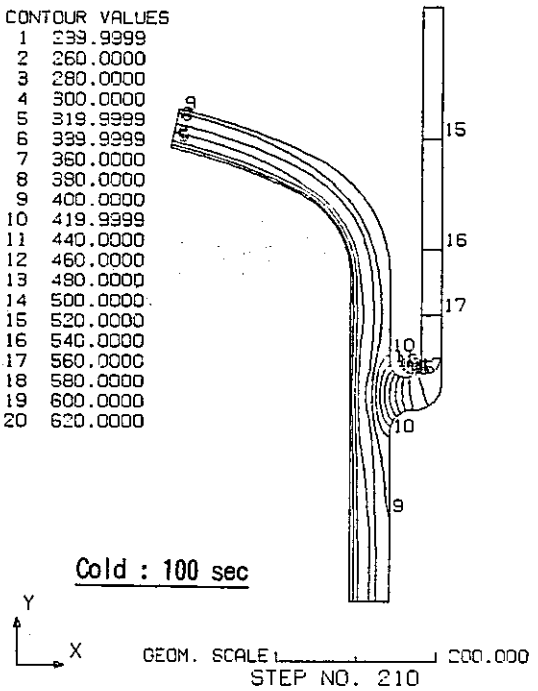
1	239.9999
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	319.9999
6	339.9999
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	419.9999
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000



FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

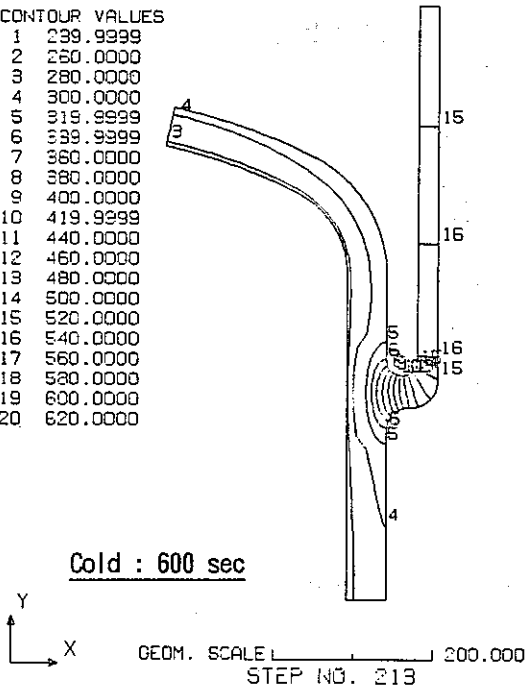
1	239.9999
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	319.9999
6	339.9999
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	419.9999
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000



FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	239.9999
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	319.9999
6	339.9999
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	419.9999
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000



FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	239.9999
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	319.9999
6	339.9999
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	419.9999
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000

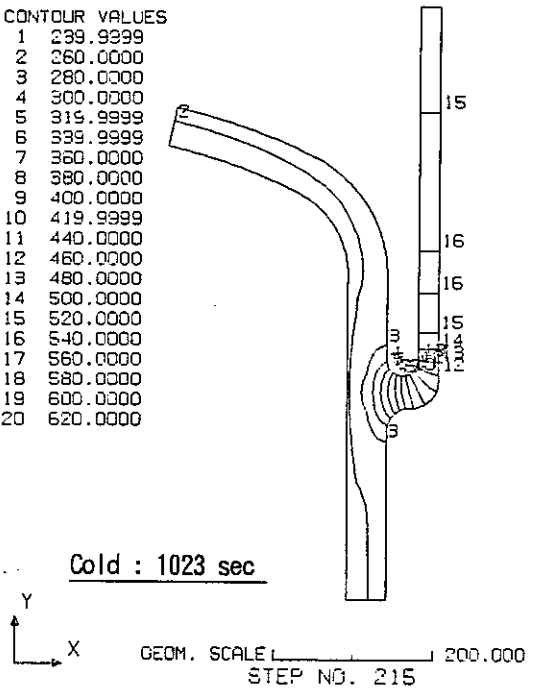
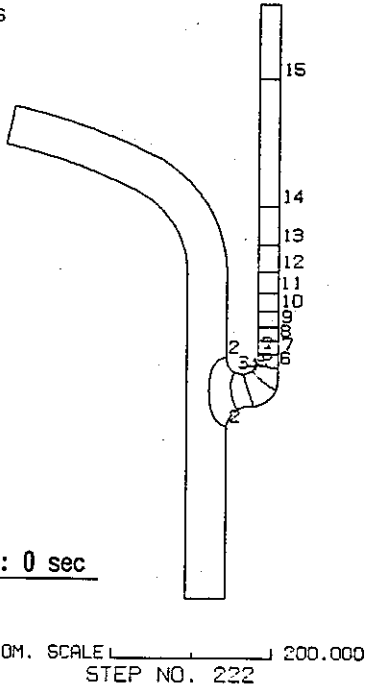


Fig. 2.4-2(a) Temperature contour (Standard Case)

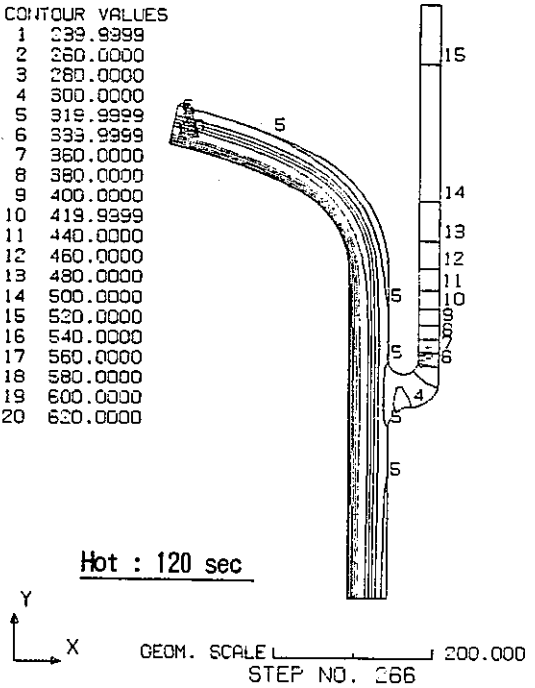
FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



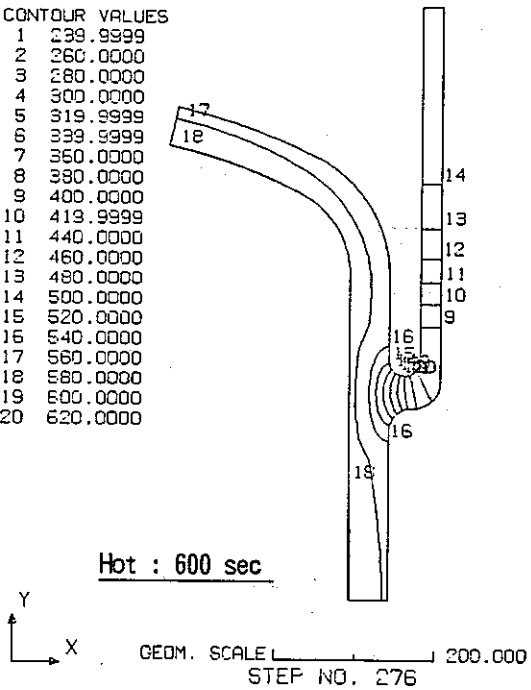
FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

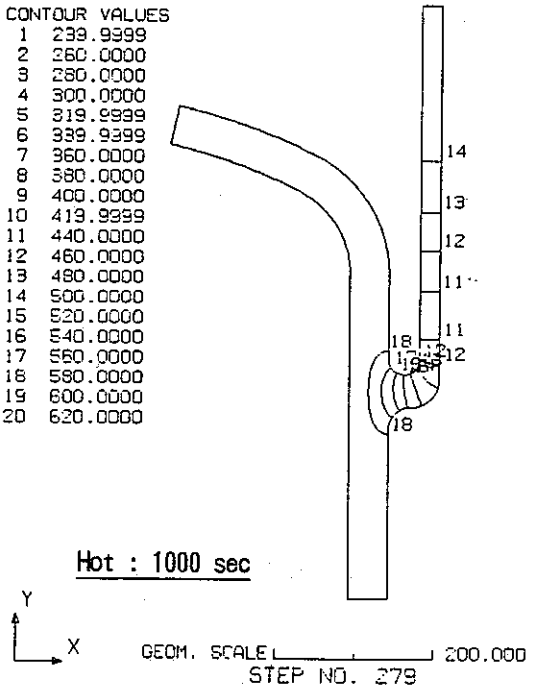
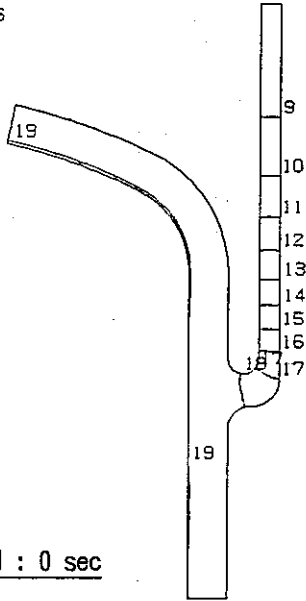


Fig. 2.4-2(b) Temperature contour (Standard Case)

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

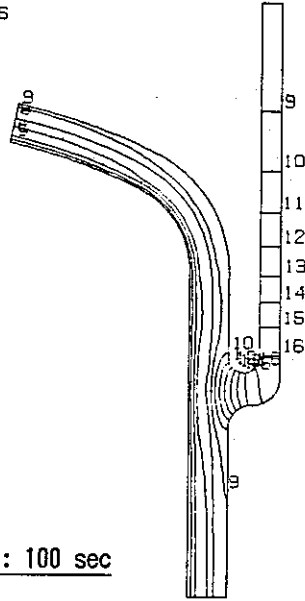


Cold : 0 sec

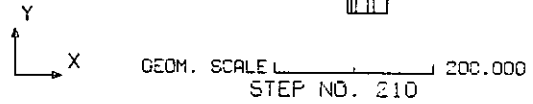


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

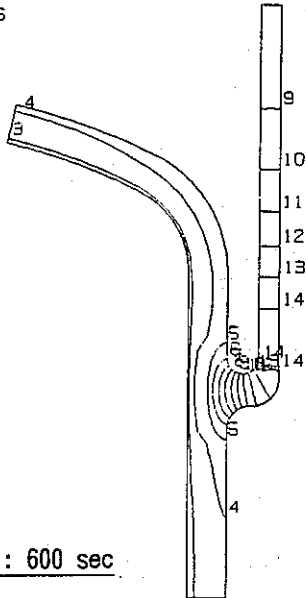


Cold : 100 sec



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

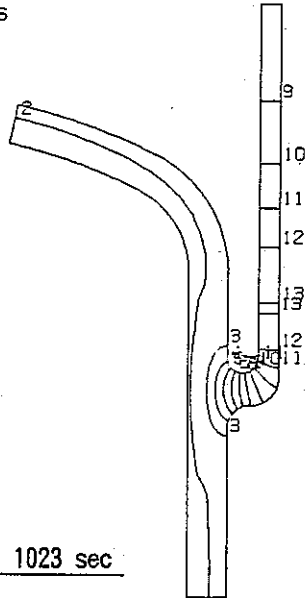


Cold : 600 sec



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



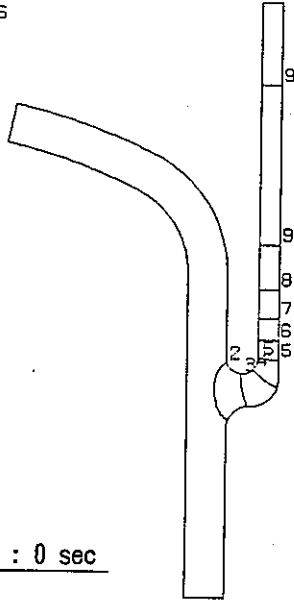
Cold : 1023 sec



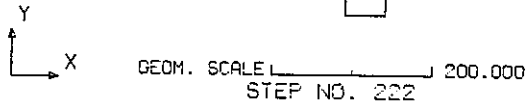
Fig. 2.4-3(a) Temperature contour (Case D-1)

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

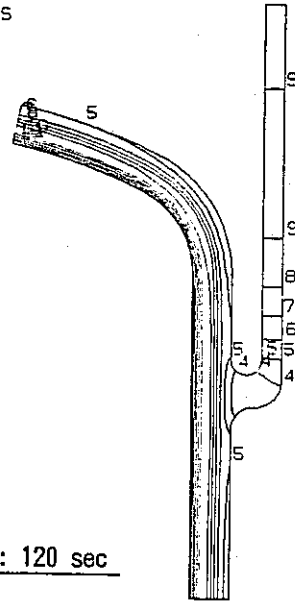


Hot : 0 sec

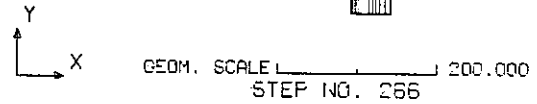


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

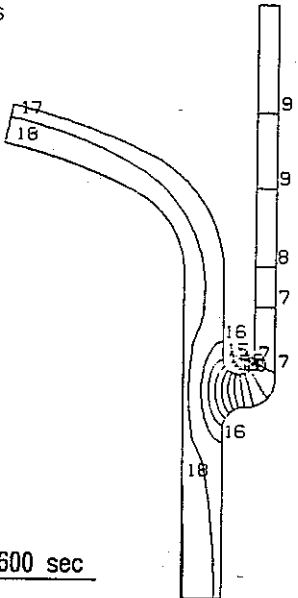


Hot : 120 sec

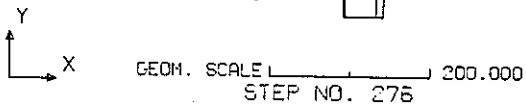


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

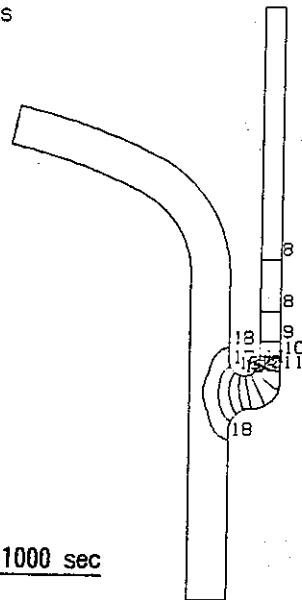


Hot : 600 sec



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



Hot : 1000 sec

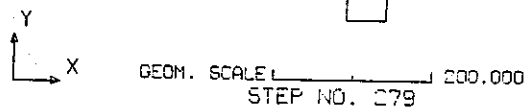
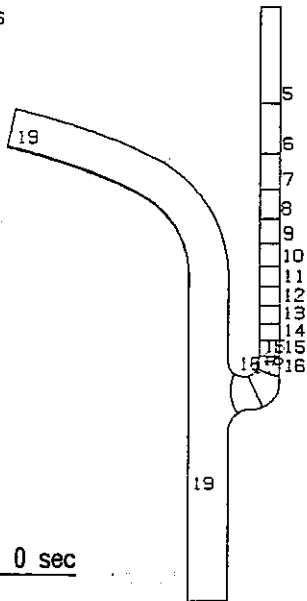


Fig. 2. 4-3(b) Temperature contour (Case D-1)

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

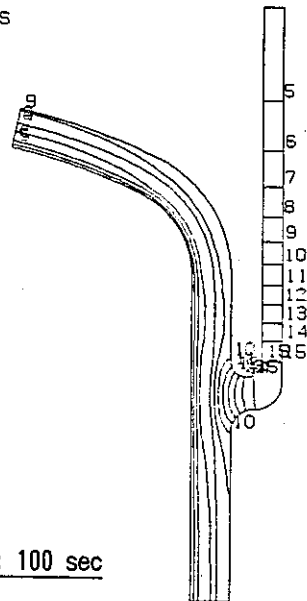


Cold : 0 sec



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

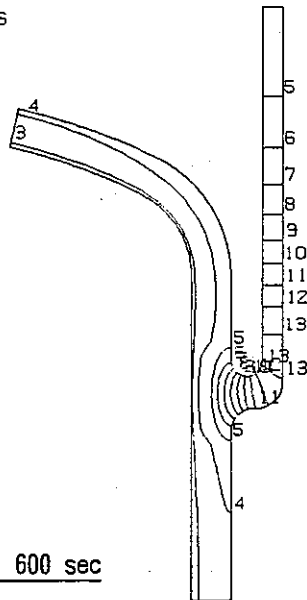


Cold : 100 sec



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

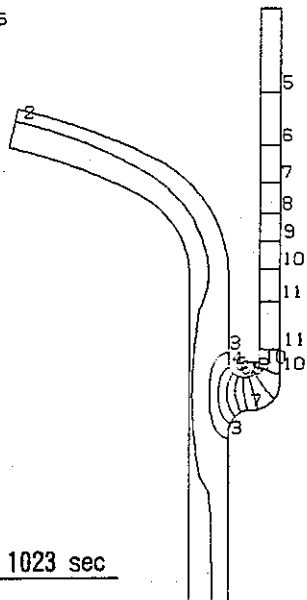


Cold : 600 sec



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



Cold : 1023 sec

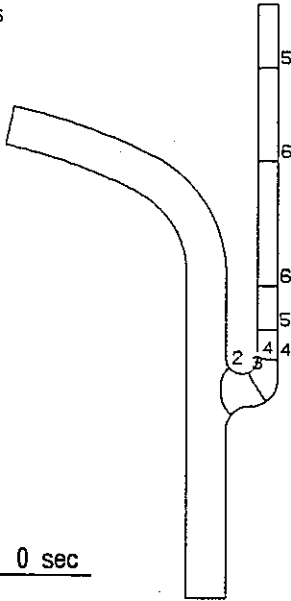


Fig. 2.4-4(a) Temperature contour (Case D-2)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

- 1 239.9999
- 2 260.0000
- 3 280.0000
- 4 300.0000
- 5 319.9999
- 6 339.9999
- 7 360.0000
- 8 380.0000
- 9 400.0000
- 10 419.9999
- 11 440.0000
- 12 460.0000
- 13 480.0000
- 14 500.0000
- 15 520.0000
- 16 540.0000
- 17 560.0000
- 18 580.0000
- 19 600.0000
- 20 620.0000



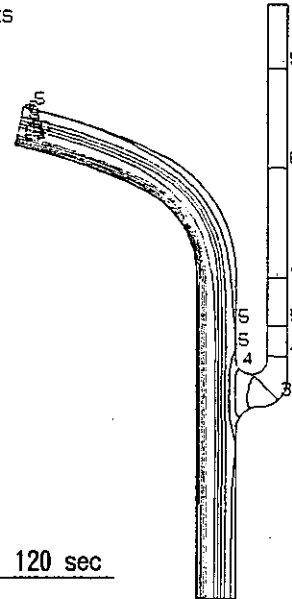
Hot : 0 sec

GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 222

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

- 1 239.9999
- 2 260.0000
- 3 280.0000
- 4 300.0000
- 5 319.9999
- 6 339.9999
- 7 360.0000
- 8 380.0000
- 9 400.0000
- 10 419.9999
- 11 440.0000
- 12 460.0000
- 13 480.0000
- 14 500.0000
- 15 520.0000
- 16 540.0000
- 17 560.0000
- 18 580.0000
- 19 600.0000
- 20 620.0000



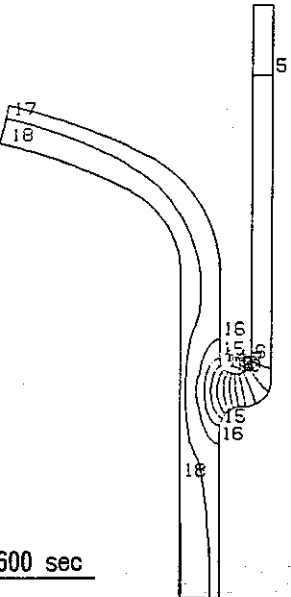
Hot : 120 sec

GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 266

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

- 1 239.9999
- 2 260.0000
- 3 280.0000
- 4 300.0000
- 5 319.9999
- 6 339.9999
- 7 360.0000
- 8 380.0000
- 9 400.0000
- 10 419.9999
- 11 440.0000
- 12 460.0000
- 13 480.0000
- 14 500.0000
- 15 520.0000
- 16 540.0000
- 17 560.0000
- 18 580.0000
- 19 600.0000
- 20 620.0000



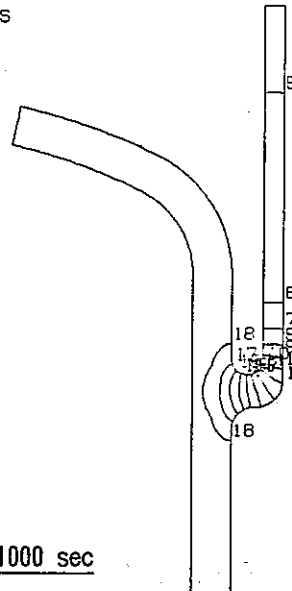
Hot : 600 sec

GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 276

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

- 1 239.9999
- 2 260.0000
- 3 280.0000
- 4 300.0000
- 5 319.9999
- 6 339.9999
- 7 360.0000
- 8 380.0000
- 9 400.0000
- 10 419.9999
- 11 440.0000
- 12 460.0000
- 13 480.0000
- 14 500.0000
- 15 520.0000
- 16 540.0000
- 17 560.0000
- 18 580.0000
- 19 600.0000
- 20 620.0000



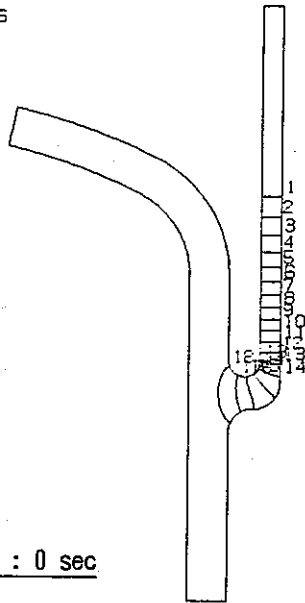
Hot : 1000 sec

GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 279

Fig. 2.4-4(b) Temperature contour (Case D-2)

FINAS
TEMPERATURE

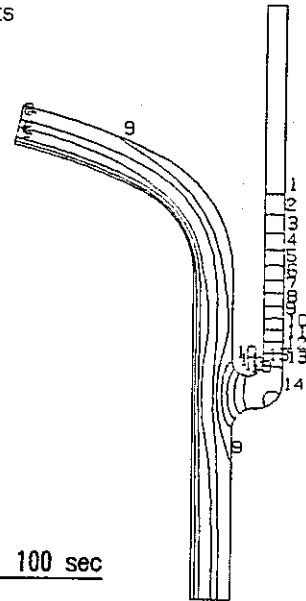
- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



Y
X GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 169

FINAS
TEMPERATURE

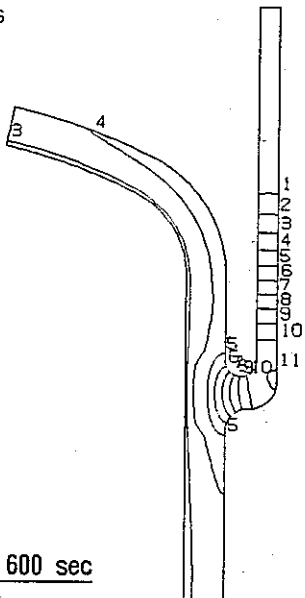
- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



Y
X GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 210

FINAS
TEMPERATURE

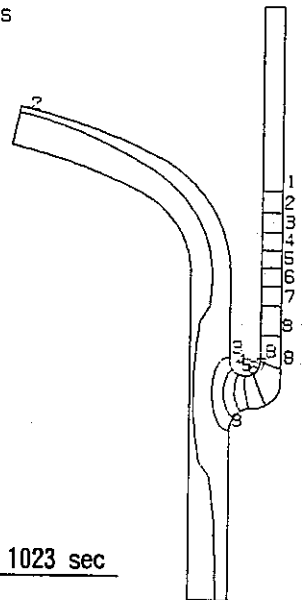
- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



Y
X GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 213

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

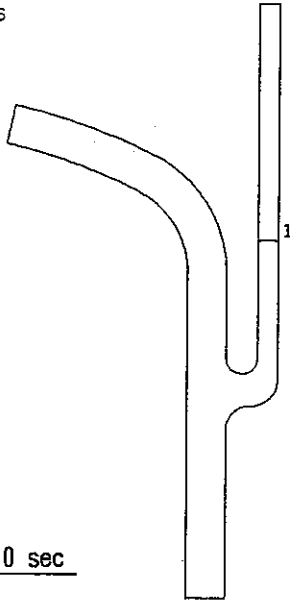


Y
X GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 215

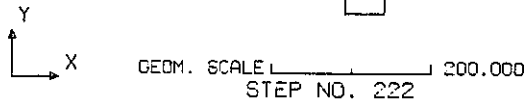
Fig. 2.4-5(a) Temperature contour (Case D-3)

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

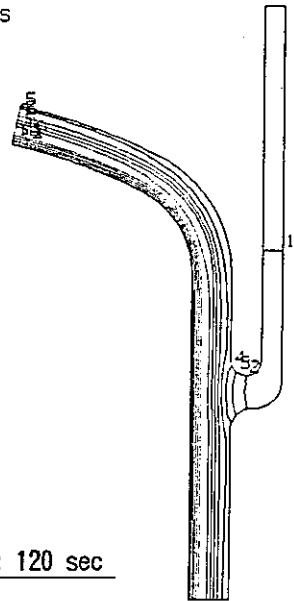


Hot : 0 sec

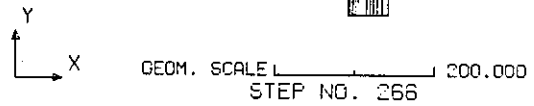


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

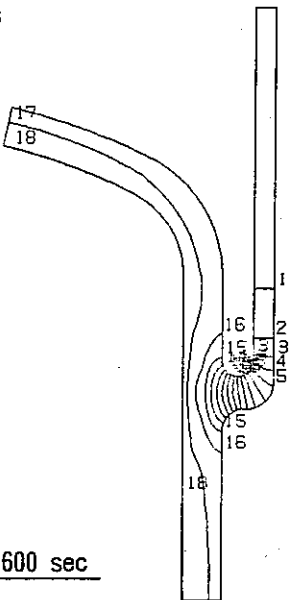


Hot : 120 sec

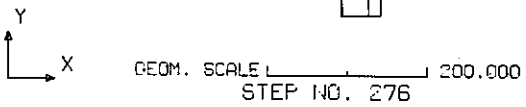


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

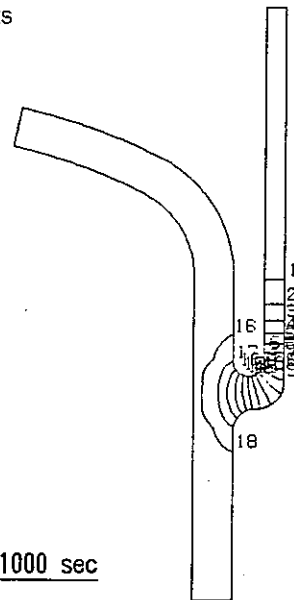


Hot : 600 sec



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



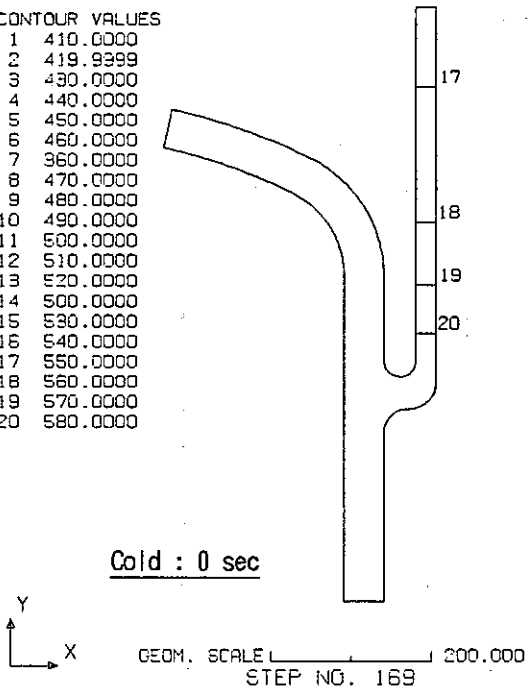
Hot : 1000 sec



Fig.2.4-5(b) Temperature contour (Case D-3)

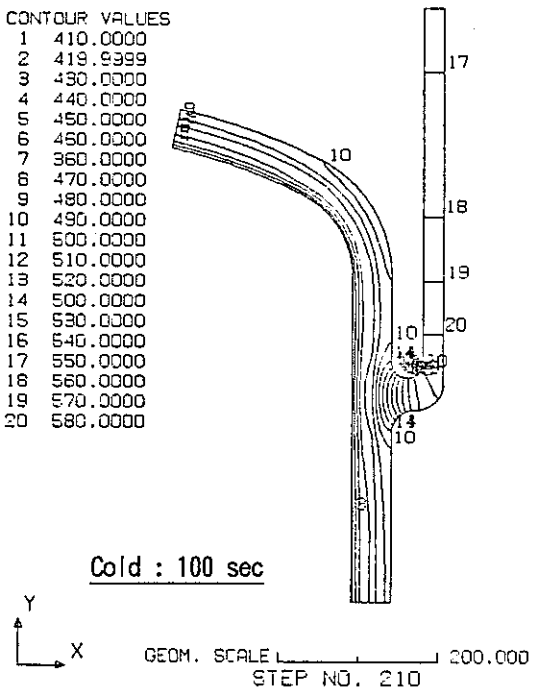
FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 410.0000
 - 2 419.9999
 - 3 430.0000
 - 4 440.0000
 - 5 450.0000
 - 6 460.0000
 - 7 360.0000
 - 8 470.0000
 - 9 480.0000
 - 10 490.0000
 - 11 500.0000
 - 12 510.0000
 - 13 520.0000
 - 14 500.0000
 - 15 530.0000
 - 16 540.0000
 - 17 550.0000
 - 18 560.0000
 - 19 570.0000
 - 20 580.0000



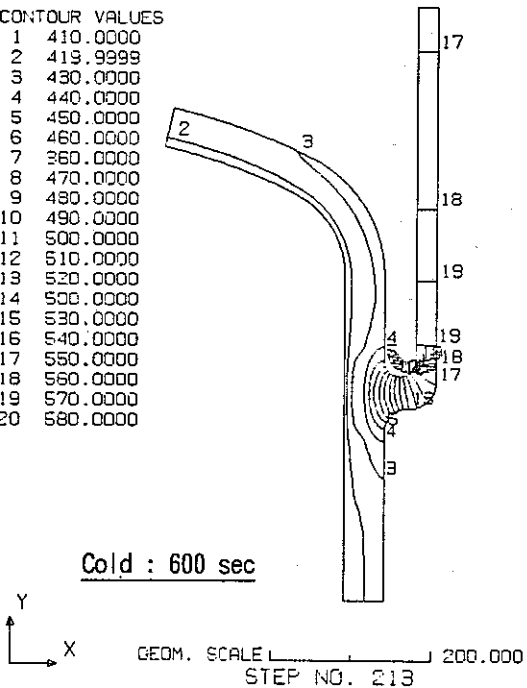
FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 410.0000
 - 2 419.9999
 - 3 430.0000
 - 4 440.0000
 - 5 450.0000
 - 6 460.0000
 - 7 360.0000
 - 8 470.0000
 - 9 480.0000
 - 10 490.0000
 - 11 500.0000
 - 12 510.0000
 - 13 520.0000
 - 14 500.0000
 - 15 530.0000
 - 16 540.0000
 - 17 550.0000
 - 18 560.0000
 - 19 570.0000
 - 20 580.0000



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 410.0000
 - 2 419.9999
 - 3 430.0000
 - 4 440.0000
 - 5 450.0000
 - 6 460.0000
 - 7 360.0000
 - 8 470.0000
 - 9 480.0000
 - 10 490.0000
 - 11 500.0000
 - 12 510.0000
 - 13 520.0000
 - 14 500.0000
 - 15 530.0000
 - 16 540.0000
 - 17 550.0000
 - 18 560.0000
 - 19 570.0000
 - 20 580.0000



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 410.0000
 - 2 419.9999
 - 3 430.0000
 - 4 440.0000
 - 5 450.0000
 - 6 460.0000
 - 7 360.0000
 - 8 470.0000
 - 9 480.0000
 - 10 490.0000
 - 11 500.0000
 - 12 510.0000
 - 13 520.0000
 - 14 500.0000
 - 15 530.0000
 - 16 540.0000
 - 17 550.0000
 - 18 560.0000
 - 19 570.0000
 - 20 580.0000

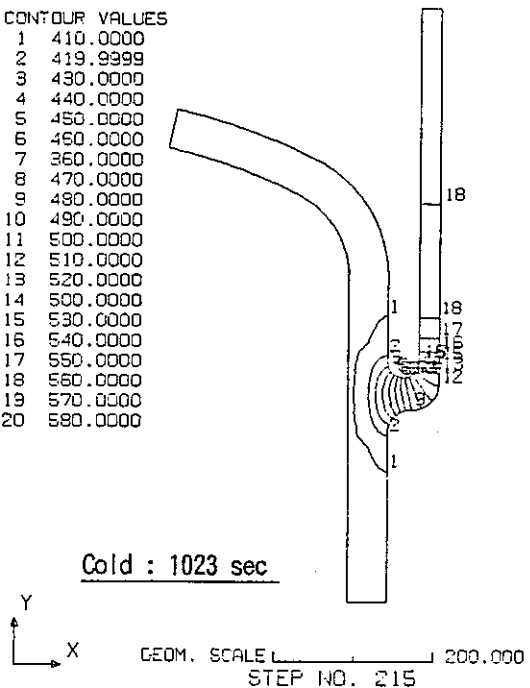
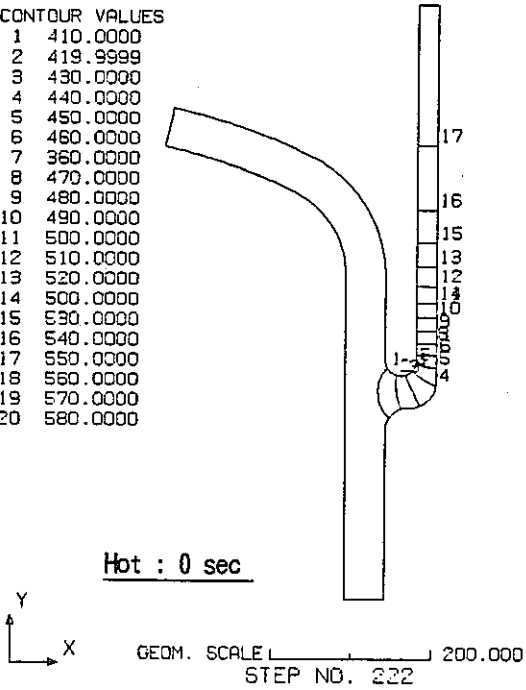


Fig.2.4-6(a) Temperature contour (Case E-1)

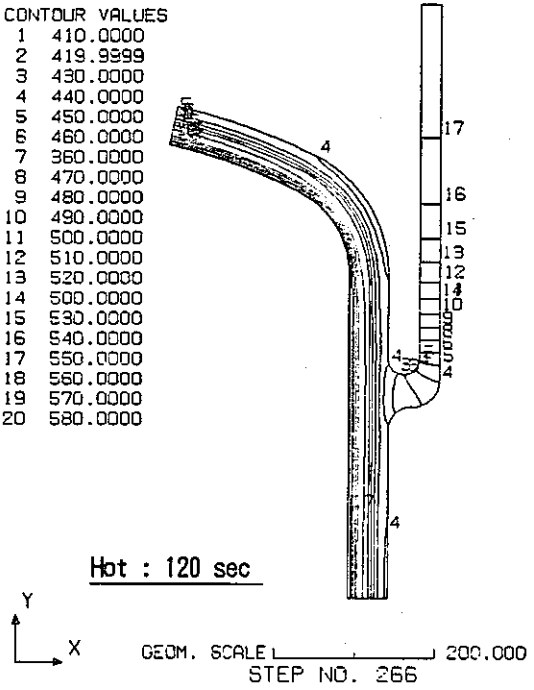
FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 410.0000
 - 2 419.9999
 - 3 430.0000
 - 4 440.0000
 - 5 450.0000
 - 6 460.0000
 - 7 360.0000
 - 8 470.0000
 - 9 480.0000
 - 10 490.0000
 - 11 500.0000
 - 12 510.0000
 - 13 520.0000
 - 14 500.0000
 - 15 530.0000
 - 16 540.0000
 - 17 550.0000
 - 18 560.0000
 - 19 570.0000
 - 20 580.0000



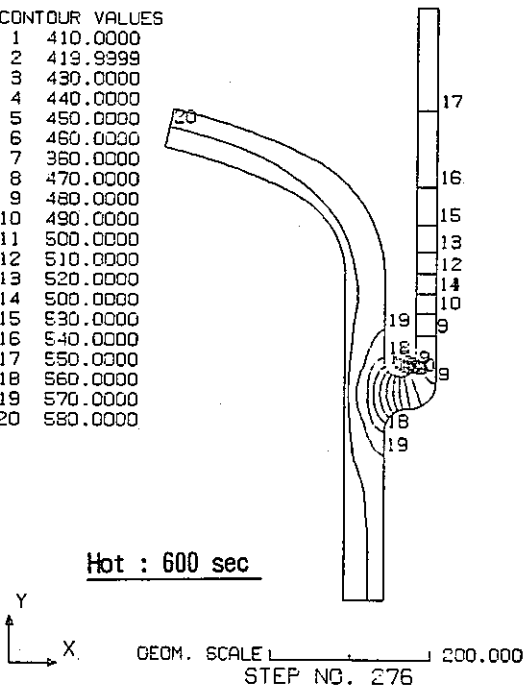
FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 410.0000
 - 2 419.9999
 - 3 430.0000
 - 4 440.0000
 - 5 450.0000
 - 6 460.0000
 - 7 360.0000
 - 8 470.0000
 - 9 480.0000
 - 10 490.0000
 - 11 500.0000
 - 12 510.0000
 - 13 520.0000
 - 14 500.0000
 - 15 530.0000
 - 16 540.0000
 - 17 550.0000
 - 18 560.0000
 - 19 570.0000
 - 20 580.0000



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 410.0000
 - 2 419.9999
 - 3 430.0000
 - 4 440.0000
 - 5 450.0000
 - 6 460.0000
 - 7 360.0000
 - 8 470.0000
 - 9 480.0000
 - 10 490.0000
 - 11 500.0000
 - 12 510.0000
 - 13 520.0000
 - 14 500.0000
 - 15 530.0000
 - 16 540.0000
 - 17 550.0000
 - 18 560.0000
 - 19 570.0000
 - 20 580.0000



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 410.0000
 - 2 419.9999
 - 3 430.0000
 - 4 440.0000
 - 5 450.0000
 - 6 460.0000
 - 7 360.0000
 - 8 470.0000
 - 9 480.0000
 - 10 490.0000
 - 11 500.0000
 - 12 510.0000
 - 13 520.0000
 - 14 500.0000
 - 15 530.0000
 - 16 540.0000
 - 17 550.0000
 - 18 560.0000
 - 19 570.0000
 - 20 580.0000

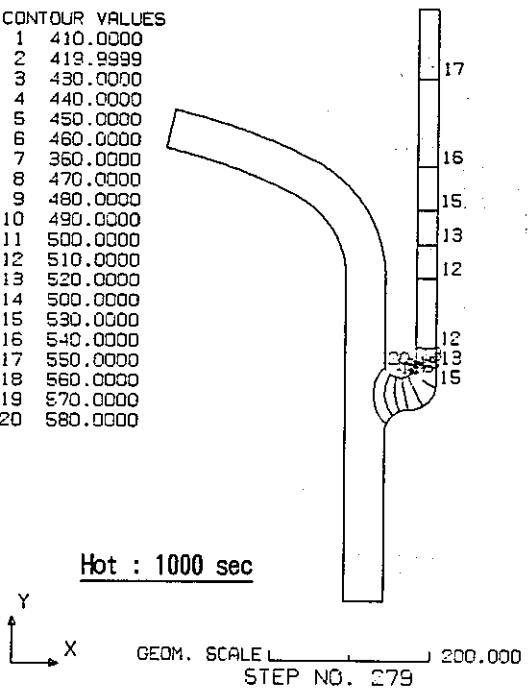
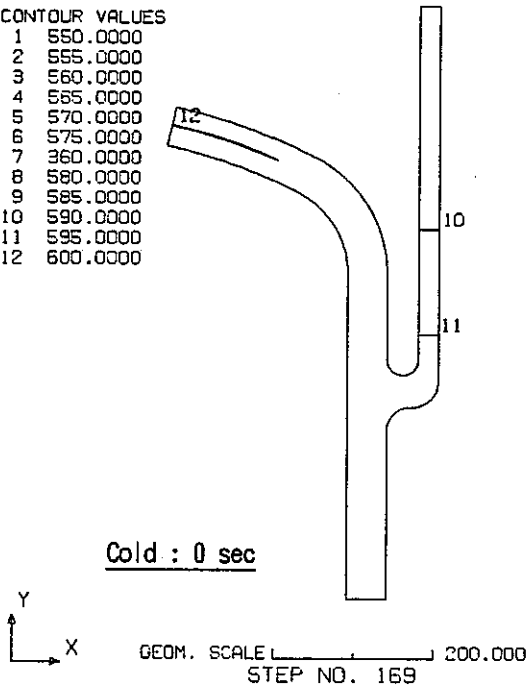


Fig. 2.4-6(b) Temperature contour (Case E-1)

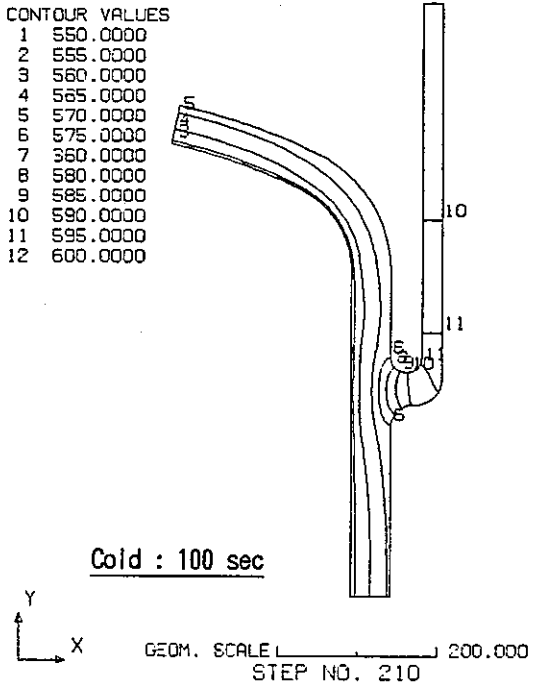
FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES
 1 550.0000
 2 555.0000
 3 560.0000
 4 565.0000
 5 570.0000
 6 575.0000
 7 360.0000
 8 580.0000
 9 585.0000
 10 590.0000
 11 595.0000
 12 600.0000



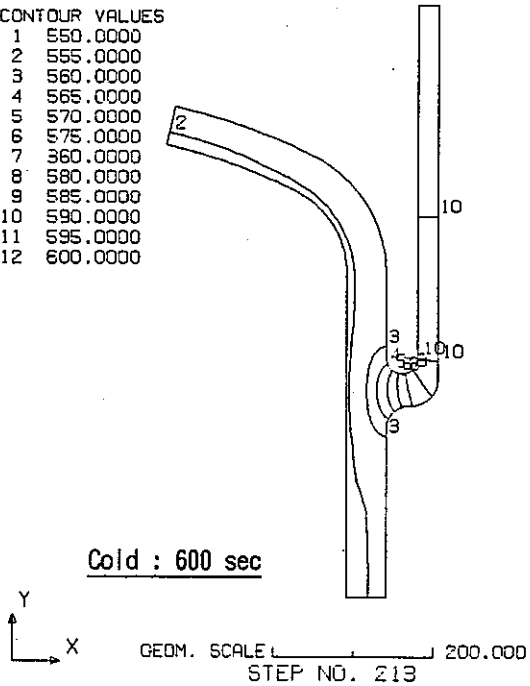
FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES
 1 550.0000
 2 555.0000
 3 560.0000
 4 565.0000
 5 570.0000
 6 575.0000
 7 360.0000
 8 580.0000
 9 585.0000
 10 590.0000
 11 595.0000
 12 600.0000



FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES
 1 550.0000
 2 555.0000
 3 560.0000
 4 565.0000
 5 570.0000
 6 575.0000
 7 360.0000
 8 580.0000
 9 585.0000
 10 590.0000
 11 595.0000
 12 600.0000



FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES
 1 550.0000
 2 555.0000
 3 560.0000
 4 565.0000
 5 570.0000
 6 575.0000
 7 360.0000
 8 580.0000
 9 585.0000
 10 590.0000
 11 595.0000
 12 600.0000

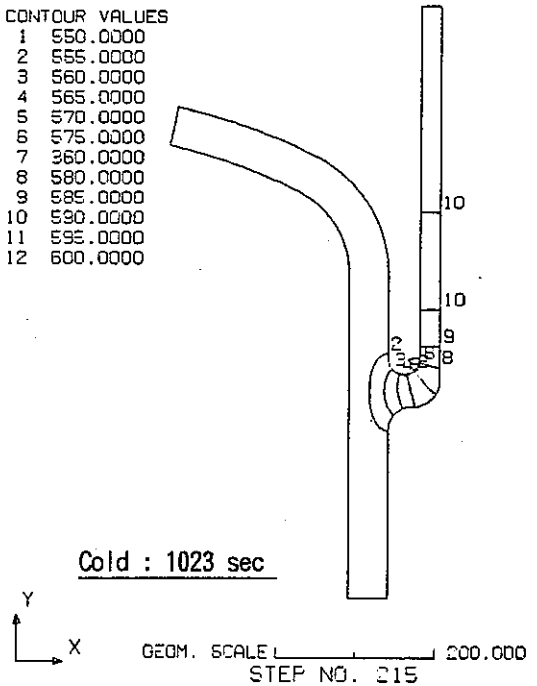
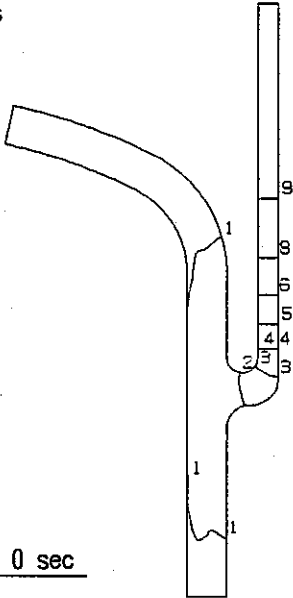


Fig. 2.4-7(a) Temperature contour (Case E-2)

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 550.0000
 - 2 555.0000
 - 3 560.0000
 - 4 565.0000
 - 5 570.0000
 - 6 575.0000
 - 7 360.0000
 - 8 580.0000
 - 9 585.0000
 - 10 590.0000
 - 11 595.0000
 - 12 600.0000

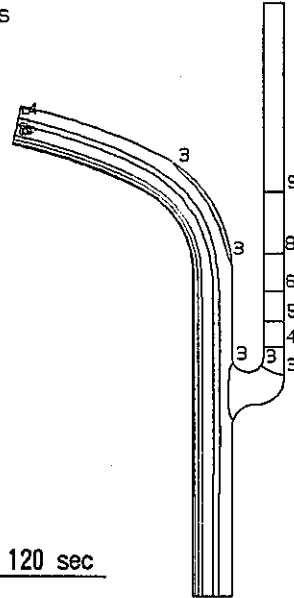


Hot : 0 sec

Y
X
GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 222

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 550.0000
 - 2 555.0000
 - 3 560.0000
 - 4 565.0000
 - 5 570.0000
 - 6 575.0000
 - 7 360.0000
 - 8 580.0000
 - 9 585.0000
 - 10 590.0000
 - 11 595.0000
 - 12 600.0000

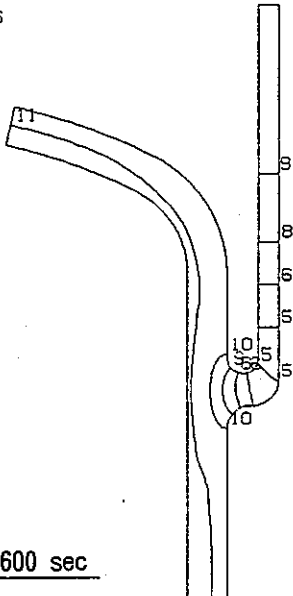


Hot : 120 sec

Y
X
GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 266

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 550.0000
 - 2 555.0000
 - 3 560.0000
 - 4 565.0000
 - 5 570.0000
 - 6 575.0000
 - 7 360.0000
 - 8 580.0000
 - 9 585.0000
 - 10 590.0000
 - 11 595.0000
 - 12 600.0000

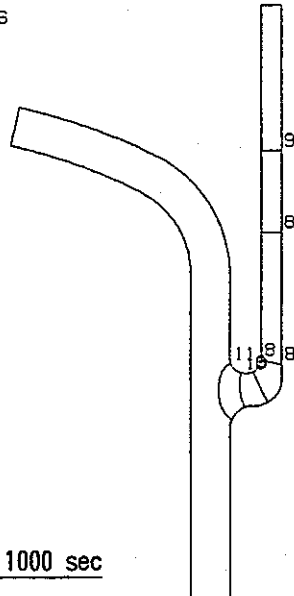


Hot : 600 sec

Y
X
GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 276

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 550.0000
 - 2 555.0000
 - 3 560.0000
 - 4 565.0000
 - 5 570.0000
 - 6 575.0000
 - 7 360.0000
 - 8 580.0000
 - 9 585.0000
 - 10 590.0000
 - 11 595.0000
 - 12 600.0000



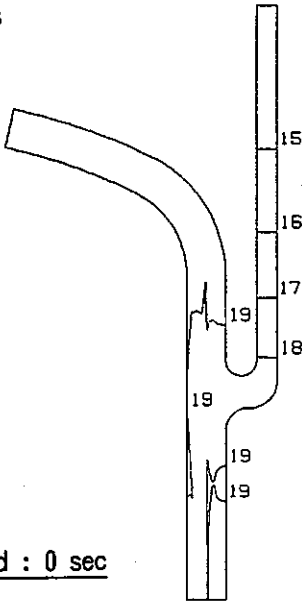
Hot : 1000 sec

Y
X
GEOM. SCALE 200.000
STEP NO. 279

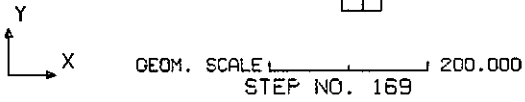
Fig. 2.4-7(b) Temperature contour (Case E-2)

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

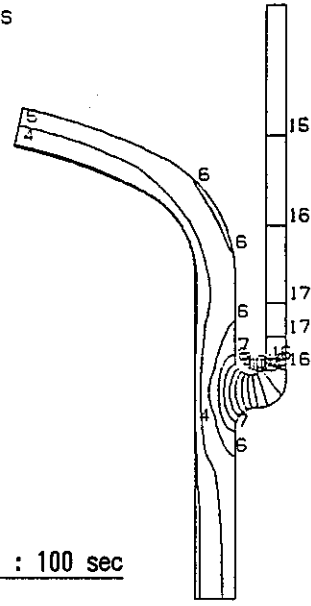


Cold : 0 sec

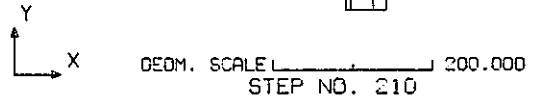


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

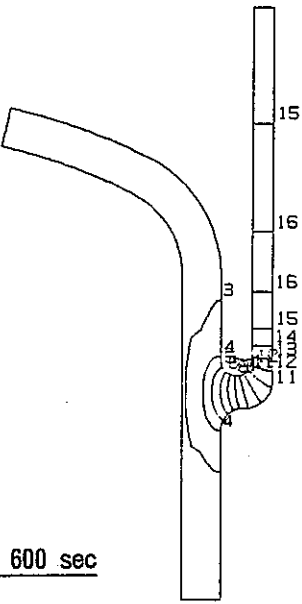


Cold : 100 sec

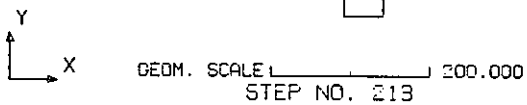


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

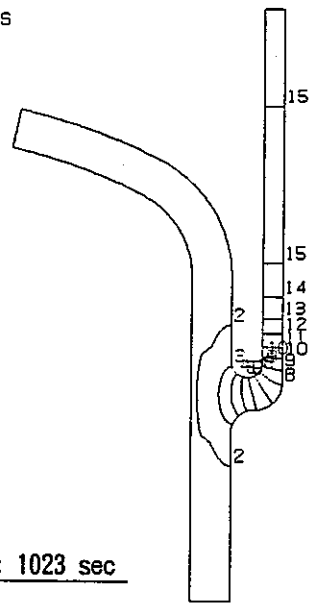


Cold : 600 sec



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



Cold : 1023 sec

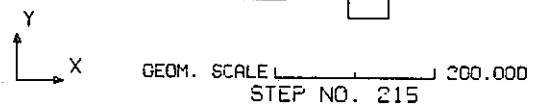
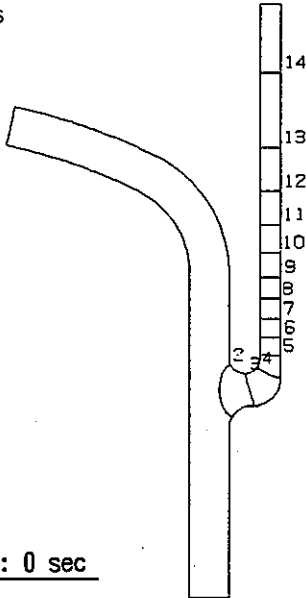


Fig. 2.4-8(a) Temperature contour (Case F-1)

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

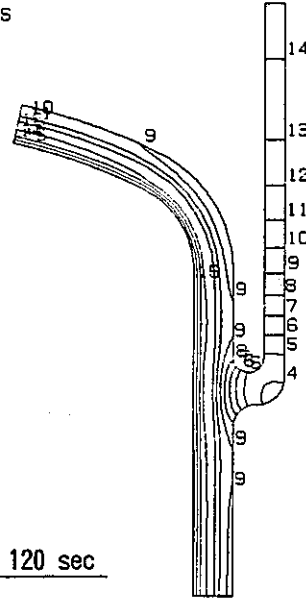


Hot : 0 sec

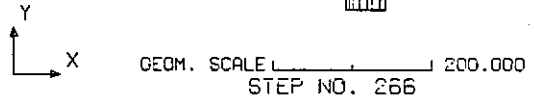


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

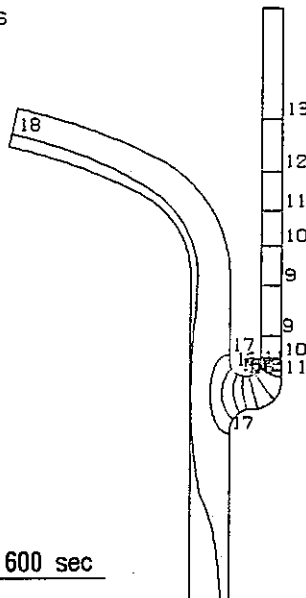


Hot : 120 sec

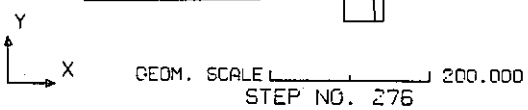


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

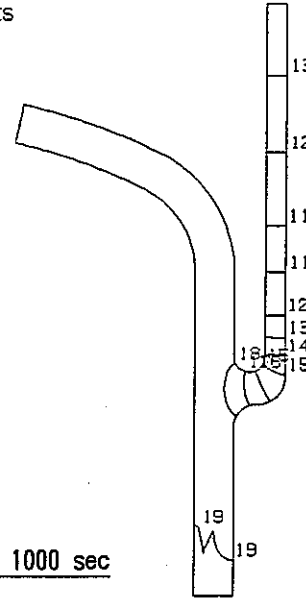


Hot : 600 sec



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



Hot : 1000 sec

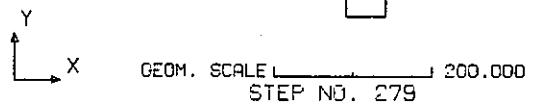
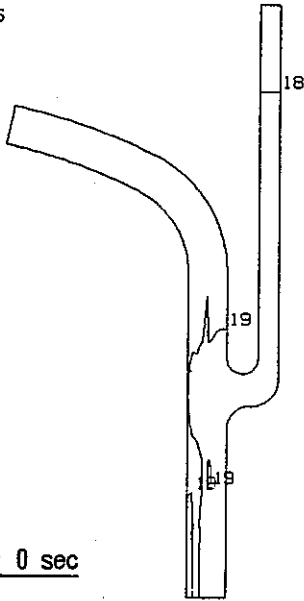


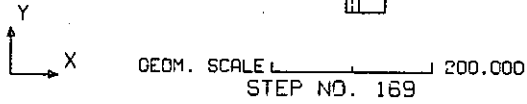
Fig.2.4-8(b) Temperature contour (Case F-1)

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

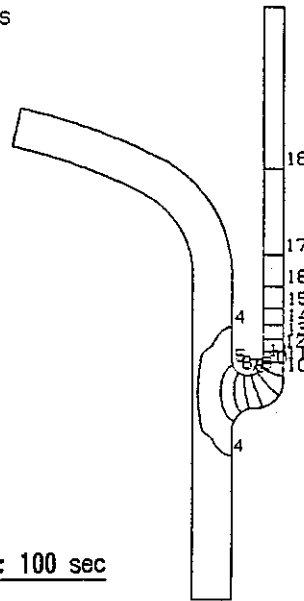


Cold : 0 sec

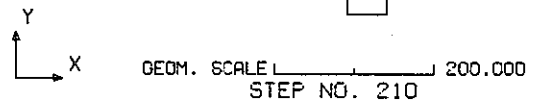


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

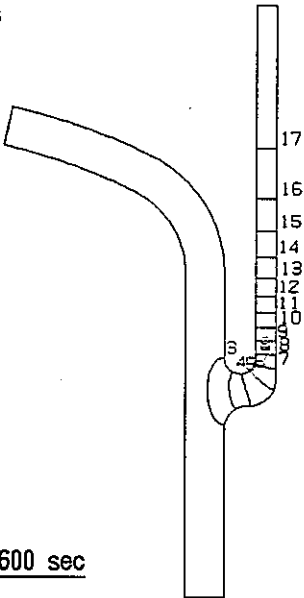


Cold : 100 sec

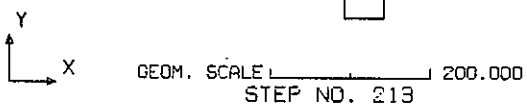


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

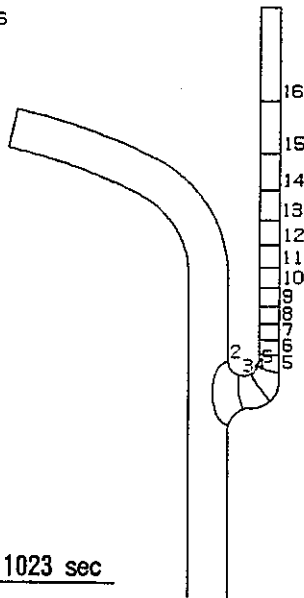


Cold : 600 sec



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



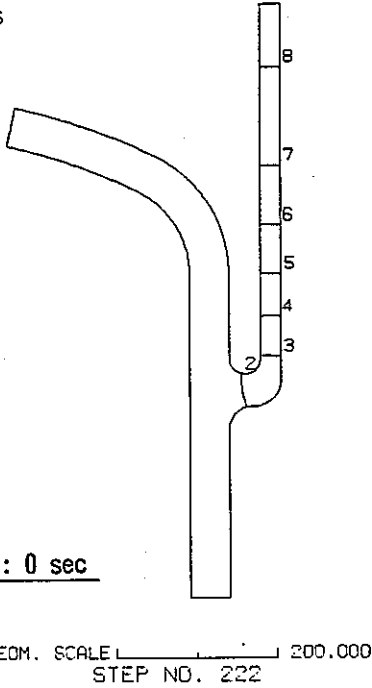
Cold : 1023 sec



Fig. 2.4-9(a) Temperature contour (Case F-2)

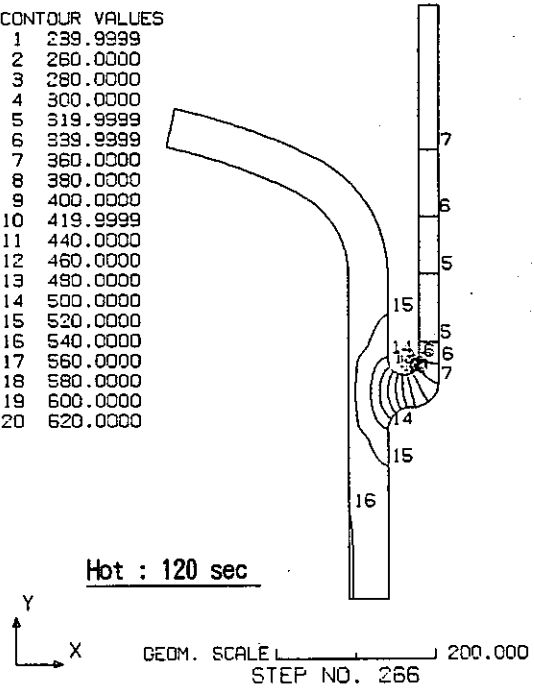
FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



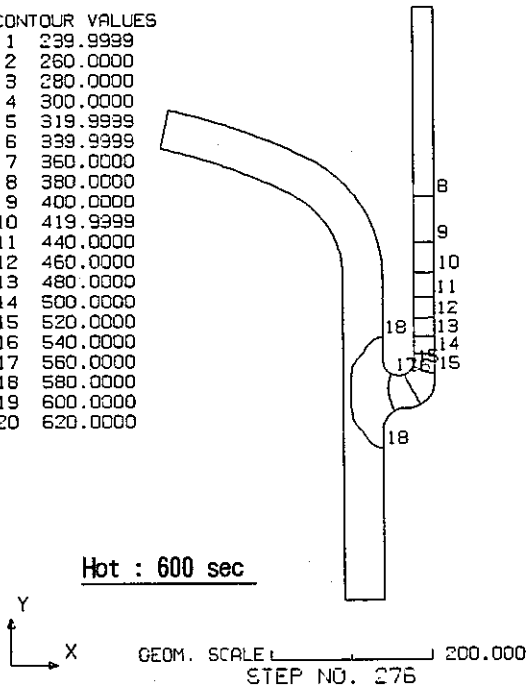
FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

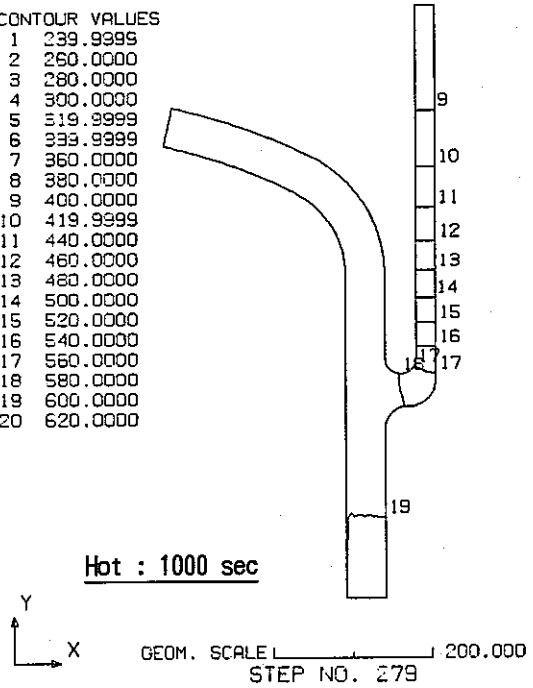
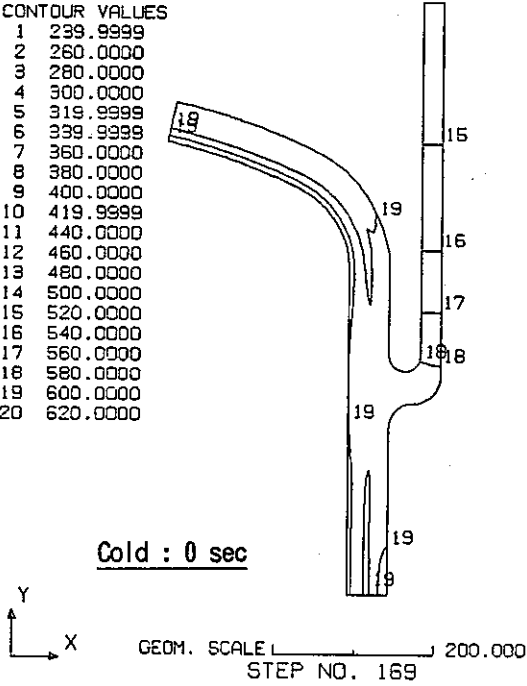


Fig. 2. 4-9(b) Temperature contour (Case F-2)

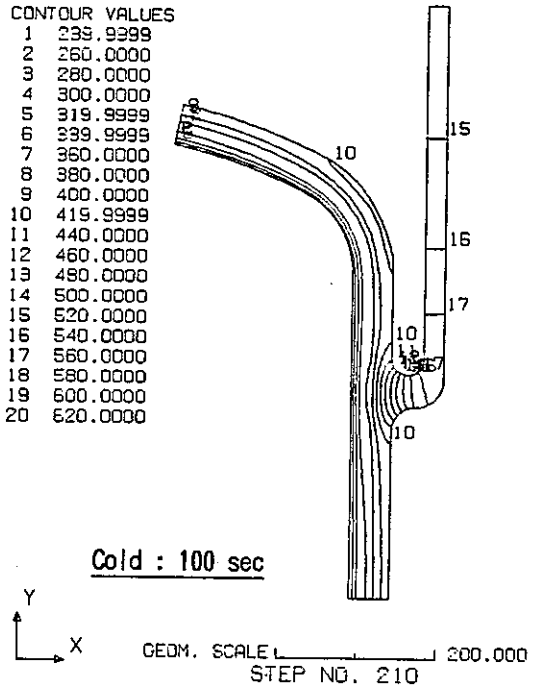
FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



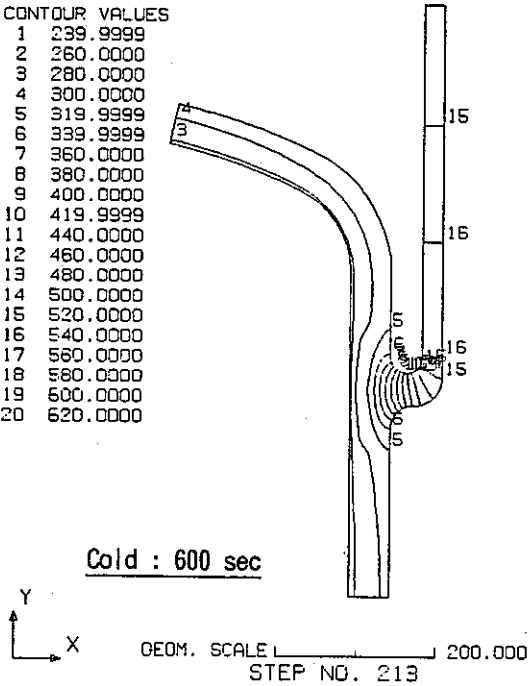
FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

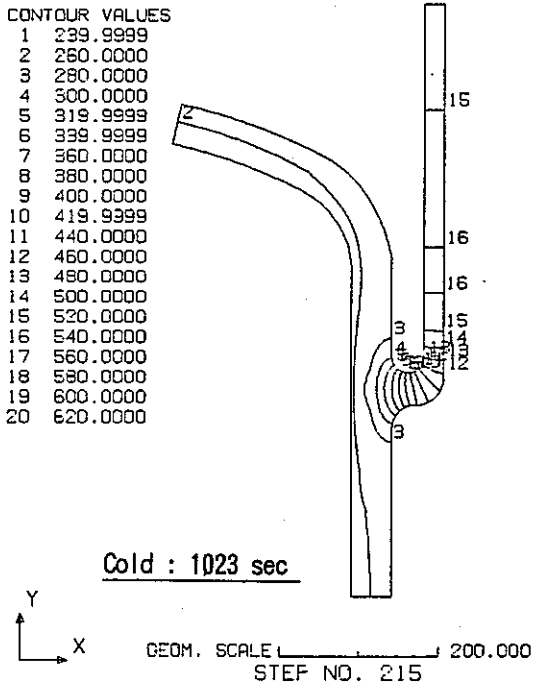
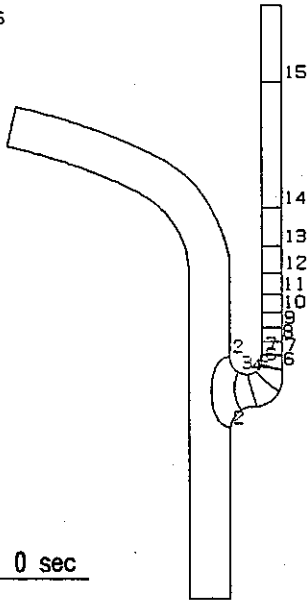


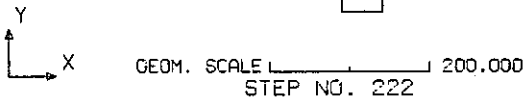
Fig. 2.4-10(a) Temperature contour (Case G-1)

FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

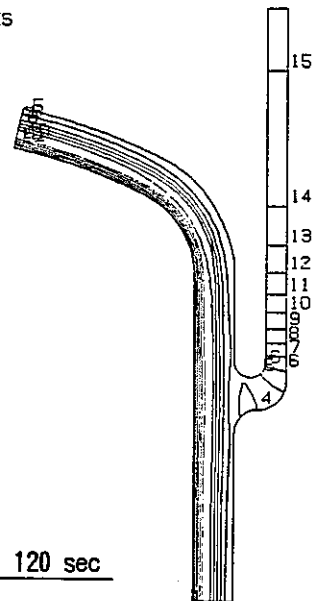


Hot : 0 sec

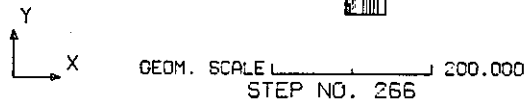


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

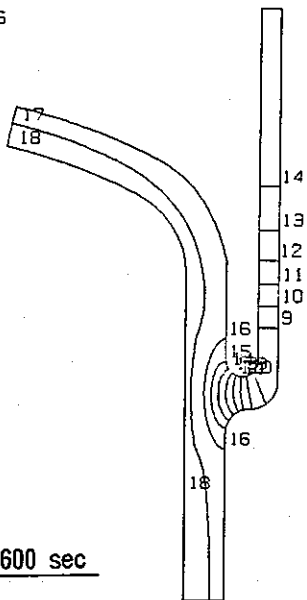


Hot : 120 sec

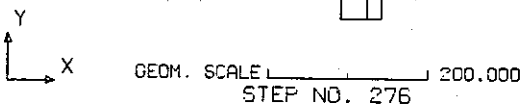


FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000

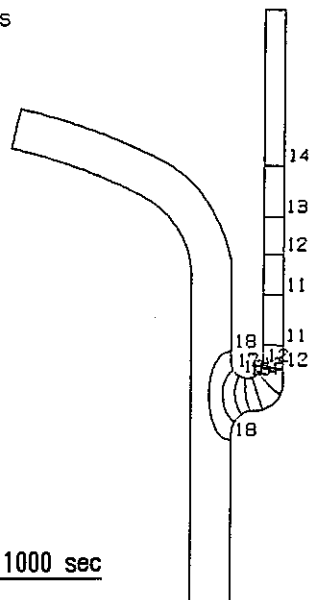


Hot : 600 sec



FINAS
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 239.9999
 - 2 260.0000
 - 3 280.0000
 - 4 300.0000
 - 5 319.9999
 - 6 339.9999
 - 7 360.0000
 - 8 380.0000
 - 9 400.0000
 - 10 419.9999
 - 11 440.0000
 - 12 460.0000
 - 13 480.0000
 - 14 500.0000
 - 15 520.0000
 - 16 540.0000
 - 17 560.0000
 - 18 580.0000
 - 19 600.0000
 - 20 620.0000



Hot : 1000 sec

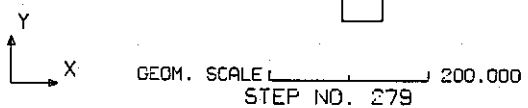


Fig. 2.4-10(b) Temperature contour (Case G-1)

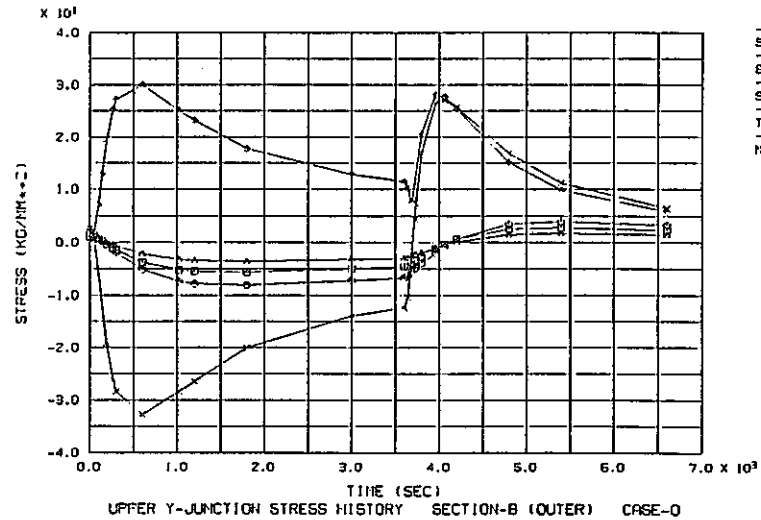
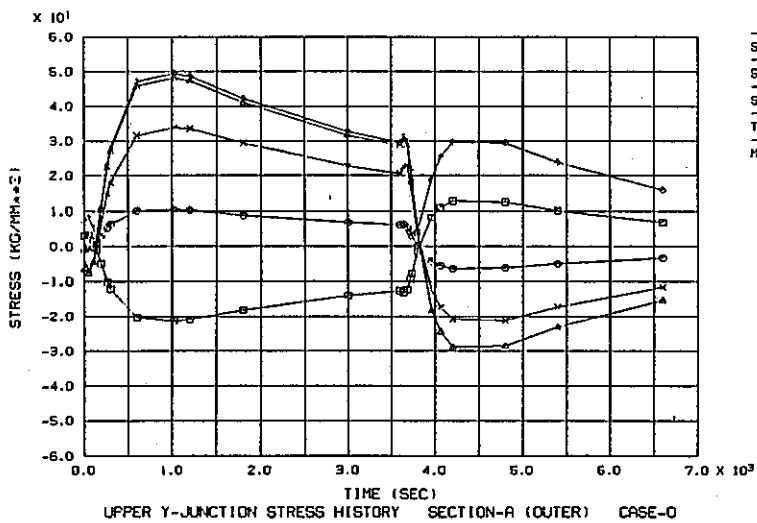
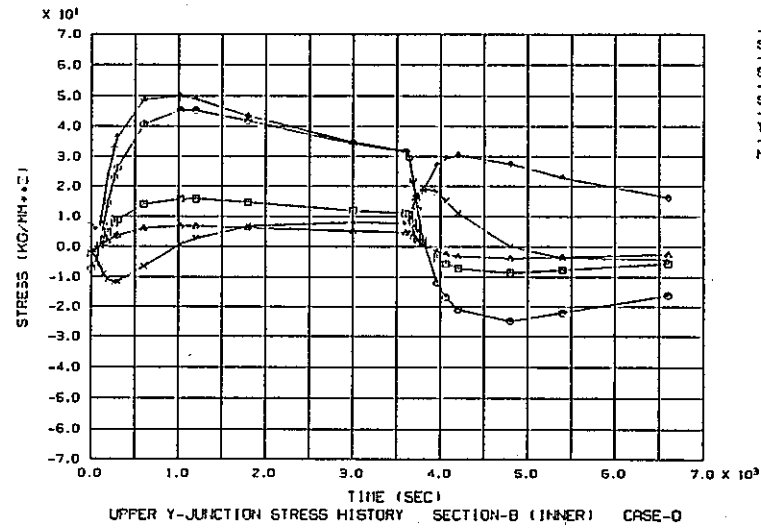
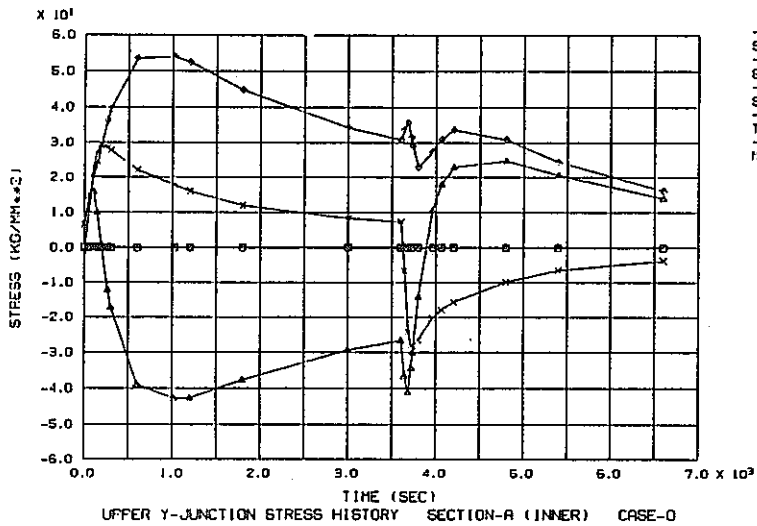


Fig. 2.4-11 Stress history at surface of estimation section (Standard Case - Elastic)

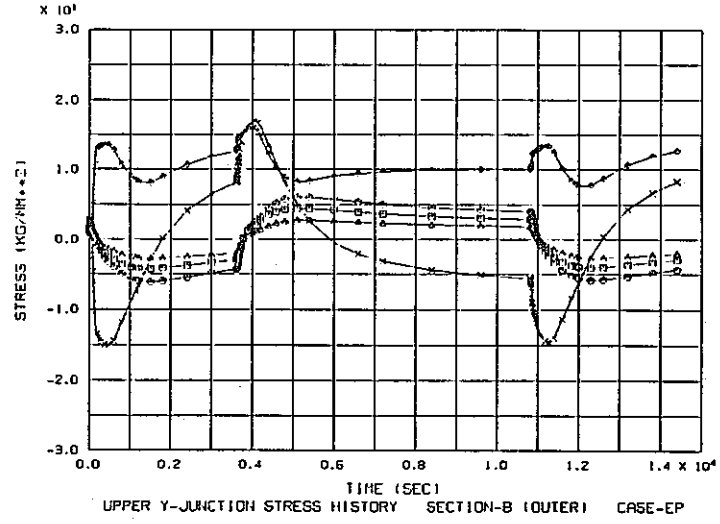
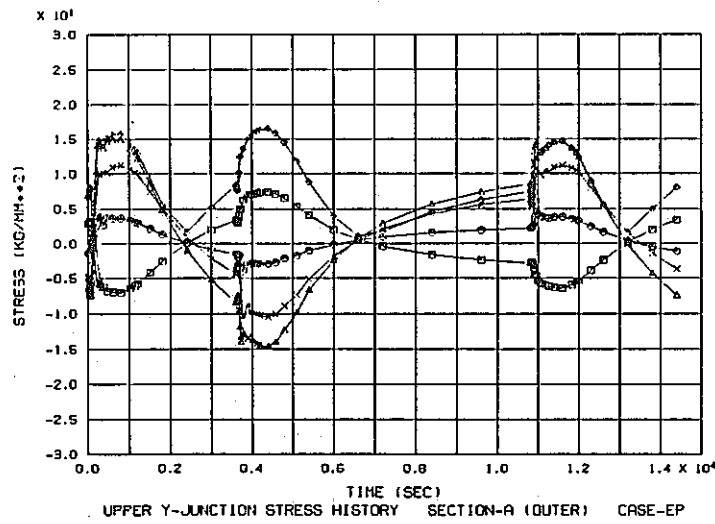
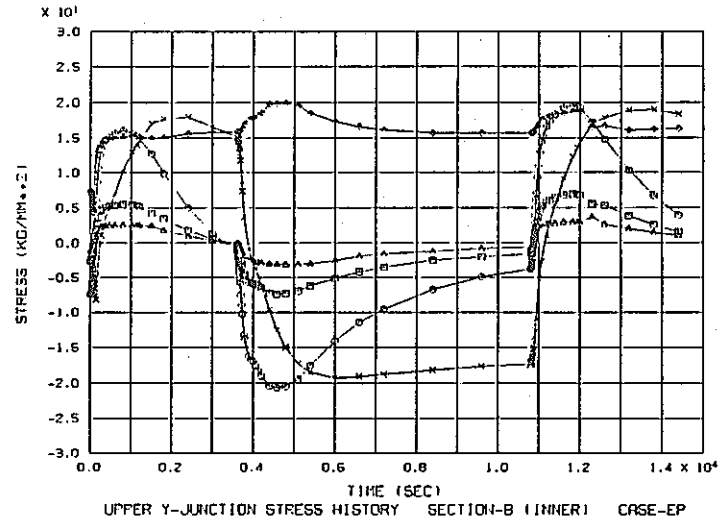
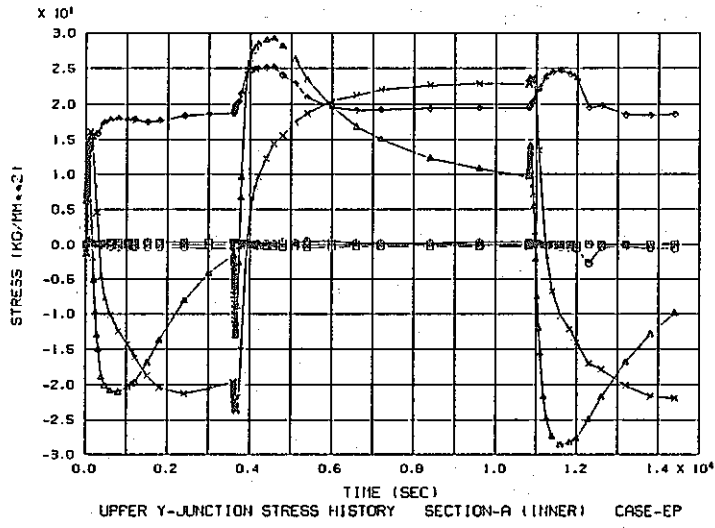


Fig. 2.4-12 Stress history at surface of estimation section (Standard Case - Elasto-plastic)

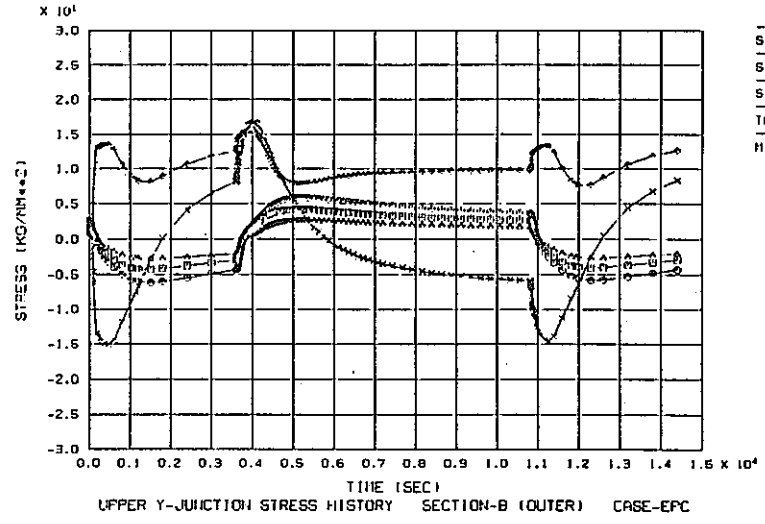
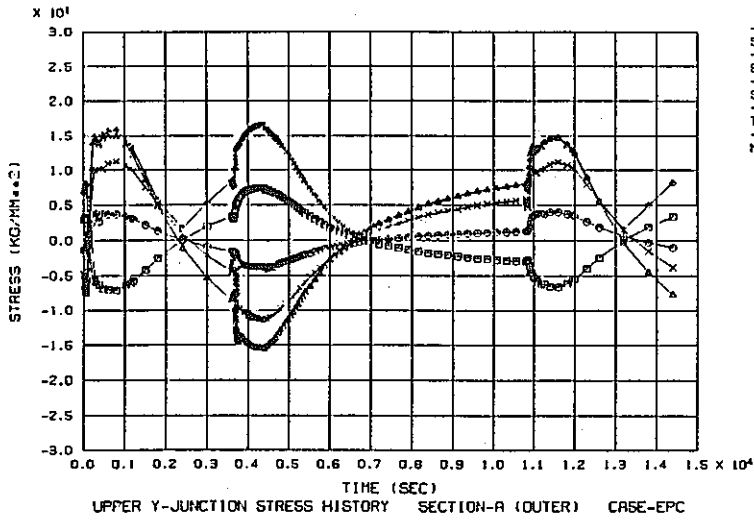
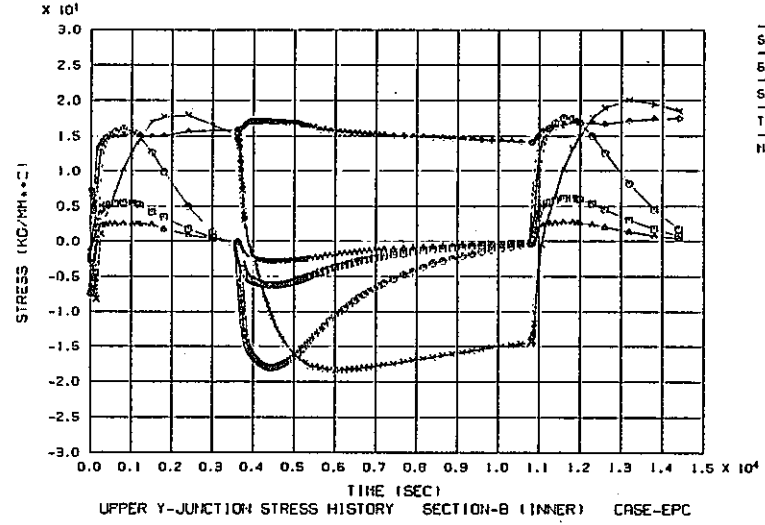
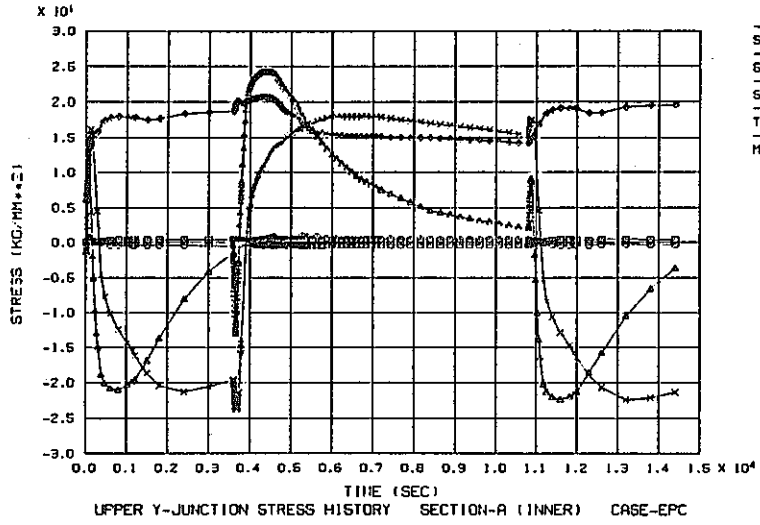


Fig. 2.4-13 Stress history at surface of estimation section (Standard Case - Elastic-plastic-creep)

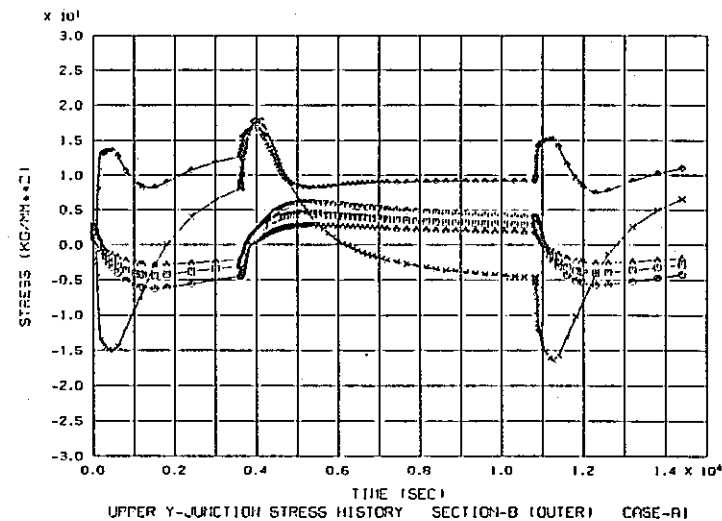
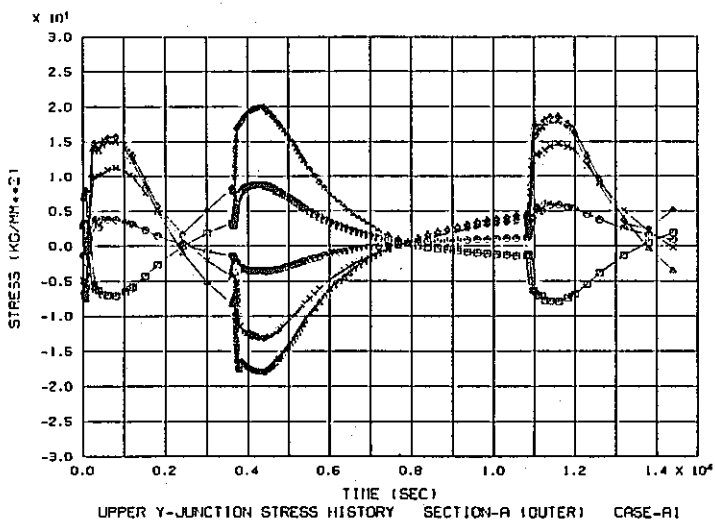
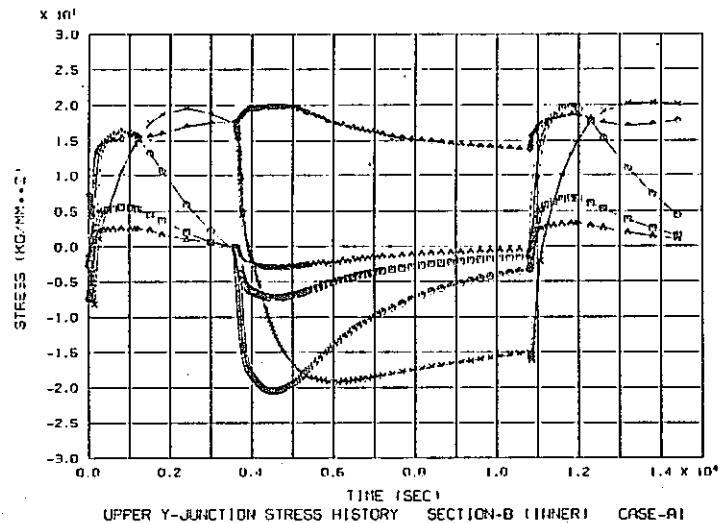
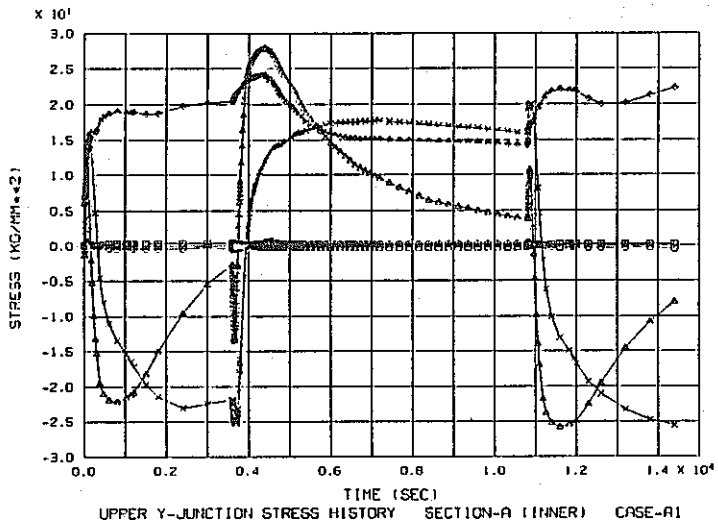
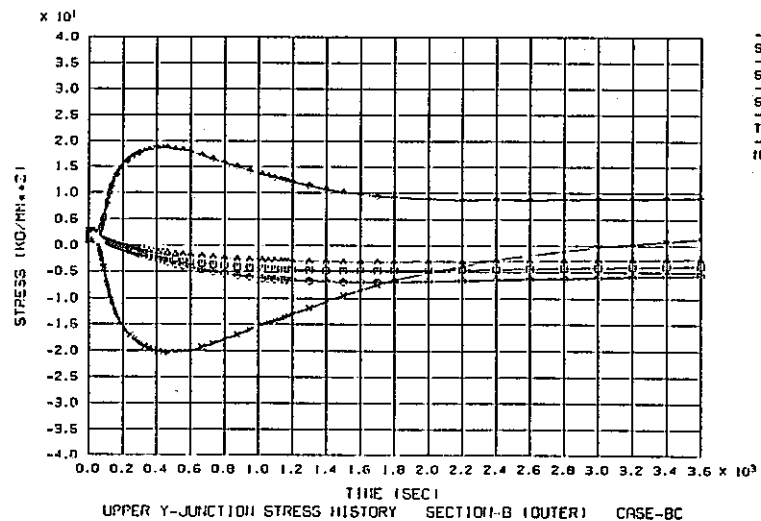
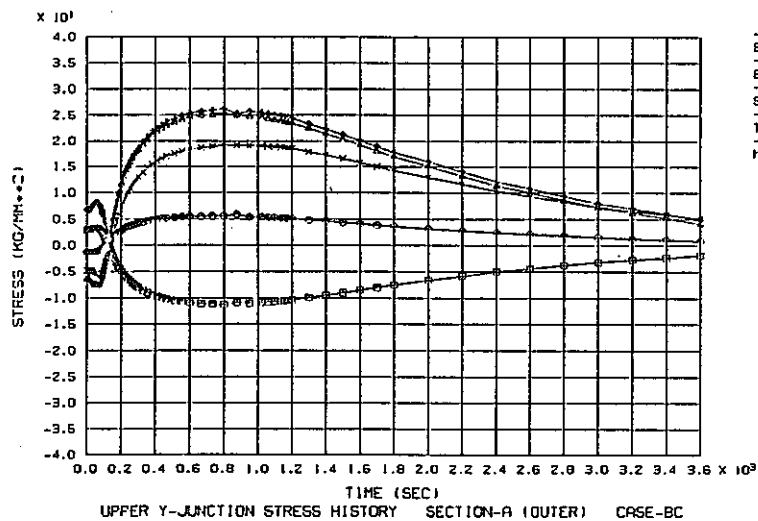
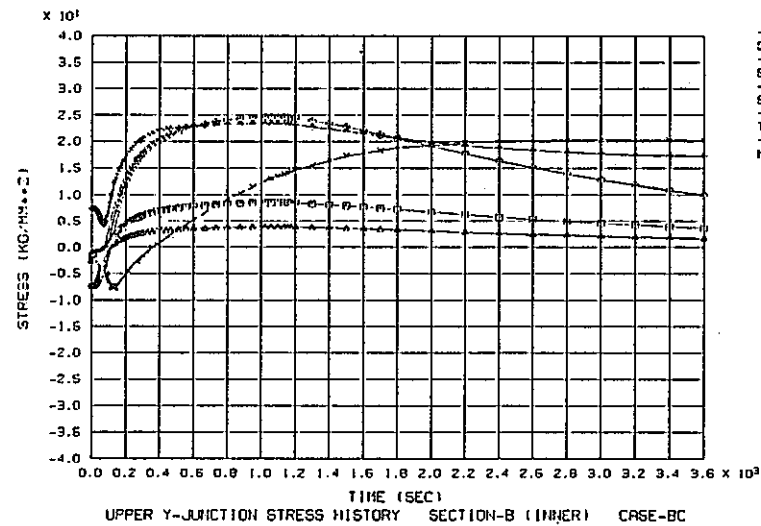
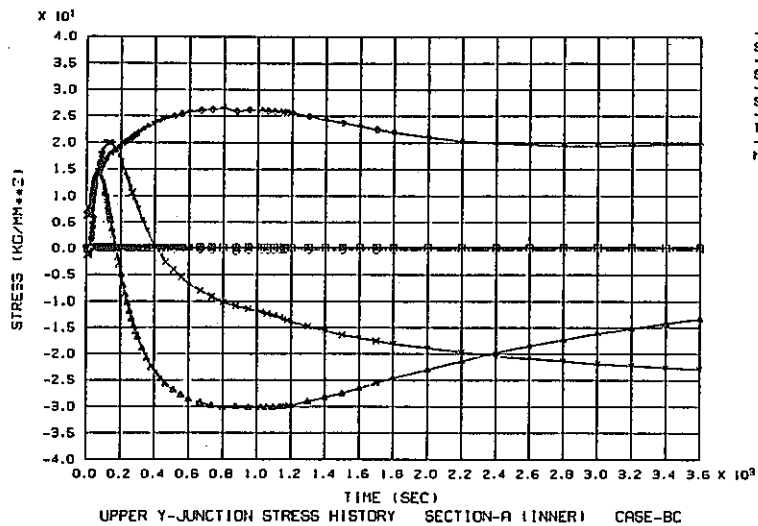
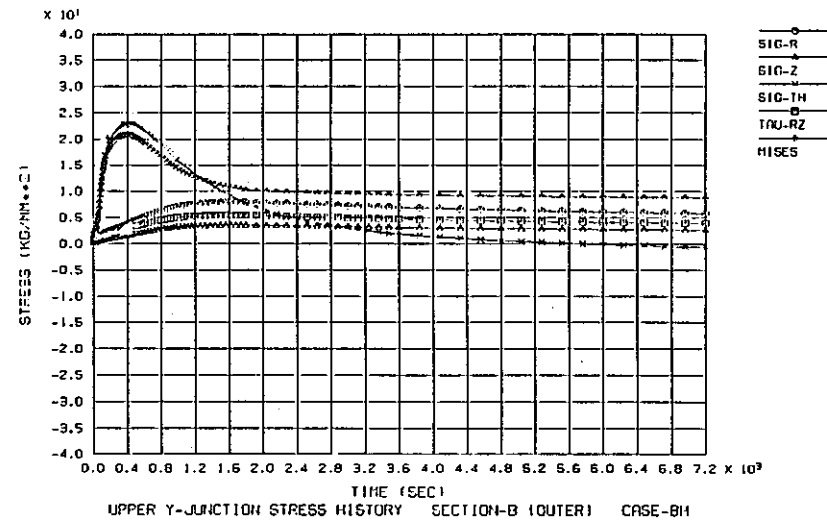
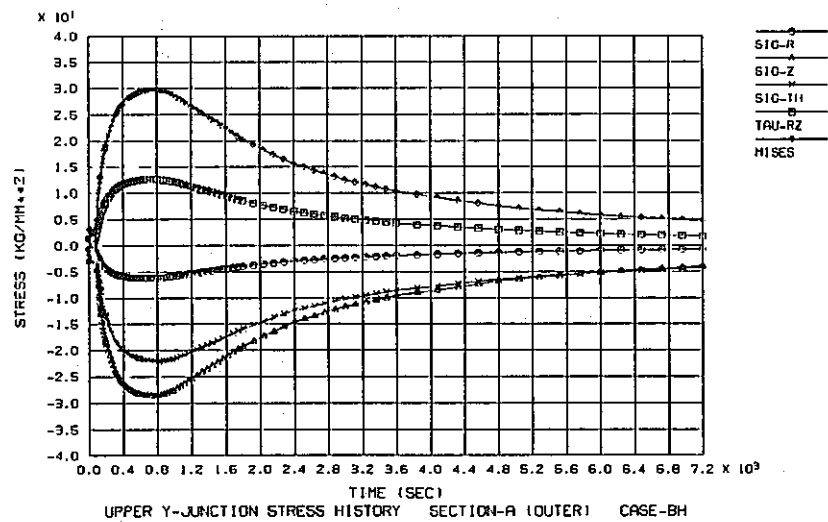
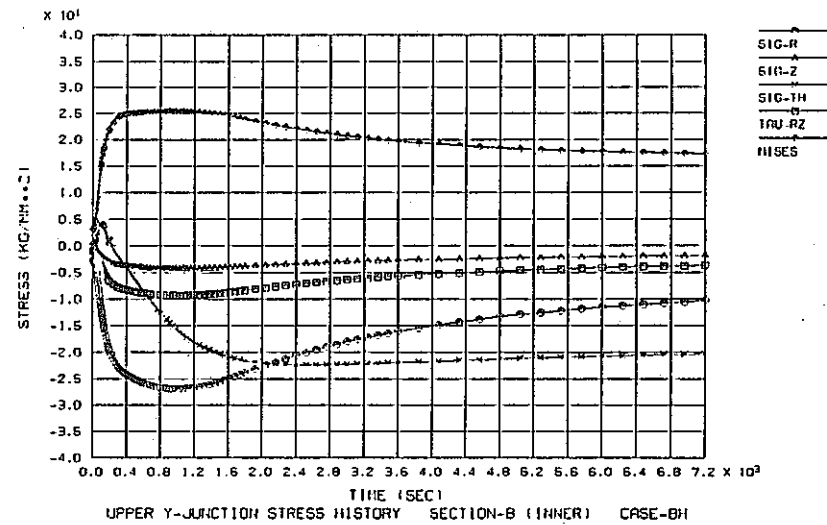
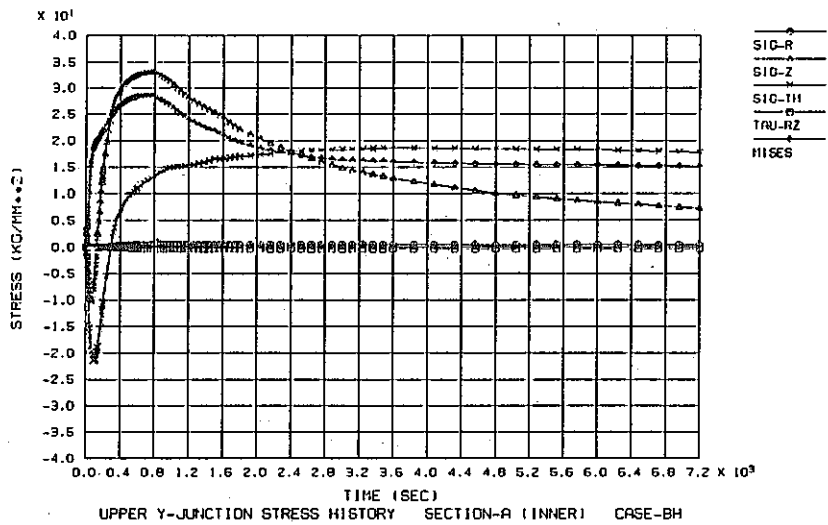


Fig. 2.4-14 Stress history at surface of estimation section (Case A-1)



コールドランジェント

Fig.2.4-15(a) Stress history at surface of estimation section (Case B-1)



ホットランジェント

Fig.2.4-15(b) Stress history at surface of estimation section (Case B-1)

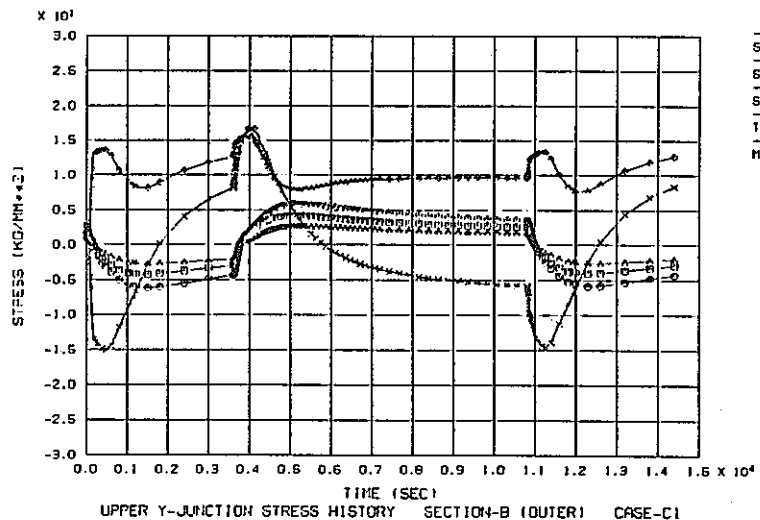
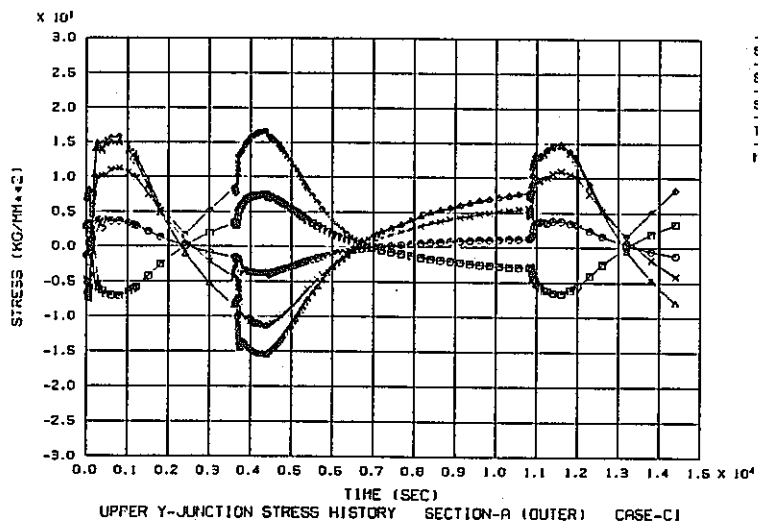
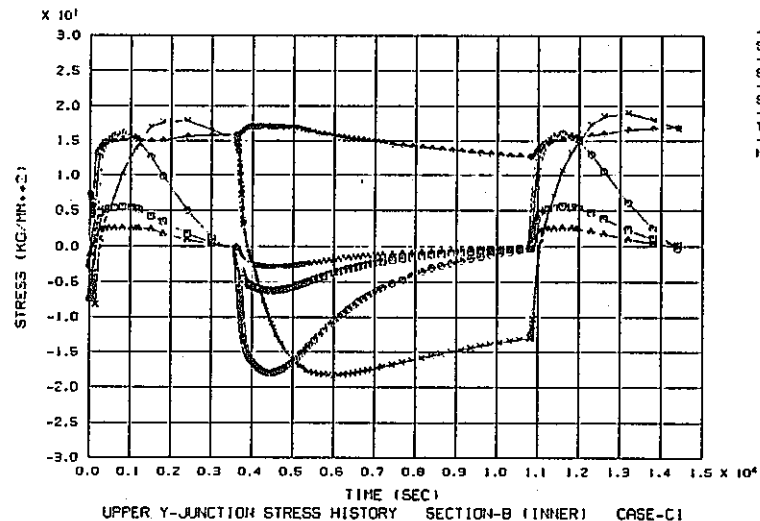
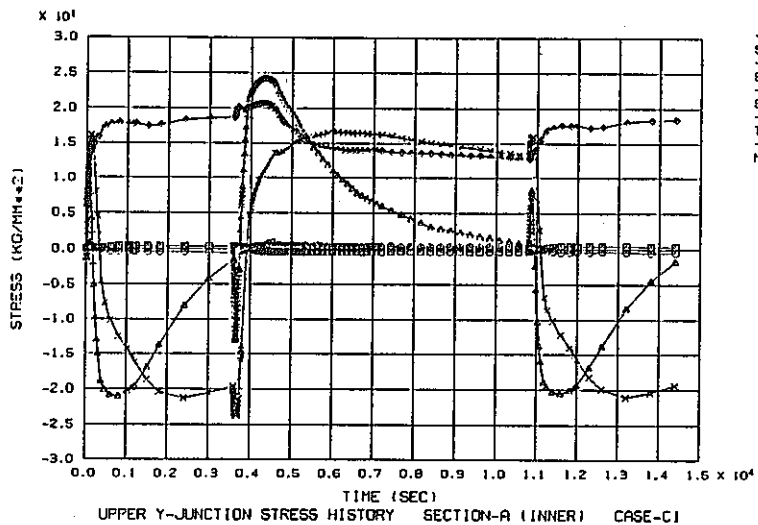


Fig. 2.4-16 Stress history at surface of estimation section (Case C-1)

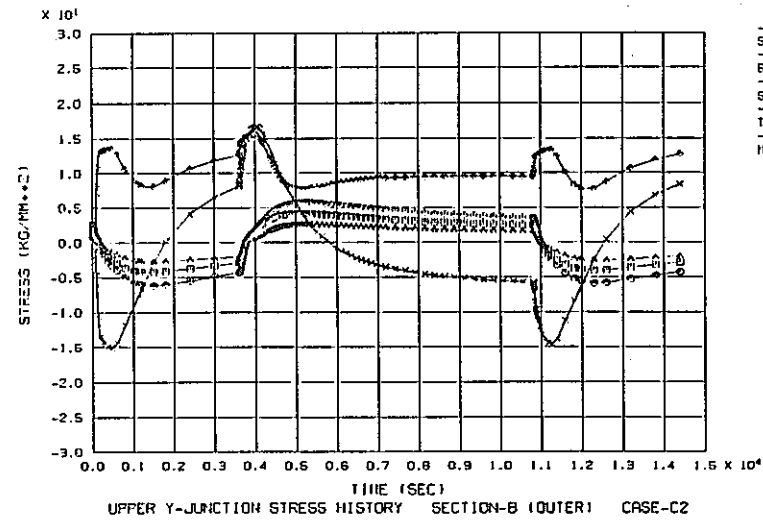
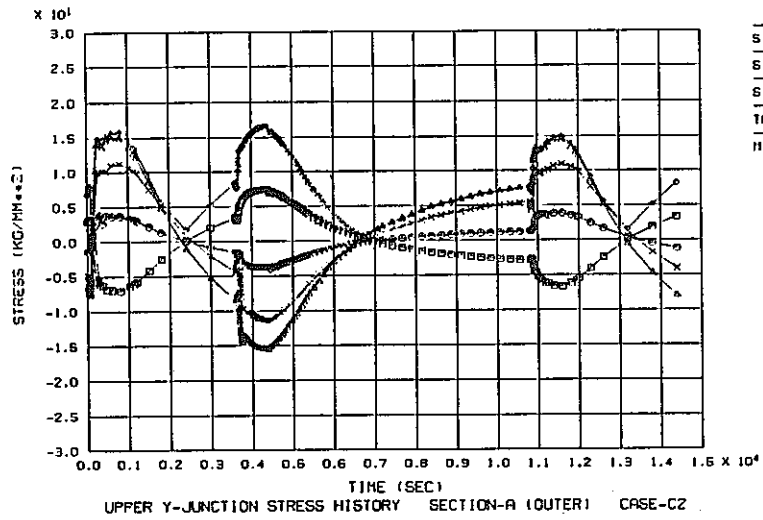
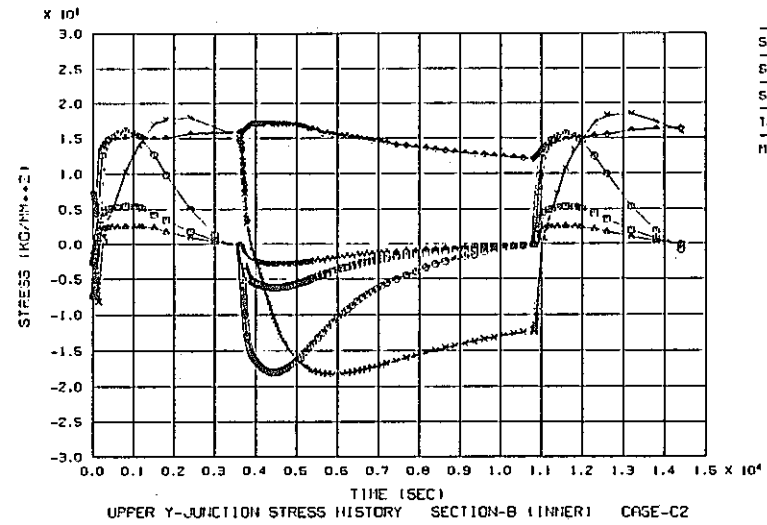
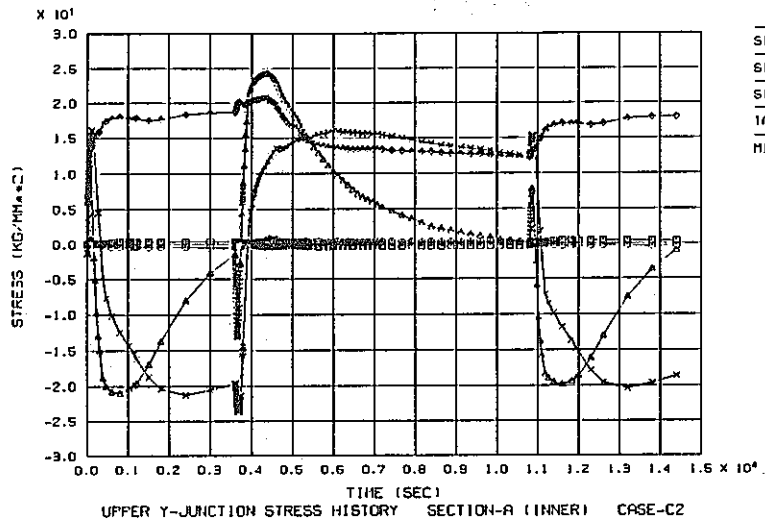


Fig.2.4-17 Stress history at surface of estimation section (Case C-2)

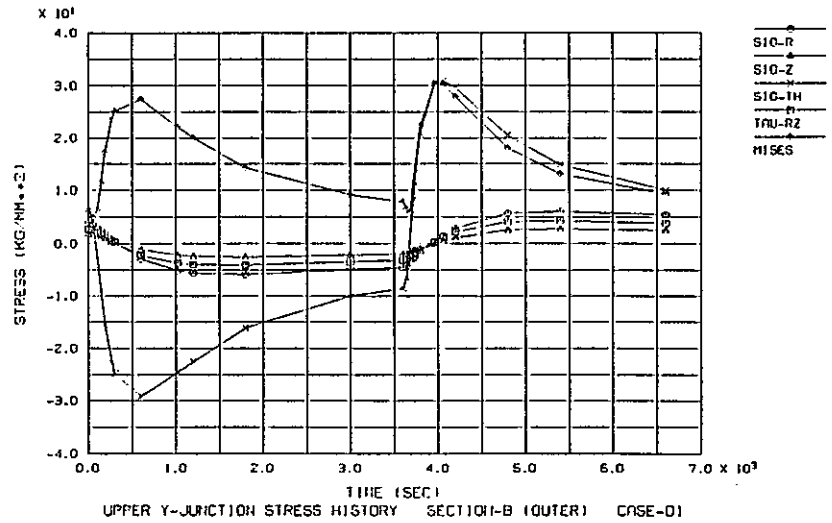
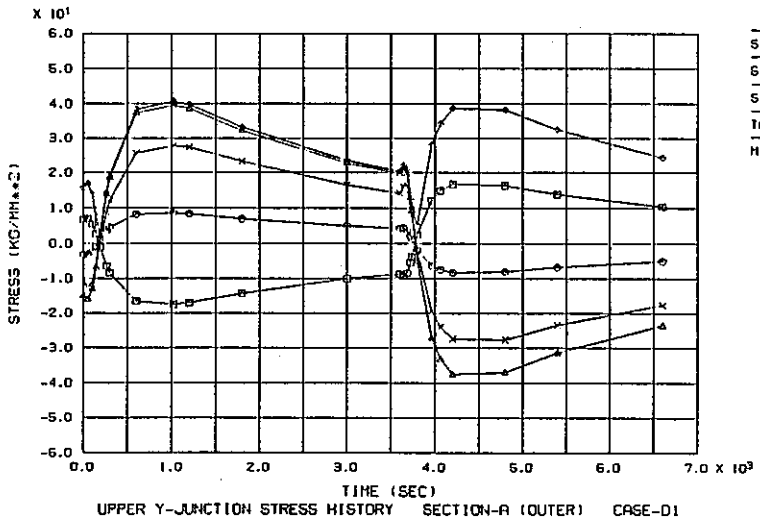
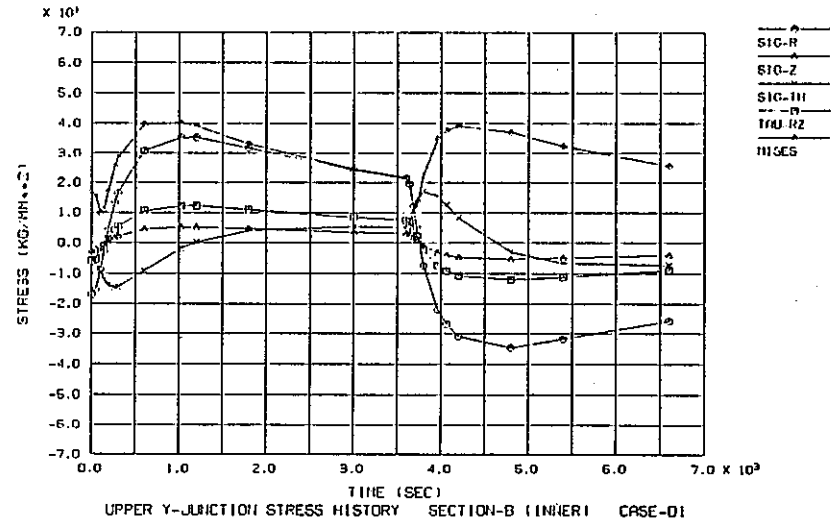
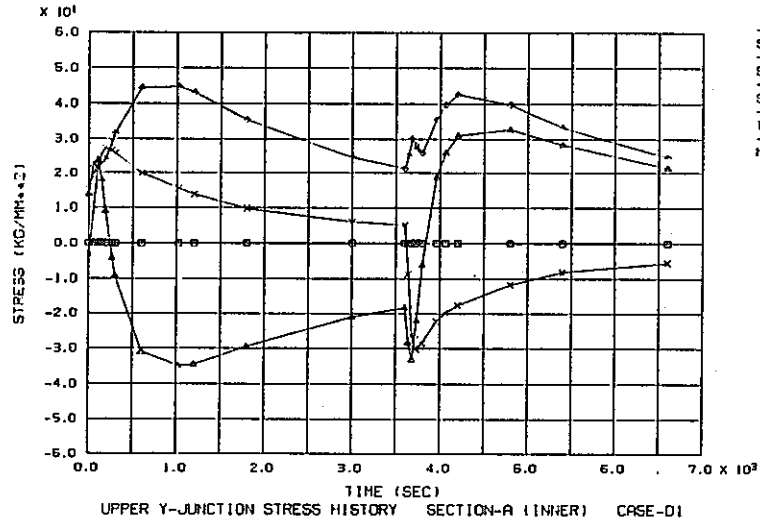
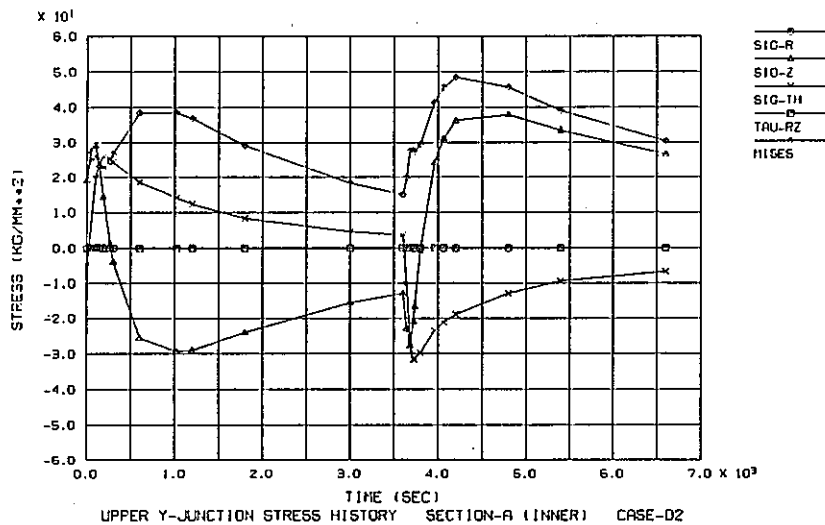
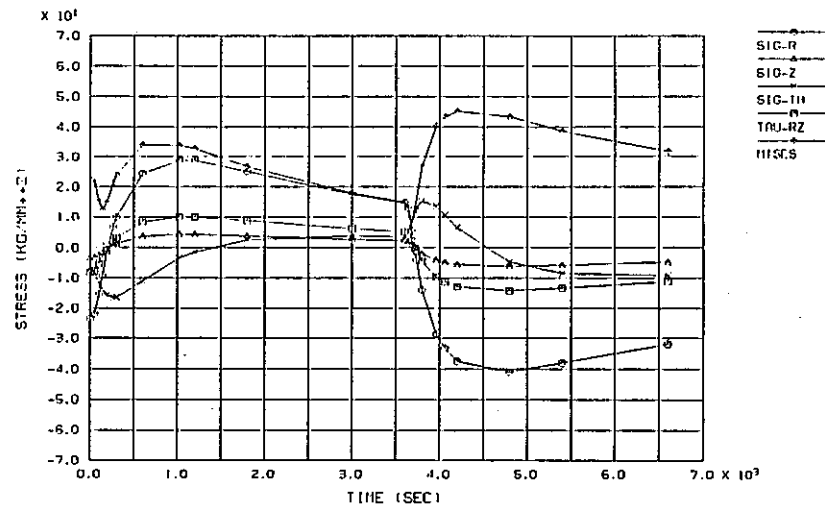


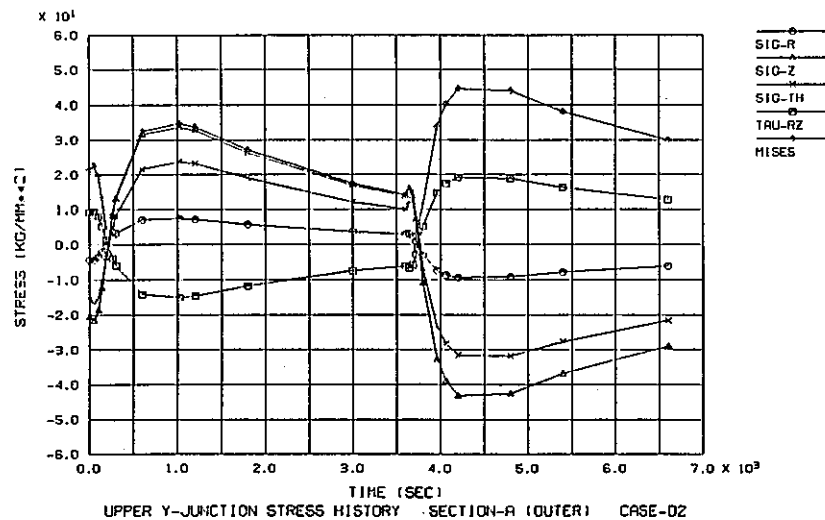
Fig. 2.4-18 Stress history at surface of estimation section (Case D-1)



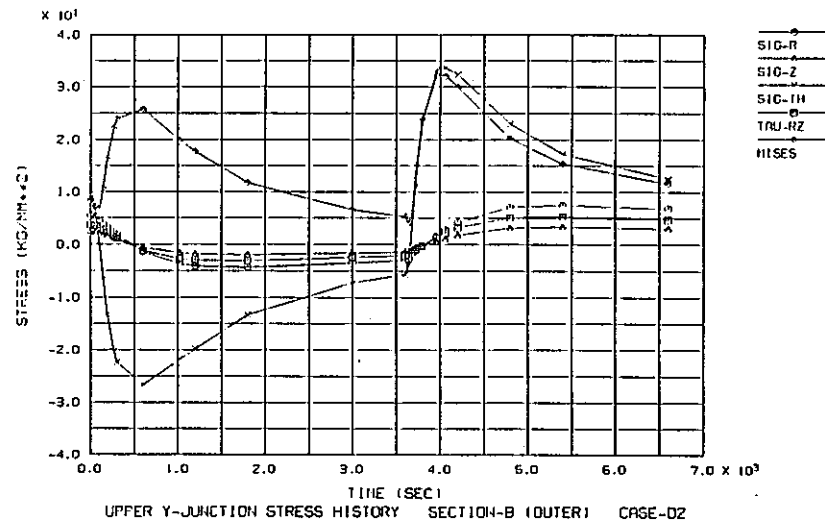
UPPER Y-JUNCTION STRESS HISTORY SECTION-A (INNER) CASE-D2



UPPER Y-JUNCTION STRESS HISTORY SECTION-B (INNER) CASE-D2



UPPER Y-JUNCTION STRESS HISTORY SECTION-A (OUTER) CASE-D2



UPPER Y-JUNCTION STRESS HISTORY SECTION-B (OUTER) CASE-D2

Fig.2.4-19 Stress history at surface of estimation section (Case D-2)

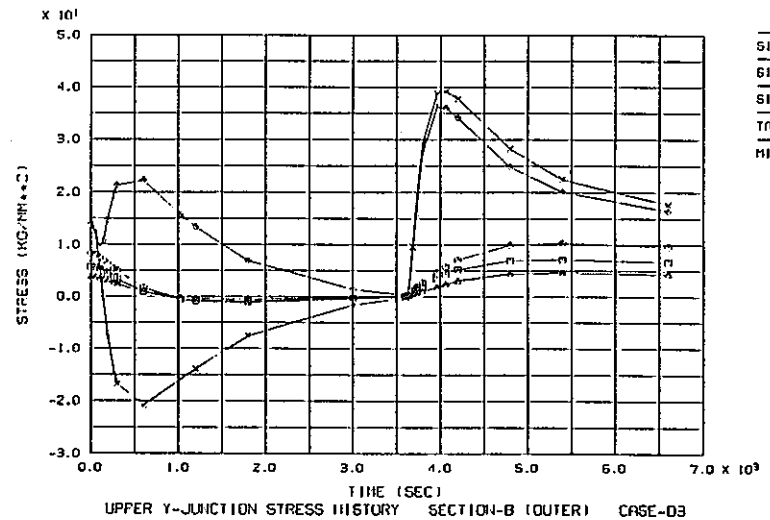
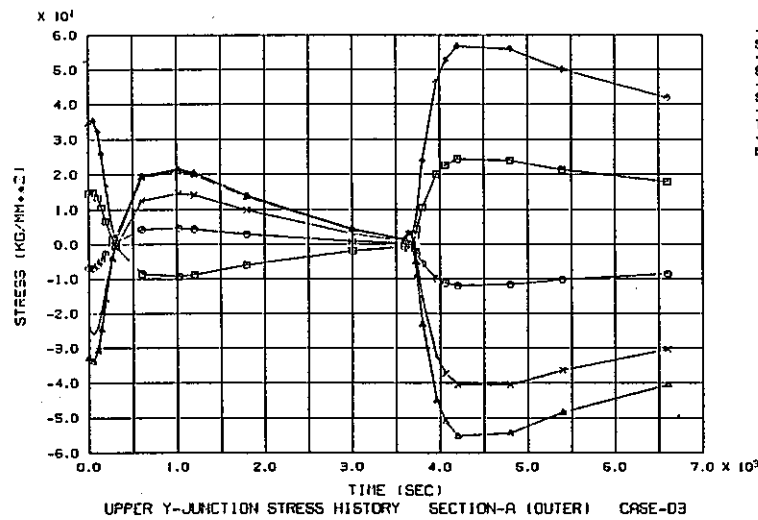
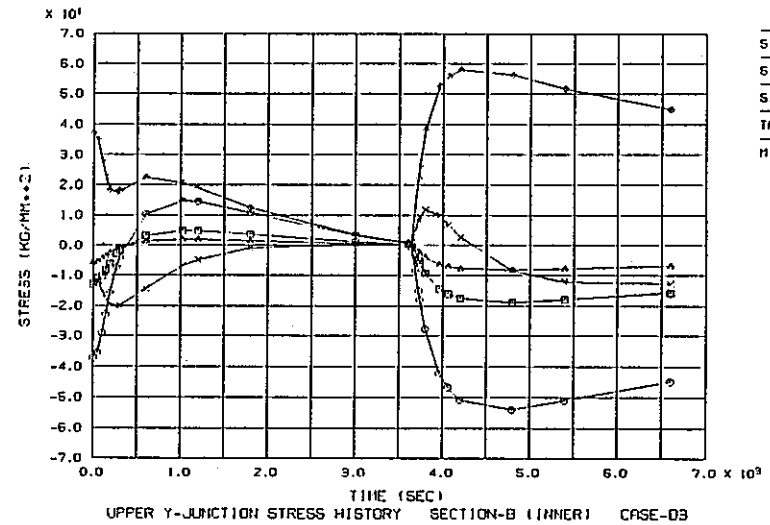
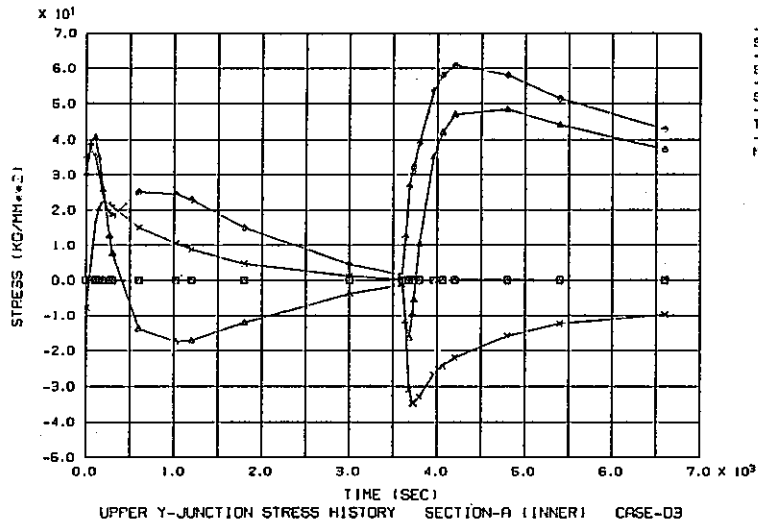


Fig. 2.4-20 Stress history at surface of estimation section (Case D-3)

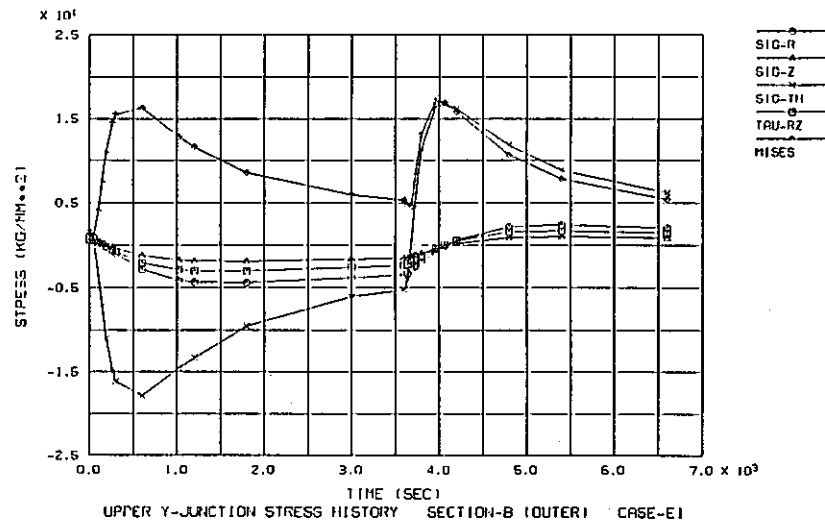
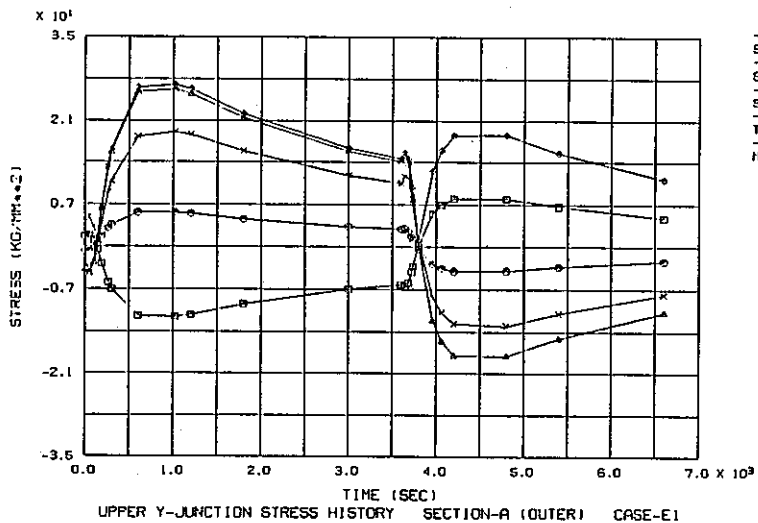
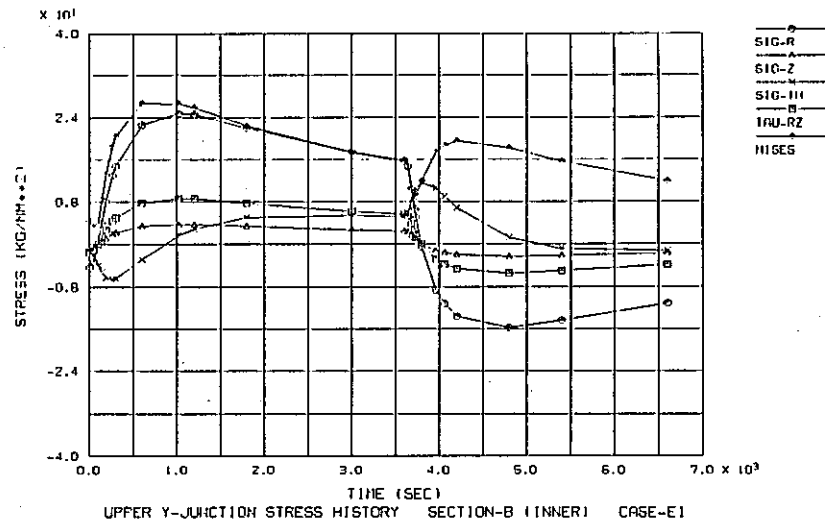
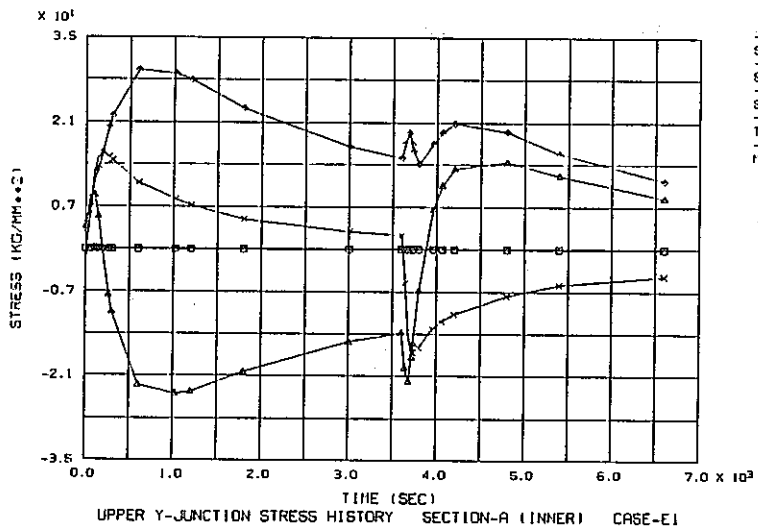


Fig. 2.4-21 Stress history at surface of estimation section (Case E-1)

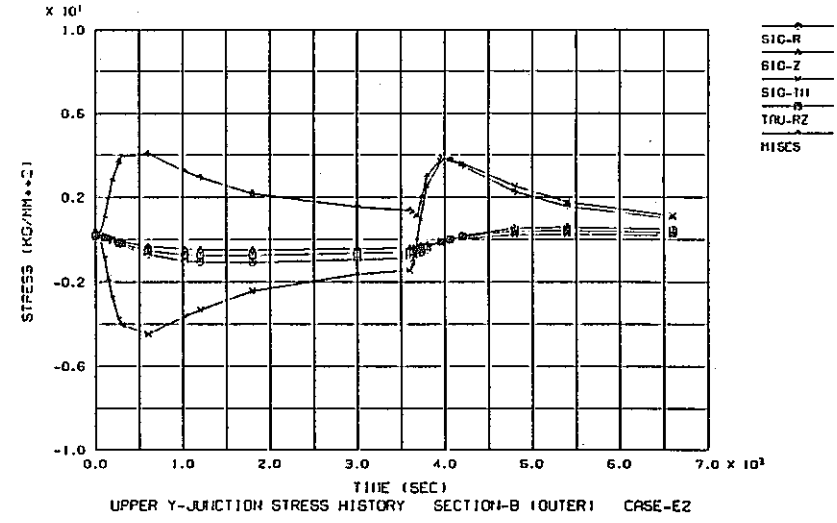
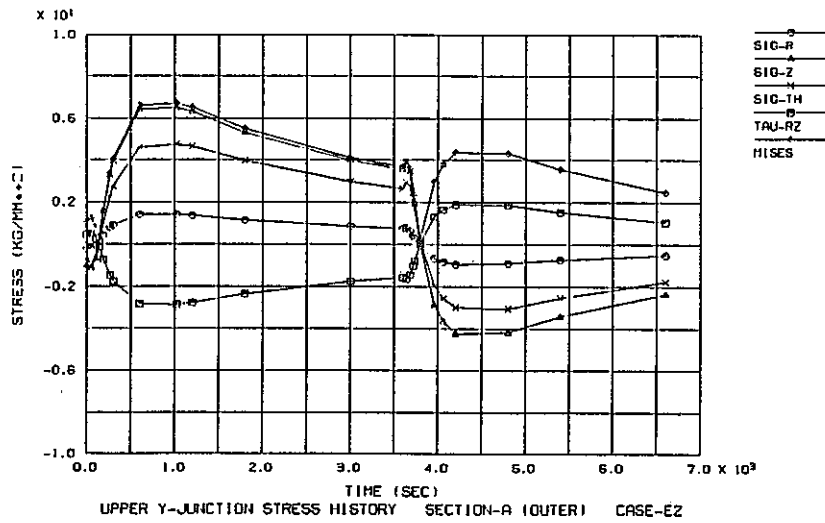
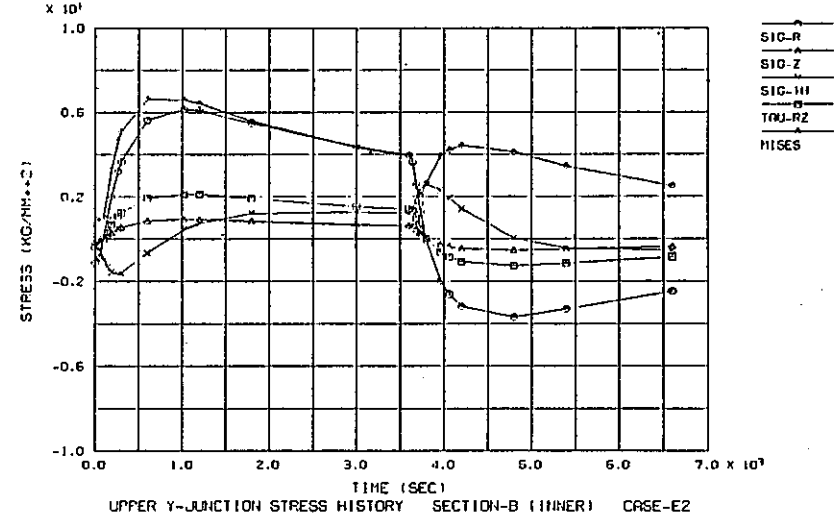
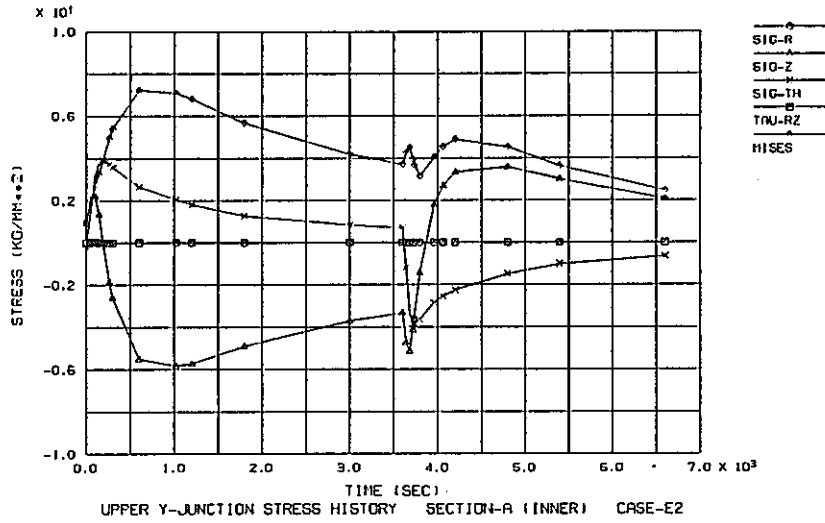


Fig. 2.4-22 Stress history at surface of estimation section (Case E-2)

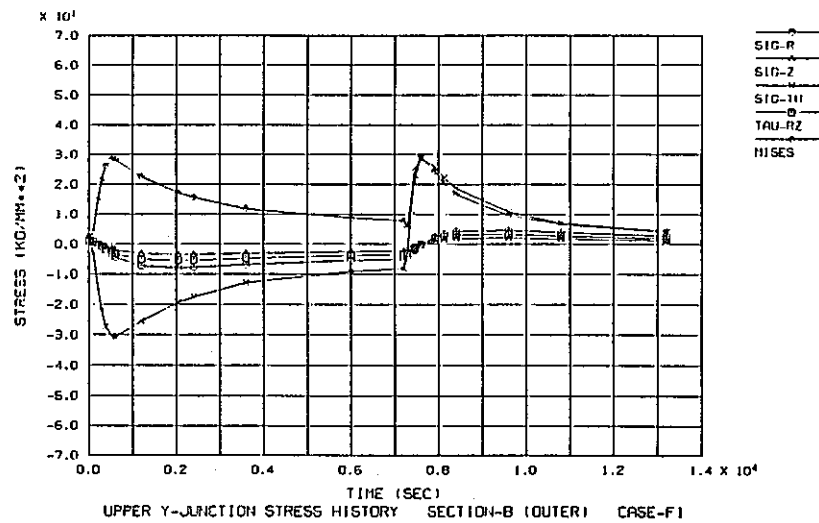
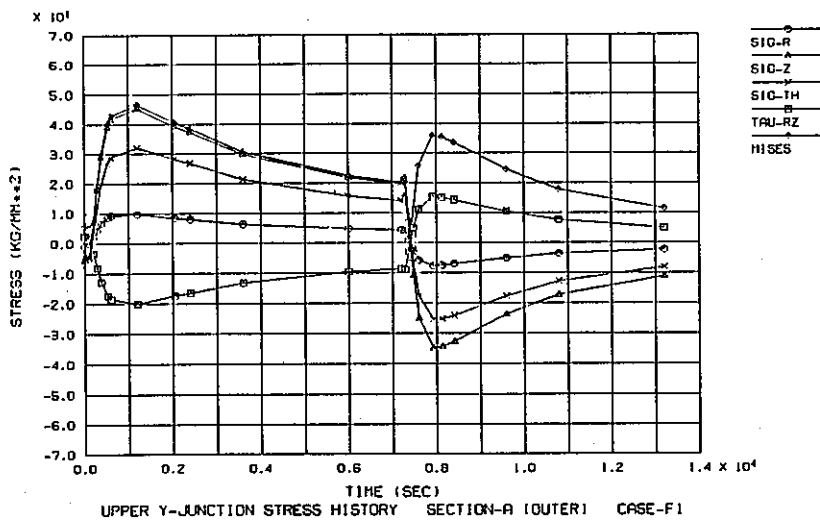
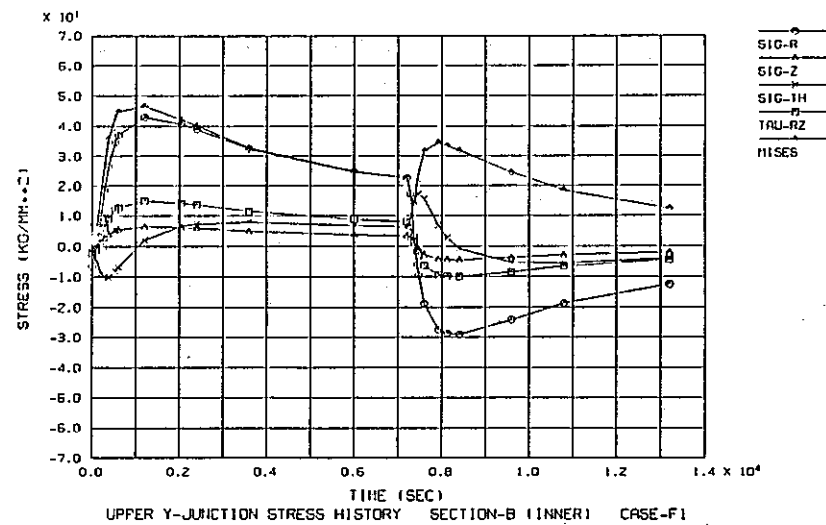
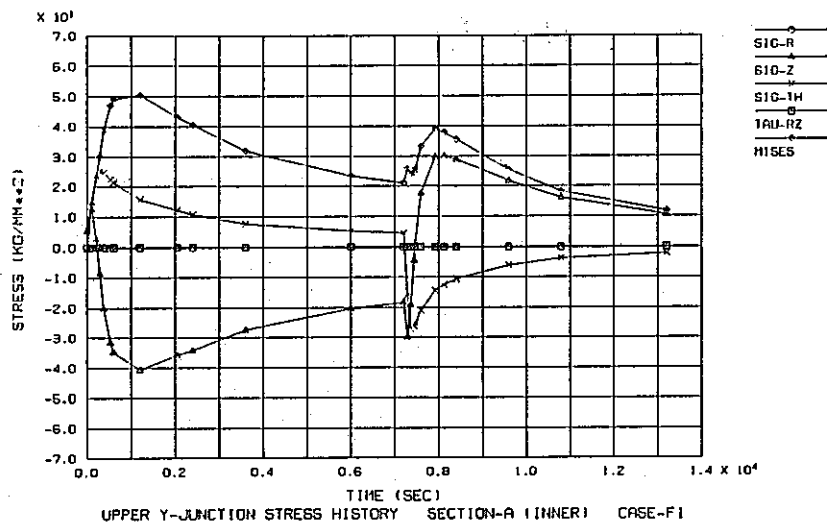


Fig. 2.4-23 Stress history at surface of estimation section (Case F-1)

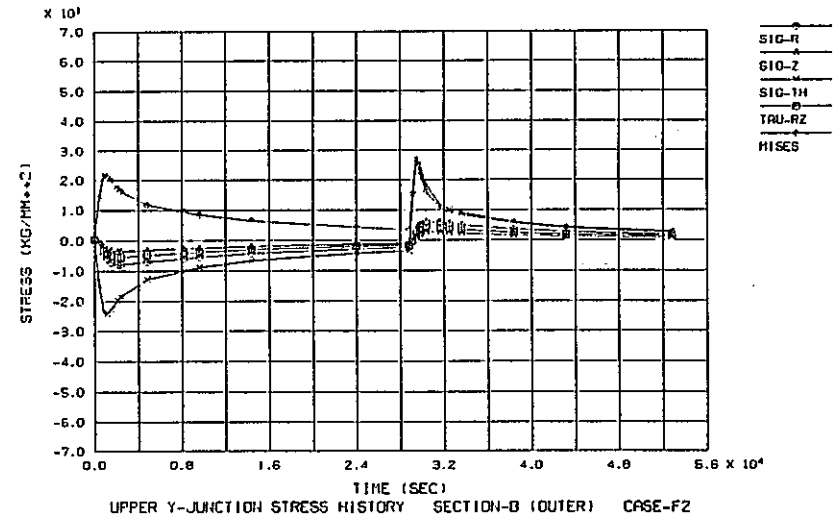
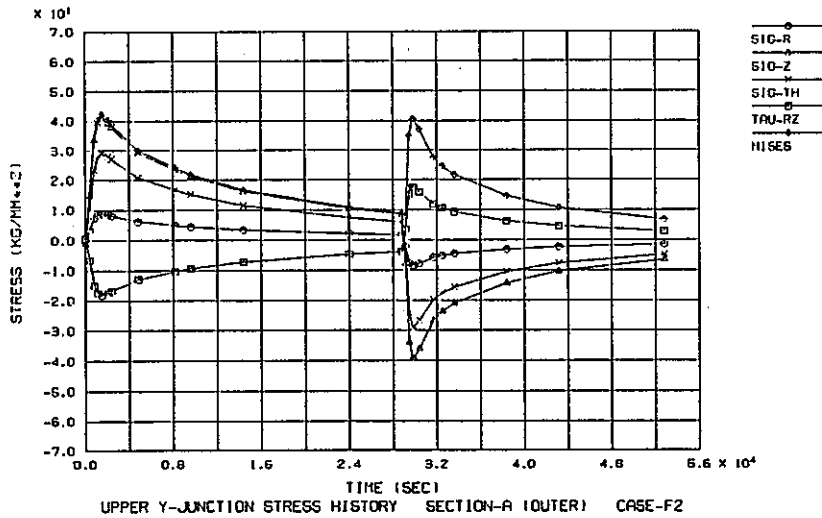
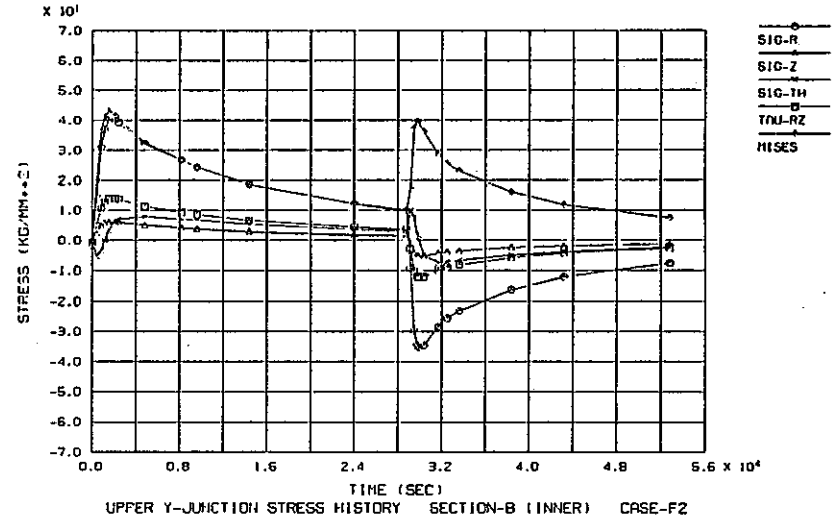
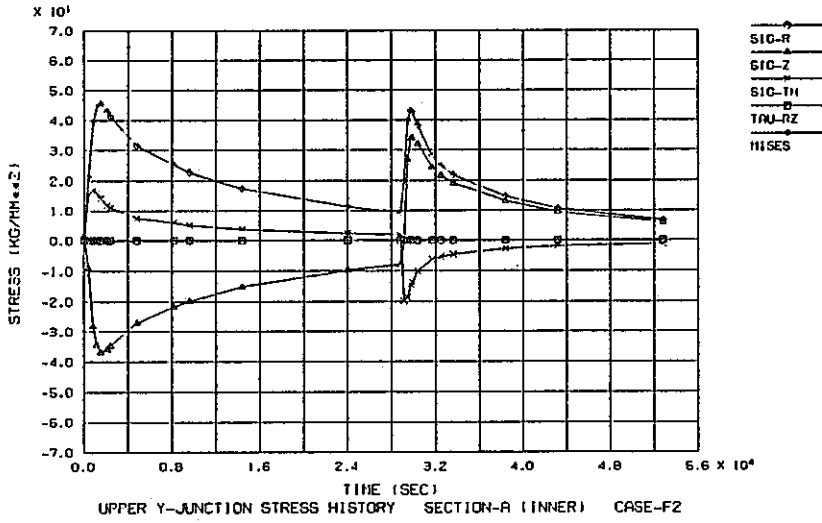


Fig. 2.4-24 Stress history at surface of estimation section (Case F-2)

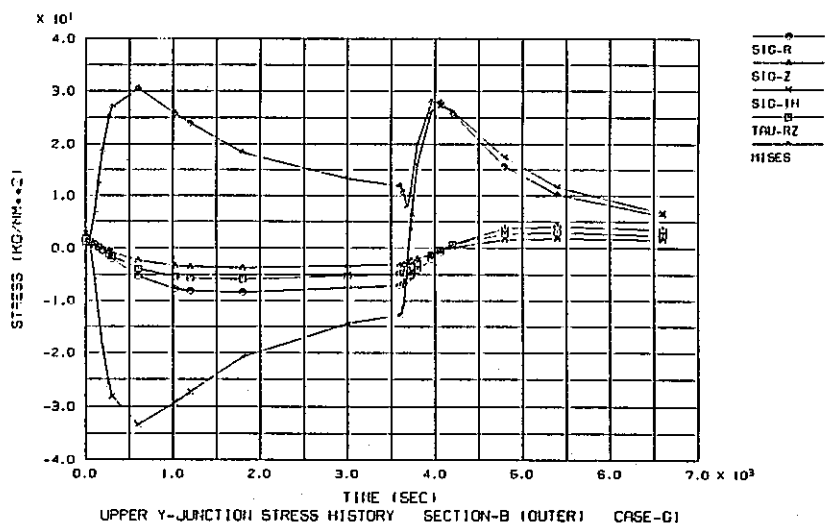
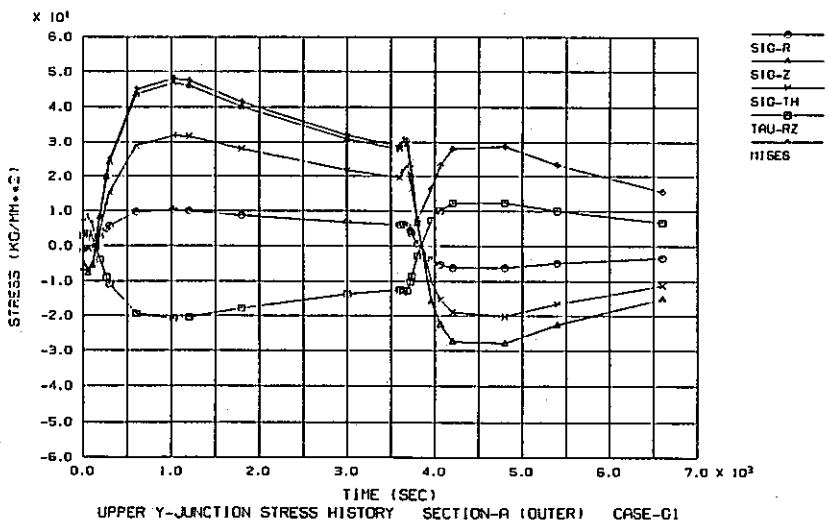
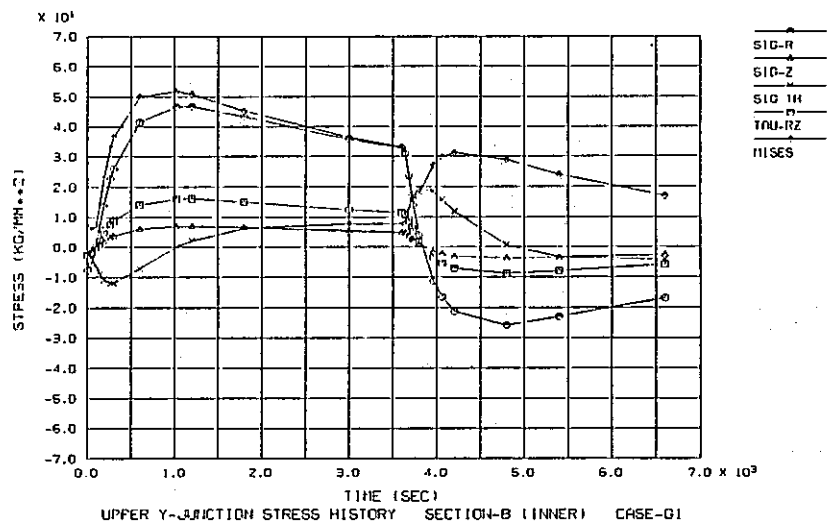
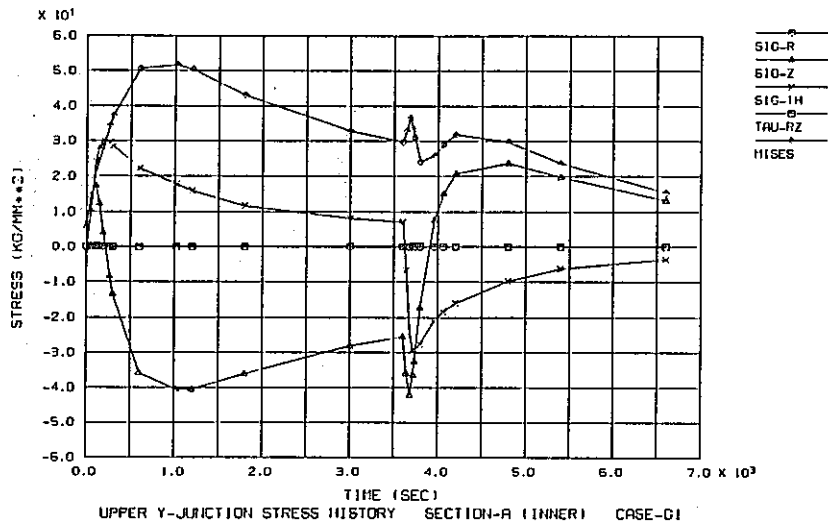


Fig. 2.4-25 Stress history at surface of estimation section (Case G-1)

3. クリープ疲労強度評価

3.1 評価手法

TTSで試験される供試体の強度は、TTS-DSによって評価される。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り、構造物のクリープ疲労強度を実質的に予測することができる。Fig.3.1-1 にTTS-DSの評価手法の流れを示す。

(1) ひずみ範囲の算出

a. 最大相当ひずみ範囲

TTS-DS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成分より、熱過渡サイクル中の最大相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{e,q}$ を次式で求める。

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

弾塑性及び弾塑性クリープ解析では、ここで求まる相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{e,q}$ をひずみ範囲 ε_t に読み替える。

弾性解析では、公称ひずみ範囲 ε_n を次式で求める。

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

更に、ひずみ範囲 ε_t を次式で求める。

$$\varepsilon_t = K_\varepsilon \cdot \varepsilon_n$$

ここで、 K_ε はひずみ集中係数で、弾性解析で得られたひずみにこの定数を乗ずることにより、塑性効果を含めたひずみ範囲を算出する。本評価では $K_\varepsilon = 1.2$ とした。

b. 疲労損傷の算出

熱過渡1サイクル中のひずみ範囲 ε_t 、ひずみ速度 $2\varepsilon_t/t_c$ (t_c : 熱過渡周期)、温度 T_{max} (熱過渡サイクル中の最高温度)を最適疲労破損式に代入して得られる

寿命を N_f とする。

$$N = N(\epsilon_f)$$

繰返し熱過渡サイクル数を n とし、次式で疲労損傷 D_f を求める。

$$D_f = n / N_f$$

c. クリープ損傷の算出

熱過渡1サイクル中のひずみ範囲から動的応力ひずみ式を用いて初期応力 σ_0 を算出する。この初期応力を用いて単軸リラクゼーション解析を実施し、高温使用時間中に生じるクリープ損傷 D_c を算出する。単軸リラクゼーション解析ではひずみ硬化型のクリープを想定し、クリープ破断における時間係数 α_R およびクリープひずみ式における時間係数 α_c を考慮してクリープ損傷を算出する。

$$D_c = n \int_0^{t_h} \frac{dt}{T_R}$$

d. クリープ疲労損傷の算出

疲労損傷 D_f とクリープ損傷 D_c の和としてクリープ疲労損傷 D を算出する。

$$D = D_f + D_c$$

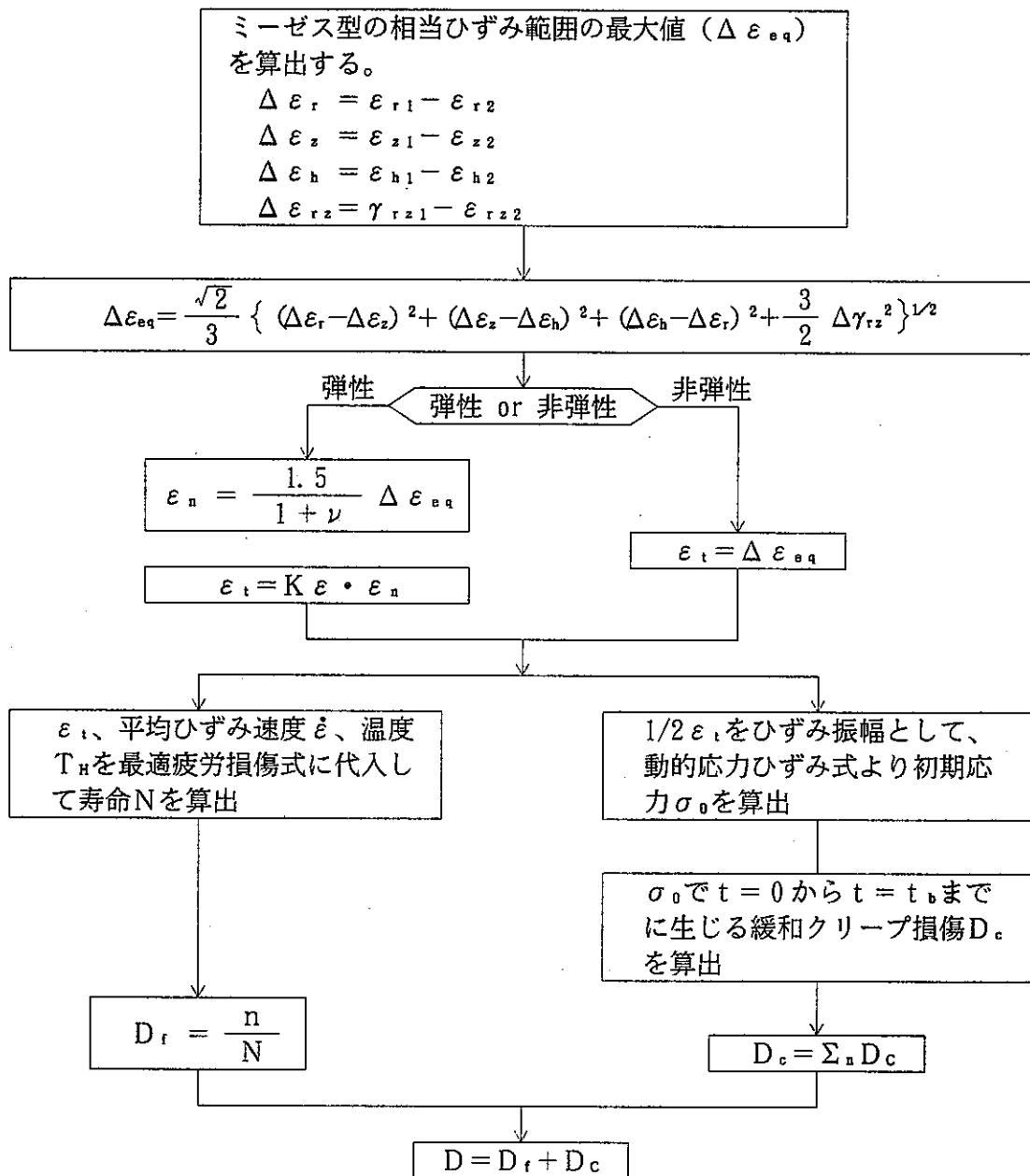


Fig. 3.1-1 Flow of TTS-DS

3.2 損傷評価結果

熱応力解析結果より、

- ・ ひずみ範囲
- ・ 熱過渡サイクル中の評価点最高温度
- ・ ひずみ範囲を形成する2時点の評価点温度

を求め、TTS-DSを用いたクリープ疲労損傷評価を実施した。クリープ疲労損傷は、溶接容器型モデルの熱過渡強度試験条件に合わせ、熱過渡1サイクルを3時間（高温側；2時間、低温側；1時間）、1,000サイクルの熱過渡を繰り返す条件で評価した。

評価断面におけるクリープ疲労損傷評価結果をTable 3.2-1~4に示す。また、Fig. 3.2-1に示すクリープ疲労損傷評価ラインに沿ったクリープ疲労損傷の分布をFig. 3.2-2~14に示す。図の横軸はFig. 3.2-1に示す評価ライン上の節点（中間節点を除く）位置と対応しており、評価ラインの始点を①とし、シーケンシャルに番号を付けたものである。評価断面の内外表面との対応は以下のとおりである。

- 評価断面A内面 : ライン-11の⑪
- 評価断面A外面 : ライン-33の⑥
- 評価断面B内面 : ライン-33の⑩
- 評価断面B外面 : ライン-22の⑩

個々の解析ケースの比較については、後述の4章に詳細を述べることとし、以下に基準ケースに対するクリープ疲労損傷評価の結果の概要を示す。

(1) 評価ライン-11

- クリープ疲労損傷値は、応力評価断面Aの内表面（⑪）をピークとした分布形状である。
- 容器胴内面ではこの点の近傍にクリープ疲労損傷が集中する。
- スカート付け根の厚肉部や評価断面Aと反対側のスカートの付け根には大きなクリープ疲労損傷は見られない。

(2) 評価ライン-22

- クリープ疲労損傷値は、評価ライン-11及び33に比べ相対的に小さい。
- クリープ疲労損傷の分布は、スカート胴の付け根近傍（⑩、⑪）で大きくなり、

スカート胴付け根や容器胴では非常に小さい。これは、スカートの剛性（板厚25mm）に対し、スカート付け根部の剛性（最小板厚40mm）が大きいことが要因と考えられる。

- スカート付け根の面取りは、評価ライン-22側でR30であり、評価ライン-33側のR20に対して十分に大きい。このため、容器胴側には大きなひずみ集中は生じない。

(3) 評価ライン-33

- 評価ライン-33のクリープ疲労損傷値は、スカート付け根のR止端部で大きな値となる。
- ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷のピークは、評価断面Aの外面と評価断面Bの内面（⑥及び⑩）に見られる。
- 評価断面Aの外面は、容器胴とスカート胴の相対温度差によるたが締め及びスカート付け根の回転によってひずみ集中を受ける。
- 評価断面Bの内面は、容器胴とスカート胴の股裂き効果によりひずみ集中を受ける。

Table 3.2-1 Results of creep-fatigue damage evaluation
(Section-A : Inner surface)

解析 ケース	時刻 (秒)	T_{max} (°C)	$\Delta \varepsilon_{eq}$ ($\times 10^{-3}$)	$K \varepsilon$	$\Delta \varepsilon_1$ ($\times 10^{-3}$)	D_f	D_c	D
基準 弾性	600.0	598.8	4.535	1.2	6.295	0.631	0.403	1.034
	600.0							
基準 弾塑性	800.0	598.5	4.579	1.0	4.579	0.268	0.281	0.550
	800.0							
基準 弾塑性 クリープ	800.0	598.5	5.238	1.0	5.238	0.451	0.384	0.835
	800.0							
A-1	120.0	598.5	4.943	1.0	4.943	0.337	0.308	0.645
	103.5							
B-1	800.0	598.5	7.572	1.0	7.572	0.943	0.485	1.428
	1026.4							
C-1	800.0	598.5	5.375	1.0	5.375	0.425	0.339	0.764
	800.0							
C-2	800.0	598.5	5.419	1.0	5.419	0.493	0.398	0.891
	909.8							
D-1	600.0	596.7	4.591	1.2	6.373	0.638	0.404	1.043
	600.0							
D-2	600.0	595.2	4.620	1.2	6.413	0.640	0.404	1.044
	600.0							
D-3	600.0	591.2	4.642	1.2	6.445	0.627	0.398	1.025
	600.0							
E-1	600.0	599.2	2.729	1.2	3.771	0.139	0.222	0.361
	600.0							
E-2	600.0	599.8	0.698	1.2	0.961	0.000	0.001	0.001
	600.0							
F-1	600.0	598.9	4.638	1.2	6.433	0.748	0.459	1.207
	720.0							
F-2	1520.0	599.7	4.649	1.2	6.456	0.952	0.545	1.497
	960.0							
G-1	600.0	598.8	4.297	1.2	5.964	0.555	0.381	0.936
	600.0							

(注) 時刻は、上段がコールドトランジエント開始からの時間、下段がホットトランジエント開始からの時間を示す。

Table 3.2-2 Results of creep-fatigue damage evaluation
(Section-A : Outer surface)

解析 ケース	時刻 (秒)	T_{max} (°C)	$\Delta \varepsilon_{0.4}$ ($\times 10^{-3}$)	$K \varepsilon$	$\Delta \varepsilon_1$ ($\times 10^{-3}$)	D_f	D_c	D
基準 弾性	1023.0	597.9	4.381	1.2	5.990	0.551	0.379	0.930
	1200.0							
基準 弾塑性	800.0	597.5	8.998	1.0	8.998	1.303	0.571	1.874
	800.0							
基準 弾塑性 カーブ	800.0	597.5	9.473	1.0	9.473	1.434	0.600	2.034
	946.4							
A-1	946.4	597.5	7.806	1.0	7.806	0.987	0.497	1.484
	66.3							
B-1	800.0	597.5	10.910	1.0	10.910	1.847	0.685	2.532
	1500.0							
C-1	800.0	597.5	9.621	1.0	9.621	1.475	0.609	2.084
	983.0							
C-2	800.0	597.5	9.624	1.0	9.624	1.476	0.609	2.085
	1026.4							
D-1	1023.0	594.4	4.380	1.2	6.078	0.549	0.374	0.923
	1200.0							
D-2	1023.0	591.9	4.412	1.2	6.124	0.544	0.369	0.913
	1200.0							
D-3	1023.0	584.9	4.436	1.2	6.161	0.513	0.348	0.862
	1200.0							
E-1	1023.0	598.7	2.587	1.2	3.574	0.111	0.203	0.314
	1200.0							
E-2	1023.0	599.7	0.667	1.2	0.918	0.000	0.001	0.001
	1200.0							
F-1	1200.0	598.6	4.485	1.2	6.229	0.687	0.443	1.130
	920.0							
F-2	1520.0	599.7	4.554	1.2	6.322	0.909	0.535	1.444
	1088.0							
G-1	1023.0	597.7	4.190	1.2	5.813	0.512	0.366	0.878
	1200.0							

(注) 時刻は、上段がコールドトランジェント開始からの時間、下段がホットトランジェント開始からの時間を示す。但し、ケースA-1については、上下段共ホットトランジェント開始の時間を示す。

Table 3.2-3 Results of creep-fatigue damage evaluation
(Section-B : Inner surface)

解析 ケース	時刻 (秒)	T_{max} (°C)	$\Delta \varepsilon_{eq}$ ($\times 10^{-3}$)	$K \varepsilon$	$\Delta \varepsilon_t$ ($\times 10^{-3}$)	D_r	D_c	D
基準 弾性	600.0 600.0	587.8	4.267	1.2	5.916	0.497	0.353	0.850
基準 弾塑性	800.0 600.0	586.7	4.788	1.0	4.788	0.275	0.267	0.542
基準 弾塑性 クリープ	1023.0 800.0	586.7	4.903	1.0	4.903	0.296	0.276	0.571
A-1	800.0 800.0	586.7	4.748	1.0	4.748	0.268	0.264	0.532
B-1	800.0 836.6	586.7	6.893	1.0	6.893	0.706	0.418	1.124
C-1	1023.0 800.0	586.7	5.041	1.0	5.041	0.320	0.286	0.606
C-2	1023.0 800.0	586.7	5.052	1.0	5.052	0.322	0.287	0.609
D-1	600.0 600.0	571.4	4.200	1.2	5.829	0.418	0.300	0.718
D-2	1023.0 1200.0	560.0	4.154	1.2	5.765	0.369	0.258	0.627
D-3	1023.0 1200.0	532.4	4.068	1.2	5.656	0.278	0.145	0.423
E-1	600.0 600.0	592.8	2.478	1.2	3.423	0.087	0.178	0.265
E-2	600.0 600.0	598.1	0.641	1.2	0.882	0.000	0.001	0.001
F-1	600.0 720.0	590.1	4.323	1.2	5.992	0.589	0.412	1.001
F-2	1520.0 1088.0	598.1	4.396	1.2	6.103	0.830	0.517	1.347
G-1	600.0 1200.0	587.7	4.377	1.2	6.055	0.526	0.362	0.888

(注) 時刻は、上段がコールドトランジエント開始からの時間、下段がホットトランジエント開始からの時間を示す。

Table 3.2-4 Results of creep-fatigue damage evaluation
(Section-B : Outer surface)

解析 ケース	時刻 (秒)	T_{max} (°C)	$\Delta \epsilon_{eq}$ ($\times 10^{-3}$)	$K \epsilon$	$\Delta \epsilon_t$ ($\times 10^{-3}$)	D_f	D_c	D
基準 弾性	600.0 460.0	587.4	2.938	1.2	4.078	0.164	0.215	0.379
基準 弾塑性	465.0 400.0	586.2	3.416	1.0	3.416	0.080	0.160	0.240
基準 弾塑性 クリープ	465.0 400.0	586.2	3.412	1.0	3.412	0.079	0.160	0.239
A-1	465.0 400.0	586.2	3.360	1.0	3.360	0.074	0.156	0.230
B-1	465.0 460.0	586.2	3.910	1.0	3.910	0.160	0.251	0.411
C-1	465.0 400.0	586.2	3.414	1.0	3.414	0.079	0.160	0.239
C-2	465.0 400.0	586.2	3.416	1.0	3.416	0.080	0.160	0.240
D-1	600.0 460.0	570.2	2.912	1.2	4.046	0.133	0.164	0.297
D-2	600.0 460.0	558.2	2.893	1.2	4.022	0.115	0.128	0.242
D-3	600.0 460.0	528.9	2.831	1.2	3.942	0.078	0.048	0.126
E-1	600.0 360.0	592.6	1.713	1.2	2.369	0.011	0.090	0.100
E-2	600.0 360.0	598.1	0.438	1.2	0.603	0.000	0.000	0.000
F-1	530.0 400.0	589.8	2.928	1.2	4.065	0.191	0.261	0.452
F-2	800.0 680.0	598.0	2.409	1.2	3.343	0.134	0.280	0.414
G-1	600.0 460.0	587.3	2.975	1.2	4.128	0.171	0.219	0.389

(注) 時刻は、上段がコールドトランジエント開始からの時間、下段がホットトランジエント開始からの時間を示す。

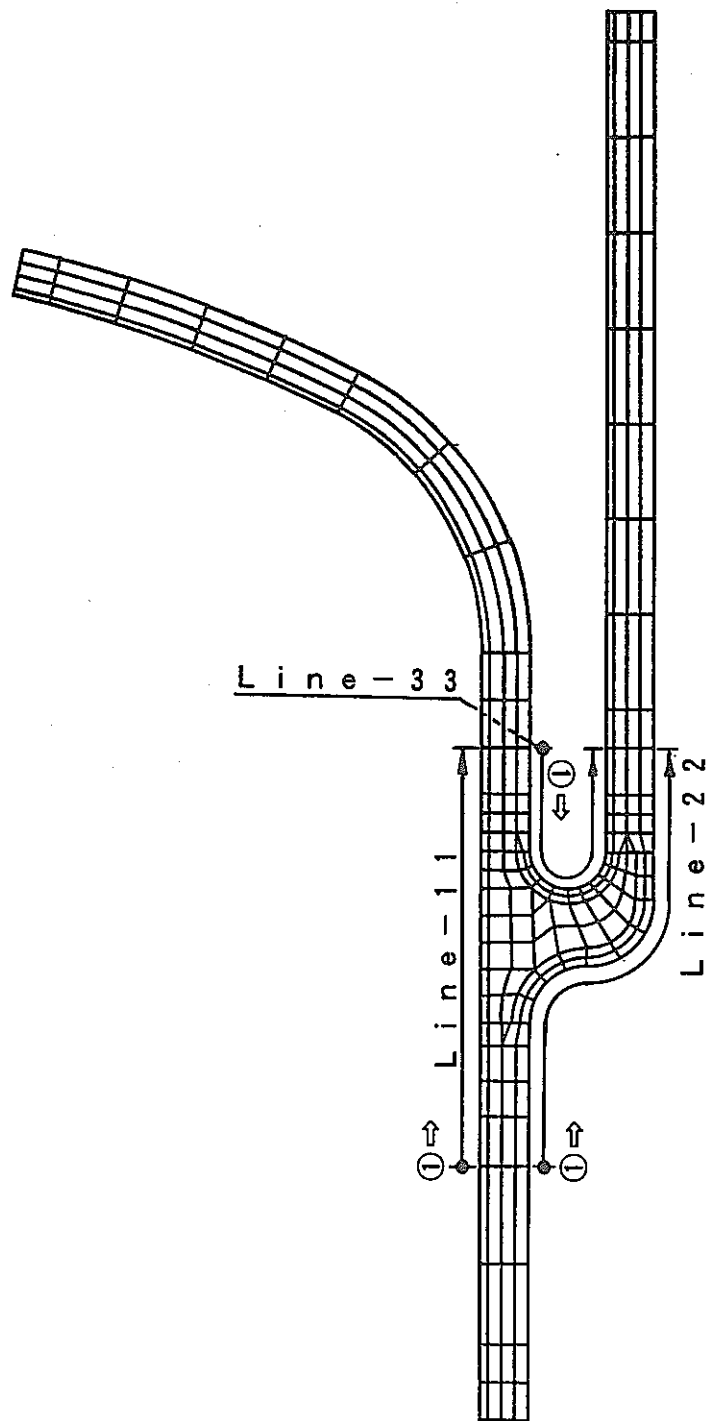


Fig.3.2-1 Creep-fatigue damage estimation lines

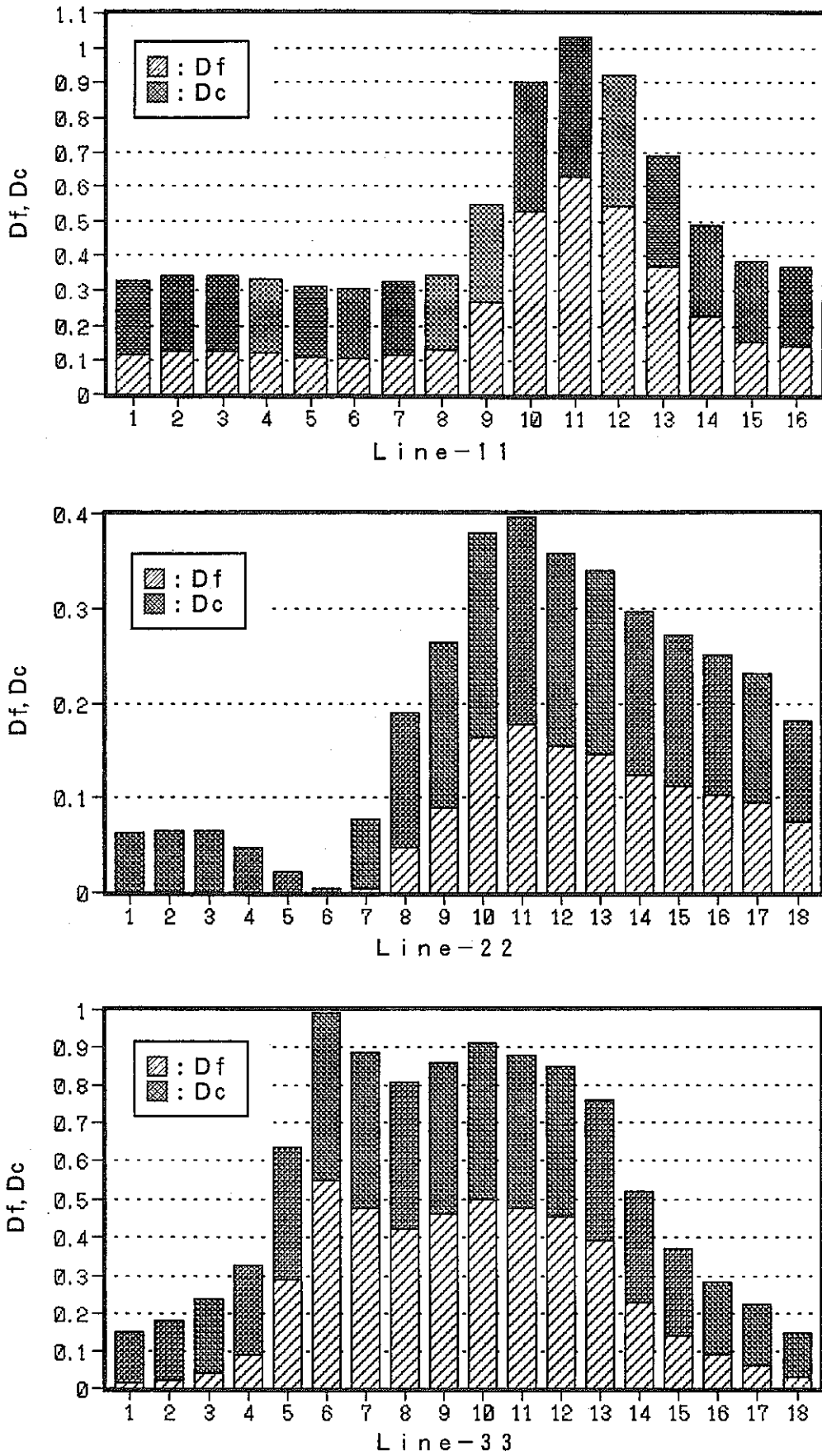


Fig. 3.2-2 Creep-fatigue damage distribution (Standard Case - Elastic)

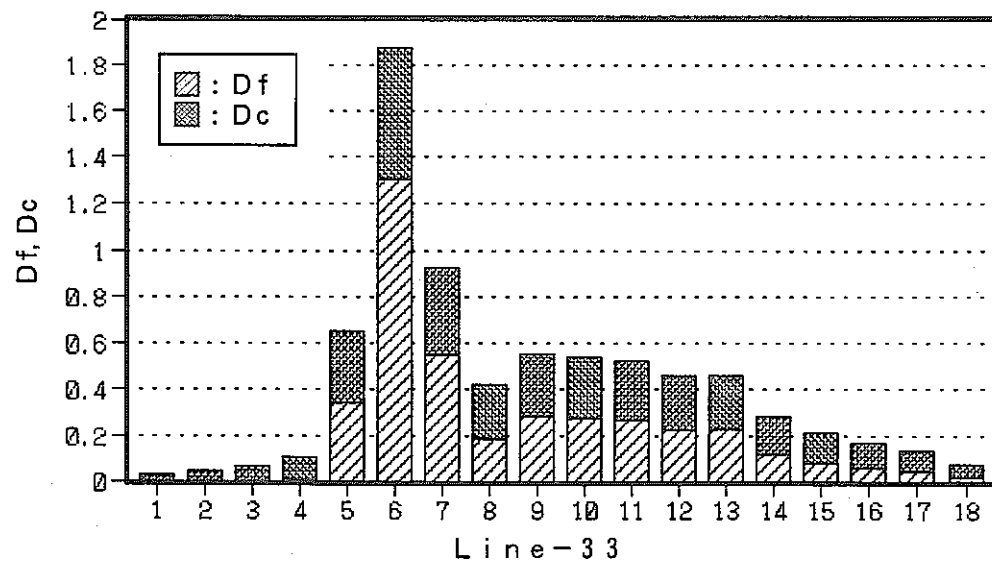
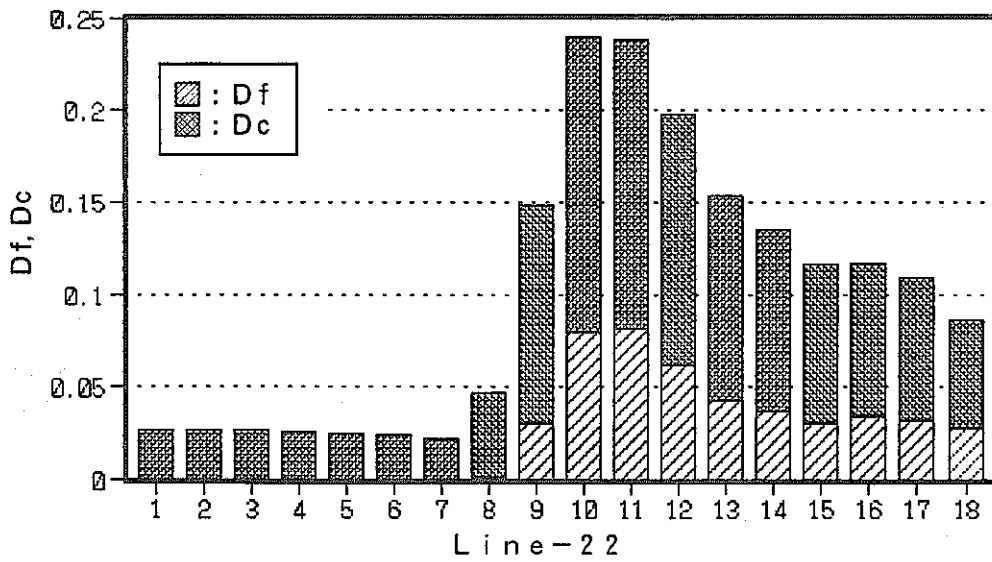
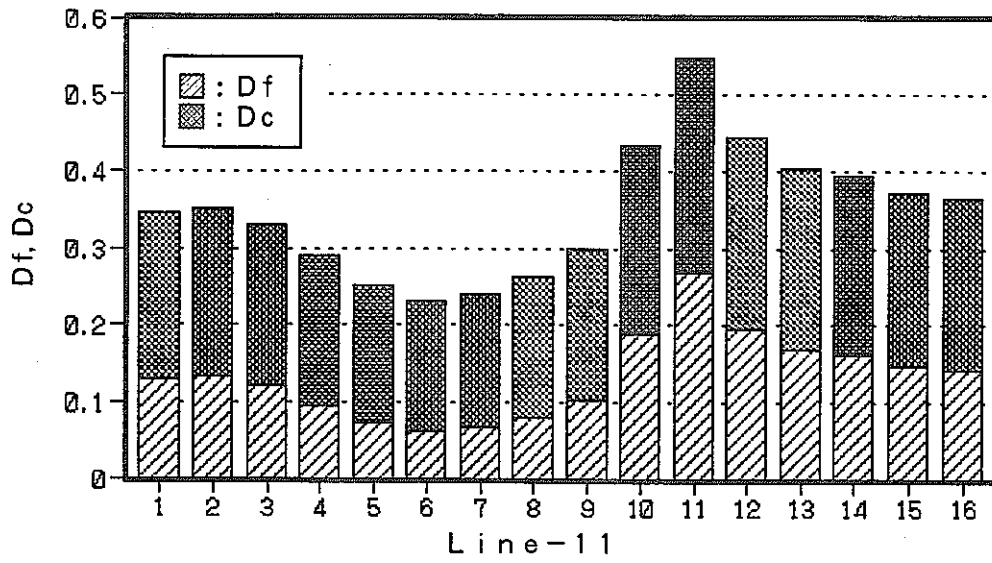


Fig. 3.2-3 Creep-fatigue damage distribution (Standard Case - Elasto-plastic)

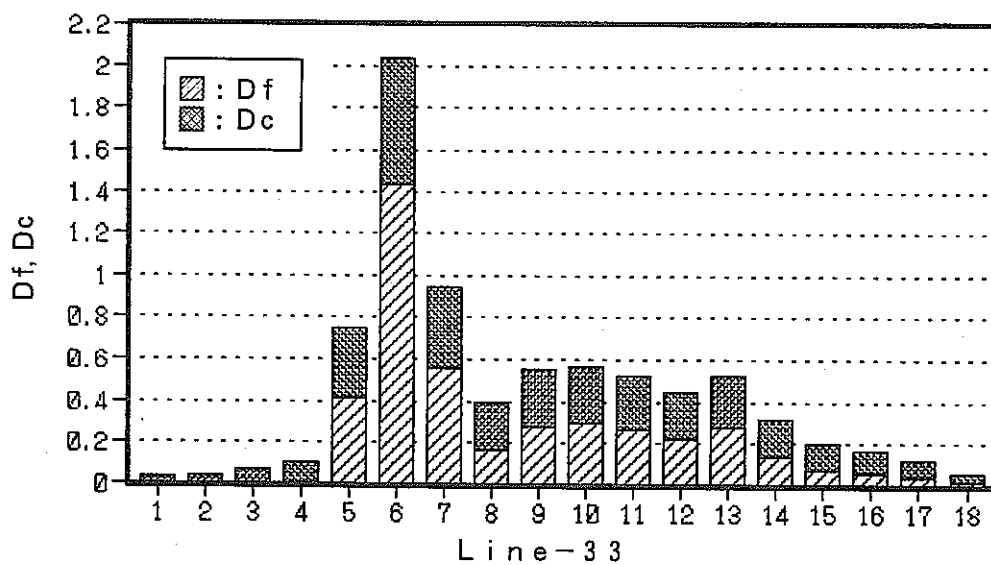
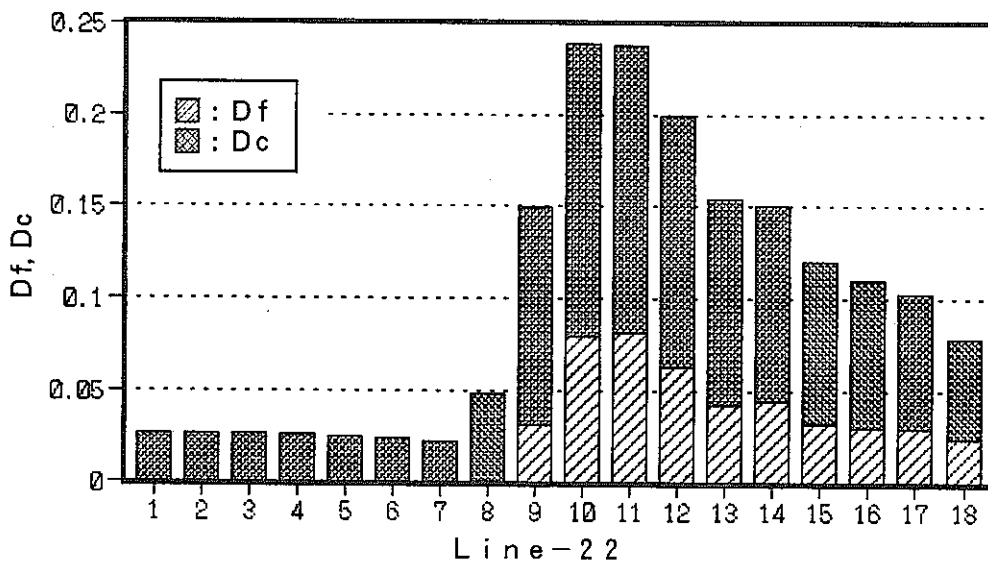
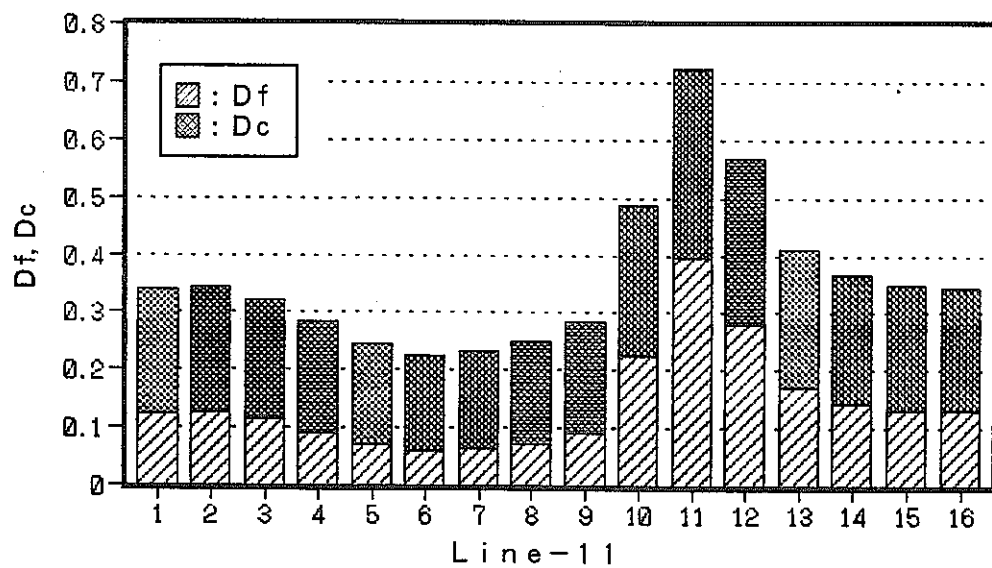


Fig. 3.2-4 Creep-fatigue damage distribution (Standard Case - Elastic-plastic-creep)

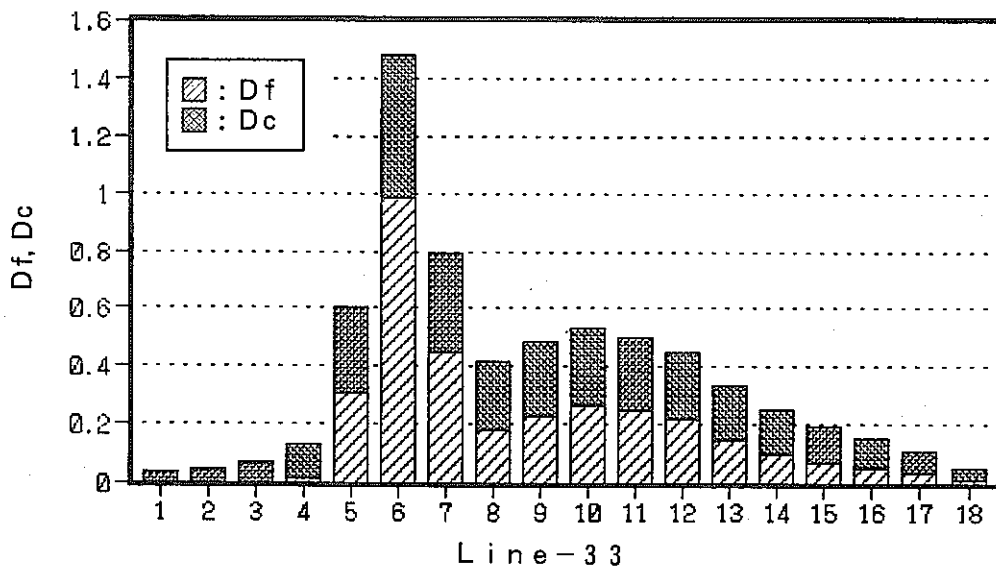
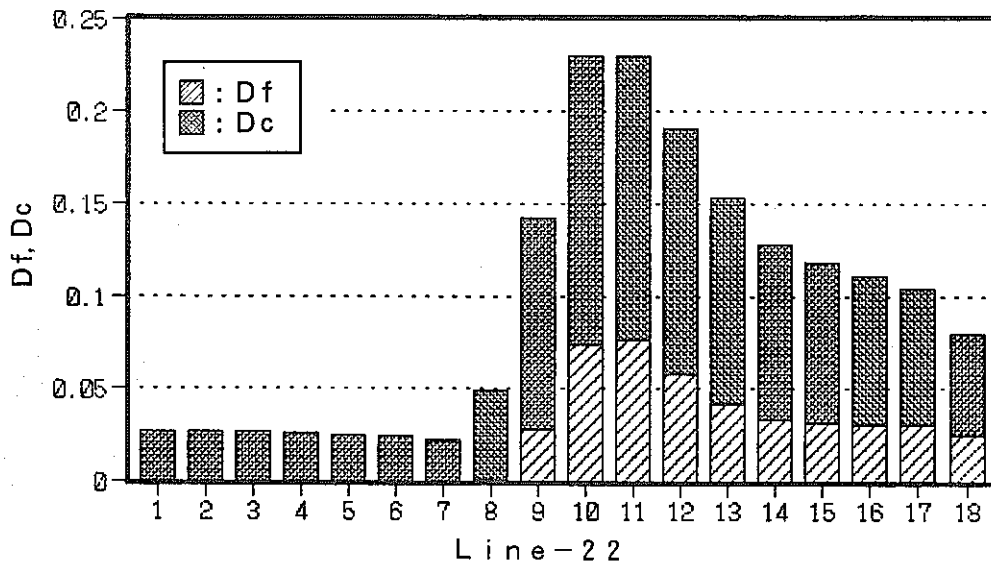
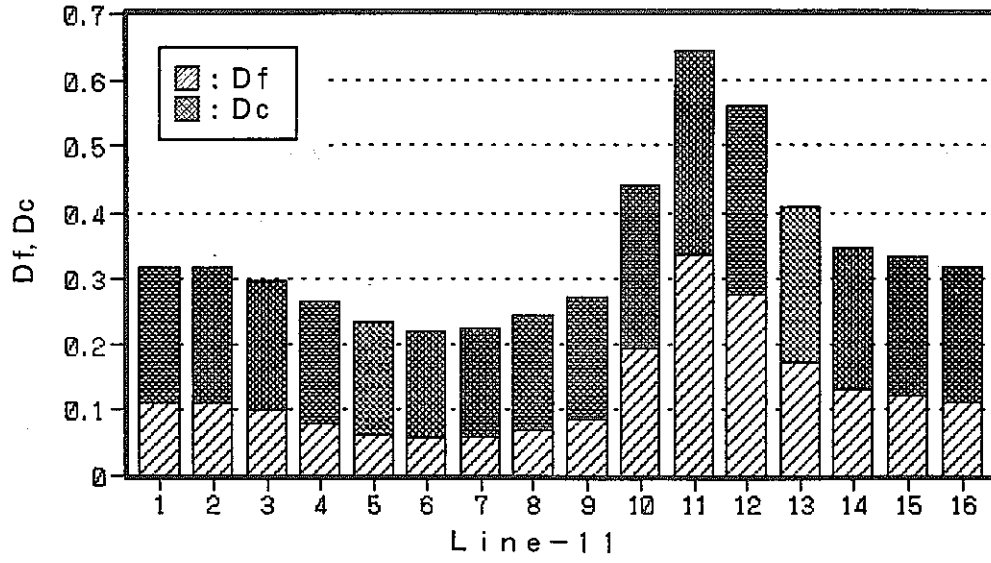


Fig.3.2-5 Creep-fatigue damage distribution (Case A-1)

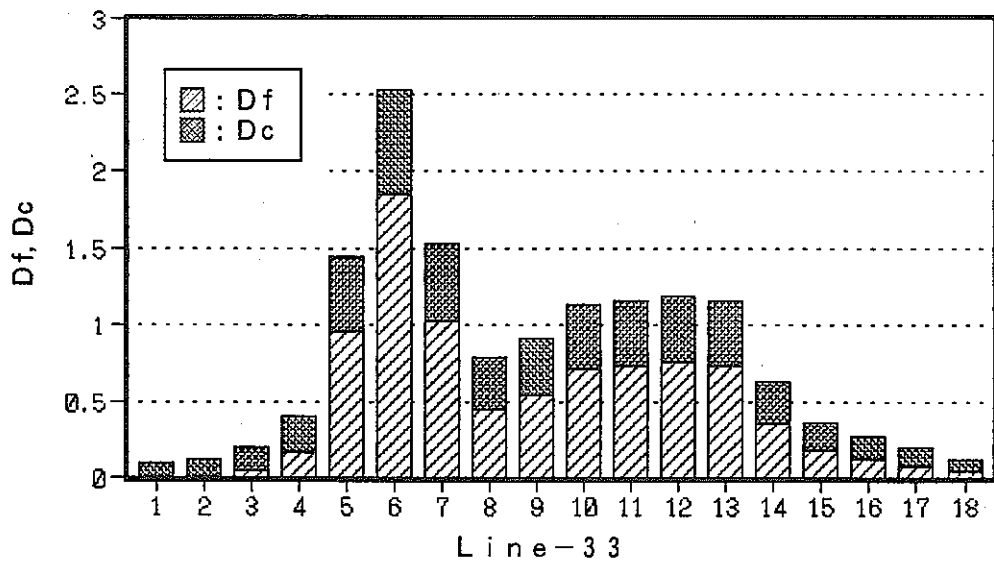
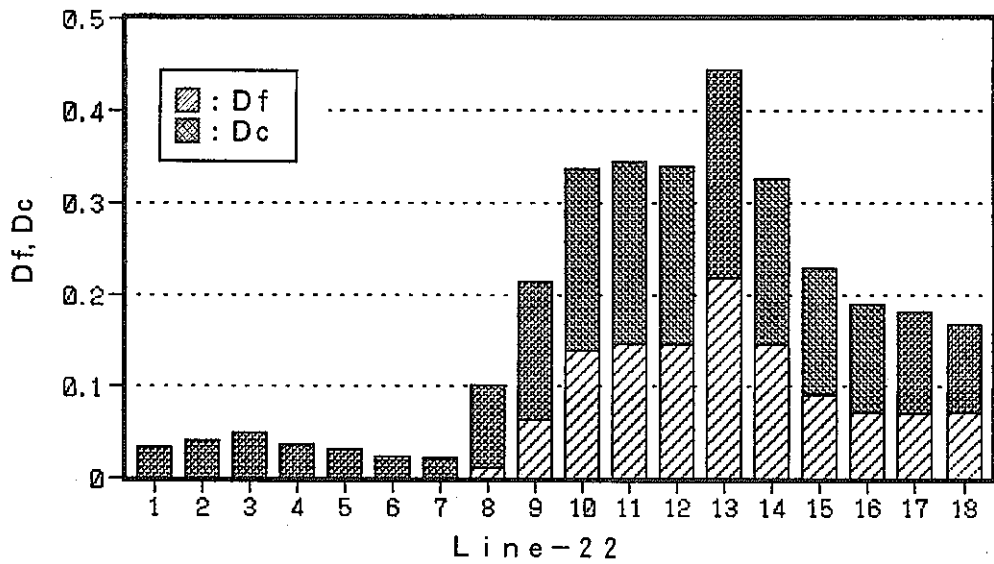
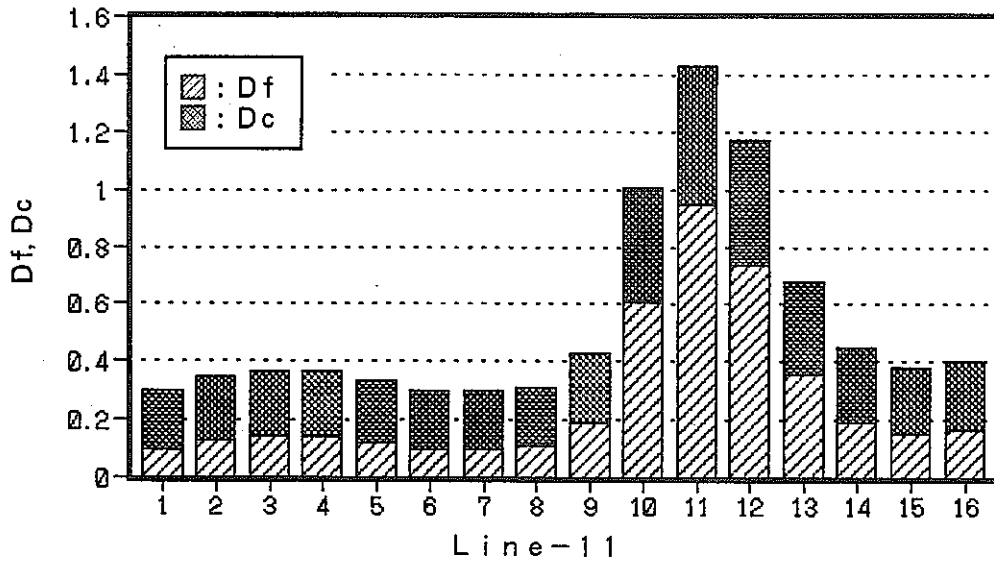


Fig. 3.2-6 Creep-fatigue damage distribution (Case B-1)

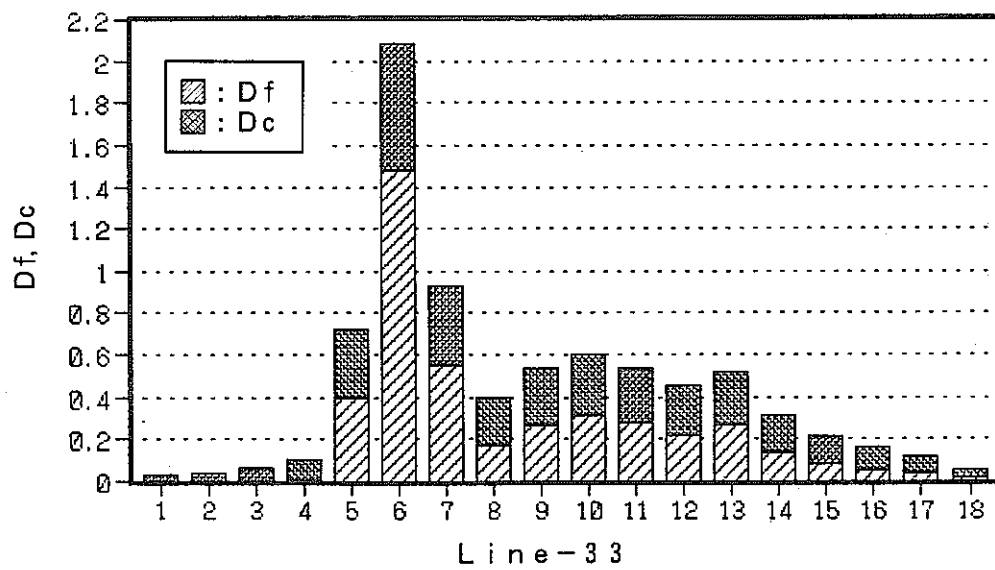
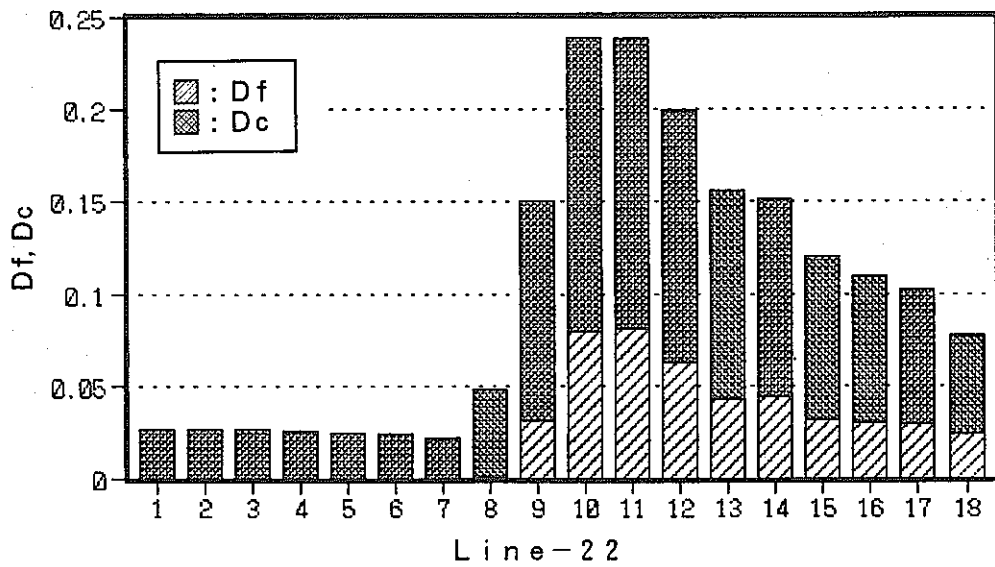
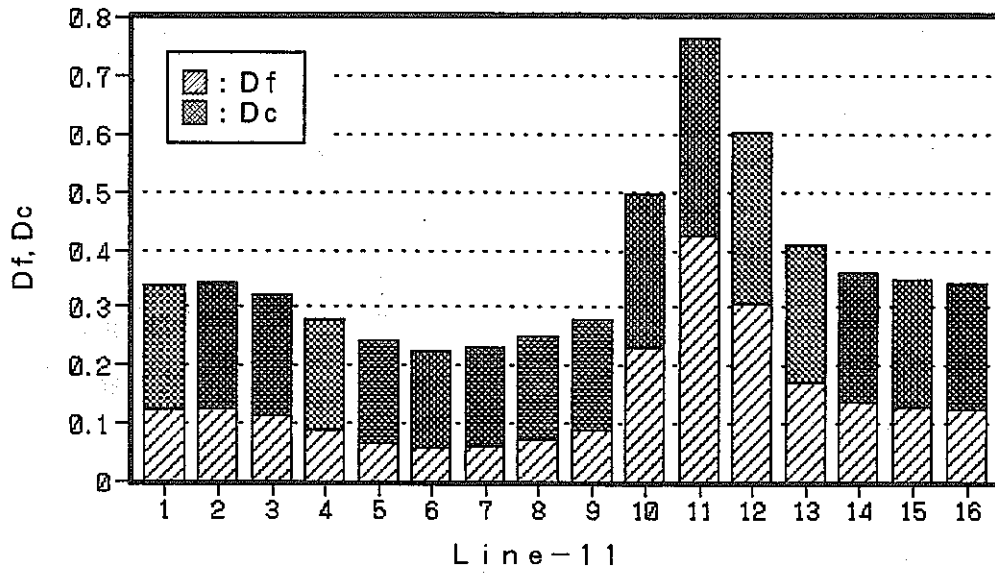


Fig.3.2-7 Creep-fatigue damage distribution (Case C-1)

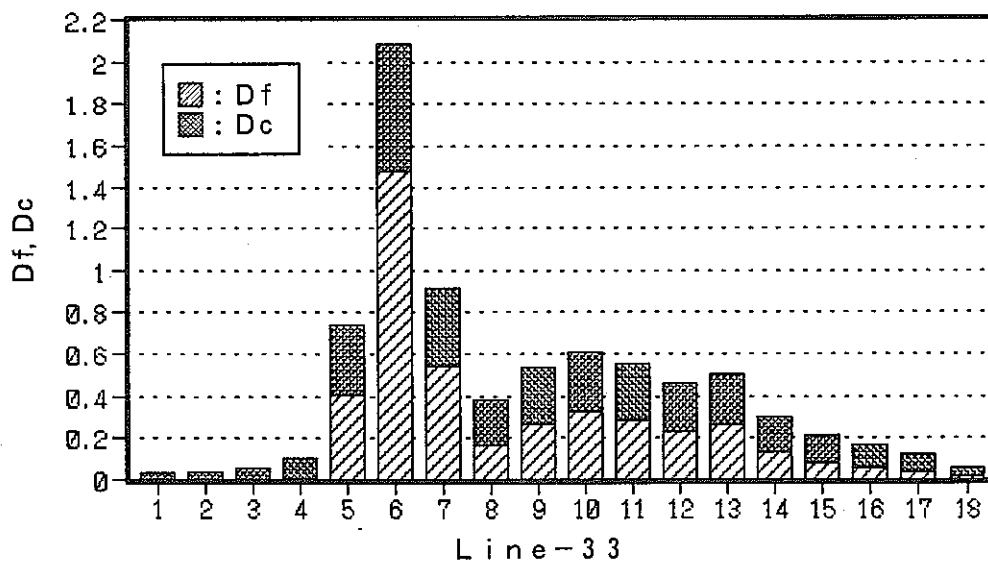
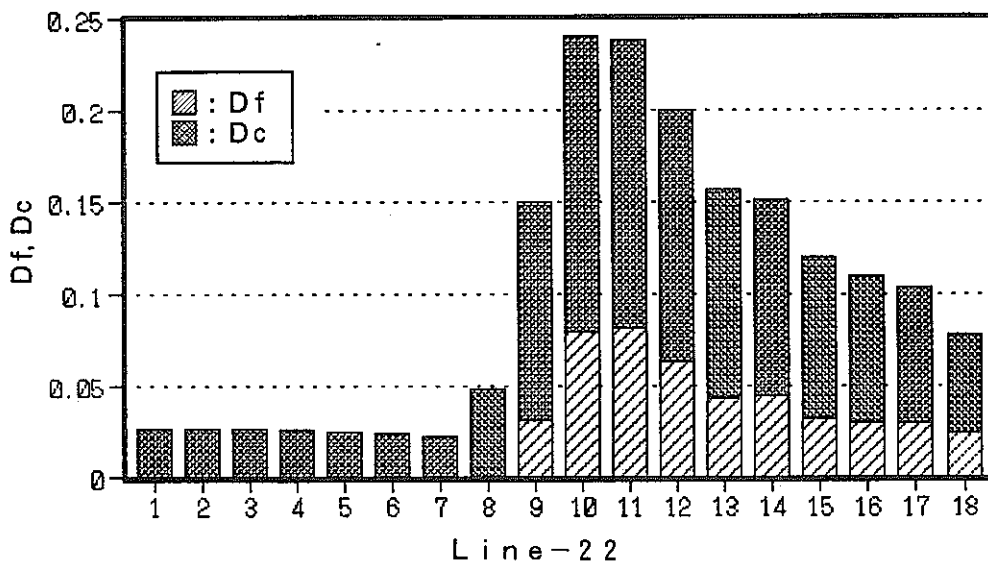
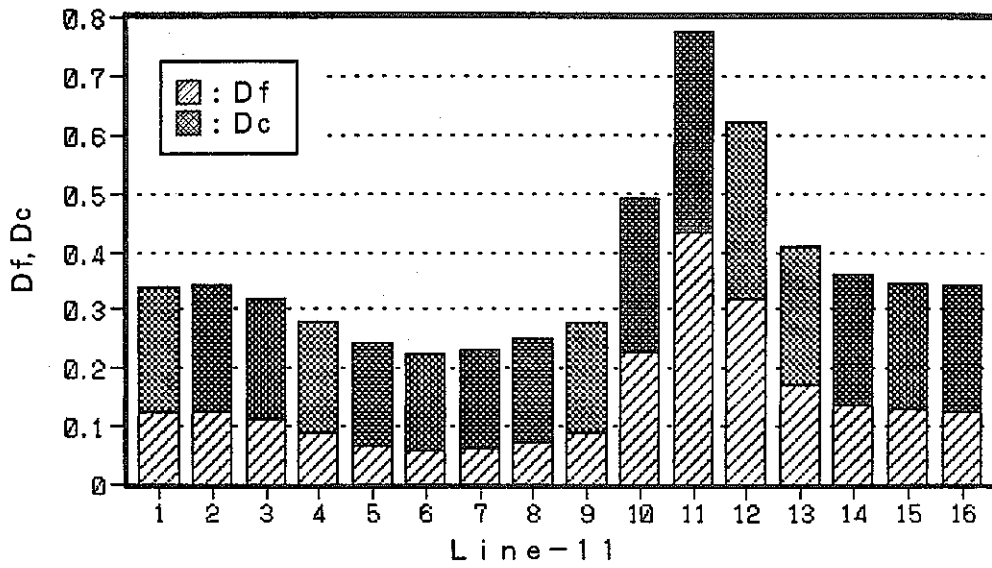


Fig. 3.2-8 Creep-fatigue damage distribution (Case C-2)

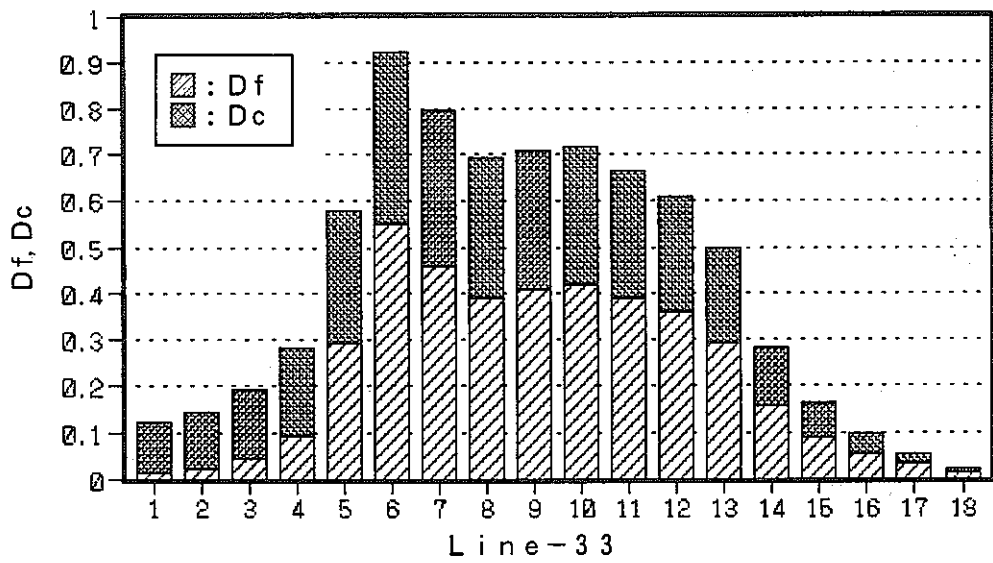
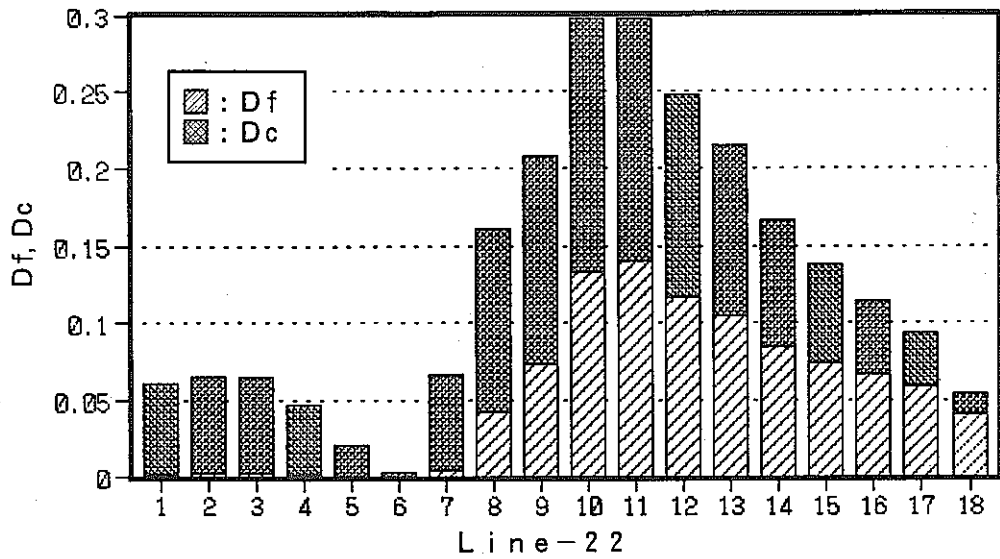
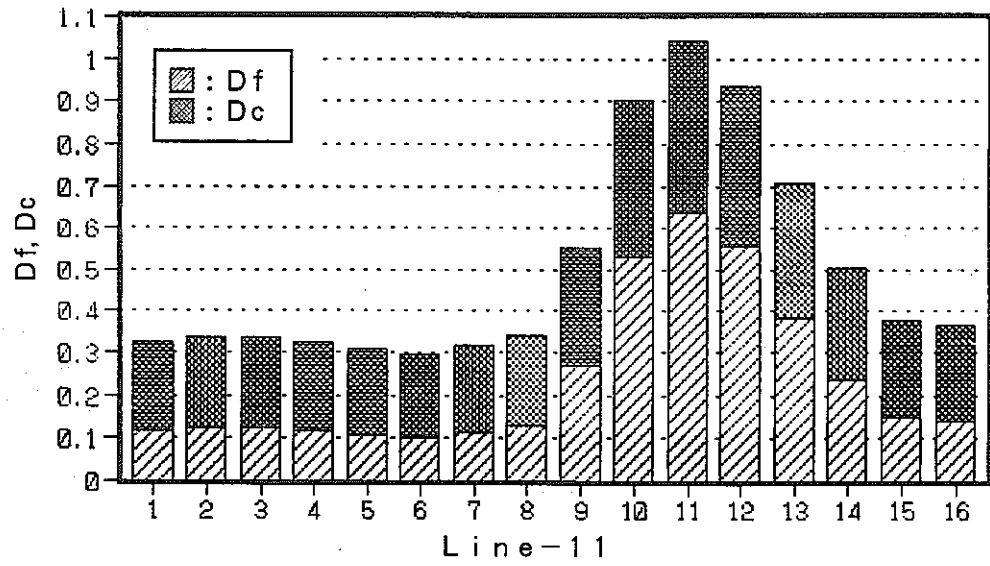


Fig. 3.2-9 Creep-fatigue damage distribution (Case D-1)

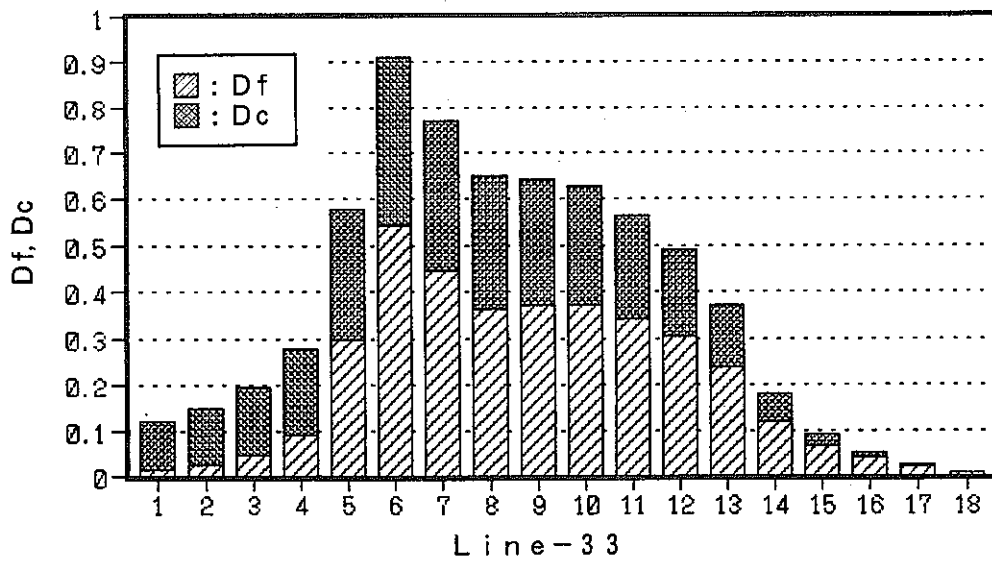
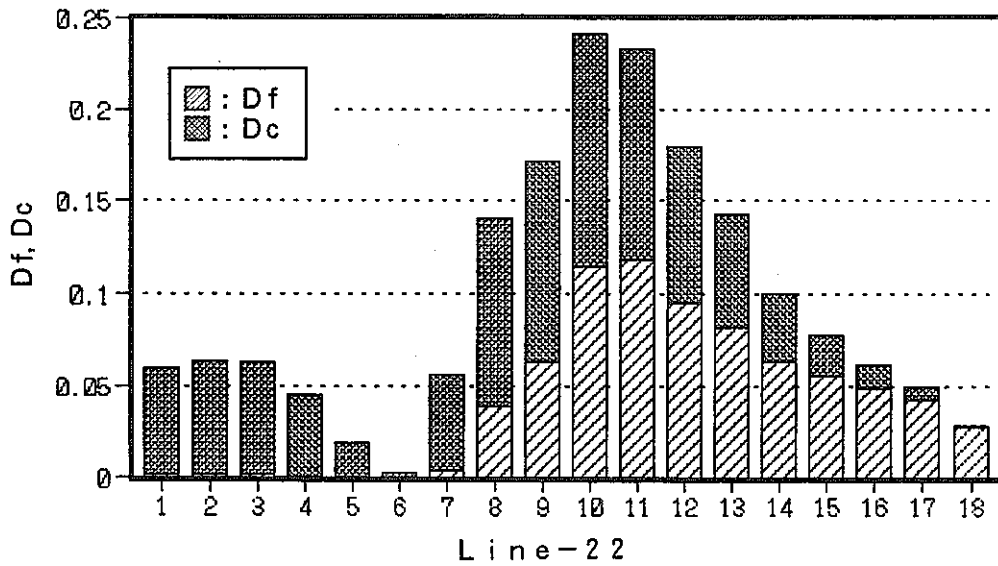
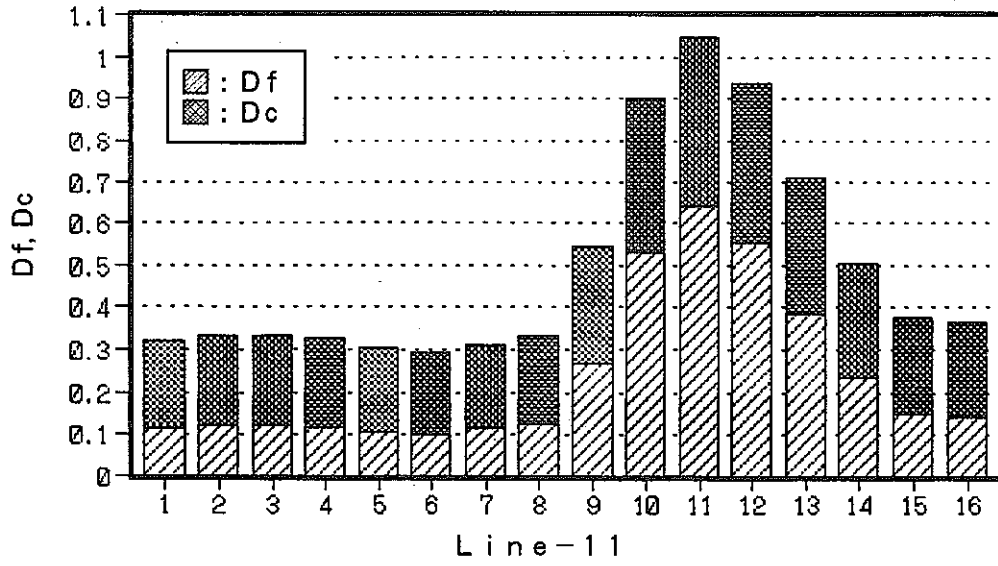


Fig. 3.2-10 Creep-fatigue damage distribution (Case D-2)

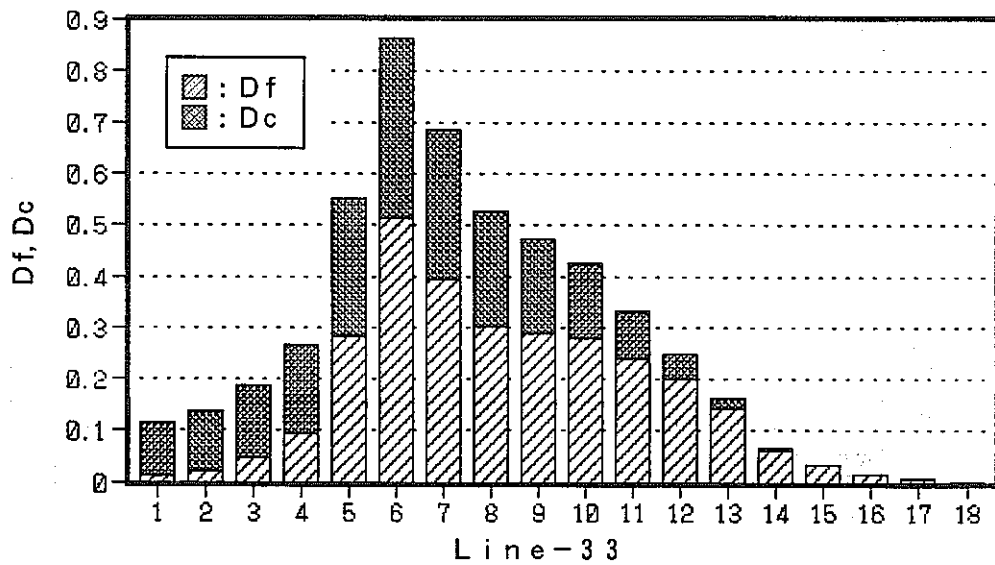
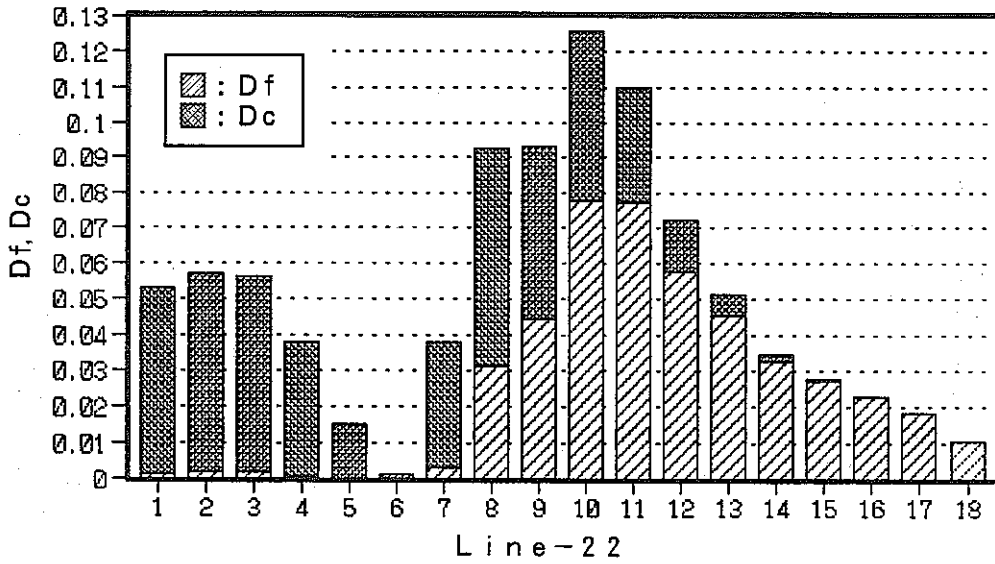
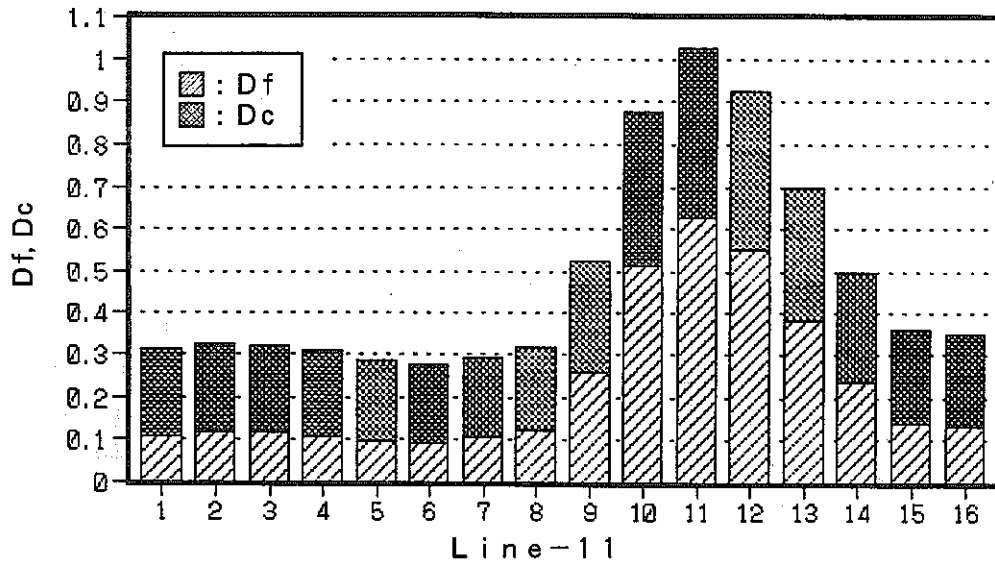


Fig. 3.2-11 Creep-fatigue damage distribution (Case D-3)

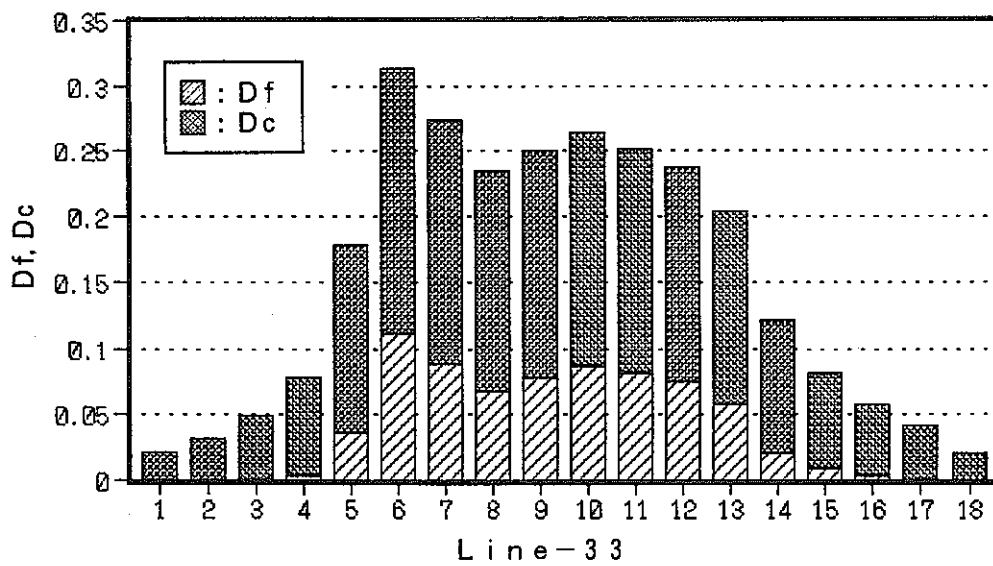
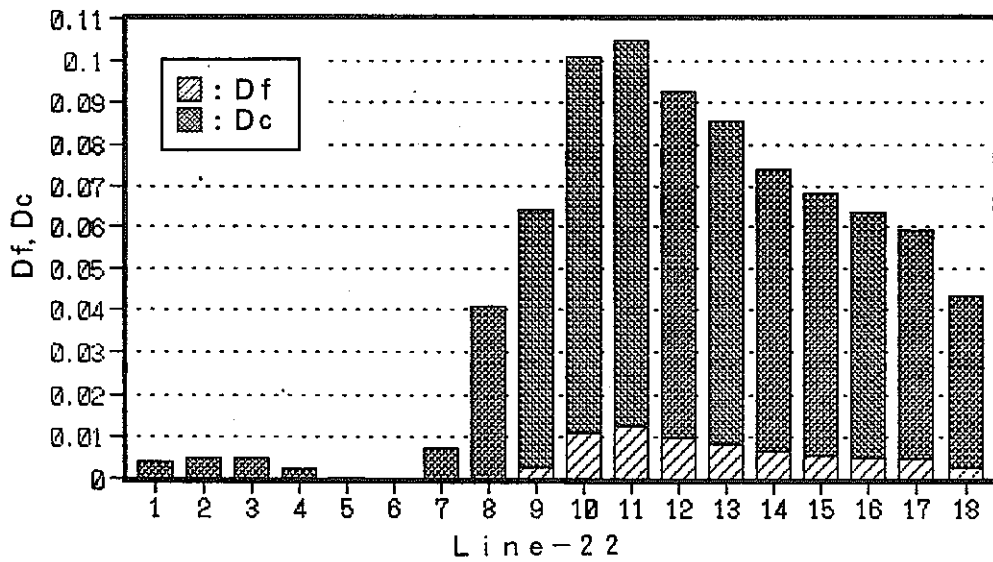
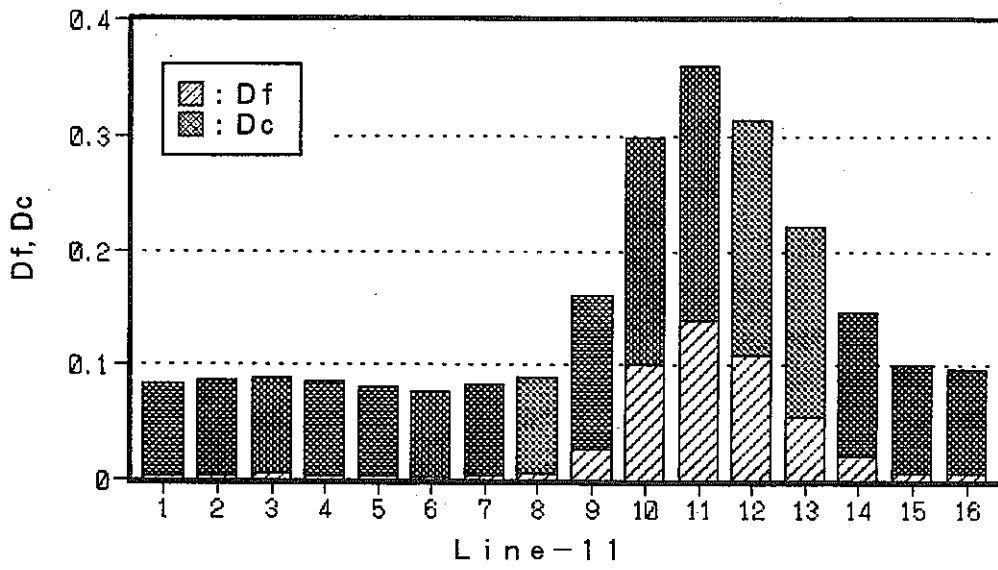


Fig. 3.2-12 Creep-fatigue damage distribution (Case E-1)

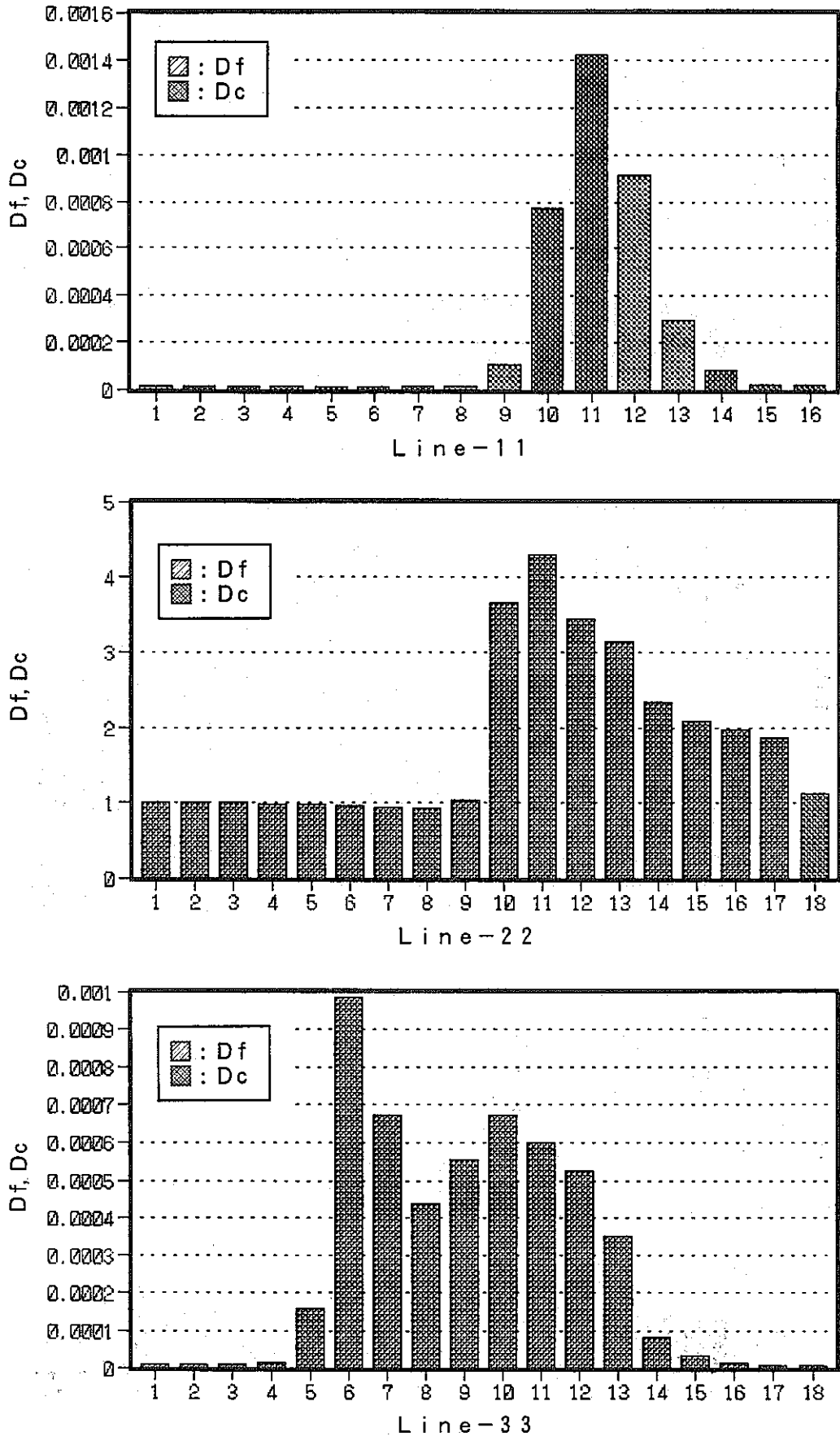


Fig. 3.2-13 Creep-fatigue damage distribution (Case E-2)

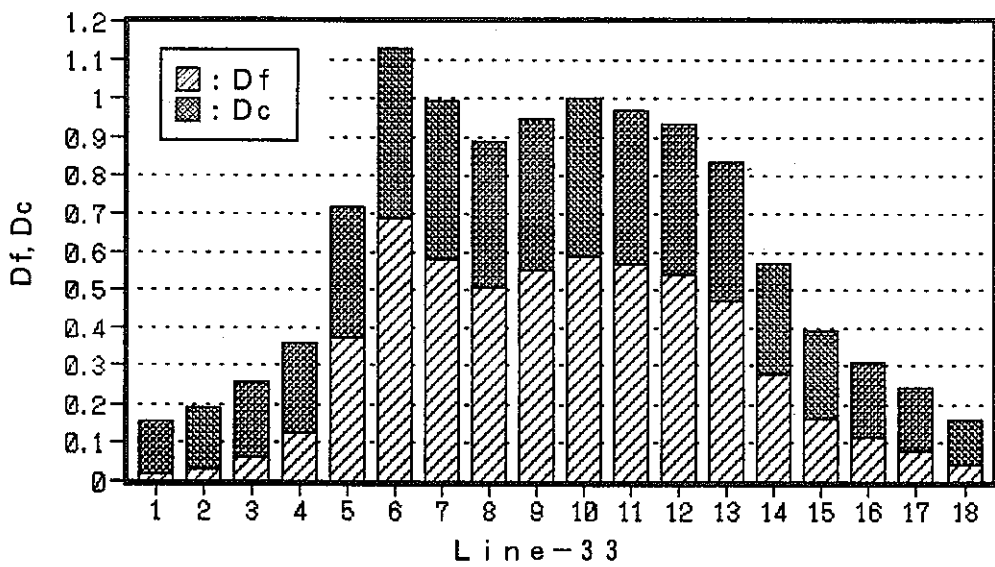
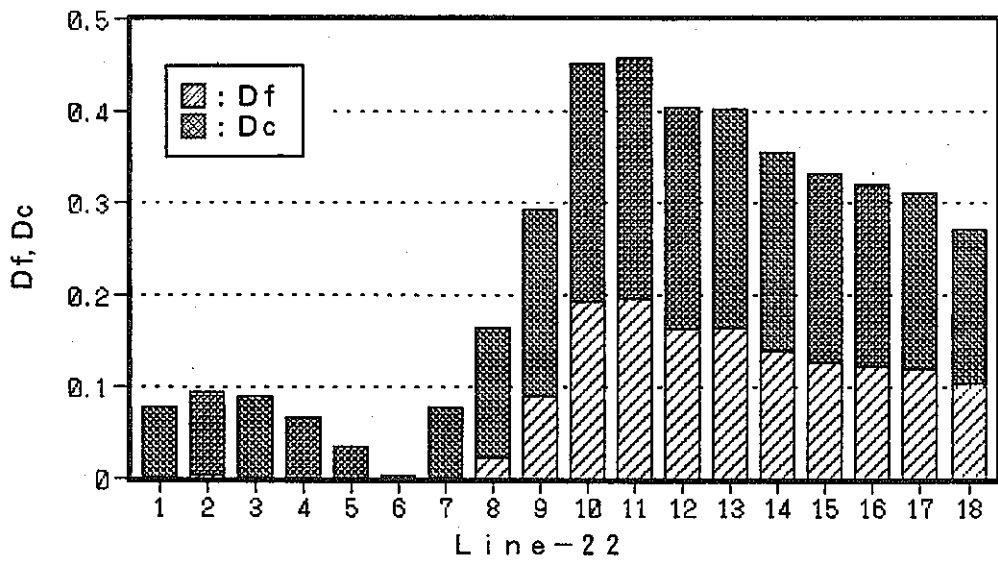
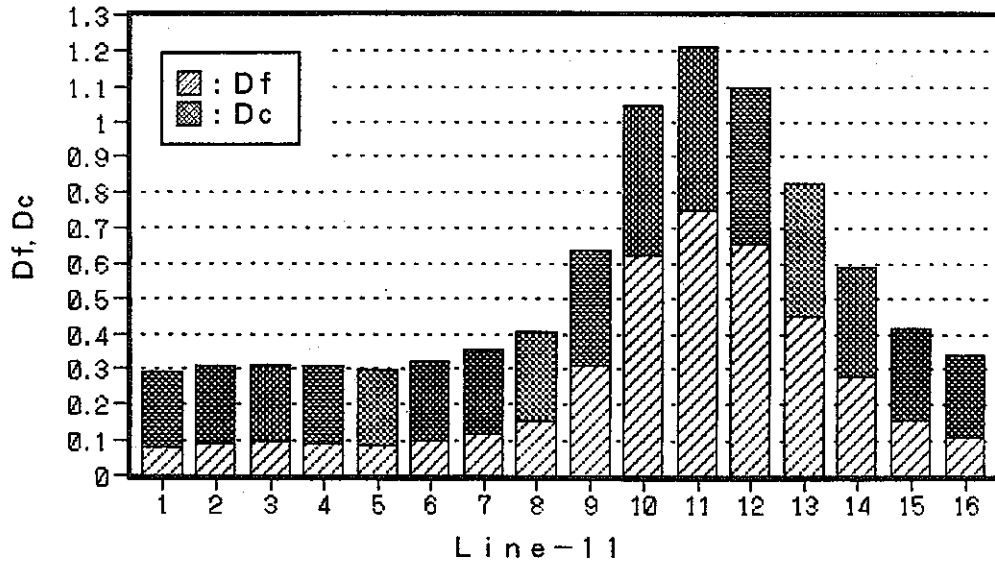


Fig. 3.2-14 Creep-fatigue damage distribution (Case F-1)

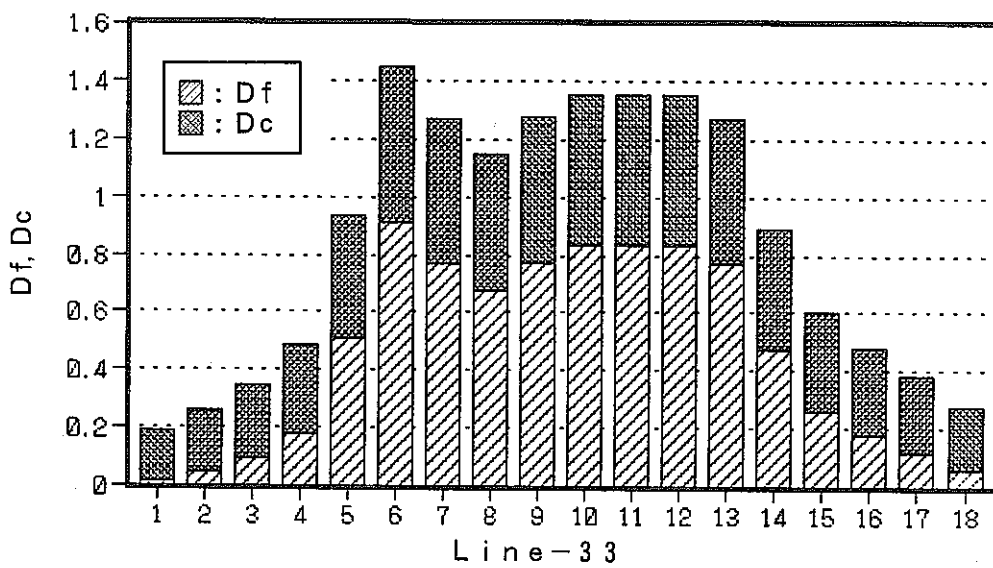
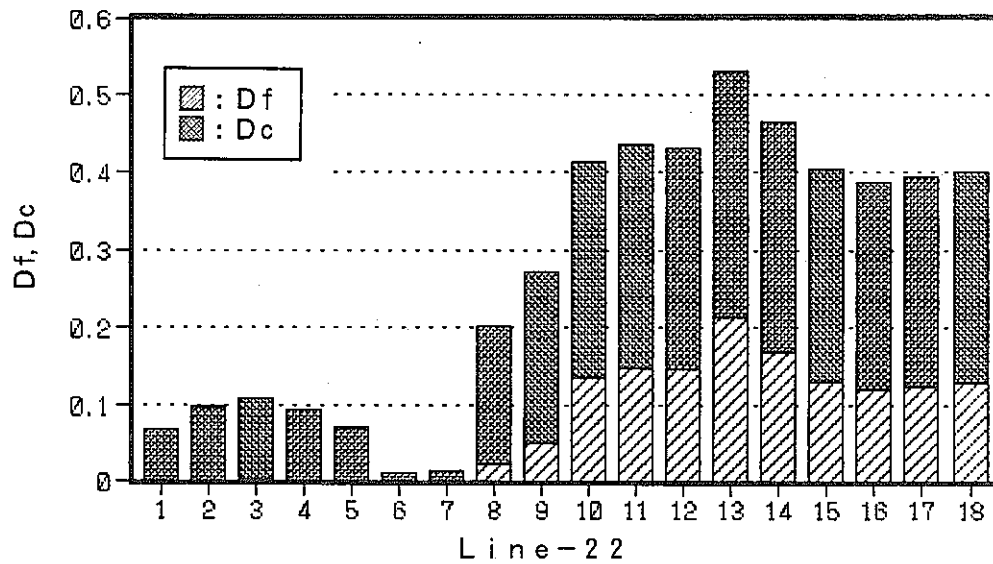
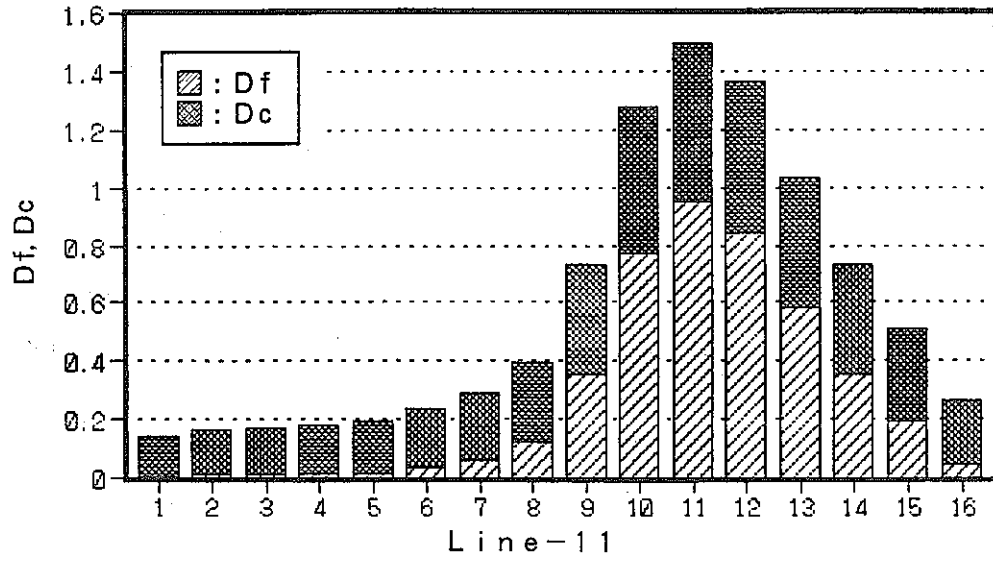


Fig. 3.2-15 Creep-fatigue damage distribution (Case F-2)

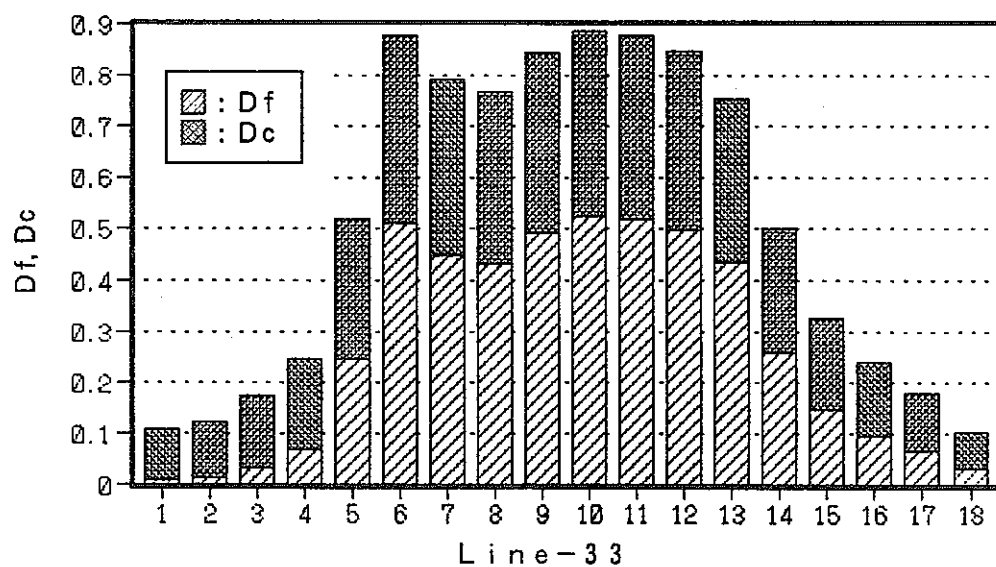
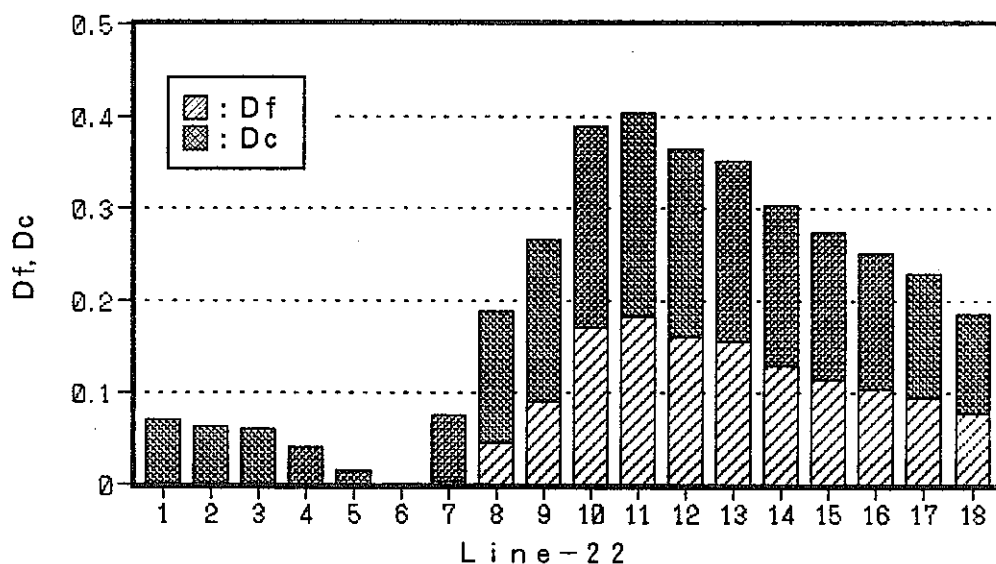
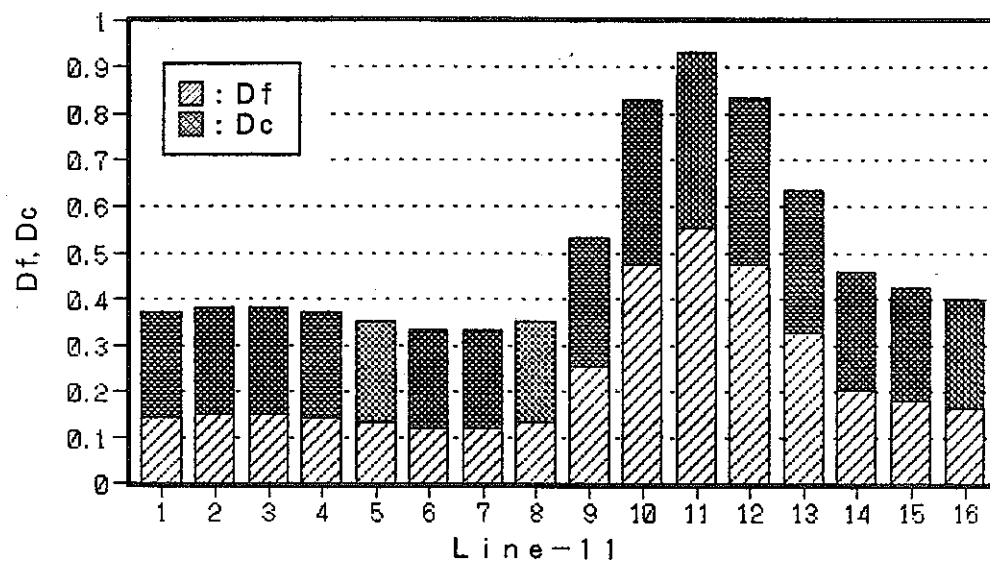


Fig.3.2-16 Creep-fatigue damage distribution (Case G-1)

4. 考 察

4.1 弾性解析と弾塑性解析

基準ケースについて、同一荷重条件に基づく弾性・弾塑性熱応力解析を実施した。これらの解析結果を比較・検討する。

(1) 応力時刻歴

基準ケースの弾性及び弾塑性解析について、応力評価断面内外表面の応力時刻歴を比較しFig.4.1-1に示す。弾性解析結果は、コールド⇒ホットの順でホットトランジェント開始から6,000秒後までの応力時刻歴、弾塑性解析結果は、コールド⇒ホット⇒コールドの順で1.5サイクル分の応力時刻歴を示す。

弾塑性解析におけるミーゼス型の相当応力から、評価断面A、Bともに内表面では熱過渡のサイクルを通して塑性状態で応力が挙動していることがわかる。ここで、応力の挙動は弾性解析と弾塑性解析で大きく異なる。以下に、弾性解析結果と弾塑性解析結果の応力の挙動が極端に異なる評価断面Aの内面を例に、応力の挙動を比較・検討する。

弾性解析では、コールドトランジェント開始直後に本体胴の板厚温度勾配に起因する σ_z 及び σ_h が引張応力として発生する。引き続き、スカート胴と本体胴の温度差に起因するたが締め及びスカート付け根の回転によって σ_z が圧縮側に転じるため、 σ_z と σ_h が異符号に推移する。これに対し、弾塑性解析結果では、初期の板厚内温度勾配に起因する応力、及びその後のスカート胴と本体胴との温度差に起因する応力の内 σ_z は、弾性解析結果とほぼ同様に推移する。しかし、 σ_h は弾性解析と異なり板厚内温度勾配に起因する応力の減衰と共に σ_z と同符号に推移する。この様に、 σ_h が弾性解析と異なった挙動となる理由は、ミーゼスの降伏曲面に基づいて説明することができる。

評価断面Aの内面は、面内の応力を σ_z と σ_h とする平面応力状態であると考えられる。また、評価部位はミーゼス型の相当応力で約 $17.5\text{kg}/\text{mm}^2$ の応力が発生していることから降伏状態にあると考えられる（熱過渡平均温度 425°C における降伏応力は、 $13.99\text{kg}/\text{mm}^2$ である）。平面応力場で、降伏状態にある面内の応力2成分は、ミーゼスの降伏曲面上を移動する。

これより、コールドトランジェントにおける応力の挙動は、Fig.4.1-2 に基づいて以下のように追える。

- ① 初期で応力0の状態を仮定する。
- ② 板厚内温度勾配により σ_z 、 σ_h （双方とも引張）が発生する。
- ③ 容器胴とスカート胴の相対温度差により σ_z は減少するが、 σ_h は更に増加し、これに伴い評価断面は降伏する。
- ④ 容器胴とスカート胴の温度差が増加し、 σ_z が圧縮側に推移する。板厚内温度勾配の緩和に伴って σ_h も減少する。
- ⑤ スカート胴と本体胴の温度差が解消すると共に σ_z も減衰する。この過程でも σ_h は σ_z の減少と共に増加する。
- ⑥ 更に σ_z が減少することによって σ_h が減少する。

ホットトランジェントについても、コールドトランジェント時の応力の符号を逆転させることで、その挙動を説明できる。

TTS-DSによるクリープ疲労損傷評価は、構造物のひずみ履歴に基づいた評価が行われる。そこで、弾性・弾塑性解析のひずみ挙動の比較をFig.4.1-3 に示す。ひずみの挙動は応力の挙動に比べ、弾性・弾塑性解析間に有意な差はない。しかし、弾塑性解析における σ_z は、塑性の効果によるポアソン比の増大により、弾性解析に比べて大きくなる。

(2) ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷

基準ケースの弾性及び弾塑性解析について、クリープ疲労損傷評価ラインに沿ったひずみ範囲及びクリープ疲労損傷値を比較し、Fig.4.1-4 に示す。図中の弾性解析結果は、Fig.3.1-1 に示すフローに沿って補正されたものである。また、各図の横軸は、3.2節で述べたように評価ラインの始点の節点を①として、シーケンシャルに付けた番号である。

Fig.3.1-1 に示すように、TTS-DSによるクリープ疲労損傷評価では、弾塑性解析によるひずみ範囲はミーゼス型の相当ひずみ範囲をそのまま用いる。これに対し、弾性解析によるひずみ範囲は、相当ひずみ範囲を公称ひずみ範囲に補正し、更にひずみ集中係数を乗じたものとしている。但し、弾性解析結果の補正に用いるひずみ集中係数

は、構造物の実際のひずみ範囲（本検討では、弾塑性クリープ解析結果）と同等とするための係数であるので、クリープひずみを含まない弾塑性解析から得られるひずみ範囲は、弾性解析結果を補正したひずみ範囲よりも小さくなることが予想される。弾塑性解析によるひずみ範囲は、ほとんどの部位で弾性解析結果を下回るか同等となっているが、評価断面Aの外面（評価ライン-33の⑥）近傍に見られるように、弾塑性解析によるひずみ範囲が弾塑性クリープ解析結果を大きく上回る部位がある。この周囲の評価点で、弾性解析に比べてひずみが小さくなっていることから、評価断面Aの外面近傍に弾性追従によるひずみ集中が生じた特別な部位であると考えられる。

(3) まとめ

弾性解析と弾塑性解析結果の比較から、以下のことが明らかになった。

- 応力の挙動は弾性解析結果と弾塑性解析結果で大きく異なる。これに対し、ひずみの挙動は応力に比べて大きな相違は見られない。ただし、塑性の効果によってポアソン比が増加する分、弾塑性解析で若干大きくなる。
- 弾性解析結果を補正して得られるひずみ範囲は、弾塑性解析から得られるひずみ範囲に比べて、概ね大きめの値となる。
- 弾塑性解析では、スカート付け根のR止端部容器側（評価断面Aの外表面近傍）に弾性追従によるものと見られるひずみ集中が生じている。この局所的なひずみ集中部では、弾塑性解析結果が弾性解析結果の約50%増となる。

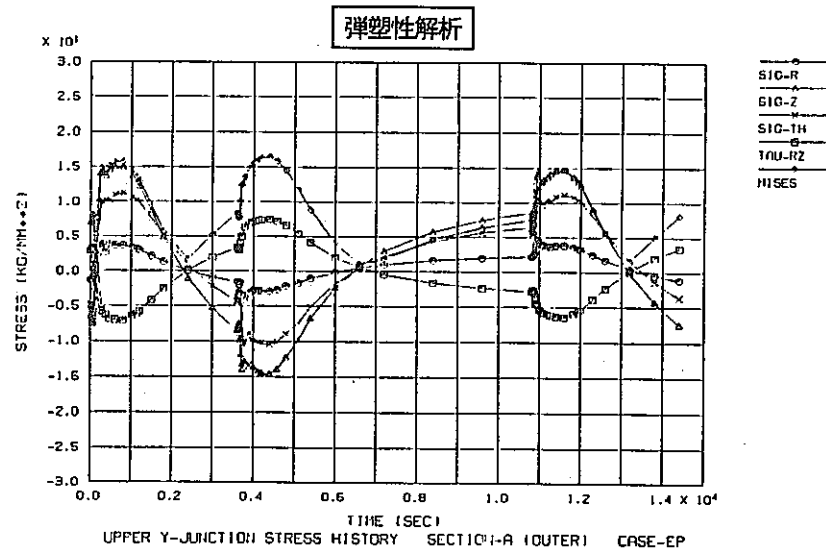
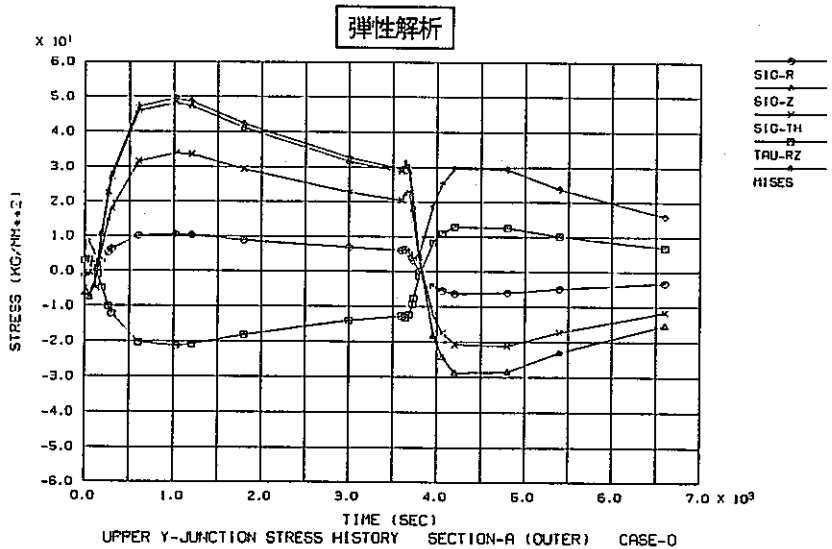
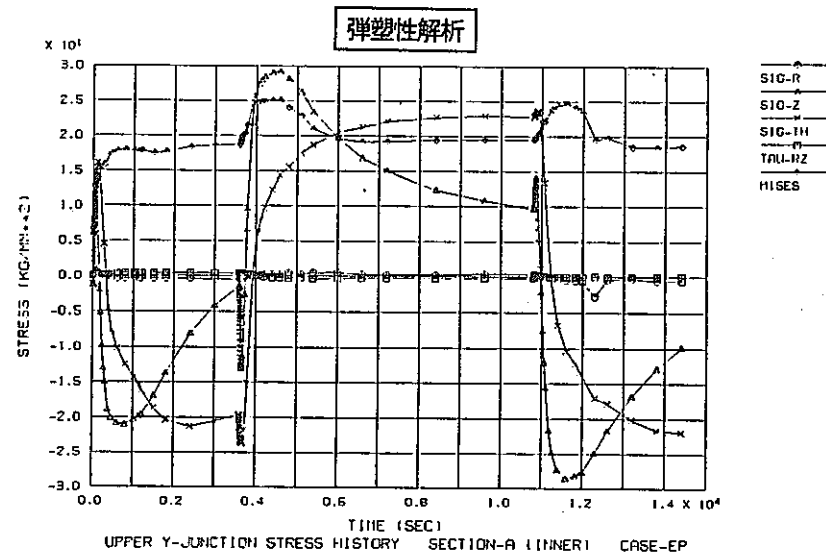
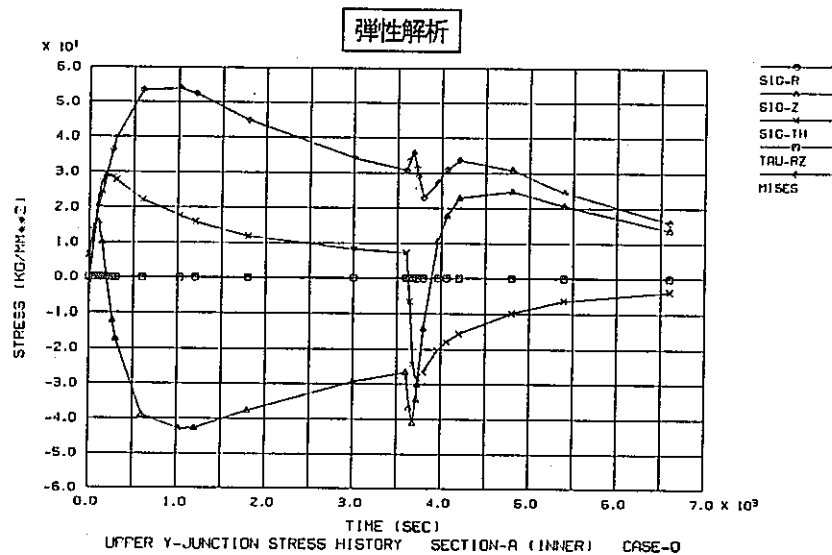


Fig. 4.1-1(a) Comparison of stress history between elastic and elasto-plastic analysis

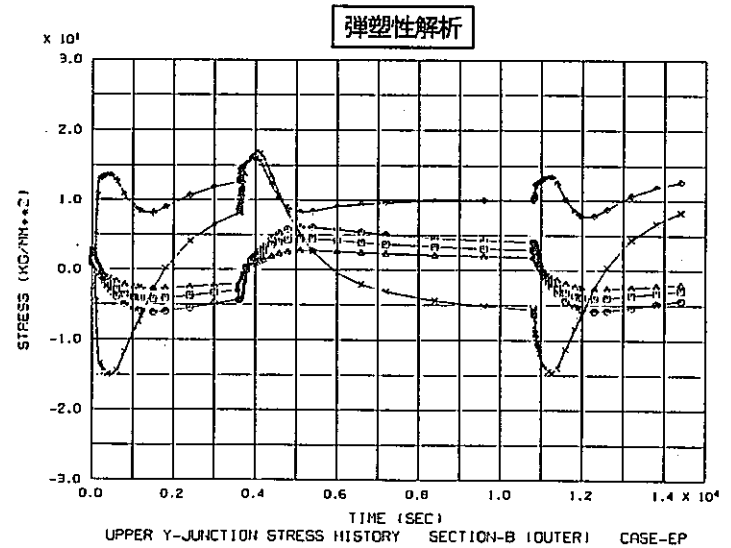
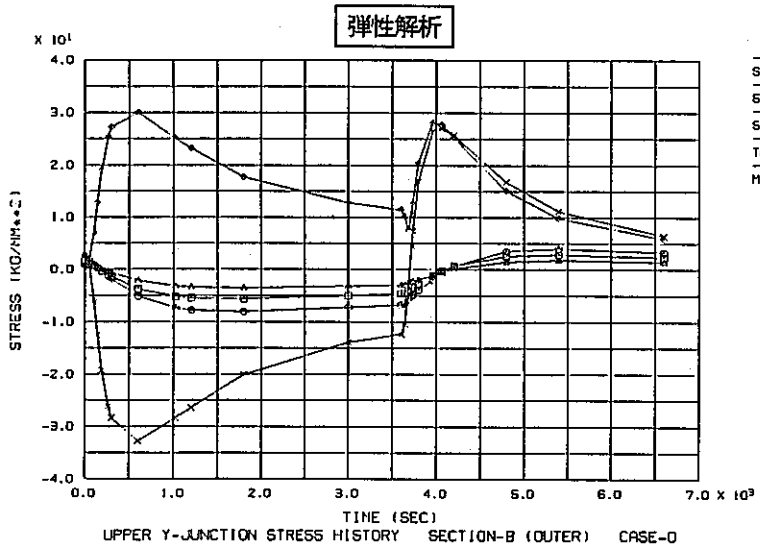
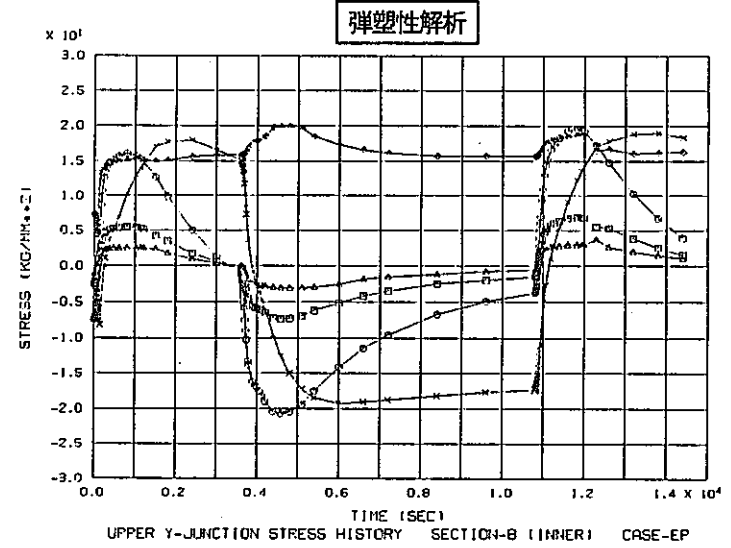
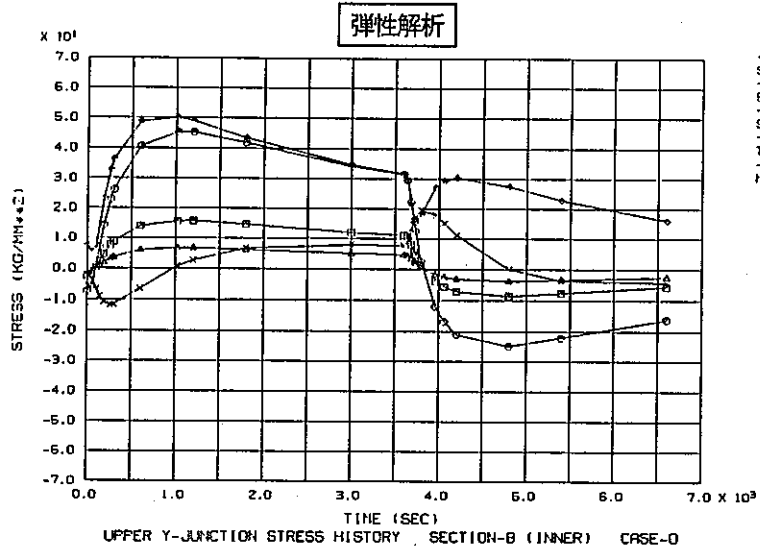


Fig. 4.1-1(b) Comparison of stress history between elastic and elasto-plastic analysis

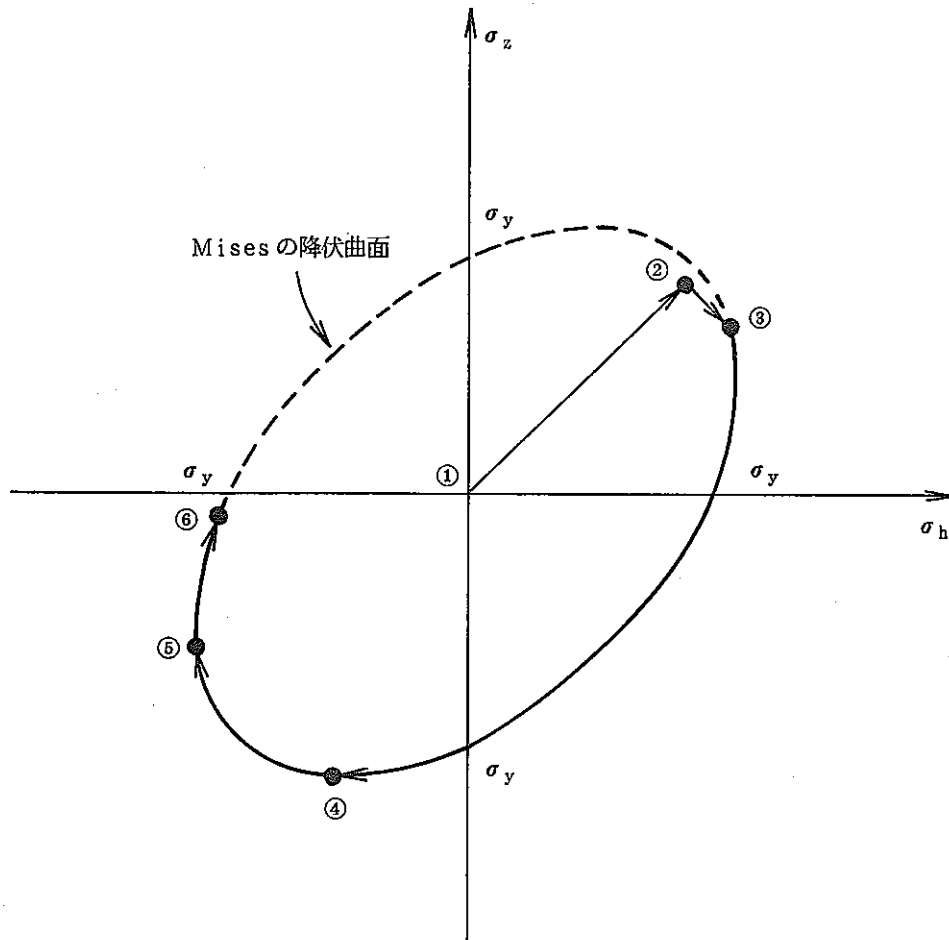


Fig. 4.1-2 Stress Behavior based on Von-Mises yield condition

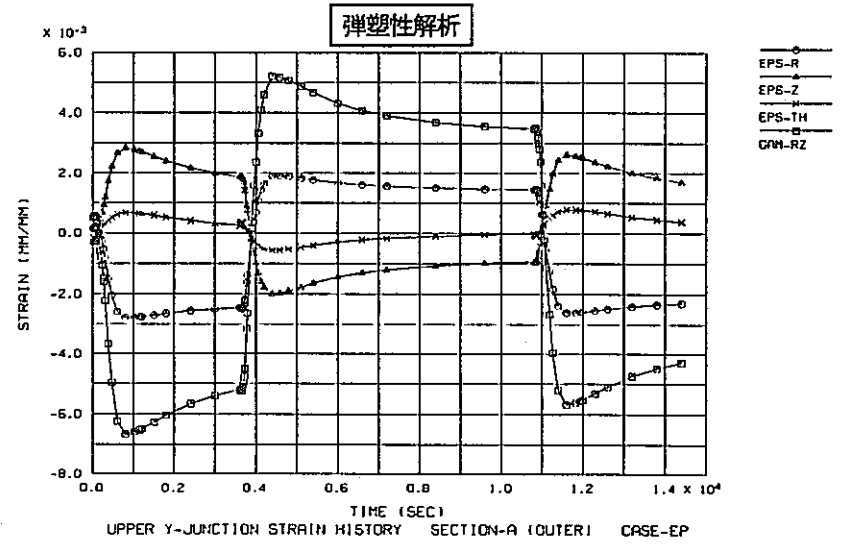
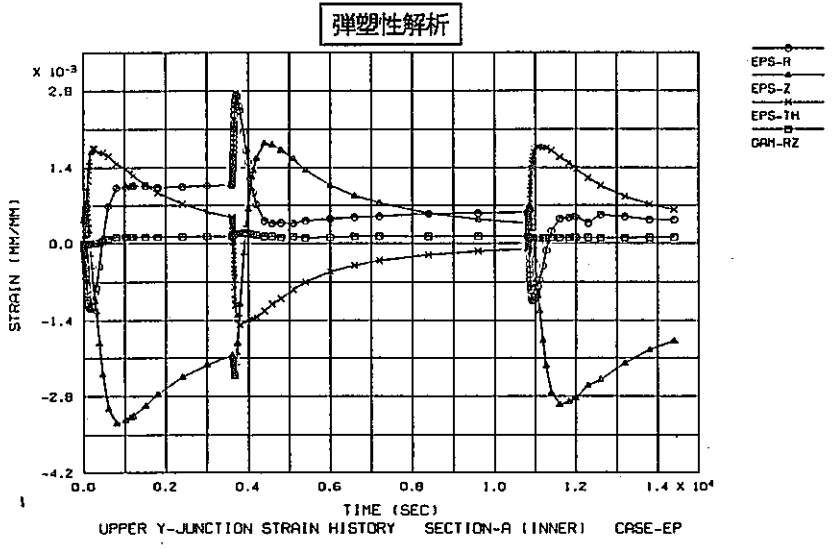
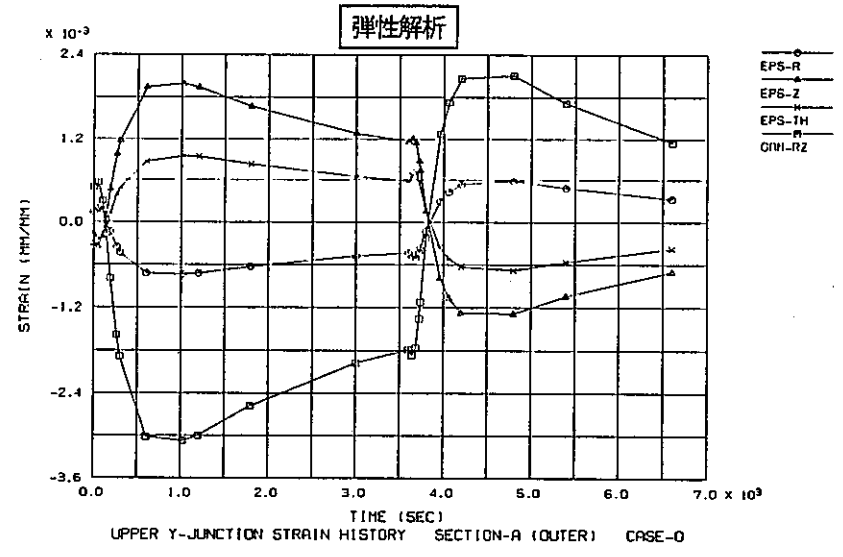
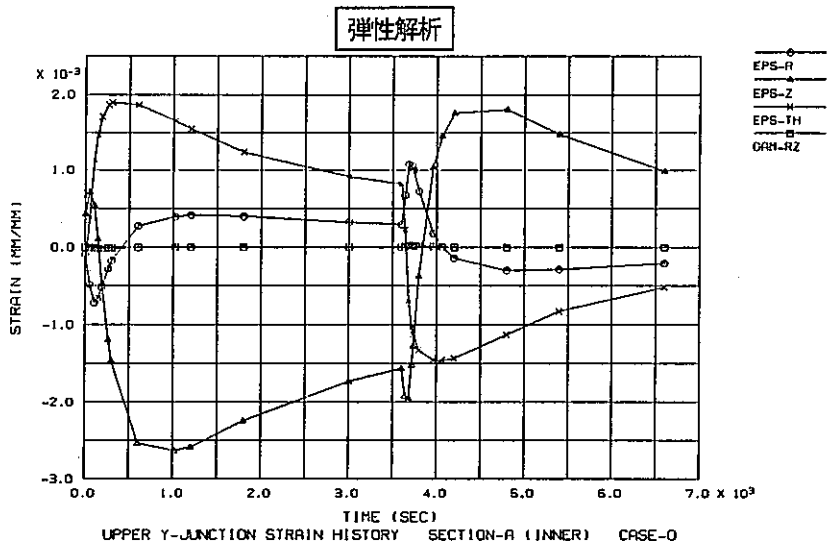


Fig. 4.1-3(a) Comparison of strain history between elastic and elasto-plastic analysis

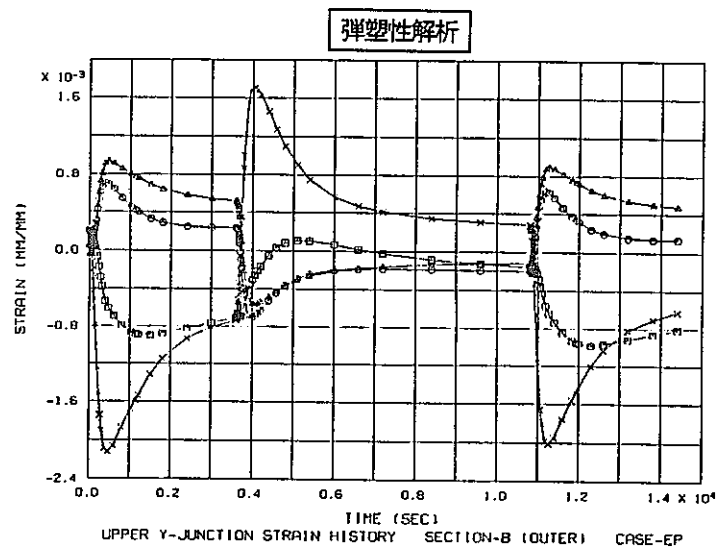
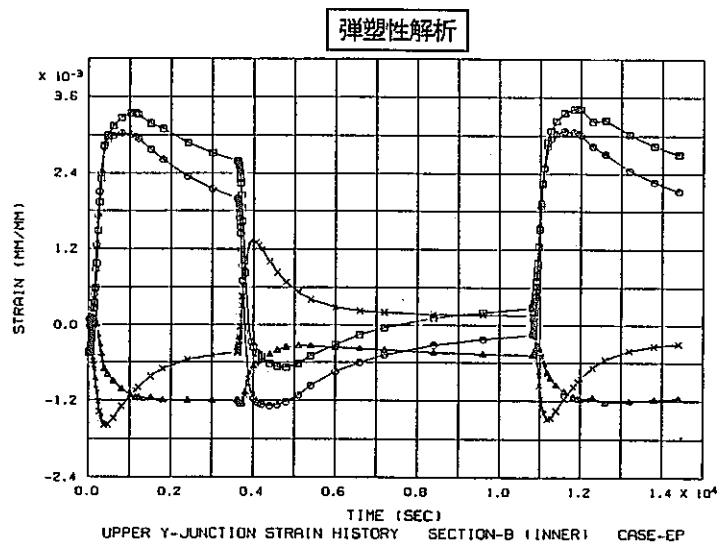
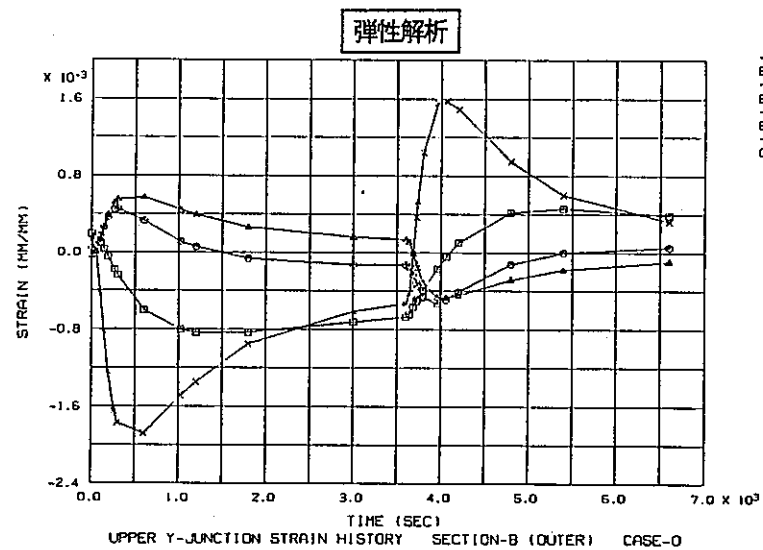
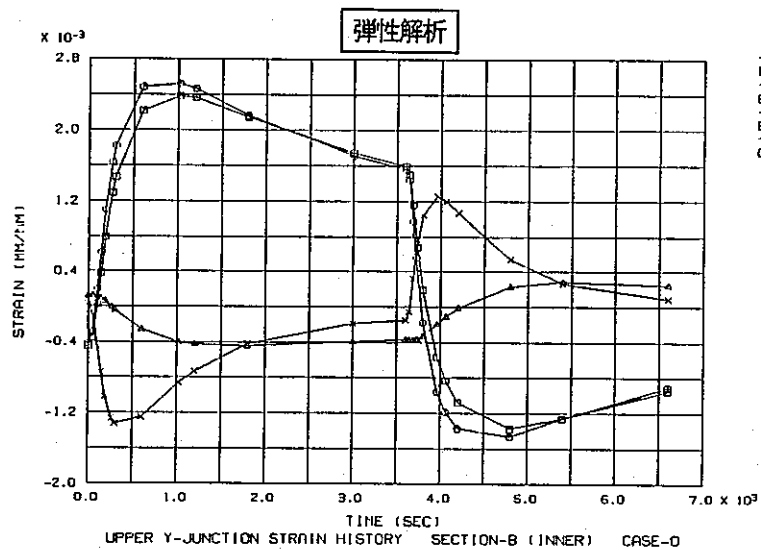


Fig. 4.1-3(b) Comparison of strain history between elastic and elasto-plastic analysis

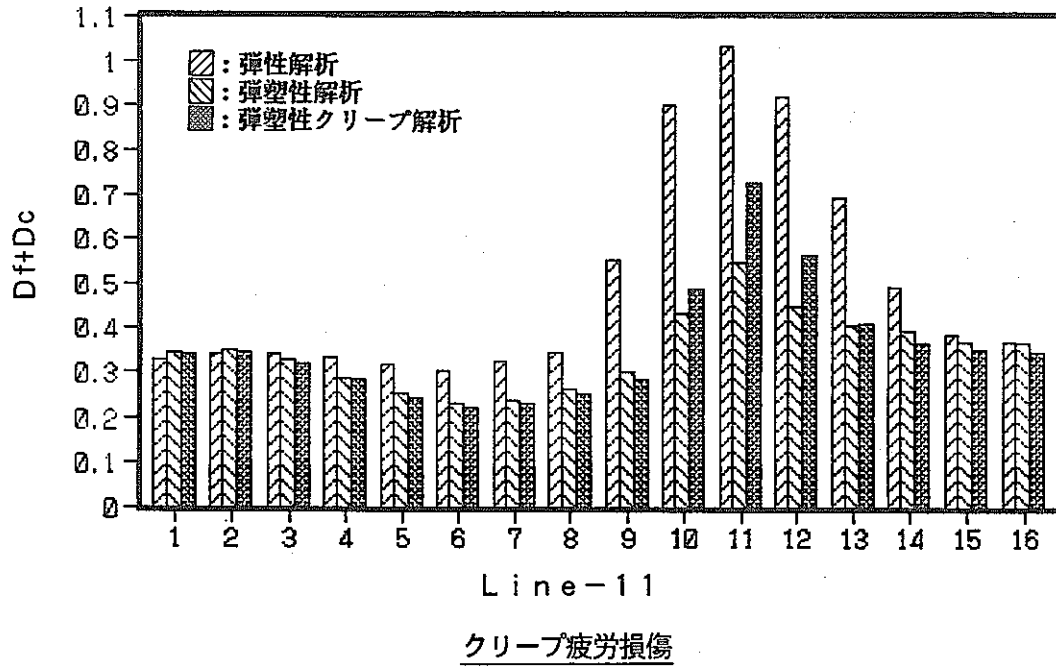
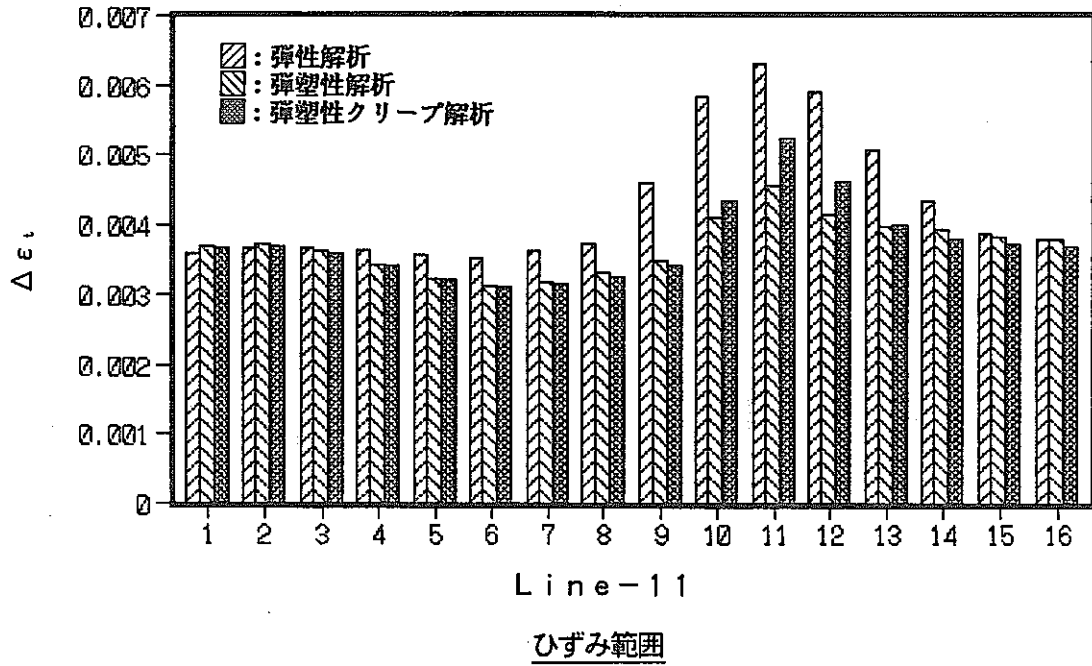


Fig. 4.1-4(a) Comparison of strain range and creep-fatigue damage among elastic, elasto-prastic and elastic-plastic-creep analysis

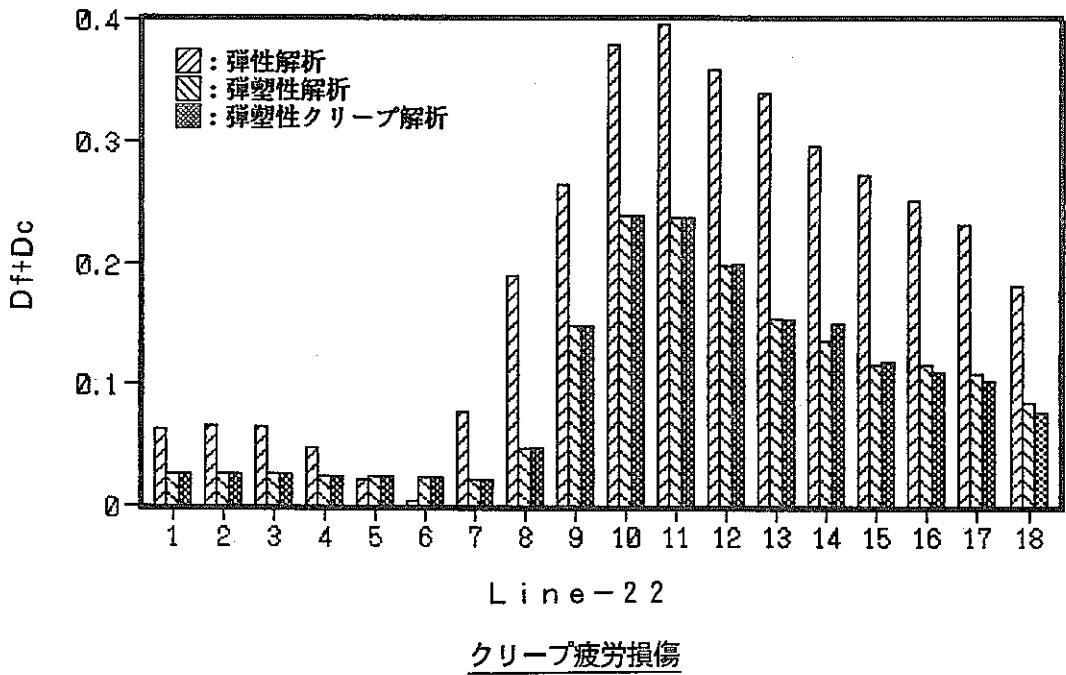
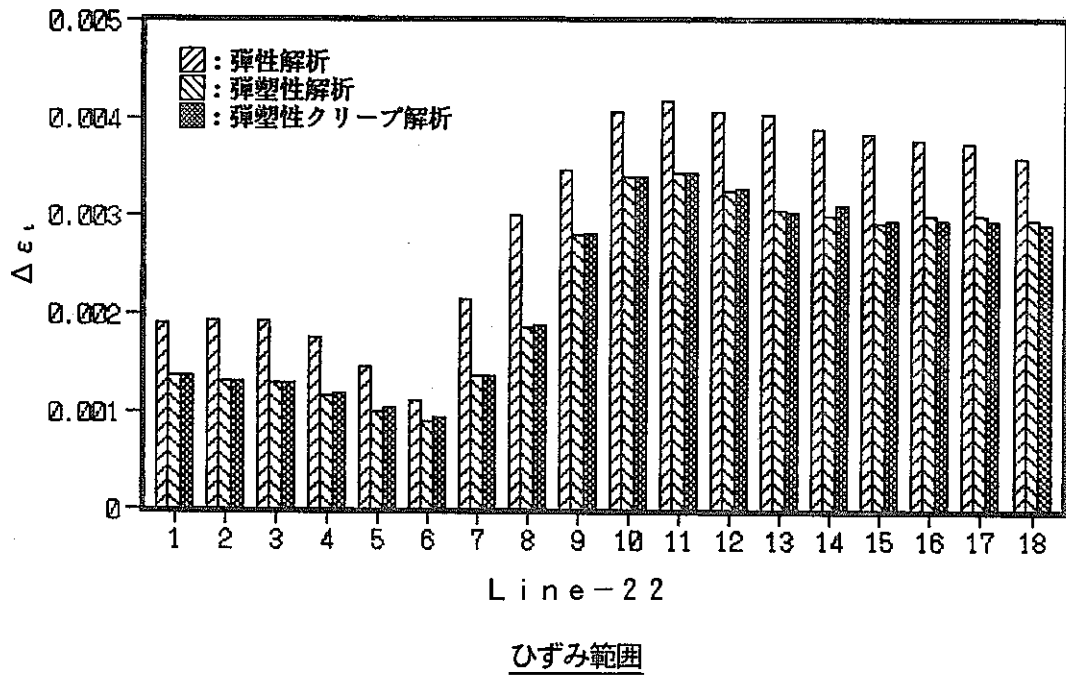


Fig. 4.1-4(b) Comparison of strain range and creep-fatigue damage among elastic, elasto-prastic and elastic-plastic-creep analysis

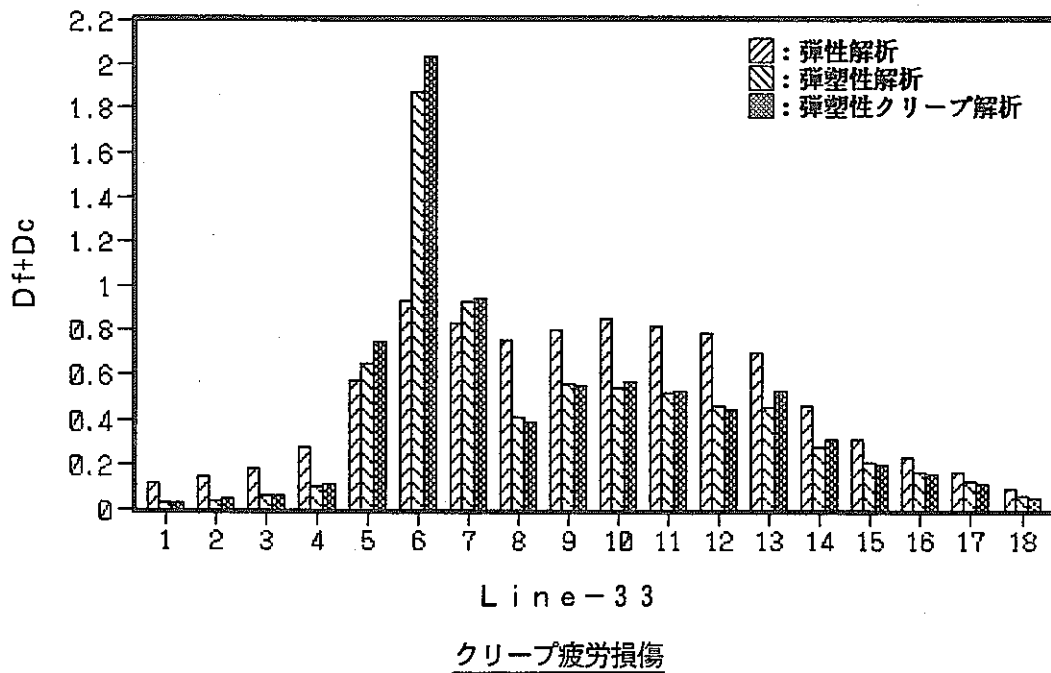
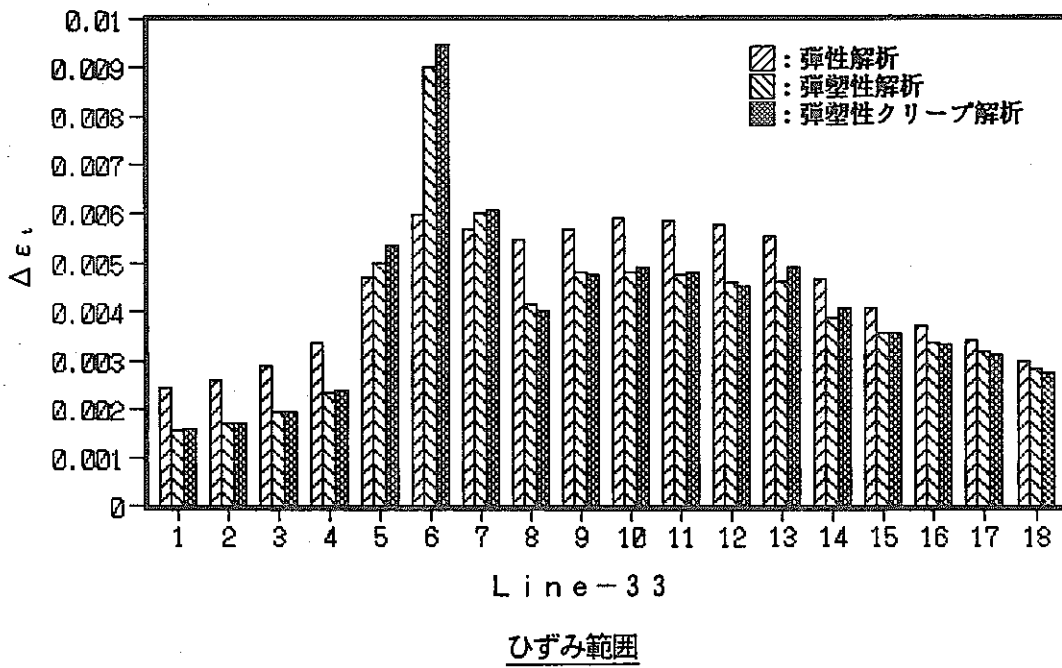


Fig. 4.1-4(c) Comparison of strain range and creep-fatigue damage among elastic, elasto-prastic and elastic-plastic-creep analysis

4.2 クリープの効果

基準ケースについて、同一荷重条件下における弾塑性及び弾塑性クリープ熱応力解析を実施した。弾塑性クリープ解析においては、ホットランジェント開始より 100秒後からコールドランジェント開始まで、クリープ解析を実施している。

(1) 応力時刻歴

基準ケースの弾塑性及び弾塑性クリープ解析の評価断面内外表面における応力時刻歴を比較し、Fig.4.2-1 に示す。解析結果は、双方ともコールド⇒ホット⇒コールドの順で1.5サイクルの応力時刻歴を示している。

評価断面Aの内面において、弾塑性クリープ解析から求めたホットランジェント時のミーゼス型の相当応力は、熱過渡終了時で、弾塑性解析に比べて約25%小さくなる。また、相当応力のピーク値もホットランジェント時で約15%、コールドランジェントで約25%小さくなっており、クリープによる応力緩和が見られる。評価断面Aと同様に、評価断面Bの内面においても弾塑性解析に比べて弾塑性クリープ解析による応力が下回っており、クリープによる応力緩和が見られる。

これに対し、評価断面A、Bとも、外面における応力の挙動は弾塑性解析と弾塑性クリープ解析においてほとんど差がないことがわかる。これは、以下の理由によると考えられる。

- ・外面の応力は内面に比べて小さく、クリープによる応力緩和が発生しにくいこと。
- ・外面の応力は内面に比べて短時間に減衰し、クリープ歪が発生しにくいこと。
- ・外面は内面に比べて低温で、クリープが発生しにくいこと。

(2) ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷

基準ケースの弾塑性クリープ解析から得られたひずみ範囲、及びクリープ疲労損傷は、弾性・弾塑性解析結果とともにFig.4.1-4 に示されている。前述のとおり、図中の弾性解析結果は、Fig.3.1-1 に示すフローに沿って補正されたものである。

評価断面Aの内外面近傍では、弾塑性解析に対し弾塑性クリープ解析のひずみ範囲が約15%大きくなる。しかし、その他の評価部位のひずみ範囲は、弾塑性解析と弾塑性クリープ解析でほぼ同等となる。これは、ひずみ集中部以外では大きなクリープひ

ずみが生じていないことを意味している。例として、評価断面Aの内外面の応力発生パターンを考えると、ひずみ集中部は、容器胴とスカート胴の相対的温度差によって最大応力が発生する部位である。これらの部位では、荷重要因である容器胴とスカート胴の相対的温度差が長時間緩和されないことから、応力も比較的長時間保持されることとなる。これに対し、一般部の応力は、主として容器胴（又はスカート付け根部）の板厚方向温度勾配によって発生する。この温度勾配は、応力時刻歴からも明らかのように、容器胴とスカート胴の相対的温度差に比べて短時間で緩和してしまう。このため、弾塑性クリープ解析を実施した場合には、ひずみ集中部、換言すれば、容器胴とスカート胴の相対的温度差によって、大きな応力が発生するスカート付け根部にはクリープひずみが発生するが、容器胴の板厚方向温度勾配による応力が主体となる一般部には、ほとんど発生しない。

ここで、弾性解析結果と弾塑性クリープ解析結果を比較する。上述のように弾塑性クリープ解析によるひずみ範囲は、部分的には弾塑性解析の結果を上回るが、ほとんどの部位で同等の値となっている。このため、弾塑性解析結果と同様に評価断面Aの外表面近傍を除けば、ほとんどの部位で弾性解析結果を下回るか同等となっている。Fig.3.1-1 に示すように、TTS-DSによるクリープ疲労損傷評価において、非弾性解析では、応力解析から求まるミーゼス型の相当ひずみ範囲をそのままひずみ範囲としている。これに対し、弾性解析では、相当ひずみ範囲を公称ひずみ範囲に補正し、更にひずみ集中係数を乗じたものをひずみ範囲としている。相当ひずみ範囲から公称ひずみ範囲の変換は、弾性的に計算された時に過少評価されるミーゼス型の相当ひずみを補正するもので、高速原型炉高温構造設計方針⁶⁾にも取り入れられている。また、公称ひずみ範囲からひずみ範囲への変換には、公称ひずみ範囲に対してひずみ集中係数 (K_ϵ) が乗じられる。本来、ひずみ集中係数は、構造の形状、応力分布、負荷水準等に依存する係数であるが、弾性解析では考慮できないクリープひずみや塑性効果に伴うひずみの割増を考慮し、従来より $K_\epsilon=1.2$ を用いてきた。この結果、評価断面Aの外表面（クリープ疲労損傷評価ライン-33の⑥）のように極端な弾性追従が発生する部位を除けば、上述のひずみ集中係数を用いて補正した弾性解析結果は弾塑性クリープ解析結果と概ね一致しており、弾性解析に基づく供試体設計用の評価法としては、

TTS-DSが実用的な精度を有していると考えられる。しかし、ひずみ範囲の小さな部分（例えば、容器胴外面）や曲げが主体になる部分（例えば、スカート付け根）については若干大き目の補正結果となっており、クリープ疲労損傷評価法の高度化の観点からは、今後検討の余地を残している。

(3) まとめ

基準ケースの伝熱解析結果を入力として実施した弾性、弾塑性、弾塑性クリープ解析結果から以下の結論が得られた。

- スカート構造において、径方向温度勾配が主な応力発生要因となる容器胴の一般部では、クリープひずみはほとんど発生しないが、容器胴とスカート胴の相対的温度差による応力の集中部では、クリープによるひずみの増加が見られる。
- よって、スカート構造においては、ホットランジェントの保持時間を長くすることで、クリープひずみが増大すると考えられる。
- 弾性解析と弾塑性クリープ解析によるクリープ疲労損傷の比較から、極端な弾性追従が発生する部位を除いて概ね一致しており、供試体設計用の評価法としては、TTS-DSが実用的な精度を有していると考えられる。しかし、ひずみ範囲の小さな部分や曲げが主体になる部分については若干大き目の補正結果となっており、クリープ疲労損傷評価法の高度化の観点からは、今後検討の余地を残している。
- TTS-DSは、解析結果の一部に見られる弾性追従による極端なひずみ集中は考慮していない。よって、このようなひずみ集中が予想される部位については、非弾性解析による評価が必要となる。

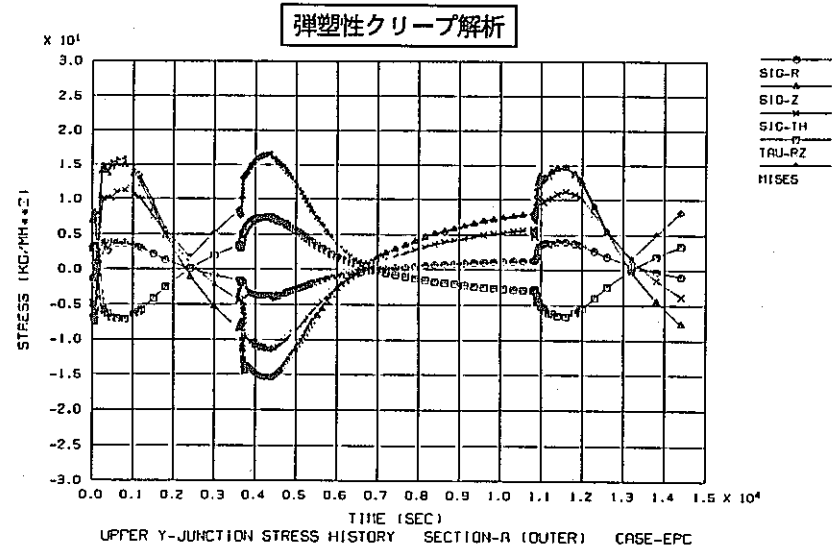
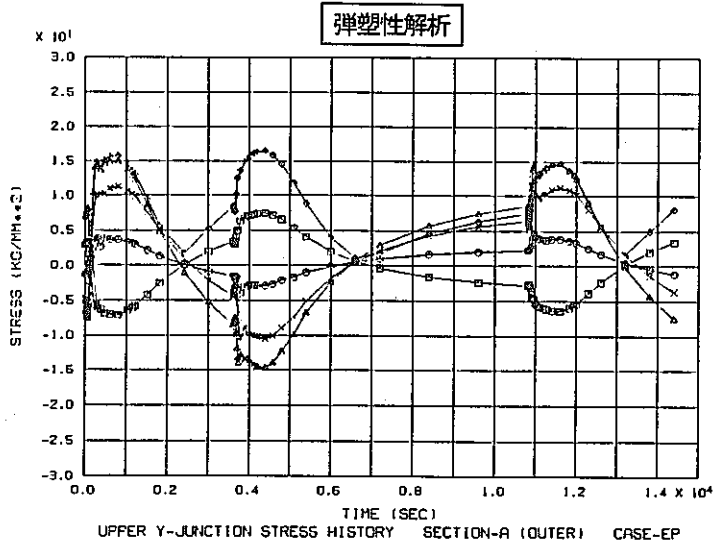
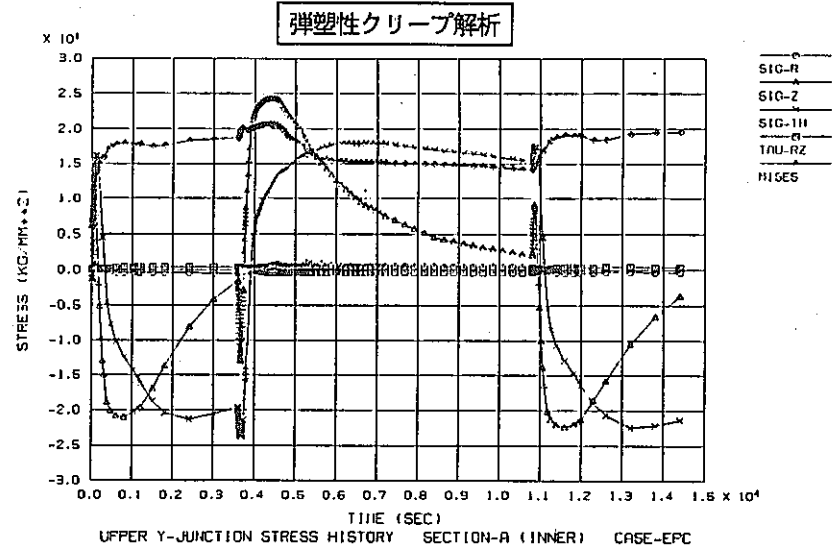
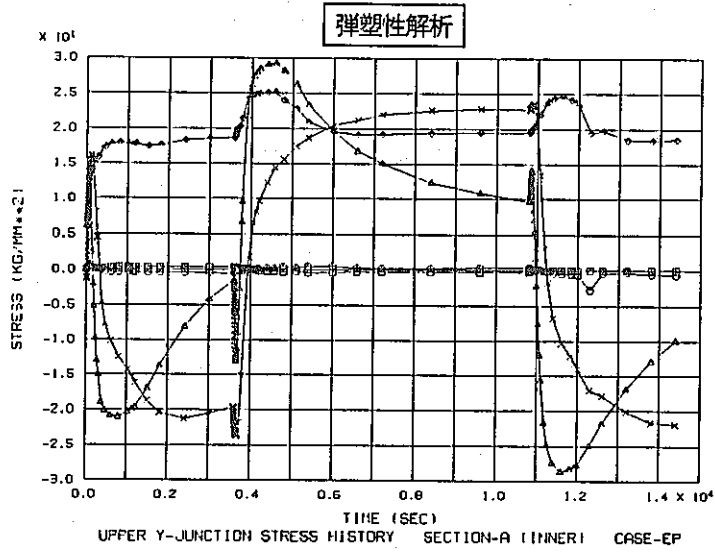


Fig. 4.2-1(a) Comparison of stress history between elasto-plastic and elastic-plastic-creep analysis

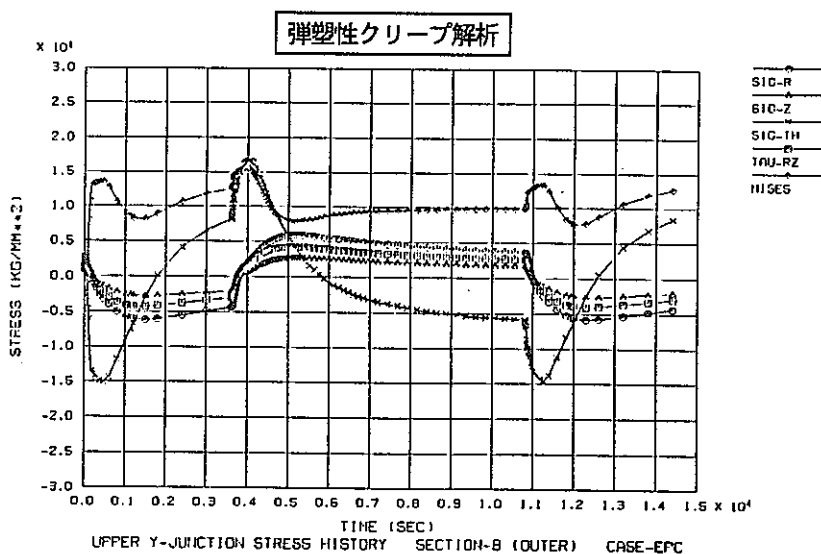
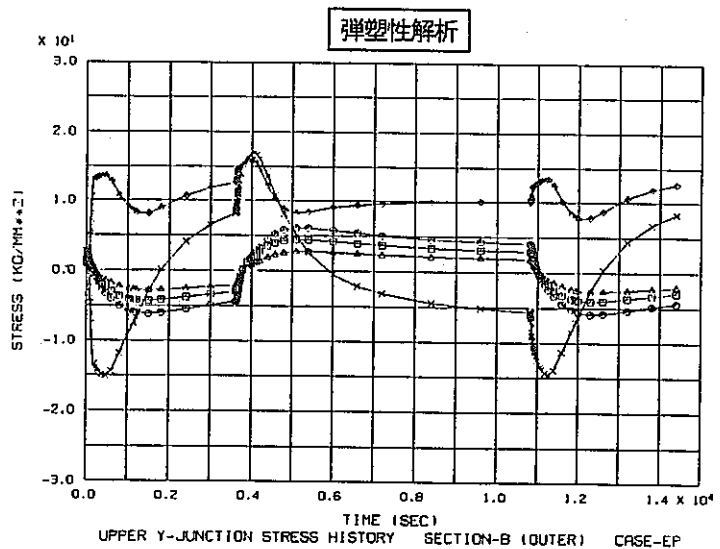
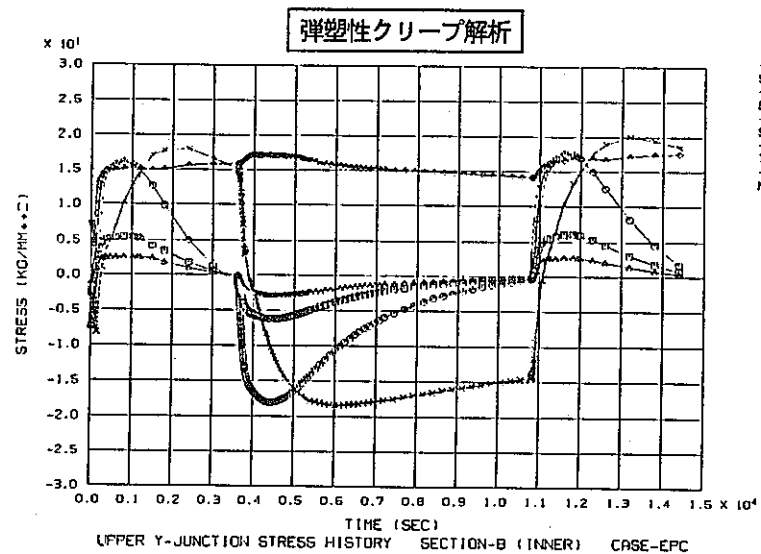
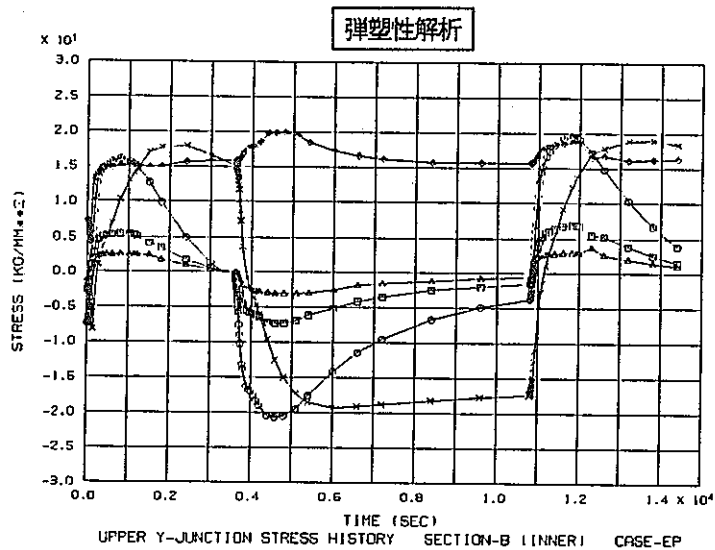
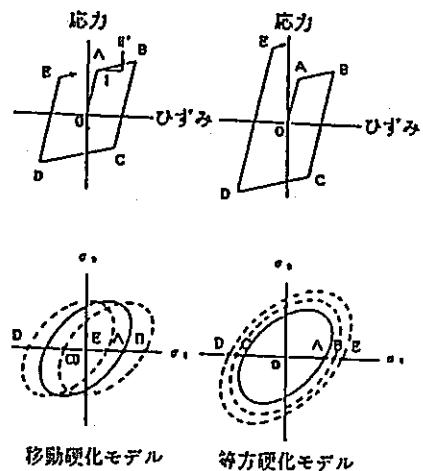


Fig. 4.2-1(b) Comparison of stress history between elasto-plastic and elastic-plastic-creep analysis

4.3 塑性に対する硬化則

基準ケースとケースA-1は、降伏後の応力ひずみ関係のうち、硬化則として移動硬化モデル、等方硬化モデルを用いたケースである。それぞれの硬化モデルにおける応力ひずみ挙動と降伏曲面の動きは、右図に示すとおりである。

以下にこれらのケースに対する比較・検討を示す。



(1) 応力の時刻歴

移動硬化モデルを用いた基準ケース及び等方硬化モデルを用いたケースA-1の評価断面内外表面における応力時刻歴を比較し、Fig. 4.3-1に示す。

すべての評価断面において、各応力成分は等方硬化モデルを用いた解析結果が移動硬化モデルを用いた解析結果に対し2割程度大きくなる。これは、上図に示すように等方硬化によって降伏曲面が増大するためである。

ミーゼス型の相当応力は、ホットランジェント開始から約2,000秒以降では双方の解析結果で同等となる。これは、クリープによる応力緩和のためである。

(2) ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷

移動硬化モデルを用いた基準ケース及び等方硬化モデルを用いたケースA-1のクリープ疲労損傷評価ラインにおけるひずみ範囲及びクリープ疲労損傷を比較し、Fig. 4.3-1に示す。

ひずみ範囲、クリープ疲労損傷ともに移動硬化モデルを用いた解析の値が等方硬化モデルを用いた解析の値を上回る。特に大きなひずみ集中が見られる評価断面A外面(ライン-33の⑥)において上記の傾向が大きく現れる。

(3) まとめ

材料が塑性変形を受けたときのひずみ硬化に対する理論として、移動硬化及び等方硬化理論がある。今回の検討では、これらの双方の硬化モデルを用いて同一荷重条件下の弾塑性クリープ解析を実施した。解析結果から以下の結論を得た。

- 発生応力は、等方硬化モデルが移動硬化モデルを約20%上回る。
- しかし、ひずみ範囲は移動硬化モデルにおいて等方硬化モデルを上回り、ひずみ集中部において、この傾向が顕著である。
- 繰り返し荷重を受ける材料の挙動が、一般に移動硬化モデルに近いとされていることから、熱過渡を繰り返し受ける構造物のクリープ疲労損傷は、等方硬化モデルを用いた評価において非安全側となることが想定される。

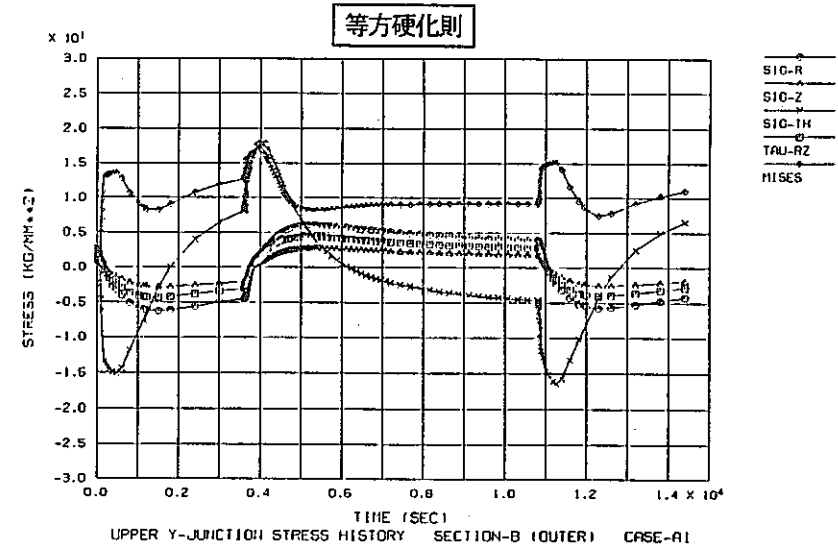
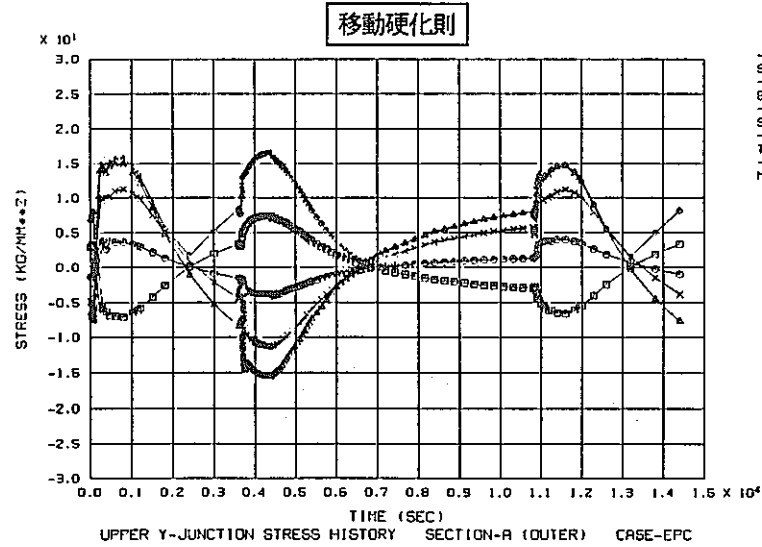
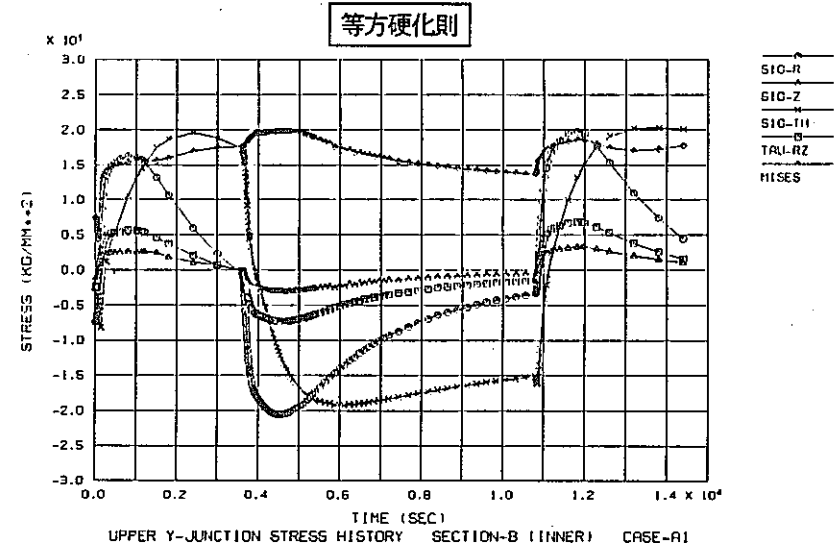
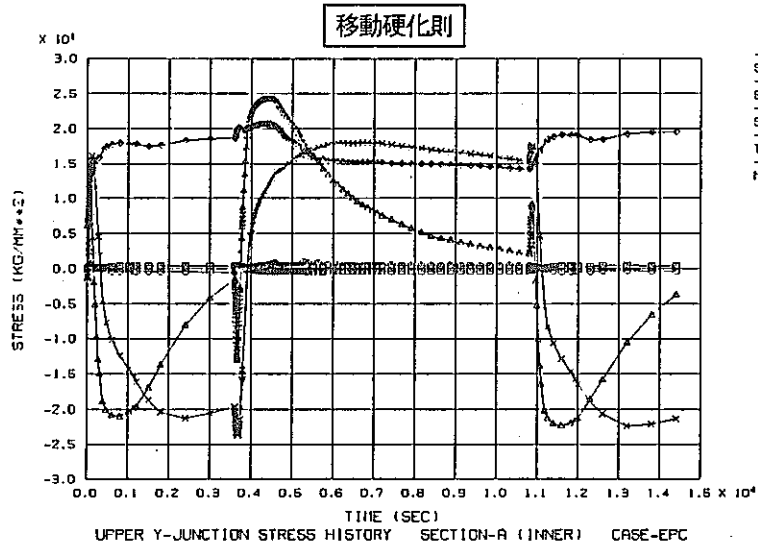


Fig. 4.3-1(a) Comparison of stress history between kinematic and isotropic hardening rule

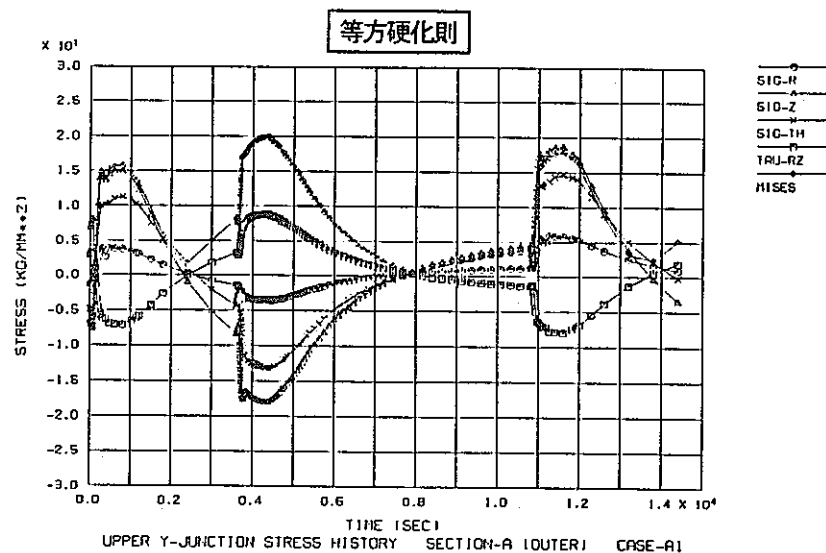
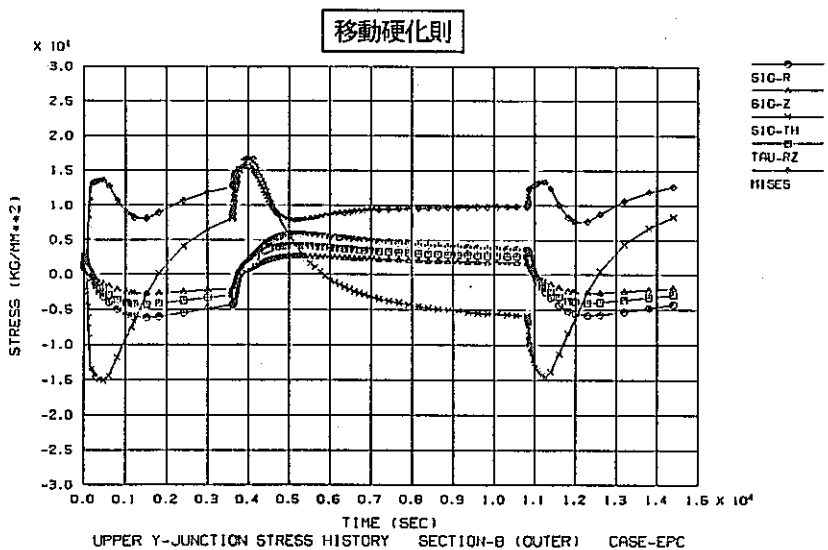
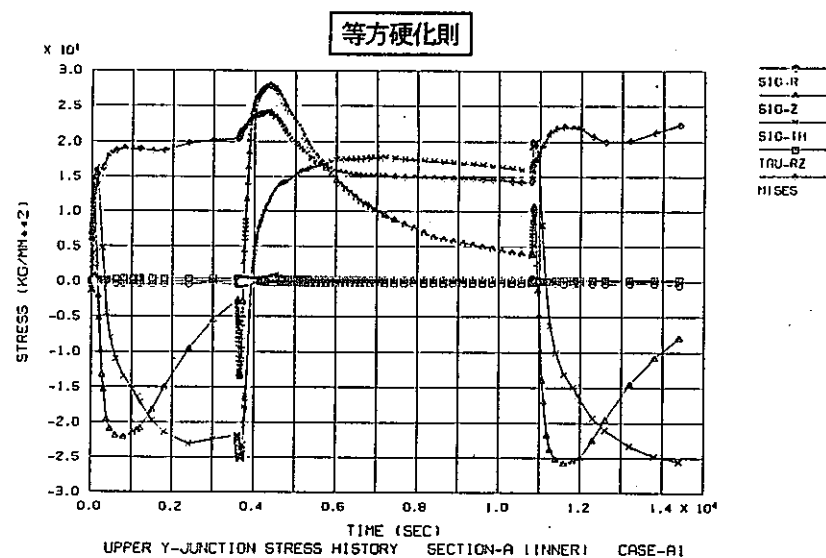
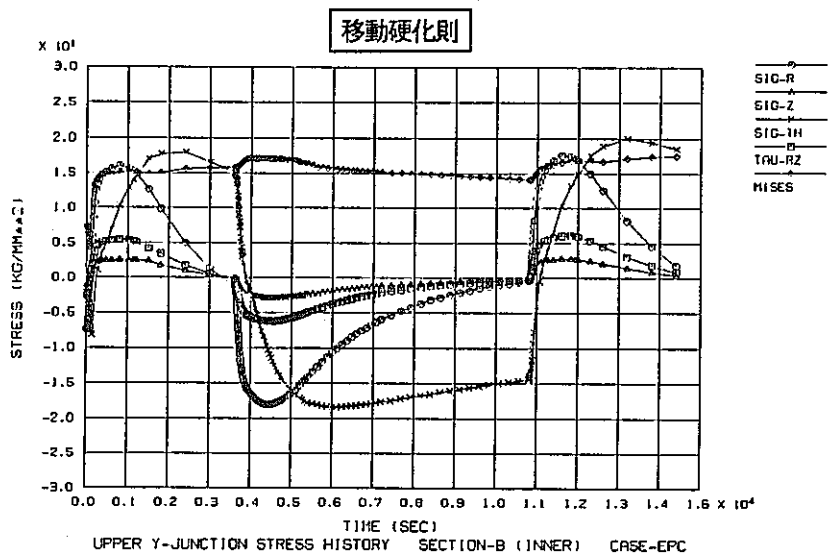


Fig. 4.3-1(b) Comparison of stress history between kinematic and isotropic hardening rule

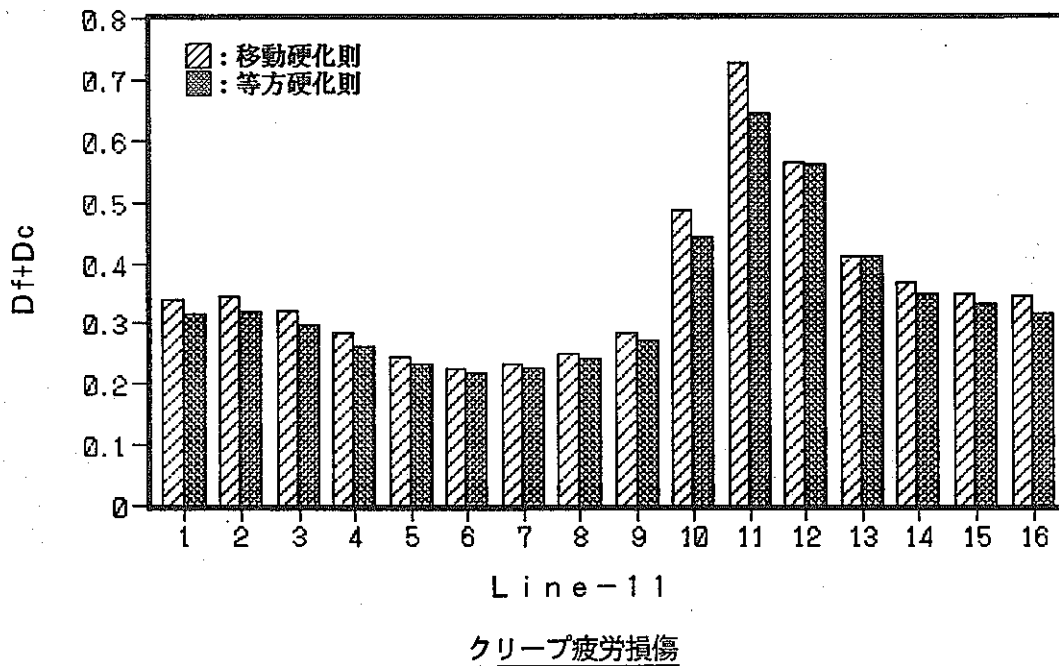
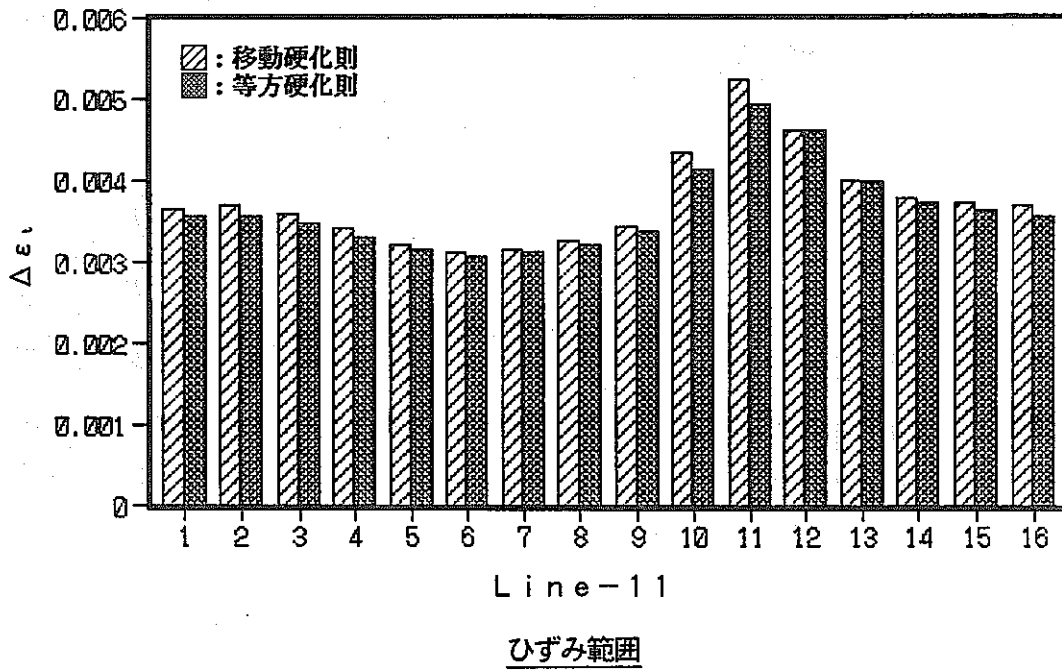


Fig. 4.3-2(a) Comparison of strain range and creep-fatigue damage between kinematic and isotropic hardening rule

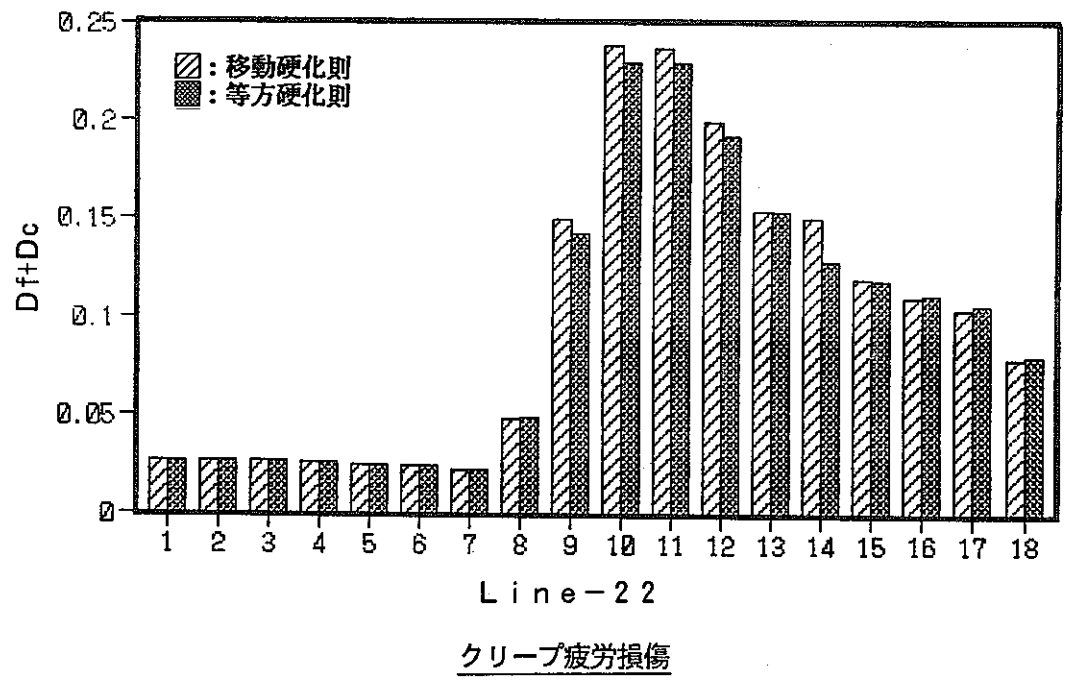
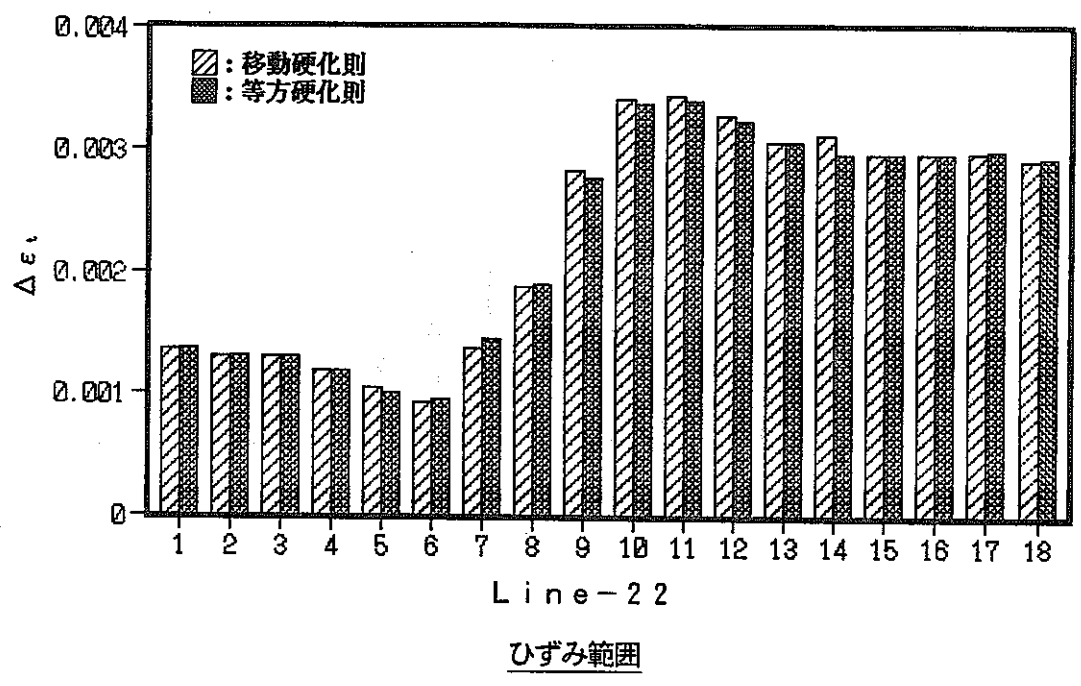


Fig. 4.3-2(b) Comparison of strain range and creep-fatigue damage between kinematic and isotropic hardening rule

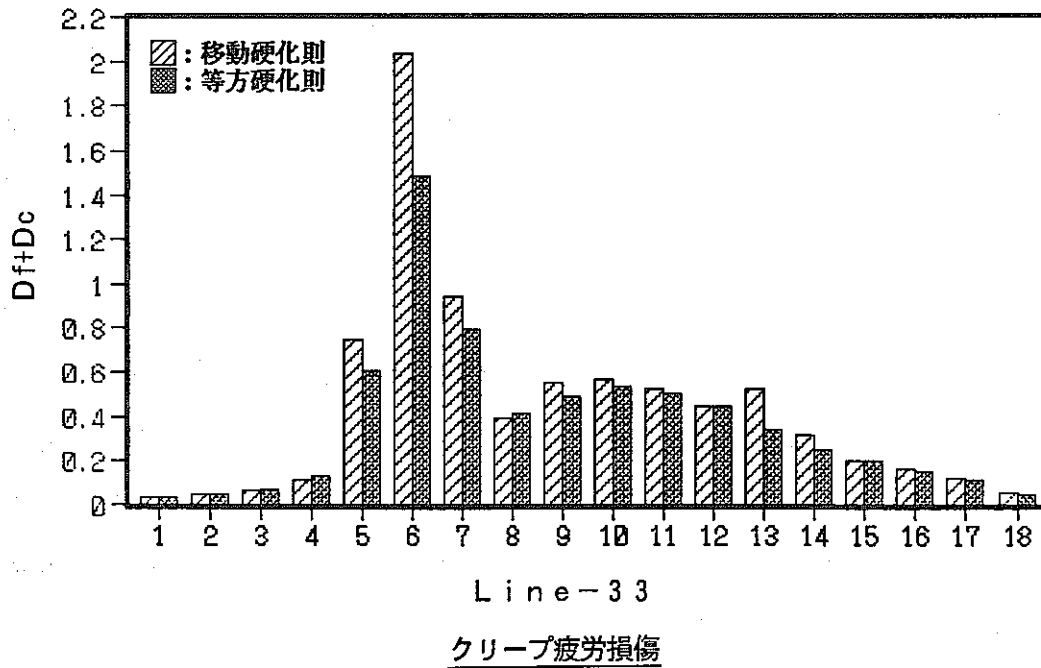
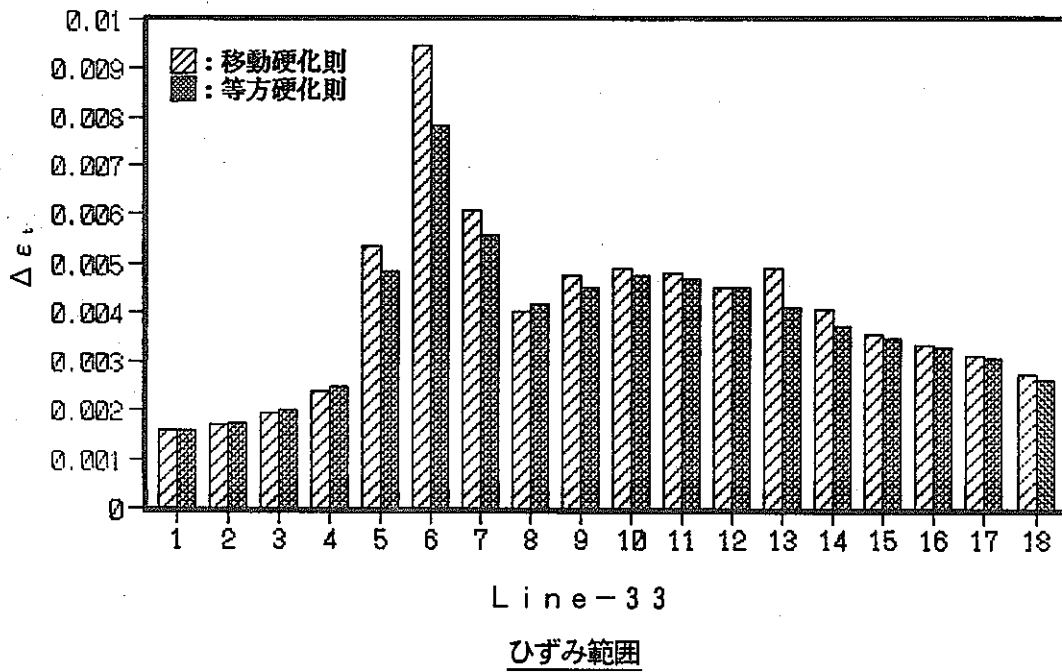


Fig. 4.3-2(c) Comparison of strain range and creep-fatigue damage between kinematic and isotropic hardening rule

4.4 応力-ひずみ関係

応力-ひずみ曲線の影響として、多直線近似動的応力-ひずみ曲線（以下、動的応力-ひずみ曲線と呼ぶ）を用いたケースB-1と2直線近似単調応力-ひずみ曲線（以下、単調応力-ひずみ曲線と呼ぶ）を用いたケースA-1を比較する。また、2直線近似応力-ひずみ曲線における繰返し硬化の影響を確認するため、ケースA-1で用いた単調応力-ひずみ曲線を2直線近似定常繰返し応力-ひずみ曲線（以下、定常応力-ひずみ曲線と呼ぶ）に変更した解析を実施し、併せて比較・検討する。これらの熱応力解析は、同一荷重条件（基準ケースの伝熱解析結果を流用）に基づいた弾塑性クリープ解析である。

(1) 応力の時刻歴

単調応力-ひずみ曲線、定常応力-ひずみ曲線及び動的応力-ひずみ曲線を用いた解析結果の応力評価断面内外表面における応力の時刻歴を比較し、Fig.4.4-1に示す。動的応力-ひずみ曲線を用いた解析では、除荷時の応力が塑性域まで達すると、負荷時の最大ひずみに対応した加工硬化係数がそのまま用いられるため、実際の加工硬化係数よりも小さな値が取られる。そこで、本解析ではコールドトランジェントとホットトランジェントを別々に解析している。

応力の時刻歴における各応力成分の変化は、それぞれの解析で類似の結果となっている。応力のレベルは、単調応力-ひずみ曲線、動的応力-ひずみ曲線、定常応力-ひずみ曲線の順に大きくなる。これは、Fig.4.4-2に示すように応力-ひずみ曲線の大きさに対応している。

(2) ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷

単調応力-ひずみ曲線、定常応力-ひずみ曲線及び動的応力-ひずみ曲線を用いた解析のクリープ疲労損傷評価ラインにおけるひずみ範囲及びクリープ疲労損傷を比較し、Fig.4.4-3に示す。動的応力-ひずみ曲線を用いた解析のひずみ範囲は、コールド及びホットトランジェントに対して別々に実施した解析結果を合わせ、熱過渡1サイクルとして求めたものである。

図に示すように、動的応力-ひずみ曲線を用いた解析から得られたひずみ範囲及びクリープ疲労損傷は、単調及び定常応力-ひずみ曲線を用いた解析に比べて大きく、

特にひずみの集中する部位でこの傾向が大きい。また、単調応力-ひずみ曲線と定常応力-ひずみ曲線を用いた解析結果の差は、これらと動的応力-ひずみ曲線を用いた解析との差に比べて小さい。一般には、応力-ひずみ曲線が硬めになる程ひずみ範囲は小さくなると言われるが、単調応力-ひずみ曲線と定常応力-ひずみ曲線を用いた解析を比較するとこの傾向が現れていることがわかる。しかし、動的応力-ひずみ曲線は、これら2本の応力-ひずみ曲線の間には有りながら、ひずみ範囲はこれら2本の応力-ひずみ曲線を用いた解析結果の間にはなく、双方の解析結果を上回っている。このように、ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷において、動的応力-ひずみ曲線を用いた解析結果が単調及び定常応力-ひずみ曲線を用いた解析結果を上回る理由は、応力-ひずみの関係よりも解析方法にあると考えられる。単調及び定常応力-ひずみ曲線を用いた解析ではコールド及びホットランジェントが繰り返し負荷され、熱過渡開始時にはその熱過渡で発生する最大ひずみと異符号の残留ひずみが存在する。これに対し、動的応力-ひずみ曲線を用いた解析ではコールド及びホットランジェントを別々に解析しているため、熱過渡開始時（解析開始時）の応力及びひずみが0となり、単調及び定常応力-ひずみ曲線を用いた解析では考慮されているはずの残留ひずみが適切に評価されていない。このため、動的応力-ひずみ曲線を用いた解析においては、単調及び定常応力-ひずみ曲線を用いた解析に比べてひずみ範囲が大きくなり、この傾向は相対的に応力の発生時刻が遅く、緩和の鈍いスカート付け根近傍で顕著である。

先に述べたように、動的応力-ひずみ曲線を用いた解析では除荷における塑性に対して加工硬化係数が小さくなる問題が生じるため、本解析ではコールドランジェントとホットランジェントを別々に解析した。この対策によって、板厚方向温度分布が応力の主要因となる容器胴一般部については除荷による塑性は生じていないと考えられる。しかし、容器胴とスカート胴の相対的溫度差による応力が発生するスカート付け根近傍においては、コールド又はホットランジェントのどちらか一方においても除荷中の塑性が生じ、除荷中の応力-ひずみ曲線が適切に評価されない可能性を有している*。

* 溫度變化を伴う繰返しの弾塑性挙動が適切に取扱える構成式の開発が必要である。

(3) まとめ

動的応力-ひずみ曲線と単調及び定常応力-ひずみ曲線を用いた解析結果の比較によって、以下の結論が得られた。

- 応力のレベルは、単調応力-ひずみ曲線、動的応力-ひずみ曲線、定常応力-ひずみ曲線を用いた解析の順に大きくなり、これは応力-ひずみ曲線のひずみに対する応力の大きさに対応する。
- 動的応力-ひずみ曲線を用いた解析は、単調及び定常応力-ひずみ曲線を用いた解析に対し、ひずみ範囲が大きくなる。これは、動的応力-ひずみ曲線を用いた解析が、コールドとホットトランジェントの熱応力解析を別々に実施しており、熱過渡開始時の残留ひずみが適切に評価されていないためであると考えられる。

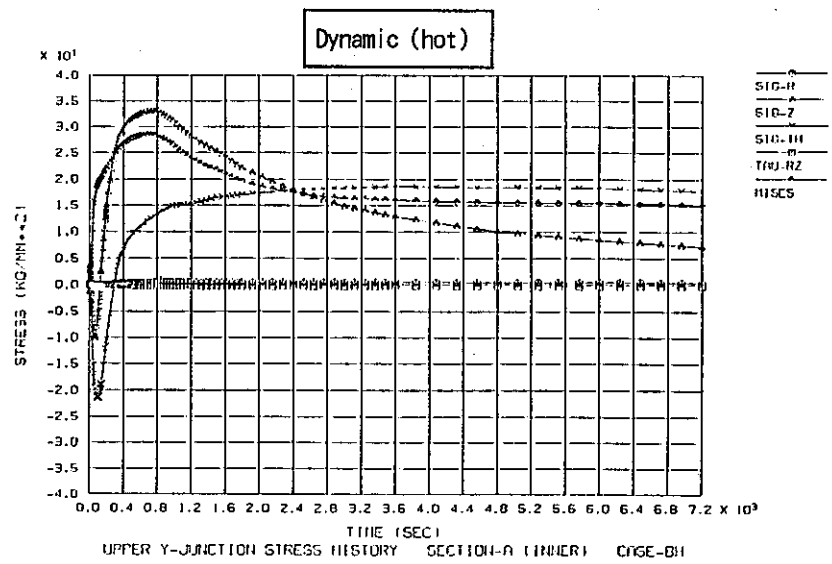
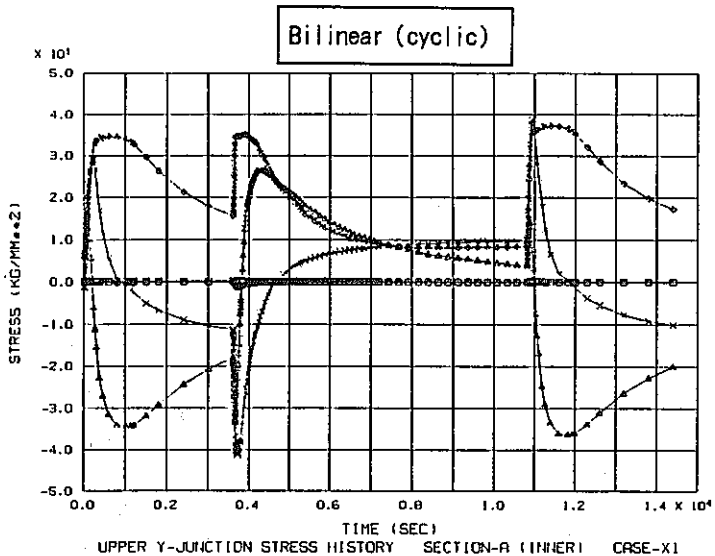
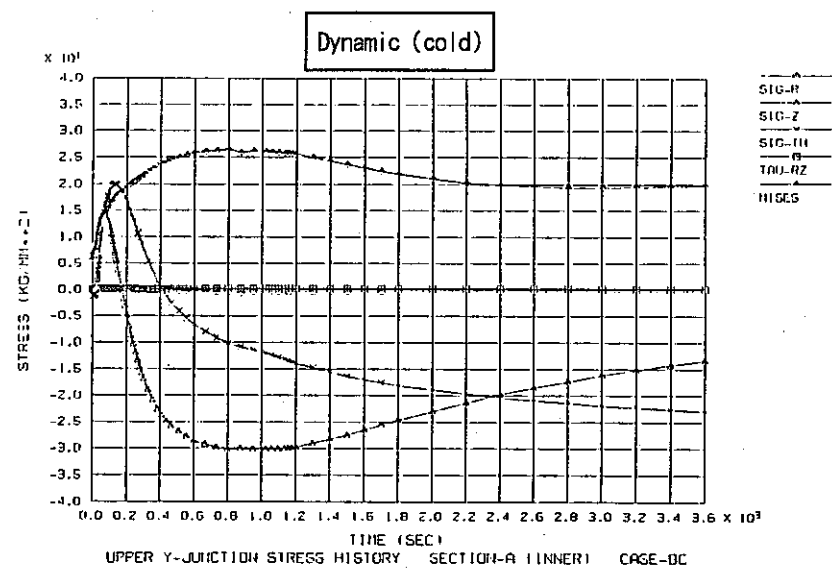
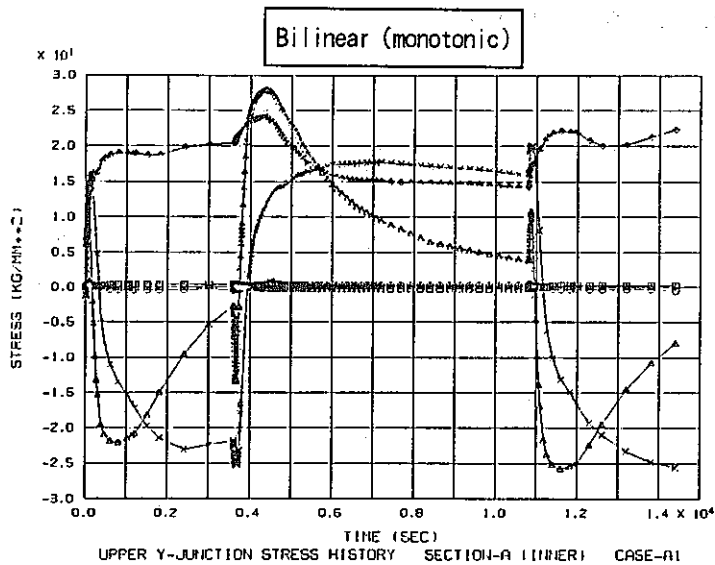


Fig. 4.4-1(a) Influence of stress/strain curve on stress history

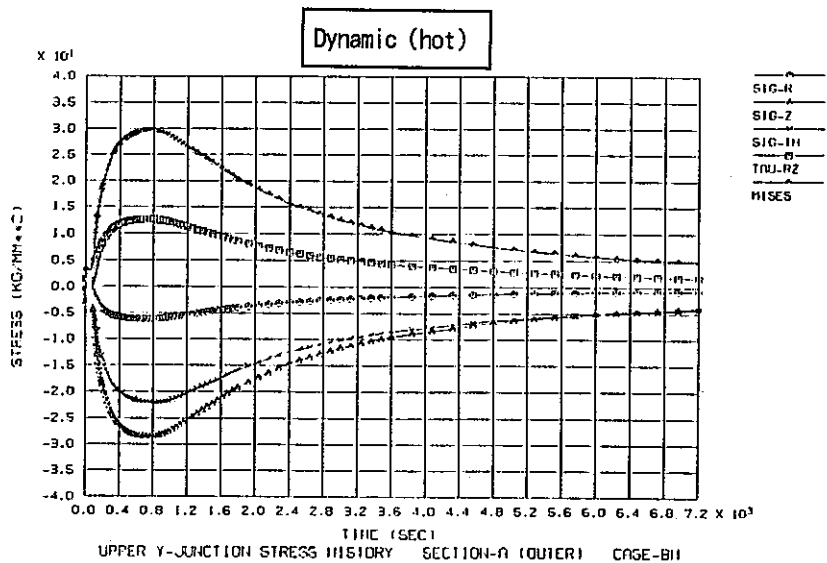
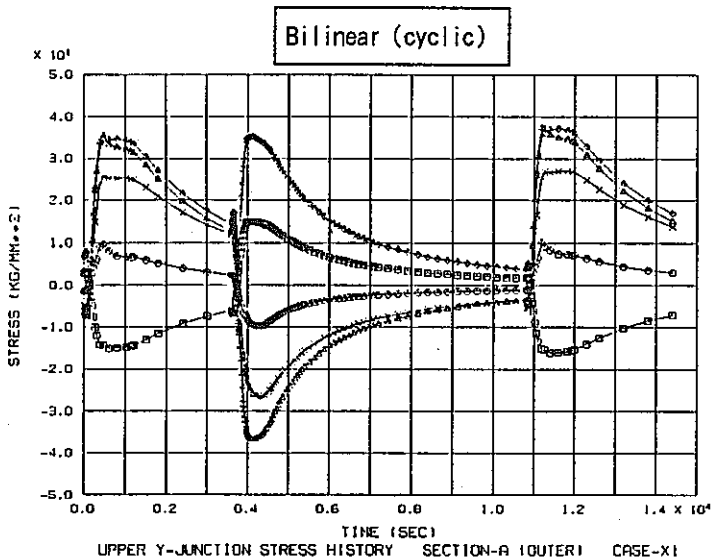
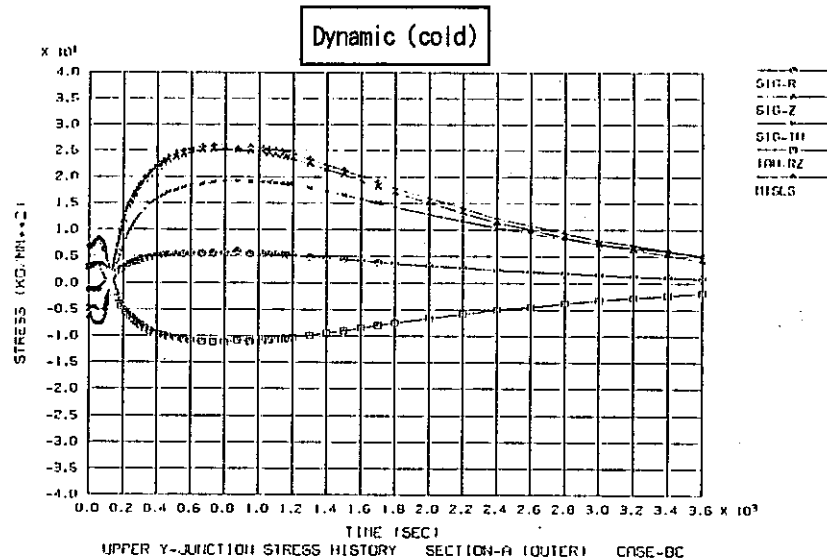
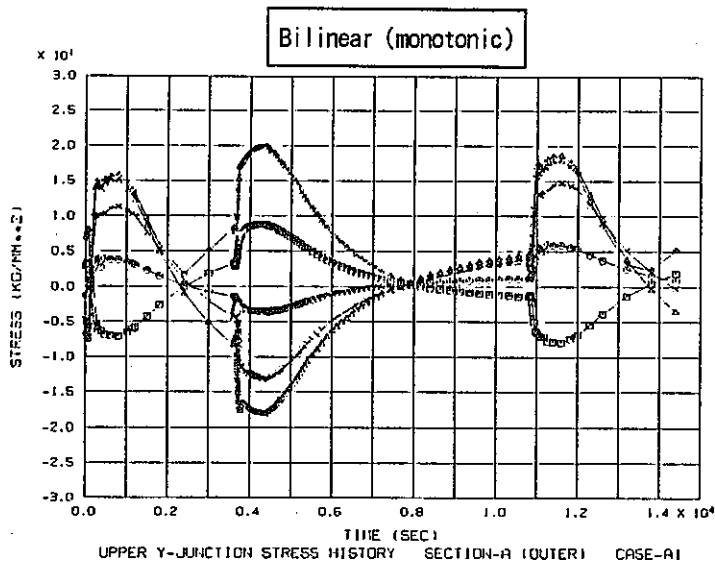


Fig. 4.4-1(b) Influence of stress/strain curve on stress history

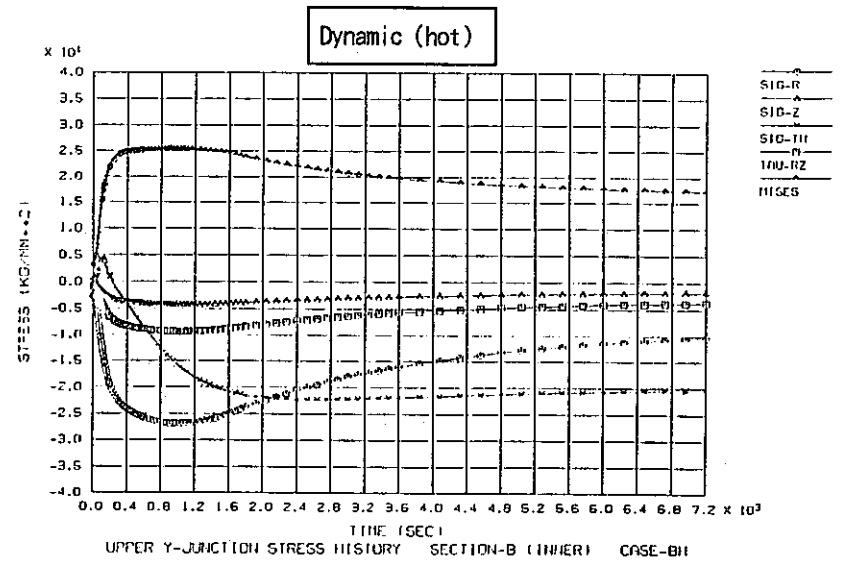
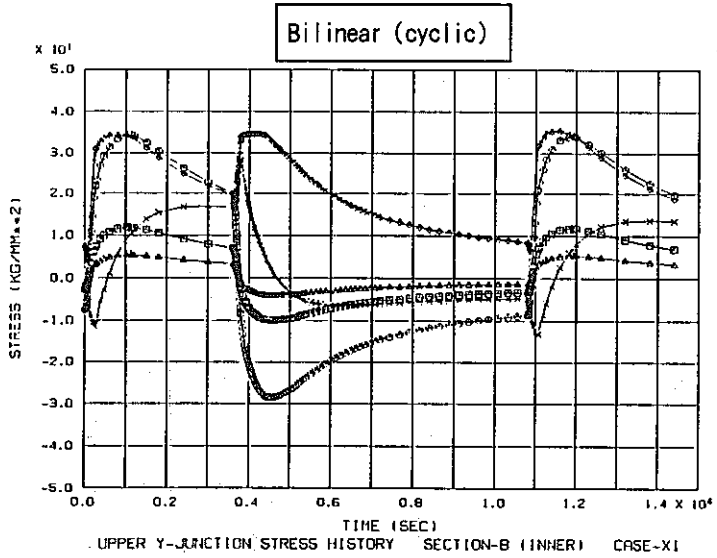
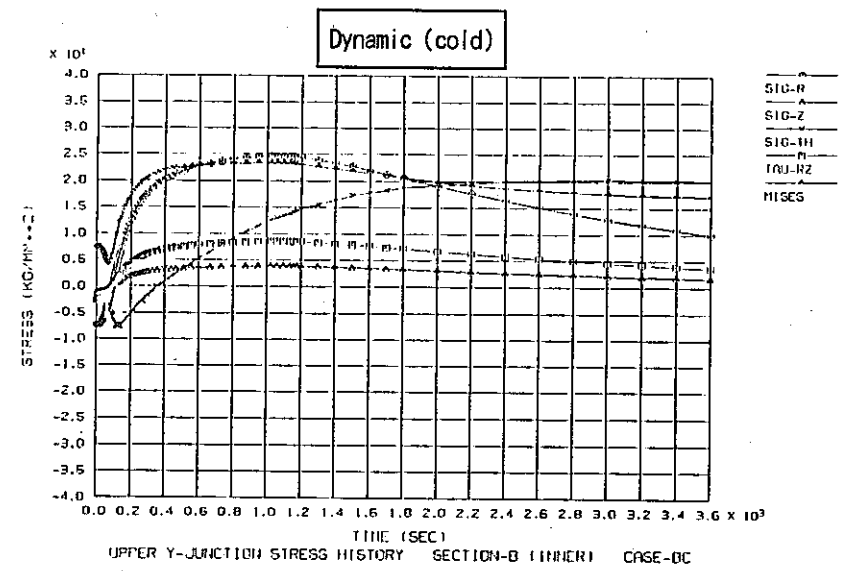
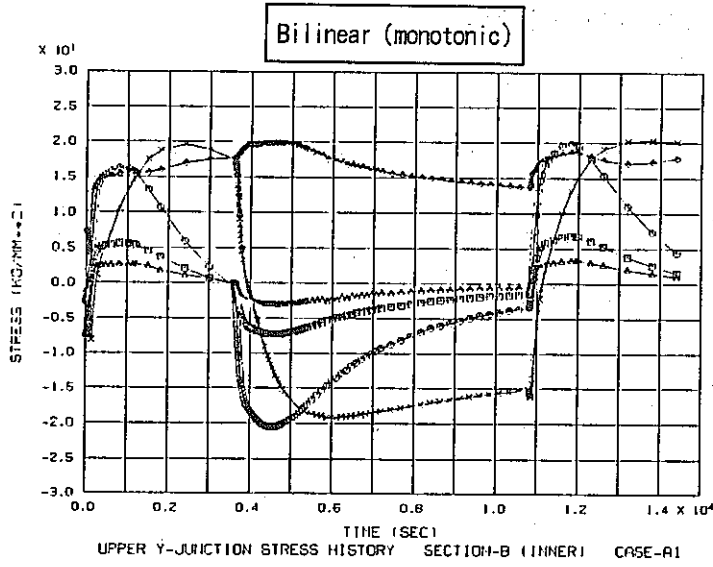


Fig.4.4-1(c) Influence of stress/strain curve on stress history

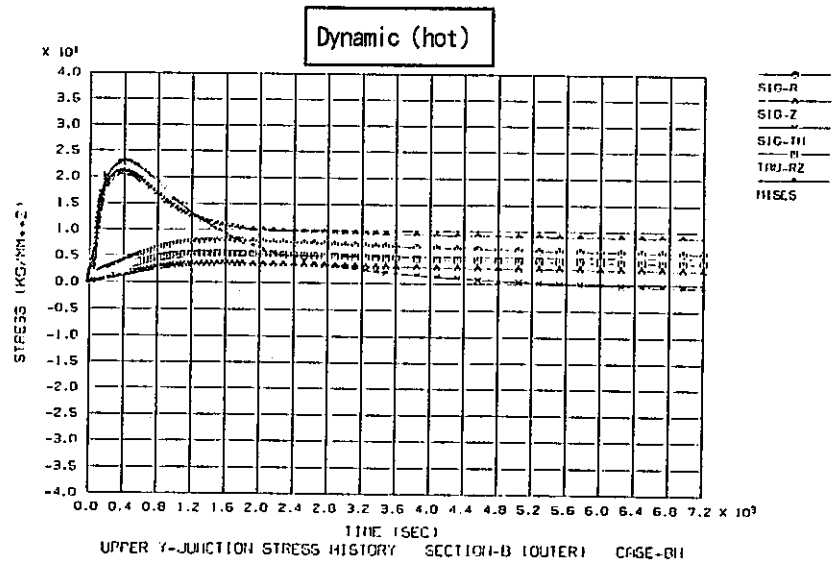
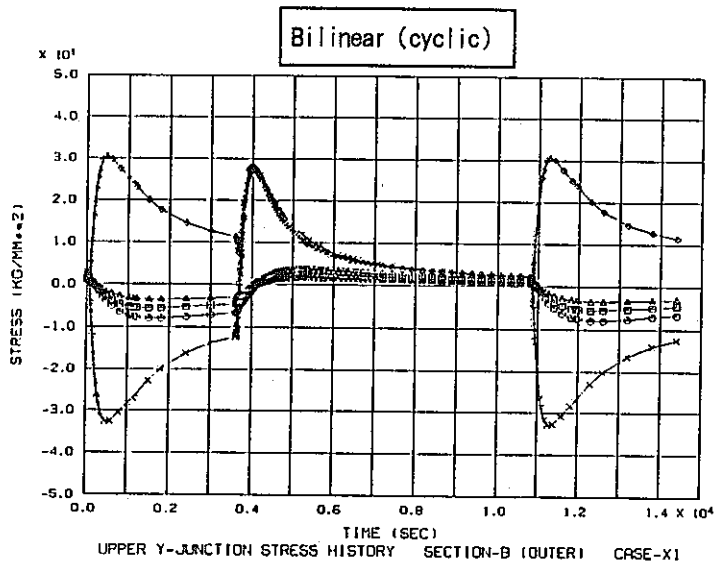
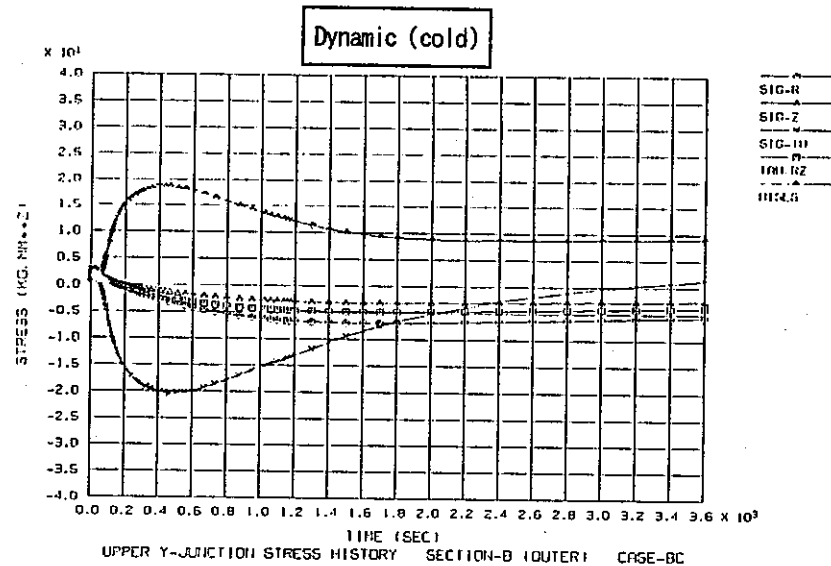
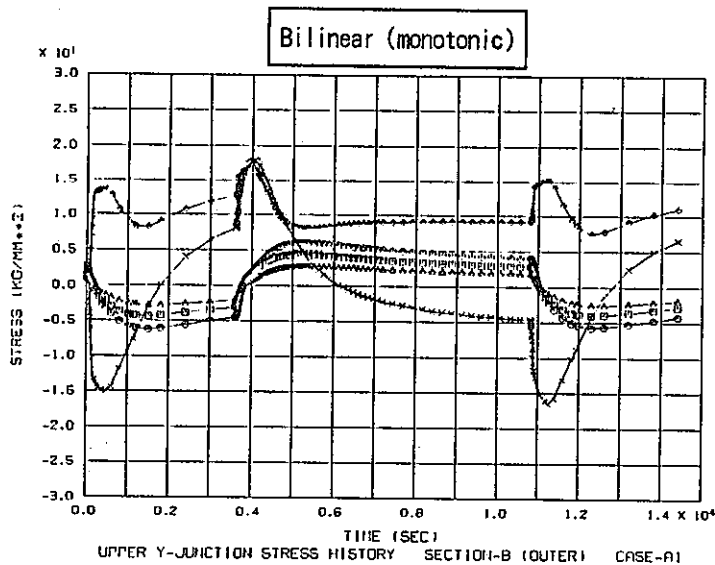


Fig. 4.4-1(d) Influence of stress/strain curve on stress history

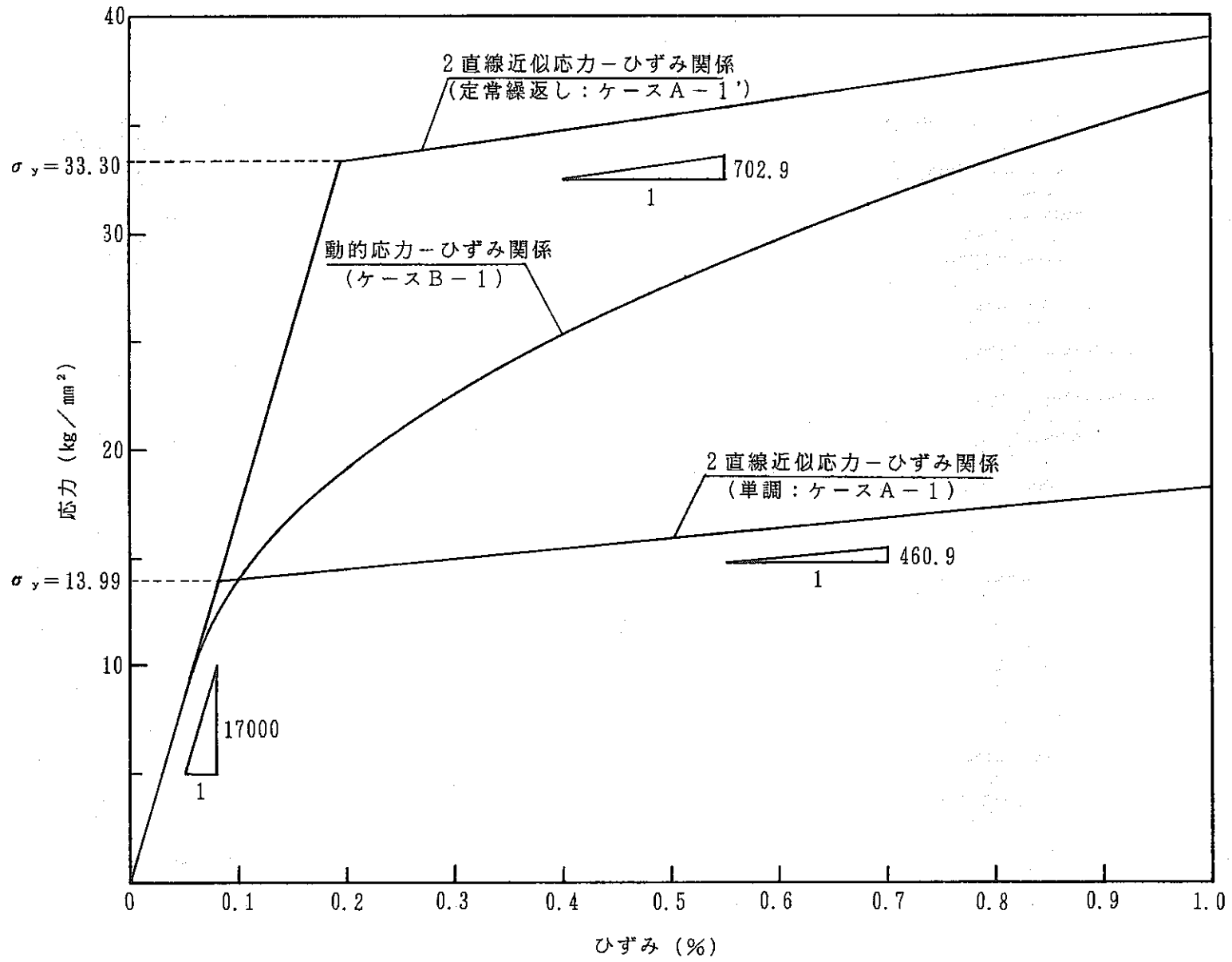


Fig.4.4-2 Comparison of bilinear and dynamic stress/strain curve

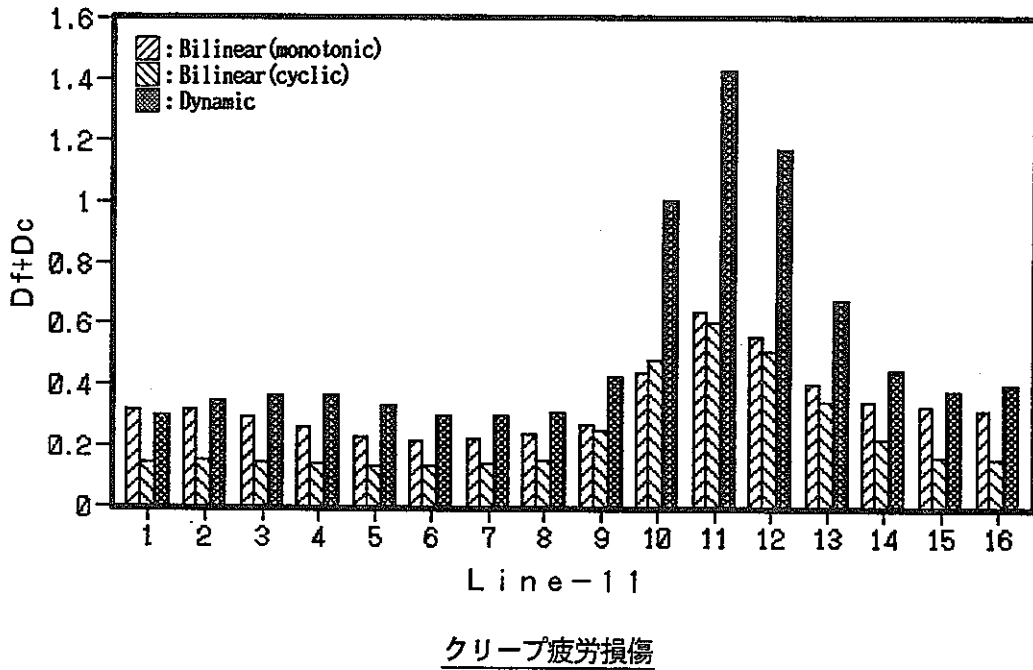
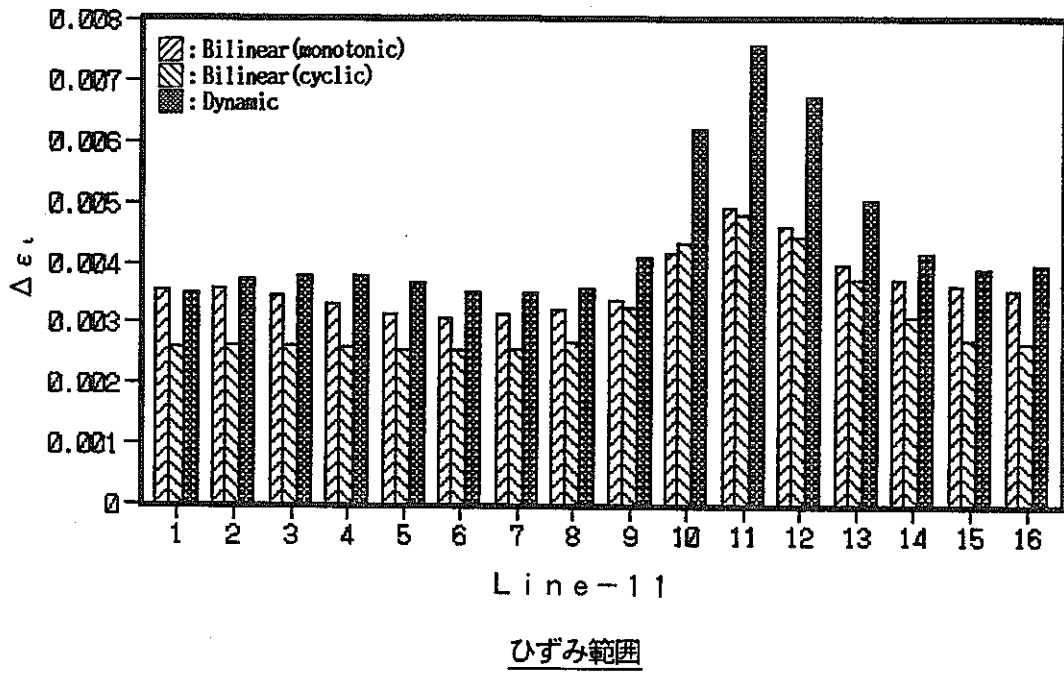


Fig. 4.4-3(a) Influence of stress/strain curve on strain range and creep-fatigue damage

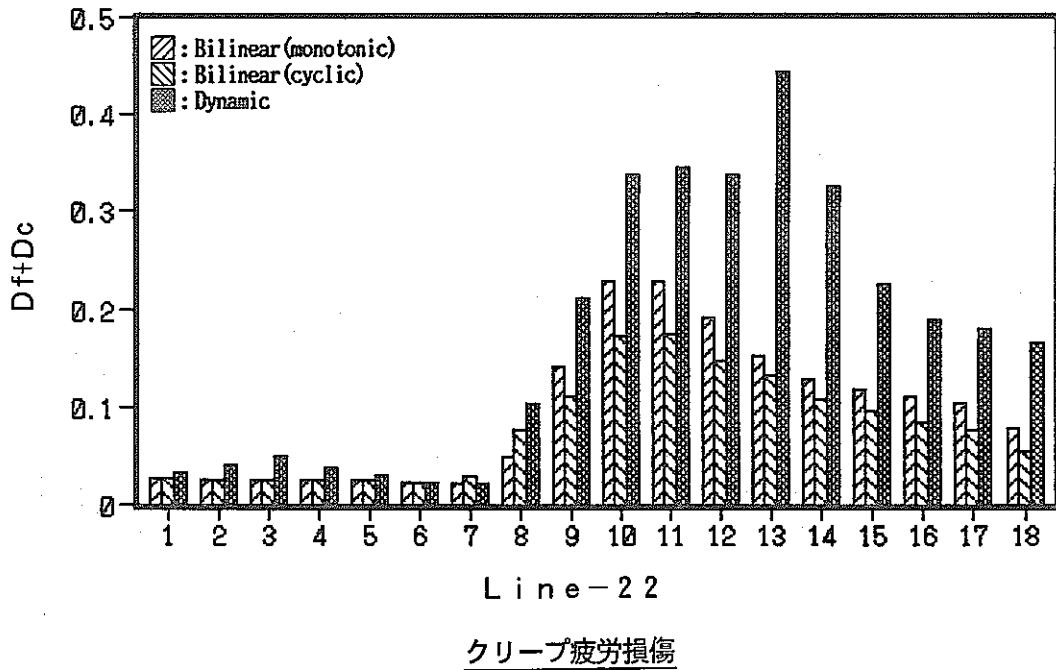
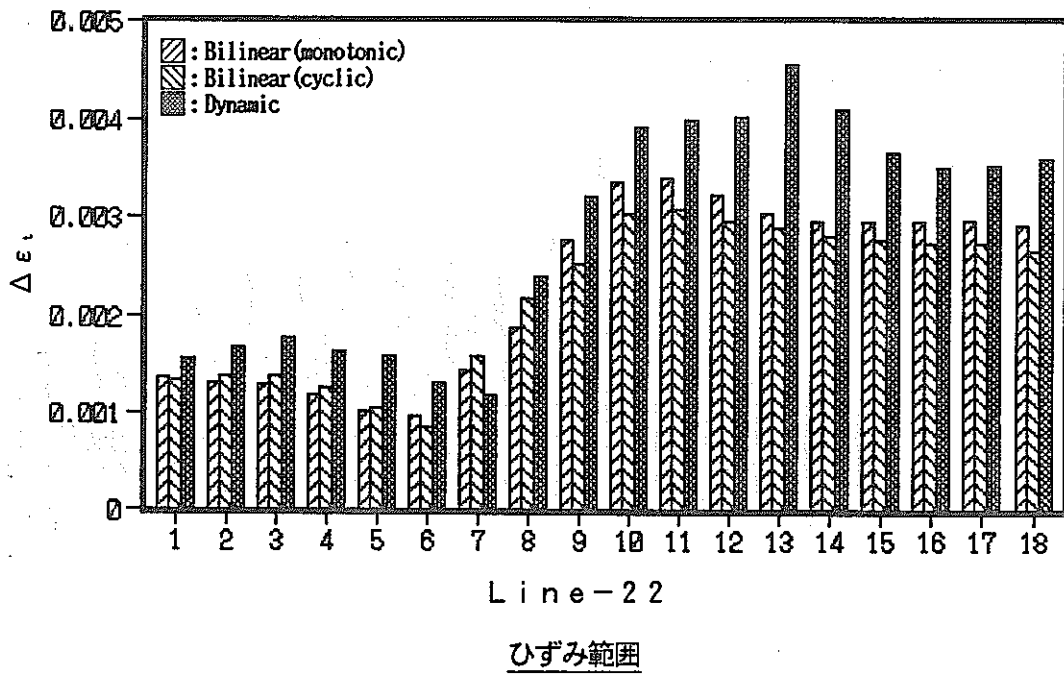


Fig. 4.4-3(b) Influence of stress/strain curve on strain range and creep-fatigue damage

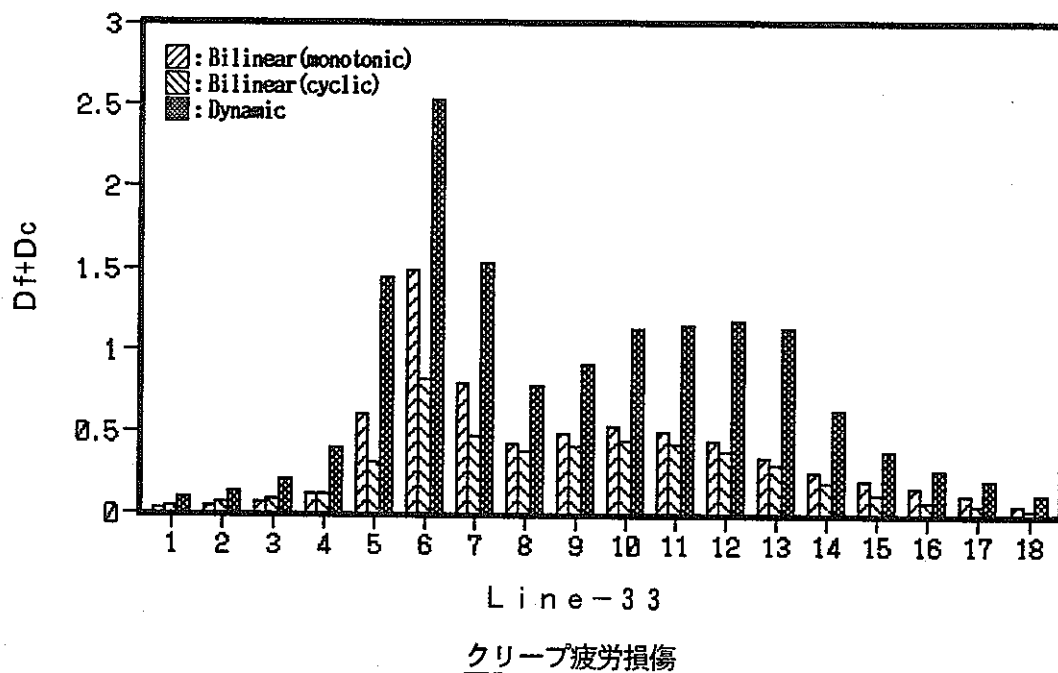
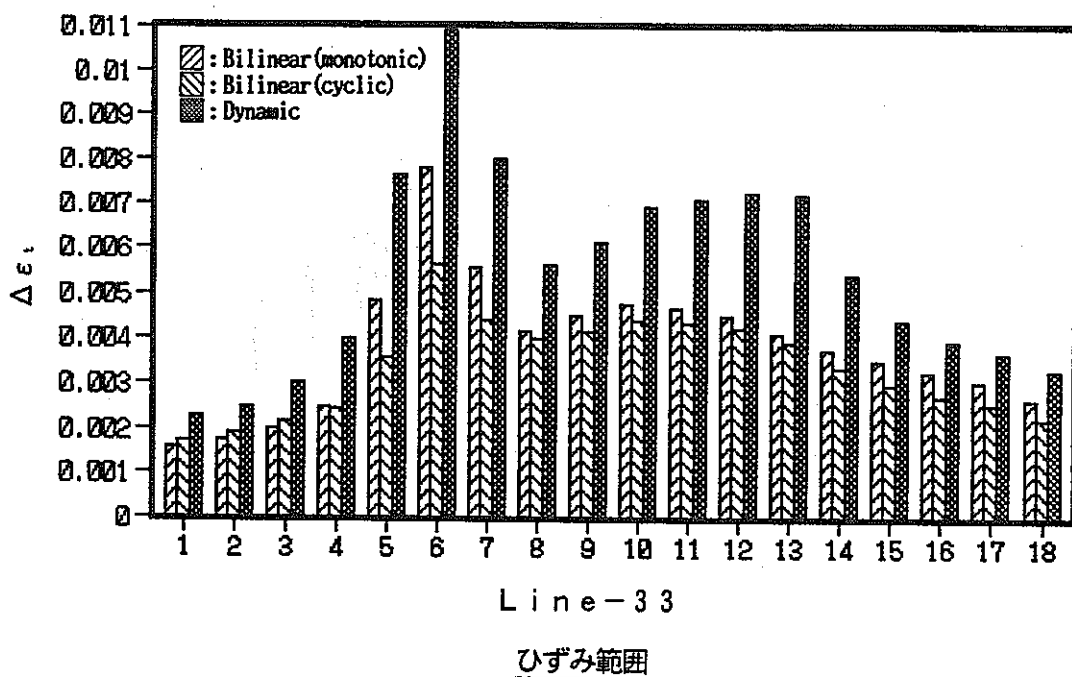


Fig. 4.4-3(c) Influence of stress/strain curve on strain range and creep-fatigue damage

4.5 クリープひずみ式

基準ケース、ケースC-1及びC-2は、クリープひずみ式の応力緩和のばらつきを示す係数 α_c を、それぞれ1、3及び5とした解析ケースである。通常、 α_c を大きくすることにより、応力緩和速度が早くなるためクリープひずみは大きくなる。

(1) 応力時刻歴

基準ケース、ケースC-1及びC-2の評価断面内外表面の応力時刻歴を比較し、Fig. 4.5-1に示す。

ホットランジェントの応力履歴を比較すると、 α_c を大きくするにつれて応力緩和速度が大きくなることがわかる。この傾向は、高温、高応力となる評価断面の内面側で大きくなる。しかし、クリープの影響が顕著となるホットランジェント保持時間が短く、コールドランジェント側ではクリープ温度を下回ることから α_c による応力の変動は極端ではない。また、コールドランジェントの応力時刻歴においては、双方の解析結果で差異は見られない。

(2) ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷

基準ケース、ケースC-1、及びC-2について、クリープ疲労損傷評価ラインに沿ったひずみ範囲及びクリープ疲労損傷を比較しFig. 4.5-2に示す。

ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷ともに、ひずみ集中部において α_c の影響が若干現れるが、一般部においてはほとんどこの影響が現れない。これは、ひずみ範囲全体に対してクリープひずみの占める割合が、小さいためである。よって、仮に α_c がクリープひずみにに対して感度が良いとしても、ひずみ範囲にはこの影響が大きく現れない。これは、Fig. 4.1-4に示した弾塑性解析と弾塑性クリープ解析結果の比較からも明らかである。

(3) まとめ

クリープひずみ式の応力緩和のばらつきを示す係数 α_c をパラメータとした解析結果から、以下の結論が得られた。

- TTS供試体のように、温度変化速度の大きい熱過渡荷重を受けるスカート構造の伝熱・応力解析において、クリープ式の応力緩和のばらつきを示す係数 α_c は、発生応力及びひずみ範囲に対して鈍感なパラメータである。

- ただし、熱過渡サイクル（特に高温側）が長時間となり、高温・高応力状態が長時間保持される場合には、影響が小さいとは言い切れない。

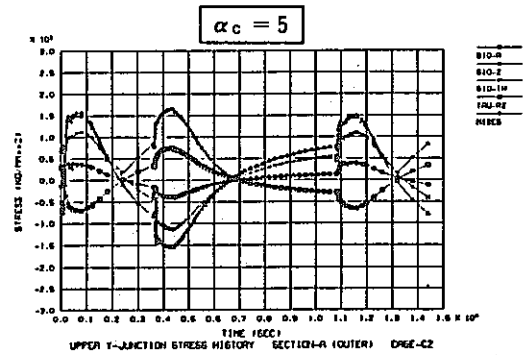
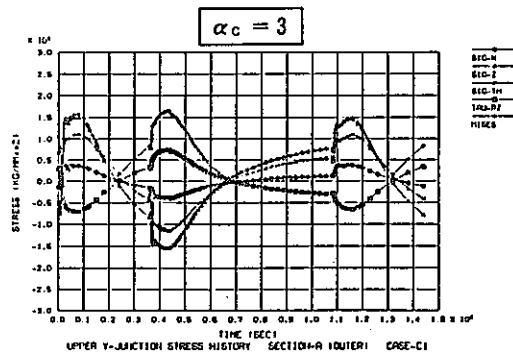
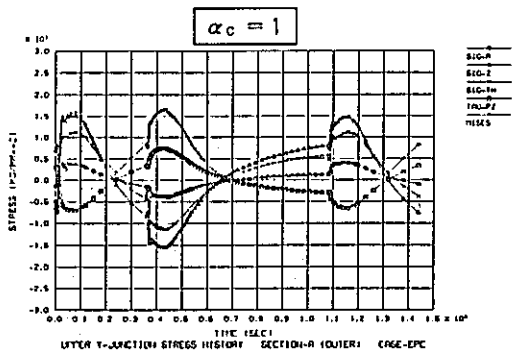
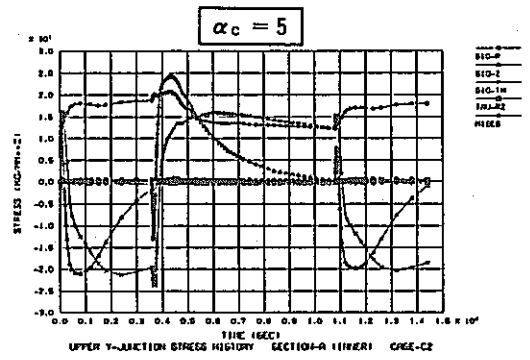
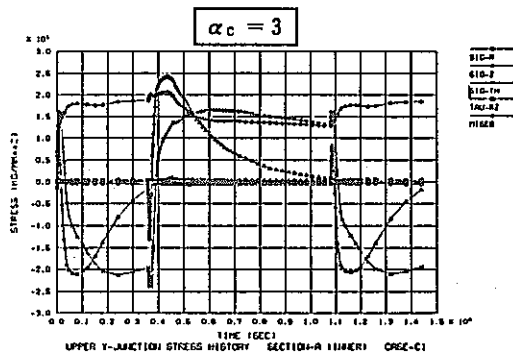
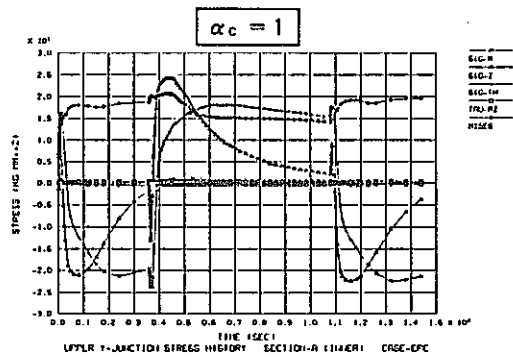


Fig. 4.5-1(a) Influence of creep-strain equation on stress history

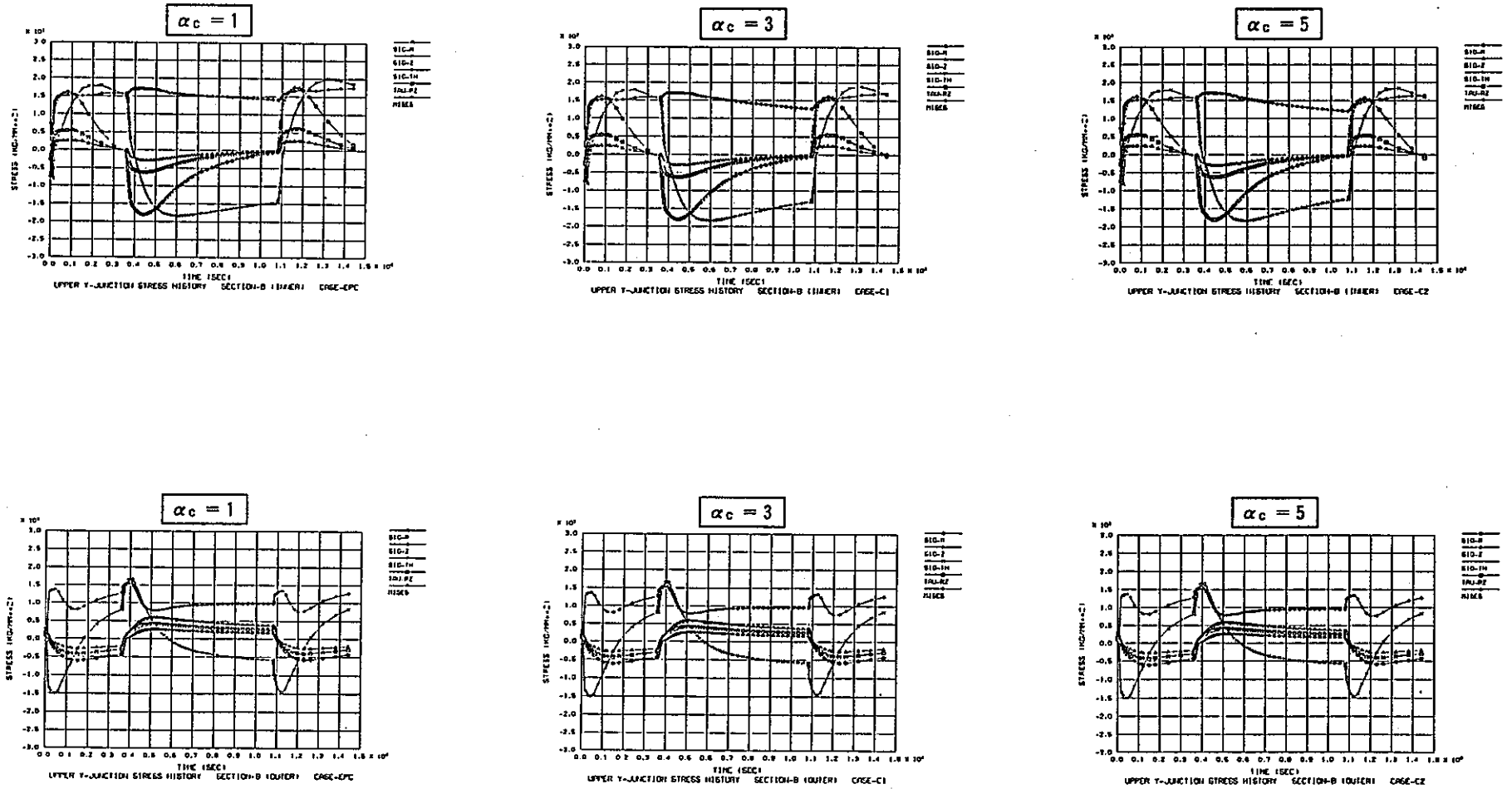


Fig. 4.5-1(b) Influence of creep-strain equation on stress history

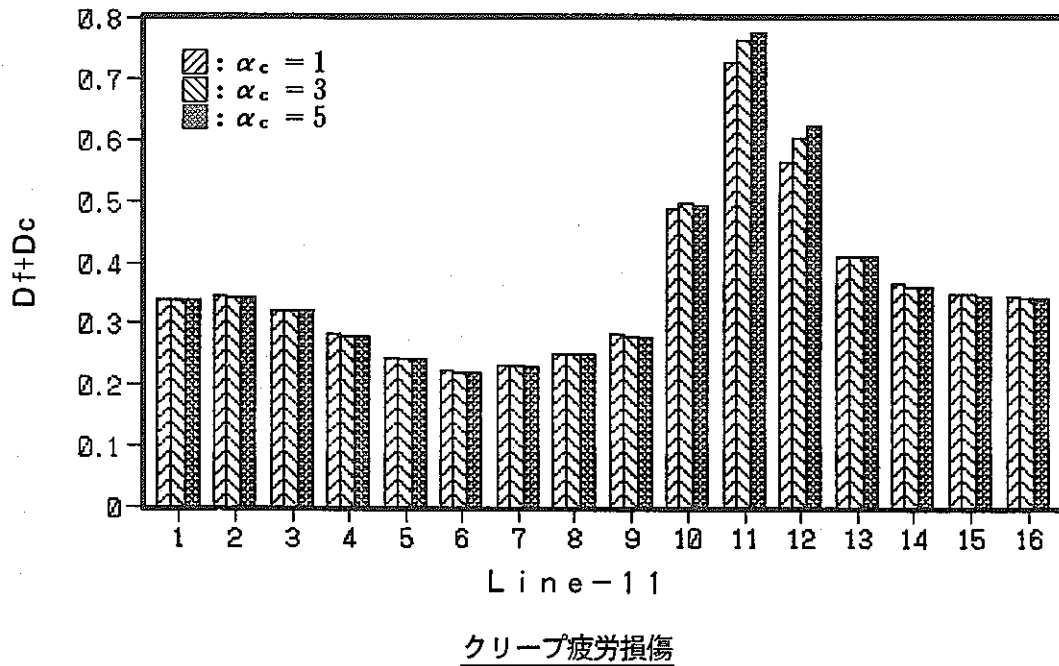
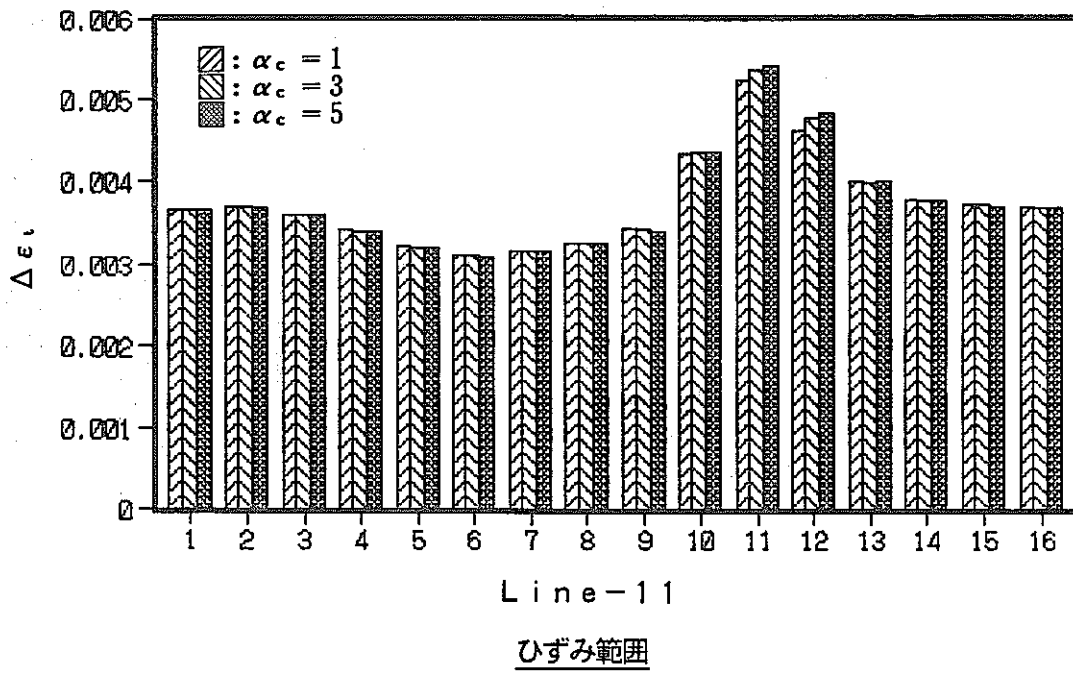


Fig. 4.5-2(a) Influence of creep-strain equation on strain range and creep-fatigue damage

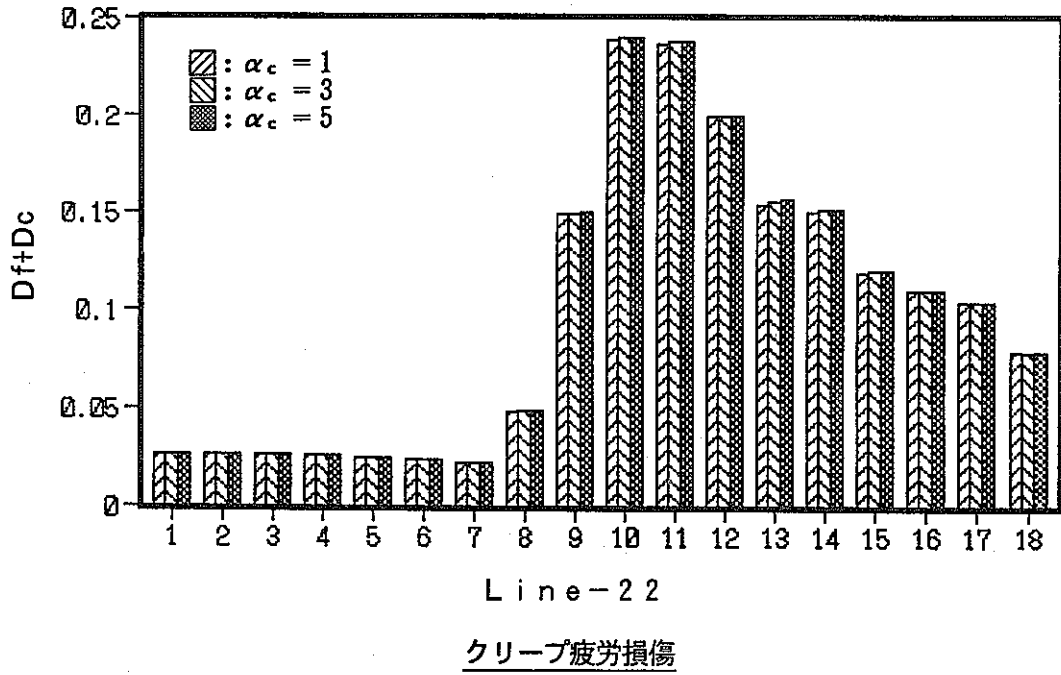
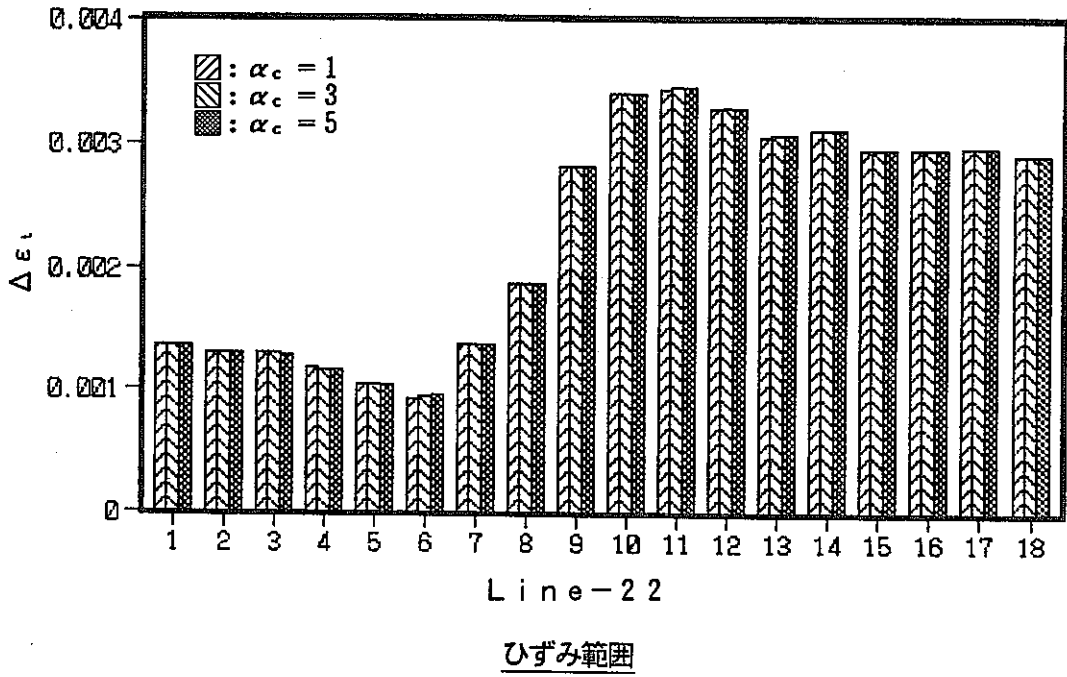


Fig. 4.5-2(b) Influence of creep-strain equation on strain range and creep-fatigue damage

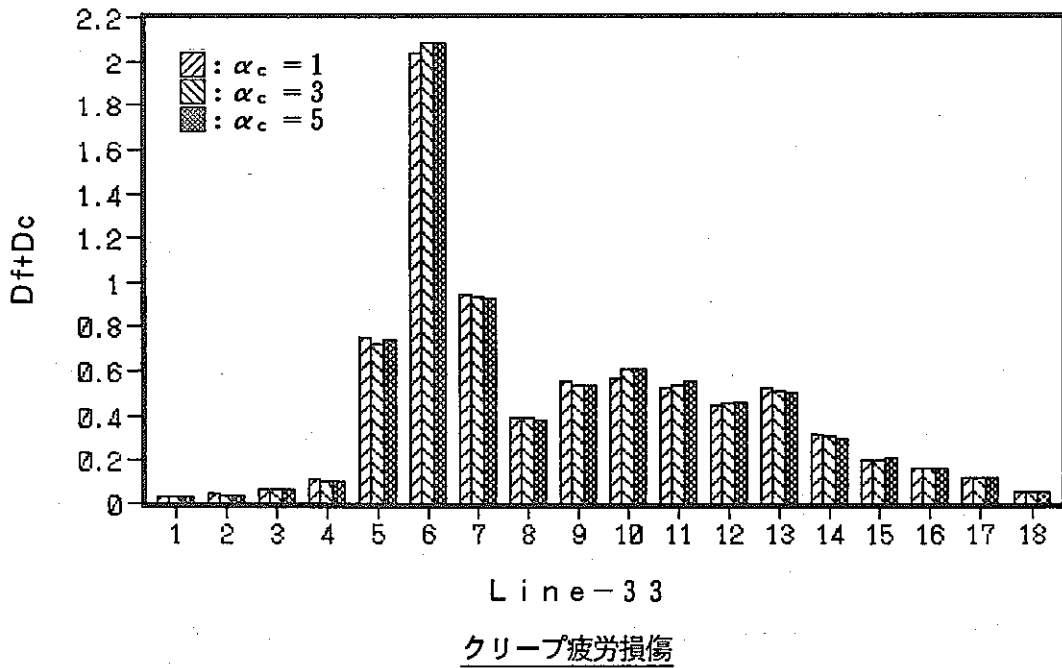
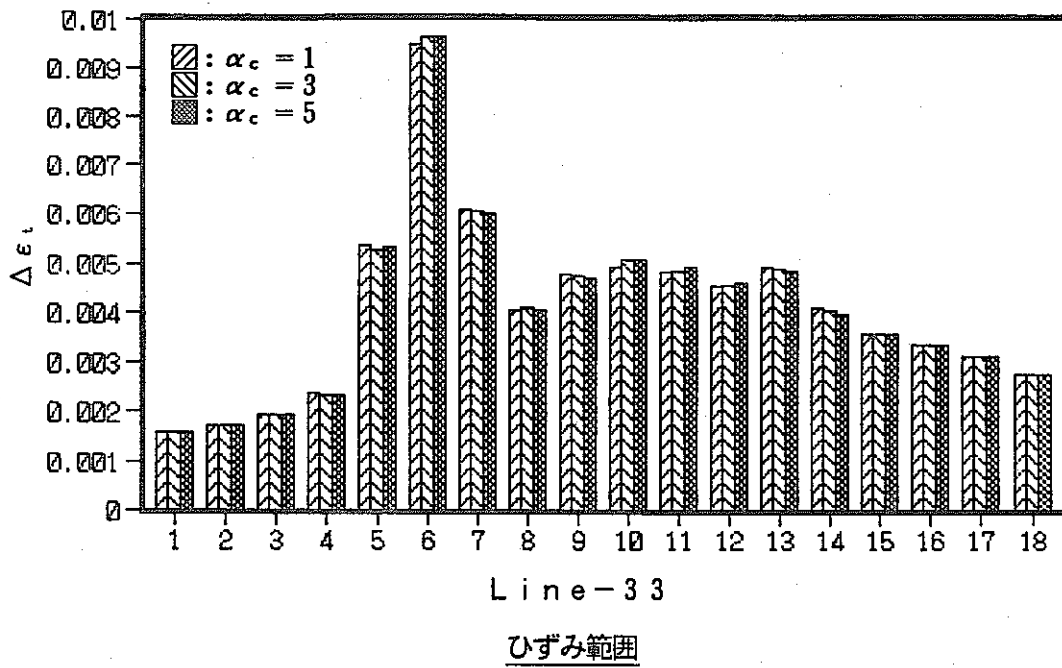


Fig. 4.5-2(c) Influence of creep-strain equation on strain range and creep-fatigue damage

4.6 外面の熱伝達率

ケースD-1～3は、基準ケースで断熱としていた解析モデル外面の熱伝達率を0.5、1.0、3.0 kcal/m²-hr-°Cとした弾性解析ケースである。

(1) 応力の時刻歴

基準ケース及びケースD-1～3の評価断面内外表面の応力時刻歴を比較し、Fig. 4.6-1に示す。

解析モデル外面の熱伝達率を大きくするとともにコールドトランジェント時の応力は減少し、ホットトランジェント時の応力は増加する。これは、熱伝達を設定することによってスカート胴の温度が低下し、本体胴とスカート胴の温度差がホットトランジェント時に大きく、コールドトランジェント時に小さくなるためである。これにより、容器胴とスカート胴の相対的温度差による熱曲げ及びたが締めによる応力は、ホットトランジェント時には外面の熱伝達率の増加に伴って大きくなり、コールドトランジェント時にはホットトランジェント時と逆に小さくなる。

ここで、応力の挙動に対して熱伝達率の影響が顕著に見られる評価断面Aの内面について、具体的に比較・検討する。評価部位は、 σ_z 及び σ_h の2軸応力場となっている。ここで、この2つの応力成分に着目する。 σ_z は解析モデル外面の熱伝達率に非常に敏感であり、外面を断熱にした基準ケースの σ_z は熱伝達率3.0 kcal/m²-hr-°Cを設定したケースD-3に対し、コールド側で約2.5倍、ホット側で約0.5倍となる。これに対して σ_h は、 σ_z ほど外面の熱伝達率に敏感ではなく、基準ケースの σ_h はケースD-3に対し、コールド側で約1.3倍、ホット側で約0.8倍となる。このような応力変動の差は、各応力成分の発生要因と過渡時の温度分布の差によって生じる。

本構造では、サーマルライナ内面から容器胴外面までの熱通過を考えた場合、容器胴内面までの熱抵抗に比べて、容器胴及び容器外表面の熱抵抗が十分に大きいため、熱過渡開始時の容器胴内面の温度は、熱伝達率の影響を受けにくい。また、容器胴の熱抵抗が非常に大きいため、熱過渡中の板厚内温度勾配も外表面の熱伝達率に大きな影響を受けない。熱過渡開始直後に発生する σ_h は、板厚内温度勾配が主要因となっているため、外面の熱伝達率に敏感でなくなる。これに対し、本体胴とスカートの温度差は、スカートへの熱伝達経路において熱抵抗が大きく、更にスカート表面からの放

熱も加わるために、構造物の熱伝導率やスカート表面の熱伝達率に大きく支配される。 σ_z は容器胴とスカート胴の温度差が主な応力発生要因であるため、解析モデルの外表面の熱伝達率の増減に大きな影響を受ける。

(2) ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷

基準ケースとケースD-1～3のひずみ範囲及びクリープ疲労損傷を比較し、Fig. 4.5-2に示す。

ひずみ範囲は、外面の熱伝達に比較的影響を受けにくく、各解析ケースではほぼ同等となる。これは、以下の要因によるものと考えられる。

- ・ 容器胴一般部に発生する板厚方向の温度勾配は、外面の熱伝達率に大きく影響を受けない。
- ・ 容器胴とスカート胴の相対的溫度差によるひずみは、外面の熱伝達率を定義することによって、コールドトランジェント時に減少するが、ホットトランジェント時は増加し、ひずみ範囲としては同等となる。

しかし、構造物のサイクル中の最高温度は、熱伝達率に影響されて低下するので、クリープ疲労損傷は、外面の熱伝達率の増加に伴って減少する。熱伝達率の影響は、熱源であるナトリウムからの距離が大きくなるスカート部で顕著に現れ、ひずみ範囲は、各解析ケースで同等であるにもかかわらず、クリープ疲労損傷は極端に減少している。

(3) まとめ

解析モデルの外面の熱伝達率をパラメータに設定した伝熱・応力解析及びクリープ疲労損傷評価を実施した。この結果、以下の結論が得られた。

- 容器胴とスカート胴の相対的溫度差による応力は、外面の熱伝達率に敏感に反応し、熱伝達率の増加に伴いコールドトランジェントでは減少し、ホットトランジェントでは増加する。
- 板厚方向温度勾配によって容器胴に発生する応力は、外面の熱伝達率に敏感でない。
- ひずみ範囲は、外面の熱伝達率に敏感でない。
- ひずみ範囲が、外面の熱伝達率に依らずほぼ一定であるのに対し、クリープ疲労

損傷は、外面の熱伝達率の増加に伴って減少する。これは、熱過渡サイクル中の構造物温度が低下するためである。

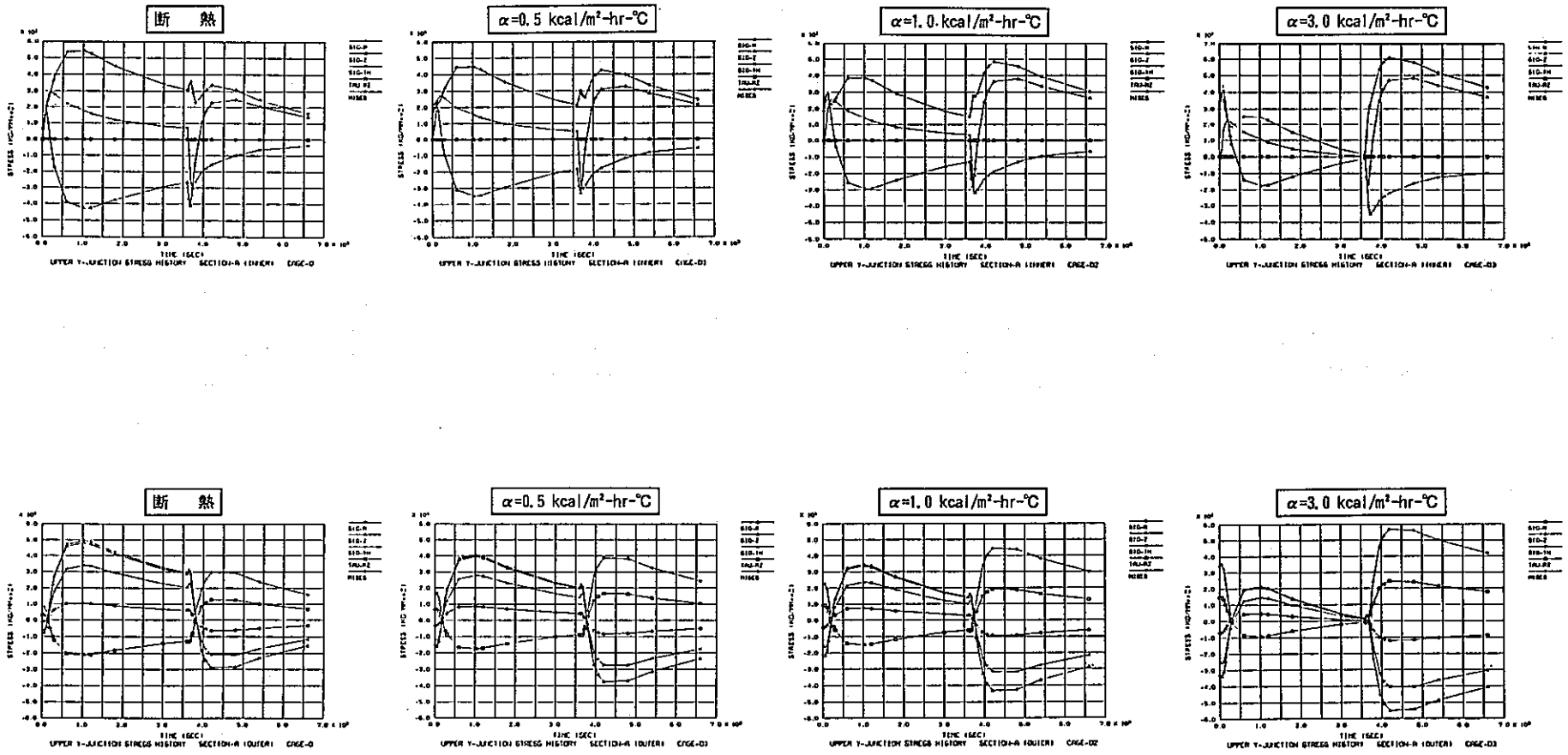


Fig. 4.6-1(a) Influence of heat transfer coefficient on stress history

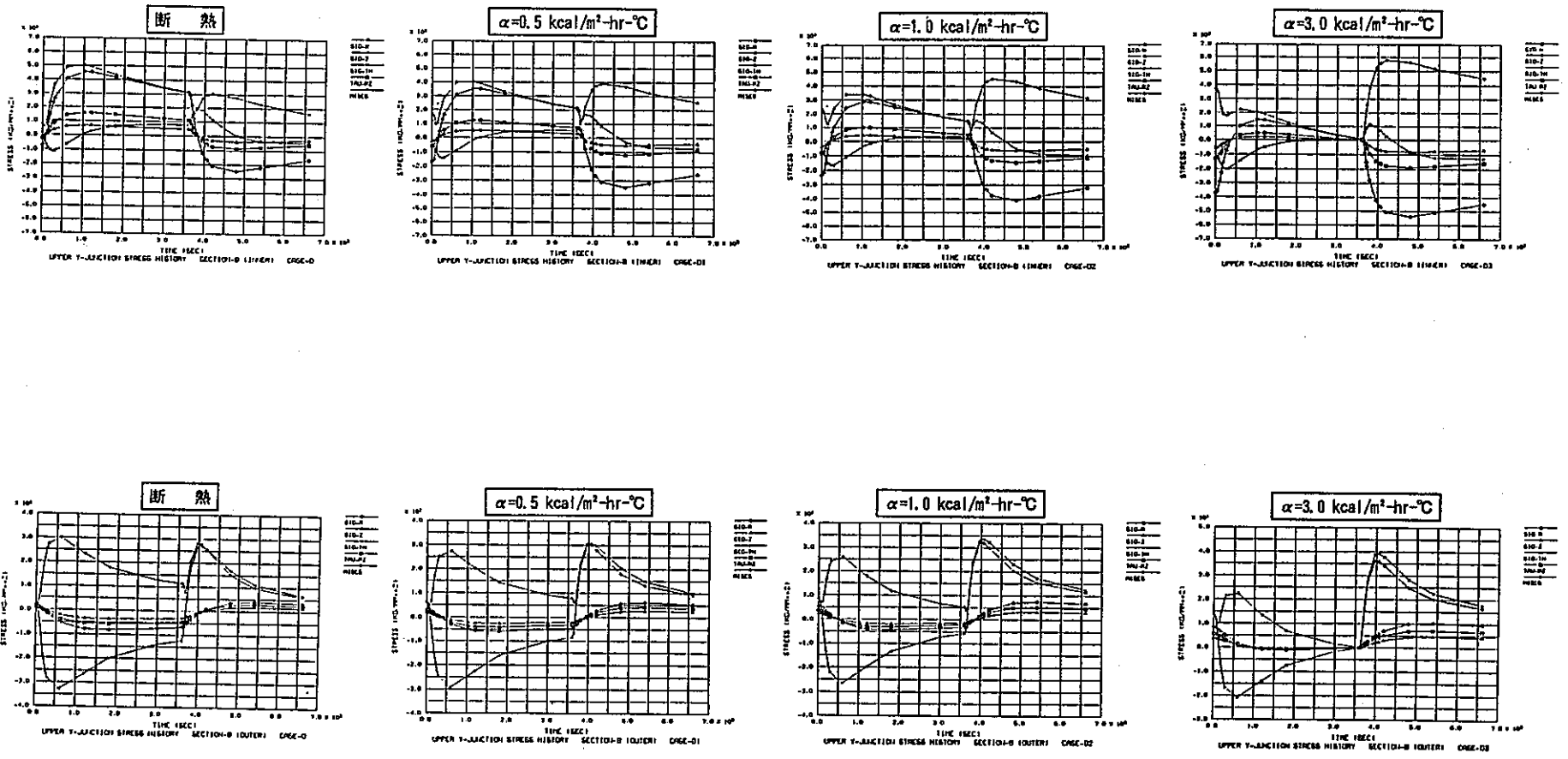


Fig. 4.6-1(b) Influence of heat transfer coefficient on stress history

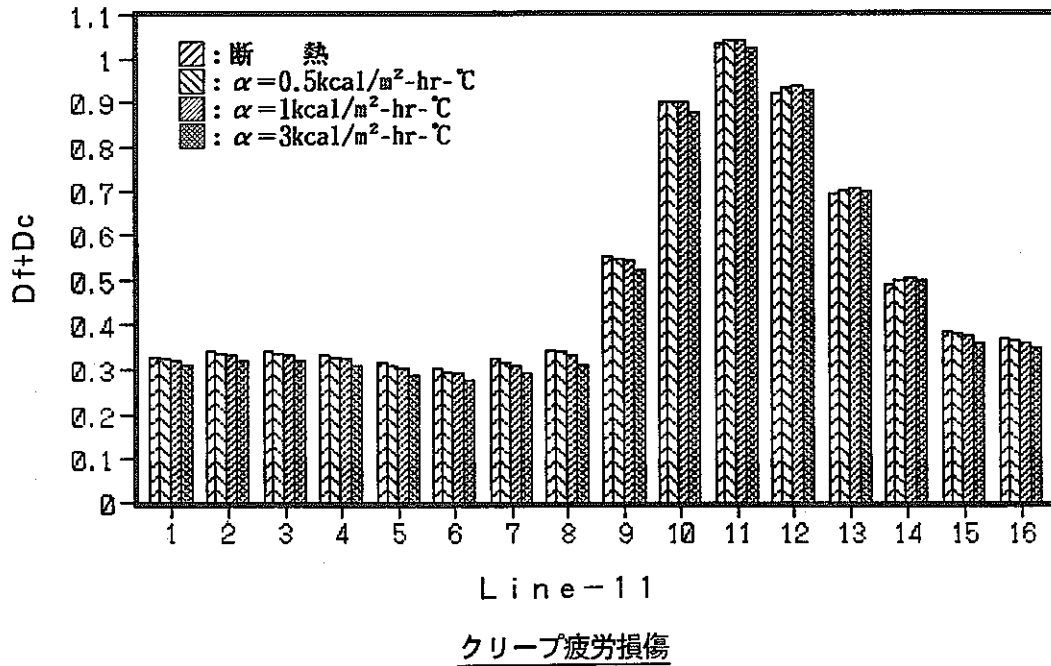
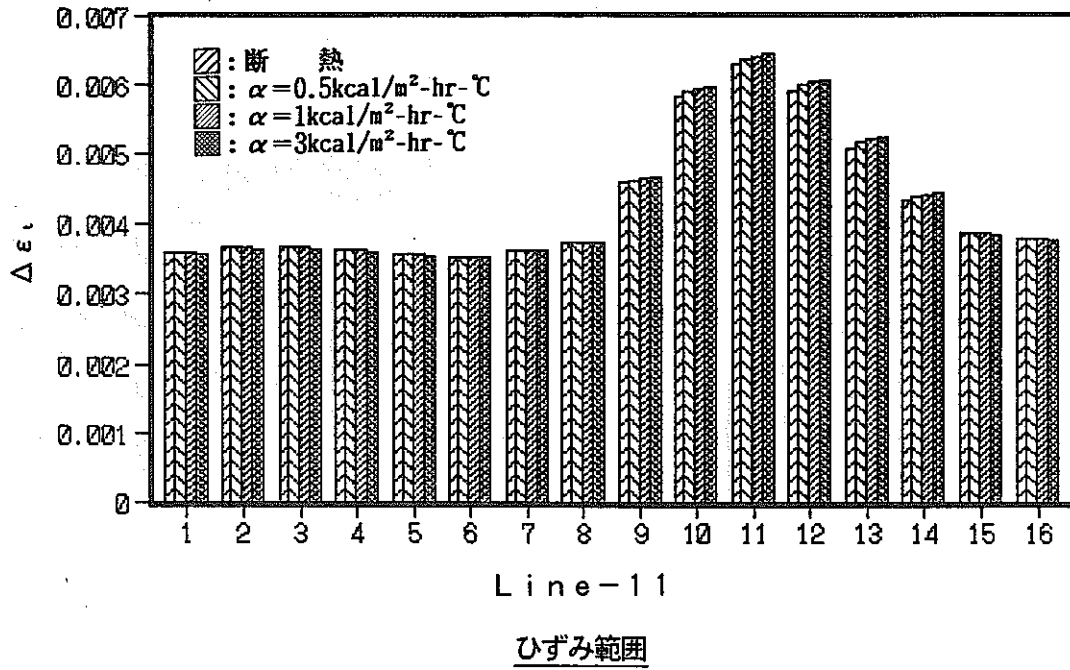


Fig. 4.6-2(a) Influence of heat transfer coefficient on strain range and creep-fatigue damage

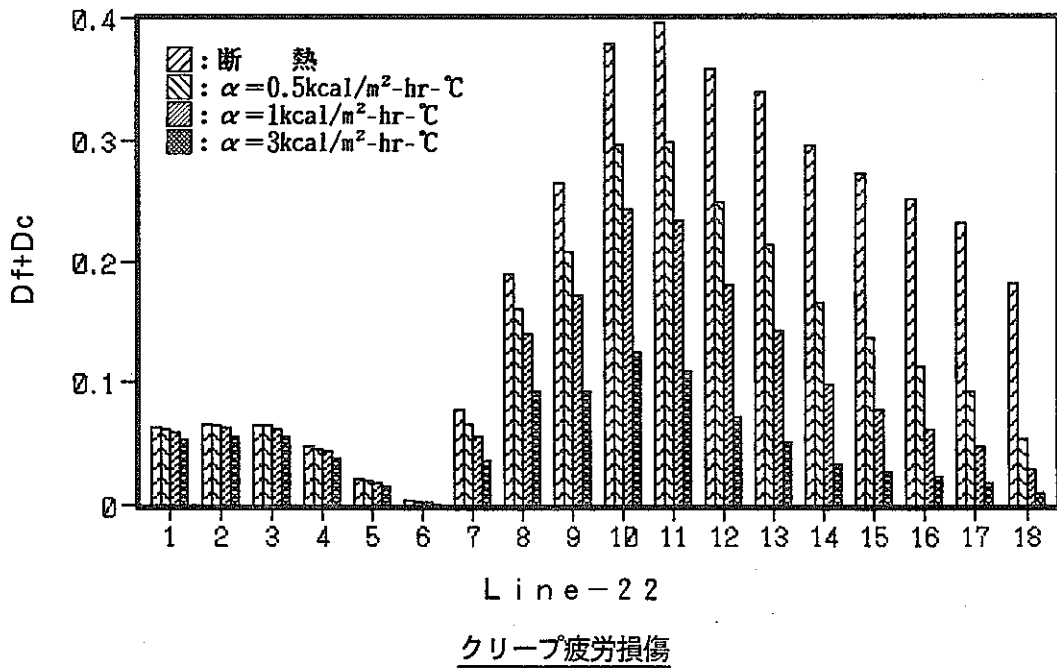
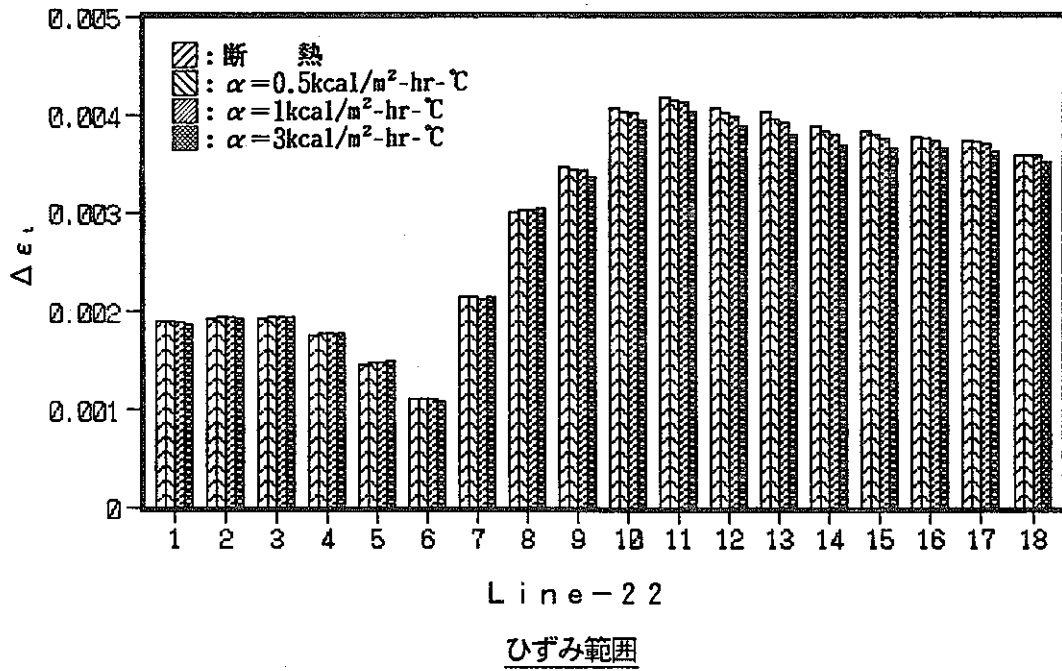


Fig. 4.6-2(b) Influence of heat transfer coefficient on strain range and creep-fatigue damage

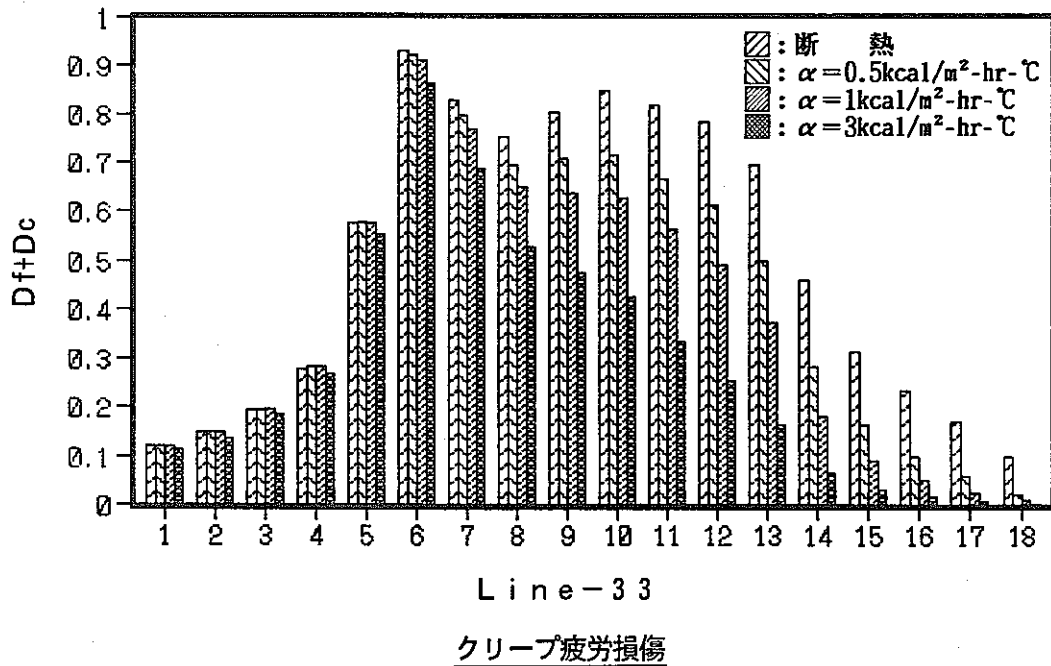
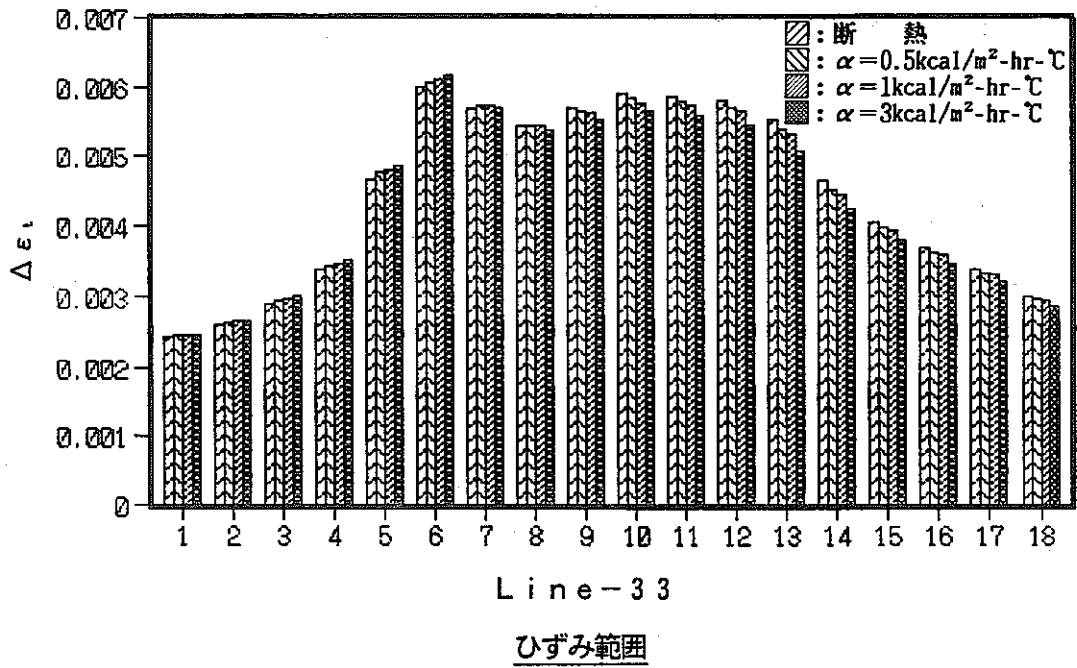


Fig. 4.6-2(c) Influence of heat transfer coefficient on strain range and creep-fatigue damage

4.7 熱過渡温度変化幅

ケースE-1、E-2は、温度変化幅を基準ケースの350°Cに対し、200°C、50°Cとした弾性解析である。

(1) 応力時刻歴

基準ケース、ケースE-1及びケースE-2の評価断面内外表面の応力時刻歴を比較し、Fig.4.7-1に示す。

スカート部に発生する応力のパターン (σ_z と σ_n の比やホット・コールドトランジェントにおける応力レベルの比)は、温度変化幅に依らず概ね一定である。これに対し、応力の大きさは温度変化幅に比例し、基準ケースに比べてケースE-1、E-2で小さくなっている。つまり、応力は温度変化幅に対して敏感であると言える。

(2) ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷

基準ケース、ケースE-1及びケースE-2のクリープ疲労損傷評価ラインにおけるひずみ範囲及びクリープ疲労損傷を比較し、Fig.4.7-2に示す。

温度変化幅50°Cの結果は、クリープ疲労損傷がほぼ0となるため図から割愛した。ひずみ範囲も応力と同様に温度変化幅に比例しており、基準ケースに対してケースE-1、E-2において小さくなる。また、クリープ疲労損傷は更にこの傾向が強くなり、ケースE-1でも基準ケースに対して極端に小さくなり、ケースE-2ではほぼ0となる。

つまり、クリープ疲労損傷は、温度変化幅に非常に敏感であると言える。

(3) まとめ

熱過渡の温度変化幅を350°C、200°C、50°Cとした解析結果を実施し、応力、クリープ疲労損傷に対する温度変化幅の影響を検討した。この結果、以下の結論が得られた。

- 応力の発生パターンは、温度変化幅に影響されない。
- 応力の大きさは、弾性解析において温度変化幅に比例する。
- ひずみ範囲も、弾性解析において温度変化幅に比例する。
- クリープ疲労損傷は、応力やひずみ範囲に比べ、温度変化幅に対して敏感である。

よって、クリープ疲労損傷は、温度変化幅によって容易にコントロールできる。

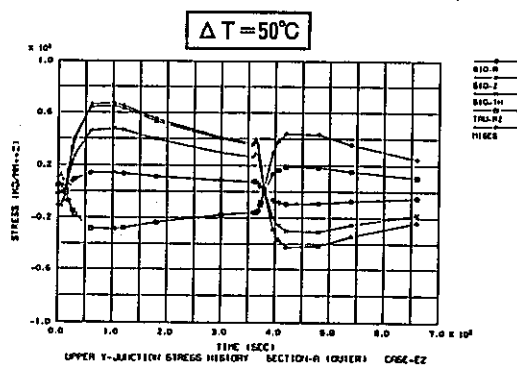
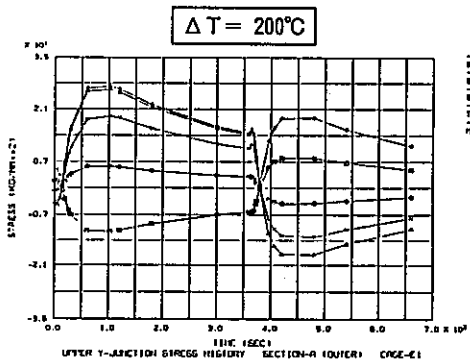
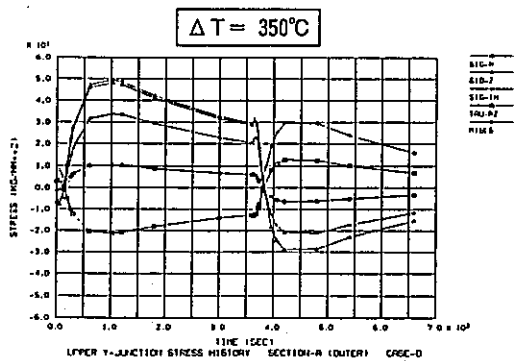
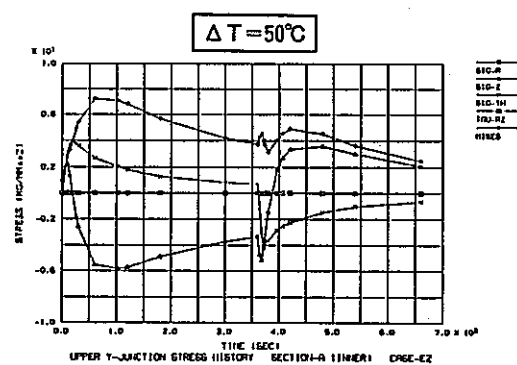
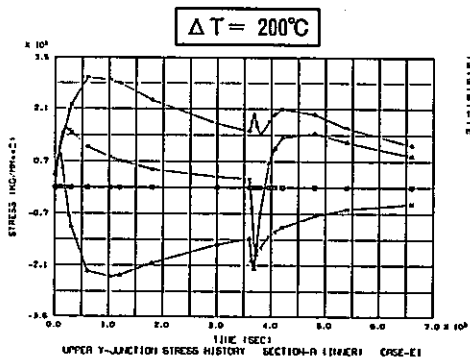
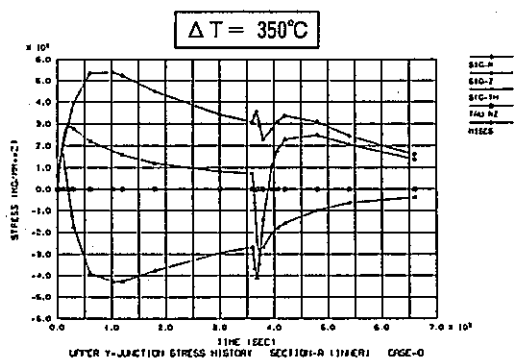


Fig. 4.7-1(a) Influence of temperature range on stress history

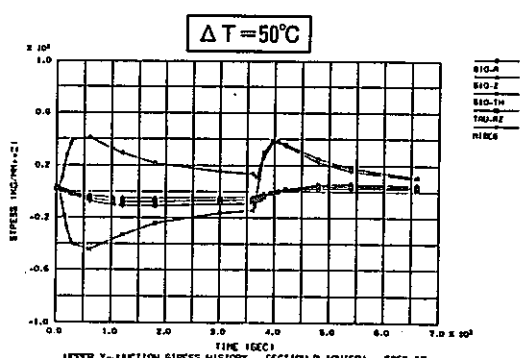
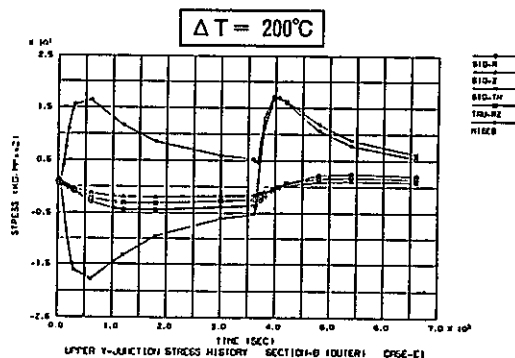
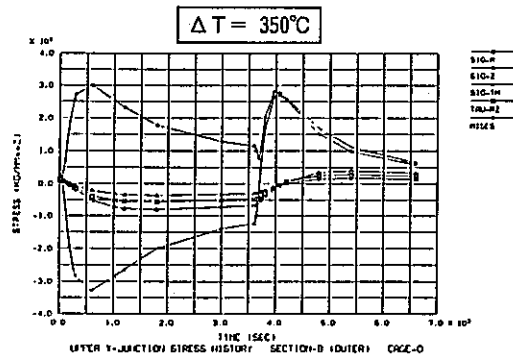
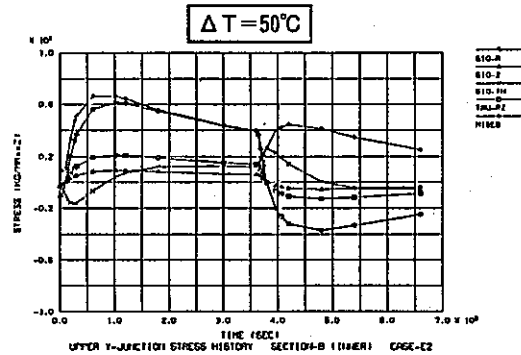
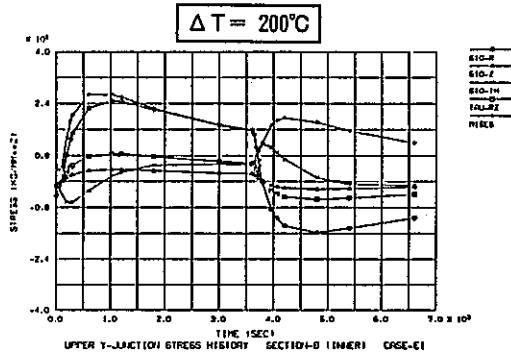
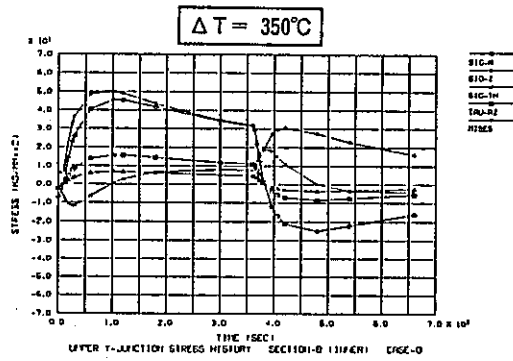


Fig. 4.7-1(b) Influence of temperature range on stress history

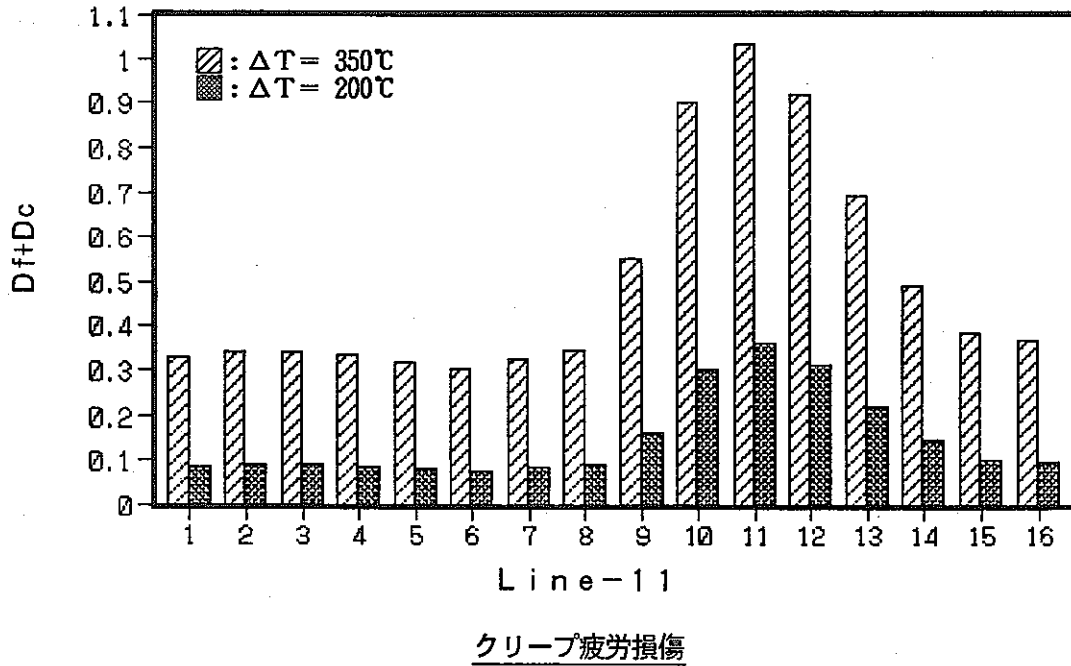
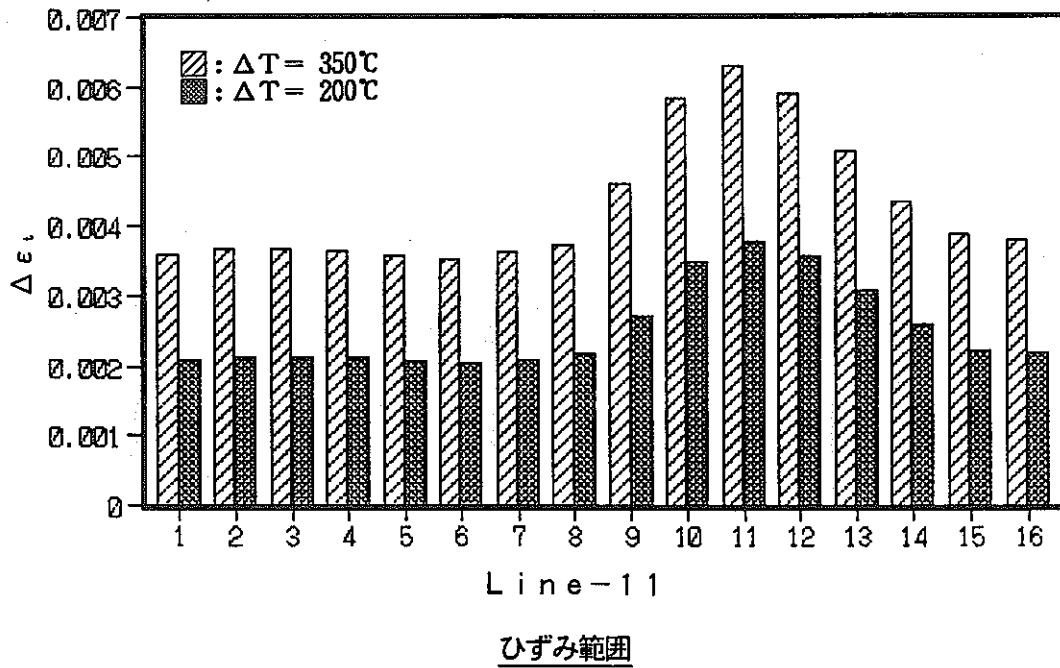


Fig. 4.7-2(a) Influence of temperature range on strain range and creep-fatigue damage

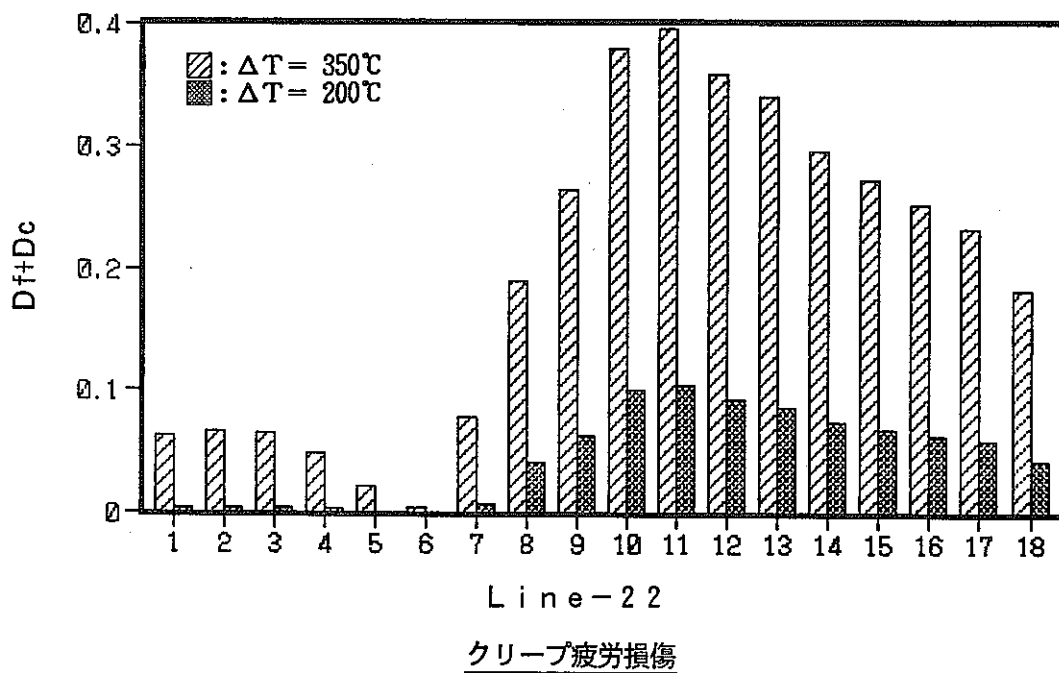
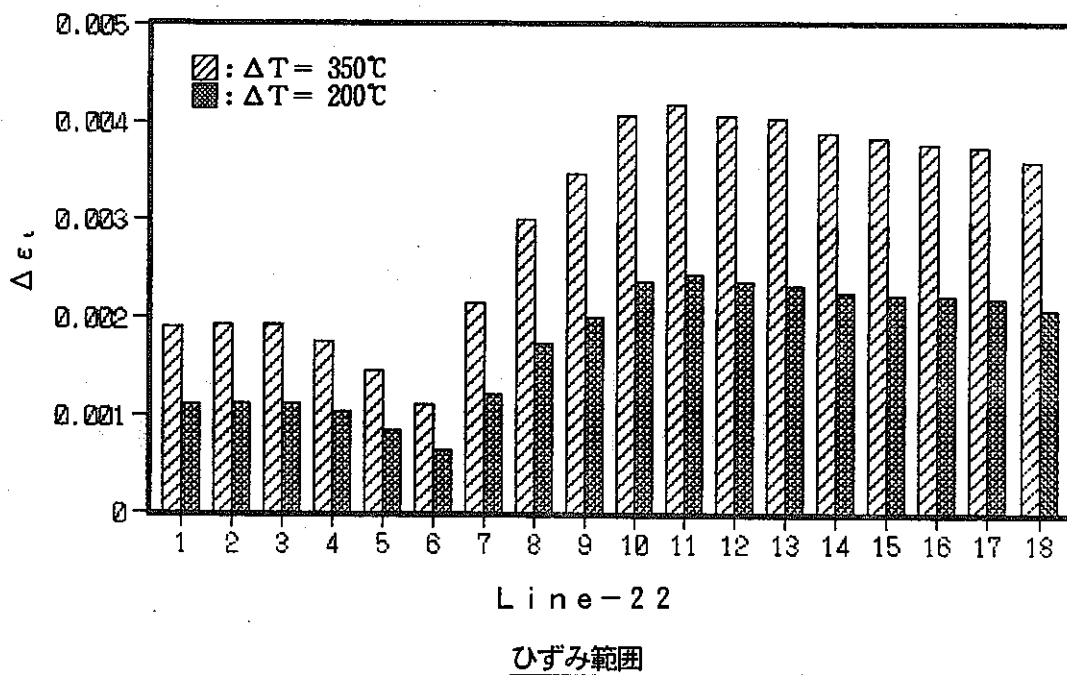


Fig. 4.7-2(b) Influence of temperature range on strain range and creep-fatigue damage

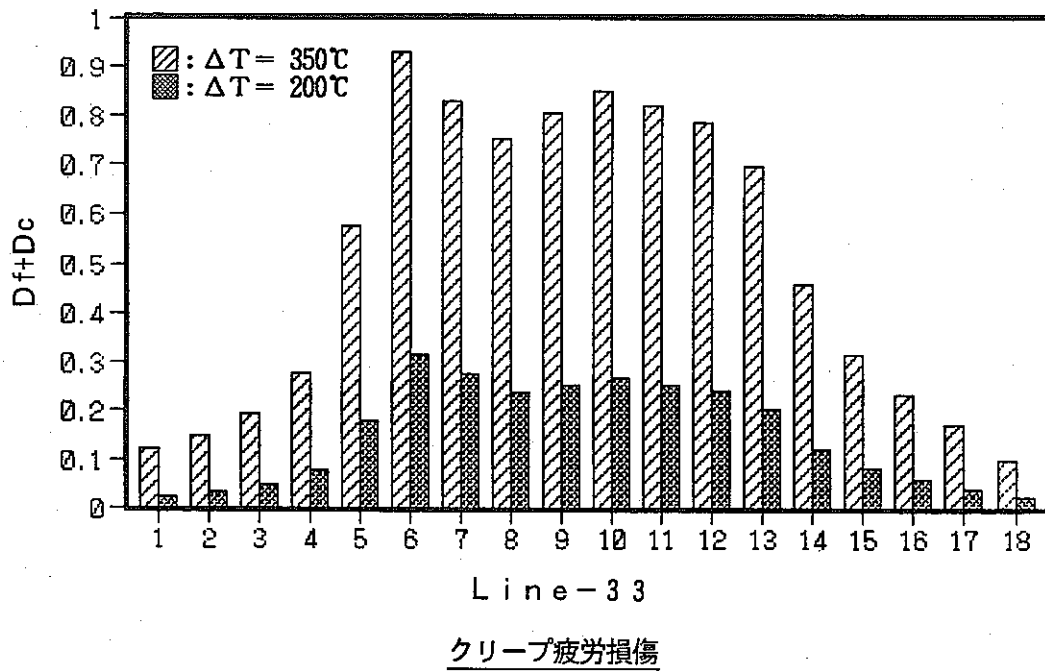
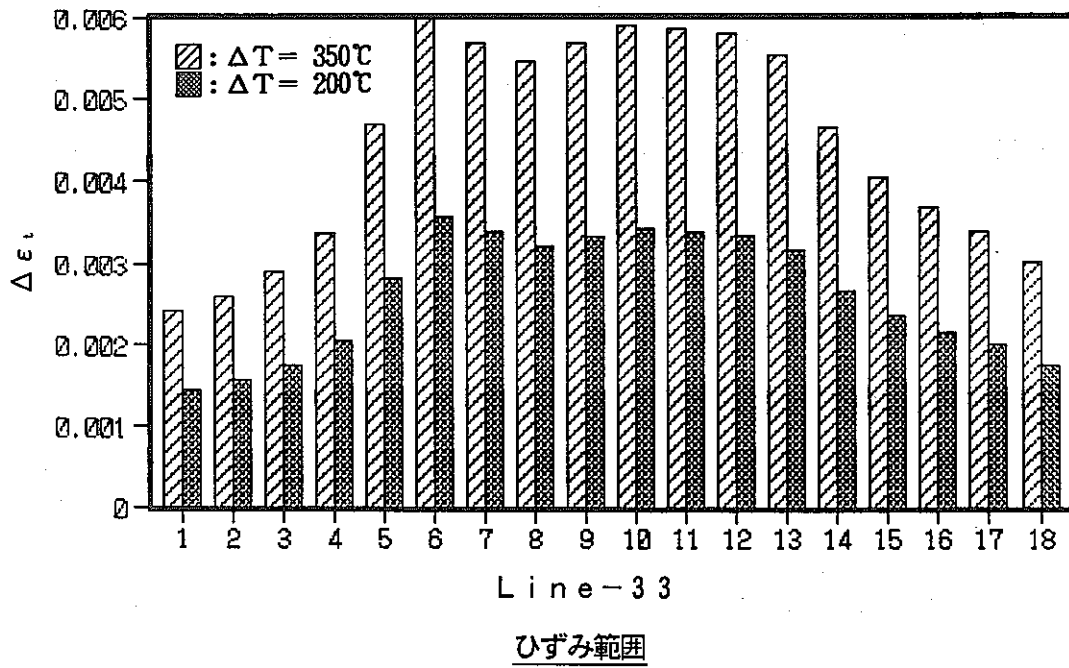


Fig. 4.7-2(c) Influence of temperature range on strain range and creep-fatigue damage

4.8 熱過渡温度変化速度

ケースF-1、F-2は、熱過渡の温度変化速度を基準ケースの1/2及び1/8とした弾性解析ケースである。熱過渡の保持時間は、温度変化速度の減少に伴い、それぞれ2倍、8倍とした。

(1) 応力の時刻歴

基準ケース、ケースF-1及びF-2の評価断面内外表面における応力時刻歴を比較し、Fig. 4.8-1に示す。

評価断面A内表面の応力履歴を例にとると、 σ_n はホット又はコールドトランジェントに関わらず、温度変化速度を小さくすることによって減少する。これは、 σ_n が主に板厚内温度勾配を要因として発生するためである。これに対し、 σ_z は温度変化速度を小さくしても σ_n ほど極端には減少しない。これは、 σ_n と σ_z の応力発生要因の差に起因する。 σ_z は、スカートと本体胴との温度差およびスカートの軸方向温度勾配によるスカート胴の回転が主な発生要因である。このため、スカート構造では熱過渡の温度変化速度を容器胴からスカート胴への熱通過を下回る程度の入熱量まで低下させない場合には σ_z に大きな影響を及ぼさない。

σ_n が温度変化速度もしくは構造物内面の熱伝達率に対して敏感であるのに対し、 σ_z はスカートへの熱通過量もしくは温度落差に対して敏感である。このような応力発生要因の差は、応力の最大値の発生時刻や減衰の挙動にも現れている。最大応力の発生時刻は、 σ_n が板厚内に大きな温度勾配が発生する比較的早い時刻に最大となるのに対し、 σ_z はスカートと本体胴に大きな温度差が発生する時点で最大となる。また、板厚内温度勾配は長時間保持されないために、 σ_n は比較的早い時間で減衰する（ただし、スカート付け根近傍にはたが締め効果による σ_n は残る）のに対し、 σ_z はスカートの温度応答が悪く、本体胴との温度差が長時間にわたって残るために減衰が緩やかとなる。

スカート構造に発生する応力のレベルは、温度変化速度を小さくするにしたがってコールドとホットトランジェントでの値が同一になっていく。これは、温度変化速度の影響よりも保持時間の影響によるものである。基準ケースの保持時間は、ホットトランジェント2時間、コールドトランジェント1時間であるのに対し、ケースF-1は2倍、ケースF-2は8倍の保持時間となっている。よって、基準ケースでは熱過

渡に追従しきらなかったスカート温度が、保持時間を長くすることによって十分に追従し、ホットでもコールドトランジェントでも同程度の大きさの応力を発生することとなる。

上述のように、熱過渡に対しスカートの温度が完全に追従することから、ホットトランジェント時の応力は、熱過渡の温度変化速度が小さくなることによって増加する傾向にある。これに対し、コールドトランジェント時には、容器胴とスカート胴の相対温度差を主要因とする応力は、熱過渡温度変化速度の影響をあまり受けない。このため、応力範囲は熱過渡の温度変化速度を小さくすることによって大きくなる。

(2) ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷

基準ケース、ケースF-1及びF-2のクリープ疲労損傷評価ラインにおける応力時刻歴を比較し、Fig. 4.8-2に示す。

容器胴とスカート胴の相対的溫度差による熱曲げの効果を受けない容器胴の一般部では、溫度変化速度を小さくすることによってひずみ範囲も小さくなるが、熱曲げの効果を受けるスカート付け根近傍においては、溫度変化速度によらず同等、又は、溫度変化速度を小さくした場合に大きなひずみ範囲となる。一般部において、溫度変化速度を小さくすることによってひずみ範囲が小さくなる理由は、これらの部位の主ひずみが ϵ_1 であり、板厚内溫度勾配に敏感なためである。これに対して、スカート付け根近傍においては ϵ_1 に ϵ_2 が重疊している。スカート付け根近傍においても、板厚内溫度勾配による ϵ_1 は溫度変化速度を小さくすることによって一般部と同様に小さくなる。しかし、スカートと本体胴の溫度差によって生じる ϵ_1 及び ϵ_2 は、基準ケースに比べて熱過渡の保持時間が大きいために、スカート胴の溫度が熱過渡に追従することから、容器胴とスカート胴の相対的溫度差が大きくなるケースF-1、F-2で基準ケースを上回る。スカート付け根近傍及びR止端部では、板厚内溫度勾配による ϵ_1 よりもスカートと本体胴の溫度差によって生じる ϵ_2 及び ϵ_1 が支配的となるため、溫度変化速度の小さいケースの方が大きなひずみ範囲となる。

クリープ疲労損傷評価では、ひずみ範囲に加え、高温保持時間の効果が更に大きく影響し、基準ケースに比べてケースF-1、F-2の損傷値が大きくなっている。

(3) まとめ

熱過渡の温度変化速度をパラメータとした伝熱・応力解析及びクリープ疲労損傷評価を実施した。この結果、以下の結論が得られた。

- 熱過渡の温度変化速度は、板厚方向温度勾配による応力に対しては敏感であり、この応力は温度変化速度の低下に伴い減少する。
- 容器胴とスカート胴の相対的溫度差による応力は、熱過渡の温度変化速度に対して敏感でない。
- ひずみ範囲は、板厚方向温度勾配が主要因となる容器胴一般部では、熱過渡の温度変化速度の低下に伴って減少する。逆に、容器胴とスカート胴の相対的溫度差が主要因となるスカート付け根及びR止端部では、熱過渡の温度変化速度の低下に大きくは影響されない。
- 今回の解析では、熱過渡温度変化速度の減少にともなって熱過渡の保持時間を長くしているため、スカート付け根やR止端部のクリープ疲労損傷は、熱過渡の温度変化速度の低下によって増加する。

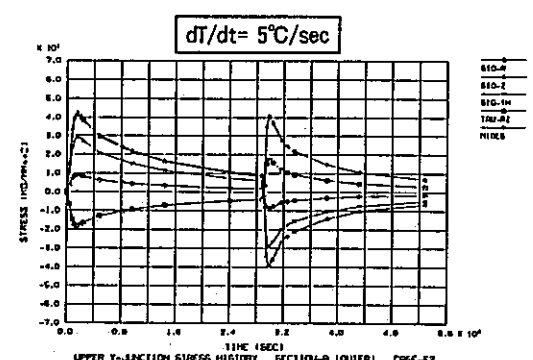
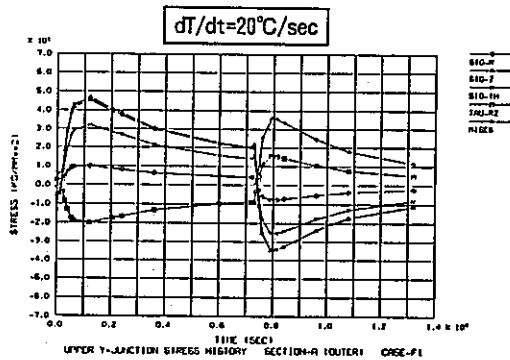
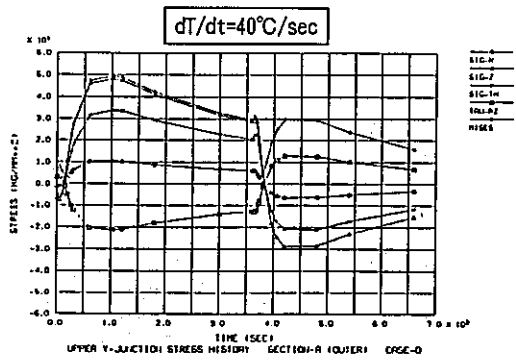
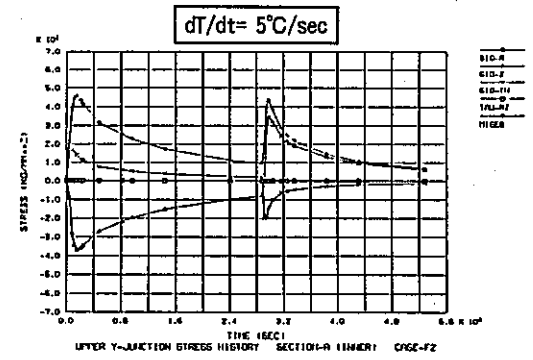
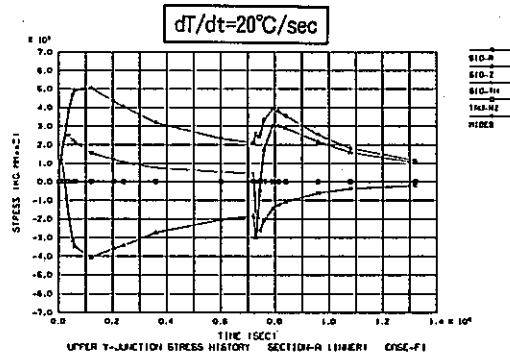
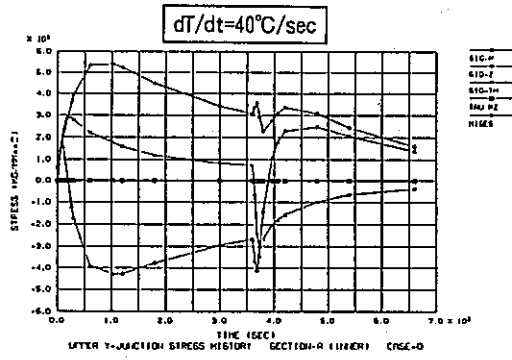


Fig.4.8-1(b) Influence of temperature change rate on stress history

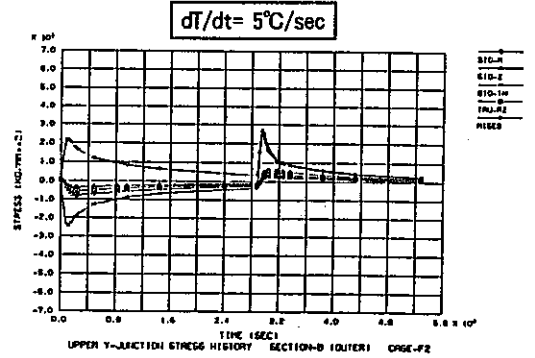
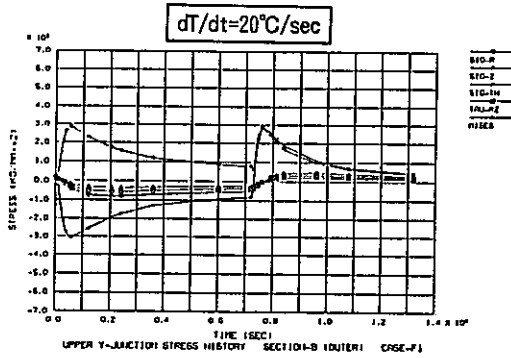
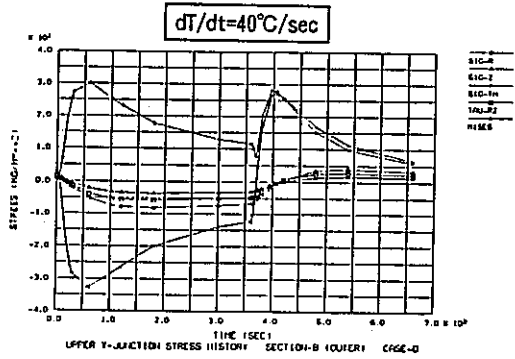
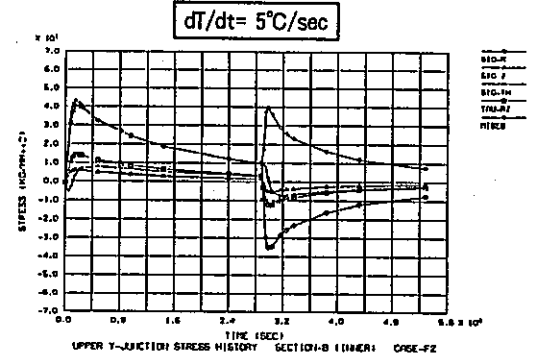
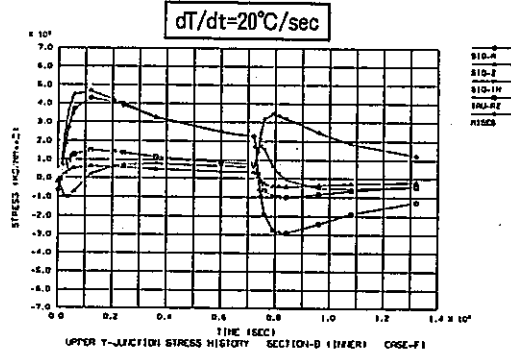
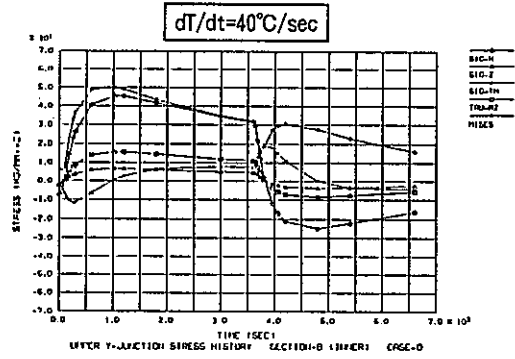


Fig. 4.8-1(a) Influence of temperature change rate on stress history

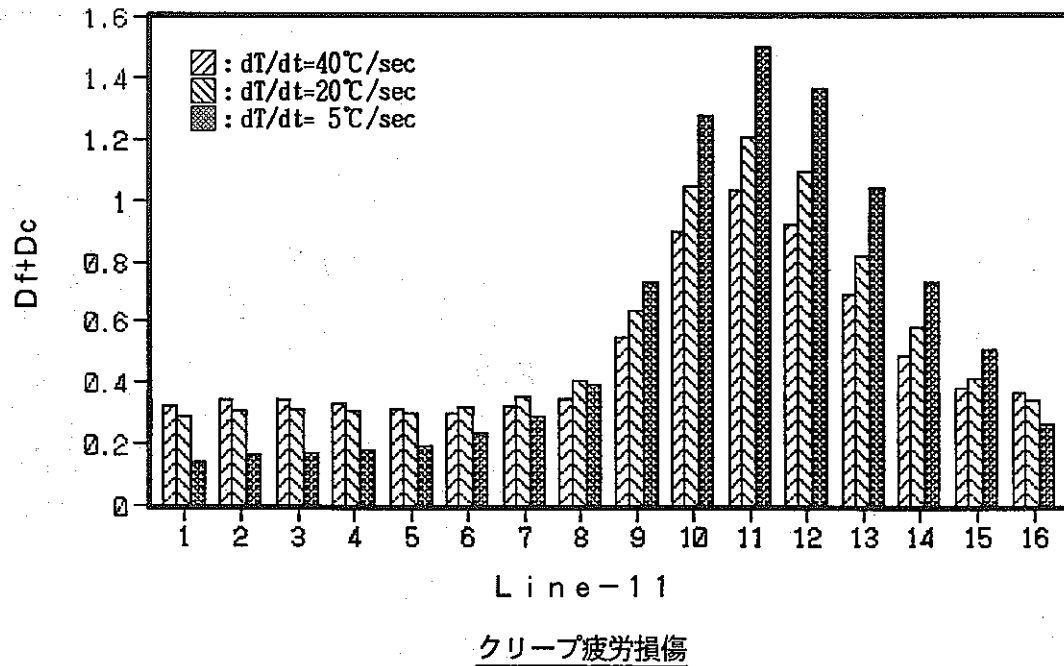
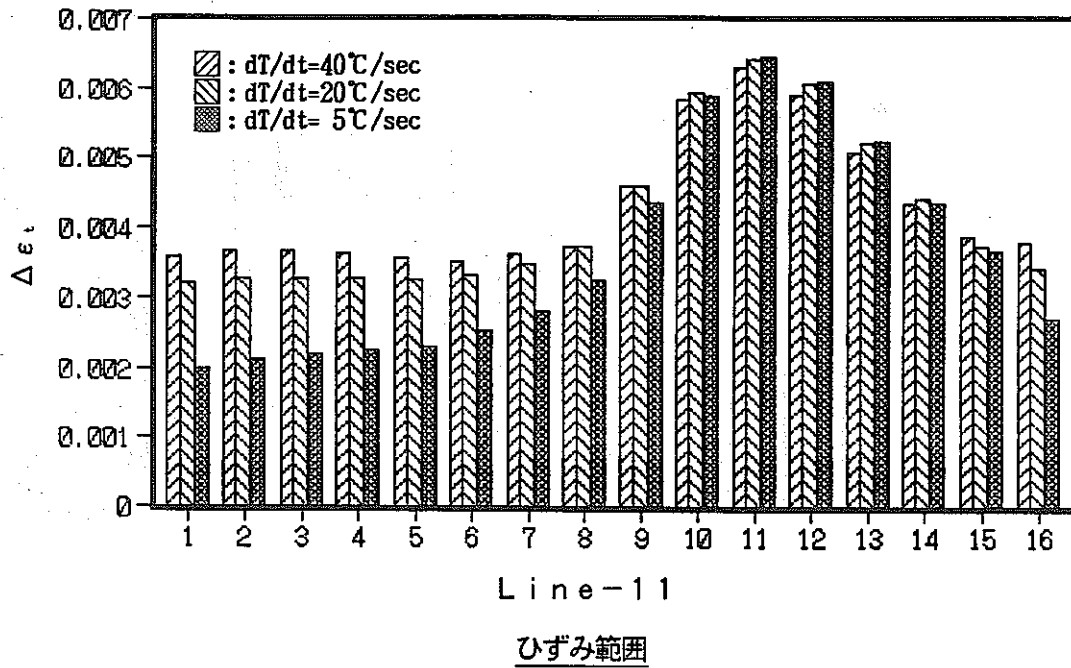


Fig. 4.8-2(a) Influence of temperature change rate on strain range and creep-fatigue damage

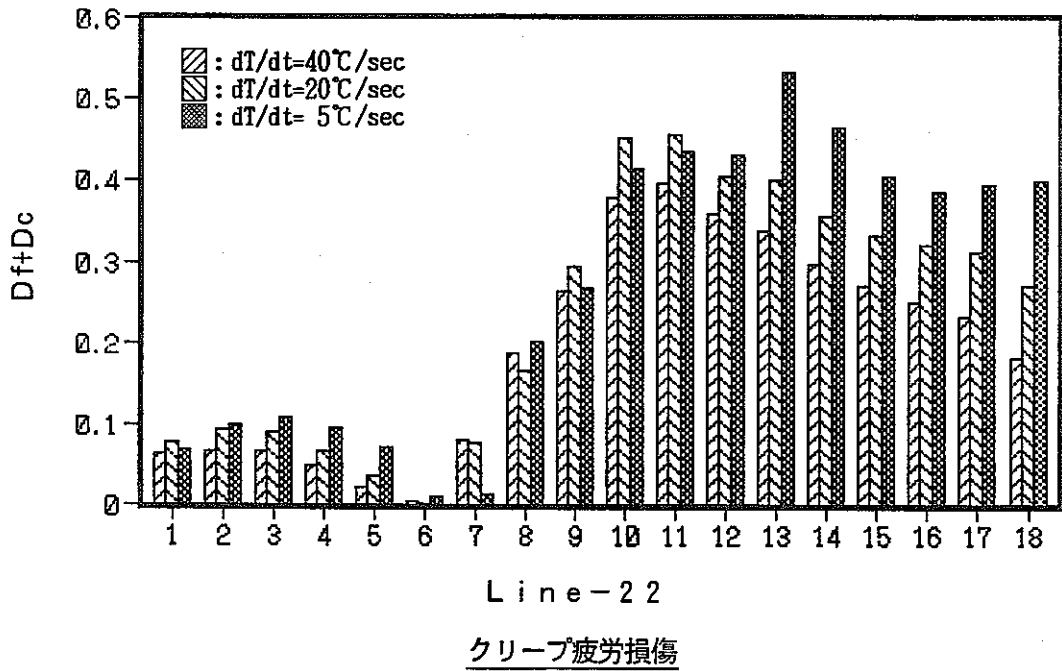
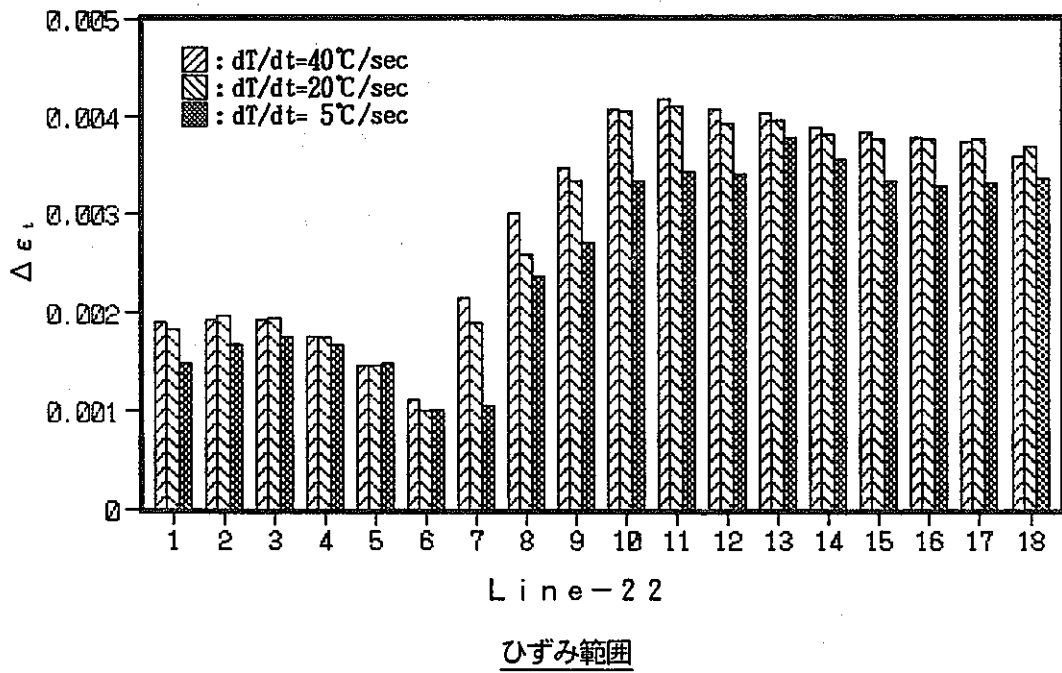


Fig. 4.8-2(b) Influence of temperature change rate on strain range and creep-fatigue damage

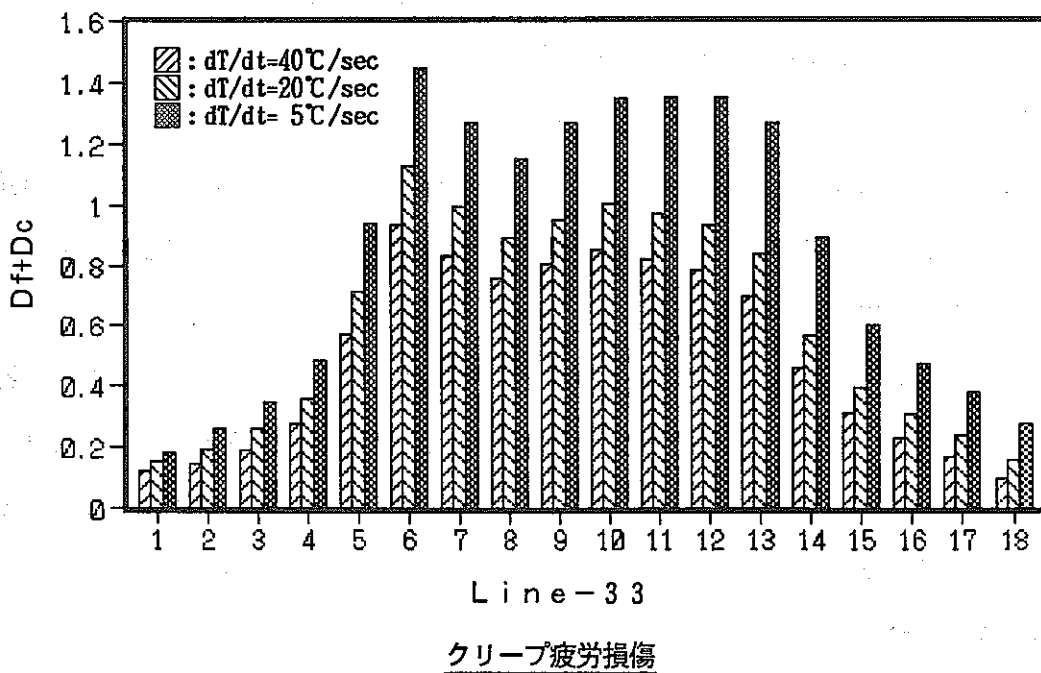
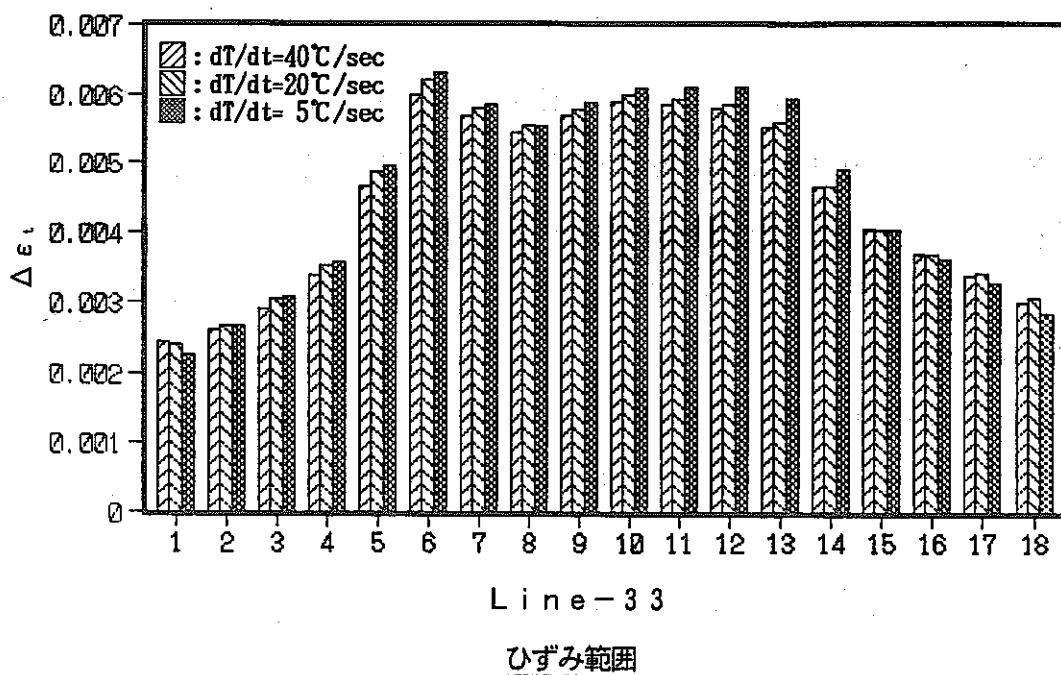


Fig. 4.8-2(c) Influence of temperature change rate on strain range and creep-fatigue damage

4.9 容器胴の板厚

ケースG-1は、基準ケースに対し本体胴の板厚のみ1.5 mm増加（内径固定）したケースである。板厚の増加分は、溶接容器型モデル製作時に設定した寸法許容差（溶接構造物に対する普通寸法許容差）の最大値を取ったものである。ここでは、基準ケースとケースG-1の解析結果から、容器胴板厚がスカート構造に発生する応力の挙動及びクリープ疲労損傷に与える影響を検討する。

(1) 応力の時刻歴

基準ケースとケースG-1の応力評価断面内外表面における応力時刻歴を比較し、Fig. 4.9-1に示す。

応力評価断面における応力の挙動は、基準ケースとケースG-1で類似した結果となっている。ただし、ケースG-1の応力レベルは、基準ケースに比べて若干小さくなっている。

(2) ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷

基準ケースとケースG-1のクリープ疲労損傷評価ラインにおけるひずみ範囲及びクリープ疲労損傷を比較し、Fig. 4.9-2に示す。

容器胴の板厚増加により、ケースG-1の容器胴一般部のひずみ範囲は、基準ケースと比べて増加する。これは、容器胴の板厚増加によって、板厚方向の温度勾配に起因する応力が増加するためであると考えられる。しかし、容器胴ひずみ集中部（評価断面A内表面の近傍）のひずみ範囲は、一般部とは逆に減少する。これは、容器胴の曲げ剛性の増加によって容器胴とスカート胴の相対的温度差による応力が減少するためであると考えられる。

スカート胴のひずみ範囲は、容器胴の板厚増加によって増加する。これは、容器胴の曲げ剛性の増加により、スカート胴の軸方向温度勾配によるモーメント及び容器胴とスカート胴の相対的温度差によるモーメントがスカート部の付け根に集中するためであると考えられる。

(3) まとめ

スカート構造において、容器胴の板厚を1.5 mm増加した条件で解析を実施し、この影響を確認した。この結果、以下の結論が得られた。

- 容器胴の板厚増加により、容器胴の応力集中部に発生する応力は減少する。しかし、一般部の応力は逆に増加する。
- 容器胴の板厚増加により、スカート胴に発生す応力は増加する。特にスカート付け根でこの傾向が大きい。
- 容器胴とスカート胴の板厚は、相反する関係にあると考えられ、これらの板厚を調整することによって、容器胴及びスカート胴の応力（ひずみ）を調整することが可能であると考えられる。

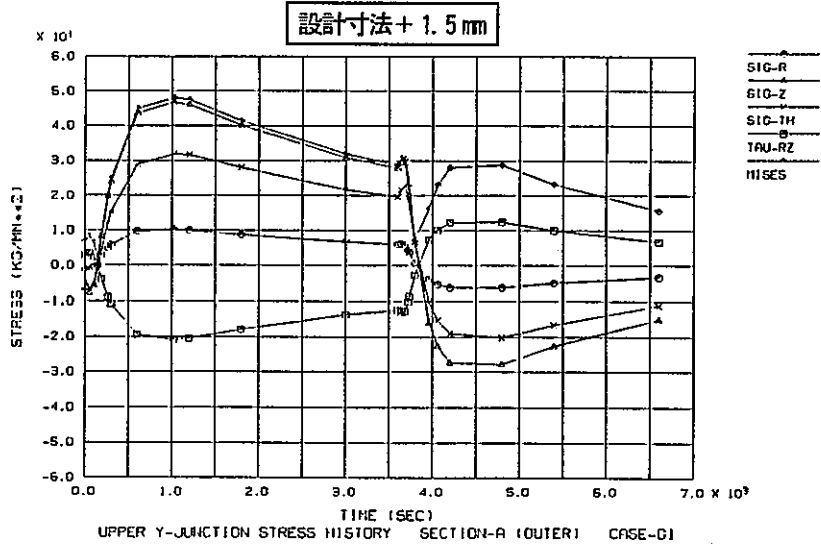
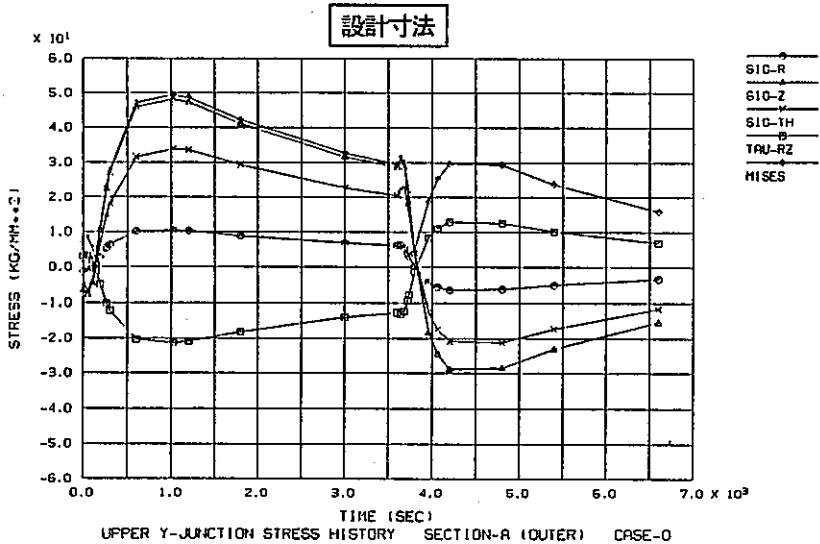
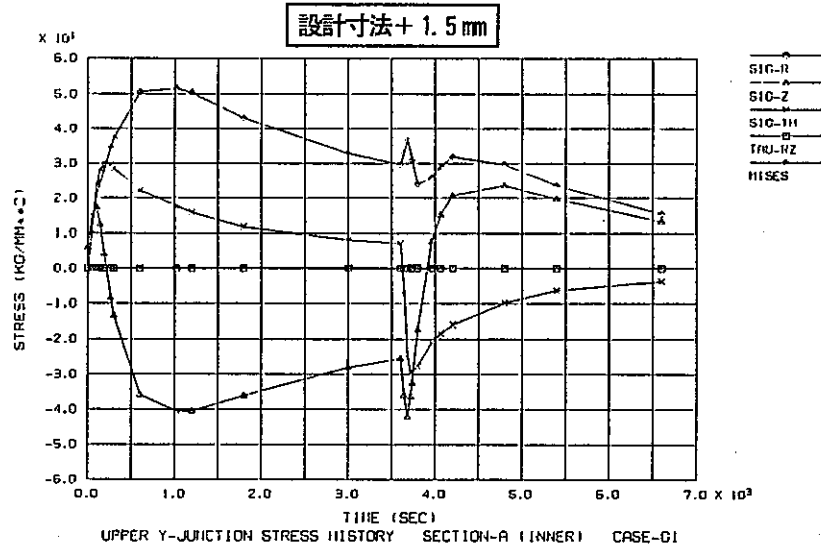
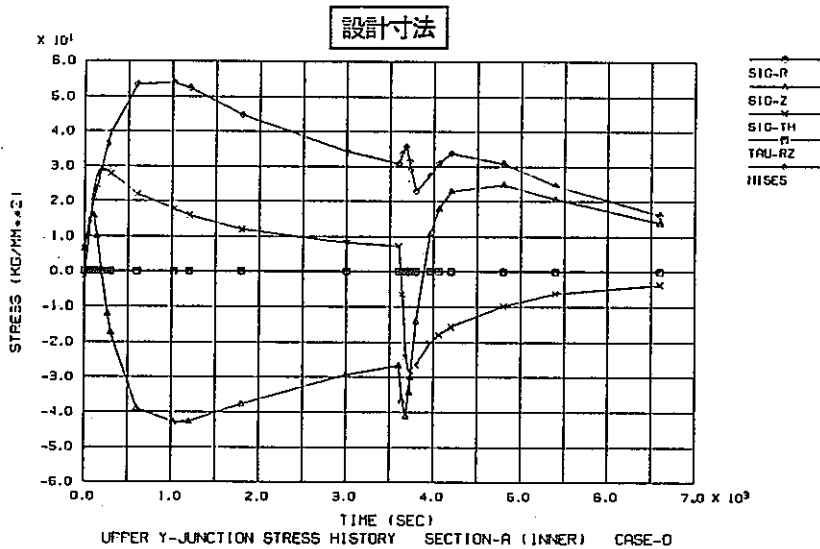


Fig. 4.9-1(a) Influence of vessel thickness on stress history

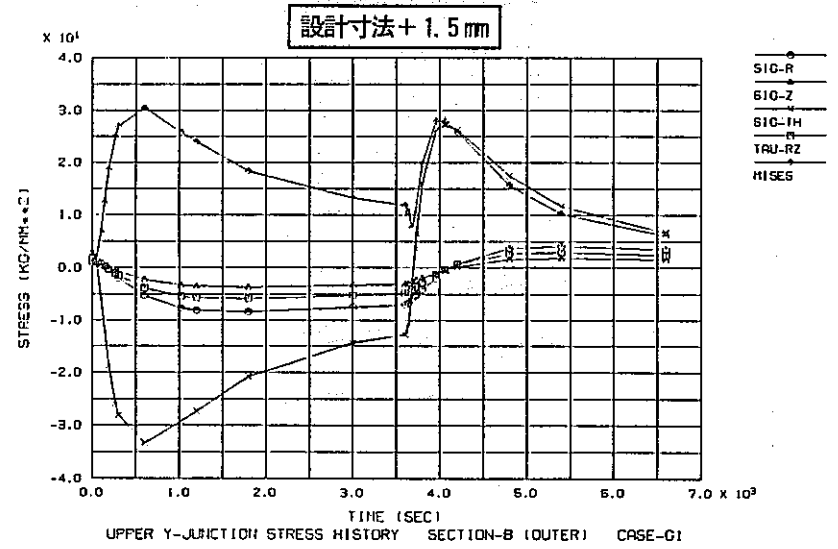
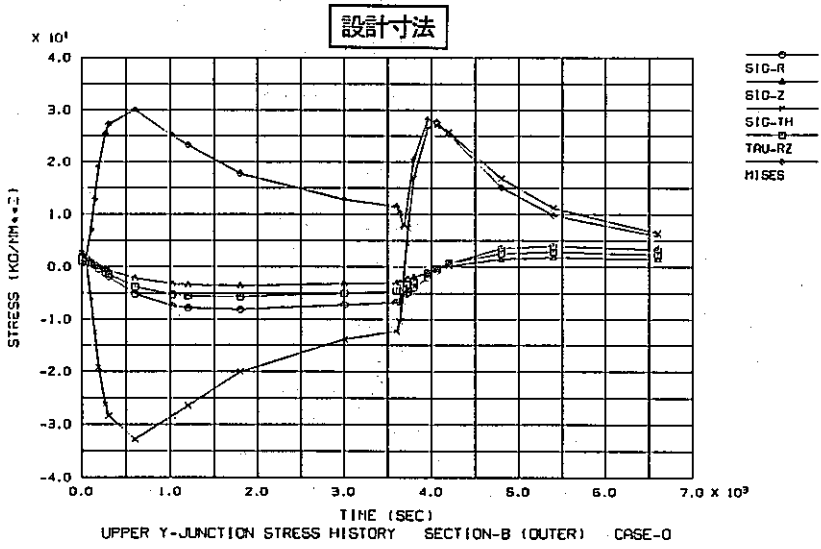
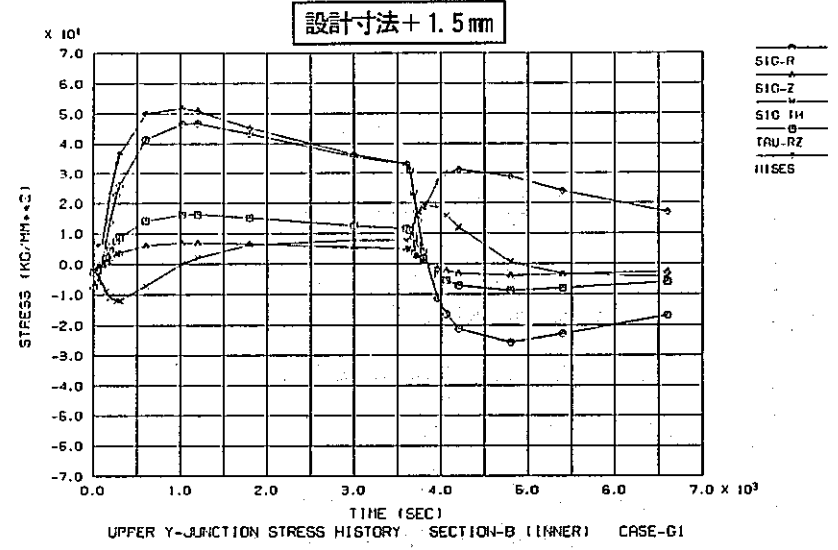
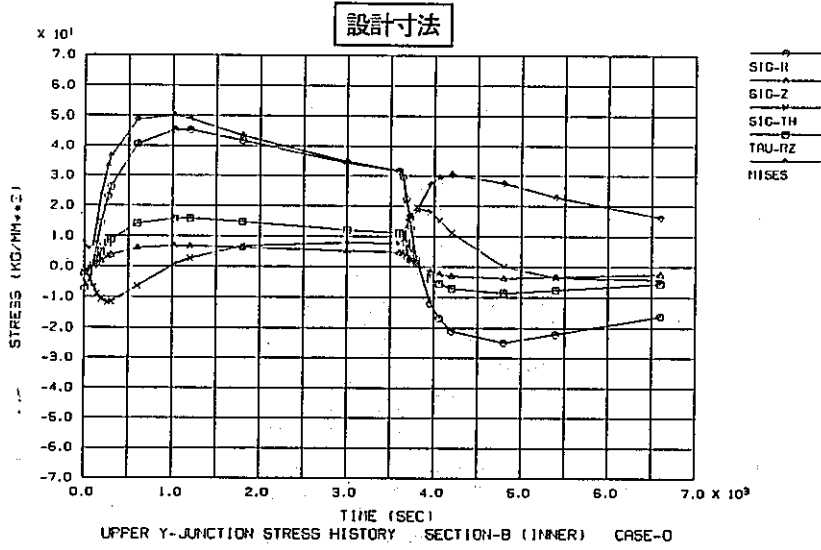


Fig.4.9-1(b) Influence of vessel thickness on stress history

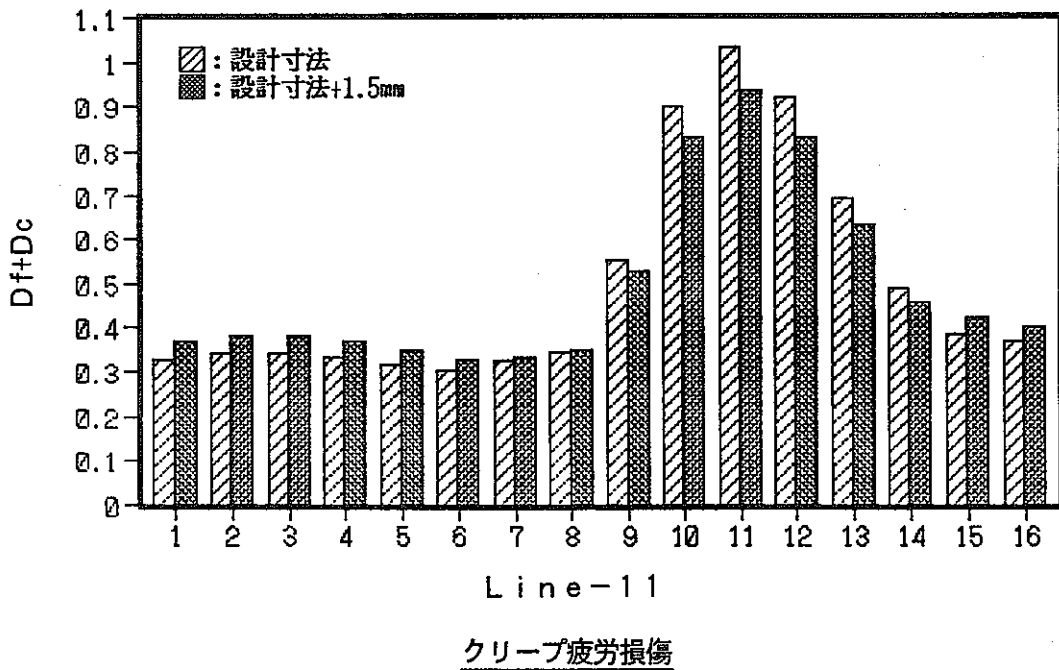
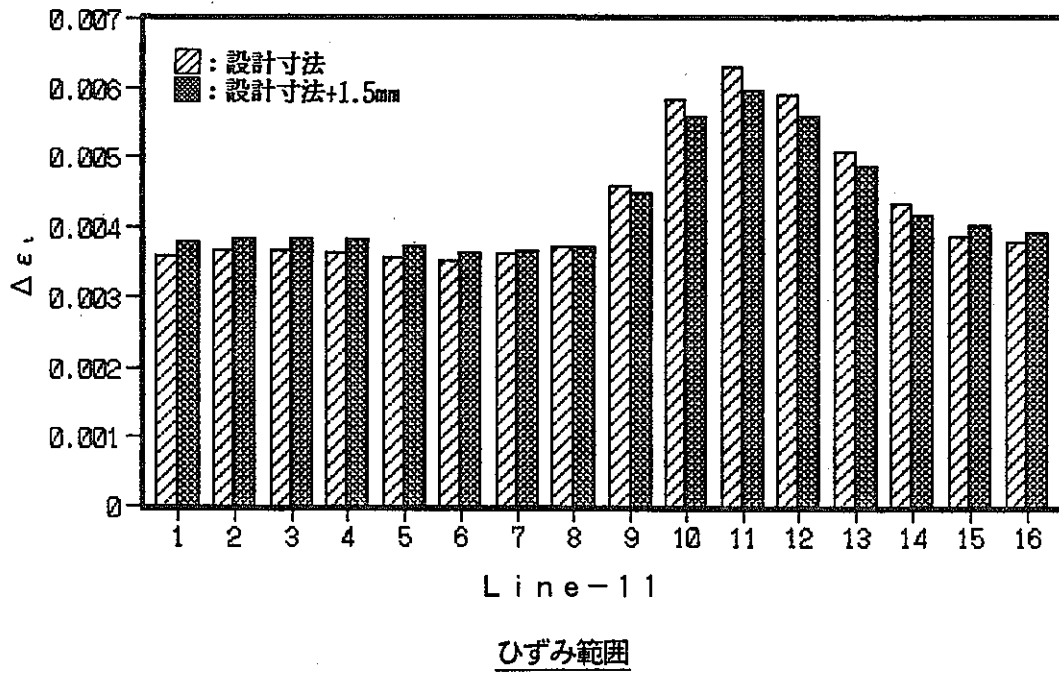


Fig. 4.9-2(a) Influence of vessel thickness on strain range and creep-fatigue damage

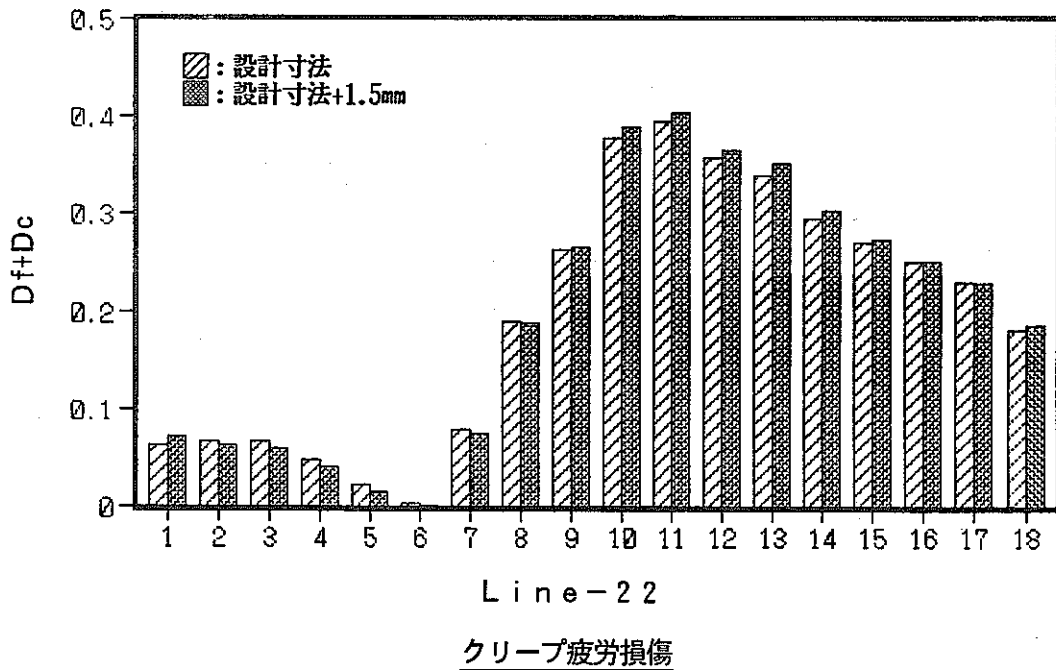
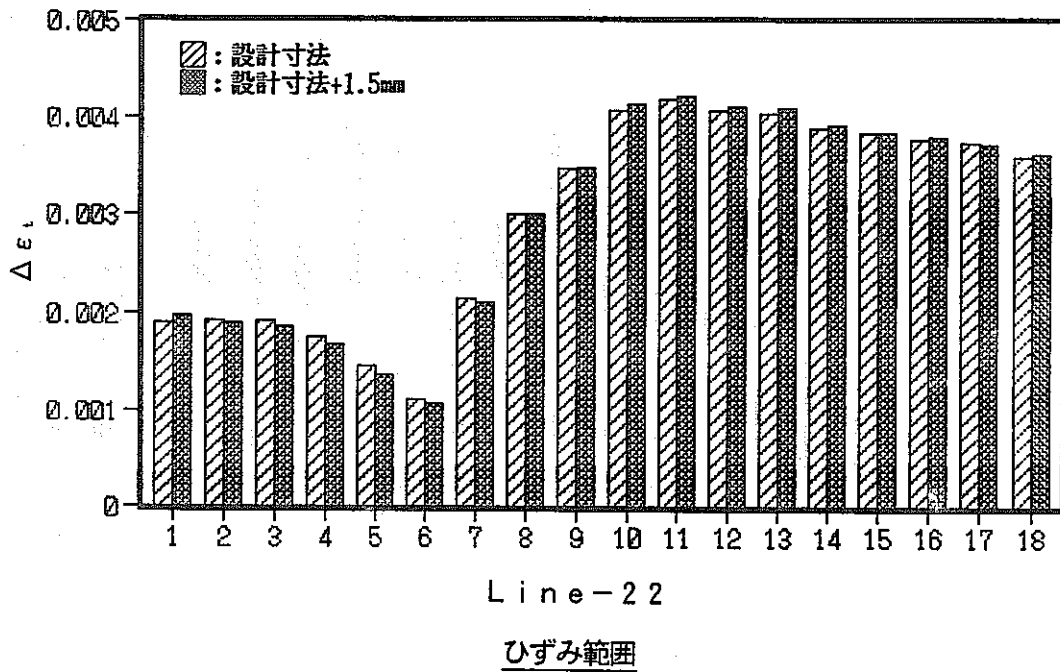


Fig. 4.9-2(b) Influence of vessel thickness on strain range and creep-fatigue damage

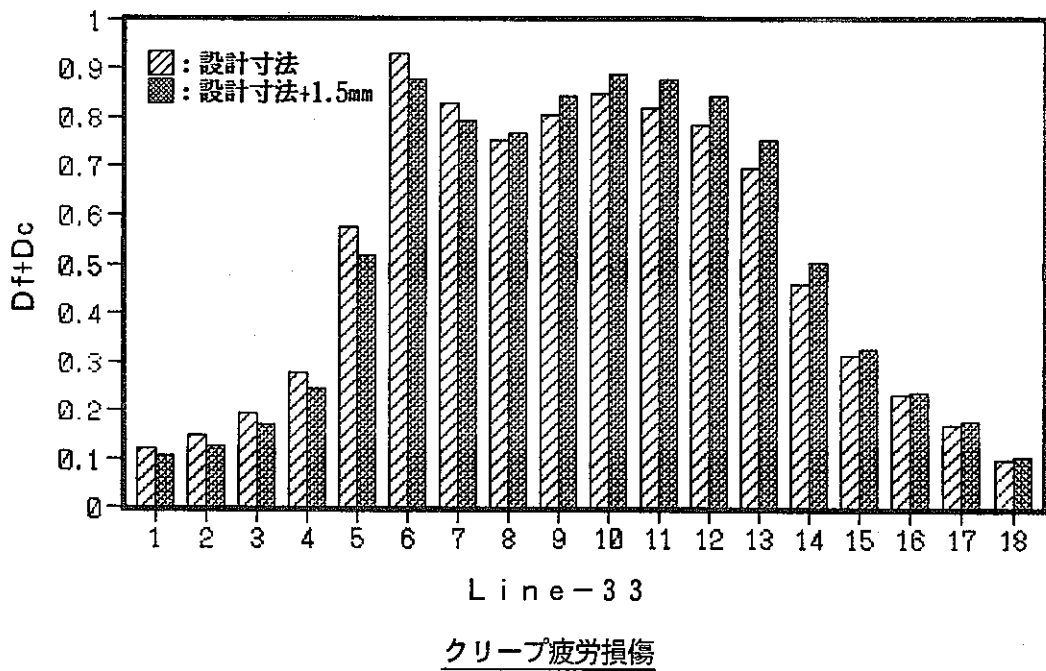
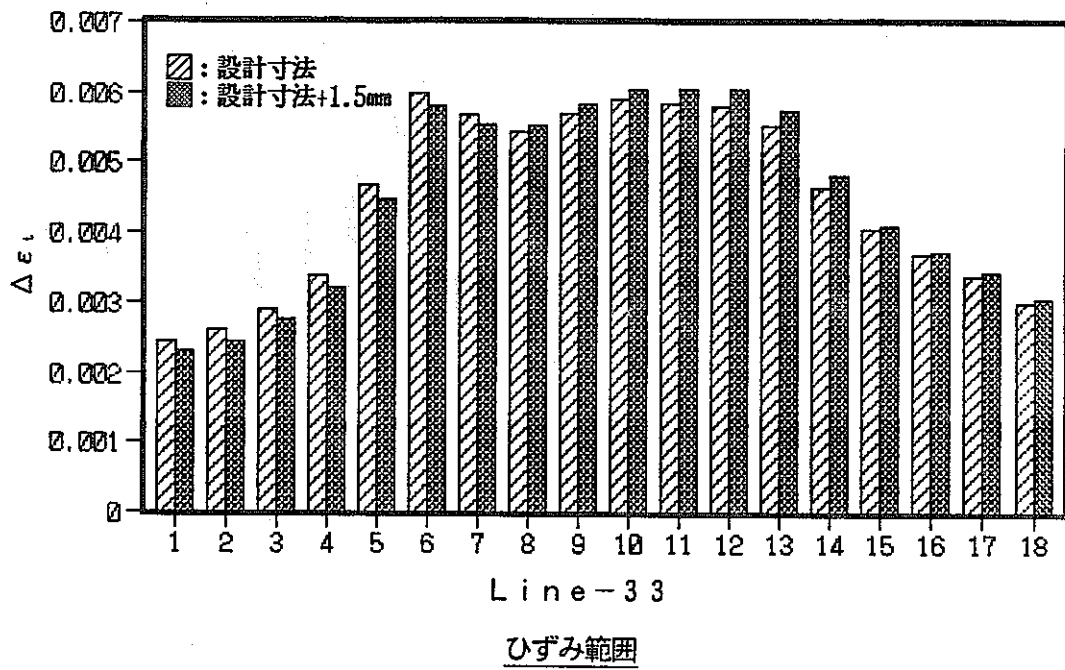


Fig. 4.9-2(c) Influence of vessel thickness on strain range and creep-fatigue damage

4.10 簡易評価法

スカート構造に対する簡易応力評価法の検討として、シェル理論に基づいた評価法が検討されている⁷⁾。ここでは、このシェル理論に基づく検討を実施し、軸対称ソリッド要素を用いた解析結果と比較・検討を行う。

(1) 簡易法による応力解析

a. 解析モデル

簡易法では、スカート構造をFig. 4.10-1のように円筒胴を4分割、スカートを2分割したモデルを用いて評価する。簡易法において、荷重は各領域の節点に平均温度と板厚方向温度勾配を入力し、各領域を結ぶ節点の変位を合わせて構造全体の応力分布を求める。ここで、円筒胴とスカートは剛結合（円筒胴側の節点とスカート側の節点の周方向回転変位と径方向変位をカップリング）としている。領域内の温度は、節点温度を線形に結んだものとする。また、簡易解析モデルでは、評価する時点によって温度分布が異なるために、温度分布と共に各領域の軸方向長さも入力する。

b. 荷重条件

簡易解析は、ソリッド解析と入力条件を合わせるために、基準ケースにおいて評価断面A内面のひずみ範囲が最大となる極2時点の温度分布を入力とした解析とする。基準ケースにおいて、ひずみ範囲が最大となる2時点の円筒胴及びスカートの温度分布をFig. 4.10-2に示す。荷重条件は、図に示す温度分布からFig. 4.10-3に従って設定する。解析条件をTable 4.10-1～4にまとめる。

c. 解析結果

簡易解析から求めた円筒胴及びスカートの応力分布をソリッド解析結果と比較し、Fig. 4.10-4, 5に示す。

(2) ソリッド解析との比較

Fig. 4.10-4, 5に比較した簡易解析結果とソリッド解析結果をから、スカート構造に対する簡易解析法の適用に関して以下の結論が得られた。

- 温度分布を適切に入力することによって、簡易解析法は容器胴とスカート胴の接合部を除き、スカート構造の応力分布を概ね求めることができる。従って、概略検

討のレベルであればスカート構造の応力評価に適用できる。

- ただし、正確な応力分布を求めるためには、ソリッド要素を用いた伝熱解析が必要となる。また、スカート部の軸方向温度勾配が凸状の分布となる場合には、Fig. 4.10-3に示すように温度分布を分割して入力する必要があり、入力条件の設定が簡易でない。よって、簡易解析法をスカート構造に適用するには、その温度分布を簡易的に求めるルーチンの追加が望まれる。

Table 4.10-1 Analytical condition for simplified method
(Vessel-Cold transient)

温度 T_{v1-m} (°C)	温度 T_{v1-b} (°C)	温度 T_{v2-m} (°C)	温度 T_{v2-b} (°C)	温度 T_{v3-m} (°C)	温度 T_{v3-b} (°C)	長さ l_{v-12} (mm)	長さ l_{v-23} (mm)
292.0	6.0	362.0	36.0	302.0	6.9	102.0	82.0

Table 4.10-2 Analytical condition for simplified method
(Skirt-Cold transient)

温度 T_{s1-m} (°C)	温度 T_{s1-b} (°C)	温度 T_{s2-m} (°C)	温度 T_{s2-b} (°C)	温度 T_{s3-m} (°C)	温度 T_{s3-b} (°C)	長さ l_{s-12} (mm)	長さ l_{s-23} (mm)
520.0	0.0	558.0	0.0	519.0	0.0	90.0	210.0

Table 4.10-3 Analytical condition of simplified method
(Vessel-Hot transient)

温度 T_{v1-m} (°C)	温度 T_{v1-b} (°C)	温度 T_{v2-m} (°C)	温度 T_{v2-b} (°C)	温度 T_{v3-m} (°C)	温度 T_{v3-b} (°C)	長さ l_{v-12} (mm)	長さ l_{v-23} (mm)
563.0	-4.5	511.0	-30.0	557.0	-5.3	124.0	80.0

Table 4.10-4 Analytical condition of simplified method
(Skirt-Hot transient)

温度 T_{s1-m} (°C)	温度 T_{s1-b} (°C)	温度 T_{s2-m} (°C)	温度 T_{s2-b} (°C)	温度 T_{s3-m} (°C)	温度 T_{s3-b} (°C)	長さ l_{s-12} (mm)	長さ l_{s-23} (mm)
358.0	0.0	520.0	0.0	520.0	0.0	295.0	0.0

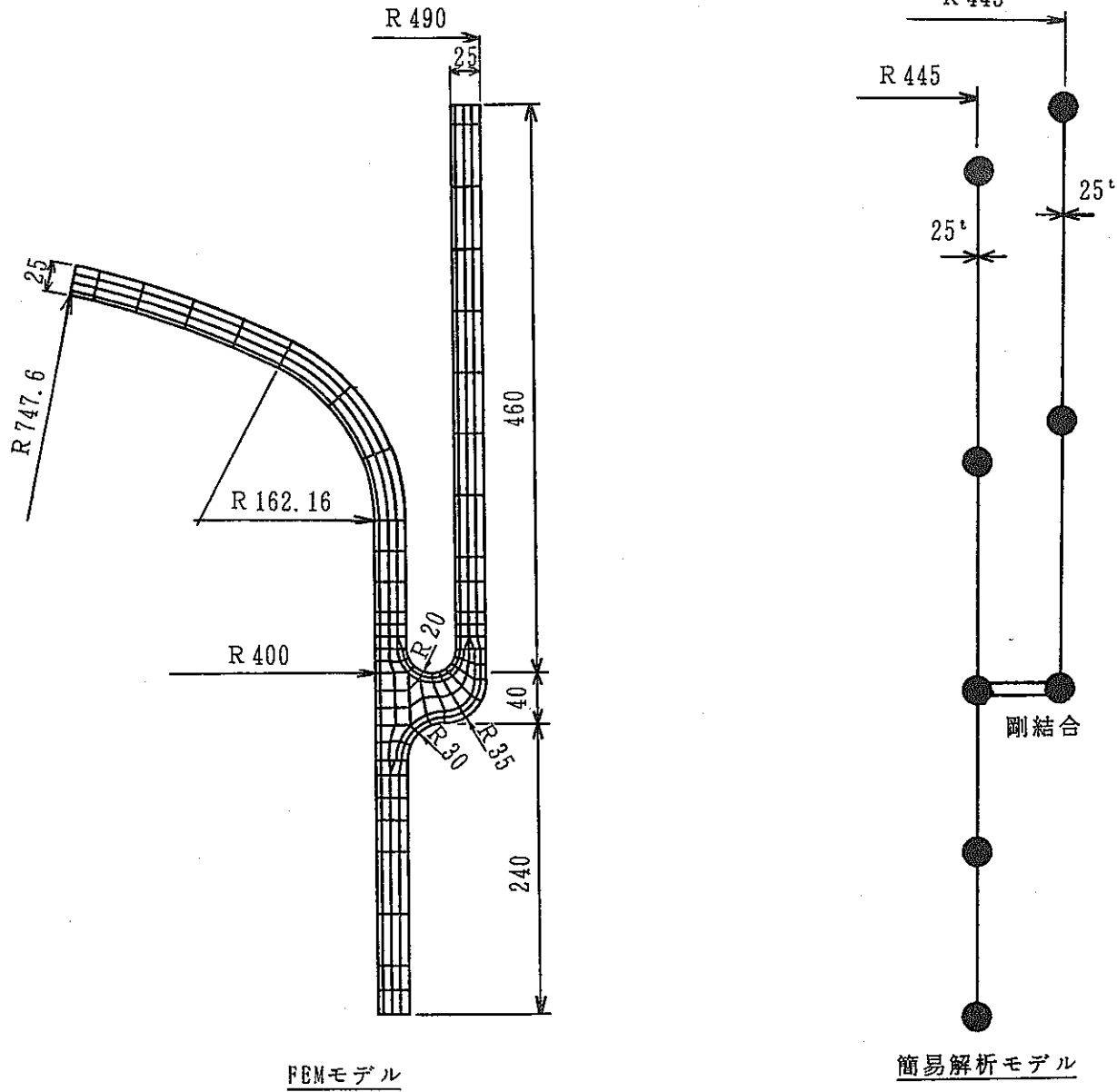
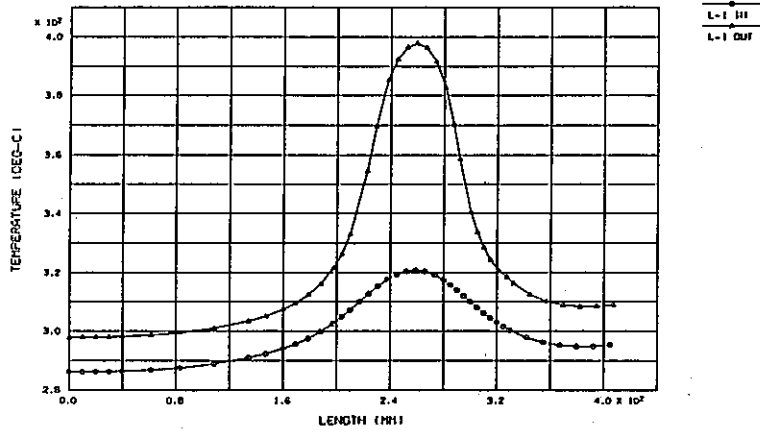
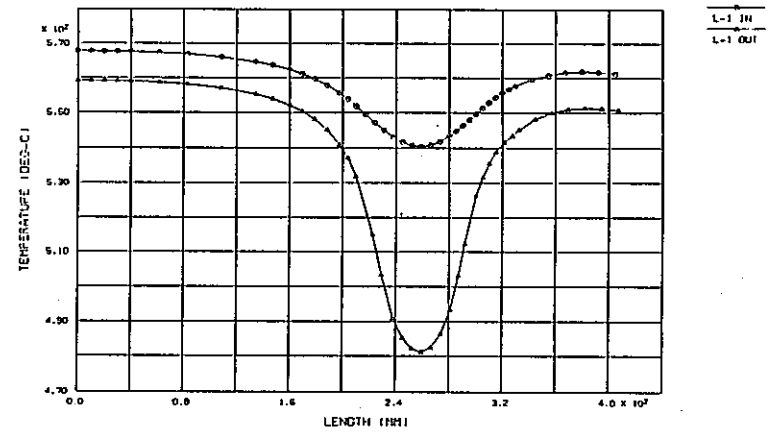


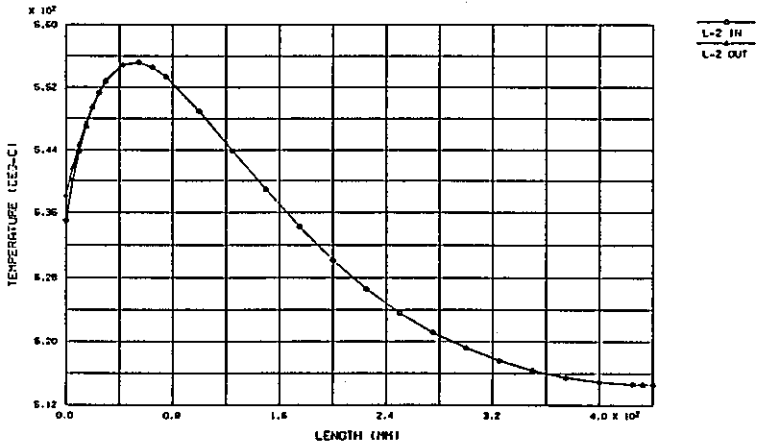
Fig. 4.10-1 Analytical model for simplified method



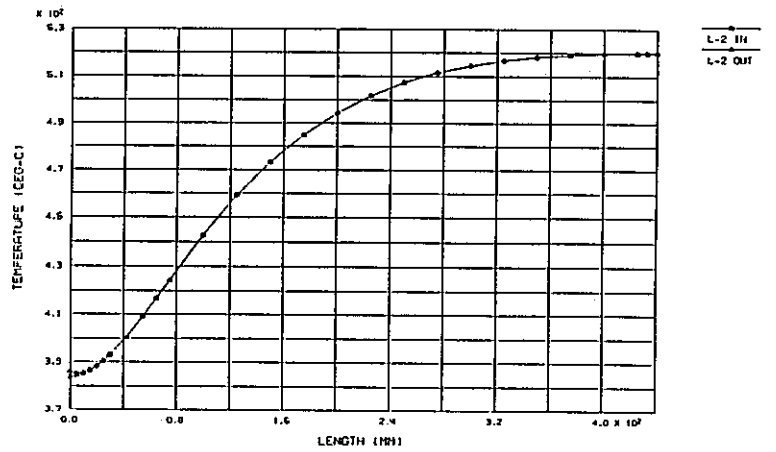
容器胴の温度分布 (cold ; 600 sec)



容器胴の温度分布 (hot ; 600 sec)



スカート胴の温度分布 (cold ; 600 sec)



スカート胴の温度分布 (hot ; 600 sec)

Fig.4.10-2 Thermal distribution on surface of model

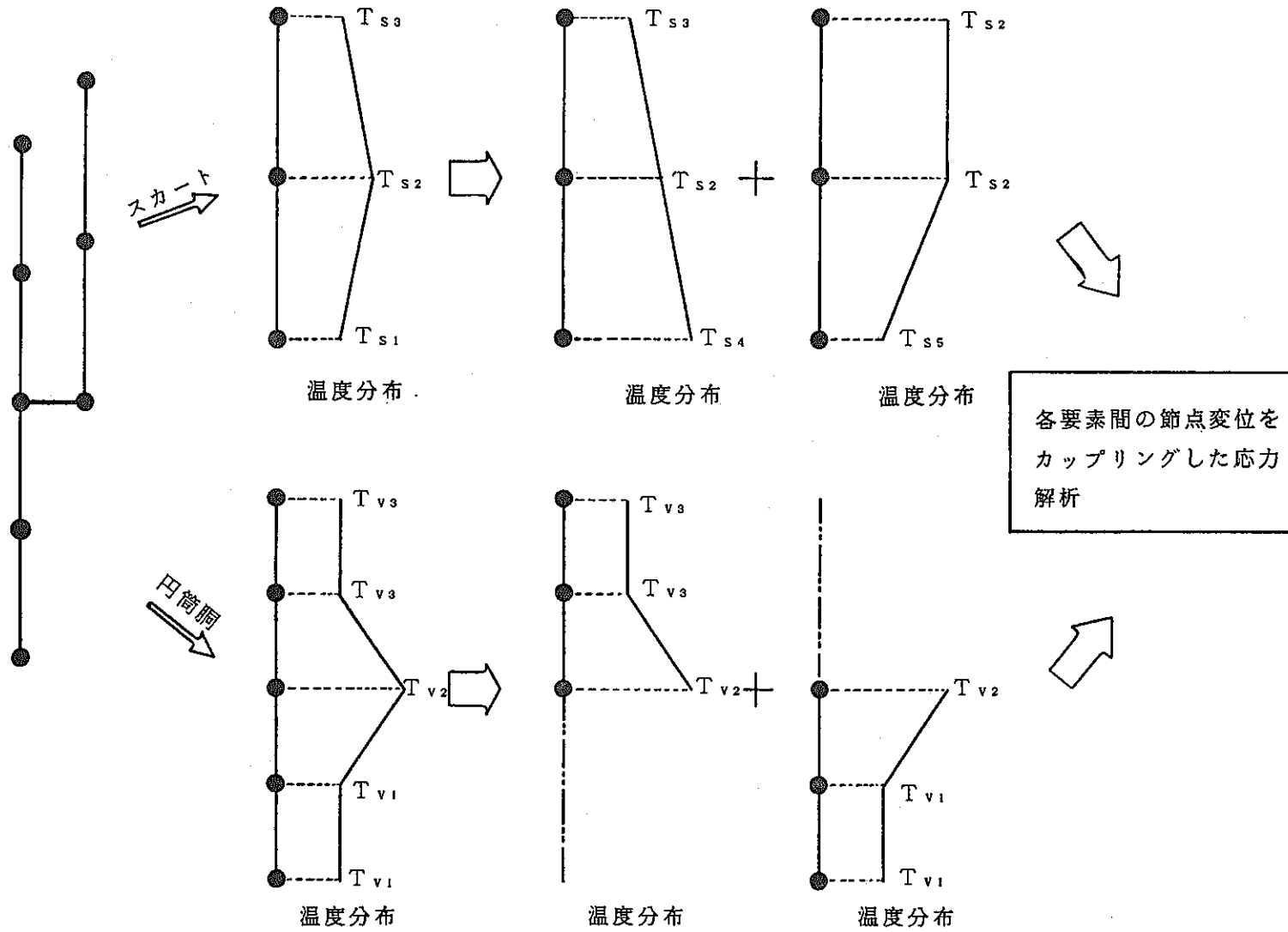


Fig.4.10-3 Arrangement for input of thermal loading

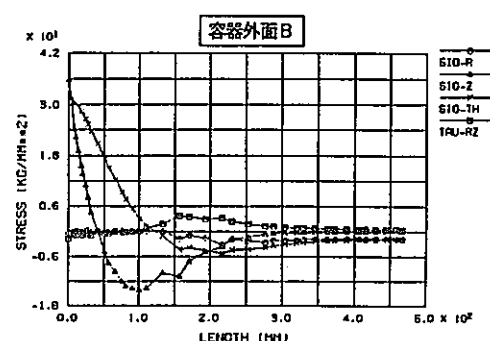
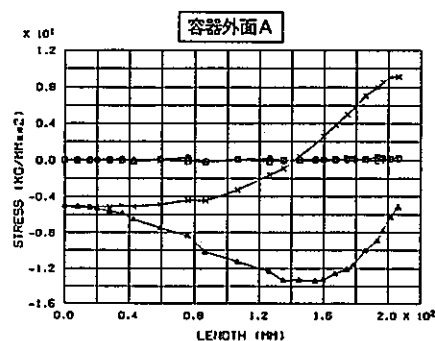
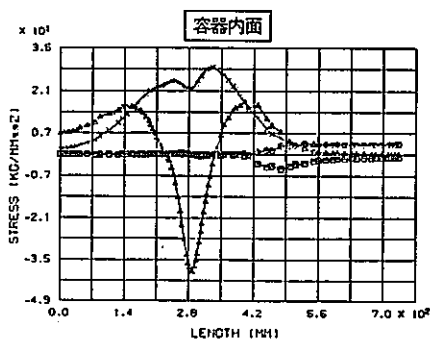
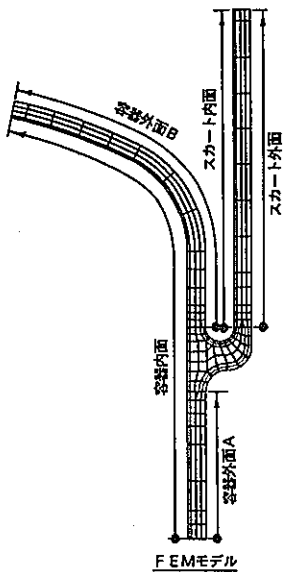
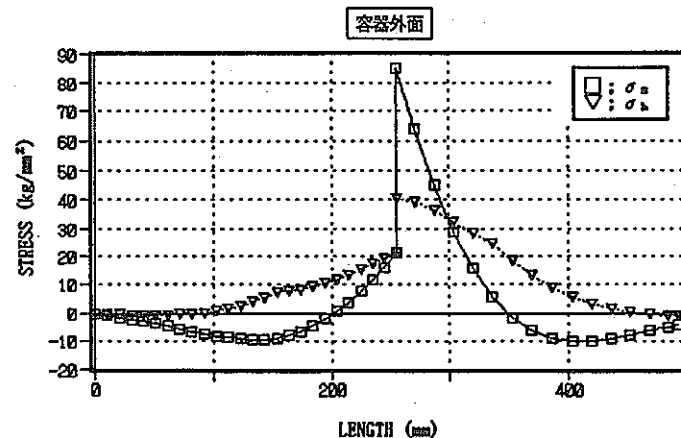
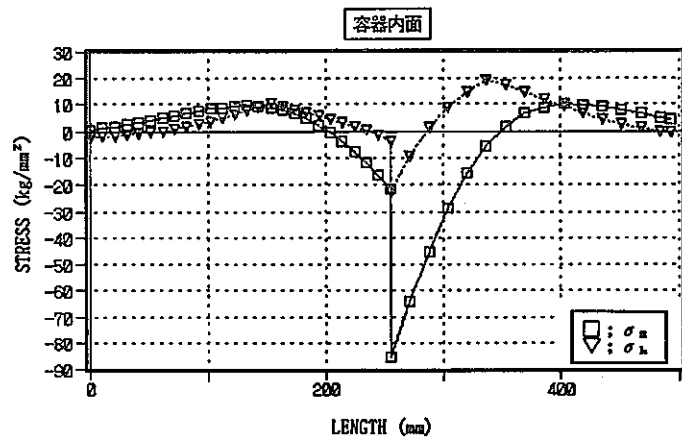
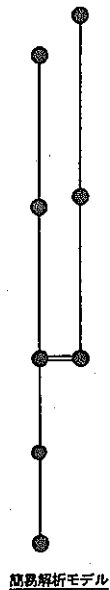


Fig. 4.10-4(a) Results of simplified method (Cold transient)

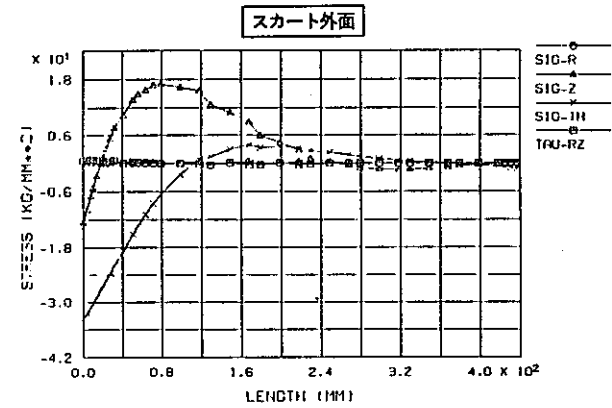
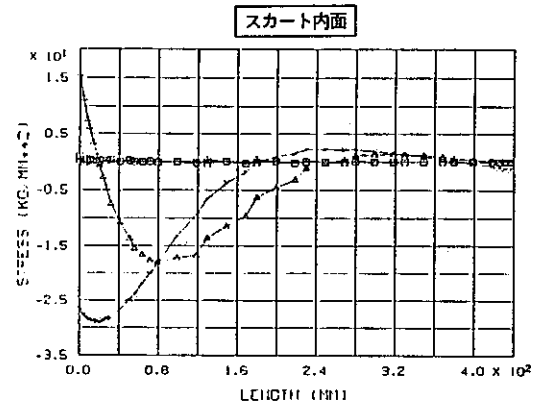
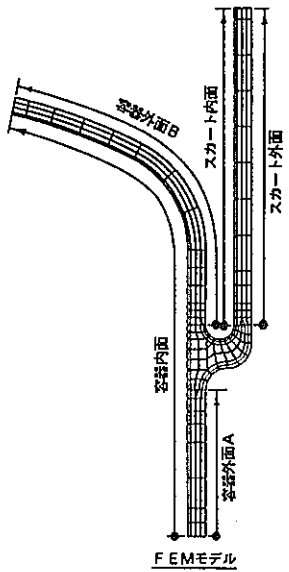
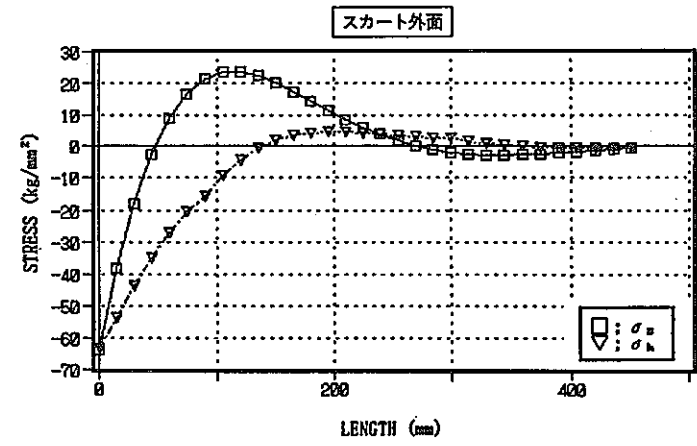
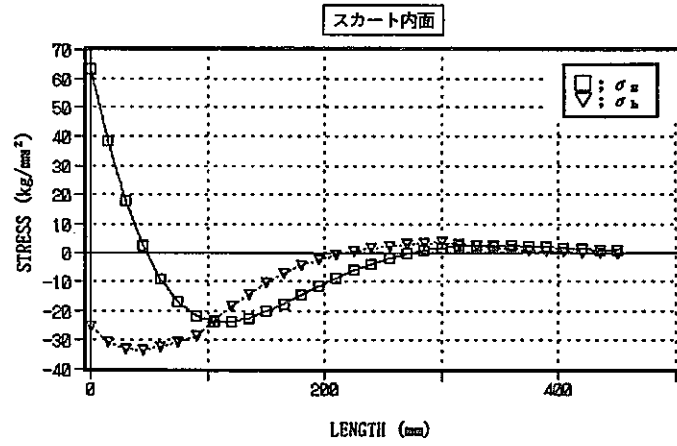
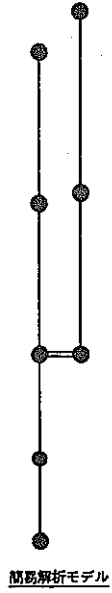


Fig. 4.10-4(b) Results of simplified method (Cold transient)

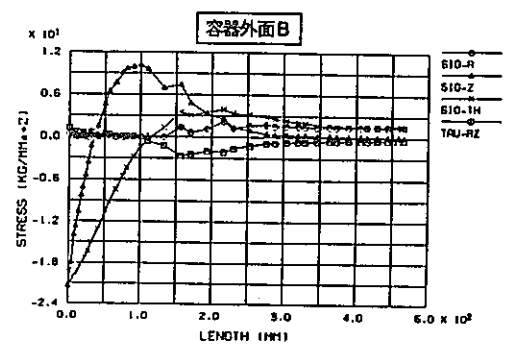
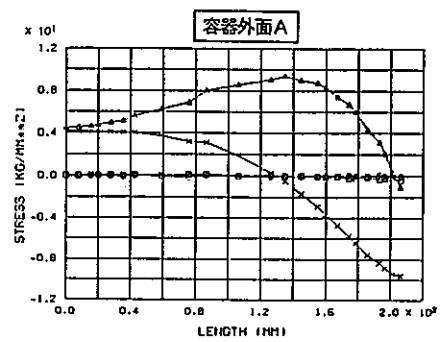
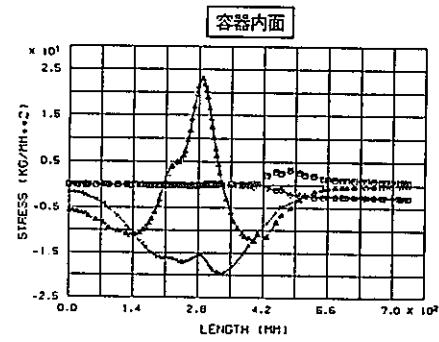
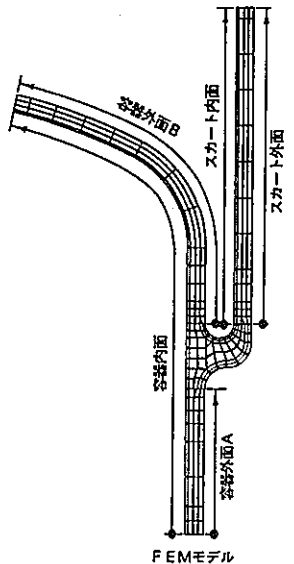
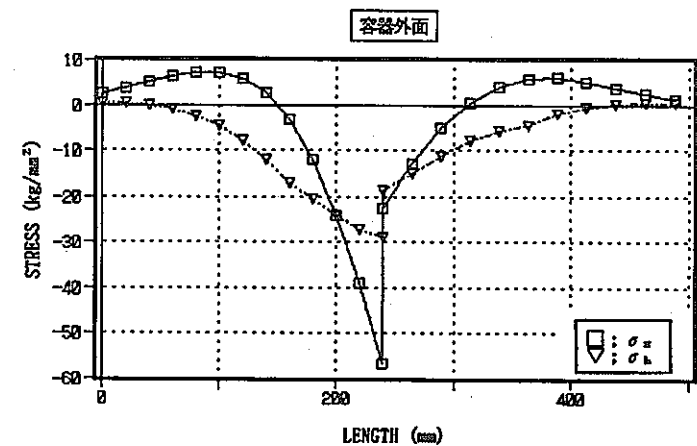
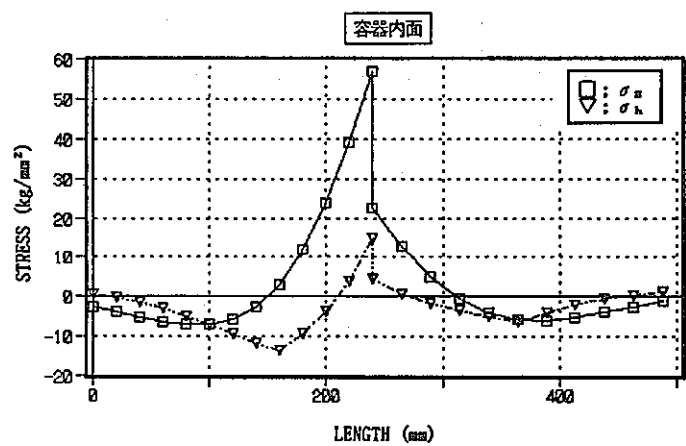
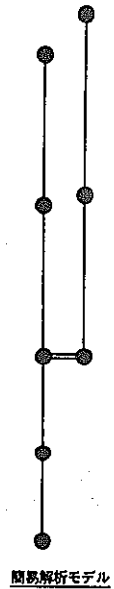


Fig. 4.10-5(a) Results of simplified method (Hot transient)

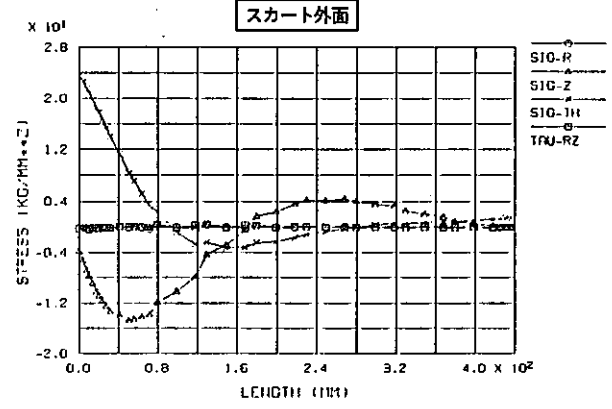
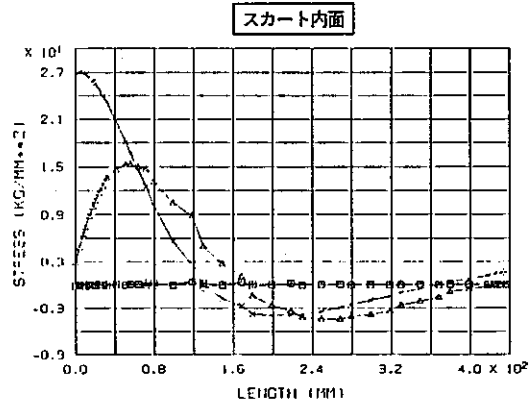
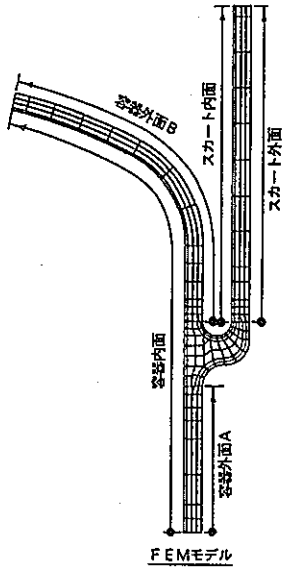
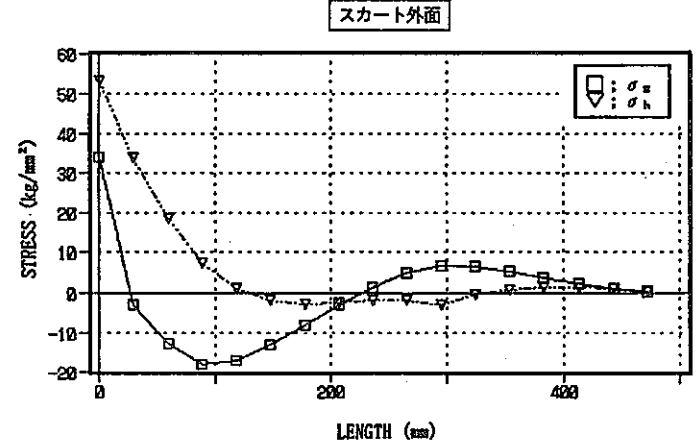
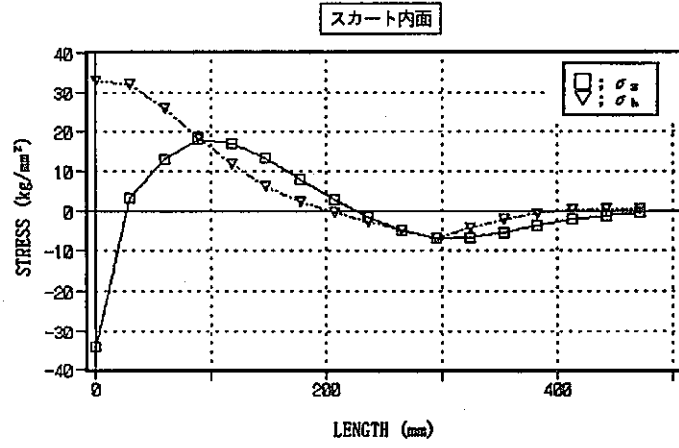


Fig. 4.10-5(b) Results of simplified method (Hot transient)

5. 結 論

溶接容器型モデルの上部Yピースを対象に、物理的・解析的条件を解析パラメータとして、スカート構造に発生する応力及びクリープ疲労損傷と物理的・解析的条件の関係を解析的に評価・検討した。この結果、以下の結論が得られた。

- (1) 塑性の効果として、スカート付け根の容器胴外面に弾性追従によると考えられるひずみの集中が見られる。この部位のクリープ疲労損傷は、弾性解析に比べて弾塑性解析結果が約2倍になる。
- (2) クリープによるひずみ増分は、応力が長時間保持されるスカート付け根近傍では発生するが、容器胴一般部のように板厚方向温度勾配による応力が主体になる部位ではほとんど発生しない。
- (3) 塑性に対する硬化則において、移動硬化モデルは、等方硬化モデルに対して応力は小さめの結果を示すが、ひずみ範囲及びクリープ疲労損傷は等方硬化モデルを上回る。
- (4) 動的応力-ひずみ関係を用いた解析結果は、2直線近似した応力-ひずみ関係を用いた解析結果に比べて応力、ひずみともに大きくなるが、これは、応力-ひずみ関係よりも動的応力-ひずみ関係を用いた解析において熱過渡開始時の残留ひずみを考慮していない影響が大きい。
- (5) クリープひずみ式における応力緩和のばらつきを示す係数 α_c は、応力の挙動及びひずみの挙動に対して鈍感である。
- (6) 解析モデル外面の熱伝達率は、ホットランジェント、コールドランジェントで発生する応力の挙動、特に容器胴とスカート胴の相対的温度差を主要因とする応力（スカート付け根の容器胴内面では α_2 ）の挙動に対して感度が高い。熱過渡の温度落差及び温度変化速度が大きい場合には、容器胴の板厚方向温度勾配は外面の熱伝達率に対して鈍感であるため、板厚方向の温度勾配による応力も、外面の熱伝達率に対して鈍感となる。ひずみ範囲は、外面の熱伝達率に対して鈍感であるが、構造材温度が熱伝達率に左右されるため、クリープ疲労損傷は熱伝達率に敏感となる。
- (7) スカート構造に発生する応力及びひずみは、熱過渡の温度変化幅にほぼ比例する。クリープ疲労損傷は、応力及びひずみに増して温度変化幅に敏感である。

- (8) 温度変化速度は、容器胴内面の板厚方向温度勾配による応力及びひずみ範囲に対して敏感であるが、容器胴とスカート胴の相対的温度差が支配的なスカート付け根やR止端部の応力及びひずみに対しては鈍感である。
- (9) 板厚方向温度勾配に支配される容器胴の応力及びひずみは、容器胴の板厚増加に伴って増加する。これに対し、容器胴とスカート胴の相対的温度差に支配されるスカート付け根やR止端部の応力及びひずみは、容器胴の板厚増加に伴って減少する。また、スカート部に発生する応力及びひずみは容器胴の板厚増加に伴って増加する。
- (10) シェル理論に基づくスカート構造の簡易解析法は、スカート構造の温度分布を適切に与えることで、スカート構造に発生する応力を概略求められることがわかった。しかし、温度分布を適切に求めるためには、伝熱解析を実施する必要があること、及び伝熱解析から求まる温度分布を簡易解析用のデータに変換するために時間を要する。よって、簡易解析法は、スカート構造のように径方向の熱伝導によって一義的に温度分布が定まらない構造物に対して、適用するメリットは小さいと考えられる。

6. 今後の課題

今回の検討から、熱過渡を受けるスカート構造において、容器胴のスカート付け根部内面には軸方向及び周方向応力による2軸応力場が形成されていることが明らかになった。この応力場は、FBRの原子炉構造設計において、構造健全性を確保する上で課題となっている部位の1つである液面近傍に発生する熱応力と類似している。スカート構造は、この応力状態を模擬できる試験モデルとして、溶接容器型モデルに採用された。また、スカート構造は、中間熱交換器やポンプといった機器のサポートやループ型炉のデッキシール構造への適用が検討されており、これらの部位も構造健全性を確保する上で重要な課題となっている。

今回の検討では、TTSで強度試験が予定されている溶接容器型モデルの上部Yピースを対象として、熱過渡や外面の熱伝達率と言った物理的条件及び解析的条件をパラメータに設定し、これらの条件が応力発生パターンやクリープ疲労損傷に与える影響を評価・検討した。この結果、スカート付け根部内面に発生する2軸応力場における応力発生パターン（応力の大きさ、応力比）は、物理的条件の設定によってある程度コントロールできることがわかった。しかし、これらの物理的条件と応力、又はクリープ疲労損傷の変化の関係は定量的な評価が難しく、機器設計に反映するには不確定因子を多く含むために適切な手法とは言い難い。

これに対し、容器胴とスカートの板厚比、直径比及びスカート付け根部の板厚等の形状をパラメータとした場合には、これらのパラメータと応力又はひずみの関係が、熱過渡や熱伝達率と言った物理的条件によるコントロールに比べて、容易かつ明確となる可能性を有している。今後、実機に対するスカート構造の適用を考えた場合、形状をパラメータとした応力発生パターンを整理しておくことは、有益かつ重要な課題の1つであると考えられる。

また、今回の検討では、荷重条件として熱過渡だけを考慮しているが、実機の設計では熱過渡以外の荷重として、

- 地震時荷重
- 配管熱膨張反力

- 内外圧差
- 自 重

等が考えられ、強度データの実機への反映を目論んだ場合、熱過渡に対する強度データに加え、上記の荷重に対する強度データを整理しておくことも、有益な課題であると考えられる。

7. 参 考 文 献

- 1) 町田他；溶接容器型モデル熱過渡強度試験
「第1報 供試体の設計・製作」 PNC N9410 90-096
- 2) 町田他；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 N9410 90-103
- 3) 汎用非線型構造解析システムF I N A S 使用説明書 PNC N9520 89-019
- 4) 高須他；「ナトリウム技術実用物性値表」 PNC N941 81-73
- 5) 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
- 6) 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針 PNC N241 84-08(1)
- 7) 古橋他；大型高速増殖炉要素技術設計研究（Ⅱ）
「簡易熱応力評価線図（不連続熱応力の簡易解析）」 PNC N9410 87-158

付 録

- A. 熱電対位置の温度履歴
- B. 評価ラインの応力分布

付録A. 熱電対位置の温度履歴

1. 概 要

本付録は、伝熱解析結果の内、試験中の温度履歴を測定するために供試体に布設されている熱電対位置の温度履歴をまとめたものである。本データは、現在準備が進められている溶接容器型モデルの熱過渡強度試験によって得られる温度履歴の実測値と比較・検討する。

2. 内 容

(1) 熱電対布設位置

熱電対の布設位置をFig.A-1 に示す。これは、供試体製作後に実測された熱電対位置である。

(2) 温度履歴

熱電対位置の温度履歴をFig.A-2 ～A-10に示す。伝熱解析は、熱過渡をコールド→ホットの順で計4サイクル分の解析を実施しているが、図は最終サイクルのコールドトランジェント開始からホットトランジェント終了までの温度履歴を示すものである。図に示す凡例はFig.A-1に示す熱電対の番号と対応する。

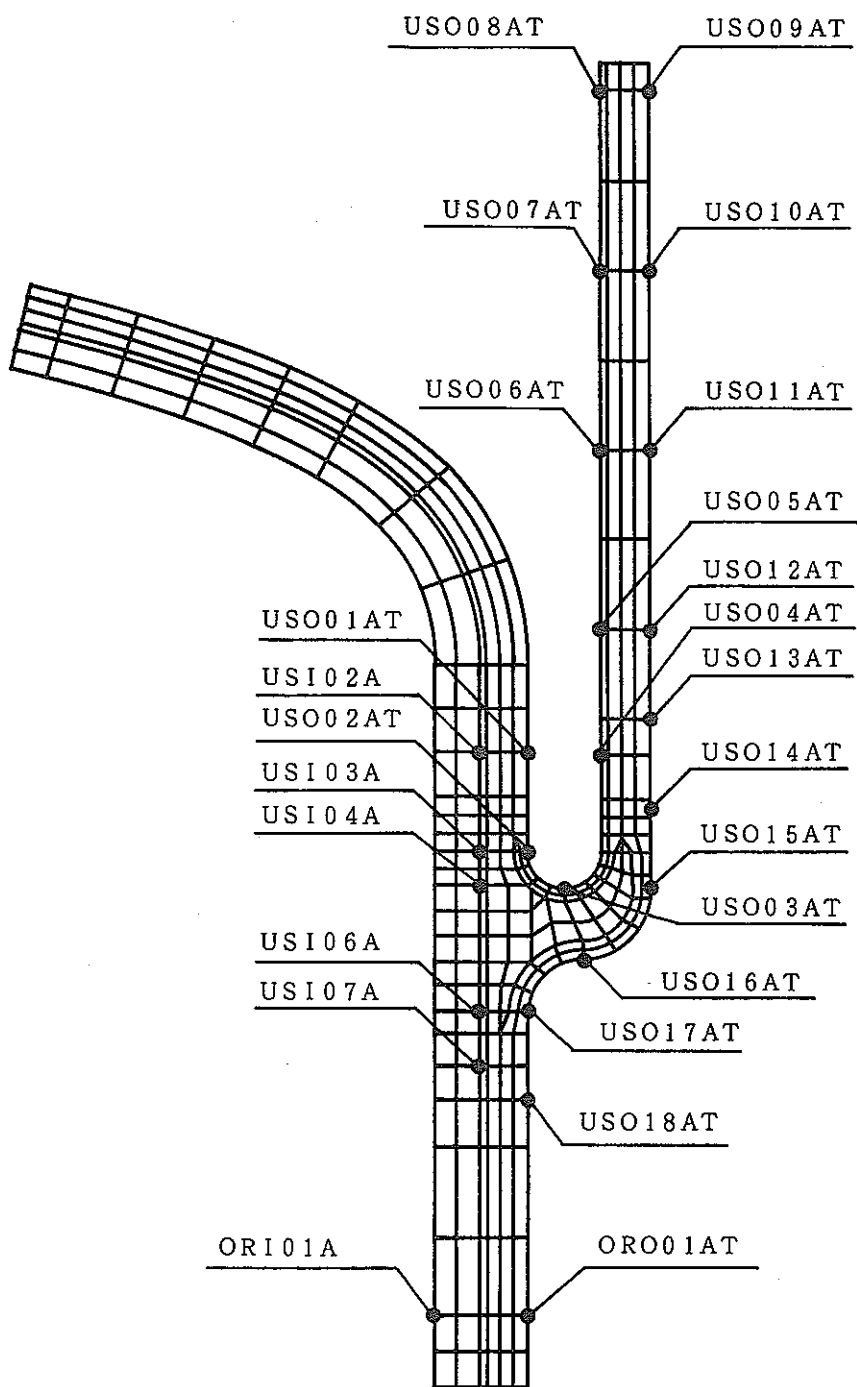


Fig.A-1 Layout of thermocouples

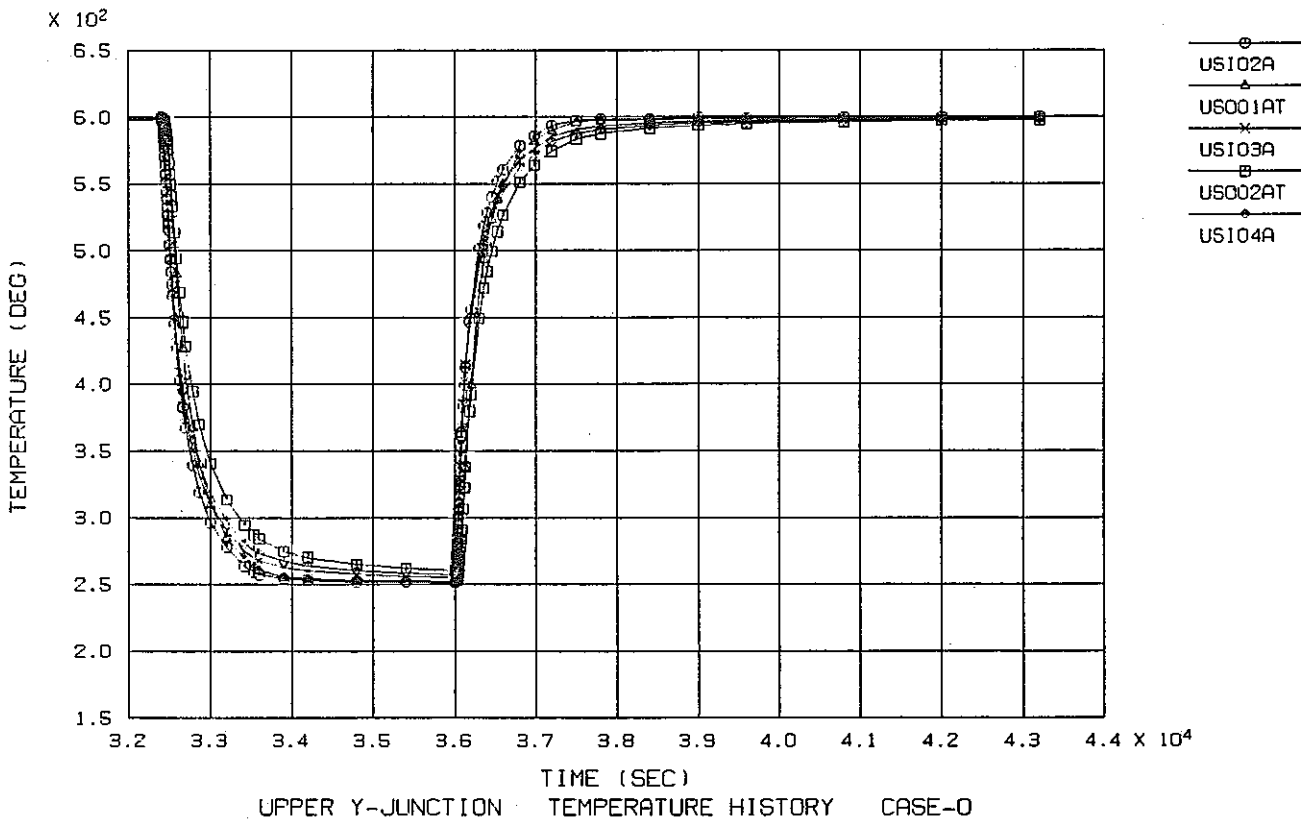
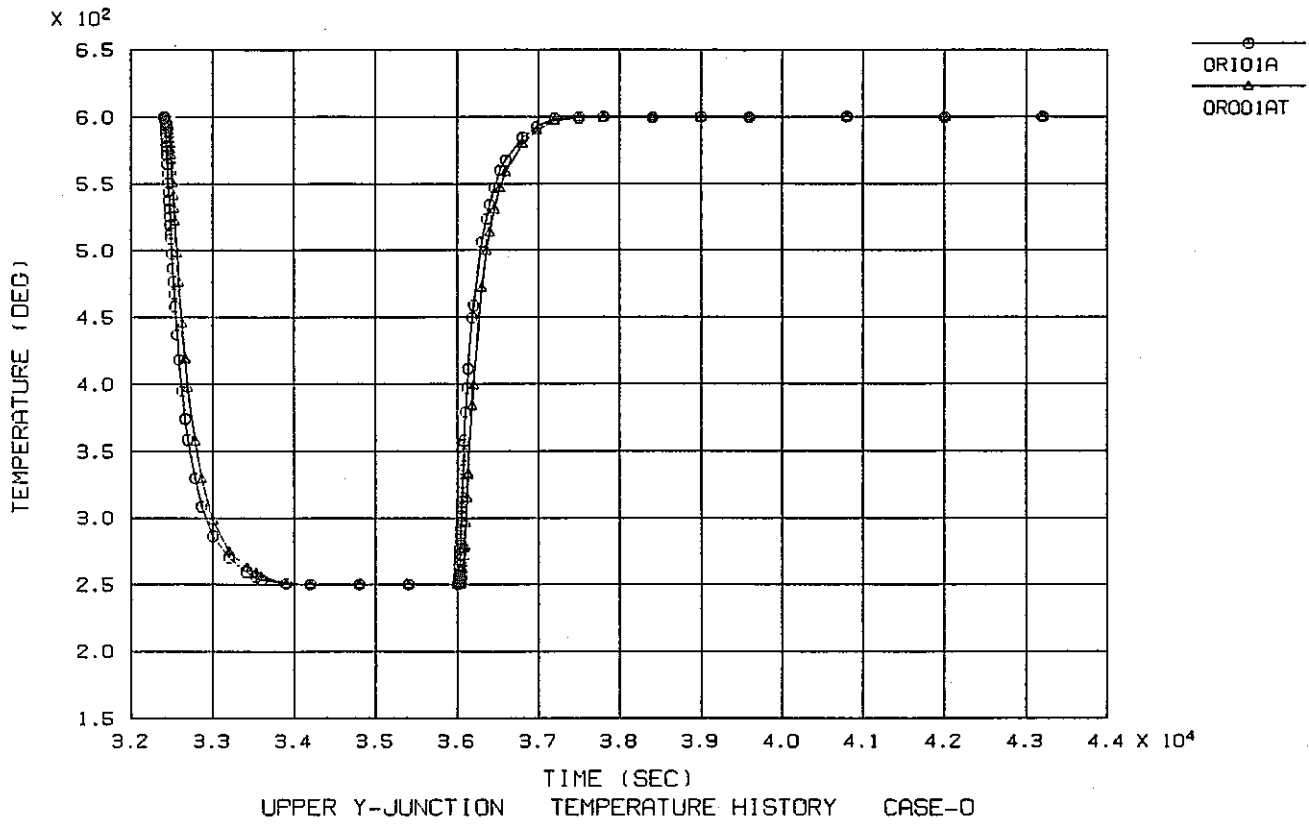


Fig.A-2(a) Temperature history at thermocouples location (Standard Case)

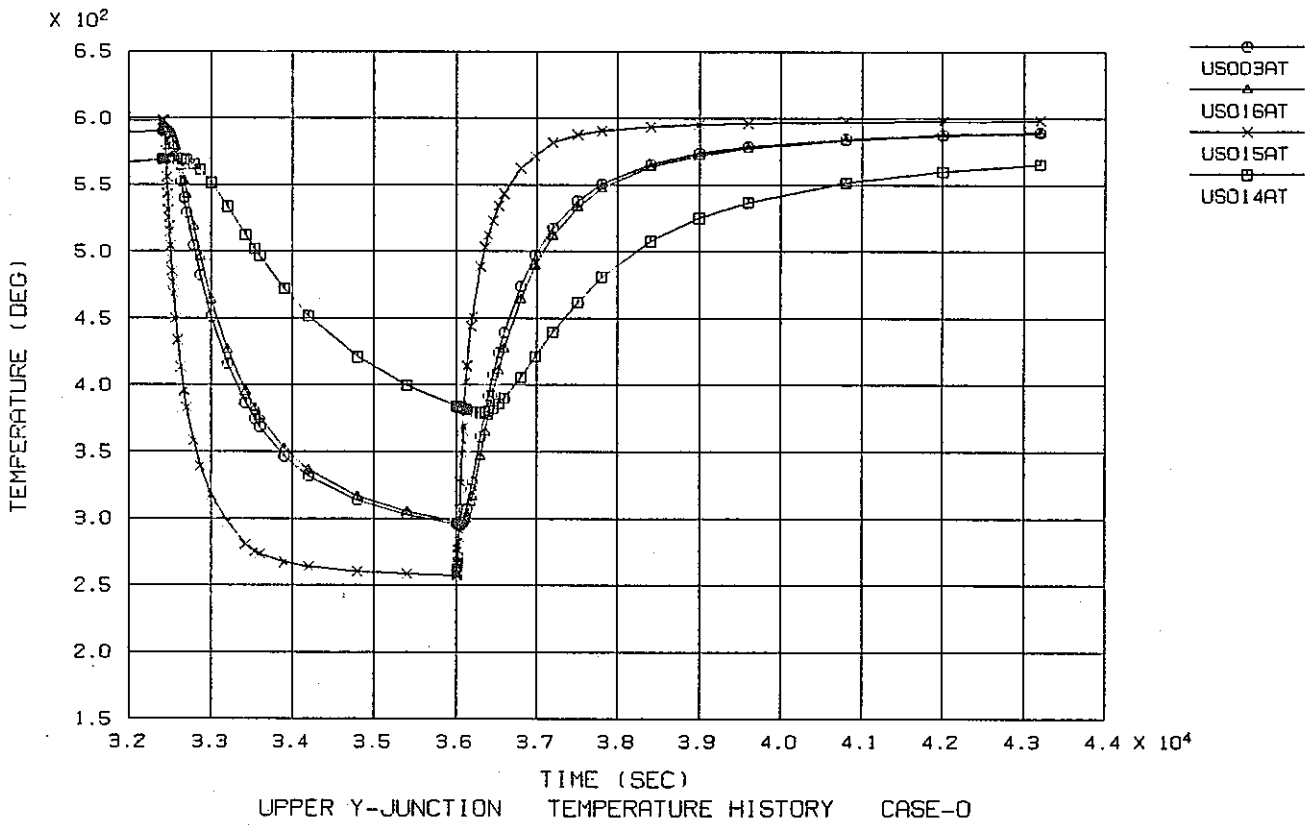
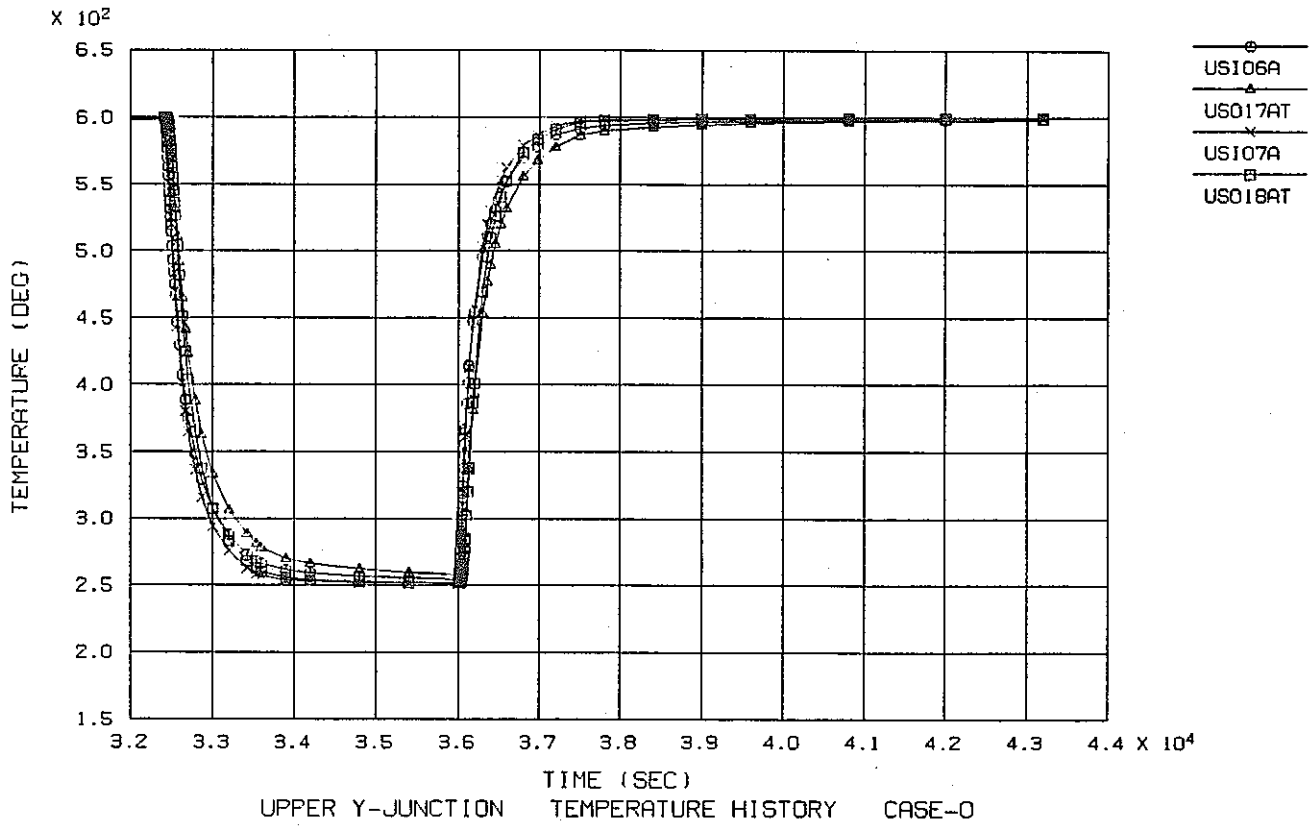


Fig. A-2(b) Temperature history at thermocouples location (Standard Case)

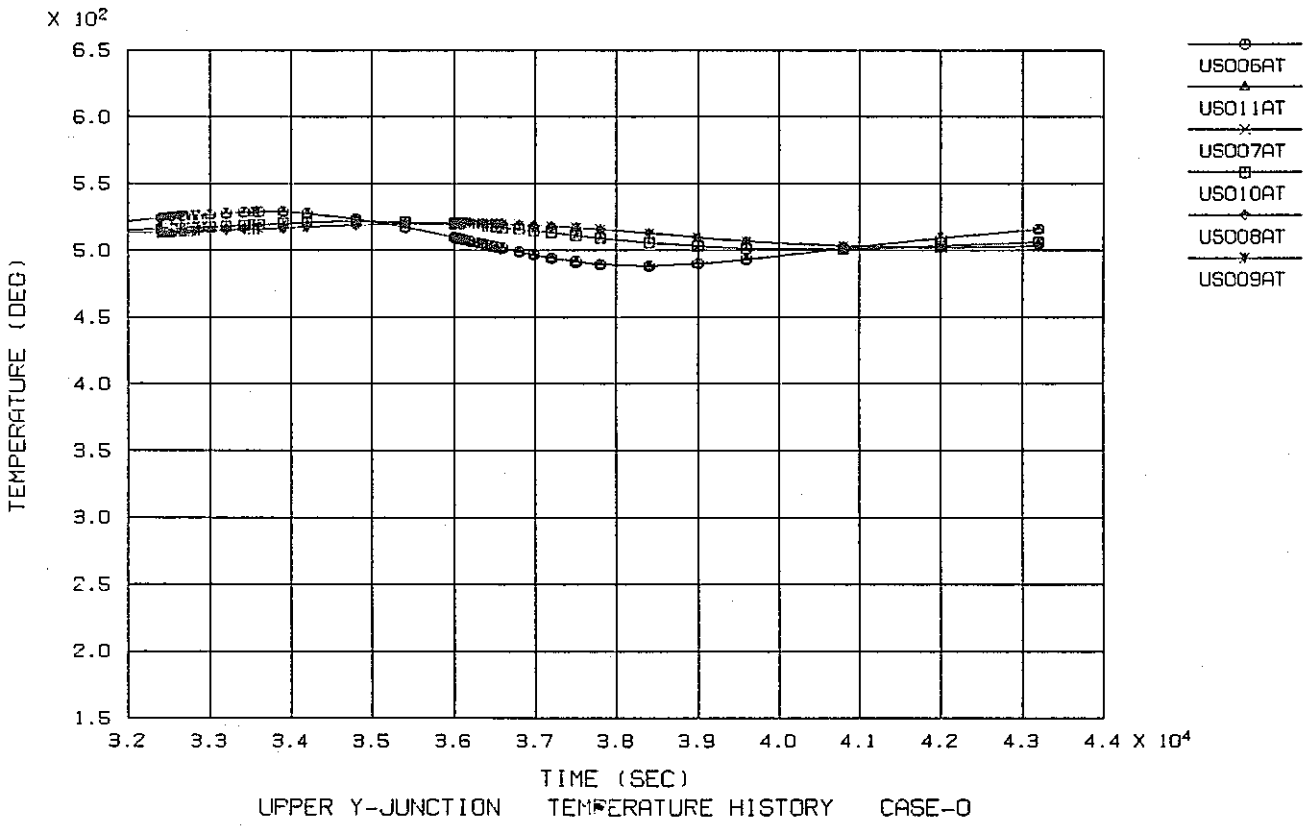
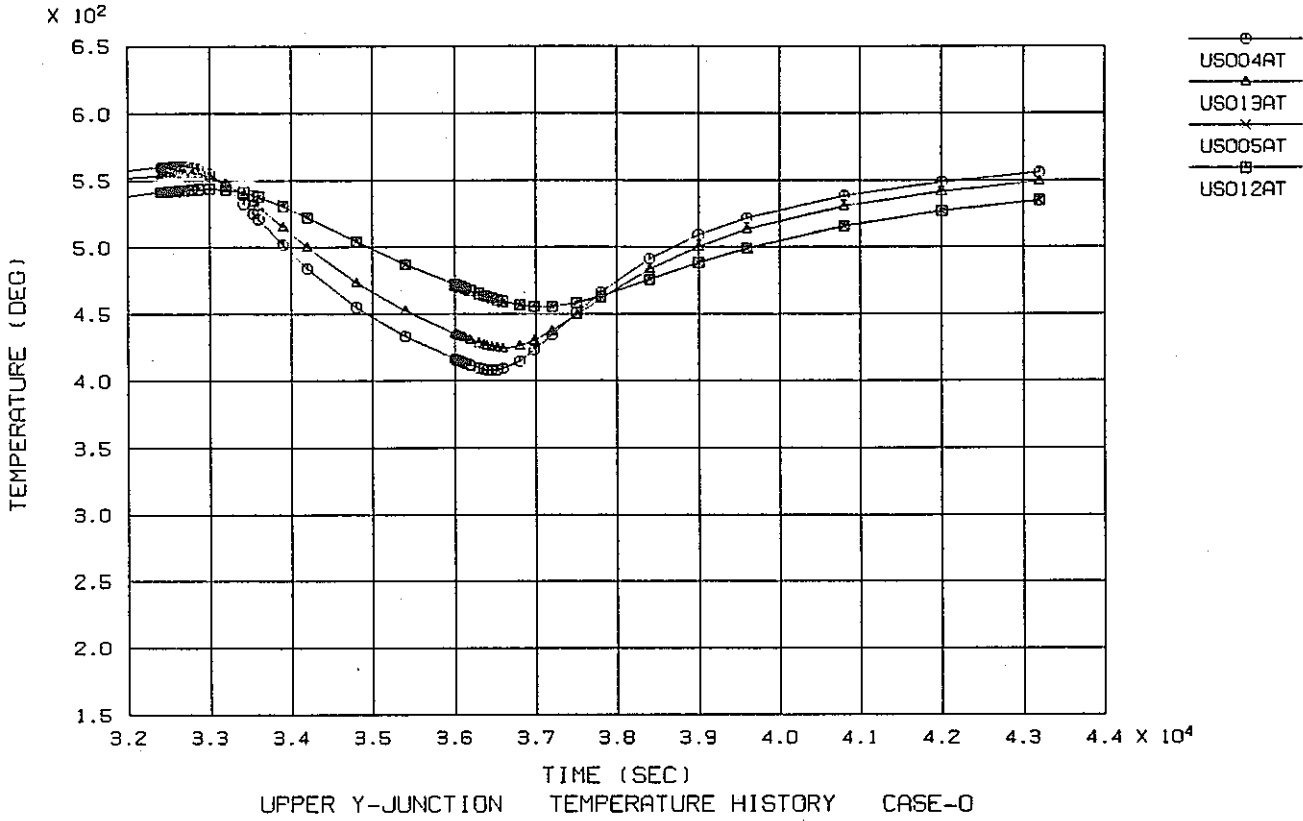


Fig. A-2(c) Temperature history at thermocouples location (Standard Case)

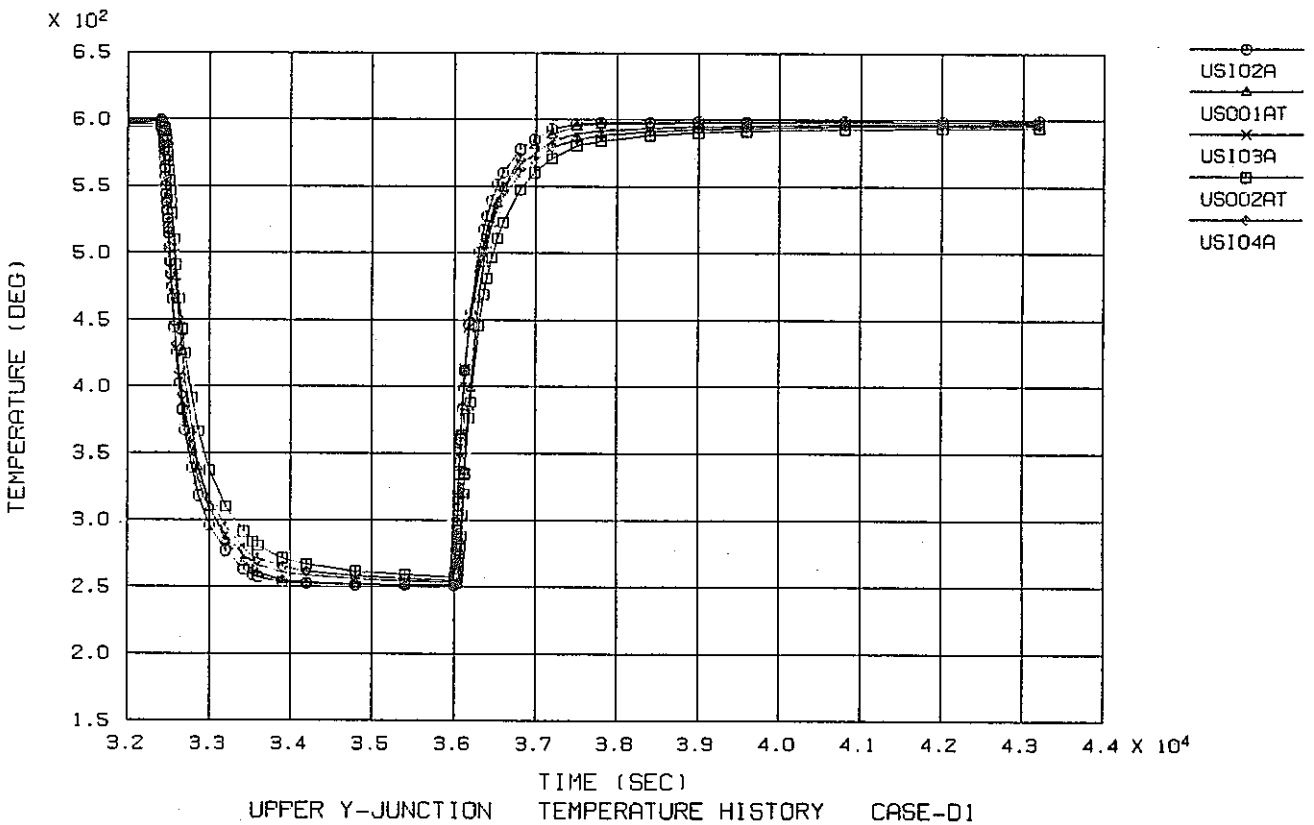
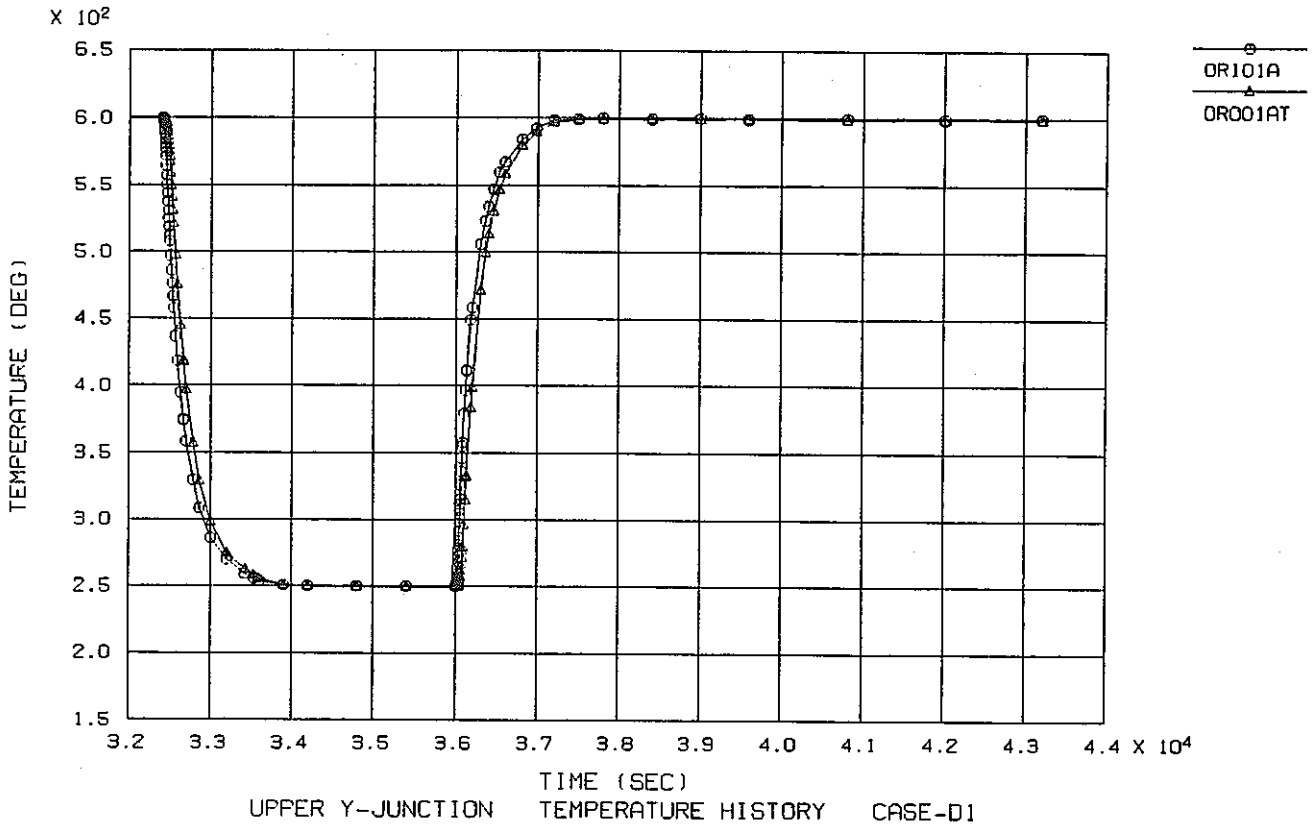


Fig. A-3(a) Temperature history at thermocouples location (Case D-1)

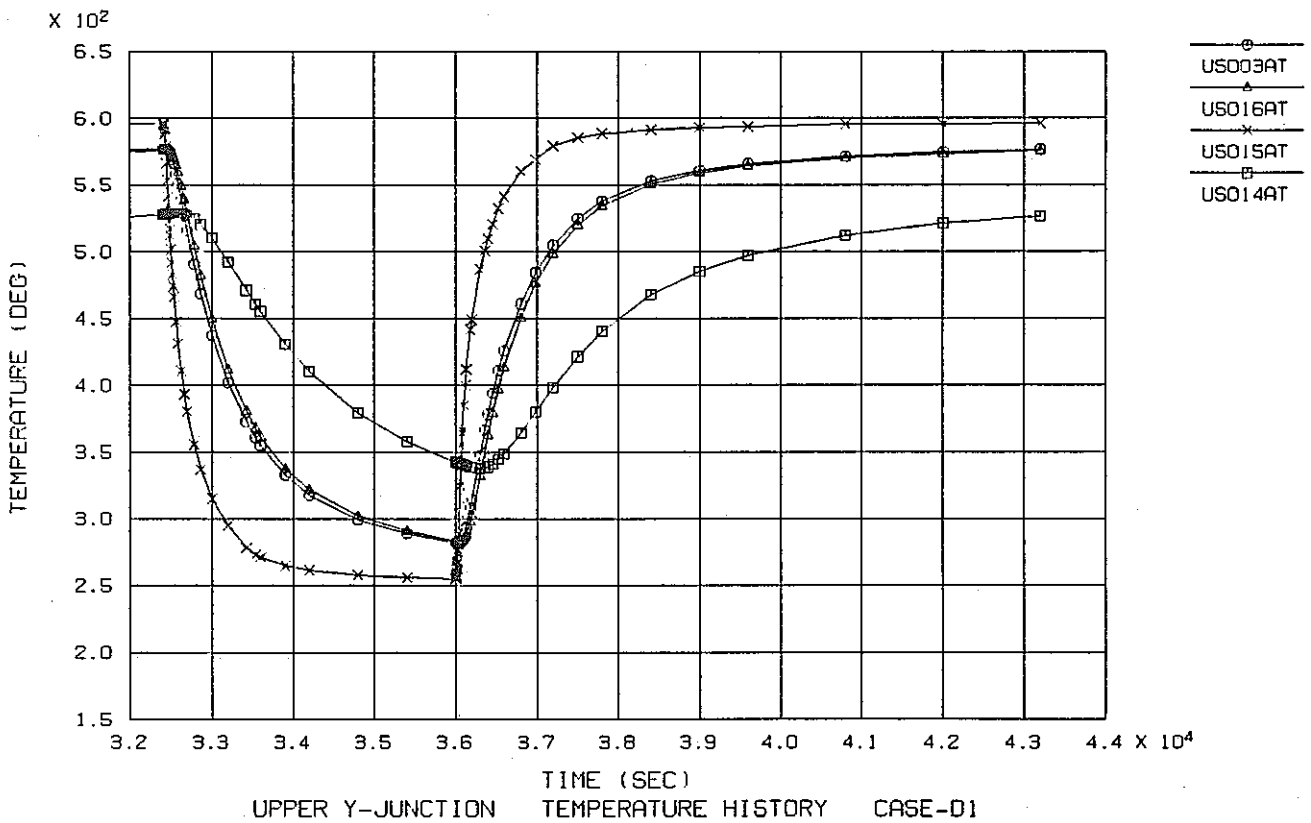
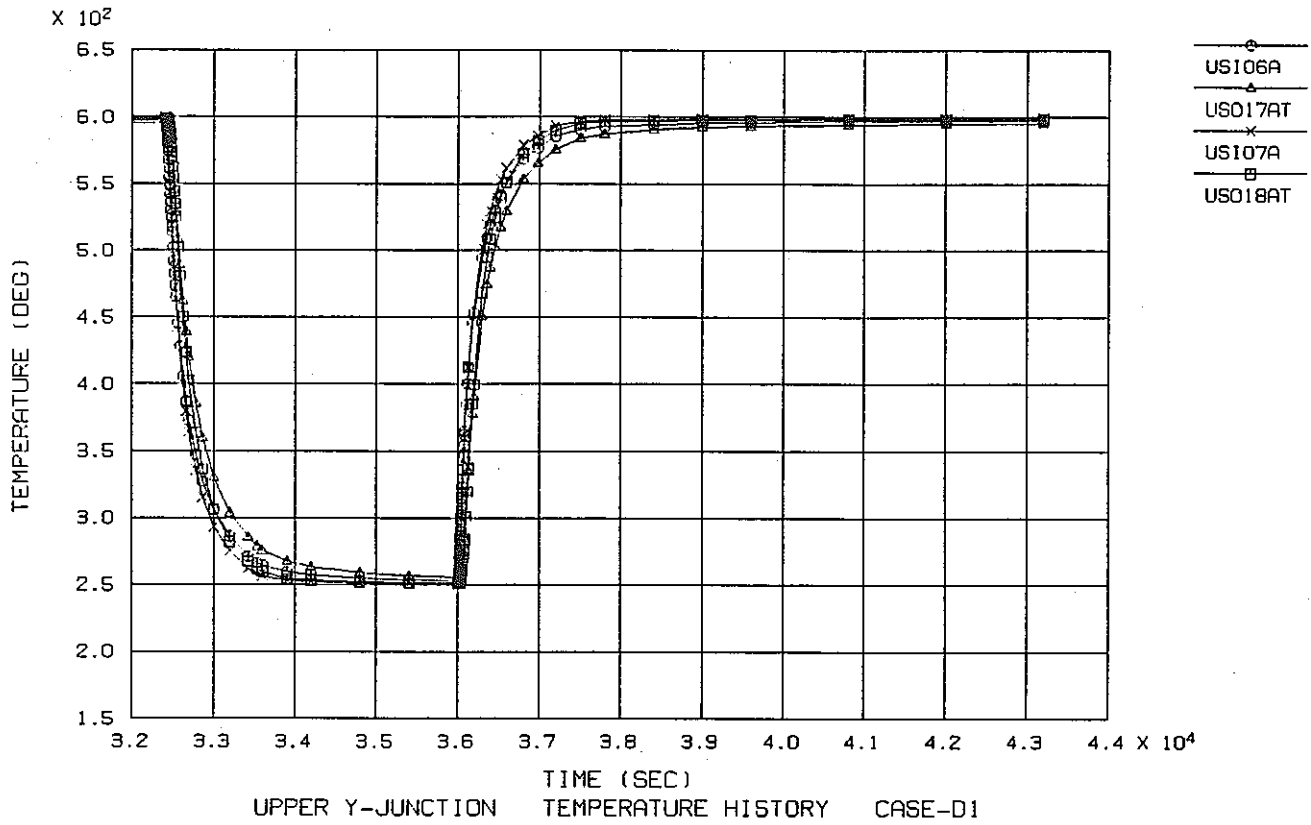


Fig. A-3(b) Temperature history at thermocouples location (Case D-1)

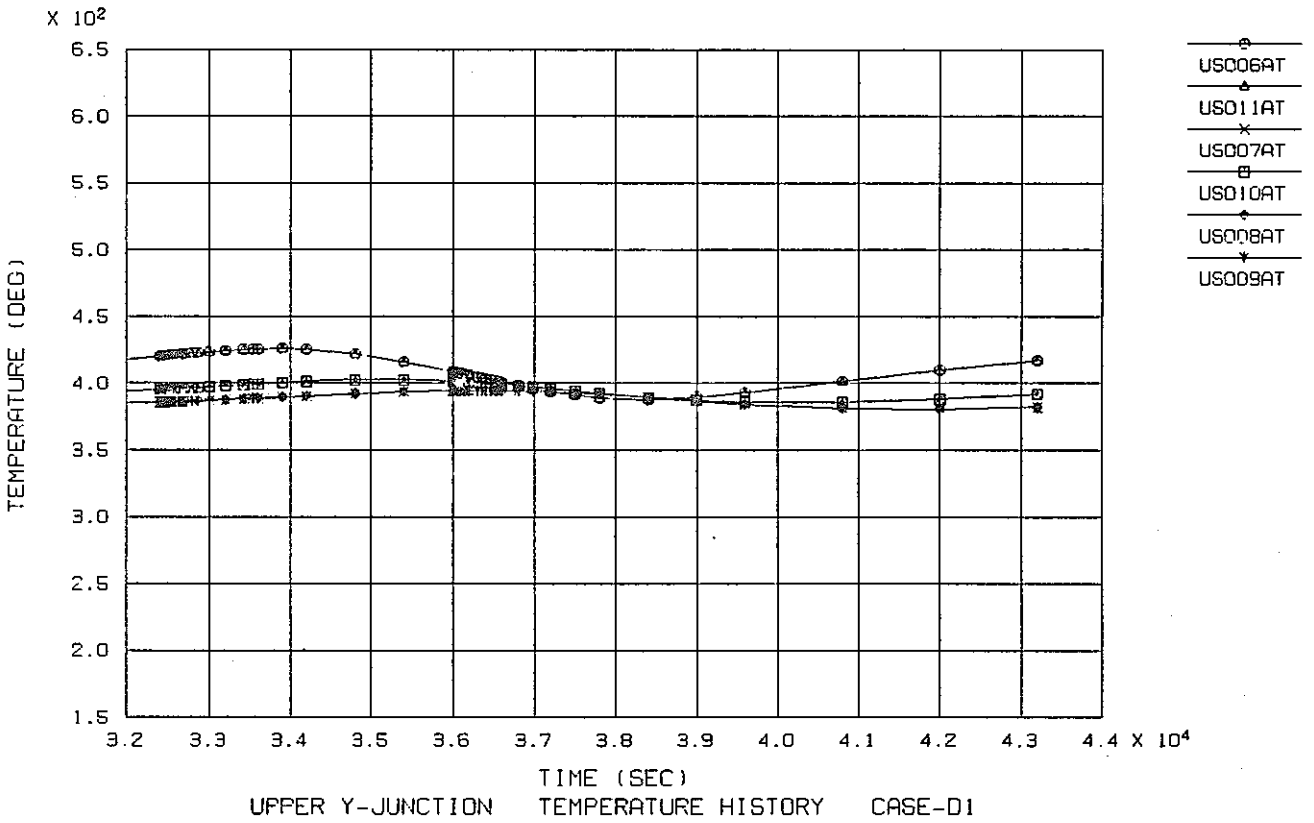
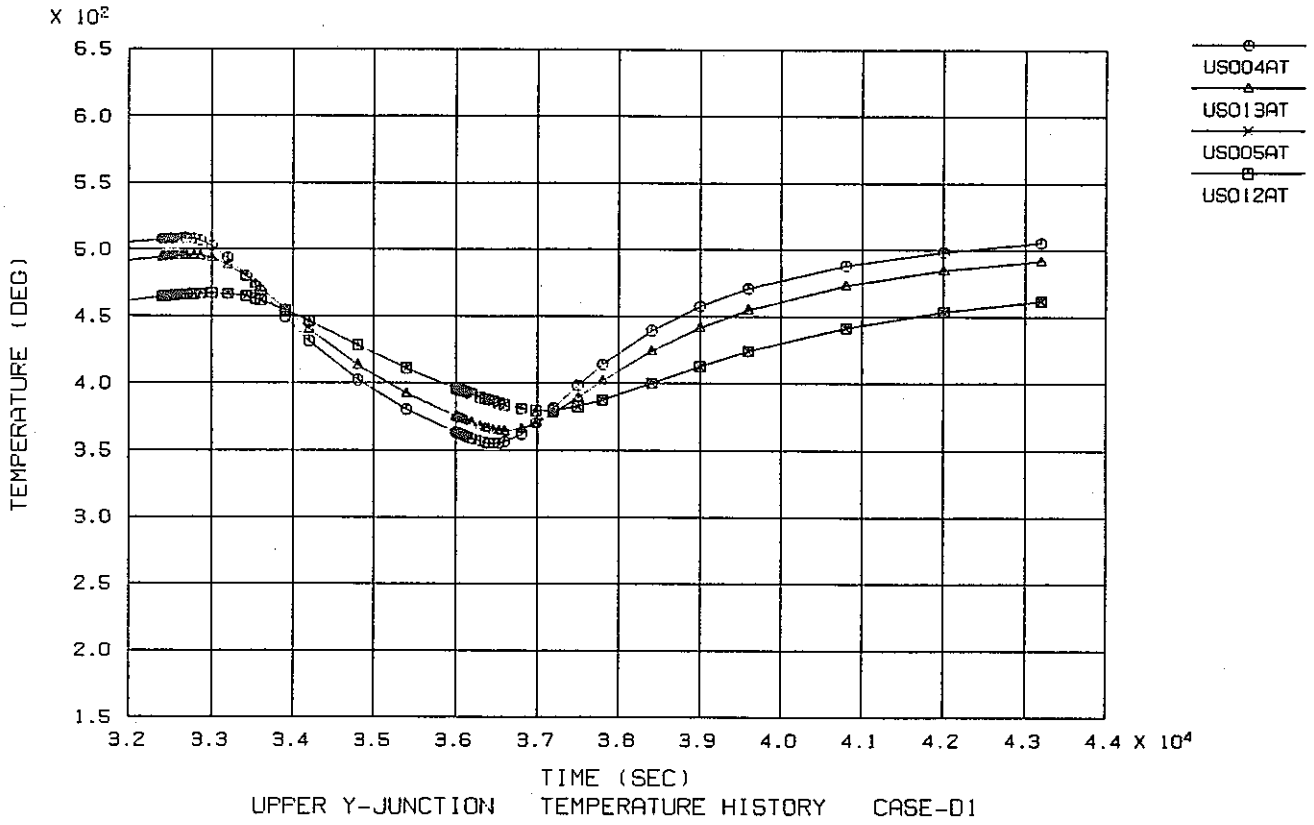


Fig. A-3(c) Temperature history at thermocouples location (Case D-1)

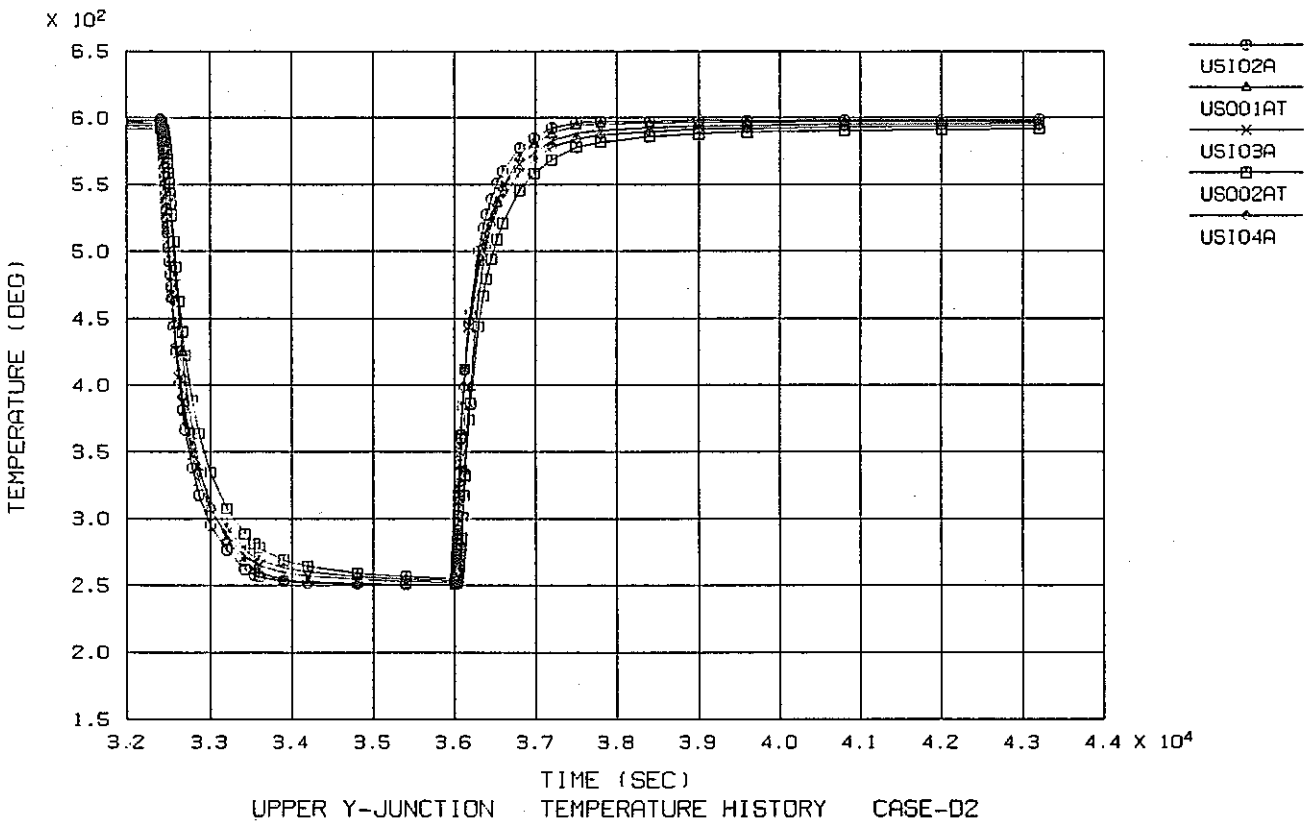
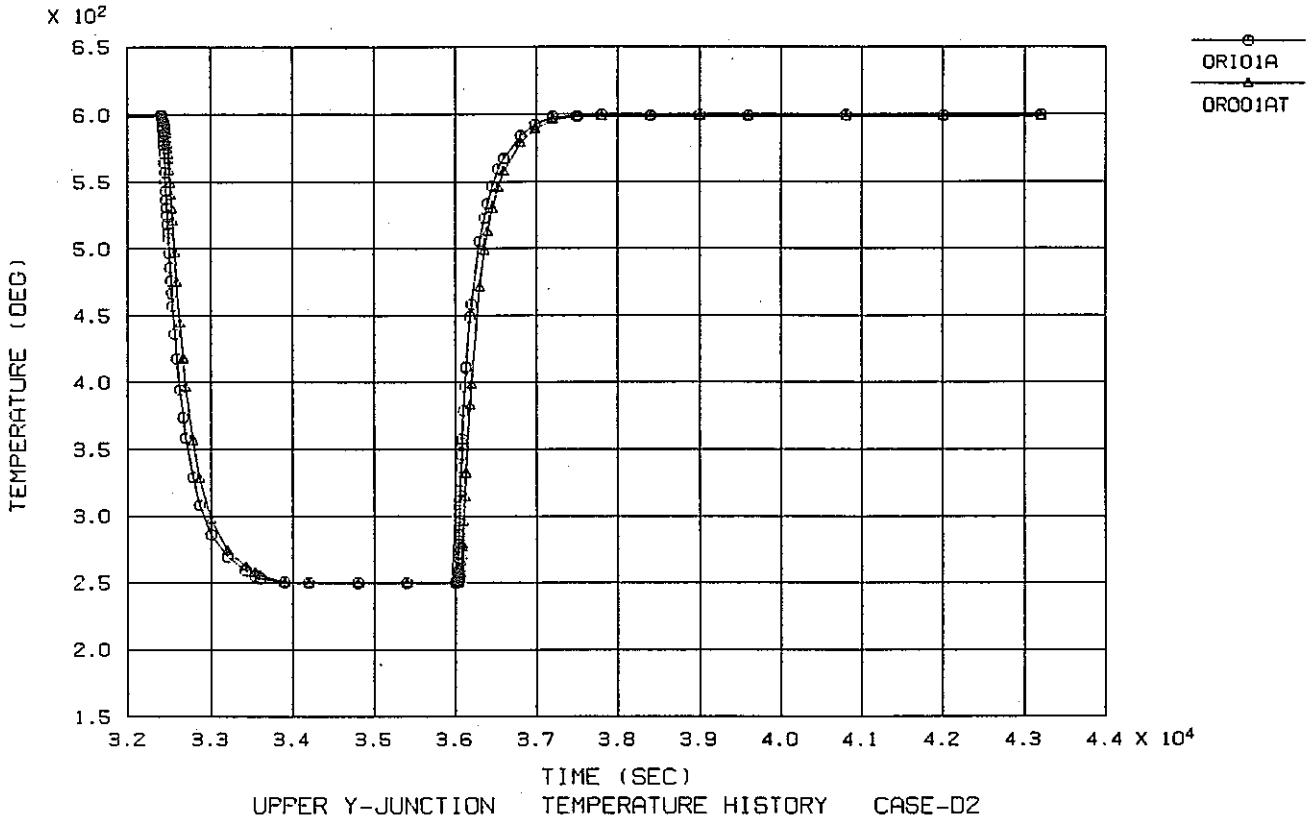


Fig. A-4(a) Temperature history at thermocouples location (Case D-2)

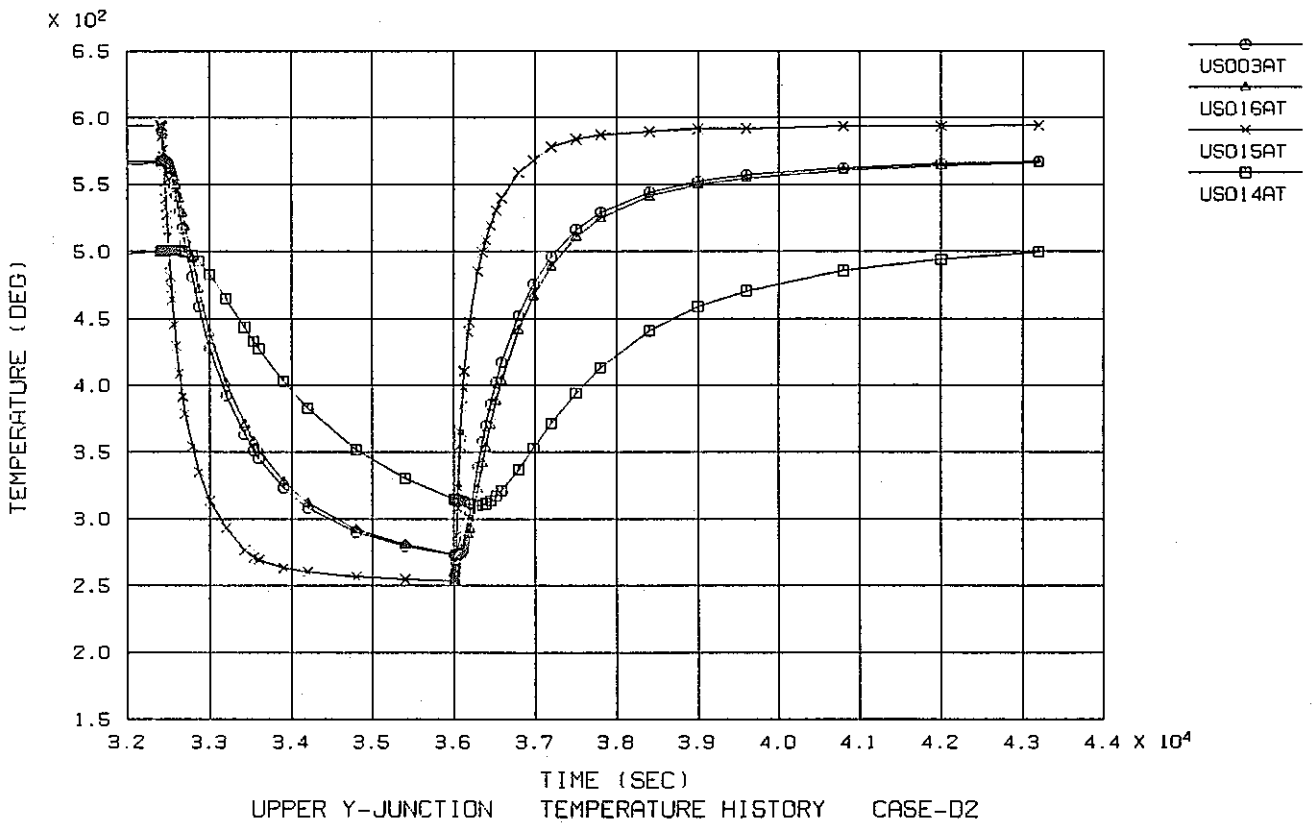
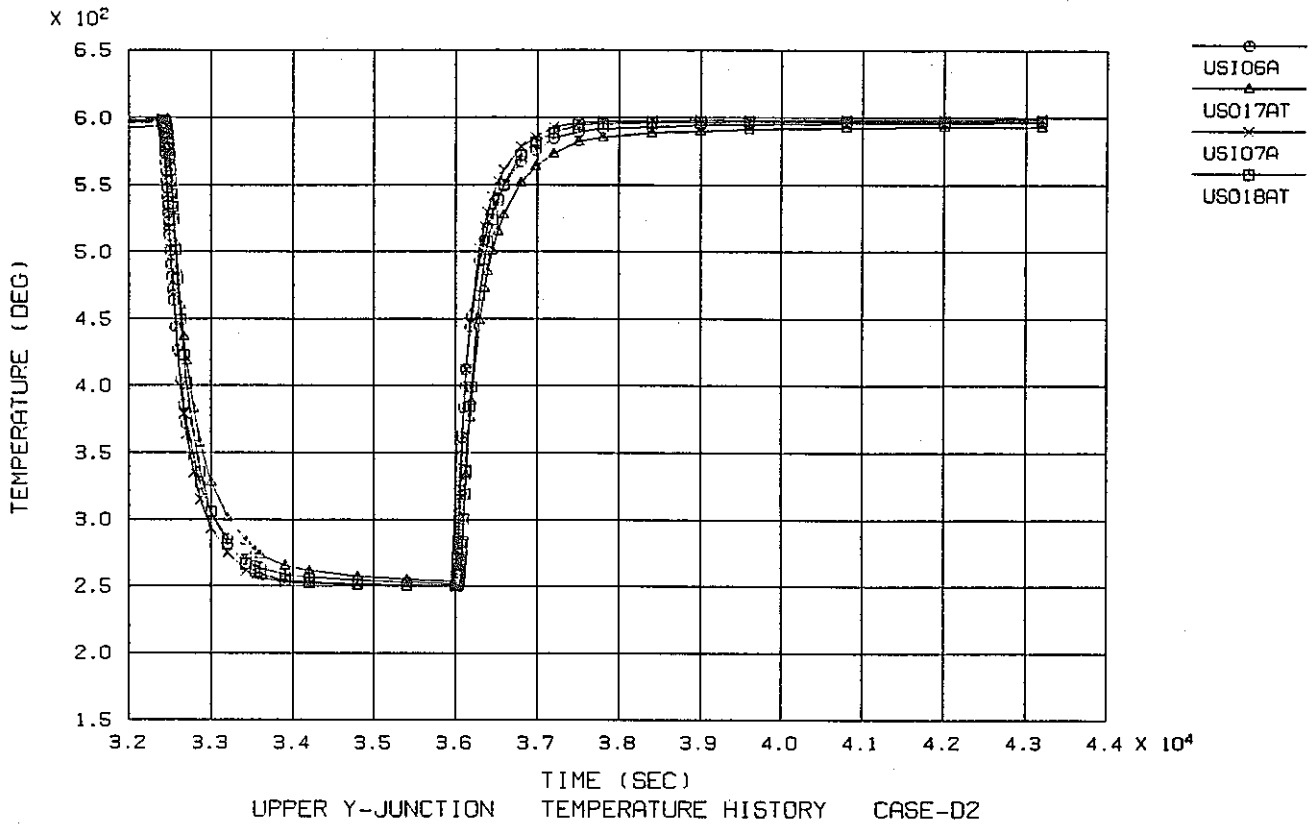


Fig. A-4(b) Temperature history at thermocouples location (Case D-2)

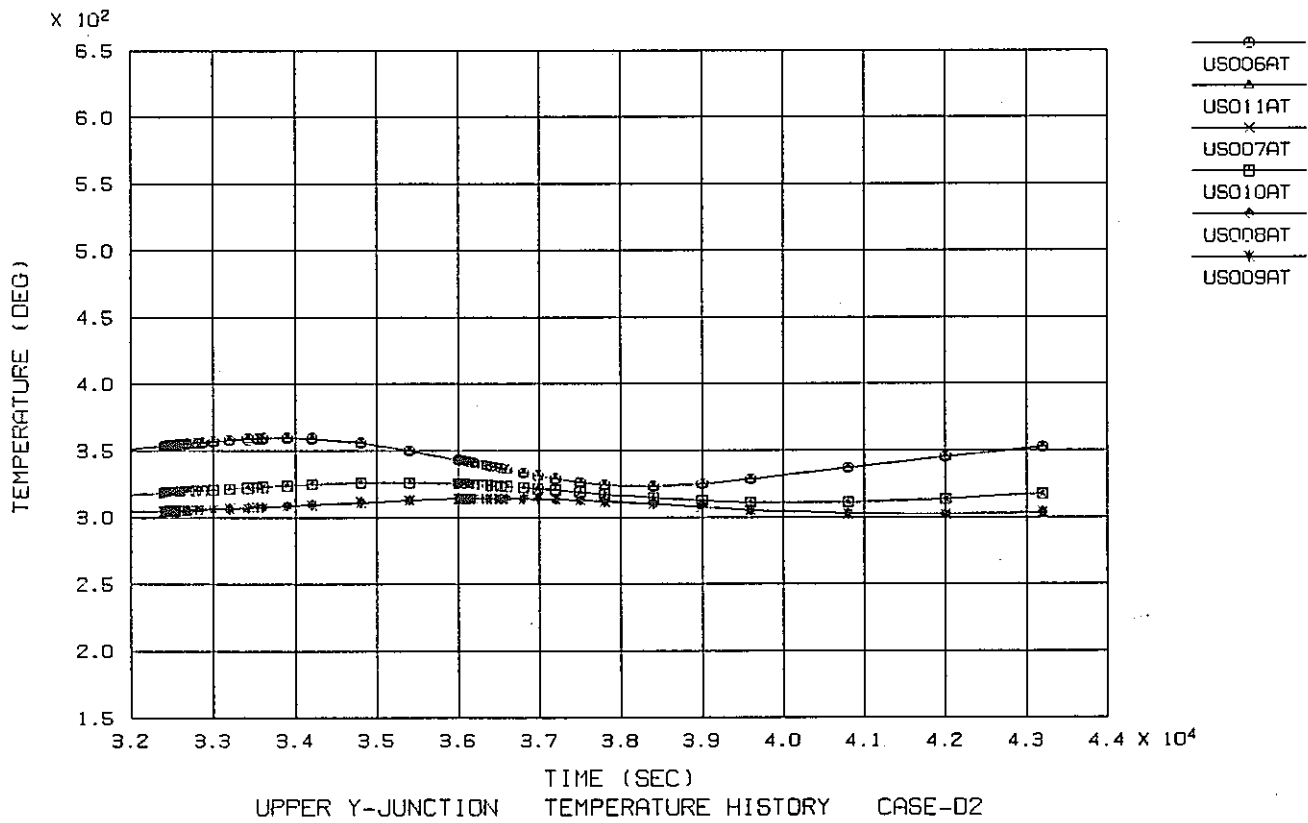
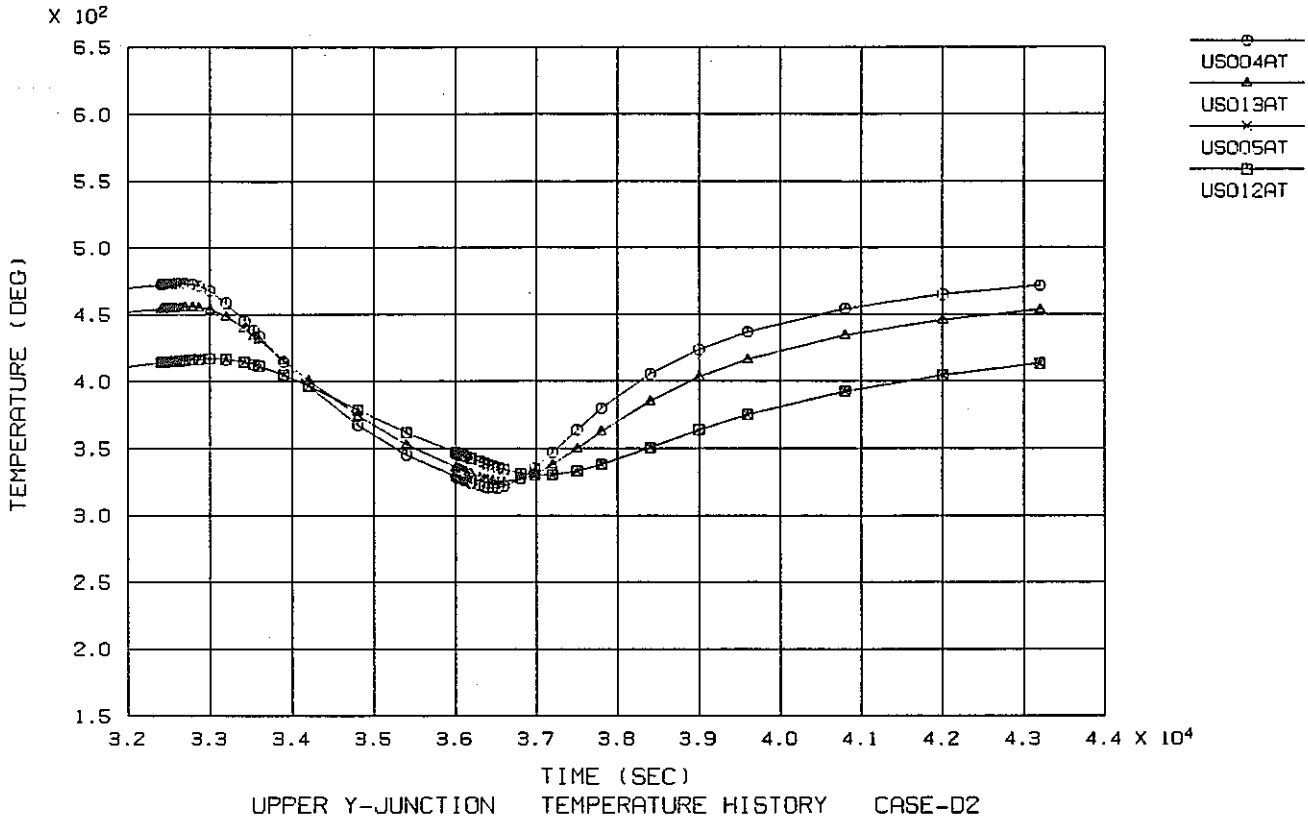


Fig. A-4(c) Temperature history at thermocouples location (Case D-2)

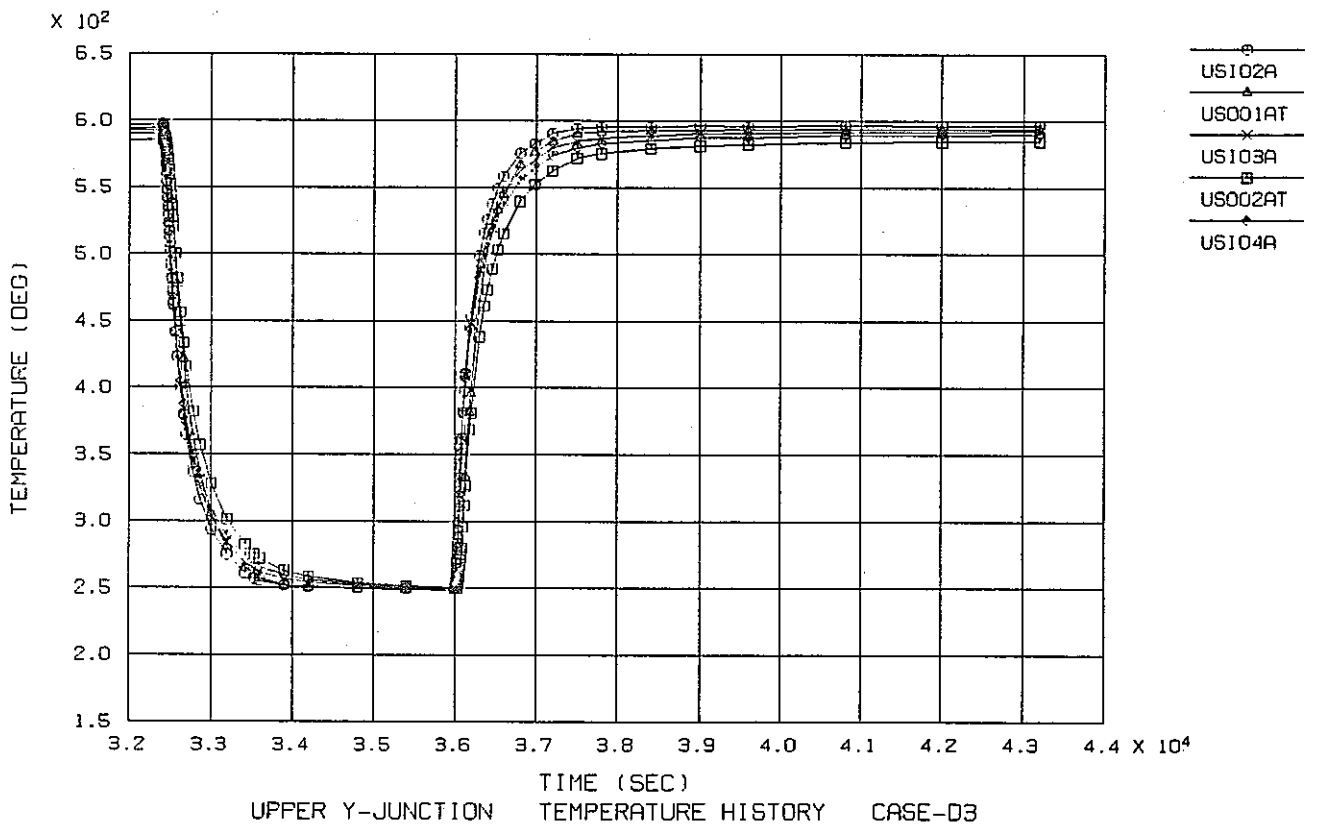
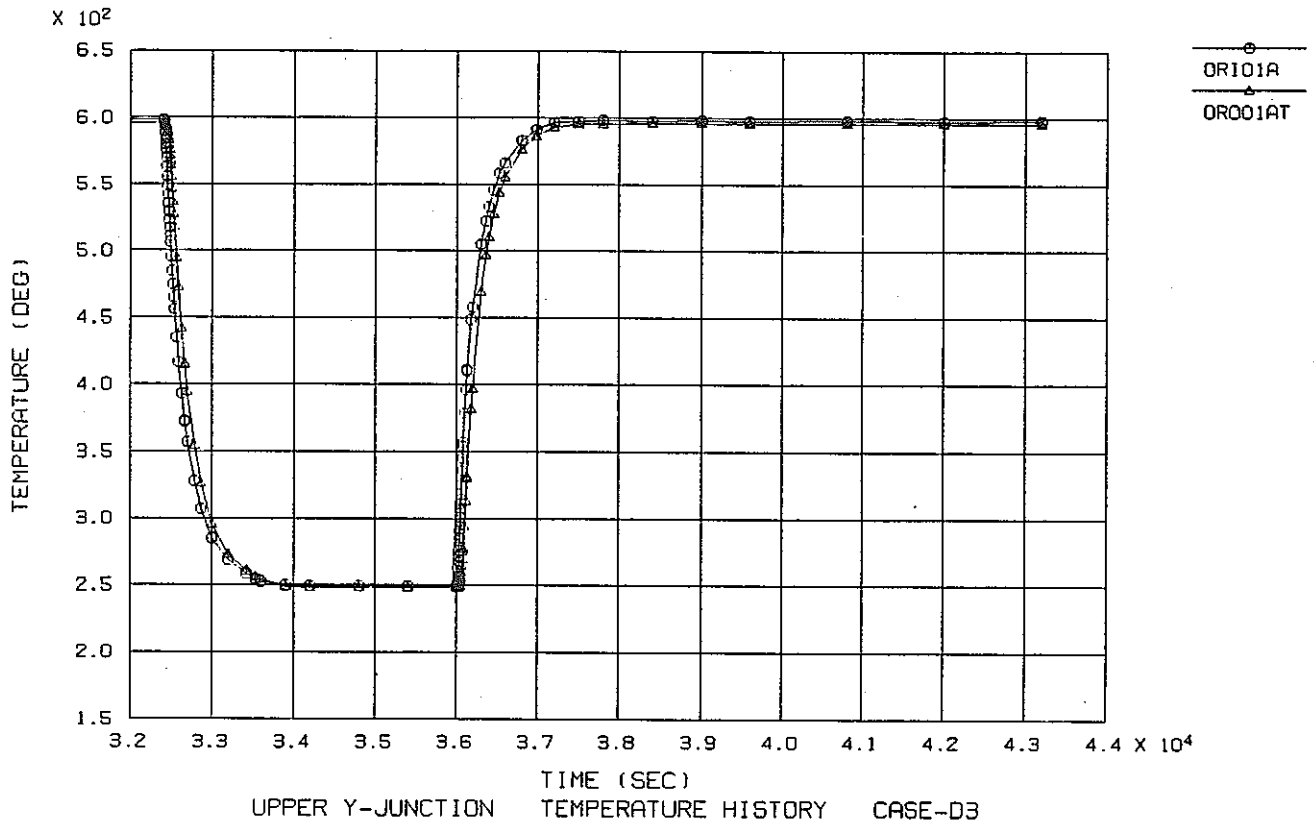


Fig. A-5(a) Temperature history at thermocouples location (Case D-3)

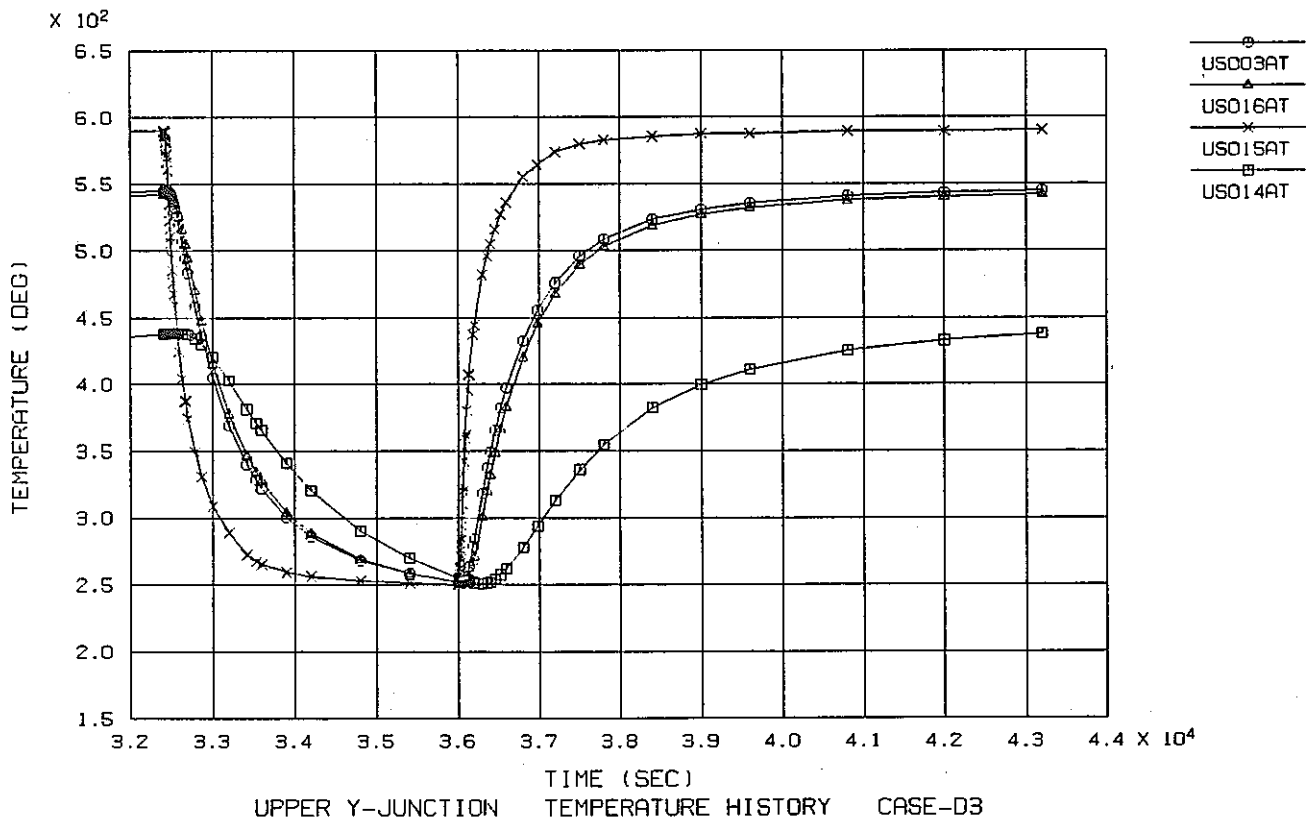
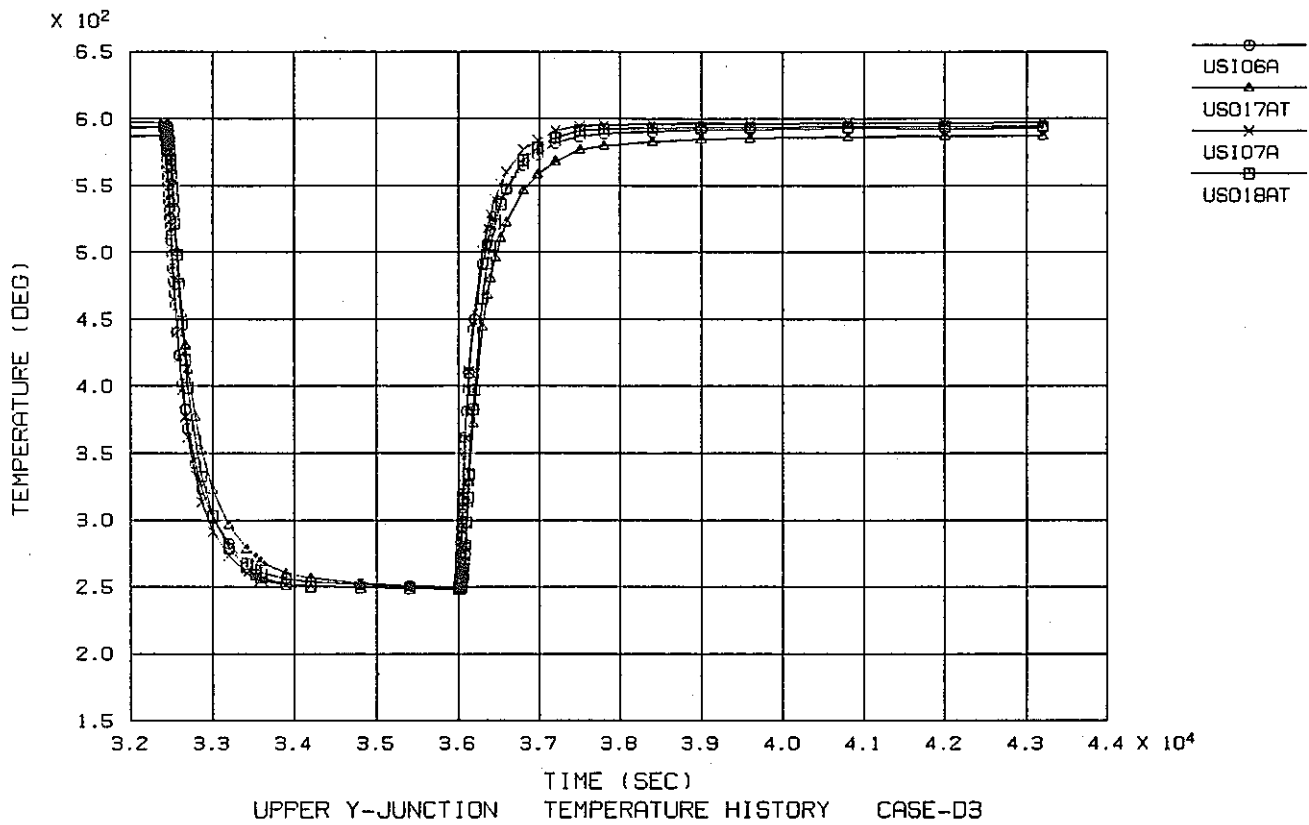


Fig.A-5(b) Temperature history at thermocouples location (Case D-3)

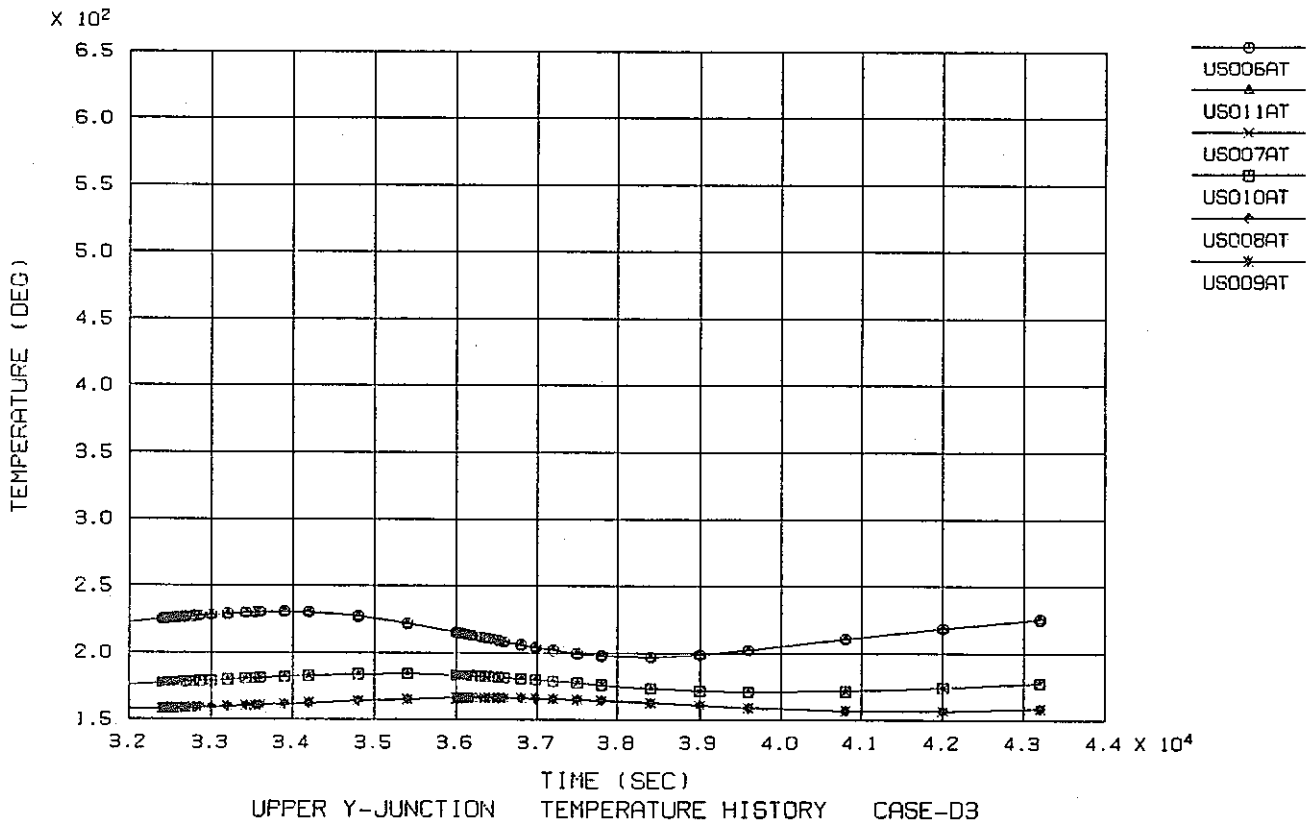
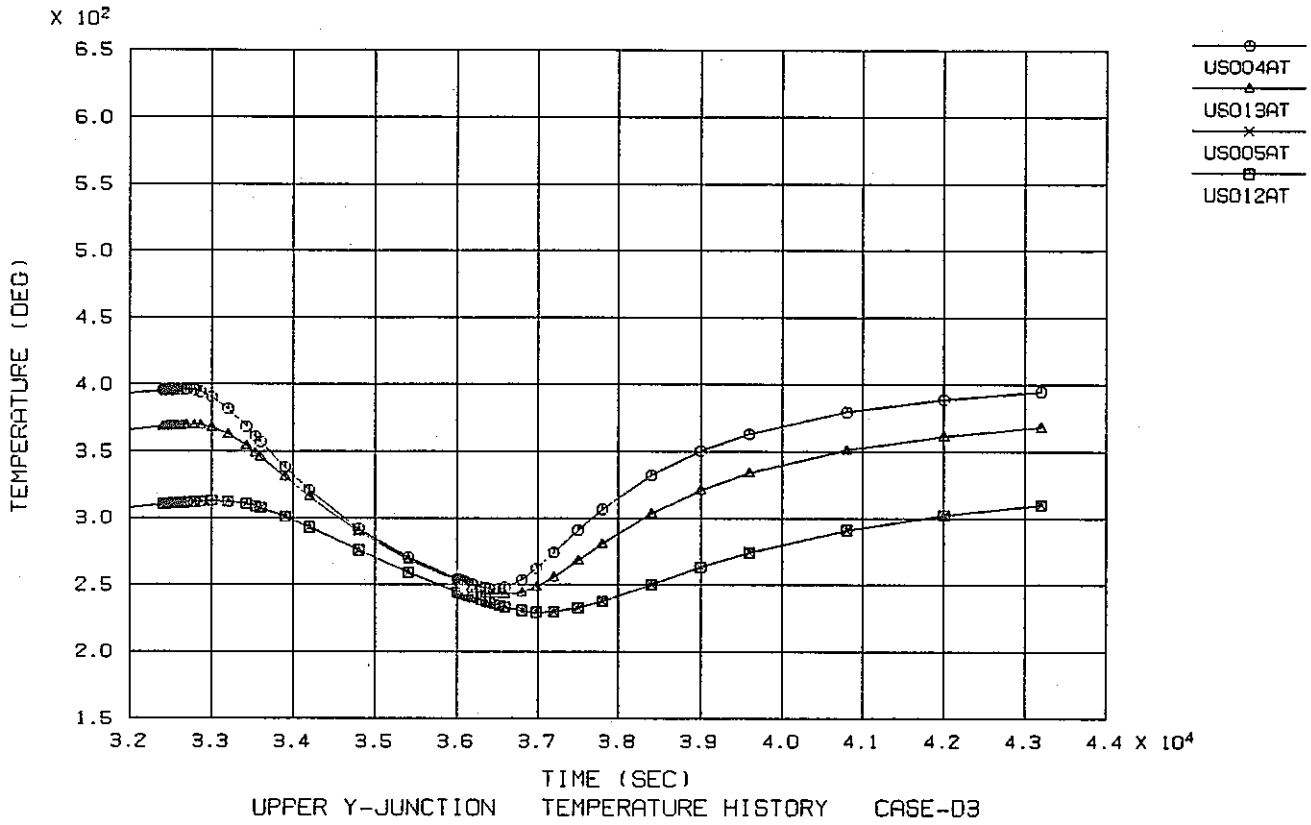


Fig. A-5(c) Temperature history at thermocouples location (Case D-3)

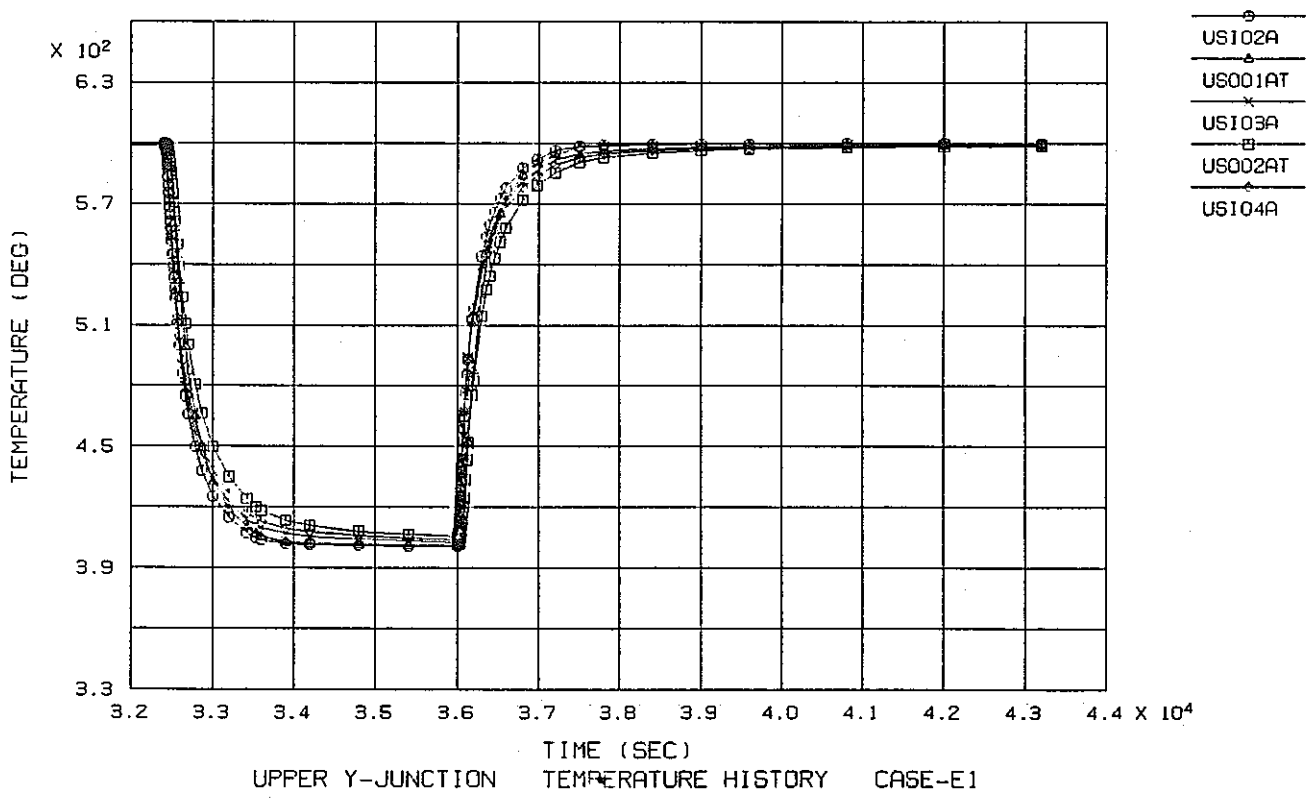
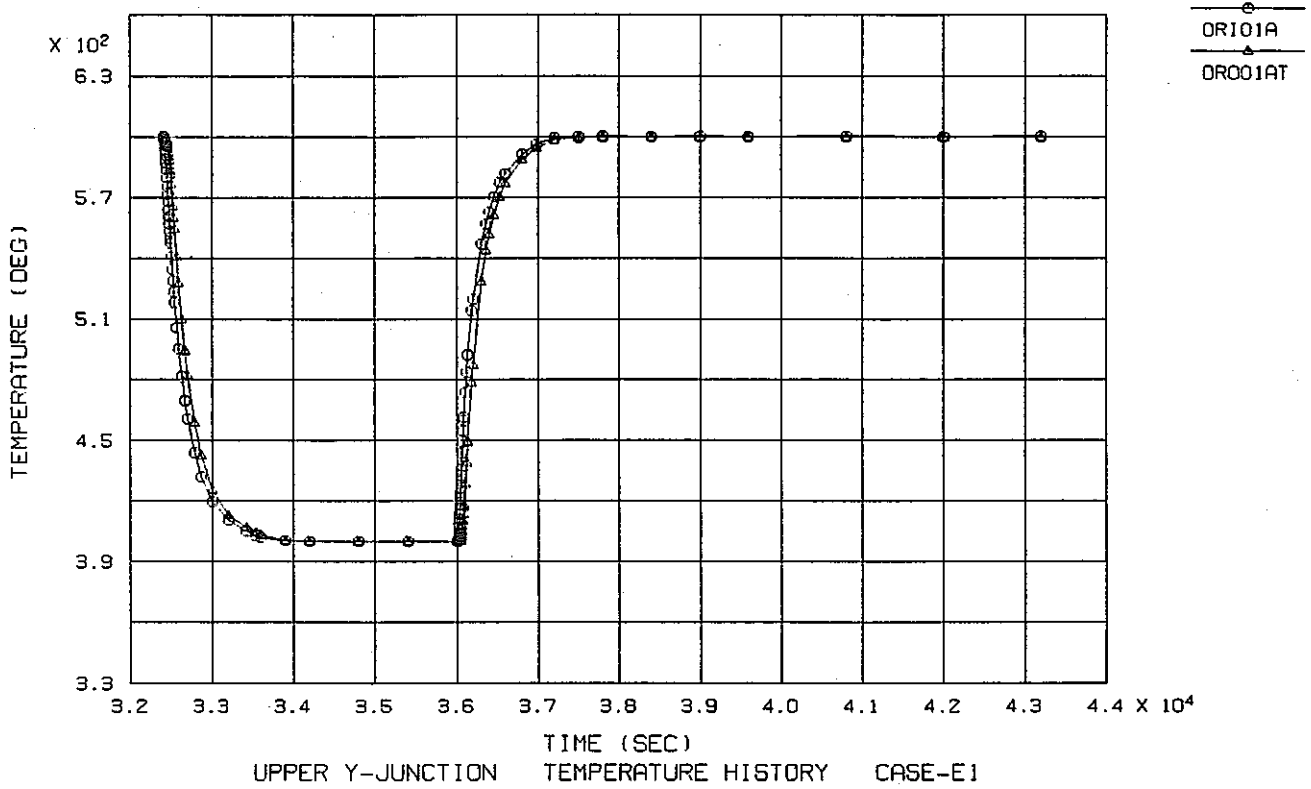


Fig. A-6(a) Temperature history at thermocouples location (Case E-1)

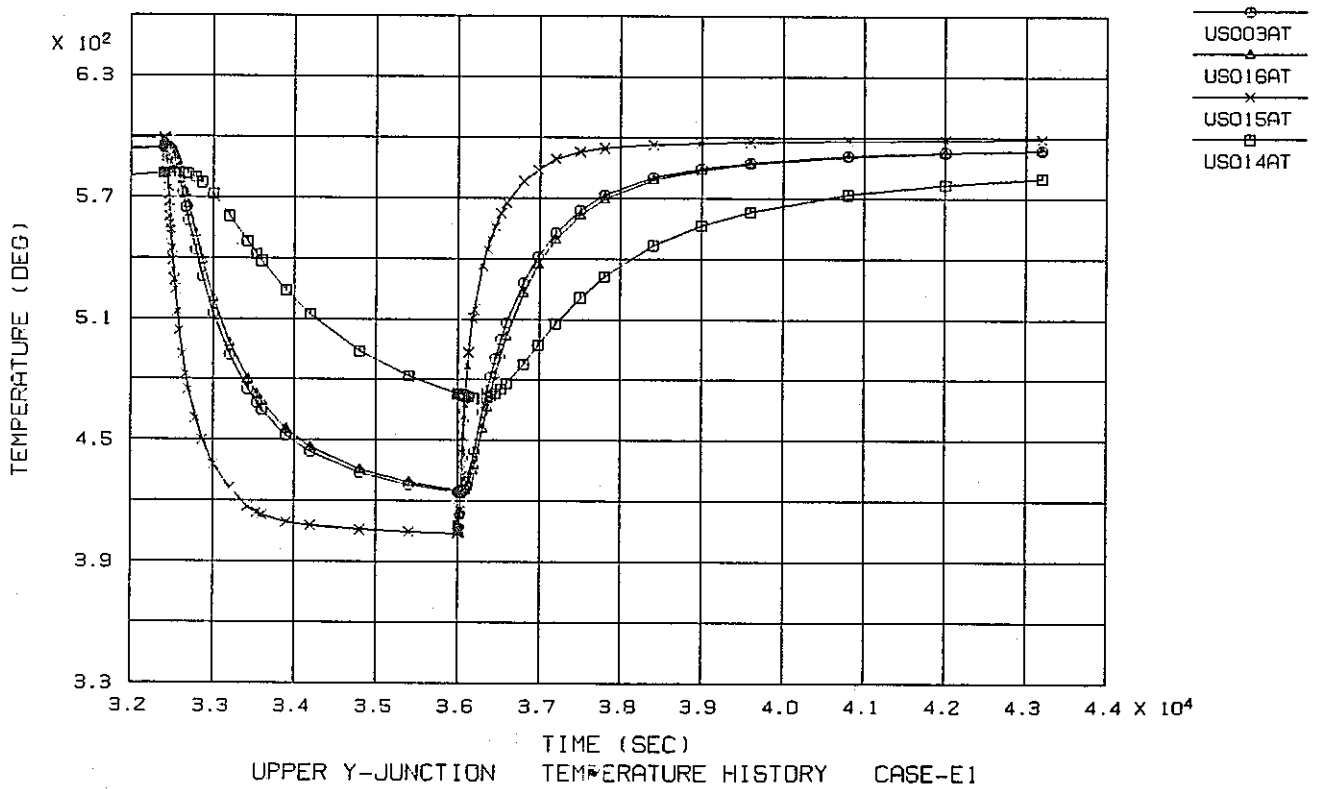
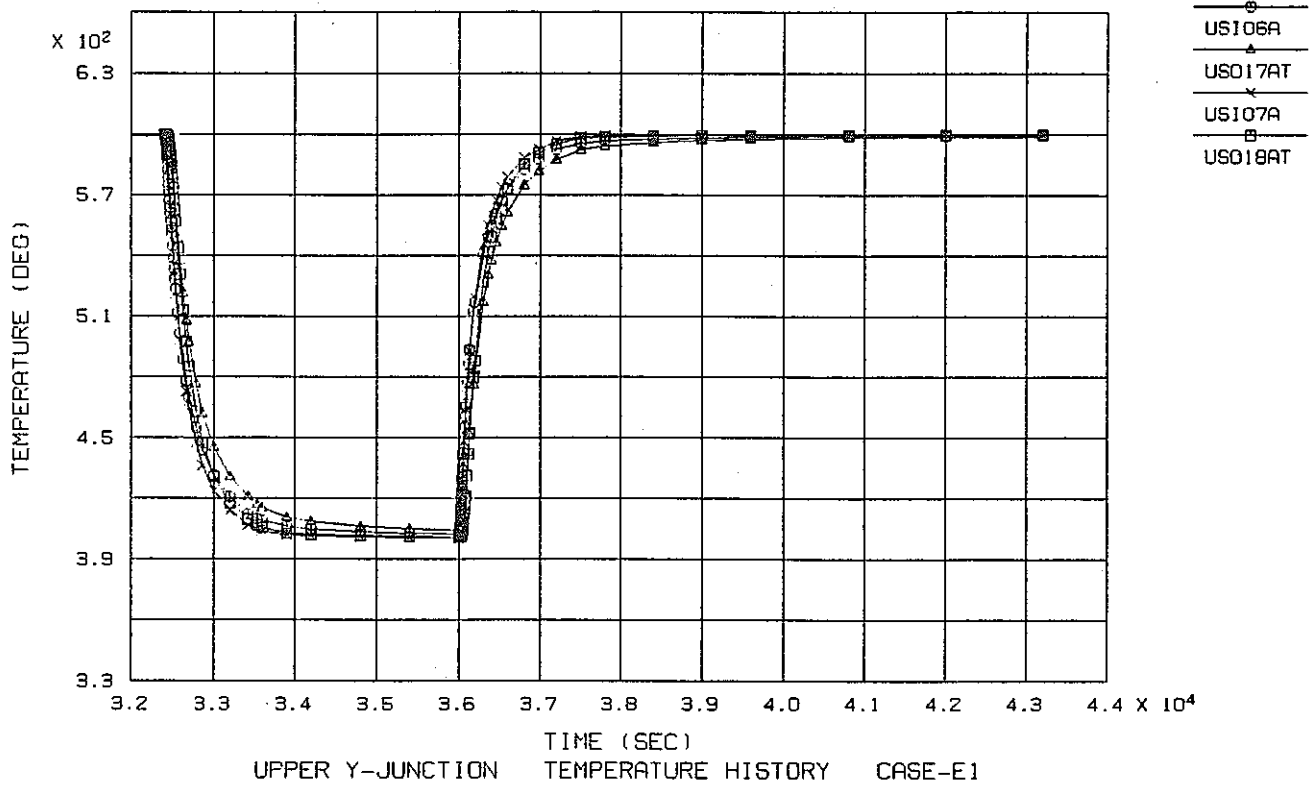


Fig. A-6(b) Temperature history at thermocouples location (Case E-1)

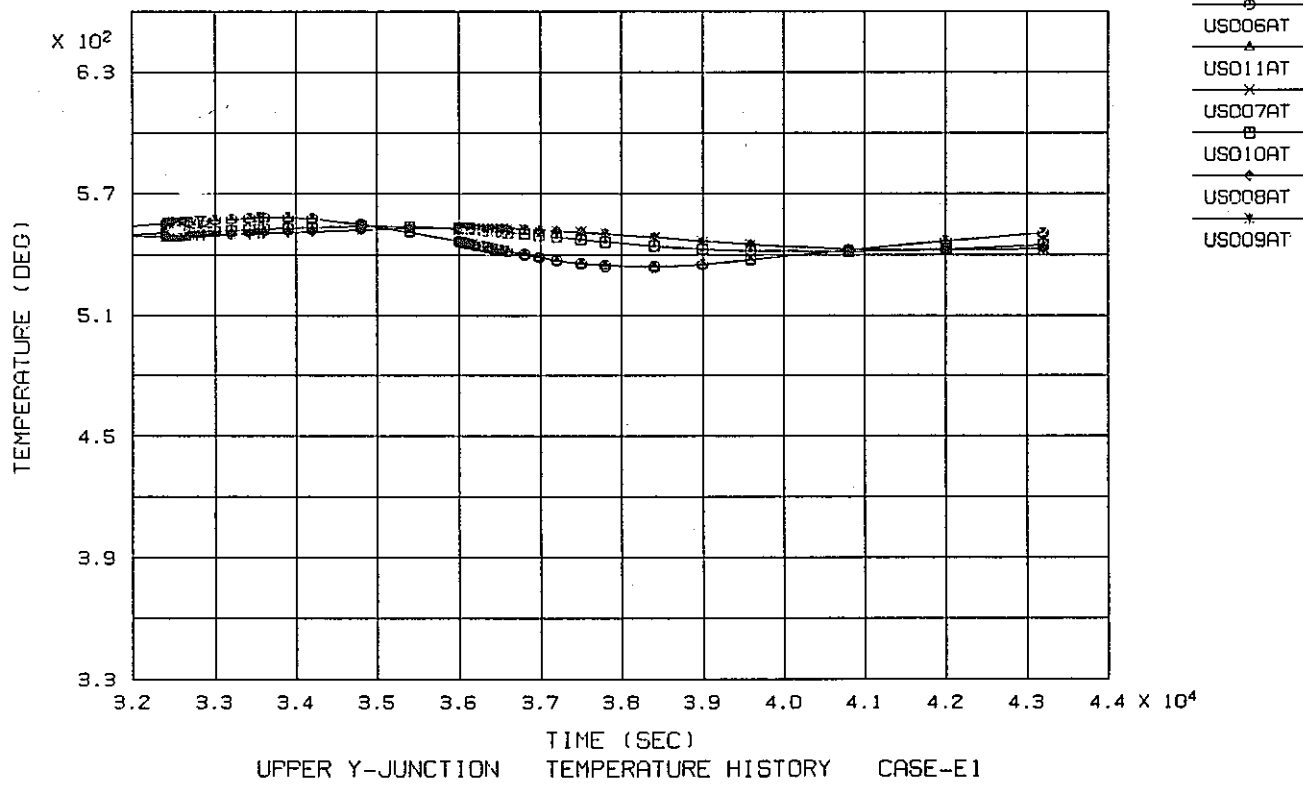
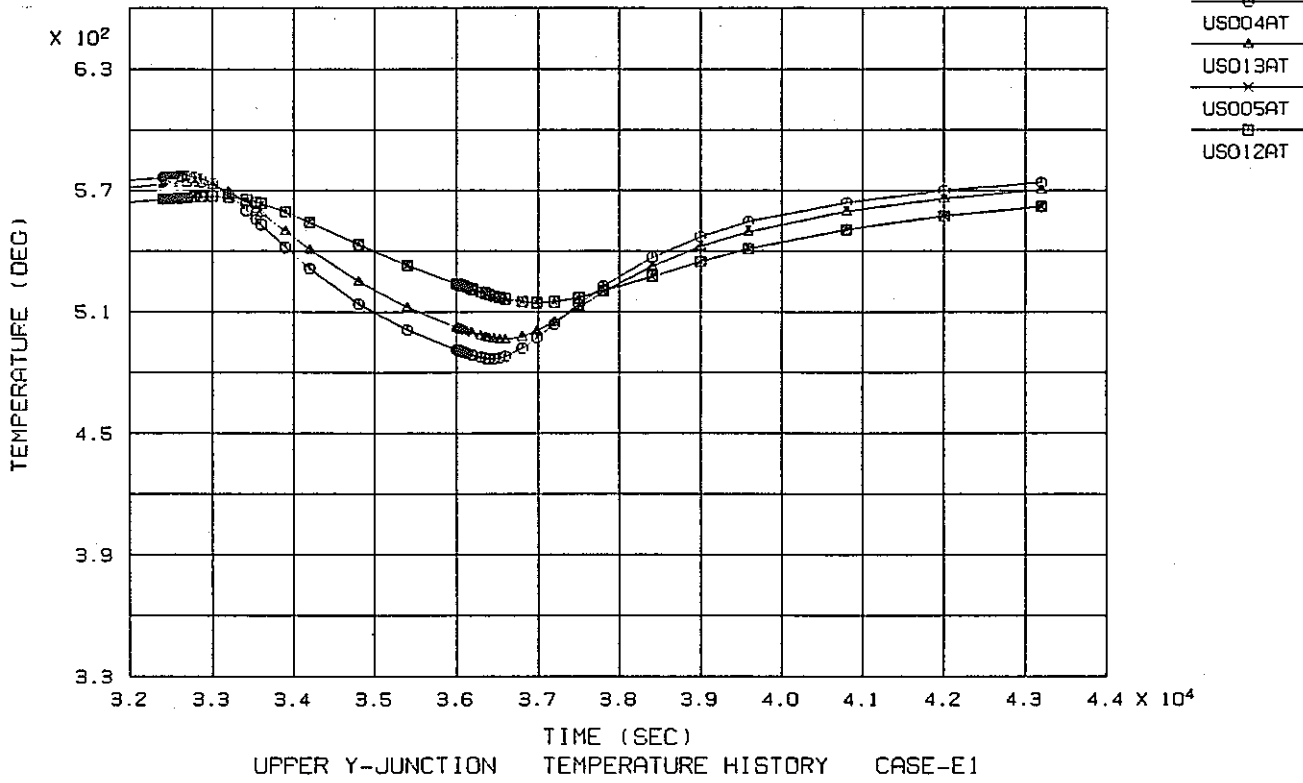


Fig. A-6(c) Temperature history at thermocouples location (Case E-1)

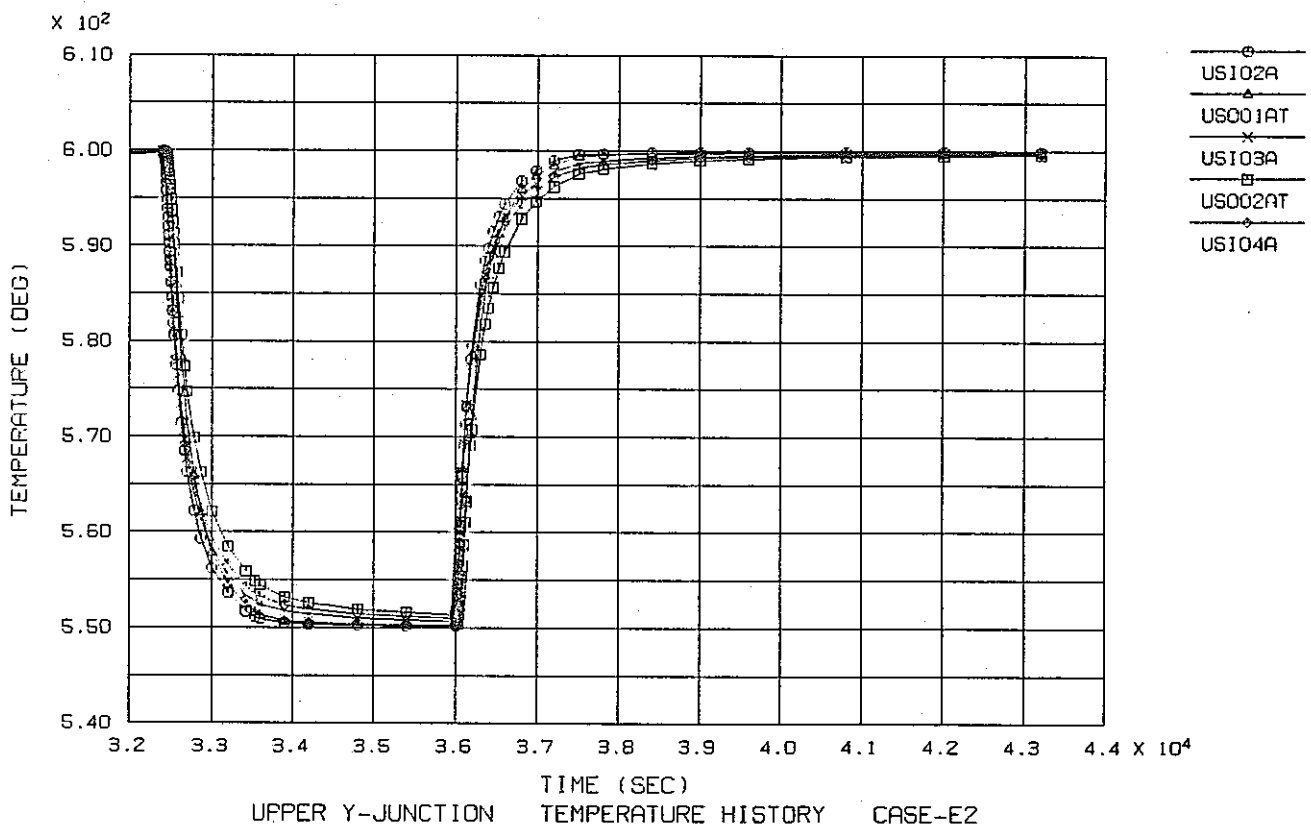
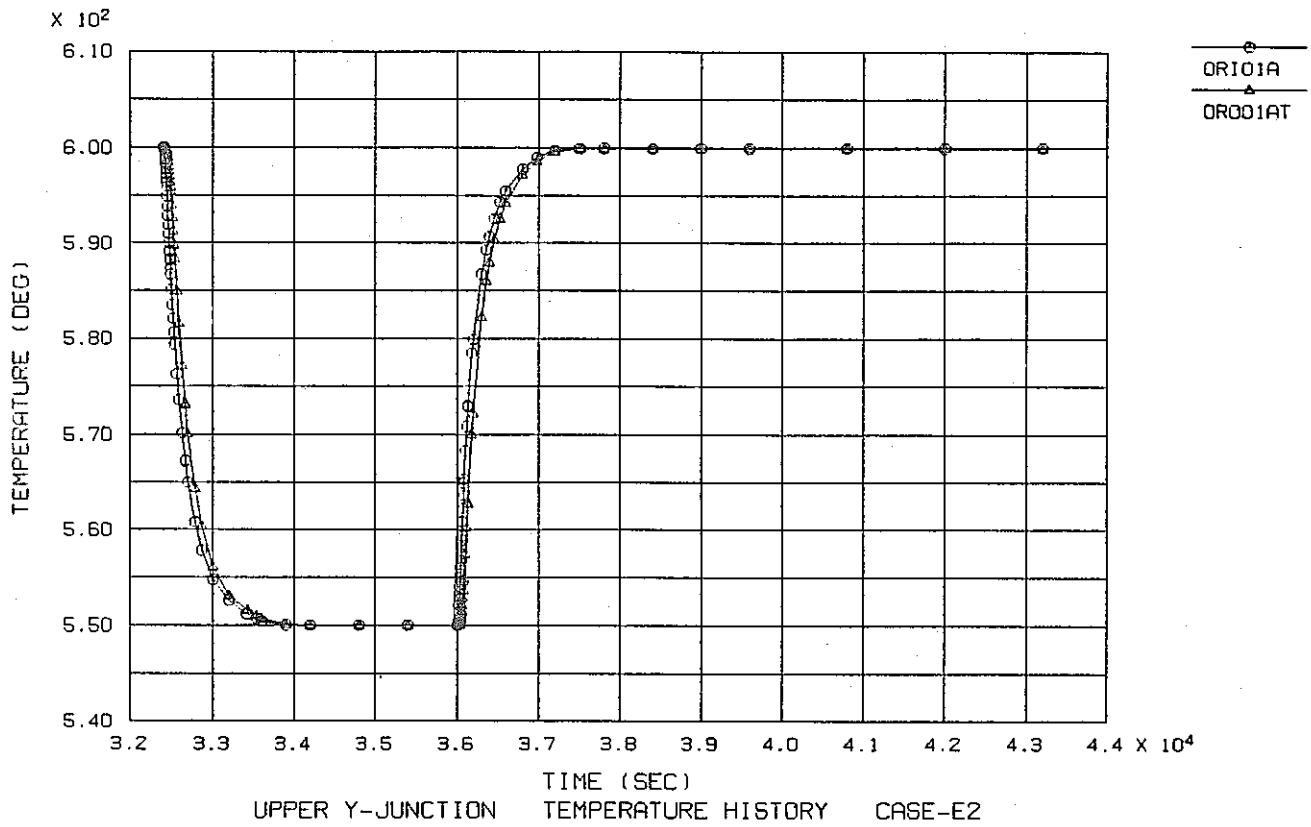


Fig. A-7(a) Temperature history at thermocouples location (Case E-1)

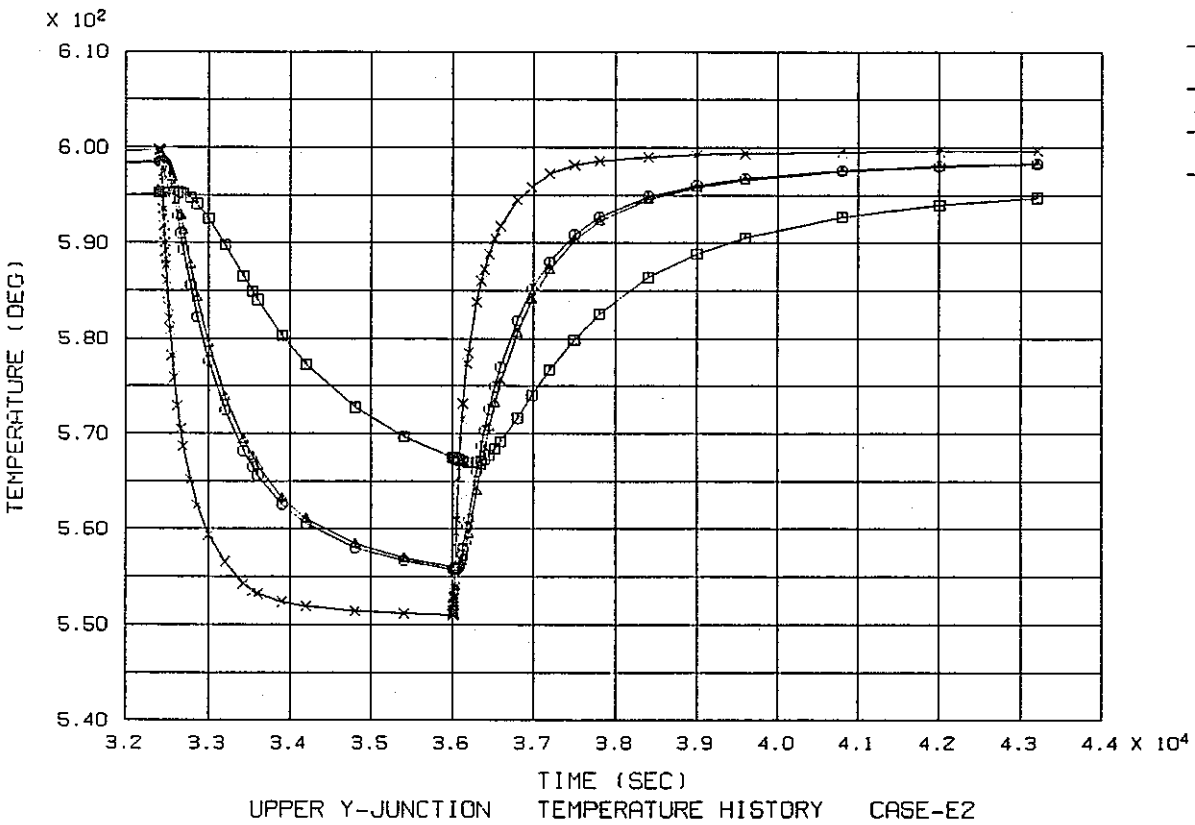
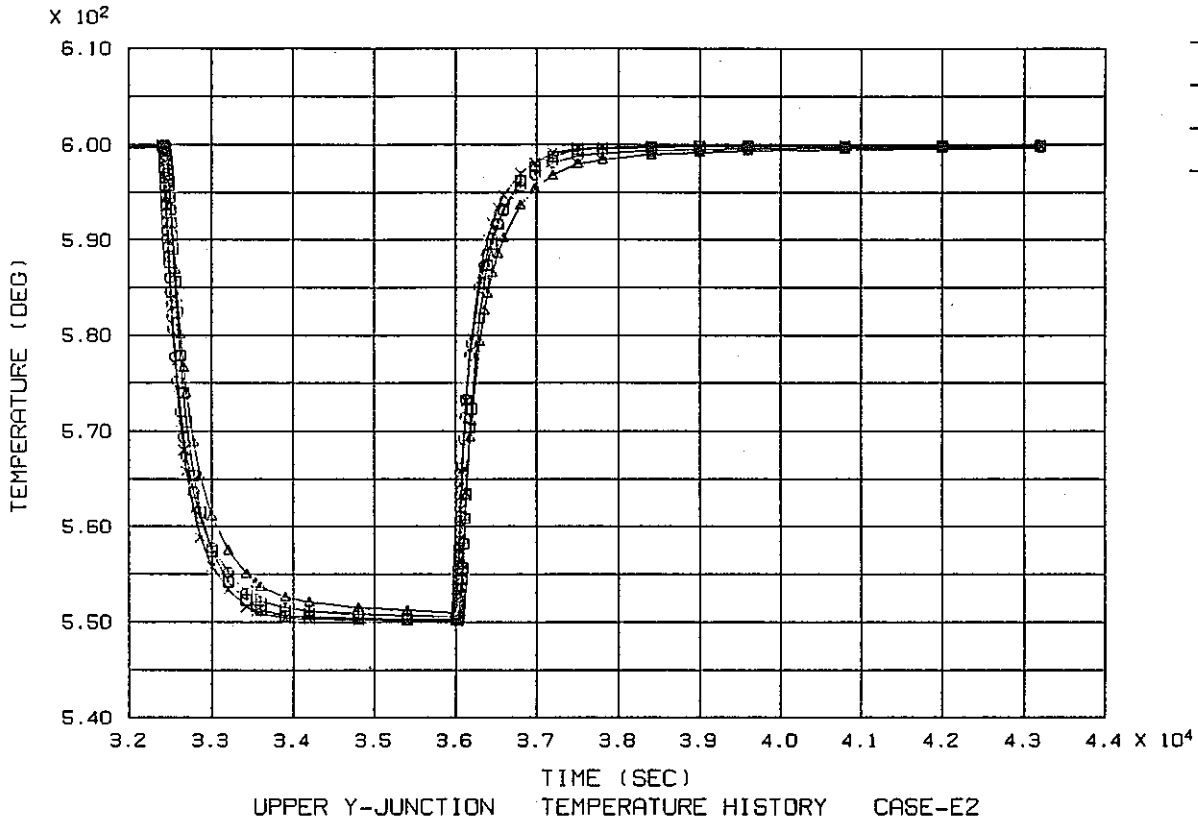


Fig. A-7(b) Temperature history at thermocouples location (Case E-1)

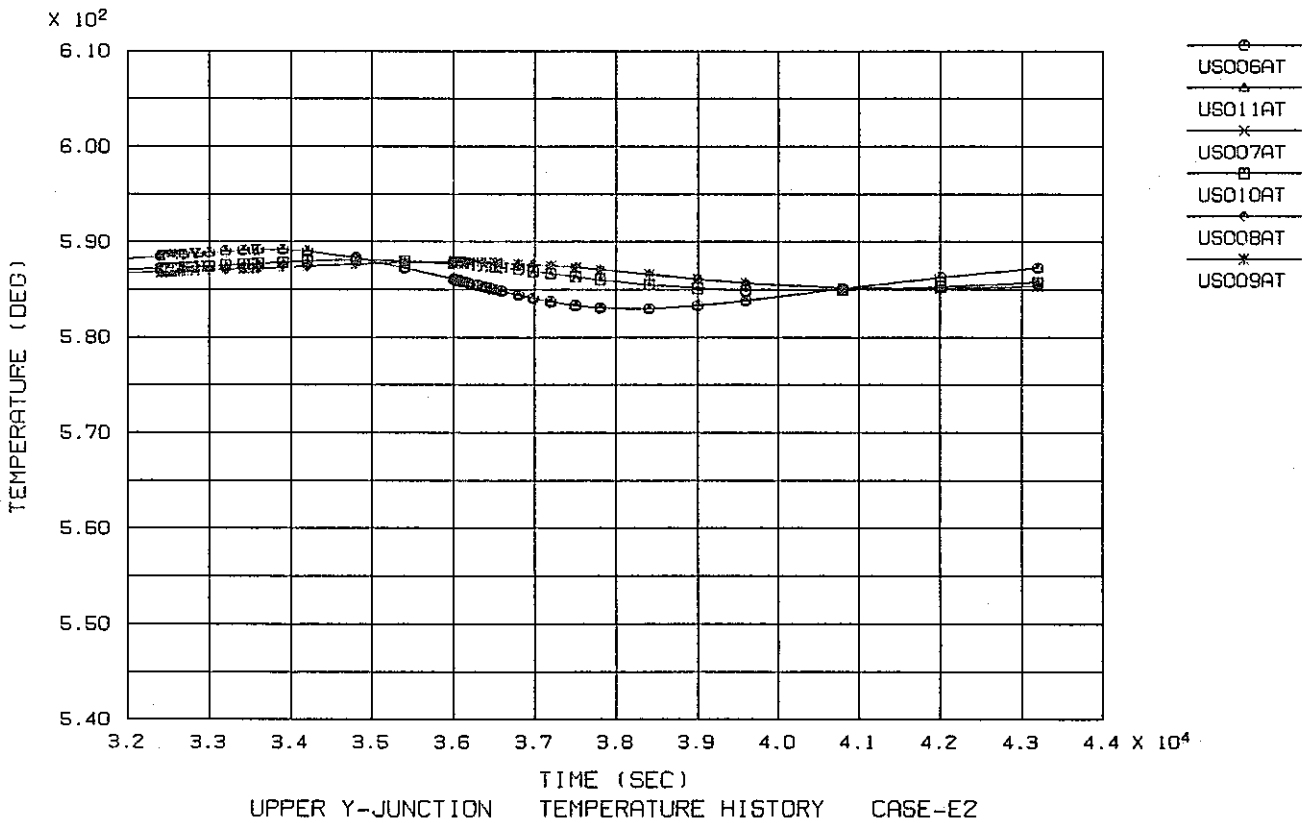
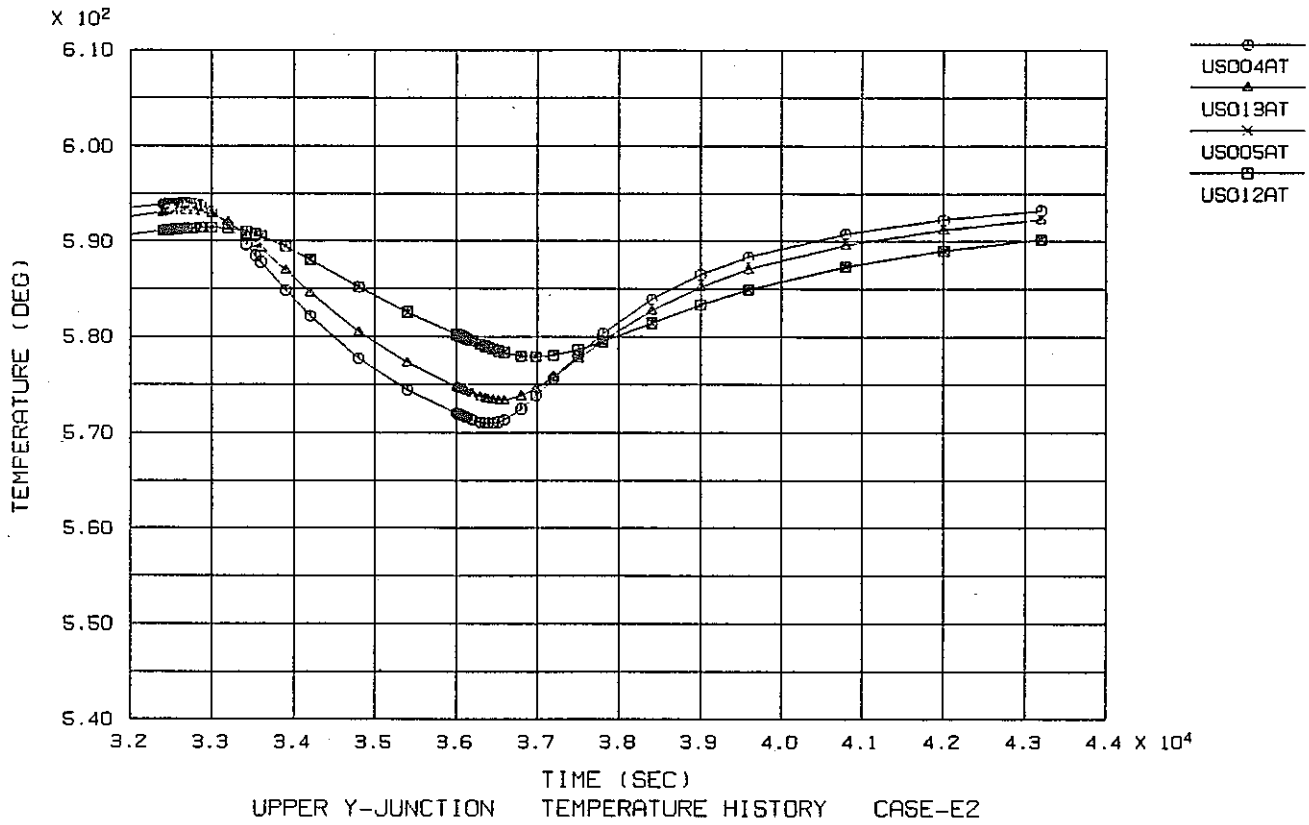


Fig. A-7(c) Temperature history at thermocouples location (Case E-1)

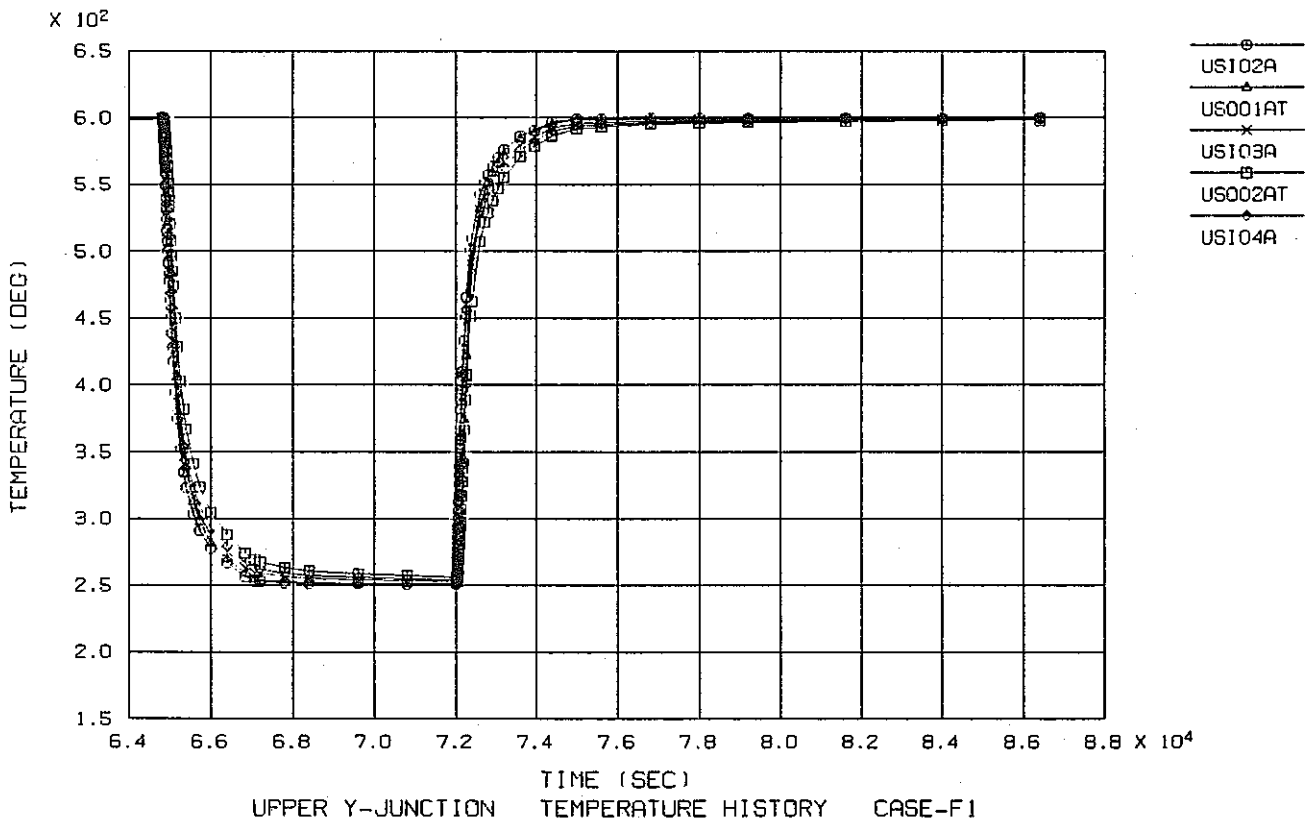
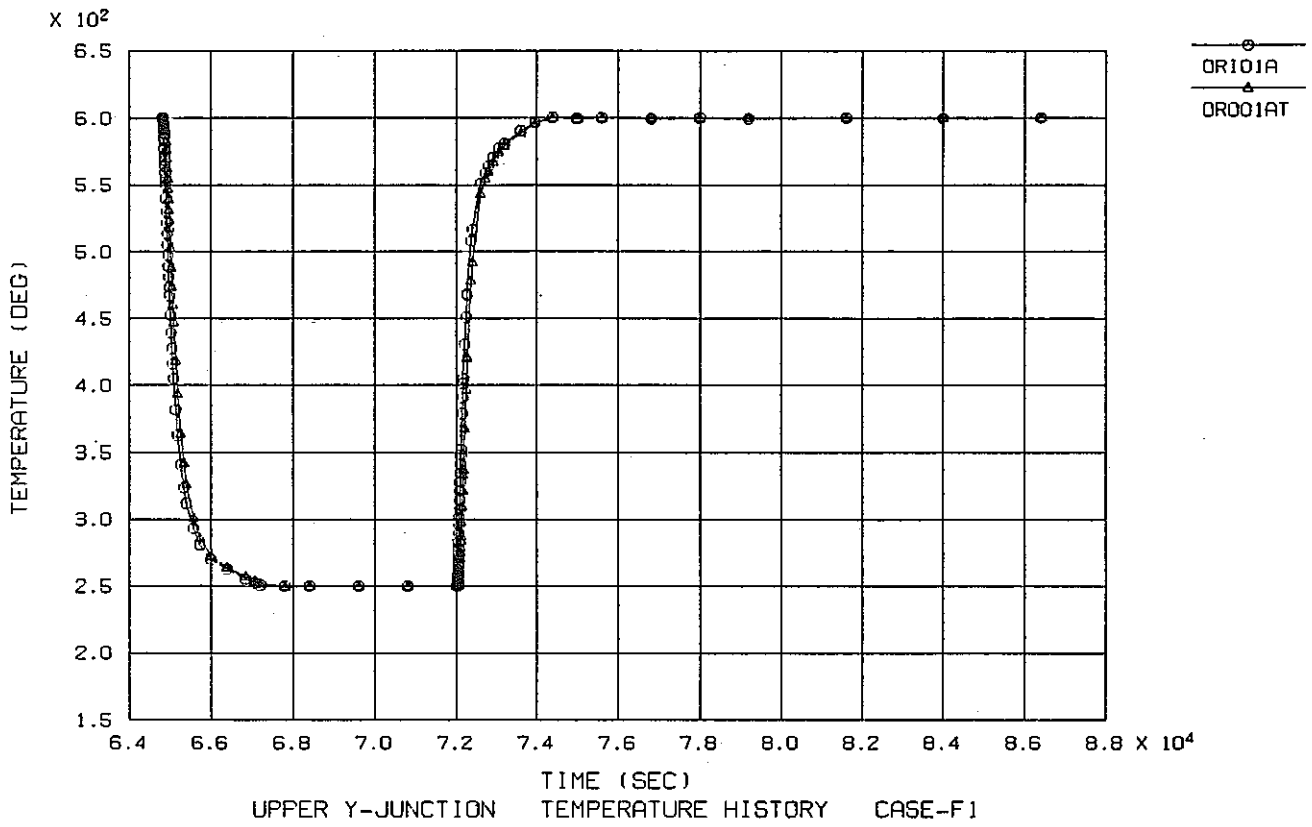


Fig. A-8(a) Temperature history at thermocouples location (Case F-1)

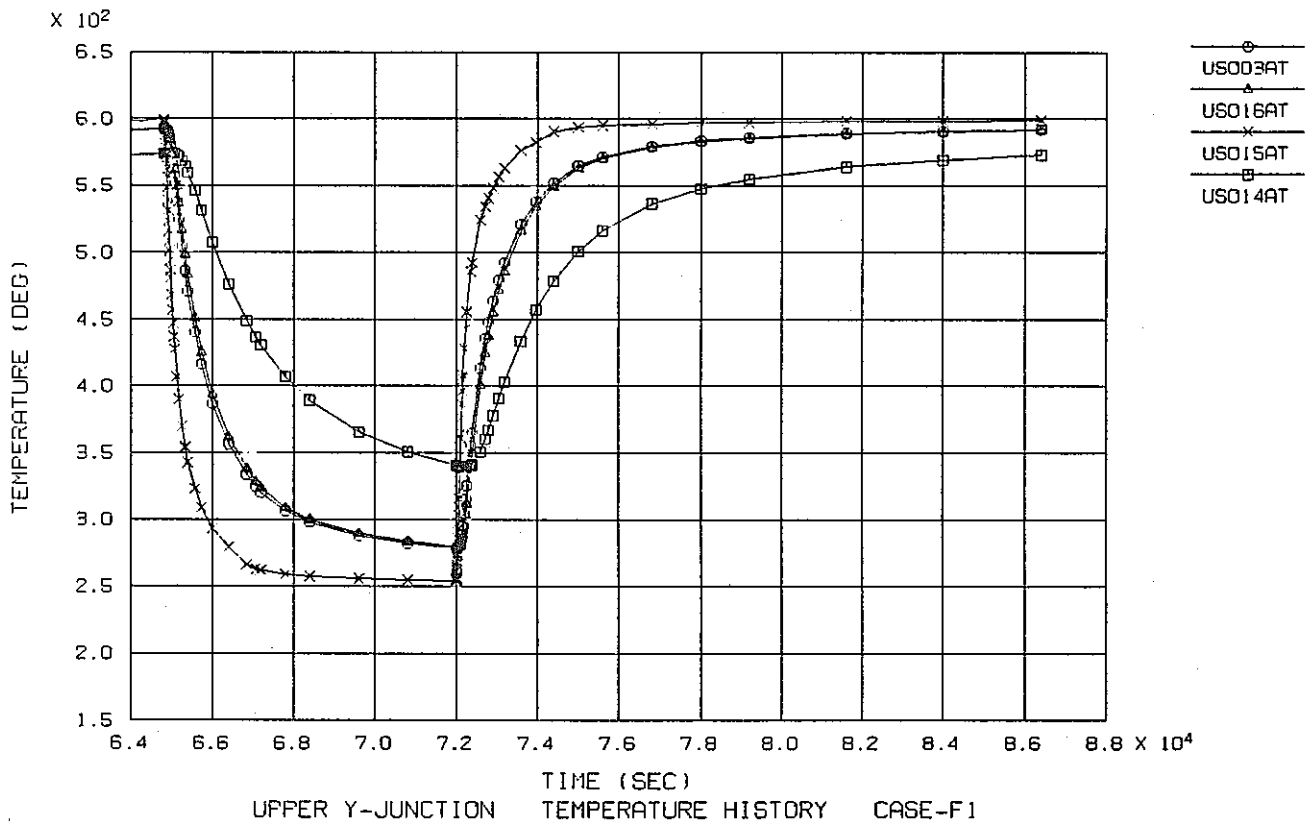
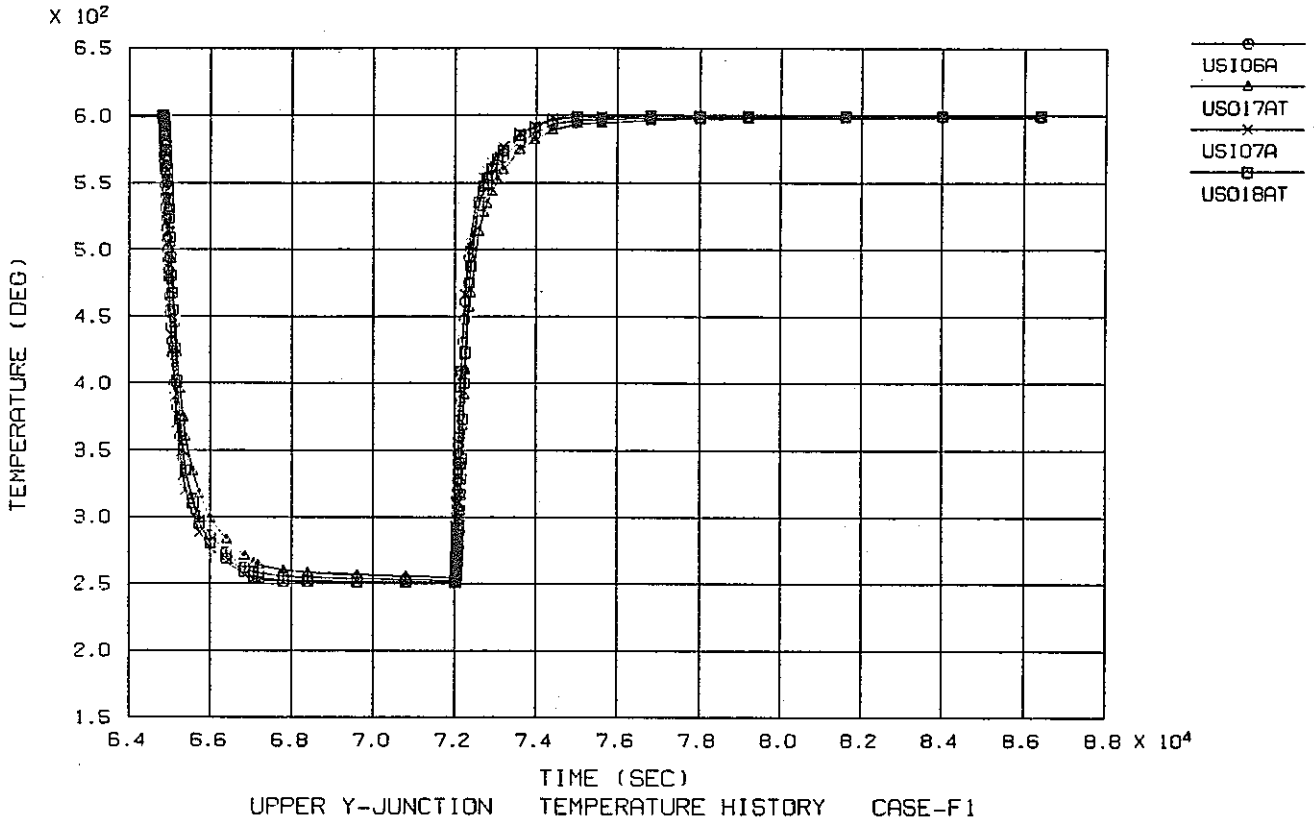


Fig. A-8(b) Temperature history at thermocouples location (Case F-1)

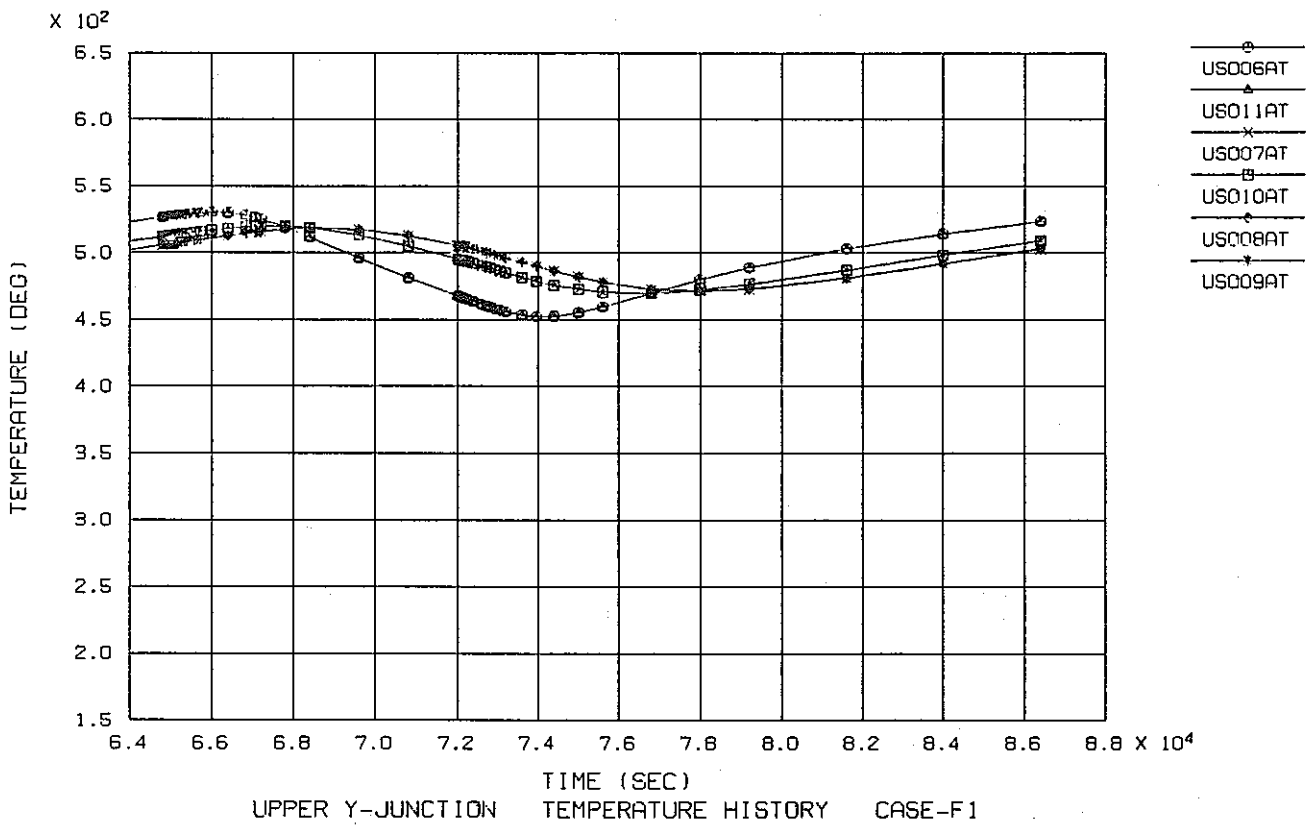
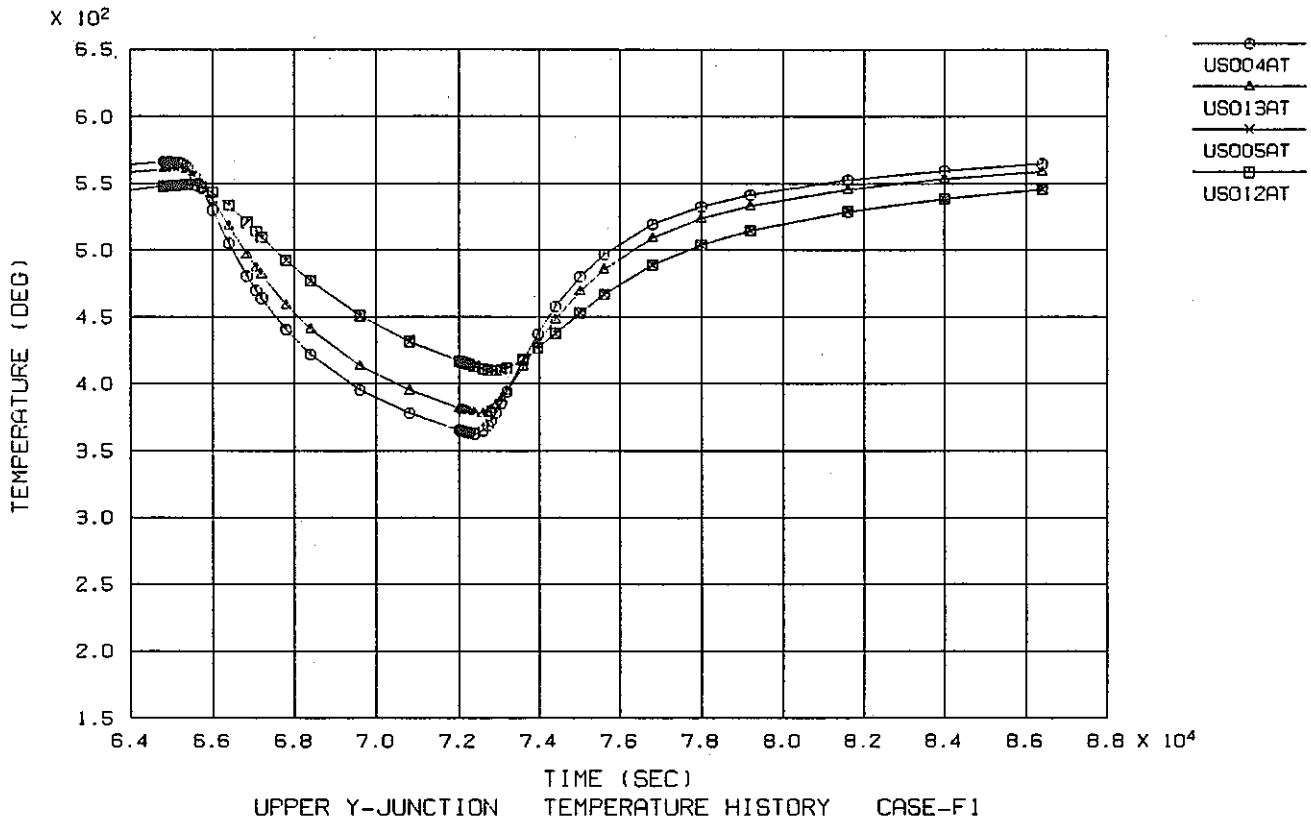


Fig. A-8(c) Temperature history at thermocouples location (Case F-1)

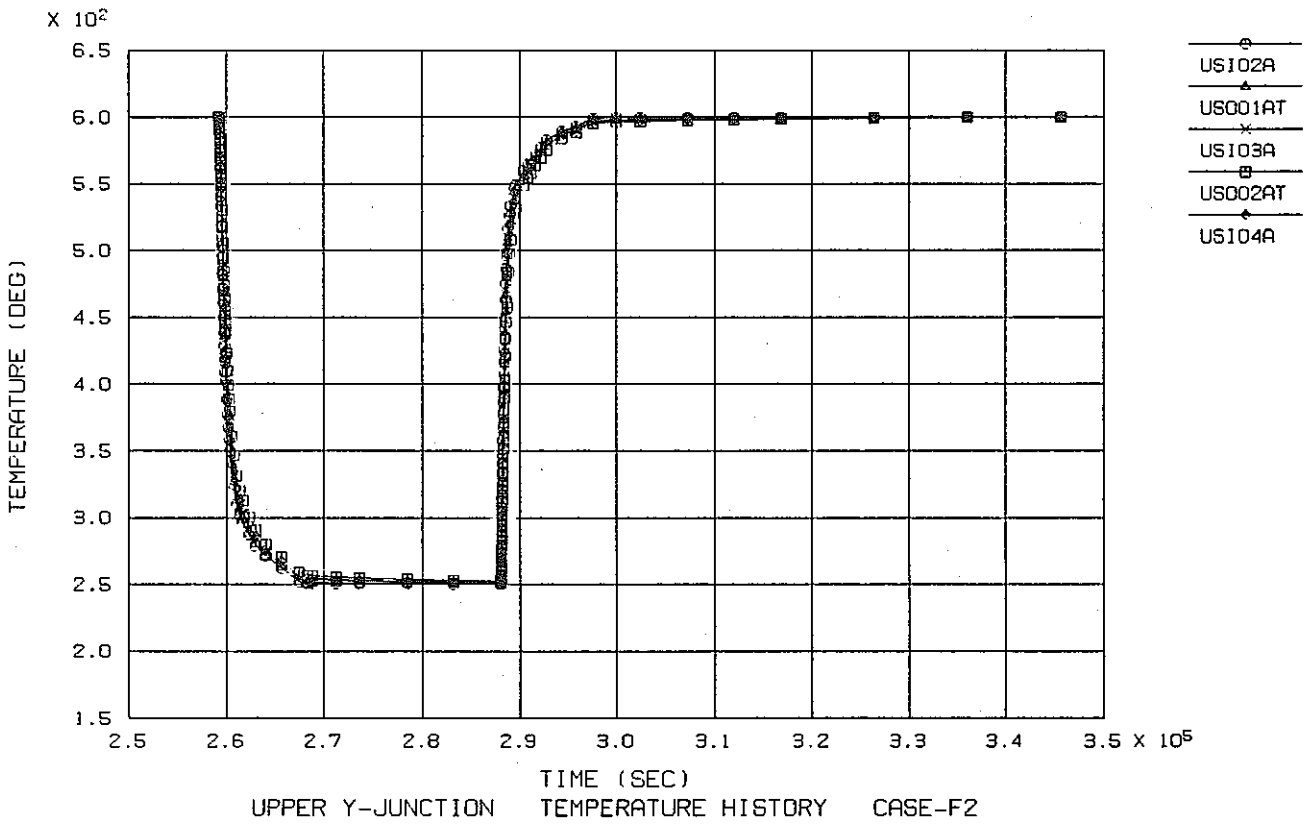
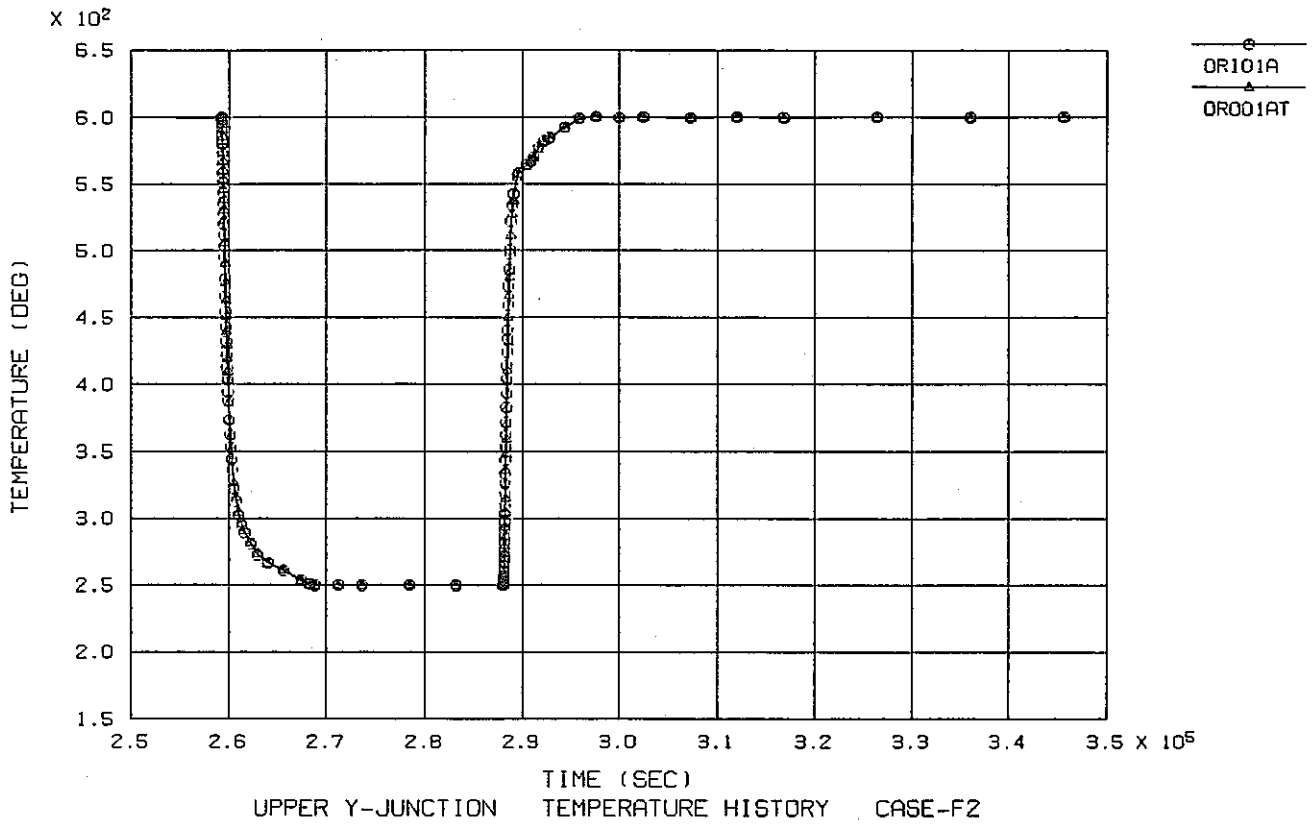


Fig. A-9(a) Temperature history at thermocouples location (Case F-1)

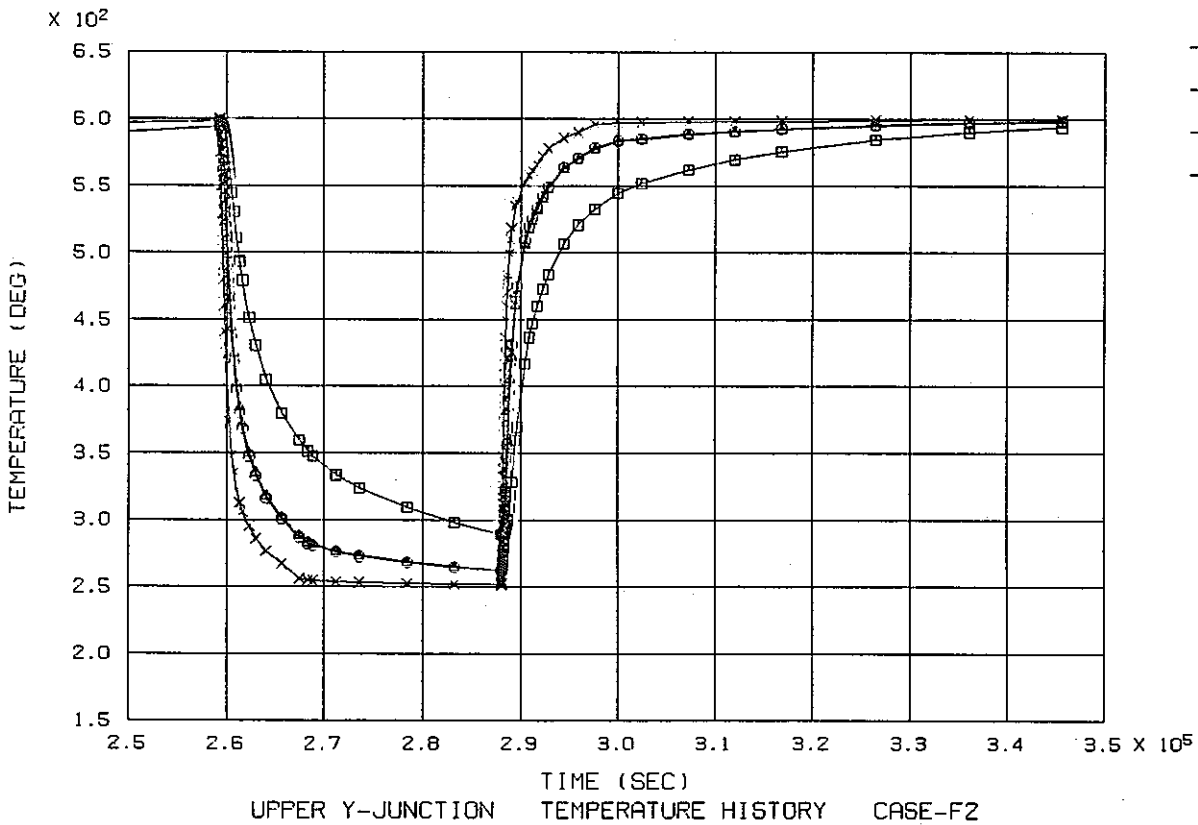
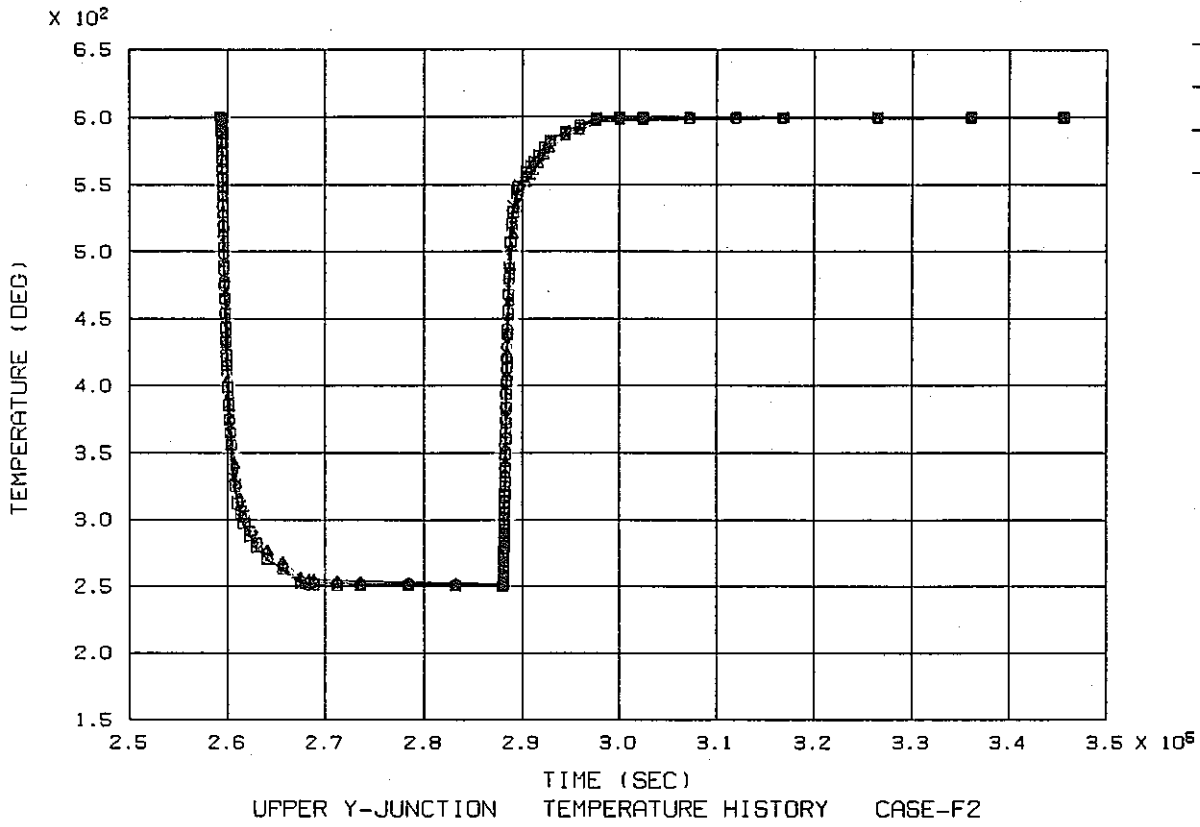


Fig. A-9(b) Temperature history at thermocouples location (Case F-1)

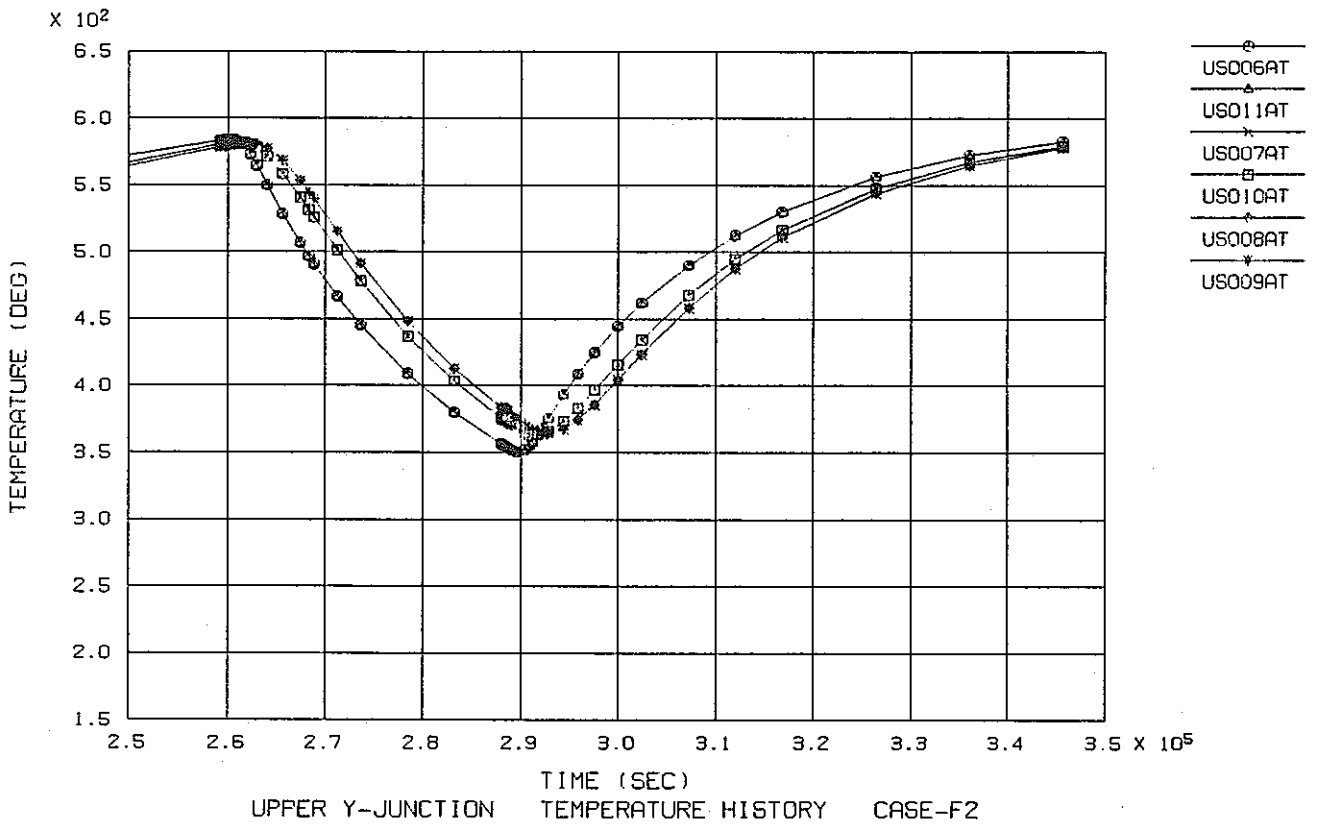
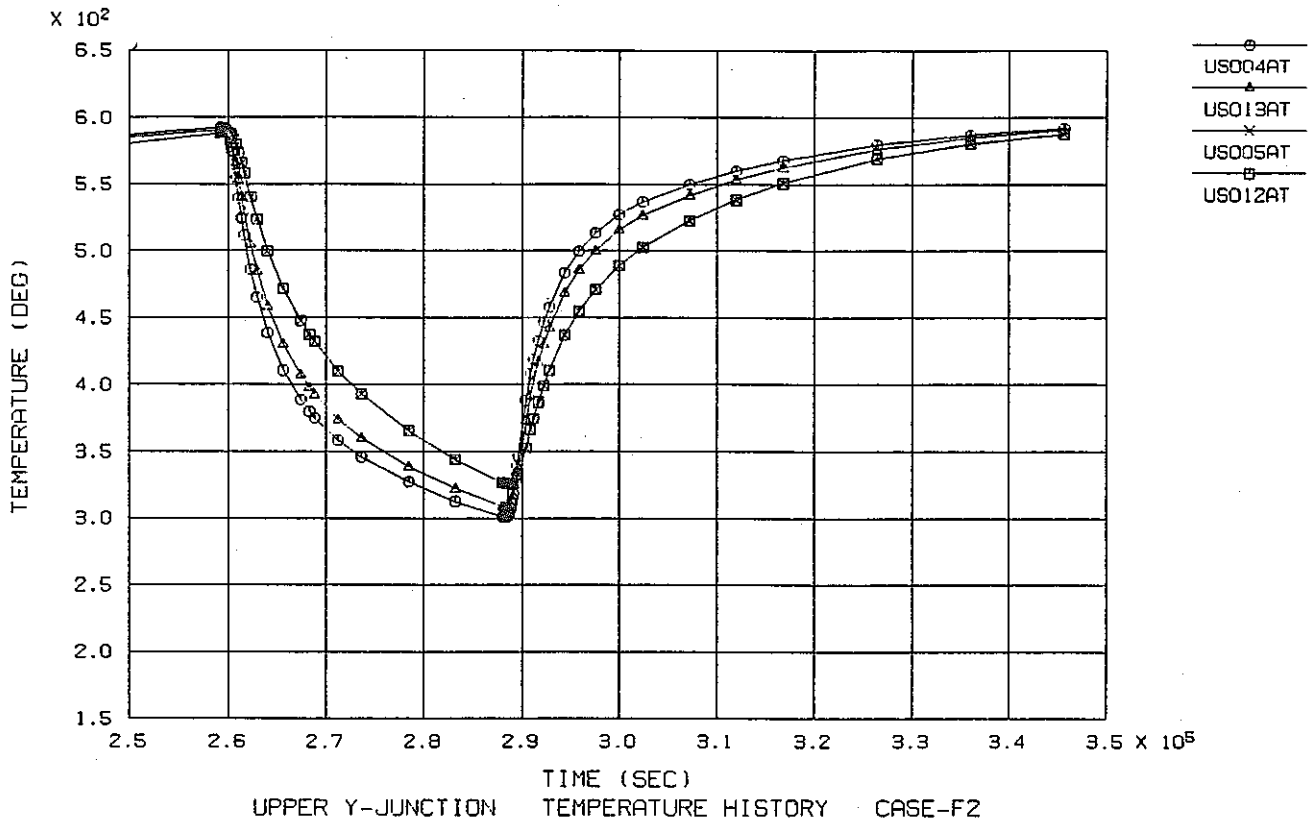


Fig. A-9(c) Temperature history at thermocouples location (Case F-1)

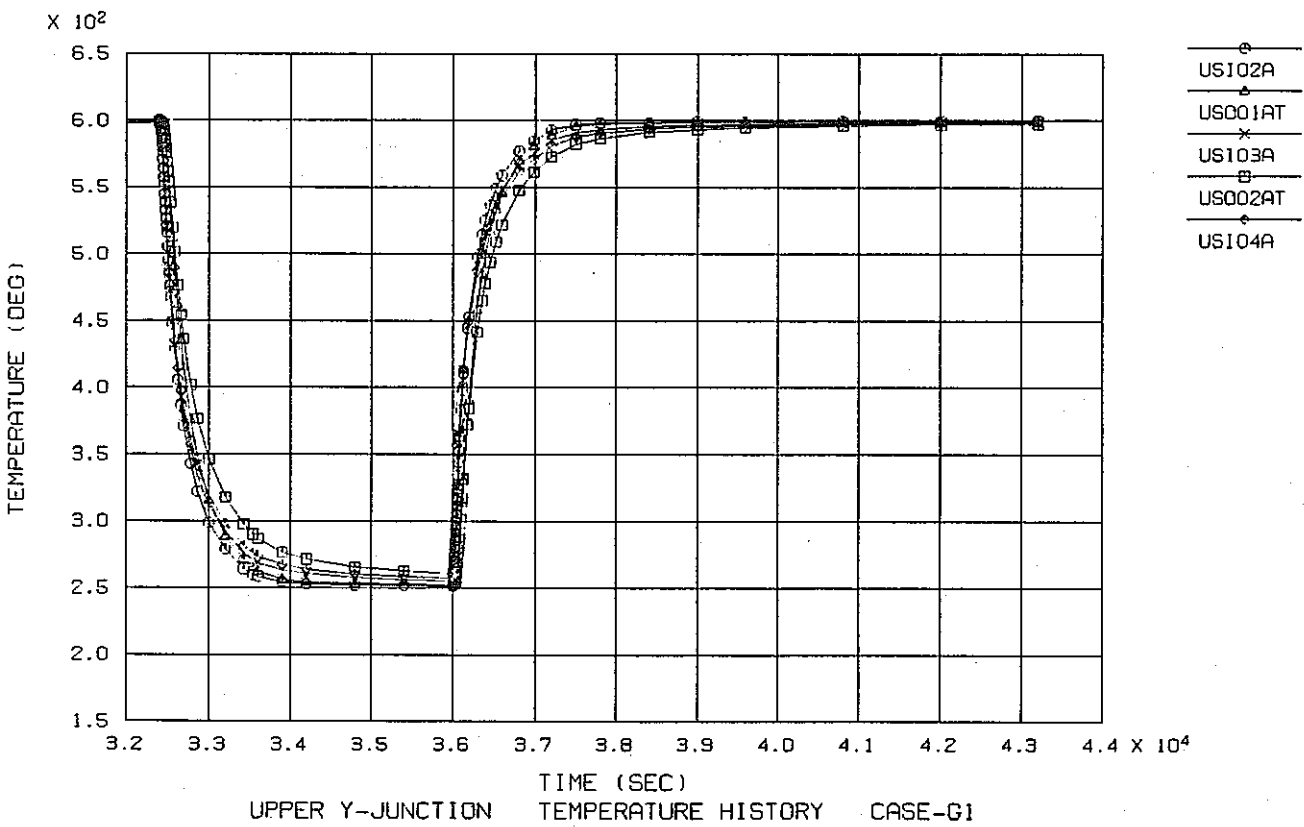
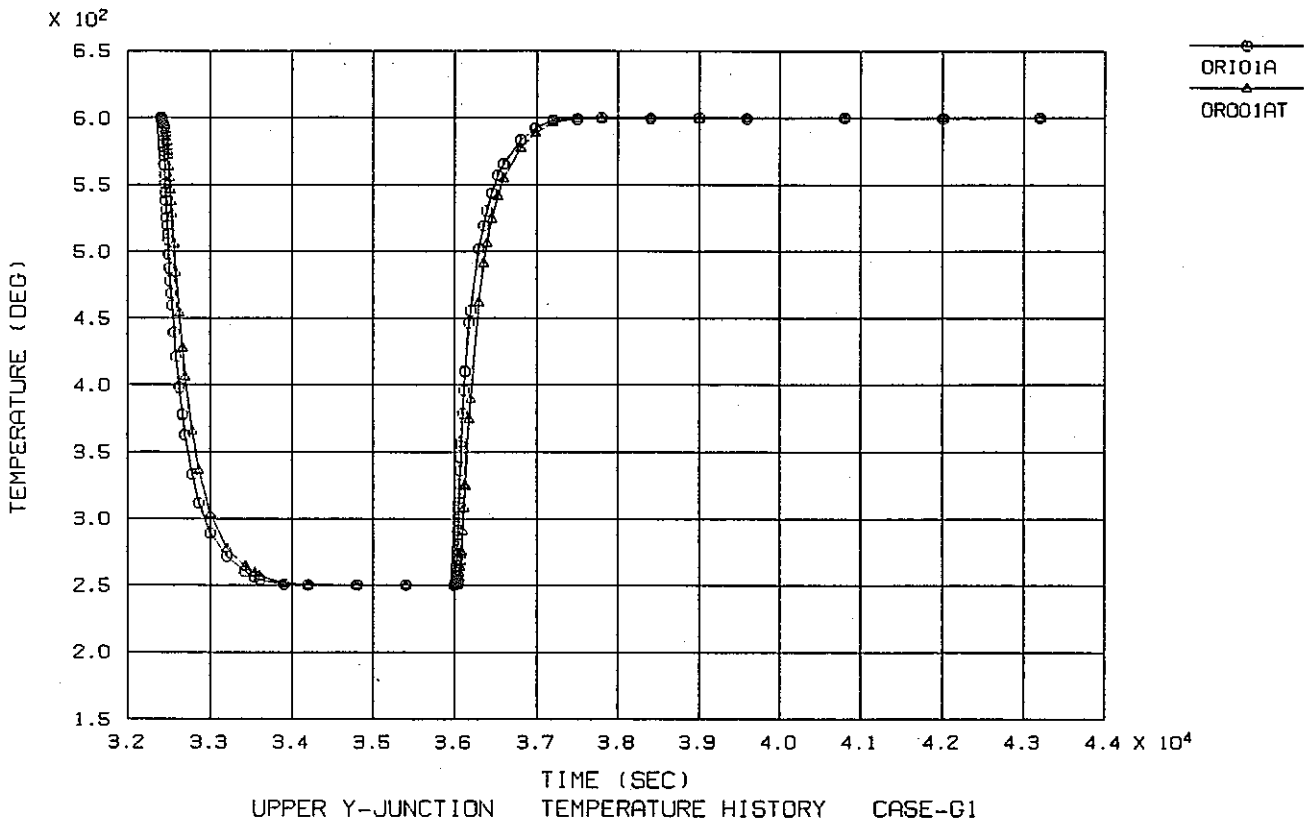


Fig. A-10(a) Temperature history at thermocouples location (Case G-1)

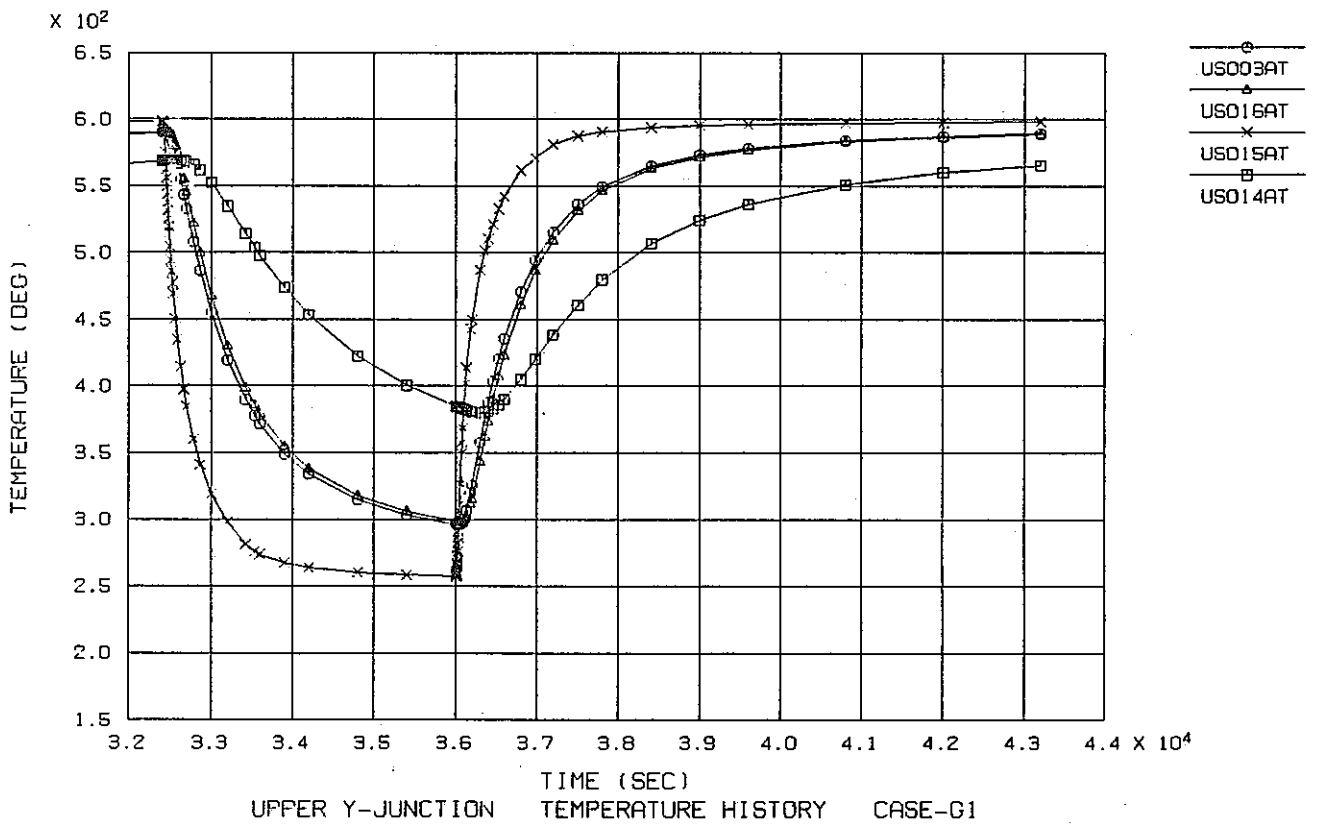
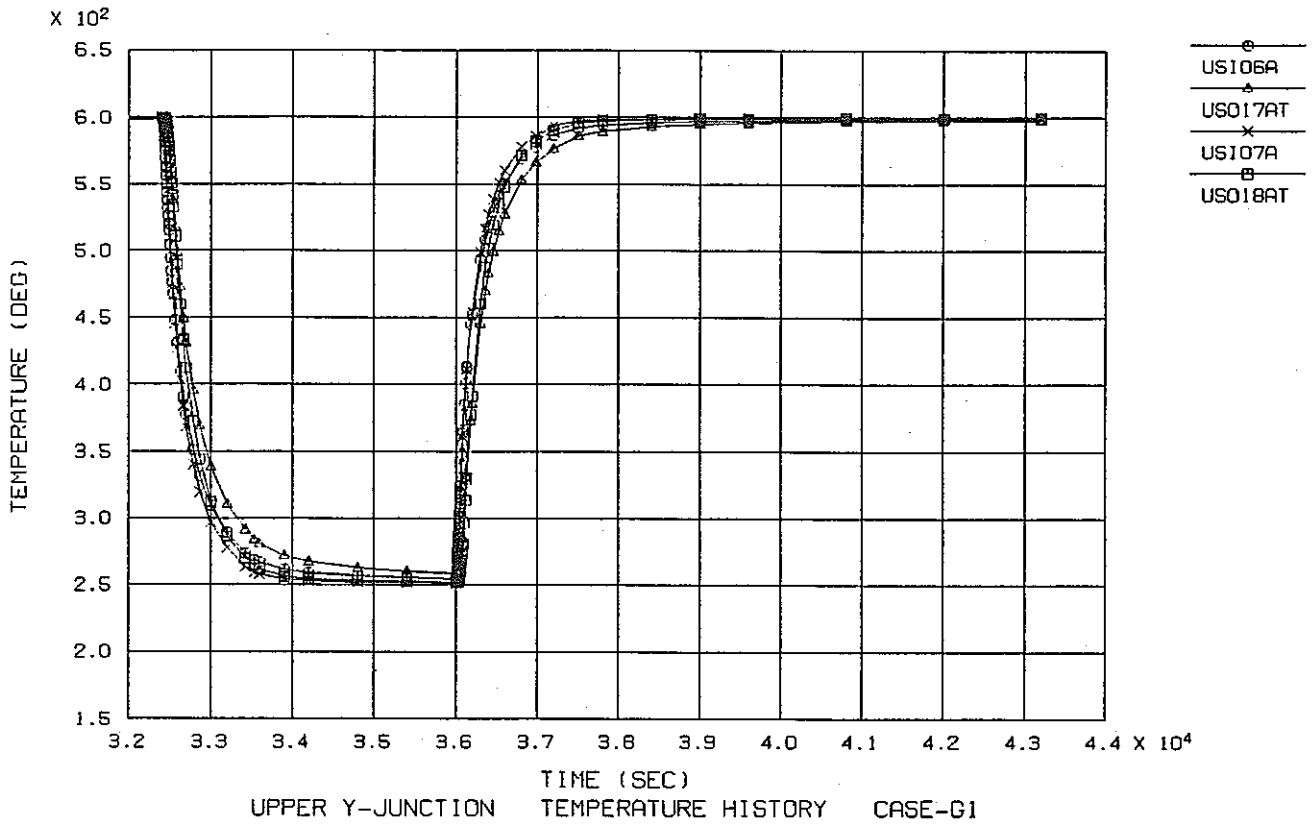


Fig.A-10(b) Temperature history at thermocouples location (Case G-1)

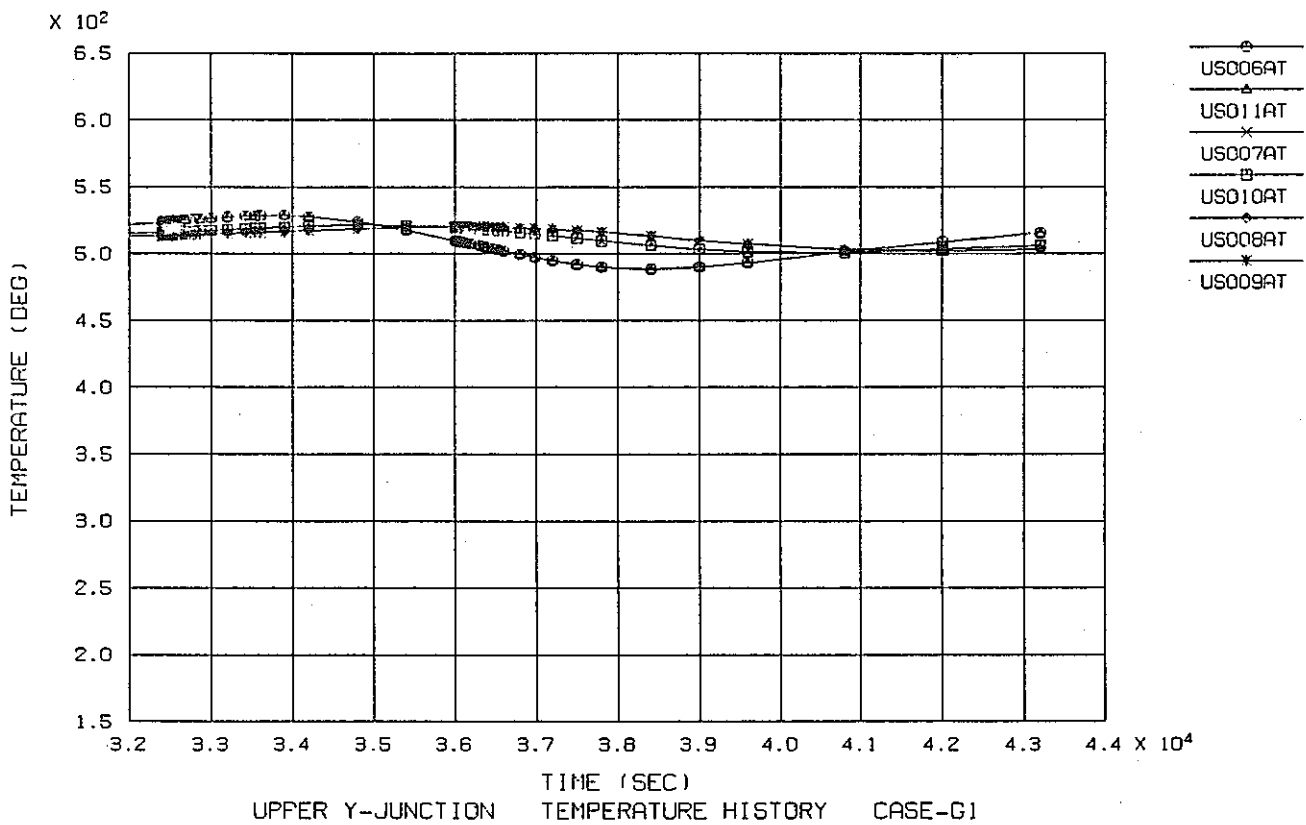
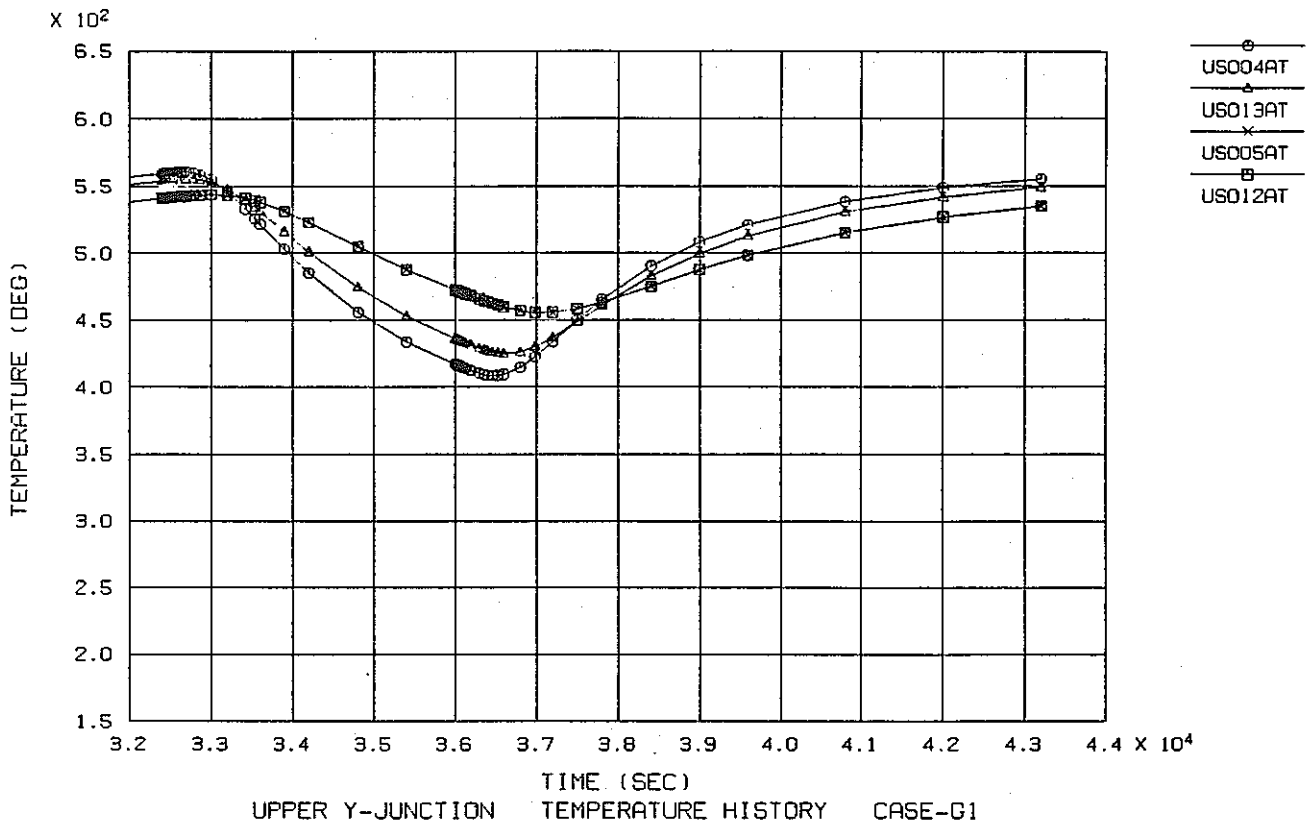


Fig. A-10(c) Temperature history at thermocouples location (Case G-1)

付録B. 応力評価ラインの応力分布

1. 概 要

本付録は、熱応力解析結果の内、解析モデルの内外表面に設定した応力評価ラインにおける応力分布を示すものである。

2. 内 容

(1) 応力評価ライン

解析モデルの内外表面に設定した応力評価ラインをFig.B-1に示す。

(2) 応力分布

応力評価ラインに沿った応力分布をFig.B-2 ~14に示す。これらの応力分布は、正確には解析モデルにおいて最も評価ライン寄りの積分点の値をプロットしたものである。また、図の横軸と構造との対応は以下に示すとおりである。

○応力評価ライン－1

・ 応力評価断面A内面 : 290 mm

○応力評価ライン－2

・ 応力評価断面B外面 : 275 mm

○応力評価ライン－3

・ 応力評価断面A外面 : 470 mm

・ R止端部底 : 490 mm

・ 応力評価断面B内面 : 500 mm

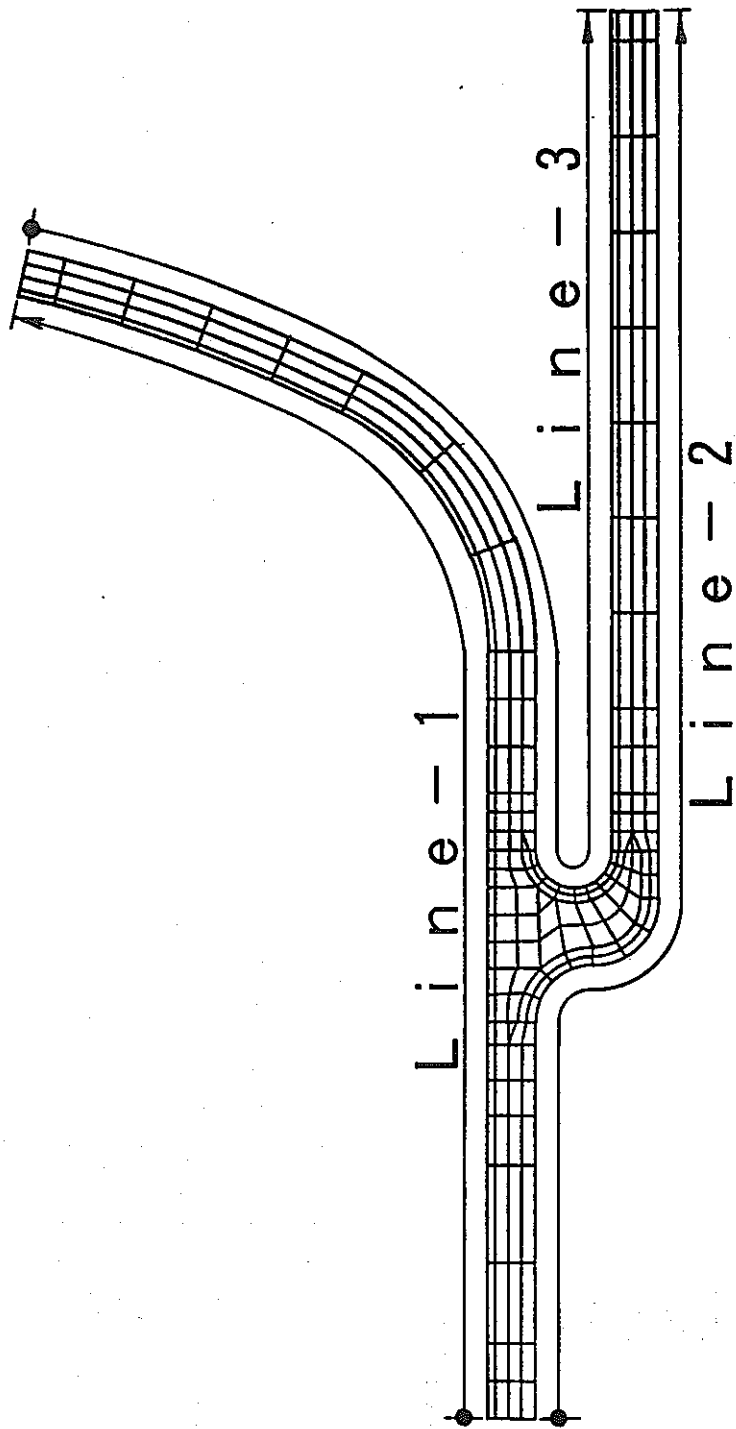
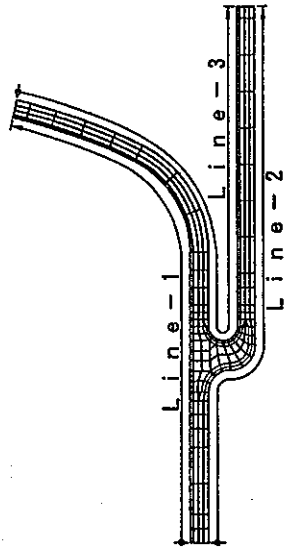


Fig. B-1 Stress estimation surfaces



応力評価ライン

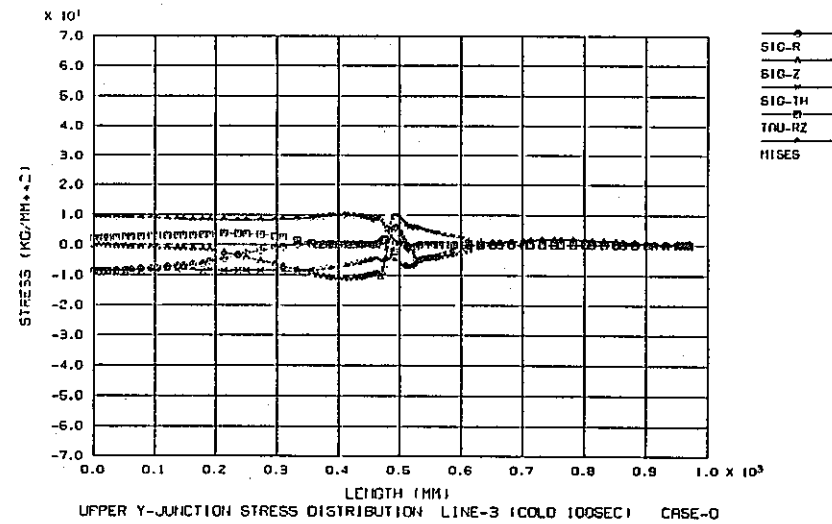
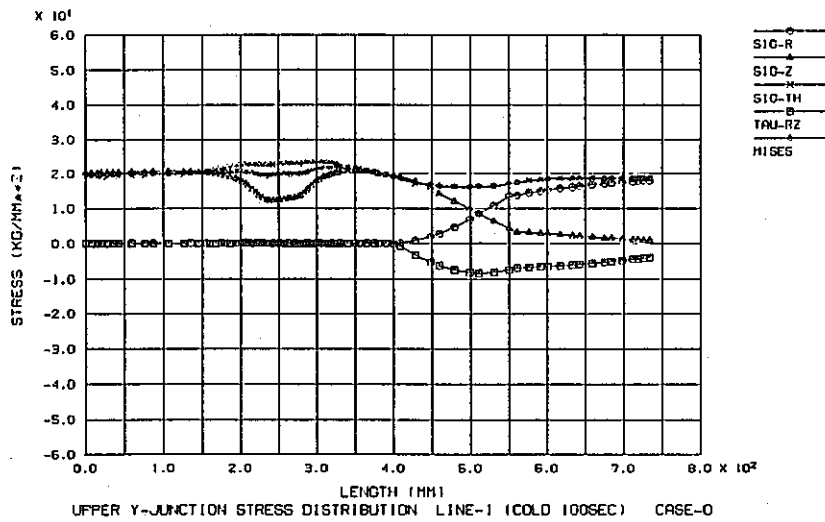
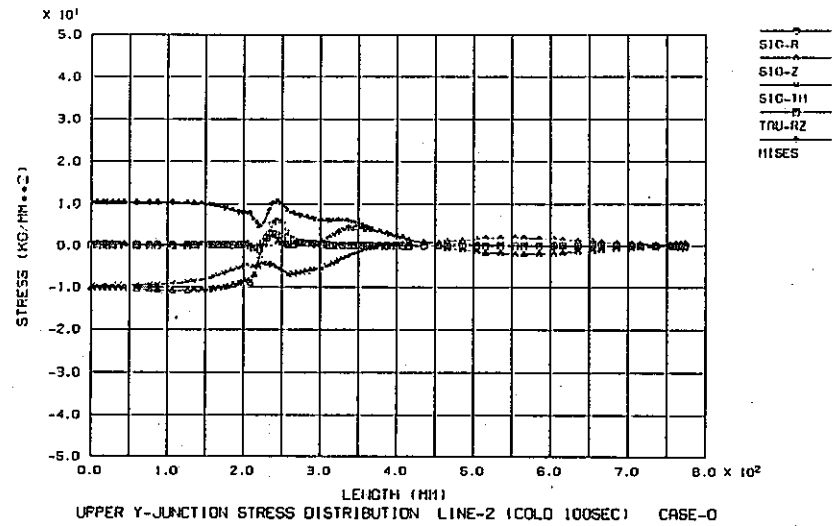
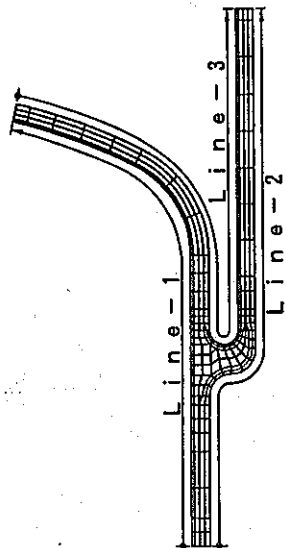


Fig.B-2(a) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic)



応力評価ライン

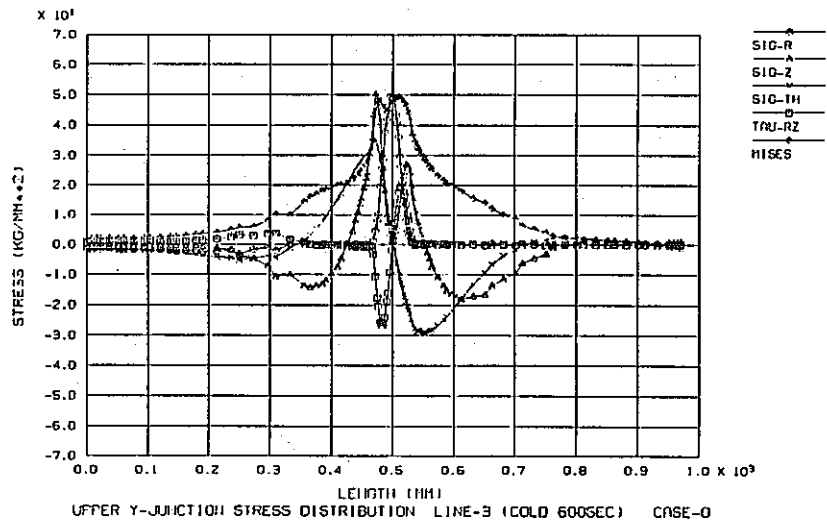
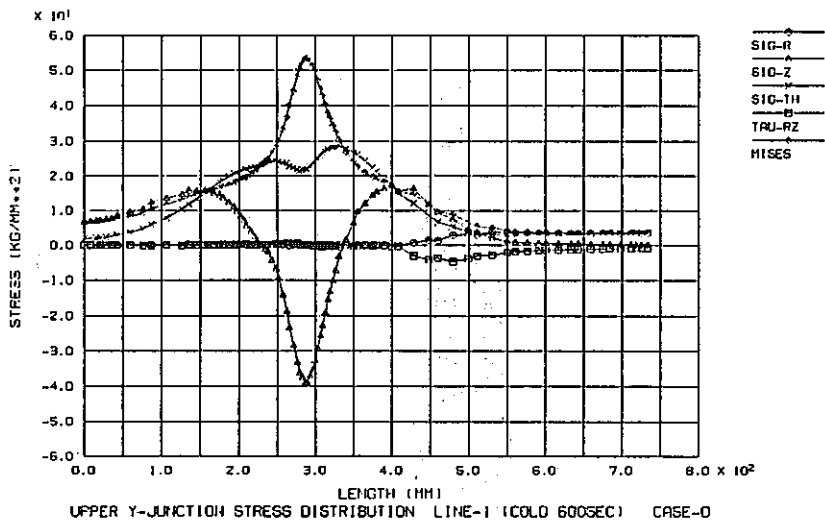
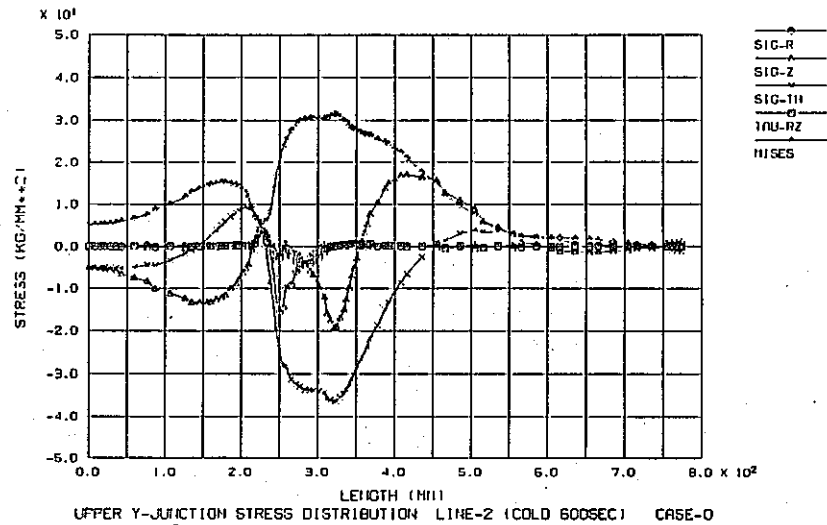
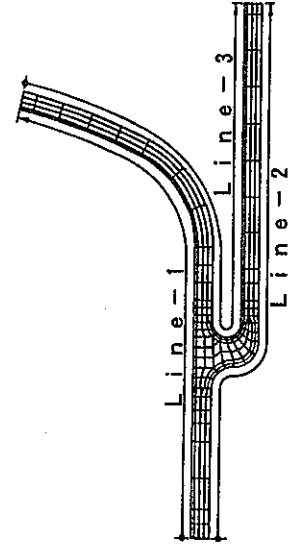


Fig.B-2(b) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic)



応力評価ライン

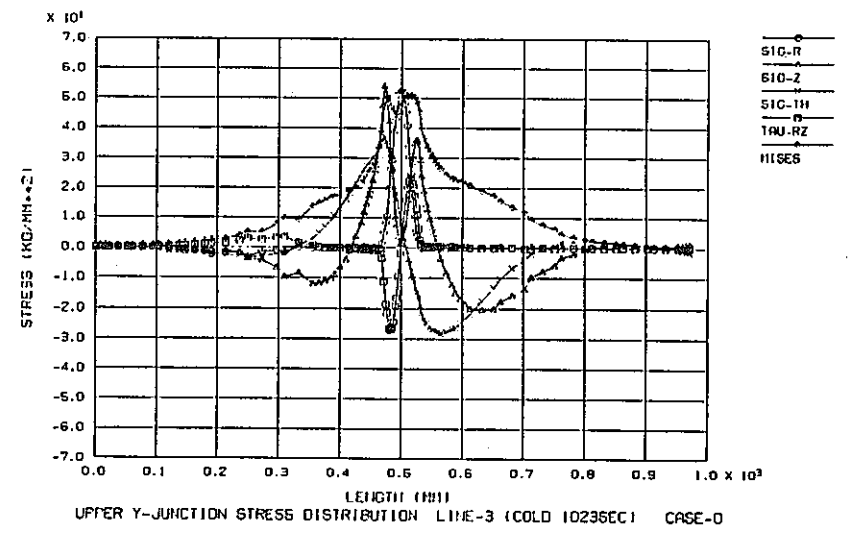
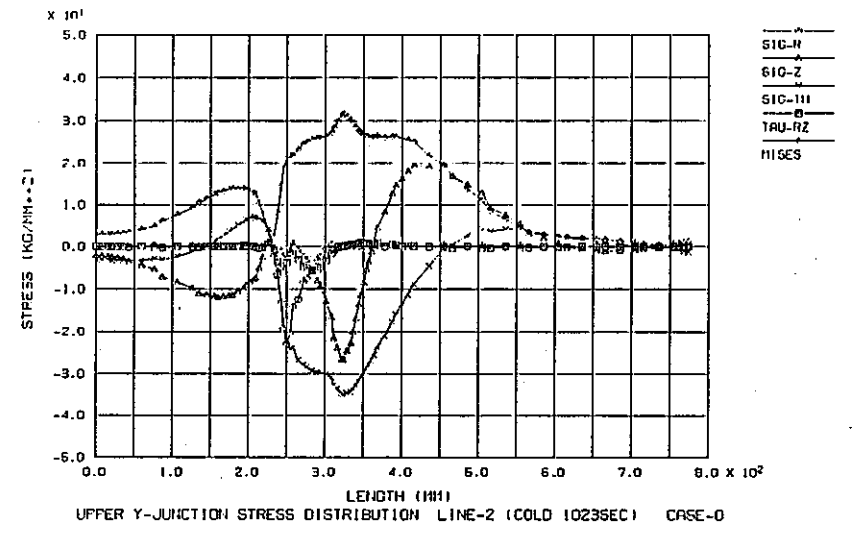
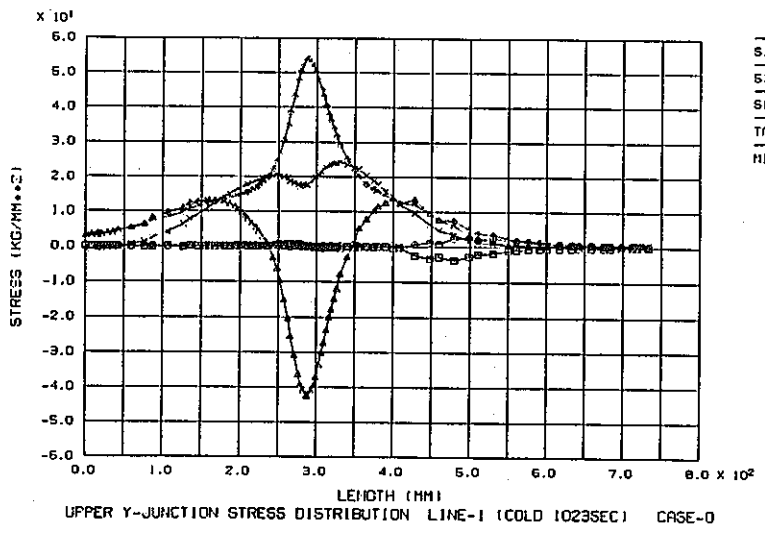
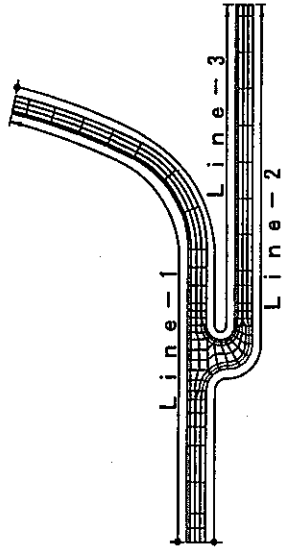


Fig. B-2(c) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic)



応力評価ライン

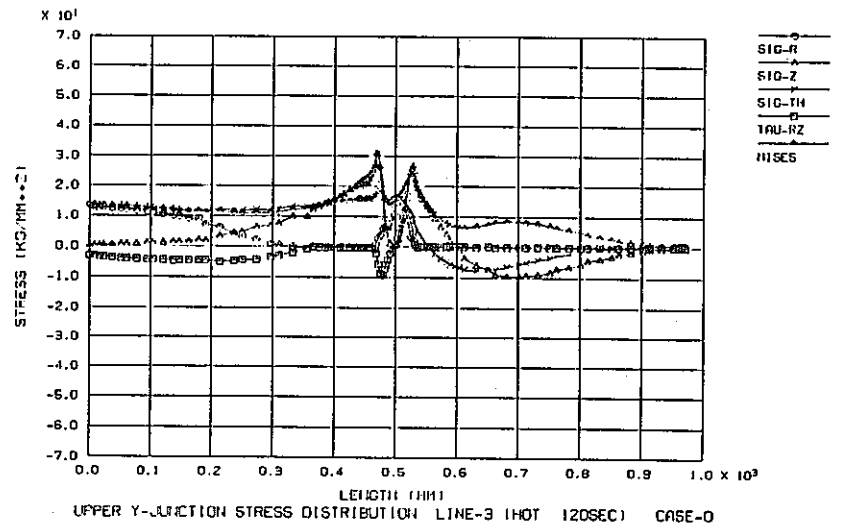
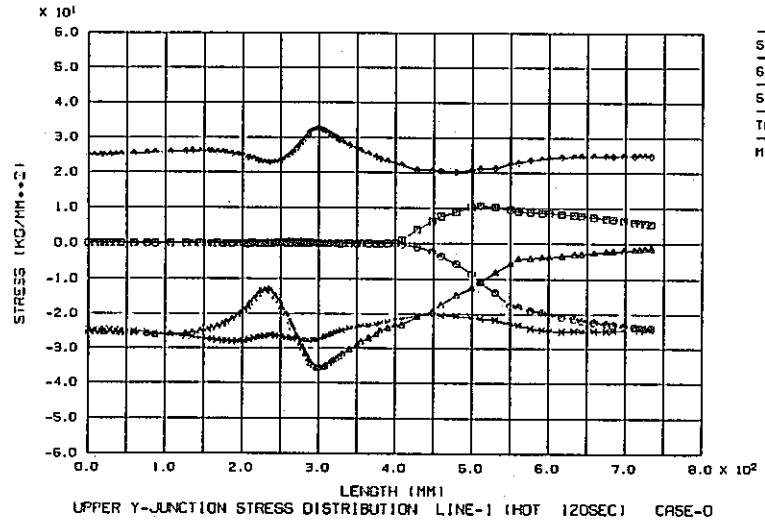
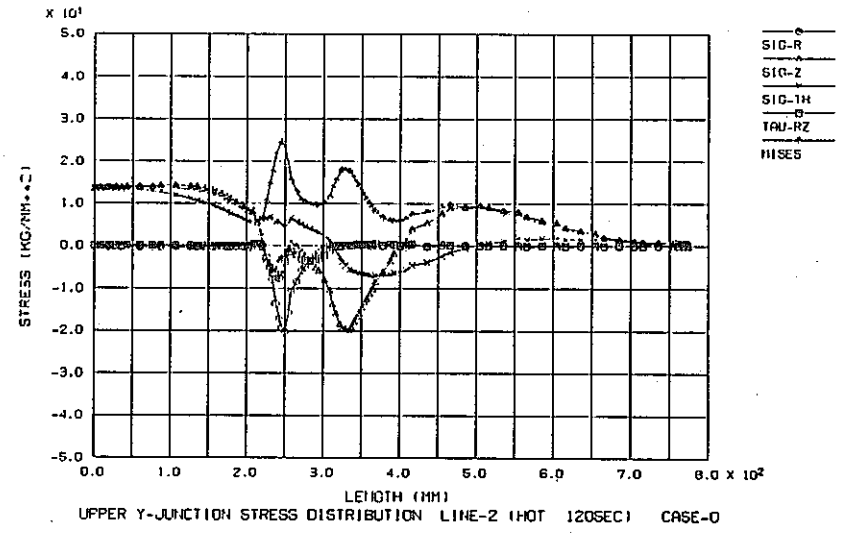
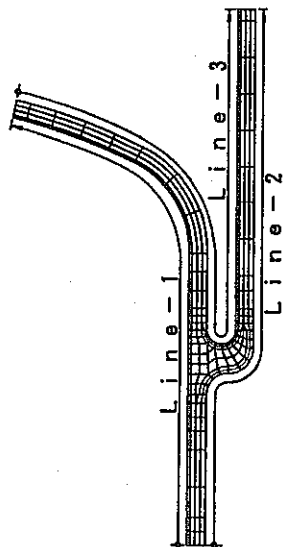


Fig.B-2(d) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic)



応力評価ライン

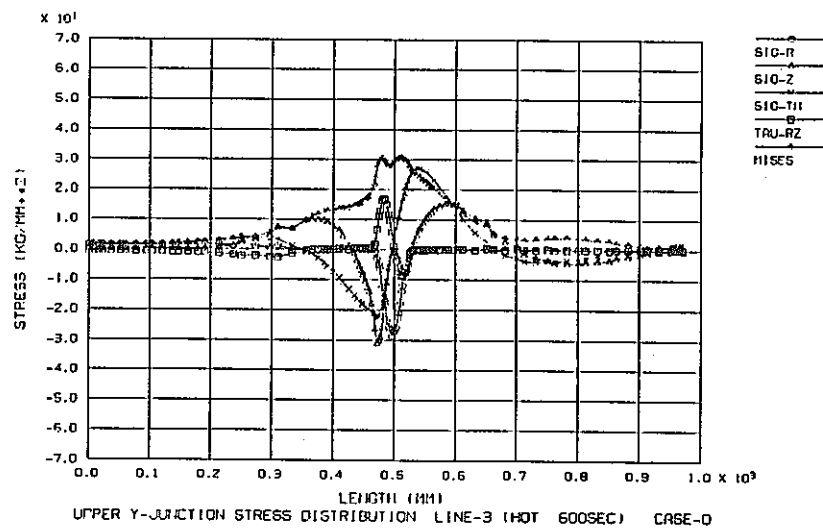
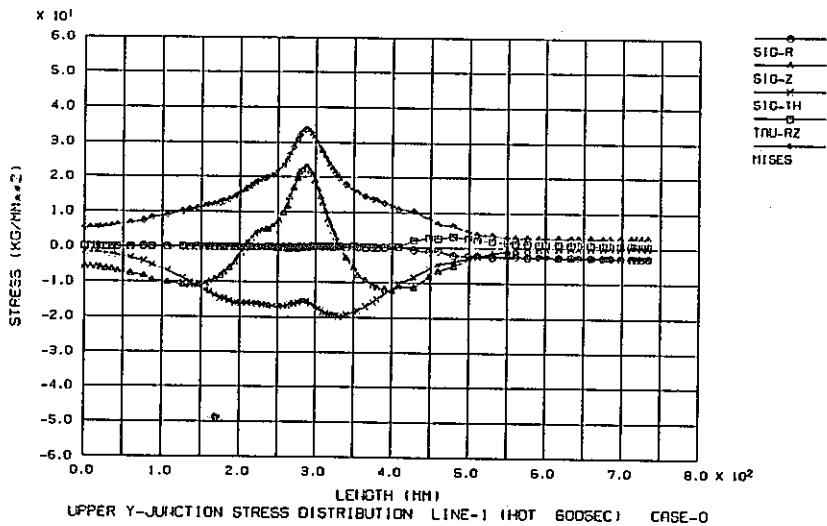
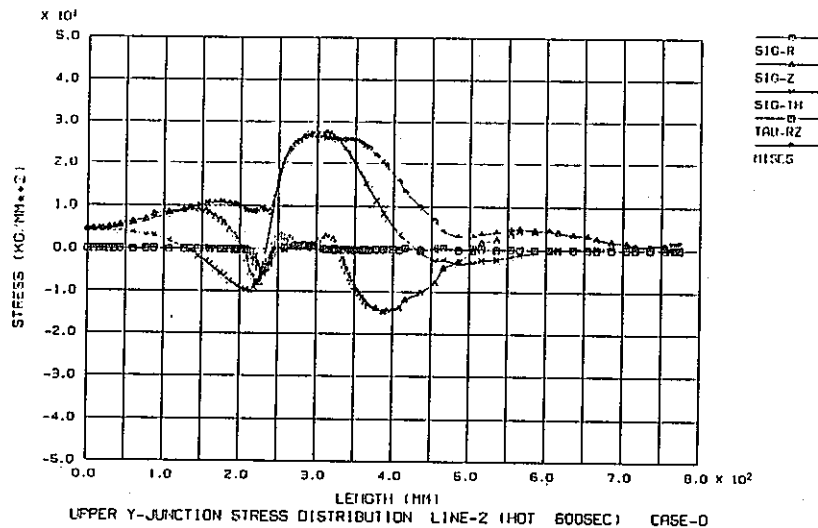
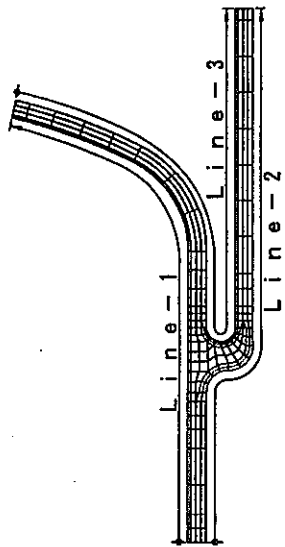


Fig.B-2(e) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic)



応力評価ライン

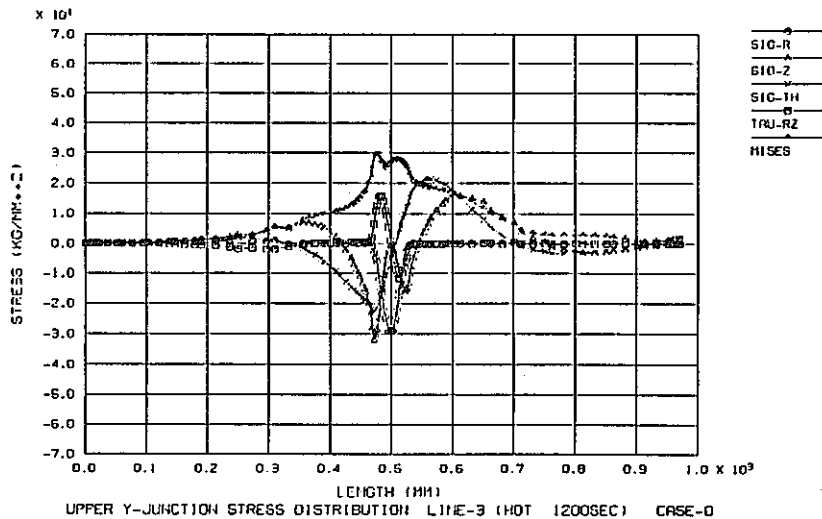
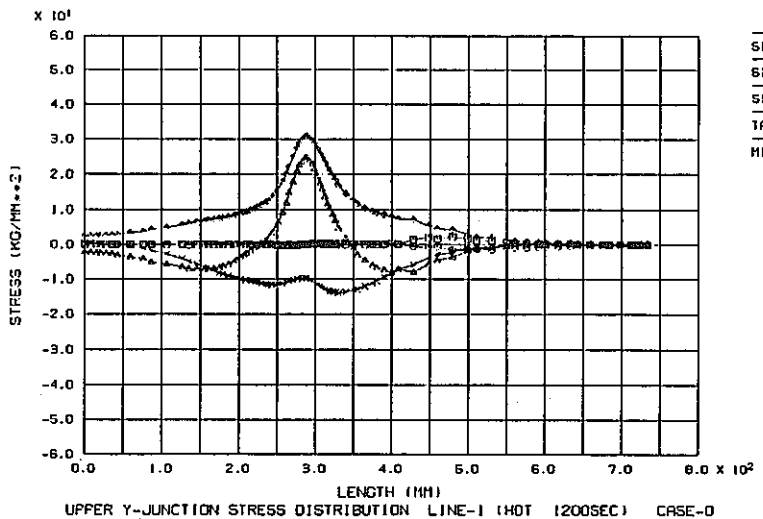
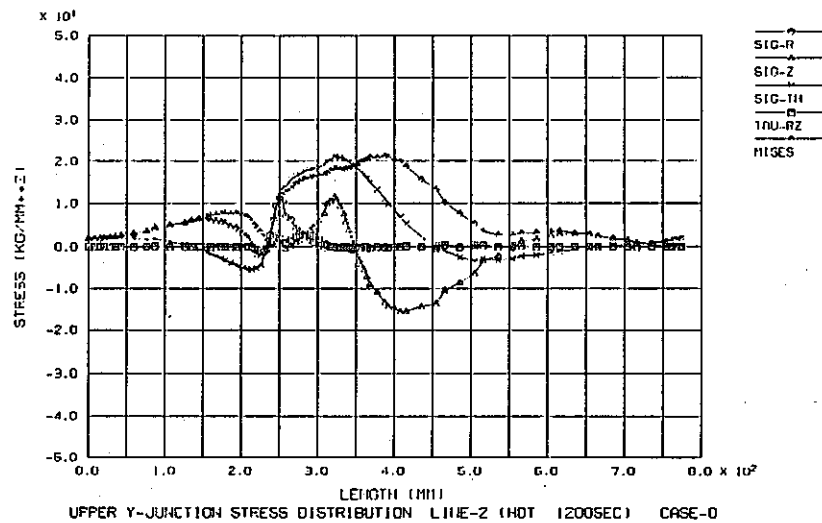
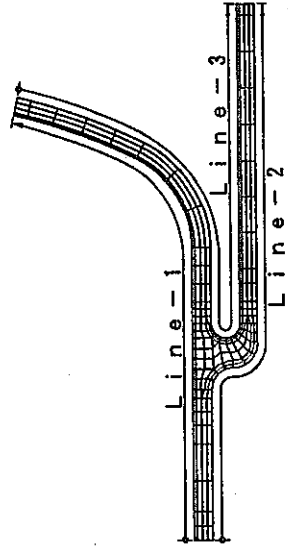


Fig.B-2(f) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic)



応力評価ライン

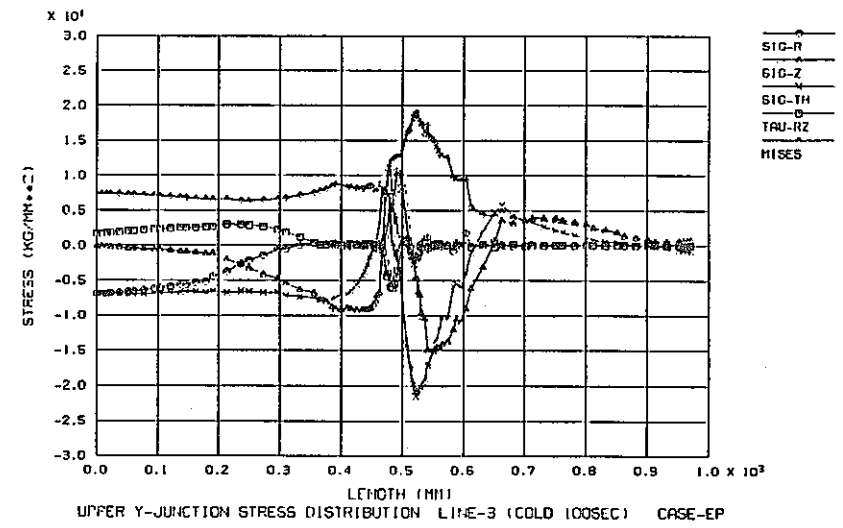
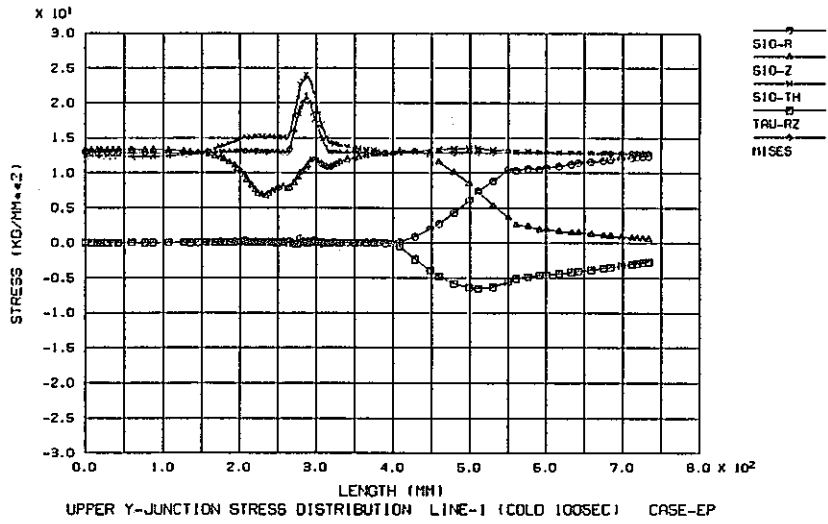
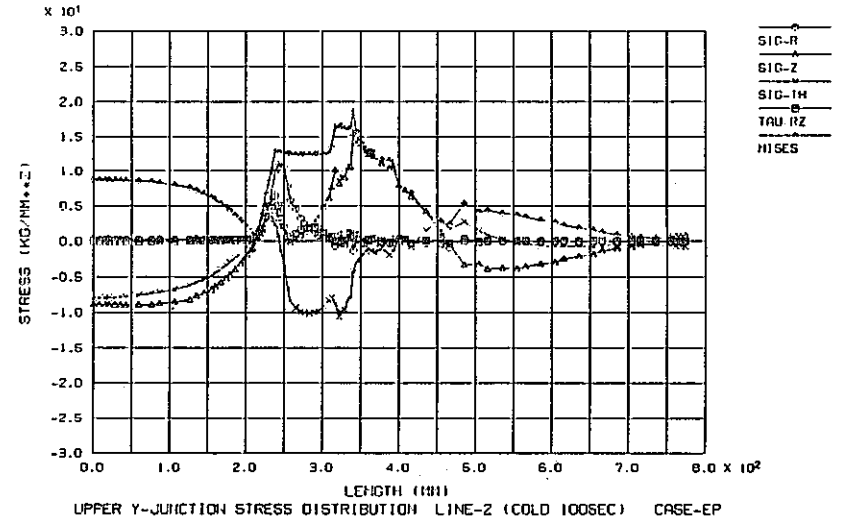
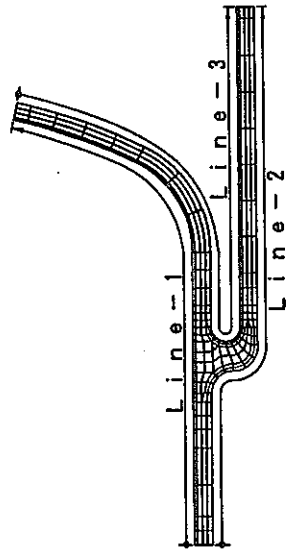


Fig. B-3(a) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elasto-plastic)



応力評価ライン

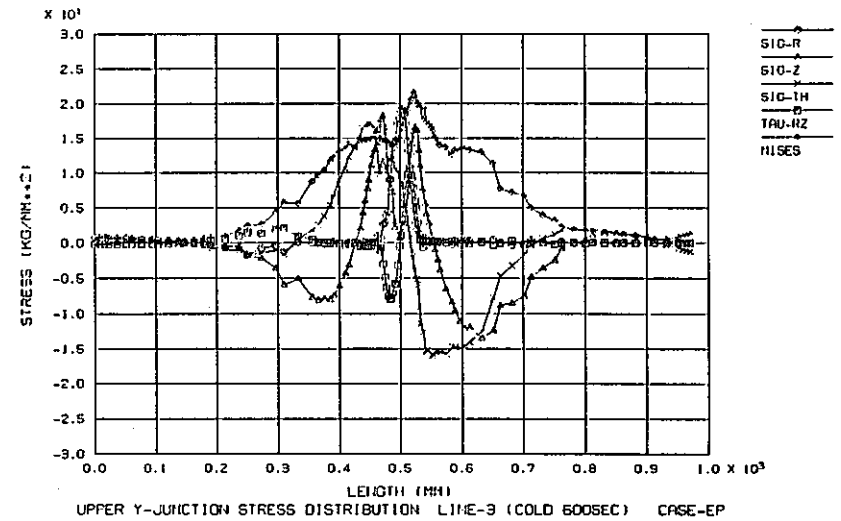
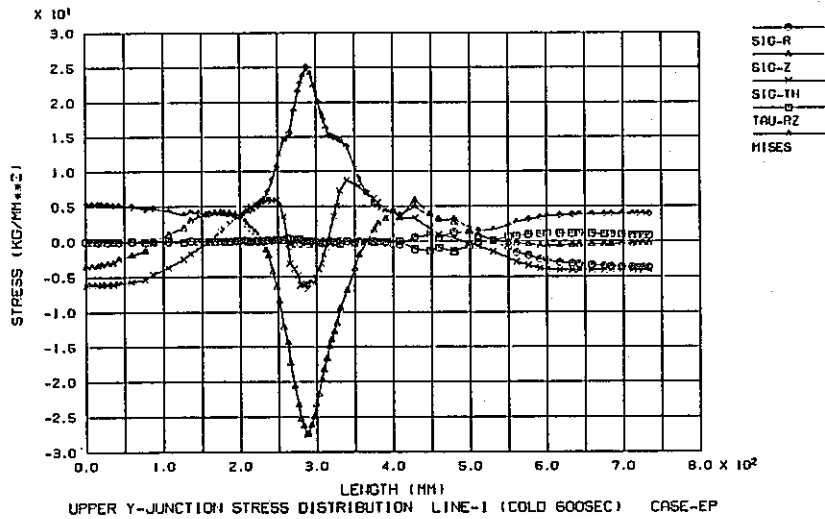
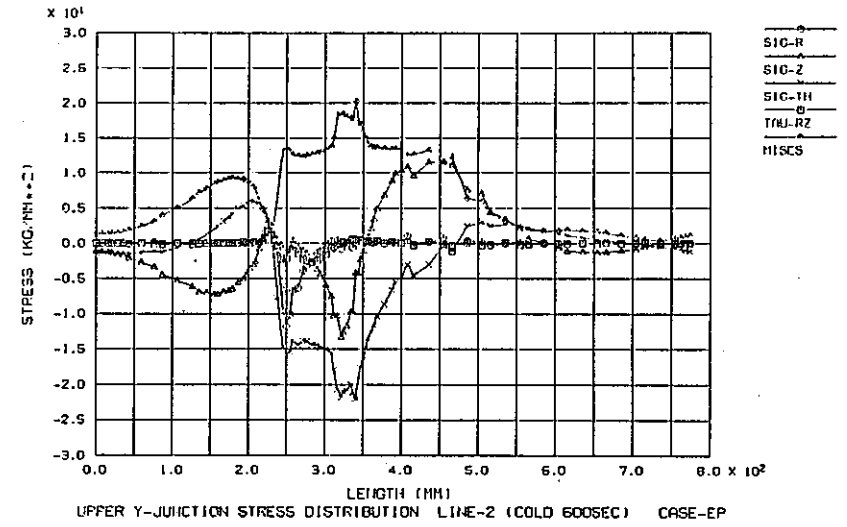
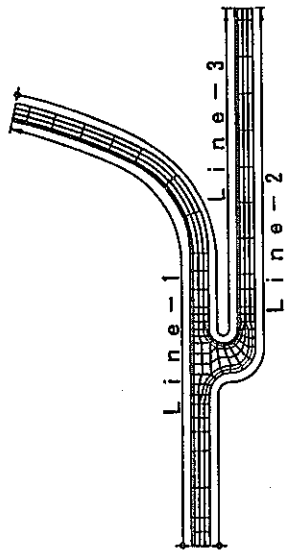


Fig.B-3(b) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elasto-plastic)



応力評価ライン

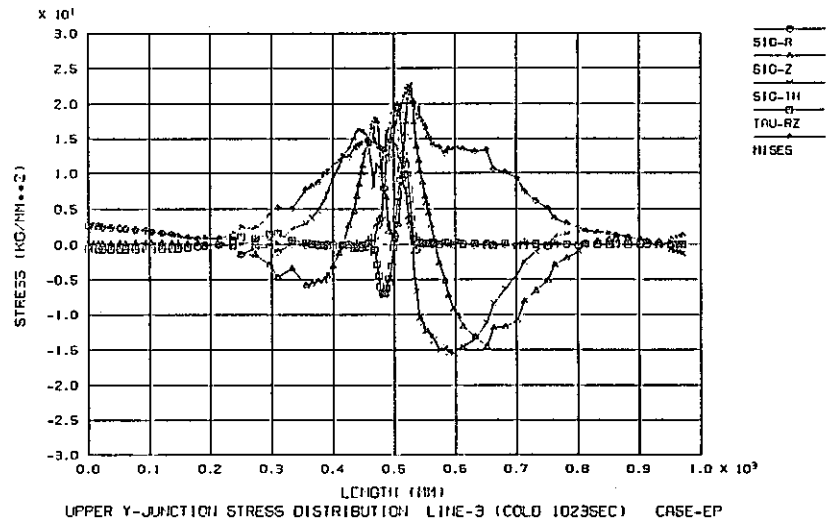
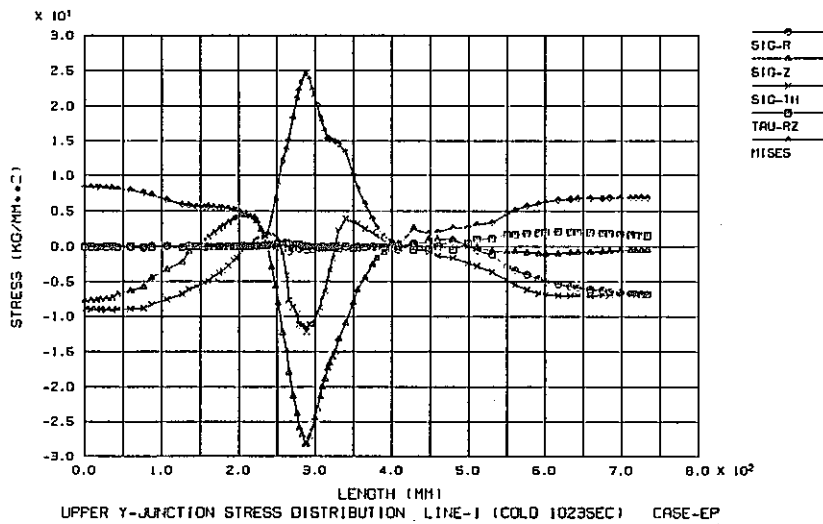
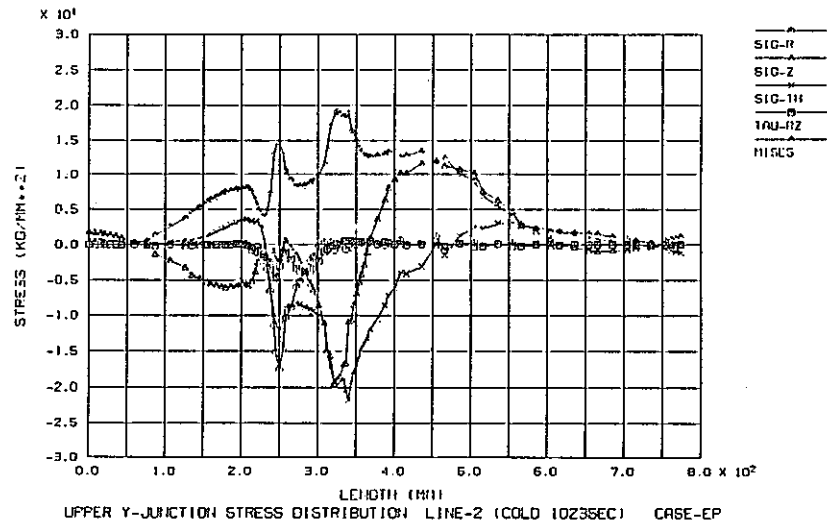
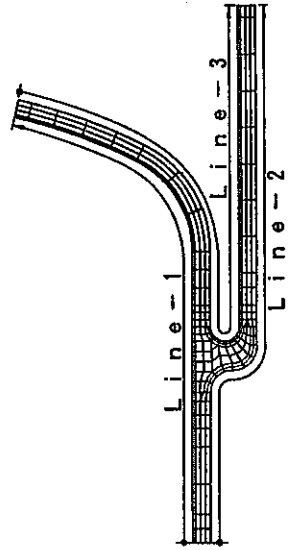


Fig.B-3(c) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elasto-plastic)



応力評価ライン

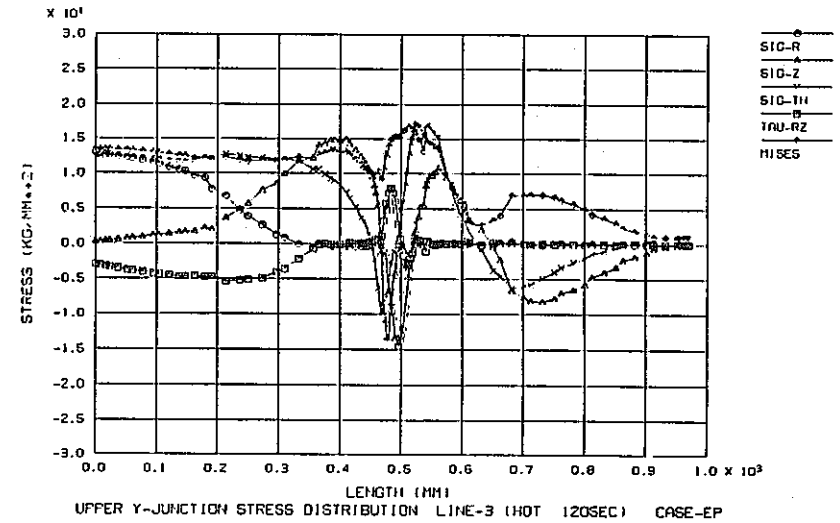
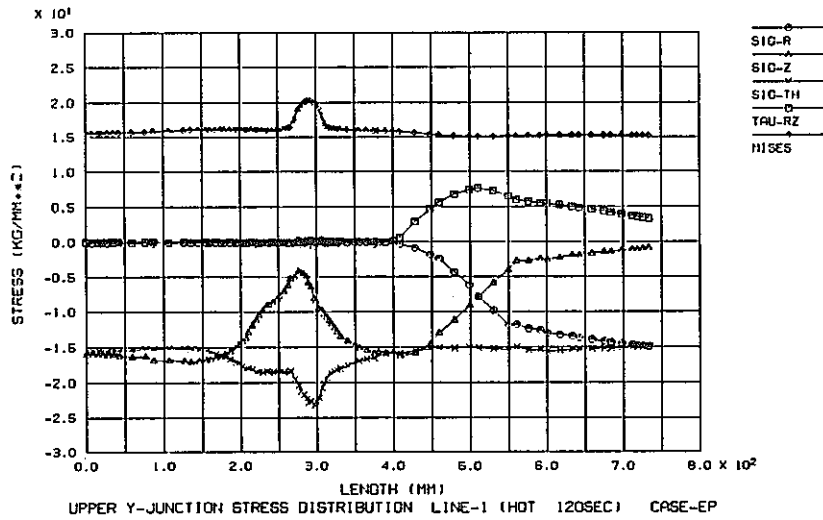
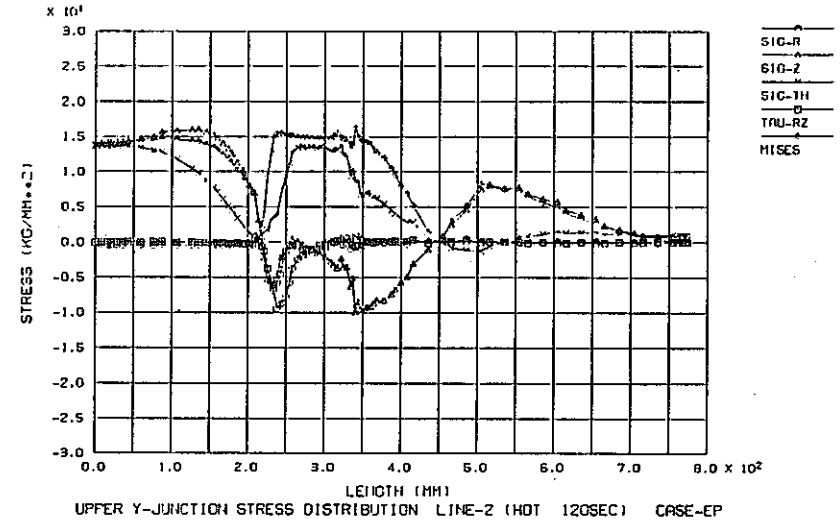
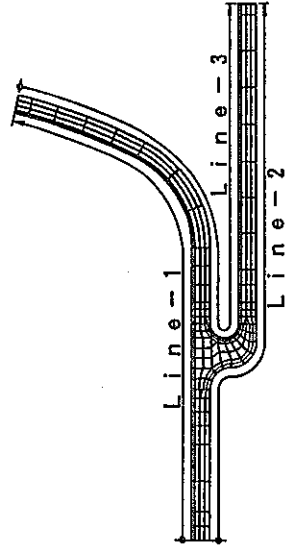


Fig.B-3(d) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elasto-plastic)



応力評価ライン

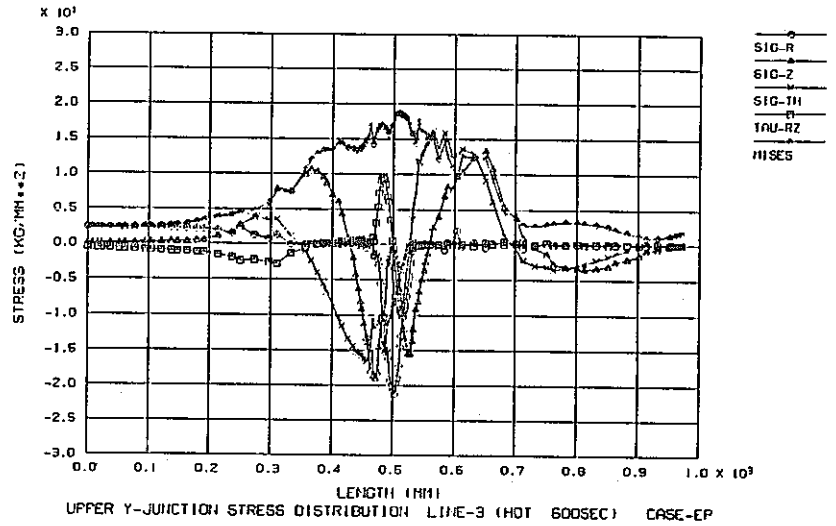
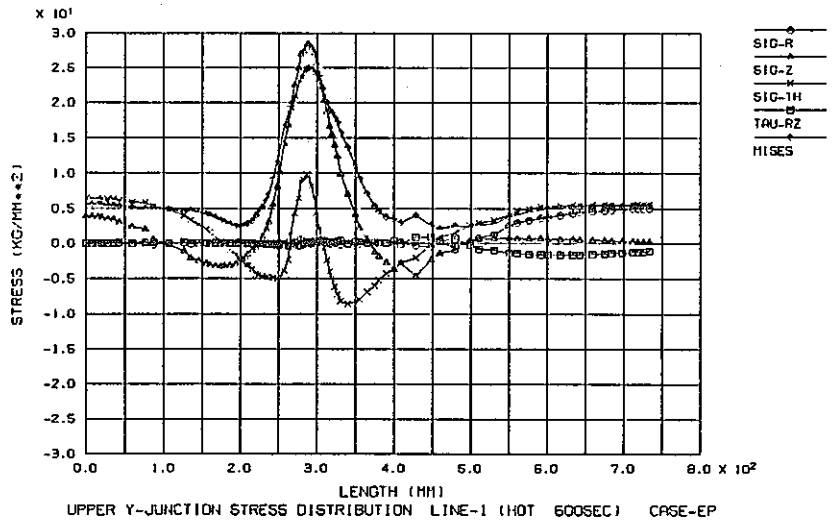
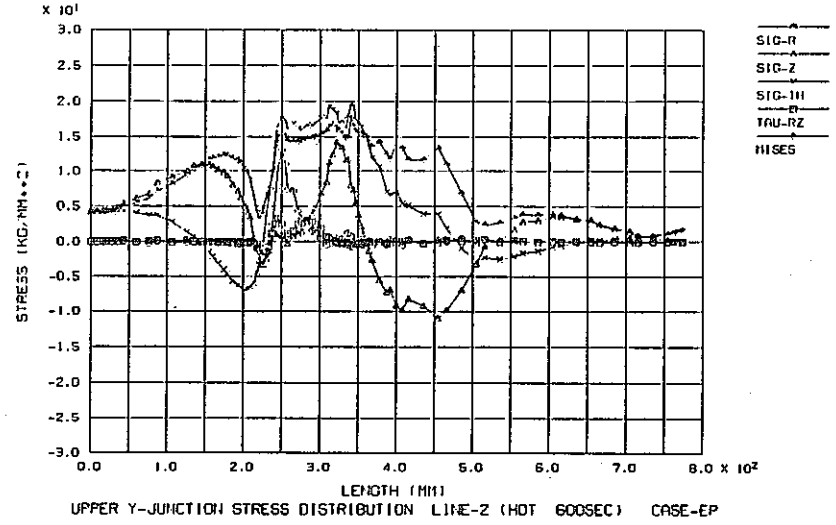
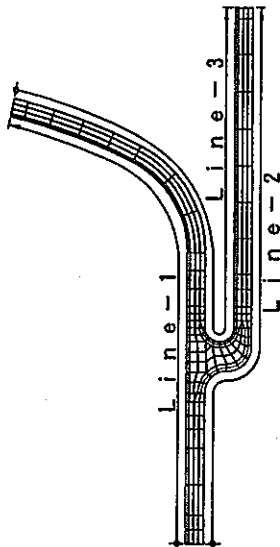


Fig.B-3(e) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elasto-plastic)



応力評価ライン

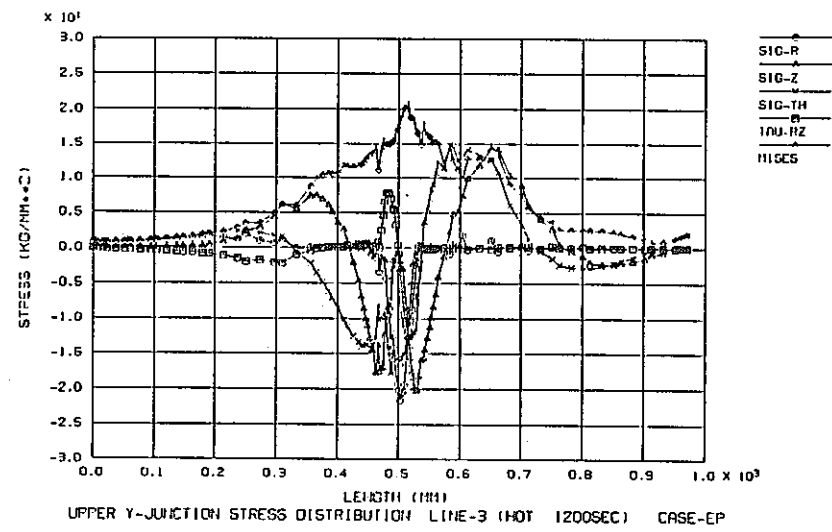
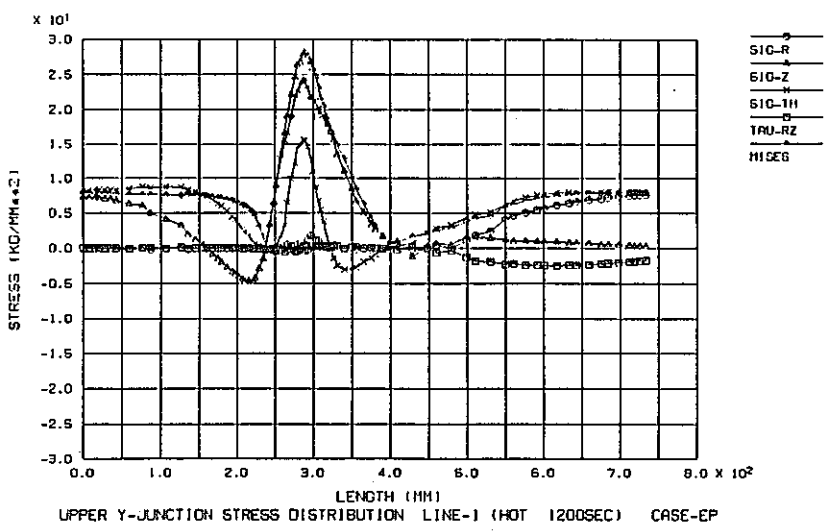
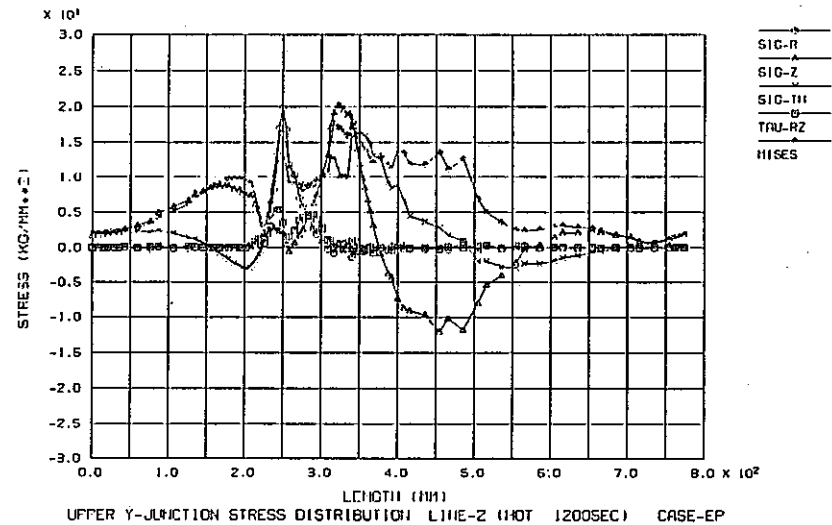
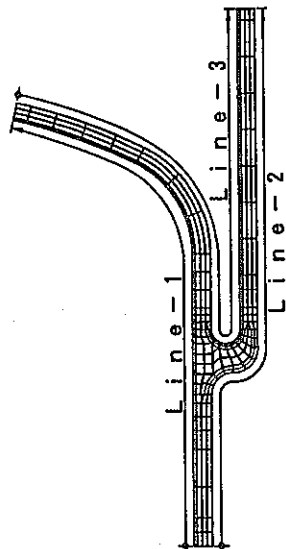


Fig. B-3(f) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elasto-plastic)



応力評価ライン

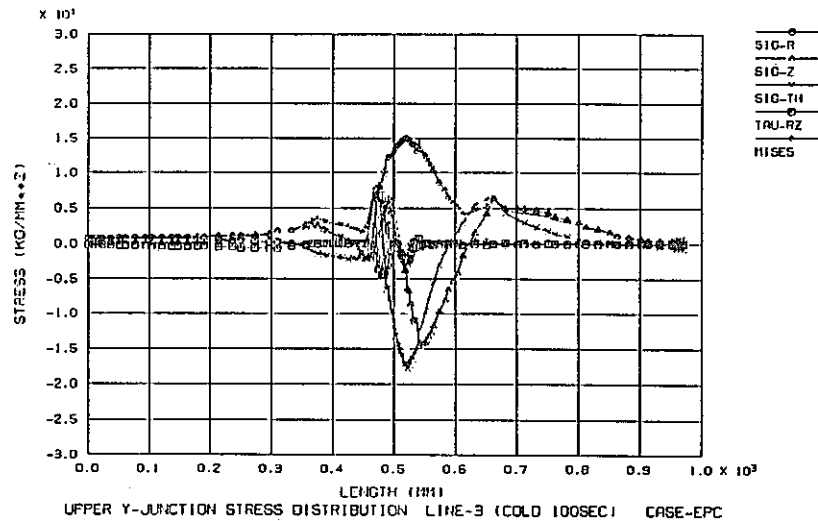
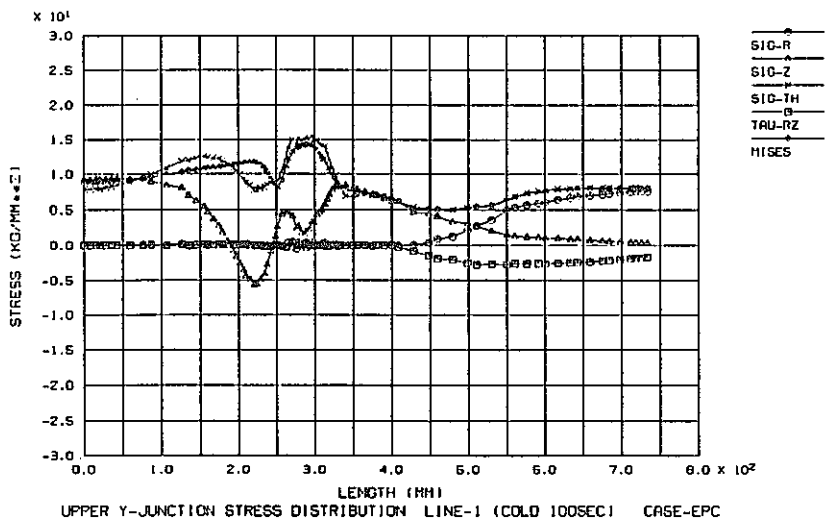
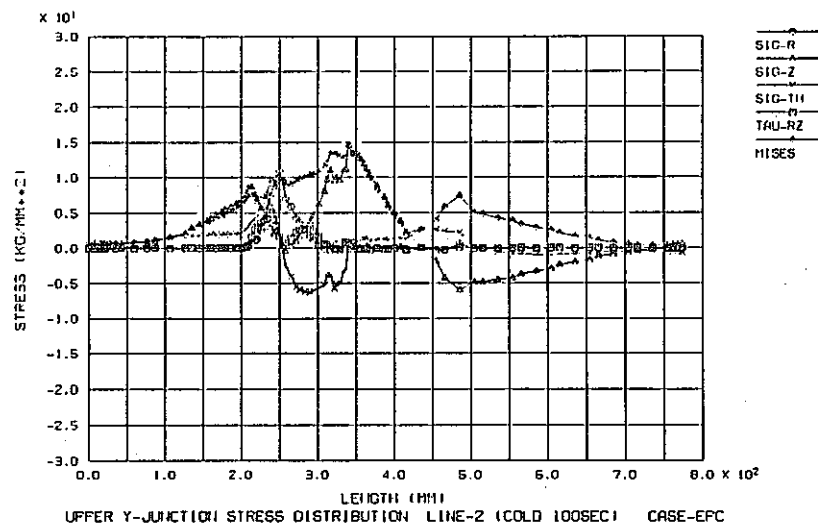
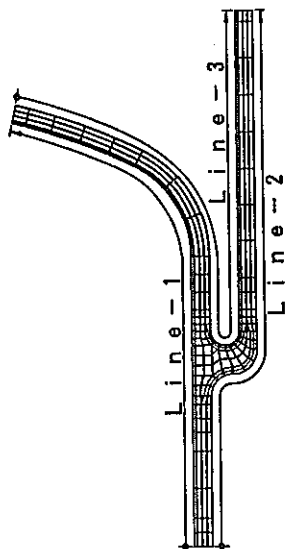


Fig. B-4(a) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic-plastic-creep)



応力評価ライン

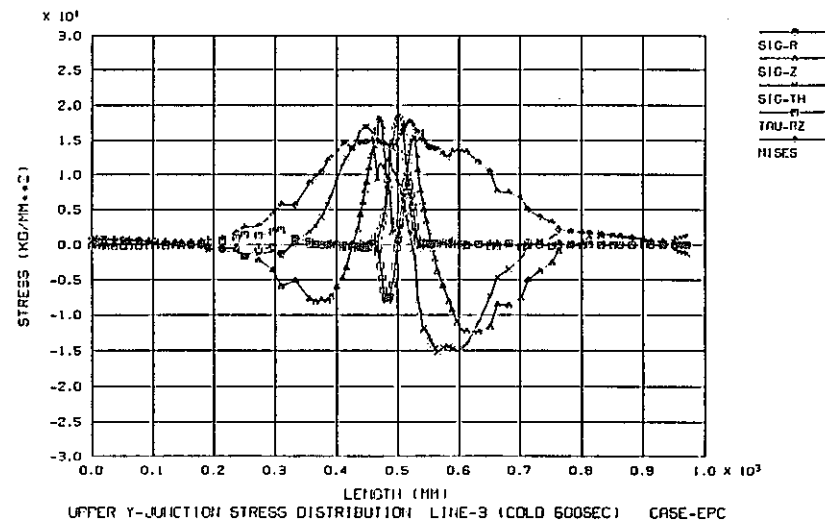
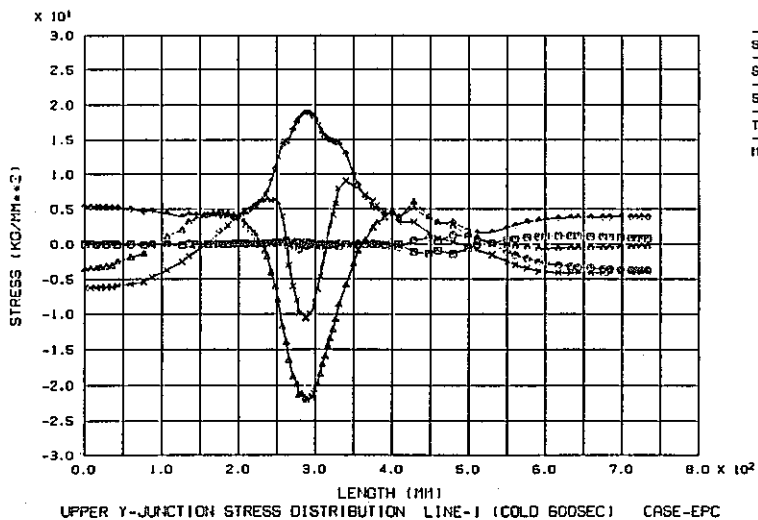
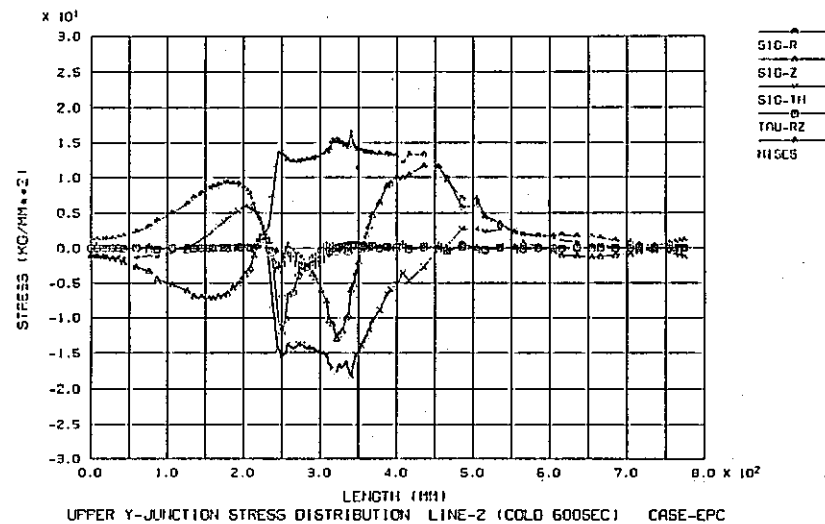
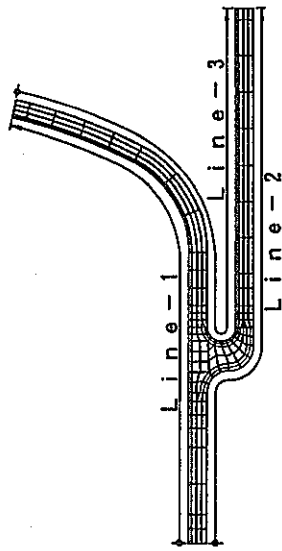


Fig. B-4(b) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic-plastic-creep)



応力評価ライン

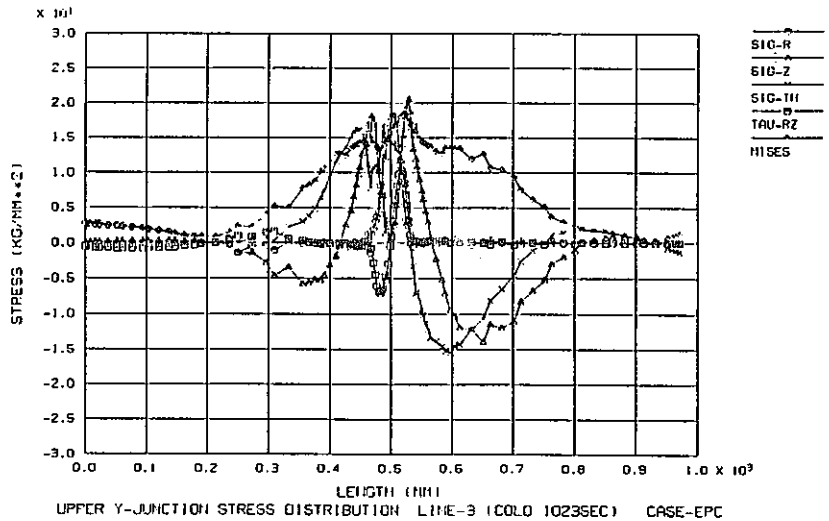
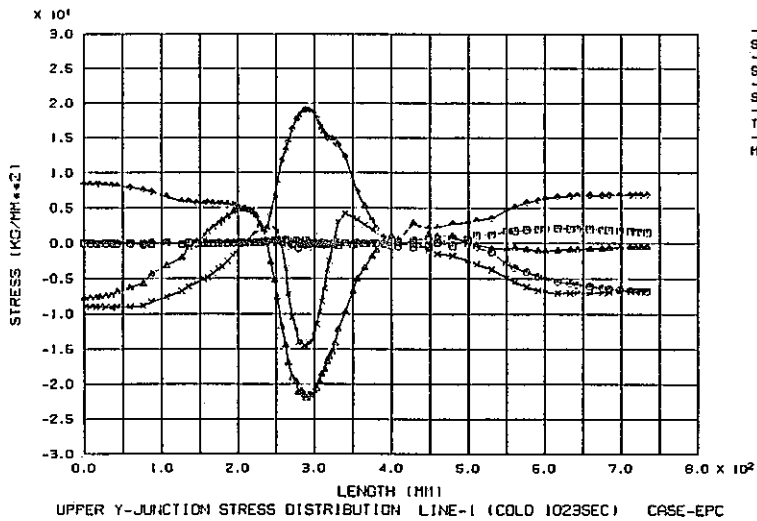
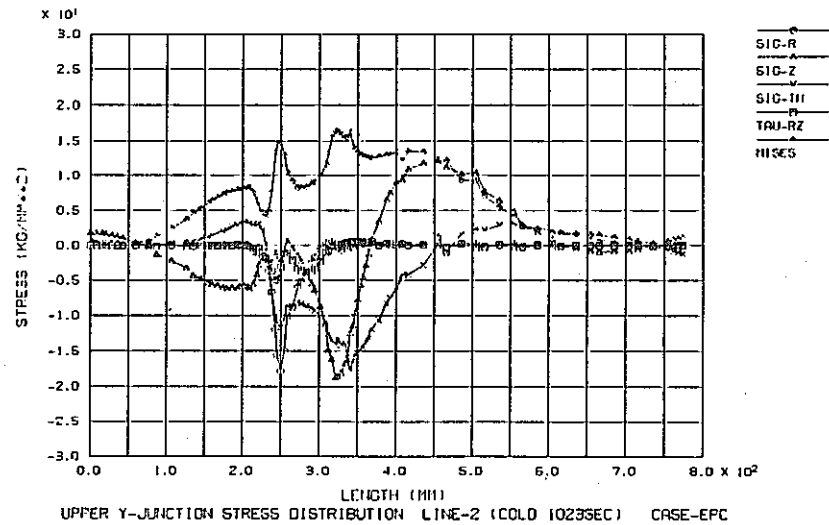
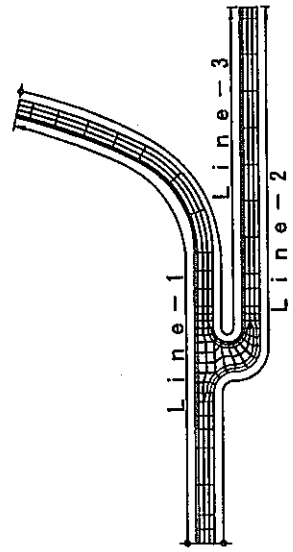


Fig.B-4(c) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic-plastic-creep)



応力評価ライン

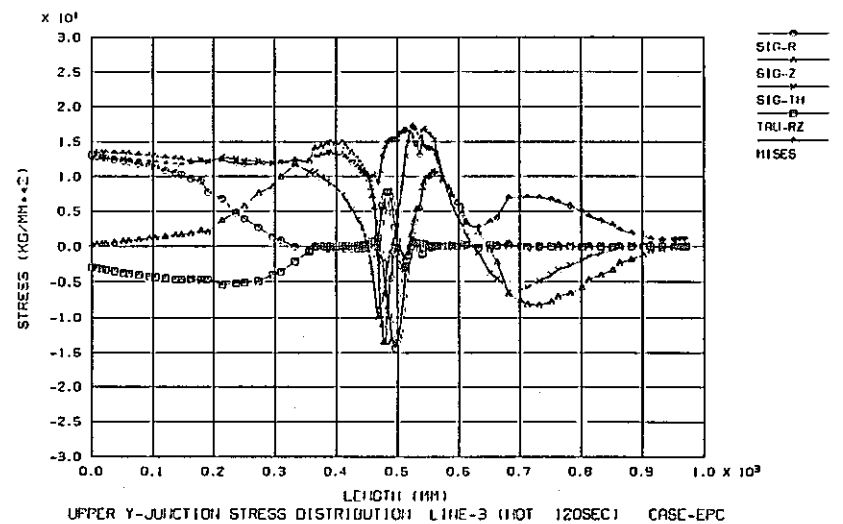
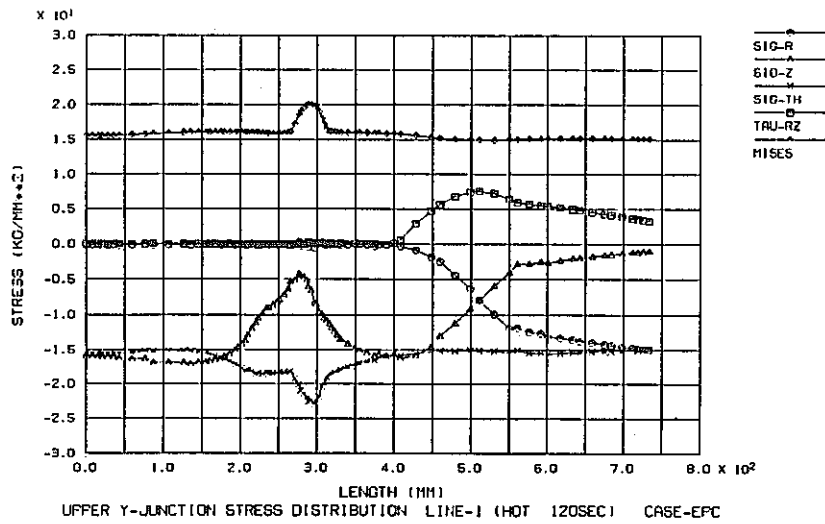
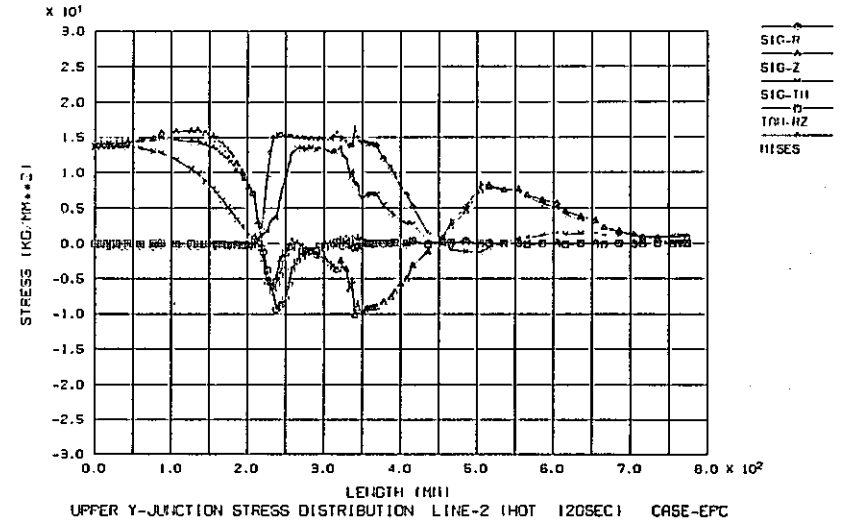
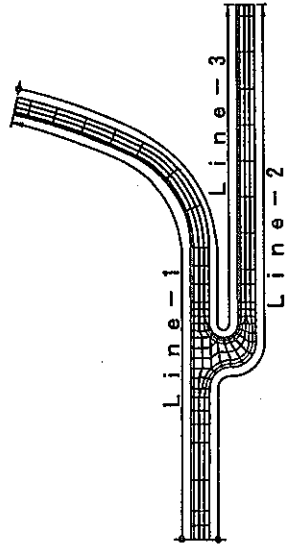


Fig.B-4(d) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic-plastic-creep)



応力評価ライン

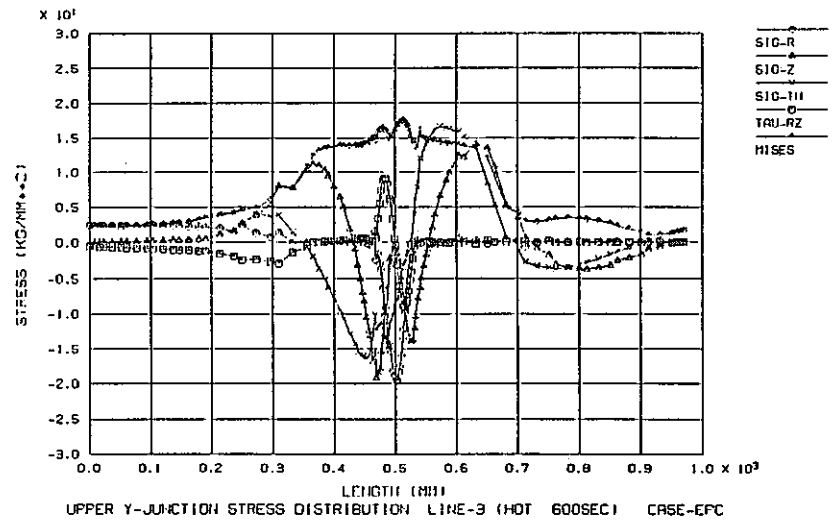
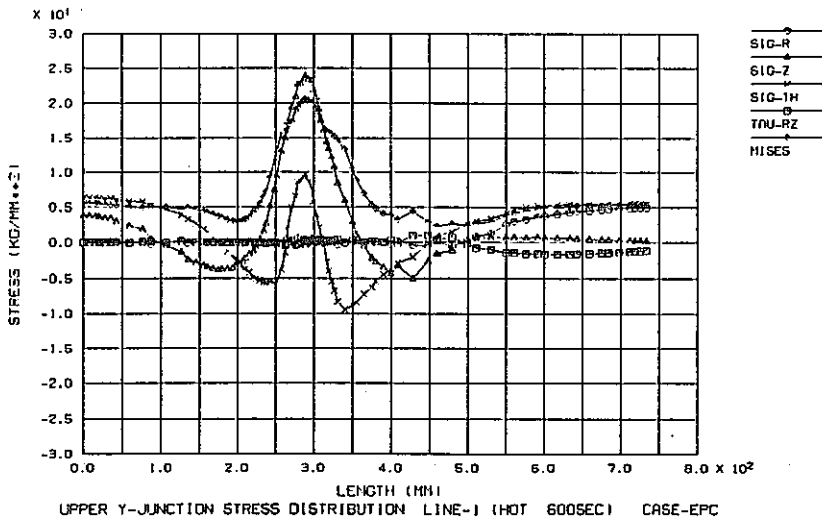
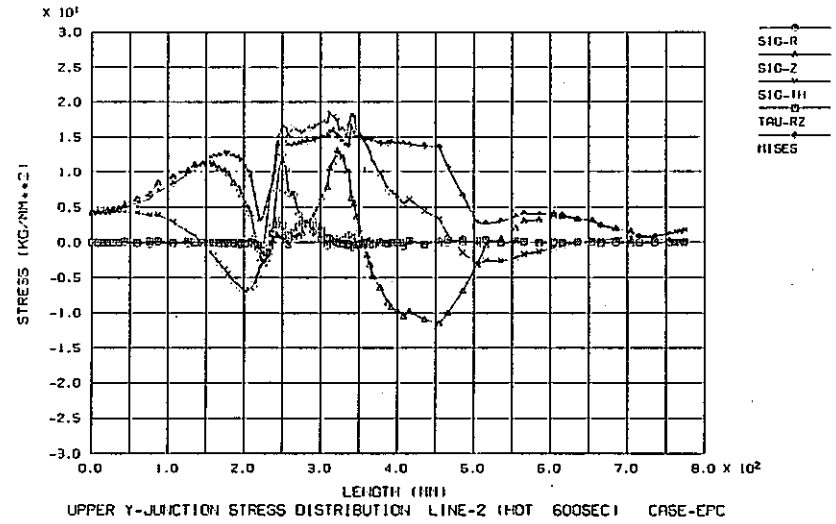
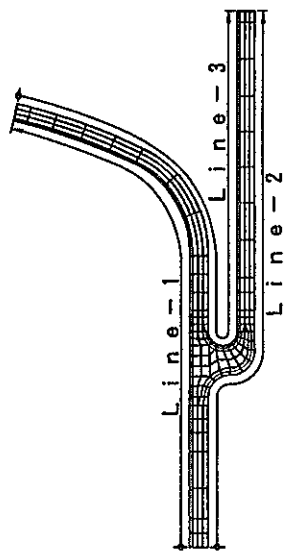


Fig. B-4(e) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic-plastic-creep)



応力評価ライン

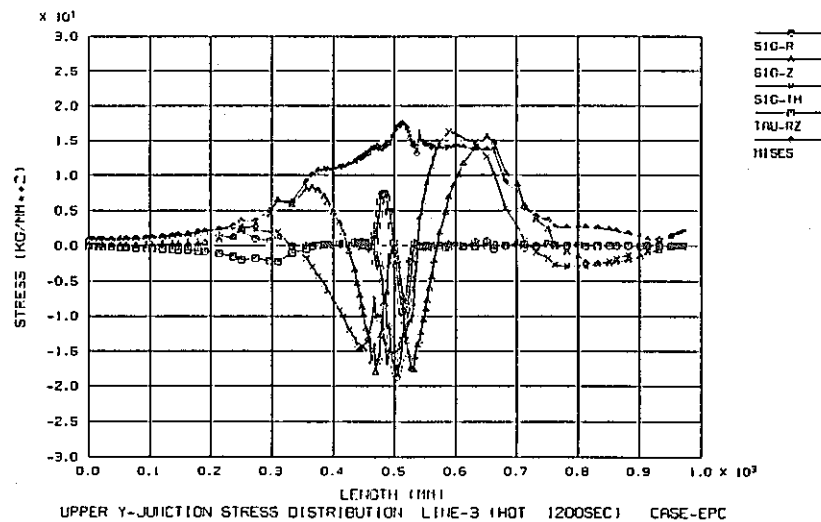
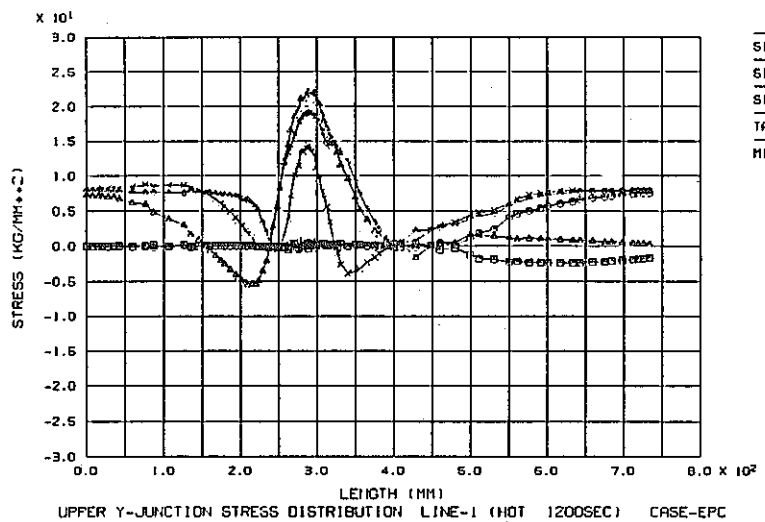
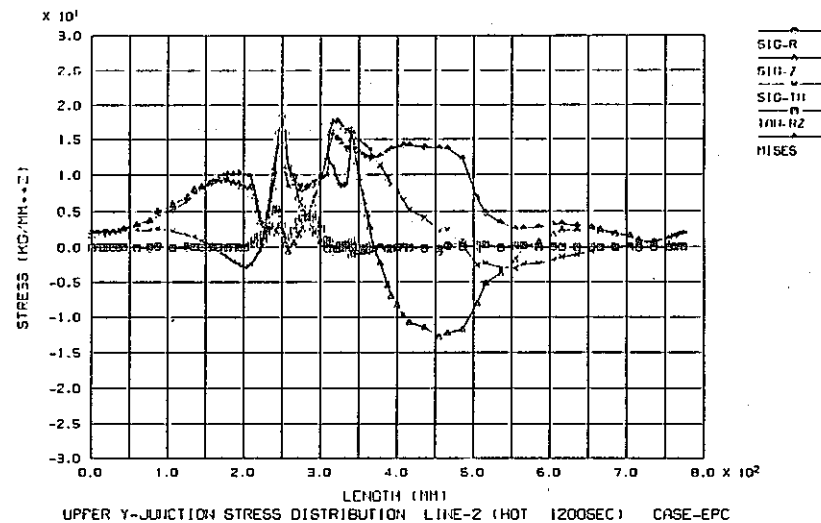
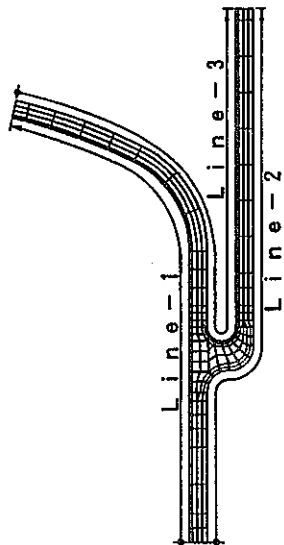


Fig.B-4(f) Stress distribution on estimation surfaces (Standard Case - Elastic-plastic-creep)



応力評価ライン

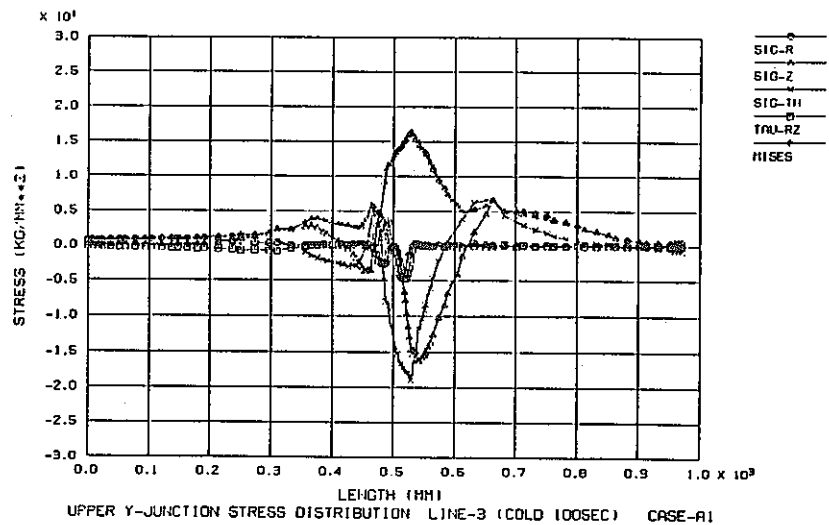
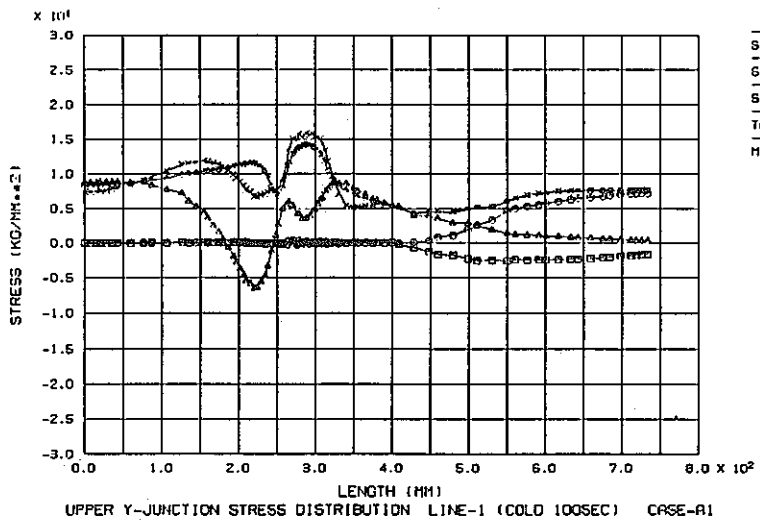
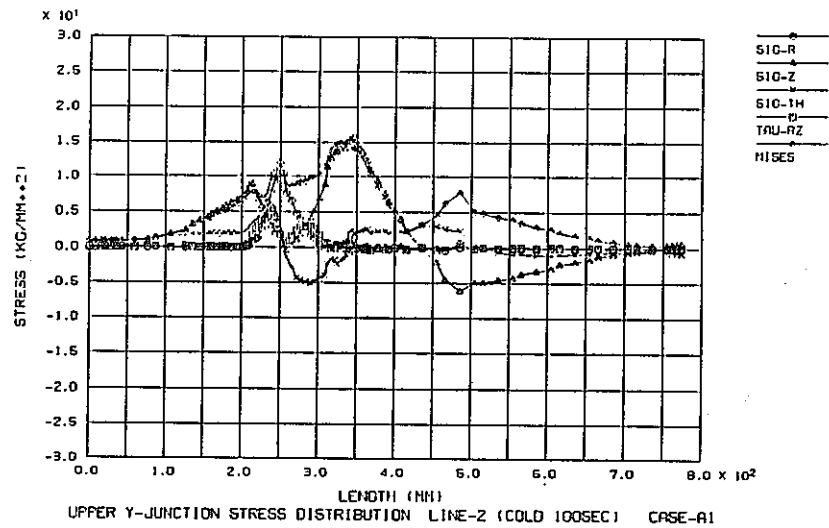
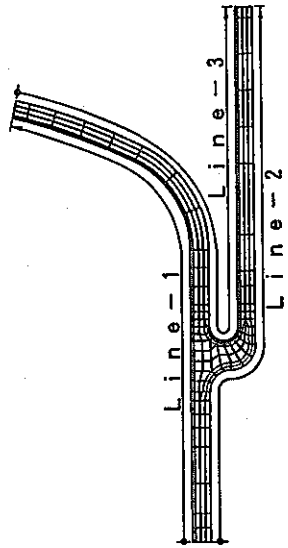


Fig.B-5(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case A-1)



応力評価ライン

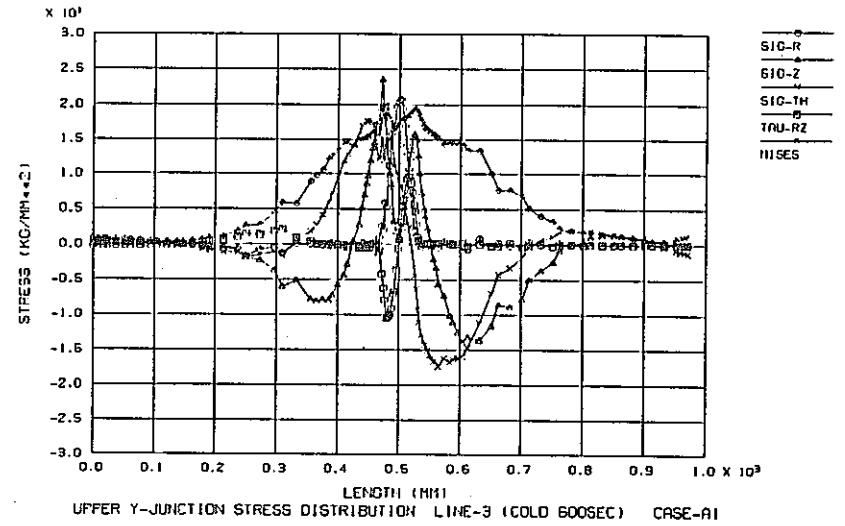
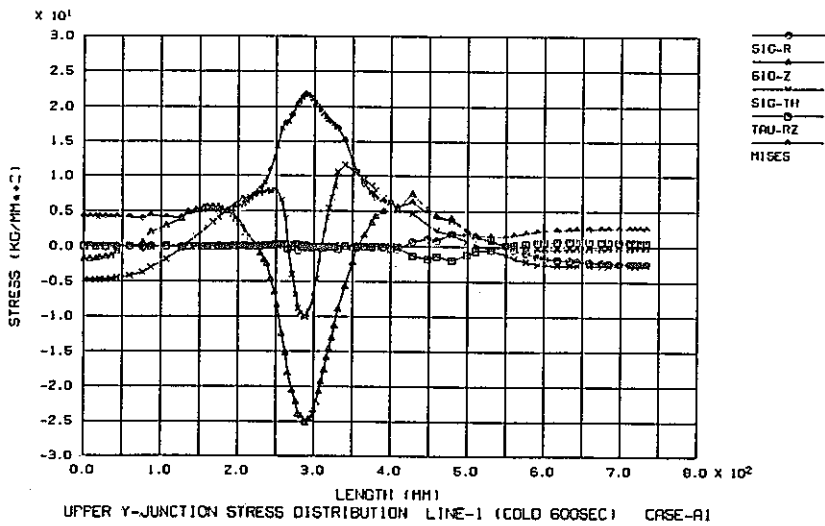
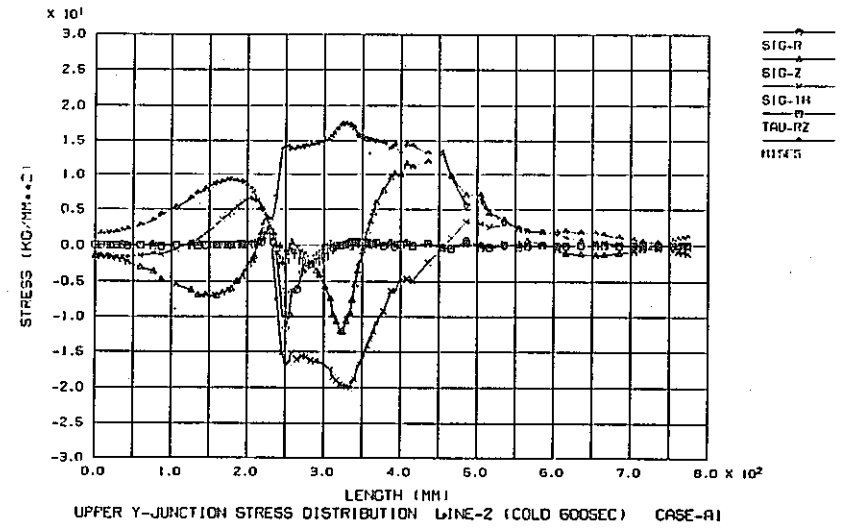
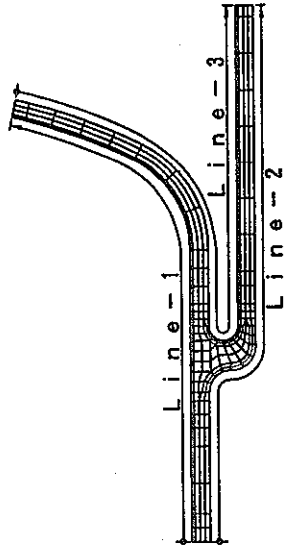


Fig. B-5(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case A-1)



応力評価ライン

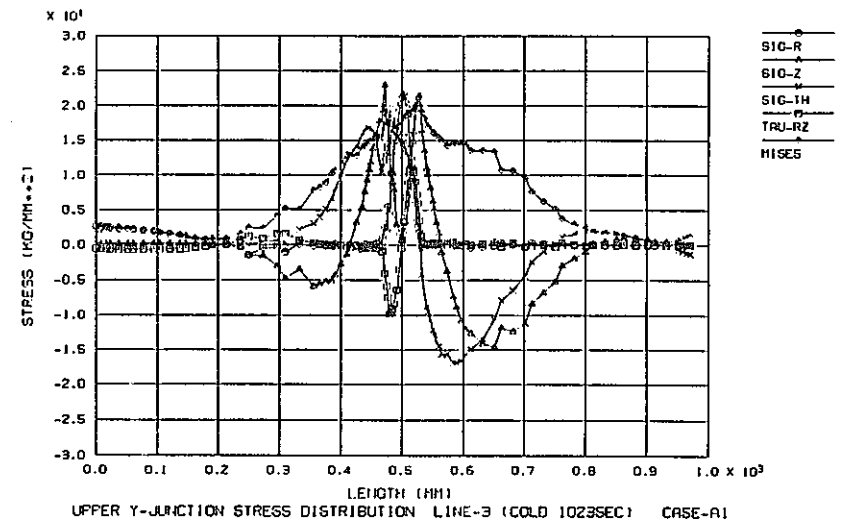
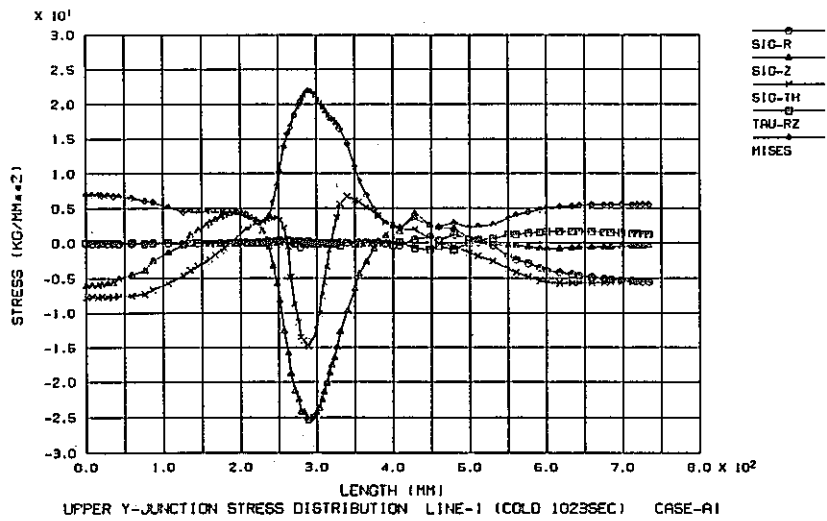
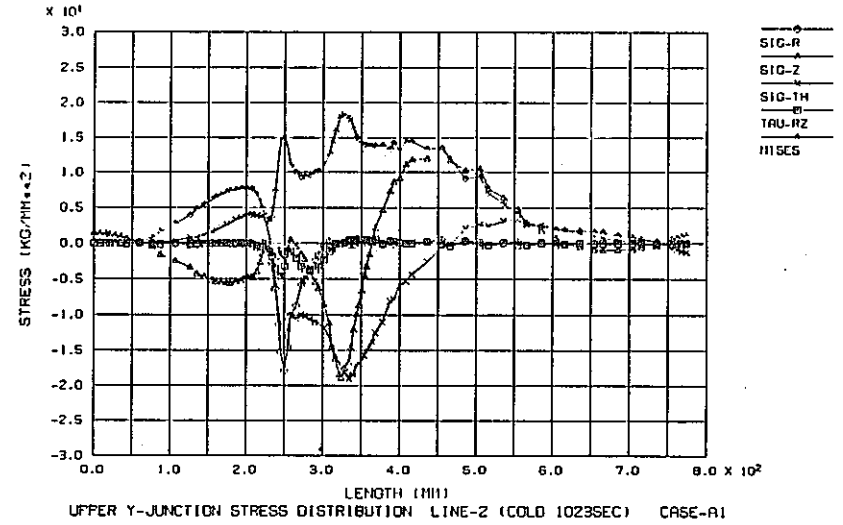
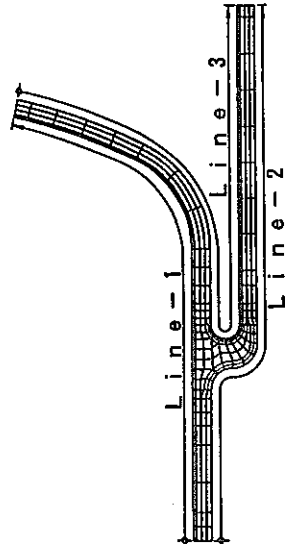


Fig. B-5(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case A-1)



応力評価ライン

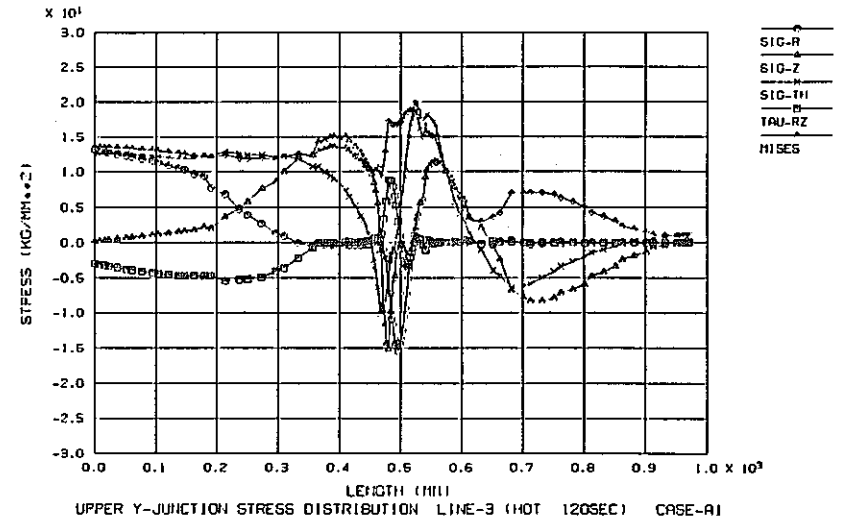
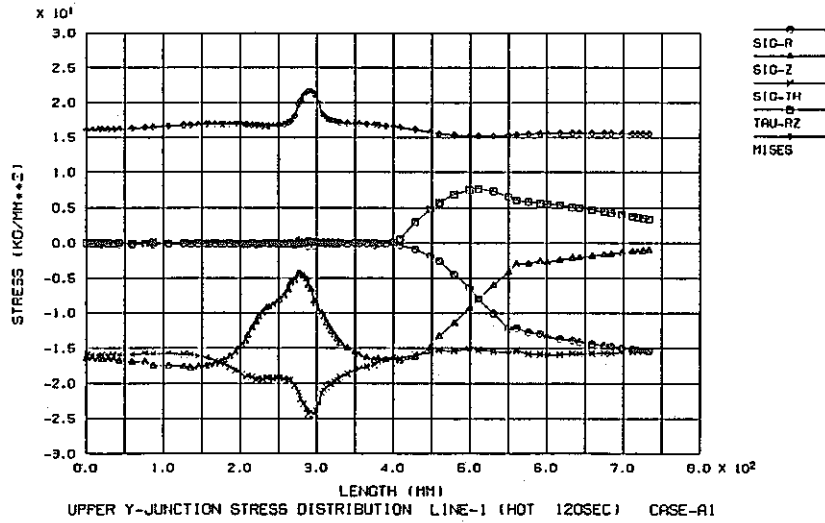
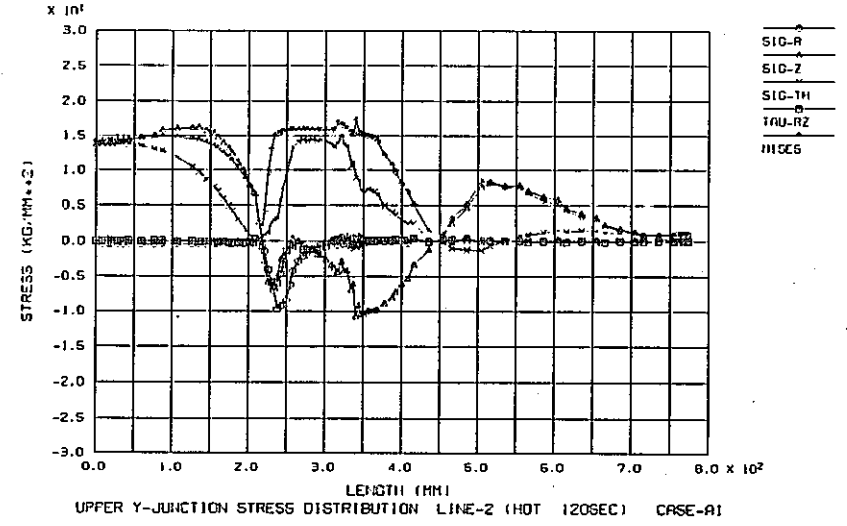
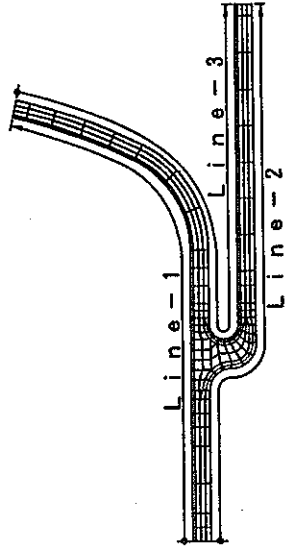


Fig. B-5(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case A-1)



応力評価ライン

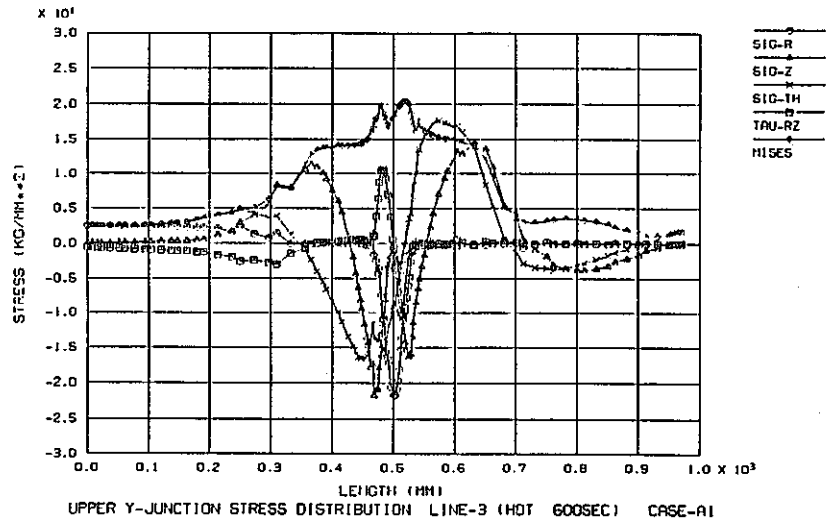
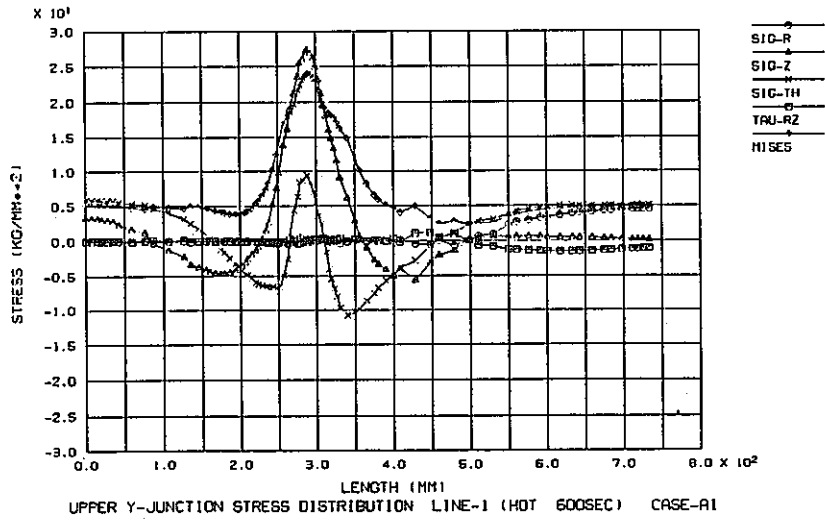
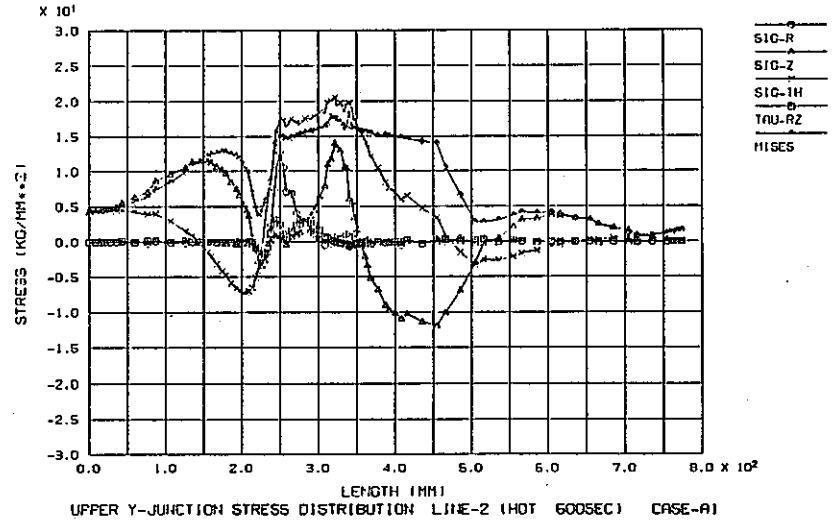
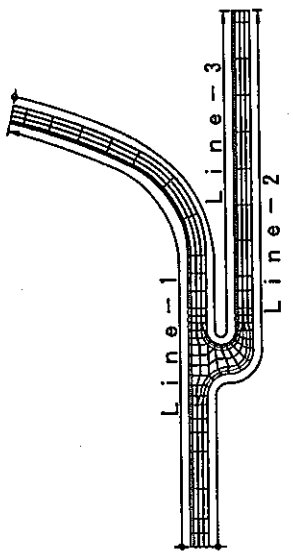
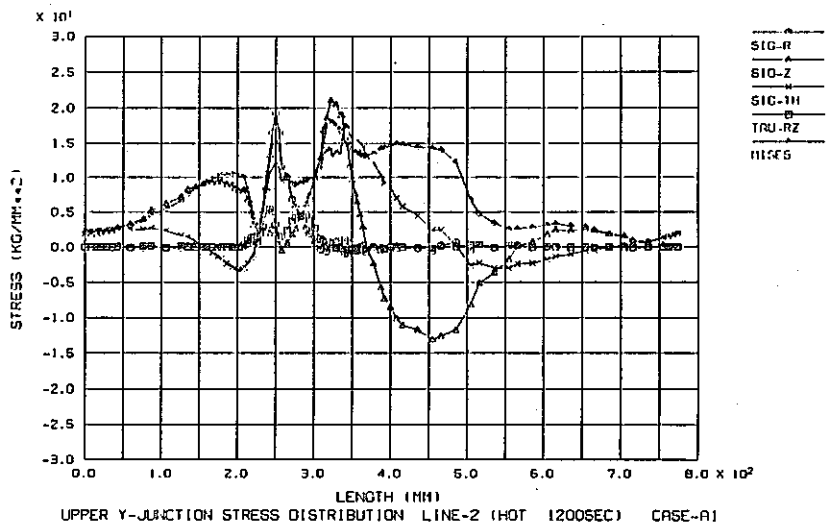


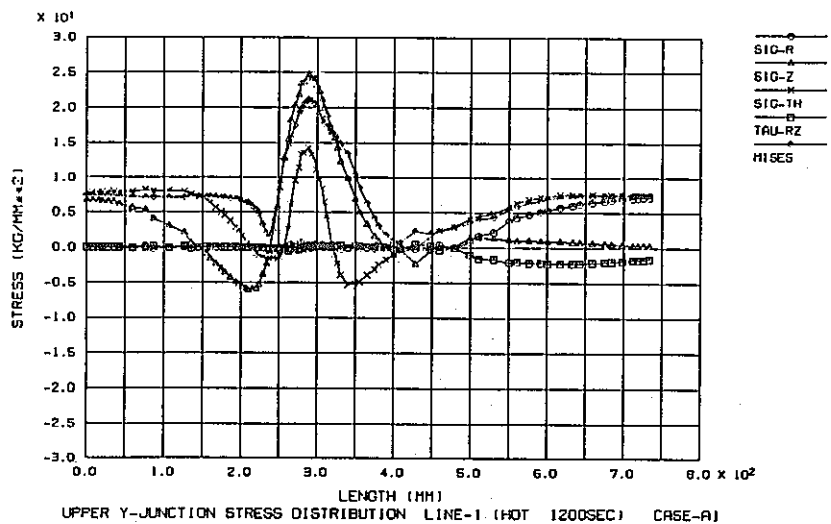
Fig. B-5(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case A-1)



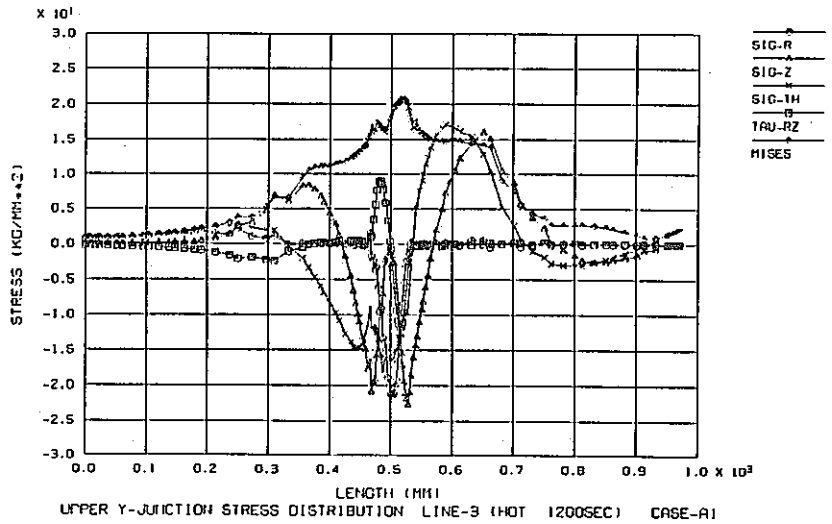
応力評価ライン



UPPER Y-JUNCTION STRESS DISTRIBUTION LINE-2 (HOT 1200SEC) CASE-A1

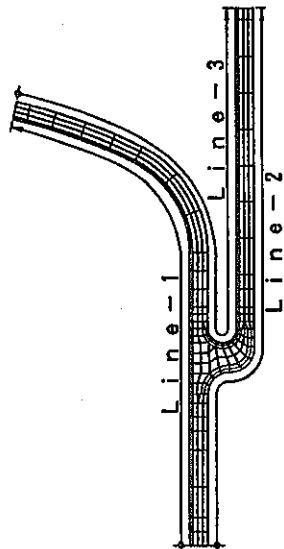


UPPER Y-JUNCTION STRESS DISTRIBUTION LINE-1 (HOT 1200SEC) CASE-A1



UPPER Y-JUNCTION STRESS DISTRIBUTION LINE-3 (HOT 1200SEC) CASE-A1

Fig. B-5(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case A-1)



応力評価ライン

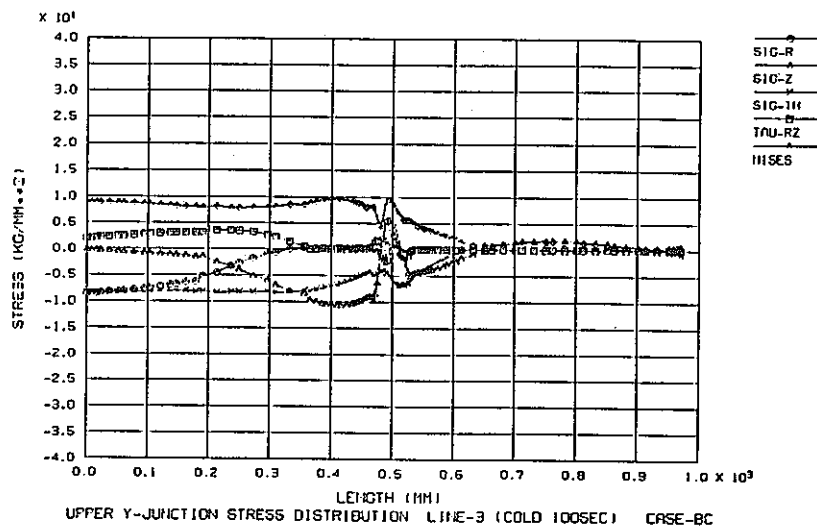
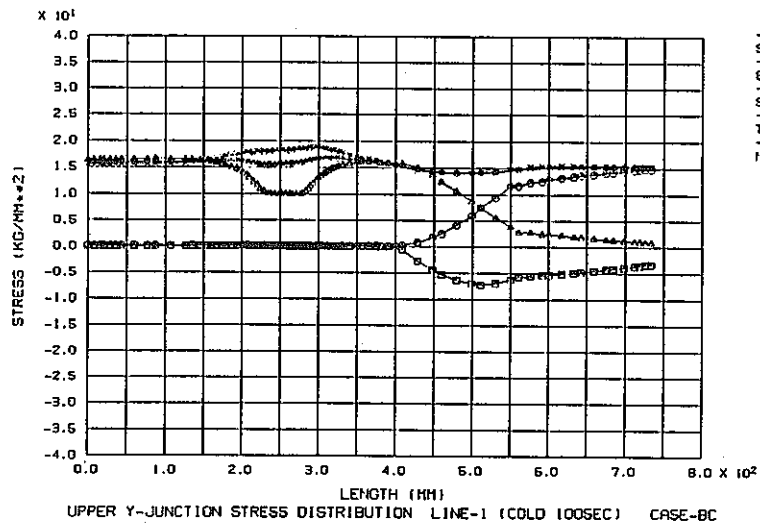
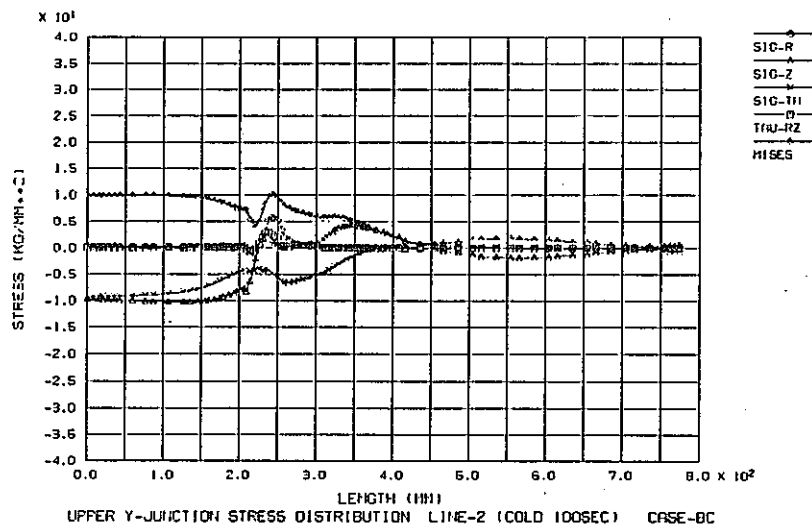
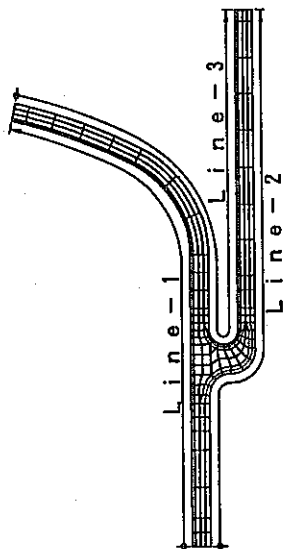
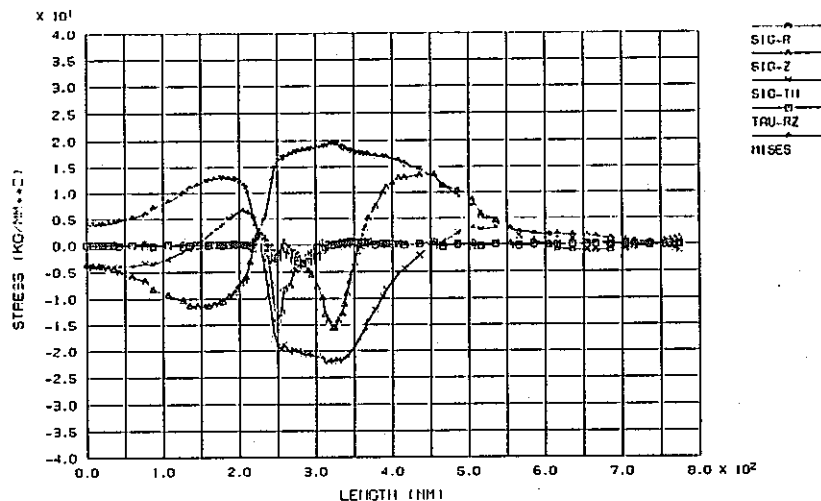


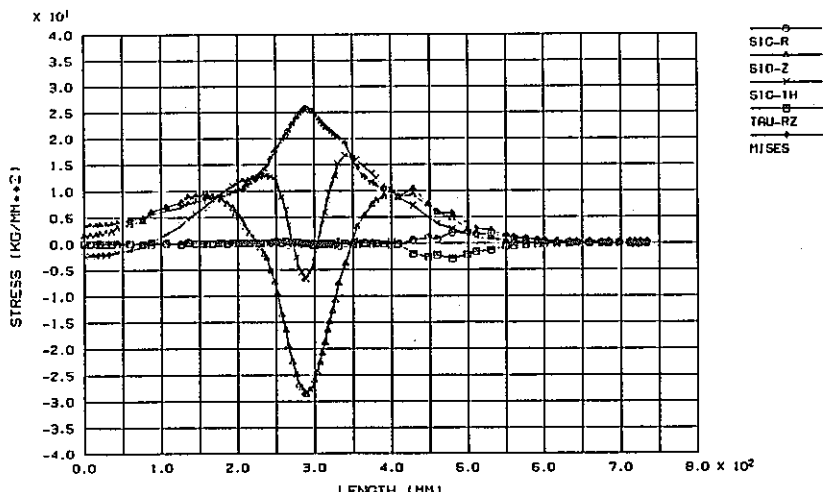
Fig.B-6(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case B-1)



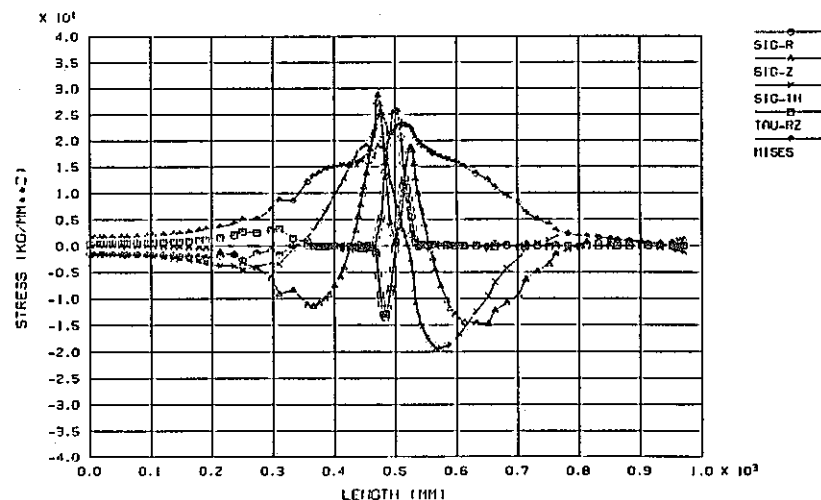
応力評価ライン



UPPER Y-JUNCTION STRESS DISTRIBUTION LINE-2 (COLD 600SEC) CASE-BC

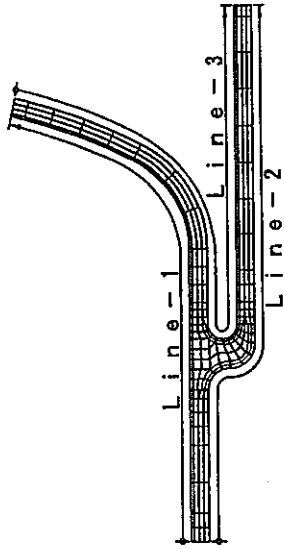


UPPER Y-JUNCTION STRESS DISTRIBUTION LINE-1 (COLD 600SEC) CASE-BC



UPPER Y-JUNCTION STRESS DISTRIBUTION LINE-3 (COLD 600SEC) CASE-BC

Fig. B-6(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case B-1)



応力評価ライン

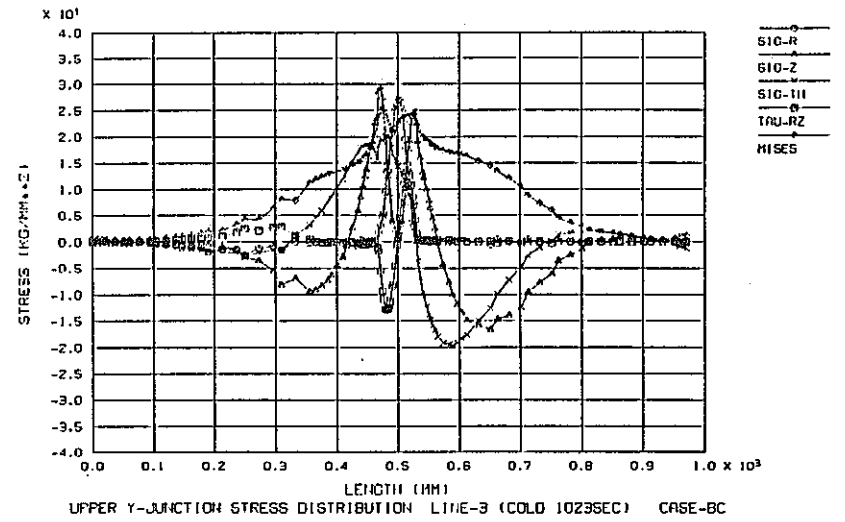
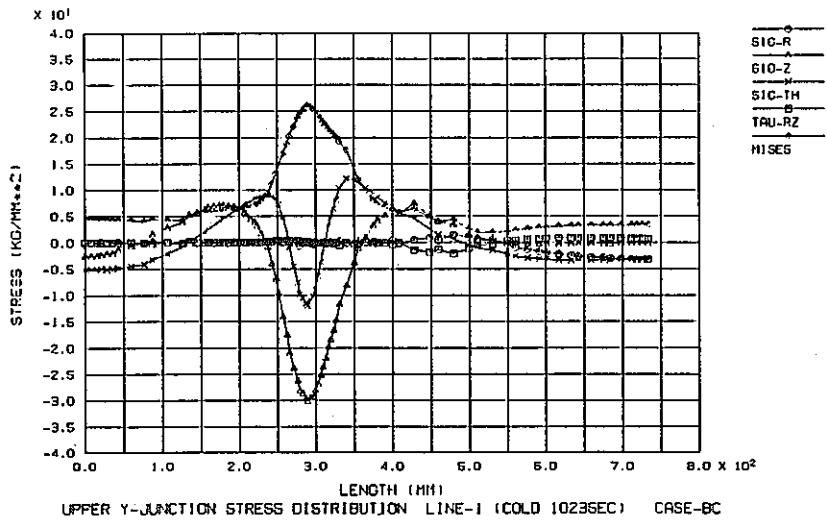
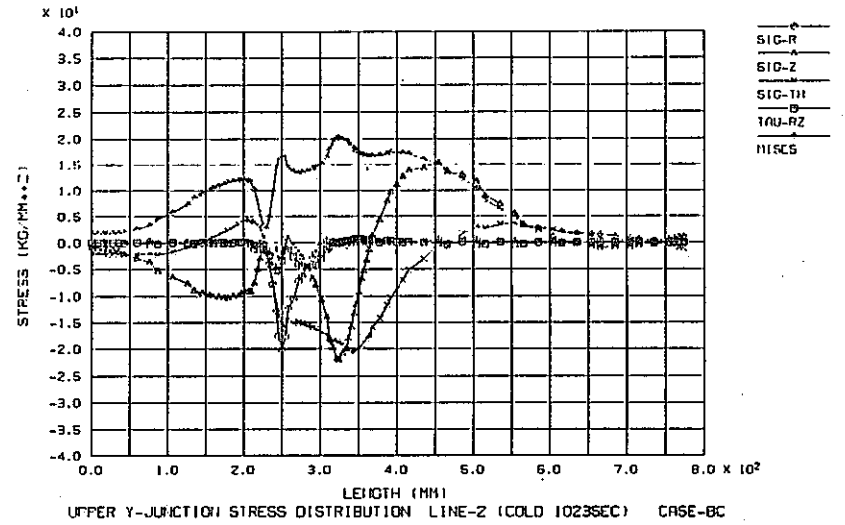
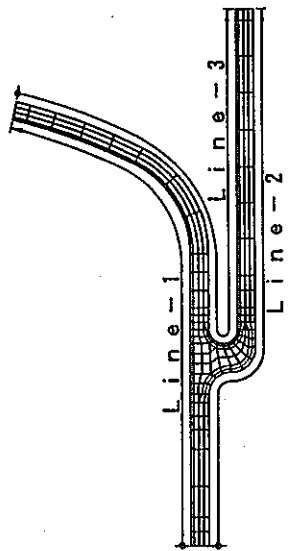


Fig.B-6(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case B-1)



応力評価ライン

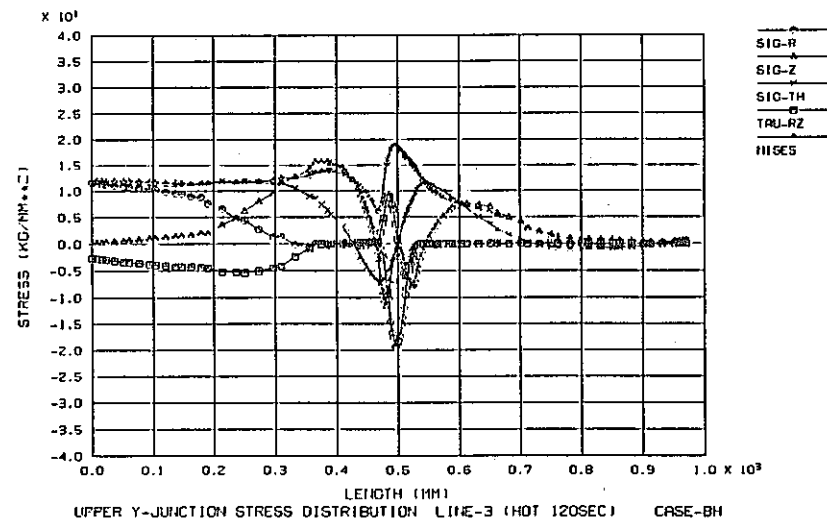
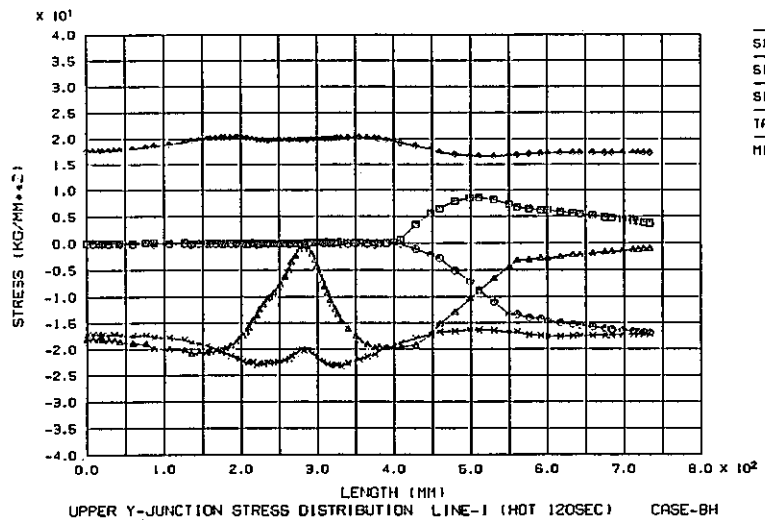
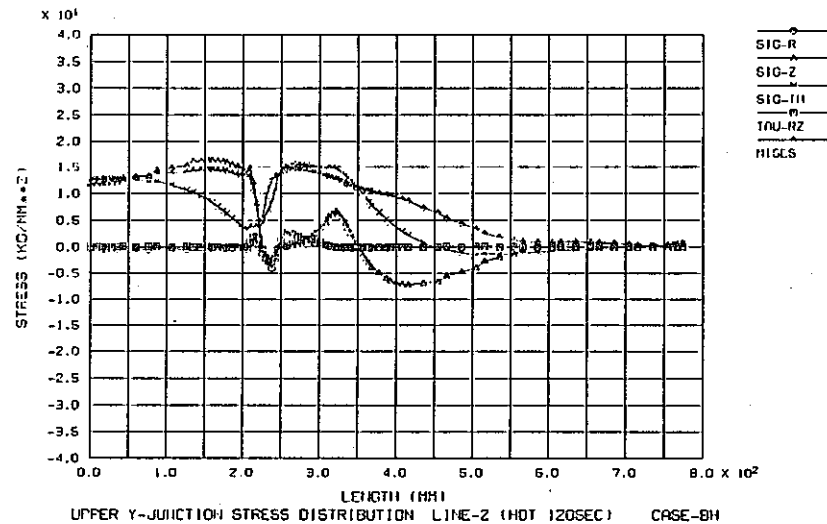
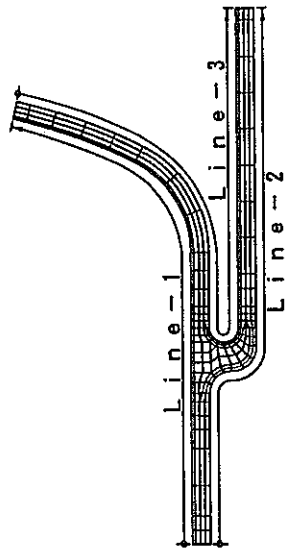


Fig.B-6(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case B-1)



応力評価ライン

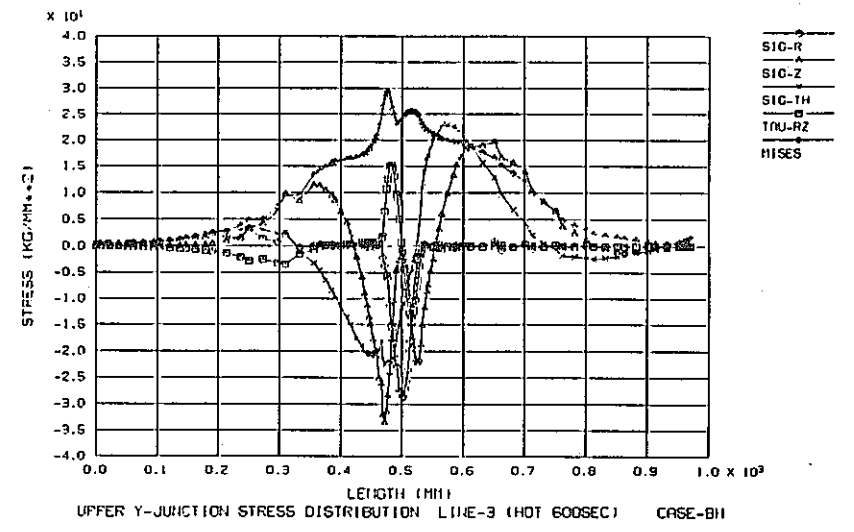
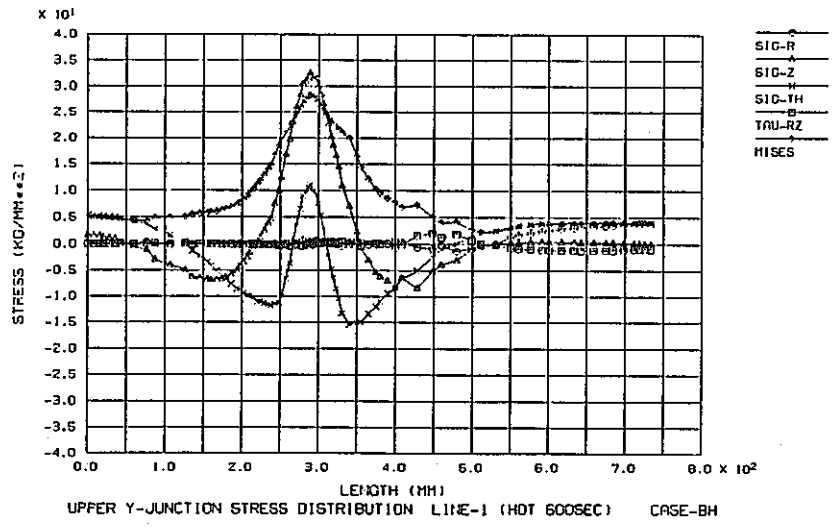
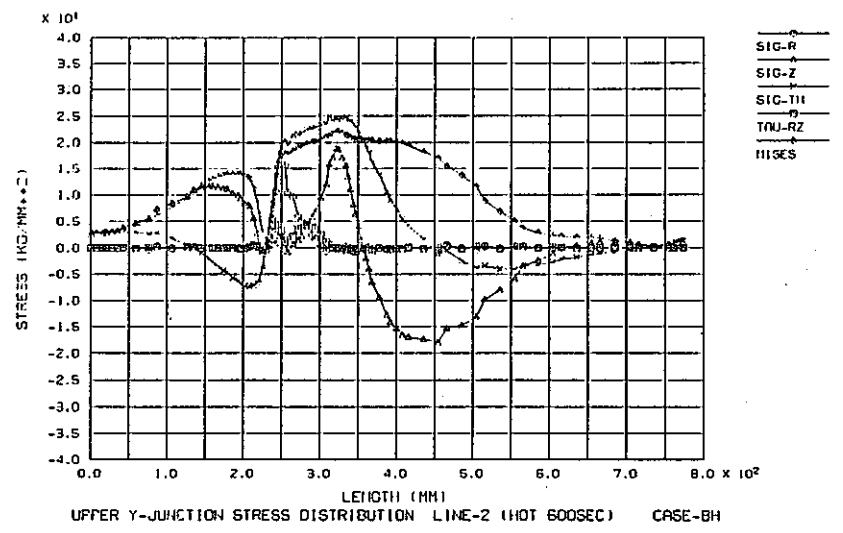
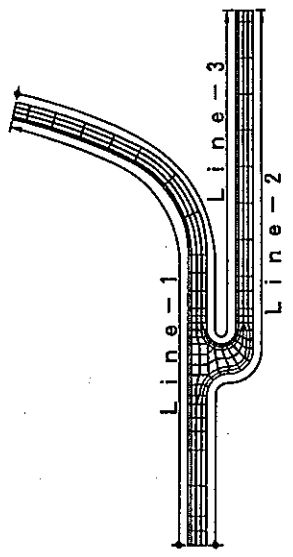


Fig. B-6(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case B-1)



応力評価ライン

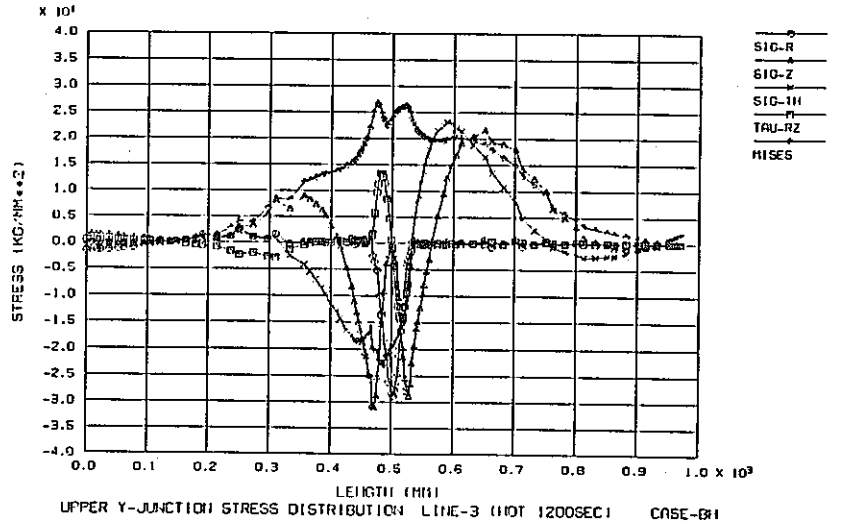
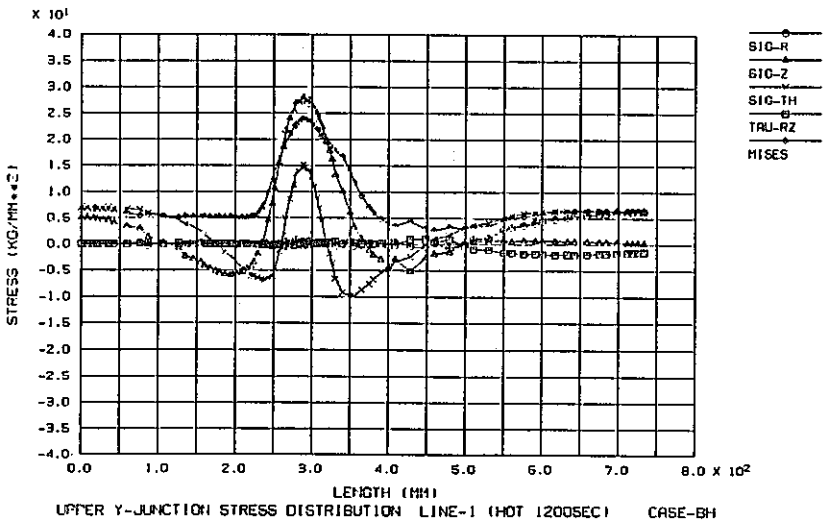
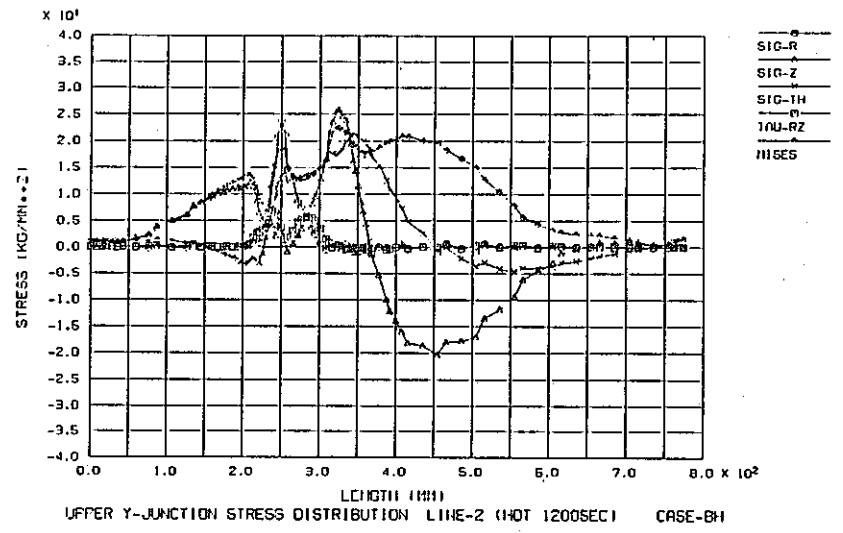
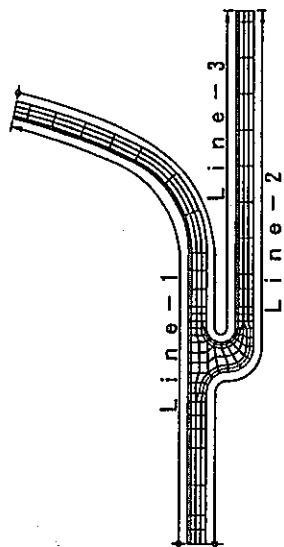


Fig. B-6(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case B-1)



応力評価ライン

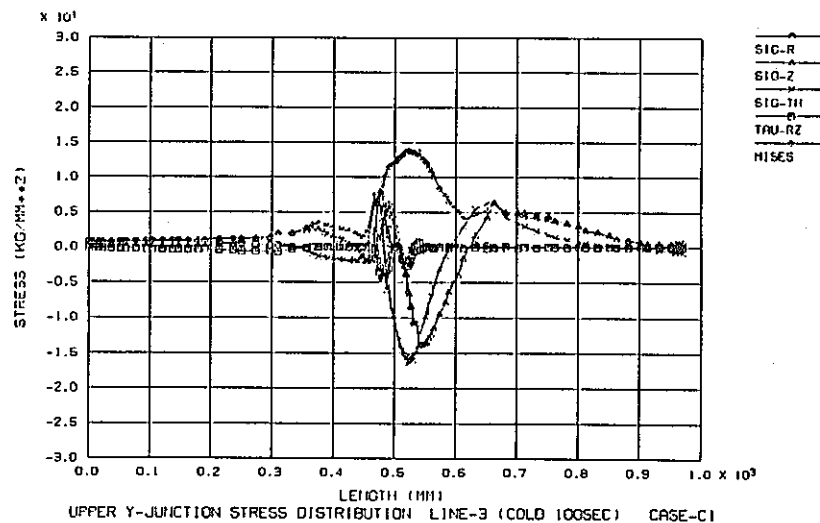
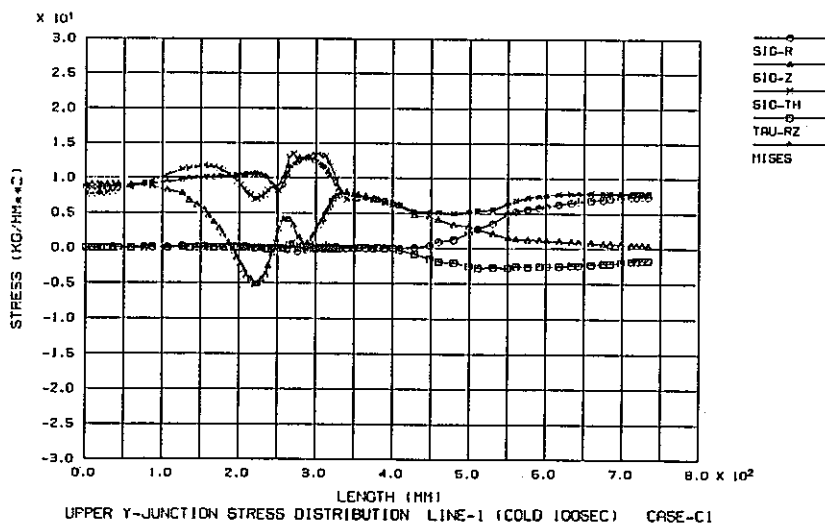
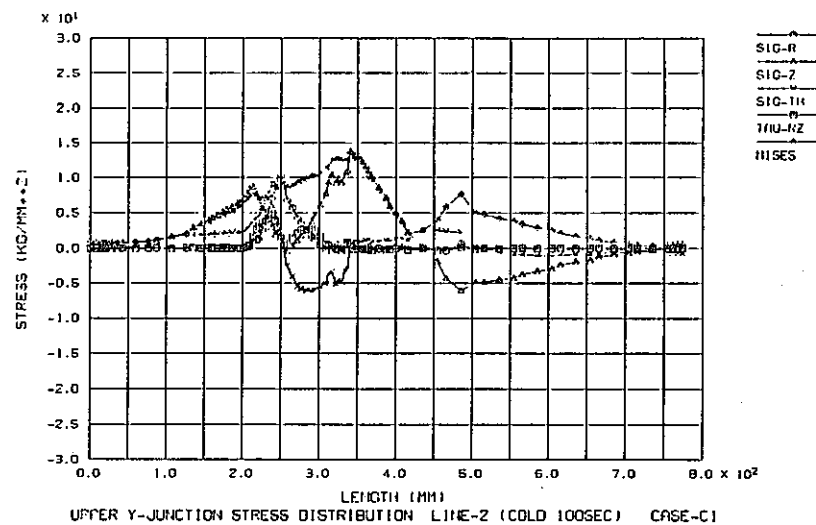
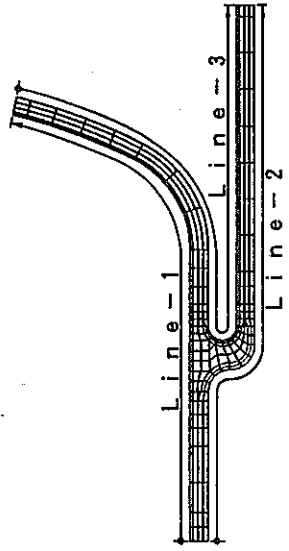


Fig. B-7(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-1)



応力評価ライン

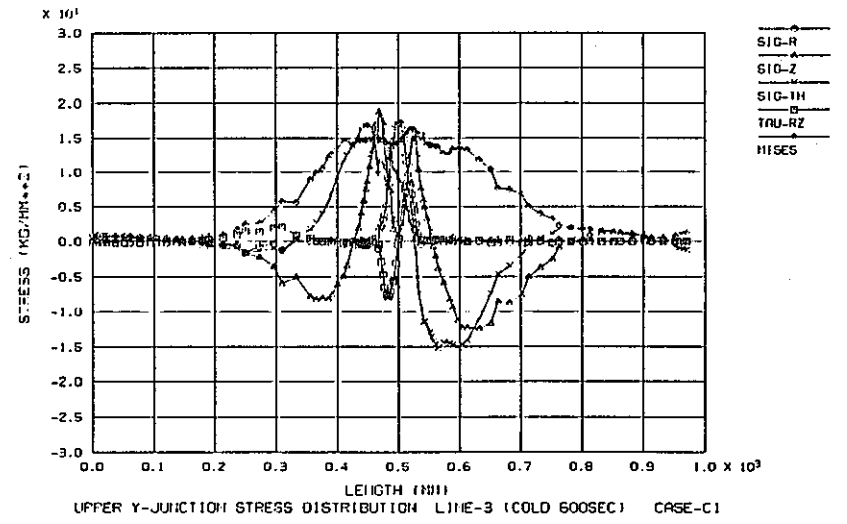
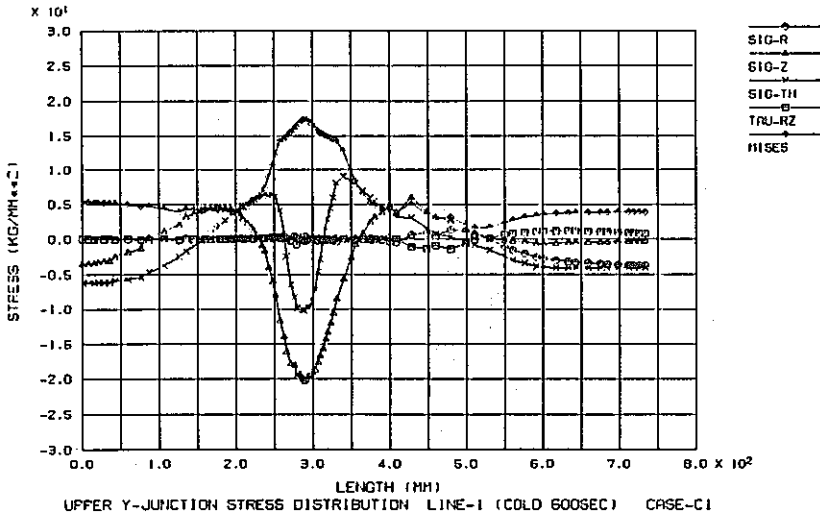
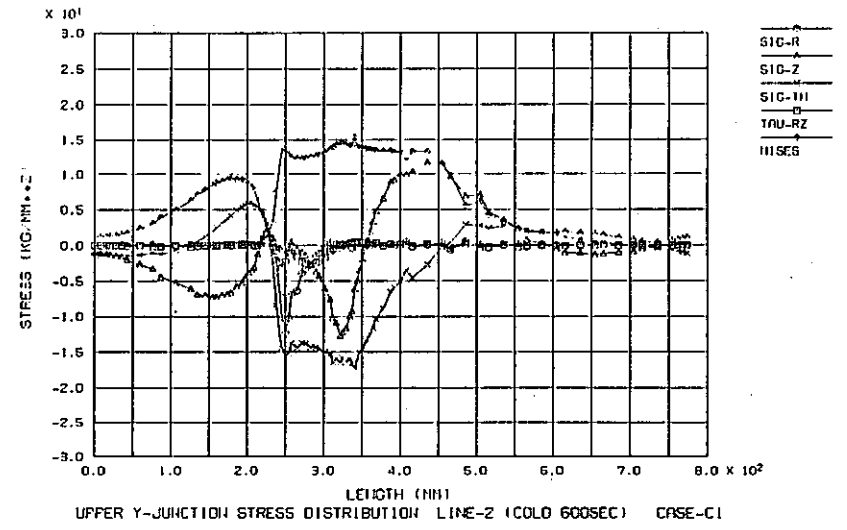
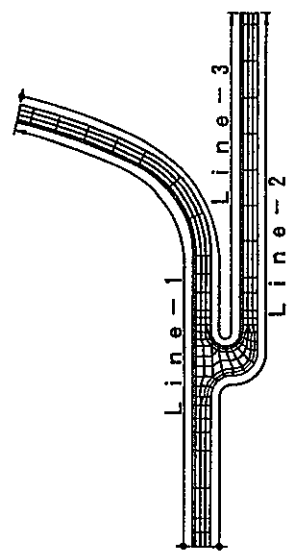


Fig. B-7(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-1)



応力評価ライン

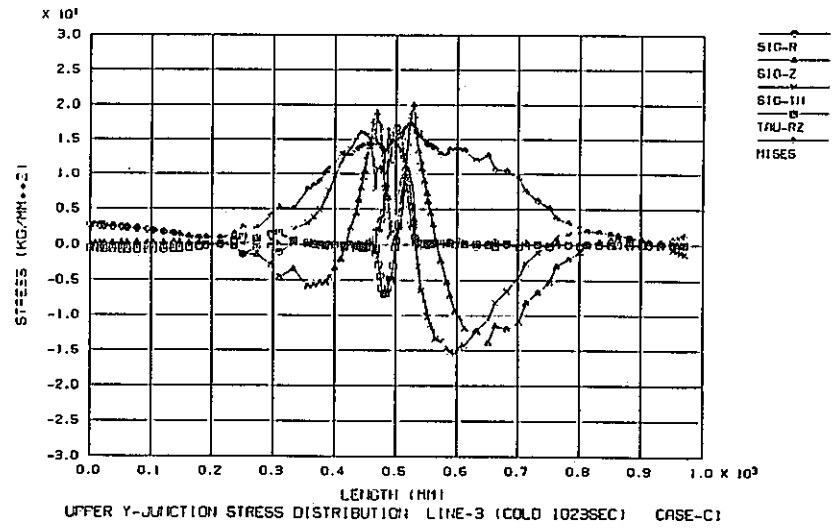
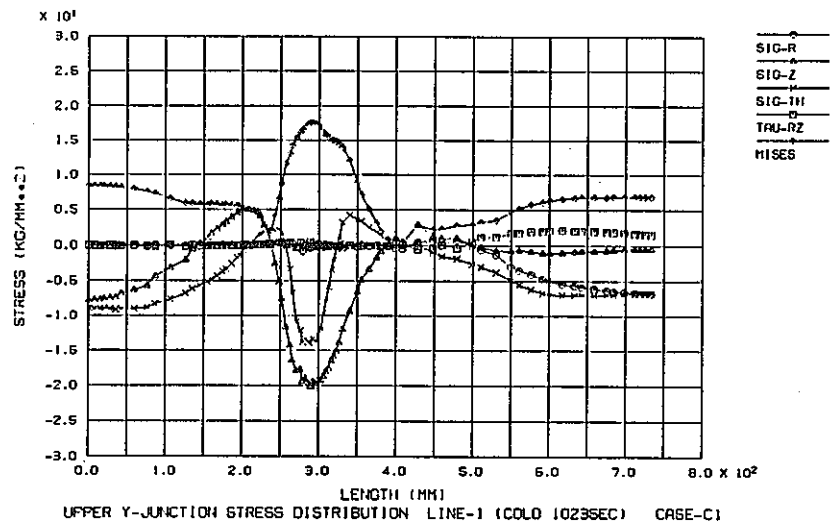
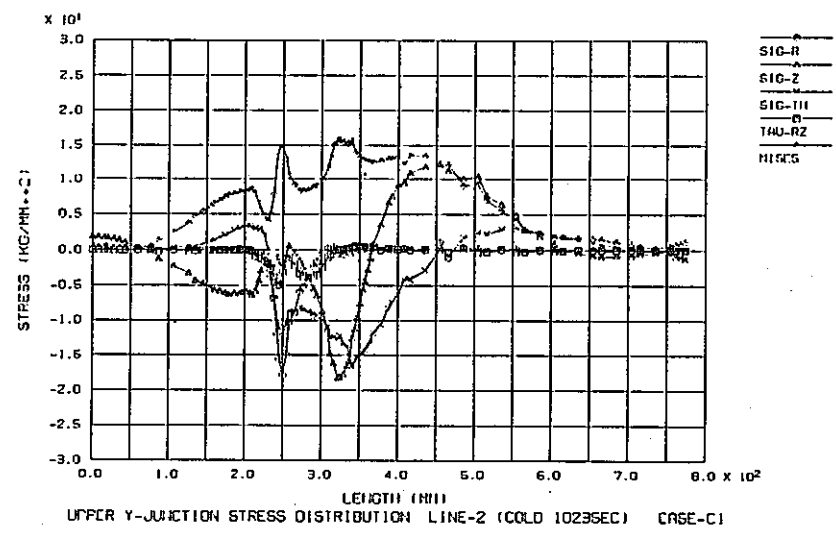
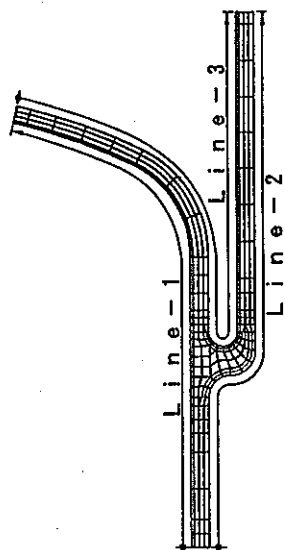


Fig.B-7(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-1)



応力評価ライン

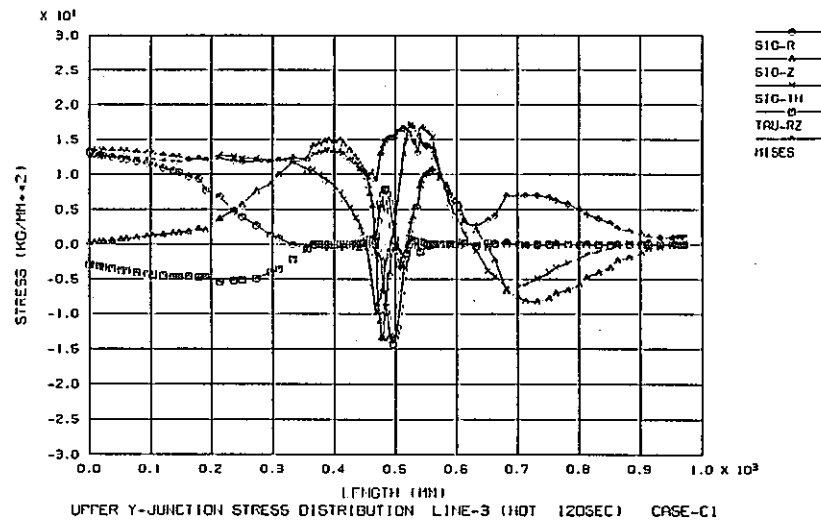
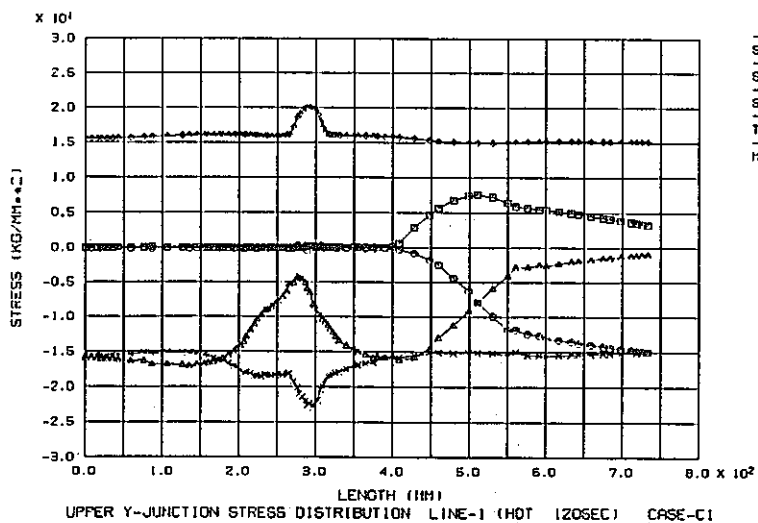
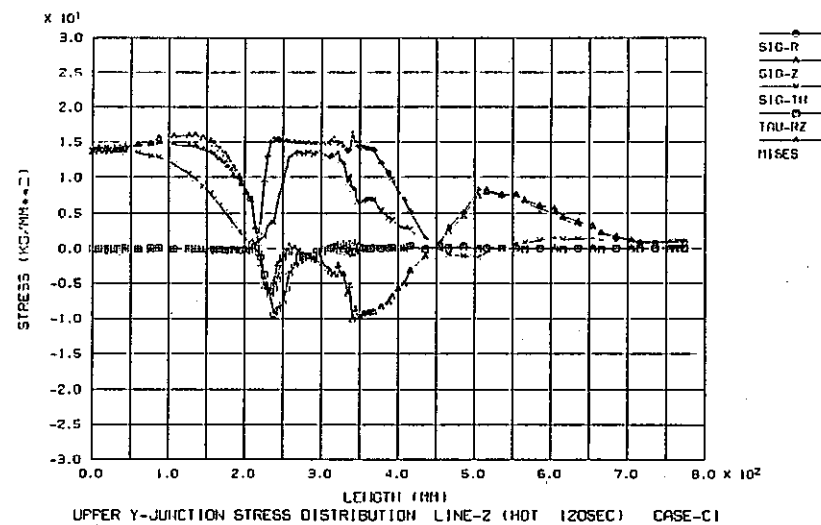
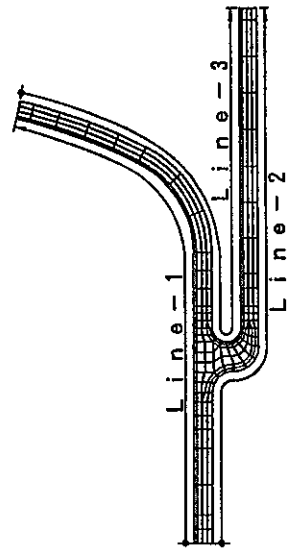


Fig.B-7(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-1)



応力評価ライン

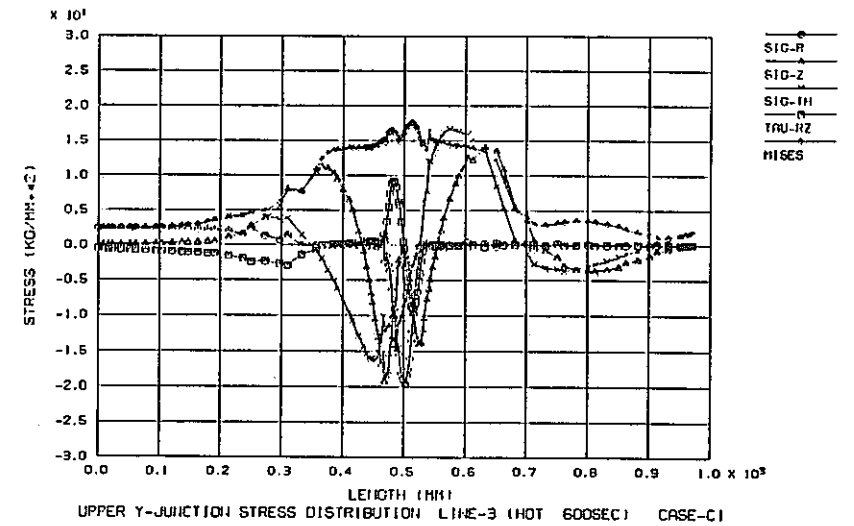
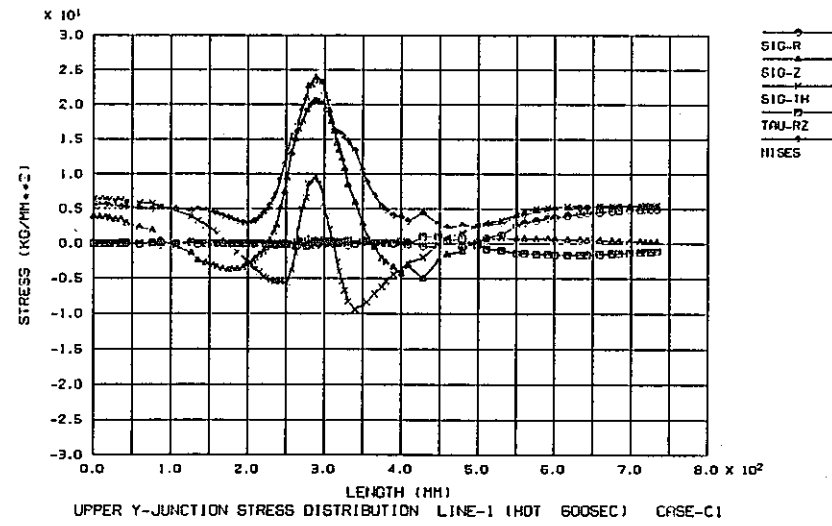
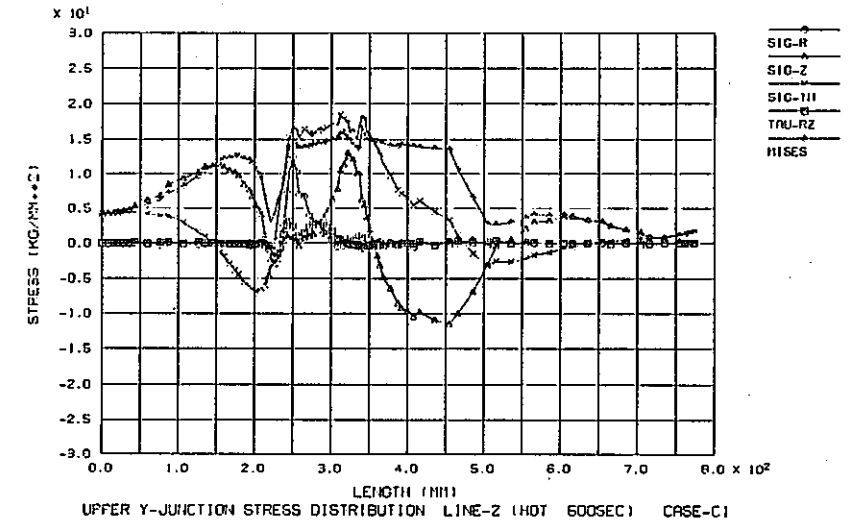
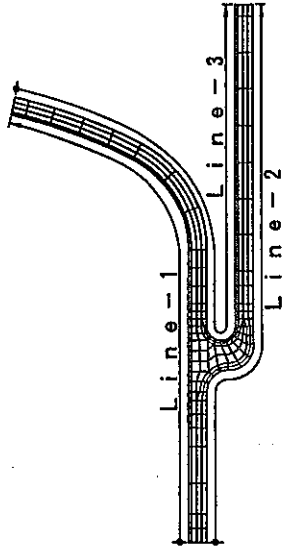


Fig.B-7(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-1)



応力評価ライン

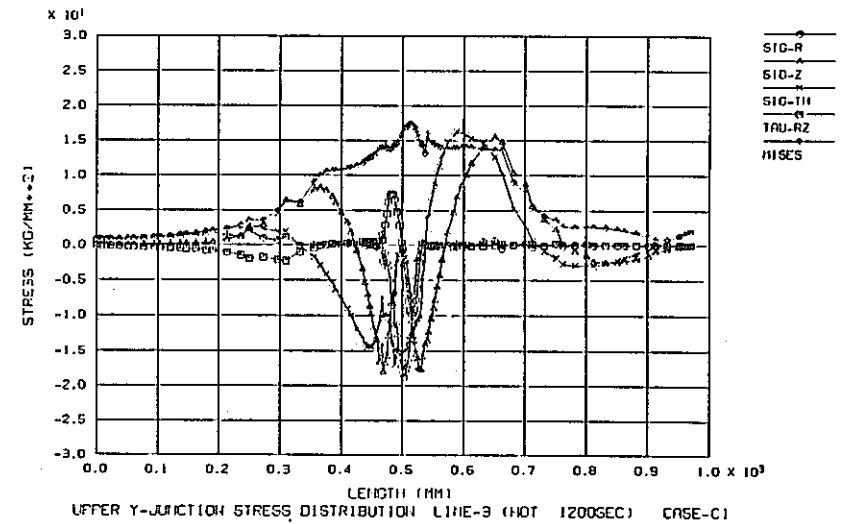
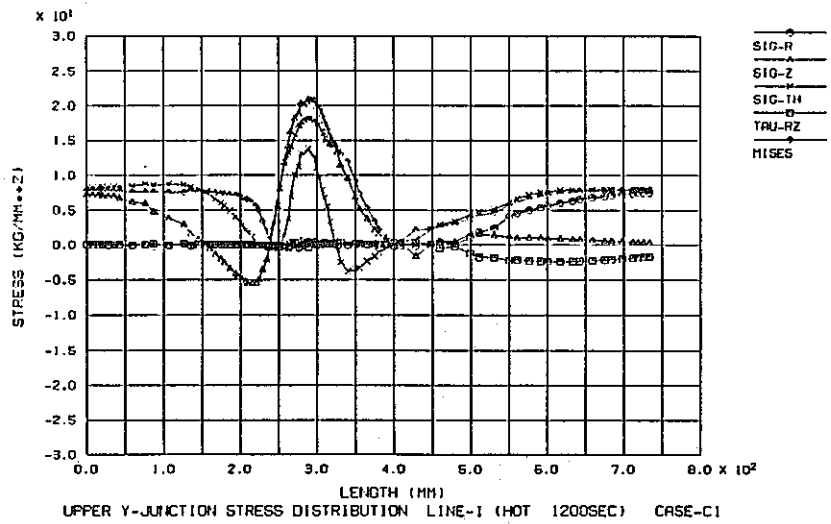
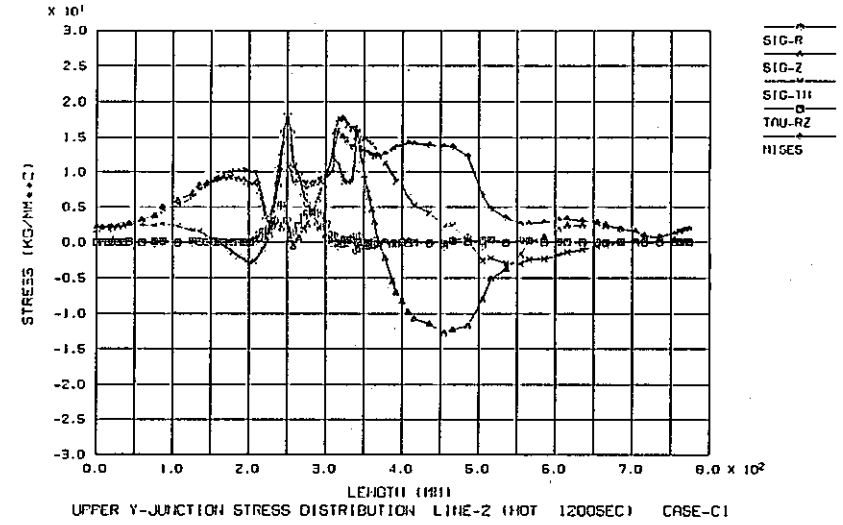
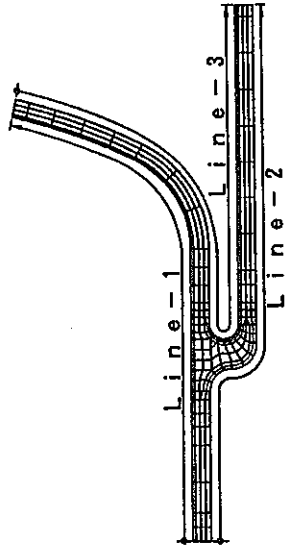


Fig.B-7(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-1)



応力評価ライン

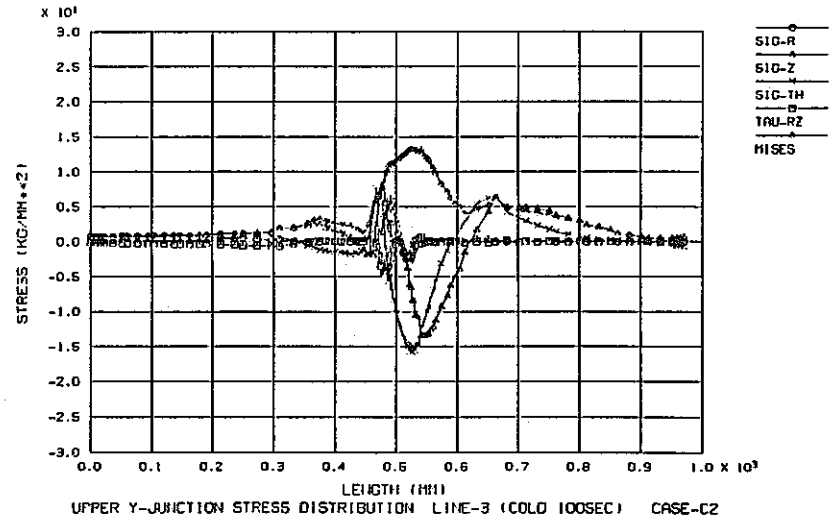
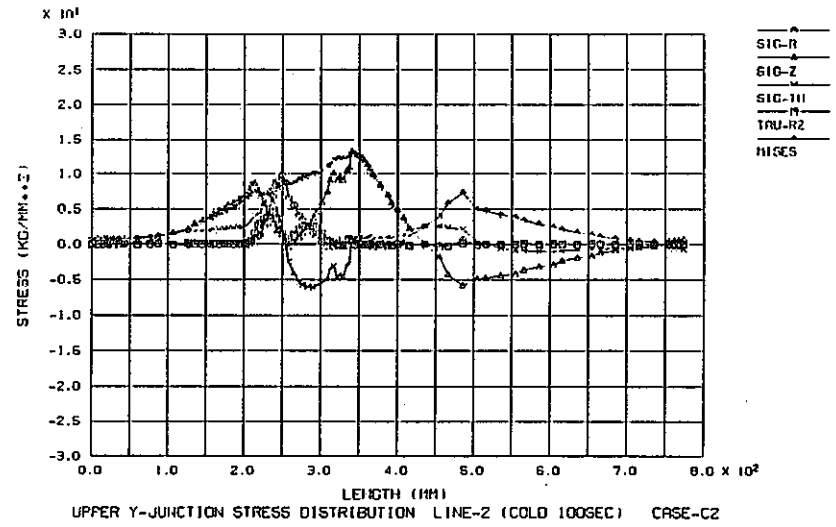
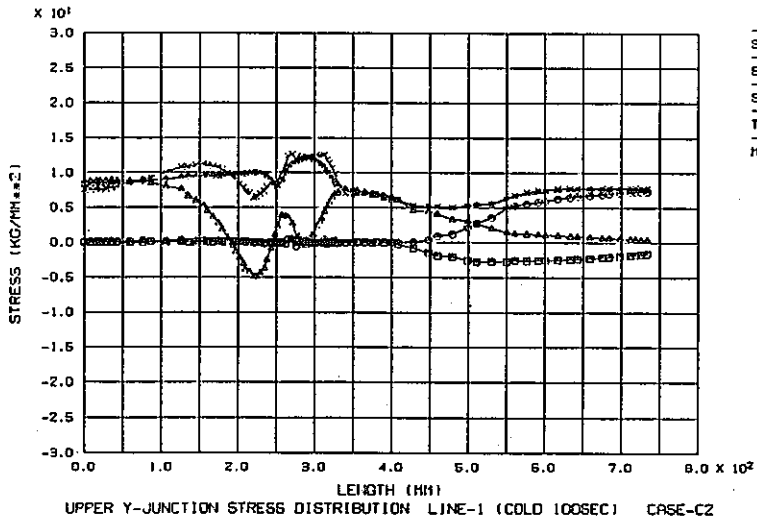
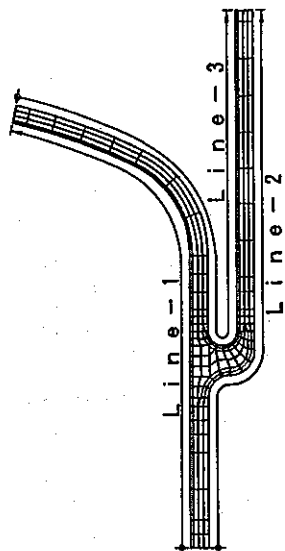


Fig.B-8(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-2)



応力評価ライン

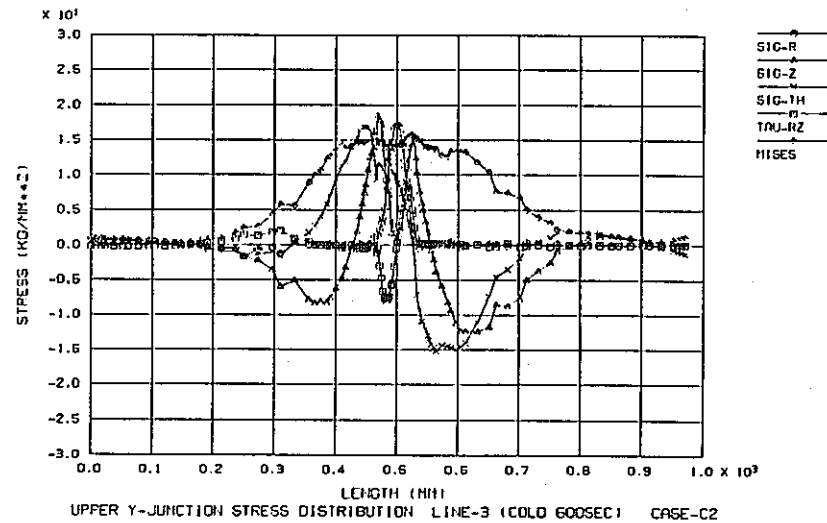
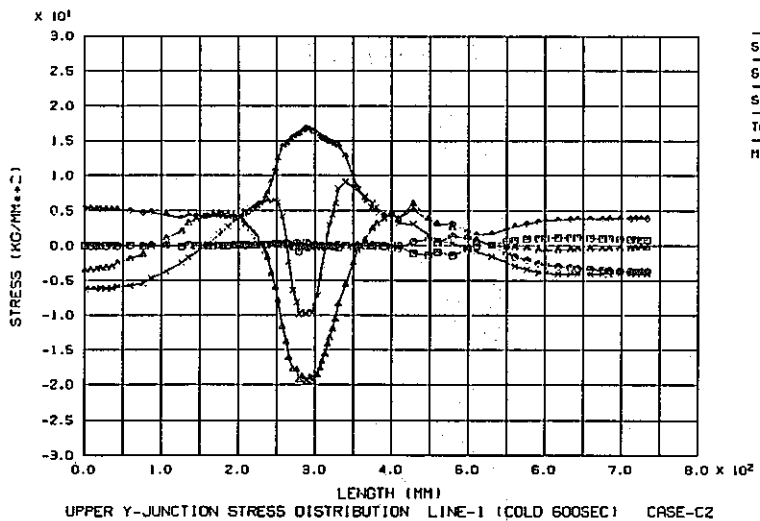
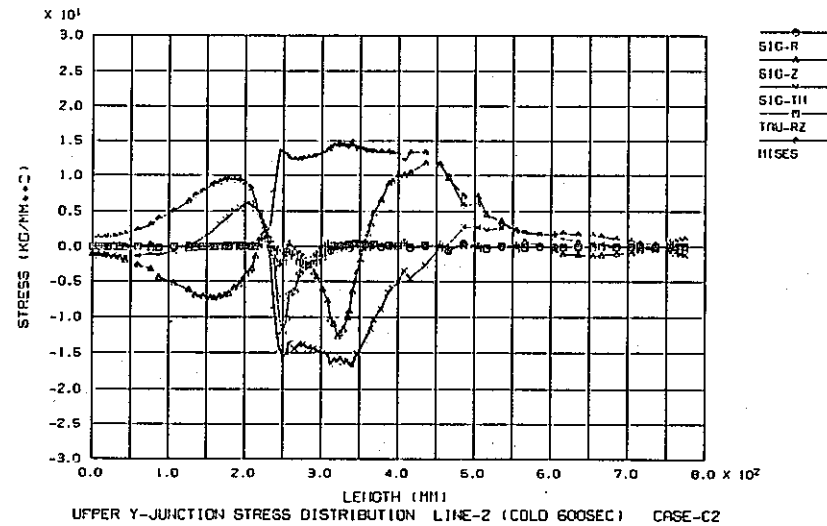
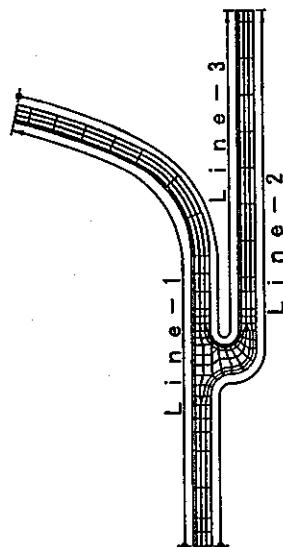


Fig. B-8(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-2)



応力評価ライン

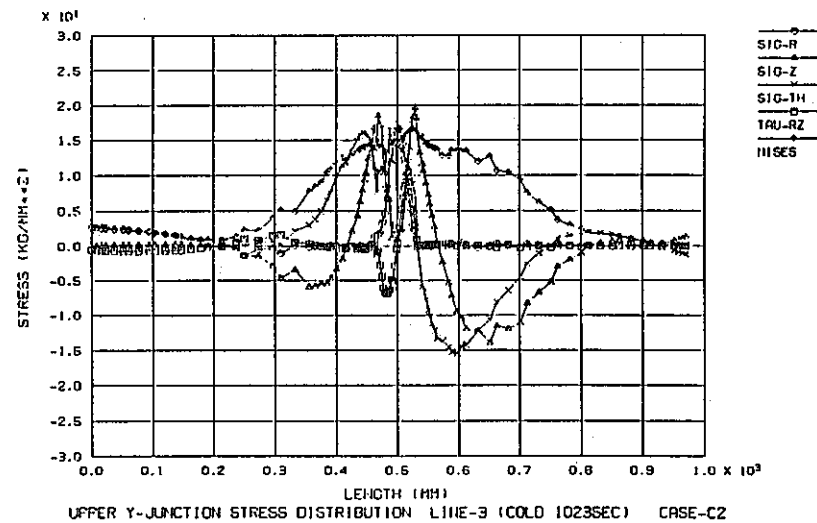
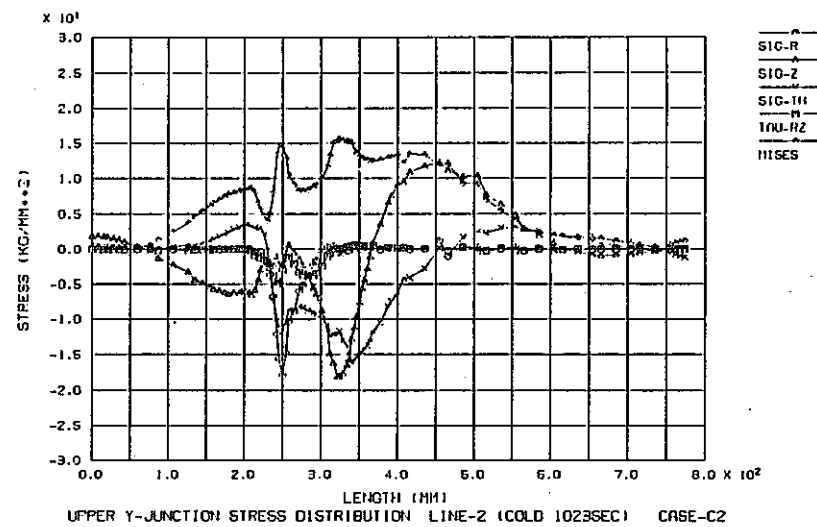
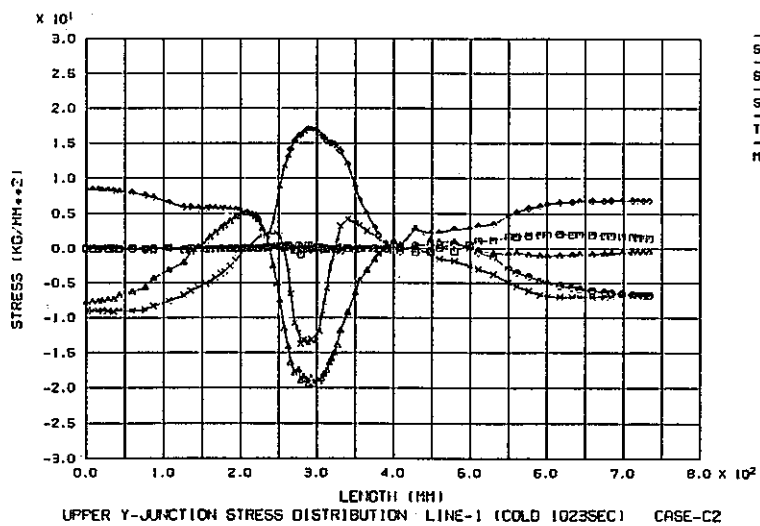
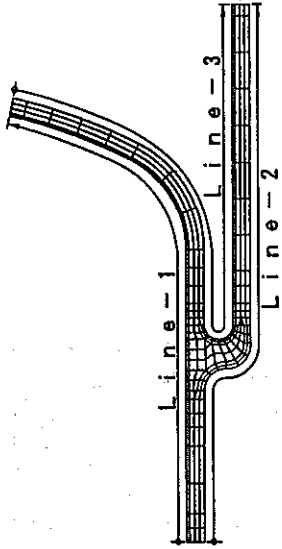


Fig.B-8(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-2)



応力評価ライン

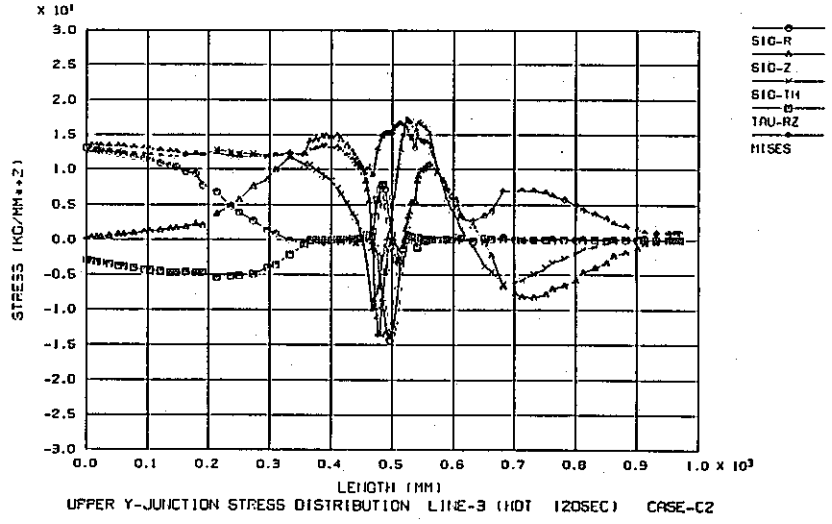
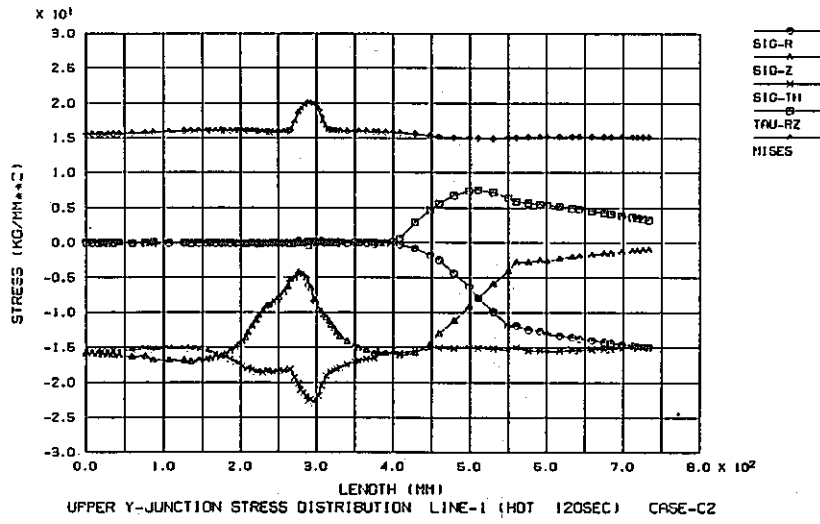
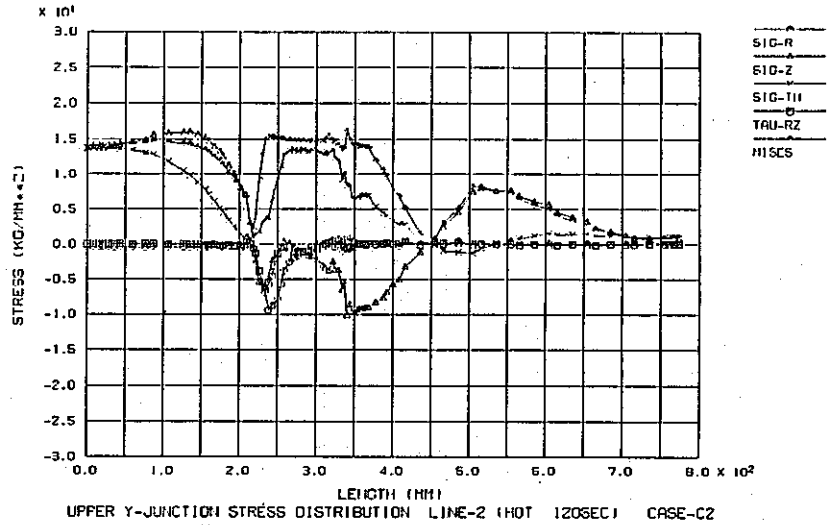
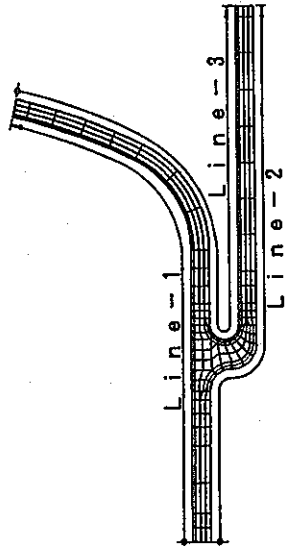


Fig.B-8(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-2)



応力評価ライン

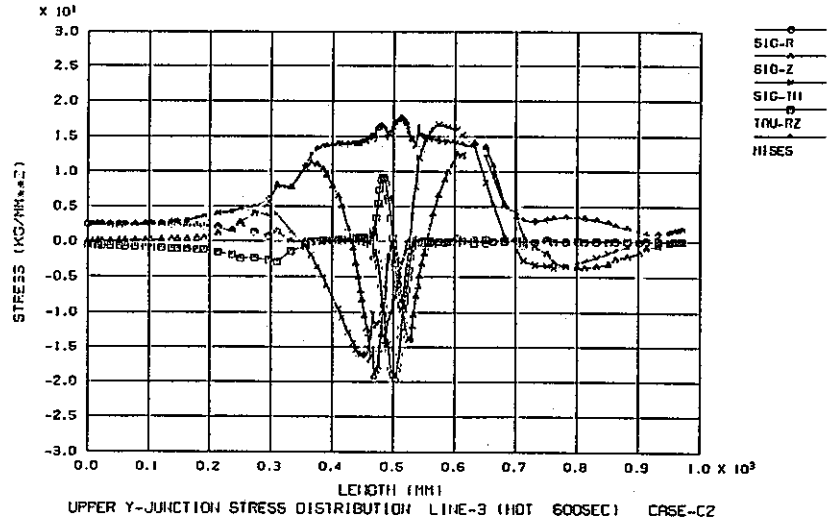
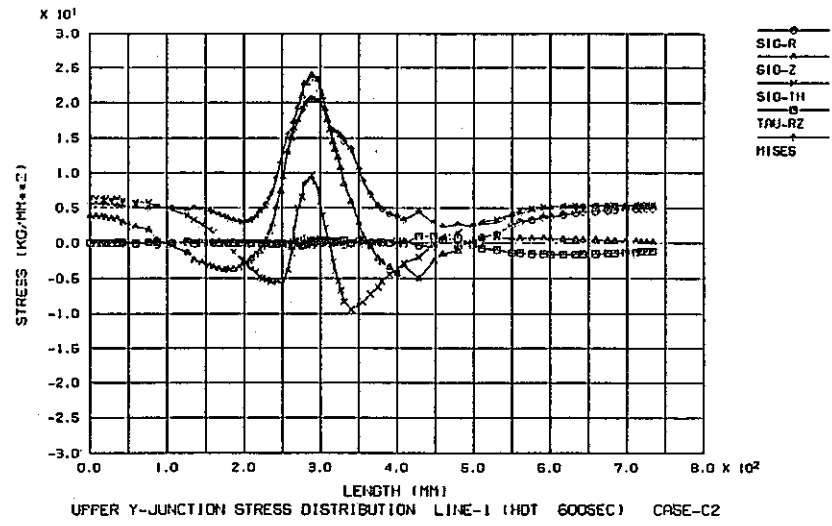
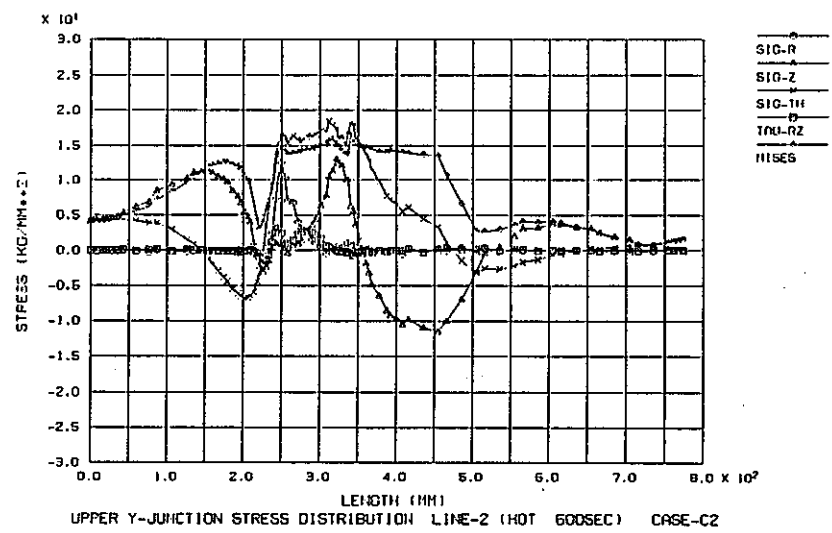
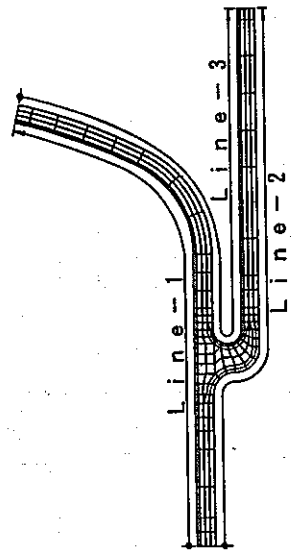


Fig.B-8(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-2)



応力評価ライン

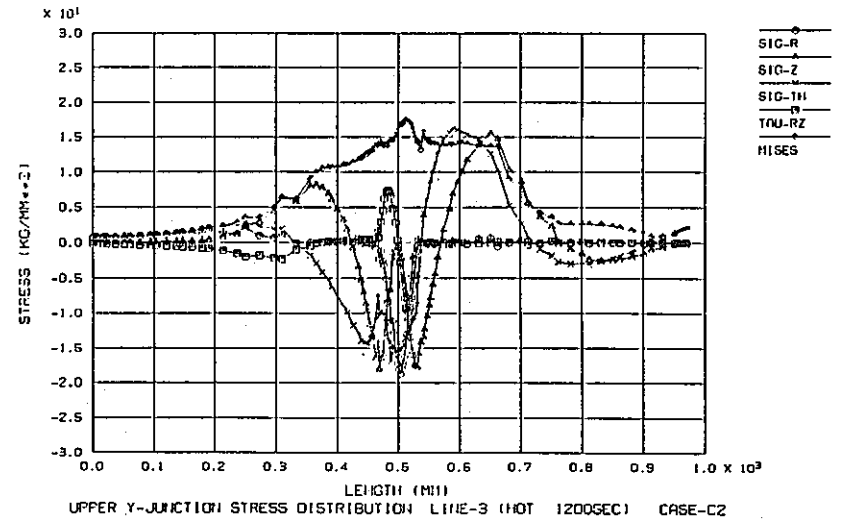
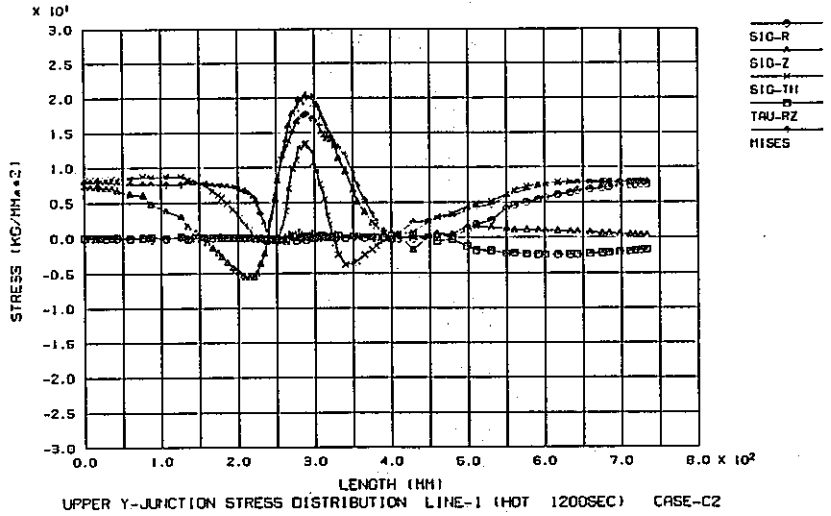
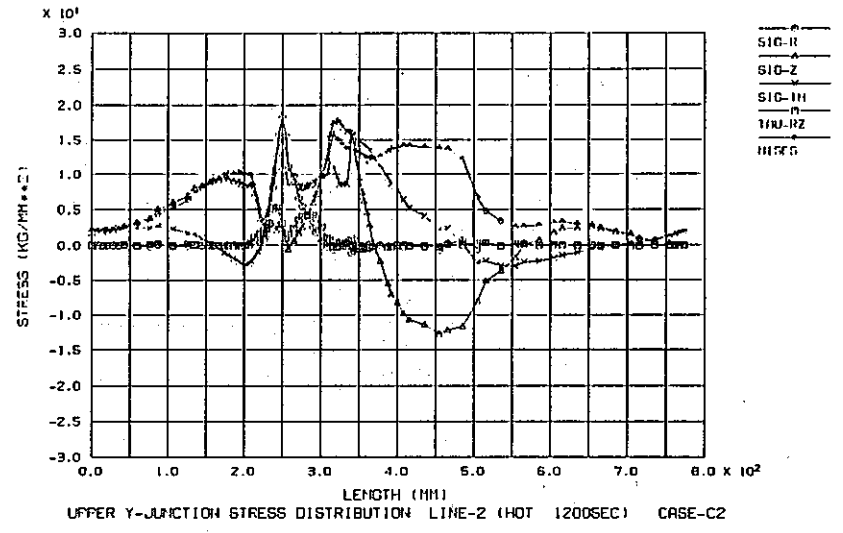
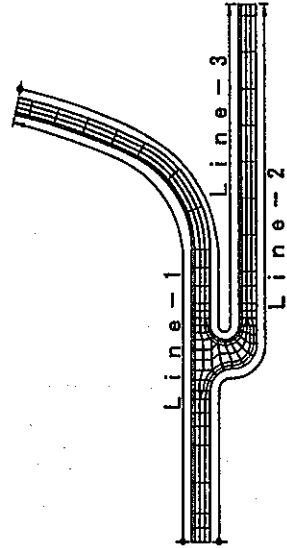


Fig.B-8(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case C-2)



応力評価ライン

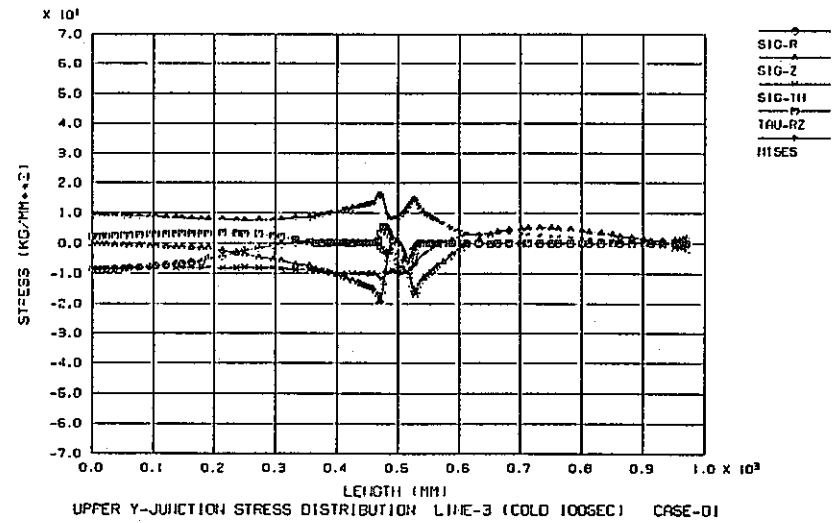
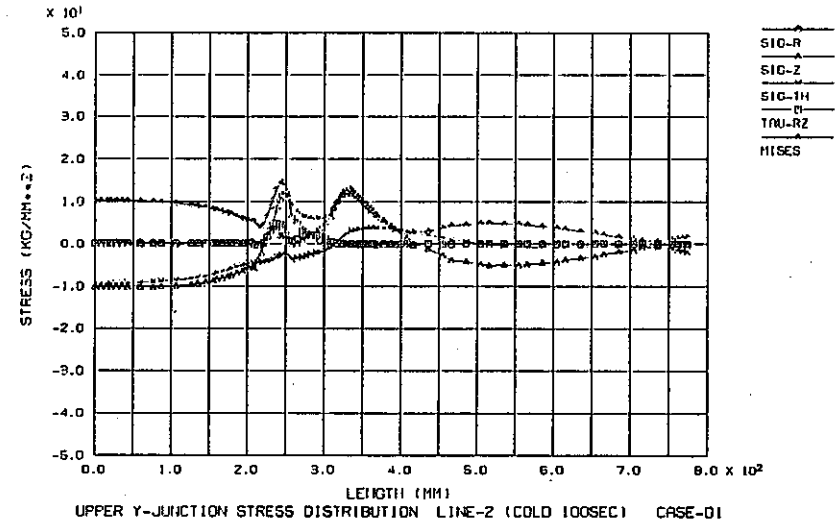
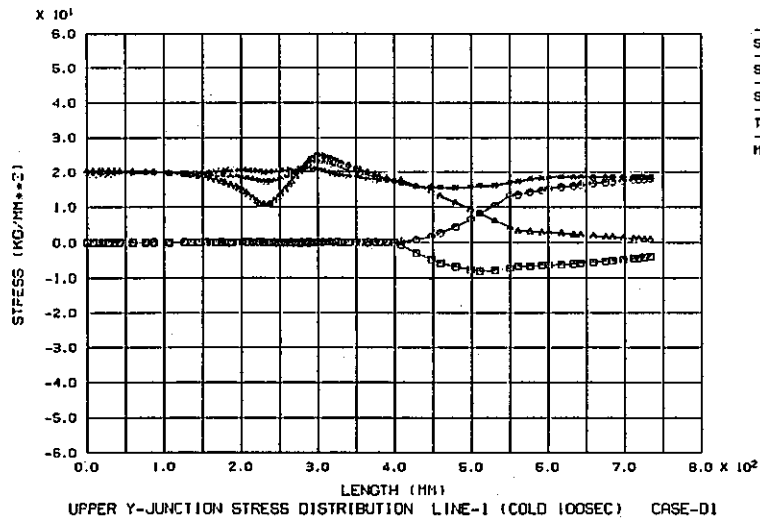
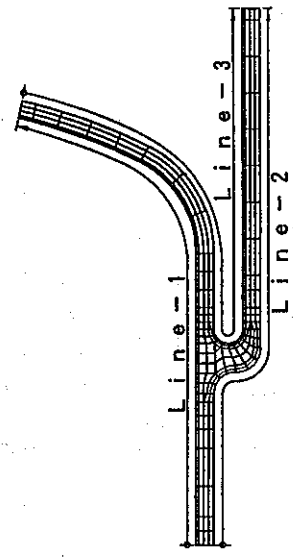


Fig. B-9(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-1)



応力評価ライン

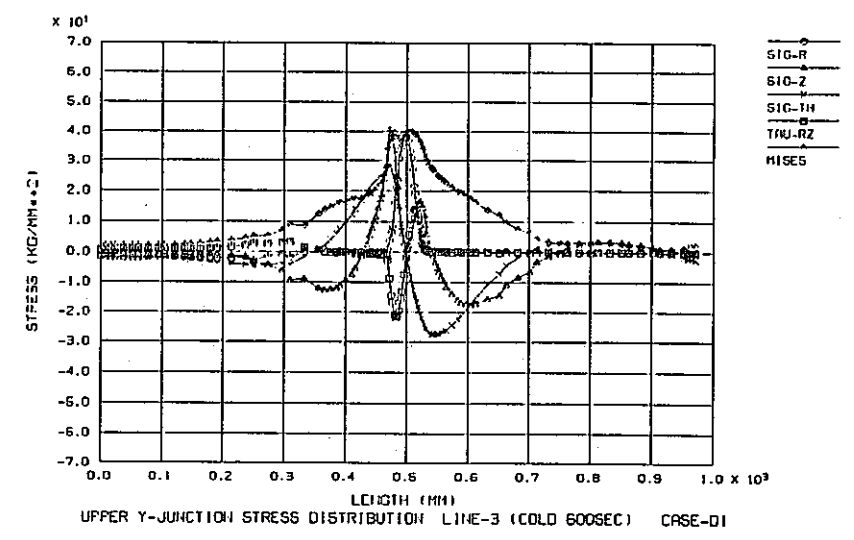
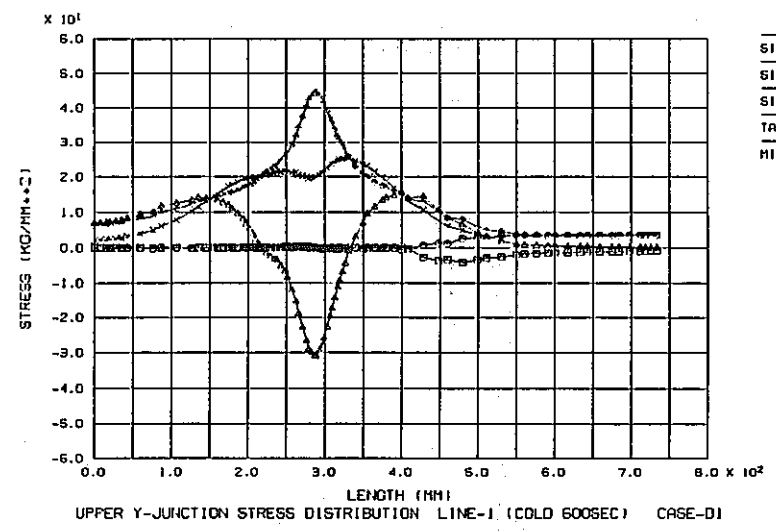
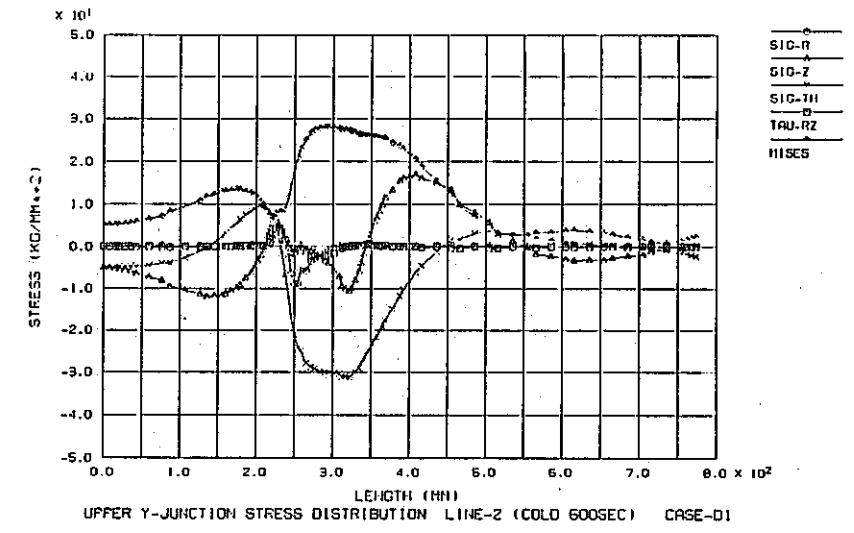
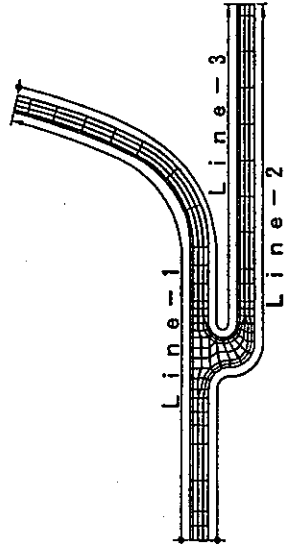


Fig. B-9(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-1)



応力評価ライン

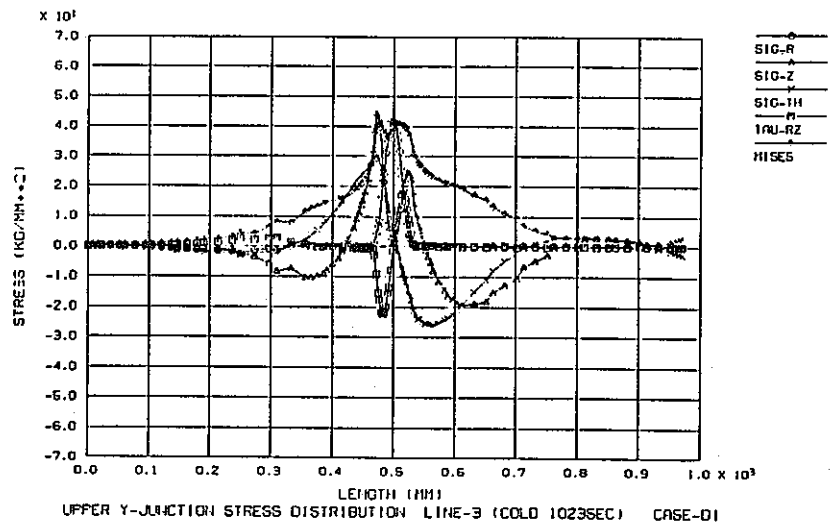
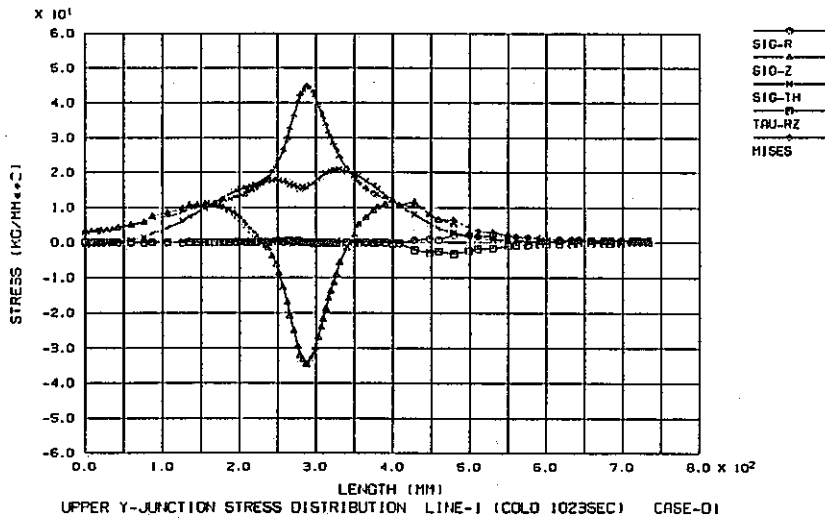
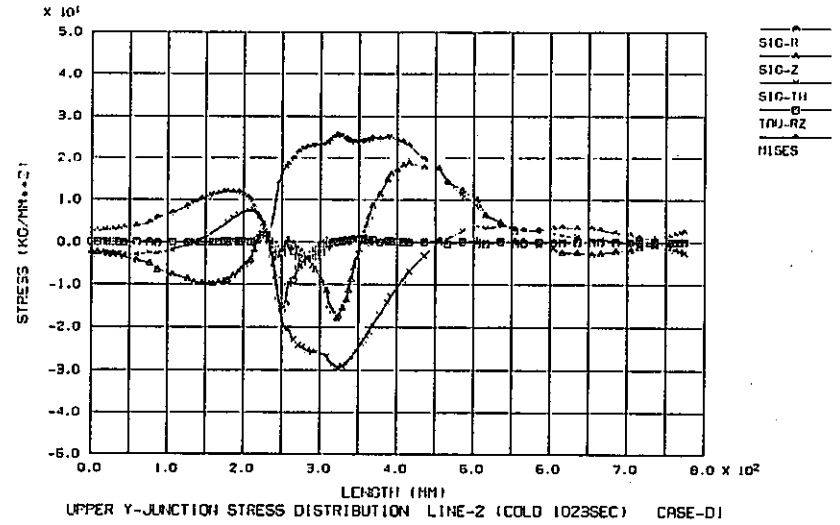
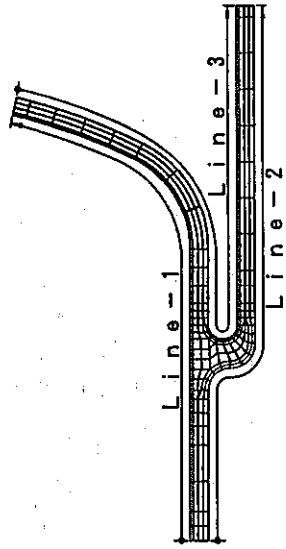


Fig. B-9(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-1)



応力評価ライン

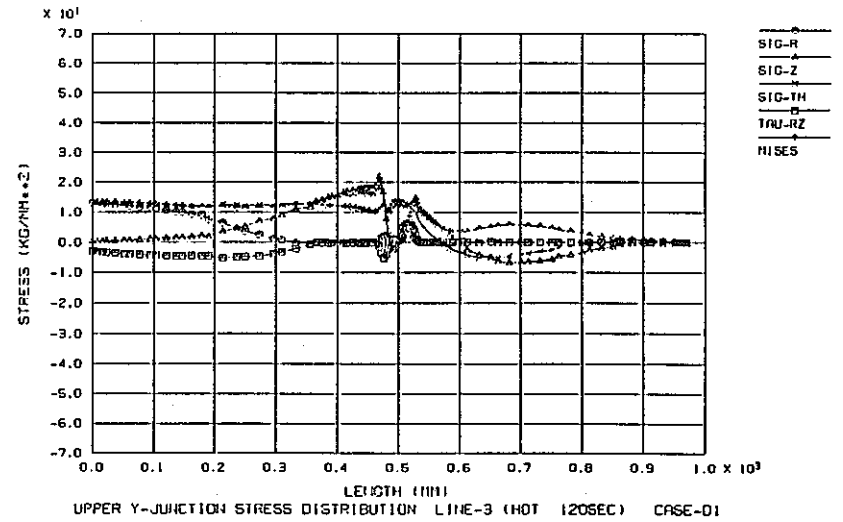
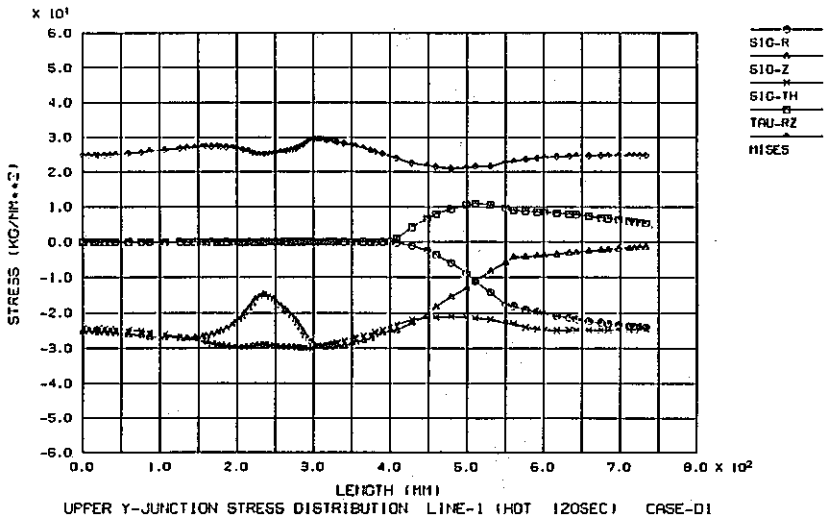
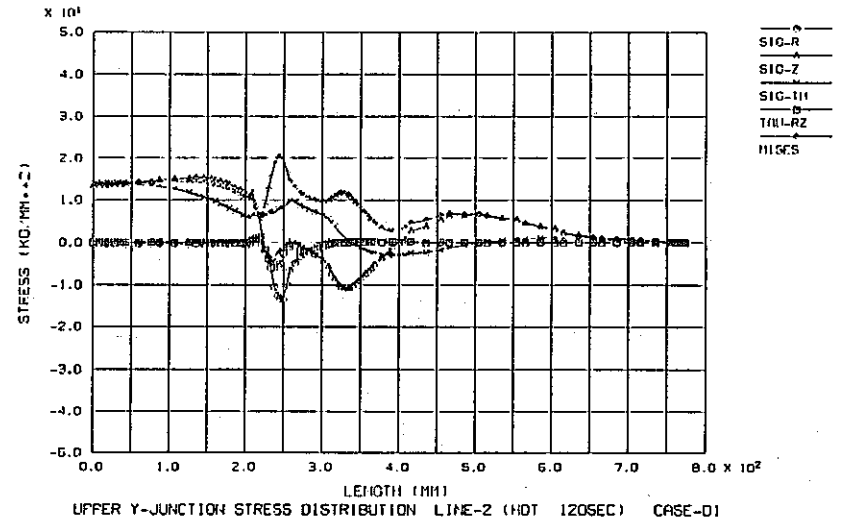
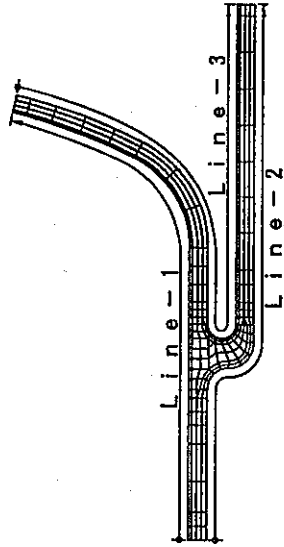


Fig.B-9(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-1)



応力評価ライン

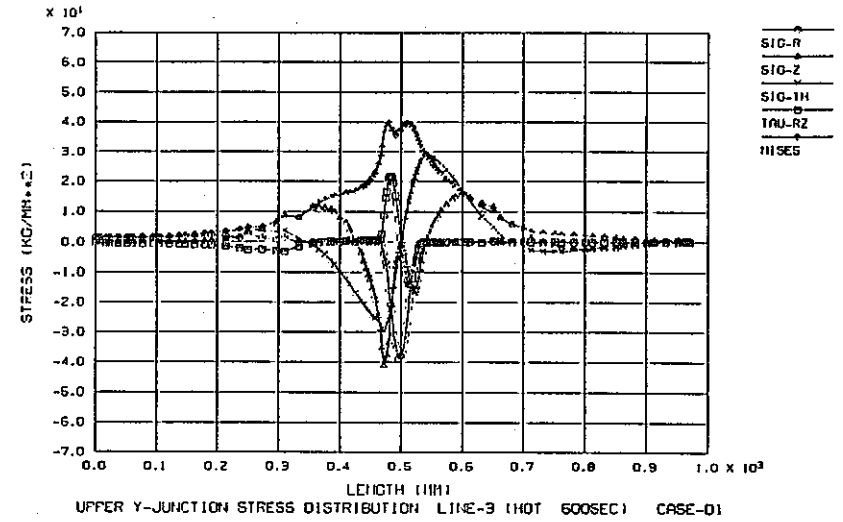
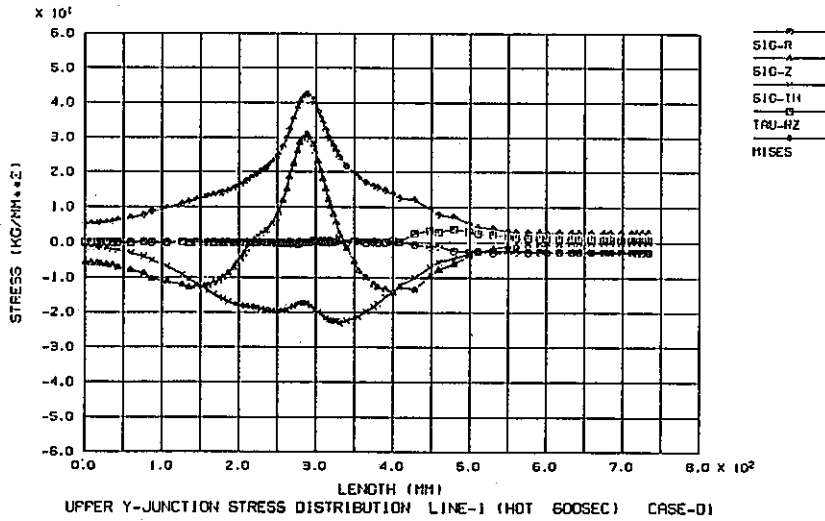
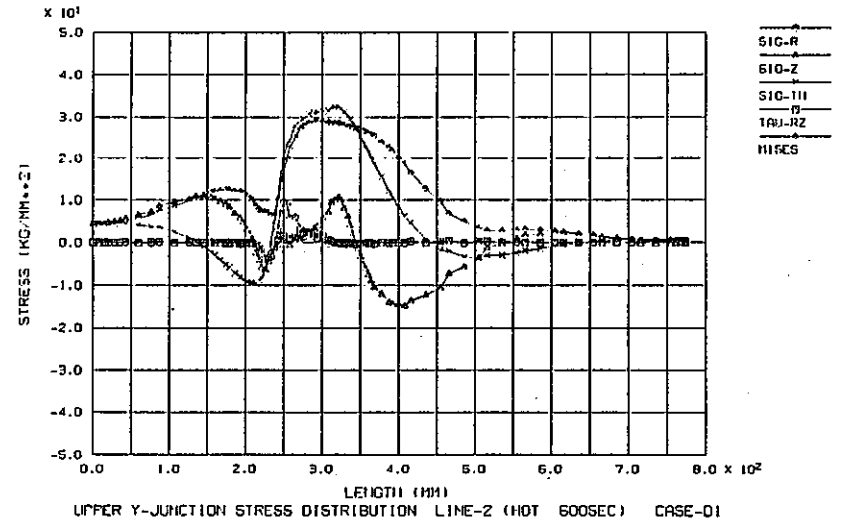
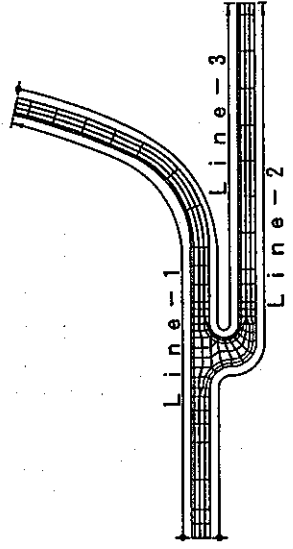


Fig. B-9(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-1)



応力評価ライン

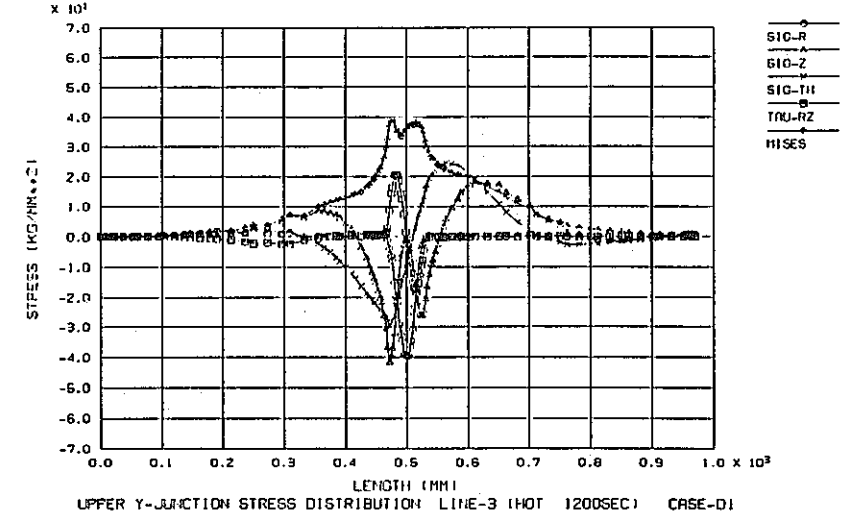
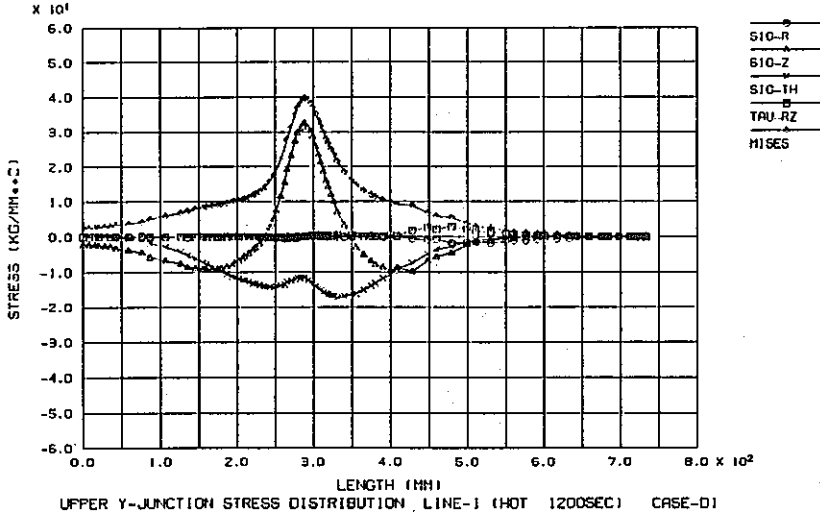
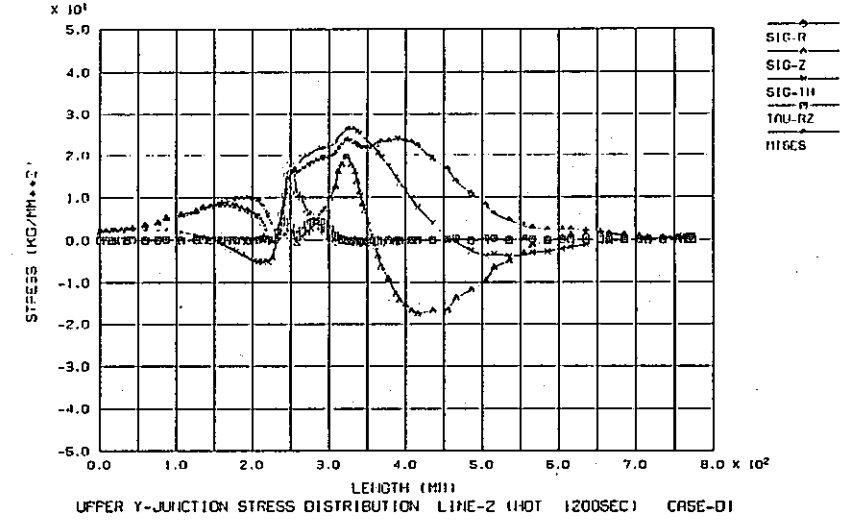
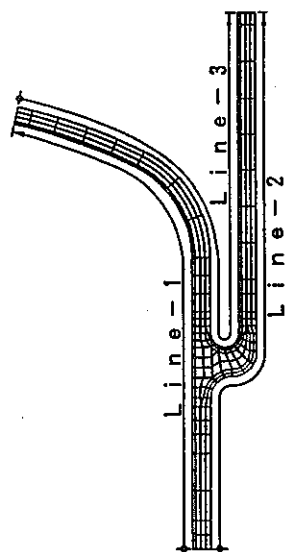


Fig. B-9(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-1)



応力評価ライン

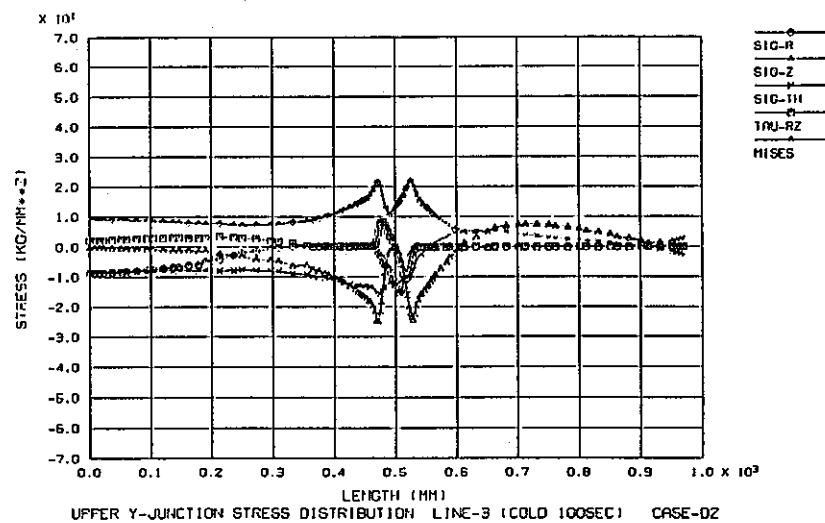
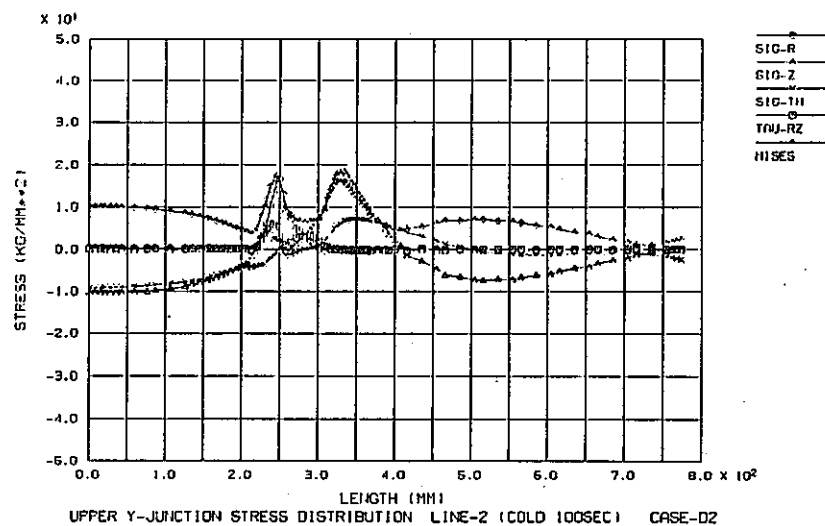
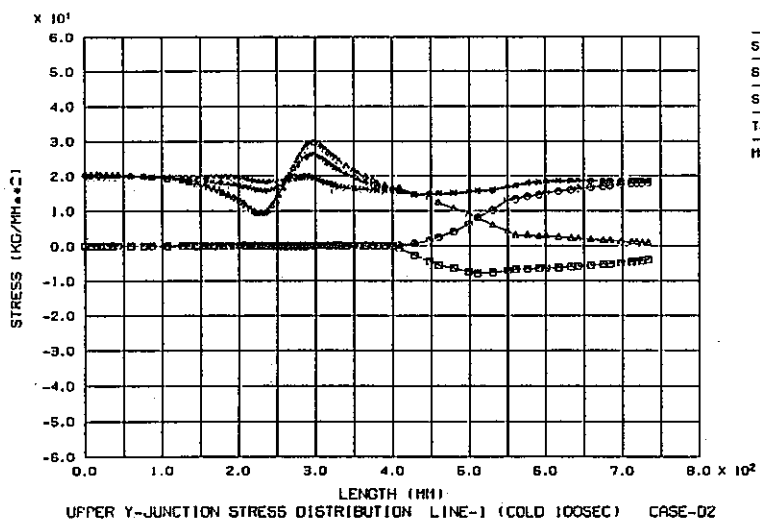
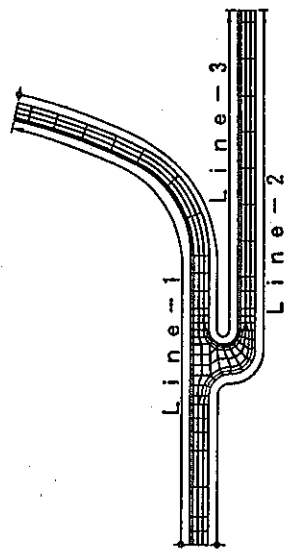


Fig.B-10(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-2)



応力評価ライン

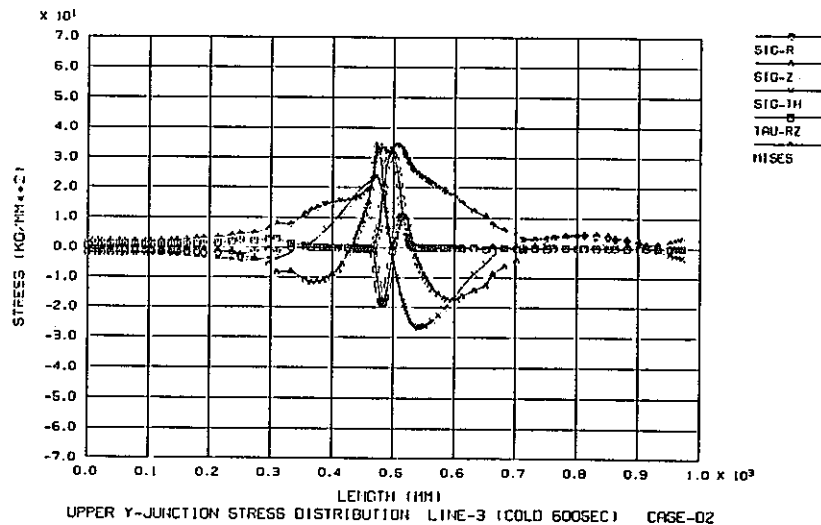
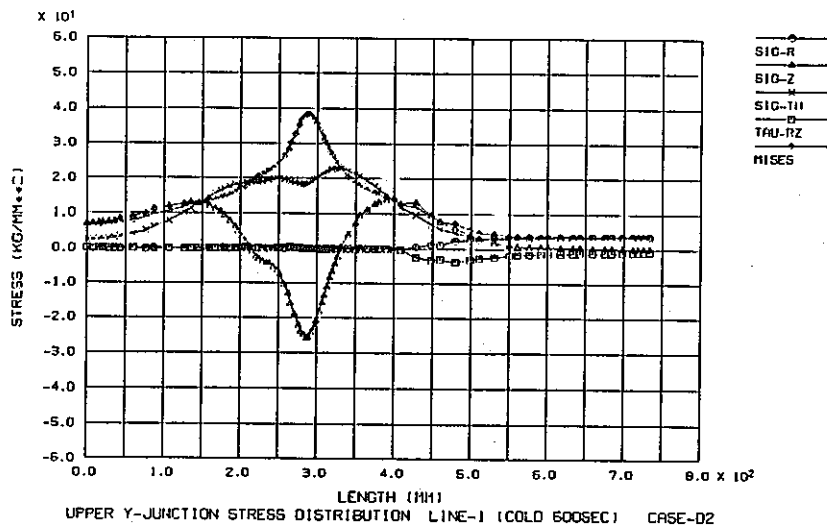
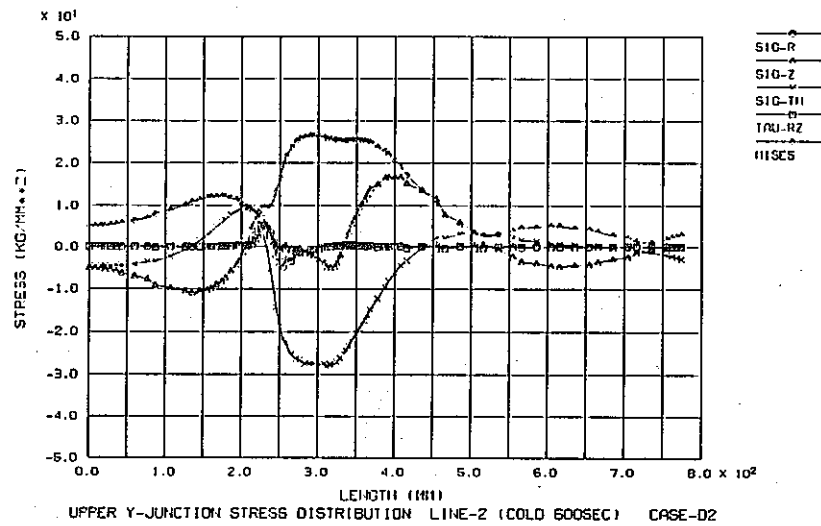
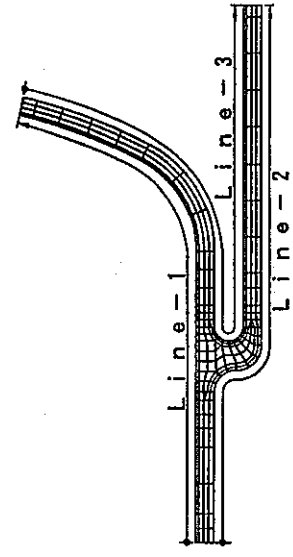


Fig.B-10(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-2)



応力評価ライン

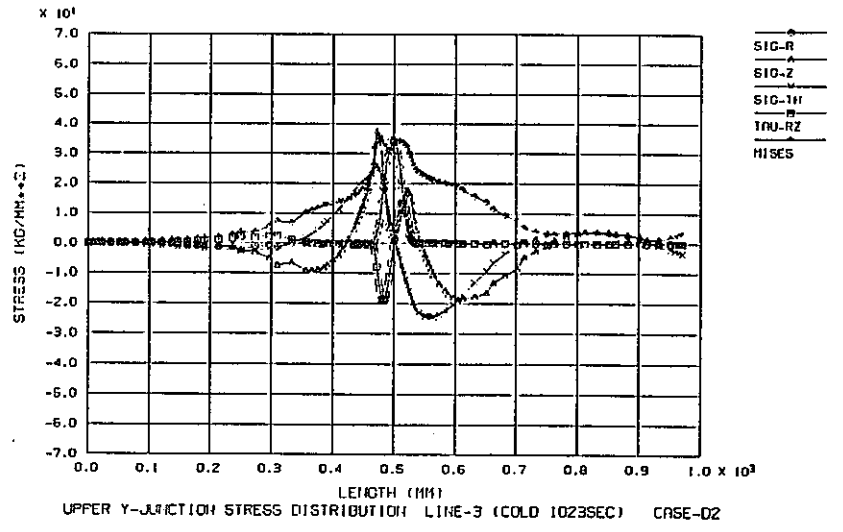
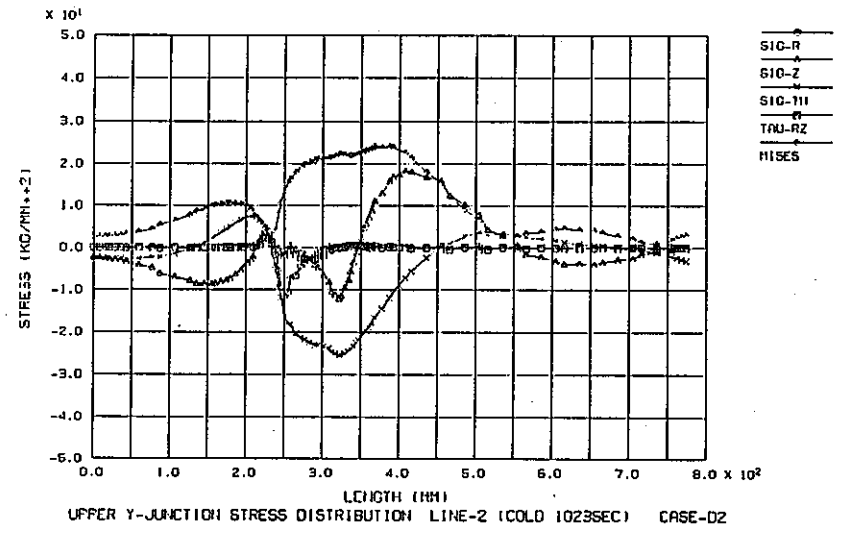
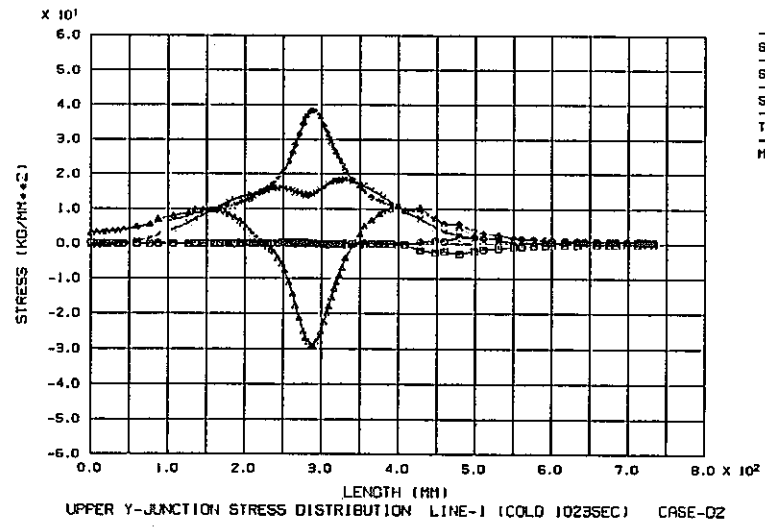
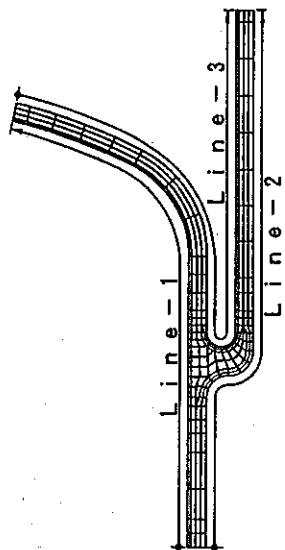


Fig.B-10(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-2)



応力評価ライン

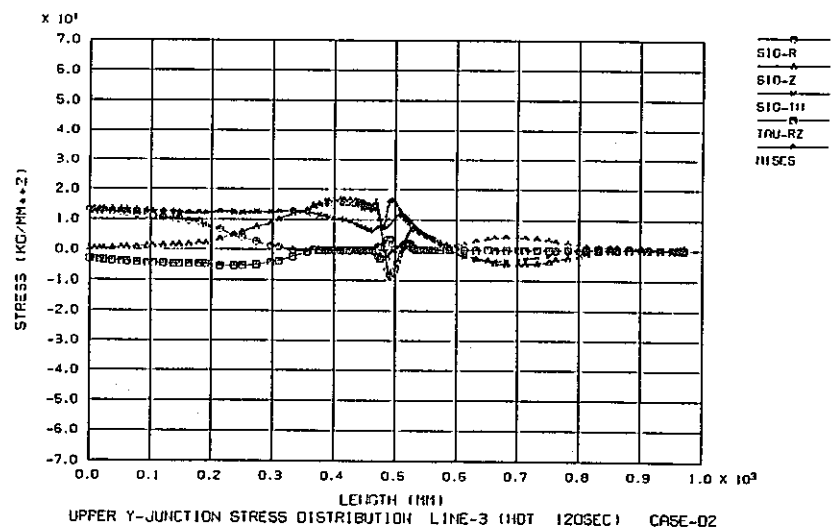
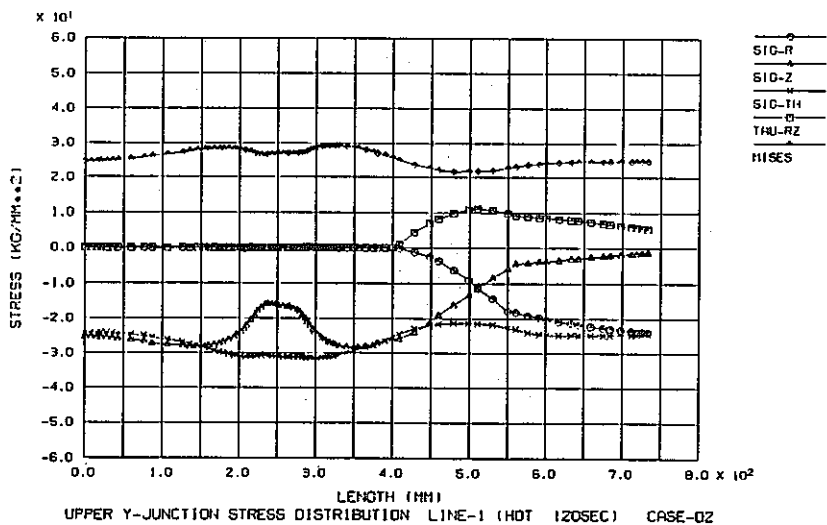
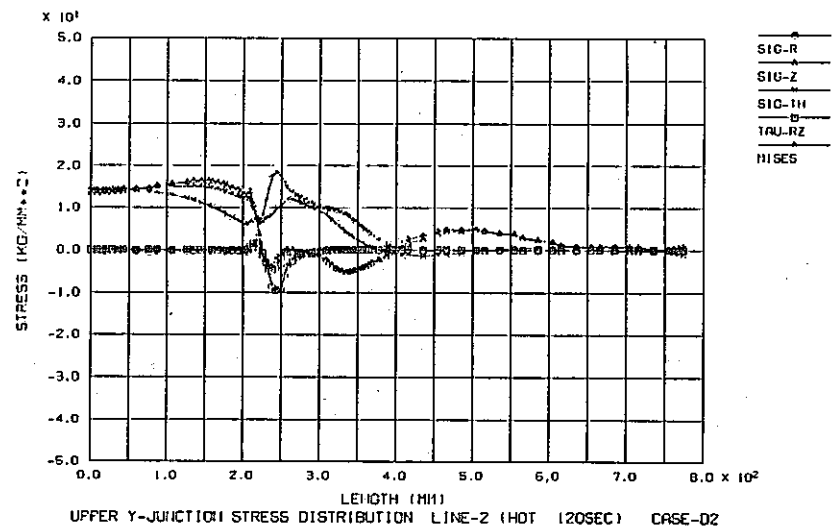
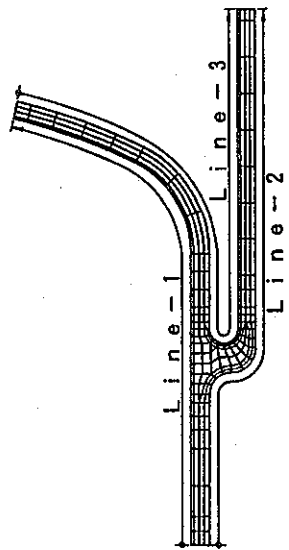


Fig. B-10(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-2)



応力評価ライン

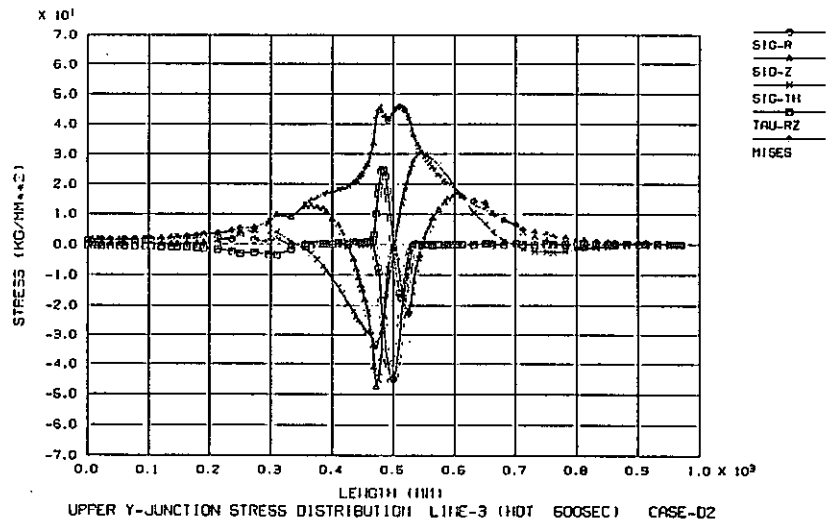
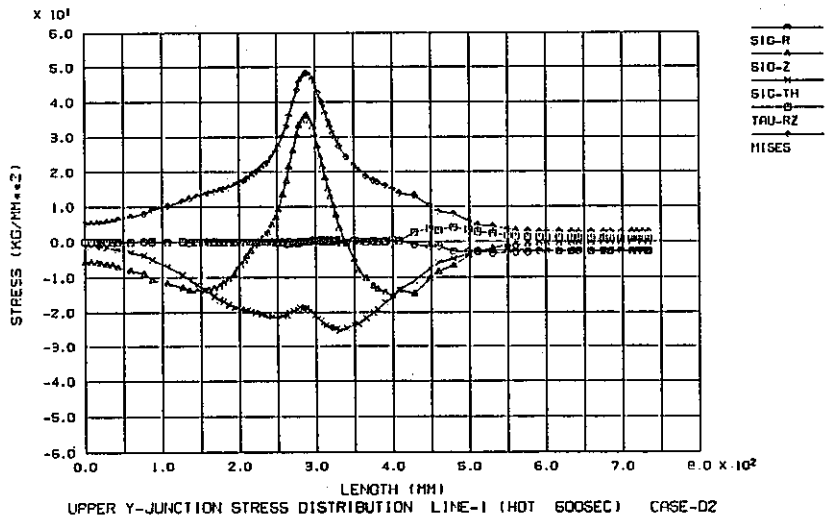
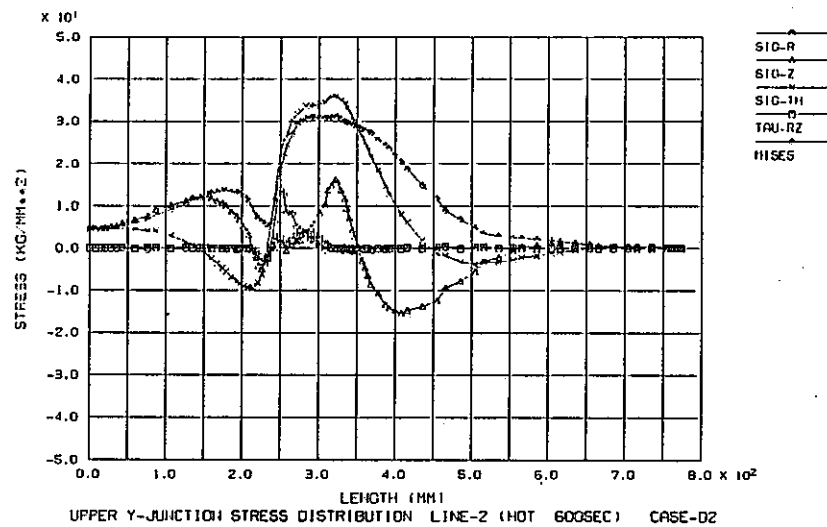
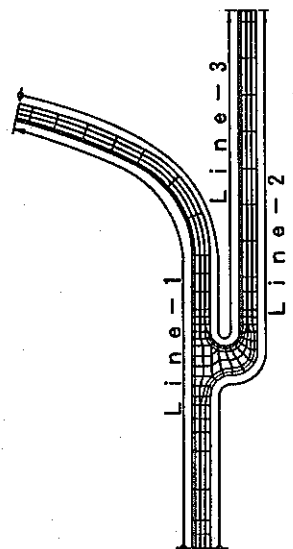


Fig.B-10(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-2)



応力評価ライン

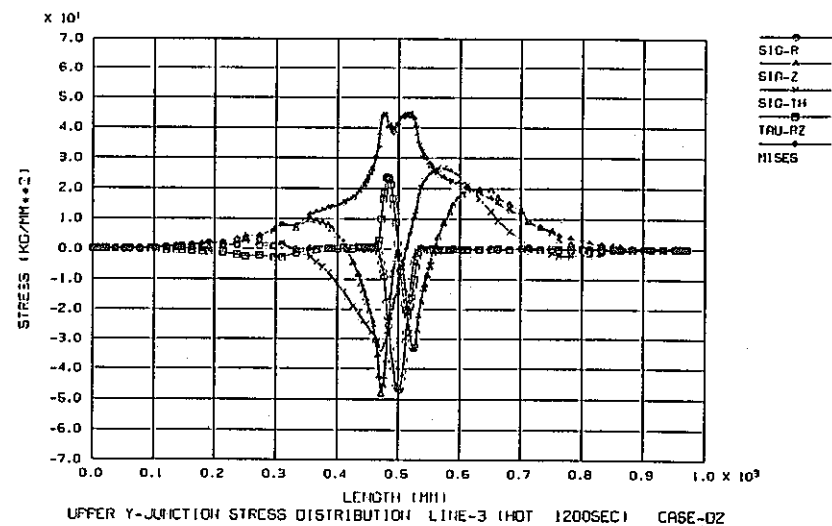
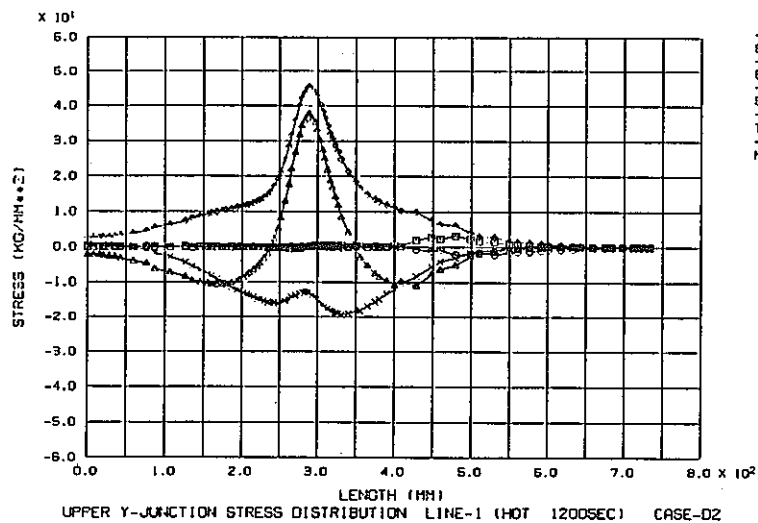
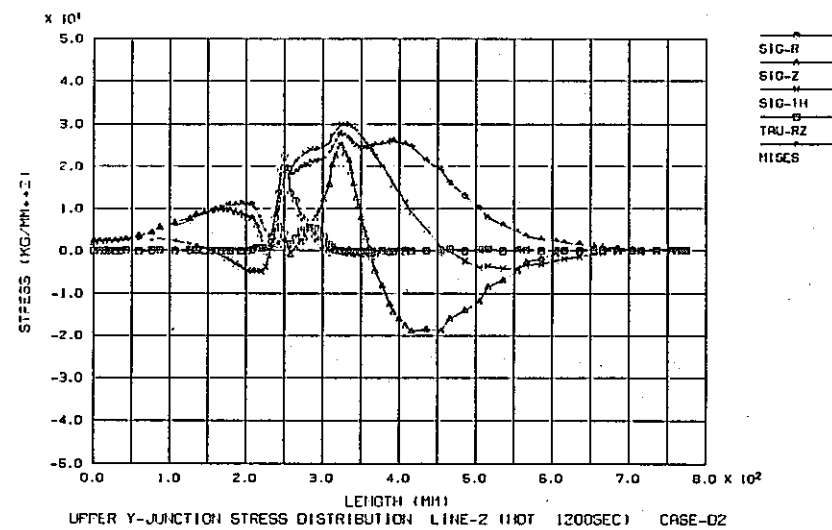
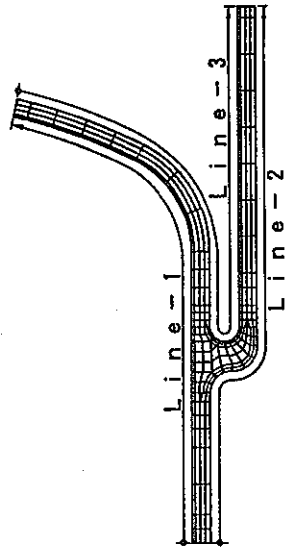


Fig.B-10(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-2)



応力評価ライン

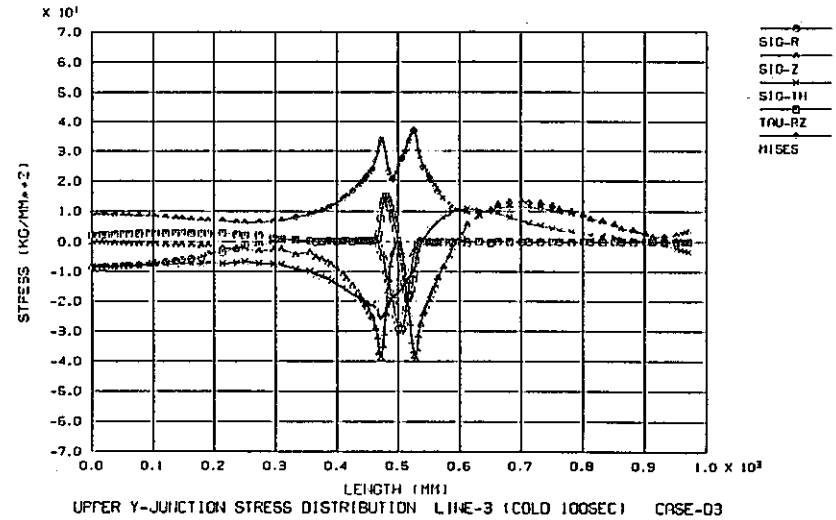
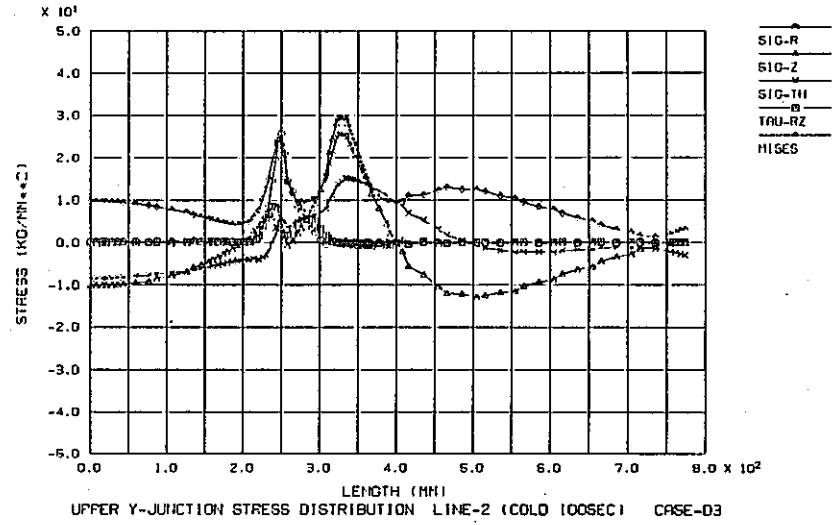
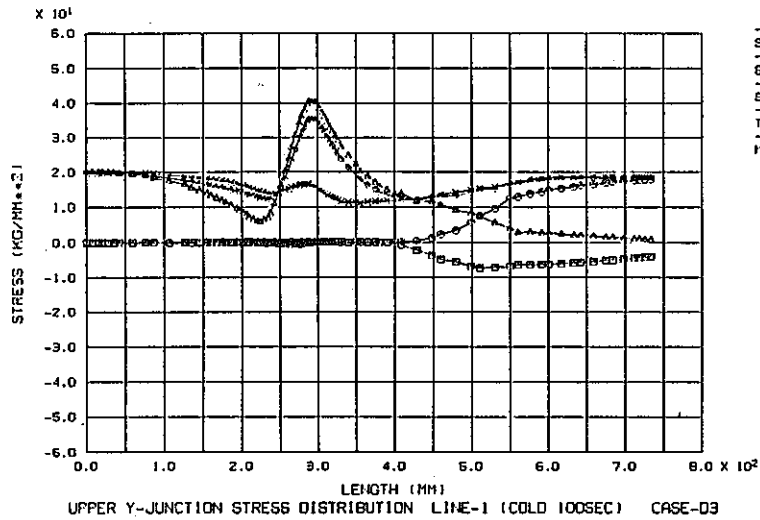
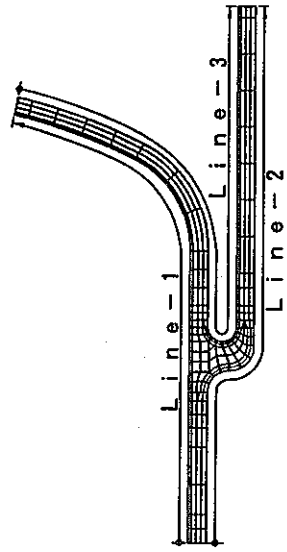


Fig.B-11(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-3)



応力評価ライン

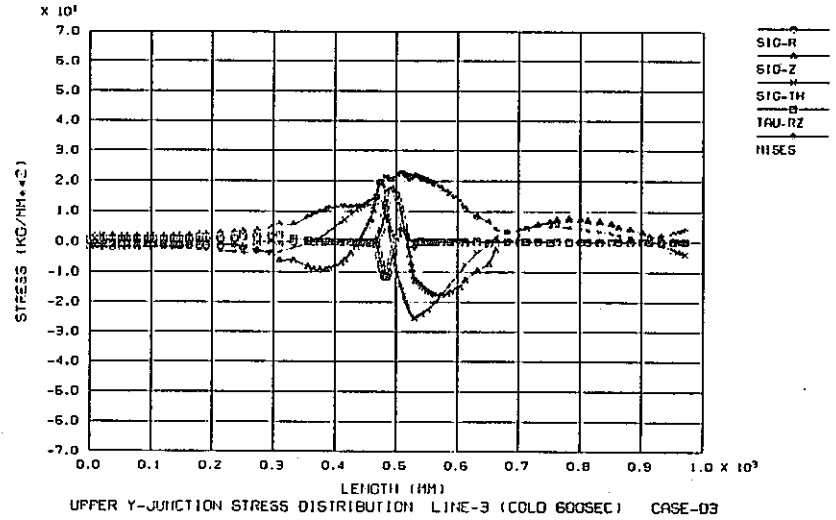
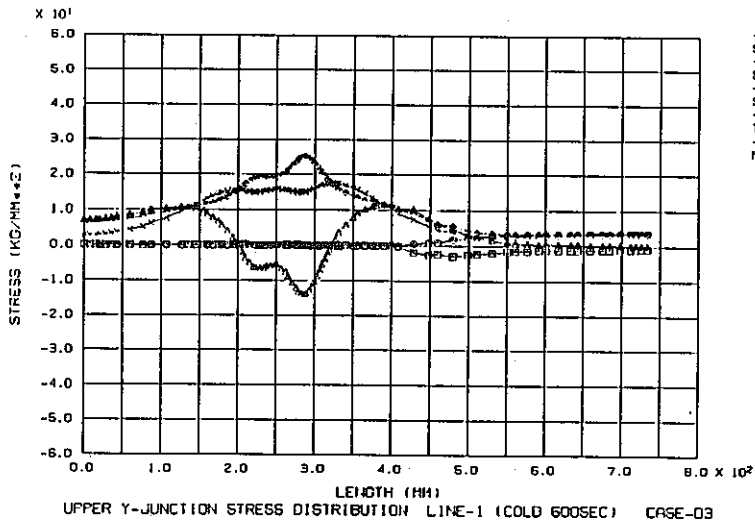
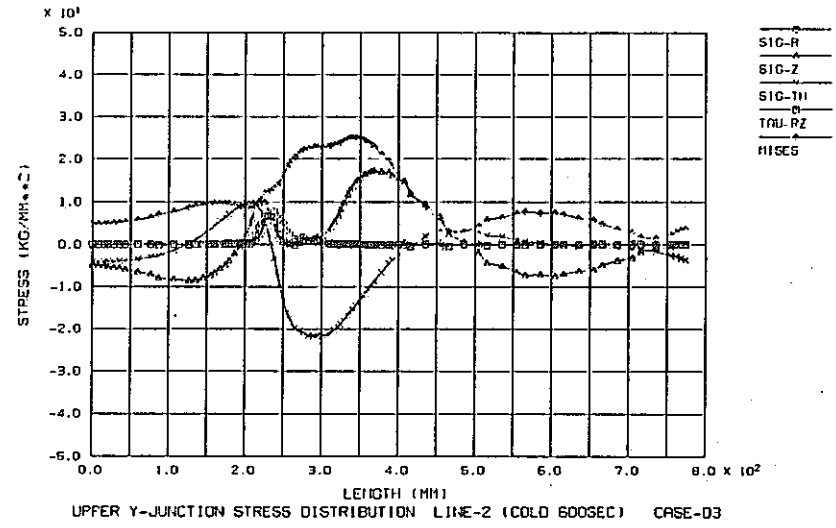
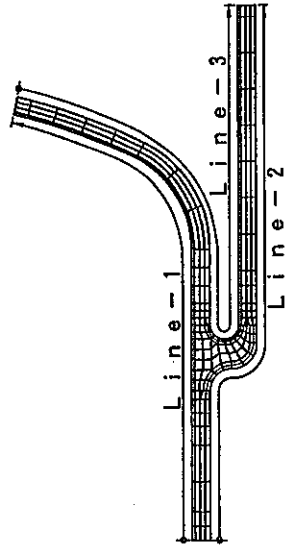


Fig.B-11(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-3)



応力評価ライン

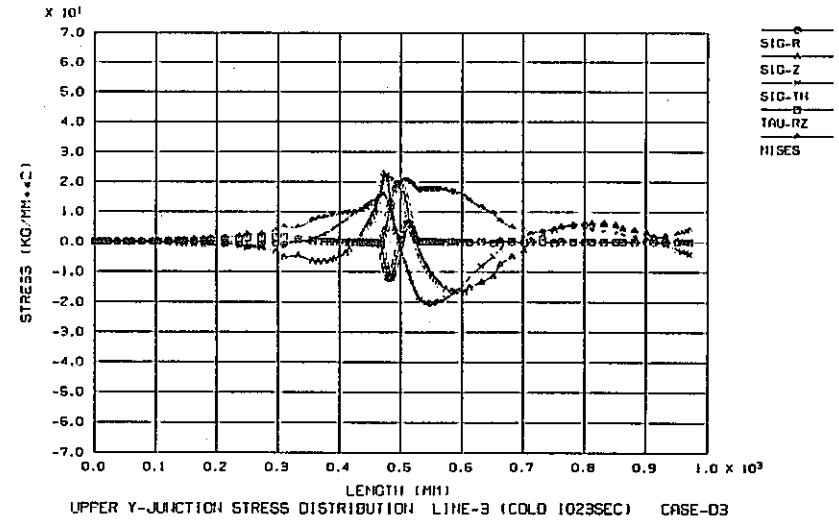
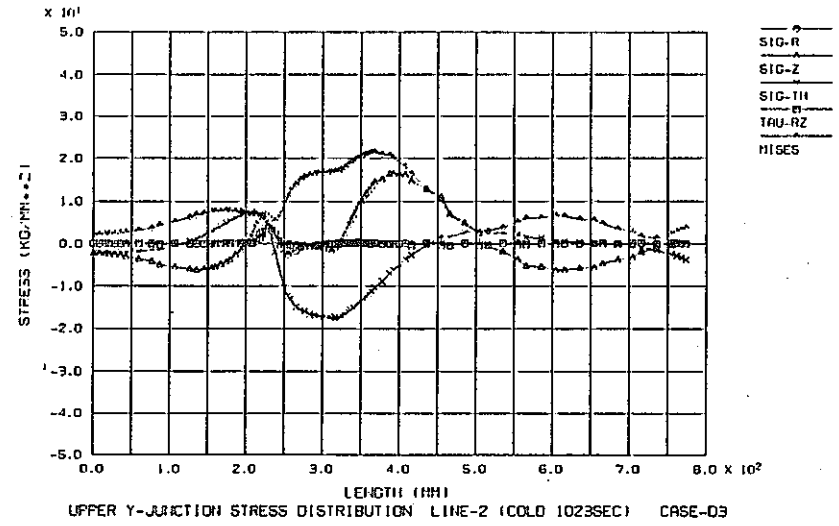
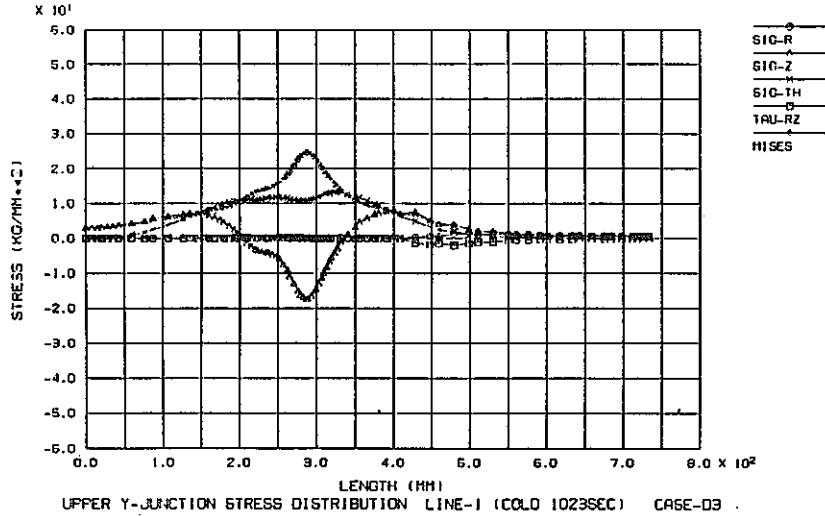
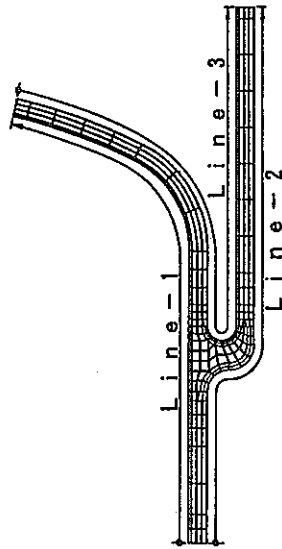


Fig.B-11(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-3)



応力評価ライン

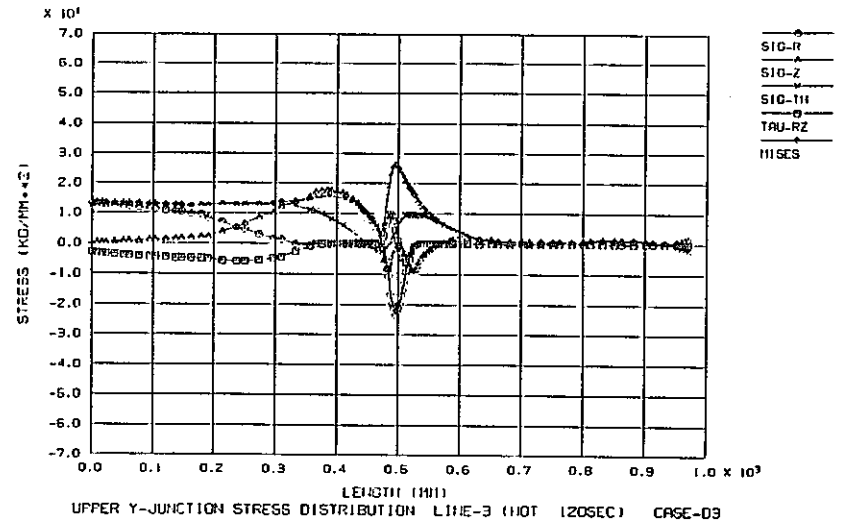
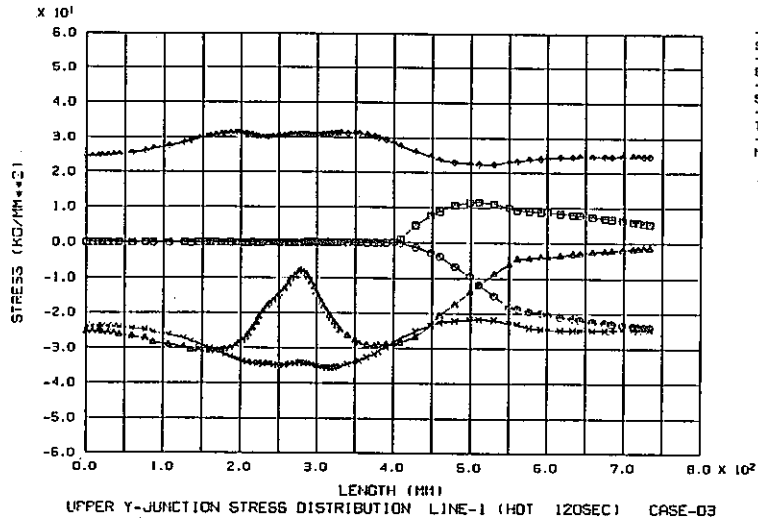
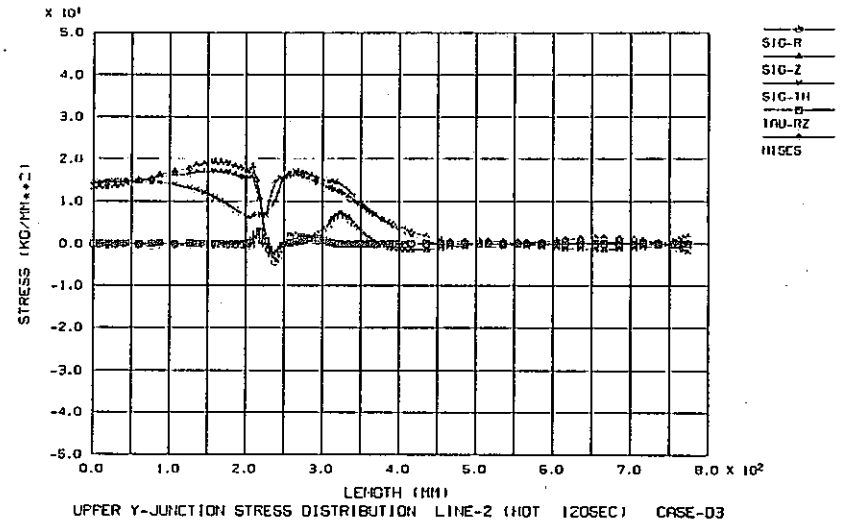
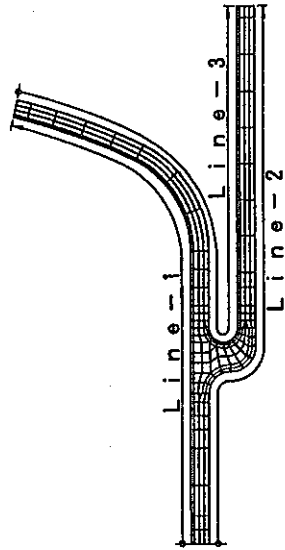


Fig.B-11(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-3)



応力評価ライン

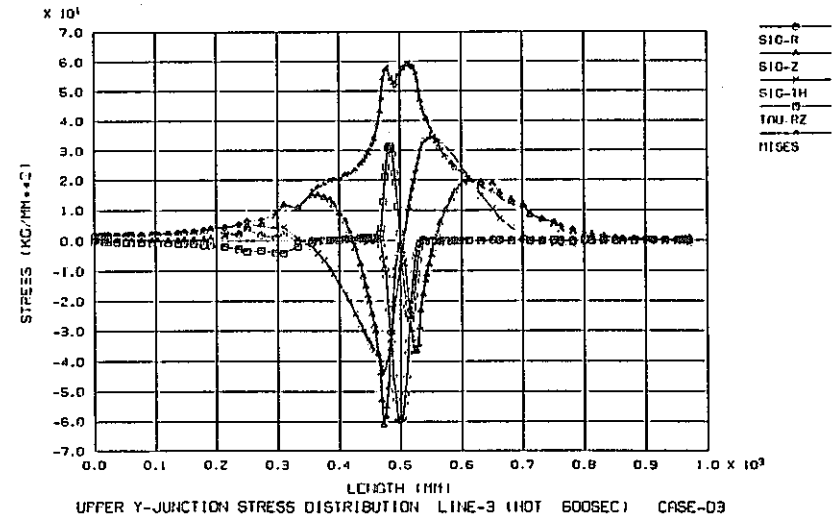
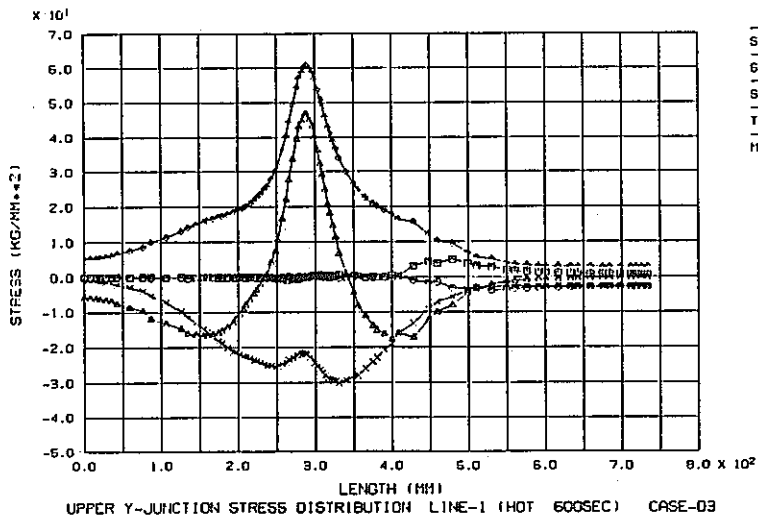
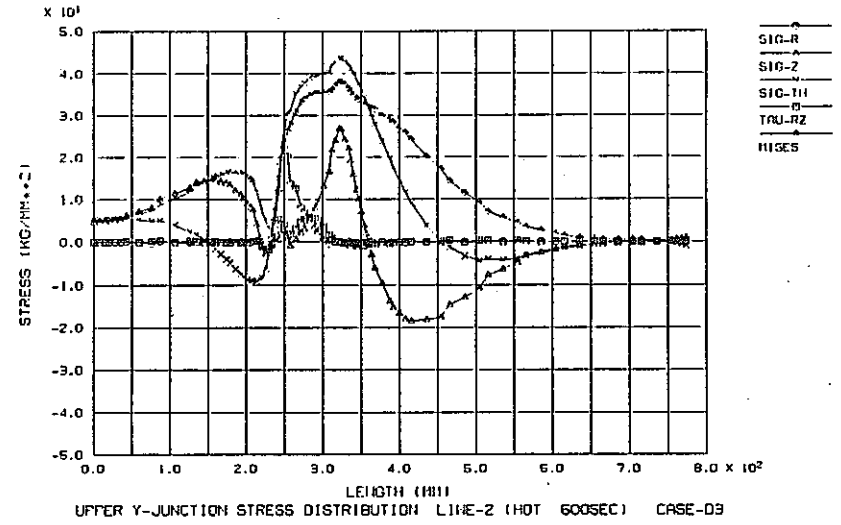
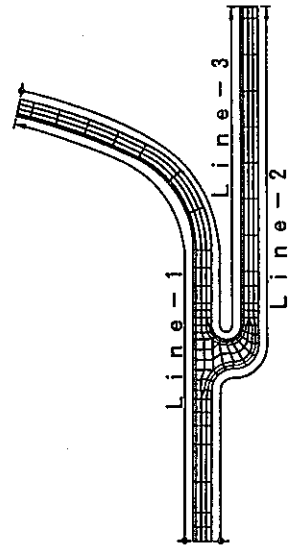


Fig. B-11(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-3)



応力評価ライン

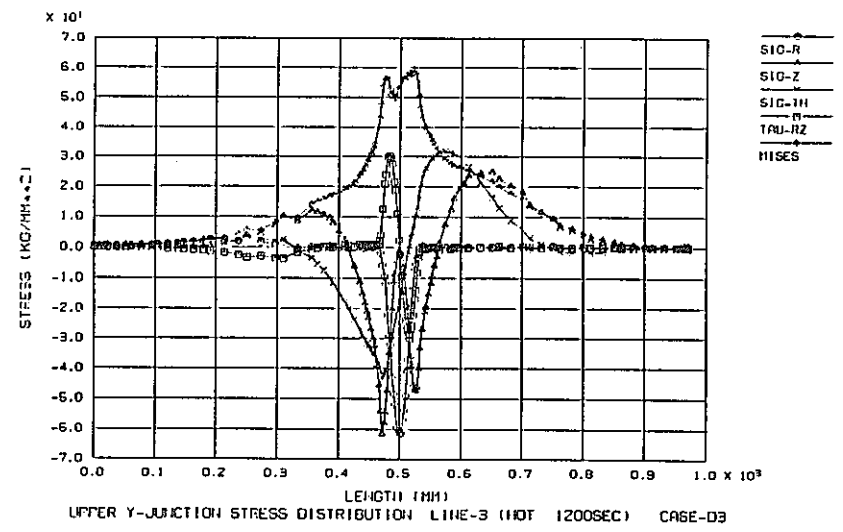
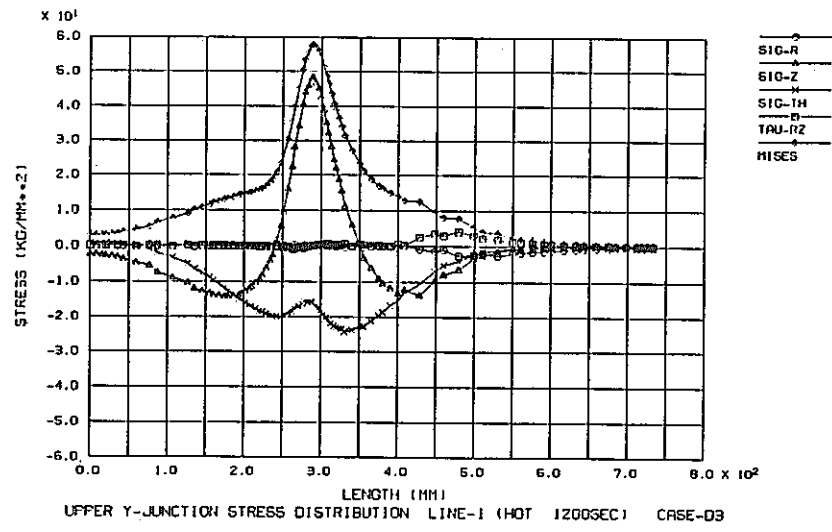
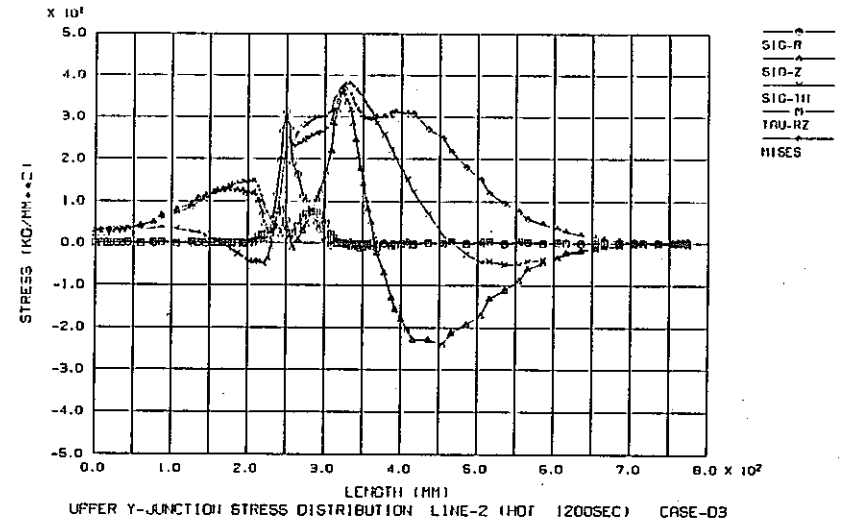
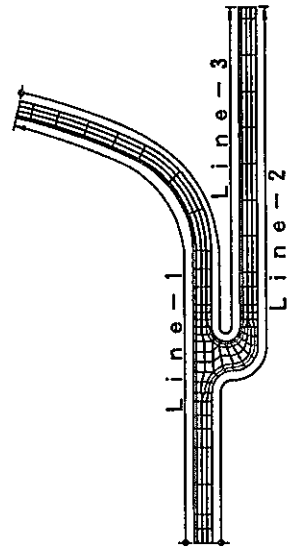


Fig.B-11(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case D-3)



応力評価ライン

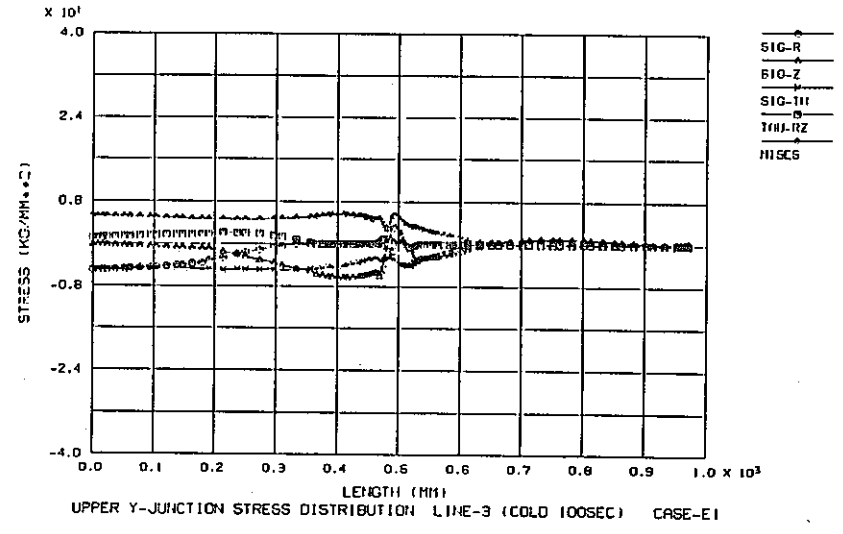
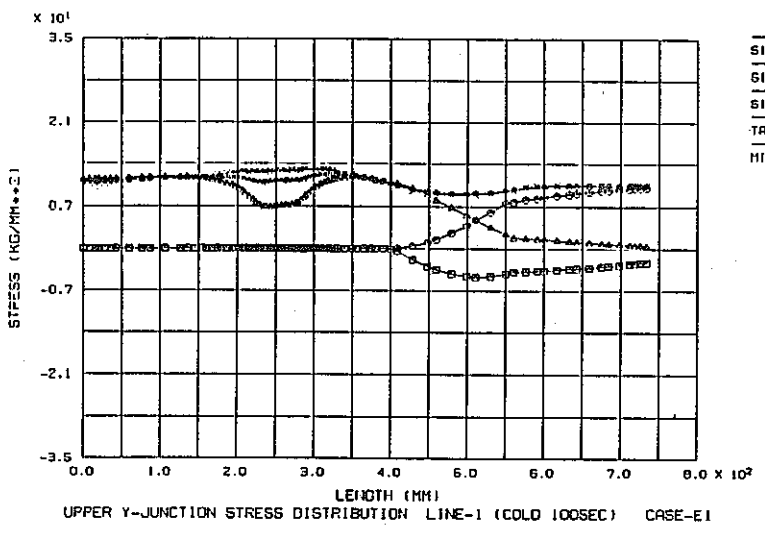
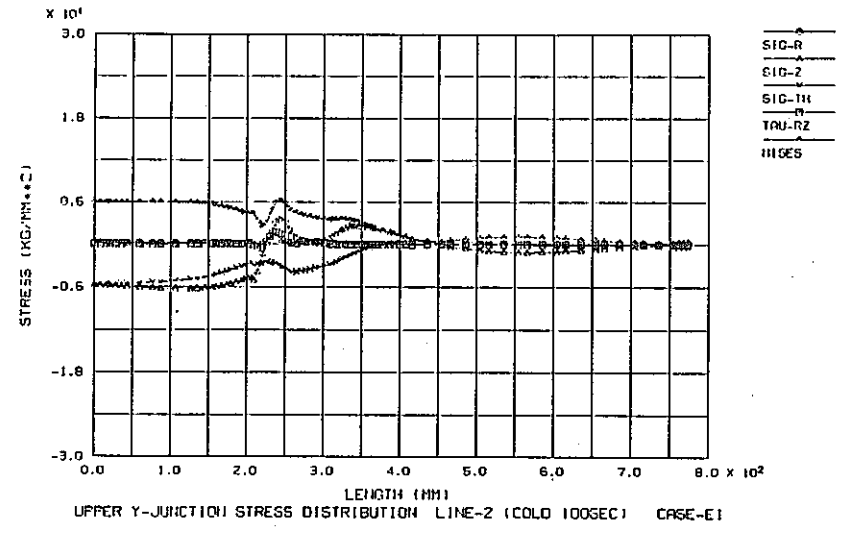
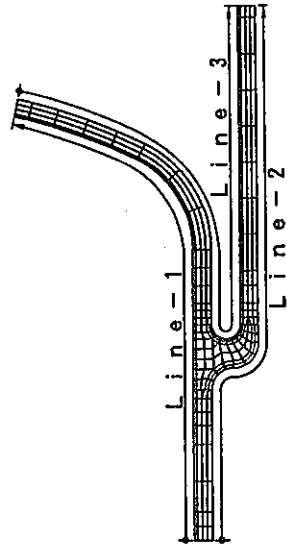


Fig.B-12(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-1)



応力評価ライン

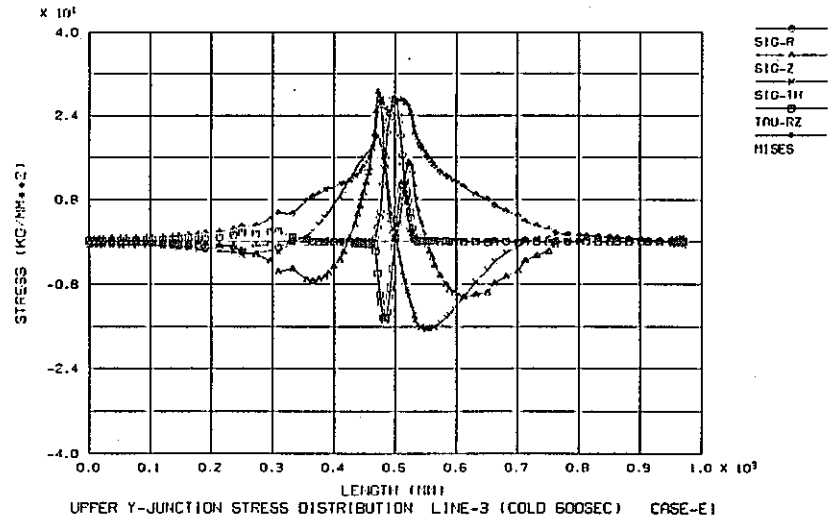
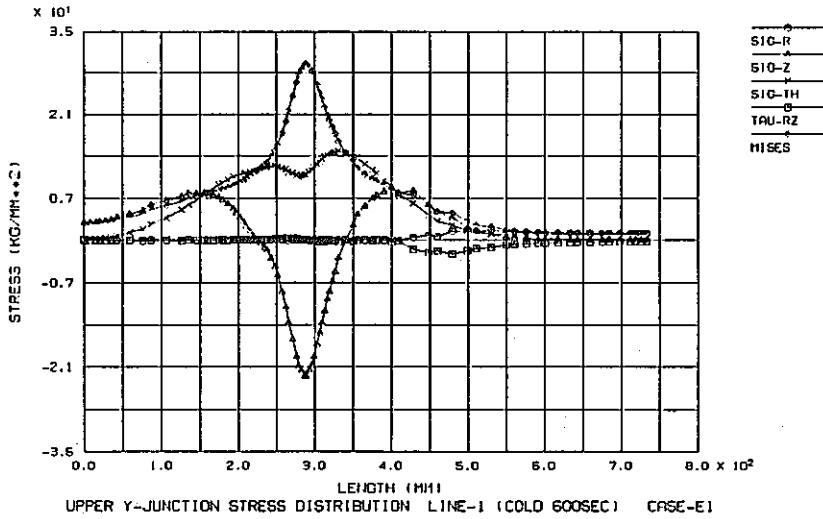
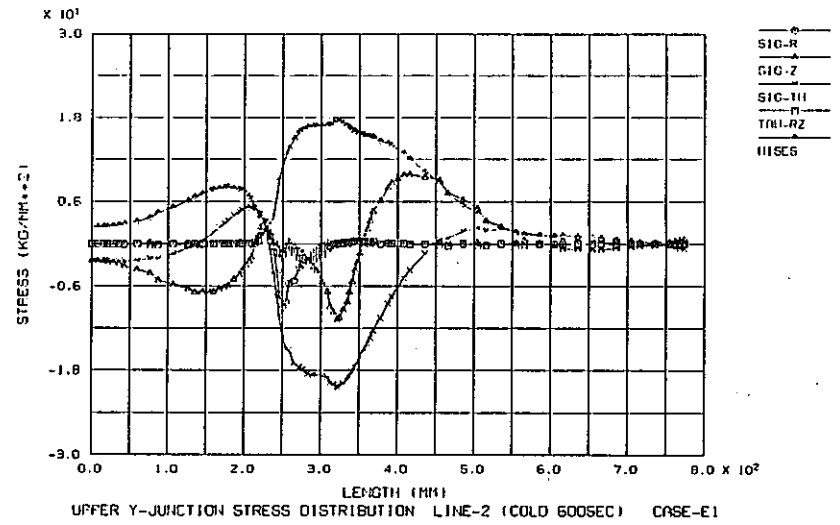
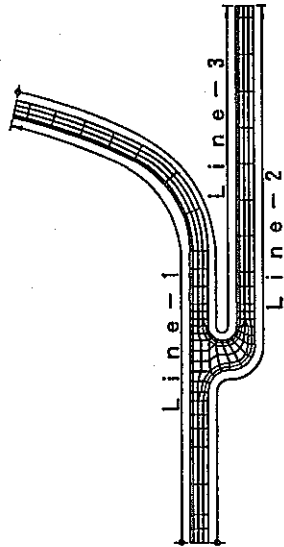


Fig.B-12(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-1)



応力評価ライン

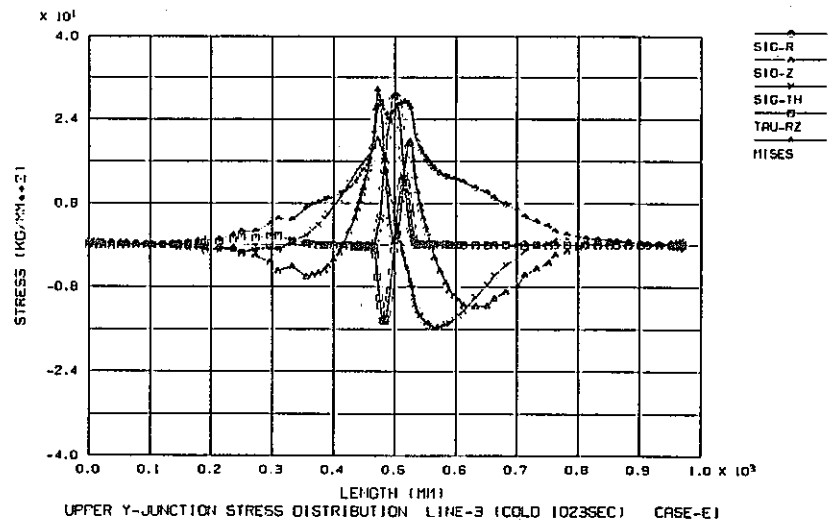
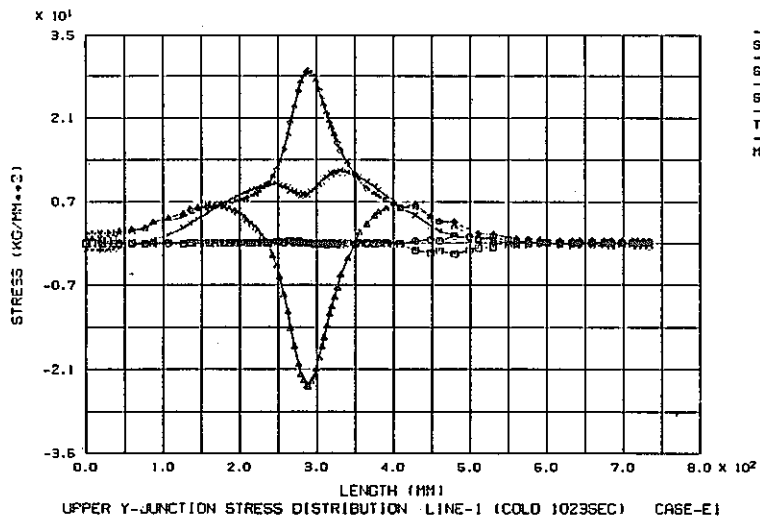
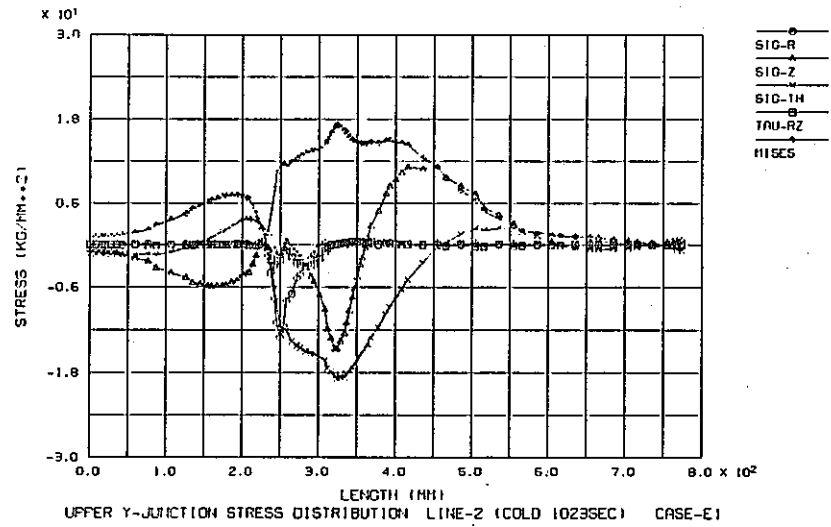
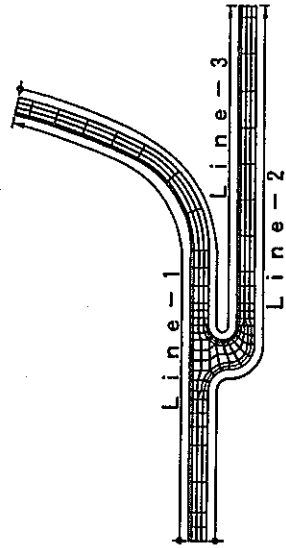


Fig. B-12(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-1)



応力評価ライン

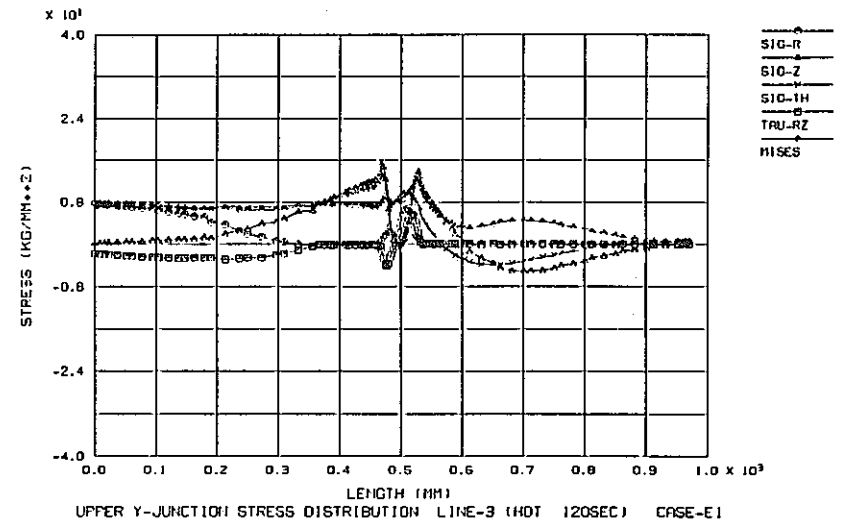
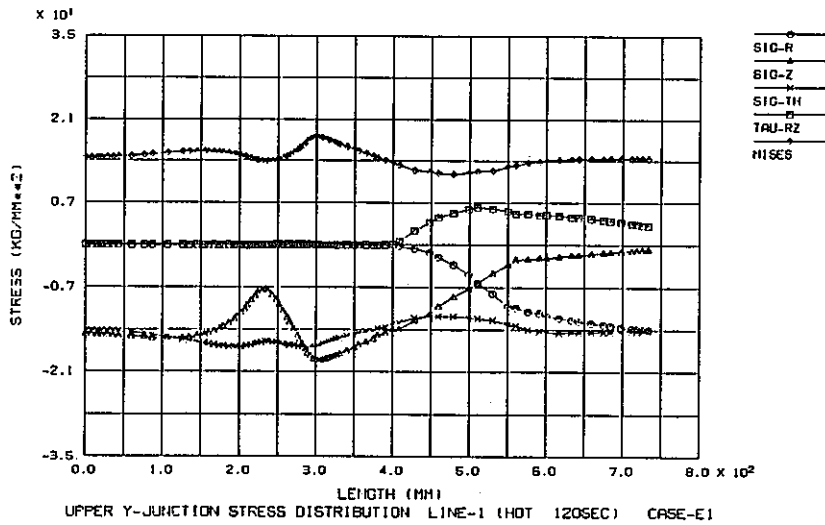
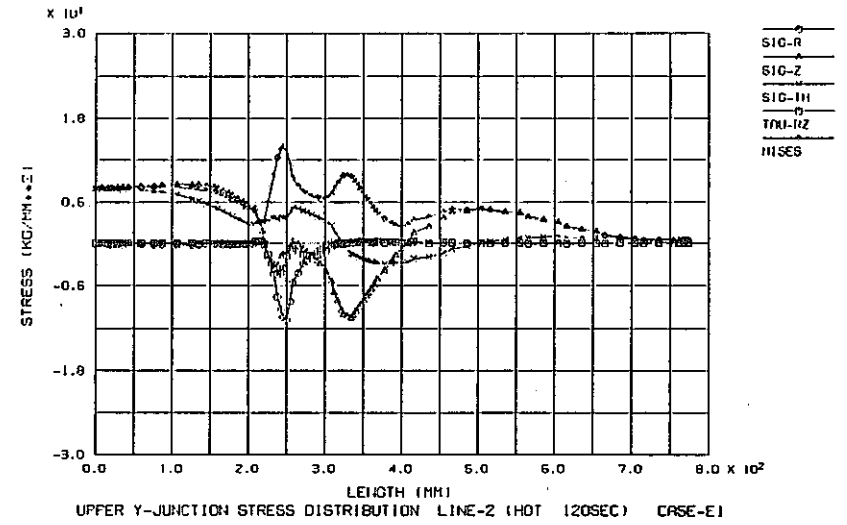
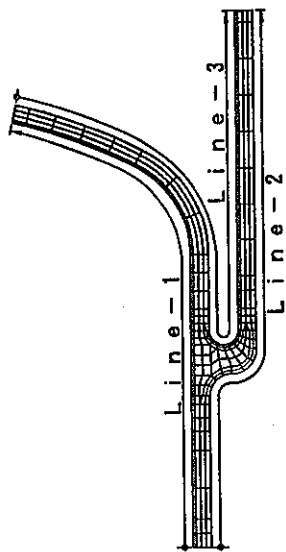


Fig.B-12(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-1)



応力評価ライン

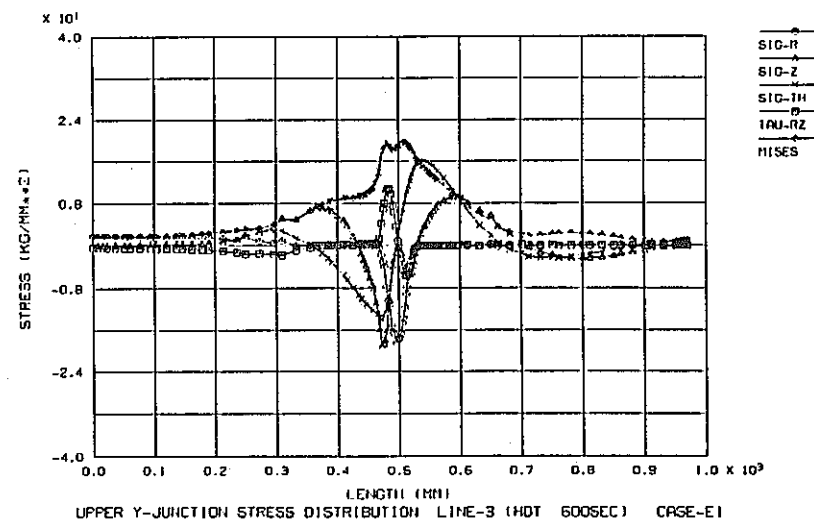
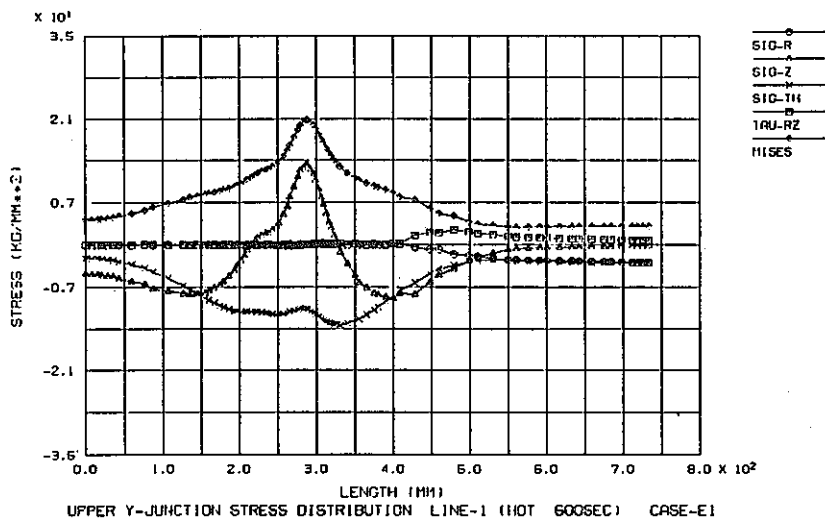
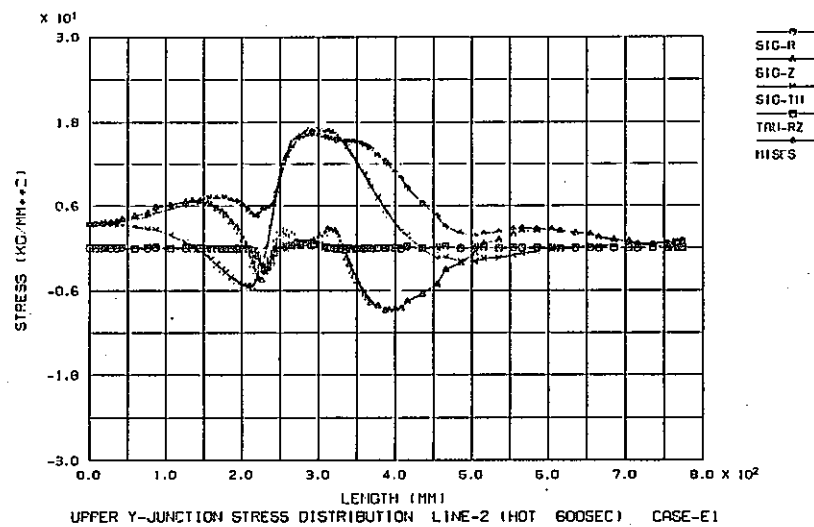
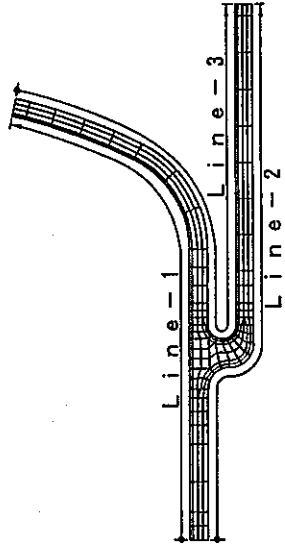


Fig.B-12(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-1)



応力評価ライン

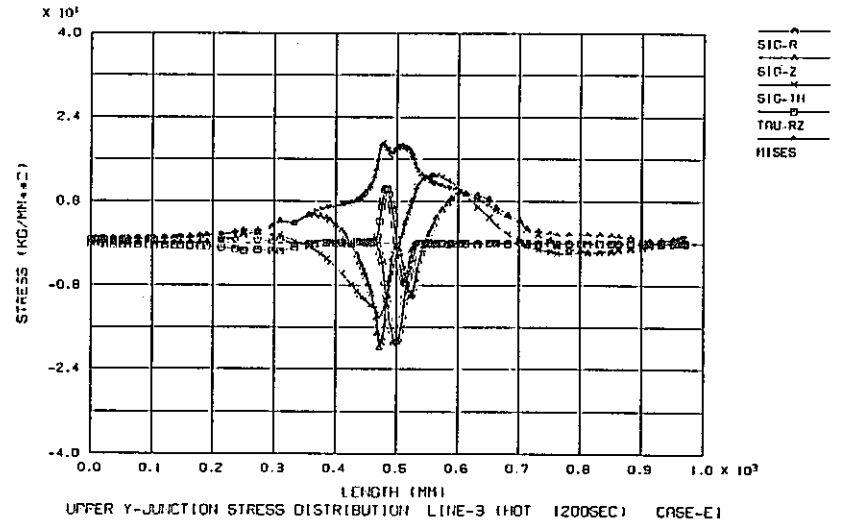
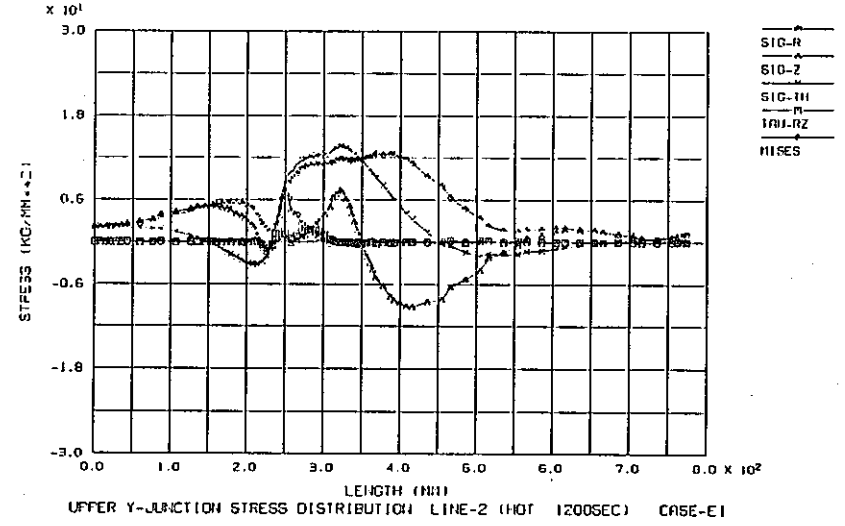
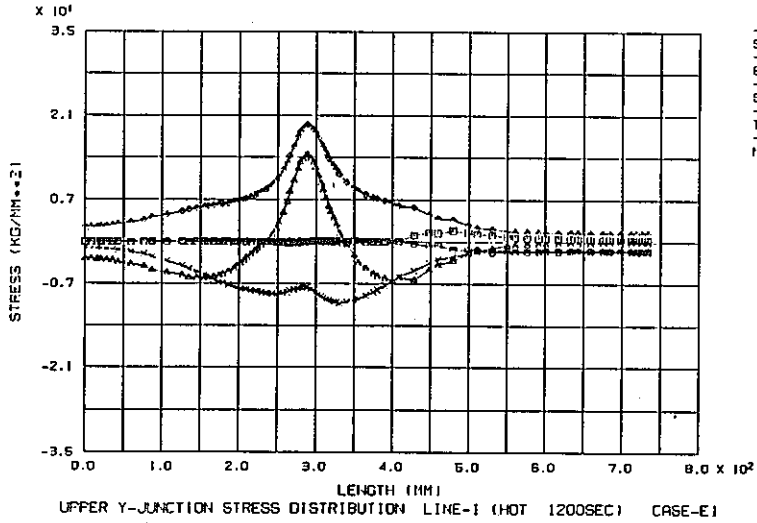
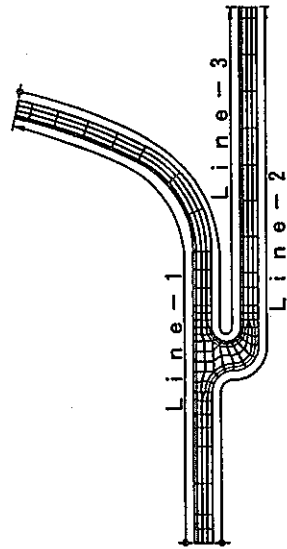


Fig.B-12(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-1)



応力評価ライン

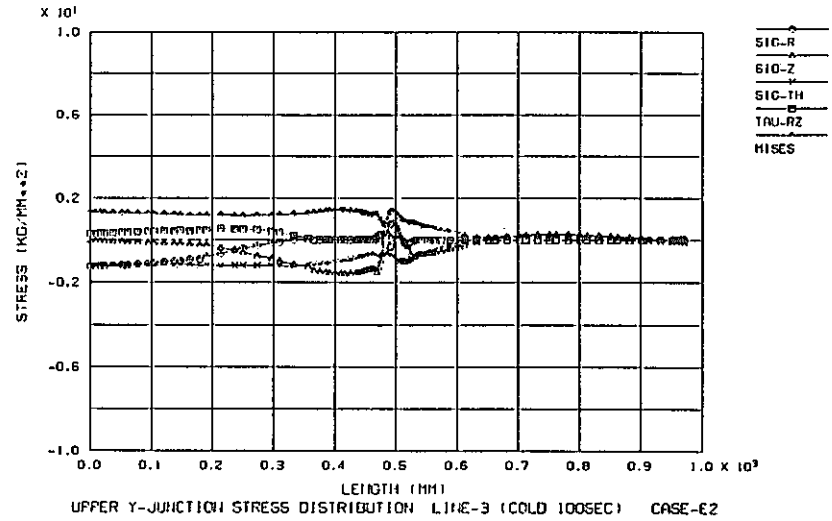
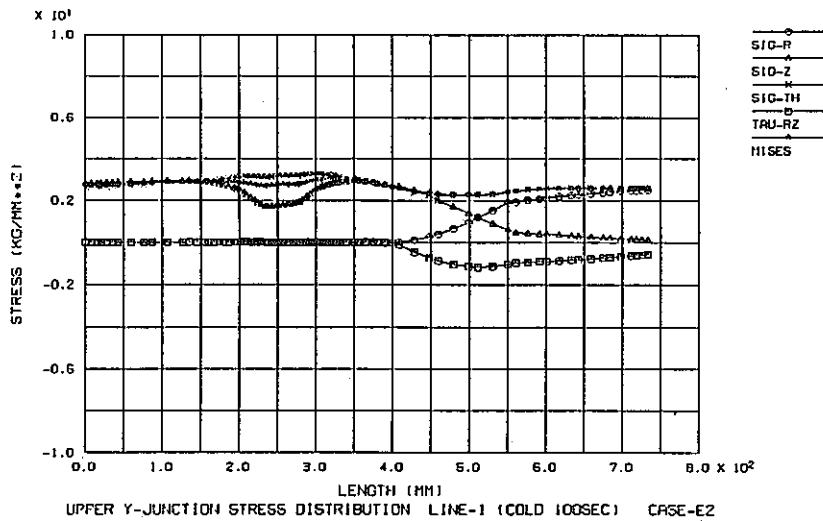
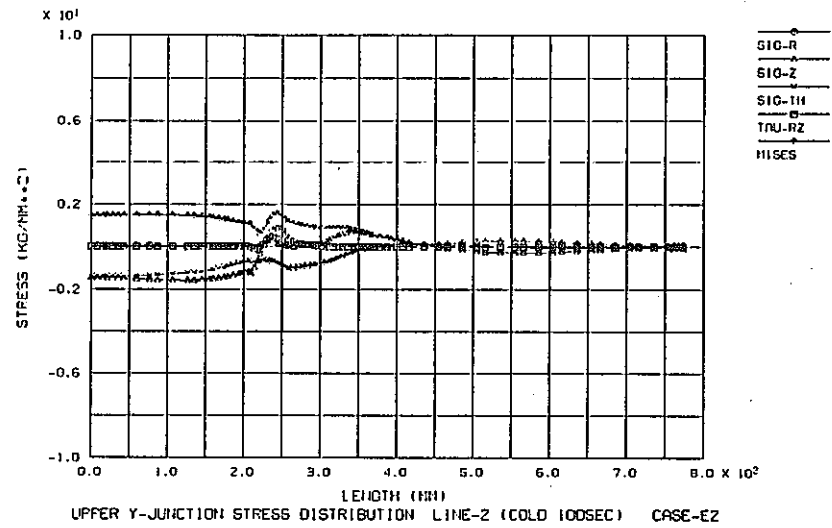
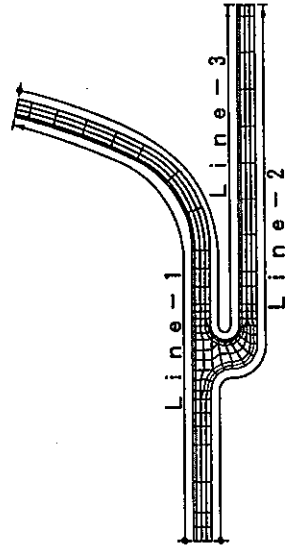


Fig.B-13(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-2)



応力評価ライン

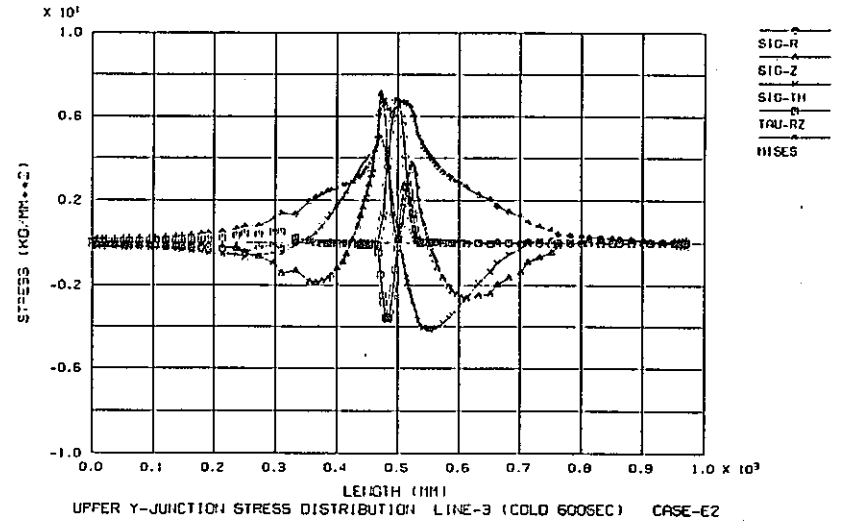
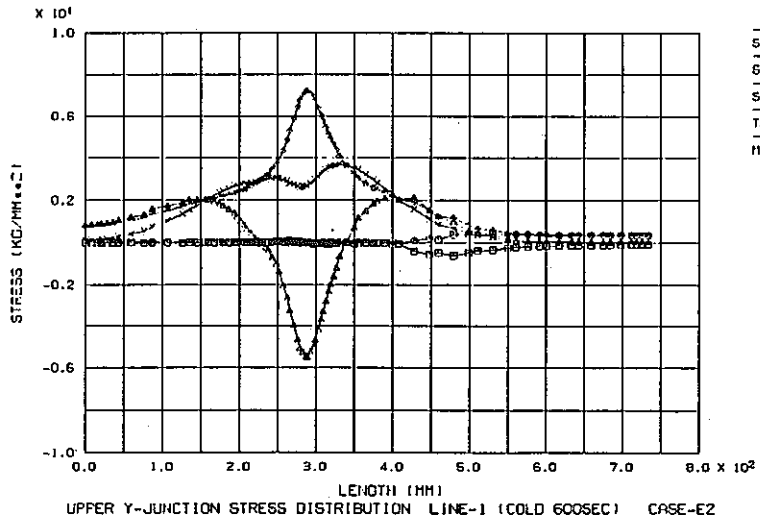
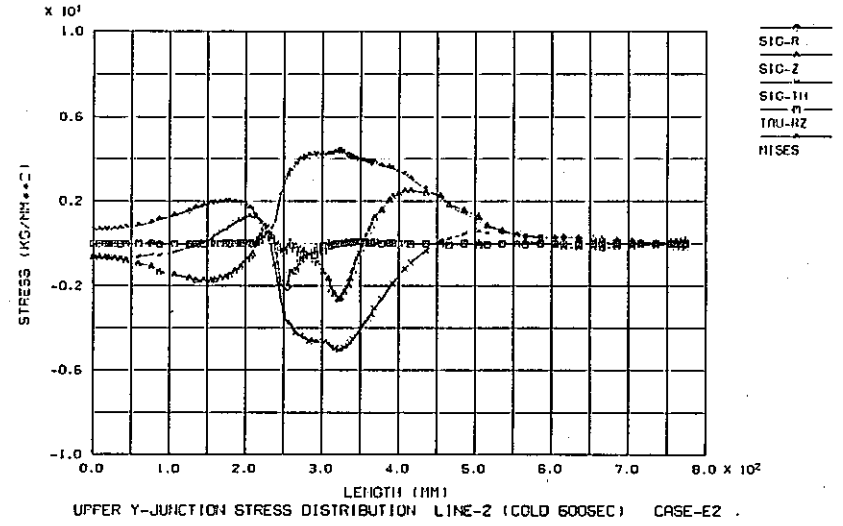
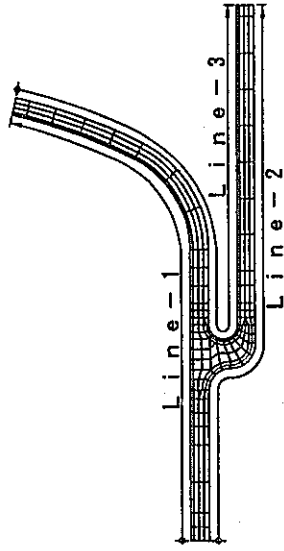


Fig.B-13(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-2)



応力評価ライン

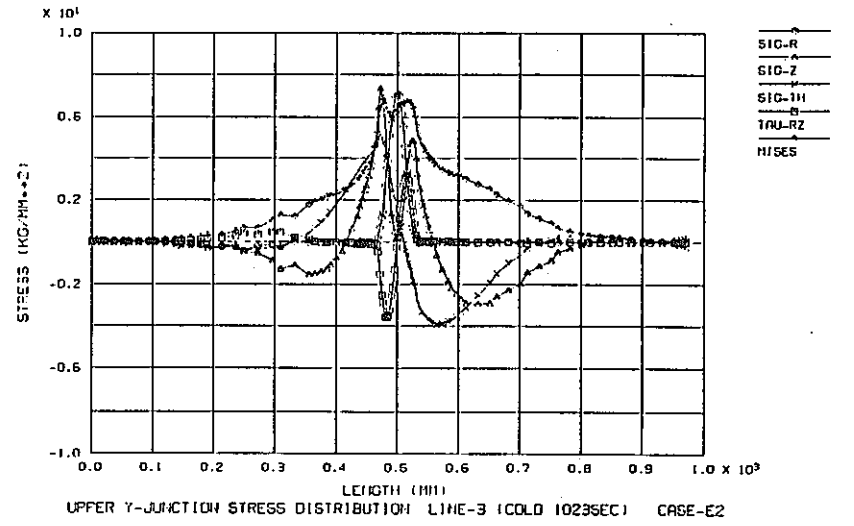
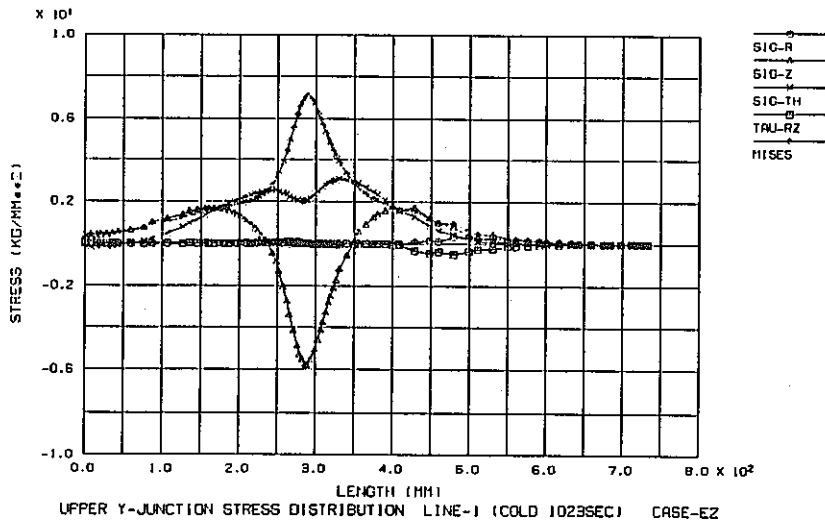
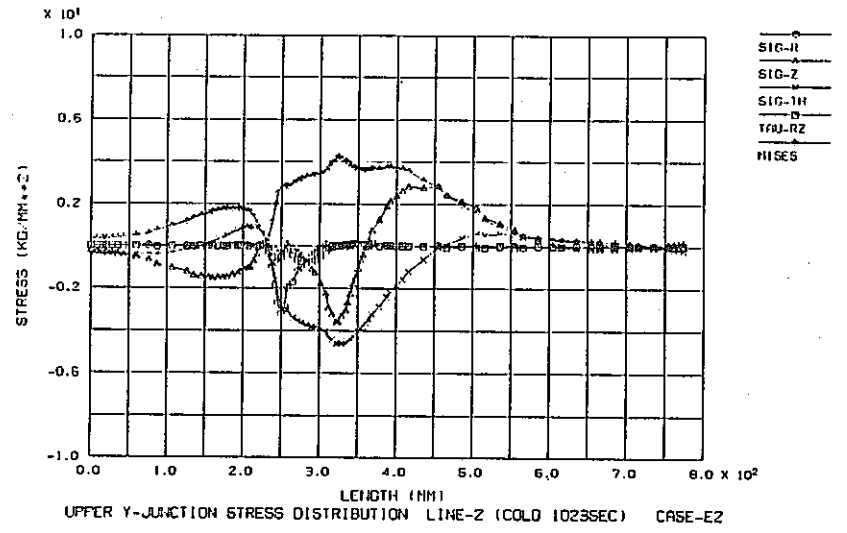
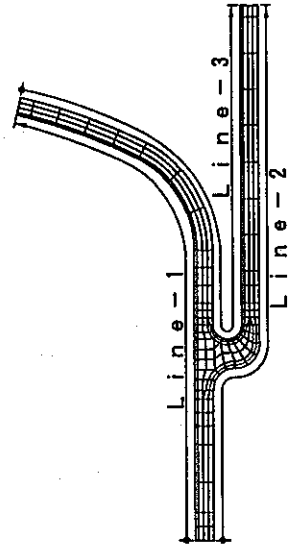


Fig.B-13(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-2)



応力評価ライン

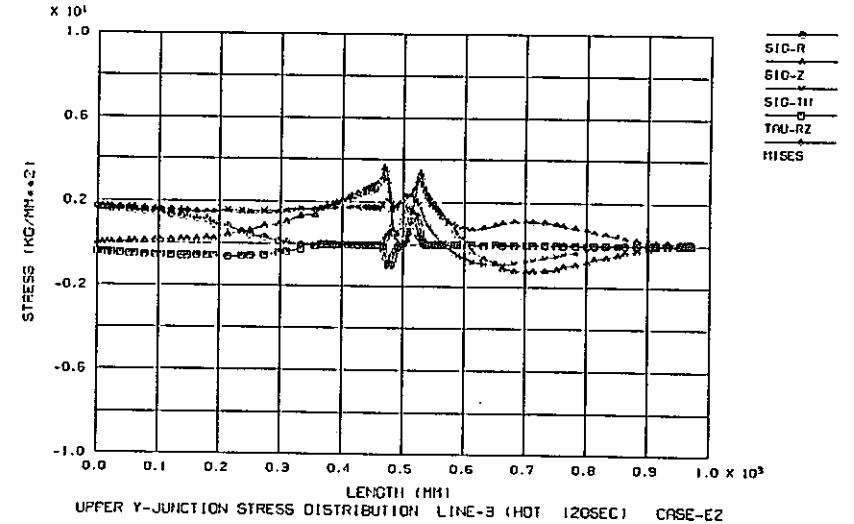
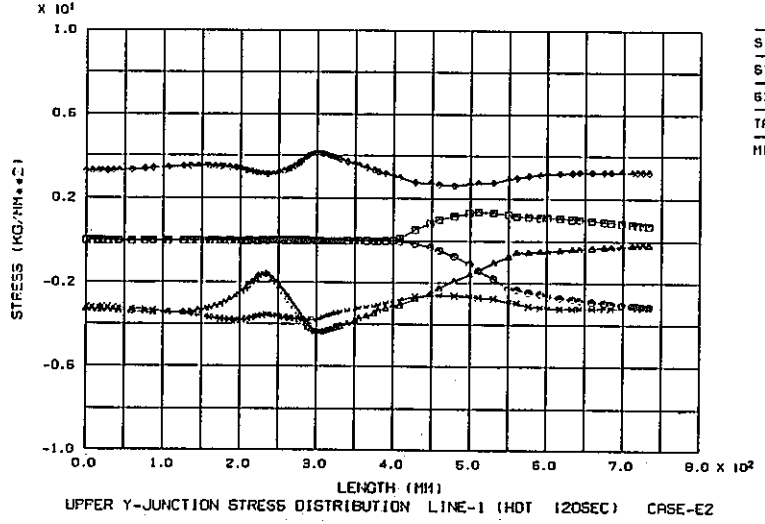
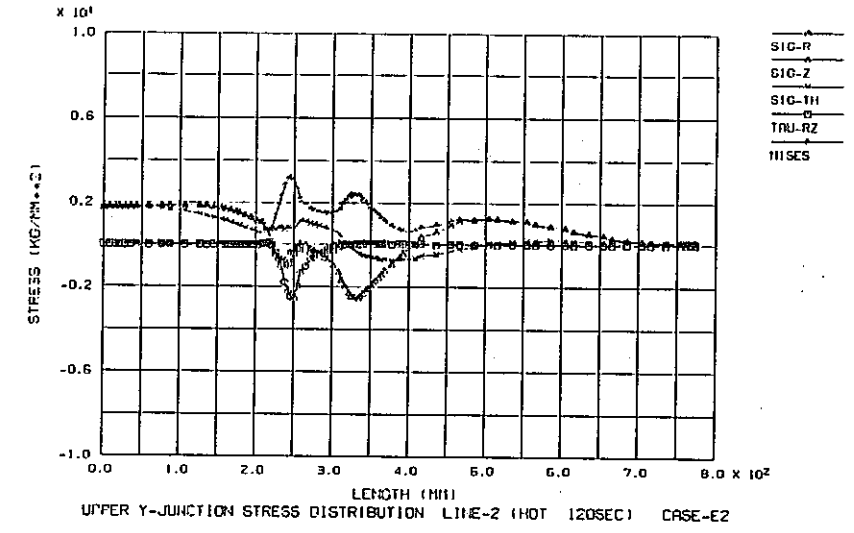
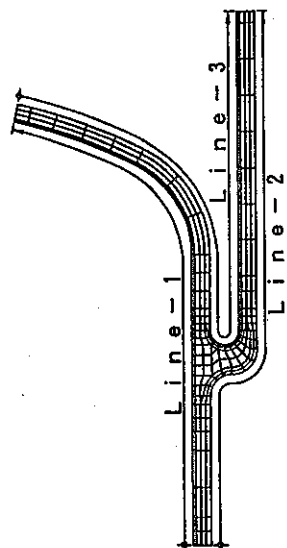


Fig.B-13(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-2)



応力評価ライン

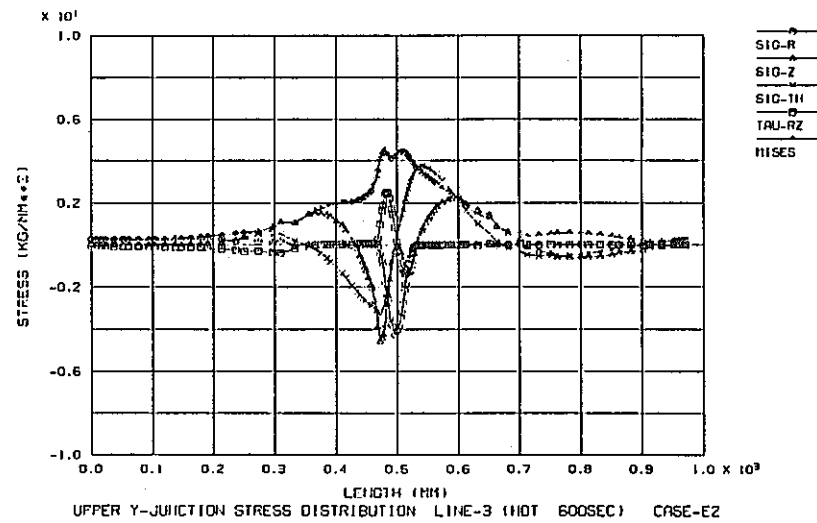
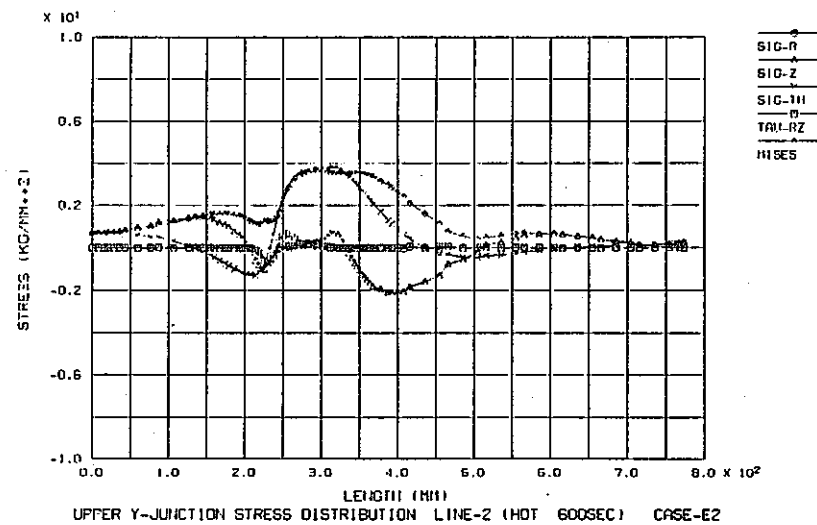
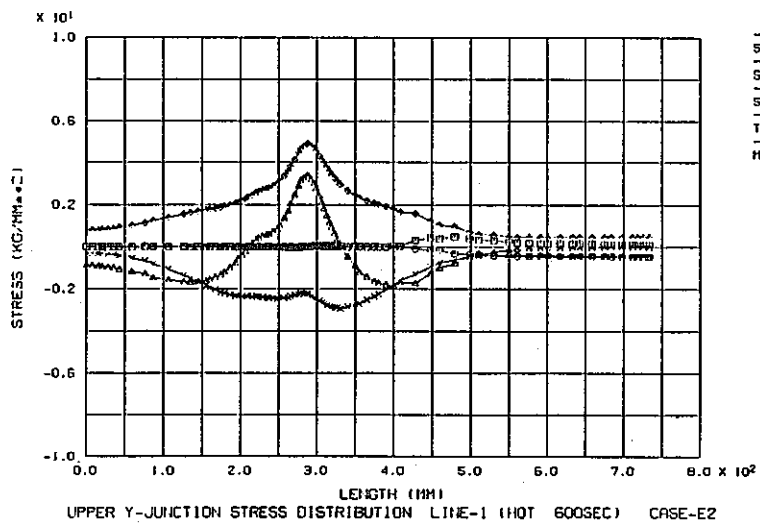
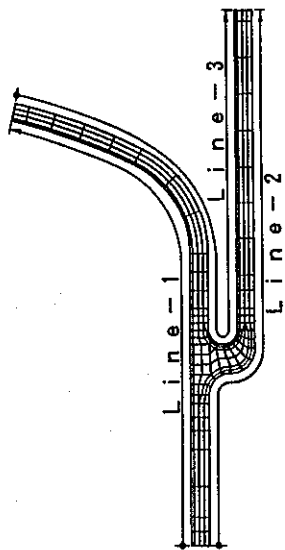


Fig.B-13(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-2)



応力評価ライン

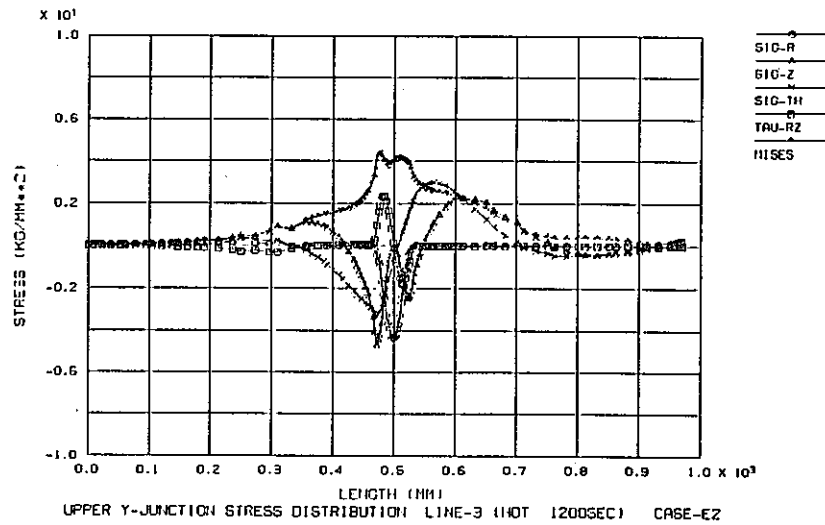
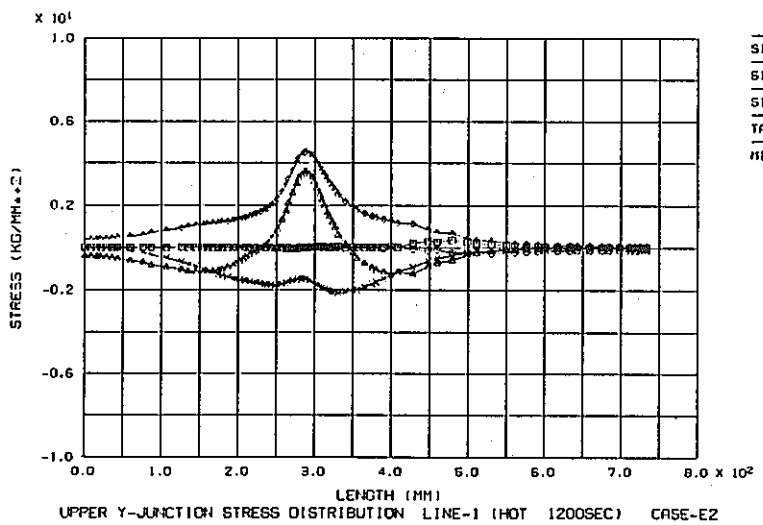
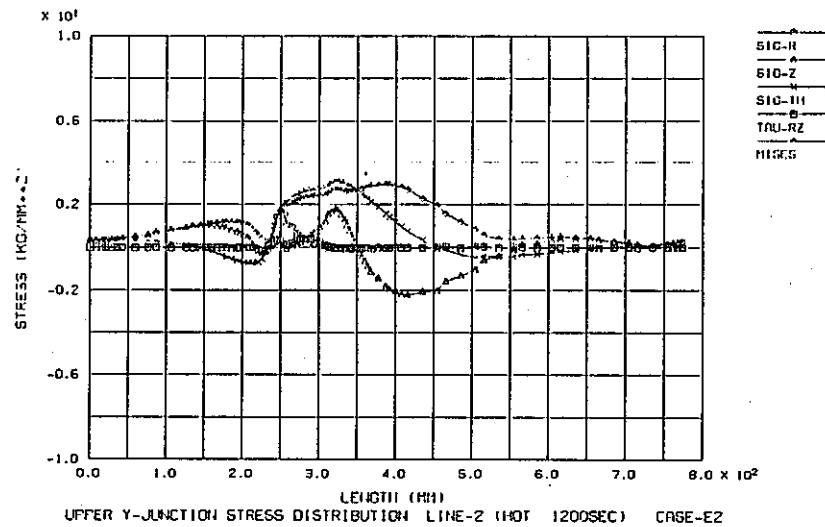
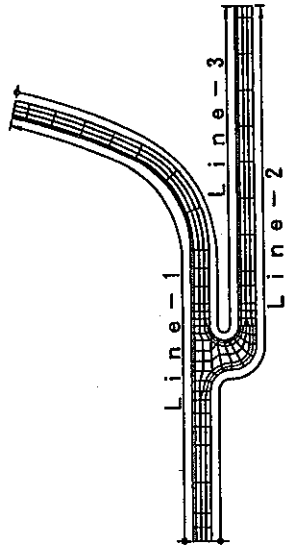


Fig.B-13(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case E-2)



応力評価ライン

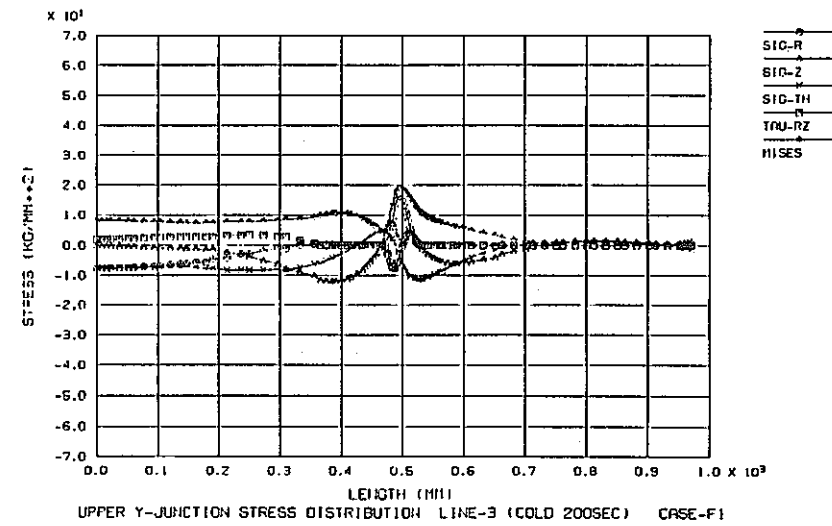
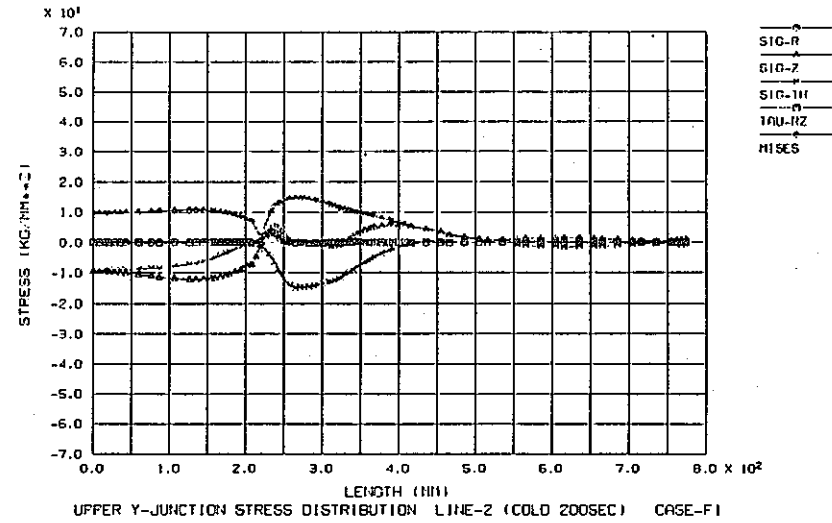
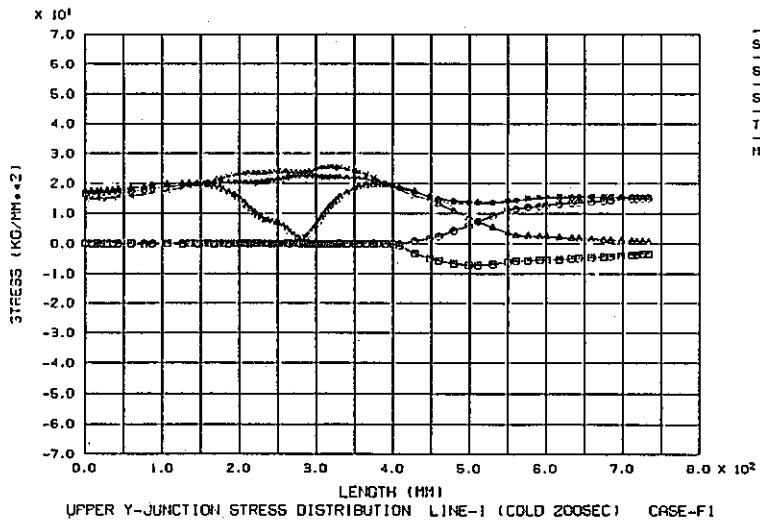
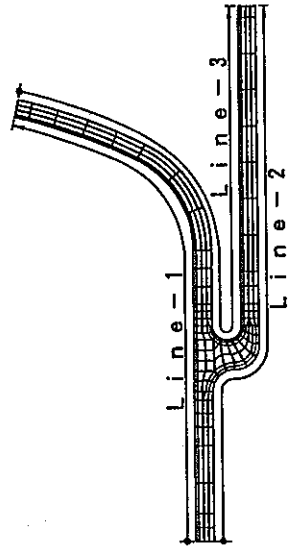


Fig.B-14(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-1)



応力評価ライン

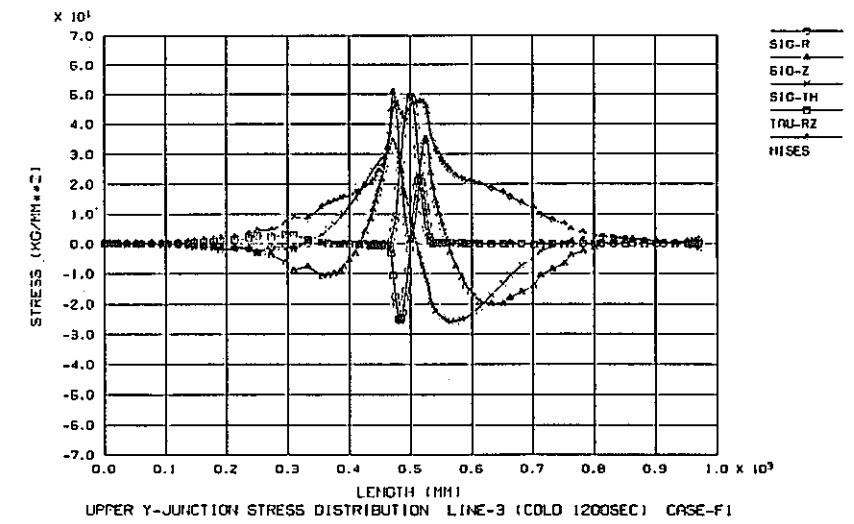
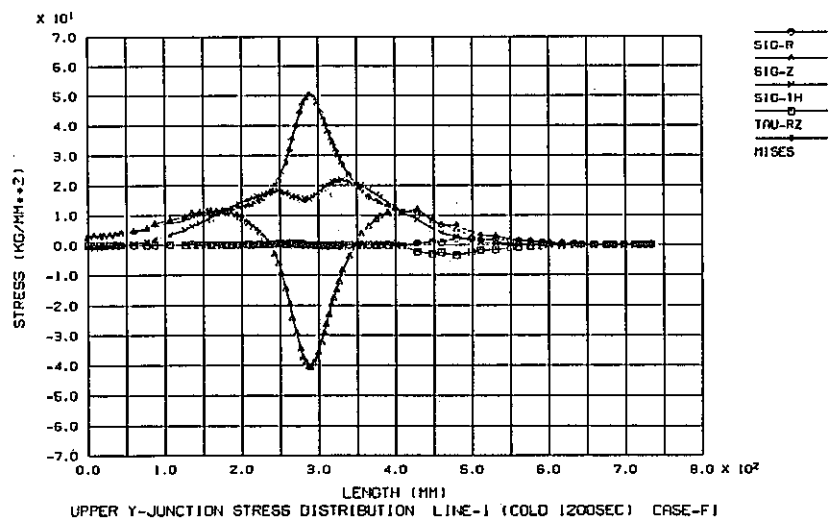
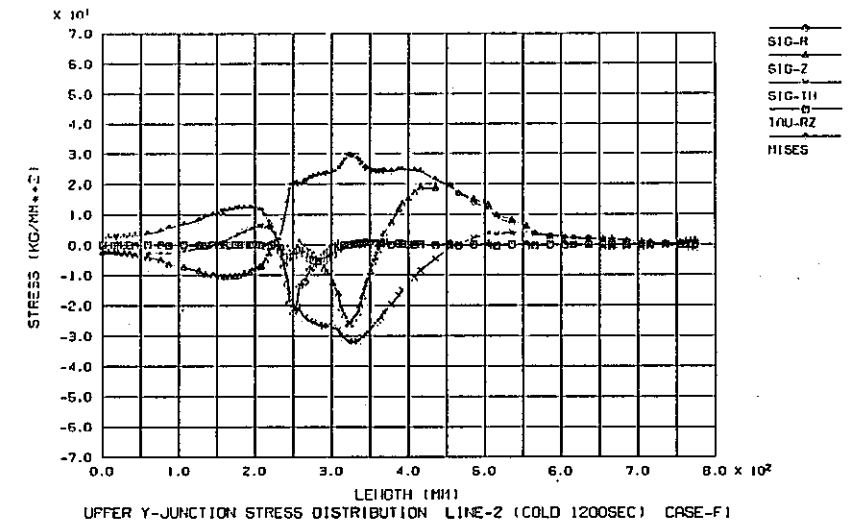
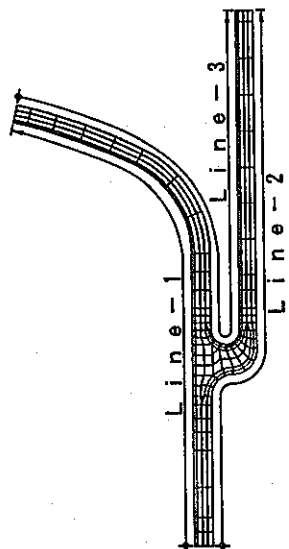


Fig.B-14(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-1)



応力評価ライン

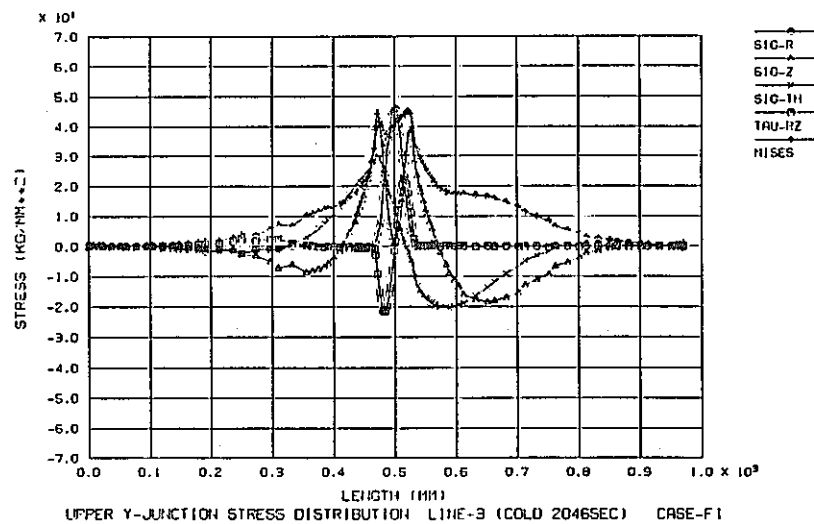
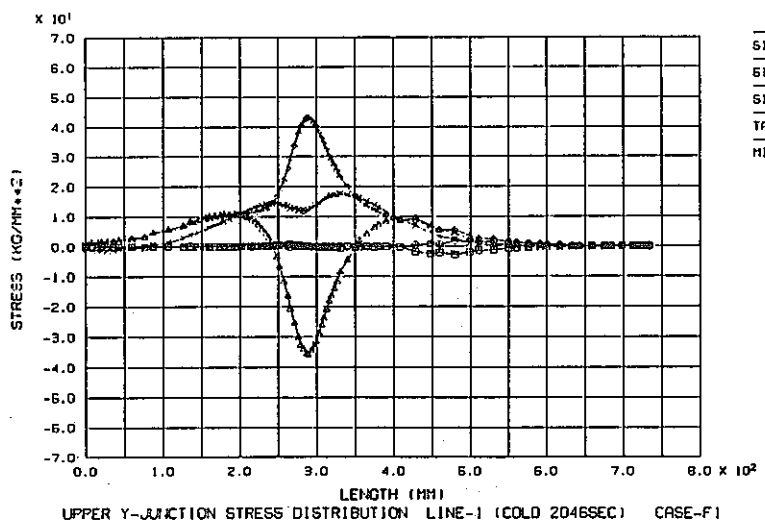
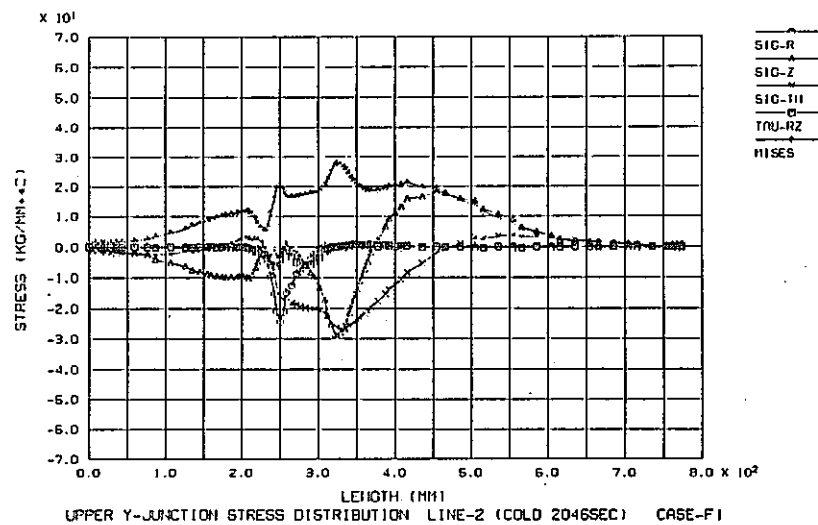
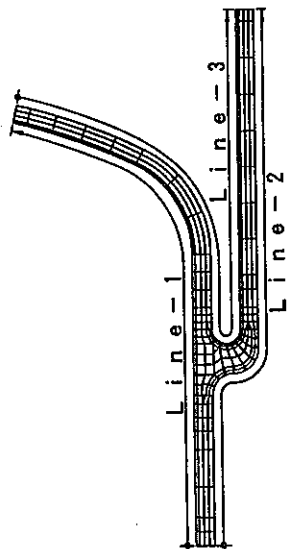


Fig.B-14(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-1)



応力評価ライン

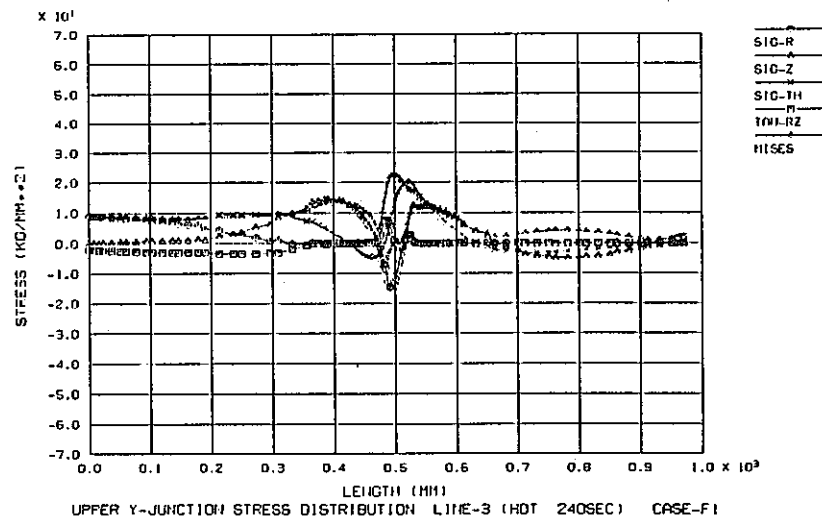
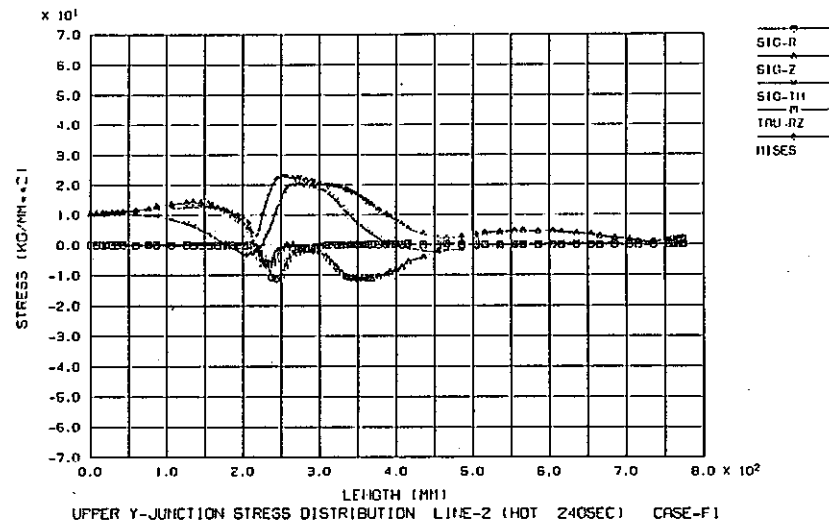
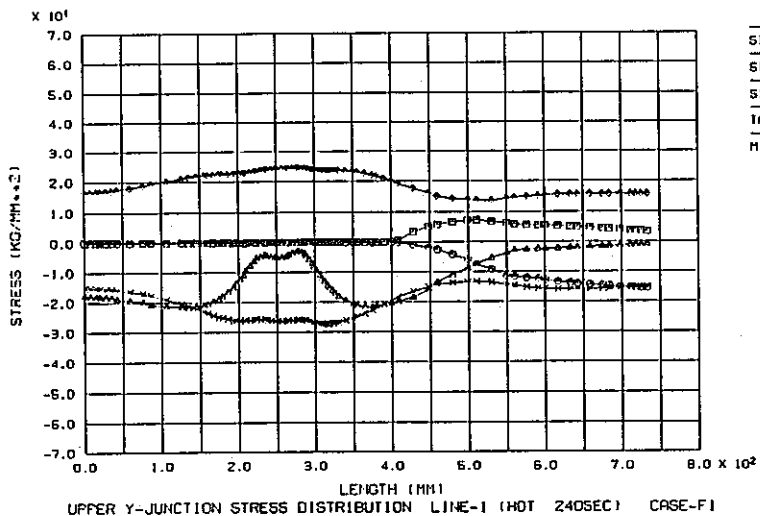
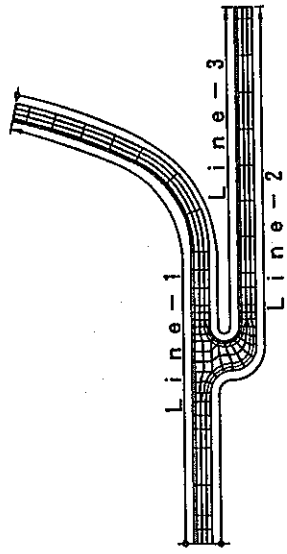


Fig.B-14(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-1)



応力評価ライン

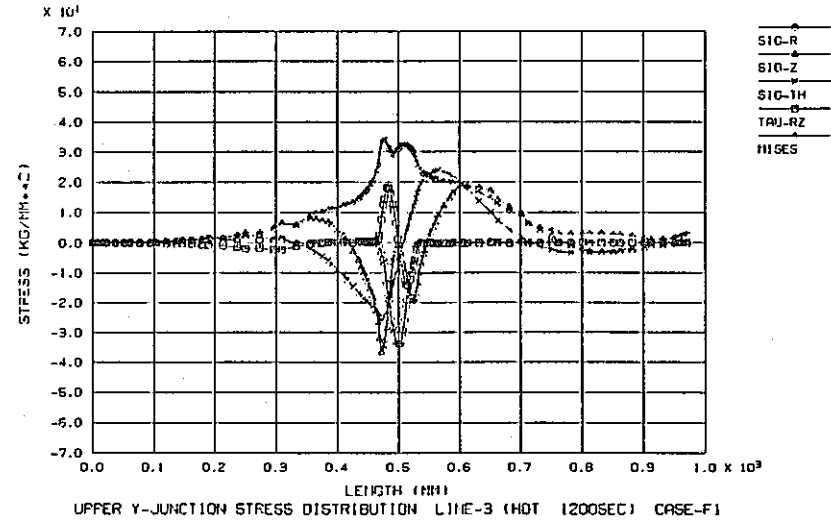
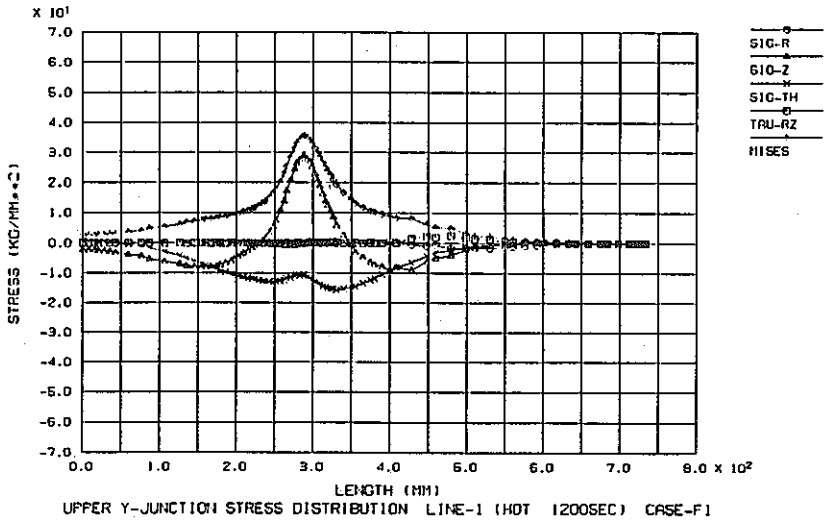
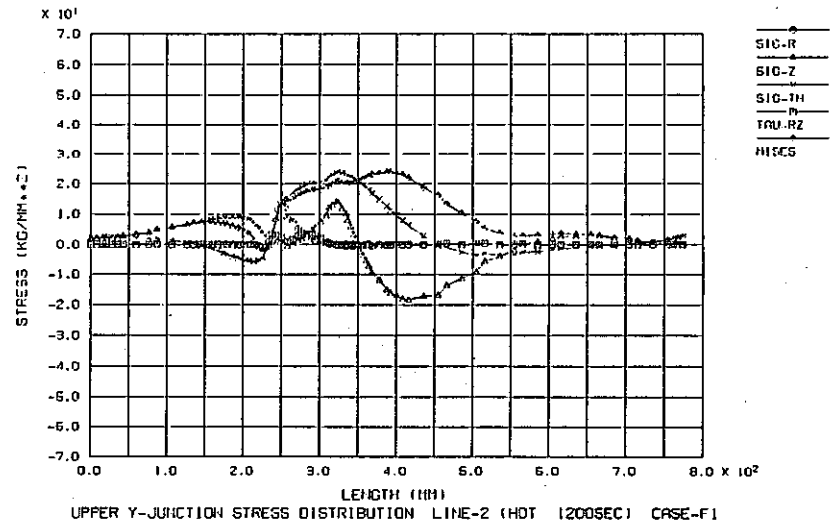
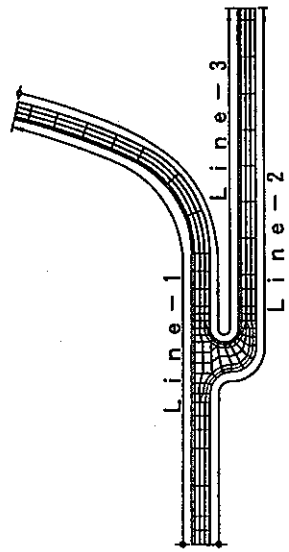


Fig. B-14(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-1)



応力評価ライン

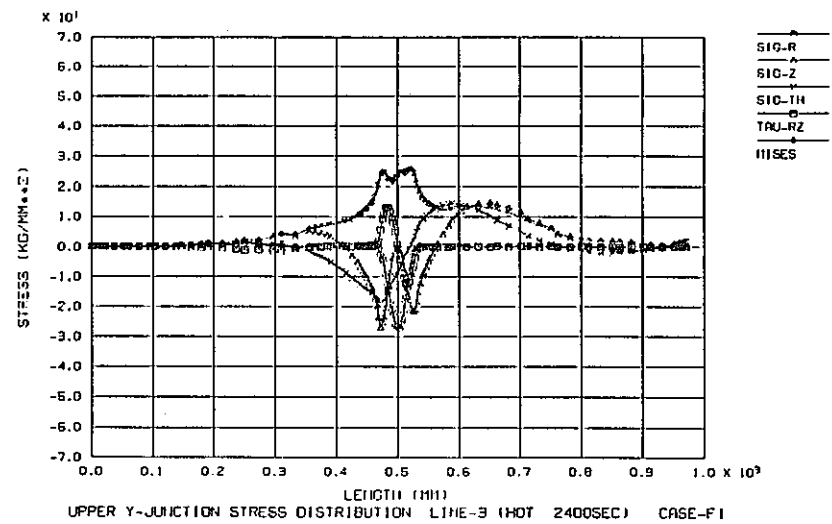
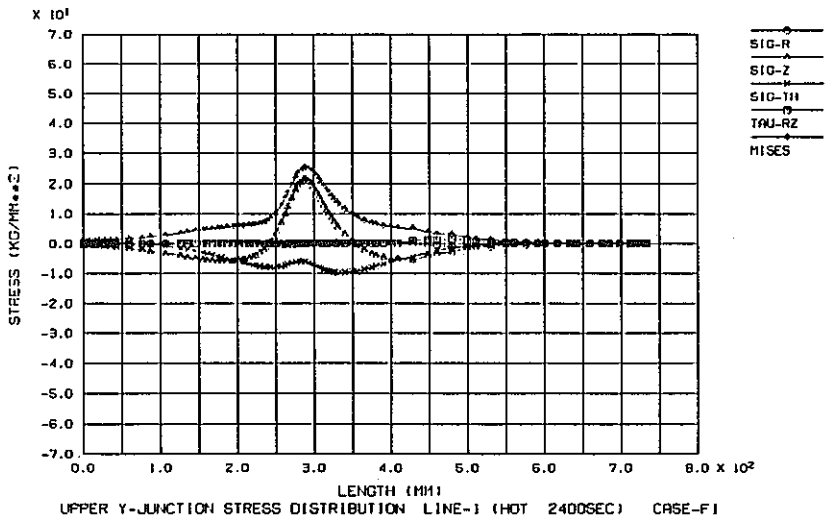
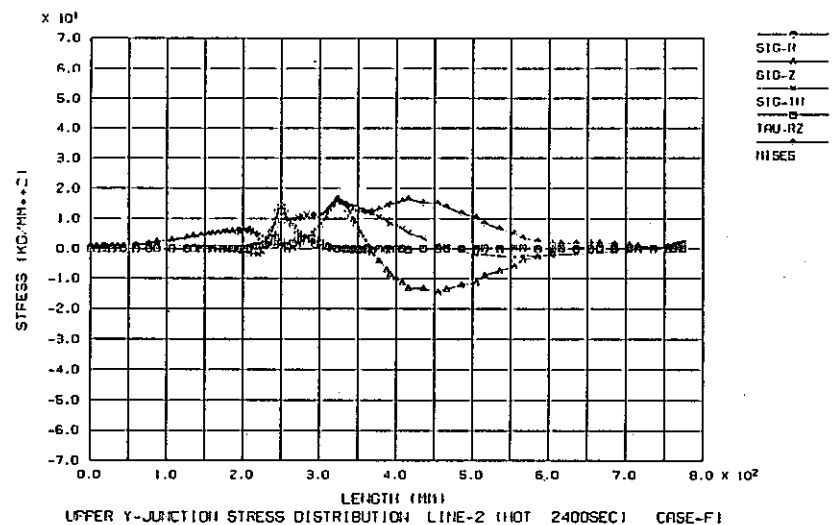
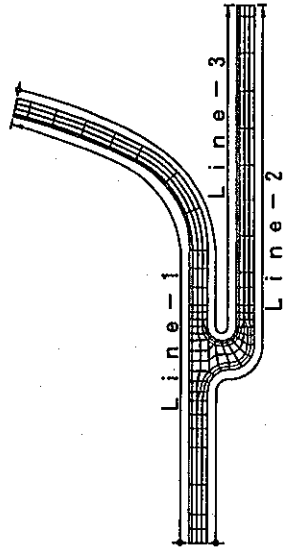


Fig.B-14(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-1)



応力評価ライン

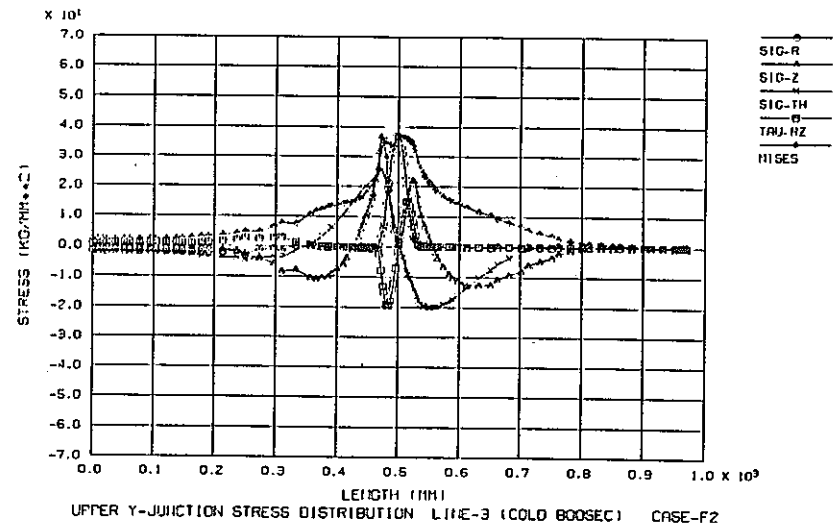
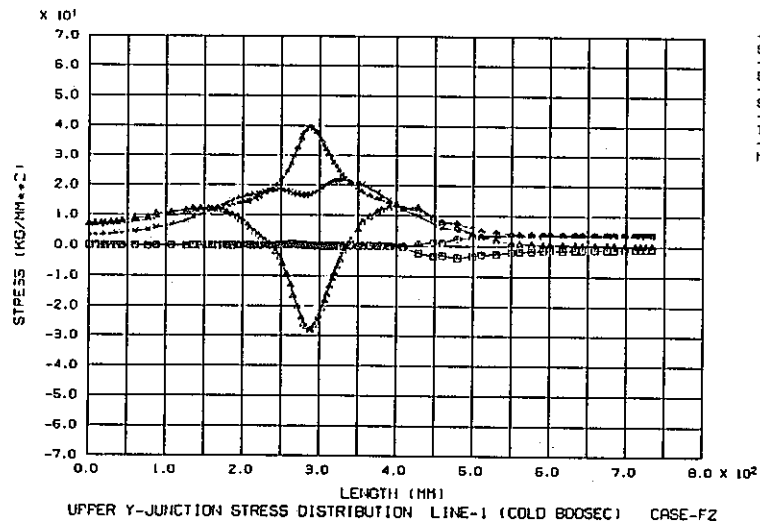
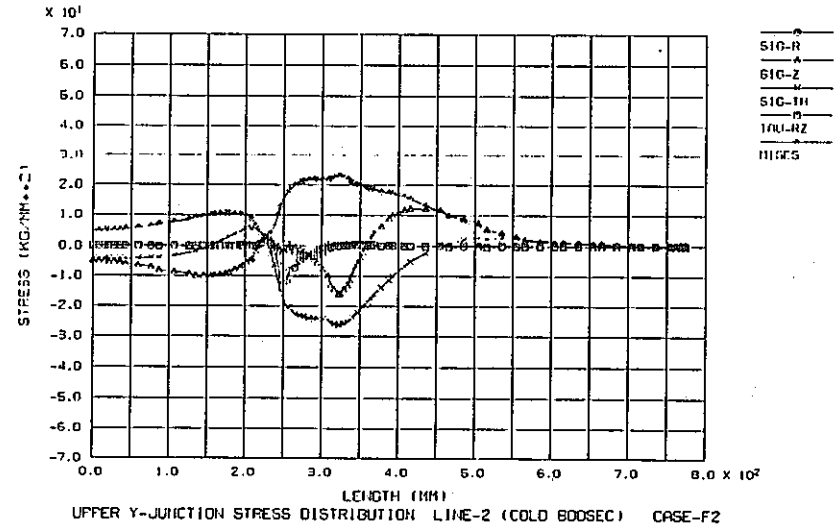
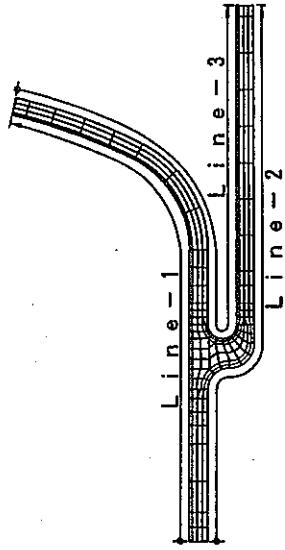


Fig. B-15(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-2)



応力評価ライン

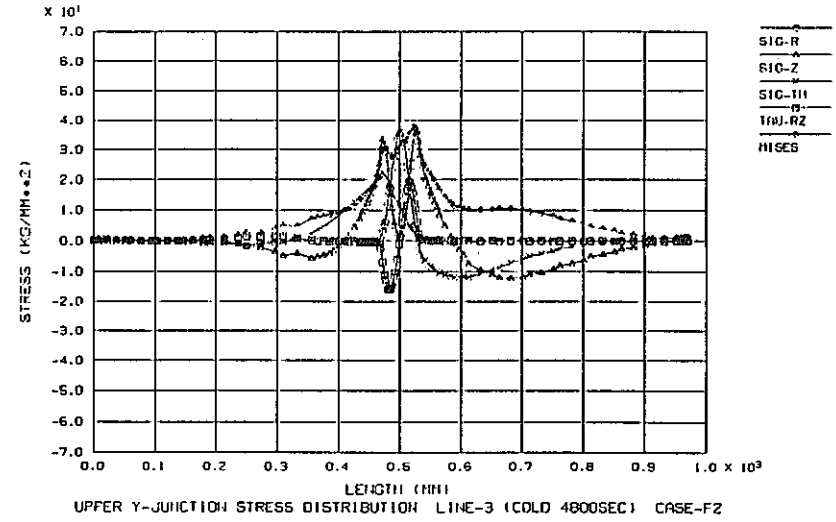
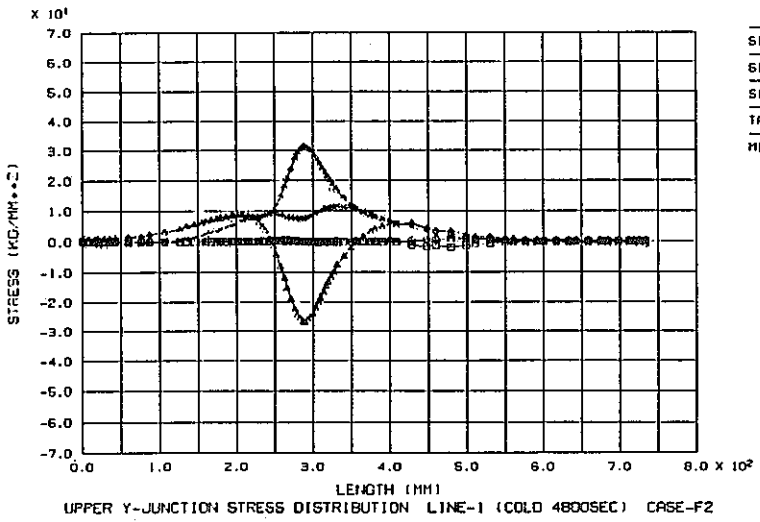
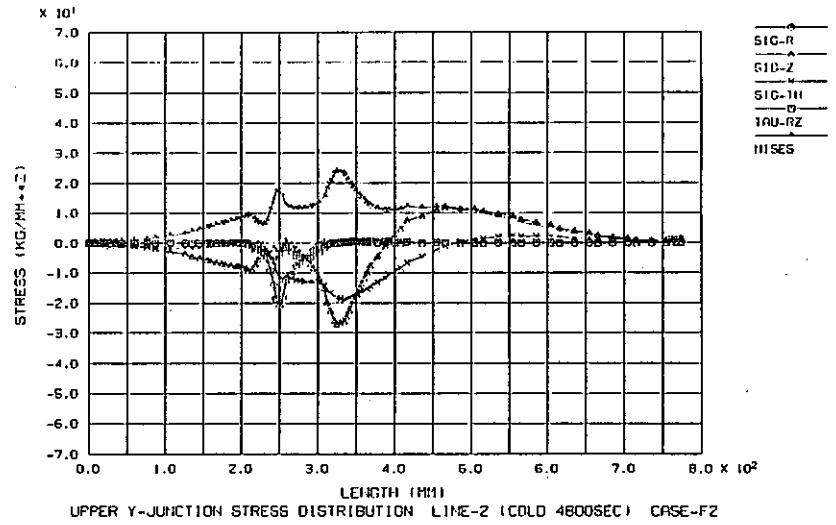
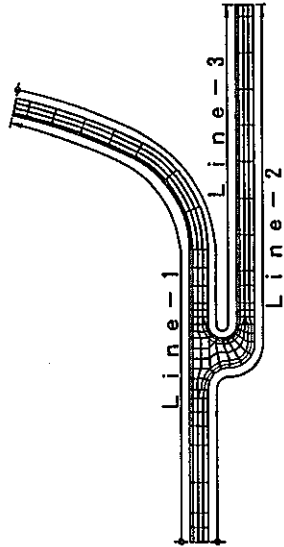


Fig.B-15(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-2)



応力評価ライン

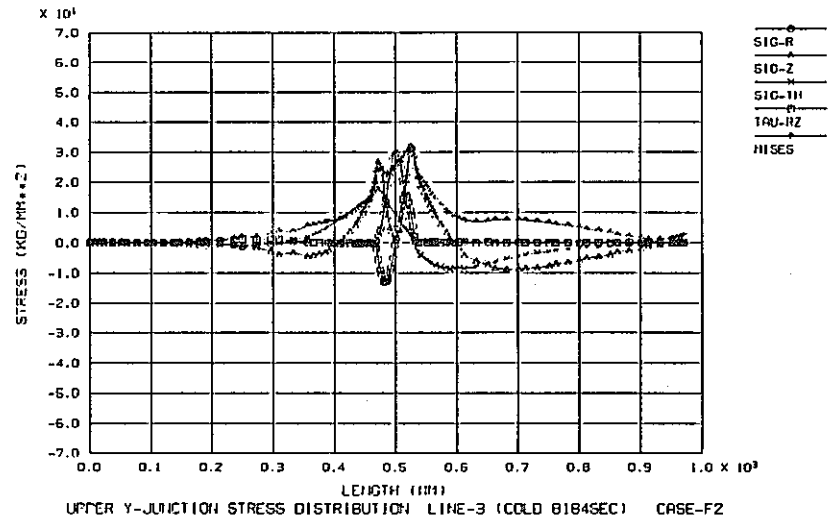
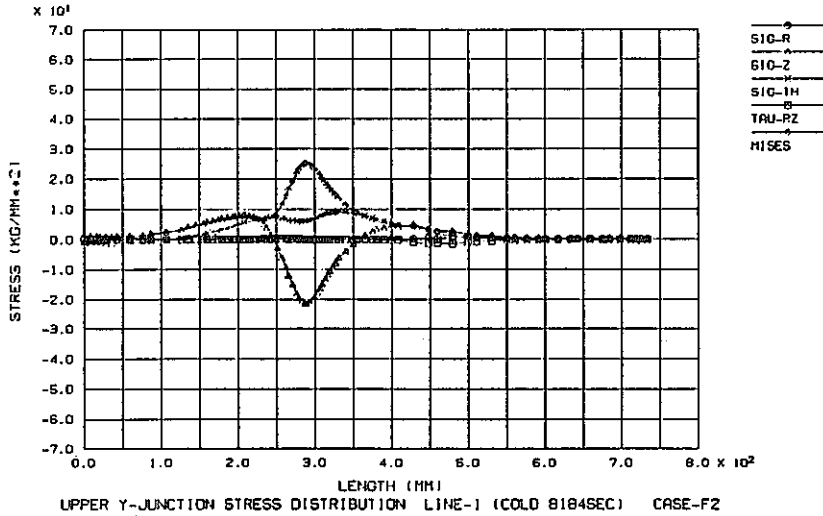
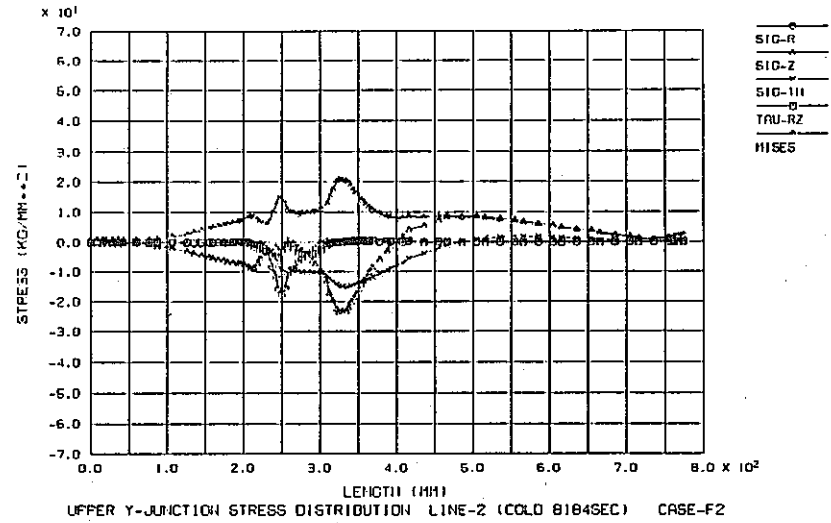
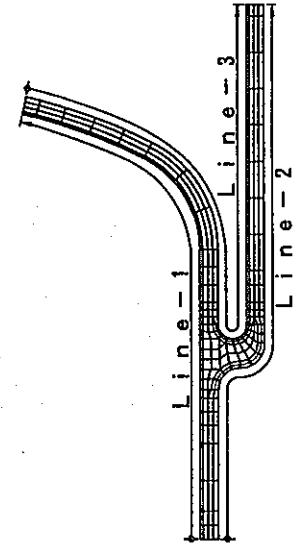


Fig.B-15(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-2)



応力評価ライン

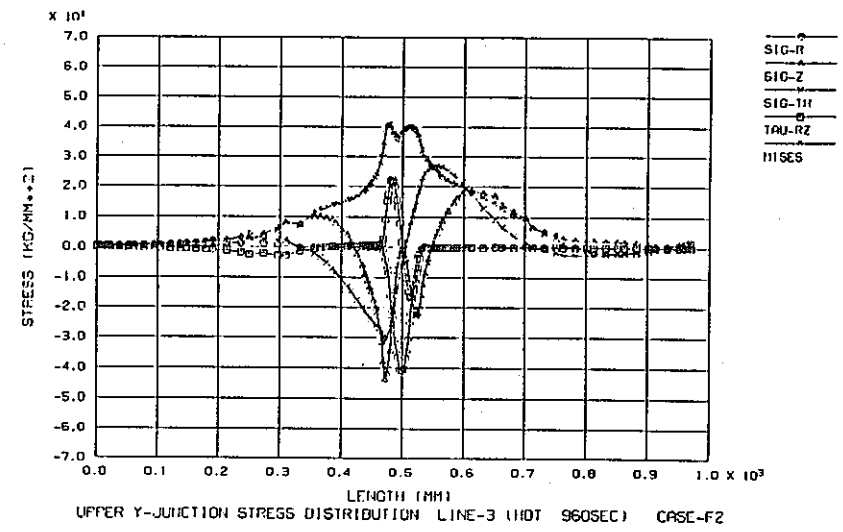
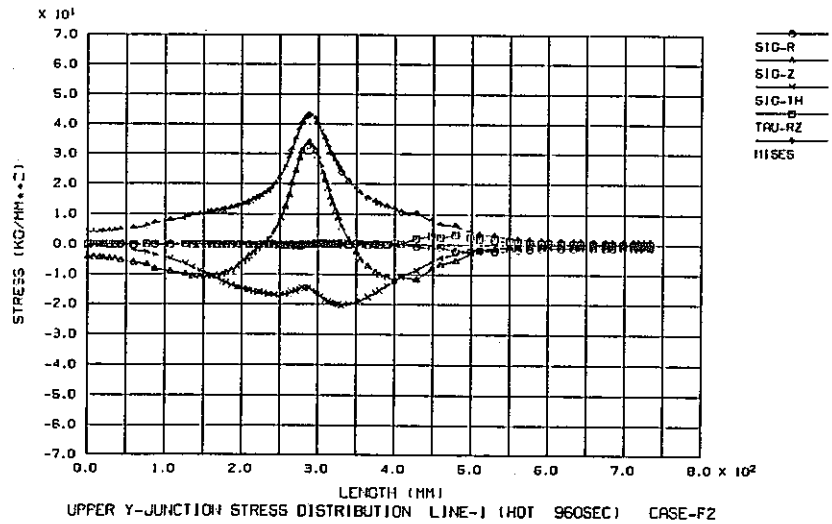
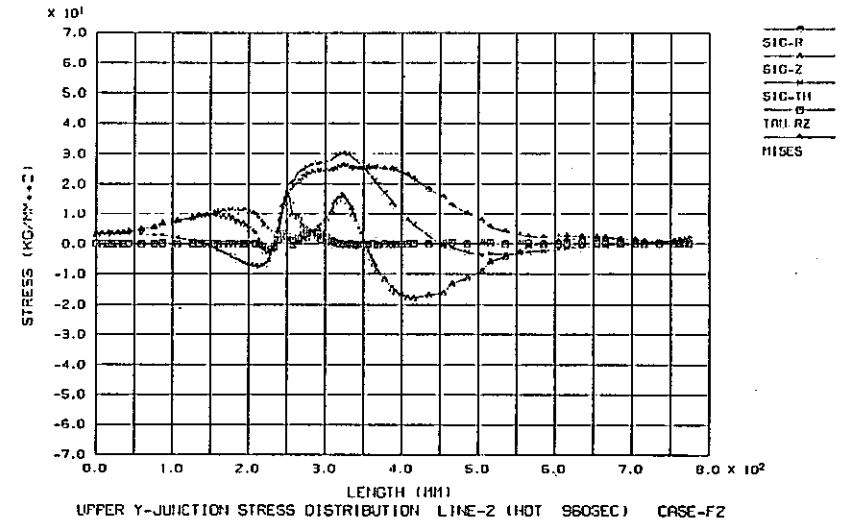
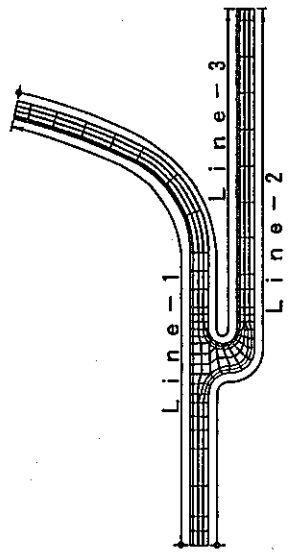


Fig. B-15(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-2)



応力評価ライン

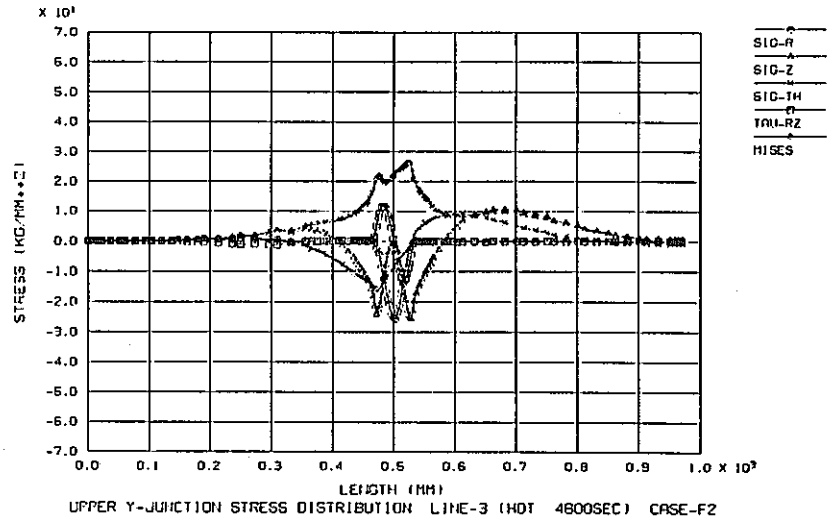
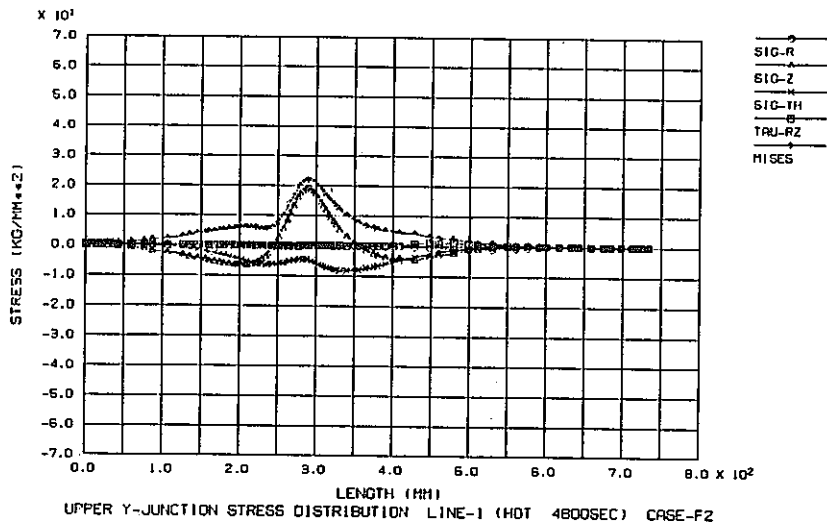
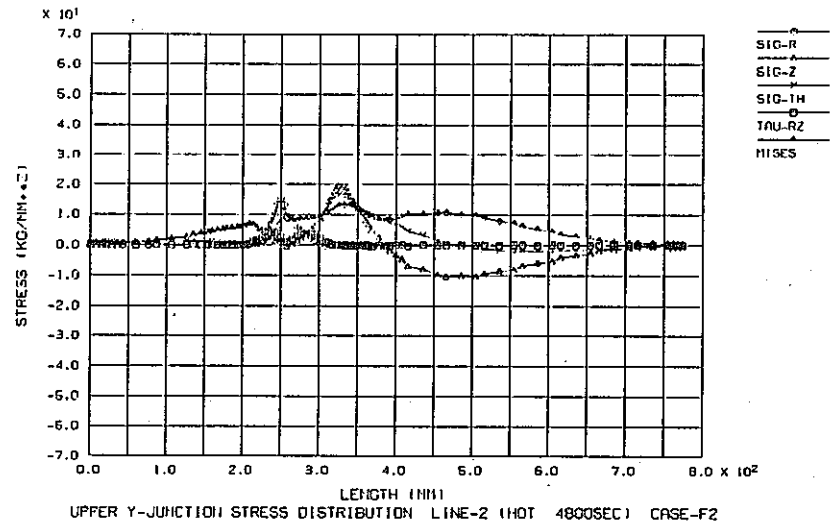
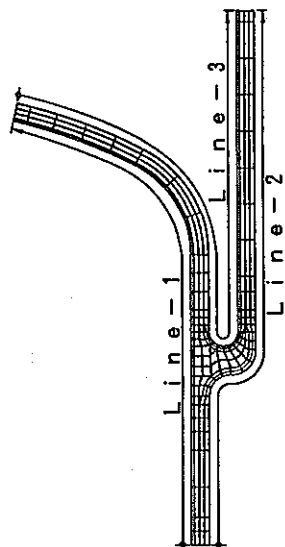


Fig. B-15(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-2)



応力評価ライン

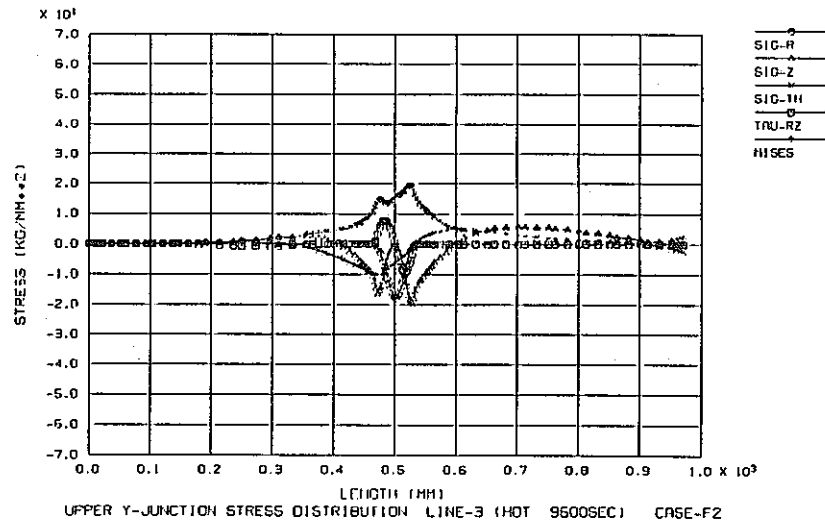
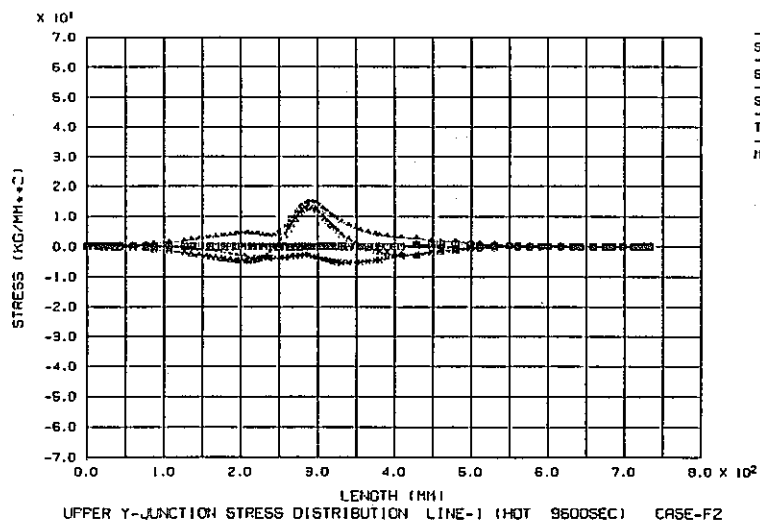
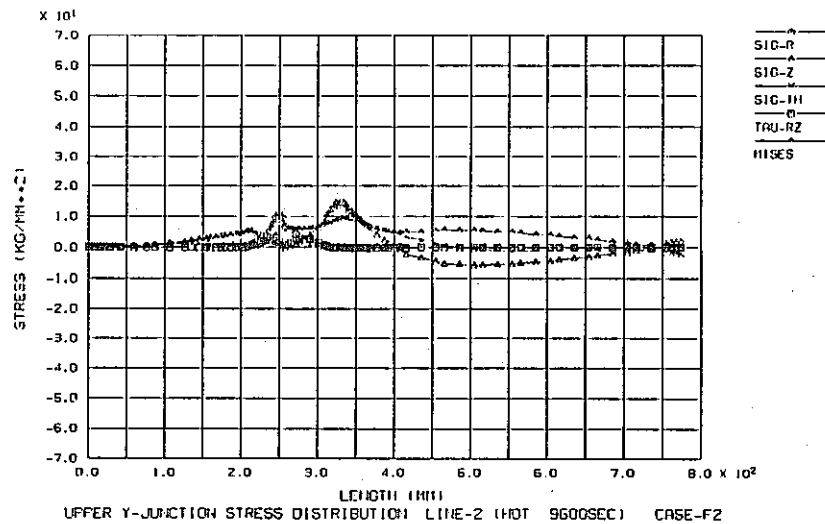
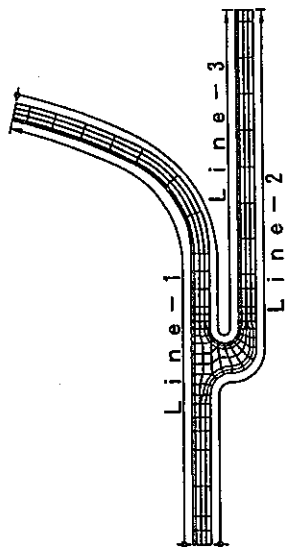


Fig.B-15(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case F-2)



応力評価ライン

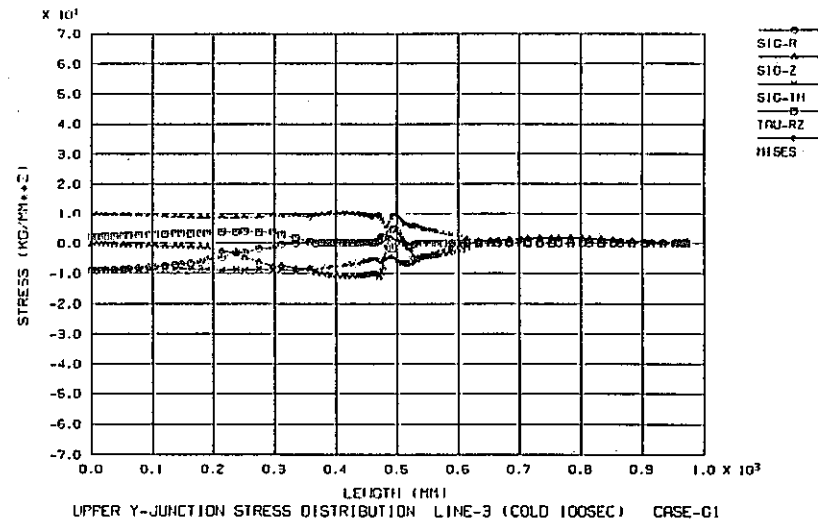
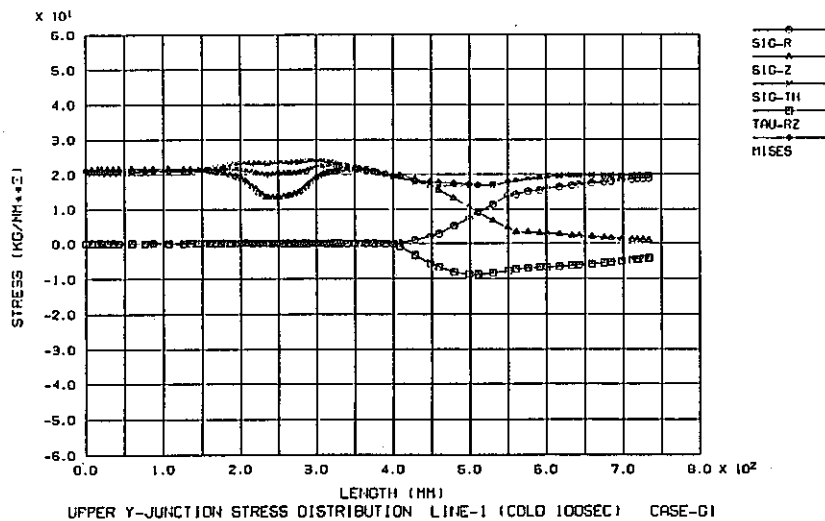
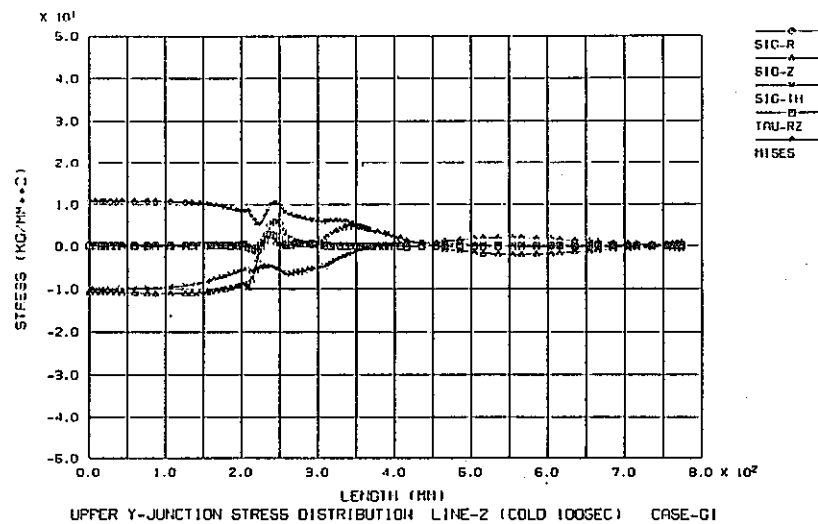
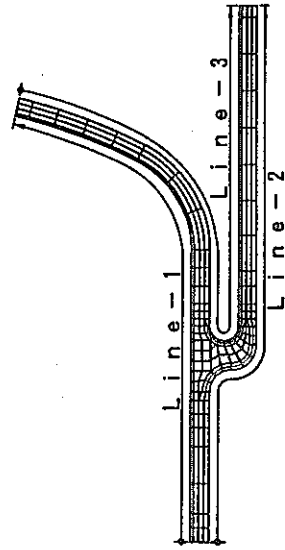


Fig. B-16(a) Stress distribution on estimation surfaces (Case G-1)



応力評価ライン

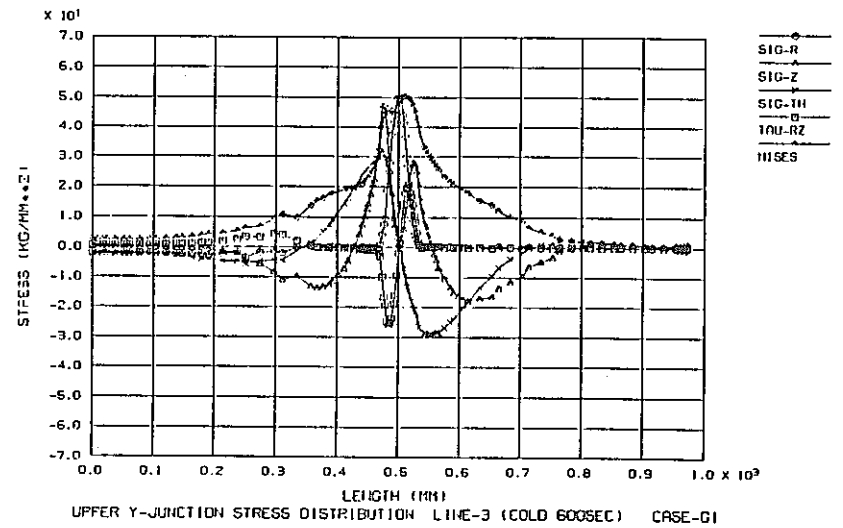
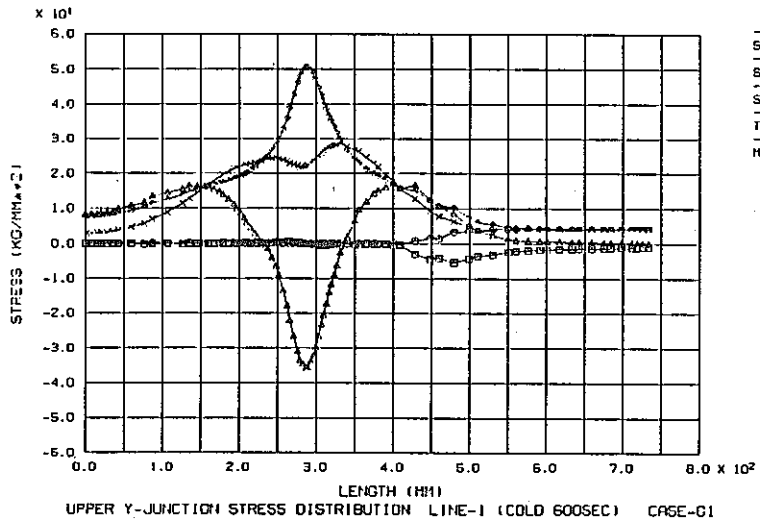
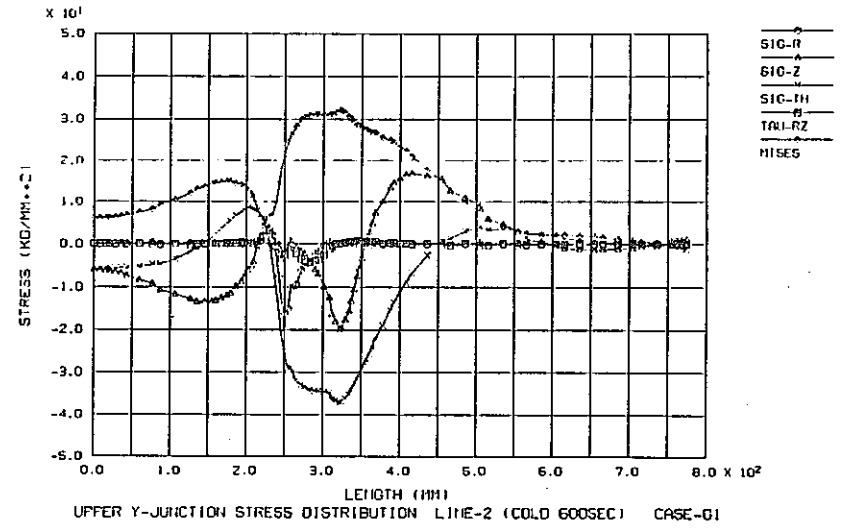
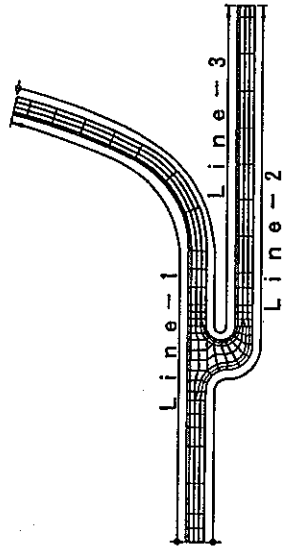


Fig.B-16(b) Stress distribution on estimation surfaces (Case G-1)



応力評価ライン

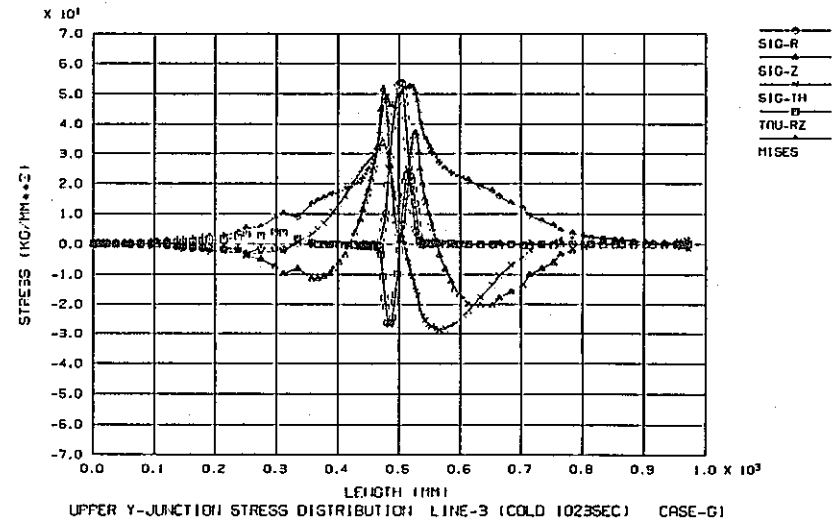
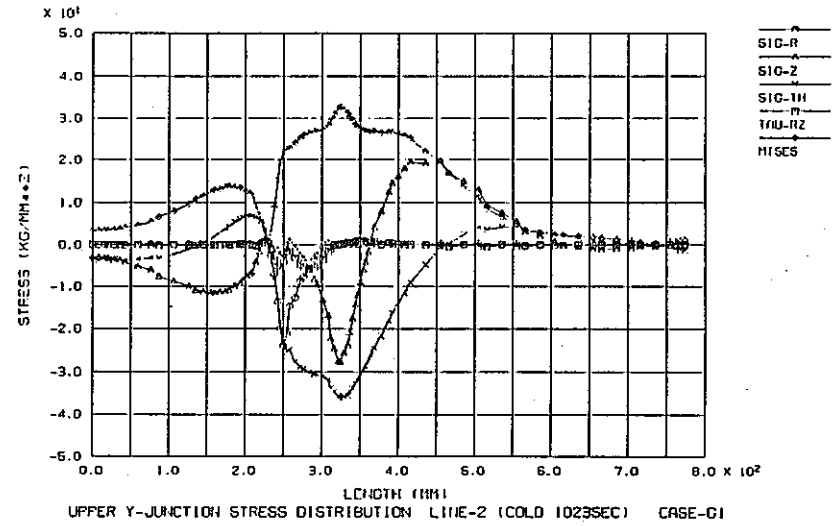
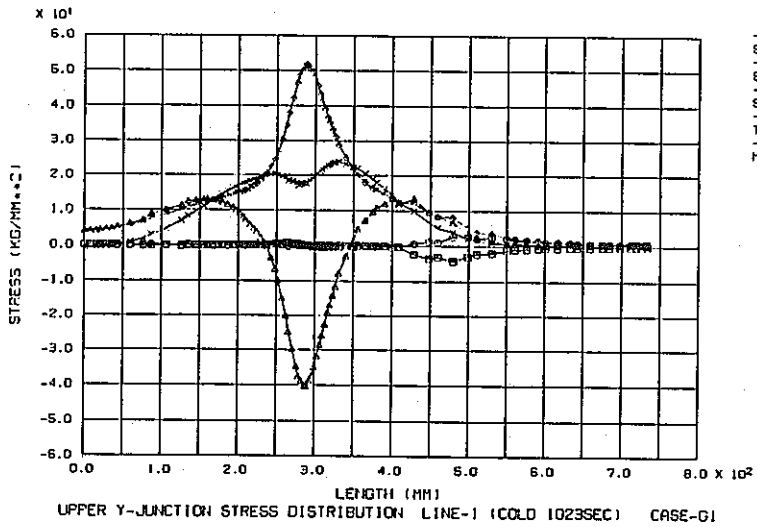
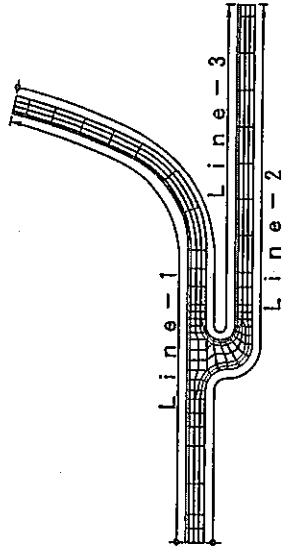


Fig.B-16(c) Stress distribution on estimation surfaces (Case G-1)



応力評価ライン

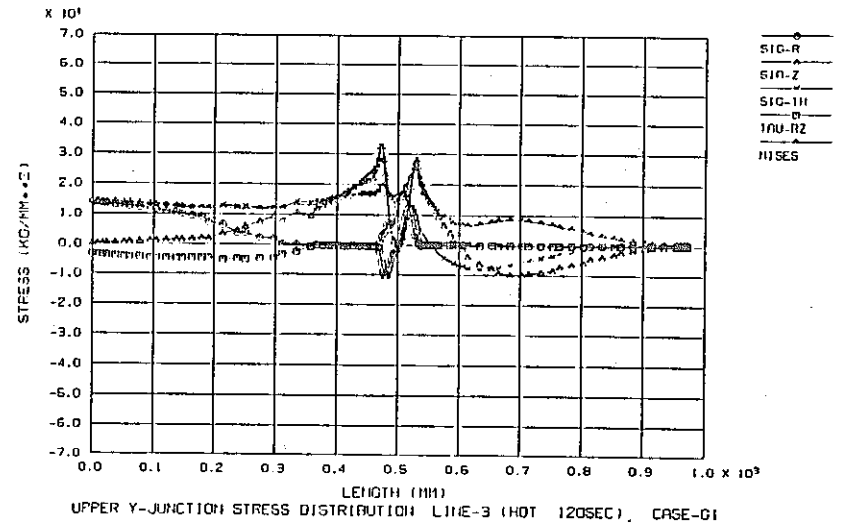
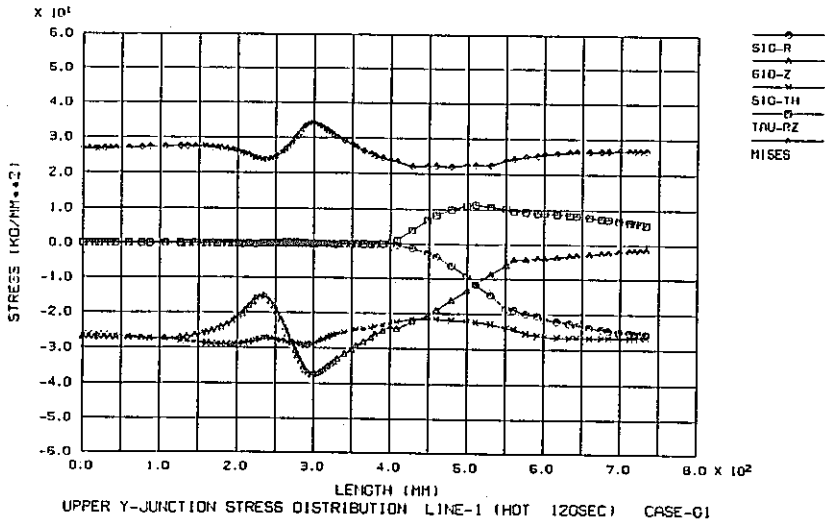
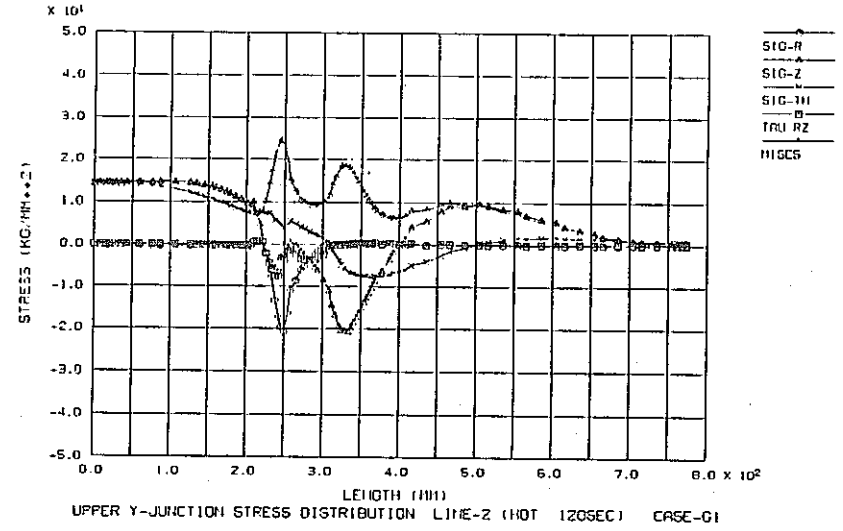
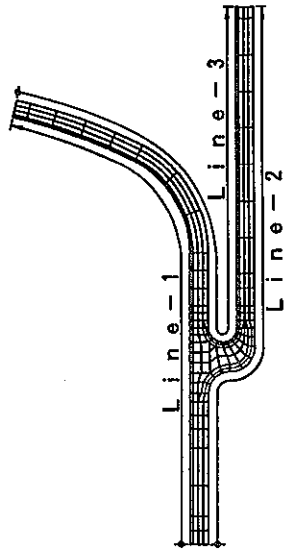


Fig. B-16(d) Stress distribution on estimation surfaces (Case G-1)



応力評価ライン

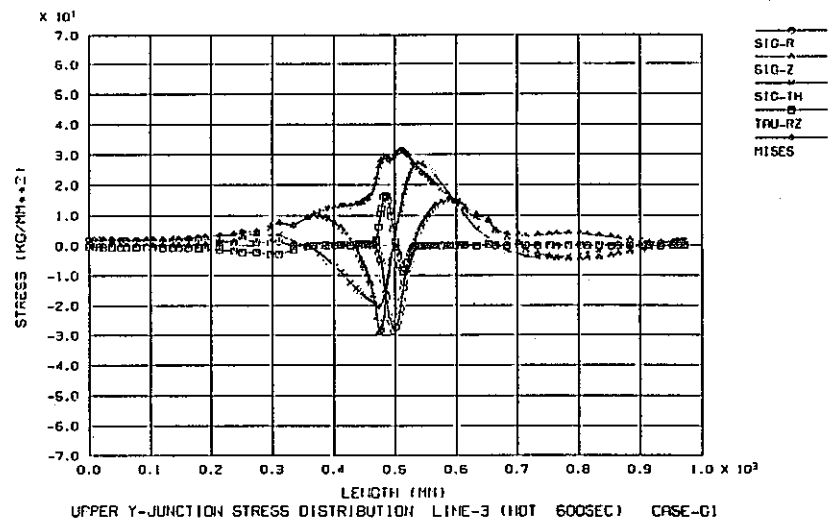
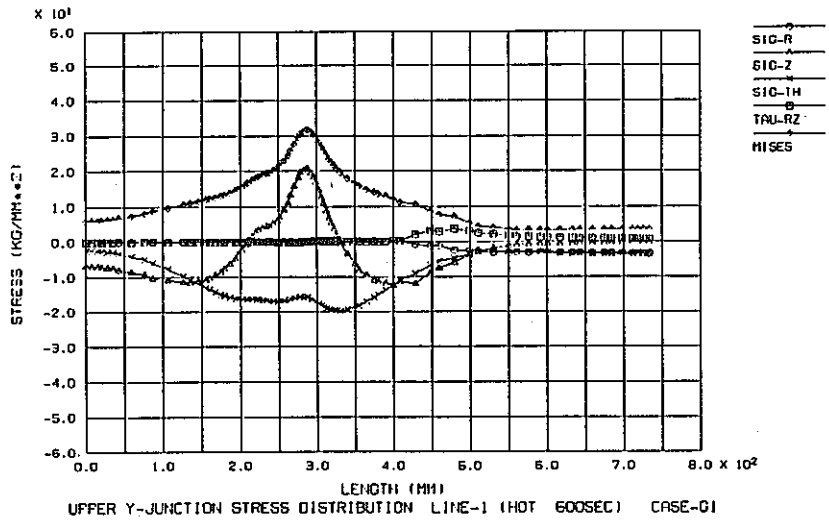
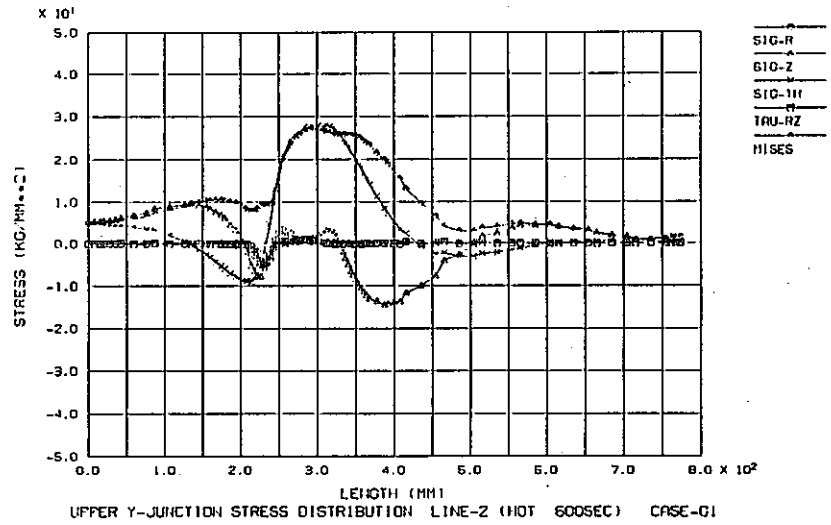
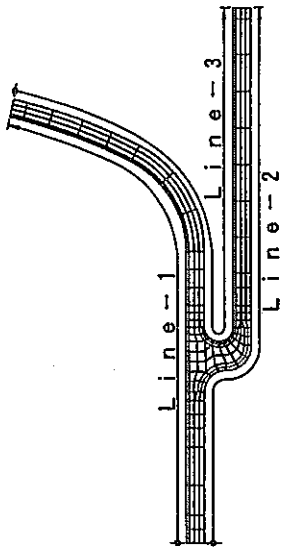


Fig.B-16(e) Stress distribution on estimation surfaces (Case G-1)



応力評価ライン

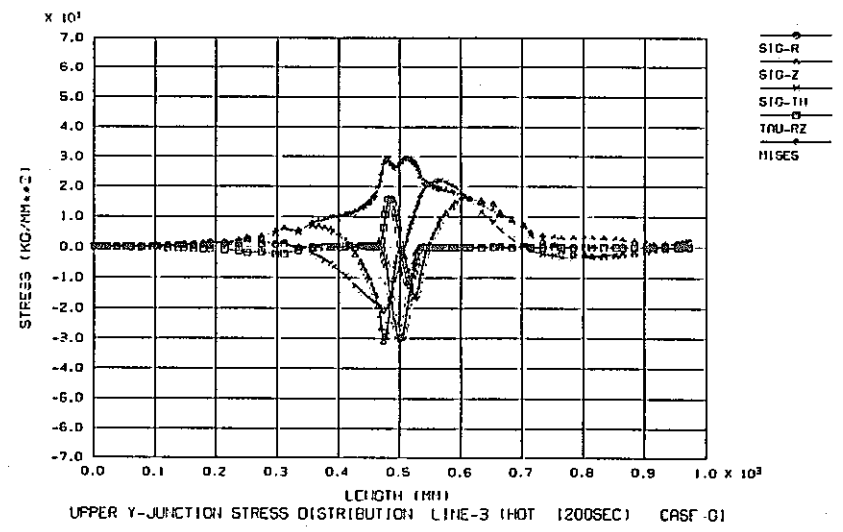
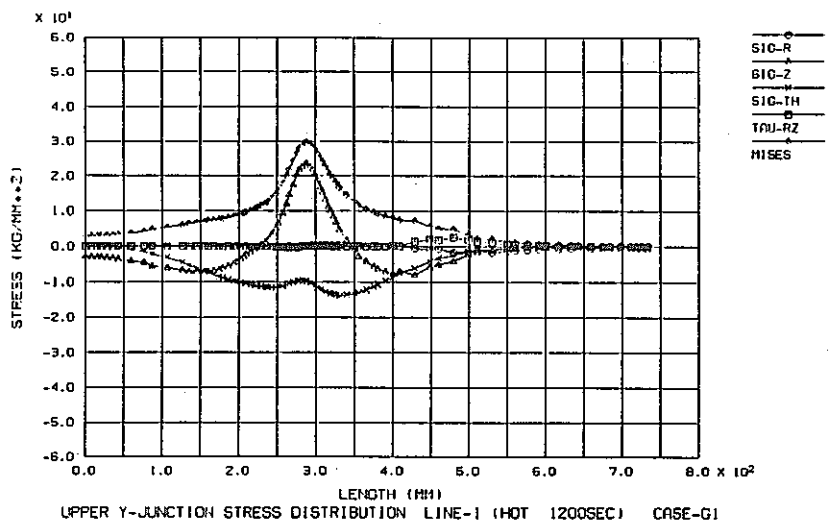
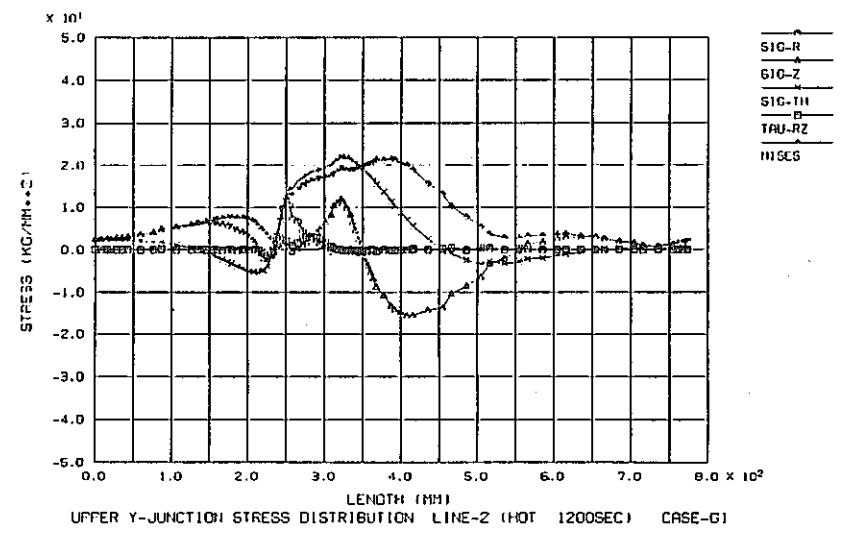


Fig.B-16(f) Stress distribution on estimation surfaces (Case G-1)