

9Cr系鋼溶接継手供試体の熱疲労試験解析

1993年9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)

9 C r 系鋼溶接継手供試体の熱疲労試験解析

田中信之***、若井隆純*、石崎公人*
菊池政之*、渡士克己**、永田敬*

要旨

本報は、内面にナトリウムによる繰返し熱過渡を受ける9 C r 系鋼製周溶接付き円筒型供試体の熱疲労き裂発生試験を対象とした実測温度データによる熱応力解析とクリープ疲労損傷計算の結果を示した報告書である。

本報で評価対象とする供試体は、板厚20mm, 15mm, および10mmの3種の板厚の円筒母材部からなり、それぞれの円筒部には2本ずつの周方向の溶接継手が含まれている。現在、このような供試体内部に550℃と300℃のナトリウムをそれぞれ5分ずつ交互に流入させる条件で、熱過渡サイクル数9000回を目標に繰返し熱過渡試験を実施中である。

本報ではまず有限要素法による弾性熱応力解析を汎用非線形構造解析コードFINASを用いて行い、この結果に基づいて設計基準の有する安全係数を取り除いた正味ベースのクリープ疲労損傷計算を、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)に対して開発した寿命予測法(TTSDS)を用いて実施した。伝熱・応力解析および損傷計算の材料定数には暫定的に材料室が定めた定数を採用した。

この結果、現在計画している試験熱過渡サイクル9,000回において、板厚20mm, 15mm, および10mmの一般円筒母材部でのクリープ疲労損傷値はそれぞれ、約1.1, 0.5, 0.15となり、厚肉部ではある程度のき裂進展が、中間板厚部では初生段階のき裂の存在が、薄肉部ではき裂発生に至っていないことがそれぞれ予測された。

一方、溶接継手部のき裂発生寿命予測については現時点では十分なデータが得られていないのが現状であるが、従来のオーステナイト系ステンレス鋼の溶接継手の場合と同程度のひずみ集中係数が適用できるとすると、厚肉部および中間板厚部の溶接継手ではある程度のき裂進展が、薄肉部の溶接継手では初生段階のき裂の存在がそれぞれ予測された。

-
- * 大洗工学センター 機器構造開発部 構造工学室
 - ** 現在 大洗工学センター 機器構造開発部 材料開発室
 - *** 現在 (株)東芝 原子力技術研究所

Thermal Fatigue Failure Test of Mod.9Cr-1Mo Piping Specimen Containing
Circumferential Weldments (2) Elastic Analysis and Damage Estimation

TANAKA.N *** , WAKAI.T * , ISHIZAKI.K *
KIKUCHI.M * , WATASHI.K ** , NAGATA.T *

ABSTRACT

This report describes elastic thermal stress analysis and creep-fatigue damage estimation results of Mod.9Cr-1Mo piping specimen which consists of three different thickness portions (20, 15, 10mm), and contains six circumferential weldments.

Thermal fatigue failure test on the specimen has been conducted in the sodium test loop named SPTT to clarify fatigue crack initiation behavior under thermal bending stress conditions, which is caused by temperature gradient arisen in the wall thickness of the specimen.

The thermal transient test is now underway, with the condition where sodium of 550°C and 300°C sodium alternately flow into the specimen for 5 minutes in one cycle. The test is scheduled to complete after loading 9,000 cycles of thermal transients. Crack inspection by using penetration test technique is planned after the test.

For an analytical study, heat transfer analysis using measured temperature data and elastic thermal stress analysis were carried out with the finite element method, and the analysis results were utilized to develop a candidate creep-fatigue damage evaluation method for Mod.9Cr-1Mo steels based on elastic analysis.

Some analysis and damage estimation results of the specimen are presented here, and crack initiation after 9,000 cycles of thermal transients are predicted based on the calculated creep-fatigue damage.

* Structural Engineering Section, O-arai Engineering Center

** Presently with Material Development Section, O-arai Engineering Center

*** Presently with Toshiba Corporation

目次

1. まえがき	1
2. 試験概要	2
2.1 供試体	2
2.2 熱過渡試験条件	2
3. 伝熱・弾性熱応力解析	6
3.1 解析概要	6
3.2 解析方法	6
3.2.1 伝熱解析法	6
3.2.2 弾性熱応力解析法	7
3.3 解析結果	7
3.3.1 伝熱解析結果	7
3.3.2 弾性熱応力解析結果	7
4. クリープ疲労損傷評価	49
4.1 損傷評価方法	49
4.1.1 損傷評価用ひずみ範囲算出法	49
4.1.2 疲労損傷計算法	49
4.1.3 クリープ損傷計算法	49
4.2 損傷評価結果	50
5. 考察	62
5.1 $2^{-1/4}Cr-1Mo$ 鋼の最適疲労破損式に基づいた疲労損傷値	62
5.2 弾塑性応力-ひずみ関係式に基づいた クリープ緩和初期応力とクリープ疲労損傷値	62
6. まとめ	69
7. 謝辞	70
参考文献	71
付録	72

表 リ ス ト

表3.1 伝熱解析で使用する供試体入口および出口での熱過渡条件	9
表3.2 伝熱解析で使用する供試体内表面での熱伝達率	10
表3.3 伝熱解析で使用するMod. 9Cr-1Mo 鋼の物性値	11
表3.4 応力解析で使用するMod. 9Cr-1Mo 鋼の物性値	11
表3.5 Mod. 9Cr-1Mo 鋼の熱膨張係数	12
表4.1 Mod. 9Cr-1Mo 鋼の疲労破損式 (ORNLの式)	51
表4.2 Mod. 9Cr-1Mo 鋼の動的応力-ひずみ関係式	52
表4.3 Mod. 9Cr-1Mo 鋼のクリープひずみ式	53
表4.4 Mod. 9Cr-1Mo 鋼のクリープ破断式	54
表4.5 20mm板厚部 (ライン-1) 内外面でのひずみ範囲	55
表4.6 15mm板厚部 (ライン-2) 内外面でのひずみ範囲	56
表4.7 10mm板厚部 (ライン-3) 内外面でのひずみ範囲	57
表5.1 2-1/4Cr-1Mo (NT) 板・伝熱管の最適疲労破損式	64
表5.2 Mod. 9Cr-1Mo 鋼の弾塑性応力-ひずみ関係式 (暫定式)	65

図 リ ス ト

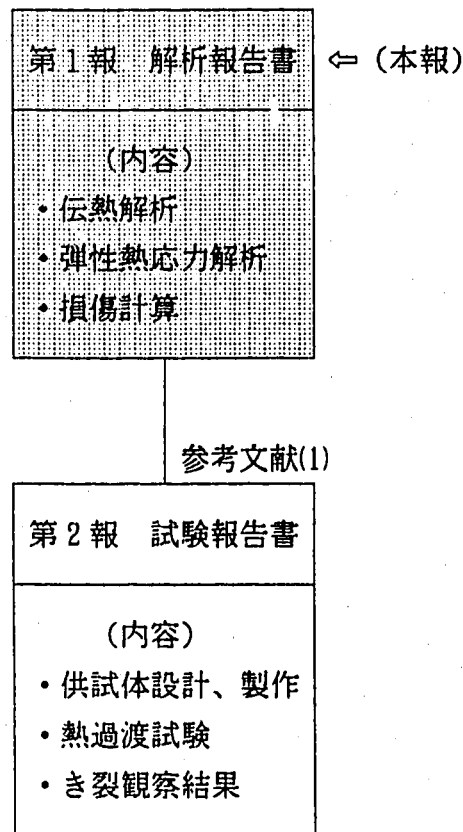
図2.1 供試体の形状と熱電対取り付け位置	3
図2.2 供試体の溶接・熱処理手順	4
図2.3 供試体の詳細寸法	5
図3.1 解析モデルメッシュ図	13
図3.2 供試体入口 (CH-0) でのNa温度測定結果 (生データ)	14
図3.3 供試体出口 (CH-1) でのNa温度測定結果 (生データ)	15
図3.4 伝熱解析用熱過渡条件 (供試体入口 (CH-0) Na温度)	16
図3.5 伝熱解析用熱過渡条件 (供試体出口 (CH-1) Na温度)	17
図3.6 伝熱解析で使用する供試体内表面での熱伝達率	18
図3.7 伝熱解析に採用した熱的境界条件	19
図3.8 弾性熱応力解析に採用した機械的境界条件	20
図3.9 供試体温度測定結果 (W1, W3, W5の外表面-1サイクル分)	21
図3.10 供試体温度測定結果 (W1, W3, W5の外表面-コールドトランジェント部分)	22
図3.11 供試体温度測定結果 (W1, W3, W5の外表面-ホットトランジェント部分)	23
図3.12 温度時刻歴解析結果 (W1, W3, W5の外表面)	24
図3.13 温度コンター図 (コールドトランジェント10秒後)	25
図3.14 温度コンター図 (コールドトランジェント30秒後)	25
図3.15 温度コンター図 (コールドトランジェント60秒後)	26
図3.16 温度コンター図 (ホットトランジェント10秒後)	26
図3.17 温度コンター図 (ホットトランジェント30秒後)	27
図3.18 温度コンター図 (ホットトランジェント60秒後)	27
図3.19 溶接継手W1 (20mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)	28
図3.20 溶接継手W2 (20mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)	29
図3.21 溶接継手W3 (15mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)	30
図3.22 溶接継手W4 (15mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)	31
図3.23 溶接継手W5 (10mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)	32
図3.24 溶接継手W6 (10mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)	33
図3.25 供試体入口部 (CH-0; 13mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)	34
図3.26 供試体出口部 (CH-1; 13mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)	35
図3.27 応力、ひずみ、損傷値等の表示ライン	36
図3.28 20mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (コールド9秒後)	37
図3.29 20mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (ホット10秒後)	38
図3.30 20mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (コールド9秒後)	39
図3.31 20mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (ホット10秒後)	40

図3.32	15mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布（コールド9秒後）	41
図3.33	15mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布（ホット10秒後）	42
図3.34	15mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布（コールド9秒後）	43
図3.35	15mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布（ホット10秒後）	44
図3.36	10mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布（コールド7秒後）	45
図3.37	10mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布（ホット8.5秒後）	46
図3.38	10mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布（コールド7秒後）	47
図3.39	10mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布（ホット8.5秒後）	48
図4.1	TTSDSによる評価の流れ	58
図4.2	ひずみ範囲とクリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布（20mm板厚部、内表面）	59
図4.3	ひずみ範囲とクリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布（15mm板厚部、内表面）	60
図4.4	ひずみ範囲とクリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布（10mm板厚部、内表面）	61
図5.1	クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布（20mm板厚部、内表面） -初期応力計算に弾塑性応力-ひずみ関係式を採用-	66
図5.2	クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布（20mm板厚部、内表面） -最適疲労破損式に2-1/4Cr-1Mo鋼の式を採用-	66
図5.3	クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布（15mm板厚部、内表面） -初期応力計算に弾塑性応力-ひずみ関係式を採用-	67
図5.4	クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布（15mm板厚部、内表面） -最適疲労破損式に2-1/4Cr-1Mo鋼の式を採用-	67
図5.5	クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布（10mm板厚部、内表面） -初期応力計算に弾塑性応力-ひずみ関係式を採用-	68
図5.6	クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布（10mm板厚部、内表面） -最適疲労破損式に2-1/4Cr-1Mo鋼の式を採用-	68

1. まえがき

本報告書は、平成3年度に配管熱過渡試験装置（SPTT）で試験を開始した、内面にナトリウムによる繰返し熱過渡を受ける9Cr系鋼製周溶接付き円筒型供試体の熱疲労き裂発生試験に対して、実測された温度データによる熱応力解析とクリープ疲労損傷計算を実施した結果をまとめたものである。

試験は本解析を実施した平成4年度も継続されており、本報では試験解析のみを中間報告としてとりまとめることとした。本研究全体の報告書の構成を下図に示す。現在、供試体の設計・製作、熱過渡試験結果、き裂観察結果、損傷評価との比較を内容とする第2報「試験報告書」を作成中である⁽¹⁾。試験の詳細についてはこれを参照されたい。



2. 試験概要

本論に入るまえに、本報で解析・評価の対象とする熱過渡試験の概要について述べる。詳細については第2報⁽¹⁾を参照されたい。

2.1 供試体

本報で評価対象とする供試体の形状は図2.1に示すとおりである。供試体は9Cr系鋼製 (Mod. 9Cr-1Mo 鋼) で、板厚20mm, 15mm, および10mmの3種の板厚の円筒部からなり、それぞれの円筒部には図2.2に示されるように2本ずつの周方向の溶接継手が含まれている。なお、供試体の詳細な寸法測定結果を図2.3に示す。

2.2 熱過渡試験条件

現在、上記供試体を配管熱過渡試験装置 (SPTT)⁽²⁾に設置し、供試体内部に550℃と300℃のナトリウムをそれぞれ5分ずつ交互に流入させる条件で、熱過渡サイクル数9000回を目標に繰返し熱過渡試験を実施中である。

なお、供試体には図2.1に示す位置に熱電対を設置しており、伝熱解析の入力用として供試体入口 (CH-0) および出口 (CH-1) でのナトリウム温度を、さらに、解析の検証用として供試体各板厚円筒溶接部の外表面温度を中心に、試験熱過渡サイクル中の温度計測を継続的に実施している。これらについては、伝熱解析の項にて詳述する。

図2.1 供試体の形状と熱電対取り付け位置

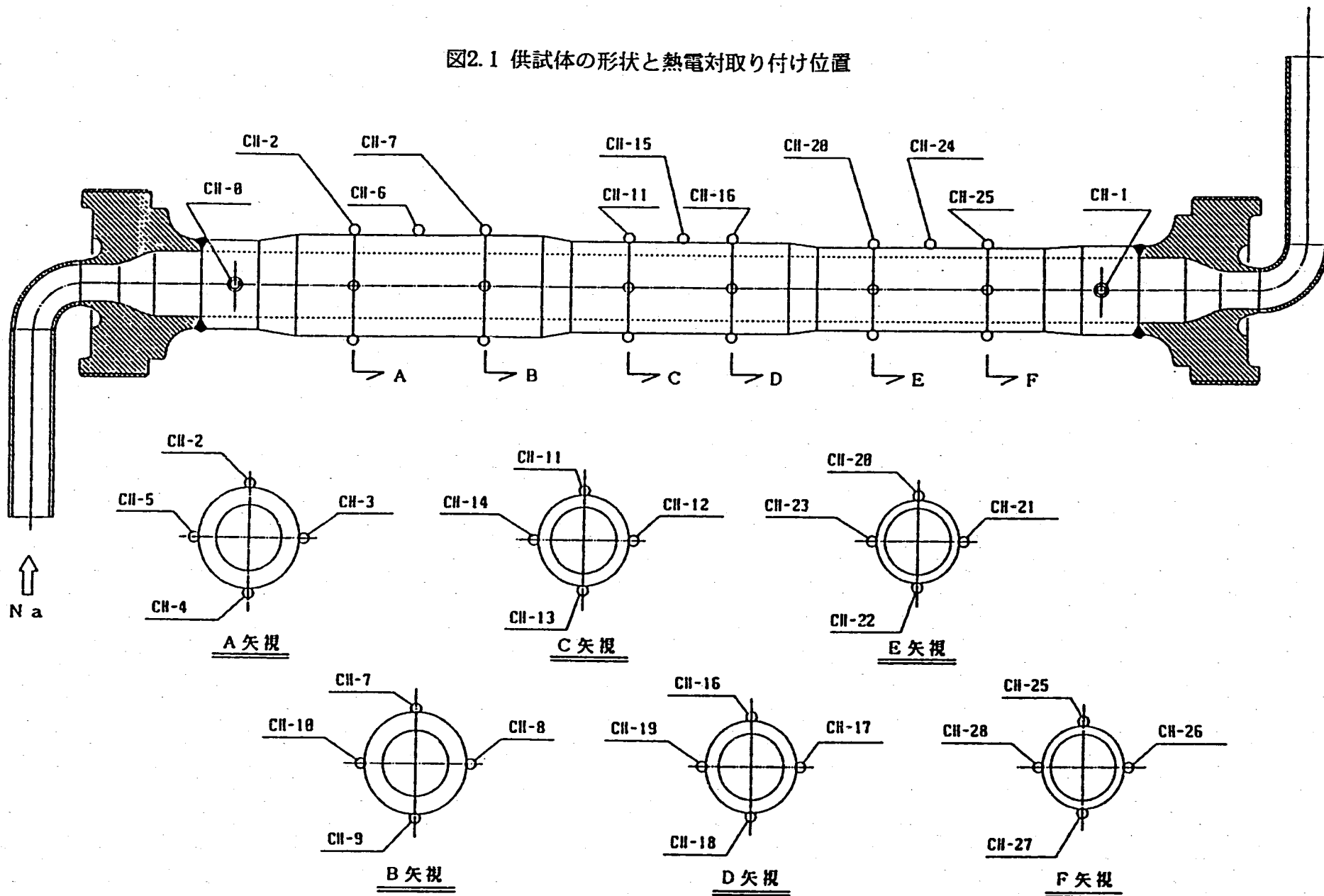
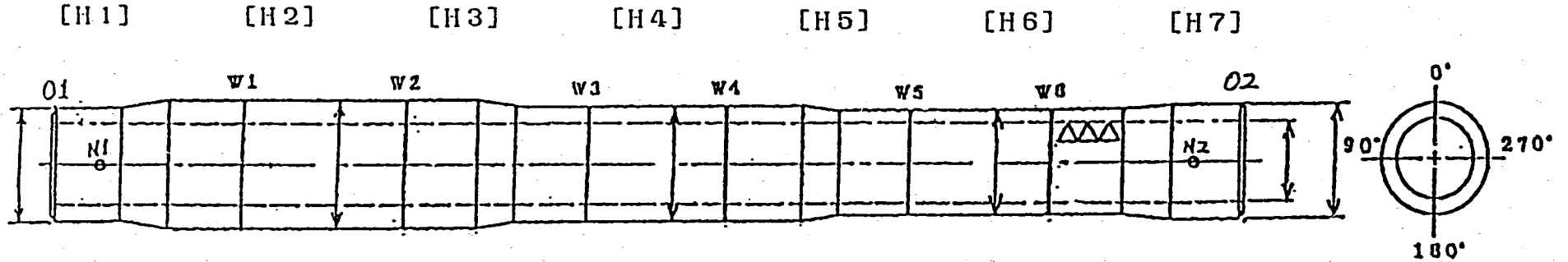


図2.1 供試体の形状と熱電対取り付け位置

図2.2 供試体の溶接・熱処理手順

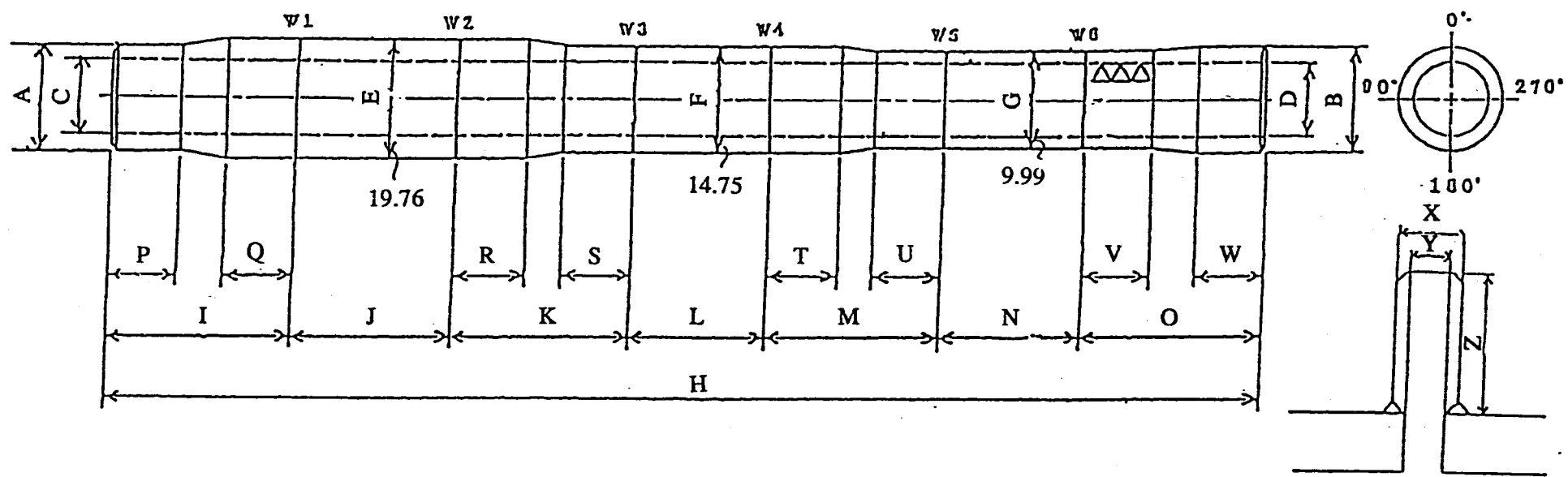


- (1) 溶接 O1, O2 バタリング → W2, W4, W6 突合せ → W1, W3, W5 突合せ一体化
 (TGS-70NCb) (CM-9Cb) (TGS-9Cb)
- (2) 熱処理
- (3) 補修 W5 切断再開先 → 再溶接 → W5 局部熱処理
 (TGS-9Cb)
- (4) ノズル溶接 N1, N2 バタリング → 隅肉溶接
 (TGS-70NCb) (TGS-9Cb)

図2.2 供試体の溶接・熱処理手順

図2.3 供試体の詳細寸法

(W1~W6が周溶接, 改良9Cr-1Mo鋼製)



(単位:mm)

	A	B	C	D	E	F	G	部 品	X	Y	Z
0° 方向	92.99	93.07	67.00	67.00	106.48	96.48	86.97	III	15.0	10.0	36.5
90° 方向	92.98	93.08	67.00	67.00	106.55	96.50	86.98	II7	15.1	10.0	36.0

	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
0° 方向	975	156.0	139.0	150.5	119.5	144.0	112.5	153.5	55.5	62.0	61.5	58.5	60.5	54.5	59.5	55.0
90° 方向	975	156.0	139.0	150.0	120.0	144.0	112.5	153.5	55.0	62.0	61.5	59.0	60.5	55.0	59.5	55.0

図2.3 供試体の詳細寸法

3. 伝熱・弾性熱応力解析

3.1 解析概要

本報では、まず有限要素法による伝熱解析を、次いで弾性熱応力解析をそれぞれ汎用非線形構造解析コードFINASを用いて行い、この結果に基づいて、最終的に設計基準の有する安全係数を取り除いた正味ベースのクリープ疲労損傷計算を、オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304鋼）に対して開発した寿命予測法（TTSDS）を用いて実施した。

ここで、伝熱・応力解析および損傷計算に用いる9Cr系鋼の材料定数には、暫定的に材料室が定めている定数⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾を採用することとした。

3.2 解析方法

3.2.1 伝熱解析法

伝熱解析に用いたモデルの要素分割を図3.1に示す。解析モデルは供試体全体を一括して軸対称にモデル化するとともに、各溶接部とその近傍については、今後母材と異なる溶金特性を導入することも想定して細かく分割している。使用した要素は軸対称アイソパラメトリック要素および軸対称熱伝達要素である。

伝熱解析では、解析モデル内表面に、熱伝達係数を介して供試体内部を流れるナトリウム温度時刻歴を入力することにより、非定常熱伝導解析を行い、各節点における温度応答を求めた。

ここで、伝熱解析に使用するナトリウム温度時刻歴を次のように定めた。すなわち、供試体の入口および出口で測定された生のナトリウム温度は図3.2と図3.3に示されるように、過渡時に両者とも細かな変動が認められるとともに、出口側の方が入口側に比べて全体的に温度変化が緩やかになっている。そこでまず、細かな温度変動を取り除く平滑化処理を施した。この結果を図3.4と図3.5に示す。また、この数値を表3.1に示す。解析では、このようにして得られた供試体入口および出口ナトリウム温度を用いて、供試体軸方向にこれらを線形補間した値を用いることで熱過渡条件とした。

供試体内表面とナトリウム間の熱伝達係数は伝熱工学便覧に記載されているSubbotinの式⁽⁶⁾を用いて算出した。この結果に基づいて、表3.2および図3.6に示すような温度依存性を考慮した形で採用した。一方、供試体外表面は保温材が設置されていることから、断熱境界条件とした。以上の伝熱解析に採用した熱的境界条件を図3.7に示した。

また、表3.3には伝熱解析で使用したMod.9Cr-1Mo鋼の物性値として、熱伝導率、比熱、密度を示した⁽³⁾。解析では、これらの物性値を温度依存性を考慮して採用した。

3.2.2 弾性熱応力解析法

前述伝熱解析で得られた温度分布を熱荷重として熱応力解析を行い供試体各部の応力、ひずみを計算した。ここで、熱応力解析は弾性解析とした。これは、9Cr系鋼については現状弾塑性解析用の定常繰返し応力-ひずみ関係式（ヒステリシスループ、あるいはその2直線近似）として標準的なものが策定されていないためである。

熱応力解析に使用した解析モデルは伝熱解析に用いたものと同じであり、材料特性には表3.4および表3.5に示したMod. 9Cr-1Mo鋼のヤング率、ポアソン比、および線膨張係数を温度依存性を考慮して採用した^{(4) (5)}。

また、熱応力解析時の変位境界条件は図3.8に示すとおりで、解析モデルの片方の端部の軸方向変位と回転を拘束し、もう一方の端部においては回転のみを拘束した。

3.3 解析結果

3.3.1 伝熱解析結果

図3.9は供試体の3種類の板厚部の周溶接部外表面に設置された熱電対で測定された熱過渡1サイクル分（コールドトランジェント、ホットトランジェントそれぞれ300秒間）の温度変化を示したものである。このうち、コールドトランジェント300秒間を拡大したものを図3.10に、またホットトランジェント300秒間を拡大したものを図3.11に示した。

また、図3.12には本解析で実施した伝熱解析により得られた各温度計測点に対応する節点での温度変化を示した。同図の解析結果と先に示した実測データにおいて、熱過渡開始後、最大温度変化幅 ΔT （=250°C）の $1/e$ まで（Hot transientでは約458°C、Cold transientでは約392°Cまで）変化するのに要する時間で比較すると、両者の差は最大で約6秒となっており、ここで得られた伝熱解析結果は後続して実施される熱応力解析の入力として十分な精度を有しているといえる。

図3.13から図3.15までにはコールドトランジェントにおける極時点を含めた代表3時点における温度コンター図を、また図3.16から図3.18までにはホットトランジェントにおける同様の温度コンター図をそれぞれ示した。

なお、付録Aには各周溶接部の内外表面等の熱過渡1サイクル分の温度解析結果を添付したので、詳細はこちらも参照されたい。

3.3.2 弾性熱応力解析結果

図3.19から図3.24にはW1からW6までの6本の周溶接部の内表面（同図上側）と外表面（同図下側）での各応力成分の時間変化を、また図3.25と図3.26には参考として、供試体入口および出口ナトリウム温度測定用に設置した熱電対（それぞれCH-0, CH-1）位置での上記同様の各応力成分の時間変化を示した。これらの図から、本供試体では各板厚部において支配的な応力成分が周方向応力と軸方向応力であり、また両者がほぼ同位相で同じ大きさの等2軸応力状態となっていることが分かる。

次に、図3.28と図3.29には20mm板厚部内表面の供試体軸方向にそった表示ライン（以

降表示部①のFACE-1と呼ぶ；図3.27参照）において、極値を形成する2時点での応力分布（各図上側）とひずみ分布（各図下側）を、また図3.30と図3.31には20mm板厚部外表面の供試体軸方向にそった表示ライン（以降表示部①のFACE-2と呼ぶ）における同様の応力、ひずみ分布を示す。

さらに、図3.32から図3.35には15mm板厚部（表示部②）の内表面（FACE-1）と外表面（FACE-2）での極値2時点の応力、ひずみ分布を、また図3.36から図3.39には10mm板厚部（表示部③）の同様の応力、ひずみ分布を示した。

これらの図から、それぞれの板厚部において板厚変化部の影響を受けると考えられる両端部を除けば、2本の周溶接部近傍からその間の広い範囲においてほぼ一定値の等2軸場が形成されていることが分かる。また、容易に推定されるように、応力、ひずみの大きさは板厚が厚いほど大きく、さらに内表面の方が外表面よりも大きい。

なお、付録Bには熱応力解析結果のさらに詳細な資料を添付しているので、あわせて参照されたい。

表3.1 伝熱解析で使用する供試体入口および出口での熱過渡条件

SPTT 9Cr 温度データ		CH O ホットショック		CH I コールドショック		CH I ホットショック	
時間 (SEC)	TEMP	時間 (SEC)	TEMP	時間 (SEC)	TEMP	時間 (SEC)	TEMP
0	550	300	300	0	550	300	300
0.5	550	301	300	1	550	301	300
1	528	302	300	1.5	550	302	300
1.25	462	302.5	314	2	548	303	200
1.5	423	303	405	2.5	523	303.5	302
1.75	409	303.5	439	3	496	304	328
2	396	304	464	3.5	470	304.5	364
2.5	377	304.5	479	4	448	305	384
3	362	305	494	4.5	434	305.5	402
3.5	352	305.5	504	5	425	306	414
4	345	306	511	5.5	419	306.5	425
4.5	339	306.5	517	6	414	307	434
5	334	307	520	6.5	409	307.5	443
6	329	307.5	523	7	405	308	450
7	325	308	526	7.5	400	308.5	457
8	321	308.5	528	8	396	309	464
9	319	309	529	8.5	393	309.5	466
10	317	309.5	530	9	390	310	470
12	314	310	530.5	9.5	387	310.5	473
14	312	311	531.5	10	384	311	475
16	311	312	532.5	11	379	311.5	477
18	310	313	533.5	12	373	312	479
20	309	314	534.5	13	368	312.5	482
25	307	315	536	14	364	313	484
30	306	317	538	15	359	313.5	486
35	305	320	540.5	16	355	314	487
40	304	325	543	17	352	314.5	489
45	303	330	545	18	350	315	491
50	302	340	548	19	348	316	495
55	301	350	549	20	344	317	496
60	300	360	549	25	334	318	498
70	300	390	550	30	325	319	500
120	300	420	550	35	321	320	502
				40	317	325	512
				45	314	320	521
				50	311	325	527
				55	309	340	532
				60	307	345	536
				70	306	350	539
				80	305	355	541
				90	303.5	360	543
				100	302	370	545
				120	301	380	548
						400	549
						420	550

表3.2 伝熱解析で使用する供試体内表面での熱伝達率

表2. 9クロム鋼溶接継手モデルの熱過渡試験条件における熱伝達率の算出結果
(Subbotinの式による、管内径67.0mm、流量150l/min)

Temp. (C)	(*) Alpha-1	(**) Alpha-2	
200	10229.5	2.842	(*) 熱伝達率, α , (kcal/m ² hr °C)
250	9921.3	2.756	
300	9625.6	2.674	
350	9341.9	2.595	
400	9069.9	2.519	
450	8809.5	2.447	(**) 熱伝達率, α , (kcal/mm ² sec °C) × 10 ⁶
500	8560.3	2.378	
550	8322.1	2.312	
600	8094.5	2.248	
650	7877.3	2.188	

表3.3 伝熱解析で使用するMod. 9Cr-1Mo 鋼の物性値

温度 (°C)	200	250	300	350	400	450	500	550	600
熱伝導率 ($\times 10^{-6}$ Kcal/mmsec°C)	7.29		7.20		7.08		7.29		6.92
比熱 (Kcal/Kg°C)	0.124	0.128	0.133	0.137	0.142	0.147	0.158	0.166	0.177
密度 (Kg/mm ³)	7.726		7.699		7.669		7.637		7.606

表3.4 応力解析で使用するMod. 9Cr-1Mo 鋼の物性値

温度 (°C)	ヤング率 ($\times 10^4$ Kg/mm ²)	ポアソン比 (mm/mm)	線膨張係数 ($\times 10^{-5}$ 1/°C)
200	2.07		別表ME.10による
300	2.00	0.300	
350		0.300	
400	1.92	0.300	
450		0.300	
500	1.81	0.302	
550		0.306	
600	1.70	0.310	

表3.5 Mod. 9Cr-1Mo 鋼の熱膨張係数

別表ME. 10

Mod. 9Cr-1Mo (NT) の熱膨張係数

 α (10^{-6} mm/mm/°C)

DS M 0102

温度 °C	Mod. 9Cr-1Mo (NT)	
	A	B
20	10.48	-
50	10.72	10.60
75	10.92	10.70
100	11.12	10.80
125	11.31	10.90
150	11.50	11.00
175	11.68	11.09
200	11.86	11.19
225	12.04	11.28
250	12.21	11.37
275	12.37	11.46
300	12.53	11.55
325	12.68	11.64
350	12.83	11.72
375	12.98	11.80
400	13.12	11.89
425	13.25	11.97
450	13.38	12.05
475	13.51	12.12
500	13.63	12.20
525	13.75	12.27
550	13.86	12.35
575	13.97	12.42
600	14.07	12.49

(備考) A は瞬時熱膨張係数
B は室温からその温度までの平均熱膨張係数

FINAS

図3.1 解析モデルメッシュ図



図3.1 解析モデルメッシュ図



GEOM. SCALE  150.000

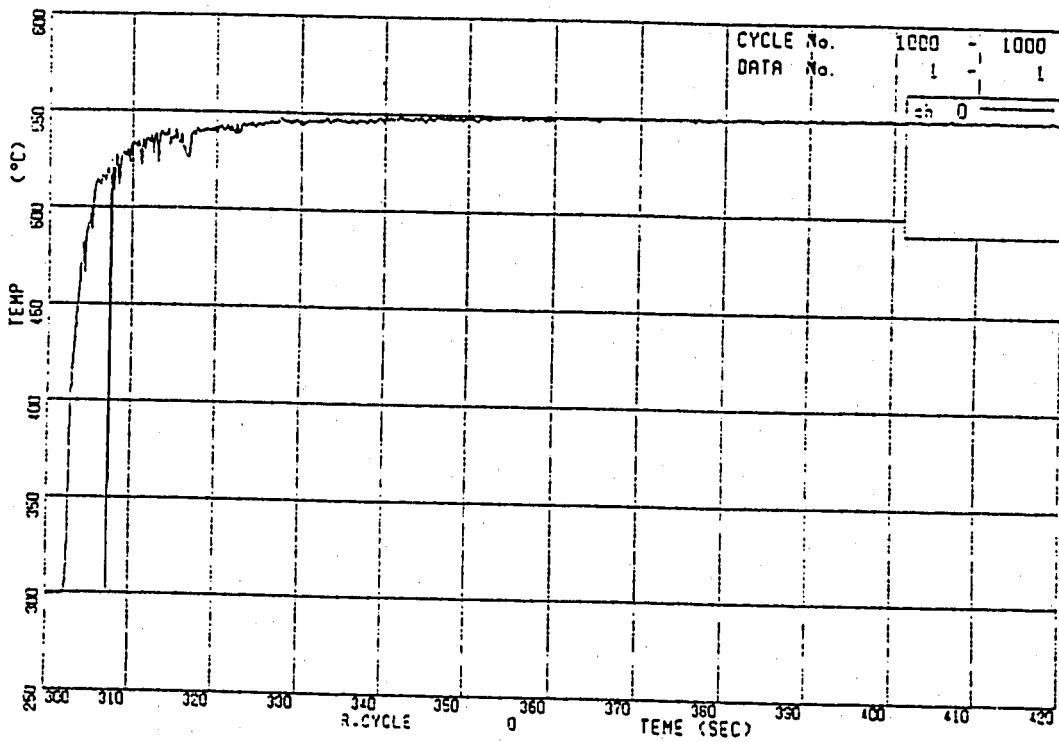
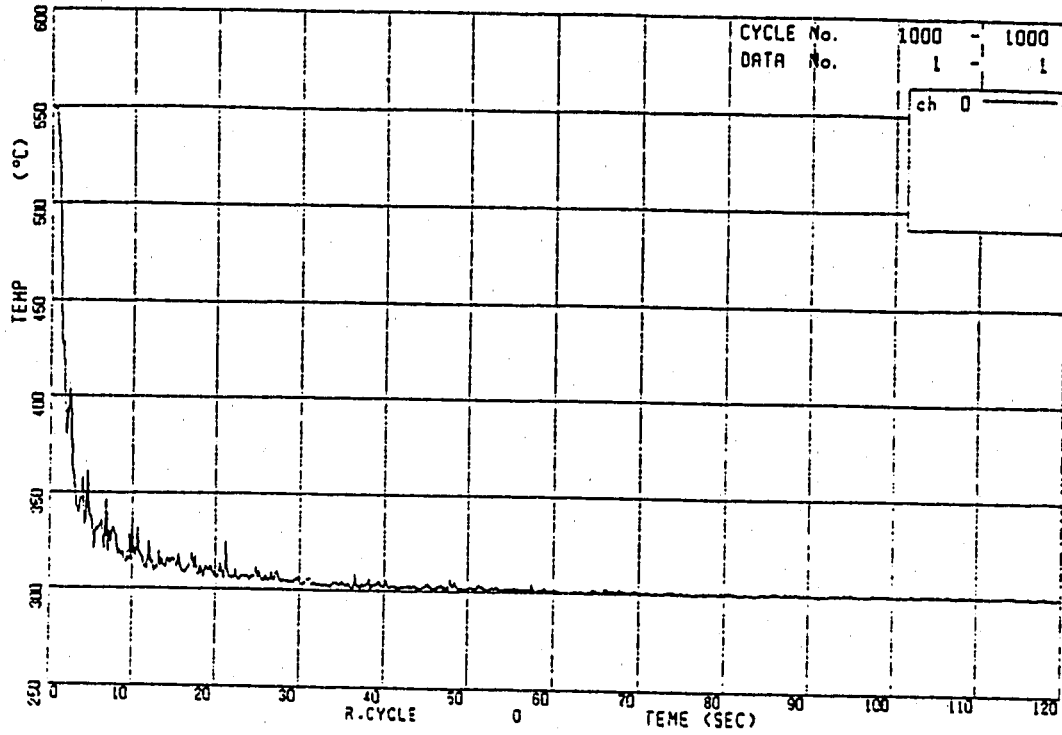
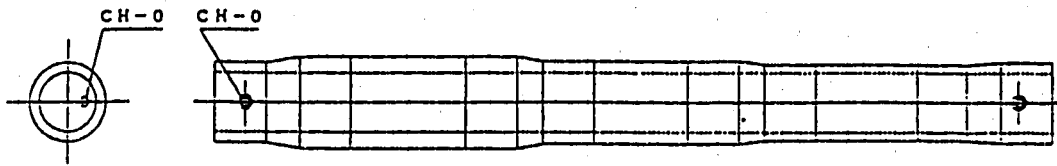


図3.2 供試体入口 (CH-0) でのNa温度測定結果 (生データ)

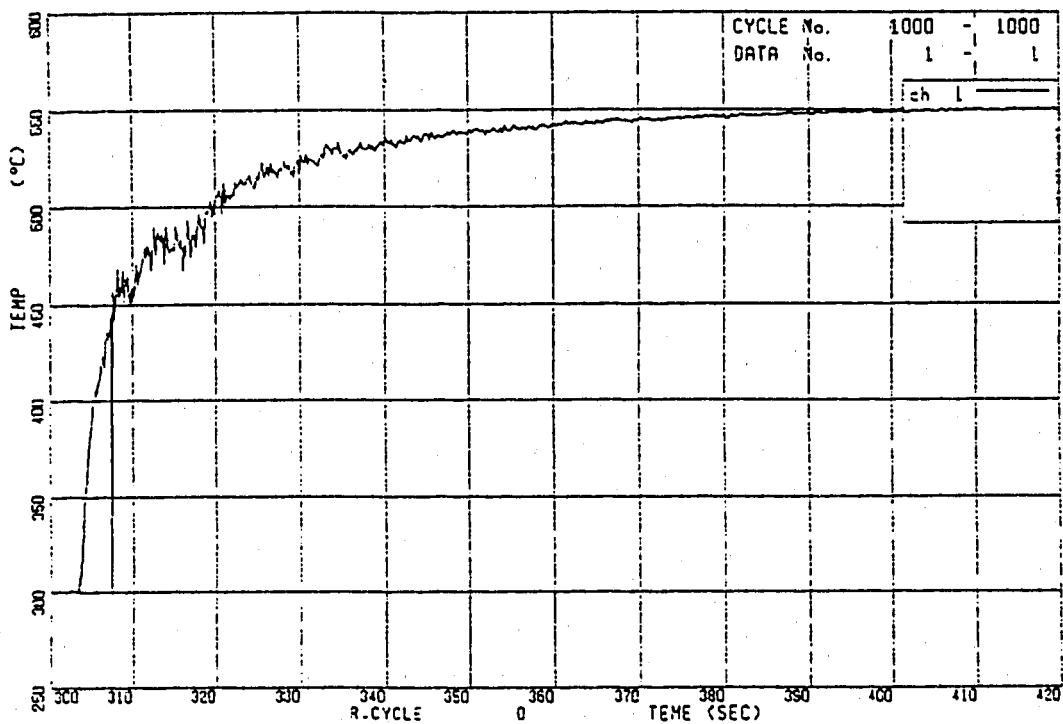
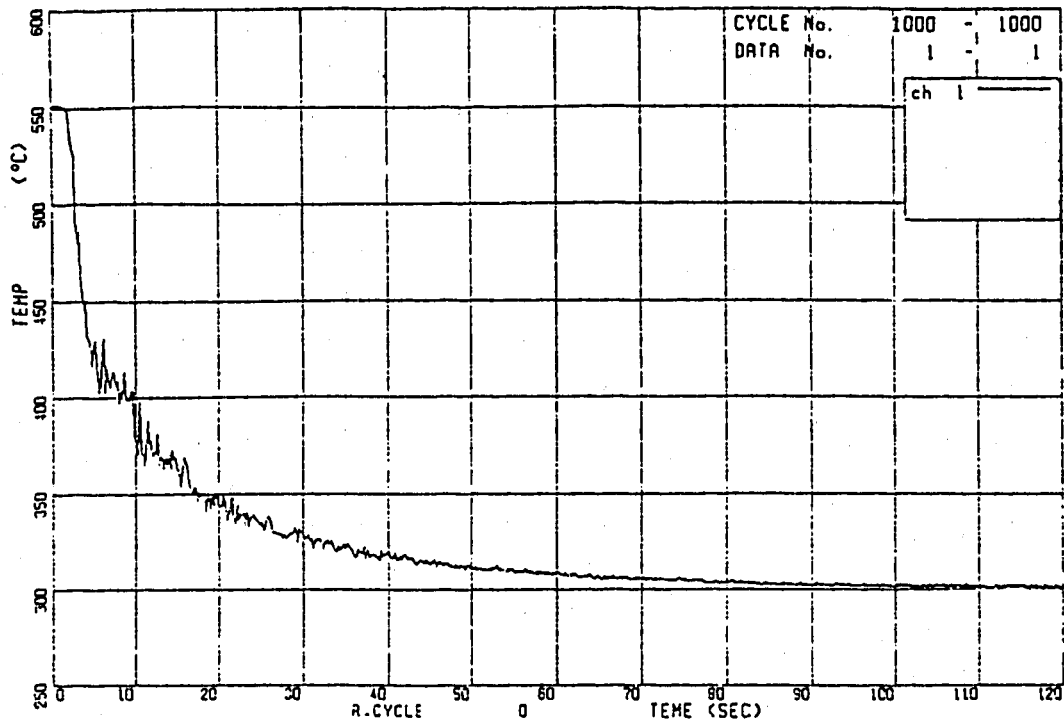
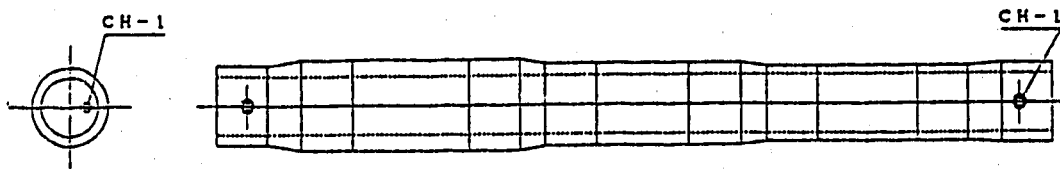
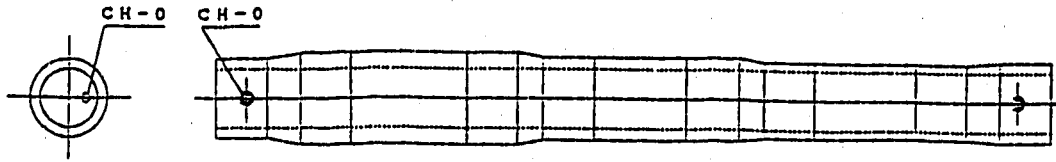
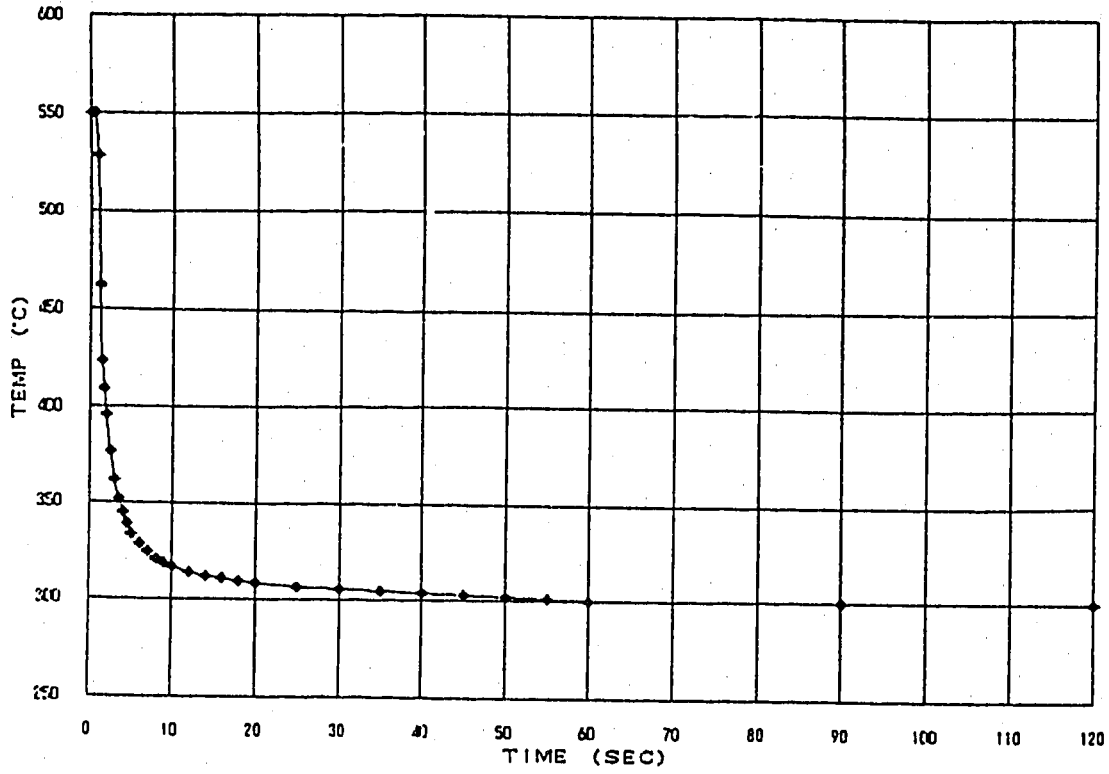


図3.3 供試体出口 (CH-1) でのNa温度測定結果 (生データ)



SPTT 9Cr 供試体入口Na温度



SPTT 9Cr 供試体入口Na温度

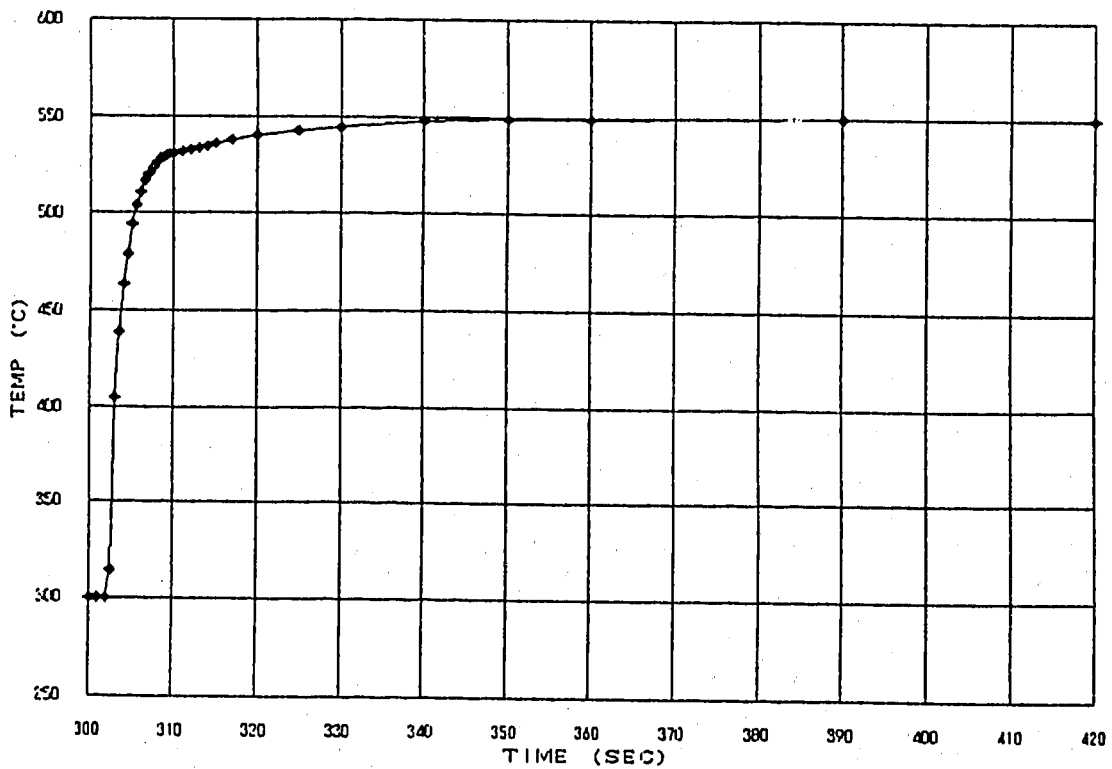
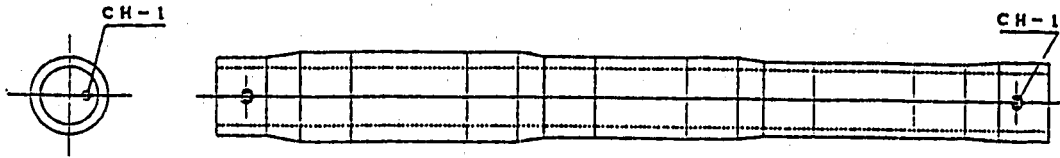
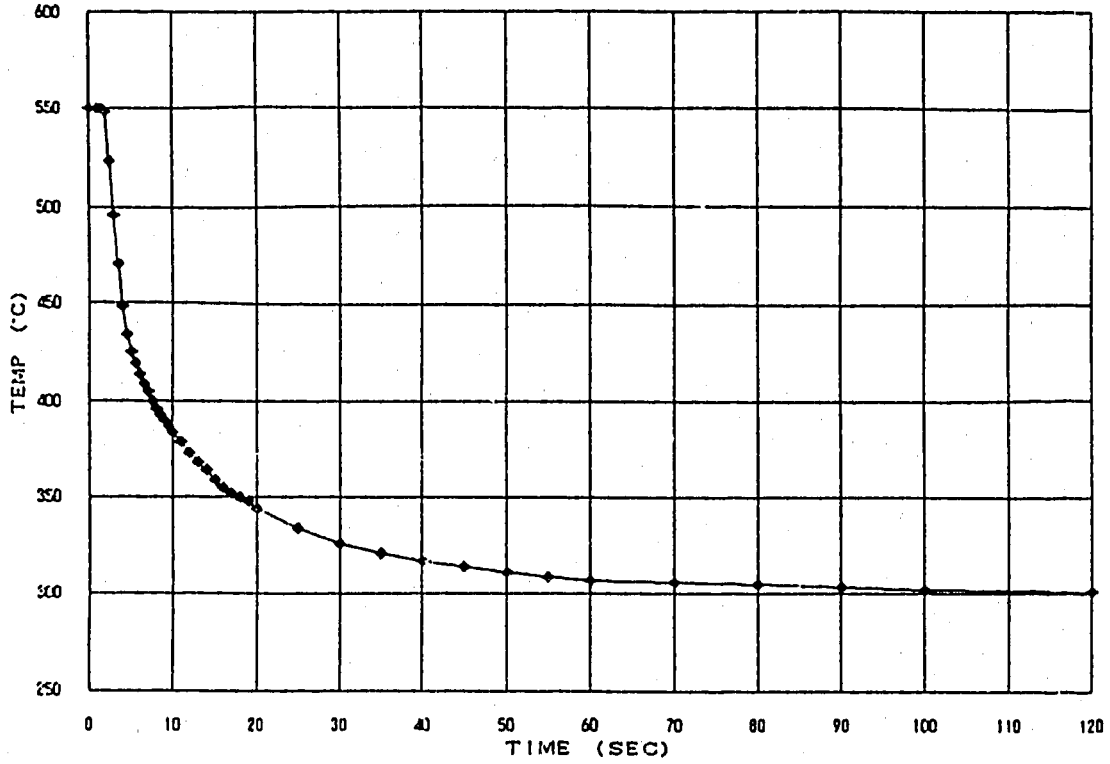


図3.4 伝熱解析用熱過渡条件 (供試体入口 (CH-0) Na 温度)



SPTT 9Cr 供試体出口Na温度



SPTT 9Cr 供試体出口Na温度

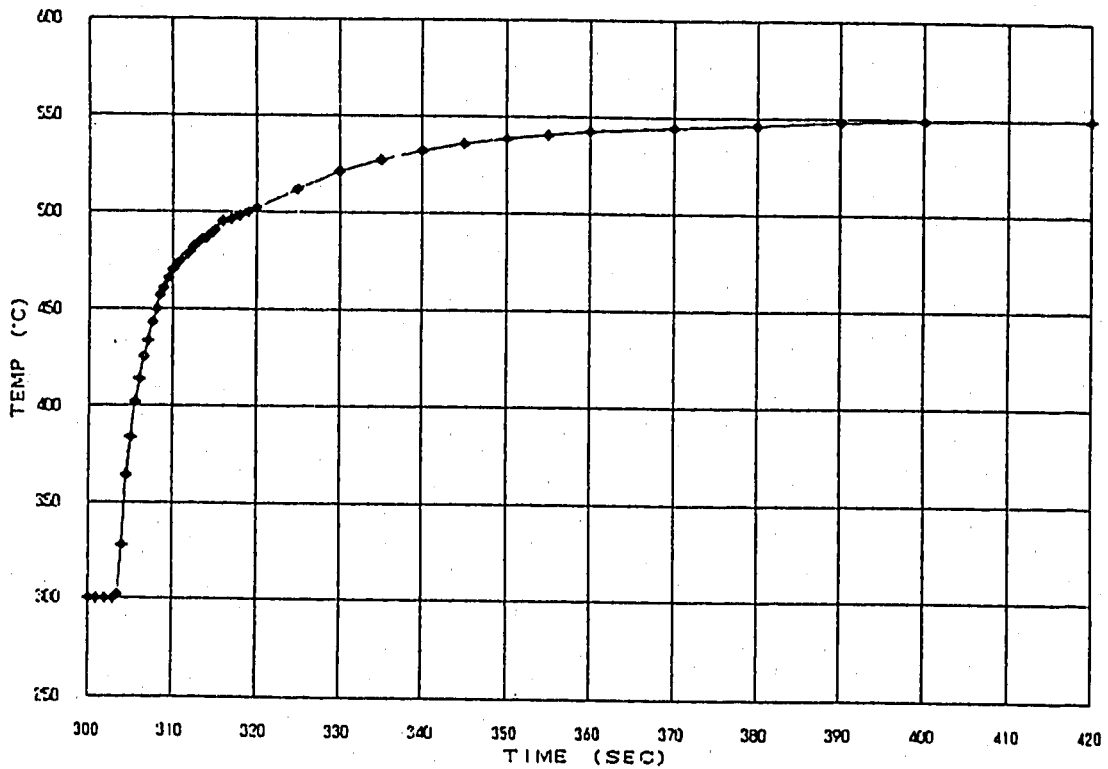
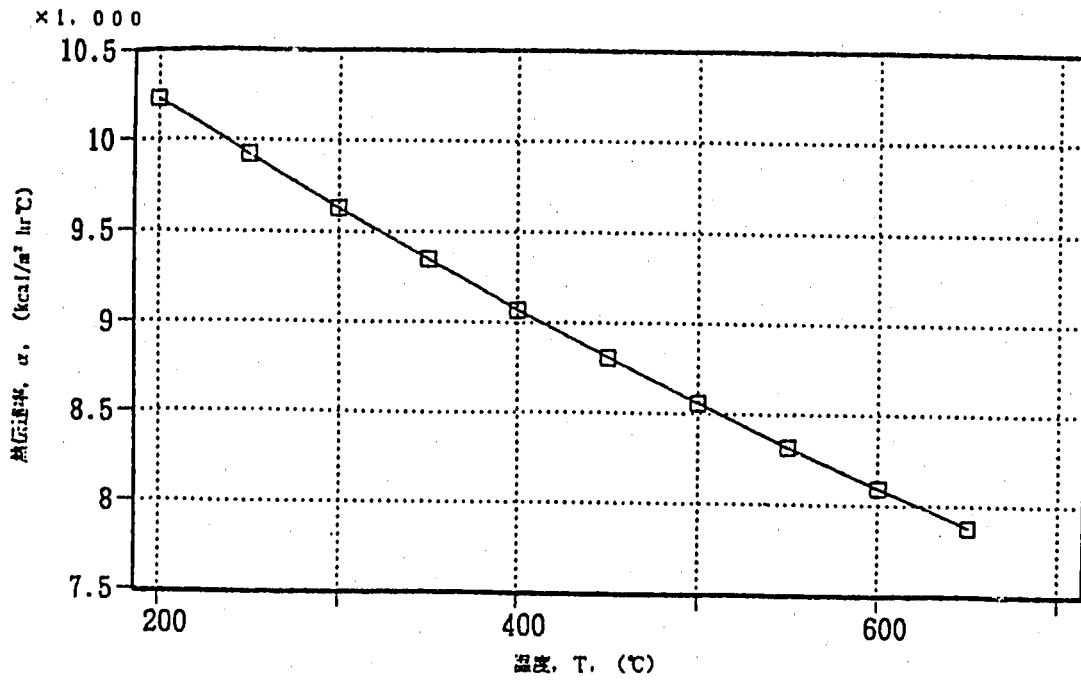
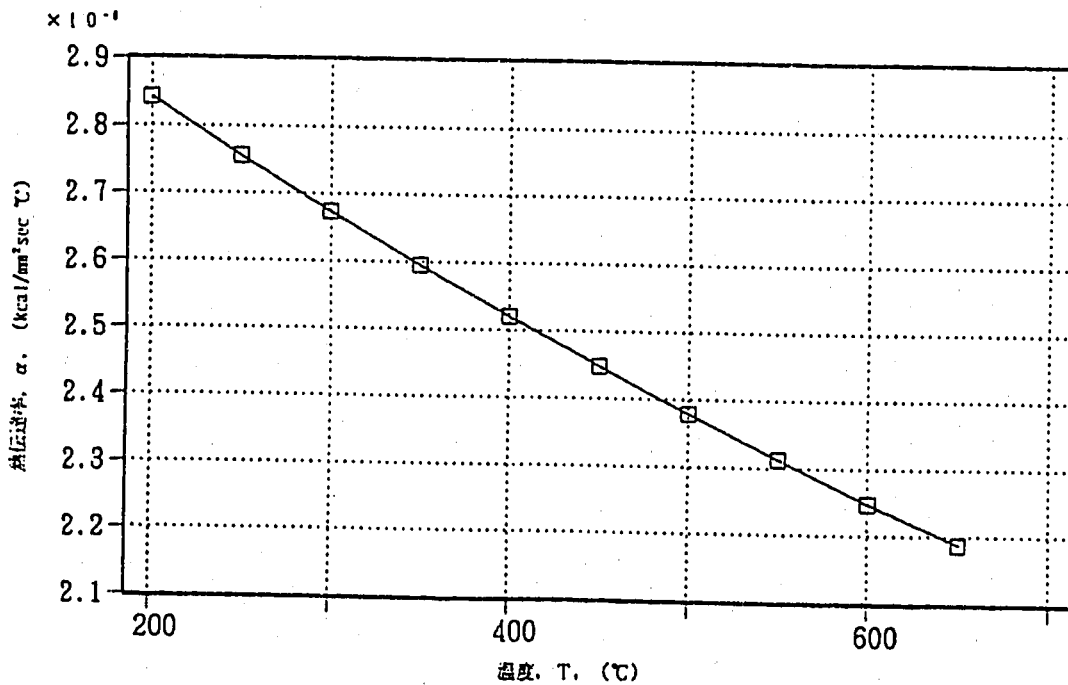


図3.5 伝熱解析用熱過渡条件 (供試体出口 (CH-1) Na 温度)



9クロム鋼溶接継手モデルの熱過渡試験条件における熱伝達率の算出結果
 (Subbotinの式による、管内径67.0mm、流量150l/min)
 (熱伝達率の単位: kcal/m² hr °C)



9クロム鋼溶接継手モデルの熱過渡試験条件における熱伝達率の算出結果
 (Subbotinの式による、管内径67.0mm、流量150l/min)
 (熱伝達率の単位: kcal/mm² sec °C)

図3.6 伝熱解析で使用する供試体内表面での熱伝達率

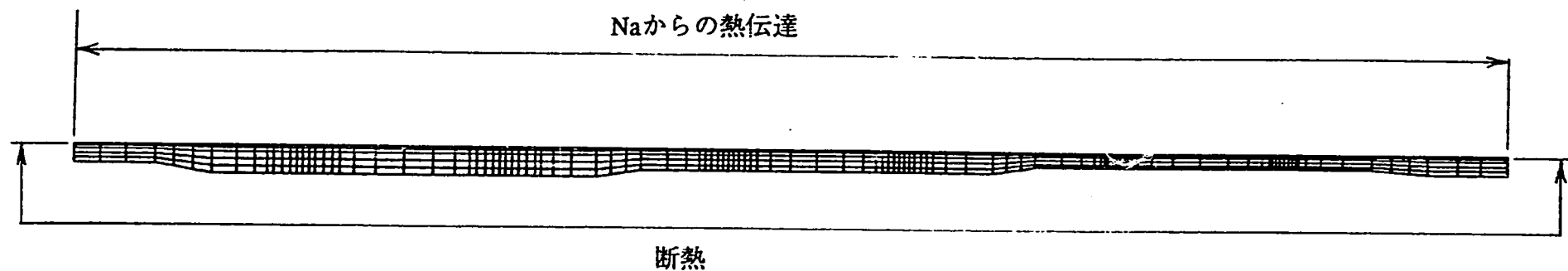


図3.7 伝熱解析に採用した熱的境界条件

GEOM. SCALE  150.000

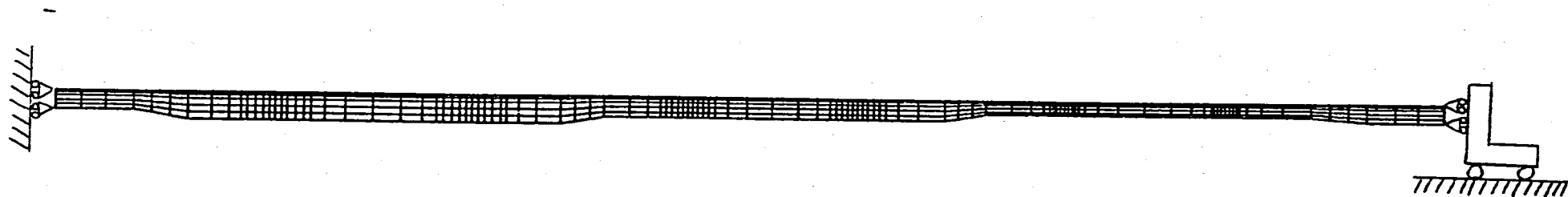

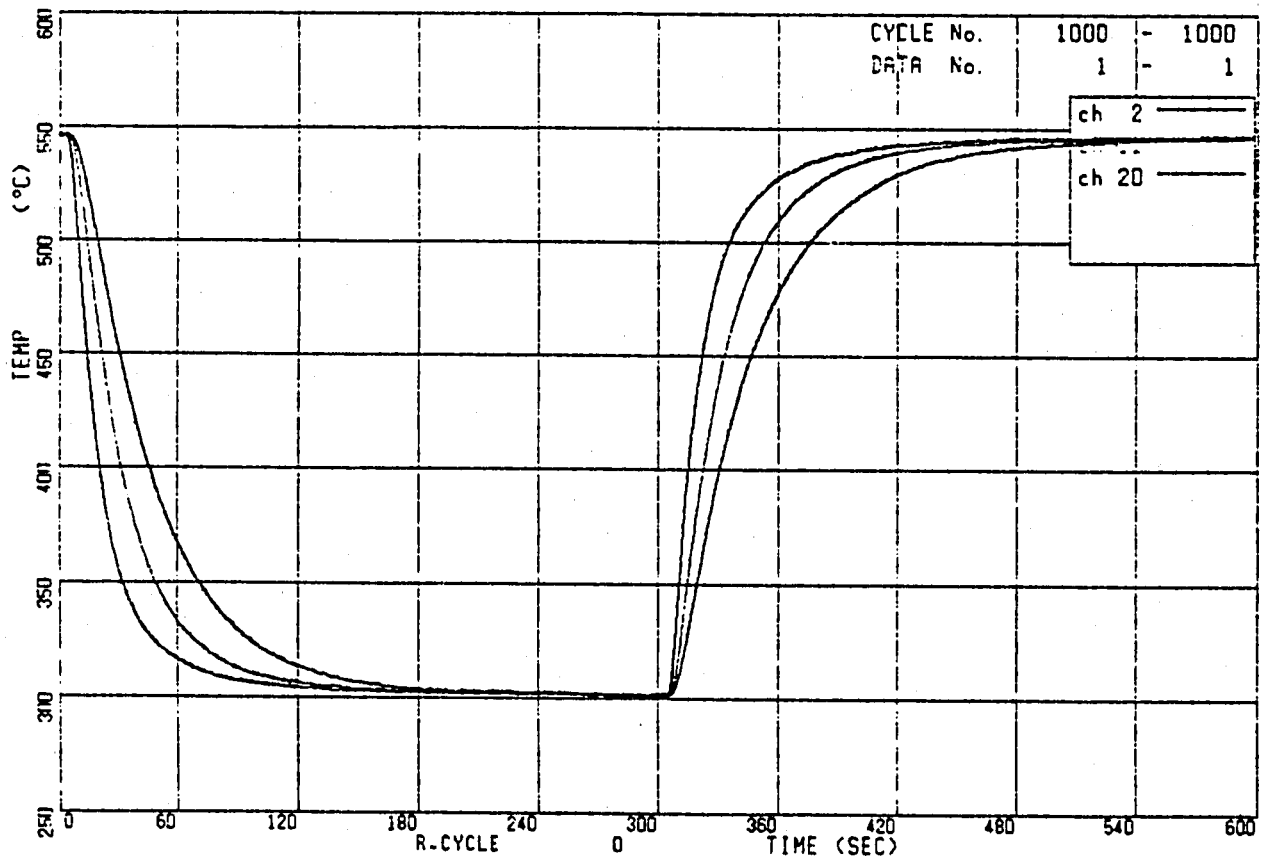
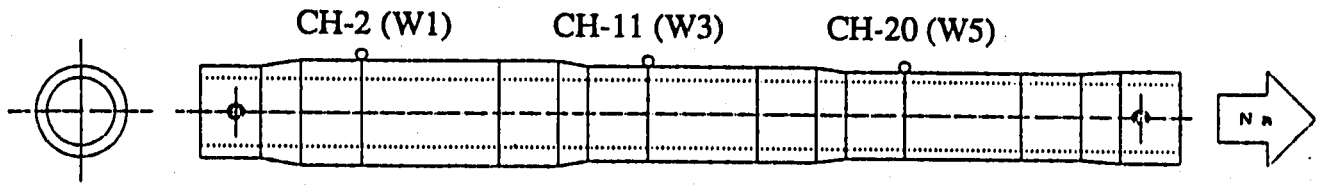


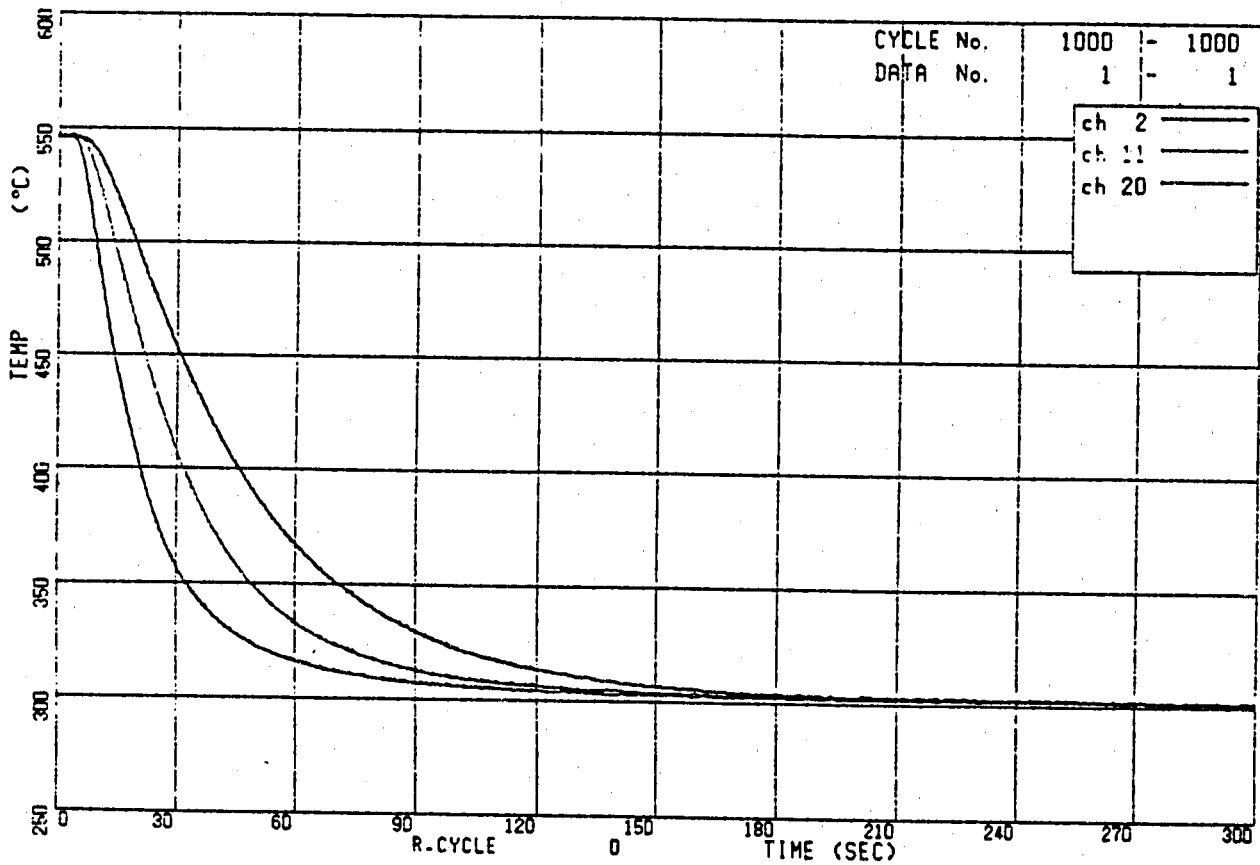
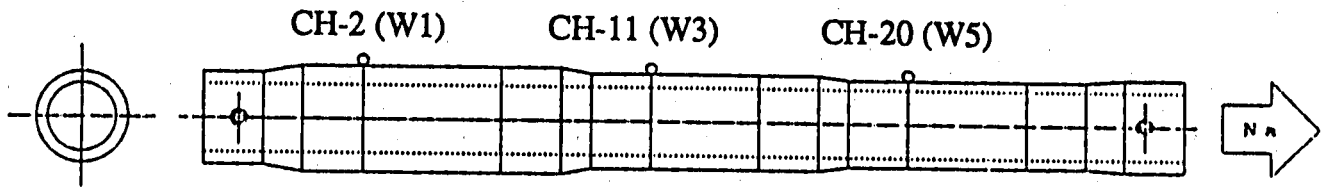
図3.8 弾性熱応力解析に採用した機械的境界条件

GEOM. SCALE  150.000



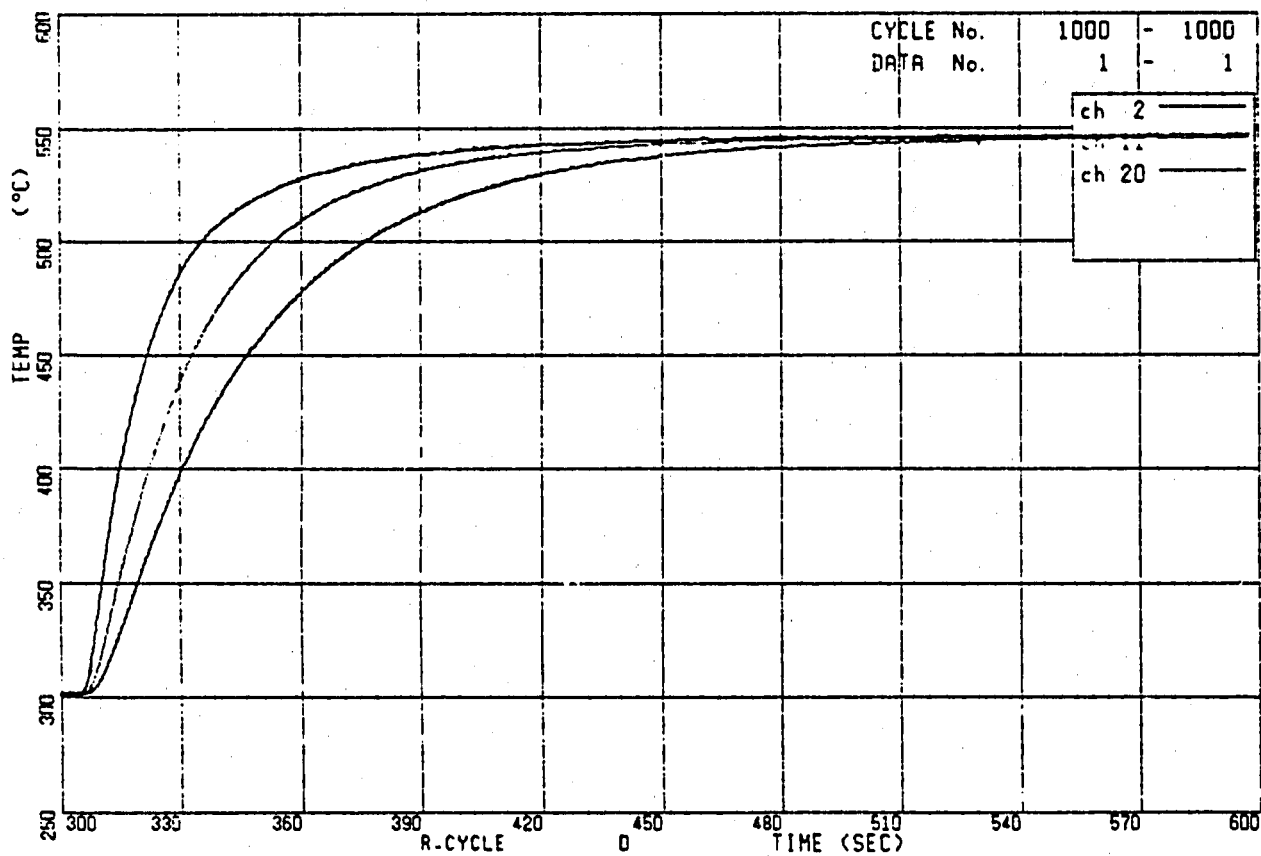
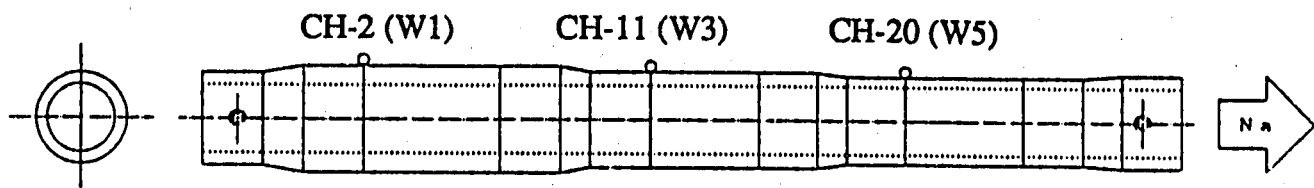
供試体外表面温度時刻歴図 (COLD+HOT 600sec)

図3.9 供試体温度測定結果 (W1, W3, W5の外表面-1サイクル分)



供試体外表面温度時刻歴図 (COLD 300sec)

図3.10 供試体温度測定結果 (W1, W3, W5の外表面-コールドトランジェント部分)



供試体外表面温度時刻歴図 (HOT 300sec)

図3.11 供試体温度測定結果 (W1, W3, W5の外表面-ホットランジェント部分)

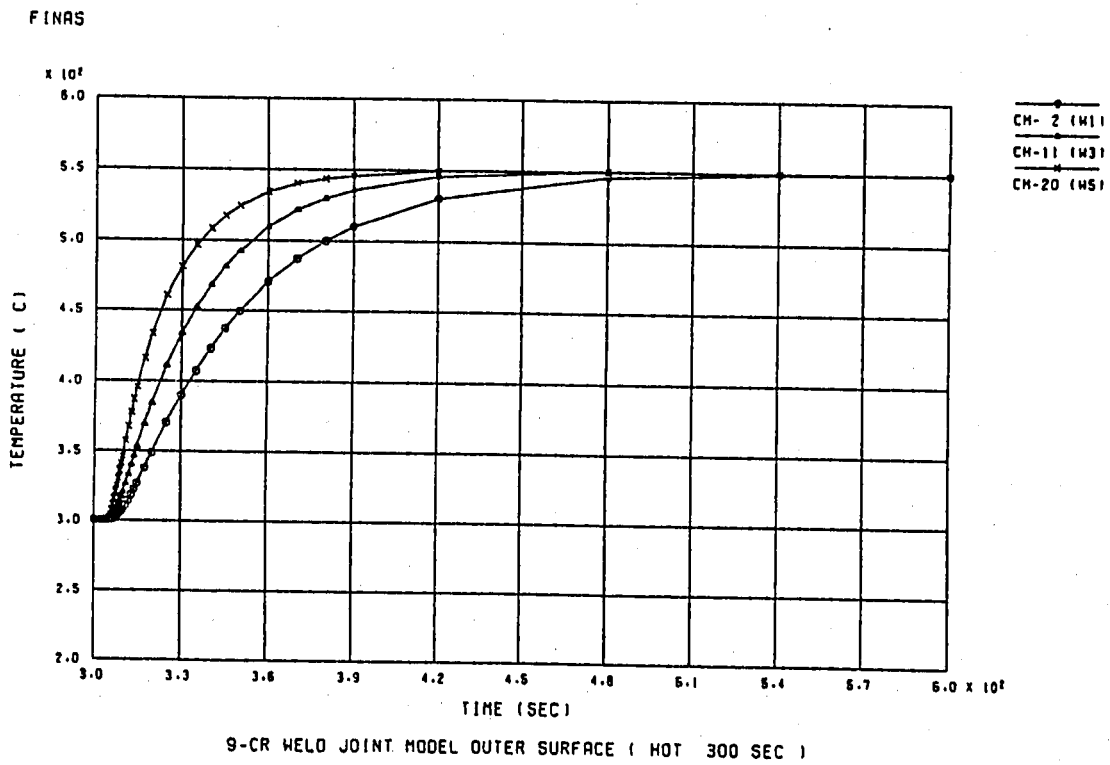
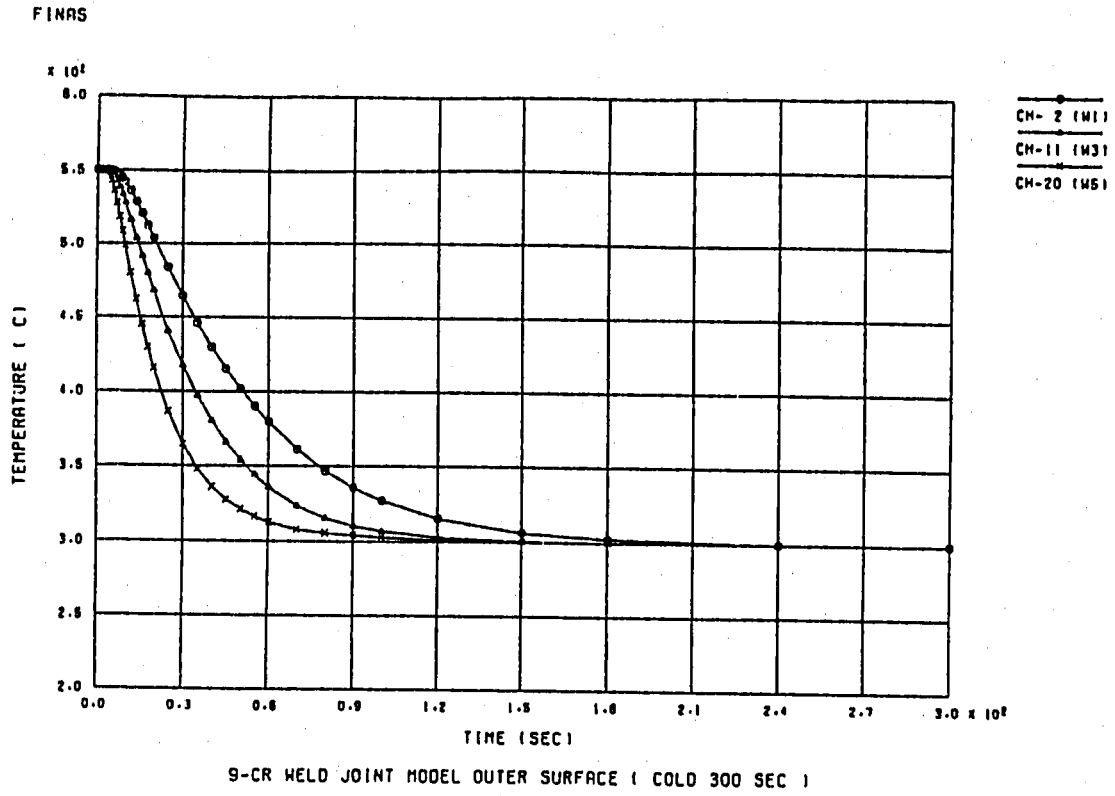


図3.12 温度時刻歴解析結果 (W1, W3, W5の外表面)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	381.0000
2	398.0000
3	415.0000
4	432.0000
5	449.0000
6	466.0000
7	483.0000
8	500.0000
9	517.0000
10	534.0000



STEP NO. 24

GEOM. SCALE 150.000

9-CR WELD JOINT MODEL (COLD SHOCK 10 SEC)

図3.13 温度コンター図 (コールドトランジェント10秒後)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	332.0000
2	346.0000
3	360.0000
4	374.0000
5	388.0000
6	402.0000
7	415.0000
8	430.0000
9	444.0000
10	458.0000



STEP NO. 31

GEOM. SCALE 150.000

9-CR WELD JOINT MODEL (COLD SHOCK 30 SEC)

図3.14 温度コンター図 (コールドトランジェント30秒後)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	308.2000
2	316.0000
3	323.8000
4	331.6000
5	339.4000
6	347.2000
7	355.0000
8	362.8000
9	370.6000
10	378.4000



STEP NO. 37

GEOM. SCALE 150.000

9-CR WELD JOINT MODEL (COLD SHOCK 60 SEC)

図3.15 温度コンター図 (コールドランジェント60秒後)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	314.0000
2	330.0000
3	346.0000
4	362.0000
5	378.0000
6	394.0000
7	410.0000
8	426.0000
9	442.0000
10	458.0000



STEP NO. 69

GEOM. SCALE 150.000

9-CR WELD JOINT MODEL (HOT SHOCK 10 SEC)

図3.16 温度コンター図 (ホットランジェント10秒後)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	393.0000
2	407.0000
3	421.0000
4	435.0000
5	449.0000
6	463.0000
7	477.0000
8	491.0000
9	505.0000
10	519.0000



STEP NO. 78

GEOM. SCALE 150.000

9-CR WELD JOINT MODEL (HOT SHOCK 30 SEC)

図3.17 温度コンター図 (ホットランジェント30秒後)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	471.3000
2	478.9000
3	486.5000
4	494.1000
5	501.7000
6	509.3000
7	516.9000
8	524.5000
9	532.1000
10	539.7000



STEP NO. 83

GEOM. SCALE 150.000

9-CR WELD JOINT MODEL (HOT SHOCK 60 SEC)

図3.18 温度コンター図 (ホットランジェント60秒後)

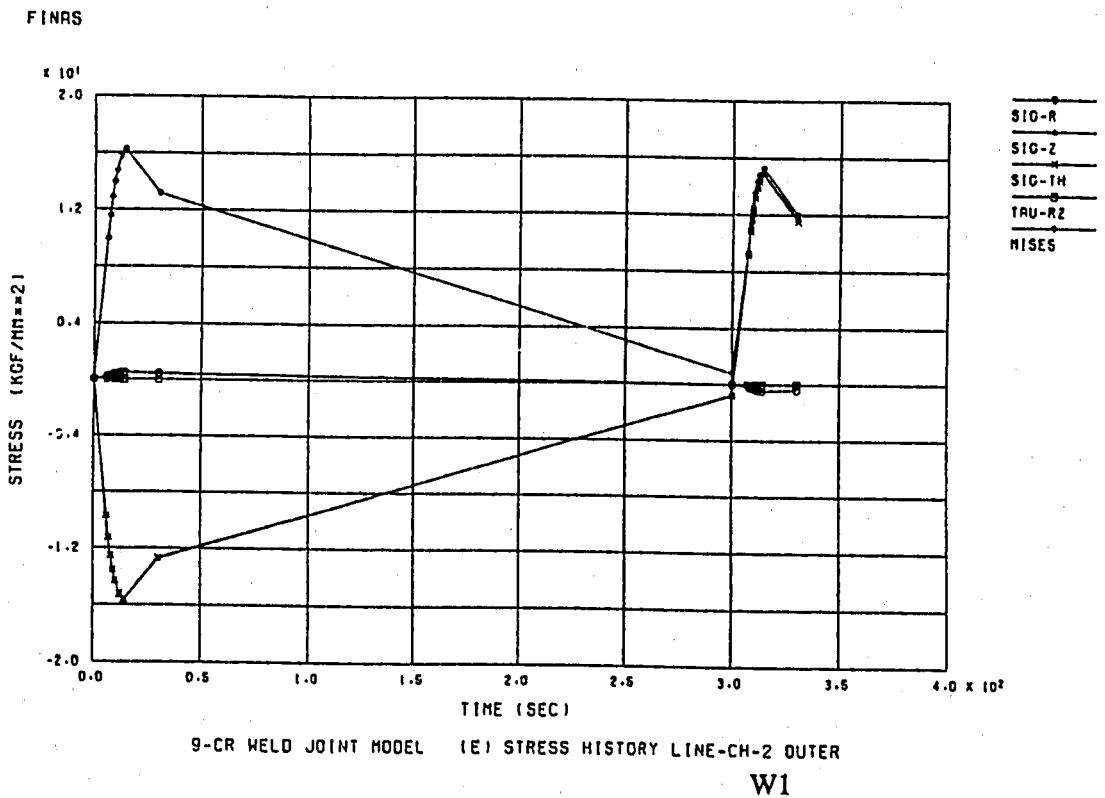
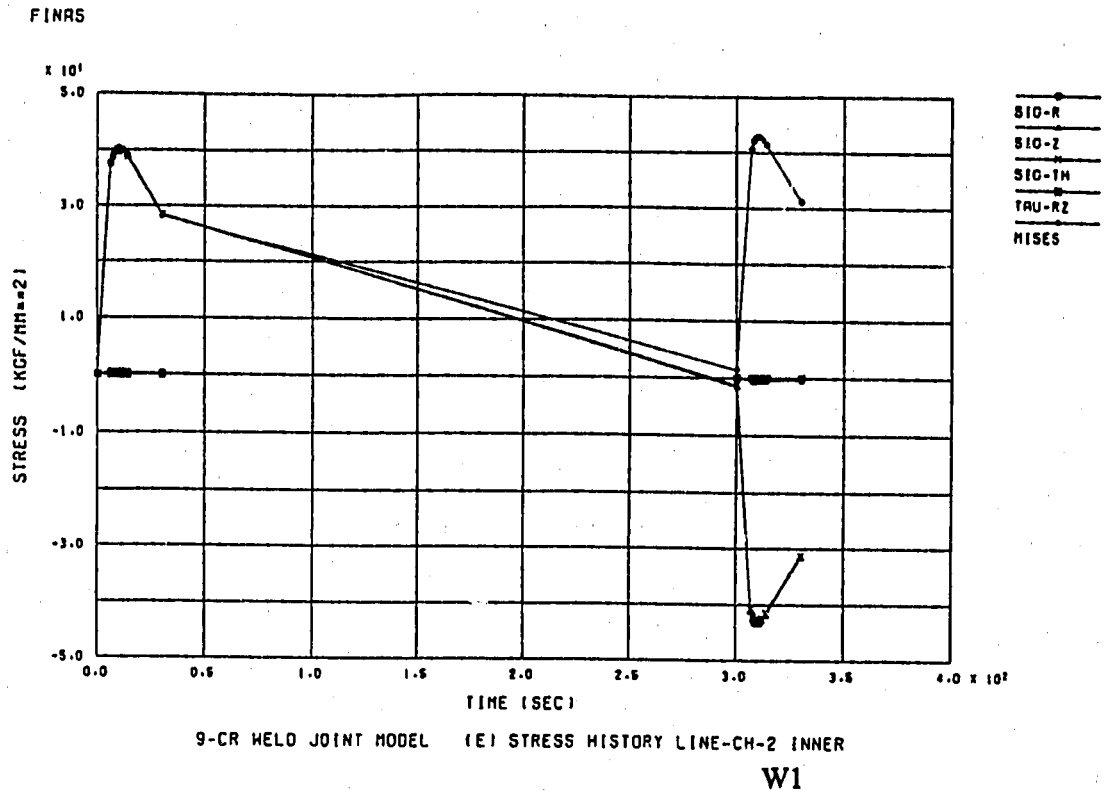


図3.19 溶接継手W1 (20mm板厚部)での応力履歴(内表面、外表面)

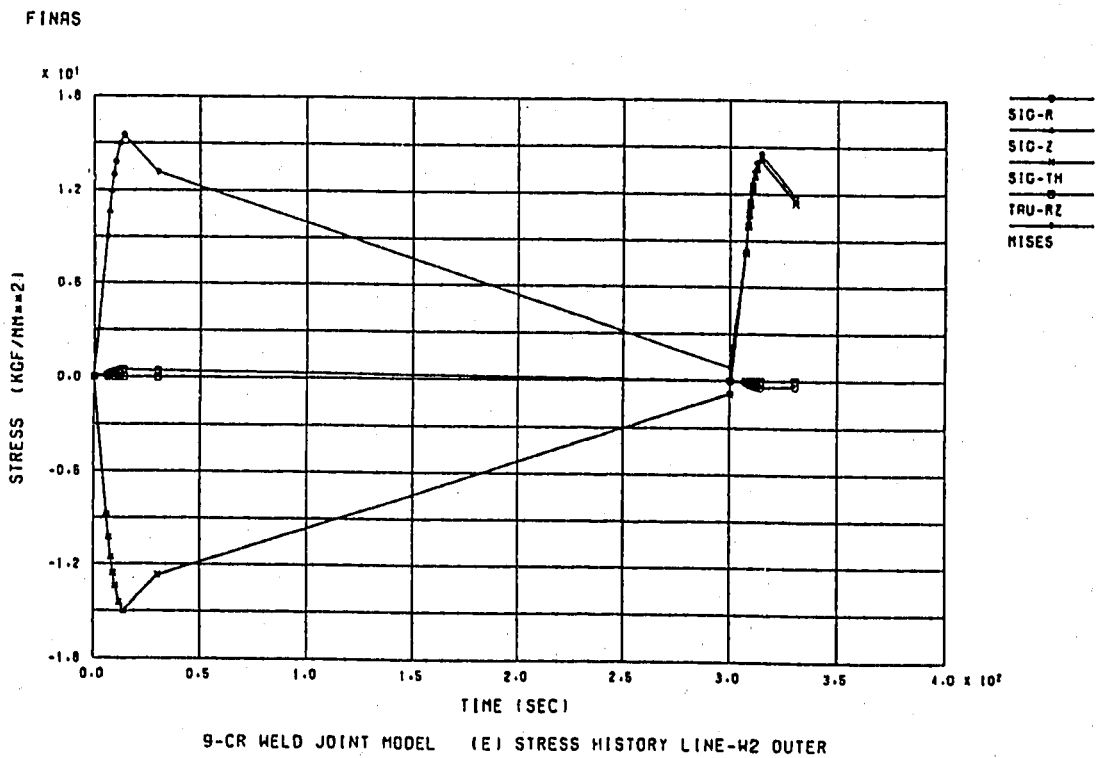
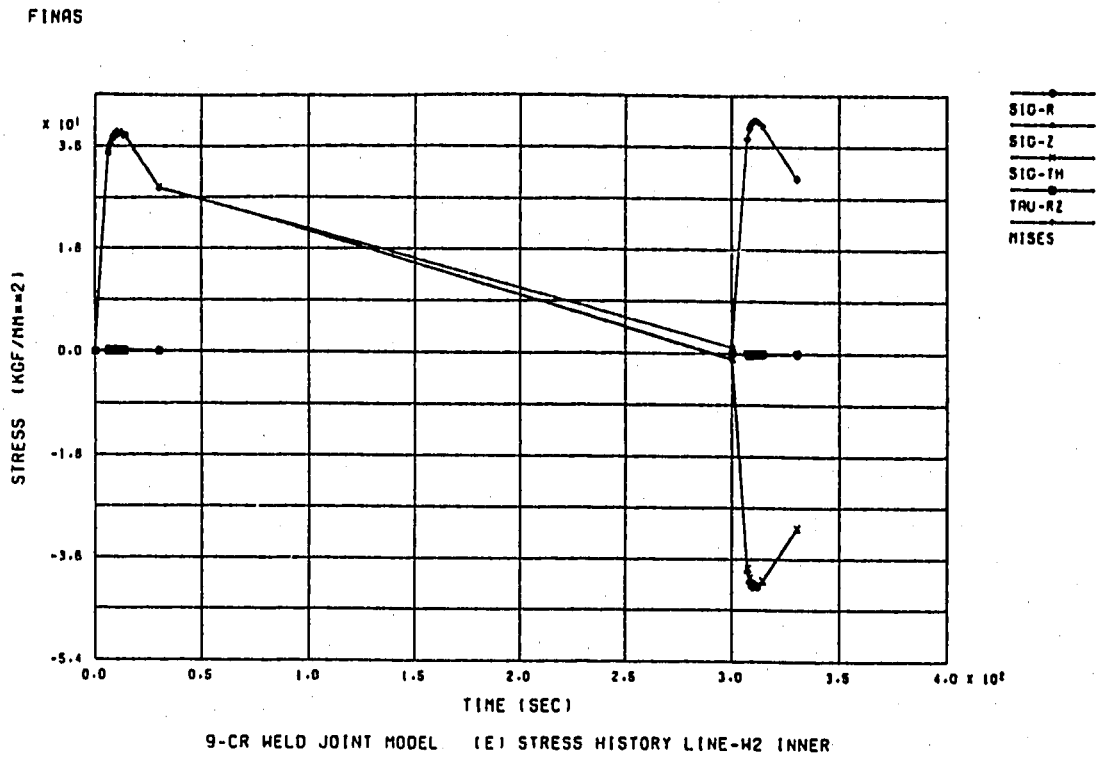


図3.20 溶接継手W2 (20mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)

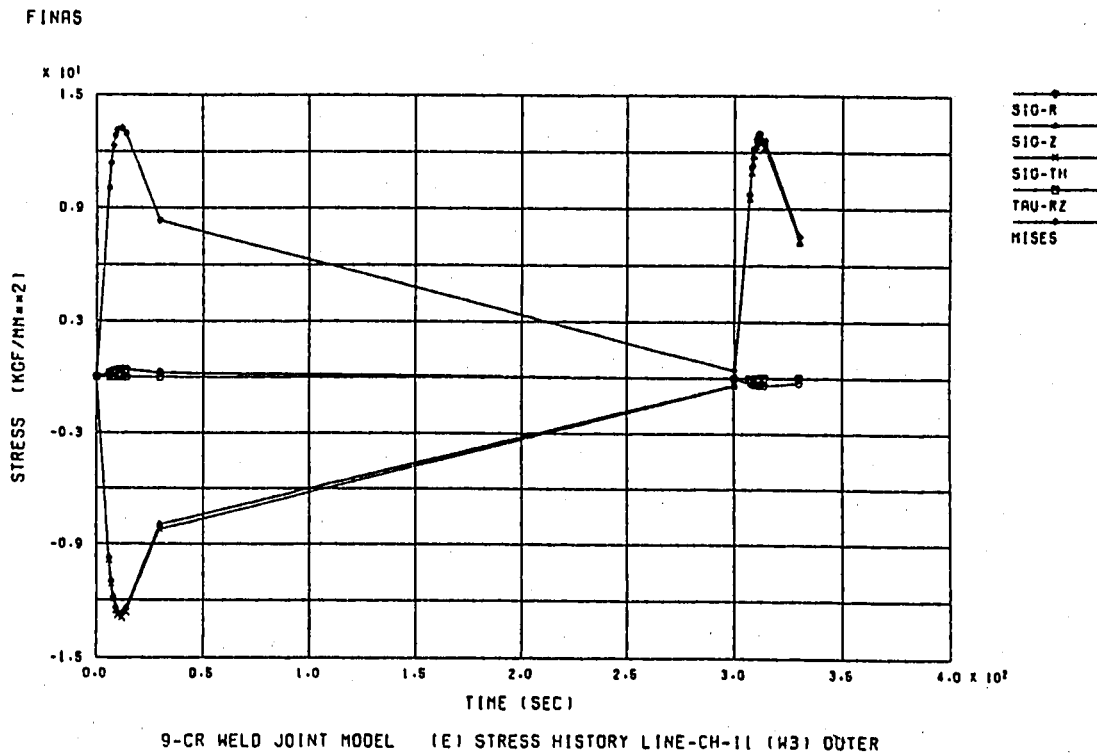
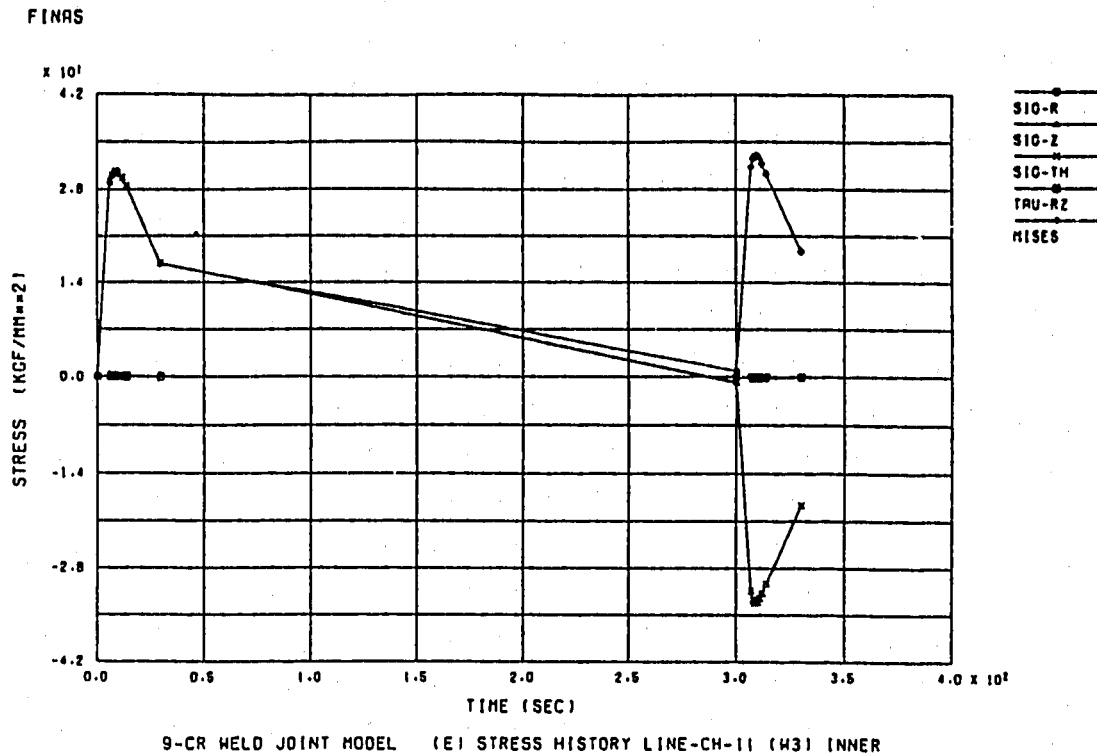
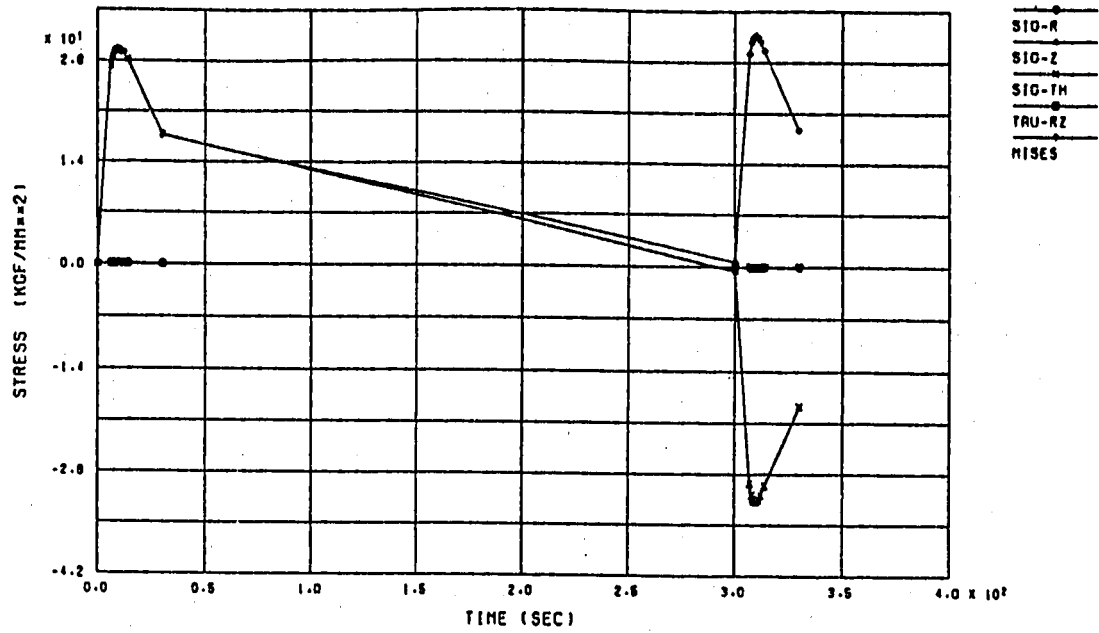


図3.21 溶接継手W3 (15mm板厚部)での応力履歴(内表面、外表面)

FINAS



FINAS

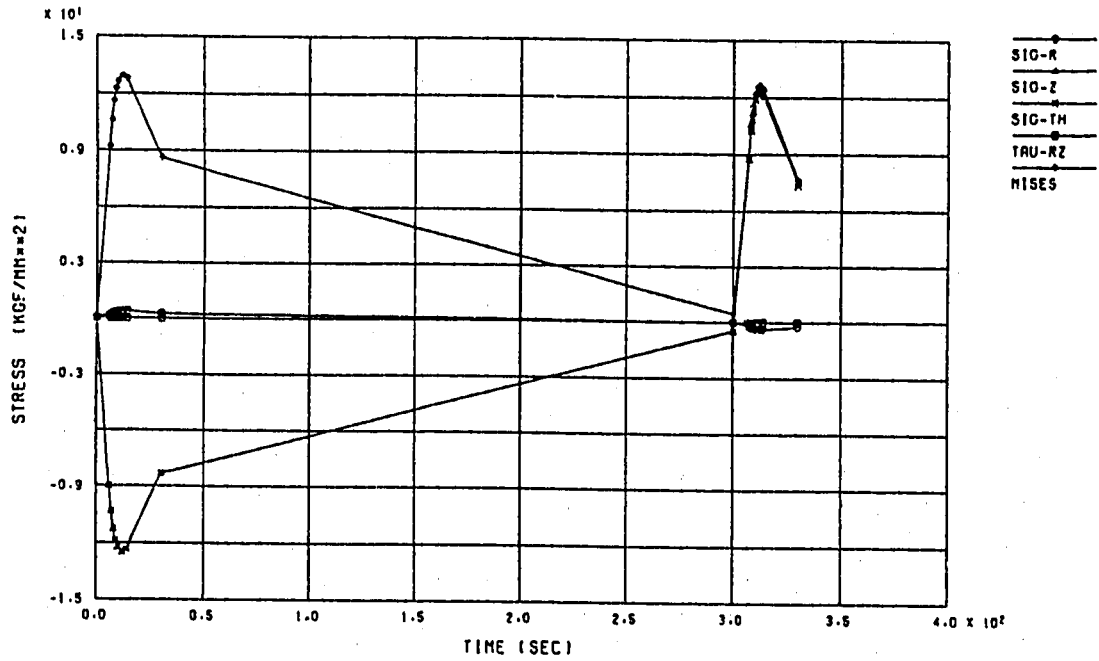
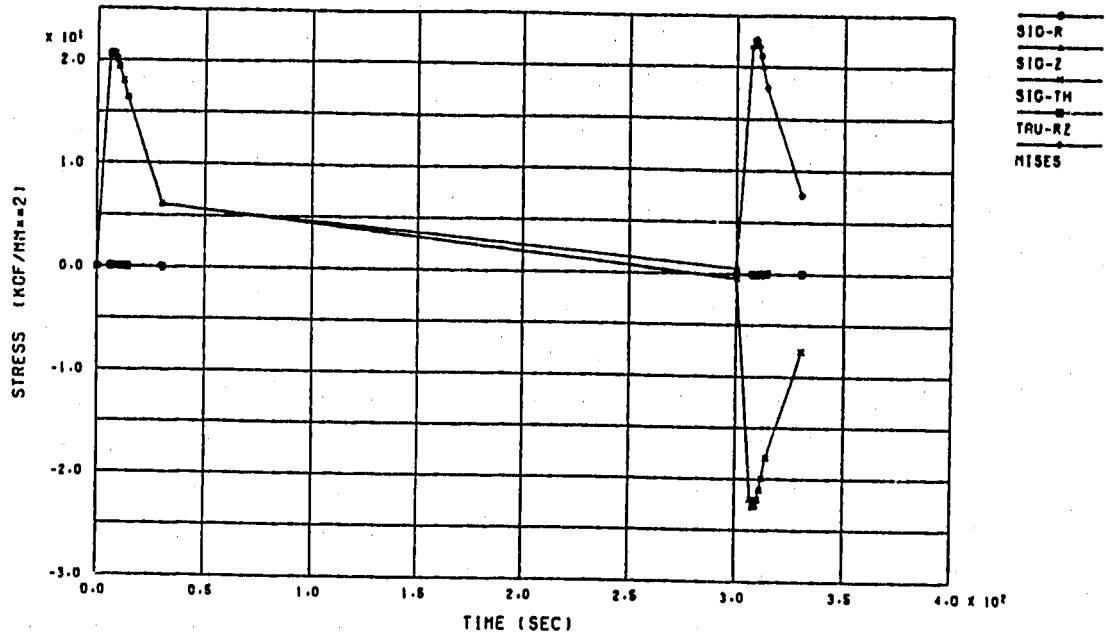


図3.22 溶接継手W4 (15mm板厚部)での応力履歴(内表面、外表面)

FINAS



FINAS

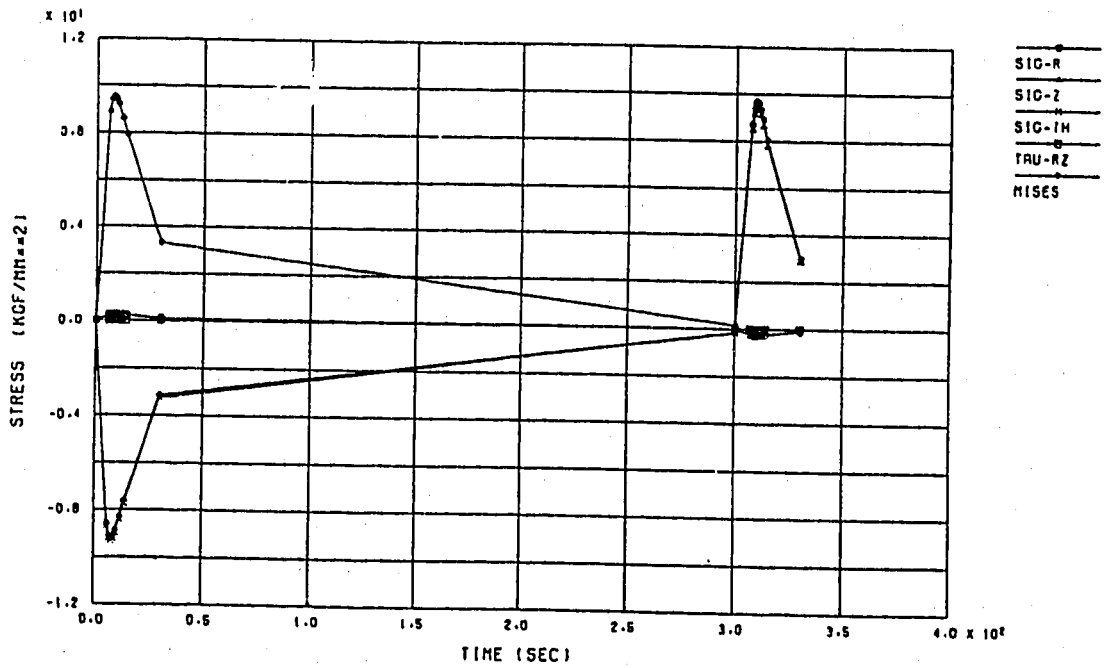


図3.23 溶接継手W5 (10mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)

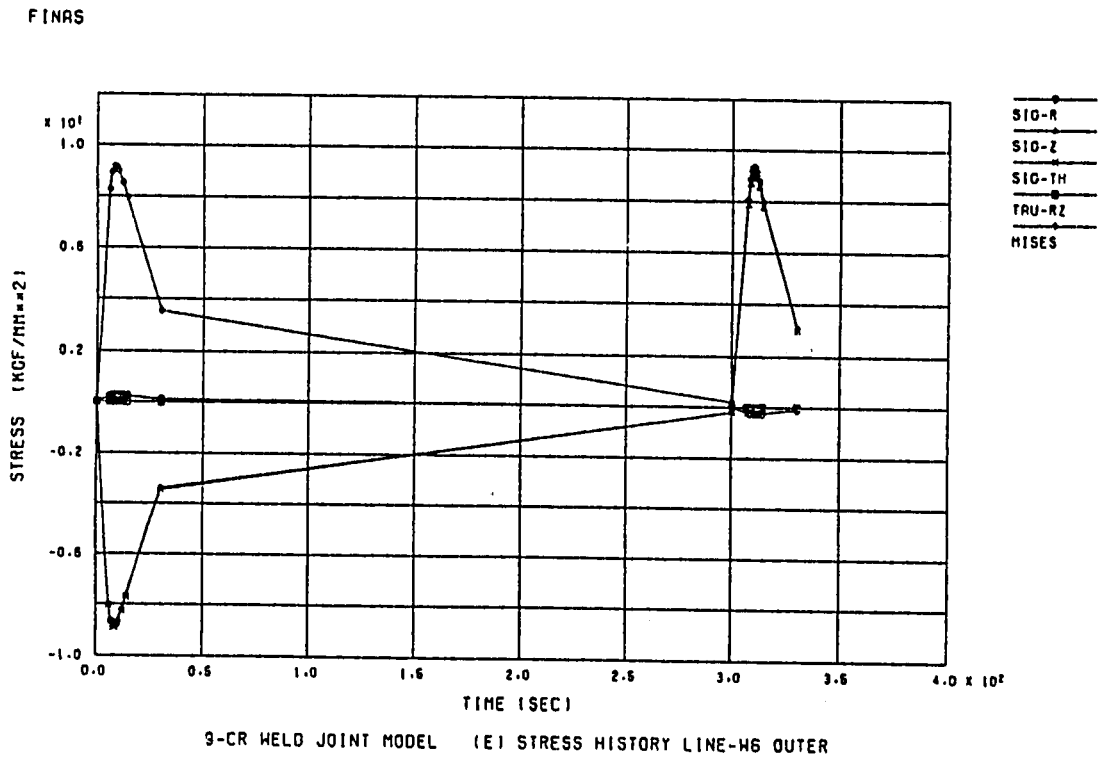
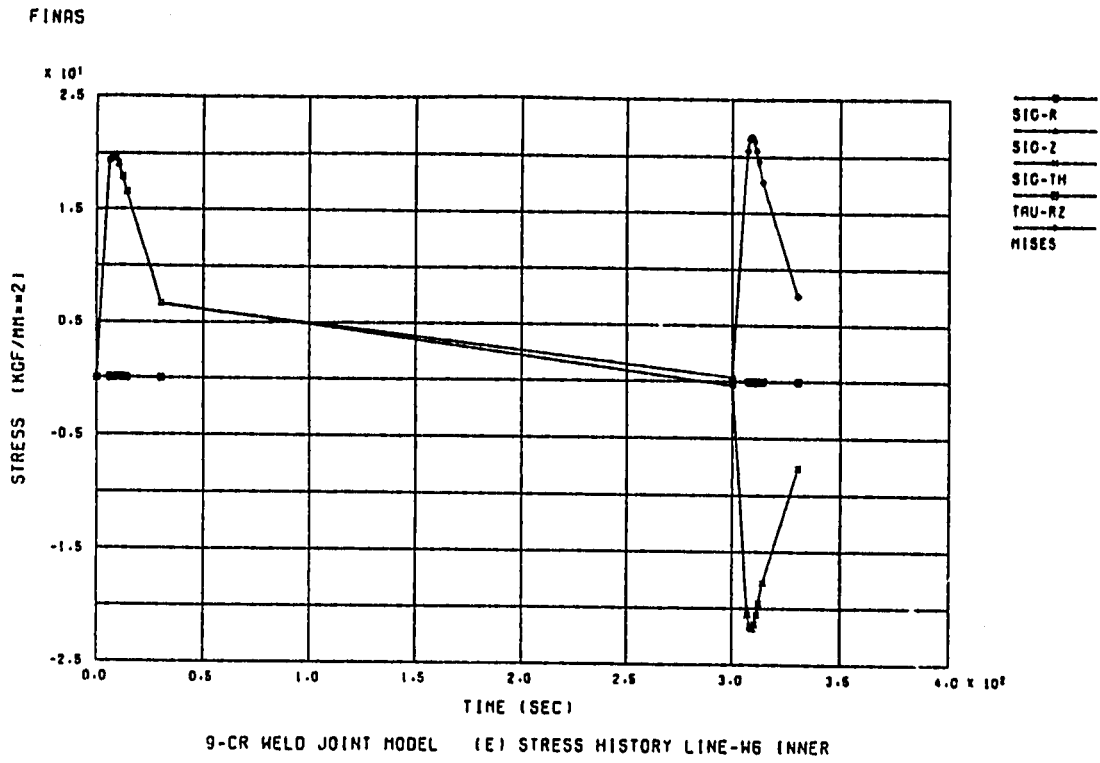


図3.24 溶接継手W6 (10mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)

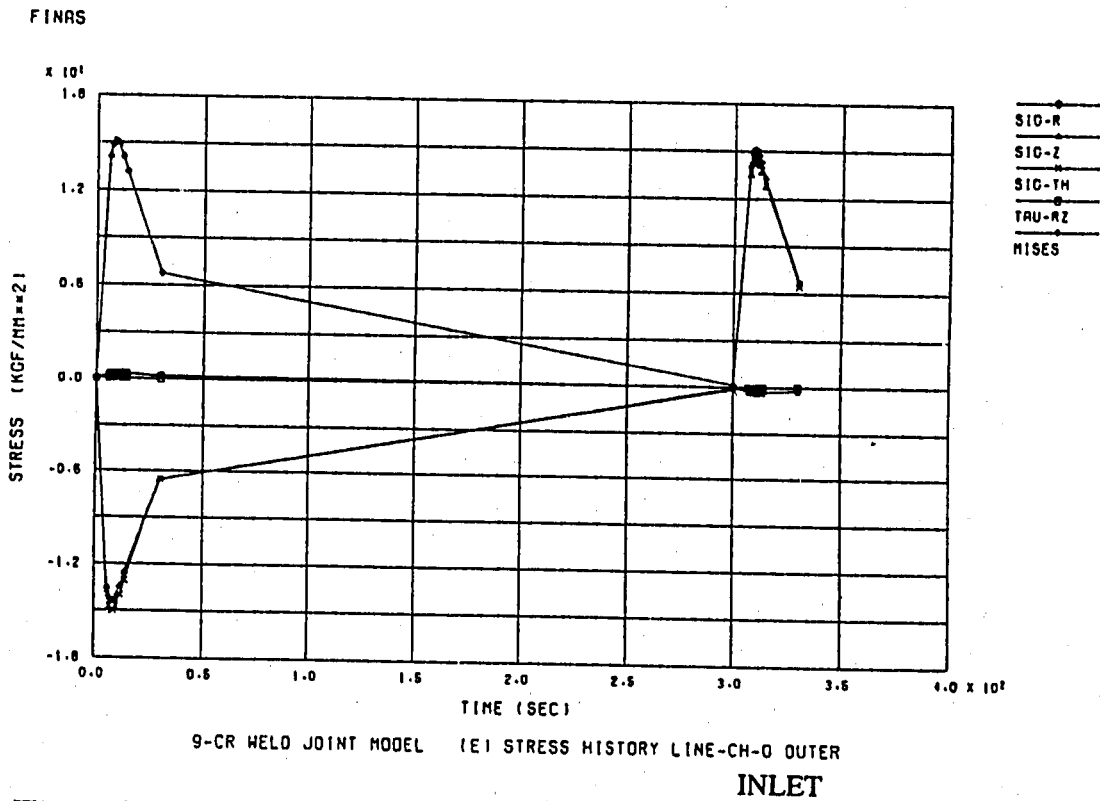
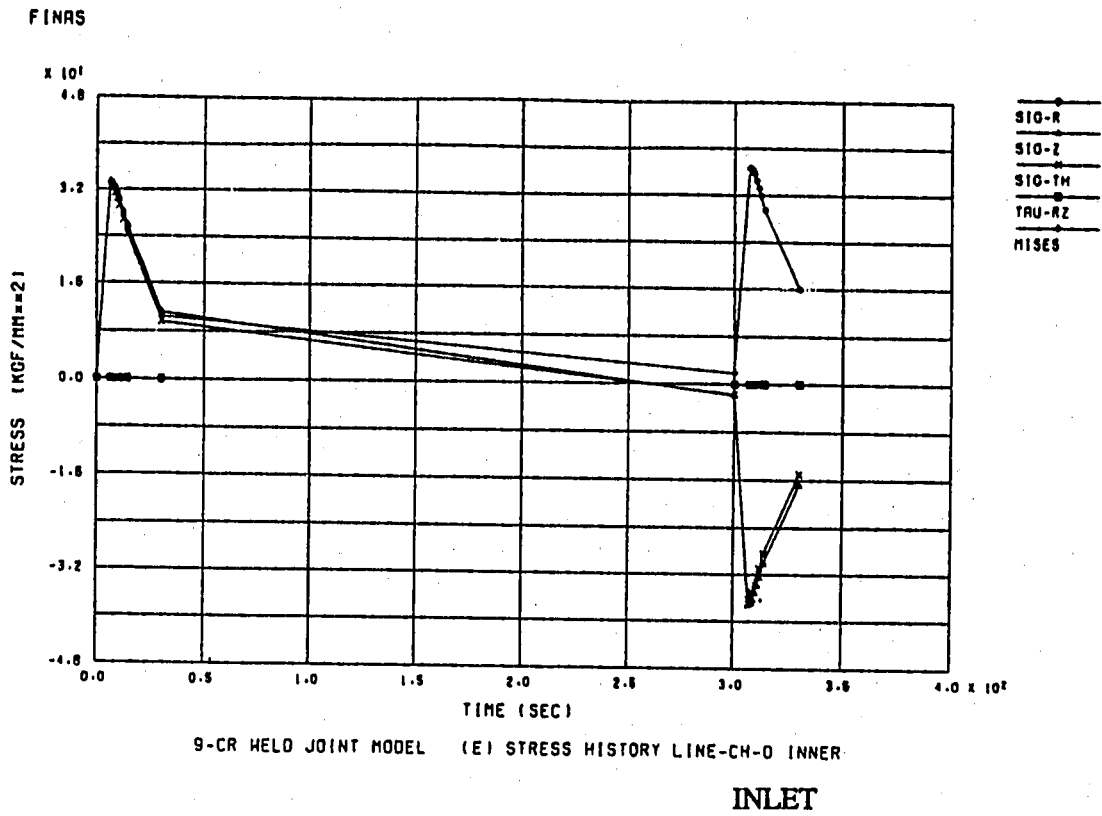


図3.25 供試体入口部 (CH-0 ; 1.3mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)

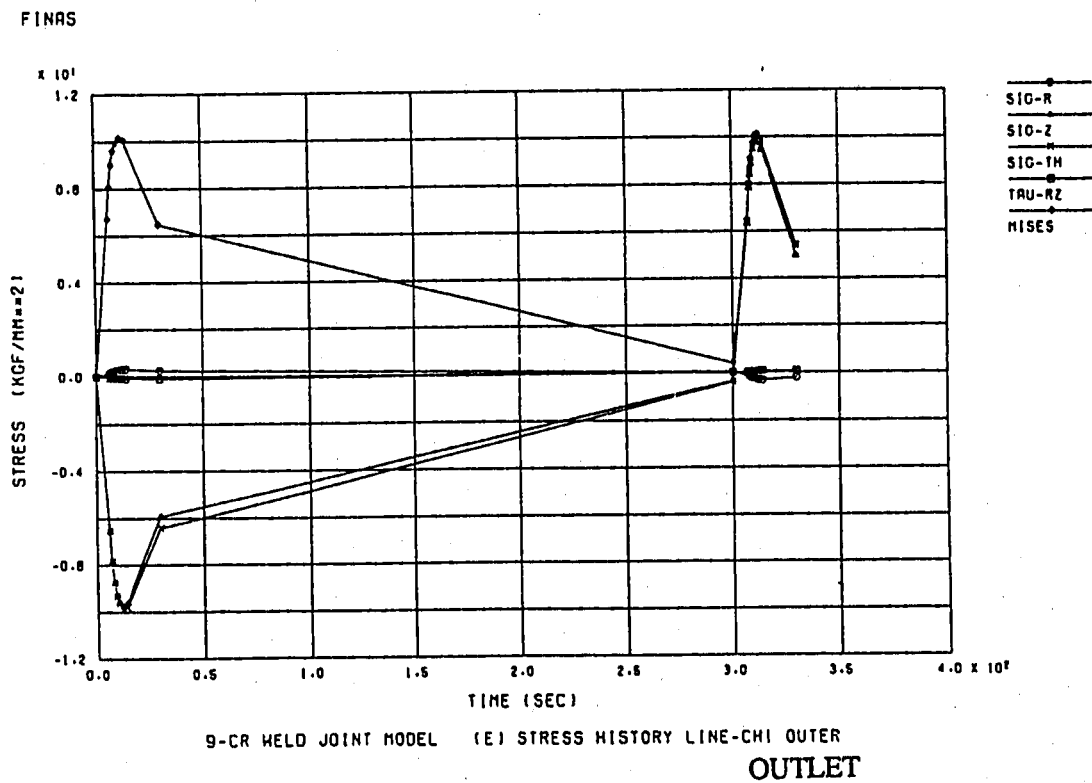
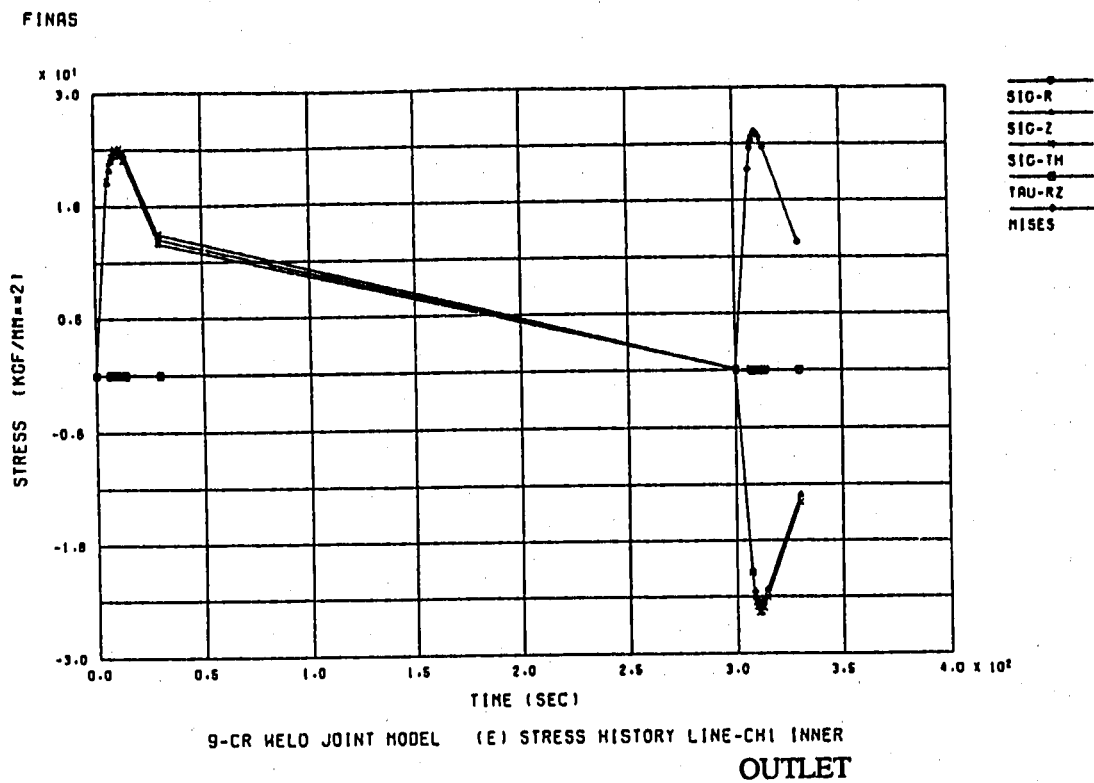


図3.26 供試体出口部 (CH-1 ; 13mm板厚部) での応力履歴 (内表面、外表面)

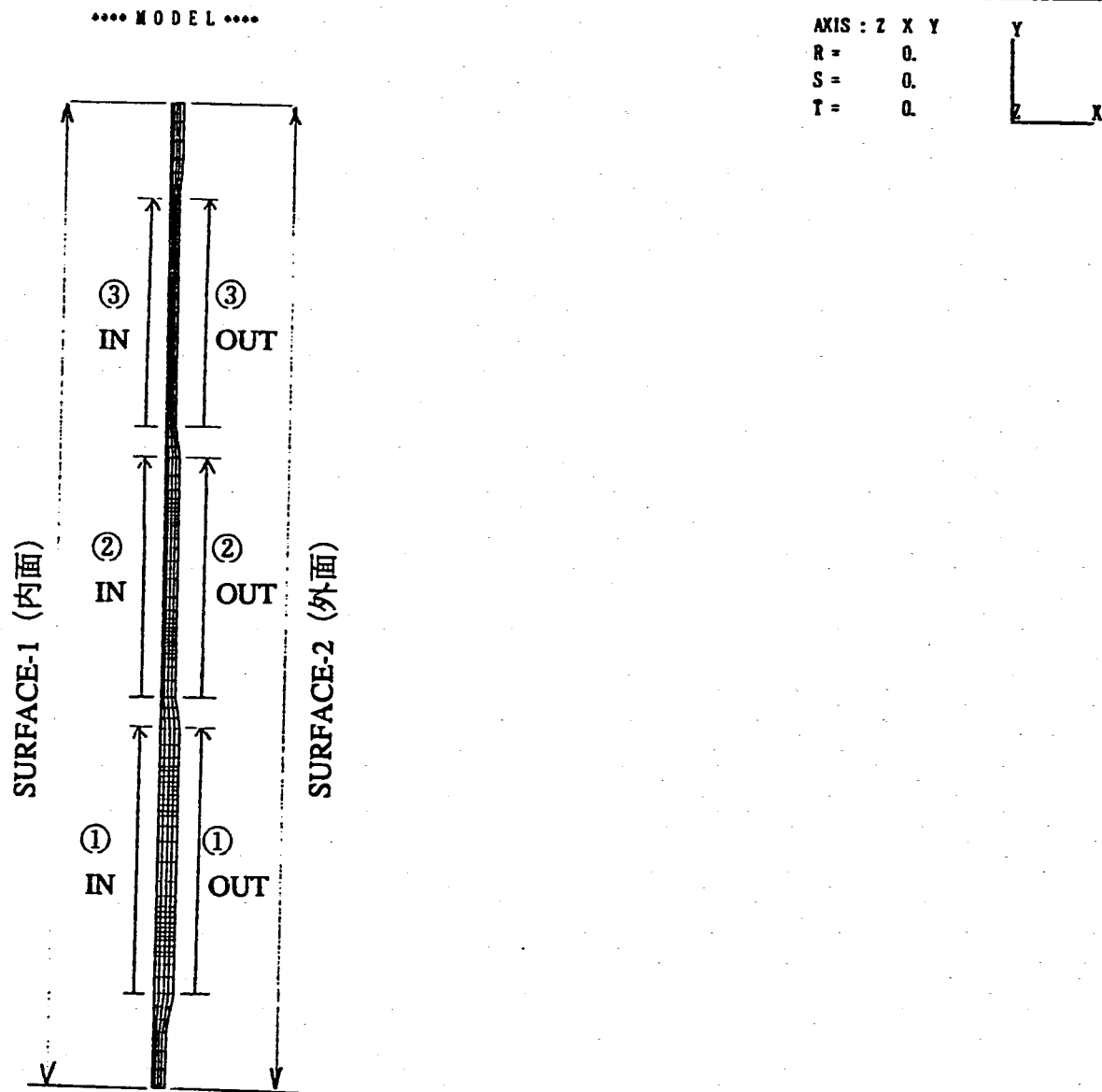


図3.27 応力、ひずみ、損傷値等の表示ライン

71.78
GEOM. SCALE

CRC/ATLAS

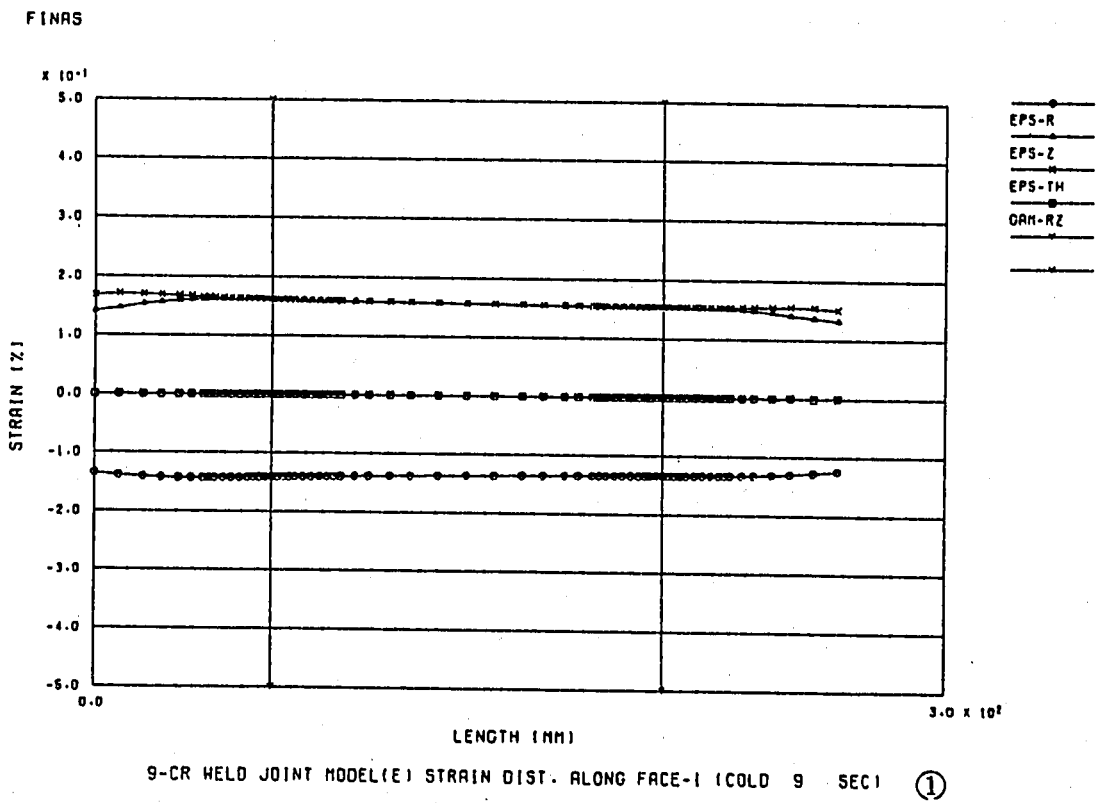
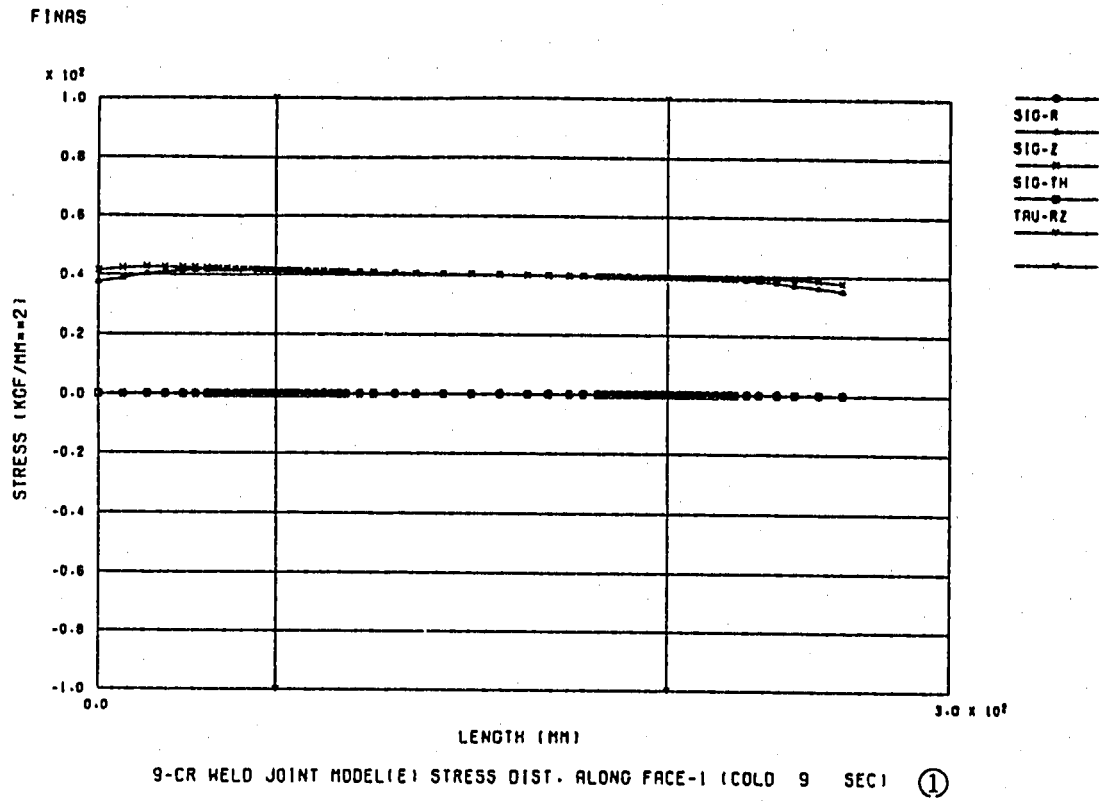


図3.28 2.0mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (コールド9秒後)

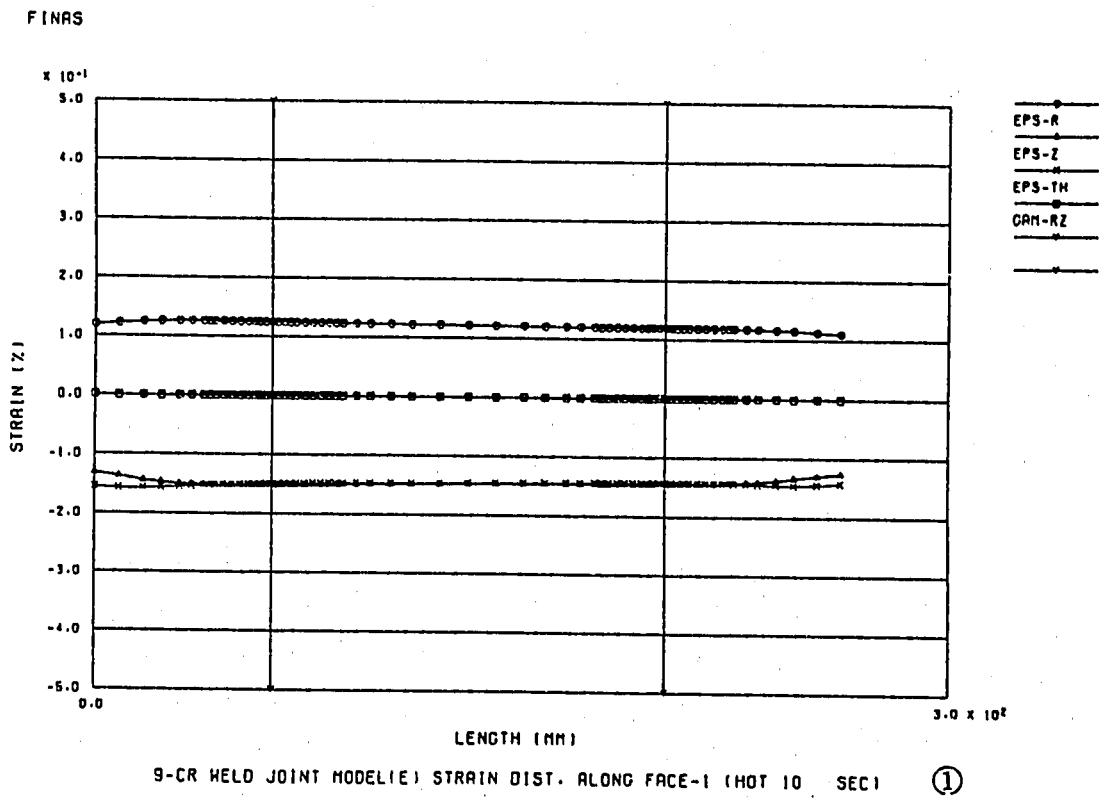
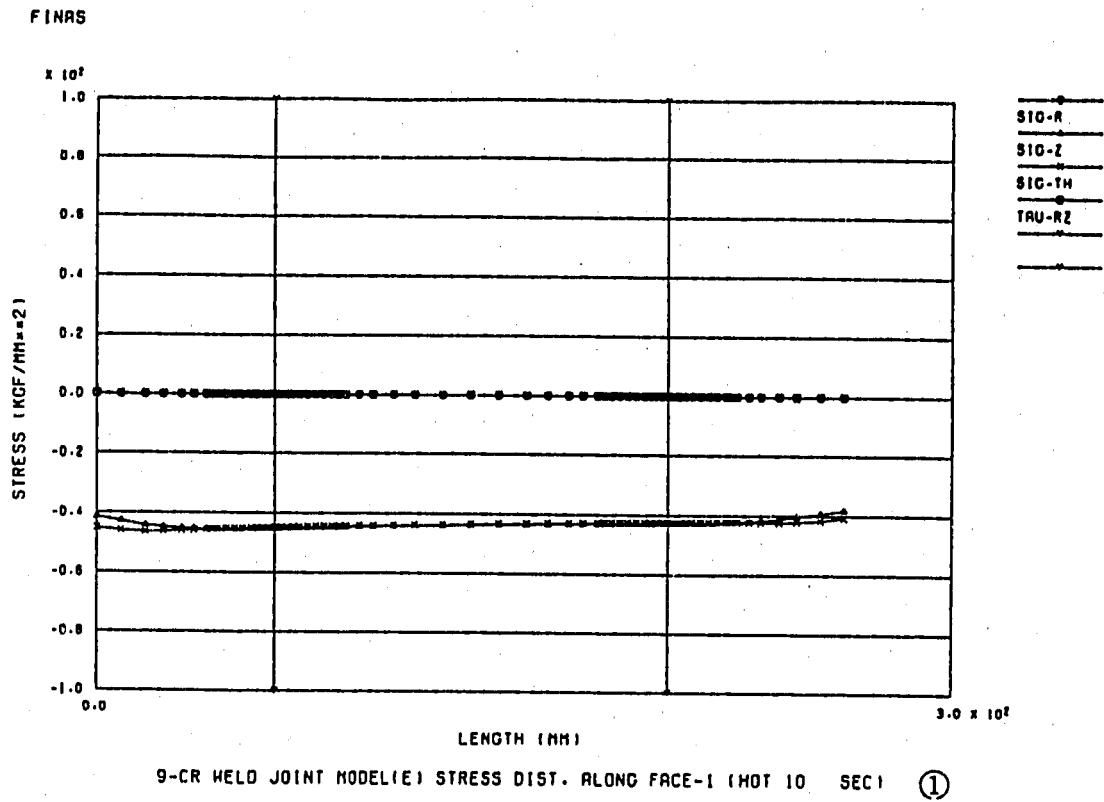


図3.29 20mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (ホット10秒後)

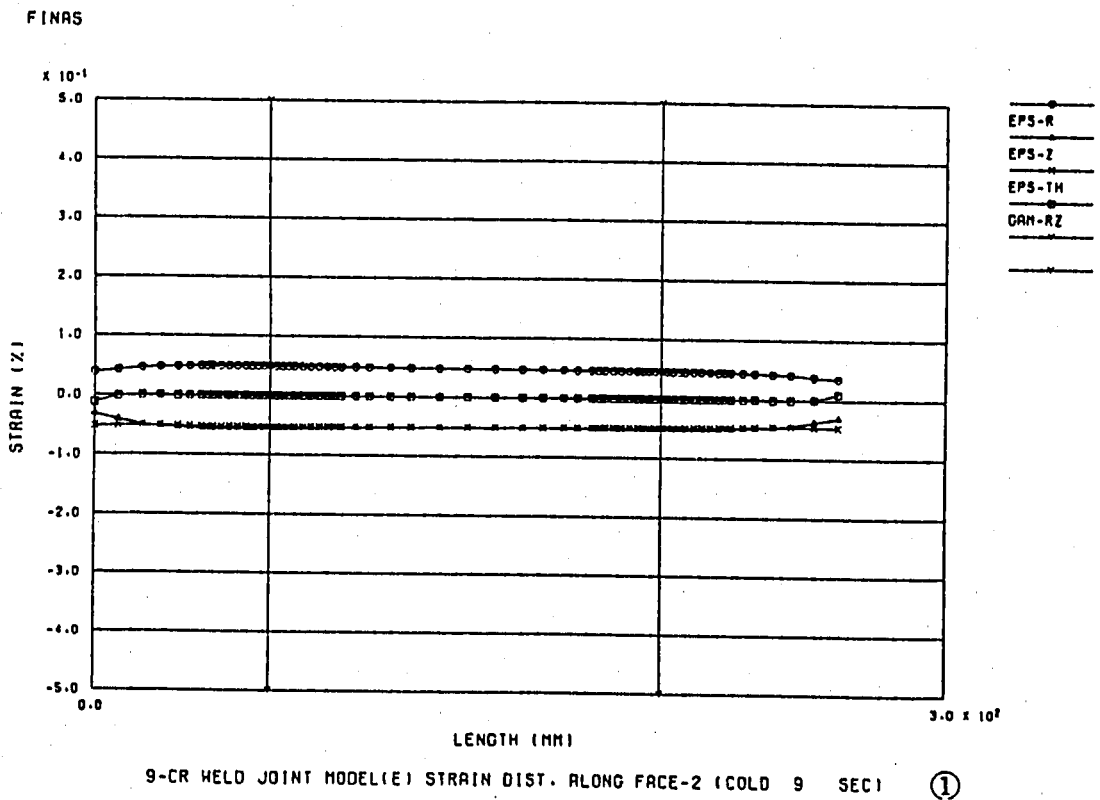
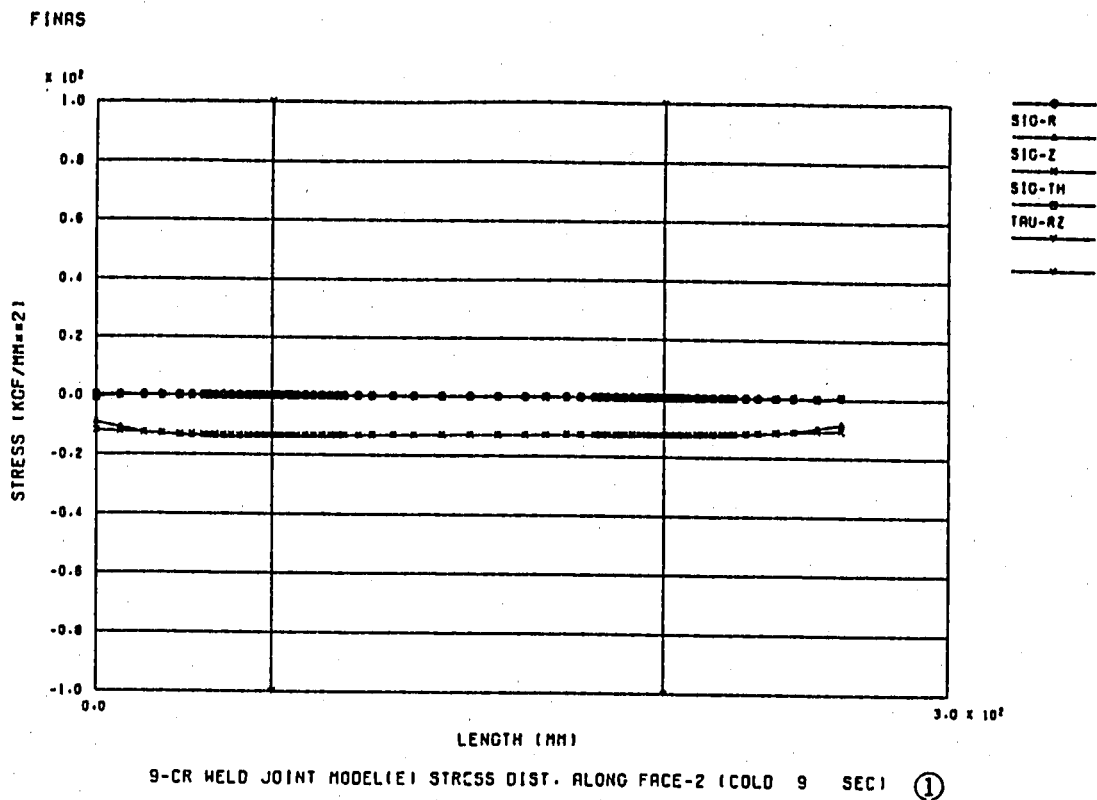


図3.30 20mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (コールド9秒後)

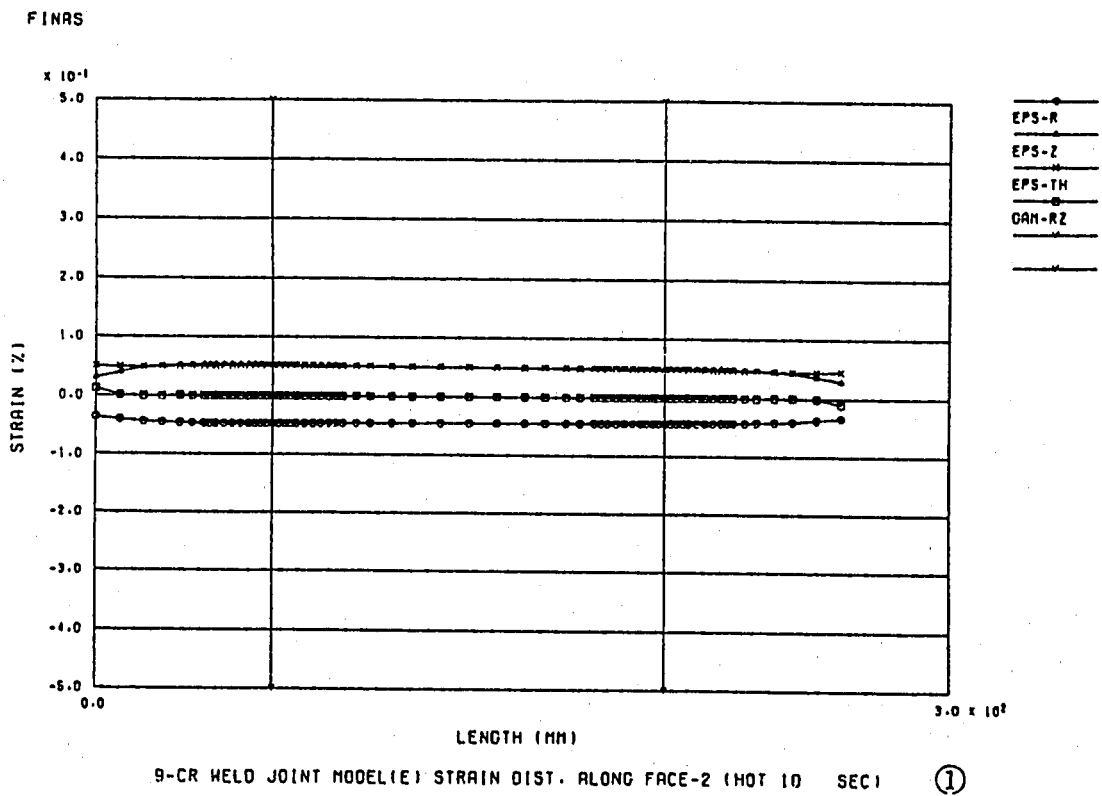
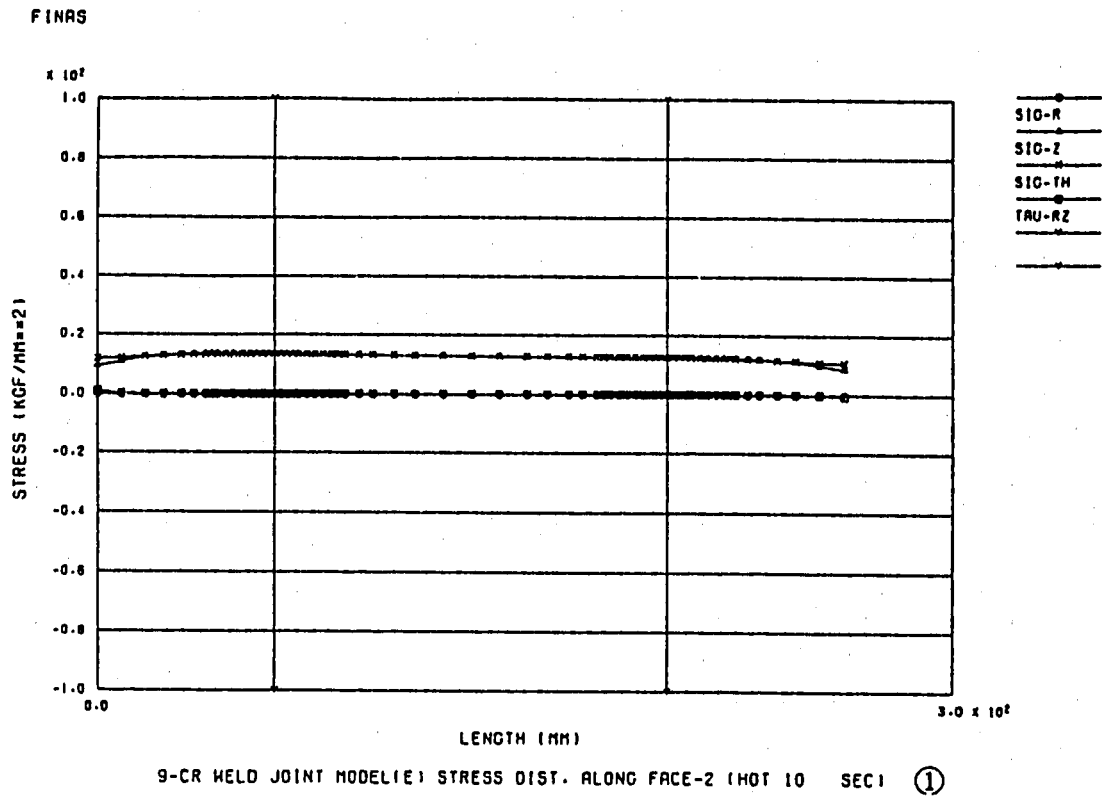


図3.31 20mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (ホット10秒後)

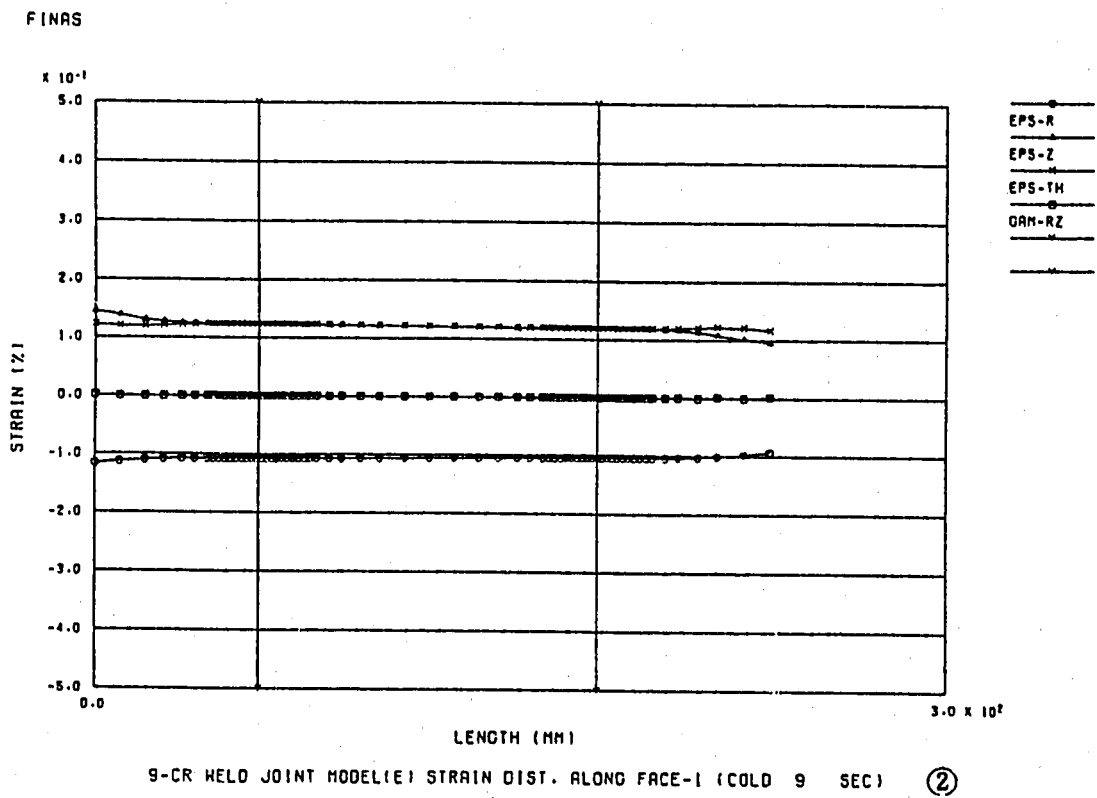
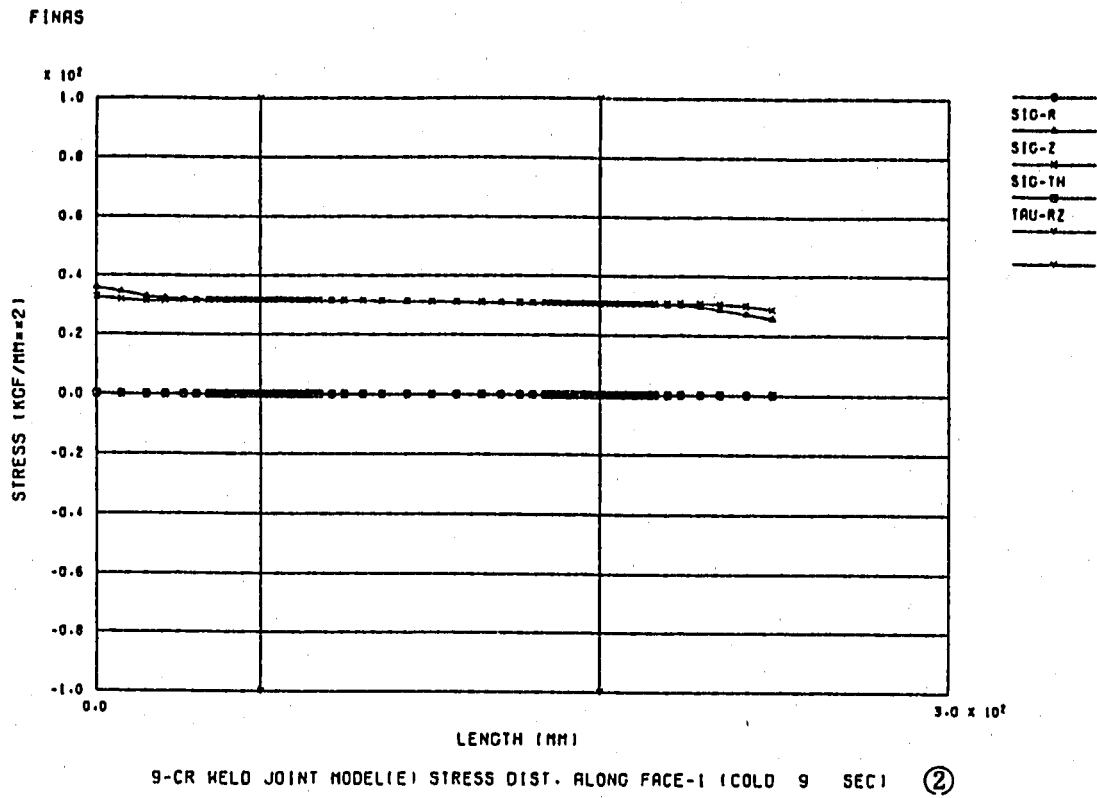


図3.32 1.5mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (コールド9秒後)

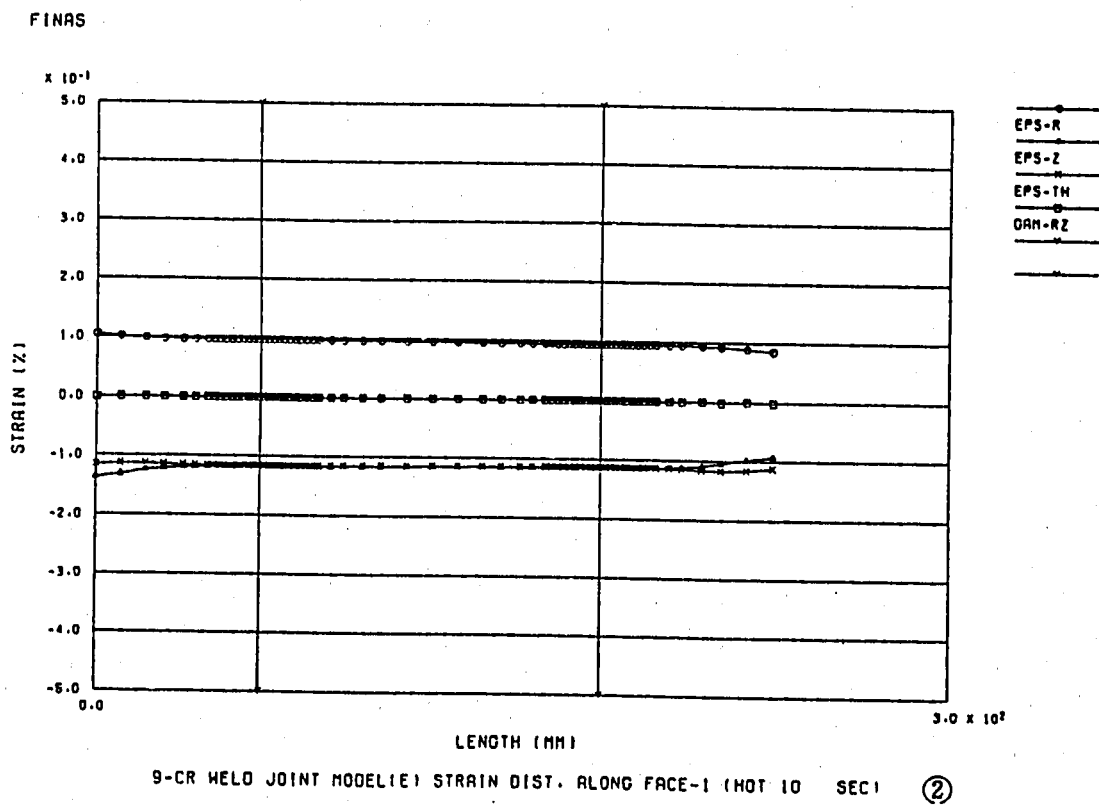
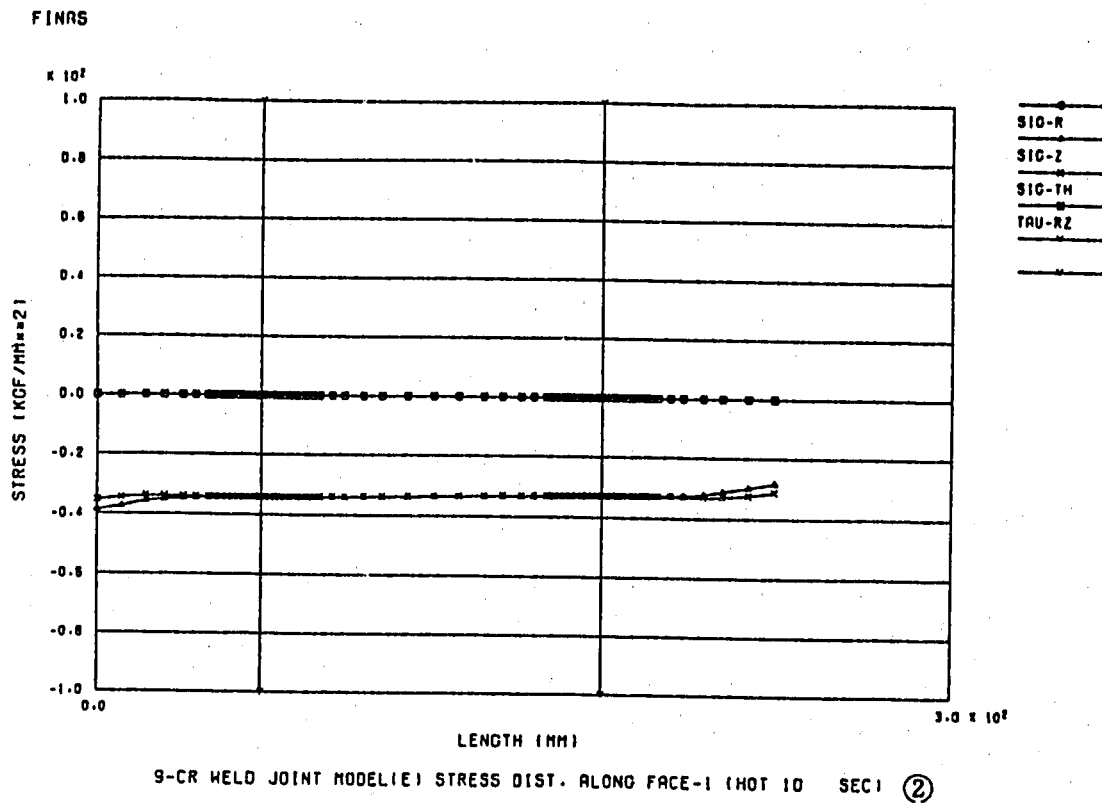


図3.33 15mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (ホット10秒後)

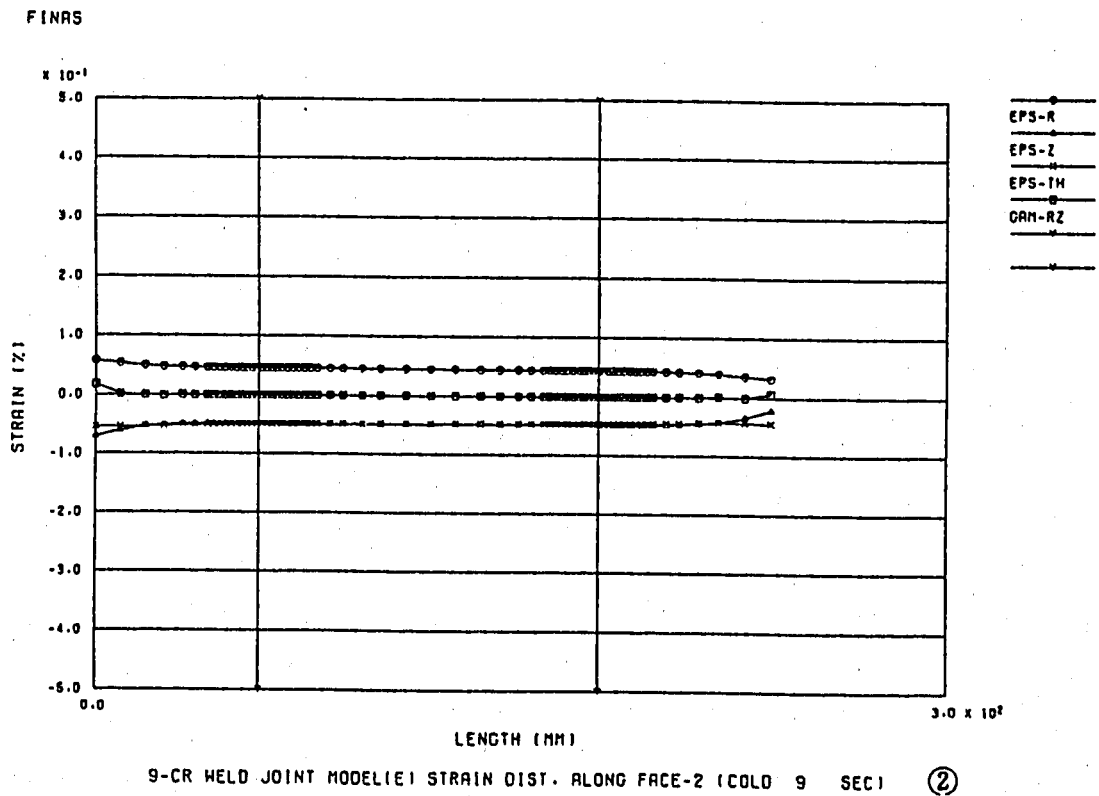
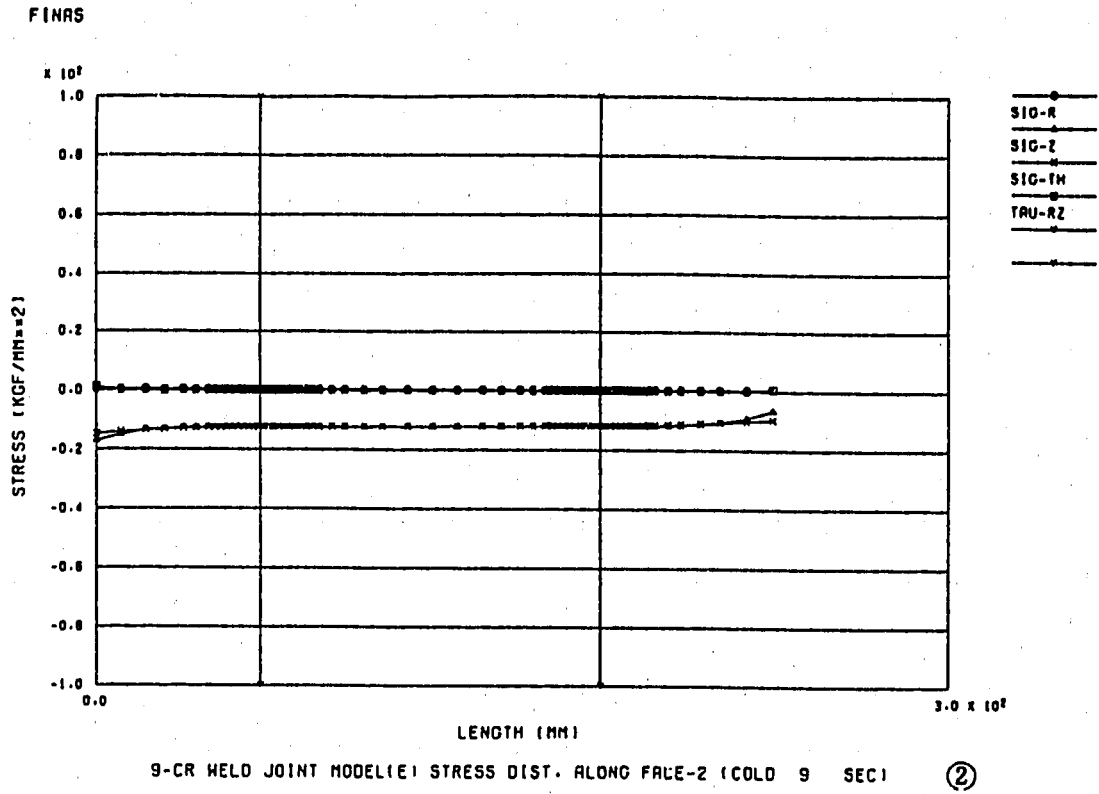


図3.34 1.5mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (コールド9秒後)

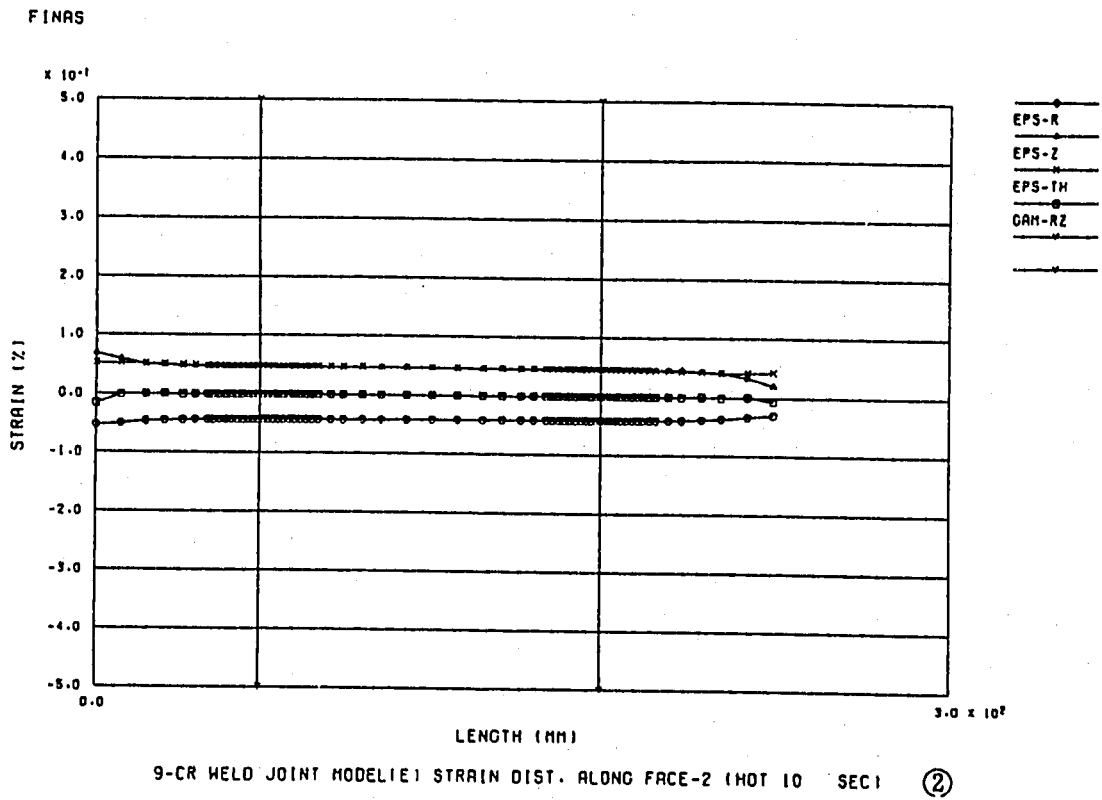
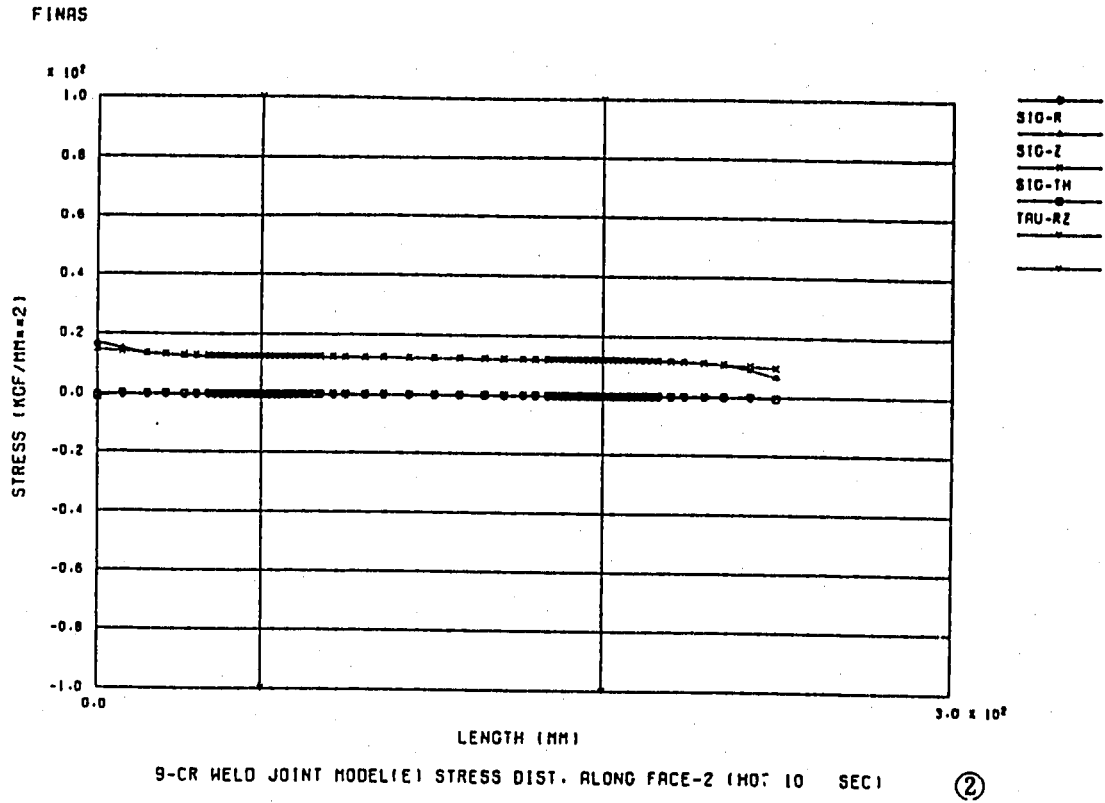


図3.35 15mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (ホット10秒後)

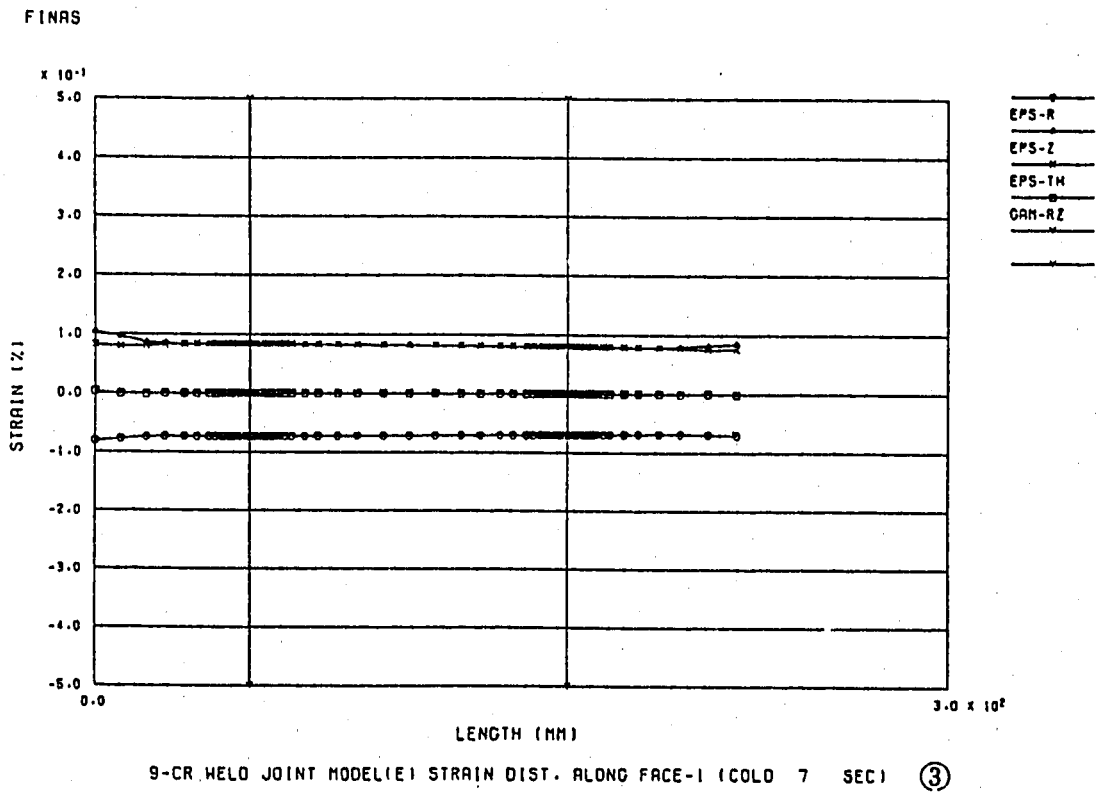
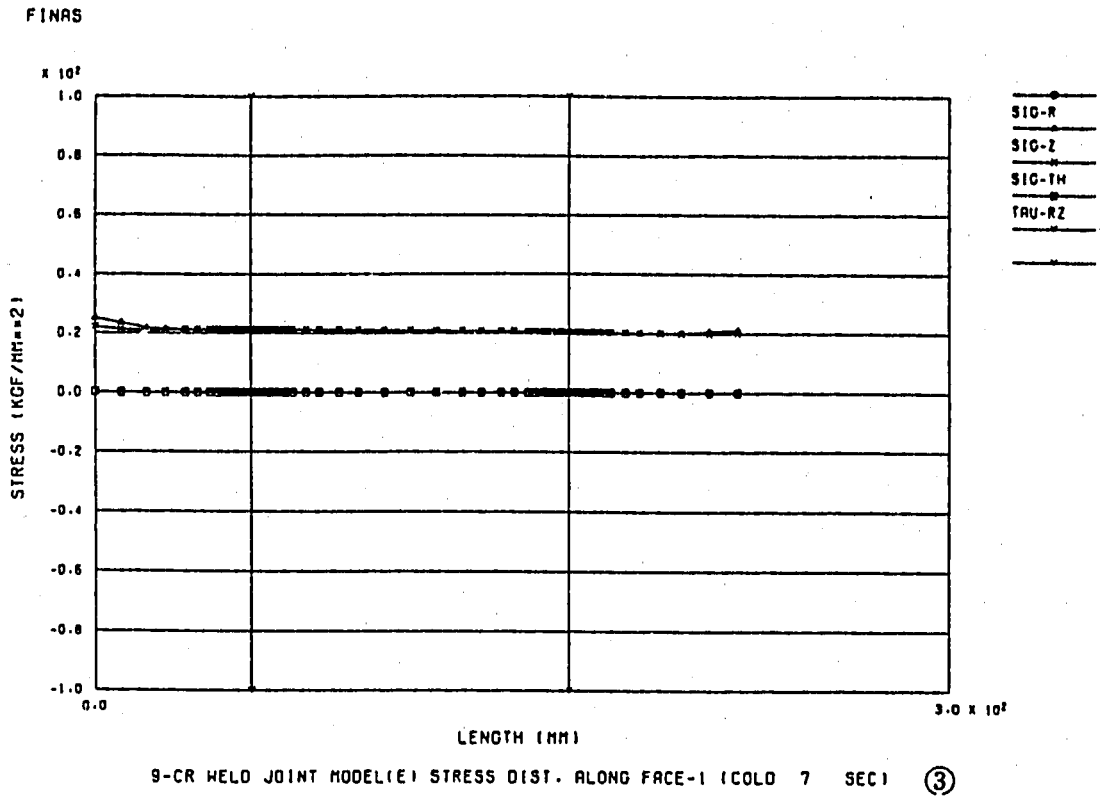


図3.36 10mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布（コールド7秒後）

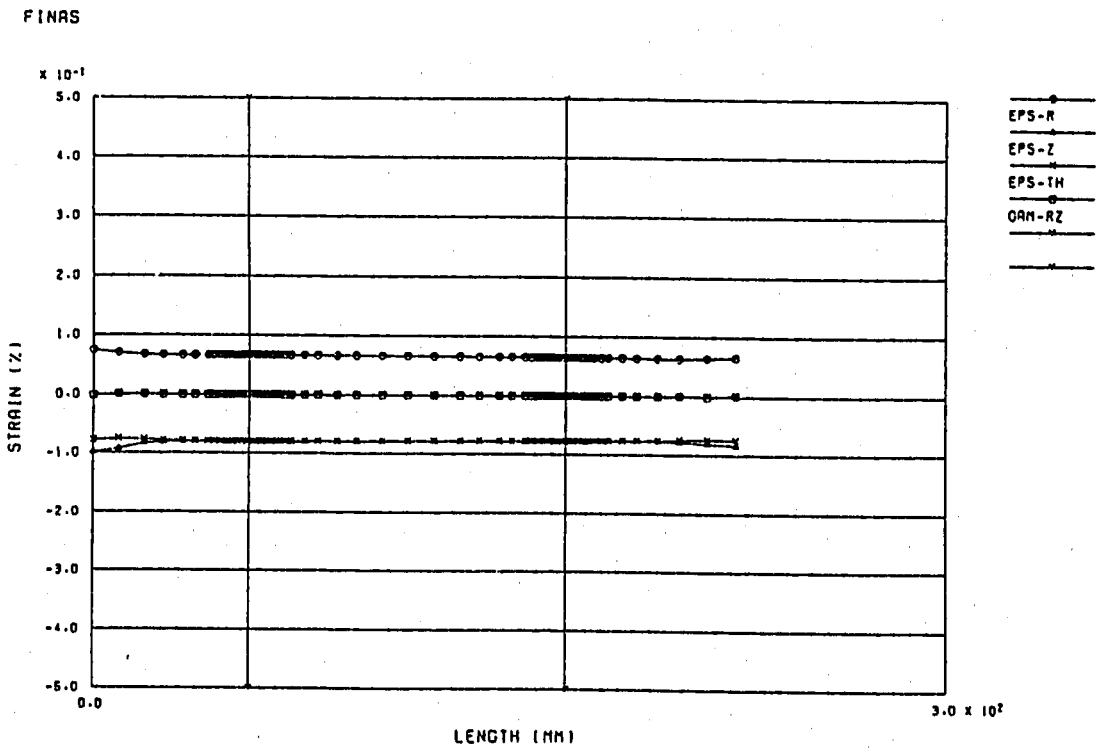
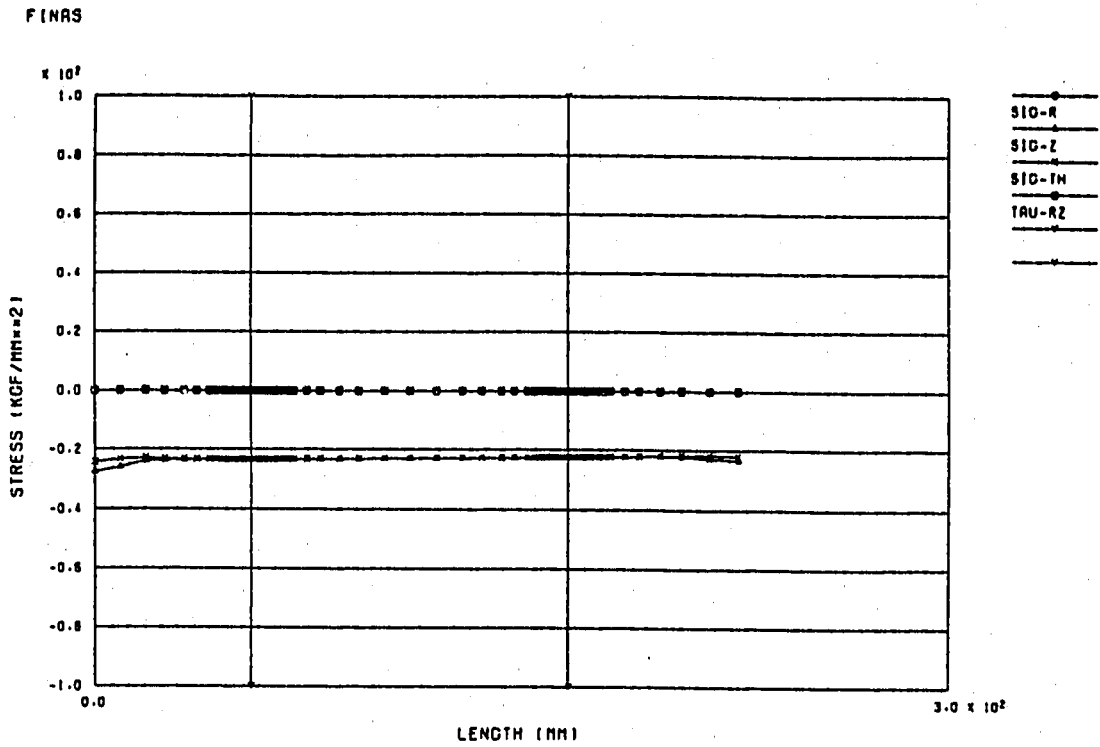


図3.37 10mm板厚部、内表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (ホット 8.5秒後)

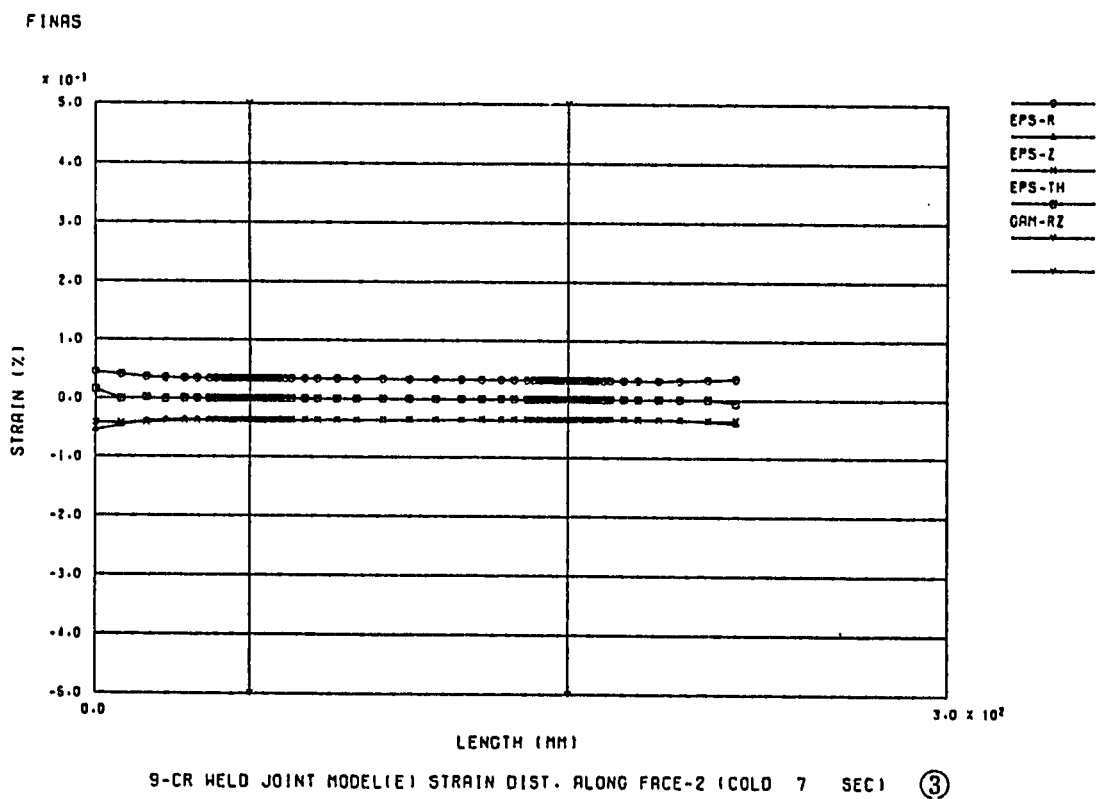
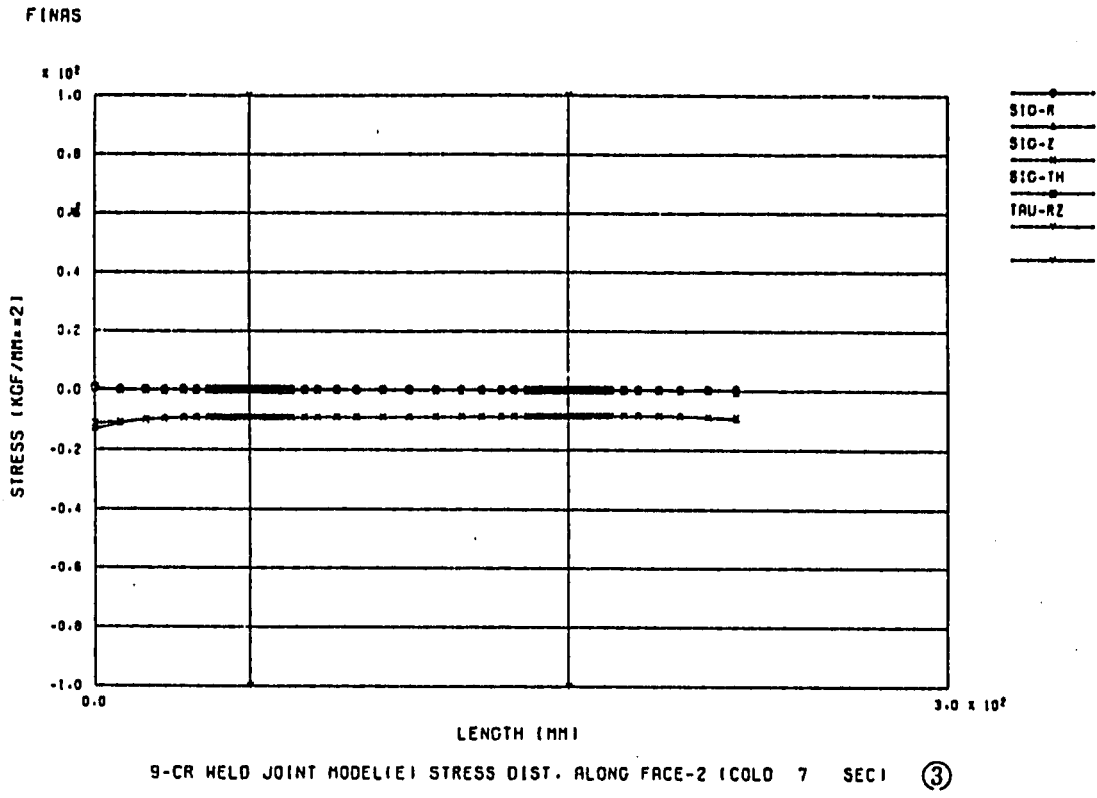


図3.38 10mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (コールド7秒後)

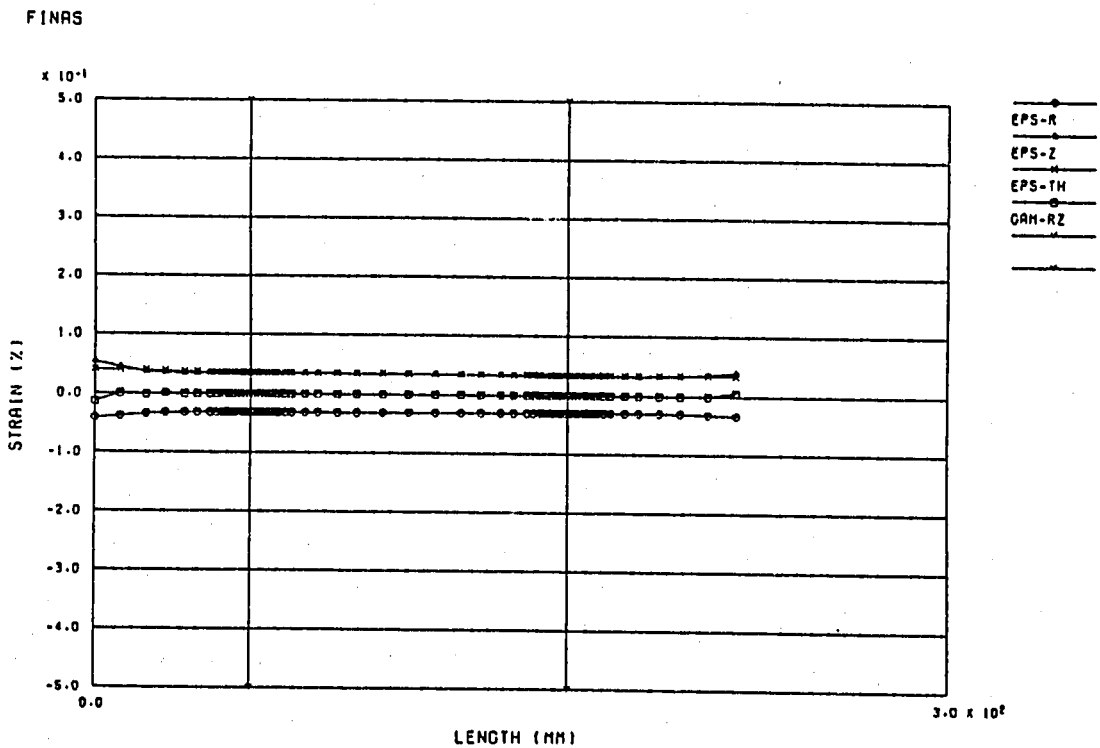
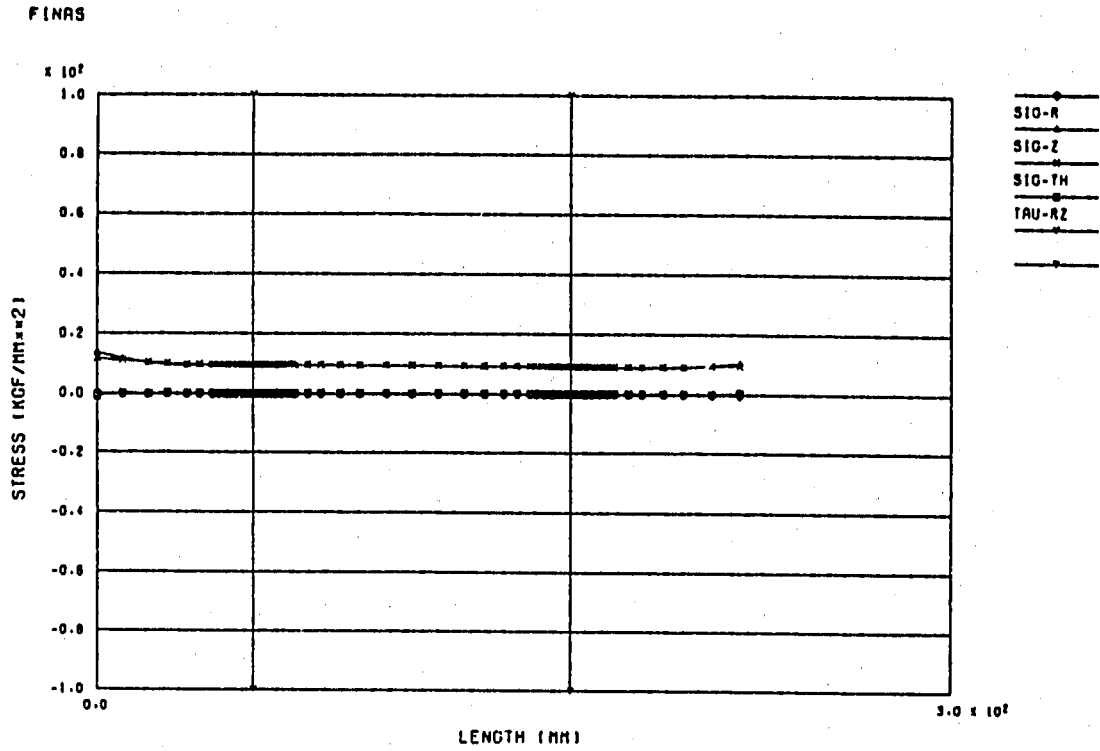


図3.39 10mm板厚部、外表面の供試体軸方向応力、ひずみの分布 (ホット 8.5秒後)

4. クリープ疲労損傷評価

4.1 損傷評価方法

損傷評価では、弾性熱応力解析によるひずみの算出結果に基づいて設計基準の有する安全係数を取り除いた正味ベースのクリープ疲労損傷計算を、オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）に対して開発した寿命予測法（TTSDS）^{(8) - (13)}を用いて実施した。ここで、損傷計算の材料定数には暫定的に材料室が定めた定数^{(4) (5)}を採用した。

4.1.1 損傷評価用ひずみ範囲算出法

図4.1にこれまでオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）に対して開発してきた寿命予測法（TTSDS）のうち弾性解析結果に基づく場合の評価の流れを示す。以下に本報で評価対象とした9Cr系鋼へ適用する場合の方法について述べる。

初めに、損傷評価用の全ひずみ範囲 ϵ_t の算出法については、SUS304の場合と同じであり、以下のとおりである。

- (1) 弾性解析結果より、評価点におけるミーゼスタイプの相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eq}$ が最大となる2時点（コールドトランジェント、ホットトランジェント）の組み合わせを選ぶ。

- (2) 公称ひずみ範囲 ϵ_n を下式により定める。

$$\epsilon_n = (1.5/(1 + \nu)) \cdot \Delta \epsilon_{eq} \quad \text{ここに、}\nu\text{: ポアソン比}$$

- (3) 公称ひずみ範囲 ϵ_n にひずみ集中係数 K_f を乗じて全ひずみ範囲 ϵ_t を定める。

$$\epsilon_t = K_f \cdot \epsilon_n$$

ここで、 K_f としてはSUS304の場合と同じ $K_f = 1.2$ を採用

4.1.2 疲労損傷計算法

- (1) 本鋼の疲労破損式に全ひずみ範囲 ϵ_t を代入し、破損繰返し数 N_f を計算する。
- (2) 試験繰返し数 N を破損繰返し数 N_f で除して疲労損傷値 D_f を計算する。

ここで、Mod. 9Cr-1Mo 鋼の疲労破損式については、現状材料室が暫定している表4.1に示したORNLの式を採用することとした。ただし、この式では破損繰返し数 N_f は全ひずみ範囲 ϵ_t のみの関数となっており、SUS304の場合のような温度あるいはひずみ速度等の影響は考慮されていない。従って、今後より詳細な疲労破損式が策定された段階で再評価する必要があると考える。

なお、第5章－考察－では、本鋼の疲労破損式に一時期採用されていた2-1/4Cr-1Mo 鋼の最適疲労破損式を採用する場合の評価について検討した。

4.1.3 クリープ損傷計算法

- (1) 本鋼の動的応力－ひずみ関係式に全ひずみ範囲 ϵ_t を代入し、得られた応力範囲の1/2を初期応力 σ_1 とする。

- (2) 本鋼のクリープひずみ式において $\alpha_c = 1$ 、初期応力 σ_1 として、ひずみ硬化則による単軸リラクゼーション解析を $t = 0 \sim t_H$ (t_H は試験熱過渡1サイクル当たりの高温側ナトリウム循環時間；すなわち 300秒)まで行う。解析では $q = 1$ として各時刻の $\sigma(t)$ を計算する。
- (3) 本鋼のクリープ破断式において、 $\alpha_R = 1$ として $\sigma(t)$ に対する破断時間 $t_R(t)$ を計算する。
- (4) 下式によりクリープ損傷値 D_c を計算する。

$$D_c = N \cdot \int_0^{t_H} (dt / (t_R(t)))$$

ここで、クリープ損傷計算に採用したMod. 9Cr-1Mo 鋼の各特性式は以下のとおりで、表4.2に動的応力-ひずみ関係式、表4.3にクリープひずみ式、表4.4にクリープ破断式を示した。

なお、本節では単軸リラクゼーション解析を行う際の初期応力の計算に動的応力-ひずみ関係式を採用することとしたが、第5章-考察-では弾塑性応力-ひずみ関係式を採用する場合の評価についても検討した。

4.2 損傷評価結果

表4.5から表4.7に板厚20mm, 15mm, 10mmの各表示ライン(①、②、③)の内表面(SURFACE-1)および外表面(SURFACE-2)に存在する全節点での極値2時点間の各座標成分ひずみ範囲とミーゼスタイプの相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eq}$ を示す。

これらの結果から、公称ひずみ範囲 ϵ_c および全ひずみ範囲 ϵ_t を計算した結果のうち損傷評価上重要な各部内表面側の分布について、図4.2から図4.4の上側に示す。

さらに、この全ひずみ範囲 ϵ_t から上述の手法を用いて計算した疲労損傷値 D_f 、クリープ損傷値 D_c 、両者の和として得られるクリープ疲労損傷値 D を図4.2から図4.4の下側に示す。なお、これらの損傷値は試験熱過渡サイクル数として現在計画している9,000回を仮定して計算したものである。

これらの図より、現在計画している試験熱過渡サイクル9,000回において、板厚20mm, 15mm, および10mmの一般円筒母材部でのクリープ疲労損傷値はそれぞれ、約1.1, 0.5, および0.15となり、クリープ疲労損傷値とき裂の発生、進展挙動の対応関係が従来検討してきたSUS304の場合と同等⁽¹⁰⁾であるとするならば、一般母材部において板厚20mmの厚肉部ではある程度のき裂進展が、板厚15mmの中間板厚部では初生段階のき裂の存在の可能性が、板厚10mmの薄肉部ではき裂発生にまでは至っていないことがそれぞれ予測される。

表 4.1 Mod. 9Cr-1Mo鋼の疲労破損式 (ORNLの式)

$$\Delta \epsilon_t = A N_f^{-a} + B N_f^{-b}$$

where

$$A = 0.650, \quad a = 0.0595, \quad B = 52.101, \quad b = 0.598, \quad \text{for } N_f \leq 74652$$

$$A = 0.650, \quad a = 0.0595, \quad B = 0.236, \quad b = 0.117, \quad \text{for } N_f > 74652$$

表4.2 Mod. 9Cr-1Mo 鋼の動的応力-ひずみ関係式

PNC SN9410 90-171より

Cyclic Stress-Strain Property of Mod. 9Cr-1Mo Steel

<p>⊙ $\Delta \sigma / 2 > \sigma_p$</p> $\log_{10} (\Delta \sigma - 2 \sigma_p) = A_0 + A_1 \cdot \log_{10} (\Delta \epsilon_t - \Delta \sigma / E)$ <p>⊙ $\Delta \sigma / 2 \leq \sigma_p$</p> $\Delta \sigma = E \cdot \Delta \epsilon_t$ <p>T : Temp. (°C) $375 \leq T \leq 650$</p> <p>$\Delta \sigma$: Stress range (kg/mm²)</p> <p>$\Delta \epsilon_t$: Total strain range (mm/mm)</p> <p>E : Elastic modulus (kg/mm²)</p> <p>σ_p : Proportional limit (kg/mm²)</p>	
A ₀	$98.73990 - 0.52935 \times T + 0.96421 \times 10^{-3} \times T^2 - 0.585000 \times 10^{-6} \times T^3$
A ₁	$0.49895 \times 10^2 - 0.27257 \times T + 0.50036 \times 10^{-3} \times T^2 - 0.30647 \times 10^{-6} \times T^3$
E	$375 \leq T \leq 400 \quad E = 2.040 \times 10^4 - 8.0 \times T$ $400 \leq T \leq 650 \quad E = 2.126 \times 10^4 - 10.125 \times T$
σ_p	$54.6370 - 7.06234 \times 10^{-2} \times T + 2.56775 \times 10^{-4} \times T^2 - 3.52683 \times 10^{-7} \times T^3$ $- (83.0 - 8.75 \times 10^{-2} \times T) \times (0.002)^{0.417 - 5.125 \times 10^{-4} \times T}$

表4.3 Mod. 9Cr-1Mo 鋼のクリープひずみ式

PNC SN9410 90-171より

Creep Strain Equation of Mod-9Cr-1Mo Steel

$\epsilon_c = C_1 (1 - \exp(-r_1 t)) + C_2 (1 - \exp(-r_2 t)) + \epsilon_n t$			
<p>T : Temp. (°C) (375 ≤ T ≤ 600)</p> <p>σ : Stress (kg/mm²) 1.4 ≤ σ</p> <p>t : Time (hr)</p> <p>ε_n : Steady creep rate (mm/mm/hr)</p>			
t ₂	$\log_{10}(\alpha_c t_2) = C + A_0 / (T + 273.15) + A_1 / (T + 273.15) \times \log_{10} \sigma + A_2 / (T + 273.15) \times (\log_{10} \sigma)^2$		
ε _n	$0.77322 \times \exp[-16956.0 / (8.31 (T + 273.15))] \times t_2^{-1.0773}$		
C ₁	0.30546 · ε _n ^{0.55235} / (r ₁ / 7.0)	C ₂	3.5 × 0.26505 · ε _n ^{0.31537} / r ₂
r ₁	7.0 × 45.2986 · t ₂ ^{-0.55158}	r ₂	14.3245 · t ₂ ^{-0.53378}

表4.4 Mod. 9Cr-1Mo 鋼のクリープ破断式

PNC SN9410 90-171より

Creep Rupture Equation of Mod. 9Cr-1Mo Steel

$$(T + 273.15) (\log_{10} (\alpha_R t_R) + C)$$

$$= A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

T : Temp. (℃) 375 ≤ T ≤ 700

σ : Stress (kg/mm²) 3.5 ≤ σ

t_R : Rupture time (hr)

C	29.11460
A ₀	31808.82
A ₁	3055.520
A ₂	-5148.248

α _R	ave. : 1
	SR : 10

表4.6 15mm板厚部 (ライン-2) 内外面でのひずみ範囲

9-CR WELDED JOINT MODEL LINE-2				SURFACE-1 : 内面				SURFACE-2 : 外面				
STRAIN RANGE (TOTAL)												
LINE	MISSES	TIME	SURFACE - 1				SURFACE - 2					
			EPS-R	EPS-Z	EPS-TH	GAM-RZ	EPS-R	EPS-Z	EPS-TH	GAM-RZ		
M301	0.2707	COLD	0.2206	-0.2806	-0.2373	-0.0023	0.1878	COLD	0.1108	0.1388	0.1082	-0.0243
M302	0.3107	COLD	0.2140	-0.2689	-0.2332	0.0006	0.1814	COLD	-0.1013	0.1170	0.1040	-0.0019
M303	0.2820	COLD	0.2088	-0.2624	-0.2303	0.0007	0.1711	COLD	-0.0912	0.0982	0.1007	0.0003
M304	0.2993	COLD	0.2086	-0.2681	-0.2359	0.0003	0.1740	COLD	-0.0887	0.0986	0.0988	0.0014
M305	0.2972	COLD	0.2052	-0.2439	-0.2378	-0.0002	0.1714	COLD	-0.0872	0.0926	0.0971	-0.0009
M306	0.2970	COLD	0.2050	-0.2428	-0.2358	-0.0001	0.1703	COLD	-0.0862	0.0922	0.0961	-0.0004
M307	0.2967	COLD	0.2048	-0.2412	-0.2392	0.0000	0.1692	COLD	-0.0854	0.0918	0.0932	0.0002
M308	0.2966	COLD	0.2047	-0.2408	-0.2398	0.0000	0.1689	COLD	-0.0853	0.0918	0.0948	0.0001
M309	0.2966	COLD	0.2047	-0.2408	-0.2397	0.0000	0.1687	COLD	-0.0851	0.0918	0.0944	0.0000
M310	0.2966	COLD	0.2046	-0.2403	-0.2399	0.0000	0.1686	COLD	-0.0850	0.0918	0.0941	0.0000
M311	0.2964	COLD	0.2046	-0.2401	-0.2400	0.0000	0.1683	COLD	-0.0848	0.0918	0.0938	0.0000
M312	0.2964	COLD	0.2046	-0.2399	-0.2401	0.0000	0.1683	COLD	-0.0847	0.0918	0.0938	0.0000
M312	0.2962	COLD	0.2046	-0.2398	-0.2401	0.0000	0.1681	COLD	-0.0847	0.0918	0.0933	0.0000
M314	0.2963	COLD	0.2046	-0.2397	-0.2401	0.0000	0.1680	COLD	-0.0846	0.0917	0.0931	0.0000
M316	0.2962	COLD	0.2044	-0.2396	-0.2401	0.0000	0.1679	COLD	-0.0846	0.0917	0.0929	0.0000
M317	0.2961	COLD	0.2044	-0.2396	-0.2400	0.0000	0.1678	COLD	-0.0845	0.0918	0.0928	0.0000
M318	0.2960	COLD	0.2044	-0.2394	-0.2400	0.0000	0.1678	COLD	-0.0845	0.0918	0.0946	0.0000
M319	0.2960	COLD	0.2043	-0.2394	-0.2399	0.0000	0.1676	COLD	-0.0842	0.0918	0.0944	0.0000
M320	0.2959	COLD	0.2043	-0.2393	-0.2398	0.0000	0.1676	COLD	-0.0842	0.0918	0.0943	0.0000
M321	0.2958	COLD	0.2042	-0.2393	-0.2397	0.0000	0.1675	COLD	-0.0841	0.0919	0.0942	0.0000
M322	0.2957	COLD	0.2041	-0.2393	-0.2398	0.0000	0.1674	COLD	-0.0841	0.0918	0.0941	0.0000
M323	0.2956	COLD	0.2041	-0.2392	-0.2398	0.0001	0.1674	COLD	-0.0841	0.0918	0.0940	0.0000
M324	0.2956	COLD	0.2040	-0.2392	-0.2393	0.0000	0.1673	COLD	-0.0840	0.0918	0.0939	0.0000
M326	0.2954	COLD	0.2039	-0.2392	-0.2391	0.0000	0.1673	COLD	-0.0840	0.0918	0.0938	0.0000
M326	0.2952	COLD	0.2038	-0.2391	-0.2390	0.0000	0.1672	COLD	-0.0839	0.0918	0.0937	0.0000
M327	0.2950	COLD	0.2036	-0.2390	-0.2387	0.0000	0.1672	COLD	-0.0839	0.0918	0.0936	0.0000
M328	0.2948	COLD	0.2034	-0.2388	-0.2384	0.0000	0.1671	COLD	-0.0837	0.0919	0.0934	0.0000
M329	0.2942	COLD	0.2031	-0.2388	-0.2379	0.0000	0.1670	COLD	-0.0836	0.0918	0.0933	0.0000
M330	0.2936	COLD	0.2028	-0.2380	-0.2373	0.0000	0.1669	COLD	-0.0834	0.0918	0.0930	0.0000
M331	0.2933	COLD	0.2022	-0.2378	-0.2367	0.0000	0.1667	COLD	-0.0831	0.0919	0.0927	0.0000
M332	0.2920	COLD	0.2016	-0.2368	-0.2369	0.0000	0.1666	COLD	-0.0827	0.0918	0.0946	0.0000
M333	0.2911	COLD	0.2009	-0.2361	-0.2362	0.0000	0.1665	COLD	-0.0823	0.0918	0.0942	0.0000
M334	0.2902	COLD	0.2004	-0.2354	-0.2348	0.0000	0.1664	COLD	-0.0819	0.0918	0.0939	0.0000
M336	0.2893	COLD	0.1997	-0.2347	-0.2337	0.0000	0.1663	COLD	-0.0818	0.0918	0.0938	0.0000
M336	0.2887	COLD	0.1992	-0.2343	-0.2332	0.0000	0.1662	COLD	-0.0818	0.0918	0.0933	0.0000
M337	0.2881	COLD	0.1988	-0.2338	-0.2328	0.0000	0.1661	COLD	-0.0817	0.0918	0.0930	0.0000
M338	0.2877	COLD	0.1986	-0.2337	-0.2322	0.0000	0.1660	COLD	-0.0816	0.0918	0.0928	0.0000
M339	0.2874	COLD	0.1984	-0.2336	-0.2319	0.0000	0.1659	COLD	-0.0816	0.0918	0.0927	0.0000
M340	0.2872	COLD	0.1983	-0.2334	-0.2317	0.0000	0.1658	COLD	-0.0816	0.0918	0.0926	0.0000
M341	0.2871	COLD	0.1982	-0.2334	-0.2316	0.0000	0.1658	COLD	-0.0817	0.0918	0.0925	0.0000
M342	0.2870	COLD	0.1981	-0.2333	-0.2316	0.0000	0.1657	COLD	-0.0817	0.0918	0.0924	0.0000
M343	0.2868	COLD	0.1980	-0.2333	-0.2313	0.0000	0.1656	COLD	-0.0816	0.0918	0.0923	0.0000
M344	0.2867	COLD	0.1979	-0.2332	-0.2311	0.0000	0.1655	COLD	-0.0816	0.0918	0.0922	0.0000
M345	0.2866	COLD	0.1978	-0.2332	-0.2310	0.0000	0.1654	COLD	-0.0816	0.0918	0.0921	0.0000
M346	0.2866	COLD	0.1978	-0.2332	-0.2309	0.0000	0.1653	COLD	-0.0816	0.0918	0.0920	0.0000
M347	0.2865	COLD	0.1978	-0.2331	-0.2309	0.0000	0.1652	COLD	-0.0816	0.0918	0.0919	0.0000
M348	0.2865	COLD	0.1977	-0.2331	-0.2308	0.0000	0.1651	COLD	-0.0816	0.0918	0.0918	0.0000
M349	0.2864	COLD	0.1977	-0.2331	-0.2308	0.0000	0.1650	COLD	-0.0816	0.0918	0.0917	0.0000
M350	0.2864	COLD	0.1977	-0.2330	-0.2307	0.0000	0.1649	COLD	-0.0816	0.0918	0.0916	0.0000
M351	0.2863	COLD	0.1977	-0.2329	-0.2307	0.0000	0.1648	COLD	-0.0816	0.0918	0.0915	0.0000
M352	0.2863	COLD	0.1976	-0.2329	-0.2308	0.0000	0.1647	COLD	-0.0816	0.0918	0.0914	0.0000
M353	0.2863	COLD	0.1976	-0.2328	-0.2308	0.0000	0.1646	COLD	-0.0816	0.0918	0.0913	0.0000
M354	0.2863	COLD	0.1976	-0.2327	-0.2309	0.0000	0.1645	COLD	-0.0816	0.0918	0.0912	0.0000
M355	0.2863	COLD	0.1976	-0.2328	-0.2310	0.0000	0.1644	COLD	-0.0816	0.0918	0.0911	0.0000
M356	0.2862	COLD	0.1976	-0.2328	-0.2312	0.0000	0.1643	COLD	-0.0816	0.0918	0.0910	0.0000
M357	0.2862	COLD	0.1976	-0.2321	-0.2314	0.0000	0.1642	COLD	-0.0816	0.0918	0.0909	0.0000
M358	0.2861	COLD	0.1976	-0.2316	-0.2317	0.0000	0.1641	COLD	-0.0816	0.0918	0.0908	0.0000
M359	0.2861	COLD	0.1976	-0.2312	-0.2321	0.0001	0.1640	COLD	-0.0816	0.0918	0.0907	0.0002
M360	0.2861	COLD	0.1972	-0.2294	-0.2329	0.0000	0.1639	COLD	-0.0816	0.0918	0.0906	-0.0002
M361	0.2864	COLD	0.1970	-0.2280	-0.2340	-0.0004	0.1638	COLD	-0.0818	0.0919	0.0910	-0.0001
M362	0.2830	COLD	0.1963	-0.2223	-0.2358	0.0004	0.1637	COLD	-0.0794	0.0882	0.0883	0.0009
M363	0.2788	COLD	0.1928	-0.2122	-0.2380	-0.0024	0.1622	COLD	-0.0781	0.0830	0.0834	-0.0024
M364	0.2701	COLD	0.1889	-0.2000	-0.2362	0.0009	0.1607	COLD	-0.0690	0.0673	0.0638	0.0007
M365	0.2684	COLD	0.1777	-0.1888	-0.2280	-0.0024	0.1593	COLD	-0.0601	0.0418	0.0431	-0.0134

表4.7 10mm板厚部 (ライン-3) 内外面でのひずみ範囲

9-GR WELDED JOINT MODEL LINE-3 STRAIN RANGE (TOTAL)								SURFACE-1 : 内面				SURFACE-2 : 外面			
LINE	MISSES	TIME	SURFACE	EPS-R	EPS-T	EPS-TM	SAN-R1	MISSES	TIME	SURFACE	EPS-R	EPS-T	EPS-TM	SAN-R2	
M301	0.2283	COLD	7.00	0.1851	-0.2028	-0.1608	-0.0048	0.1272	COLD	7.00	-0.0856	0.1080	0.0811	-0.0289	
M302	0.2140	COLD	7.00	0.1472	-0.1892	-0.1657	0.0014	0.1092	COLD	7.00	-0.0762	0.0890	0.0812	0.0016	
M303	0.2041	COLD	8.00	0.1418	-0.1704	-0.1688	0.0018	0.0952	COLD	8.00	-0.0680	0.0732	0.0772	-0.0024	
M304	0.2028	COLD	8.00	0.1400	-0.1671	-0.1610	0.0002	0.0916	COLD	8.00	-0.0632	0.0690	0.0768	0.0012	
M305	0.2020	COLD	8.00	0.1398	-0.1639	-0.1620	0.0001	0.0894	COLD	8.00	-0.0616	0.0675	0.0728	-0.0008	
M306	0.2022	COLD	8.00	0.1397	-0.1635	-0.1629	-0.0001	0.0890	COLD	8.00	-0.0616	0.0680	0.0716	-0.0003	
M307	0.2024	COLD	8.00	0.1398	-0.1632	-0.1644	0.0000	0.0888	COLD	8.00	-0.0622	0.0661	0.0708	0.0002	
M308	0.2028	COLD	8.00	0.1399	-0.1622	-0.1648	0.0000	0.0888	COLD	8.00	-0.0622	0.0682	0.0705	0.0001	
M309	0.2028	COLD	8.00	0.1400	-0.1622	-0.1648	0.0000	0.0888	COLD	8.00	-0.0622	0.1668	0.0702	0.0000	
M310	0.2026	COLD	8.00	0.1400	-0.1622	-0.1646	0.0000	0.0884	COLD	8.00	-0.0622	0.0687	0.0702	0.0000	
M311	0.2027	COLD	8.00	0.1401	-0.1622	-0.1648	0.0000	0.0884	COLD	8.00	-0.0622	0.0687	0.0701	0.0000	
M312	0.2027	COLD	8.00	0.1401	-0.1622	-0.1648	0.0000	0.0884	COLD	8.00	-0.0622	0.0688	0.0700	0.0000	
M313	0.2027	COLD	8.00	0.1401	-0.1622	-0.1646	0.0000	0.0884	COLD	8.00	-0.0622	0.0689	0.0699	0.0000	
M314	0.2027	COLD	8.00	0.1400	-0.1622	-0.1648	0.0000	0.0884	COLD	8.00	-0.0622	0.0680	0.0698	0.0000	
M315	0.2026	COLD	8.00	0.1400	-0.1622	-0.1648	0.0000	0.0884	COLD	8.00	-0.0622	0.0691	0.0697	0.0000	
M316	0.2027	COLD	8.00	0.1400	-0.1624	-0.1648	0.0000	0.0884	COLD	8.00	-0.0622	0.0691	0.0696	0.0000	
M317	0.2026	COLD	8.00	0.1400	-0.1628	-0.1644	0.0000	0.0884	COLD	8.00	-0.0622	0.0692	0.0694	0.0000	
M318	0.2026	COLD	8.00	0.1400	-0.1628	-0.1643	0.0000	0.0884	COLD	8.00	-0.0622	0.0692	0.0698	0.0000	
M319	0.2028	COLD	8.00	0.1400	-0.1628	-0.1642	0.0000	0.0884	COLD	8.00	-0.0622	0.0692	0.0694	0.0000	
M320	0.2028	COLD	8.00	0.1399	-0.1628	-0.1641	0.0000	0.0882	COLD	8.00	-0.0622	0.0692	0.0694	0.0000	
M321	0.2024	COLD	8.00	0.1398	-0.1628	-0.1641	0.0000	0.0908	COLD	7.00	-0.0649	0.0712	0.0712	0.0000	
M322	0.2024	COLD	7.00	0.1398	-0.1628	-0.1641	0.0000	0.0908	COLD	7.00	-0.0649	0.0714	0.0712	0.0000	
M323	0.2022	COLD	7.00	0.1398	-0.1628	-0.1640	0.0000	0.0908	COLD	7.00	-0.0649	0.0716	0.0712	0.0000	
M324	0.2022	COLD	7.00	0.1397	-0.1626	-0.1629	0.0000	0.0908	COLD	7.00	-0.0649	0.0716	0.0712	0.0000	
M325	0.2022	COLD	7.00	0.1397	-0.1628	-0.1628	0.0000	0.0908	COLD	7.00	-0.0649	0.0714	0.0712	0.0000	
M326	0.2021	COLD	7.00	0.1396	-0.1624	-0.1626	0.0000	0.0908	COLD	7.00	-0.0649	0.0714	0.0711	0.0000	
M327	0.2020	COLD	7.00	0.1398	-0.1624	-0.1628	0.0000	0.0907	COLD	7.00	-0.0648	0.0714	0.0711	0.0000	
M328	0.2016	COLD	7.00	0.1393	-0.1622	-0.1621	0.0000	0.0908	COLD	7.00	-0.0648	0.0712	0.0710	0.0000	
M329	0.2013	COLD	7.00	0.1391	-0.1620	-0.1628	0.0000	0.0908	COLD	7.00	-0.0647	0.0712	0.0709	0.0000	
M330	0.2008	COLD	7.00	0.1387	-0.1626	-0.1622	0.0000	0.0902	COLD	7.00	-0.0648	0.0708	0.0707	0.0000	
M331	0.2002	COLD	7.00	0.1382	-0.1622	-0.1618	0.0000	0.0899	COLD	7.00	-0.0642	0.0707	0.0708	0.0000	
M332	0.1998	COLD	7.00	0.1378	-0.1616	-0.1612	0.0000	0.0898	COLD	7.00	-0.0641	0.0702	0.0702	0.0000	
M333	0.1988	COLD	7.00	0.1374	-0.1610	-0.1607	0.0000	0.0891	COLD	7.00	-0.0628	0.0700	0.0699	0.0000	
M334	0.1982	COLD	7.00	0.1369	-0.1608	-0.1602	0.0000	0.0887	COLD	7.00	-0.0628	0.0697	0.0698	0.0000	
M335	0.1978	COLD	7.00	0.1366	-0.1600	-0.1598	0.0000	0.0882	COLD	7.00	-0.0622	0.0692	0.0692	0.0000	
M336	0.1970	COLD	7.00	0.1361	-0.1596	-0.1592	0.0000	0.0880	COLD	7.00	-0.0620	0.0691	0.0690	0.0000	
M337	0.1968	COLD	7.00	0.1357	-0.1592	-0.1588	0.0000	0.0877	COLD	7.00	-0.0628	0.0689	0.0687	0.0000	
M338	0.1962	COLD	7.00	0.1355	-0.1589	-0.1586	0.0000	0.0878	COLD	7.00	-0.0626	0.0687	0.0686	0.0000	
M339	0.1958	COLD	7.00	0.1352	-0.1586	-0.1582	0.0000	0.0872	COLD	7.00	-0.0628	0.0686	0.0684	0.0000	
M340	0.1956	COLD	7.00	0.1352	-0.1584	-0.1582	0.0000	0.0872	COLD	7.00	-0.0624	0.0688	0.0682	0.0000	
M341	0.1958	COLD	7.00	0.1350	-0.1582	-0.1581	0.0000	0.0871	COLD	7.00	-0.0622	0.0684	0.0682	0.0000	
M342	0.1954	COLD	7.00	0.1350	-0.1581	-0.1580	0.0000	0.0877	COLD	7.00	-0.0628	0.0689	0.0687	0.0000	
M343	0.1953	COLD	7.00	0.1249	-0.1580	-0.1580	0.0000	0.0877	COLD	7.00	-0.0627	0.0689	0.0687	0.0000	
M344	0.1952	COLD	7.00	0.1349	-0.1579	-0.1579	0.0000	0.0876	COLD	7.00	-0.0627	0.0688	0.0686	0.0000	
M345	0.1951	COLD	7.00	0.1348	-0.1579	-0.1578	0.0000	0.0878	COLD	7.00	-0.0626	0.0687	0.0688	0.0000	
M346	0.1950	COLD	7.00	0.1347	-0.1577	-0.1576	0.0000	0.0874	COLD	7.00	-0.0628	0.0687	0.0688	0.0000	
M347	0.1948	COLD	7.00	0.1346	-0.1576	-0.1577	0.0000	0.0874	COLD	7.00	-0.0628	0.0686	0.0688	0.0000	
M348	0.1948	COLD	7.00	0.1346	-0.1576	-0.1576	0.0000	0.0873	COLD	7.00	-0.0628	0.0688	0.0684	0.0000	
M349	0.1948	COLD	7.00	0.1348	-0.1574	-0.1576	0.0000	0.0872	COLD	7.00	-0.0624	0.0688	0.0684	0.0000	
M350	0.1948	COLD	7.00	0.1344	-0.1572	-0.1576	0.0000	0.0871	COLD	7.00	-0.0622	0.0684	0.0682	0.0000	
M351	0.1944	COLD	7.00	0.1342	-0.1572	-0.1574	0.0000	0.0870	COLD	7.00	-0.0622	0.0682	0.0682	0.0000	
M352	0.1942	COLD	7.00	0.1342	-0.1570	-0.1572	0.0000	0.0870	COLD	7.00	-0.0622	0.0682	0.0682	0.0000	
M353	0.1941	COLD	7.00	0.1341	-0.1569	-0.1572	0.0000	0.0889	COLD	7.00	-0.0622	0.0681	0.0682	0.0000	
M354	0.1940	COLD	7.00	0.1340	-0.1563	-0.1572	0.0000	0.0886	COLD	7.00	-0.0621	0.0680	0.0682	0.0000	
M355	0.1939	COLD	7.00	0.1340	-0.1567	-0.1571	0.0000	0.0887	COLD	7.00	-0.0621	0.0679	0.0681	0.0000	
M356	0.1938	COLD	7.00	0.1329	-0.1566	-0.1570	0.0000	0.0887	COLD	7.00	-0.0620	0.0678	0.0681	0.0000	
M357	0.1938	COLD	7.00	0.1328	-0.1564	-0.1569	0.0000	0.0888	COLD	7.00	-0.0620	0.0677	0.0681	0.0000	
M358	0.1934	COLD	7.00	0.1326	-0.1562	-0.1568	0.0000	0.0884	COLD	7.00	-0.0618	0.0678	0.0681	0.0000	
M359	0.1931	COLD	7.00	0.1328	-0.1568	-0.1568	-0.0001	0.0882	COLD	7.00	-0.0617	0.0673	0.0680	-0.0002	
M360	0.1928	COLD	7.00	0.1320	-0.1565	-0.1560	0.0001	0.0880	COLD	7.00	-0.0616	0.0669	0.0680	0.0001	
M361	0.1917	COLD	7.00	0.1328	-0.1549	-0.1562	0.0000	0.0887	COLD	7.00	-0.0614	0.0682	0.0682	0.0002	
M362	0.1911	COLD	7.00	0.1321	-0.1568	-0.1527	-0.0001	0.0881	COLD	7.00	-0.0616	0.0682	0.0688	-0.0001	
M363	0.1912	COLD	8.00	0.1319	-0.1584	-0.1511	0.0018	0.0881	COLD	8.00	-0.0629	0.0678	0.0708	-0.0007	
M364	0.1942	COLD	8.00	0.1340	-0.1646	-0.1494	-0.0008	0.0922	COLD	8.00	-0.0667	0.0746	0.0717	-0.0008	
M365	0.1988	COLD	8.00	0.1272	-0.1708	-0.1507	0.0028	0.0988	COLD	8.00	-0.0700	0.0826	0.0712	0.0126	

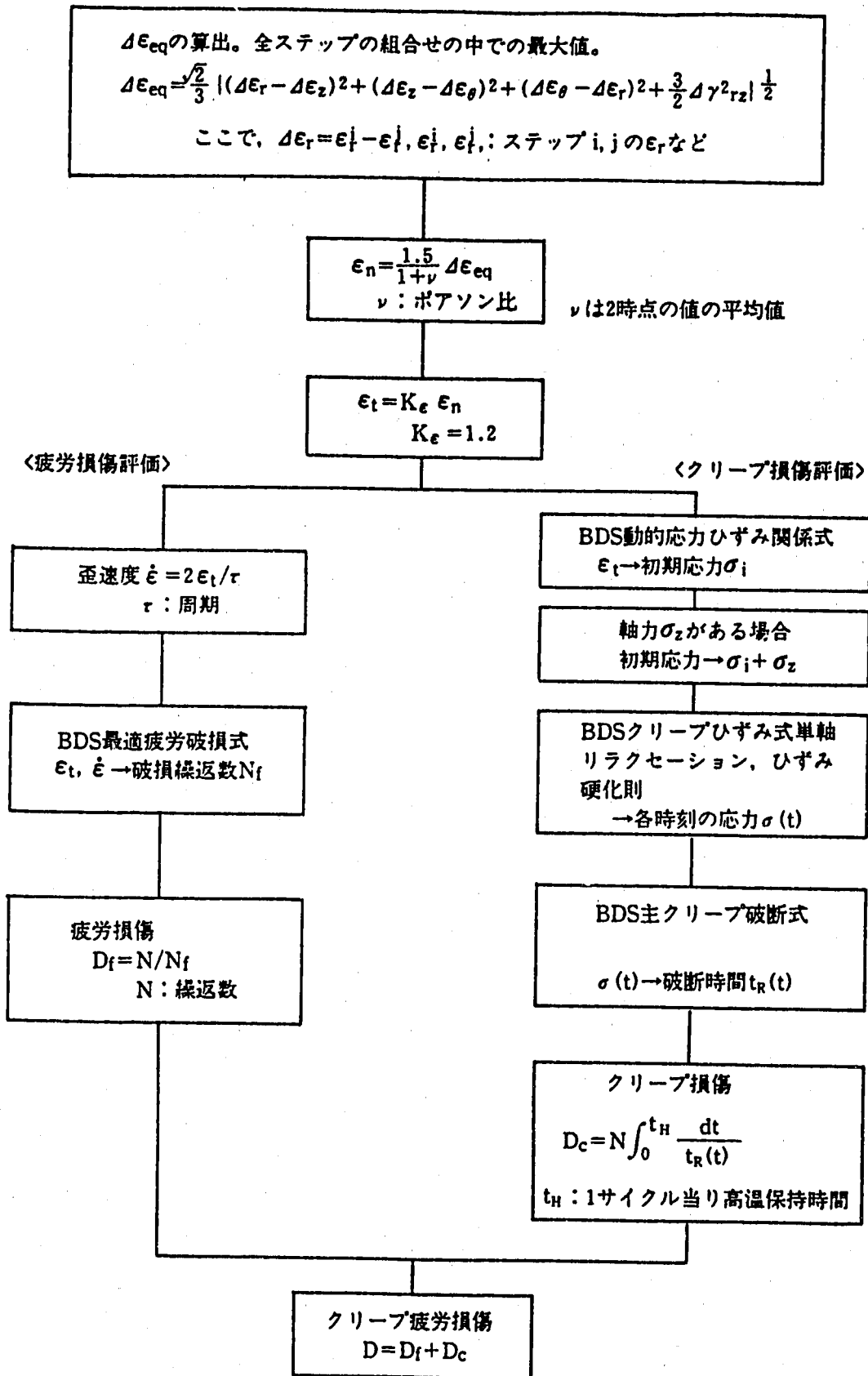
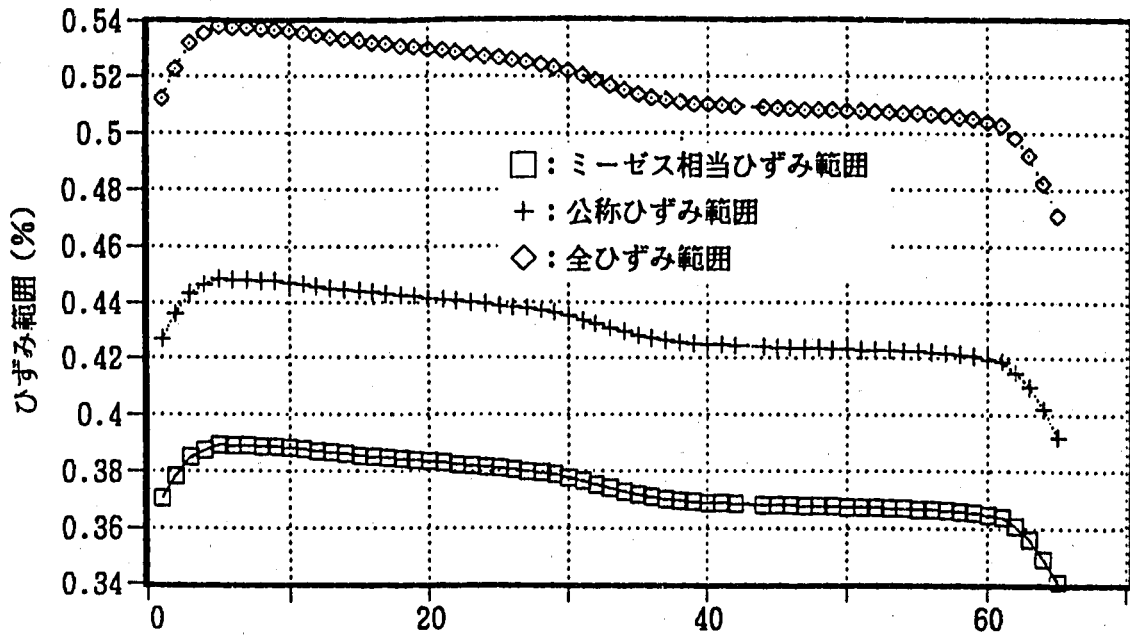
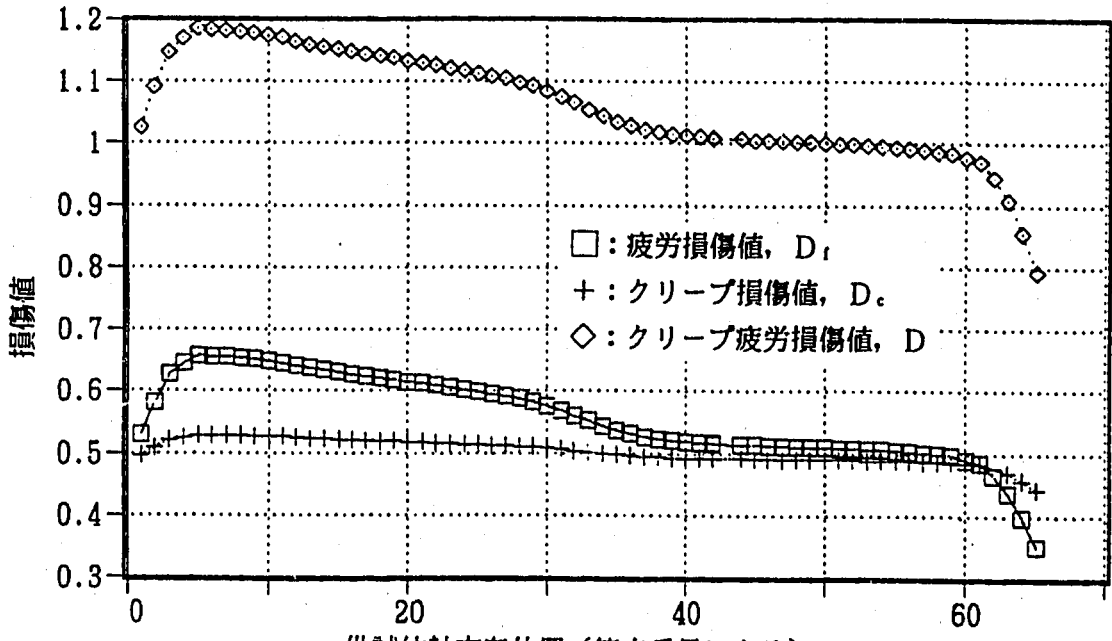
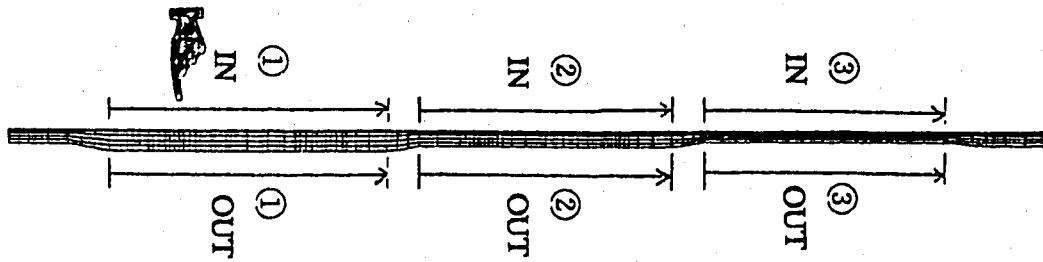


図4.1 TTSDSによる評価の流れ



供試体軸方向位置 (節点番号による)



供試体軸方向位置 (節点番号による)

図4.2 ひずみ範囲とクリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布 (20mm板厚部、内表面)
(疲労損傷値算出用の最適疲労破損式にはORNLの式を採用)
(クリープ損傷値算出用の初期応力計算には繰返し応力-ひずみ関係式を採用)

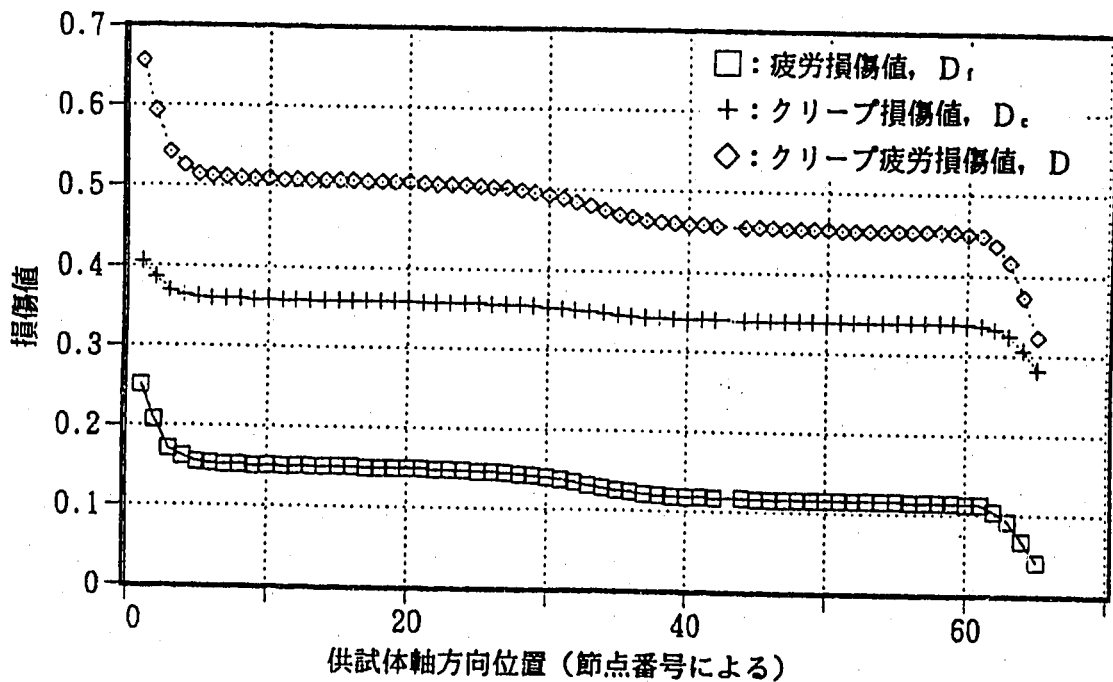
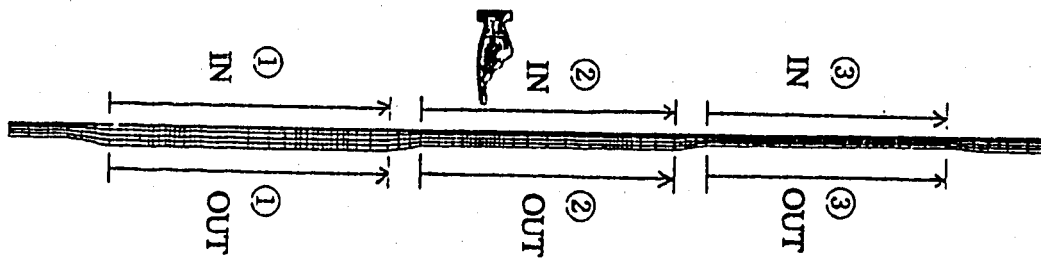
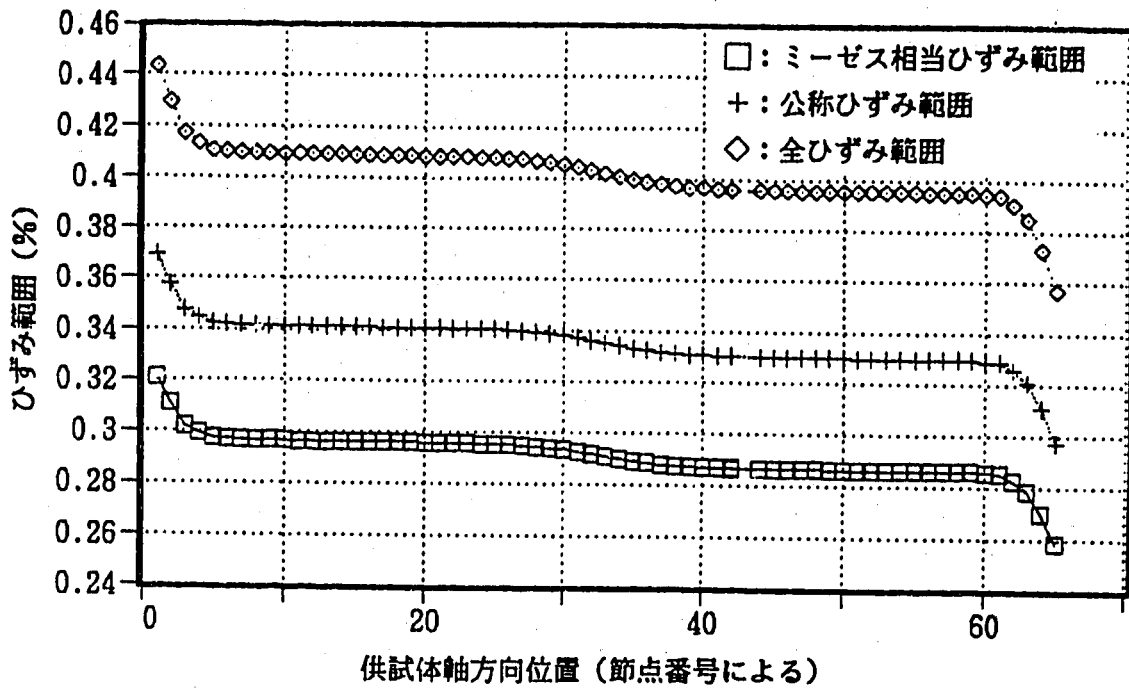


図4.3 ひずみ範囲とクリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布 (15mm板厚部、内表面)
 (疲労損傷値算出用の最適疲労破損式にはORNLの式を採用)
 (クリープ損傷値算出用の初期応力計算には繰返し応力-ひずみ関係式を採用)

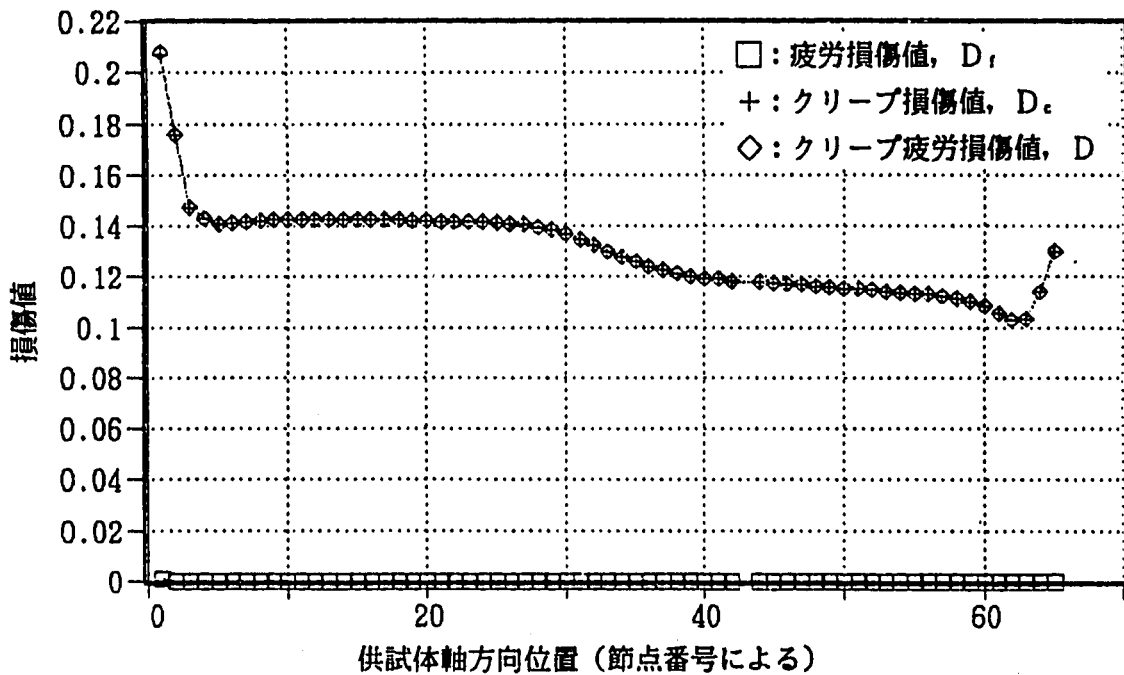
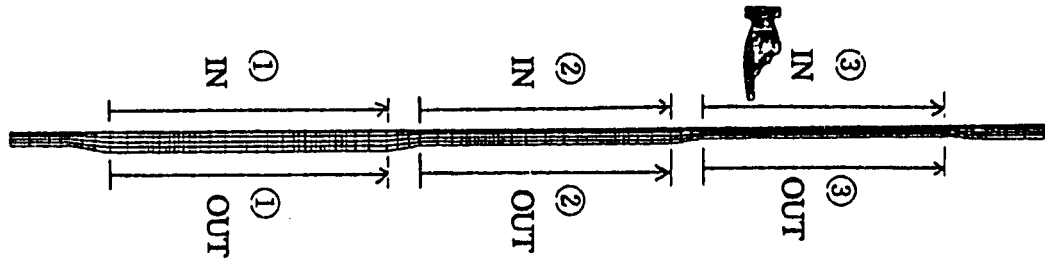
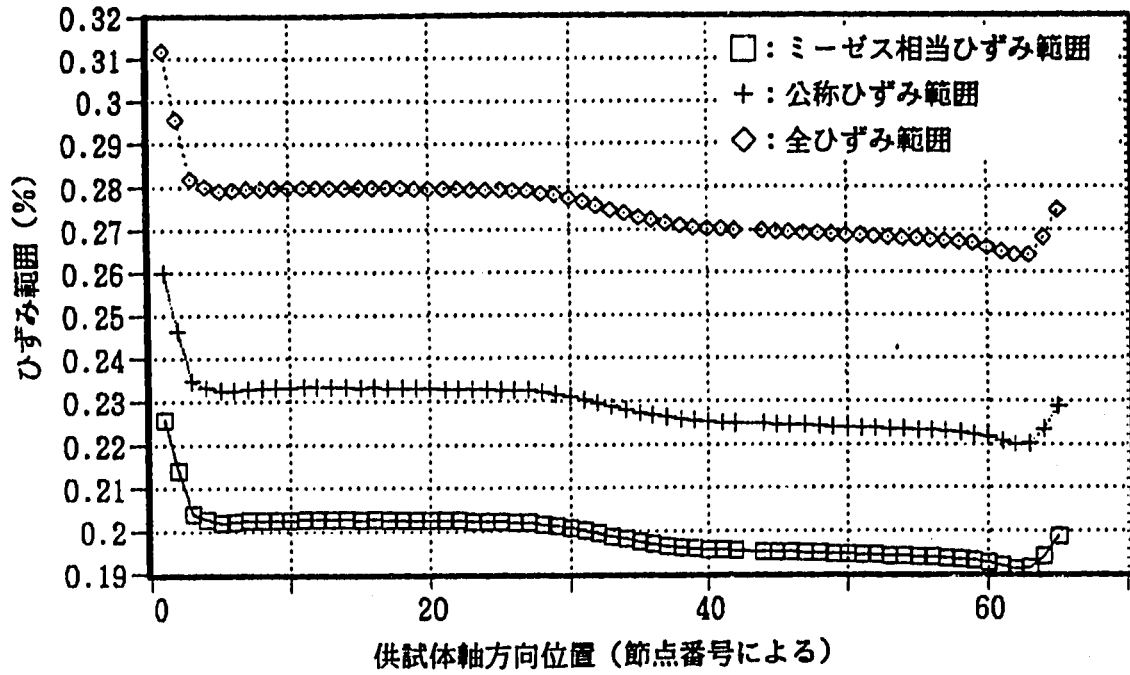


図4.4 ひずみ範囲とクリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布 (10mm板厚部、内表面)
 (疲労損傷値算出用の最適疲労破損式にはORNLの式を採用)
 (クリープ損傷値算出用の初期応力計算には繰返し応力-ひずみ関係式を採用)

5. 考察

5.1 2 ¼Cr-1Mo鋼の最適疲労破損式に基づいた疲労損傷値

第4章で述べた疲労損傷評価では、Mod. 9Cr-1Mo 鋼の疲労破損式に現状材料室が暫定している表4.1に示したORNLの式を採用して疲労損傷値の計算を行った。しかしながら、ORNLの式では破損繰返し数 N_r は全ひずみ範囲 ϵ_r のみの関数となっており、SUS304の場合のような温度あるいはひずみ速度等の影響は考慮されていない。

一方、本鋼の疲労破損式に一時期BDS材料強度基準⁽¹⁾に掲載されている2 ¼Cr-1Mo鋼の最適疲労破損式が暫定的に採用された経緯がある。この式では、全ひずみ範囲 ϵ_r の関数として表される破損繰返し数 N_r に、SUS304の場合のような温度およびひずみ速度の影響が考慮されている。従って、近い将来Mod. 9Cr-1Mo 鋼の疲労破損データベースが充実した段階で、2 ¼Cr-1Mo鋼の最適疲労破損式と同様の定式化がMod. 9Cr-1Mo 鋼についてもなされるものと考えられる。

ここでは、上述のとおり本鋼の疲労損傷予測技術が確立されていない現状を鑑みて、熱過渡試験結果が得られた段階での強度評価の便宜を考慮し、参考としてMod. 9Cr-1Mo 鋼の疲労破損式に2 ¼Cr-1Mo鋼の最適疲労破損式を採用する場合についての検討を行う。

2 ¼Cr-1Mo鋼の最適疲労破損式は表5.1に示されるとおりである。本式を用いて疲労損傷値を計算した結果（熱過渡繰返し数は9,000サイクルを仮定）を図5.2、5.4及び5.6（各図の下側）に示す。これらの図において、クリープ損傷値は前述第4章で述べたもの（すなわち緩和クリープ計算の初期応力を動的応力-ひずみ関係式から計算した）と同じである。

これらの図から、疲労損傷値は2 ¼Cr-1Mo鋼の最適疲労破損式を用いて計算した方がORNLの式を用いて計算した結果よりも数倍大きくなり、板厚20mmと15mmの部位については疲労損傷だけで十分破損する結果となっている。また、板厚10mmの部位については、クリープ疲労損傷値とトータルで考えると、0.5程度となり、初生段階のき裂の存在の可能性が考えられる。

5.2 弾塑性応力-ひずみ関係式に基づいたクリープ緩和初期応力とクリープ損傷値

第4章で述べたクリープ損傷評価では、単軸のクリープ緩和挙動を計算する際の初期応力の算定に現状材料室が暫定している表4.2に示したMod. 9Cr-1Mo鋼の動的応力-ひずみ関係式を採用した。動的応力-ひずみ関係式を採用した根拠は、損傷過程を支配する大部分の熱過渡繰返し期間の応力-ひずみ挙動が、定常状態の応力-ひずみ挙動であると考えられるからであり、この考え方はSUS304の場合と同様である。

しかしながら、SUS304の場合は負荷の繰返しに伴い材料が硬化するために、熱過渡繰返しの全期間を定常状態の応力-ひずみ挙動で代表させるのは、クリープ緩和の初期応力を全期間を通して見た場合にはやや大きめに算定することになるために、幾分クリープ損傷を過大評価する結果となると考えられる。これに対して、本鋼の場合には一般に繰返し軟化することが知られており、SUS304の場合とは逆にクリープ損傷を過小評価

する傾向となると考えられる。

全ひずみ範囲からクリープ緩和の初期応力を算定する場合に採用しうる応力-ひずみ関係式としては、前述の定常状態の応力-ひずみ挙動を表す動的応力-ひずみ関係式の他に、弾塑性応力-ひずみ関係式が考えられる。この式では、定性的には繰返し軟化する前の硬めの（すなわち同一ひずみに対して高めの応力を与える）特性を有することから、クリープ損傷を幾分過大評価する傾向となることが予想されるが、試験における破損寿命がこれまで述べた両者の中間に位置する可能性も考えられるため、ここではクリープ緩和の初期応力を算定するのに弾塑性応力-ひずみ関係式を採用する場合の評価について検討しておく。

Mod. 9Cr-1Mo鋼の弾塑性応力-ひずみ関係式は表5.2に示されるとおりである。本式を用いてクリープ緩和計算の初期応力を算出し、この初期応力を用いてクリープ損傷値を計算した結果（熱過渡繰返し数は9,000サイクルを仮定）を図5.1, 5.3及び5.5（各図の上側）に示す。これらの図において、疲労損傷値は前述第4章で述べたORNLの疲労破損式より算出したものである。

これらの図から、クリープ損傷値は初期応力計算に弾塑性応力-ひずみ関係式を用いて計算した方が動的応力-ひずみ関係式を用いて計算した結果よりも数倍大きくなり、板厚20mmと15mmの部位についてはクリープ損傷だけで十分破損する結果となっている。ただし、この場合でも板厚10mmの部位については、クリープ疲労損傷値トータルとしても0.2程度にとどまりき裂の発生には到らないものと予測される。

以上、本章では疲労損傷計算およびクリープ損傷計算に採用する9Cr系鋼の材料特性式として、第4章で述べた基本的な式（すなわち疲労損傷計算にORNLの疲労破損式、クリープ損傷計算用初期応力算出に動的応力-ひずみ関係式）の他に採用できる可能性のある式（すなわち疲労損傷計算に2¼Cr-1Mo鋼の最適疲労破損式、クリープ損傷計算用初期応力算出に弾塑性応力-ひずみ関係式）を採用することにより、本熱過渡試験におけるクリープ疲労損傷値がどのように変化するかについて若干の検討を加えた。

今後、本熱過渡試験結果が得られた段階において今回得られた損傷評価結果と詳細な比較検討を行い、9Cr系鋼の熱クリープ疲労強度評価法を確立していくことが望まれる。

なお、本鋼の溶接継手に関しては現時点では十分なデータ（特に弾塑性応力-ひずみ関係の定式化の観点で）が得られていないのが現状であるため、溶接継手部の強度予測に関しては本報では詳細な検討は実施しないが、従来のオーステナイト系ステンレス鋼の溶接継手の場合⁽¹³⁾と同程度のひずみ集中係数が適用できるとすると、第4章で得られたクリープ疲労損傷値をベースとした場合、厚肉部および中間板厚部の溶接継手ではある程度のき裂進展が、薄肉部の溶接継手では初生段階のき裂の存在が予測できると考えられる。

表5.1 2-1/4Cr-1Mo (NT) 板・伝熱管の最適疲労破損式

2 1/4 Cr-1Mo (NT) 板・伝熱管の最適疲労破損式

$$(\log_{10} N_f)^{-\frac{1}{2}} = A_0 + A_1 \cdot \log_{10} d\varepsilon_t + A_2 \cdot (\log_{10} d\varepsilon_t)^2 + A_3 \cdot (\log_{10} d\varepsilon_t)^4$$

使用単位

T : 温度 (°C)

 $\dot{\varepsilon}$: ひずみ速度 (mm/mm/sec) $d\varepsilon_t$: 全ひずみ範囲 (mm/mm) N_f : 破損繰返し数

A_0	$1.110100 - 0.2439730 \times 10^{-7} \times T^2 \times R$
A_1	0.5709357
A_2	0.1874343
A_3	$-0.144543 \times 10^{-1} + 0.7045986 \times 10^{-5} \times T - 0.6562716 \times 10^{-4} \times R$

ただし、 $R = \log_{10} \dot{\varepsilon}$ である。

表5.2 Mod. 9Cr-1Mo 鋼の弾塑性応力-ひずみ関係式 (暫定式)

Mod. 9Cr-1Mo の弾塑性応力-ひずみ関係式(暫定式)

PNC SN9410 88-105 J-1

取扱注意

(1) $\sigma \leq \sigma_p$ のとき

$$\epsilon_c = \frac{\sigma}{E}$$

$$\epsilon_p = 0$$

本式は設計研究用に使用するために暫定的に作成されたものであり、他への適用を意図していない

(2) $\sigma > \sigma_p$ のとき

$$\epsilon_c = \frac{\sigma}{E}$$

$$\epsilon_p = \left(\frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right)^m$$

<使用単位>

ϵ_c (mm/mm), ϵ_p (mm/mm), σ (kg/mm²)

<適用限界>

最大ひずみ ($\epsilon_c + \epsilon_p$) max ≤ 0.03 (mm/mm)

パラメータ	温度(°C)	[300] < T < [650]
E (kg/mm ²)	[315] $\leq T \leq$ [400]	$E = 2.040 \times 10^4 - 8.000 \cdot T$
	[400] $\leq T \leq$ [650]	$E = 2.126 \times 10^4 - 10.125 \cdot T$
σ_p (kg/mm ²)		$\sigma_y - K (0.002)^m$
σ_y (kg/mm ²)		平均曲線: $5.463696 \times 10^4 - 7.062338 \times 10^{-2} \cdot T$ $+ 2.567754 \times 10^{-1} \cdot T^2 - 3.526828 \times 10^{-5} \cdot T^3$ 最小曲線: 設計降伏点 S_y による
K (kg/mm ²)		$83.0 - 8.75 \times 10^{-2} \cdot T$
m		$0.417 - 5.125 \times 10^{-4} \cdot T$

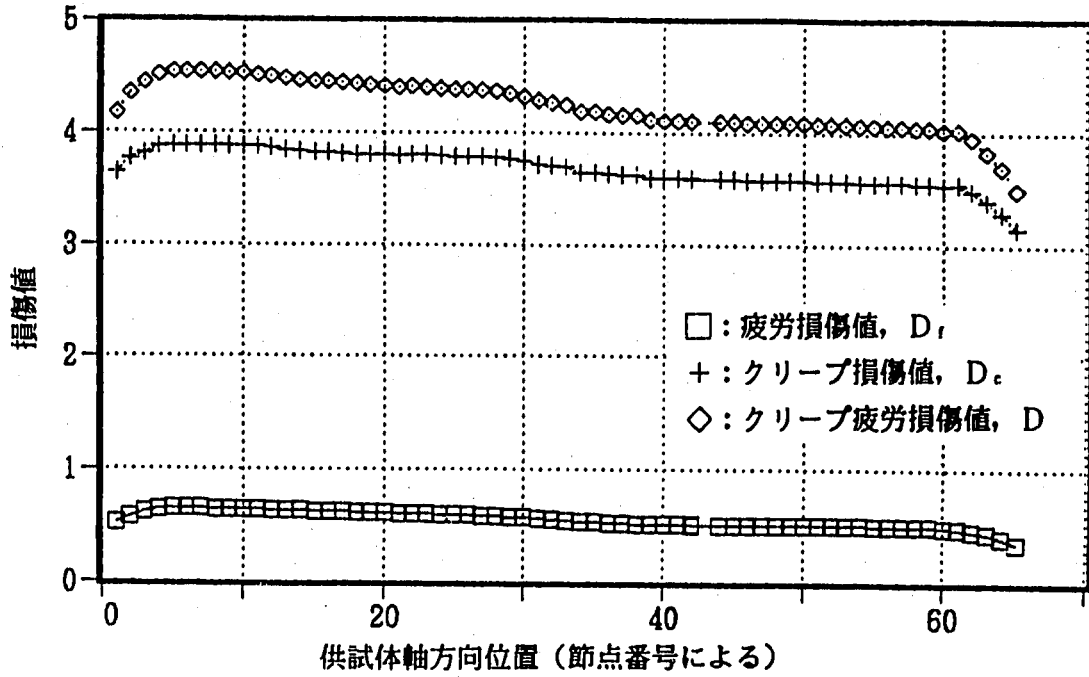


図5.1 クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布 (20mm板厚部、内表面)
 (疲労損傷値算出用の最適疲労破損式にはORNLの式を採用)
 (クリープ損傷値算出用の初期応力計算には弾塑性応力-ひずみ関係式を採用)

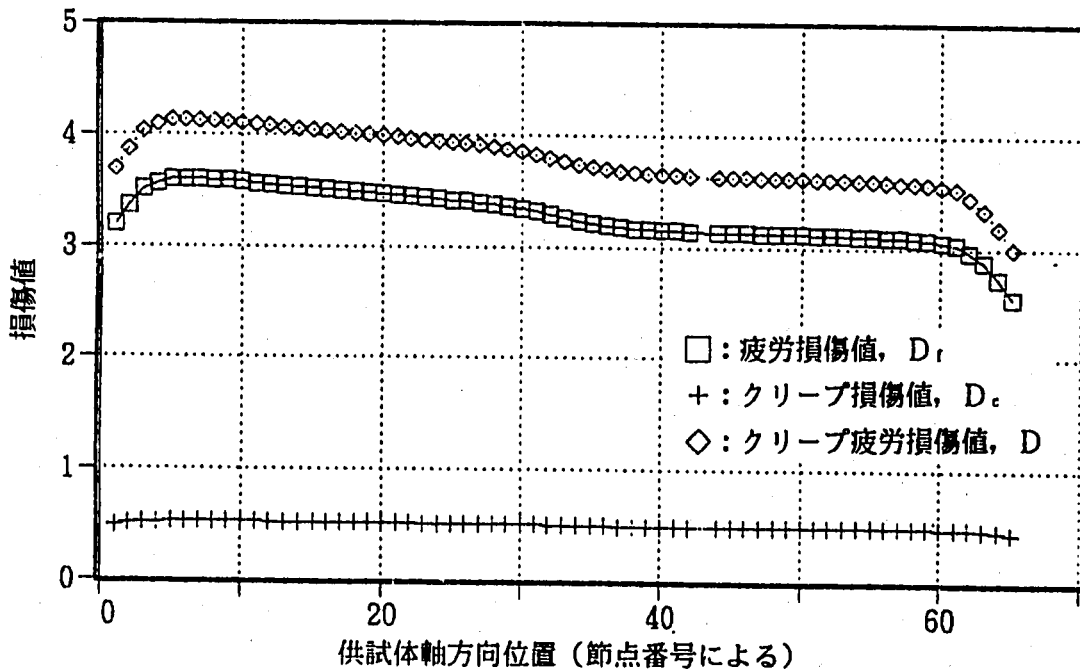
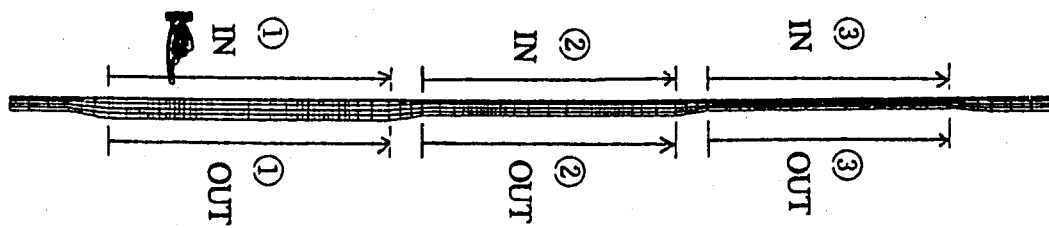


図5.2 クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布 (20mm板厚部、内表面)
 (疲労損傷値算出用の最適疲労破損式には2-1/4Cr-1Mo鋼の式を採用)
 (クリープ損傷値算出用の初期応力計算には繰返し応力-ひずみ関係式を採用)

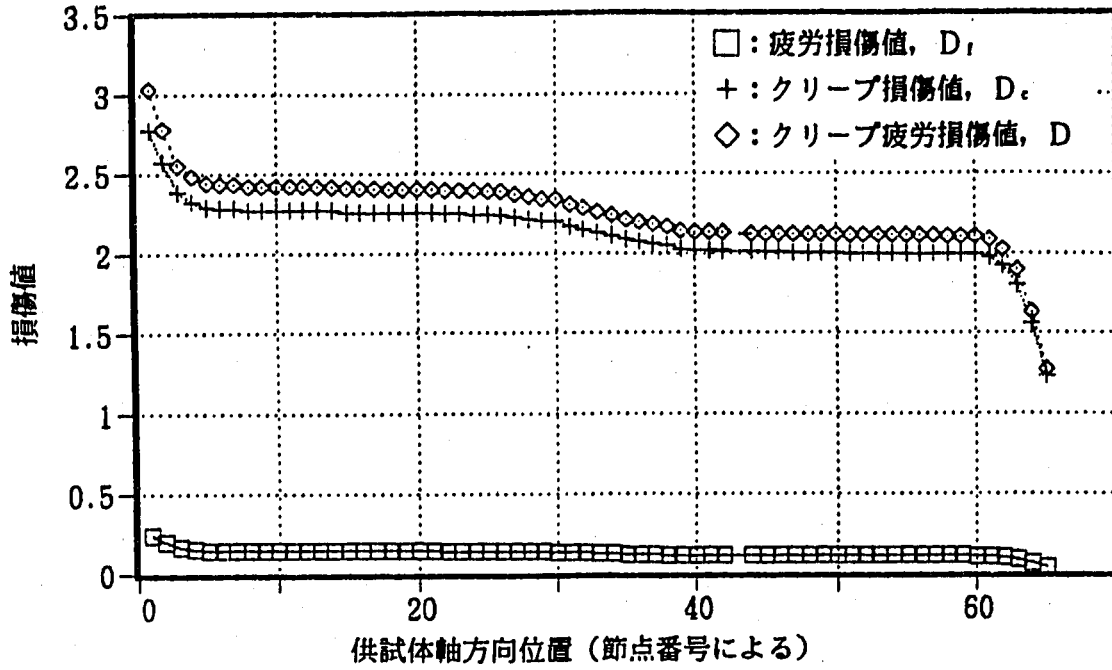


図5.3 クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布 (15mm板厚部、内表面)
 (疲労損傷値算出用の最適疲労破損式にはORNLの式を採用)
 (クリープ損傷値算出用の初期応力計算には弾塑性応力-ひずみ関係式を採用)

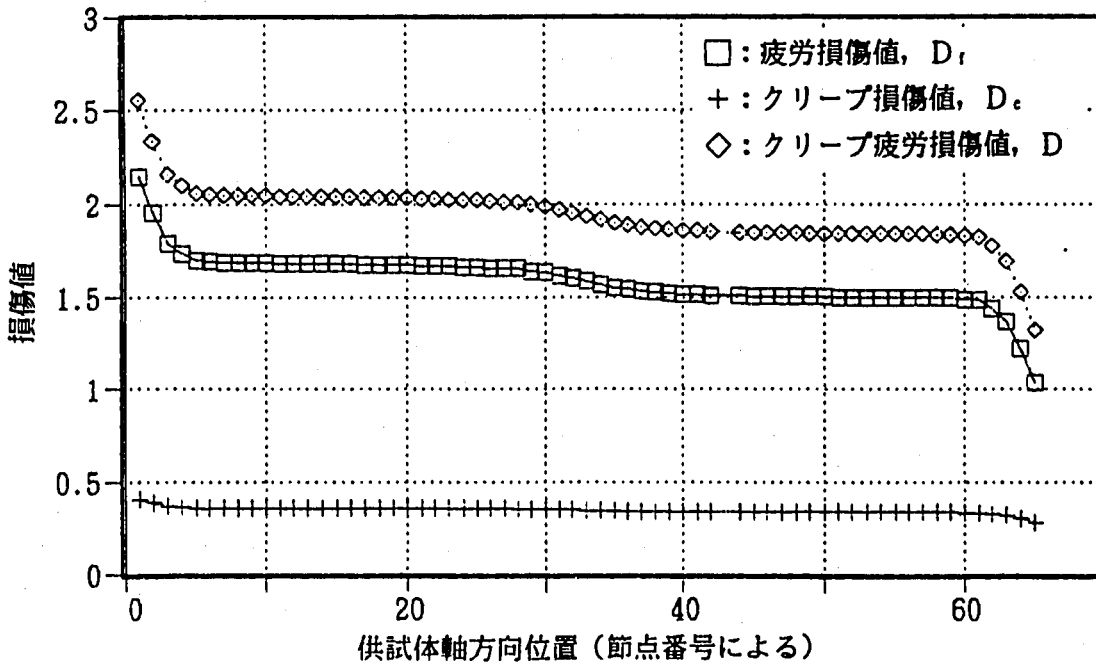
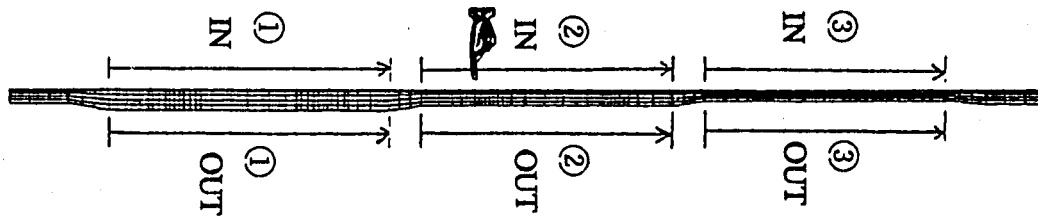


図5.4 クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布 (15mm板厚部、内表面)
 (疲労損傷値算出用の最適疲労破損式には2-1/4Cr-1Mo鋼の式を採用)
 (クリープ損傷値算出用の初期応力計算には繰返し応力-ひずみ関係式を採用)

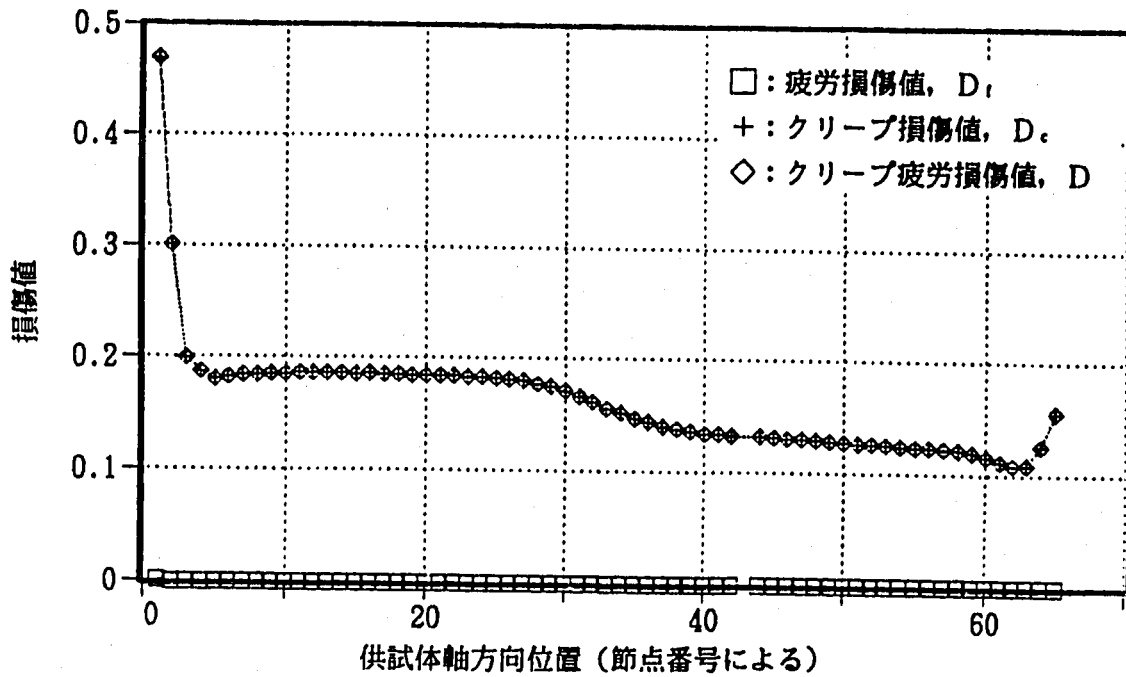


図5.5 クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布 (10mm板厚部、内表面)
 (疲労損傷値算出用の最適疲労破損式にはORNLの式を採用)
 (クリープ損傷値算出用の初期応力計算には弾塑性応力-ひずみ関係式を採用)

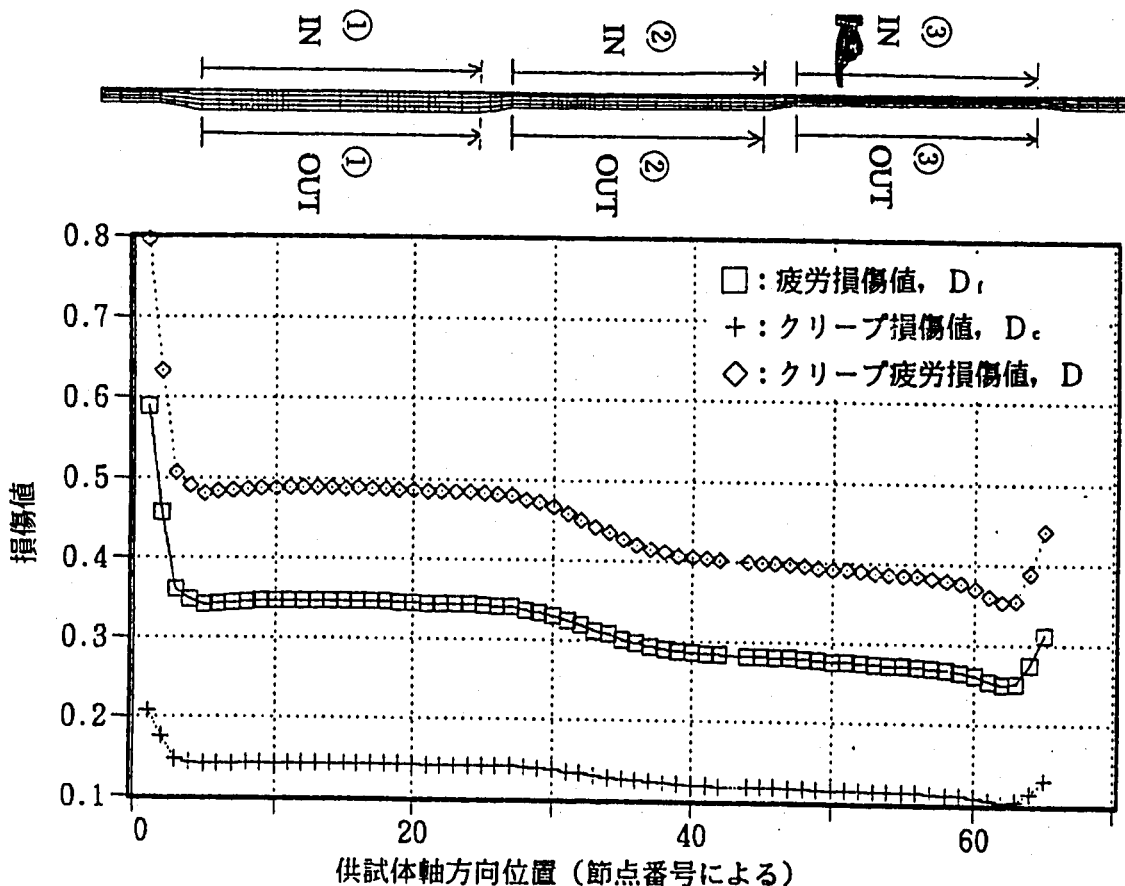


図5.6 クリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布 (10mm板厚部、内表面)
 (疲労損傷値算出用の最適疲労破損式には2-1/4Cr-1Mo鋼の式を採用)
 (クリープ損傷値算出用の初期応力計算には繰返し応力-ひずみ関係式を採用)

6. まとめ

本報では、内面にナトリウムによる繰返し熱過渡を受ける 9 C r 系鋼製周溶接付き円筒型供試体の熱疲労き裂発生試験を対象として、実測温度データによる弾性熱応力解析とこの結果に基づいたクリープ疲労損傷評価をおこなった。

評価対象とした供試体は、板厚20mm, 15mm, および10mmの3種の板厚の円筒部からなり、それぞれの円筒部には2本ずつの周方向の溶接継手が含まれている。試験は供試体内部に550℃と300℃のナトリウムをそれぞれ5分ずつ交互に流入させる条件で、熱過渡サイクル数9000回を目標に繰返し熱過渡負荷を継続している。

解析・評価として、まず有限要素法による非定常伝熱解析、次に汎用非線形構造解析コード F I N A S を用いて弾性熱応力解析を行い、この結果に基づいて設計基準の有する安全係数を取り除いた正味ベースのクリープ疲労損傷計算を、オーステナイト系ステンレス鋼 (S U S 3 0 4) に対して開発した寿命予測法 (T T S D S) を用いて実施した。伝熱・応力解析および損傷計算の材料定数には暫定的に材料室が定めた定数を採用した。

この結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 計画している試験熱過渡サイクル 9,000回において、板厚20mmの厚肉部一般円筒母材でのクリープ疲労損傷値は約 1.1となり、ある程度のき裂進展が予測される。
- (2) 板厚15mmの中間板厚部一般円筒母材でのクリープ疲労損傷値は約 0.5となり、初生段階のき裂が存在している可能性がある。
- (3) 板厚10mmの薄肉部一般円筒母材でのクリープ疲労損傷値は約0.15となり、き裂発生に至っていないことが予測される。
- (4) 溶接継手部のき裂発生寿命予測について、従来のオーステナイト系ステンレス鋼の溶接継手の場合と同程度のひずみ集中係数が適用できるとすると、厚肉部および中間板厚部の溶接継手ではある程度のき裂進展が、また薄肉部の溶接継手では初生段階のき裂が存在する可能性があると考えられる。

なお、本報では損傷評価用の 9 C r 系鋼の材料特性式として、疲労損傷計算に ORNL の疲労破損式、クリープ損傷用初期応力計算に動的応力-ひずみ関係式を採用する方法を基本としたが、これら以外にも疲労損傷計算に $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の最適疲労破損式を、またクリープ損傷用初期応力計算に弾塑性応力-ひずみ関係式を採用することにより、若干の検討を加えた。今後、本熱過渡試験結果が得られた段階において今回得られた損傷評価結果との詳細な比較検討を行い、9 C r 系鋼の熱クリープ疲労強度評価法を確立していくことが望まれる。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、応力・ひずみの計算はCRC総研に依頼して行った。同所構造技術部、吉田博治氏ほか関係各位の皆様にお礼申し上げます。また、解析条件の設定、材料物性値、強度特性値等の選定においてはISL(柳佐々木敏彦氏)による予備解析検討資料を参考にさせて頂くとともに、材料室の関係各位より有益な情報を提供して頂いた。これらの方々にお礼申し上げます。

参考文献

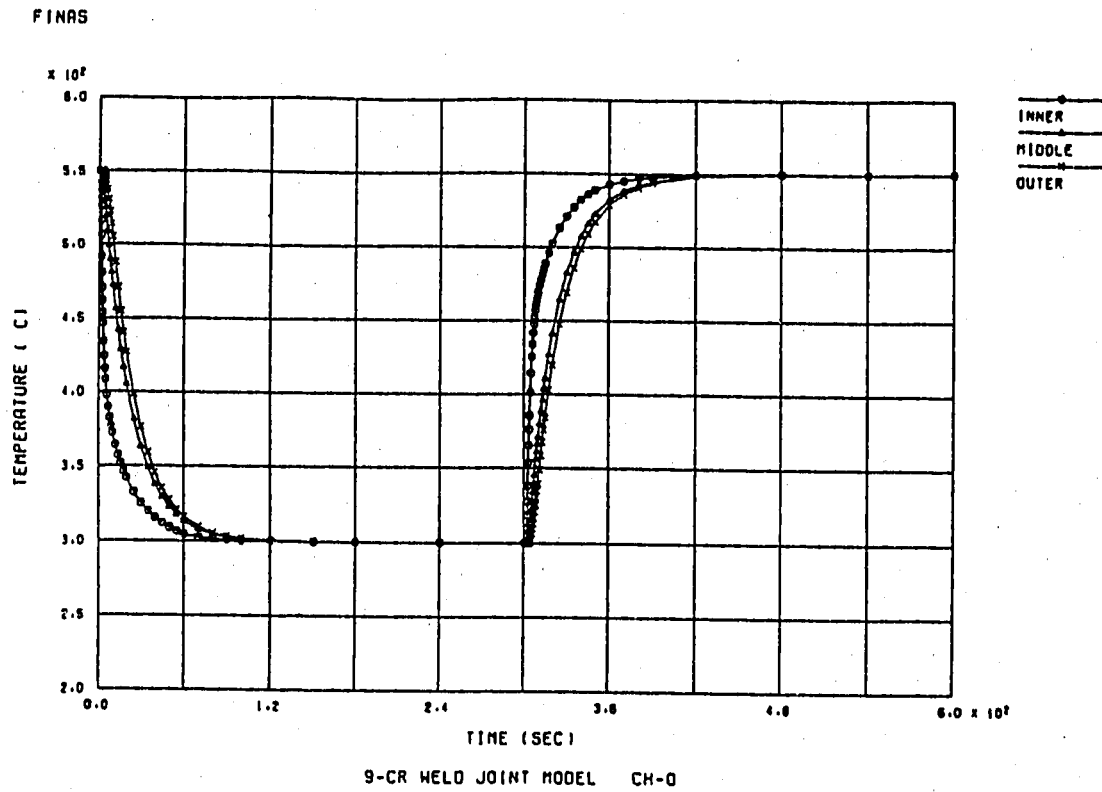
- (1) 9Cr系鋼溶接継手供試体の熱疲労試験 第2報 熱過渡試験と解体検査
PNC ZN9410 93-XXX (作成中)
- (2) 植田他、SUS304周溶接継手の熱疲労試験 PNC N941 82-195
- (3) 木村他、FBR構造材料の物性値測定
- (その1) 各種圧延鋼板の物性値測定 - PNC SN9410 90-094
- (4) 高速増殖炉高温構造設計基準材料強度基準等の高度化に関する検討報告 (I)
- 昭和62年度KOM-MSS W/G活動報告 - PNC SN9410 88-105
- (5) Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手の疲労・クリープ疲労強度評価法の検討
PNC SN9410 90-171
- (6) 伝熱工学資料 (改定第4版), P. 106, 日本機械学会
- (7) 解説 高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等 PNC SN241 85-08
- (8) 渡士、小出、斎藤、中西、今津 原子炉容器モデル熱過渡強度試験
第1報 クリープ疲労強度評価法 PNC SN9410 86-059
- (9) 渡士他 同上 第5報 伝熱応力解析と強度評価法 PNC SN9410 86-076
- (10) 谷川、木村、斎藤、石崎、渡士、今津 熱過渡強度データのまとめ
PNC SN9410 87-176
- (11) 木村、渡士、岩田、今津 熱応力緩和構造モデル(1)熱過渡強度試験
第2報 伝熱応力解析と強度評価 PNC SN9410 89-105
- (12) 石崎、渡士、高橋、岩田 SUS304鋼の熱疲労試験 PNC SN9410 89-101
- (13) 田中、渡士、岩田、木村、吉田 熱応力緩和構造モデル(1)熱過渡強度試験
第4報 非弾性解析と強度評価 PNC SN9410 90-106

付録

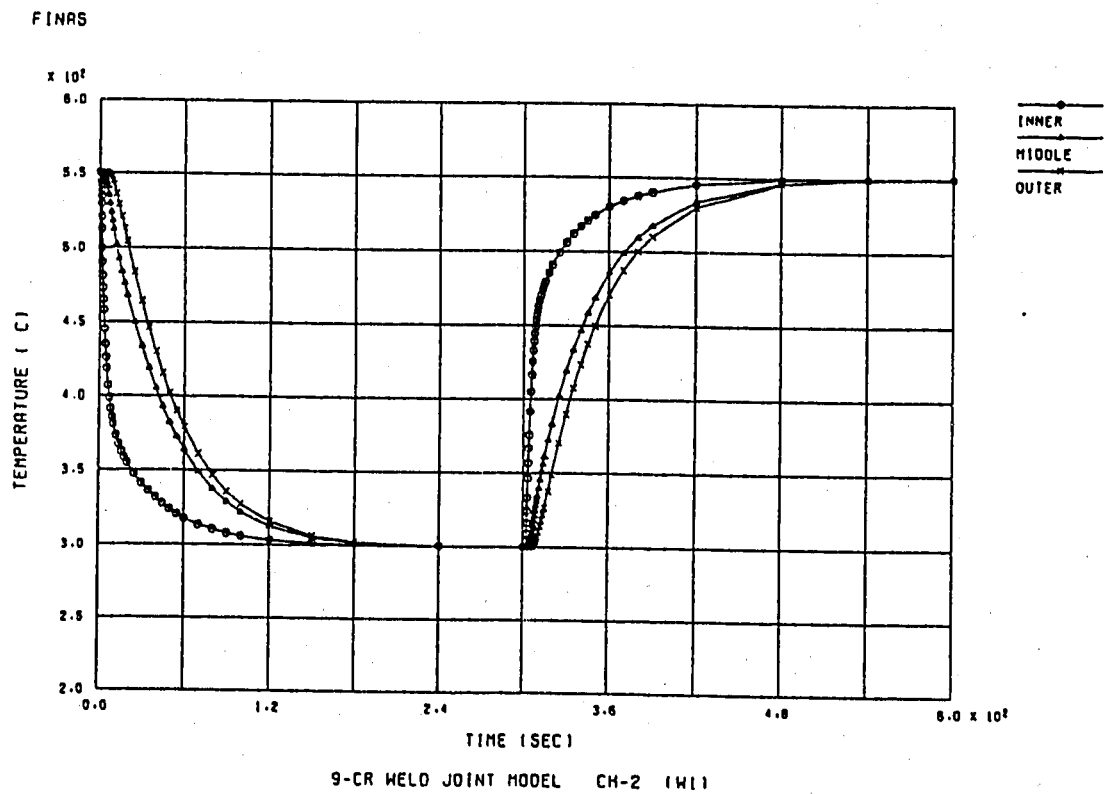
付録A 伝熱解析結果	73
付録B 弾性熱応力解析結果	82

付録 A 伝熱解析結果

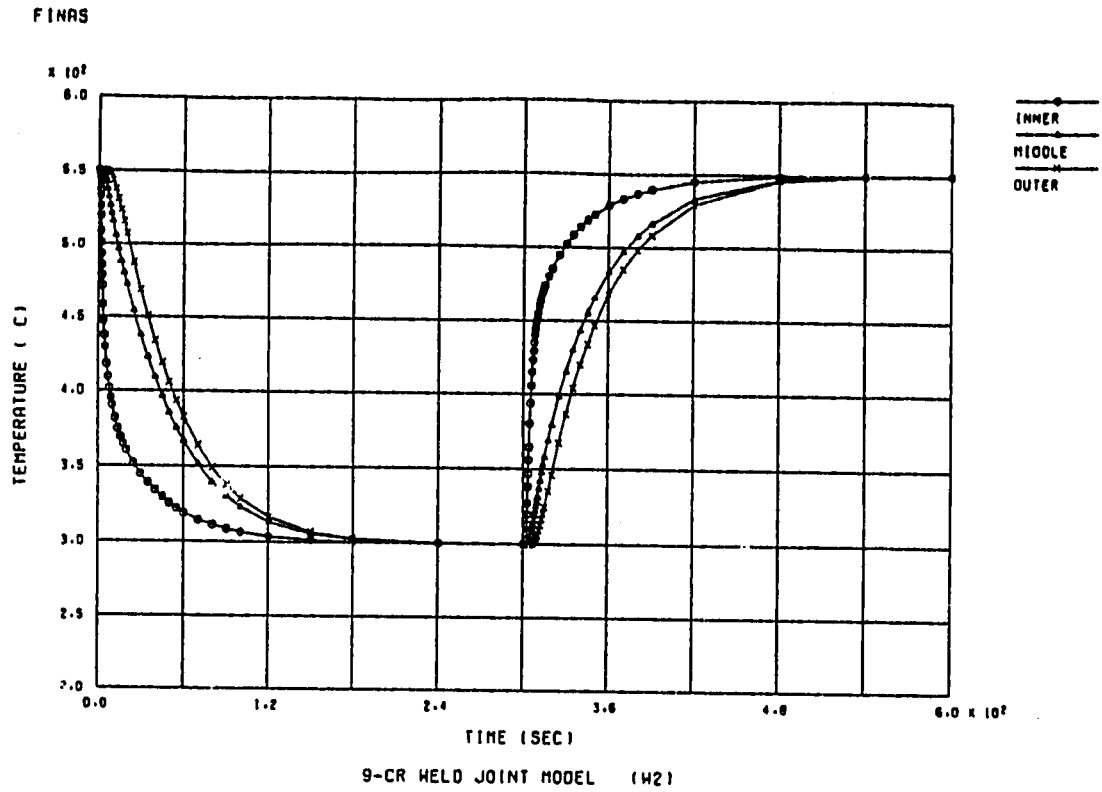
- 付図 A-1 供試体入口部の熱過渡 1 サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)
- 付図 A-2 溶接継手 W 1 の熱過渡 1 サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)
- 付図 A-3 溶接継手 W 2 の熱過渡 1 サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)
- 付図 A-4 溶接継手 W 3 の熱過渡 1 サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)
- 付図 A-5 溶接継手 W 4 の熱過渡 1 サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)
- 付図 A-6 溶接継手 W 5 の熱過渡 1 サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)
- 付図 A-7 溶接継手 W 6 の熱過渡 1 サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)
- 付図 A-8 供試体出口部の熱過渡 1 サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)
- 付図 A-9 溶接継手 W 1、W 3、W 5 での温度解析結果 (外表面、コールド 300 秒)
- 付図 A-10 溶接継手 W 1、W 3、W 5 での温度解析結果 (外表面、ホット 300 秒)
- 付図 A-11 溶接継手 W 1、W 3、W 5 での温度解析結果 (内表面、コールド 300 秒)
- 付図 A-12 溶接継手 W 1、W 3、W 5 での温度解析結果 (内表面、ホット 300 秒)
- 付図 A-13 溶接継手 W 2、W 4、W 6 での温度解析結果 (外表面、コールド 300 秒)
- 付図 A-14 溶接継手 W 2、W 4、W 6 での温度解析結果 (外表面、ホット 300 秒)
- 付図 A-15 溶接継手 W 2、W 4、W 6 での温度解析結果 (内表面、コールド 300 秒)
- 付図 A-16 溶接継手 W 2、W 4、W 6 での温度解析結果 (内表面、ホット 300 秒)



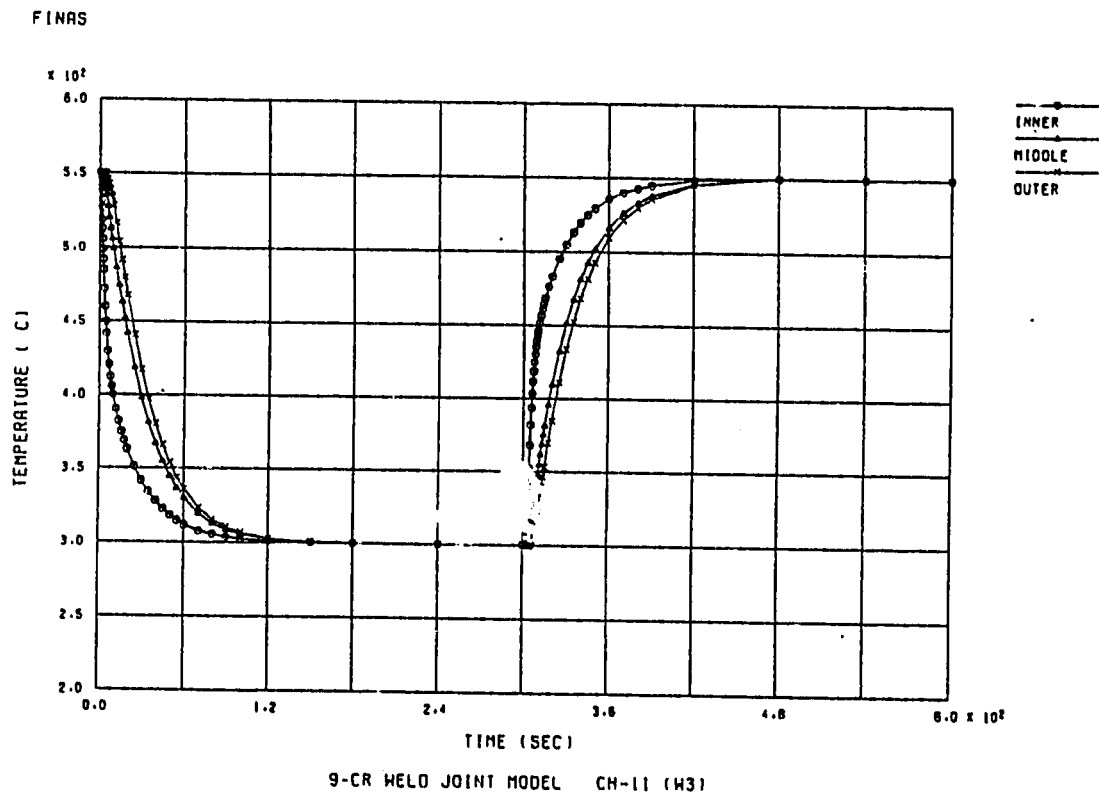
付図 A-1 供試体入口部の熱過渡1サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)



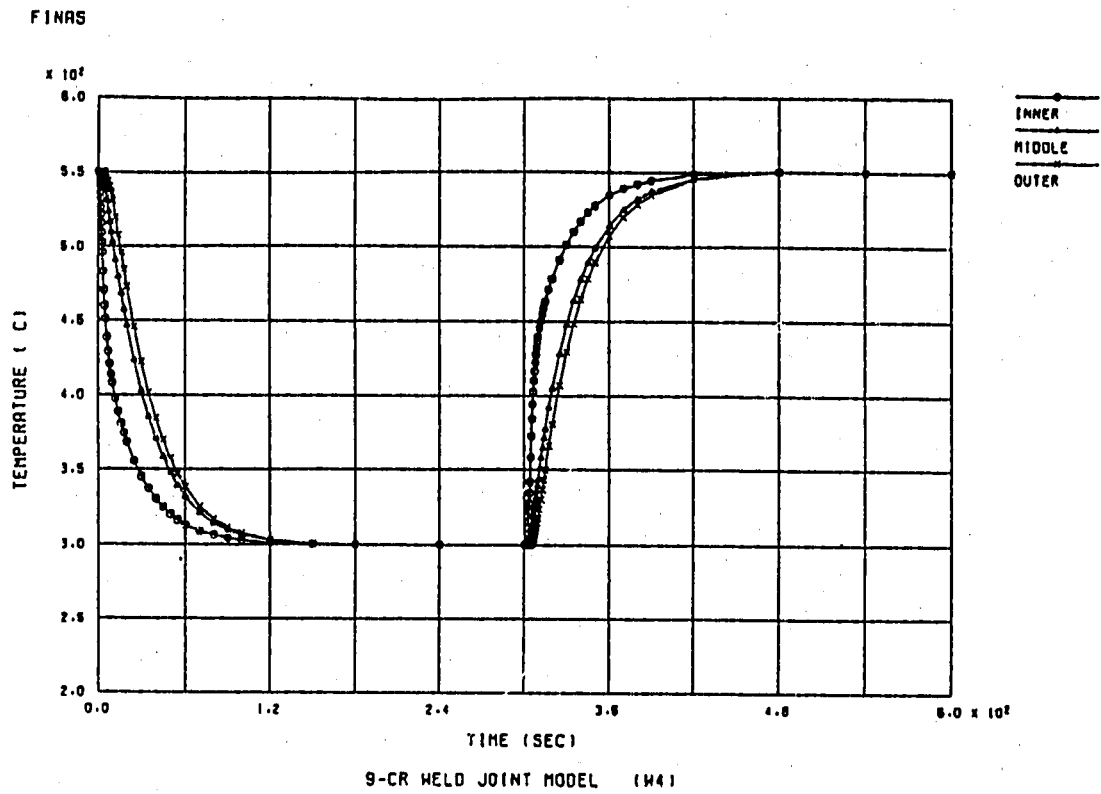
付図 A-2 溶接継手W1の熱過渡1サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)



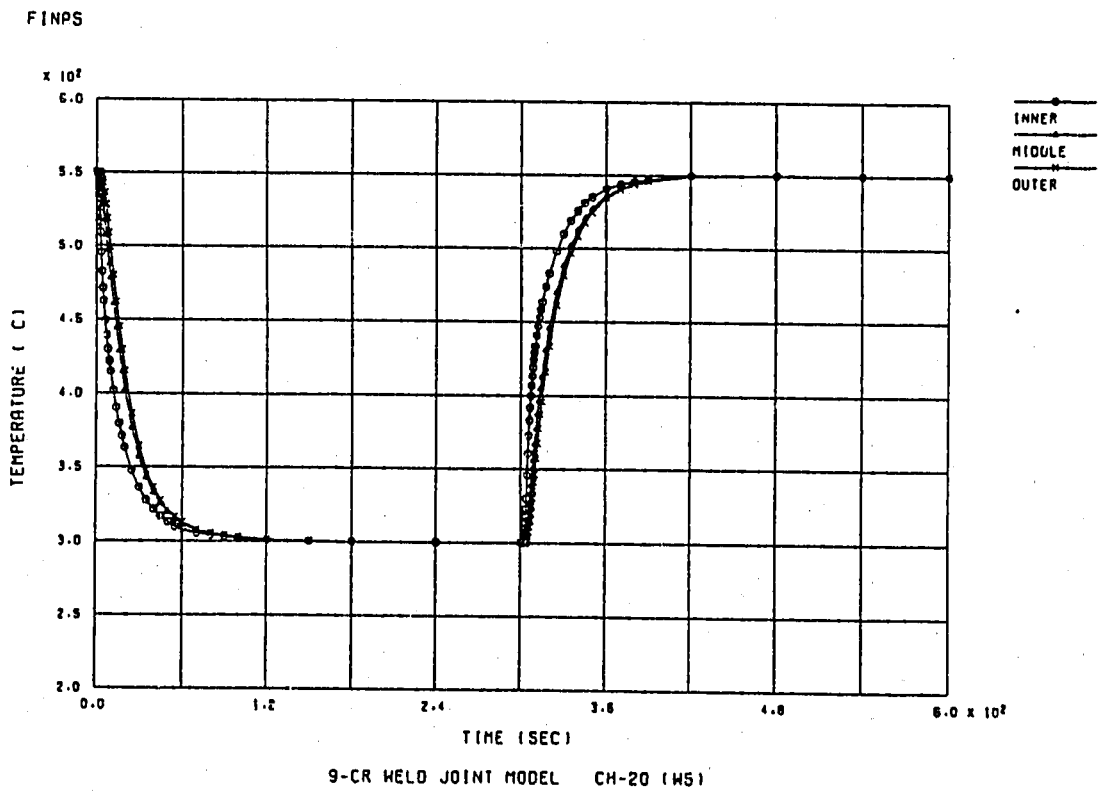
付図 A-3 溶接継手W 2 の熱過渡 1 サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)



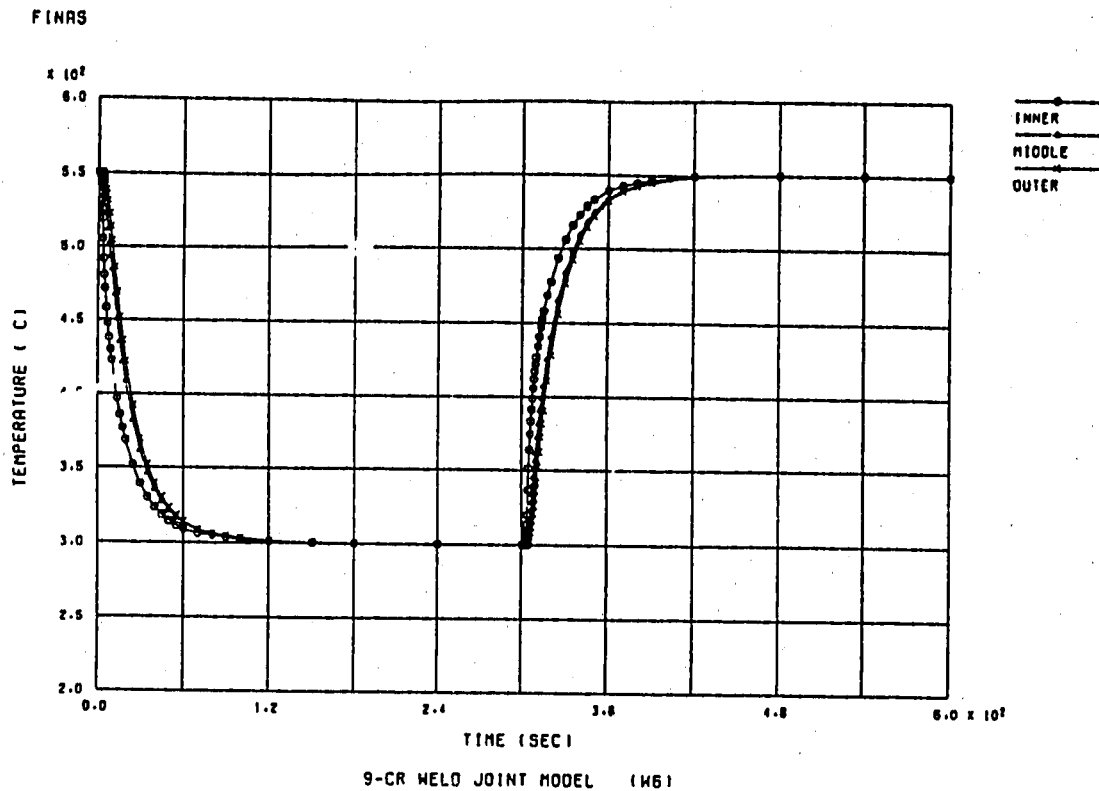
付図 A-4 溶接継手W 3 の熱過渡 1 サイクル中の温度解析結果 (内外表面、板厚中央)



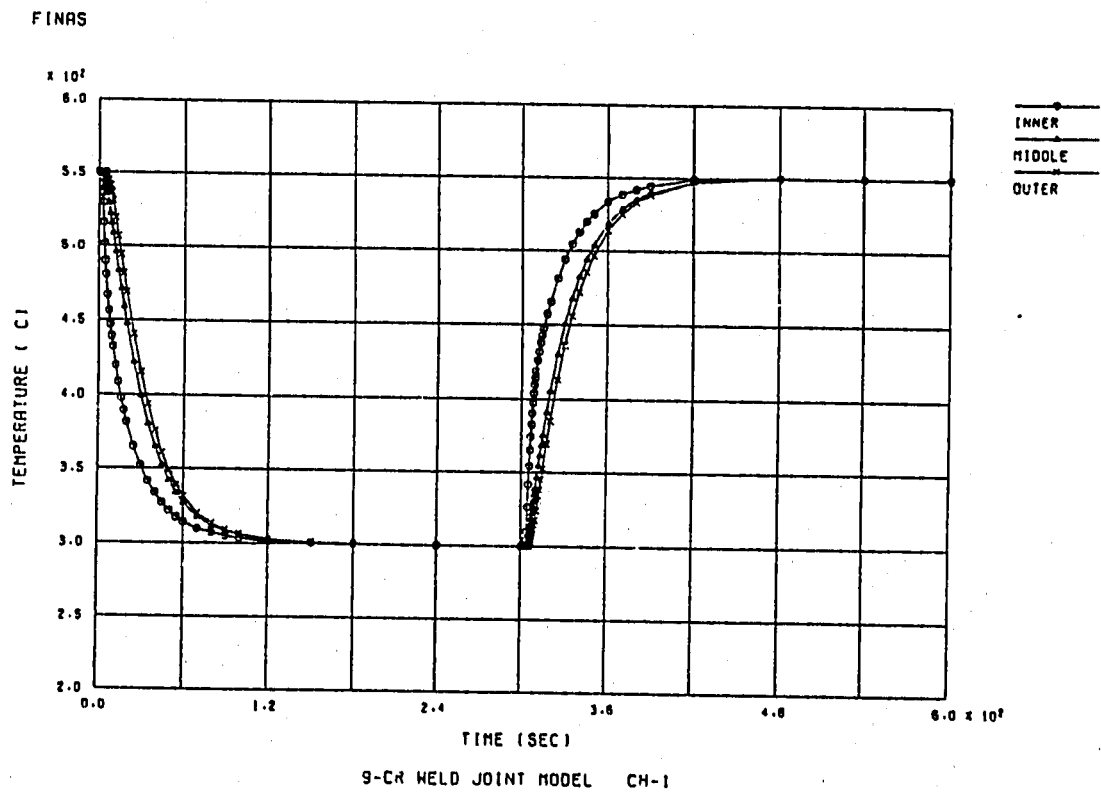
付図 A-5 溶接継手W4の熱過渡1サイクル中の温度解析結果(内外表面、板厚中央)



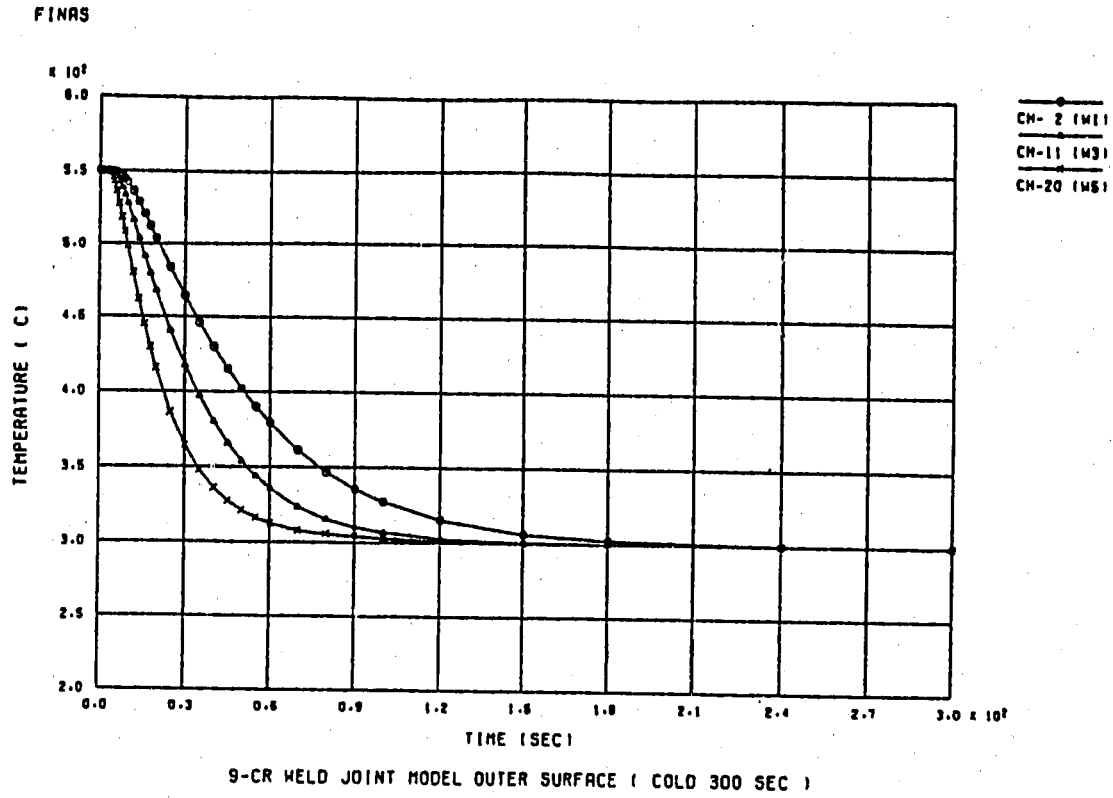
付図 A-6 溶接継手W5の熱過渡1サイクル中の温度解析結果(内外表面、板厚中央)



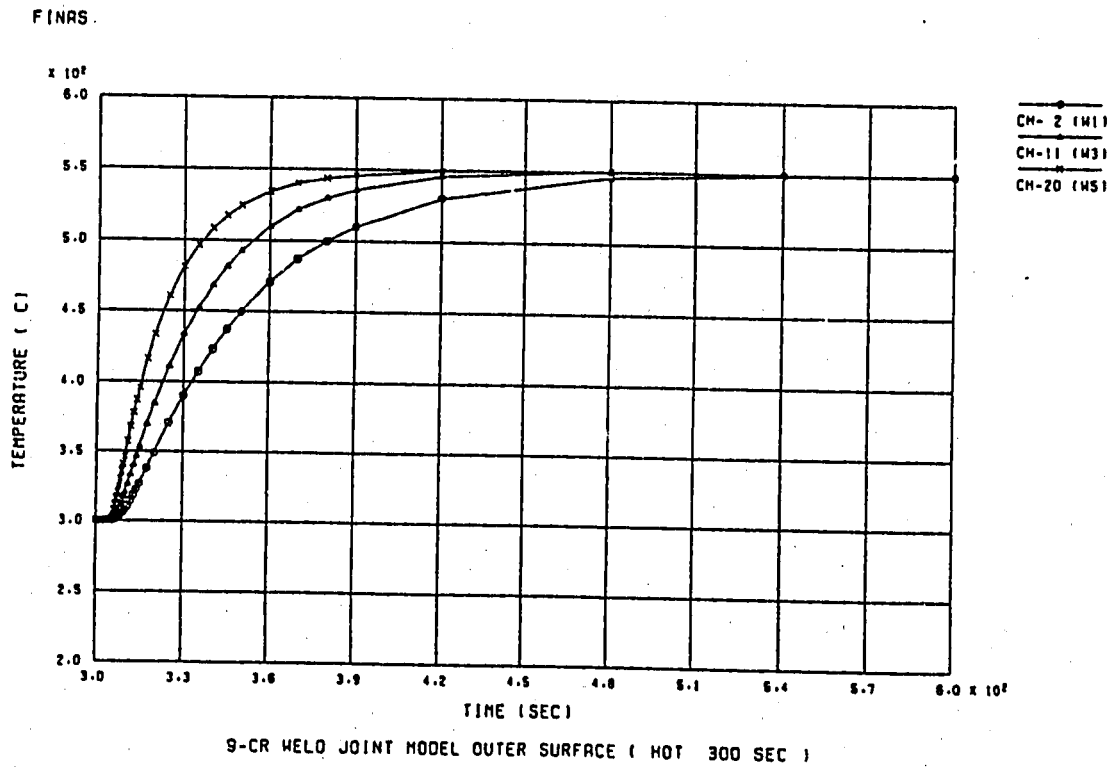
付図 A-7 溶接継手W6の熱過渡1サイクル中の温度解析結果(内外表面、板厚中央)



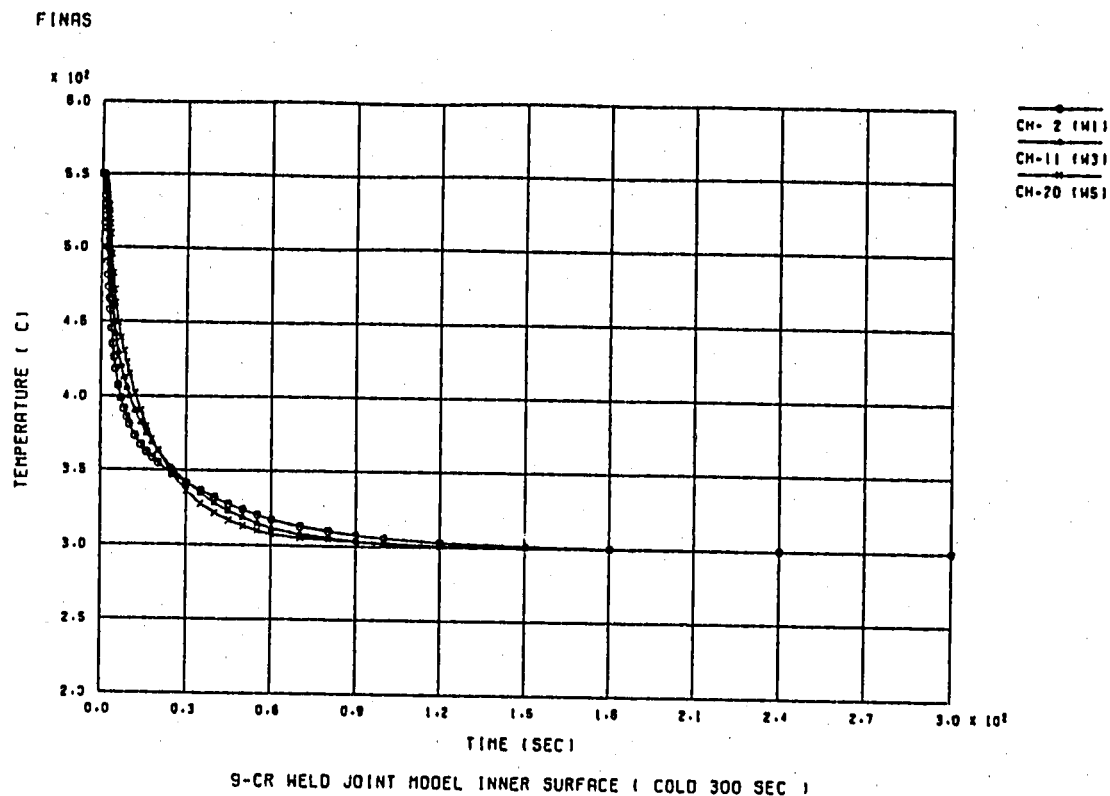
付図 A-8 供試体出口部の熱過渡1サイクル中の温度解析結果(内外表面、板厚中央)



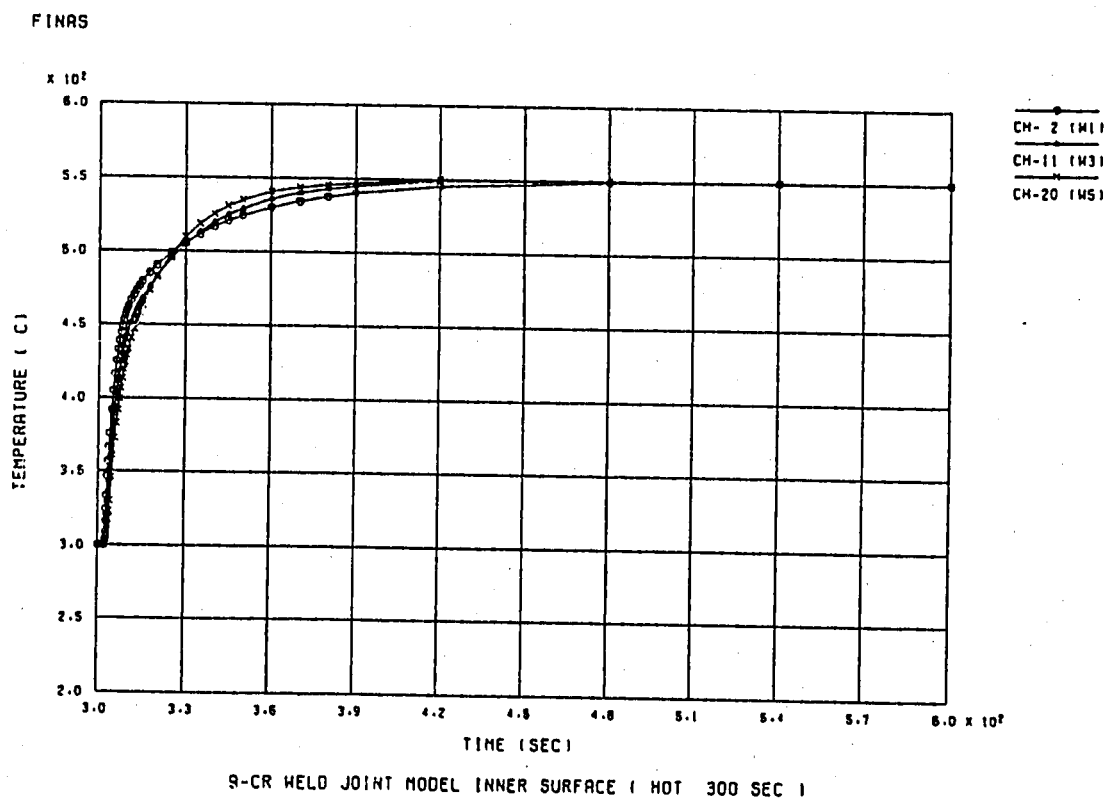
付図 A-9 溶接継手W1、W3、W5での温度解析結果 (外表面、コールド300秒)



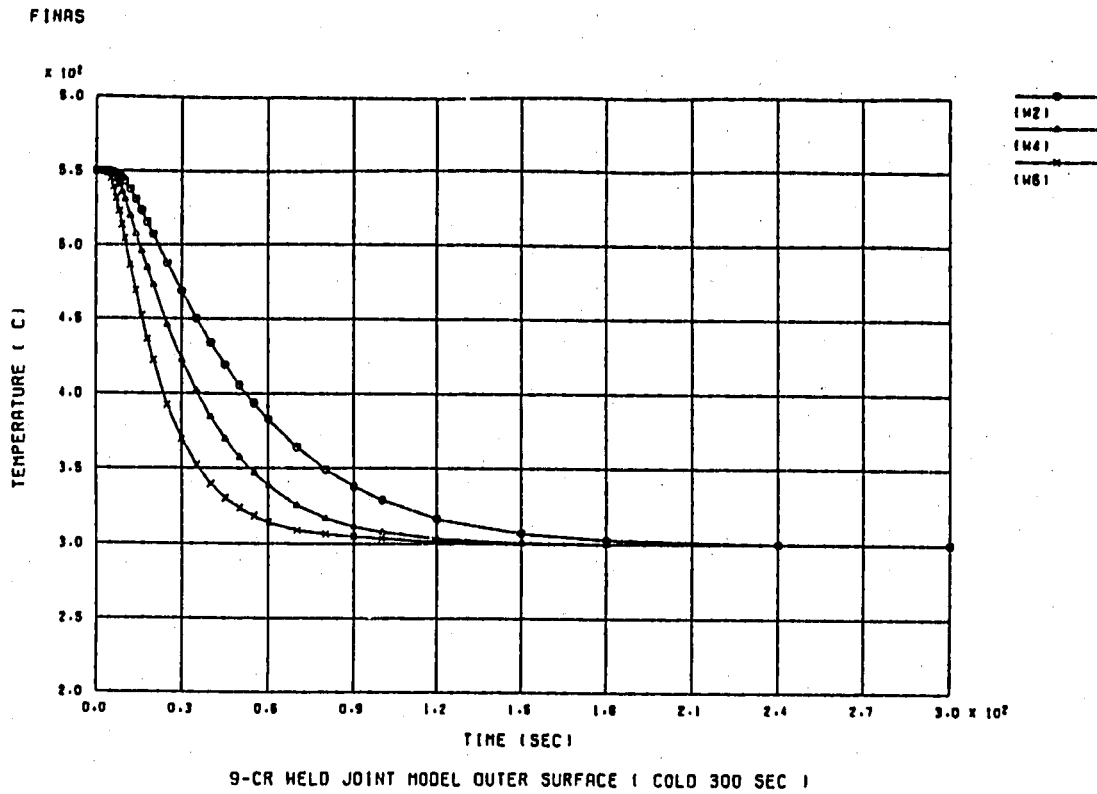
付図 A-10 溶接継手W1、W3、W5での温度解析結果 (外表面、ホット 300秒)



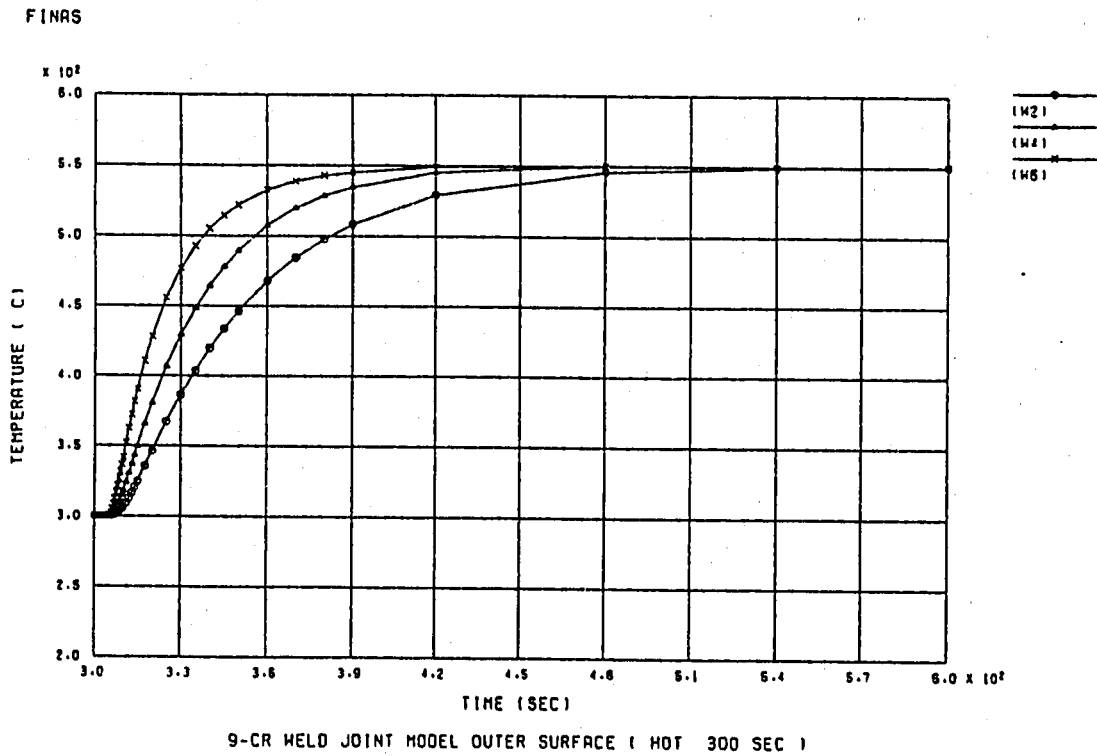
付図 A-11 溶接継手W1、W3、W5での温度解析結果 (内表面、コールド300秒)



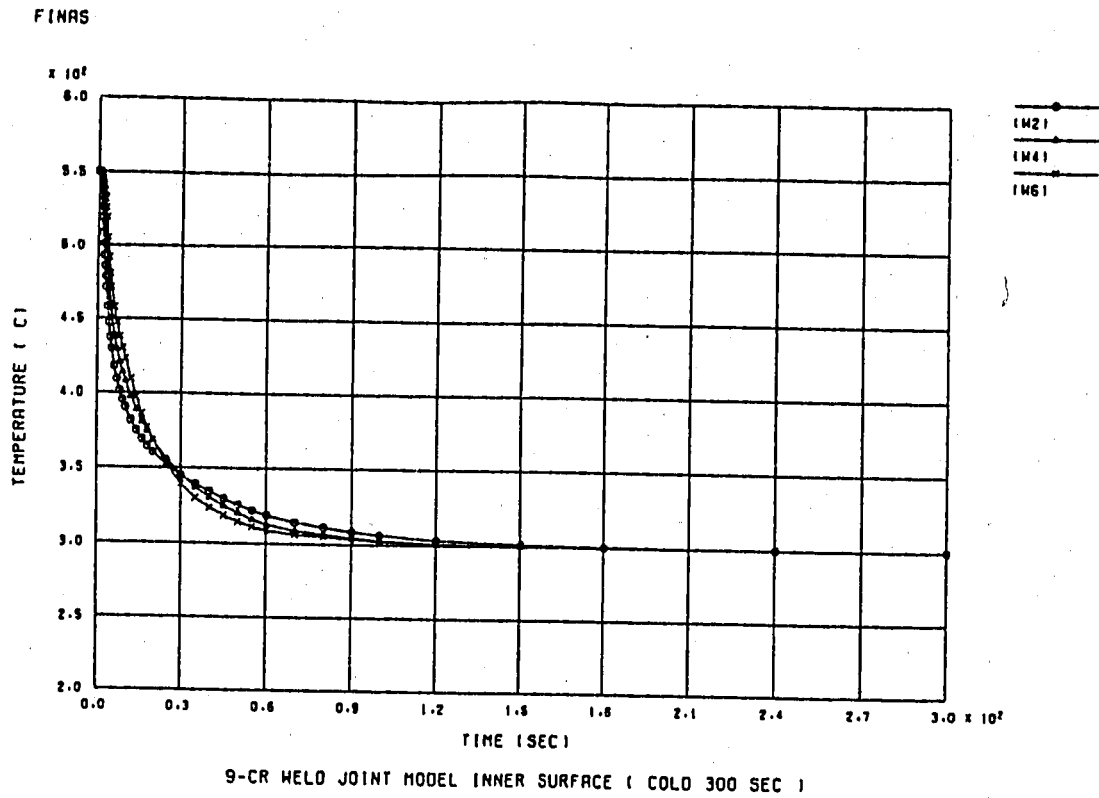
付図 A-12 溶接継手W1、W3、W5での温度解析結果 (内表面、ホット 300秒)



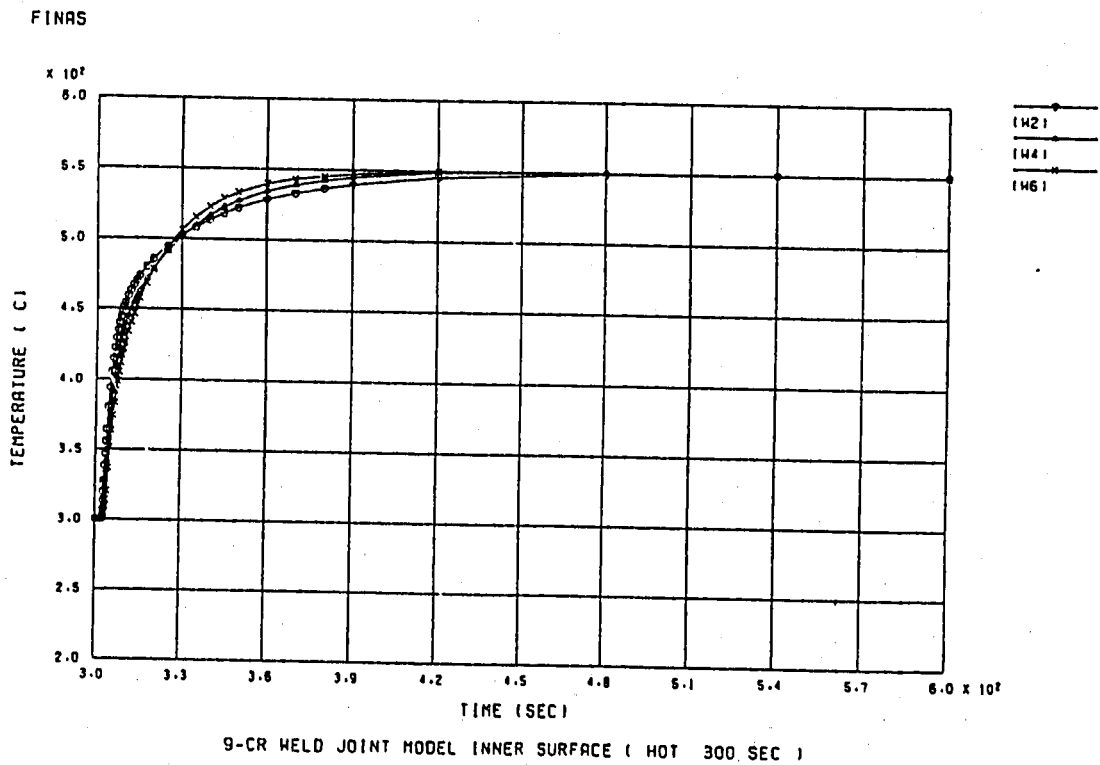
付図 A-13 溶接継手W 2、W 4、W 6での温度解析結果 (外表面、コールド300秒)



付図 A-14 溶接継手W 2、W 4、W 6での温度解析結果 (外表面、ホット 300秒)



付図 A-15 溶接継手W 2、W 4、W 6での温度解析結果 (内表面、コールド300秒)



付図 A-16 溶接継手W 2、W 4、W 6での温度解析結果 (内表面、ホット 300秒)

付録 B 弾性熱応力解析結果

- 付図 B-1 軸方向応力のコンター図 (コールドランジェント 10 秒後)
- 付図 B-2 周方向応力のコンター図 (コールドランジェント 10 秒後)
- 付図 B-3 軸方向応力のコンター図 (ホットランジェント 10 秒後)
- 付図 B-4 周方向応力のコンター図 (ホットランジェント 10 秒後)
- 付図 B-5 相当応力範囲の供試体軸方向分布 (20 mm板厚部、内表面と外表面)
- 付図 B-6 相当応力範囲の供試体軸方向分布 (15 mm板厚部、内表面と外表面)
- 付図 B-7 相当応力範囲の供試体軸方向分布 (10 mm板厚部、内表面と外表面)
- 付図 B-8 各成分ひずみ範囲の供試体軸方向分布 (20 mm板厚部、内表面と外表面)
- 付図 B-9 各成分ひずみ範囲の供試体軸方向分布 (15 mm板厚部、内表面と外表面)
- 付図 B-10 各成分ひずみ範囲の供試体軸方向分布 (10 mm板厚部、内表面と外表面)
- 付図 B-11 20 mm板厚部内表面軸方向の極 2 時点における軸方向応力、ひずみ成分分布
- 付図 B-12 20 mm板厚部内表面軸方向の極 2 時点における周方向応力、ひずみ成分分布
- 付図 B-13 20 mm板厚部外表面軸方向の極 2 時点における軸方向応力、ひずみ成分分布
- 付図 B-14 20 mm板厚部外表面軸方向の極 2 時点における周方向応力、ひずみ成分分布
- 付図 B-15 15 mm板厚部内表面軸方向の極 2 時点における軸方向応力、ひずみ成分分布
- 付図 B-16 15 mm板厚部内表面軸方向の極 2 時点における周方向応力、ひずみ成分分布
- 付図 B-17 15 mm板厚部外表面軸方向の極 2 時点における軸方向応力、ひずみ成分分布
- 付図 B-18 15 mm板厚部外表面軸方向の極 2 時点における周方向応力、ひずみ成分分布
- 付図 B-19 10 mm板厚部内表面軸方向の極 2 時点における軸方向応力、ひずみ成分分布
- 付図 B-20 10 mm板厚部内表面軸方向の極 2 時点における周方向応力、ひずみ成分分布
- 付図 B-21 10 mm板厚部外表面軸方向の極 2 時点における軸方向応力、ひずみ成分分布
- 付図 B-22 10 mm板厚部外表面軸方向の極 2 時点における周方向応力、ひずみ成分分布

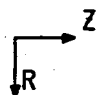
FINAS
STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES

1	-17.0000
2	-10.8000
3	-4.60000
4	1.600000
5	7.800000
6	14.00000
7	20.20000
8	26.40000
9	32.60000
10	38.80000



付図 B-1 軸方向応力のコンター図 (コールドトランジェント10秒後)



STEP NO. 6

GEOM. SCALE 150.000

9-CR WELD JOINT MODEL SIG-Z (COLD, 10.0SEC)

軸方向応力のコンター図 (コールドトランジェント10秒後)

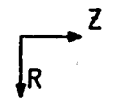
FINAS
STRESS COMPONENT 3

CONTOUR VALUES

1	-14.0000
2	-8.10000
3	-2.20000
4	3.700000
5	9.600000
6	15.50000
7	21.40000
8	27.30000
9	33.20000
10	39.10000



付図 B-2 周方向応力のコンター図 (コールドトランジェント10秒後)



STEP NO. 6

GEOM. SCALE  150.000

9-CR WELD JOINT MODEL SIG-TH (COLD, 10.0SEC)

周方向応力のコンター図 (コールドトランジェント10秒後)

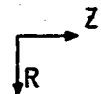
FINAS
STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES

1	-42.2000
2	-35.7000
3	-29.2000
4	-22.7000
5	-16.2000
6	-9.70000
7	-3.20000
8	3.300000
9	9.800000
10	16.30000



付図 B-3 軸方向応力のコンター図 (ホットランジェント 10秒後)



STEP NO. 15

GEOM. SCALE 150.000

9-CR WELD JOINT MODEL SIG-Z (HOT .10.0SEC)

軸方向応力のコンター図 (ホットランジェント 10秒後)

FINAS
STRESS COMPONENT 3

CONTOUR VALUES

1	-43.1000
2	-36.8000
3	-30.5000
4	-24.2000
5	-17.9000
6	-11.6000
7	-5.30000
8	1.000000
9	7.300000
10	13.60000



付図 B-4 周方向応力のコンター図 (ホットランジェント 10秒後)

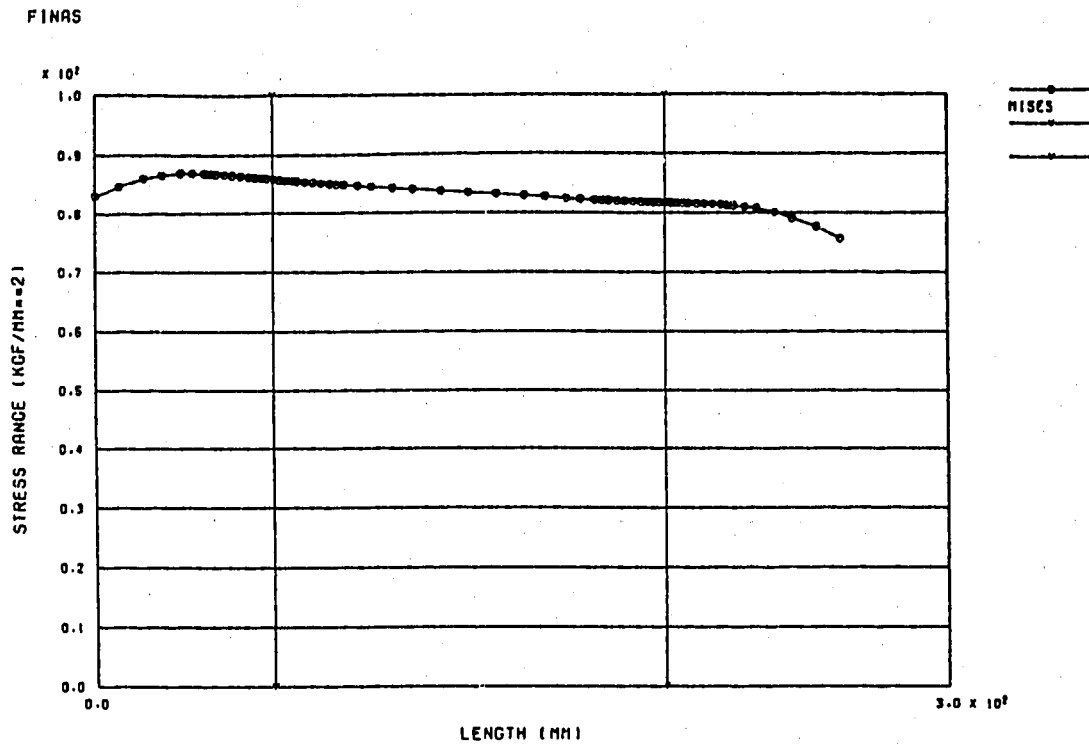


STEP NO. 15

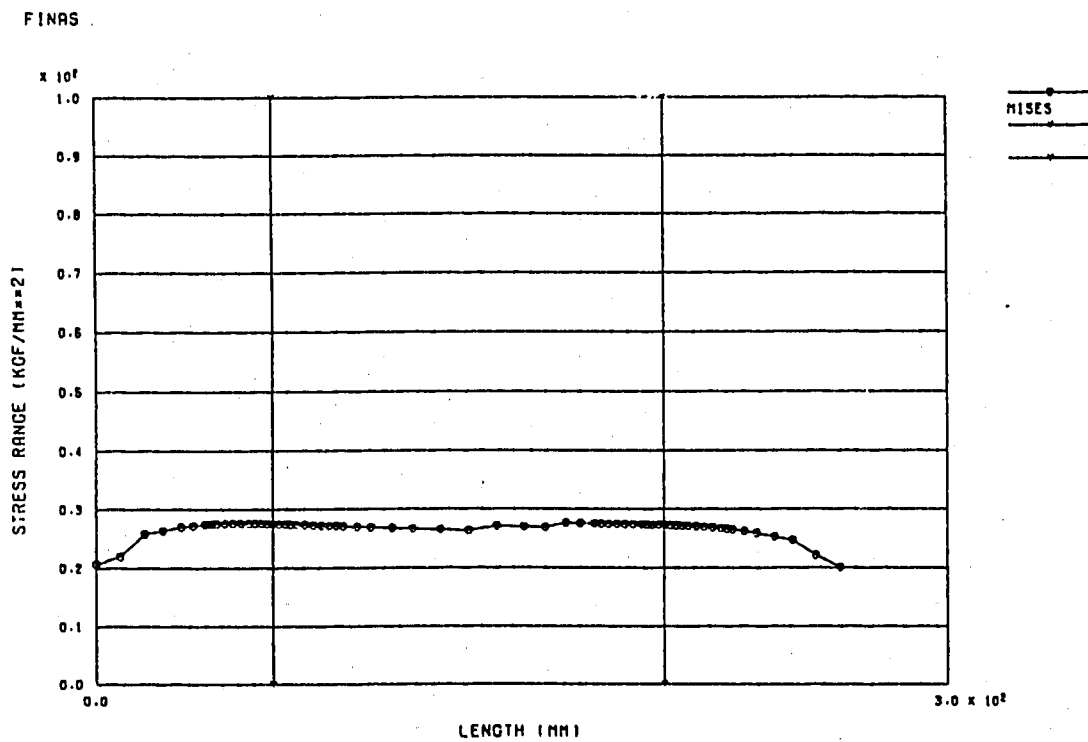
GEOM. SCALE  150.000

9-CR WELD JOINT MODEL SIG-TH (HOT .10.0SEC)

周方向応力のコンター図 (ホットランジェント 10秒後)

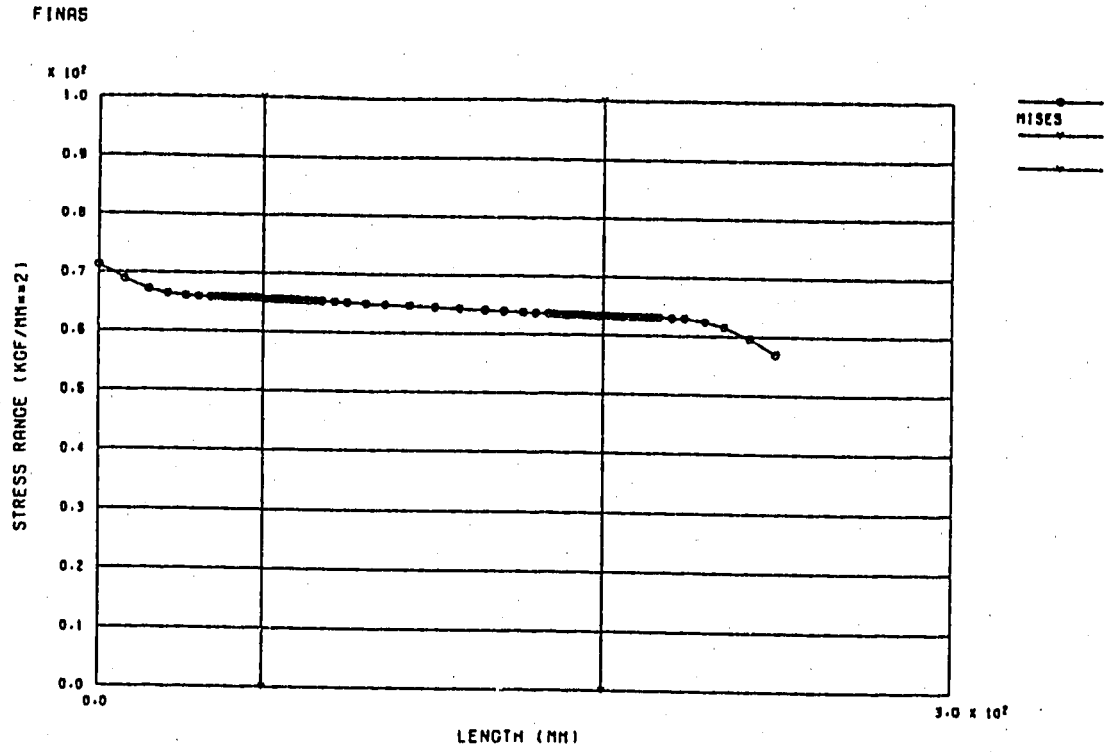


9-CR WELD JOINT MODEL(E) STRESS RANGE DISTRIBUTION ALONG FACE-1 ①

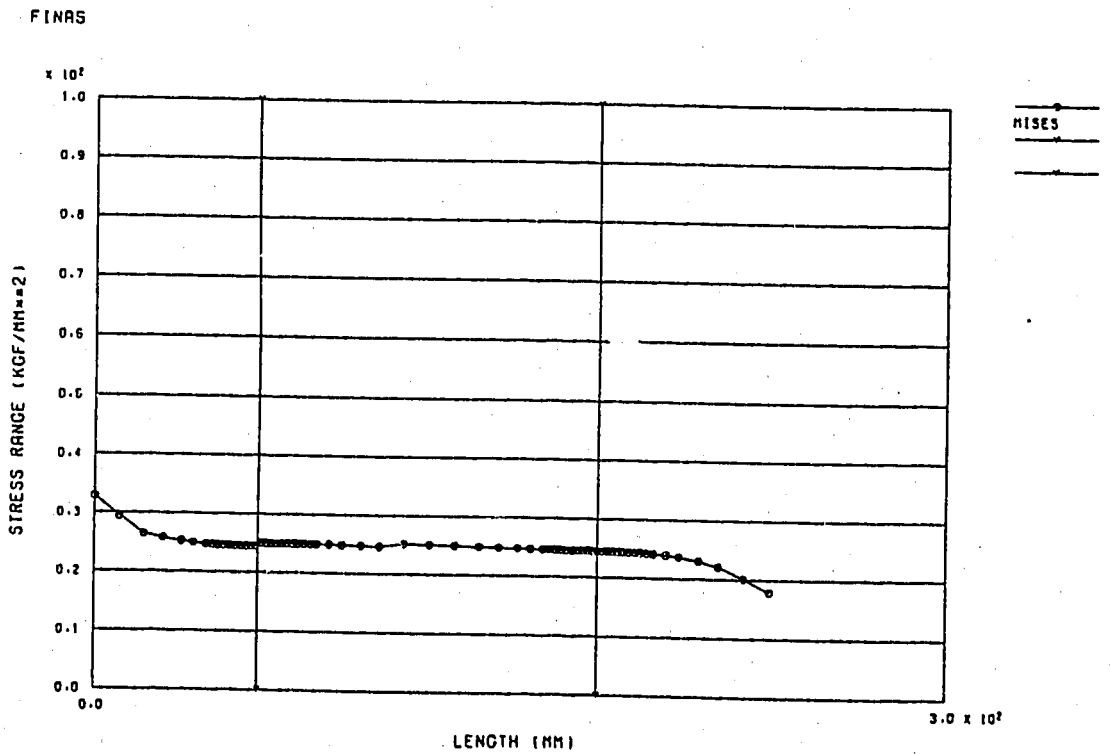


9-CR WELD JOINT MODEL(E) STRESS RANGE DISTRIBUTION ALONG FACE-2 ①

付図 B-5 相当応力範囲の供試体軸方向分布 (20mm板厚部、内表面と外表面)

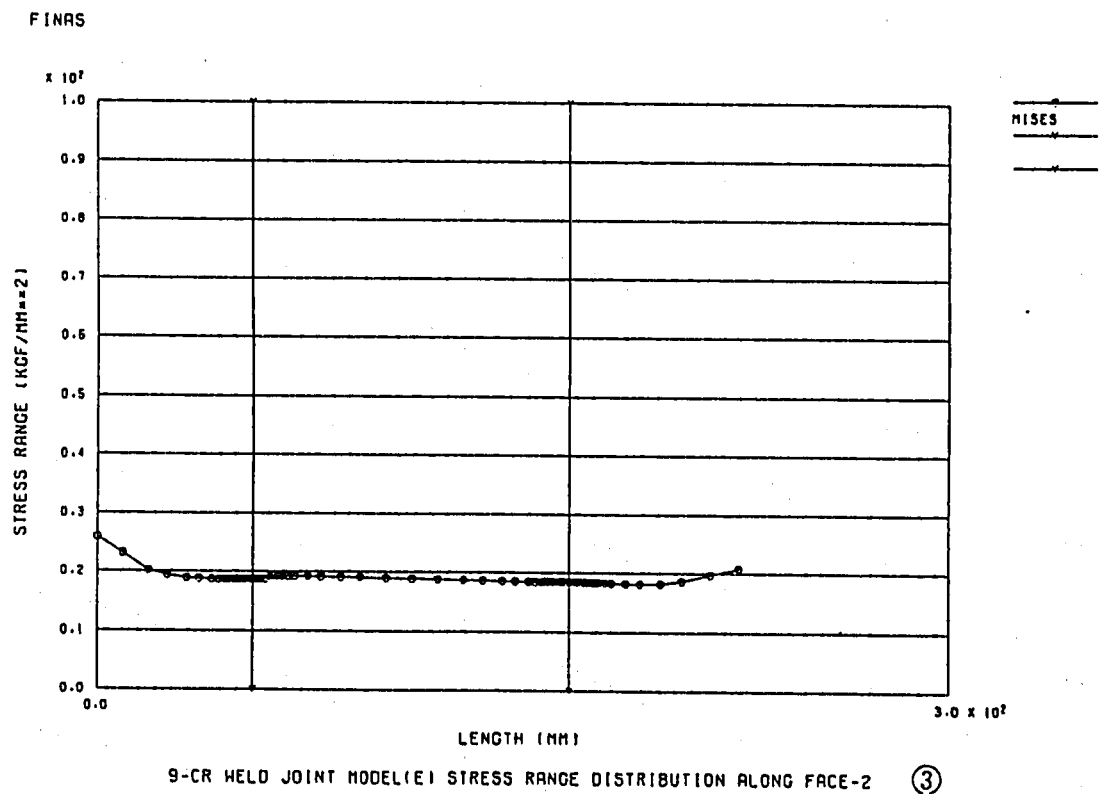
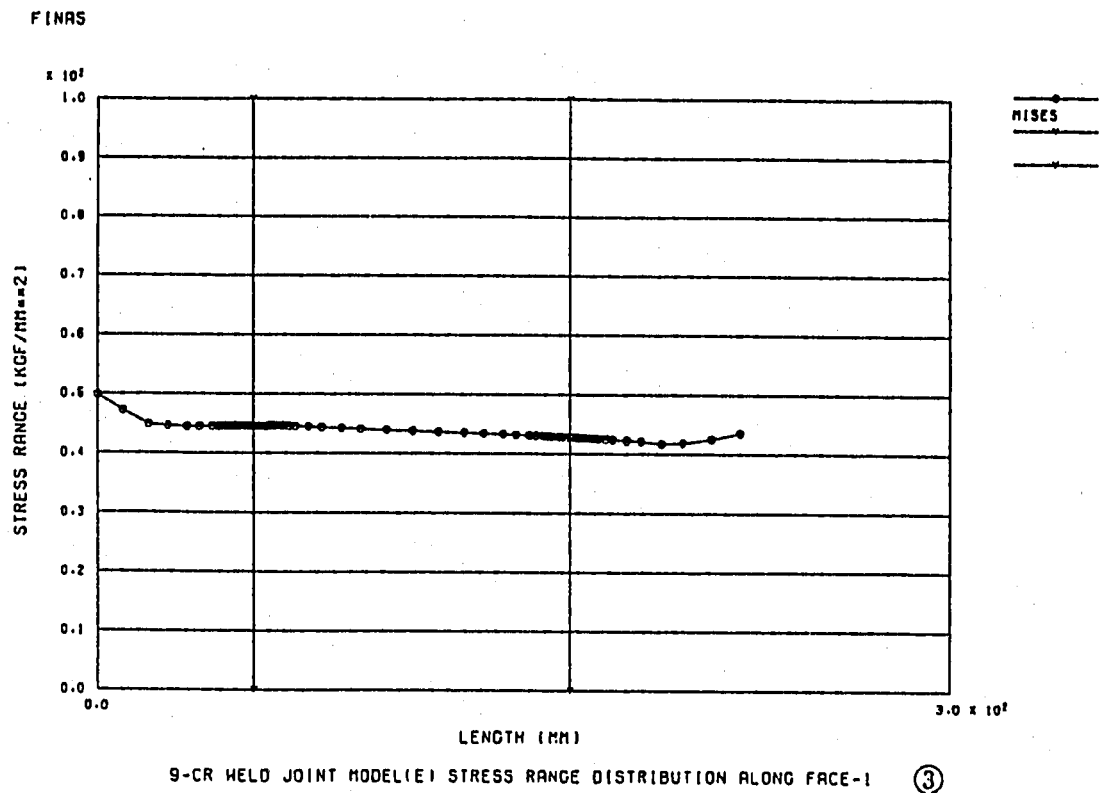


9-CR WELD JOINT MODEL(E) STRESS RANGE DISTRIBUTION ALONG FACE-1

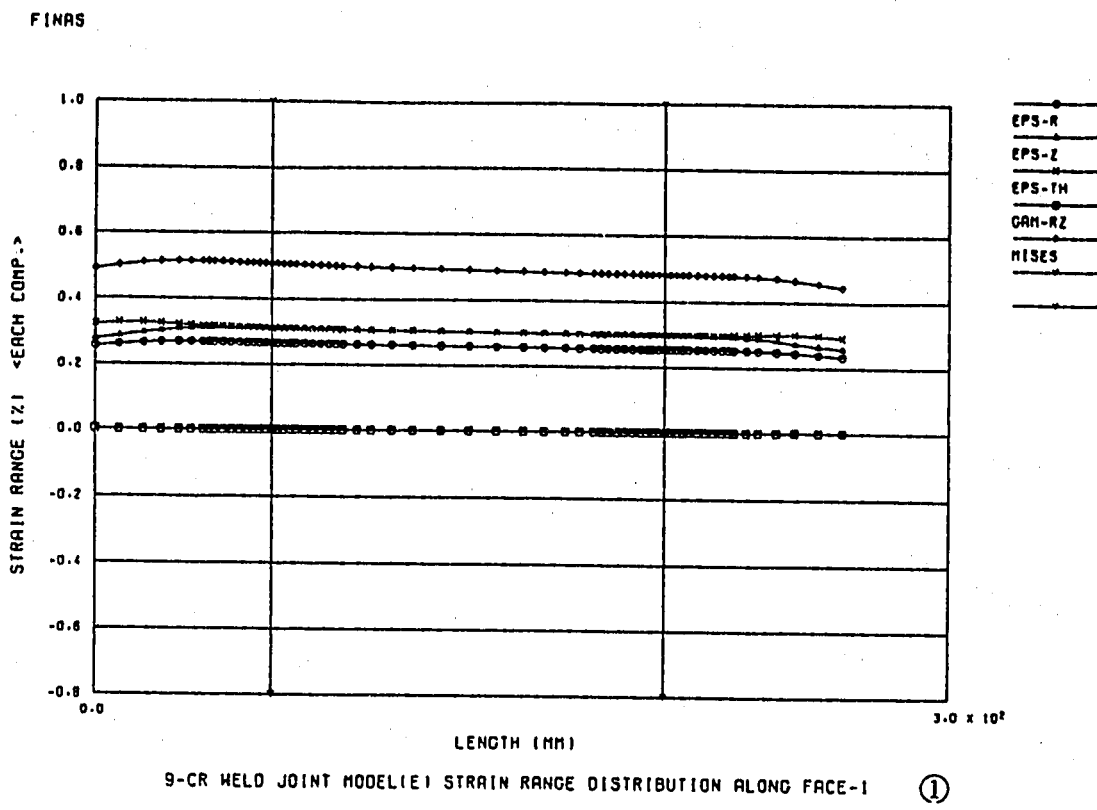


9-CR WELD JOINT MODEL(E) STRESS RANGE DISTRIBUTION ALONG FACE-2

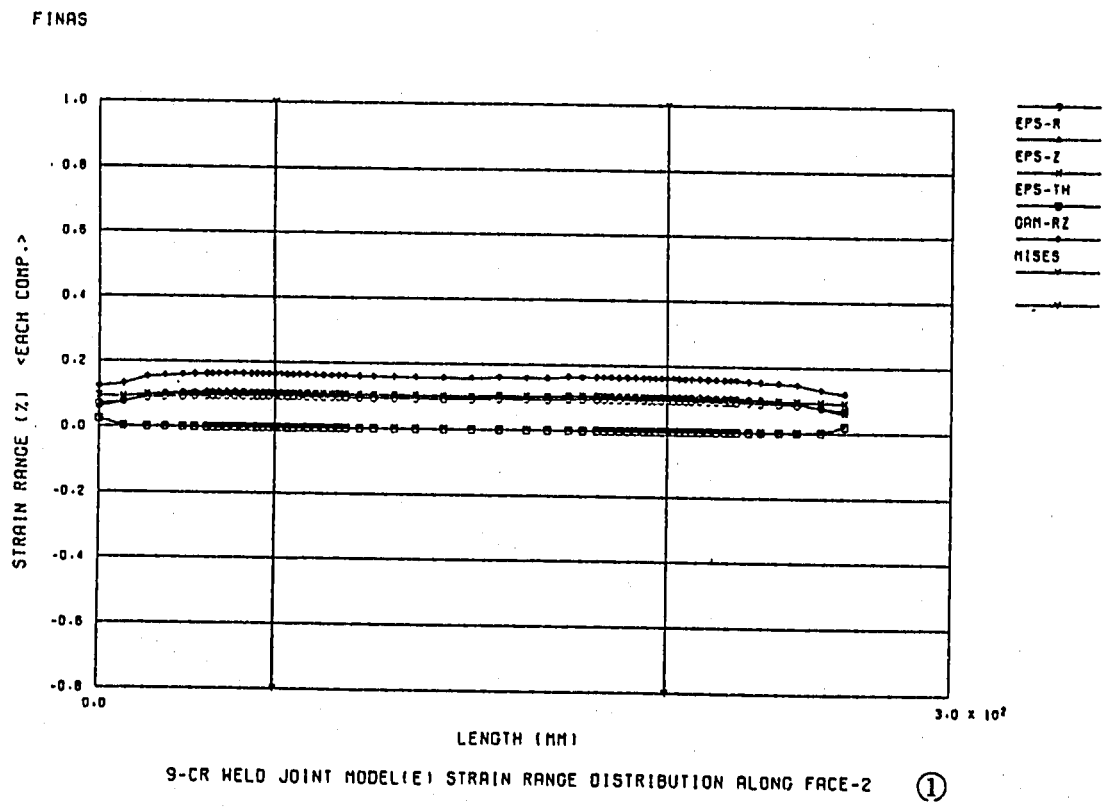
付図 B-6 相当応力範囲の供試体軸方向分布 (1.5mm板厚部、内表面と外表面)



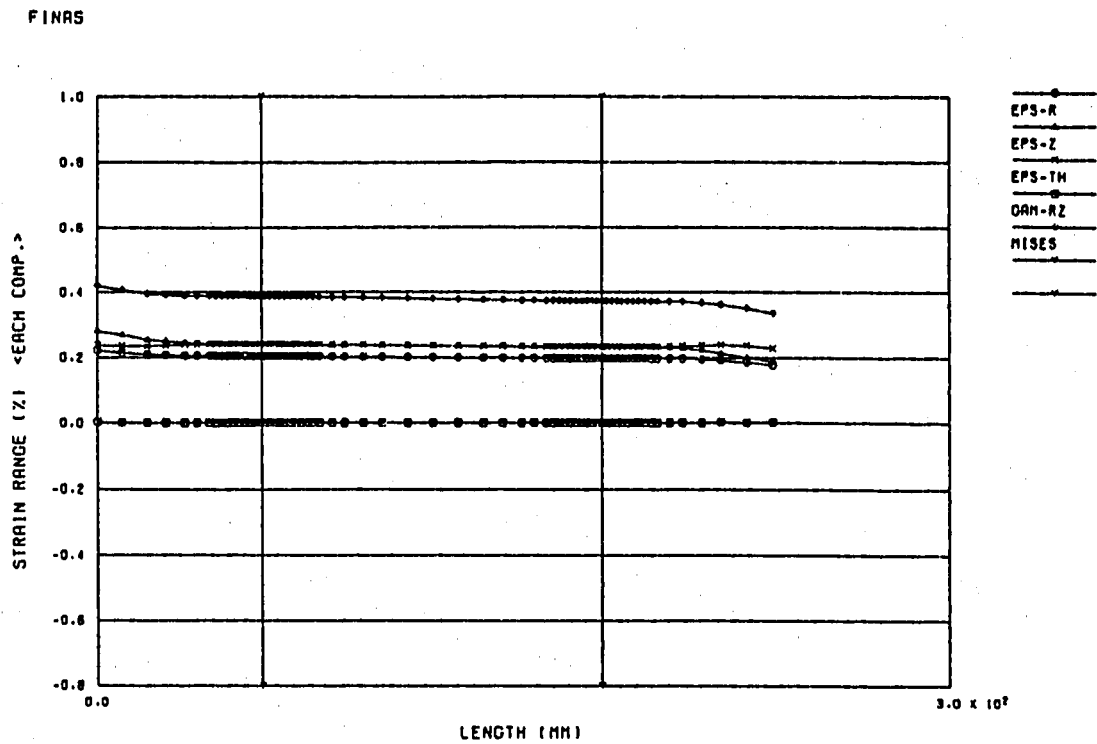
付図 B-7 相当応力範囲の供試体軸方向分布 (10mm板厚部、内表面と外表面)



(注) 本図に示すミーゼス型相当ひずみ範囲は、相当応力範囲をヤング率で除した値であり、本文に示すものとは異なる。

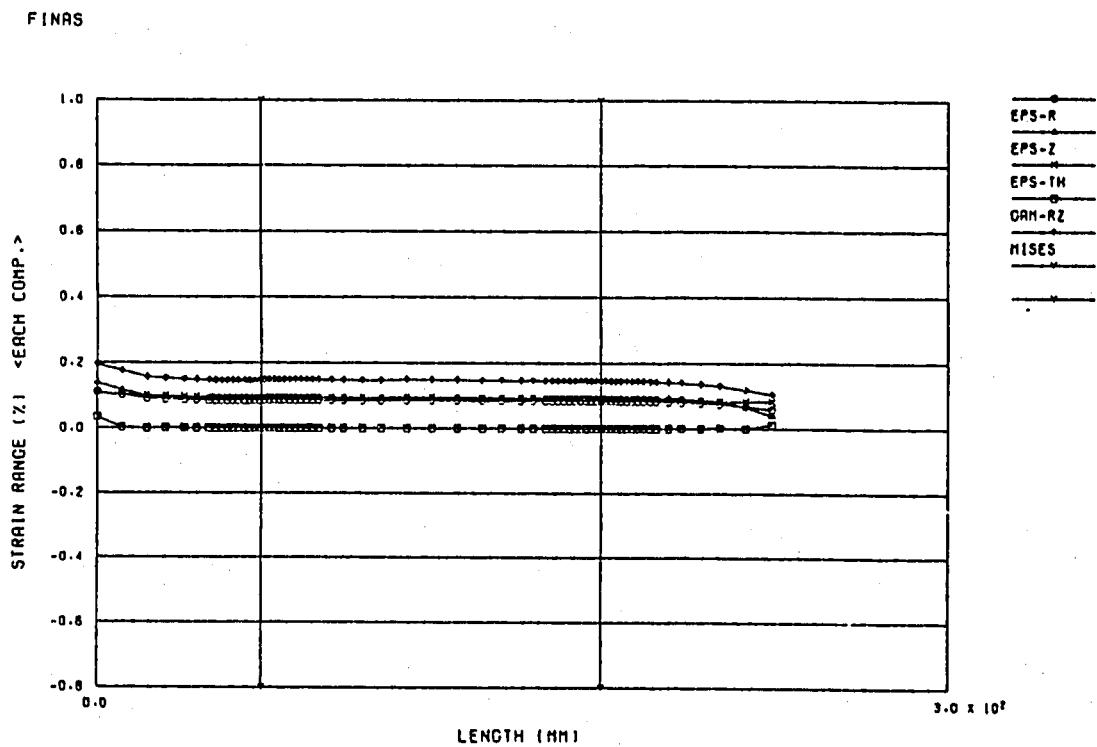


付図 B-8 各成分ひずみ範囲の供試体軸方向分布 (20mm板厚部、内表面と外表面)



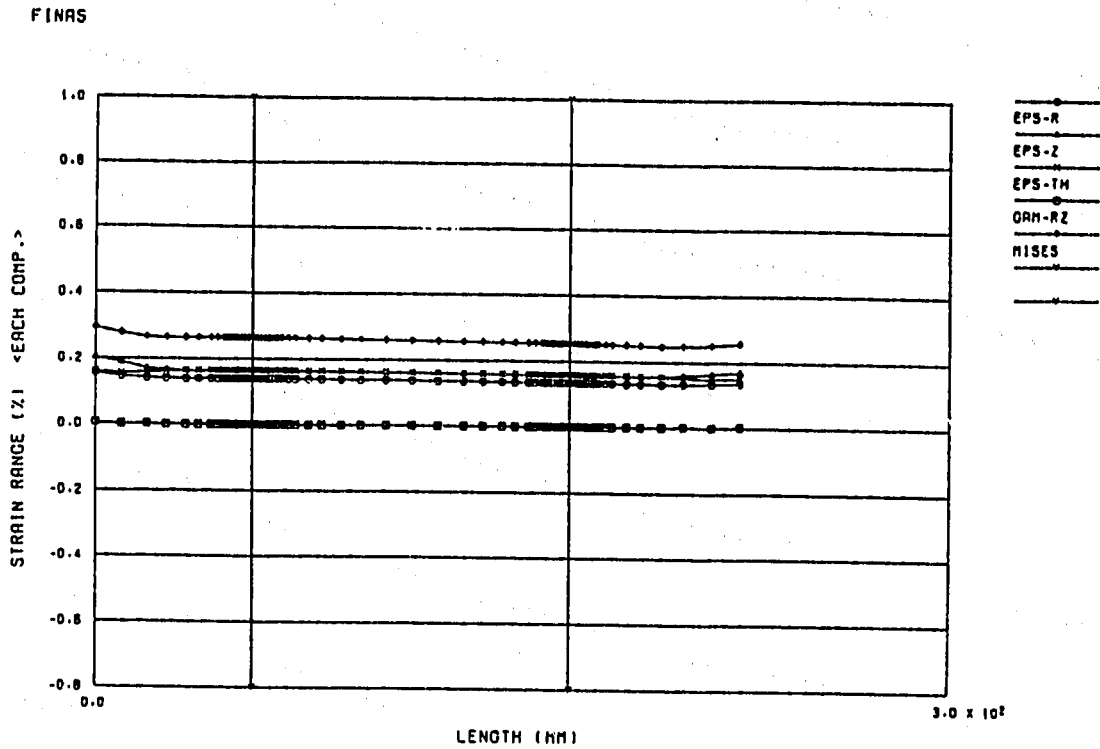
9-CR WELD JOINT MODEL(E) STRAIN RANGE DISTRIBUTION ALONG FACE-1 ②

(注) 本図に示すミーゼス型相当ひずみ範囲は、相当応力範囲をヤング率で除した値であり、本文に示すものとは異なる。

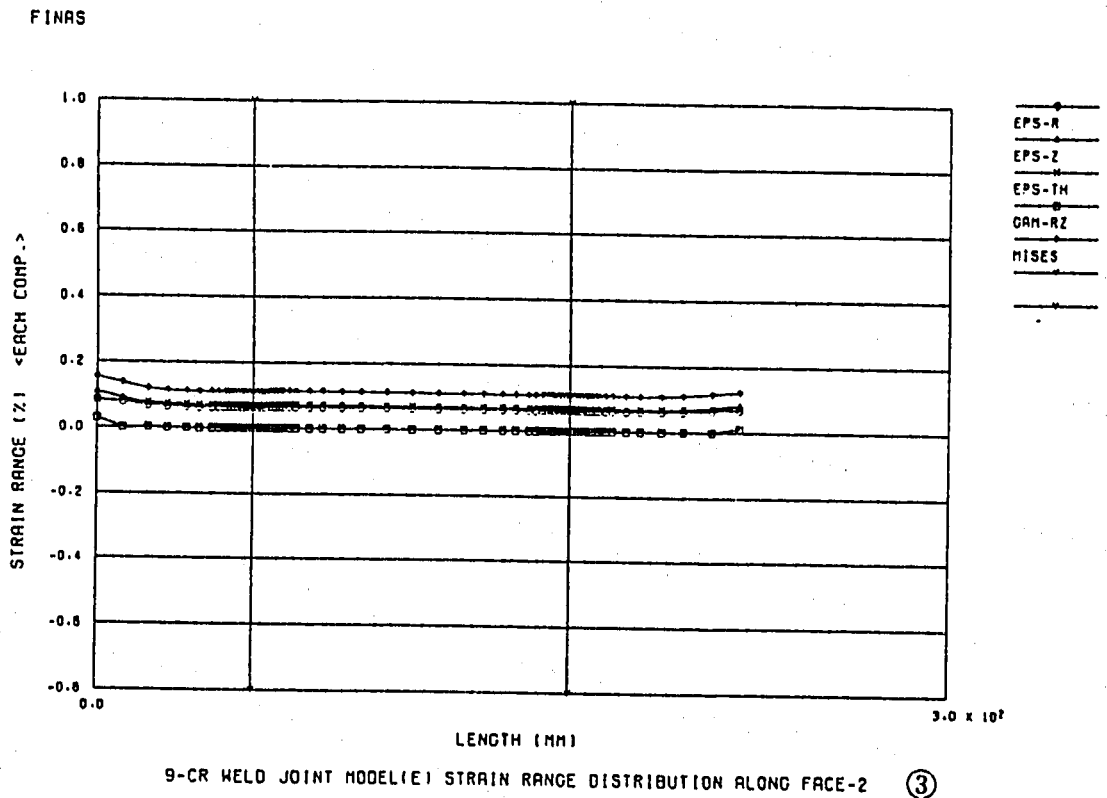


9-CR WELD JOINT MODEL(E) STRAIN RANGE DISTRIBUTION ALONG FACE-2 ②

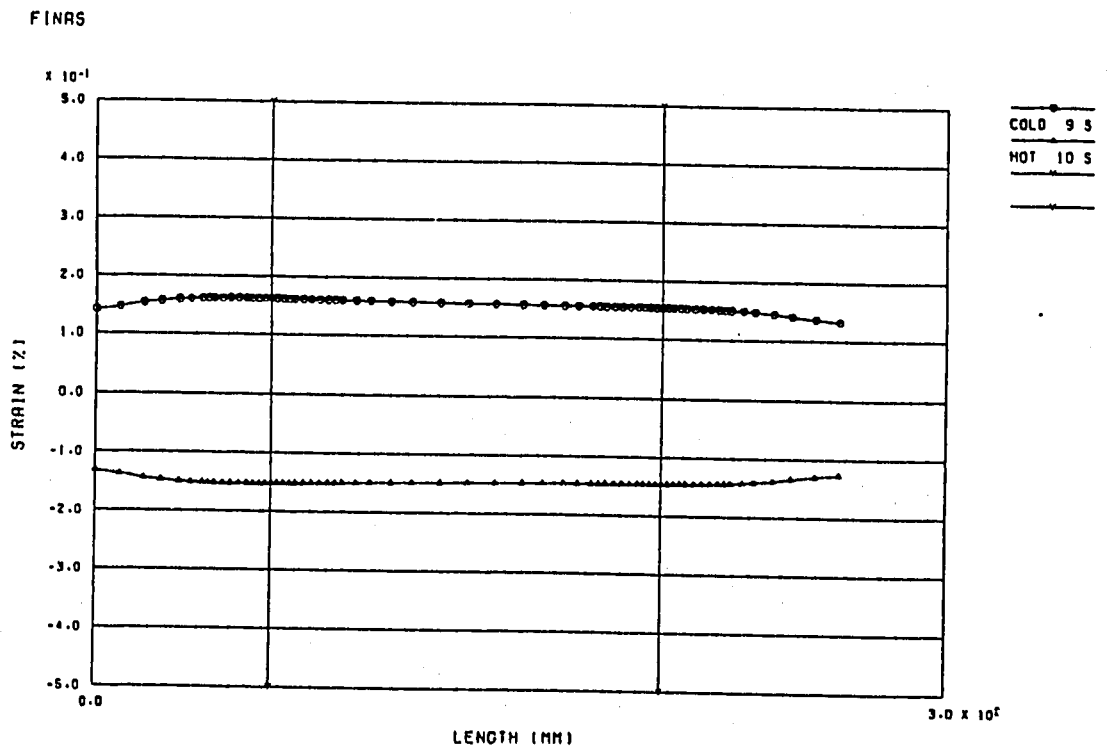
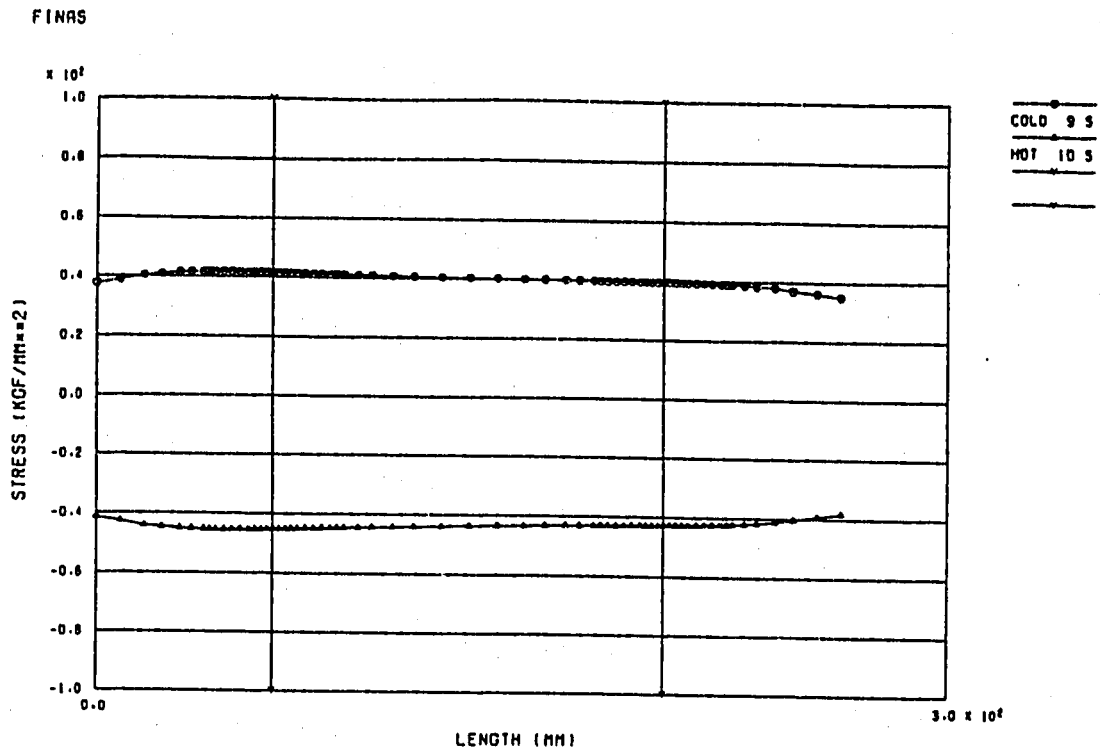
付図 B-9 各成分ひずみ範囲の供試体軸方向分布 (15mm板厚部、内表面と外表面)



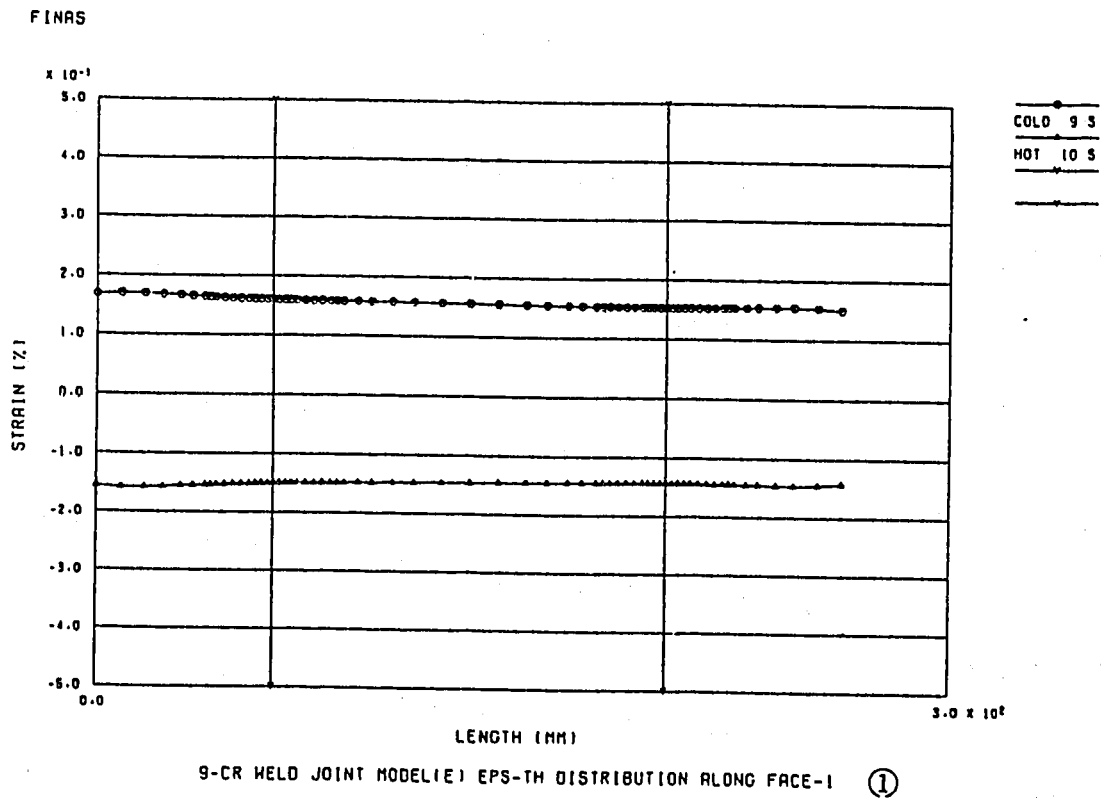
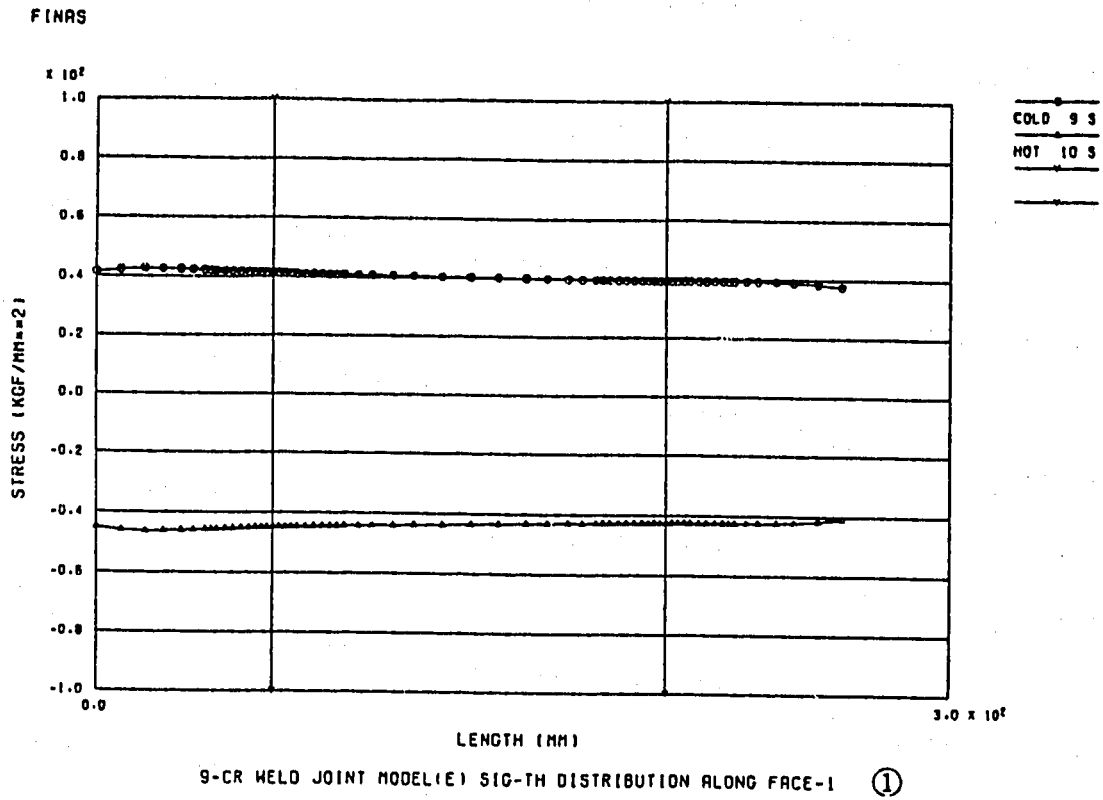
(注) 本図に示すミーゼス型相当ひずみ範囲は、相当応力範囲をヤング率で除した値であり、本文に示すものとは異なる。



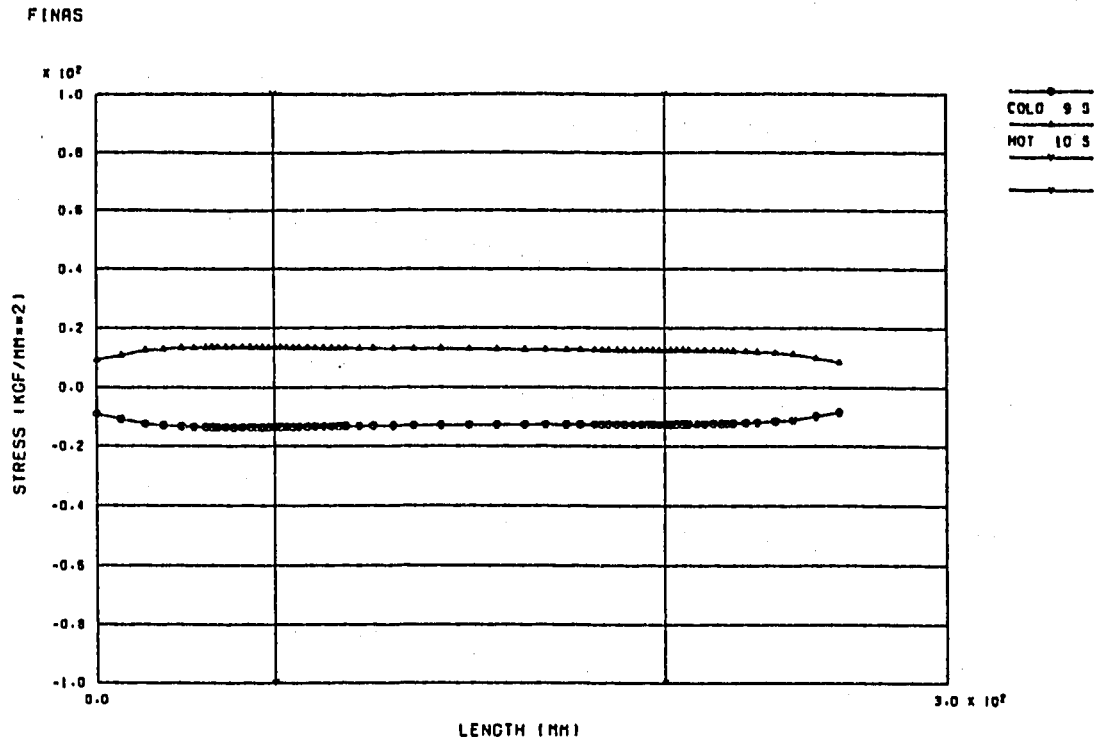
付図 B-10 各成分ひずみ範囲の供試体軸方向分布 (10 mm板厚部、内表面と外表面)



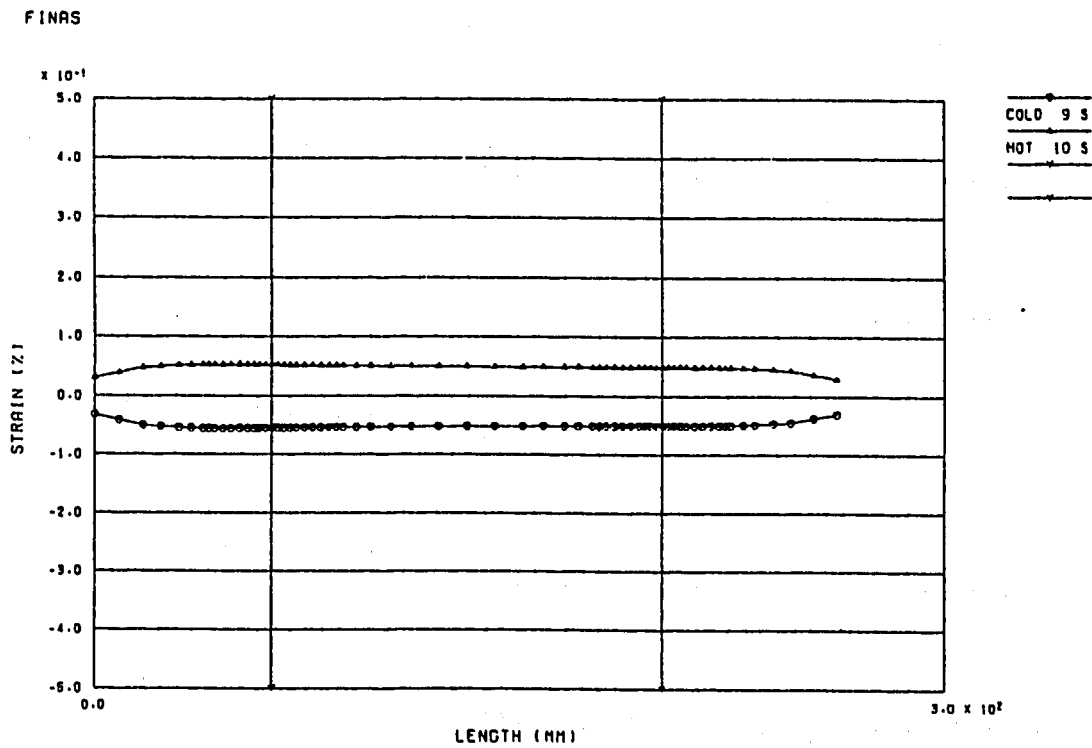
付図 B-11 20mm板厚部内表面軸方向の極2時点における軸方向応力、ひずみ成分分布



付図 B-12 20mm板厚部内表面軸方向の極2時点における周方向応力、ひずみ成分分布

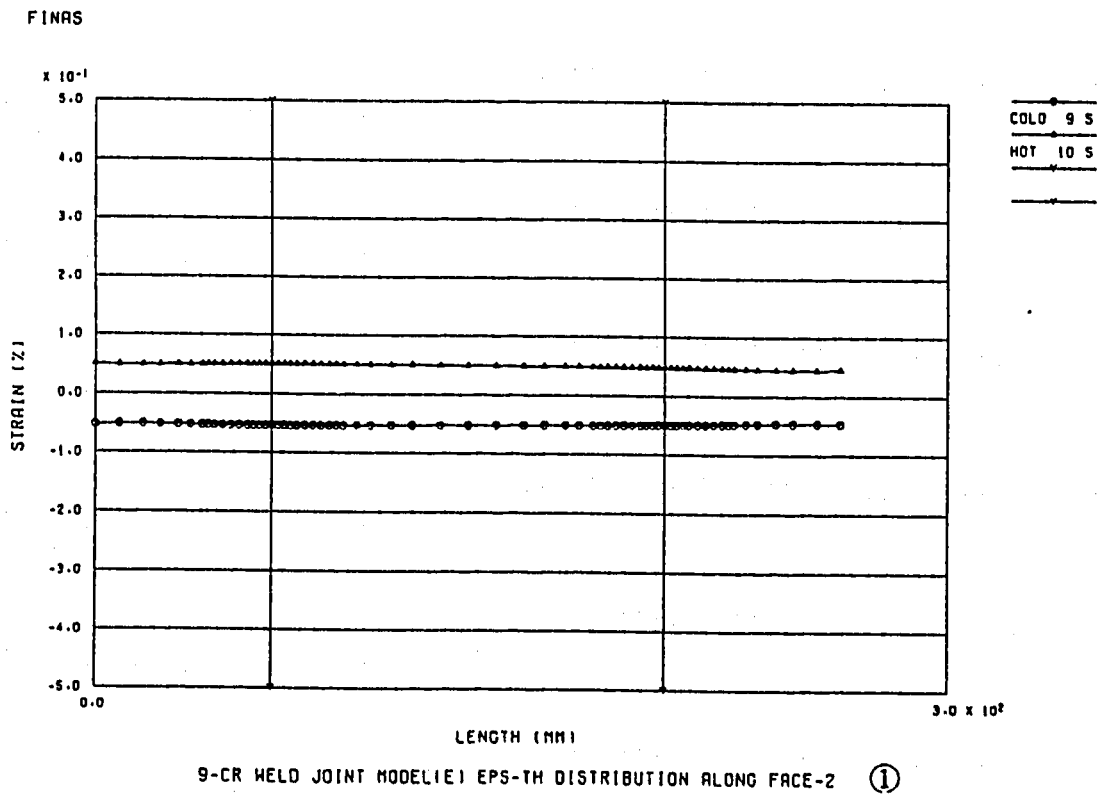
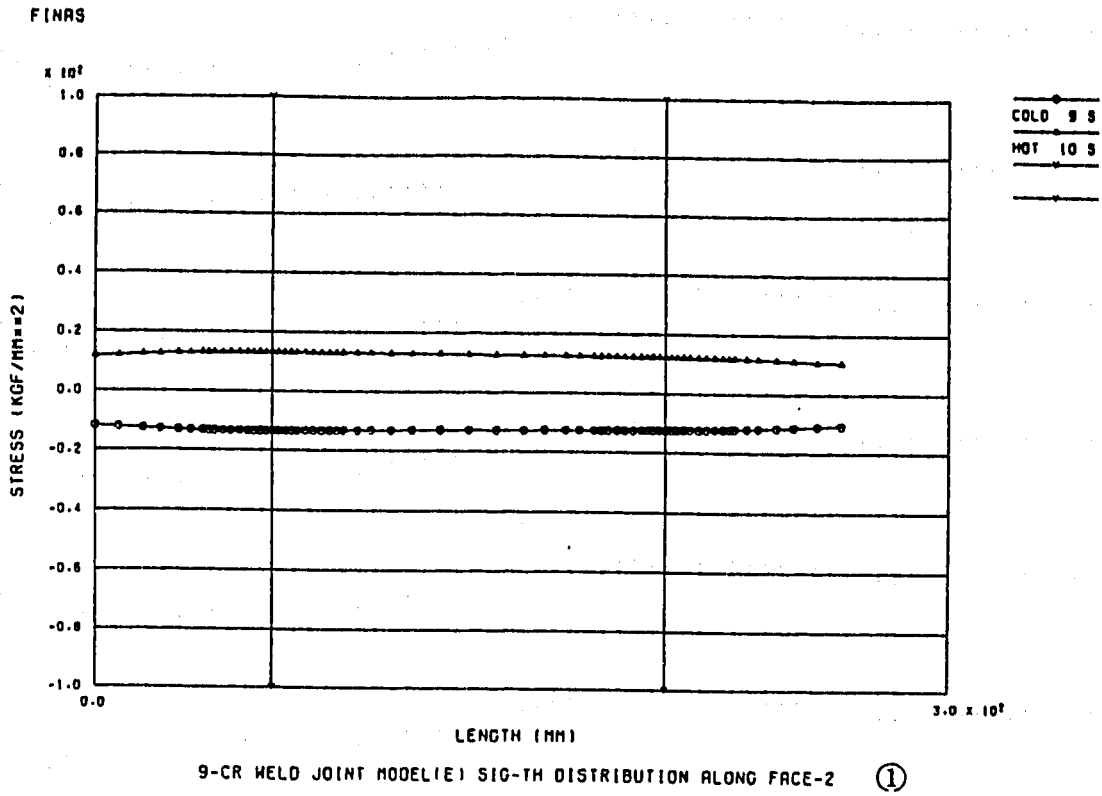


9-CR WELD JOINT MODEL(E) SIG-Z DISTRIBUTION ALONG FACE-2 ①

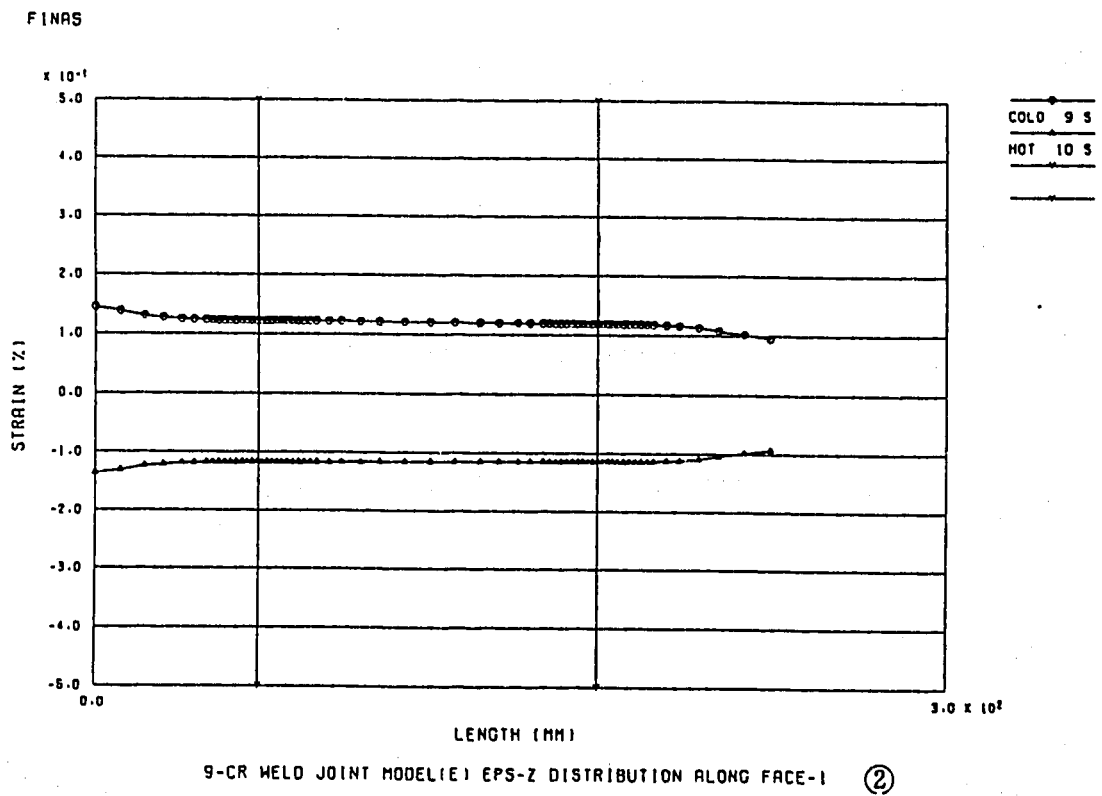
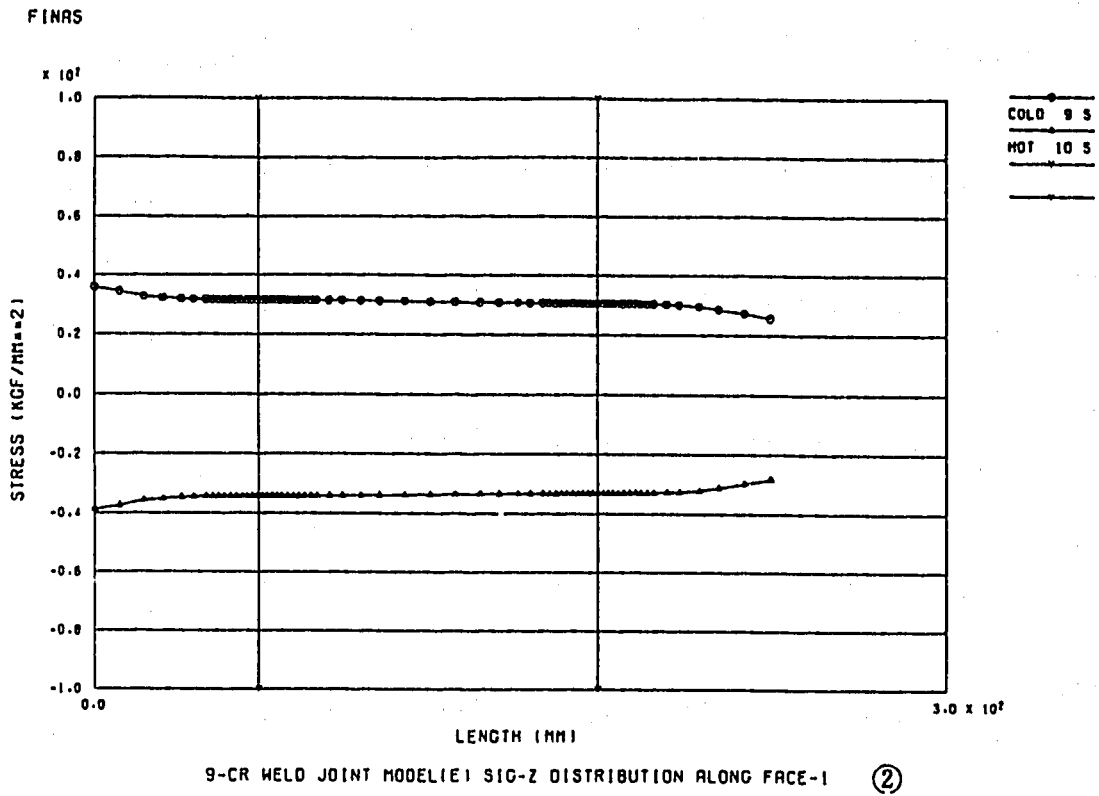


9-CR WELD JOINT MODEL(E) EPS-Z DISTRIBUTION ALONG FACE-2 ①

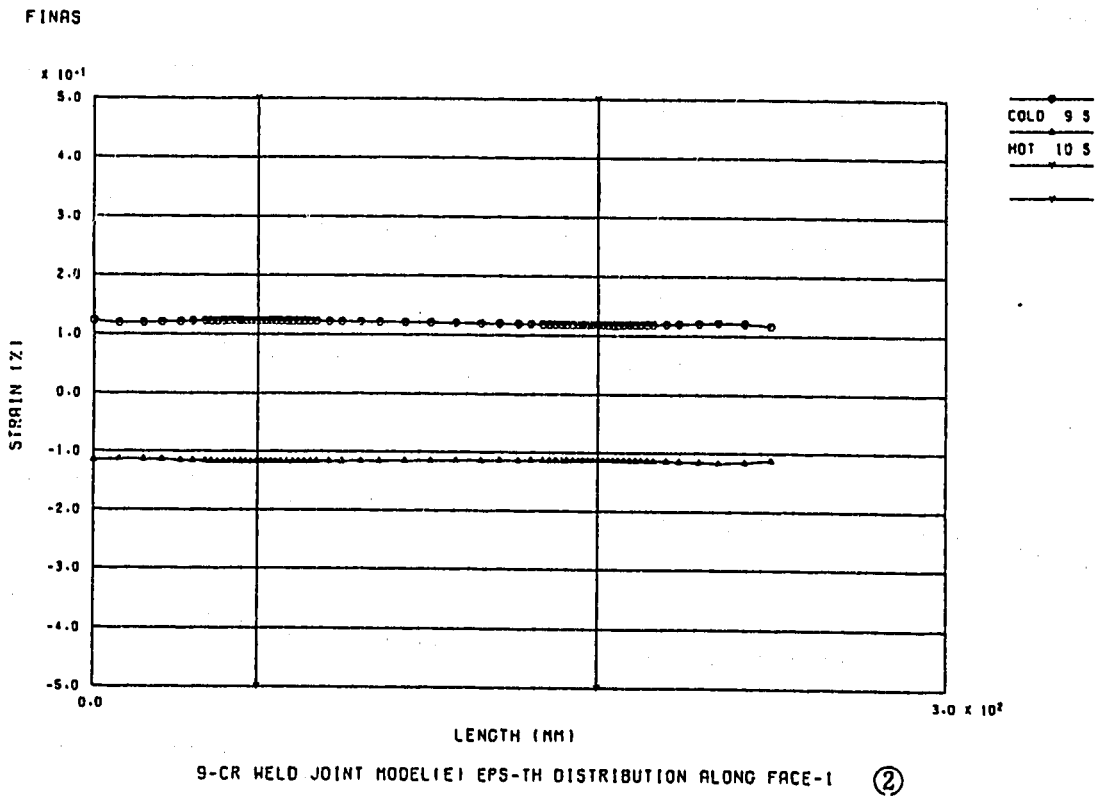
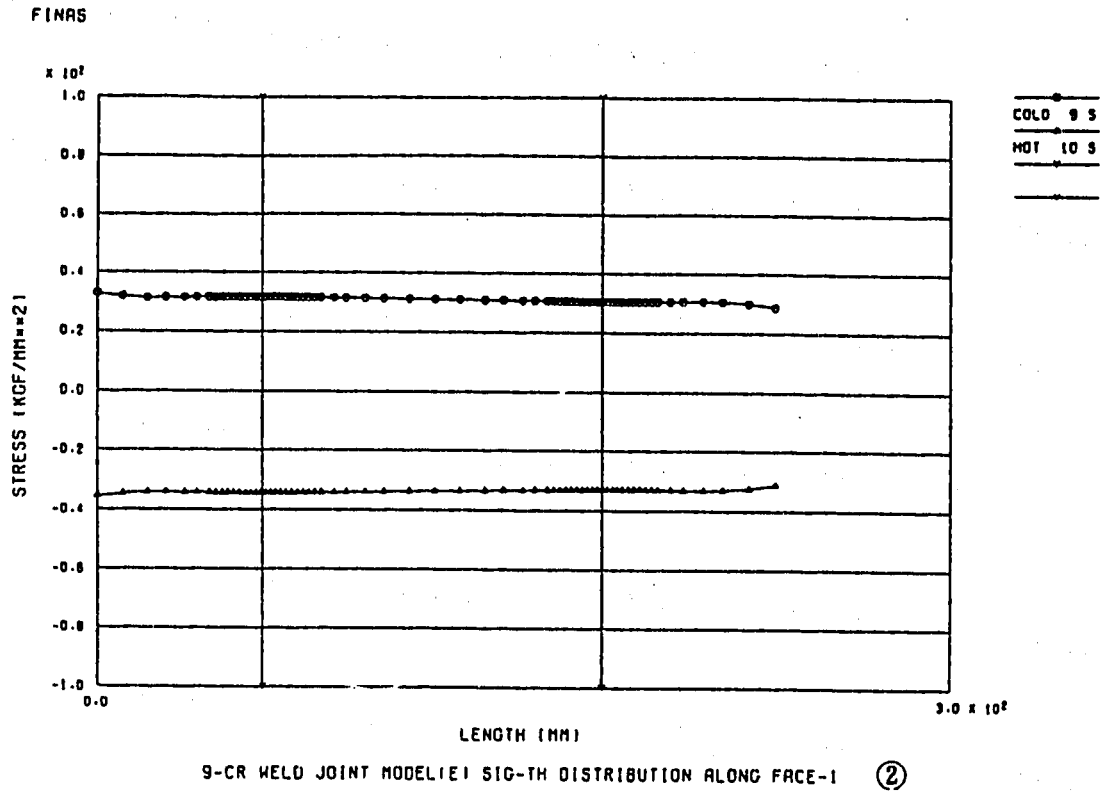
付図 B-13 20mm板厚部外表面軸方向の極2時点における軸方向応力、ひずみ成分分布



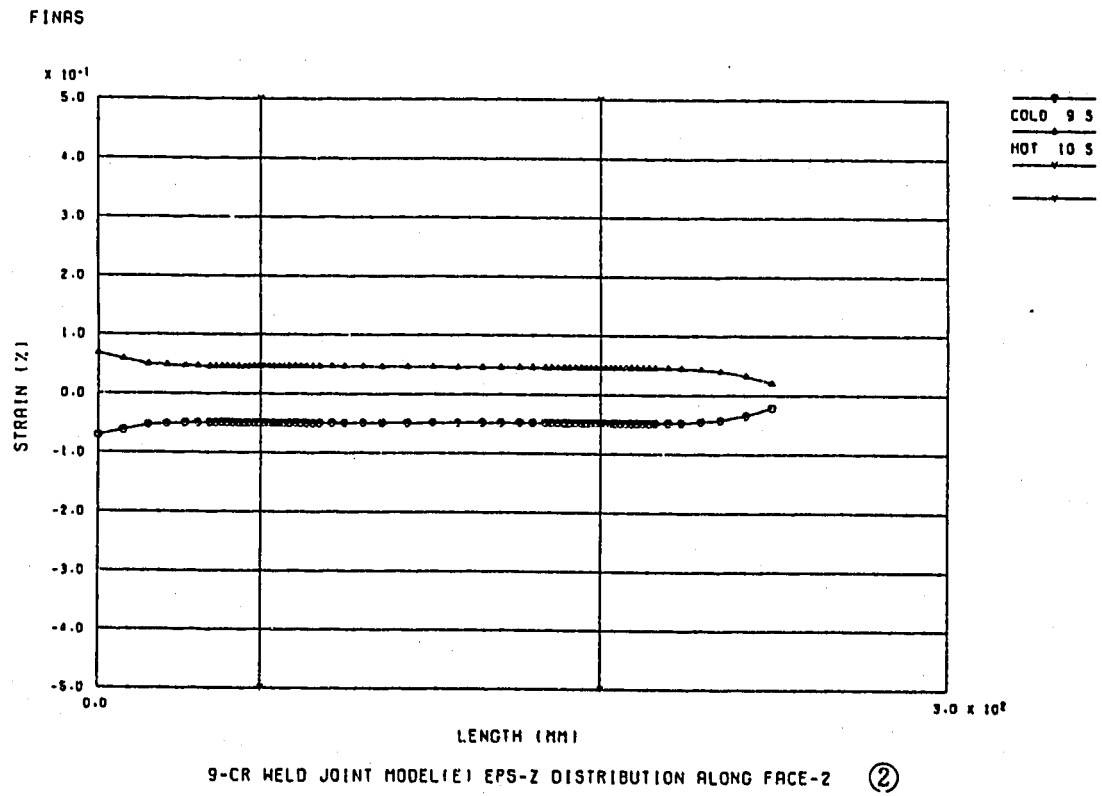
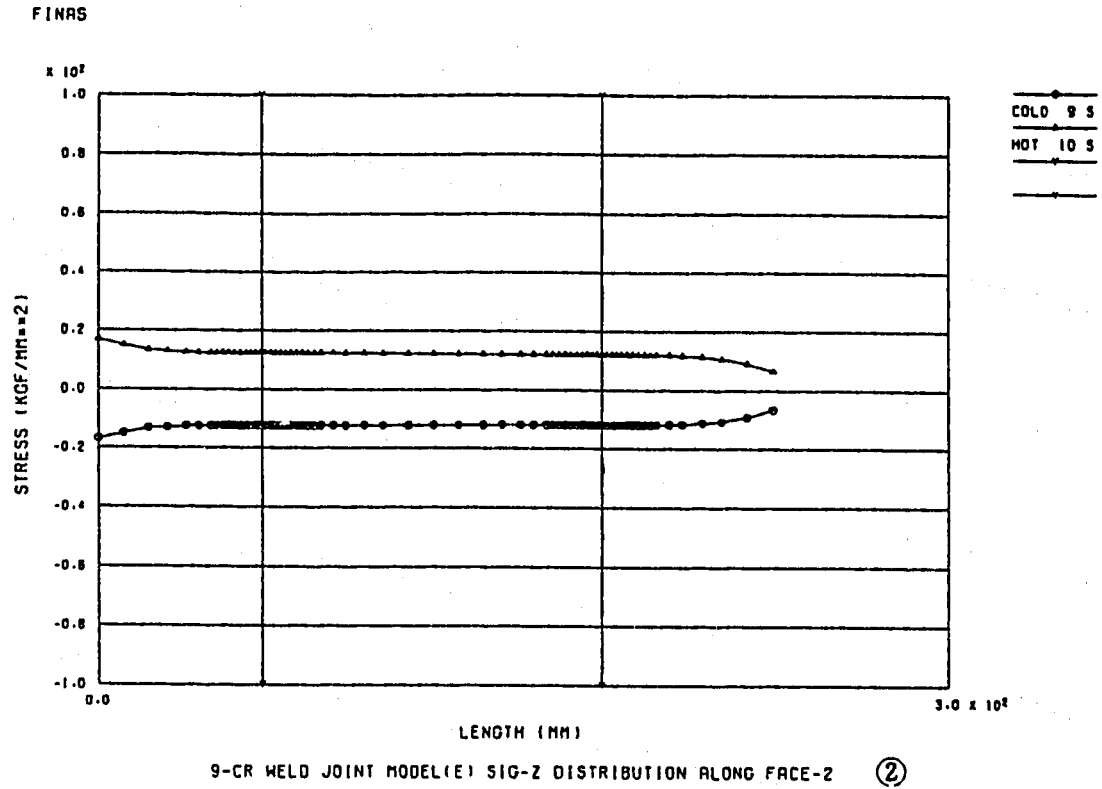
付図 B-14 20mm板厚部外表面軸方向の極2時点における周方向応力、ひずみ成分分布



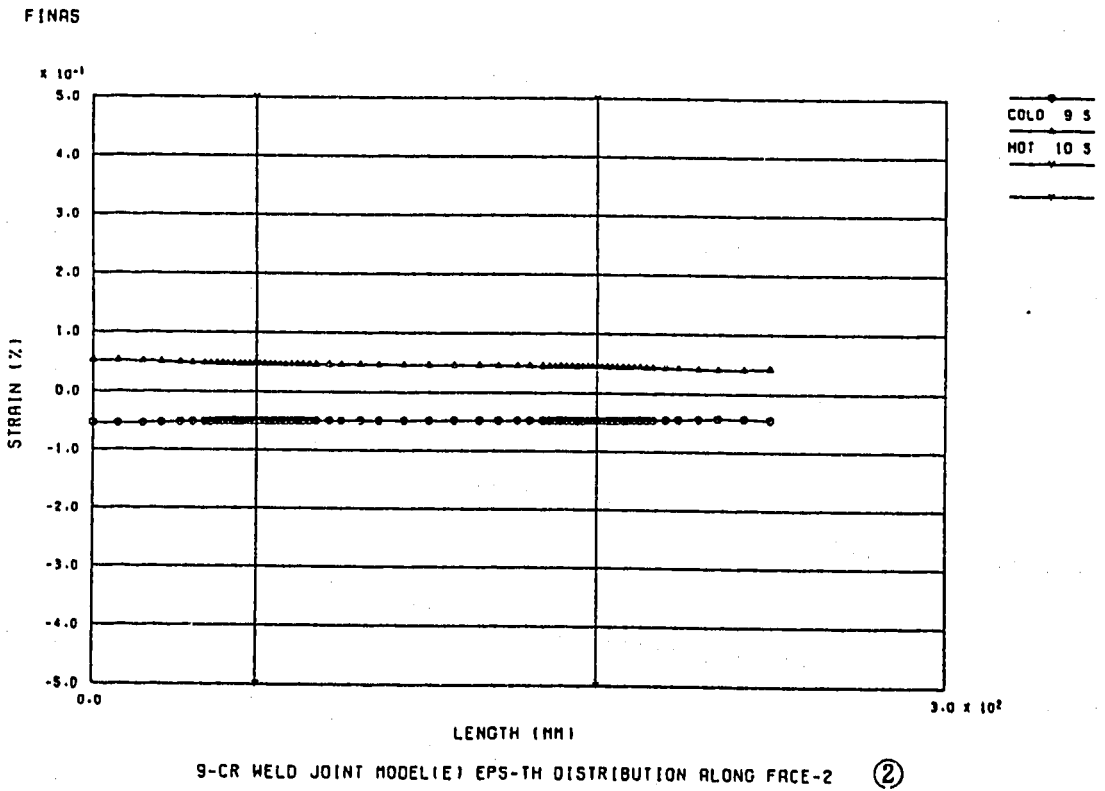
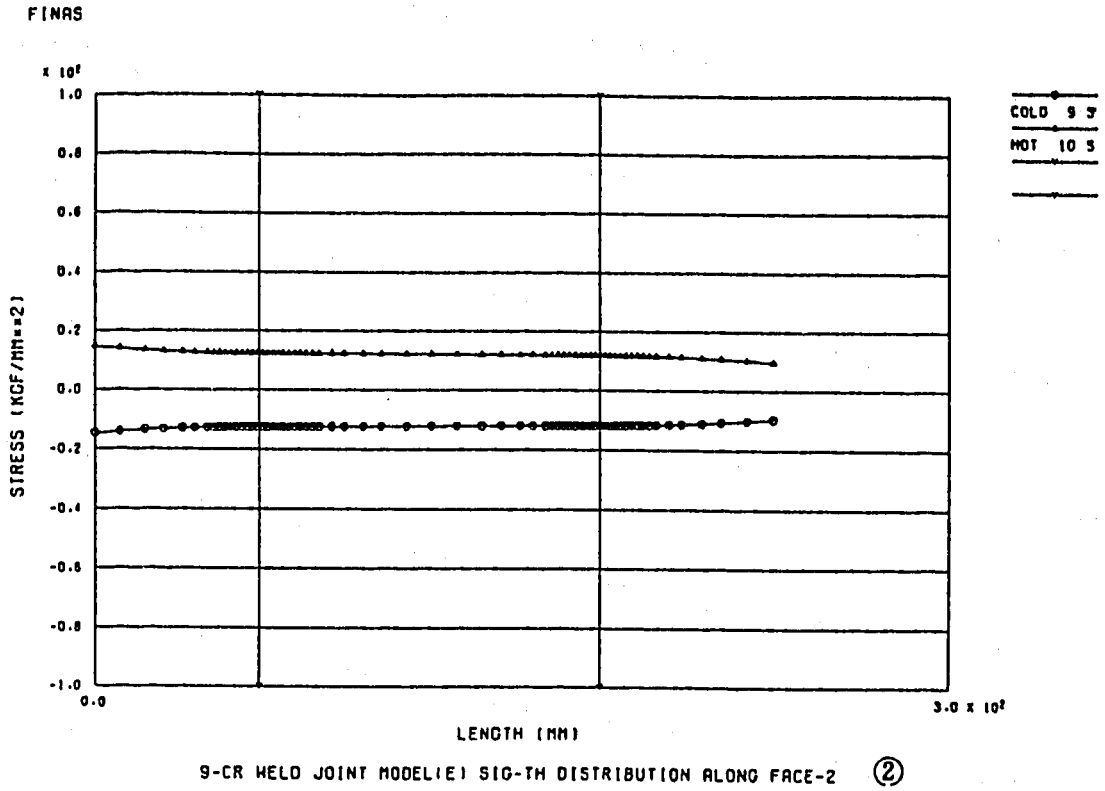
付図 B-15 15mm板厚部内表面軸方向の極2時点における軸方向応力、ひずみ成分分布



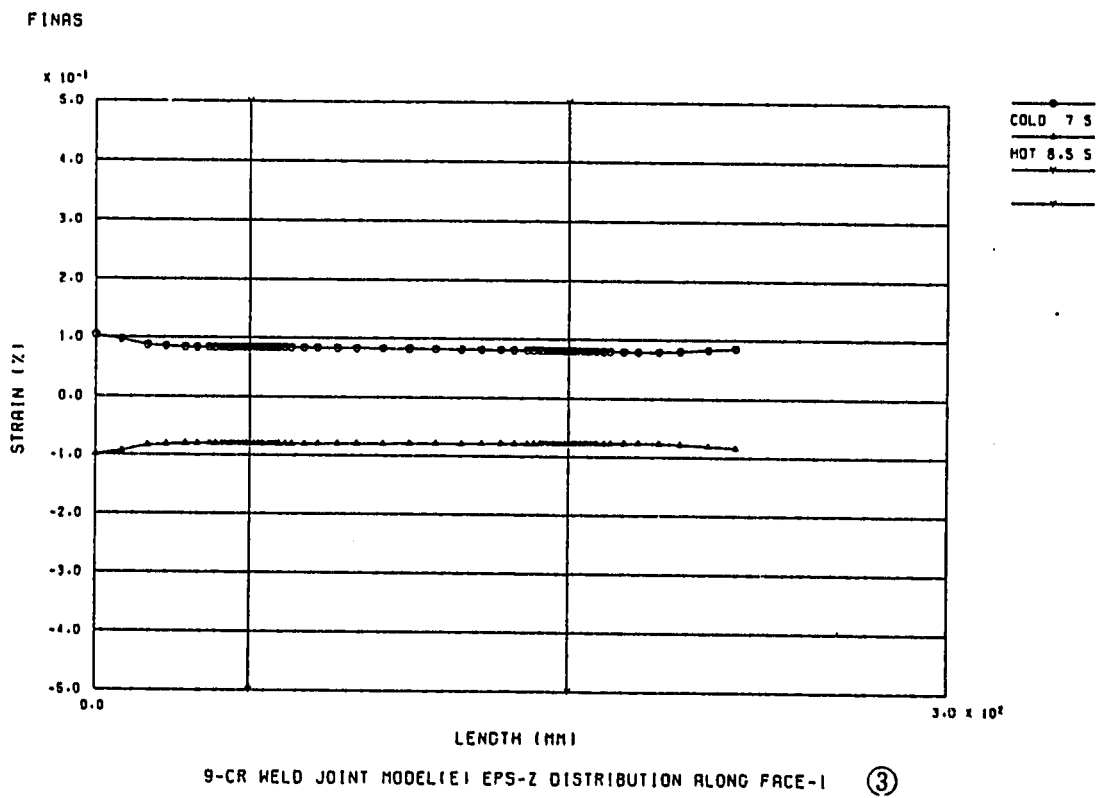
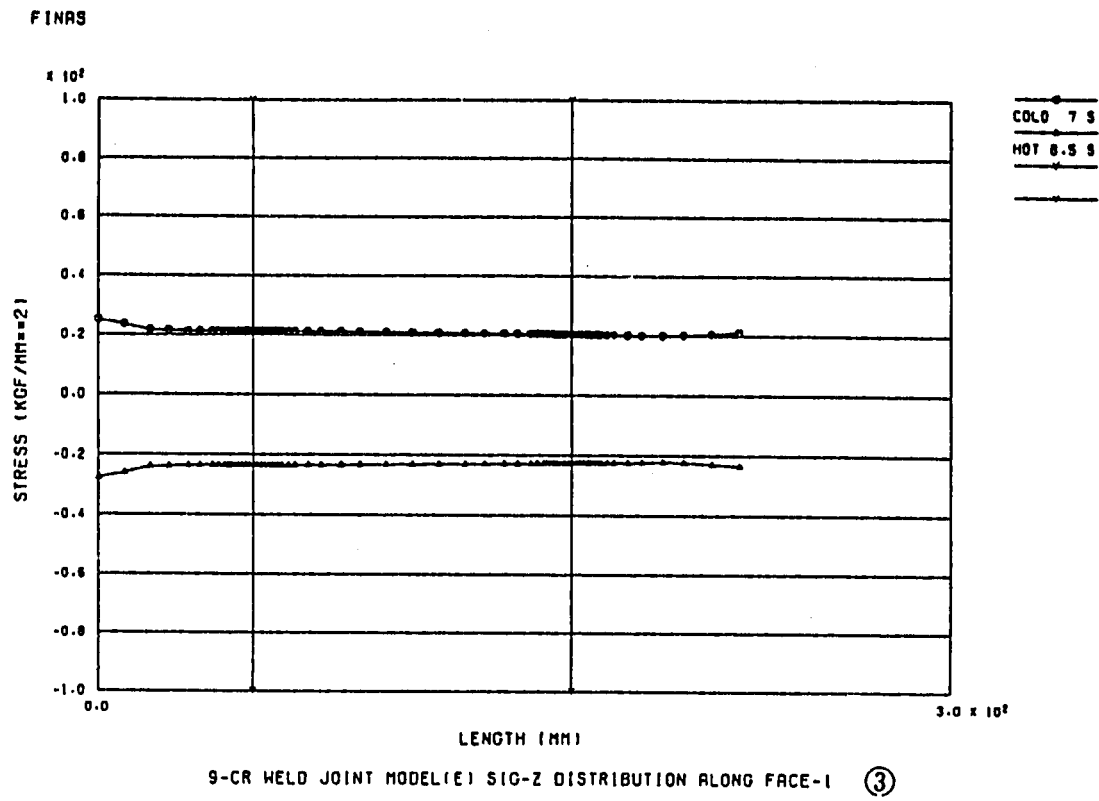
付図 B-16 15mm板厚部内表面軸方向の極2時点における周方向応力、ひずみ成分分布



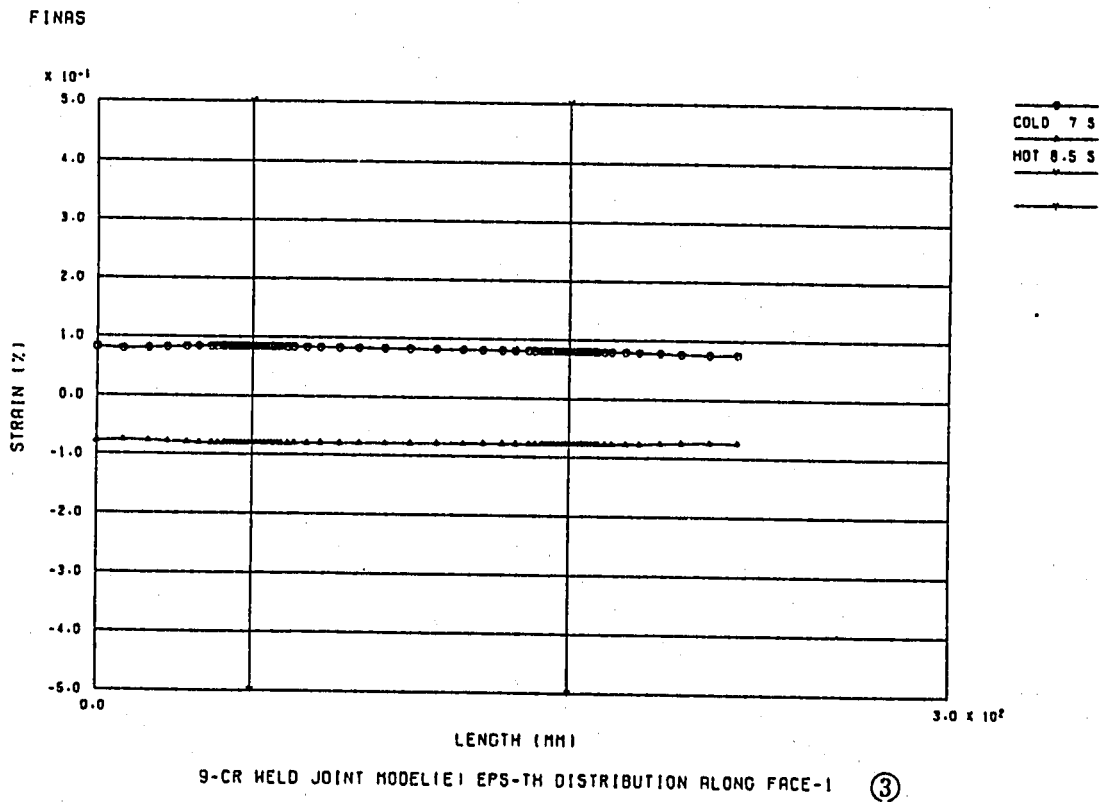
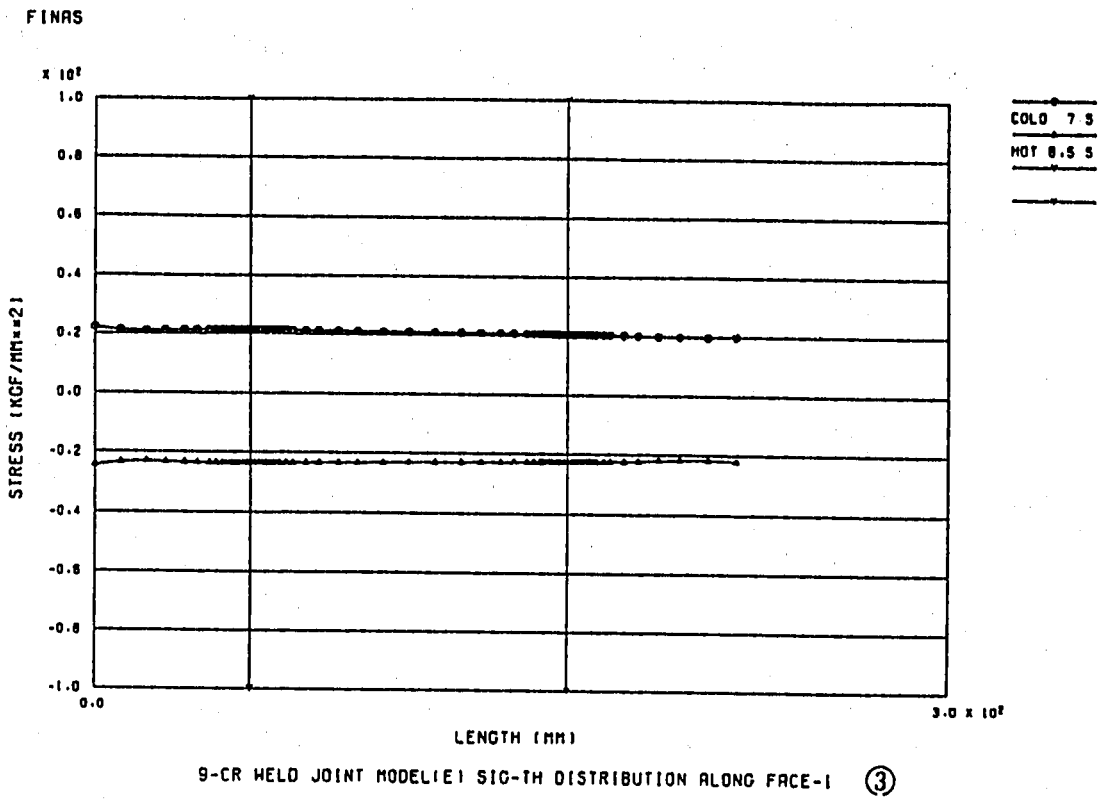
付図 B-17 15mm板厚部外表面軸方向の極2時点における軸方向応力、ひずみ成分分布



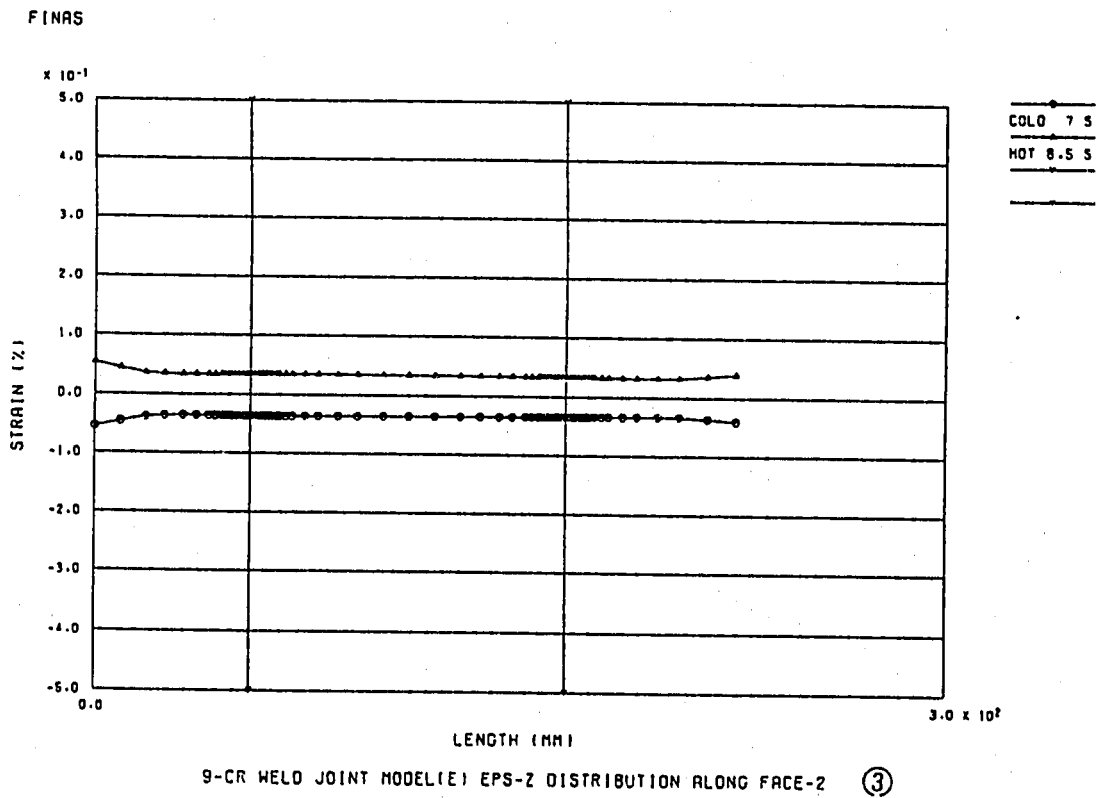
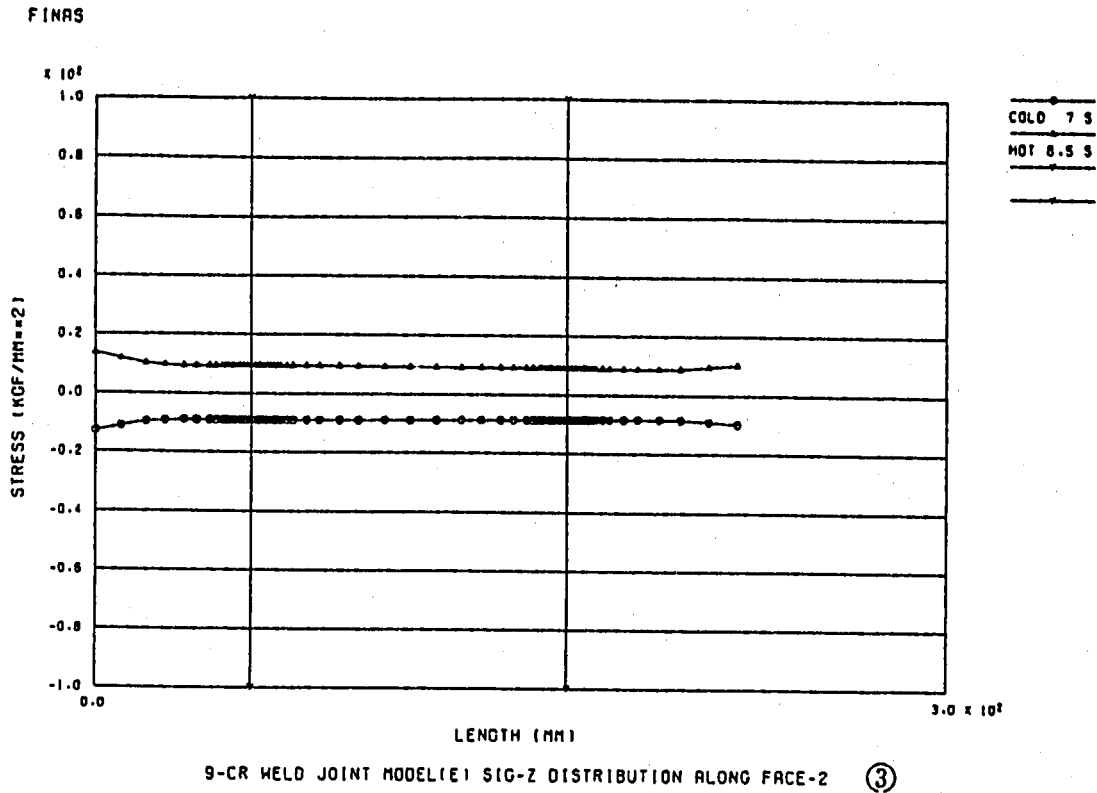
付図 B-18 1.5mm板厚部外表面軸方向の極2時点における周方向応力、ひずみ成分分布



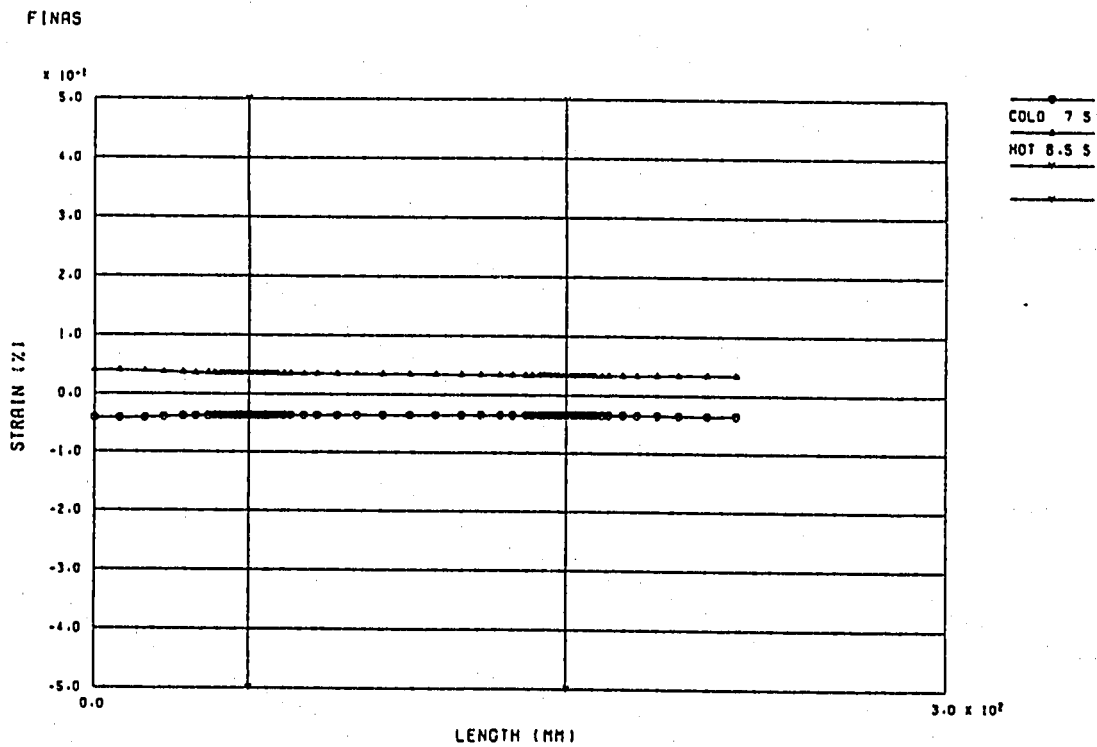
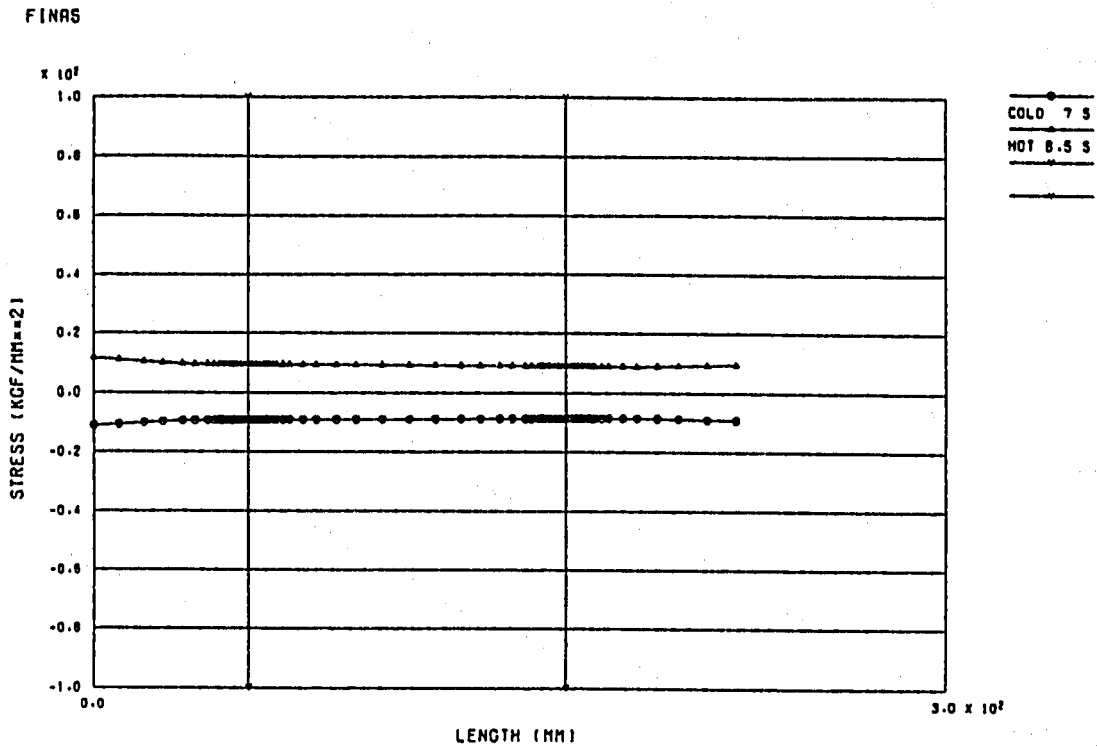
付図 B-19 10mm板厚部内表面軸方向の極2時点における軸方向応力、ひずみ成分分布



付図 B-20 10mm板厚部内表面軸方向の極2時点における周方向応力、ひずみ成分分布



付図 B-21 10mm板厚部外表面軸方向の極2時点における軸方向応力、ひずみ成分分布



付図 B-22 10mm板厚部外表面軸方向の極2時点における周方向応力、ひずみ成分分布