

分置

# 高速炉構造用SUS316鋼溶接継手供試体の 熱クリープ疲労試験解析

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)

## 高速炉構造用 SUS 316 鋼溶接継手供試体の熱クリープ疲労試験解析

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高速炉構造用 SUS 316 鋼製周溶接付き円筒型供試体の熱クリープ疲労き裂発生試験を対象とした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。

本報で評価対象とした供試体は、内径53.5mm、板厚20mm、長さ350mmの円筒形状モデルであり、円筒中央部には周方向の溶接継手が含まれている。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時間と1時間づつ交互に流入させる条件で、熱過渡サイクル数1600回までの繰返し熱過渡試験を実施し、溶接部および一般母材部にき裂の発生を確認している。

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、同種のオーステナイト系ステンレス鋼である SUS 304 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開発室が定めた定数を採用した。

この結果、試験熱過渡サイクル1600回において、板厚20mmの一般円筒母材部でのクリープ疲労損傷値は約1.2 となり、これまでの SUS 304 の実績からある程度のき裂進展が生じることが推定される。

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 SUS 304 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、厚肉部の溶接継手でも同程度以上のき裂進展が推定される。

これらの推定は実際に供試体に観察されたき裂の存在と矛盾しておらず、SUS 304 鋼で開発した手法の材料特性データを SUS 316 鋼のものに置き換えることにより、妥当な評価が行える見通しが得られたと考える。

---

\* 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 Creep-Fatigue Failure Test of SUS316FR Piping Specimen Containing  
Circumferential Weldment (2) Elastic Analysis and Damage Evaluation

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

ABSTRACT

This report describes elastic thermal stress analysis and creep-fatiguedamage evaluation results of an SUS316FR piping specimen which containscircumferential weldment in the middle portion of it.

Thermal creep-fatigue failure test on the specimen was conducted in a sodiumtest loop named STST to clarify creep-fatigue crack initiation behavior ofSUS316FR base metal and weldment under thermal bending stress conditions, which is caused by temperature gradient arisen in the wall thickness of the specimen. Thermal transient test was conducted under the condition that 550°C and 300°Csodium alternately flow into the specimen for 5 hours and 1 hour, respectively in one cycle. The test had been completed after loading 1,600 cycles of thermaltransients. After the test, crack inspection by PT was performed, and crackswere observed successfully in both the base metal and weldment.

For an analytical study, heat transfer analysis using measured temperaturedata and elastic thermal stress analysis were carried out with the finiteelement method, and the analysis results were utilized to develop a candidatecreep-fatigue damage evaluation method for SUS316FR steel based on elasticsanalysis.

Some analysis results and damage evaluation results of the specimen arepresented here, and crack initiation after 1,600 cycles of thermal transients ispredicted based on the calculated creep-fatigue damage, which demonstrates agood agreements with the crack distribution on the specimen inner surface.

---

\* 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. 熱過渡試験の概要	2
2.1 供試体	2
2.2 熱過渡試験条件	2
2.3 き裂発生状況	2
3. 伝熱・応力解析	15
3.1 解析概要	15
3.2 解析方法	15
3.2.1 伝熱解析法	15
3.2.2 弾性熱応力解析法	16
3.3 解析結果	16
3.3.1 伝熱解析結果	16
3.3.2 弾性熱応力解析結果	17
4. クリープ疲労損傷評価	48
4.1 損傷評価方法	48
4.1.1 損傷評価用ひずみ範囲算出法	48
4.1.2 疲労損傷計算法	48
4.1.3 クリープ損傷計算法	49
4.2 クリープ疲労損傷評価結果	49
5. 考察	61
5.1 クリープ緩和初期応力計算にSUS316鋼の単調応力-ひずみ関係式 を採用した場合のクリープ損傷値	61
5.2 クリープ疲労損傷計算にSUS304鋼の材料特性式を採用した場合の 損傷評価結果との比較	62
6. まとめ	79
7. 謝辞	80
参考文献	81
付録	82

## 表リスト

- 表 2.1 試験後の供試体内表面のき裂深さ測定結果
- 表 3.1 本報における伝熱解析のための熱過渡条件、熱伝達係数
- 表 3.2 伝熱解析に用いたSUS316鋼の材料物性値
- 表 3.3 弾性熱応力解析に用いたSUS316鋼の材料特性値
- 表 4.1 損傷評価に使用したSUS316鋼の最適疲労破損式
- 表 4.2 損傷評価に使用したSUS316鋼の動的応力-ひずみ関係式
- 表 4.3 損傷評価に使用したSUS316鋼のクリープひずみ式
- 表 4.4 損傷評価に使用したSUS316鋼のクリープ破断式
- 表 4.5 損傷評価用のミーゼス相当ひずみ範囲
- 表 4.6 疲労損傷計算結果（熱過渡1600サイクル）
- 表 4.7 緩和クリープ計算用の初期応力算出結果
- 表 4.8 クリープ損傷計算結果（熱過渡1600サイクル）
- 表 5.1 SUS316鋼の単調応力-ひずみ関係式
- 表 5.2 SUS316鋼の単調応力-ひずみ関係式で算定したクリープ緩和初期応力
- 表 5.3 クリープ緩和初期応力をSUS316鋼の単調応力-ひずみ関係式で算定した場合のクリープ損傷値（熱過渡1600サイクル）
- 表 5.4 伝熱解析に用いられるSUS304鋼の材料物性値
- 表 5.5 弾性熱応力解析に用いられるSUS304鋼の材料特性値
- 表 5.6 SUS304鋼の動的応力-ひずみ関係式
- 表 5.7 SUS304鋼のクリープひずみ式
- 表 5.8 SUS304鋼のクリープ破断式
- 表 5.9 緩和クリープ計算用の初期応力算出結果（SUS304特性を使用）
- 表 5.10 クリープ損傷計算結果（SUS304特性を使用；熱過渡1600サイクル）

## 図リスト

- 図 2.1 供試体の形状と寸法
- 図 2.2 供試体内表面でのき裂発生状況
- 図 2.3 試験後の供試体内表面のき裂分布状況のスケッチ
- 図 2.4 試験後の供試体内表面の液体浸透探傷試験結果 (90° 方向)
- 図 2.5 試験後の供試体内表面の液体浸透探傷試験結果 (270° 方向)
- 図 2.6 周溶接部でのき裂と断面マクロ組織 (70° 位相)
- 図 2.7 周溶接部でのき裂と断面マクロ組織 (135° 位相)
- 図 2.8 周溶接部でのき裂と断面マクロ組織 (250° 位相)
- 図 2.9 周溶接部でのき裂と断面マクロ組織 (315° 位相)
- 図 2.10 き裂深さの測定結果 (母材部、溶接部)
- 図 3.1 伝熱解析のモデル化の考え方とモデル化範囲
- 図 3.2 解析モデルメッシュ図と評価点
- 図 3.3 供試体内部での Na 温度測定結果 (熱過渡 1 サイクル分; CH 3)
- 図 3.4 供試体内部での Na 温度測定結果 (低温熱過渡初期の 300 秒; CH 3)
- 図 3.5 供試体内部での Na 温度測定結果 (高温熱過渡初期の 300 秒; CH 3)
- 図 3.6 伝熱解析に採用した熱的境界条件
- 図 3.7 弾性熱応力解析に採用した機械的境界条件
- 図 3.8 供試体外表面での温度測定結果 (熱過渡 1 サイクル分; CH 6 1)
- 図 3.9 供試体外表面での温度測定結果 (熱過渡 1 サイクル分; CH 6 2)
- 図 3.10 供試体外表面での温度測定結果 (熱過渡 1 サイクル分; CH 6 3)
- 図 3.11 供試体外表面での温度測定結果 (トランジェント初期の 300 秒; CH 6 1)
- 図 3.12 供試体外表面での温度測定結果 (トランジェント初期の 300 秒; CH 6 2)
- 図 3.13 供試体外表面での温度測定結果 (トランジェント初期の 300 秒; CH 6 3)
- 図 3.14 温度時刻歴解析結果 (トランジェント初期の 300 秒; ライン A, B, C, 外面)  
- 供試体内表面～ナトリウム熱伝達係数修正前 -
- 図 3.15 温度時刻歴解析結果 (トランジェント初期の 300 秒; ライン A, B, C, 外面)  
- 供試体内表面～ナトリウム熱伝達係数修正後 -
- 図 3.16 温度時刻歴解析結果 (トランジェント初期の 300 秒; ライン A, B, C, 内面)
- 図 3.17 温度時刻歴解析結果 (1 サイクル; ライン A の内外面と板厚中央)
- 図 3.18 温度時刻歴解析結果 (1 サイクル; ライン B の内外面と板厚中央)
- 図 3.19 温度時刻歴解析結果 (1 サイクル; ライン C の内外面と板厚中央)
- 図 3.20 温度コンター図 (コールドトランジェント 60 秒後)
- 図 3.21 温度コンター図 (コールドトランジェント 150 秒後)
- 図 3.22 温度コンター図 (コールドトランジェント 500 秒後)
- 図 3.23 温度コンター図 (ホットトランジェント 60 秒後)
- 図 3.24 温度コンター図 (ホットトランジェント 150 秒後)
- 図 3.25 温度コンター図 (ホットトランジェント 500 秒後)
- 図 3.26 軸方向と周方向応力のコンター図 (コールドトランジェント 30 秒後)

- 図 3.27 軸方向と周方向応力のコンター図（コールドトランジェント 43秒後）
- 図 3.28 軸方向と周方向応力のコンター図（ホットトランジェント 31.5秒後）
- 図 3.29 軸方向と周方向応力のコンター図（ホットトランジェント 45秒後）
- 図 3.30 ラインA、内外表面点での応力履歴図
- 図 3.31 ラインB、内外表面点での応力履歴図
- 図 3.32 ラインC、内外表面点での応力履歴図
- 図 3.33 供試体内表面の各座標成分毎のひずみ範囲の軸方向分布
- 図 3.34 供試体外表面の各座標成分毎のひずみ範囲の軸方向分布
- 図 3.35 供試体内表面のミーゼス相当応力範囲の軸方向分布
- 図 3.36 供試体外表面のミーゼス相当応力範囲の軸方向分布
- 図 4.1 T T S D Sによる評価の流れ
- 図 4.2 評価結果の表示ライン
- 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（内表面）
- 図 5.1 各温度におけるSUS316とSUS304の密度の比較（絶対値）
- 図 5.2 各温度におけるSUS316の密度のSUS304に対する比（%表示）
- 図 5.3 クリープ緩和初期応力計算にSUS316とSUS304それぞれの動的応力-ひずみ関係式を採用した場合の比較（全ひずみ範囲に対する表示）
- 図 5.4 損傷計算にSUS316とSUS304それぞれの特性式を採用した場合のクリープ損傷値の比較（1,600サイクル時点；全ひずみ範囲に対する表示）
- 図 5.5 クリープ緩和初期応力計算にSUS316とSUS304それぞれの動的応力-ひずみ関係式を採用した場合の比較（供試体軸方向分布）
- 図 5.6 損傷計算にSUS316とSUS304それぞれの特性式を採用した場合のクリープ損傷値の比較（1,600サイクル時点；供試体軸方向分布）
- 図 5.7 損傷計算にSUS304特性を採用した場合との損傷値比較（500サイクル時点）
- 図 5.8 損傷計算にSUS304特性を採用した場合との損傷値比較（900サイクル時点）
- 図 5.9 損傷計算にSUS304特性を採用した場合との損傷値比較（1,300サイクル時点）
- 図 5.10 損傷計算にSUS304特性を採用した場合との損傷値比較（1,600サイクル時点）



# 1. まえがき

高速大型炉の一次冷却系の機器・配管用の構造材料として、現在改良316鋼が有力視されている。そこで、構造工学室では本材料の母材および溶接部の繰返し熱応力・ひずみ下でのクリープ疲労強度を把握することを目的とした試験研究を計画した。

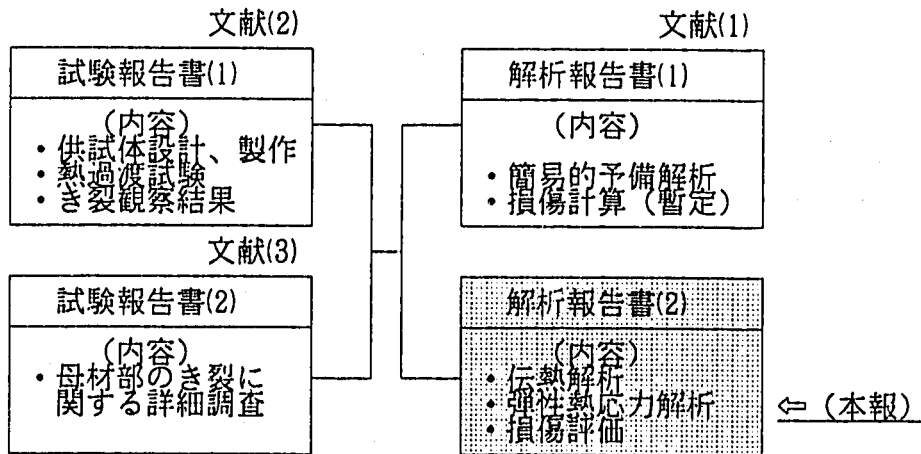
本報告書は、この一環として小型熱衝撃試験装置（STST）で試験を行った、内面にナトリウムによる繰返し熱過渡を受ける高速炉構造用SUS316鋼製の周溶接付き円筒型供試体の熱クリープ疲労き裂発生試験に対して、非定常の伝熱応力解析とクリープ疲労損傷評価を実施した結果をまとめたものである。

試験では温度差250℃の熱過渡を1600サイクル負荷した後解体検査を行い、溶接部および一般母材部にき裂の発生を確認している<sup>(2)</sup>。

本報解析・評価ではまず有限要素法による非定常伝熱解析および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、本鋼と同種のオーステナイト系ステンレス鋼であるSUS304に対して開発した寿命予測法（TTSDS）<sup>(10) - (11)</sup>を用いて実施した。

本報では試験で確認されたき裂の発生状況と上記損傷評価結果との比較検討を行うことにより、これまでSUS304に対して開発してきた寿命予測法（TTSDS）の本鋼への適用可能性を調査することとした。

なお、本試験研究全体の報告書の構成は以下に示す通りである。試験の詳細については、「試験報告書」<sup>(2) (3)</sup>を参照されたい。



## 2. 熱過渡試験の概要

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。詳細については試験報告書(1) (2) 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および寸法を図2.1に示す。本供試体は高速炉構造用SUS316鋼(SUS316FR)製で、内径53.5mm、板厚20mm、長さ350mmの円筒型モデルであり、円筒中央部には周方向の溶接継手が含まれている。

### 2.2 熱過渡試験条件

上記供試体を小型熱衝撃試験装置(STST) (1) (2) に設置し、供試体内部に550℃及び300℃のナトリウムを流量200ℓ/min条件にてそれぞれ5時間と1時間づつ交互に流入させる条件で、熱過渡サイクル数1600回までの繰返し熱過渡試験を実施した。

なお、供試体にはその内部および中央溶接部外表面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内部のナトリウム温度を、さらに、解析の検証用として溶接部の外表面温度を、試験熱過渡サイクル中継続的に計測している。これらについては、伝熱解析の項にて詳述する。

### 2.3 き裂発生状況

熱過渡試験終了後の供試体内表面のPT検査、破面検査等によるき裂発生状況については試験報告書(2) (3) に詳述されている。従ってここでは、母材部および溶接部におけるき裂発生状況の概要についてのみ述べる。

図2.2に試験熱過渡の代表的サイクル数として、500、900、1300サイクル終了時点における供試体内表面でのき裂の発生進展状況を、また図2.3には試験完了時点すなわち1600サイクル終了時点でのき裂の存在状況を模式的に示した。さらに、図2.4と図2.5に供試体を軸方向に2分割してそれぞれの内表面についてPT検査した結果を、また図2.6から図2.9には周溶接部の4位相縦断面内におけるき裂の進展状況とマクロ組織を示した。

き裂は母材部、溶接部ともに供試体内表面でのみ発生しており、試験完了時点においても外表面ではき裂の存在は観察されなかった。

まず、供試体内表面母材部では500サイクル時点で一部に供試体軸方向のヘアクラック状のき裂が数点観察され、900サイクル時点では同様のき裂の発生範囲が軸方向に拡大し、1300サイクル時点では個々のき裂が軸方向に進展、合体して比較的長いき裂に成長し、最終的に1600サイクル時点では軸方向に長くつながった状態で確認された。

一方、供試体内表面溶接部では500サイクル時点ではき裂の存在は確認できず、900サイクル時点では一部周方向のヘアクラックが観察され、1300サイクル時点ではこれらが周方向に進展、合体してやや長いき裂に成長し、最終的に1600サイクル時点では周方向

のかなり広い範囲に長くつながった状態で確認された。

以上、最終1600サイクル完了時点で観察された母材部の軸方向き裂および溶接部の周方向き裂の板厚方向深さの測定結果を表2.1と図2.10に示す。これらの図表より本試験では溶接部のき裂よりも母材部のき裂の方が幾分早めに発生し、やや深く進展したことが分かる。き裂の破面形態は、母材部のき裂が粒内割れ、溶接部のき裂が樹枝状組織に沿った割れでいずれもストライエーションが観察されている。

ここで注目すべき点は、溶接部のき裂が周方向の広い範囲に存在しているのに対して、母材部のき裂は溶接継手部を境としてナトリウム流路の上流側と下流側で位相にずれがあるものの、いずれの側においてもき裂の存在する位相が互いに $180^\circ$ 異なった2位相に限定される点である。

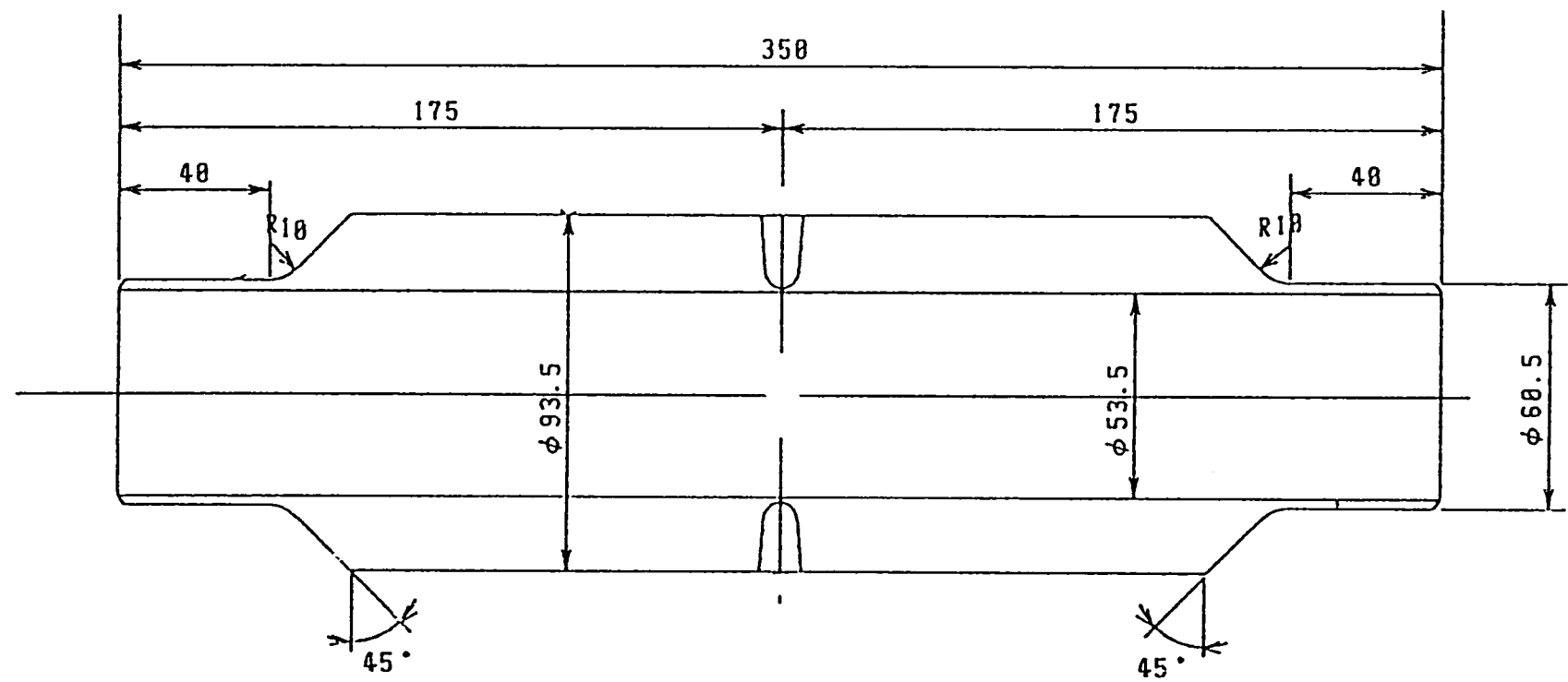
第3章-伝熱・応力解析-で示されるが、本供試体では軸対称構造にほぼ軸対称の板厚方向温度勾配による熱荷重が負荷されることから、周方向と軸方向のほぼ等2軸応力ひずみ場が形成されている。これまでに蓄積された構造物の熱過渡強度データからは、このような応力ひずみ場においては、表面形態が亀甲状で供試体内表面全周にわたり一様なき裂が発生すると予想されたが、上述の母材部のき裂はこの予想と整合しないため、素材ベースの詳細な調査・検討を進めた<sup>(3)</sup>。この結果、本供試体では通常の管の製造方法と異なる製造方法がとられたために、管横断面内の互いに $180^\circ$ 異なった2位相に $\delta$ フェライト層が残存し、これが起点となってき裂が発生した可能性が高いことが判明している。

従って、本供試体母材のき裂発生寿命については、通常の母材のデータよりも小さめの値となっているとみるべきであると考えられる。この調査結果については、別途試験報告書(2)<sup>(3)</sup>で述べられるので、詳細についてはそちらを参照されたい。

表 2.1 試験後の供試体内表面のき裂深さ測定結果

SUS316LNP溶接継手供試体き裂深さ

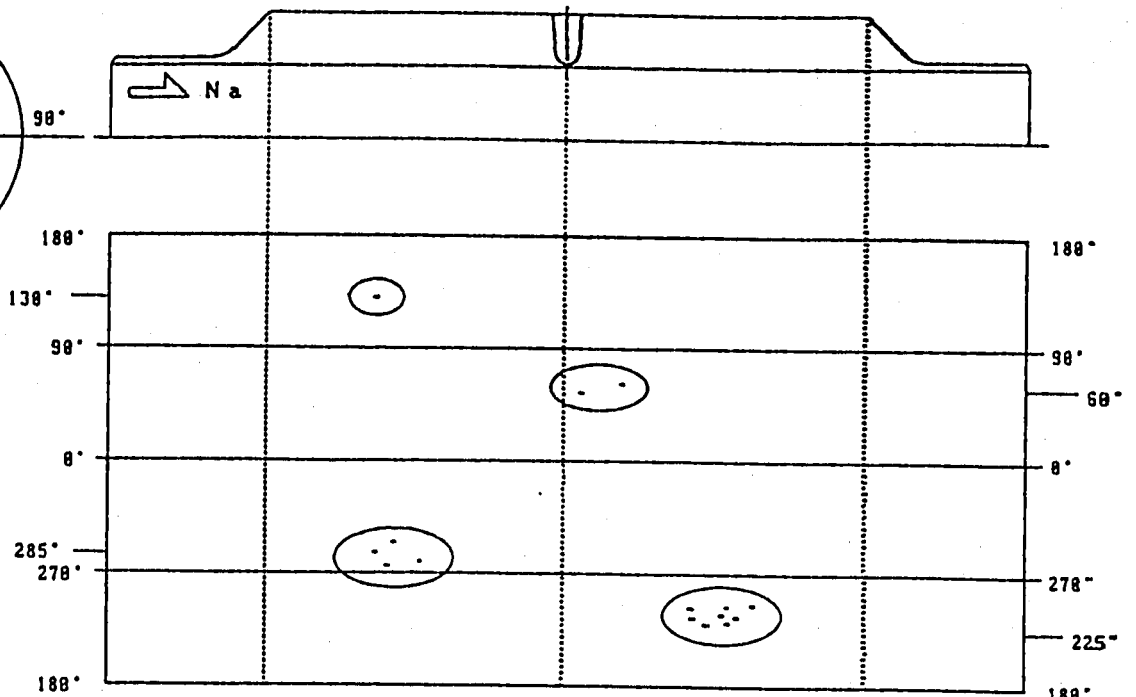
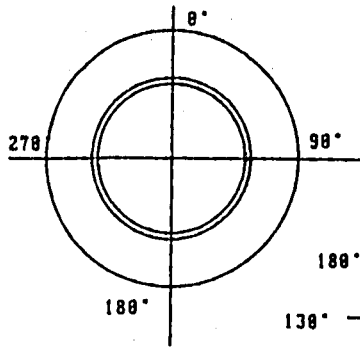
き裂状況	母材部		溶接部 (mm)
	上流側 (mm)	下流側 (mm)	
方向：梁さ	95° :1.00	50° :1.00	70° :1.00
	110° :0.63	<u>215° :3.68</u>	<u>135° :2.80</u>
	<u>120° :4.75</u>	240° :1.95	250° :2.51
	285° :1.95		315° :0.87
	290° :1.86		
	300° :3.30		



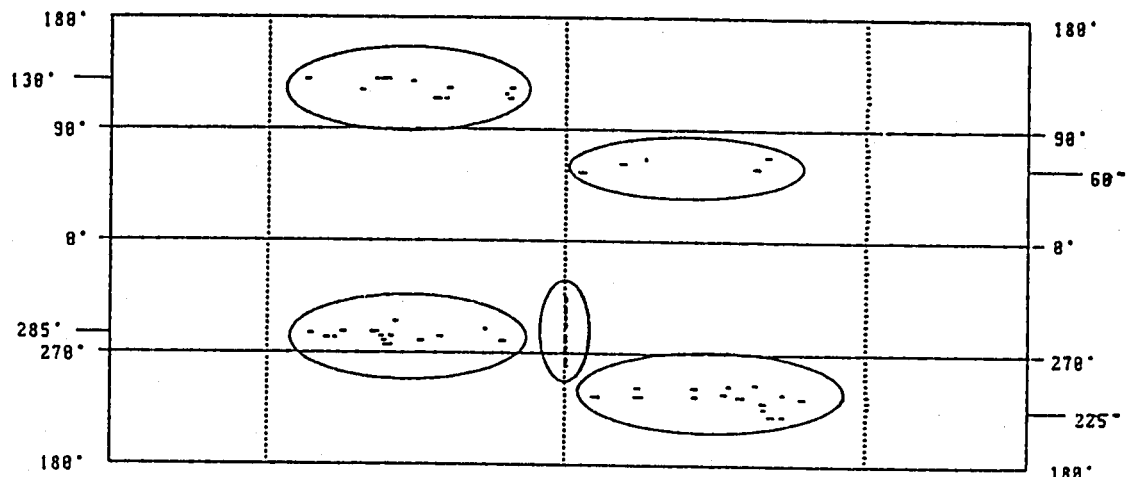
SUS 316 LNP 供試体構造図

Precise dimensioning of the model

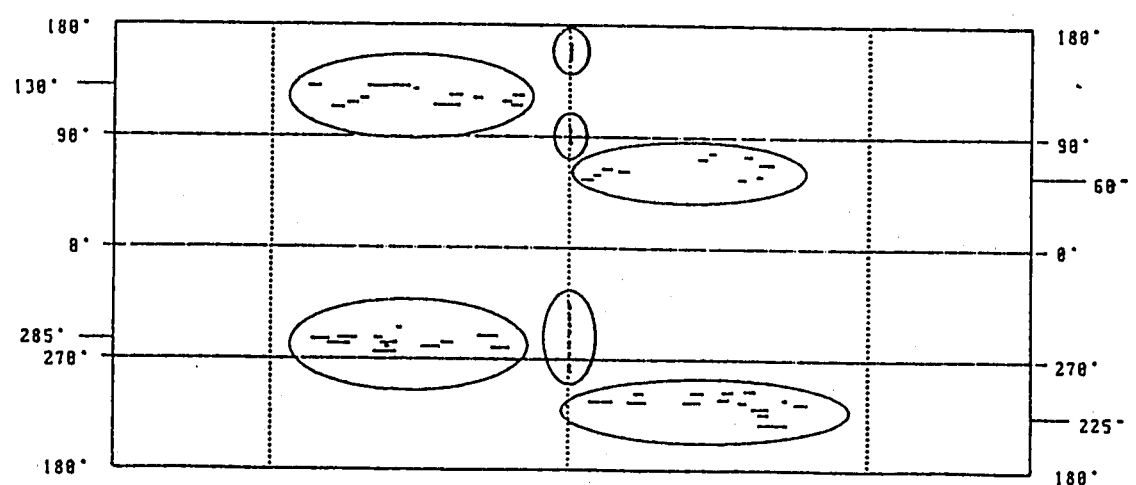
図 2.1 供試体の形状と寸法



500サイクル完了時点



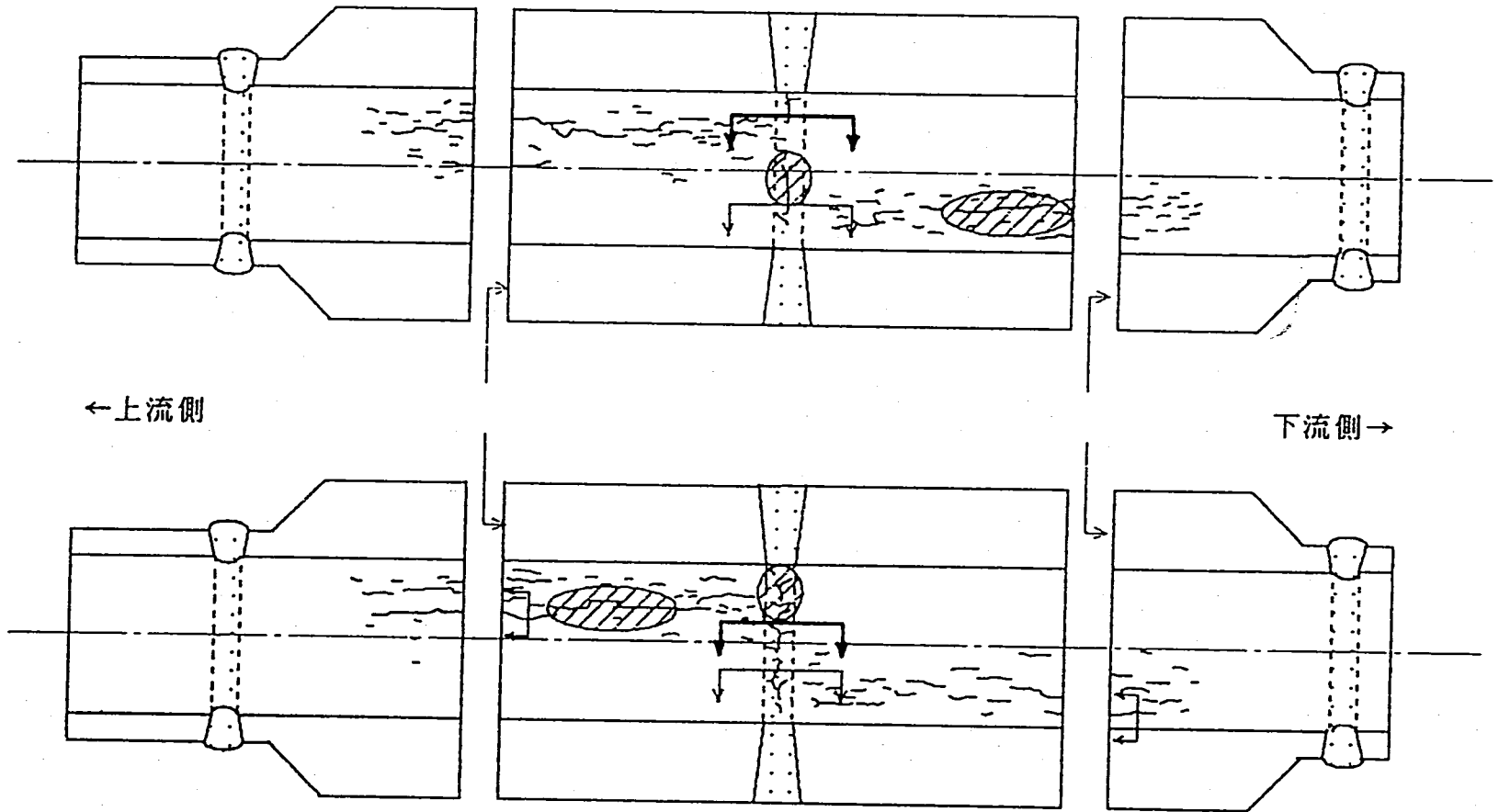
900サイクル完了時点



1300サイクル完了時点

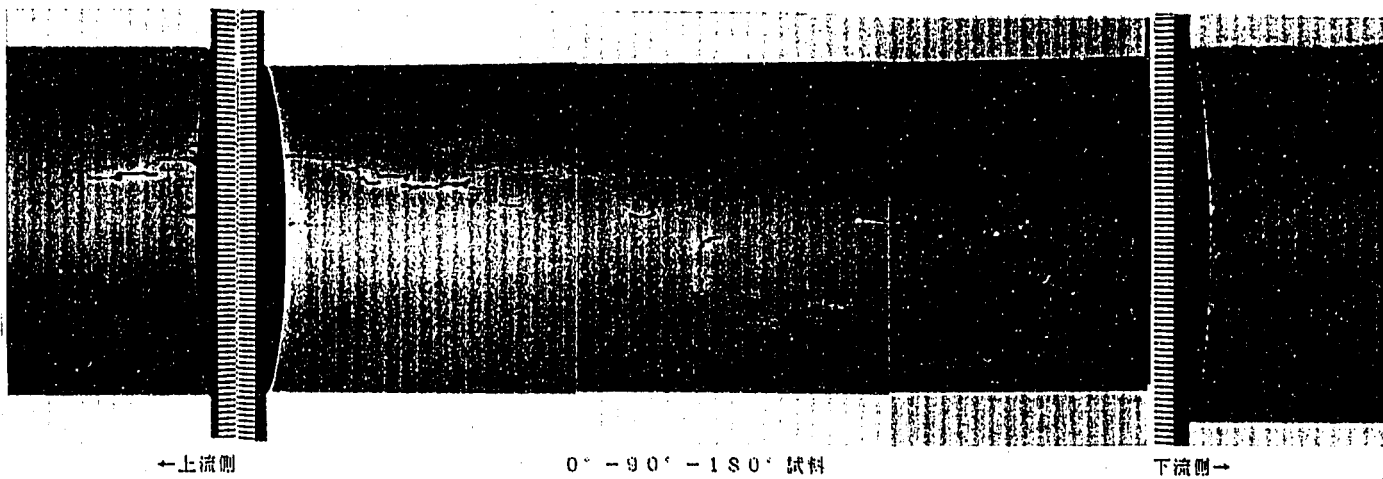
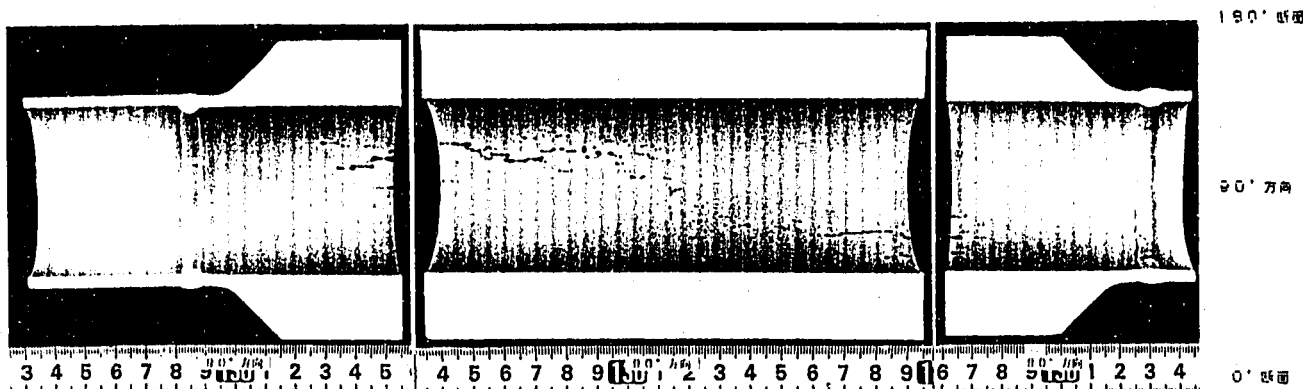
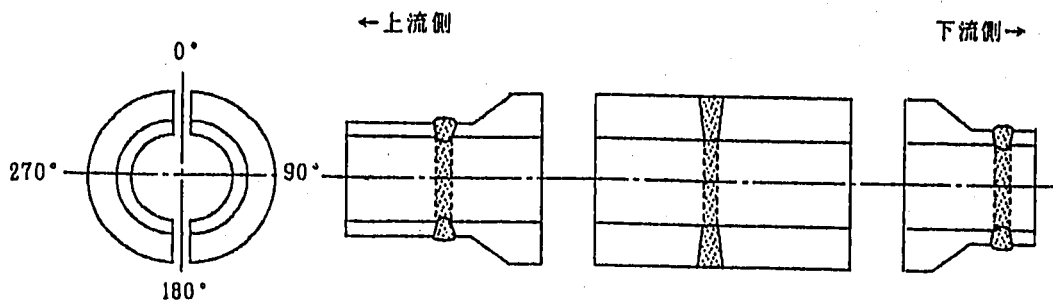
SUS316LNP供試体内面き裂分布図

図 2.2 供試体内表面でのき裂発生状況



- ┌┐ : 母材部 (上・下流側) 縦亀裂……断面P T, 亀裂深さ測定, マクロ組織
- └┘ : 母材部 (上・下流側) 縦亀裂……ミクロ組織
- ┌┐ : 溶接部周亀裂……断面P T, 亀裂深さ測定, マクロ組織
- └┘ : 溶接部周亀裂……断面P T, 亀裂深さ測定, マクロ・ミクロ組織
- ⊘ : 母材部縦亀裂……破面観察      ⊘ : 溶接部周亀裂……破面観察

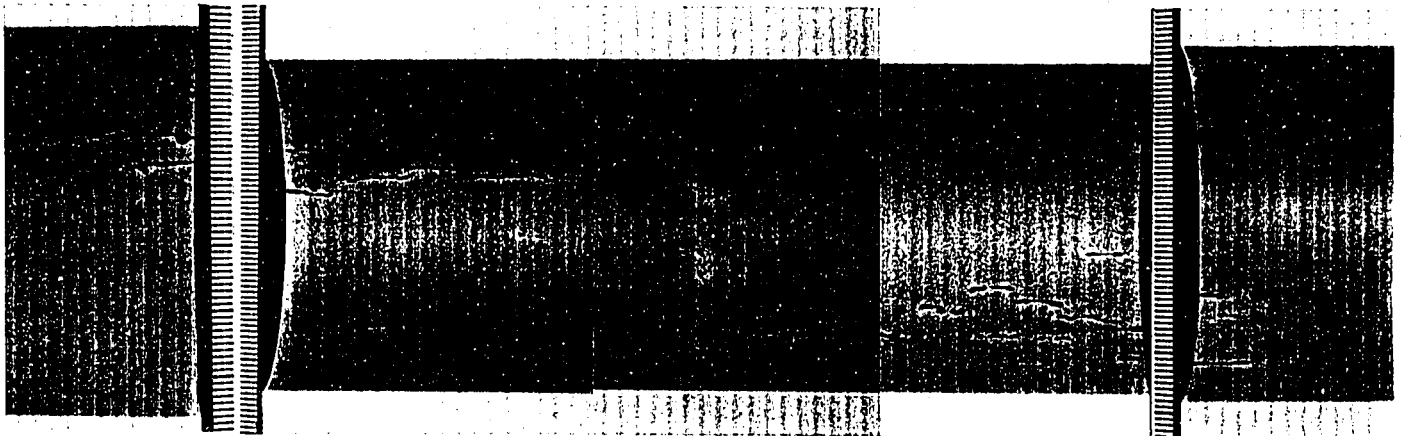
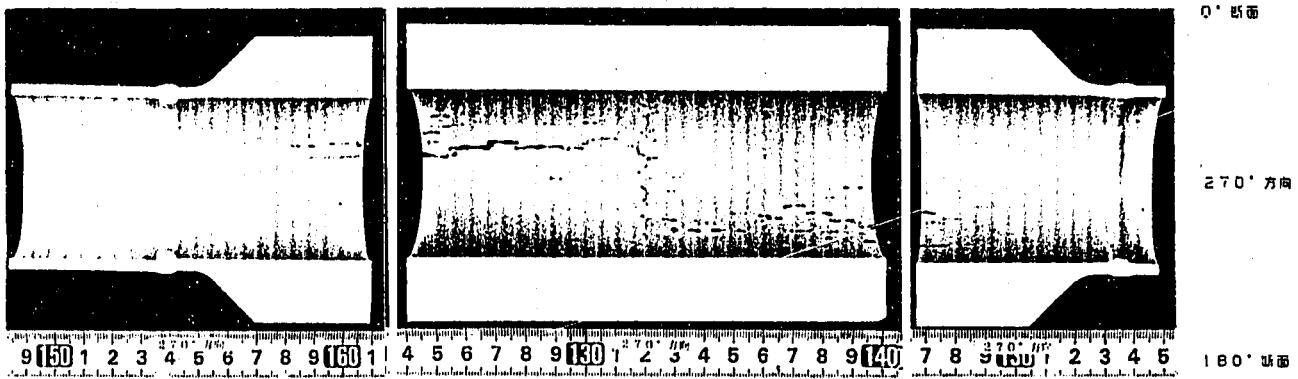
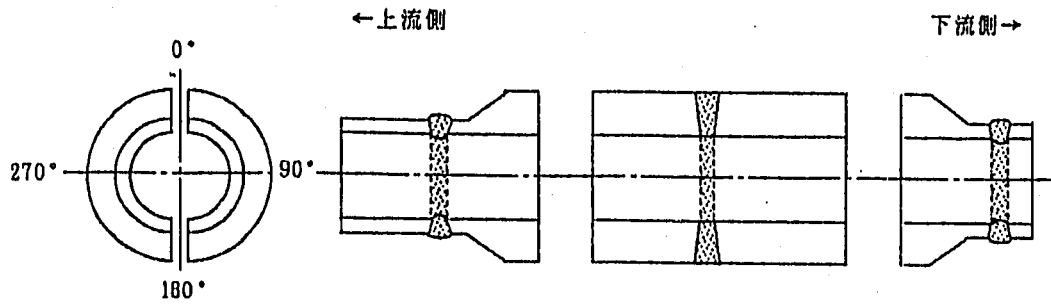
図 2.3 試験後の供試体内表面のき裂分布状況のスケッチ



SUS316・LNP 供試体・内面浸透探傷試験結果

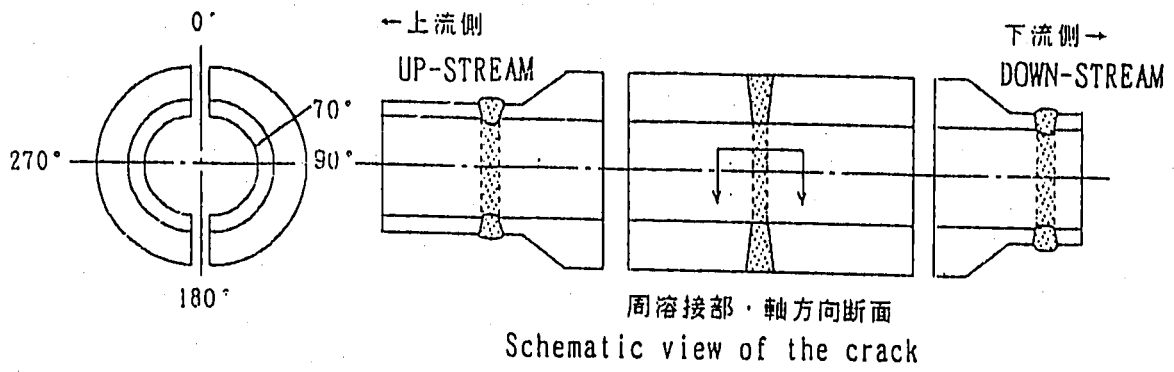
図 2.4 試験後の供試体内表面の液体浸透探傷試験結果 (90° 方向)



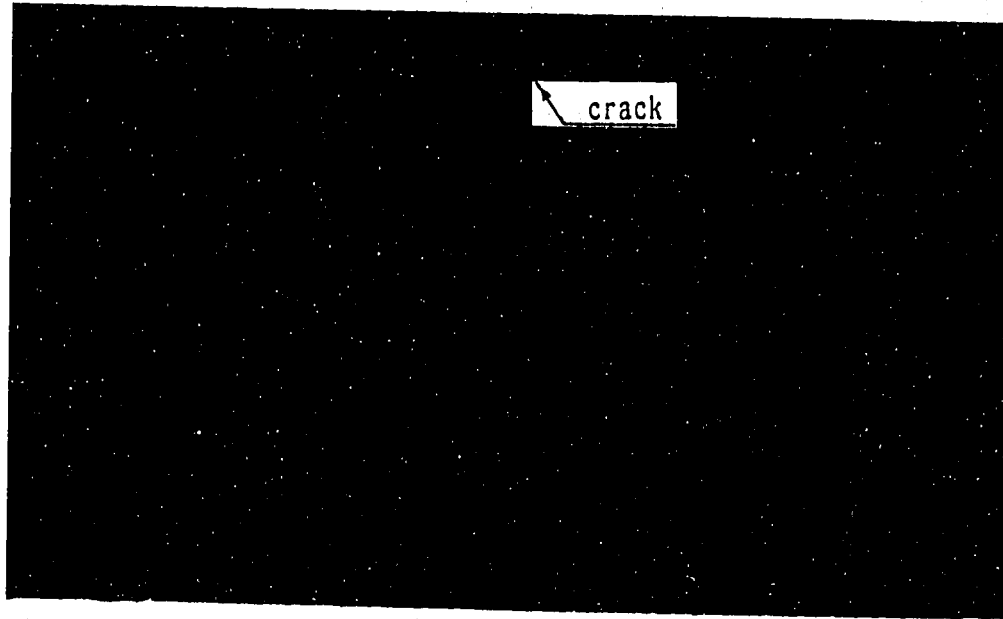


SUS316・LNP 供試体・内面浸透探傷試験結果

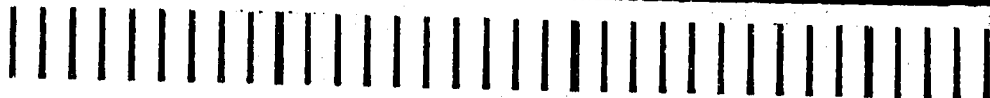
図 2.5 試験後の供試体内表面の液体浸透探傷試験結果 (270° 方向)



INNER SURFACE



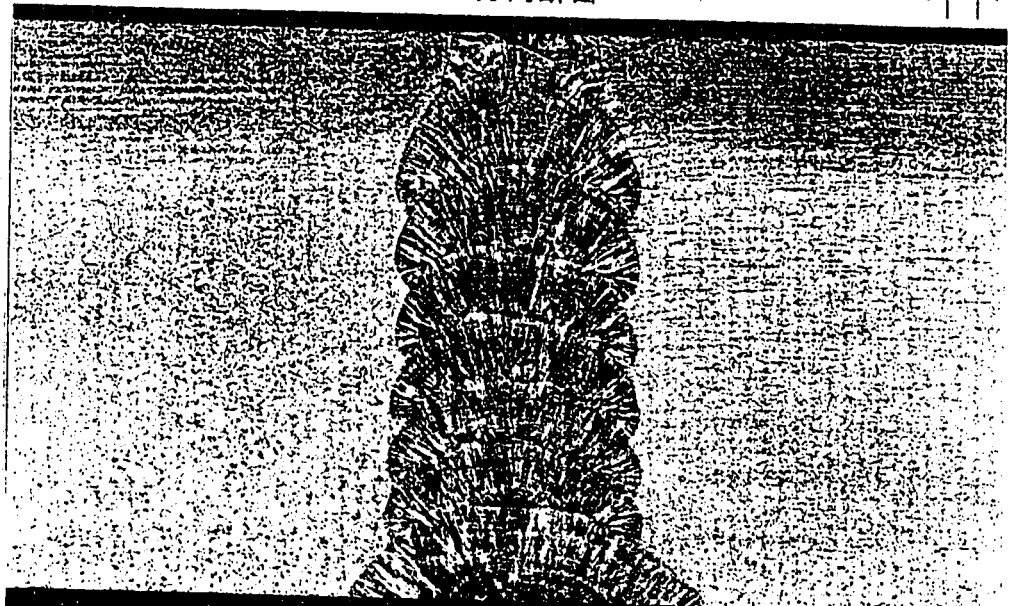
OUTER SURFACE



70° 方向断面

1mm

INNER SURFACE



OUTER SURFACE



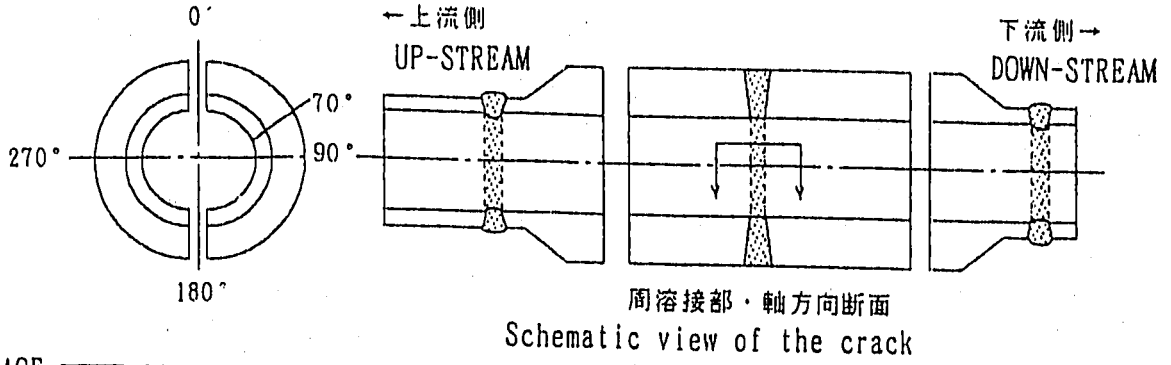
同上・マクロ組織

1mm

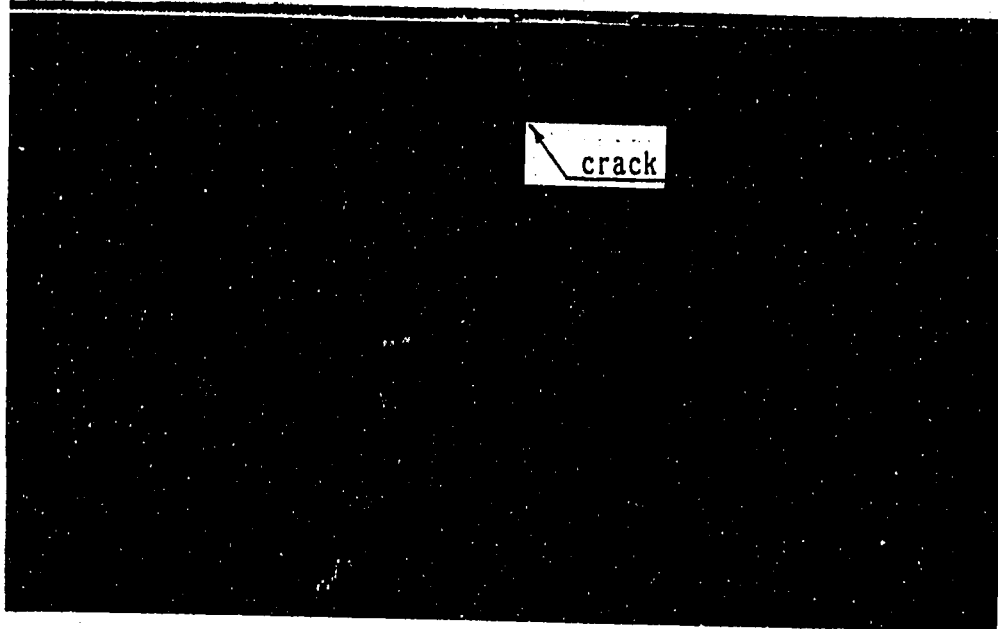
SUS316・LNP供試体・亀裂断面マクロ観察

Macroscopic morphology in the vertical section-1(70°) of the weldment

図 2.6 周溶接部でのき裂と断面マクロ組織 (70° 位相)



INNER SURFACE



OUTER SURFACE



135° 方向断面

1mm

INNER SURFACE



OUTER SURFACE



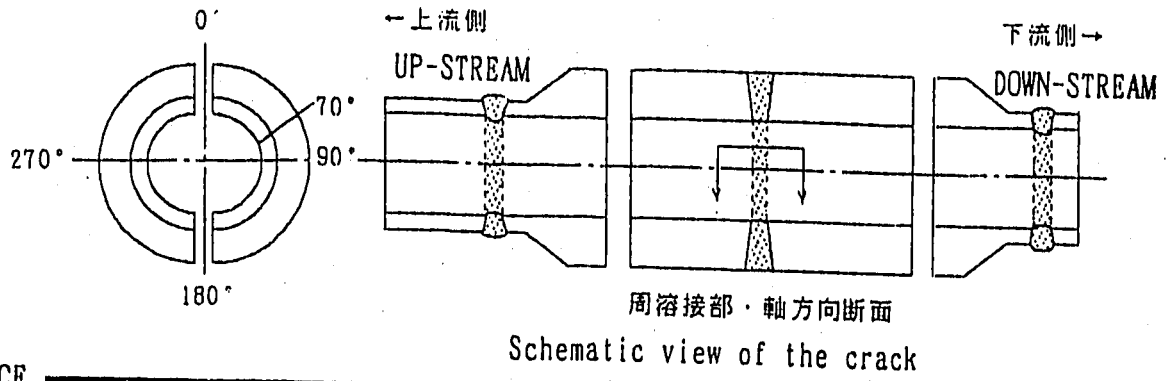
同上・マクロ組織

1mm

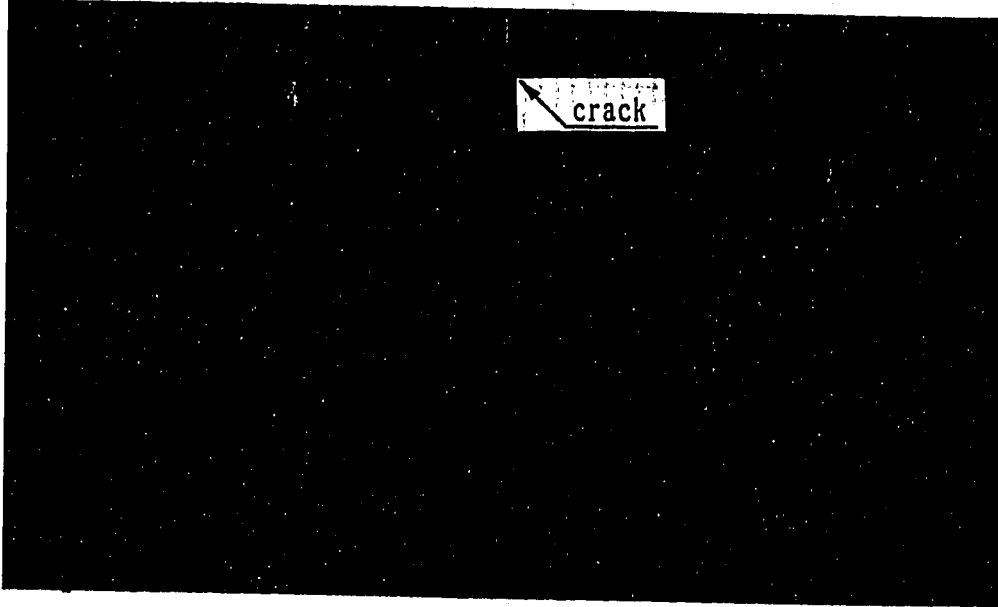
SUS316・LNP供試体・亀裂断面マクロ観察

Macroscopic morphology in the vertical section-2(135°) of the weldment

図 2.7 周溶接部でのき裂と断面マクロ組織 (135° 位相)



INNER SURFACE



OUTER SURFACE



250° 方向断面

1mm

INNER SURFACE



OUTER SURFACE



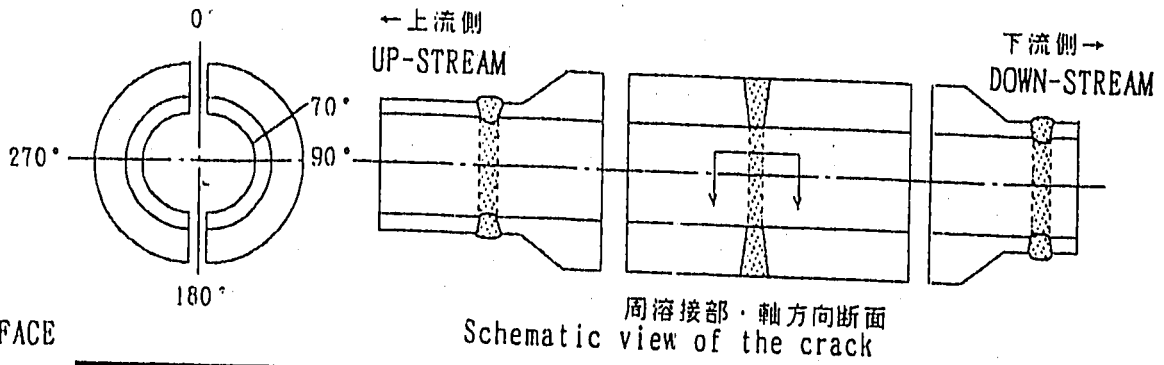
同上・マクロ組織

1mm

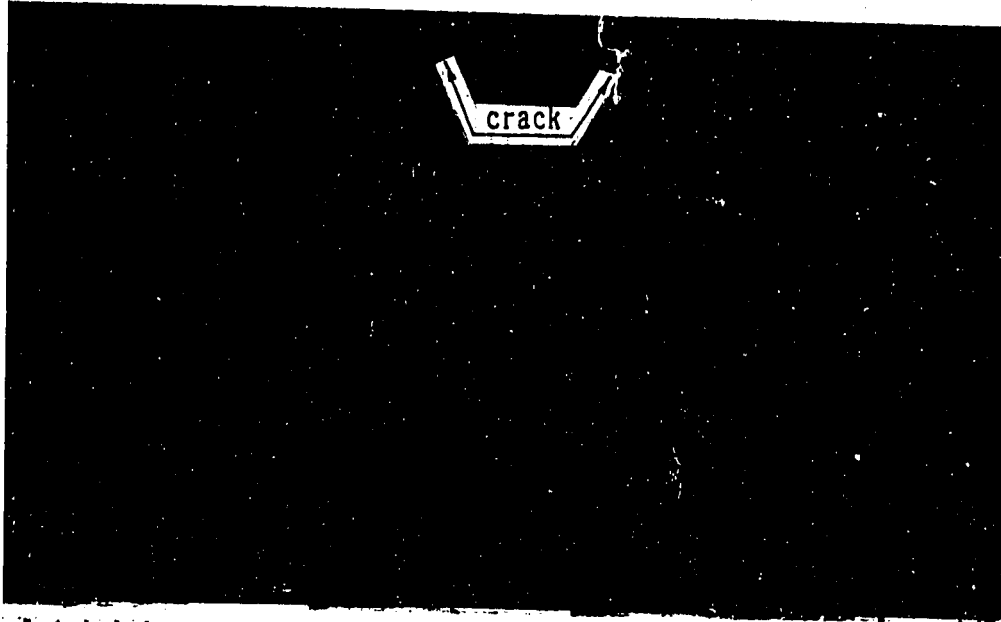
SUS316・LNP供試体・亀裂断面マクロ観察

Macroscopic morphology in the vertical section-3(250°) of the weldment

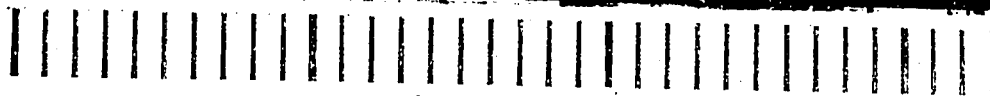
図 2.8 周溶接部でのき裂と断面マクロ組織 (250° 位相)



INNER SURFACE



OUTER SURFACE



315° 方向断面

1mm

INNER SURFACE



OUTER SURFACE



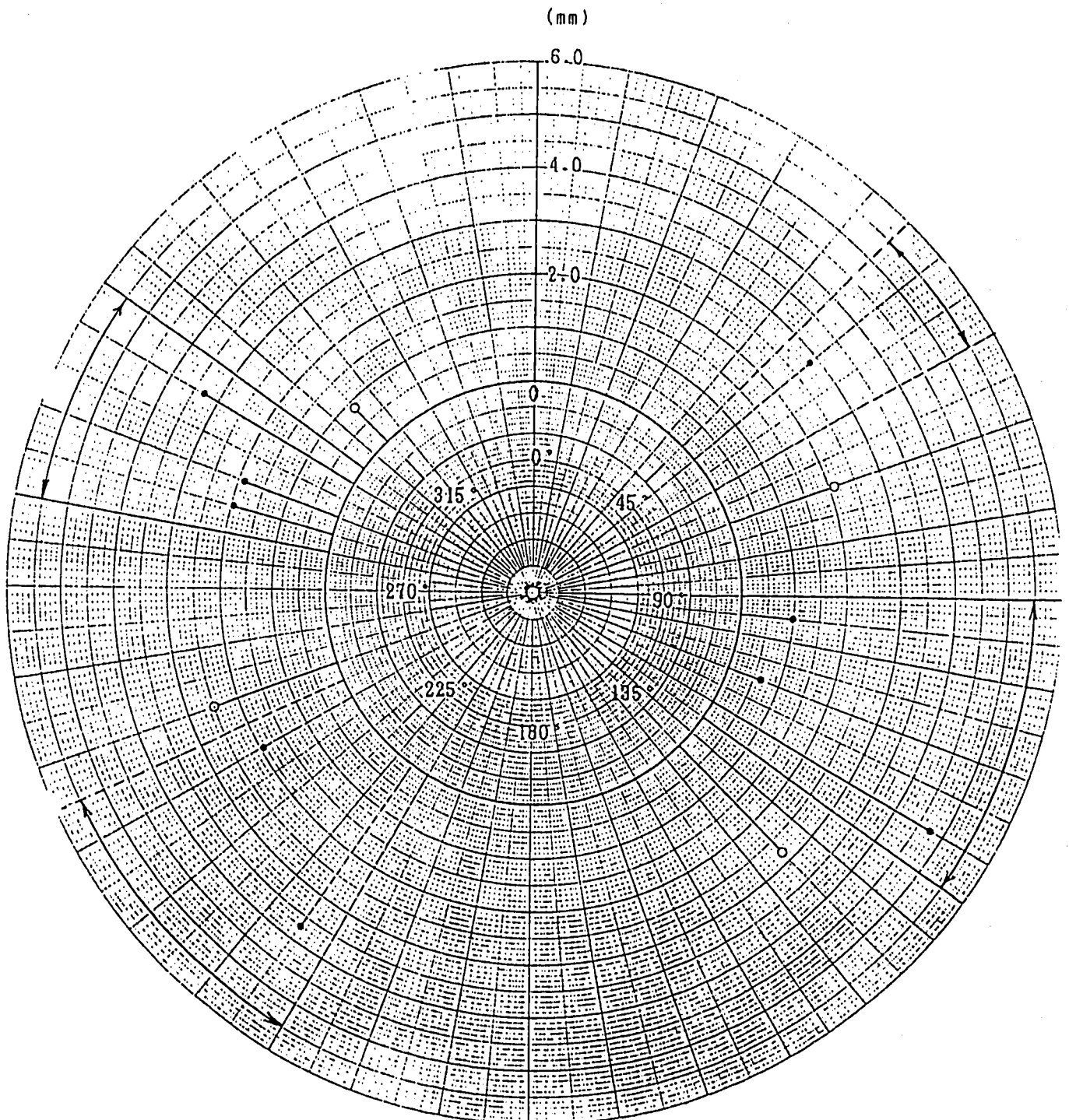
同上・マクロ組織

1mm

SUS316・LNP供試体・亀裂断面マクロ観察

Macroscopic morphology in the vertical section-4(315°) of the weldment

図 2.9 周溶接部でのき裂と断面マクロ組織 (315° 位相)



- : 母材・上流側 (縦亀裂)
- - - : 母材・下流側 ( " )
- : 溶接部 (周亀裂)



-  : 母材上流側亀裂発生範囲
-  : " 下流側 "

図 2.10 き裂深さの測定結果 (母材部、溶接部)

### 3. 伝熱・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<sup>(6)</sup>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、本鋼と同種のオーステナイト系ステンレス鋼であるSUS304に対して開発した寿命予測法(TTSDS)<sup>(10)-(14)</sup>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材料定数には、高速炉構造用SUS316鋼用として暫定的に材料室が定めている定数<sup>(4)</sup>を採用することとした。

#### 3.2 解析方法

##### 3.2.1 伝熱解析法

図3.1に本供試体の伝熱解析のモデル化の考え方とモデル化範囲を示す。また、モデルメッシュ図を図3.2に示す。解析モデルは供試体が溶接部を中心として左右対称であるため、軸方向1/2の範囲を軸対称にモデル化した。また、溶接部とその近傍(A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ある。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、解析モデル内表面全範囲に、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一律に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、ナトリウム温度時刻歴は表3.1に示した値を採用した。供試体の内部で測定された生のナトリウム温度は図3.3(1サイクル; 6時間の変化)、および図3.4、図3.5(各々コールドトランジェント初期5分間、ホットトランジェント初期5分間の変化)に示すとおりである。

また、供試体内表面とナトリウム間の熱伝達係数については、予備解析では、Subbotinの式により算出された前報<sup>(1)</sup>採用の値を用いることとしたが、後述のとおりこの解析結果が供試体外表面で測定された実際の温度変化と一致しなかったため、本解析では、両者が一致するように先の熱伝達係数を修正し、表3.1に示されるような温度依存性を考慮した形で採用した。なお、前報採用の値については付表C-1に示した。

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3.6に示した。

また、表3.2には伝熱解析で使用したSUS316鋼の物性値<sup>(5)</sup>として、熱伝導率、比熱、密度を示した。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の応力、ひずみを計算した。ここで、SUS316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、熱応力解析は弾性解析とした。

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3.3<sup>(6)</sup>に示したSUS316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。

また、熱応力解析時の変位境界条件は図3.7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3.8から図3.10は供試体の周溶接部外表面上の3位相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1時間、ホットトランジェント5時間）の温度変化を示したものである。また、それぞれの温度変化のうち、コールドトランジェント300秒間とホットトランジェント300秒間の両者を拡大したものを図3.11から図3.13に示した。これらの図から、供試体の周方向にほぼ均一な熱過渡が負荷されていたことが読み取れる。

次に、図3.14には前述の熱伝達係数調整前の予備伝熱解析により得られたラインA, B, Cの外表面各点（Aが温度計測点に対応する）での温度変化を、また図3.15には熱伝達係数調整後の本伝熱解析により得られたラインA, B, Cの外表面各点での同様の温度変化を示した。これらの図と先に示した実測データを比較すると、予備解析の結果は実測データに比べて降温時、昇温時のいずれにおいてもやや早めに応答しているのに対して、熱伝達係数調整後の本伝熱解析の結果は実測データとかなり良く一致しており、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考えられる。

図3.16には上述のとおり検証された伝熱解析結果のうち、ラインA, B, Cの内表面点でのコールドトランジェントおよびホットトランジェント初期の300秒間の温度変化を、また図3.17から図3.19にはラインA, B, Cの内表面、板厚中央、外表面における熱過渡1サイクル中の温度変化を示した。

さらに、図3.20から図3.22にはコールドトランジェントにおける代表3時点における温度コンター図を、また図3.23から図3.25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には参考までに熱伝達係数調整前の予備伝熱解析により得られた温度解析結果を上記と同様の様式で添付したので、比較用に参照されたい。



### 3.3.2 弾性熱応力解析結果

図3.26と図3.27にはコールドトランジェント開始から30秒後と43秒後の軸方向と周方向の応力のコンター図を、また図3.28と図3.29にはホットトランジェント開始から31.5秒後と45秒後の軸方向と周方向の応力のコンター図をそれぞれ示した。

次に、図3.30から図3.32にはラインA, B, Cそれぞれの内表面(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示した。これらの図から、本供試体では溶接部(A近傍)を中心とした厚肉部の広い範囲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3.33、図3.34には内表面(SURFACE-1と呼ぶ;図4.2参照)と外表面(SURFACE-2と呼ぶ)の供試体軸方向にそった表示ラインに対する、極値を形成する2時点間での各座標成分毎のひずみ範囲の分布を、また図3.35、図3.36には内外表面の供試体軸方向にそった表示ラインに対するミーゼス相当応力範囲の分布を示す。

これらの図から、板厚変化部の影響を受けると考えられる厚肉両端部を除けば、周溶接部からその両側の比較的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。ただし、詳細には厚肉両端部に相当するラインBまわりでは周方向成分が軸方向成分を上回り、逆に薄肉部付け根に相当するラインCまわりでは絶対値は小さいが、軸方向成分が周方向成分を上回る傾向が見られる。また、容易に推定されるように、応力、ひずみの大きさは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 本報における伝熱解析のための熱過渡条件、熱伝達係数

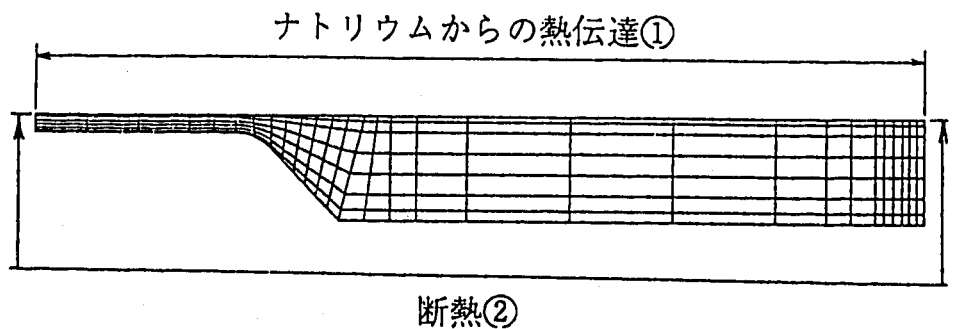
Input temperature history of SUS 316FR welded pipe part

TIME (sec)	Sodium Temp. (°C)
0.0	550.00
10.0	550.00
18.5	545.00
23.0	542.29
25.5	537.01
28.5	430.92
30.0	381.83
32.0	359.17
35.0	335.10
37.0	327.16
43.0	315.43
60.0	309.00
90.0	307.29
120.0	308.00
150.0	307.00
180.0	307.00
300.0	302.50
500.0	300.00
900.0	302.50
1800.0	303.50
3600.0	302.50
3613.0	302.50
3619.0	302.71
3624.0	304.85
3625.5	310.84
3627.0	376.39
3628.5	414.64
3630.0	453.08
3631.5	484.11
3634.0	504.68
3636.0	514.69
3641.0	529.20
3649.0	537.42
3660.0	539.28
3690.0	543.56
3720.0	542.78
3750.0	541.92
3780.0	542.06
3900.0	545.56
4100.0	550.00
5400.0	550.00
7200.0	550.00
9000.0	550.00
13900.0	550.00
21600.0	550.00

Heat Transfer Coefficient

Temp. 温度 [°C]	熱伝達率 (Kcal/m <sup>2</sup> ·h·°C)	
	①	②
20.0	—	ADIABATIC
210.0	—	
300.0	3.83 × 10 <sup>-3</sup>	
400.0	3.63 × 10 <sup>-3</sup>	
500.0	3.43 × 10 <sup>-3</sup>	
550.0	3.33 × 10 <sup>-3</sup>	

- ① Heat transfer was considered
- ② Adiabatic



(b) Thermal boundary condition for heat transfer analysis

Above sodium temperature were estimated from the values measured at the Nozzle Model-3, which located at the upstream side of the SUS316FR welded pipe

表 3.2 伝熱解析に用いたSUS316鋼の材料物性値

オーステナイトステンレス鋼SUS316

温度 (°C)	熱伝導係数 (kcal/mm·sec·°C)	比熱 (kcal/kg·°C)	密度 (kg/mm <sup>3</sup> )
20	$3.48 \times 10^{-4}$	0.103	$7.97 \times 10^{-3}$
50	3.53	0.112	7.96
100	3.73	0.118	7.94
150	3.89	0.122	7.92
200	4.05	0.125	7.89
250	4.21	0.128	7.87
300	4.37	0.129	7.85
350	4.53	0.131	7.83
400	4.70	0.132	7.80
450	4.86	0.133	7.78
500	5.02	0.134	7.76
550	5.18	0.136	7.74
600	5.34	0.138	7.72
650	5.51	0.140	7.69
700	5.67	0.142	7.67
750	5.83	0.145	7.65
800	5.98	0.147	7.63

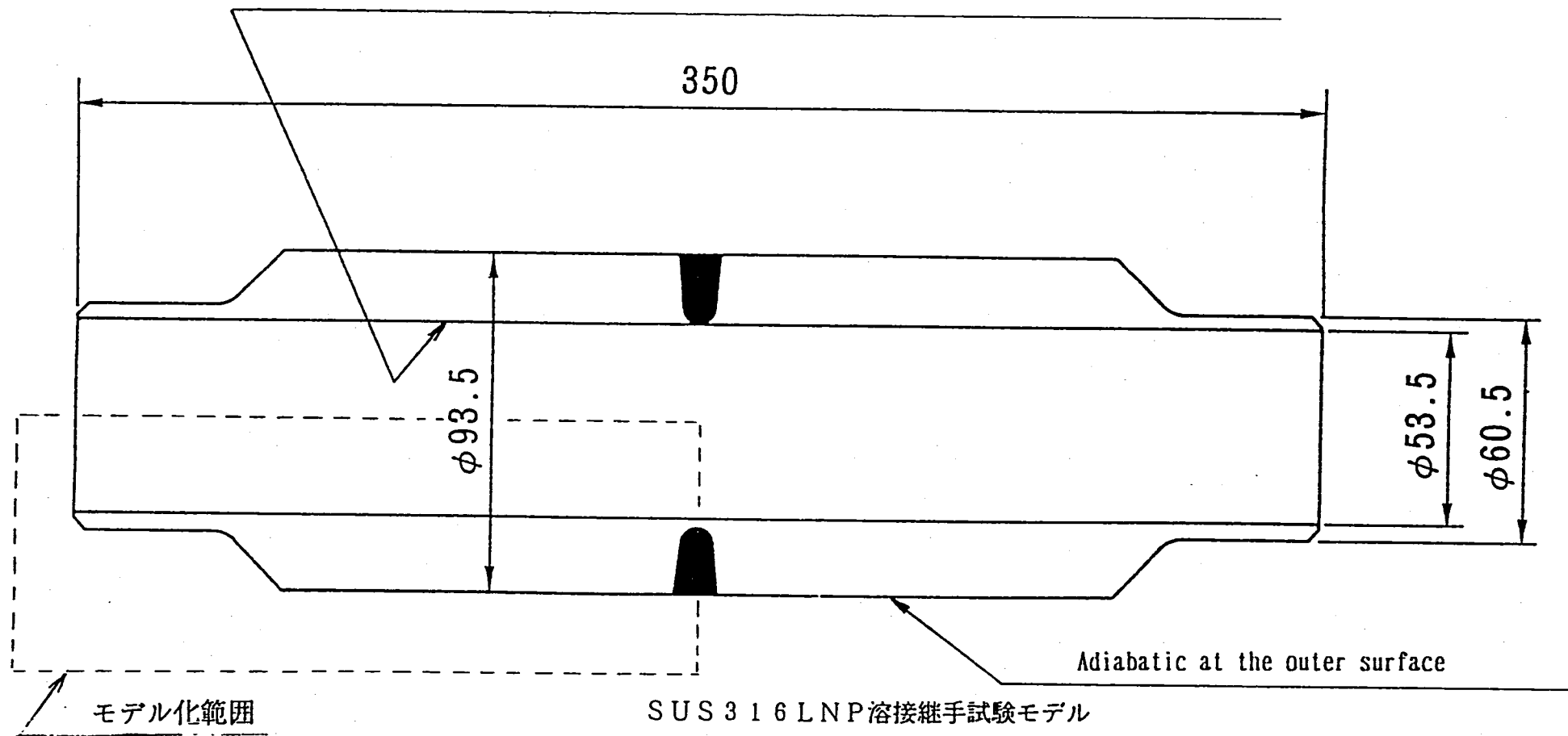
表 3.3 弾性熱応力解析に用いたSUS316鋼の材料特性値

SUS316鋼のヤング係数、ポアソン比、線膨張係数

温度 (°C)	ヤング係数 (kg/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	線膨張係数 (1/°C)
20	$1.98 \times 10^4$	0.266	$15.15 \times 10^{-6}$
50	$1.96 \times 10^4$	0.263	$15.65 \times 10^{-6}$
100	$1.94 \times 10^4$	0.272	$16.48 \times 10^{-6}$
150	$1.91 \times 10^4$	0.275	$17.22 \times 10^{-6}$
200	$1.88 \times 10^4$	0.279	$17.55 \times 10^{-6}$
250	$1.84 \times 10^4$	0.283	$18.36 \times 10^{-6}$
300	$1.80 \times 10^4$	0.287	$18.79 \times 10^{-6}$
350	$1.76 \times 10^4$	0.291	$19.19 \times 10^{-6}$
400	$1.72 \times 10^4$	0.295	$19.57 \times 10^{-6}$
450	$1.67 \times 10^4$	0.298	$19.93 \times 10^{-6}$
500	$1.62 \times 10^4$	0.302	$20.28 \times 10^{-6}$
550	$1.57 \times 10^4$	0.306	$20.60 \times 10^{-6}$
600	$1.52 \times 10^4$	0.310	$20.87 \times 10^{-6}$
650	$1.47 \times 10^4$	0.314	$21.09 \times 10^{-6}$

Heat input was considered using heat transfer element at the inner surface with the specific heat transfer coefficients (Table)

Input temperature histories of sodium at the SUS316FR welded pipe part are shown in Table



Configuration of the model ( SUS 316FR welded pipe part )

図 3.1 伝熱解析のモデル化の考え方とモデル化範囲

FINAS

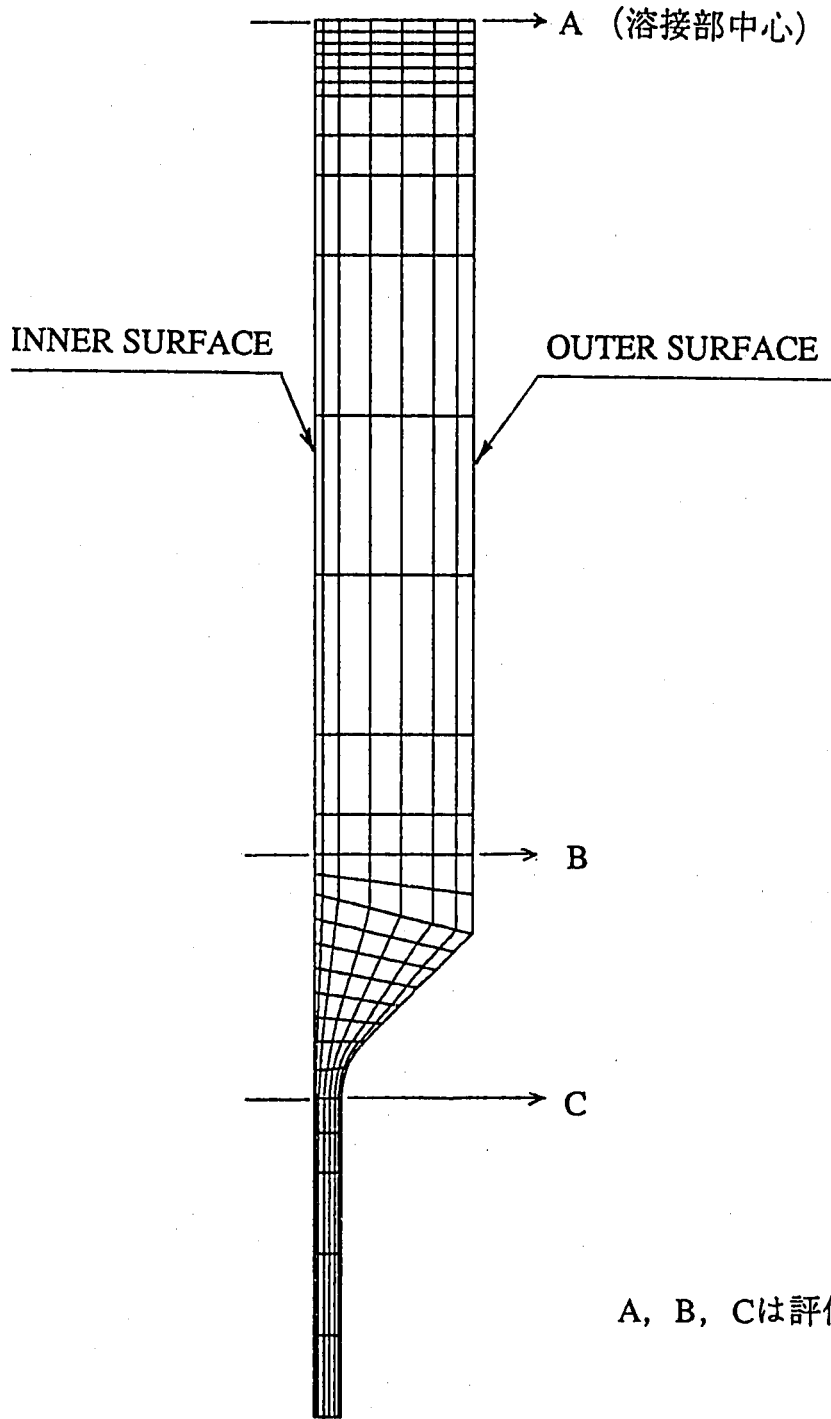


図 3.2 解析モデルメッシュ図と評価点

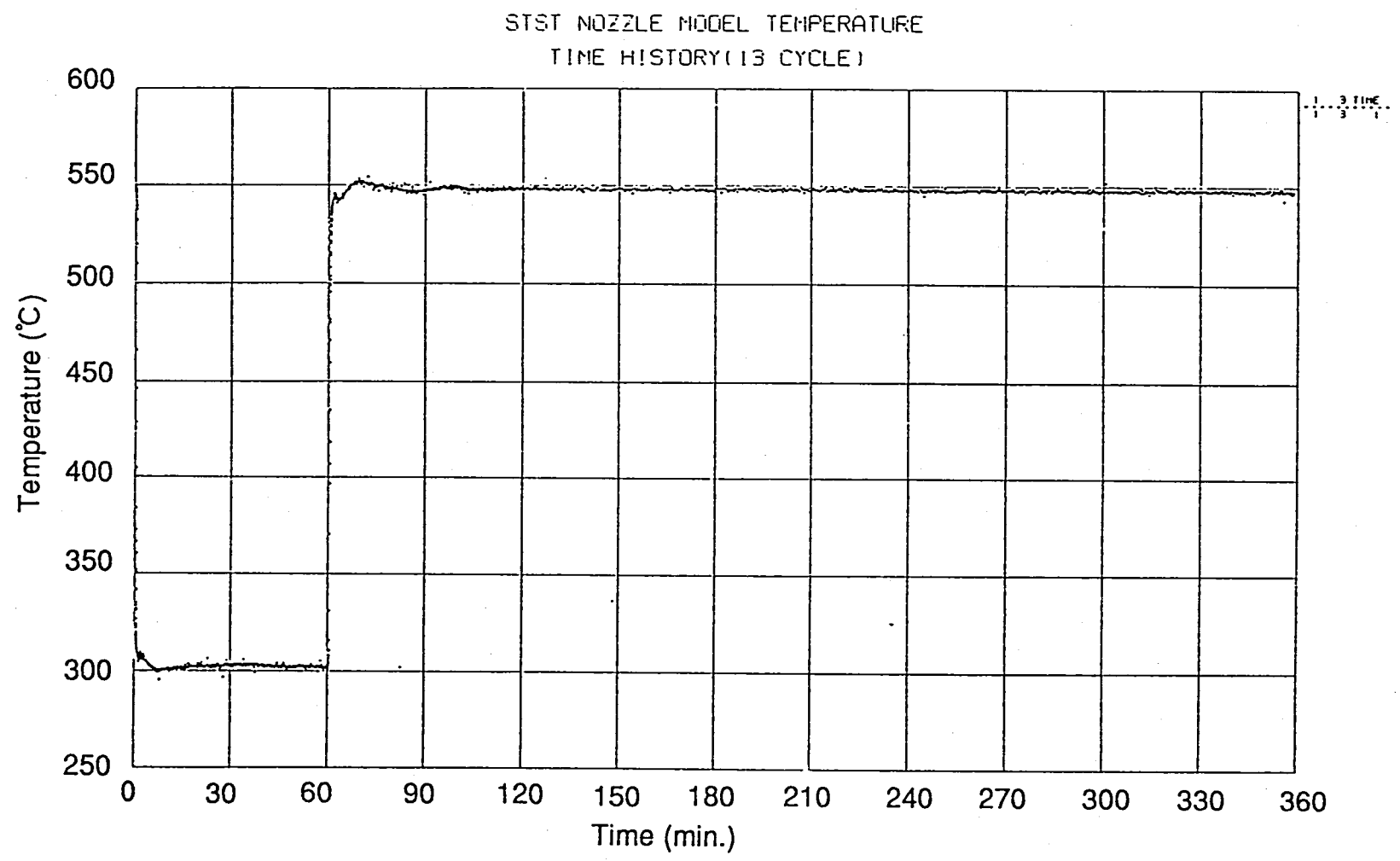


図 3.3 供試体内部でのNa温度測定結果 (熱過渡1サイクル分; CH3)

STST NOZZLE MODEL TEMPERATURE  
TIME HISTORY (13 CYCLE)

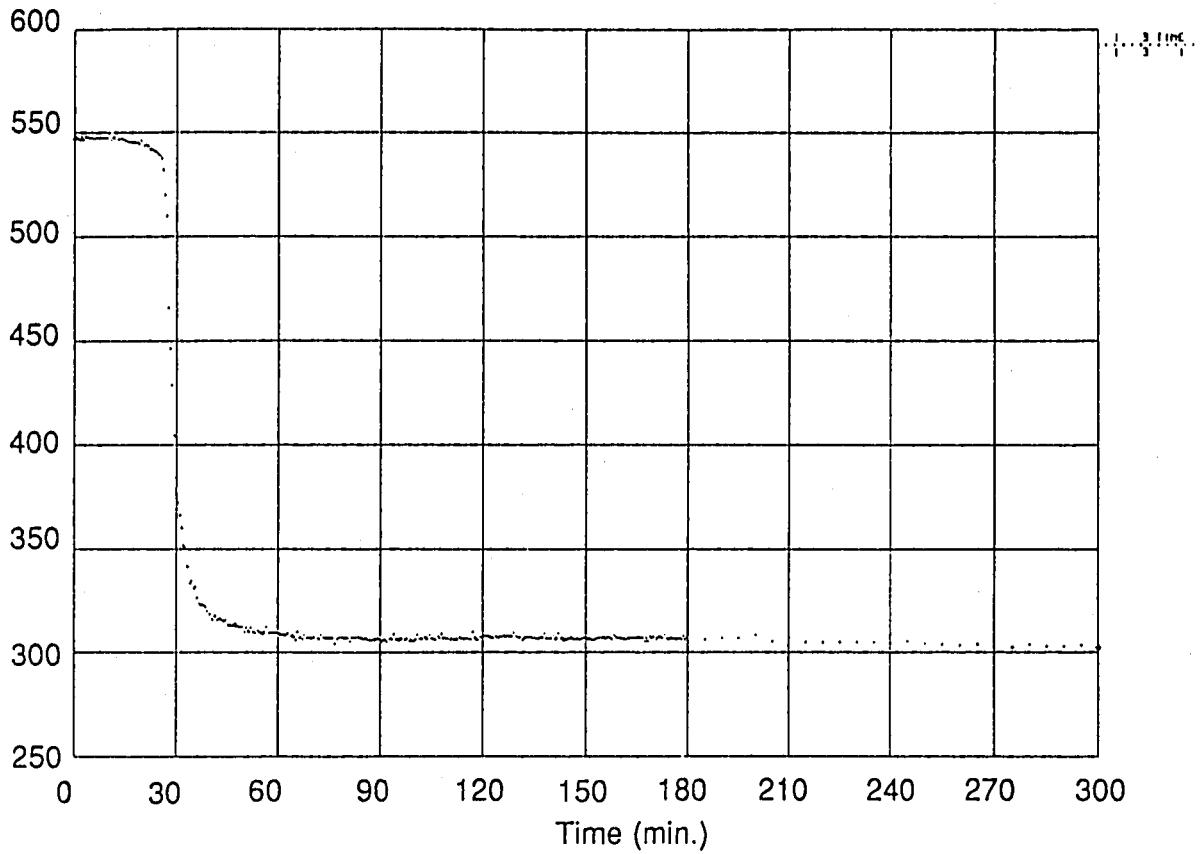


図 3.4 供試体内部でのNa温度測定結果 (低温熱過渡初期の300秒; CH3)

STST NOZZLE MODEL TEMPERATURE  
TIME HISTORY (13 CYCLE)

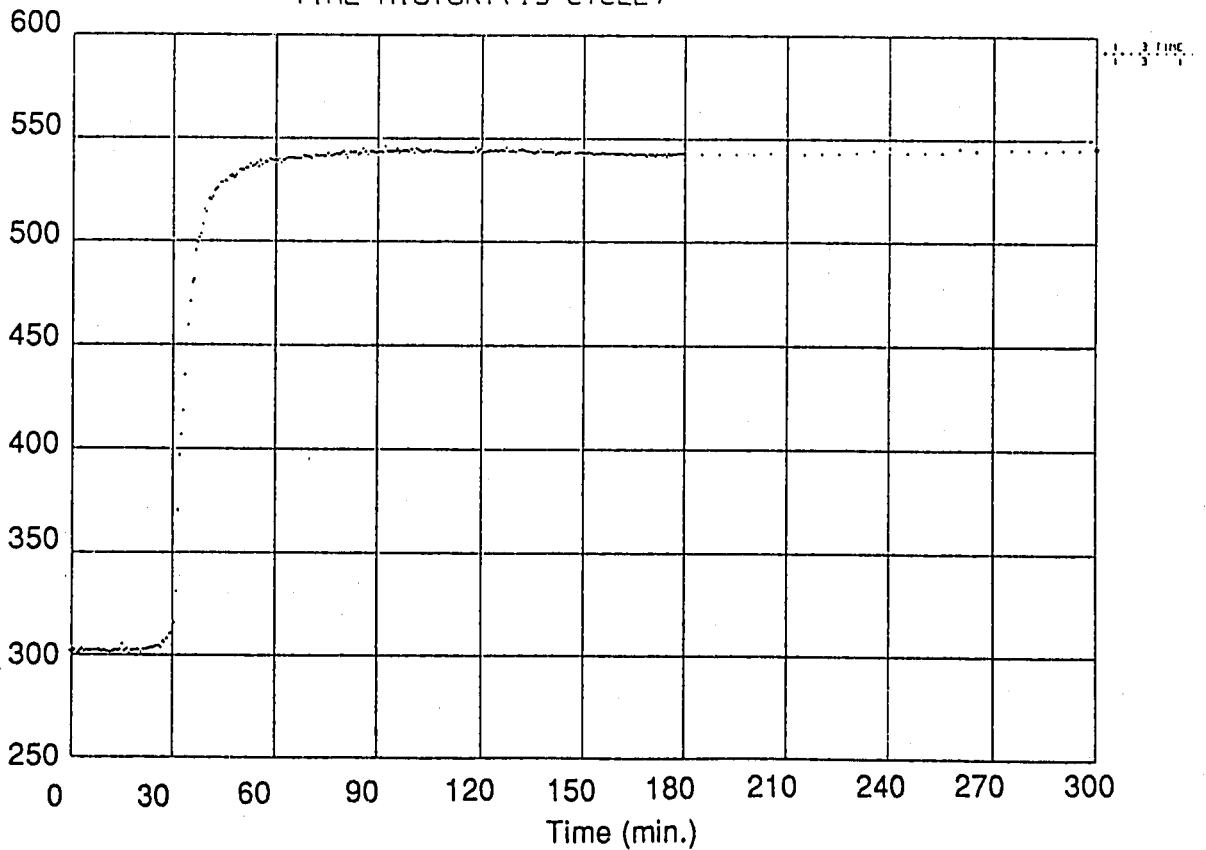


図 3.5 供試体内部でのNa温度測定結果 (高温熱過渡初期の300秒; CH3)

FINAS

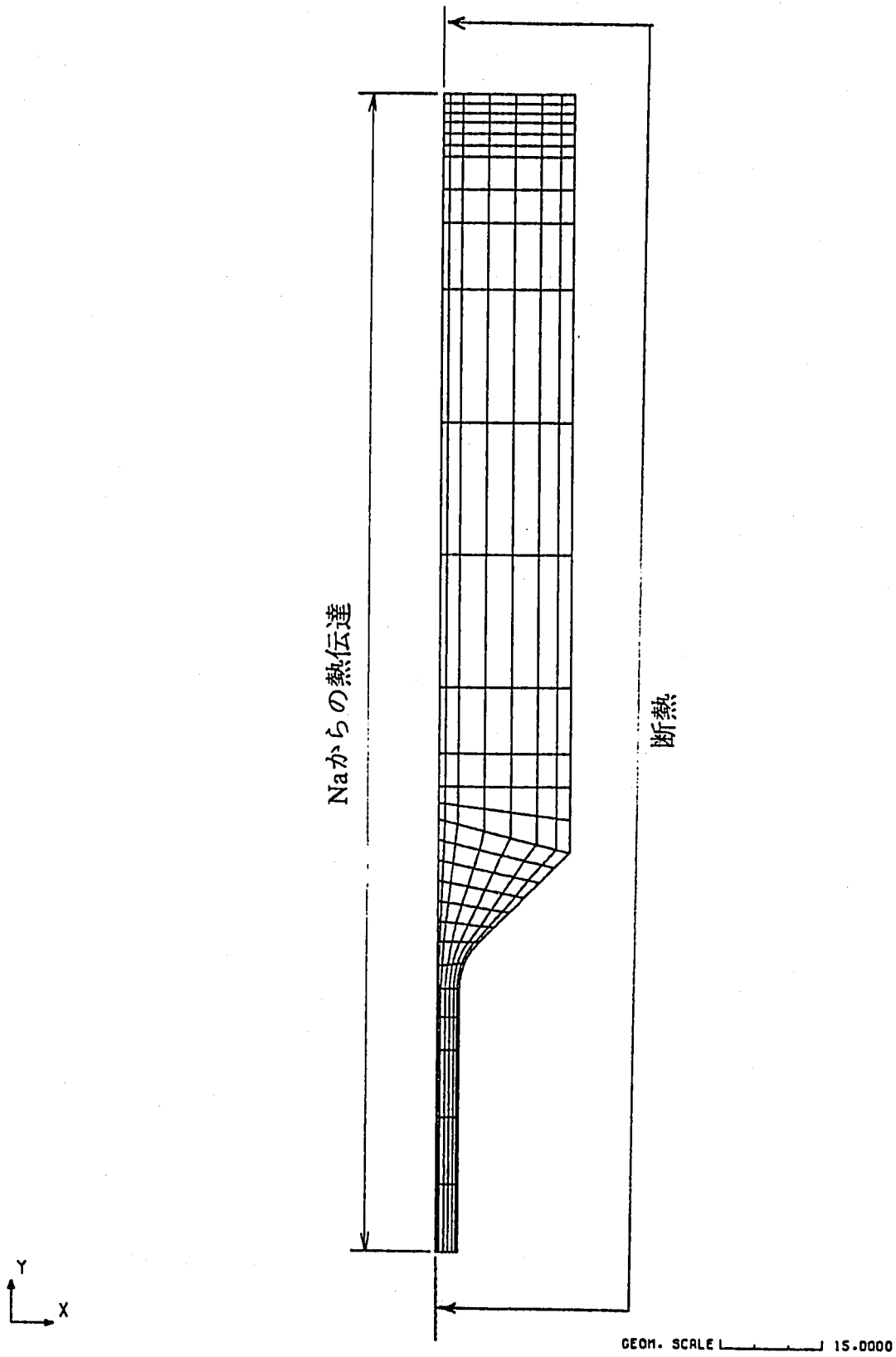
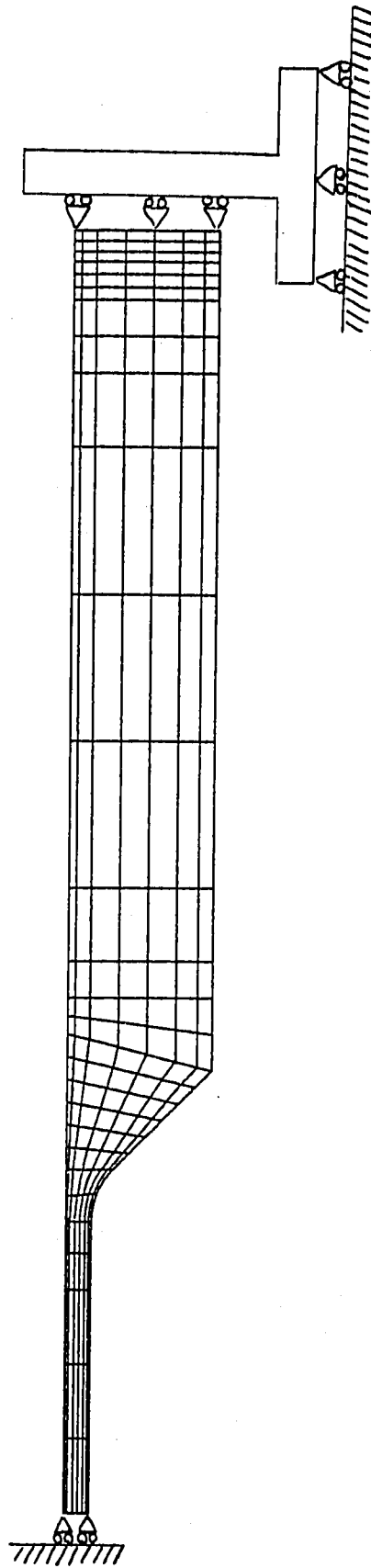


図 3.6 伝熱解析に採用した熱的境界条件



FINAS



GEOM. SCALE 1 : 15.0000

図 3.7 弾性熱応力解析に採用した機械的境界条件

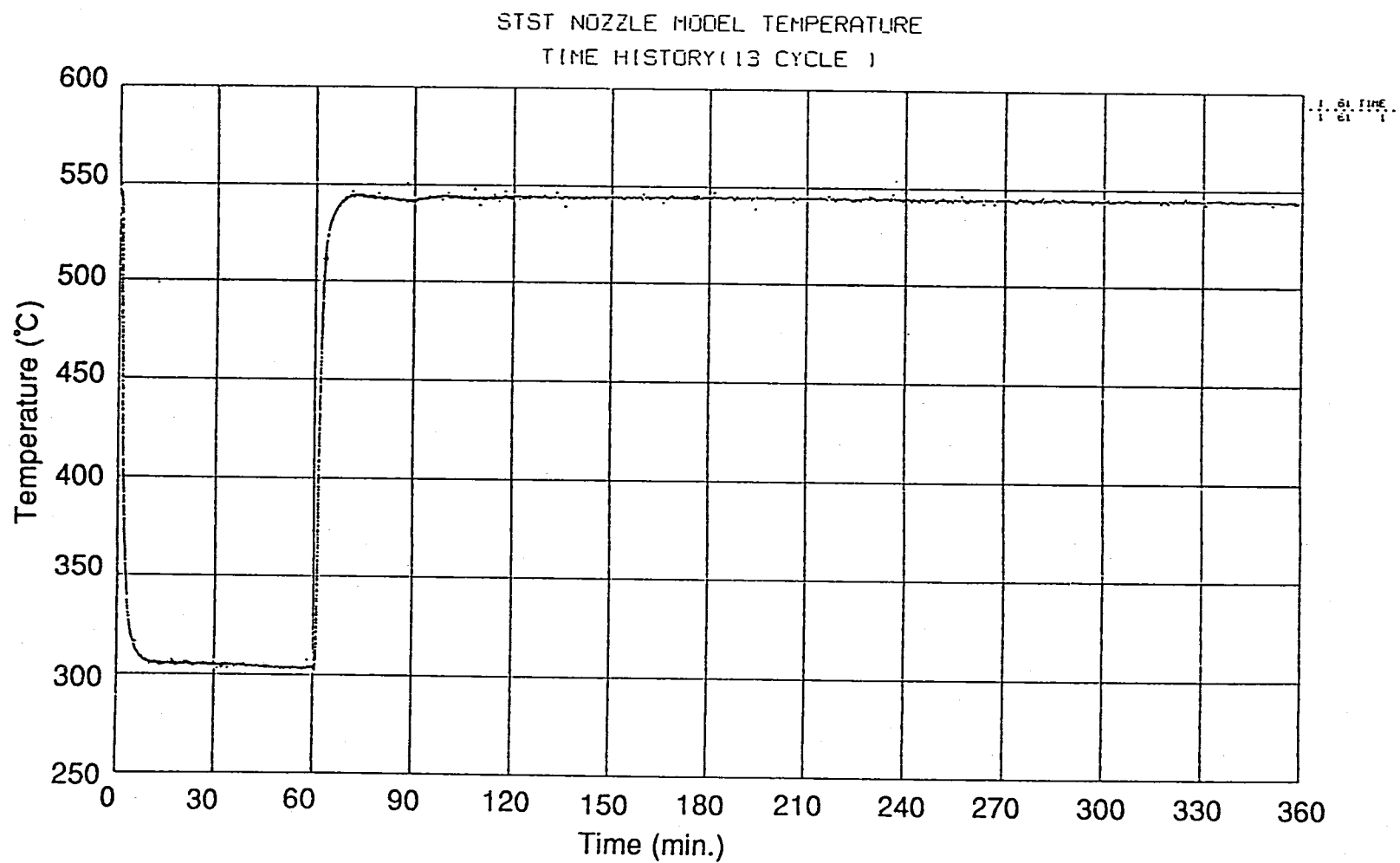


図 3.8 供試体外表面での温度測定結果 (熱過渡 1 サイクル分 ; CH 6 1)

STST NOZZLE MODEL TEMPERATURE  
TIME HISTORY (13 CYCLE )

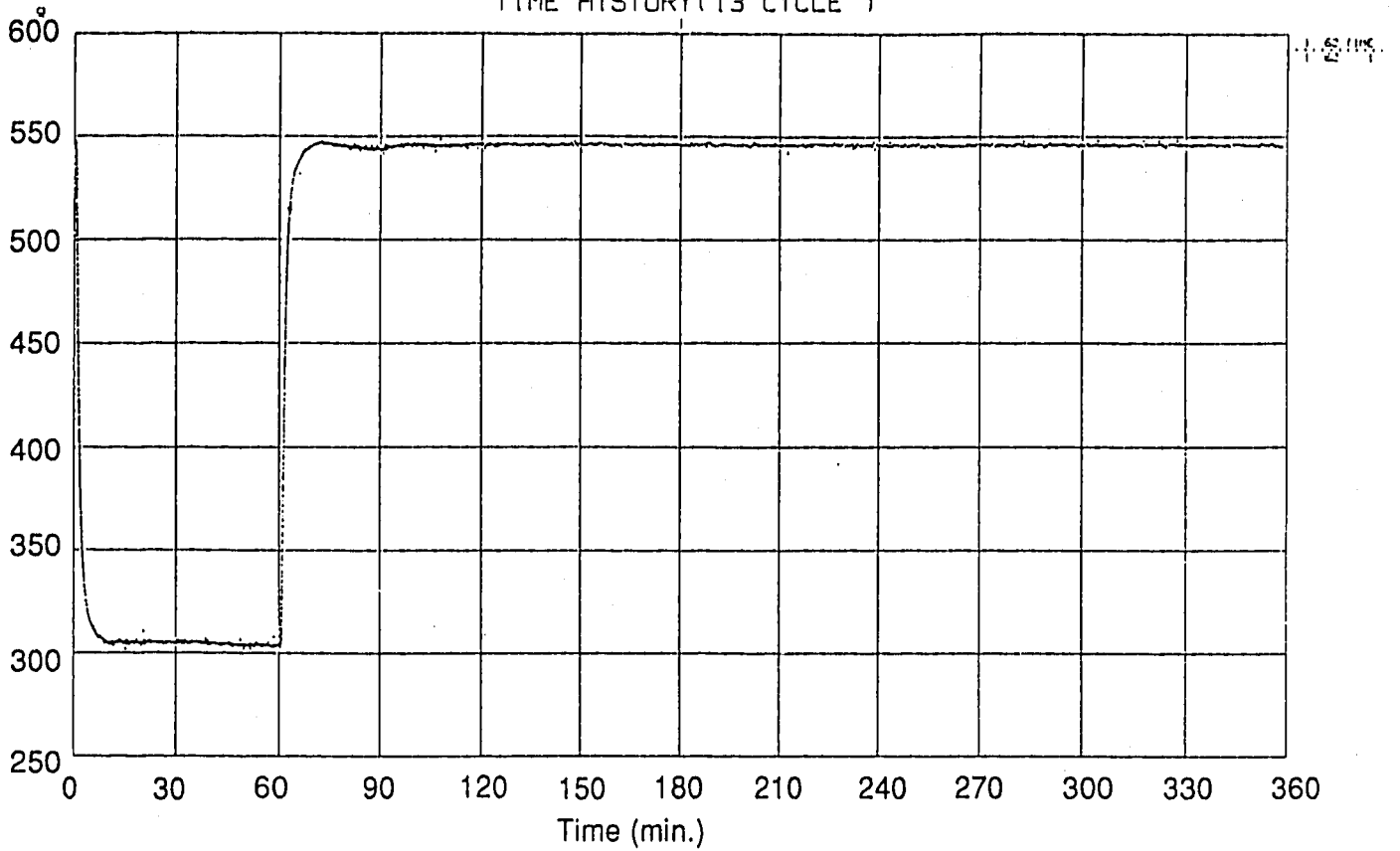


図 3.9 供試体外表面での温度測定結果 (熱過渡 1 サイクル分 ; CH 6 2)

STST NOZZLE MODEL TEMPERATURE  
TIME HISTORY (13 CYCLE )

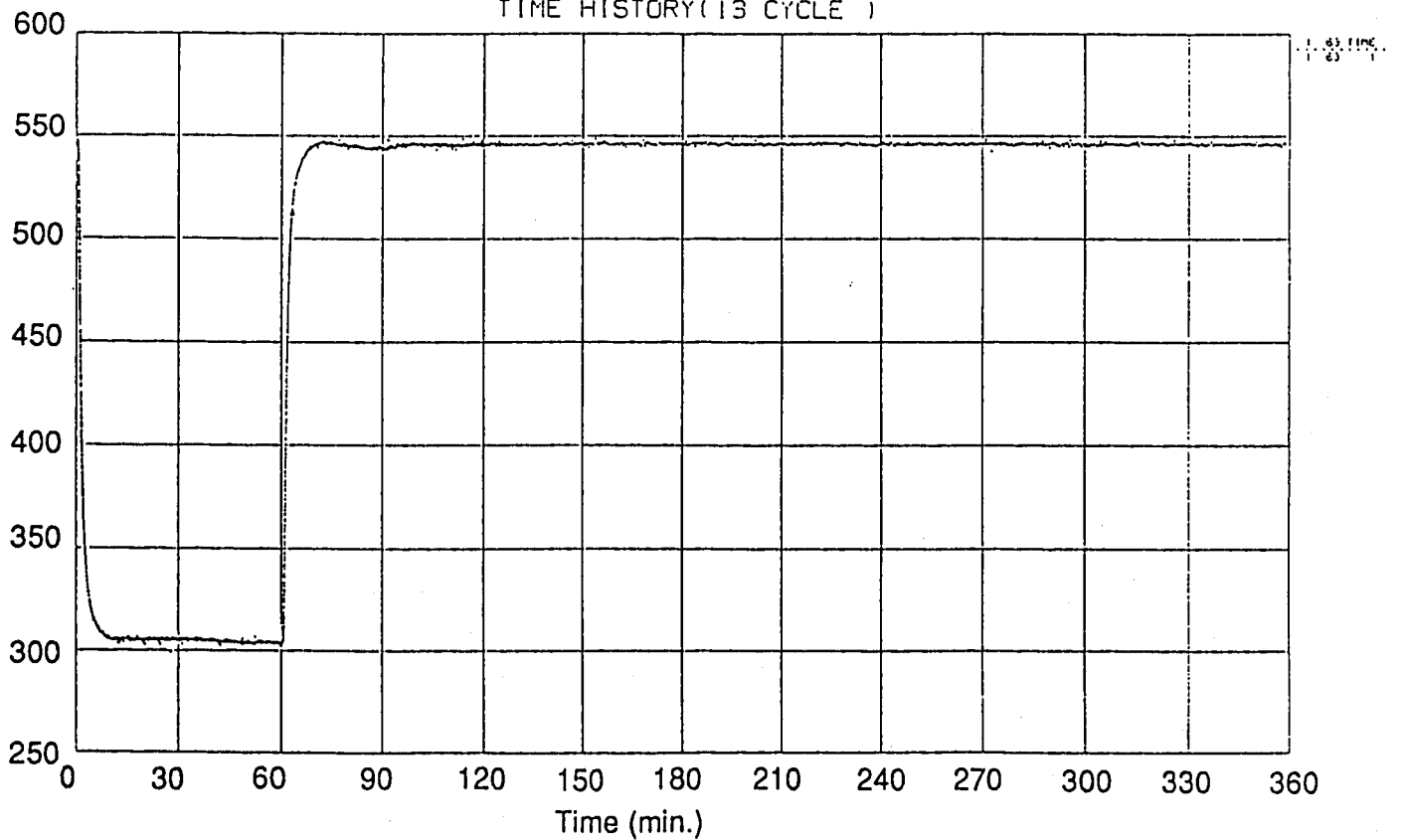


図 3.10 供試体外表面での温度測定結果 (熱過渡 1 サイクル分 ; CH 6 3)

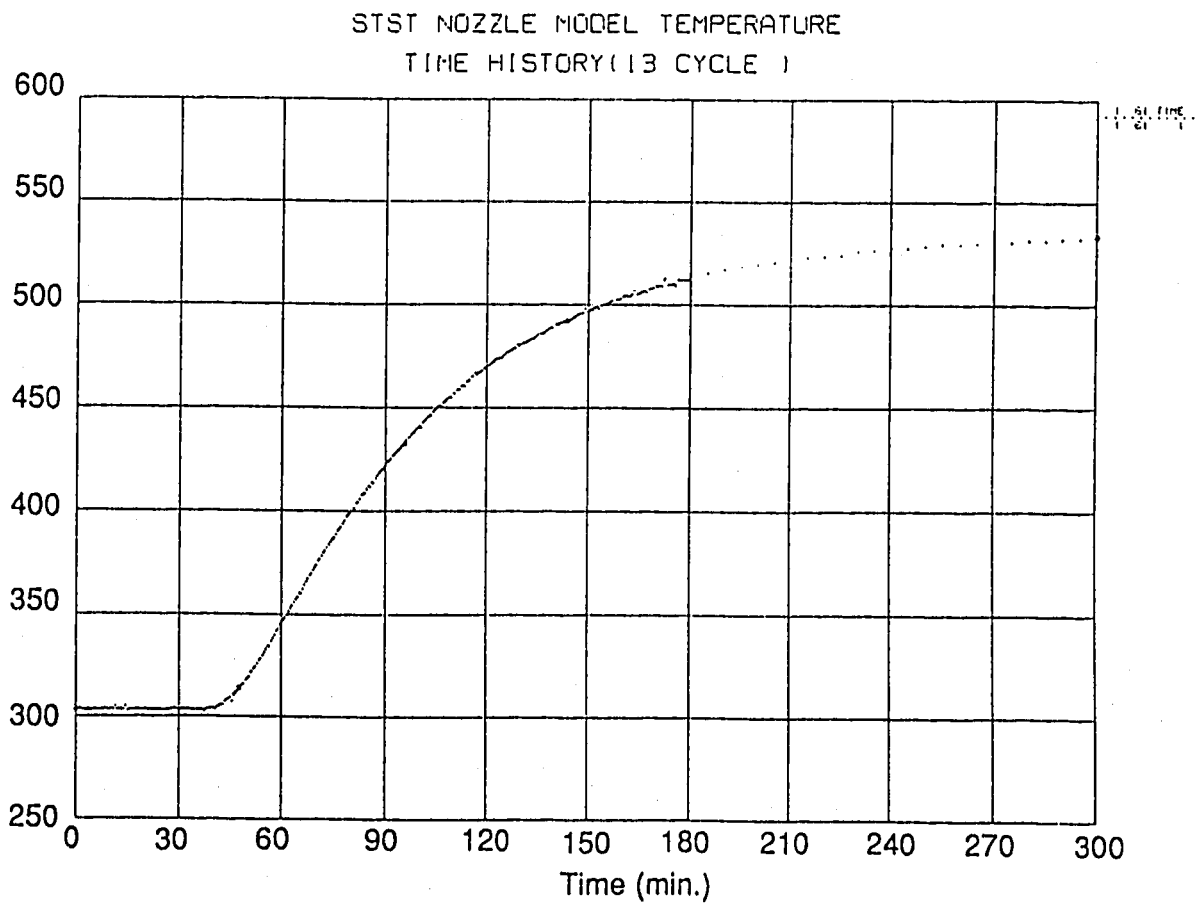
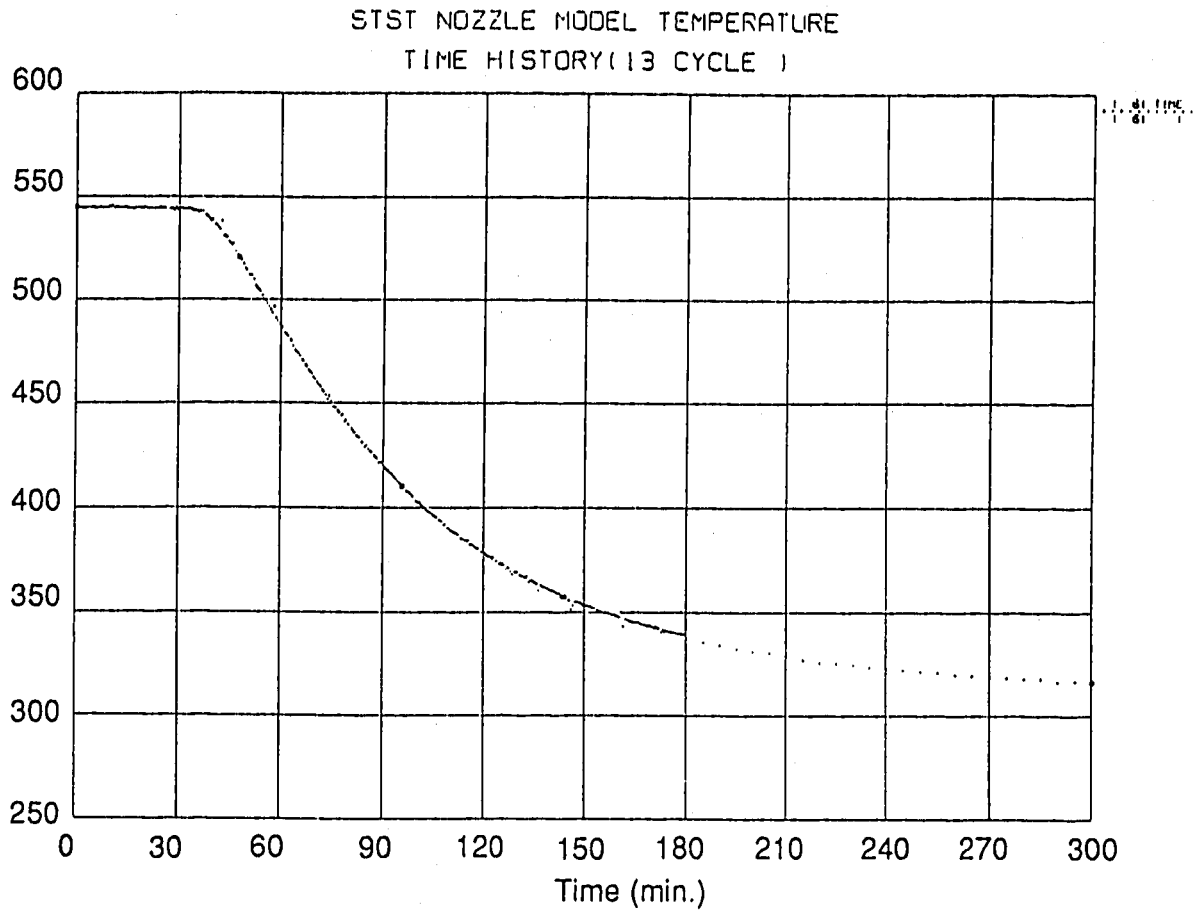
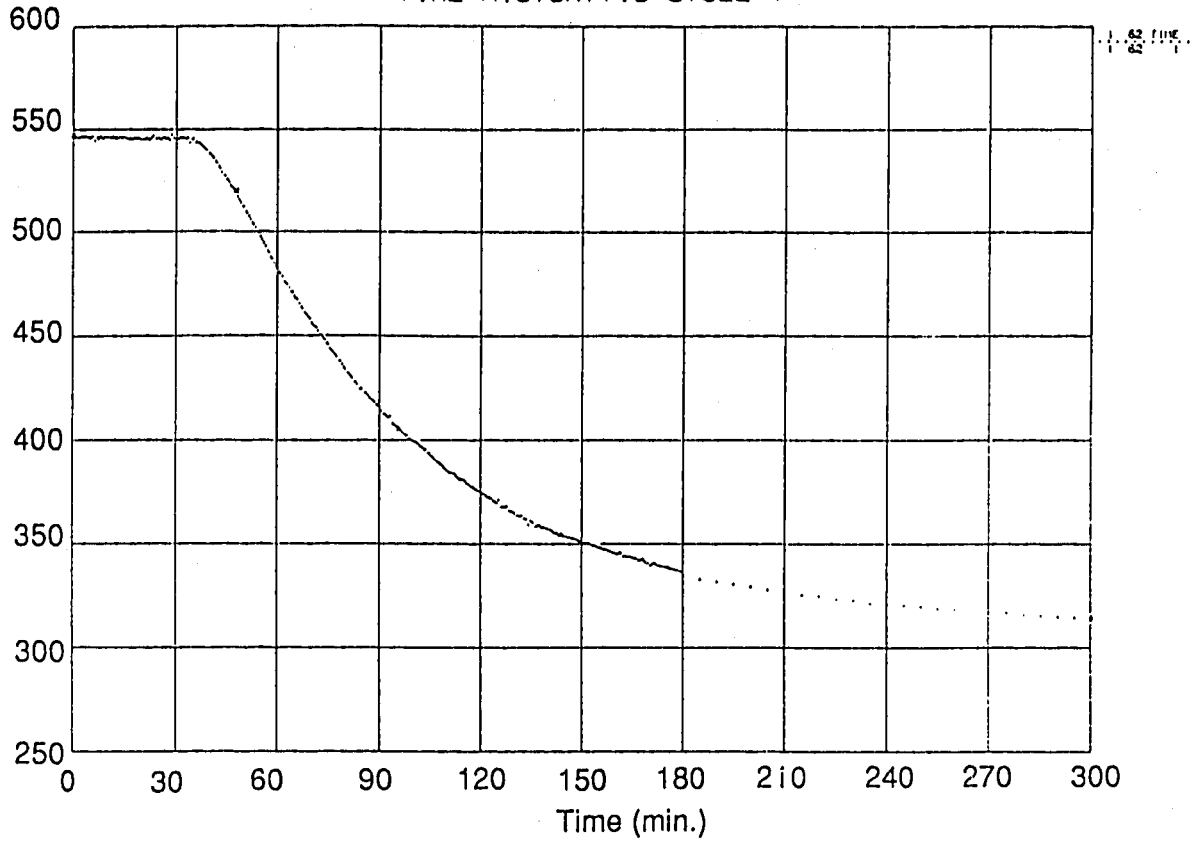


図 3.11 供試体外表面での温度測定結果 (トランジェント初期の300秒; CH61)

STST NOZZLE MODEL TEMPERATURE  
TIME HISTORY (13 CYCLE )



STST NOZZLE MODEL TEMPERATURE  
TIME HISTORY (13 CYCLE )

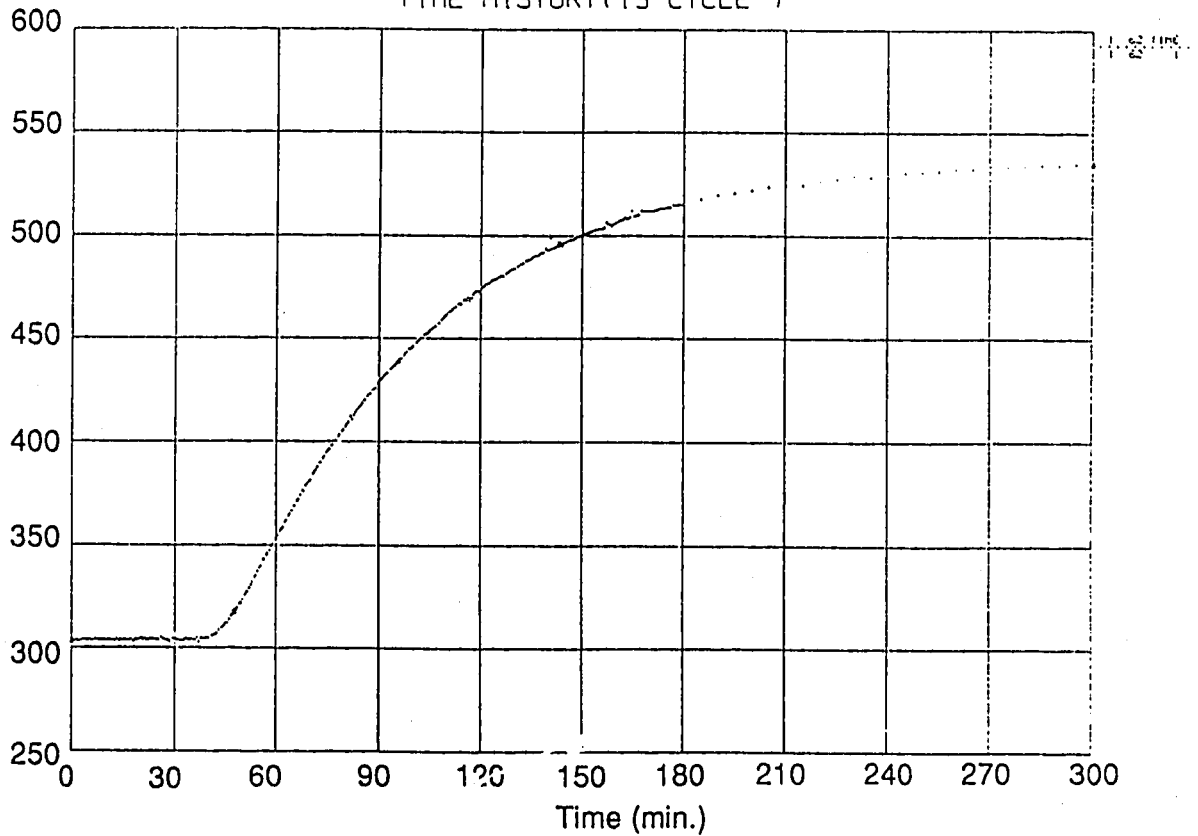


図 3.12 供試体外表面での温度測定結果 (トランジェント初期の300秒; CH62)

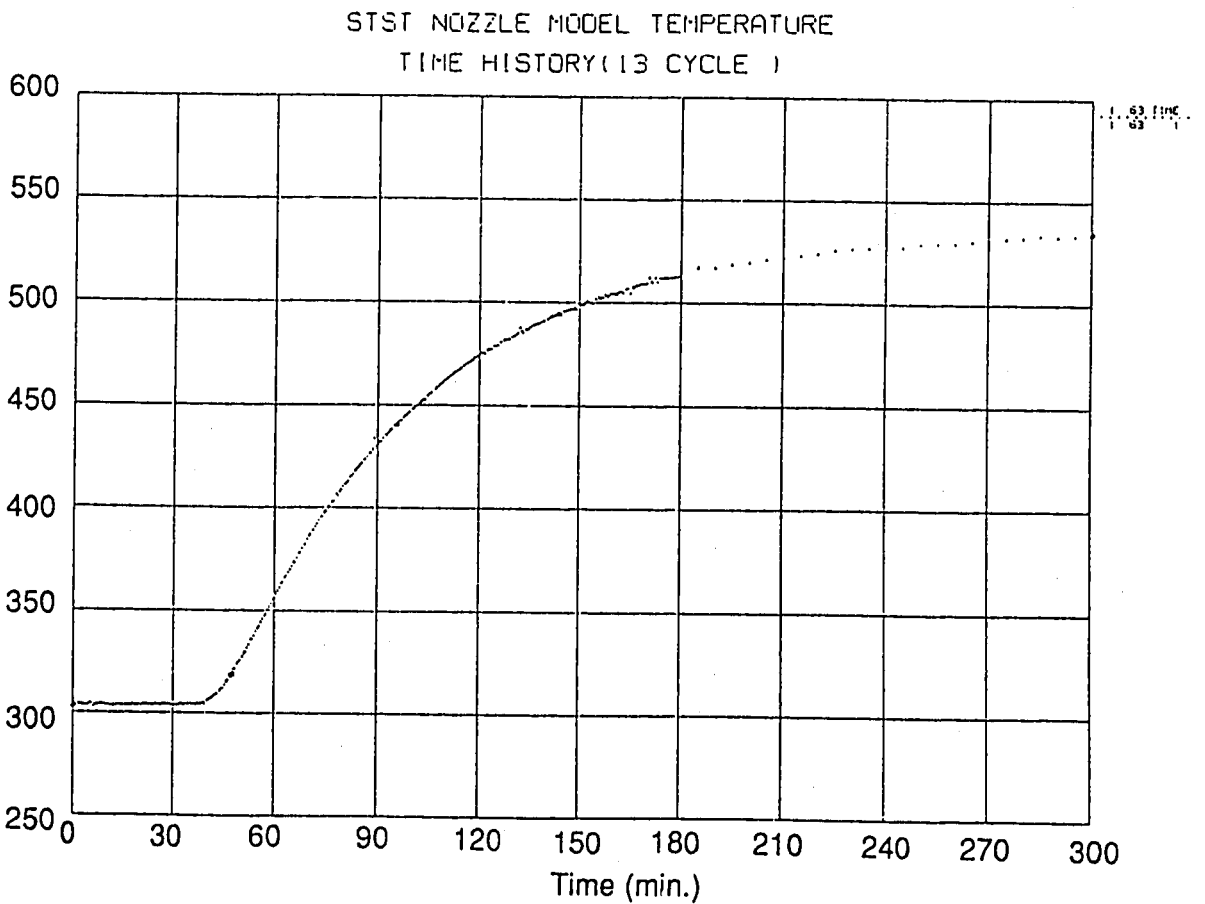
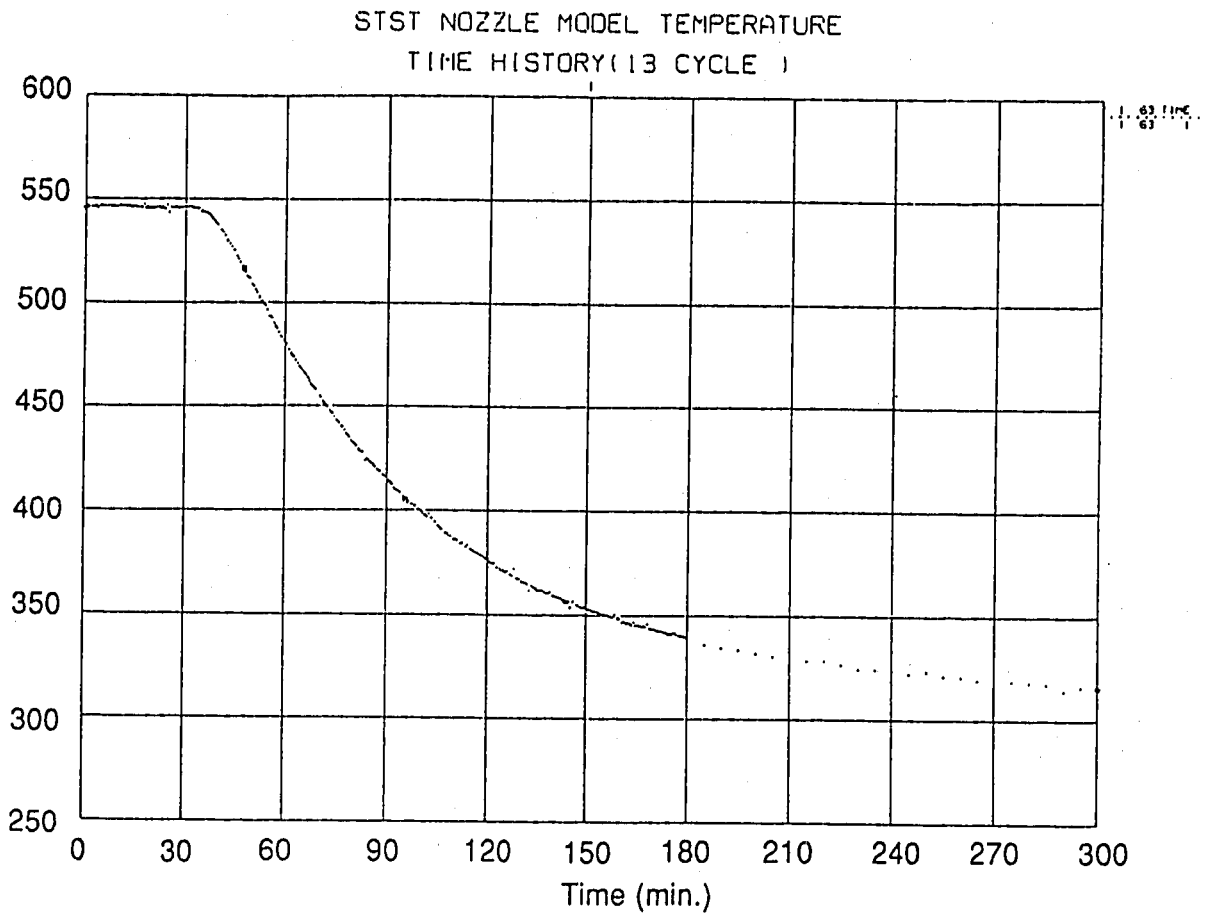


図 3.13 供試体外表面での温度測定結果 (トランジェント初期の300秒; CH63)

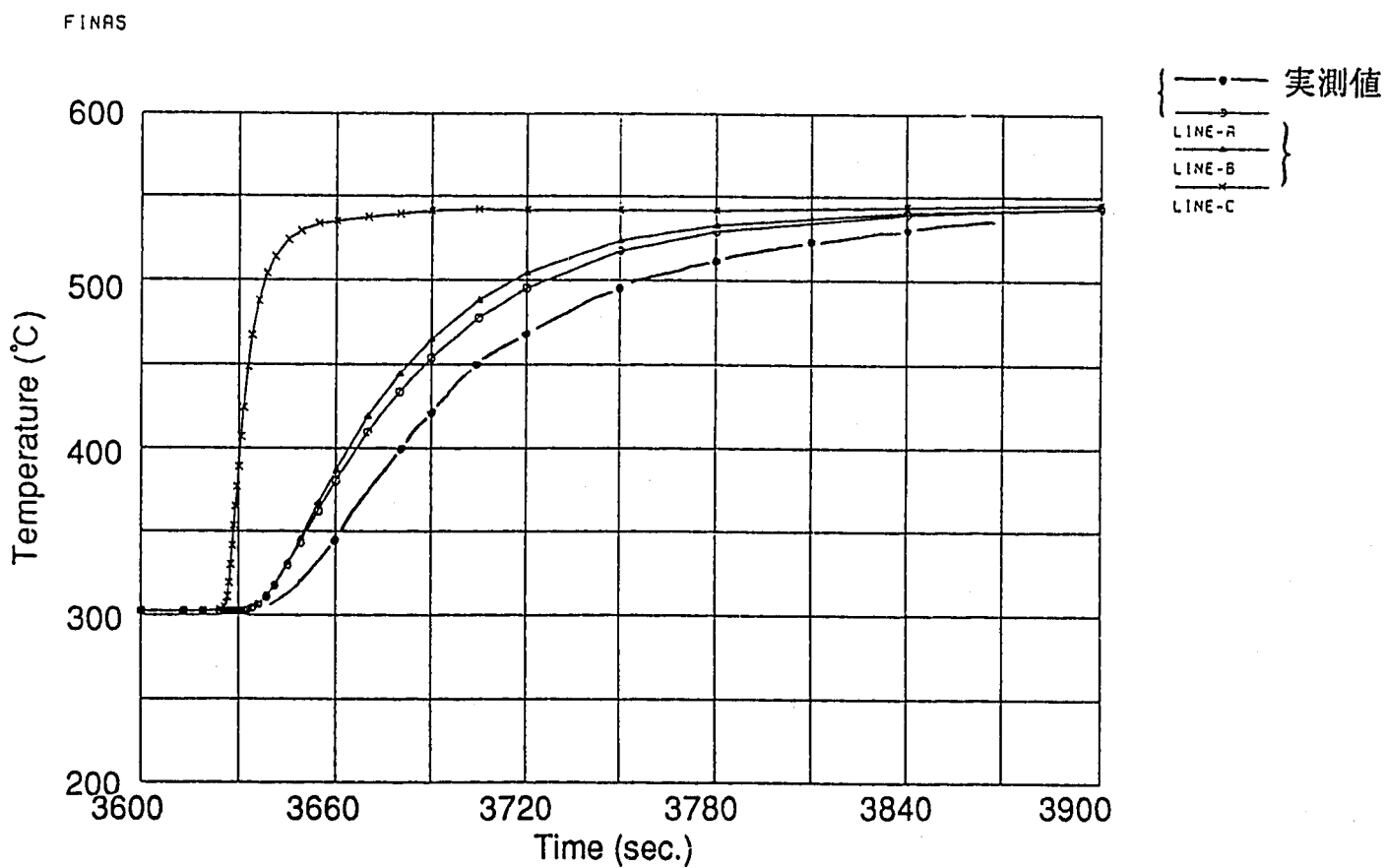
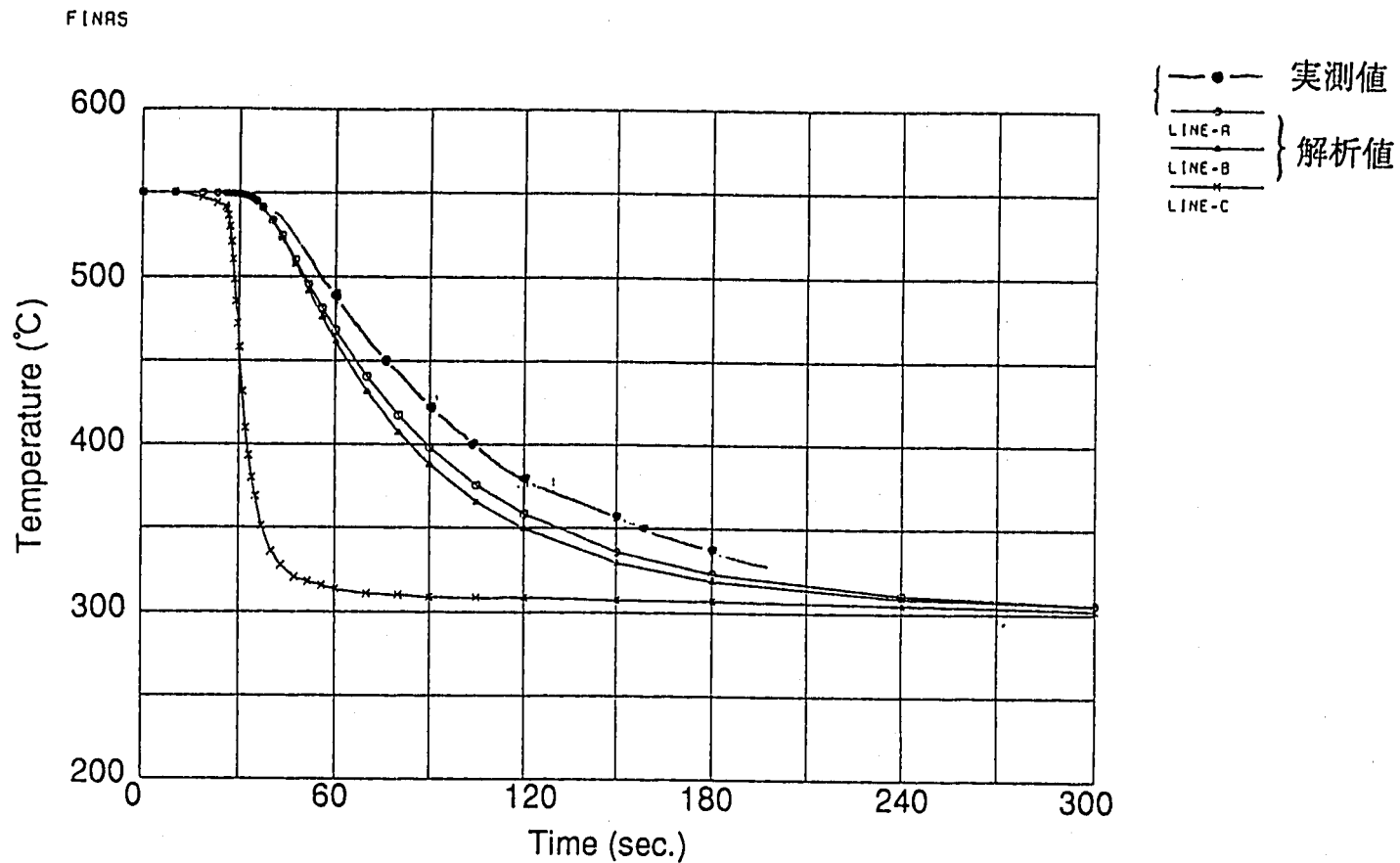


図 3.14 温度時刻歴解析結果 (トランジェント初期の300秒; ラインA, B, C, 外面)  
 - 供試体内表面~ナトリウム熱伝達係数修正前 -

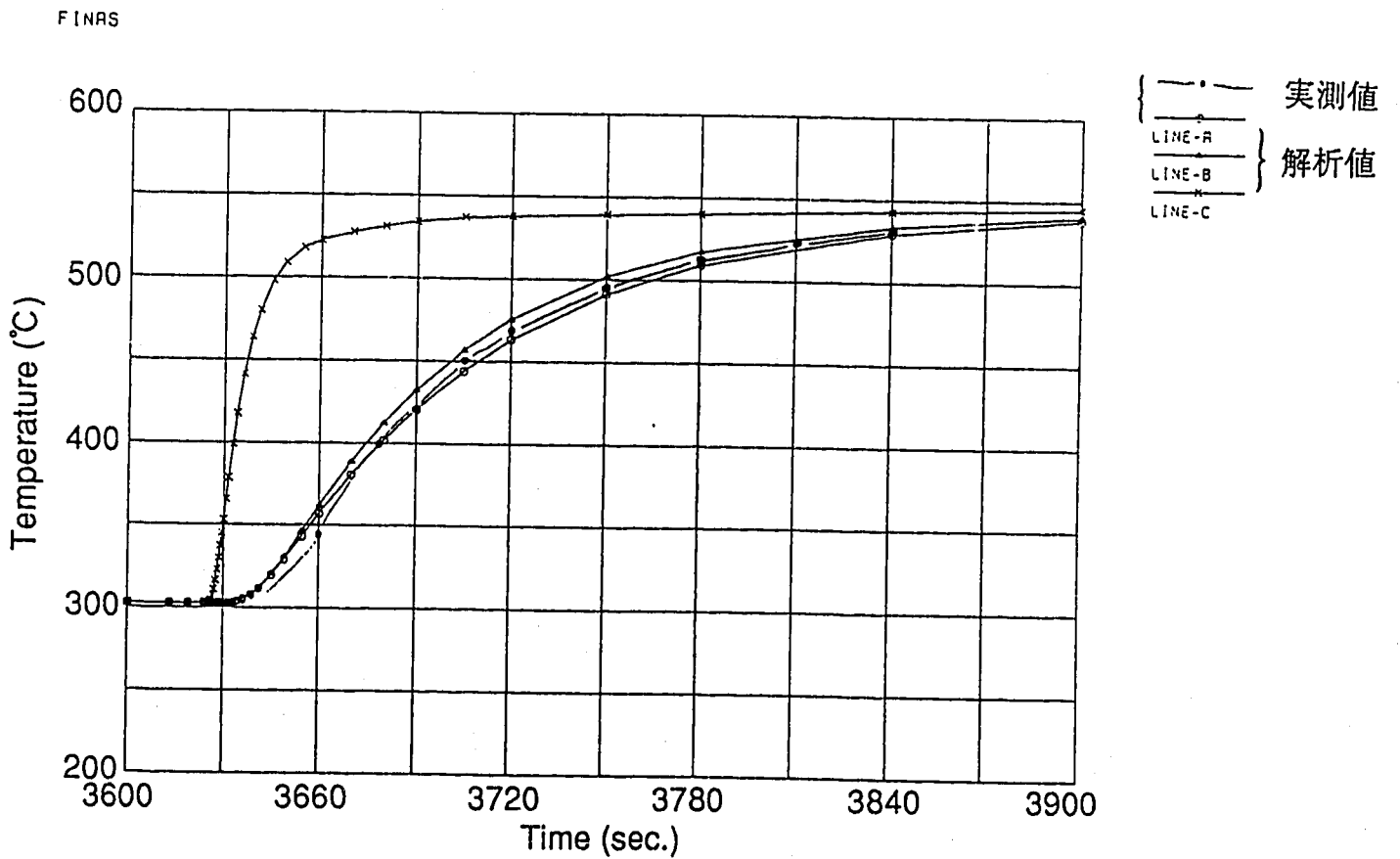
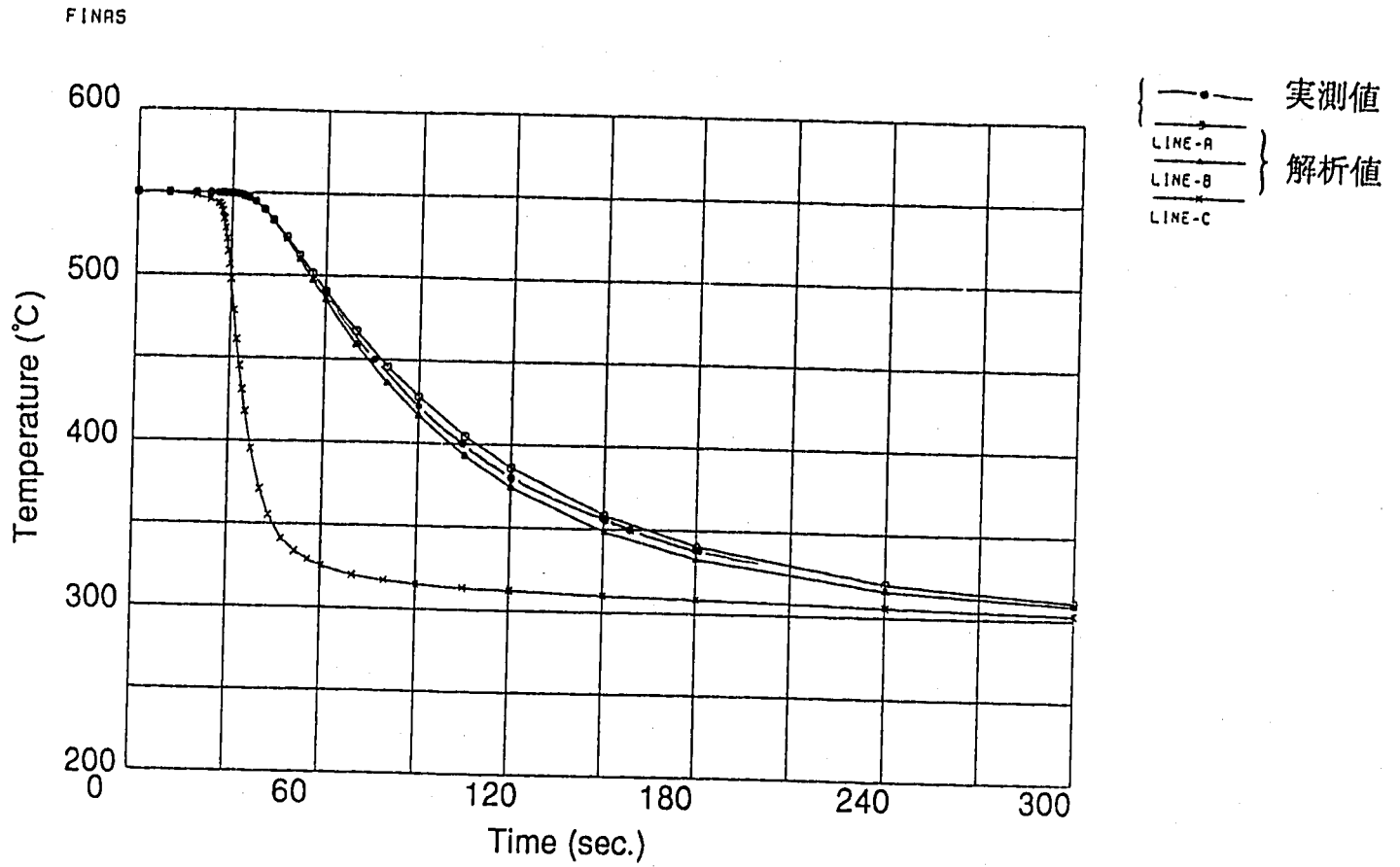
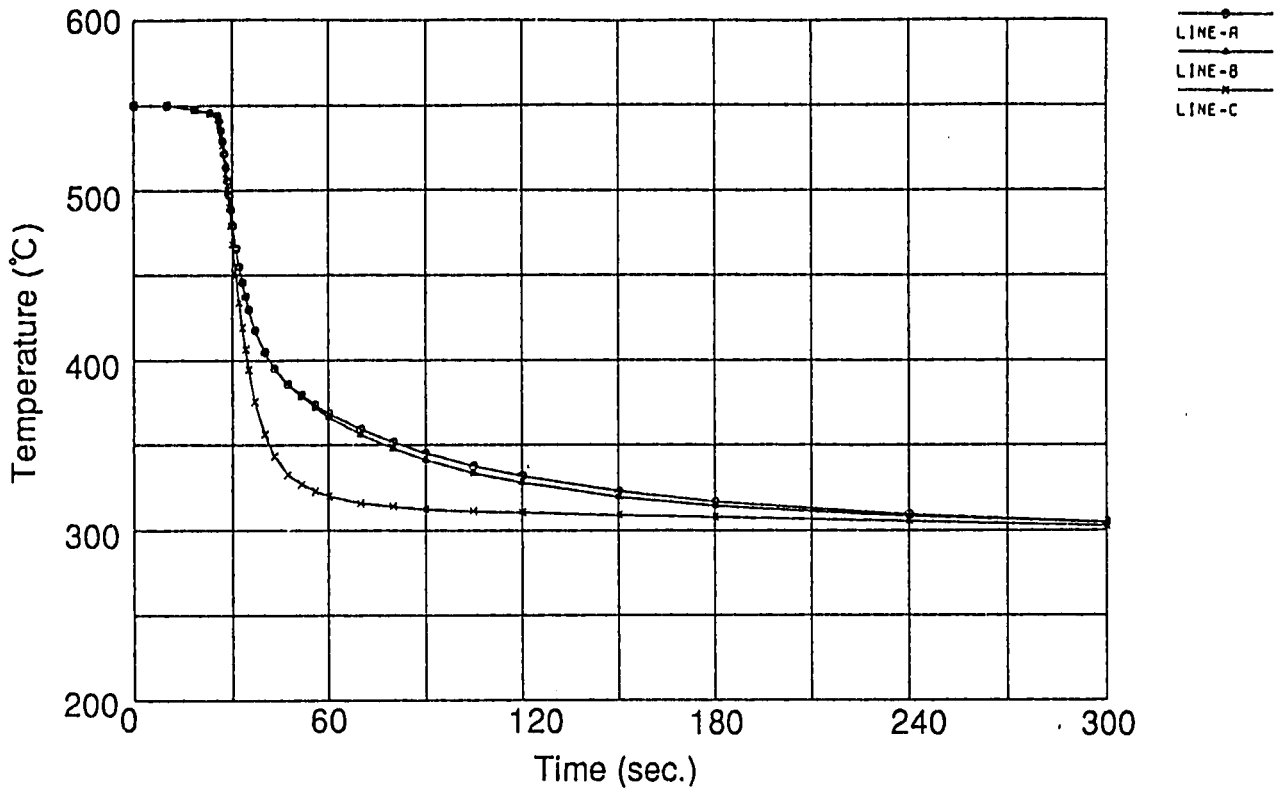


図 3.15 温度時刻歴解析結果 (トランジェント初期の300秒; ラインA, B, C, 外面)  
 - 供試体内表面~ナトリウム熱伝達係数修正後 -



FINAS



FINAS

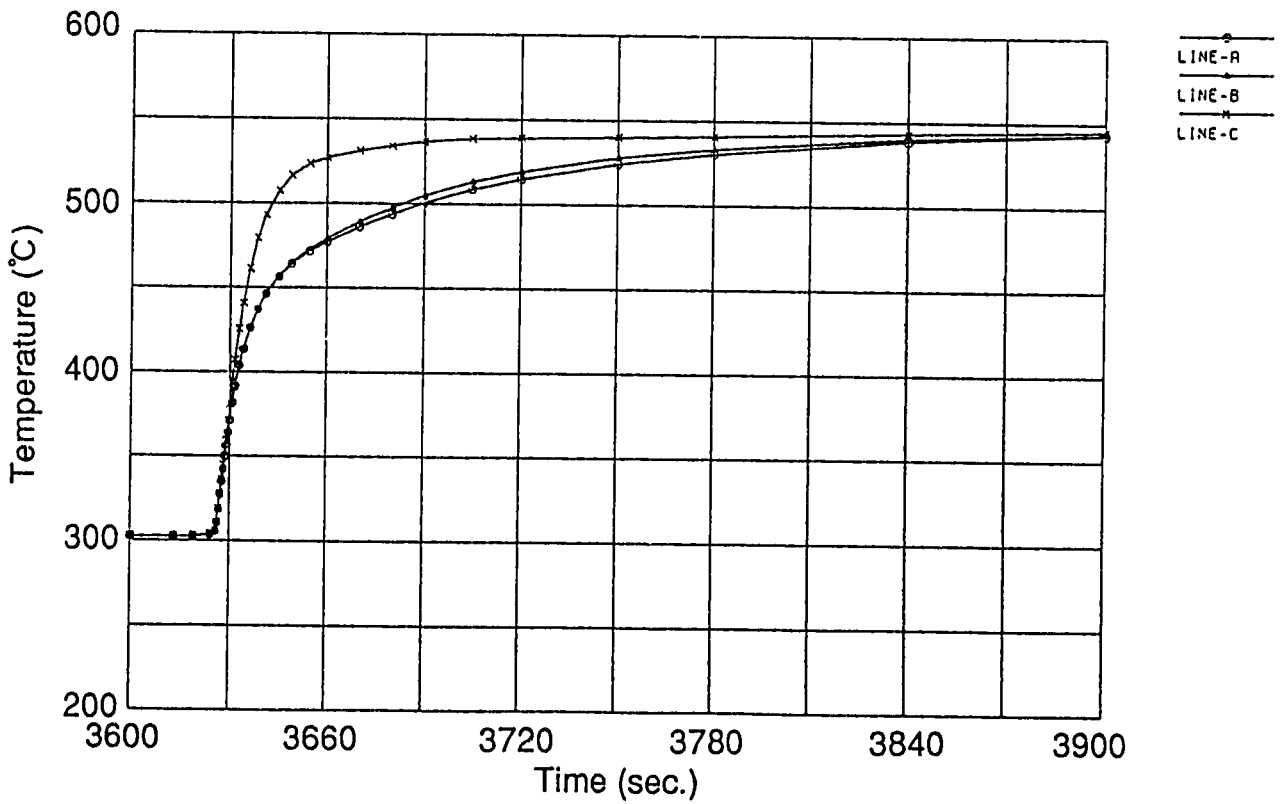


図 3.16 温度時刻歴解析結果 (トランジェント初期の300秒; ラインA, B, C, 内面)

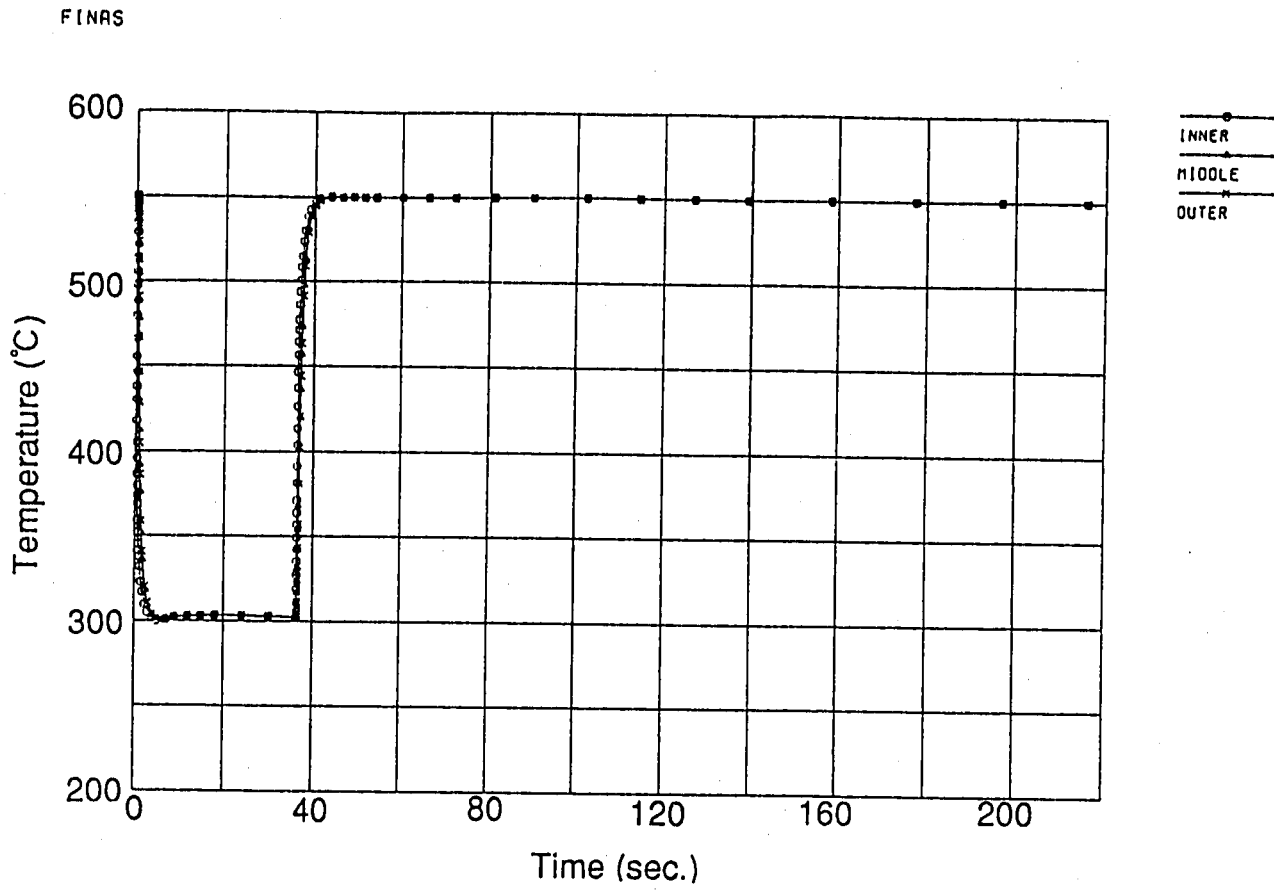


図 3.17 温度時刻歴解析結果 (1 サイクル; ライン A の内外面と板厚中央)

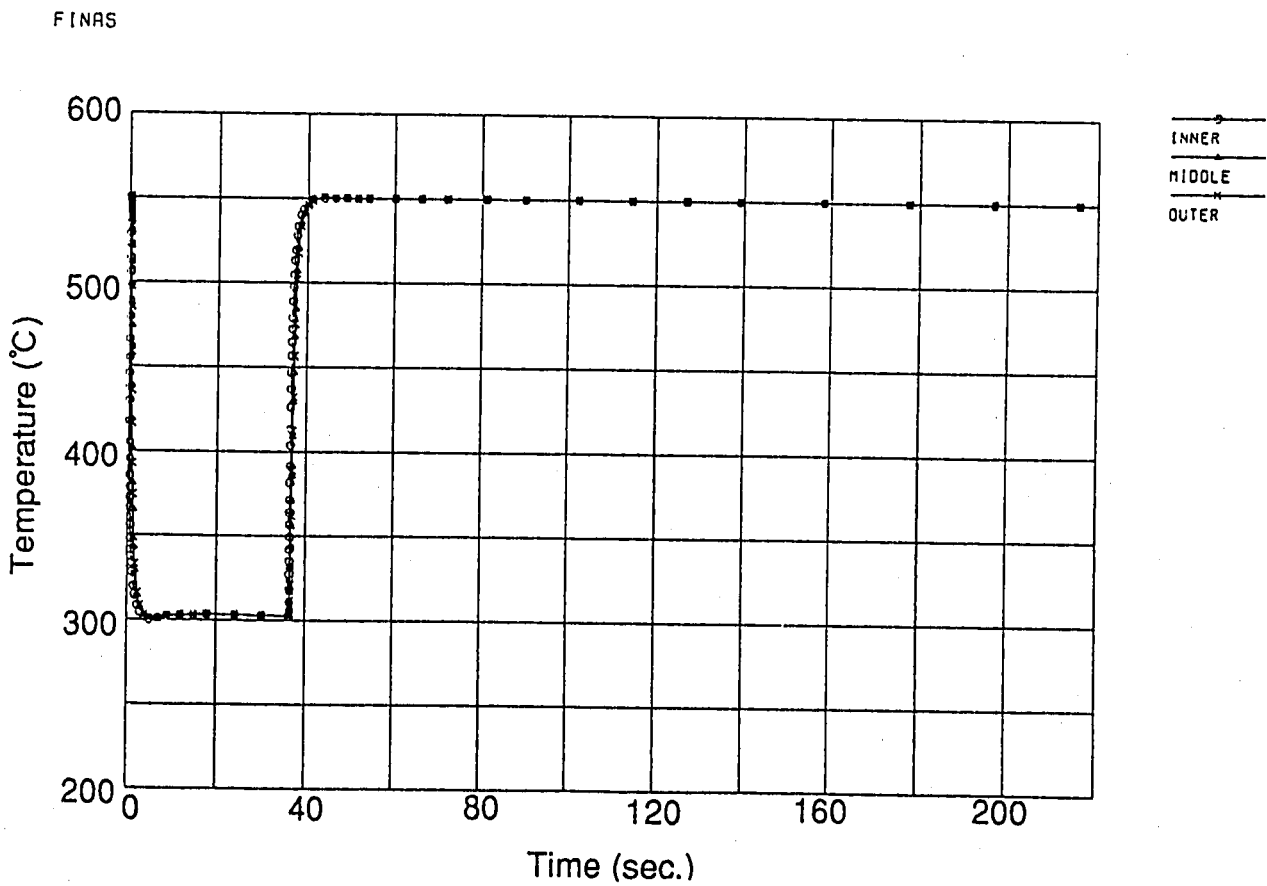


図 3.18 温度時刻歴解析結果 (1 サイクル; ライン B の内外面と板厚中央)

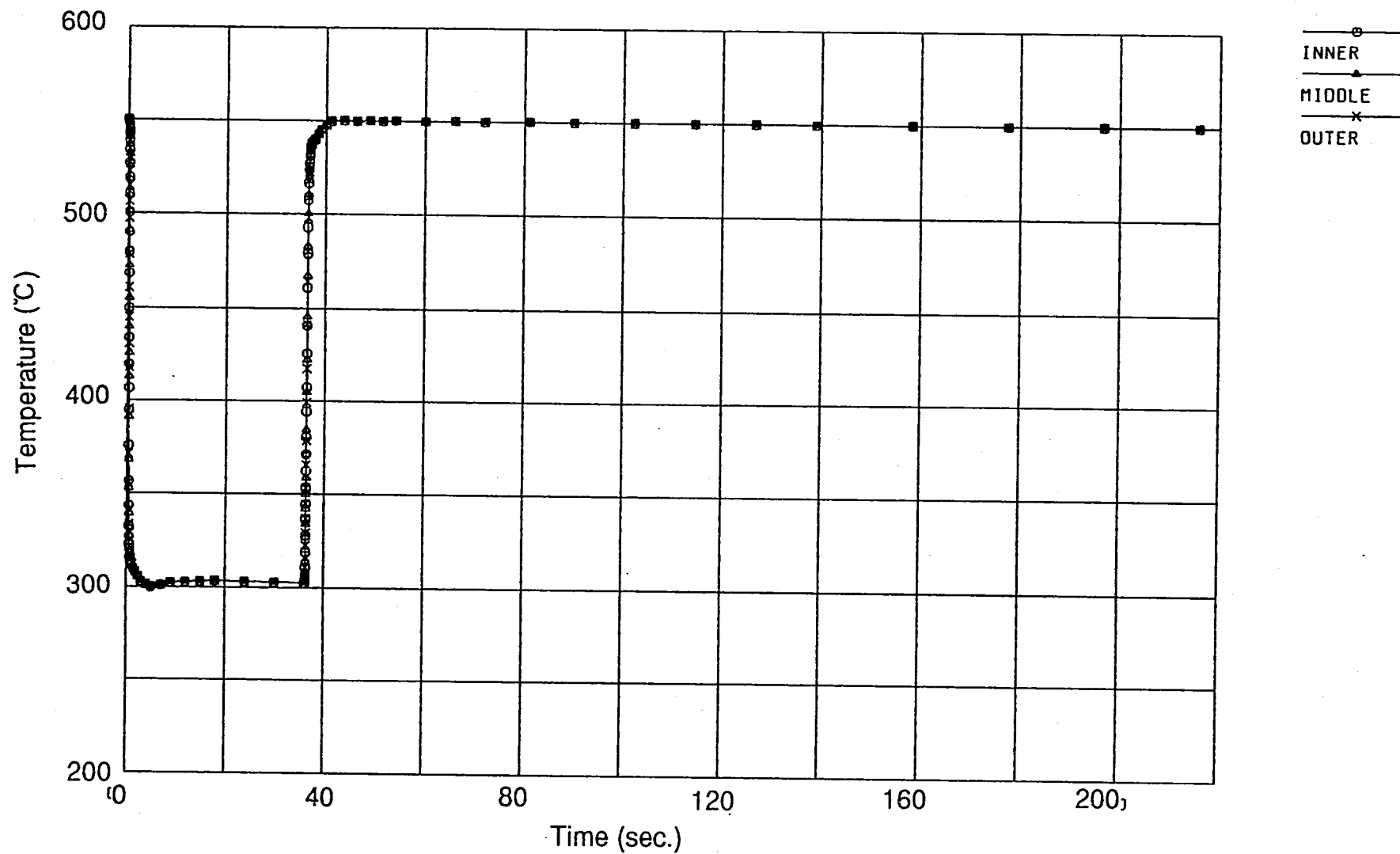
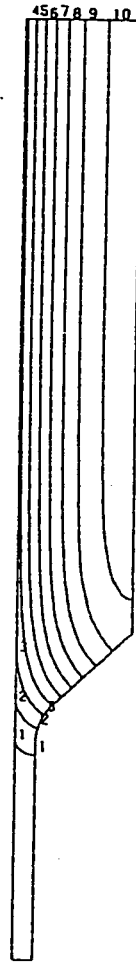


図 3.19 温度時刻歴解析結果 (1 サイクル; ライン C の内外面と板厚中央)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	320.0000
2	338.0000
3	356.0000
4	374.0000
5	392.0000
6	410.0000
7	428.0000
8	446.0000
9	464.0000
10	482.0000



STEP NO. 26

GEOM. SCALE 1 20.0000

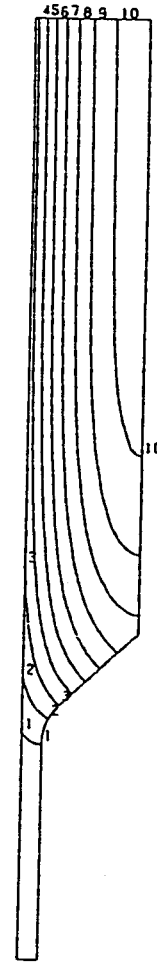
SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( COLD SHOCK 60 SEC )

図 3.20 温度コンター図 (コールドトランジェント60秒後)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	309.8000
2	314.9000
3	320.0000
4	325.1000
5	330.2000
6	335.3000
7	340.4000
8	345.5000
9	350.6000
10	355.7000



STEP NO. 32

GEOM. SCALE 1 20.0000

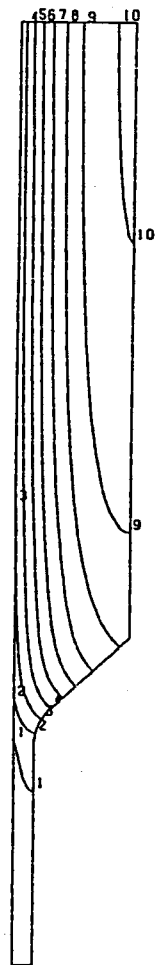
SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( COLD SHOCK 150 SEC )

図 3.21 温度コンター図 (コールドトランジェント150秒後)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	300.0400
2	300.1700
3	300.3000
4	300.4300
5	300.5600
6	300.6900
7	300.8200
8	300.9500
9	301.0800
10	301.2100



STEP NO. 37

GEOM. SCALE  20.0000

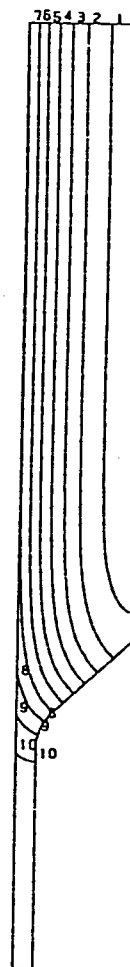
SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( COLD SHOCK 500 SEC )

図 3.22 温度コンター図 (コールドトランジェント 500秒後)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	366.0000
2	384.0000
3	402.0000
4	420.0000
5	438.0000
6	456.0000
7	474.0000
8	492.0000
9	510.0000
10	528.0000



STEP NO. 69

GEOM. SCALE  20.0000

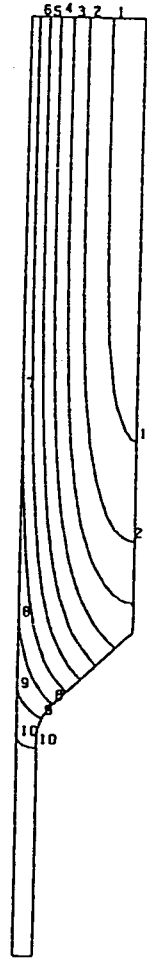
SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( HOT SHOCK 60 SEC )

図 3.23 温度コンター図 (ホットトランジェント 60秒後)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	493.8000
2	498.9000
3	504.0000
4	509.1000
5	514.2000
6	519.3000
7	524.4000
8	529.5000
9	534.6000
10	539.7000



STEP NO. 75

GEOM. SCALE 20.0000

SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( HOT SHOCK 150 SEC )

図 3.24 温度コンター図 (ホットランジェント 150秒後)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	548.1700
2	548.3500
3	548.5300
4	548.7100
5	548.8900
6	549.0700
7	549.2500
8	549.4300
9	549.6100
10	549.7900



STEP NO. 80

GEOM. SCALE 20.0000

SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( HOT SHOCK 500 SEC )

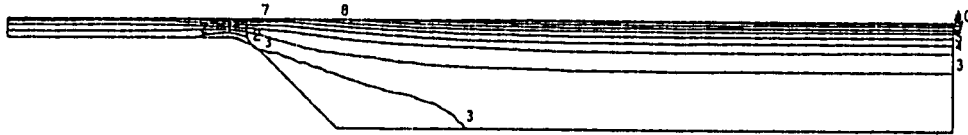
図 3.25 温度コンター図 (ホットランジェント 500秒後)

FINAS  
STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES

1	-11.1000
2	-6.90000
3	-2.70000
4	1.500000
5	5.700000
6	9.900000
7	14.10000
8	18.30000
9	22.50000
10	26.70000

(1) 軸方向応力  $\sigma_z$



STEP NO. 4

GEOM. SCALE 20.0000

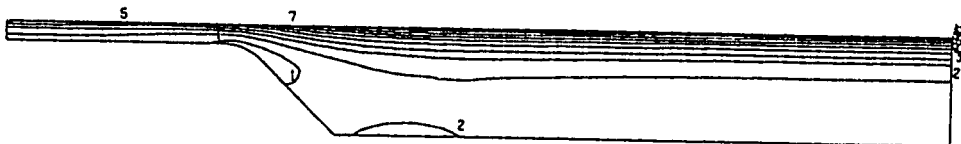
SUS316FR WELDED PIPE MODEL SIG-Z (COLD. 30SEC)

FINAS  
STRESS COMPONENT 3

CONTOUR VALUES

1	-7.10000
2	-3.20000
3	0.700000
4	4.600000
5	8.500000
6	12.40000
7	16.30000
8	20.20000
9	24.10000
10	28.00000

(2) 周方向応力  $\sigma_\theta$



STEP NO. 4

GEOM. SCALE 20.0000

SUS316FR WELDED PIPE MODEL SIG-TH (COLD. 30SEC)

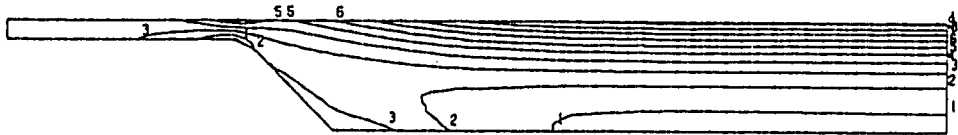
図 3.26 軸方向と周方向応力のコンター図 (コールドトランジェント 30 秒後)

FINAS  
STRESS COMPONENT 2

(1) 軸方向応力  $\sigma_z$

CONTOUR VALUES

1	-15.3000
2	-8.30000
3	-1.30000
4	5.700000
5	12.70000
6	19.70000
7	26.70000
8	33.70000
9	40.70000
10	47.70000



STEP NO. 8

GEOM. SCALE 20.0000

SUS316FR WELDED PIPE MODEL SIG-Z (COLO. 43SEC)

FINAS  
STRESS COMPONENT 3

(2) 周方向応力  $\sigma_\theta$

CONTOUR VALUES

1	-13.7000
2	-5.80000
3	0.100000
4	7.000000
5	13.90000
6	20.80000
7	27.70000
8	34.60000
9	41.50000
10	48.40000



STEP NO. 8

GEOM. SCALE 20.0000

SUS316FR WELDED PIPE MODEL SIG-TH (COLO. 43SEC)

図 3.27 軸方向と周方向応力のコンター図 (コールドトランジェント 43 秒後)

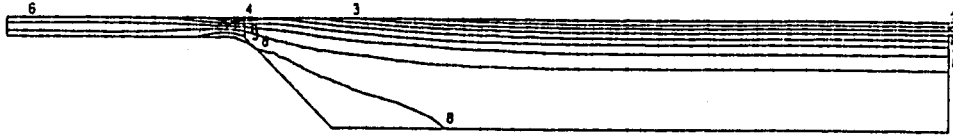


FINAS  
STRESS COMPONENT 2

(1) 軸方向応力  $\sigma_z$

CONTOUR VALUES

1	-33.3000
2	-28.1000
3	-22.9000
4	-17.7000
5	-12.5000
6	-7.30000
7	-2.10000
8	3.100000
9	8.300000
10	13.50000



STEP NO. 15

GEOM. SCALE 20.0000

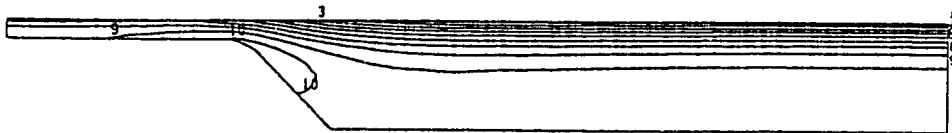
SUS316FR WELDED PIPE MODEL SIG-Z (HOT . 31.5SEC)

FINAS  
STRESS COMPONENT 3

(2) 周方向応力  $\sigma_\theta$

CONTOUR VALUES

1	-34.3000
2	-29.5000
3	-24.7000
4	-19.9000
5	-15.1000
6	-10.3000
7	-5.50000
8	-0.70000
9	4.100000
10	8.900000



STEP NO. 15

GEOM. SCALE 20.0000

SUS316FR WELDED PIPE MODEL SIG-TH (HOT . 31.5SEC)

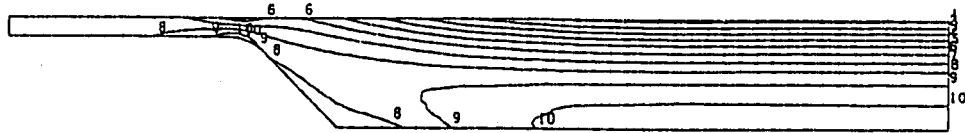
図 3.28 軸方向と周方向応力のコンター図 (ホットランジェント 31.5秒後)

FINAS  
STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES

1	-44.6000
2	-38.0000
3	-31.4000
4	-24.8000
5	-18.2000
6	-11.6000
7	-5.00000
8	1.600000
9	8.200000
10	14.80000

(1) 軸方向応力  $\sigma_z$



STEP NO. 18

GEOM. SCALE 20.0000

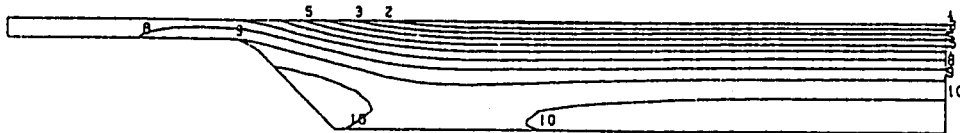
SUS316FR WELDED PIPE MODEL SIG-Z (HOT . 45SEC)

FINAS  
STRESS COMPONENT 3

CONTOUR VALUES

1	-46.1000
2	-39.3000
3	-32.5000
4	-25.7000
5	-18.9000
6	-12.1000
7	-5.30000
8	1.500000
9	8.300000
10	15.10000

(2) 周方向応力  $\sigma_\theta$



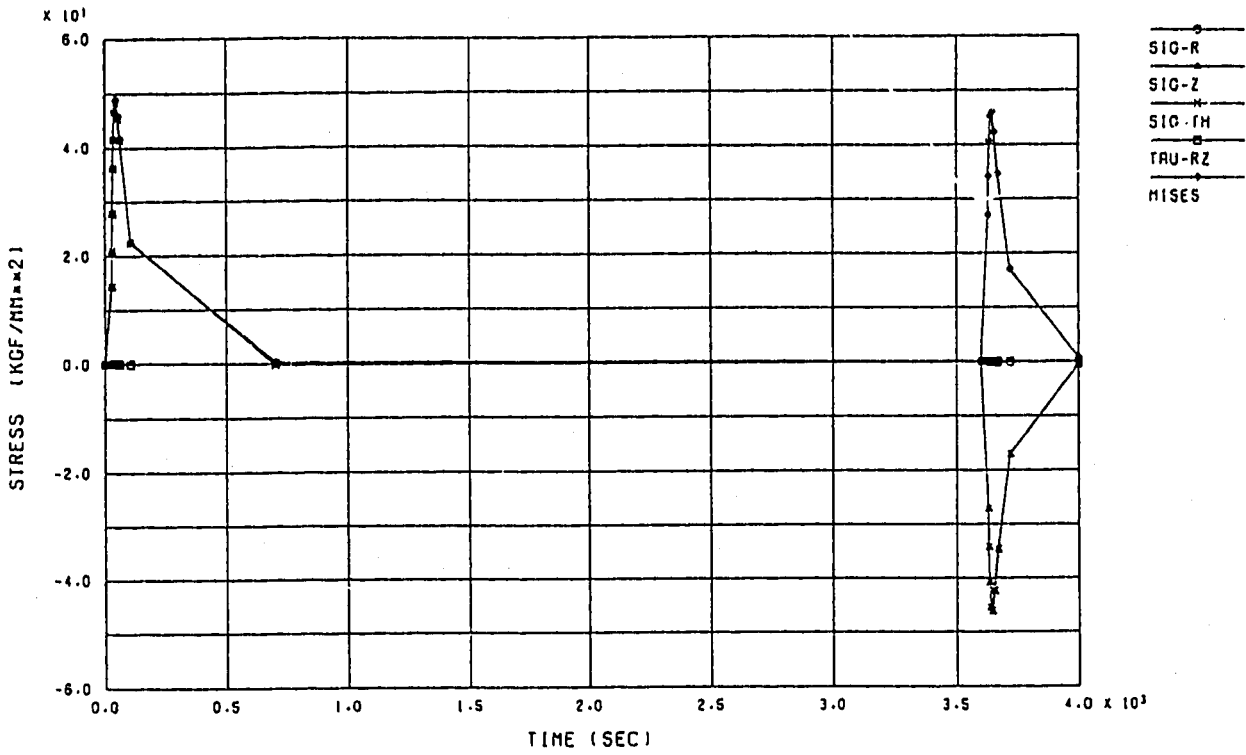
STEP NO. 18

GEOM. SCALE 20.0000

SUS316FR WELDED PIPE MODEL SIG-TH (HOT 45SEC)

図 3.29 軸方向と周方向応力のコンター図 (ホットトランジェント 45秒後)

FINAS



FINAS

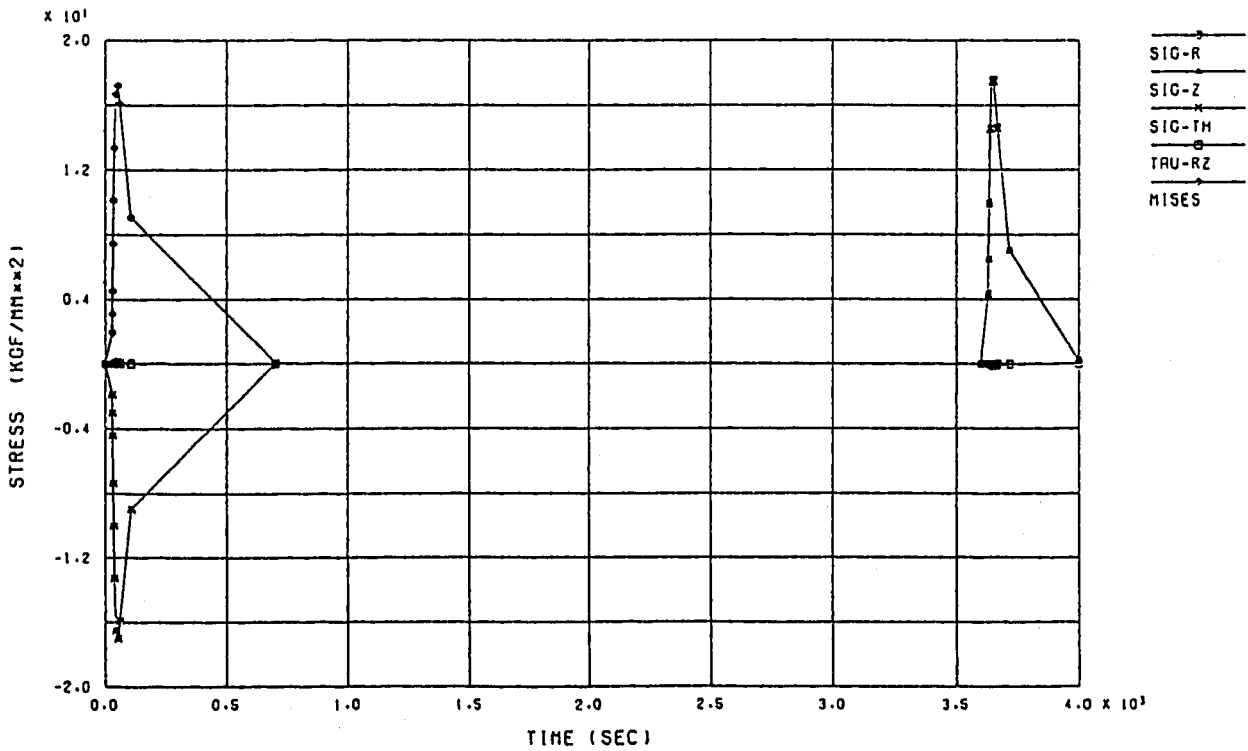
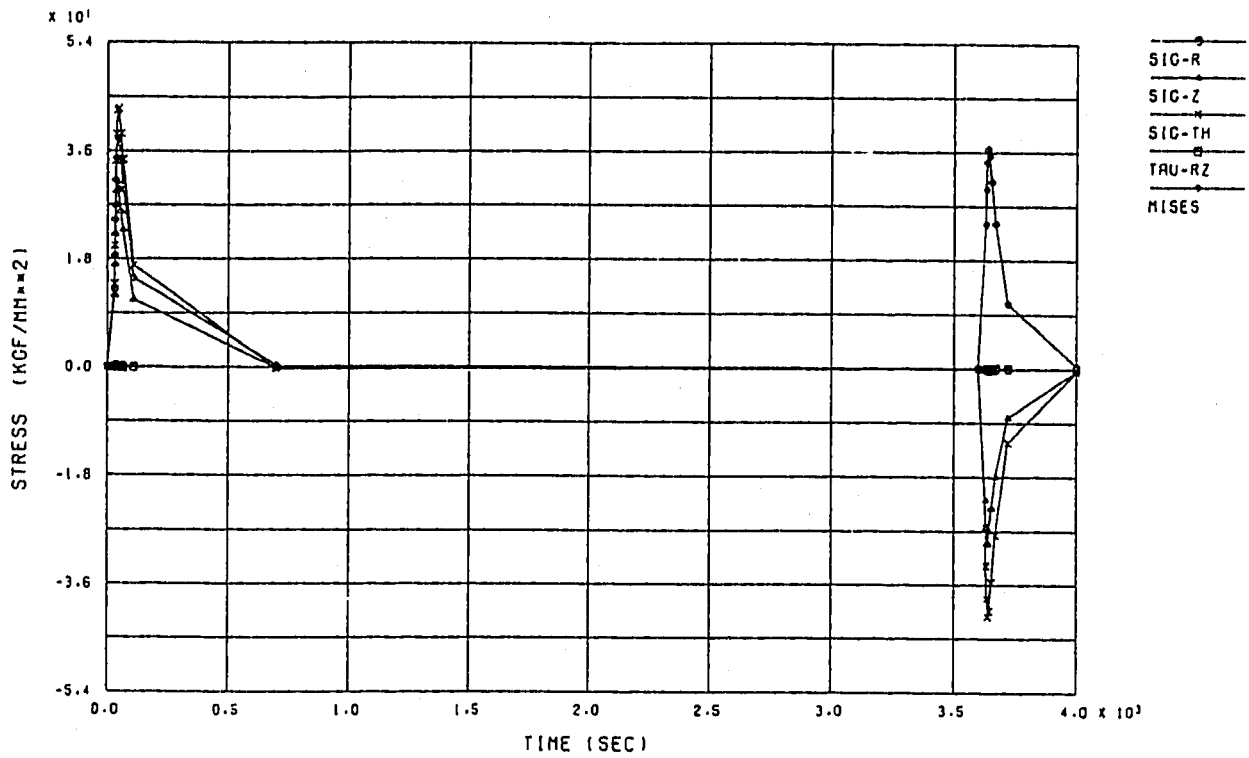


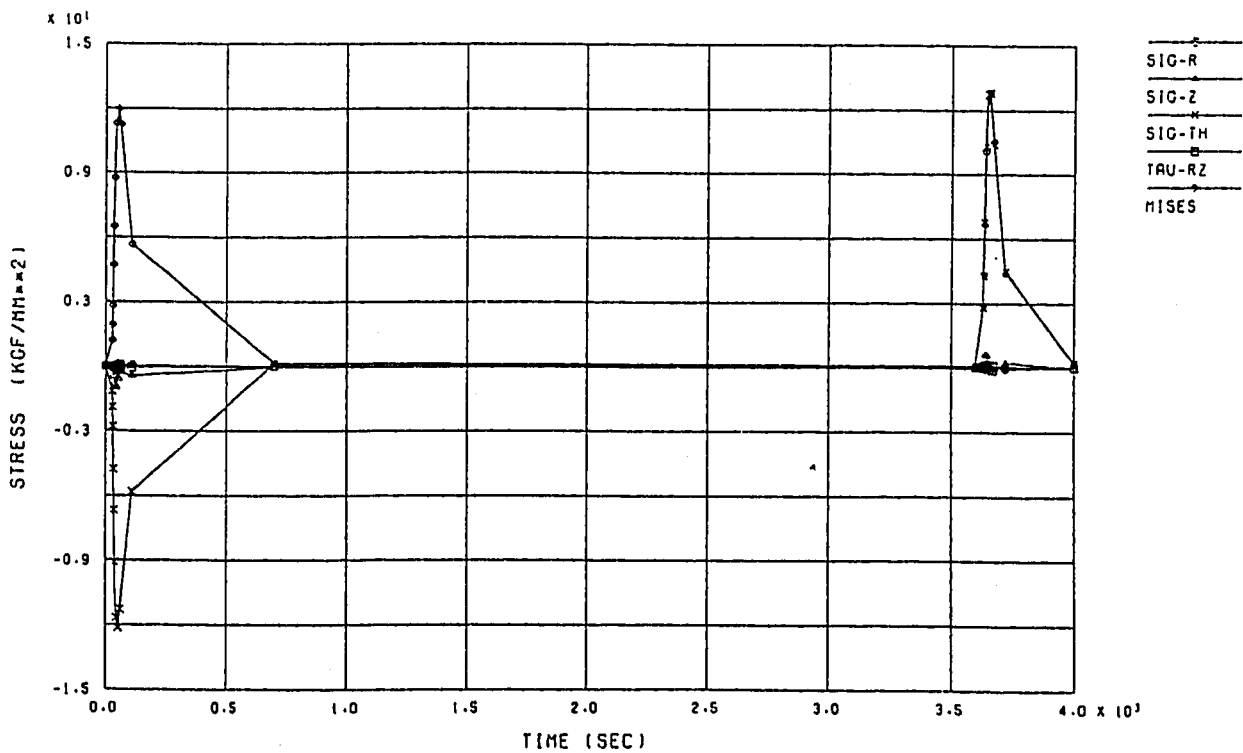
図 3.30 ラインA、内外表面点での応力履歴図

FINAS



SUS316FR WELDED PIPE MODEL (E) STRESS HISTORY LINE-B INNER

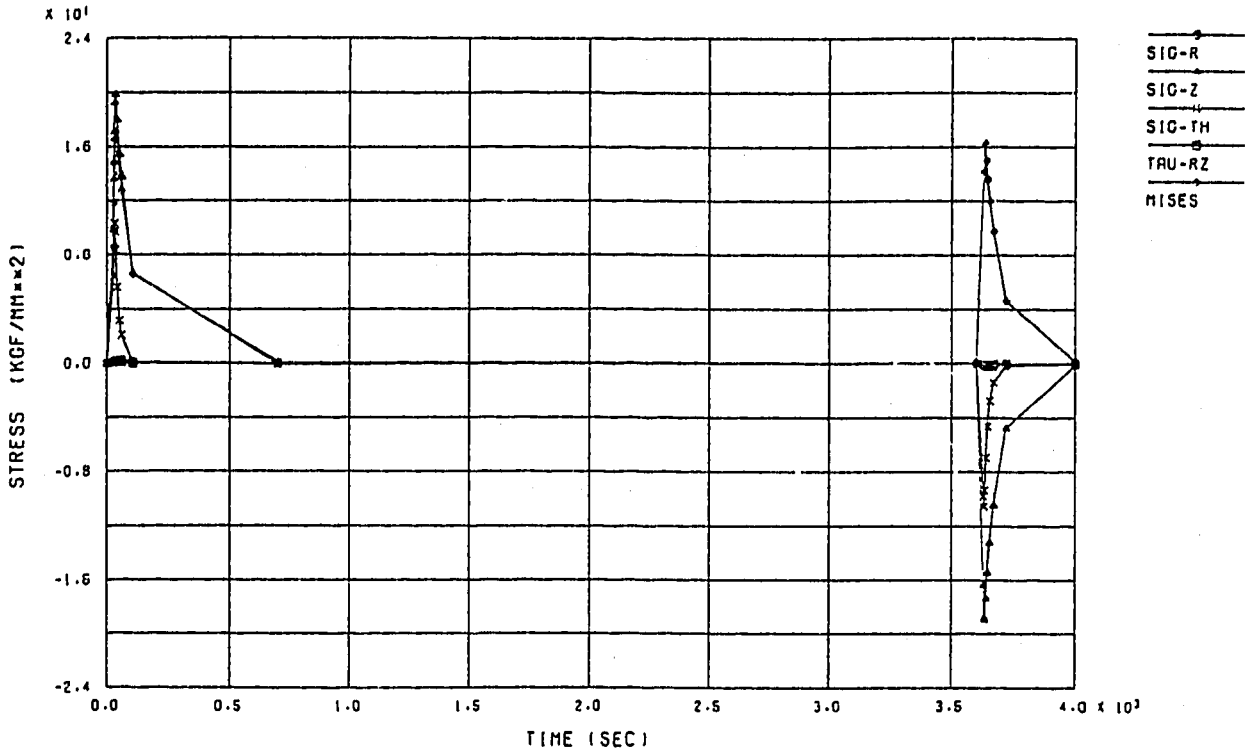
FINAS



SUS316FR WELDED PIPE MODEL (E) STRESS HISTORY LINE-B OUTER

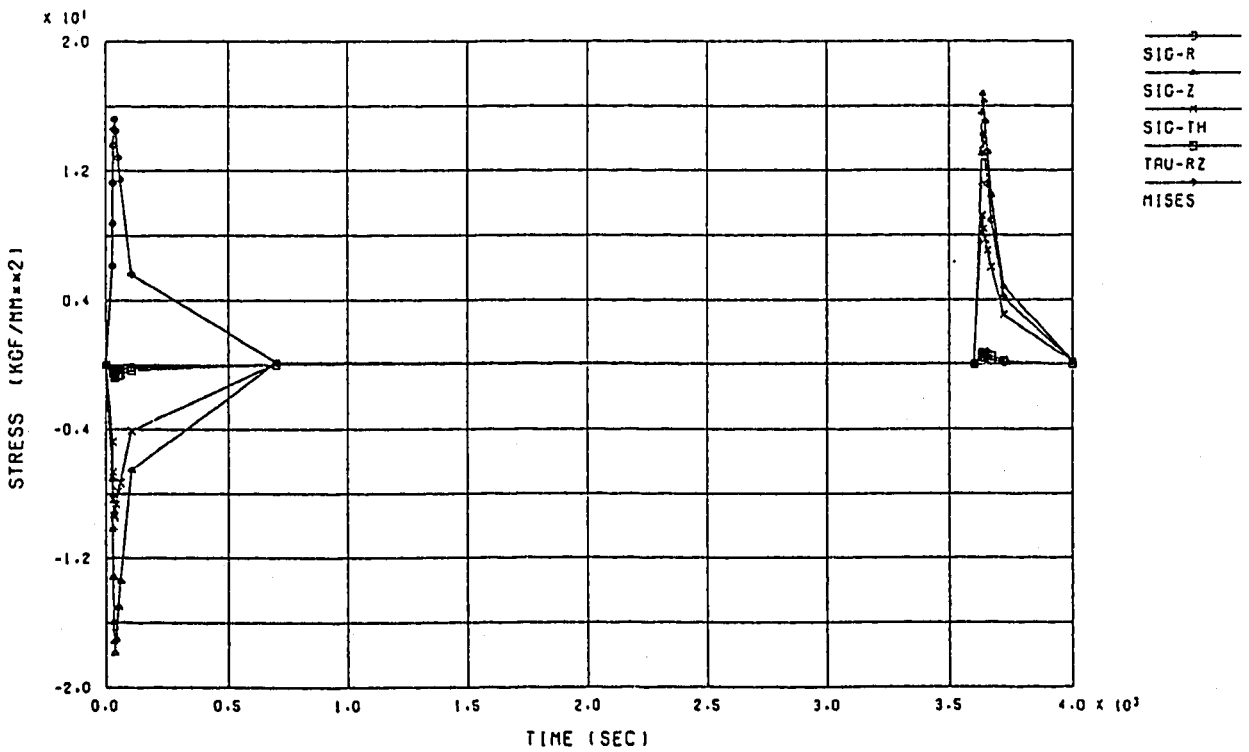
図 3.31 ラインB、内外表面点での応力履歴図

FINAS



SUS316FR WELDED PIPE MODEL (E) STRESS HISTORY LINE-C INNER

FINAS



SUS316FR WELDED PIPE MODEL (E) STRESS HISTORY LINE-C OUTER

図 3.32 ラインC、内外表面点での応力履歴図

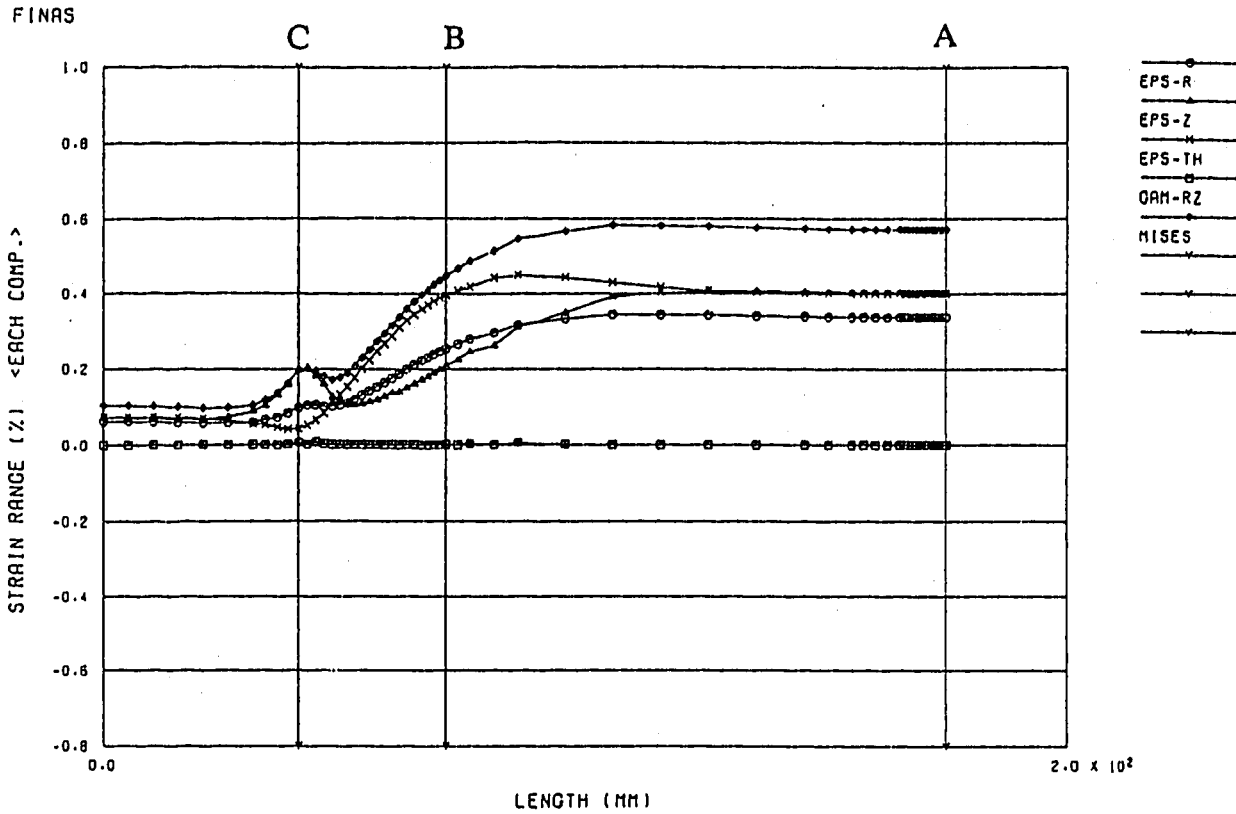


図 3.33 供試体内表面の各座標成分毎のひずみ範囲の軸方向分布

※本図に示されるミーゼス型相当ひずみ範囲は、相当応力をヤング率で除した値であり、第4章で計算される値とは若干異なる。

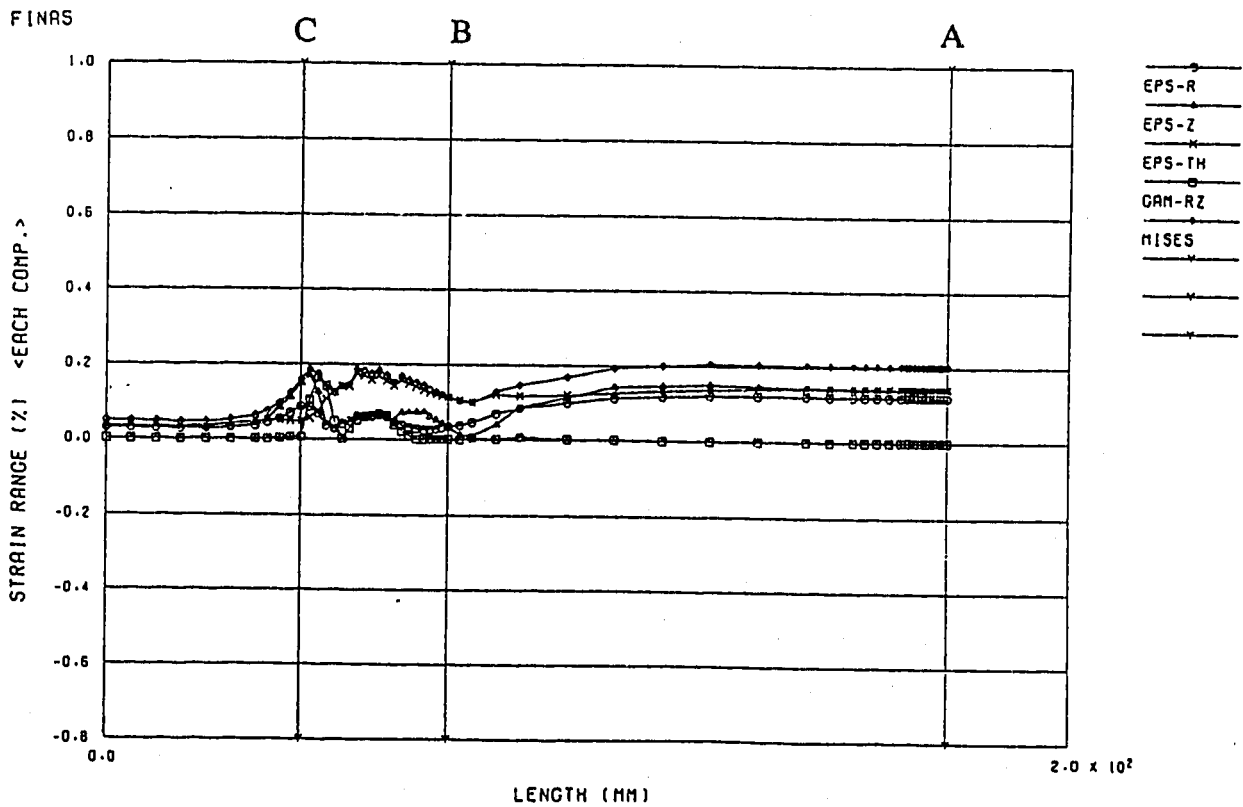


図 3.34 供試体外表面の各座標成分毎のひずみ範囲の軸方向分布

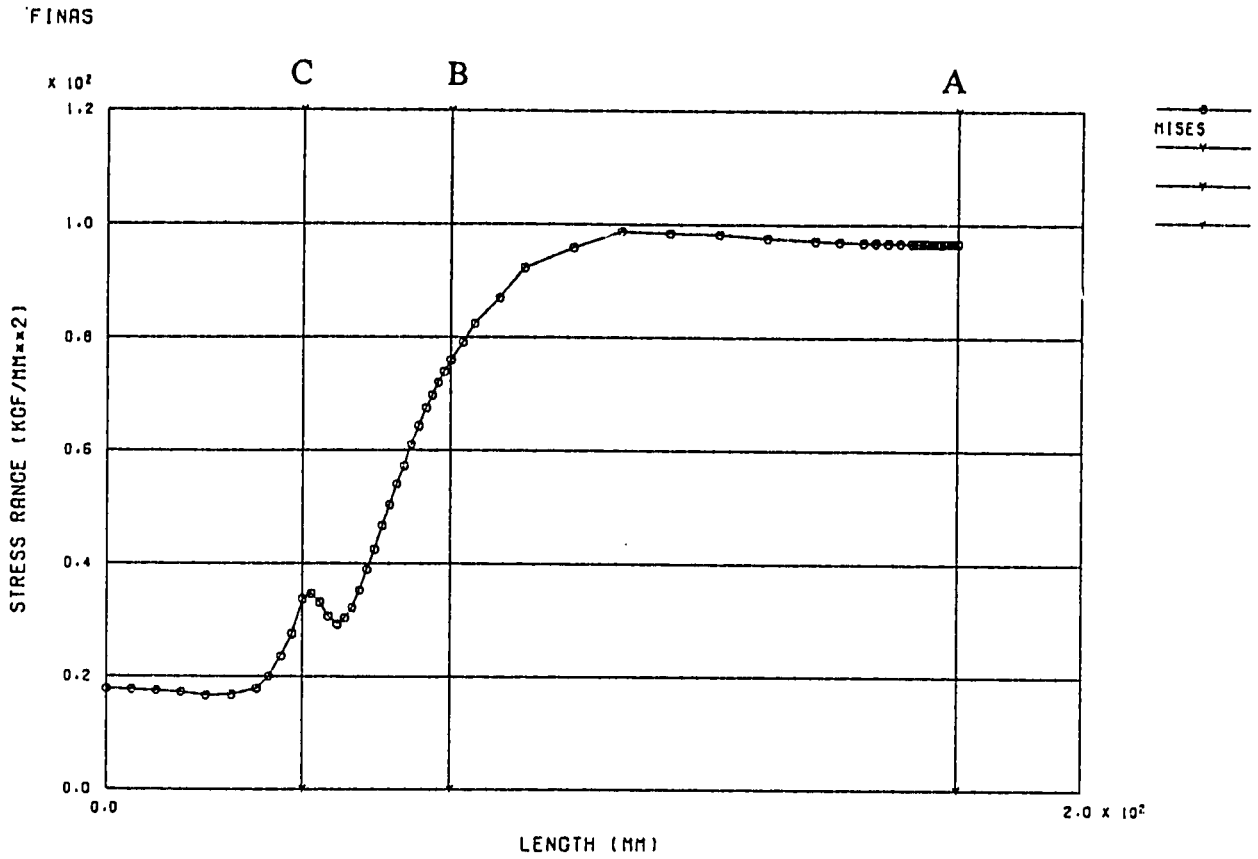


図 3.35 供試体内表面のミーゼス相当応力範囲の軸方向分布

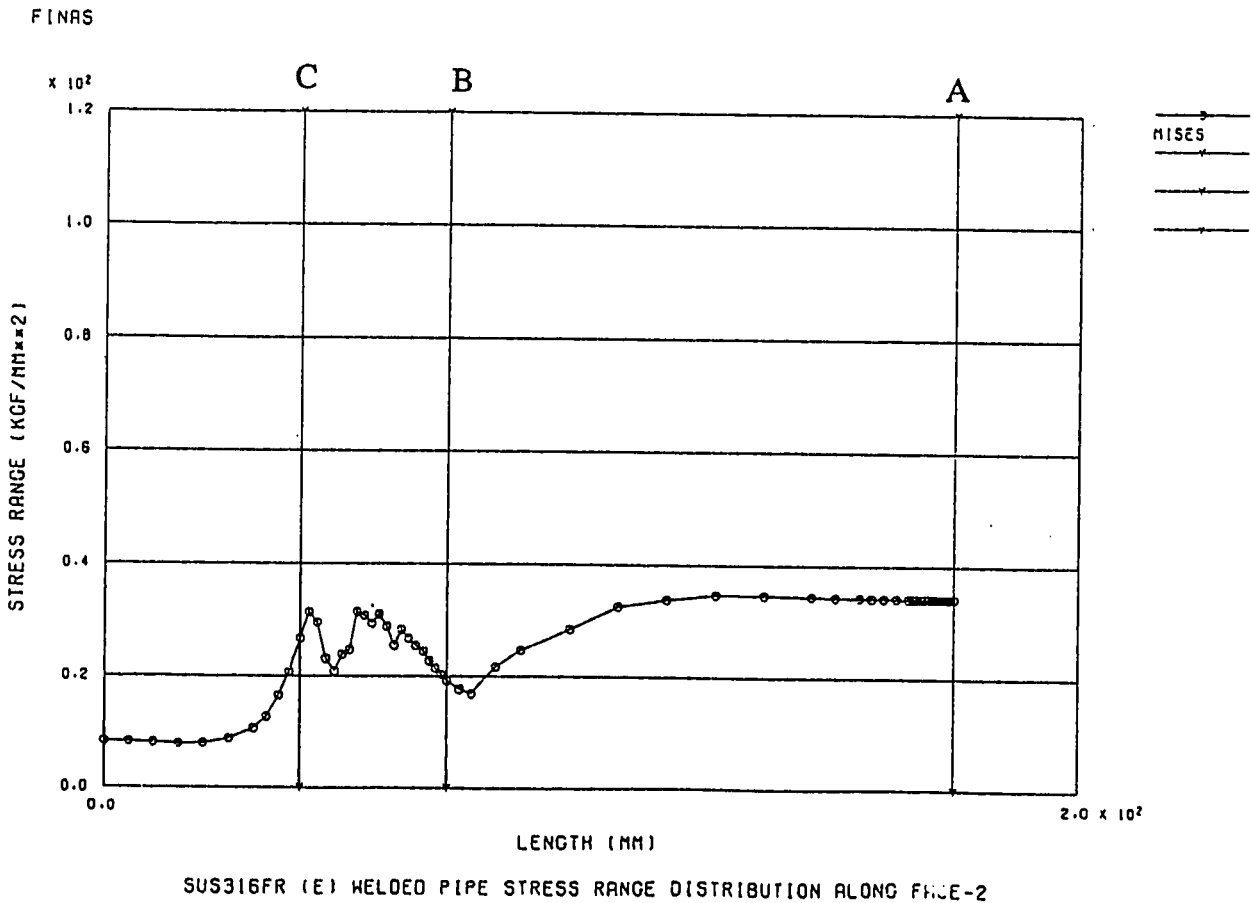


図 3.36 供試体外表面のミーゼス相当応力範囲の軸方向分布

## 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、本鋼と同種のオーステナイト系ステンレス鋼である SUS 304 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、損傷計算用の材料定数としては暫定的に材料室が定めた定数<sup>(4)</sup>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 (SUS 304) 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高速炉構造用 SUS 316 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  $\varepsilon_i$  の算出法については、SUS 304 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  $\Delta \varepsilon_{eq}$  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  $\varepsilon_n$  を下式により定める。

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

(3) 公称ひずみ範囲  $\varepsilon_n$  にひずみ集中係数  $K_f$  を乗じて全ひずみ範囲  $\varepsilon_i$  を定める。

$$\varepsilon_i = K_f \cdot \varepsilon_n$$

ここで、 $K_f$  としては SUS 304 の場合と同じ  $K_f = 1.2$  を採用

#### 4.1.2 疲労損傷計算法

(1) 本鋼の最適疲労破損式に全ひずみ範囲  $\varepsilon_i$ 、試験温度、ひずみ速度等を代入し、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、高速炉構造用 SUS 316 鋼の最適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 SUS 304 と同一の式を採用することとした。従って、後述するように高速炉構造用 SUS 316 鋼の伝熱解析用および弾性解析用の各特性と SUS 304 鋼の各特性の間に殆ど差がないため、弾性熱応力解析の範囲ではひずみ範囲、疲労損傷値ともほぼ一致する。



### 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  $\varepsilon_1$  を代入し、得られた応力範囲の  $1/2$  を初期応力  $\sigma_1$  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  $\sigma_1$  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 サイクル当たり的高温側ナトリウム循環時間；すなわち 5 時間) 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高速炉構造用 SUS 316 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。これらの式は SUS 304 鋼と形式は同じであるが係数が異なっており、弾性解析ではほぼ同一のひずみ範囲が得られるにしても、クリープ緩和の初期応力、クリープ損傷値ともに両鋼種間で異なってくる。

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-では単調応力-ひずみ関係式を採用する場合の評価について検討するとともに、クリープ疲労損傷評価を SUS 304 鋼の特性式に基づいて実施した結果（すなわち、上述の内容からこれはクリープ損傷値の計算においてのみ両鋼種間の差を考慮することと同義）との比較についても検討する。

## 4.2 損傷評価結果

表 4.5 に本供試体の内表面 (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  $\Delta \varepsilon_{eq}$  の計算結果を示す。

これらの結果から、公称ひずみ範囲  $\varepsilon_0$  および全ひずみ範囲  $\varepsilon_1$  を計算した結果のうち損傷評価上重要な内表面側の分布について、図 4.3 の上側に示した。

さらに、この全ひずみ範囲  $\varepsilon_1$  から上述の手法を用いて計算した疲労損傷値  $D_f$  (表 4.6)、クリープ損傷値  $D_c$  (表 4.8)、および両者の和として得られるクリープ疲労損傷値  $D$  を図 4.3 の下側に示した。さらに参考として表 4.7 には緩和クリープ計算用の初期応力として、動的応力-ひずみ関係式を採用して算出された値を示す。なお、上記の損傷値は試験熱過渡サイクル数として試験完了時点の 1,600 サイクルを考慮して計算したものである。

これらの図、表より、試験完了時点の熱過渡サイクル 1,600 回において、板厚 20mm の一

般円筒母材部でのクリープ疲労損傷値は約1.2 となり、クリープ疲労損傷値とき裂発生との対応関係が、従来検討してきたSUS304鋼の場合<sup>(12)</sup>と同等であるとするならば、ある程度のき裂が生じていることが推定できる。

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必ずしも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SUS304鋼の溶接継手の場合と同程度のひずみ集中係数<sup>(13)</sup>が適用できるとするならば、厚肉部の溶接継手では母材と同程度以上のき裂が生じていることが推定できる。

以上の母材部と溶接部に対する推定は実際に供試体に観察されたき裂の存在と矛盾しておらず、SUS304鋼で開発した手法の材料特性データをSUS316鋼のものに置き換えることにより、概ね妥当な評価結果が得られる見通しが得られたと考える。

表 4.1 損傷評価に使用したSUS316鋼の最適疲労破損式

SUS 304, SUS 316 及び SUS 321 の最適疲労破損式

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

使用単位

T : 温度 (°C)

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

$A_0$	$1.621827 - 0.4567850 \times 10^{-7} \times T^2 \times R$
$A_1$	$1.131346 + 0.8665061 \times 10^{-8} \times T^2$
$A_2$	0.3439663
$A_3$	$-0.1374387 \times 10^{-1} + 0.4910723 \times 10^{-4} \times R$

ただし,  $R = \log_{10} \dot{\epsilon}$  である。

表 4.2 損傷評価に使用したSUS316鋼の動的応力-ひずみ関係式

SUS 316 動的応力-ひずみ関係式

⊙  $d\sigma/2 > \sigma_p$  のとき

$$\log_{10} (d\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \cdot \log_{10} (d\varepsilon_t - d\sigma/E)$$

⊙  $d\sigma/2 \leq \sigma_p$  のとき

$$d\sigma = E \cdot d\varepsilon_t$$

使用単位

T : 温度 (°C)                      425 ≤ T ≤ 650

dσ : 応力範囲 (kg/mm<sup>2</sup>)

dε<sub>t</sub> : 全ひずみ範囲 (mm/mm)

E : 縦弾性係数 (kg/mm<sup>2</sup>)

σ<sub>p</sub> : 比例限 (kg/mm<sup>2</sup>)

A <sub>0</sub>	$4.139556 - 0.4434273 \times 10^{-2} \times T + 0.1354228 \times 10^{-5} \times T^2 + 0.1593061 \times 10^{-8} \times T^3$
A <sub>1</sub>	$2.171727 - 0.7045263 \times 10^{-2} \times T + 0.7832692 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.2083600 \times 10^{-8} \times T^3$
E	$2.10236 \times 10^4 - 9.71895 \times T$
σ <sub>p</sub>	$26.8073 - 5.04547 \times 10^{-2} \times T + 8.03901 \times 10^{-5} \times T^2 - 5.11282 \times 10^{-8} \times T^3$ $- (40.0909 - 9.69990 \times 10^{-3} \times T) \times (0.002)^{0.326245 + 6.13276 \times 10^{-5} \times T}$

表 4.3 損傷評価に使用したSUS316鋼のクリープひずみ式

Material properties of SUS 316 for creep analysis

Candidate creep strain equation of SUS 316 FR stainless steel

$$\epsilon_c = C_1(1 - e^{-r_1 t}) + C_2(1 - e^{-r_2 t}) + \epsilon_m t$$

T : Temperature (°C)  $425^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C}$  $\sigma$  : Stress (kgf/mm<sup>2</sup>)  $0.7 \text{ kgf/mm}^2 \leq \sigma$  $t_R$  : Creep rupture time (hr) $\epsilon_m$  : Steady creep rate (mm/mm/hr)

t : Time (hr)

$$t_R \quad \log_{10}(\alpha_c t_R) = -25.82042 + \frac{32232.27}{T + 273.15} - \frac{39.74271}{T + 273.15} \log_{10} \sigma - \frac{3481.803}{T + 273.15} (\log_{10} \sigma)^2$$

$$\epsilon_m = 241.33 \cdot \exp\left[-\frac{51222}{8.31 \cdot (T + 273.15)}\right] \cdot t_R^{-1.1032}$$

$$C_1 = 1.2692 \cdot \frac{\epsilon_m^{0.74491}}{r_1}$$

$$C_2 = 0.48449 \cdot \frac{\epsilon_m^{0.81155}}{r_2}$$

$$r_1 = 103.37 \cdot t_R^{-0.72607}$$

$$r_2 = 17.255 \cdot t_R^{-0.86775}$$

$$\alpha_c = 1.0$$

表 4.4 損傷評価に使用したSUS316鋼のクリープ破断式

Creep rupture curve for SUS 316 FR stainless 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 : Temperature (°C)  $425^\circ\text{C} \leq T \leq 825^\circ\text{C}$  $\sigma$  : Stress (kgf/mm<sup>2</sup>)  $2 \text{ kgf/mm}^2 \leq \sigma$  $\sigma$  should not exceed tensile strength. $t_R$  : Creep rupture time (hr)

$$C = 25.82042$$

$$A_0 = 32232.27$$

$$A_1 = -39.74271$$

$$A_2 = -3481.803$$

$$\alpha_R = 1.0$$



表 4.6 疲労損傷計算結果 (熱過渡1600サイクル)

節点番号	相当ひずみ範囲(%)	全ひずみ範囲(mm/mm)	ひずみ速度(/sec)	破損寿命(cycles)	疲労損傷値
1	.091	.0012634	1.16981E-07	2.38978E+09	6.69518E-07
2	.0909	1.26062E-03	1.16724E-07	2.54663E+09	6.28281E-07
3	.0897	1.24535E-03	1.1531E-07	3.54513E+09	4.38815E-07
4	.0883	1.22591E-03	1.1351E-07	5.89338E+09	2.71261E-07
5	.0854	1.18565E-03	1.09782E-07	1.7585E+10	9.09869E-08
6	.086	1.19398E-03	1.10554E-07	1.38668E+10	1.15384E-07
7	.0914	1.26895E-03	1.17496E-07	2.10771E+09	7.59117E-07
8	.1029	1.42861E-03	1.32279E-07	1.1433E+08	1.39946E-05
9	.1198	1.66324E-03	1.54004E-07	7.47852E+06	2.13945E-04
10	.1414	1.96313E-03	1.81771E-07	883646	1.81068E-03
11	.1713	2.37824E-03	2.20208E-07	148873	.0107474
12	.1765	2.45044E-03	2.26392E-07	118339	.0135205
13	.1687	2.34215E-03	2.16865E-07	168147	.0095155
14	.156	2.16583E-03	2.00539E-07	329773	4.95182E-03
15	.149	2.06864E-03	1.91541E-07	511606	3.12741E-03
16	.1548	2.14917E-03	1.98997E-07	354201	4.51721E-03
17	.164	2.27689E-03	2.10824E-07	212280	7.53722E-03
18	.1795	2.49209E-03	2.30749E-07	104471	.0153152
19	.1983	.0027531	2.54916E-07	53243.3	.0300507
20	.2164	3.00439E-03	2.73134E-07	31315.9	.0502377
21	.2363	3.28067E-03	3.03766E-07	20103.3	.0795869
22	.2545	3.53335E-03	3.27162E-07	14195.9	.112709
23	.2734	3.79575E-03	3.51458E-07	10446.5	.153151
24	.2918	4.05121E-03	3.75112E-07	3078.63	.193053
25	.3107	.0043136	3.99408E-07	6416.61	.249353
26	.3273	4.54407E-03	4.20747E-07	5362.29	.29933
27	.3439	4.77454E-03	4.42037E-07	4561.01	.350799
28	.3554	.0049342	4.5687E-07	4113.64	.38395
29	.3659	5.09386E-03	4.71653E-07	3733.88	.429509
30	.3753	.0052313	4.8438E-07	3451.06	.463626
31	.3871	.0053743	4.97521E-07	3192.64	.501153
32	.4036	5.60338E-03	5.19832E-07	2340.6	.553251
33	.4206	.0058394	5.40695E-07	2541.17	.62963
34	.4443	3.16344E-03	5.71152E-07	2204.25	.725371
35	.4717	5.54385E-03	6.05375E-07	1900.17	.842023
36	.4893	5.80014E-03	6.29642E-07	1736.5	.921393
37	.5041	6.99867E-03	6.48025E-07	1623.52	.985174
38	.5026	6.97735E-03	6.46037E-07	1634.33	.973595
39	.5017	5.96535E-03	6.4494E-07	1641.64	.974637
40	.4982	5.91676E-03	6.40441E-07	1568.6	.953337
41	.496	5.33622E-03	5.37613E-07	1685.92	.949035
42	.4951	6.97372E-03	6.36456E-07	1693.11	.945008
43	.4944	.006364	6.35556E-07	1638.74	.941376
44	.4941	5.85984E-03	6.3517E-07	1701.15	.940533
45	.4939	5.95706E-03	6.34913E-07	1702.77	.939548
46	.4937	6.35428E-03	6.34656E-07	1704.39	.938752
47	.4936	.0068529	6.34527E-07	1705.19	.938309
48	.4935	5.85151E-03	6.34399E-07	1706.02	.937858
49	.4935	5.85151E-03	6.34399E-07	1706.02	.937858
50	.4934	5.85012E-03	6.3427E-07	1705.92	.937413
51	.4934	5.85012E-03	6.3427E-07	1706.82	.937413
52	.4934	5.85012E-03	6.3427E-07	1706.82	.937413
53	.4934	5.85012E-03	6.3427E-07	1706.82	.937413
54	.4933	5.84873E-03	6.34142E-07	1707.62	.936979
55	.4933	5.84873E-03	6.34142E-07	1707.62	.936979
56	.4933	5.84873E-03	6.34142E-07	1707.62	.936979
57	.4933	5.84873E-03	6.34142E-07	1707.62	.936979
58	.4933	5.84873E-03	6.34142E-07	1707.62	.936979
59	.4933	5.84873E-03	6.34142E-07	1707.62	.936979

表 4.7 緩和クリーブ計算用の初期応力算出結果

節点番号	相当ひずみ範囲(%)	全ひずみ範囲(mm/mm)	初期応力(kgf/mm <sup>2</sup> )
1	.091	.0012634	9.90389
2	.0908	1.26062E-03	9.88213
3	.0897	1.24535E-03	9.76241
4	.0883	1.22591E-03	9.61004
5	.0854	1.18565E-03	9.29442
6	.086	1.19398E-03	9.35972
7	.0914	1.26895E-03	9.94743
8	.1029	1.42861E-03	11.195
9	.1198	1.66324E-03	13.02
10	.1414	1.96313E-03	15.19
C 11	.1713	2.37824E-03	17.725
12	.1765	2.45044E-03	18.11
13	.1687	2.34215E-03	17.525
14	.156	2.16583E-03	16.495
15	.149	2.06864E-03	15.885
16	.1548	2.14917E-03	16.395
17	.164	2.27689E-03	17.155
18	.1795	2.49209E-03	18.33
19	.1983	.0027531	19.585
20	.2164	3.00439E-03	20.65
21	.2363	3.29067E-03	21.695
22	.2545	3.53335E-03	22.56
23	.2734	3.79575E-03	23.375
24	.2918	4.05121E-03	24.105
25	.3107	.0043135	24.8
26	.3273	4.54407E-03	25.375
27	.3439	4.77454E-03	25.915
28	.3554	.0049342	25.27
29	.3669	5.09386E-03	26.615
30	.3768	.0052313	26.9
B 31	.3871	.0053743	27.195
32	.4036	5.50338E-03	27.64
33	.4206	.0058394	28.085
34	.4443	6.16844E-03	23.67
35	.4717	6.54885E-03	29.31
36	.4893	6.80014E-03	29.715
37	.5041	6.99867E-03	30.025
38	.5026	6.97785E-03	29.99
39	.5017	6.96535E-03	29.975
40	.4982	6.91676E-03	29.9
41	.496	6.88622E-03	29.85
42	.4951	6.87372E-03	29.83
43	.4944	.006864	29.815
44	.4941	6.85984E-03	29.81
45	.4939	6.85706E-03	29.805
46	.4937	6.85428E-03	29.8
47	.4936	.0068529	29.8
48	.4935	6.85151E-03	29.795
49	.4935	6.85151E-03	29.795
50	.4934	6.85012E-03	29.795
51	.4934	6.85012E-03	29.795
52	.4934	6.85012E-03	29.795
53	.4934	6.85012E-03	29.795
54	.4933	6.84873E-03	29.79
55	.4933	6.84873E-03	29.79
56	.4933	6.84873E-03	29.79
57	.4933	6.84873E-03	29.79
58	.4933	6.84873E-03	29.79
A 59	.4933	6.84873E-03	29.79



表 4.8 クリープ損傷計算結果 (熱過渡1600サイクル)

節点番号	初期応力(kgf/mm <sup>2</sup> )	保持時間(hr)	クリープひずみ(mm/mm)	緩和後応力(kgf/mm <sup>2</sup> )	11ヶ月間の損傷	全11ヶ月間の損傷
1	9.90389	4.99506	5.13157E-08	9.90309	4.01899E-09	6.43039E-06
2	9.88213	4.99506	5.06292E-08	9.88134	3.94485E-09	6.31175E-06
3	9.76241	4.99506	4.64026E-08	9.76169	3.55919E-09	5.69471E-06
4	9.61004	4.99506	4.15293E-08	9.6094	3.11919E-09	4.9907E-06
5	9.29442	4.99506	3.30328E-08	9.29391	2.36419E-09	3.78271E-06
6	9.35972	4.99506	3.47293E-08	9.35918	2.50477E-09	4.00763E-06
7	9.94743	4.99506	5.29921E-08	9.9466	4.17126E-09	6.67402E-06
8	11.195	4.99506	1.23975E-07	11.1931	1.16628E-08	1.86605E-05
9	13.02	4.99506	3.91674E-07	13.0139	4.67297E-08	7.47675E-05
C 10	15.19	4.99506	1.35682E-06	15.1687	2.09411E-07	3.35057E-04
11	17.725	4.99506	5.01301E-06	17.6463	1.01435E-06	1.62296E-03
12	18.11	4.99506	6.03817E-06	18.0152	1.26965E-06	2.03144E-03
13	17.525	4.99506	4.54598E-06	17.4536	9.0129E-07	1.44206E-03
14	15.495	4.99506	2.70782E-06	16.4525	4.82235E-07	7.71576E-04
15	15.885	4.99506	1.97046E-06	15.8541	3.28482E-07	5.25571E-04
16	16.395	4.99506	2.57141E-06	16.3546	4.53139E-07	7.25022E-04
17	17.155	4.99506	3.78357E-06	17.0956	7.22297E-07	1.15567E-03
18	18.33	4.99506	6.70458E-06	18.2247	1.44092E-06	2.30547E-03
19	19.585	4.99506	1.194E-05	19.3975	2.89404E-06	4.63046E-03
20	20.65	4.99506	1.89371E-05	20.3527	5.05878E-06	8.09404E-03
21	21.695	4.99506	2.89904E-05	21.2399	8.48143E-06	.0135703
22	22.56	4.99505	4.03739E-05	21.9261	1.26903E-05	.0203045
23	23.375	4.99506	5.41323E-05	22.5251	1.81541E-05	.0290466
24	24.105	4.99506	6.9262E-05	23.0176	2.45588E-05	.0392941
25	24.8	4.99506	8.62932E-05	23.4452	3.22058E-05	.0515292
26	25.375	4.99506	1.02327E-04	23.7675	3.93071E-05	.0636913
27	25.915	4.99506	1.19138E-04	24.0445	4.80842E-05	.0769346
28	26.27	4.99505	.000131	24.2133	5.41574E-05	.0855518
29	26.615	4.99506	1.43185E-04	24.367	6.05529E-05	.0968846
30	26.9	4.99506	1.53688E-04	24.4871	6.62134E-05	.105941
B 31	27.195	4.99506	1.64944E-04	24.6054	7.24381E-05	.115901
32	27.64	4.99506	1.82736E-04	24.7711	8.25379E-05	.132061
33	28.085	4.99506	2.01352E-04	24.9238	9.35019E-05	.149603
34	28.67	4.99506	2.27092E-04	25.1047	1.09241E-04	.174786
35	29.31	4.99506	2.56665E-04	25.2804	1.28179E-04	.205087
36	29.715	4.99506	2.75891E-04	25.3835	1.41121E-04	.225794
37	30.025	4.99506	2.90939E-04	25.4573	1.51511E-04	.242418
38	29.99	4.99506	2.89128E-04	25.4507	1.50339E-04	.240542
39	29.975	4.99506	2.88471E-04	25.446	1.49812E-04	.239699
40	29.9	4.99506	2.84715E-04	25.43	1.47296E-04	.235674
41	29.85	4.99506	2.8214E-04	25.4204	1.45645E-04	.233032
42	29.83	4.99506	2.81404E-04	25.412	1.44934E-04	.231894
43	29.815	4.99506	2.80812E-04	25.4063	1.44408E-04	.231053
44	29.81	4.99506	2.80561E-04	25.4052	1.44244E-04	.23079
45	29.805	4.99506	2.80311E-04	25.4041	1.4408E-04	.230528
46	29.8	4.99506	2.80062E-04	25.403	1.43915E-04	.230264
47	29.8	4.99506	2.80062E-04	25.403	1.43915E-04	.230264
48	29.795	4.99506	2.79771E-04	25.4026	1.43759E-04	.230015
49	29.795	4.99505	2.79771E-04	25.4026	1.43759E-04	.230015
50	29.795	4.99506	2.79771E-04	25.4026	1.43759E-04	.230015
51	29.795	4.99506	2.79771E-04	25.4026	1.43759E-04	.230015
52	29.795	4.99506	2.79771E-04	25.4026	1.43759E-04	.230015
53	29.795	4.99506	2.79771E-04	25.4026	1.43759E-04	.230015
54	29.79	4.99506	2.79564E-04	25.4009	1.43587E-04	.229738
55	29.79	4.99506	2.79564E-04	25.4009	1.43587E-04	.229738
56	29.79	4.99506	2.79564E-04	25.4009	1.43587E-04	.229738
57	29.79	4.99505	2.79564E-04	25.4009	1.43587E-04	.229738
58	29.79	4.99506	2.79564E-04	25.4009	1.43587E-04	.229733
A 59	29.79	4.99506	2.79564E-04	25.4009	1.43587E-04	.229738

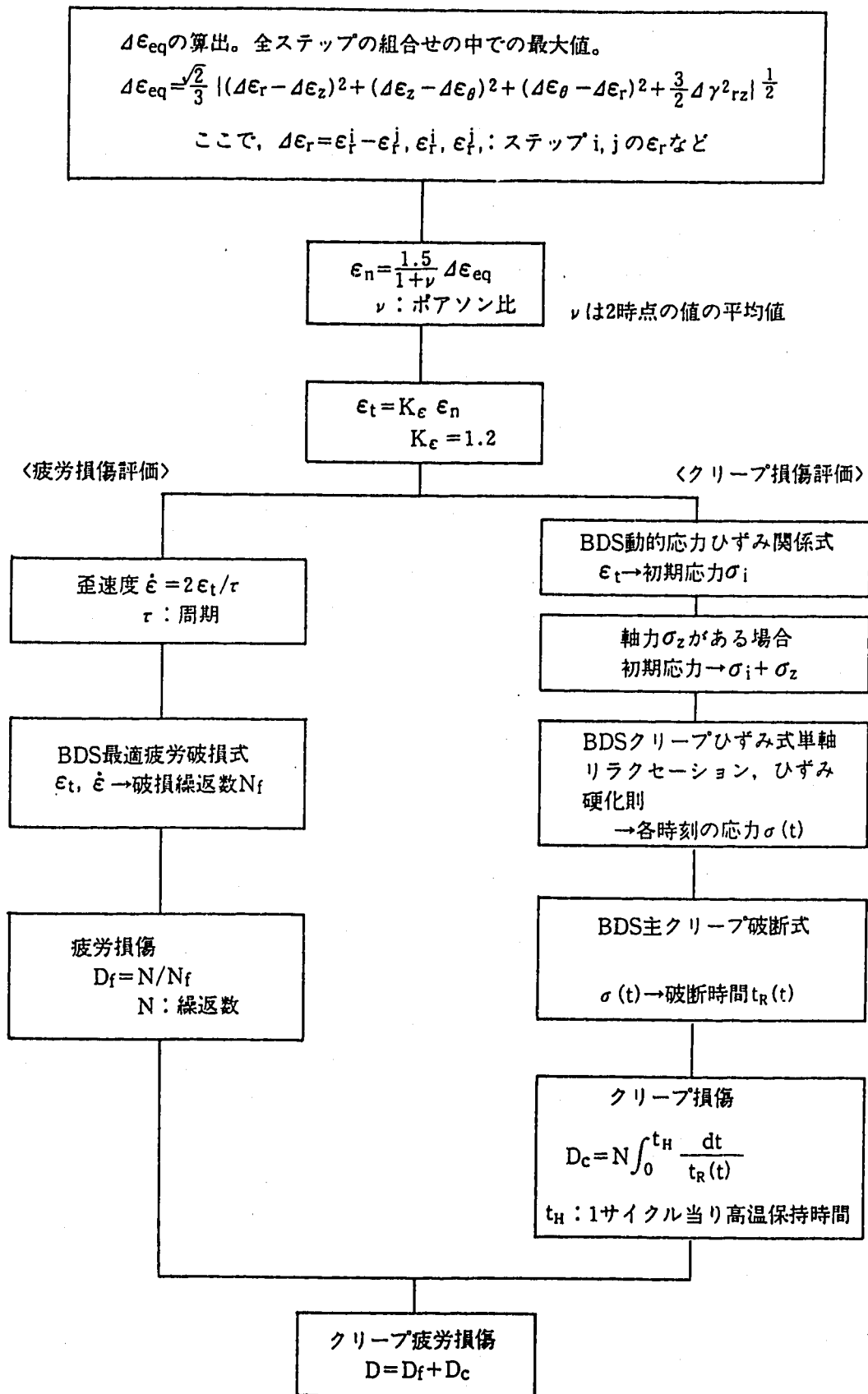


図4.1 TTSDSによる評価の流れ

FINAS

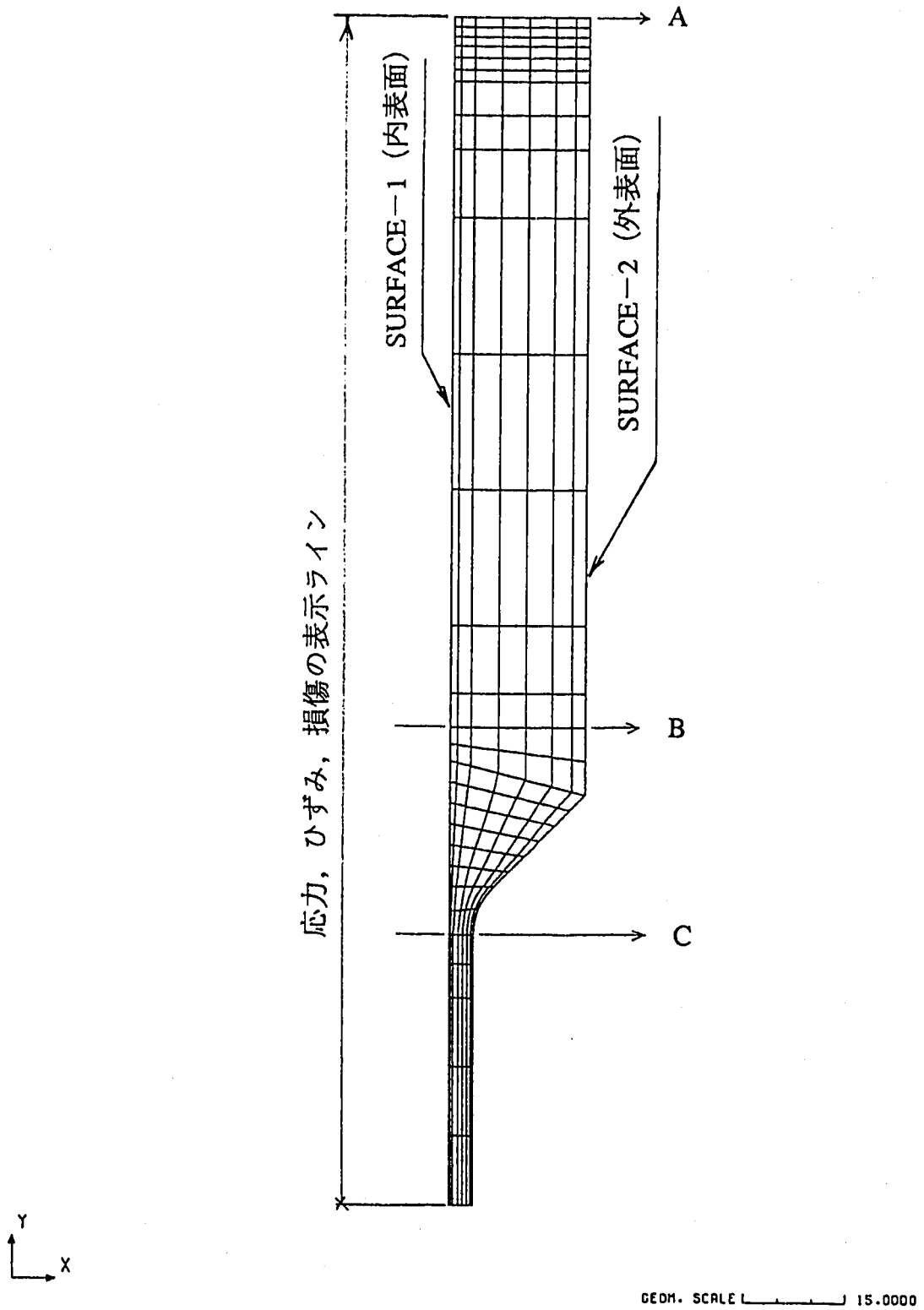


図 4.2 評価結果の表示ライン

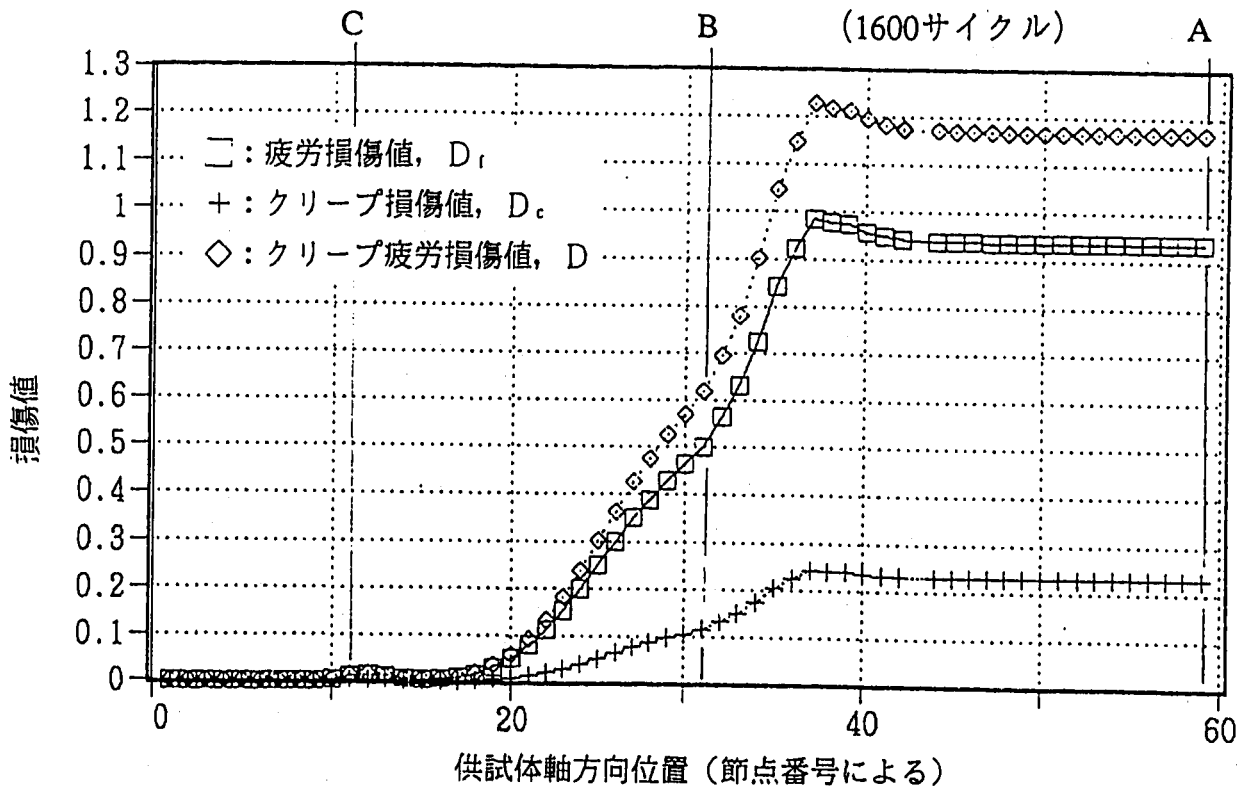
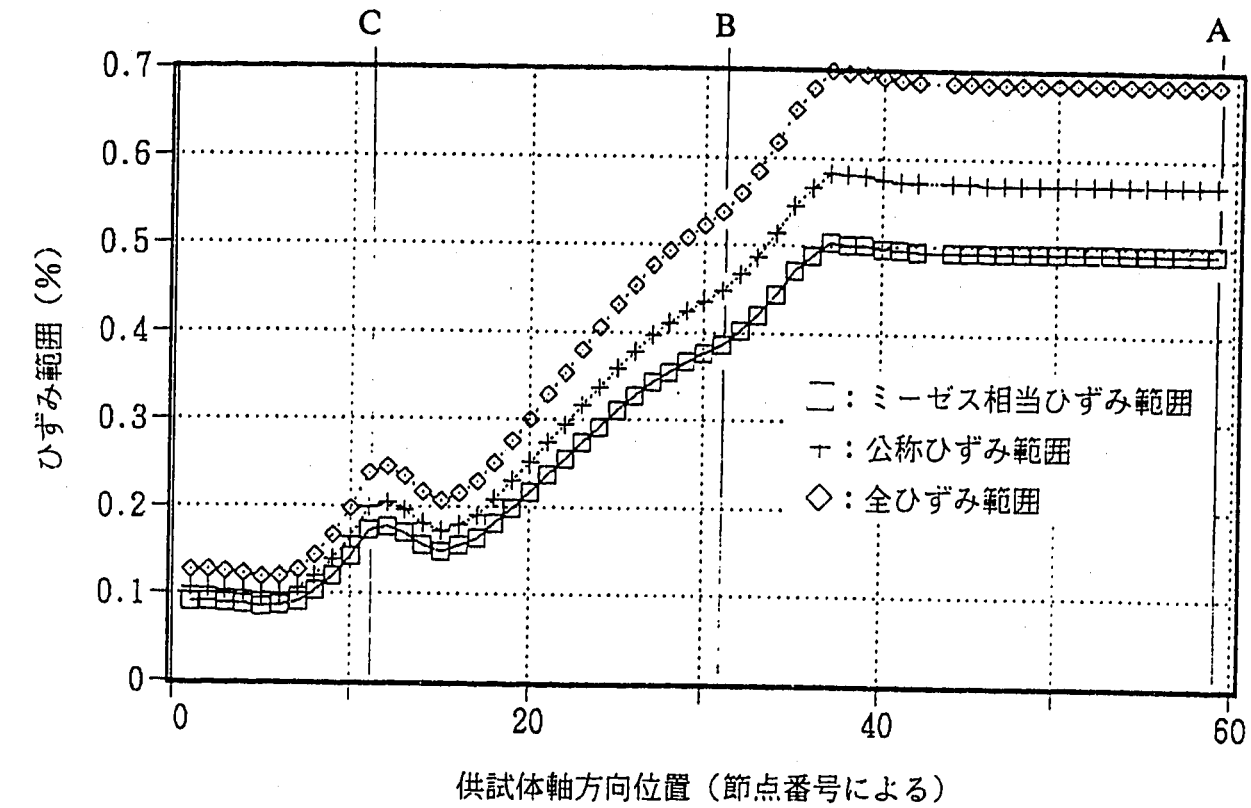


図 4.3 ひずみ範囲とクリープ疲労損傷値の供試体軸方向分布 (内表面)

## 5. 考察

### 5.1 クリープ緩和初期応力計算にSUS316鋼の単調応力-ひずみ関係式を採用した場合のクリープ損傷値

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材料開発室が暫定している表4.2に示したSUS316鋼の動的応力-ひずみ関係式を採用した。ところで、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、単調応力-ひずみ関係式が考えられる。先に動的応力-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鋼の場合と同様である。

通常SUS304鋼やSUS316鋼の場合のように負荷の繰返しに伴い材料が硬化する材料では、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多少なりとも大きめに算定することになると考えられる（特にひずみ範囲の大きい低サイクル疲労の場合）ために、幾分クリープ損傷を過大評価する結果になるとみられる。特に、SUS316鋼の場合にはSUS304鋼の場合に比べて、単調負荷時の挙動を表す単調応力-ひずみ挙動に対する定常繰返し応力-ひずみ挙動の硬化の度合いが大きいとみられることから、上述の影響が大きく現れる可能性もある。

従って、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単調応力-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。

SUS316鋼の単調応力-ひずみ関係式は表5.1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た結果を表5.2に示す。さらに、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1,600サイクルを考慮）を表5.3に示す。

これらの表から、初期応力は主要な厚肉部において単調応力-ひずみ関係式を用いて計算した場合、動的応力-ひずみ関係式を用いて計算した結果の約1/2に低下し、このため初期応力を単調応力-ひずみ関係式から計算した場合のクリープ損傷値は、ほとんど破損に寄与しないレベルにまで低下する結果となることが分かる。

SUS316鋼の熱クリープ疲労破損の破面形態はSUS304鋼の場合ほど明瞭な粒界割れを示さないとも考えられているが、本試験結果における母材部のき裂がストライエーションをとまなう粒内割れであった事実からは、クリープ損傷がそれほど寄与しなかった可能性も考えられる。ただし、母材部のき裂に関しては第2章に述べたように、 $\delta$ フェライトが主たる破損要因と考えるのが妥当ともいえるので、ここでは明確な結論は導けない。

## 5.2 クリープ疲労損傷計算にSUS304鋼の材料特性式を採用した場合との比較

高速炉構造用SUS316鋼とSUS304鋼の構造物としての熱過渡強度を比較し、前者が定量的にどの程度優れているのかを示すことは意義深いことである。試験サイドからは、同一形状の供試体に同一の熱荷重を負荷してそれぞれの破損寿命を比較するのが最も分かりやすい議論となるが、今回の試験ではSUS304鋼との直接比較はできない。

ところで、第4章および前節5.1までに述べたクリープ疲労損傷評価では、材料強度特性式として高速炉構造用SUS316鋼用に暫定されている式を採用してきたが、解析サイドからは、伝熱解析、応力解析、クリープ疲労損傷計算の各段階で、両鋼の材料特性式を採用することで、両鋼の比較を数値実験的に議論することは可能である。ただし、この場合それぞれの解析手法、評価手法の妥当性が前提条件となる。

そこで、以下では本試験の伝熱応力解析およびクリープ疲労損傷評価をSUS304鋼の特性式に基づいて実施する場合について検討し、これと先の高速炉構造用SUS316鋼の場合の結果との比較を行う。

まず伝熱解析段階（表3.2と表5.4参照）では、解析に使用される材料物性値のうち熱伝導係数および比熱については両鋼とも同一であり、密度のみ高速炉構造用SUS316鋼のほうが1%程度小さい（図5.1と図5.2に両鋼の密度の比較を示した）という僅かな差を有するのみである。次に弾性熱応力解析段階（表3.3と表5.5参照）では、解析に使用される材料特性値はヤング率、ポアソン比および線膨張係数の3者とも両鋼で同一である。従って、伝熱・弾性熱応力解析までの範囲では両鋼の材料特性値を採用した解析結果はほとんど一致するといえる。

次に、クリープ疲労損傷計算段階では、まず疲労損傷の算出に使用される最適疲労破損式（表4.1）は両鋼とも同一であり、上記伝熱応力解析でほぼ等しい温度、ひずみ範囲が得られるために、疲労損傷値は両鋼ともほぼ同一である。一方、クリープ損傷値については、応力緩和経路の初期応力を決めるために用いられる動的応力-ひずみ関係式（表4.2と表5.6参照）、緩和経路を計算するために用いられるクリープひずみ式（表4.3と表5.7参照）、さらにクリープ損傷の時間分数を計算するために用いられるクリープ破損クライテリアとしての主クリープ破断関係式（表4.4と表5.8参照）の3者とも両鋼で式の係数が異なっている。従って、両鋼の弾性熱応力解析に基づくクリープ疲労損傷評価では、クリープ損傷値のみが異なり、結果として高速炉構造用SUS316鋼の方が小さな損傷値となる（言い換えれば、クリープ破断に対する抵抗力が大きい）。

参考として表5.6から表5.8にSUS304鋼の動的応力-ひずみ関係式、クリープひずみ式およびクリープ破断関係式をそれぞれ示す。

上述の内容から以下ではクリープ損傷値の計算について両鋼種間の差を考慮した場合の比較を行う。図5.3には初期応力の計算に両鋼それぞれの動的応力-ひずみ関係式を採用した場合の比較を示す。また、図5.4にはこの初期応力からさらに両鋼のクリープ特性式に基づいてクリープ損傷値（本試験条件に合わせて1600サイクルを考慮）を計算した結果を比較して示す。なお、横軸はいずれもひずみ範囲（本供試体で実際に発生した範囲の値）としている。これらの図から、ひずみ範囲が同一の場合、初期応力は高速炉構造用SUS316鋼の方が高く算出される（すなわち硬めの傾向）にも係わらず、クリープ損傷

値は本鋼のほうがSUS304鋼よりもかなり低めに計算されることが分かる。これは高速炉構造用SUS316鋼の方がクリープ強度に優れているためである。

次に、今回の解析モデルの各節点でのひずみ範囲から実際にSUS304鋼の特性を用いて初期応力を計算し(表5.9)、この結果からさらにSUS304鋼の特性を用いてクリープ損傷計算(1600サイクルを考慮)を行った結果を表5.10に示す。また、図5.5と図5.6にはこれらの結果と先に高速炉構造用SUS316鋼の特性を用いて得られた初期応力とクリープ損傷値を対比させて示す。

これらの図より、本供試体厚肉部において、高速炉構造用SUS316鋼の場合にはSUS304鋼に比較して初期応力が $6 \text{ kgf/mm}^2$ 程度高くなるが、クリープ損傷値は逆に $1/3$ (0.6に対して0.2程度)と小さくなる。

図5.7から図5.10にはこのようにして算出されたクリープ損傷値に両鋼で同一の疲労損傷値も合わせてクリープ疲労損傷値とし、今回の試験における熱過渡サイクルの中間段階(500, 900, 1300サイクル時点)と試験完了時点(1600サイクル時点)における両鋼での損傷値を対比させて示した。なお、これらのサイクル時点におけるき裂観察の結果は第2章の図2.2に示したとおりである。

これらの図より今回の試験条件において両鋼の破損寿命(便宜的に $D=1$ と考える)を比較した場合、多少高速炉構造用SUS316鋼のほうが寿命が長いと予想されるが、その差はそれほど顕著ではないようである。これは、今回の試験条件ではひずみ範囲がやや高く、全クリープ疲労損傷に占める疲労損傷(両鋼で同一)の割合が高いためである。

なお、図2.2に示したき裂の発生状況との比較に関しては、ミクロなヘアクラックまで含めた場合のき裂発生状況と損傷値との相関関係は試験データの蓄積の多いSUS304鋼の場合についてさえも定量化されていないのが現状であり、ここで断定的な結論を導き出すのは困難であるが、クリープ疲労損傷値が0.4から0.7程度となる500サイクルから900サイクルまでの間に本供試体母材部にヘアクラックが観察された事実からは、本鋼の場合も従来のSUS304鋼の場合とほぼ同様のき裂発生傾向を有するとみなせる可能性もある。ただし、第2章で述べたように、本供試体の母材部のき裂が $\delta$ フェライトに起因した例外的なものであるとした場合には、通常的一般母材部はき裂発生により多くの熱過渡サイクル数を要する結果となるゆえ、従来のSUS316鋼の最適疲労破損式を用いた評価を行った場合には、疲労損傷値を保守的に見積もる可能性が考えられる。

以上、本章では解析、評価の各段階にSUS304鋼の材料特性式を採用した場合、本熱過渡試験におけるクリープ疲労損傷値が、第4章で述べた高速炉構造用SUS316鋼の材料特性式を採用した場合の結果に対してどのように変化するかについて検討を加えることにより、両鋼のクリープ疲労破損に対する強度を考察した。

今後、本鋼の母材および溶接継手を含めた熱過渡強度データがさらに蓄積された段階において、今回得られた損傷評価結果を踏まえたさらに詳細な評価検討を行い、本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解析および強度評価用の十分なデータ(特に繰返し応力-ひずみ関係の定式化)が得られていないのが現状であるため、早急にデータベースの充実をはかり、定式化を進めることが望まれる。

表 5.1 SUS 316 鋼の単調応力-ひずみ関係式

(1)  $\sigma \leq \sigma_p$  のとき

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

$$\epsilon_p = 0$$

(2)  $\sigma > \sigma_p$  のとき

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

$$\epsilon_p = \left( \frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right)^{\frac{1}{m}}$$

&lt; 使用単位 &gt;

$$\epsilon_e (\text{mm/mm}), \epsilon_p (\text{mm/mm}), \sigma (\text{kg/mm}^2)$$

&lt; 適用限界 &gt;

$$\text{最大ひずみ} (\epsilon_e + \epsilon_p)_{\text{max}} \leq 0.03 (\text{mm/mm})$$

パラメータ	温度 (°C)	315 ≤ T ≤ 650
E (kg/mm <sup>2</sup> )	315 ≤ T < 400 400 ≤ T ≤ 650	E = 2.040 × 10 <sup>4</sup> - 8.000 T E = 2.126 × 10 <sup>4</sup> - 1.0125 T
σ <sub>p</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )		σ <sub>y</sub> - K (0.002) <sup>m</sup>
σ <sub>y</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )		平均曲線: 26.8073 - 5.04547 × 10 <sup>-2</sup> T + 8.03901 × 10 <sup>-5</sup> T <sup>2</sup> - 5.11282 × 10 <sup>-8</sup> T <sup>3</sup> 最小曲線: 別表 1.4 設計降伏点 S <sub>y</sub> による
K (kg/mm <sup>2</sup> )		40.0909 - 9.69990 × 10 <sup>-3</sup> T
m		0.326245 + 6.13276 × 10 <sup>-5</sup> T



表 5.2 SUS316 鋼の単調応力-ひずみ関係式で算定したクリープ緩和初期応力

節点番号	相当ひずみ範囲(%)	全ひずみ範囲(mm/mm)	初期応力(kgf/mm <sup>2</sup> )
1	.091	.0012634	9.91215
2	.0908	1.26062E-03	9.89037
3	.0897	1.24535E-03	9.77055
4	.0883	1.22591E-03	9.61805
5	.0854	1.18565E-03	9.30217
6	.086	1.19398E-03	9.36753
7	.0914	1.26895E-03	9.95572
8	.1029	1.42861E-03	11.2
9	.1198	1.66324E-03	12.17
10	.1414	1.96313E-03	12.59
C 11	.1713	2.37824E-03	13.14
12	.1765	2.45044E-03	13.2
13	.1687	2.34215E-03	13.1
14	.156	2.16583E-03	12.93
15	.149	2.06864E-03	12.82
16	.1548	2.14917E-03	12.91
17	.164	2.27689E-03	13.04
18	.1795	2.49209E-03	13.24
19	.1983	.0027531	13.44
20	.2164	3.00439E-03	13.61
21	.2363	3.28067E-03	13.78
22	.2545	3.53335E-03	13.91
23	.2734	3.79575E-03	14.05
24	.2918	4.05121E-03	14.17
25	.3107	.0043136	14.28
26	.3273	4.54407E-03	14.38
27	.3439	4.77454E-03	14.47
28	.3554	.0049342	14.53
29	.3669	5.09386E-03	14.59
30	.3768	.0052313	14.64
B 31	.3871	.0053743	14.69
32	.4036	5.60338E-03	14.77
33	.4206	.0058394	14.85
34	.4443	6.16844E-03	14.95
35	.4717	6.54885E-03	15.06
36	.4898	6.80014E-03	15.14
37	.5041	6.99867E-03	15.19
38	.5026	6.97785E-03	15.19
39	.5017	6.96535E-03	15.18
40	.4982	6.91676E-03	15.17
41	.496	6.88622E-03	15.16
42	.4951	6.87372E-03	15.16
43	.4944	.006864	15.15
44	.4941	6.85984E-03	15.15
45	.4939	6.85706E-03	15.15
46	.4937	6.85428E-03	15.15
47	.4936	.0068529	15.15
48	.4935	6.85151E-03	15.15
49	.4935	6.85151E-03	15.15
50	.4934	6.85012E-03	15.15
51	.4934	6.85012E-03	15.15
52	.4934	6.85012E-03	15.15
53	.4934	6.85012E-03	15.15
54	.4933	6.84873E-03	15.15
55	.4933	6.84873E-03	15.15
56	.4933	6.84873E-03	15.15
57	.4933	6.84873E-03	15.15
58	.4933	6.84873E-03	15.15
A 59	.4933	6.84873E-03	15.15

表 5.3 クリープ緩和初期応力を SUS 316 鋼の単調応力-ひずみ関係式で算定した場合のクリープ損傷値 (熱過渡1600サイクル)

節点番号	初期応力(kg/mm <sup>2</sup> )	保持時間(hr)	クリープひずみ(mm/mm)	緩和後応力(kg/mm <sup>2</sup> )	1ヶ所の損傷	全体の損傷
1	9.91215	4.99506	5.16158E-08	9.91135	4.04749E-09	6.47598E-06
2	9.89037	4.99506	5.08839E-08	9.88958	3.97278E-09	6.35644E-06
3	9.77055	4.99506	4.66304E-08	9.76982	3.58425E-09	5.7348E-06
4	9.61805	4.99506	4.19351E-08	9.6174	3.14099E-09	5.02558E-06
5	9.30217	4.99506	3.32228E-08	9.30166	2.38049E-09	3.80879E-06
6	9.36753	4.99506	3.49213E-08	9.36699	2.5221E-09	4.03536E-06
7	9.95572	4.99506	5.32942E-08	9.95489	4.20086E-09	6.72137E-06
8	11.2	4.99506	1.24556E-07	11.1981	1.17094E-08	1.8735E-05
9	12.17	4.99506	2.32305E-07	12.1664	2.48718E-08	3.97948E-05
10	12.69	4.99506	3.20532E-07	12.685	3.66952E-08	5.87124E-05
11	13.14	4.99506	4.20811E-07	13.1334	5.09751E-08	8.15602E-05
12	13.2	4.99506	4.36261E-07	13.1932	5.32302E-08	8.51683E-05
13	13.1	4.99506	4.10986E-07	13.0936	4.95213E-08	7.9234E-05
14	12.93	4.99506	3.70954E-07	12.9242	4.37651E-08	7.00242E-05
15	12.82	4.99506	3.47014E-07	12.8146	4.038E-08	6.4608E-05
16	12.91	4.99506	3.66407E-07	12.9043	4.31305E-08	6.90087E-05
17	13.04	4.99506	3.96196E-07	13.0338	4.74136E-08	7.58617E-05
18	13.24	4.99506	4.46832E-07	13.233	5.47852E-08	8.76563E-05
19	13.44	4.99506	5.02837E-07	13.4321	6.32165E-08	1.01146E-04
20	13.61	4.99506	5.55915E-07	13.6013	7.13205E-08	1.14113E-04
21	13.78	4.99506	6.13748E-07	13.7704	8.03866E-08	1.28619E-04
22	13.91	4.99506	6.61611E-07	13.8996	8.8034E-08	1.40854E-04
23	14.05	4.99506	7.17217E-07	14.0387	9.70258E-08	1.55241E-04
24	14.17	4.99506	7.6852E-07	14.1579	1.05407E-07	1.68651E-04
25	14.28	4.99506	8.18057E-07	14.2671	1.1368E-07	1.81888E-04
26	14.38	4.99506	8.65562E-07	14.3664	1.21724E-07	1.94758E-04
27	14.47	4.99506	9.10331E-07	14.4557	1.29414E-07	2.07063E-04
28	14.53	4.99506	9.42362E-07	14.5152	1.34791E-07	2.15665E-04
29	14.59	4.99506	9.74034E-07	14.5747	1.40375E-07	.0002246
30	14.64	4.99506	1.00199E-06	14.6243	1.45193E-07	2.32308E-04
31	14.59	4.99506	1.0305E-06	14.6738	1.50164E-07	2.40262E-04
32	14.77	4.99506	1.0768E-06	14.7531	1.58451E-07	2.53521E-04
33	14.85	4.99506	1.12577E-06	14.8323	1.67162E-07	2.67459E-04
34	14.95	4.99506	1.19008E-06	14.9313	1.78679E-07	2.85887E-04
35	15.06	4.99506	1.2632E-06	15.0402	1.92202E-07	3.07523E-04
36	15.14	4.99506	1.31987E-06	15.1193	2.02629E-07	3.24206E-04
37	15.19	4.99506	1.35682E-06	15.1687	2.09411E-07	3.35057E-04
38	15.19	4.99506	1.35682E-06	15.1687	2.09411E-07	3.35057E-04
39	15.18	4.99506	1.34941E-06	15.1588	2.08038E-07	3.3286E-04
40	15.17	4.99506	1.34244E-06	15.1489	2.06672E-07	3.30676E-04
41	15.16	4.99506	1.33485E-06	15.139	2.05316E-07	3.28505E-04
42	15.16	4.99506	1.33485E-06	15.139	2.05316E-07	3.28505E-04
43	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
44	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
45	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
46	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
47	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
48	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
49	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
50	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
51	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
52	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
53	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
54	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
55	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
56	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
57	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
58	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04
59	15.15	4.99506	1.32818E-06	15.1291	2.03968E-07	3.26349E-04

表 5.4 伝熱解析に用いられる SUS 304 鋼の材料物性値

表 6.5-2 オーステナイトステンレス鋼 SUS304

温度 (°C)	熱伝導係数 (kcal/mm·sec·°C)	比熱 (kcal/kg·°C)	密度 (kg/mm <sup>3</sup> )
20	$3.48 \times 10^{-6}$	0.108	$8.03 \times 10^{-4}$
50	3.53	0.112	8.02
100	3.73	0.118	8.00
150	3.89	0.122	7.97
200	4.05	0.125	7.95
250	4.21	0.128	7.93
300	4.37	0.129	7.90
350	4.53	0.131	7.88
400	4.70	0.132	7.86
450	4.86	0.133	7.83
500	5.02	0.134	7.81
550	5.18	0.136	7.79
600	5.34	0.138	7.76
650	5.51	0.140	7.74
700	5.67	0.142	7.72
750	5.83	0.145	7.70
800	5.98	0.147	7.67

表 5.5 弾性熱応力解析に用いられる SUS 304 鋼の材料特性値

表 4.5-2 SUS304 鋼のヤング係数、ポアソン比、線膨張係数

温度 (°C)	ヤング係数 (kg/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	線膨張係数 (1/°C)
20	$1.98 \times 10^4$	0.266	$15.15 \times 10^{-6}$
50	$1.96 \times 10^4$	0.268	$15.65 \times 10^{-6}$
100	$1.94 \times 10^4$	0.272	$16.48 \times 10^{-6}$
150	$1.91 \times 10^4$	0.275	$17.22 \times 10^{-6}$
200	$1.88 \times 10^4$	0.279	$17.85 \times 10^{-6}$
250	$1.84 \times 10^4$	0.283	$18.36 \times 10^{-6}$
300	$1.80 \times 10^4$	0.287	$18.79 \times 10^{-6}$
350	$1.76 \times 10^4$	0.291	$19.19 \times 10^{-6}$
400	$1.72 \times 10^4$	0.295	$19.57 \times 10^{-6}$
450	$1.67 \times 10^4$	0.298	$19.93 \times 10^{-6}$
500	$1.62 \times 10^4$	0.302	$20.28 \times 10^{-6}$
550	$1.57 \times 10^4$	0.306	$20.60 \times 10^{-6}$
600	$1.52 \times 10^4$	0.310	$20.87 \times 10^{-6}$
650	$1.47 \times 10^4$	0.314	$21.09 \times 10^{-6}$

表 5.6 SUS304 鋼の動的応力-ひずみ関係式

SUS 304 の動的応力-ひずみ関係式

⊙  $d\sigma/2 > \sigma_p$  のとき

$$\log_{10} (d\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \cdot \log_{10} (d\varepsilon_t - d\sigma/E)$$

⊙  $d\sigma/2 \leq \sigma_p$  のとき

$$d\sigma = E \cdot d\varepsilon_t$$

使用単位

T : 温度 (°C)                       $425 \leq T \leq 650$

$d\sigma$  : 応力範囲 (kg/mm<sup>2</sup>)

$d\varepsilon_t$  : 全ひずみ範囲 (mm/mm)

E : 縦弾性係数 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_p$  : 比例限 (kg/mm<sup>2</sup>)

$A_0$	$0.9772687 + 0.6446708 \times 10^{-2} \times T - 0.4675557 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.3724201 \times 10^{-8} \times T^3$
$A_1$	$3.690128 - 0.1847969 \times 10^{-1} \times T + 0.3544927 \times 10^{-4} \times T^2 - 0.2297822 \times 10^{-7} \times T^3$
E	$2.10236 \times 10^4 - 9.71895 \times T$
$\sigma_p$	$25.5655 - 5.58937 \times 10^{-2} \times T + 1.04384 \times 10^{-4} \times T^2 - 7.42535 \times 10^{-7} \times T^3$ $- (44.3068 - 1.78933 \times 10^{-2} \times T) \times (0.002)^{0.279395 + 7.749 \cdot 10^{-3} \cdot T}$

表 5.7 SUS304鋼のクリープひずみ式

表4.5-4 SUS304鋼のクリープひずみ式

$$\epsilon^c = c_1(1 - \exp(-r_1 t)) + c_2(1 - \exp(-r_2 t)) + \epsilon_m t$$

ここで

$$r_1 = 103.37 t_R^{-0.72607}, \quad r_2 = 17.255 t_R^{-0.86775}$$

$$c_1 = 1.2692 \epsilon_m^{0.74491} / r_1, \quad c_2 = 0.48449 \epsilon_m^{0.81155} / r_2$$

$$\epsilon_m = F t_R^{-1.1335}$$

$$\log_{10}(a_R t_R) = \begin{cases} B_0 + B_1 \log_{10} \sigma + B_2 (\log_{10} \sigma)^2 & (0.1 \leq \sigma \leq 38.0 \text{ のとき}) \\ \{B_0 - B_2 (\log_{10} 0.1)^2\} + (B_1 + 2B_2 \log_{10} 0.1) \log_{10} \sigma & (0.01 \leq \sigma < 0.1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

ただし、 $0 \leq \sigma < 0.01$  に対しては、 $r_1 = r_2 = c_1 = c_2 = \epsilon_m = 0$

<使用単位>  $\epsilon^c$ (mm/mm)、 $\sigma$ (kg/m<sup>2</sup>)、 $t$ (hr)、 $T$ (°C)

パラメータ	温度(°C)	425 ≤ T ≤ 650
F		$62.416 \exp \left\{ - \frac{4.812}{8.31(T+273.15)} \right\}$
B <sub>0</sub>		$-17.54301 + 26248.54 / (T + 273.15)$
B <sub>1</sub>		$-6104.579 / (T + 273.15)$
B <sub>2</sub>		$-425.0012 / (T + 273.15)$
a <sub>R</sub>		MATERIALデータB <sub>12</sub> カードで指定した値。B <sub>12</sub> カードのa <sub>R</sub> が無記入の場合は1.0

表 5.8 SUS304 鋼のクリープ破断式

SUS304 の主クリープ破断関係式

$$(T+273.15) \{ \log_{10} (\alpha_R t_R) + C \} \\ = A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

使用単位

T : 温度 (°C)      425 ≤ T ≤ 825

σ : 応力 (kg/mm<sup>2</sup>)      2 ≤ σ

t<sub>R</sub> : 破断時間 (hr)

C	17.54301
A <sub>0</sub>	26248.54
A <sub>1</sub>	-6104.579
A <sub>2</sub>	-425.0012

α <sub>R</sub>	平均値 : 1
	設計最小値 : 10

ただし、σは当該温度における引張強さを超えてはならない。

表 5.9 緩和クリープ計算用の初期応力算出結果 (SUS304 特性を使用)

節点番号	相当ひずみ範囲(%)	全ひずみ範囲(mm/mm)	初期応力(kgf/mm <sup>2</sup> )
1	.091	.0012634	9.89
2	.0908	1.26062E-03	9.87
3	.0897	1.24535E-03	9.755
4	.0883	1.22591E-03	9.605
5	.0854	1.18565E-03	9.29442
6	.086	1.19398E-03	9.35972
7	.0914	1.26895E-03	9.93
8	.1029	1.42861E-03	11.015
9	.1198	1.66324E-03	12.31
10	.1414	1.96313E-03	13.645
C 11	.1713	2.37824E-03	15.13
12	.1765	2.45044E-03	15.355
13	.1687	2.34215E-03	15.01
14	.156	2.16583E-03	14.41
15	.149	2.06864E-03	14.055
16	.1548	2.14917E-03	14.35
17	.164	2.27689E-03	14.795
18	.1795	2.49209E-03	15.485
19	.1983	.0027531	16.245
20	.2164	3.00439E-03	16.915
21	.2363	3.28067E-03	17.595
22	.2545	3.53335E-03	18.175
23	.2734	3.79575E-03	18.735
24	.2918	4.05121E-03	19.255
25	.3107	.0043136	19.76
26	.3273	4.54407E-03	20.185
27	.3439	4.77454E-03	20.59
28	.3554	.0049342	20.865
29	.3669	5.09386E-03	21.13
30	.3768	.0052313	21.355
B 31	.3871	.0053743	21.585
32	.4036	5.60338E-03	21.945
33	.4206	.0058394	22.3
34	.4443	6.16844E-03	22.78
35	.4717	6.54885E-03	23.315
36	.4898	6.80014E-03	23.655
37	.5041	6.99867E-03	23.915
38	.5026	6.97785E-03	23.89
39	.5017	6.96535E-03	23.875
40	.4982	6.91676E-03	23.81
41	.496	6.88622E-03	23.77
42	.4951	6.87372E-03	23.75
43	.4944	.006864	23.74
44	.4941	6.85984E-03	23.735
45	.4939	6.85706E-03	23.73
46	.4937	6.85428E-03	23.725
47	.4936	.0068529	23.725
48	.4935	6.85151E-03	23.72
49	.4935	6.85151E-03	23.72
50	.4934	6.85012E-03	23.72
51	.4934	6.85012E-03	23.72
52	.4934	6.85012E-03	23.72
53	.4934	6.85012E-03	23.72
54	.4933	6.84873E-03	23.72
55	.4933	6.84873E-03	23.72
56	.4933	6.84873E-03	23.72
57	.4933	6.84873E-03	23.72
58	.4933	6.84873E-03	23.72
A 59	.4933	6.84873E-03	23.72

表 5.10 クリープ損傷計算結果 (SUS304特性を使用; 熱過渡1600サイクル)

節点番号	初期応力(kgf/mm <sup>2</sup> )	保持時間(hr)	クリープひずみ(mm/mm)	緩和後応力(kgf/mm <sup>2</sup> )	1600サイクルのクリープ損傷	全クリープ損傷
1	9.89	299.704	6.18598E-06	9.79288	1.68942E-06	2.70308E-03
2	9.87	299.704	6.09838E-06	9.77426	1.66164E-06	2.65863E-03
3	9.755	299.704	5.61994E-06	9.66677	1.50934E-06	2.41494E-03
4	9.605	299.704	5.04378E-06	9.52581	1.32889E-06	2.12623E-03
5	9.29442	299.704	4.00603E-06	9.23152	1.01379E-06	1.62207E-03
6	9.35972	299.704	4.20785E-06	9.29366	1.07402E-06	1.71843E-03
7	9.93	299.704	6.36208E-06	9.83012	1.74624E-06	2.79399E-03
8	11.015	299.704	1.30058E-05	10.8108	4.0522E-06	6.48351E-03
9	12.31	299.704	2.72824E-05	11.8817	9.71796E-06	.0155487
C 10	13.645	299.704	5.19823E-05	12.8289	2.08985E-05	.0334375
11	15.13	299.704	9.34307E-05	13.6631	4.22702E-05	.0676322
12	15.355	299.704	1.01003E-04	13.7692	4.64559E-05	.0743294
13	15.01	299.704	8.95301E-05	13.6044	4.01429E-05	.0642287
14	14.41	299.704	7.14634E-05	13.288	3.05923E-05	.0489476
15	14.055	299.704	6.19255E-05	13.0828	2.57619E-05	.0412191
16	14.35	299.704	6.97906E-05	13.2543	2.97347E-05	.0475755
17	14.795	299.704	8.27799E-05	13.4954	3.65155E-05	.0584249
18	15.485	299.704	1.05528E-04	13.8282	4.89927E-05	.0783883
19	16.245	299.704	1.33974E-04	14.1416	6.56031E-05	.104965
20	16.915	299.704	1.61663E-04	14.3769	8.27727E-05	.132436
21	17.595	299.704	1.92044E-04	14.5799	1.02579E-04	.164127
22	18.175	299.704	2.19129E-04	14.7347	1.21389E-04	.194223
23	18.735	299.704	2.46428E-04	14.8661	1.41138E-04	.225821
24	19.255	299.704	2.72786E-04	14.9723	1.60789E-04	.257263
25	19.76	299.704	2.98586E-04	15.0722	1.81198E-04	.289917
26	20.185	299.704	3.20213E-04	15.1577	1.99452E-04	.319124
27	20.59	299.704	3.41386E-04	15.2302	2.17535E-04	.348056
28	20.865	299.704	3.55863E-04	15.278	2.30253E-04	.368404
29	21.13	299.704	3.69489E-04	15.329	2.43005E-04	.388809
30	21.355	299.704	3.81082E-04	15.372	2.54122E-04	.406595
B 31	21.585	299.704	3.9398E-04	15.3995	2.65275E-04	.424439
32	21.945	299.704	4.13169E-04	15.4583	2.8371E-04	.453937
33	22.3	299.704	4.32087E-04	15.5162	3.02507E-04	.484011
34	22.78	299.704	4.56247E-04	15.6169	3.29761E-04	.527518
35	23.315	299.704	4.84076E-04	15.715	3.61161E-04	.577858
36	23.655	299.704	5.03464E-04	15.7506	3.80581E-04	.60893
37	23.915	299.704	5.16891E-04	15.7998	3.96896E-04	.635033
38	23.89	299.704	5.15081E-04	15.8032	3.95663E-04	.633061
39	23.875	299.704	5.14528E-04	15.7969	3.94587E-04	.631339
40	23.81	299.704	5.10357E-04	15.7974	3.91075E-04	.62572
41	23.77	299.704	5.08333E-04	15.7892	3.88562E-04	.6217
42	23.75	299.704	5.06932E-04	15.7912	3.87693E-04	.620308
43	23.74	299.704	5.06335E-04	15.7905	3.8703E-04	.619248
44	23.735	299.704	5.06041E-04	15.7902	3.86748E-04	.618797
45	23.73	299.704	5.05975E-04	15.7862	3.86282E-04	.618051
46	23.725	299.704	5.05679E-04	15.7858	3.85996E-04	.617593
47	23.725	299.704	5.05679E-04	15.7858	3.85996E-04	.617593
48	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142
49	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142
50	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142
51	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142
52	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142
53	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142
54	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142
55	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142
56	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142
57	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142
A 58	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142
59	23.72	299.704	5.05384E-04	15.7855	3.85714E-04	.617142



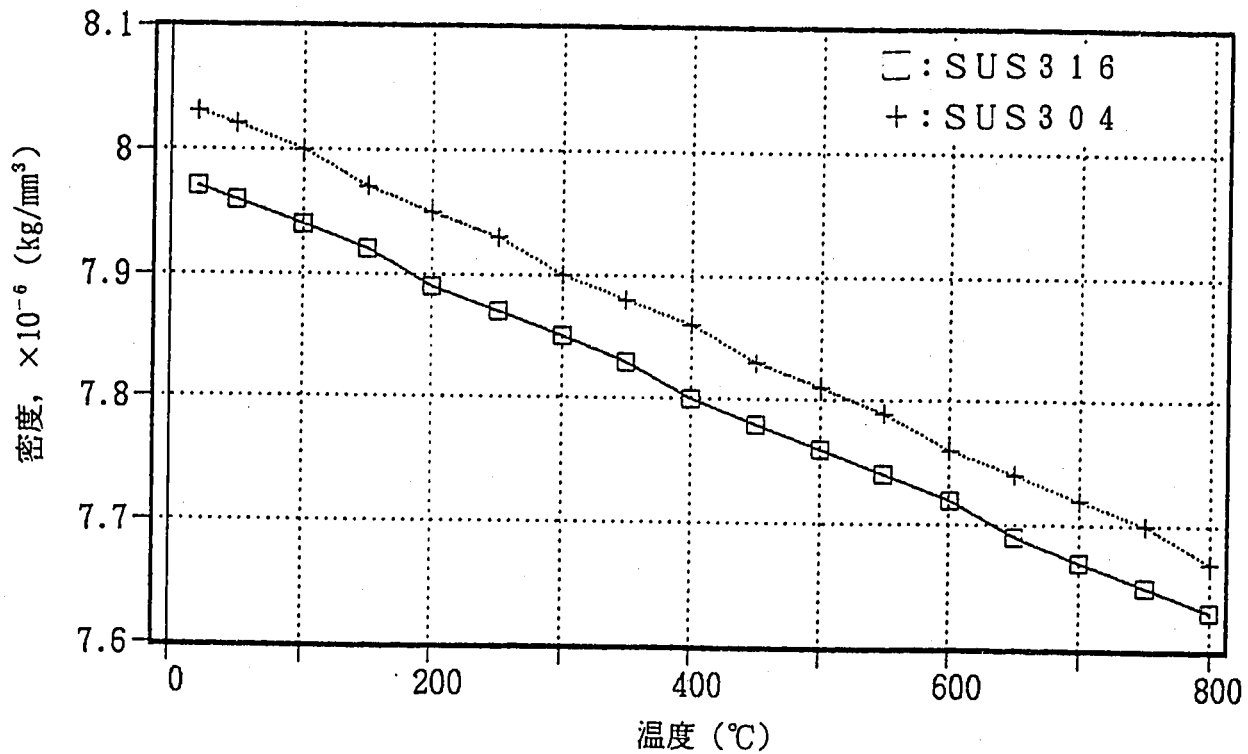


図 5.1 各温度におけるSUS316とSUS304の密度の比較 (絶対値)

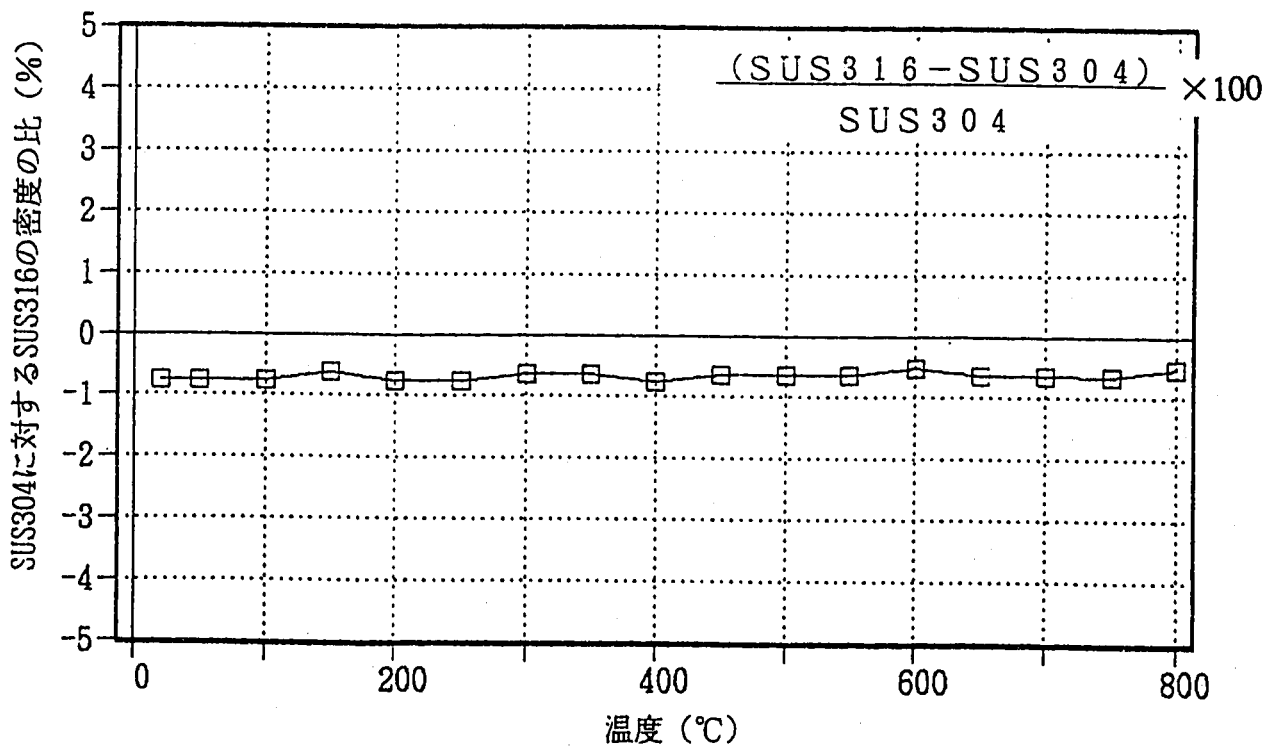


図 5.2 各温度におけるSUS316の密度のSUS304に対する比 (%表示)

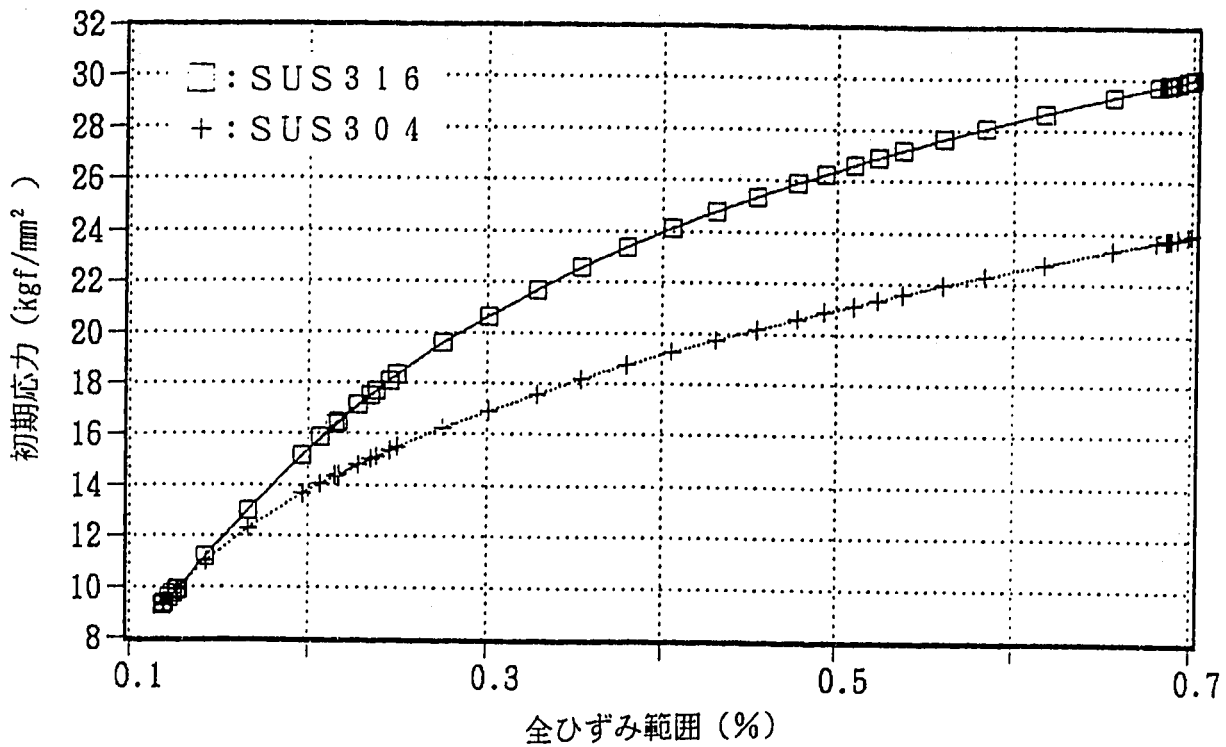


図 5.3 クリープ緩和初期応力計算にSUS316とSUS304それぞれの動的応力-ひずみ関係式を採用した場合の比較 (全ひずみ範囲に対する表示)

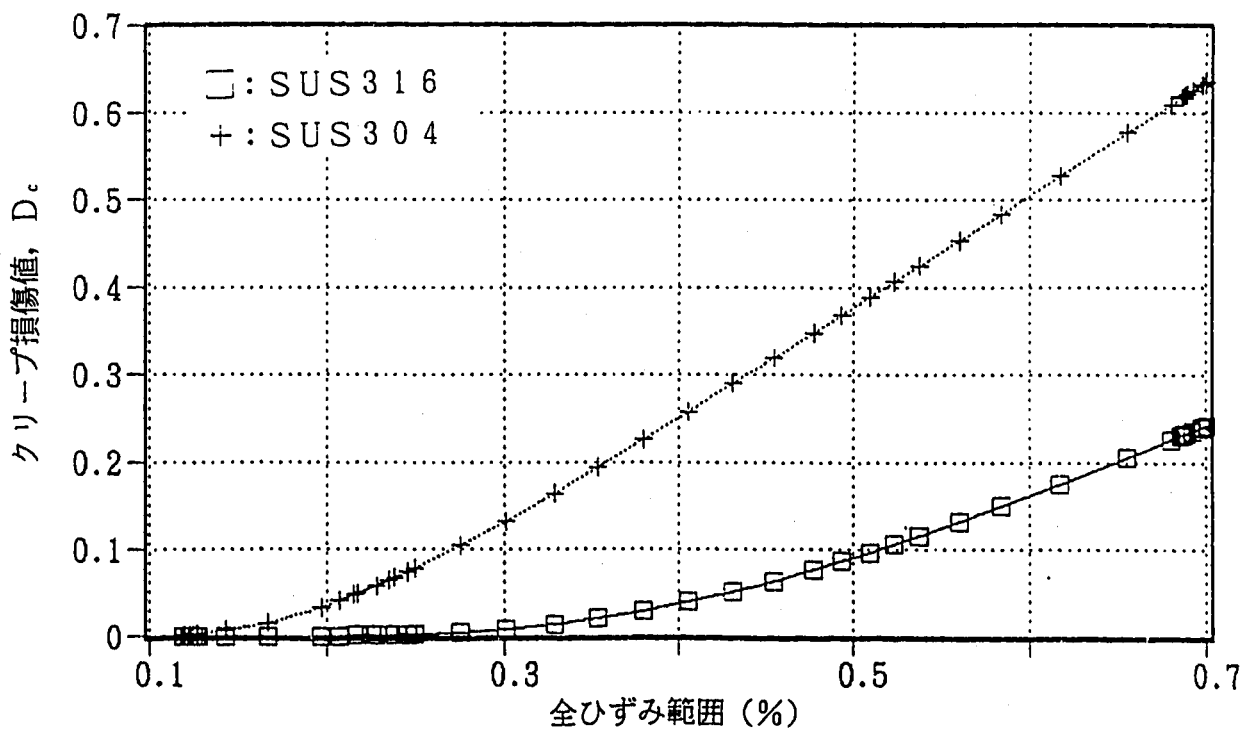


図 5.4 損傷計算にSUS316とSUS304それぞれの特徴式を採用した場合のクリープ損傷値の比較 (1,600サイクル時点; 全ひずみ範囲に対する表示)

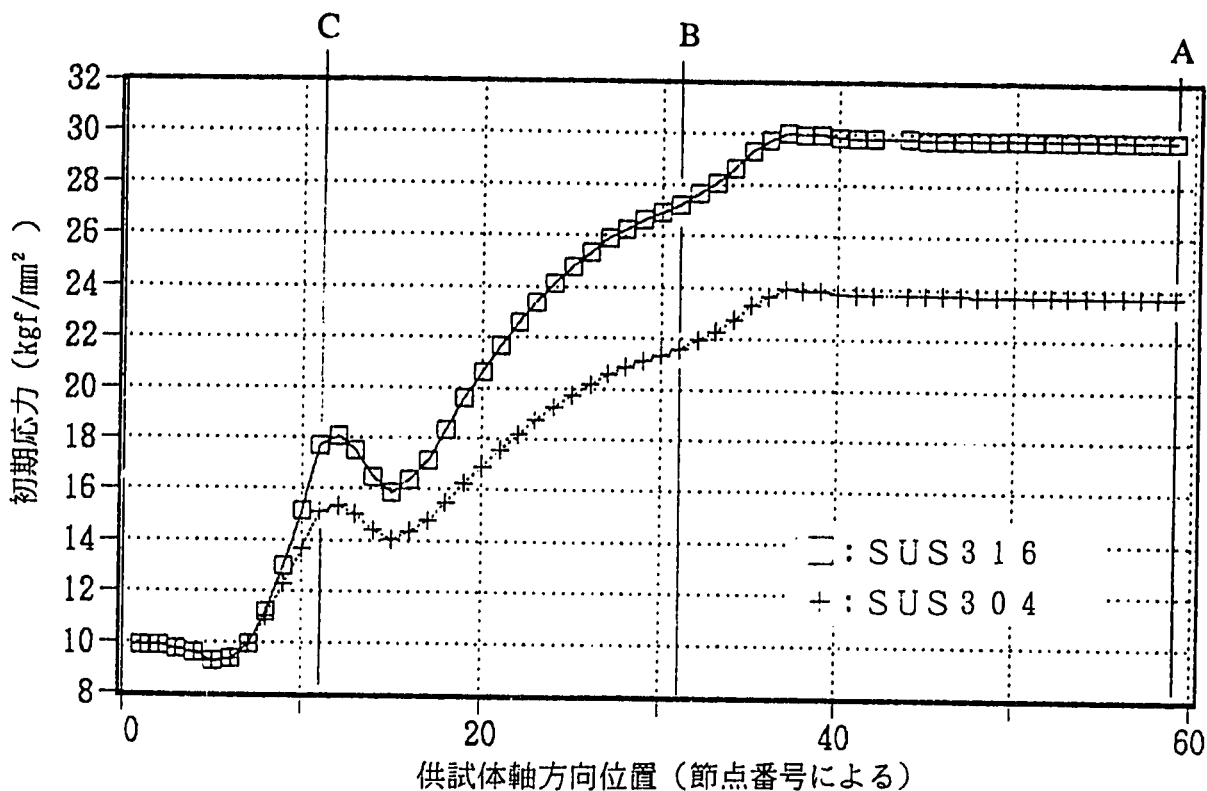


図 5.5 クリープ緩和初期応力計算にSUS316とSUS304それぞれの動的応力-ひずみ関係式を採用した場合の比較（供試体軸方向分布）

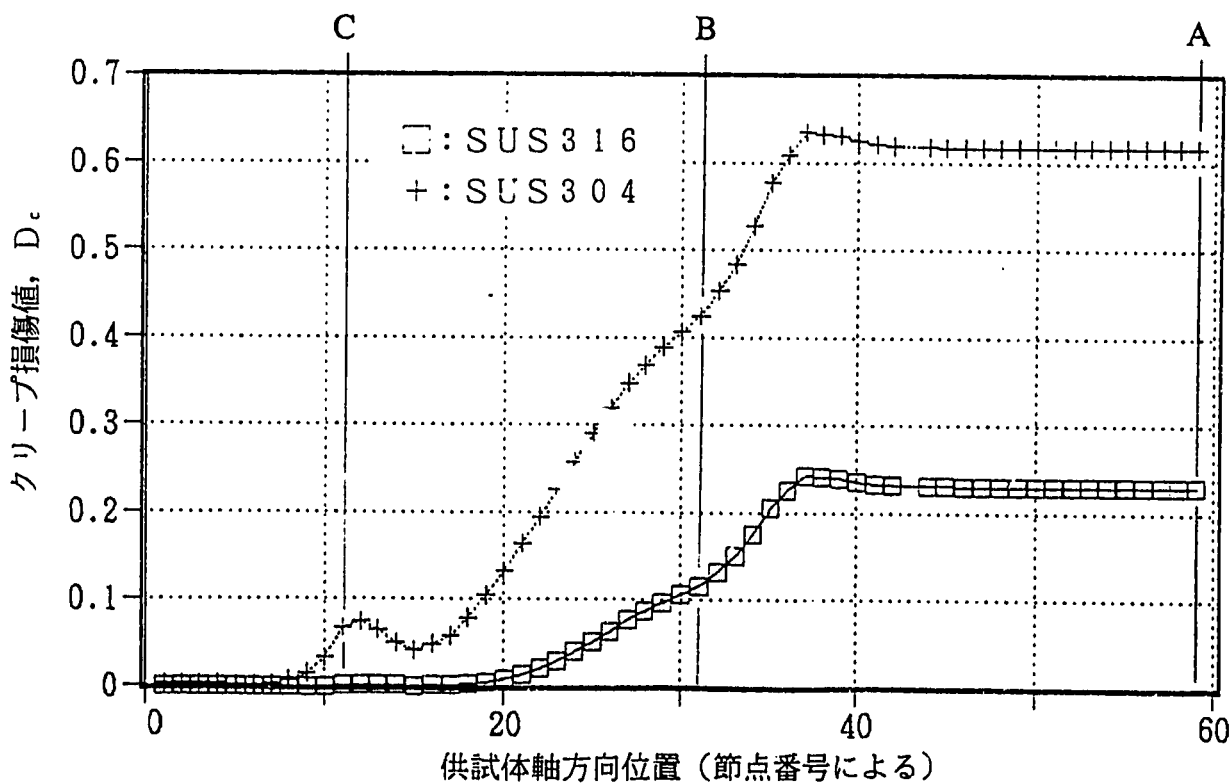


図 5.6 損傷計算にSUS316とSUS304それぞれの特性式を採用した場合のクリープ損傷値の比較（1,600サイクル時点；供試体軸方向分布）

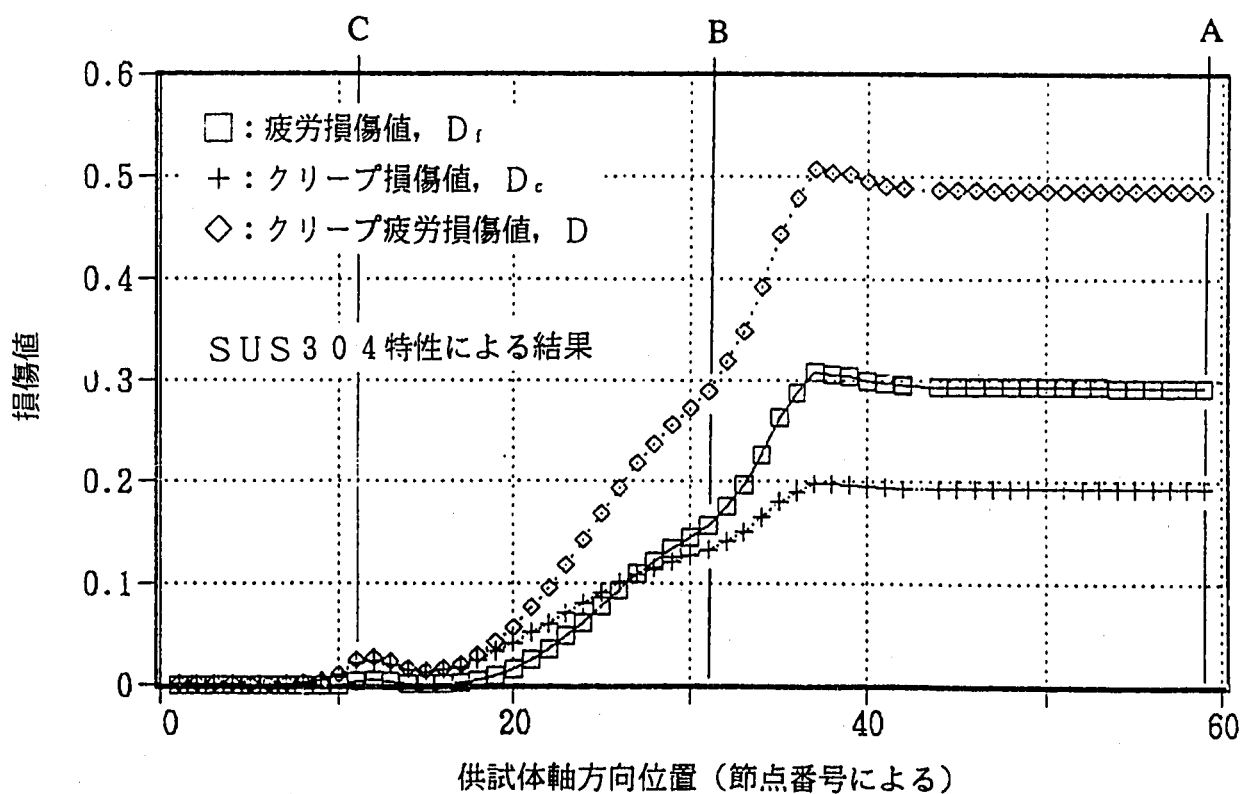
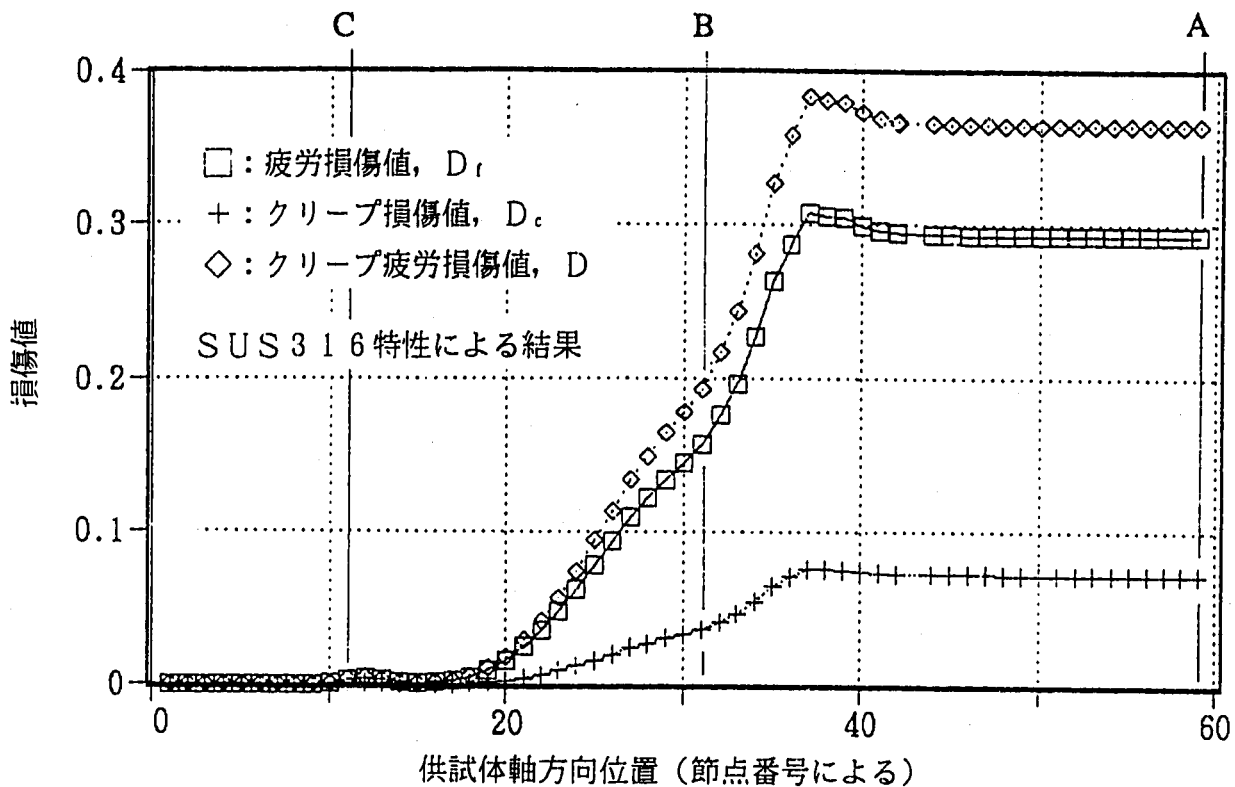


図 5.7 損傷計算にSUS304特性を採用した場合との損傷値比較 (500サイクル時点)

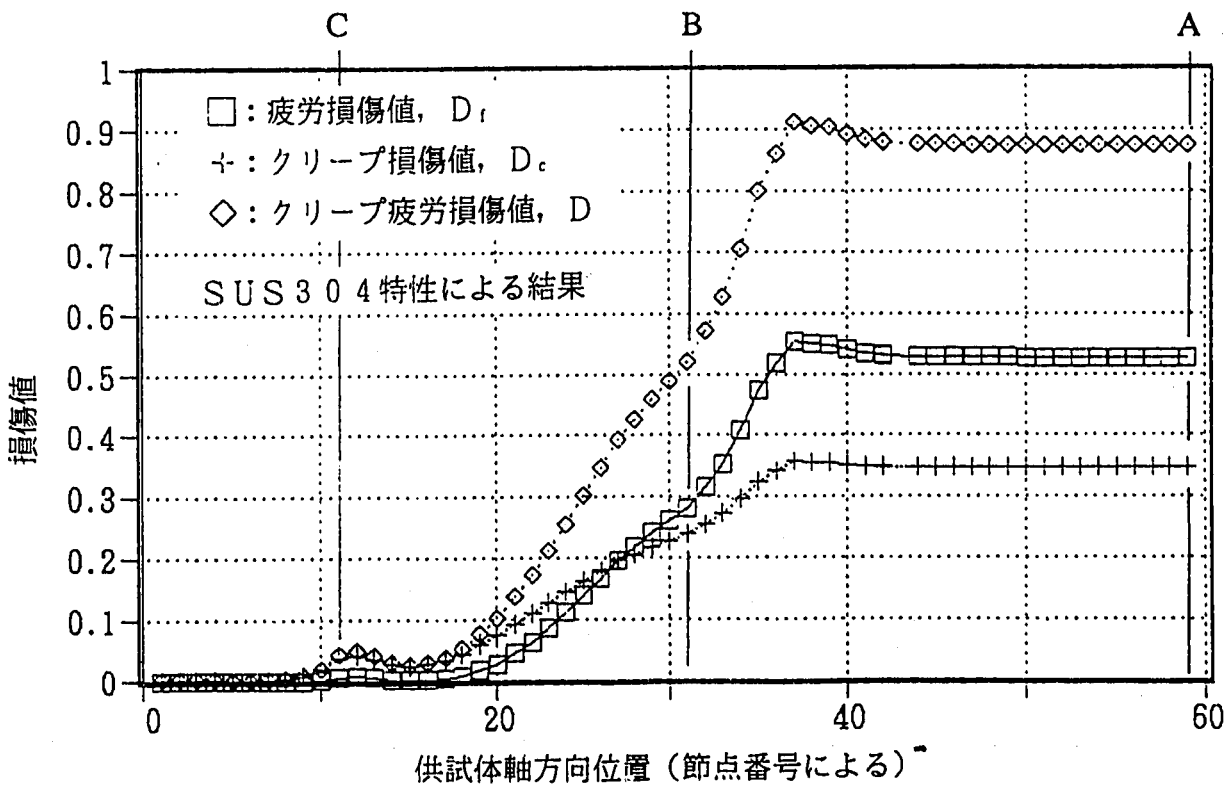
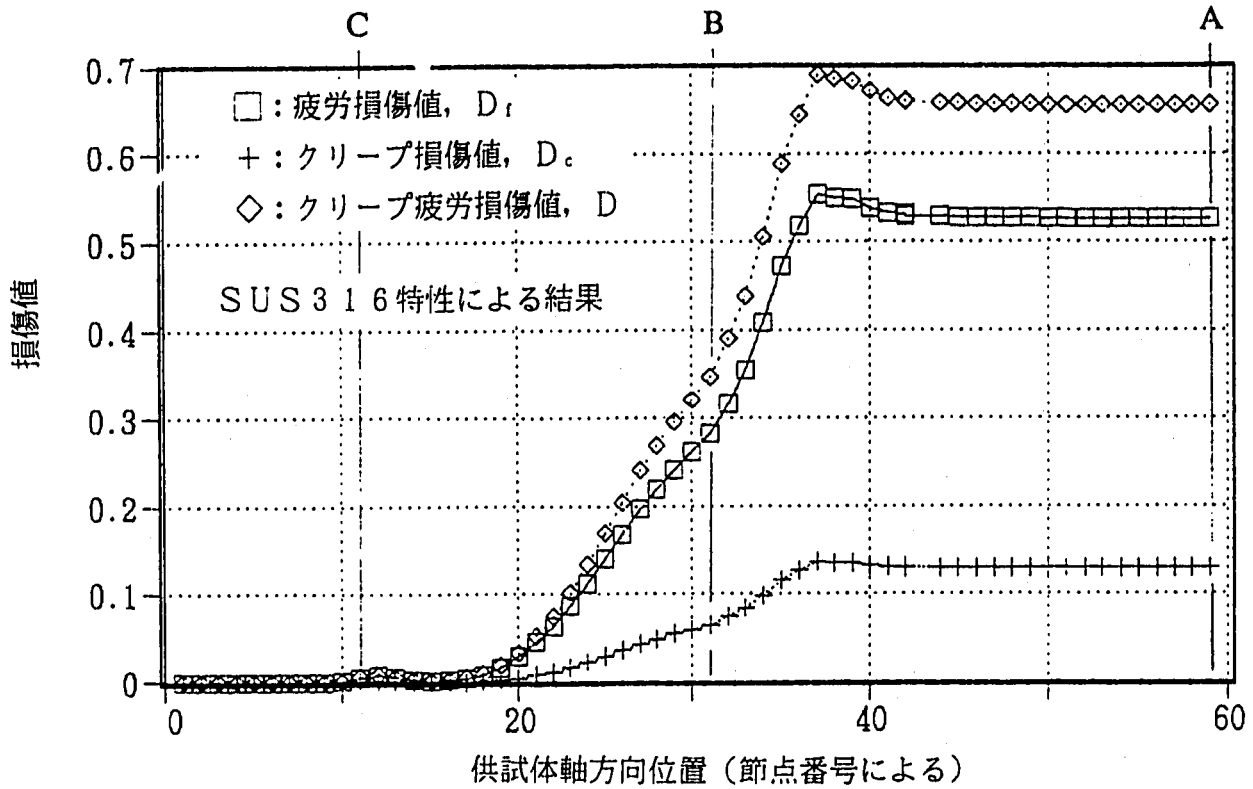


図 5.8 損傷計算にSUS304特性を採用した場合との損傷値比較 (900サイクル時点)

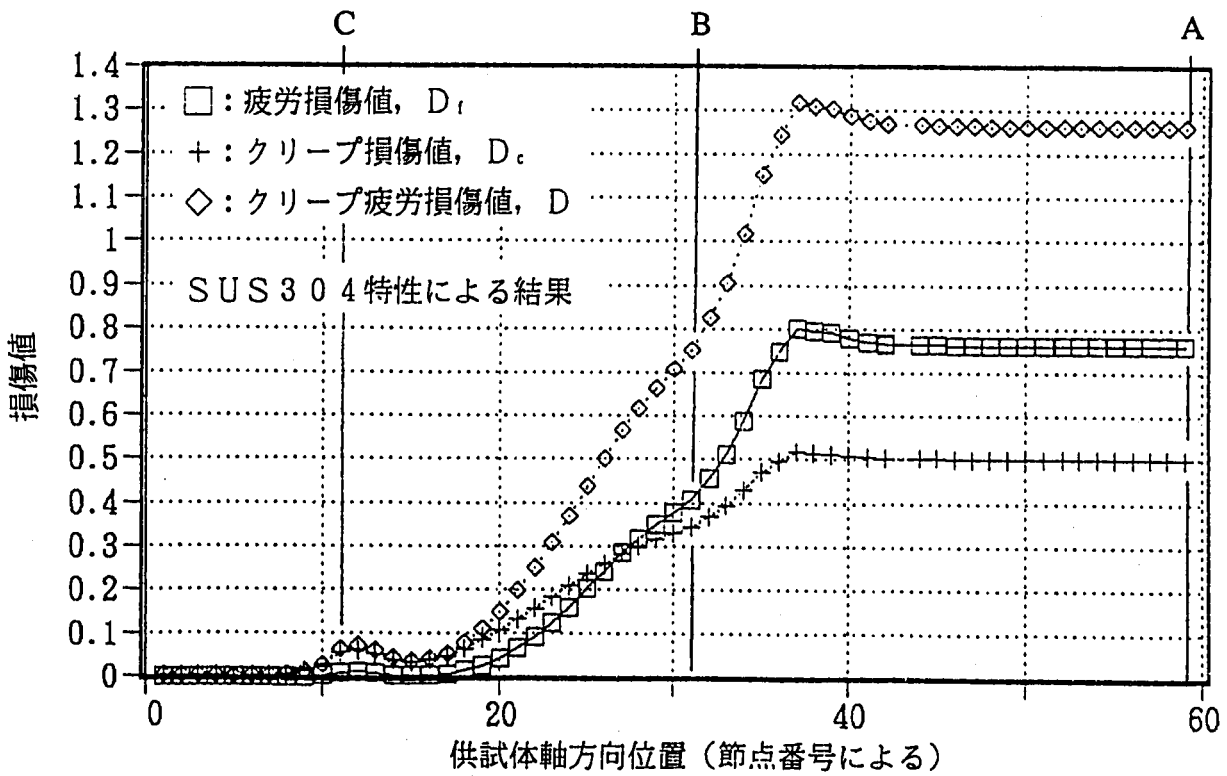
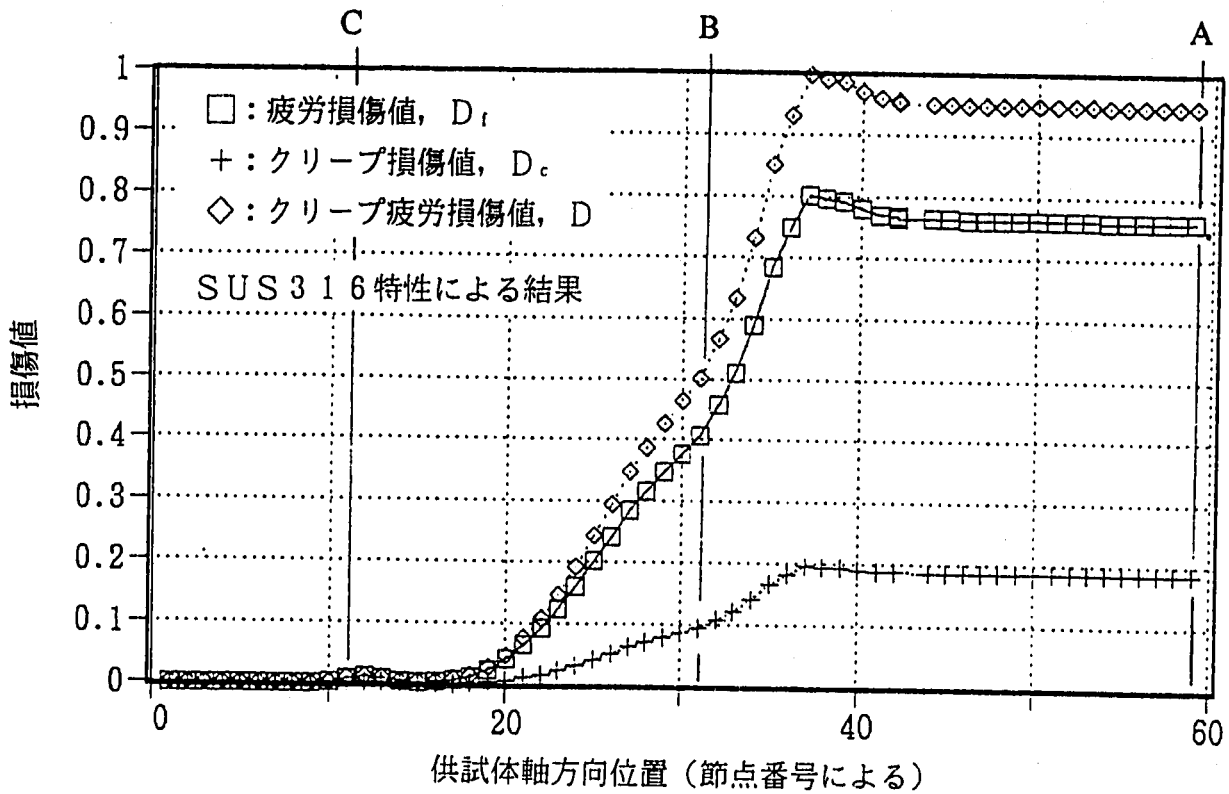


図 5.9 損傷計算にSUS304特性を採用した場合との損傷値比較 (1,300サイクル時点)

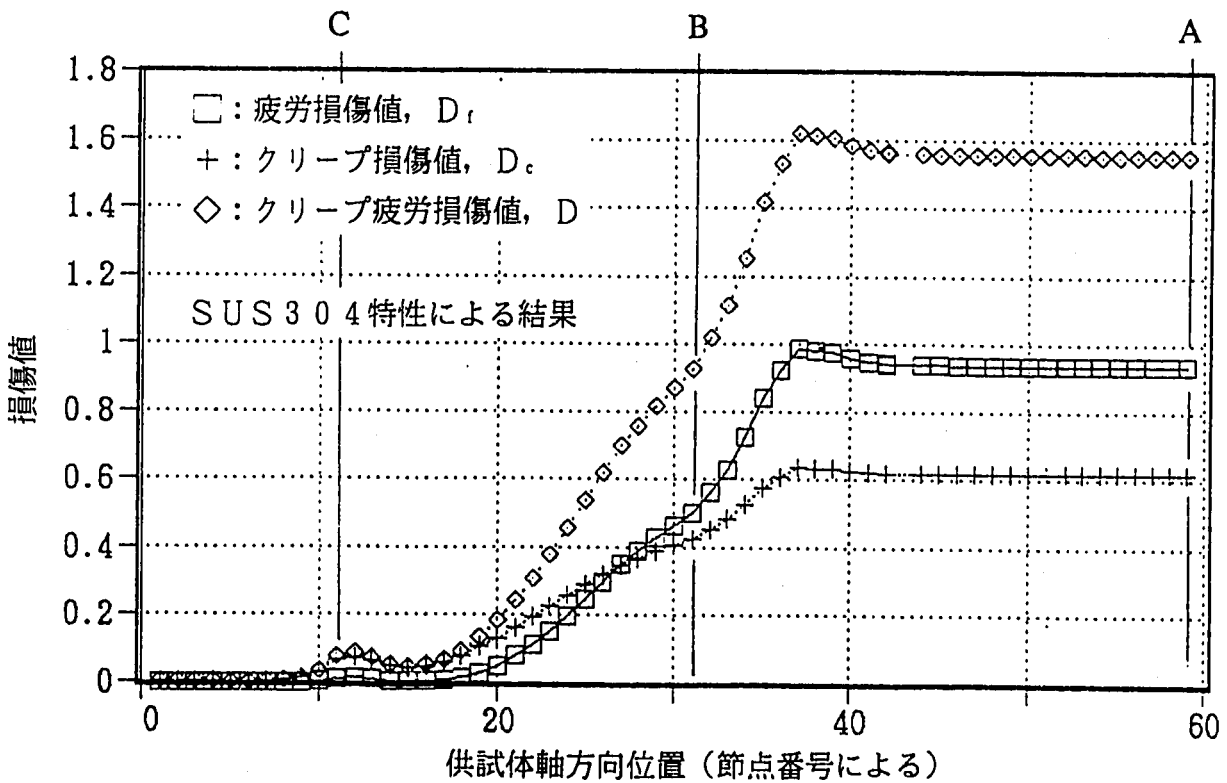
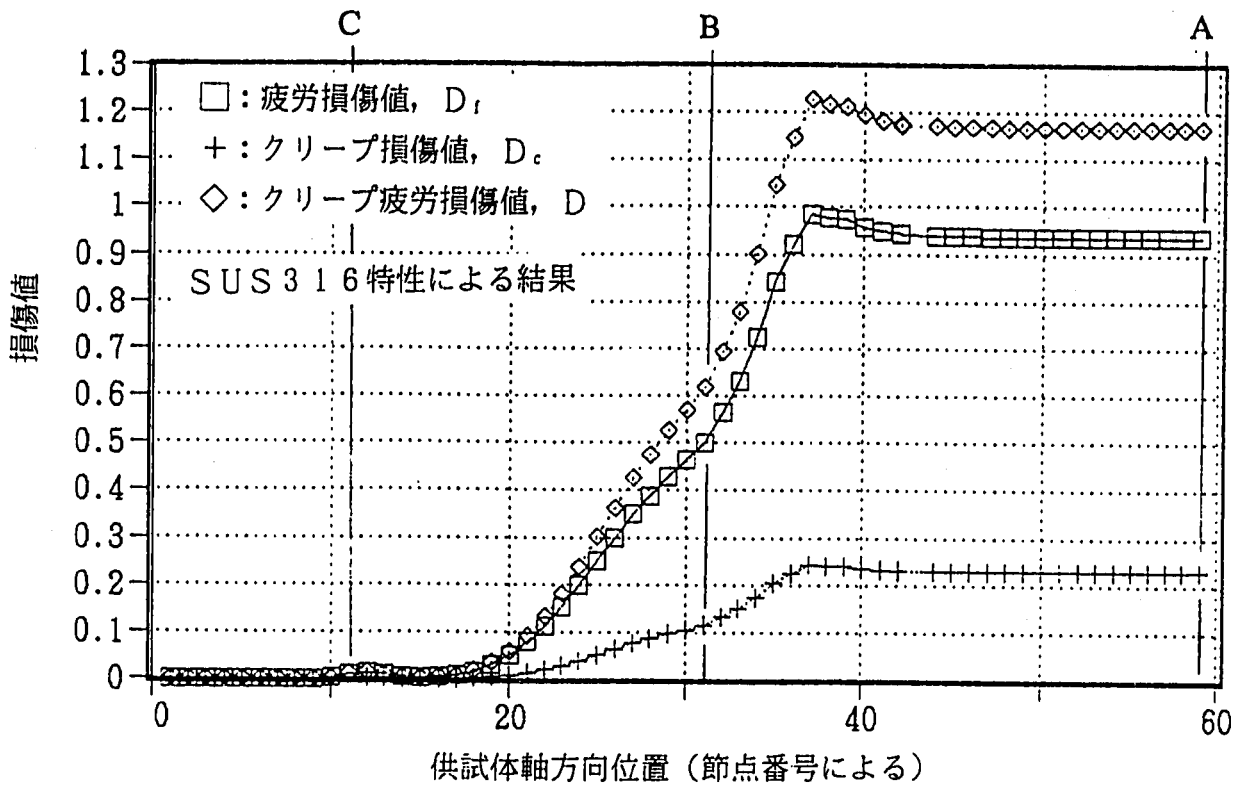


図 5.10 損傷計算にSUS304特性を採用した場合との損傷値比較 (1,600サイクル時点)

## 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高速炉構造用 SUS 316 鋼製の周溶接付き円筒型供試体の熱クリープ疲労き裂発生試験を対象として、伝熱・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、内径53.5mm、板厚20mm、長さ350mmの円筒形状モデルであり、円筒中央部には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時間と1時間ずつ交互に流入させる条件で、熱過渡サイクル数1600回までの繰返し熱過渡試験を実施し、溶接部および一般母材部にき裂の発生を確認している。

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、同種のオーステナイト系ステンレス鋼である SUS 304 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。この結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 試験熱過渡サイクル1600回において、板厚20mmの一般円筒母材部でのクリープ疲労損傷値としては約1.2の値が得られたが、この値はこれまでの SUS 304 鋼母材での実績に基づけばある深さのき裂進展が十分生じうる値であるといえる。
- (2) 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 SUS 304 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考えれば、本供試体厚肉部の溶接継手でも上記母材と同程度以上のき裂進展が生じうると考えられる。
- (3) 上記推定は実際に供試体に観察されたき裂の存在と矛盾しておらず、SUS 304 鋼で開発した手法 (TTSDS) の材料特性データを SUS 316 鋼のものに置き換えることにより、概ね妥当な評価結果が得られる見通しが得られた。

なお、本報では解析・評価に採用する材料特性としては、現時点で高速炉構造用 SUS 316 鋼用として暫定されている各種材料特性式を採用したが、別途、解析・評価の各段階に SUS 304 鋼の材料特性式を採用することで、クリープ疲労破損に対する両鋼の強度比較についても解析的に検討を加えた。

今後、本鋼の母材および溶接継手を含めた熱過渡強度データがさらに蓄積された段階において、今回得られた損傷評価結果を踏まえたさらに詳細な評価検討を行い、本鋼の熱クリープ疲労強度評価法を確立していくことが期待される。

なお、本鋼の溶接継手に関しては現時点では解析および強度評価用の十分なデータ（特に繰返し応力-ひずみ関係の定式化）が得られていないのが現状であるため、早急にデータベースの充実をはかり、定式化を進めることが望まれる。



## 7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、応力・ひずみの計算は、CRC総合研究所(株)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(株)・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) 渡士、佐々木、古橋、小出、岩田 STST熱応力き裂発生試験の解析  
PNC N9410 90-150
- (2) 石崎他 STST熱応力き裂発生試験  
熱過渡試験と解体検査 PNC ZN9410 92-248
- (3) 石崎他 SUS316FR材溶接継手の熱過渡強度試験  
一般部のき裂発生状況とクリープ疲労強度 PNC ZN9410 93-147
- (4) 動燃事業団成果報告書 PNC SN9410 90-139
- (5) 汎用非線形構造解析システム FINAS VERSION 11.0 使用説明書  
PNC N9520 89-019
- (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
- (14) 田中、石崎、菊池、渡士、岩田 STST熱応力き裂発生試験  
-非弾性解析と強度評価- PNC SN9410 92-248

## 付録

付録A	熱伝達係数修正前の伝熱解析結果	85
付録B	弾性熱応力解析結果（熱伝達係数修正後の伝熱解析結果に基づく）	91
付録C	前報の伝熱応力解析結果に基づくクリープ疲労評価の検討	100

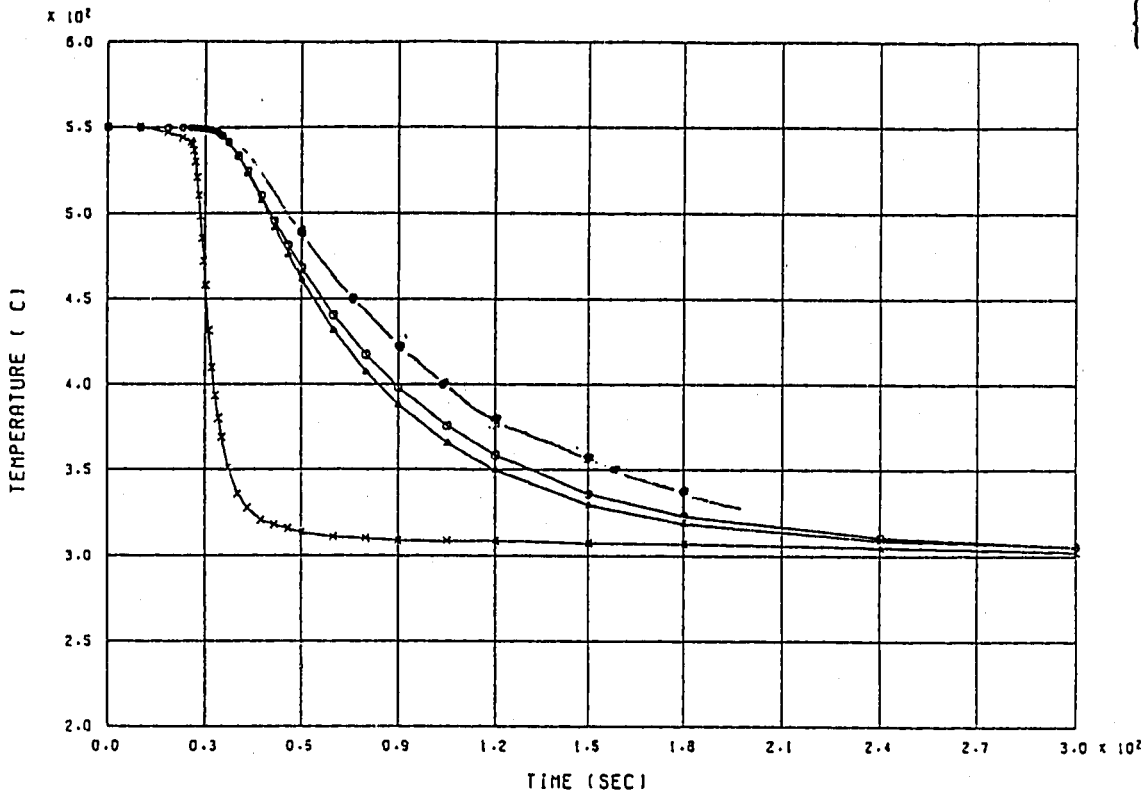
## 付録 A 熱伝達係数修正前の伝熱解析結果

- 付図 A-1 温度時刻歴解析結果 (トランジェント初期の300秒; ラインA, B, C, 外面)
- 付図 A-2 温度時刻歴解析結果 (トランジェント初期の300秒; ラインA, B, C, 内面)
- 付図 A-3 温度時刻歴解析結果 (1サイクル; ラインAの内外面と板厚中央)
- 付図 A-4 温度時刻歴解析結果 (1サイクル; ラインBの内外面と板厚中央)
- 付図 A-5 温度時刻歴解析結果 (1サイクル; ラインCの内外面と板厚中央)
- 付図 A-6 温度コンター図 (コールドトランジェント60秒後)
- 付図 A-7 温度コンター図 (コールドトランジェント150秒後)
- 付図 A-8 温度コンター図 (コールドトランジェント500秒後)
- 付図 A-9 温度コンター図 (ホットトランジェント60秒後)
- 付図 A-10 温度コンター図 (ホットトランジェント150秒後)
- 付図 A-11 温度コンター図 (ホットトランジェント500秒後)

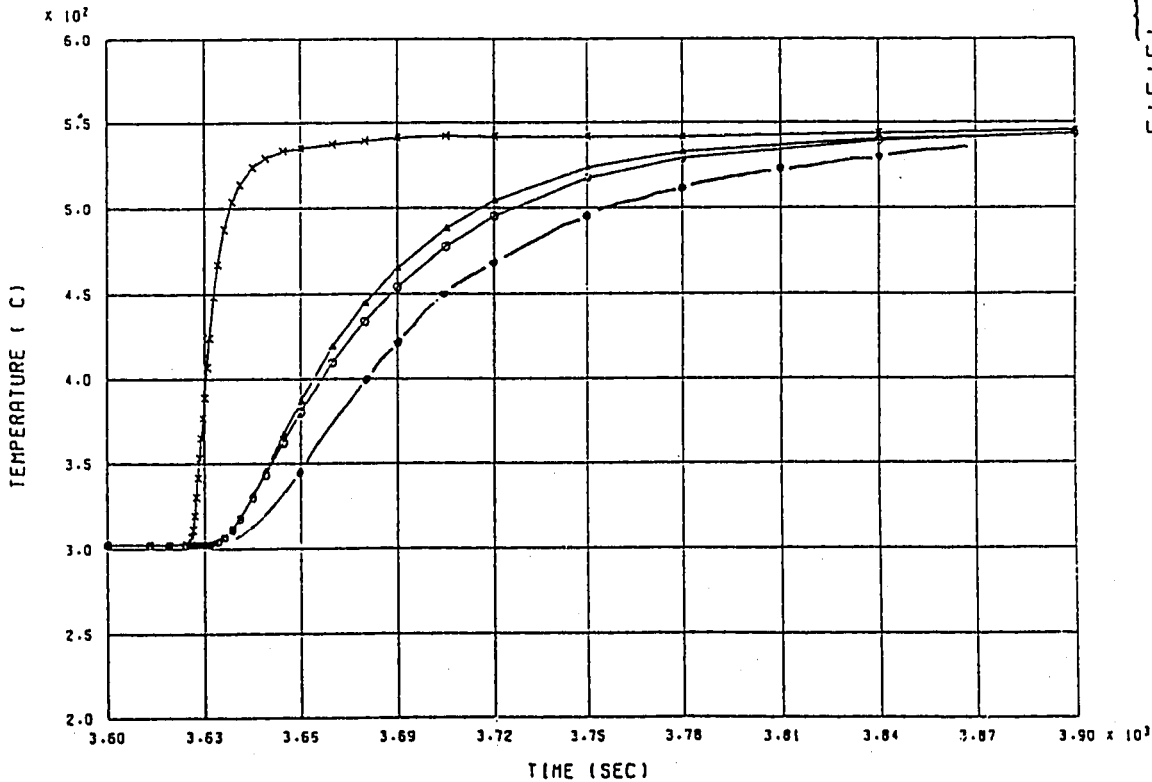
付録Aには本文第3章に掲載した伝熱解析結果に対して、熱伝達係数値として前報で採用された値(付表C-1参照)をそのまま用いて得られた伝熱解析結果を示した。前報の解析条件と主な解析結果に対する若干の検討は付録Cに示している。

この伝熱解析結果では、本文第3章で述べたとおり、試験で実測された温度応答よりも早めに変化する傾向となっていたため、最終的には熱伝達係数を本文表3.1に示した値に低下させて解析を行った。

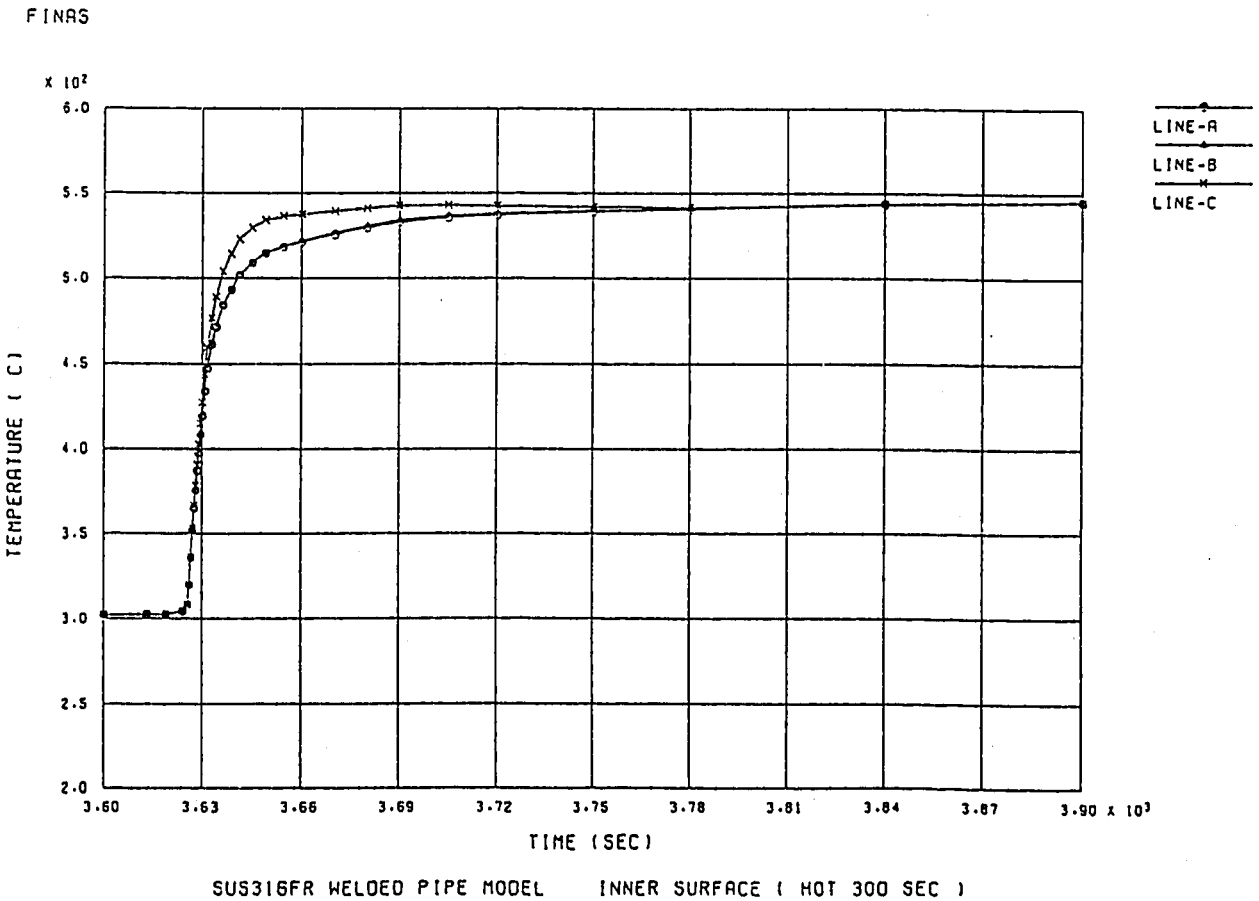
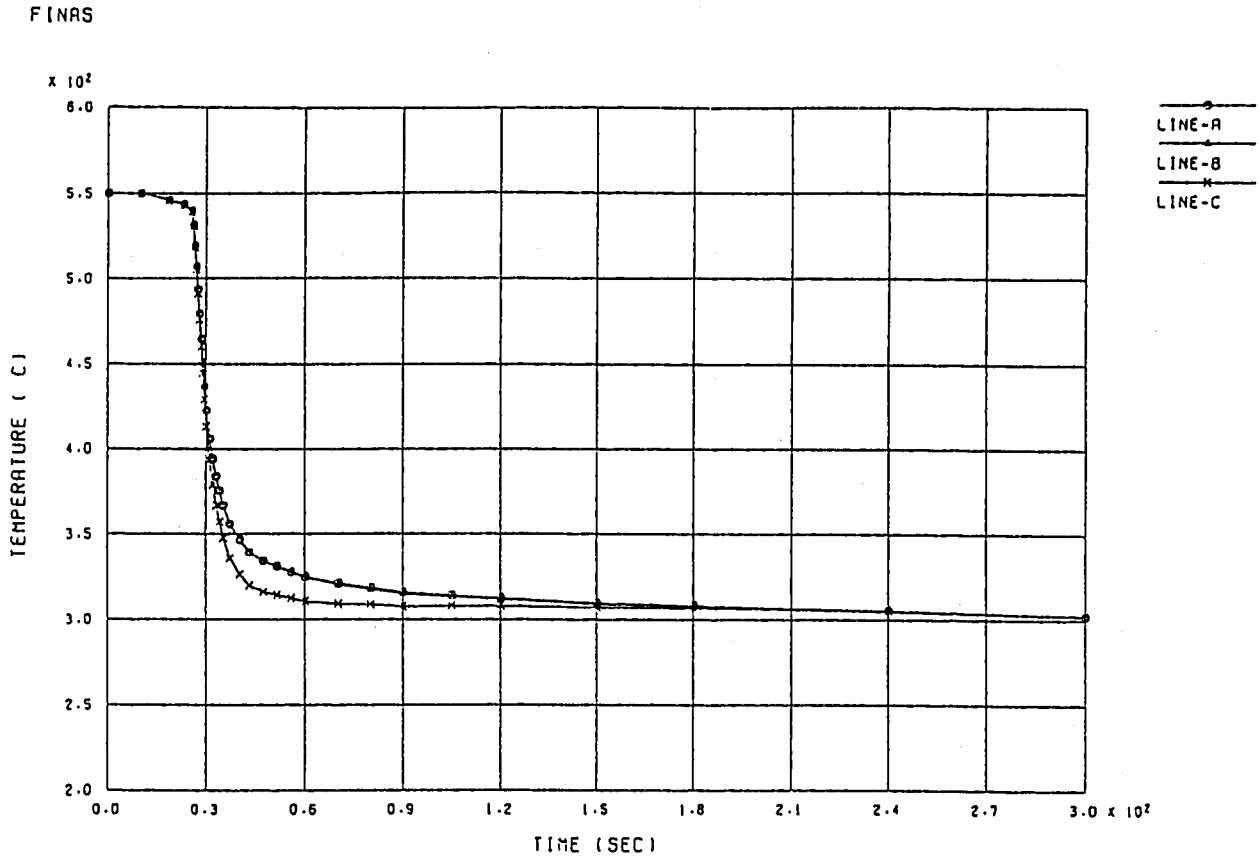
FINAS



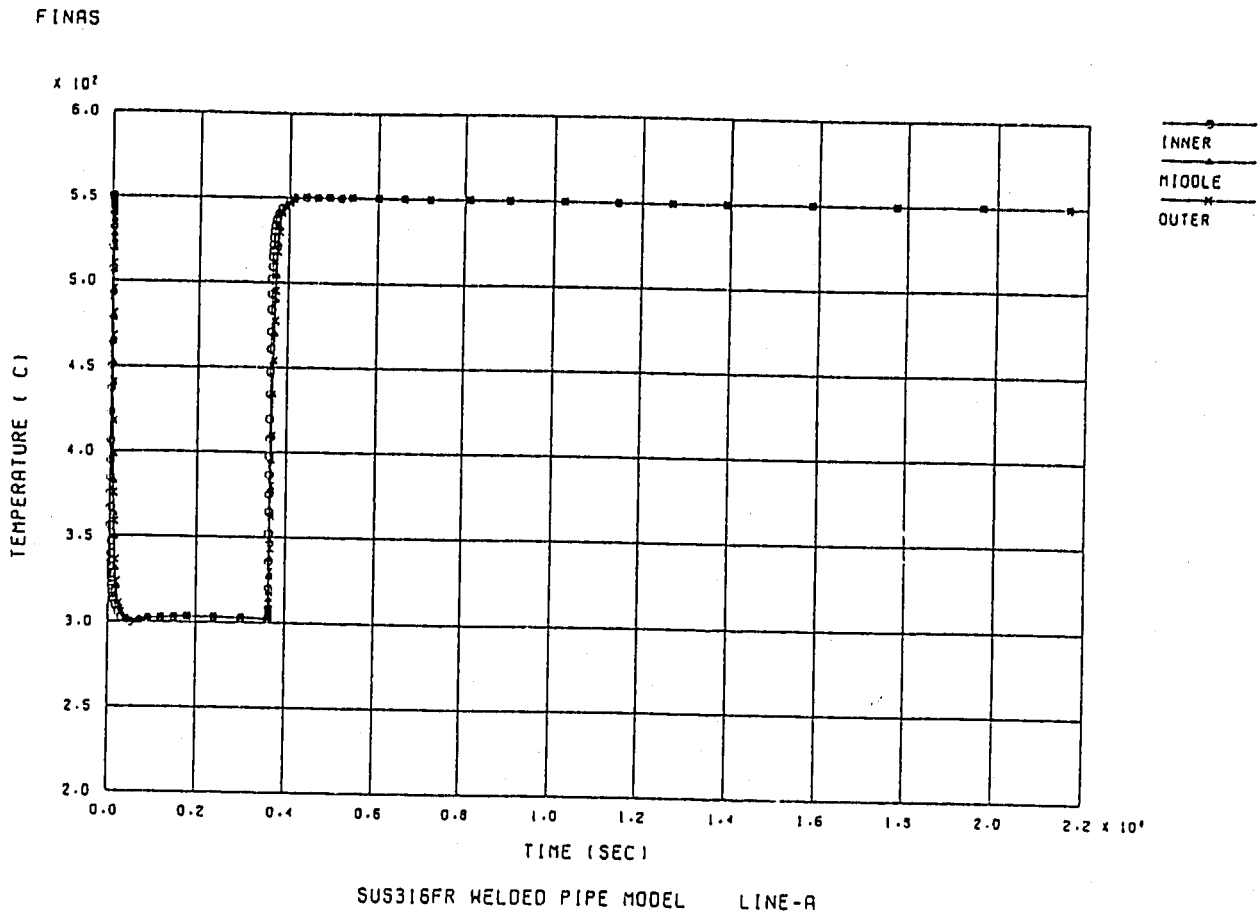
FINAS



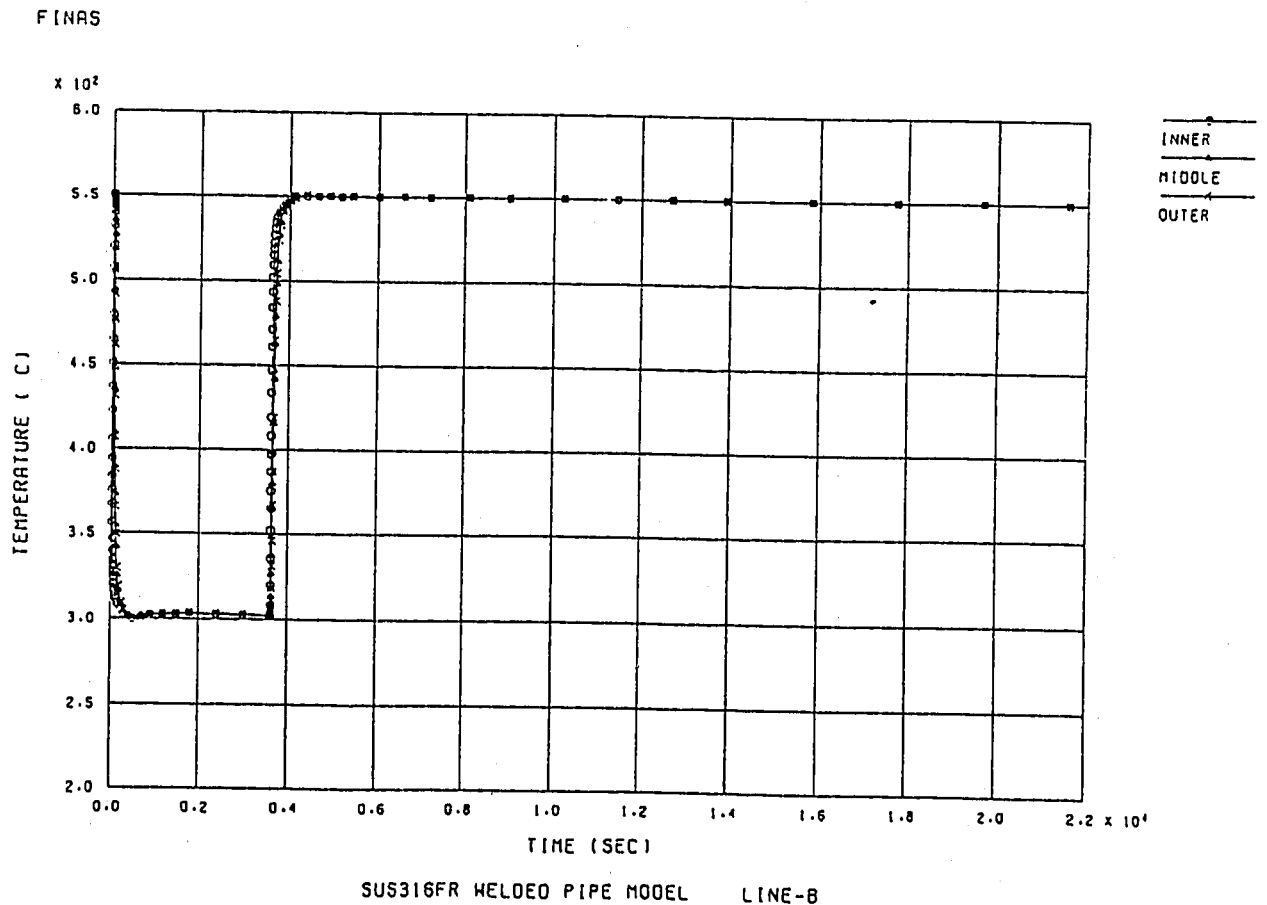
付図 A-1 温度時刻歴解析結果 (トランジェント初期の300秒; ラインA, B, C, 外面)  
 —供試体内表面~ナトリウム熱伝達係数修正前—



付図 A-2 温度時刻歴解析結果 (トランジェント初期の300秒; ラインA, B, C, 内面)

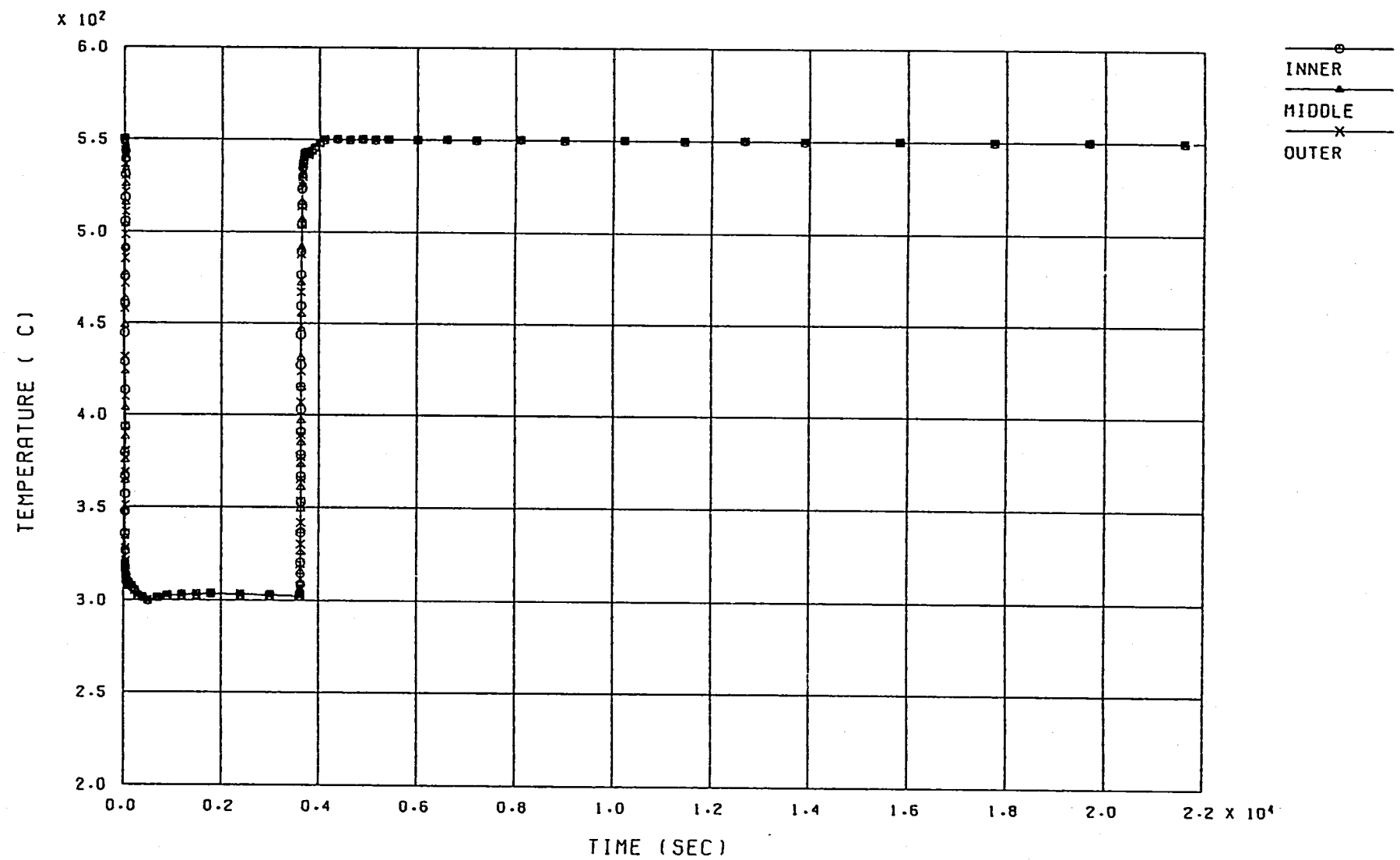


付図 A-3 温度時刻歴解析結果 (1 サイクル; ライン A の内外面と板厚中央)



付図 A-4 温度時刻歴解析結果 (1 サイクル; ライン B の内外面と板厚中央)

FINAS



SUS316FR WELDED PIPE MODEL LINE-C

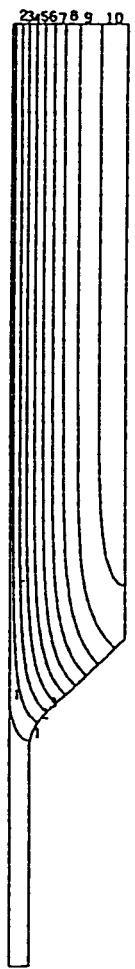
付図 A-5 温度時刻歴解析結果 (1サイクル; ラインCの内外面と板厚中央)



FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	317.0000
2	333.0000
3	349.0000
4	365.0000
5	381.0000
6	397.0000
7	413.0000
8	429.0000
9	445.0000
10	461.0000



STEP NO. 26

GEOM. SCALE 20.0000

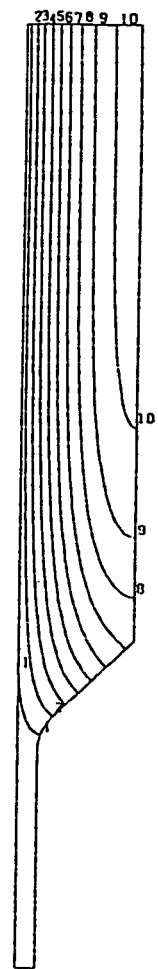
SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( COLD SHOCK 60 SEC )

付図 A-6 温度コンター図 (コールドトランジェント60秒後)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	308.6000
2	311.5000
3	314.4000
4	317.3000
5	320.2000
6	323.1000
7	326.0000
8	328.9000
9	331.8000
10	334.7000



STEP NO. 32

GEOM. SCALE 20.0000

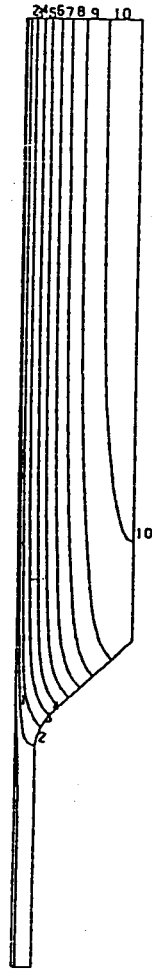
SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( COLD SHOCK 150 SEC )

付図 A-7 温度コンター図 (コールドトランジェント150秒後)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	299.9140
2	300.0060
3	300.0980
4	300.1900
5	300.2820
6	300.3740
7	300.4660
8	300.5580
9	300.6500
10	300.7420



STEP NO. 37

GEOM. SCALE 20.0000

SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( COLD SHOCK 500 SEC )

付図 A-8 温度コンター図 (コールドトランジェント 500秒後)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	388.0000
2	404.0000
3	420.0000
4	436.0000
5	452.0000
6	468.0000
7	484.0000
8	500.0000
9	516.0000
10	532.0000



STEP NO. 69

GEOM. SCALE 20.0000

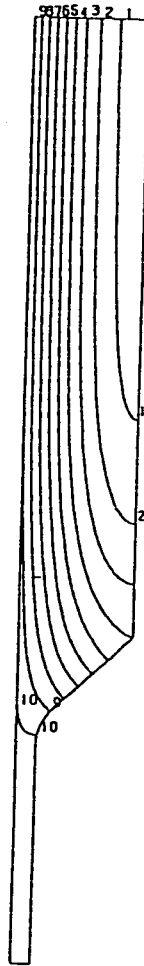
SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( HOT SHOCK 60 SEC )

付図 A-9 温度コンター図 (ホットトランジェント 60秒後)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	518.8000
2	521.3000
3	523.8000
4	526.3000
5	528.8000
6	531.3000
7	533.8000
8	536.3000
9	538.8000
10	541.3000



STEP NO. 75

GEOM. SCALE 20.0000

SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( HOT SHOCK 150 SEC )

付図 A-10 温度コンター図 (ホットランジェント 150秒後)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	548.7900
2	549.9100
3	549.0300
4	549.1500
5	549.2700
6	549.3900
7	549.5100
8	549.6300
9	549.7500
10	549.8700



STEP NO. 80

GEOM. SCALE 20.0000

SUS316FR WELDED PIPE MODEL ( HOT SHOCK 500 SEC )

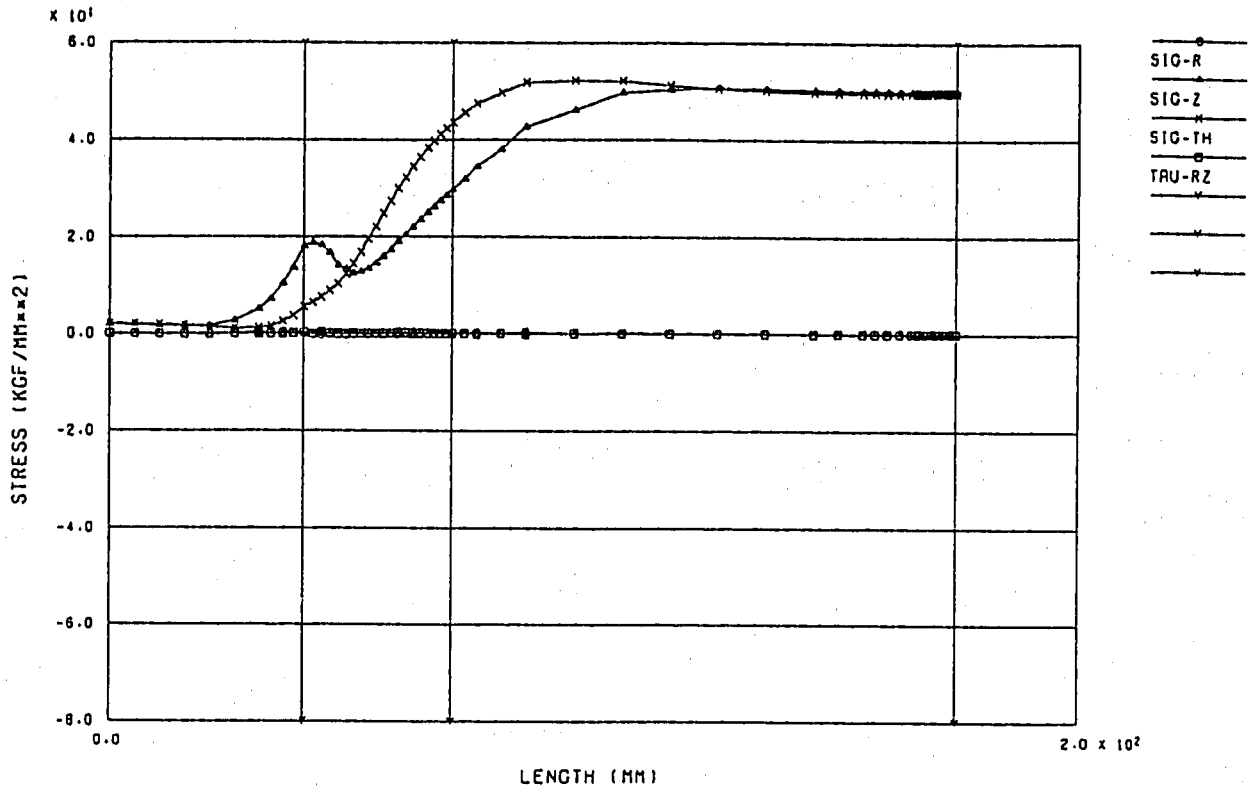
付図 A-11 温度コンター図 (ホットランジェント 500秒後)

## 付録 B 弾性熱応力解析結果

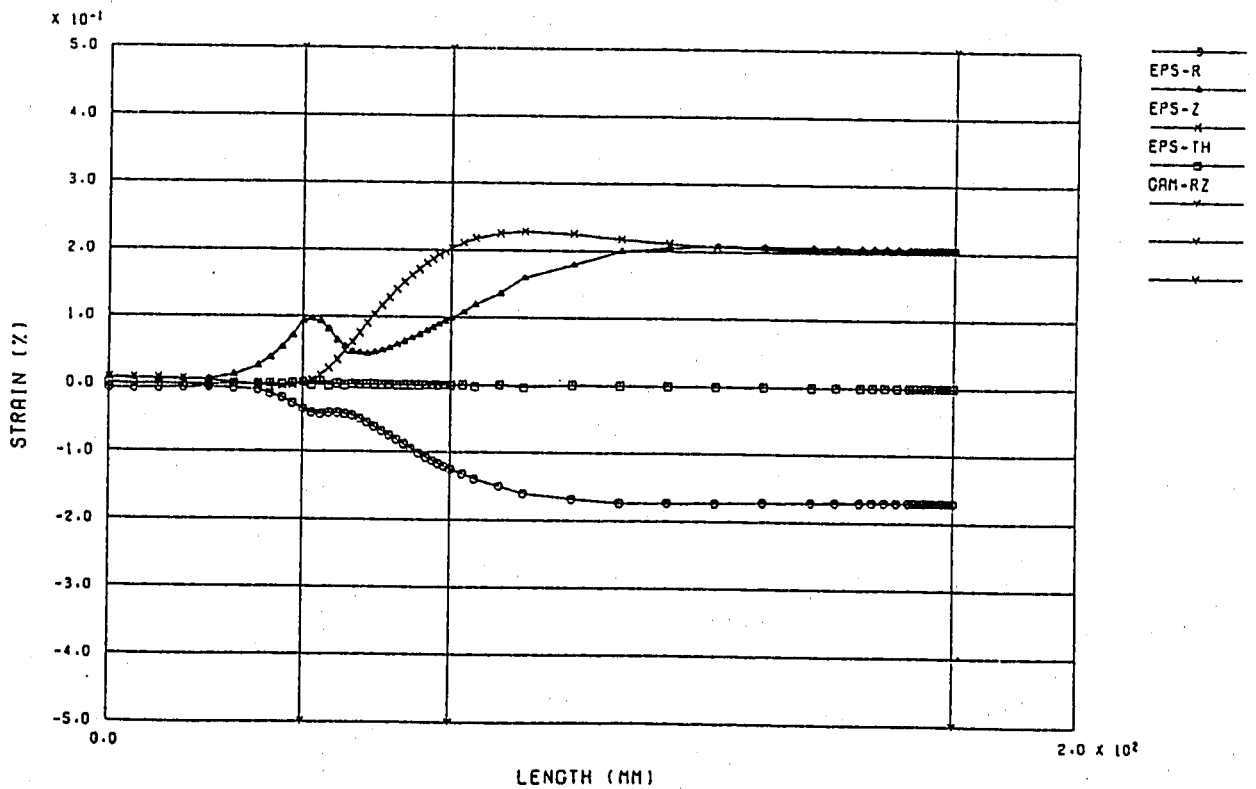
(熱伝達係数修正後の伝熱解析結果に基づく)

- 付図 B-1 供試体内表面の応力、ひずみ各座標成分の軸方向分布 (コールド 4 3 秒)
- 付図 B-2 供試体外表面の応力、ひずみ各座標成分の軸方向分布 (コールド 4 3 秒)
- 付図 B-3 供試体内表面の応力、ひずみ各座標成分の軸方向分布 (ホット 4 5 秒)
- 付図 B-4 供試体外表面の応力、ひずみ各座標成分の軸方向分布 (ホット 4 5 秒)
- 付図 B-5 供試体内表面の軸方向応力、ひずみの極 2 時点における軸方向分布
- 付図 B-6 供試体内表面の周方向応力、ひずみの極 2 時点における軸方向分布
- 付図 B-7 供試体外表面の軸方向応力、ひずみの極 2 時点における軸方向分布
- 付図 B-8 供試体外表面の周方向応力、ひずみの極 2 時点における軸方向分布

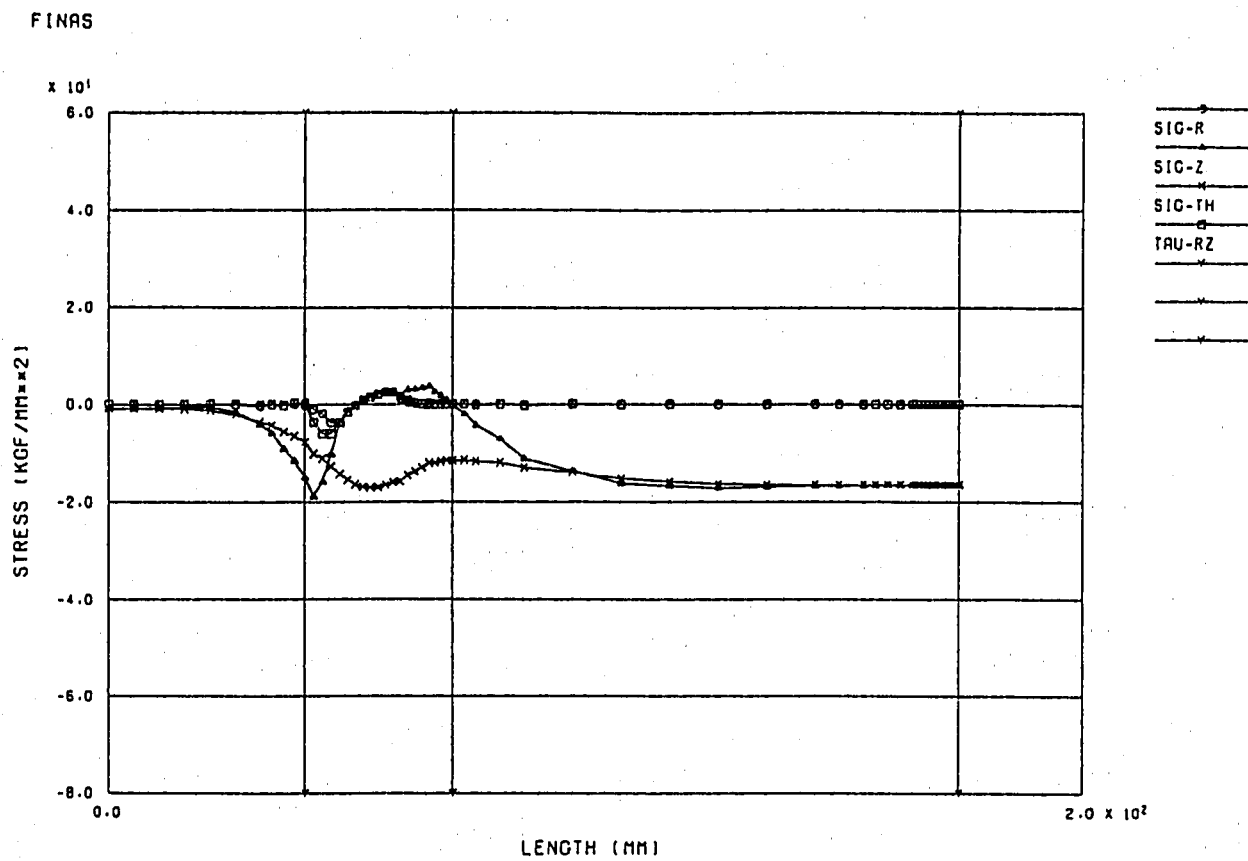
FINAS



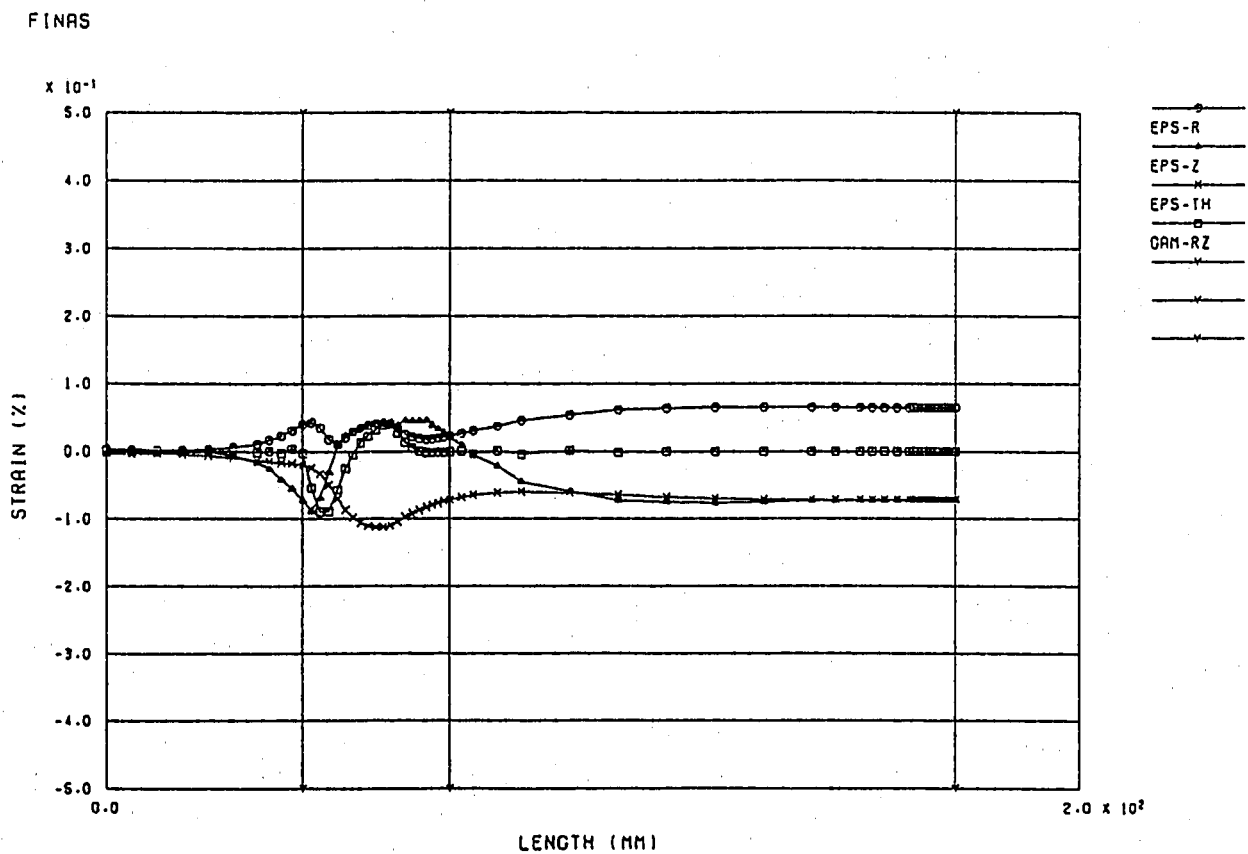
FINAS



付図 B-1 供試体内表面の応力、ひずみ各座標成分の軸方向分布 (コールド43秒)

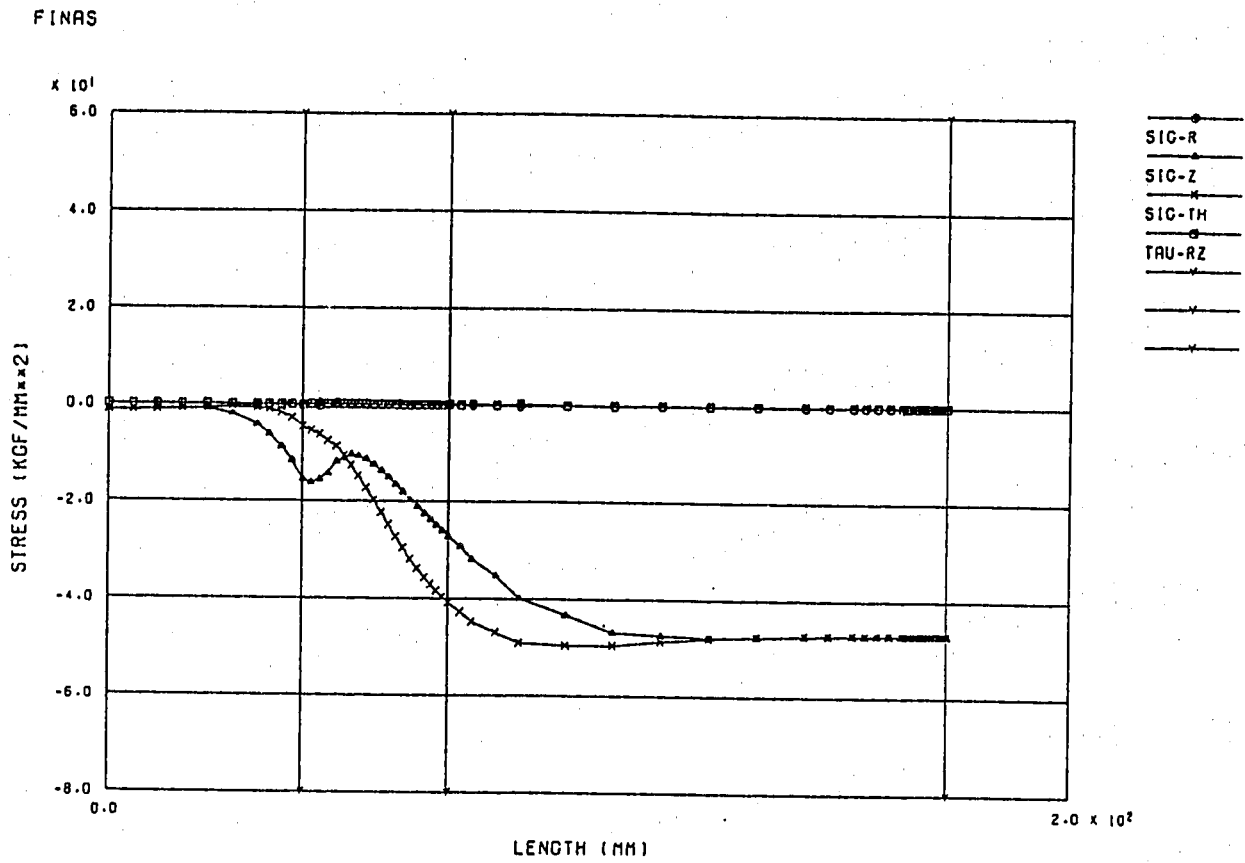


SUS316FR (E) WELDED PIPE STRESS DIST. ALONG FACE-2 (COLD 43 SEC)

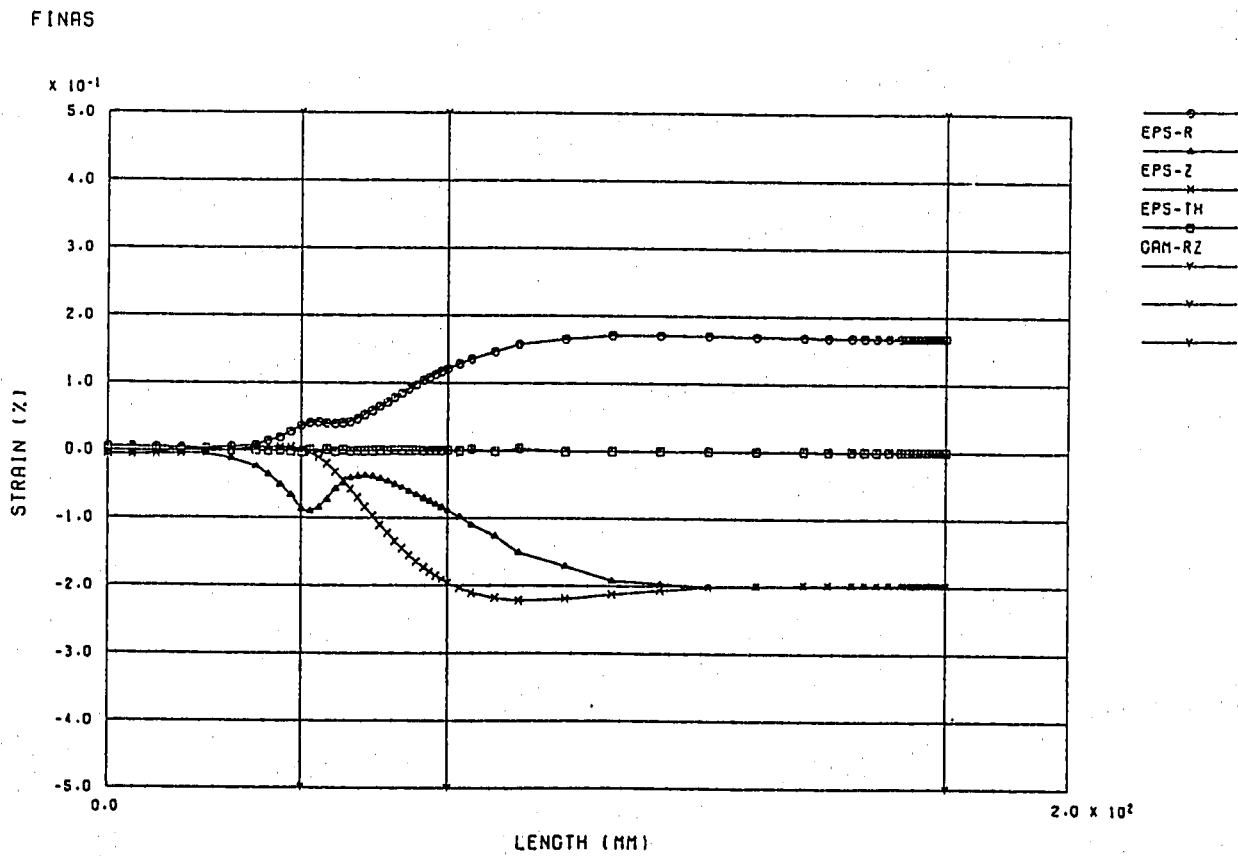


SUS316FR (E) WELDED PIPE STRAIN DIST. ALONG FACE-2 (COLD 43 SEC)

付図 B-2 供試体外表面の応力、ひずみ各座標成分の軸方向分布 (コールド43秒)

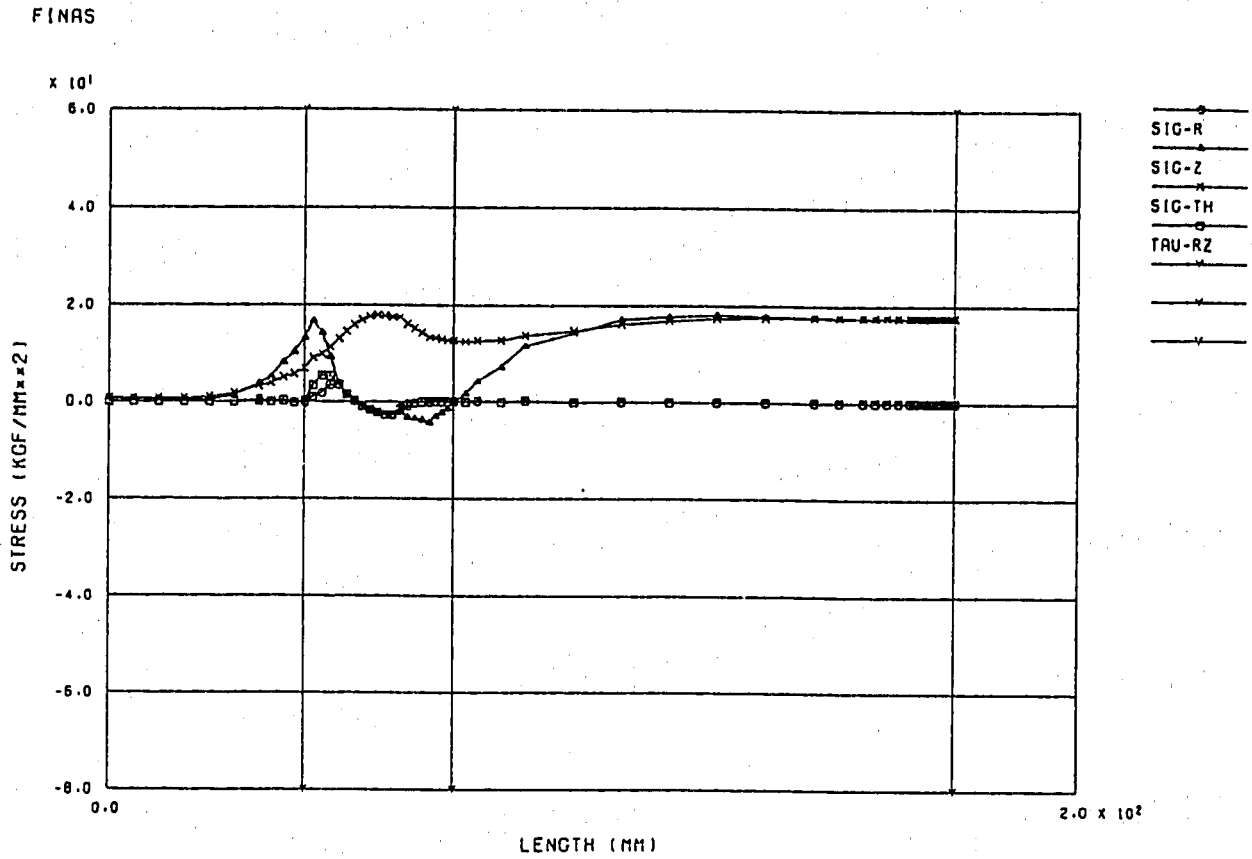


SUS316FR (E) WELDED PIPE STRESS DIST. ALONG FACE-1 (HOT 45 SEC)

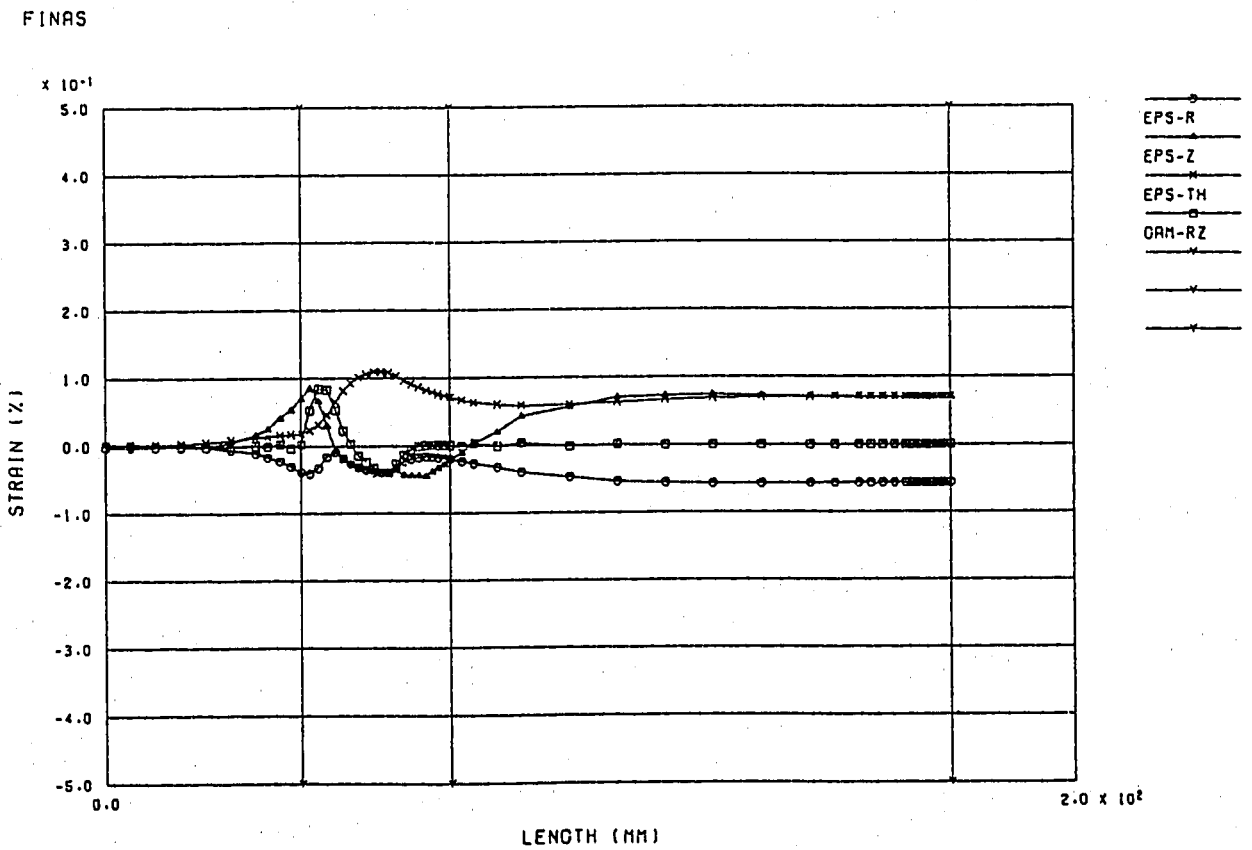


SUS316FR (E) WELDED PIPE STRAIN DIST. ALONG FACE-1 (HOT 45 SEC)

付図 B-3 供試体内表面の応力、ひずみ各座標成分の軸方向分布 (ホット 45 秒)



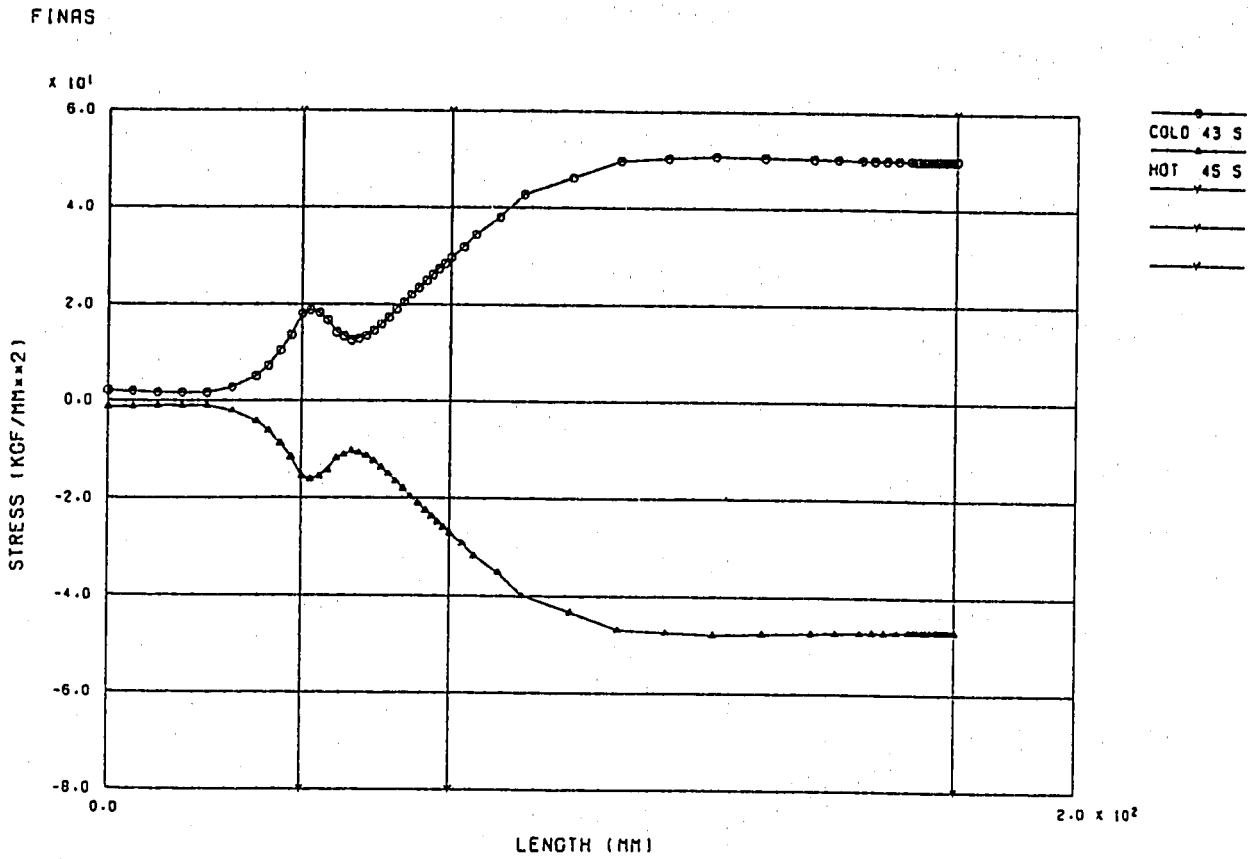
SUS316FR (E) WELDED PIPE STRESS DIST. ALONG FACE-2 (HOT 45 SEC)



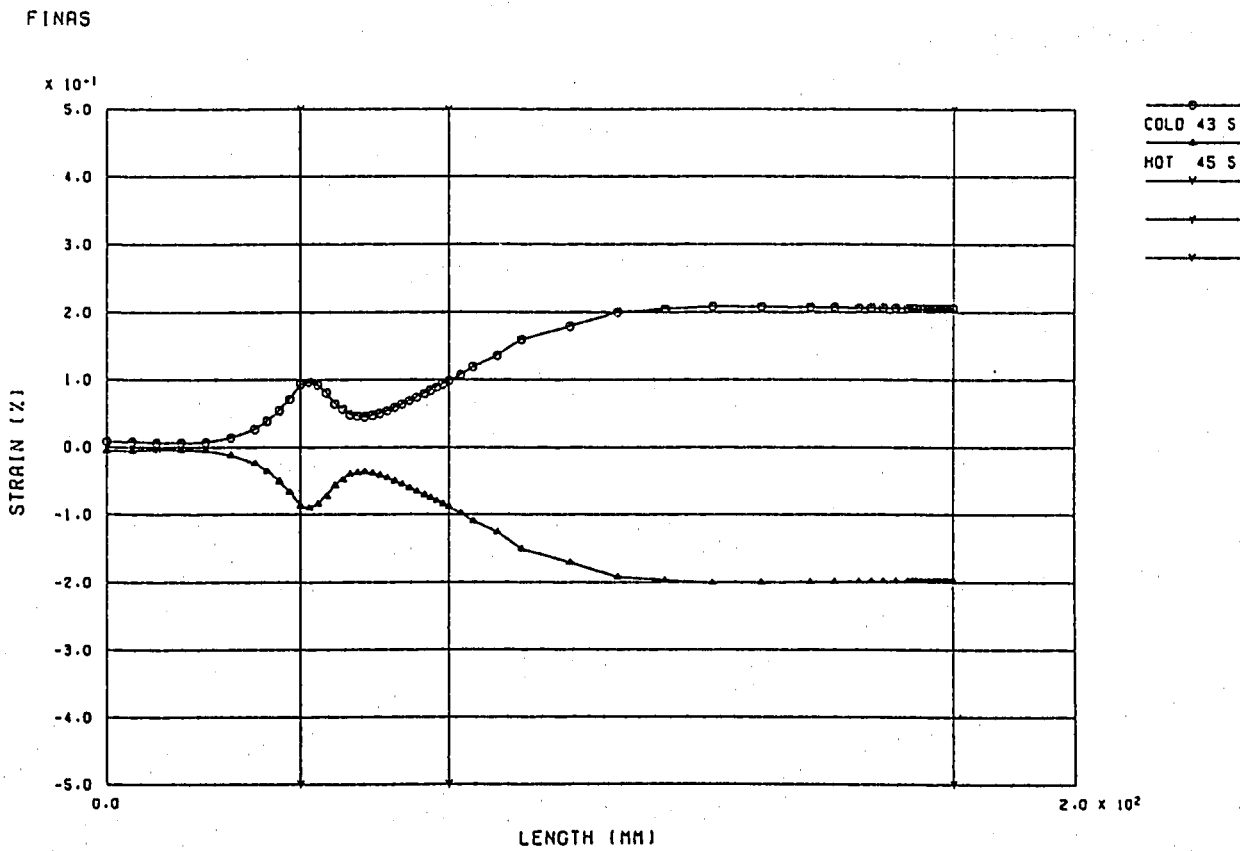
SUS316FR (E) WELDED PIPE STRAIN DIST. ALONG FACE-2 (HOT 45 SEC)

付図 B-4 供試体外表面の応力、ひずみ各座標成分の軸方向分布 (ホット 45 秒)





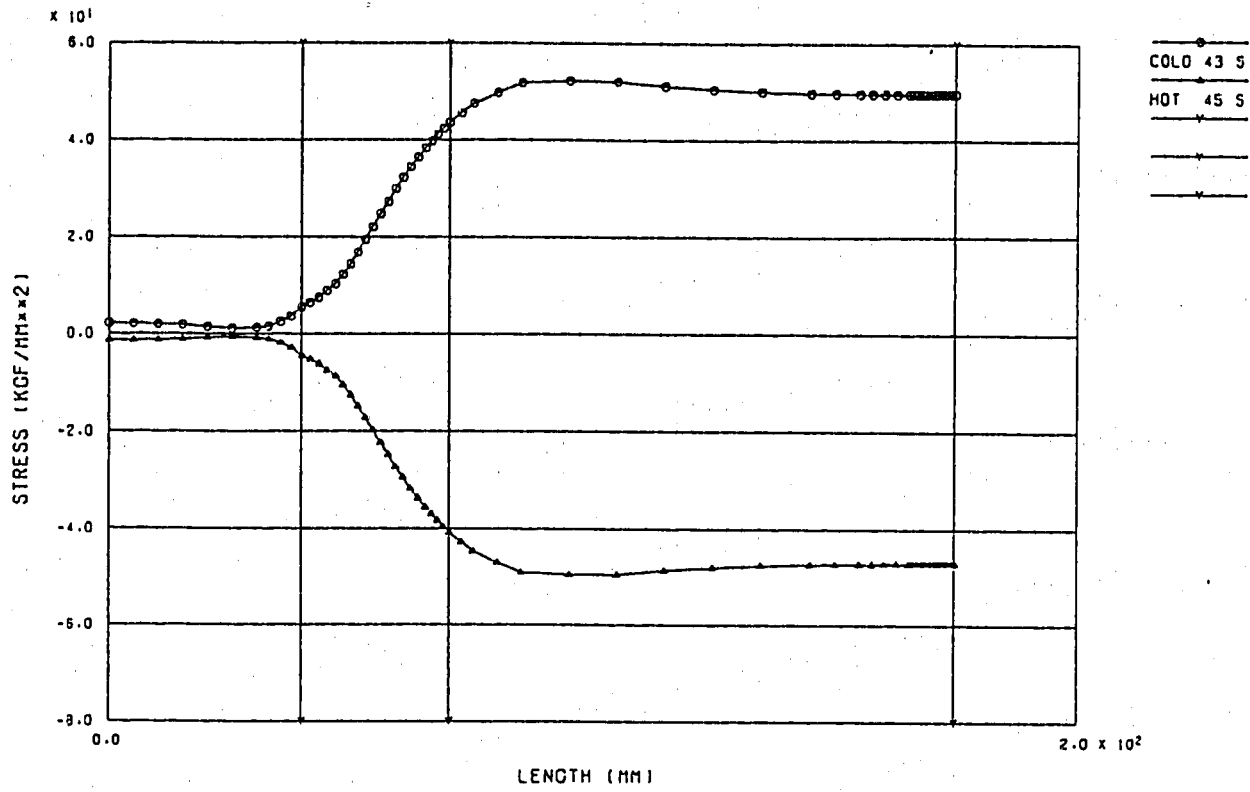
SUS316FR (E) WELDED PIPE SIG-Z DISTRIBUTION ALONG FACE-1



SUS316FR (E) WELDED PIPE EPS-Z DISTRIBUTION ALONG FACE-1

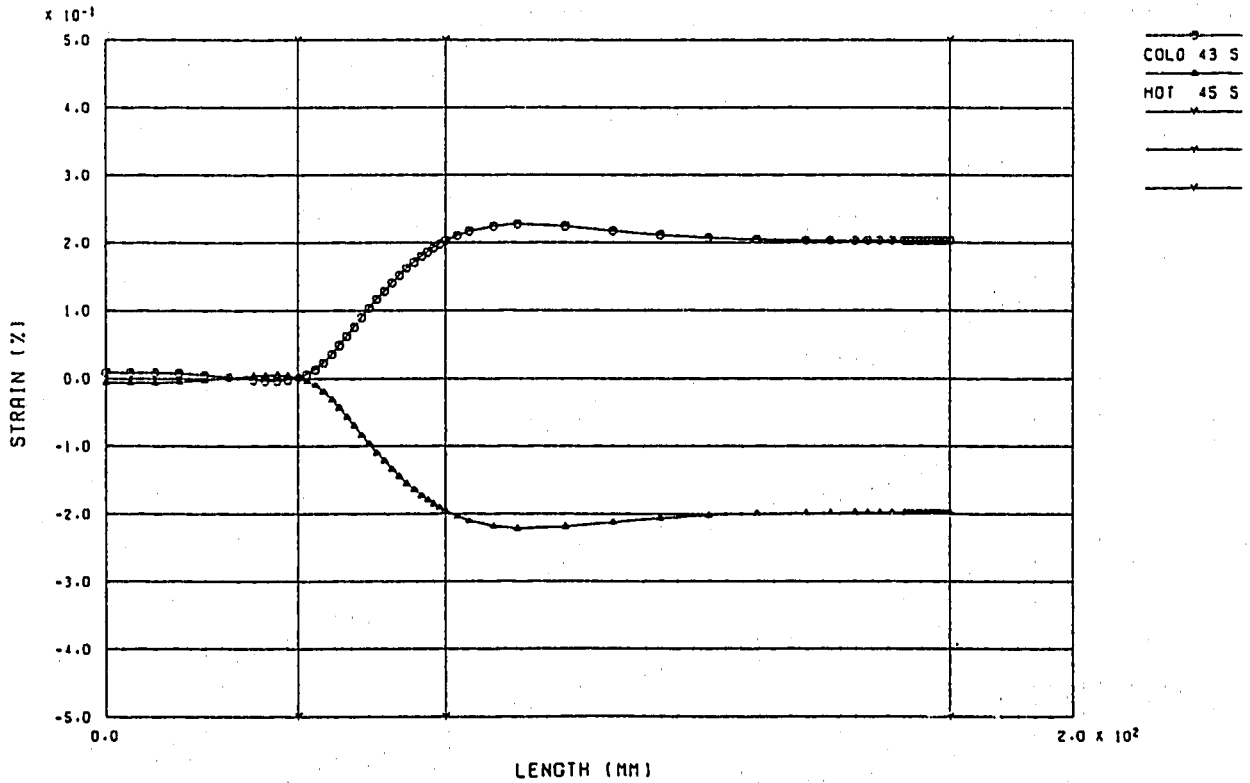
付図 B-5 供試体内表面の軸方向応力、ひずみの極2時点における軸方向分布

FINAS



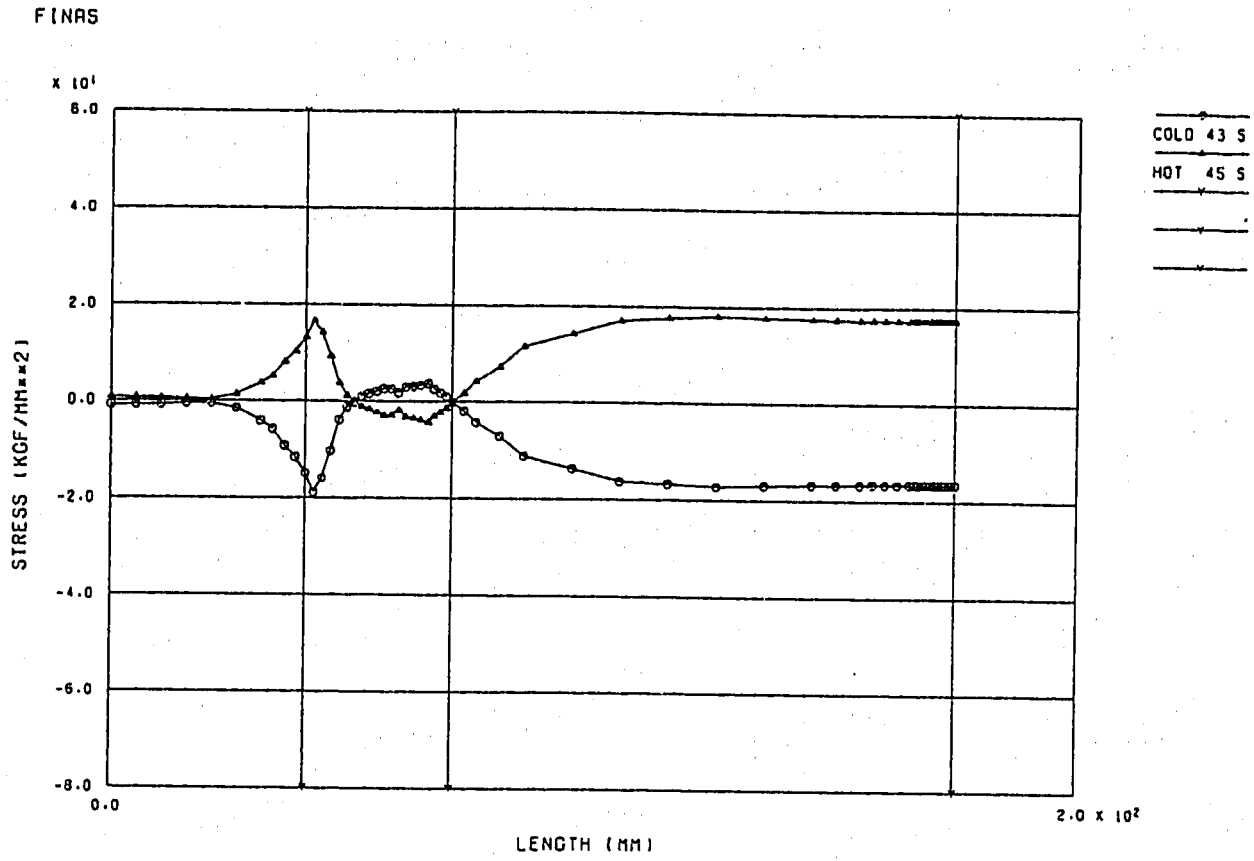
SUS316FR (E) WELDED PIPE SIG-TH DISTRIBUTION ALONG FACE-1

FINAS

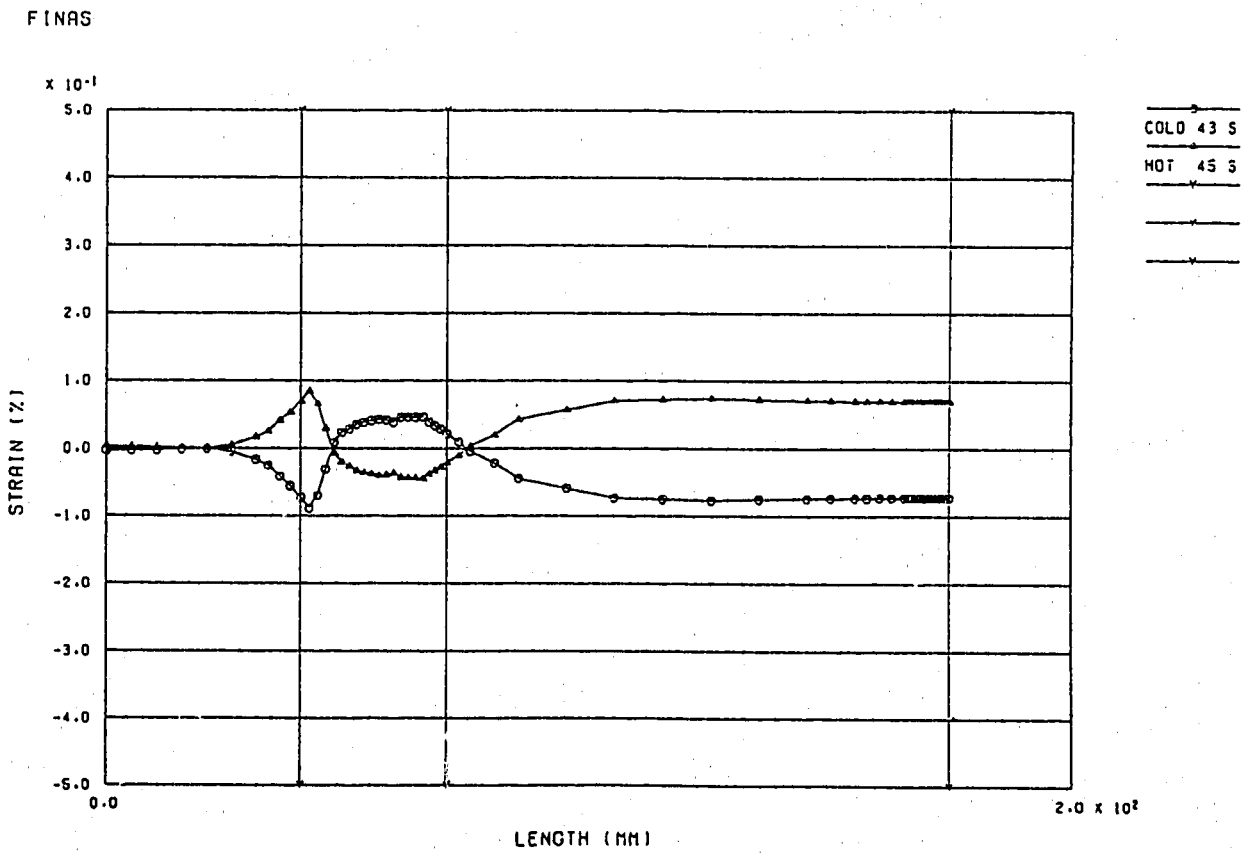


SUS316FR (E) WELDED PIPE EPS-TH DISTRIBUTION ALONG FACE-1

付図 B-6 供試体内表面の周方向応力、ひずみの極 2 時点における軸方向分布

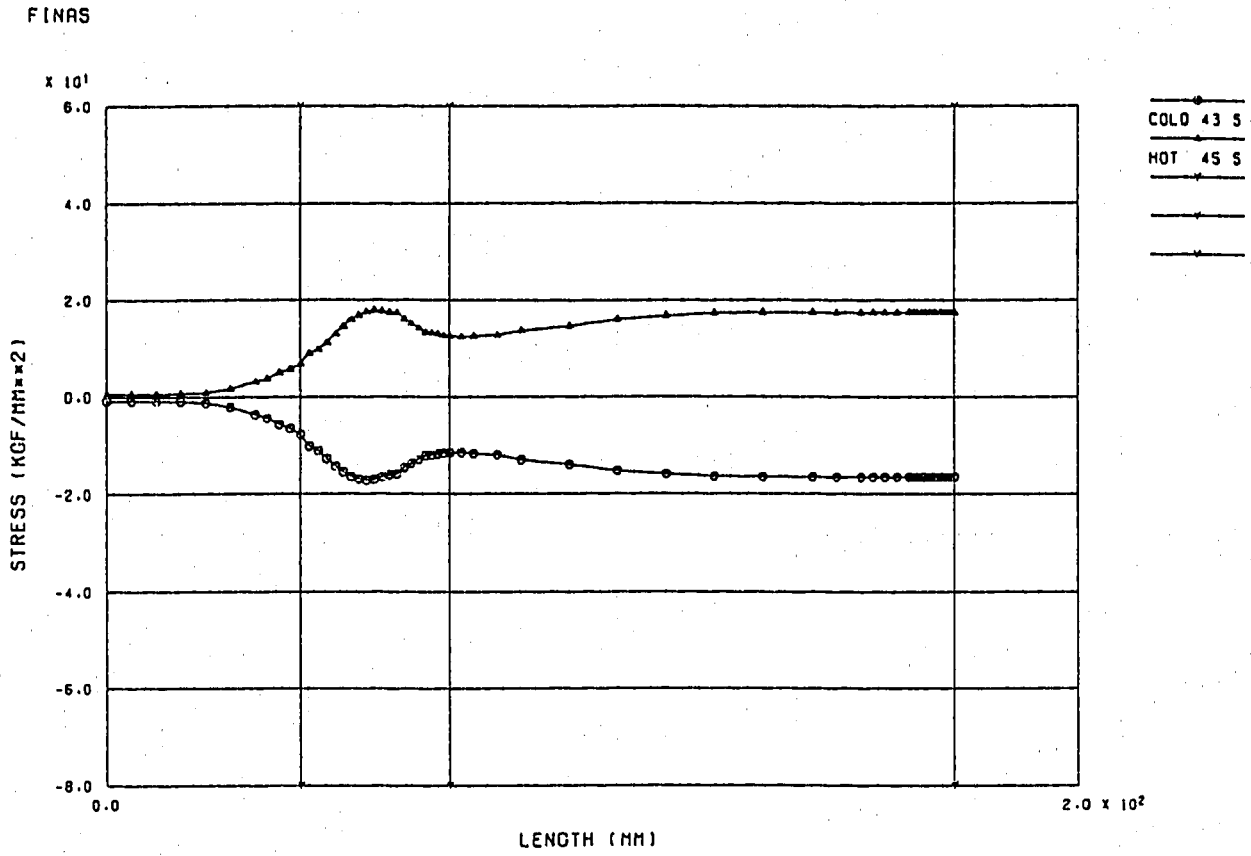


SUS316FR (E) WELDED PIPE SIG-Z DISTRIBUTION ALONG FACE-2

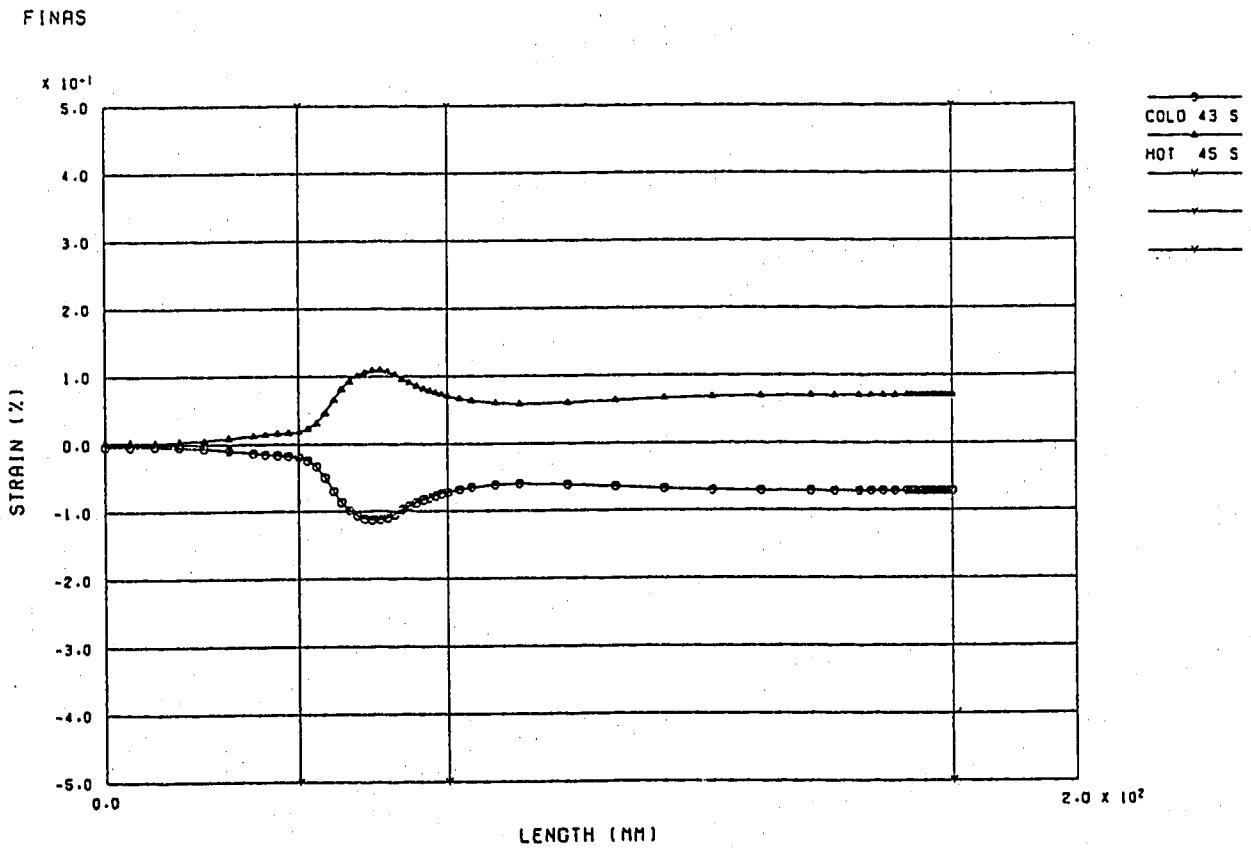


SUS316FR (E) WELDED PIPE EPS-Z DISTRIBUTION ALONG FACE-2

付図 B-7 供試体外表面の軸方向応力、ひずみの極 2 時点における軸方向分布



SUS316FR (E) WELDED PIPE SIG-TH DISTRIBUTION ALONG FACE-2



SUS316FR (E) WELDED PIPE EPS-TH DISTRIBUTION ALONG FACE-2

付図 B-8 供試体外表面の周方向応力、ひずみの極 2 時点における軸方向分布

## 付録C 前報の伝熱応力解析結果に基づくクリープ疲労評価の検討

付図 C-1 前報における解析モデル化の方法

付表 C-1 前報における伝熱解析のための熱過渡条件、熱伝達係数

付表 C-2 前報における弾性熱応力解析結果と損傷値

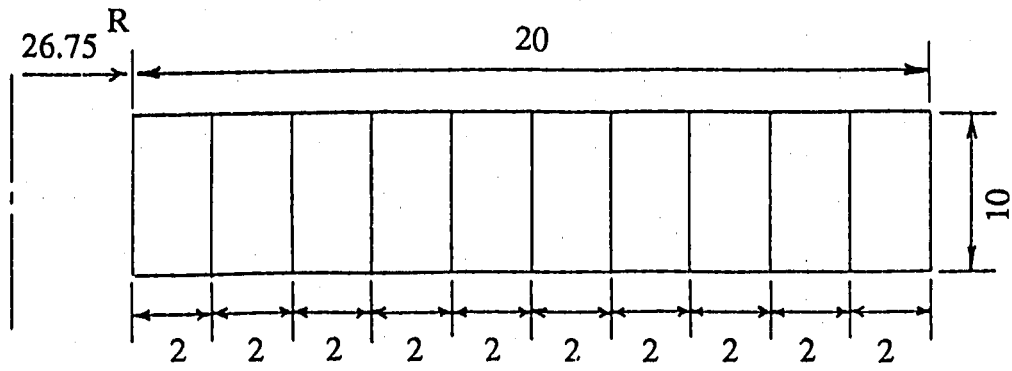
付図 C-2 SUS316LNP 鋼の材料特性を使用した場合の損傷評価結果（前報）

付図 C-3 SUS304鋼の材料特性を使用した場合の損傷評価結果（前報）

付図 C-4 SUS316LNP 鋼とSUS304鋼の材料特性を使用した場合の損傷評価結果の比較

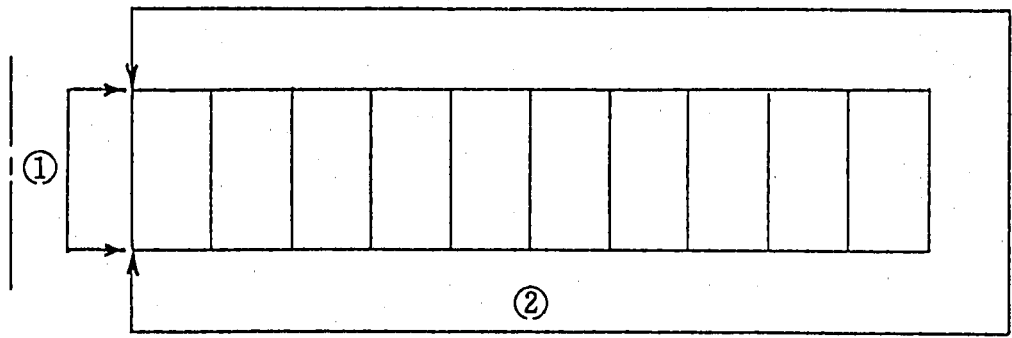
前報（PNC N9410 90-150）では、供試体長手方向10mm幅を1層に、半径方向20mm板厚を2mm厚さの10層に等分割した部分解析モデルを用いて、入力温度データとして本報と同じ供試体上流側（厳密には本供試体と同時に試験されたノズル形状モデルの最下流側）のナトリウム温度の熱過渡1サイクル分を用いて非定常の伝熱解析と弾性熱応力解析を実施し、この結果に基づいたクリープ疲労損傷計算として、TTSDSに基づいた手法により、熱過渡1200サイクル時点での損傷値を算出している。

ここで、本報との大きな違いは、当時供試体外表面での温度測定結果が利用できる状態でなかったため、前報の伝熱解析結果は実測温度データとのつきあわせ検証がなされなかった点である。本文第3章および付録Aで述べたとおり、前報の解析結果は供試体とナトリウム間の熱伝達係数がやや大きめに見積もられていたため、温度応答が実際のものよりもやや早くなり、この結果応力、ひずみあるいは損傷値が多少大きめに計算されていたと考えられる。

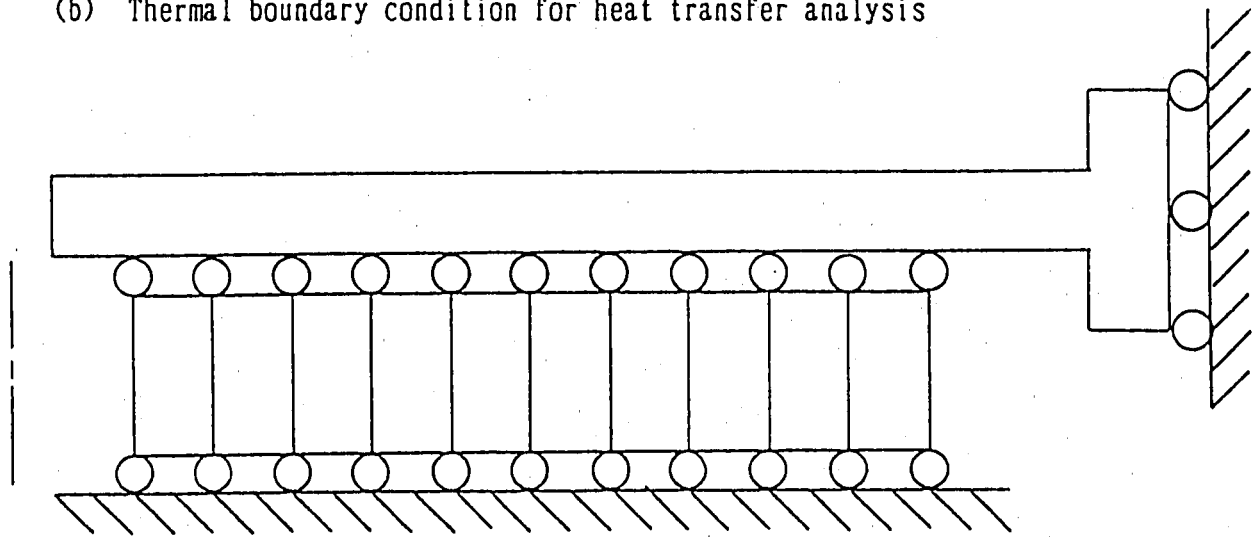


(a) Mesh division

- ① Heat transfer was considered
- ② Adiabatic



(b) Thermal boundary condition for heat transfer analysis



(c) Mechanical boundary condition for thermal stress analysis

Analysis model for the SUS316FR welded pipe part model

付図 C-1 前報における解析モデル化の方法

付表 C-1 前報における伝熱解析のための熱過渡条件、熱伝達係数

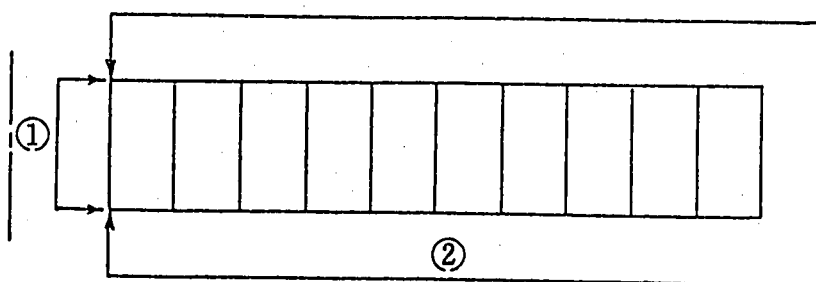
Input temperature history of SUS 316FR welded pipe part

TIME (sec)	Sodium Temp. (°C)
0.0	550.00
10.0	550.00
18.5	545.00
23.0	542.29
25.5	537.01
28.5	430.92
30.0	381.83
32.0	359.17
35.0	335.10
37.0	327.16
43.0	315.43
60.0	309.00
90.0	307.29
120.0	308.00
150.0	307.00
180.0	307.00
300.0	302.50
500.0	300.00
900.0	302.50
1800.0	303.50
3600.0	302.50
3613.0	302.50
3619.0	302.71
3624.0	304.85
3625.5	310.84
3627.0	376.39
3628.5	414.64
3630.0	453.08
3631.5	484.11
3634.0	504.68
3636.0	514.69
3641.0	529.20
3649.0	537.42
3660.0	539.28
3690.0	543.56
3720.0	542.78
3750.0	541.92
3780.0	542.06
3900.0	545.56
4100.0	550.00
5400.0	550.00
7200.0	550.00
9000.0	550.00
13900.0	550.00
21600.0	550.00

Heat Transfer Coefficient

Temp. 温度 [°C]	熱伝達率 [Kcal/m <sup>2</sup> ·h·°C]	
	①	②
20.0	—	ADIABATIC
210.0	—	
300.0	1.53×10 <sup>4</sup>	
400.0	1.45×10 <sup>4</sup>	
500.0	1.37×10 <sup>4</sup>	
550.0	1.33×10 <sup>4</sup>	

- ① Heat transfer was considered
- ② Adiabatic



(b) Thermal boundary condition for heat transfer analysis

Above sodium temperature were estimated from the values measured at the Nozzle Model-3, which located at the upstream side of the SUS316FR welded pipe

付表 C-2 前報における弾性熱応力解析結果と損傷値

極値時点のひずみ範囲およびひずみ成分

	Range	区分	$\epsilon_H$	$\epsilon_z$	$\epsilon_\theta$	$\gamma_{rz}$
SUS316	0.6714	COLD	-0.2262	0.2800	0.2765	
		HOT	0.2314	-0.2702	-0.2723	
SUS304	0.6720	COLD	-0.2264	0.2802	0.2767	
		HOT	0.2316	-0.2705	-0.2726	

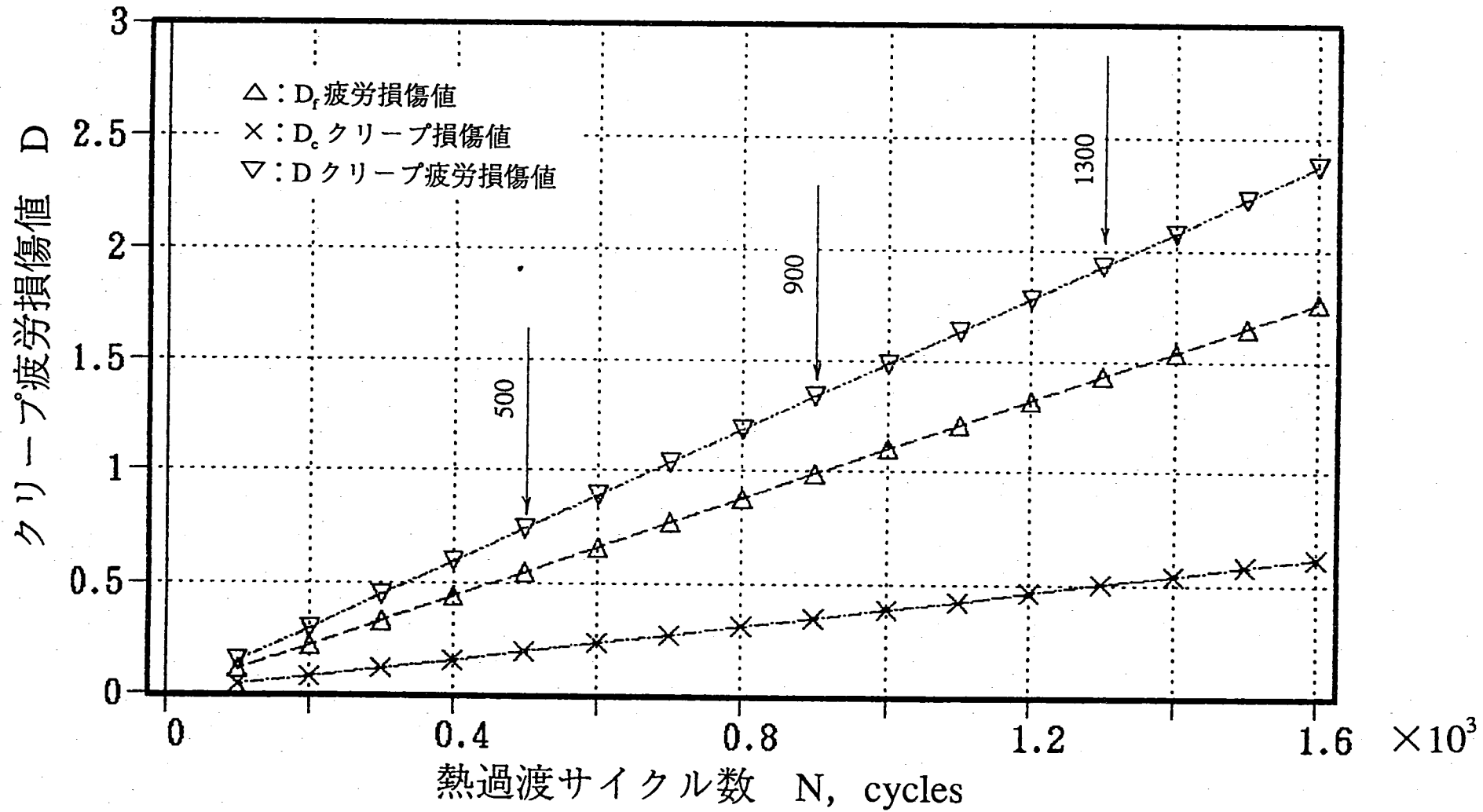
応力範囲及び応力成分（等価線形処理前）

	MISES	TRESCA	区分	$\sigma_H$	$\sigma_z$	$\sigma_\theta$
SUS316	131.366	131.469	COLD	0.681	69.419	68.942
			HOT	-0.597	-63.328	-63.598
SUS304	131.494	131.598	COLD	0.684	69.482	69.004
			HOT	-0.598	-63.393	-63.667

ひずみ範囲及び損傷値 (1,200cycle)

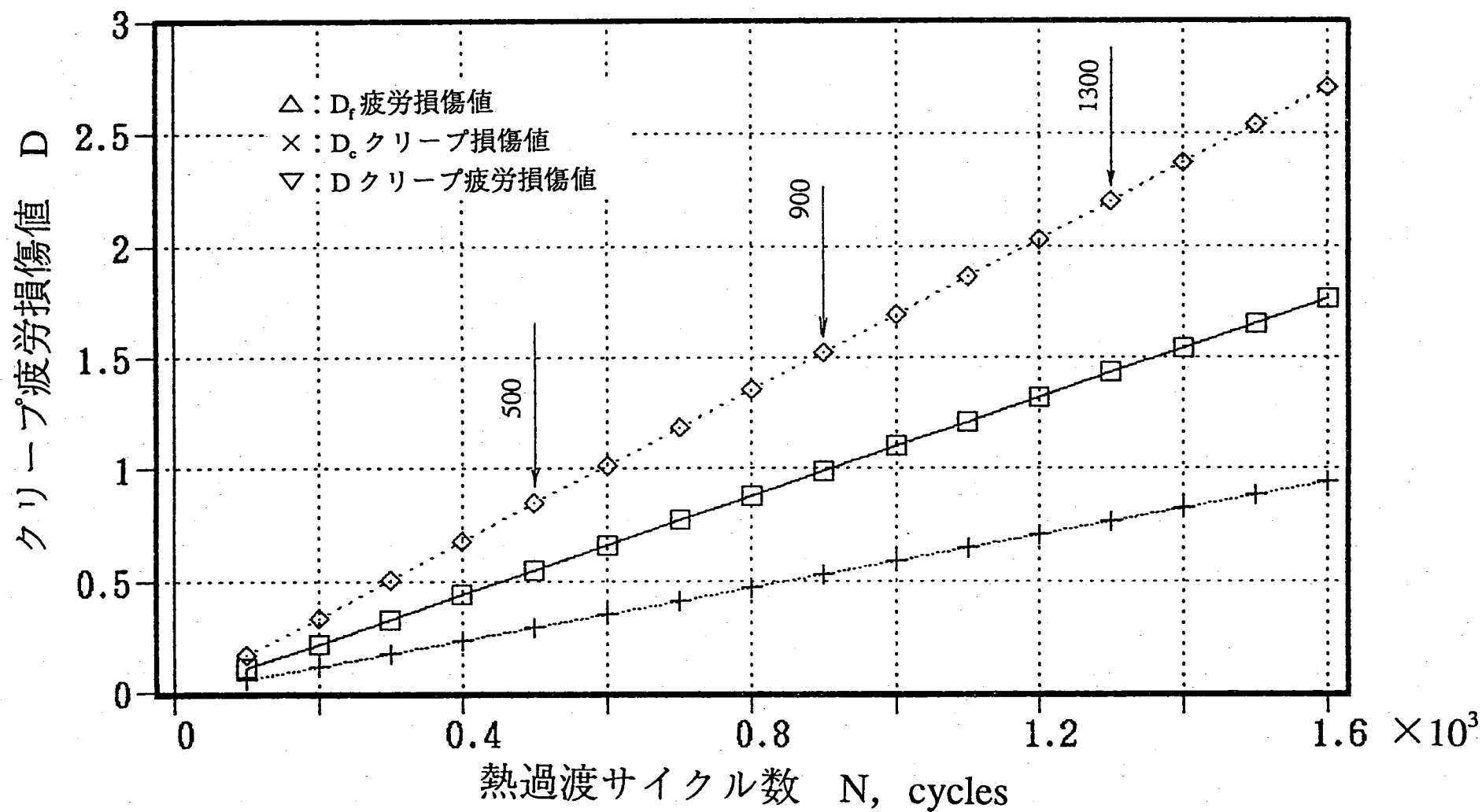
	$\Delta \epsilon_{e1}$	$\epsilon_n$	$\epsilon_1$	$D_r$	$D_c$	D	
SUS316	0.006714	0.007729	0.009275	1.32	0.466	1.78	
SUS304	0.006720	0.007736	0.009283	1.32	0.706	2.03	
* 上記の1,600サイクル換算値				SUS316	1.76	0.621	2.38
				SUS304	1.76	0.941	2.70
* 本報の1,600サイクル計算値				SUS316	0.937	0.230	1.17
				SUS304	0.937	0.617	1.55





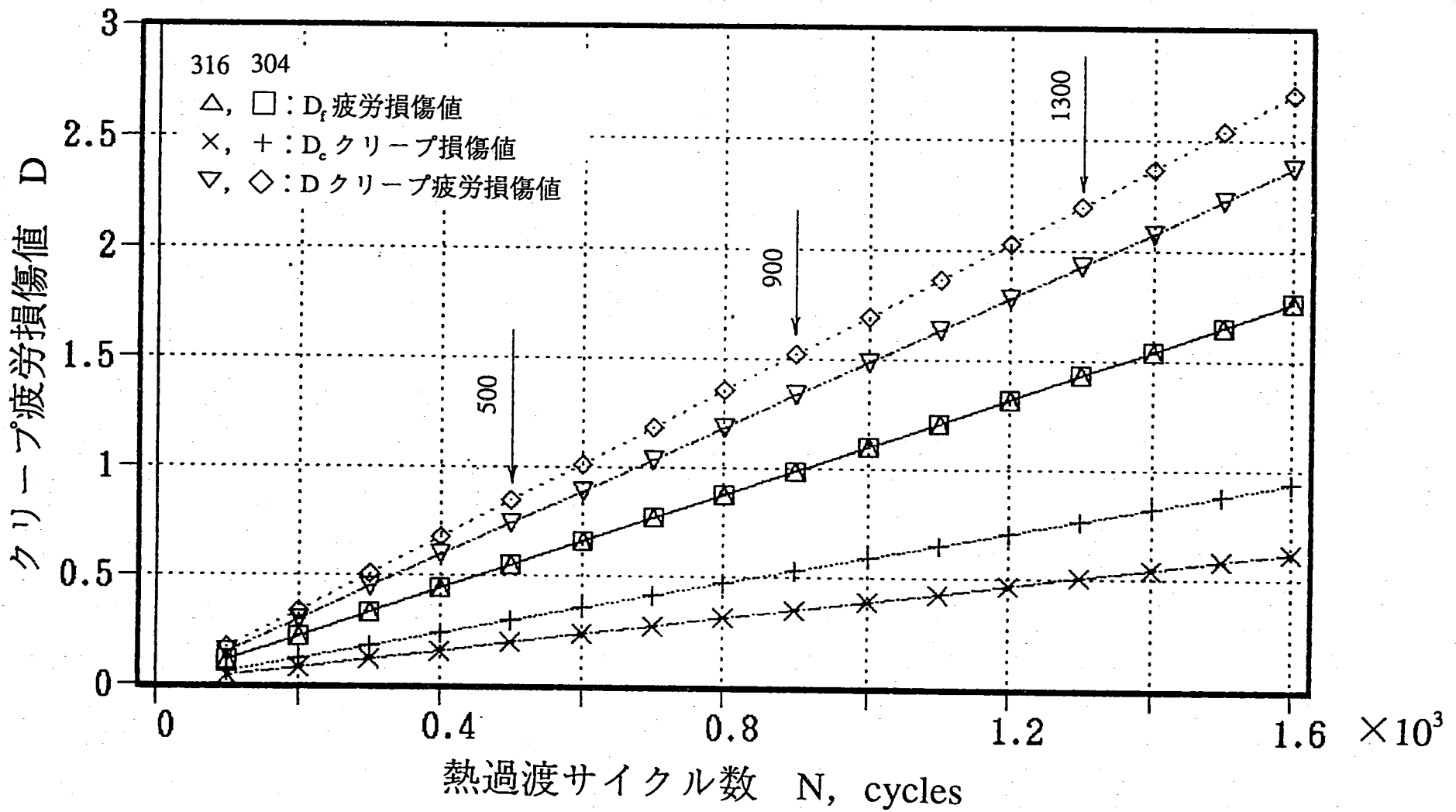
SUS316溶接継手モデルのクリープ疲労損傷値 (弾性解析, TTSDSによる)  
(解析, 損傷評価にSUS316の材料特性を使用)

付図 C-2 SUS316LNP 鋼の材料特性を使用した場合の損傷評価結果 (前報)



SUS304溶接継手モデルのクリープ疲労損傷値 (弾性解析, TTSDSによる)  
 (解析, 損傷評価にSUS316の材料特性を使用)

付図 C-3 SUS304鋼の材料特性を使用した場合の損傷評価結果 (前報)



SUS316溶接継手モデルのクリープ疲労損傷値 (弾性解析, TTSDSによる)  
 (解析, 損傷評価にSUS316とSUS304の材料特性を使用した場合の比較)

付図 C-4 SUS316LNP 鋼とSUS304鋼の材料特性を使用した場合の損傷評価結果の比較