

# STST熱応力き裂発生試験の解析

1990年7月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討及び周知を目的とする社内資料です。刊行物に引用する場合には、事業団の承認が必要です。

## S T S T 熱応力き裂発生試験の解析

著者 渡士 克己、佐々木敏彦\*  
古橋 一郎\*\*、小出 昭雄\*\*\*  
岩田 耕司

### 要 旨

本報は、内面にナトリウムによる熱過渡の繰返しを受けるSUS304鋼製ノズル形状モデル、および板厚内温度分布を受けるSUS316LNP 溶接継手の熱クリープ疲労き裂発生試験の実験温度データを用いた熱応力解析とクリープ疲労損傷計算の結果を示した報告書である。

有限要素法による熱弾性応力解析、熱非弾性応力解析をFINAS Ver. 10.0で行った。クリープ疲労損傷計算は高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針の長期1次応力が低い場合の手法、および寿命予測法であるTTSDSによった。材料定数はSUS304では標準材料データ、SUS316LNP に対しては暫定的に材料室が定めた定数を用いた。

従来用いてきた損傷計算プログラムの統廃合を実施し、現状の計算プログラムの説明を示した。

---

#### 構造室

\* : ISL(株)

\*\* : ATS(株)

\*\*\* : CCS(株)、現在日産自動車(株)

July, 1990

Analysis of thermal strain and creep-fatigue damage of structural element models  
tested in Small Thermal Shock Sodium Loop

Author K.Watashi ,T.Sasaki \*

I.Furuhashi\*\*, A.Koide\*\*\*

and K.Iwata

ABSTRACT

Crack initiation test is continuing in Thermal Shock Test Sodium Loop. The test model consists of two types of thermal stresses; one is throughout temperature distribution arisen in a nozzle-like configuration model made of SUS 304 and the other is temperature gradient arisen in SUS316 weldment. The test will be continued to crack initiation at crosssections interested.

This report describes the result of thermal stress analysis and creep-fatigue damage estimation of the models. Presently the SUS304 model is just subjected to 1,300 cycles and SUS316 weldment 1,200 cycles of thermal transient. The transient is that 550°C and 300°C sodium flow into the models for 5 h and 1 h, respectively. Present creep-fatigue damage is 1.8 for SUS304 and 2.0 for SUS316 weldment. The damage caused cracking in the SUS304 model, but did not in SUS316 weldment.

This report also includes computer programm interpretation of damage estimation.

---

Structural Engineering Section

\* : ISL Ltd.

\*\* : ATS Ltd.

\*\*\*: CCS Ltd.

## 目 次

第1編	過渡熱応力の繰り返しを受けるノズル形状モデルの熱応力と損傷計算	1
1.1	まえがき	1
1.2	解析モデル	2
1.3	解析方法	2
1.4	解析条件	3
1.4.1	材料特性	3
1.4.2	境界条件	3
1.4.3	荷重条件	3
1.5	弾性および弾塑性クリープ解析結果	4
1.6	クリープ疲労損傷評価	5
1.6.1	クリープ疲労損傷評価手順	5
1.6.2	弾性擬応力を用いた損傷計算の結果	9
1.6.3	弾塑性クリープ解析の結果を用いた損傷計算の結果	10
第2編	SUS316LNP 溶接継手の解析	110
2.1	まえがき	110
2.2	解析方法	110
2.3	解析結果	111
	まとめ	120
Appendix A.	「EBDS」によるクリープ疲労損傷評価手順, 入力説明およびサブルーチンの説明	121
Appendix B.	「TTSDS」によるクリープ疲労損傷評価手順, 入力説明およびサブルーチンの説明	136
Appendix C.	「NEBDS」によるクリープ疲労損傷評価手順, 入力説明およびサブルーチンの説明	150

## 表リスト

表1.2.1 : 熱伝導解析、熱応力解析での使用要素数・節点数	13
表1.3.1 : 熱伝導解析、熱応力解析での使用要素の種類	13
表1.4.1.1 熱伝導解析に使用する材料特性	14
表1.4.1.2 熱応力解析に使用する材料特性	15
表1.4.1.3 弾塑性解析に使用する材料特性	16
表1.4.1.4 クリープ解析に使用する材料特性	17
表1.4.3.1(I) : MODEL-1 の弾性解析ステップ (cold shock)	18
表1.4.3.1(II) : MODEL-1 の弾性解析ステップ (hot shock)	19
表1.4.3.2(I) : MODEL-2 の弾性解析ステップ (cold shock)	20
表1.4.3.2(II) : MODEL-2 の弾性解析ステップ (hot shock)	21
表1.4.3.3(I) : MODEL-3 の弾性解析ステップ (cold shock)	22
表1.4.3.3(II) : MODEL-3 の弾性解析ステップ (hot shock)	23
表1.4.3.4(I) ~ (VIII) : 非弾性解析ステップ	24~31
表1.6.2.1 「EBDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)	77
表1.6.2.2 「EBDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)	78
表1.6.2.3 「EBDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-3)	79
表1.6.2.4 「TTSDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)	80
表1.6.2.5 「TTSDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)	81
表1.6.2.6 「TTSDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-3)	82
表1.6.3.1 「NEBDS」による非弾性クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)	83
表1.6.3.2 「NEBDS」による非弾性クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)	84
表1.6.3.3 「NEBDS」による非弾性クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-3)	85
表1.6.3.4 「TTSDS」による非弾性クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)	
(q = 1.0)	86
表1.6.3.5 「TTSDS」による非弾性クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)	
(q = 1.0)	87
表1.6.3.6 「TTSDS」による非弾性クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-3)	
(q = 1.0)	88
表1.6.3.7 「TTSDS」による非弾性クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)	
(q = 1.5)	89

表1.6.3.8	「TTSDS」による非弾性クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)	
	(q = 1.5)	90
表1.6.3.9	「TTSDS」による非弾性クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-3)	
	(q = 1.5)	91
表2.2.1	SUS316の弾塑性応力ひずみ関係式	112
表2.2.2	改良SUS316のクリープひずみ式	113
表2.2.3	改良SUS316の主クリープ破断式	114
表2.2.4	SUS304、SUS316及びSUS321の最適疲労破損式	115
表2.2.5	SUS316動的応力ひずみ関係式	116
表2.2.6	極値時点の温度及び等価線形処理結果	117
表2.2.7	極値時点のひずみ範囲およびひずみ成分	117
表2.2.8	応力範囲および応力成分 (等価線形処理前)	117
表2.2.9	応力範囲および応力成分 (等価線形処理前)	118
表2.2.10	ひずみ範囲および損傷値	118

## 図リスト

図1.2.1 : 解析対象の供試体の形状及び寸法	32
図1.2.2 : MODEL-1 の解析形状	33
図1.2.3 : MODEL-2 の解析形状	34
図1.2.4 : MODEL-3 の解析形状	35
図1.2.5 : MODEL-1 の要素番号	36
図1.2.6 : MODEL-2 の要素番号	37
図1.2.7 : MODEL-3 の要素番号	38
図1.2.8 : MODEL-1 の節点番号	39
図1.2.9 : MODEL-2 の節点番号	40
図1.2.10: MODEL-3 の節点番号	41
図1.3.1 : 計算処理フロー	42
図1.4.2.1 MODEL-1 の熱伝導解析に於ける熱的境界条件	43
図1.4.2.2 MODEL-2 の熱伝導解析に於ける熱的境界条件	44
図1.4.2.3 MODEL-3 の熱伝導解析に於ける熱的境界条件	45
図1.4.2.4 MODEL-1 の熱応力解析に於ける機械的境界条件	46
図1.4.2.5 MODEL-2 の熱応力解析に於ける機械的境界条件	47
図1.4.2.6 MODEL-3 の熱応力解析に於ける機械的境界条件	48
図1.4.3.1 入力温度時刻歴の測定位置	49
図1.4.3.2(I) ~ (III) : FT-1b 測定位置に於ける液体ナトリウム温度時刻歴	50~52
図1.4.3.3(I) ~ (III) : FT-2b 測定位置に於ける液体ナトリウム温度時刻歴	53~55
図1.4.3.4(I) ~ (III) : FT-3b 測定位置に於ける液体ナトリウム温度時刻歴	56~58
図1.4.3.5(I) ~ (III) : FT-4b 測定位置に於ける液体ナトリウム温度時刻歴	59~61
図1.5.1 (a) 伝熱解析結果 (モデル1)	62
図1.5.1 (b) 伝熱解析結果 (モデル2)	63
図1.5.1 (c) 伝熱解析結果 (モデル3)	64
図1.5.2 (a) 熱弾性応力解析結果 (モデル1)	65
図1.5.2 (b) 熱弾性応力解析結果 (モデル2)	66
図1.5.2 (c) 熱弾性応力解析結果 (モデル3)	67
図1.5.3 (a) 熱非弾性応力解析結果 (モデル1)	68
図1.5.3 (b) 熱非弾性応力解析結果 (モデル2)	69



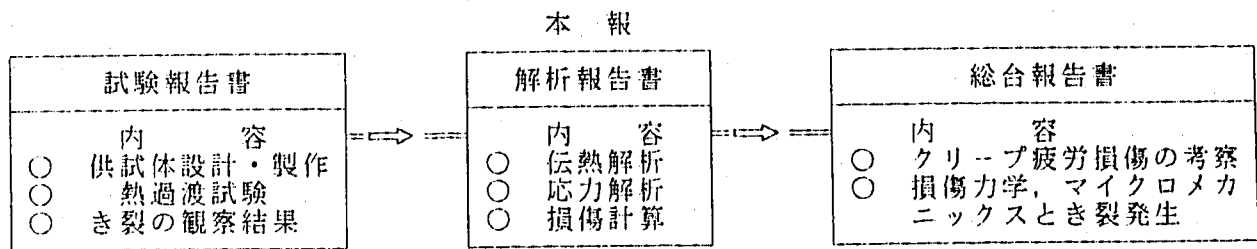
図1.5.3 (c) 熱非弾性応力解析結果 (モデル3) .....	70
図1.6.2.1 「EBDS」に於ける評価ライン (MODEL-1) .....	71
図1.6.2.2 「EBDS」に於ける評価ライン (MODEL-2) .....	72
図1.6.2.3 「EBDS」に於ける評価ライン (MODEL-3) .....	73
図1.6.2.4 「TTSDS」に於ける評価点 (MODEL-1) .....	74
図1.6.2.5 「TTSDS」に於ける評価点 (MODEL-2) .....	75
図1.6.2.6 「TTSDS」に於ける評価点 (MODEL-3) .....	76
図1.6.2.7 MODEL-1 に於ける弾性解析クリープ疲労損傷 「EBDS」と「TTSDS」の結果の比較 .....	92
図1.6.2.8 MODEL-2 に於ける弾性解析クリープ疲労損傷 「EBDS」と「TTSDS」の結果の比較 .....	93
図1.6.2.9 MODEL-3 に於ける弾性解析クリープ疲労損傷 「EBDS」と「TTSDS」の結果の比較 .....	94
図1.6.3.1 「NEBDS」に於ける評価点 (MODEL-1) .....	95
図1.6.3.2 「NEBDS」に於ける評価点 (MODEL-2) .....	96
図1.6.3.3 「NEBDS」に於ける評価点 (MODEL-3) .....	97
図1.6.3.4 MODEL-1に於ける非弾性解析クリープ疲労損傷評価結果 「NEBDS」の結果 .....	98
図1.6.3.5 MODEL-2に於ける非弾性解析クリープ疲労損傷評価結果 「NEBDS」の結果 .....	99
図1.6.3.6 MODEL-3に於ける非弾性解析クリープ疲労損傷評価結果 「NEBDS」の結果 .....	100
図1.6.3.7 MODEL-1に於ける非弾性解析クリープ疲労損傷評価結果 「TTSDS」の結果 .....	101
図1.6.3.8 MODEL-2に於ける非弾性解析クリープ疲労損傷評価結果 「TTSDS」の結果 .....	102
図1.6.3.9 MODEL-3に於ける非弾性解析クリープ疲労損傷評価結果 「TTSDS」の結果 .....	103
図1.6.3.10 MODEL-1に於ける非弾性解析クリープ疲労損傷評価結果 「NEBDS」と「TTSDS」の比較 .....	104
図1.6.3.11 MODEL-2に於ける非弾性解析クリープ疲労損傷評価結果 「NEBDS」と「TTSDS」の比較 .....	105
図1.6.3.12 MODEL-3に於ける非弾性解析クリープ疲労損傷評価結果	

	「NEBDS」と「TTSDS」の比較 .....	106
図1.6.3.13	MODEL-1に於けるクリープ疲労損傷評価結果 「TTSDS」による弾性と非弾性解析結果による比較 .....	107
図1.6.3.14	MODEL-2に於けるクリープ疲労損傷評価結果 「TTSDS」による弾性と非弾性解析結果による比較 .....	108
図1.6.3.15	MODEL-3に於けるクリープ疲労損傷評価結果 「TTSDS」による弾性と非弾性解析結果による比較 .....	109
図2.1.1	SUS316LNP 溶接継手試験モデル .....	119

# 第1編 過渡熱応力の繰返しを受けるノズル形状モデルの熱応力と損傷計算

## 1.1 まえがき

本報告書は、昭和63年度に小型熱衝撃試験装置（STST）で試験を開始した長時間熱クリープ疲労試験の解析の部分をまとめたものである。試験は平成2年度でも継続されており、試験解析のみ中間報告としてまとめることにした。全体の報告書の構成を下図に示す。また試験の概況として、950サイクル終了時のき裂観察状況の写真を下に示す。



## 1.2 解析モデル

ノズル構造供試体の解析対象の形状及び寸法を図1.2.1に示す。

熱伝導解析、熱応力解析とも供試体を3分割した部分モデルMODEL-1～MODEL-3の解析形状モデル図を図1.2.2～図1.2.4に示す。

また、各モデルの主要部の要素番号を図1.2.5～図1.2.7に示す。節点番号を図1.2.8～図1.2.10に示す。

また、表1.2.1に各モデルで使用している要素数、節点数を示す。

## 1.3 解析方法

解析コードは、汎用非線型構造解析コードFINAS-V10.0を用いた。

要素は軸対称アイソパラメトリック要素及び、軸対称熱伝達要素を用いた。

熱伝導解析、熱応力解析で使用した要素の種類を表1.3.1に示す。

解析手順を以下に示す。

- (1) モデル内表面に、熱伝達係数を介して供試体内部を流れるナトリウム温度時刻歴を入れ、非定常熱伝導解析を行い、各節点における温度応答を求める。
- (2) (1)で得られた結果を熱荷重として、熱応力の解析を行う。  
この場合、熱応力解析は、弾性解析と非弾性解析（弾塑性クリープ解析）とを行い、応力、ひずみを求めた。
- (3) (2)で得られた結果より、BDSによりクリープ疲労評価を行った。図1.3.1に使用コードと計算処理フローを示す。

## 1.4 解析条件

### 1.4.1 材料特性

熱伝導解析で使用した材料は、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304であり、その材料特性物性値（熱伝導係数、比熱、密度）を表1.4.1.1 に示す。

また、熱応力解析で使用した材料特性物性値（ヤング係数、ポアソン比、線膨張係数）を表1.4.1.2 に示す。

塑性の硬化則は、移動硬化則、応力-ひずみ関係は、二直線近似とし、最大想定ひずみレベルを0.3%とする。

非弾性解析で使用する材料特性物性値（降伏応力、加工硬化係数、クリープ式）を表1.4.1.3 ～表1.4.1.4 に示す。

尚、材料特性は全て温度依存性を考慮している。

### 1.4.2 境界条件

熱伝導解析で使用した熱的境界条件をMODEL-1 ～MODEL-3 について図1.4.2.1 ～図1.4.2.3 に示す。

また、応力解析で使用した機械的境界条件を図1.4.2.4 ～図1.4.2.6 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算定にはサボテンの式を用い、外表面の熱伝達係数は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た。

### 1.4.3 荷重条件

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、供試体に繰り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 3 0 0 サイクル繰り返えされる。

熱伝導解析で使用される入力温度時刻歴は、図1.4.3.1 で示す位置で測定された 4 本

の熱電対出力値（図1.4.3.2～図1.4.3.5）を軸方向の距離で線形補間したものある。

熱応力解析は、熱伝導解析で得られた温度分布（各節点の温度増分の時刻歴）を用いて行う。

弾性解析を行った時刻を表1.4.3.1～表1.4.3.3に示す。

非弾性解析は、コールドショック～ホットショック～コールドショックの1.5サイクルで行った。ステップ対時刻対応表を表1.4.3.4に示す。

#### 1.5 弾性および弾塑性クリープ解析結果

弾性および非弾性応力解析結果は中間報告でもあり、大部になることもあるので別資料としてまとめた。<sup>\*</sup>

そこにはホットショックおよびコールドショック時の応力分布の等高線図、内表面、外表面および評価ラインに沿った応力分布が示されている。時系列1.5サイクル（0～25,200 sec）の各評価点における応力履歴とひずみ履歴も載せている。また、von Mises型相当応力-相当ひずみ線図も当該資料に示した。

---

#### 脚 注

\* ) i 試料：構造室保管

## 1.6 クリープ疲労損傷評価

本節では、高温低サイクル疲労寿命における速度効果をRobinson・平則に基づく線形累積損傷則によって計算する。本試験は、熱クリープ疲労き裂発生寿命の評価法を開発する目的の試験であり、この目的に沿った考察は第3報に記す予定であるが、本報告書には既存手法によるクリープ疲労損傷の計算結果を示す。既存手法として採用したものは、弾性応力計算ベースではBDSの方法(EBDS)とTTSDS(TTSDS)、非弾性応力解析ベースでは応力分類するBDSに似た手法(NEBDS)とTTSDS(TTSDS)であり、いずれも脚中文献に示される手順による。

### 1.6.1 クリープ疲労損傷評価手順

#### 1.6.1.1 「EBDS」による評価手順

以下に評価手順を示す。①～⑤の手順は $S_p$ を決定した2極値時点に対して行う。また、従来当グループで用いていたプログラムではK算出までを前処理としていたが、改良版では、 $S_p$ 算出、K算出を評価プログラム内で行う。

- ①熱伝導解析結果より、温度の等価線型処理を行い、表面温度と等価線型化された表面温度との差 $\Delta T_2$ をコールド側、ホット側の2極値時点に対して求めて入力する。
- ②板厚平均温度より物性値(E,  $\nu$ ,  $\alpha$ )を算出し、2極値時点の熱ピーク応力を求める。
- ③表面の応力成分から、②で算出した熱ピーク応力を差し引いてピーク応力範囲を算出する。
- ④③で計算した応力範囲より、主応力範囲に変換する。
- ⑤主応力範囲より、主応力範囲差を計算し、その絶対値の最大値を $S_p$ (ピーク応力強さ範囲)とする。
- ⑥弾性解析結果より、局所座標系での応力成分を等価線形処理し、コールド側、ホッ

ト側より1時点づつ応力成分を選び応力範囲を求め、主応力範囲を算出する。

その主応力範囲差の絶対値の最大値を選び、コールド、ホットの各組み合わせの中で計算された最大のものを $S_n$ （1次+2次応力強さ範囲）とする。

$S_n$ を与える2時点を極値時点と称する。

⑦  $S_p$ と $S_n$ の比より応力集中係数 $K$ を求め、ノイバー則によりひずみ集中係数 $K_\epsilon$ を算出する。

⑧ 相当ひずみ範囲 $\epsilon_i$ を求める。更に、熱過渡サイクル数 $n$ を、相当ひずみ範囲に対するBDSテーブルの破損繰返し数 $N_d$ 値で除し、疲労損傷値 $D_f$ を定める。

⑨ 最高使用温度 $T_H$ 、高温使用時間 $t^*$ より（1次+2次）応力に伴うクリープ損傷係数 $D_{cN}$ を $D_{c1}$ と $D_{c2}$ の和として求める。 $D_{c1}$ は応力水準 $S_n$ で時間 $t^*$ 間に生じるクリープ損傷値である。 $D_{c2}$ は、（1次+2次）応力強さ範囲（ $S_n$ ）が $3S_m$ を超えた時、緩和過程に生じるクリープ損傷値である。

⑩ 最高使用温度 $T_H$ 、高温使用時間 $t^*$ 、ひずみ範囲 $\epsilon_i$ より $3S_m/E$ と $2S_n/E$ の大きい方をひずみ範囲 $\epsilon_i$ が超えた場合BDSの図F. 1よりクリープ損傷値 $D^{**}$ を読み取り、それを $\epsilon_i$ を超えた回数倍したものをピーク応力に伴うクリープ損傷値 $D_{cP}$ とする。

⑪ クリープ損傷値 $D_c$ を $D_{cN}$ と $D_{cP}$ の和として定める。

⑫ クリープ疲労損傷値 $D$ を、 $D_f$ と $D_c$ の和として定める。

（詳細はAppendix A. 参照）

#### 1.6.1.2 「TTSDS」による評価手順

① 線型成分によるMises型相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eq}$ を算出する。

脚注：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



②公称ひずみ範囲  $\varepsilon_0$  を算出する。

③相当ひずみ範囲  $\varepsilon_1$  を算出する。

④ひずみ速度を  $\dot{\varepsilon} = 10^{-4}$  とし、BDS 最適疲労破損式より  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon$  に対応する破損繰返し数  $N_1$  を算出する。

⑤サイクル数  $N$  を  $N_1$  で除し疲労損傷  $D_1$  を算出する。

⑥初期応力  $\sigma_1$  を計算する。

BDS 動的応力ひずみ関係式に相当ひずみ範囲  $\varepsilon_1$  を代入し、得られた応力範囲の 1/2 を初期応力とする。軸力  $\sigma_z$  が有る場合は、 $\sigma_z$  を加算したものをあらためて  $\sigma_1$  とする。

⑦応力緩和挙動  $\sigma(t)$  を求める。

BDS クリープひずみ式において、 $\alpha_c = 1$ 、初期応力  $\sigma_1$  としてひずみ硬化則による単軸リラクセーション解析を  $t=0 \sim t_H$  まで行う。ここで、 $t_H$  は 1 サイクル当りの高温側ナトリウム循環時間である。

解析では、 $q=1$  として各時刻の応力  $\sigma(t)$  を求める。

⑧クリープ破断時間  $t_R$  を求める。

BDS クリープ破断式において、 $\alpha_R = 1$  として  $\sigma(t)$  に対する破断時間  $t_R(t)$  を求める。

⑨クリープ損傷を  $D_c$  を以下の式で計算する。

$$D_c = N \int \dot{\varepsilon}^q dt / t_R(t)$$

⑩クリープ疲労損傷値  $D$  を、 $D_1$  と  $D_c$  の和として定める。

(詳細は Appendix B. 参照)

### 1.6.1.3 「NEBDS」による評価手順

①弾塑性クリープひずみ成分を求め、ひずみ成分範囲を定める。

$$\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r1}^e + \varepsilon_{r1}^p + \varepsilon_{r1}^c$$

$$\varepsilon_{z1} = \varepsilon_{z1}^e + \varepsilon_{z1}^p + \varepsilon_{z1}^c$$

$$\varepsilon_{\theta 1} = \varepsilon_{\theta 1}^e + \varepsilon_{\theta 1}^p + \varepsilon_{\theta 1}^c$$

$$\tau_{rz1} = \tau_{rz1}^e + \tau_{rz1}^p + \tau_{rz1}^c \quad (i : \text{時点})$$

時点1、2 に対するひずみ成分範囲を求める。

$$\Delta \varepsilon_r = \varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}$$

$$\Delta \varepsilon_z = \varepsilon_{z2} - \varepsilon_{z1}$$

$$\Delta \varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta 2} - \varepsilon_{\theta 1}$$

$$\Delta \tau_{rz} = \tau_{rz2} - \tau_{rz1}$$

③ 時点1、2 に対する相当ひずみ範囲を求める。

$$\Delta \varepsilon_e = \sqrt{2/3} \{ (\Delta \varepsilon_r - \Delta \varepsilon_z)^2 + (\Delta \varepsilon_r - \Delta \varepsilon_{\theta})^2 + (\Delta \varepsilon_{\theta} - \Delta \varepsilon_z)^2 + 3/2 \Delta \tau_{rz}^2 \}^{1/2}$$

④ 相当ひずみ範囲  $\Delta \varepsilon_e$  を求める。

$$\Delta \varepsilon_e = \text{MAX} (\Delta \varepsilon_e)$$

⑤ 相当ひずみ範囲  $\Delta \varepsilon_e$ 、ひずみ速度 ( $\dot{\varepsilon}$ ) と疲労破損式より、許容繰り返し数  $N_d$  を求める。

⑥ サイクル数  $N$  を  $N_d$  で除し疲労損傷  $D_f$  を算出する。

⑦ クリープ破断式より各時間ステップにおける破断時間  $t_R$  を求め、それを高温保持時間 ( $t_H$ ) まで積分する。

更に、サイクル数をかけて、以下の式によりクリープ損傷値  $D_c$  を求める。

$$D_c = N \int \dot{\varepsilon}^n dt / t_R$$

⑧ クリープ疲労損傷値  $D$  を  $D_f$  と  $D_c$  の和として求める。

(詳細は Appendix c. 参照)

## 1.6.2 弾性擬応力を用いた損傷計算結果

上記1.6.1節で示した手順に従い解析した結果を以下に示す。

MODEL-1～MODEL-3に於ける「EBDS」による評価ラインを図1.6.2.1～図1.6.2.3に、「TTSDS」による評価点を図1.6.2.4～図1.6.2.6に示す。また、表1.6.2.1～表1.6.2.3に「EBDS」による弾性応力解析のクリープ疲労損傷計算結果を、MODEL-1～MODEL-3の順で示す。同様に「TTSDS」の計算結果を表1.6.2.4～表1.6.2.6に示す。また、これらのプロット図を図1.6.2.7～図1.6.2.9に示す。これらの結果より以下の点に分かる。

### 【EBDS】

- (1)MODEL-1～MODEL-3の形状不連続部のA点、J1、J2点が、B、I点よりも損傷の程度が大きい。
- (2)MODEL-1は、内表面でG点が、外表面ではM点が損傷が大きく最大はM点の338.5である。
- (3)MODEL-2は、内表面でF点が、外表面ではM点が損傷が大きく最大はM点の341.9である。
- (4)MODEL-3は、内表面でE点が、外表面ではK点が損傷が大きく最大はE点の220.8である。
- (5)厚肉部近傍では疲労損傷が高めに評価され、薄肉部ではクリープ損傷が高めに評価される。

### 【TTSDS】

- (6)(1)で述べた「EBDS」の結果ほど顕著に形状不連続部の効果は見出せない。
- (7)MODEL-1は、内表面でE点が、外表面ではM点が損傷が大きく最大はM点の1.81である。
- (8)MODEL-2は、内表面でF点が、外表面ではM点が損傷が大きく最大はM点の1.84である。
- (9)MODEL-3は、内表面でE点が、外表面ではK点が損傷が大きく最大はK点の1.69である。
- (10)厚肉部近傍では疲労損傷が高めに評価され、薄肉部では、クリープ損傷が高めに評

価される。

### 1.6.3 弾塑性クリープ解析の結果を用いた損傷計算の結果

1.6.1 節で示した「NEBDS」、「TTSDS」の解析手順に従い非弾性応力解析結果に基づくクリープ疲労損傷評価について以下に示す。

図1.6.3.1～図1.6.3.3に「NEBDS」で使用する評価点の図を示す。「TTSDS」の評価点は、弾性解析と同一の位置である。表1.6.3.1～表1.6.3.3に、「NEBDS」によるMODEL-1～MODEL-3の計算結果を示す。「TTSDS」による計算結果は表1.6.3.4～表1.6.3.6に $q$ (弾性追従係数)=1.0の場合を、表1.6.3.7～表1.6.3.9に $q=1.5$ の場合を示す。また、これらの表のグラフを、図1.6.3.4～図1.6.3.6に「NEBDS」の結果を、図1.6.3.7～図1.6.3.9に「TTSDS」の結果を示す。

また、図1.6.3.10～図1.6.3.12にMODEL-1～MODEL-3の非弾性クリープ疲労損傷値の「NEBDS」と「TTSDS」の結果の比較を示す。また、図1.6.3.13～図1.6.3.15にMODEL-1～MODEL-3の「TTSDS」による弾性解析と非弾性解析のクリープ疲労損傷値の比較を示す。

「NEBDS」の結果は以下の通りである。

- ①MODEL-1～MODEL-3ともに疲労損傷がクリープ損傷よりかなり高く評価され、疲労損傷が、クリープ疲労損傷のそのほとんどに寄与している。
- ②厚肉部、薄肉部共に、疲労損傷がクリープ損傷を大きく上回り、弾性解析結果の傾向と一致しない。
- ③MODEL-1は、内表面でF点、外表面ではM点の損傷が大きく最大はM点の1.99である。
- ④MODEL-2は、内表面でF点、外表面ではM点の損傷が大きく最大はM点の2.49である。
- ⑤MODEL-3は、内表面でE点、外表面ではEOUT点の損傷が大きく最大はEOUT点の2.40

である。

- ⑥MODEL-3においては、MODEL-1、MODEL-2で見られる形状不連続部（A、H点）での損傷値の増大の傾向はみられない。
- ⑦MODEL-1でC点、MODEL-2、3でのD点だけに見られるクリープ損傷値の落ち込みの傾向が確認される。

次に、「TTSDS」の結果は以下に示す。

- ①「NEBDS」の傾向と異なり、MODEL-1～MODEL-3ともに、疲労損傷とクリープ損傷の両者がクリープ疲労損傷に寄与している。
- ②弾性解析の結果と同様に、厚肉部近傍では疲労損傷が高めに評価され、薄肉部では、クリープ損傷が高く評価される。
- ③MODEL-1では、内表面でF点が、外表面ではM点が損傷が大きく、最大はM点の2.92<sub>4</sub>である。
- ④MODEL-2では、内表面でF点が、外表面ではM点が損傷が大きく、最大はM点の3.56<sub>4</sub>である。
- ⑤MODEL-3では、内表面でE点が、外表面ではI点が損傷が大きく、最大はI点の3.36<sub>5</sub>である。
- ⑥MODEL-1、2ともに弾性解析結果で見られる形状不連続部における疲労損傷値、クリープ損傷値の増大傾向が確認される。しかし、MODEL-3においては、「NEBDS」の結果と同様に損傷値の増大の傾向は確認されない。
- ⑦「NEBDS」の結果で見られるMODEL-1でのC点、MODEL-2、3のD点におけるクリープ緩和傾向が「TTSDS」の結果では確認されない。

「NEBDS」と「TTSDS」の非弾性解析のクリープ疲労損傷値の結果の比較は次の点を確認される。図1.6.3.10～図1.6.3.12にその比較を示す。

①クリープ疲労損傷値は、「TTSDS」の結果が「NEBDS」の結果よりMODEL-1～MODEL-3の全ての評価点において安全側に評価している。

MODEL-1～MODEL-3の最も損傷値が高い評価点で「TTSDS」の結果が、

1.43～1.47倍程度上回っている。また、両プログラムの損傷値の最大は、MODEL-2のM点である。

②疲労損傷値は、評価手順が同一であり全てはほぼ一致している。

③「NEBDS」の計算結果において、クリープ損傷値の寄与は厚肉部においてのみMODEL-1で24%(F-E点)、MODEL-2で18%(F点)、MODEL-3で16%(E点)程度であり、小さいことがわかる。

「TTSDS」の結果におけるクリープ損傷値の寄与は、薄肉部では疲労損傷の寄与より大きく、損傷値の高い厚肉部においては寄与は小さくなるが最小でもMODEL-1のM点の32%と比較的大きいことがわかる。

表 1.2.1 使用要素数・節点数

	熱 伝 導 解 析		熱 応 力 解 析	
	要素数	節点数	要素数	節点数
MODEL-1	364	903	270	903
MODEL-2	342	851	258	851
MODEL-3	360	887	262	887

表 1.3.1 使用要素

	熱 伝 導 解 析	熱 応 力 解 析
8 節点四辺形 軸対称要素	HQAX8	QAX8
6 節点四辺形 軸対称要素	HTAX6	TAX6
熱伝達 3 節点 軸対称要素	FCAX3	

表 1. 4. 1. 1 材料特性 (熱伝導解析)

温 度 (°C)	熱伝導係数 (kcal/mm·sec·°C)	比 熱 (kcal/kg·°C)	密 度 (kg/mm <sup>3</sup> )
20	$3.48 \times 10^{-6}$	0.108	$8.03 \times 10^{-6}$
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 1.4.1.2 材料特性 (熱応力解析)

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

表 1.4.1.3 材料特性 (弾塑性解析)

最大想定ひずみレベル 0.3%

温 度 (°C)	降伏応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	加工硬化係数 (kg/mm <sup>2</sup> )
350	12.97	1352.7
400	12.57	1302.0
450	12.30	1254.2
500	12.04	1207.7
550	11.75	1161.3
600	11.36	1113.8
650	10.83	1064.0

表 1.4.1.4 材料特性 (クリープ解析)

$\epsilon^c = c_1 \{1 - \exp(-r_1 f)\} + c_2 \{1 - \exp(-r_2 f)\} + \dot{\epsilon}_m t$

ここで

$r_1 = 103.37 t_H^{0.72607}, r_2 = 17.255 t_H^{0.86775}$   
 $c_1 = 1.2692 \dot{\epsilon}_m^{0.744391} / r_1, c_2 = 0.48449 \dot{\epsilon}_m^{0.81155} / r_2$   
 $\dot{\epsilon}_m = F t_H^{1.1335}$

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

ただし,  $0 \leq \sigma < 0.01$  に対しては,  $r_1 = r_2 = c_1 = c_2 = \dot{\epsilon}_m = 0$

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

温度 (°C)	425 ≤ T ≤ 650
パラメータ	
F	$62.416 \exp \left\{ - \frac{40812}{8.31 (T + 273.15)} \right\}$
B <sub>0</sub>	$-17.54301 + 26248.54 / (T + 273.15)$
B <sub>1</sub>	$-6401.579 / (T + 273.15)$
B <sub>2</sub>	$-425.0012 / (T + 273.15)$
a <sub>R</sub>	MATERIAL データ B <sub>12</sub> カードで指定した値。B <sub>12</sub> カードの a <sub>R</sub> が無記入の場合は 1.0

表1.4.3.1 (I) 弾性解析ステップ (MODEL-1)  
<COLD SHOCK>

ステップ		時 間 (sec.)	ステップ		時 間 (sec.)
弾性解析	熱伝導解析		弾性解析	熱伝導解析	
1	129	28.0	21	182	72.0
2	133	28.5	22	183	78.0
3	137	29.0	23	184	84.0
4	141	29.5	24	185	90.0
5	145	30.0	25	186	100.0
6	149	31.0	26	187	110.0
7	153	32.0	27	188	120.0
8	156	33.0	28	189	135.0
9	159	34.0	29	190	150.0
10	162	35.0	30	191	180.0
11	164	36.0	31	192	210.0
12	166	37.7	32	193	240.0
13	168	39.0	33	194	270.0
14	170	41.0	34	195	300.0
15	172	43.0	35	196	350.0
16	174	47.25	36	197	400.0
17	176	51.5	37	198	450.0
18	178	55.75			
19	180	60.0			
20	181	66.0			

表 1.4.3.1 (II) 弾性解析ステップ (MODEL-1)

&lt;HOT SHOCK&gt;

ステップ		時間 (sec.)	ステップ		時間 (sec.)
弾性解析	熱伝導解析		弾性解析	熱伝導解析	
38	253	3628.5	58	304	3700.0
39	259	3629.25	59	305	3710.0
40	265	3630.0	60	306	3720.0
41	269	3630.75	61	307	3735.0
42	271	3631.5	62	308	3750.0
43	276	3632.75	63	309	3780.0
44	281	3634.0	64	310	3810.0
45	283	3635.0	65	312	3840.0
46	285	3636.0	66	314	3870.0
47	287	3638.5	67	316	3900.0
48	289	3641.0	68	318	3650.0
49	292	3645.0	69	320	4000.0
50	294	3659.5	70	322	4050.0
51	296	3654.0			
52	298	3660.0			
53	299	3666.0			
54	300	3672.0			
55	301	3678.0			
56	302	3684.0			
57	303	3690.0			

表 1.4.3.2 (I) 弾性解析ステップ (MODEL-2)

## &lt; COLD SHOCK &gt;

ステップ		時間 (sec.)	ステップ		時間 (sec.)
弾性解析	熱伝導解析		弾性解析	熱伝導解析	
1	135	28.0	21	188	72.0
2	139	28.5	22	189	78.0
3	143	29.0	23	190	84.0
4	147	29.5	24	191	90.0
5	151	30.0	25	192	100.0
6	155	31.0	26	193	110.0
7	159	32.0	27	194	120.0
8	162	33.0	28	195	135.0
9	165	34.0	29	196	150.0
10	168	35.0	30	197	180.0
11	170	36.0	31	198	210.0
12	172	37.0	32	199	240.0
13	174	39.0	33	200	270.0
14	176	41.0	34	201	300.0
15	178	43.0	35	202	350.0
16	180	47.25	36	203	400.0
17	182	51.5	37	204	450.0
18	184	55.75	38	205	500.0
19	186	60.0	39	207	700.0
20	187	66.0			

表 1. 4. 3. 2 (Ⅱ) 弾性解析ステップ (MODEL-2)

<HOT SHOCK>

ステップ		時間 (sec.)	ステップ		時間 (sec.)
弾性解析	熱伝導解析		弾性解析	熱伝導解析	
40	249	3627.5	60	308	3684.0
41	254	3628.0	61	309	3690.0
42	259	3628.5	62	310	3700.0
43	265	3629.25	63	311	3710.0
44	271	3630.0	64	312	3720.0
45	274	3630.75	65	313	3735.0
46	277	3631.5	66	314	3750.0
47	282	3632.75	67	315	3780.0
48	287	3634.0	68	316	3810.0
49	289	3635.0	69	318	3840.0
50	291	3636.0	70	320	3870.0
51	293	3638.5	71	322	3900.0
52	295	3641.0	72	324	3950.0
53	298	3645.0	73	326	4000.0
54	300	3649.0	74	328	4050.0
55	302	3654.5	75	330	4100.0
56	304	3660.0	76	343	4425.0
57	305	3666.0			
58	306	3672.0			
59	307	3678.0			

表1.4.3.3 (I) 弾性解析ステップ (MODEL-3)

## &lt; C O L D S H O C K &gt;

ステップ		時 間 (sec.)	ステップ		時 間 (sec.)
弾性解析	熱伝導解析		弾性解析	熱伝導解析	
1	135	28.0	21	188	72.0
2	139	28.5	22	189	78.0
3	143	29.0	23	190	84.0
4	147	29.5	24	191	90.0
5	151	30.0	25	192	100.0
6	155	31.0	26	193	110.0
7	159	32.0	27	194	120.0
8	162	33.0	28	195	135.0
9	165	34.0	29	196	150.0
10	168	35.0	30	197	180.0
11	170	36.0	31	198	210.0
12	172	37.0	32	199	240.0
13	174	39.0	33	200	270.0
14	176	41.0	34	201	300.0
15	178	43.0	35	202	350.0
16	180	47.25	36	203	400.0
17	182	51.5	37	204	450.0
18	184	55.75	38	205	500.0
19	186	60.0	39	207	700.0
20	187	66.0			



表 1.4.3.3 (II) 弾性解析ステップ (MODEL-3)

&lt;HOT SHOCK&gt;

ステップ		時間 (sec.)	ステップ		時間 (sec.)
弾性解析	熱伝導解析		弾性解析	熱伝導解析	
40	249	3627.5	60	308	3684.0
41	254	3628.0	61	309	3690.0
42	259	3628.5	62	310	3700.0
43	265	3629.25	63	311	3710.0
44	271	3630.0	64	312	3720.0
45	274	3630.75	65	313	3735.0
46	277	3631.5	66	314	3750.0
47	282	3632.75	67	315	3780.0
48	287	3634.0	68	316	3810.0
49	289	3635.0	69	318	3840.0
50	291	3636.0	70	320	3870.0
51	293	3638.5	71	322	3900.0
52	295	3641.0	72	324	3950.0
53	298	3645.0	73	326	4000.0
54	300	3649.0	74	328	4050.0
55	302	3654.5	75	330	4100.0
56	304	3660.0	76	343	4425.0
57	305	3666.0			
58	306	3672.0			
59	307	3678.0			

表 1. 4. 3. 4 ( I ) 非弾性解析ステップ表

ステップ	時間 (sec.)	ステップ	時間 (sec.)
1	0.0	21	27.5
2	10.0	22	27.625
3	18.5	23	27.75
4	23.0	24	27.875
5	25.5	25	28.0
6	25.625	26	28.125
7	25.75	27	28.25
8	25.875	28	28.375
9	26.0	29	28.5
10	26.125	30	28.625
11	26.25	31	28.75
12	26.375	32	28.875
13	26.5	33	29.0
14	26.625	34	29.125
15	26.75	35	29.25
16	26.875	36	29.375
17	27.0	37	29.5
18	27.125	38	29.625
19	27.25	39	29.75
20	27.375	40	29.875

表 1. 4. 3. 4 (II) 非弾性解析ステップ表

ステップ	時間 (sec.)	ステップ	時間 (sec.)
41	30.0	61	36.5
42	30.25	62	37.0
43	30.5	63	38.0
44	30.75	64	39.0
45	31.0	65	40.0
46	31.25	66	41.0
47	31.5	67	42.0
48	31.75	68	43.0
49	32.0	69	45.125
50	32.333	70	47.25
51	32.667	71	49.375
52	33.0	72	51.5
53	33.333	73	53.625
54	33.667	74	55.75
55	34.0	75	57.875
56	34.333	76	60.0
57	34.667	77	66.0
58	35.0	78	72.0
59	35.5	79	78.0
61	36.0	80	84.0

表 1. 4. 3. 4 (Ⅲ). 非弾性解析ステップ表

ステップ	時間 (sec.)	ステップ	時間 (sec.)
81	90.0	101	1200.0
82	100.0	102	1350.0
83	110.0	103	1500.0
84	120.0	104	1650.0
85	135.0	105	1800.0
86	150.0	106	2025.0
87	180.0	107	2250.0
88	210.0	108	2475.0
89	240.0	109	2700.0
90	270.0	110	2925.0
91	300.0	111	3150.0
92	350.0	112	3375.0
93	400.0	113	3600.0
94	450.0	114	3613.0
95	500.0	115	3619.0
96	600.0	116	3624.0
97	700.0	117	3625.0
98	800.0	118	3625.5
99	900.0	119	3625.6
100	1050.0	120	3625.7

表 1. 4. 3. 4 (IV) 非弾性解析ステップ表

ステップ	時間 (sec.)	ステップ	時間 (sec.)
121	3625.7	141	3627.7
122	3625.8	142	3627.8
123	3625.9	143	3627.9
124	3626.0	144	3628.0
125	3626.1	145	3628.1
126	3626.2	146	3628.2
127	3626.3	147	3628.3
128	3626.4	148	3628.4
129	3626.5	149	3628.5
130	3626.6	150	3628.625
131	3626.7	151	3628.75
132	3626.8	152	3628.875
133	3626.9	153	3629.0
134	3627.0	154	3629.125
135	3627.1	155	3629.25
136	3627.2	156	3629.375
137	3627.3	157	3629.5
138	3627.4	158	3629.625
139	3627.5	159	3629.75
140	3627.6	160	3629.875

表 1. 4. 3. 4 (V) 非弾性解析ステップ表

ステップ	時間 (sec.)	ステップ	時間 (sec.)
161	3630.0	181	3636.0
162	3630.25	182	3637.25
163	3630.5	183	3638.5
164	3630.75	184	3639.75
165	3631.0	185	3641.0
166	3631.25	186	3642.333
167	3631.5	187	3642.667
168	3631.75	188	3645.0
169	3632.0	189	3647.0
170	3632.25	190	3649.0
171	3632.5	191	3651.75
172	3632.75	192	3654.5
173	3633.0	193	3657.25
174	3633.25	194	3666.0
175	3633.5	195	3666.0
176	3633.75	196	3672.0
177	3634.0	197	3678.0
178	3634.5	198	3684.0
179	3635.0	199	3690.0
180	3635.5	200	3700.0

表 1. 4. 3. 4 (VI) 非弾性解析ステップ表

ステップ	時間 (sec.)	ステップ	時間 (sec.)
201	3710.0	221	4125.0
202	3720.0	222	4150.0
203	3735.0	223	4175.0
204	3750.0	224	4200.0
205	3780.0	225	4225.0
206	3810.0	226	4250.0
207	3825.0	227	4275.0
208	3840.0	228	4300.0
209	3855.0	229	4325.0
210	3870.0	230	4350.0
211	3885.0	231	4375.0
212	3900.0	232	4400.0
213	3925.0	233	4425.0
214	3950.0	234	4450.0
215	3975.0	235	4475.0
216	4000.0	236	4500.0
217	4025.0	237	4525.0
218	4050.0	238	4550.0
219	4075.0	239	4575.0
220	4100.0	240	4600.0

表 1. 4. 3. 4 (VII) 非弾性解析ステップ表

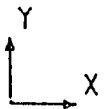
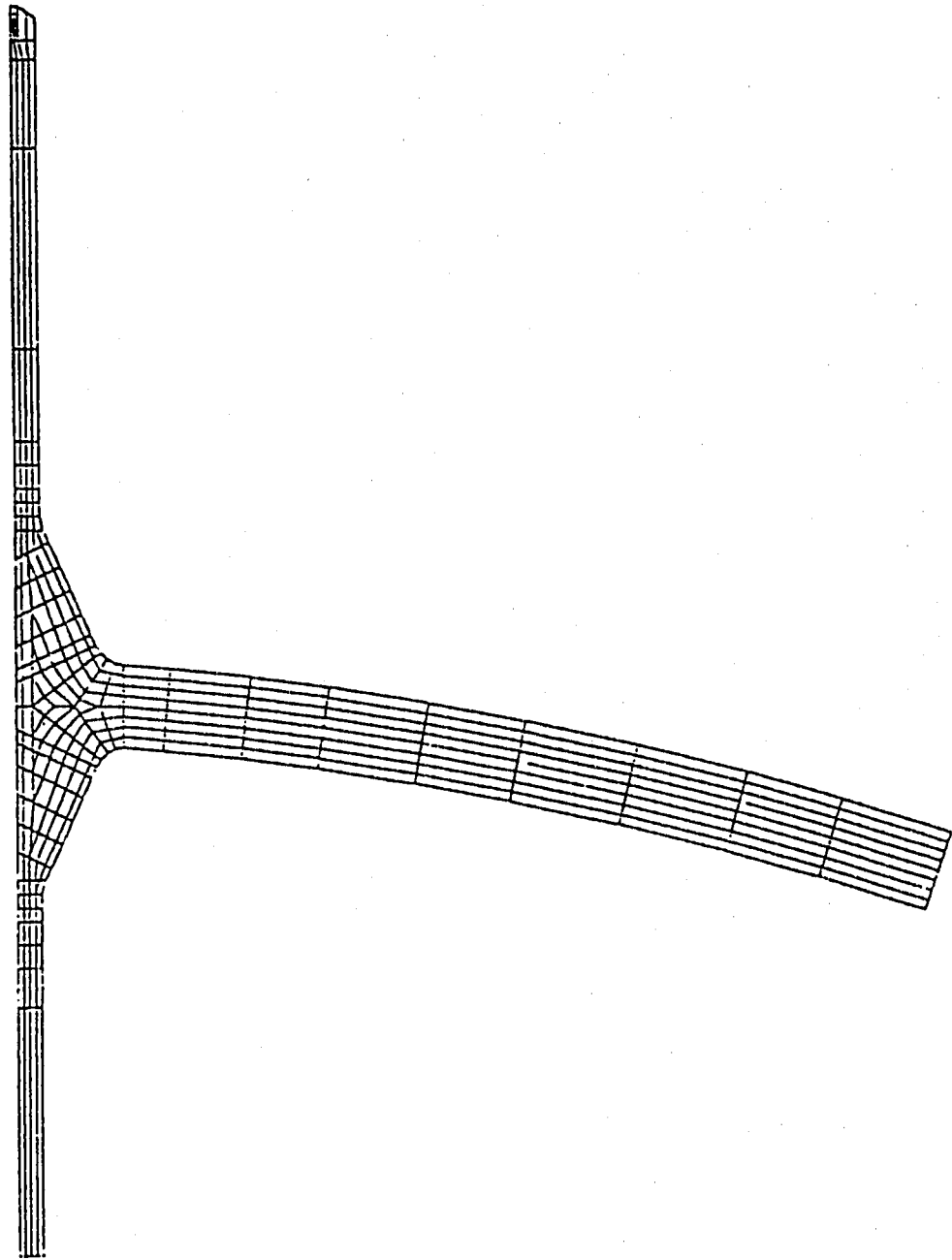
ステップ	時間 (sec.)	ステップ	時間 (sec.)
241	4625.0	261	5300.0
242	465.0	262	5400.0
243	4675.0	263	5550.0
244	4700.0	264	5700.0
245	4725.0	265	5850.0
246	475.0	266	6000.0
247	4775.0	267	6150.0
248	4800.0	268	6300.0
249	4825.0	269	6450.0
250	4850.0	270	6600.0
251	4875.0	271	6800.0
252	4900.0	272	7000.0
253	4925.0	273	7200.0
254	4950.0	274	7400.0
255	4975.0	275	7600.0
256	5000.0	276	7800.0
527	5050.0	277	8000.0
258	5100.0	278	8200.0
259	5150.0	279	8400.0
260	5200.0	280	8600.0



表 1. 4. 3. 4 (Ⅷ) 非弾性解析ステップ表

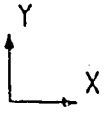
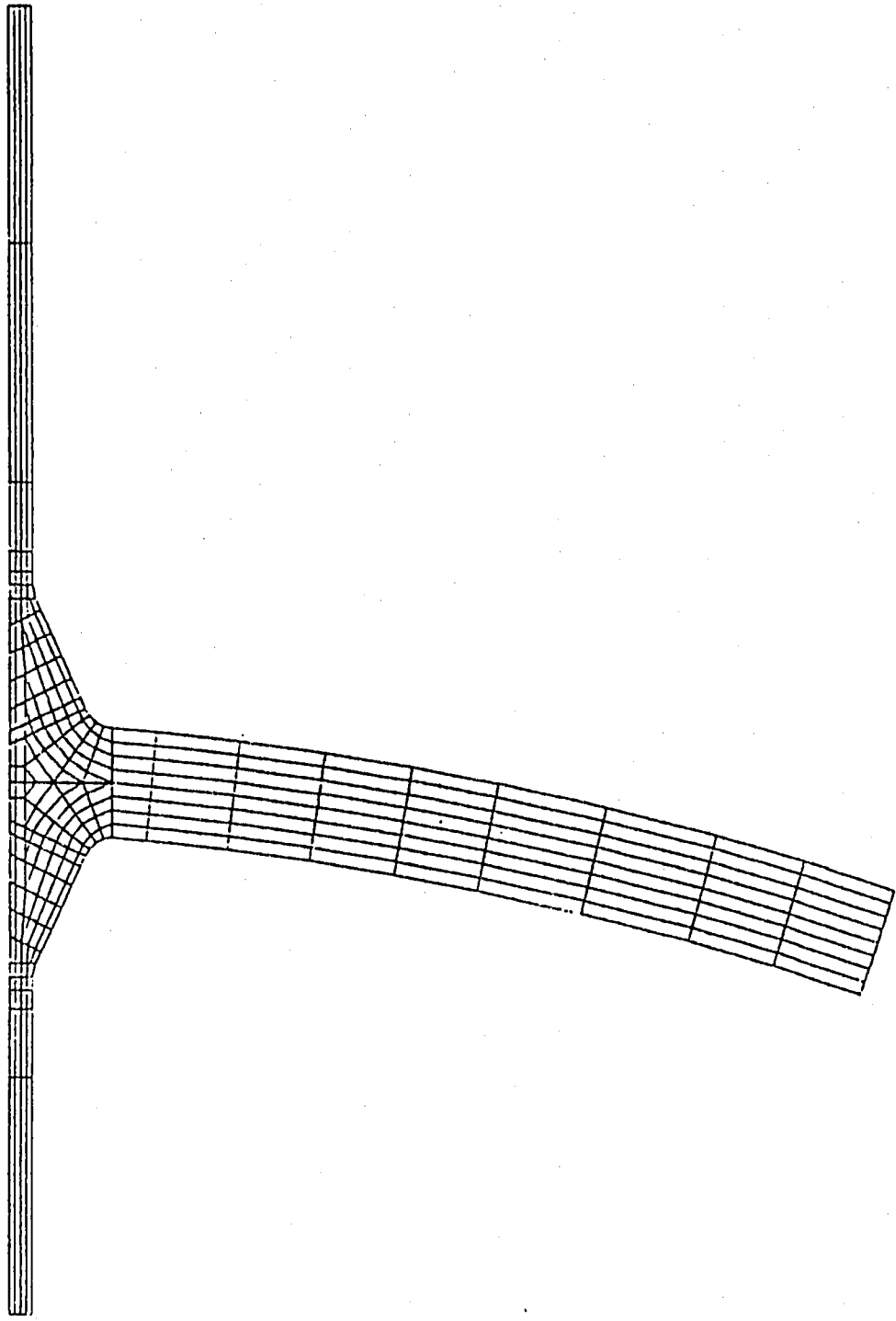
ステップ	時間 (sec.)	ステップ	時間 (sec.)
281	8800.0	301	
282	9200.0	302	
283	9600.0	303	
284	10000.0	304	
285	10400.0	305	
286	10800.0	306	
287	11600.0	307	
288	12400.0	308	
289	13200.0	309	
290	14000.0	310	
291	14800.0	311	
292	15600.0	312	
293	17100.0	313	
294	18600.0	314	
295	20100.0	315	
296	21600.0	316	
297		317	
298		318	
299		319	
300		320	





GEOM. SCALE 1 : 30.0000

図1.2.2 : MODEL-1 の解析形状




GEOM. SCALE  30.0000

図1.2.3 : MODEL-2 の解析形状

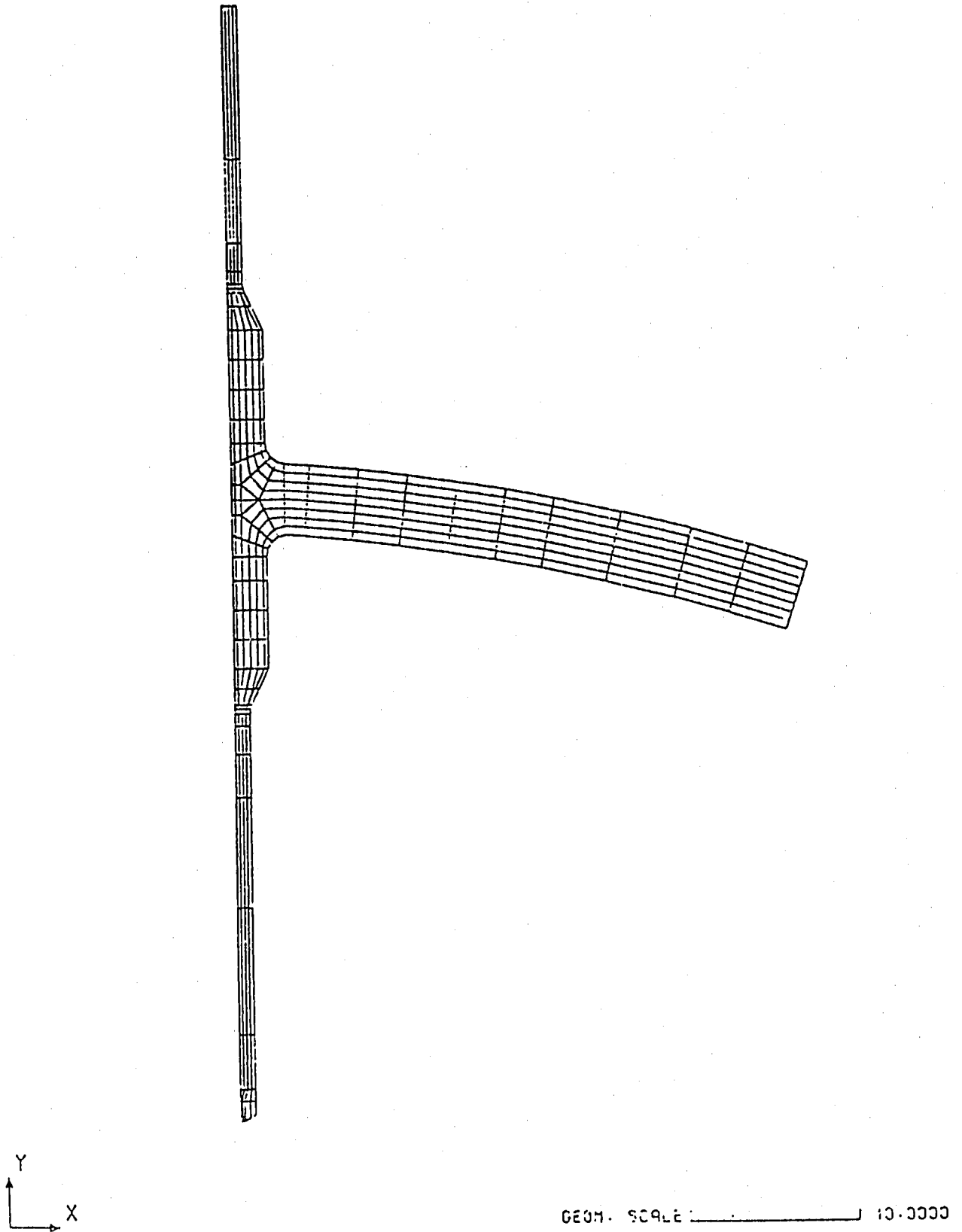
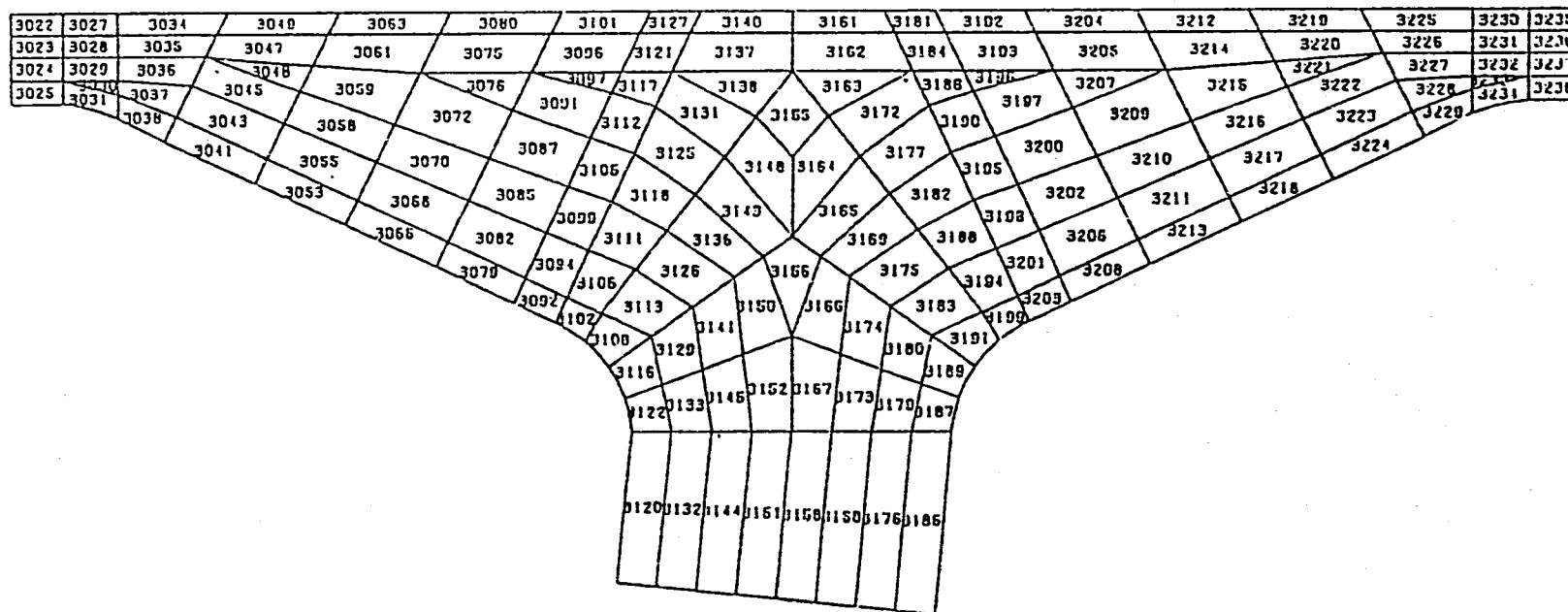


図1.2.4 : MODEL-3の解析形状



GEOM. SCALE 1:50000

図1.2.5 : MODEL-1 の要素番号



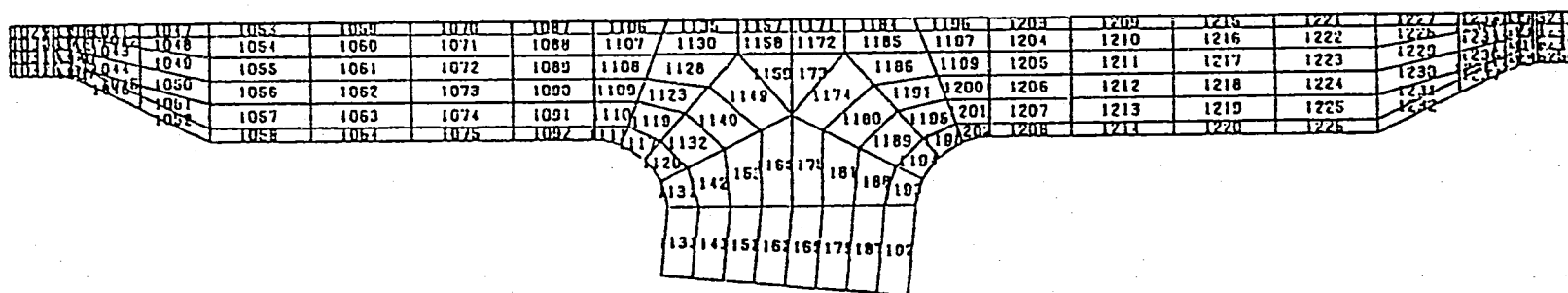


図1.2.7 : MODEL-3 の要素番号

GEOM. SCALE  10.0000



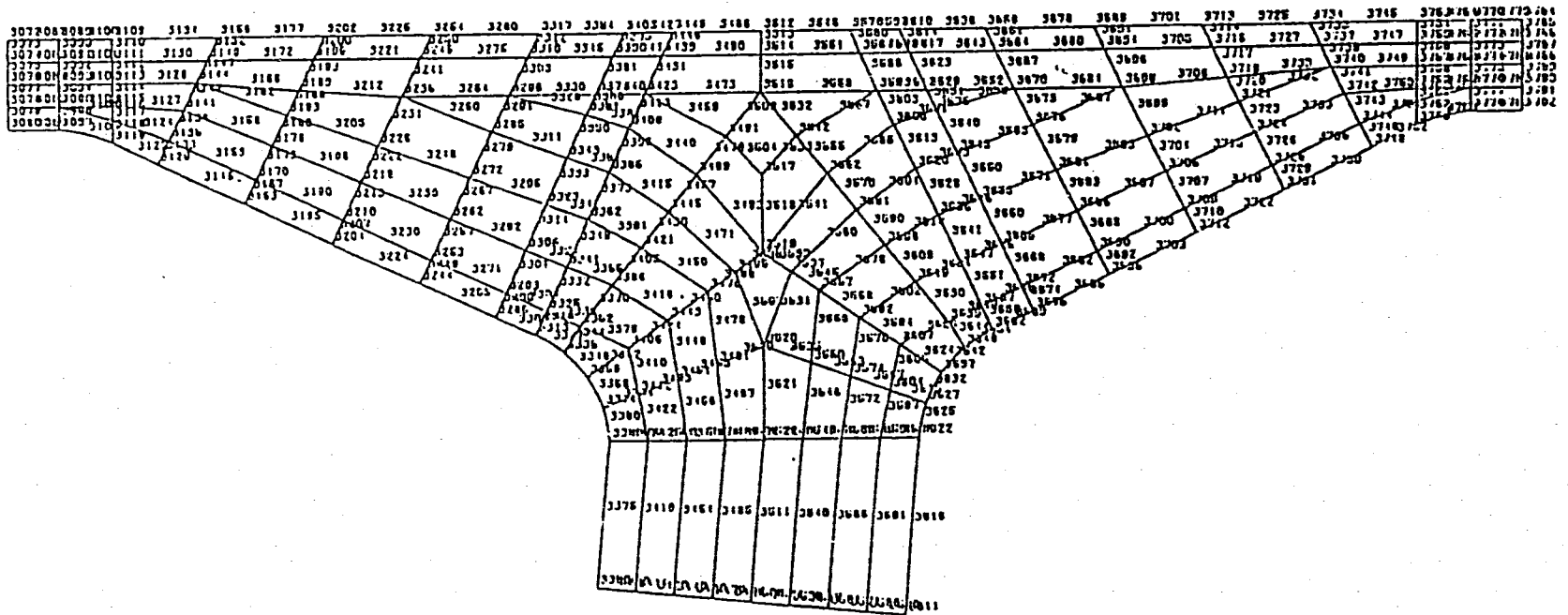


図1.2.8 : MODEL-1 の節点番号

39

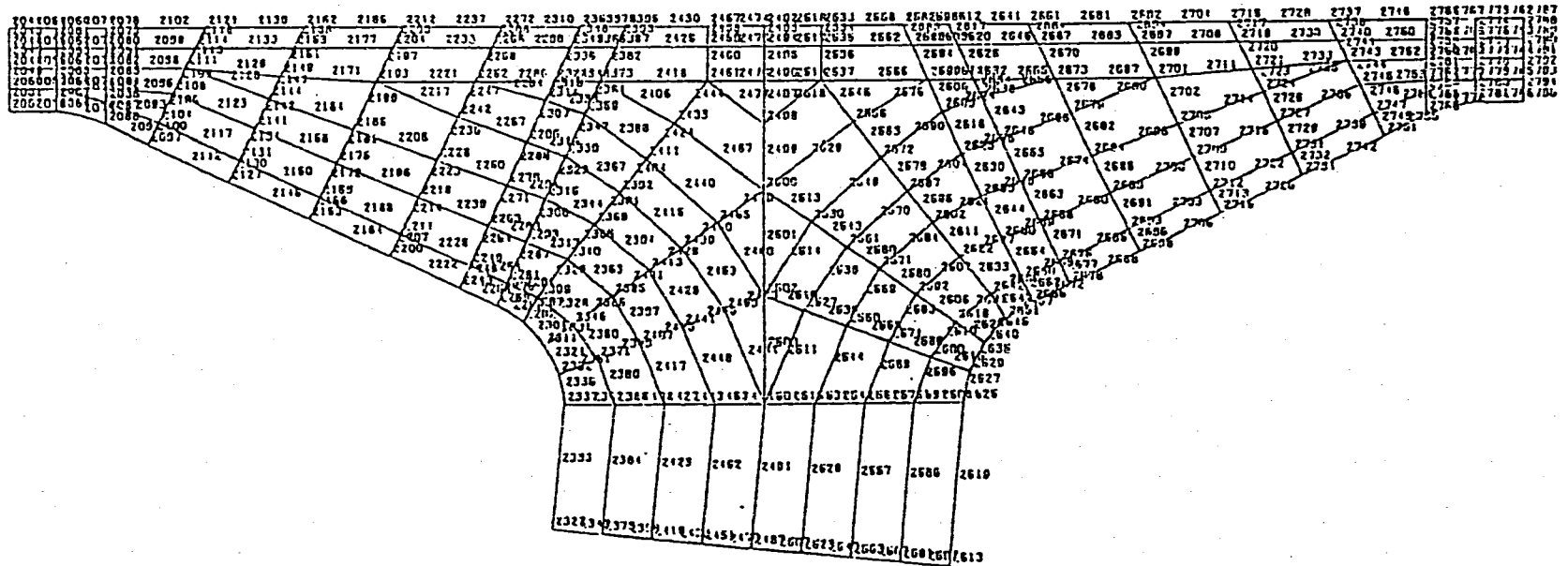
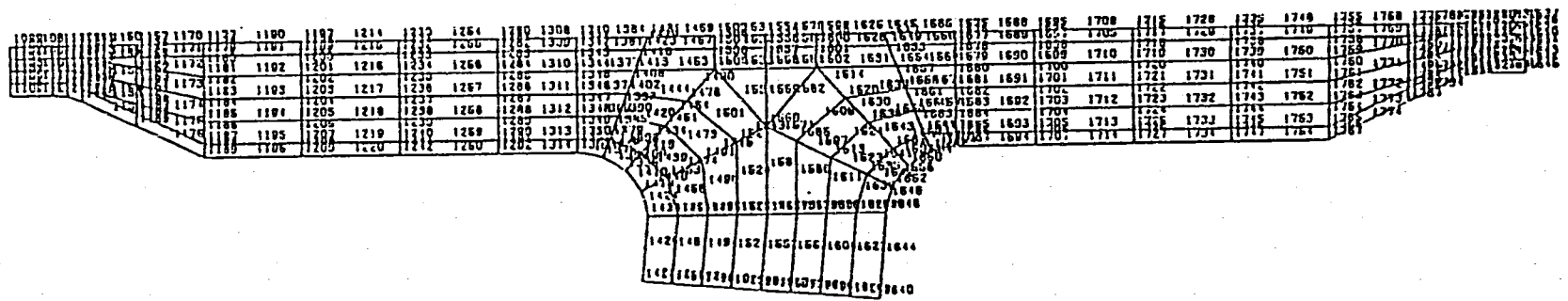


図1.2.9 : MODEL-2 の節点番号

GEOM. SCALE 1:50000



FINAS



GEOM. SCALE 10-3000

図 1.2.10 MODEL-3の節点番号

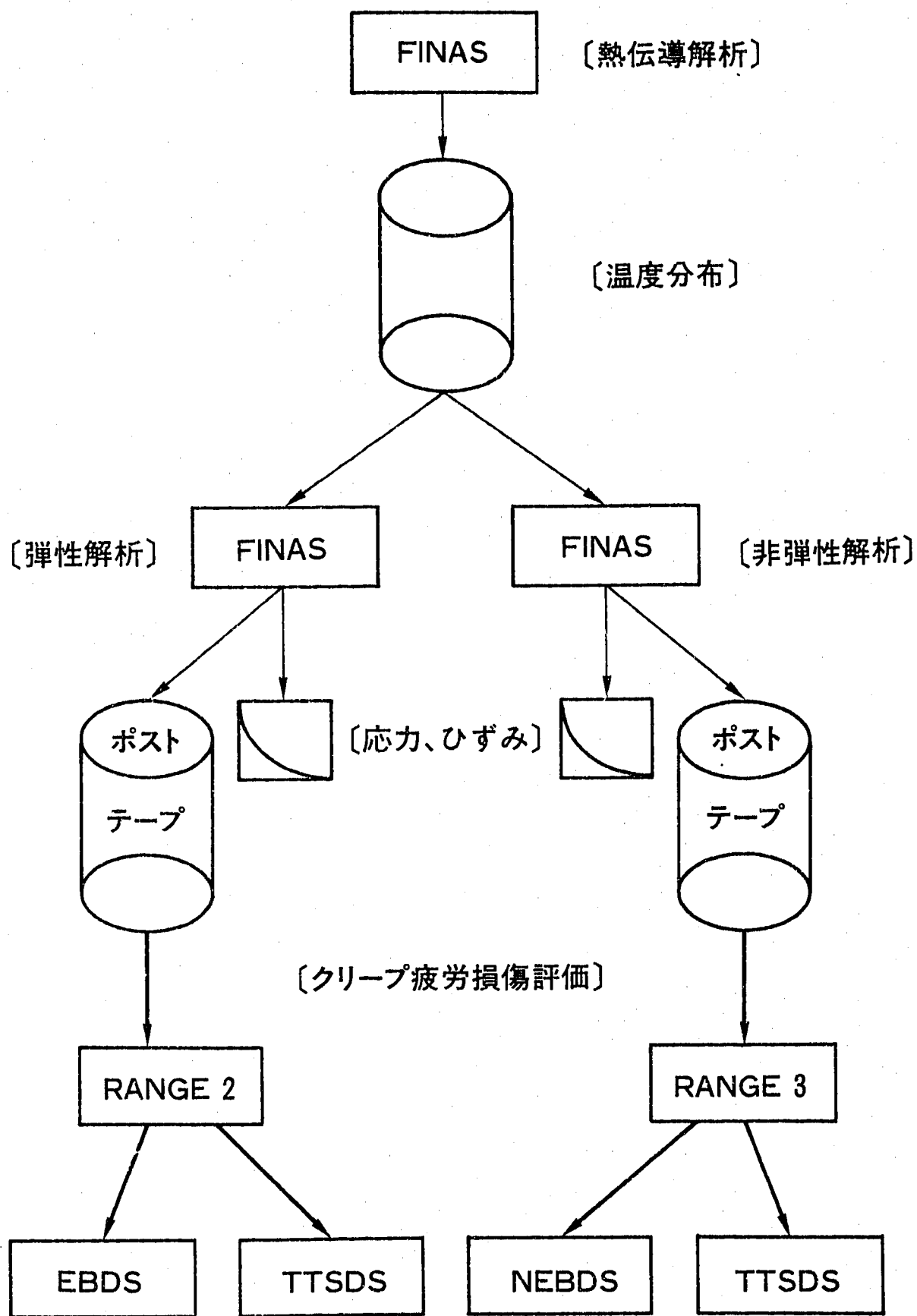
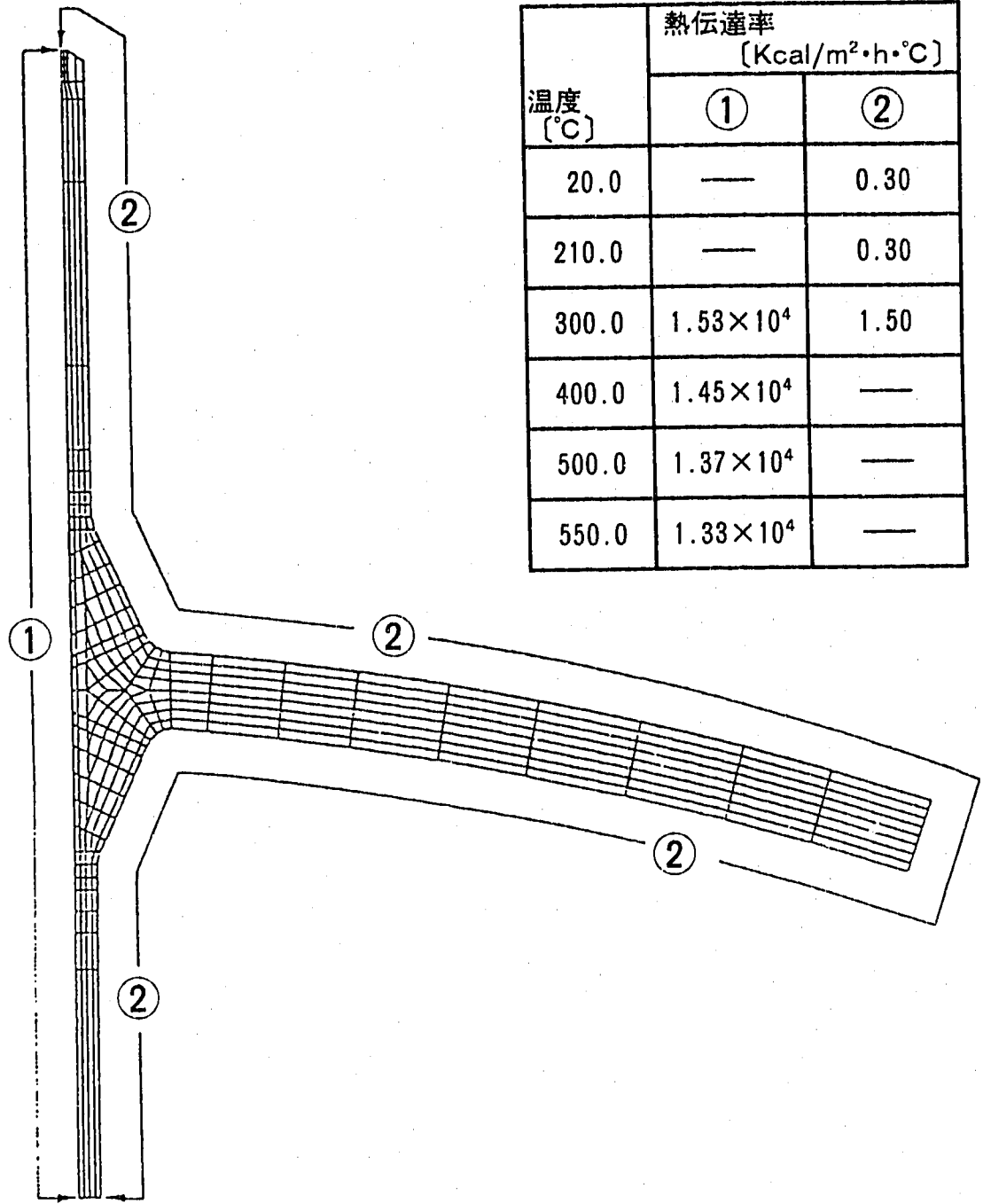


図 1.3.1 計算処理フロー



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>	—
500.0	1.37×10 <sup>4</sup>	—
550.0	1.33×10 <sup>4</sup>	—

MODEL-1

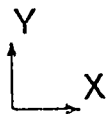
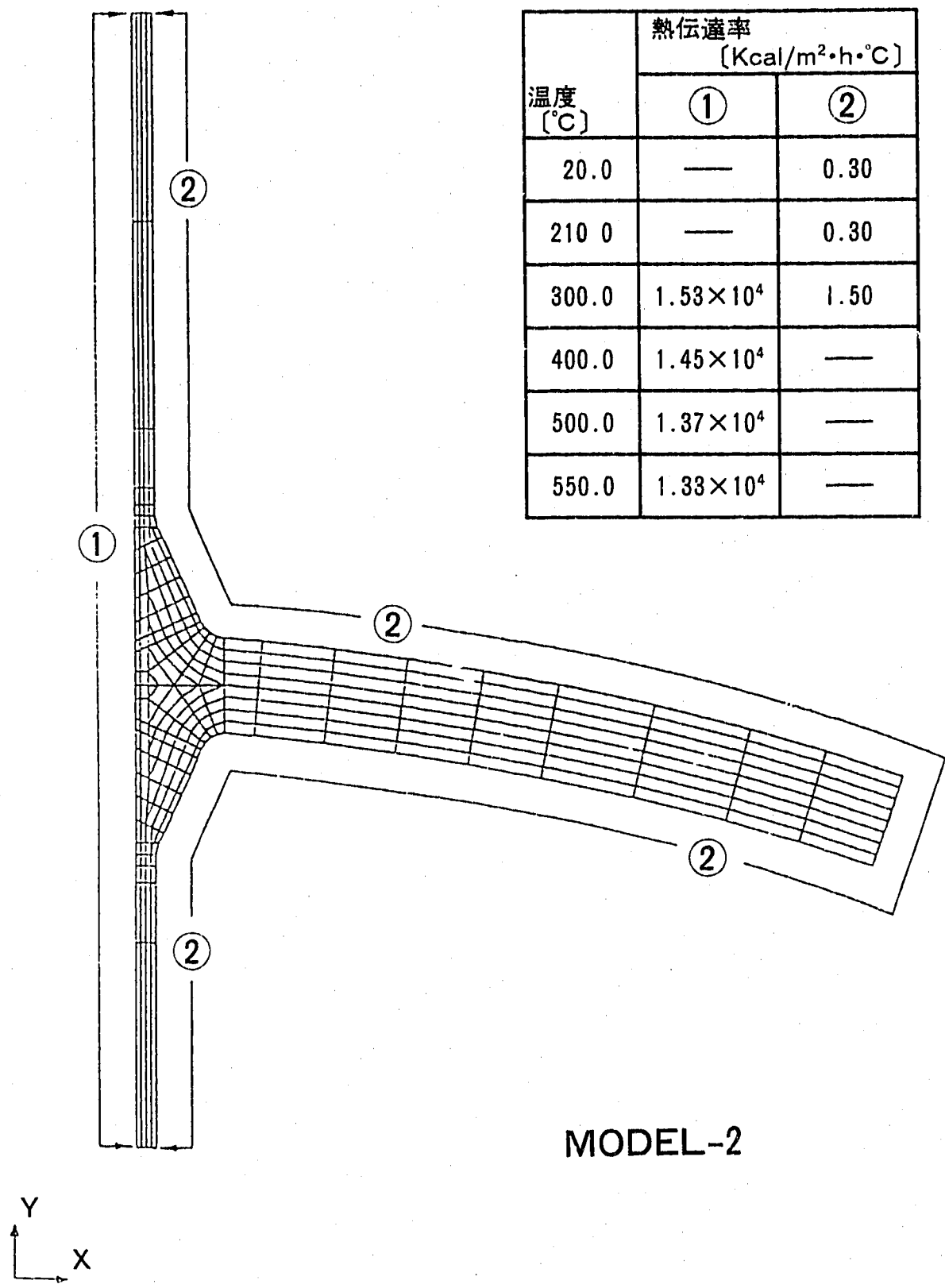


図 1.4.2.1 熱的境界条件 (MODEL-1)



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>	—
500.0	1.37 × 10 <sup>4</sup>	—
550.0	1.33 × 10 <sup>4</sup>	—

MODEL-2

图 1.4.2.2 熱的境界条件 (MODEL-2)

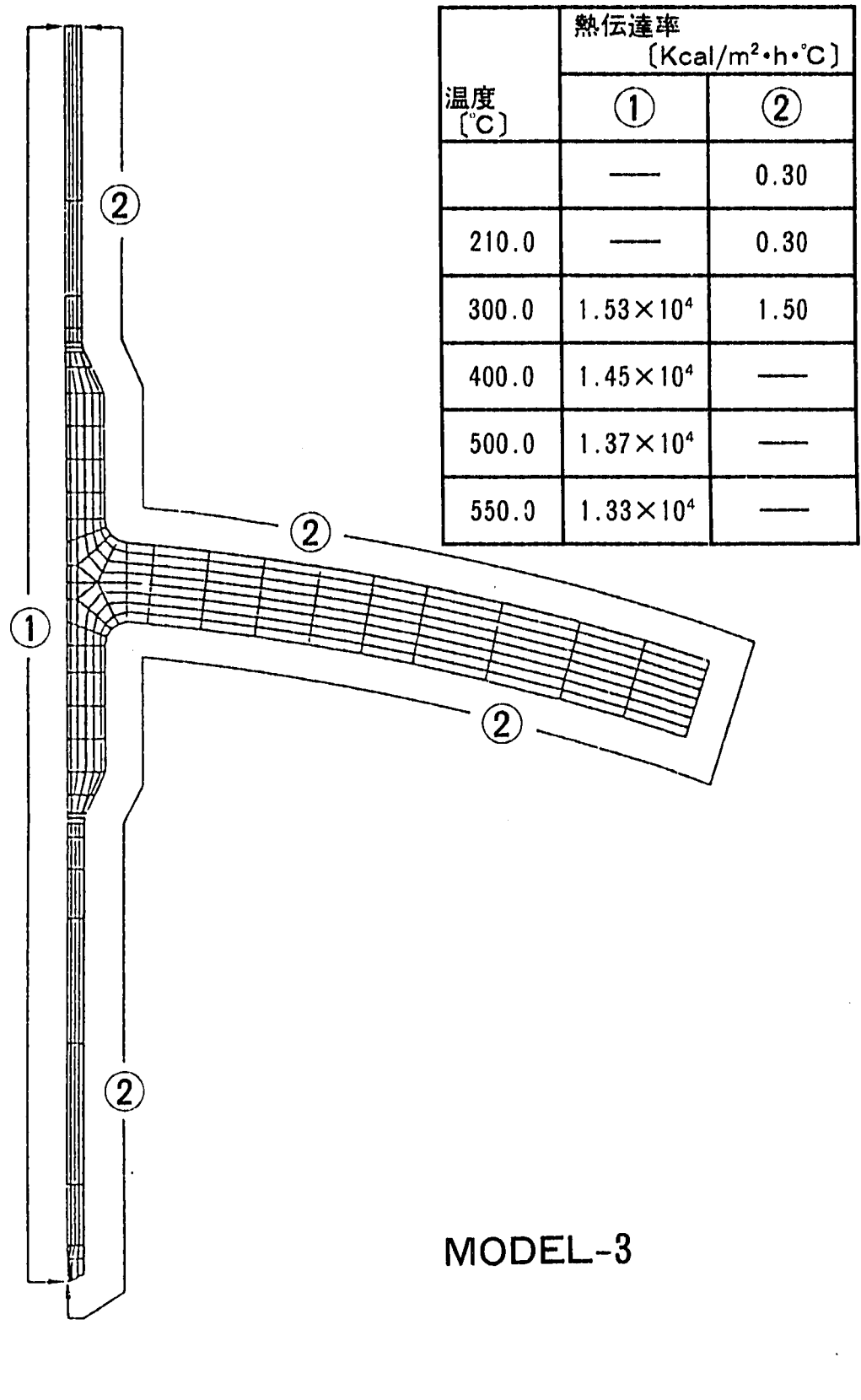


図 1.4.2.3 熱的境界条件 (MODEL-3)

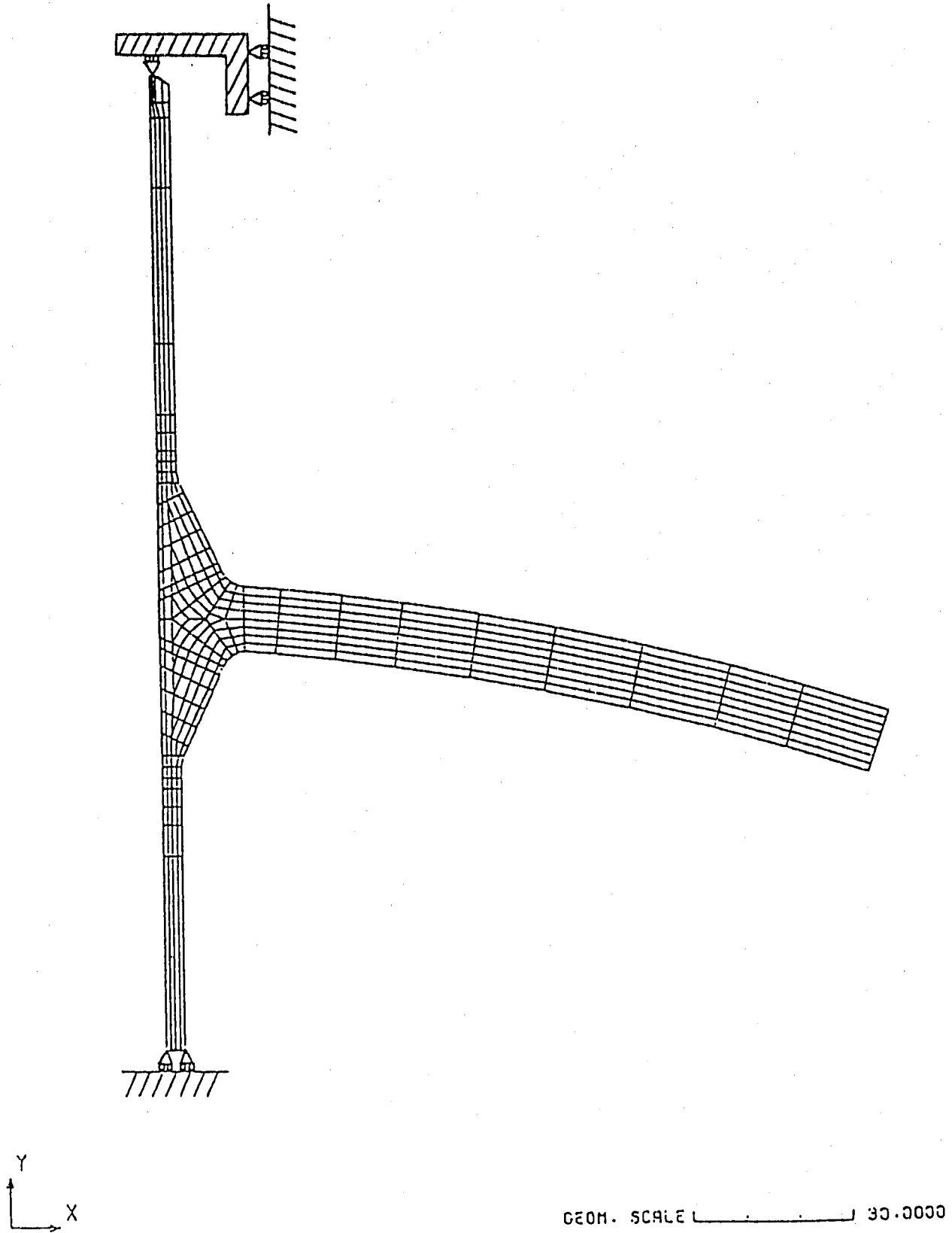


図1.4.2.4 MODEL-1 の熱応力解析に於ける機械的境界条件



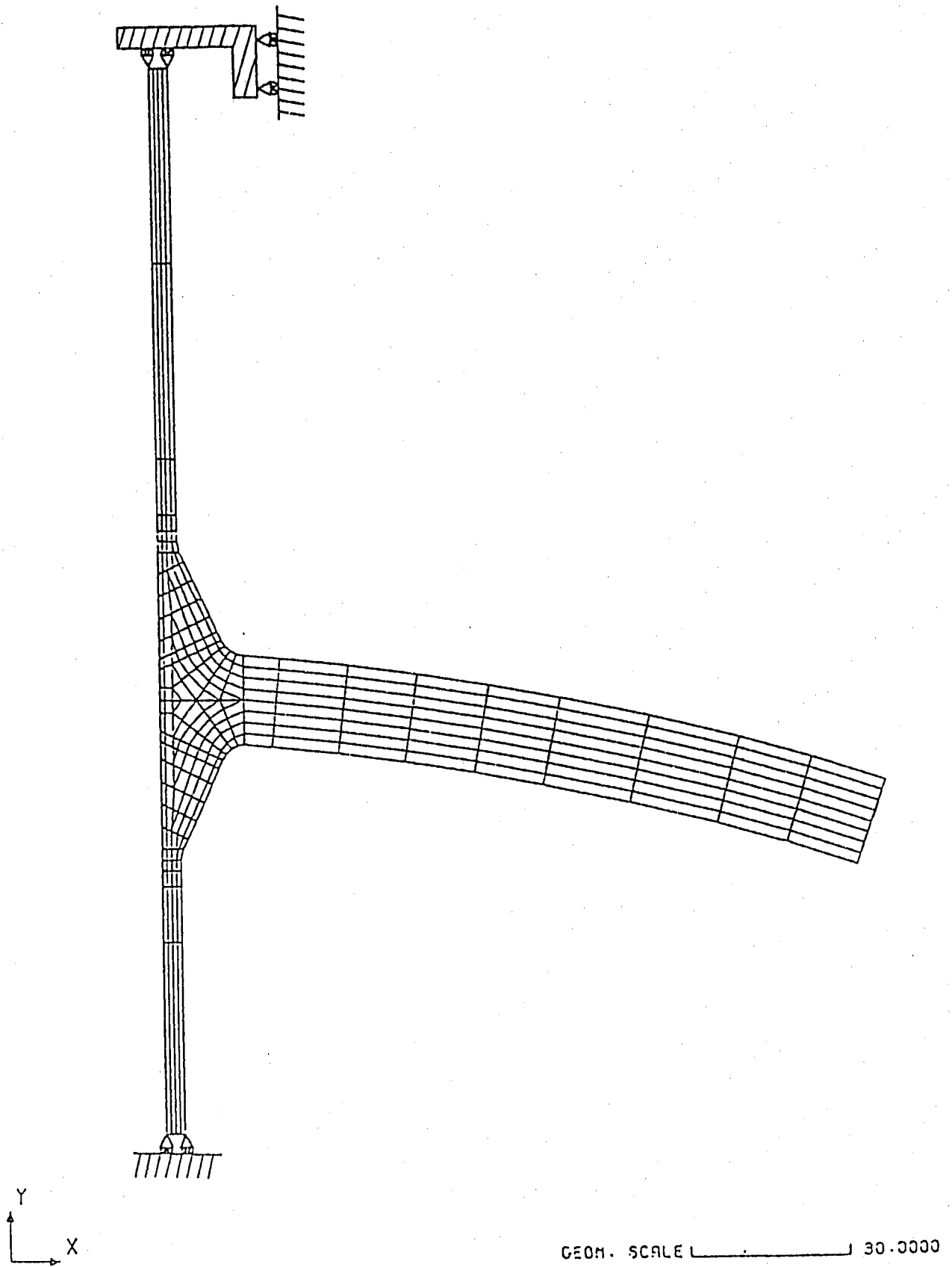


図1.4.2.5 MODEL-2 の熱応力解析に於ける機械的境界条件

FINAS

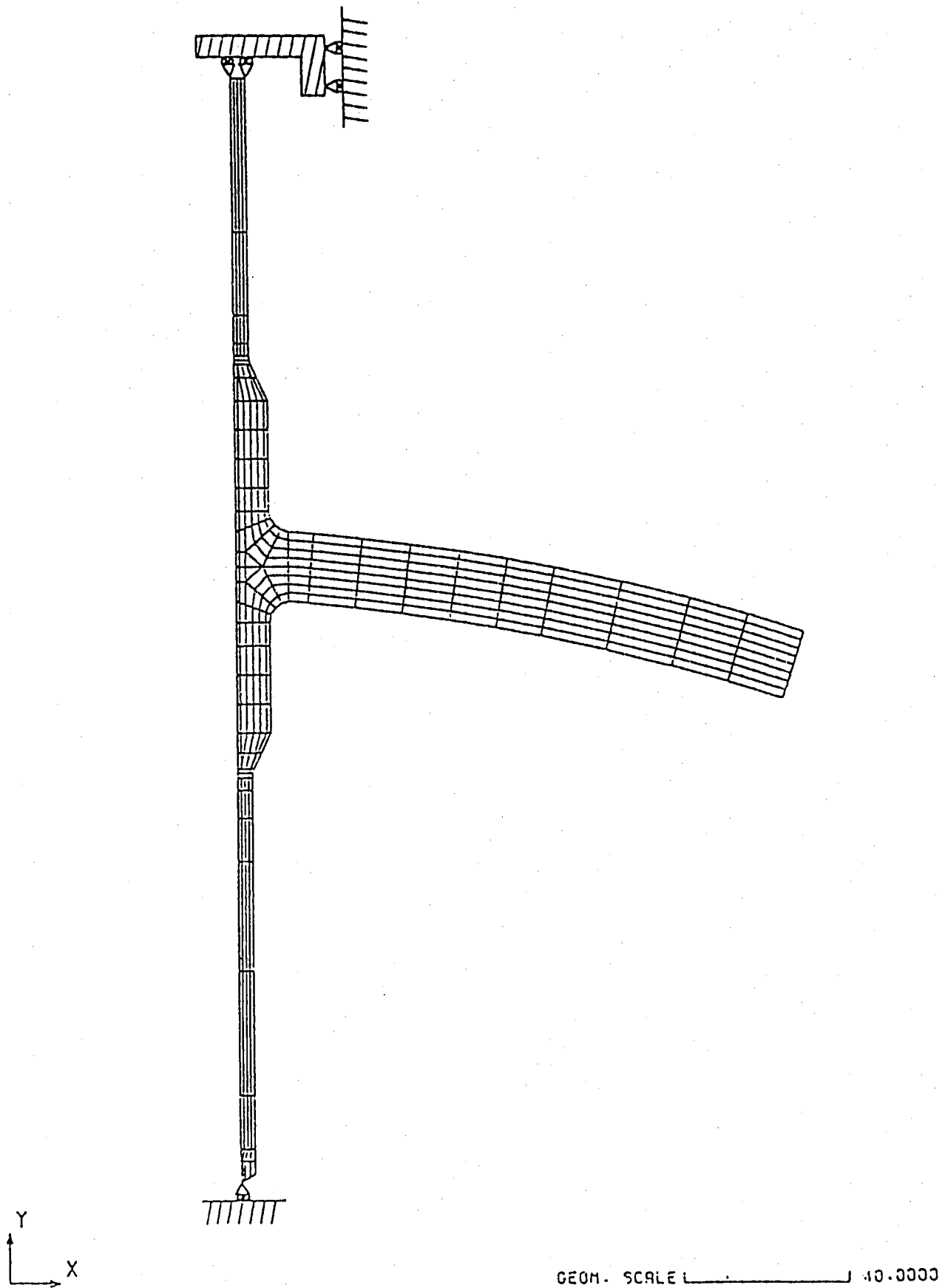


図1.4.2.6 MODEL-3 の熱応力解析に於ける機械的境界条件

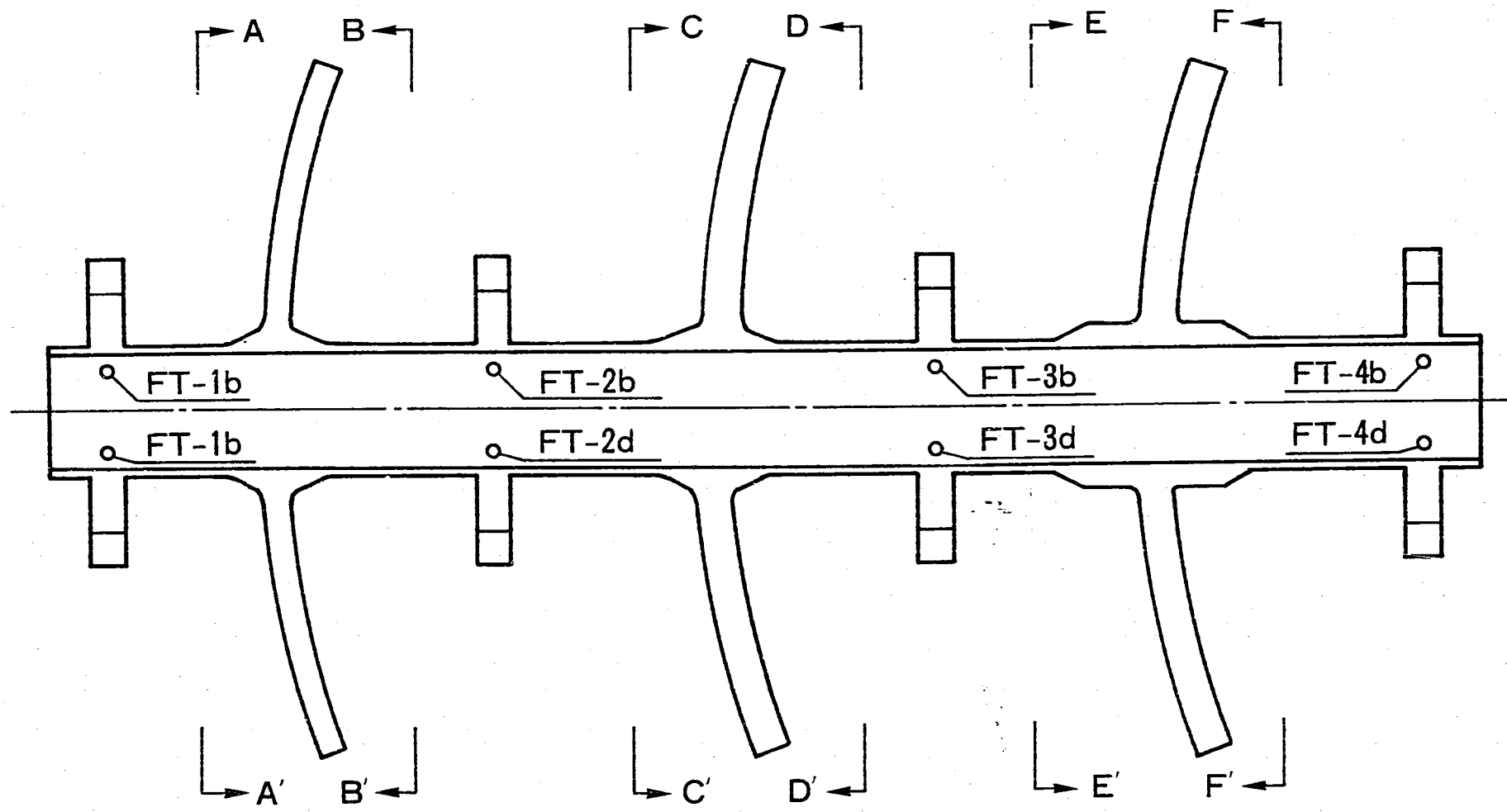


図 1.4.3.1 熱電対取付位置 (液体ナトリウム温度測定用)

### STST Nozzle Model Temperature Time History (5 Cycle)

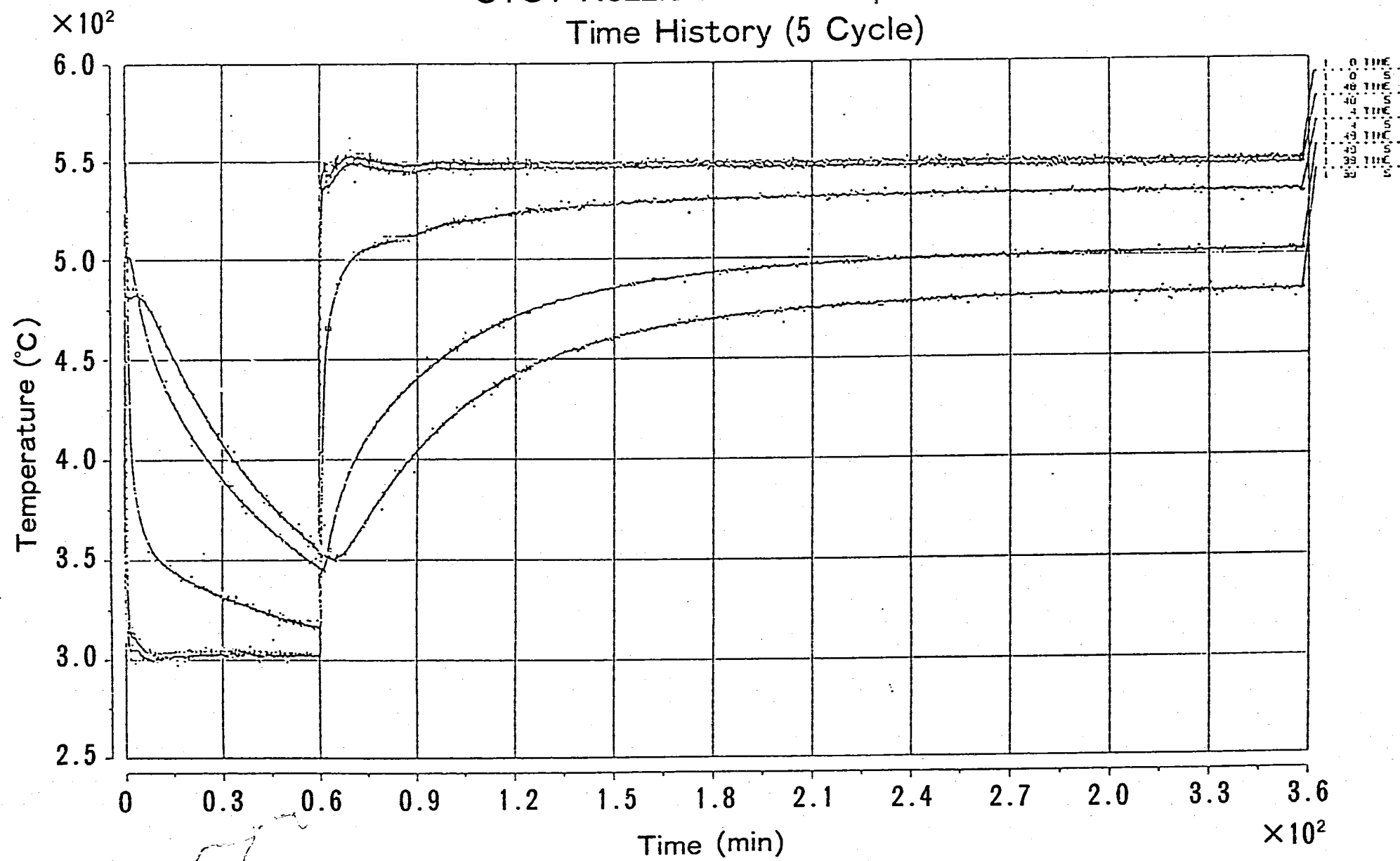
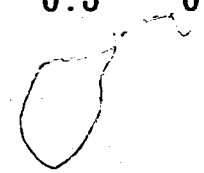


図 1.4.3.2 (I) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-1 b)



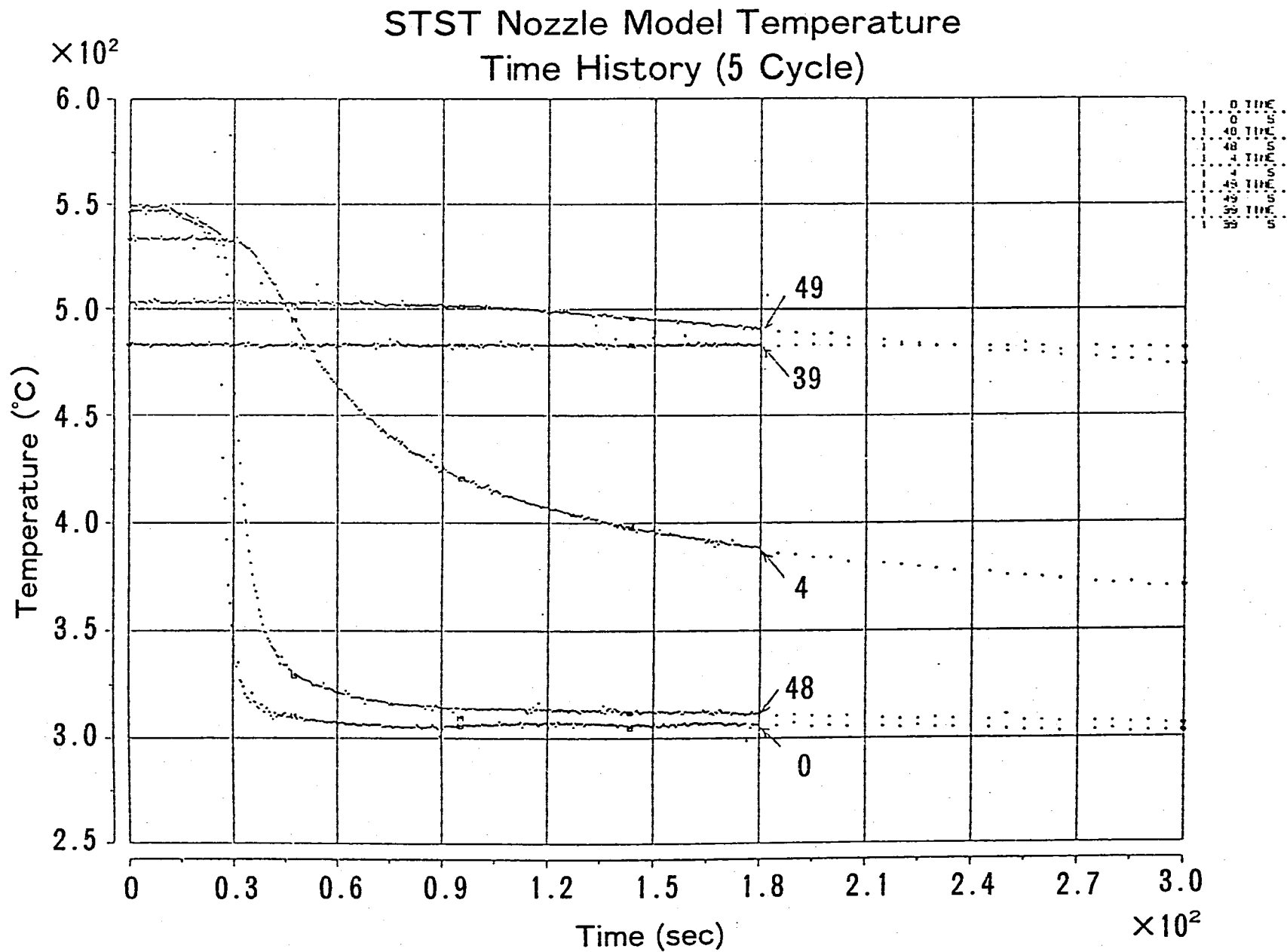


図 1.4.3.2 (II) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-1b)

### STST Nozzle Model Temperature Time History (5 Cycle)

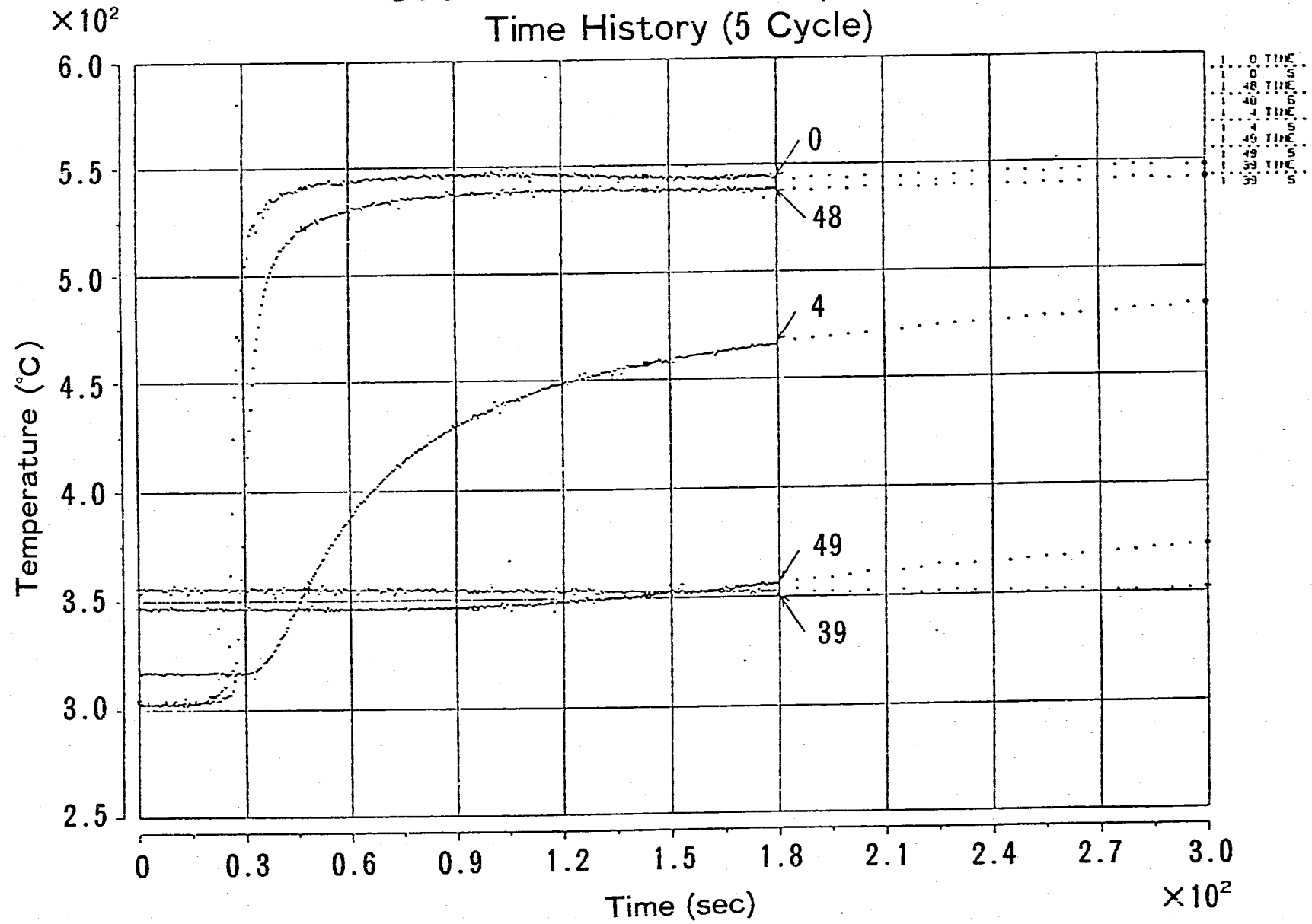


図 1.4.3.2 (Ⅲ) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-1b)

### STST Nozzle Model Temperature Time History (5 Cycle)

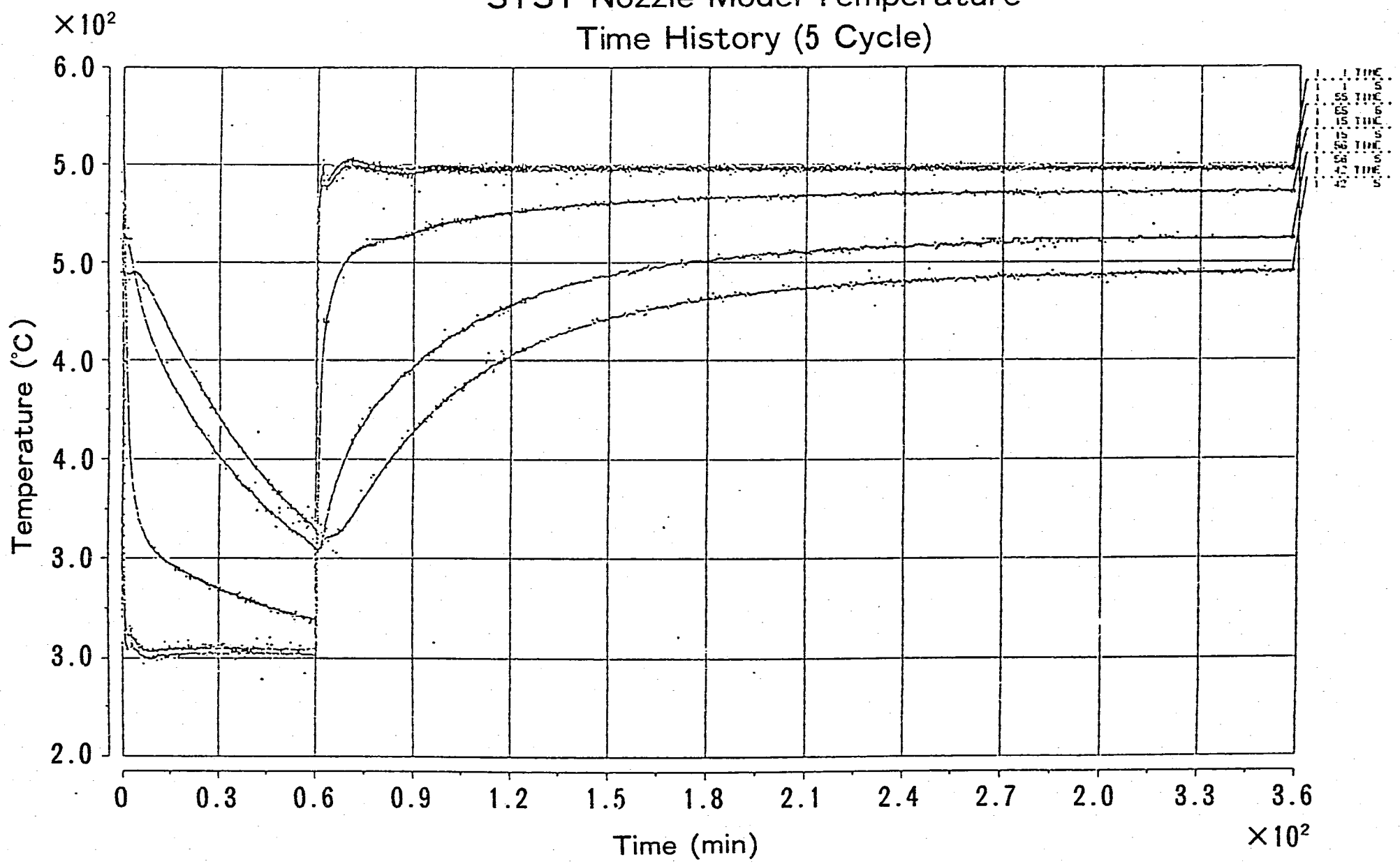


図 1.4.3.3 (I) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-2 b)

### STST Nozzle Model Temperature Time History (5 Cycle)

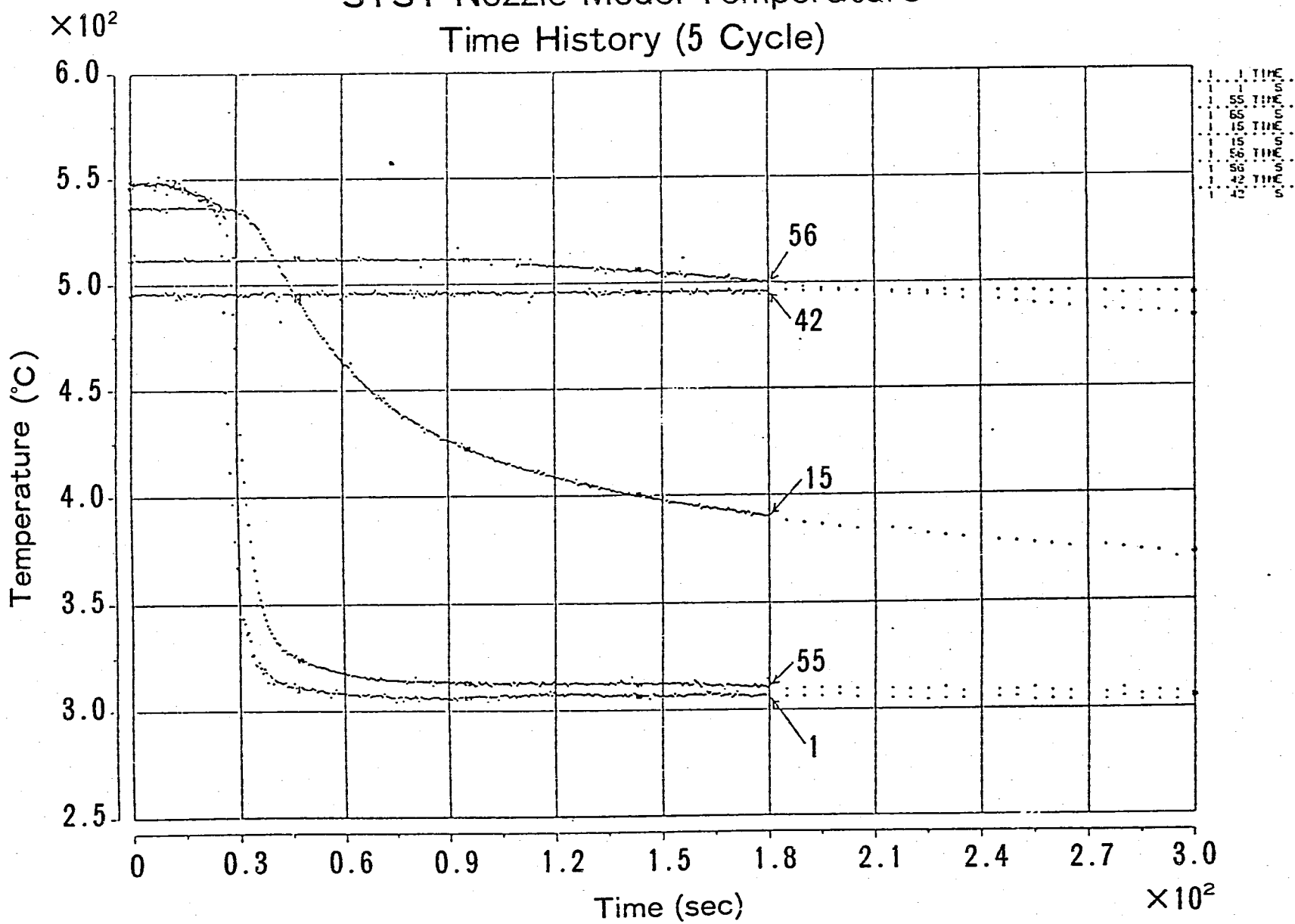


図 1.4.3.3 (II) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-2b)



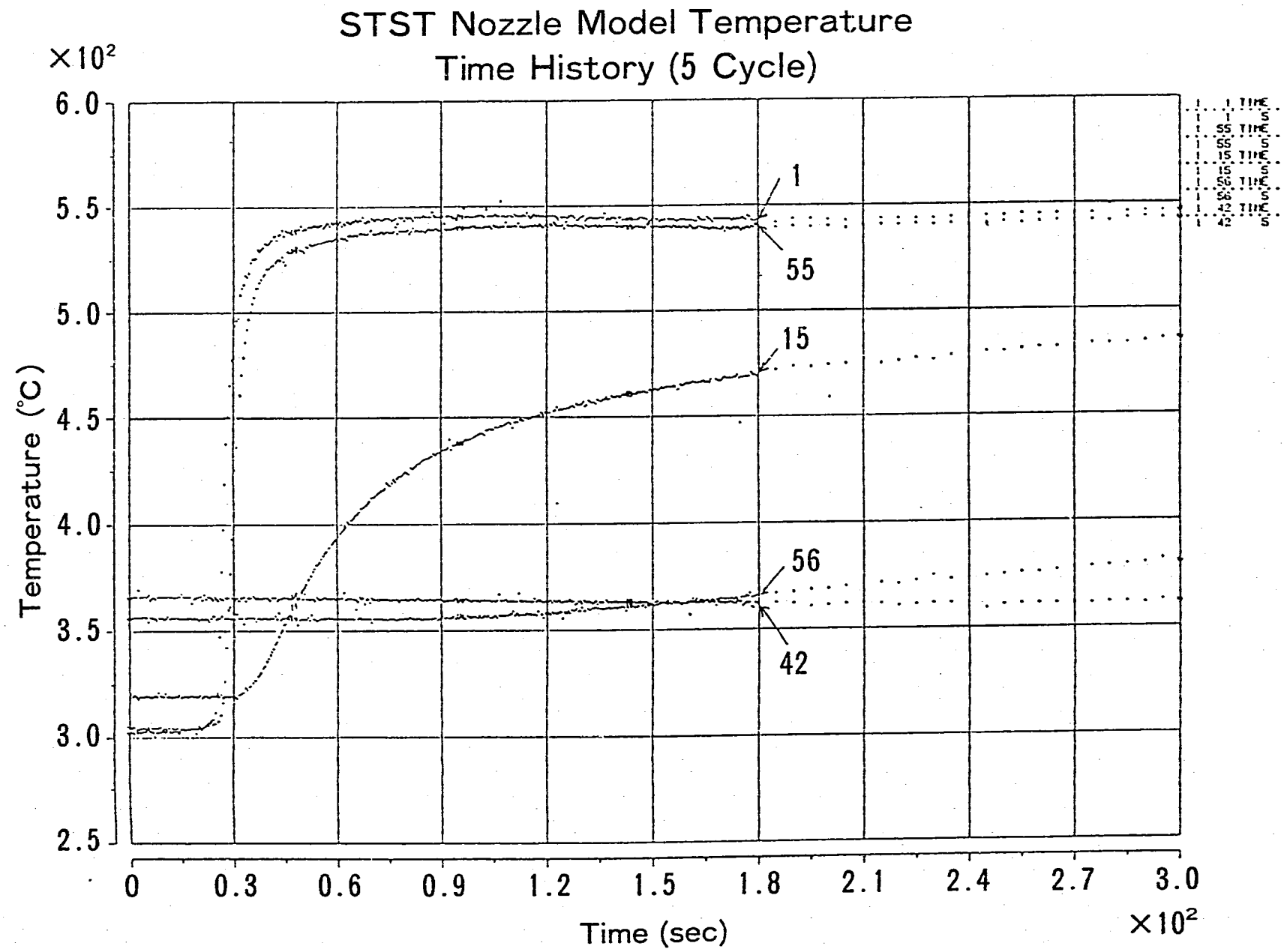


図 1.4.3.3 (Ⅲ) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-2b)

### STST Nozzle Model Temperature Time History (5 Cycle)

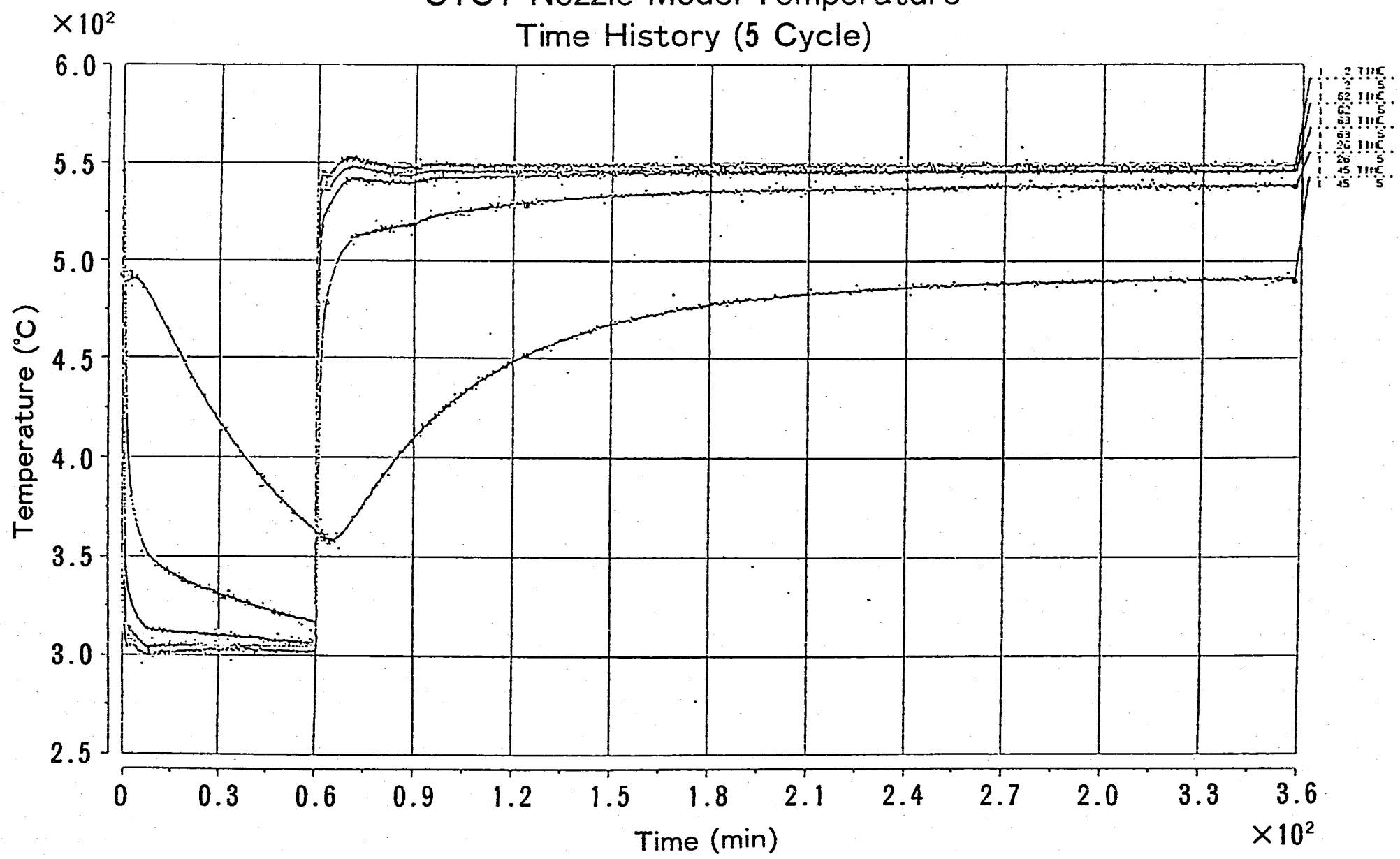


図 1.4.3.4 (I) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-3b)

### STST Nozzle Model Temperature Time History (5 Cycle)

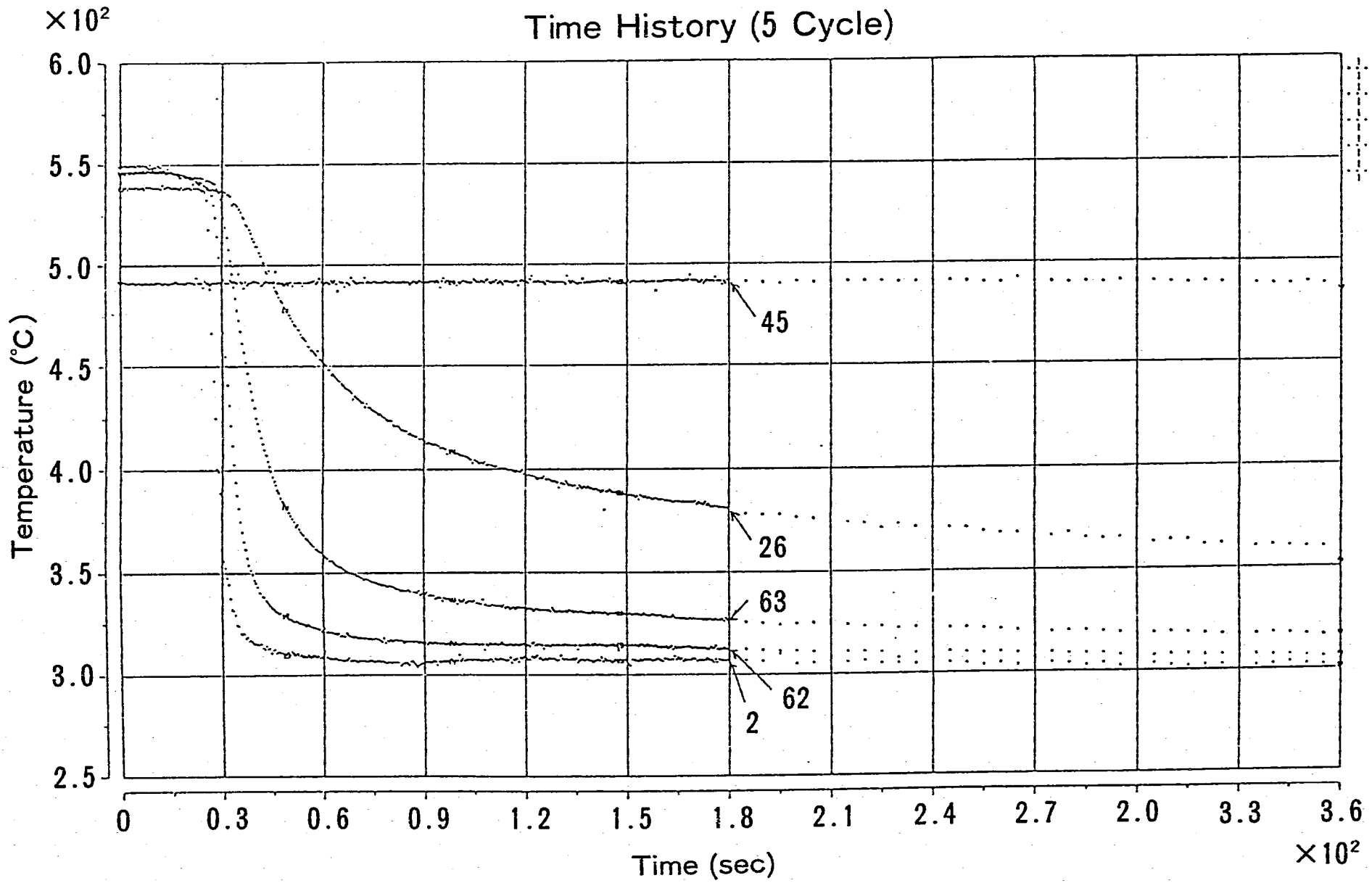


図 1.4.3.4 (II) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-3b)

# STST Nozzle Model Temperature Time History (5 Cycle)

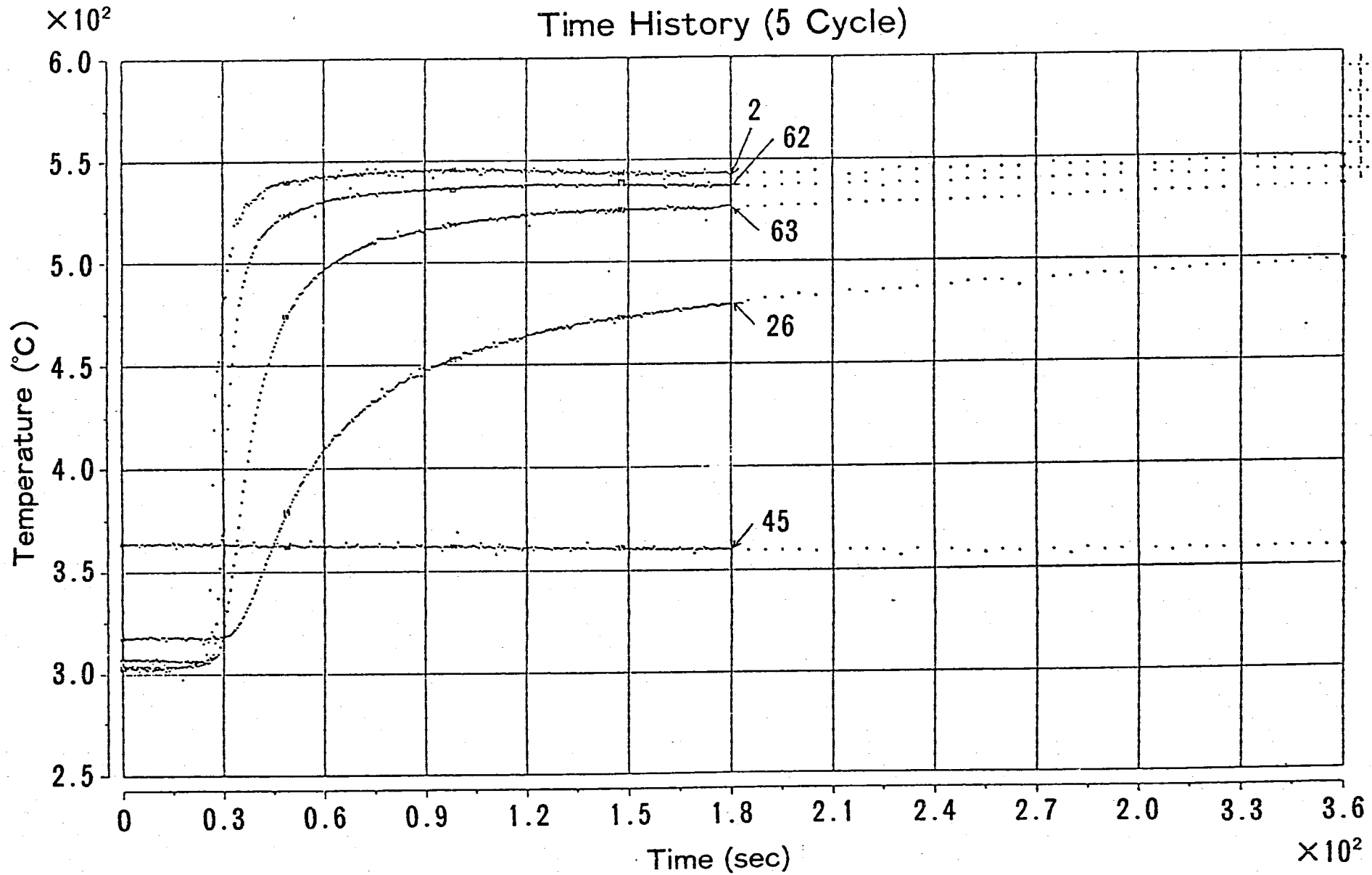


図 1.4.3.4 (Ⅲ) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-3b)

### STST Nozzle Model Temperature Time History (5 Cycle)

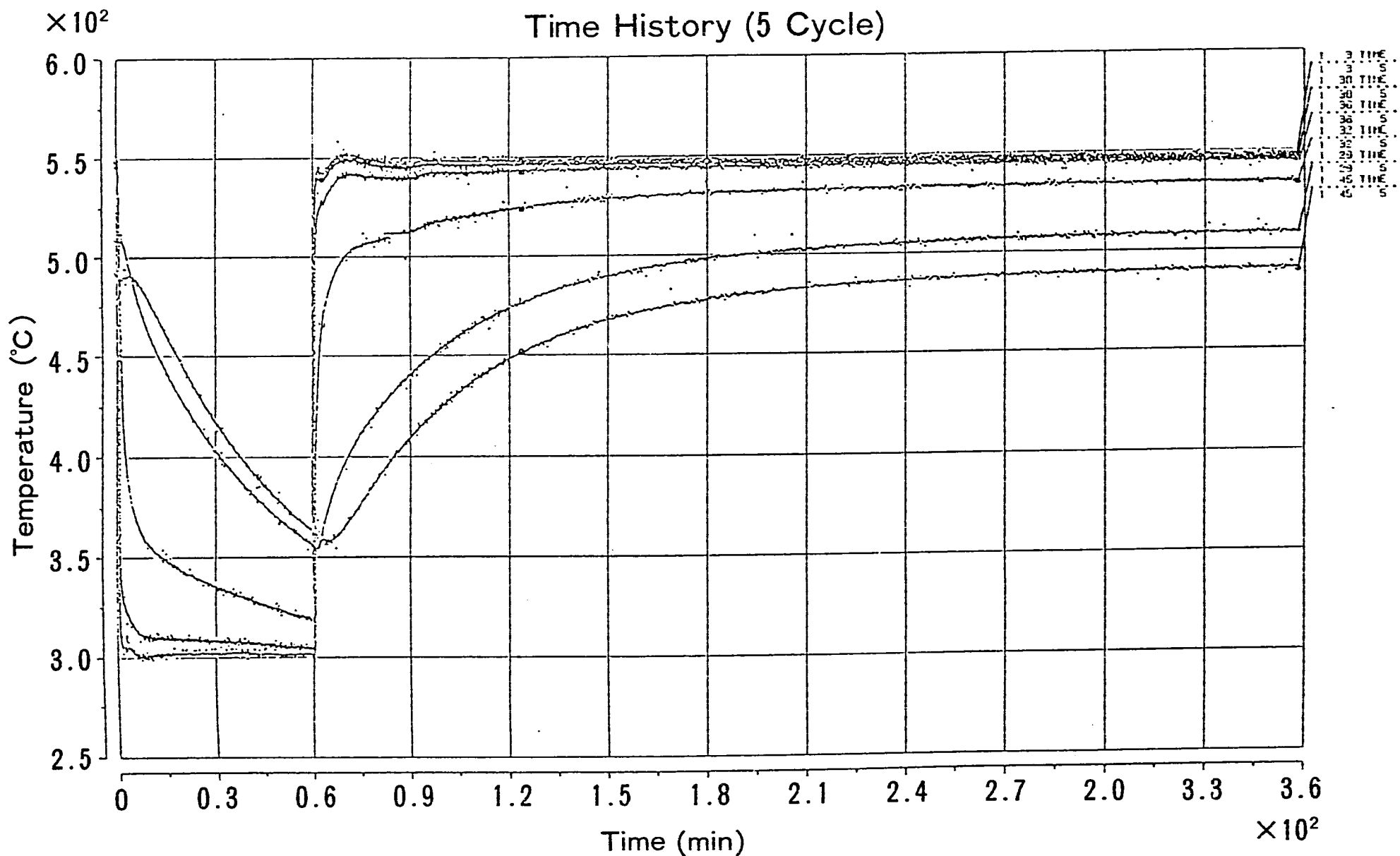


図 1.4.3.5 (I) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-4b)

# STST Nozzle Model Temperature Time History (5 Cycle)

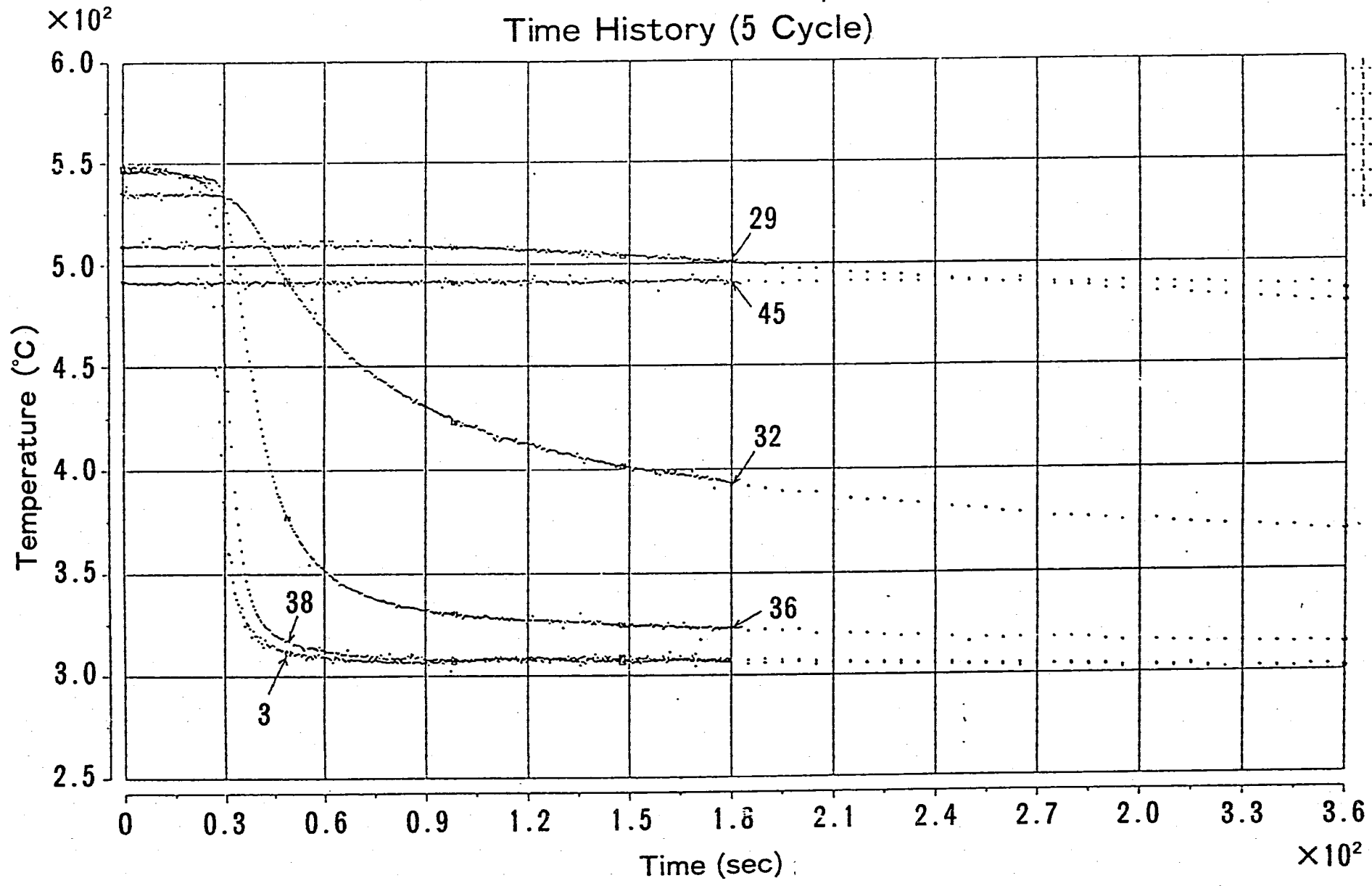


図 1.4.3.5 (II) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-4b)

09

### STST Nozzle Model Temperature Time History (5 Cycle)

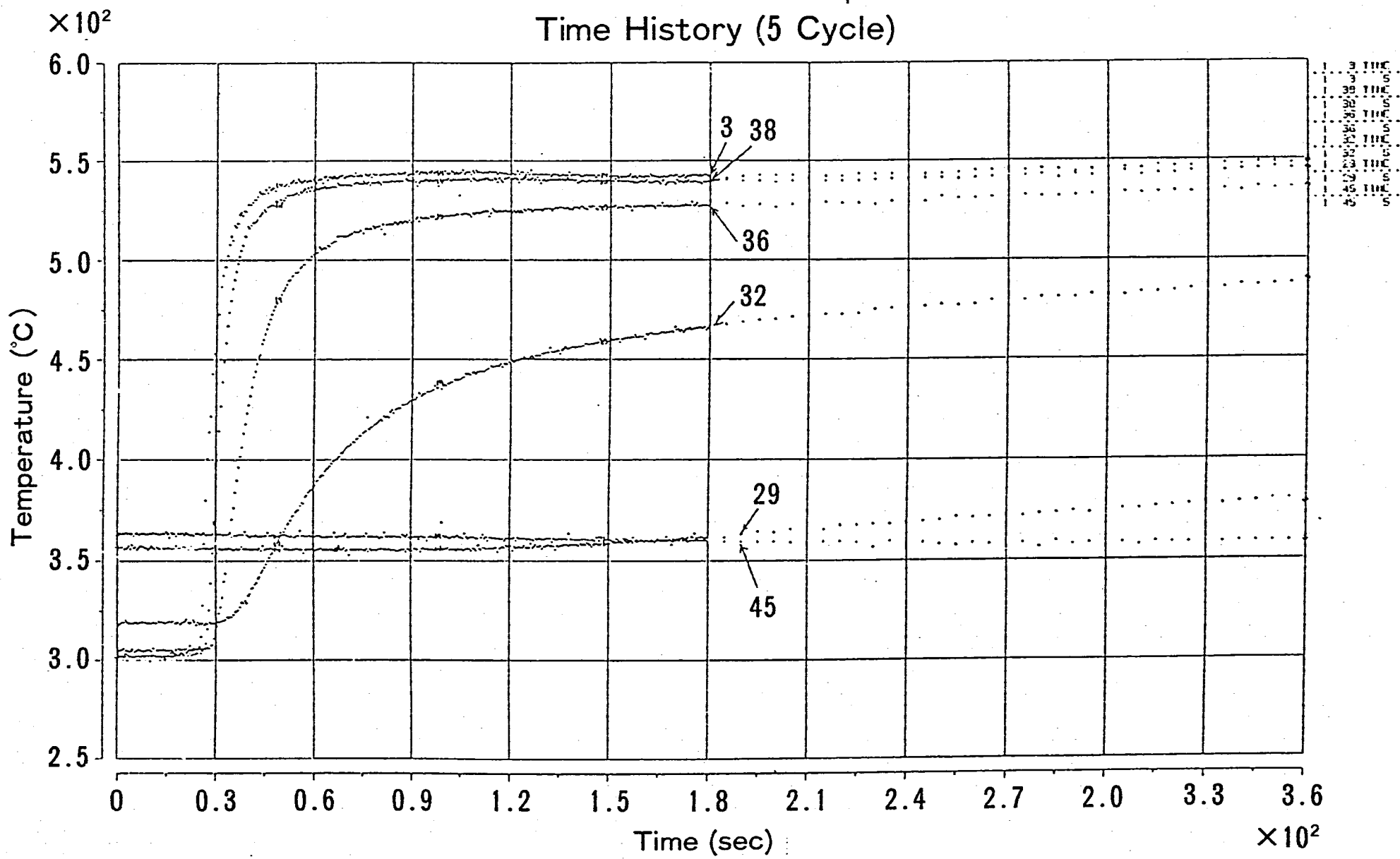
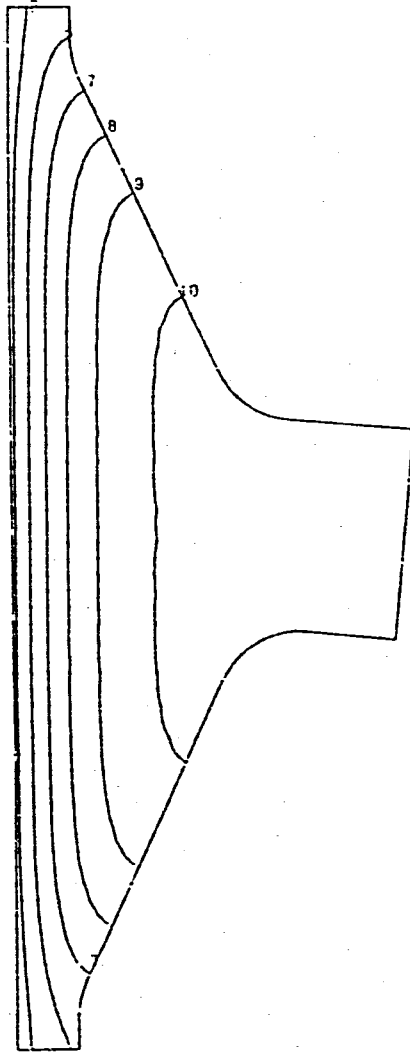


図 1.4.3.5 (Ⅲ) 液体ナトリウム温度時刻歴 (FT-4 b)

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  
 11 549.0000

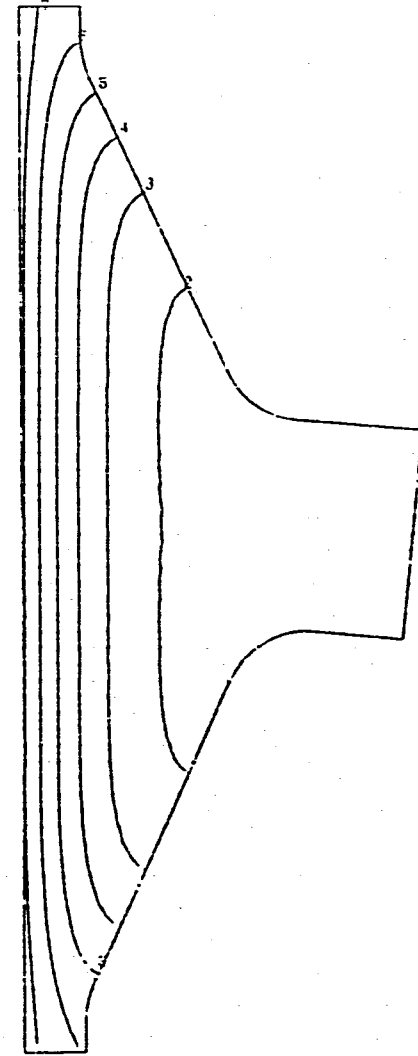


STEP NO. 145

GEOM. SCALE 6.00000

CONTOUR OF TEMPERATURE AT 30.0 SEC. < COLD SHOCK > MODEL-1

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  
 11 549.0000



STEP NO. 265

GEOM. SCALE 6.00000

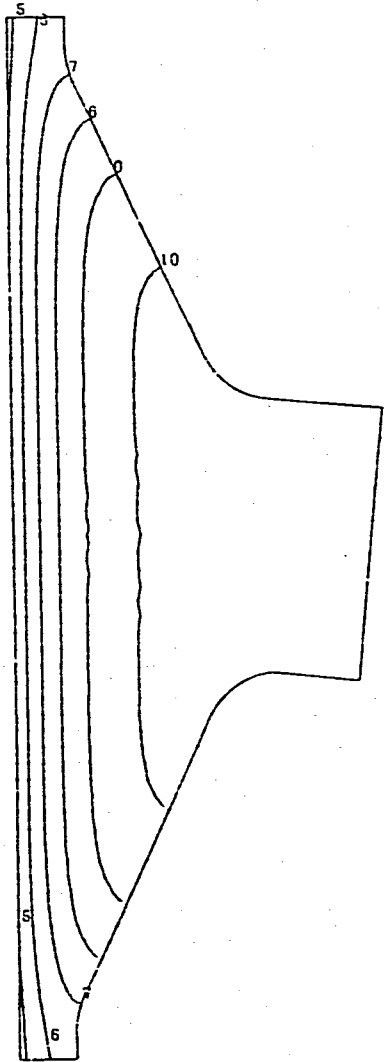
CONTOUR OF TEMPERATURE AT 30.0 SEC. < HOT SHOCK > MODEL-1

図1.5.1 (a) 伝熱解析結果 (モデル1)



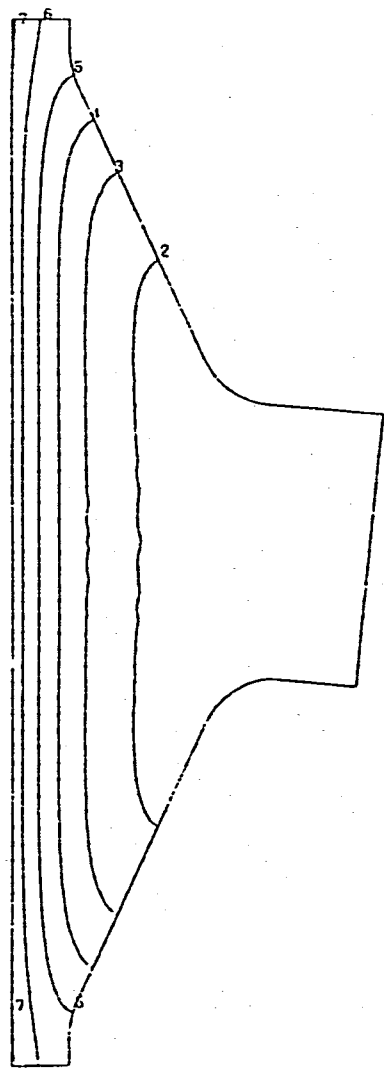
TEMPERATURE

- 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
  - 11 549.0000



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
  - 11 549.0000



STEP NO. 151

GEOM. SCALE 10.0000



STEP NO. 271

GEOM. SCALE 10.0000

CONTOUR OF TEMPERATURE AT 30.0 SEC. < COLD SHOCK > MODEL-2

CONTOUR OF TEMPERATURE AT 30.0 SEC. < HOT SHOCK > MODEL-2

図1.5.1 (b) 伝熱解析結果 (モデル2)

TEMPERATURE

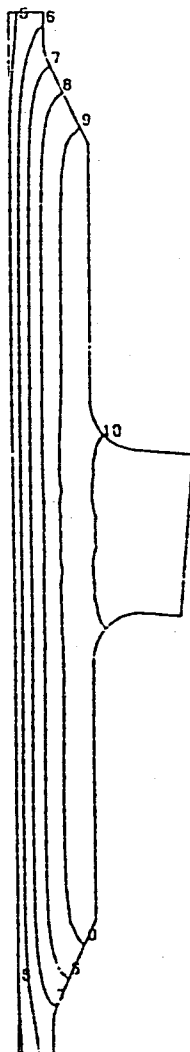
TEMPERATURE

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
- 11 549.0000

CONTOUR VALUES

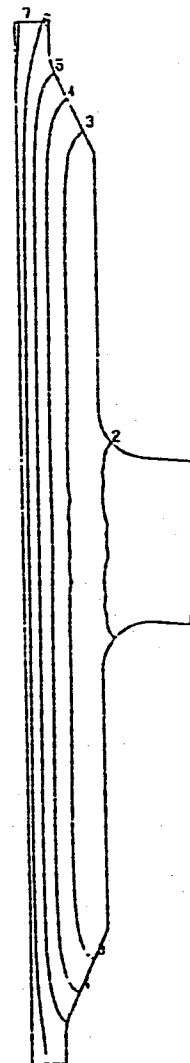
- 1 300.0000
- 2 325.0000
- 3 350.0000
- 4 375.0000
- 5 400.0000
- 6 425.0000
- 7 450.0000
- 8 475.0000
- 9 500.0000
- 10 525.0000
- 11 549.0000



STEP NO. 151

GEOM. SCALE 15.0000

CONTOUR OF TEMPERATURE AT 30.0 SEC. < COLD SHOCK > MODEL-3



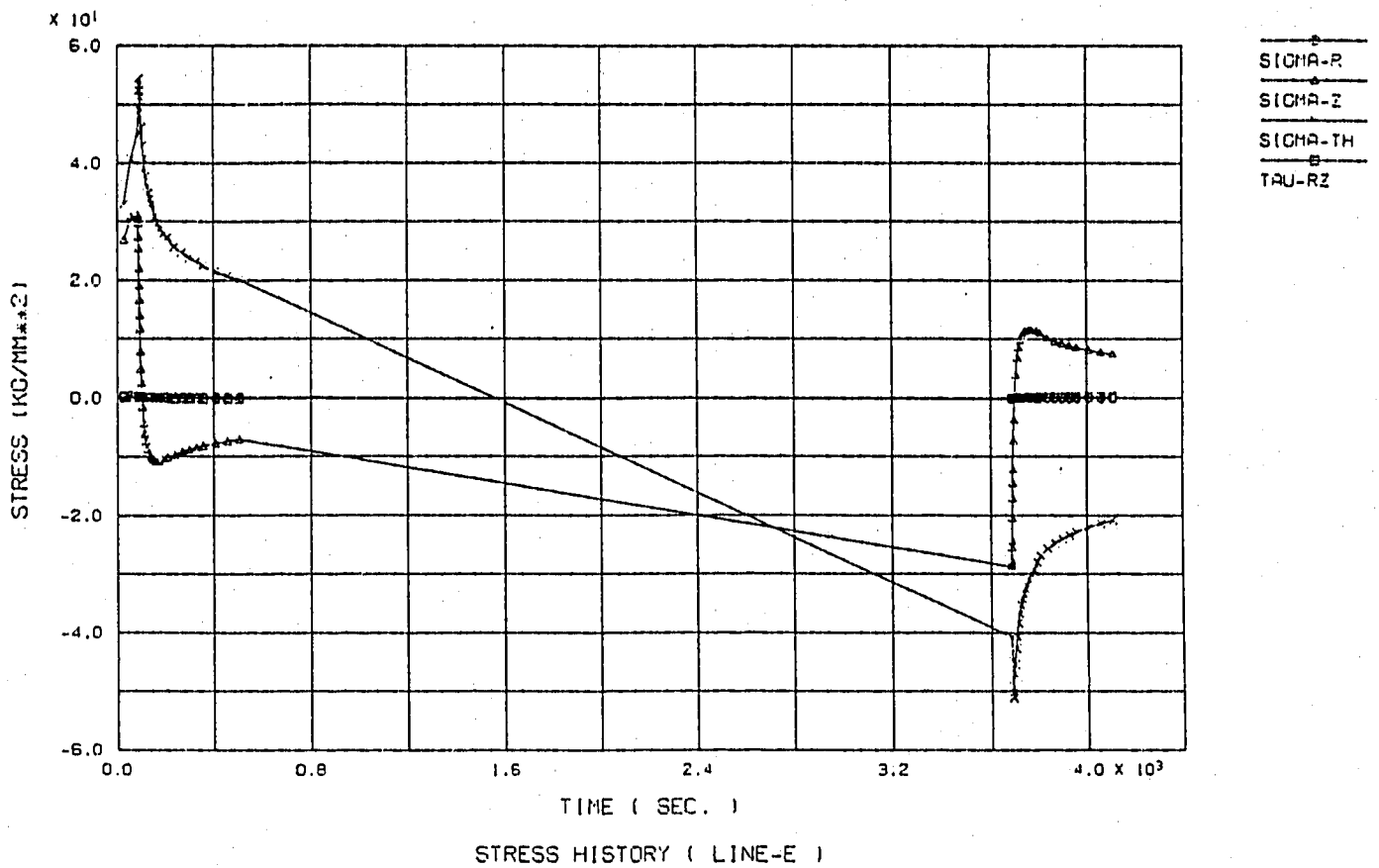
STEP NO. 271

GEOM. SCALE 15.0000

CONTOUR OF TEMPERATURE AT 30.0 SEC. < HOT SHOCK > MODEL-3

図1.5.1 (c) 伝熱解析結果 (モデル3)

FINAS



FINAS

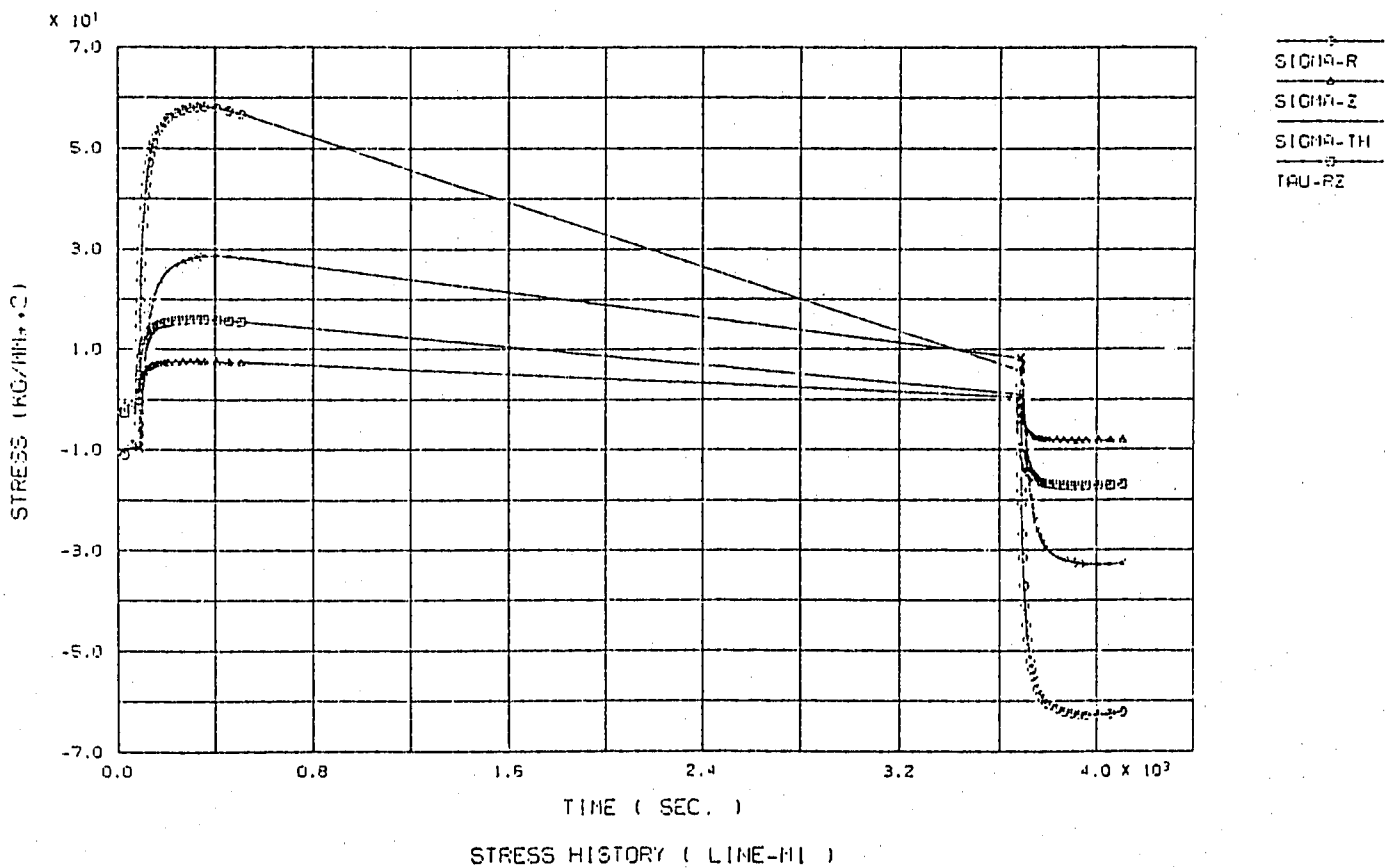
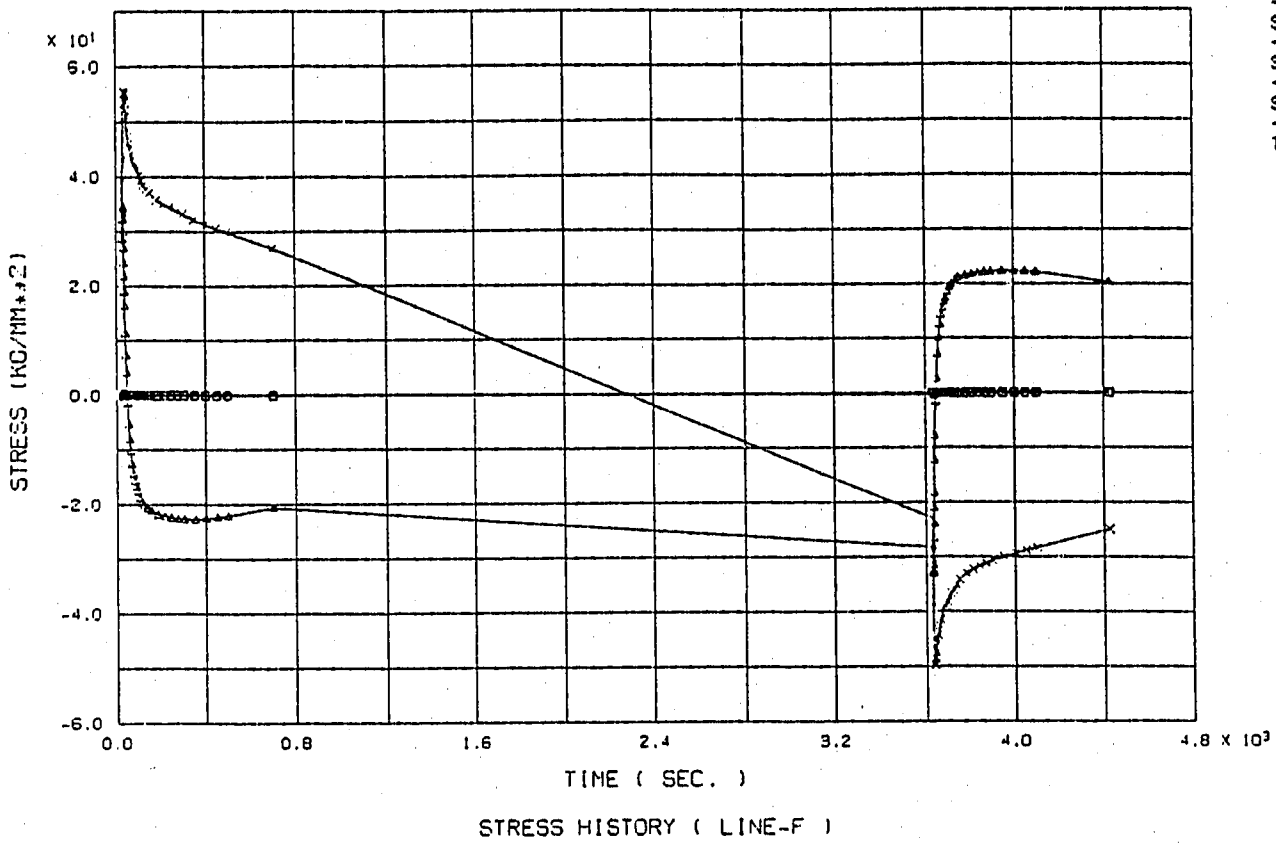


図1.5.2 (a) 熱弾性応力解析結果 (モデル1)

FINAS



FINAS

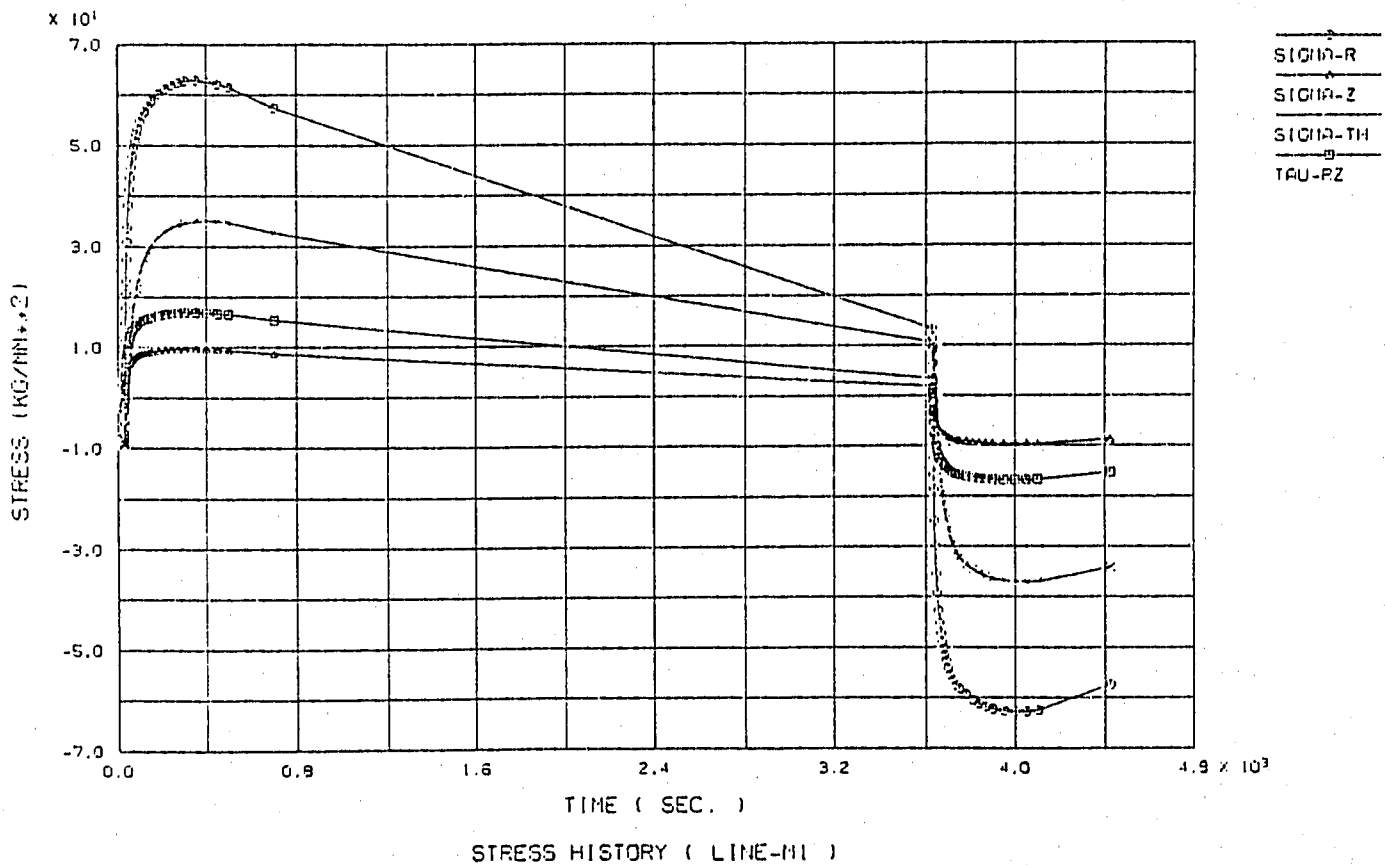
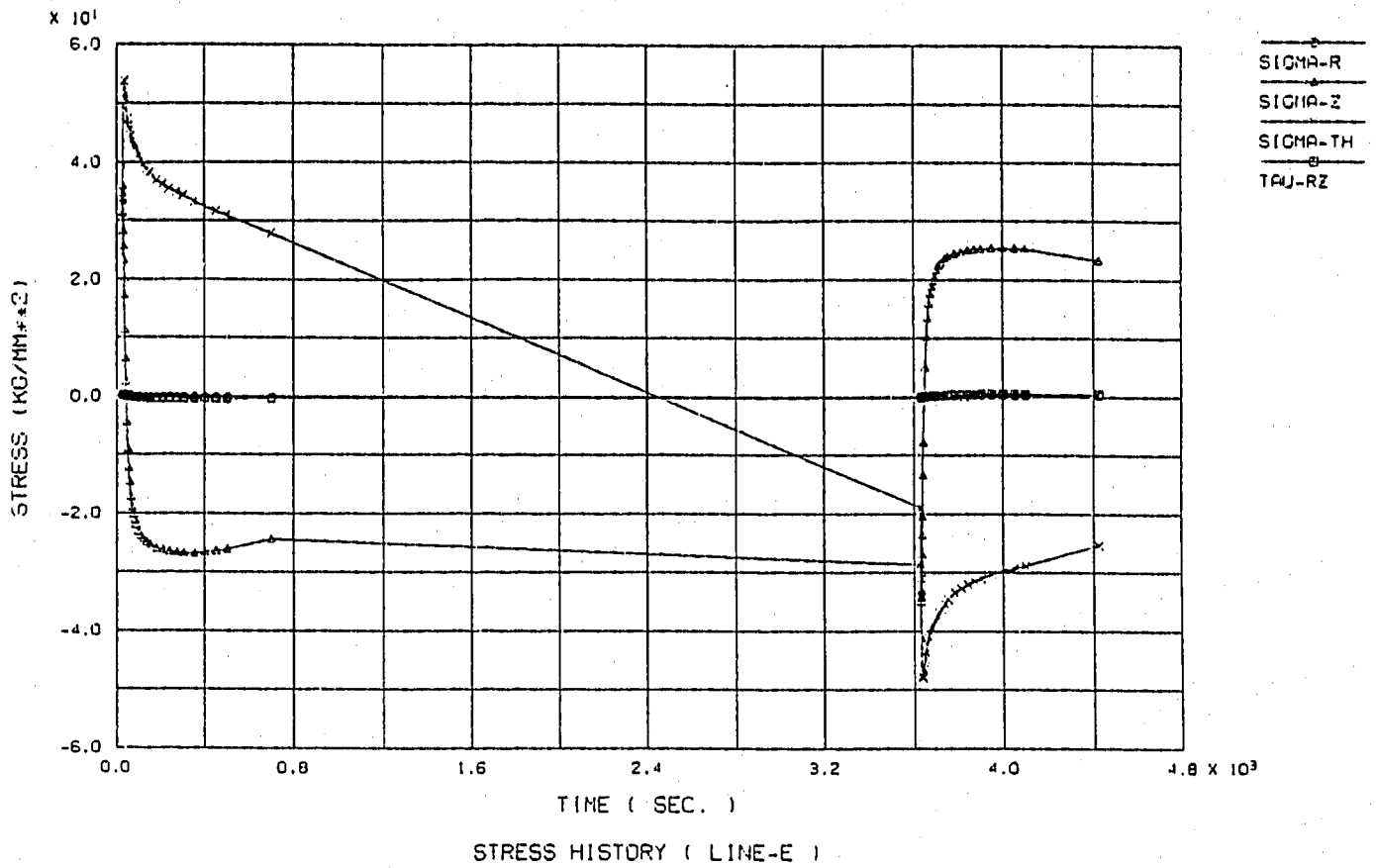


図1.5.2 (b) 熱弾性応力解析結果 (モデル2)

FINAS



FINAS

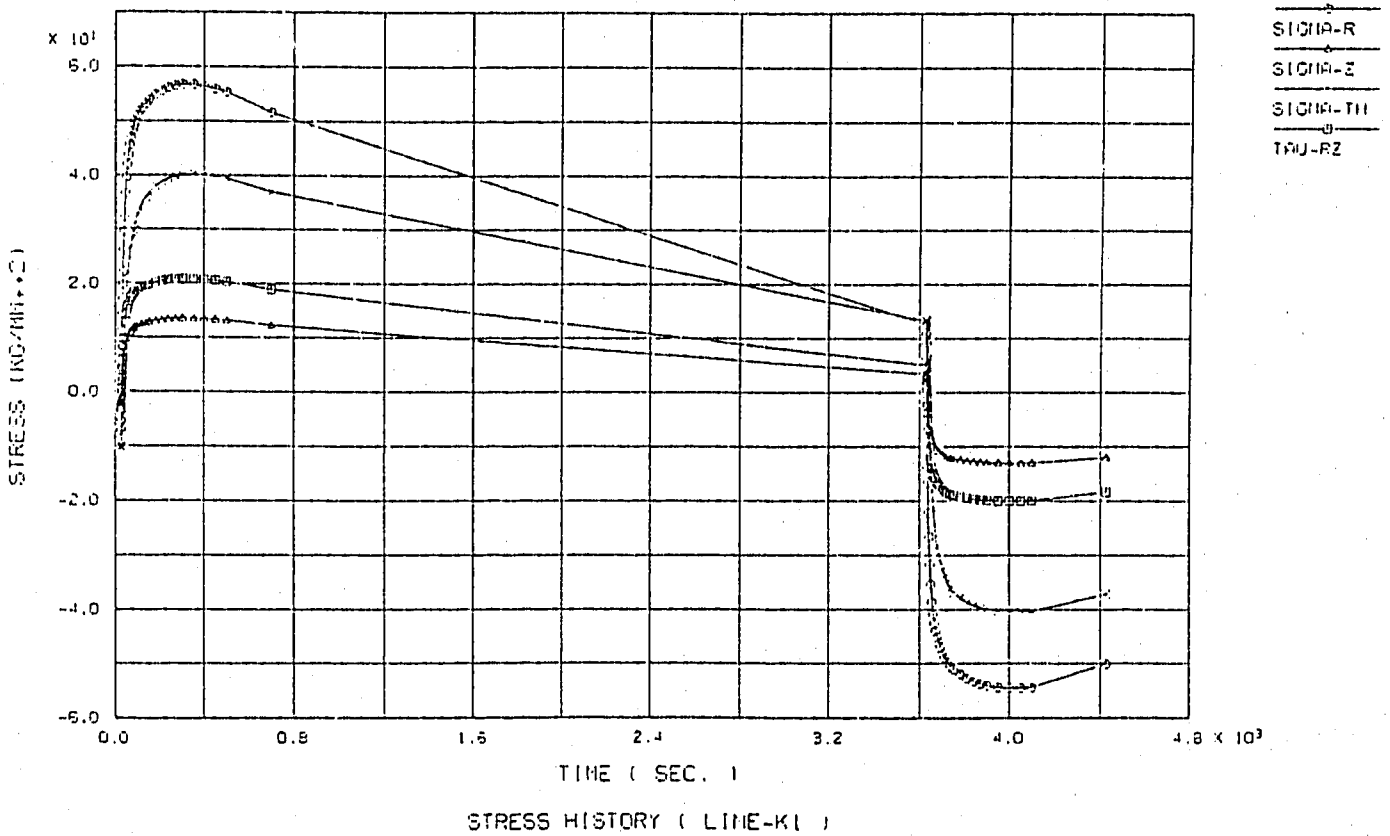
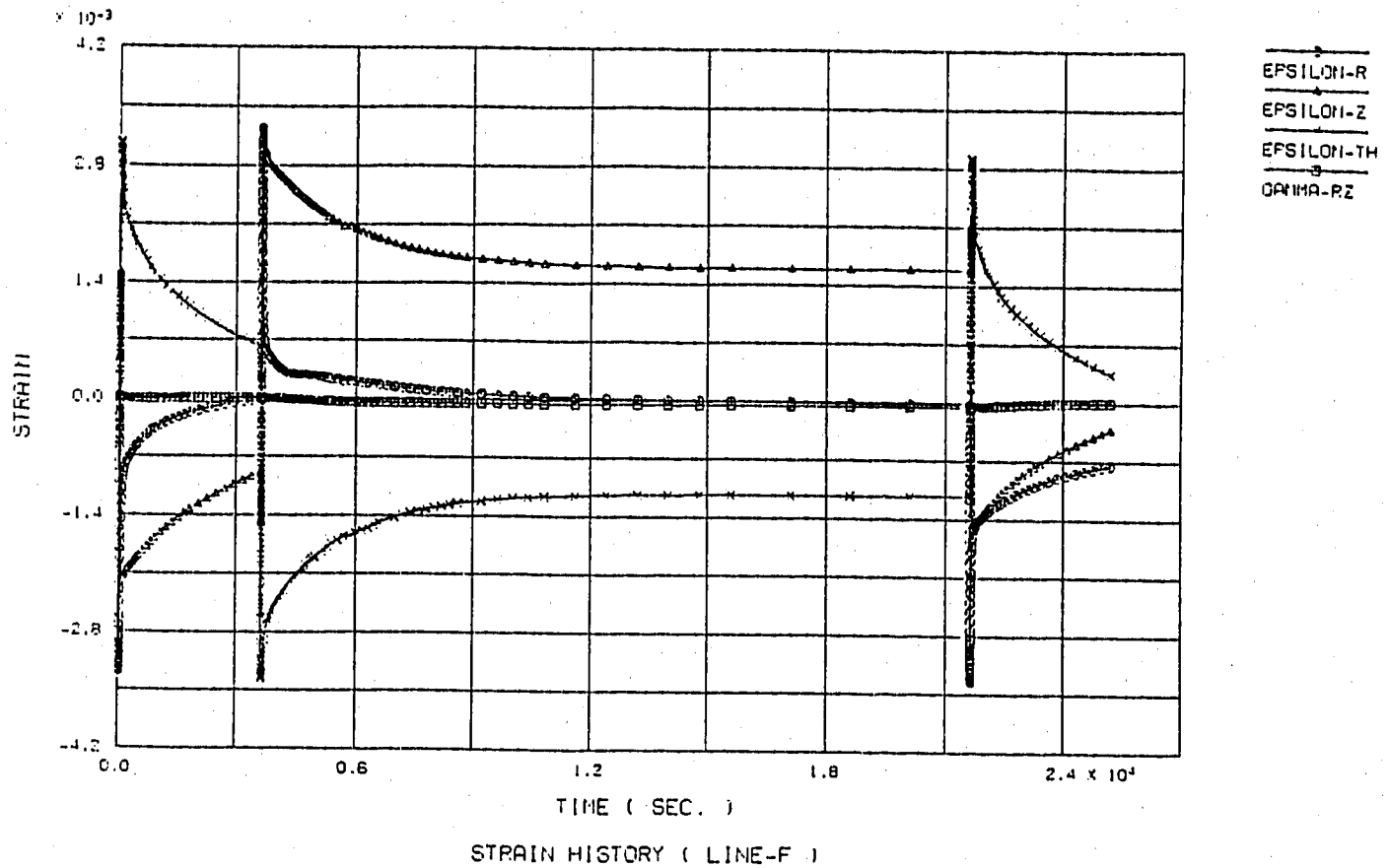


図1.5.2 (c) 熱弾性応力解析結果 (モデル3)

F111AS



F111AS

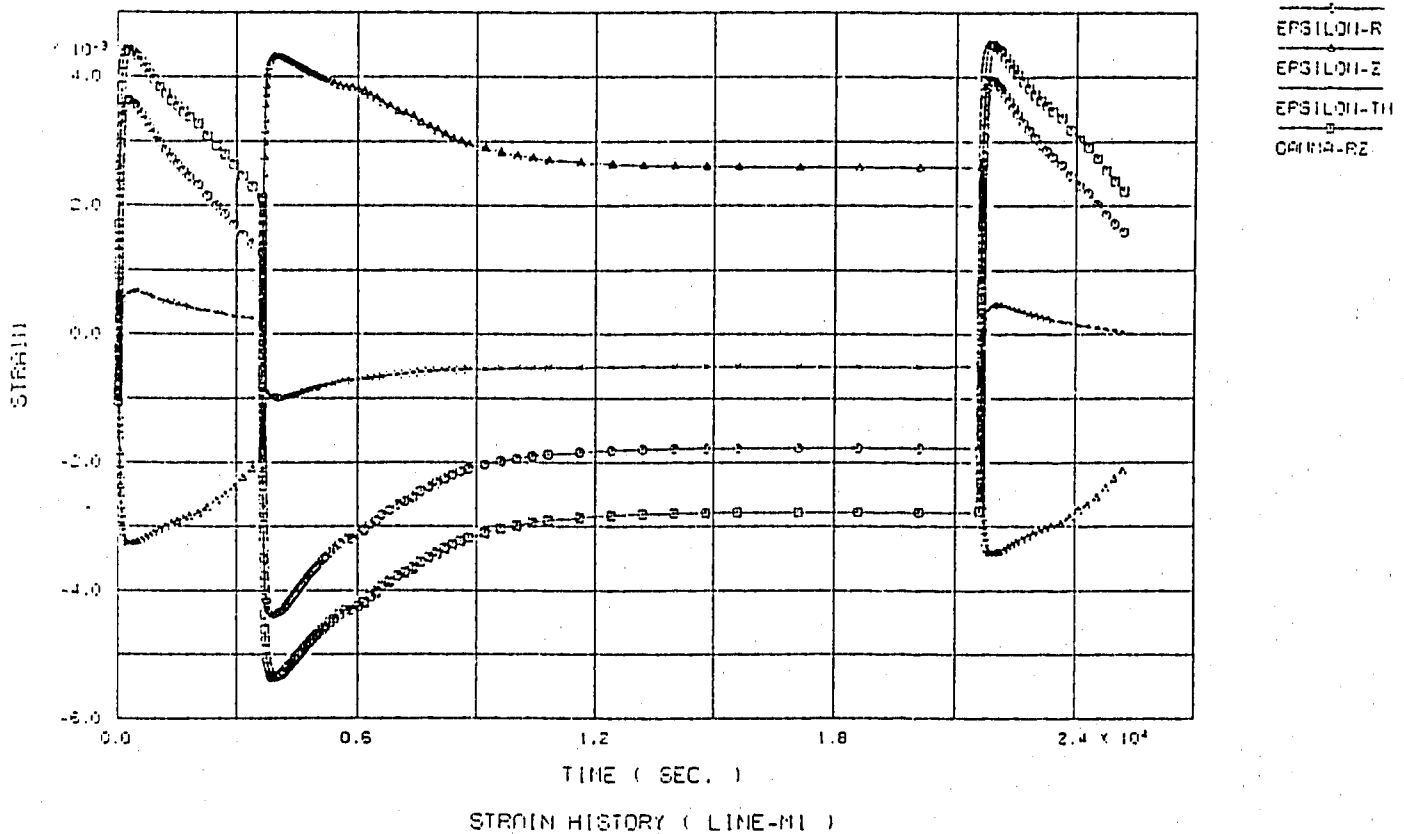
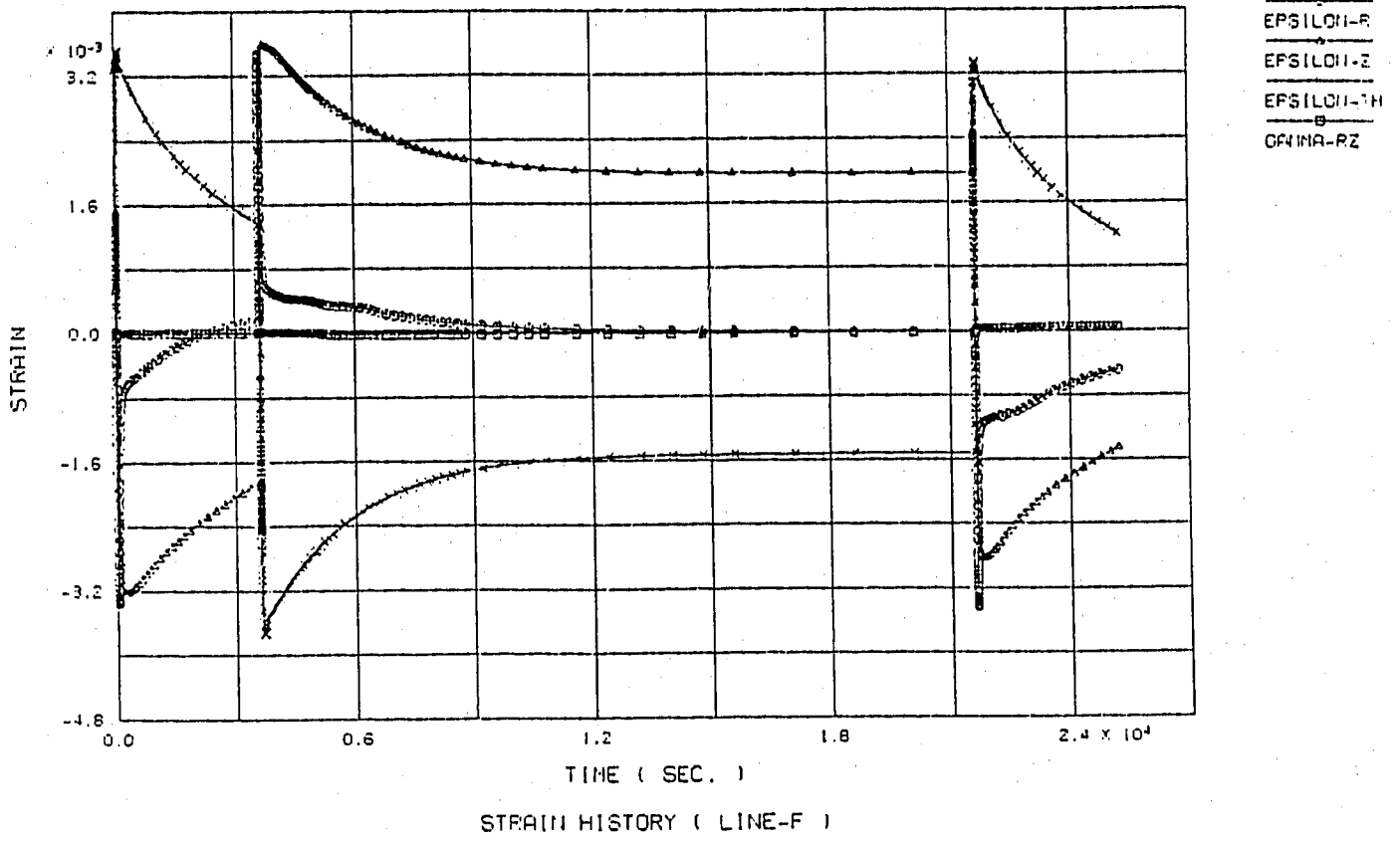


図1.5.3 (a) 熱非弾性応力解析結果 (モデル1)

F11A5



F11A5

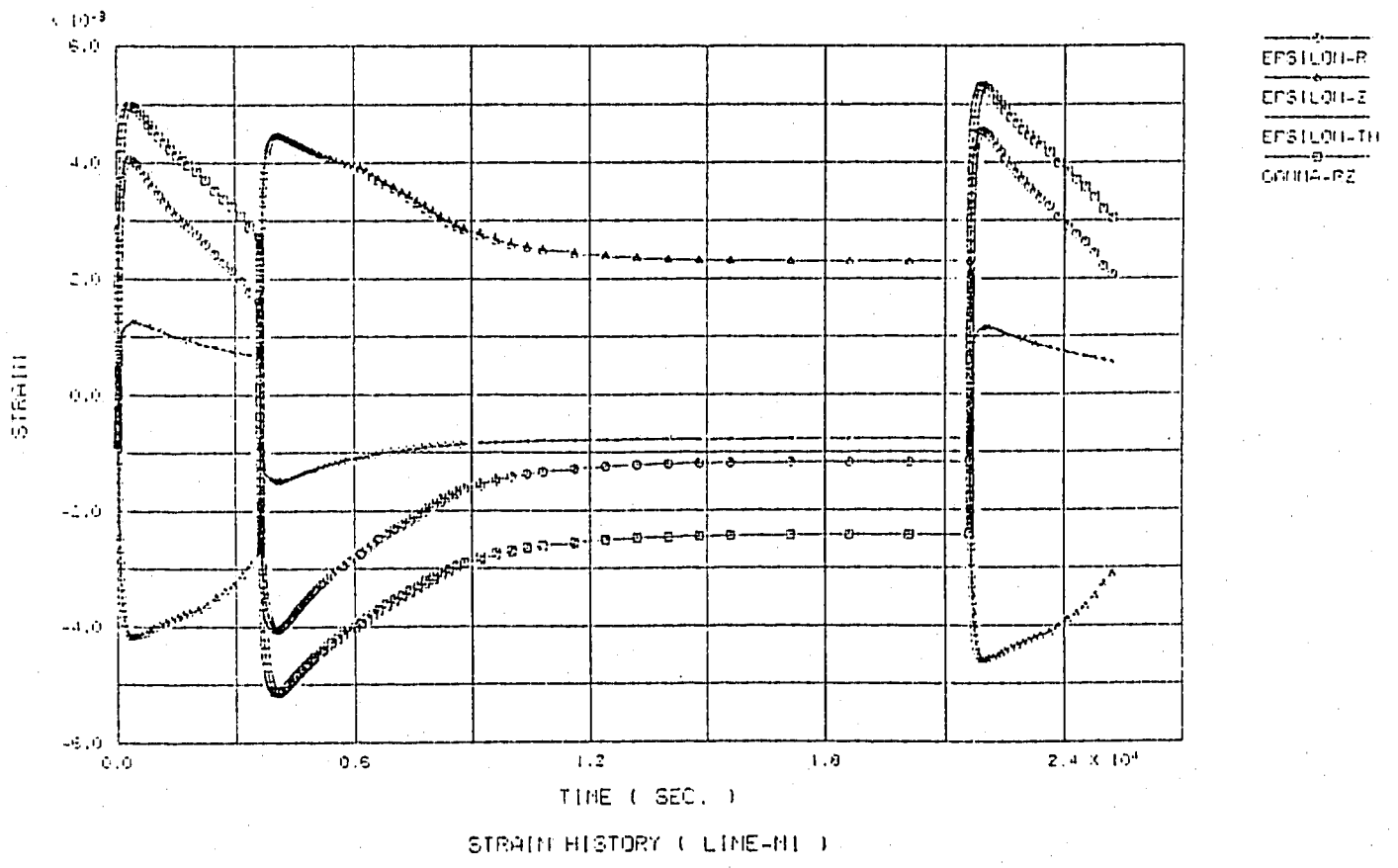
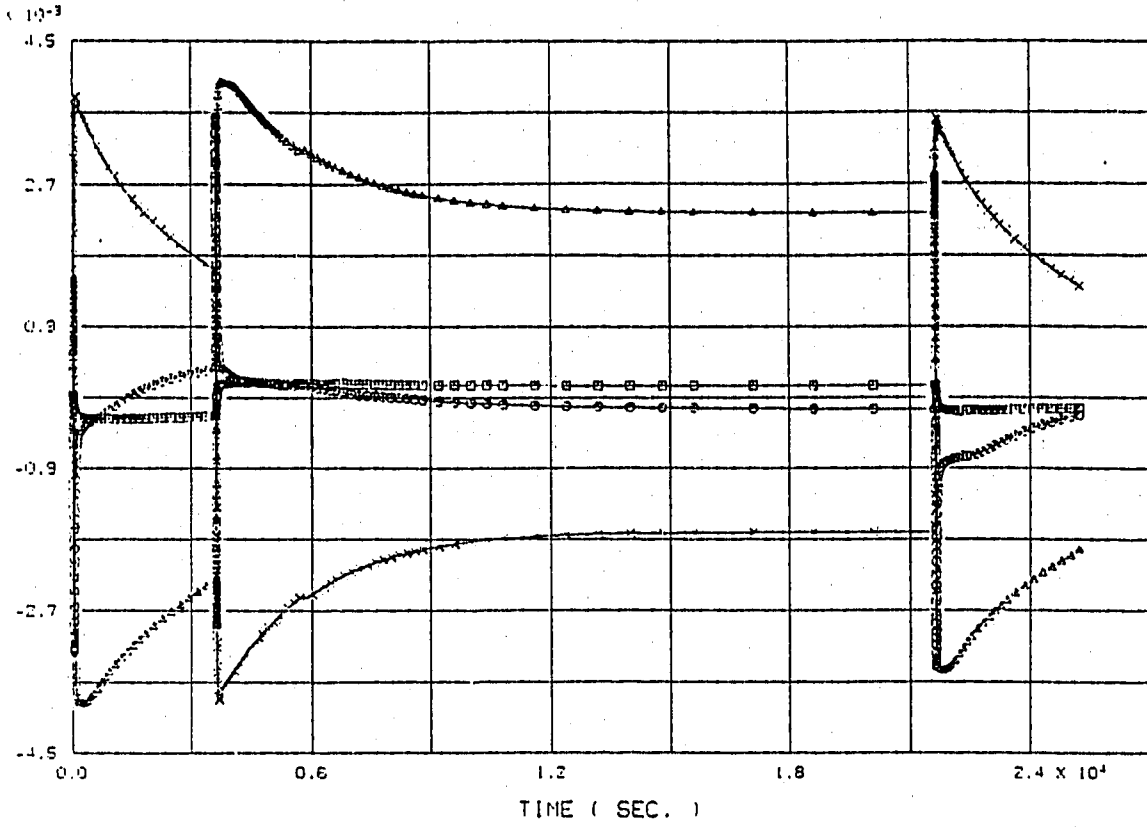


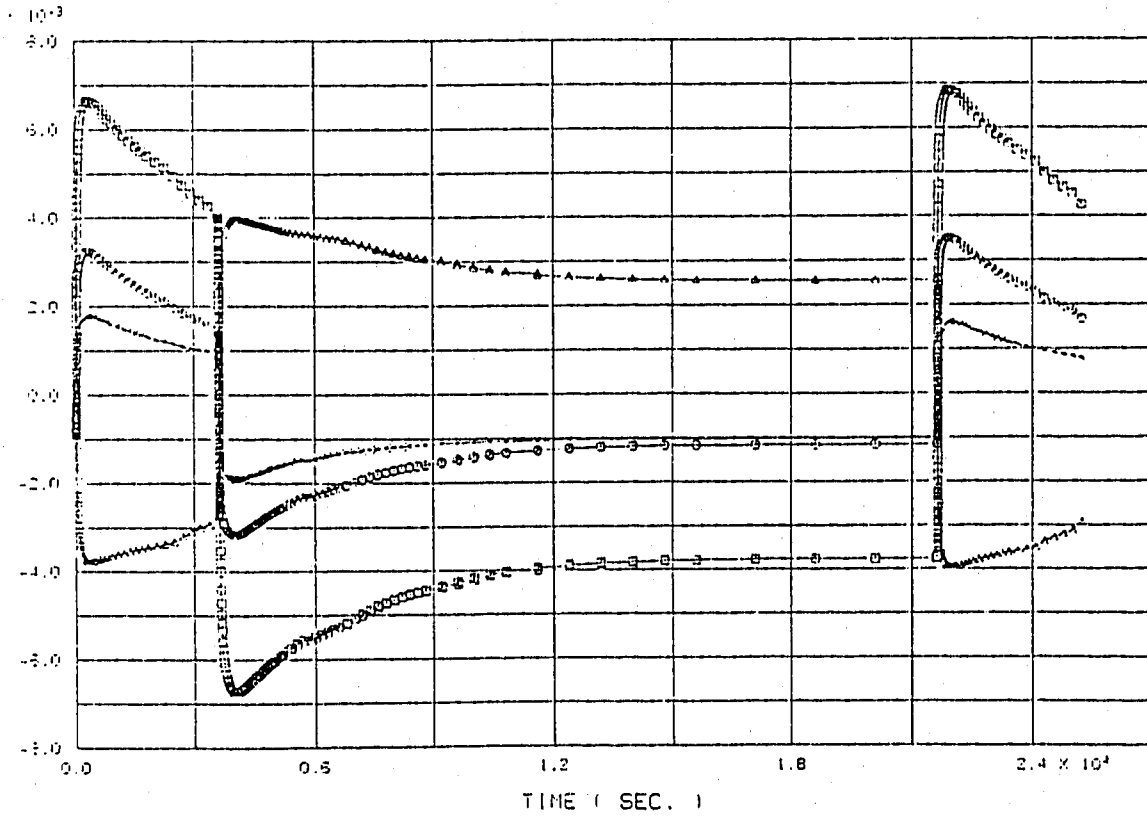
図1.5.3 (b) 熱非弾性応力解析結果 (モデル2)

FILMS



STRAIN HISTORY ( LINE-E )

FILMS



STRAIN HISTORY ( LINE-KI )

図1.5.3 (c) 熱非弾性応力解析結果 (モデル3)



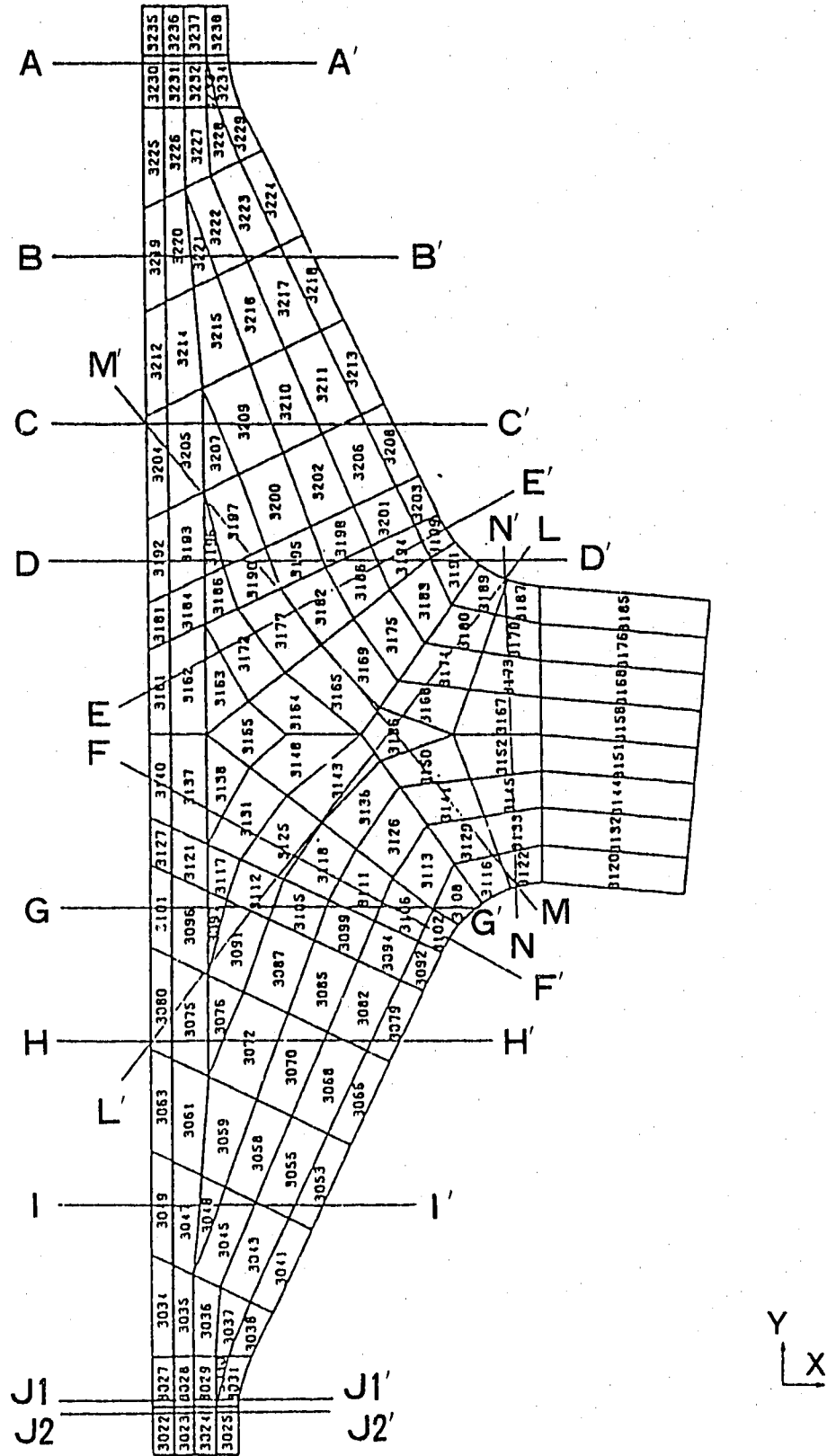


図 1.6.2.1 「EBDS」による評価ライン (MODEL-1)

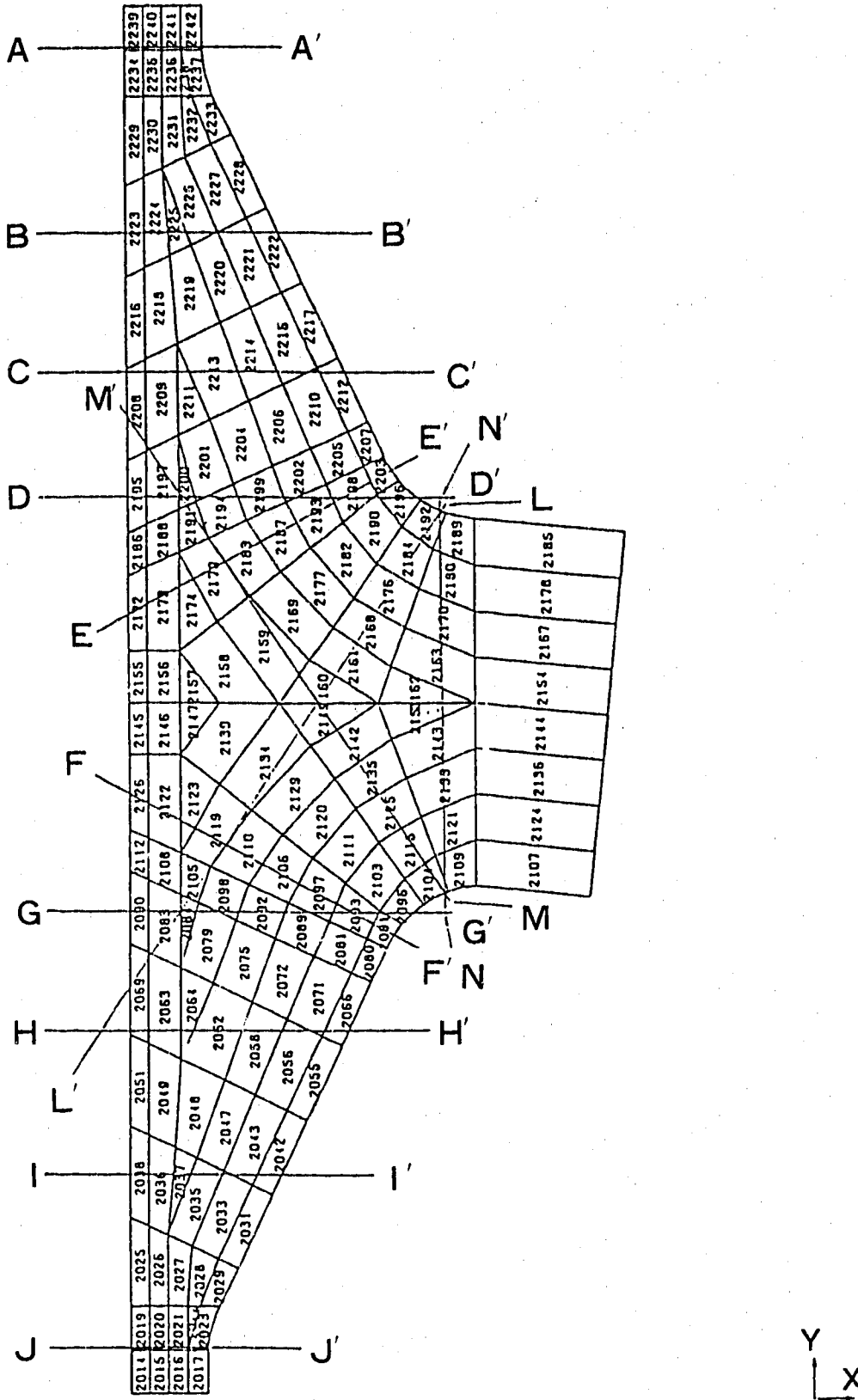


図 1.6.2.2 「EBDS」による評価ライン (MODEL-2)

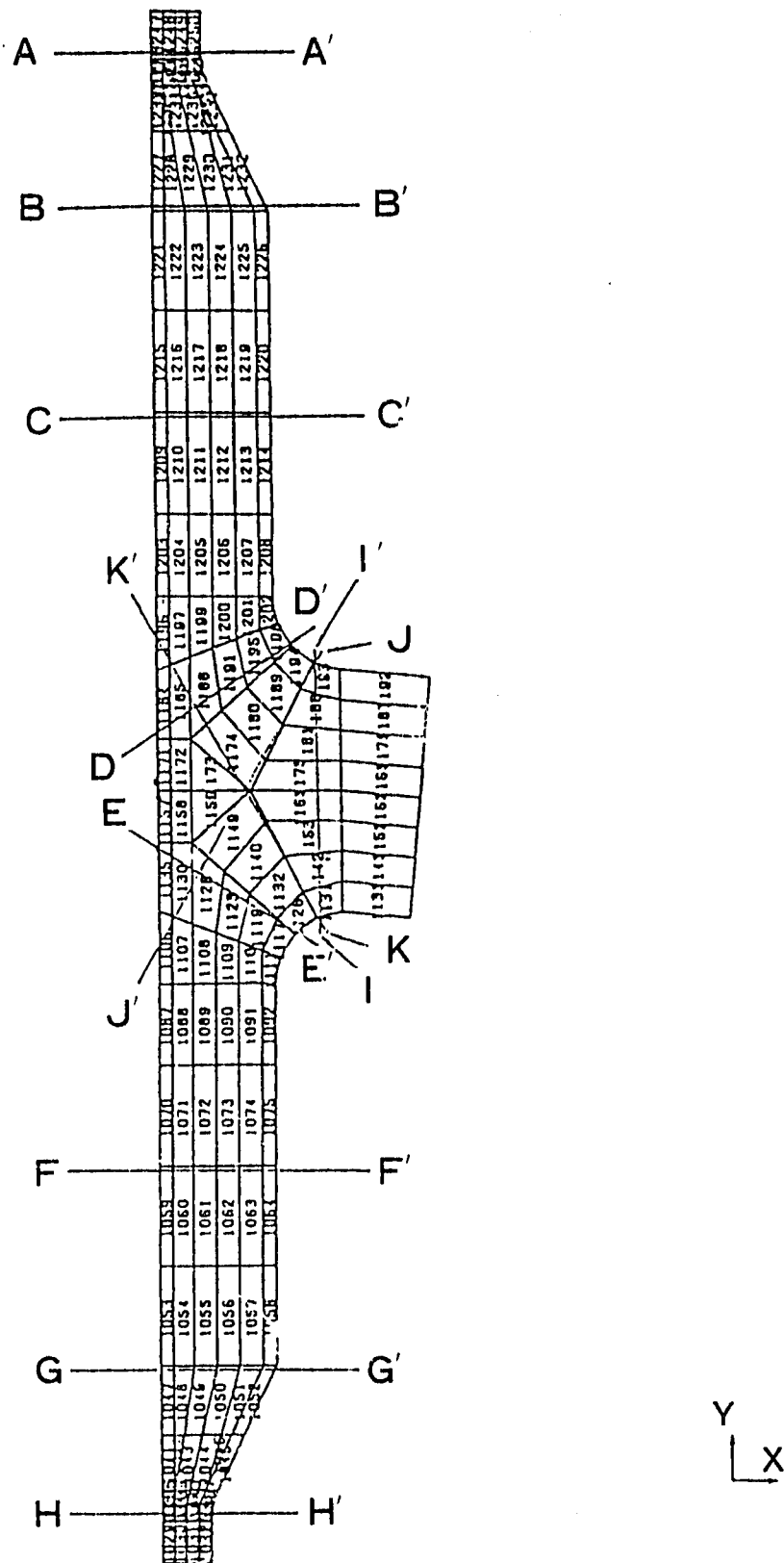


図 1.6.2.3 「EBDS」による評価ライン (MODEL-3)

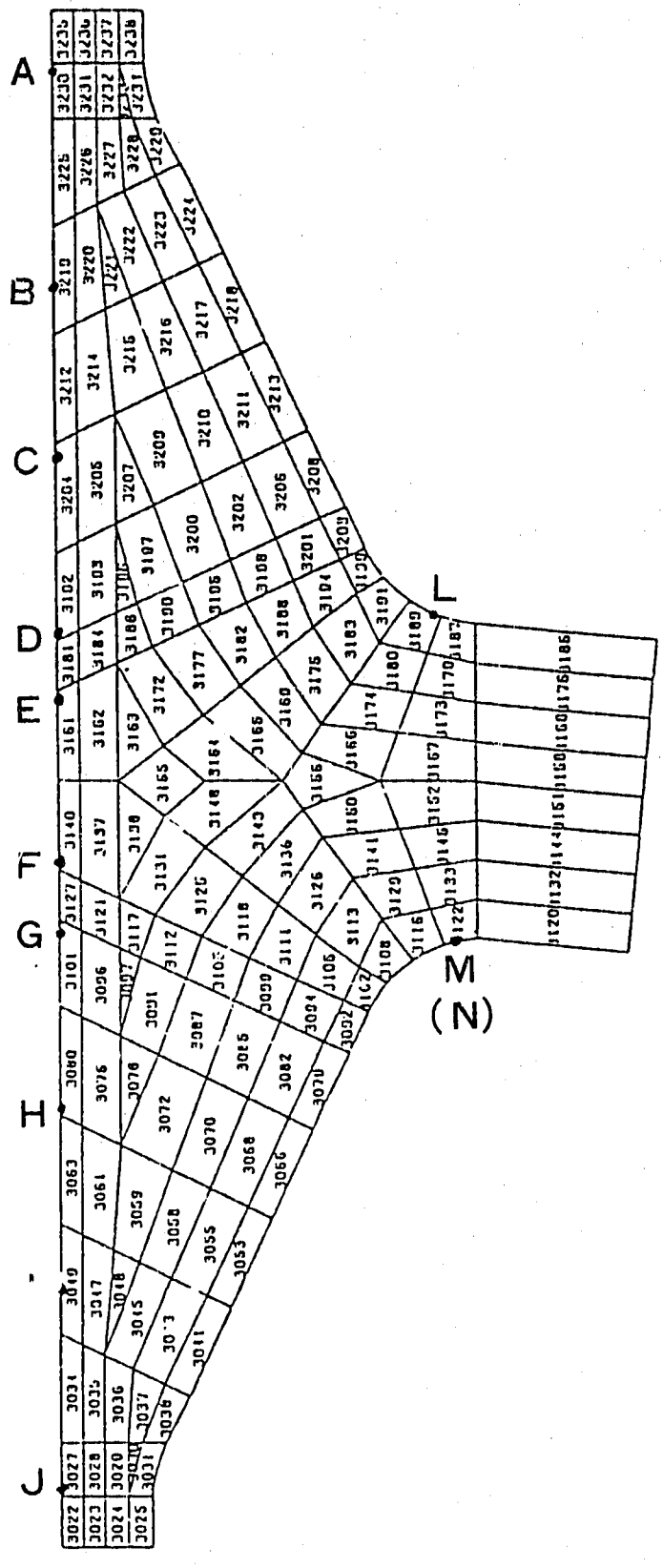
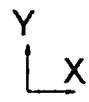


図 1.6.2.4 「TTS DS」による評価点 (MODEL-1)



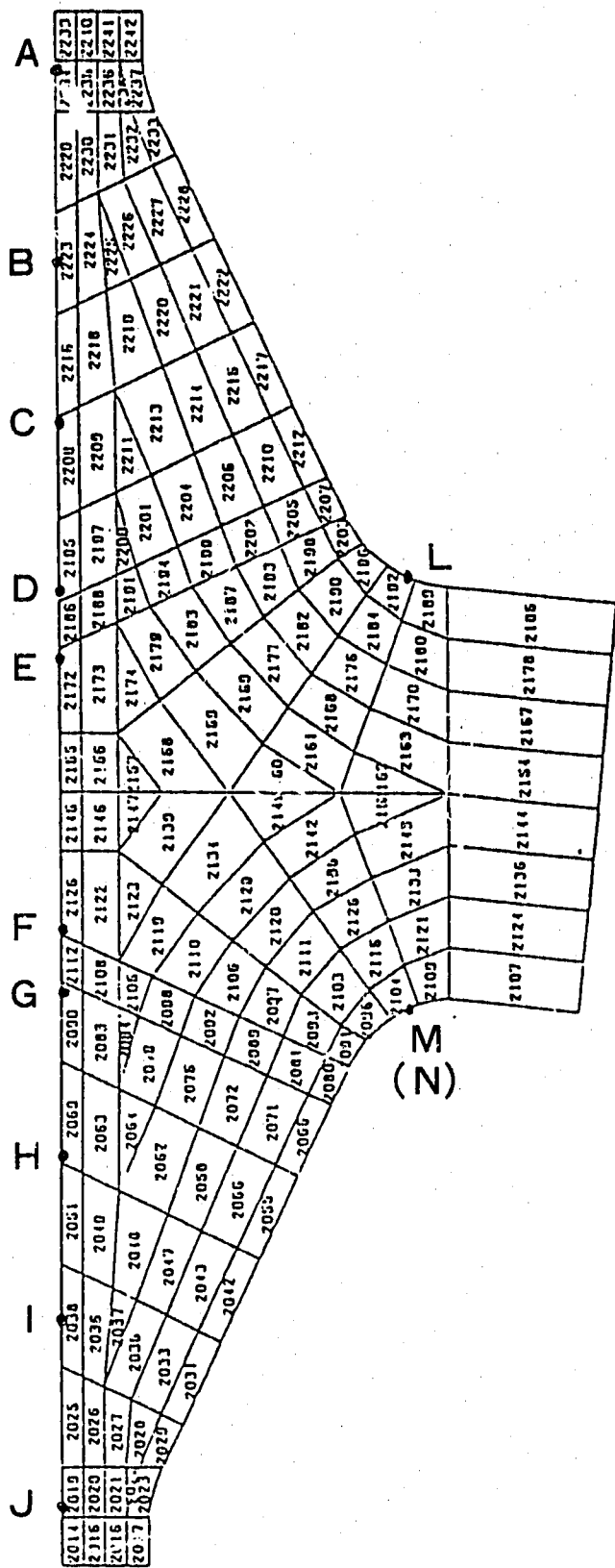
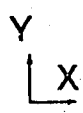


図 1.6.2.5 「TTSDS」による評価点 (MODEL-2)



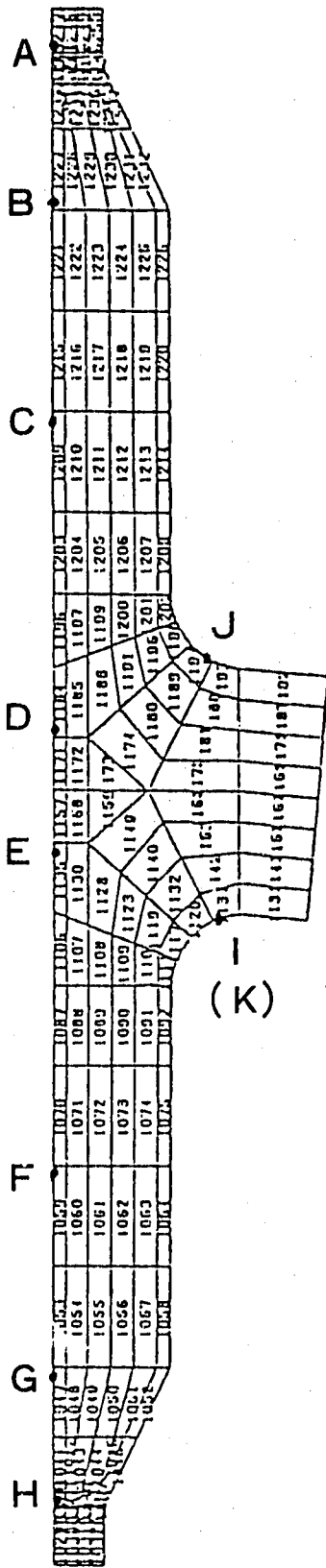


図 1.6.2.6 「TTSDS」による評価点 (MODEL-3)

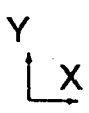


表1.6.2.1 「EBDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)

LINE	代表時間 [SEC]	$S_n$	$S_c$	$S_r$	$K(=S_r/S_n)$	$\epsilon_n$	$\epsilon_c$	$D_c$	$D_r$	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	3.164E-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	$t_c = 270.0$ $t_H = 550.0$	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)

表1.6.2.2 「EBDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)

LINE	代表時間 [SEC]	$S_n$	$S_t$	$S_p$	$K(=S_p/S_n)$	$\varepsilon_n$	$\varepsilon_t$	$D_t$	$D_c$	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]



表1.6.2.3 「EBDS」によるクリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-3)

LINE	代表時間 [SEC]	$S_n$	$S_t$	$S_p$	$K(=S_p/S_n)$	$\epsilon_n$	$\epsilon_t$	$D_t$	$D_c$	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
F	$t_c = 30.0$ $t_H = 30.0$	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]

表1.6.2.4 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	$\Delta \epsilon_1$
A	$t_c$ 29.0 $t_h$ 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
i	270.0 325.0	1.143	6.678 E-1	1.810	8.371 E-3

表1.6.2.5 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	$D_r$	$D_c$	D	$\Delta \epsilon_r$
A	$t_c$ 30.0 $t_h$ 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1.6.2.6 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	$D_r$	$D_c$	D	$\Delta \epsilon_t$
A	$t_c$ 30.0 $t_h$ 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

表1.6.3.1 クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)

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

表1.6.3.2 クリーブ疲労損傷評価結果 (MODEL-2)

非弾性解析 (「NEBDS」使用)					
評価点	代表時間	$D_1$	$D_c$	D	$\Delta \epsilon_c$
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	6.095 E-2	5.126 E-4	6.147 E-2	3.411 E-3
	30.2				
C	35.0	3.223 E-1	1.495 E-3	3.238 E-1	5.177 E-3
	35.0				
D	35.0	5.869 E-1	1.100 E-3	5.880 E-1	6.362 E-3
	37.2				
E	36.0	7.997 E-1	5.997 E-3	8.057 E-1	7.182 E-3
	41.0				
E F 1	37.0	8.284 E-1	2.265 E-1	1.055	7.288 E-3
	37.2				
E F 2	78.0	8.486 E-1	1.310 E-1	9.795 E-1	7.360 E-3
	90.0				
F	100.0	9.661 E-1	2.073 E-1	1.173	7.776 E-3
	120.0				
G	135.0	8.385 E-1	1.418 E-1	9.803 E-1	7.324 E-3
	135.0				
H	150.0	3.964 E-1	1.280 E-3	3.977 E-1	5.537 E-3
	135.0				
I	30.0	5.326 E-2	6.892 E-5	5.333 E-2	3.323 E-3
	30.2				
J 1	30.0	7.937 E-2	9.236 E-6	7.938 E-2	3.301 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	1.527 E-1	3.633 E-4	1.531 E-1	4.192 E-3
	42.3				
L	38.0	1.249 E-1	1.861 E-4	1.251 E-1	3.989 E-3
	39.7				
L**	38.0	9.553 E-2	1.740 E-4	9.570 E-2	3.749 E-3
	39.7				
G'	300.0	1.061	1.456 E-3	1.062	8.098 E-3
	350.0				
M	300.0	2.482	5.017 E-3	2.487	1.225 E-2
	425.0				
N	300.0	2.482	5.017 E-3	2.487	1.225 E-2
	425.0				

表1.6.3.3 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	$\Delta \epsilon_1$
A 1	30.0	2.995 E-2	5.919 E-5	3.001 E-2	2.998 E-3
A 2	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	7.083 E-1	7.999 E-4	7.091 E-1	6.841 E-3
	41.0				
DE 1	84.0	8.782 E-1	1.102 E-2	8.892 E-1	7.467 E-5
	90.0				
DE 2	90.0	9.164 E-1	2.855 E-2	9.449 E-1	7.602 E-3
	100.0				
E	110.0	1.187	2.234 E-1	1.411	8.518 E-3
	135.0				
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	1.986 E-3	1.049 E-3	3.036 E-3	2.124 E-3
	60.0				
I'	51.0	6.019 E-2	3.415 E-4	6.053 E-2	3.403 E-3
	54.5				
J	45.0	5.056 E-2	3.054 E-4	5.086 E-2	3.290 E-3
	51.7				
EOUT*	350.0	1.253	1.734 E-3	1.255	8.730 E-3
	500.0				
EOUT	300.0	2.399	3.353 E-3	2.403	1.203 E-2
	400.0				
K	300.0	2.326	3.703 E-3	2.330	1.184 E-2
	450.0				

表1.6.3.4 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	$D_r$	$D_c$	D	$\Delta \varepsilon_r$
A	$t_c$ 29.0 $t_h$ 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1.6.3.5 クリーブ疲労損傷評価結果 (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	$\Delta \epsilon_c$
A	$t_c$ 30.0 $t_n$ 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	7.905 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1.6.3.6 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	$D_r$	$D_c$	D	$\Delta \epsilon_i$
A	$t_r$ 30.0 $t_h$ 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1.6.3.7 クリープ疲労損傷評価結果 (MODEL-1)

非弾性解析 (「TTSDS」使用) ( $\alpha = 1.5$ )					
評価点	代表時間	$D_1$	$D_2$	D	$\Delta \varepsilon_1$
A	$t_a$ 29.0 $t_b$ 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1.6.3.8 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 <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D	$\Delta \epsilon$
A	t <sub>1</sub> 30.0 t <sub>2</sub> 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1.6.3.9 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	$D_r$	$D_c$	D	$\Delta \epsilon_r$
A	t <sub>0</sub> 30.0 t <sub>n</sub> 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

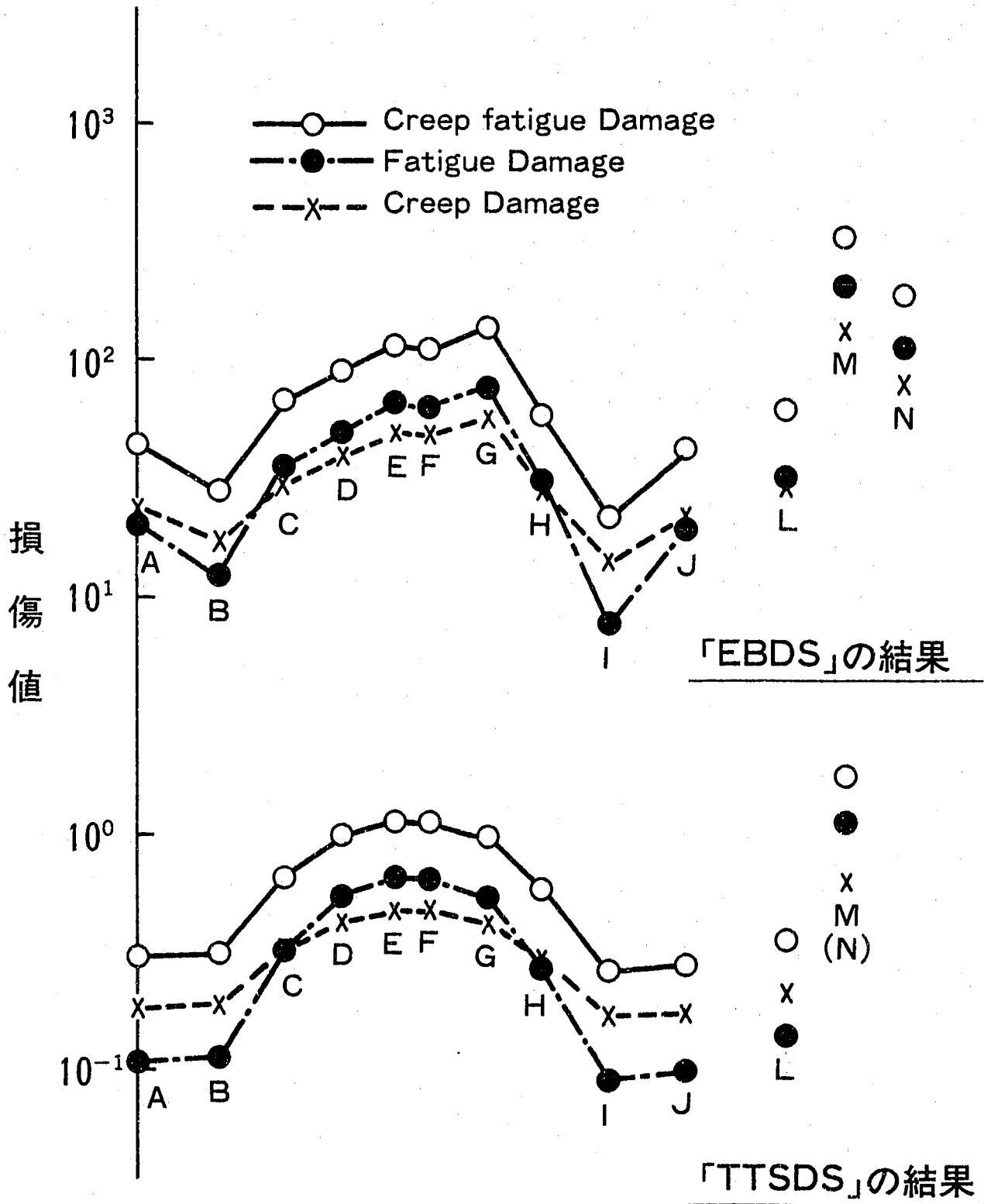


図 1.6.2.7 弾性解析クリープ疲労損傷 (MODEL-1)

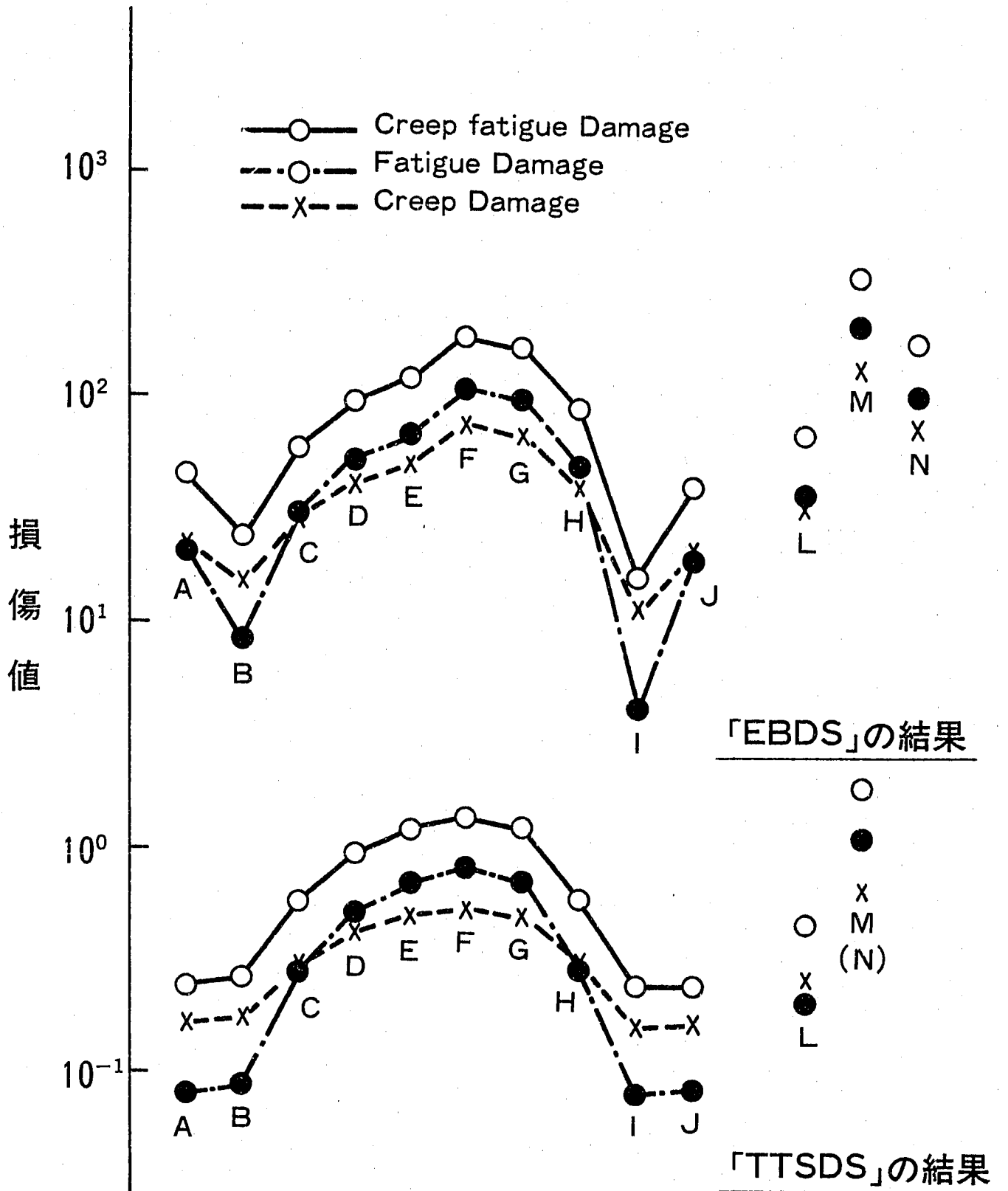


図 1.6.2.8 弾性解析クリープ疲労損傷 (MODEL-2)

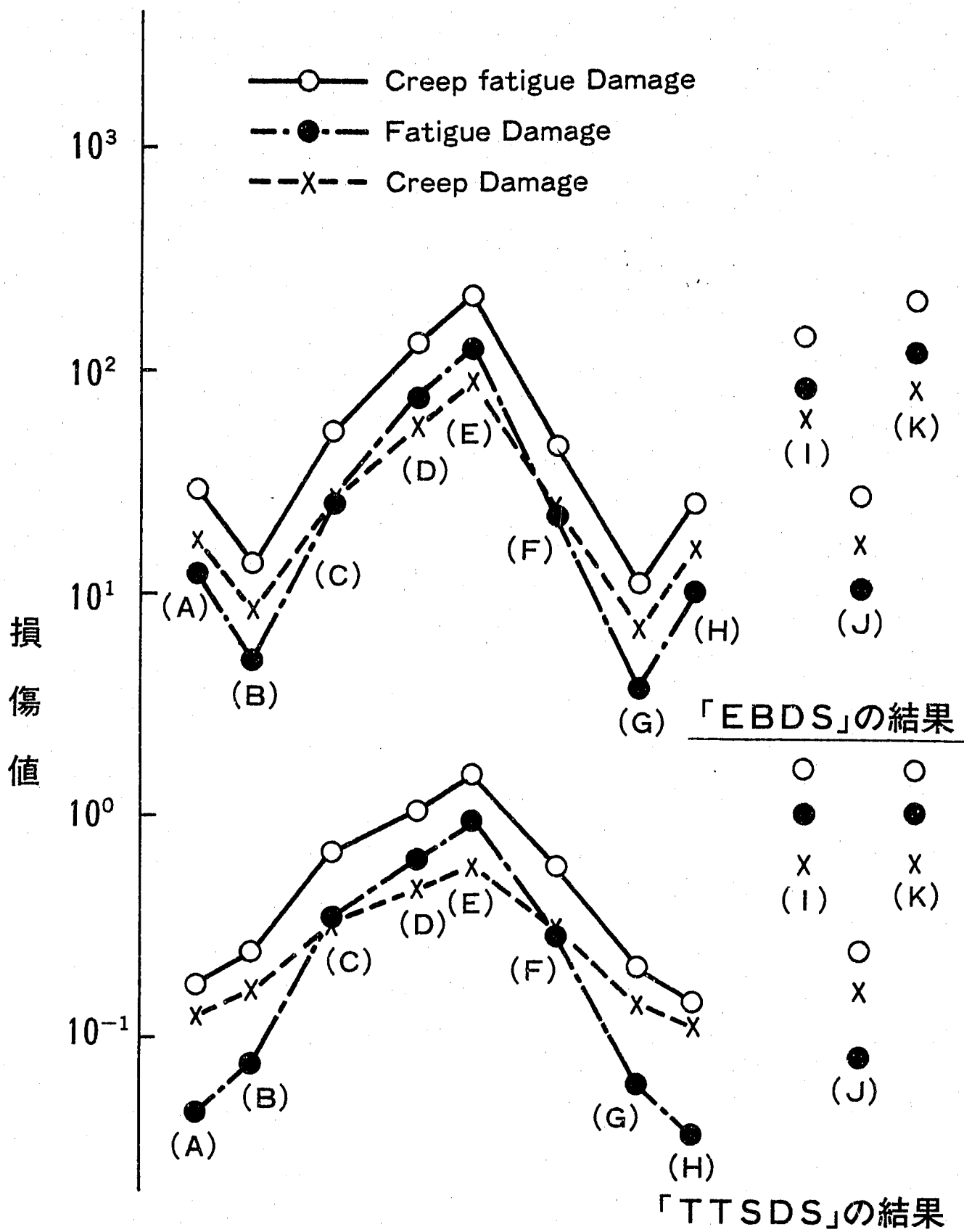


図 1.6.2.9 弾性解析クリープ疲労損傷 (MODEL-3)



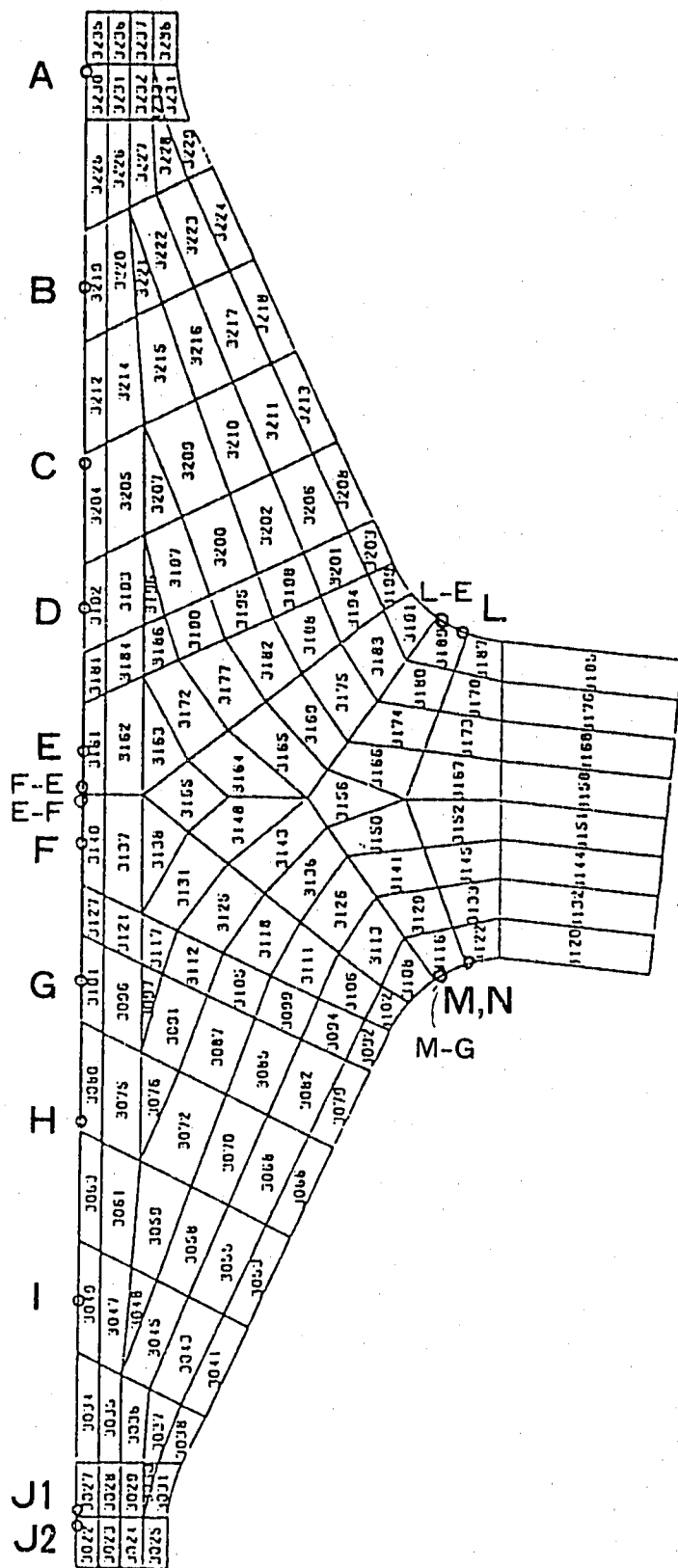


図 1.6.3.1 「NEBDS」による評価点 (MODEL-1)

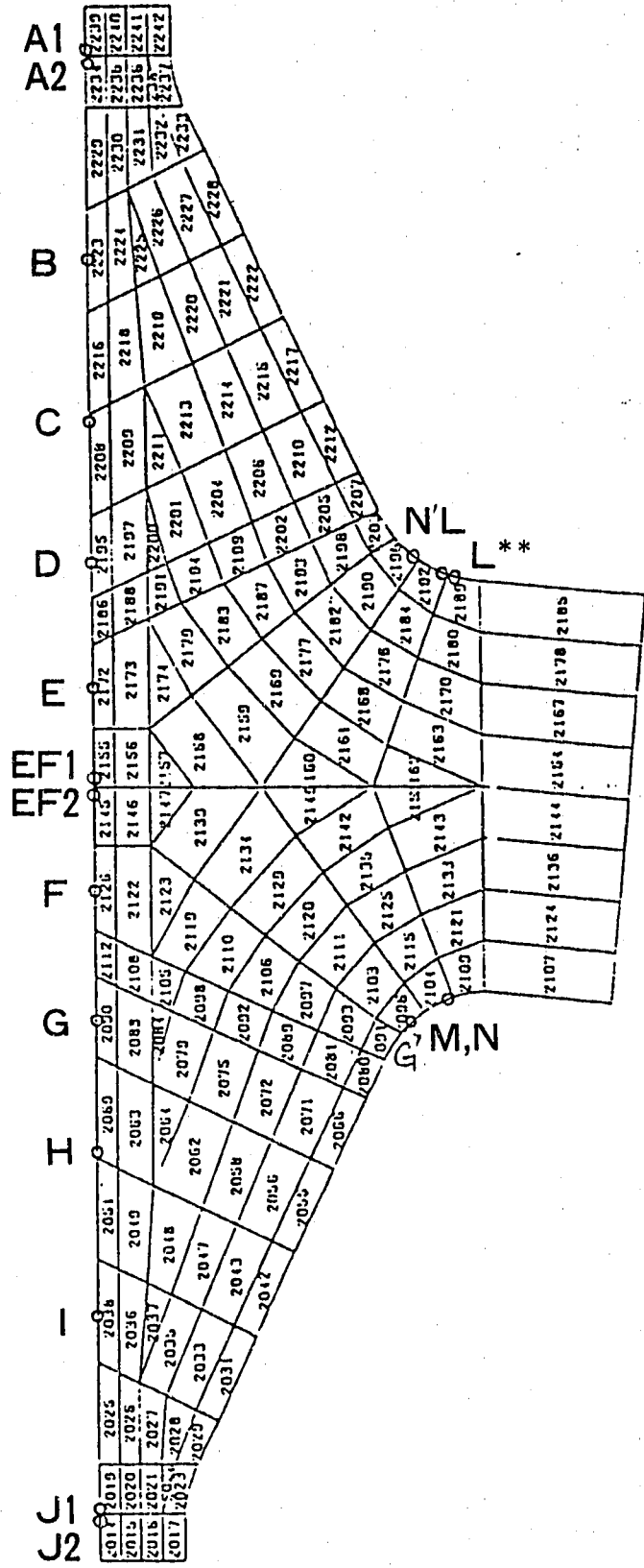


図 1.6.3.2 「NEBDS」による評価点 (MODEL-2)

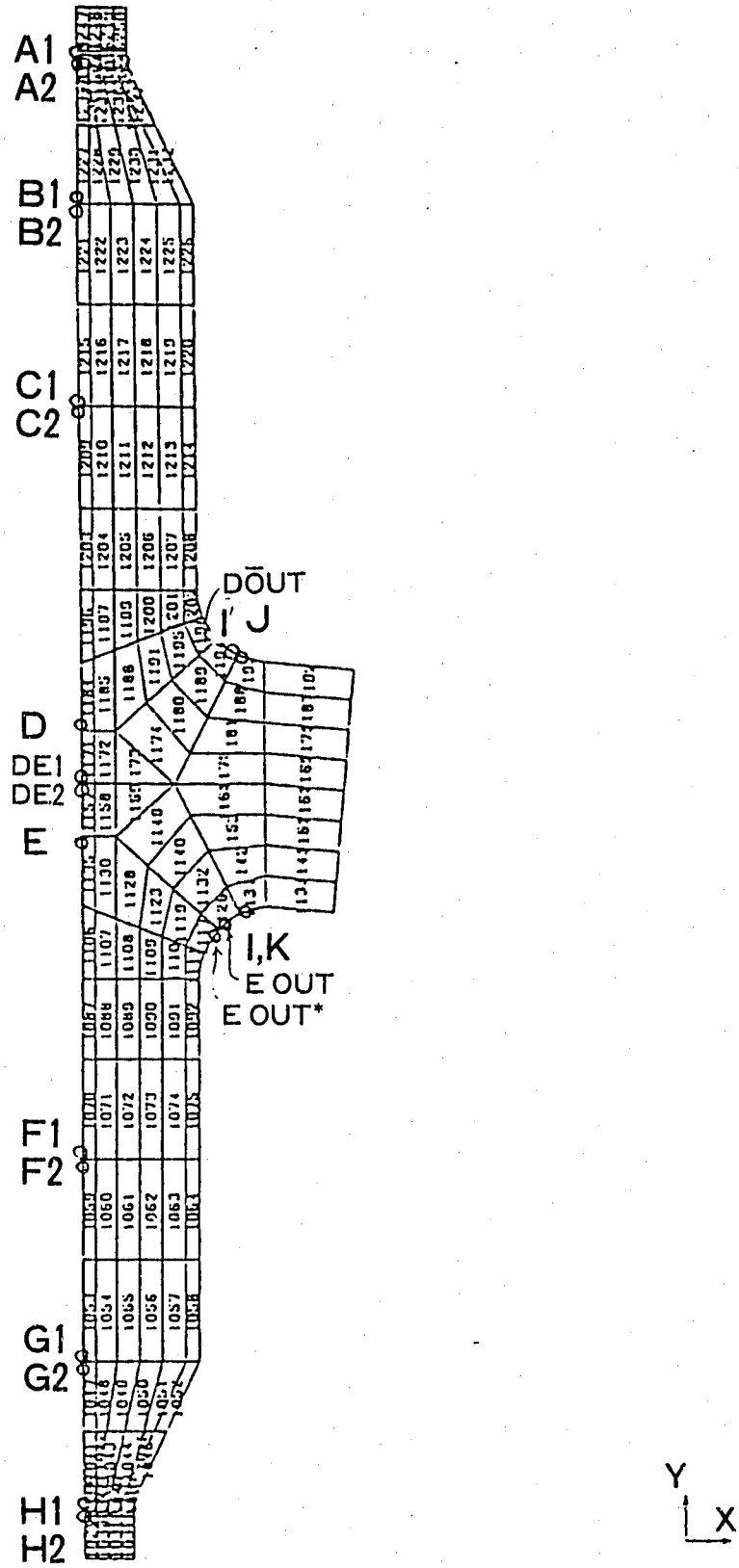


図 1.6.3.3 「NEBDS」による評価点 (MODEL-3)

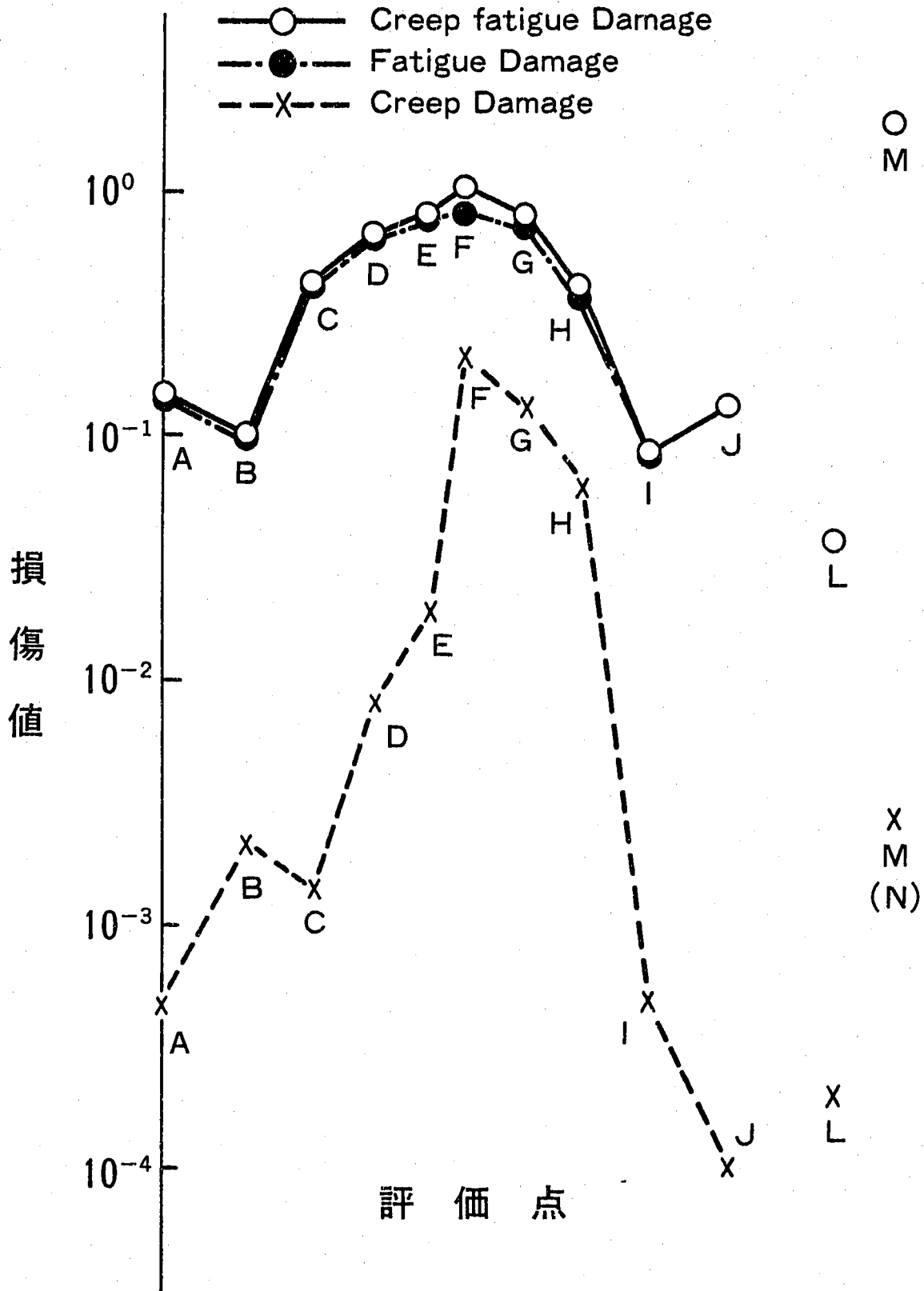


図 1.6.3.4 非弾性解析クリープ疲労損傷 (MODEL-1)  
「NEBDS」の結果

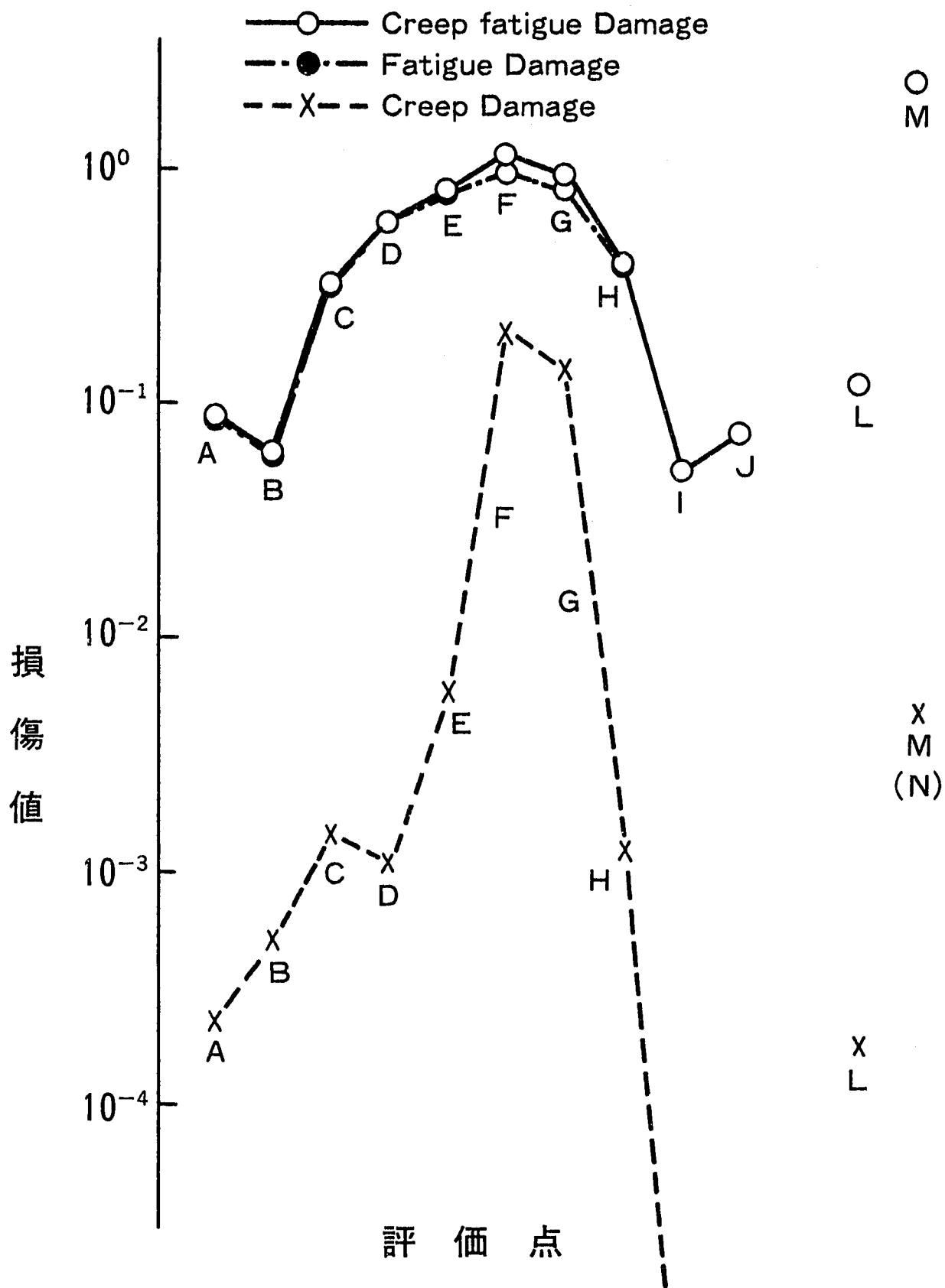


図 1.6.3.5 非弾性解析クリープ疲労損傷 (MODEL-2) 「NEBDS」の結果

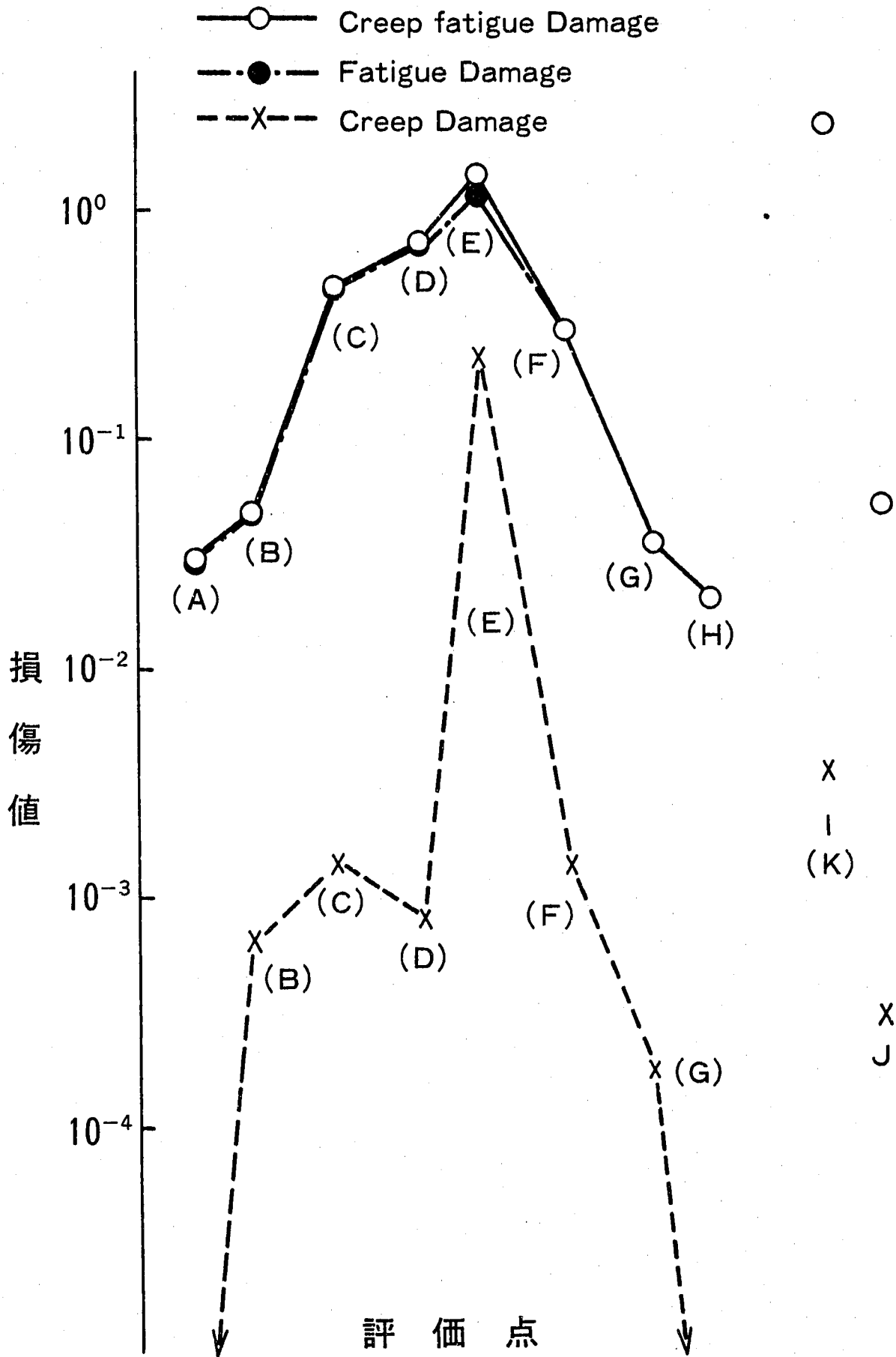


図 1.6.3.6 非弾性解析クリープ疲労損傷 (MODEL-3)  
「NEBDS」の結果

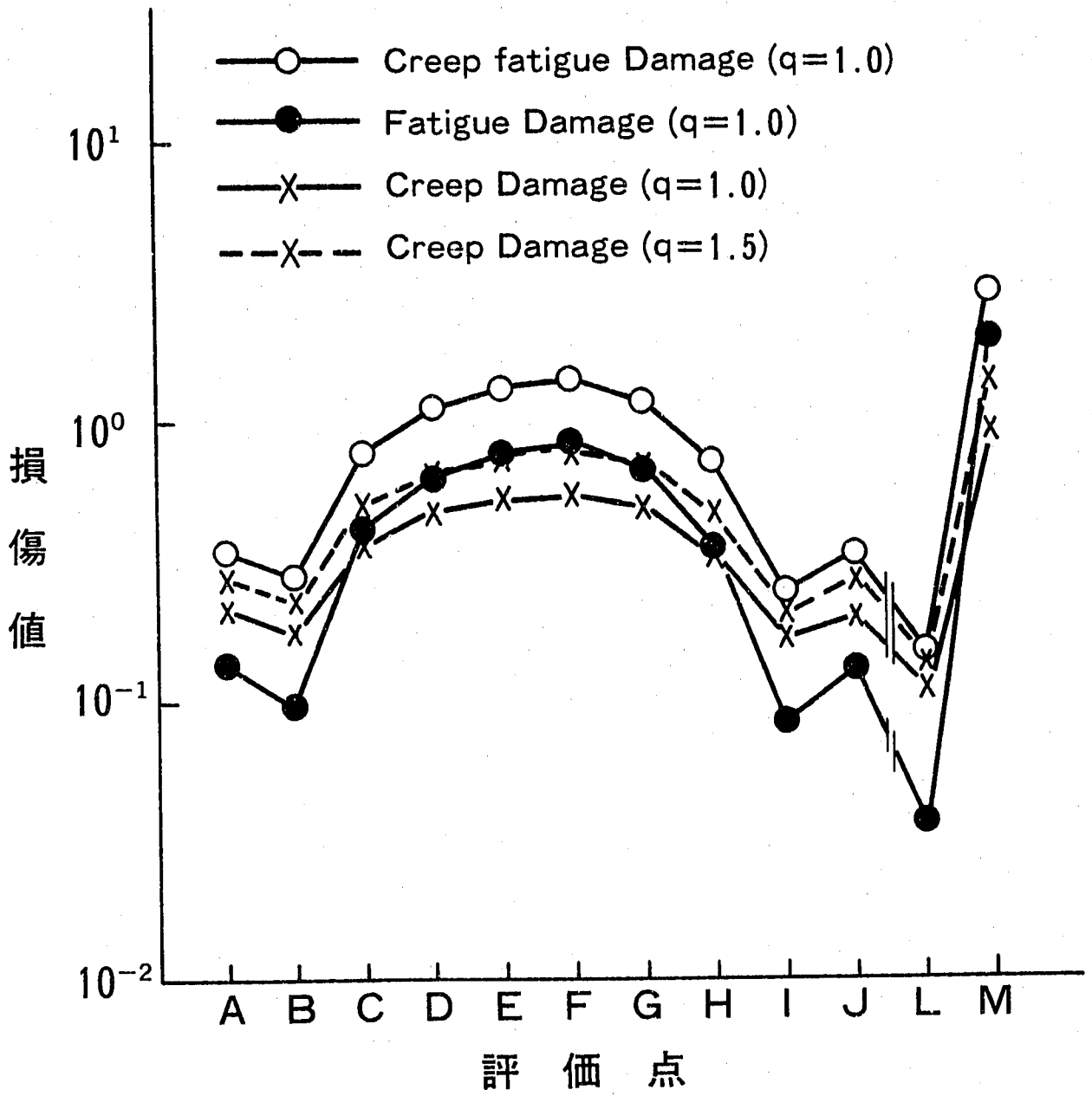


図 1.6.3.7 「TTSDS」による非弾性解析クリープ疲労損傷値 (MODEL-1)

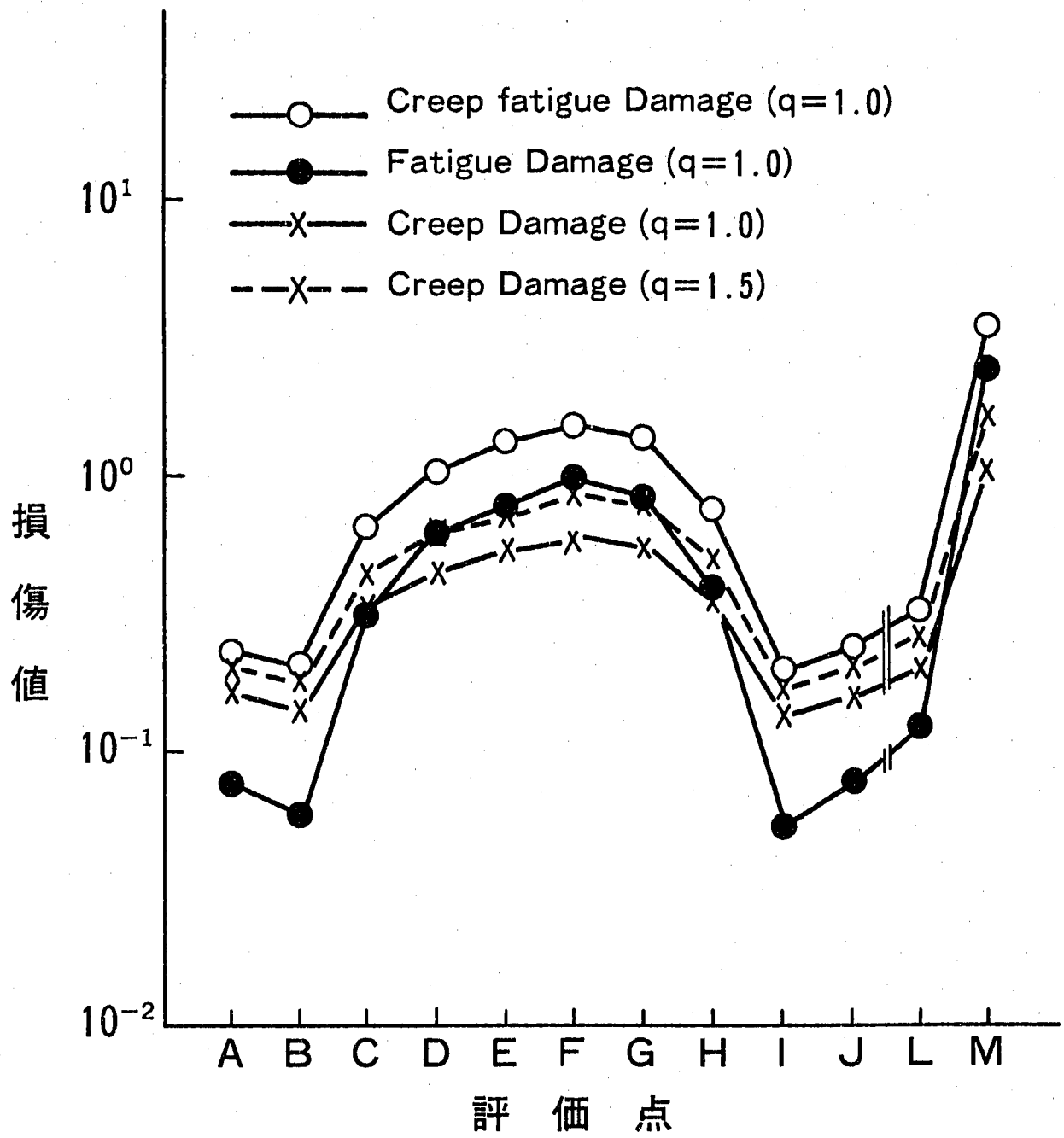


図 1.6.3.8 「TTSDS」による非弾性解析クリープ疲労損傷値 (MODEL-2)



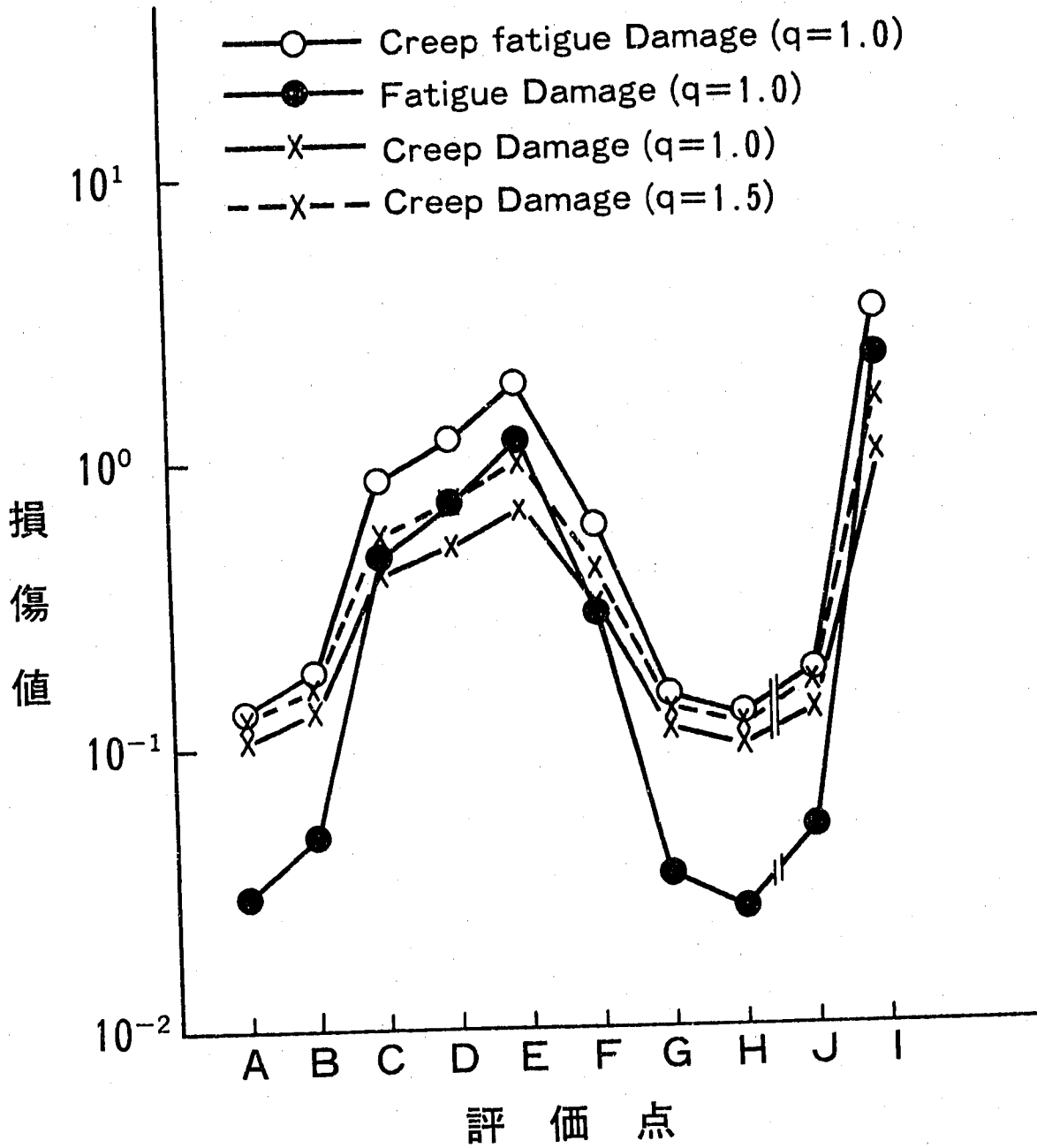


図 1.6.3.9 「TTSDS」による非弾性解析クリープ疲労損傷値 (MODEL-3)

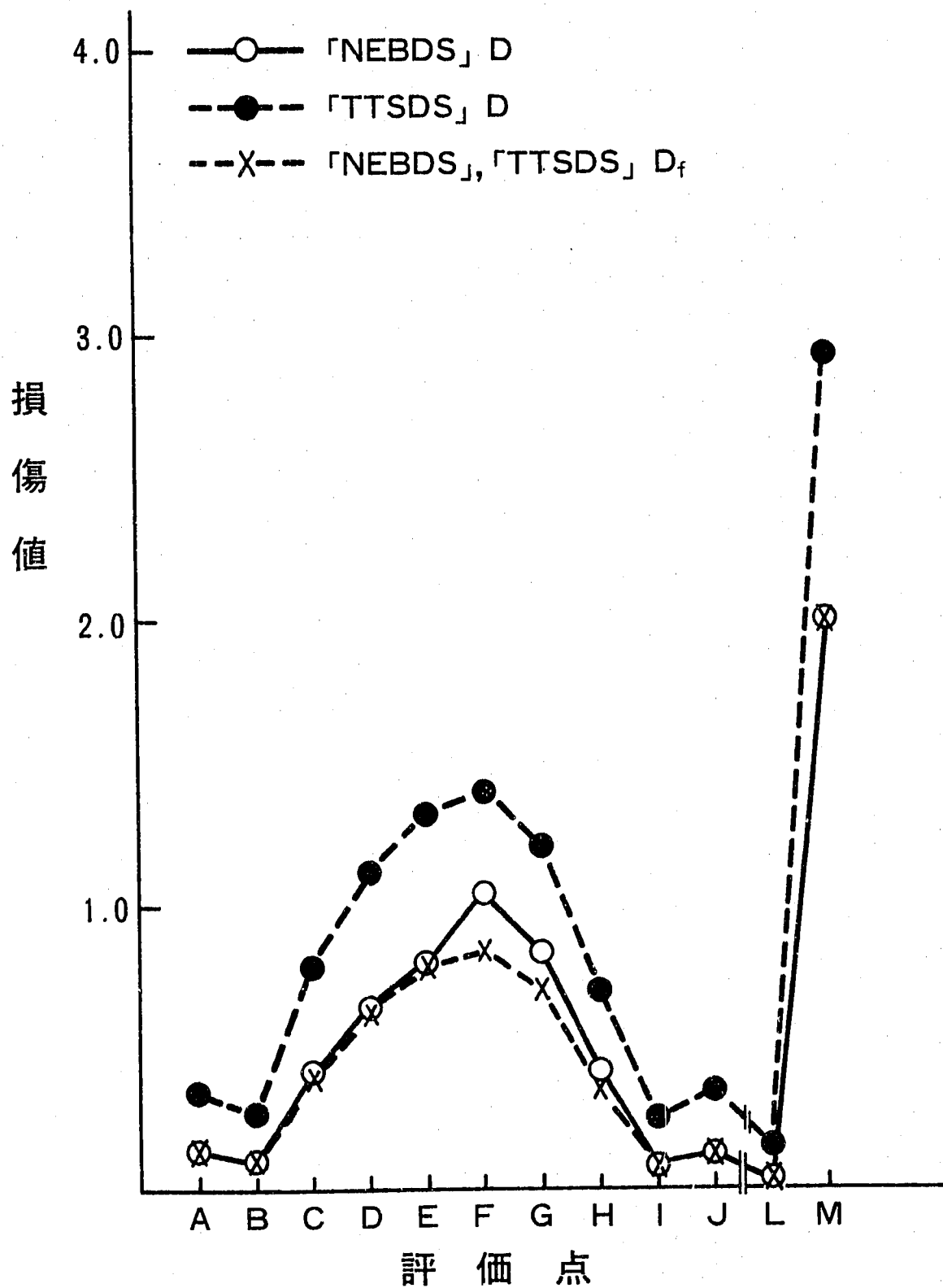


図 1.6.3.10 非弾性クリープ疲労損傷値 (MODEL-1)

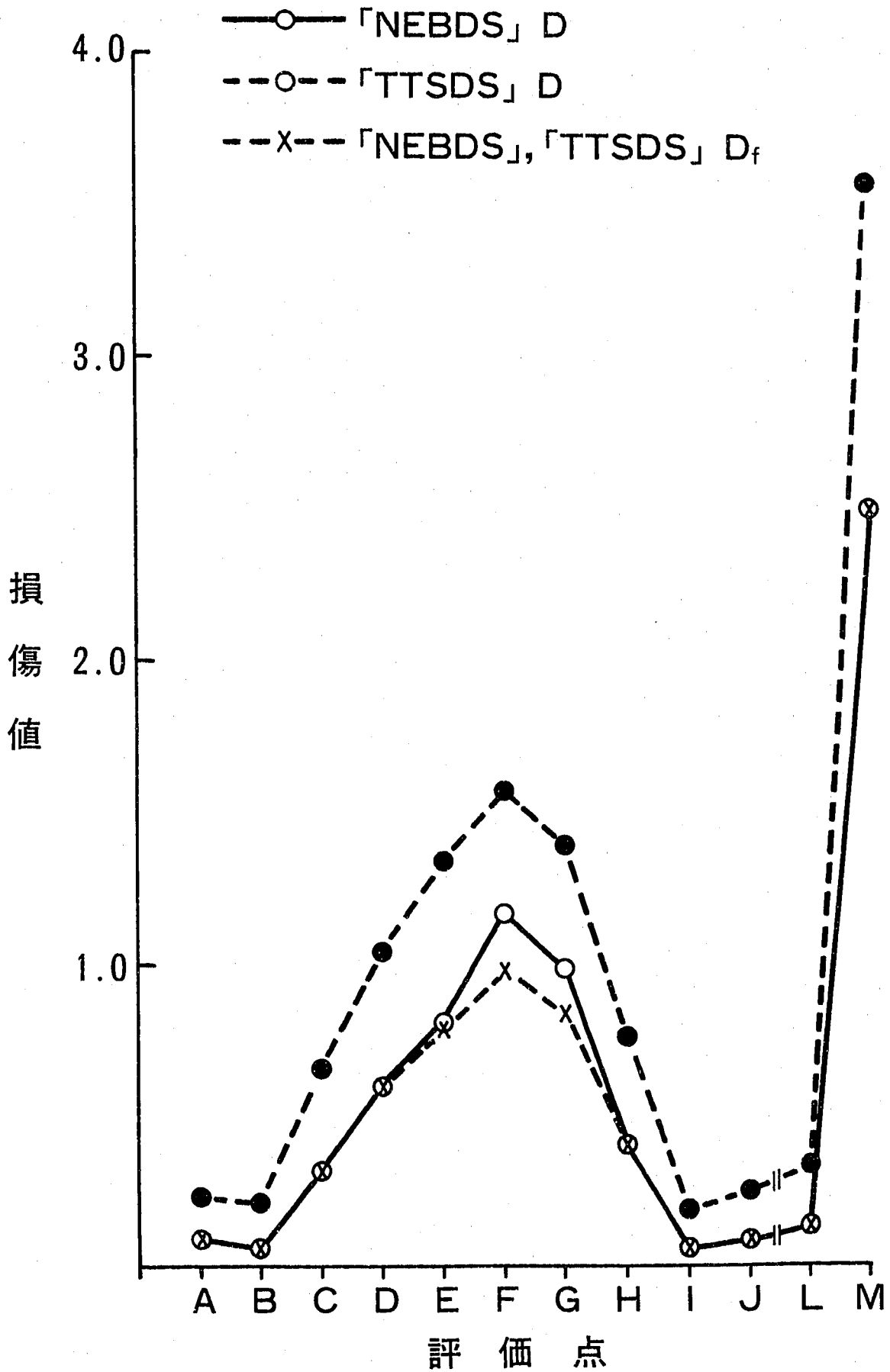


図 1.6.3.11 非弾性クリープ疲労損傷値 (MODEL-2)

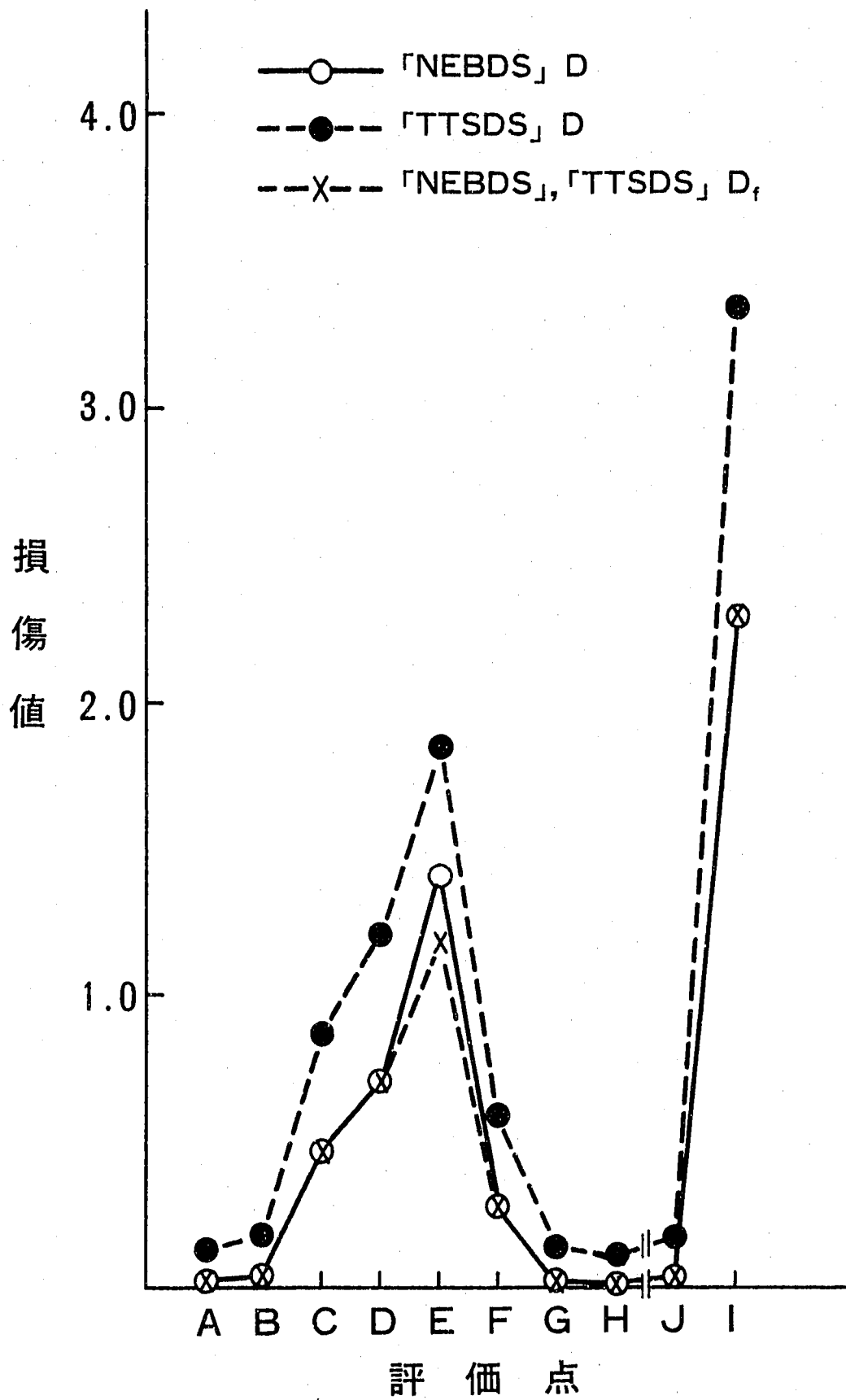


図 1.6.3.12 非弾性クリープ疲労損傷値 (MODEL-3)

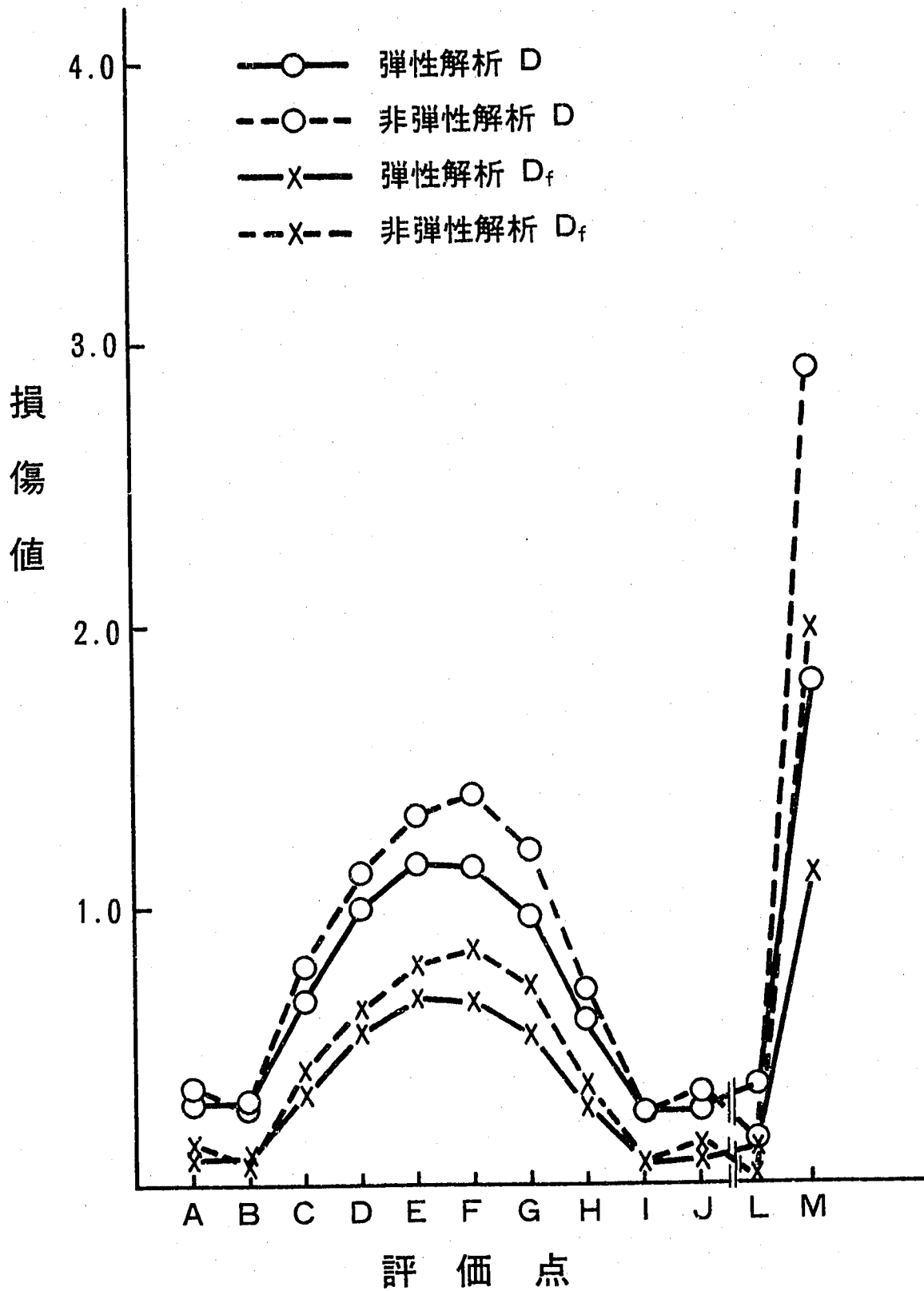


図 1.6.3.13 「TTSDS」によるクリープ疲労損傷値 (MODEL-1)

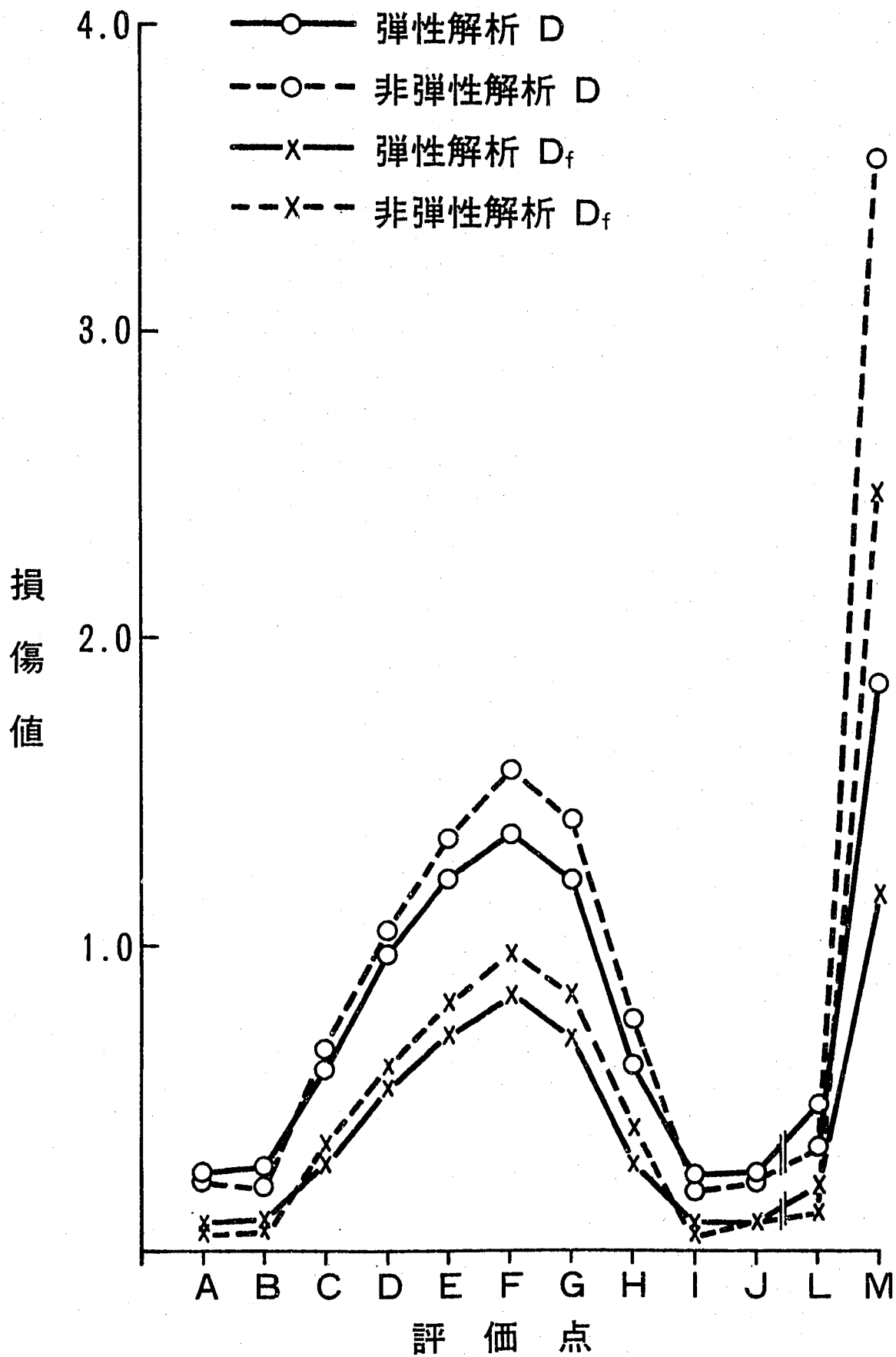


図 1.6.3.14 「TTSDS」によるクリープ疲労損傷値 (MODEL-2)

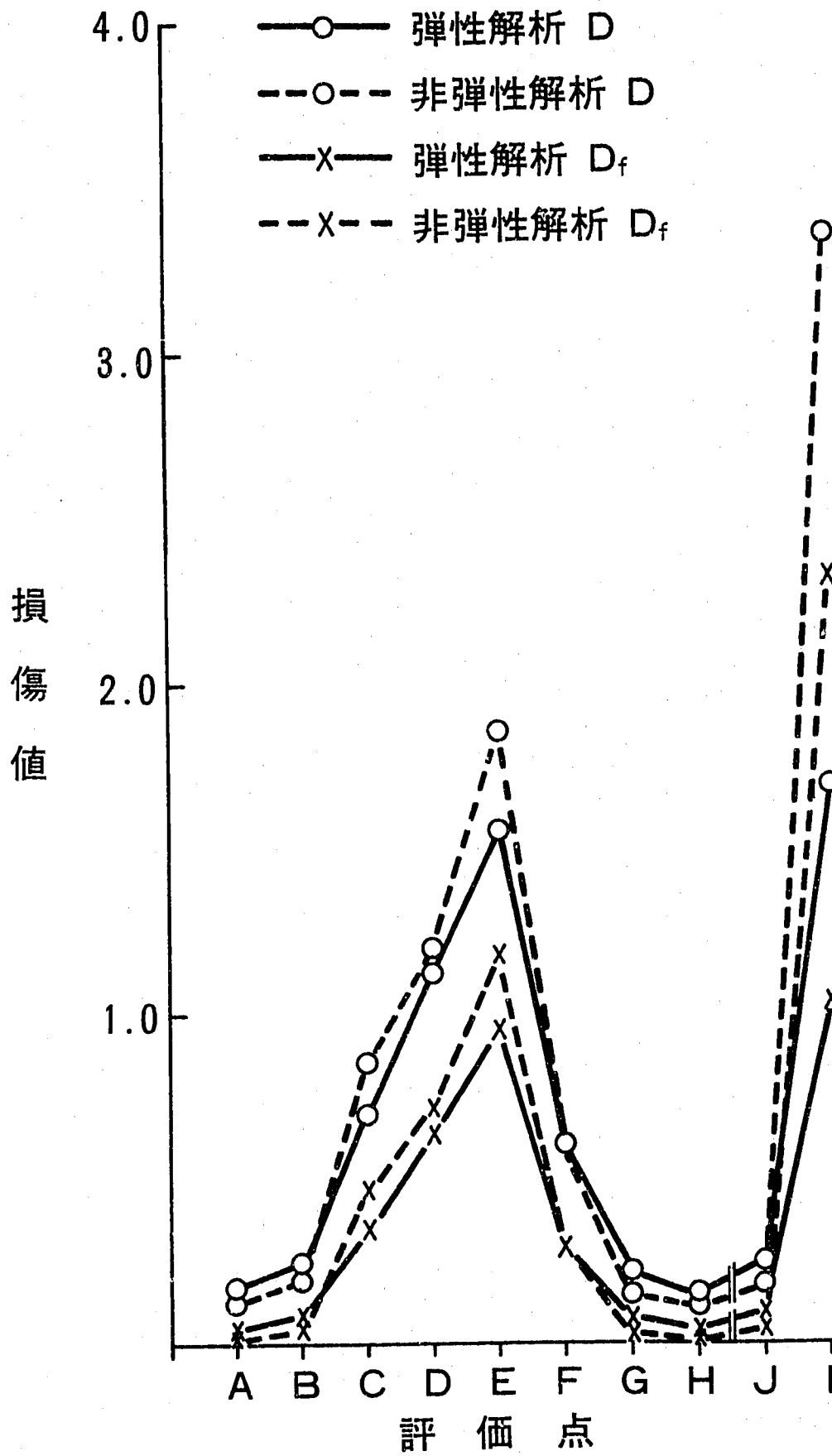


図 1.6.3.15 「TTSDS」によるクリープ疲労損傷値 (MODEL-3)

## 第2編 SUS316LNP鋼溶接継手の解析

### 2.1 まえがき

高速大型炉用の一次冷却系機器・配管用の構造材料として改良316鋼が有力である。そこで、この材料の溶接部の繰返し熱応力ひずみ下でのクリープ疲労強度を把握するために、小型熱衝撃試験装置に図2.1.1に示す供試体を取りつけ試験中である。この試験は、第1編で記した供試体と直列に取りつけており、現在1,200サイクルの熱過渡を終了しているが、今後試験が継続実施される可能性があるので、熱応力解析と損傷評価のみここで報告する。

報告書の構成は第1編と同様であり、今後試験報告書および総合報告が予定されている。

供試体は図2.1.1に示すように、外径93.5mm、肉厚20mmの円筒中央部に周継手を有するものであり、第1編と同じ熱過渡を本供試体に与えた。即ち、

$$T_{max} = 550\text{ }^{\circ}\text{C} \quad , \quad T_{min} = 300\text{ }^{\circ}\text{C} \quad , \quad \Delta T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Hot Transient} : 5 \text{ h} \quad , \quad \text{Cold Transient} : 1 \text{ h} .$$

### 2.2 解析方法

解析モデルは軸方向1層径方向6層の均質モデルであり、FINASのQAX-8の要素を用いて非定常伝熱弾性応力解析を実施した。入力温度データは、本供試体が第1編のモデル3の下流側であることから、モデル3と同じデータを用いた。

材料特性は、材料室が高速炉用SUS316LNPに暫定的に定めている数値を用いた。表2.2.1に弾塑性応力ひずみ関係式、表2.2.2にクリープひずみ式、表2.2.3に主クリープ破断式、表2.2.4に最適疲労破断式、表2.2.5に動的応力ひずみ関係式を示す。

また参考のために、SUS304の材料データを用いた解析も実施した。



### 2.3 解析結果

表2.2.6～表2.2.11に極値時点（表面でvon Mises型応力が最大になるCold TransientとHot Transient中の解析時刻）の計算結果を示す。損傷の計算には安全率を含めない、いわゆるTTSDSによった。ひずみ範囲計算にはTTSDSの1.2の係数、また疲労損傷計算にはひずみ速度 $10^{-6}$  (mm/mm/sec)の最適疲労破損式を用いた。

結果をみると、

- ・温度、ひずみ、応力はSUS304とSUS316LNPでほとんど同一である
- ・疲労損傷値もほとんど同一である
- ・クリープ損傷値はSUS304の方が約1.5倍大きい
- ・結果としてクリープ疲労損傷はSUS304の方が約1.14倍大きいことがわかる。

表 2.2.1 SUS 316 の弾塑性応力-ひずみ関係式

(1)  $\sigma \leq \sigma_p$  のとき

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

$$\varepsilon_p = 0$$

(2)  $\sigma > \sigma_p$  のとき

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

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

<使用単位>

$$\varepsilon_e, \varepsilon_p \text{ (mm/mm)}, \sigma \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

<適用限界>

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

パラメータ	温度 (°C)	315 ≤ T ≤ 650
E (kg/mm <sup>2</sup> )	315 ≤ T < 400	E = 2.040 × 10 <sup>4</sup> - 8.000 T
	400 ≤ T ≤ 650	E = 2.126 × 10 <sup>4</sup> - 10.125 T
σ <sub>p</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )		σ <sub>p</sub> = K (0.002) <sup>m</sup>
σ <sub>y</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )		平均曲線 : 26.8073 - 5.04547 × 10 <sup>-2</sup> T + 8.03901 × 10 <sup>-5</sup> T <sup>2</sup> - 5.11282 × 10 <sup>-8</sup> T <sup>3</sup> 最小曲線 : 別表1.4 設計降伏点 S <sub>y</sub> による
K (kg/mm <sup>2</sup> )		40.0909 - 9.69990 × 10 <sup>-3</sup> T
m		0.326245 + 6.13276 × 10 <sup>-5</sup> T

表 2.2.2 改良 S U S 316 のクリープひずみ式

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

使用単位

T : 温度 (°C)            425 ≤ T ≤ 650

σ : 応力 (kg/mm<sup>2</sup>)        0.7 ≤ σ

t<sub>R</sub> : 破断時間 (hr)

ε̇<sub>m</sub> : 定常クリープ速度 (mm/mm/hr)

t : 時間 (hr)

t <sub>R</sub>	$\log_{10}(\alpha c t_R) = -27.08044 + \frac{29459.86}{T + 273.15} + \frac{6725.071}{T + 273.15} \log_{10} \sigma - \frac{6282.966}{T + 273.15} (\log_{10} \sigma)^2$		
ε̇	$59119.0 \cdot \exp \left[ - \frac{93475.0}{8.31 \cdot (T + 273.15)} \right] \cdot t_R^{-1.1126}$		
C <sub>1</sub>	1.2692 · ε̇ <sub>m</sub> <sup>0.74491</sup> / r <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	0.48449 · ε̇ <sub>m</sub> <sup>0.81155</sup> / r <sub>2</sub>
r <sub>1</sub>	103.37 · t <sub>R</sub> <sup>-0.72607</sup>	r <sub>2</sub>	17.255 · t <sub>R</sub> <sup>0.86775</sup>

ただし、α<sub>c</sub> はクリープひずみ挙動のばらつきを表示するための時間関数である。

表 2.2.3 改良 SUS 316 の主クリープ破断関係式

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

使用単位

T : 温度 (°C)                     $425 \leq T \leq 825$  $\sigma$  : 応力 (kg/mm<sup>2</sup>)             $2 \leq \sigma$ t<sub>R</sub> : 破断時間 (hr)

C	27.08044
A <sub>0</sub>	294589.86
A <sub>1</sub>	6725.071
A <sub>2</sub>	-6282.966

$\alpha_R$	平均値 : 1
	設計最小値 : 10

ただし、 $\sigma$  は当該温度における引張強さを超えてはならない。

表 2.2.4 SUS304, SUS316 及び SUS321 の最適疲労破損式

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

使用単位

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

A <sub>0</sub>	1.621827 - 0.4567850 × 10 <sup>-1</sup> × T <sup>2</sup> × R
A <sub>1</sub>	1.131346 + 0.8665061 × 10 <sup>-9</sup> T <sup>2</sup>
A <sub>2</sub>	0.3439663
A <sub>3</sub>	-0.1374387 × 10 <sup>-1</sup> + 0.4910723 × 10 <sup>-4</sup> × R

ただし、R = log<sub>10</sub>  $\dot{\epsilon}$  である。

表 2.2.5 SUS316 動的応力-ひずみ関係式

◎  $\Delta\sigma / 2 > \sigma_p$  のとき

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

◎  $\Delta\sigma / 2 \leq \sigma_p$  のとき

$$\Delta\sigma = E \cdot \Delta\varepsilon_t$$

使用単位

- T : 温度 (°C)  $425 \leq T \leq 650$   
 $\Delta\sigma$  : 応力範囲 (kg/mm<sup>2</sup>)  
 $\Delta\varepsilon_t$  : 全ひずみ範囲 (mm/mm)  
 E : 縦弾性係数 (kg/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_p$  : 比例限 (kg/mm<sup>2</sup>)

A <sub>0</sub>	$4.139556 - 0.4434273 \times 10^{-2} \times T + 0.1354228 \times 10^{-5} \times T^2 + 0.1593061 \times 10^{-8} \times T^3$
A <sub>1</sub>	$2.171727 - 0.7045263 \times 10^{-2} \times T + 0.7832692 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.2083600 \times 10^{-8} \times T^3$
E	$2.10236 \times 10^4 - 9.71895 \times T$
$\sigma_p$	$26.8073 - 5.04547 \times 10^{-2} \times T + 8.03901 \times 10^{-5} \times T^2 - 5.11285 \times 10^{-8} \times T^3$ $- (40.0909 - 9.69990 \times 10^{-3} \times T) \times (0.002)^{0.32624516 - 1.3276 \times 10^{-5} \times T}$

表2.2.6 極値時点の温度及び等価線形処理結果

	区分	Time	$T_{in}$	$T_{out}$	$T_{mean}$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$
SUS316	COLD	37.00	356.20	541.30	491.00	-168.60	-50.50
	HOT	38.50	493.00	311.40	364.4	172.80	42.30
SUS304	COLD	37.00	356.30	541.40	491.20	-168.60	-50.70
	HOT	38.50	493.00	311.30	364.20	172.80	42.40

表2.2.7 極値時点のひずみ範囲およびひずみ成分

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

表2.2.8 応力範囲及び応力成分（等価線形処理前）

	MISES	TRESCA	区分	$\sigma_R$	$\sigma_z$	$\sigma_\theta$
SUS316	131.366	131.469	COLD	0.681	69.419	68.942
			HOT	-0.597	-63.328	-63.598
SUS304	131.494	131.598	COLD	0.684	69.482	69.004
			HOT	-0.598	-63.398	-63.667

表 2.2.9 応力範囲及び応力成分（等価線形処理後）

	MISES	TRESCA	区分	$\sigma_R$	$\sigma_z$	$\sigma_\theta$
SUS316	72.014	76.930	COLD	5.683	43.834	37.982
			HOT	-5.651	-44.430	-39.155
SUS304	71.982	76.898	COLD	5.684	43.815	37.963
			HOT	-5.654	-44.421	-39.144

表 2.2.10 ひずみ範囲及び損傷値

	$\Delta \epsilon_{eq}$	$\epsilon_n$	$\epsilon_t$	$D_t$	$D_c$	D
SUS316	0.006714	0.007729	0.009275	0.32	0.466	1.78
SUS304	0.006720	0.007736	0.009283	1.32	0.706	2.03



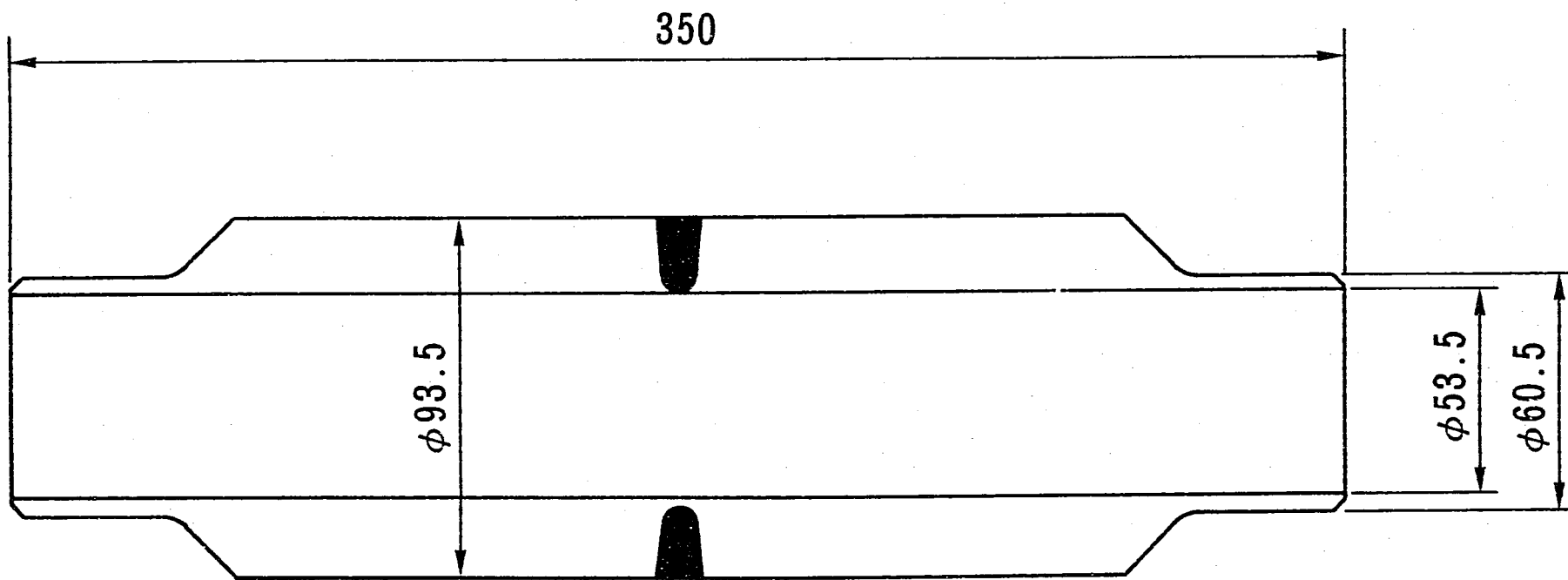


図 2.1.1 SUS316LNP溶接継手試験モデル

## ま と め

小型熱衝撃試験装置で現在実施中の構造要素試験モデルの熱弾性解析、熱弾塑性クリープ解析およびこれらの結果に基づくクリープ疲労損傷計算を、実験で得られた温度応答を用いて実施した。この結果、つぎのことが分かった、

- (1) 相対的温度分布によるSUS304製構造要素モデルは、繰返し数1,300 サイクルにおいてクリープ疲労損傷が1.7～1.8程度となる。
- (2) 板厚内温度勾配による曲げ応力の繰返しを受けるSUS316LNP 溶接継手モデルは、繰返し数1,200 サイクルにおいてクリープ疲労損傷が1.8程度となるが、クリープ特性が良好な材料であるため、従来のTTSDSによる熱クリープ疲労寿命予測法がどこまで成立するか不明である。このことは従来の線形累積損傷則の成立性に係わることであり、今後の試験結果に注目したい。

## Appendix A. 「EBDS」(弾性解析)コードによるクリープ疲労損傷評価手順

熱伝導解析及び弾性応力解析で得られた結果より、以下の手順でクリープ疲労損傷評価を行う。

- ① 応力解析結果ポストファイルの積分点の温度の等価線型処理を行い、表面温度と等価線型化された表面温度との差  $\Delta T_2$  をコールド側、ホット側より 1 時点ずつ選び入力する。(  $S_n$  を決定した 2 時点とする。 ) ( 「RANGE」 の出力 )

[MAINルーチン]

- ② 板厚平均温度 ( 「RANGE」 出力、  $T_{m, cold}$  ,  $T_{m, hot}$  ) より物性値 (  $E$  ,  $\nu$  ,  $\alpha$  ) を算出し、2 時点の熱ピーク応力を求める。最高使用温度の物性値より熱ピーク応力範囲を求める。

$$\text{(熱ピーク応力：コールド側)} \quad \sigma_{z, c, th} = \sigma_{\theta, c, th} = -E \alpha \Delta T_{2, c} / (1 - \nu)$$

$$\text{(熱ピーク応力：ホット側)} \quad \sigma_{z, h, th} = \sigma_{\theta, h, th} = -E \alpha \Delta T_{2, h} / (1 - \nu)$$

$$\text{(熱ピーク応力範囲)} \quad S_F = E_h \alpha_h | \Delta T_{2, range} / (1 - \nu_h)$$

[MAINルーチン]

- ③ 表面の応力成分 ( 「RANGE」 出力、TOTAL STRESS  $\sigma_r$  ,  $\sigma_z$  ,  $\sigma_{\theta}$  ,  $\tau_{rz}$  ) から②で計算した熱ピーク応力を差し引いてピーク応力範囲 (Stress Range) を算出する。

$$| \sigma_r | = | \sigma_{r, c} - \sigma_{r, h} |$$

$$| \sigma_z | = | (\sigma_{z, c} - \sigma_{z, c, th}) - (\sigma_{z, h} - \sigma_{z, h, th}) |$$

$$| \sigma_{\theta} | = | (\sigma_{\theta, c} - \sigma_{\theta, c, th}) - (\sigma_{\theta, h} - \sigma_{\theta, h, th}) |$$

$$| \tau_{rz} | = | \tau_{rz, c} - \tau_{rz, h} |$$

[MAINルーチン]

- ④③で計算した応力範囲より、主応力範囲に変換する。

$$\left. \begin{array}{l} | \sigma_1 | \\ | \sigma_2 | \end{array} \right\} = ( | \sigma_r | + | \sigma_z | ) / 2 \pm \sqrt{ \{ ( | \sigma_r | - | \sigma_z | ) / 2 \}^2 + | \tau_{rz} |^2 }$$

[サブルーチン SPRIN]

$$|\sigma_3| = |\sigma_\theta|$$

⑤主応力範囲

$|\sigma_1|$ 、 $|\sigma_2|$ 、 $|\sigma_3|$ 、 $|\sigma_\theta|$  より、

主応力範囲差を求め、その絶対値の最大値を $S_p$ （ピーク応力強さ範囲）とする。

$$S_p = \text{Max} \begin{cases} ||\sigma_1| - |\sigma_2|| \\ ||\sigma_2| - |\sigma_3|| \\ ||\sigma_3| - |\sigma_1|| \end{cases}$$

[サブルーチンSPRIN]

⑥弾性解析結果より、局所座標系での応力成分を等価線型処理し、コールド側、ホット側より1時点ずつ応力成分を選び応力範囲を求め主応力範囲を算出する。その主応力範囲差の絶対値の最大値を選び、コールド、ホットの各組み合わせの中で計算された最大のものを $S_n$ （1次+2次応力強さ範囲）とする。（「RANGE」出力）

⑦ $S_p$ と $S_n$ の比より応力集中係数 $K$ を求めノイバー則によりひずみ集中係数 $K_\epsilon$ を算出する。  
（オリジナル版； $K$  入力）

$$K = \text{MAX} (S_p / S_n, 1) \quad (\text{改良版} \quad ; K \text{ 算出})$$

[MAINルーチン]

⑧相当ひずみ範囲（ $\epsilon_1$ ）をもとめる。

$$\epsilon_1 = K_\epsilon \times \epsilon_n + K_T \times \epsilon_F \quad (\text{「RANGE」出力})$$

ひずみ速度： $10^{-6}$ m/m/sec

$\epsilon_n$  : 公称ひずみ範囲

$K_T (=1)$  : ピーク熱ひずみ弾性応力集中係数

$\epsilon_F$  : ピーク熱ひずみ範囲

熱過渡サイクル数 $n$ を、相当ひずみ範囲にたいするBDSテーブルの破損繰返し数 $N_d$ 値で除し、疲労損傷値 $D_f$ を定める。

$$D_f = n / N_d (\epsilon_1, \epsilon)$$

[サブルーチンSTRLI2]

- ⑩最高使用温度  $T_H$ 、高温使用時間  $t^*$  より 1 次 + 2 次応力にともなうクリープ損傷係数で、 $D_{cN}$  を  $D_{c1}$  と  $D_{c2}$  の和としてもとめる。 $D_{c1}$  は応力水準  $S_s$  で時間  $t^*$  間に生じるクリープ損傷値である。 $D_{c2}$  は、1 次 + 2 次応力強さ範囲 ( $S_n$ ) が  $3 S_m$  を超えた時、緩和過程に生じるクリープ損傷値である。

[サブルーチン DRCP]

- ⑪最高使用温度  $T_H$ 、高温使用時間  $t^*$ 、ひずみ範囲  $\epsilon_s$  より  $3 S_m/E$  と  $2 S_n/E$  の大きい方をひずみ範囲  $\epsilon_s$  が超えた場合 BDS の図 F. 1 よりクリープ損傷値  $D^{**}$  を読み取り、それを  $\epsilon_s$  を超えた回数倍したものをピーク応力に伴うクリープ損傷値  $D_c$  とする。

[MAINルーチン]

- ⑫クリープ損傷値  $D_c$  を  $D_{cN}$  と  $D_{cp}$  の和として定める。  
クリープ疲労損傷値  $D$  を  $D_f$  と  $D_c$  の和として定める。

$$D_{cN} = D_{c1} + D_{c2}$$

$$D_c = D_{cN} + D_{cp}$$

$$D = D_f + D_c$$

[MAINルーチン]

## [Key Word]

- $\varepsilon_r$  : ピーク熱ひずみ範囲

$$\varepsilon_r = \alpha_h / (1 - \nu_h) | \Delta T_2(0, t_c) - \Delta T_2(0, t_h) |$$

$\Delta T_2(0, t_c)$ : 時刻  $t$  における内表面のピーク熱

- $\varepsilon_n$  : 公称ひずみ範囲

$$\varepsilon_n = S_n(0, t_{ch}) / E_h$$

$S_n(0, t_{ch})$ : 1次 + 2次応力範囲 (Kg/mm<sup>2</sup>)

- $K_T$  : ピーク熱ひずみに関する弾性応力集中係数

$$= 1.0$$

- $K_\varepsilon$  : ひずみ集中係数

$$= \text{MAX} \begin{cases} (S^*/\bar{S})K^2 & ; S_n \leq 3\bar{S}_m \\ (S^*/\bar{S})K^2, KK_\varepsilon & ; S_n > 3\bar{S}_m \end{cases}$$

$$S^* = \begin{cases} E \cdot \varepsilon_n & ; \varepsilon_n \leq S_{r,h}/E \\ S(\varepsilon_n - S_{r,h}/E) + S_{r,h} & ; \varepsilon_n > S_{r,h}/E \end{cases}$$

$$\bar{S} = \begin{cases} KE \cdot \varepsilon_n & ; K\varepsilon_n \leq S_{r,h}/E \\ S(K\varepsilon_n - S_{r,h}/E) + S_{r,h} & ; K\varepsilon_n > S_{r,h}/E \end{cases}$$

$$K_{\sigma} : = 1 + (q-1)(1 - 3S_m/S_n)$$

$$3S_m : = 1.5S_{m,c} + S_{r,h}$$

q : 弾性追従パラメータ (「EBDS」では q=3)

S<sub>m,c</sub> : 低温側における設計応力強さ

S<sub>r,h</sub> : 高温側における設計緩和強さ

● ε<sub>t</sub> : 相当ひずみ範囲

$$\varepsilon_t = K_{\varepsilon} \times \varepsilon_n + K_T \times \varepsilon_r$$

● K : 応力集中係数

$$K = S_p(0, t_{ch}) / S_n(0, t_{ch})$$

S<sub>p</sub>(0, t<sub>ch</sub>) : ピーク応力強さ範囲

S<sub>n</sub>(0, t<sub>ch</sub>) : 1次+2次応力強さ範囲

## 「E B D S」改良版入力データマニュアル 5/15/89現在

$S_{\theta}$  値及び  $S_{\theta}$  決定 2 時点の応力テンソル、 $T_m$ 、 $\Delta T_2$  を入力し、 $S_p$  算出、 $K = S_p$  /  $S_{\theta}$  算出の機能を追加した。

オリジナルでは前処理で、 $S_p$ 、 $K$  を算出し  $S_{\theta}$ 、 $K$  を入力データとしている。

## [CARD-1] (A60)

TITLE : 計算タイトル

## [CARD-2] (5F10.0)

N : サイクル数 (サイクル)

TIMEH : 高温側使用時間 (時間)

TIMEC : 低温側使用時間 (時間)

TH : 高温温度 (°C)

TC : 低温温度 (°C)

## [CARD-3] (15, F5.1)

D2 : 緩和クリープ損傷モジュール  
=0 ; Not consider, =1 ; Consider

KT : 応力集中係数

## [CARD-4] (A10, E10.1)

LNAME : 評価ライン名

SN :  $S_{\theta}$  の値

\* (「RANGE」出力 "STRESS RANGE(MEM+BEN)" の Tresca の値)

## [CARD-5] (6E10.1)

XS1(I) : I=1  $\sigma_1$

I=2  $\sigma_2$

\* (「RANGE」出力 "STRESS RANGE(TOTAL)" at cold



$$\left. \begin{array}{l} I=3 \quad \sigma_{\theta} \\ I=4 \quad \tau_{rz} \end{array} \right\} \text{ shock)}$$
  
 TM1 :  $T_m$  \* (「RANGE」出力 “TEMP RANGE  $T_{\text{membrane}}$ ” at cold shock)
   
 TP1 :  $\Delta T_2$  \* (「RANGE」出力 “TEMP RANGE  $\Delta T_2$  peak” at cold shock)

[CARD-6] (6E10.1)

$$\left. \begin{array}{l} I=1 \quad \sigma_r \\ I=2 \quad \sigma_z \\ I=3 \quad \sigma_{\theta} \\ I=4 \quad \tau_{rz} \end{array} \right\} * (「RANGE」出力 “STRESS RANGE(TOTAL)” at hot shock)}$$
  
 TM2 :  $T_m$  \* (「RANGE」出力 “TEMP RANGE  $T_{\text{membrane}}$ ” at hot shock)
   
 TP2 :  $\Delta T_2$  \* (「RANGE」出力 “TEMP RANGE  $\Delta T_2$  peak” at hot shock)

\*\*\* [CARD-4]~[CARD-6]を評価ラインの数だけ繰り返す \*\*\*

\*\*\* 最終カードとして1カラム目から、ENDを入力する。\*\*\*

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet				Version	1.1
サブルーチン説明書			名称	SUBROUTINE ●MAIN FUNCTION			
機能	入力データの読み込み、プログラム全体のコントロール及び計算結果の出力を行う						
CALLs サブルーチン	YOUNG , POIS , ALPHA , SPRIN , DLTT2 , STRLI2 , SLEVEL , STRSTR , DRCP SMPDS2 , STRLEL						
使用 COMMON	BDS						
引数	引数名	I/O	モード	意味			単位
	なし						
記事	<p>以下の機能のコントロールを行う。</p> <p>(1) 入力データの読み込み</p> <p>(2) 入力データの出力</p> <p>(3) 損傷値計算ルーチンの呼出及びコントロール</p> <p>(4) 計算結果の出力</p>						

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet				Version	1.1
サブルーチン説明書			名称	● SUBROUTINE YOUNG FUNCTION			
機能	ヤング率を温度により、直線内挿または直線外挿の計算で求める。						
CALLs サブルーチン	FUNCTION XY			CALLed サブルーチン	MAIN , DLTT2		
使用 COMMON							
引数	引数名	I/O	モード	意味			
	TH	I	R*4	高温側又は低温側の温度			
	E	0	R*4	ヤング率			
記事	<p>以下の処理を行う。</p> <p>高温側温度、低温側温度のヤング率を直線内挿、直線外挿の計算で求める。 但し、直線内挿の温度範囲は、375℃～650℃までの25℃間隔で12点までとする TH &lt; 375℃の時は、375℃、400℃の2点で直線外挿する。 TH &gt; 650℃の時は、625℃、650℃の2点で直線外挿する。</p>						

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE POIS FUNCTION	
機能	ポアソン比を温度により、直線内挿または直線外挿の計算で求める。					
CALLs サブルーチン	FUNCTION XY			CALLed サブルーチン	MAIN, DLTT2	
使用 COMMON						
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	TH	1	R*4	高温側温度又は、低温側温度		
	PO	0	R*4	ポアソン比		
記事	<p>以下の処理を行う。</p> <p>高温側温度、低温側温度のポアソン比を直線内挿、直線外挿の計算で求める。          但し、直線内挿の温度範囲は、375℃～650℃までの25℃間隔で12点までとする          TH &lt; 375℃の時は、375℃、400℃の2点で直線外挿する。          TH &gt; 650℃の時は、625℃、650℃の2点で直線外挿する。</p>					

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE ALPHA FUNCTION	
機能	熱膨張係数を温度により、直線内挿または直線外挿の計算で求める。					
CALLs サブルーチン	FUNCTION XY			CALLed サブルーチン	MAIN	
使用 COMMON						
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	TH	1	R*4	高温側温度または低温側温度		
	ALP	0	R*4	熱膨張係数		
記事	<p>以下の処理を行う。</p> <p>高温側温度、低温側温度の熱膨張係数を直線内挿、直線外挿の計算で求める。          但し、直線内挿の温度範囲は、250℃～650℃までの50℃間隔で9点までとする          TH &lt; 250℃の時は、250℃、300℃の2点で直線外挿する。          TH &gt; 650℃の時は、600℃、650℃の2点で直線外挿する。</p>					

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE SPRIN FUNCTION	
機能	主応力範囲より、ピーク応力強さ範囲を計算する。					
CALLs サブルーチン				CALLED サブルーチン	MAIN	
使用 COMMON						
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	S1	I	R*4	表面の応力成分 ( $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_c, \tau_{rz}$ )		
	S2	I	R*4	熱ピーク応力		
	P	O	R*4	主応力範囲差の絶対値の最大値(ピーク応力強さ範囲)		
記事	<p>以下の処理を行う。</p> <p>(1) 表面の応力成分 (<math>\sigma_r, \sigma_z, \sigma_c, \tau_{rz}</math>) から熱ピーク応力を差し引いてピーク応力範囲を算出する。</p> <p>(2) ピーク応力範囲より以下の式で主応力範囲に変換する。</p> $\left. \begin{array}{l}  \sigma_1  \\  \sigma_2  \end{array} \right\} = \frac{( \sigma_r  +  \sigma_z )}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{ \sigma_r  -  \sigma_z }{2}\right)^2 +  \tau_{rz} }$ $ \sigma_3  =  \sigma_c $ <p>(3) 主応力範囲より主応力範囲差を求め最大値をピーク応力強さ範囲とする。</p>					

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE DLTT2 FUNCTION	
機能	公称ひずみ、ひずみ集中係数、ピーク熱ひずみ等を計算する。					
CALLs サブルーチン	YOUNG, STRLEL, STRS, STRSTR, STRLI2 POIS, FUNCTION XY, XY2			CALLED サブルーチン	MAIN	
使用 COMMON	BDS					
引数	引数名	I/O	モード	意味		
記事	<p>以下の処理を行う。</p> <p>(1) 公称ひずみ範囲を計算する。 <math>\epsilon_n = S_n(0, t_{ch}) / E_n</math>      <math>S_n(0, t_{ch})</math> : 1次+2次応力範囲</p> <p>(2) ひずみ集中係数を計算する。 <math>(S^*/S)K^2</math> ; <math>S_n \leq 3S_m</math>      <math>(S^*/S), KK_e</math> ; <math>S_n &gt; 3S_m</math></p> <p><math>K\epsilon = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{l} \text{(3) ピーク熱ひずみ範囲を計算する。} \\ \epsilon_p = \alpha_n / (1 - \nu_n)   \Delta T_2(0, t_c) - \Delta T_2(0, t_h)   \\ \Delta T_2(0, t_c) : \text{時刻 } t \text{ における内表面ピーク熱} \end{array} \right.</math></p>					

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE STRL12 FUNCTION	
機能	破損許容繰り返し数を計算する。					
CALLs サブルーチン	FUNCTION XY ,XY2			CALLed サブルーチン	MAIN	
使用 COMMON	T112					
引 数	引 数 名	I/O	モード	意 味		
	TH	I	R*4	高温側温度又は低温側温度		
	EPT	I	R*4	相当ひずみ範囲		
	ND	0	R*4	破損許容繰り返し数		
記 事	以下の処理を行う。					
	<p>(1) 温度により、最適疲労曲線の相当ひずみ範囲を直線内挿する。          但し、直線内挿の温度範囲は425℃～650℃までの25℃間隔で10点までである          TH &lt; 425℃の時は、425℃、450℃の2点で直線外挿する。          TH &gt; 650℃の時は、625℃、650℃の2点で直線外挿する。</p> <p>(2) 最適疲労曲線において、相当ひずみ範囲より破損許容繰り返し数を直線内挿する。</p>					

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE SLEVEL FUNCTION	
機能	応力水準 $S_r$ を計算する。					
CALLs サブルーチン	FUNCTION XY, XY2			CALLED サブルーチン	MAIN	
使用 COMMON						
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	TH	I	R*4	高温側温度または低温側温度		
	TIME	I	R*4	高温側時間×サイクル数		
	SG	I	R*4	クリープ緩和開始応力		
記事	<p>以下の処理を行う。            応力水準 <math>S_r</math> を直線内挿により計算する。            但し、内挿する温度範囲は425℃～650℃の25℃間隔で10点とする。            TH &lt; 425℃の時は、425℃、450℃で直線外挿する。            TH &gt; 650℃の時は、625℃、650℃で直線外挿する。</p>					

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE STRSTR FUNCTION	
機能	各温度の設計応力強さを直線内挿により計算する。					
CALLs サブルーチン	FUNCTION XY			CALLED サブルーチン	MAIN, DLTT2	
使用 COMMON						
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	TC	I	R*4	高温側温度又は低温側温度		
	SMC	0	R*4	設計応力強さ		
記事	<p>以下の処理を行う。            (1) 低温側における設計応力強さを計算する。            (2) 高温側における設計緩和強さを計算する。            但し温度は、-30.0, 75.0, 100.0, 150.0, 200.0℃以降25℃間隔で650℃までである。            TH &lt; -30.0℃の時は、-30.0℃, 75.0℃で直線外挿する。            TH &gt; 650℃の時は、625℃, 650℃で直線外挿する。</p>					

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE DRCP FUNCTION	
機能	1次+2次応力に伴うクリープ損傷を計算する。					
CALLs サブルーチン				CALLED サブルーチン	MAIN	
使用 COMMON						
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	TH	I	R*4	高温側温度		
	TIME	I	R*4	高温側保持時間		
	DC1	I	R*4	応力水準 $S_n$ のクリープ損傷値		
	DA	0	R*4	1次+2次応力に伴うクリープ損傷係数		
記事	以下の処理を行う。 一次+2次応力強さ範囲( $S_n$ )が $3 S_m$ を超えた時、緩和過程に生じるクリープ損傷係数を計算する。					

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE STRLEL FUNCTION	
機能	設計緩和応力を直線内挿で計算する。					
CALLs サブルーチン	FUNCTION XY ,XY2			CALLED サブルーチン	MAIN	
使用 COMMON						
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	TH	I	R*4	高温側温度		
	HTIME	I	R*4	高温側保持時間		
	SRH	0	R*4	設計緩和強さ		
記事	以下の処理を行う。設計緩和応力の計算を直線内挿で求める。但し温度は、425℃~650℃の25℃間隔の10点とする。 TH < 425℃の時は425℃と450℃で直線外挿して求める。 TH > 650℃の時は625℃と650℃で直線外挿して求める。					

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書		名称	SUBROUTINE ● FUNCTION XY			
機能	直線内挿計算を行う。					
CALLs サブルーチン	なし	CALLED サブルーチン	YOUNG, POIS, ALPHA, STRLEL, STRSTR, STRLI1, STRLI2, SLEVEL			
使用 COMMON	なし					
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	X2	I	R*4	直線内挿のための既知 x 座標 2 の値		
	X1	I	R*4	直線内挿のための既知 x 座標 1 の値		
	Y2	I	R*4	直線内挿のための既知 y 座標 2 の値		
	Y1	I	R*4	直線内挿のための既知 y 座標 1 の値		
	XX	I	R*4	内挿座標の x 座標値		
記事	<p>以下の処理を行う。2つの座標(x1, y1), (x2, y2)を直線で結びその2点間に有る座標(xx, yy)を直線内挿して求める。</p> $yy = \frac{(y2-y1) \times (xx-x1)}{(x2-x1)} + y1$					

PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書		名称	SUBROUTINE ● FUNCTION XY2			
機能	両対数座標軸系での内挿計算を行う。					
CALLs サブルーチン	なし	CALLED サブルーチン	STRLEL, STRLI1, STRLI2, SLEVEL			
使用 COMMON	なし					
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	X2	I	R*4	対数座標内挿のための既知 x 座標 2 の値		
	X1	I	R*4	対数座標内挿のための既知 x 座標 1 の値		
	Y2	I	R*4	対数座標内挿のための既知 y 座標 2 の値		
	Y1	I	R*4	対数座標内挿のための既知 y 座標 1 の値		
	XX	I	R*4	対数座標内挿の x 座標値		
記事	<p>以下の処理を行う。両対数座標軸の2つの座標(x1, y1), (x2, y2)を直線で結びその2点間に有る座標(xx, yy)を内挿して求める。</p> $\log yy = \frac{(\log y2 - \log y1) \times (\log xx - \log x1)}{(\log x2 - \log x1)} + \log y1$					



PROGRAM NAME	EBDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE SMPDS2 FUNCTION	
機能	ピーク応力の緩和クリープ損傷の計算を行う。					
CALLs サブルーチン	DYNASS			CALLED サブルーチン	MAIN	
使用 COMMON						
引 数	引 数 名	I/O	モード	意 味		
	MAT	I	R*4			
	TH	I	R*4			
	E	I	R*4			
	EPT	I	R*4			
	TIME	I	R*4			
	SG	I	R*4			
	DAA	I	R*4			
	NEW	I	R*4			
	SM3BB	I	R*4			
	SRH	I	R*4			
	AKO	I	R*4			
記 事	以下の処理を行う。 ピーク応力の緩和クリープ損傷の計算を行う。					

## Appendix B. 「TTSDS」(弾性解析)コードによるクリープ疲労損傷評価手順

TTSDSはBDSに含まれる安全裕度を取り除くとともに、評価ラインを無くし、評価点のひずみを用いて損傷値の算出が出来るように作成されたプログラムである。

①弾性解析によるMises型相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{eq}$ を算出する。

$$\Delta \varepsilon_{eq} = \sqrt{2/3} \{ (\Delta \varepsilon_x - \Delta \varepsilon_z)^2 + (\Delta \varepsilon_z - \Delta \varepsilon_y)^2 + (\Delta \varepsilon_y - \Delta \varepsilon_x)^2 + 3/2 \Delta \tau_{xy}^2 \}^{1/2}$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_x = \varepsilon_{xi} - \varepsilon_{xj}$

$\varepsilon_{xi}$  : ステップ i の  $\varepsilon_x$

$\varepsilon_{xj}$  : ステップ j の  $\varepsilon_x$

全ステップの組み合わせの中で最大値を $\Delta \varepsilon_{eq}$ とする。

[「RANGE」出力結果 - STRAIN(TOTAL)RANGE]

②公称ひずみ範囲 $\varepsilon_n$ を算出する。

$$\varepsilon_n = 1.5 / (1 + \nu) \Delta \varepsilon_{eq}$$

$\nu$  : 2時点のポアソン比の平均値

(\* 「EBDS」では $\varepsilon_n = S_n/E$ )

非弾性計算では $\varepsilon_n = \Delta \varepsilon_{eq}$

③相当ひずみ範囲 $\varepsilon_e$ を算出する。

$$\varepsilon_e = K_\varepsilon \cdot \varepsilon_n$$

$K_\varepsilon$  : = 1.2 (入力)

(非弾性解析による $\Delta \varepsilon_{eq}$ を使用する時は、 $K_\varepsilon = 1.0$ )

(\* 「EBDS」では $\varepsilon_e = K_\varepsilon \cdot \varepsilon_n + K_T \cdot \varepsilon_T$ )

[サブルーチンTTSDS]

④ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  を算出する。

$$(10PT(1)=1) : \epsilon = 2 \epsilon_i / \tau \quad \tau : \text{周期}$$

$$(10PT(1)=2) : \epsilon = 10^{-6} \text{ (m/m/sec)}$$

[サブルーチン T T S D S]

⑤ B D S 最適疲労破損式より  $\epsilon_i, \epsilon$  の破損繰返し数  $N_d$  を算出する。

(10PT(2)=1) の時

$$(\log_{10} Nd)^{-1/2} = A_0 + A_1 \cdot \log \Delta \epsilon_i + A_2 (\log \Delta \epsilon_i)^2 + A_3 (\log \Delta \epsilon_i)^4$$

$$A_0 = 1.621827 - 0.4567850 \times 10^{-7} \times T^2 \times R$$

$$A_1 = 1.131346 + 0.8665061 \times 10^{-8} \times T^2$$

$$A_2 = 0.3439663$$

$$A_3 = -0.1374387 \times 10^{-1} + 0.4910723 \times 10^{-4} \times R$$

$$R = \log \dot{\epsilon}$$

$N_d$ : 許容繰返し数

但し、

$$\epsilon_i < 0.0015 \quad \text{の時} \quad \epsilon_i = 0.0015$$

[サブルーチン D I R C K]

(10PT(2)=2) の時

$$(\log_{10} \alpha Nd)^{-1/2} = A_0 + A_1 \cdot \log \Delta \epsilon_i + A_2 (\log \Delta \epsilon_i)^2 + A_3 (\log \Delta \epsilon_i)^4$$

$$A_0 = 1.20551064 - 0.00054660 \times R \times (T/100)^2$$

$$A_1 = 0.66002143$$

$$A_2 = 0.18040042$$

$$A_3 = -0.00814329 + 0.00025308 \times R$$

$$+ 0.00021832 \times (T/100)$$

$$R = \log \dot{\epsilon}$$

Nd: 許容繰返し数

$$\alpha = 1.5$$

但し、

$$\epsilon_i < 0.0015 \quad \text{の時} \quad \epsilon_i = 0.0015$$

[サブルーチンDIRKO]

ここで、

(IOPT(4)=1:No Margine) は上記式で計算する。

(IOPT(4)=1:With Margine) は以下の方法とする。

これは、サイクル数で4倍、ひずみ範囲で1.4倍のマージンをとることを意味する

- ・初期の $\Delta \epsilon_i$ で算出した $N_{d1}$
- ・次に $1.4 \times \Delta \epsilon_i$ で算出した $N_{d2}$
- ・ $N_{d1}/4$ と $N_{d2}$ で小さい方の値を $N_d$ とする。

[サブルーチンTTSDS]

⑥疲労損傷 $D_f$ を算出する。

$$D_f = N / N_d$$

N: サイクル数

⑦クリープ損傷評価

(IOPT(3)=1): B D S弾塑性stress-strainカーブを用いて、 $\epsilon_i$ をクリープ緩和開始応力 $\sigma(t=0)$ に換算する。

(a)  $\sigma \leq \sigma_p$  の時

$$\epsilon_e = \sigma / E$$

$$\epsilon_p = 0$$

$$\epsilon_e + \epsilon_p = \epsilon_i / 2$$

(b)  $\sigma > \sigma_p$  の時

$$\epsilon_e = \sigma / E$$

$$\epsilon_p = \{(\sigma - \sigma_p) / K\}^{1/m}$$

$$\epsilon_0 + \epsilon_p = \epsilon_t / 2$$

換算  $\sigma(t=0) = \sigma + \sigma_1$  (1次応力)

(詳細は B D S 設計指針 P237)

[サブルーチン E P S S]

(10PT(3)=2) : B D S 動的応力ひずみ関係式を用いて、 $\epsilon_t$  をクリープ緩和開始応力  $\sigma(t=0)$  に換算する。

(a)  $\Delta \sigma / 2 > \sigma_p$  の時

$$\log_{10}(\Delta \sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \cdot \log(\Delta \epsilon_t - \Delta \sigma / E)$$

(b)  $\Delta \sigma / 2 \leq \sigma_p$  の時

$$\Delta \sigma = E \cdot \Delta \epsilon_t$$

T ; 温度 (°C)      425 ≤ T ≤ 650

$\Delta \sigma$  ; 応力範囲 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\Delta \epsilon_t$  ; 全ひずみ範囲 (mm/mm)

E ; 縦弾性係数 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_p$  ; 比例限 (kg/mm<sup>2</sup>)

換算  $\sigma(t=0) = \Delta \sigma / 2 + \sigma_1$  (1次応力)

(詳細は B D S 設計指針 P256)

[サブルーチン D E P S]

⑧ B D S クリープひずみ式単軸リラクセーション、ひずみ硬化則を用いて、クリープ緩和解析を行う。

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

T ; 温度 (°C)      425 ≤ T ≤ 650

$\sigma$  ; 応力 (kg/mm<sup>2</sup>)      0.1 ≤  $\sigma$

$t_R$  ; 破断時間 (hr)

$\dot{\epsilon}_m$  ; 定常クリープ速度 (mm/mm/hr)

t ; 時間 (hr)

(詳細は B D S 設計指針 P243)

[サブルーチン T T S D S]

- ⑨ BDSクリープ破断式より各時間ステップの応力 $\sigma(t)$ に対するクリープ破断時間 $t_R$ を求める。

(クリープ破断式)

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

$T$  ; 温度 (°C) (425 ≤ T ≤ 825)  $A_0 = 26248.54$

$t_R$  ; クリープ破断時間 (hr)  $A_1 = -6104.579$

$\sigma$  ; クリープ破断応力 (Kg/mm<sup>2</sup>)  $A_2 = -425.0012$

$\alpha_R$  ; 時間係数  $C = 17.54301$

平均値=1

設計最小値=10

[サブルーチンCREPD]

- ⑩ クリープ損傷計算

$$D_c = N \int \frac{dt}{t_R(t)}$$

$t_h$  : 1サイクル当たりの高温保持時間

$N$  : サイクル数

[サブルーチンCRDA]

- ⑪ クリープ疲労損傷計算

$$D = D_r + D_c$$

[サブルーチンTTSDS]

「TTSDS」改良版入力データマニュアル 5/15/89

[CARD-1] (A60)

TITLE : 入力データタイトル

[CARD-2] (415, 5X, 15, 2F10.0)

IOP(1) 1=1 : ひずみ速度オプション

=1 ;  $\dot{\epsilon} = \epsilon_c / \tau$

=2 ;  $\dot{\epsilon} = 10^{-6}$

=2 : Dierks方程式オプション

=1 ; Dierks equation (NEW)

=2 ; Dierks equation (OLD)

\*\*\* 最適疲労破損式の定数が異なる\*\*\* (マニュアル参照)

=3 : 初期応力

=1 ; BDS弾塑性 stress-strainカーブ

=2 ; BDS動的 stress-strain 関係式

=3 : 疲労損傷計算オプション

=1 ; No margine

=2 ; with margine

\*\*\* 最適疲労破損式における $N_f$ の計算方法が異なる \*\*\*  
(マニュアル参照)

NF : サイクル数

TMAX : 高温側温度 (°C)

TMIN : 低温側温度 (°C)

[CARD-3] (5F5.1)

TMH : 高温側時間 (時間)

TMC : 低温側時間 (時間)

Q : Elastic follow up factor

ALFR : Creep parameter (average=1.0)

ALFC : Cyclic hardening effect  
=1/3 ; TTS. =1.0 ; TTSDS

[CARD-4] (A5, F5.1, F10.0, F5.1)

LNAME : 評価ライン名  
SIGI : 一次応力 (長期一次応力)  
DEP :  $\Delta \epsilon_{eq}$  (Mises 型相当ひずみ範囲)  
\*\*\* 「RANGE」出力 "STRAIN(TOTAL) RANGE" \*\*\*

AK : ひずみ集中係数 ( $K \epsilon$ )  
=1.2

(非弾性解析による  $\Delta \epsilon_{eq}$  使用の時は、 $K \epsilon = 1.0$ を使用)



PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	SUBROUTINE ●MAIN	FUNCTION
機能	入力データの読み込み及びプログラム全体のコントロール					
CALLs サブルルーチン	TTSDS					
使用 COMMON						
引 数	引 数 名	I/O	モード	意 味		単 位
	なし					
記 事	以下の機能のコントロールを行う。(1) 入力データの読み込み。(2) 損傷値計算コントロールルーチン(TTSDS)の呼出。(3) 入力データの出力					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE TTSDS	FUNCTION
機能	損傷値計算の全体のコントロール					
CALLs サブルルーチン	POIS, DRESTR, DIRCK, DIRKO, CREPD, EPSS, DEPS, CRDA			CALL ed サブルルーチン	MAIN	
使用 COMMON	ブランクCOMMON					
引 数	引 数 名	I/O	モード	意 味		
	SIG1	I	R*4	長期一次応力		
	DEP	I	R*4	Mises 型相当ひずみ範囲 ( $\Delta \epsilon_{eq}$ )		
	AK	I	R*4	ひずみ集中係数 ( $K\epsilon$ )		
	TIME	I	R*4	熱過渡の合計時間 (Hot shock + Cold shock)		
	EPN	0	R*4	公称ひずみ範囲 ( $\epsilon_n$ )		
	EPT	0	R*4	相当ひずみ範囲 ( $\epsilon_r$ )		
	EPS	0	R*4	ひずみ速度 ( $\dot{\epsilon}$ )		
	D	0	R*4	損傷値 (DF+DC)		
	DF	0	R*4	疲労損傷値		
	DC	0	R*4	クリープ損傷値		
	DC1	0	R*4	高温保持時間に生じるクリープ損傷値		
	DC2	0	R*4	緩和過程に生じるクリープ損傷値		
記 事	以下の処理を行う。(1) 公称ひずみ範囲、相当ひずみ範囲、ひずみ速度を算出する。(2) 疲労損傷値の計算のコントロールを行う。(3) クリープ損傷値の計算のコントロールを行う。(4) クリープ疲労損傷値の計算を行う。					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE POIS FUNCTION	
機能	高温側温度、低温側温度のポアソン比を内挿計算する。					
CALLs サブルーチン	FUNCTION XY			CALLED サブルーチン	TTSDS	
使用 COMMON	ブランクCOMMON					
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	TH	I	R*4	高温側温度又は、低温側温度		
	PO	0	R*4	ポアソン比		
記事	以下の処理を行う。 (1) 高温側温度、低温側温度のポアソン比を直線内挿する。					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE DRESTR FUNCTION	
機能	緩和応力を高温側温度とその保持時間で内挿する。					
CALLs サブルーチン	FUNCTION XY			CALLED サブルーチン	TTSDS	
使用 COMMON	ブランクCOMMON					
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	TH	I	R*4	高温側温度		
	HTIME	I	R*4	全サイクルの高温保持時間		
	SRH	I	R*4	緩和応力		
記事	以下の処理を行う。 (1) 高温側温度と高温保持時間により、緩和応力を内挿する。					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書		名称	● SUBROUTINE DIRCK		FUNCTION	
機能	最適疲労破損式 (Dirck new) より破損許容繰り返し数を算出する。					
CALLs サブルーチン				CALLED サブルーチン	TTSDS	
使用 COMMON	ブランクCOMMON					
引 数	引 数 名	I/O	ε-f	意 味		
	TD	I	R*4	高温側温度		
	EPT	I	R*4	相当ひずみ範囲 (ε <sub>r</sub> )		
	EPS	I	R*4	ひずみ速度 (ε)		
	AN	0	R*4	破損許容繰り返し数 (N <sub>d</sub> )		
記 事	以下の処理を行う。 以下の式により破損許容繰り返し数 Nd を計算する。 $(\log_{10} Nd)^{-1/2} = A0 + A1 \cdot \log \Delta \epsilon_r + A2 (\log \Delta \epsilon_r)^2 + A3 (\log \Delta \epsilon_r)^4$ $A0 = 1.621827 - 0.4567850 \times 10^{-7} \times T^2 \times R$ ; $A1 = 1.131346 + 0.8665061 \times 10^{-8} \times T^2$ $A2 = 0.3439663$ ; $A3 = -0.1374387 \times 10^{-1} + 0.4910723 \times 10^{-4} \times R$ $R = \log \epsilon$ ; Nd : 許容繰り返し数 但し、ε <sub>r</sub> < 0.0015 の時 ε <sub>r</sub> = 0.0015					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書		名称	● SUBROUTINE DIRKO		FUNCTION	
機能	最適疲労破損式 (Dirck old) より破損許容繰り返し数を算出する。					
CALLs サブルーチン				CALLED サブルーチン	TTSDS	
使用 COMMON	ブランクCOMMON					
引 数	引 数 名	I/O	ε-f	意 味		
	TD	I	R*4	高温側温度		
	EPT	I	R*4	相当ひずみ範囲 (ε <sub>r</sub> )		
	EPS	I	R*4	ひずみ速度 (ε)		
	AN	0	R*4	破損許容繰り返し数 (N <sub>d</sub> )		
記 事	以下の処理を行う。以下の式により破損許容繰り返し数 Nd を計算する。 $(\log_{10} \alpha Nd)^{-1/2} = A0 + A1 \cdot \log \Delta \epsilon_r + A2 (\log \Delta \epsilon_r)^2 + A3 (\log \Delta \epsilon_r)^4$ $A0 = 1.20551064 - 0.00054660 \times R \times (T/100)^2$ , $A1 = 0.66002143$ $A2 = 0.18040042$ , $A3 = -0.00814329 + 0.00025308 \times R + 0.00021832 \times (T/100)$ $R = \log \epsilon$ , Nd : 許容繰り返し数 $\alpha = 1.5$ , 但し、ε <sub>r</sub> < 0.0015 の時 ε <sub>r</sub> = 0.0015					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE CREPD FUNCTION	
機能	BDS クリープ破断式より各時間ステップの応力に対するクリープ破断時間 $t_R$ を求める。					
CALLs サブルーチン				CALLED サブルーチン	TTSDS	
使用 COMMON	ブランクCOMMON					
引数	引数名	I/O	ε-F	意味		
	TC	I	R*4	高温側温度		
	SI	I	R*4	クリープ破断応力		
	TR	I	R*4	クリープ破断時間		
記事	以下の処理を行う。 以下の式によりクリープ破断時間 $t_R$ を求める。 $(T+273.15)(\log_{10}(\alpha_R \cdot t_R) + C) = A_0 + A_1 \cdot \log \sigma + A_2(\log \sigma)^2$ $A_0 = 26248.54 \quad A_1 = -6104.579 \quad A_2 = -425.0012 \quad C = 17.54301$ $\alpha_R$ : 時間係数 $= 1.0$					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE EPSS FUNCTION	
機能	BDS 弾塑性応力ひずみ曲線を用いて相当ひずみ $\epsilon_1$ をクリープ緩和開始応力 $\sigma(t=0)$ に換算する。					
CALLs サブルーチン				CALLED サブルーチン	TTSDS	
使用 COMMON	ブランクCOMMON					
引数	引数名	I/O	ε-F	意味		
	T	I	R*4	高温側温度		
	EPI	I	R*4	相当ひずみ		
	SI	I	R*4	クリープ緩和開始応力		
記事	以下の処理を行う。 BDS 弾塑性応力ひずみ曲線を用いて、相当ひずみ $\epsilon_1$ をクリープ緩和開始応力 $\sigma(t=0)$ に換算する。 (1) $\sigma \leq \sigma_p$ の時 $\epsilon_e = \sigma/E$ $\epsilon_p = 0$ $\epsilon_e + \epsilon_p = \epsilon_1/2$ $\epsilon_e$ : 相当弾性ひずみ, $\epsilon_p$ : 相当塑性ひずみ, E : 縦弾性係数, $\sigma_p$ : 比例限 (2) $\sigma > \sigma_p$ の時 $\epsilon_e = \sigma_p/E$ $\epsilon_p = \{(\sigma - \sigma_p)/K\}^{1/m}$ $\epsilon_e + \epsilon_p = \epsilon_1/2$ (3) 緩和開始応力換算 $\sigma(t=0) = \sigma + \sigma_1(1 \text{ 次応力})$					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE DEPS FUNCTION	
機能	BDS 動的応力ひずみ曲線を用いて相当ひずみ $\epsilon_c$ をクリープ緩和開始応力 $\sigma(t=0)$ に換算する。					
CALLs サブルーチン				CALLED サブルーチン	TTSDS	
使用 COMMON	ブランクCOMMON					
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	T	I	R*4	高温側温度		
	EPT	I	R*4	相当ひずみ		
	SIG	I	R*4	クリープ緩和開始応力		
記事	<p>以下の処理を行う。BDS 動的応力ひずみ曲線を用いて、相当ひずみ <math>\epsilon_c</math> をクリープ緩和開始応力 <math>\sigma(t=0)</math> に換算する。</p> <p>(1) <math>\Delta\sigma/2 &gt; \sigma_p</math> の時 <math>\log_{10}(\Delta\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \cdot \log(\Delta\epsilon_c - \Delta\sigma/E)</math></p> <p>(2) <math>\Delta\sigma/2 \leq \sigma_p</math> の時 <math>\Delta\sigma = E \cdot \Delta\epsilon_c</math></p> <p>(3) 緩和開始応力換算 <math>\sigma(t=0) = \sigma + \sigma_1</math> (1次応力)</p> <p>T : 温度 , <math>\Delta\sigma</math> : 応力範囲 , <math>\Delta\epsilon_c</math> : 全ひずみ範囲  E : 縦弾性係数 , <math>\sigma_p</math> : 比例限</p>					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE CRDA FUNCTION	
機能	緩和クリープ損傷値を計算する。					
CALLs サブルーチン	XCREEP			CALLED サブルーチン	TTSDS	
使用 COMMON	ブランクCOMMON					
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	SIGB	I	R*4	1次応力+緩和開始応力		
	TIMH	I	R*4	高温保持時間		
	T	I	R*4	高温側温度		
	SR	I	R*4	緩和過程の応力		
	DC	I	R*4	緩和過程のクリープ損傷値		
記事	<p>以下の処理を行う。</p> $D_c = N \int \dot{\epsilon} dt / t_n (l)$ <p>th : 1サイクル当たりの高温保持時間 (hour) , <math>\sigma_p</math> : 比例限  N : サイクル数 <math>t_n</math> : クリープ等価時間</p>					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書		名称	SUBROUTINE ● FUNCTION XY			
機能	直線内挿計算を行う。					
CALLs サブルーチン	なし	CALLED サブルーチン	POIS, DRESTR			
使用 COMMON	なし					
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	X2	I	R*4	直線内挿のための既知 x 座標 2 の値		
	X1	I	R*4	直線内挿のための既知 x 座標 1 の値		
	Y2	I	R*4	直線内挿のための既知 y 座標 2 の値		
	Y1	I	R*4	直線内挿のための既知 y 座標 1 の値		
	XX	I	R*4	内挿座標の x 座標値		
記事	<p>以下の処理を行う。2つの座標(x1, y1), (x2, y2)を直線で結びその2点間に有る座標(xx, yy)を直線内挿して求める。</p> $yy = \frac{(y2-y1) \times (xx-x1)}{(x2-x1)} + y1$					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書		名称	SUBROUTINE ● FUNCTION XY1			
機能	片対数座標軸系での内挿計算を行う。					
CALLs サブルーチン	なし	CALLED サブルーチン	DRESTR			
使用 COMMON	なし					
引数	引数名	I/O	モード	意味		
	X2	I	R*4	対数座標内挿のための既知 x 座標 2 の値		
	X1	I	R*4	対数座標内挿のための既知 x 座標 1 の値		
	Y2	I	R*4	線形座標内挿のための既知 y 座標 2 の値		
	Y1	I	R*4	線形座標内挿のための既知 y 座標 1 の値		
	XX	I	R*4	対数座標内挿の x 座標値		
記事	<p>以下の処理を行う。片対数座標軸の2つの座標(x1, y1), (x2, y2)を直線で結びその2点間に有る座標(xx, yy)を内挿して求める。</p> $yy = \frac{(y2 - y1) \times (\log xx - \log x1)}{(\log x2 - \log x1)} + y1$					

PROGRAM NAME	TTSDSX1	Program Description Sheet			Version	1.1
サブルーチン説明書		名称	● SUBROUTINE XCREEP		FUNCTION	
機能	緩和クリープ計算中の累積クリープひずみとクリープ等価時間、クリープひずみ速度を計算する。					
CALLs サブルーチン				CALLED サブルーチン	TTSDS	
使用 COMMON	ブランクCOMMON					
引 数	引 数 名	I/O	ε-F	意 味		
	TIME	I	R*4	時刻幅		
	T	I	R*4	高温側温度		
	SIGB	I	R*4	現時点の応力		
	EPSCB	0	R*4	現時点までの累積クリープひずみ		
	DTIME	I	R*4	現時点の時刻		
	DEPSCB	0	R*4	現時点のクリープひずみ速度		
	TRR	0	R*4	現時点の応力、クリープひずみに対応する等価時間		
記 事	<p>以下の処理を行う。(1) BDS クリープ破断式より各時間ステップの応力<math>\sigma(T)</math>に対するクリープ破断時間<math>t_R</math>を求める。</p> $(T+273.15)(\log_{10}(\alpha_R \cdot t_R)+C)=A_0+A_1 \cdot \log \sigma+A_2(\log \sigma)^2$ <p>T : 温度 (°C) (425 ≤ T ≤ 650)  <math>t_R</math> : クリープ破断時間, <math>\sigma</math> : クリープ破断応力, <math>\alpha_R</math> : 時間係数  A0=26248.54 A1=-6104.579 A2=-425.0012 C=17.54301</p> <p>(2) 現時点までの累積クリープひずみと現時点の応力を与えてクリープ等価時間とクリープひずみ速度を求める。</p>					

## Appendix C. 「NEBDS」(非弾性解析)コードによるクリープ疲労損傷評価手順

熱伝導解析及び非弾性解析で得られた結果より以下の手順で非弾性クリープ疲労損傷評価を行う。

- ①クリープ破断式より、各時間ステップにおける相当応力(非弾性解析)に対するクリープ破断時間( $t_R$ )を求め、損傷値( $dt/t_R$ )を高温保持時間( $t_H$ )まで積分する。

(クリープ破断式)

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

$$T ; \text{ 温度 } (^{\circ}\text{C}) \quad (425 \leq T \leq 825) \quad A_0 = 26248.54$$

$$t_R ; \text{ クリープ破断時間 (hr)} \quad A_1 = -6104.579$$

$$\sigma ; \text{ クリープ破断応力 (Kg/mm}^2\text{)} \quad A_2 = -425.0012$$

$$\alpha_R ; \text{ 時間係数} \quad C = 17.54301$$

平均値=1

設計最小値=10

更にサイクル数Nをかけてクリープ損傷値 $D_c$ を求める。

$$D_c = N \int \dot{\epsilon}^h dt / t_R$$

[サブルーチンBDS2]

- ②弾塑性クリープひずみ成分を求める。

$$\epsilon_{r1} = \epsilon_{r1}^e + \epsilon_{r1}^p + \epsilon_{r1}^c$$

$$\epsilon_{z1} = \epsilon_{z1}^e + \epsilon_{z1}^p + \epsilon_{z1}^c$$

$$\epsilon_{\theta 1} = \epsilon_{\theta 1}^e + \epsilon_{\theta 1}^p + \epsilon_{\theta 1}^c$$

$$\tau_{rz1} = \tau_{rz1}^e + \tau_{rz1}^p + \tau_{rz1}^c$$

(時点; i)

更に、時点1、2に対するひずみ範囲を求める。

$$\Delta \epsilon_r = \epsilon_{r2} - \epsilon_{r1}$$

$$\Delta \epsilon_z = \epsilon_{z2} - \epsilon_{z1}$$

$$\Delta \epsilon_{\theta} = \epsilon_{\theta 2} - \epsilon_{\theta 1}$$

$$\Delta \tau_{rz} = \tau_{rz2} - \tau_{rz1}$$



③時点 1、2 に対する相当ひずみ範囲を求める。

$$\Delta \varepsilon_{i'} = \sqrt[2]{\frac{1}{3} \{ (\Delta \varepsilon_r - \Delta \varepsilon_z)^2 + (\Delta \varepsilon_z - \Delta \varepsilon_\theta)^2 + (\Delta \varepsilon_\theta - \Delta \varepsilon_r)^2 + 3/2 \Delta \tau_{rz}^2 \}}^{1/2}$$

④相当ひずみ範囲を求める。

$$\Delta \varepsilon_i = \text{MAX} (\Delta \varepsilon_{i'})$$

[MAINルーチン]

⑤相当ひずみ範囲( $\Delta \varepsilon_i$ )、ひずみ速度( $\dot{\varepsilon}$ )より以下の疲労破損式より許容繰り返し数を求める。

$$(\log_{10} Nd)^{-1/2} = A_0 + A_1 \cdot \log \Delta \varepsilon_i + A_2 (\log \Delta \varepsilon_i)^2 + A_3 (\log \Delta \varepsilon_i)^4$$

T ; 温度 (°C)

$\dot{\varepsilon}$  ; ひずみ速度 (m/m/sec)

$\Delta \varepsilon$  ; 全ひずみ範囲 (m/m)

$$A_0 = 1.621827 - 0.4567850 \times 10^{-7} \times T^2 \times R$$

$$A_1 = 1.131346 + 0.8665061 \times 10^{-8} \times T^2$$

$$A_2 = 0.3439663$$

$$A_3 = -0.1374387 \times 10^{-1} + 0.4910723 \times 10^{-4} \times R$$

$$R = \log \dot{\varepsilon}$$

Nd: 許容繰り返し数

[サブルーチン DAM]

⑥疲労損傷値  $D_f$  を以下の式より求める。

$$D_f = N / Nd$$

N : サイクル中、相当ひずみ範囲が  $\Delta \varepsilon_i$  であるひずみサイクルの繰り返し数

⑦クリープ疲労損傷値Dを以下の式より求める。

$$D = D_i + D_c$$

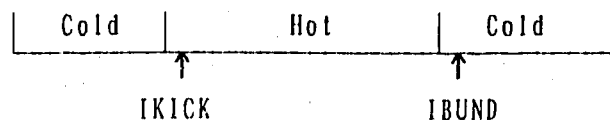
[サブルーチンBDSS]

## [CARD-1] (7F100, 15)

CREEPS : クリープ開始時刻 (sec)  
 CREEPS : クリープ終了時刻 (sec)  
 TH : サイクル中の最高金属温度 (°C)  
 AN : サイクル数  
 TINE1 : (高温使用時間) × (サイクル数)  
 AR : クリープ破断式の  $\alpha_n$  (安全裕度ファクター)  
 EPV : ひずみ速度  
     ● 熱過度解析推奨値 =  $10^{-6}$   
     ● < 0 (マイナス) で入力した場合  
        = (全ひずみ範囲 / 時間) をプログラムでセットしている  
 IDEB : デバッグフラグ (= 0)

## [CARD-2] (315)

IKICK : 最初の評価対象ステップ  
 IBUND : Hot shock と Cold shock の境目のステップ (Cold shock 側)  
 ICARD : 評価ラインのカード (CARD-3) の枚数



## [CARD-3] (I10, I5, A5)

IELME : 評価対象要素番号  
 IPNUM : 積分点番号  
 LNE : 評価ライン名

\*\*\* [CARD-3]をICARD 回繰返す \*\*\*

PROGRAM NAME	NEBDS	Program Description Sheet				Version	1.0
サブルーチン説明書			名称	SUBROUTINE ● MAIN FUNCTION			
機能	入力データの読み込み、温度及び応力成分のポストファイルからの読み込み及びプログラム全体のコントロールを行う。						
CALLs サブルーチン	BDS2 , BDSS						
使用 COMMON	BDS59 , BDSS2 , BDSS3						
引数	引数名	I/O	モード	意味			単位
	なし						
記事	以下の機能のコントロールを行う。 (1) 入力データの読み込みを行う。 (2) 「FINAS」ポストテープより温度、応力成分を読み込む。 (3) 損傷値計算コントロールルーチン(BDS2 , BDSS)の呼出を行う。 (4) 入力データの出力を行う。						

PROGRAM NAME	NEBDS	Program Description Sheet				Version	1.0
サブルーチン説明書			名称	● SUBROUTINE BDS2 FUNCTION			
機能	クリープ損傷値の計算を行う。						
CALLs サブルーチン	STRBRK	CAL Led サブルーチン			MAIN		
使用 COMMON	BDS59						
引数	引数名	I/O	モード	意味			
	AN	I	R*4	サイクル数			
記事	以下の処理を行う。 (1) クリープ破断式より、各時間ステップにおける相当応力（非弾性解析）に対するクリープ破断時間（ $t_r$ ）を求め、高温保持時間（ $t_h$ ）まで積分する。 （クリープ破断式） $(T+273.15)(\log_{10}(\alpha_n \cdot t_r)+C)=A_0+A_1 \cdot \log \sigma +A_2(\log \sigma)^2$ $T : \text{温度 } (^{\circ}\text{C}) \quad (425^{\circ}\text{C} \leq T \leq 650^{\circ}\text{C}) \quad A_0=26248.54$ $t_r : \text{クリープ破断時間 (hr)} \quad A_1=-6104.579$ $\sigma : \text{クリープ破断応力 (Kg/mm}^2\text{)} \quad A_2=-425.0012$ $\alpha_n : \text{時間係数} \quad C =17.54301$ 平均値= 1 設計最小値=10 (2) クリープ損傷値を計算する。 $D_c = N \int \dot{\epsilon} dt/t_r$						



PROGRAM NAME	NEBDS	Program Description Sheet			Version	1.0
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE DAM FUNCTION	
機能	ひずみ速度を計算し、疲労破損式より許容繰返し数を求める。					
CALLS サブルーチン					CALL ed サブルーチン	BDSS
使用 COMMON	BDSS3					
引 数	引 数 名	I/O	モード	意 味		
	TH	I	R*4	高温側温度 (°C)		
	EPT	I	R*4	全ひずみ範囲		
	TIME	I	R*4	高温保持時間		
	AN	I	R*4	サイクル数		
	AND	0	R*4	許容繰返し数		
記 事	<p>以下の処理を行う。次式により破損許容繰返し数 <math>N_d</math> を計算する。</p> $(\log_{10} N_d)^{1/2} = A0 + A1 \cdot \log \Delta \epsilon_r + A2 (\log \Delta \epsilon_r)^2 + A3 (\log \Delta \epsilon_r)^4$ $A0 = 1.621827 - 0.4567850 \times 10^{-7} \times T^2 \times R, \quad A1 = 1.131346 + 0.8665061 \times 10^{-8} \times T^2$ $A2 = 0.3439663, \quad A3 = -0.1374387 \times 10^{-1} + 0.4910723 \times 10^{-4} \times R$ $R = \log \epsilon, \quad N_d : \text{許容繰返し数}$					

PROGRAM NAME	NEBDS	Program Description Sheet			Version	1.0
サブルーチン説明書				名称	● SUBROUTINE SLEVEL FUNCTION	
機能	高温側温度により、応力レベルを直線内挿または直線外挿により計算する。					
CALLS サブルーチン	FUNCTION XY, XY2				CALL ed サブルーチン	BDSS
使用 COMMON						
引 数	引 数 名	I/O	モード	意 味		
	TH	I	R*4	高温側温度		
	TIME	I	R*4	高温保持時間		
	SG	0	R*4	応力レベル		
記 事	<p>以下の処理を行う。</p> <p>高温側温度により、応力レベルを直線内挿、直線外挿により計算する。          但し、直線内挿の温度範囲は、425°C ~ 650°Cまでの25°C間隔で10点である。          TH &lt; 425°Cの時は、425°C、450°Cの2点で直線外挿する。          TH &gt; 650°Cの時は、625°C、650°Cの2点で直線外挿する。</p>					

PROGRAM NAME	NEBDS	Program Description Sheet			Version	1.0
サブルーチン説明書				名称	SUBROUTINE ● FUNCTION XY	
機能	直線内挿計算を行う。					
CALLs サブルーチン	なし	CALLED サブルーチン	SLEVEL			
使用 COMMON	なし					
引 数	引 数 名	I/O	モード	意 味		
	X2	I	R*4	直線内挿のための既知 x 座標 2 の値		
	X1	I	R*4	直線内挿のための既知 x 座標 1 の値		
	Y2	I	R*4	直線内挿のための既知 y 座標 2 の値		
	Y1	I	R*4	直線内挿のための既知 y 座標 1 の値		
	XX	I	R*4	内挿座標の x 座標値		
記 事	<p>以下の処理を行う。2つの座標(x1, y1), (x2, y2)を直線で結びその2点間に有る座標 (xx, yy) を直線内挿して求める。</p> $yy = \frac{(y2-y1) \times (xx-x1)}{(x2-x1)} + y1$					

PROGRAM NAME	NEBDS	Program Description Sheet			Version	1.0
サブルーチン説明書				名称	SUBROUTINE ● FUNCTION XY2	
機能	両対数座標軸系での内挿計算を行う。					
CALLs サブルーチン	なし	CALLED サブルーチン	SLEVEL			
使用 COMMON	なし					
引 数	引 数 名	I/O	モード	意 味		
	X2	I	R*4	対数座標内挿のための既知 x 座標 2 の値		
	X1	I	R*4	対数座標内挿のための既知 x 座標 1 の値		
	Y2	I	R*4	対数座標内挿のための既知 y 座標 2 の値		
	Y1	I	R*4	対数座標内挿のための既知 y 座標 1 の値		
	XX	I	R*4	対数座標内挿の x 座標値		
記 事	<p>以下の処理を行う。両対数座標軸の2つの座標(x1, y1), (x2, y2)を直線で結びその2点間に有る座標 (xx, yy) を内挿して求める。</p> $\log yy = \frac{(\log y2 - \log y1) \times (\log xx - \log x1)}{(\log x2 - \log x1)} + \log y1$					