

STST熱応力き裂発生試験  
—非弾性解析と強度評価—

1992年5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)

## S T S T 熱応力き裂発生試験

## 非弾性解析と強度評価

田中信之\*，石崎公人\*，菊池政之\*  
渡士克己\*\*，岩田耕司\*\*\*

## 要 旨

容器ノズル形状部の過渡熱応力下でのクリープ疲労強度評価法の詳細化を図ることを目的に、容器ノズルを模擬した試験体を用いた熱過渡強度試験結果について、弾塑性応力ひずみ関係、クリープ挙動、クリープ損傷評価法等をパラメータとする非弾性解析および同解析結果に基づくクリープ疲労損傷評価を行った結果以下が明らかとなった。

- (1) 弾塑性応力ひずみ関係に標準ひずみ速度の繰返し応力ひずみ関係を使用した非弾性解析結果をひずみ範囲に使用し、一方当該ひずみ範囲極値に対応する応力を初期応力としてクリープ損傷を計算すると供試体き裂発生状況と良好に対応するクリープ疲労損傷値が得られる。
- (2) 材料のクリープ挙動を考慮した非弾性解析結果と考慮しない非弾性解析結果とでは、クリープ疲労損傷値に有意な差が得られなかった。
- (3) (1)での評価について、標準ひずみ速度の繰返し応力ひずみ関係を低ひずみ速度の繰返し応力ひずみ関係に置き換えると、ひずみ範囲が10%、またクリープ疲労損傷値が20%程度増加するが、供試体き裂発生状況との対応に大幅な差違はなく、いずれも良好な破損との対応を示す。
- (4) (1)での評価について、標準ひずみ速度の繰返し応力ひずみ関係を単調負荷曲線に置き換えると、ひずみ範囲が30~40%、またクリープ疲労損傷値が60~80%程度増加し、単調負荷曲線を用いた損傷値は実際より広い範囲でのき裂発生を予想する結果となった。
- (5) クリープ損傷値を相当応力の時刻歴に沿って計算すると疲労損傷値に比べて無視できる程度の大きさのクリープ損傷値を示すに止まる。
- (6) き裂発生領域では、弾性解析結果にひずみ拡大係数1.2 を乗じて求めたひずみ範囲は(1)による計算結果と良好に対応した。一方、き裂が発生していない領域ではこの方法は損傷値を過大評価する結果となった。

---

\* 大洗工学センター 機器構造開発部 構造工学室

\*\* 大洗工学センター 機器構造開発部 材料開発室

\*\*\* 大洗工学センター 機器構造開発部

May. 1992

Creep-Fatigue Failure Test of Nozzle Models under Thermal Transient Loadings  
(3) Inelastic Analysis and Damage Evaluation

TANAKA. N \* , ISHIZAKI. K\* , KIKUCHI. M\*  
WATASHI. K \*\* , IWATA. K \*\*\*

ABSTRACT

This report describes the inelastic thermal stress analysis and creep-fatigue damage evaluation results of the three kinds of nozzle-like configuration models made of SUS304.

Crack initiation test on the models has been conducted in Thermal Shock Test Sodium Loop to clarify crack initiation behavior in thermal bending stress conditions. The models have been loaded with two types of thermal bending stresses; one is caused by throughout temperature distribution arisen in the nozzle-like configuration and the other is caused by temperature gradient arisen in the wall thickness of the models.

Thermal transient test has been conducted under the condition that 550°C and 300°C sodium flow into the models for 5 hrs and 1 hr, respectively in one cycle, and finished after loading 1,700 cycles of thermal transient. After the test, crack inspection test by PT has been performed, and crack initiation at cross-sections interested have been observed successfully.

For the analytical study, heat transfer analysis using the measured temperature data and inelastic thermal stress analysis were carried out by using cyclic stress-strain curves obtained from two kinds of strain rate conditions as the constitutive stress-strain relationships. Analysis results were utilized mainly for two objectives. One was to present the prospect of damage evaluation method based on inelastic analysis. And the other was to advance the present creep-fatigue damage evaluation method based on elastic analysis.

Many analysis results and damage evaluation results of the test models are presented here, and discussed focusing on the application of inelastic analysis results to rational creep-fatigue failure predicting method.

---

\* Structural Engineering Section, O-arai Engineering Center

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

\*\*\* Presently with Systems and Components Development Division, O-arai  
Engineering Center

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 試験・検査の概要 .....	2
2.1 供試体 .....	2
2.2 熱過渡強度試験 .....	2
2.2.1 試験方法 .....	2
2.2.2 試験結果 .....	2
3. 伝熱・応力解析 .....	11
3.1 伝熱・応力解析法 .....	11
3.1.1 解析モデル.....	11
3.1.2 伝熱解析法.....	11
3.1.3 非弾性熱応力解析法 .....	12
3.2 伝熱・応力解析結果 .....	32
3.2.1 伝熱解析結果 .....	32
3.2.2 非弾性熱応力解析結果 .....	32
4. クリープ疲労損傷評価 .....	50
4.1 クリープ疲労損傷評価法 .....	50
4.2 クリープ疲労損傷評価結果 .....	51
4.3 損傷評価結果とき裂の発生状況 .....	52
5. 考察 .....	64
5.1 非弾性解析におけるクリープ解析考慮の有無の影響 .....	65
5.2 非弾性解析における応力-ひずみ関係の影響に関する検討-1 .....	69
(標準ひずみ速度と低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係の結果の比較)	
5.3 非弾性解析における応力-ひずみ関係の影響に関する検討-2 .....	72
(単調応力-ひずみ関係と定常繰返し応力-ひずみ関係の結果の比較)	
5.4 非弾性解析に基づくクリープ損傷評価に関する検討 .....	78
5.5 弾性解析に基づく強度評価に関する検討 .....	89
5.6 まとめと今後の課題 .....	96
6. 結論 .....	107
7. 謝辞 .....	109
8. 参考文献 .....	110
付録 .....	111

## 表 リ ス ト

表 2.2.1	熱過渡試験条件	6
表 3.1.1	伝熱解析、熱応力解析に使用した要素の種類	13
表 3.1.2	伝熱解析、熱応力解析に使用した要素数と節点数	13
表 3.1.3	伝熱解析に使用したSUS304鋼の材料特性	14
表 3.1.4	伝熱解析に使用した熱過渡条件	15
表 3.1.5	熱応力解析に使用したSUS304鋼の材料特性	16
表 3.1.6	非弾性熱応力解析に使用したSUS304鋼の材料特性（弾塑性特性）	17
表 3.1.7	非弾性熱応力解析に使用したSUS304鋼の材料特性（クリープひずみ式）	17
表 3.2.1	伝熱解析のタイムチャート	34
表 3.2.2	ノズルモデル1の非弾性解析結果	35
表 3.2.3	ノズルモデル2の非弾性解析結果	36
表 3.2.4	ノズルモデル3の非弾性解析結果	37
表 4.2.1	ノズルモデル1のクリープ疲労損傷評価結果	54
表 4.2.2	ノズルモデル2のクリープ疲労損傷評価結果	55
表 4.2.3	ノズルモデル3のクリープ疲労損傷評価結果	56
表 5.1.1	ノズルモデルに対する解析の種類	66
表 5.6.1	ノズルモデル1のクリープ疲労損傷評価結果の概要	101
表 5.6.2	ノズルモデル2のクリープ疲労損傷評価結果の概要	102
表 5.6.3	ノズルモデル3のクリープ疲労損傷評価結果の概要	103

## 図 リ ス ト

図 1.1	本試験研究の報告書の構成	2
図 2.1.1	ノズル形状モデルの形状および寸法	7
図 2.2.1	ノズル形状モデル1の液体浸透探傷検査結果	8
図 2.2.2	ノズル形状モデル2の液体浸透探傷検査結果	9
図 2.2.3	ノズル形状モデル3の液体浸透探傷検査結果	10
図 3.1.1	ノズル形状モデル1のFEM解析モデル図	18
図 3.1.2	ノズル形状モデル2のFEM解析モデル図	19
図 3.1.3	ノズル形状モデル3のFEM解析モデル図	20
図 3.1.4	ノズル形状モデル1の伝熱解析における熱的境界条件	21
図 3.1.5	ノズル形状モデル2の伝熱解析における熱的境界条件	22
図 3.1.6	ノズル形状モデル3の伝熱解析における熱的境界条件	23
図 3.1.7	ノズル形状モデルの伝熱解析入力温度測定用の熱電対の位置	24
図 3.1.8	伝熱解析用入力熱過渡条件 (FT-1b でのナトリウム温度時刻歴)	25
図 3.1.9	伝熱解析用入力熱過渡条件 (FT-2b でのナトリウム温度時刻歴)	26
図 3.1.10	伝熱解析用入力熱過渡条件 (FT-3b でのナトリウム温度時刻歴)	27
図 3.1.11	伝熱解析用入力熱過渡条件 (FT-4b でのナトリウム温度時刻歴)	28
図 3.1.12	ノズル形状モデル1の熱応力解析における機械的境界条件	29
図 3.1.13	ノズル形状モデル2の熱応力解析における機械的境界条件	30
図 3.1.14	ノズル形状モデル3の熱応力解析における機械的境界条件	31
図 3.2.1	ノズル形状モデル1の伝熱解析結果 (2極時点での温度コンター)	38
図 3.2.2	ノズル形状モデル2の伝熱解析結果 (2極時点での温度コンター)	39
図 3.2.3	ノズル形状モデル3の伝熱解析結果 (2極時点での温度コンター)	40
図 3.2.4	ノズル形状モデル1の非弾性解析結果 (2極時点での相当応力コンター)	41
図 3.2.5	ノズル形状モデル2の非弾性解析結果 (2極時点での相当応力コンター)	42
図 3.2.6	ノズル形状モデル3の非弾性解析結果 (2極時点での相当応力コンター)	43
図 3.2.7	ノズル形状モデル1の非弾性解析結果の表示ラインと評価点	44
図 3.2.8	ノズル形状モデル2の非弾性解析結果の表示ラインと評価点	45
図 3.2.9	ノズル形状モデル3の非弾性解析結果の表示ラインと評価点	46
図 3.2.10	ノズル形状モデル1の非弾性解析結果 (内表面1のひずみ分布)	47
図 3.2.11	ノズル形状モデル2の非弾性解析結果 (内表面2のひずみ分布)	48
図 3.2.12	ノズル形状モデル3の非弾性解析結果 (内表面3のひずみ分布)	49
図 4.1.1	クリープ疲労評価法の流れ	57
図 4.2.1	ノズル形状モデル1のクリープ疲労損傷評価点	58
図 4.2.2	ノズル形状モデル2のクリープ疲労損傷評価点	59
図 4.2.3	ノズル形状モデル3のクリープ疲労損傷評価点	60
図 4.2.4	ノズル形状モデル1の評価点でのひずみ範囲とクリープ疲労損傷値	61
図 4.2.5	ノズル形状モデル2の評価点でのひずみ範囲とクリープ疲労損傷値	62
図 4.2.6	ノズル形状モデル3の評価点でのひずみ範囲とクリープ疲労損傷値	63

図 5.1.1	クリープ解析実施の有無のクリープ疲労損傷評価に及ぼす影響 (ひずみ範囲)	67
図 5.1.2	クリープ解析実施の有無のクリープ疲労損傷評価に及ぼす影響 (損傷値)	68
図 5.2.1	クリープ解析実施の有無のクリープ疲労損傷評価に及ぼす影響 (低ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみ関係による)	71
図 5.2.2	定常繰返し応力-ひずみ関係におけるひずみ速度条件のクリープ疲労損傷 評価に及ぼす影響	71
図 5.3.1	「間接法」におけるクリープ疲労損傷評価に及ぼす弾性追従係数 $q$ の影響 (単調応力-ひずみ関係を用いた非弾性解析結果に基づく)	75
図 5.3.2	非弾性解析に用いる弾塑性応力-ひずみ関係のひずみ範囲に及ぼす影響 (単調応力-ひずみ関係と標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係の比較)	
図 5.3.3	非弾性解析に用いる弾塑性応力-ひずみ関係のクリープ疲労損傷評価に及ぼす 影響 (単調応力-ひずみ関係と標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係 の比較)	76
図 5.3.4	非弾性解析に用いる弾塑性応力-ひずみ関係のクリープ疲労損傷評価に及ぼす 影響 (低ひずみ速度および標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係と 単調応力-ひずみ関係の比較)	77
図 5.4.1	「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較 (モデル1)	81
図 5.4.2	「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較 (モデル2)	82
図 5.4.3	「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較 (モデル3)	83
図 5.4.4	「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較 (標準ひずみ速度の 定常繰返し応力-ひずみ関係を用いた弾塑性クリープ解析結果に基づく)	84
図 5.4.5	「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較 (標準ひずみ速度の 定常繰返し応力-ひずみ関係を用いた弾塑性解析結果に基づく)	85
図 5.4.6	「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較 (単調応力-ひずみ関係を用いた非弾性解析結果に基づく)	86
図 5.4.7	「間接法」によるクリープ疲労損傷値に及ぼす弾性追従係数 $q$ の影響 ( $q=1.0$ と $1.5$ の場合の比較; 単調応力-ひずみ関係による解析結果)	87
図 5.4.8	「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較 (単調応力-ひずみ関係を用いた非弾性解析結果に基づく、「間接法」では 弾性追従係数 $q=1.0$ と $1.5$ の場合を含む)	88
図 5.5.1	弾性解析および弾塑性クリープ解析による全ひずみ範囲の比較 (弾性解析: 全ひずみ範囲、弾塑性クリープ解析: 相当ひずみ範囲)	91
図 5.5.2	弾性解析および弾塑性クリープ解析によるクリープ疲労損傷値の比較	92
図 5.5.3	弾性解析および弾塑性クリープ解析によるひずみ範囲の比較 (弾性解析: 公称 ひずみ範囲、全ひずみ範囲/弾塑性クリープ解析: 相当ひずみ範囲)	93
図 5.5.4	各評価点における非弾性ひずみ集中係数 $K_f$	94
図 5.5.5	弾性解析の公称ひずみ範囲と非弾性ひずみ集中係数 $K_f$ の関係	95
図 5.6.1	ノズルモデル1のクリープ疲労損傷評価結果のまとめ	104
図 5.6.2	ノズルモデル2のクリープ疲労損傷評価結果のまとめ	105
図 5.6.3	ノズルモデル3のクリープ疲労損傷評価結果のまとめ	106



## 1. まえがき

本報告書は小型熱過渡試験装置（略称S T S T）で実施した形状・寸法の異なる3種のSUS304鋼製ノズル形状モデルの熱応力き裂発生試験研究のうち、試験体モデルの非弾性熱応力解析を実施し、各モデルの応力・ひずみ挙動を推定し、この結果に基づいてクリープ疲労損傷を評価した結果について述べたものである。

本試験研究は高速炉で使用される代表的な構造材料であるSUS304鋼を用いて製作した容器－ノズル構造を模擬したノズル形状モデル（形状・寸法の異なる3体）に対して、実機で想定される以上の厳しい熱過渡荷重を繰返し負荷することにより、クリープ疲労き裂発生データを得るとともに、これらの構造要素モデルの熱過渡荷重下におけるクリープ疲労強度を弾性解析、あるいは、非弾性解析により精度良く予測し得る評価手法を開発することを主たる目的として実施している。

熱過渡試験は、ノズル形状モデル3体をナトリウムループに直列に設置することにより同時に行い、各モデルに対して1,700サイクルの熱過渡を負荷して終了し、引き続き解体検査を行い、各モデルにき裂発生を確認した。

本報では、3種のノズル形状モデルについて、弾塑性応力－ひずみ関係として標準ひずみ速度（ $1 \times 10^{-3}$  mm/mm/sec）の定常繰返し応力－ひずみヒステリシス曲線の2直線近似式を、またクリープひずみ式として遷移クリープを考慮した動燃の式を用いた、弾塑性クリープ解析を標準的解析条件とした非弾性解析を行った。さらに、一部解析モデルでは、非弾性解析条件の強度評価結果に及ぼす影響を把握する目的で、クリープを考慮しない弾塑性解析のみの条件、さらに弾塑性応力－ひずみ関係として、低ひずみ速度（ $1 \times 10^{-6}$  mm/mm/sec）の定数を採用した解析を実施し、比較検討を行った。

また、強度評価では、これらの解析結果に基づいて、設計基準の有する安全裕度を取り除いた正味ベースのクリープ疲労損傷評価を行い、供試体のき裂発生状況と比較した。このうちクリープ損傷値の算出には、解析により得られる相当応力の経時変化に沿って損傷値を直接時間積分する方法と、仮想的な応力緩和経路を用いる方法の2種類の方法について比較検討を行った。

本試験研究に関しては、図 1.1に示される報告を予定しており、このうち熱過渡試験の中間段階（1,300サイクル時点）での損傷計算を実施した結果については既に第2報<sup>(1)</sup>で報告済みであり、本報はその第3報に当たる。本報では第2報で実施できなかった実際のき裂発生状況と損傷値の対比、さらに繰返し熱過渡荷重条件下での応力－ひずみ関係として、実際に材料が示すと考えられる定常繰返し応力－ひずみヒステリシス曲線を用いた非弾性解析に基づいた損傷評価に焦点を合わせている。

本試験研究の成果は既存の弾性解析に基づくクリープ疲労強度評価法の精度向上に活用されるほか、今後の大型炉用の高温構造設計基準の開発に際して、非弾性解析を採り入れていくための貴重なデータベースとなるものとする。

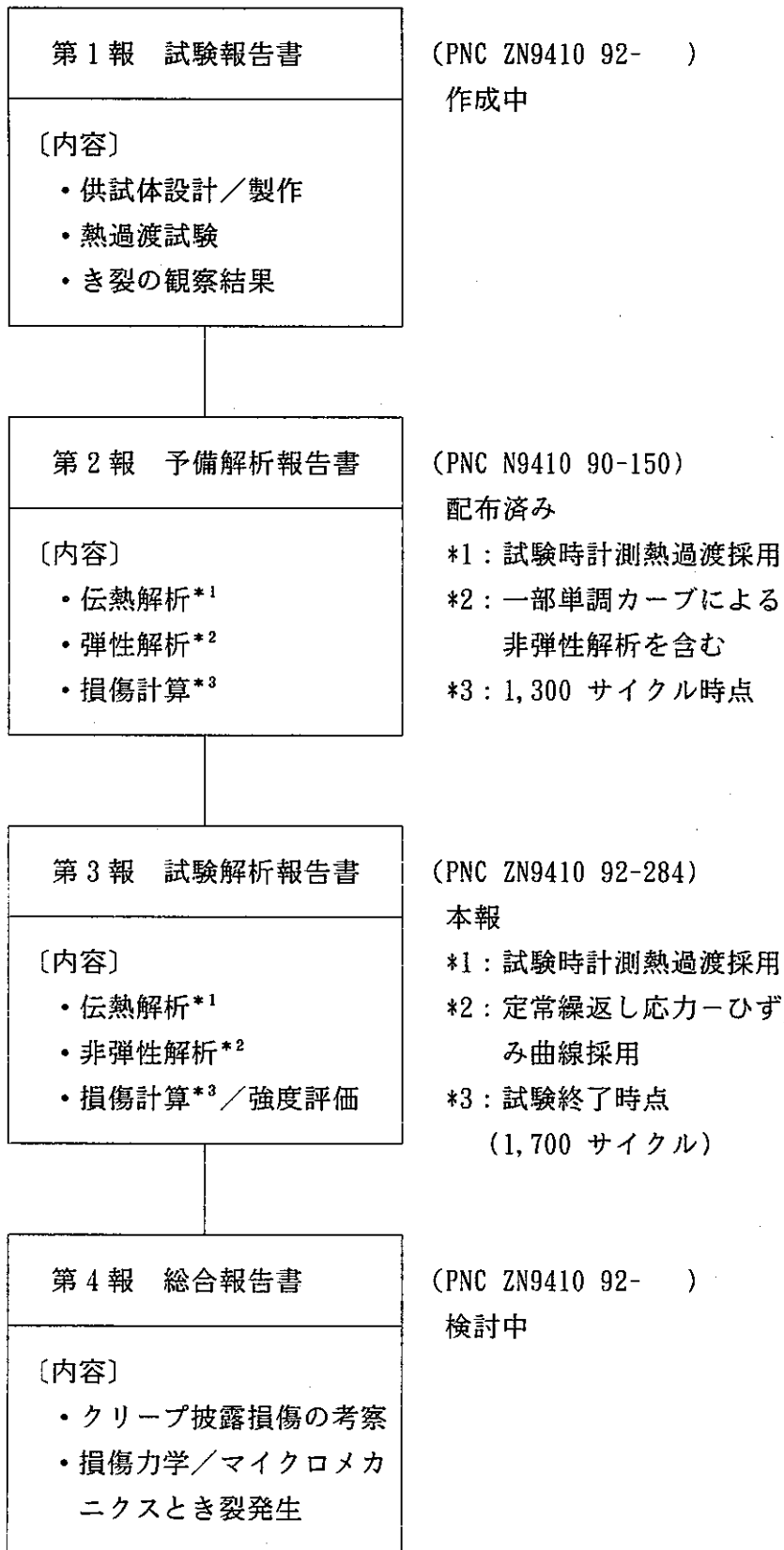


図 1.1 本試験研究の報告書の構成

## 2. 試験・検査の概要

本論に入る前に、本報で解析、評価の対象とした熱過渡試験の概要について述べる。詳細については、本試験研究の第1報<sup>(2)</sup>を参照されたい。

### 2.1 供試体

本試験研究の熱過渡試験に供した試験体は図 2.1.1に構造を示すSUS304鋼製ノズル形状モデル3体である。本モデルは容器に取り付けられるノズル部構造を模擬した形状を有し、ノズル本体に相当する円筒に、容器胴あるいは鏡板を模擬したツバが取り付けられている。このうち、モデル1とモデル2では円筒に対するツバの取り付け方法は同様とし、ツバの板厚を変えている。また、モデル2とモデル3ではツバの寸法を同一とし、その円筒に対する取り付け方法を、モデル3では補強のための厚肉部を設けるように変えている。

これらのモデルでは、その内面にナトリウムによる繰返し熱過渡が負荷された場合、円筒部とツバ部の相対的温度差によりツバ付け根部に大きな曲げ応力が発生することが予想されるため、高速炉構造の強度評価上、注意を要する構造の一つに上げられる。

### 2.2 熱過渡強度試験

#### 2.2.1 試験方法

熱過渡強度試験は、小型熱過渡試験装置（STST）のテストセクション上流側より、ノズル形状モデル1、2、3を直列に設置し、550℃の高温ナトリウムと300℃の低温ナトリウムを供試体内部に交互に流入させることにより行った。

ナトリウム流量は200l/minで、5時間の高温ナトリウム流入と1時間の低温ナトリウム流入により、1サイクル当たり6時間の熱過渡を、3種のノズル形状モデルに対して同時に合計1,700サイクル与えた。表 2.2.1に試験条件を示す。

#### 2.2.2 試験結果

熱過渡試験終了後、供試体内外面のき裂発生分布、き裂深さおよび破面形態を調べることを目的として、供試体の解体検査を行った。き裂発生分布は供試体内外面の液体浸透探傷検査（PT）により、き裂深さは板厚断面のPTにより、破面形態は光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡によりそれぞれ観察、計測を実施した。各モデルでのき裂の検査結果の概要は以下の通りである。

##### (1) ノズル形状モデル1

図 2.2.1にノズル形状モデル1の液体浸透探傷検査の結果を示す。

○ 円筒内表面のき裂

- a. き裂発生箇所～円筒内表面ツバ付け根部近傍
- b. き裂の方向～軸方向
- c. き裂発生分布～円筒内表面上ほぼ全周に31本の軸方向き裂  
～ツバ付け根部中央より上流側8mm、下流側11mm
- d. き裂の寸法～ツバ付け根部中央の深さ4.07mm
- e. 破面形態～発生から進展の前半では粒界割れ、進展の後半では粒内割れ（混在）

○ 円筒外表面ツバ付け根R部のき裂

- a. き裂発生箇所～円筒外表面ツバ付け根R部（下流、凹面側）
- b. き裂の方向～周方向
- c. き裂発生分布～全周に1本の周方向き裂（周辺には微細な周方向き裂多数）
- d. き裂の寸法～最大深さ1.71mm（位相45°）
- e. 破面形態～ほぼ粒内割れ（ストライエーション存在）

(2) ノズル形状モデル2

図 2.2.2にノズル形状モデル2の液体浸透探傷検査の結果を示す。

○ 円筒内表面のき裂

- a. き裂発生箇所～円筒内表面ツバ付け根部近傍
- b. き裂の方向～軸方向（下流側では周方向のき裂も混在）
- c. き裂発生分布～円筒内表面上ほぼ全周に30本の軸方向き裂  
～ツバ付け根部中央より上流側9mm、下流側15mm
- d. き裂の寸法～ツバ付け根部中央の深さ5.95mm
- e. 破面形態～発生から進展の前半では粒界割れ、進展の後半では粒内割れ（混在）

○ 円筒外表面ツバ付け根R部のき裂

- a. き裂発生箇所～円筒外表面ツバ付け根R部（下流、凹面側）
- b. き裂の方向～周方向
- c. き裂発生分布～全周に2本の周方向き裂（周辺には微細な周方向き裂多数）
- d. き裂の寸法～最大深さ0.95mm（位相0°）
- e. 破面形態～ほぼ粒内割れ（ストライエーション存在）

(3) ノズル形状モデル3

図 2.2.3にノズル形状モデル3の液体浸透探傷検査の結果を示す。

○ 円筒内表面のき裂

- a. き裂発生箇所～円筒内表面ツバ付け根部近傍
- b. き裂の方向～軸方向（下流側では周方向のき裂も混在）
- c. き裂発生分布～円筒内表面上ほぼ全周に36本の軸方向き裂  
～ツバ付け根部中央より上流側8mm、下流側15mm
- d. き裂の寸法～ツバ付け根部中央の深さ5.62mm
- e. 破面形態～発生から進展の前半では粒界割れ、進展の後半では粒内割れ（混在）

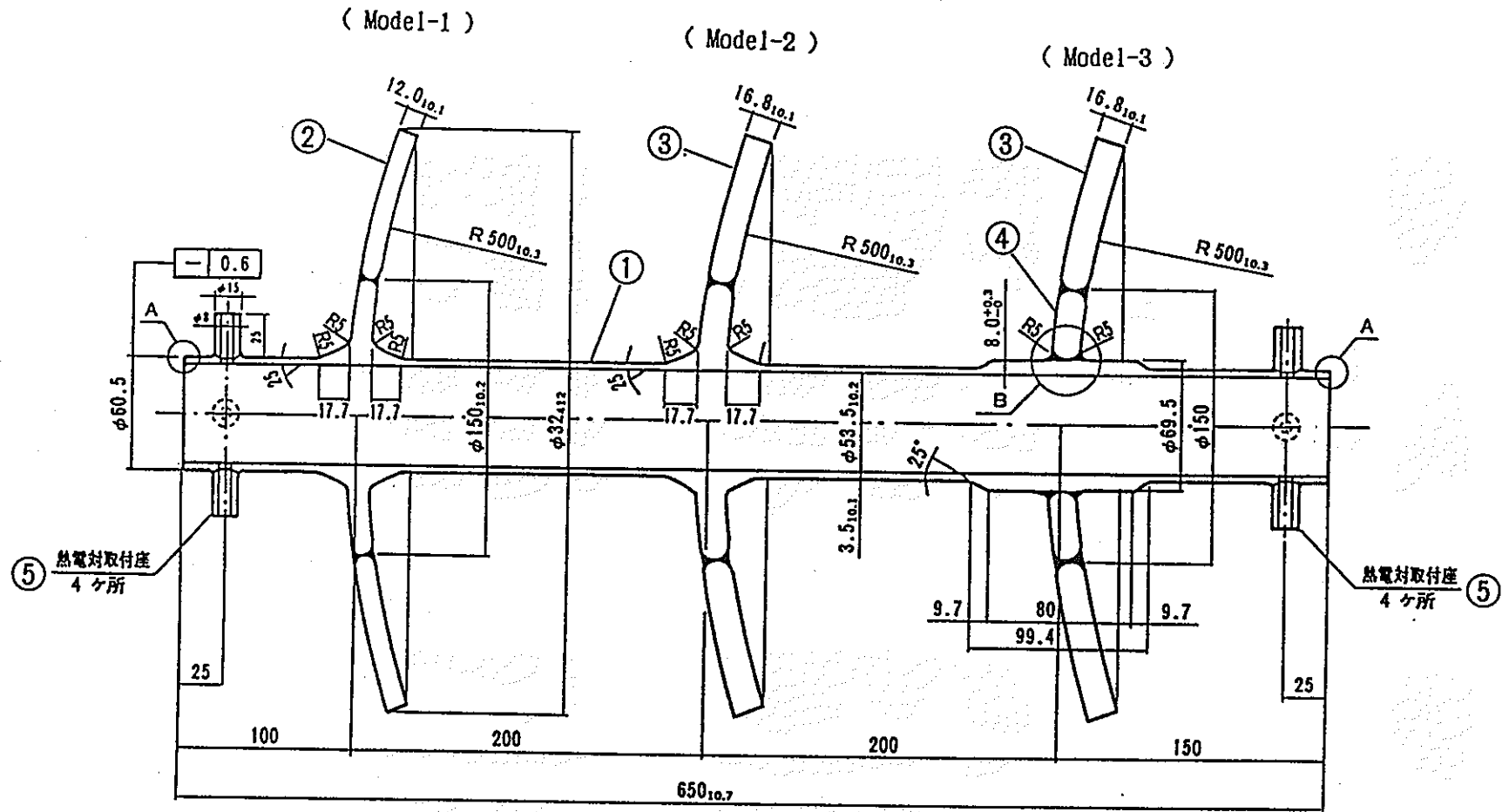
○ 円筒外表面ツバ付け根R部のき裂

- a. き裂発生箇所～円筒外表面ツバ付け根R部（下流、凹面側）  
（ただし上流、凸面側の一部にも存在）～本き裂は円筒-ツバ溶接部の溶金内に発生
- b. き裂の方向～周方向
- c. き裂発生分布～全周に1本の周方向き裂（周辺には微細な周方向き裂多数）
- d. き裂の寸法～最大深さ4.33mm（位相270°）
- e. 破面形態～溶金（デンドライド）内割れ（ストライエーション存在）

注）上流側のき裂は内部（表面より0.5mm深さ）の溶接欠陥（溶け込み不良）による  
き裂の長さは周方向約25mmである。

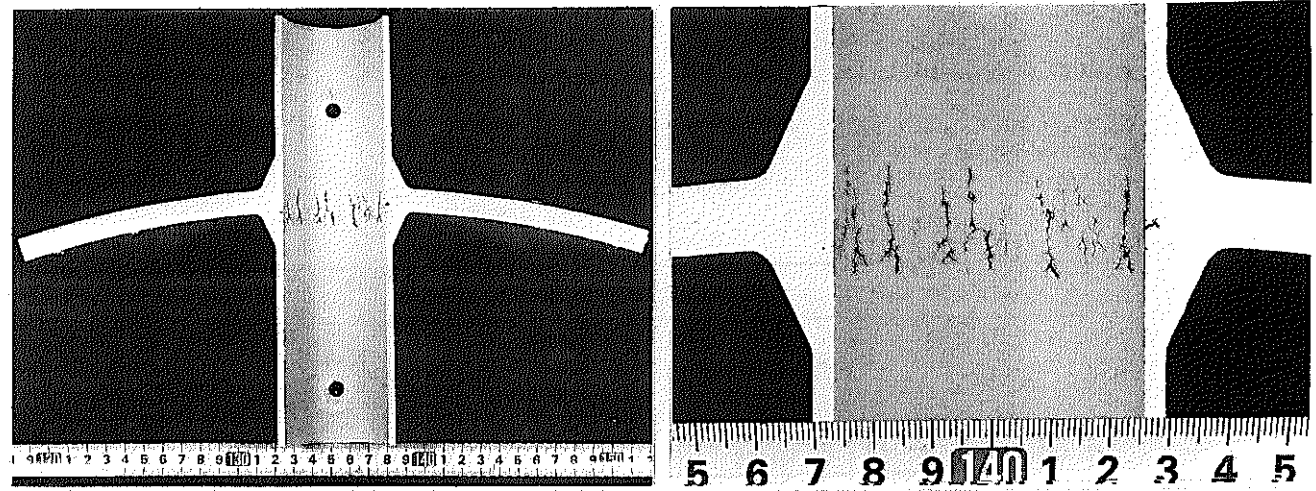
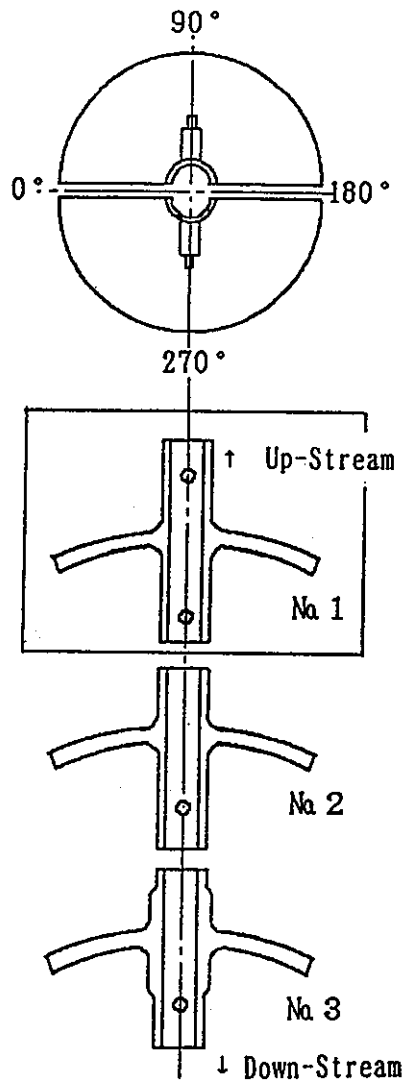
表 2.2.1 熱過渡試験条件

item		Nozzle models (304)
Hot Transient	sodium temp.	550°C
	duration	5 hrs
Cold Transient	sodium temp.	300°C
	duration	1 hr
the number of cycles		1,700 cycles

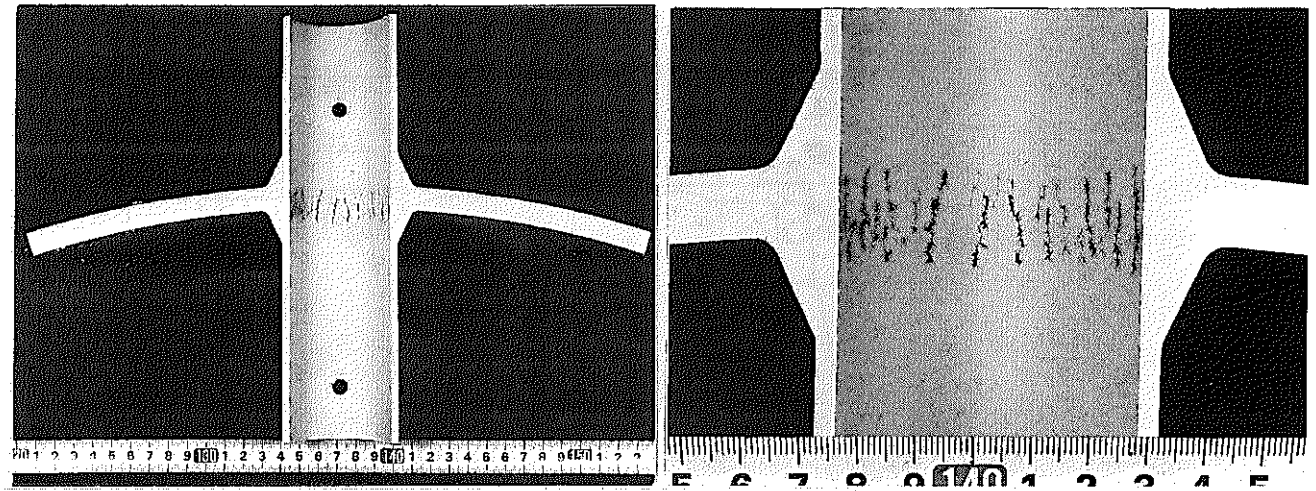


unit in mm

図 2.1.1 ノズル形状モデルの形状および寸法



90° Direction



270° Direction

図 2.2.1 ノズル形状モデル1の液体浸透探傷検査結果



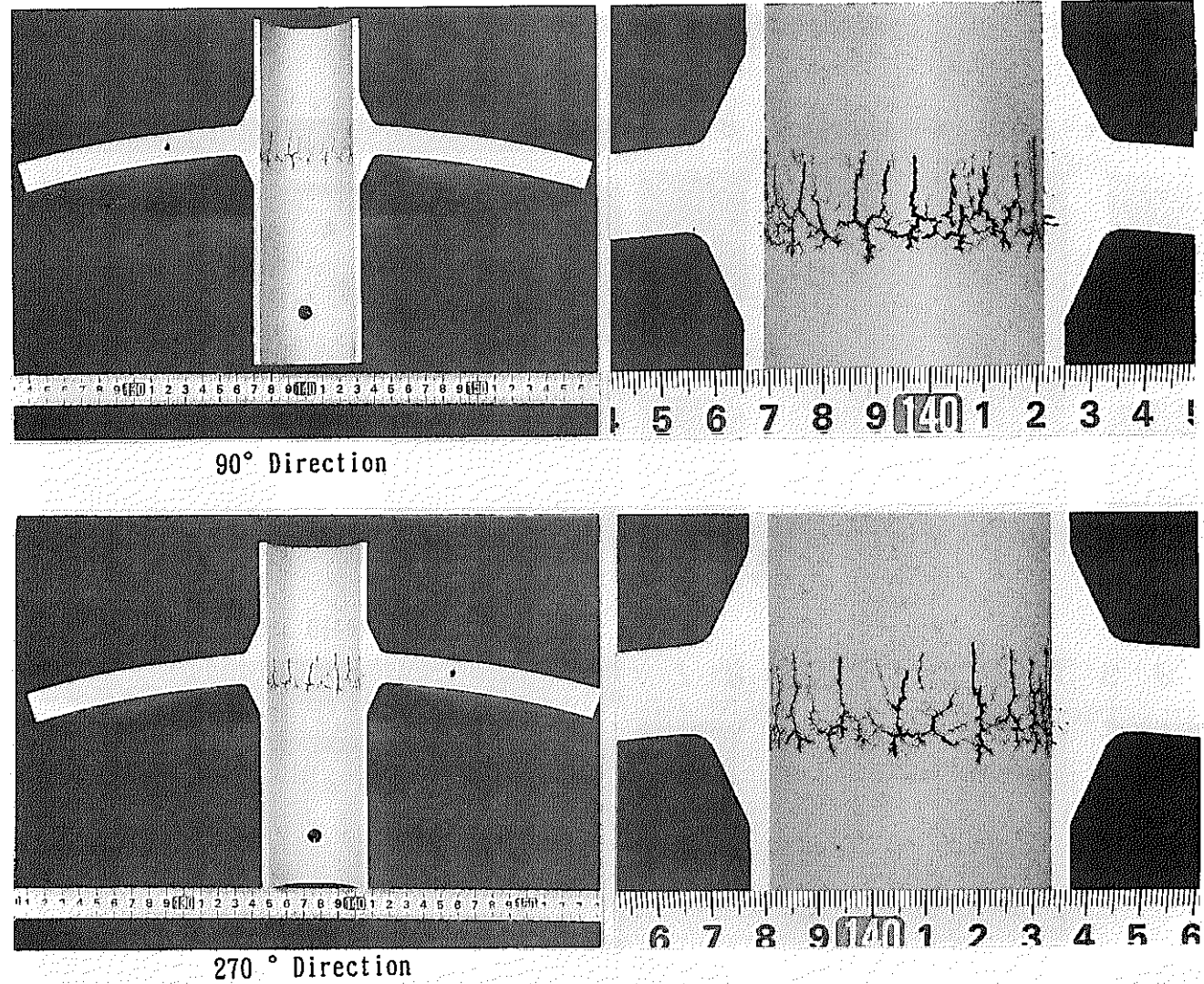
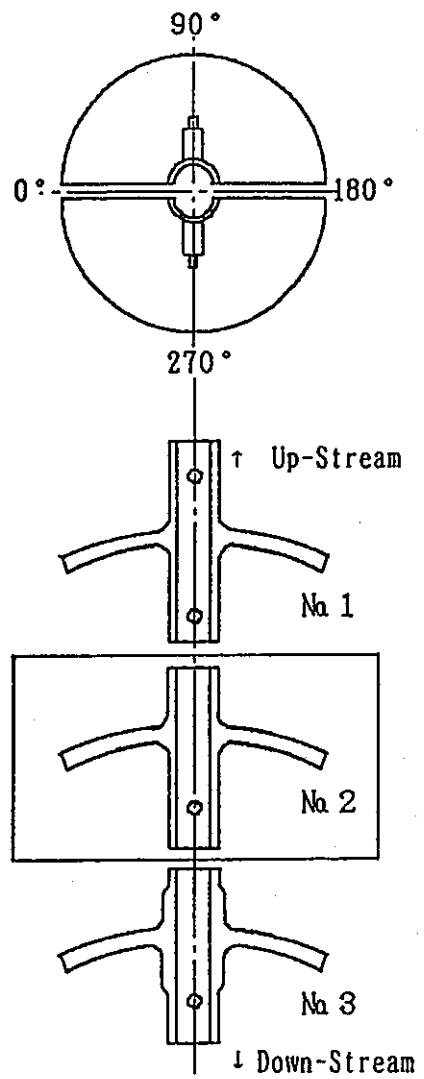


図 2.2.2 ノズル形状モデル 2 の液体浸透探傷検査結果

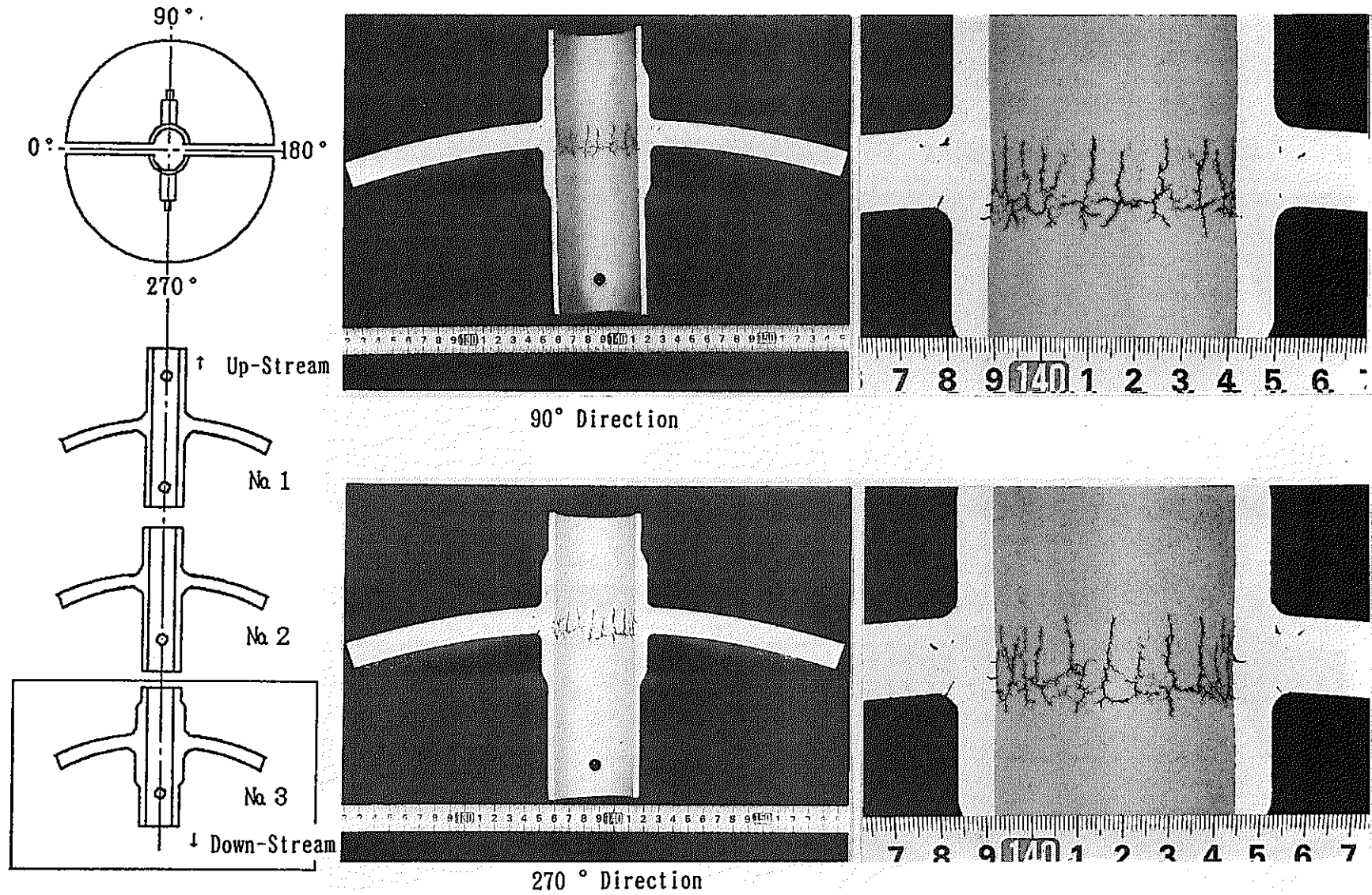


図 2.2.3 ノズル形状モデル3の液体浸透探傷検査結果

### 3. 伝熱・応力解析

伝熱・応力解析およびクリープ疲労損傷評価は以下の手順に従って実施した。

- (1) 伝熱解析として、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の温度時刻歴を入力し、非定常伝熱解析を行い、各節点における温度応答を計算する。
- (2) 熱応力解析として、(1)で得られた結果を熱荷重として、非弾性熱応力解析を行い、応力、ひずみを計算する。
- (3) (2)で得られた結果を用いて、後述するクリープ疲労損傷評価法により損傷値を計算する。

以下にそれぞれの手順における解析・評価の方法、条件を述べる。非弾性解析に採用する弾塑性応力-ひずみ関係を除いては、基本的に本研究第2報<sup>(1)</sup>で採用した方法、条件と同じである。詳細については、第2報を参照されたい。なお、(3)のクリープ疲労損傷評価法については、第4章で述べる。

#### 3.1 伝熱・応力解析法

伝熱解析および非弾性熱応力解析に使用した解析コードは、汎用非線形構造解析コード FINAS-V11.0である。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。それぞれの解析に使用した要素の種類を表 3.1.1に示す。

##### 3.1.1 解析モデル

ノズル形状モデル供試体の形状および寸法は図 2.1.1に示したとおりである。伝熱解析、非弾性熱応力解析とも供試体全体を個々のノズル部に3分割した部分モデル、MODEL-1～MODEL-3を用いて実施した。これらの解析モデルを図 3.1.1～図 3.1.3に示す。さらに、表 3.1.2には各モデルで使用した要素数および節点数を示す。

##### 3.1.2 伝熱解析法

まず、熱過渡試験時に計測した供試体内部を流れるナトリウムの温度時刻歴を入力として、非定常伝熱解析を行った。伝熱解析では、材料特性として供試体製作に使用したオーステナイト系ステンレス鋼SUS304の値を使用した。これらの材料特性、物性値（熱伝導係数、比熱、密度）を表 3.1.3に示す。

また、伝熱解析で使用した熱的境界条件を MODEL-1～MODEL-3 について図 3.1.4～図 3.1.6に示す。供試体の内面には液体ナトリウムが流れており、外面は保温材を介して大気（20℃）と接している。供試体内表面の熱伝達係数の算定はサボテンの式<sup>(3)</sup>を用い、外表面の熱伝達係数は、供試体外表面に設置された熱電対の応答値と伝熱解析結果が合うようにパラメータサーベイして決定した。

本試験は、供試体内面に200 l/minの流量で、低温（300℃）と高温（550℃）の液体ナ

トリウムを交互に流し、供試体に繰返し熱過渡荷重を負荷することにより、供試体にクリープ疲労損傷を与えるものである。1サイクルは、低温1時間、高温5時間の計6時間であり、1,700サイクル繰返された。

伝熱解析で使用した入力温度時刻歴は、図 3.1.7に示す位置で測定した4本の熱電対出力値(図 3.1.8 ~ 図 3.1.11)を試験体軸方向の距離で線形補間したものである。

### 3.1.3 非弾性熱応力解析法

次に伝熱解析結果を入力として、非弾性熱応力解析を実施した。熱応力解析で使用した機械的境界条件を図 3.1.12 ~ 図 3.1.14 に示す。また、熱応力解析で使用したSUS304鋼の材料特性、物性値としてヤング率、ポアソン比、線膨張係数を表 3.1.5に示す。

非弾性解析では、3種類のノズル形状モデル全てに対して共通に行う標準的解析条件として、弾塑性・クリープ解析を行った。ここで、塑性の構成則としては定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の2直線近似による定常降伏応力と定常加工硬化係数として、ひずみ速度 $1 \times 10^{-3} 1/s$ ，最大想定ひずみレベル0.3%条件の値を用いた。また塑性の硬化則は移動硬化則を用いた。解析条件としてひずみ速度 $1 \times 10^{-3} 1/s$ を採用したのは、本条件がSUS304について低サイクル疲労試験で時間依存型変形の寄与しない標準条件と見なすことができ、この種の解析の弾塑性応力-ひずみ関係として多用されてきたためである。一方クリープの取扱に関しては、クリープひずみ式として遷移クリープを考慮した動燃の式を用い、硬化則としてひずみ硬化則を用いた。弾塑性・クリープ解析で使用する材料特性、物性値として定常降伏応力、定常加工硬化係数、クリープひずみ式を表 3.1.6 ~ 表 3.1.7 に示す。なお、以上述べた材料特性は全て温度依存性を考慮している。

また、上記標準条件とは別に、クリープ解析実施の有無が強度評価結果に及ぼす影響を把握する目的で、3種類のノズル形状モデルに対してクリープを考慮しない、弾塑性解析のみの条件で解析を行う(5.1節参照)とともに、強度評価結果に及ぼす異なるひずみ速度条件での応力-ひずみ関係の影響を把握するため、MODEL-1についてはひずみ速度 $1 \times 10^{-6} 1/s$ ，最大想定ひずみレベル0.3%条件のデータによる解析(5.2節参照)も合わせて実施した。本ひずみ速度条件は、先に実施した解析の結果から本熱過渡試験で生じるひずみ速度が本条件に近いことが予想されたために選定したものである。これらの検討結果については第5章で述べる。

表 3.1.1 伝熱解析、熱応力解析に使用した要素の種類

	heat transfer analysis	thermal stress analysis
Axi-symmetrical 8-nodes quadrilateral element	H Q A X 8	Q A X 8
Axi-symmetrical 6-nodes triangle element	H T A X 6	T A X 6
Axi-symmetrical 3-nodes heat transfer element	F C A X 3	

表 3.1.2 伝熱解析、熱応力解析に使用した要素数と節点数

	heat transfer analysis		thermal stress analysis	
	number of elements	number of nodes	number of elements	number of nodes
MODEL-1	364	903	270	903
MODEL-2	342	851	258	851
MODEL-3	360	887	262	887

表 3.1.3 伝熱解析に使用したSUS304鋼の材料特性

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

表 3.1.4 伝熱解析に使用した熱過渡条件

TIME (sec)	FT1b (℃)	FT2b (℃)	FT3b (℃)	FT4b (℃)
0.0	550.0	550.0	550.0	550.0
10.0	550.0	550.0	550.0	550.0
18.5	542.0	545.0	545.0	545.0
23.0	535.0	538.0	541.0	542.0
25.5	532.0	530.5	532.5	536.0
28.5	370.0	397.0	400.0	424.0
30.0	350.0	362.0	362.5	377.5
32.0	327.5	337.0	345.0	356.0
35.0	317.5	322.0	323.5	332.5
37.0	315.5	318.0	317.5	325.0
43.0	310.0	313.0	313.5	315.0
60.0	307.5	309.0	309.0	309.0
90.0	305.0	307.0	306.0	307.0
120.0	307.5	308.0	308.0	308.0
150.0	306.0	307.0	307.0	307.0
180.0	306.0	307.0	307.0	307.0
300.0	302.5	302.5	302.5	302.5
500.0	300.0	300.0	300.0	300.0
900.0	302.5	302.5	302.5	302.5
1800.0	303.5	303.5	303.5	303.5
3600.0	302.5	302.5	302.5	302.5
3613.0	302.5	302.5	302.5	302.5
3619.0	305.0	304.0	304.0	303.0
3624.0	310.0	308.5	305.5	305.0
3625.5	330.0	321.0	316.0	312.0
3627.0	425.0	398.0	392.5	380.0
3628.5	472.0	450.5	447.5	422.0
3630.0	500.0	482.0	479.5	459.0
3631.5	519.0	497.5	497.0	487.0
3634.0	528.0	518.5	519.5	508.0
3636.0	532.0	526.0	525.0	517.0
3641.0	539.0	535.5	535.0	530.5
3649.0	543.0	540.0	540.0	538.0
3660.0	544.5	542.5	542.5	540.0
3690.0	547.5	545.5	545.5	544.0
3720.0	547.5	546.5	546.0	543.5
3750.0	545.0	543.5	544.5	542.5
3780.0	545.0	543.5	544.0	542.5
3900.0	548.5	547.5	547.5	546.0
4100.0	550.0	550.0	550.0	552.5
5400.0	550.0	550.0	550.0	550.0
7200.0	550.0	550.0	550.0	550.0
9000.0	550.0	550.0	550.0	550.0
13900.0	550.0	550.0	550.0	550.0
21600.0	550.0	550.0	550.0	550.0

表 3.1.5 熱応力解析に使用したSUS304鋼の材料特性

Temperature (°C)	Modulus of Elasticity (kg/mm <sup>2</sup> )	Poisson's Ratio	Coefficient of Linear Expansion (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 3.1.6 非弾性熱応力解析に使用したSUS304鋼の材料特性 (弾塑性特性)

最大想定ひずみレベル 0.3%

Temperature (°C)	Steady State Yield Stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Steady State Work Hardening Coefficient (kg/mm <sup>2</sup> )
400	16.95	5134.4
450	16.95	5134.4
500	16.95	5134.4
550	16.45	4384.6
600	15.61	3442.5
650	14.80	2828.1

表 3.1.7 非弾性熱応力解析に使用したSUS304鋼の材料特性 (クリープひずみ式)

Creep strain equation of SUS 304 stainless steel

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

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

σ : Stress (kgf/mm<sup>2</sup>)      0.1 kgf/mm<sup>2</sup> ≤ σ

t<sub>R</sub> : Creep rupture time (hr)

ε<sub>m</sub> : Steady creep rate (mm/mm/hr)

t : Time (hr)

$$t_R \quad \log_{10}(\alpha_c t_R) = -17.54301 + \frac{26248.54}{T + 273.15} - \frac{6104.579}{T + 273.15} \log_{10} \sigma - \frac{425.0012}{T + 273.15} (\log_{10} \sigma)^2$$

$$\dot{\epsilon}_m = 62.416 \cdot \exp\left[-\frac{40812}{8.31 \cdot (T + 273.15)}\right] \cdot t_R^{-1.1335}$$

$$C_1 = 1.2692 \cdot \frac{\dot{\epsilon}_m^{0.74491}}{r_1}$$

$$C_2 = 0.48449 \cdot \frac{\dot{\epsilon}_m^{0.81155}}{r_2}$$

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

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

$$\alpha_c = 1.0$$

FINAS

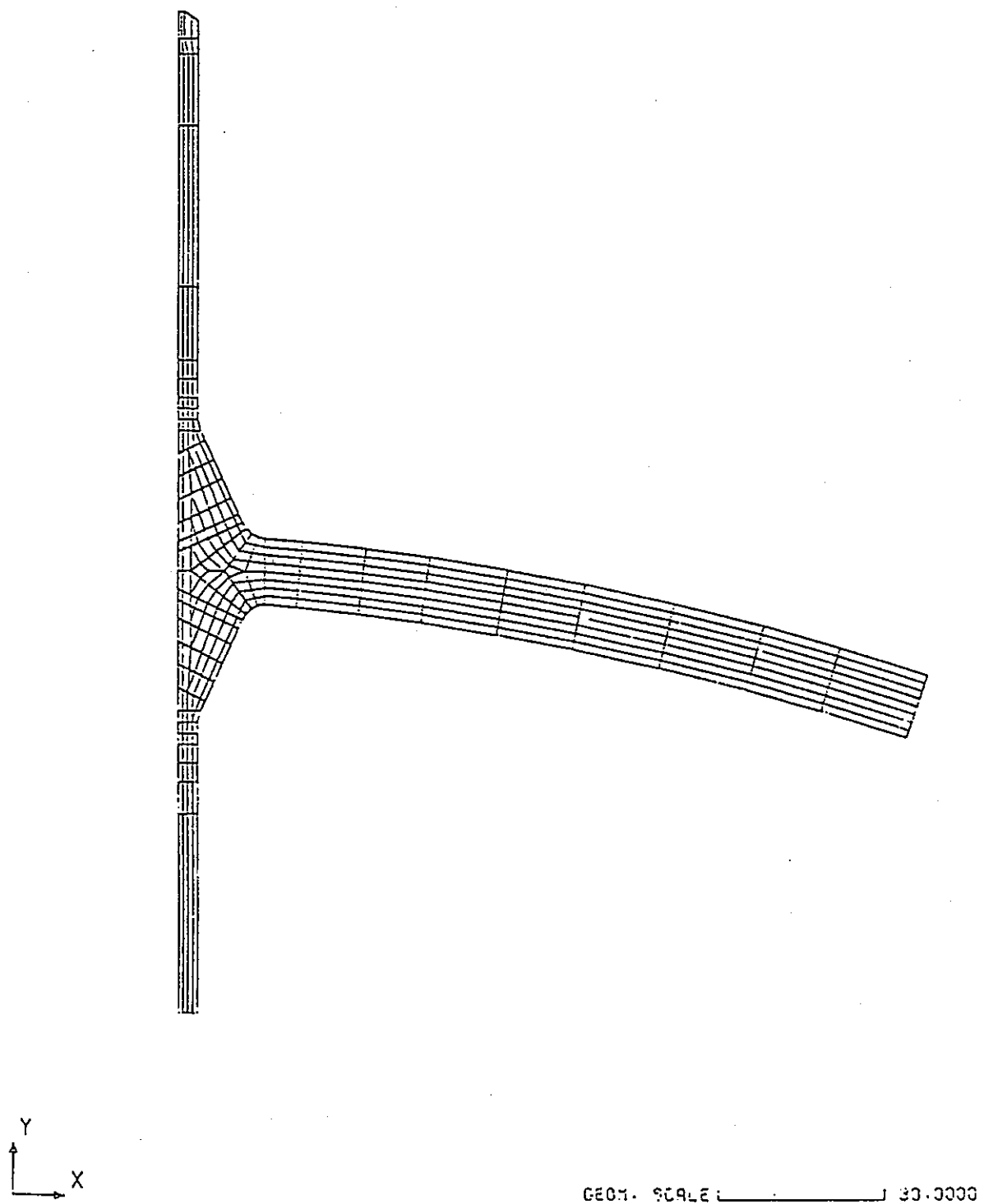


図 3.1.1 ノズル形状モデル1のFEM解析モデル図

FINAS

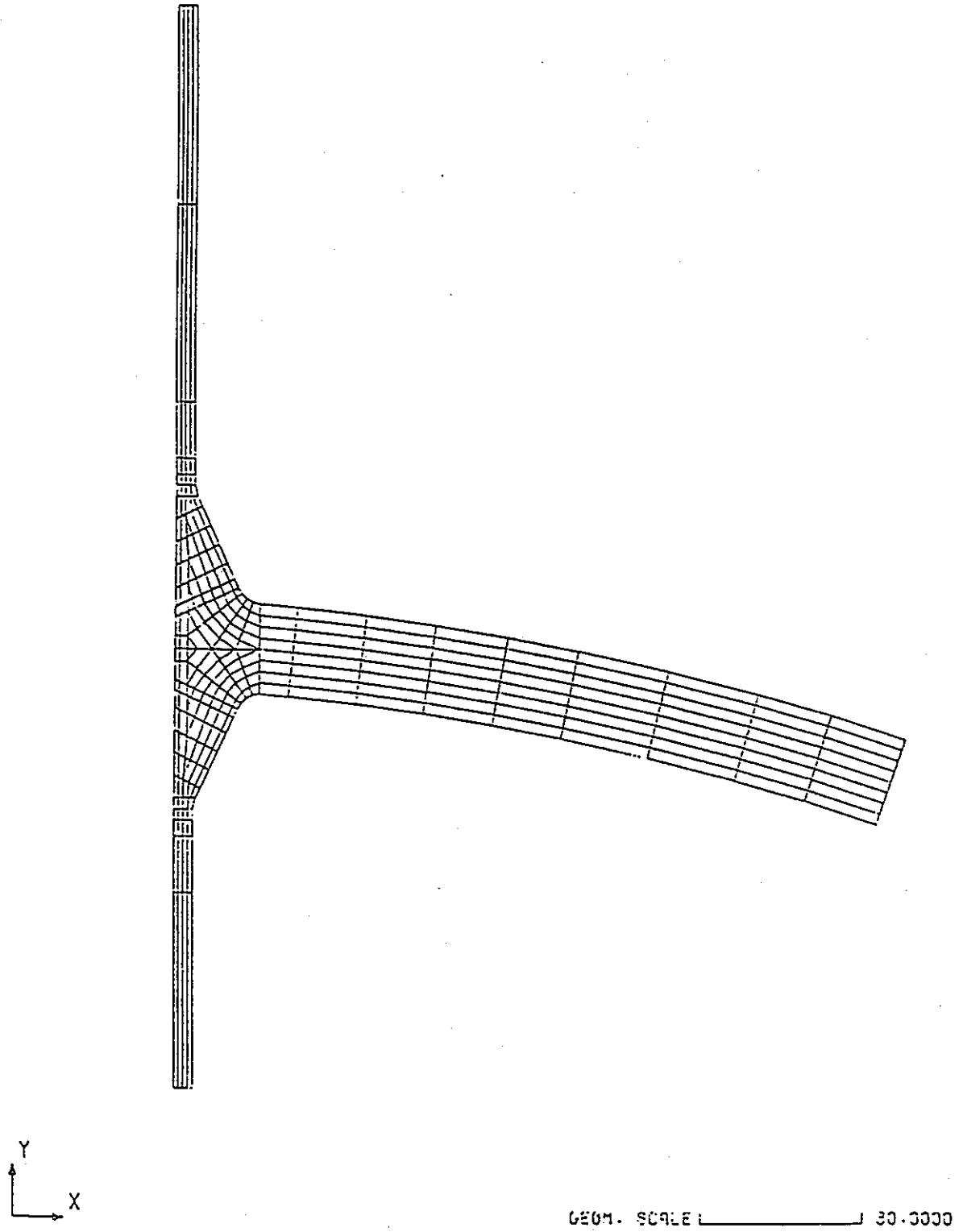


図 3.1.2 ノズル形状モデル2のFEM解析モデル図

FINAS

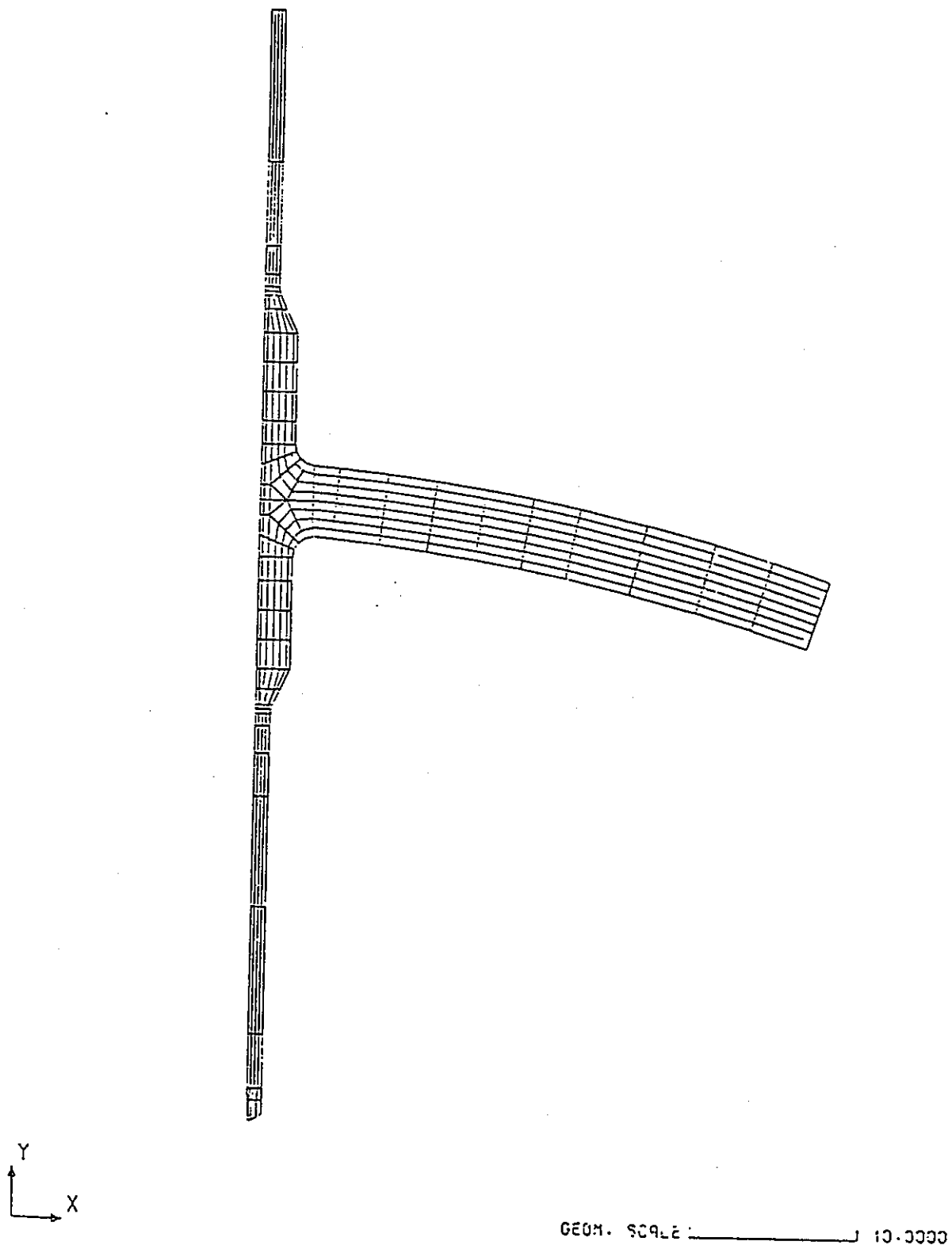
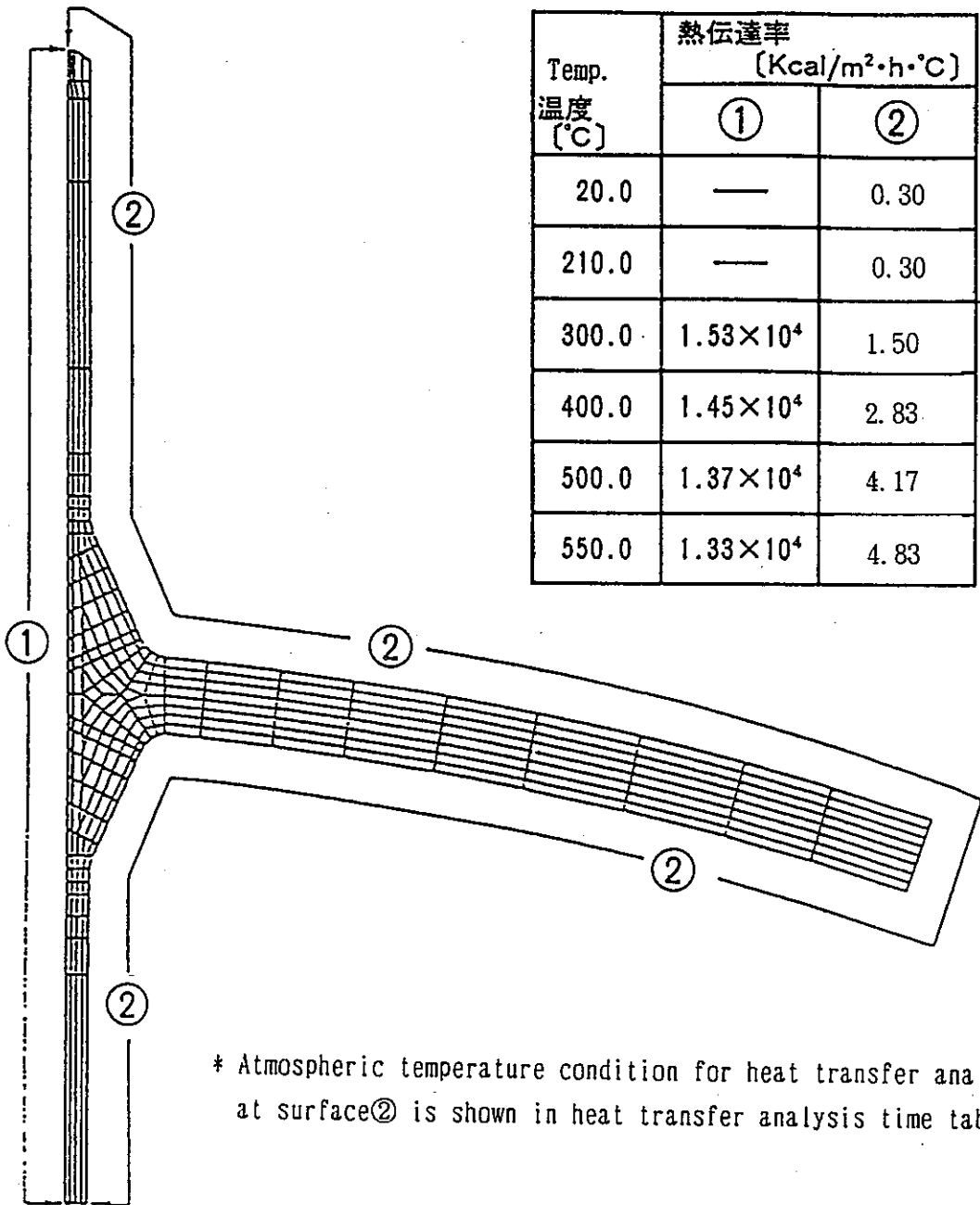


図 3.1.3 ノズル形状モデル3のFEM解析モデル図

Heat Transfer Coefficient

Temp. 温度 [°C]	熱伝達率 [Kcal/m <sup>2</sup> ·h·°C]	
	①	②
20.0	—	0.30
210.0	—	0.30
300.0	1.53 × 10 <sup>4</sup>	1.50
400.0	1.45 × 10 <sup>4</sup>	2.83
500.0	1.37 × 10 <sup>4</sup>	4.17
550.0	1.33 × 10 <sup>4</sup>	4.83



MODEL-1

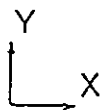
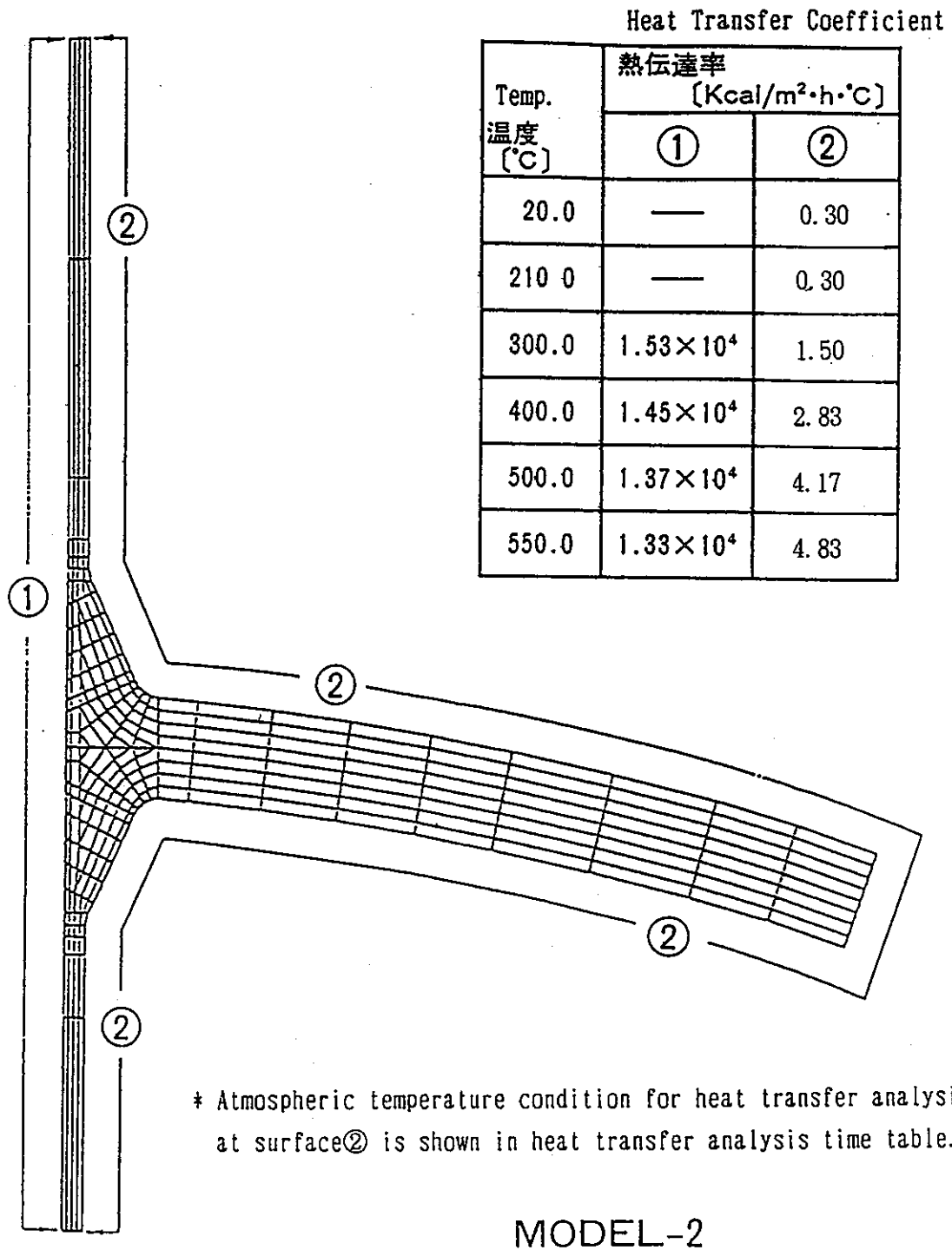


図 3.1.4 ノズル形状モデル1の伝熱解析における熱的境界条件



\* Atmospheric temperature condition for heat transfer analysis at surface② is shown in heat transfer analysis time table.

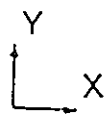
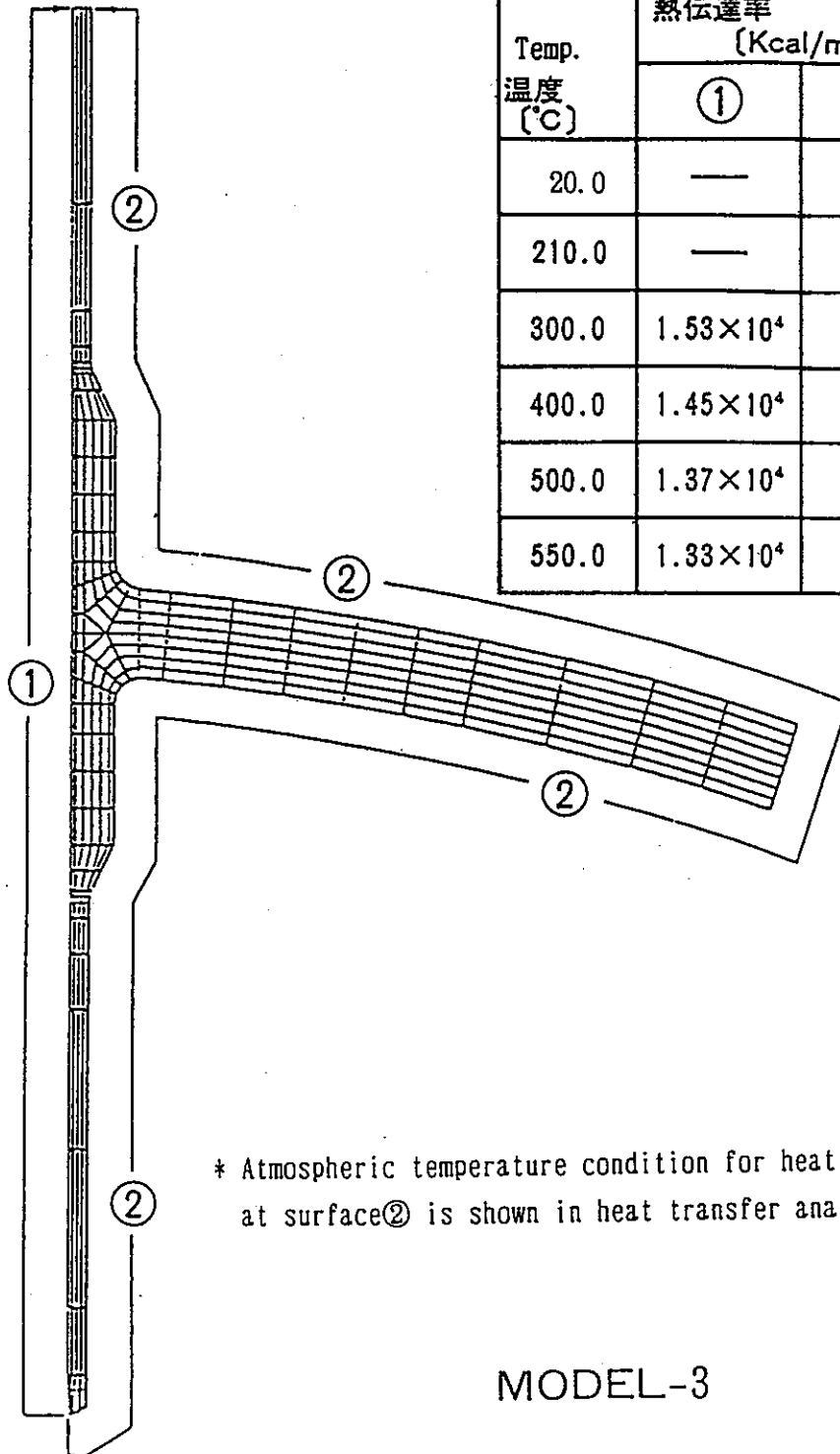


図 3.1.5 ノズル形状モデル 2 の伝熱解析における熱的境界条件

Heat Transfer Coefficient

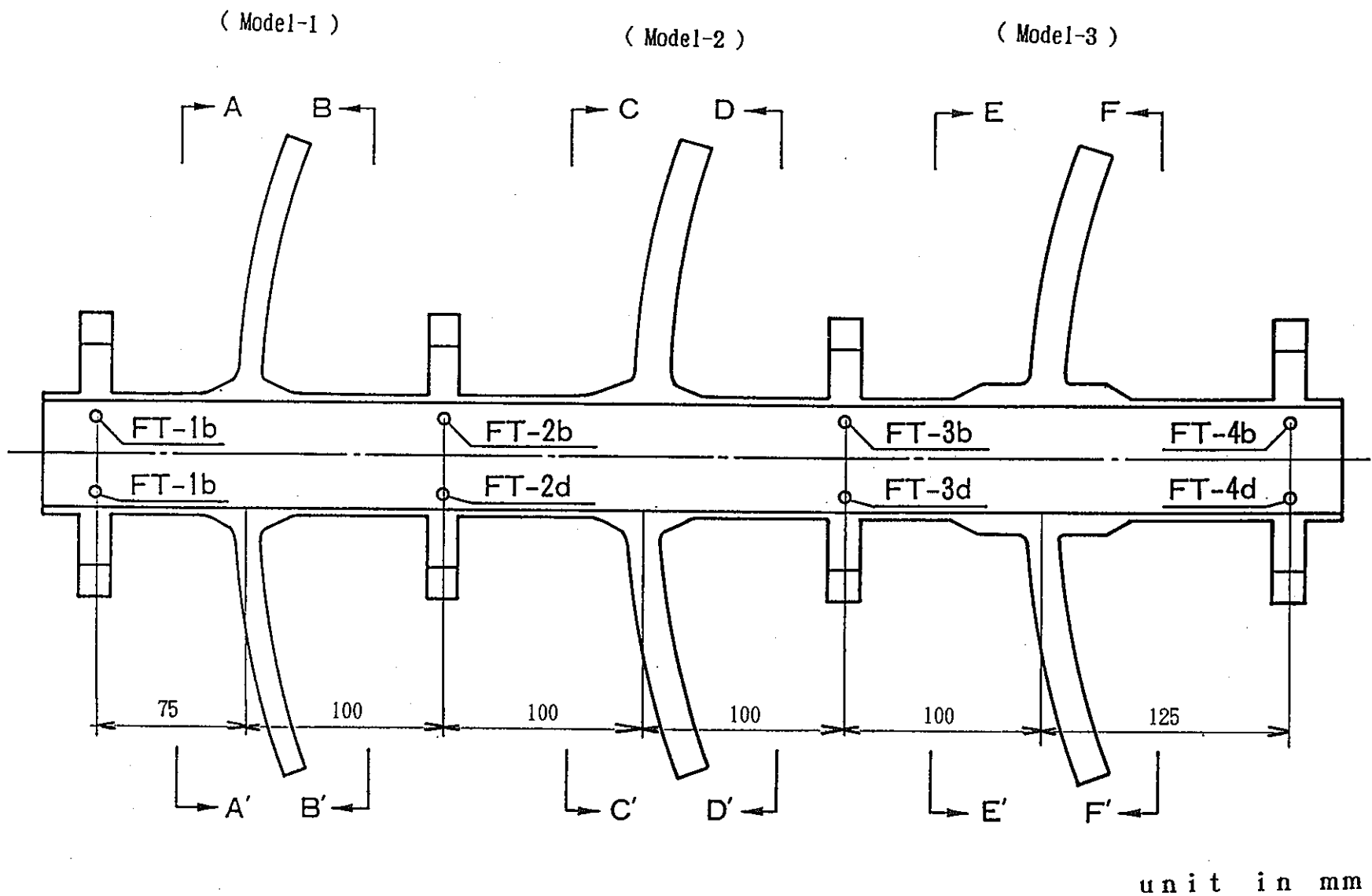
Temp. 温度 [°C]	熱伝達率 [Kcal/m <sup>2</sup> ·h·°C]	
	①	②
20.0	—	0.30
210.0	—	0.30
300.0	1.53 × 10 <sup>4</sup>	1.50
400.0	1.45 × 10 <sup>4</sup>	2.83
500.0	1.37 × 10 <sup>4</sup>	4.17
550.0	1.33 × 10 <sup>4</sup>	4.83



\* Atmospheric temperature condition for heat transfer analysis at surface② is shown in heat transfer analysis time table.

MODEL-3

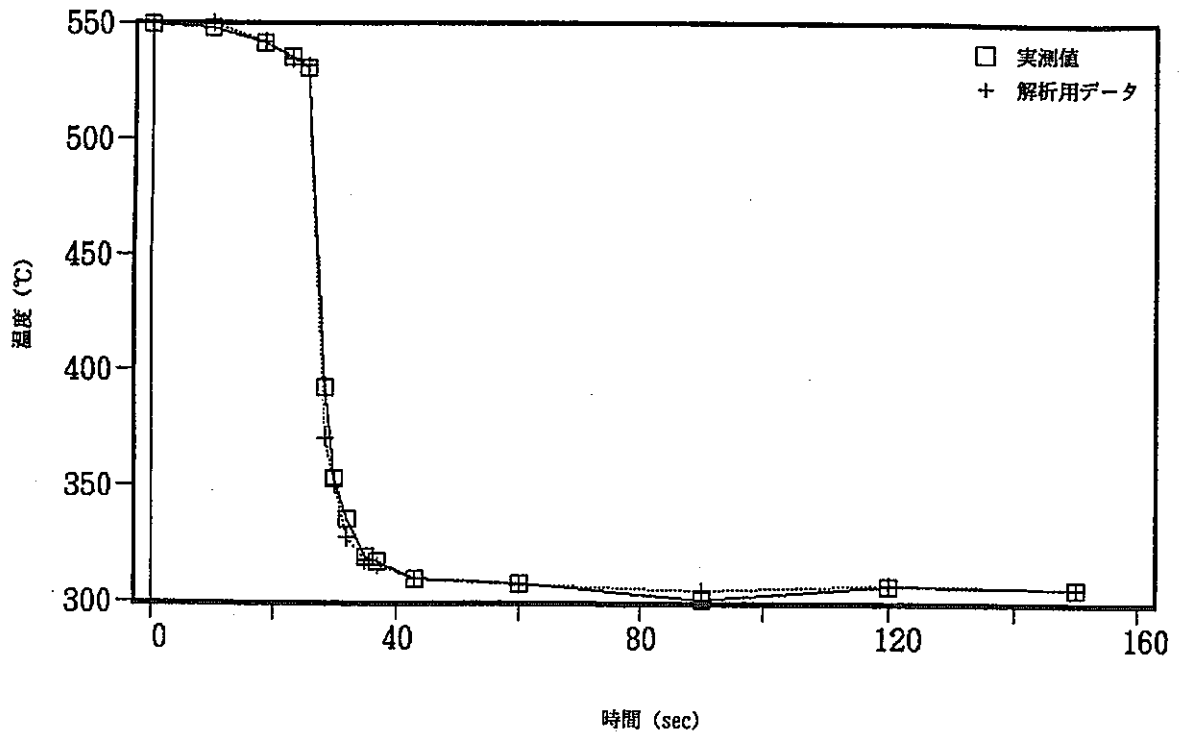
図 3.1.6 ノズル形状モデル3の伝熱解析における熱的境界条件



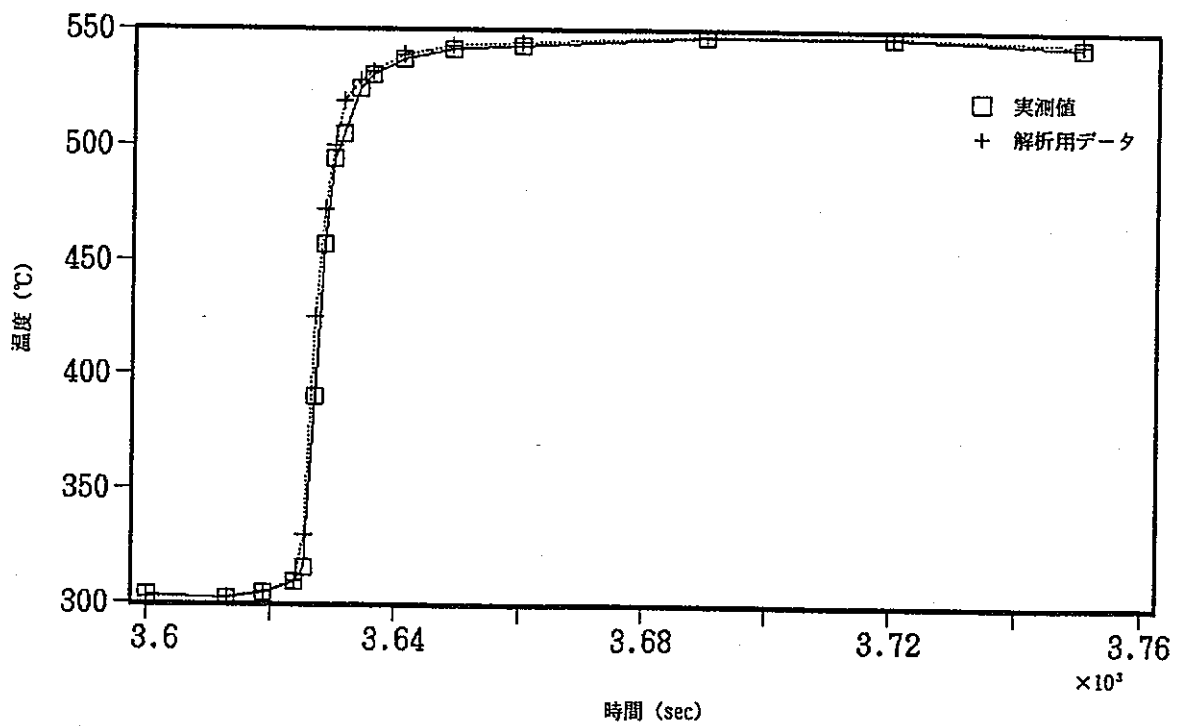
熱電対取付位置 (液体ナトリウム温度測定用)

図 3.1.7 ノズル形状モデルの伝熱解析入力温度測定用の熱電対の位置



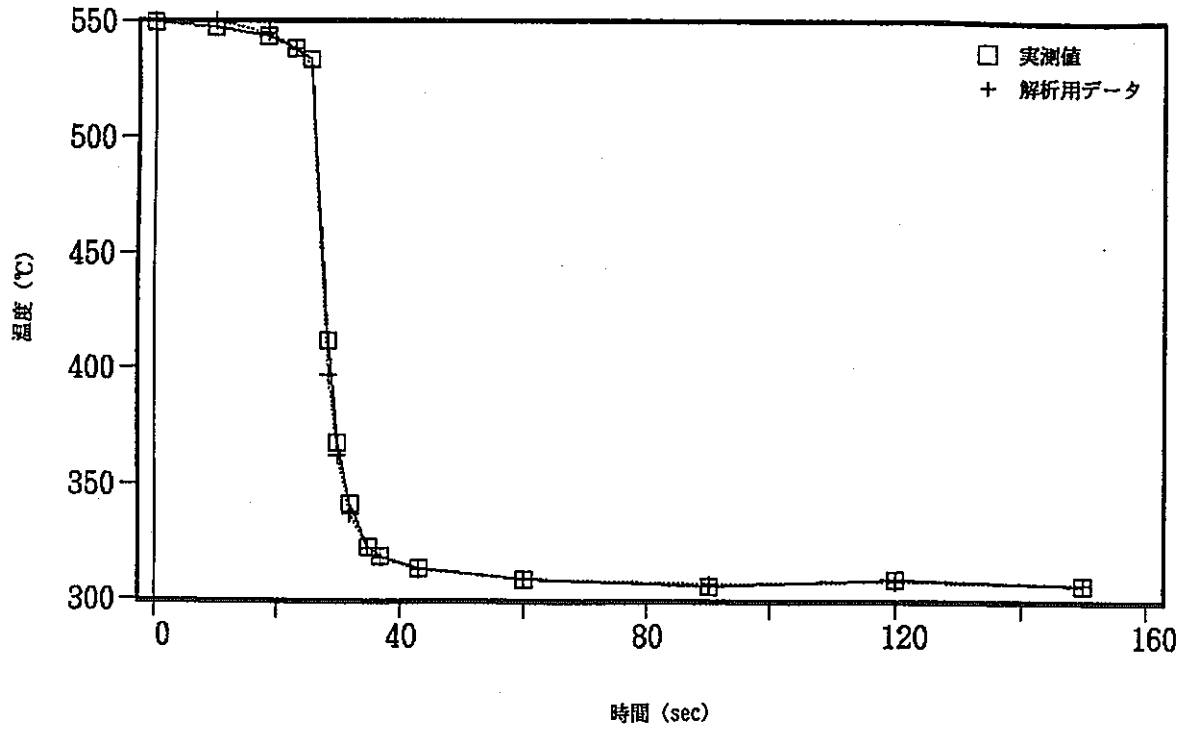


ノズルモデル1上流側測定点 (FT1b-CHO) における温度変化  
 実測値と解析用データの比較 (コールドトランジェント150 秒まで)

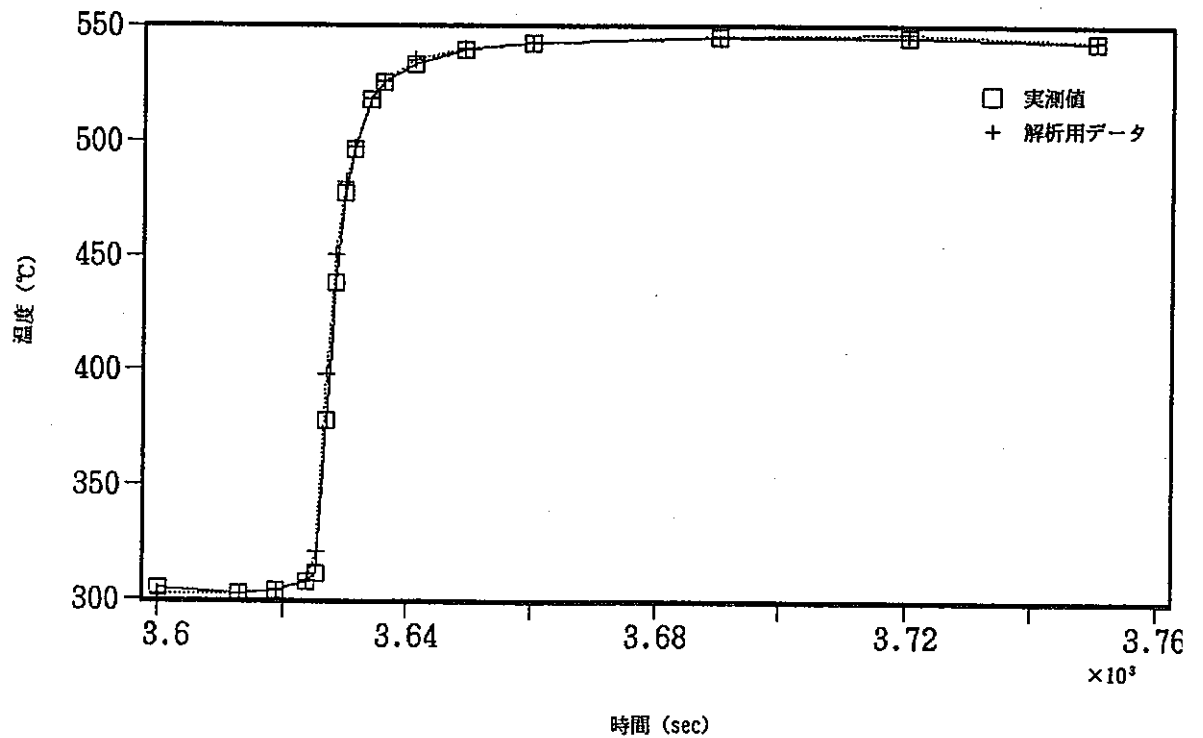


ノズルモデル1上流側測定点 (FT1b-CHO) における温度変化  
 実測値と解析用データの比較 (ホットトランジェント150 秒まで)

図 3.1.8 伝熱解析用入力熱過渡条件 (FT-1b でのナトリウム温度時刻歴)

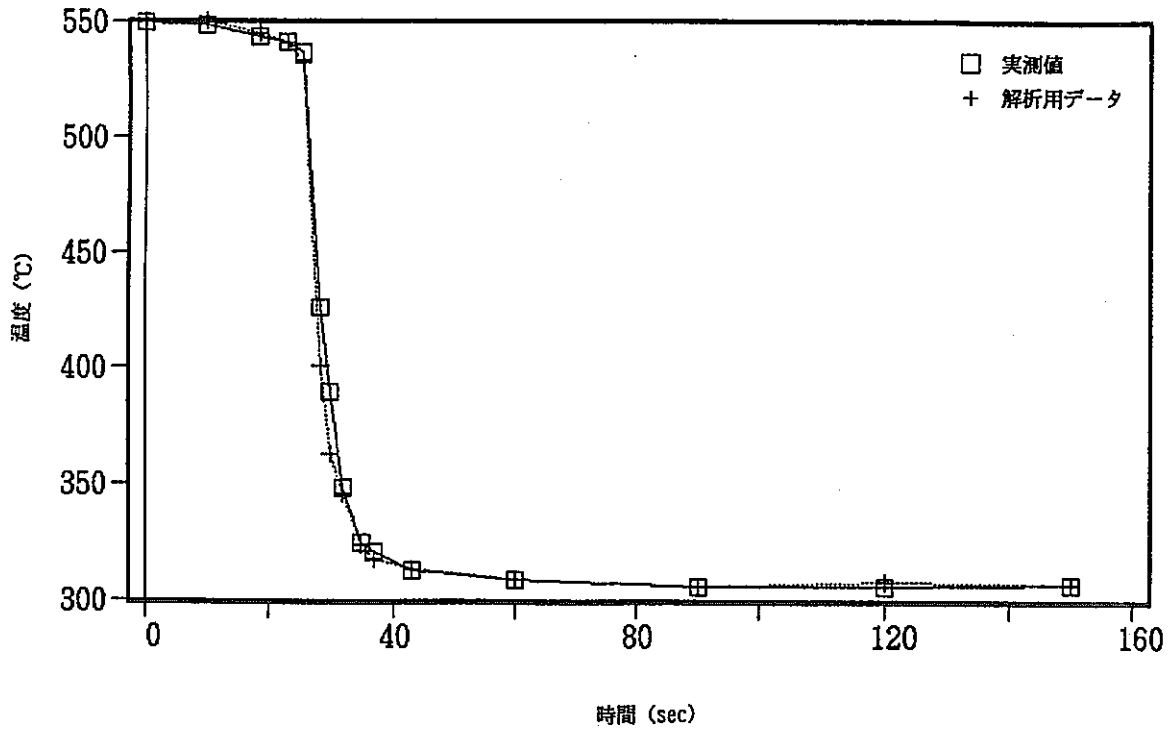


ノズルモデル2上流側測定点 (FT2b-CH1) における温度変化  
実測値と解析用データの比較 (コールドトランジェント150 秒まで)

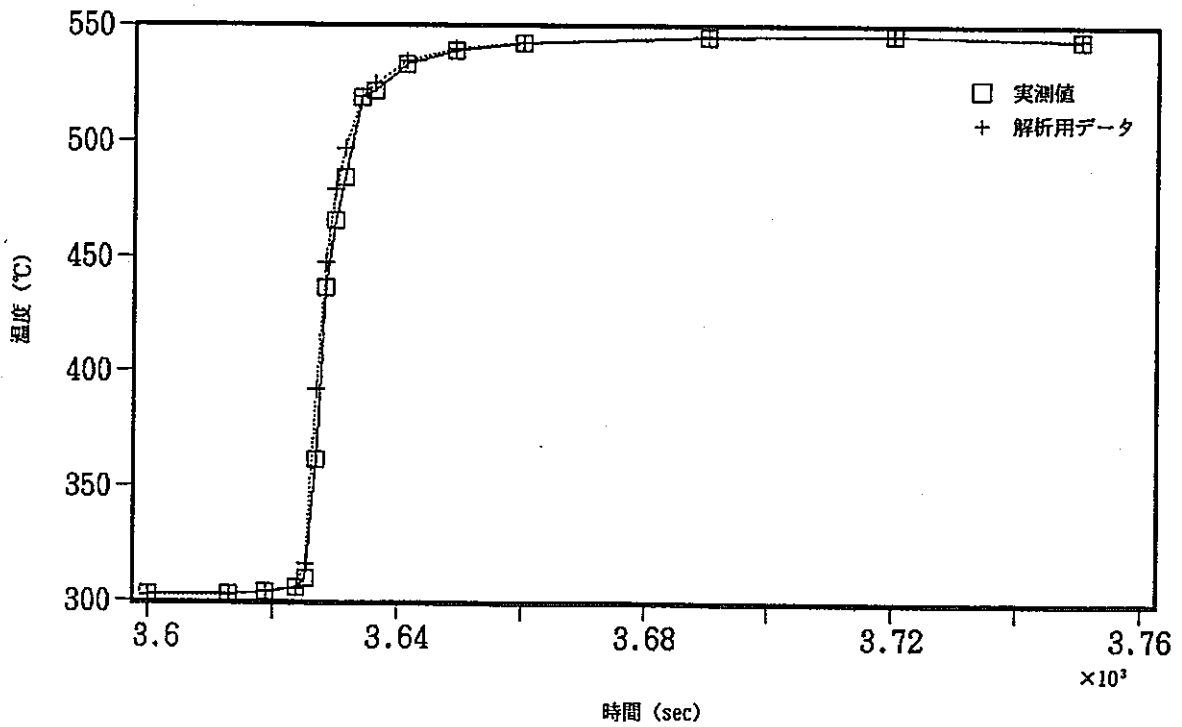


ノズルモデル2上流側測定点 (FT2b-CH1) における温度変化  
実測値と解析用データの比較 (ホットトランジェント150 秒まで)

図 3.1.9 伝熱解析用入力熱過渡条件 (FT-2b でのナトリウム温度時刻歴)

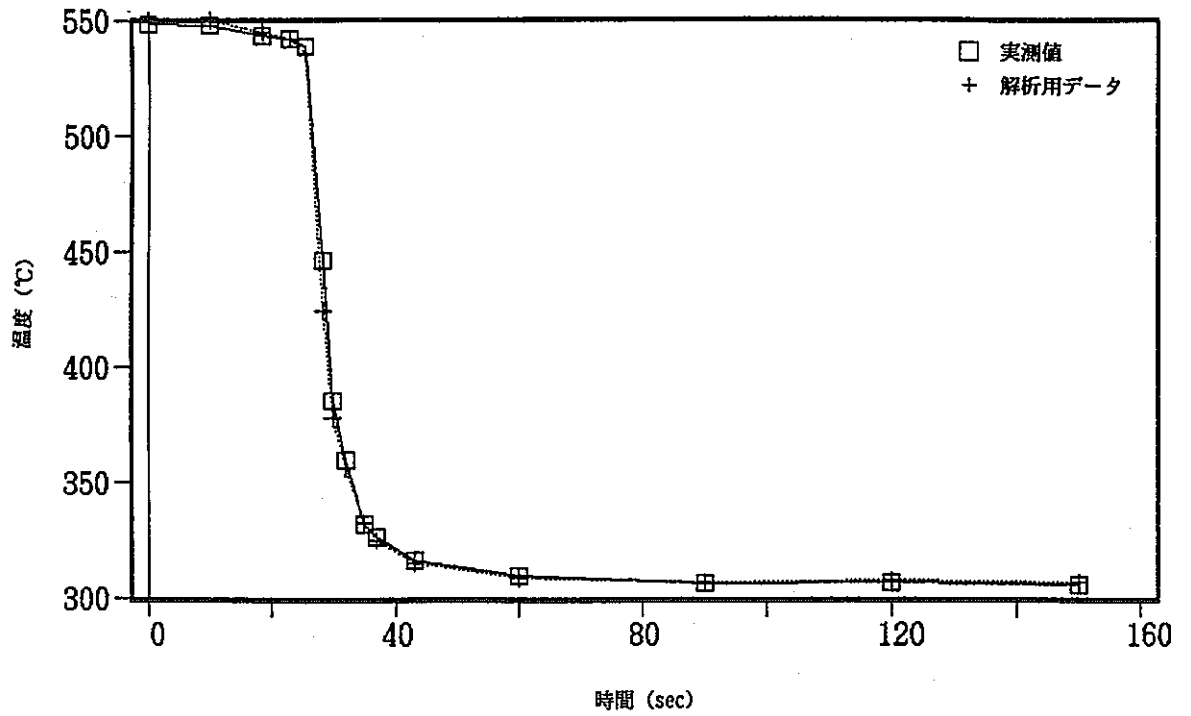


ノズルモデル3上流側測定点 (FT3b-CH2) における温度変化  
 実測値と解析用データの比較 (コールドトランジェント150秒まで)

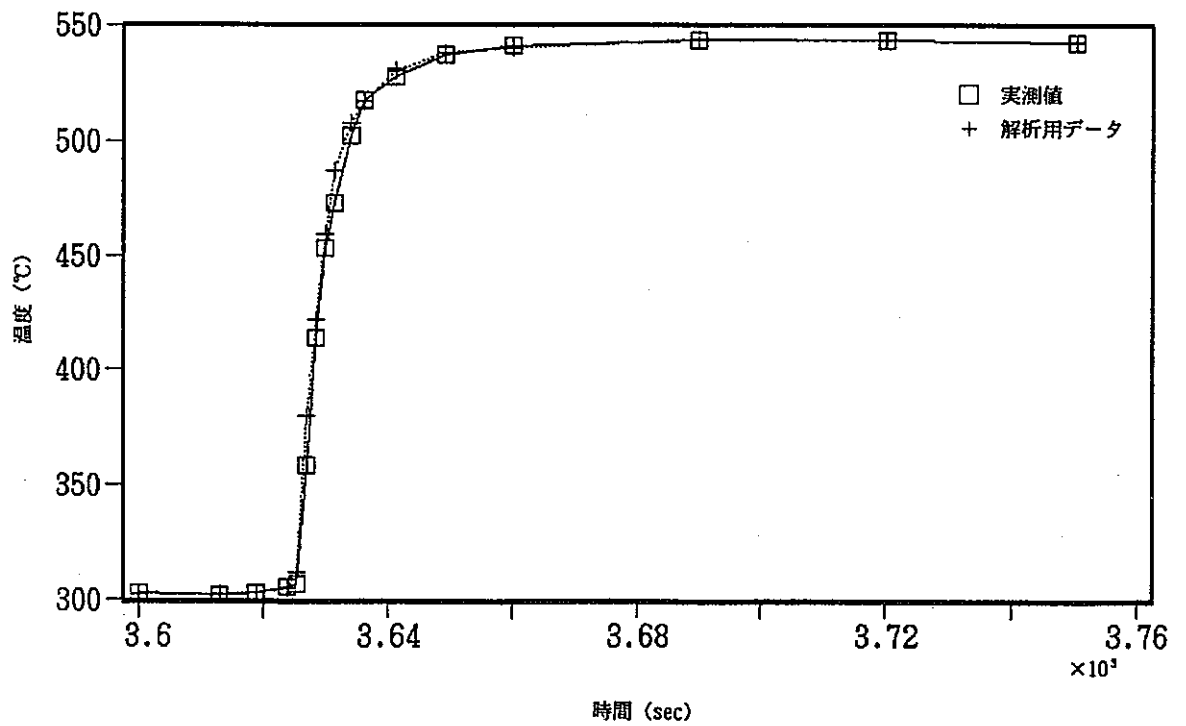


ノズルモデル3上流側測定点 (FT3b-CH2) における温度変化  
 実測値と解析用データの比較 (ホットトランジェント150秒まで)

図 3.1.10 伝熱解析用入力熱過渡条件 (FT-3b でのナトリウム温度時刻歴)



ノズルモデル3下流側測定点 (FT4b-CH3) における温度変化  
 実測値と解析用データの比較 (コールドトランジェント150秒まで)



ノズルモデル3下流側測定点 (FT4b-CH3) における温度変化  
 実測値と解析用データの比較 (ホットトランジェント150秒まで)

図 3.1.11 伝熱解析用入力熱過渡条件 (FT-4b でのナトリウム温度時刻歴)

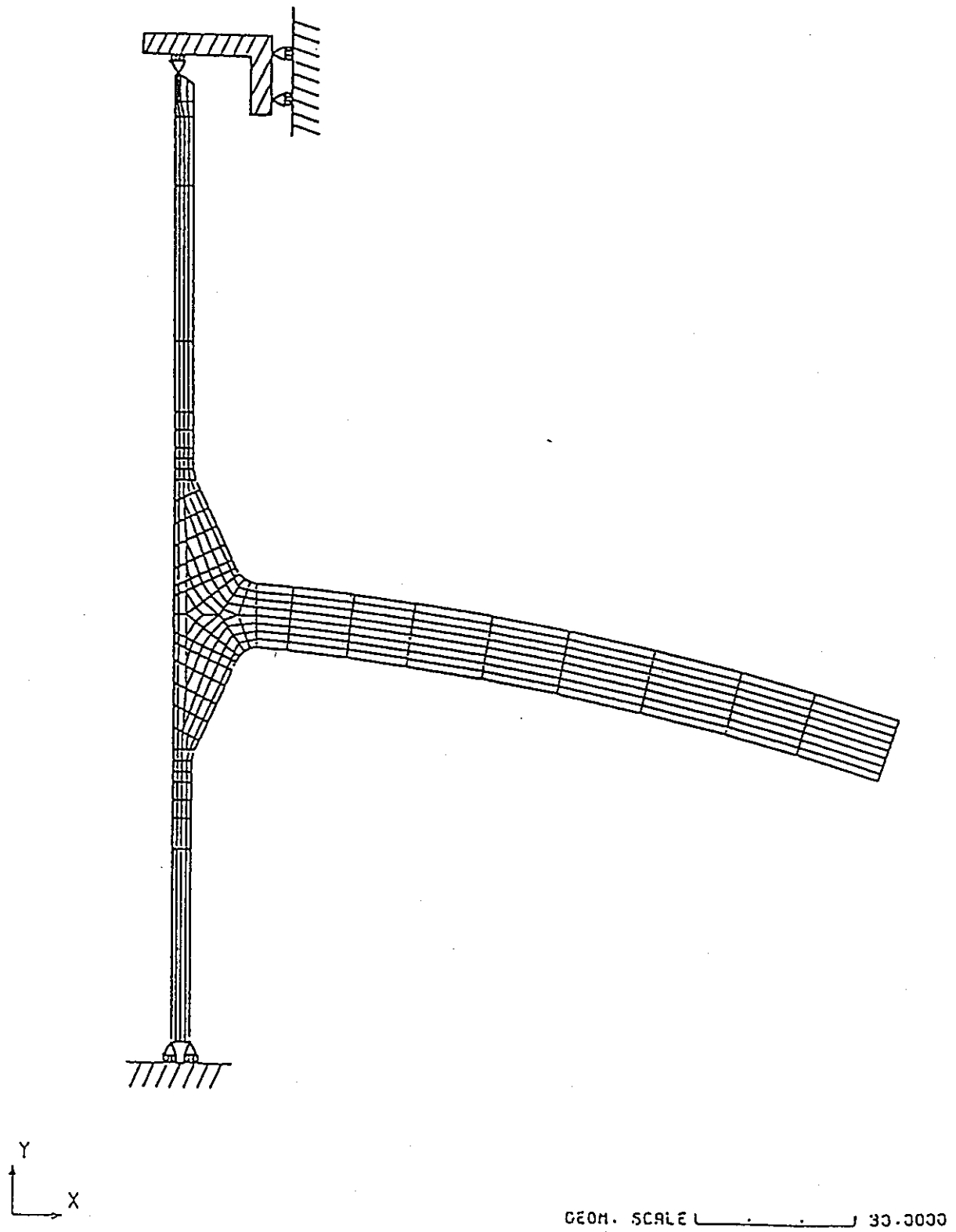


図 3.1.12 ノズル形状モデル1の熱応力解析における機械的境界条件

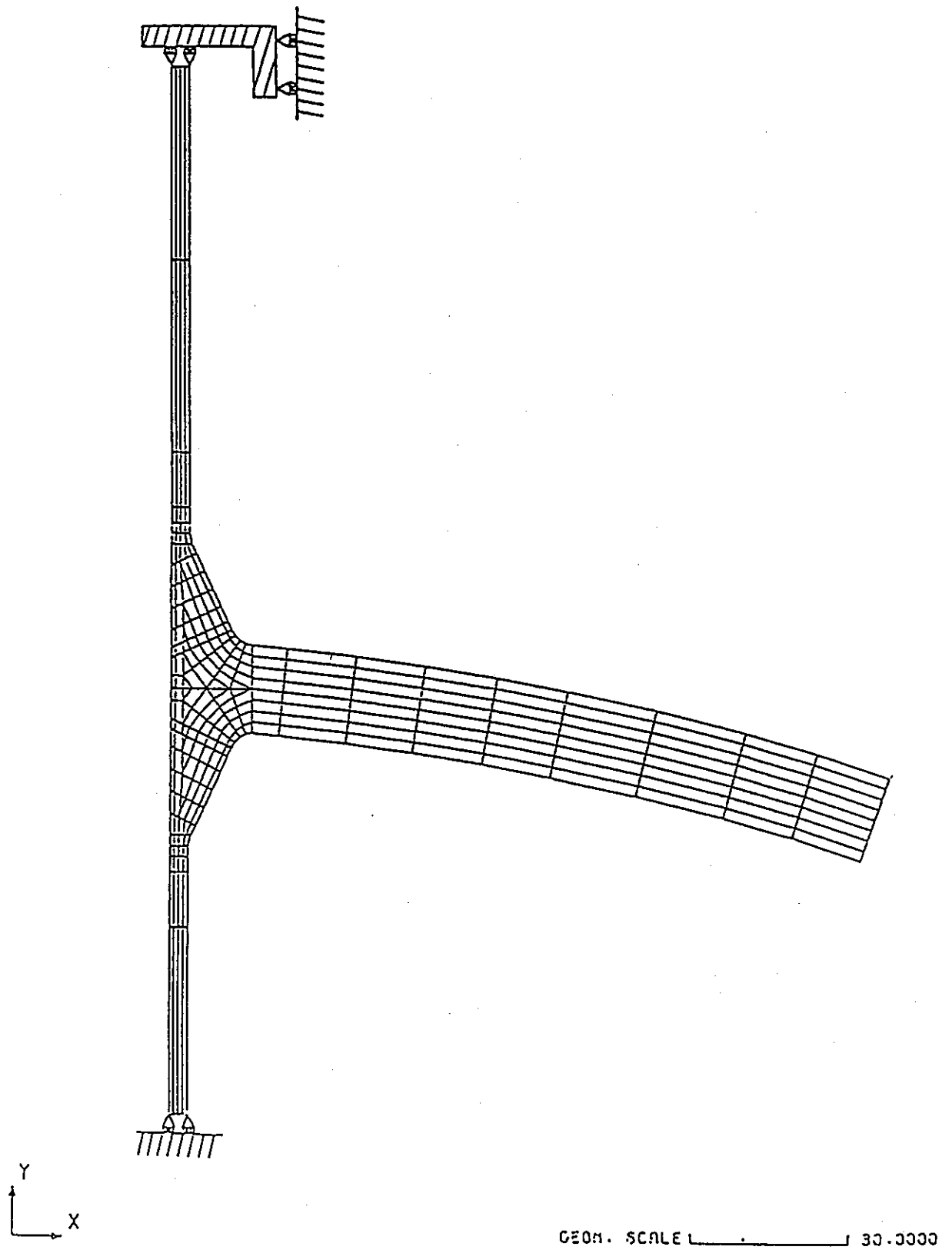


図 3.1.13 ノズル形状モデル 2 の熱応力解析における機械的境界条件

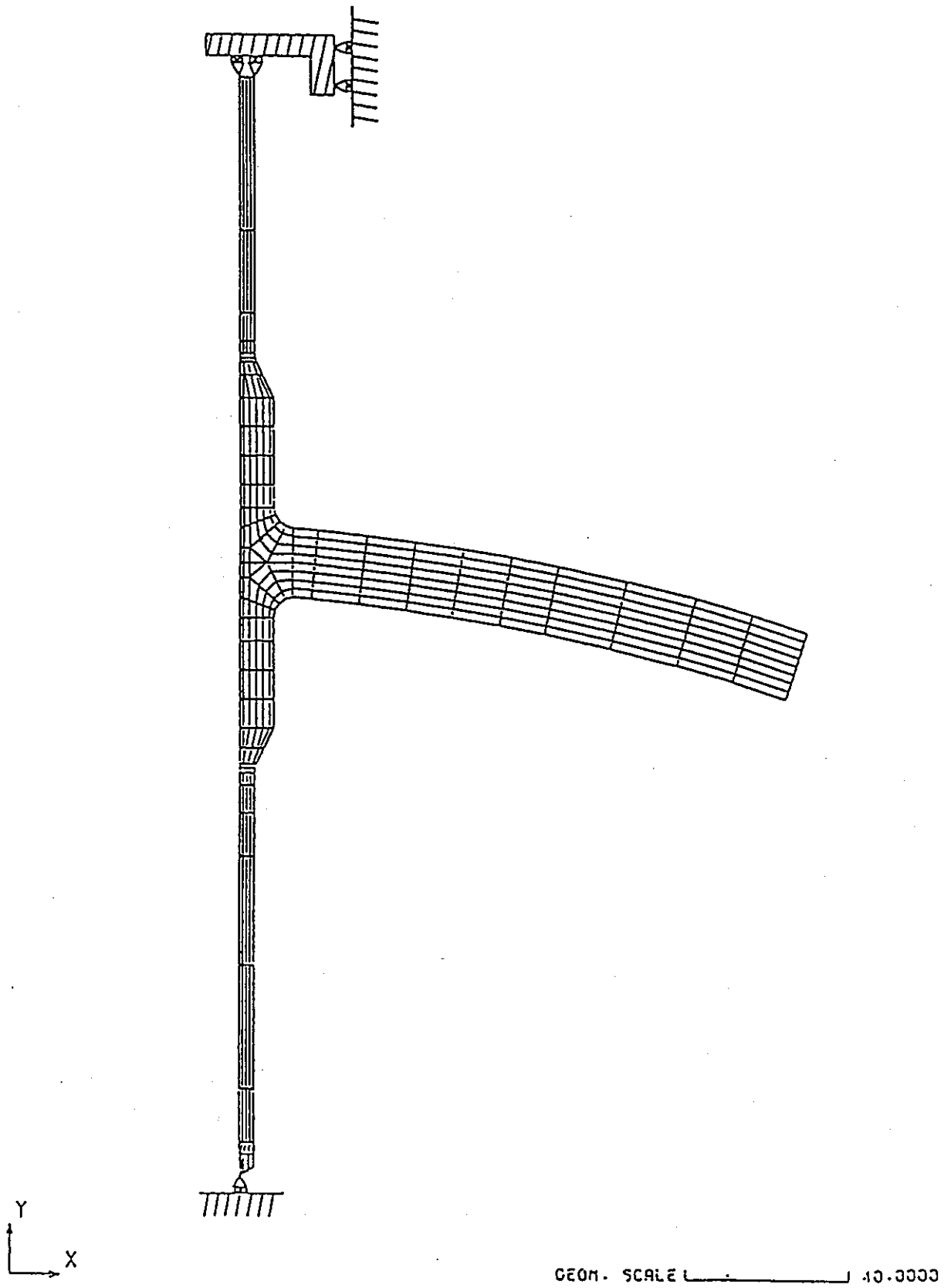


図 3.1.14 ノズル形状モデル3の熱応力解析における機械的境界条件

## 3.2 伝熱・応力解析結果

### 3.2.1 伝熱解析結果

伝熱解析については、本研究第2報<sup>(1)</sup>において供試体外表面に設置した熱電対の応答値と伝熱解析結果が合うようにパラメータサーベイがなされ、適切な熱伝達係数等の解析条件が把握されている。これらの条件を各モデル毎に整理したものが表3.2.1である。本解析条件のポイントは、以下のとおりである。

(1) 供試体外表面に保温材を設置してはいるが、ツバの部分での大気(室温)との熱伝達を完全には遮断できていない。従って、この部分は断熱と仮定するよりも外部雰囲気とのわずかな熱伝達を考慮したほうが、実測値に近い解析結果が得られる。また5時間におよぶ高温ナトリウム(550℃)の循環でもツバの部分には温度分布が残存し、均一温度とはなっていない。

(2) 従って、熱過渡試験第2サイクル以降の定常サイクルにおける低温熱過渡開始時点での供試体温度分布と解析の初期温度分布を合わせるための前処理解析が必要となる。このための前処理解析として、各モデルとも1時間の低温熱過渡と、それに続く30分程度の高温熱過渡の解析を行っている。ここでの高温熱過渡側の解析時間は、個々のモデルの初期温度分布と合うように調整したもので、実時間とは一致していない。また、この前処理解析段階では、外部雰囲気の温度条件は550℃を採用しているが、この値も実際の値(室温)とは異なる。

(3) 次に、熱応力解析に供される温度応答を得るための本解析として、低温-高温-低温の1.5サイクルの伝熱解析を、実際の熱過渡試験の実時間どおりに行っている。ここでの外部雰囲気の温度条件は実際の室温(20℃)を採用している。

今回の伝熱解析では、当初、より単純な外表面断熱条件でも結果に大きな影響が無いと考え比較検討を行ったが、外表面での放熱が無視できない結果となったため、前回と同一の条件を採用することとした。

伝熱解析結果として、各モデルでの内表面に着目した、極値2時点近傍における温度コンター図を図3.2.1~図3.2.3に示す。温度分布は、ツバの取り付けられた円筒胴厚肉部からツバの先端方向に向かって大きな温度勾配が形成されていることが分かる。これらの結果は第2報および試験データと良く合っている。

なお、付録Aにはここに示した以外の主要な伝熱解析結果および上記外表面断熱条件での解析結果と比較した結果等を示した。

### 3.2.2 非弾性熱応力解析結果

非弾性解析の結果については、モデル内外表面に沿った応力、ひずみの分布、さらに各モデルにおいて高い応力、ひずみの発生する主要な評価点における応力、ひずみの時刻歴および損傷評価を実施するために必要な各種パラメータを把握する観点から整理を行った。



図 3.2.7～図 3.2.9に各モデルの損傷評価点および応力、ひずみの分布を表示する範囲を示す。

非弾性解析結果として、図 3.2.4～図 3.2.6には各モデルの内表面に着目した場合の低温熱過渡および高温熱過渡時の 2 極値を形成する時点近傍でのミ- $\epsilon$ 相当応力のコンター図を、また図 3.2.10～図 3.2.12 には図 3.2.7～図 3.2.9に示した各モデルの内表面側の表示ラインに沿ったひずみの分布として、低温熱過渡および高温熱過渡時の 2 極値を形成する時点近傍でのものを対比させて示した。さらに、表 3.2.2～表 3.2.4には各モデルの内外表面代表点（図 3.2.7～図 3.2.9に示したクリープ疲労損傷評価点）での極値 2 時点における時刻、温度、各成分ひずみ、相当ひずみ範囲を示した。

これらの図、表より、以下のことがいえる。応力コンター図によれば各モデルにおいて最も応力が厳しい部位は円筒内表面のうちツバ取り付け部中央よりやや下流側と外表面側のツバ取り付けR部のうちの下流側（ツバの凹面側）である。

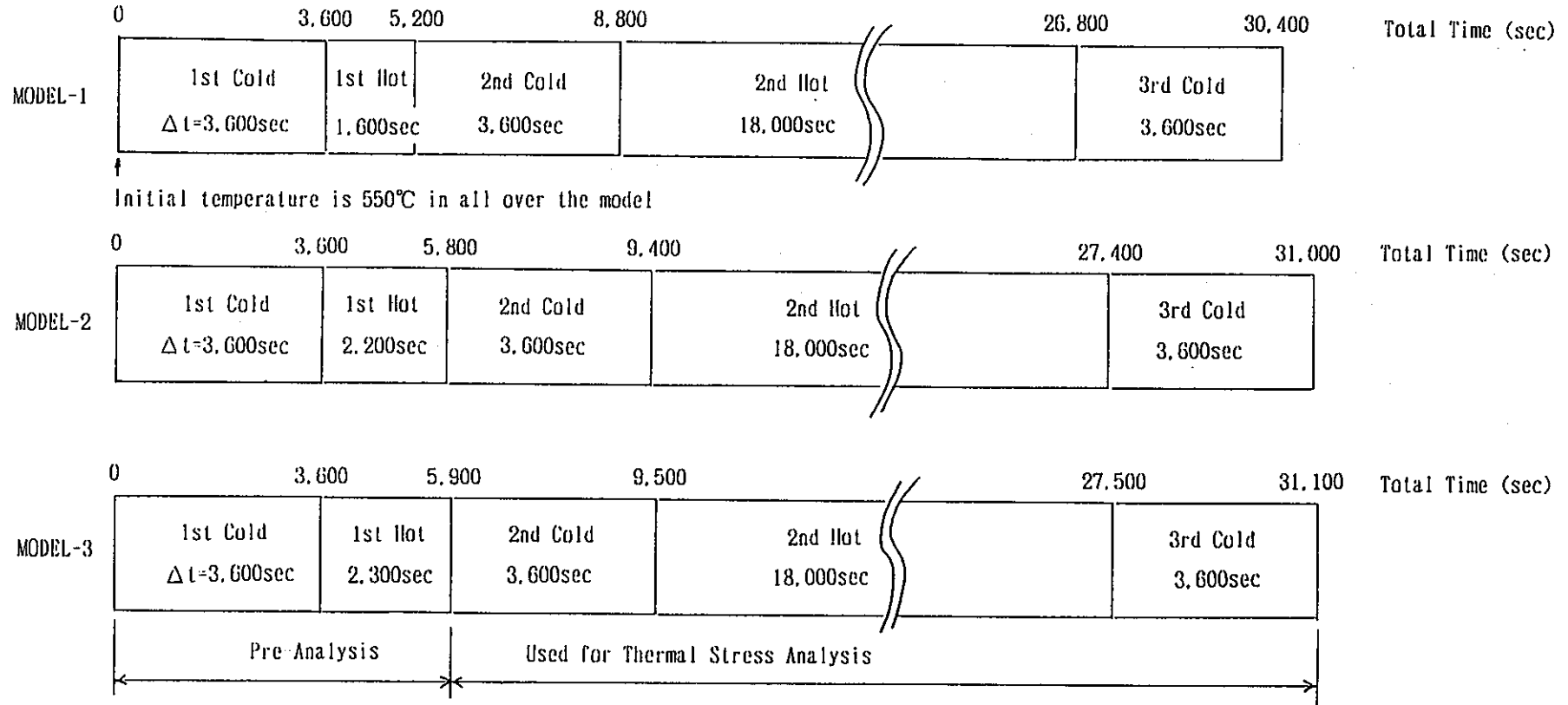
また、内表面に沿ったひずみ分布図によれば最も大きなひずみ範囲が形成されるのはモデル 1、モデル 2 では評価点 F 近傍であり、モデル 3 では評価点 E 近傍が厳しい。また、同図よりき裂発生に寄与すると考えられるひずみの成分をみると、モデル 1 では周方向成分が卓越しており、円筒内表面にき裂が発生するとすれば、軸方向のき裂となることが予想される結果となっている。一方モデル 2、モデル 3 では、最もひずみ範囲の大きくなる F 点、E 点近傍において周方向成分が卓越すると同時に逆位相側に周方向成分と同レベルの軸方向ひずみのピークが形成されていることが分かる。従って、これらのモデルでは、円筒内表面にき裂が発生するとすれば、軸方向のき裂のなかに一部周方向のき裂が発生することも考えられる結果となっている。

また、ひずみ範囲のまとめ表によれば、内表面については、モデル 1 では全評価点領域において熱過渡開始後 30 秒程度の早い時期に応力、ひずみの極値が形成され、その値はツバ付け根中央部で大きくなる。一方、モデル 2、モデル 3 では大部分の評価点ではモデル 1 と同様といえるが、ひずみ範囲の最も大きい F、G 点（モデル 2）、E 点（モデル 3）では熱過渡開始後 100～150 秒程度のやや遅い時期に応力、ひずみの極値が形成されることが分かる。また、円筒外表面側ツバ付け根部では、各モデルともツバ取り付け R 部のうちの下流側（ツバの凹面側）において内面も含めて最も大きなひずみ範囲が形成され、応力、ひずみの極値が形成される時刻は熱過渡開始後 270～480 秒程度のかかなり遅い時期であることが分かる。さらにこの部位におけるひずみの成分は局所座標系における  $z$  方向成分（全体座標系における R 方向成分）が支配的となっており、き裂が発生するとすれば、周方向のき裂となることが予想される結果となっている。

なお、付録 B にはここに示した以外の主要な非弾性解析結果として内表面および外表面の代表点（概ねそれぞれの面で最大の損傷値が得られる点）での応力、ひずみの時刻歴、さらに外表面側での応力、ひずみの分布他を示した。

また、本報告書に記述していない詳細な伝熱解析結果および各種条件での非弾性解析結果については、別途内部資料<sup>(4)</sup>としてとりまとめを行っている。

表 3.2.1 伝熱解析のタイムチャート



- \* Atmospheric temperature condition for heat transfer analysis at surface② is 550.0 °C (constant) during the Pre-Analysis.
- \* Atmospheric temperature condition for heat transfer analysis at surface② is 20.0°C (constant) after the Pre-Analysis.
- \* To adjust the temperature distribution analysis results to measured ones, first hot transient analysis was interrupted at the above shown periods in each model.

表 3.2.2 ノズルモデル1の非弾性解析結果

MODEL-1の評価点の歪み範囲及び歪み成分  
(弾塑性クリープ解析)

評価点	極値時点	温度	$\Delta \epsilon_{eq}$	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$	$\epsilon_\theta$	$\gamma_{rz}$
A	th 30.00	468.3	0.3334	0.1156	-0.1528	-0.0570	0.0005
	tc 28.74	408.0		-0.1362	0.1601	0.0778	-0.0006
B	th 30.25	462.2	0.3328	0.1235	-0.0700	-0.1493	-0.0015
	tc 28.87	411.7		-0.1326	0.0791	0.1522	0.0016
C	th 31.75	478.5	0.4824	0.1819	-0.0442	-0.2297	0.0007
	tc 31.99	364.8		-0.1875	0.0438	0.2351	-0.0007
D	th 32.25	481.1	0.5930	0.2276	-0.0403	-0.2781	0.0002
	tc 32.32	362.9		-0.2379	0.0441	0.2825	-0.0008
E	th 34.00	491.7	0.6476	0.1855	0.0379	-0.3051	-0.2337
	tc 32.32	363.3		-0.1888	-0.0080	0.2959	0.2890
F	th 32.25	480.1	0.6571	0.1872	0.0022	-0.2897	0.2901
	tc 32.32	363.5		-0.1920	0.0056	0.2911	-0.3111
G	th 31.75	475.7	0.6088	0.2474	-0.0915	-0.2622	-0.0009
	tc 32.32	363.8		-0.2586	0.0978	0.2660	-0.0012
H	th 31.75	475.6	0.4877	0.1929	-0.0775	-0.2141	-0.0014
	tc 31.99	366.5		-0.2055	0.0916	0.2131	0.0005
I	th 30.25	458.3	0.3115	0.1168	-0.0841	-0.1336	-0.0014
	tc 29.99	392.9		-0.1229	0.0946	0.1309	0.0007
J	th 30.00	462.4	0.3209	0.1132	-0.1570	-0.0497	-0.0001
	tc 29.12	404.9		-0.1206	0.1599	0.0576	0.0000
L	th 38.50	343.7	0.3316	0.0347	-0.1601	0.0655	0.1216
	tc 37.98	503.4		-0.0456	0.1749	-0.0659	-0.1395
M	th 325.00	502.7	0.9051	0.2774	-0.3704	-0.0782	-0.5430
	tc 269.98	351.3		-0.2321	0.3227	0.0605	0.4612

表 3.2.3 ノズルモデル2の非弾性解析結果

MODEL-2の評価点の歪み範囲及び歪み成分  
(弾塑性クリープ解析)

評価点	極値時点	温度	$\Delta \epsilon_{eq}$	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$	$\epsilon_\theta$	$\gamma_{rz}$
A	th 30.00	452.3	0.2991	0.1016	-0.1367	-0.0577	0.0027
	tc 29.99	392.4		-0.1181	0.1523	0.0616	-0.0011
B	th 30.25	448.6	0.3071	0.1078	-0.0651	-0.1369	-0.0015
	tc 30.24	395.8		-0.1243	0.0739	0.1467	0.0019
C	th 34.00	486.5	0.4490	0.1603	-0.0307	-0.2152	0.0008
	tc 32.32	370.8		-0.1782	0.0484	0.2231	-0.0007
D	th 36.00	495.7	0.5753	0.2081	-0.0061	-0.2730	0.0005
	tc 35.48	349.7		-0.2265	0.0119	0.2876	-0.0001
E	th 36.00	495.1	0.6547	0.1850	0.0355	-0.2963	-0.2374
	tc 35.48	350.3		-0.2013	-0.0373	0.3139	0.2599
F	th110.00	538.0	0.6822	0.1389	0.2219	-0.3217	-0.1300
	tc 99.98	314.2		-0.1523	-0.2097	0.3148	0.0905
G	th120.00	540.0	0.6413	0.0838	0.2544	-0.3015	0.0004
	tc149.98	311.5		-0.0936	-0.2401	0.2845	-0.0001
H	th 34.00	486.5	0.4679	0.1923	-0.0927	-0.1841	-0.0004
	tc 31.99	375.1		-0.2061	0.1129	0.1874	0.0000
I	th 30.25	448.0	0.2899	0.1035	-0.0976	-0.1030	-0.0014
	tc 30.24	396.2		-0.1208	0.1053	0.1148	-0.0008
J	th 30.00	451.5	0.2888	0.0910	-0.1390	-0.0433	-0.0014
	tc 29.99	392.8		-0.1106	0.1571	0.0475	-0.0005
L	th 42.33	359.5	0.3794	0.0619	-0.1987	0.0554	0.1275
	tc 39.98	499.4		-0.0665	0.2025	-0.0591	-0.1321
M	th450.00	506.4	1.0000	0.3555	-0.4113	-0.1168	-0.4059
	tc349.98	352.8		-0.3484	0.4082	0.1049	0.3961

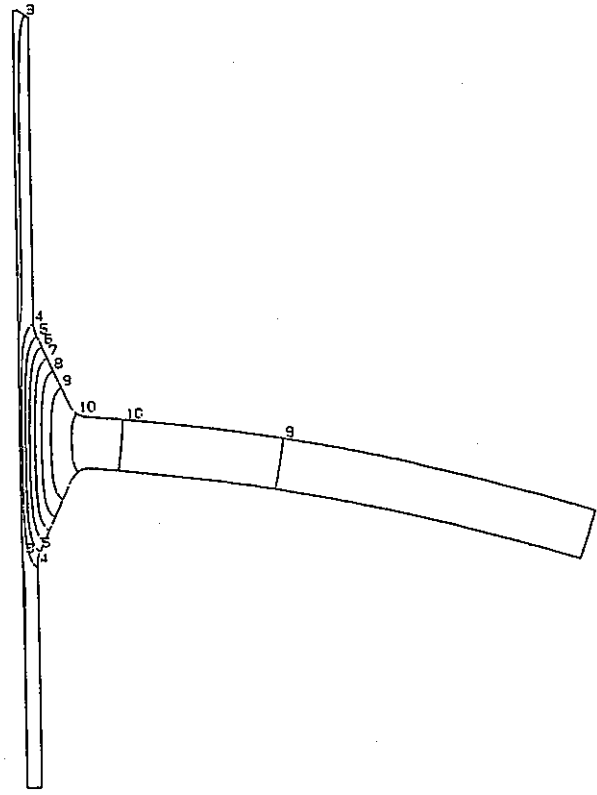
表 3.2.4 ノズルモデル3の非弾性解析結果

MODEL-3の評価点の歪み範囲及び歪み成分  
(弾塑性クリープ解析)

評価点	極値時点	温度	$\Delta \varepsilon_{eq}$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_\theta$	$\gamma_{rz}$
A	th 29.12	426.7	0.2571	0.0827	-0.1212	-0.0552	-0.0009
	tc 29.99	396.0		-0.0976	0.1354	0.0575	0.0013
B	th 30.00	437.3	0.3041	0.1093	-0.0727	-0.1304	0.0025
	tc 29.99	406.1		-0.1238	0.0809	0.1394	-0.0021
C	th 31.50	458.0	0.5044	0.2047	-0.1408	-0.1802	-0.0018
	tc 30.24	403.1		-0.2201	0.1486	0.1881	0.0020
D	th 41.00	508.1	0.6183	0.1598	0.0959	-0.2957	-0.1828
	tc 37.98	344.6		-0.1637	-0.0780	0.2971	0.2421
E	th120.00	536.9	0.7251	0.1453	0.2386	-0.3292	-0.2015
	tc 99.98	314.5		-0.1537	-0.2269	0.3220	0.1531
F	th 31.75	458.0	0.4567	0.1863	-0.1298	-0.1644	0.0037
	tc 30.49	403.5		-0.1964	0.1368	0.1687	-0.0036
G	th 30.25	434.4	0.2843	0.0981	-0.0654	-0.1248	-0.0024
	tc 29.99	412.4		-0.1152	0.0754	0.1352	0.0016
H	th 30.00	436.4	0.2441	0.0765	-0.1151	-0.0525	-0.0002
	tc 29.99	405.0		-0.0930	0.1293	0.0597	0.0026
J	th 45.00	402.1	0.2960	0.0681	-0.1730	0.0077	0.0469
	tc 42.98	456.8		-0.0662	0.1739	-0.0160	-0.0468
K	th475.00	517.1	0.9429	0.3850	-0.4166	-0.1559	-0.1709
	tc299.98	344.3		-0.3645	0.4047	0.1404	0.1597

FINAS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 300.0000
  - 2 325.0000
  - 3 350.0000
  - 4 375.0000
  - 5 400.0000
  - 6 425.0000
  - 7 450.0000
  - 8 475.0000
  - 9 500.0000
  - 10 525.0000
  - 11 550.0000



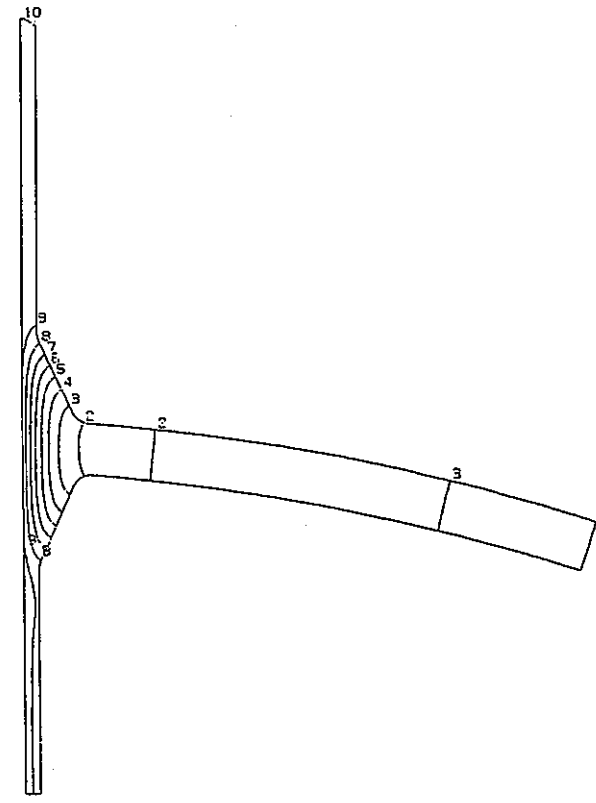
STEP NO. 449

GEOM. SCALE 1 30.0000

CONTOUR OF TEMPERATURE AT 32.32 SEC. < COLD SHOCK > MODEL-1

FINAS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 300.0000
  - 2 325.0000
  - 3 350.0000
  - 4 375.0000
  - 5 400.0000
  - 6 425.0000
  - 7 450.0000
  - 8 475.0000
  - 9 500.0000
  - 10 525.0000
  - 11 550.0000



STEP NO. 281

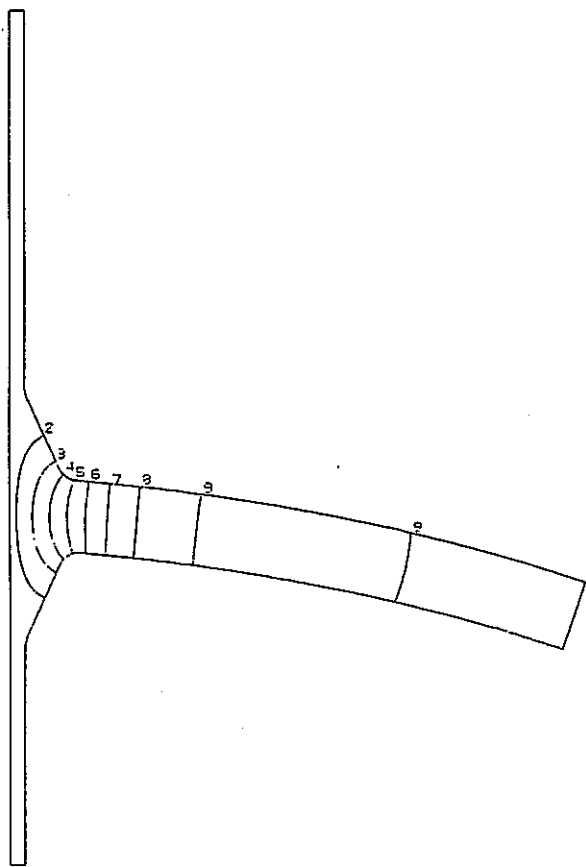
GEOM. SCALE 1 30.0000

CONTOUR OF TEMPERATURE AT 34.0 SEC. < HOT SHOCK > MODEL-1

図 3.2.1 ノズル形状モデル1の伝熱解析結果 (2極時点での温度コンター)

FINAS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 300.0000
  - 2 325.0000
  - 3 350.0000
  - 4 375.0000
  - 5 400.0000
  - 6 425.0000
  - 7 450.0000
  - 8 475.0000
  - 9 500.0000
  - 10 525.0000
  - 11 550.0000



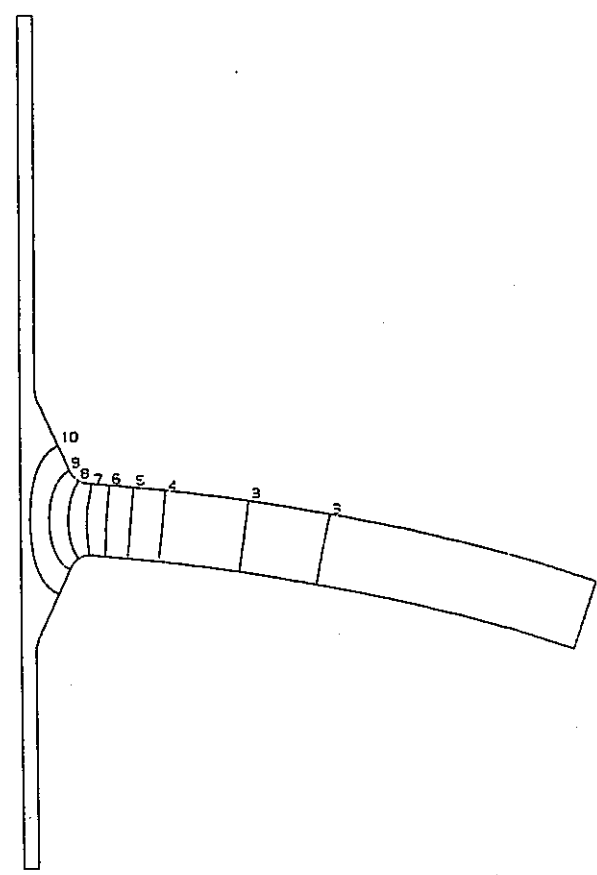
STEP NO. 487

GEOM. SCALE 50.0000

CONTOUR OF TEMPERATURE AT 93.98 SEC. < COLD SHOCK > MODEL-2

FINAS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 300.0000
  - 2 325.0000
  - 3 350.0000
  - 4 375.0000
  - 5 400.0000
  - 6 425.0000
  - 7 450.0000
  - 8 475.0000
  - 9 500.0000
  - 10 525.0000
  - 11 550.0000



STEP NO. 311

GEOM. SCALE 50.0000

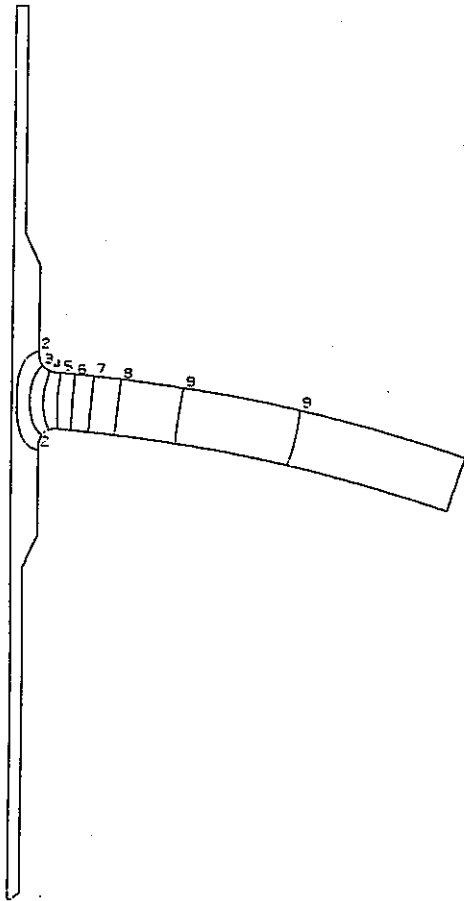
CONTOUR OF TEMPERATURE AT 110.0 SEC. < HOT SHOCK > MODEL-2

図 3.2.2 ノズル形状モデル2の伝熱解析結果 (2極時点での温度コンター)

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	300.0000
2	325.0000
3	350.0000
4	375.0000
5	400.0000
6	425.0000
7	450.0000
8	475.0000
9	500.0000
10	525.0000
11	550.0000



STEP NO. 486

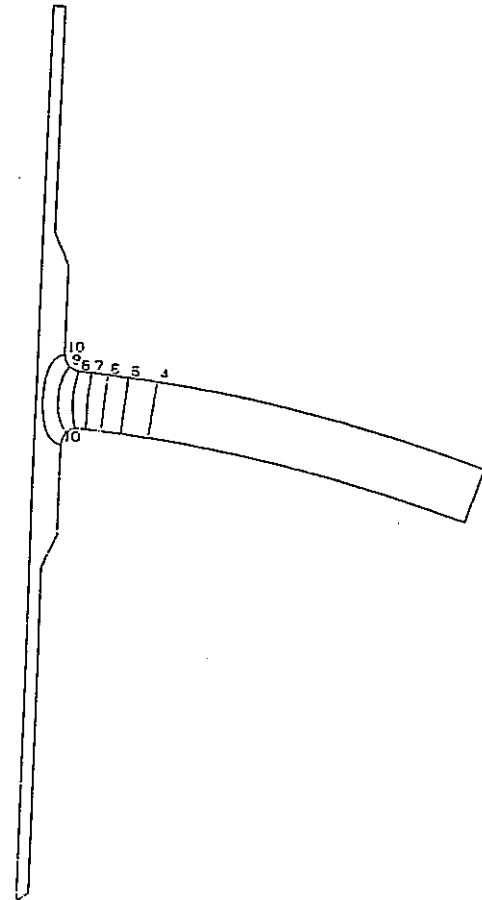
GEOM. SCALE 40.0000

CONTOUR OF TEMPERATURE 109.98 SEC. < COLD SHOCK > MODEL-3

FINAS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	300.0000
2	325.0000
3	350.0000
4	375.0000
5	400.0000
6	425.0000
7	450.0000
8	475.0000
9	500.0000
10	525.0000
11	550.0000



STEP NO. 510

GEOM. SCALE 40.0000

CONTOUR OF TEMPERATURE AT 120.0 SEC. < HOT SHOCK > MODEL-3

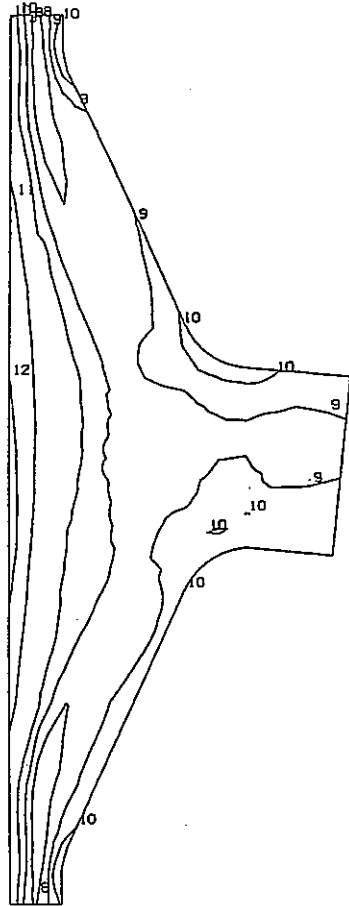
図 3.2.3 ノズル形状モデル3の伝熱解析結果(2極時点での温度コンター)



FINAS  
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	-30.0000
2	-25.0000
3	-20.0000
4	-15.0000
5	-10.0000
6	-5.00000
7	0.0
8	5.000000
9	10.00000
10	15.00000
11	20.00000
12	25.00000
13	30.00000



STEP NO. 346

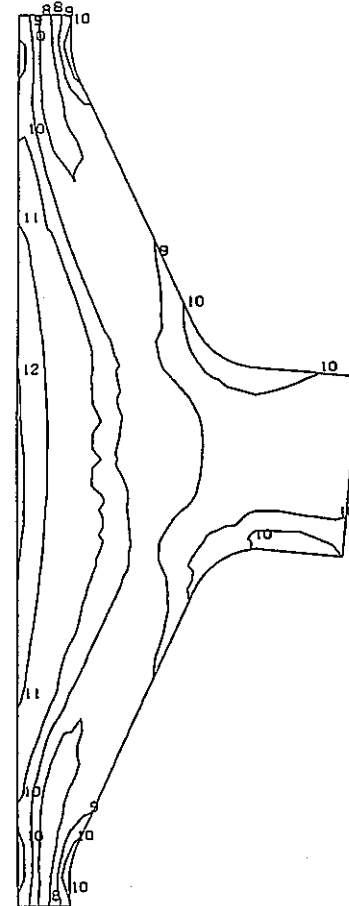
GEOM. SCALE 1 8.00000

VON-MISES AT 32.32 SEC. < COLD SHOCK > MODEL-1  
(弾塑性解析/標準歪速度)

FINAS  
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	-30.0000
2	-25.0000
3	-20.0000
4	-15.0000
5	-10.0000
6	-5.00000
7	0.0
8	5.000000
9	10.00000
10	15.00000
11	20.00000
12	25.00000
13	30.00000



STEP NO. 178

GEOM. SCALE 1 8.00000

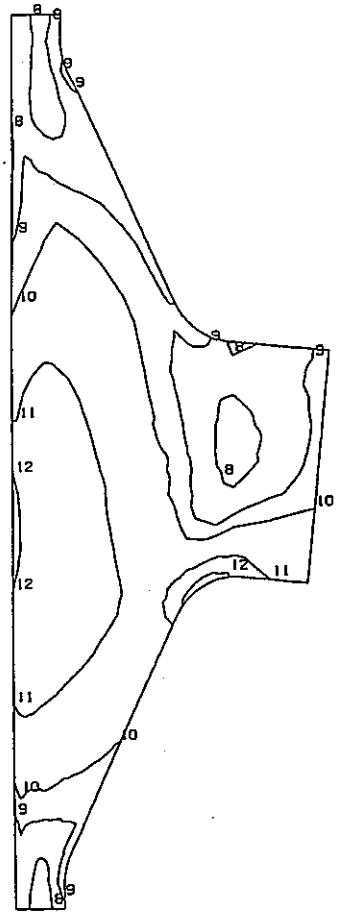
VON-MISES AT 34.0 SEC. < HOT SHOCK > MODEL-1  
(弾塑性解析/標準歪速度)

図 3.2.4 ノズル形状モデル1の非弾性解析結果(2極時点での相当応力コンター)

FINAS  
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	-30.0000
2	-25.0000
3	-20.0000
4	-15.0000
5	-10.0000
6	-5.00000
7	0.0
8	5.000000
9	10.00000
10	15.00000
11	20.00000
12	25.00000
13	30.00000



STEP NO. 378

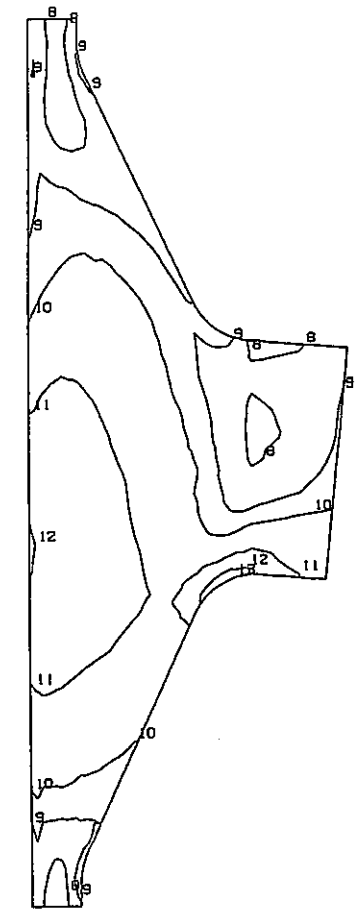
GEOM. SCALE 10.0000

VON-MISES AT 99.98 SEC. < COLD SHOCK > MODEL-2  
(弾塑性解析/標準歪速度)

FINAS  
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	-30.0000
2	-25.0000
3	-20.0000
4	-15.0000
5	-10.0000
6	-5.00000
7	0.0
8	5.000000
9	10.00000
10	15.00000
11	20.00000
12	25.00000
13	30.00000



STEP NO. 202

GEOM. SCALE 10.0000

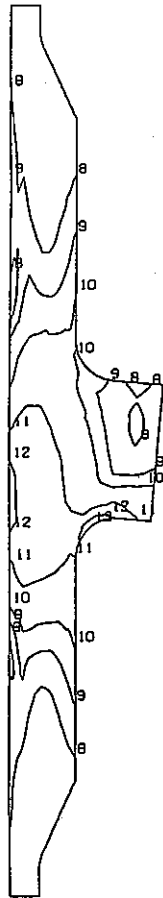
VON-MISES AT 110.0 SEC. < HOT SHOCK > MODEL-2  
(弾塑性解析/標準歪速度)

図 3.2.5 ノズル形状モデル2の非弾性解析結果(2極時点での相当応力コンター)

FINAS  
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	-30.0000
2	-25.0000
3	-20.0000
4	-15.0000
5	-10.0000
6	-5.00000
7	0.0
8	5.000000
9	10.00000
10	15.00000
11	20.00000
12	25.00000
13	30.00000



STEP NO. 379

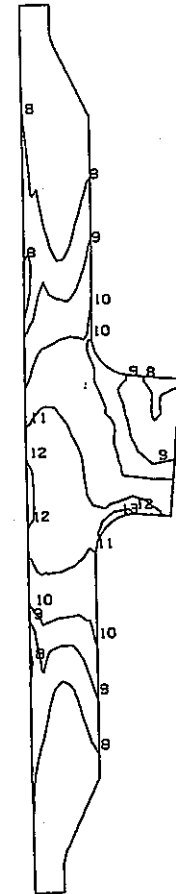
GEOM. SCALE 15,000

VON-MISES AT 109.98 SEC. < COLD SHOCK > MODEL-3  
(弾塑性解析/標準歪速度)

FINAS  
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	-30.0000
2	-25.0000
3	-20.0000
4	-15.0000
5	-10.0000
6	-5.00000
7	0.0
8	5.000000
9	10.00000
10	15.00000
11	20.00000
12	25.00000
13	30.00000



STEP NO. 203

GEOM. SCALE 15,000

VON-MISES AT 120.0 SEC. < HOT SHOCK > MODEL-3  
(弾塑性解析/標準歪速度)

図 3.2.6 ノズル形状モデル3の非弾性解析結果(2極時点での相当応力コンター)

FINAS

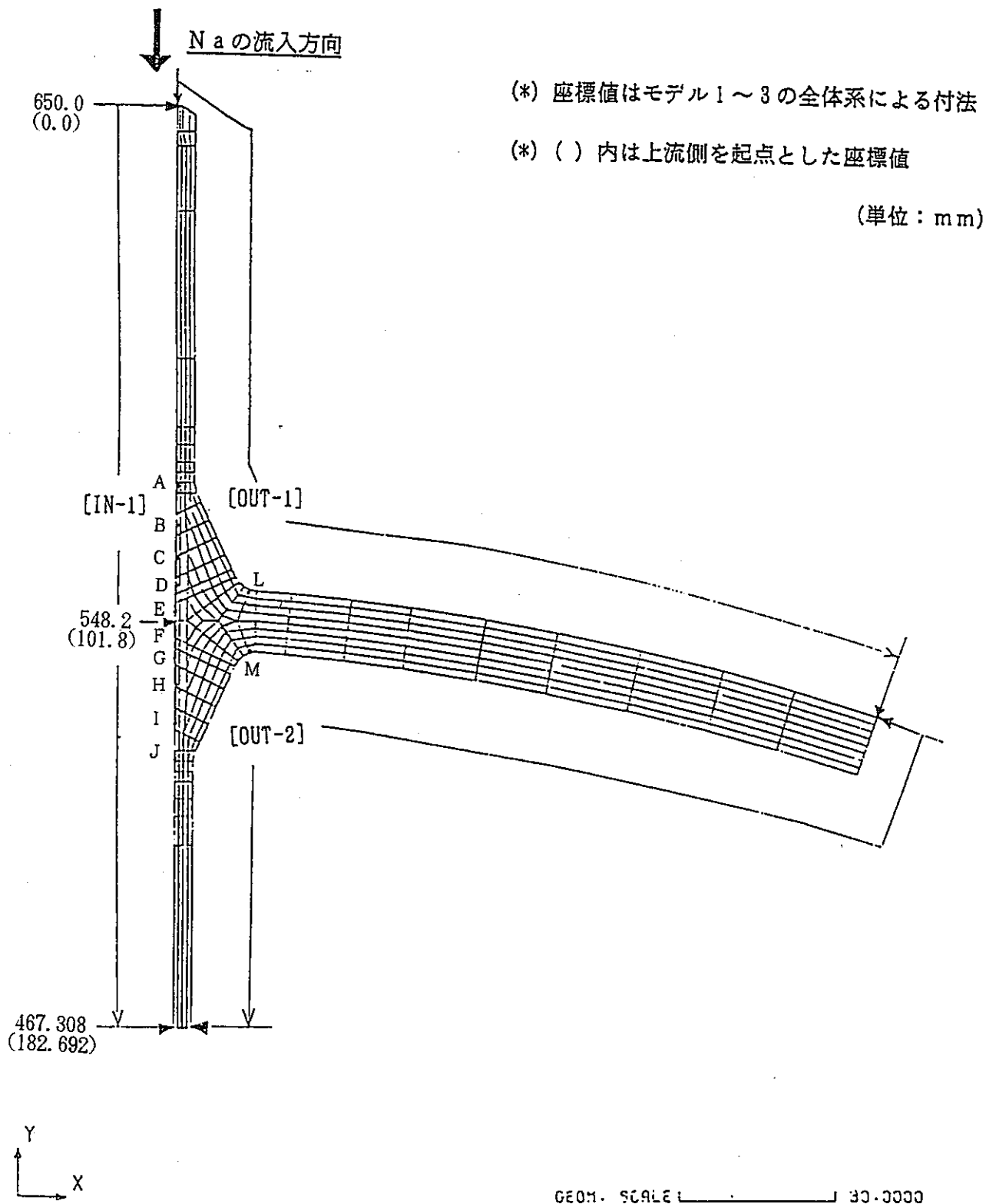


図 3.2.7 ノズル形状モデル1の非弾性解析結果の表示ラインと評価点

FINAS

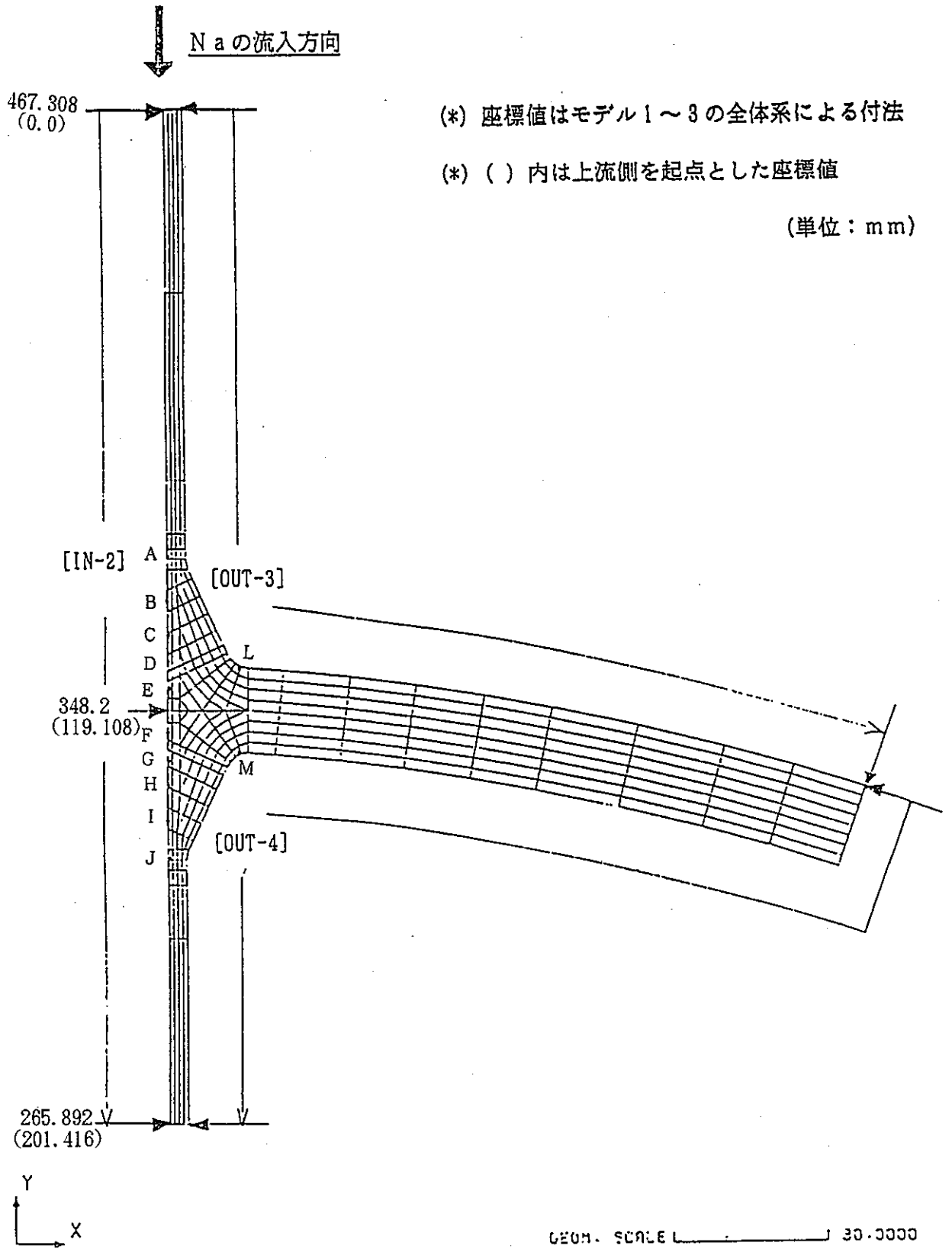


図 3.2.8 ノズル形状モデル2の非弾性解析結果の表示ラインと評価点

FINAS

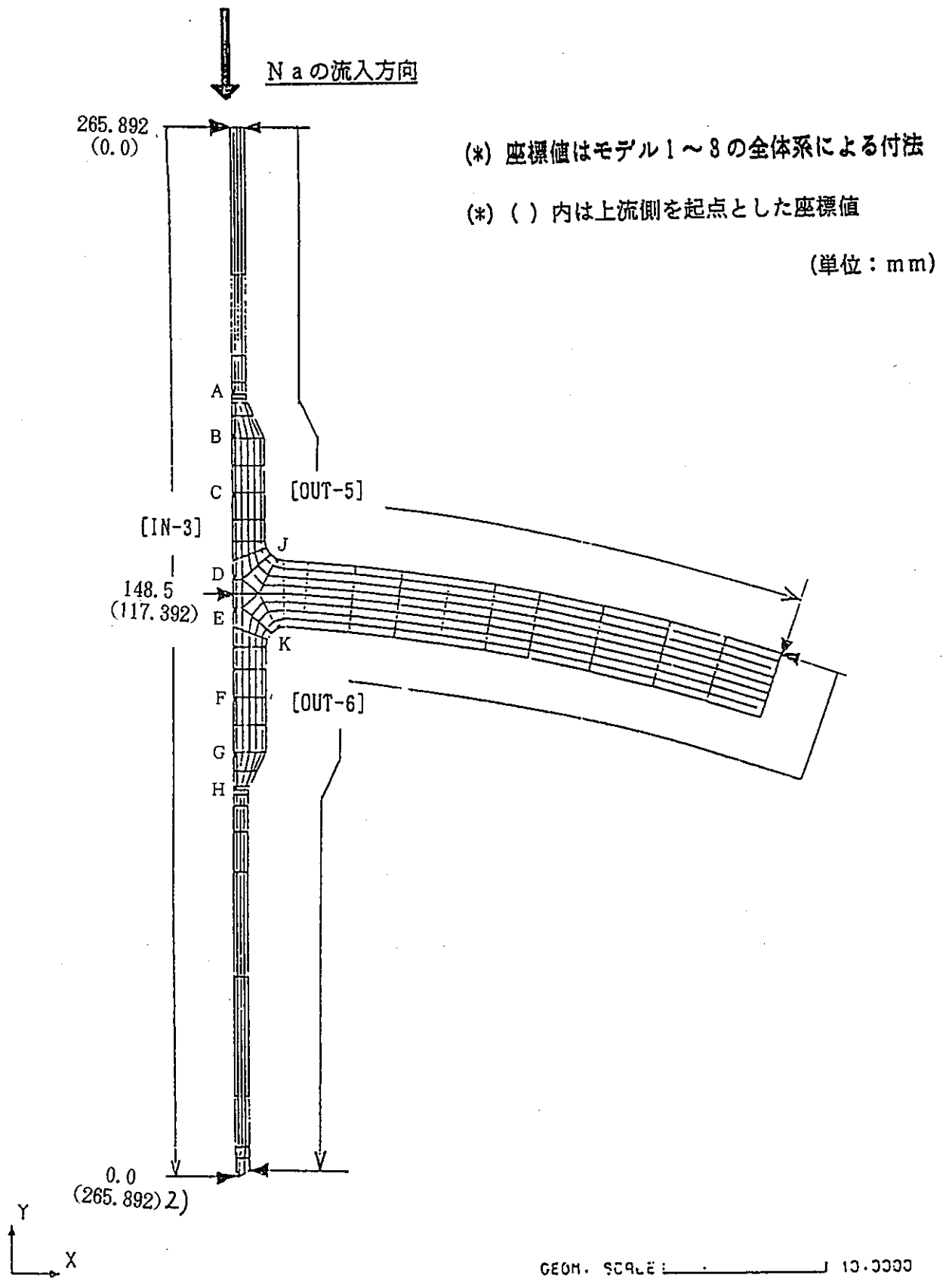
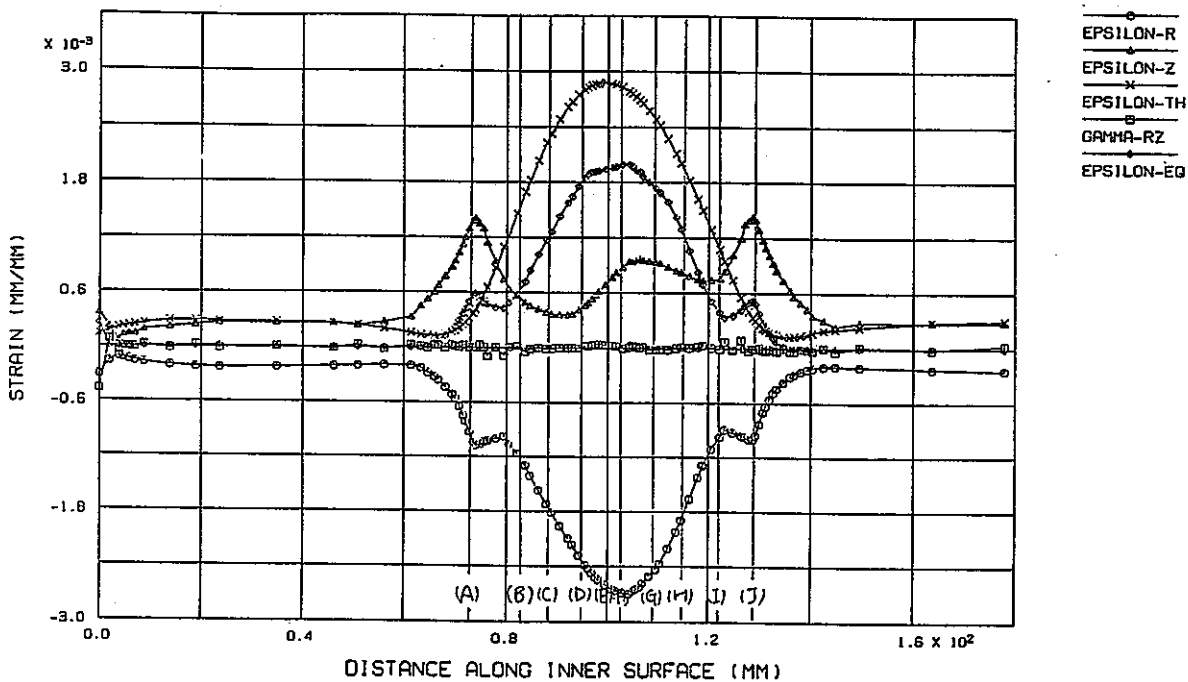


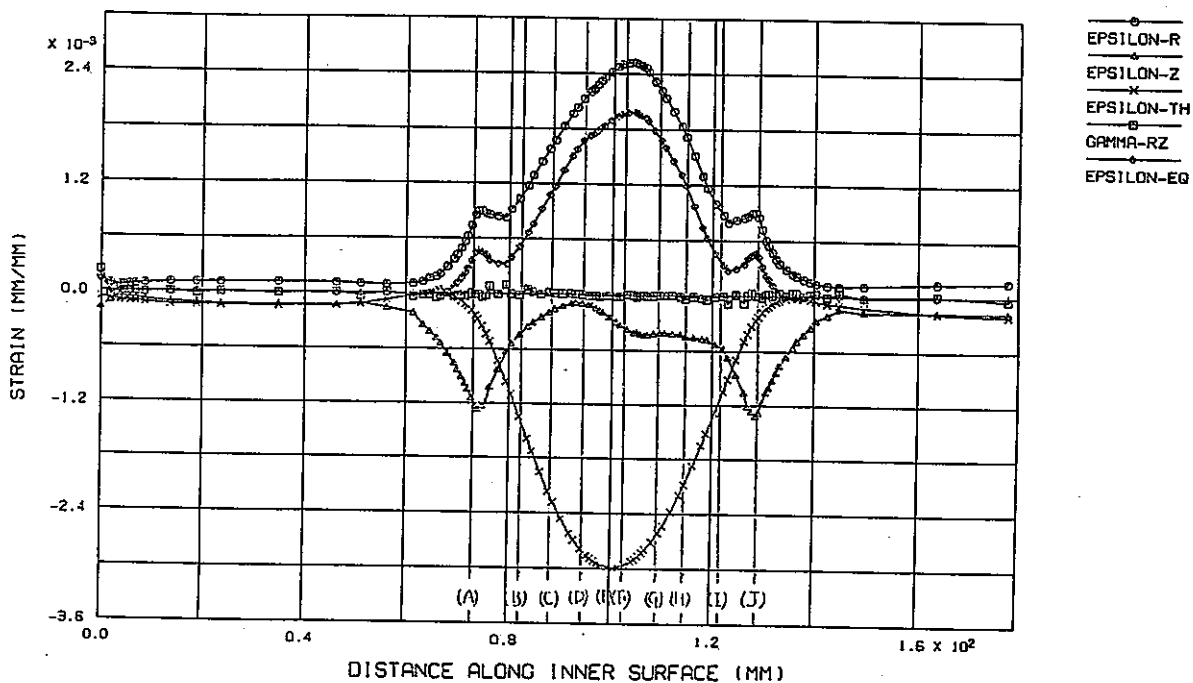
図 3.2.9 ノズル形状モデル3の非弾性解析結果の表示ラインと評価点

FINAS  
STEP NO. 346



STRAIN DISTRIBUTION AT 32.3 SEC. < COLD SHOCK > (IN-1)  
(弾塑性解析/標準歪速度)

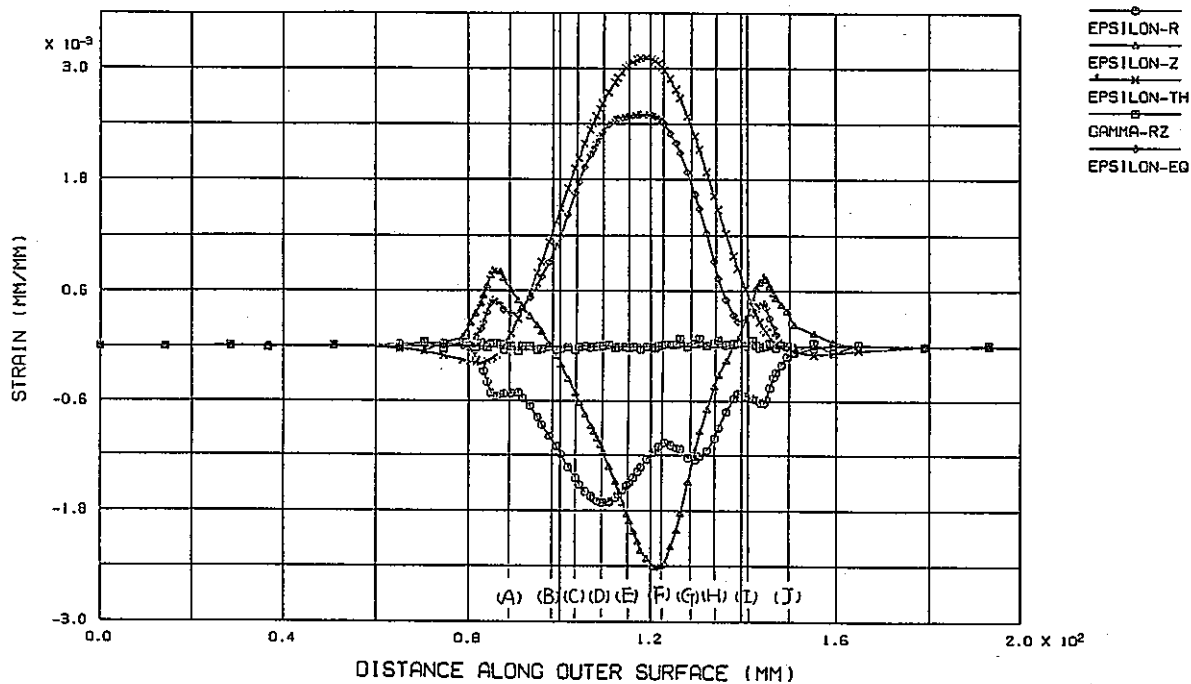
FINAS  
STEP NO. 178



STRAIN DISTRIBUTION AT 34.0 SEC. < HOT SHOCK > (IN-1)  
(弾塑性解析/標準歪速度)

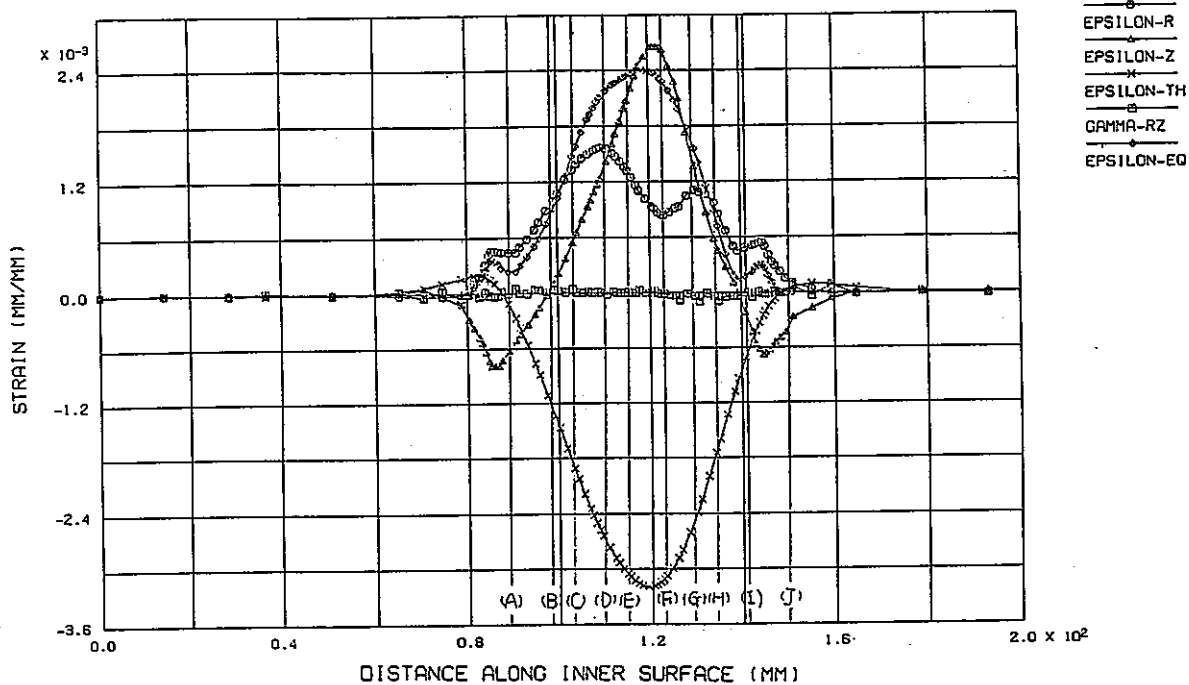
図 3.2.10 ノズル形状モデル1の非弾性解析結果 (内表面1のひずみ分布)

FINAS  
STEP NO. 378



STRAIN DISTRIBUTION AT 99.98 SEC. < COLD SHOCK > (IN-2)  
(弾塑性解析/標準歪速度)

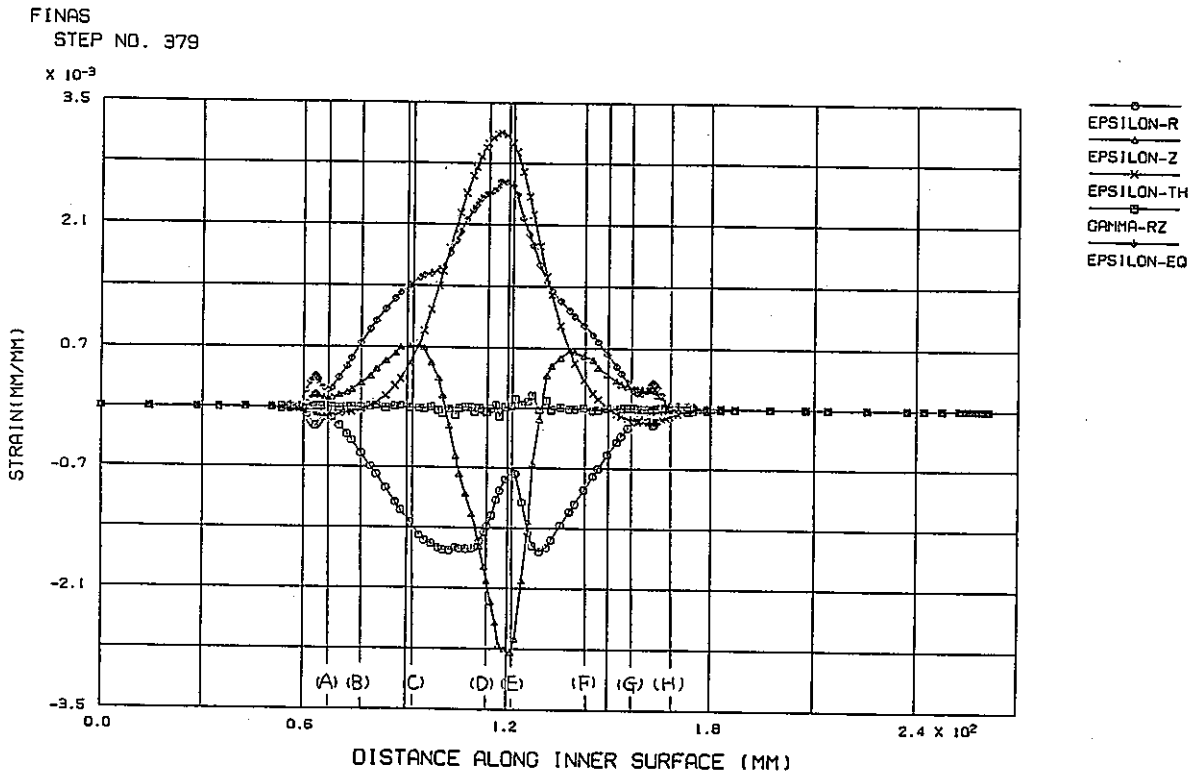
FINAS  
STEP NO. 202



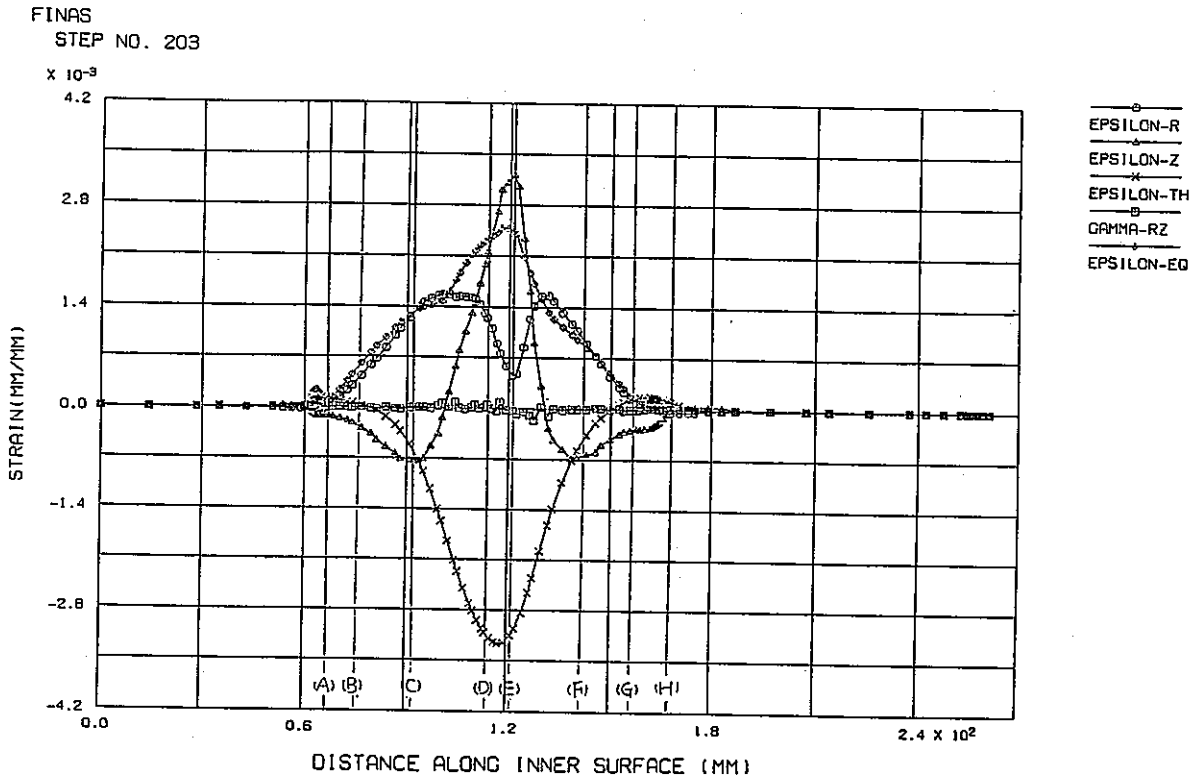
STRAIN DISTRIBUTION AT 110.0 SEC. < HOT SHOCK > (IN-2)  
(弾塑性解析/標準歪速度)

図 3.2.11 ノズル形状モデル2 の非弾性解析結果 (内表面2 のひずみ分布)





STRAIN DISTRIBUTION AT 109.98 SEC. < COLD SHOCK > (IN-3)  
(弾塑性有限要素解析/標準歪速度)



STRAIN DISTRIBUTION AT 120.0 SEC. < HOT SHOCK > (IN-3)  
(弾塑性有限要素解析/標準歪速度)

図 3.2.12 ノズル形状モデル3の非弾性解析結果 (内表面3のひずみ分布)

## 4. クリープ疲労損傷評価

### 4.1 クリープ疲労損傷評価法

本試験研究は、構造部材間の相対的溫度差による熱クリープ疲労き裂発生寿命の評価法を開発することを主たる目的とした研究であり、この目的に沿った検討、考察は第4報：総合報告書<sup>(5)</sup>に記す予定である。本報では、現在強度評価用として一般的に採用されているRobinson・平<sup>(6)</sup>による線形累積損傷則に基づく既存の手法を用いたクリープ疲労損傷値の算出を行い、供試体に発生したき裂の分布との比較、検討を試みる。

これまでに構造室では、非弾性解析結果を用いた線形累積損傷則に基づくクリープ疲労損傷評価として、クリープ損傷値の算出法の違いにより大きく分けて以下の2種類の評価法を採用した検討を実施してきている。

- (1) クリープ損傷値を算出するのに、仮想的に算出した応力緩和経路を用いる方法
  - ・緩和の初期応力算出にひずみ範囲と動的応力-ひずみ関係を使用
  - ・応力緩和経路の算出に弾性追従係数 $q$ を使用
  - ・仮想的な応力緩和経路とクリープ破断関係式を対比させ、時間分数を算出  
～ 以下、本報では「間接法」と呼ぶ
- (2) 解析により得られる相当応力の経時変化に沿って損傷値を直接時間積分する方法
  - ・解析により得られる生の相当応力の経時変化とクリープ破断関係式を対比させ、時間分数を算出  
～ 以下、本報では「直接法」と呼ぶ

本節では、上記2種類の方法のうちの第1番目の方法「間接法」による評価検討を試みる。なお、クリープ損傷評価に上記第2番目の方法「直接法」を採用した評価検討については第5章に述べる。

非弾性解析に基づくクリープ疲労損傷評価の1番目の方法である「間接法」の流れを図4.1.1に示す。本手法の特徴は次のとおりである。すなわち、本手法は熱クリープ疲労寿命予測法として構造室で開発した評価法であり、弾性解析あるいは非弾性解析で得られる構造物表面の相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eq}$ を用いて、これに弾性解析に基づく場合には、非弾性ひずみ増大による強度低減をひずみ集中係数 $K_f$ の形で考慮して得られるひずみ範囲 $\epsilon_c$ を用いて、また非弾性解析に基づく場合には、 $K_f = 1$ とすることで（解析結果に既に非弾性ひずみ増大による強度低減の効果が含まれるため） $\epsilon_c$ として $\Delta \epsilon_{eq}$ をそのまま用いることにより、疲労損傷値とクリープ損傷値を算出し、線型累積損傷則に基づいてクリープ疲労寿命を予測するものである。

ここでクリープ損傷値の算出法の上記第2番目の「直接法」との違いは、仮想的な応力緩和経路を用いる点であり、全ひずみ範囲 $\epsilon_c$ と動的応力-ひずみ関係式から緩和開始の初期応力を算出し、その後構造、熱過渡荷重の特徴を考慮した適切な弾性追従係数 $q$ （単純な円筒モデルに板厚方向の温度勾配が負荷されるような場合には通常1.0を設定する）

を用いてクリープ緩和の計算を行うことにより応力緩和経路を推定し、さらにこの応力緩和経路において応力が一定とみなせる微小時間毎にクリープ破断式に対比させることにより、損傷の時間分数を算出する、このような計算を応力の緩和経路に沿って繰返し、時間積分してクリープ損傷を算出するものである。本手法でのクリープ緩和の計算には、クリープひずみ式として遷移クリープを考慮した動燃の式を用い、ひずみ硬化則を仮定して行っている。

また疲労損傷は、評価点での熱過渡1サイクル中の相当ひずみ範囲とサイクル中の最高金属温度および平均ひずみ速度を用いて平均疲労破損式に基づいて算出する。なお、これらの強度評価では、供試体のき裂発生分布との比較を行うために、設計基準の有する安全裕度を取り除いた、正味ベースのクリープ疲労損傷計算を行っている。

本手法は、従来の非弾性解析とこれに基づく強度評価の経験から、応力の計算結果が採用する応力-ひずみ関係式に大きく依存するのに対して、ひずみの計算結果はさほど応力-ひずみ関係式の影響を受けないため、ひずみ範囲計算結果をベースとしたクリープ損傷の計算値が非弾性解析条件によらず比較的安定した値となることに着目した評価法と言える。これに対して上記第2番目の手法である「直接法」は、非弾性解析の生の応力計算結果を直接採用するため手法としては簡明であるが、その損傷計算結果は非弾性解析法、特に弾塑性応力-ひずみ関係式として採用する構成則に大きく依存することが明らかとなっている<sup>(7)</sup>。

なお、本供試体製作に使用した素材SUS304鋼の低サイクル疲労強度およびクリープ強度等の高温強度特性については現在試験を進めているが、これまでに明らかになった疲労強度、クリープ強度他の特性は従来の高温構造設計基準の材料強度基準に定められた平均的な値とほぼ一致しており、今回の解析および強度評価には上記基準の平均値として定められたものを使用した。付録Cには現在までに得られている材料強度試験結果の一部を掲載した。

#### 4.2 クリープ疲労損傷評価の結果

本節では、3種のノズル形状モデルに対して実施した標準的解析条件での非弾性熱応力解析結果を用いて、4.1節で示したクリープ疲労損傷評価法のうちの仮想的な応力緩和経路を使用する「間接法」に基づいて評価した結果について示すとともに、き裂検査により得られた各供試体のき裂発生状況との比較検討結果について示す。

クリープ疲労損傷評価を行った評価点を各モデルについて図4.2.1～図4.2.3に示す。これらの評価点は各モデルとも非弾性解析結果を考慮して、円筒内表面についてはき裂発生の予想される高い応力、ひずみの生じるツバ付け根部を中心としてその前後の範囲から複数の点を選び、また円筒外表面については、ツバ付け根部の上流側（凸面側）、下流側（凹面側）において、応力、ひずみの表面長手方向分布上極大値を示す代表点をそれぞれ1点ずつ選んでいる。

クリープ疲労損傷評価結果として、表4.2.1～表4.2.3にこれらの評価点におけるひずみ範囲、疲労損傷値、クリープ損傷値、クリープ疲労損傷値をモデルごとに示す。また、図4.2.4～図4.2.6には、モデルごとに各評価点でのひずみ範囲とクリープ疲労

損傷値を示す。以下、評価結果と供試体のき裂発生状況について比較検討を行う。

#### 4.3 損傷評価結果とき裂の発生状況

4.2 節の図 4.2.1～図 4.2.3には、各モデルの損傷評価点と対応させてき裂の発生領域を示した。これらの図と図 4.2.4～図 4.2.6に示したクリープ疲労損傷値を比較すると次のことが言える。

本試験条件（温度、サイクル数）において、き裂発生に結びつく有意な損傷値が得られるひずみ範囲は 0.4% 以上である。各モデルの内外表面評価点におけるひずみ範囲をみると、ひずみ範囲が最も大きいのはいずれも円筒外表面ツバ付け根 R 部のうちの下流側（ツバ凹面側、モデル 1 の M 点、モデル 2 の M 点、モデル 3 の K 点）であり、0.8%～0.9%のひずみ範囲に対して 2.5 程度のクリープ疲労損傷値 D が得られている。本強度評価でのき裂発生クライテリアが  $D > 1.0$  であることから、き裂発生が予測されるが、各モデルとも本部位に周方向の全周き裂が発生していたことと対応する結果となっている。また、同じ外表面ツバ付け根 R 部でも、上流側（ツバ凸面側、モデル 1 の L 点、モデル 2 の L 点、モデル 3 の J 点）ではひずみ範囲が 0.3% 程度と小さく、損傷値も 0.2 程度となり、き裂が発生しないことを予測するが、各モデルとも本部位にはき裂が発生しておらず対応する結果となっている（ただし、モデル 3 の評価点 J に相当する部位の周方向の一部には、溶接欠陥によるき裂が検出されたがこれは除外している）。

次に円筒内表面側をみると、各モデルともツバ付け根中心近傍にひずみ範囲 0.4% 以上の領域が認められ（モデル 1 で C 点～H 点、モデル 2 で C 点～H 点、モデル 3 で C 点～F 点）、最もひずみ範囲が大きいのはいずれもツバ付け根中心よりやや下流側（ツバ凹面側、モデル 1 の F 点、モデル 2 の F 点、モデル 3 の E 点）で 0.6%～0.7% の値となっている。このひずみ範囲に対応する損傷値は 0.5～2.0 が得られており、従来の熱過渡試験の強度評価の経験から充分き裂の発生する可能性があるとして予測される損傷値となっているが、各モデルともき裂の発生した領域は上記評価点に相当する範囲である。

ここで、き裂の発生範囲と評価点位置がはっきり対応付けられるので、損傷値レベルとき裂の有無を厳密に調べると、モデル 1 では上流側のき裂存在範囲が D 点よりやや上流までで、C 点までいくとき裂は存在しなかったが、損傷値は D 点で 1 を越えるのに対して、C 点では 0.7 程度である。また、下流側のき裂存在範囲が G 点を越えて H 点の手前までで、H 点までいくとき裂は存在しなかったが、損傷値は G 点で 1 を越えるのに対して、H 点では 0.7 程度である。

次に、モデル 2 では上流側のき裂存在範囲がちょうど D 点までで、その上流 C 点ではき裂は存在しなかったが、損傷値は D 点でほぼ 1 となるのに対して、C 点では 0.6 程度である。また、下流側のき裂存在範囲がほぼ H 点までで、その下流 I 点までいくとき裂は存在しなかったが、損傷値は H 点で 0.7 程度（例外的に 1 を下回った）であるのに対して、I 点では 0.2 程度である。

次に、モデル 3 では上流側のき裂存在範囲が D 点よりやや上流までで、C 点までいくとき裂は存在しなかったが、損傷値は D 点で 1 を越えるのに対して、C 点では 0.7 程度である。また、下流側のき裂存在範囲が E 点と F 点の間までで、F 点までいくとき裂は存在

しなかったが、損傷値はE点で1を越えるのに対して、F点では0.5程度である。

以上のように、本熱過渡試験に対するクリープ疲労強度評価では、き裂の存在と破損クライテリア： $D > 1$ が、モデル2のH点近傍を除いて非常に精度良く対応する結果が得られた。この結果から、現状技術レベルで非弾性解析に基づいてクリープ疲労強度評価を行う場合、応力-ひずみ関係として標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の2直線近似式を採用して弾塑性-クリープ解析を行うとともに、クリープ損傷評価としてひずみ範囲と動的応力-ひずみ関係式から初期応力を算出し、弾性追従係数 $q = 1$ を仮定して計算される仮想的応力緩和曲線を用いる「間接法」を採用することにより、かなり精度の高い寿命予測が可能であるといえる。

なお、3.2節のなかで、非弾性解析結果のひずみの成分から各モデル内外面においてき裂が発生する場合に予想されるき裂の方向について述べたが、実際に発生したき裂の方向と各評価点における支配的ひずみの成分の関係は以下のとおりである。

内表面に沿ったひずみ分布図によればモデル1では周方向成分が卓越しており、軸方向き裂となることが予想されたが、実際のき裂は軸方向となっていた。一方モデル2、モデル3では、最もひずみ範囲の大きくなるF点、E点近傍において周方向成分が卓越すると同時に逆位相側に周方向成分と同レベルの軸方向ひずみのピークが形成されていることから、これらのモデルでは、軸方向き裂のなかに一部周方向き裂が発生することが考えられたが、実際のき裂は主たる軸方向き裂のなかに一部（F点、E点近傍）周方向のき裂が発生していた。

一方、円筒外表面側ツバ付け根部では、各モデルともツバ取り付けR部のうちの下流側（ツバの凹面側）においてひずみの成分は局所座標系におけるz方向成分（全体座標系におけるR方向成分）が支配的となっており、周方向き裂となることが予想されたが、実際のき裂は周方向全周き裂となっていた。

以上のように、き裂発生が予測された部位における主たるひずみの成分とき裂の発生方向には直交する関係が良く成立していた。

最後に、発生したき裂の深さについては、損傷値の大きい外表面側の全周き裂よりも、損傷値の小さい円筒内表面側のき裂の方が深く進展していた。クリープ疲労損傷値自体はき裂の発生しやすさを示す指標であるため、一概に損傷値の大小とき裂の深さを比較することはできず、厳密には破壊力学によるき裂進展評価に依らなくては明確な予測はできないが、上記の原因としてはクリープ損傷に寄与する高温保持期間中の応力が、外表面側で圧縮、内表面側で引張となっていたことと対応するものと考えられる。これは、破面のSEM観察結果が、外表面側で疲労損傷が主体と考えられる粒内割れであったのに対して、内表面側ではクリープ損傷も寄与したと考えられる粒界割れとなっていたこととも対応していると考えられる。

なお、以上の検討は試験終了後、すなわち、1,700 サイクル後の供試体上のき裂分布状況とこの時点でのクリープ疲労損傷値との比較に基づくものであるが、各モデルとも円筒外表面側ツバ付け根部では試験の中間時点でPT試験によりき裂の検出検査が試みられた。一方、これらの部位におけるき裂破面上にはSEM観察において、ストライエーションも観察されており、その幅の計測からき裂進展に要したサイクル数、さらに、発生に要したサイクル数のおおよその値が推定できる。これらの観点からの検討については、付録Jに述べた。

表 4.2.1 ノズルモデル1のクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-1 の歪み範囲及び損傷値  
 (弾塑性クリープ解析, 「TTSDS」使用,  $q=1.0$ )

評価点	極値時点	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 28.74	3.087E-03	4.653E-02	1.506E-01	1.971E-01
B	th 30.25 tc 29.12	3.133E-03	5.063E-02	1.562E-01	2.068E-01
C	th 31.75 tc 31.99	4.729E-03	3.120E-01	3.661E-01	6.781E-01
D	th 35.00 tc 32.32	5.758E-03	5.817E-01	5.082E-01	1.090E+00
E	th 35.50 tc 32.32	6.310E-03	7.506E-01	5.851E-01	1.336E+00
F	th 34.00 tc 32.32	6.384E-03	7.744E-01	5.955E-01	1.370E+00
G	th 32.25 tc 32.32	5.902E-03	6.243E-01	5.283E-01	1.153E+00
H	th 31.75 tc 31.99	4.805E-03	3.296E-01	3.765E-01	7.061E-01
I	th 30.25 tc 29.99	2.937E-03	3.458E-02	1.328E-01	1.674E-01
J	th 30.00 tc 29.12	2.979E-03	3.771E-02	1.376E-01	1.753E-01
L	th 38.50 tc 37.98	3.041E-03	3.597E-02	9.389E-02	1.299E-01
M	th325.00 tc269.98	8.283E-03	1.320E+00	7.591E-01	2.079E+00

表 4.2.2 ノズルモデル2のクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-2の歪み範囲及び損傷値  
(弾塑性クリープ解析, 「TTSDS」使用,  $q=1.0$ )

評価点	極値時点	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 29.99	2.731E-03	2.154E-02	1.090E-01	1.306E-01
B	th 30.25 tc 30.24	2.894E-03	3.154E-02	1.277E-01	1.593E-01
C	th 34.00 tc 32.32	4.415E-03	2.437E-01	3.234E-01	5.670E-01
D	th 37.25 tc 34.98	5.587E-03	5.325E-01	4.845E-01	1.017E+00
E	th 38.50 tc 35.48	6.381E-03	7.734E-01	5.951E-01	1.368E+00
F	th110.00 tc 99.98	6.756E-03	8.975E-01	6.474E-01	1.545E+00
G	th120.00 tc149.98	6.343E-03	7.612E-01	5.897E-01	1.351E+00
H	th135.00 tc149.98	4.756E-03	3.182E-01	3.698E-01	6.879E-01
I	th 30.25 tc 30.24	2.718E-03	2.085E-02	1.076E-01	1.284E-01
J	th 30.25 tc 30.24	2.689E-03	1.934E-02	1.044E-01	1.237E-01
L	th 42.33 tc 39.98	3.481E-03	7.755E-02	1.475E-01	2.250E-01
M	th425.00 tc349.98	9.118E-03	1.664E+00	8.985E-01	2.562E+00

表 4.2.3 ノズルモデル3のクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-3の歪み範囲及び損傷値  
 (弾塑性クリープ解析, 「TTSDS」使用,  $q=1.0$ )

評価点	極値時点	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
A	th 29.12 tc 29.99	2.345E-03	6.631E-03	6.847E-02	7.510E-02
B	th 30.00 tc 29.99	2.785E-03	2.459E-02	1.151E-01	1.397E-01
C	th 31.50 tc 30.49	4.881E-03	3.476E-01	3.869E-01	7.345E-01
D	th 49.00 tc 42.98	5.998E-03	6.533E-01	5.416E-01	1.195E+00
E	th120.00 tc109.98	7.172E-03	1.042E+00	7.056E-01	1.748E+00
F	th 31.75 tc 30.49	4.288E-03	2.182E-01	3.062E-01	5.243E-01
G	th 30.25 tc 29.99	2.615E-03	1.584E-02	9.624E-02	1.121E-01
H	th 30.00 tc 29.99	2.271E-03	4.977E-03	6.143E-02	6.641E-02
J	th 43.66 tc 41.98	2.686E-03	1.661E-02	7.187E-02	8.848E-02
K	th475.00 tc299.98	8.516E-03	1.441E+00	8.205E-01	2.262E+00



クリープ疲労損傷評価法

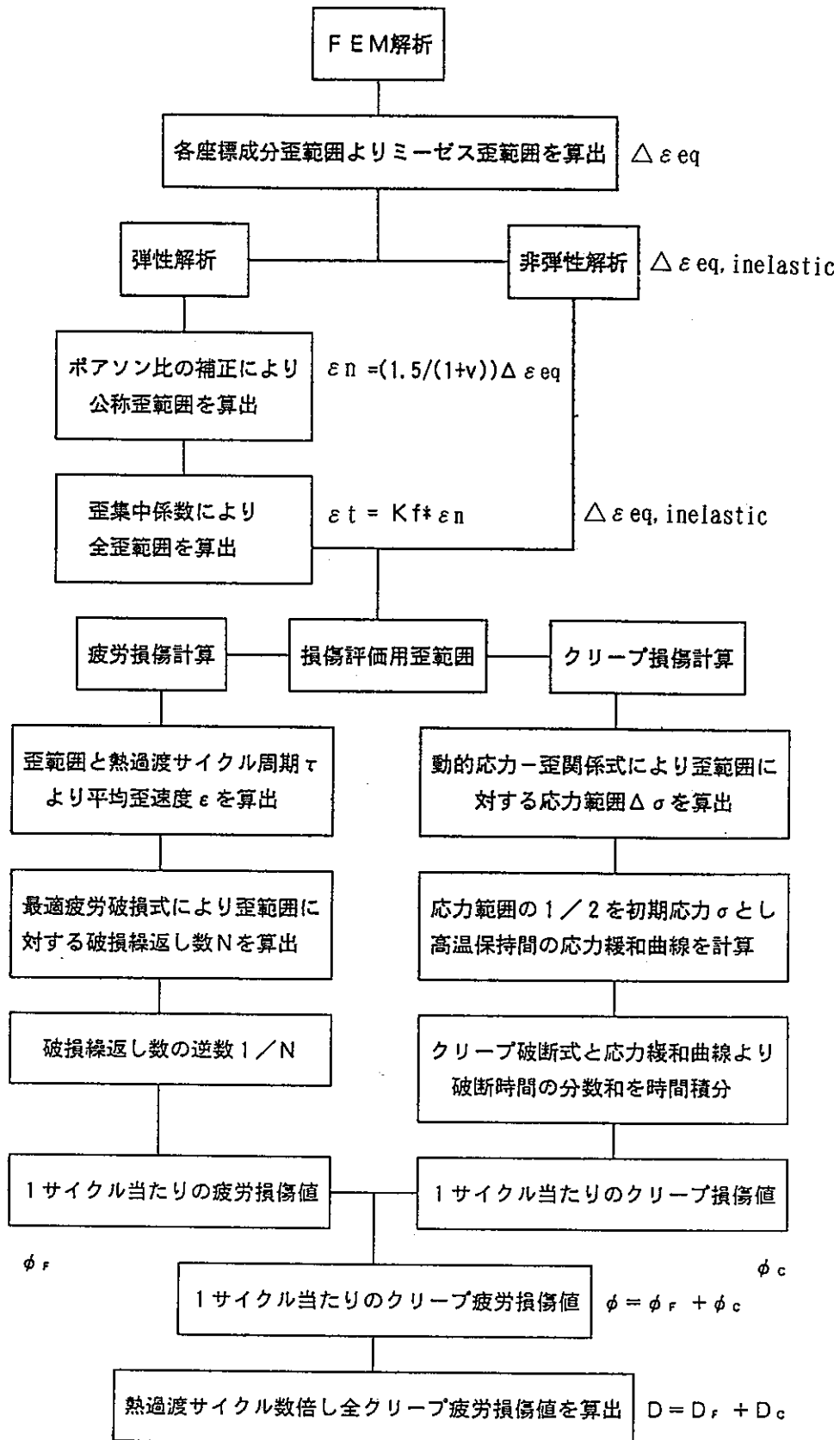


図 4.1.1 クリープ疲労評価法の流れ

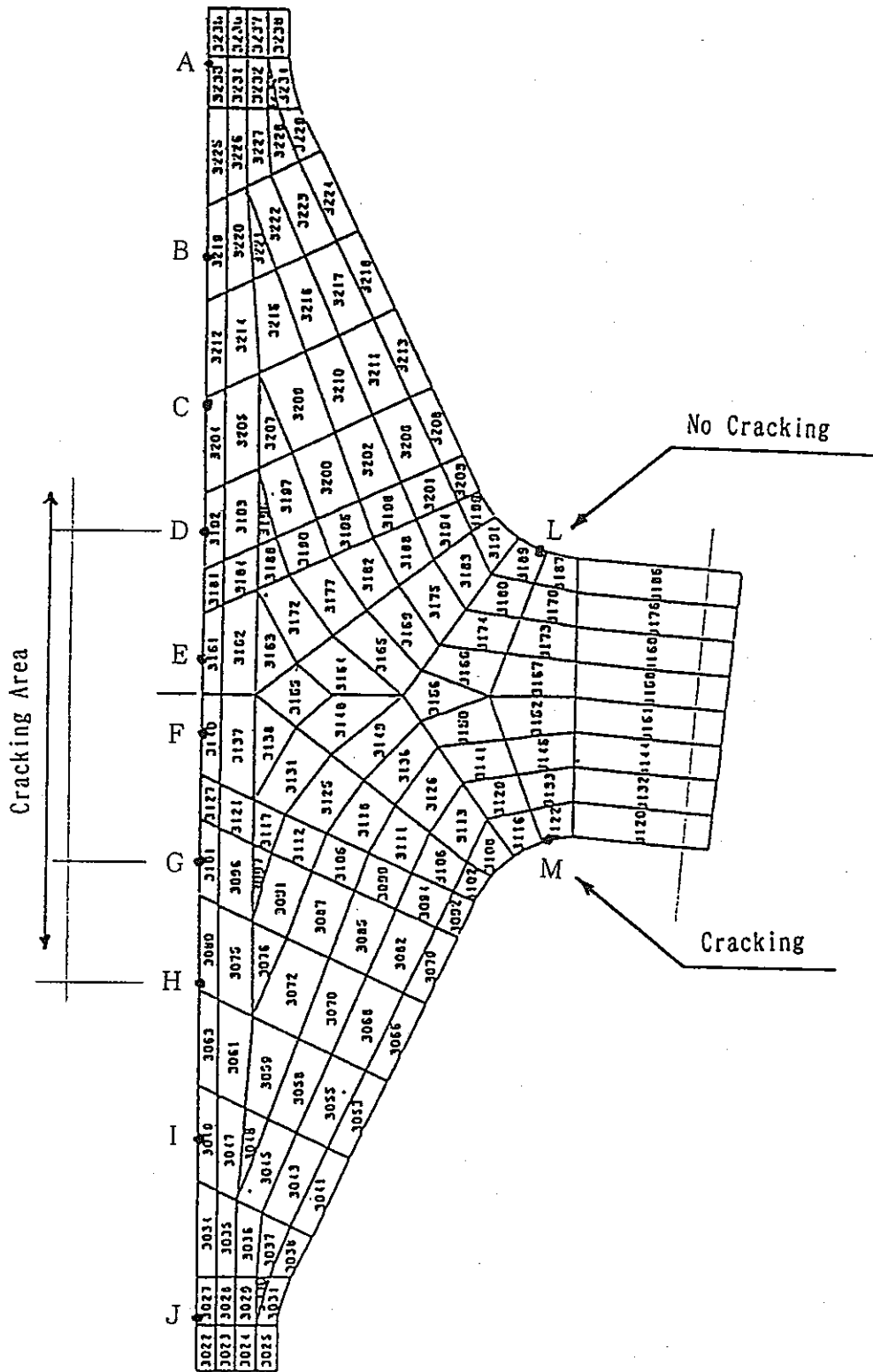


図 4.2.1 ノズル形状モデル1のクリープ疲労損傷評価点

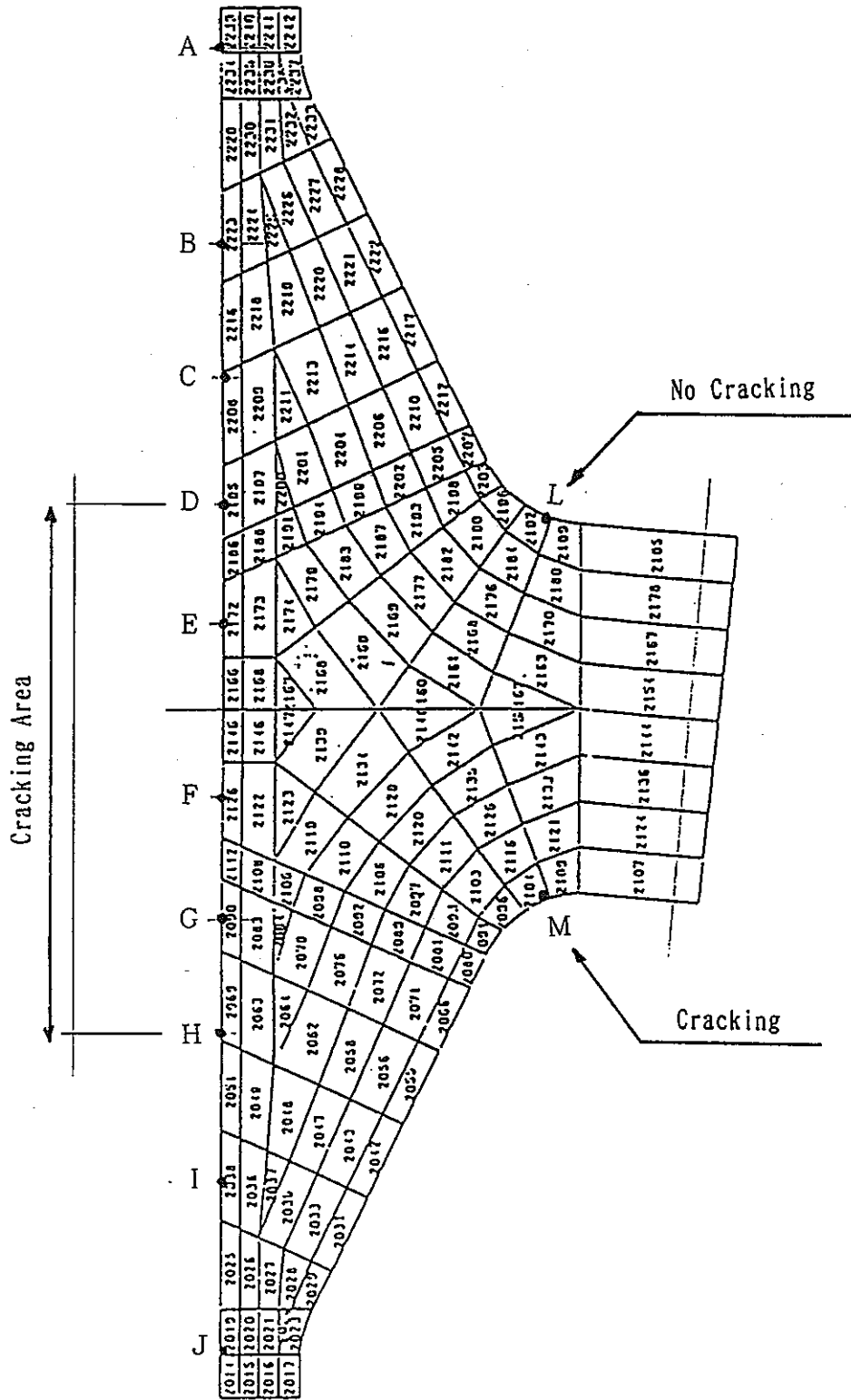


図 4.2.2 ノズル形状モデル2のクリープ疲労損傷評価点

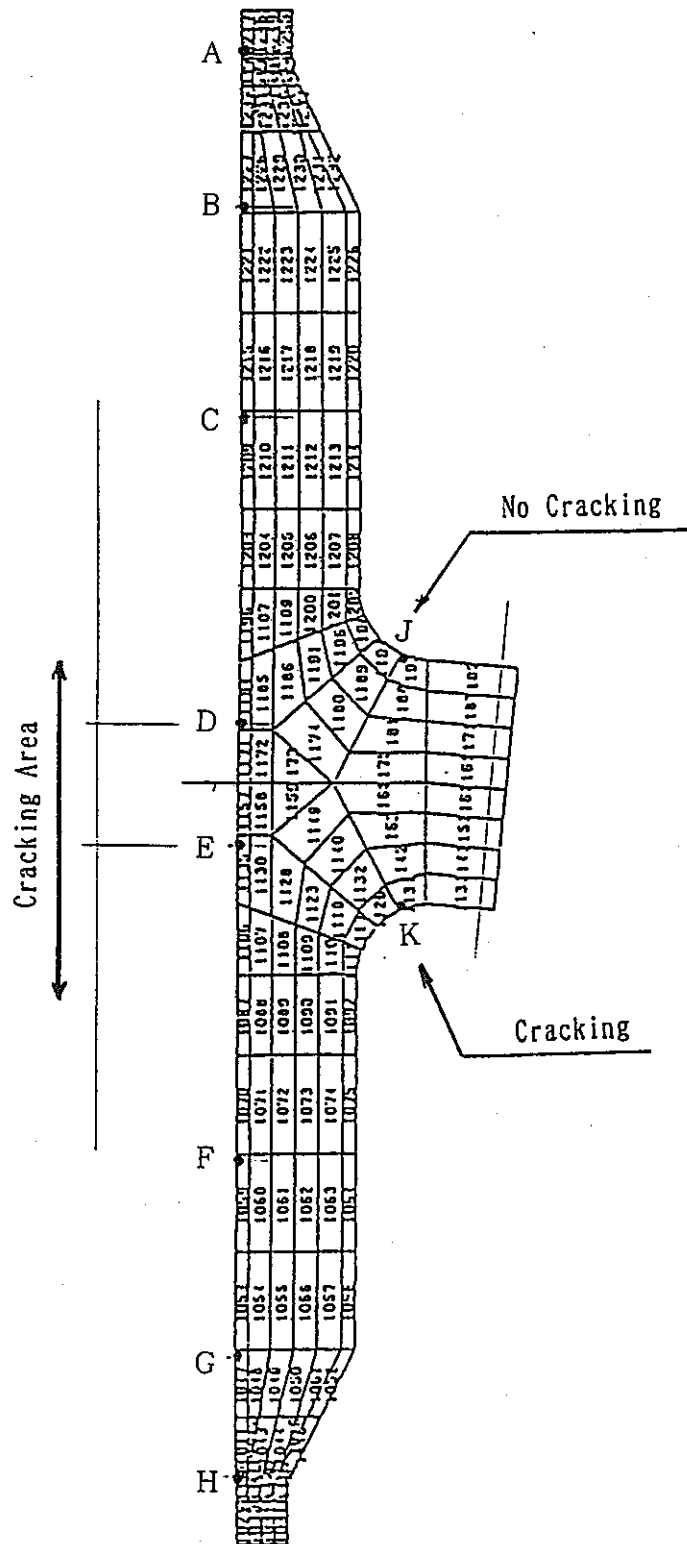


図 4.2.3 ノズル形状モデル3のクリープ疲労損傷評価点

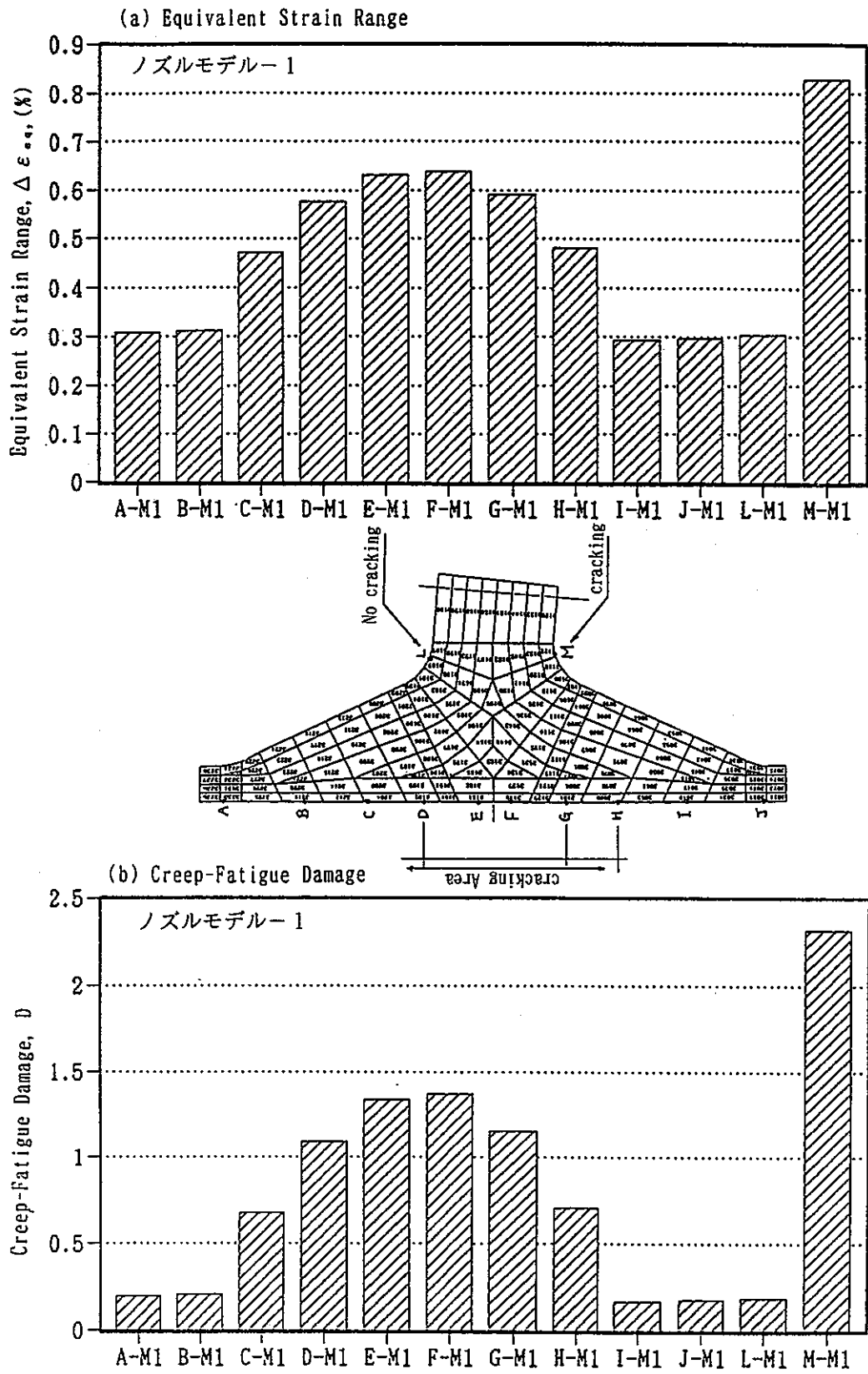


図 4.2.4 ノズル形状モデル1の評価点でのひずみ範囲とクリープ疲労損傷値

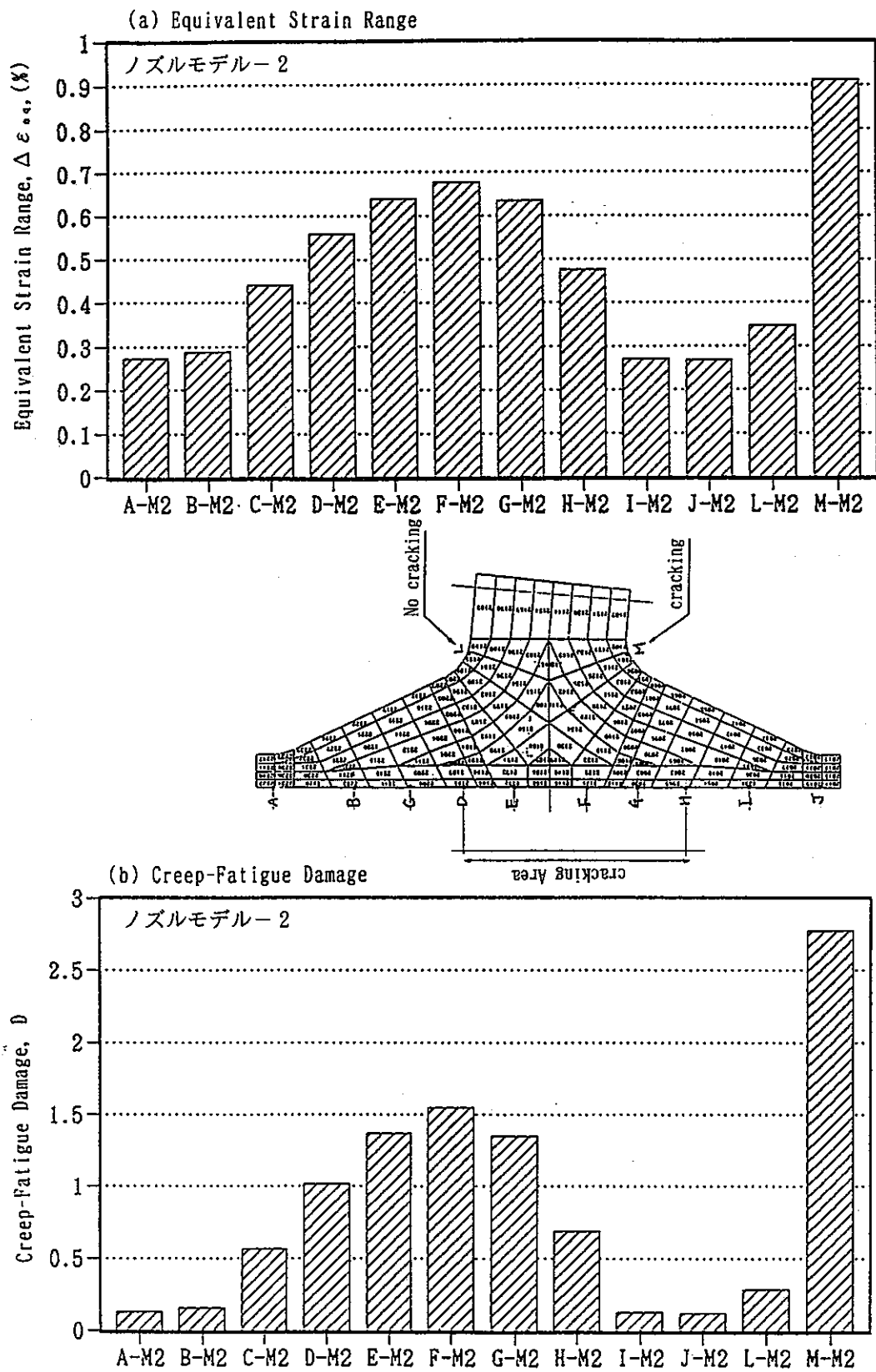


図 4.2.5 ノズル形状モデル2の評価点でのひずみ範囲とクリープ疲労損傷値

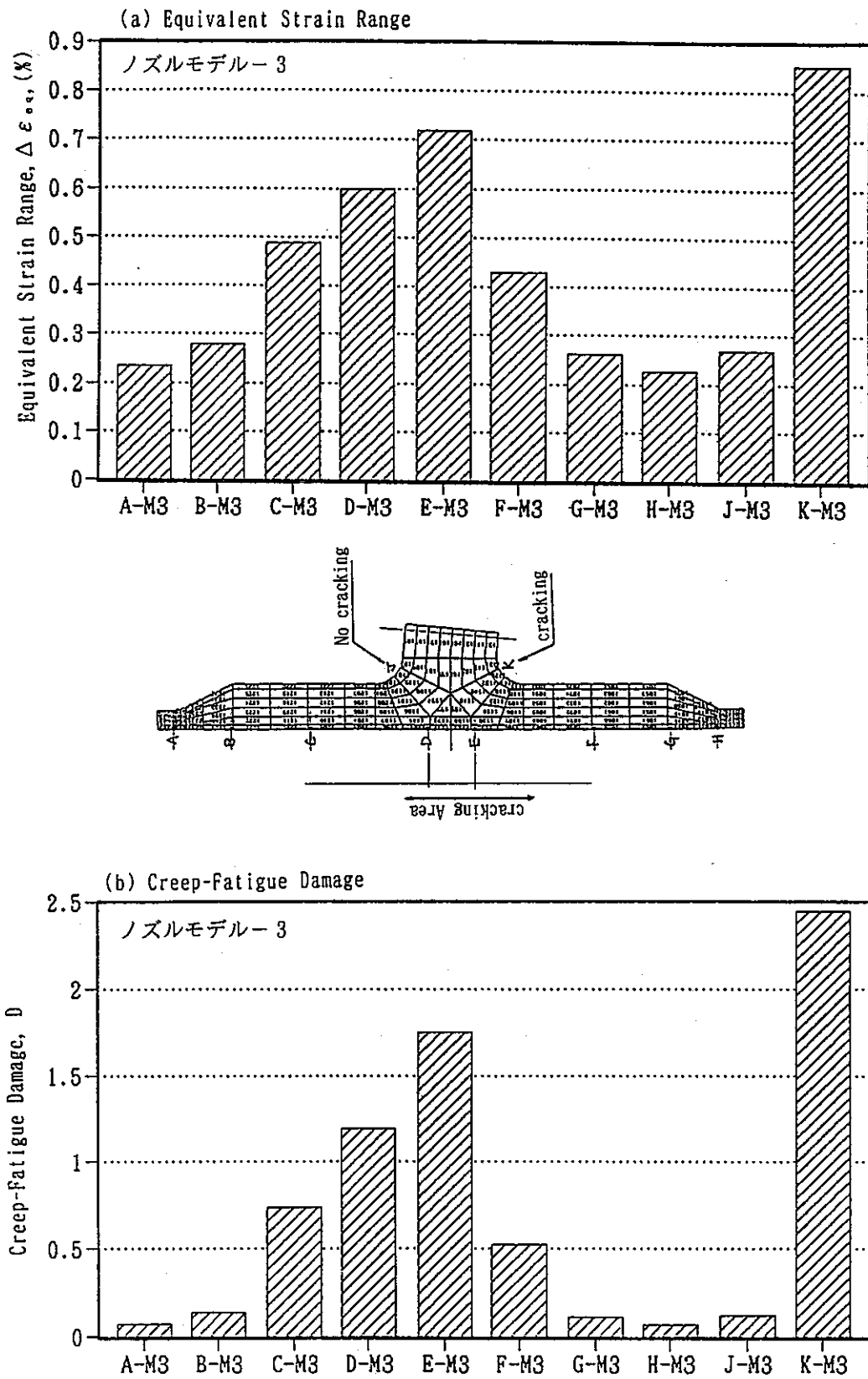


図 4.2.6 ノズル形状モデル3の評価点でのひずみ範囲とクリープ疲労損傷値

## 5. 考察

3種類のノズル形状モデルに対する熱応力解析としてこれまでに実施した解析の種類を表 5.1.1に示す。前報(第2報)<sup>(1)</sup>では、上記3モデルに対して、弾性解析と非弾性解析の2種類の解析を実施している。そこでの非弾性解析としては、弾塑性応力-ひずみ関係式に単調応力-ひずみ関係を採用した弾塑性-クリープ解析を実施した。

また、これらの弾性・非弾性解析に基づいたクリープ疲労損傷計算としては、弾性解析結果に対する損傷計算では、BDSに規定された手法に従う計算(EBDSと表記)と、本報第4章で述べたクリープ損傷計算に仮想的応力緩和経路を使用する「間接法」のうちの弾性解析用の手法(TTSDSと表記)に従う計算の2種類の方法により、1,300サイクル時点での損傷計算を行っている。一方、非弾性解析結果に対する損傷計算では、本報第4章で採用した、クリープ損傷計算に仮想的応力緩和経路を使用する「間接法」のうちの非弾性解析用の手法(TTSDSと表記)と、クリープ損傷計算に解析より得られる生の相当応力の経時変化を使用する「直接法」(NEBDSと表記)の2種類の方法により、1,300サイクル時点の損傷計算を行っている。なお、「直接法」による検討結果については本報5.4節で述べる。

これに対して本報では、まず、第3章で述べたように、3種類のノズル形状モデルに対する標準的非弾性解析として弾塑性応力-ひずみ関係式に標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係を採用した弾塑性-クリープ解析を行った。

また、これらの非弾性解析に基づいたクリープ疲労損傷計算としては、第4章で述べたように、クリープ損傷計算に仮想的応力緩和経路を使用する「間接法」により試験終了時点までに負荷した全熱過渡サイクル数である1,700サイクル時点の損傷計算を行った。

一方、これらと合わせて、今回の解析・強度評価では、非弾性解析条件の強度評価結果に及ぼす影響を検討する観点から、3種類のモデルに対して上記条件のうちクリープ解析を考慮しない弾塑性解析のみの解析を実施するとともに、さらに同様の観点から、モデル1については、弾塑性応力-ひずみ関係式に低ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみ関係を採用した弾塑性-クリープ解析とクリープ解析を考慮しない弾塑性解析のみの2種類の解析も別途実施した。

また、これらの非弾性解析結果に対するクリープ疲労損傷計算としては、同一の解析結果に対して異なる強度評価法を採用した場合の評価結果の違いを調べる観点から、第4章で述べた「間接法」の他に後述する「直接法」による評価も行った。

以下、本章ではこれらの解析および損傷計算の結果に基づいて、5.1~5.4節では非弾性解析に基づく強度評価法に関する検討として、まずクリープ解析実施の有無による評価結果の違いを検討し(5.1節)、次に非弾性解析に用いる弾塑性応力-ひずみ関係の違いが評価結果に及ぼす影響について、定常繰返し応力-ひずみ関係のうちの標準ひずみ速度の材料データを採用した場合と低ひずみ速度の材料データを採用した場合の比較(5.2節)および単調応力-ひずみ関係を採用した場合と定常繰返し応力-ひずみ関係を採用した場合の比較(5.3節)を行う。次に、損傷評価法として「直接法」を採用した場合の比較検討を行う(5.4節)。



次に、5.5 節では弾性解析に基づく強度評価法に関する検討として、前報第 2 報で実施した弾性解析結果に基づいて、先に算出した1,300 サイクル時点での損傷値を試験終了時の全熱過渡サイクル数に対応する1,700 サイクル時点での損傷値に修正し、再評価するとともに、上記非弾性解析に基づく強度評価結果、さらに実際のき裂発生状況との比較検討を行う。

### 5.1 非弾性解析におけるクリープ解析考慮の有無の影響

本報第 3 章では、3 種類のノズル形状モデルに対する非弾性解析として、弾塑性応力-ひずみ関係に標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の 2 直線近似を、またクリープひずみ式に遷移クリープを考慮した動燃の式を用いることにより、弾塑性-クリープ解析の形で行った。しかしながら、本熱過渡試験のように発生する熱応力が熱過渡の早い時期に極大値を持ち、その後構造部材内の温度分布が時間の経過とともに平準化するに従い応力が徐々に低下するような場合において、クリープ解析を実施する（解析上クリープを考慮する）効果がどの程度であるのかを把握しておくことはクリープ損傷を検討するうえで重要と考えられる。そこで、上記解析条件のもとで、クリープ解析を実施しない、すなわち弾塑性解析のみの条件での解析とクリープ疲労損傷評価を行い、先の結果と比較検討した。

付録 D には弾塑性解析のみの条件での解析結果と損傷評価結果について個々のモデルごとに以下の図表を示した。

付表 D.1～付表 D.3に 3 種類のノズル形状モデルの解析結果として先に示した各評価点でのひずみ範囲を、また付表 D.4～付表 D.6には第 4 章と同じ「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果を示す。また、付図 D.1～付図 D.2にはこれらのひずみ範囲と損傷値をグラフ化して示した。

これらの結果と先に示したクリープ解析まで行った非弾性解析結果を対比させて図 5.1.1～図 5.1.2 にひずみ範囲と損傷値を示す。同図より明らかなように、今回の熱過渡試験条件では、非弾性解析として弾塑性-クリープ解析を行った場合と弾塑性解析のみを行った場合で、ひずみ範囲およびクリープ疲労損傷値にほとんど差が認められない結果となった。

ここでひずみ範囲は熱過渡 1 サイクルの間の全ひずみの変動分として算出している。従って、弾塑性-クリープ解析を行った場合と弾塑性解析のみを行った場合でひずみ範囲に差が無いということは、今回の熱過渡試験条件では 1 サイクル当たりのひずみ範囲としてクリープひずみの寄与がほとんど無く、その大部分が弾塑性成分により形成されていることを意味している。一方損傷値については、ここで採用した「間接法」では疲労損傷値、クリープ損傷値ともに全ひずみ範囲の関数として与えられるため、ひずみ範囲に変化が生じなかったため、弾塑性-クリープ解析を行った場合と弾塑性解析のみを行った場合で同じ値となっている。

表 5.1.1 ノズルモデルに対する解析の種類

解析の種類	モデル-1	モデル-2	モデル-3
弾性解析	第2報で実施 (TTSDS <sup>*1</sup> ) (EBDS <sup>*2</sup> )	第2報で実施 (TTSDS) (EBDS)	第2報で実施 (TTSDS) (EBDS)
弾塑性クリープ解析 (単調応力-ひずみ曲線)	第2報で実施 (TTSDS <sup>*3</sup> ) (NEBDS <sup>*4</sup> )	第2報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	第2報で実施 (TTSDS) (NEBDS)
弾塑性クリープ解析 (繰返し応力-ひずみ曲線) (標準ひずみ速度)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)
弾塑性解析 (繰返し応力-ひずみ曲線) (標準ひずみ速度)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)
弾塑性クリープ解析 (繰返し応力-ひずみ曲線) (低ひずみ速度)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	—————	—————
弾塑性解析 (繰返し応力-ひずみ曲線) (低ひずみ速度)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	—————	—————

注) カッコ内は適用した評価手法を示す。

(\*1) TTSDS : 寿命予測法、構造物強度確性試験施設専用基準 (弾性解析ベース)

(\*2) EBDS : 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針の長期一次応力が低い場合の手法 (弾性解析ベース)

(\*3) TTSDS : 寿命予測法 (非弾性解析ベース、本報では「間接法」と呼ぶ)

(\*4) NEBDS : 寿命予測法 (非弾性解析ベース、本報では「直接法」と呼ぶ)

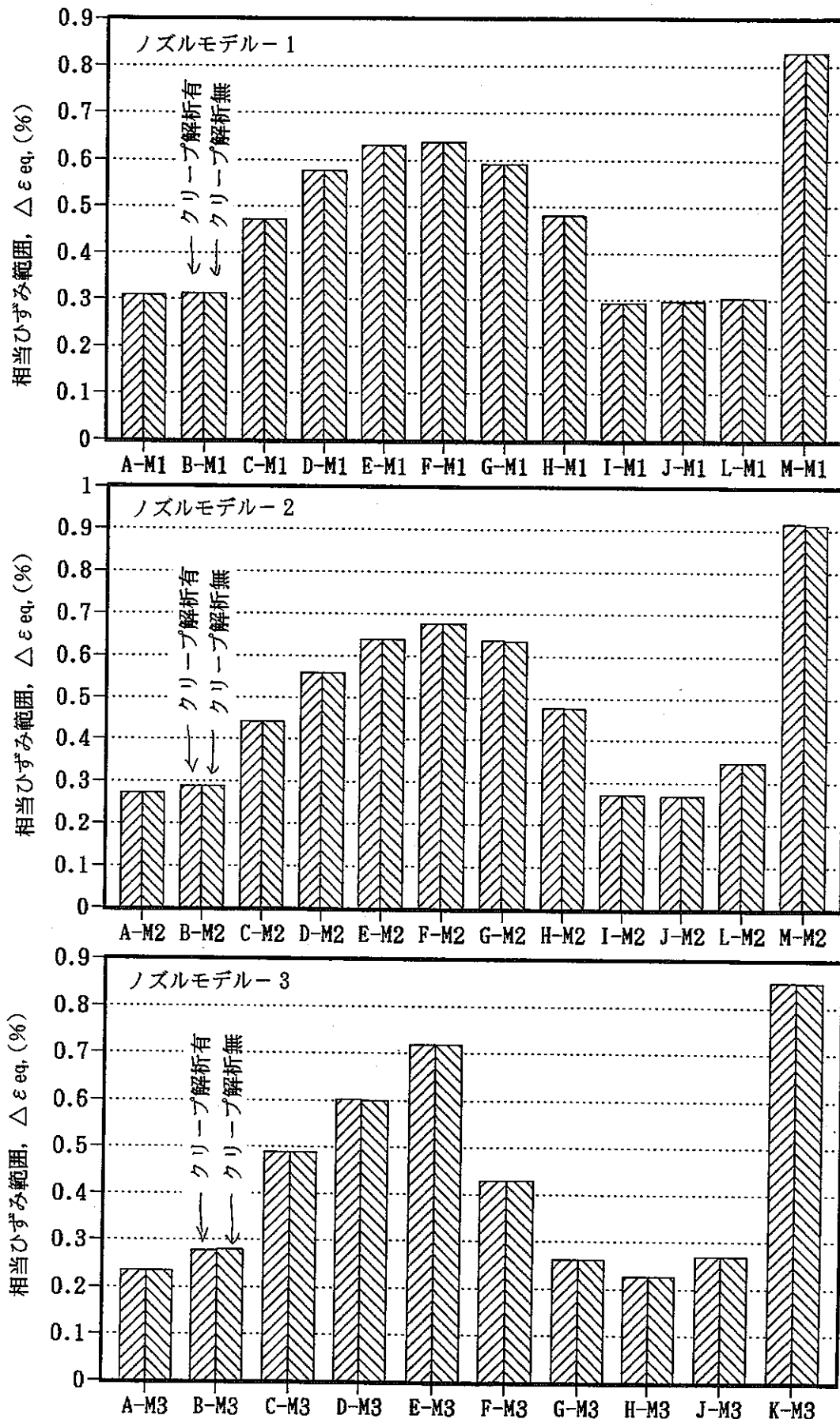


図 5.1.1 クリープ解析実施の有無のクリープ疲労損傷評価に及ぼす影響 (ひずみ範囲)

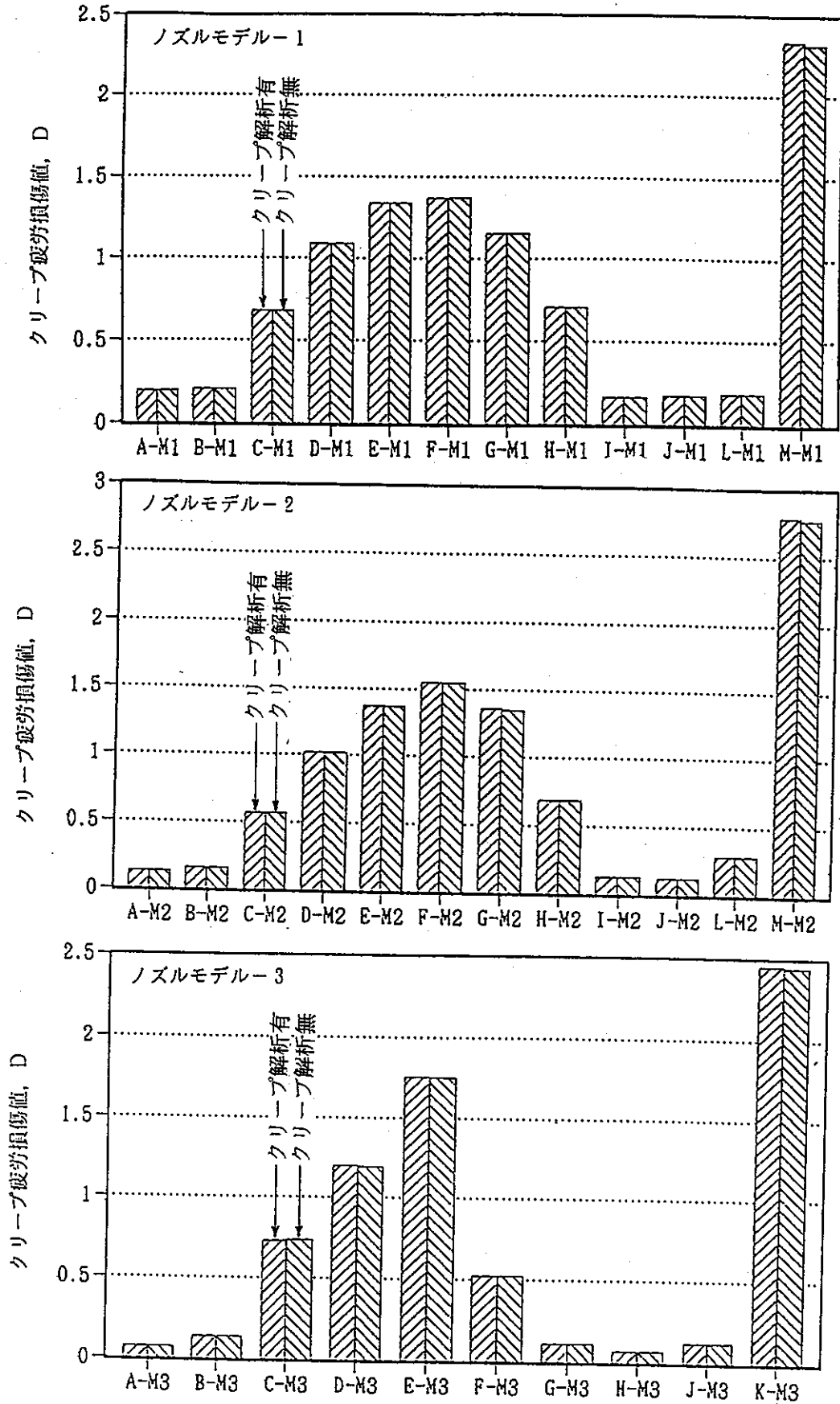


図 5.1.2 クリープ解析実施の有無のクリープ疲労損傷評価に及ぼす影響 (損傷値)

## 5.2 非弾性解析における応力-ひずみ関係の影響に関する検討-1.

(標準ひずみ速度と低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係の結果の比較)

本報第3章では、3種類のノズル形状モデルに対する非弾性解析として、弾塑性応力-ひずみ関係に標準ひずみ速度 ( $1 \times 10^{-3}$  mm/mm/sec) 条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の2直線近似を、またクリープひずみ式に遷移クリープを考慮した動燃の式を用いた弾塑性-クリープ解析を行った。解析条件として弾塑性応力-ひずみ関係にひずみ速度  $1 \times 10^{-3}$  1/s を採用したのは、本条件がSUS304について低サイクル疲労試験で時間依存型変形の寄与しない標準条件と見なすことができ、この種の解析の弾塑性応力-ひずみ関係として多用されてきたためである。

しかしながら、本熱過渡試験のように熱過渡時のひずみ速度が比較的小さい場合には(ひずみ速度  $1 \times 10^{-6}$  mm/mm/s 程度) 定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線がより柔らかい挙動(ヒステリシス曲線としてはより偏平化された挙動)を示すことが指摘されてきており、このような低ひずみ速度の応力-ひずみ関係を使用した非弾性解析による強度評価結果では、上記標準ひずみ速度での評価結果よりも大きな損傷値を示す場合があることが報告されている。<sup>(7)</sup> 従ってこの弾塑性応力-ひずみ関係に採用するひずみ速度条件の影響がどの程度であるかを把握しておくことは重要と考えられる。

そこで、強度評価結果に及ぼす異なるひずみ速度条件での応力-ひずみ関係の影響を把握するため、MODEL-1 に対して、ひずみ速度  $1 \times 10^{-6}$  mm/mm/s の低ひずみ速度条件データによる解析も合わせて実施した。低ひずみ速度条件として本ひずみ速度条件を選んだのは、先に実施した解析の結果から本熱過渡試験で生じるひずみ速度が本条件に近いことが予想されたためである。解析としては、弾塑性-クリープ解析とクリープ解析を実施しない弾塑性解析のみの条件による解析の2条件で実施し、これらの結果を用いて「間接法」によるクリープ疲労損傷評価を行い、先の結果と比較検討した。

付録Eには低ひずみ速度条件での弾塑性-クリープ解析および弾塑性解析の結果と損傷評価結果として以下の図表を示した。

付表 E.1~付表 E.2に弾塑性-クリープ解析の結果として先に示した各評価点でのひずみ範囲と第4章で述べた「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果を示す。また付表 E.3~付表 E.4には同様に弾塑性解析の結果として各評価点でのひずみ範囲とクリープ疲労損傷評価結果を示す。また、付図 E.1~付図 E.2にはこれらのひずみ範囲と損傷値をグラフ化して示した。

初めに、弾塑性応力-ひずみ関係に低ひずみ速度 ( $1 \times 10^{-6}$  mm/mm/sec) 条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の2直線近似を用いた場合において、5.1節の検討同様、クリープ解析の実施の有無の影響を検討した。図 5.2.1 に弾塑性-クリープ解析と弾塑性解析のみの解析による損傷値を比較して示す。2種類の解析条件の結果は5.1節に示した標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した場合と同様にほとんど一致しており、クリープ解析の寄与は認められない。

次に、これらの損傷値と先に示した標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した場合の結果を対比させて図 5.2.2に示す。同図より明らかなように、き裂発生認められた各評価点において、低ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひず

みヒステリシス曲線を採用した場合の方が標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した場合よりも損傷値が内表面側で5%~10%程度、また最も損傷が厳しい評価点Mでは20%程度大きくなっている。しかし、これら2種類の解析に基づく損傷値は、き裂発生状況との対比上は大きな差はなく、両者ともほぼ妥当にき裂発生を予測しているといえる。一方、き裂発生が認められなかった評価点においては損傷値にほとんど差が認められない。

上記報告<sup>(7)</sup>で、ひずみ速度の影響の比較的大きく現れたケースは溶接継手の溶接止端部で1%以上のひずみ範囲の部位であり、本供試体内表面のような平滑な部位において1%以下の低ひずみ範囲の領域ではこのひずみ速度の差はそれほど大きな影響因子とはならないと言える。

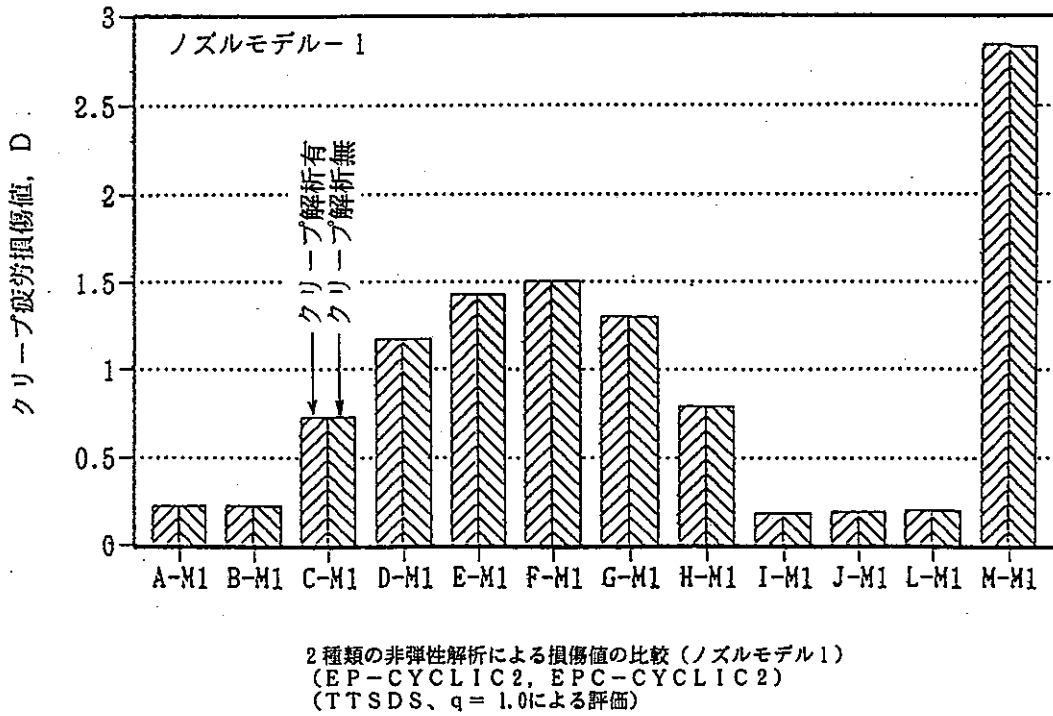


図 5.2.1 クリープ解析実施の有無のクリープ疲労損傷評価に及ぼす影響  
 (低ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみ関係による)

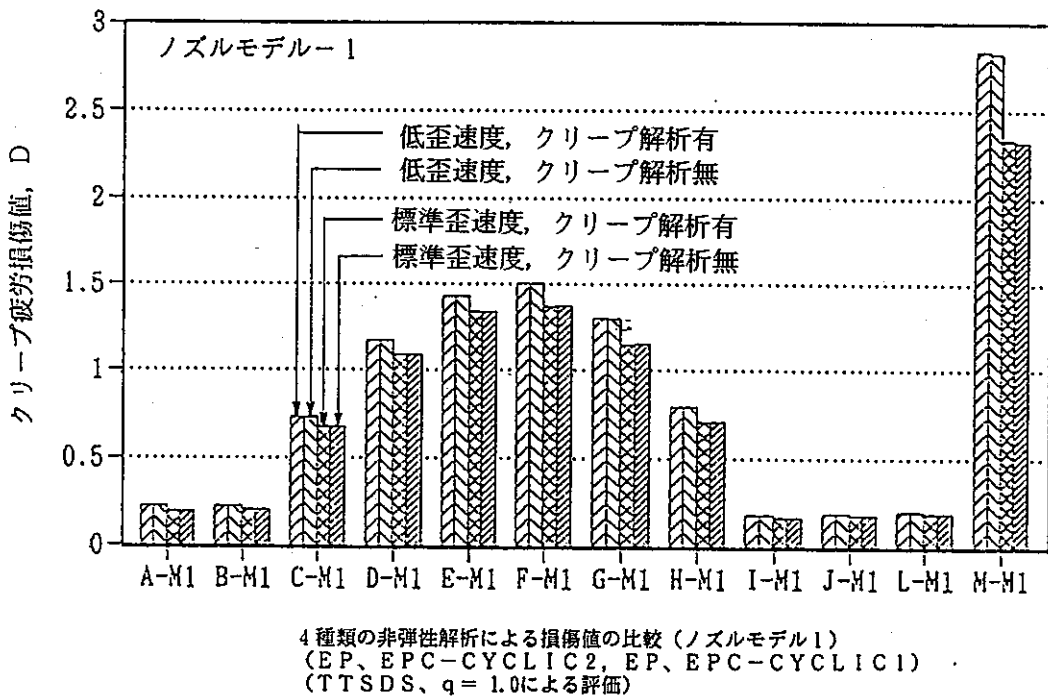


図 5.2.2 定常繰返し応力-ひずみ関係におけるひずみ速度条件のクリープ疲労損傷  
 評価に及ぼす影響

### 5.3 非弾性解析における応力-ひずみ関係の影響に関する検討-2 (単調応力-ひずみ関係と定常繰返し応力-ひずみ関係の結果の比較)

本研究第2報<sup>(1)</sup>では、3種類のノズル形状モデルに対する非弾性解析として、弾塑性応力-ひずみ関係に単調応力-ひずみ関係式を、またクリープひずみ式に遷移クリープを考慮した動燃の式を用いた弾塑性-クリープ解析を行い、その結果に基づいて熱過渡1,300サイクル時点でのクリープ疲労損傷計算を実施した。

通常、SUS304のような繰返し硬化特性を示す材料に対する繰返し負荷条件のもとでの応力、ひずみ挙動を非弾性解析により予測する場合には、処女材に対する単調負荷時の挙動を表現する単調応力-ひずみ関係式よりも、繰返し硬化特性の影響が含まれる定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した方が、より実際の材料挙動に近い結果を算出できると考えられる。そこで、本報では、3種類のノズル形状モデルに対する非弾性解析として、弾塑性応力-ひずみ関係に定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の2直線近似を、またクリープひずみ式に遷移クリープを考慮した動燃の式を用いた弾塑性-クリープ解析を行った。解析結果および損傷評価結果はすでに述べたとおり、実際に供試体に発生したき裂との対応関係は良好であった。

SUS304の場合、単調応力-ひずみ関係は硬化後の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線より柔らかい挙動（応力-ひずみ曲線上、同じ応力に対してひずみの大きくなる傾向の応答挙動）を示すため、損傷計算をひずみ範囲に基づいて行う「間接法」では、単調応力-ひずみ関係を使用した非弾性解析による強度評価結果のほうが、定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を使用した評価結果よりも大きな損傷値となることが予想される。そこで、これら2種類の異なる応力-ひずみ関係式を採用した場合の強度評価結果に及ぼす影響を把握するため、3種類のノズル形状モデルに対して前報で実施した単調応力-ひずみ関係を用いた場合の結果と、本報で実施した定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を用いた場合の結果について、比較検討を行った。

付録Fには単調応力-ひずみ関係を用いた場合の解析結果と損傷評価結果について個々のモデルごとに以下の図表を示した。

付図 F.1に前報の単調応力-ひずみ関係を用いた場合の弾塑性-クリープ解析の結果として3種類のノズル形状モデルの各評価点でのひずみ範囲を示す。前報ではこれらのひずみ範囲を用いて「間接法」（TTSDSと表記）に基づいたクリープ疲労損傷計算として、弾性追従係数 $q$ を1.0 および 1.5とした場合の計算を行っている。付表 F.1~F.3 と付図 F.2には弾性追従係数 $q$ を1.0 とした場合の、また付表 F.4~F.6 と付図 F.3には弾性追従係数 $q$ を1.5 とした場合の3種類のノズル形状モデルの各評価点での損傷値を示す。これらのクリープ疲労損傷値は前報で計算した熱過渡1,300サイクル時点での値を線形累積損傷則に基づいて熱過渡試験終了時の1,700サイクル時点での値に修正したものである。

初めに、単調応力-ひずみ関係を用いた場合の結果に基づいて、「間接法」によりクリープ疲労損傷評価を行う場合の弾性追従係数 $q$ の影響を調べた。図 5.3.1 に弾性追従係数 $q$ をそれぞれ1.0, 1.5とした場合の3種類のノズル形状モデルの各評価点での損傷値を対比させて示す。「間接法」によりクリープ疲労損傷評価を行う場合、弾性追従係数 $q$ が影響を及ぼすのはクリープ損傷を計算する際の応力緩和計算の部分であり、疲労損傷計算



には影響しない。従って、同図における2種類の評価結果の差はクリープ損傷値の差である。今回の試験条件で、弾性追従係数 $q$ の1.0と1.5の違いによる損傷値の差はき裂発生認められた部位のうち内表面側で15%程度であり、また、最も損傷の厳しい外表面側評価点(M-M1, M-M2, K-M3)でも15%程度であり、弾性追従係数 $q$ がこの程度の範囲では評価結果に及ぼす影響はそれほど大きくないといえる。

次に、弾塑性応力-ひずみ関係に単調応力-ひずみ関係を用いた場合と標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の2直線近似を用いた場合の3種類のノズル形状モデルの各評価点でのひずみ範囲を対比させて図5.3.2に示す。同図において、定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を用いた場合の結果は5.1節で検討したクリープ解析を実施したものと実施していないものの2者の結果を合わせて示しているが、これらに対して単調応力-ひずみ関係を用いた場合のひずみ範囲は内表面側では一様に15%~20%程度、さらに、最も損傷の厳しい外表面側評価点(M-M1, M-M2, K-M3)では30%~40%程度大きい値となっていることが分かる。

次に、損傷値について同様に比較した結果を図5.3.3に示す。同図において、単調応力-ひずみ関係を用いた場合の結果については、上に述べた弾性追従係数 $q$ として1.0と1.5の場合の2種の結果を、また、定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を用いた場合の結果は5.1節で検討したクリープ解析を実施したものと実施していないものの2種の結果(両者とも弾性追従係数 $q$ は1.0)を合わせて示している。弾性追従係数 $q$ として同一の1.0を採用した場合の単調応力-ひずみ関係を用いた場合と定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を用いた場合の比較では、単調応力-ひずみ関係を用いた場合の損傷値の方が内表面側では一様に30%~40%程度、また、最も損傷の厳しい外表面側評価点(M-M1, M-M2, K-M3)では60%~80%程度大きい値となっていることが分かる。同図には、供試体に観察されたき裂の発生範囲も合わせて示しているが、寿命評価法の破損クライテリアがクリープ疲労損傷値 $D=1$ であることを考えると、定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を用いた場合の方が試験結果に良く合っていると見える。

なお、図5.3.4にはモデル1について、5.2節で検討した低ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の2直線近似を用いた場合の損傷評価結果も合わせて示したが、この結果も単調応力-ひずみ関係を用いた場合の損傷値に対して一様に小さい値となっており、ほぼ試験結果と整合する結果を示していることが分かる。

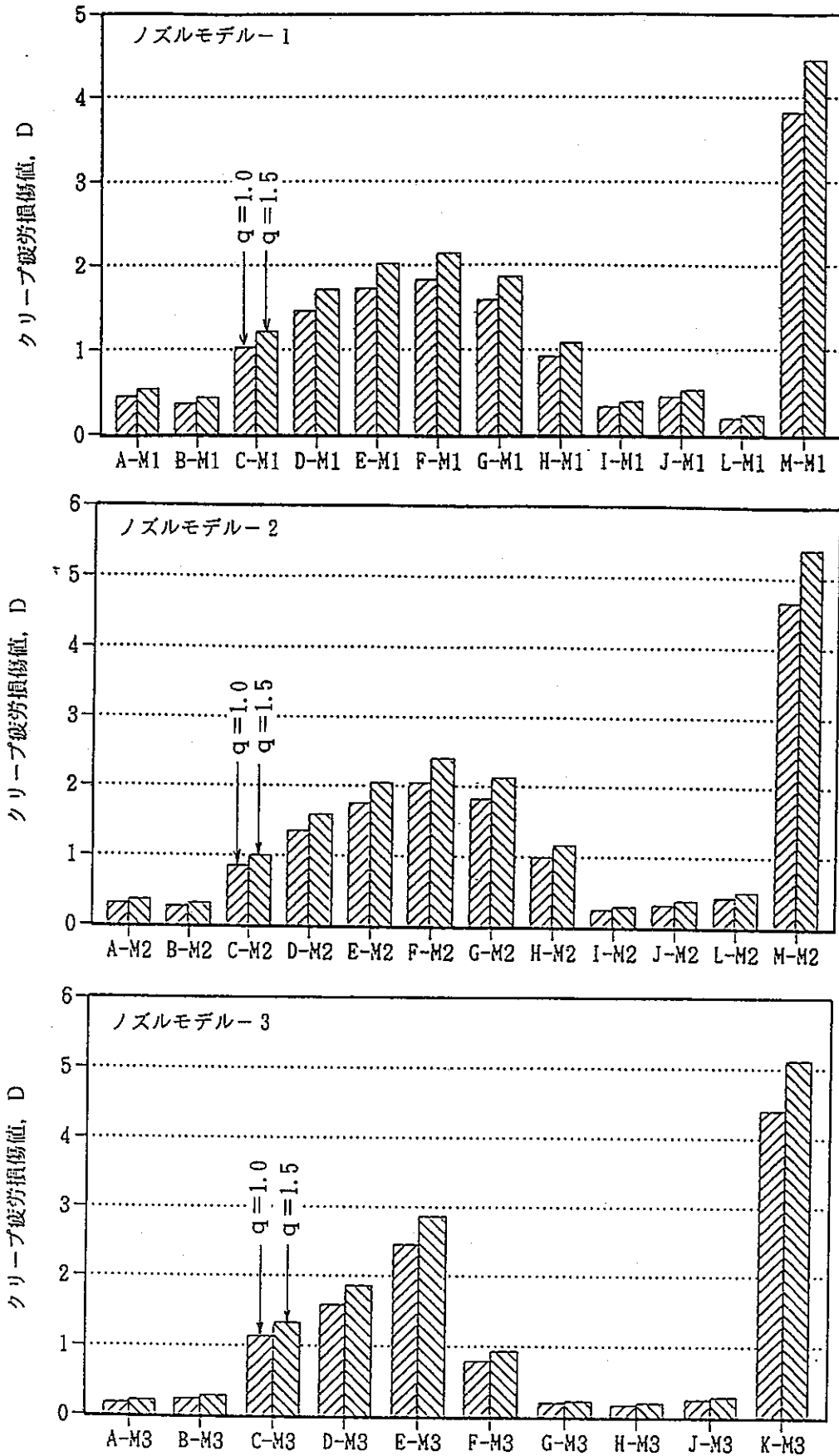


図 5.3.1 「間接法」におけるクリープ疲労損傷評価に及ぼす弾性追従係数  $q$  の影響  
(単調応力-ひずみ関係を用いた非弾性解析結果に基づく)

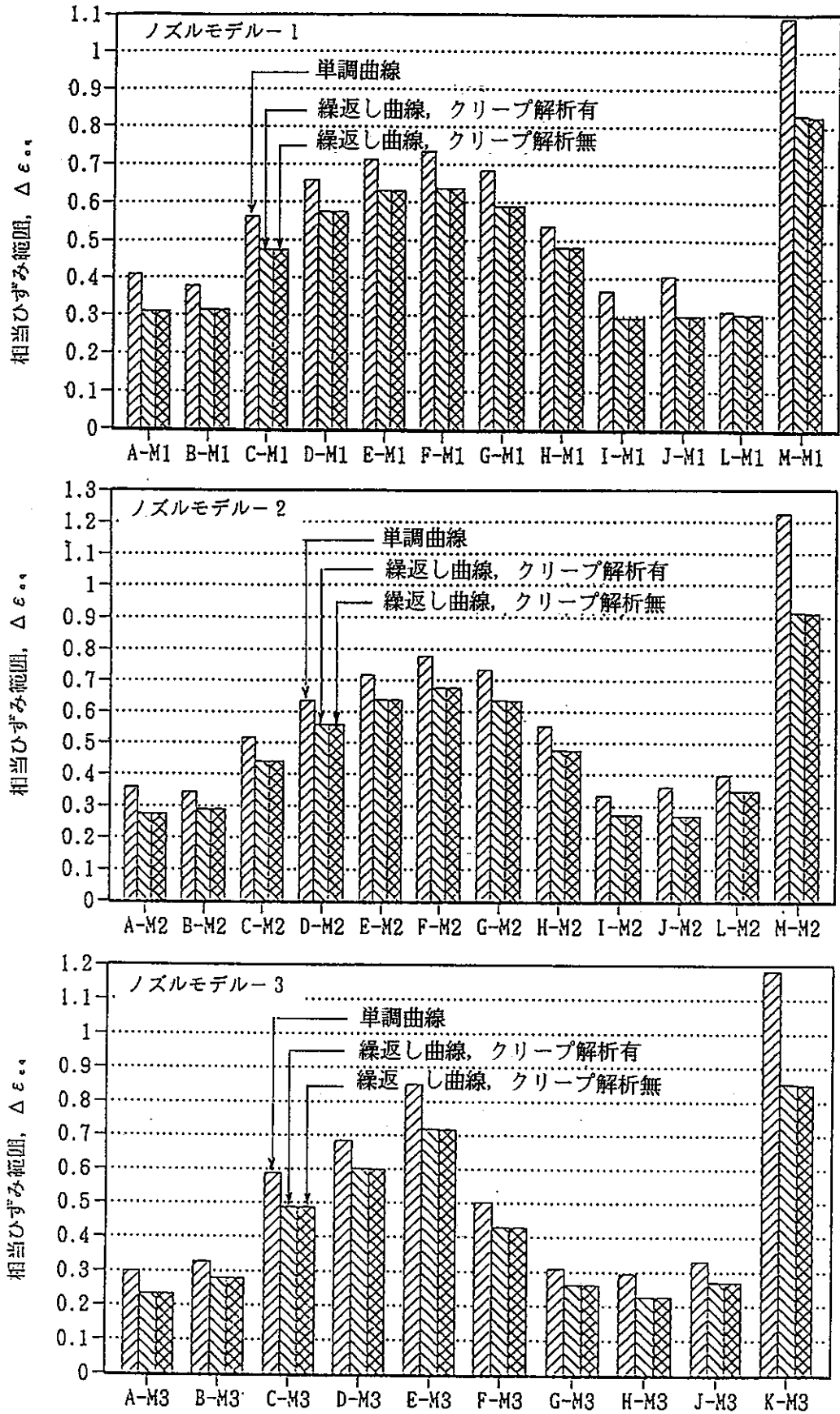


図 5.3.2 非弾性解析に用いる弾塑性応力-ひずみ関係のひずみ範囲に及ぼす影響  
 (単調応力-ひずみ関係と標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係  
 の比較)

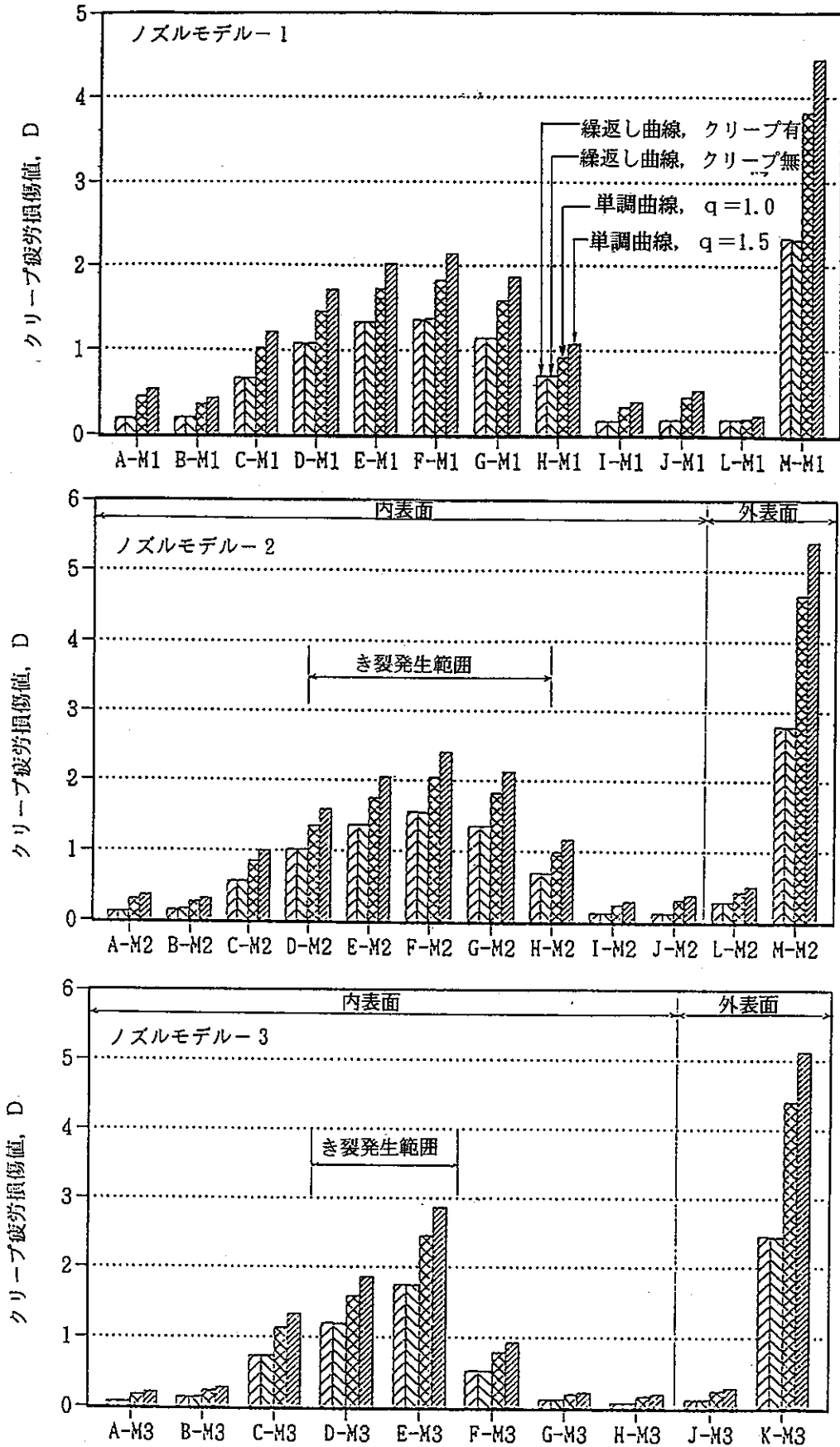
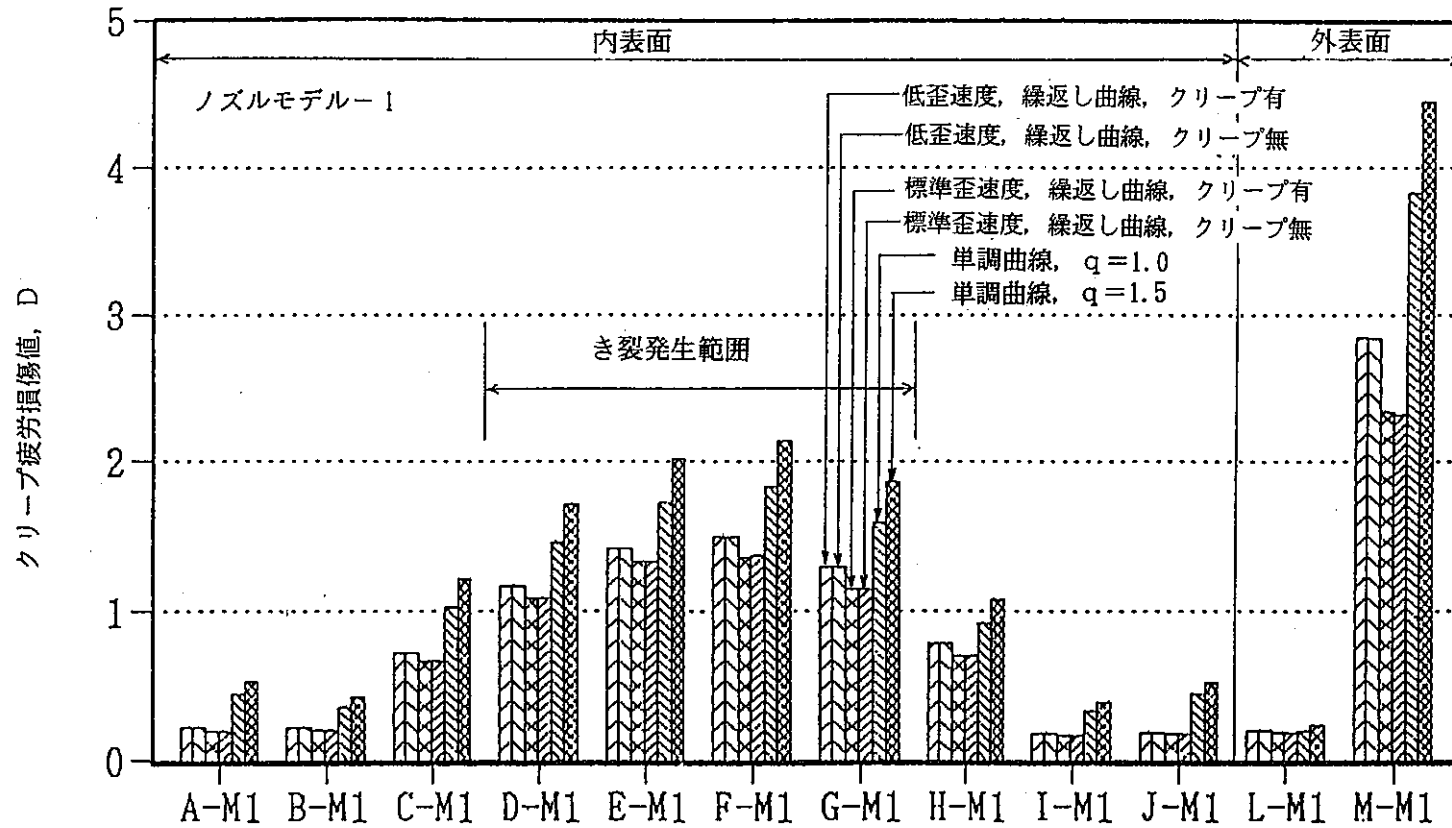


図 5.3.3 非弾性解析に用いる弾塑性応力-ひずみ関係のクリープ疲労損傷評価に及ぼす影響 (単調応力-ひずみ関係と標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係の比較)



5種類の非弾性解析による損傷値の比較 (ノズルモデル1)  
 (EP、EPC-CYCLIC2、EP、EPC-CYCLIC1、  
 EPC-MONO)  
 (TTSDS、 $q=1.0$ による評価、EPC-MONOでは $q=1.5$ 含む)

図 5.3.4 非弾性解析に用いる弾塑性応力-ひずみ関係のクリープ疲労損傷評価に及ぼす影響 (低ひずみ速度および標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係と単調応力-ひずみ関係の比較)

#### 5.4 非弾性解析に基づくクリープ損傷評価に関する検討

先に述べたように、これまで構造室で実施した各種熱過渡試験の強度評価において、非弾性解析に基づくクリープ疲労損傷評価としては、主としてクリープ損傷の算出法の違いにより以下の2通りの評価法を採用し、検討を試みている（第4章参照）。

- (1) クリープ損傷値を算出するのに、仮想的な応力緩和経路を用いる方法  
（本報では「間接法」と呼ぶ）
- (2) 解析により得られる相当応力の経時変化に沿って損傷値を直接時間積分する方法  
（本報では「直接法」と呼ぶ）

本報第4章では、上記2種類の方法のうちの第1番目の方法「間接法」により評価検討を試みた。本手法の具体的なクリープ損傷の算出法は以下のとおりであった。

すなわち、全ひずみ範囲  $\varepsilon_c$  と動的応力-ひずみ関係式から緩和開始の初期応力を算出し、その後構造、熱過渡荷重の特徴を考慮した適切な弾性追従係数  $q$  を用いてクリープ緩和の計算を行うことにより応力緩和経路を推定し、この応力緩和経路に対して、応力が一定とみなせる微小時間毎にクリープ破断式に対応させることにより、損傷の時間分数を算出し、この計算を相当応力の時刻歴に沿って繰返しおこない、時間積分することによりクリープ損傷を算出するものである。本手法で、クリープ緩和の計算は、クリープひずみ式として遷移クリープを考慮した動燃の式を用い、ひずみ硬化則を仮定して行っている。また、本手法において寿命予測を行う場合には、クリープ破断式は裕度を含まない形すなわち  $\alpha_R = 1$  として使用している。また本評価法において疲労損傷値は、評価点での熱過渡1サイクル中の全ひずみ範囲とサイクル中の最高金属温度および平均ひずみ速度を用いて平均疲労破断式に基づいて算出している。

本手法は、従来の非弾性解析の経験から、応力計算結果が採用する応力-ひずみ関係式に大きく依存するのに対して、ひずみ計算結果はさほど応力-ひずみ関係式の影響を受けないため、このひずみ範囲計算結果をベースとしたクリープ損傷の計算値が安定した値となることに着目した評価法と考えられた。

これに対する強度評価手法として、非弾性解析に基づくクリープ損傷計算に上記2番目の方法を採用した「直接法」がある。本評価法でのクリープ損傷の計算法は次のとおりである。すなわち、非弾性解析により得られる評価点での生の相当応力の、熱過渡1サイクル中の時刻歴およびその時刻における金属温度を用いて、応力が一定とみなせる微小時間毎にクリープ破断式に直接対応させることにより、損傷の時間分数を計算し、この計算を相当応力の時刻歴に沿って繰返しおこない、時間積分することによりクリープ損傷を計算する方法である。本手法において寿命予測を行う場合には、クリープ破断式は「間接法」同様裕度を含まない形すなわち  $\alpha_R = 1$  として使用する。また本手法における疲労損傷の算出法も「間接法」の場合と同一であり、得られる疲労損傷値は「間接法」の場合と同一である。

本手法は、非弾性解析の生の結果（クリープ評価に応力、疲労評価にひずみ）を直接採用するため手法としては簡明であるが、その精度は非弾性解析法、特に弾塑性応力-ひずみ関係として採用する構成則に大きく依存すると考えられる。

以下本節では、3種のノズル形状モデルに対して実施した各種解析条件での非弾性熱応

力解析結果に対して、クリープ疲労損傷評価法として「直接法」を採用して評価した結果を示すとともに、第4章で述べた「間接法」による評価結果と比較検討した。

付録Gには各種非弾性解析条件での結果に基づいた「直接法」による評価結果について個々のモデルごとに以下の図表を示した。

付表 G.1～付表 G.3に3種のノズル形状モデルについて標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した弾塑性-クリープ解析の結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果を示す。同様に、付表 G.4～付表 G.6には3種のノズル形状モデルについて標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した弾塑性解析のみの場合の結果を示す。さらに、付表 G.10～付表 G.11にはモデル1について実施した低ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した弾塑性-クリープ解析および弾塑性解析のみの場合の結果を示す。また、付図 G.1～付図 G.4にはこれらの結果をグラフ化して示した。なお、3種のノズル形状モデルについて先に実施した単調応力-ひずみ関係を用いた場合の結果については本研究第2報に示されているものを付表 G.7～G.9 と付図 G.3に再掲した。

初めに、図 5.4.1～図 5.4.3に3種のノズル形状モデルについて、5.3節で検討した単調応力-ひずみ関係を用いた場合と標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を用いた場合の損傷値を対比する形で、上側に「直接法」による結果を、また下側に「間接法」による結果を合わせて示した。これらの図において、「直接法」による評価結果は各モデルにおける損傷値の分布形態としては「間接法」による評価結果とほぼ同様の傾向を示し、また単調応力-ひずみ関係を用いた場合と定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を用いた場合の損傷値の大小関係も「間接法」による評価結果と一致している。しかし、損傷値の大きさは「直接法」の場合の方が一様に小さくなっている。

次に、これら2種の評価法の差をより明確にするために、図 5.4.4～図 5.4.6には各モデルについて、解析条件ごとに「直接法」による結果と「間接法」による結果を比較して示した。図 5.4.4は定常繰返し応力-ひずみ曲線（標準ひずみ速度）を用いた弾塑性-クリープ解析による結果を、図 5.4.5は同様定常繰返し応力-ひずみ曲線を用いた弾塑性解析による結果を、さらに図 5.4.6は単調応力-ひずみ曲線を用いた弾塑性-クリープ解析による結果をそれぞれ示している。

これらの図において、「直接法」によるクリープ疲労損傷値は「間接法」による損傷値に対して値が一様に小さくなっている。両評価法の疲労損傷値は同一であるため、この差はクリープ損傷値の差であるが、「直接法」では前述の表に示されるように疲労損傷値に対して、クリープ損傷値は大部分の評価点で1オーダー以上小さい値となっており、損傷値のほとんどが疲労損傷値で構成される結果となっている。

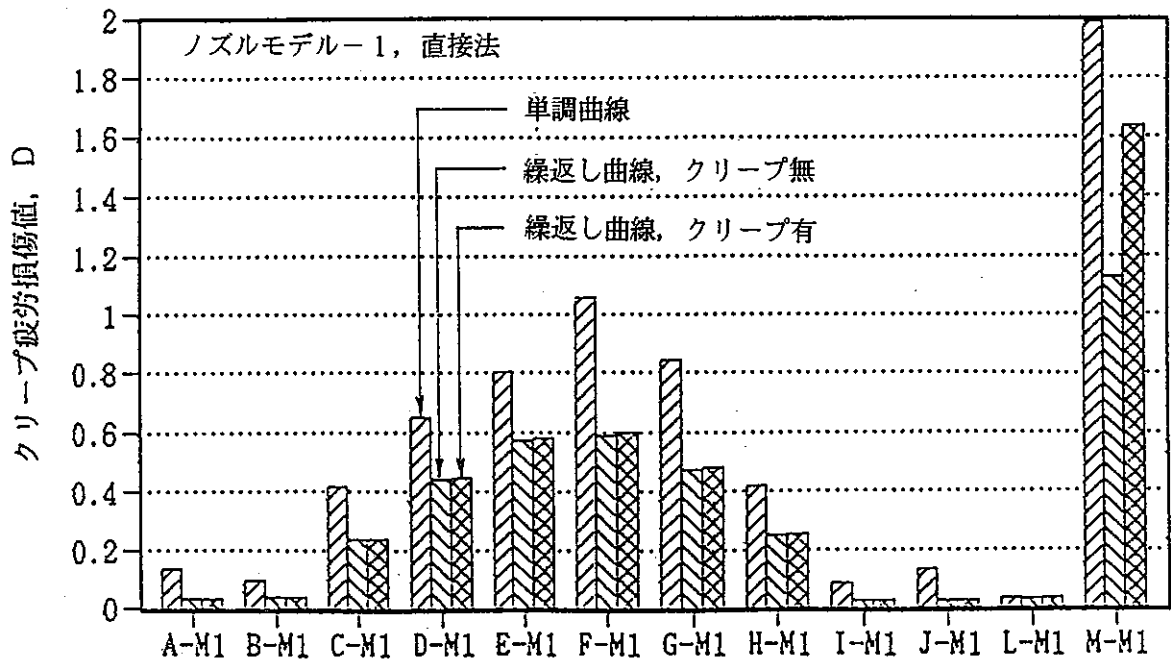
試験後のき裂破面観察によれば、3種のノズルモデル内表面のき裂では進展の初期～中期にはクリープ損傷の寄与したと考えられる粒界割れが明らかに確認されており、「直接法」で算出されたクリープ損傷の傾向とは整合しない。同様の傾向がTTSで試験した熱応力緩和構造モデル(1) 供試体の強度評価結果<sup>(7)</sup>でも確認されている。この点は非弾性解析に基づくクリープ疲労損傷評価法を確立する上での問題点のひとつと考えられる。

なお、「直接法」と「間接法」の比較における損傷値（クリープ損傷値）の差は以上述べたとおりであるが、前述 5.3節では「間接法」の中で弾性追従係数 $q$ の設定値（1.0と

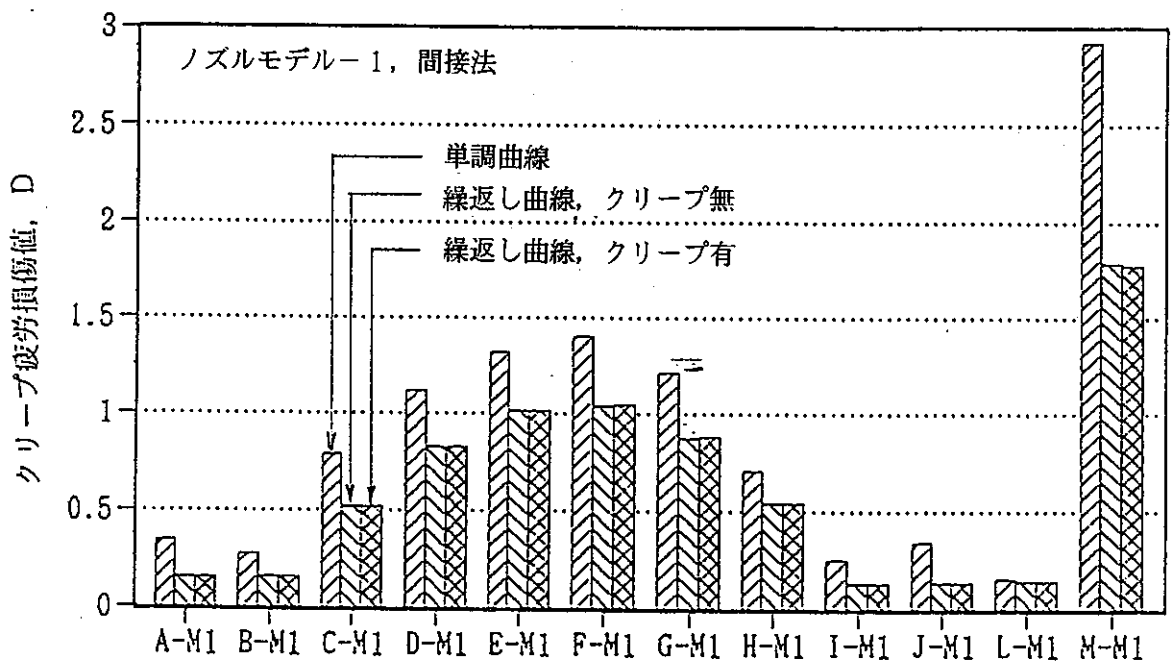
1.5)の差がクリープ損傷値に及ぼす影響について述べた。ここでは、さらにこの弾性追従係数の差がクリープ損傷値に及ぼす影響と「直接法」と「間接法」の評価法間の差が損傷値に及ぼす影響の大きさについて比較する。

図 5.4.7には、単調応力-ひずみ曲線を用いて実施した弾塑性-クリープ解析の結果に対する「間接法」による損傷評価結果として弾性追従係数 $q$ の設定値を1.0 と1.5 の2種類に設定した場合の比較を示す。図 5.4.8には、さらに「直接法」による損傷評価結果も合わせて示している。これらの3者を比較すると、「間接法」の中で弾性追従係数 $q$ の設定値を1.0 から1.5 に変化させる影響よりも「直接法」と「間接法」の評価法間の差の方が損傷値に及ぼす影響が大きいことが分かる。





3種類の非弾性解析による損傷値の比較(ノズルモデル1)  
(NEBDSによる評価)  
(EPC-MONO, EP-CYCLICI, EPC-CYCLICI)



3種類の非弾性解析による損傷値の比較(ノズルモデル1)  
(TTSDSによる評価)  
(EPC-MONO, EP-CYCLICI, EPC-CYCLICI)

図 5.4.1 「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較(モデル1)

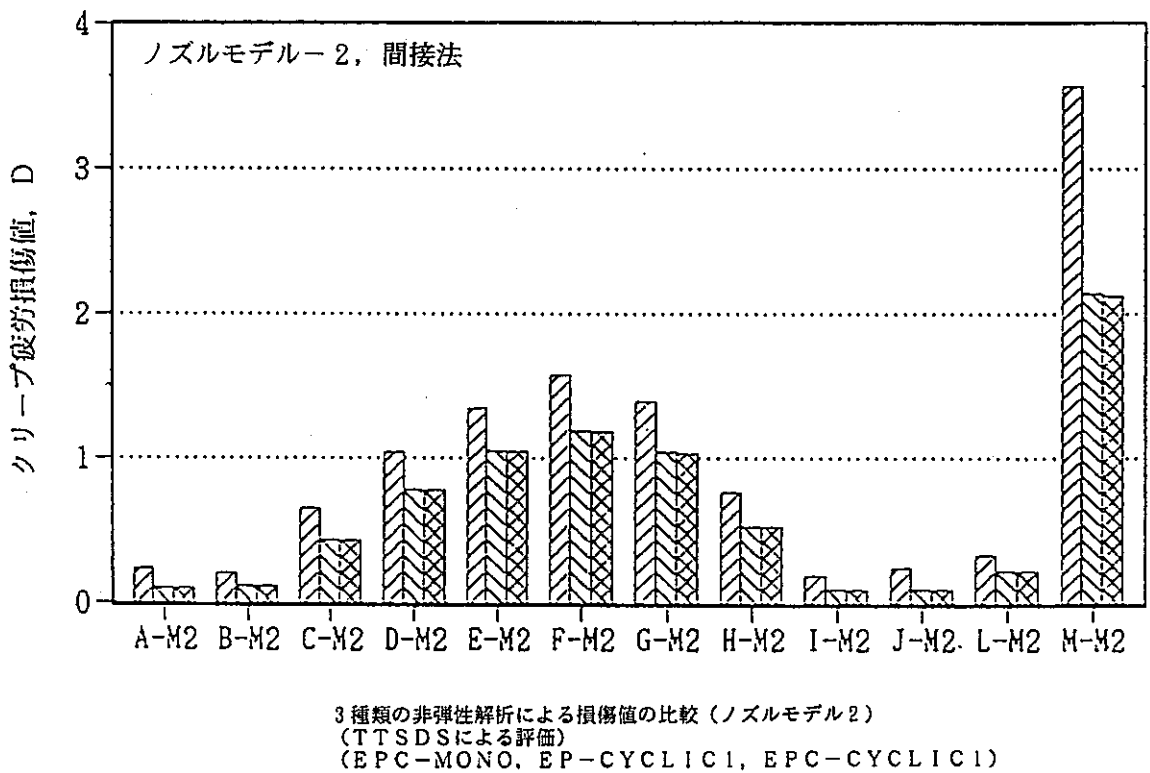
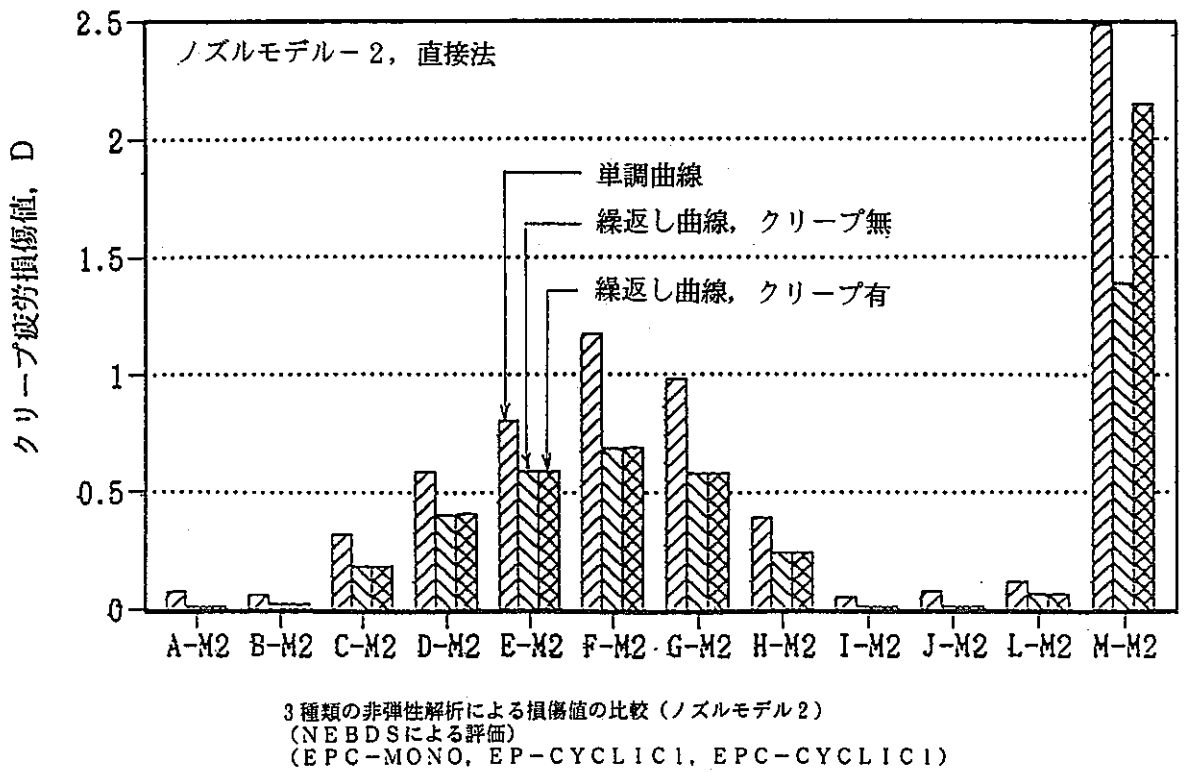


図 5.4.2 「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較 (モデル2)

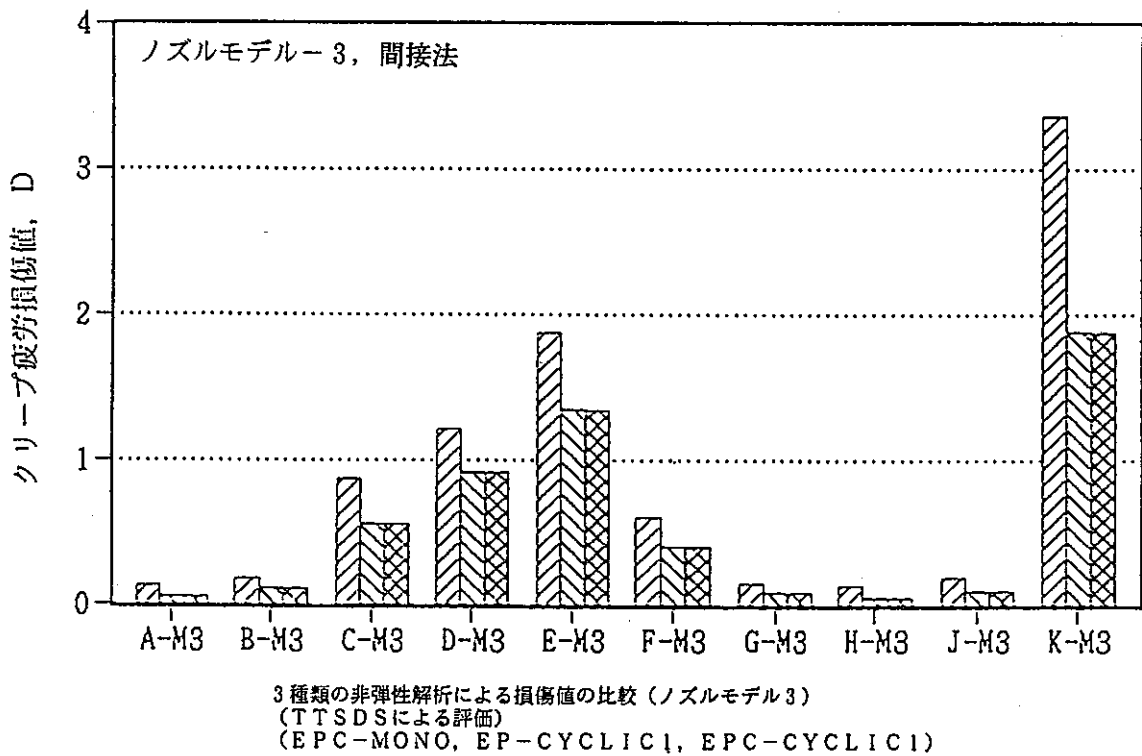
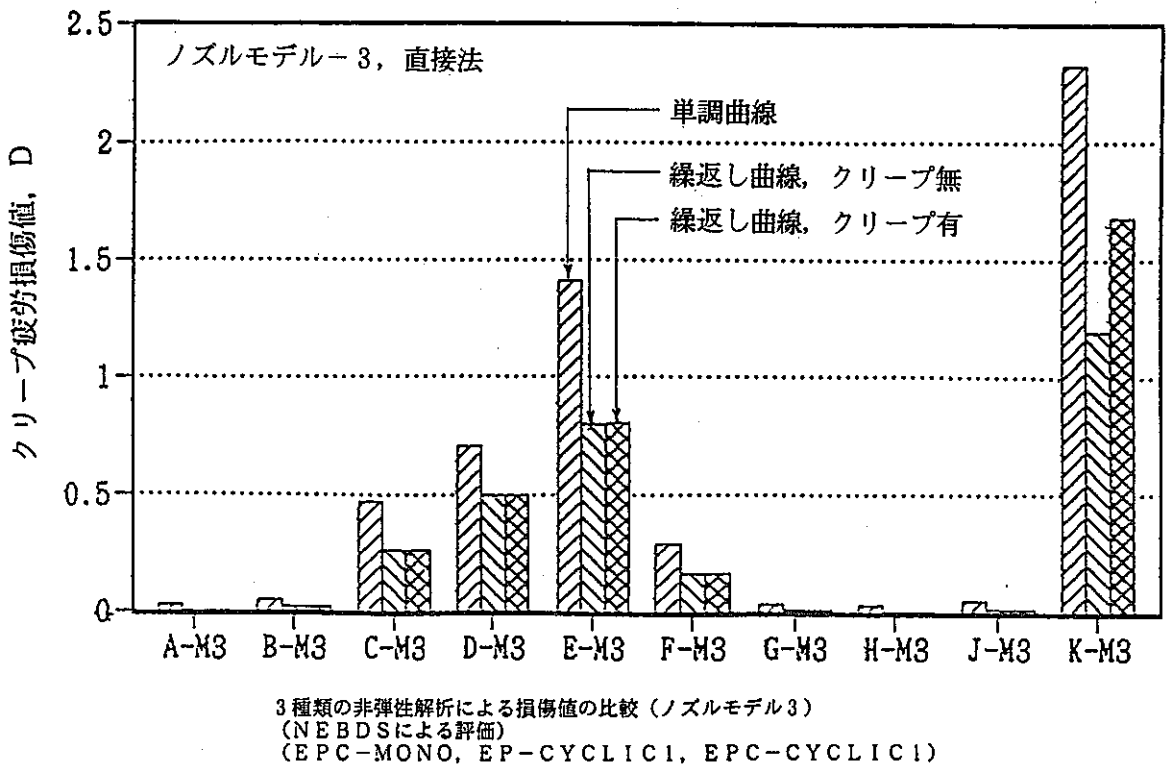


図 5.4.3 「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較 (モデル3)

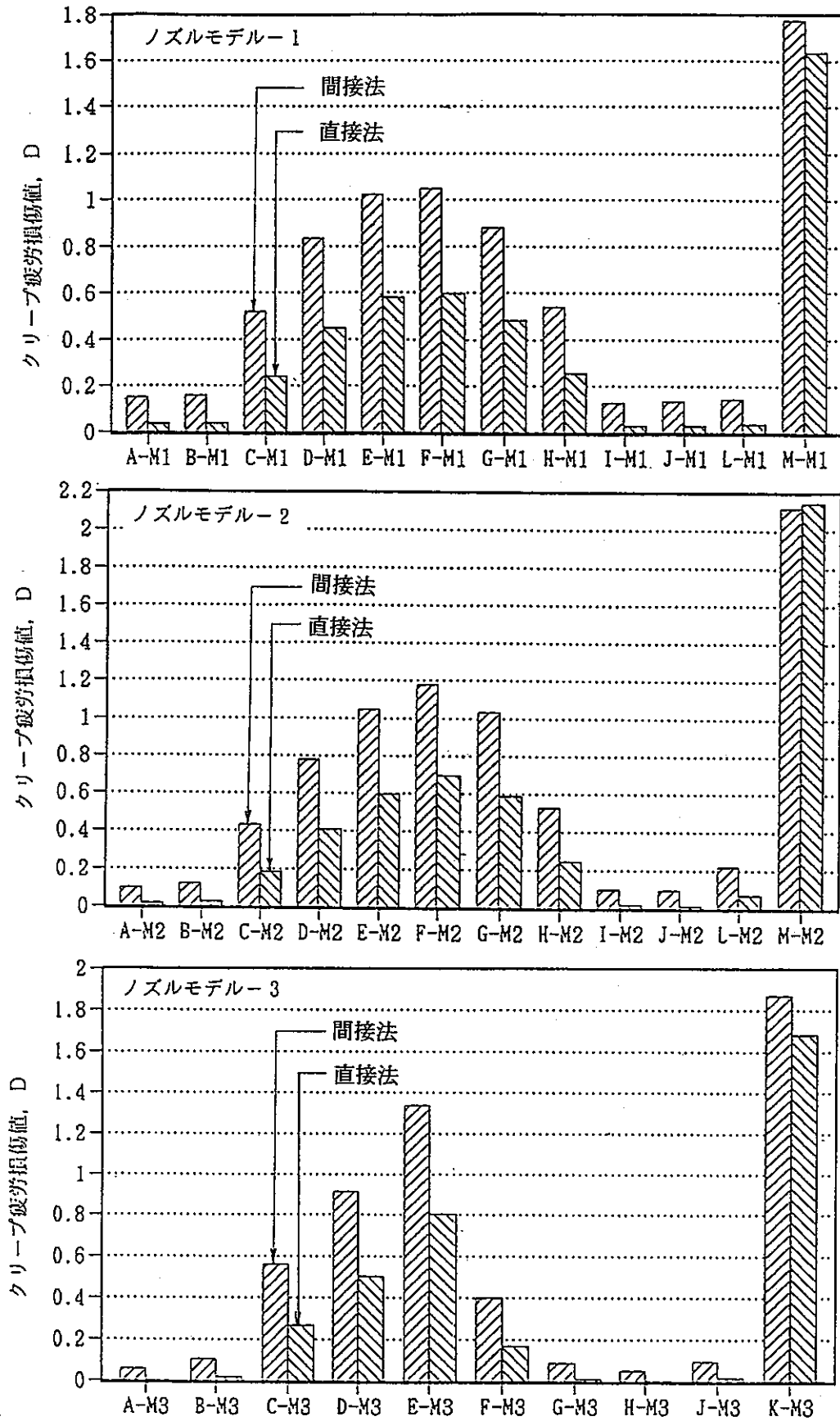


図 5.4.4 「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較 (標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係を用いた弾塑性クリープ解析結果に基づく)

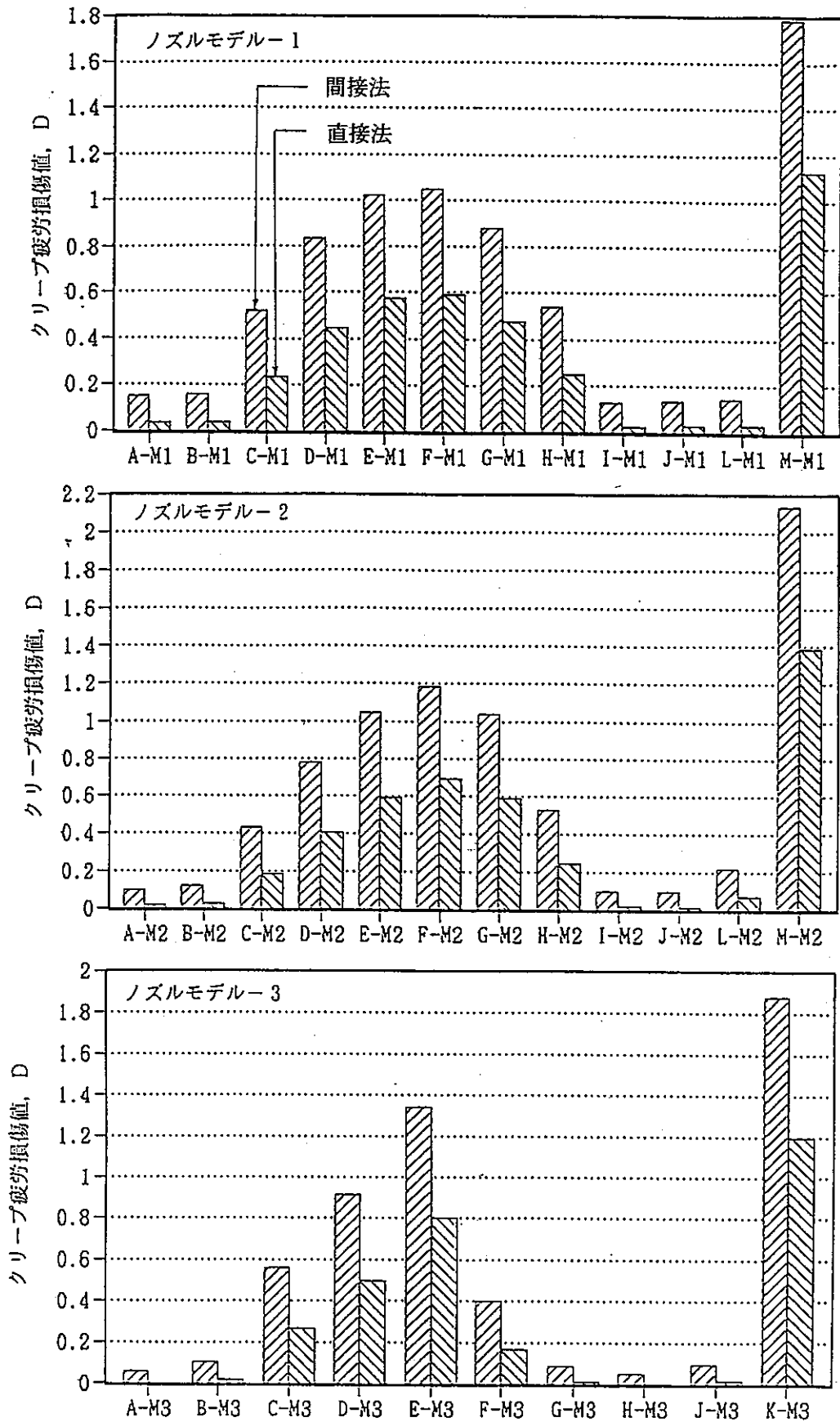


図 5.4.5 「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較（標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係を用いた弾塑性解析結果に基づく）

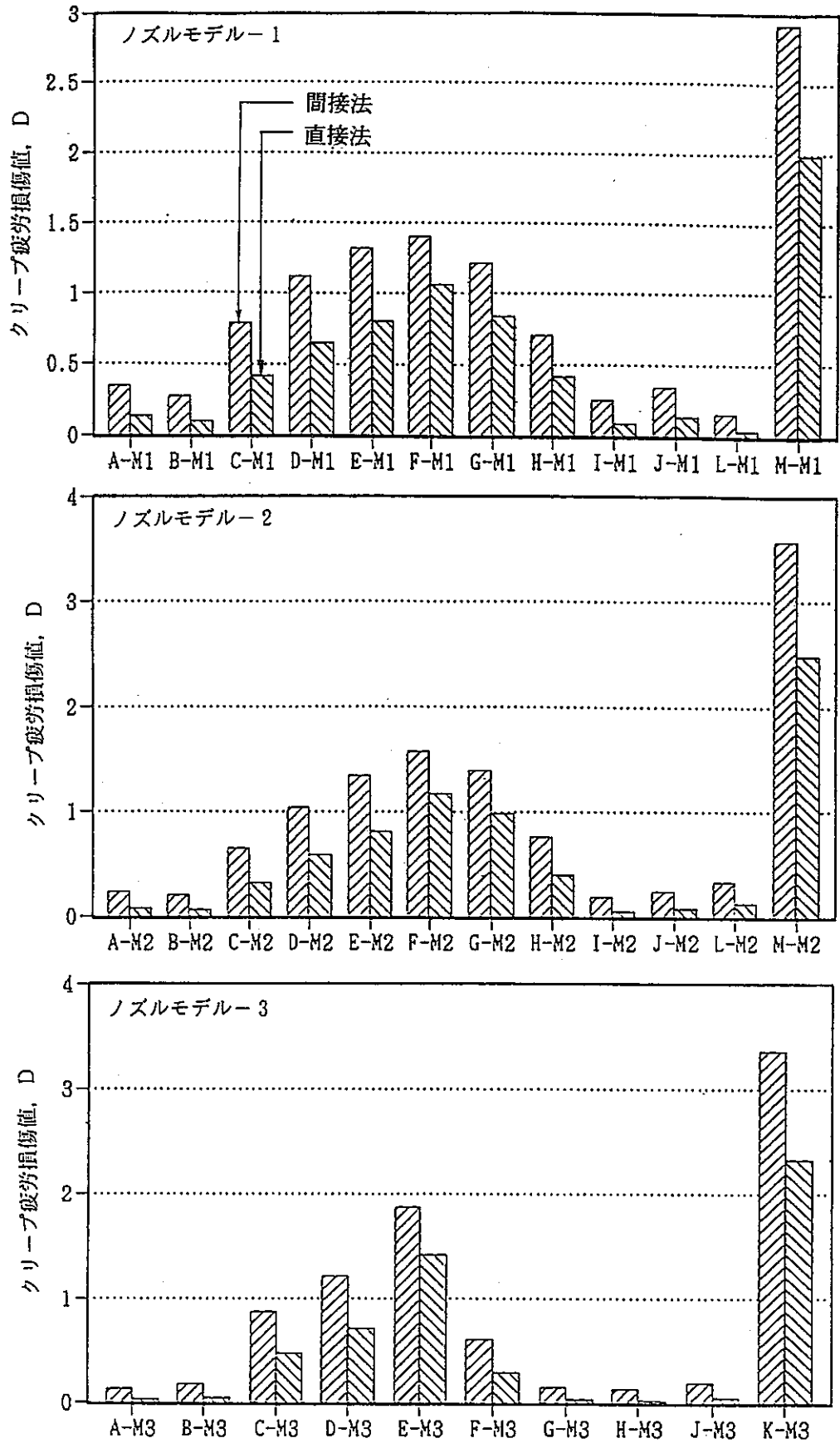


図 5.4.6 「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較  
(単調応力-ひずみ関係を用いた非弾性解析結果に基づく)

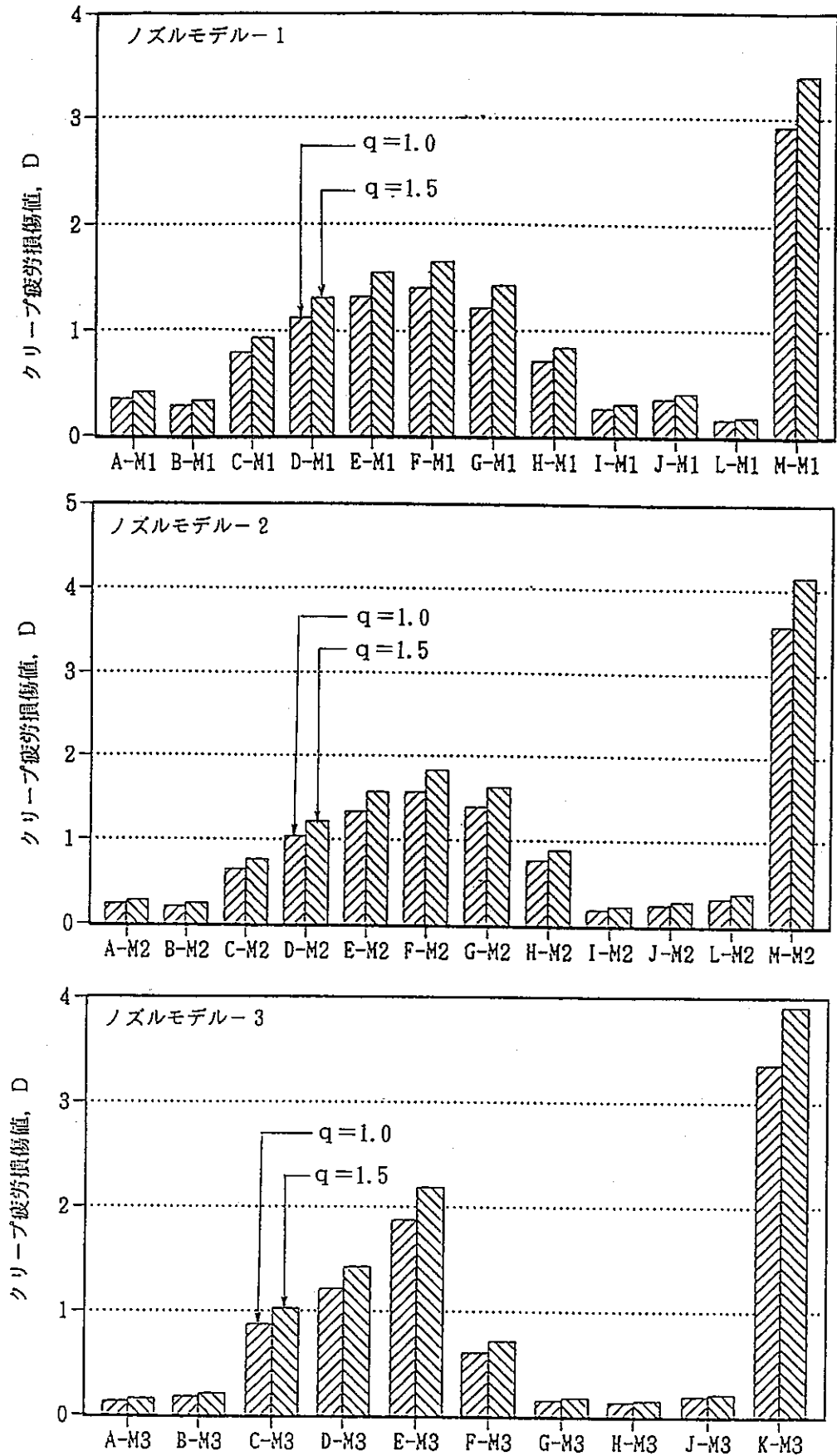


図 5.4.7 「間接法」によるクリープ疲労損傷値に及ぼす弾性追従係数  $q$  の影響  
 ( $q=1.0$  と  $1.5$  の場合の比較; 単調応力-ひずみ関係による解析結果)

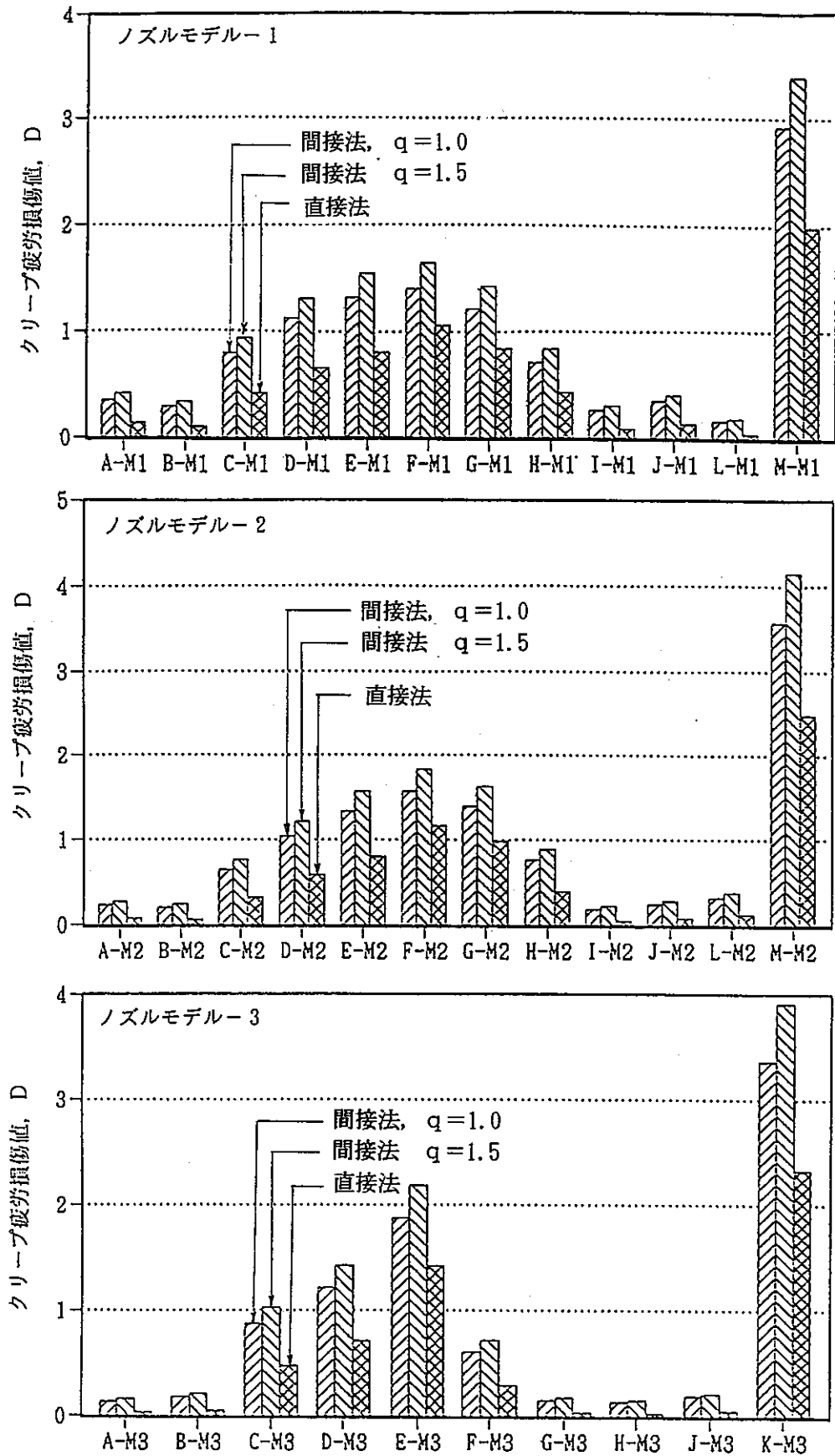


図 5.4.8 「直接法」と「間接法」によるクリープ疲労損傷値の比較  
 (単調応力-ひずみ関係を用いた非弾性解析結果に基づく、「間接法」では  
 弾性追従係数  $q=1.0$  と  $1.5$  の場合を含む)



## 5.5 弾性解析に基づく強度評価に関する検討

本研究第2報<sup>(1)</sup>では、3種類のノズル形状モデルに対する熱応力解析として、弾塑性応力-ひずみ関係式に単調応力-ひずみ関係を採用した弾塑性-クリープ解析を実施するとともに、別途、通常設計評価で使用される弾性解析に基づいた強度評価についても検討を試みている。このための弾性解析としては、非弾性解析に使用したものと同一の解析モデルを用いて、同一の伝熱解析結果を入力とした熱過渡1サイクル分の弾性熱応力解析を実施している。また、これらの弾性解析結果に対するクリープ疲労損傷計算としては、設計用の安全係数を含むBDSに規定された手法に従う計算（EBDSと呼んでいる）と本報第4章に示した安全係数を含まない「間接法」のうちの弾性解析用の手法（TTSDSと呼んでいる）に従う計算の2種類の方法により、1,300サイクル時点での損傷計算を行っている。

本節では弾性解析に基づいた強度評価に関する検討として、解析そのものは上述のように前報でほぼ十分詳細なレベルで実施しているため新たに実施することはしないで、前報の弾性解析結果に基づいて、すでに計算している1,300サイクル時点での損傷値を試験終了時の全熱過渡サイクル数に対応する1,700サイクル時点での損傷値に修正し、再評価を行うとともに、これまで述べてきた非弾性解析に基づいた強度評価結果、さらに実際のき裂発生状況と比較検討した。

付録Hには弾性熱応力解析結果とこれに基づいた損傷評価結果について個々のモデルごとに以下の図表を示した。

付図 H.1に弾性解析の結果として3種類のノズル形状モデルの各評価点における全ひずみ範囲 $\epsilon_t$ を示す。また、付表 H.1~H.3 と付図 H.2には「間接法」によるクリープ疲労損傷値を示す。全ひずみ範囲 $\epsilon_t$ は「間接法」に従って以下の手順により算出される。すなわち、弾性解析により得られる生のミーゼス相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_e$ に対して、ポアソン比に係わる修正を施して公称ひずみ範囲 $\epsilon_e$ を算出し、さらにこれに対して材料の非弾性挙動に伴うひずみの増加分を考慮して、ひずみ集中係数 $K_f$ をかけることにより全ひずみ範囲 $\epsilon_t$ を算出するものである。全ひずみ範囲 $\epsilon_t$ 算出後のクリープ疲労損傷計算法は非弾性解析結果に対する「間接法」の計算法と同じである。

図 5.5.1 ~図 5.5.2 にはこのようにして得られた弾性解析による全ひずみ範囲とクリープ疲労損傷値を標準条件の非弾性解析による結果と対比させて示した。ひずみ範囲は全体的な分布としては弾性解析、非弾性解析とも類似しているといえるが、モデル2とモデル3の外表面側ツバ付け根部の2点を除けば、弾性解析による値の方が非弾性解析の値よりもやや大きくなっている。損傷値はこのひずみ範囲の差を反映して弾性解析による場合の方がやや大きくなっている。

弾性解析の結果から「間接法」に基づいてクリープ疲労損傷評価を行う場合の重要なポイントのひとつに全ひずみ範囲を算出するさいに使用するひずみ集中係数 $K_f$ の設定法の問題がある。すなわち、弾性解析に基づいた強度評価法の高度化のためには、弾性解析により得られる仮想的な応力、ひずみの計算結果から実際の構造物中の非弾性挙動を伴う応力、ひずみの挙動を精度良く推測することが重要となる。しかしながら、現状では実際の構造物中の応力、ひずみの挙動を直接的に計測することは困難なために、実際の挙動を比

較的精度良く予測できると考えられる非弾性解析の結果をこれに代わるベースとして検討を行うことにより、弾性解析に基づいた強度評価法高度化の手掛かりを調査することが重要となる。

図 5.5.3 には非弾性解析により得られたミーゼス相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{0.2}$ に対比させて、弾性解析により得られた公称ひずみ範囲 $\varepsilon_n$ と全ひずみ範囲 $\varepsilon_t$ を示す。ここでは、ひずみ集中係数 $K_f$ として 1.2を使用している(即ち $\varepsilon_t = 1.2 \times \varepsilon_n$ )。弾性解析により得られた全ひずみ範囲 $\varepsilon_t$ と非弾性解析により得られたミーゼス相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{0.2}$ の比較は先に述べた通りである。一方、弾性解析により得られた公称ひずみ範囲 $\varepsilon_n$ は、き裂発生を予測しないような低ひずみ範囲の評価点ではひずみ集中係数 $K_f$ を考慮しなくとも非弾性解析により得られたミーゼス相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{0.2}$ に近い値となっていることがわかる。他方、き裂発生を予測するような高ひずみ範囲の評価点ではある程度のひずみ集中係数 $K_f$ を考慮する必要があるといえる。

次に、図 5.5.4 には各モデルの評価点におけるひずみ集中係数 $K_f$ として、弾性解析により得られた公称ひずみ範囲 $\varepsilon_n$ に対する非弾性解析により得られたミーゼス相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{0.2}$ の比を示す(即ち $K_f = \Delta \varepsilon_{0.2} / \varepsilon_n$ )。同図において供試体外表面のき裂発生点では1.2～1.3程度のひずみ集中係数となるのに対して、供試体内表面でき裂の発生した領域ではやや小さい1.1程度のひずみ集中係数となっていることが分かる。

次に、図 5.5.5 には各モデルの評価点について、これらのひずみ集中係数 $K_f$ ( $K_f = \Delta \varepsilon_{0.2} / \varepsilon_n$ )を弾性解析により得られた公称ひずみ範囲 $\varepsilon_n$ に対してプロットして示した。同図においてひずみ範囲が概略0.4%以下の弾性範囲ではひずみ集中係数 $K_f$ が1以下であり、ひずみ範囲が0.4%を越えるとひずみ集中係数 $K_f$ は1よりも大きくなり、ひずみ範囲が0.7%程度まではひずみ集中係数 $K_f$ は約1.2となっていることが分かる。従って、弾性解析に基づいた強度評価法「間接法」において現在設定しているひずみ集中係数 $K_f = 1.2$ はほぼ妥当な評価結果を与えるといえる。ただし、実際にはき裂の発生しない低ひずみ範囲の評価点に対しても一律にこの値を採用するのは損傷値を過大評価することになるため、例えばひずみ範囲が0.4%以下では $K_f = 1.0$ とするような「足きり」による合理化が期待できる。

なお、今回の評価では供試体内外表面が平滑であり、溶接施工にともなうような局部的形状不連続が存在しない条件下での検討結果であるが、TTSで試験した熱応力緩和構造モデル(1)供試体の検討結果では、溶接止端部の局部的形状不連続部において、ひずみ集中係数 $K_f = 1.8$ という大きい結果も得られており<sup>(7)</sup>、実際の複雑な形状を有する構造物の評価においては注意を要する。

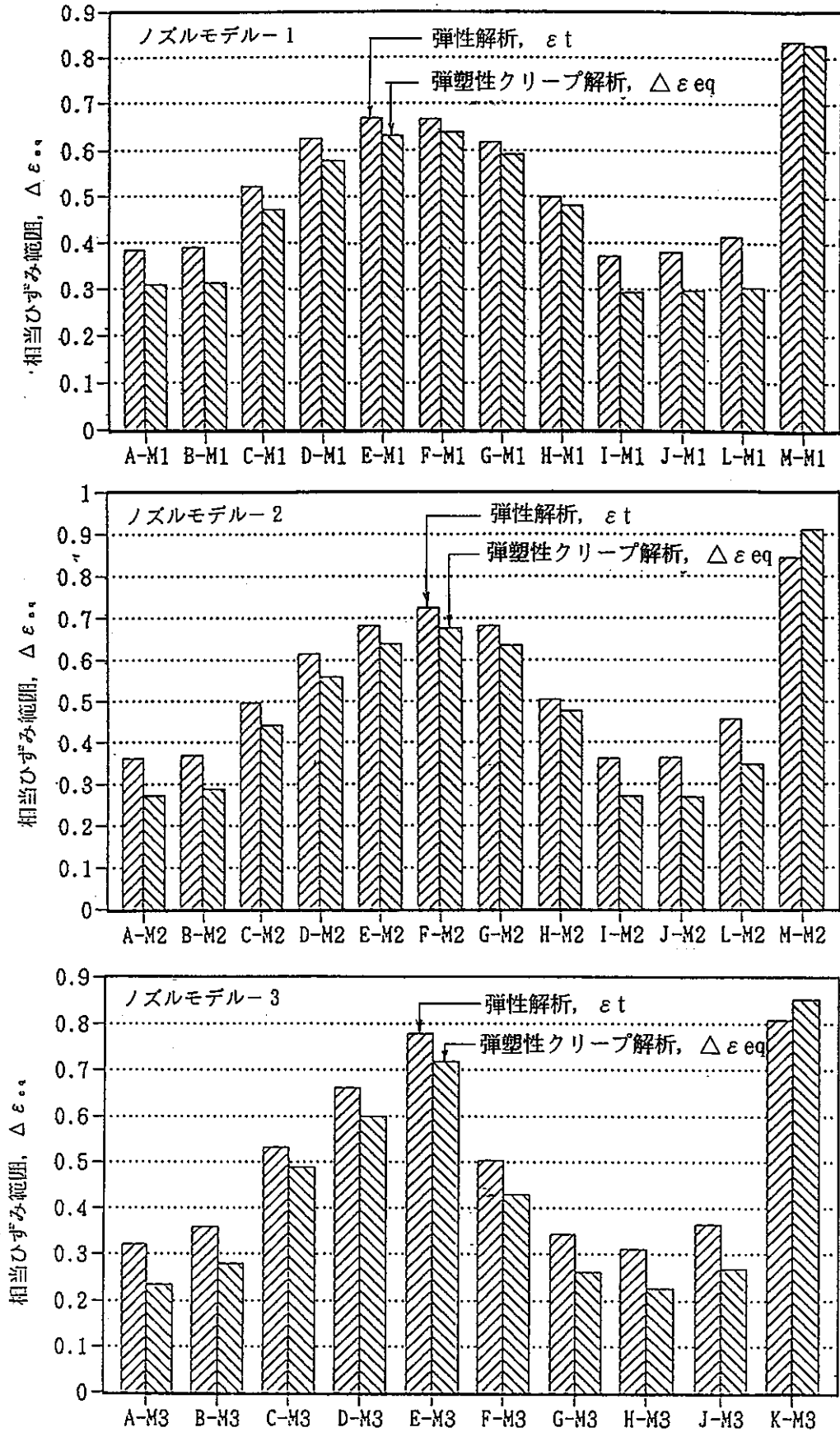


図 5.5.1 弾性解析および弾塑性クリープ解析による全ひずみ範囲の比較  
 (弾性解析：全ひずみ範囲、弾塑性クリープ解析：相当ひずみ範囲)

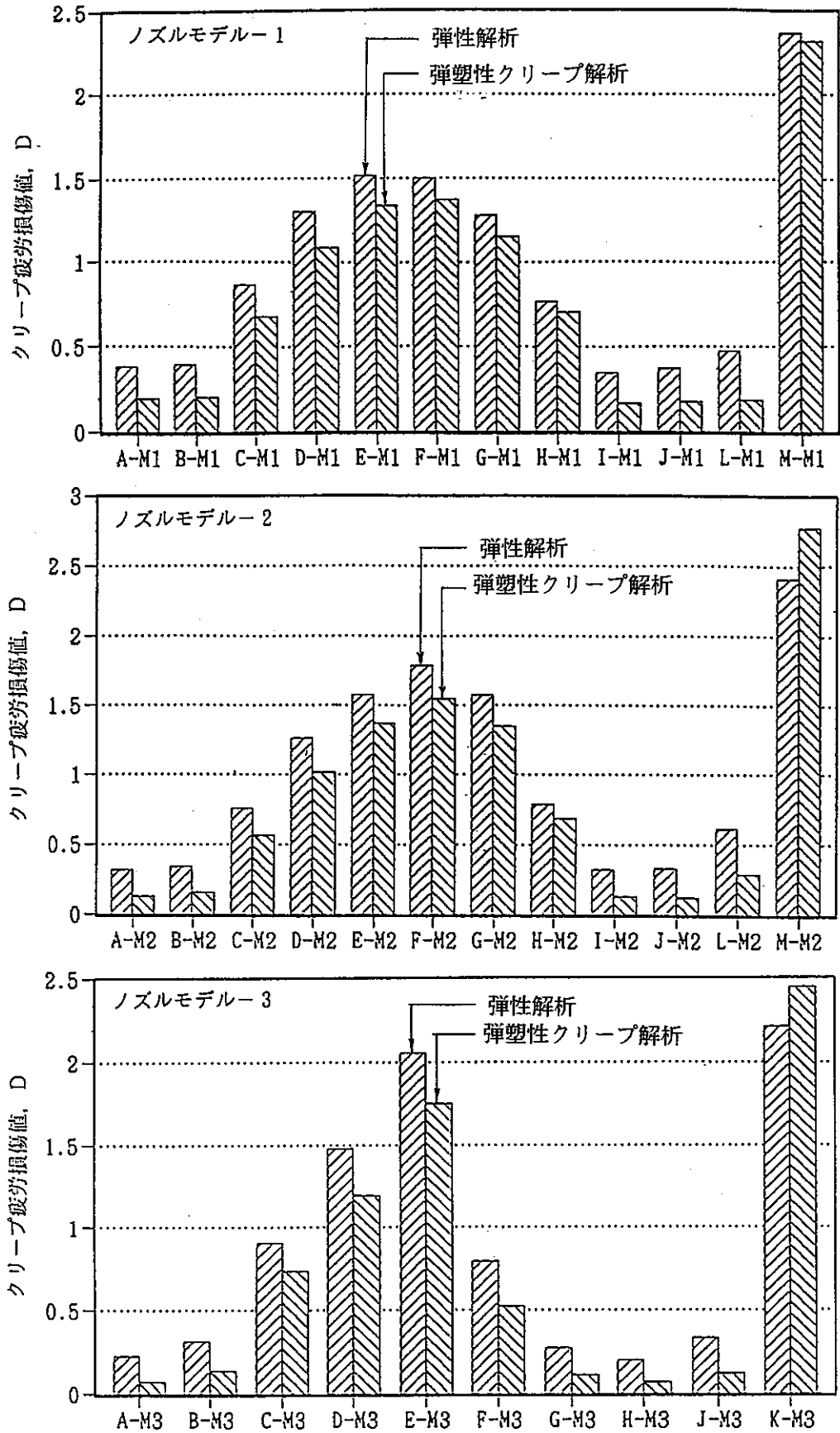


図 5.5.2 弾性解析および弾塑性クリープ解析によるクリープ疲労損傷値の比較

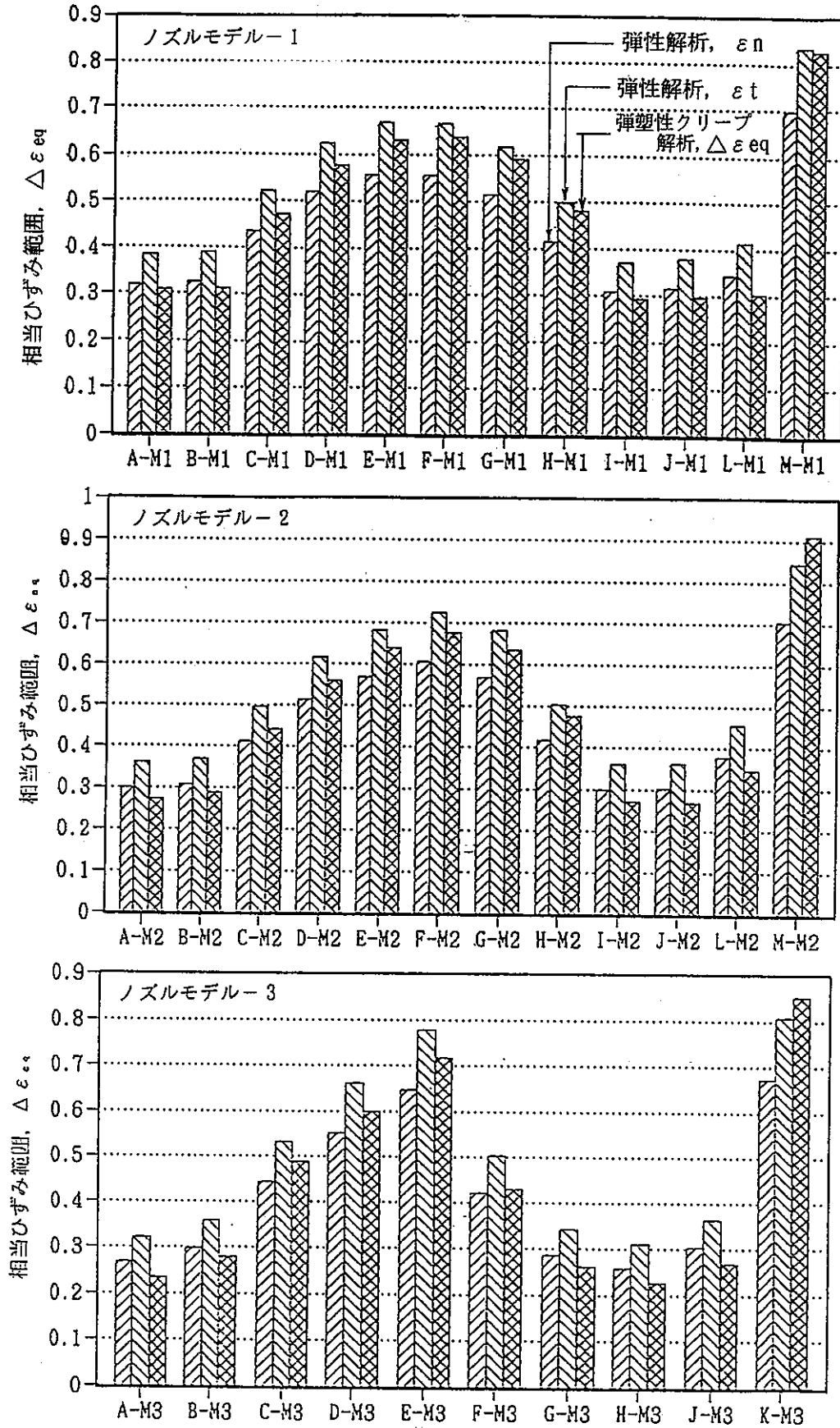


図 5.5.3 弾性解析および弾塑性クリープ解析によるひずみ範囲の比較（弾性解析：公称ひずみ範囲、全ひずみ範囲／弾塑性クリープ解析：相当ひずみ範囲）

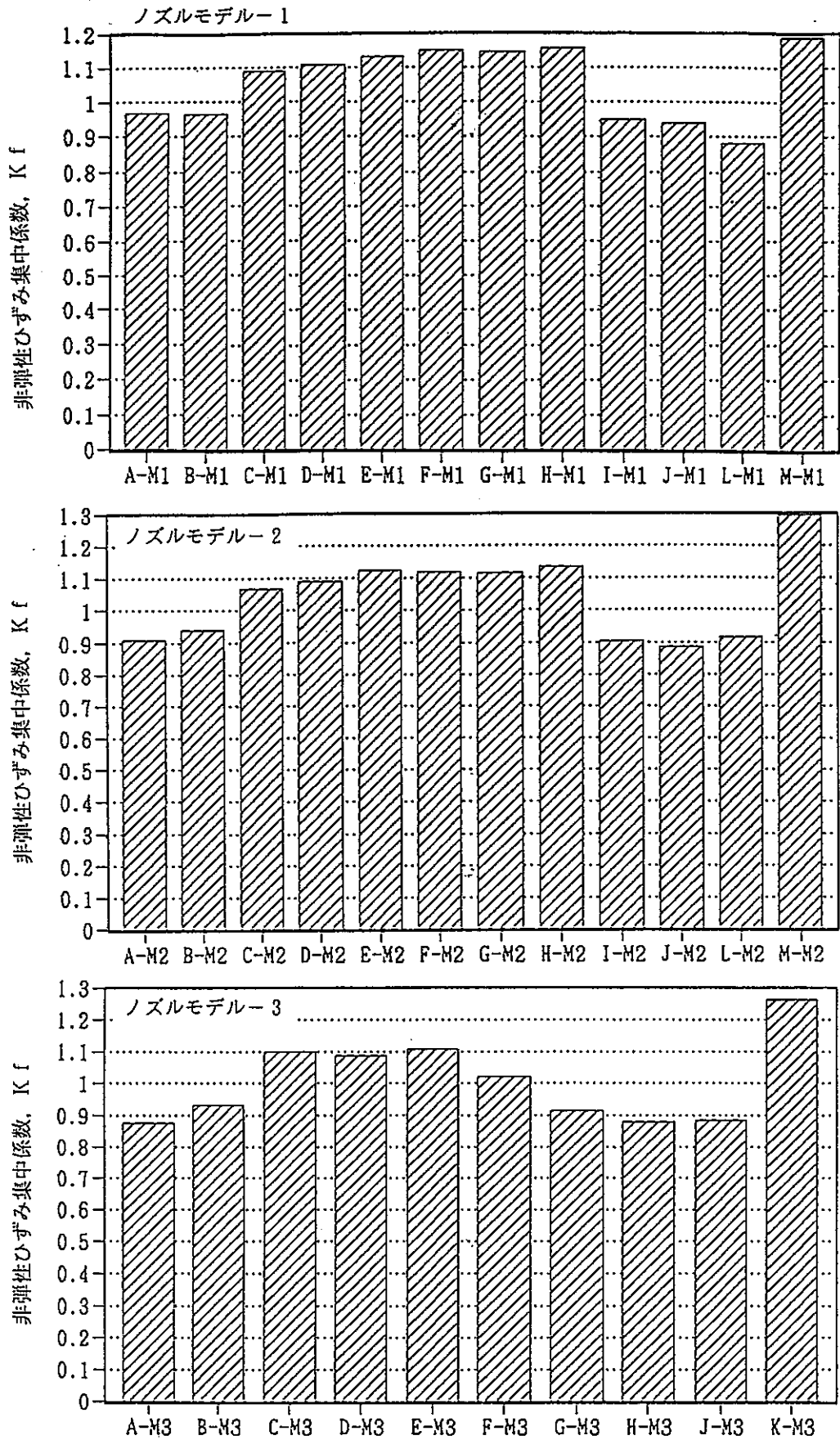


図 5.5.4 各評価点における非弾性ひずみ集中係数  $K_f$

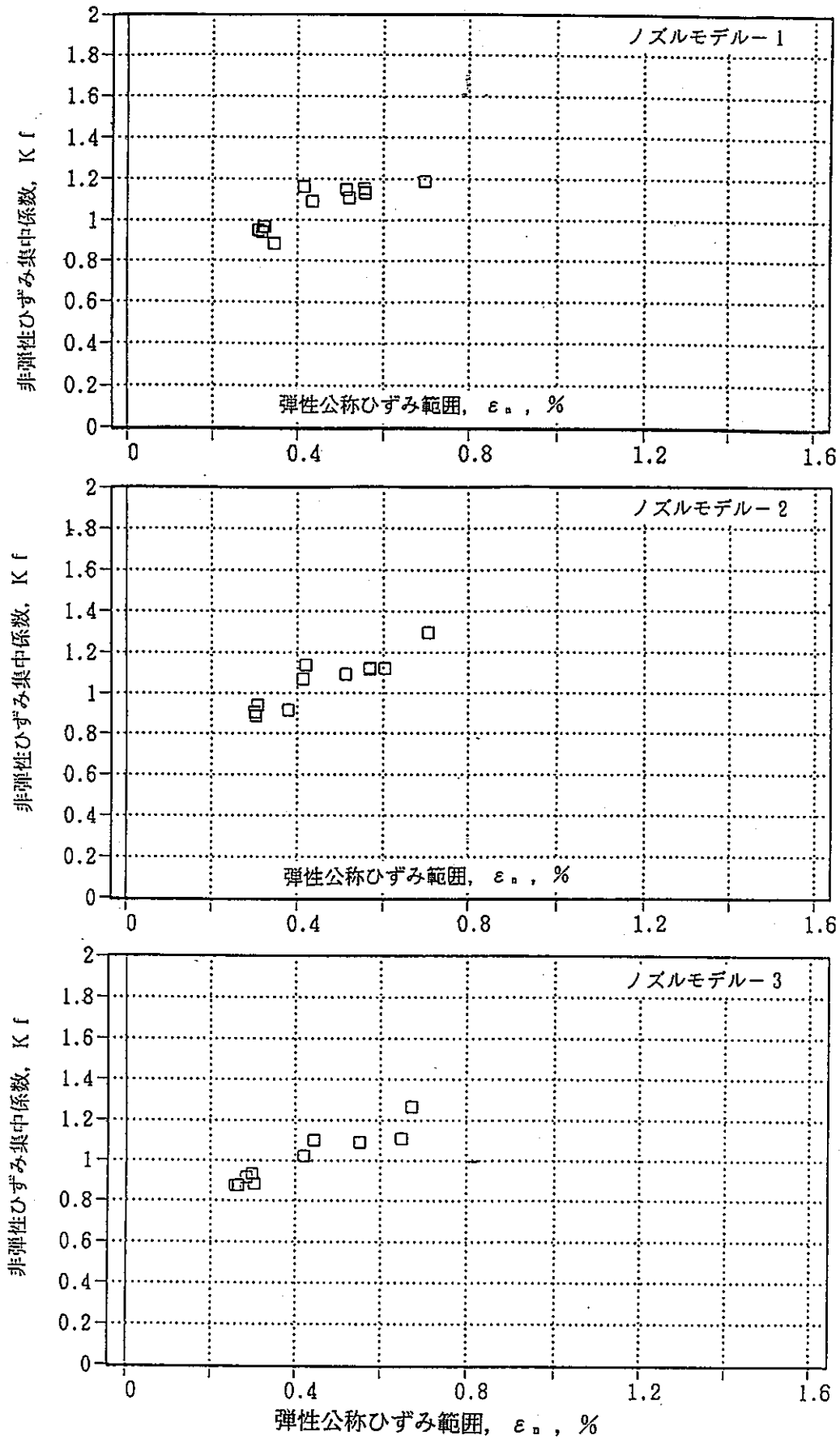


図 5.5.5 弾性解析の公称ひずみ範囲と非弾性ひずみ集中係数Kfの関係

## 5.6 まとめと今後の課題

### 5.6.1 クリープ疲労損傷評価結果について

本報では、小型熱過渡試験装置（略称 S T S T）を用いて熱過渡強度試験を実施した 3 種類のノズル形状モデルに対して非弾性熱応力解析を行い、この結果に基づいてクリープ疲労強度評価を行った。解析は、弾塑性応力-ひずみ関係として標準ひずみ速度条件（ $1 \times 10^{-3} \text{ mm/mm/sec}$ ）の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の 2 直線近似式を、またクリープひずみ式として遷移クリープを考慮した動燃の式を用いた弾塑性クリープ解析を標準的解析条件として行い（第 2、第 3 章）、強度評価は、これらの解析結果に基づいて、設計基準の有する安全裕度を取り除いた正味ベースのクリープ疲労損傷計算として、クリープ損傷計算に仮想的な応力緩和経路を用いる方法を用い、疲労損傷計算にミゼース相当ひずみ範囲を用いる強度評価法を採用することにより評価を行い、実際に供試体に観察されたき裂発生状況との相関を調べた（第 4 章）。その結果、供試体のき裂発生分布と相関の良い評価結果が得られることが分かった。

### 5.6.2 非弾性解析手法に関する検討結果について

これに引き続く解析的検討は次のような観点から展開された。まず、強度評価結果に及ぼす非弾性解析条件の影響を把握することを目的として、クリープを考慮しない弾塑性解析のみの条件での解析を行い、上記標準的弾塑性クリープ解析の結果と比較することにより、非弾性解析の実施において、クリープ解析を実施する場合と実施しない場合の評価結果に及ぼす影響を検討した（5.1節）。その結果、両解析条件間でひずみ範囲およびクリープ疲労損傷にはほとんど差が認められず、今回の熱過渡試験条件では、解析上クリープの影響はほとんど現れない程度のものであることが分かった。また、この傾向は別途実施した定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線に低ひずみ速度条件の定数を採用した解析の場合（5.2節）でも同様であった。

次に、弾塑性応力-ひずみ関係に上記標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を用いた場合の評価結果と、前報にて実施した単調応力-ひずみ関係式を用いた場合の評価結果の比較（いずれも弾塑性-クリープ解析として実施した）では、最も損傷の厳しい評価点において、ひずみ範囲で 30~40%、クリープ疲労損傷で 60~80% 程度、単調応力-ひずみ関係式を用いた場合の評価結果の方が大きな値となった（5.3節）。この評価結果は、供試体上のき裂発生分布よりも広い範囲でき裂発生を予測する結果となっており、非弾性解析に単調応力-ひずみ関係式を用いることはクリープ疲労損傷を過大評価することが分かった。

さらに、弾塑性応力-ひずみ関係として低ひずみ速度条件（ $1 \times 10^{-6} \text{ mm/mm/sec}$ ）の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した解析を行い、上記標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した解析結果と比較することにより、このひずみ速度条件の差が評価結果に及ぼす影響を検討した（5.2節）。その結果、最も損傷の厳しい評価点において、ひずみ範囲で 10%、クリープ疲労損傷で 20% 程度、低ひず



み速度条件の応力-ひずみ曲線を用いた解析による評価結果の方が大きい値となった。しかし、損傷値とき裂発生分布の対応上は両ひずみ速度条件での解析間で大きな差は無く、両者ともほぼ妥当な評価結果が得られることが分かった。

### 5.6.3 クリープ疲労損傷評価手法に関する検討結果について

上記解析の結果を受けて実施されるクリープ疲労損傷評価においては、以下の検討を行った。まず、クリープ疲労損傷評価法に関する検討として、クリープ損傷の計算に非弾性解析より得られる相当応力の経時変化に沿って損傷値を直接時間積分する方法と仮想的な応力緩和経路を用いる方法の2種類の方法を用いて評価を行い両者を比較した(5.4節)。その結果、上記2種類の方法によるクリープ損傷値の計算結果には大きな差が現れ、前者により算出されたクリープ損傷値はほとんど破損に寄与しない程度の小さな値(疲労損傷値よりも1オーダー程度小さい)となった。これに対して、後者により算出されたクリープ損傷値は、疲労損傷値とほぼ同レベルの値となり、疲労損傷値と合わせたクリープ疲労損傷値としてみた場合、き裂の発生状況と良く対応しており、ほぼ妥当とみられる損傷値が得られることが分かった。なお、この結果は破面観察により確認された粒界割れ破損モード(クリープの影響が含まれるとされる破面)とも対応していると考えられた。

次に、弾性解析に基づいた強度評価法の検討として、損傷評価のベースとなるひずみ範囲を計算するのに、弾性解析で得られる構造物表面の相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eq}$ に対して非弾性ひずみ増大による強度低減をひずみ集中係数 $K_f = 1.2$ の形で考慮する寿命予測法を採用して評価を行った(5.5節)。その結果、き裂発生領域に対しては上記標準的非弾性解析条件による解析結果、およびそれに基づいた強度評価結果に近いひずみ範囲、損傷値が得られ、現在設定している非弾性ひずみ集中係数 $K_f = 1.2$ はほぼ妥当な値であることが分かった。ただし、き裂の発生しない低ひずみ範囲の領域に対しても同じ係数を適用するのは、このような領域での損傷値を過大評価する結果となるため、合理化の余地があることが分かった。

なお、以上の非弾性解析およびクリープ疲労損傷評価結果の総括として表5.6.1~表5.6.3には各モデルの内外表面においてクリープ疲労損傷値が最大となる代表点について、非弾性解析の条件ごとにひずみ範囲と「間接法」と「直接法」で算出された損傷値をまとめて示した。さらに、図5.6.1~図5.6.3には各モデルの内外表面評価点におけるクリープ疲労損傷評価結果として本報での検討により妥当と考えられた「間接法」による損傷評価結果を解析条件ごとに比較して示した。

### 5.6.4 今後の課題

以上本研究で検討した内容をクリープ疲労強度評価法の観点から総括したが、本研究において検討を進める上で必要と考えられたが対応できなかった課題と、クリープ疲労強度評価法のさらなる精度の向上、適用範囲の拡大を図るためにさらに検討する必要があると考えられる研究項目を以下にあげる。

## (a) き裂進展挙動の検討

本熱過渡試験において3種のモデルとも発生したき裂の深さは、クリープ疲労損傷値の大きい円筒外表面側ツバ付け根R部の全周き裂よりも、損傷値の小さい円筒内表面側の軸方向き裂の方が深く進展していた。ここで、クリープ疲労損傷値自体はき裂の発生しやすさを示す指標であるため、一概に損傷値の大きとき裂の深さを比較することはできないが、上記結果は直感的な類推の逆の結果となっている。この原因としてはクリープ損傷に寄与する高温保持期間中の応力が、外表面側で圧縮、内表面側で引張となっていたことと対応するものと考えられた。またこの推測は、破面のSEM観察結果が、外表面側で疲労損傷が主体と考えられる粒内割れであったのに対して、内表面側ではクリープ損傷も寄与したと考えられる粒界割れとなっていた事実とも対応していると考えられた。これらの推測を解析的に裏付けるための一手段として、破壊力学パラメータ解析によるき裂進展評価に依る検討が有効であると考えられる。

## (b) モデル3 ツバ付け根R部の溶接金属内き裂に関する検討

モデル3の円筒外表面側ツバ付け根R部の全周き裂は他の2ケのモデルの同様箇所のき裂よりも深く進展していた。均一材質モデル化の範囲でのひずみ範囲およびクリープ疲労損傷値の比較では、ツバの板厚がモデル3と等しいモデル2の方が高い損傷値となっており、き裂深さの傾向とは逆転している。円筒胴部へのツバの取り付け方法として、モデル2では一体物からの削り出しとしているのに対して、モデル3では溶接継手構造としている。このため、モデル3においては構造不連続以外に材質不連続に起因するひずみ集中挙動が強度を低減させている可能性も考えられる。従って、モデル3においては溶接金属特性を考慮した材質不連続モデルを採用した解析とこれに基づいた強度評価検討により有用な情報がえられるものと考えられる。

## (c) 伝熱解析技術の高度化

本報の伝熱解析では、当初、単純な外表面断熱条件での検討を行ったが、外表面での放熱が無視できない結果となったため、前報と同一の解析条件を採用することとした。前報の伝熱解析では、熱過渡試験第2サイクル以降の定常サイクルにおける低温熱過渡開始時点での供試体温度分布と解析上の初期温度分布を合わせるための前処理解析として、1時間の低温熱過渡と、それに続く30分程度の高温熱過渡の解析を行っている。この前処理解析での高温熱過渡側の解析時間は、各モデルの初期温度分布と合うように調整したもので、実時間とは一致していない。また、この前処理解析段階では、外部雰囲気温度条件として550℃を採用しているが、この値も実際の値(室温)とは異なるものであった。

単純な円筒形状モデルでその外面に断熱材を密着させて設置できる場合には単純な外表面断熱条件での解析で十分な精度の温度応答が得られるが、本試験モデルのように外表面での放熱が無視できない場合には解析結果と実測値を合わせるために多大の労力と時間を要する。解析モデル化技術も合わせて伝熱解析技術の高度化が期待される。

以上、本試験研究に直接的に係わる問題点、課題をあげたが、これ以外に構造物の熱ク

クリープ疲労強度評価法を高度化するために検討されることが望まれる研究課題を以下にあげる。

(d) クリープ損傷評価手法の高度化

本報では、非弾性解析結果からクリープ損傷値を計算するのに2種類の方法を採用し比較検討を行った。まず、クリープ損傷値を算出するのに、非弾性解析により得られる相当応力の経時変化過程を直接時間分数として積分する方法を採用すると、疲労損傷値に対してクリープ損傷値が1オーダー以上小さく評価される結果となった。一方、クリープ損傷値を算出するのに、ひずみ範囲と動的応力-ひずみ関係から初期応力を定め、応力緩和過程を弾性追従係数 $q = 1$ を仮定して計算すると、得られるクリープ損傷値は疲労損傷値とほぼ同レベルとなり、さらに総合されたクリープ疲労損傷値とき裂発生状況との相関もかなり良いものとなった。後者の評価法では、温度分布の平準化による応力・ひずみの低下を考慮せず、一定ひずみ制御のイメージでクリープ損傷値を計算することになるため、現実よりも応力レベルを過大評価していると予想されるにもかかわらず、実際の破損と対応させた評価結果はむしろ前者よりも良くなっている。この一見矛盾する事実を説明づけるひとつの仮説として、現在の単軸・応力制御型クリープ破断試験に基づくクリープ破断クライテリアが実際の繰返し熱過渡荷重を受ける構造物のクリープ損傷メカニズムと異なる（クライテリアとしては危険サイドとなっている）可能性が考えられる。この考えに従えば、クリープ損傷値を応力解析結果から直接時間積分する前者の評価法では、実際に近い応力の解析結果が得られても現在使用しているクリープ破断クライテリアが危険サイドゆえクリープ損傷値が過少評価されるのに対して、クリープ損傷値を仮想的応力緩和経路（応力レベルとして過大評価している）から計算する後者の評価法では、上に述べたクリープ破断クライテリアがD<sub>c</sub>を過少評価させる分を、応力緩和過程での応力レベルを過大評価することにより、総合して見た場合適度にバランスがとれるため実際の破損データと見掛け上合ってくると考えらる。

本課題は材料試験が先行すべき課題とも考えるが、クリープ損傷評価手法の高度化のためには、構造物が実際に経験する繰返しひずみ負荷条件を模擬しうる（あるいは考慮できる）条件下でのクリープ（疲労）破断データから純粋なクリープ損傷分を抽出し、現在のクリープ破断クライテリアの検証を行うとともに、必要であればこれらのデータに基づいてより現実に即したクリープ破断クライテリアへの見直しが必要と考える。

(e) 多軸応力・ひずみ場における破損規定パラメータの抽出

現在、原型炉用に策定されたクリープ疲労寿命評価法では、破損の力学的主要因子である応力あるいはひずみに関して、評価法のデータベースとなっている単軸応力・ひずみ条件で得られた材料試験による疲労ないしクリープ破断データを、多軸応力・ひずみ状態となる構造物の破損と結び付けるために「トレスカ型」あるいは「ミーゼス型」の相当応力・相当ひずみを採用しているが、「非等2軸応力・ひずみ状態」あるいは「非比例負荷状態」といった実機プラントの主要な構造物で問題となる複雑な応力・ひずみ状態では、必ずしもこれらの相当応力・相当ひずみが破損挙動と最も良く対応付けられる訳ではないことが明らかにされつつある。従って、実機プラントの主要な構造物で問題となる複雑な応力・ひずみ状態でのクリープ疲労寿命評価法として現在の評価法を改良・高度化すること

が期待されている。

この課題に関連して、TTSで次に試験を計画している「Y型分岐構造」を主たる評価対象構造とした熱過渡試験では、クリープ疲労破損に寄与する応力・ひずみ成分として容器胴の軸方向および周方向の成分が卓越する2軸応力・ひずみ場をねらい、さらに複数の評価部位で容器に対する脚部の取り付け角度、容器と脚部の板厚比等を変えることにより軸方向成分と周方向成分の大きさの比率を比較的大きくかえた「非等2軸応力・ひずみ状態」を形成するとともに、熱過渡初期の熱ピーク成分を抑制することにより軸方向成分と周方向成分の最大値の発生する時刻の異なった「非比例負荷状態」でのクリープ疲労破損データ取得を予定している。この供試体の解析・評価を通して上記課題の解決に寄与できる知見が得られると考えられるが、今回実施したノズル形状モデルでの応力、ひずみの挙動は程度の差はあるものの、上記「Y型分岐構造」での応力、ひずみと類似した挙動を示すとみられた。従って本強度評価結果もデータベースの一部とした広範な検討が期待される。

以上主として構造解析サイドからの検討課題を述べたが、クリープ疲労条件下における材料強度、さらには特定の構造強度因子に着目した強度試験データの蓄積およびそれらにより高精度に記述しうる破損（破断）判定基準の開発が望まれる。

表 5.6.1 ノズルモデル1のクリープ疲労損傷評価結果の概要  
 内・外表面において損傷値が最大となる評価点の解析結果  
 (MODEL-1)

			内表面損傷値最大評価点 (F)				外表面損傷値最大評価点 (M)			
	解析法	評価法	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
標準歪速度	EPC (モニタ)	TTSDS	7.342 E-3	8.434 E-1	5.577 E-1	1.401	1.091 E-2	1.986	9.388 E-1	2.924
		NEBDS	7.342 E-3	8.434 E-1	2.148 E-1	1.058	1.091 E-2	1.985	2.867 E-3	1.988
	EP (サイクル)	TTSDS	6.380 E-3	7.731 E-1	5.949 E-1	1.368	8.315 E-3	1.332	7.636 E-1	2.096
		NEBDS	6.380 E-3	7.731 E-1	2.164 E-2	7.947 E-1	8.315 E-3	1.332	1.491 E-1	1.481
	EPC (サイクル)	TTSDS	6.384 E-3	7.744 E-1	5.955 E-1	1.370	8.283 E-3	1.320	7.591 E-1	2.079
		NEBDS	6.384 E-3	7.743 E-1	2.110 E-2	7.954 E-1	8.283 E-3	1.321	1.351 E-1	1.456
低歪速度	EP (サイクル)	TTSDS	6.670 E-3	8.685 E-1	6.354 E-1	1.504	9.231 E-3	1.679	8.940 E-1	2.573
		NEBDS	6.670 E-3	8.686 E-1	2.537 E-3	8.712 E-1	9.231 E-3	1.679	1.367 E-1	1.816
	EPC (サイクル)	TTSDS	6.672 E-3	8.692 E-1	6.357 E-1	1.505	9.207 E-3	1.670	8.905 E-1	2.560
		NEBDS	6.672 E-3	8.692 E-1	2.535 E-3	8.717 E-1	9.207 E-3	1.670	1.253 E-1	1.795

表 5.6.2 ノズルモデル2のクリープ疲労損傷評価結果の概要

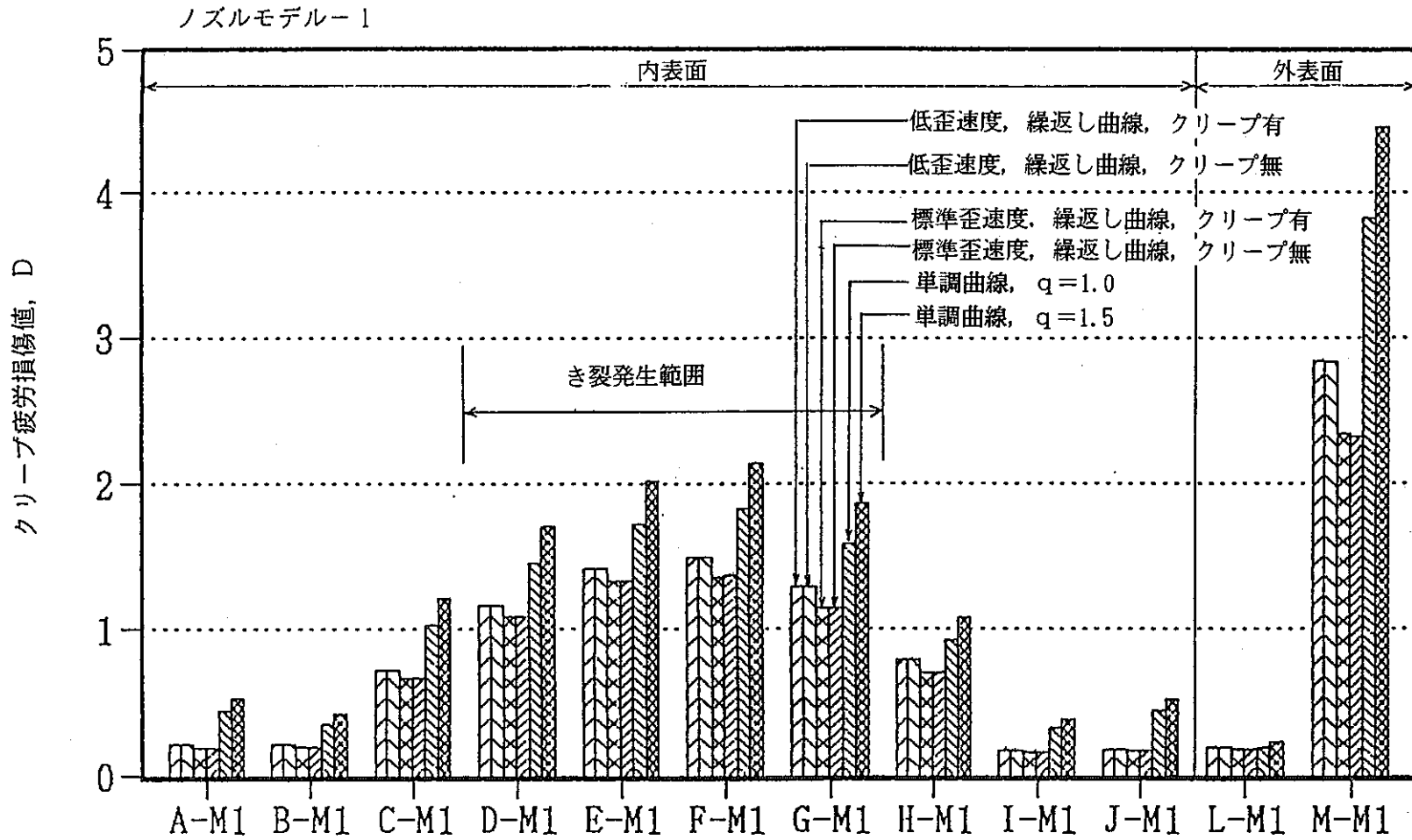
内・外表面において損傷値が最大となる評価点の解析結果  
(MODEL-2)

			内表面損傷値最大評価点 (F)				外表面損傷値最大評価点 (M)			
	解析法	評価法	$\Delta \varepsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D	$\Delta \varepsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
標準歪速度	EPC (モトニック)	TTSDS	7.776 E-3	9.662 E-1	6.042 E-1	1.570	1.225 E-2	2.483	1.081	3.564
		NEBDS	7.776 E-3	9.661 E-1	2.073 E-1	1.173	1.225 E-2	2.482	5.017 E-3	2.487
	EP (サイクリック)	TTSDS	6.768 E-3	9.015 E-1	6.491 E-1	1.551	9.151 E-3	1.677	9.032 E-1	2.580
		NEBDS	6.768 E-3	9.016 E-1	1.022 E-1	1.004	9.151 E-3	1.677	2.046 E-1	1.881
	EPC (サイクリック)	TTSDS	6.756 E-3	8.975 E-1	6.474 E-1	1.545	9.118 E-3	1.664	8.985 E-1	2.562
		NEBDS	6.756 E-3	8.976 E-1	9.340 E-2	9.910 E-1	9.118 E-3	1.663	1.818 E-1	1.845

表 5.6.3 ノズルモデル3のクリープ疲労損傷評価結果の概要

内・外表面において損傷値が最大となる評価点の解析結果  
(MODEL-3)

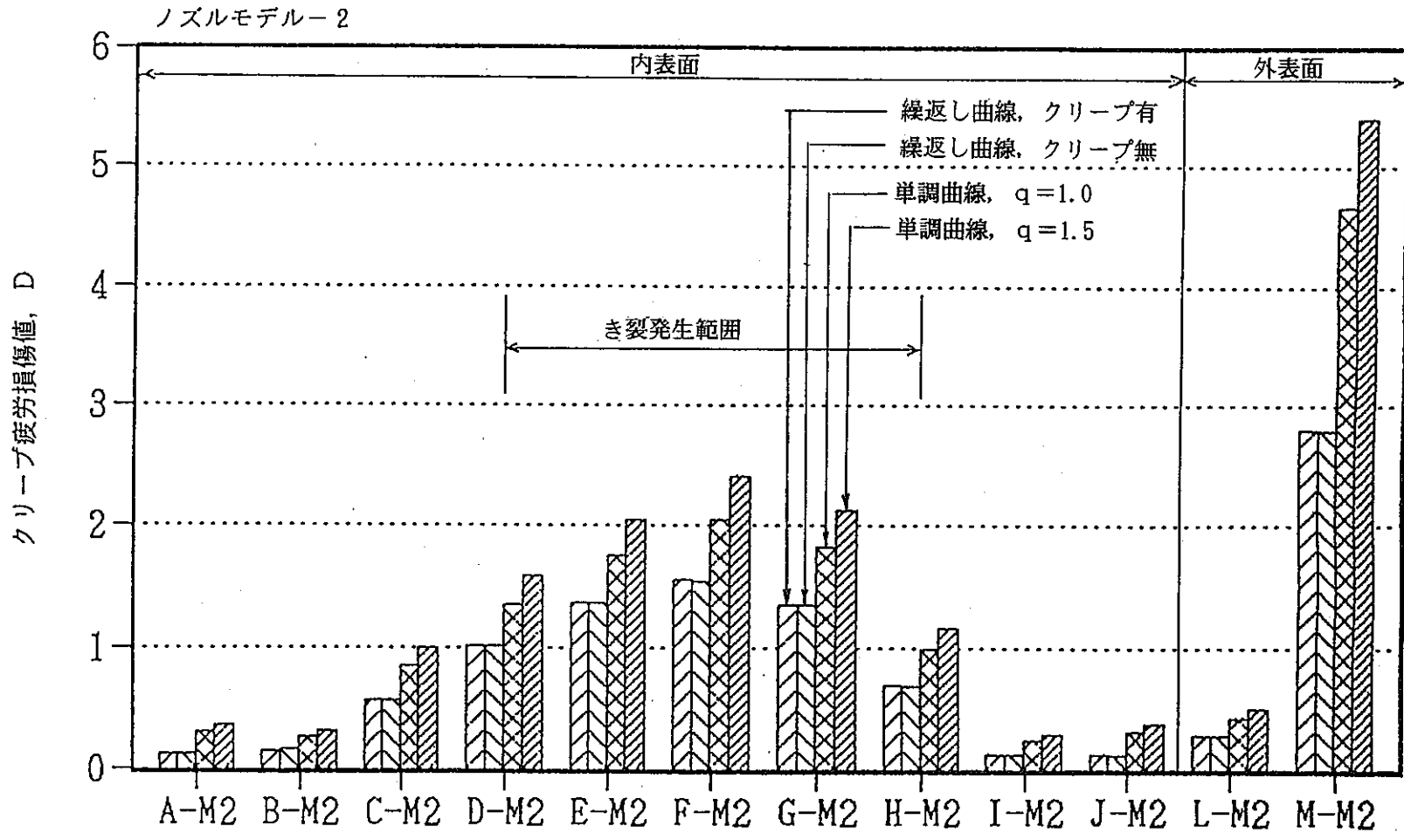
			内表面損傷値最大評価点 (E)				外表面損傷値最大評価点 (K)			
	解析法	評価法	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
標準歪速度	EPC (モニタック)	TTSDS	8.518 E-3	1.187	6.835 E-1	1.871	1.184 E-2	2.327	1.038	3.365
		NEBDS	8.518 E-3	1.187	2.234 E-1	1.411	1.184 E-2	2.326	3.703 E-3	2.330
	EP (サイクリック)	TTSDS	7.183 E-3	1.046	7.071 E-1	1.753	8.538 E-3	1.449	8.236 E-1	2.273
		NEBDS	7.183 E-3	1.046	2.289 E-1	1.275	8.538 E-3	1.450	2.402 E-1	1.690
	EPC (サイクリック)	TTSDS	7.172 E-3	1.042	7.056 E-1	1.748	8.516 E-3	1.441	8.205 E-1	2.262
		NEBDS	7.172 E-3	1.042	1.821 E-1	1.224	8.516 E-3	1.441	2.098 E-1	1.651



5種類の非弾性解析による損傷値の比較 (ノズルモデル1)  
 (EP、EPC-CYCLIC2、EP、EPC-CYCLIC1、  
 EPC-MONO)  
 (TTSDS、q=1.0による評価、EPC-MONOではq=1.5含む)

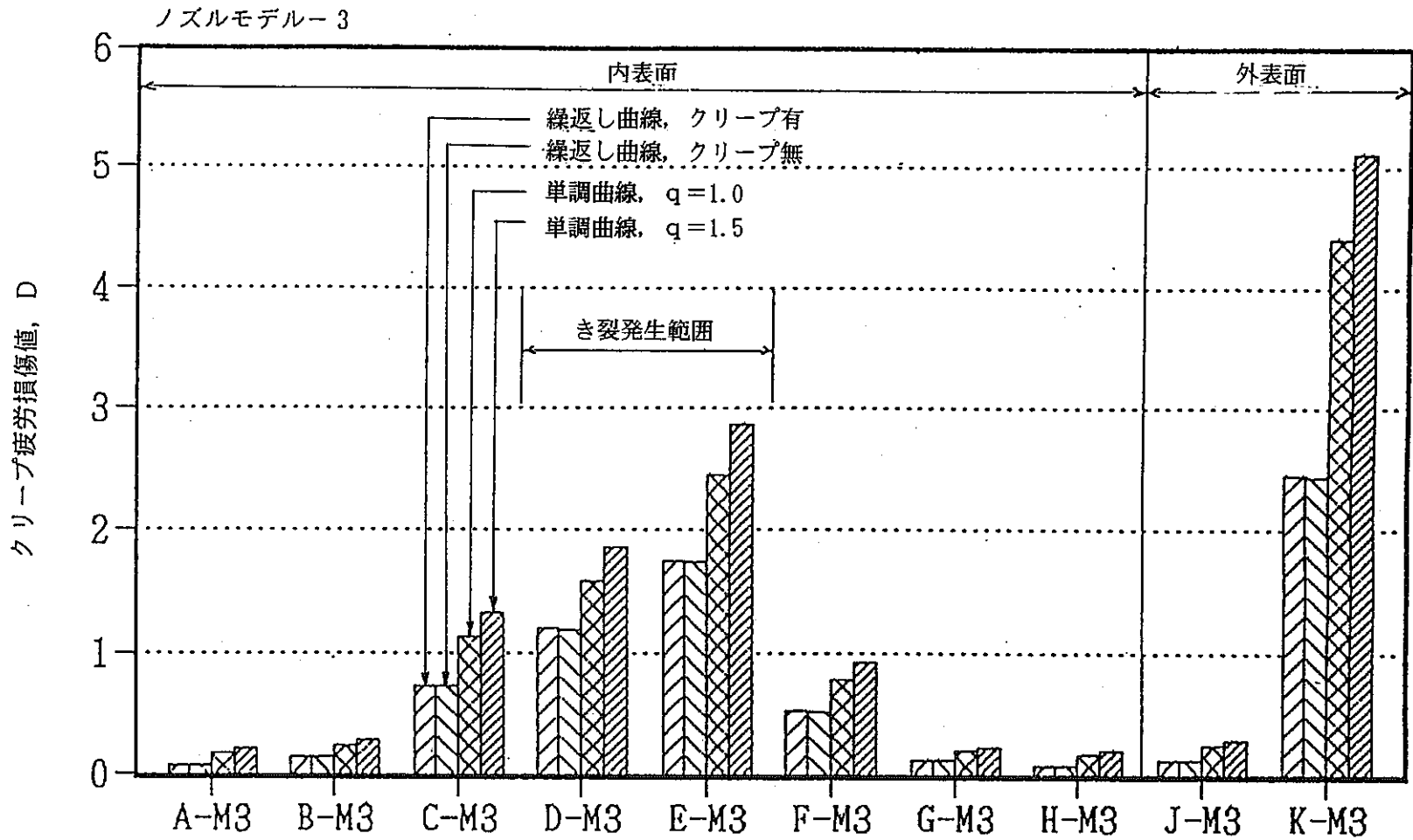
図 5.6.1 ノズルモデル1のクリープ疲労損傷評価結果のまとめ





3種類の非弾性解析による損傷値の比較 (ノズルモデル2)  
 (EP-CYCLIC1, EPC-CYCLIC1, EPC-MONO)  
 (TTSDS、 $q=1.0$ による評価、EPC-MONOでは $q=1.5$ 含む)

図 5.6.2 ノズルモデル2のクリープ疲労損傷評価結果のまとめ



3種類の非弾性解析による損傷値の比較 (ノズルモデル3)  
 (EP-CYCLIC1, EPC-CYCLIC1, EPC-MONO)  
 (TTSDS、 $q = 1.0$ による評価、EPC-MONOでは $q = 1.5$ 含む)

図 5.6.3 ノズルモデル3のクリープ疲労損傷評価結果のまとめ

## 6. 結論

高速炉実機構造の強度評価上重要な構造部材間の相対的温度差により生じる熱曲げ応力条件下での熱過渡強度データの取得およびクリープ疲労強度評価法の開発、高度化を目的として、高速炉実機構造に適用される代表的な構造材料であるSUS304鋼を用いて製作した3種類のノズル形状モデルを対象として、小型熱過渡試験装置（略称STST）を用いて熱過渡強度試験を実施した。

本報では、上記3種類のノズル形状モデルに対して、弾塑性応力-ひずみ関係として定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の2直線近似式を、またクリープひずみ式として遷移クリープを考慮した動燃の式を用いた弾塑性クリープ解析を標準的解析条件とした非弾性解析を行うとともに、強度評価として、これらの解析結果に基づいて、設計基準の有する安全裕度を取り除いた正味ベースのクリープ疲労損傷評価を行い、実際に供試体に確認されたき裂発生状況との相関を調べた。

また、一部解析ケースでは、強度評価結果に及ぼす非弾性解析条件の影響を把握する目的で、クリープを考慮しない弾塑性解析のみの条件での解析、さらに弾塑性応力-ひずみ関係として低ひずみ速度の定数を採用した解析を行うとともに、クリープ疲労損傷評価法に関する検討として、クリープ損傷の計算に、非弾性解析より得られる相当応力の経時変化に沿って損傷値を直接時間積分する方法と、仮想的な応力緩和経路を用いる方法の2種類の方法を用いて評価結果の差異を調べた。これらの検討により以下の知見が得られた。

(1) 非弾性解析条件として、弾塑性応力-ひずみ関係に標準ひずみ速度 ( $1 \times 10^{-3}$  mm/mm/sec) の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の2直線近似式を用い、クリープひずみ式に遷移クリープを考慮した動燃の式を用いた弾塑性クリープ解析を行うとともに、クリープ疲労損傷評価として、クリープ損傷計算に仮想的な応力緩和経路を用いる方法を用い、疲労損傷計算にミゼース相当ひずみ範囲を用いる強度評価法を採用することにより供試体のき裂発生分布と相関の良い評価結果が得られた。

(2) 上記非弾性解析条件において、クリープ解析を実施した場合と実施しない場合の結果の比較では、ひずみ範囲およびクリープ疲労損傷にほとんど差が認められず、今回の試験条件では、解析上クリープの影響はほとんど認められなかった。また、この傾向は定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線に低ひずみ速度の定数を採用した解析の場合でも同様であった。

(3) 弾塑性応力-ひずみ関係に標準ひずみ速度 ( $1 \times 10^{-3}$  mm/mm/sec) の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を用いた場合と低ひずみ速度 ( $1 \times 10^{-6}$  mm/mm/sec) の定数を用いた場合の結果では、最も損傷の厳しい評価点において、ひずみ範囲で10%、クリープ疲労損傷で20%程度、低ひずみ速度条件の方が大きい値となった。しかし、損傷値とき裂発生分布の対応上は大きな差は無く、両者ともほぼ妥当な評価結果が得られた。

(4) 弾塑性応力-ひずみ関係に標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を用いた場合と単調応力-ひずみ関係式を用いた場合では、最も損傷の厳しい評価点において、ひずみ範囲で30~40%、クリープ疲労損傷で60~80%程度、単調応力-ひずみ関係式を用いた場合の方が大きい値となった。また、この評価結果は、供試体のき裂発生分布よりも広い範囲でき裂発生を予測しており、損傷値を過大評価する結果となった。

(5) クリープ損傷評価に、解析より得られる相当応力の経時変化に沿って損傷値を直接時間積分する方法と、仮想的な応力緩和経路を用いる方法の2種類の方法を採用した場合の比較では、評価結果に大きな差が現れ、前者で算出された損傷値はほとんど破損に寄与しない程度の小さな値となった。これに対して、後者ではほぼ妥当とみられる損傷値が得られた。

(6) 弾性解析に基づいた強度評価を行った結果、き裂発生領域に対しては上記標準的非弾性解析条件による解析結果、およびそれに基づいた強度評価結果に近い損傷値が得られ、現在設定している非弾性ひずみ集中係数  $K_f = 1.2$  はほぼ妥当な値であった。ただし、き裂の発生しない低ひずみ範囲の領域に対しても同じ係数を適用するのはこのような領域で損傷値を過大評価する結果となった。

## 7. 謝辞

本試験研究のうち熱過渡試験は、構造工学室で実施した。また、非弾性熱応力計算、損傷計算は I S L (株) に依頼して実施した。さらに、本供試体素材の基礎的材料強度特性試験は材料開発室に実施していただいている。

構造工学室・永田敬室長、同熱過渡強度グループの関係各位ならびに運転管理班の方々、I S L (株) ・佐々木敏彦氏、材料開発室・浅山泰氏ほか関係各位の皆様感謝します。

8. 参考文献

- (1) 渡士、佐々木、古橋、小出、岩田 S T S T熱応力き裂発生試験の解析  
PNC N9410 90-150
- (2) 石崎、高橋、菊池、渡士、岩田 S T S T熱応力き裂発生試験  
第1報 熱過渡試験と解体検査 PNC ZN9410 92- (印刷中)
- (3) 伝熱工学資料(改定第4版), P.106, 日本機械学会
- (4) 田中、他 「SUS304鋼製ノズル形状モデルの繰返し熱応力によるクリープ疲労き裂発生試験-第3報 非弾性解析と強度評価」に係わるデータ集(作成中)
- (5) 田中、他 SUS304鋼製ノズル形状モデルの繰返し熱応力によるクリープ疲労き裂発生試験-第4報 総合報告書 (作成予定)
- (7) 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
- (8) 渡士、近内、小出、今津 原子炉容器モデル熱過渡強度試験  
第6報 非弾性解析と強度評価 PNC SN9410 87-181
- (9) 町田、渡士、岩田 溶接容器型モデル熱過渡強度試験供試体  
第3報 上部Yピースの熱応力解析とクリープ疲労強度評価 PNC ZN9410 91-066

付録

- 付録 A 伝熱解析結果
- 付録 B 非弾性解析結果
- 付録 C 供試体素材の材料試験結果（中間結果）
- 付録 D 弾塑性解析（クリープ解析無し）の結果およびクリープ疲労損傷評価結果
- 付録 E 低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による非弾性解析結果とクリープ疲労損傷評価結果
- 付録 F 単調応力-ひずみ関係による弾塑性-クリープ解析結果とクリープ疲労損傷評価結果
- 付録 G 「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果
- 付録 H 弾性解析に基づくクリープ疲労損傷評価結果
- 付録 I 本研究で採用した解析手法と強度評価法の組み立てについて
- 付録 J き裂発生時点に基づいた強度評価結果の検討について

## 付録 A 伝熱解析結果

付録Aとして、3.2節に示した以外の主要な伝熱解析結果および外表面断熱条件での解析結果と比較した結果を示す。

伝熱解析結果として、各モデルでの温度表示用代表点の位置を付図 A.1, A.3, A.5に、またこれらの点における温度履歴を付図 A.2, A.4, A.6に示す。これらの結果は第2報および試験データと良く合っている。

- 図 A.1 ノズルモデル1の温度時刻歴表示位置
- 図 A.2 ノズルモデル1の各点での温度時刻歴
- 図 A.3 ノズルモデル2の温度時刻歴表示位置
- 図 A.4 ノズルモデル2の各点での温度時刻歴
- 図 A.5 ノズルモデル3の温度時刻歴表示位置
- 図 A.6 ノズルモデル3の各点での温度時刻歴
- 図 A.7 外表面断熱条件と熱伝達考慮条件での伝熱解析結果の比較  
熱過渡1サイクル分の表示（下図が外表面断熱条件）
- 図 A.8 外表面断熱条件と熱伝達考慮条件での伝熱解析結果の比較  
コールドトランジェント初期分の表示（下図が外表面断熱条件）
- 図 A.9 外表面断熱条件と熱伝達考慮条件での伝熱解析結果の比較  
ホットトランジェント初期分の表示（下図が外表面断熱条件）

また、本伝熱解析結果に対応する弾性熱応力解析結果について、第2報で実施した「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針の長期一次応力が低い場合の手法」（EBDSと呼んでいる）に基づいた評価結果のまとめ表は付録Hに添付した。



FINAS

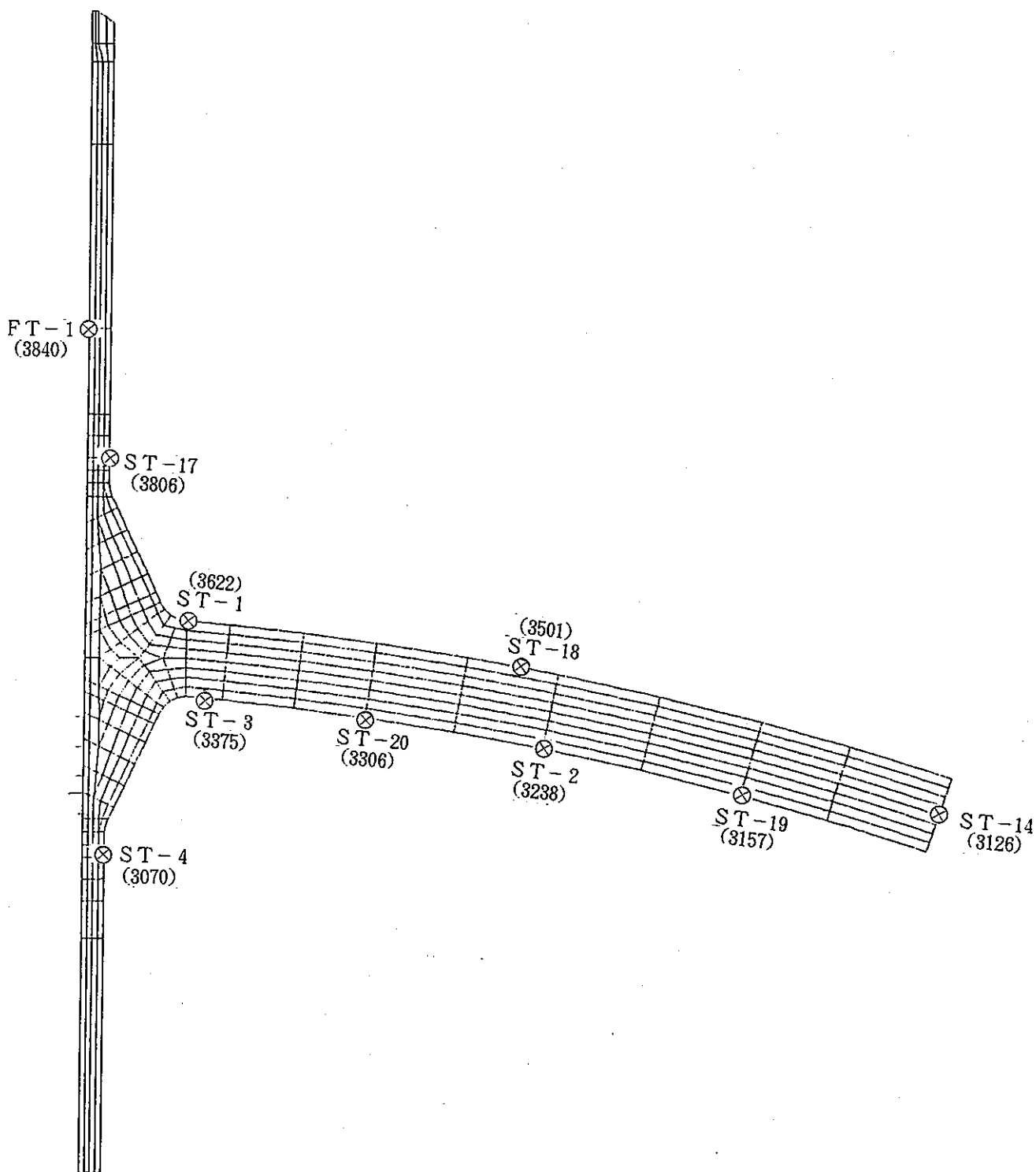


図 A.1 ノズルモデル1の温度時刻歴表示位置

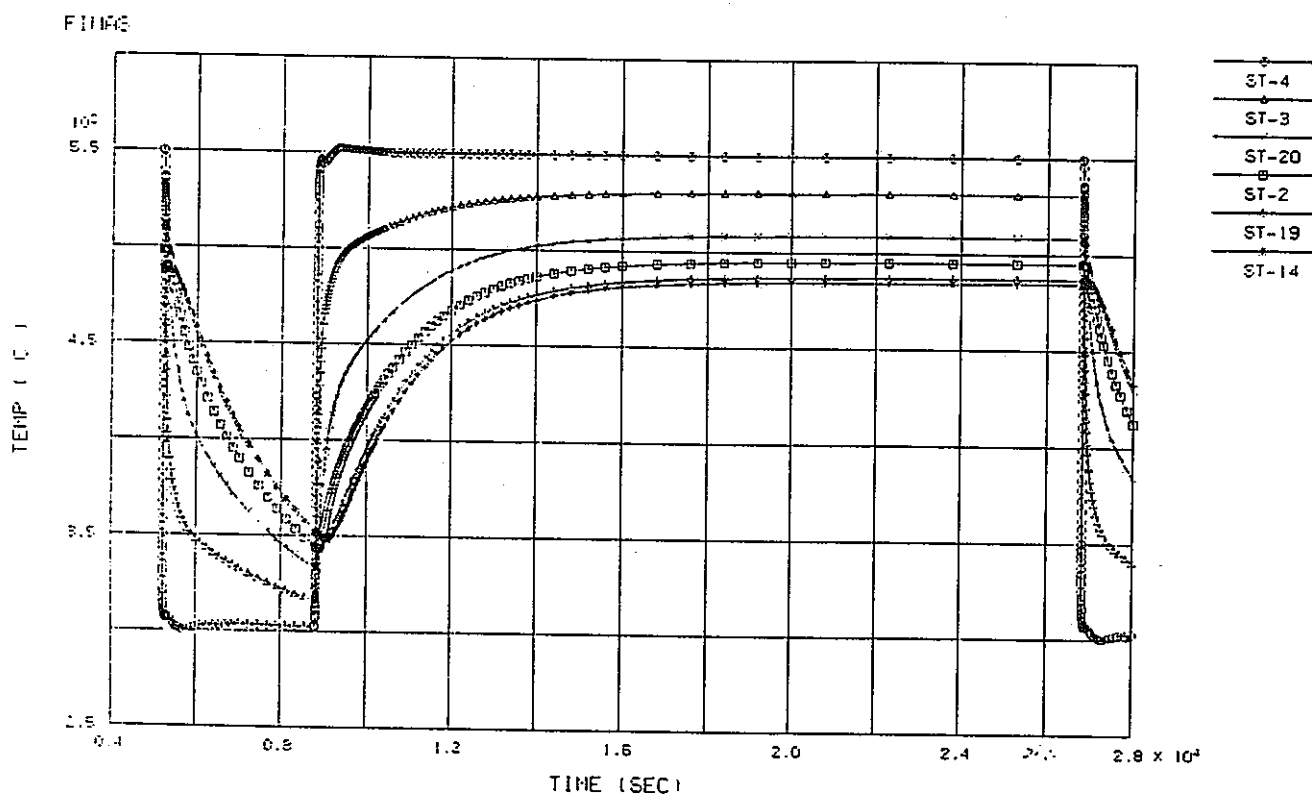
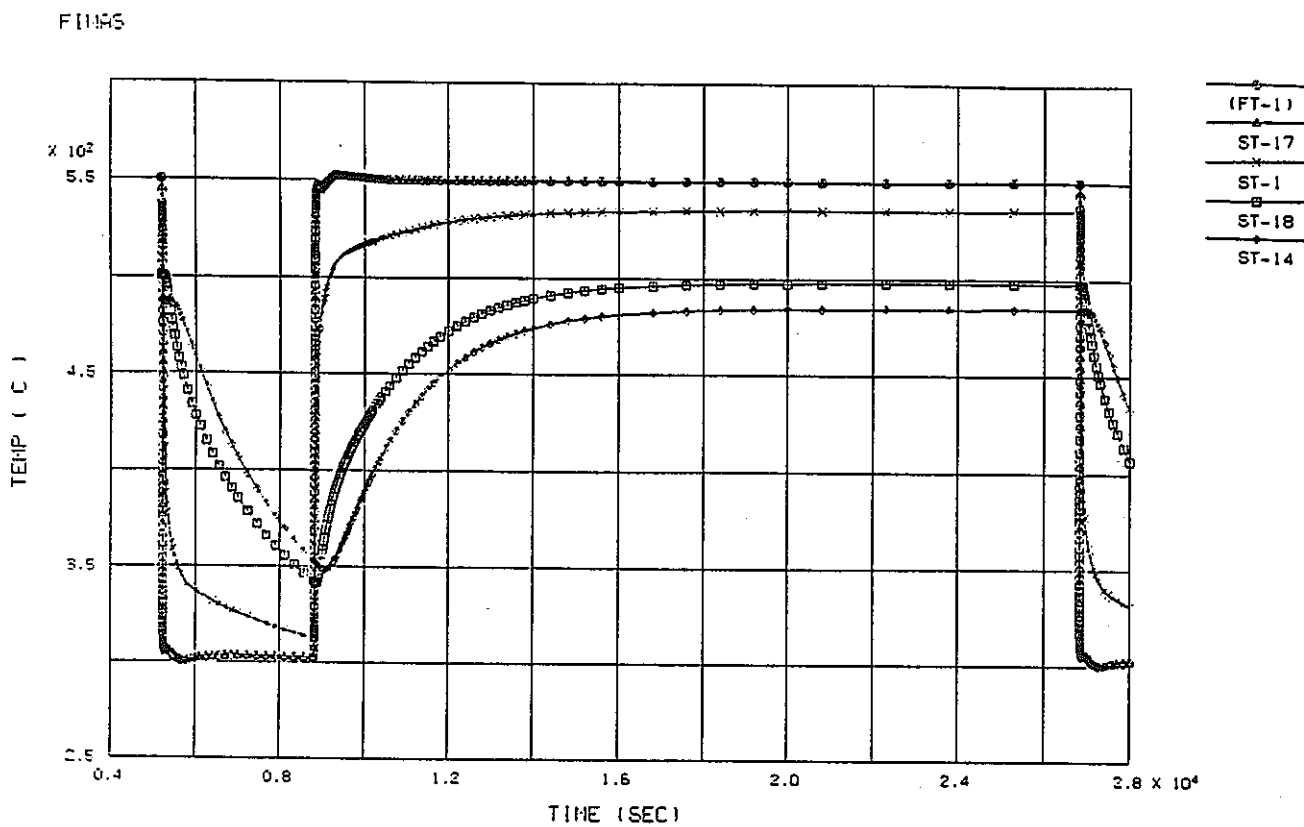


図 A.2 ノズルモデル1の各点での温度時刻歴

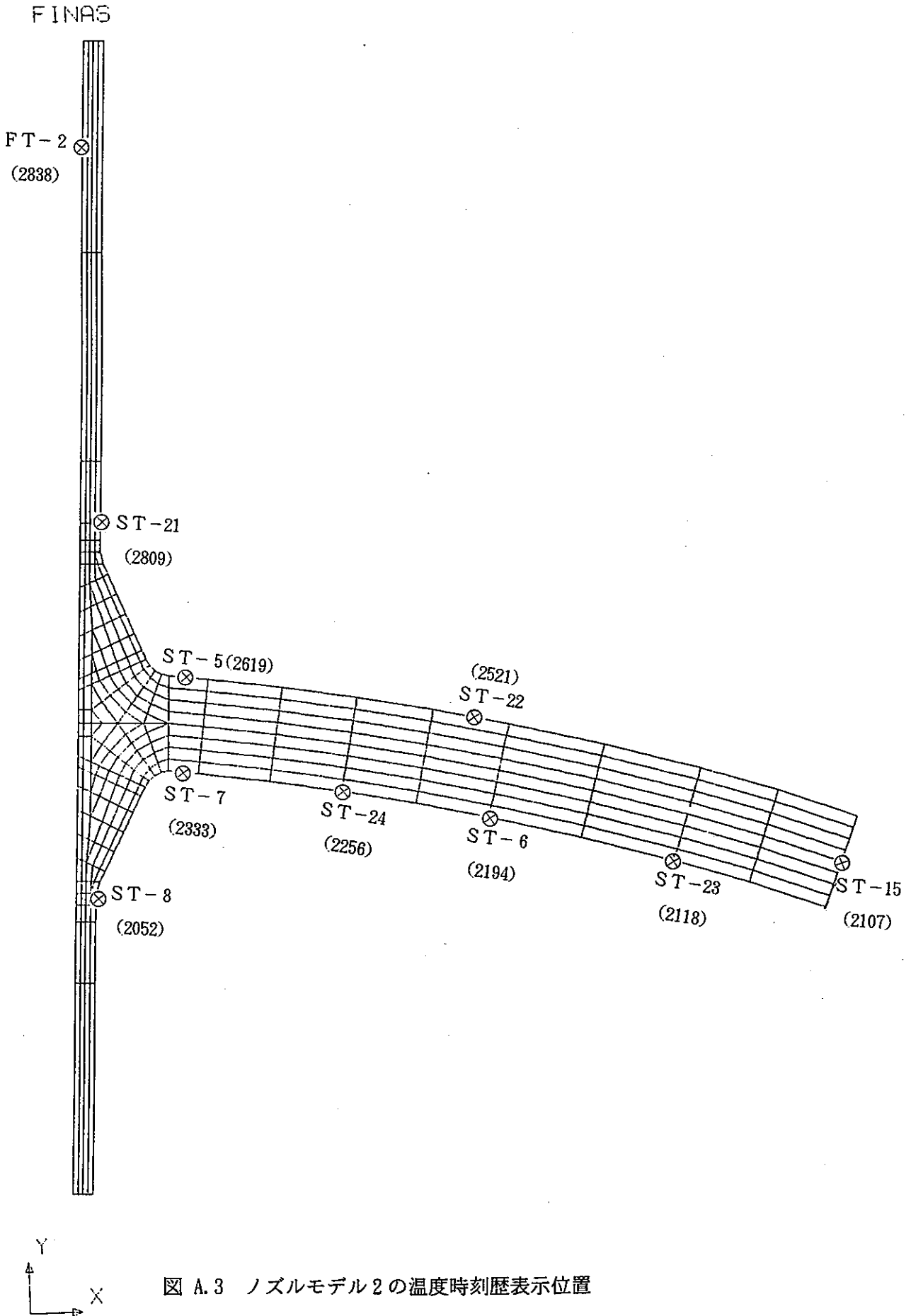


図 A.3 ノズルモデル2の温度時刻歴表示位置

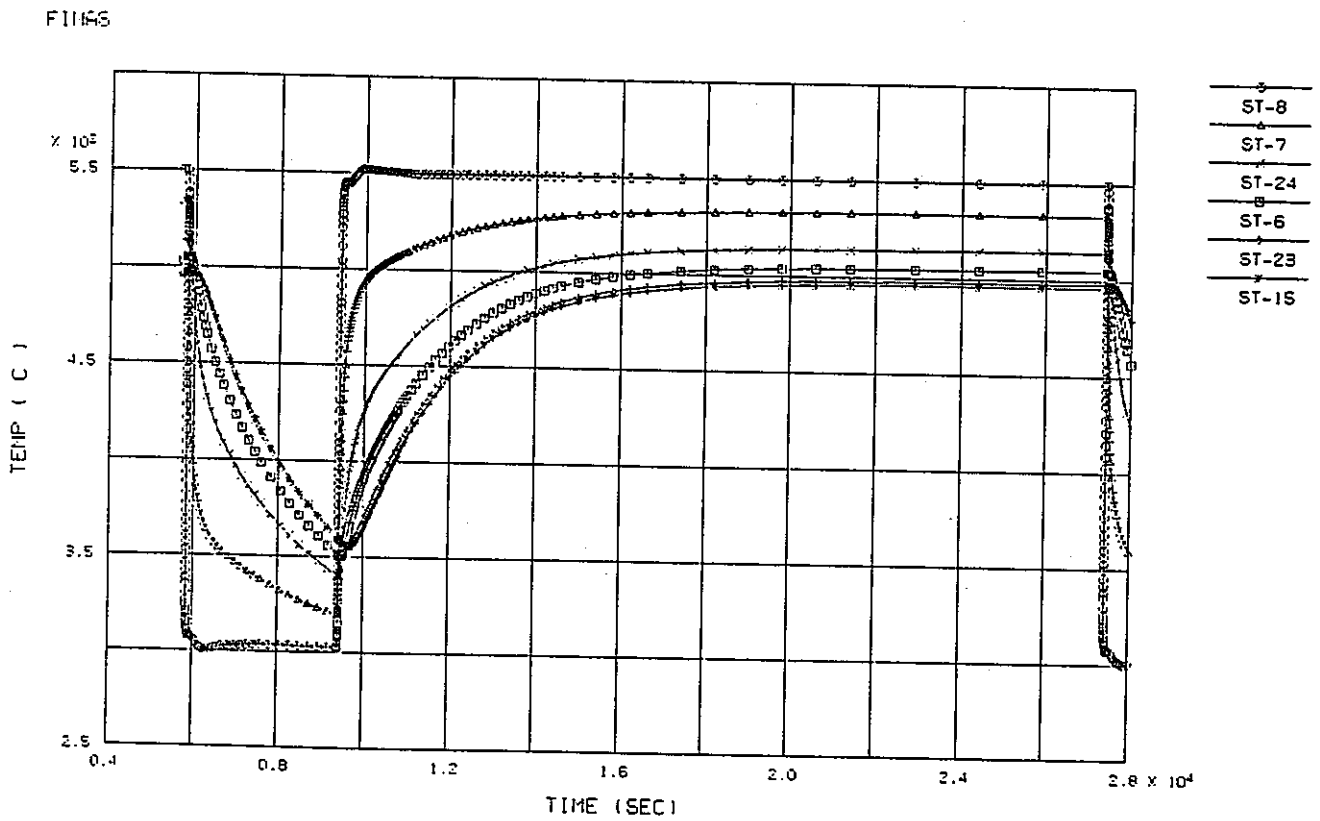
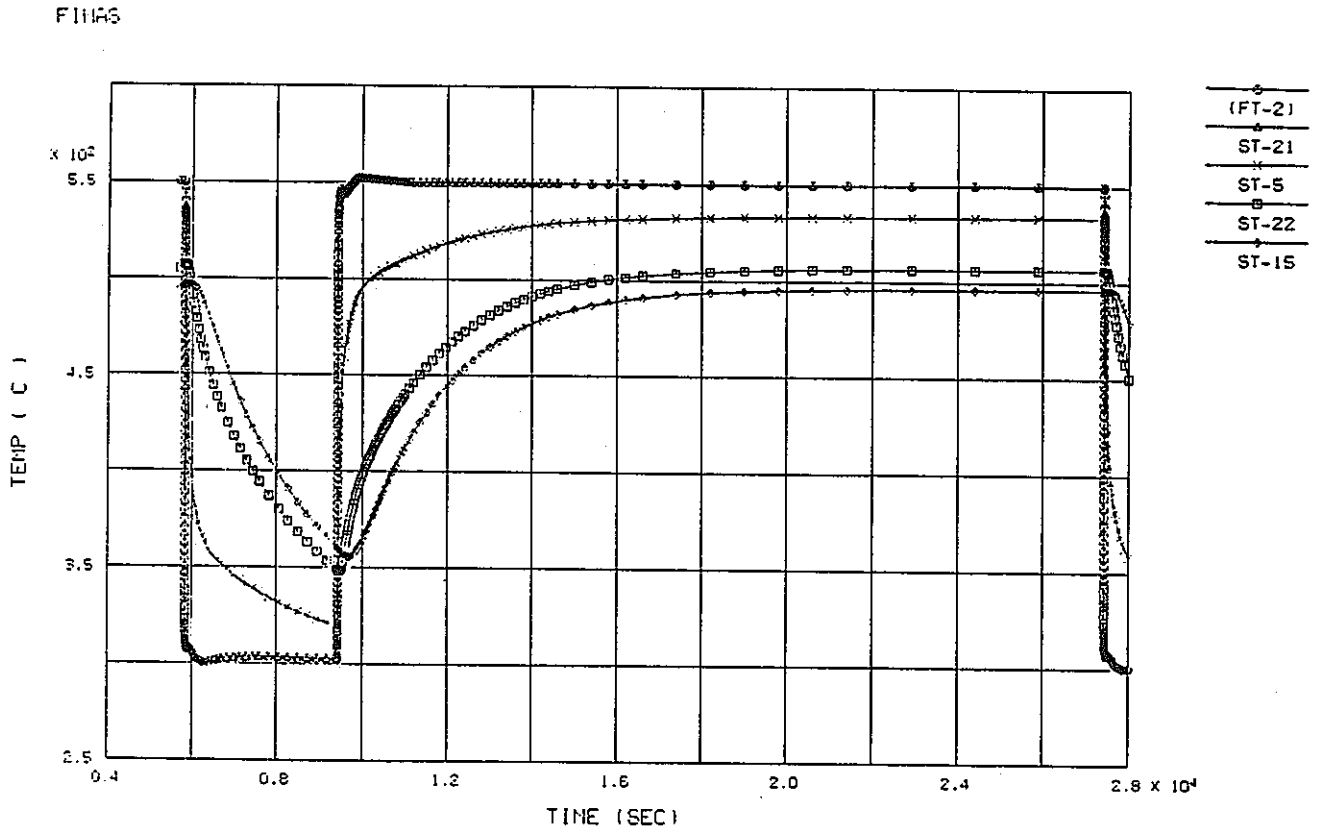


図 A.4 ノズルモデル2の各点での温度時刻歴

FINAS

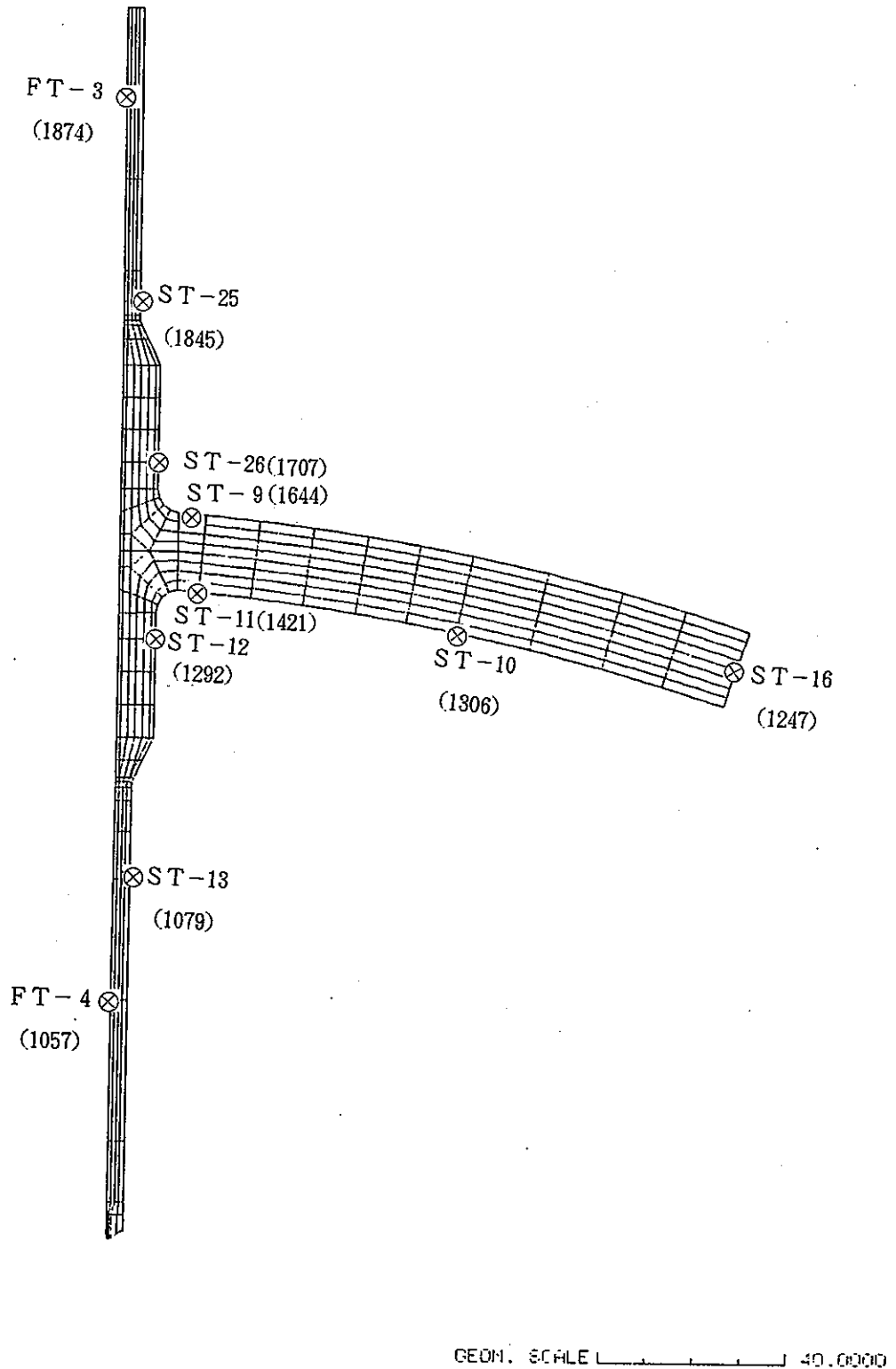


図 A.5 ノズルモデル3の温度時刻歴表示位置

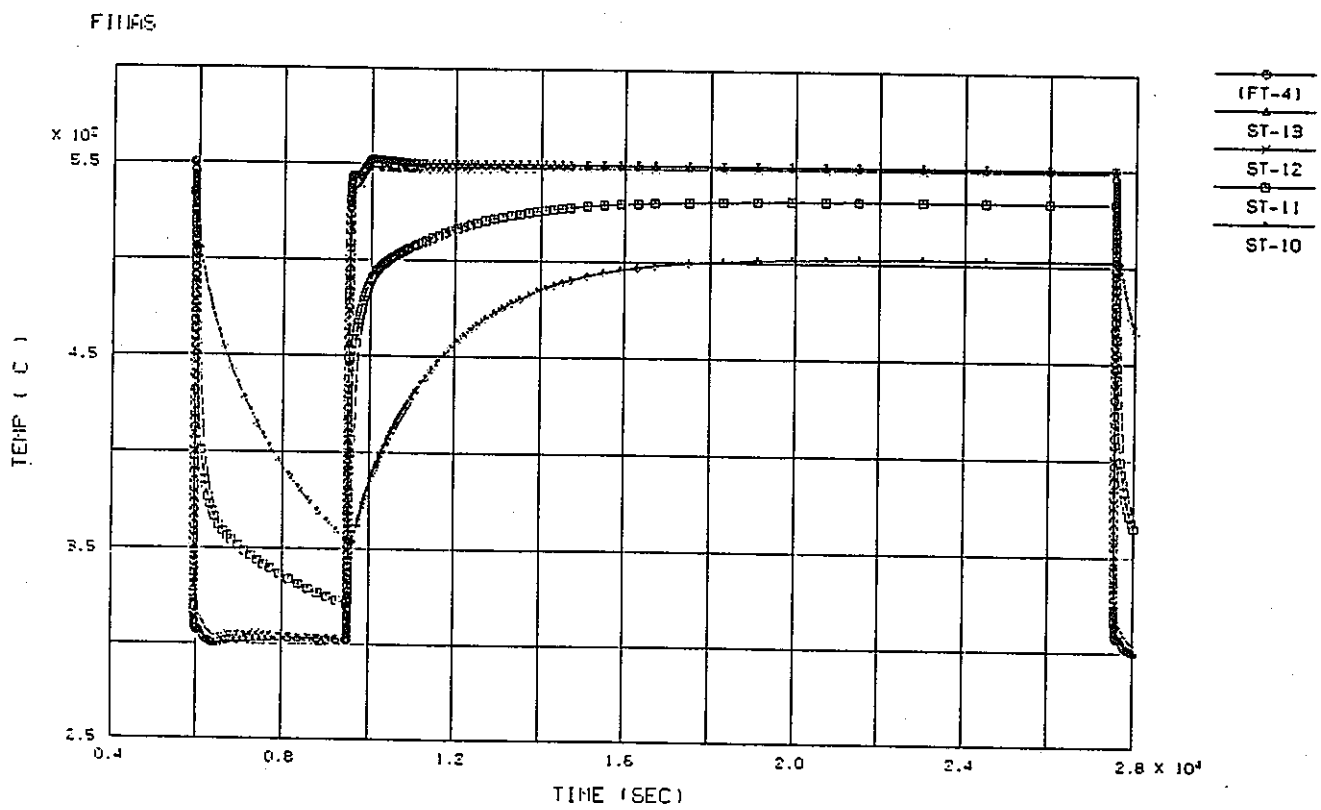
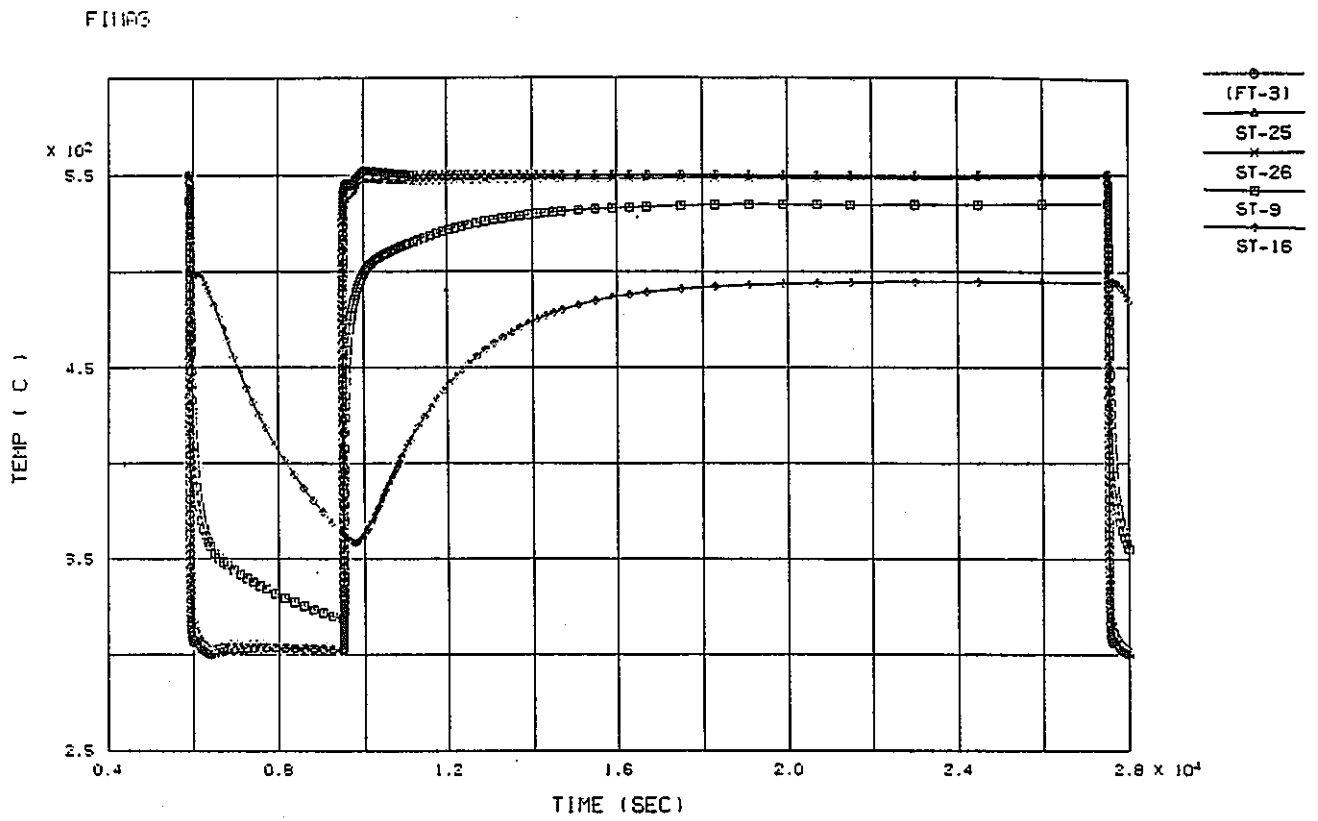
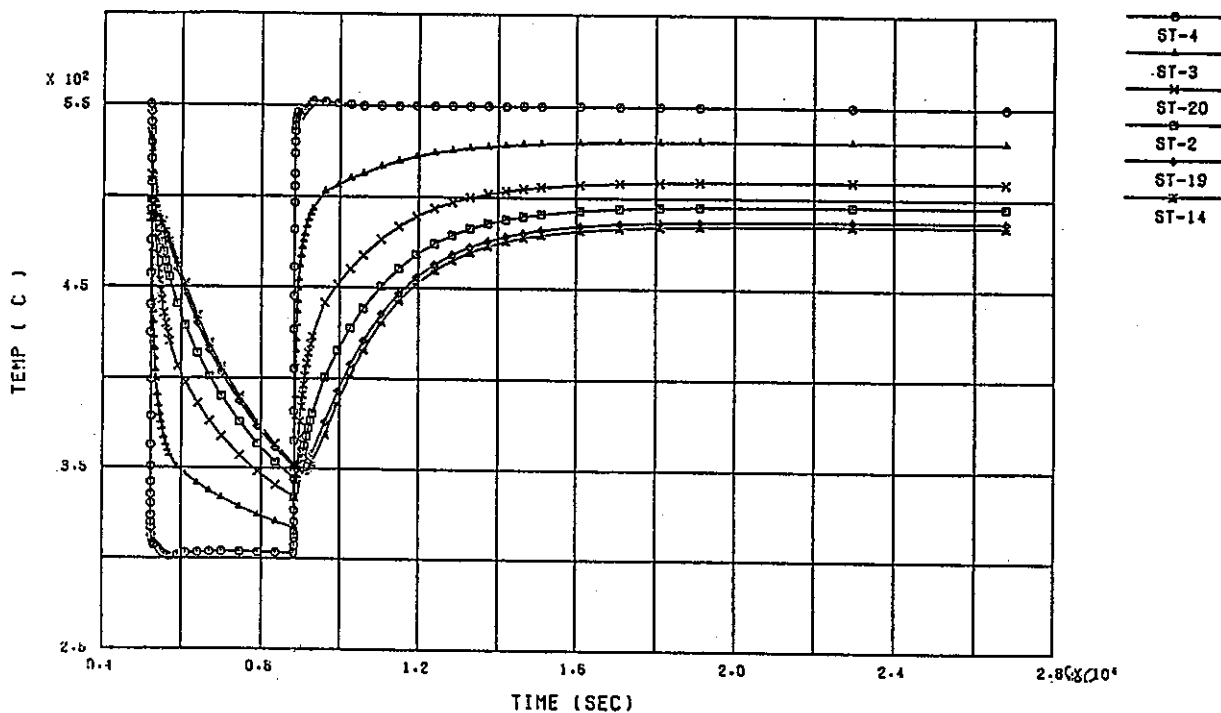


図 A.6 ノズルモデル 3 の各点での温度時刻歴

FINAS



モデル境界温度時刻歴 (MODEL-1)

FINAS

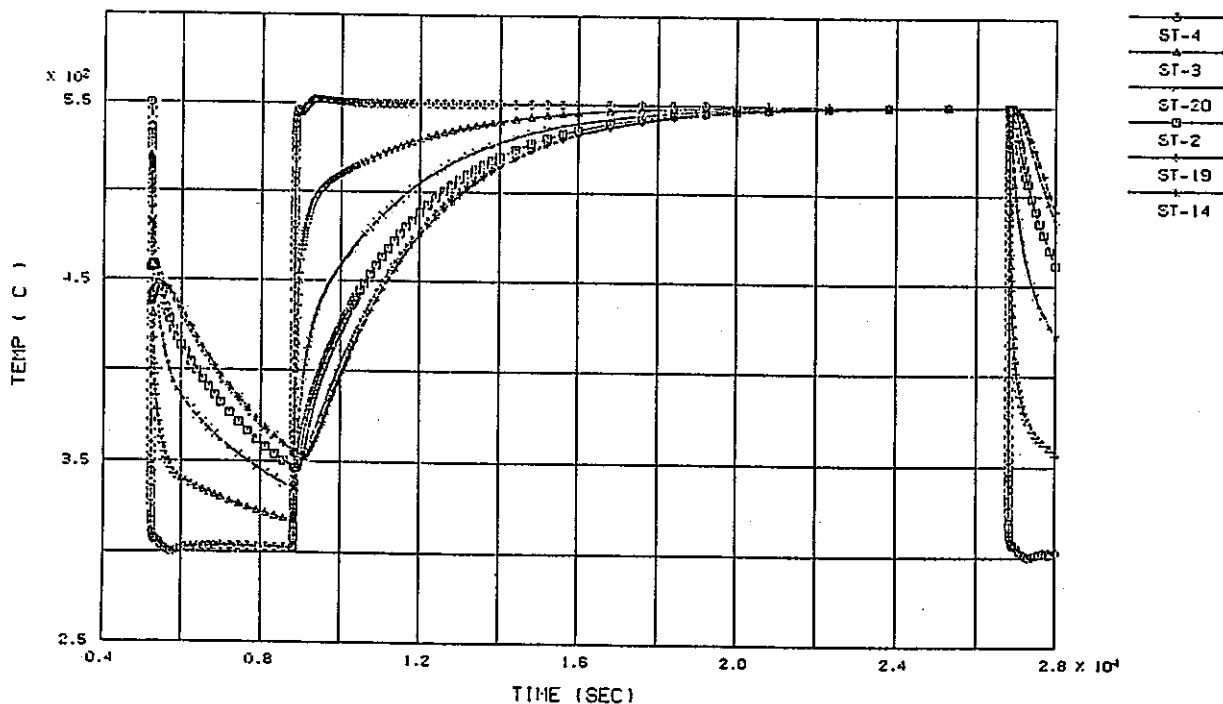
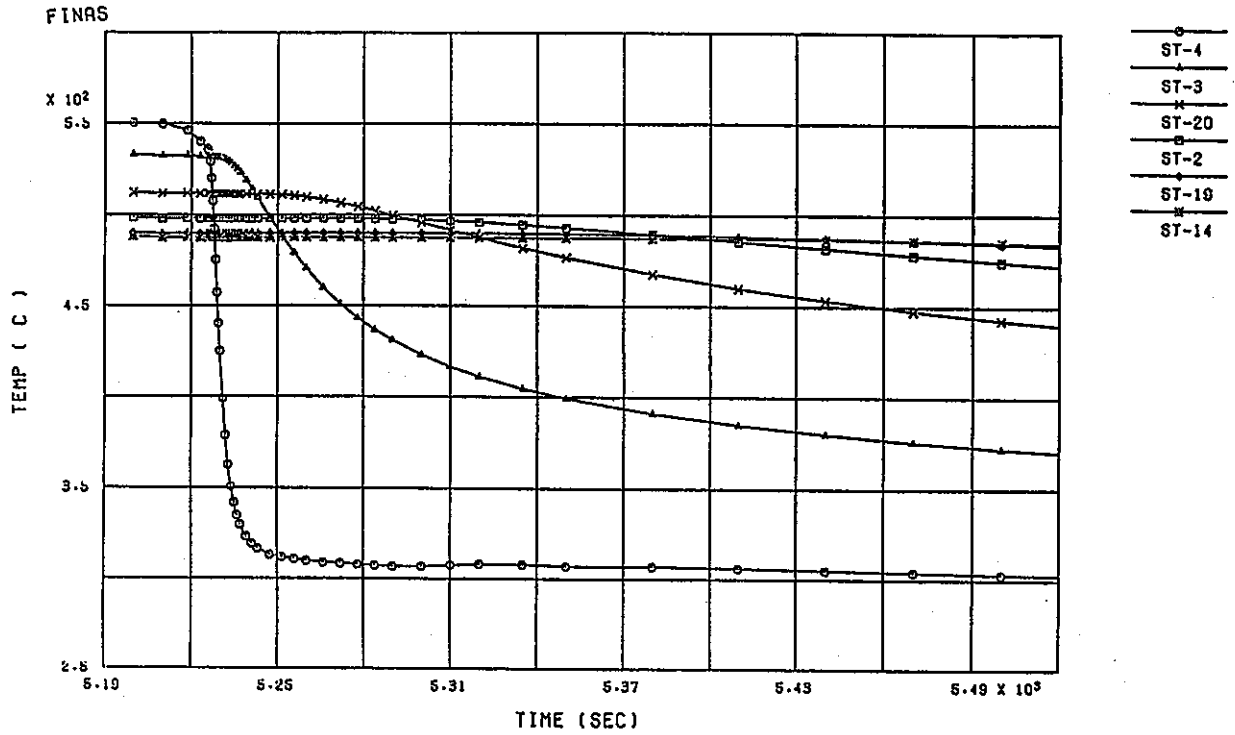


図 A.7 外表面断熱条件と熱伝達考慮条件での伝熱解析結果の比較  
熱過渡 1 サイクル分の表示 (下図が外表面断熱条件)



モデル境界温度時刻歴 ( MODEL-1 )

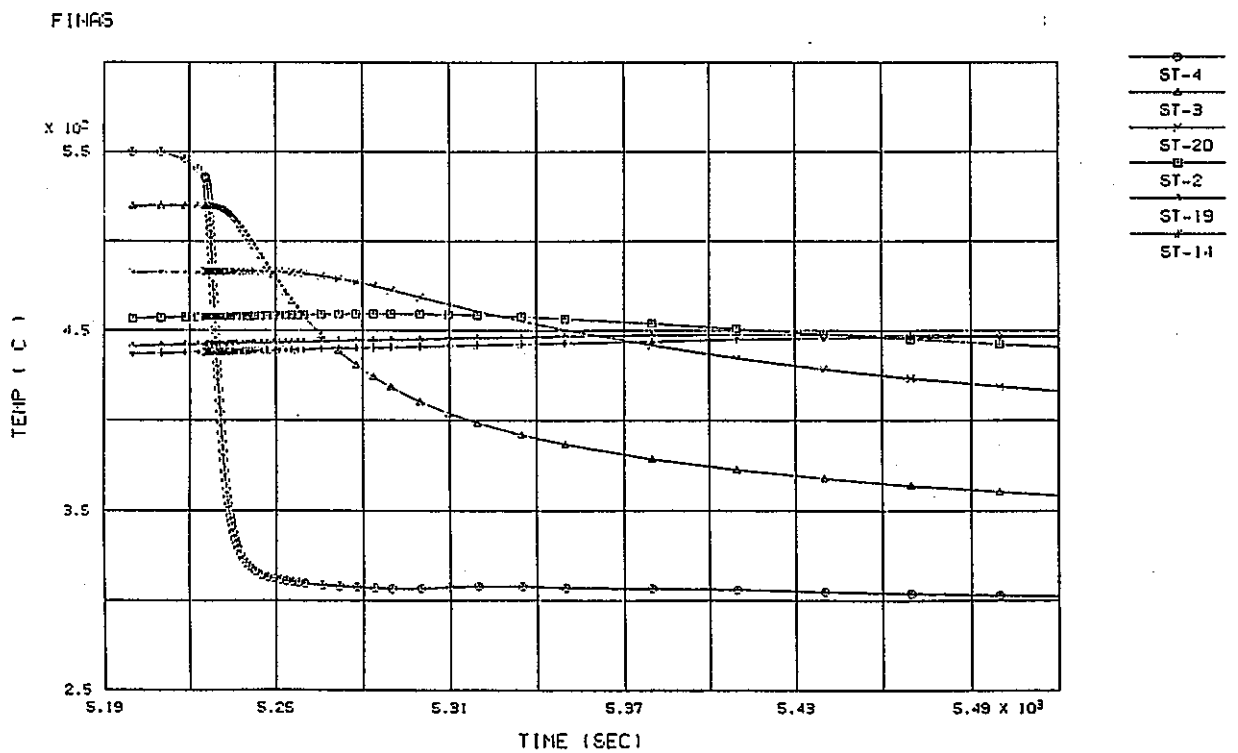
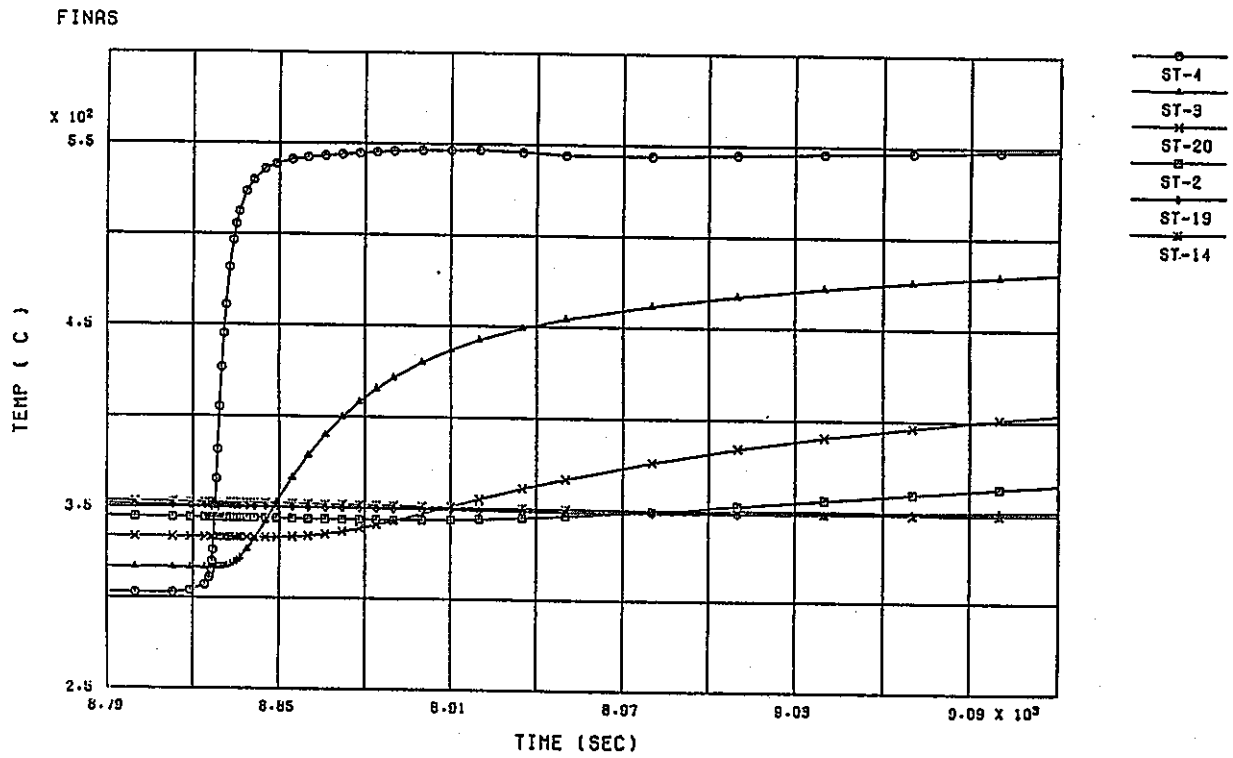


図 A.8 外表面断熱条件と熱伝達考慮条件での伝熱解析結果の比較  
コールドトランジェント初期分の表示 (下図が外表面断熱条件)





モデル境界温度時刻歴 (MODEL-1)

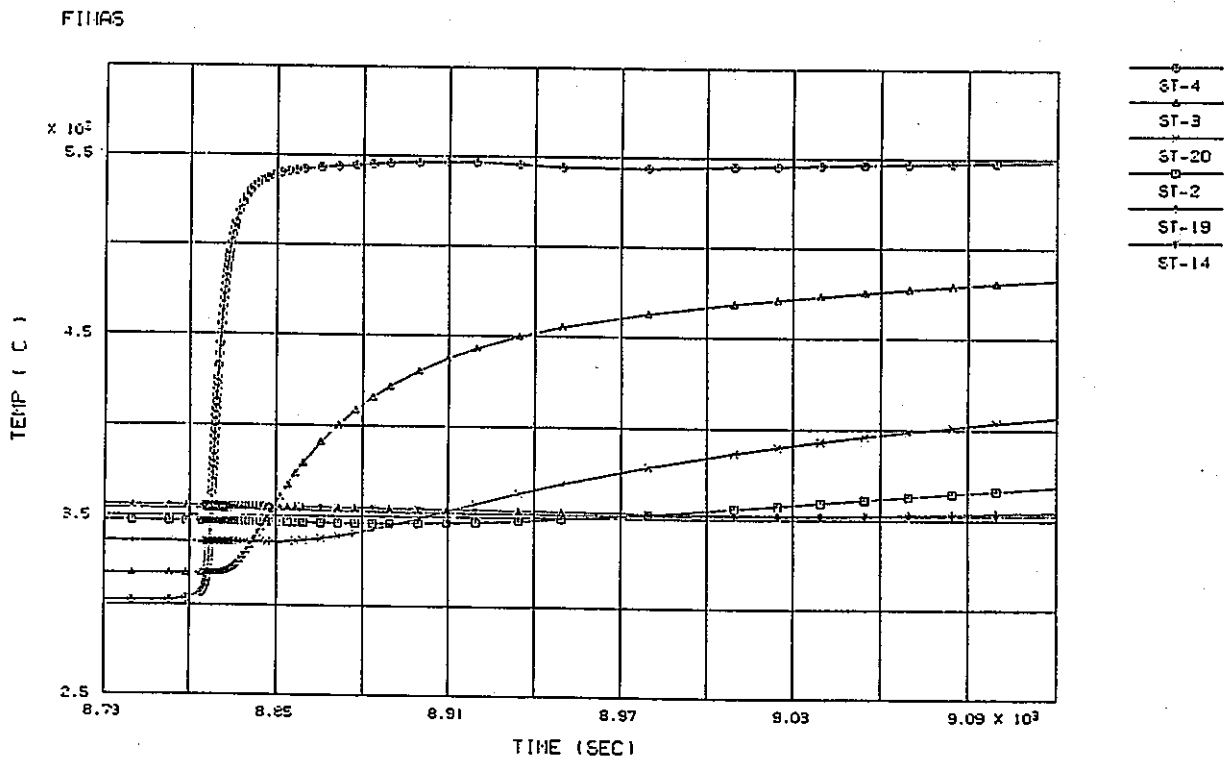


図 A.9 外表面断熱条件と熱伝達考慮条件での伝熱解析結果の比較  
 ホットランジェント初期分の表示 (下図が外表面断熱条件)

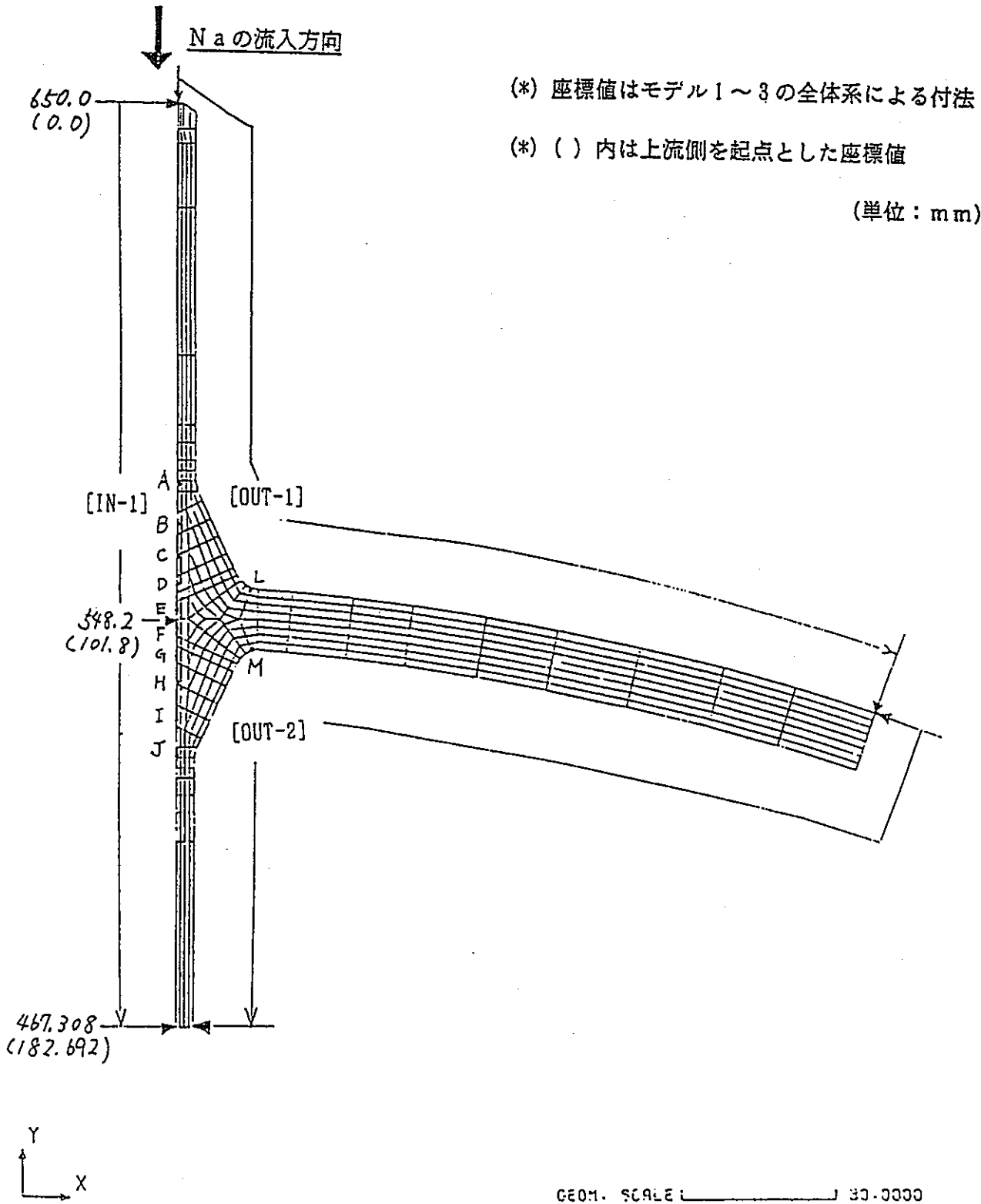
## 付録 B 非弾性解析結果

付録Bとして、3.2節に示した以外の主要な非弾性解析結果を示す。非弾性解析の結果については、モデル内外表面に沿った応力、ひずみの分布、さらに各モデルにおいて高い応力、ひずみの発生する主要な評価点における応力、ひずみの時刻歴さらに損傷評価を実施するために必要な各種パラメータを把握する観点から整理を行った。

図 B.1, B.8, B.15 に各モデルの損傷評価点および応力、ひずみの分布を表示する範囲を示す。非弾性解析結果として、図 B.2～図 B.5にはモデル1の内外表面における低温熱過渡および高温熱過渡時の2極値を形成する時点近傍の応力およびひずみの分布を、また図 B.6～図 B.7には内表面および外表面の代表点（概ねそれぞれの面で最大の損傷値が得られる点）での応力およびひずみの時刻歴を示した。また、図 B.9～図 B.14にはモデル2の結果について、図 B.16～図 B.21にはモデル3の結果について同様に示した。

- 図 B.1 ノズルモデル1の評価点と応力、ひずみ分布の表示範囲
- 図 B.2 ライン IN-1（内面）に沿った応力、ひずみの分布（低温熱過渡時）
- 図 B.3 ライン IN-1（内面）に沿った応力、ひずみの分布（高温熱過渡時）
- 図 B.4 ライン OUT-2（外面）に沿った応力、ひずみの分布（低温熱過渡時）
- 図 B.5 ライン OUT-2（外面）に沿った応力、ひずみの分布（高温熱過渡時）
- 図 B.6 内表面側代表点Fにおける応力、ひずみの時刻歴
- 図 B.7 外表面側代表点M-1における応力、ひずみの時刻歴
- 図 B.8 ノズルモデル2の評価点と応力、ひずみ分布の表示範囲
- 図 B.9 ライン IN-2（内面）に沿った応力、ひずみの分布（低温熱過渡時）
- 図 B.10 ライン IN-2（内面）に沿った応力、ひずみの分布（高温熱過渡時）
- 図 B.11 ライン OUT-4（外面）に沿った応力、ひずみの分布（低温熱過渡時）
- 図 B.12 ライン OUT-4（外面）に沿った応力、ひずみの分布（高温熱過渡時）
- 図 B.13 内表面側代表点Fにおける応力、ひずみの時刻歴
- 図 B.14 外表面側代表点M-1における応力、ひずみの時刻歴
- 図 B.15 ノズルモデル3の評価点と応力、ひずみ分布の表示範囲
- 図 B.16 ライン IN-3（内面）に沿った応力、ひずみの分布（低温熱過渡時）
- 図 B.17 ライン IN-3（内面）に沿った応力、ひずみの分布（高温熱過渡時）
- 図 B.18 ライン OUT-6（外面）に沿った応力、ひずみの分布（低温熱過渡時）
- 図 B.19 ライン OUT-6（外面）に沿った応力、ひずみの分布（高温熱過渡時）
- 図 B.20 内表面側代表点Eにおける応力、ひずみの時刻歴
- 図 B.21 外表面側代表点K-1における応力、ひずみの時刻歴

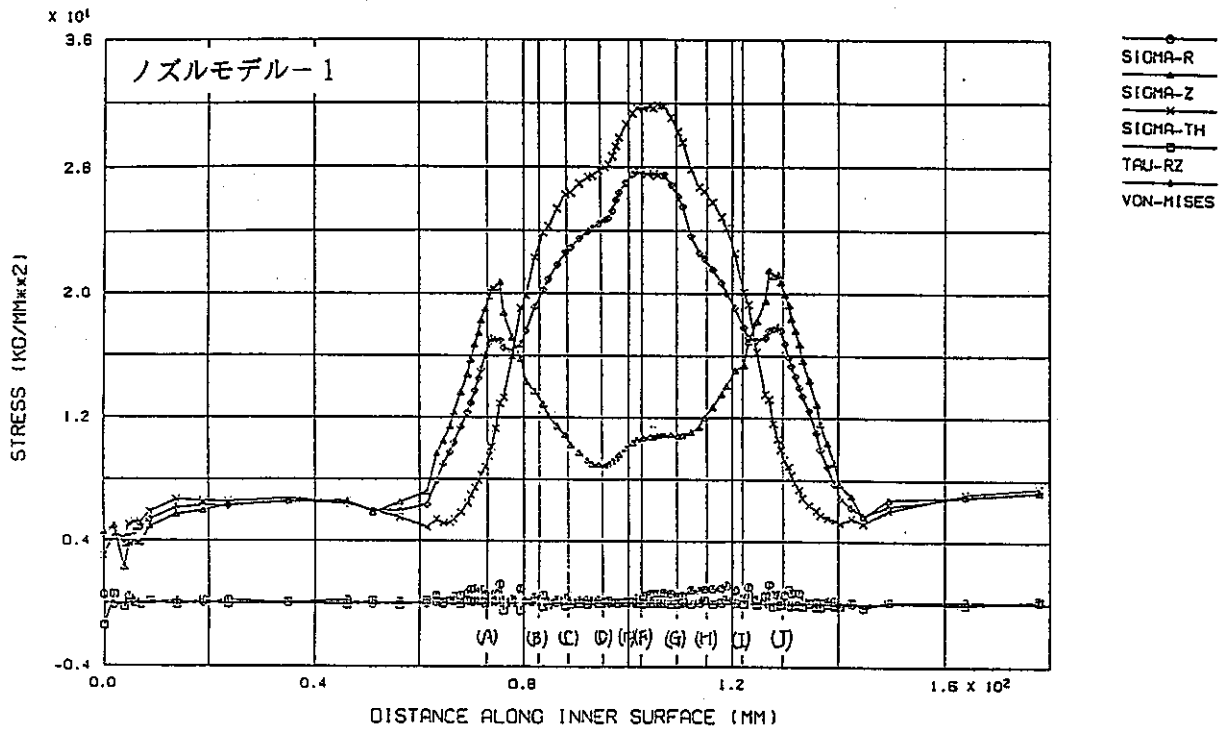
FINAS



解析形状の座標及び評価点 (モデル1)

図 B.1 ノズルモデル1の評価点と応力、ひずみ分布の表示範囲

FINAS  
STEP NO. 346



FINAS  
STEP NO. 346

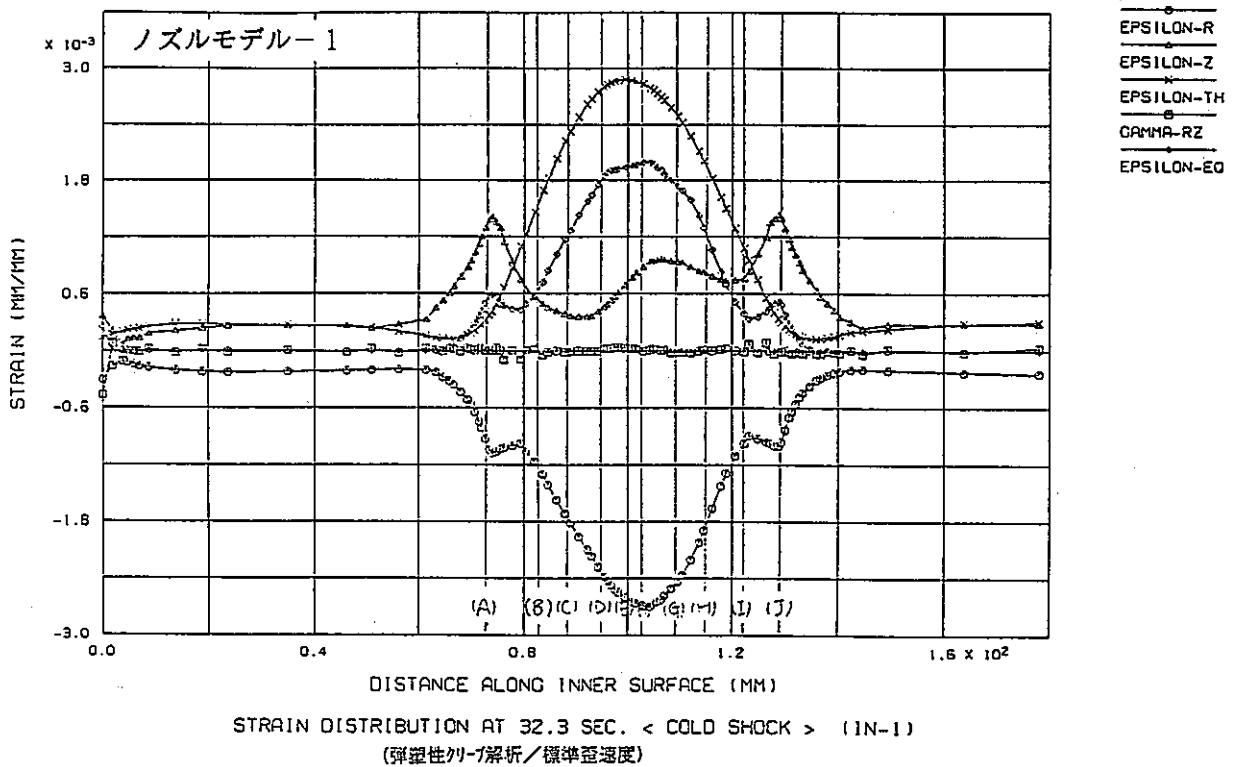
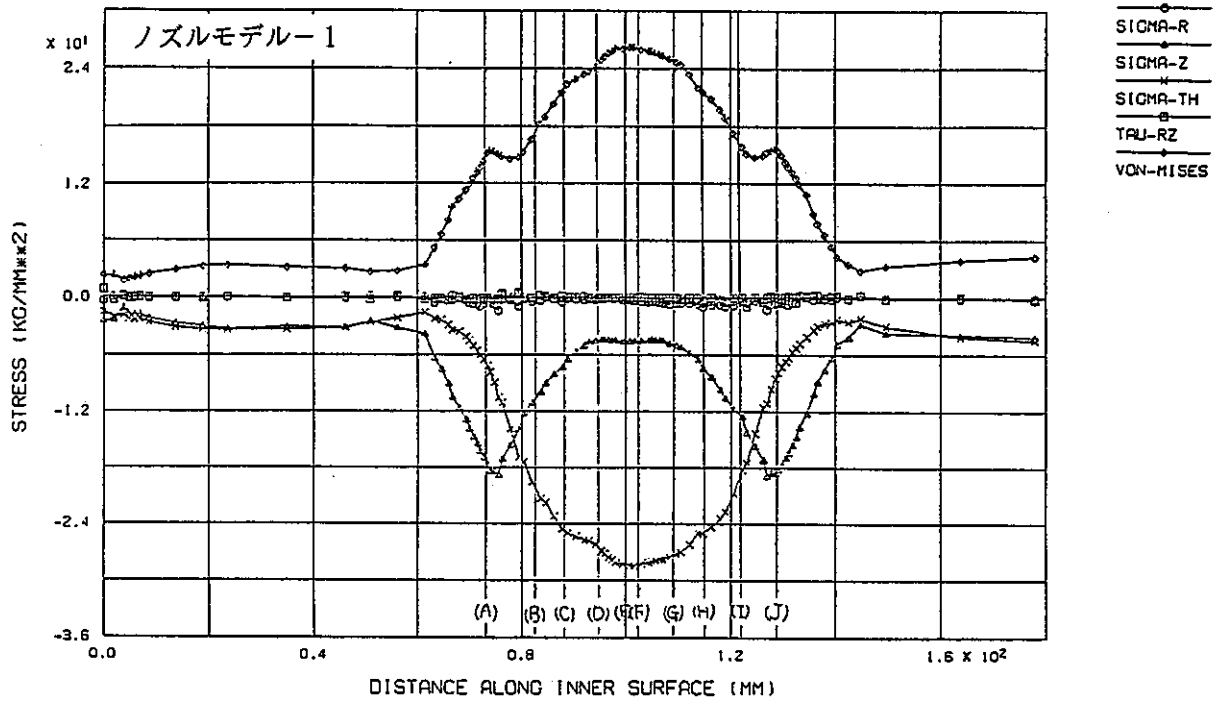


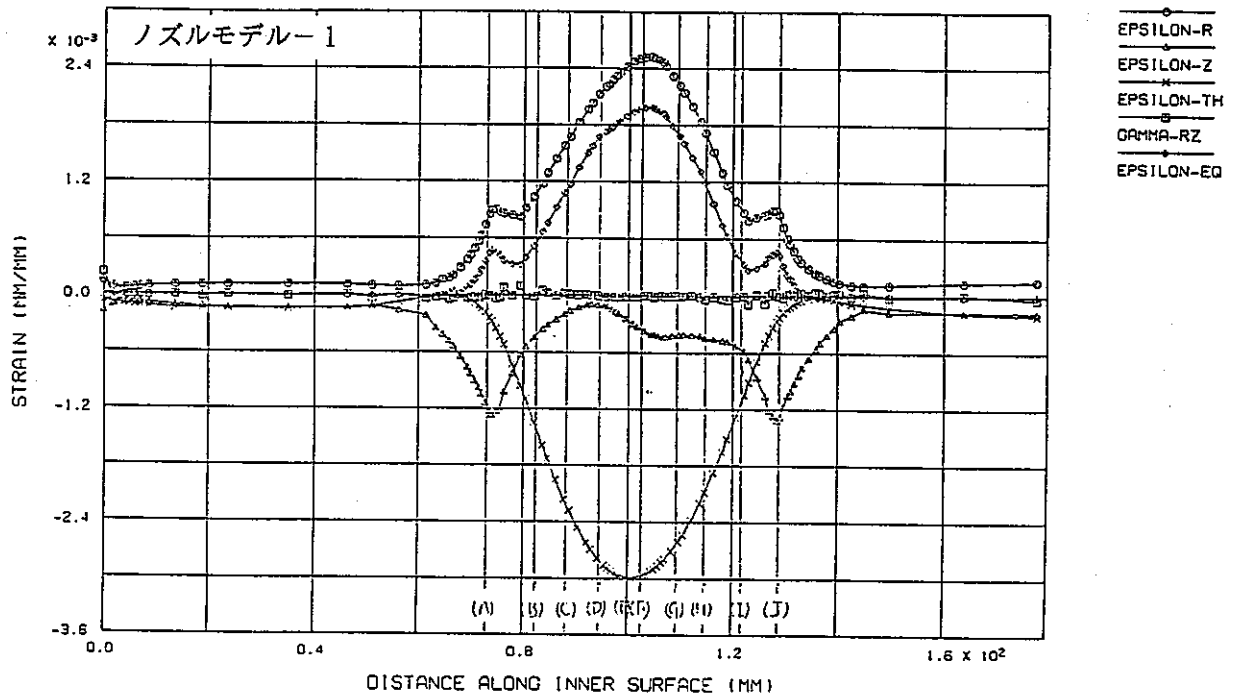
図 B.2 ライン IN-1 (内面) に沿った応力、ひずみの分布 (低温熱過渡時)

FINAS  
STEP NO. 178



STRESS DISTRIBUTION AT 34.0 SEC. < HOT SHOCK > (IN-1)  
(弾塑性クリブ解析/標準登速度)

FINAS  
STEP NO. 178



STRAIN DISTRIBUTION AT 34.0 SEC. < HOT SHOCK > (IN-1)  
(弾塑性クリブ解析/標準登速度)

図 B.3 ライン IN-1 (内面) に沿った応力、ひずみの分布 (高温熱過渡時)

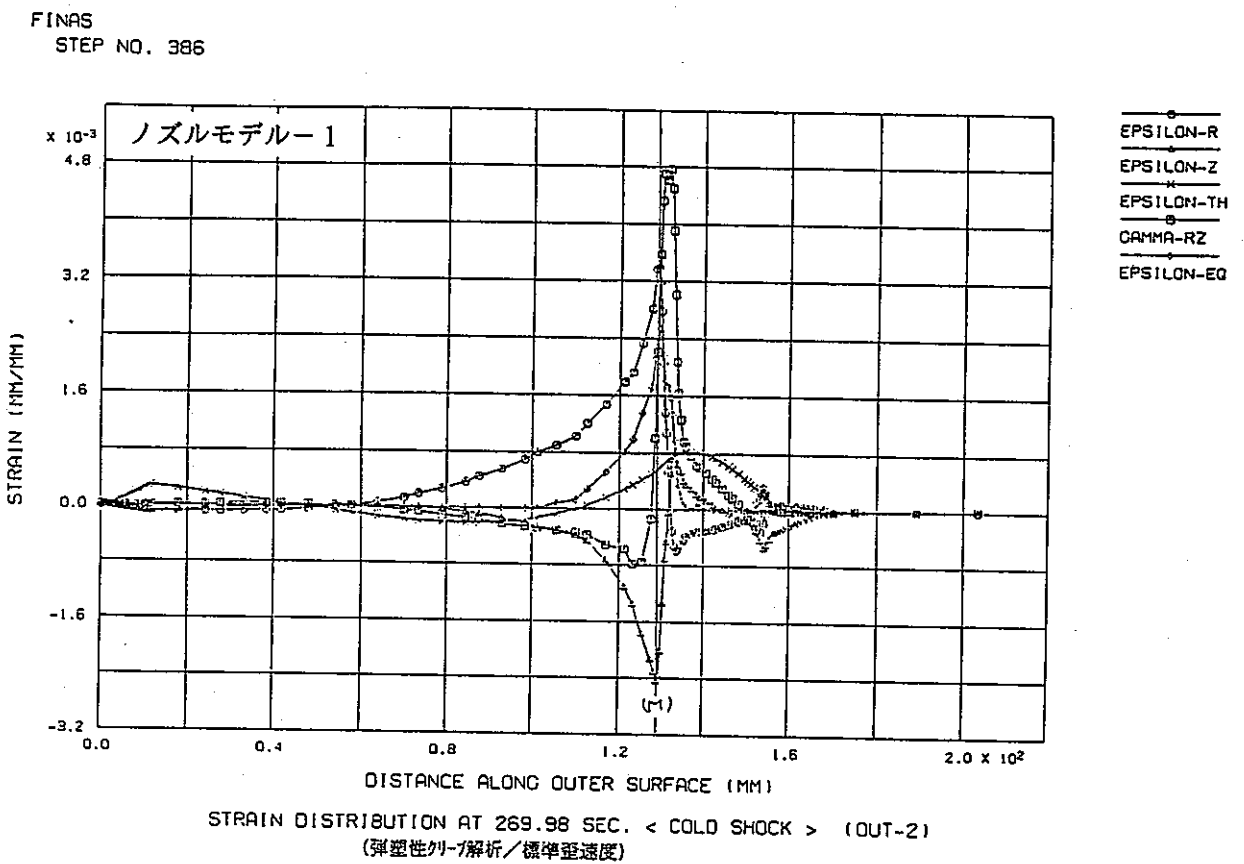
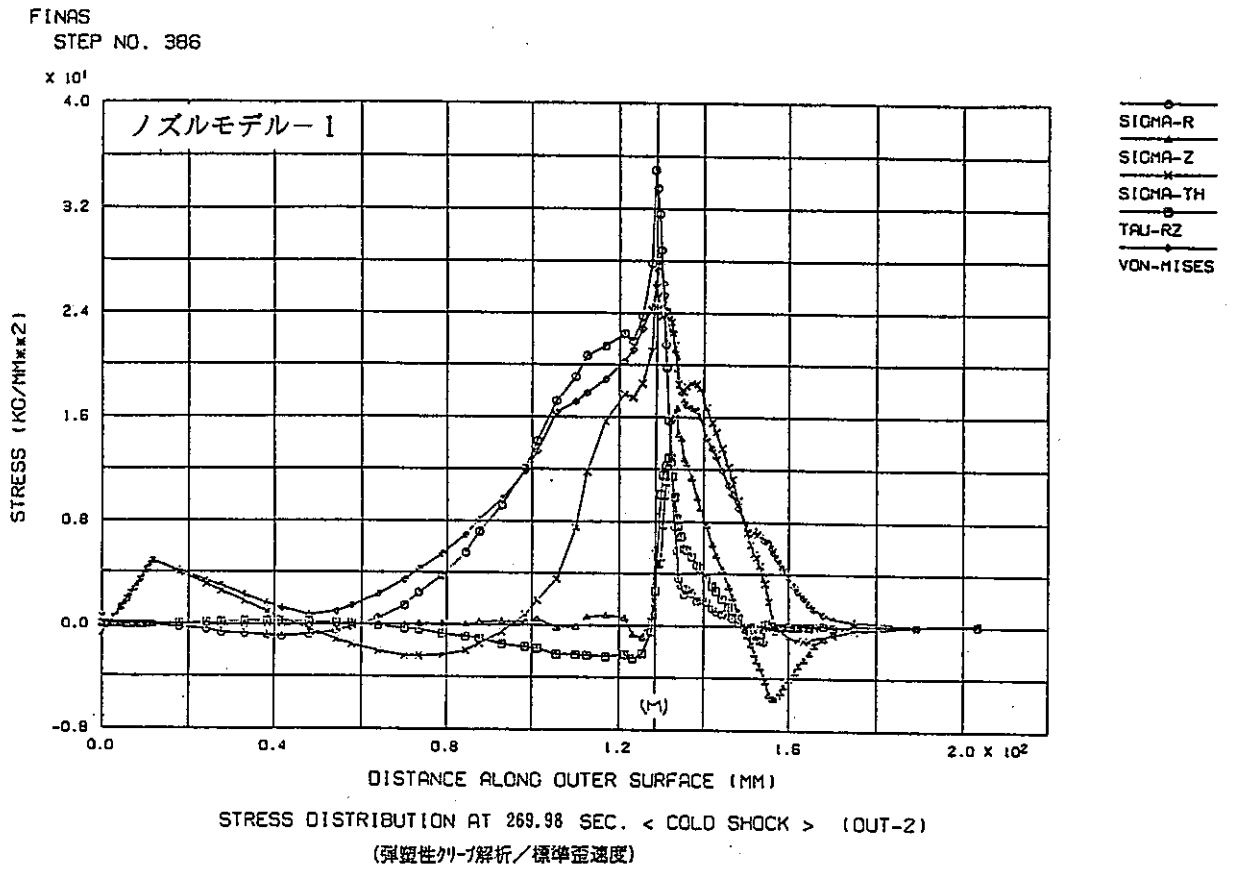
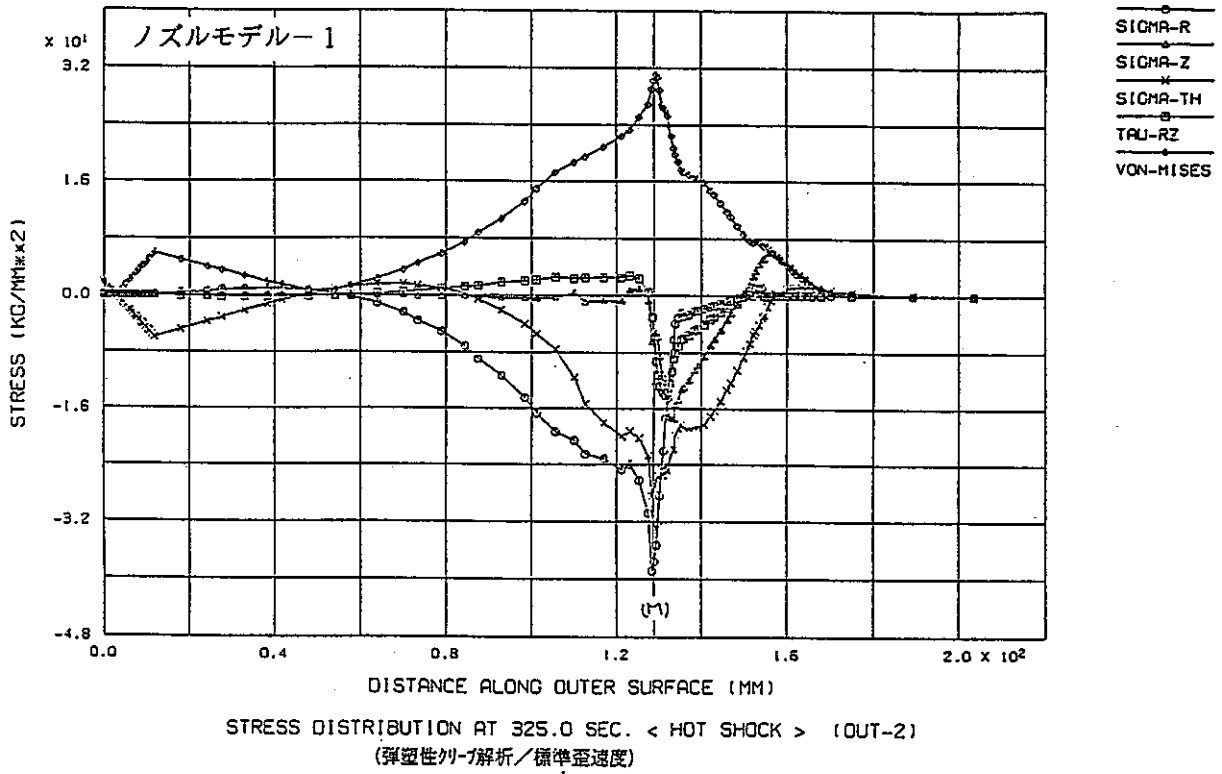


図 B.4 ライン OUT-2 (外面) に沿った応力、ひずみの分布 (低温熱過渡時)

FINAS  
STEP NO. 214



FINAS  
STEP NO. 214

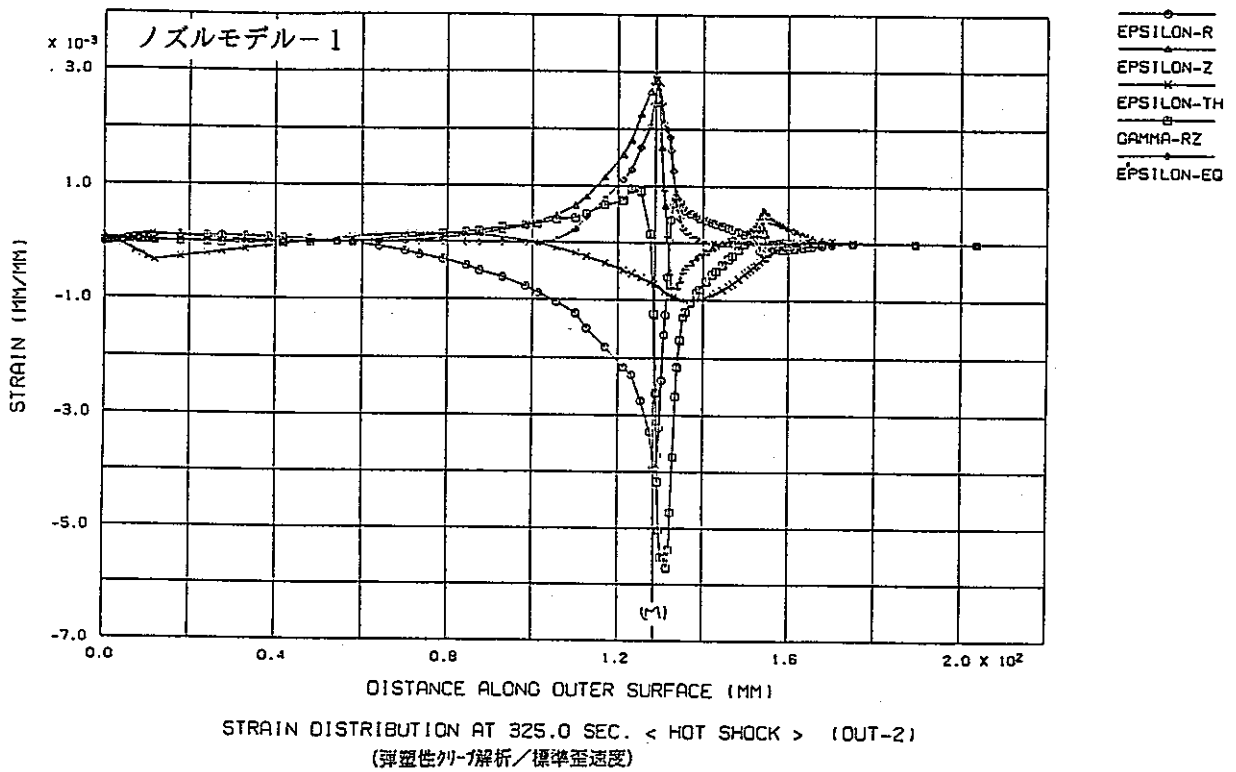
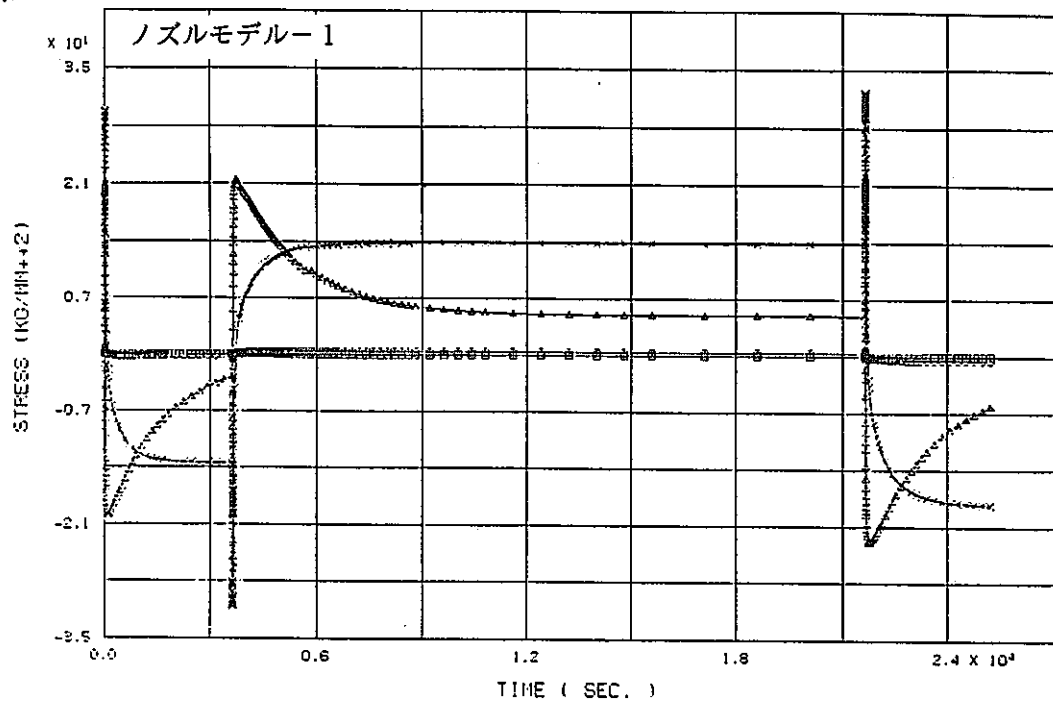


図 B.5 ライン OUT-2 (外面) に沿った応力、ひずみの分布 (高温熱過渡時)

FINAS



FINAS

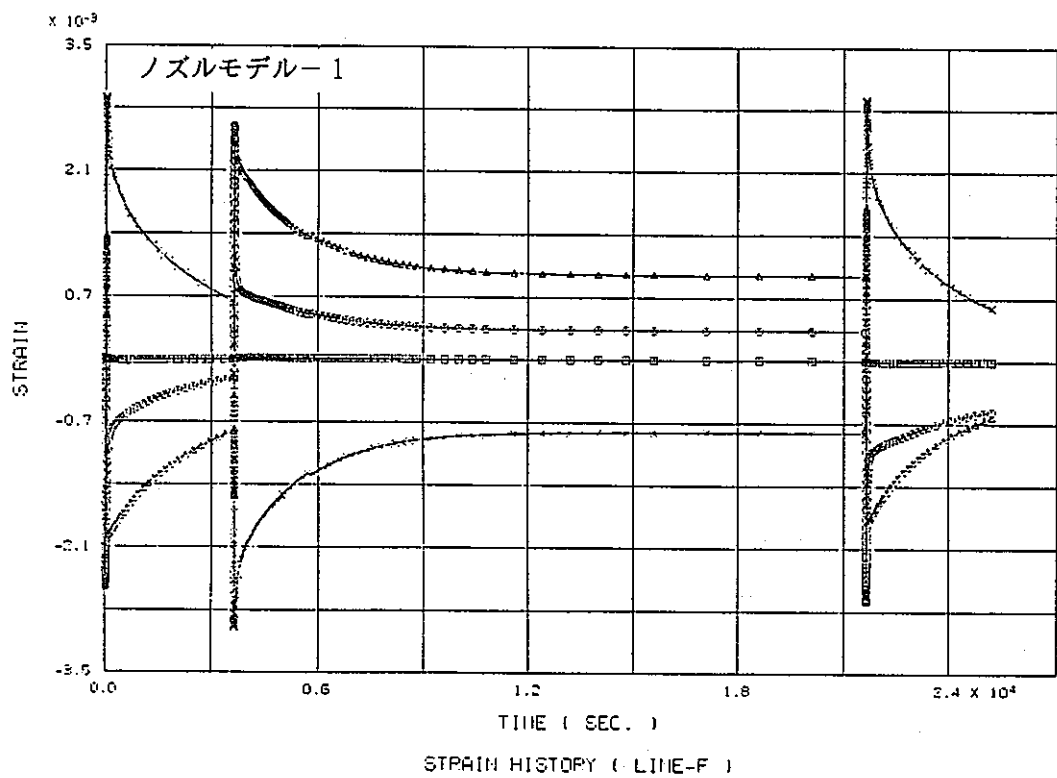
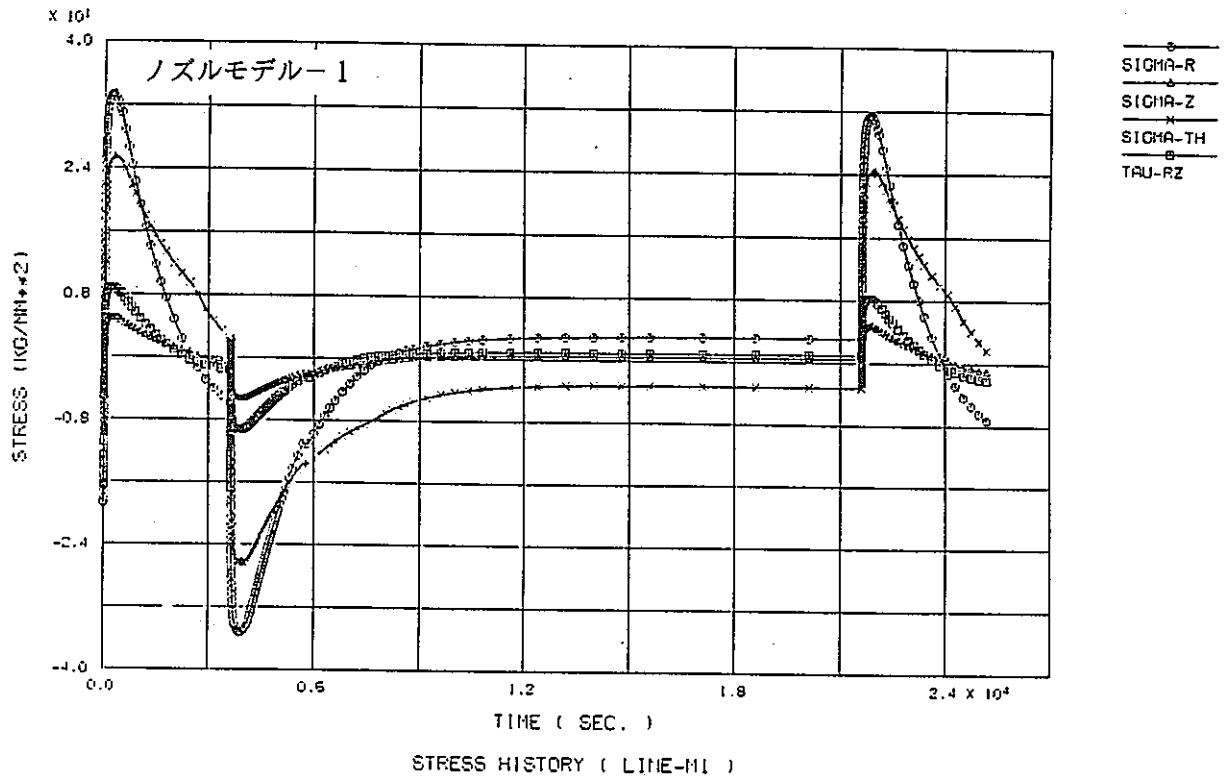


図 B.6 内表面側代表点Fにおける応力、ひずみの時刻歴



FIIAS



FIIAS

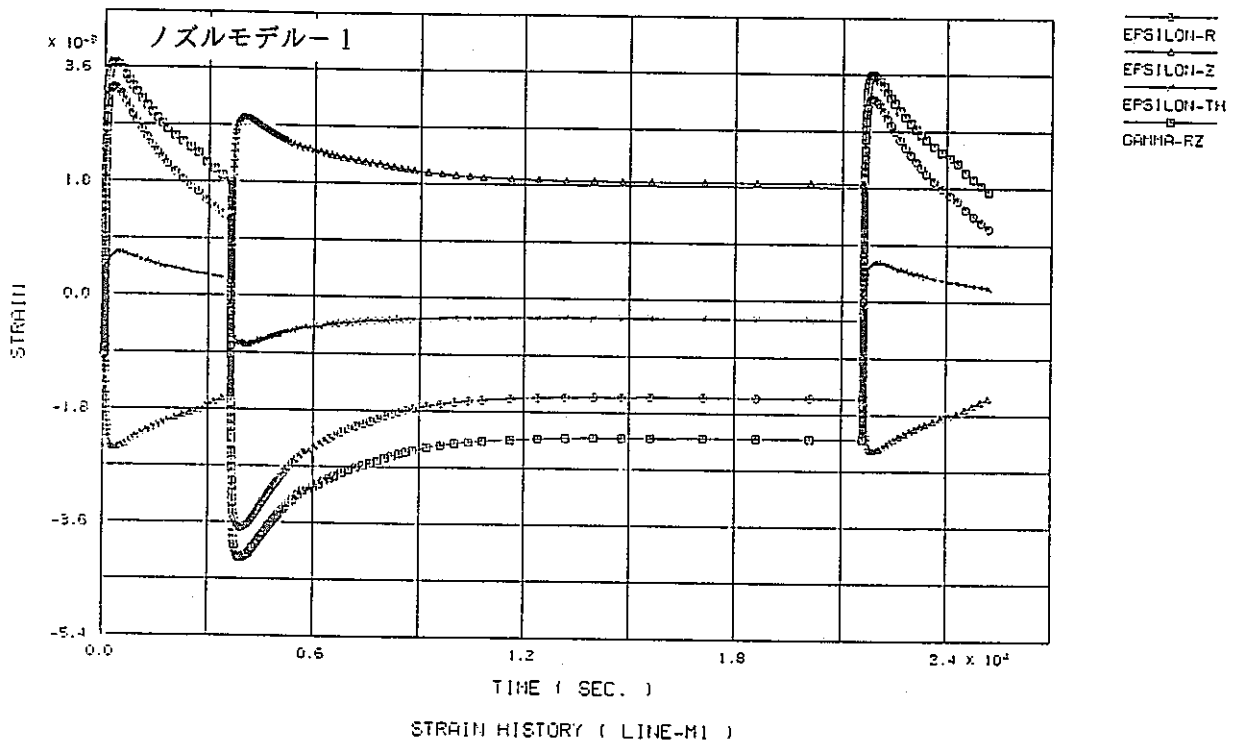
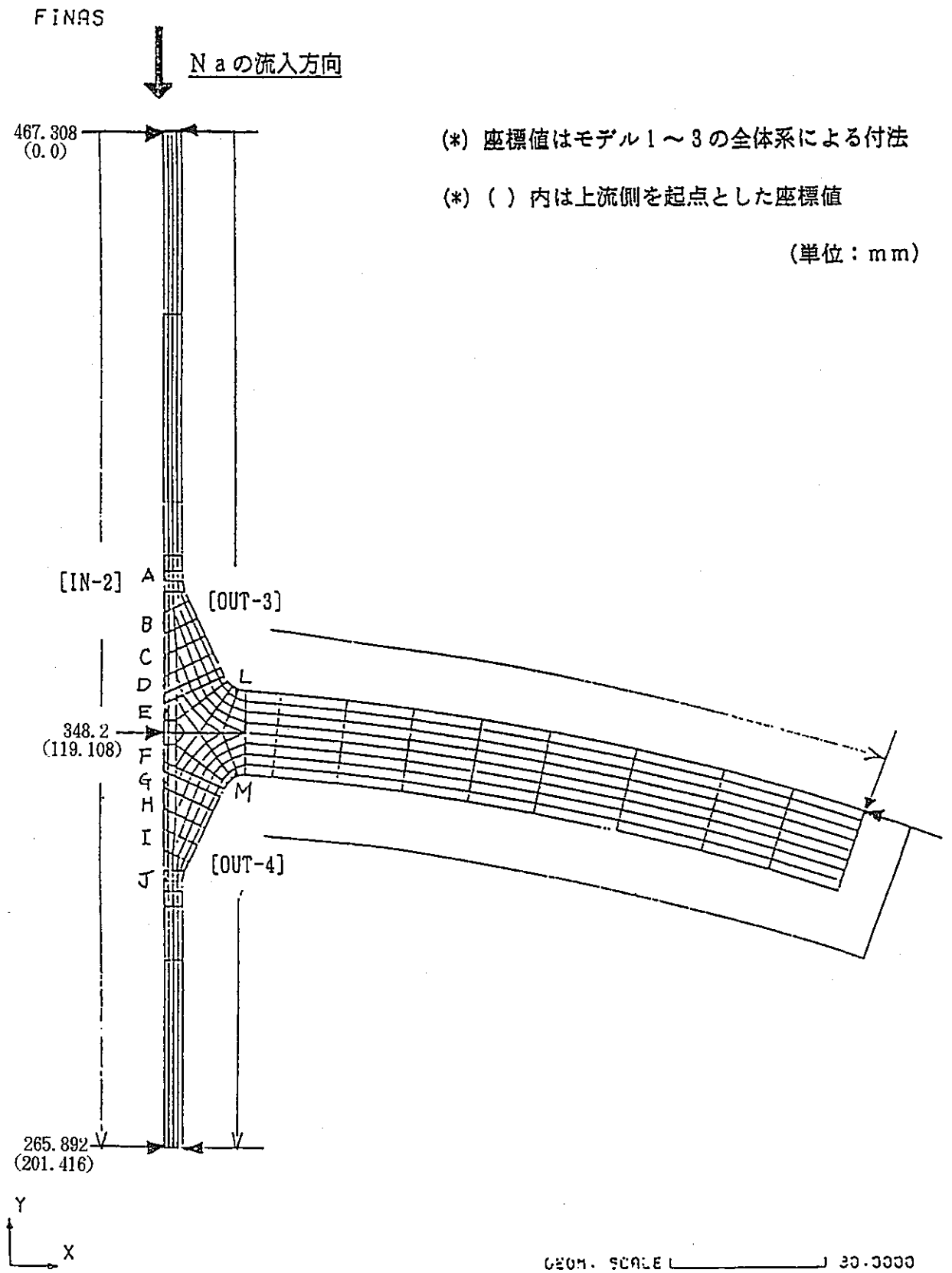


図 B.7 外表面側代表点M-1における応力、ひずみの時刻歴



解析形状の座標及び評価点 (モデル2)

図 B.8 ノズルモデル2の評価点と応力、ひずみ分布の表示範囲

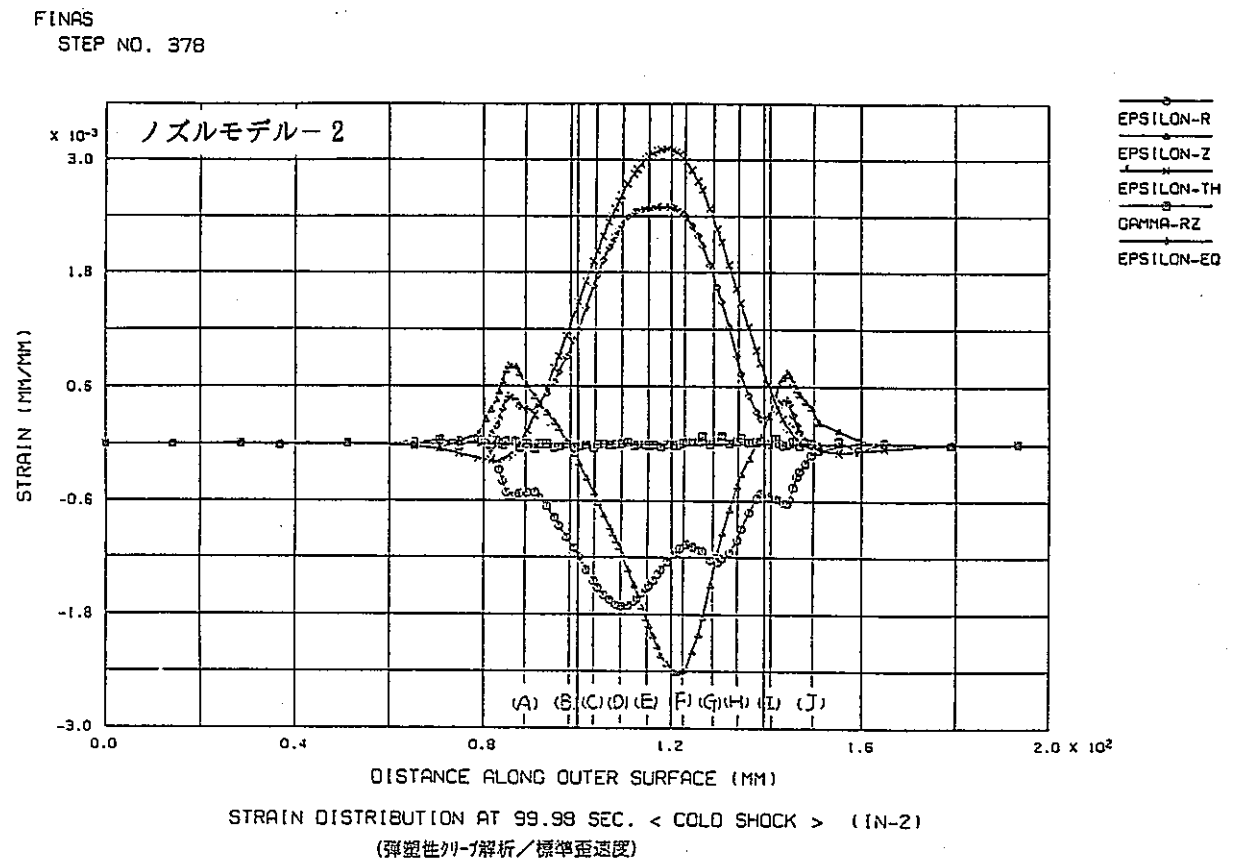
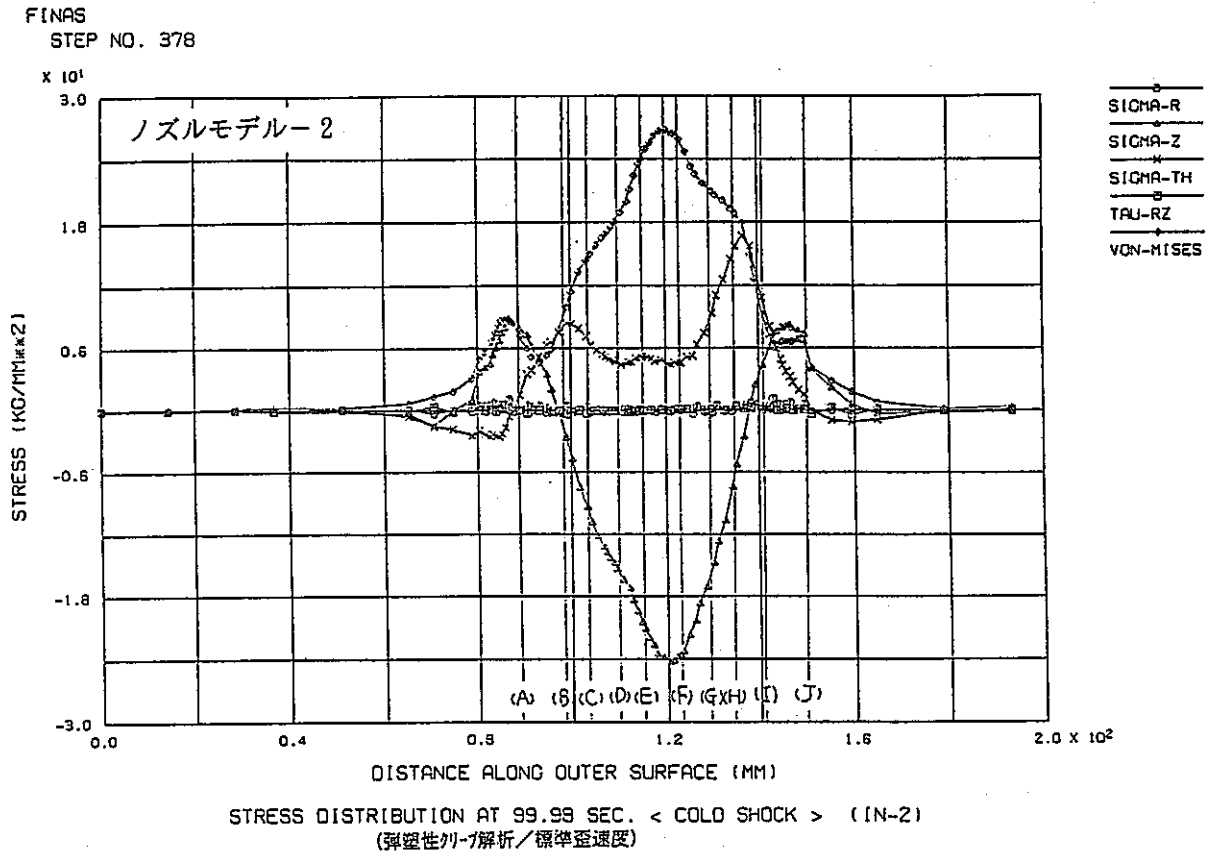


図 B.9 ライン IN-2 (内面) に沿った応力、ひずみの分布 (低温熱過渡時)

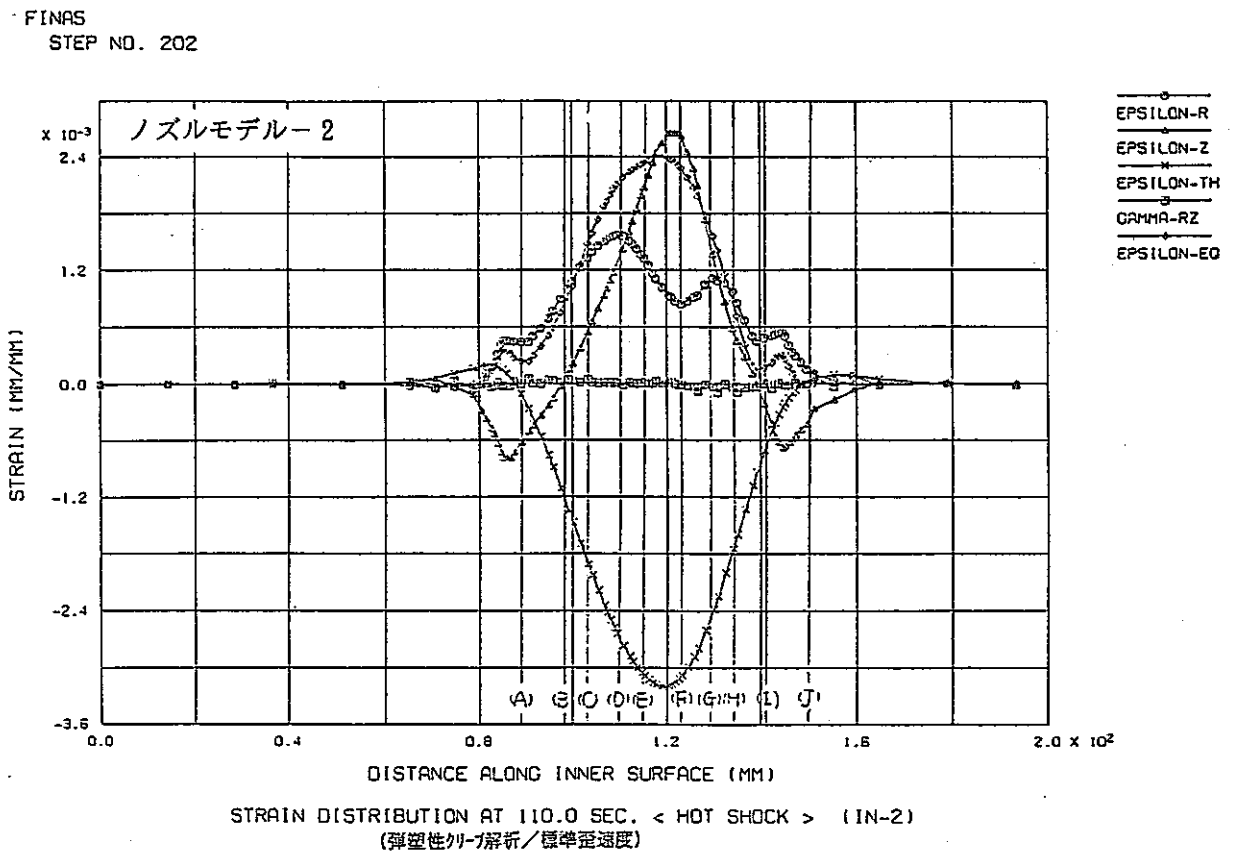
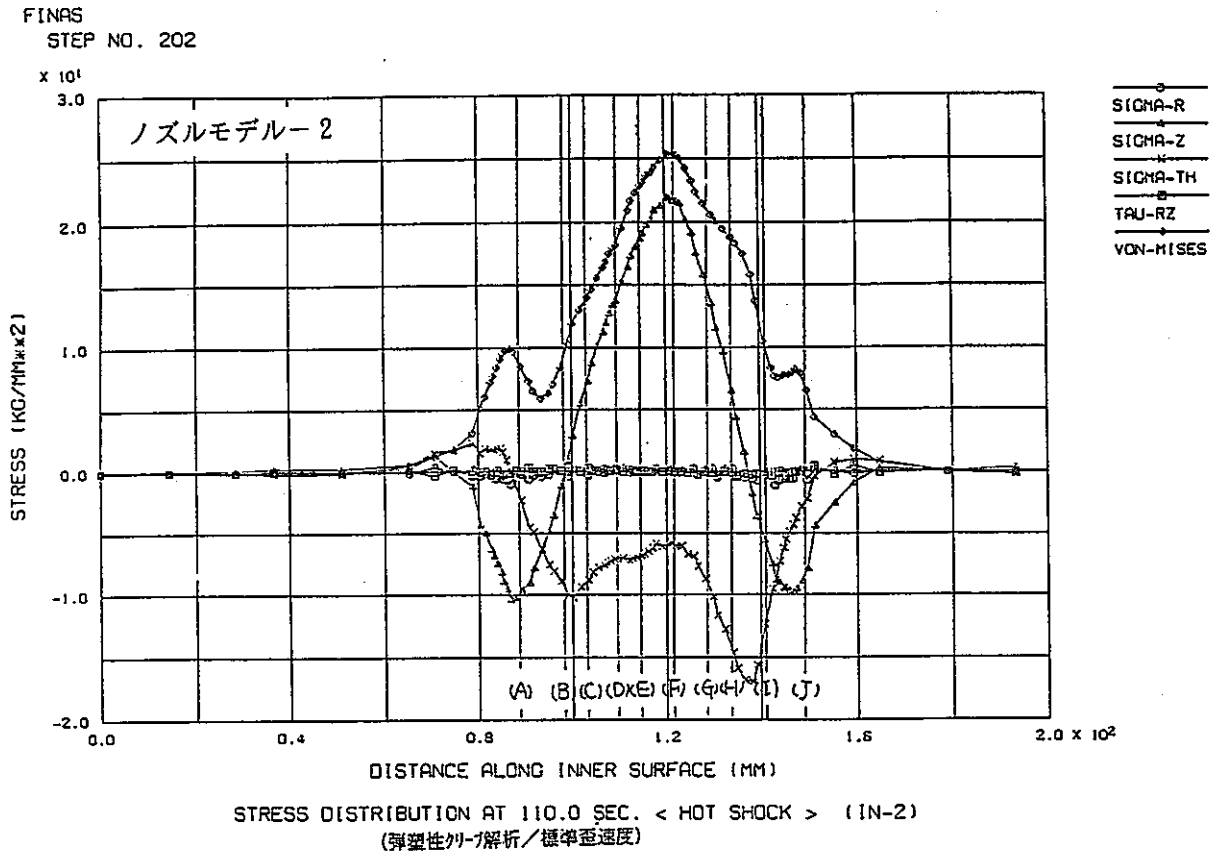
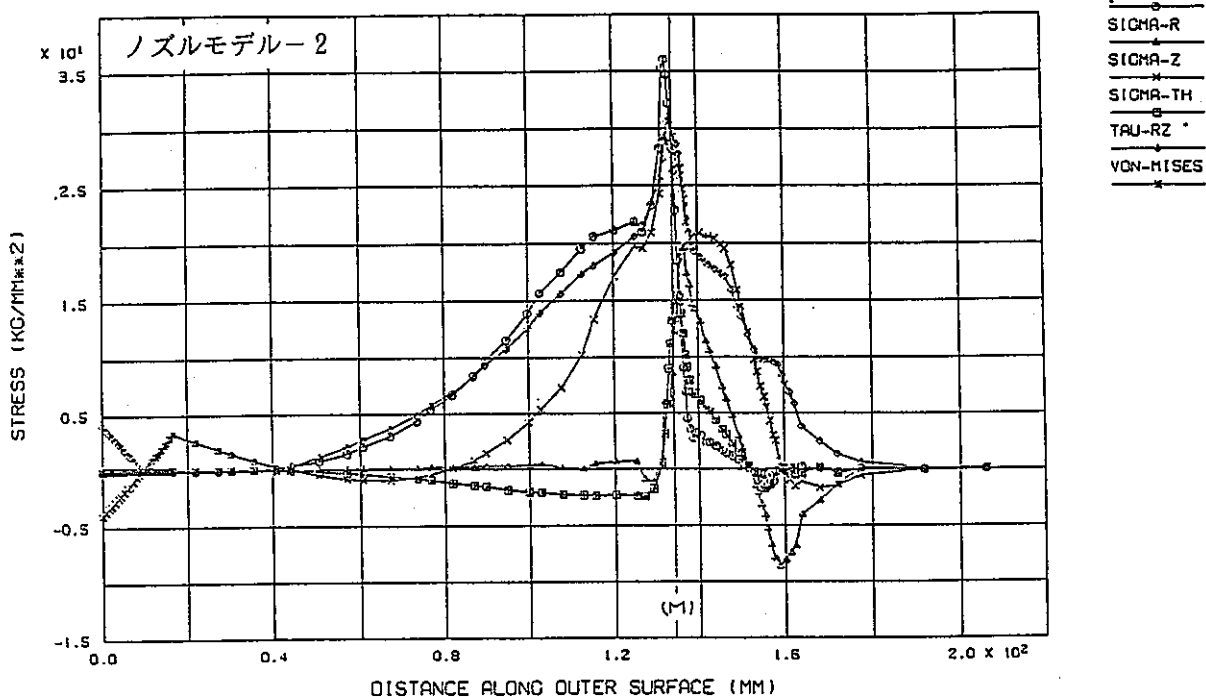


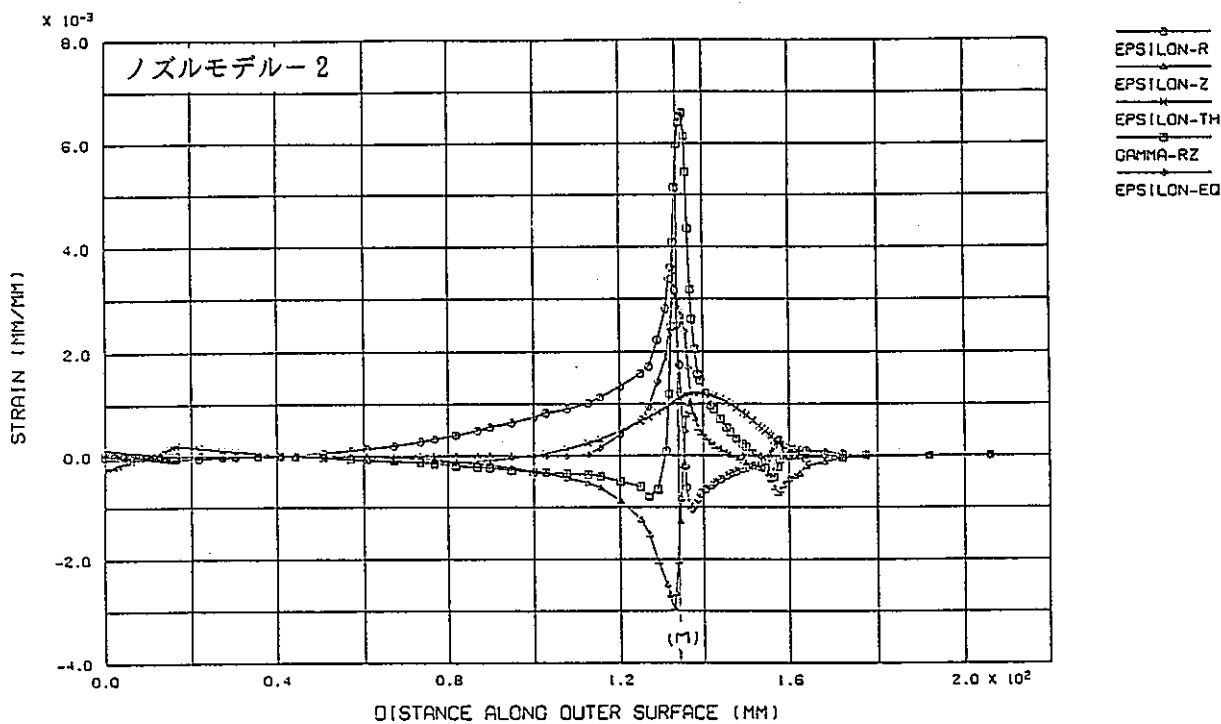
図 B.10 ライン IN-2 (内面) に沿った応力、ひずみの分布 (高温熱過渡時)

FINAS  
STEP NO. 388



STRESS DISTRIBUTION AT 349.98 SEC. < COLD SHOCK > (OUT-4)  
(弾塑性有限要素解析/標準亞速度)

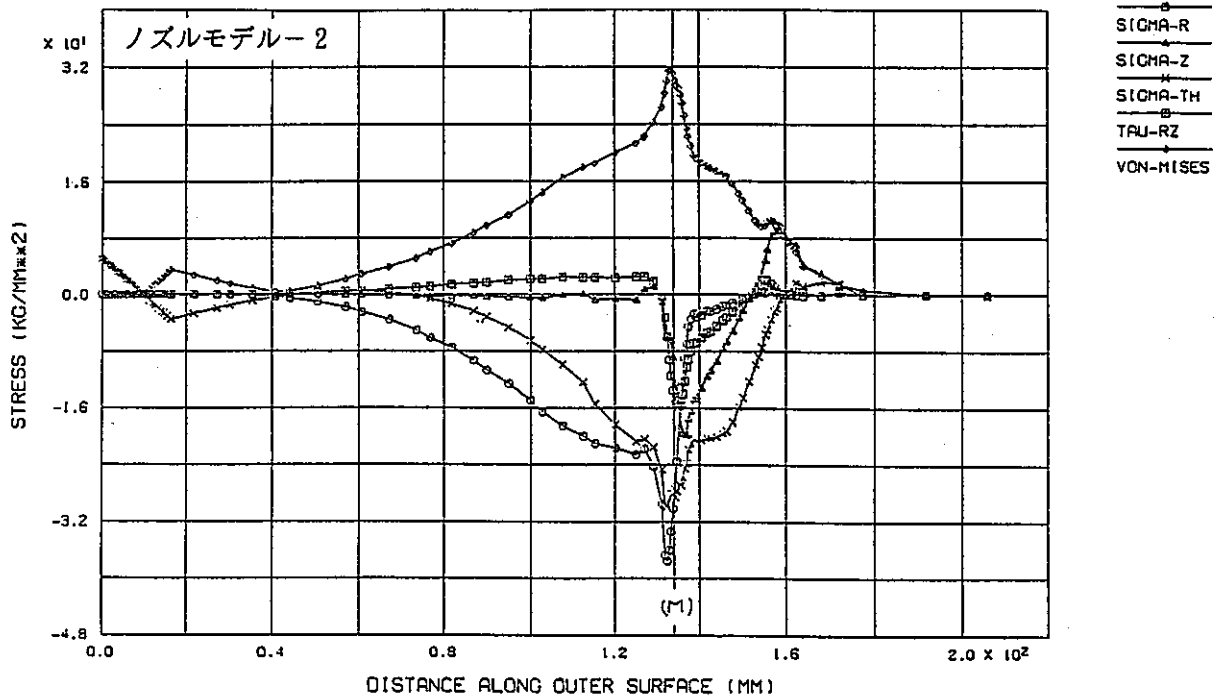
FINAS  
STEP NO. 388



STRAIN DISTRIBUTION AT 349.98 SEC. < COLD SHOCK > (OUT-4)  
(弾塑性有限要素解析/標準亞速度)

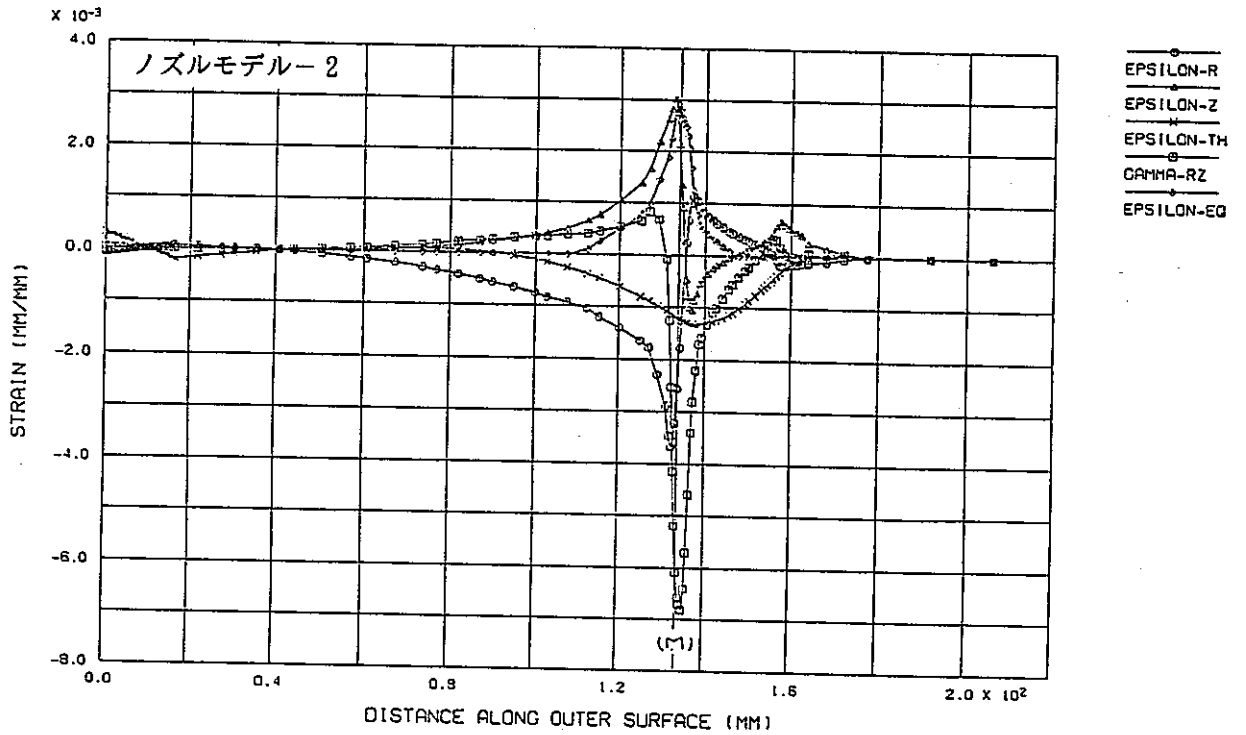
図 B.11 ライン OUT-4 (外面) に沿った応力、ひずみの分布 (低温熱過渡時)

FINAS  
STEP NO. 218



STRESS DISTRIBUTION AT 425.0 SEC. < HOT SHOCK > (OUT-4)  
(弾塑性クリープ解析/標準歪速度)

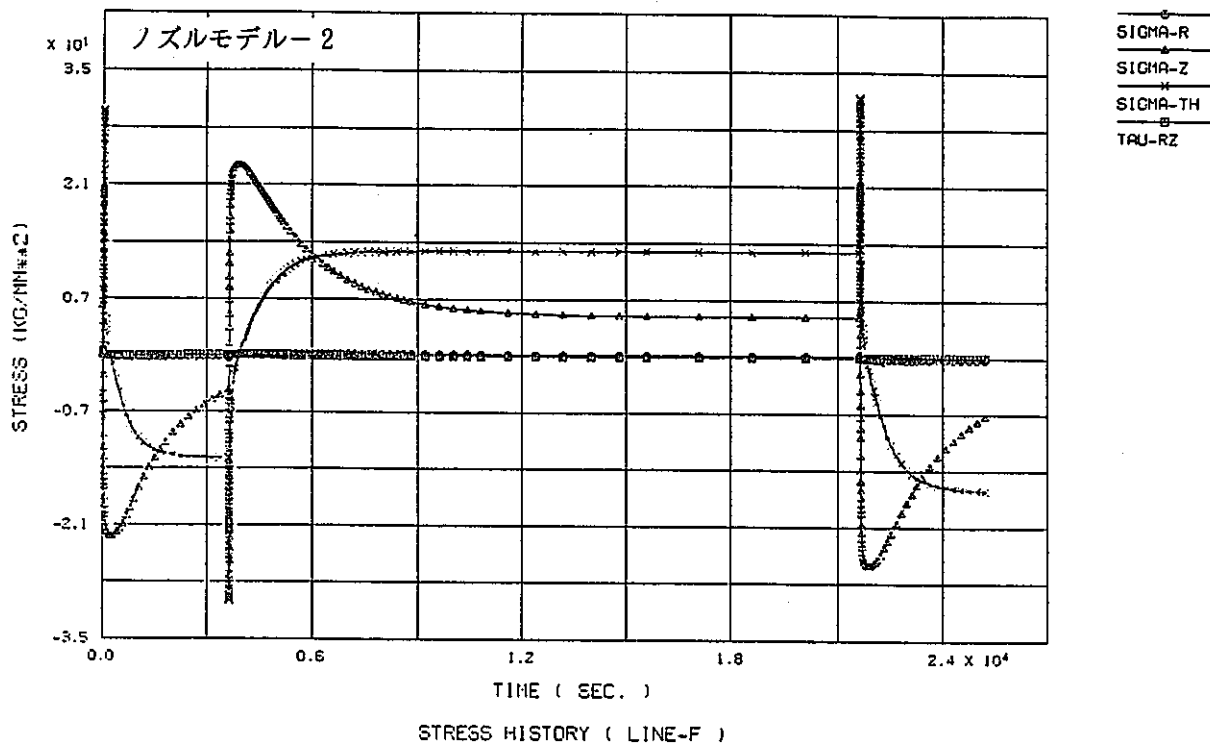
FINAS  
STEP NO. 218



STRAIN DISTRIBUTION AT 425.0 SEC. < HOT SHOCK > (OUT-4)  
(弾塑性クリープ解析/標準歪速度)

図 B.12 ライン OUT-4 (外面) に沿った応力、ひずみの分布 (高温熱過渡時)

FINAS



FINAS

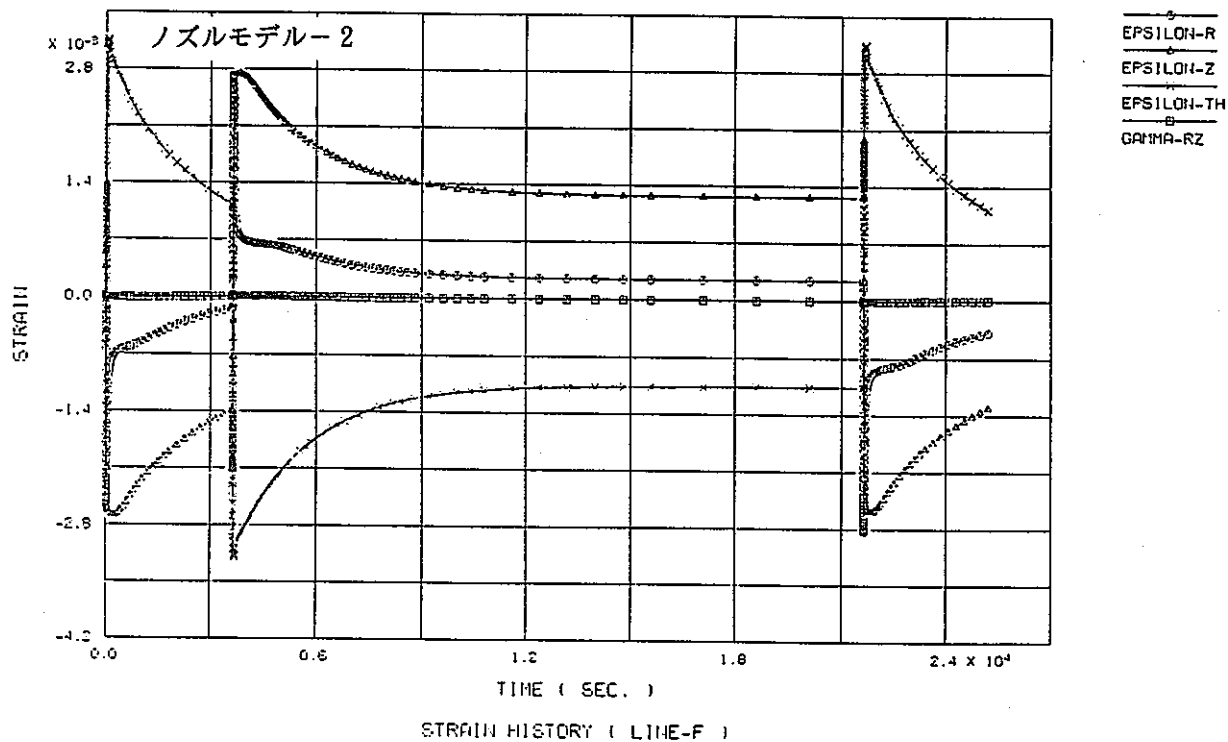


図 B.13 内表面側代表点Fにおける応力、ひずみの時刻歴

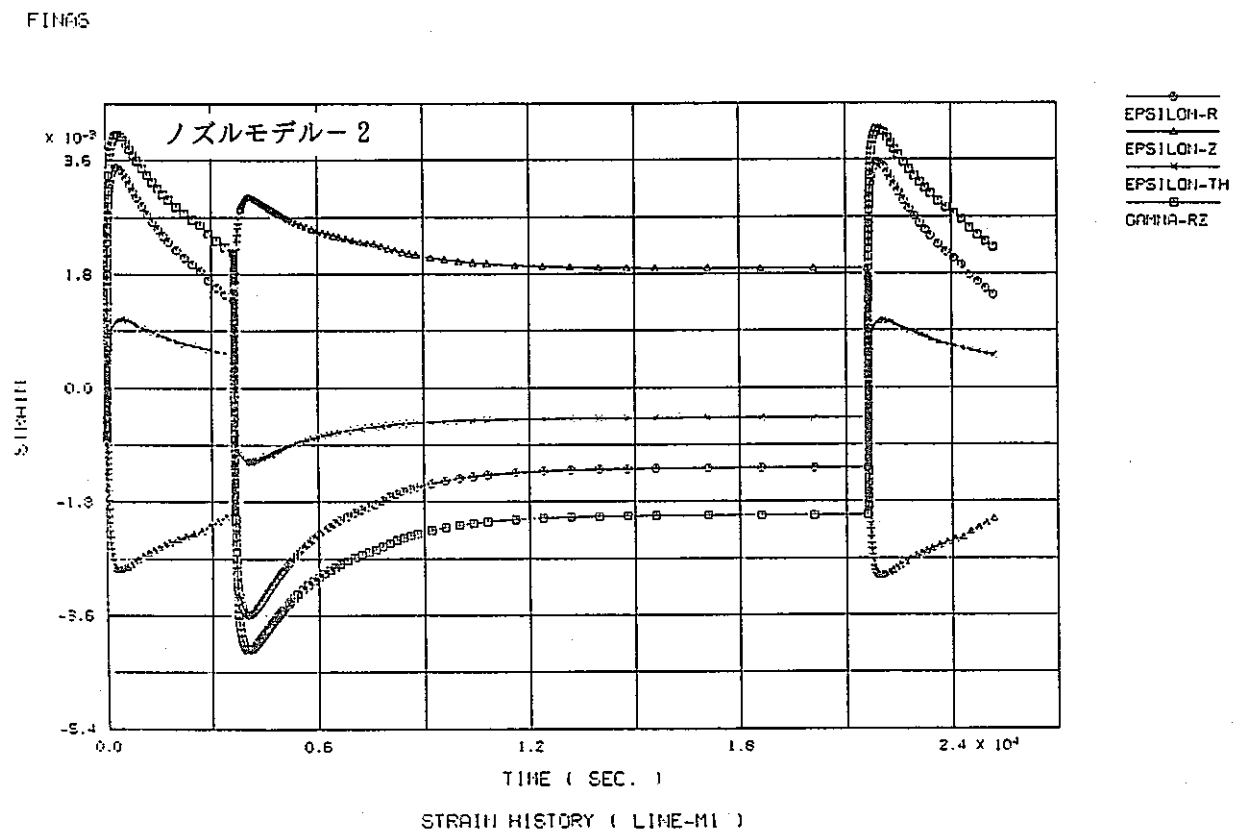
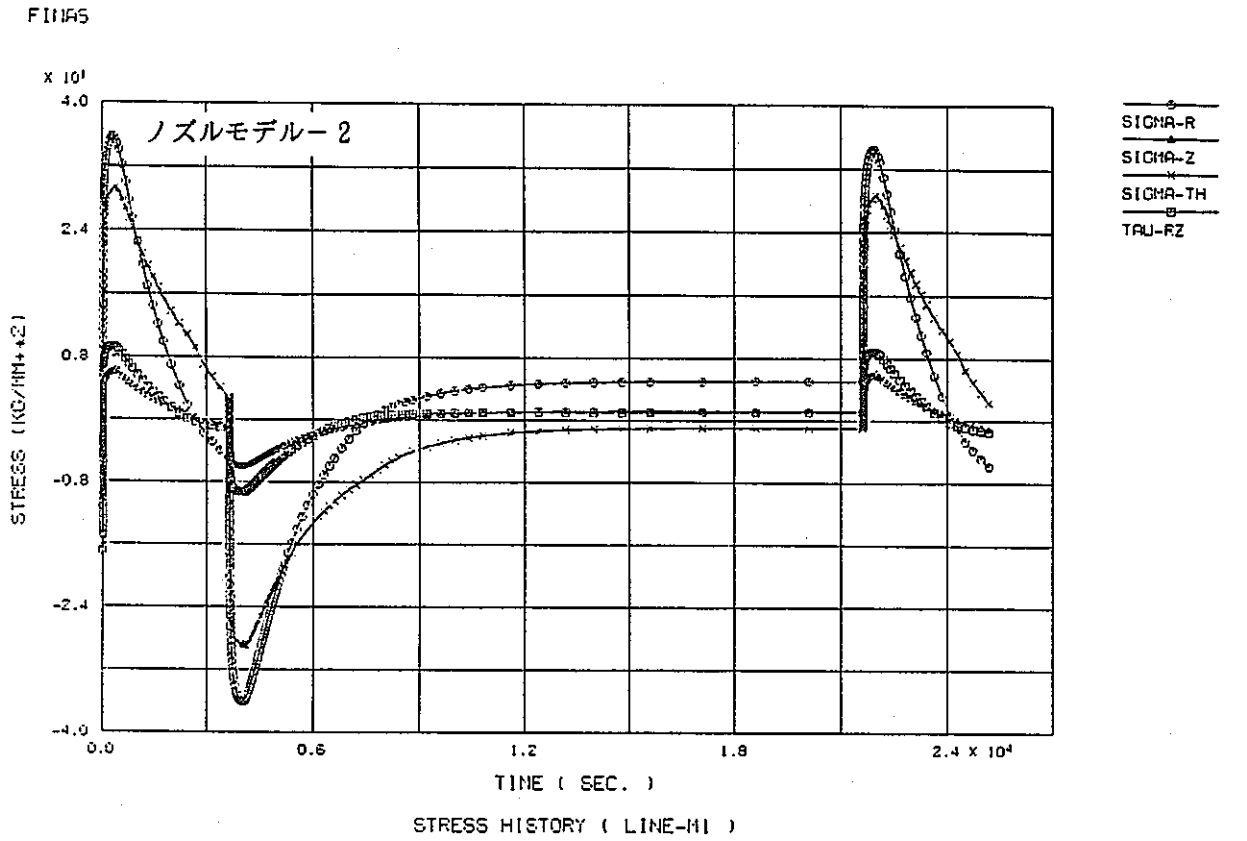


図 B.14 外表面側代表点M-1における応力、ひずみの時刻歴



FINAS

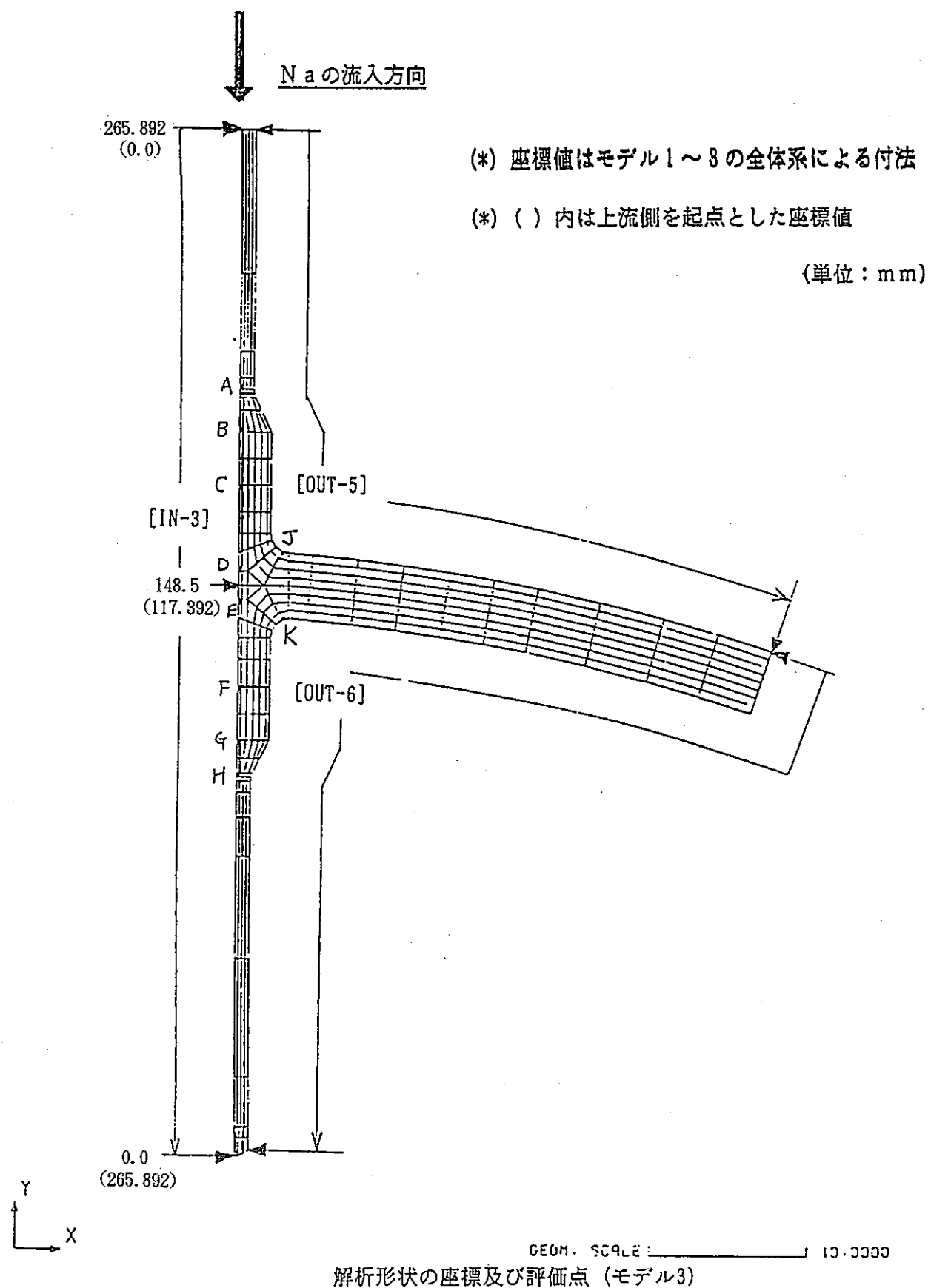
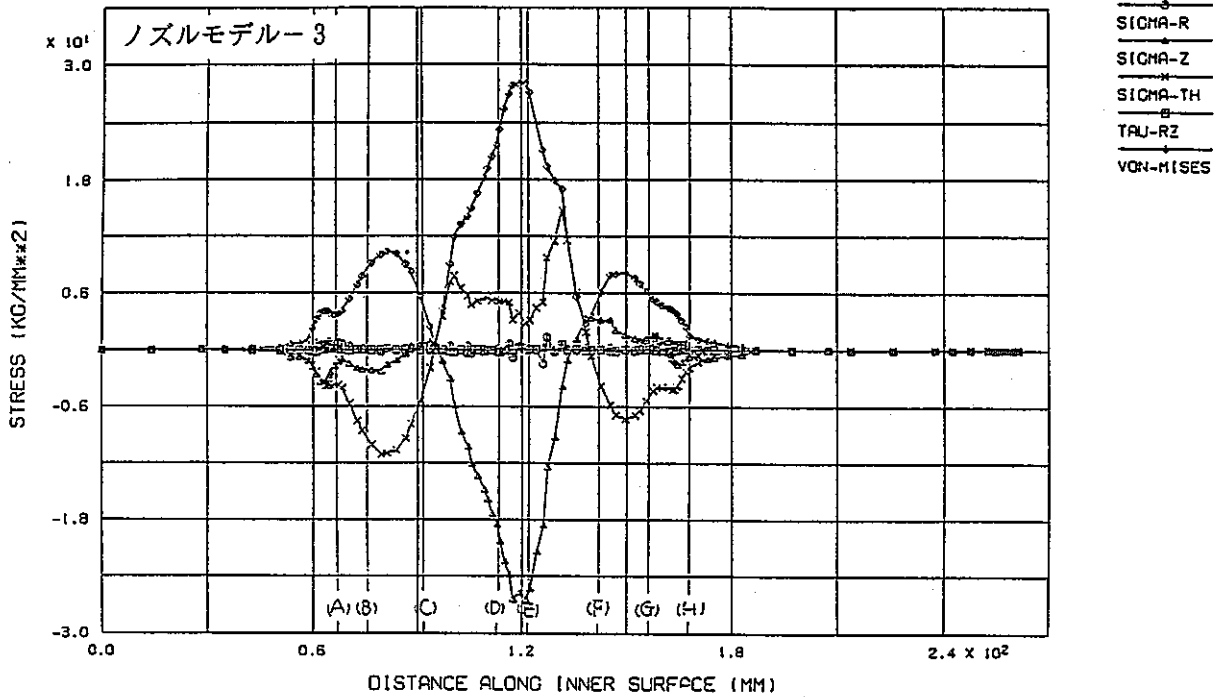


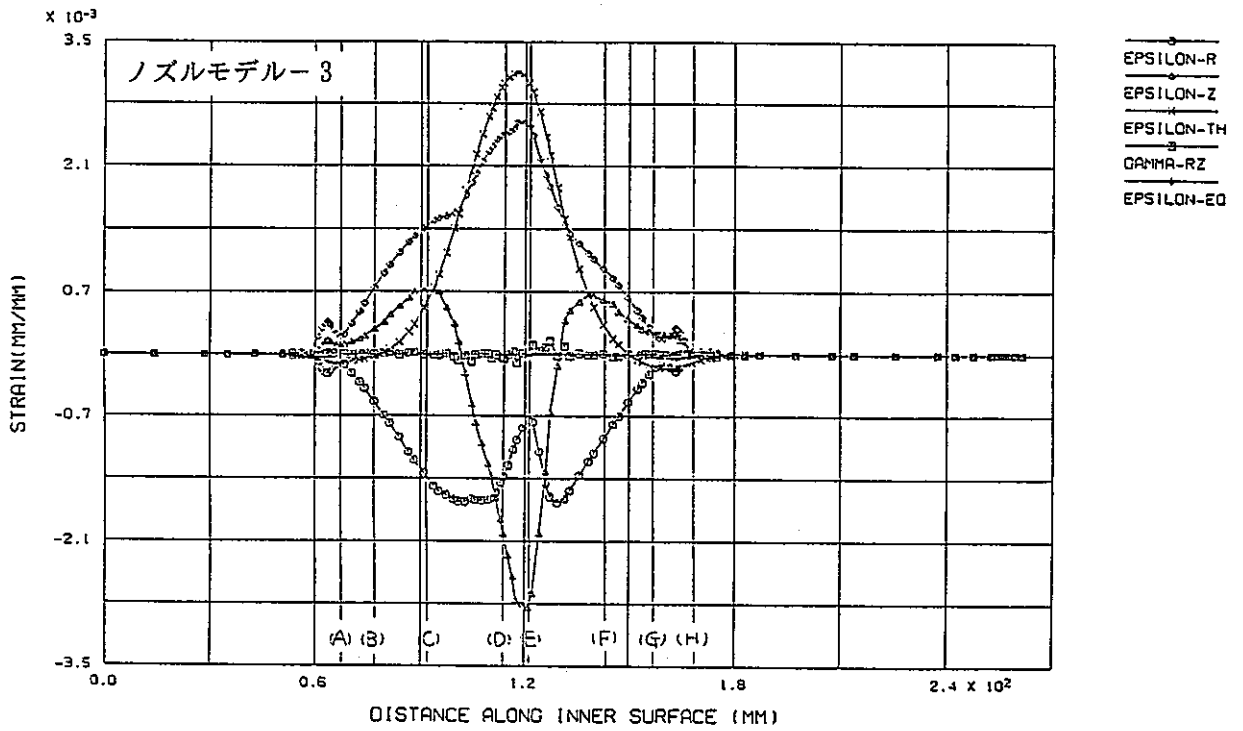
図 B.15 ノズルモデル3の評価点と応力、ひずみ分布の表示範囲

FINAS  
STEP NO. 379



STRESS DISTRIBUTION AT 109.98 SEC. < COLD SHOCK > (IN-3)  
(弾塑性有限要素解析/標準室温)

FINAS  
STEP NO. 379



STRAIN DISTRIBUTION AT 109.98 SEC. < COLD SHOCK > (IN-3)  
(弾塑性有限要素解析/標準室温)

図 B.16 ライン IN-3 (内面) に沿った応力、ひずみの分布 (低温熱過渡時)

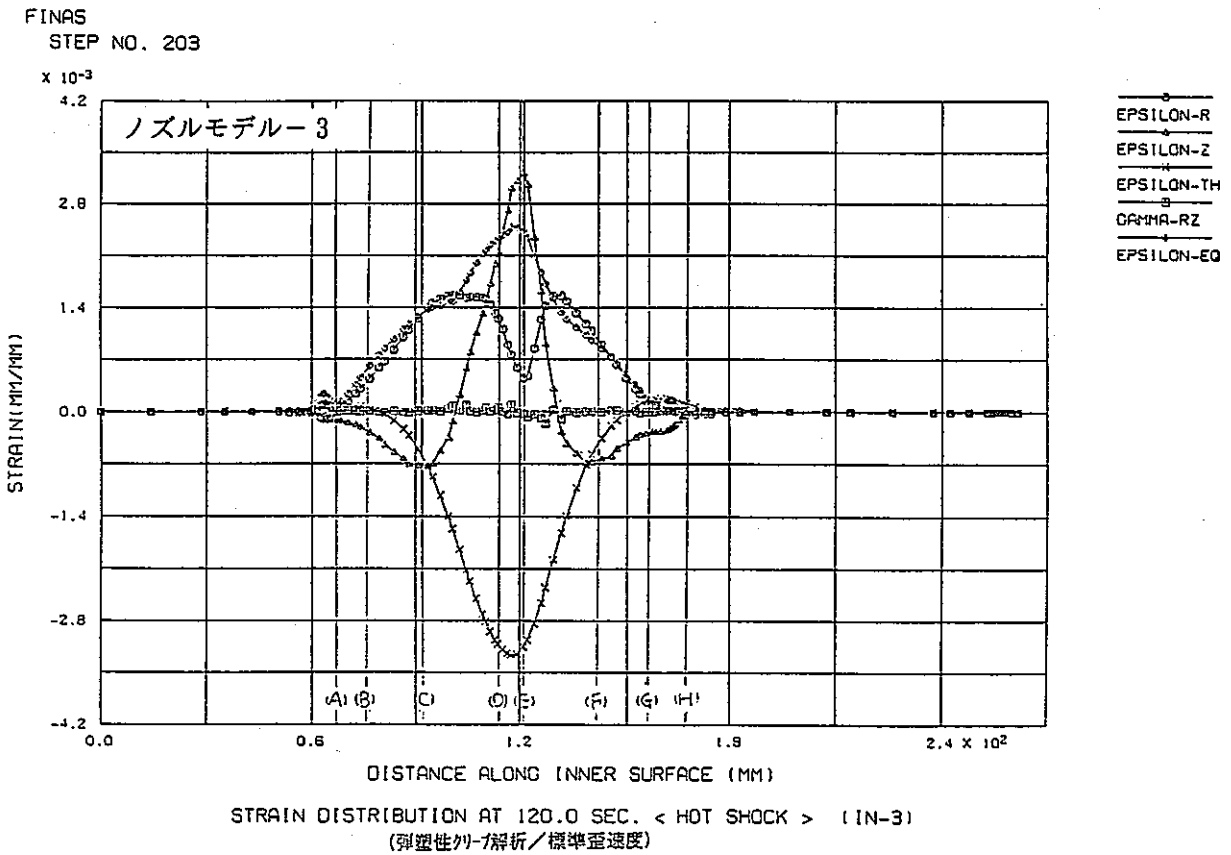
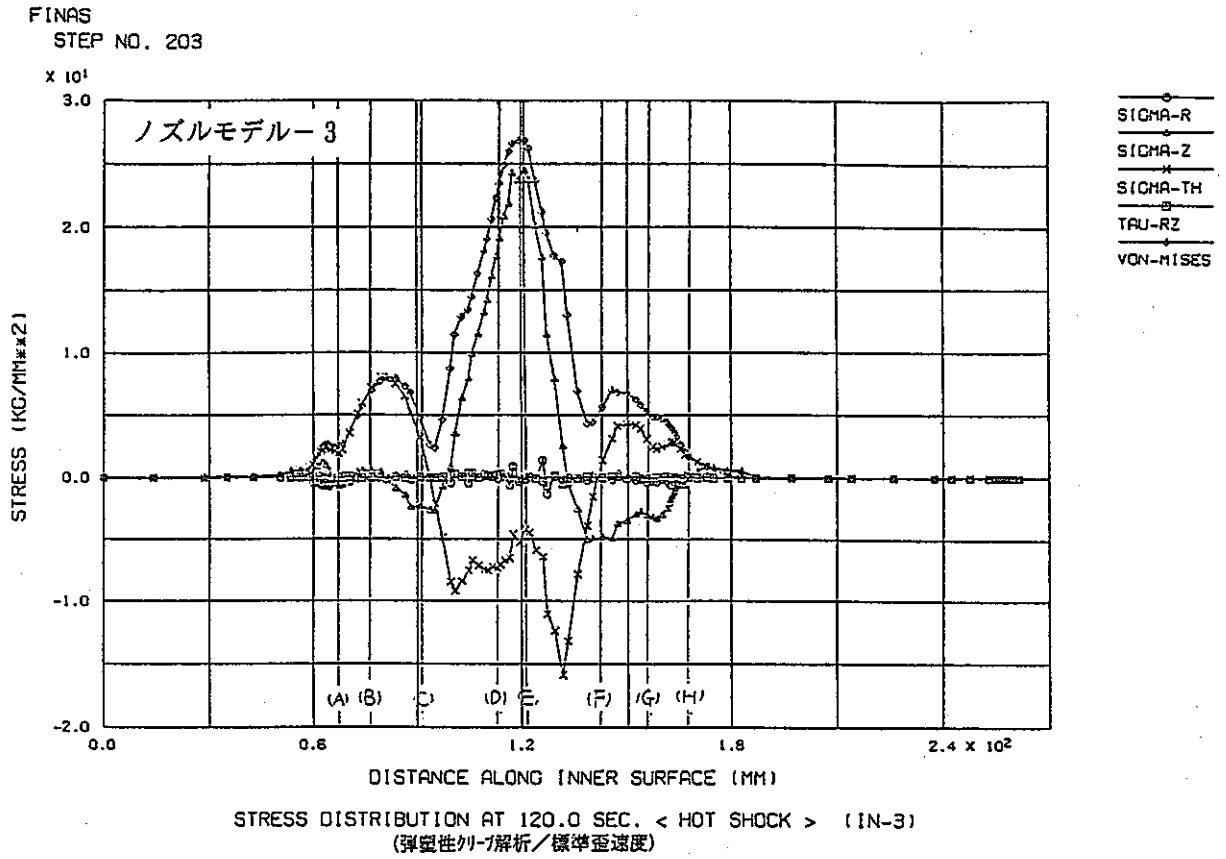
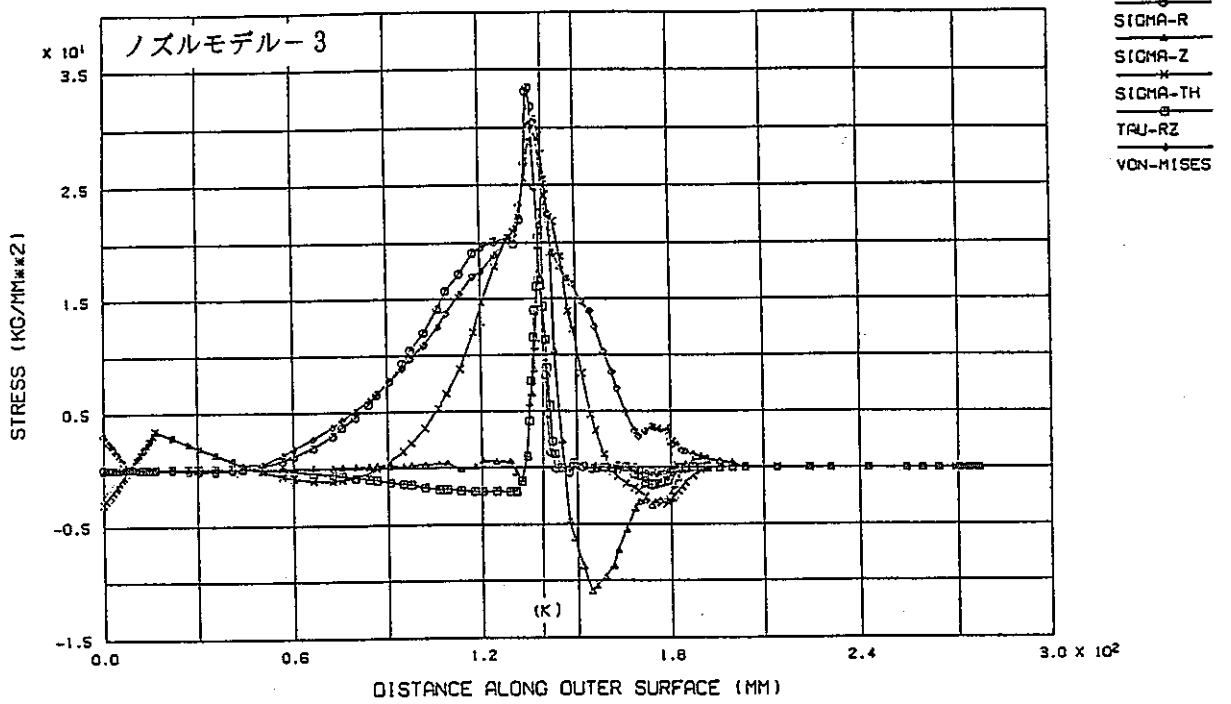


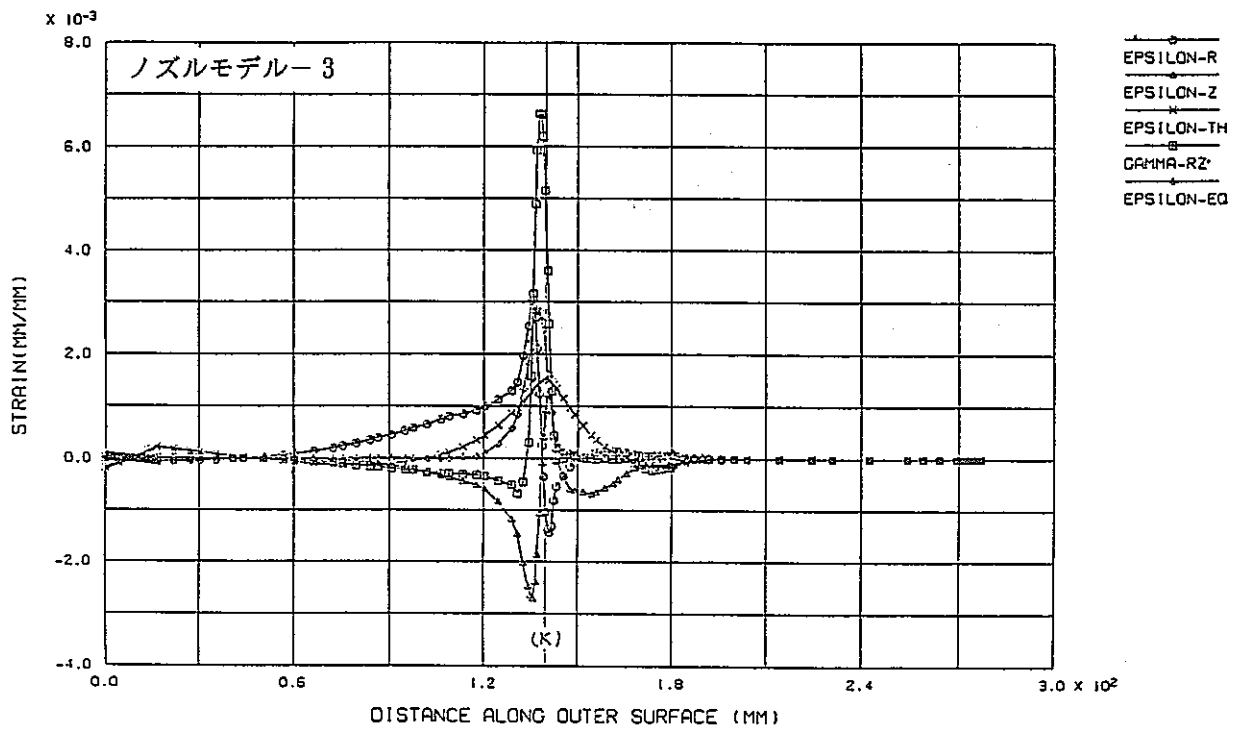
図 B.17 ライン IN-3 (内面) に沿った応力、ひずみの分布 (高温熱過渡時)

FINAS  
STEP NO. 387



STRESS DISTRIBUTION AT 299.98 SEC. < COLD SHOCK > (OUT-6)  
(弾塑性有限要素解析/標準空速時)

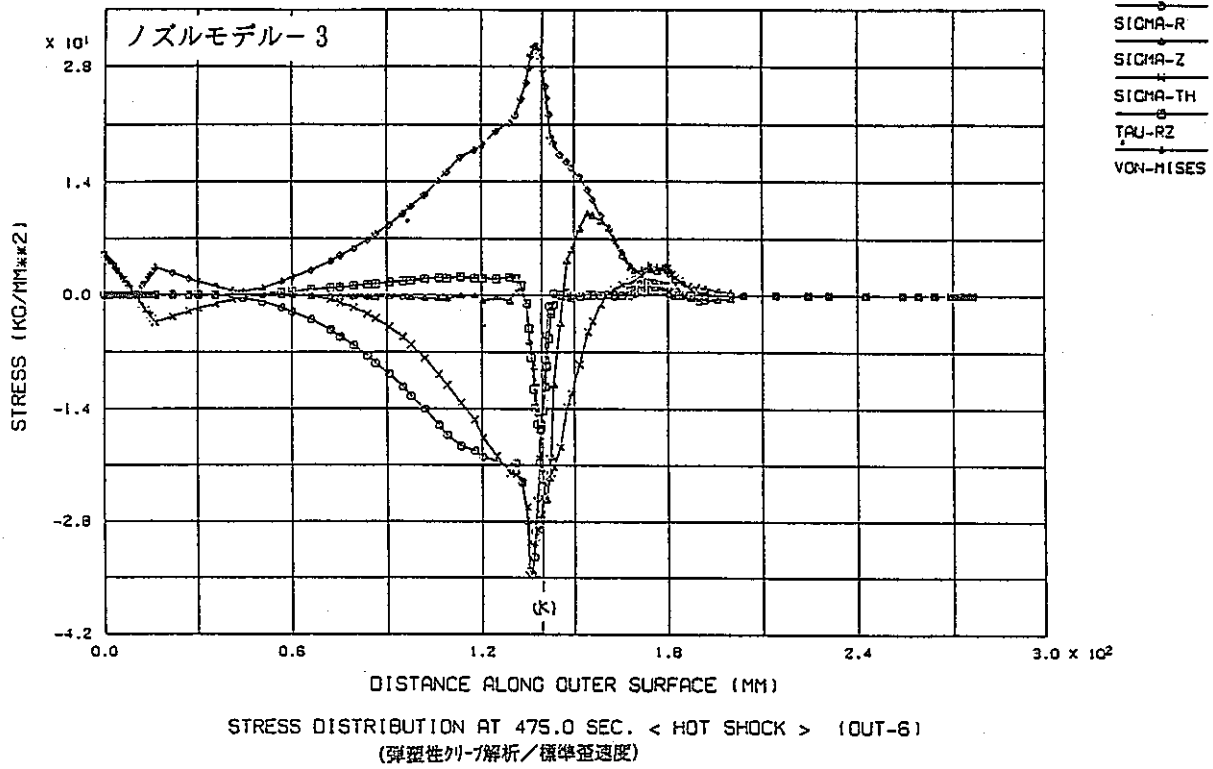
FINAS  
STEP NO. 387



STRAIN DISTRIBUTION AT 299.98 SEC. < COLD SHOCK > (OUT-6)  
(弾塑性有限要素解析/標準空速時)

図 B.18 ライン OUT-6 (外面) に沿った応力、ひずみの分布 (低温熱過渡時)

FINAS  
STEP NO. 220



FINAS  
STEP NO. 220

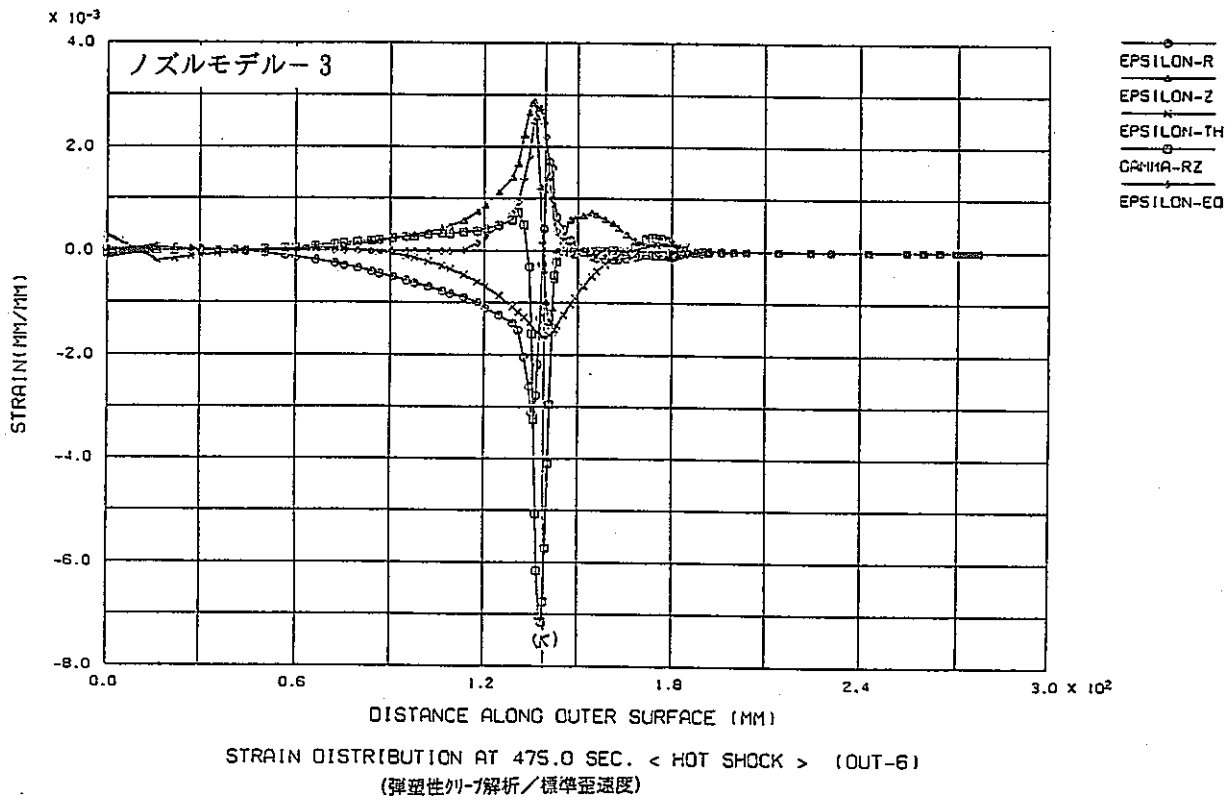


図 B.19 ライン OUT-6 (外面) に沿った応力、ひずみの分布 (高温熱過渡時)

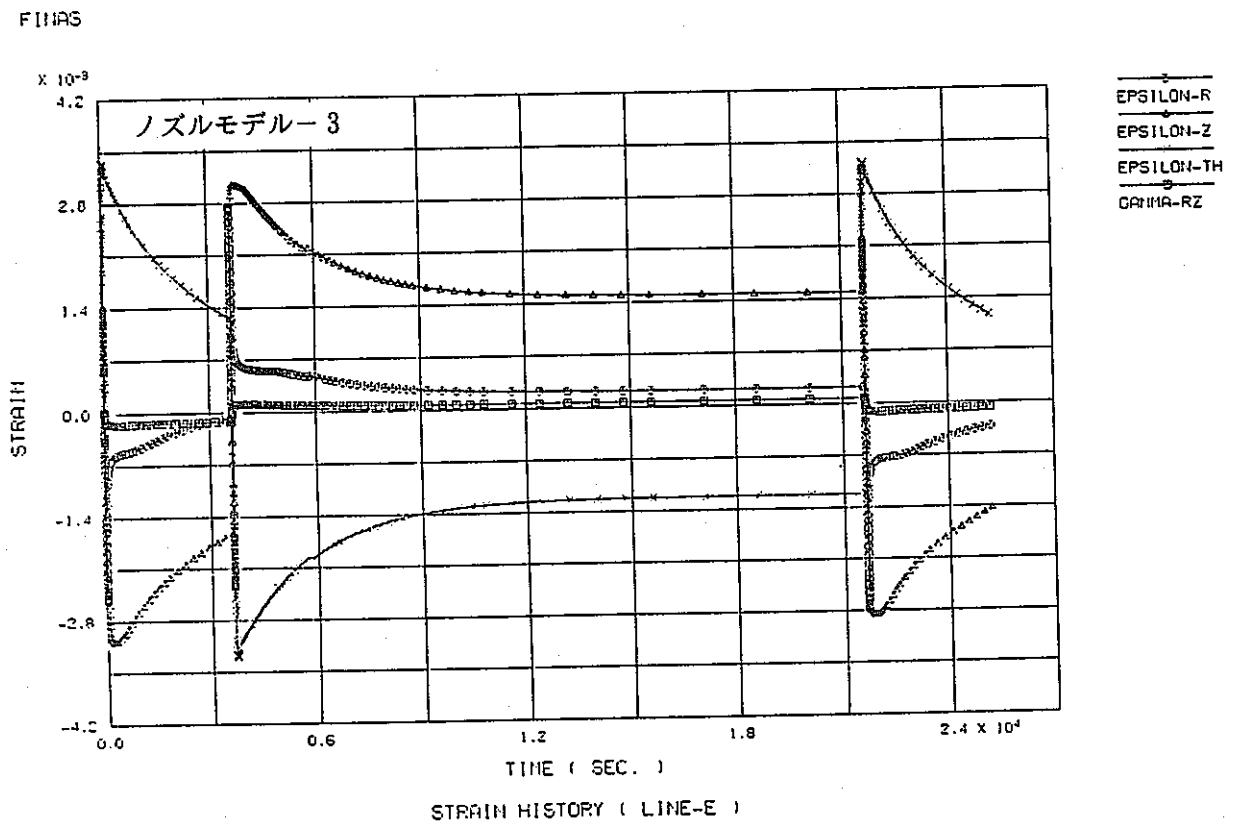
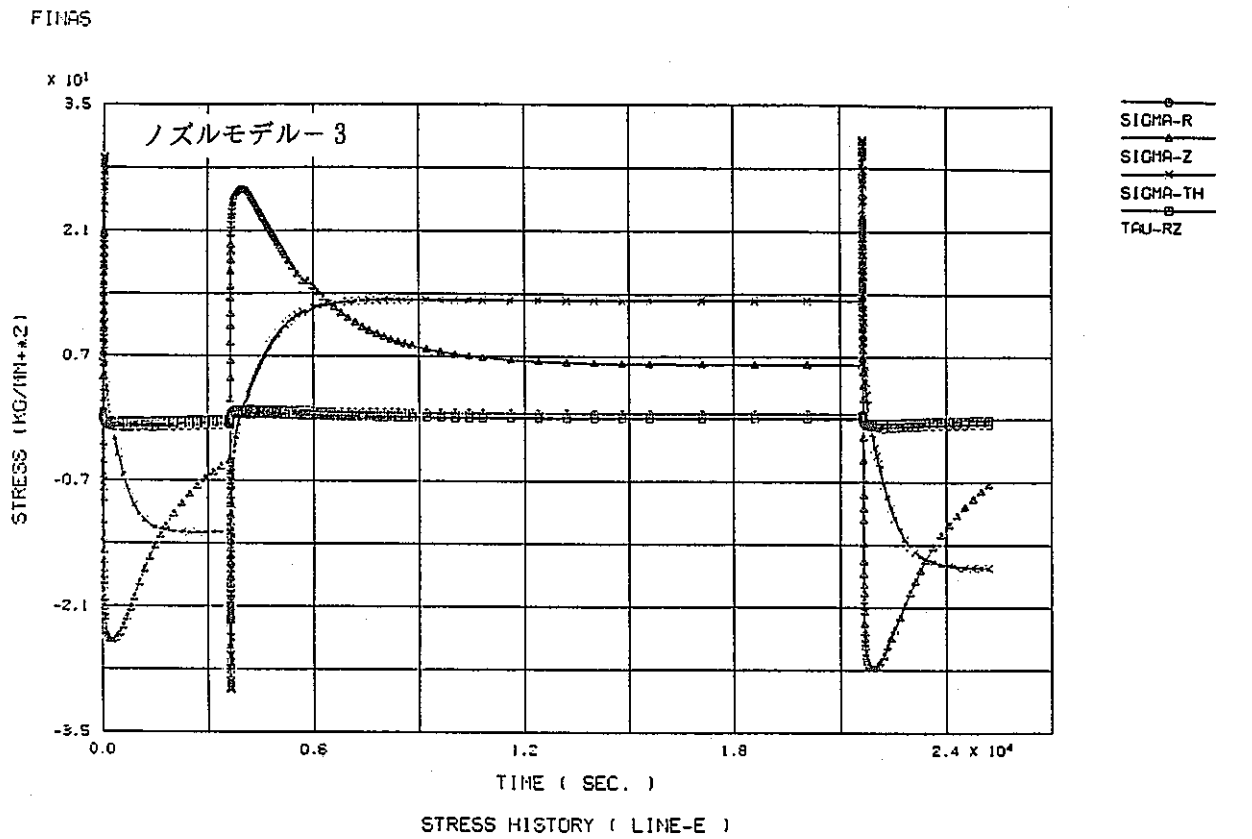
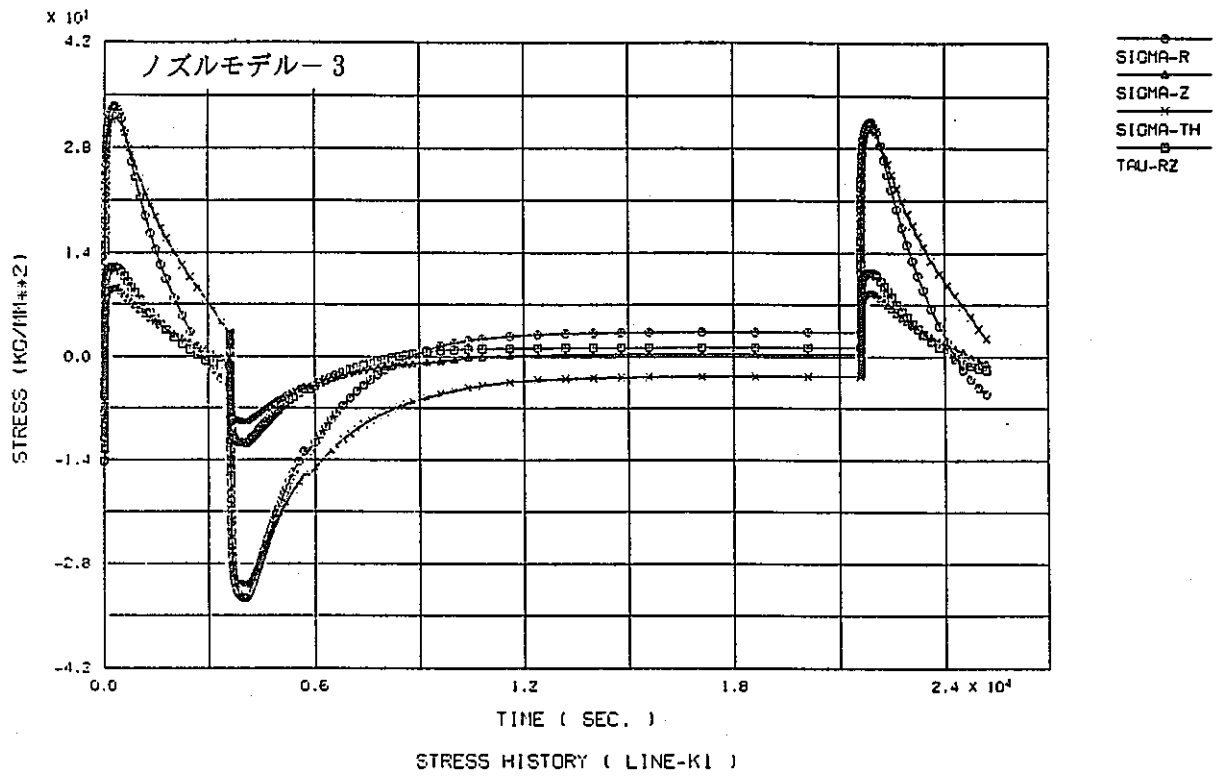


図 B. 20 内表面側代表点Eにおける応力、ひずみの時刻歴

FINAS



FINAS

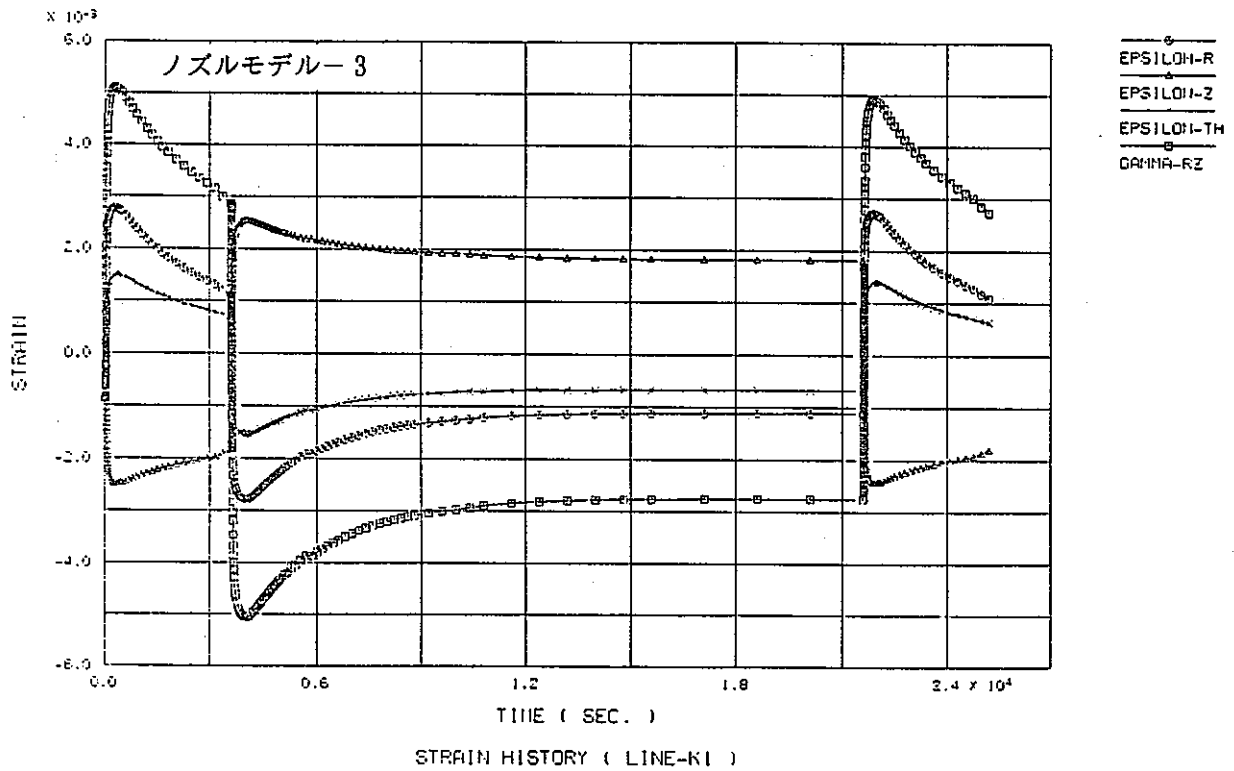


図 B.21 外表面側代表点K-1における応力、ひずみの時刻歴

付録 C 供試体素材の材料試験結果（中間結果）

付録Cとして供試体素材の高温における材料強度確認のため実施している低サイクル疲労試験結果（3点）とクリープ破断試験結果（1点）を示した。これらのデータは動的応力-ひずみ曲線、疲労破損寿命、クリープ破断時間のいずれも材料強度基準のSUS304鋼の平均的な値とほぼ等しい結果となっており、本試験供試体のクリープ疲労強度評価には上記材料強度基準の平均特性値を使用できることが確認されつつある。

図 C.1 550℃における低サイクル疲労試験の結果（疲労破損寿命）

図 C.2 550℃における低サイクル疲労試験の結果（動的応力-ひずみ曲線）

図 C.3 550℃におけるクリープ破断試験の結果（クリープ破断時間）



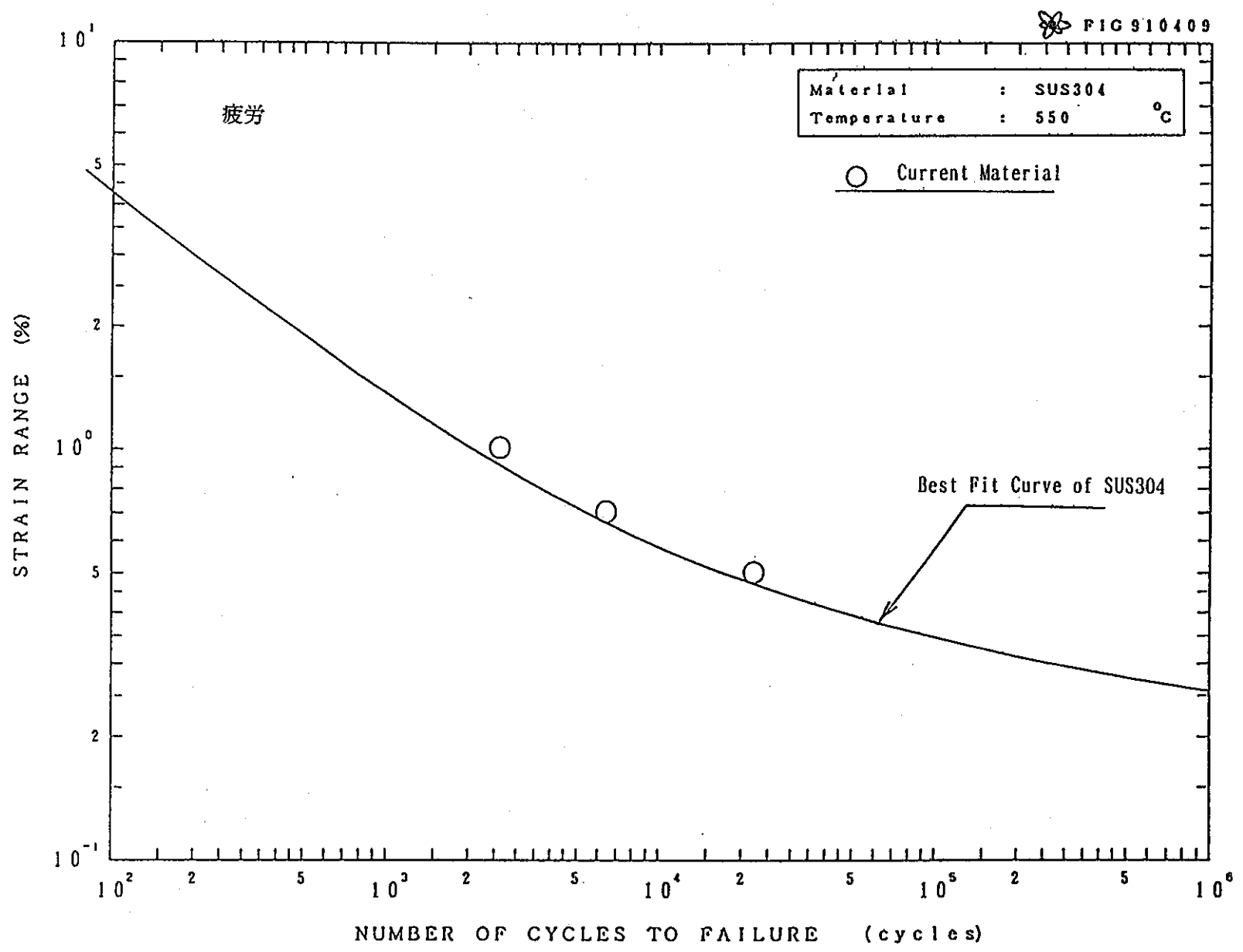


図 C.1 550°Cにおける低サイクル疲労試験の結果 (疲労破損寿命)

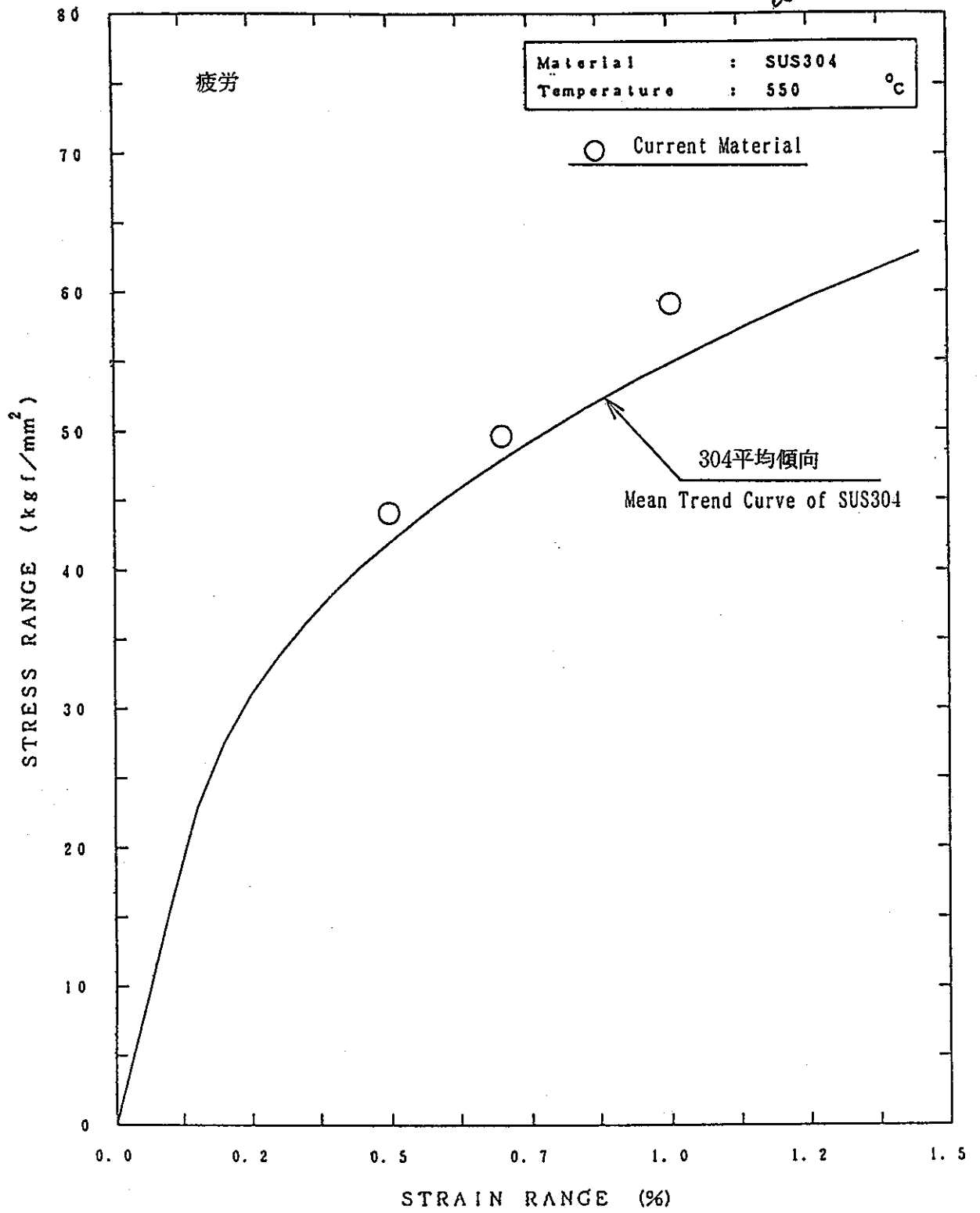


図 C.2 550°Cにおける低サイクル疲労試験の結果（動的応力-ひずみ曲線） 04

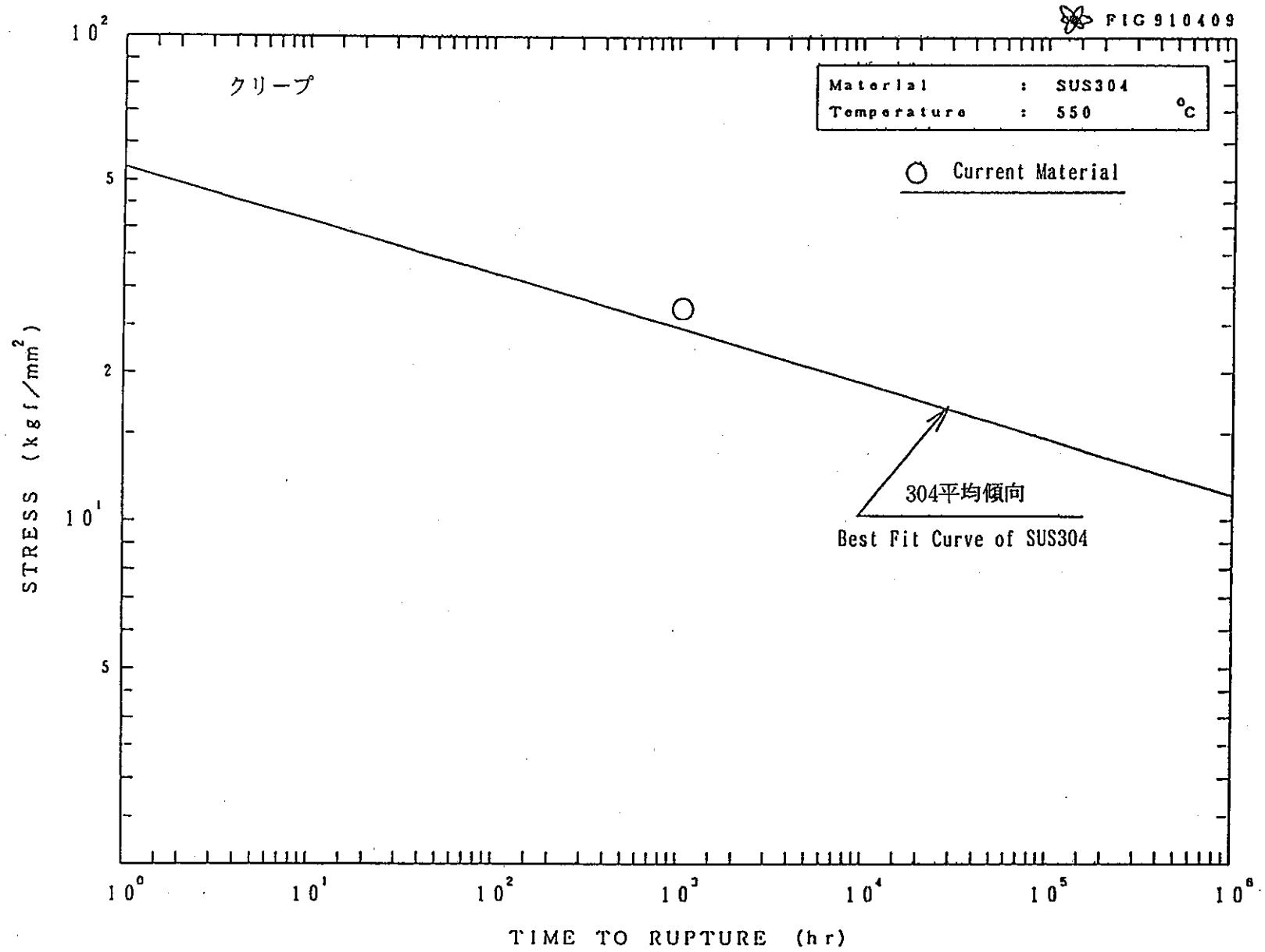


図 C.3 550°Cにおけるクリープ破断試験の結果 (クリープ破断時間)

付録 D 弾塑性解析（クリープ解析無し）の結果およびクリープ疲労損傷評価結果

付録Dとして、5.1 節で検討したクリープ解析を実施しない、すなわち弾塑性解析のみの条件による解析の結果とこれに基づくクリープ疲労損傷評価結果を示す。

表 D.1～表 D.3に3種類のノズル形状モデルの各評価点でのひずみ範囲を、また表 D.4～表 D.6には第4章と同じ「間接法」（TTSDSと呼ぶ）によるクリープ疲労損傷評価結果を示す。図 D.1～図 D.2はひずみ範囲と損傷値をグラフ化したものである。

表 D.1 ノズルモデル1の弾塑性解析結果

表 D.2 ノズルモデル2の弾塑性解析結果

表 D.3 ノズルモデル3の弾塑性解析結果

表 D.4 ノズルモデル1の「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

表 D.5 ノズルモデル2の「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

表 D.6 ノズルモデル3の「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

図 D.1 ノズルモデル1～3の評価点のひずみ範囲

図 D.2 ノズルモデル1～3の評価点のクリープ疲労損傷値

表 D.1 ノズルモデル1の弾塑性解析結果

MODEL-1の評価点の歪み範囲及び歪み成分  
(弾塑性解析)

評価点	極値時点	温度	$\Delta \epsilon_{eq}$	$\epsilon_r$	$\epsilon_x$	$\epsilon_\theta$	$\gamma_{rz}$
A	th 30.00	468.3	0.3334	0.1156	-0.1528	-0.0570	0.0005
	tc 28.74	408.0		-0.1362	0.1602	0.0777	-0.0006
B	th 30.25	462.2	0.3327	0.1235	-0.0700	-0.1493	-0.0015
	tc 28.87	411.7		-0.1326	0.0793	0.1521	0.0016
C	th 31.75	478.5	0.4825	0.1819	-0.0442	-0.2297	0.0007
	tc 31.99	364.8		-0.1876	0.0440	0.2350	-0.0007
D	th 32.25	481.1	0.5931	0.2276	-0.0403	-0.2781	0.0002
	tc 32.32	362.9		-0.2380	0.0444	0.2826	-0.0008
E	th 34.00	491.7	0.6475	0.1855	0.0379	-0.3051	-0.2337
	tc 32.32	363.3		-0.1886	-0.0080	0.2960	0.2888
F	th 32.75	483.6	0.6567	0.1885	0.0110	-0.2940	0.2785
	tc 32.32	363.5		-0.1915	0.0054	0.2913	-0.3101
G	th 31.75	475.7	0.6086	0.2474	-0.0915	-0.2622	-0.0009
	tc 32.32	363.8		-0.2582	0.0972	0.2663	-0.0011
H	th 31.75	475.6	0.4875	0.1929	-0.0775	-0.2141	-0.0014
	tc 31.99	366.5		-0.2051	0.0911	0.2134	0.0005
I	th 30.25	458.3	0.3114	0.1168	-0.0841	-0.1336	-0.0014
	tc 29.99	392.9		-0.1228	0.0941	0.1311	0.0007
J	th 30.00	462.4	0.3211	0.1132	-0.1570	-0.0497	-0.0001
	tc 29.12	404.9		-0.1207	0.1600	0.0577	0.0000
L	th 38.50	343.7	0.3315	0.0347	-0.1601	0.0655	0.1216
	tc 37.98	503.4		-0.0455	0.1748	-0.0659	-0.1393
M	th 325.00	502.7	0.9088	0.2771	-0.3704	-0.0781	-0.5426
	tc 269.98	351.3		-0.2349	0.3245	0.0609	0.4664

表 D.2 ノズルモデル2の弾塑性解析結果

MODEL-2の評価点の歪み範囲及び歪み成分  
(弾塑性解析)

評価点	極値時点	温度	$\Delta \epsilon_{eq}$	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$	$\epsilon_\theta$	$\gamma_{rz}$
A	th 30.00	452.3	0.2991	0.1016	-0.1367	-0.0577	0.0027
	tc 29.99	392.4		-0.1181	0.1524	0.0614	-0.0010
B	th 30.25	448.6	0.3071	0.1078	-0.0651	-0.1369	-0.0015
	tc 30.24	395.8		-0.1243	0.0742	0.1464	0.0019
C	th 34.00	486.5	0.4489	0.1603	-0.0307	-0.2152	0.0008
	tc 32.32	370.8		-0.1784	0.0488	0.2229	-0.0007
D	th 36.00	495.7	0.5755	0.2081	-0.0061	-0.2730	0.0005
	tc 35.48	349.7		-0.2270	0.0126	0.2875	-0.0001
E	th 36.00	495.1	0.6552	0.1850	0.0355	-0.2963	-0.2374
	tc 35.48	350.3		-0.2017	-0.0369	0.3141	0.2612
F	th110.00	538.0	0.6834	0.1389	0.2219	-0.3217	-0.1300
	tc 99.98	314.2		-0.1516	-0.2106	0.3159	0.0935
G	th120.00	540.0	0.6430	0.0837	0.2543	-0.3015	0.0004
	tc149.98	311.5		-0.0913	-0.2430	0.2857	-0.0005
H	th135.00	541.5	0.4683	0.1083	0.1390	-0.2346	-0.0009
	tc149.98	309.8		-0.1184	-0.1234	0.2226	0.0004
I	th 30.25	448.0	0.2897	0.1035	-0.0976	-0.1030	-0.0014
	tc 30.24	396.2		-0.1206	0.1045	0.1153	-0.0008
J	th 30.00	451.5	0.2892	0.0910	-0.1390	-0.0433	-0.0014
	tc 29.99	392.8		-0.1111	0.1573	0.0476	-0.0005
L	th 42.33	359.5	0.3792	0.0619	-0.1987	0.0554	0.1275
	tc 39.98	499.4		-0.0663	0.2023	-0.0591	-0.1319
M	th425.00	505.1	1.0037	0.3546	-0.4114	-0.1163	-0.4053
	tc349.98	352.8		-0.3523	0.4103	0.1057	0.4004

表 D.3 ノズルモデル3の弾塑性解析結果

MODEL-3の評価点の歪み範囲及び歪み成分  
(弾塑性解析)

評価点	極値時点	温度	$\Delta \varepsilon_{\theta\theta}$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_{\theta}$	$\gamma_{rz}$
A	th 29.12	426.7	0.2571	0.0827	-0.1212	-0.0552	-0.0009
	tc 29.99	396.0		-0.0976	0.1354	0.0575	0.0013
B	th 30.00	437.3	0.3040	0.1093	-0.0727	-0.1304	0.0025
	tc 29.99	406.1		-0.1237	0.0809	0.1394	-0.0022
C	th 31.50	458.0	0.5042	0.2047	-0.1408	-0.1802	-0.0018
	tc 30.24	403.1		-0.2198	0.1486	0.1879	0.0020
D	th 41.00	508.1	0.6190	0.1598	0.0959	-0.2957	-0.1828
	tc 36.98	347.6		-0.1617	-0.0679	0.2945	0.2641
E	th120.00	536.9	0.7259	0.1452	0.2385	-0.3292	-0.2016
	tc 99.98	314.5		-0.1530	-0.2275	0.3230	0.1545
F	th 31.75	458.0	0.4570	0.1863	-0.1298	-0.1644	0.0037
	tc 30.49	403.5		-0.1968	0.1372	0.1687	-0.0036
G	th 30.25	434.4	0.2843	0.0981	-0.0654	-0.1248	-0.0024
	tc 29.99	412.4		-0.1152	0.0755	0.1352	0.0016
H	th 30.00	436.4	0.2441	0.0765	-0.1151	-0.0525	-0.0002
	tc 29.99	405.0		-0.0930	0.1293	0.0597	0.0026
J	th 45.00	402.1	0.2953	0.0681	-0.1730	0.0077	0.0469
	tc 42.98	456.8		-0.0656	0.1732	-0.0161	-0.0466
K	th425.00	514.8	0.9455	0.3831	-0.4163	-0.1554	-0.1697
	tc299.98	344.3		-0.3689	0.4063	0.1414	0.1642

表 D.4 ノズルモデル1の「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-1の歪み範囲及び損傷値  
 (弾塑性解析, 「TTSDS」使用,  $q=1.0$ )  
 (「NEBDS」の $\Delta \epsilon_t$ を使用)

評価点	極値時点	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 28.74	3.087E-03	4.653E-02	1.506E-01	1.971E-01
B	th 30.25 tc 29.12	3.133E-03	5.063E-02	1.562E-01	2.068E-01
C	th 31.75 tc 31.99	4.730E-03	3.122E-01	3.662E-01	6.784E-01
D	th 35.00 tc 32.32	5.759E-03	5.820E-01	5.083E-01	1.090E+00
E	th 35.50 tc 32.32	6.310E-03	7.506E-01	5.851E-01	1.336E+00
F	th 34.00 tc 32.32	6.380E-03	7.731E-01	5.949E-01	1.368E+00
G	th 32.25 tc 32.32	5.901E-03	6.240E-01	5.281E-01	1.152E+00
H	th 31.75 tc 31.99	4.803E-03	3.291E-01	3.762E-01	7.053E-01
I	th 30.25 tc 29.99	2.936E-03	3.450E-02	1.327E-01	1.672E-01
J	th 30.00 tc 29.12	2.980E-03	3.779E-02	1.377E-01	1.755E-01
L	th 38.50 tc 37.98	3.040E-03	3.590E-02	9.381E-02	1.297E-01
M	th325.00 tc269.98	8.315E-03	1.332E+00	7.636E-01	2.096E+00



表 D.5 ノズルモデル2の「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-2の歪み範囲及び損傷値  
 (弾塑性解析, 「TTSDS」使用,  $q=1.0$ )  
 (「NEBDS」の $\Delta \epsilon_t$ を使用)

評価点	極値時点	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 29.99	2.731E-03	2.154E-02	1.090E-01	1.306E-01
B	th 30.25 tc 30.24	2.893E-03	3.147E-02	1.276E-01	1.591E-01
C	th 34.00 tc 32.32	4.416E-03	2.439E-01	3.235E-01	5.674E-01
D	th 37.25 tc 34.98	5.589E-03	5.331E-01	4.848E-01	1.018E+00
E	th 38.50 tc 35.48	6.386E-03	7.750E-01	5.958E-01	1.371E+00
F	th110.00 tc 99.98	6.768E-03	9.015E-01	6.491E-01	1.551E+00
G	th120.00 tc149.98	6.361E-03	7.670E-01	5.922E-01	1.359E+00
H	th135.00 tc149.98	4.765E-03	3.203E-01	3.710E-01	6.913E-01
I	th 30.25 tc 30.24	2.716E-03	2.074E-02	1.074E-01	1.281E-01
J	th 30.25 tc 30.24	2.693E-03	1.955E-02	1.048E-01	1.244E-01
L	th 42.33 tc 39.98	3.479E-03	7.733E-02	1.473E-01	2.246E-01
M	th425.00 tc349.98	9.151E-03	1.677E+00	9.032E-01	2.580E+00

表 D.6 ノズルモデル3の「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-3の歪み範囲及び損傷値  
 (弾塑性解析, 「TTSDS」使用,  $q=1.0$ )  
 (「NEBDS」の $\Delta \epsilon_t$ を使用)

評価点	極値時点	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
A	th 29.12 tc 29.99	2.345E-03	6.631E-03	6.847E-02	7.510E-02
B	th 30.00 tc 29.99	2.784E-03	2.453E-02	1.150E-01	1.396E-01
C	th 31.50 tc 30.49	4.879E-03	3.471E-01	3.867E-01	7.338E-01
D	th 41.00 tc 36.98	6.003E-03	6.548E-01	5.423E-01	1.197E+00
E	th120.00 tc109.98	7.183E-03	1.046E+00	7.071E-01	1.753E+00
F	th 31.75 tc 30.49	4.291E-03	2.188E-01	3.066E-01	5.253E-01
G	th 30.25 tc 29.99	2.615E-03	1.584E-02	9.624E-02	1.121E-01
H	th 30.00 tc 29.99	2.271E-03	4.977E-03	6.143E-02	6.641E-02
J	th 43.66 tc 41.98	2.681E-03	1.639E-02	7.143E-02	8.782E-02
K	th425.00 tc299.98	8.538E-03	1.449E+00	8.236E-01	2.273E+00

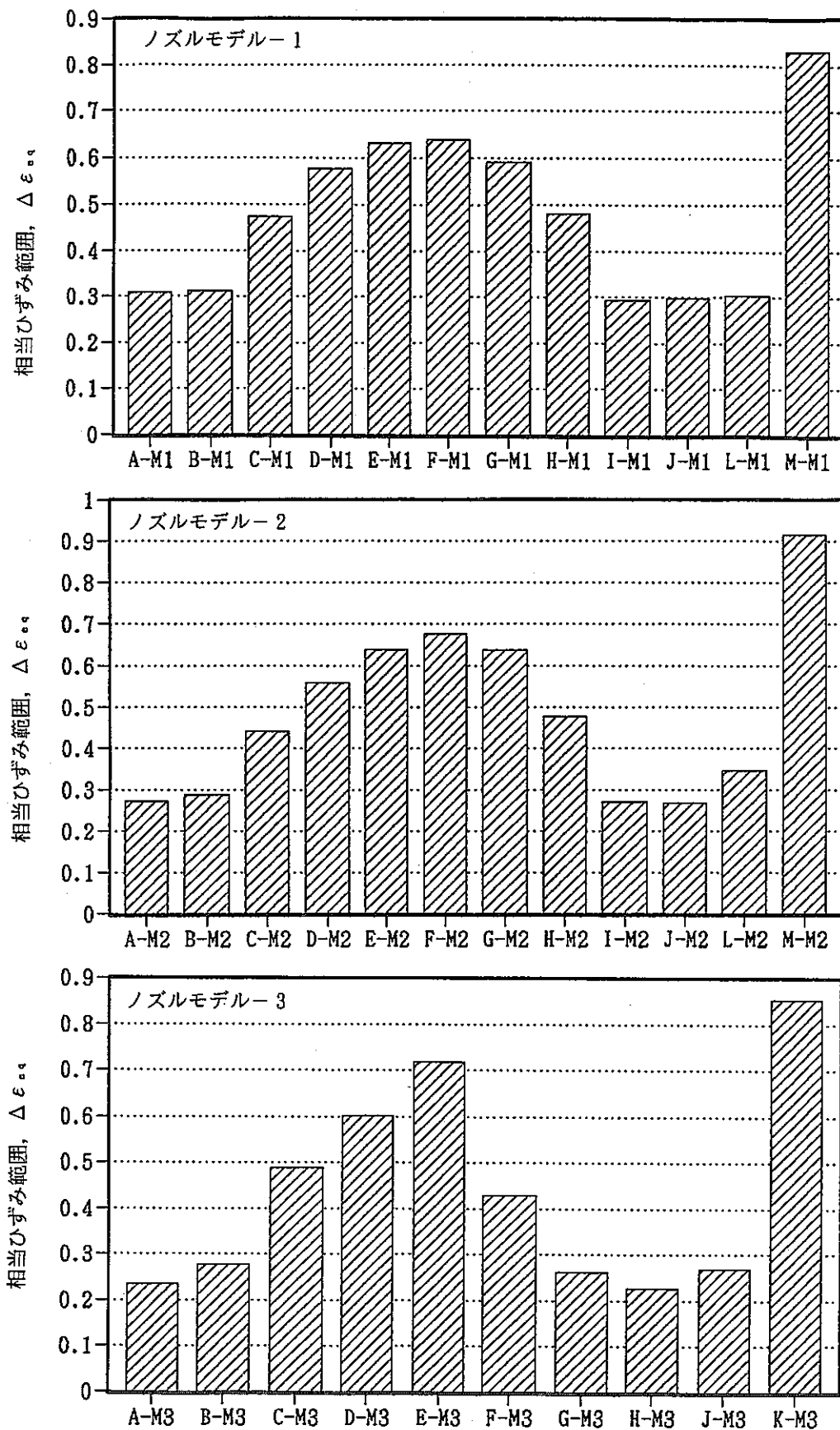


図 D.1 ノズルモデル 1～3 の評価点のひずみ範囲

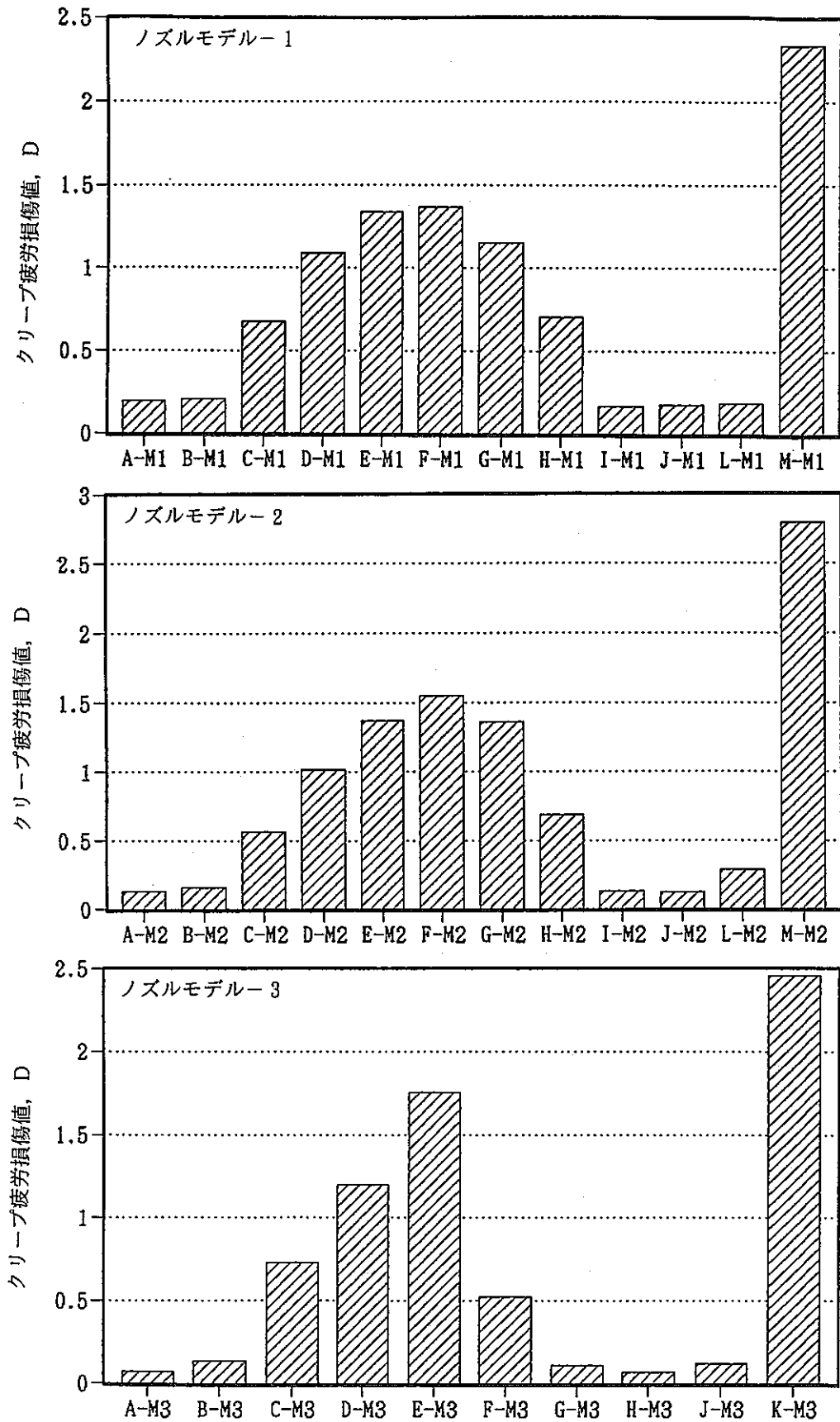


図 D.2 ノズルモデル1～3の評価点のクリープ疲労損傷値

## 付録 E 低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による非弾性解析結果とクリープ疲労損傷評価結果

付録 E として、5.2 節で検討したノズルモデル 1 を対象とした、ひずみ速度  $1 \times 10^{-6}$  mm/mm/s の低ひずみ速度条件データによる解析結果およびこれに基づくクリープ疲労損傷評価結果を示す。解析としては、弾塑性-クリープ解析とクリープ解析を実施しない、すなわち弾塑性解析のみの条件による解析の 2 種類であり、これらの結果を用いて「間接法」(TTSDS と呼ぶ) によるクリープ疲労損傷評価を行った。

表 E.1~表 E.2 に弾塑性-クリープ解析の結果として各評価点でのひずみ範囲および「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果を示す。また表 E.3~表 E.4 には同様に弾塑性解析の場合のひずみ範囲とクリープ疲労損傷評価結果を示す。また、図 E.1~図 E.2 はひずみ範囲と損傷値をグラフ化したものである。

表 E.1 低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果

表 E.2 低ひずみ速度の弾塑性クリープ解析結果に対するクリープ疲労損傷評価結果

表 E.3 低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性解析結果

表 E.4 低ひずみ速度の弾塑性解析結果に対するクリープ疲労損傷評価結果

図 E.1 低ひずみ速度の弾塑性クリープ解析による評価点のひずみ範囲とクリープ疲労損傷値

図 E.2 低ひずみ速度の弾塑性解析による評価点のひずみ範囲とクリープ疲労損傷値

表 E.1 低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果

MODEL-1 の評価点の歪み範囲及び歪み成分 (低歪速度)  
(弾塑性クリープ解析)

評価点	極値時点	温度	$\Delta \varepsilon_{eq}$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_\theta$	$\gamma_{rz}$
A	th 30.00	468.3	0.3481	0.1239	-0.1594	-0.0564	0.0004
	tc 28.74	408.0		-0.1482	0.1557	0.0838	-0.0014
B	th 30.25	462.2	0.3419	0.1286	-0.0713	-0.1522	-0.0018
	tc 28.87	411.7		-0.1388	0.0699	0.1561	0.0006
C	th 31.75	478.5	0.4969	0.1854	-0.0402	-0.2369	0.0009
	tc 31.99	364.8		-0.2036	0.0414	0.2334	-0.0014
D	th 34.00	492.4	0.6103	0.2213	-0.0004	-0.2964	-0.0005
	tc 32.32	362.9		-0.2649	0.0533	0.2743	0.0002
E	th 34.00	491.7	0.6661	0.1863	0.0493	-0.3179	-0.2165
	tc 32.32	363.3		-0.2111	0.0037	0.2814	0.3394
F	th 32.25	480.1	0.6873	0.1861	0.0147	-0.3023	0.2684
	tc 32.32	363.5		-0.2234	0.0259	0.2732	-0.3950
G	th 31.75	475.7	0.6430	0.2399	-0.0732	-0.2742	-0.0009
	tc 31.99	366.8		-0.3182	0.1603	0.2419	0.0023
H	th 31.75	475.6	0.5116	0.1936	-0.0687	-0.2236	-0.0010
	tc 31.99	366.5		-0.2423	0.1283	0.1941	0.0004
I	th 30.25	458.3	0.3192	0.1226	-0.0839	-0.1382	-0.0006
	tc 29.99	392.9		-0.1295	0.1030	0.1201	0.0039
J	th 30.00	462.4	0.3301	0.1204	-0.1620	-0.0499	-0.0002
	tc 28.87	411.3		-0.1265	0.1564	0.0597	0.0001
L	th 38.50	343.7	0.3380	0.0385	-0.1629	0.0577	0.1260
	tc 36.98	507.9		-0.0488	0.1750	-0.0740	-0.1456
M	th 325.00	502.7	1.0080	0.2953	-0.3643	-0.0988	-0.5509
	tc 269.98	351.3		-0.2924	0.3801	0.0375	0.5758

表 E.2 低ひずみ速度の弾塑性クリープ解析結果に対するクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-1 の歪み範囲及び損傷値 (低歪速度条件)  
 (弾塑性クリープ解析, 「TTSDS」使用,  $q=1.0$ )  
 (「NEBDS」の  $\Delta \varepsilon_t$  を使用)

評価点	極値時点	$\Delta \varepsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 28.74	3.214E-03	5.833E-02	1.662E-01	2.245E-01
B	th 30.25 tc 29.12	3.219E-03	5.882E-02	1.668E-01	2.256E-01
C	th 31.75 tc 31.99	4.870E-03	3.450E-01	3.854E-01	7.304E-01
D	th 34.00 tc 32.32	5.943E-03	6.366E-01	5.340E-01	1.171E+00
E	th 34.50 tc 32.32	6.504E-03	8.134E-01	6.122E-01	1.426E+00
F	th 32.75 tc 32.32	6.672E-03	8.692E-01	6.357E-01	1.505E+00
G	th 31.75 tc 32.32	6.231E-03	7.255E-01	5.741E-01	1.300E+00
H	th 31.75 tc 31.99	5.041E-03	3.868E-01	4.089E-01	7.957E-01
I	th 30.25 tc 29.99	3.005E-03	3.973E-02	1.407E-01	1.805E-01
J	th 30.00 tc 28.99	3.056E-03	4.389E-02	1.468E-01	1.907E-01
L	th 38.50 tc 36.98	3.103E-03	4.055E-02	9.972E-02	1.403E-01
M	th325.00 tc299.98	9.207E-03	1.670E+00	8.905E-01	2.560E+00

表 E.3 低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性解析結果

MODEL-1 の評価点の歪み範囲及び歪み成分 (低歪速度)  
(弾塑性解析)

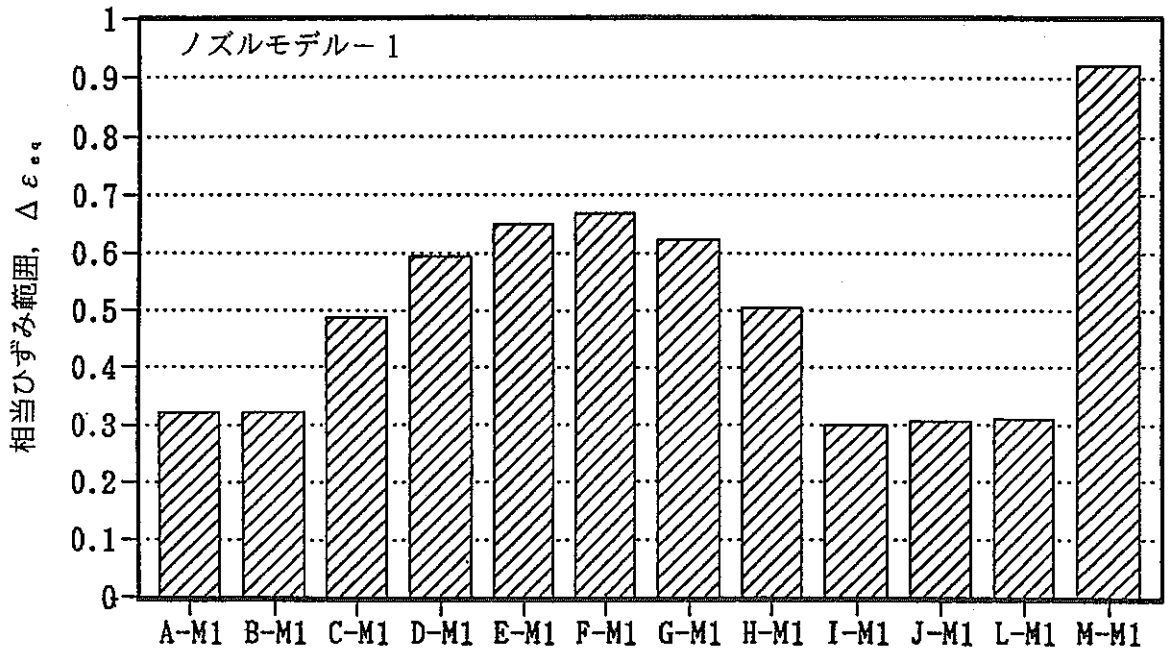
評価点	極値時点	温度	$\Delta \epsilon_{eq}$	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$	$\epsilon_\theta$	$\gamma_{rz}$
A	th 30.00	468.3	0.3482	0.1239	-0.1594	-0.0564	0.0004
	tc 28.74	408.0		-0.1482	0.1557	0.0838	-0.0014
B	th 30.25	462.2	0.3419	0.1286	-0.0713	-0.1522	-0.0018
	tc 28.87	411.7		-0.1388	0.0699	0.1561	0.0006
C	th 31.75	478.5	0.4969	0.1854	-0.0402	-0.2369	0.0009
	tc 31.99	364.8		-0.2037	0.0415	0.2334	-0.0014
D	th 34.00	492.4	0.6103	0.2213	-0.0004	-0.2964	-0.0005
	tc 32.32	362.9		-0.2650	0.0533	0.2744	0.0001
E	th 34.00	491.7	0.6665	0.1863	0.0493	-0.3179	-0.2165
	tc 32.32	363.3		-0.2116	0.0039	0.2815	0.3397
F	th 32.25	480.1	0.6871	0.1861	0.0147	-0.3023	0.2684
	tc 32.32	363.5		-0.2234	0.0260	0.2734	-0.3943
G	th 31.75	475.7	0.6432	0.2399	-0.0732	-0.2742	-0.0009
	tc 31.99	366.8		-0.3184	0.1601	0.2421	0.0032
H	th 31.75	475.6	0.5116	0.1936	-0.0687	-0.2236	-0.0010
	tc 31.99	366.5		-0.2423	0.1282	0.1943	0.0001
I	th 30.25	458.3	0.3191	0.1226	-0.0839	-0.1382	-0.0006
	tc 29.99	392.9		-0.1294	0.1028	0.1202	0.0039
J	th 30.00	462.4	0.3301	0.1204	-0.1620	-0.0499	-0.0002
	tc 28.87	411.3		-0.1266	0.1564	0.0597	0.0001
L	th 38.50	343.7	0.3378	0.0385	-0.1629	0.0577	0.1260
	tc 36.98	507.9		-0.0487	0.1749	-0.0740	-0.1454
M	th 325.00	502.7	1.0108	0.2950	-0.3642	-0.0987	-0.5505
	tc 269.98	351.3		-0.2944	0.3814	0.0378	0.5801



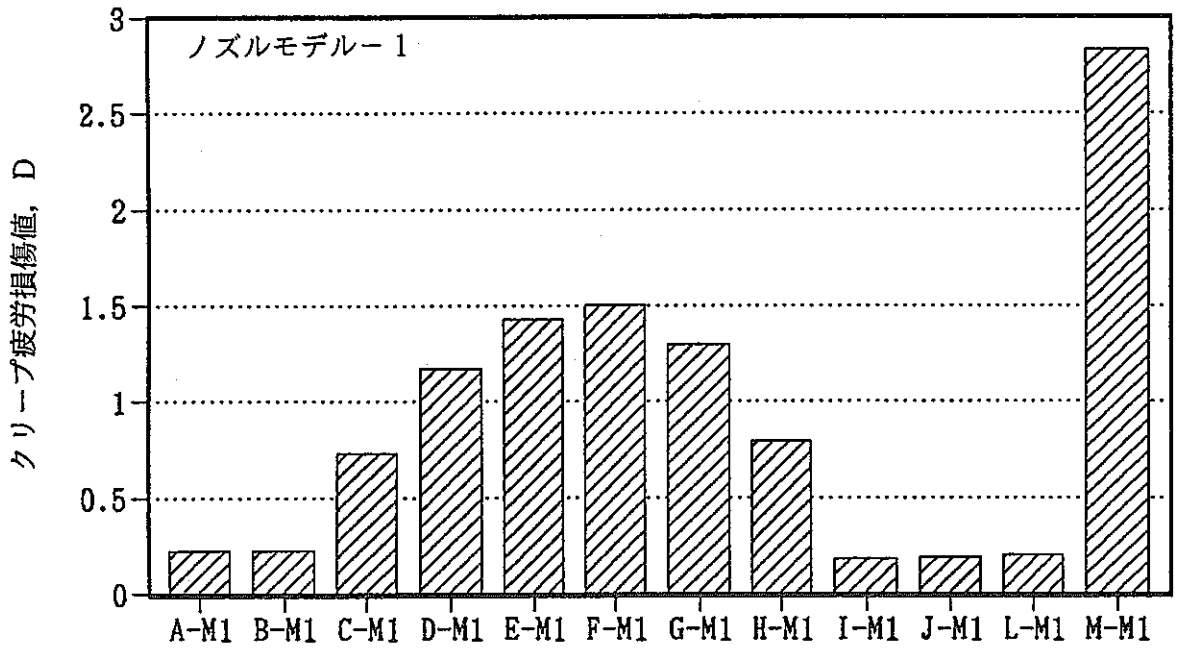
表 E.4 低ひずみ速度の弾塑性解析結果に対するクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-1 の歪み範囲及び損傷値 (低歪速度条件)  
 (弾塑性解析, 「TTSDS」使用,  $q=1.0$ )  
 (「NEBDS」の  $\Delta \epsilon_t$  を使用)

評価点	極値時点	$\Delta \epsilon_t$	$D_r$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 28.74	3.214E-03	5.833E-02	1.662E-01	2.245E-01
B	th 30.25 tc 29.12	3.219E-03	5.882E-02	1.668E-01	2.256E-01
C	th 31.75 tc 31.99	4.870E-03	3.450E-01	3.854E-01	7.304E-01
D	th 34.00 tc 32.32	5.943E-03	6.366E-01	5.340E-01	1.171E+00
E	th 34.50 tc 32.32	6.508E-03	8.147E-01	6.128E-01	1.428E+00
F	th 32.75 tc 32.32	6.670E-03	8.685E-01	6.354E-01	1.504E+00
G	th 31.75 tc 32.32	6.233E-03	7.262E-01	5.744E-01	1.301E+00
H	th 31.75 tc 31.99	5.041E-03	3.868E-01	4.089E-01	7.957E-01
I	th 30.25 tc 29.99	3.004E-03	3.966E-02	1.406E-01	1.803E-01
J	th 30.00 tc 28.99	3.056E-03	4.389E-02	1.468E-01	1.907E-01
L	th 38.50 tc 36.98	3.101E-03	4.039E-02	9.953E-02	1.399E-01
M	th325.00 tc299.98	9.231E-03	1.679E+00	8.940E-01	2.573E+00

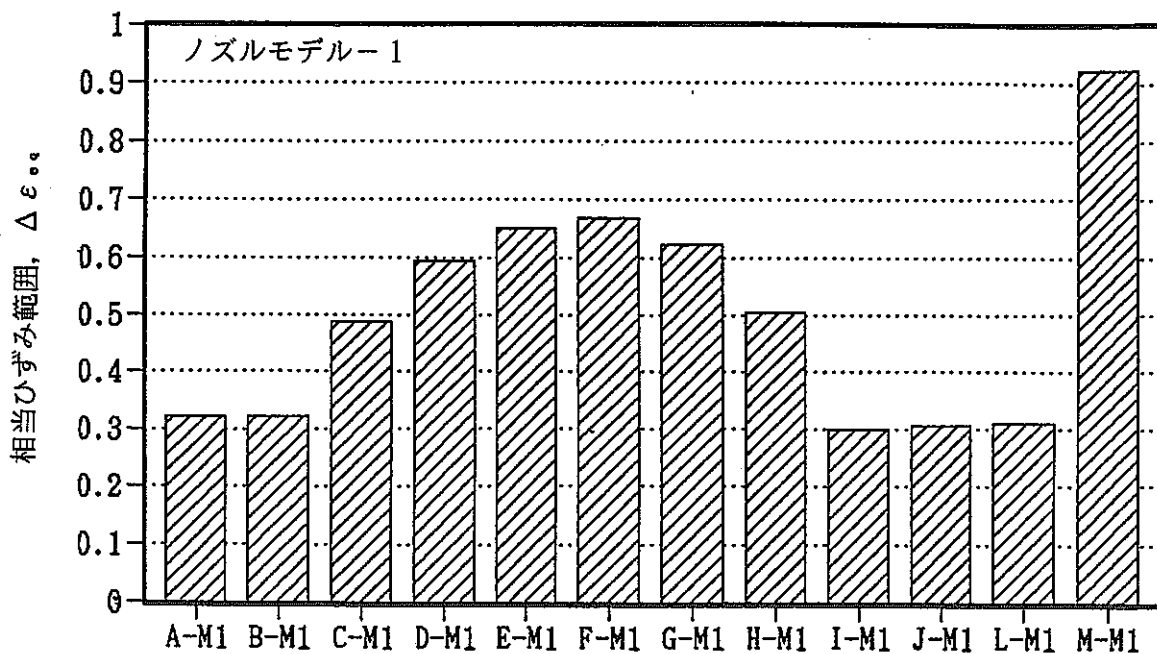


ノズルモデル1の評価点の歪範囲  
(弾塑性-クリープ解析、サイクリックカーブ、 $1 \times 10^{-8}$ mm/mm/sec)

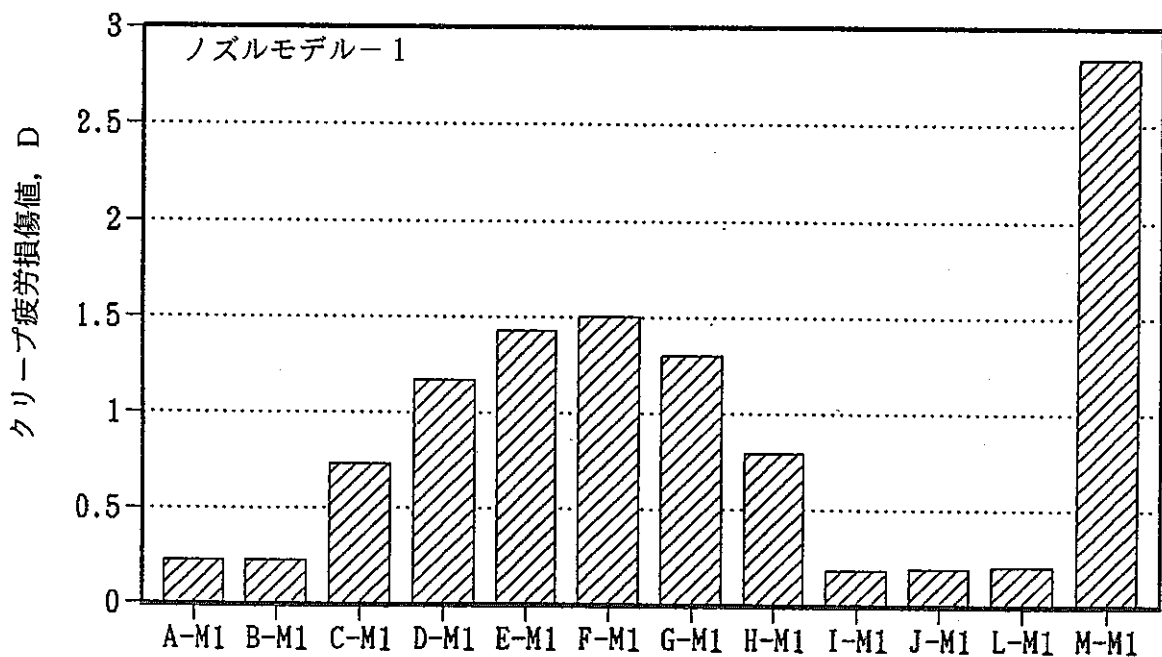


ノズルモデル1の評価点の損傷値  
(弾塑性-クリープ解析、サイクリックカーブ、 $1 \times 10^{-8}$ mm/mm/sec)  
(TTSDSによる、 $q = 1.0$ 、 $N = 1,700$ サイクル)

図 E.1 低ひずみ速度の弾塑性クリープ解析による評価点のひずみ範囲とクリープ疲労損傷値



ノズルモデル1の評価点の歪範囲  
(弾塑性解析、サイクリックカーブ、 $1 \times 10^{-4}$  mm/mm/sec)



ノズルモデル1の評価点の損傷値  
(弾塑性解析、サイクリックカーブ、 $1 \times 10^{-4}$  mm/mm/sec)  
(TTSDSによる、 $q = 1.0$ 、 $N = 1,700$ サイクル)

図 E.2 低ひずみ速度の弾塑性解析による評価点のひずみ範囲とクリープ疲労損傷値

## 付録 F 単調応力-ひずみ関係による弾塑性-クリーブ解析結果とクリーブ疲労損傷評価結果

付録 F として、5.3 節で検討した単調応力-ひずみ関係による弾塑性-クリーブ解析結果およびこれに基づくクリーブ疲労損傷評価結果を示す。3 種類のノズル形状モデルに対する単調応力-ひずみ関係を用いた弾塑性-クリーブ解析は第 2 報で実施されたもので、その結果を再掲する。また、これらの結果に対するクリーブ疲労損傷値は第 2 報で計算した熱過渡 1,300 サイクル時点での値を線形累積損傷則に基づいて熱過渡試験終了時の 1,700 サイクル時点での値に修正したものである。

図 F.1 に先の単調応力-ひずみ関係を用いた場合の弾塑性-クリーブ解析の結果として 3 種類のノズル形状モデルの各評価点でのひずみ範囲を示す。前報ではこれらのひずみ範囲を用いて「間接法」(TTSDS と呼ぶ)に基づいたクリーブ疲労損傷値の計算として、弾性追従係数  $q$  を 1.0 および 1.5 とした場合の計算を行っている。表 F.1~表 F.3 と図 F.2 には弾性追従係数  $q$  を 1.0 とした場合の、また表 F.4~表 F.6 と図 F.3 には弾性追従係数  $q$  を 1.5 とした場合の 3 種類のノズル形状モデルの各評価点での損傷値を示す。

表 F.1 ノズルモデル 1 の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリーブ解析結果と「間接法」によるクリーブ疲労損傷値 ( $q = 1.0$ )

表 F.2 ノズルモデル 2 の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリーブ解析結果と「間接法」によるクリーブ疲労損傷値 ( $q = 1.0$ )

表 F.3 ノズルモデル 3 の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリーブ解析結果と「間接法」によるクリーブ疲労損傷値 ( $q = 1.0$ )

表 F.4 ノズルモデル 1 の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリーブ解析結果と「間接法」によるクリーブ疲労損傷値 ( $q = 1.5$ )

表 F.5 ノズルモデル 2 の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリーブ解析結果と「間接法」によるクリーブ疲労損傷値 ( $q = 1.5$ )

表 F.6 ノズルモデル 3 の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリーブ解析結果と「間接法」によるクリーブ疲労損傷値 ( $q = 1.5$ )

図 F.1 ノズルモデル 1~3 の単調応力-ひずみ関係による評価点のひずみ範囲

図 F.2 ノズルモデル 1~3 の単調応力-ひずみ関係による評価点のクリーブ疲労損傷値 ( $q = 1.0$ )

図 F.3 ノズルモデル 1~3 の単調応力-ひずみ関係による評価点のクリーブ疲労損傷値 ( $q = 1.5$ )

表 F.1 ノズルモデル1の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果と「間接法」によるクリープ疲労損傷値 ( $q=1.0$ )

クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)

非弾性解析 (「TTSDS」使用) ( $q=1.0$ )					
評価点	代表時間	$D_1$	$D_2$	D	$\Delta \varepsilon_c$
A	1. 29.0 1. 30.0	1.366 E-1	2.125 E-1	3.491 E-1	4.077 E-3
B	30.0 31.5	9.792 E-2	1.814 E-1	2.793 E-1	3.770 E-3
C	32.0 31.7	4.150 E-1	3.743 E-1	7.893 E-1	5.623 E-3
D	32.0 34.0	6.430 E-1	4.770 E-1	1.120	6.587 E-3
E	33.0 34.0	7.862 E-1	5.354 E-1	1.322	7.133 E-3
F	32.0 33.2	8.434 E-1	5.577 E-1	1.401	7.342 E-3
G	32.0 32.2	7.098 E-1	5.047 E-1	1.214	6.846 E-3
H	32.0 31.7	3.590 E-1	3.463 E-1	7.053 E-1	5.359 E-3
I	30.0 31.5	8.561 E-2	1.704 E-1	2.561 E-1	3.660 E-3
J	29.0 30.0	1.331 E-1	2.098 E-1	3.429 E-1	4.051 E-3
L	36.0 37.2	3.666 E-2	1.166 E-1	1.533 E-1	3.103 E-3
M	270.0 325.0	1.986	9.388 E-1	2.924	1.091 E-2
N	270.0 325.0	1.986	9.388 E-1	2.924	1.091 E-2

表 F.2 ノズルモデル2の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果と  
「間接法」によるクリープ疲労損傷値 ( $q=1.0$ )

クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)

非弾性解析 (「TTSDS」使用) ( $q=1.0$ )					
評価点	代表時間	$D_r$	$D_c$	D	$\Delta \varepsilon_c$
A	$t_c$ 30.0 $t_h$ 30.2	7.669 E-2	1.620 E-1	2.387 E-1	3.575 E-3
B	30.0 30.2	6.093 E-2	1.460 E-1	2.069 E-1	3.411 E-3
C	35.0 35.0	3.222 E-1	3.271 E-1	6.493 E-1	5.177 E-3
D	35.0 37.2	5.867 E-1	4.530 E-1	1.040	6.362 E-3
E	36.0 41.0	7.995 E-1	5.407 E-1	1.340	7.182 E-3
F	100.0 120.0	9.662 E-1	6.042 E-1	1.570	7.776 E-3
G	135.0 135.0	8.385 E-1	5.558 E-1	1.394	7.324 E-3
H	150.0 135.0	3.964 E-1	3.652 E-1	7.616 E-1	5.537 E-3
I	30.0 30.2	5.329 E-2	1.375 E-1	1.907 E-1	3.323 E-3
J	30.0 30.2	7.936 E-2	1.646 E-1	2.439 E-1	3.601 E-3
L	38.0 39.7	1.249 E-1	2.035 E-1	3.284 E-1	3.989 E-3
M	300.0 425.0	2.483	1.081	3.564	1.225 E-2
N	300.0 425.0	2.483	1.081	3.564	1.225 E-2

表 F.3 ノズルモデル3の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果と「間接法」によるクリープ疲労損傷値 (q=1.0)

クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-3)

非弾性解析 (「TTSDS」使用) (q=1.0)					
評価点	代表時間	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D	Δε <sub>c</sub>
A	1, 30.0 1, 30.2	2.996 E-2	1.070 E-1	1.369 E-1	2.998 E-3
B	30.0 30.2	4.927 E-2	1.328 E-1	1.820 E-1	3.274 E-3
C	35.0 35.0	4.692 E-1	4.001 E-1	8.693 E-1	5.866 E-3
D	35.0 37.2	7.085 E-1	5.042 E-1	1.213	6.841 E-3
E	36.0 41.0	1.187	6.835 E-1	1.871	8.518 E-3
F	100.0 120.0	2.931 E-1	3.112 E-1	6.043 E-1	5.027 E-3
G	135.0 135.0	3.499 E-2	1.143 E-1	1.493 E-1	3.078 E-3
H	150.0 135.0	2.723 E-2	1.028 E-1	1.300 E-1	2.951 E-3
J	30.0 30.2	5.057 E-2	1.343 E-1	1.849 E-1	3.290 E-3
I	30.0 30.2	2.327	1.038	3.365	1.184 E-2
K	39.0 42.3	2.327	1.038	3.365	1.184 E-2

表 F.4 ノズルモデル1の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果と「間接法」によるクリープ疲労損傷値 ( $q=1.5$ )

クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)

非弾性解析 (「TTSDS」使用) ( $q=1.5$ )					
評価点	代表時間	$D_r$	$D_c$	D	$\Delta \varepsilon_c$
A	$t_c$ 29.0 $t_h$ 30.0	1.366 E-1	2.739 E-1	4.106 E-1	4.077 E-3
B	30.0 31.5	9.792 E-2	2.299 E-1	3.278 E-1	3.770 E-3
C	32.0 31.7	4.150 E-1	5.129 E-1	9.279 E-1	5.623 E-3
D	32.0 34.0	6.430 E-1	6.709 E-1	1.314	6.587 E-3
E	33.0 34.0	7.862 E-1	7.622 E-1	1.548	7.133 E-3
F	32.0 33.2	8.434 E-1	7.975 E-1	1.641	7.342 E-3
G	32.0 32.2	7.098 E-1	7.141 E-1	1.424	6.846 E-3
H	32.0 31.7	3.590 E-1	4.705 E-1	8.296 E-1	5.359 E-3
I	30.0 31.5	8.561 E-2	2.145 E-1	3.002 E-1	3.660 E-3
J	29.0 30.0	1.331 E-1	2.701 E-1	4.033 E-1	4.051 E-3
L	36.0 37.2	3.666 E-2	1.414 E-1	1.781 E-1	3.103 E-3
M	270.0 325.0	1.986	1.418	3.404	1.091 E-2
N	270.0 325.0	1.986	1.418	3.404	1.091 E-2



表 F.5 ノズルモデル2の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果と「間接法」によるクリープ疲労損傷値 ( $q=1.5$ )

クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)

非弾性解析 (「TTSDS」使用) ( $q=1.5$ )					
評価点	代表時間	$D_1$	$D_2$	D	$\Delta \epsilon_1$
A	1. 30.0 1. 30.2	7.669 E-2	2.029 E-1	2.796 E-1	3.575 E-3
B	30.0 30.2	6.093 E-2	1.808 E-1	2.417 E-1	3.411 E-3
C	35.0 35.0	3.222 E-1	4.417 E-1	7.640 E-1	5.177 E-3
D	35.0 37.2	5.867 E-1	6.336 E-1	1.220	6.362 E-3
E	36.0 41.0	7.995 E-1	7.705 E-1	1.570	7.182 E-3
F	100.0 120.0	9.662 E-1	8.713 E-1	1.837	7.776 E-3
G	135.0 135.0	8.385 E-1	7.945 E-1	1.633	7.324 E-3
H	150.0 135.0	3.964 E-1	4.990 E-1	8.955 E-1	5.537 E-3
I	30.0 30.2	5.329 E-2	1.694 E-1	2.227 E-1	3.323 E-3
J	30.0 30.2	7.936 E-2	2.064 E-1	2.858 E-1	3.601 E-3
L	38.0 39.7	1.249 E-1	2.611 E-1	3.860 E-1	3.989 E-3
M	300.0 425.0	2.483	1.658	4.141	1.225 E-2
N	300.0 425.0	2.483	1.658	4.141	1.225 E-2

表 F.6 ノズルモデル3の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果と  
「間接法」によるクリープ疲労損傷値 ( $q=1.5$ )

クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-3)

非弾性解析 (「TTSDS」使用) ( $q=1.5$ )					
評価点	代表時間	$D_1$	$D_2$	D	$\Delta \varepsilon_c$
A	$t_1$ 30.0 $t_2$ 30.2	2.996 E-2	1.286 E-1	1.585 E-1	2.998 E-3
B	30.0 30.2	4.927 E-2	1.630 E-1	2.123 E-1	3.274 E-3
C	35.0 35.0	4.692 E-1	5.523 E-1	1.021	5.866 E-3
D	35.0 37.2	7.085 E-1	7.132 E-1	1.422	6.841 E-3
E	36.0 41.0	1.187	9.986 E-1	2.186	8.518 E-3
F	100.0 120.0	2.931 E-1	4.181 E-1	7.112 E-1	5.027 E-3
G	135.0 135.0	3.499 E-2	1.383 E-1	1.733 E-1	3.078 E-3
H	150.0 135.0	2.723 E-2	1.230 E-1	1.502 E-1	2.951 E-3
J	30.0 30.2	5.057 E-2	1.651 E-1	2.157 E-1	3.290 E-3
I	30.0 30.2	2.327	1.584	3.911	1.184 E-2
K	39.0 42.3	2.327	1.584	3.911	1.184 E-2

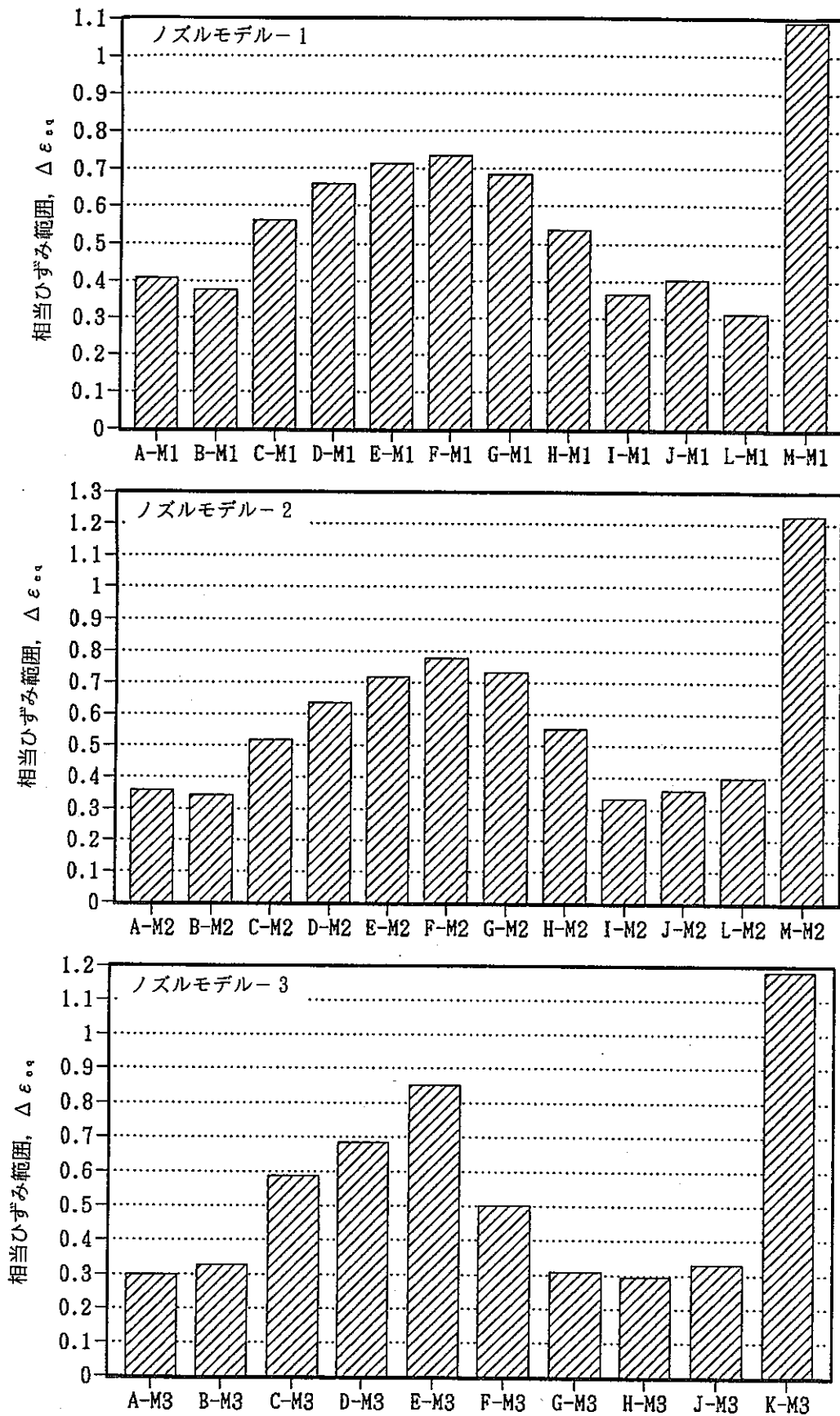


図 F.1 ノズルモデル1～3の単調応力-ひずみ関係による評価点のひずみ範囲

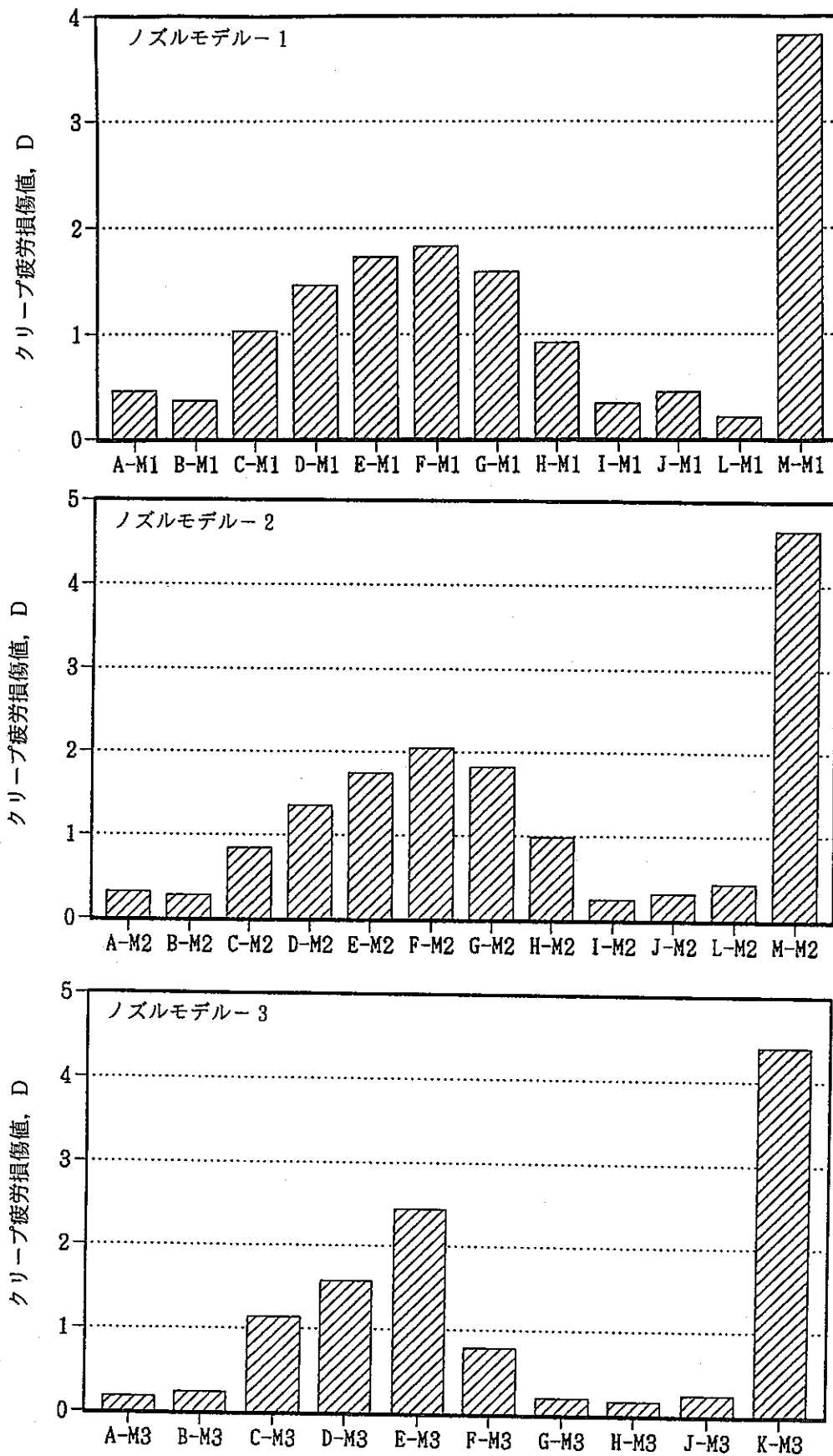


図 F.2 ノズルモデル1～3の単調応力-ひずみ関係による評価点のクリープ疲労損傷値 (q=1.0)

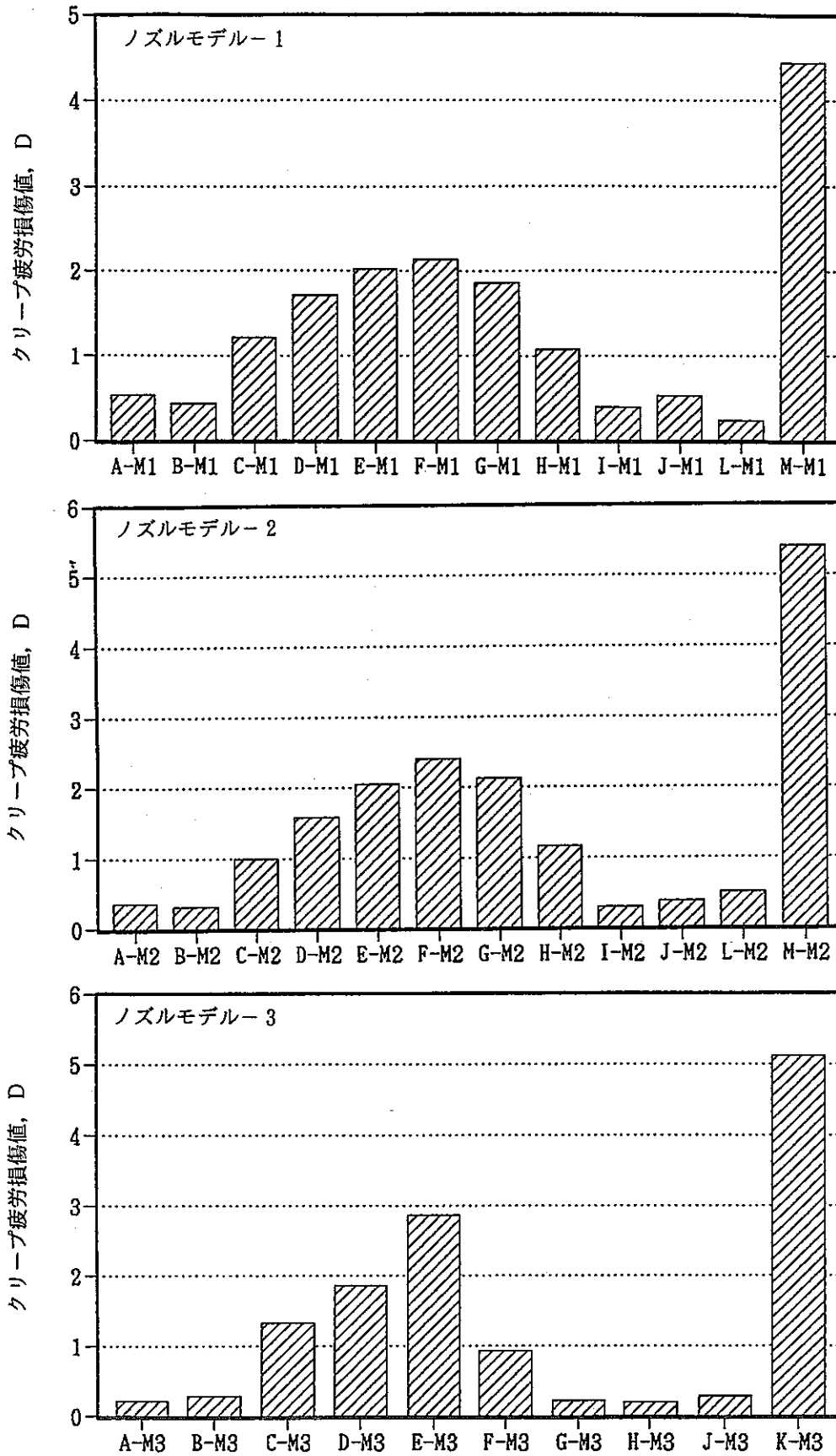


図 F.3 ノズルモデル1～3の単調応力-ひずみ関係による評価点のクリープ疲労損傷値 (q=1.5)

## 付録 G 「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

付録Gとして、3種のノズル形状モデルに対して実施した各種解析条件での非弾性熱応力解析結果に対して、クリープ疲労損傷評価法として5.3節で検討した「直接法」(NEBDSと呼ぶ)を採用した場合の評価結果を示す。

表 G.1～表 G.3に3種のノズル形状モデルについて標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した弾塑性-クリープ解析の結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果を示す。同様に、表 G.4～表 G.6には3種のノズル形状モデルについて標準ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した弾塑性解析のみの場合の結果を示す。さらに、表 G.10～表 G.11にはモデル1について実施した低ひずみ速度条件の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線を採用した弾塑性-クリープ解析および弾塑性解析のみの場合の結果を示す。また、図 G.1～図 G.4はこれらの結果をグラフ化したものである。なお、3種のノズル形状モデルについて単調応力-ひずみ関係を用いた場合の結果については本研究第2報に示されているものを再掲した。(表 G.7～表 G.9、図 G.3)

- 表 G.1 ノズルモデル1の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果
- 表 G.2 ノズルモデル2の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果
- 表 G.3 ノズルモデル3の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果
- 表 G.4 ノズルモデル1の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果
- 表 G.5 ノズルモデル2の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果
- 表 G.6 ノズルモデル3の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果
- 表 G.7 ノズルモデル1の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果
- 表 G.8 ノズルモデル2の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果
- 表 G.9 ノズルモデル3の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果
- 表 G.10 ノズルモデル1の低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果
- 表 G.11 ノズルモデル1の低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

- 図 G.1 ノズルモデル1～3の評価点での「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果  
(標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果)
- 図 G.2 ノズルモデル1～3の評価点での「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果  
(標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性解析結果)
- 図 G.3 ノズルモデル1～3の評価点での「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果  
(単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果)
- 図 G.4 ノズルモデル1の評価点での「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果  
(低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析および  
弾塑性解析結果)

表 G.1 ノズルモデル1の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による  
弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-1の歪み範囲及び損傷値  
(弾塑性クリープ解析, 「NEBDS」使用)

評価点	極値時点	温度	TMAX	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 28.74	465.8 411.2	552.2	3.087E-03	4.653E-02	8.229E-06	4.653E-02
B	th 30.25 tc 29.12	459.5 409.5	551.4	3.133E-03	5.065E-02	6.835E-06	5.066E-02
C	th 31.75 tc 31.99	475.7 367.9	550.2	4.729E-03	3.121E-01	9.870E-04	3.130E-01
D	th 35.00 tc 32.32	494.8 365.8	549.3	5.758E-03	5.816E-01	2.294E-03	5.839E-01
E	th 35.50 tc 32.32	496.0 366.3	548.8	6.310E-03	7.506E-01	1.038E-02	7.610E-01
F	th 34.00 tc 32.32	489.1 366.5	548.7	6.384E-03	7.743E-01	2.110E-02	7.954E-01
G	th 32.25 tc 32.32	476.9 366.8	549.3	5.902E-03	6.243E-01	4.086E-02	6.651E-01
H	th 31.75 tc 31.99	472.8 369.7	550.2	4.805E-03	3.296E-01	1.271E-02	3.423E-01
I	th 30.25 tc 29.99	455.5 396.0	551.3	2.937E-03	3.457E-02	8.335E-03	4.290E-02
J	th 30.00 tc 29.12	459.9 407.8	552.1	2.979E-03	3.772E-02	4.544E-06	3.772E-02
L	th 38.50 tc 37.98	344.9 502.3	536.5	3.041E-03	3.597E-02	1.851E-03	3.782E-02
M	th 325.00 tc 269.98	501.7 352.3	535.6	8.283E-03	1.321E+00	1.351E-01	1.456E+00



表 G.2 ノズルモデル2の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による  
弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-2の歪み範囲及び損傷値  
(弾塑性クリープ解析, 「NEBDS」使用)

評価点	極値時点	温度	TMAX	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 29.99	450.5 394.5	552.2	2.731E-03	2.153E-02	3.177E-05	2.156E-02
B	th 30.25 tc 30.24	446.0 398.7	551.3	2.894E-03	3.152E-02	9.192E-06	3.153E-02
C	th 34.00 tc 32.32	484.0 373.7	550.0	4.415E-03	2.438E-01	5.696E-04	2.443E-01
D	th 37.25 tc 34.98	498.4 354.7	549.0	5.587E-03	5.324E-01	2.510E-03	5.349E-01
E	th 38.50 tc 35.48	501.2 352.8	548.8	6.381E-03	7.733E-01	4.665E-03	7.780E-01
F	th110.00 tc 99.98	537.4 314.9	548.7	6.756E-03	8.976E-01	9.340E-02	9.910E-01
G	th120.00 tc149.98	539.6 311.9	548.9	6.343E-03	7.613E-01	1.110E-01	8.723E-01
H	th135.00 tc149.98	541.1 310.3	550.0	4.756E-03	3.181E-01	3.846E-02	3.565E-01
I	th 30.25 tc 30.24	445.4 399.1	551.2	2.718E-03	2.083E-02	1.660E-02	3.743E-02
J	th 30.25 tc 30.24	453.8 390.2	552.1	2.689E-03	1.936E-02	1.296E-05	1.937E-02
L	th 42.33 tc 39.98	360.8 498.3	538.7	3.481E-03	7.757E-02	2.116E-03	7.968E-02
M	th425.00 tc349.98	505.9 351.9	538.2	9.118E-03	1.663E+00	1.818E-01	1.845E+00

表 G.3 ノズルモデル3の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による  
弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-3の歪み範囲及び損傷値  
(弾塑性クリープ解析, 「NEBDS」使用)

評価点	極値時点	温度	TMAX	$\Delta \epsilon_t$	$D_r$	$D_c$	D
A	th 29.12 tc 29.99	424.7 398.0	552.3	2.345E-03	6.635E-03	3.545E-07	6.635E-03
B	th 30.00 tc 29.99	435.0 408.7	552.3	2.785E-03	2.459E-02	2.074E-06	2.459E-02
C	th 31.50 tc 30.49	455.3 402.6	551.9	4.881E-03	3.476E-01	3.511E-03	3.511E-01
D	th 49.00 tc 42.98	519.3 395.7	548.6	5.998E-03	6.533E-01	3.389E-03	6.567E-01
E	th120.00 tc109.98	536.6 314.9	548.5	7.172E-03	1.042E+00	1.821E-01	1.224E+00
F	th 31.75 tc 30.49	455.4 406.5	552.0	4.288E-03	2.182E-01	2.260E-05	2.182E-01
G	th 30.25 tc 29.99	432.0 415.2	552.3	2.615E-03	1.584E-02	1.733E-06	1.584E-02
H	th 30.00 tc 29.99	434.2 407.5	552.3	2.271E-03	4.981E-03	3.395E-07	4.981E-03
J	th 43.66 tc 41.98	393.5 464.0	539.7	2.686E-03	1.662E-02	3.949E-03	2.057E-02
K	th475.00 tc299.98	515.9 345.7	539.2	8.516E-03	1.441E+00	2.098E-01	1.651E+00

表 G.4 ノズルモデル1の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による  
弾塑性解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-1の歪み範囲及び損傷値  
(弾塑性解析, 「NEBDS」使用)

評価点	極値時点	温度	TMAX	$\Delta \epsilon_t$	$D_r$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 28.74	465.8 411.2	552.2	3.087E-03	4.655E-02	8.208E-06	4.656E-02
B	th 30.25 tc 29.12	459.5 409.5	551.4	3.133E-03	5.062E-02	6.800E-06	5.063E-02
C	th 31.75 tc 31.99	475.7 367.9	550.2	4.730E-03	3.122E-01	9.907E-04	3.131E-01
D	th 35.00 tc 32.32	494.8 365.8	549.3	5.759E-03	5.819E-01	2.304E-03	5.842E-01
E	th 35.50 tc 32.32	496.0 366.3	548.8	6.310E-03	7.505E-01	1.063E-02	7.611E-01
F	th 34.00 tc 32.32	489.1 366.5	548.7	6.380E-03	7.731E-01	2.164E-02	7.947E-01
G	th 32.25 tc 32.32	476.9 366.8	549.3	5.901E-03	6.239E-01	4.044E-02	6.643E-01
H	th 31.75 tc 31.99	472.8 369.7	550.2	4.803E-03	3.292E-01	1.291E-02	3.421E-01
I	th 30.25 tc 29.99	455.5 396.0	551.3	2.936E-03	3.451E-02	8.642E-03	4.315E-02
J	th 30.00 tc 29.12	459.9 407.8	552.1	2.980E-03	3.783E-02	4.545E-06	3.783E-02
L	th 38.50 tc 37.98	344.9 502.3	536.5	3.040E-03	3.587E-02	1.855E-03	3.772E-02
M	th 325.00 tc 269.98	501.7 352.3	535.6	8.315E-03	1.332E+00	1.491E-01	1.481E+00

表 G.5 ノズルモデル2の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による  
弾塑性解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-2の歪み範囲及び損傷値  
(弾塑性解析, 「NEBDS」使用)

評価点	極値時点	温度	TMAX	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 29.99	450.5 394.5	552.2	2.731E-03	2.153E-02	3.125E-05	2.156E-02
B	th 30.25 tc 30.24	446.0 398.7	551.3	2.893E-03	3.147E-02	8.791E-06	3.148E-02
C	th 34.00 tc 32.32	484.0 373.7	550.0	4.416E-03	2.438E-01	5.680E-04	2.444E-01
D	th 37.25 tc 34.98	498.4 354.7	549.0	5.589E-03	5.332E-01	2.515E-03	5.357E-01
E	th 38.50 tc 35.48	501.2 352.8	548.8	6.386E-03	7.752E-01	4.704E-03	7.799E-01
F	th110.00 tc 99.98	537.4 314.9	548.7	6.768E-03	9.016E-01	1.022E-01	1.004E+00
G	th120.00 tc149.98	539.6 311.9	548.9	6.361E-03	7.669E-01	1.240E-01	8.909E-01
H	th135.00 tc149.98	541.1 310.3	550.0	4.765E-03	3.203E-01	3.997E-02	3.603E-01
I	th 30.25 tc 30.24	445.4 399.1	551.2	2.716E-03	2.074E-02	1.713E-02	3.787E-02
J	th 30.25 tc 30.24	453.8 390.2	552.1	2.693E-03	1.953E-02	1.290E-05	1.954E-02
L	th 42.33 tc 39.98	360.8 498.3	538.7	3.479E-03	7.729E-02	2.140E-03	7.943E-02
M	th425.00 tc349.98	505.9 351.9	538.2	9.151E-03	1.677E+00	2.046E-01	1.881E+00

表 G.6 ノズルモデル3の標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による  
弾塑性解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-3の歪み範囲及び損傷値  
(弾塑性解析, 「NEBDS」使用)

評価点	極値時点	温度	TMAX	$\Delta \epsilon_t$	$D_f$	$D_c$	D
A	th 29.12 tc 29.99	424.7 398.0	552.3	2.345E-03	6.629E-03	3.540E-07	6.629E-03
B	th 30.00 tc 29.99	435.0 408.7	552.3	2.784E-03	2.456E-02	2.055E-06	2.456E-02
C	th 31.50 tc 30.49	455.3 402.6	551.9	4.879E-03	3.470E-01	3.572E-03	3.506E-01
D	th 41.00 tc 36.98	506.6 349.8	548.6	6.003E-03	6.547E-01	3.411E-03	6.581E-01
E	th120.00 tc109.98	536.6 314.9	548.5	7.183E-03	1.046E+00	2.289E-01	1.275E+00
F	th 31.75 tc 30.49	455.4 406.5	552.0	4.291E-03	2.188E-01	2.340E-05	2.188E-01
G	th 30.25 tc 29.99	432.0 415.2	552.3	2.615E-03	1.584E-02	1.706E-06	1.584E-02
H	th 30.00 tc 29.99	434.2 407.5	552.3	2.271E-03	4.979E-03	3.392E-07	4.979E-03
J	th 43.66 tc 41.98	393.5 464.0	539.7	2.681E-03	1.637E-02	4.043E-03	2.041E-02
K	th425.00 tc299.98	513.6 345.7	539.2	8.538E-03	1.450E+00	2.402E-01	1.690E+00

表 G.7 ノズルモデル1の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリーブ解析結果に対する「直接法」によるクリーブ疲労損傷評価結果

クリーブ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)

非弾性解析 (「NEBDS」使用)					
評価点	代表時間	$D_1$	$D_2$	D	$\Delta \epsilon_c$
A	t <sub>1</sub> 29.0 t <sub>2</sub> 30.0	1.366 E-1	4.747 E-4	1.371 E-1	4.077 E-3
B	30.0 31.5	9.791 E-2	2.121 E-3	1.000 E-1	3.770 E-3
C	32.0 31.7	4.151 E-1	1.407 E-3	4.165 E-1	5.623 E-3
D	32.0 34.0	6.430 E-1	8.292 E-3	6.513 E-1	6.587 E-3
E	33.0 34.0	7.864 E-1	1.910 E-2	8.055 E-1	7.133 E-3
E-F	33.0 34.0	8.208 E-1	9.204 E-2	9.129 E-1	7.260 E-3
F-E	33.0 34.0	8.330 E-1	2.652 E-1	1.098	7.304 E-3
F	32.0 33.2	8.434 E-1	2.148 E-1	1.058	7.342 E-3
G	32.0 32.2	7.097 E-1	1.346 E-1	8.443 E-1	6.846 E-3
H	32.0 31.7	3.590 E-1	6.235 E-2	4.213 E-1	5.359 E-3
I	30.0 31.5	8.565 E-2	5.171 E-4	8.617 E-2	3.660 E-3
J 1	29.0 30.2	1.332 E-1	1.012 E-4	1.333 E-1	4.051 E-3
J 2	29.0 30.0	1.108 E-1	6.627 E-5	1.109 E-1	3.878 E-3
L-E	36.0 37.2	5.306 E-2	1.926 E-4	5.325 E-2	3.320 E-3
L	36.0 37.2	3.669 E-2	2.176 E-4	3.691 E-2	3.103 E-3
M-G	210.0 255.0	1.044	1.122 E-3	1.045	8.042 E-3
M	270.0 325.0	1.985	2.867 E-3	1.988	1.091 E-2
N	270.0 325.0	1.985	2.867 E-3	1.988	1.091 E-2

表 G.8 ノズルモデル2の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

## クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)

非弾性解析 (「NEBDS」使用)					
評価点	代表時間	$D_1$	$D_2$	D	$\Delta \epsilon_1$
A 1	1, 30.0	7.674 E-2	1.610 E-4	7.690 E-2	3.575 E-3
A 2	1, 30.2	8.740 E-2	2.278 E-4	8.763 E-2	3.676 E-3
B	30.0 30.2	6.095 E-2	5.126 E-4	6.147 E-2	3.411 E-3
C	35.0 35.0	3.223 E-1	1.495 E-3	3.238 E-1	5.177 E-3
D	35.0 37.2	5.869 E-1	1.100 E-3	5.880 E-1	6.362 E-3
E	36.0 41.0	7.997 E-1	5.997 E-3	8.057 E-1	7.182 E-3
E F 1	37.0 37.2	8.284 E-1	2.265 E-1	1.055	7.288 E-3
E F 2	78.0 90.0	8.486 E-1	1.310 E-1	9.795 E-1	7.360 E-3
F	100.0 120.0	9.661 E-1	2.073 E-1	1.173	7.776 E-3
G	135.0 135.0	8.385 E-1	1.418 E-1	9.803 E-1	7.324 E-3
H	150.0 135.0	3.964 E-1	1.280 E-3	3.977 E-1	5.537 E-3
I	30.0 30.2	5.326 E-2	6.892 E-5	5.333 E-2	3.323 E-3
J 1	30.0	7.937 E-2	9.236 E-6	7.938 E-2	3.601 E-3
J 2	30.2	5.803 E-2	4.025 E-6	5.804 E-2	3.378 E-3
N'	39.0 42.3	1.527 E-1	3.633 E-4	1.531 E-1	4.192 E-3
L	38.0 39.7	1.249 E-1	1.861 E-4	1.251 E-1	3.989 E-3
L**	38.0 39.7	9.553 E-2	1.740 E-4	9.570 E-2	3.749 E-3
G'	300.0 350.0	1.061	1.456 E-3	1.062	8.098 E-3
M	300.0 425.0	2.482	5.017 E-3	2.487	1.225 E-2
N	300.0 425.0	2.482	5.017 E-3	2.487	1.225 E-2

表 G.9 ノズルモデル3の単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果に対する  
「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-3)

非弾性解析 (「NEBDS」使用)					
評価点	代表時間	$D_1$	$D_2$	D	$\Delta \epsilon_c$
A 1	1. 30.0	2.995 E-2	5.919 E-5	3.001 E-2	2.998 E-3
A 2	1. 30.0	4.157 E-2	8.772 E-5	4.166 E-2	3.173 E-3
B 1	30.0	4.930 E-2	6.610 E-4	4.996 E-2	3.274 E-3
B 2	30.2	7.313 E-2	2.071 E-4	7.520 E-2	3.540 E-3
C 1	30.0	4.208 E-1	1.578 E-3	4.224 E-1	5.649 E-3
C 2	31.7	4.692 E-1	1.439 E-3	4.707 E-1	5.866 E-3
D	37.0 41.0	7.083 E-1	7.999 E-4	7.091 E-1	6.841 E-3
DE 1	84.0 90.0	8.782 E-1	1.102 E-2	8.892 E-1	7.467 E-3
DE 2	90.0 100.0	9.164 E-1	2.855 E-2	9.449 E-1	7.602 E-3
E	110.0 135.0	1.187	2.234 E-1	1.411	8.518 E-3
F 1	30.0	3.223 E-1	1.143 E-3	3.234 E-1	5.177 E-3
F 2	31.7	2.931 E-1	1.322 E-3	2.945 E-1	5.027 E-3
G 1	30.0	5.148 E-2	4.113 E-4	5.190 E-2	3.301 E-3
G 2	31.5	3.498 E-2	1.834 E-4	3.516 E-2	3.078 E-3
H 1	30.0	2.724 E-2	1.339 E-5	2.726 E-2	2.951 E-3
H 2	30.2	2.021 E-2	8.920 E-6	2.022 E-2	2.816 E-3
DOUT	56.0 60.0	1.986 E-3	1.049 E-3	3.036 E-3	2.124 E-3
I'	51.0 54.5	6.019 E-2	3.415 E-4	6.053 E-2	3.403 E-3
J	45.0 51.7	5.056 E-2	3.054 E-4	5.086 E-2	3.290 E-3
EOUT'	350.0 500.0	1.253	1.734 E-3	1.255	8.730 E-3
EOUT	300.0 400.0	2.399	3.353 E-3	2.403	1.203 E-2
K	300.0 450.0	2.326	3.703 E-3	2.330	1.184 E-2



表 G.10 ノズルモデル1の低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による  
弾塑性クリープ解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-1の歪み範囲及び損傷値(低歪速度条件)  
(弾塑性クリープ解析, 「NEBDS」使用)

評価点	極値時点	温度	TMAX	$\Delta \varepsilon_t$	$D_r$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 28.74	465.8 411.2	552.2	3.214E-03	5.832E-02	1.062E-05	5.833E-02
B	th 30.25 tc 29.12	459.5 409.5	551.4	3.219E-03	5.883E-02	9.436E-06	5.884E-02
C	th 31.75 tc 31.99	475.7 367.9	550.2	4.870E-03	3.449E-01	3.678E-04	3.453E-01
D	th 34.00 tc 32.32	490.1 365.8	549.3	5.943E-03	6.365E-01	3.320E-04	6.368E-01
E	th 34.50 tc 32.32	491.9 366.3	548.8	6.504E-03	8.136E-01	1.526E-03	8.151E-01
F	th 32.75 tc 32.32	481.0 366.5	548.7	6.672E-03	8.692E-01	2.535E-03	8.717E-01
G	th 31.75 tc 32.32	472.9 366.8	549.3	6.231E-03	7.254E-01	4.500E-03	7.299E-01
H	th 31.75 tc 31.99	472.8 369.7	550.2	5.041E-03	3.868E-01	1.893E-03	3.887E-01
I	th 30.25 tc 29.99	455.5 396.0	551.3	3.005E-03	3.974E-02	3.211E-03	4.295E-02
J	th 30.00 tc 28.99	459.9 411.0	552.1	3.056E-03	4.387E-02	4.603E-06	4.387E-02
L	th 38.50 tc 36.98	344.9 507.0	536.5	3.103E-03	4.054E-02	1.693E-04	4.071E-02
M	th325.00 tc299.98	501.7 349.4	535.6	9.207E-03	1.670E+00	1.253E-01	1.795E+00

表 G.11 ノズルモデル1の低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による  
弾塑性解析結果に対する「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

MODEL-1の歪み範囲及び損傷値(低歪速度条件)  
(弾塑性解析, 「NEBDS」使用)

評価点	極値時点	温度	TMAX	$\Delta \epsilon_t$	$D_r$	$D_c$	D
A	th 30.00 tc 28.74	465.8 411.2	552.2	3.214E-03	5.834E-02	1.059E-05	5.835E-02
B	th 30.25 tc 29.12	459.5 409.5	551.4	3.219E-03	5.884E-02	9.400E-06	5.885E-02
C	th 31.75 tc 31.99	475.7 367.9	550.2	4.870E-03	3.451E-01	3.677E-04	3.454E-01
D	th 34.00 tc 32.32	490.1 365.8	549.3	5.943E-03	6.367E-01	3.321E-04	6.370E-01
E	th 34.50 tc 32.32	491.9 366.3	548.8	6.508E-03	8.147E-01	1.527E-03	8.162E-01
F	th 32.75 tc 32.32	481.0 366.5	548.7	6.670E-03	8.686E-01	2.537E-03	8.712E-01
G	th 31.75 tc 32.32	472.9 366.8	549.3	6.233E-03	7.260E-01	4.510E-03	7.305E-01
H	th 31.75 tc 31.99	472.8 369.7	550.2	5.041E-03	3.867E-01	1.876E-03	3.886E-01
I	th 30.25 tc 29.99	455.5 396.0	551.3	3.004E-03	3.969E-02	3.306E-03	4.300E-02
J	th 30.00 tc 28.99	459.9 411.0	552.1	3.056E-03	4.391E-02	4.602E-06	4.391E-02
L	th 38.50 tc 36.98	344.9 507.0	536.5	3.101E-03	4.042E-02	1.682E-04	4.059E-02
M	th325.00 tc299.98	501.7 349.4	535.6	9.231E-03	1.679E+00	1.367E-01	1.816E+00

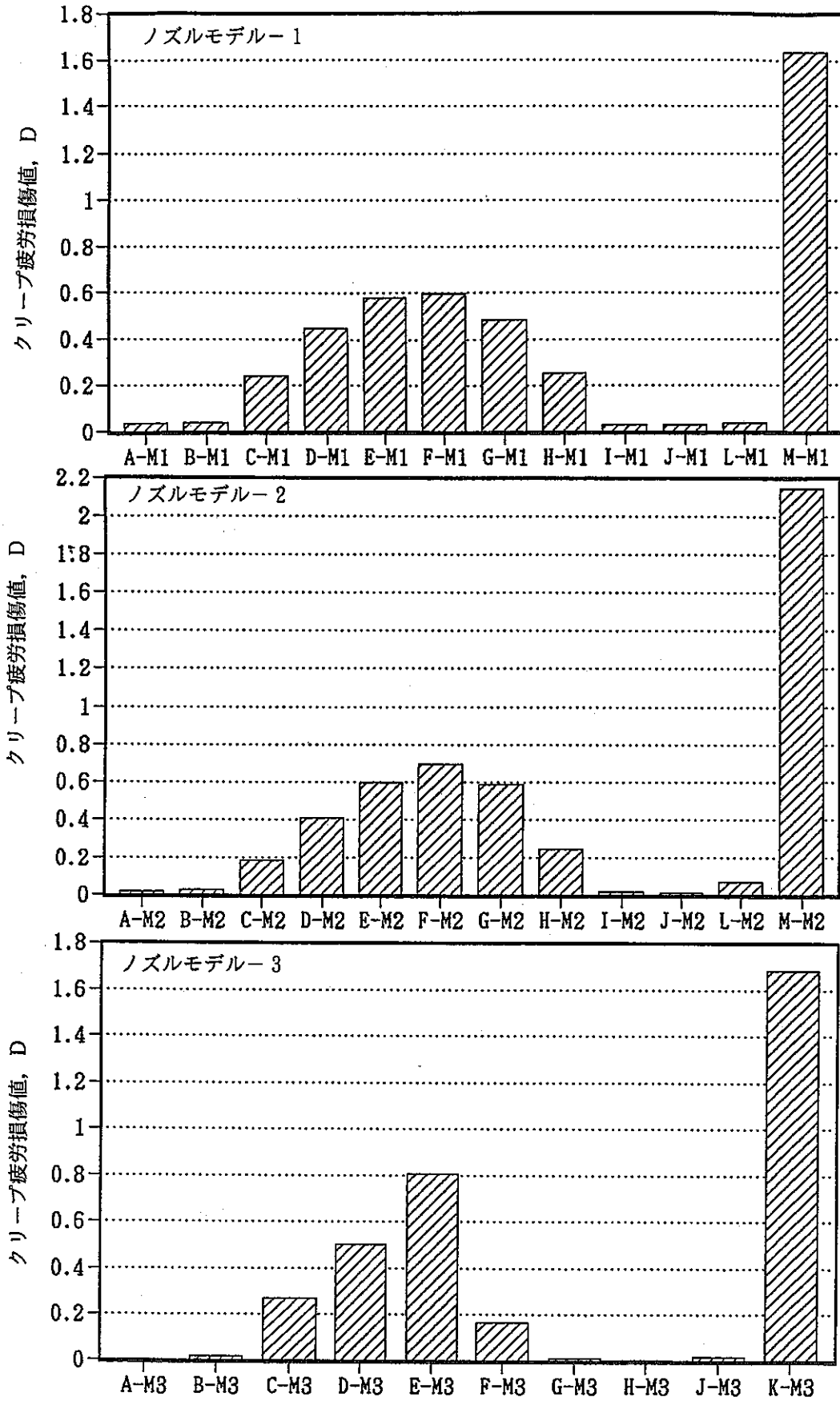


図 G.1 ノズルモデル1～3の評価点での「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果  
(標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果)

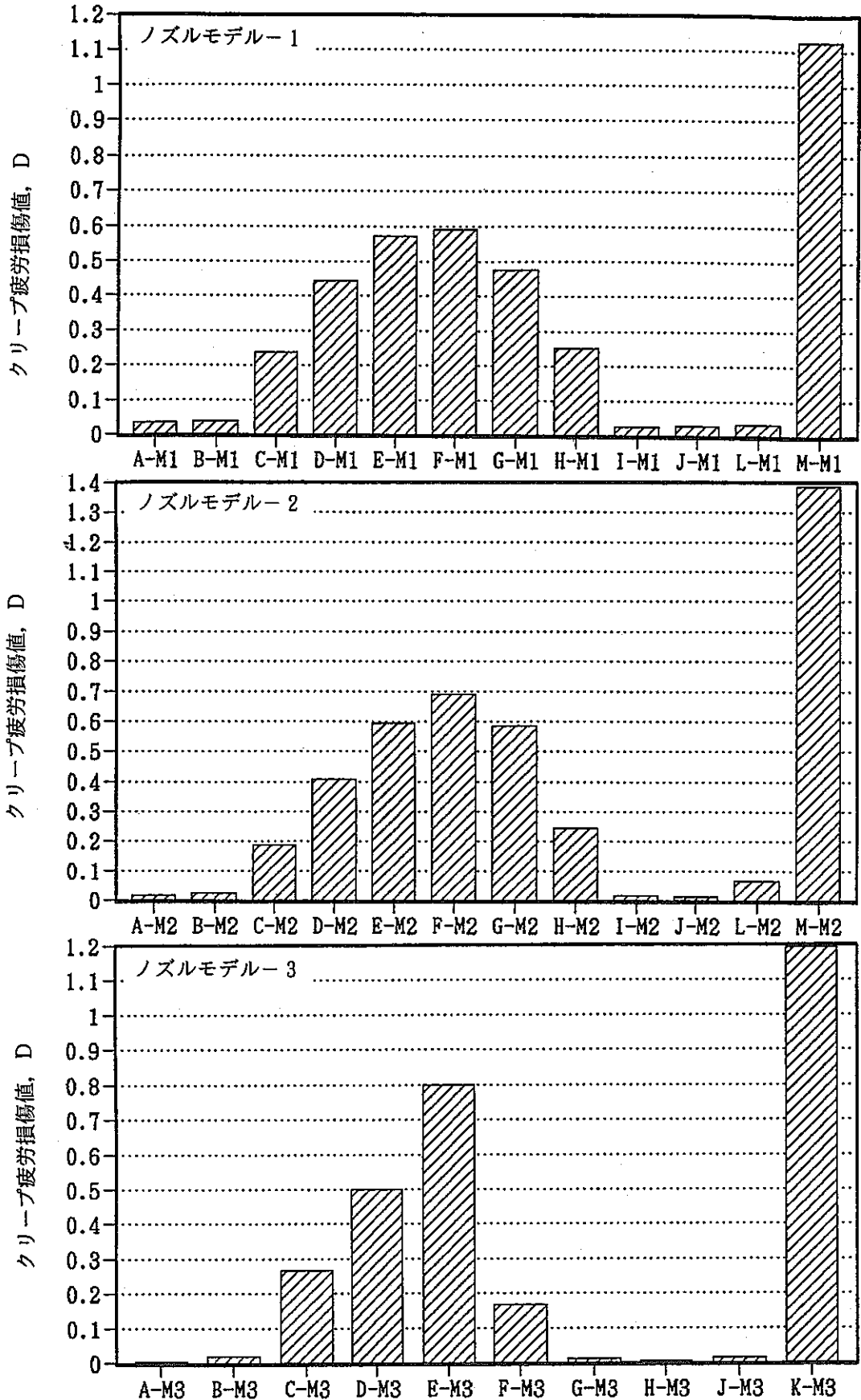


図 G.2 ノズルモデル1～3の評価点での「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果  
(標準ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性解析結果)

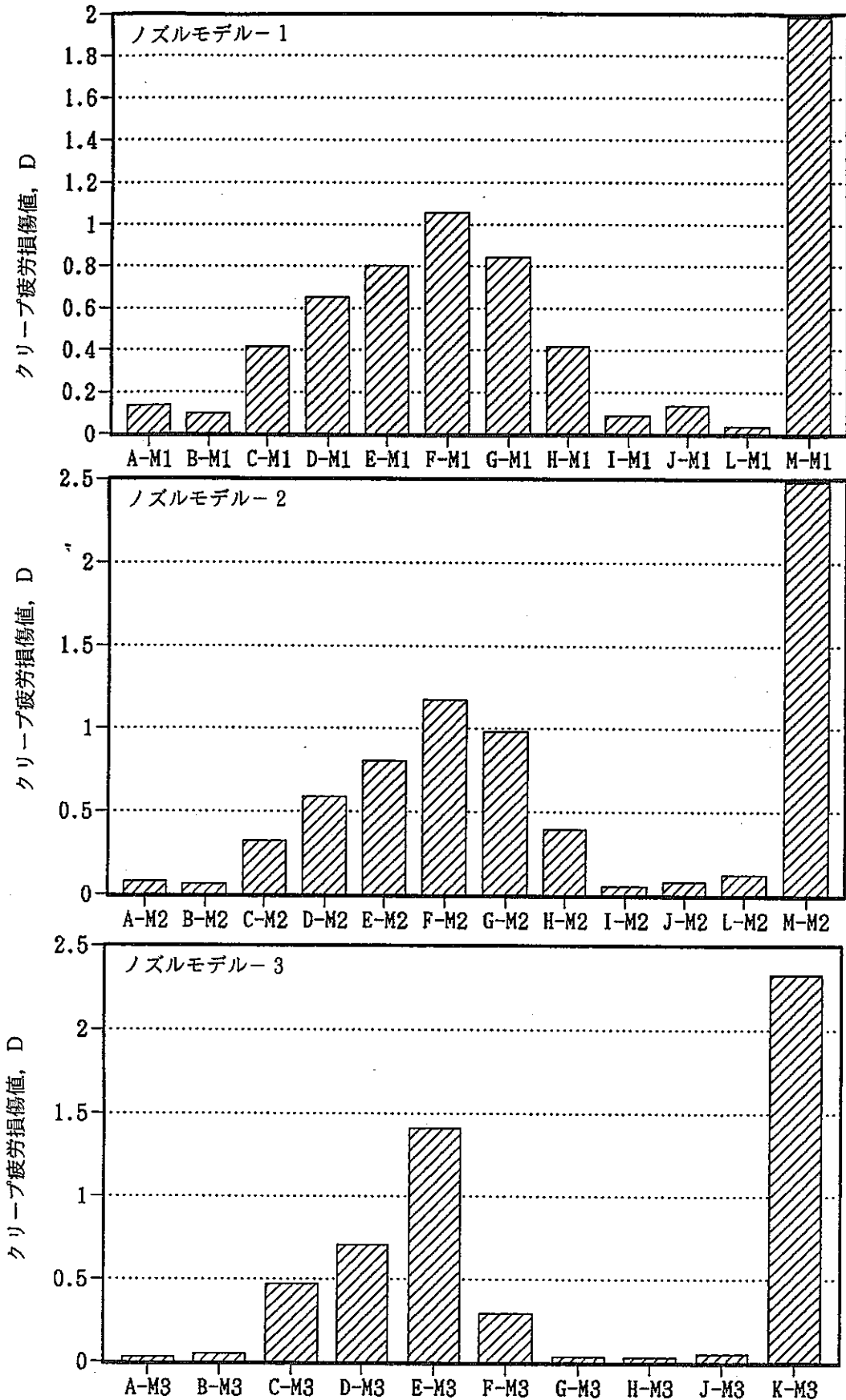


図 G.3 ノズルモデル1～3の評価点での「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果 (単調応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析結果)

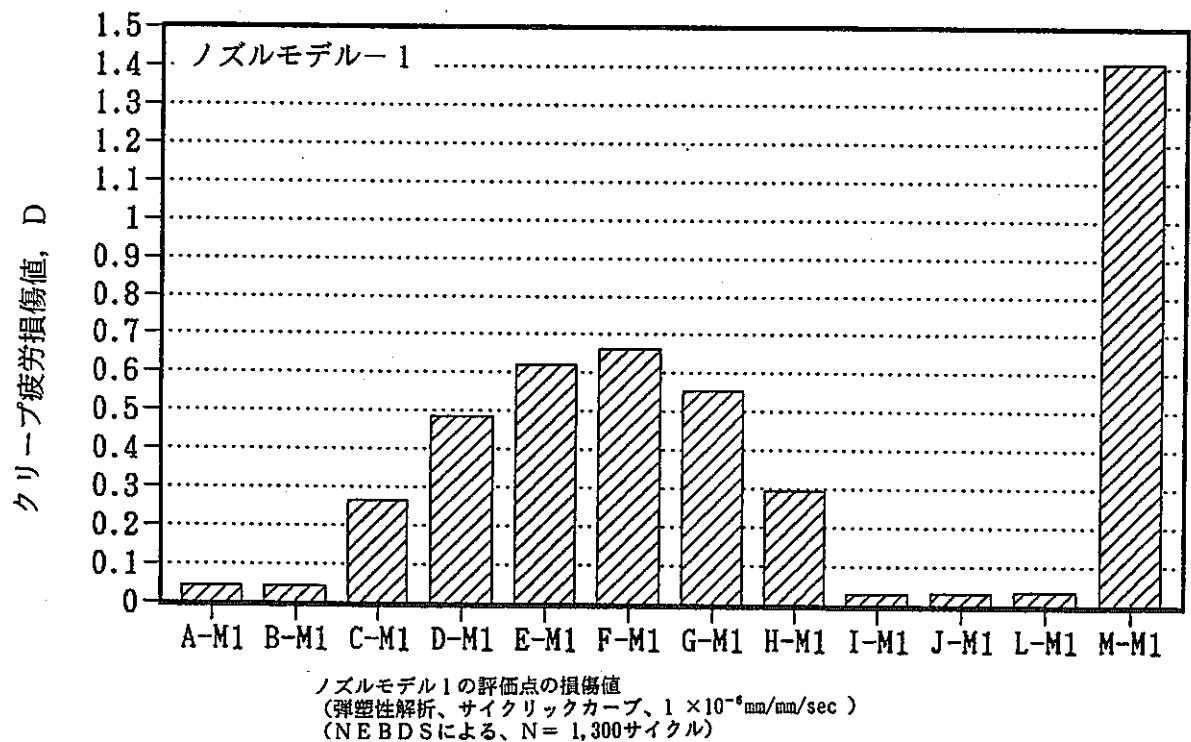
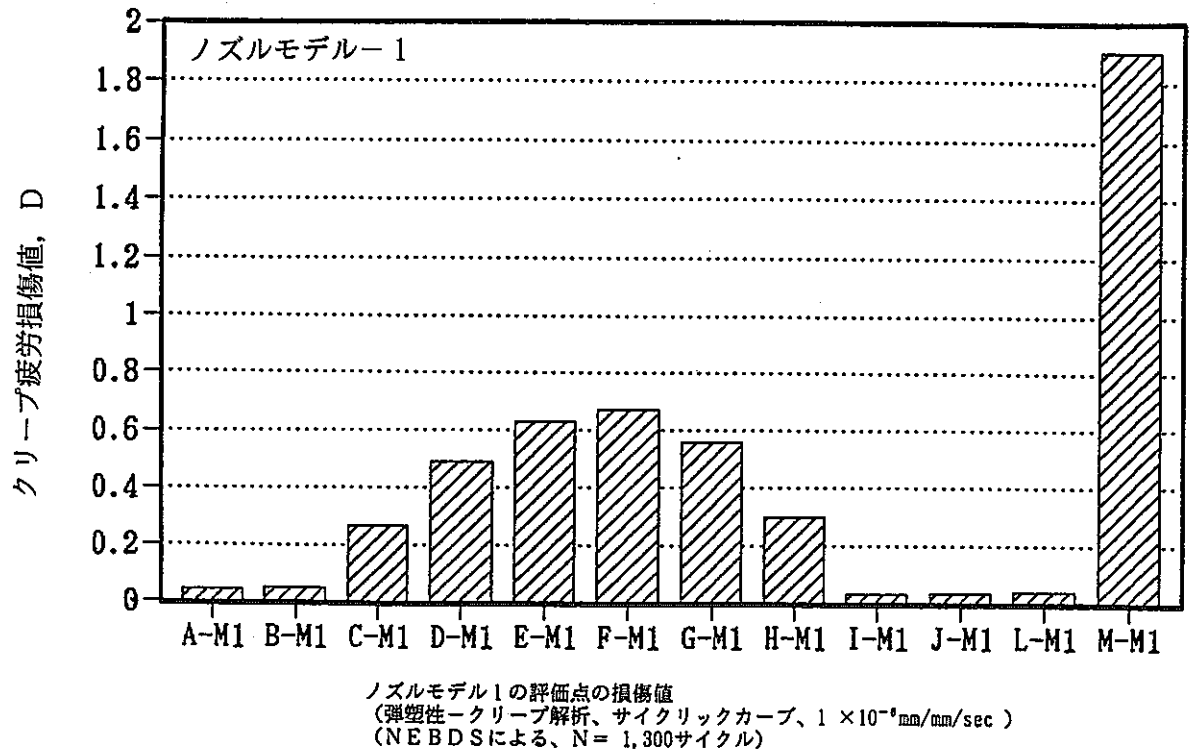


図 G.4 ノズルモデル1の評価点での「直接法」によるクリープ疲労損傷評価結果  
(低ひずみ速度の定常繰返し応力-ひずみ関係による弾塑性クリープ解析および弾塑性解析結果)

## 付録 H 弾性解析に基づくクリープ疲労損傷評価結果

付録Hとして、3種のノズル形状モデルに対して第2報で実施した弾性熱応力解析結果に対して「間接法」(TTSDSと呼ぶ)によるクリープ疲労損傷評価を行った結果について示す。

ここでは、第2報の弾性解析結果に基づいて、すでに得られている1,300サイクル時点での損傷値を試験終了時の全熱過渡サイクル数である1,700サイクル時点での損傷値に修正した。

図 H.1に弾性解析の結果として3種類のノズル形状モデルの各評価点での全ひずみ範囲  $\epsilon_t$  を、また表 H.1~H.3 と図 H.2には「間接法」によるクリープ疲労損傷値を示す。

表 H.1 ノズルモデル1の弾性解析結果に対する「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

表 H.2 ノズルモデル2の弾性解析結果に対する「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

表 H.3 ノズルモデル3の弾性解析結果に対する「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

図 H.1 ノズルモデル1~3の評価点でのひずみ範囲(弾性解析結果による)

図 H.2 ノズルモデル1~3の評価点での「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果(弾性解析結果による)

また、弾性熱応力解析結果について、第2報で実施した「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針の長期一次応力が低い場合の手法」(EBDSと呼んでいる)に基づいた評価結果のまとめ表を各モデルについて添付する。

表 H.4 EBDSによる損傷評価結果(モデル-1)

表 H.5 EBDSによる損傷評価結果(モデル-2)

表 H.6 EBDSによる損傷評価結果(モデル-3)

図 H.3 EBDSで設定した評価ライン(モデル-1)

図 H.4 EBDSで設定した評価ライン(モデル-2)

図 H.5 EBDSで設定した評価ライン(モデル-3)

表 H.1 ノズルモデル1の弾性解析結果に対する「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

## クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)

弾性解析 (「TTSDS」使用)					
評価点	代表時間	$D_1$	$D_2$	D	$\Delta \epsilon_c$
A	1. 29.0 1. 30.0	1.049 E-1	1.873 E-1	2.922 E-1	3.829 E-3
B	30.0 31.5	1.132 E-1	1.941 E-1	3.037 E-1	3.897 E-3
C	32.0 31.7	3.295 E-1	3.309 E-1	6.604 E-1	5.214 E-3
D	32.0 34.0	5.556 E-1	4.394 E-1	9.950 E-1	6.234 E-3
E	33.0 34.0	6.693 E-1	4.881 E-1	1.157	6.690 E-3
F	32.0 33.2	6.615 E-1	4.848 E-1	1.146	6.660 E-3
G	32.0 32.2	5.420 E-1	4.333 E-1	9.754 E-1	6.178 E-3
H	32.0 31.7	2.845 E-1	3.064 E-1	5.909 E-1	4.981 E-3
I	30.0 31.5	9.116 E-2	1.754 E-1	2.666 E-1	3.711 E-3
J 1	29.0 30.2	1.015 E-1	1.844 E-1	2.858 E-1	3.800 E-3
J 2	29.0 30.0	9.807 E-2	1.815 E-1	2.795 E-1	3.771 E-3
L	36.0 37.2	1.446 E-1	2.184 E-1	3.630 E-1	4.135 E-3
M	270.0 325.0	1.143	6.678 E-1	1.810	8.371 E-3
N	270.0 325.0	1.143	6.678 E-1	1.810	8.371 E-3



表 H.2 ノズルモデル2の弾性解析結果に対する「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

## クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)

弾性解析 (「TTSDS」使用)					
評価点	代表時間	$D_t$	$D_c$	D	$\Delta \varepsilon_c$
A	$t_c$ 30.0 $t_s$ 30.2	8.012 E-2	1.653 E-1	2.454 E-1	3.608 E-3
B	30.0 30.2	8.947 E-2	1.739 E-1	2.634 E-1	3.695 E-3
C	35.0 35.0	2.798 E-1	3.038 E-1	5.836 E-1	4.957 E-3
D	35.0 37.2	5.347 E-1	4.301 E-1	9.648 E-1	6.147 E-3
E	36.0 41.0	7.033 E-1	5.021 E-1	1.205 E-1	6.821 E-3
F	100.0 120.0	8.188 E-1	5.482 E-1	1.367	7.252 E-3
G	135.0 135.0	7.033 E-1	5.021 E-1	1.205	6.821 E-3
H	150.0 135.0	2.934 E-1	3.114 E-1	6.047 E-1	5.028 E-3
I	30.0 30.2	8.041 E-2	1.656 E-1	2.460 E-1	3.611 E-3
J	30.0 30.2	8.332 E-2	1.683 E-1	2.517 E-1	3.639 E-3
L	38.0 39.7	2.086 E-1	2.617 E-1	4.703 E-1	4.553 E-3
M	300.0 425.0	1.166	6.761 E-1	1.842	8.449 E-3
N	300.0 425.0	1.166	6.761 E-1	1.842	8.449 E-3

表 H.3 ノズルモデル3の弾性解析結果に対する「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果

## クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-3)

弾性解析 (「TTSDS」使用)					
評価点	代表時間	$D_1$	$D_2$	D	$\Delta \varepsilon_1$
A	1, 30.0 1, 30.2	4.465 E-2	1.271 E-1	1.718 E-1	3.215 E-3
B	30.0 30.2	7.741 E-2	1.627 E-1	2.401 E-1	3.582 E-3
C	35.0 35.0	3.524 E-1	3.429 E-1	6.953 E-1	5.327 E-3
D	35.0 37.2	6.510 E-1	4.804 E-1	1.131 E-1	6.618 E-3
E	36.0 41.0	9.654 E-1	6.039 E-1	1.569	7.773 E-3
F	100.0 120.0	2.960 E-1	3.128 E-1	6.088 E-1	5.042 E-3
G	135.0 135.0	6.267 E-2	1.478 E-1	2.105 E-1	3.430 E-3
H	150.0 135.0	3.673 E-2	1.167 E-1	1.535 E-1	3.104 E-3
J	30.0 30.2	8.436 E-2	1.693 E-1	2.536 E-1	3.648 E-3
I	30.0 30.2	1.054	6.364 E-1	1.691	8.077 E-3
K	39.0 42.3	1.054	6.364 E-1	1.691	8.077 E-3

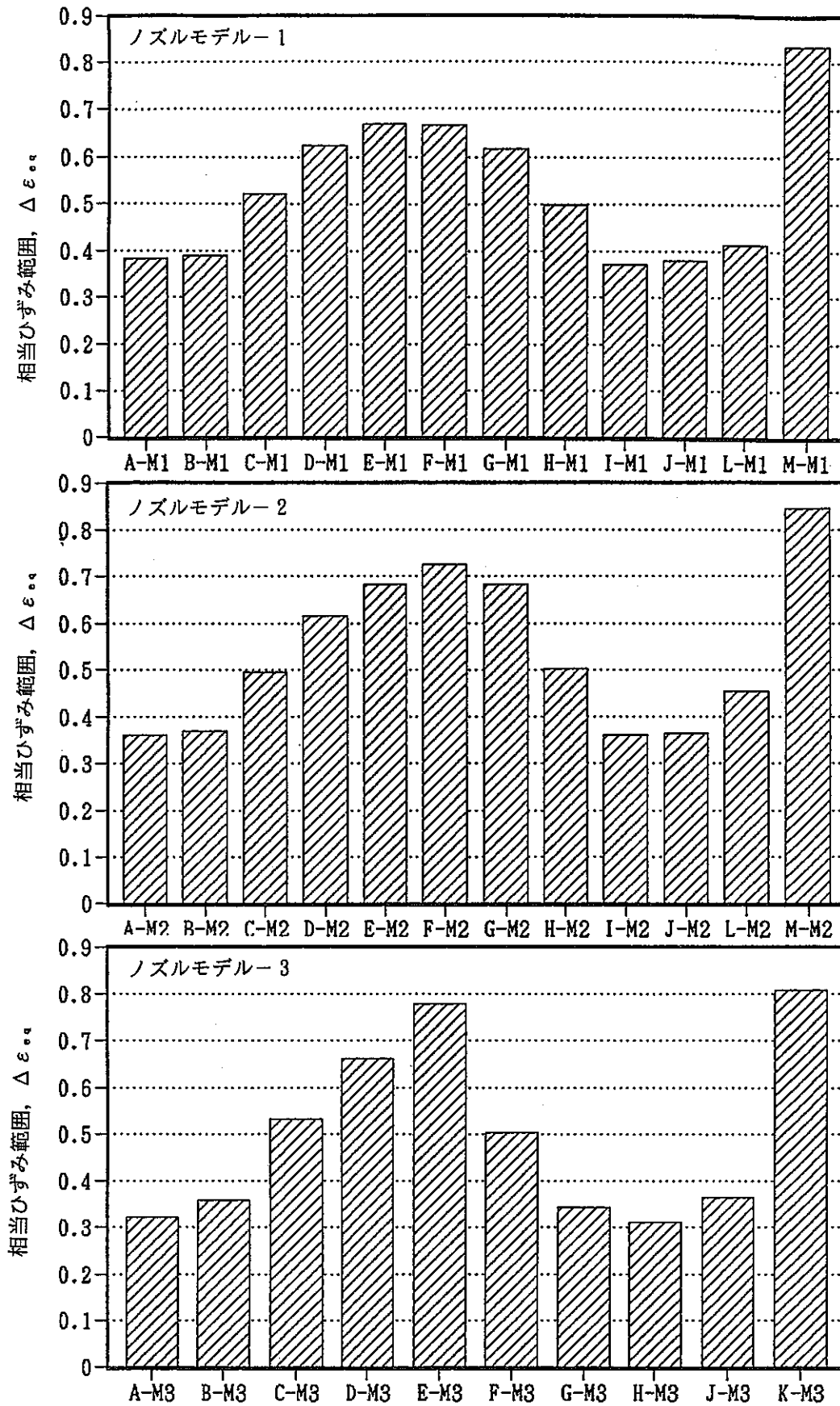


図 H.1 ノズルモデル 1～3 の評価点でのひずみ範囲 (弾性解析結果による)

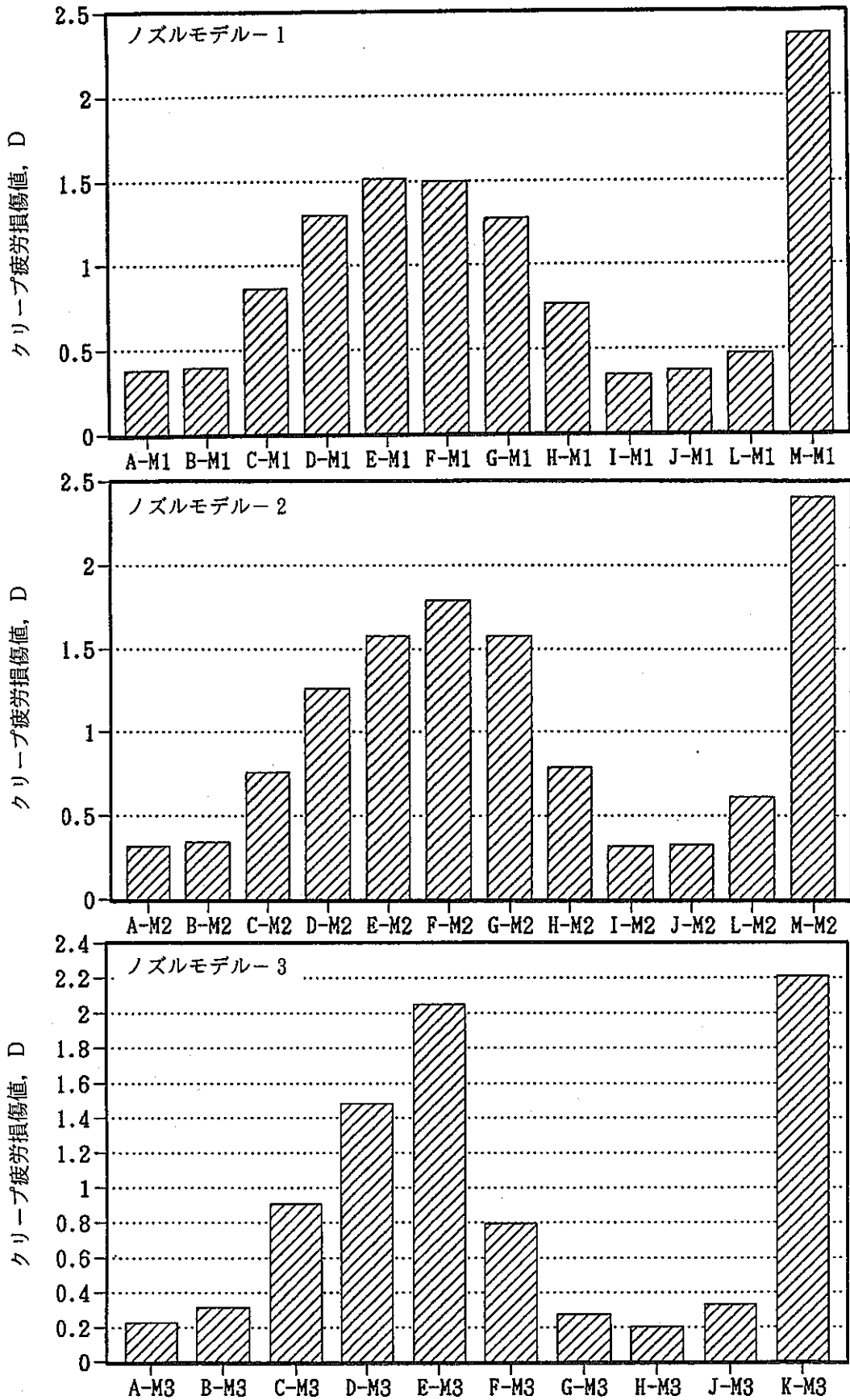


図 H.2 ノズルモデル1～3の評価点での「間接法」によるクリープ疲労損傷評価結果 (弾性解析結果による)

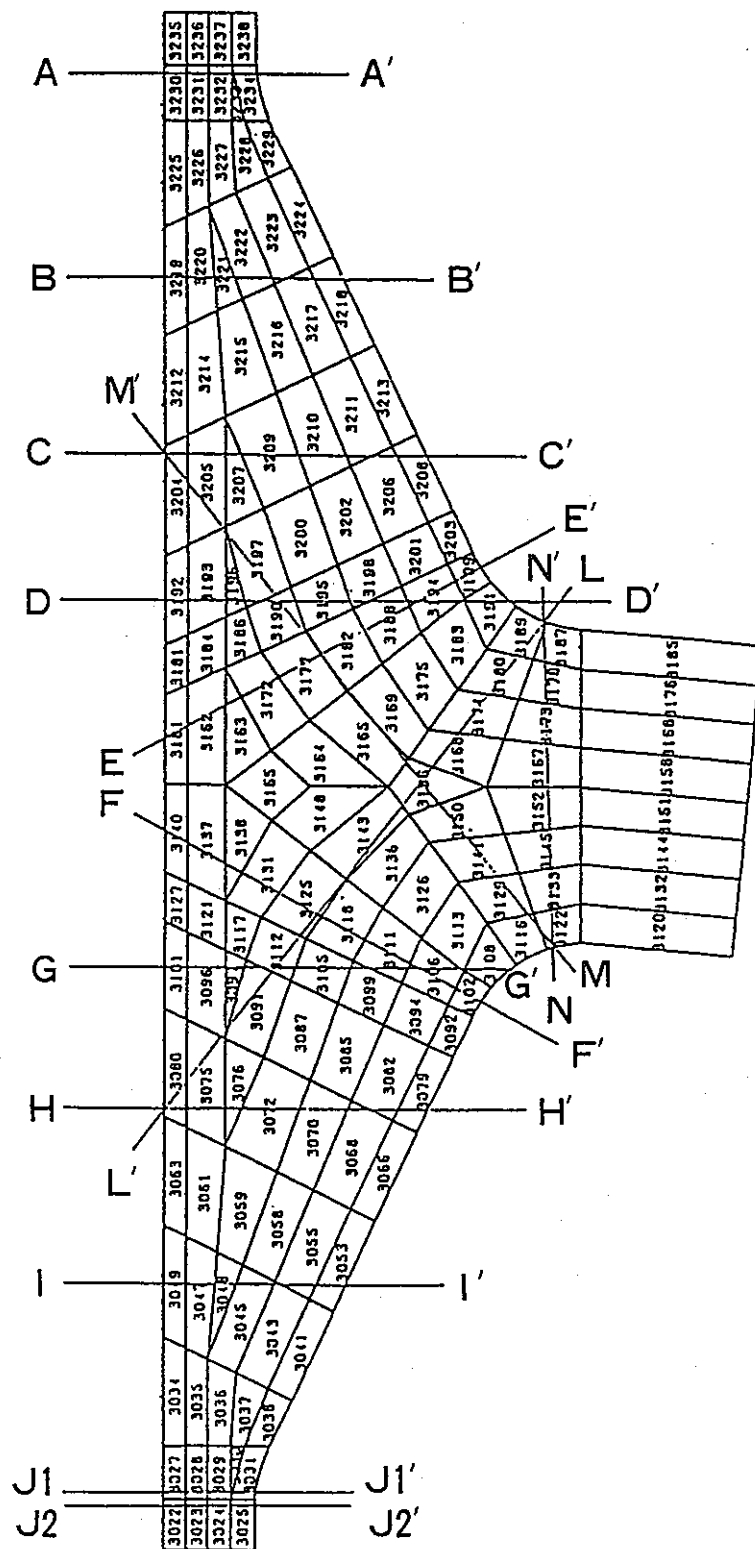


図 H.3 「EBDS」による評価ライン (MODEL-1)

表 H.4 「EBDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)

LINE	代表時間 [SEC]	$S_n$	$S_t$	$S_r$	$K(=S_r S_n)$	$\varepsilon_n$	$\varepsilon_t$	$D_t$	$D_c$	D
A	$t_c = 29.0$ $t_H = 30.0$	55.13	7.36	54.73	0.993	3.512E-3	8.121E-3	20.77	22.95	43.73
B	$t_c = 29.0$ $t_H = 30.0$	38.80	16.31	44.21	1.139	2.472E-3	6.290E-3	11.24	17.02	28.26
C	$t_c = 32.0$ $t_H = 31.5$	53.99	22.51	63.19	1.169	3.439E-3	1.028E-2	35.13	31.47	66.60
D	$t_c = 32.0$ $t_H = 32.75$	62.31	32.53	69.22	1.111	3.969E-3	1.237E-2	50.00	40.55	90.55
E	$t_c = 33.0$ $t_H = 34.0$	72.59	28.01	80.86	1.114	4.623E-3	1.425E-2	65.39	49.85	115.24
F	$t_c = 33.0$ $t_H = 34.0$	71.00	28.19	79.95	1.126	4.522E-3	1.405E-2	63.72	48.84	112.56
G	$t_c = 72.0$ $t_H = 30.0$	94.93	0.84	98.58	1.038	6.047E-3	1.581E-2	78.64	58.37	137.01
H	$t_c = 32.0$ $t_H = 31.5$	51.17	22.51	59.19	1.157	3.259E-3	9.569E-3	30.27	28.49	58.77
I	$t_c = 30.0$ $t_H = 30.0$	35.69	15.19	40.46	1.133	2.273E-3	5.506E-3	7.69	14.50	22.19
J 1	$t_c = 29.0$ $t_H = 30.0$	54.39	7.55	54.36	0.999	3.464E-3	7.992E-3	20.03	22.51	42.54
J 2	$t_c = 29.0$ $t_H = 30.0$	54.38	7.46	53.96	0.992	3.464E-3	7.984E-3	19.98	22.48	42.46
L	$t_c = 39.0$ $t_H = 41.0$	49.31	21.86	63.86	1.295	3.141E-3	1.000E-3	33.33	30.29	63.62
M	$t_c = 270.0$ $t_H = 350.0$	39.71	1.21	129.89	3.271	2.529E-3	2.715E-3	204.95	133.51	338.46
N	$t_c = 270.0$ $t_H = 350.0$	67.60	2.66	131.28	1.942	4.306E-3	1.952E-3	114.26	80.15	194.41

※ 繰り返し数 N : 1300

※ ひずみサイクル中の最高金属温度 TH : 550.0 (°C)

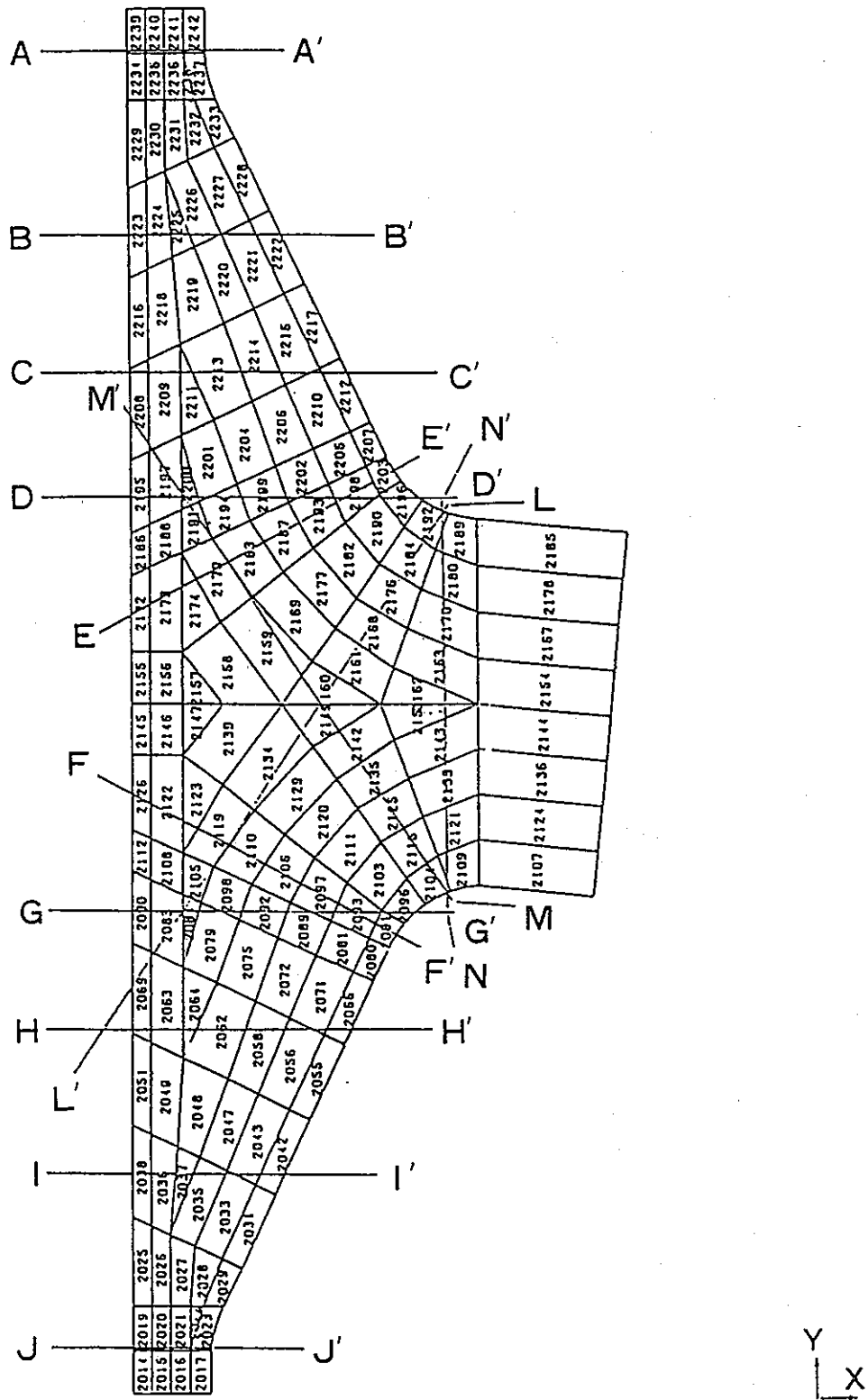


図 H.4 「EBDS」による評価ライン (MODEL-2)

表 H.5 「EBDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)

LINE	代表時間 [SEC]	$S_n$	$S_c$	$S_p$	$K(=S_p/S_n)$	$\epsilon_n$	$\epsilon_c$	$D_c$	$D_p$	D
A	$t_c = 30.0$ $t_H = 30.0$	57.67	4.15	54.91	0.952	3.673E-3	8.364E-3	22.23	23.82	46.05
B	$t_c = 30.0$ $t_H = 30.0$	56.51	15.33	41.67	1.141	2.325E-3	5.725E-3	8.60	15.20	23.80
C	$t_c = 32.0$ $t_H = 34.0$	52.08	19.90	60.96	1.170	3.317E-3	9.666E-3	30.98	28.89	59.87
D	$t_c = 35.0$ $t_H = 35.0$	67.50	25.91	73.53	1.089	4.299E-3	1.276E-2	53.02	42.37	96.39
E	$t_c = 35.0$ $t_H = 36.0$	77.52	25.07	83.24	1.074	4.938E-3	1.461E-2	68.32	51.78	120.10
F	$t_c = 90.0$ $t_H = 100.0$	113.74	5.08	73.61	0.963	7.245E-3	1.915E-2	110.39	77.87	188.27
G	$t_c = 100.0$ $t_H = 120.0$	105.44	0.23	108.93	1.033	6.716E-3	1.776E-2	96.65	69.68	166.34
H	$t_c = 210.0$ $t_H = 270.0$	79.45	0.61	79.63	1.002	5.061E-3	1.228E-3	49.32	40.14	89.46
I	$t_c = 30.0$ $t_H = 30.0$	31.09	15.52	36.17	1.163	1.980E-3	4.622E-3	4.33	11.69	16.02
J	$t_c = 30.0$ $t_H = 30.0$	53.40	6.85	52.90	0.990	3.401E-3	7.752E-3	18.67	21.71	40.39
L	$t_c = 41.0$ $t_H = 41.0$	47.47	21.86	68.98	1.453	3.024E-3	1.051E-3	36.63	32.44	69.07
N	$t_c = 300.0$ $t_H = 450.0$	41.61	2.56	133.11	3.199	2.650E-3	2.732E-3	207.12	134.81	341.93
N	$t_c = 300.0$ $t_H = 450.0$	58.93	4.33	127.53	2.164	3.754E-3	1.827E-3	101.62	72.68	174.30

※ 繰り返し数 N : 1300

※ ひずみサイクル中の最高金属温度 TH : 550.0 (°C)



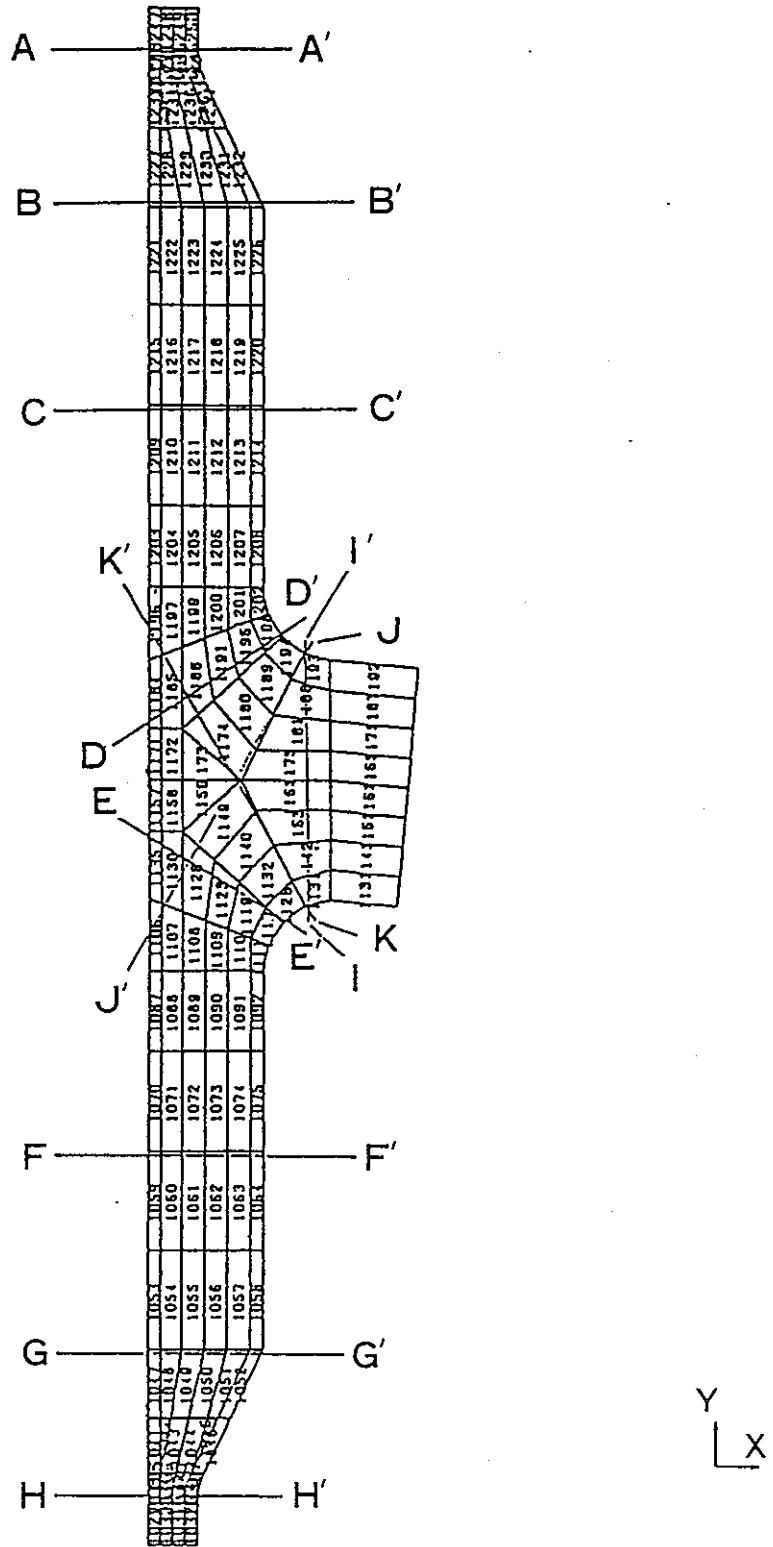


図 H.5 「EBDS」による評価ライン (MODEL-3)

表 H.6 「EBDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-3)

LINE	代表時間 [SEC]	$S_n$	$S_c$	$S_p$	$K(=S_p/S_n)$	$\varepsilon_n$	$\varepsilon_c$	$D_c$	$D_p$	D
A	$t_c = 30.0$ $t_H = 30.0$	46.73	6.57	45.65	0.977	2.976E-3	6.456E-3	12.10	17.55	29.65
B	$t_c = 30.0$ $t_H = 30.0$	29.89	20.18	36.10	1.208	1.904E-3	4.830E-3	5.05	8.42	13.47
C	$t_c = 30.0$ $t_H = 31.5$	50.49	21.58	56.77	1.124	3.216E-3	9.128E-3	27.17	26.74	53.90
D	$t_c = 47.25$ $t_H = 54.5$	90.05	9.41	94.14	1.045	5.736E-3	1.559E-2	76.68	57.09	133.77
E	$t_c = 90.0$ $t_H = 100.0$	124.09	4.47	73.72	0.933	7.904E-3	2.108E-2	130.88	89.95	220.82
F	$t_c = 31.0$ $t_H = 31.5$	47.53	20.37	53.75	1.131	3.027E-3	8.445E-3	22.72	24.11	46.83
G	$t_c = 30.0$ $t_H = 30.75$	28.75	19.01	34.79	1.210	1.831E-3	4.485E-3	3.89	7.33	11.23
H	$t_c = 30.0$ $t_H = 30.0$	44.80	6.62	43.69	0.975	2.853E-3	6.089E-3	10.25	16.37	26.62
I	$t_c = 300.0$ $t_H = 450.0$	50.61	5.73	113.40	2.240	3.224E-3	1.661E-2	85.77	62.93	148.70
J	$t_c = 43.0$ $t_H = 45.0$	32.03	16.98	50.04	1.563	2.040E-3	6.258E-3	11.08	16.92	27.99
K	$t_c = 300.0$ $t_H = 450.0$	50.67	3.73	126.78	2.502	3.228E-3	2.048E-3	124.40	86.14	210.55

※ 繰り返し数 N : 1300

※ ひずみサイクル中の最高金属温度 TH : 550.0 [°C]

付録 I 本研究で採用した解析手法と強度評価法の組み立てについて

付録 I として、3種のノズル形状モデルに対して本研究で実施した弾性、非弾性解析の条件およびクリープ疲労強度評価法の組み立てについて、まとめ表を添付する。

表 I.1に各モデルに採用した解析の種類とその結果に対して適用されたクリープ疲労強度評価法の種類を再掲する。また、表 I.2には、解析に使用した弾塑性応力-ひずみ関係とクリープひずみ式の種類を、さらに、表 I.3には、クリープ疲労強度評価法の組み立てとして、疲労損傷評価法、クリープ損傷評価法の詳細を間接法(Method-1)と直接法(Method-2)のそれぞれについて比較して示した。

表 I.1 本研究で実施したノズルモデルに対する解析の種類

表 I.2 解析に使用した弾塑性応力-ひずみ関係とクリープひずみ式

表 I.3 強度評価法の組み立て

表 I.1 ノズルモデルに対する解析の種類

解析の種類	モデル-1	モデル-2	モデル-3
弾性解析	第2報で実施 (TTSDS* <sup>1</sup> ) (EBDS* <sup>2</sup> )	第2報で実施 (TTSDS) (EBDS)	第2報で実施 (TTSDS) (EBDS)
弾塑性クリープ解析 (単調応力-ひずみ曲線)	第2報で実施 (TTSDS* <sup>3</sup> ) (NEBDS* <sup>4</sup> )	第2報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	第2報で実施 (TTSDS) (NEBDS)
弾塑性クリープ解析 (繰返し応力-ひずみ曲線) (標準ひずみ速度)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)
弾塑性解析 (繰返し応力-ひずみ曲線) (標準ひずみ速度)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)
弾塑性クリープ解析 (繰返し応力-ひずみ曲線) (低ひずみ速度)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	—————	—————
弾塑性解析 (繰返し応力-ひずみ曲線) (低ひずみ速度)	本報で実施 (TTSDS) (NEBDS)	—————	—————

注) カッコ内は適用した評価手法を示す。

(\*1) TTSDS : 寿命予測法、構造物強度確性試験施設専用基準 (弾性解析ベース)

(\*2) EBDS : 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針の長期一次応力が低い場合の手法 (弾性解析ベース)

(\*3) TTSDS : 寿命予測法 (非弾性解析ベース、本報では「間接法」と呼ぶ)

(\*4) NEBDS : 寿命予測法 (非弾性解析ベース、本報では「直接法」と呼ぶ)

Table I.2 Stress-Strain Relation and Creep Strain Equation used for the Analysis

Analysis Type	Stress-Strain Relation	Creep Strain
Elastic	Linear	_____
Elasto-Plastic	(a) Cyclic Curve ( $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-3} \text{ mm/mm/sec}$ ) (b) Cyclic Curve ( $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6} \text{ mm/mm/sec}$ )*	_____ _____
Elasto-Plastic Creep	(a) Cyclic Curve ( $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-3} \text{ mm/mm/sec}$ ) (b) Cyclic Curve ( $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6} \text{ mm/mm/sec}$ )* (c) Monotonic Curve	PNC's Equation (Blackburn Type)

\* : For only Model-1

Table I.3 Creep-Fatigue Damage Evaluation Methods based on Inelastic Analysis

Evaluation Method	Fatigue Damage, $D_f$	Creep Damage, $D_c$	Creep-Fatigue Damage, $D$
Method-1	Fatigue Life Equation (Best Fit Curve) $\Delta \epsilon_{eq}, T_{max}, \dot{\epsilon}$	Virtual Stress Relax. History with $q^*$ Creep Rupture Equation $\alpha_R = 1, T_{max}$	$D = D_f + D_c$
Method-2	ditto	Calculated Equivalent Stress( $\sigma_{eq}$ ) History Creep Rupture Equation $\alpha_R = 1, T_{cal.}$	ditto

\* : Initial stress level is calculated from dynamic stress-strain curve with equivalent strain range;  $\Delta \epsilon_{eq}$ .

## 付録 J き裂発生時点に基づいた強度評価結果の検討について

本編第4章での強度評価結果に対する検討は試験終了後、すなわち、1,700 サイクル後の供試体上のき裂分布状況と、この時点でのクリープ疲労損傷値との比較に基づくものであったが、各モデルとも円筒外表面側ツバ付け根部では試験の中間時点でP T試験によりき裂の検出検査が試みられた。その結果、溶接構造のモデル3では350サイクル時点で、また、鍛造品のモデル1、2では550サイクル時点で微細なき裂の存在が確認されている（詳細は本研究第1報参照）。

一方、これらの部位におけるき裂破面上にはSEM観察において、ストライエーションも観察されており、その幅の計測からき裂進展に要したサイクル数、さらに、発生に要したサイクル数のおおよその値が推定できる。

これらの観点からの検討結果について以下に述べる。

- 表 J.1 供試体外面のき裂発生状況一覧
- 表 J.2 ノズル形状供試体のき裂深さ一覧（試験終了後）
- 図 J.1 供試体外面き裂破面のストライエーション間隔の分布図
- 図 J.2 ストライエーション間隔から予測したき裂進展状況（最大深さ基準）
- 図 J.3 ストライエーション間隔から予測したき裂進展状況（平均深さ基準）
- 図 J.4 各モデル全評価点の350, 550, 1700サイクルでのクリープ疲労損傷値
- 図 J.5 各モデル内外面代表点の熱過渡サイクル数とクリープ疲労損傷値の関係
- 図 J.6 モデル-1の内外面代表点での熱過渡サイクル数とクリープ疲労損傷値の関係
- 図 J.7 モデル-2の内外面代表点での熱過渡サイクル数とクリープ疲労損傷値の関係
- 図 J.8 モデル-3の内外面代表点での熱過渡サイクル数とクリープ疲労損傷値の関係

## 付録 J き裂発生時点に基づいた強度評価結果の検討について

## 1. はじめに

クリーブ疲労寿命評価法の精度を検討する上で、重要なポイントは構造側の破損の定義である。すなわち、高精度化された寿命評価法の評価で損傷値 $D = 1$ となった時点での構造物の評価部位における損傷（あるいは破損）の状態がどの程度なのかが明確になっていなければ寿命評価法の精度を議論できない。従来の構造供試体に対するナトリウムを用いた熱過渡試験の経験からは、PT検査で明らかに確認できる程度（1mm程度の深さ）のき裂の存在が損傷値 $D = 1$ に対応すると考えられており、逆にこの程度のき裂が発生した部位に対する評価結果が損傷値 $D = 1$ となるような寿命評価法の開発を目指してきた。しかし、この1mmという数値も厳密なものではなく、構造、負荷形態、その他諸々の要因によって変化すると考えられ（例えば、構造物表面で損傷値 $D$ が同じであっても、断面内一様に負荷されている場合と曲げ応力のように表面では厳しいが内部では穏やかな場合では、 $D = 1$ の時点でのき裂の深さは異なると考えられる）、現時点では評価される構造側の破損の定義の明確化と評価する手段である寿命評価法の高精度化をさまざまな試験、解析を通して同時に並行させて進めているといえる。

## 2. 検討方法

ここでは、まず試験による情報が比較的多く得られている供試体外面ツバ付け根R部のき裂に着目して、 $D = 1$ に対応させる損傷の度合いを2～3設定し、これらと本報で検討した中で最も妥当と考えられた評価法で算出された評価結果と比較する。 $D = 1$ すなわちき裂発生時点に対応させる損傷の度合いとして、以下の3時点を選んだ。

- ① PTにより最初に欠陥指示が検出された時点
- ② ストライエーション間隔から算出される進展曲線に基づいて、き裂が深さ0.5mmに成長した時点
- ③ ストライエーション間隔から算出される進展曲線に基づいて、き裂が深さ1.0mmに成長した時点

表J.1には試験の各サイクル数時点でのPT検査結果を、表J.2には試験終了時点である1700サイクル時点での検査結果を示す。①の定義からは、溶接構造のモデル3では350サイクル時点で、また、鍛造品のモデル1、2では550サイクル時点で微細なき裂の存在が確認されており、これらの時点で $D = 1$ と考える。従って、線型累積損傷則に従って1サイクルあたりの損傷値、1700サイクル時点での損傷値が算出でき、さらに、1サイクルあたりの損傷値からは、ひずみ範囲が推定できる。これらについては、後述する。

次に、供試体外面ツバ付け根R部のき裂破面上にはSEM観察において、ストライエーションが観察されている。その間隔の測定結果を図J.1に示す。各モデルにおける平均化したストライエーション間隔をき裂進展速度と考えると、最終き裂深さ（1700サイクル時点）から逆方向に進展過程を算出した結果が図J.2である。同図からはストライエーションの観察された範囲でのき裂進展挙動が把握できる。これらの曲線から上記②、③の定義によるき裂深さとなるサイクル数が読み取れる。このサイクル数時点で $D = 1$ と考えることに

より①の場合と同様の検討が行える。なお、同図にはP T検査により初めて指示の認められたサイクル数の時点も示しているが、明らかなストライエーションを伴って成長を開始するのは、かなり後であることが読み取れる。

なお、上記図J.2 に示した進展予測では、試験終了時点1700サイクルでのき裂深さとして、表J.2 に示した周方向8位相中の最大値を採用しているが、図J.3 には8位相で測定された全データの平均値をベースとして進展予測を行った結果を示す。以下の検討で上記②、③の定義によるき裂深さとなるサイクル数のデータとしては上述の最大値ベースと平均値ベースの2種類の進展曲線による結果を採用する。

### 3. 検討結果

初めに、本編における検討の範囲で、試験終了後、すなわち、1,700 サイクル後の供試体上のき裂分布状況と最も対応の良いクリープ疲労損傷値が得られた評価手法を用いて算出した試験中間段階における損傷値を示す。この評価手法は、弾塑性応力-ひずみ関係として標準ひずみ速度 ( $1 \times 10^{-3}$  mm/mm/sec) の定常繰返し応力-ひずみヒステリシス曲線の2直線近似式を採用し、またクリープひずみ式として遷移クリープを考慮した動燃の式を採用した弾塑性クリープ解析を行い、クリープ疲労損傷評価として、クリープ損傷計算に仮想的な応力緩和経路を用いる方法を採用し、疲労損傷計算にミゼース相当ひずみ範囲を用いる手法である。

図J.4 には各モデル全評価点での350, 550サイクル、さらに1700サイクルでのクリープ疲労損傷値を、また、図J.5 には各モデル内外面代表点での熱過渡サイクル数とクリープ疲労損傷値の関係を示した。さらに、図J.6 ~図J.8 にはモデルごとに内外面代表点での熱過渡サイクル数と疲労損傷値、クリープ損傷値の関係を詳細に示している。

図J.4, J.5において、いま着目している供試体外面ツバ付け根R部(モデル1, 2のM点およびモデル3のK点)でP Tにより最初に欠陥指示が検出された時点の損傷値をみると、クリープ損傷も含めた全損傷値ではモデル1, 2でそれぞれ0.7 ~0.8 程度、モデル3ではやや小さい0.5 程度である。モデル3でやや小さいのは溶接構造であるための強度低減と考えられる。一方、これらの部位における破面観察結果がストライエーションをとまなう疲労破面であったことから、クリープ損傷は与えられなかったと考えることができるが、この場合図J.6 ~図J.8 より疲労損傷値だけをみると、モデル1, 2でそれぞれ0.4 ~0.5 程度、モデル3ではやや小さい0.3 程度となる。従って、今回採用した評価手法によれば、P Tにより最初に欠陥指示が検出される時点は、破損すなわち $D = 1$ となる時点よりも前の段階であることが推測される。

次に、表 J.3と表J.4 に前述3種の供試体側の破損基準から推定される破損繰返し数、損傷値、歪範囲と解析により得られたこれらの値を比較して示した。破損基準としてき裂深さを採用する場合には、周方向8位相のなかでの最大値をベースとした場合とそれらの平均値をベースとした場合の2種類の結果を算出したが、最大値ベースの結果を表 J.3に、平均値ベースの結果を表J.4 にそれぞれ示した。なお、解析により得られる各値にはクリープ損傷まで考慮した値と疲労損傷のみを考慮した値が算出されるが、後者を正と考え、前者は参考値として示している。



まず、P T 指示検出を破損基準と考えた場合の試験データと解析データを比較すると、いずれのモデルでも試験による破損繰返し数が解析による破損繰返し数よりもかなり小さくなるため、損傷値、歪範囲ともに試験側がかなり大きく予測される。この傾向は、解析側のデータとしてクリープ損傷まで含めた値を採用しても変わらない。この点は先に述べたとおりであり、P T により最初に欠陥指示が検出される時点を、破損すなわち  $D = 1$  と考えることが妥当でないことを示唆している。

次に、き裂深さを破損基準と考えた場合の結果について調べる。まず、表 J.3 と表 J.4 の比較から、き裂深さとして最大値をベースとした場合と平均値をベースとした場合では、後者の方が 200 ~ 400 サイクル程度破損繰返し数が大きくなる。このうち、モデル 3 では、試験側データとしてもっとも大きい破損繰返し数となる平均き裂深さベースでの深さ 1 mm の基準を採用した場合においても、解析側の破損繰返し数よりも小さな破損繰返し数しか算出されない（クリープ損傷まで考慮すれば別であるが、いまは疲労損傷のみを考慮している）。これは、本モデルが溶接構造であり、評価しているき裂がちょうど溶接金属部に発生、進展したためと考えられる。この結果からは本モデルの詳細な評価には、溶接構造特有の形状、材質の不連続に起因する歪集中係数を導入する必要があることが示唆される。

これに対して、モデル 2 では、試験側データとしてもっとも小さい破損繰返し数となる最大き裂深さベースでの深さ 0.5 mm の基準を採用した場合においても、解析側の破損繰返し数よりも大きな破損繰返し数が算出される。これは、本モデルのき裂が近接した 2 か所に発生したため、干渉効果により進展が遅れた結果と考えられる。この結果からは本モデルの詳細な評価には、2 本のき裂の干渉効果を考慮した進展評価を実施する必要があることが示唆される。さらに、き裂深さを破損基準と考える場合には、近傍に干渉を及ぼすようなき裂が存在するか否かが重要となることが分かる。

次に、モデル 1 では、試験側データとしてもっとも小さい破損繰返し数となる最大き裂深さベースでの深さ 0.5 mm の基準を採用した場合において、解析側の破損繰返し数とほぼ等しい破損繰返し数が算出されている。この結果、損傷値、歪範囲ともに試験側データと解析側データが近い値となっている。本モデルは鍛造構造で材質が均一であり、またき裂は主き裂が 1 本進展していた。従って、今回の検討において最も評価に適した条件といえる。本モデルの結果から、今回採用した供試体構造、荷重形態において、深さ 0.5 mm 程度のき裂の存在が、破損クライテリア  $D = 1$  に対応する構造側の損傷度合いであると考えられる。

表 J.1 供試体外面のき裂発生状況一覧

サイクル数	供試体No.1の鏡板付け根部	供試体No.2の鏡板付け根部	供試体No.3の鏡板付け根部
27, 50	鏡板の内外面ともにき裂無し。	鏡板の内外面ともにき裂無し。	鏡板の内外面ともにき裂無し。
75, 100 150, 200 250, 300	鏡板の内外面ともにき裂無し。	鏡板の内外面ともにき裂無し。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・内側にはき裂無し。</li> <li>・75サイクル終了時外側の85° 方向にピンホール状の微細なき裂を1個観察</li> <li>・150 サイクルでは外側の85° 方向と80° 方向にピンホール状の微細なき裂を2個観察</li> <li>・300 サイクルでは80° 方向と85° 方向のき裂がつながった7mm長さのき裂を観察。さらに90° 方向にピンホール状のき裂を観察</li> </ul>
350	鏡板の内外面ともにき裂無し。	鏡板の内外面ともにき裂無し。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鏡板内側の約2/3 周に渡り1本の筋状の微細欠陥を観察。残り1/3 周にもヘアクラックを観察</li> <li>・鏡板外側は300 サイクルと同様</li> </ul>
400, 450 500	鏡板の内外面ともにき裂無し。	鏡板の内外面ともにき裂無し。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・450 サイクルでは上記同様</li> <li>・500 サイクルでは鏡板内側のき裂が全周に進展。主き裂の脇に微細な周方向き裂を多数観察</li> <li>・鏡板外側では100° 方向に新たなピンホール状のき裂が観察</li> <li>き裂の範囲が20mmに拡大</li> </ul>
550	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鏡板内側の全周に渡って微細なヘアクラックを観察。</li> <li>き裂は周方向き裂が主体</li> <li>・鏡板外側にはき裂無し。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鏡板内側の全周に渡って微細なヘアクラックを観察。</li> <li>き裂は周方向き裂が主体</li> <li>・鏡板外側にはき裂無し。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・500 サイクルと略同様</li> <li>鏡板内側のき裂がやや進展。</li> </ul>
600, 650 700, 800 900, 1000 1100, 1200 1400	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鏡板内側のヘアクラック状の欠陥はサイクル数の増加に伴い段々と繋がって、周方向の複数の長いき裂へと進展。</li> <li>き裂は鏡板付け根部で進展し、1~3mmの幅をもって円周上に発生</li> <li>・鏡板外側にはき裂無し。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鏡板内側のヘアクラック状の欠陥はサイクル数の増加に伴い段々と繋がって、周方向の複数の長いき裂へと進展。</li> <li>き裂は鏡板付け根部で進展し、約5mmの幅をもって円周上に発生。</li> <li>・鏡板外側にはき裂無し。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鏡板内側のき裂の分布に変化無し。</li> <li>但し、サイクル数の増加に伴い主き裂がより明瞭となり、き裂が明らかに進展している様子が窺えた。</li> <li>・鏡板外側のき裂はサイクル数の増加に伴いき裂が長くなり、1200サイクルでは全部のき裂が繋がって、約25mm長さのき裂に進展。</li> <li>発生位置は80° ~105° 方向。</li> </ul>
1700	解体検査結果参照	解体検査結果参照	解体検査結果参照

表 J.2 ノズル形状供試体のき裂深さ一覧 (試験終了後)

き裂	方向	No. 1 (mm)	No. 2 (mm)	No. 3 (mm)
外面き裂	0°	0.79	<u>0.95</u>	3.09
	45°	<u>1.71</u>	0.42	2.98
	90°	0.39	0.80	2.36
	135°	1.00	0.63	4.16
	180°	0.83	0.47	3.69
	225°	0.61	0.47	4.13
	270°	1.04	0.89	<u>4.33</u>
	315°	0.86	0.44	3.68
内面き裂		き裂数：31 最大き裂深さ 153°方向 4.07	き裂数：30 最大き裂深さ 141°方向 5.95	き裂数：36 最大き裂深さ 301°方向 5.62

N=1.700 cycle ; 試験終了時点

表 J.3 各種基準による破損寿命等の試験結果と解析結果の比較 (最大き裂深さベース)

破損基準	モデル-1		モデル-2		モデル-3	
	試験	解析	試験	解析	試験	解析
PT指示検出	N 550 cycle $\Phi$ $1.82 \times 10^{-3}$ D 3.09 $\epsilon$ 1.20 % $\epsilon'$	N 1288 cycle N' 818 cycle $\Phi$ $7.76 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.22 \times 10^{-3}$ D 1.32 D' 2.08 $\epsilon$ 0.83 %	N 550 cycle $\Phi$ $1.82 \times 10^{-3}$ D 3.09 $\epsilon$ 1.20 % $\epsilon'$	N 1022 cycle N' 664 cycle $\Phi$ $9.79 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.51 \times 10^{-3}$ D 1.66 D' 2.56 $\epsilon$ 0.91 %	N 350 cycle $\Phi$ $2.86 \times 10^{-3}$ D 4.86 $\epsilon$ 1.56 % $\epsilon'$	N 1180 cycle N' 752 cycle $\Phi$ $8.48 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.33 \times 10^{-3}$ D 1.44 D' 2.26 $\epsilon$ 0.85 %
$a \geq 0.5$ mm	N 1200 cycle $\Phi$ $8.33 \times 10^{-4}$ D 1.42 $\epsilon$ 0.80 % $\epsilon'$	N 1288 cycle N' 818 cycle $\Phi$ $7.76 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.22 \times 10^{-3}$ D 1.32 D' 2.08 $\epsilon$ 0.83 %	N 1500 cycle $\Phi$ $6.67 \times 10^{-4}$ D 1.13 $\epsilon$ 0.72 % $\epsilon'$	N 1022 cycle N' 664 cycle $\Phi$ $9.79 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.51 \times 10^{-3}$ D 1.66 D' 2.56 $\epsilon$ 0.91 %	N 700 cycle $\Phi$ $1.43 \times 10^{-3}$ D 2.43 $\epsilon$ 1.05 % $\epsilon'$	N 1180 cycle N' 752 cycle $\Phi$ $8.48 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.33 \times 10^{-3}$ D 1.44 D' 2.26 $\epsilon$ 0.85 %
$a \geq 1.0$ mm	N 1400 cycle $\Phi$ $7.14 \times 10^{-4}$ D 1.21 $\epsilon$ 0.75 % $\epsilon'$	N 1288 cycle N' 818 cycle $\Phi$ $7.76 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.22 \times 10^{-3}$ D 1.32 D' 2.08 $\epsilon$ 0.83 %	N 1700 cycle $\Phi$ $5.88 \times 10^{-4}$ D 1.00 $\epsilon$ 0.69 % $\epsilon'$	N 1022 cycle N' 664 cycle $\Phi$ $9.79 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.51 \times 10^{-3}$ D 1.66 D' 2.56 $\epsilon$ 0.91 %	N 800 cycle $\Phi$ $1.25 \times 10^{-3}$ D 2.13 $\epsilon$ 0.98 % $\epsilon'$	N 1180 cycle N' 752 cycle $\Phi$ $8.48 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.33 \times 10^{-3}$ D 1.44 D' 2.26 $\epsilon$ 0.85 %

N : 破損繰返し数、試験では3種の破損基準より、解析では損傷値=1となる時点

$\Phi$  : 1サイクルあたりの損傷値、すなわち  $1/N$

D : 試験終了時 (1700サイクル) の損傷値

$\epsilon$  : 歪範囲、試験では1サイクルあたりの損傷値から算出、解析では相当歪範囲

\* 解析の欄でダッシュ付きの数値はクリープ損傷まで考慮した場合の値

ダッシュのない数値は疲労損傷のみを考慮した場合の値

\* 試験の欄の  $\epsilon'$  はクリープ損傷まで考慮した場合の値

$\epsilon$  は疲労損傷のみを考慮した場合の値、すなわち最適疲労破損式から算出される値

表 J.4 各種基準による破損寿命等の試験結果と解析結果の比較 (平均き裂深さベース)

破損基準	モデル-1		モデル-2		モデル-3	
	試験	解析	試験	解析	試験	解析
P T指示検出 (表 J.3と同じ)	N 550 cycle $\Phi$ $1.82 \times 10^{-3}$ D 3.09 $\epsilon$ 1.20 % $\epsilon'$	N 1288 cycle N' 818 cycle $\Phi$ $7.76 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.22 \times 10^{-3}$ D 1.32 D' 2.08 $\epsilon$ 0.83 %	N 550 cycle $\Phi$ $1.82 \times 10^{-3}$ D 3.09 $\epsilon$ 1.20 % $\epsilon'$	N 1022 cycle N' 664 cycle $\Phi$ $9.79 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.51 \times 10^{-3}$ D 1.66 D' 2.56 $\epsilon$ 0.91 %	N 350 cycle $\Phi$ $2.86 \times 10^{-3}$ D 4.86 $\epsilon$ 1.56 % $\epsilon'$	N 1180 cycle N' 752 cycle $\Phi$ $8.48 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.33 \times 10^{-3}$ D 1.44 D' 2.26 $\epsilon$ 0.85 %
$a \geq 0.5$ mm	N 1600 cycle $\Phi$ $6.25 \times 10^{-4}$ D 1.06 $\epsilon$ 0.70 % $\epsilon'$	N 1288 cycle N' 818 cycle $\Phi$ $7.76 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.22 \times 10^{-3}$ D 1.32 D' 2.08 $\epsilon$ 0.83 %	N 1700 cycle $\Phi$ $5.88 \times 10^{-4}$ D 1.00 $\epsilon$ 0.69 % $\epsilon'$	N 1022 cycle N' 664 cycle $\Phi$ $9.79 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.51 \times 10^{-3}$ D 1.66 D' 2.56 $\epsilon$ 0.91 %	N 900 cycle $\Phi$ $1.11 \times 10^{-3}$ D 1.89 $\epsilon$ 0.92 % $\epsilon'$	N 1180 cycle N' 752 cycle $\Phi$ $8.48 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.33 \times 10^{-3}$ D 1.44 D' 2.26 $\epsilon$ 0.85 %
$a \geq 1.0$ mm	N 1800 cycle $\Phi$ $5.56 \times 10^{-4}$ D 0.94 $\epsilon$ 0.67 % $\epsilon'$	N 1288 cycle N' 818 cycle $\Phi$ $7.76 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.22 \times 10^{-3}$ D 1.32 D' 2.08 $\epsilon$ 0.83 %	N 1900 cycle $\Phi$ $5.26 \times 10^{-4}$ D 0.89 $\epsilon$ 0.65 % $\epsilon'$	N 1022 cycle N' 664 cycle $\Phi$ $9.79 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.51 \times 10^{-3}$ D 1.66 D' 2.56 $\epsilon$ 0.91 %	N 1000 cycle $\Phi$ $1.00 \times 10^{-3}$ D 1.70 $\epsilon$ 0.88 % $\epsilon'$	N 1180 cycle N' 752 cycle $\Phi$ $8.48 \times 10^{-4}$ $\Phi'$ $1.33 \times 10^{-3}$ D 1.44 D' 2.26 $\epsilon$ 0.85 %

N : 破損繰返し数、試験では3種の破損基準より、解析では損傷値=1となる時点

$\Phi$  : 1サイクルあたりの損傷値、すなわち  $1/N$

D : 試験終了時 (1700サイクル) の損傷値

$\epsilon$  : 歪範囲、試験では1サイクルあたりの損傷値から算出、解析では相当歪範囲

\* 解析の欄でダッシュ付きの数値はクリープ損傷まで考慮した場合の値

ダッシュのない数値は疲労損傷のみを考慮した場合の値

\* 試験の欄の  $\epsilon'$  はクリープ損傷まで考慮した場合の値

$\epsilon$  は疲労損傷のみを考慮した場合の値、すなわち最適疲労破損式から算出される値

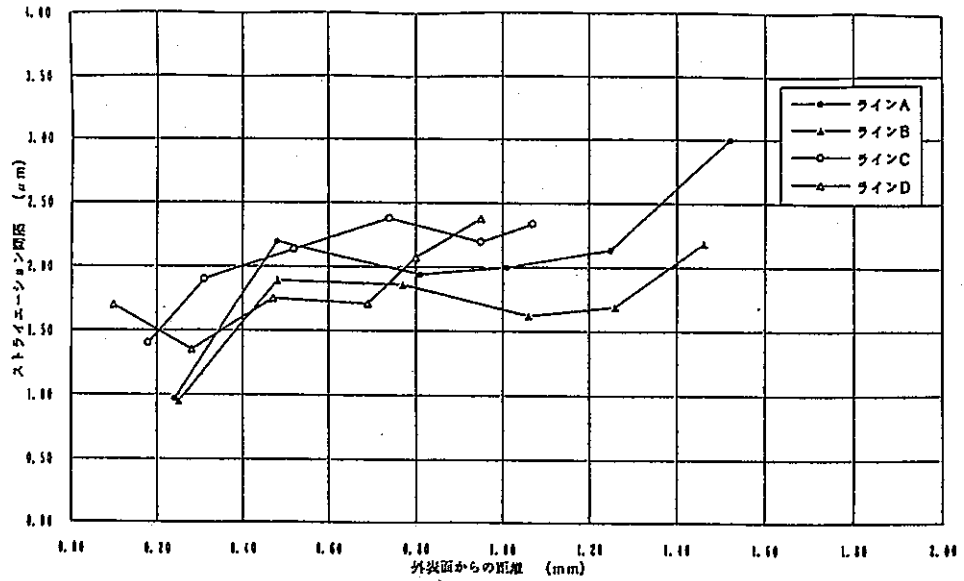


図1.1.1 供試体No. 1 鏡板付け根部分のストライエーション間隔の分布図

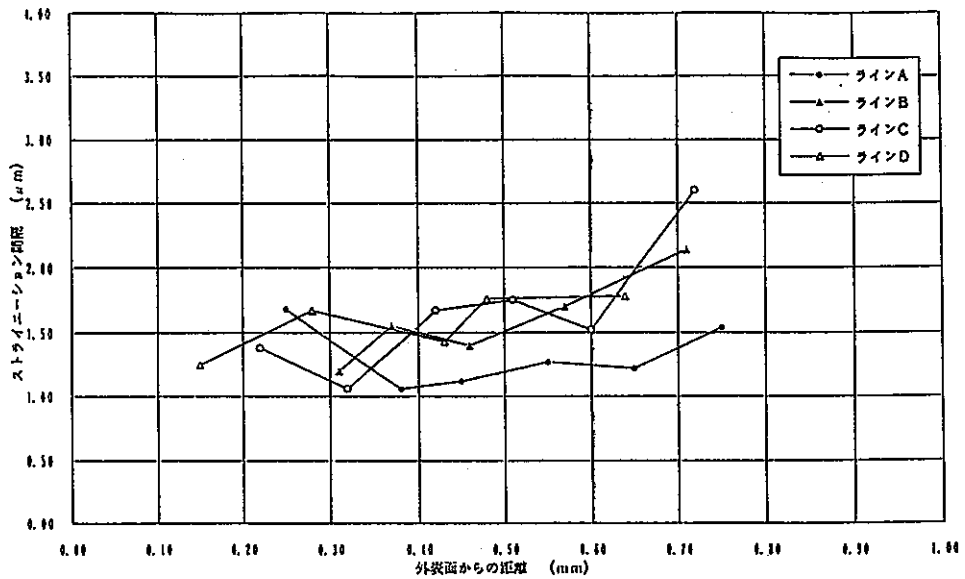


図1.1.2 供試体No. 2 鏡板付け根部分のストライエーション間隔の分布図

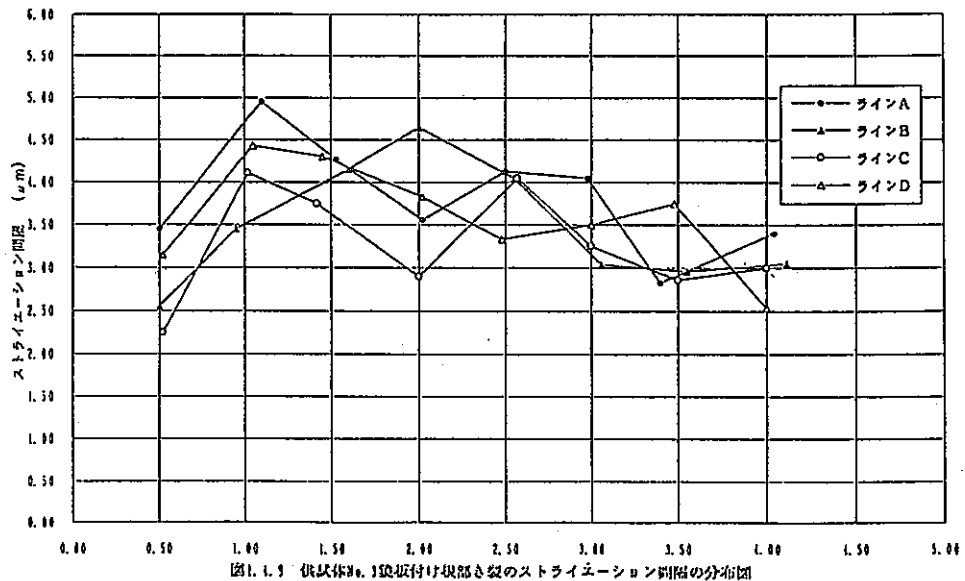


図1.1.3 供試体No. 3 鏡板付け根部分のストライエーション間隔の分布図

図 J.1 供試体外面き裂破面のストライエーション間隔の分布図

ストライエーション間隔から予測した熱過渡サイクル数とき裂深さの関係

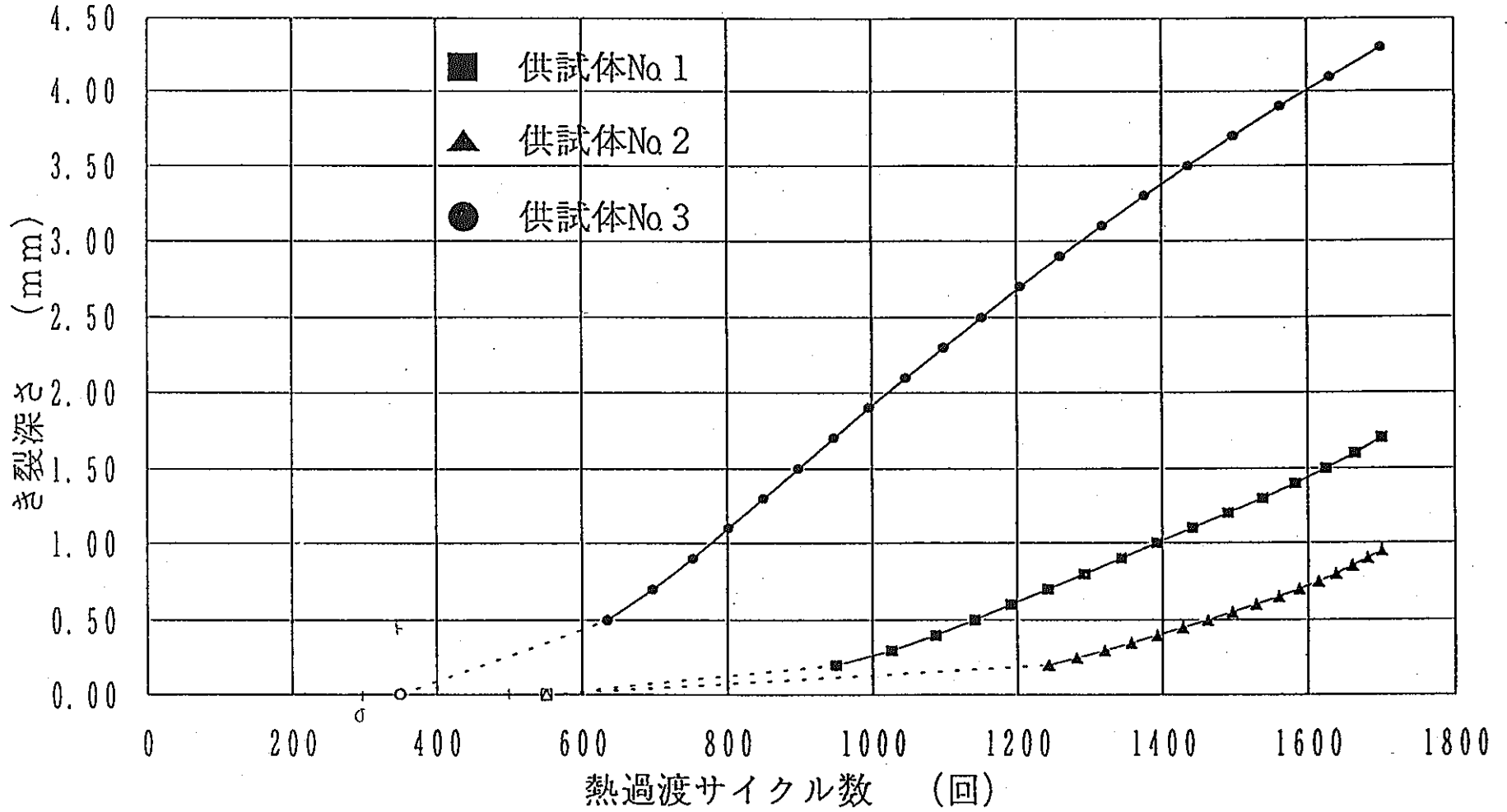


図 J.2 ストライエーション間隔から予測したき裂進展状況 (最大深さ基準)

ストライエーション間隔から予測した熱過渡サイクル数とき裂深さの関係

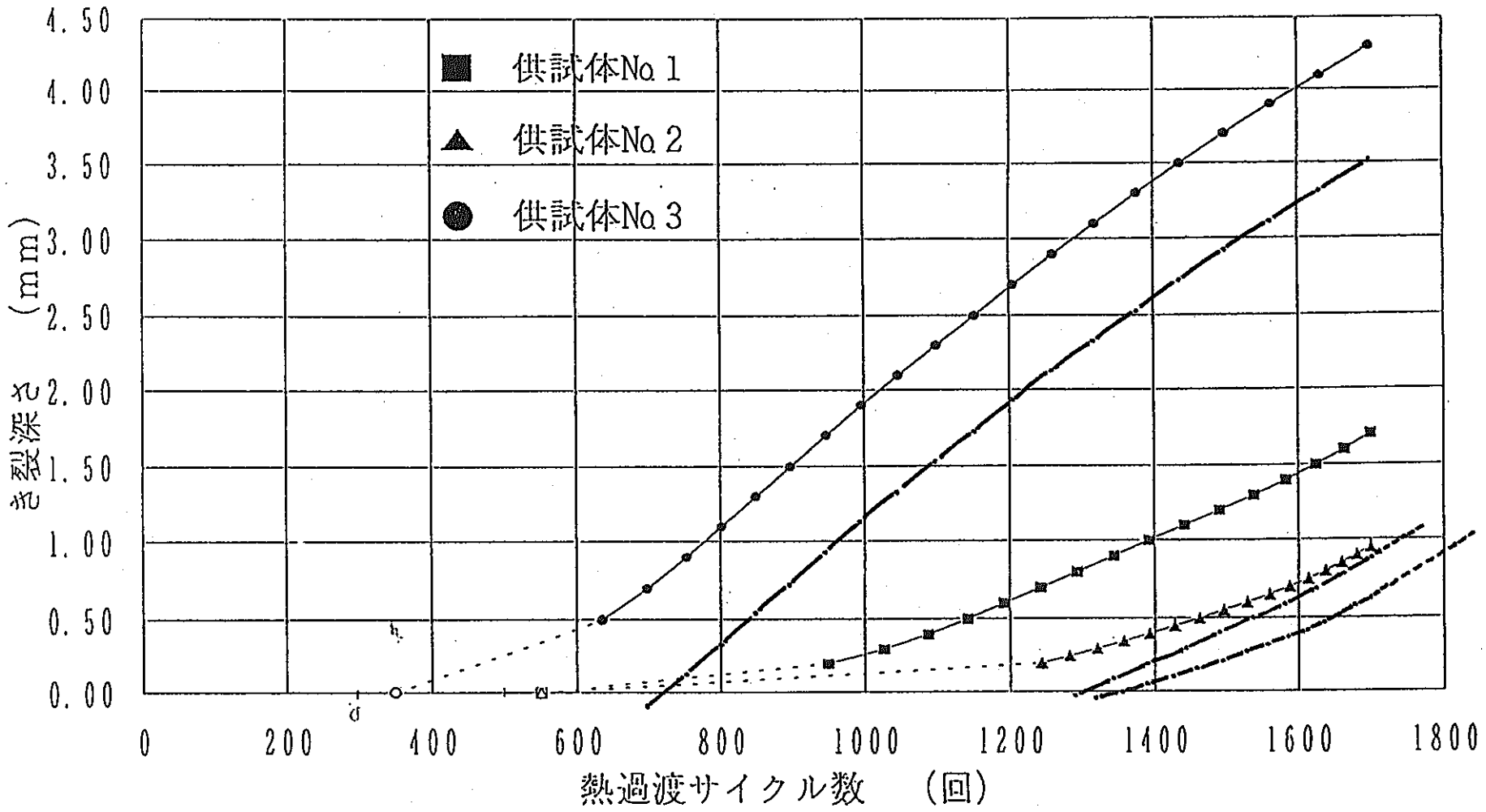


図 J.3 ストライエーション間隔から予測したとき破進展状況 (平均深さ基準)



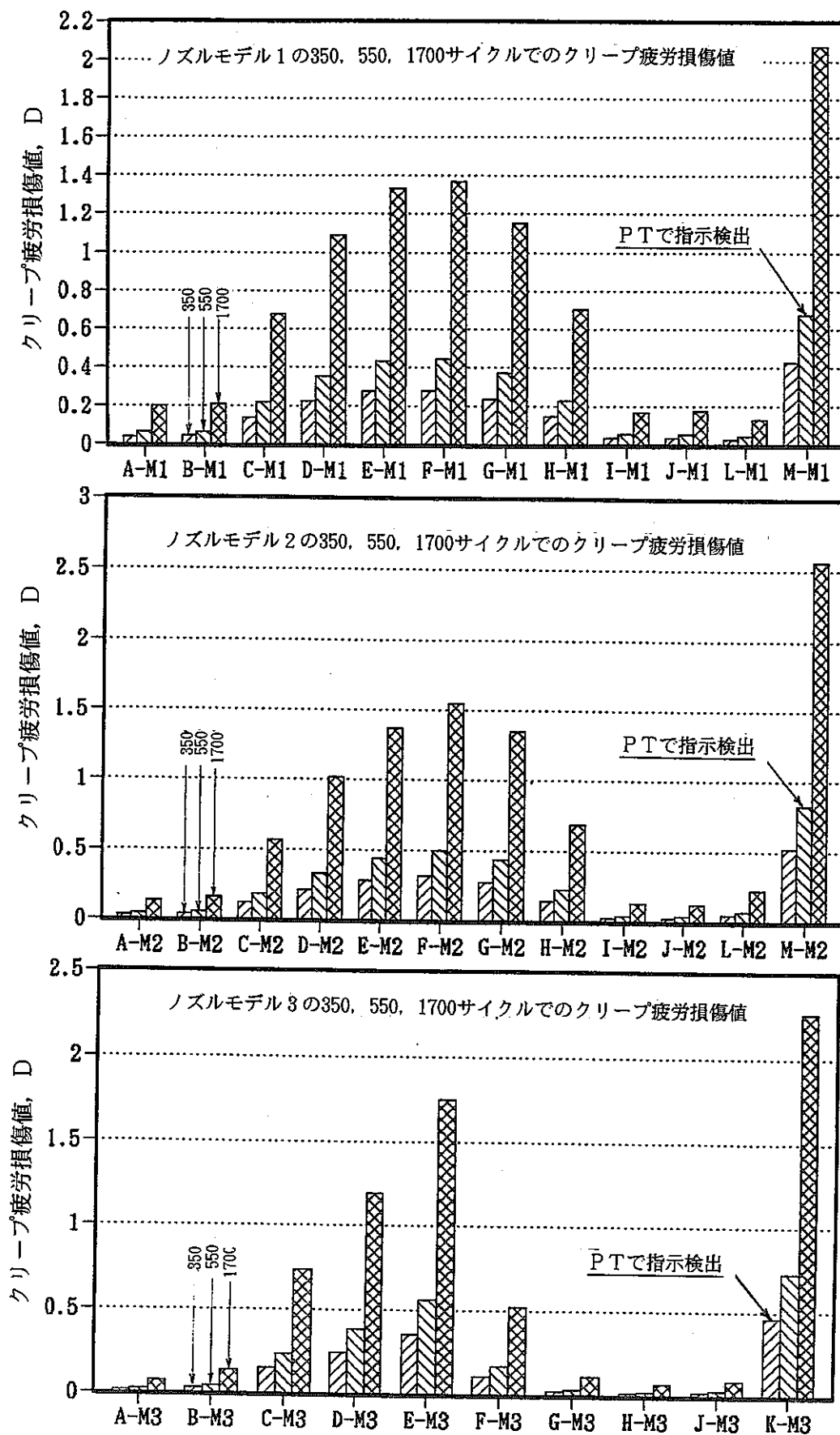
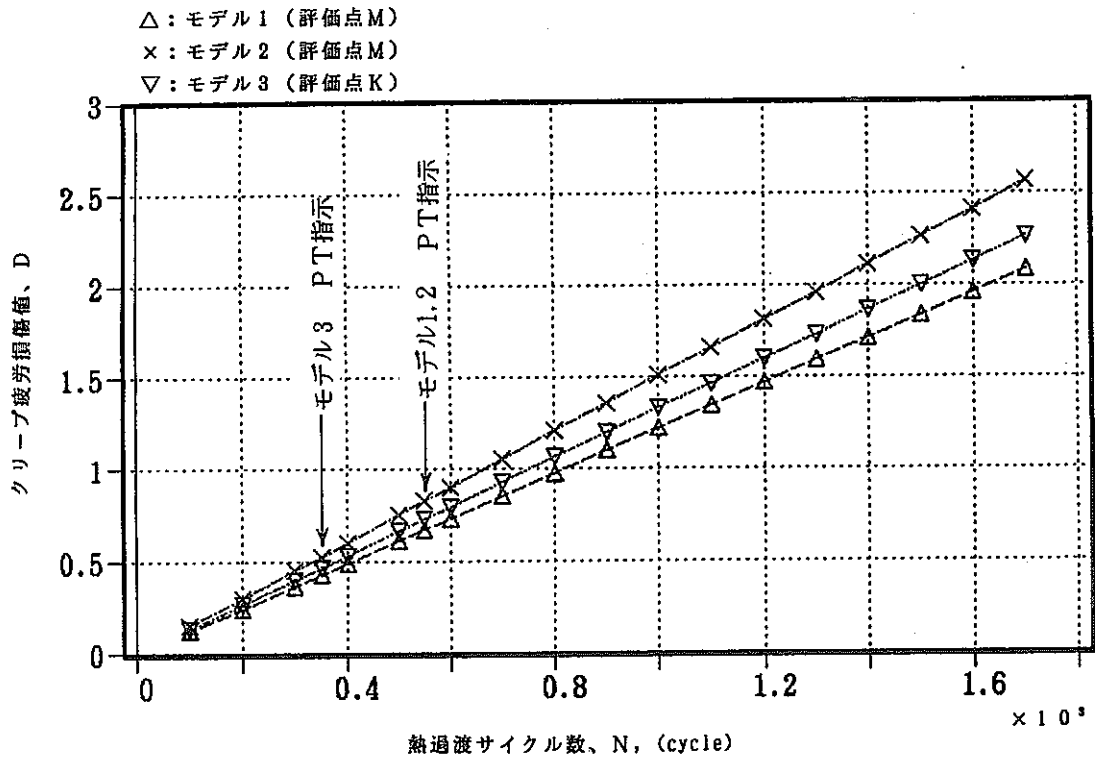
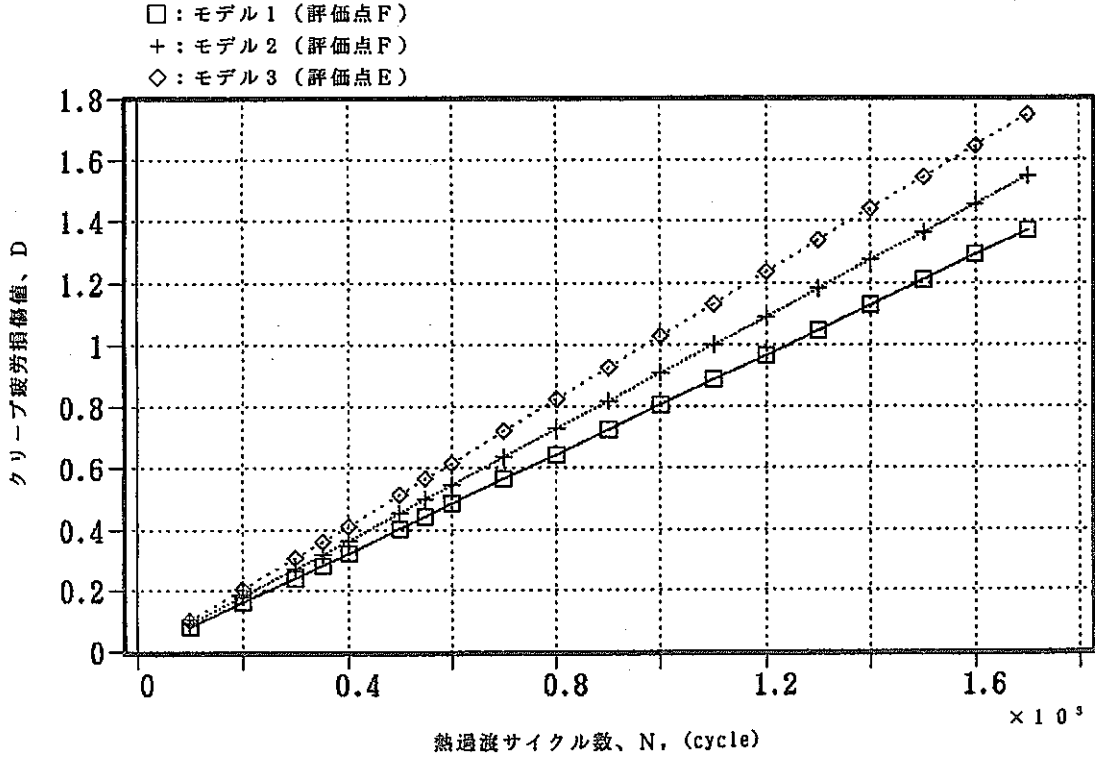


図 J.4 各モデル全評価点の350, 550, 1700サークルでのクリープ疲労損傷値



ノズル形状モデル1～3の外側評価点での熱過渡の繰返しに伴う損傷値  
 (モデル1: 評価点M, モデル2: 評価点M, モデル3: 評価点K,  
 クリープ疲労損傷値: D)



ノズル形状モデル1～3の内側評価点での熱過渡の繰返しに伴う損傷値  
 (モデル1: 評価点F, モデル2: 評価点F, モデル3: 評価点E,  
 クリープ疲労損傷値: D)

図 J.5 各モデル内外面代表点の熱過渡サイクル数とクリープ疲労損傷値の関係

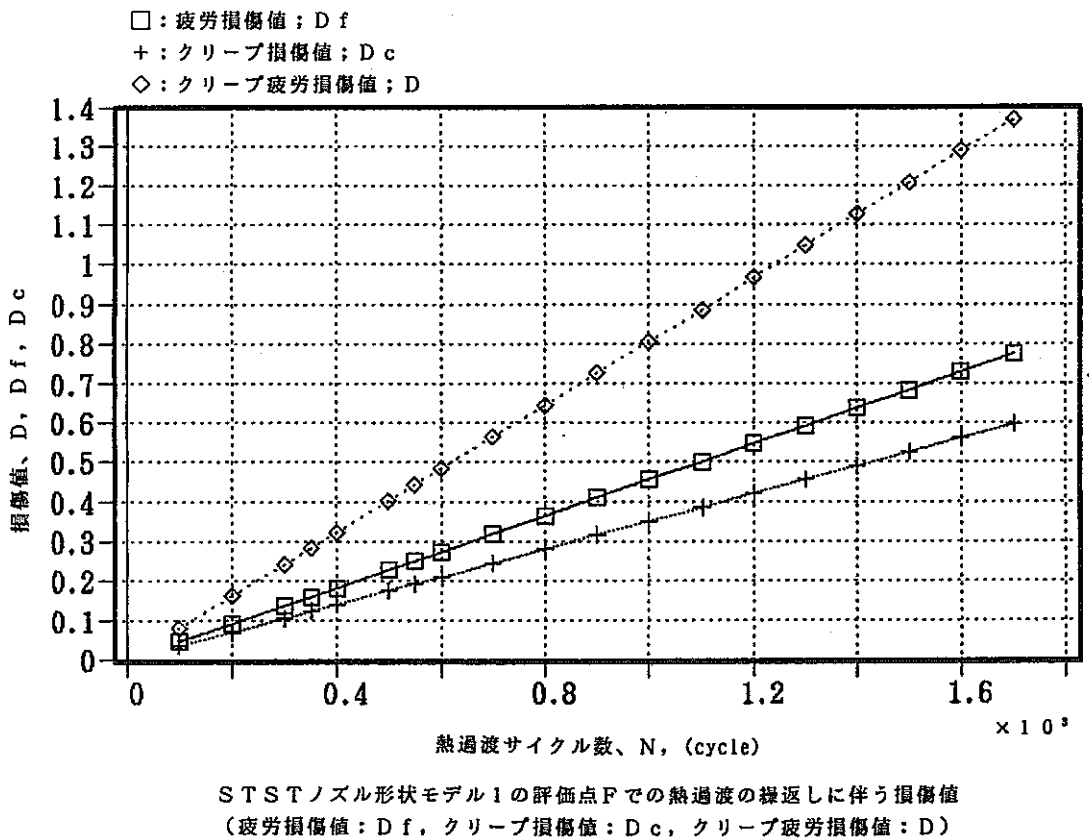
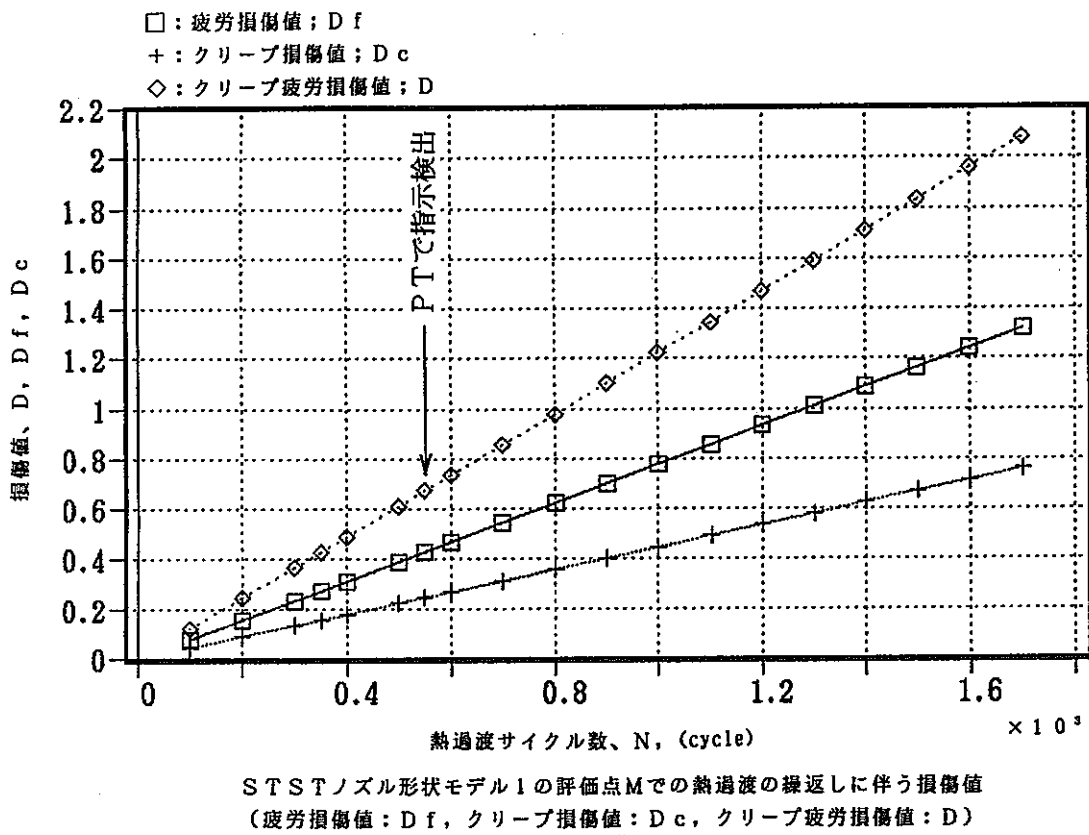
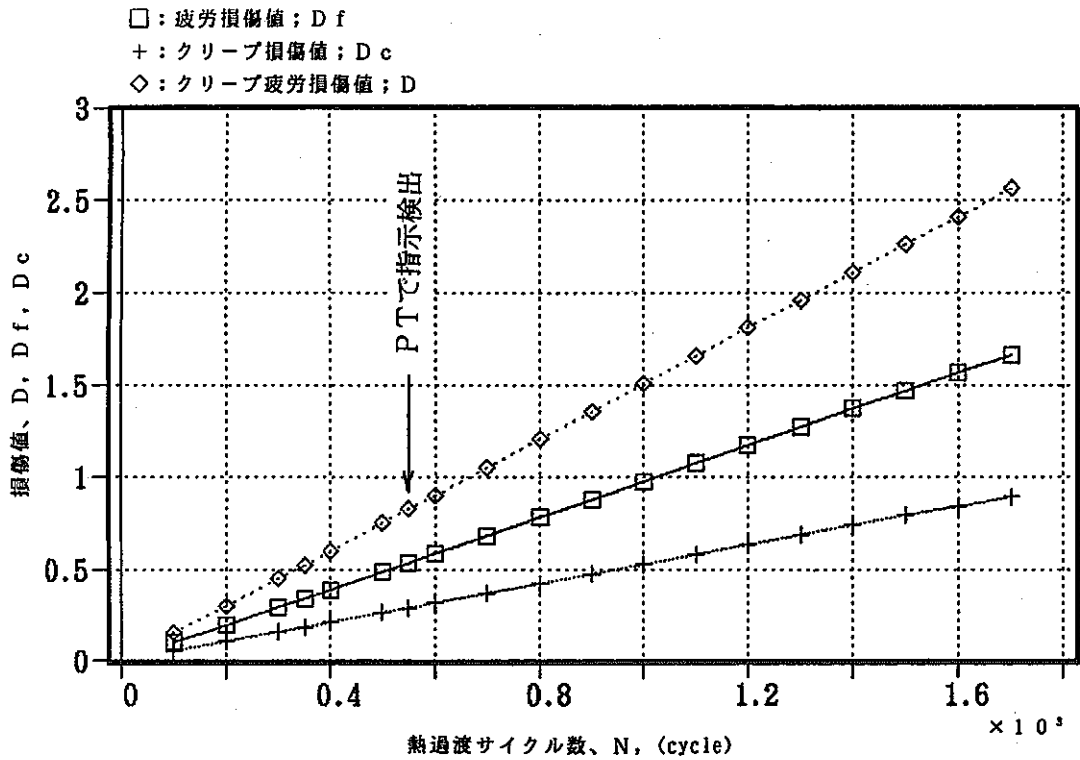
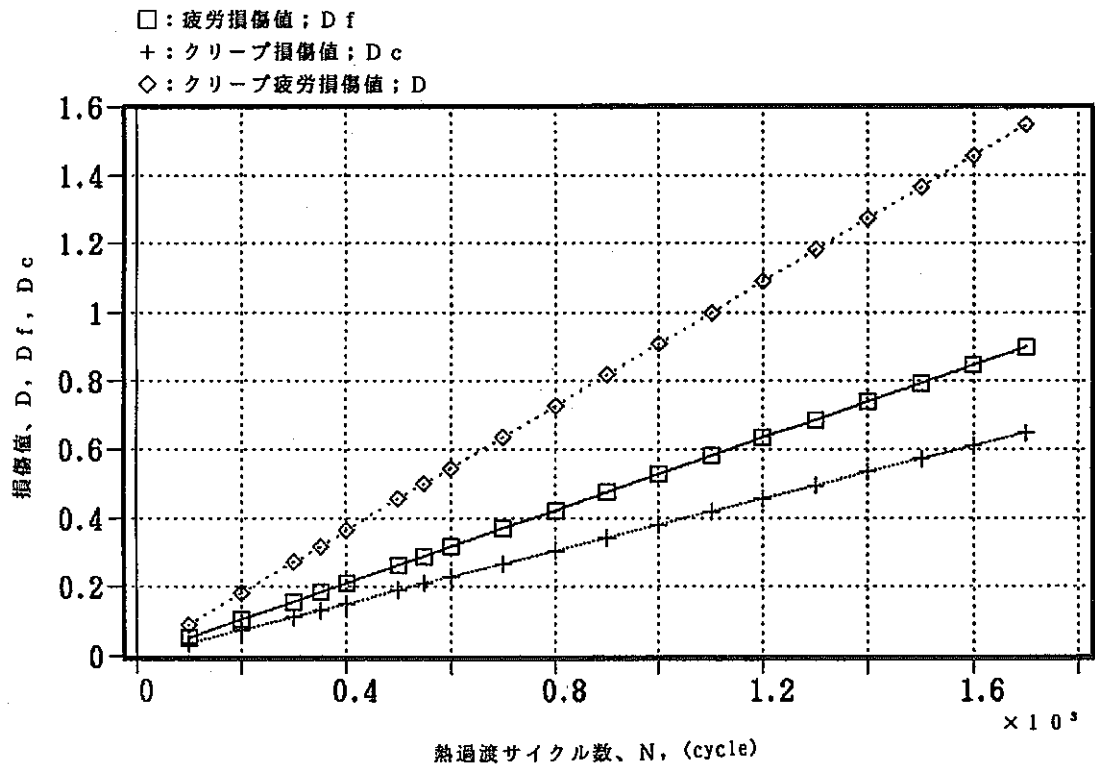


図 J.6 モデル1の内外面代表点での熱過渡サイクル数とクリープ疲労損傷値の関係

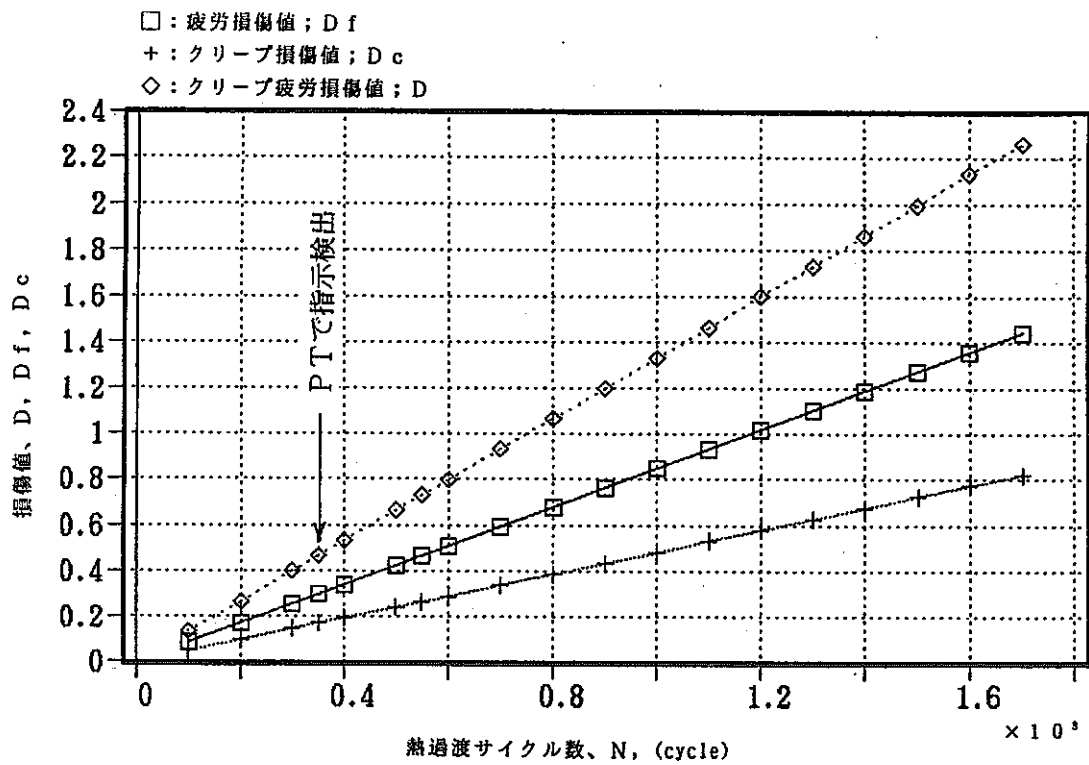


STSTノズル形状モデル2の評価点Mでの熱過渡の繰返しに伴う損傷値  
 (疲労損傷値:  $D_f$ , クリープ損傷値:  $D_c$ , クリープ疲労損傷値:  $D$ )

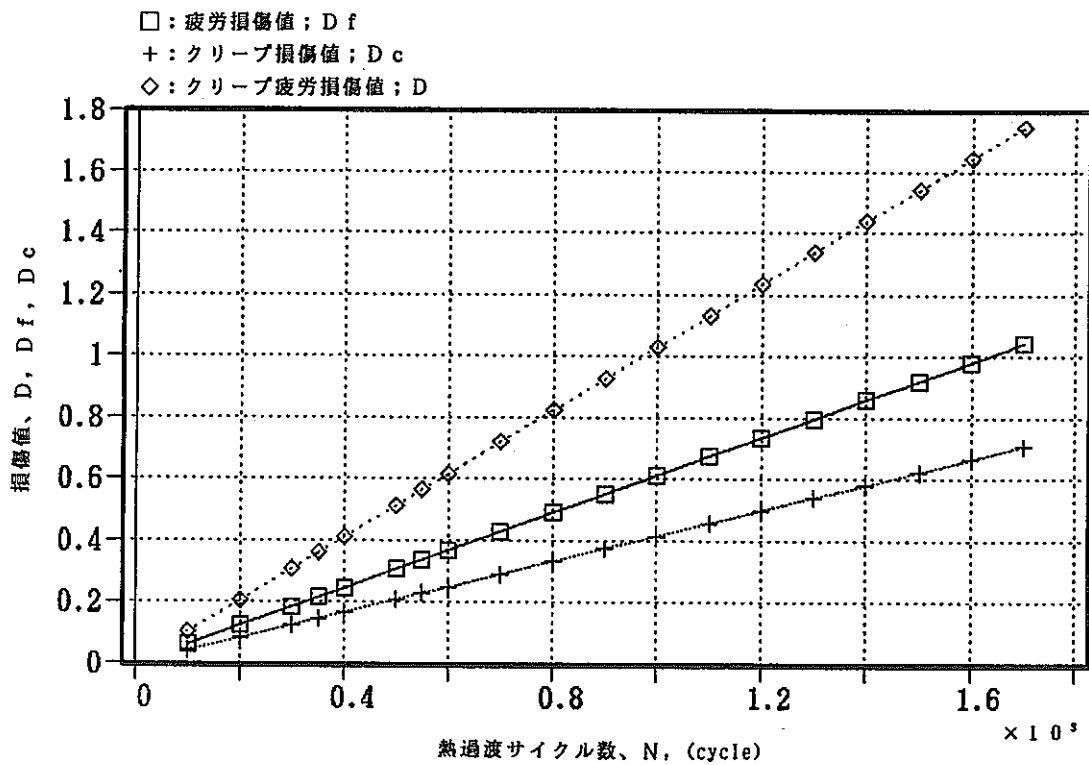


STSTノズル形状モデル2の評価点Fでの熱過渡の繰返しに伴う損傷値  
 (疲労損傷値:  $D_f$ , クリープ損傷値:  $D_c$ , クリープ疲労損傷値:  $D$ )

図 J.7 モデル2の内外面代表点での熱過渡サイクル数とクリープ疲労損傷値の関係



STSTノズル形状モデル3の評価点Kでの熱過渡の繰返しに伴う損傷値  
 (疲労損傷値 : D f, クリープ損傷値 : D c, クリープ疲労損傷値 : D)



STSTノズル形状モデル3の評価点Eでの熱過渡の繰返しに伴う損傷値  
 (疲労損傷値 : D f, クリープ損傷値 : D c, クリープ疲労損傷値 : D)

図 J.8 モデル3の内外面代表点での熱過渡サイクル数とクリープ疲労損傷値の関係