

# 溶接部ナトリウム中熱疲労試験

(第1報、試験体の温度分布及び応力分布に関する予備解析)

1990年1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、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱いには十分注意を払って下さい。  
なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。



## 溶接部ナトリウム中熱疲労試験

(第1報、試験体の温度分布および応力分布に関する予備解析)

浅山 泰\*, 香川 裕之\*, 矢口 勝巳\*\*

青木 昌典\*, 今津 彰\*

### 要 旨

本報告は、溶接継手のクリープ疲労評価法およびき裂進展評価法等の高度化に資することを目的として材料開発室に建設された、「溶接部ナトリウム中熱疲労試験装置」の試験開始に先立ち実施された予備解析をまとめたものである。この予備解析は、試験体の熱応力解析に関するものである。

本予備解析では、本試験時に主に問題となると考えられる以下のパラメータが、試験体に発生する温度分布・応力分布に及ぼす影響を定量的に検討し、本試験を円滑に遂行するための展望を得た。

- 1) 熱伝達係数
- 2) 熱過渡温度差
- 3) 試験体浸漬速度
- 4) 試験体が母材である場合と溶接継手である場合
- 5) 負荷が熱応力である場合と機械荷重である場合

---

\* 機器構造開発部・材料開発室

\*\* (株)常陽産業職員

## Sodium Thermal Fatigue Test

### Part I - Preliminary Analysis on Temperature / Stress Distribution on Test Specimens

T. Asayama\*, H. Kagawa\*, K. Yaguchi\*\*  
M. Aoki\*, A. Imazu\*

#### Abstract

A preliminary analysis was performed on the sodium thermal fatigue tests which are planned to be conducted with the "Sodium Thermal Fatigue Test

Apparatus", which was recently constructed in the Material Development Section. This test machine was constructed for the purpose of acquisition of data needed for sofistication of the evaluation method of creep-fatigue and crack propagation of welded joints. This preliminary analysis is concerned with thermal analysis and stress analysis on test specimens which are planed to be used in the machine.

Effects of following parameters on temperature / stress distribution of test specimens under various conditions were analysed. These parameters are considered to play significant roles in the analysis of the results of upcoming experiments.

- 1) Heat transfer coefficient
- 2) Thermal shock temperature
- 3) Speed of submerging specimen
- 4) Comparison of behavior of base metal and welded joint
- 5) Comparison of mechanical loading and thermal loading

---

\* Materials Development Section, O-arai Engineering Center, PNC

\*\*Joyo-Sangyo, Co. Ltd.

# 目 次

1. 序 論 .....	1
1.1 本報の目的 .....	1
1.2 溶接部ナトリウム中熱疲労試験装置の目的及び試験の概略 .....	1
1.2.1 目 的 .....	1
1.2.2 試験装置 .....	2
1.2.3 試験条件 .....	2
1.3 本報告書の構成 .....	4
2. 一次元モデルによる熱過渡の解析 .....	9
2.1 解析の目的及び解析条件 .....	9
2.1.1 目 的 .....	9
2.1.2 解析条件 .....	9
2.1.3 FEM コード .....	10
2.2 解析結果 .....	10
2.3 热伝達係数の影響の検討 .....	10
2.4 热過渡温度差の影響の検討 .....	11
3. 二次元モデルによる熱過渡の解析 .....	36
3.1 解析の目的及び解析条件 .....	36
3.1.1 目 的 .....	36
3.1.2 解析条件 .....	36
3.1.3 FEM コード .....	36
3.2 解析結果 .....	37
3.3 热過渡温度差の影響の検討 .....	38
3.4 一次元モデルによる解析と二次元モデルによる解析の対比 .....	38
4. 浸漬速度の影響に関する解析 .....	67
4.1 解析の目的及び解析条件 .....	67
4.2 解析結果 .....	67
4.3 試験片浸漬速度の影響 .....	67
5. クリープ疲労損傷の検討 .....	85
5.1 解析の目的及び解析条件 .....	85
5.2 疲労損傷のみを考慮した場合の検討結果 .....	85
5.3 クリープ疲労損傷を考慮した場合 .....	86

6. 溶接継手試験片の解析 .....	96
6.1 解析の目的および解析条件 .....	96
6.2 解析結果 .....	96
6.3 熱過渡負荷と機械負荷の関係 .....	96
7. まとめ及び今後の課題 .....	111
7.1 まとめ .....	111
7.2 今後の課題 .....	112
7.2.1 流体-構造連成解析 .....	112
7.2.2 試験片形状の詳細解析 .....	112
7.2.3 実測温度分布による応力解析 .....	113
7.2.4 複数のき裂が発生することの影響等の検討 .....	113
謝　　辞 .....	114
参考文献 .....	115

## 表 リ ス ト

表 2.1	解析条件一覧表（一次元解析）	12
表 2.2(1)~(3)	FEM 解析条件	13
表 3.1	解析条件一覧表（二次元解析）	39
表 3.2	FEM 解析条件	40
表 4.1	解析条件一覧表（浸漬速度の影響に関する解析）	69
表 4.2	FEM 解析条件	70
表 6.1	解析条件一覧表（溶接継手の解析）	98
表 6.2	FEM 解析条件	99

## 図 リ ス ト

図1.1	溶接部ナトリウム中熱疲労試験装置概要	5
図1.2	試験片浸漬部概念図	6
図1.3	現在計画中の試験片の寸法形状	7
図1.4	本試験装置における熱過渡上のパラメータ	8
図2.1	一次元解析モデル	17
図2.2	一次元解析メッシュ分割図	18
図2.3	試験片の温度変化に及ぼす熱伝達係数の影響（円筒試験片）	19
図2.4(a)	試験片の温度変化に及ぼす熱伝達係数の影響（中空円筒試験片、外表面）	20
図2.4(b)	試験片の温度変化に及ぼす熱伝達係数の影響（中空円筒試験片、内表面）	21
図2.5(a)	応力ひずみ履歴（円筒試験片、r 方向）	22
図2.5(b)	応力ひずみ履歴（円筒試験片、θ 方向）	23
図2.5(c)	応力ひずみ履歴（円筒試験片、z 方向）	24
図2.6(a)	応力ひずみ履歴（中空円筒試験片、r 方向）	25
図2.6(b)	応力ひずみ履歴（中空円筒試験片、θ 方向）	26
図2.6(c)	応力ひずみ履歴（中空円筒試験片、z 方向）	27
図2.7	相当ひずみの経時変化（円筒試験片）	28
図2.8	相当応力の経時変化（中空円筒試験片）	29
図2.9	相当ひずみの経時変化（円筒試験片）	30
図2.10	相当応力の経時変化（中空円筒試験片）	31
図2.11	熱伝達係数と発生相当ひずみの関係	32
図2.12	熱伝達係数と発生相当応力の関係	33
図2.13	コールドショック時の温度差と Mises 型相当ひずみの関係	34
図2.14	コールドショック時の温度差と Mises 型相当応力の関係	35
図3.1	二次元解析モデル	41
図3.2	二次元解析メッシュ分割図	42
図3.3(a)	温度変化の軸方向分布（600 - 200°C の場合）	43
図3.3(b)	温度変化の軸方向分布（500 - 200°C の場合）	44
図3.3(c)	温度変化の軸方向分布（400 - 200°C の場合）	45
図3.3(d)	温度変化の軸方向分布（300 - 200°C の場合）	46
図3.4(a)	応力ひずみ履歴（円筒試験片、r 方向, 600 - 200°C）	47
図3.4(b)	応力ひずみ履歴（円筒試験片、θ 方向, 600 - 200°C）	48

図3.4(c) 応力ひずみ履歴(円筒試験片, z方向, 600 - 200°C)	49
図3.4(d) 応力ひずみ履歴(円筒試験片, r方向, 600 - 200 - 600°C)	50
図3.4(e) 応力ひずみ履歴(円筒試験片, θ方向, 600 - 200 - 600°C)	51
図3.4(f) 応力ひずみ履歴(円筒試験片, z方向, 600 - 200 - 600°C)	52
図3.5 相当ひずみの経時変化(600 - 200°C)	53
図3.6 相当応力の経時変化(600 - 200°C)	54
図3.7(a) 相当ひずみの軸方向分布の経時変化(600 - 200°C)	55
図3.7(b) 相当ひずみの軸方向分布の経時変化(500 - 200°C)	56
図3.7(c) 相当ひずみの軸方向分布の経時変化(400 - 200°C)	57
図3.7(d) 相当ひずみの軸方向分布の経時変化(300 - 200°C)	58
図3.8(a) 相当応力の軸方向分布の経時変化(600 - 200°C)	59
図3.8(b) 相当応力の軸方向分布の経時変化(500 - 200°C)	60
図3.8(c) 相当応力の軸方向分布の経時変化(400 - 200°C)	61
図3.8(d) 相当応力の軸方向分布の経時変化(300 - 200°C)	62
図3.9 コールドショック時の温度差とMises型相当ひずみの関係	63
図3.10 コールドショック時の温度差とMises型相当応力の関係	64
図3.11 一次元解析結果と二次元解析結果の比較(相当ひずみ)	65
図3.12 一次元解析結果と二次元解析結果の比較(相当応力)	66
図4.1 热伝導解析の結果(0.01 m/s, 600 - 200°Cの場合)	71
図4.2 相当ひずみの軸方向分布の経時変化(0.01 m/s, 600 - 200°Cの場合)	72
図4.3 相当応力の軸方向分布の経時変化(0.01 m/s, 600 - 200°Cの場合)	73
図4.4 热伝導解析の結果(1.5 m/s, 600 - 200°Cの場合)	74
図4.5 相当ひずみの軸方向分布の経時変化(1.5 m/s, 600 - 200°Cの場合)	75
図4.6 相当応力の軸方向分布の経時変化(1.5 m/s, 600 - 200°Cの場合)	76
図4.7 热伝導解析の結果(0.01 m/s, 400 - 200°Cの場合)	77
図4.8 相当ひずみの軸方向分布の経時変化(0.01 m/s, 400 - 200°Cの場合)	78
図4.9 相当応力の軸方向分布の経時変化(0.01 m/s, 400 - 200°Cの場合)	79
図4.10 軸方向最大温度差に与える浸漬速度の影響	80
図4.11 軸方向最大相当ひずみに与える浸漬速度の影響	81
図4.12 軸方向最大相当応力に与える浸漬速度の影響	82
図4.13 最大温度差と最大Mises相当ひずみの関係	83
図4.14 最大温度差と最大Mises相当応力の関係	84
図5.1 疲労寿命の評価結果	88
図5.2 热過渡温度差と疲労寿命の関係	89

図5.3 試験片浸漬速度と相当ひずみ速度の関係	90
図5.4 試験片浸漬速度の相違による相当ひずみ速度の相違を考慮した場合の 熱過渡温度差と疲労寿命の関係	91
図5.5 热過渡サイクルの概念図	92
図5.6 相当ひずみの経時変化	93
図5.7 相当応力の経時変化	94
図5.8 疲労損傷とクリープ損傷の軸方向分布	95
図6.1 溶接継手の概念図	100
図6.2 溶接継手試験片のモデル化	101
図6.3 溶接継手試験片のメッシュ分割	102
図6.4 母材及び継手の応力ひずみ関係のモデル化	103
図6.5 相当ひずみのコンター図（軸方向中心位置の相当ひずみ最大時）	104
図6.6 相当応力のコンター図（軸方向中心位置の相当応力最大時）	105
図6.7 相当ひずみの軸方向分布の経時変化	106
図6.8 相当応力の軸方向分布の経時変化	107
図6.9 機械荷重のモデル化	108
図6.10 機械荷重負荷の場合の相当ひずみの軸方向分布	109
図6.11 機械荷重負荷の場合の相当応力の軸方向分布	110

# 1. 序論

## 1.1 本報の目的

本報は、溶接継手のクリープ疲労評価法およびき裂進展評価法等の高度化のためのデータの取得を目的として材料開発室に建設された「溶接部ナトリウム中熱疲労試験装置」の運転開始に先立ち実施した予備解析をまとめたものである。この予備解析は、本試験で予定される条件下における試験片の熱伝導挙動、応力ひずみ挙動に関するものであり、これらを有限要素コード(FINAS)により解析し、熱過渡の結果発生する応力・ひずみ及びき裂発生回数等を予測することにより、本試験を円滑に進めるための展望を得ることを目的として行われたものである。

## 1.2 溶接部ナトリウム中熱疲労試験装置の目的及び試験の概略

### 1.2.1 目的

「もんじゅ」では、クリープ疲労破損の防止に特に注意を要する部位への溶接継手の使用を回避しているが、今後、高速炉が実証炉、実用化炉と進むに従って大型化すれば、機器等の製作費用低減を目的として、大型構造部材にも積極的に溶接継手を使用してゆく必要がある。このため、実機負荷条件下における熱クリープ疲労負荷に対する溶接継手の健全性評価の観点から、充分なR&Dを行い、溶接継手の強度データの蓄積とともに継手の熱クリープ疲労強度評価法の開発を行わなければならない。

このような観点から従来より、溶接継手のクリープ疲労評価法およびき裂進展評価法等の構築およびそれらの高度化のためのデータの取得を目的として、小型試験片を用いた機械的荷重による材料試験及び大型構造体を用いた熱過渡による構造物試験を行ってきた。本装置は言わばこの中間に位置しており、比較的小型で単純な形状の試験体を高温・低温のナトリウムに直接浸漬する事により熱負荷を加えるものである。本装置の特徴は、

- ① 実機条件に近い熱応力を試験体に付与できる。
- ② 試験片が小型のため熱応力解析が容易である。
- ③ き裂の発生、進展を目視により直接観察できる。

等である。①の特徴は流動ナトリウムに直接試験片を浸漬することにより比較的高い熱伝達係数(10000～20000 kcal/m<sup>2</sup>h°C程度)を得ることができることによる。②は厚肉円筒あるいは平板等の比較的単純な形状の試験片を用いることから、FEM等による詳細応力解析等も比較的容易であると予想できることによる。③は、試験片観察窓の設置により、従来のナトリウム中試験では困難であった試験中の試験片の目視による観察を可能したことによる。

### 1.2.2 試験装置

本試験装置は、材料開発室第2試験室の既設高温ナトリウム材料試験設備の中の、ナトリウム試験ループに付加設置されたものである。本試験機は、高温及び低温用ナトリウムポット各一個、これらを格納する試験ベッセル、加熱器、冷却器、電磁流量計、電磁ポンプ、ナトリウム貯蔵タンクとこれらを接続する弁、配管及び架台等により構成される。さらに、これら機器の計測制御を行うための動力系及び計測制御系が付設される。

本試験装置は、高温及び低温ナトリウム用の2つの独立したループより構成される。システム主要配管は、2BSch 20 S (外径 60.5 mm) である。ナトリウムの純化は、既設ナトリウムループの純化系を共有することにより行う。

試験ベッセル ( $\phi 2200 \times 2000$  mm) 内には高温及び低温のナトリウムポットが格納されるとともに試験片駆動機構、ナトリウムポット出入口配管が挿入・接続される。試験片はポット下部から上部方向に流れるナトリウム流に、上から下に試験片駆動機構によって浸漬される。

試験片の形状は厚肉円筒あるいは厚肉平板等の比較的単純な形状を予定しており、大きさは円筒の場合外径 10 cm 程度、平板の場合一辺 10 cm 程度（の正方形あるいは長方形）を予定している。

試験機の概略を図 1.1 に示す。試験片浸漬部の概念図を図 1.2 に示す。現在計画中の試験片の寸法・形状の概略を図 1.3 に示す。

### 1.2.3 試験条件

本試験機における制御量、測定量について述べる。

#### I) 試験機において設定すべきパラメータ (実験上のパラメータ)

本試験機において設定すべきパラメータは次の通りである。

- ① 高温ナトリウム温度 (400 ~ 600°C)
- ② 低温ナトリウム温度 [温度差] (200 ~ 400°C)
- ③ 高温ナトリウム流量 (~ 160 l/min)
- ④ 低温ナトリウム流量 (~ 160 l/min)
- ⑤ 試験片移動速度 (4 秒 ~ 20 秒)
- ⑥ 試験片浸漬速度 (~ 1.0 m/sec)
- ⑦ 試験片浸漬時間 (~ 9999 時間)
- (8) 試験片形状

#### II) 热過渡時に生じる現象

- I) にあげたパラメータが熱過渡時に生じる現象に及ぼすと考えられる影響は次の通りである。

- ① 高温ナトリウム温度

熱過渡による温度分布が主に試験片軸方向に生じる可能性がある。(試験片は下部から

先にナトリウムと接液するため、試験片上部がナトリウムと接液する時には下部における熱過渡によりナトリウムの温度が変化している〔例えばコールドショックの場合には試験片下部からの放熱により、ナトリウムが試験片上部に達したときには設定温度より上昇している可能性がある。〕可能性がある。また、これにより試験片軸方向に熱伝達係数の分布が生じる可能性がある。熱伝達係数は温度差の関数である。)

② 低温ナトリウム温度〔温度差〕

高温ナトリウム温度と同じ現象。

③ 高温ナトリウム流量

①の軸方向温度分布の大きさ及びこの結果生じる熱伝達係数の分布はナトリウム流量によっても変化する。

④ 低温ナトリウム流量

高温ナトリウム流量と同じ現象。

⑤ 試験片移動速度

低温あるいは高温ナトリウムポットから引き上げられた試験片が再び高温あるいは低温ナトリウムポットに浸漬されるまでに試験片の温度変化が生じ、以後の熱過渡挙動に影響を与える可能性がある。この場合、試験片とベッセル内雰囲気との間の熱伝達係数が小さければこの現象は無視できる。

⑥ 試験片浸漬速度

試験片軸方向に熱過渡開始時間の分布（遅れ）を生じる。

⑦ 試験片浸漬時間

主として試験片のクリープ損傷の大きさに影響を与えると考えられる。

### III) 解析上のパラメータとの対応

II) にあげた現象を解析する場合のパラメータは次の通りである。

① 高温ナトリウム温度

試験片とナトリウム流の熱過渡を時々刻々解析し、試験片温度、ナトリウム温度、熱伝達係数の全てをアップデートしながら解析することが最も現実に近い結果を与えるものと考えられる。次に現象に忠実な解析は、ナトリウム流（流れと直角方向の分布はないとする。）及び試験片の温度変化は考慮するが、それに伴う熱伝達係数の変化までは考慮しないというものである。簡易的な解析ではナトリウム温度、熱伝達係数とも一定とし、試験片の温度変化のみ考慮する。

② 低温ナトリウム温度

高温ナトリウム温度に準じる。

③ 高温ナトリウム流量

詳細解析においては、ナトリウム流量が①で述べた現象に与える影響を考慮し、ナトリ

ウム温度、試験片温度に与える影響を評価することができる。また、ナトリウム流量が熱伝達係数に与える影響を別途評価することができる。簡易的解析においては、ナトリウム温度、熱伝達係数とも一定と見なされるので、ナトリウム流量は考慮されない。

#### ④ 低温ナトリウム流量

高温ナトリウム流量に準じる。

#### ⑤ 試験片移動速度

試験片とベッセル内環境との熱伝達係数を設定することによってこの効果を考慮できるが、気体の温度分布、対流によるその変化を考慮することは大変困難であり、熱伝達係数は一定と仮定する必要があるであろう。

#### ⑥ 試験片浸漬速度

簡易的解析においても、2次元解析を行えばこの効果を考慮することができる。1次元解析においてはこの効果は無視される。

#### ⑦ 試験片浸漬時間

すべての解析において考慮される。

これらの関係をまとめて図1.4に示す。なお、本報告では、上記①の簡易的解析を行った。本報告で用いた解析上のパラメータは次の通りである。

- ① 高温ナトリウム温度
- ② 低温ナトリウム温度
- ③ 热伝達係数（熱過渡中一定）
- ④ 試験片浸漬速度
- ⑤ 試験片浸漬時間

### 1.3 本報告書の構成

本報告書では、1.2節で検討した現象のうち、最もクリティカルであると考えられ、かつ簡易的解析で解析可能な項目について検討を行った。2章では最もシンプルな解析として、1次元解析を行い、ナトリウム温度（差）、熱伝達係数の影響を検討した。3章では2次元解析を行い、2章の解析に加えて試験片浸漬速度を考慮した場合の検討を行った。4章では試験片浸漬速度を変化させた場合に熱過渡挙動に及ぼす影響を検討した。5章では、2～4章の解析のうち代表的ケースについてクリープ疲労損傷の検討を行った。6章では溶接継手の解析を行った。7章では今後の解析を進めるうえでさらに重点的に検討すべき項目の抽出を行った。

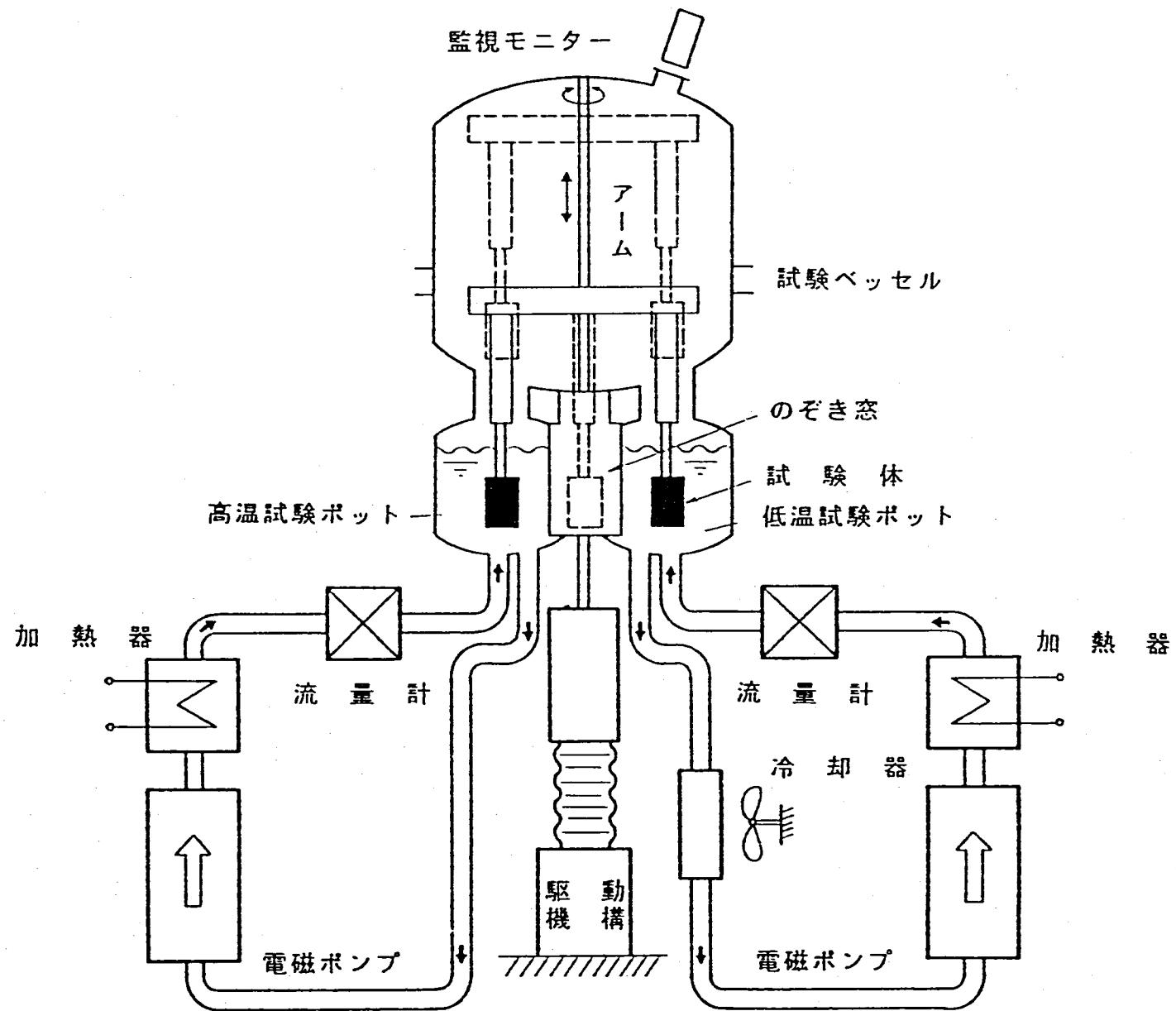


図 1.1 溶接部ナトリウム中熱疲労試験装置概要

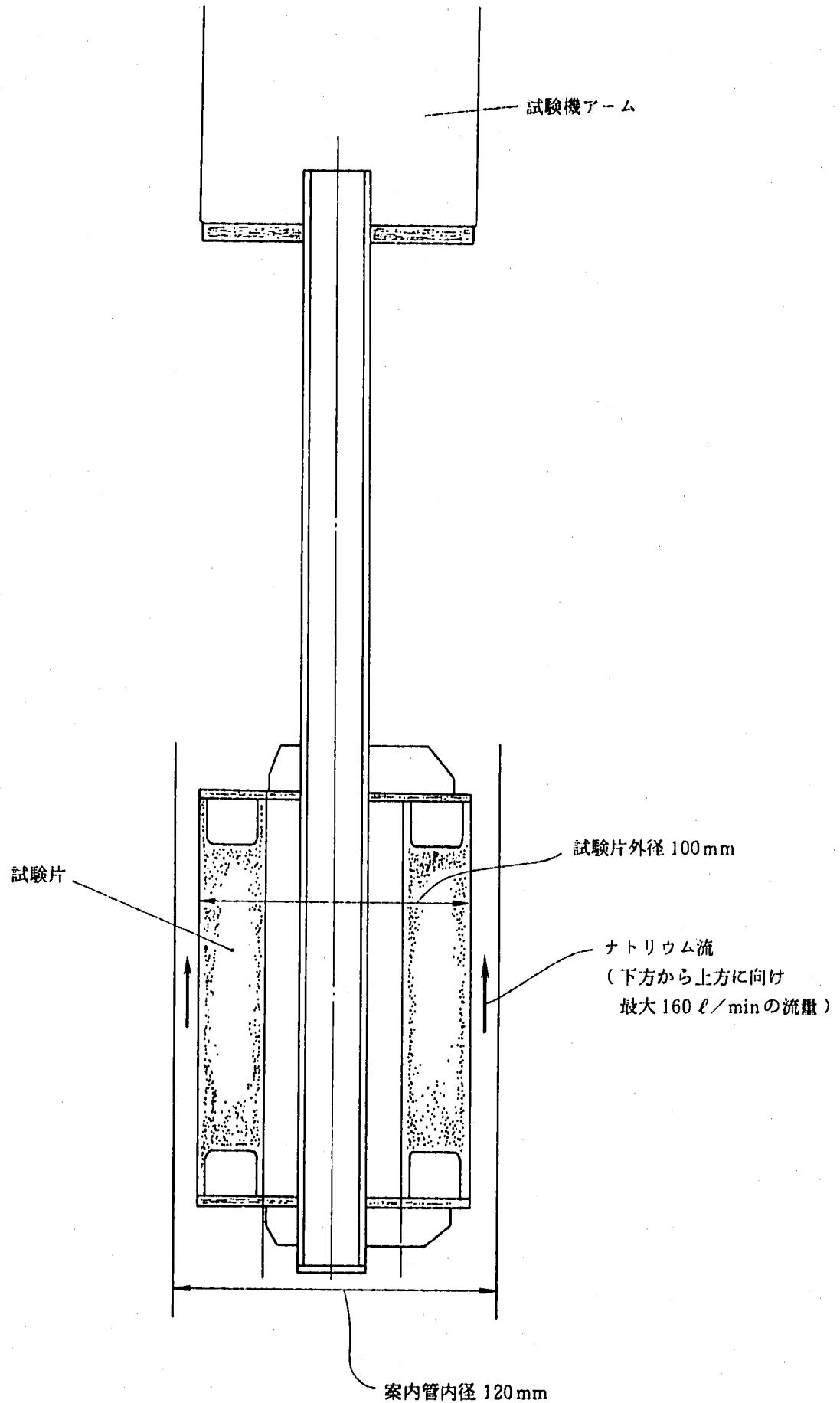
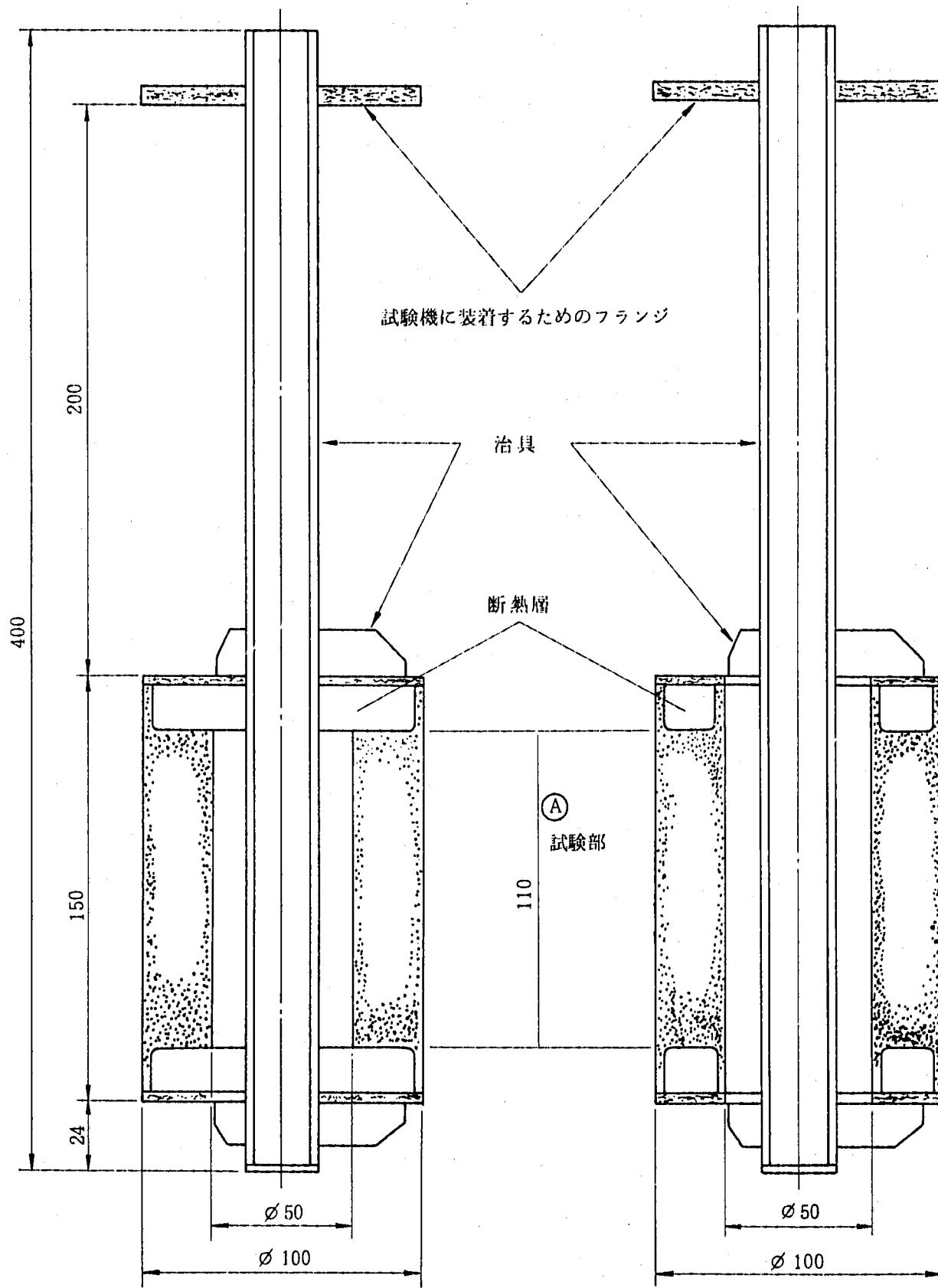


図 1.2 試験片浸漬部概念図（試験片の詳細寸法は図 1.3 に示す）



(a) 円筒型試験体  
(外面熱過渡)

(b) 中空円筒型試験体  
(内外面熱過渡)

図 1.3 現在計画中の試験片の寸法形状

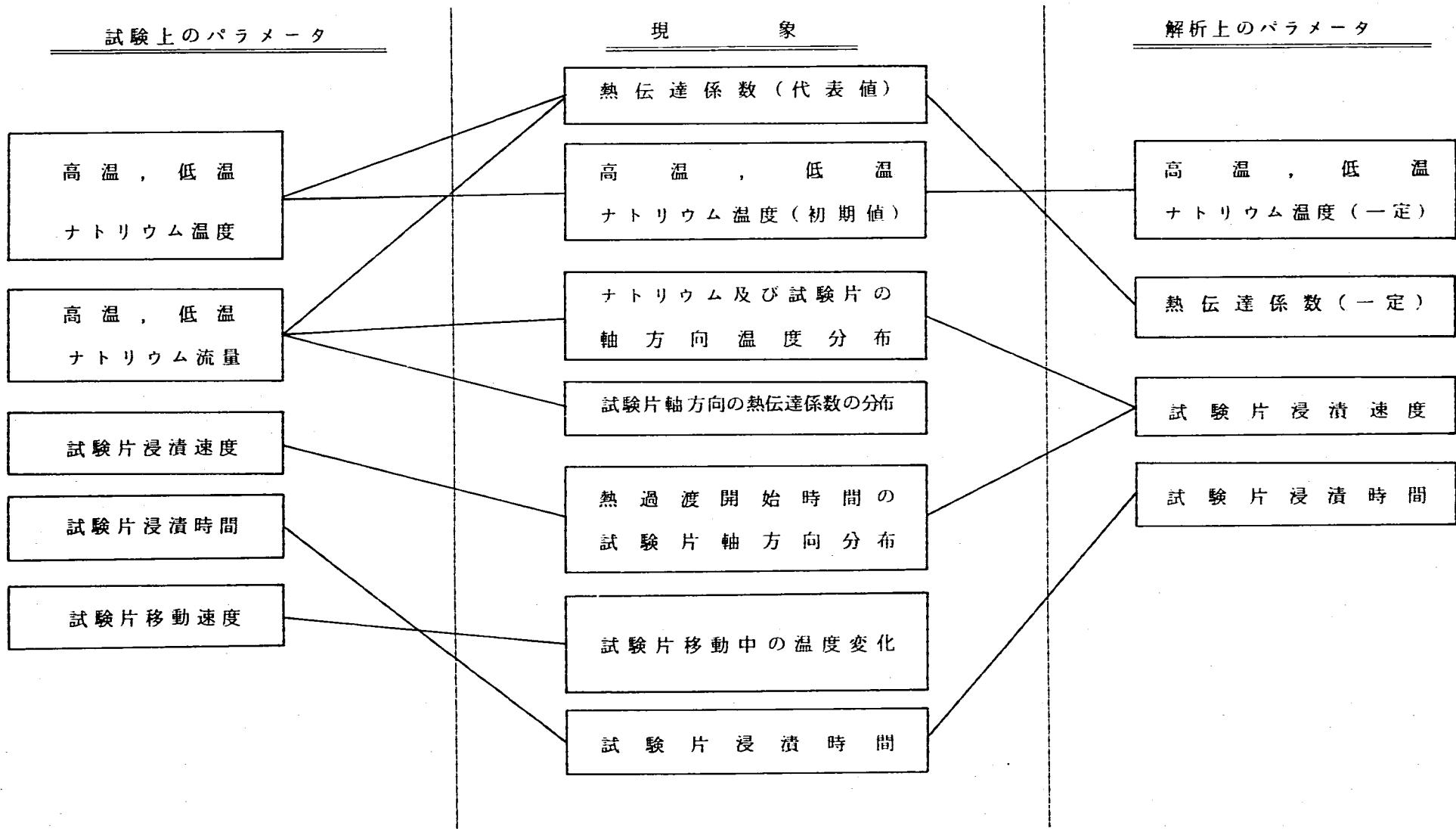


図 1.4 本試験装置における熱過渡上のパラメータ

## 2. 一次元モデルによる熱過渡の解析

### 2.1 解析の目的及び解析条件

#### 2.1.1 目的

本章では、本試験で使用予定の円筒型試験片及び中空円筒型試験片を、最も単純化されたモデルであると考えられる軸対称一次元モデルを用いて解析し、試験片とナトリウムの間の熱伝達係数及び高低温ナトリウム温度差が熱過渡挙動に及ぼす影響を検討する。

#### 2.1.2 解析条件

本章で行った一次元モデルによる解析におけるパラメータは次の4つである。

- ・高温ナトリウム温度
- ・低温ナトリウム温度（温度差）
- ・熱伝達係数
- ・ナトリウム温度変化速度

本報における解析では、構造（試験片）と流体（ナトリウム）の連成は考慮しなかった。すなわち、例えば現実に試験片に高温ナトリウムによりホットショックを与える場合には、ナトリウムと試験片が接触した瞬間から、熱伝達により試験片の温度が上昇すると同時にナトリウムの温度は低下し、これ（ナトリウム温度の低下）がその後の熱伝達挙動に微妙な影響を与える可能性が考えられるが、本報ではナトリウム温度の低下に関しては考慮しない解析モデルを用いた。また、熱過渡による構造（試験体等）の変形によるナトリウム流路の変化による熱過渡挙動の変化も考慮していない。

対象試験片は、図1.3に示した円筒型試験片及び中空円筒型試験片である。1次元解析では、対象試験片を、軸対称無限円筒の一部としてモデル化を行った。モデルを図2.1に示す。

本章では、ナトリウムと試験片の間の熱伝達係数及びナトリウムの温度差を変化させた場合に、試験片の温度変化の傾向が受ける影響を検討した。熱伝達係数の影響を検討する場合には、ナトリウム温度は高温を600°C、低温を200°C（以後600-200°Cのように記す）で温度差400°Cとした。ナトリウムの温度変化速度は設定温度差を1secで変化させるものとした（詳細は表2.1参照）。熱伝達係数については本試験ではほぼ10000～20000 kcal/m<sup>2</sup>h°C程度であると予想できるが<sup>(1)</sup>、ここでは広い範囲にわたっての傾向を把握するため、3000 kcal/m<sup>2</sup>h°C～100000 kcal/m<sup>2</sup>h°Cにわたって変化させた。

ナトリウム温度差の影響の検討に当たっては、熱伝達係数を15000 kcal/m<sup>2</sup>h°Cに固定し、ナトリウム温度が600-200°C、500-200°C、400-200°C、300-200°Cの場合を検討した。ナトリウム最高温度及び最低温度は試験機の性能を考慮して決定した。解析条件の一覧表を表2.1に

示す。

### 2.1.3 FEM コード

熱伝導解析および熱応力解析は有限要素コードによった。用いたコードは、FINAS である。応力解析は弾塑性解析とした。解析条件の詳細を表 2.2 に示す。メッシュ分割図を図 2.2 に示す。

## 2.2 解析結果

代表例として図 2.3～10 に主としてナトリウム温度 600～200°C, 热伝達係数 15000 kcal/m<sup>2</sup>h °C の熱伝達解析及び熱応力解析の結果を示す。さらに図 2.11～12 で熱伝達係数の影響を、図 13～14 で熱過渡温度差の影響を検討する。図 2.3～4 に、熱伝導解析の結果を試験片外周面および内周面（中空円筒試験片のみ）の温度の経時変化として示す。図 2.3 は円筒試験片の場合であり、図 2.4 は中空円筒試験片の場合である。熱応力解析の結果を図 2.5～10 に示す。図 2.5～6 は試験片外周面における応力ひずみ挙動を r, θ, z 方向について示したものであり（ナトリウム温度 600～200°C の場合）、図 2.5 は円筒試験片、図 2.6 は中空円筒試験片の場合である。図 2.7～10 には Mises 型相当塑性ひずみ、相当応力の経時変化を示す。図 2.7～8 は円筒試験片、9～10 は中空円筒試験片の場合である。なお図 2.5～10 はいずれも熱伝達係数が 15000 kcal/m<sup>2</sup>h °C の場合である。図 2.11～12 はコールドショック時に発生する Mises 型相当塑性ひずみおよび応力の最大値に及ぼす熱伝達係数の影響をまとめて示した結果である。いずれも、円筒試験片の外周面、中空円筒試験片の外周面および内周面について重ねてプロットしてある。図 13～14 は熱過渡温度差（ナトリウム温度差）の影響を検討したものである。

## 2.3 热伝達係数の影響の検討

熱伝達係数が温度変化の傾向に及ぼす影響を図 2.3～4 から検討すると、円筒試験片、中空円筒試験片のいずれの場合も、熱伝達係数の低下とともに温度変化速度が小さくなることがわかる。ただし、均熱時間に大きな差はなく、円筒試験片の場合 300 sec 程度で、中空円筒試験片の場合 200 sec 程度でナトリウム温度に達している。

図 2.5～6 により、試験片表面ではほぼ等二軸状態 (r, θ 方向) が実現していることが分かる。

次に、熱伝達係数が発生応力あるいはひずみに及ぼす影響を図 2.11～12 より検討する。ひずみについてみると、熱伝達係数が大きくなるとともに発生ひずみも大きくなる傾向が明らかである。本試験の熱伝達係数に近いと考えられる  $h = 7000 \sim 15000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  の範囲では、円筒試験片の外周面を例にとると、熱伝達係数の 10% の増加に対して、発生ひずみは約 3% 程度増加することがわかる。また、円筒試験片と中空円筒試験片の外周面を比較すると、熱伝達係数の値に係わらず、円筒試験片の外周面の方が発生ひずみが大きいことが分かる。さらに、中空円筒試験片の外周面と内周面を比較すると、全般に内周面の方が発生ひずみが大きいことが分かる。熱伝達係数の変化に

対する感受性は円筒試験片と中空円筒試験片の外周面ではほぼ等しいが、中空円筒試験片の内周ではそれらに比較して大きくなっている。

応力についてもひずみと同様の傾向が観察される。ただし、熱伝達係数の変化に対する感受性はひずみよりも小さく、熱伝達係数の 10% の増加に対する応力の増加は、1% 未満である ( $h = 7000 \sim 15000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  の範囲、円筒試験片の外周面)。また、熱伝達係数の変化に対する感受性についてもひずみの場合と同様の傾向が観察されるが、試験片のタイプ及び熱過渡面による感受性の差は、ひずみの場合より小さいようである。

#### 2.4 热過渡温度差の影響の検討

図 2.13～14 より熱過渡により発生する Mises 型の相当塑性ひずみ及び Mises 型相当応力の最大値は熱過渡温度差にはほぼ比例することが分かる。図 2.13 によると温度差に 10% の誤差があった場合の発生ひずみの変動はほぼ 12% 程度であることが分かる。また、図 2.14 より同じ条件で応力の変動は 2～3% であることが分かる。

表 2.1 解析条件一覧表(一次元解析)

浸漬時間 = 600 sec

	高温ナトリウム温度 °C	低温ナトリウム温度 °C	熱伝達係数 kcal/m <sup>2</sup> h °C	温度変化速度 °C/sec
熱伝達係数の影響に関する解析	600	200	3,000	400
			7,000	
			10,000	
			15,000	
			20,000	
			50,000	
			100,000	
影ナトリウム温度差の影響に関する解析	600	200	15,000	400
	500			300
	400			200
	300			100

表 2.2(1) FEM 解析条件  
(熱伝導解析および熱応力解析)

- (1) 使用コード FINAS
- (2) 使用要素 热伝導解析………HQAX 8：热伝導 8 節点 4 边形軸対称要素  
热応力解析………QAX 8：8 節点 4 边形軸対称要素
- (3) モデルの寸法および要素分割  
図 2.2 に示す。
- (4) 境界条件 図 2.2 に示す。
- (5) 热過渡解析 热過渡面（図 2.2 に示す）に接液するナトリウム温度を設定温度（表 2.1 に示す）まで 1 秒で变化させる。（下図参照。）
- (6) 応力解析における物性値  
FINAS に組み込みの物性値 (SUS 304) を使用。綫弾性係数、ポアソン比、線膨張係数を表 2.2(2) に、降伏応力、加工硬化係数は表 2.2(3) に示す。ただし、最大負荷レベルは 1 % を想定した。いずれも温度依存性を考慮した。
- (7) 応力ひずみ関係 2 直線近似とし、弾塑性解析を行った。
- (8) ひずみ硬化則 移動硬化則を用いた。

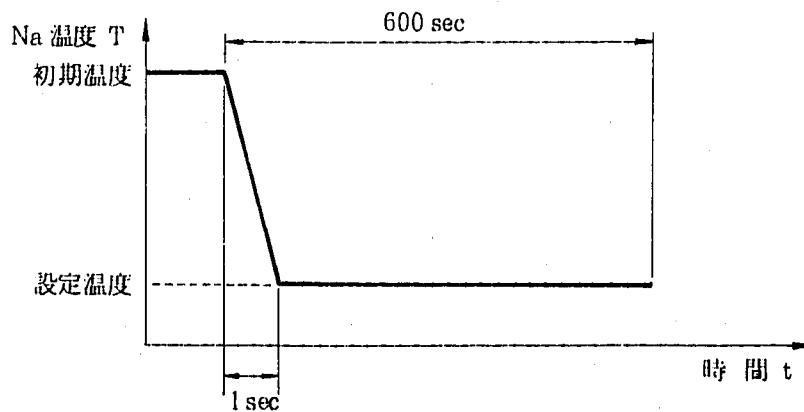


表 2.2(2) FEM 解析条件  
(SUS 304 の縦弾性係数、ポアソン比、線膨張係数)

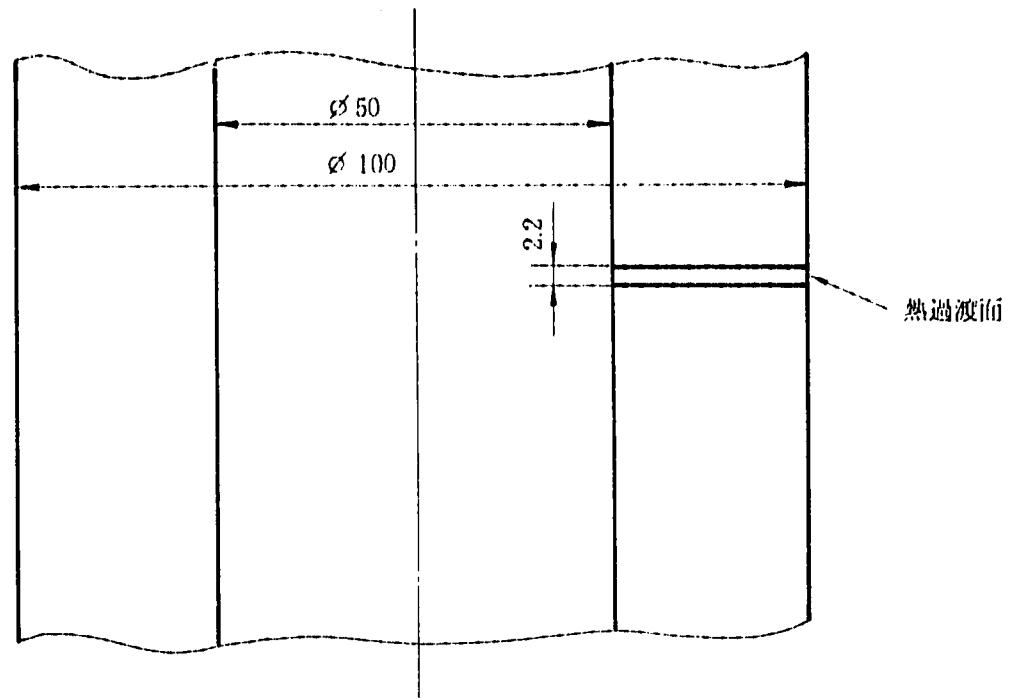
温度 (°C)	ヤング係数 (kg/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	線膨張係数 (1/°C)
20	$1.98 \times 10^4$	0.266	$15.15 \times 10^{-6}$
50	$1.96 \times 10^4$	0.268	$15.65 \times 10^{-6}$
100	$1.94 \times 10^4$	0.272	$16.48 \times 10^{-6}$
150	$1.91 \times 10^4$	0.275	$17.22 \times 10^{-6}$
200	$1.88 \times 10^4$	0.279	$17.85 \times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

表 2.2(3)の1 FEM 解析条件  
(SUS 304 の降伏応力)

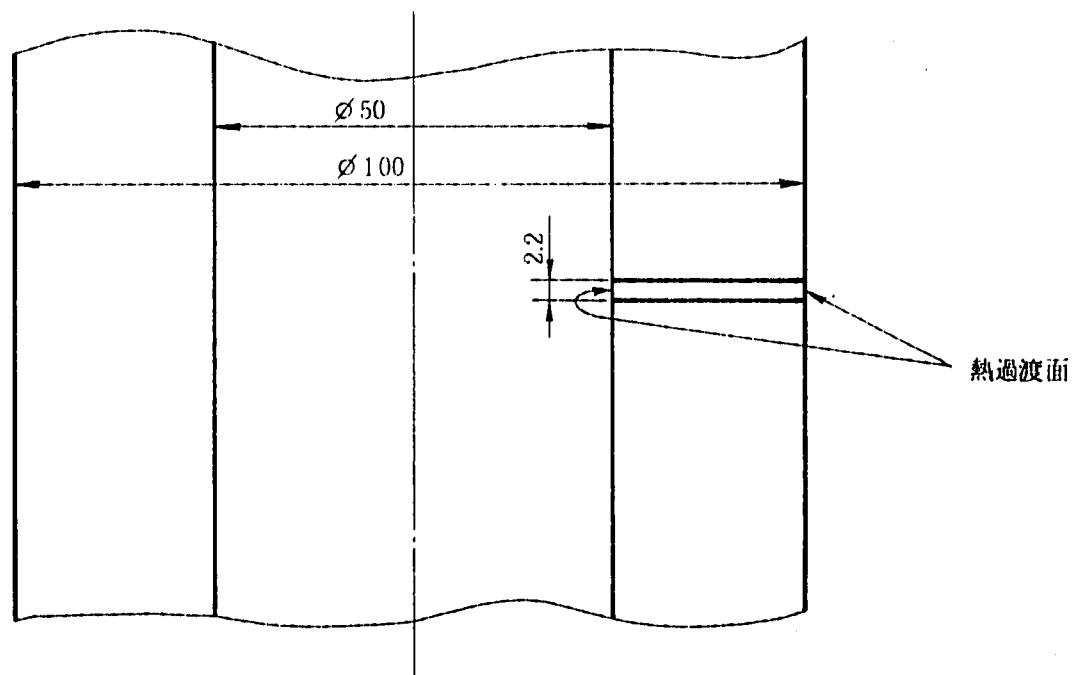
材料特性	最大想定ひずみレベル (%)	温度(°C)						
		350	400	450	500	550	600	650
降伏応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	0.2	12.43	12.10	11.84	11.61	11.33	10.97	10.46
	0.3	12.92	12.57	12.30	12.04	11.75	11.36	10.83
	0.4	13.29	12.92	12.63	12.36	12.05	11.65	11.11
	0.5	13.58	13.20	12.90	12.62	12.30	11.89	11.34
	0.6	13.83	13.44	13.13	12.84	12.51	12.09	11.53
	0.7	14.04	13.65	13.33	13.03	12.69	12.27	11.70
	0.8	14.24	13.84	13.51	13.20	12.86	12.43	11.85
	0.9	14.42	14.01	13.67	13.36	13.01	12.57	11.99
	1.0	14.58	14.16	13.82	13.50	13.15	12.70	12.11
	1.1	14.73	14.31	13.96	13.64	13.28	12.83	12.23
	1.2	14.87	14.44	14.09	13.76	13.40	12.94	12.34
	1.3	15.00	14.57	14.22	13.88	13.51	13.05	12.45
	1.4	15.13	14.69	14.33	13.99	13.62	13.15	12.54
	1.5	15.25	14.81	14.44	14.10	13.72	13.25	12.64
	1.6	15.36	14.92	14.55	14.20	13.82	13.35	12.73
	1.7	15.47	15.02	14.65	14.30	13.91	13.43	12.81
	1.8	15.57	15.12	14.74	14.39	14.00	13.52	12.90
	1.9	15.67	15.22	14.84	14.48	14.09	13.60	12.97
	2.0	15.77	15.31	14.93	14.56	14.17	13.68	13.05
	2.1	15.86	15.40	15.01	14.65	14.25	13.76	13.12
	2.2	15.95	15.48	15.09	14.73	14.33	13.83	13.20
	2.3	16.04	15.57	15.18	14.80	14.40	13.90	13.27
	2.4	16.12	15.65	15.25	14.88	14.47	13.97	13.33
	2.5	16.20	15.73	15.33	14.95	14.54	14.04	13.40
	3.0	16.57	16.09	15.68	15.29	14.87	14.35	13.70
	3.5	16.91	16.41	15.99	15.59	15.16	14.63	13.97
	4.0	17.21	16.70	16.27	15.86	15.42	14.89	14.21
	4.5	17.48	16.96	16.53	16.11	15.66	15.12	14.43
	5.0	17.74	17.21	16.76	16.34	15.88	15.33	14.64
定常降伏応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	0.2	13.65	13.65	13.65	13.48	13.06	12.55	
	0.3	16.95	16.95	16.95	16.45	15.61	14.80	
	0.4	20.01	20.01	20.01	19.26	18.01	16.85	
	0.5	22.75	22.75	22.75	21.76	20.13	18.59	
	0.6	25.24	25.24	25.24	24.01	22.01	20.10	
	0.7	27.50	27.50	27.50	26.05	23.69	21.44	
	0.8	29.58	29.58	29.58	27.92	25.23	22.63	
	0.9	31.50	31.50	31.50	29.64	26.63	23.71	
	1.0	33.30	33.30	33.30	31.24	27.93	24.70	
	1.1	34.98	34.98	34.98	32.74	29.14	25.60	
	1.2	36.57	36.57	36.57	34.14	30.27	26.45	
	1.3	38.06	38.06	38.06	35.47	31.33	27.23	
	1.4	39.49	39.49	39.49	36.73	32.33	27.97	
	1.5	40.84	40.84	40.84	37.93	33.28	28.66	
	1.6	42.14	42.14	42.14	39.07	34.19	29.32	
	1.7	43.38	43.38	43.38	40.16	35.05	29.94	
	1.8	44.56	44.56	44.56	41.20	35.87	30.53	
	1.9	45.71	45.71	45.71	42.21	36.66	31.09	
	2.0	46.81	46.81	46.81	43.17	37.42	31.63	
	2.1	47.88	47.88	47.88	44.11	38.15	32.05	
	2.2	48.90	48.90	48.90	45.01	38.85	32.46	
	2.3	49.90	49.90	49.90	45.88	39.53	32.86	
	2.4	50.87	50.87	50.87	46.72	40.19	33.25	
	2.5	51.80	51.80	51.80	47.54	40.83	33.62	
	3.0	56.13	56.13	56.13	51.30	43.74	35.35	
	3.5	59.97	59.97	59.97	54.63	46.21	36.90	
	4.0	63.44	63.44	63.44	57.63	48.37	38.30	
	4.5	66.61	66.61	66.61	60.36	50.38	39.59	
	5.0	69.54	69.54	69.54	62.88	52.24	40.78	

表2.2(3)の2 FEM 解析条件  
(SUS 304 の加工硬化係数)

材料特性	最大想定ひずみレベル (%)	温度(℃)						
		350	400	450	500	550	600	650
加工硬化係数 (kg/mm <sup>2</sup> )	0.2	2043.3	1962.2	1887.7	1816.1	1744.0	1668.0	1585.3
	0.3	1352.7	1302.0	1254.2	1207.7	1161.3	1113.8	1064.0
	0.4	1042.8	1005.3	969.3	934.3	899.4	864.0	827.6
	0.5	862.3	832.2	803.1	774.7	746.5	718.0	688.9
	0.6	742.4	717.1	692.6	668.5	644.6	620.6	596.2
	0.7	656.2	634.3	613.0	592.0	571.2	550.3	529.2
	0.8	590.8	571.4	552.6	533.9	515.4	496.9	478.2
	0.9	539.2	521.8	504.8	488.0	471.3	454.6	437.8
	1.0	497.3	481.5	466.0	450.7	435.5	420.3	404.9
	1.1	462.6	448.0	433.8	419.7	405.7	391.7	377.6
	1.2	433.2	419.7	406.5	393.4	380.4	367.4	354.4
	1.3	407.9	395.4	383.0	370.8	358.7	346.6	334.4
	1.4	386.0	374.2	362.7	351.2	339.8	328.4	317.0
	1.5	366.7	355.6	344.7	333.9	323.2	312.5	301.7
	1.6	349.6	339.1	328.8	318.6	308.5	298.3	288.1
	1.7	334.3	324.4	314.6	304.9	295.3	285.6	275.9
	1.8	320.5	311.1	301.8	292.6	283.4	274.2	265.0
	1.9	308.1	299.1	290.2	281.4	272.6	263.8	255.0
	2.0	296.7	288.2	279.7	271.2	262.8	254.4	245.9
	2.1	286.4	278.1	270.0	261.9	253.8	245.7	237.6
	2.2	276.8	268.9	261.1	253.3	245.5	237.8	230.0
	2.3	268.0	260.4	252.9	245.4	237.9	230.4	222.9
	2.4	259.9	252.6	245.3	238.0	230.8	223.6	216.4
	2.5	252.3	245.2	238.2	231.2	224.2	217.3	210.3
	3.0	221.2	215.2	209.2	203.2	197.2	191.2	185.2
	3.5	198.1	192.8	187.5	182.2	177.0	171.7	166.4
	4.0	180.0	175.3	170.6	165.9	161.2	156.5	151.8
	4.5	165.6	161.3	157.0	152.8	148.5	144.2	139.9
	5.0	153.6	149.7	145.8	141.9	138.0	134.1	130.2
定常加工硬化係数 (kg/mm <sup>2</sup> )	0.2	10216.3	10216.3	10216.3	8950.0	7260.4	6364.3	
	0.3	5134.4	5134.4	5134.4	4384.6	3442.5	2828.1	
	0.4	3211.4	3211.4	3211.4	2689.5	2060.1	1618.9	
	0.5	2240.8	2240.8	2240.8	1844.0	1381.2	1045.7	
	0.6	1670.9	1670.9	1670.9	1352.3	991.3	725.0	
	0.7	1303.5	1303.5	1303.5	1037.8	744.6	526.4	
	0.8	1051.0	1051.0	1051.0	823.3	577.9	394.7	
	0.9	869.1	869.1	869.1	669.8	459.8	303.0	
	1.0	733.2	733.2	733.2	556.0	372.9	236.7	
	1.1	628.9	628.9	628.9	469.2	307.3	187.3	
	1.2	546.9	546.9	546.9	401.4	256.5	149.6	
	1.3	481.3	481.3	481.3	347.5	216.5	120.4	
	1.4	427.9	427.9	427.9	304.0	184.4	97.3	
	1.5	383.9	383.9	383.9	268.3	158.3	78.8	
	1.6	347.1	347.1	347.1	238.7	136.9	63.9	
	1.7	316.2	316.2	316.2	213.9	119.2	51.7	
	1.8	289.8	289.8	289.8	193.0	104.4	41.7	
	1.9	267.2	267.2	267.2	175.2	91.9	33.3	
	2.0	247.7	247.7	247.7	160.0	81.2	26.4	
	2.1	230.7	230.7	230.7	146.8	72.2	25.1	
	2.2	215.9	215.9	215.9	135.4	64.4	24.3	
	2.3	202.9	202.9	202.9	125.4	57.7	23.6	
	2.4	191.3	191.3	191.3	116.7	51.9	22.9	
	2.5	181.1	181.1	181.1	109.0	46.8	22.2	
	3.0	144.0	144.0	144.0	81.8	29.7	19.6	
	3.5	121.5	121.5	121.5	66.0	23.5	17.6	
	4.0	106.9	106.9	106.9	56.4	21.6	16.0	
	4.5	97.1	97.1	97.1	50.4	20.1	14.8	
	5.0	90.1	90.1	90.1	46.4	18.8	13.8	

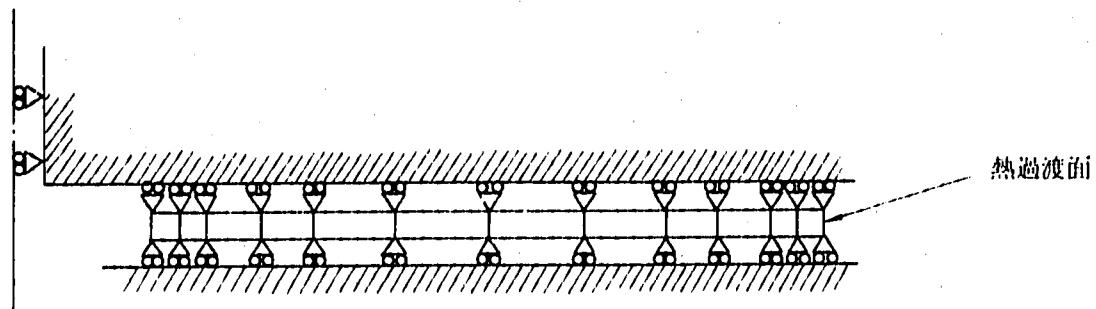


(a) 円筒型試験片



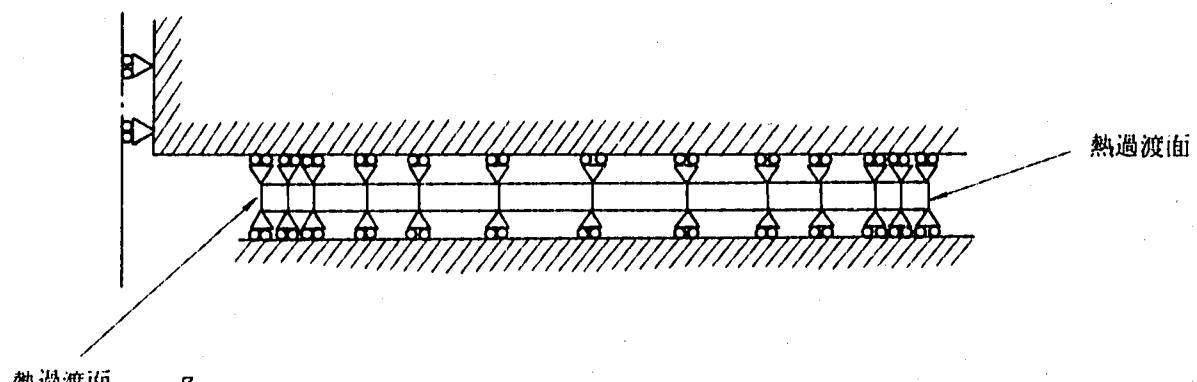
(b) 中空円筒型試験片

図 2.1 一次元解析モデル



GEOM. SCALE 5.00000

(a) 円筒型試験片



GEOM. SCALE 5.00000

(b) 中空円筒型試験片

図2.2 一次元解析メッシュ分割図

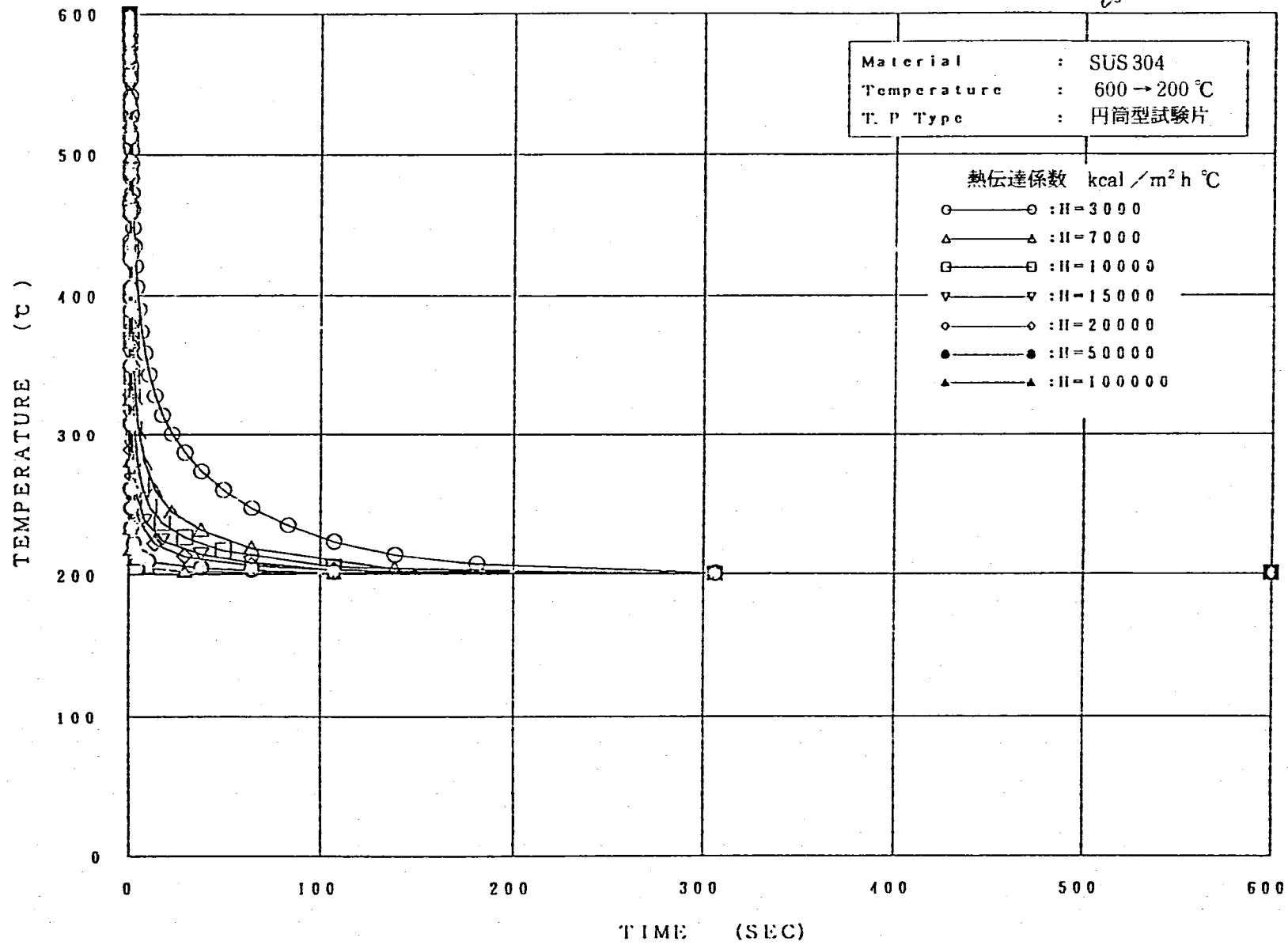


図2.3 試験片の温度変化に及ぼす熱伝達係数の影響（円筒型試験片）

FIG 891201

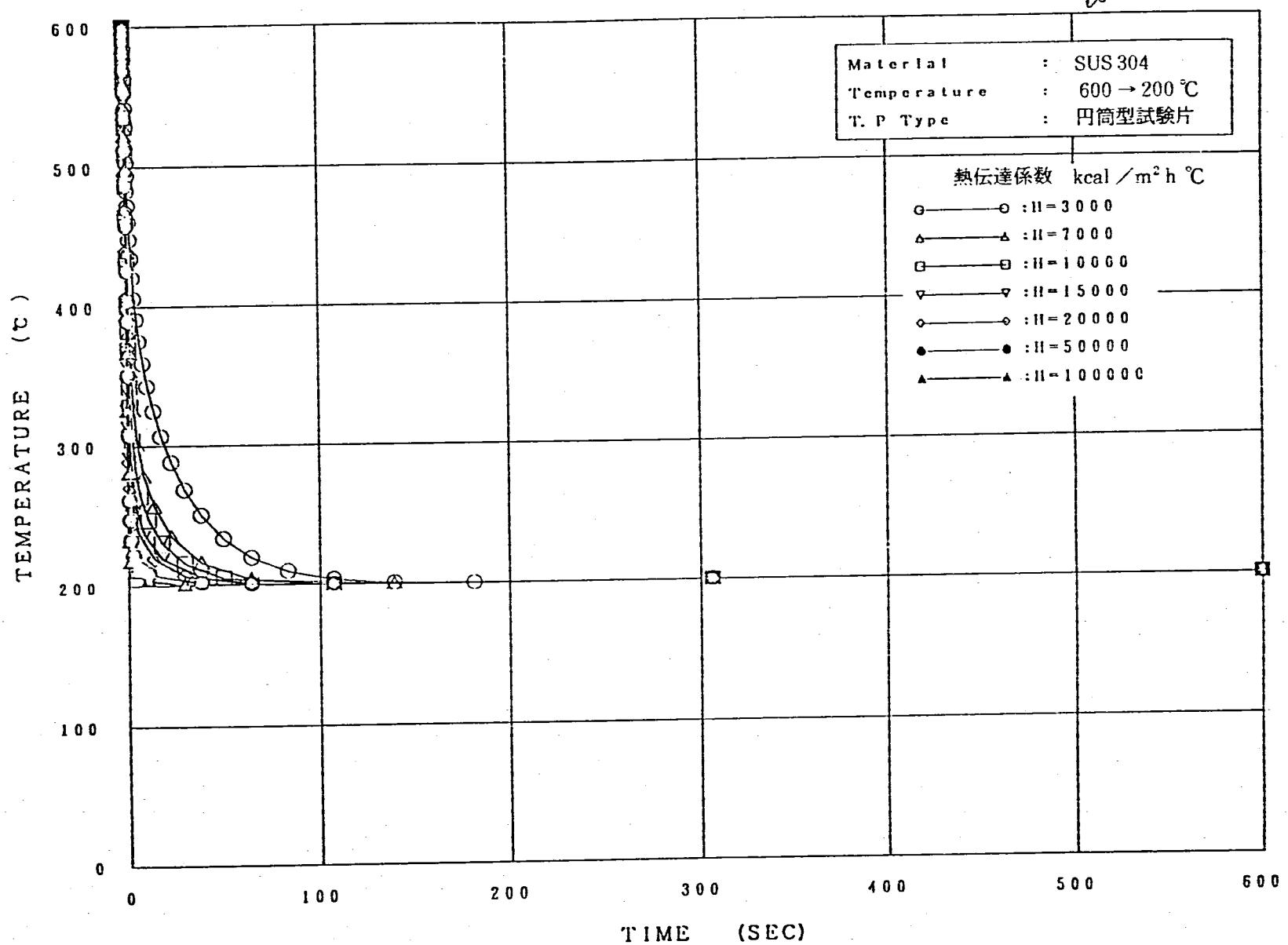


図 2.4(a) 試験片の温度変化に及ぼす熱伝達係数の影響（中空円筒型試験片、外表面）

FIG 891201

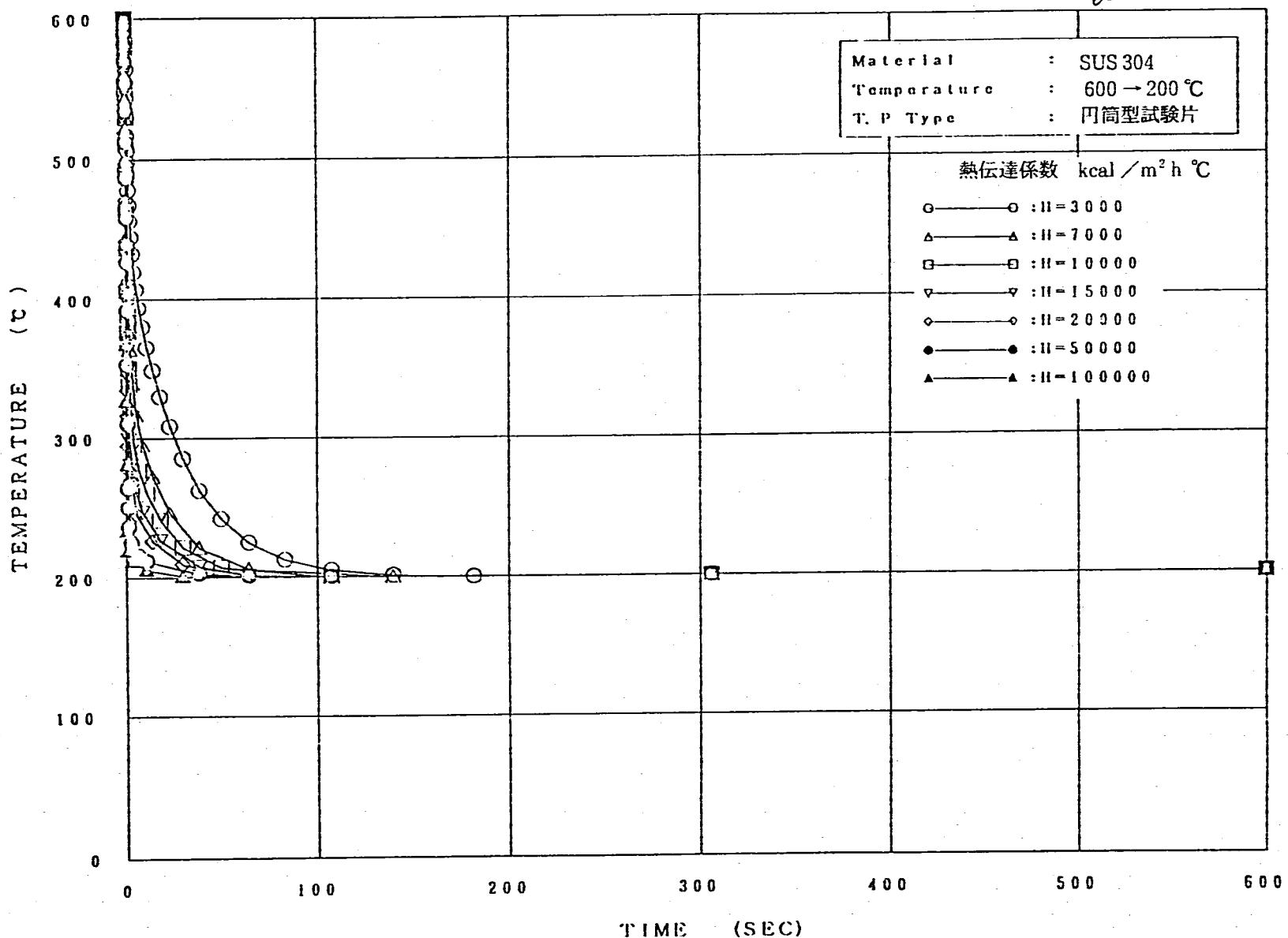


図 2.4(b) 試験片の温度変化に及ぼす熱伝達係数の影響（中空円筒型試験片、内表面）

FINAS

IP12-6

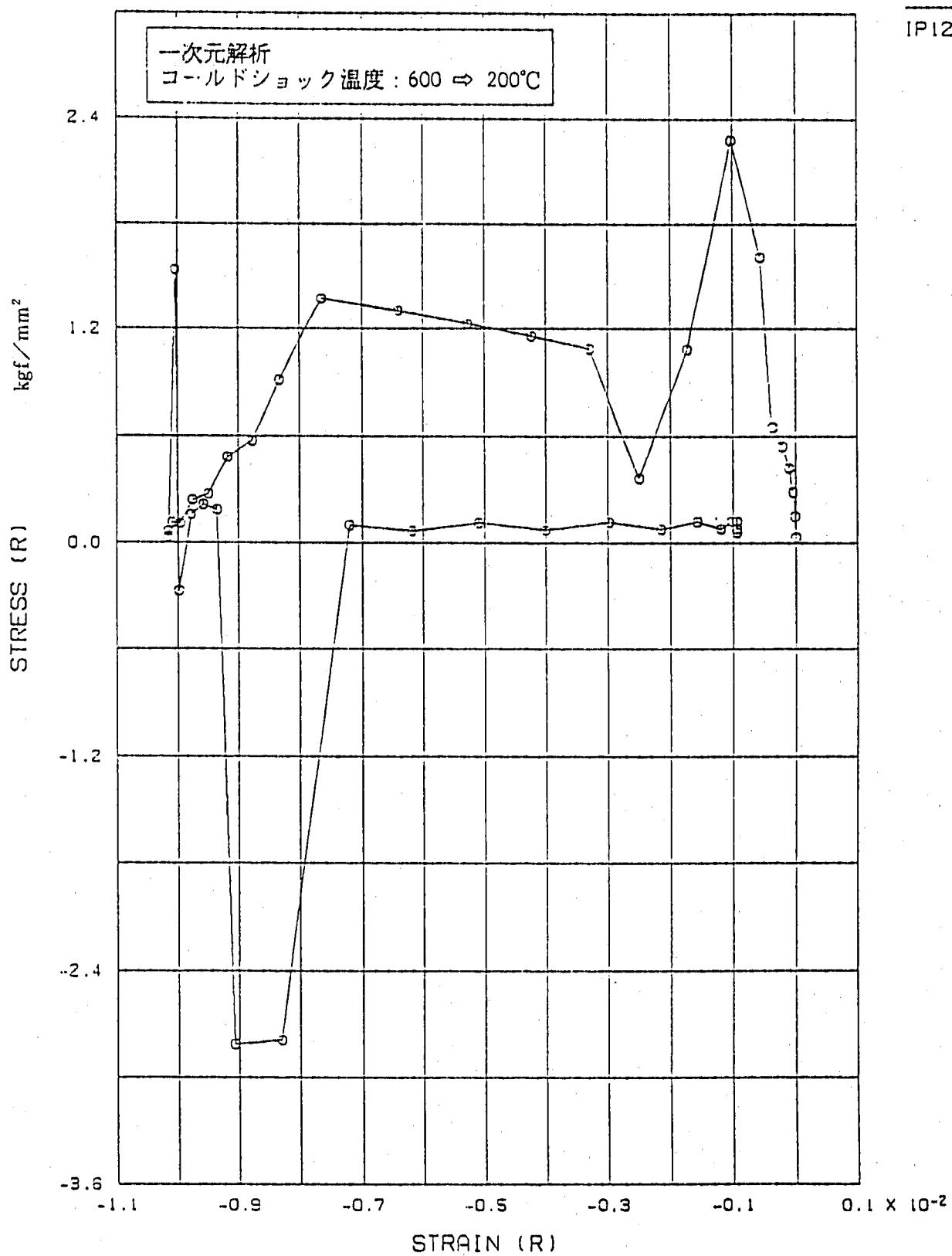
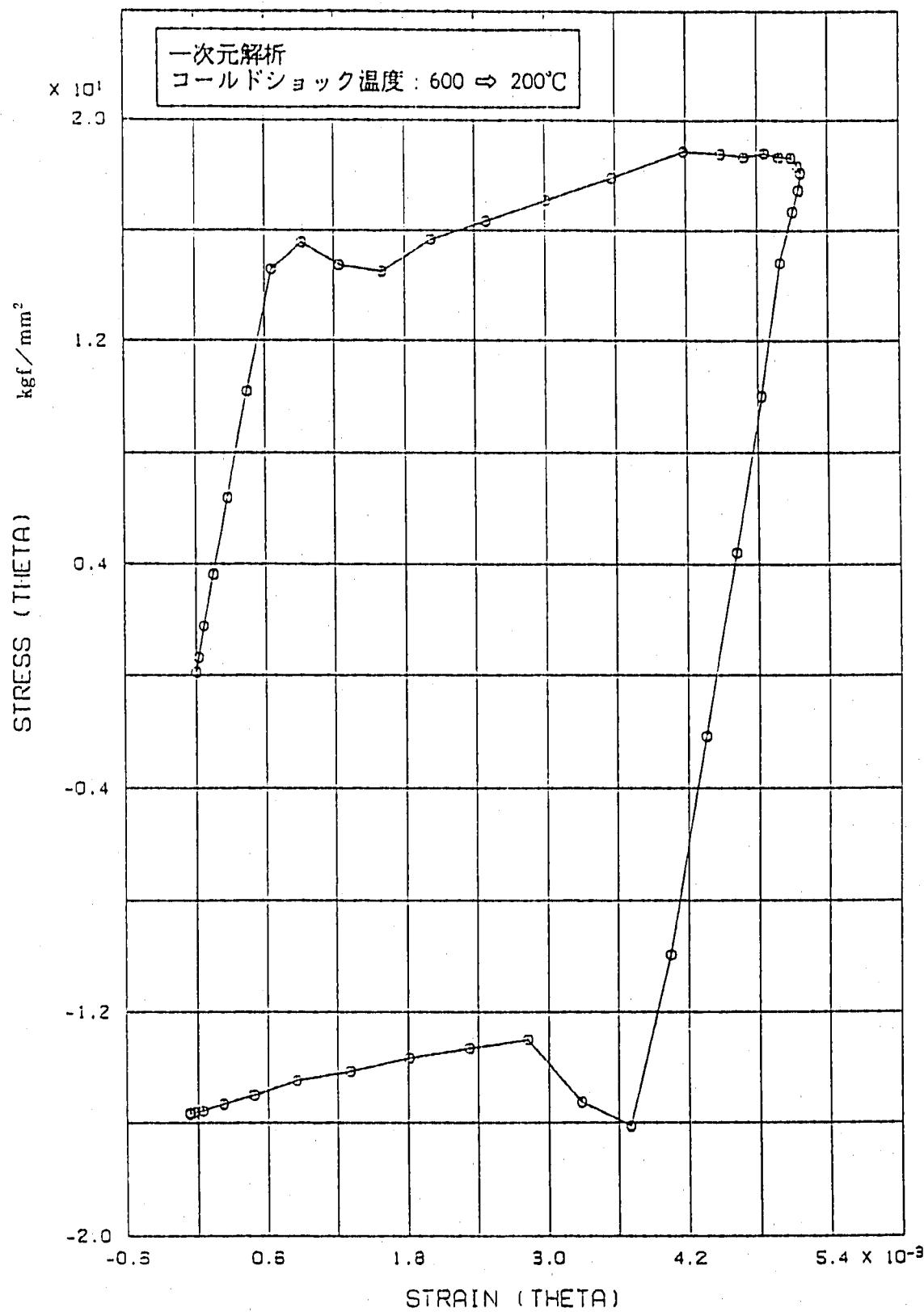


図 2.5(a) 応力ひずみ履歴(円筒型試験片, r 方向)

FINAS

IP12-6

図 2.5(b) 応力ひずみ履歴 (円筒型試験片,  $\theta$  方向)

FINAS

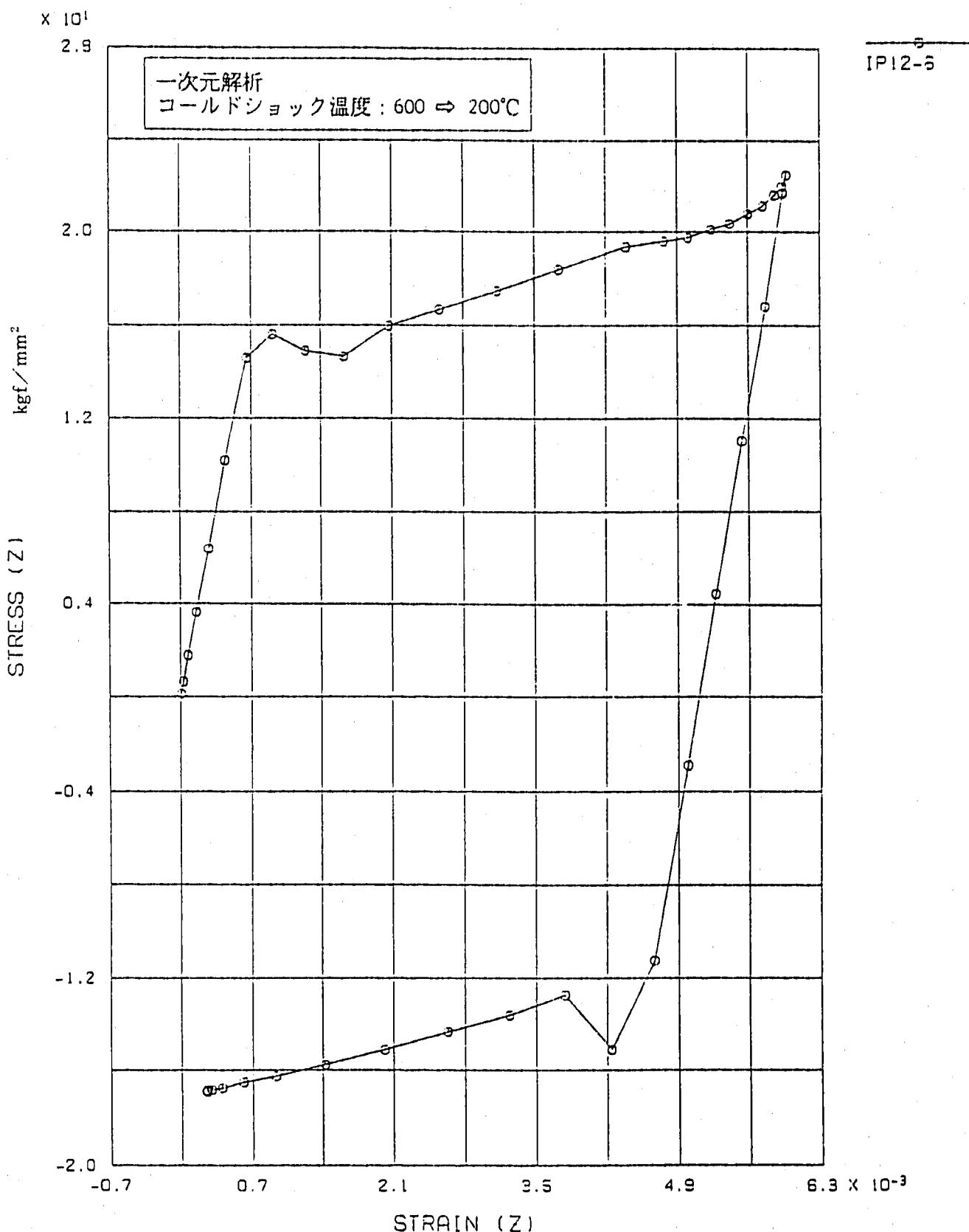


図 2.5(c) 応力ひずみ履歴 (円筒型試験片, z 方向)

FINAS

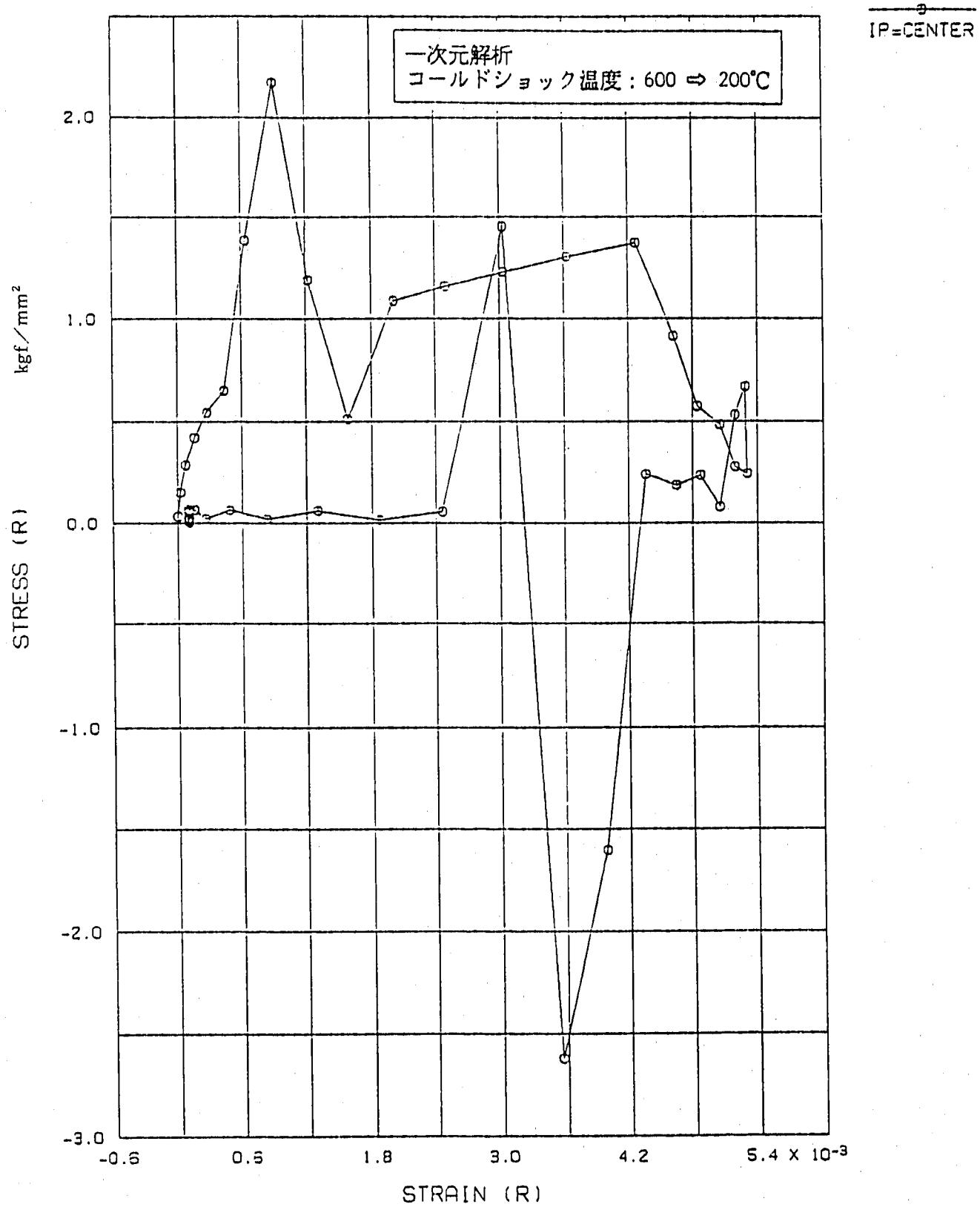


図 2.6(a) 応力ひずみ履歴(中空円筒型試験片, r 方向)

FINAS

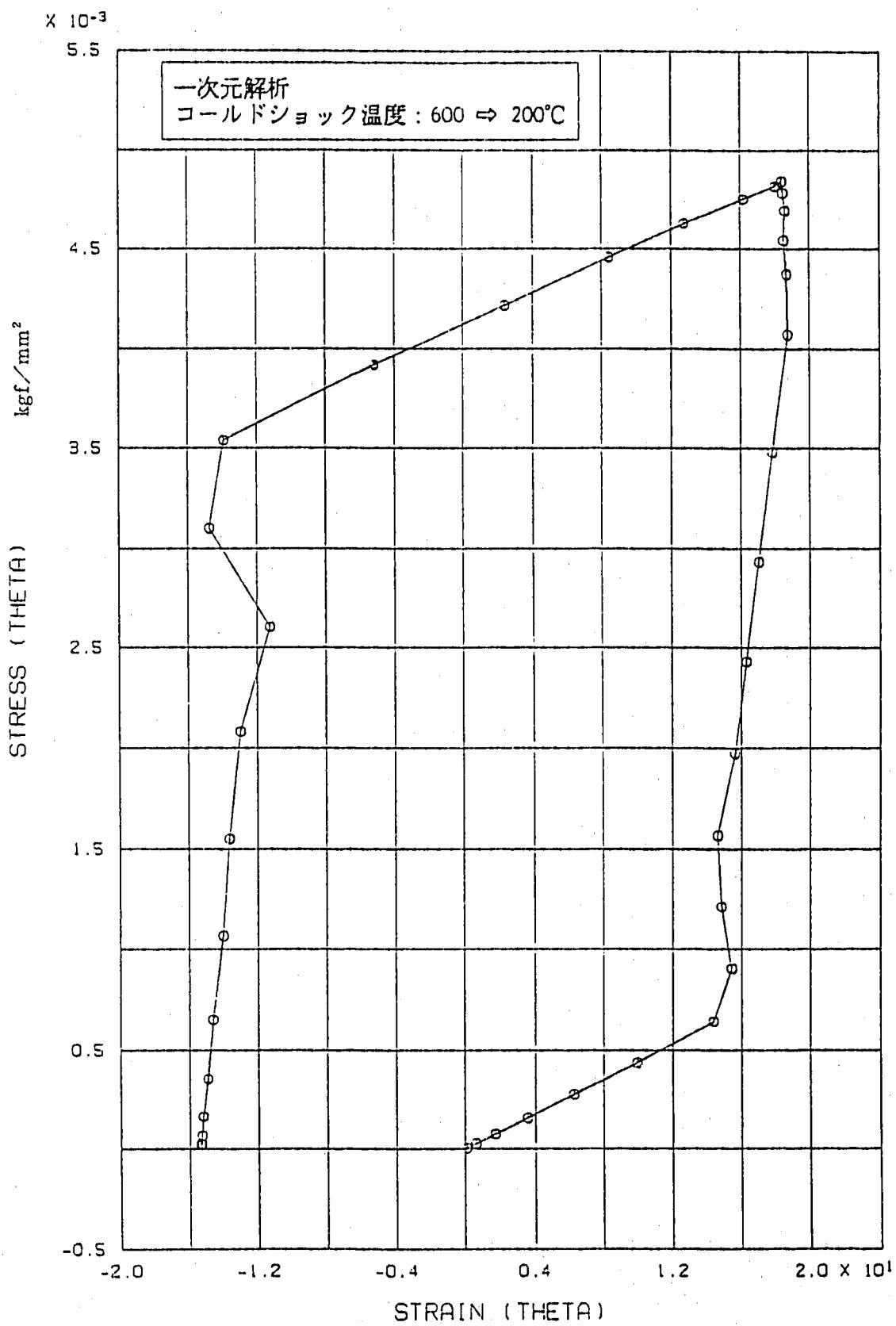


図 2.6(b) 応力ひずみ履歴（中空円筒型試験片, θ 方向）

FINAS

E-12

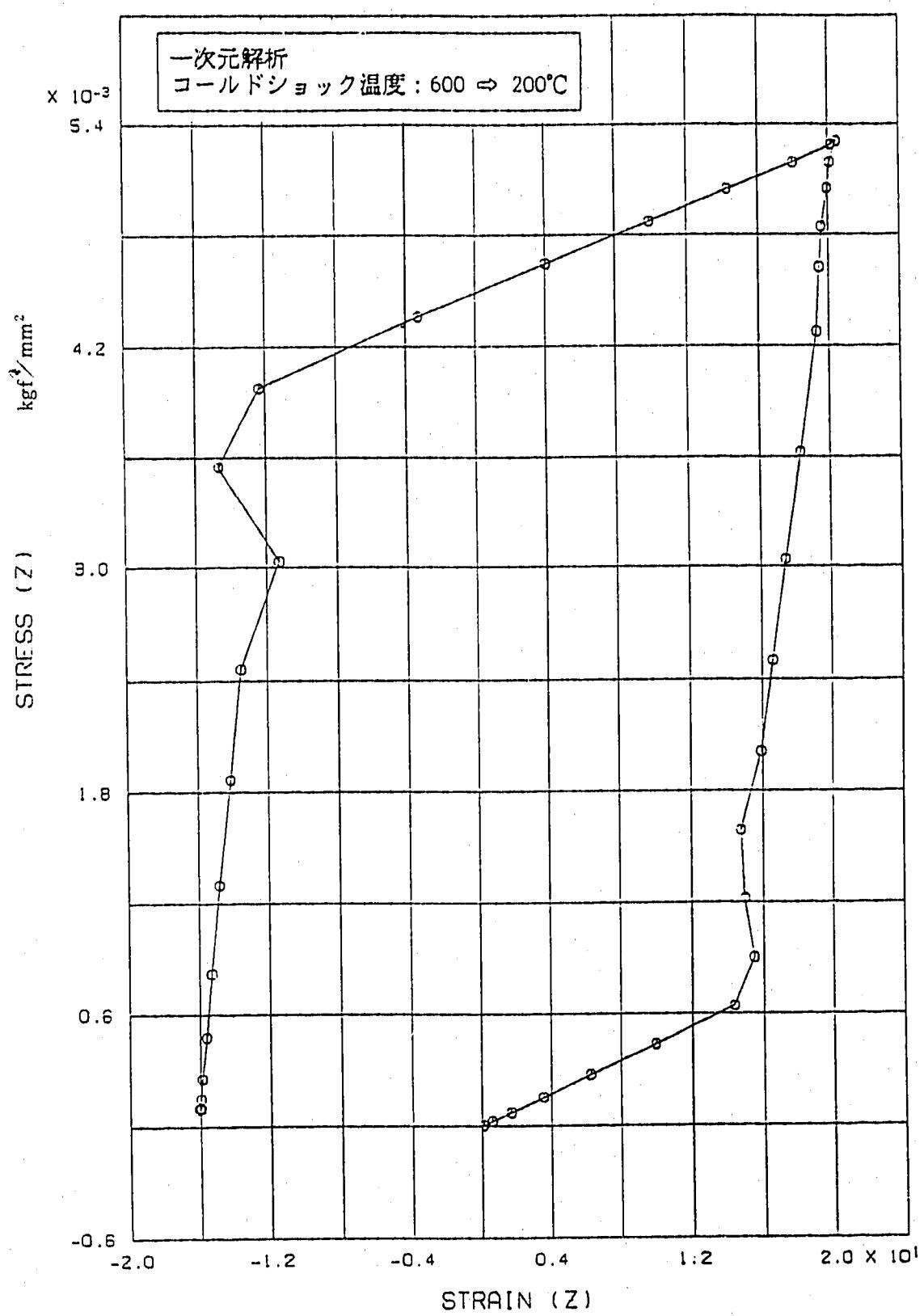


図 2.6(c) 応力ひずみ履歴 (中空円筒型試験片, z 方向)

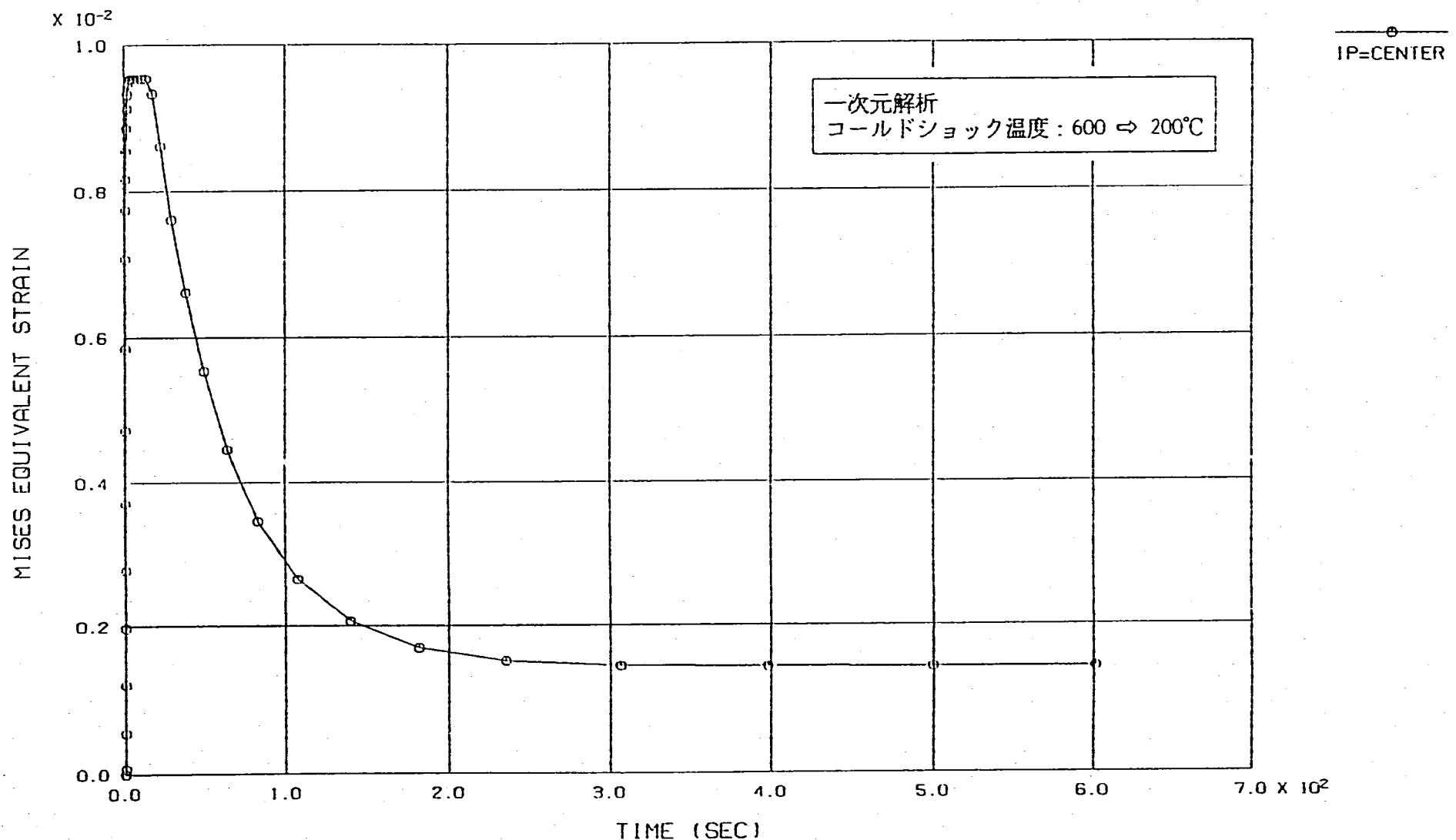


図 2.7 相当塑性ひずみの経時変化(円筒試験片)

FINAS

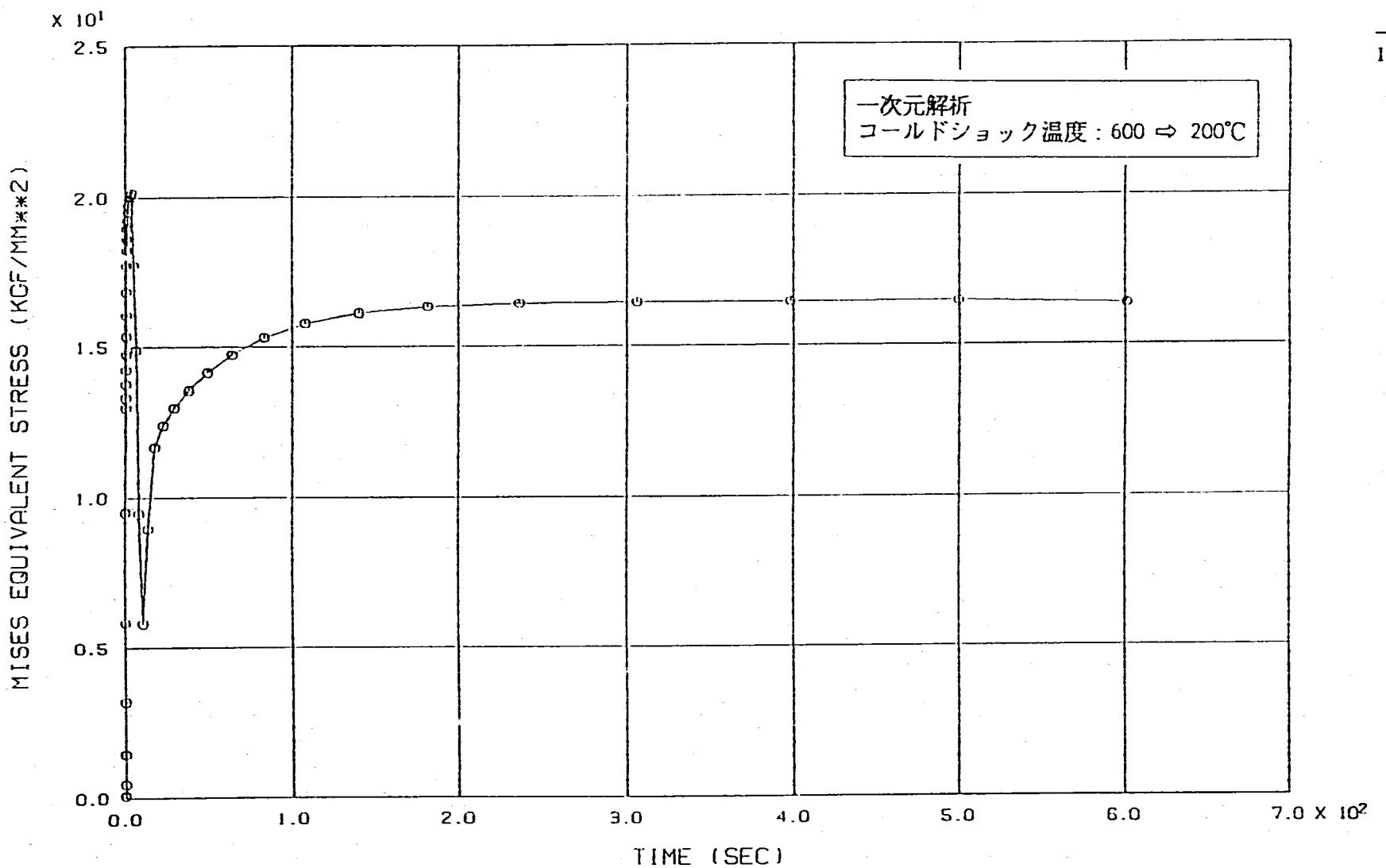


図 2.8 相当応力の経時変化(円筒試験片)

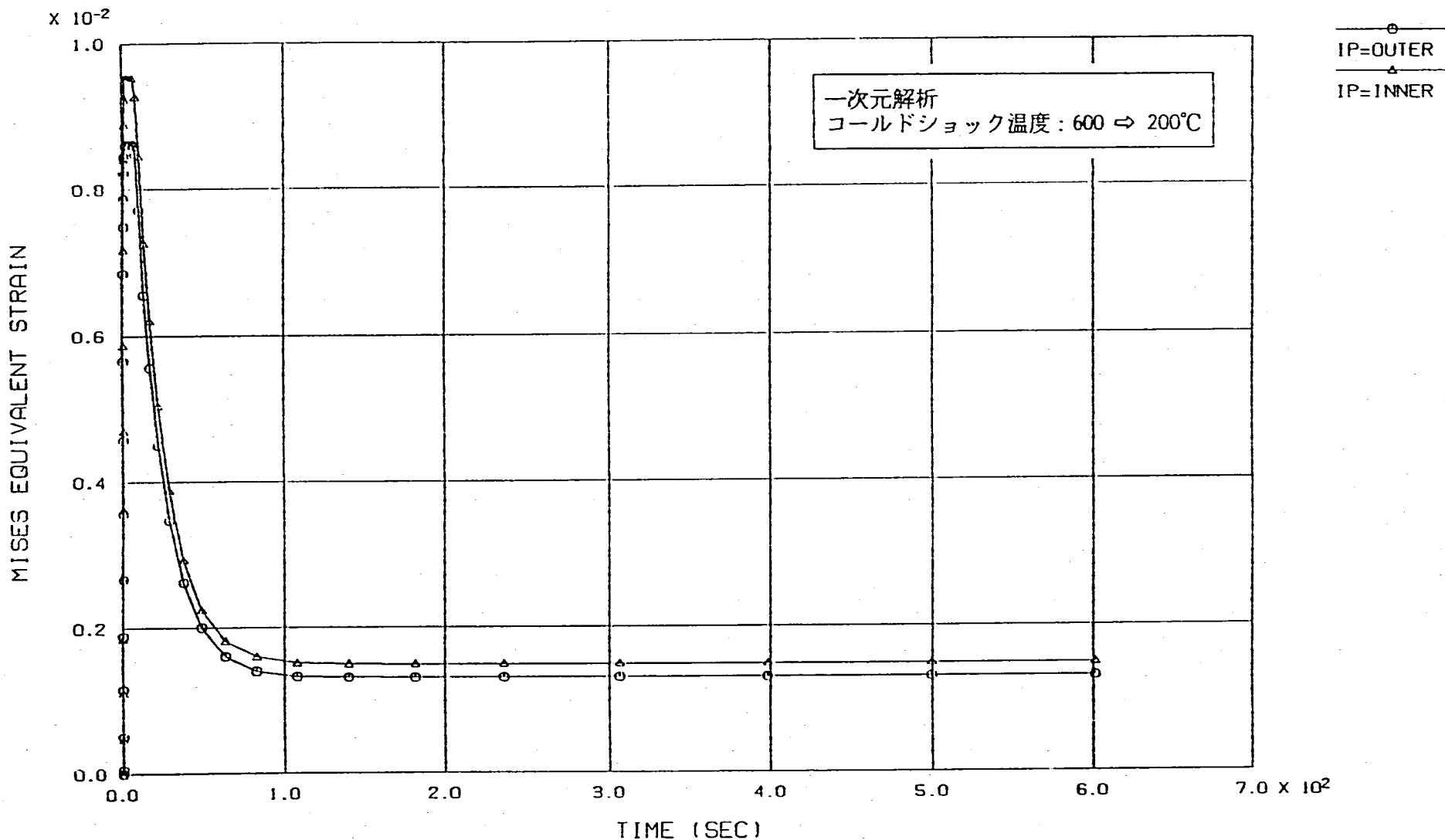


図2.9 相当塑性ひずみの経時変化（中空円筒試験片）

FINAS

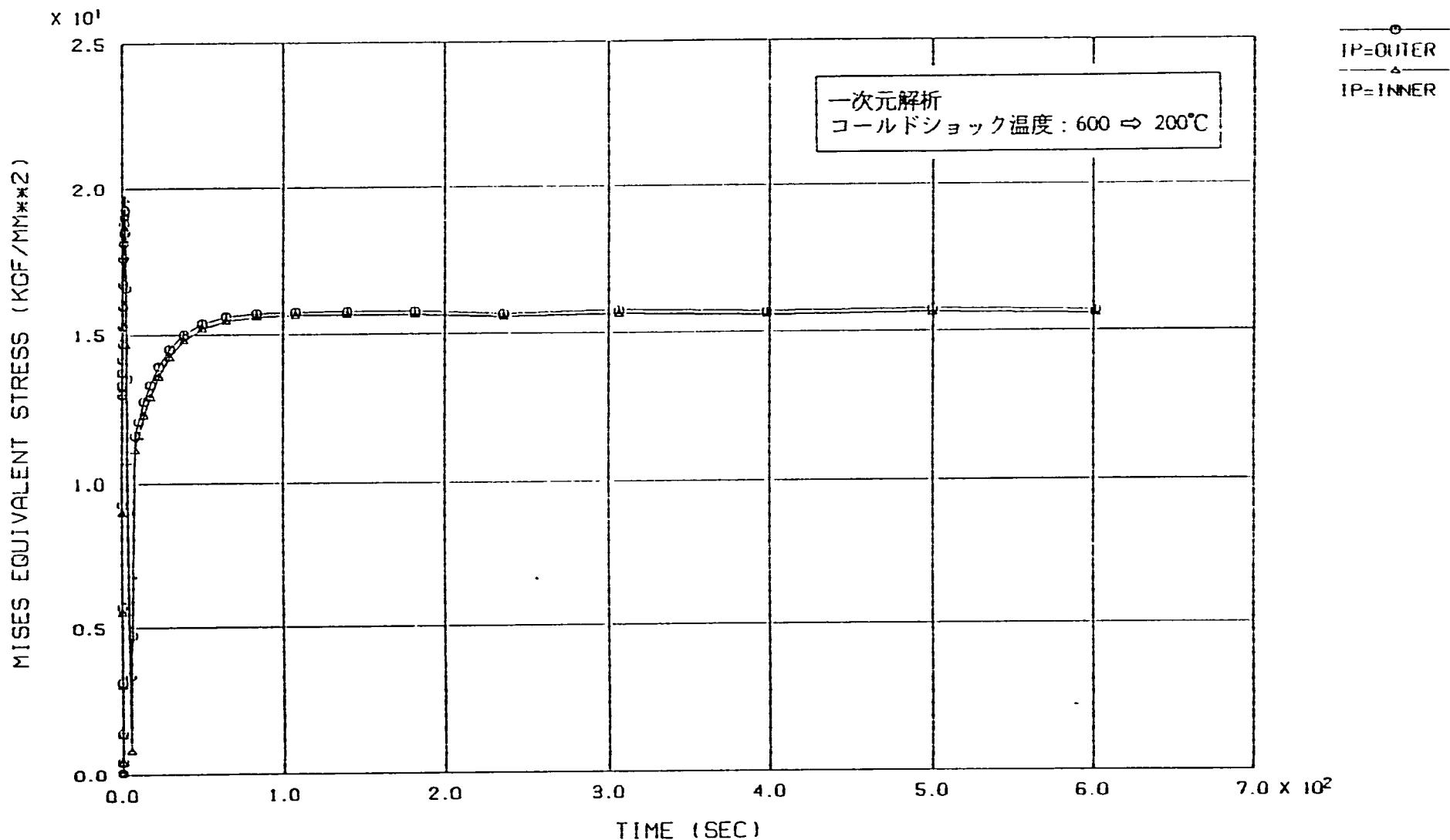


図 2.10 相当応力の経時変化（中空円筒試験片）

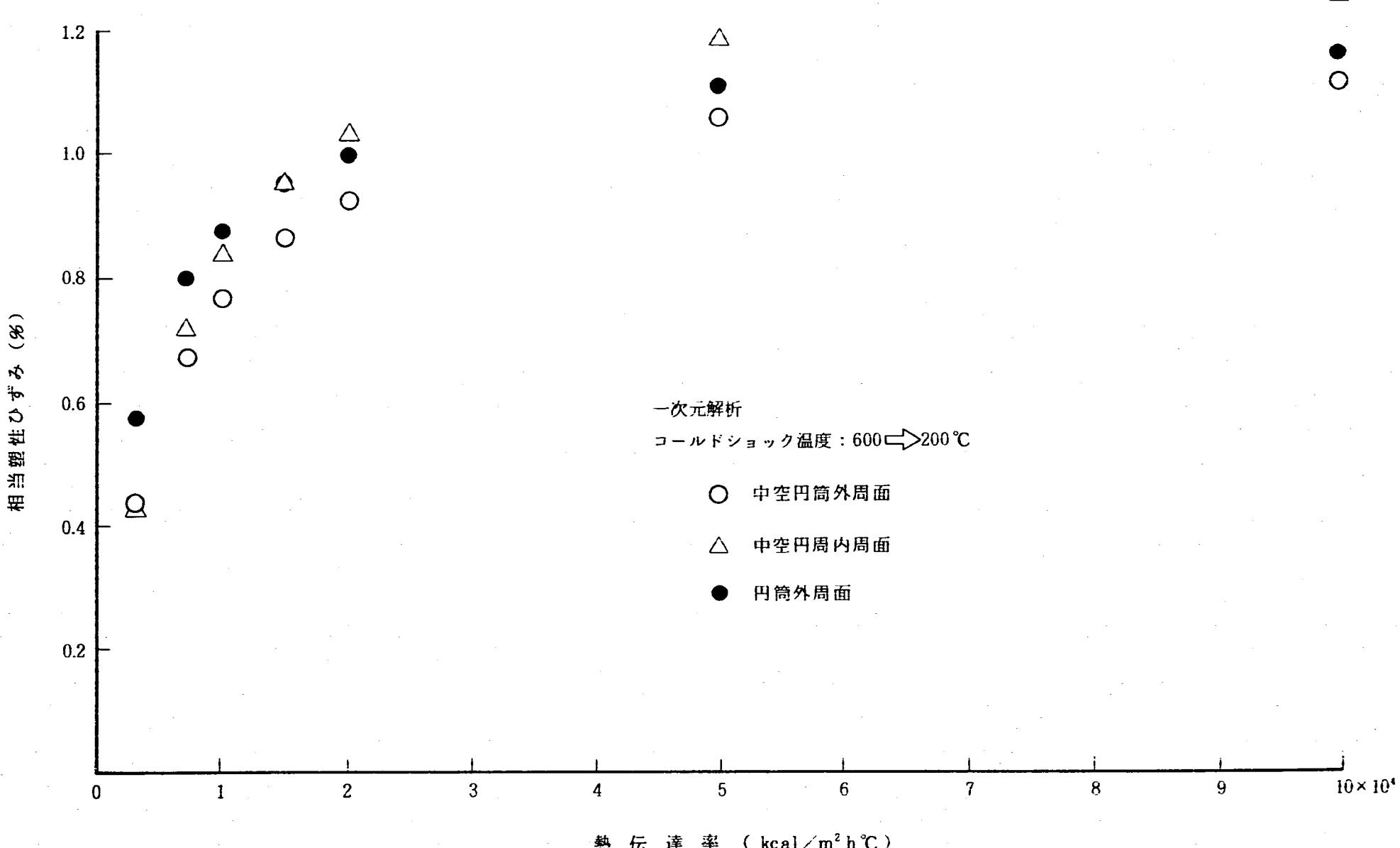


図 2.1.1 热伝達係数と発生相当塑性ひずみの関係

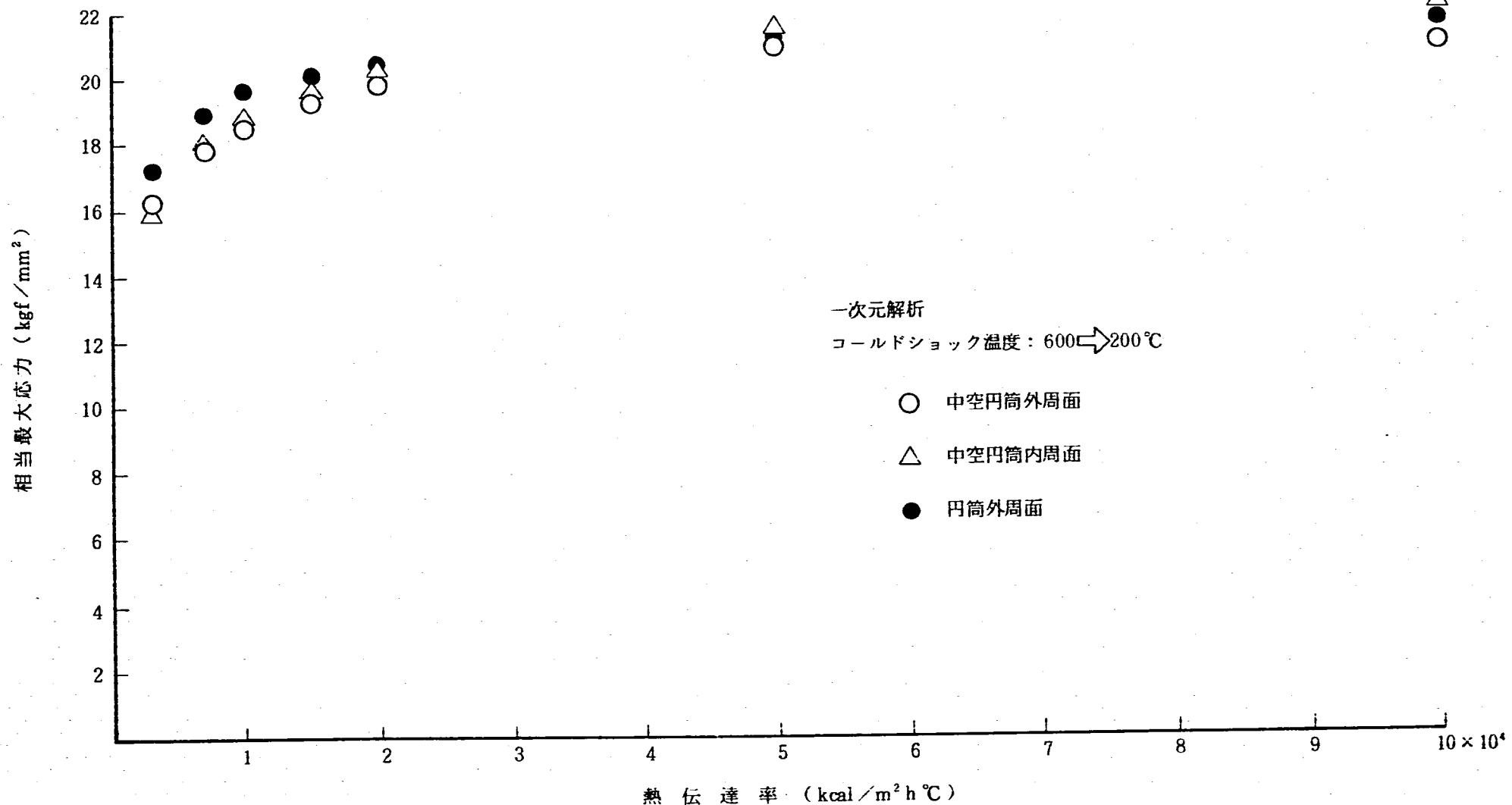


図 2.12 热伝達係数と発生相当応力の関係

一次元解析

$$h = 15000 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

コールドショック ( $200^\circ\text{C}$ )

Mises相当塑性ひずみ (%)

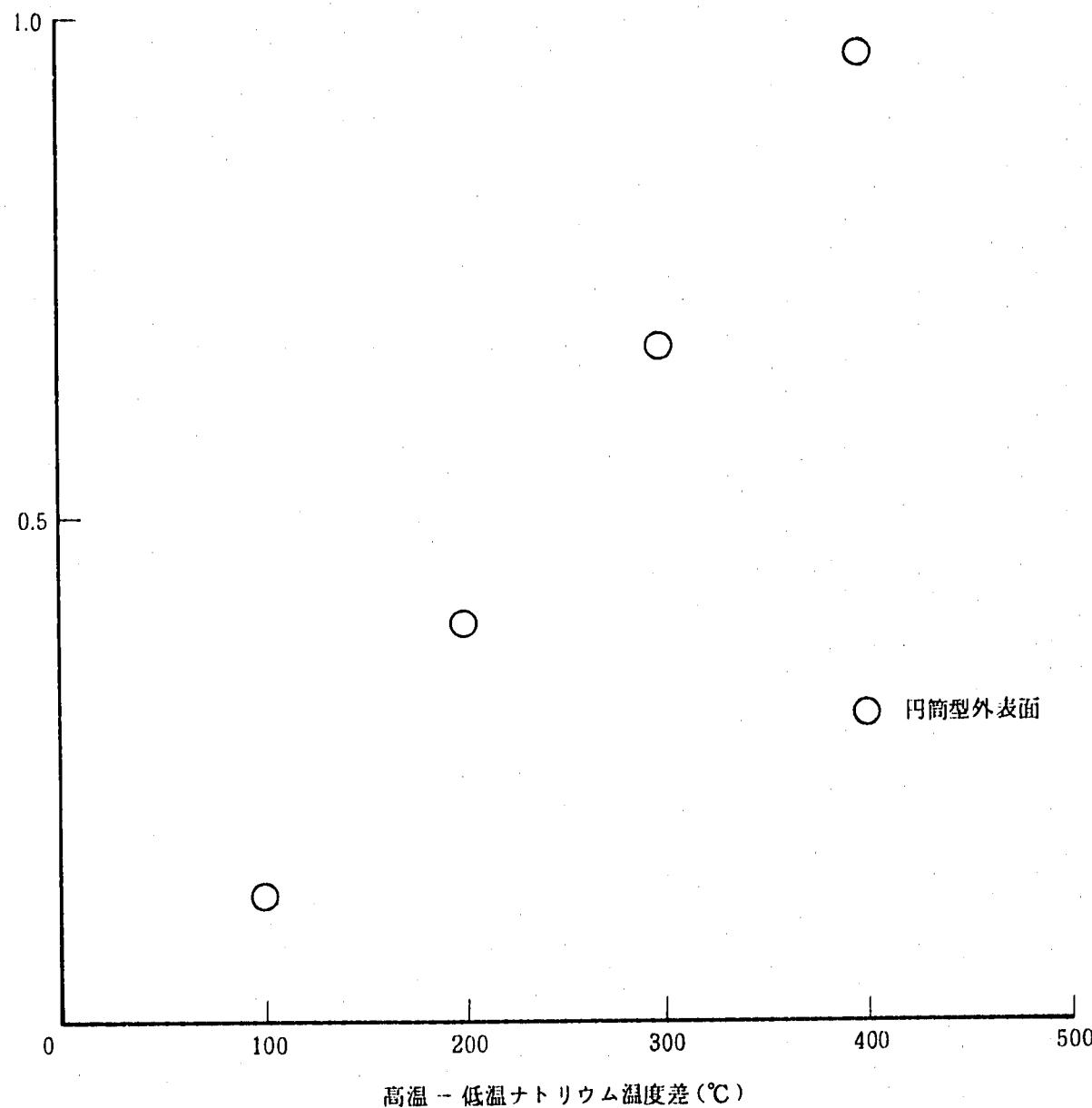


図 2.13 コールドショック時の温度差とMises相当塑性ひずみの関係

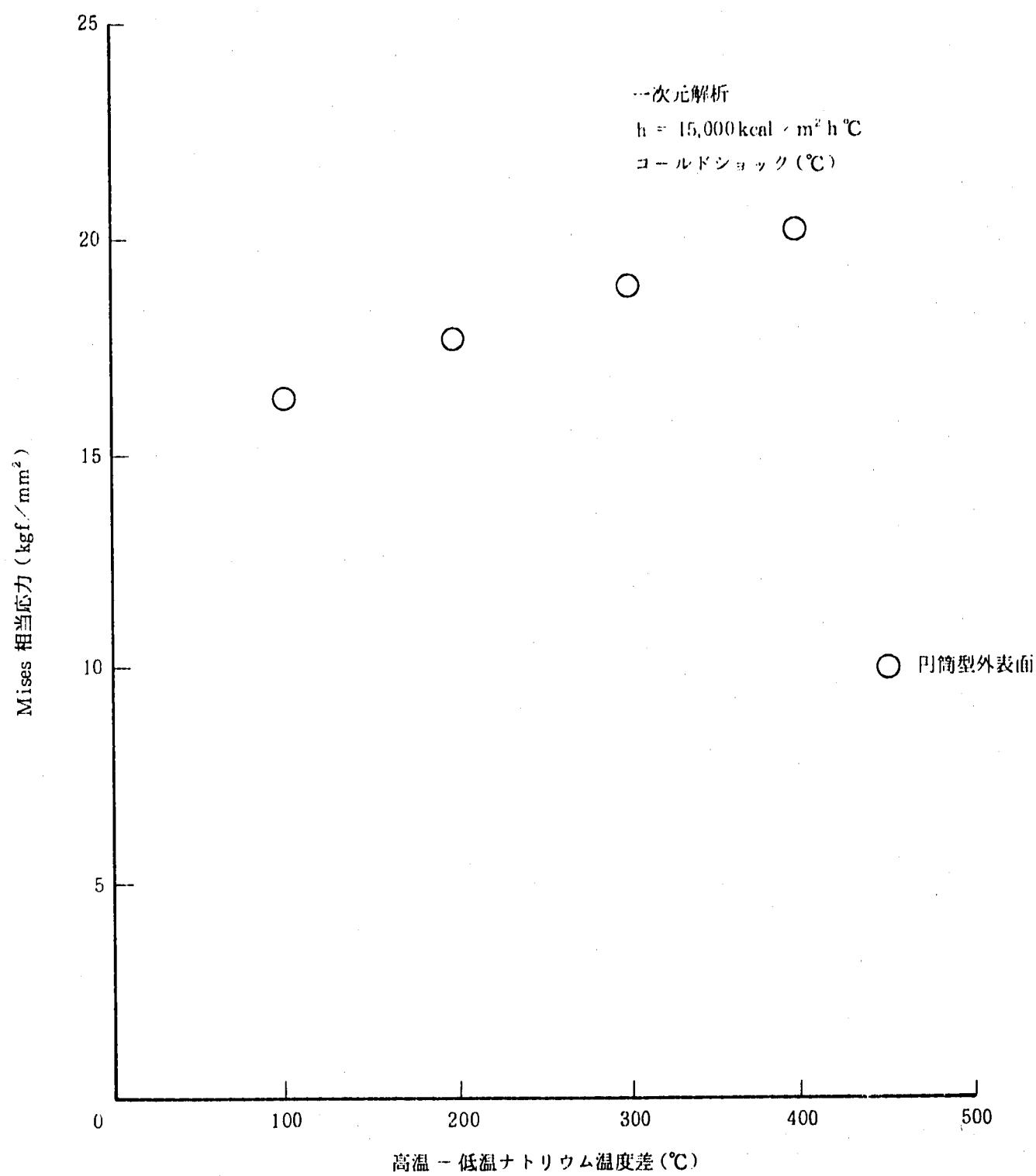


図 2.14 コールドショック時の温度差と Mises相当応力の関係

### 3. 二次元モデルによる熱過渡の解析

#### 3.1 解析の目的及び解析条件

##### 3.1.1 目的

本試験においては試験片は案内管内のナトリウム流（試験片浸漬方向とは逆方向の流れ）に浸漬される（図1.2参照）。従って最初にナトリウムに接液する試験片最下部と、最後に接液する試験片最上部では接液する時間に差があり、軸方向に何らかの温度分布が生じる可能性がある。本章ではこの軸方向の温度分布とこれがひずみ分布及び応力分布に及ぼす影響を検討するため、二次元モデルによる解析を行う。

##### 3.1.2 解析条件

二次元モデルによる解析の場合は、パラメータとして、一次元モデルによる解析の場合に試験片浸漬速度が加わり、次の5つとなる。

- ・高温ナトリウム温度
- ・低温ナトリウム温度（温度差）
- ・熱伝達係数
- ・ナトリウム温度変化速度
- ・試験片浸漬速度

対象試験片は主に本試験で用いられる円筒試験片（図1.3参照）とし、中空円筒試験片については二次元モデルによる解析は行っていない（注1）。円筒試験片のモデル化に当たっては、単純化のため、治具等は無視し、単純な円筒としてモデル化した。モデルを図3.1に示す。

ナトリウム温度は、低温側を200°Cに固定し、高温側を300, 400, 500, 600°Cと変化させ、温度差が100, 200, 300, 400°Cのコールドショックの場合を検討した。

この時、熱伝達係数は15000 kcal/m<sup>2</sup>h°C、ナトリウムの温度変化速度は設定温度差を0.0088秒で変化させることにした。解析条件の一覧表を表3.1に示す。

試験片のナトリウムへの浸漬速度は0.5 m/secとした。

##### 3.1.3 FEM コード

FINASによる解析の詳細条件を表3.2に示す。

(注1) 円筒試験片の外周面、中空円筒試験片の外周面、内周面で発生する応力及びひずみの値に大きな差がないことが第2章の図2.11～12より分かる。この場合、中空円筒試験片では外周面と内周面ではほぼ同時に熱疲労き裂が発生することが予想されるが、内周面のき裂は目視観察が困難であるため、本試験では円筒試験片を主に用いる可能性が高い。

試験片のナトリウムへの浸漬は、図3.2に示すメッシュ分割図において、試験片下部の要素より順番に上に向かって温度変化を与えることによって模擬した。この際の温度変化上昇速度を試験片浸漬速度と対応させた。

### 3.2 解析結果

解析結果を図3.3～10に示す。図3.3は熱伝導解析の結果（円筒試験片の外周面の最下部（図中○印）と最上部（図中△印）の温度の経時変化）、図3.4は試験片外表面軸方向中心における $r$ 、 $\theta$ 、 $z$ 方向の応力ひずみ挙動（ナトリウム温度600～200°Cの場合）、図3.5～6はそれぞれMises型相当塑性ひずみ、相当応力の経時変化（ナトリウム温度600～200°Cの場合）を示したものである。図3.7はMises型相当塑性ひずみの試験片軸方向分布、図3.8はMises相当応力の試験片軸方向分布を示す。なお、図3.4には、コールドショック時の応力ひずみ応答とホットショック時の応力ひずみ応答を比較するため、600～200°Cのコールドショックのみを与えた場合((a)～(c))と、これに引き続き200～600°Cのホットショックを与えた場合((d)～(f))を併せて示した。この2ケースの比較((a)と(d)、(b)と(e)、(c)と(f)が対応)により、コールドショックの応力ひずみ挙動とホットショックの応力ひずみ挙動はほぼ対称であると考えてよいことが分かる。従って以下のコールドショックに関する検討はそのままホットショックについても当てはまると考えてよい。

代表例として、ナトリウム温度が600～200°Cの場合について検討する。図3.3a)により熱伝導を検討すると、試験片浸漬速度を考慮することにより、最初にナトリウムに接液する試験片下部と、これより遅れて（遅れ時間は試験片浸漬速度と試験片長さの積であたえられる）浸漬される試験片最上部で温度変化に時間差がみられることが分かる。この温度差は試験片最下部浸漬後約0.21秒で最大となり、その時の温度差は210°Cである。この時点以後、試験片軸方向の温度差は減少し始め、約3秒後にはほぼ均熱状態（軸方向温度差±1°C以内）に達する。

図3.4(a)～(d)より、二次元解析の場合も、応力ひずみ応答は一次元解析の場合と同様に、等二軸状態に近い状態となっていることが分かる。

次に、図3.3(a)に示した熱伝導解析をもとに行った熱応力解析の結果を図3.7(a)及び図3.8(a)により検討する。図3.7(a)はMises型相当塑性ひずみの軸方向分布を代表的時点について示したものである。試験片の浸漬に伴って試験片下部から徐々にひずみが発生し、3.37秒後にピーク値をとる。ピーク値は軸方向中心付近で約0.95%である。その後ひずみは減少し、600秒浸漬後の残留ひずみは約0.16%である。この時点のひずみの最大値は軸方向中心付近ではなく、両端から約15mmの2点で、その値は0.25%である。次に図3.8(b)はMises型相当応力の軸方向分布の経時変化を示したものである。ひずみと同様試験片下部から応力が発生し、3.37秒後に軸方向中心位置で最大値をとる。この時の最大値は約20kgf/mm<sup>2</sup>である。600秒浸漬後の残留応力は中心付近では16.9kgf/mm<sup>2</sup>程度であるが、ピーク値はひずみ同様軸方向中心位置ではなく、両端から15mm程度の2点に現れている。この時の値は23kgf/mm<sup>2</sup>程度である。

その他の温度差の場合を図 3.7 (b)～(d) 3.8 (b)～(d)により検討すると、ナトリウム温度が 500 - 200°C, 400 - 200°C, 300 - 200°C の場合も、600 - 200°C の場合と定性的傾向に差はないことが分かる。

### 3.3 热過渡温度差の影響の検討

前節の解析結果より、コールドショックにおける热過渡温度差と発生する Mises 型相当塑性ひずみの関係をプロットした図を図 3.9 に示す。热過渡温度差の増加に伴い、発生するひずみの大きさも比例的に増加することが分かる。同様の傾向が図 3.10 より相当応力についても読み取れる。温度差が 10 パーセント変動した場合の相当塑性ひずみ、相当応力の変動はそれぞれ 12%, 2 ~ 3 % 程度であり、1 次元解析の場合とほぼ同じであることが分かる。なお、これらの相当応力、相当塑性ひずみはいずれも試験片軸方向中心位置における最大値である。

### 3.4 一次元モデルによる解析と二次元モデルによる解析の対比

2 章で行った一次元モデルによる解析結果と、本章で行った二次元モデルによる解析結果を比較した結果を図 3.11 ~ 12 に示す。図 3.11 は Mises 型相当塑性ひずみについて、図 3.12 は Mises 型相当応力について示したものである。いずれの場合も両者の差は非常に小さいことが分かる。

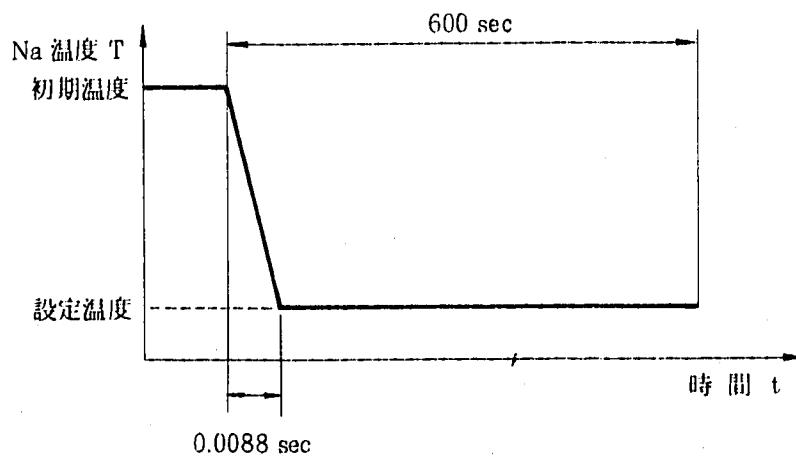
表 3.1 解析条件一覧表(二次元解析)

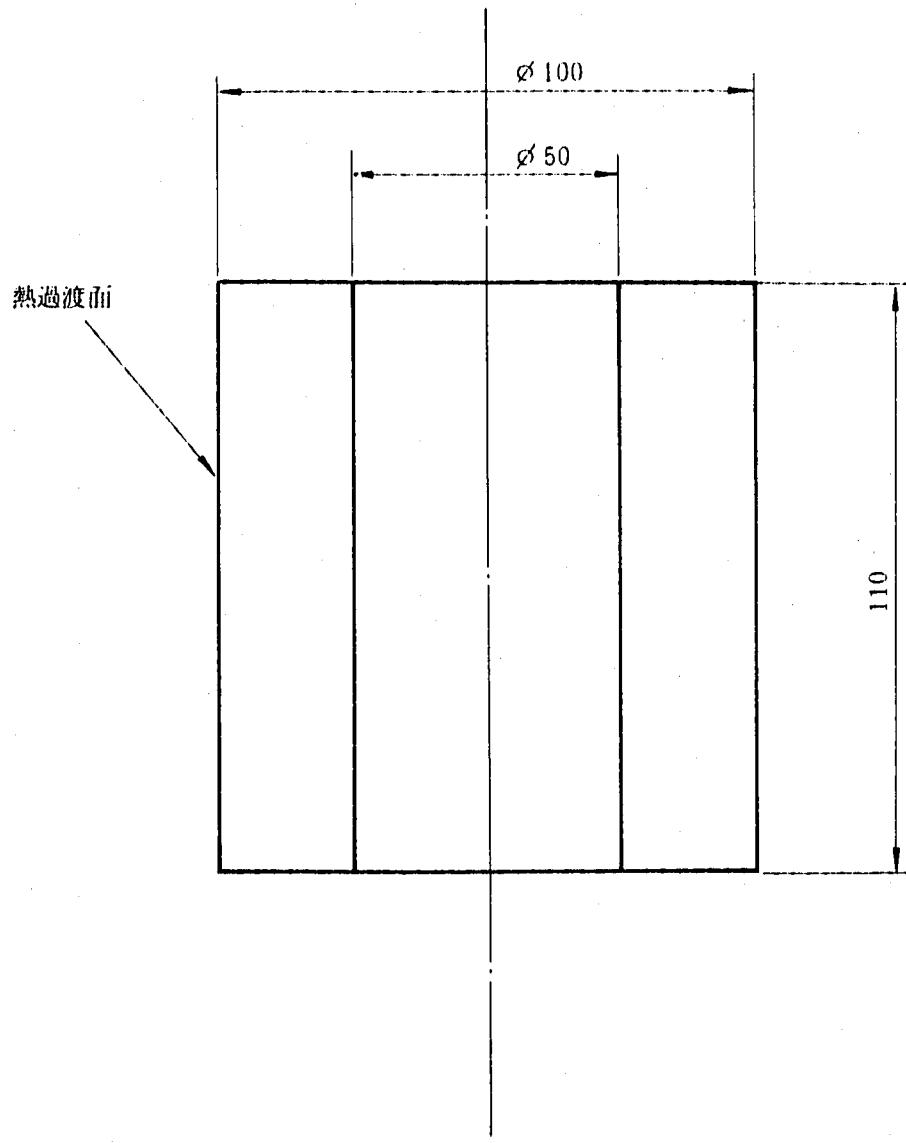
試験片浸漬速度 = 0.5 m/sec, 浸漬時間 = 600 sec

	高温ナトリウム温度 °C	低温ナトリウム温度 °C	熱伝達係数 kcal/m <sup>2</sup> h °C	Na温度変化速度 °C/sec
1	600	200	15,000	45,455
2	500			34,091
3	400			22,727
4	300			11,364

表 3.2 FEM 解析条件  
(熱伝導解析および熱応力解析)

- (1) 使用コード FINAS
- (2) 使用要素 热伝導解析………HQAX 8：热伝導 8 節点 4 边形軸対称要素  
热応力解析………QAX 8：8 節点 4 边形軸対称要素
- (3) モデルの寸法および要素分割  
図 3.2 に示す。
- (4) 境界条件 図 3.2 に示す。
- (5) 热過渡解析 热過渡面(図 3.2 に示す)に接液するナトリウム温度を設定温度(表 3.1 に示す)まで 0.0088 秒で变化させる。(下図参照)。
- (6) 応力解析における物性値  
FINAS に組み込みの物性値(SUS 304)を使用。縦弾性係数、ポアソン比、線膨張係数を表 2.2(2)に、降伏応力、加工硬化係数は表 2.2(3)に示す。ただし、最大負荷レベルは 1 % を想定した。いずれも温度依存性を考慮した。
- (7) 応力ひずみ関係 2 直線近似とし、弾塑性解析を行った。
- (8) ひずみ硬化則 移動硬化則を用いた。





円筒型試験片

図 3.1 二次元解析モデル

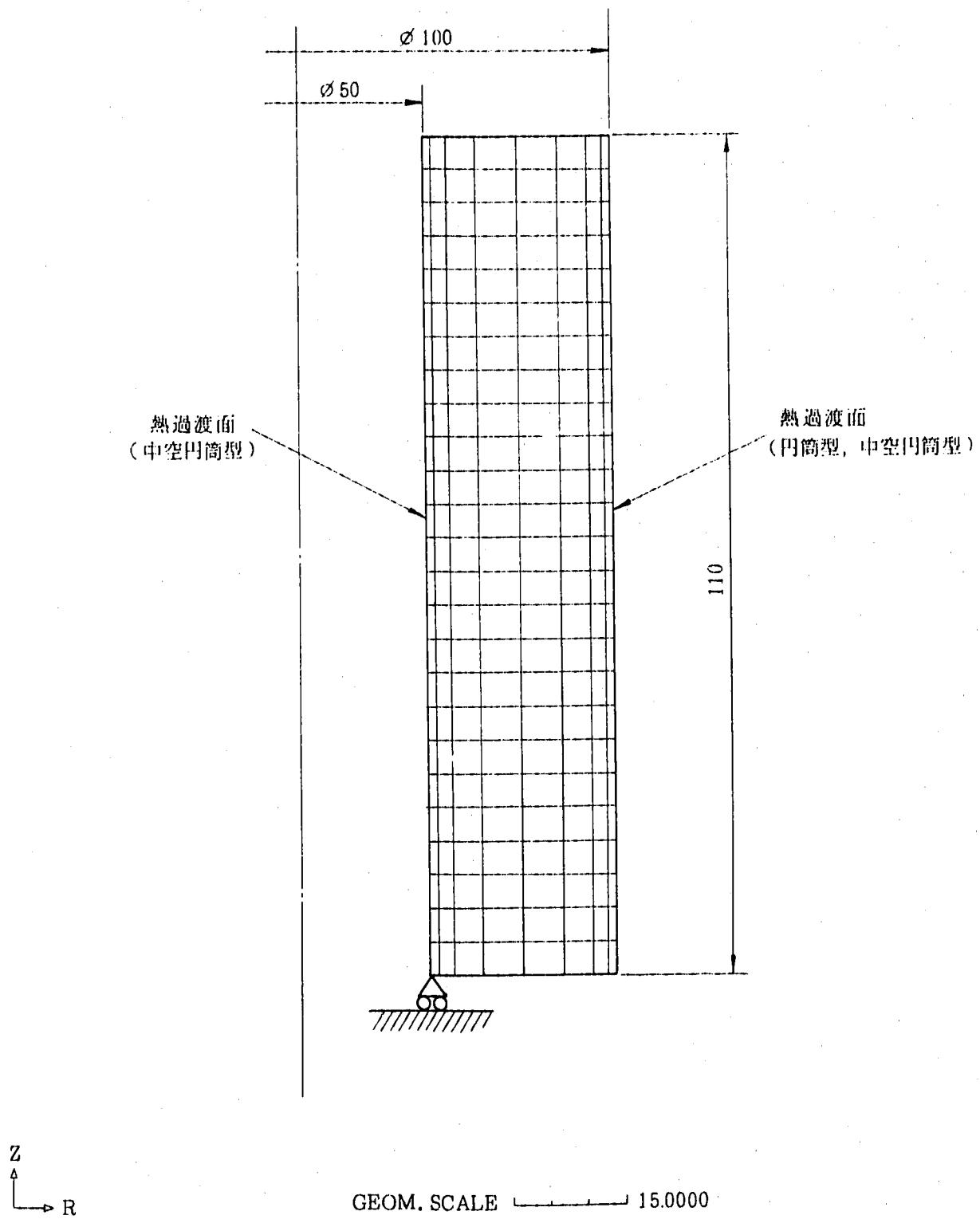


図 3.2 二次元解析メッシュ分割図

FINAS

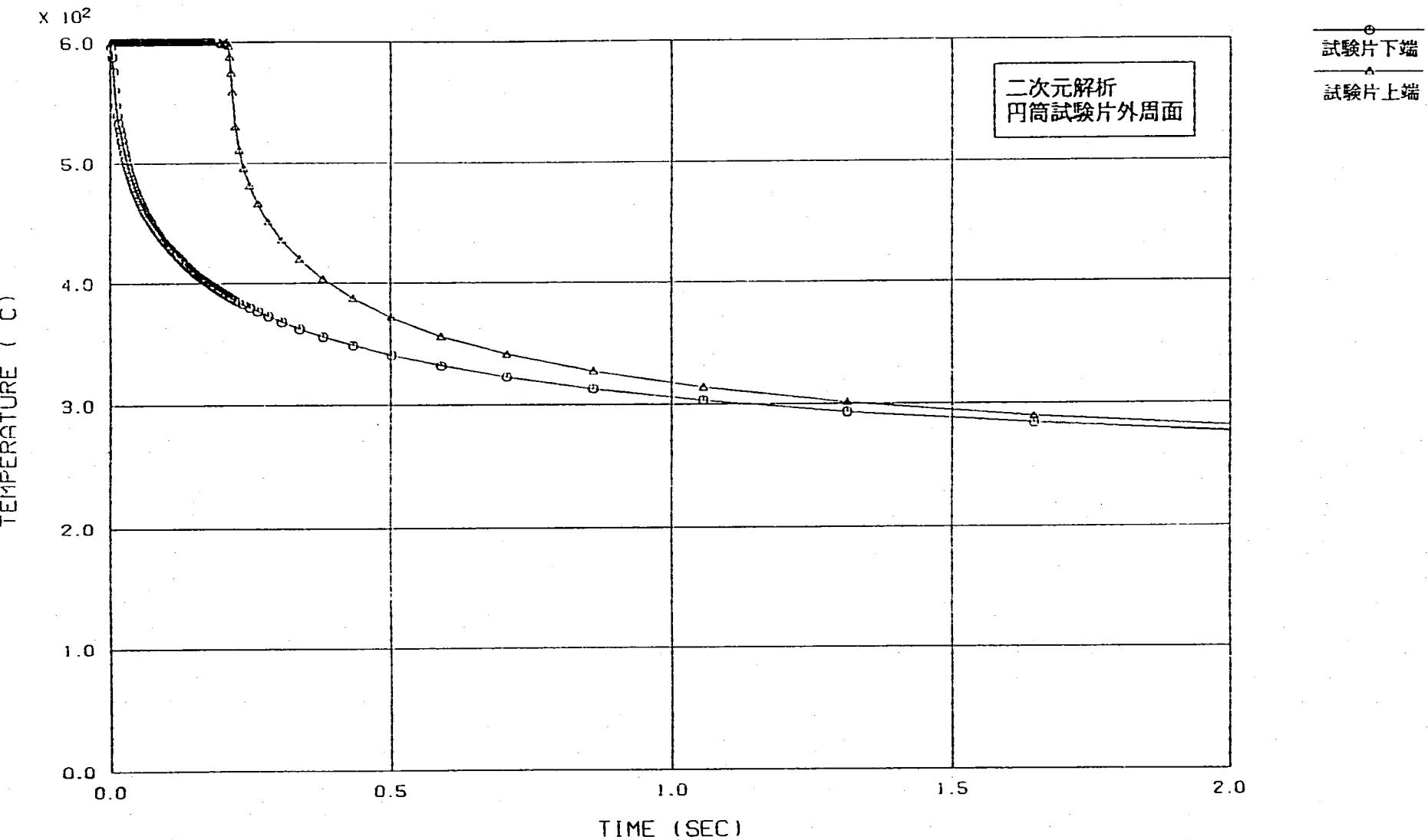


図 3.3(a) 溫度変化の軸方向分布 (600 - 200°C の場合)

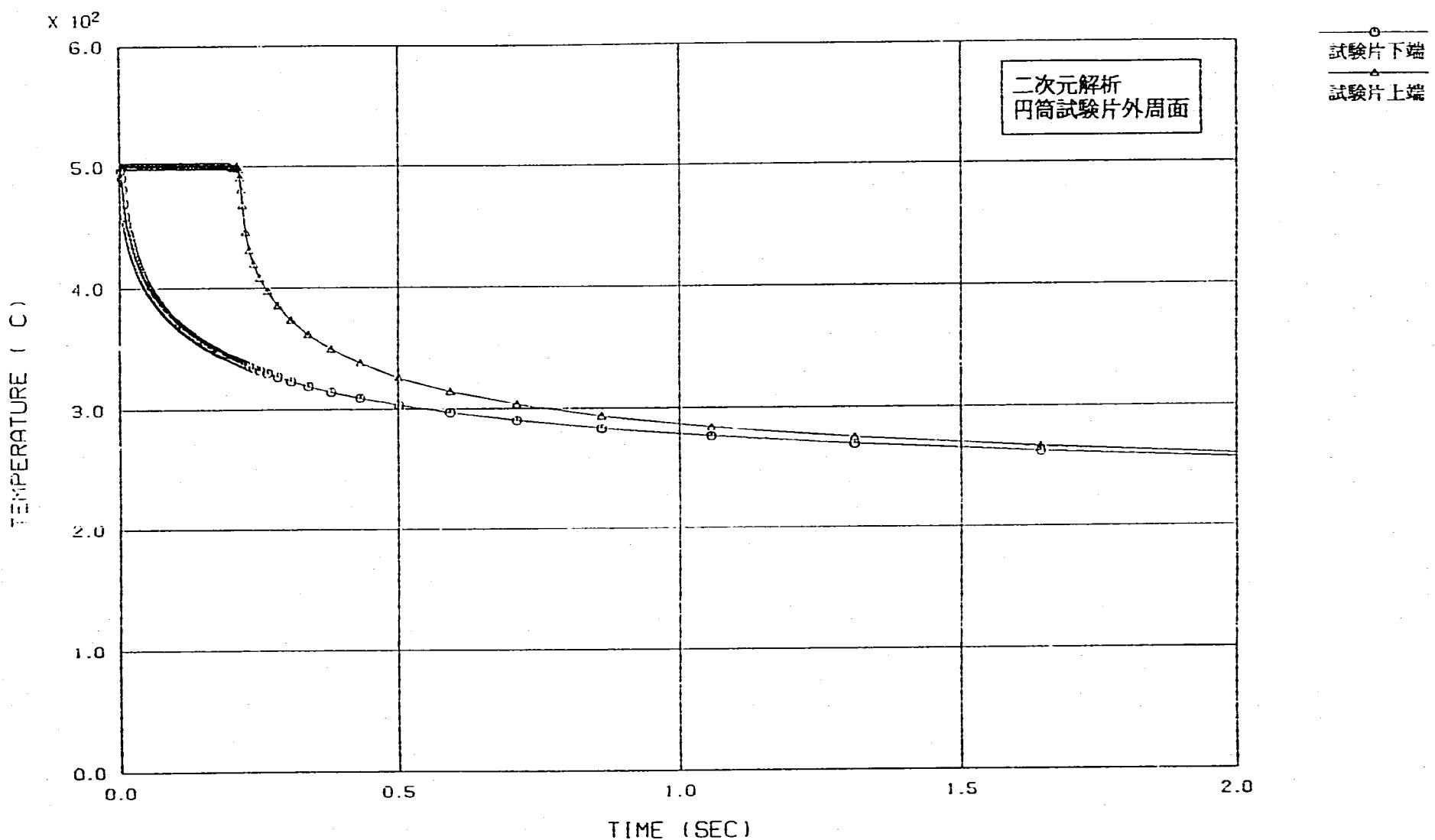


図 3.3(b) 温度変化の軸方向分布 (500 - 200°C の場合)

FINAS

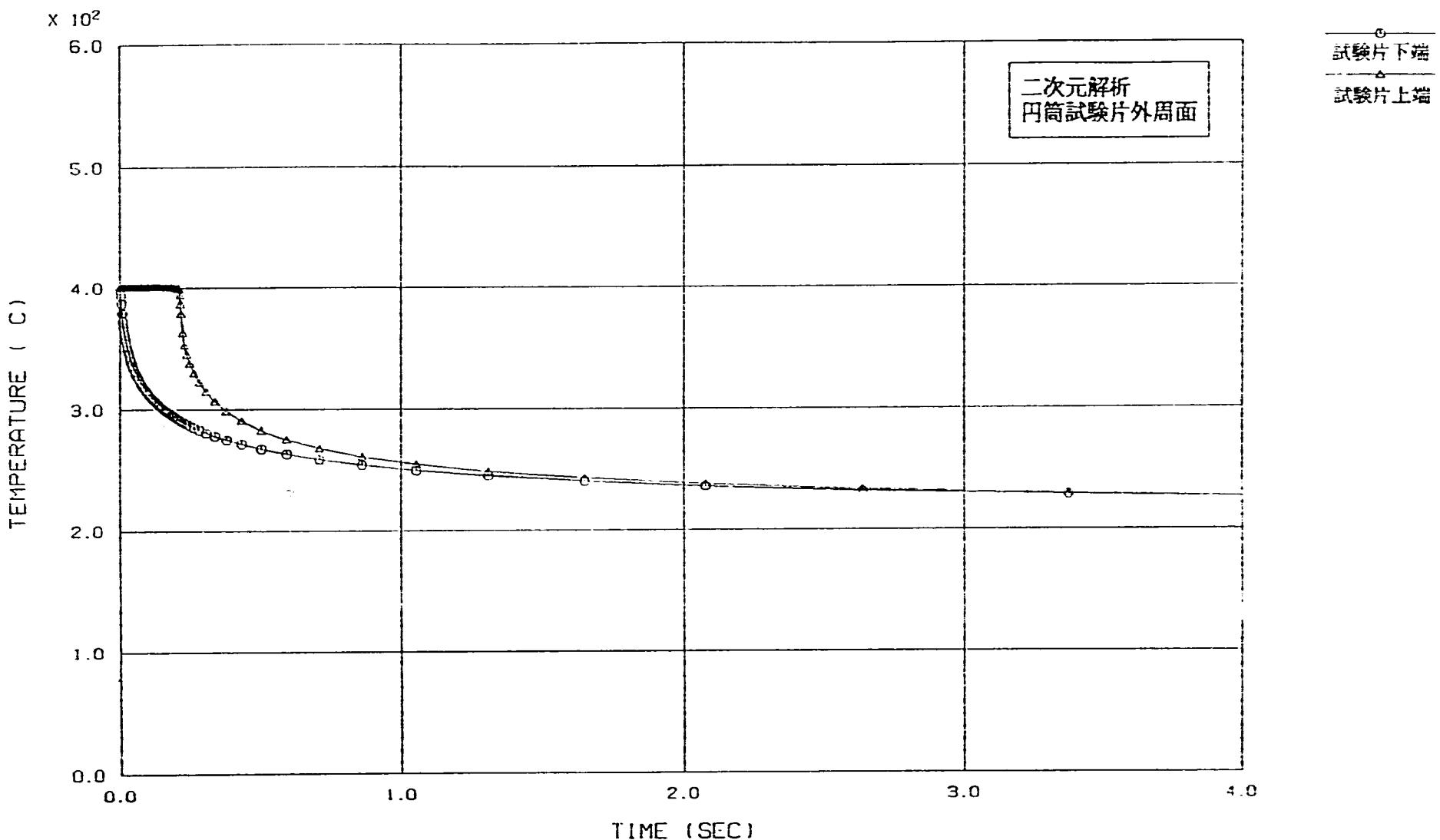


図 3.3(c) 温度変化の軸方向分布 (400 - 200°C の場合)

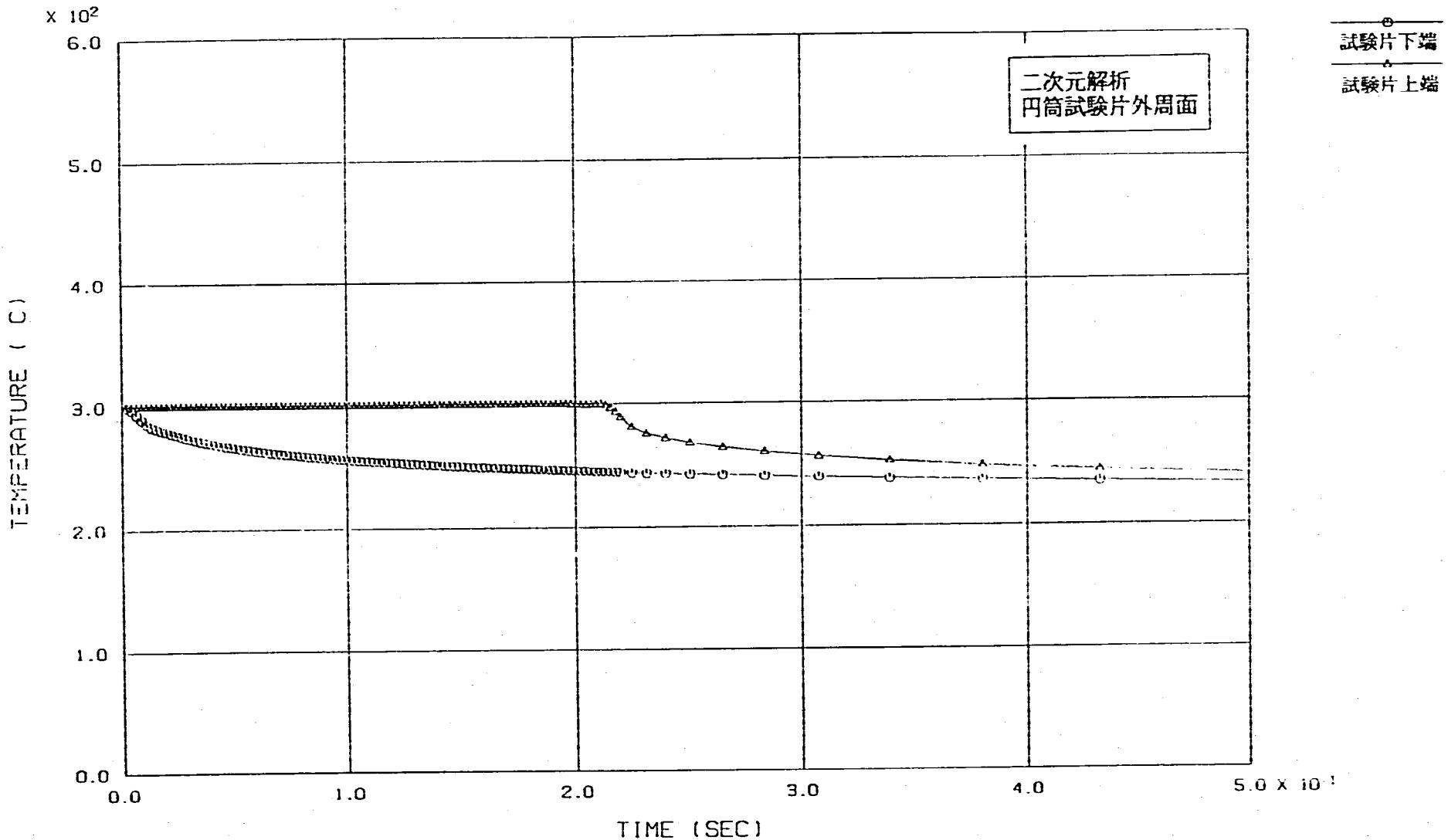


図3.3(d) 温度変化の軸方向分布 (300 - 200°C の場合)

FINAS

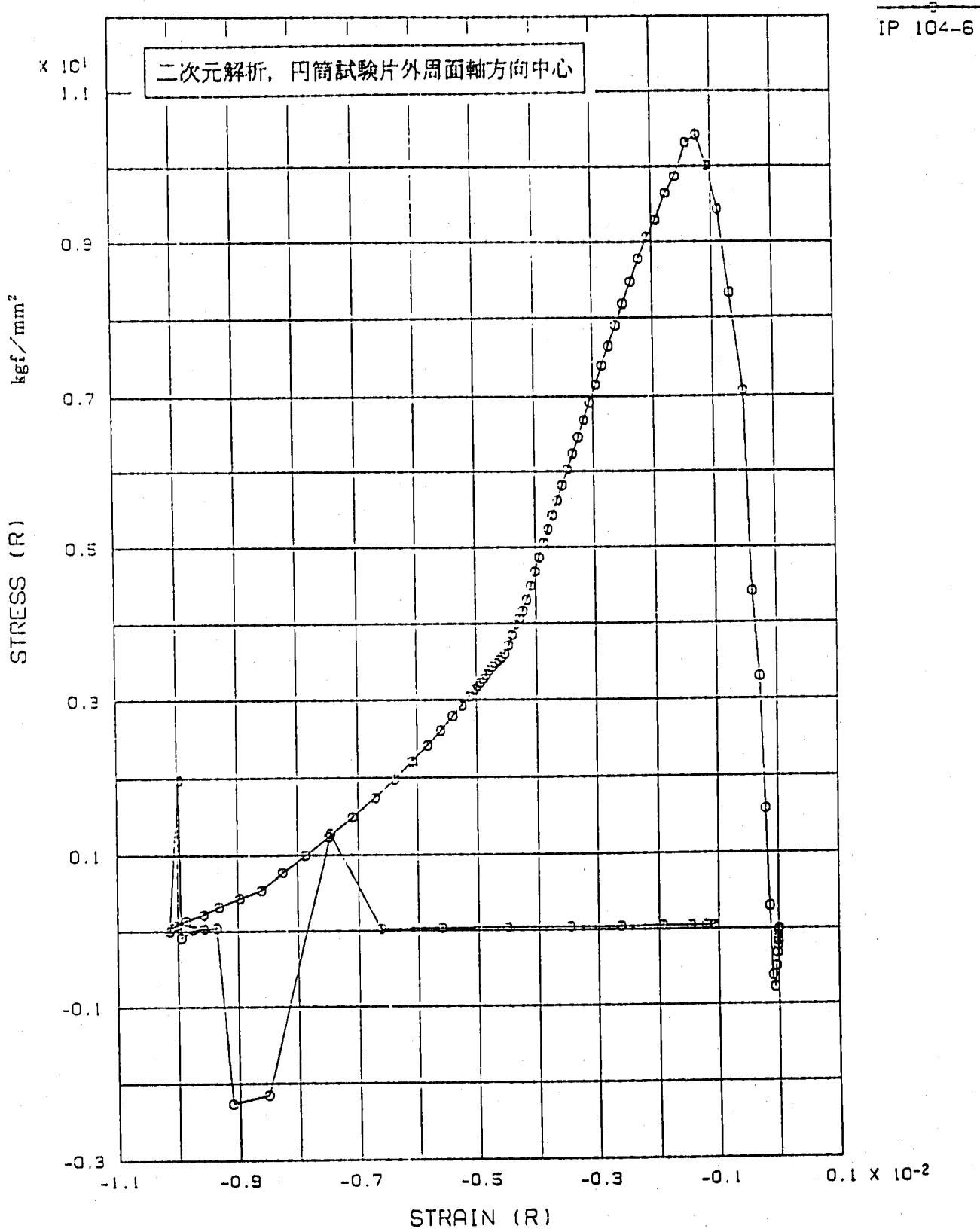
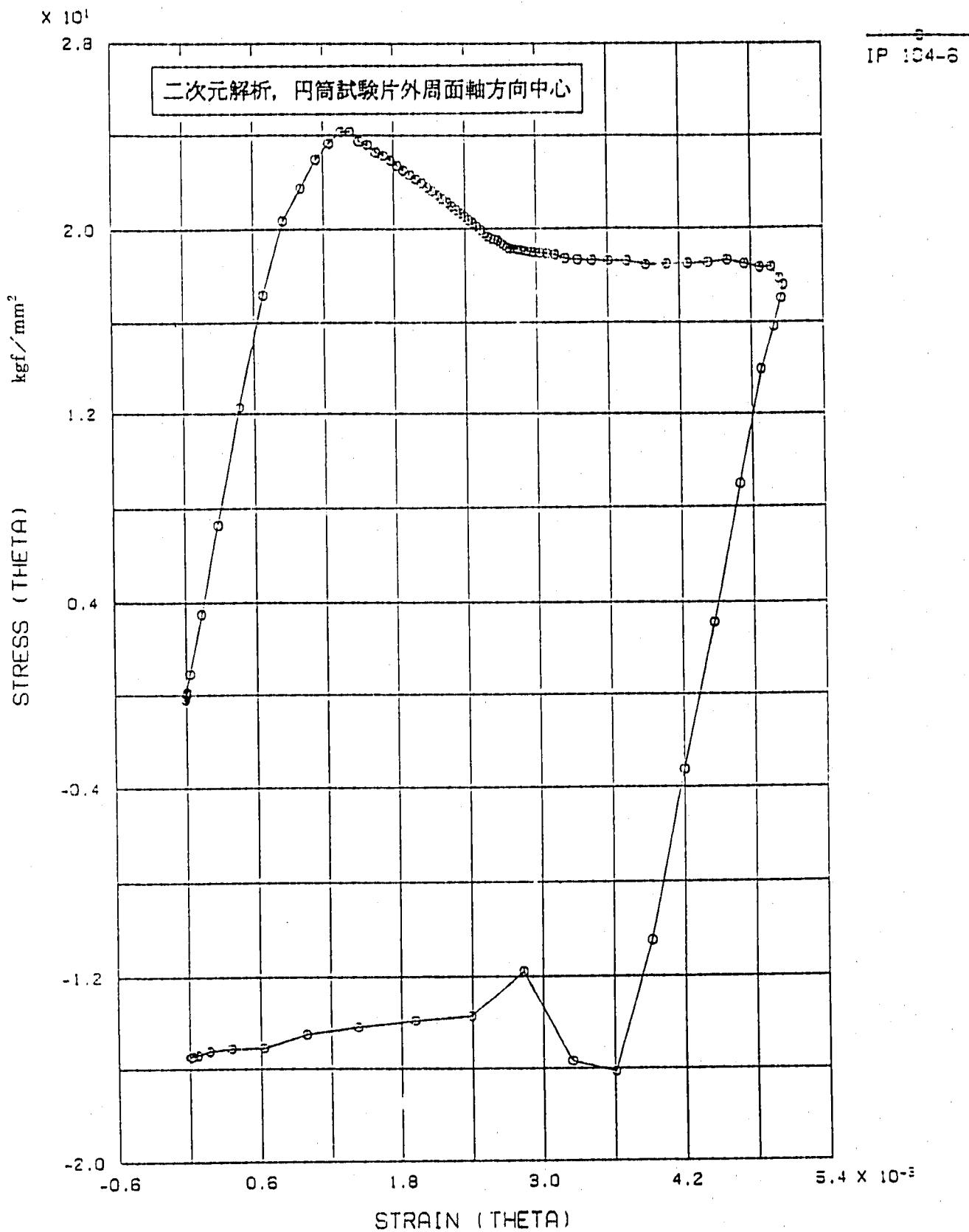


図 3.4 (a) 応力ひずみ履歴 (円筒型試験片, r 方向, 600 - 200°C)

FINAS

図3.4(b) 応力ひずみ履歴(円筒型試験片,  $\theta$ 方向, 600 - 200°C)

FINAS

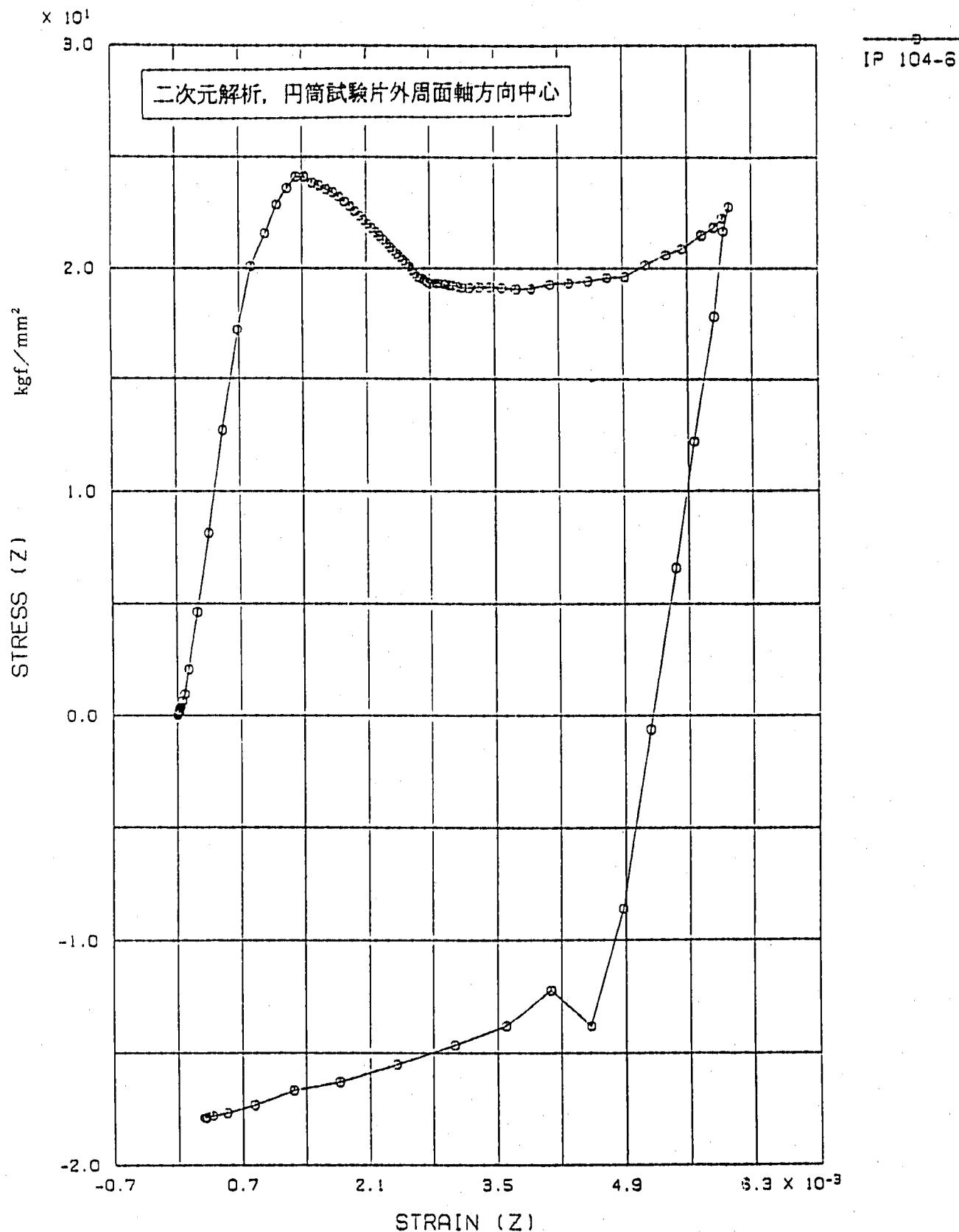
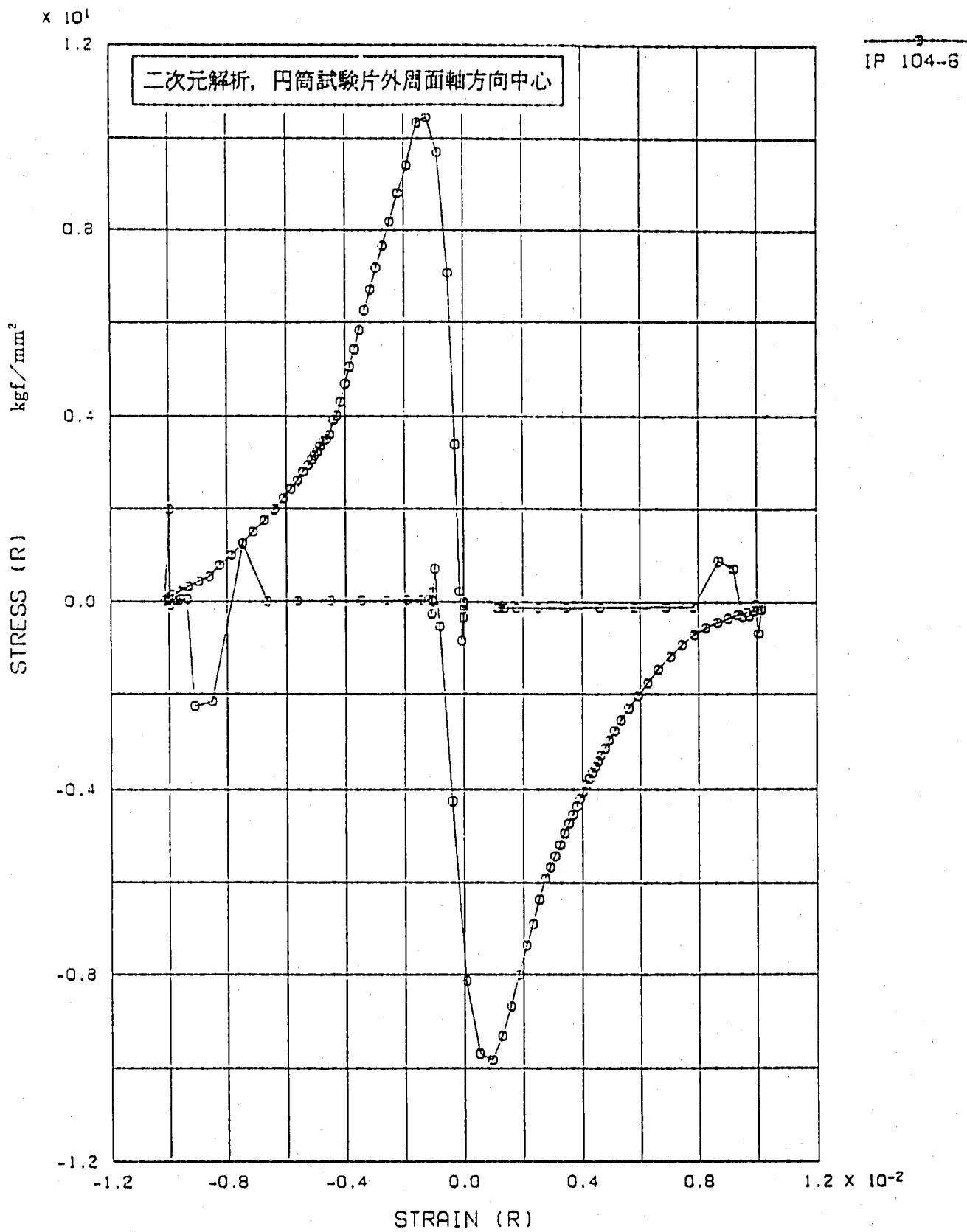
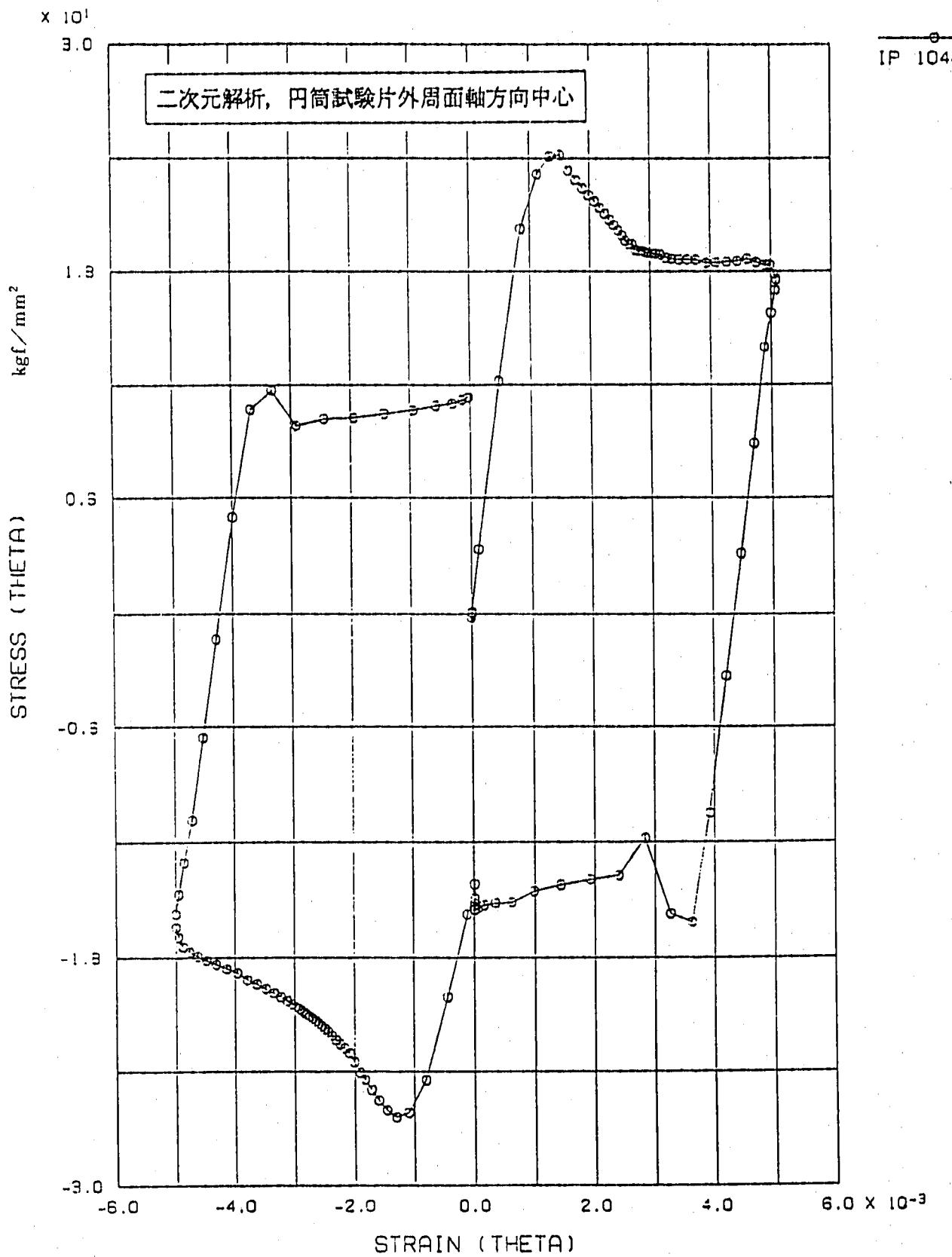


図 3.4(c) 応力ひずみ履歴(円筒型試験片, z 方向, 600 - 200°C)

FINAS

図 34(d) 応力ひずみ履歴 (円筒型試験片,  $r$  方向,  $600 - 200 - 600^\circ\text{C}$ )

FINAS

図 3.4(e) 応力ひずみ履歴(円筒型試験片,  $\theta$  方向, 600 - 200 - 600°C)

FINES

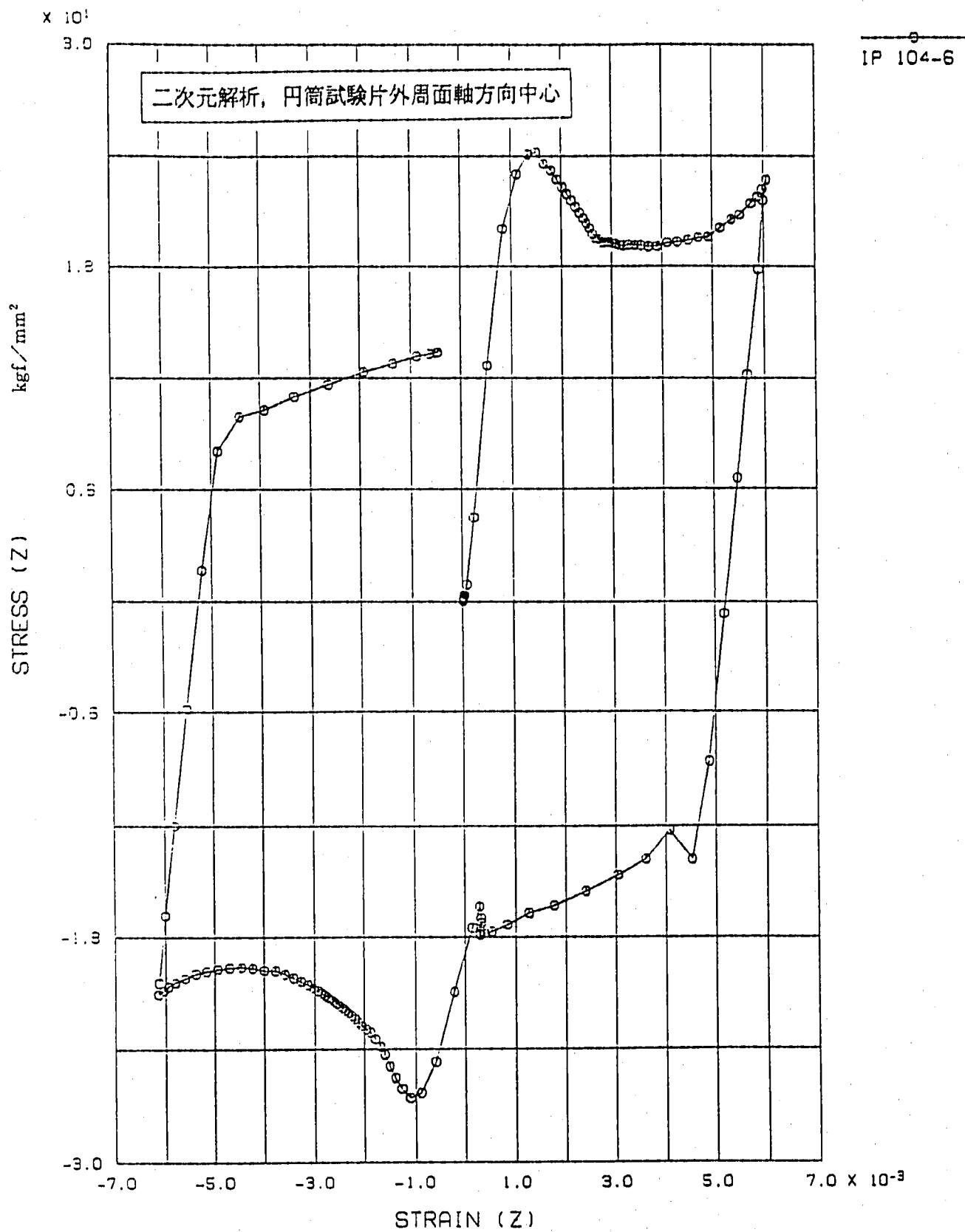


図 3.4(i) 応力ひずみ履歴(円筒型試験片, z 方向, 600 - 200 - 600°C)

FINAS

PNC SN9410 90--054

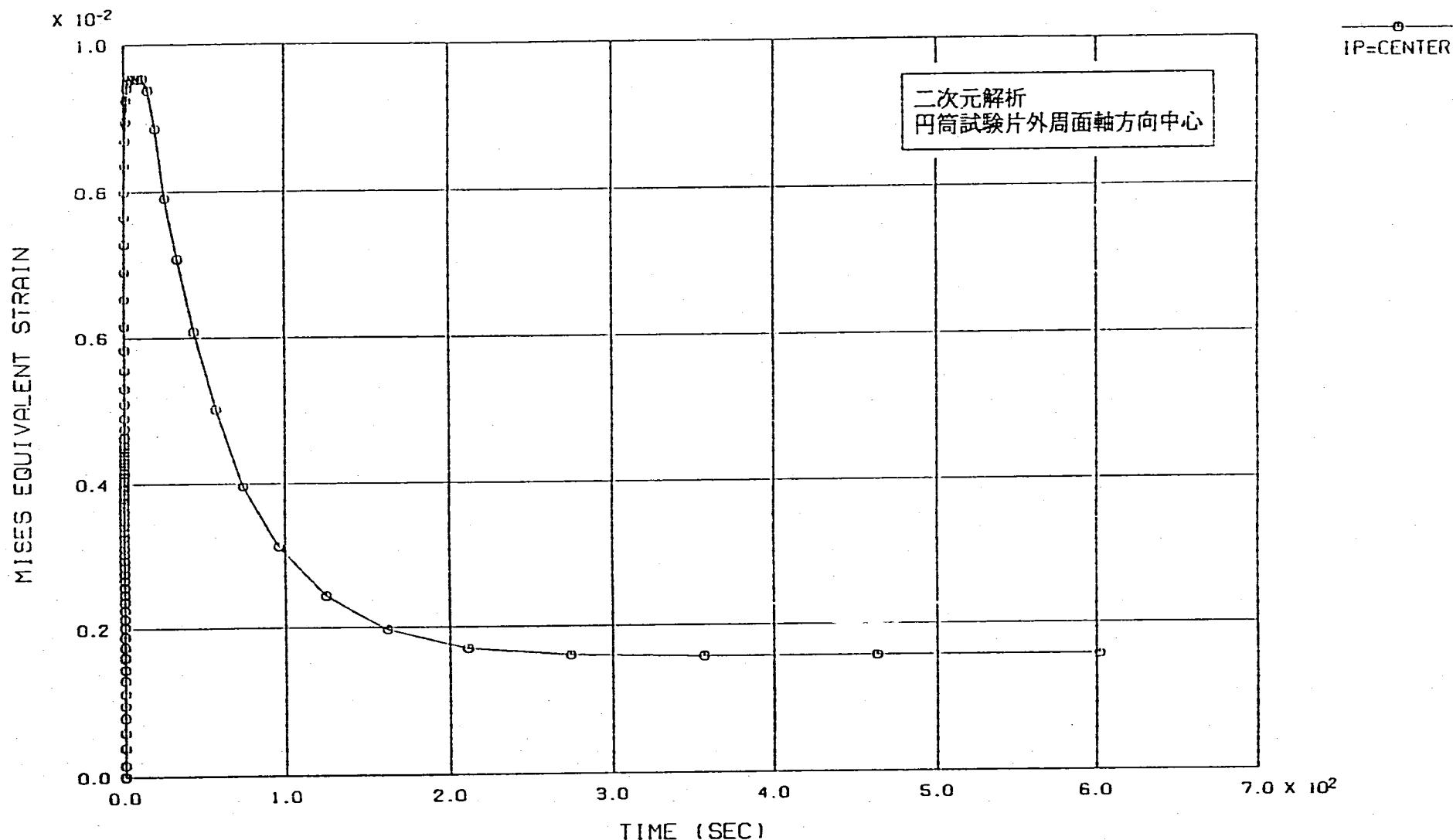


図 3.5 相当塑性ひずみの経時変化 (600 - 200°C)

FINAS

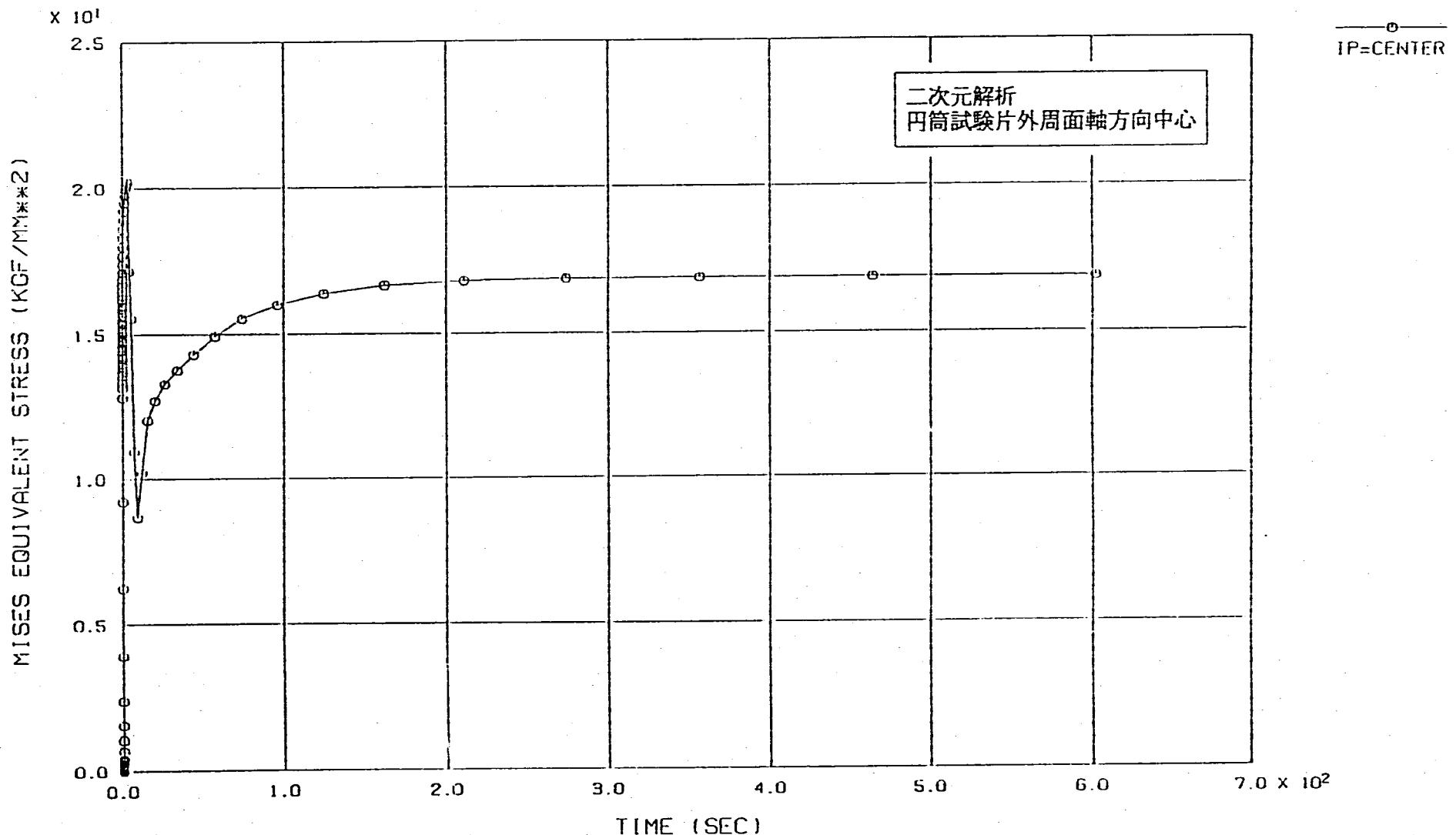


図3.6 相当応力の経時変化 (600 - 200°C)

FINAS

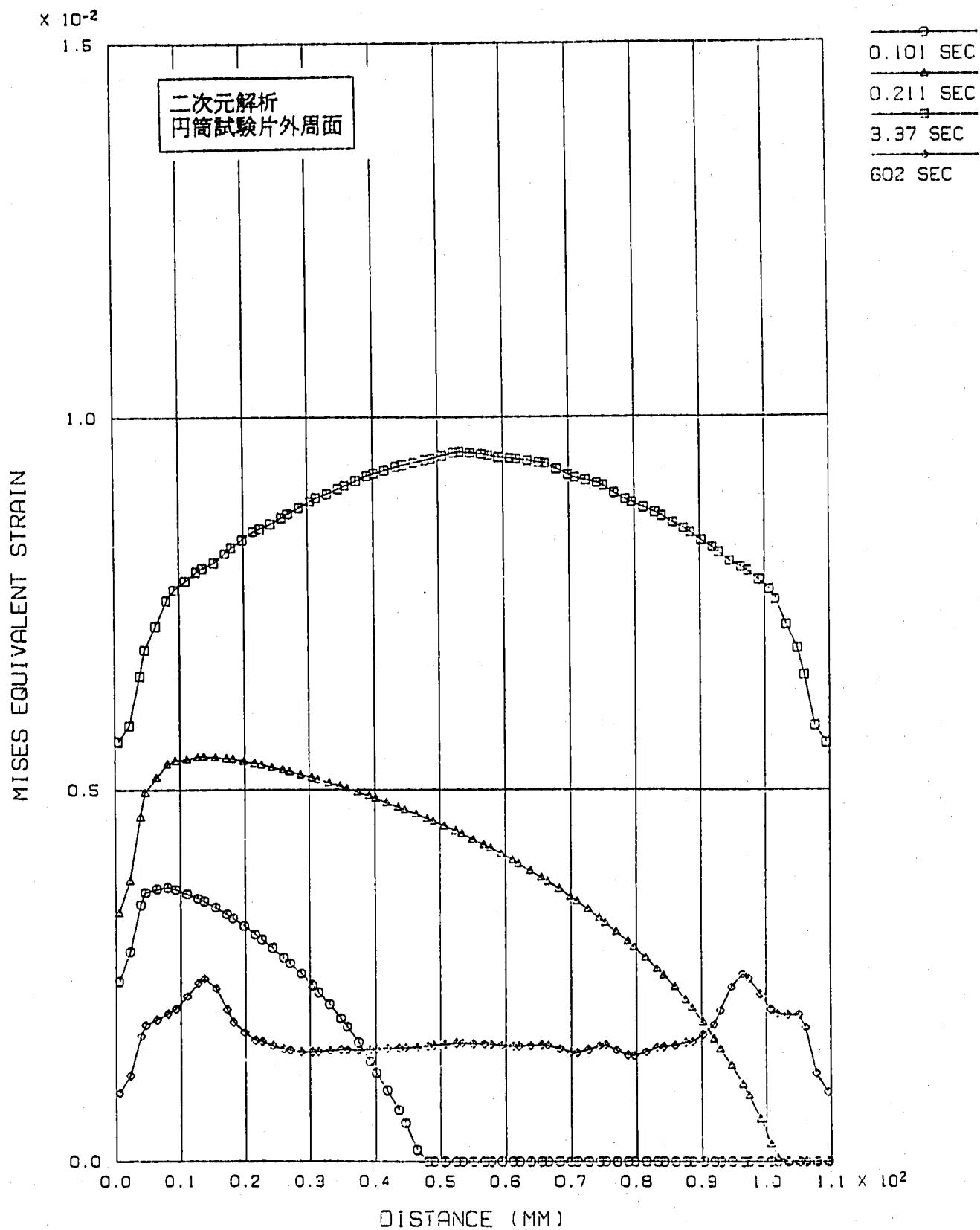


図 3.7(a) 相当塑性ひずみの軸方向分布の経時変化 (600 - 200°C)

FINAS

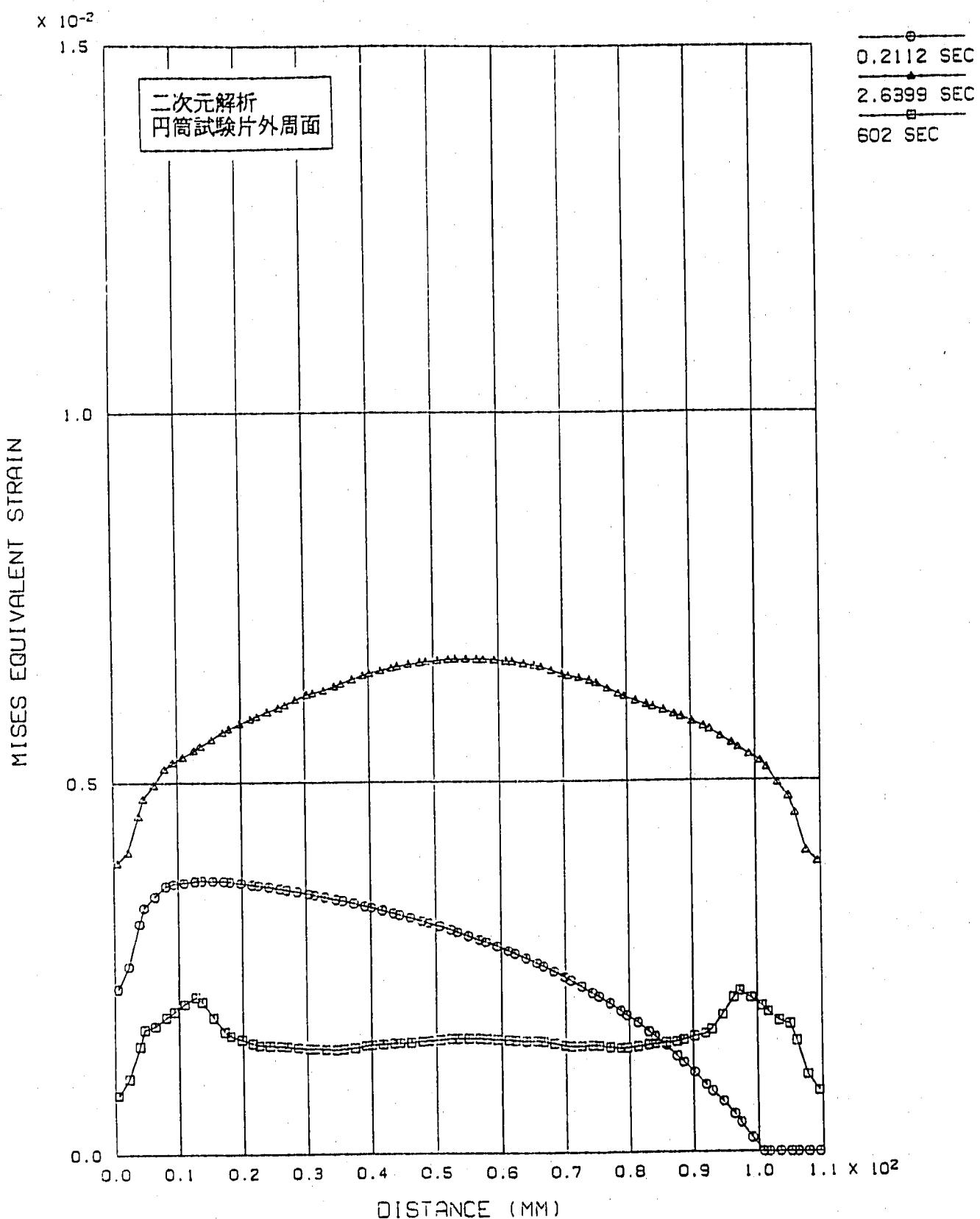


図 3.7(b) 相当塑性ひずみの軸方向分布の経時変化 (500 - 200°C)

FINAS

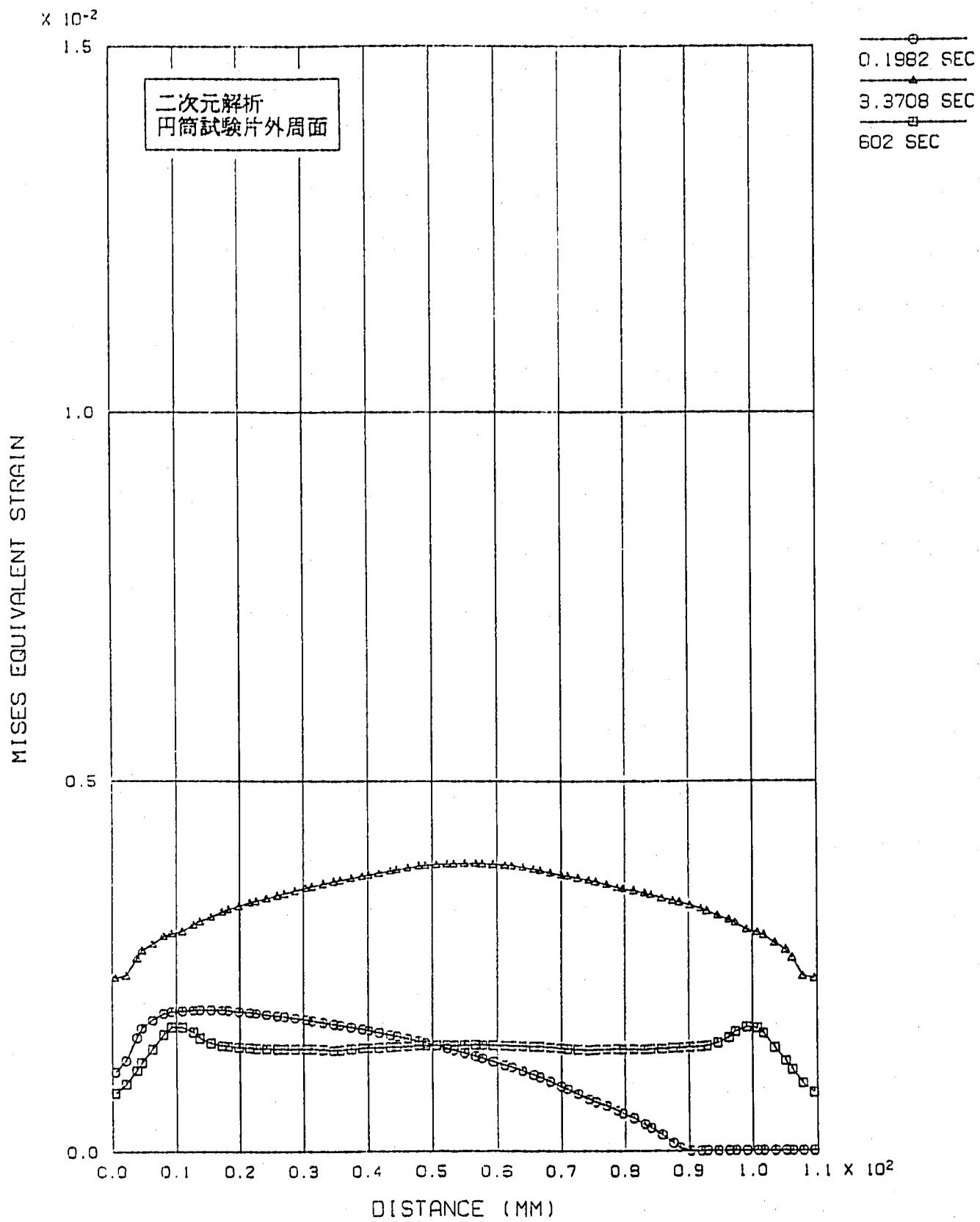


図 3.7(c) 相当塑性ひずみの軸方向分布の経時変化 (400 - 200°C)

FINAS

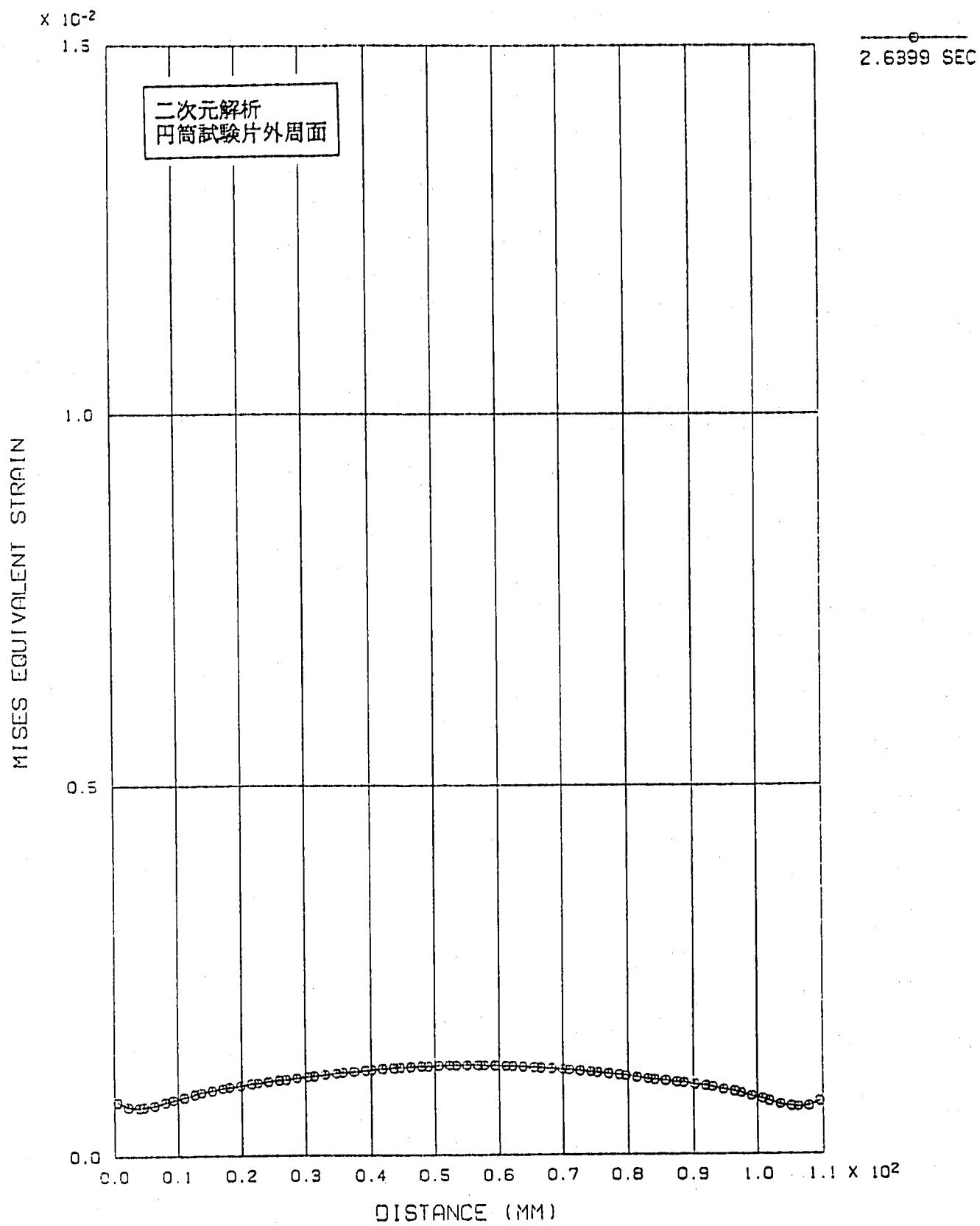


図 3.7(d) 相当塑性ひずみの軸方向分布の経時変化 (300 - 200°C)

FINAS

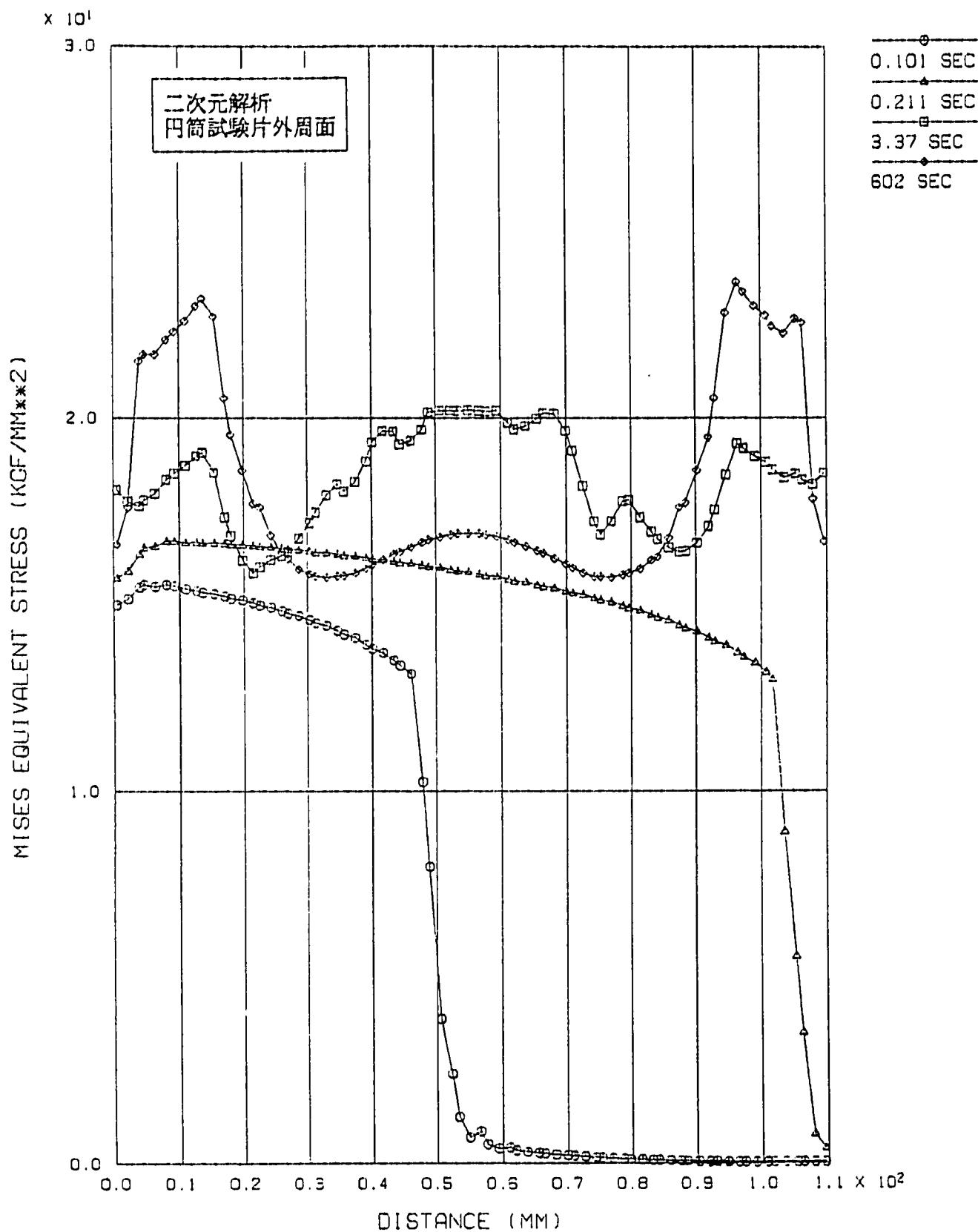


図 3.8(a) 相当応力の軸方向分布の経時変化 (600 - 200°C)

FINAS

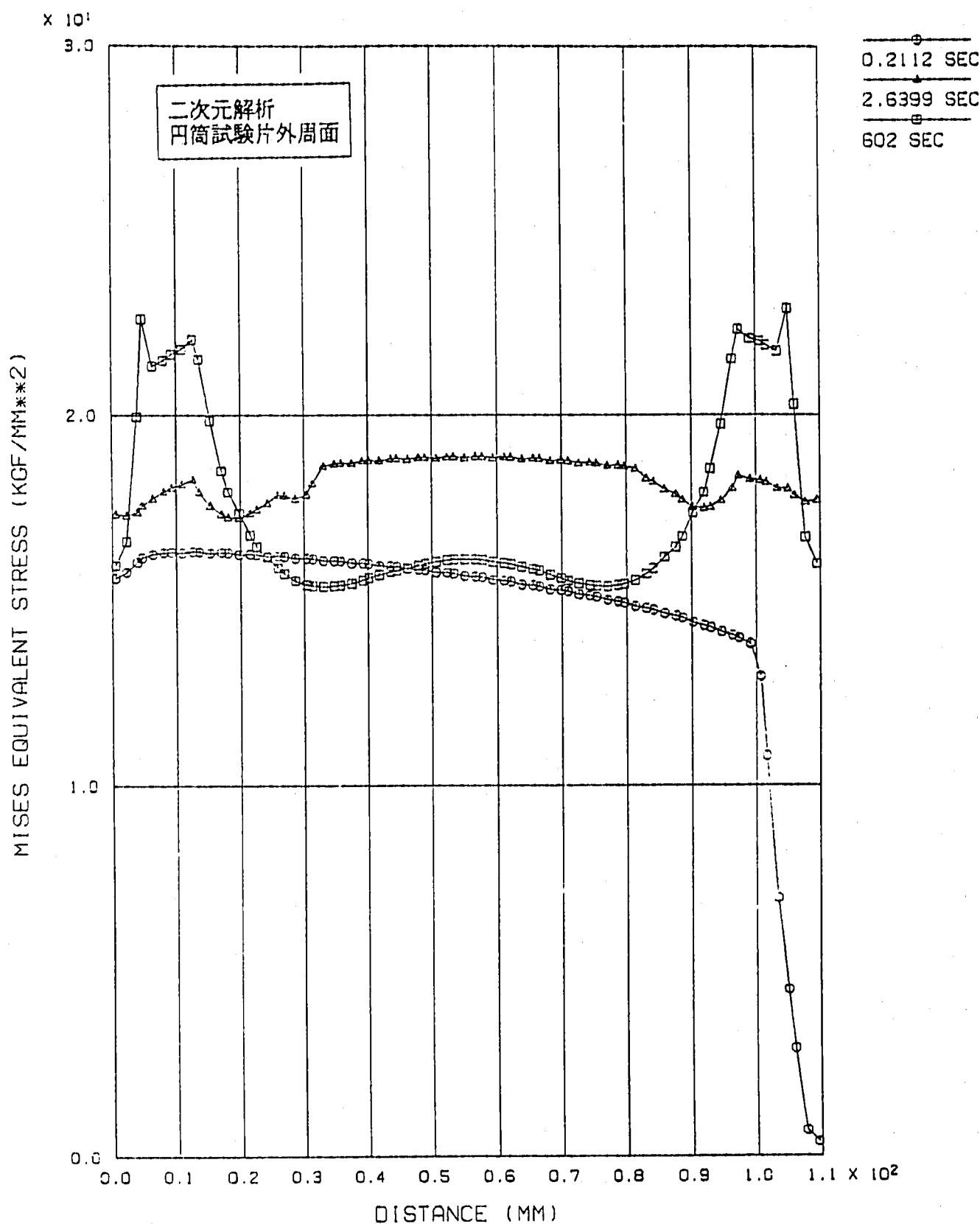


図 3.8(b) 相当応力の軸方向分布の経時変化 (500 - 200°C)

FINAS

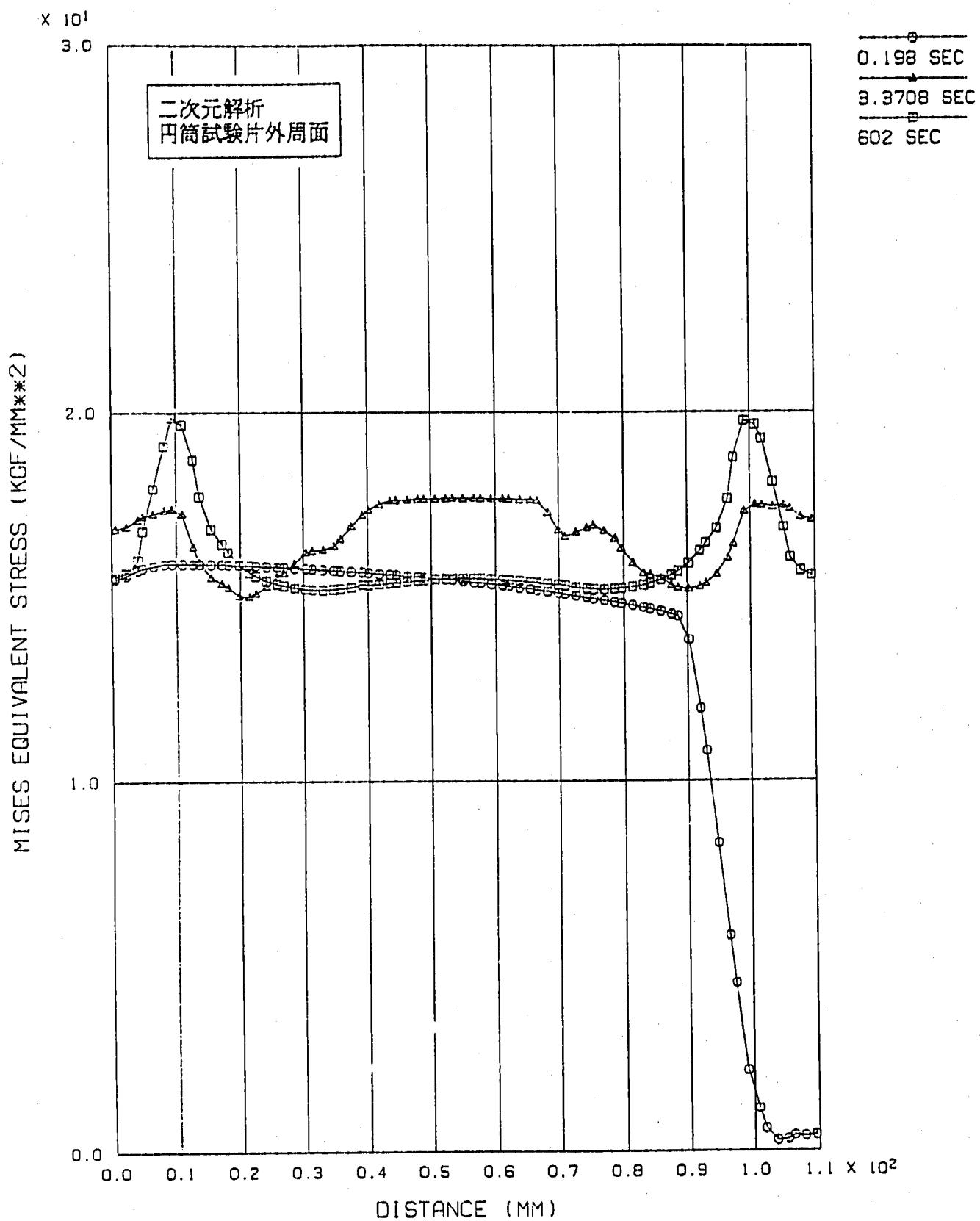


図3.8(c) 相当応力の軸方向分布の経時変化 (400 - 200°C)

FINAS

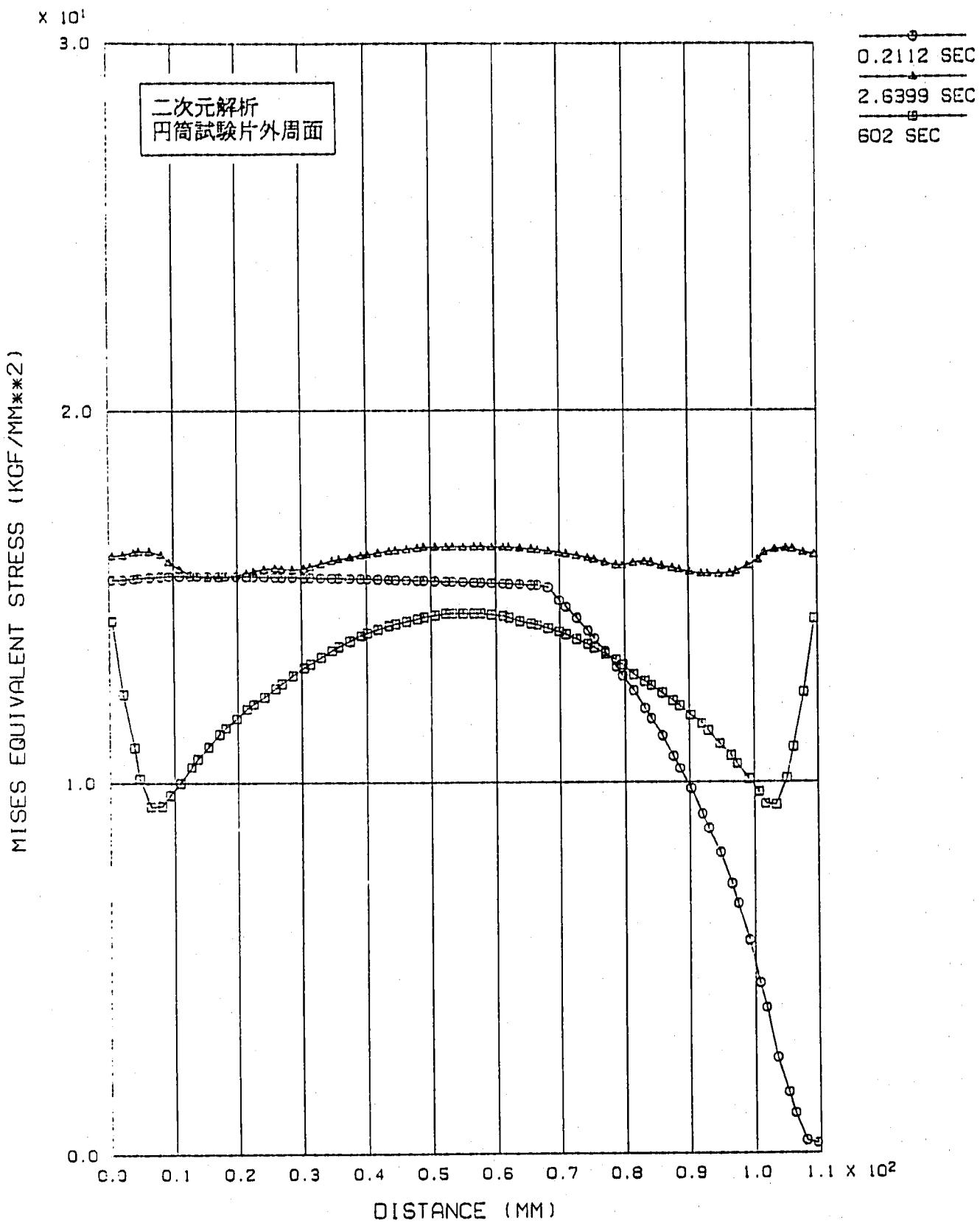


図 3.8 (d) 相当応力の軸方向分布の経時変化 (300 - 200°C)

二次元解析

円筒型試験片外周面軸方向中心

浸漬速度  $0.5 \text{ m/sec}$

$h = 15,000 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$

コールドショック 低温ナトリウム温度  $200^\circ\text{C}$

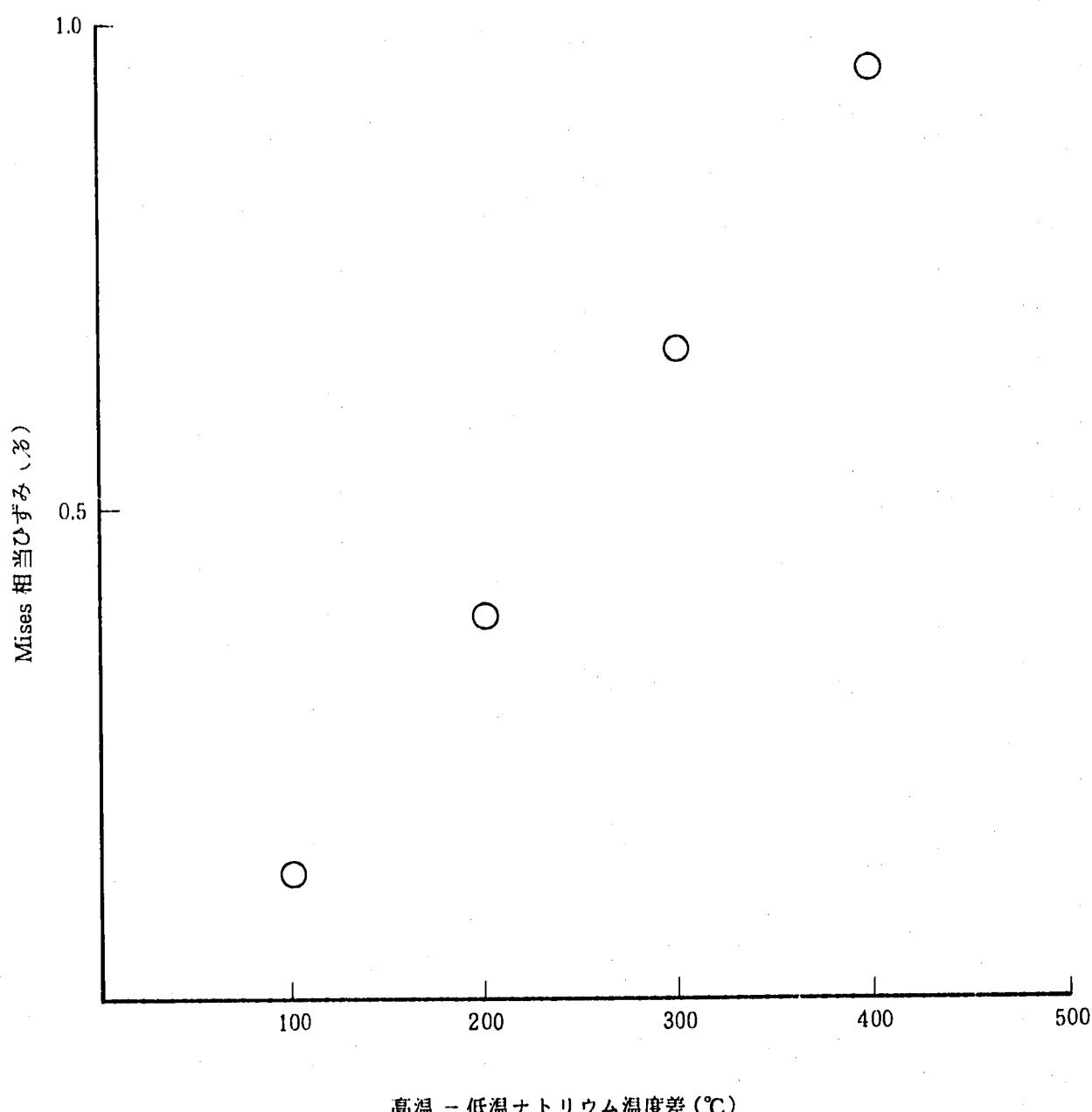


図 3.9 コールドショック時の温度差と Mises 相当塑性ひずみの関係

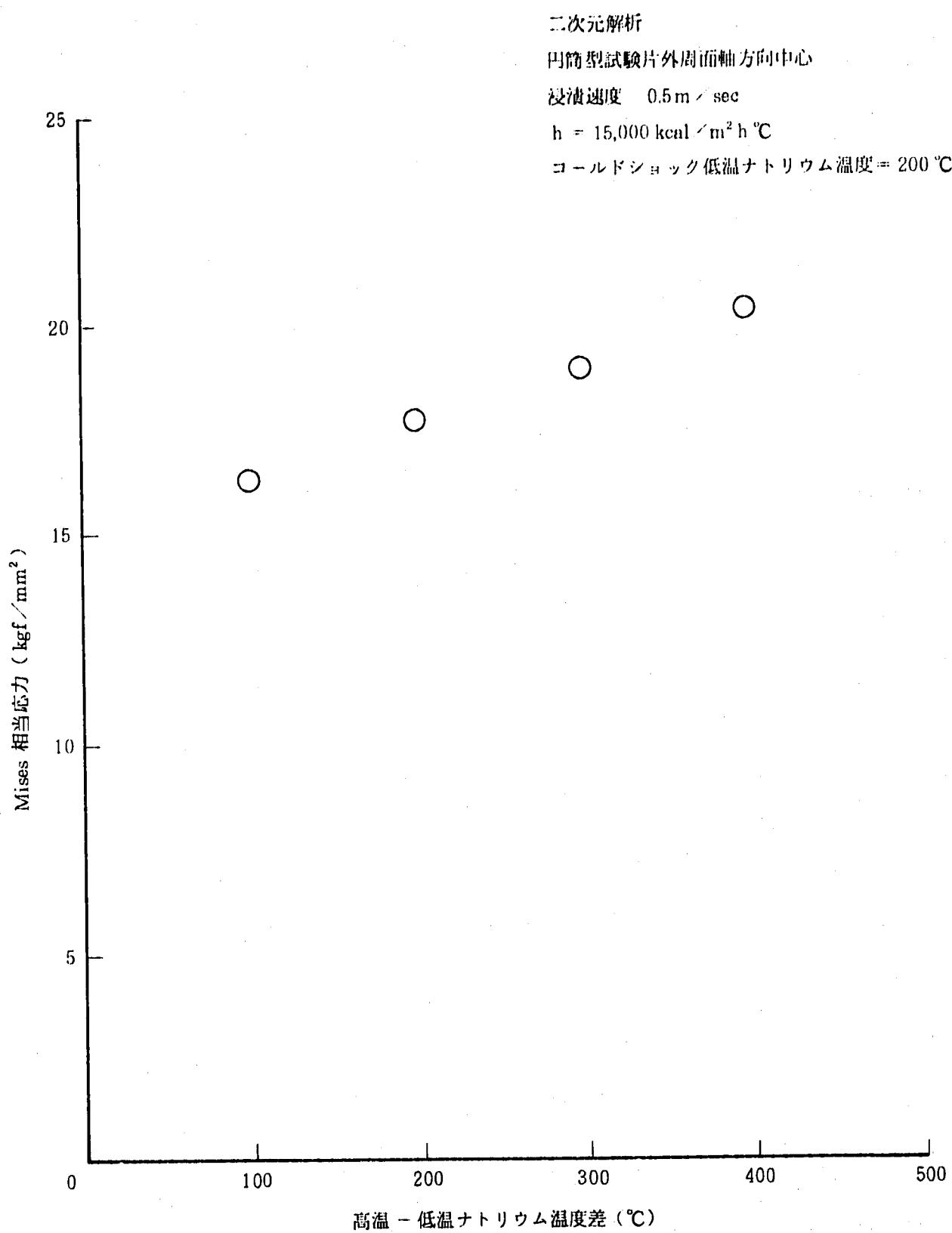


図 3.10 コールドショック時の温度差と Mises 相当応力の関係

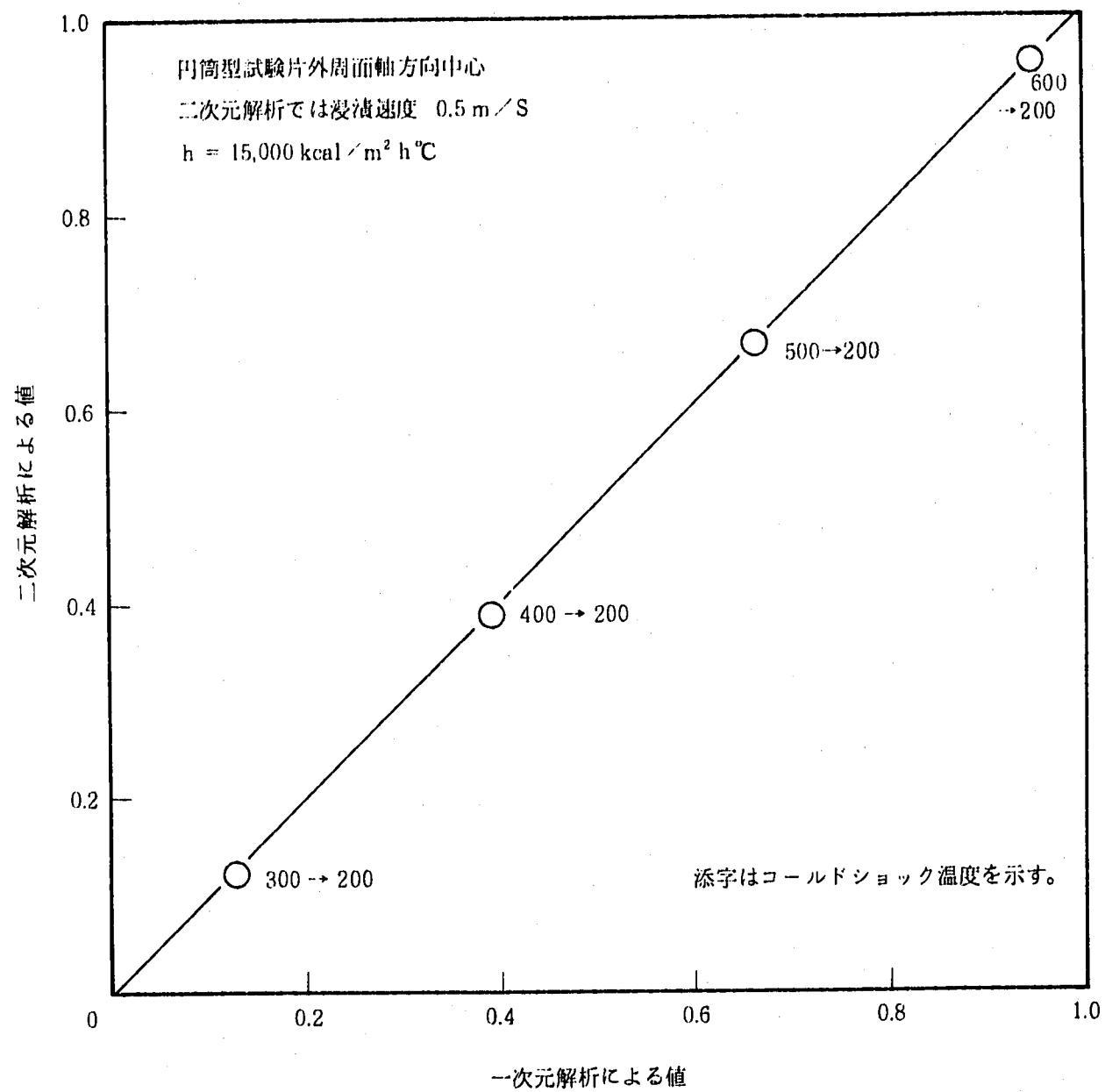


図 3.11 一次元解析結果と二次元解析結果の比較  
(相当塑性ひずみ)

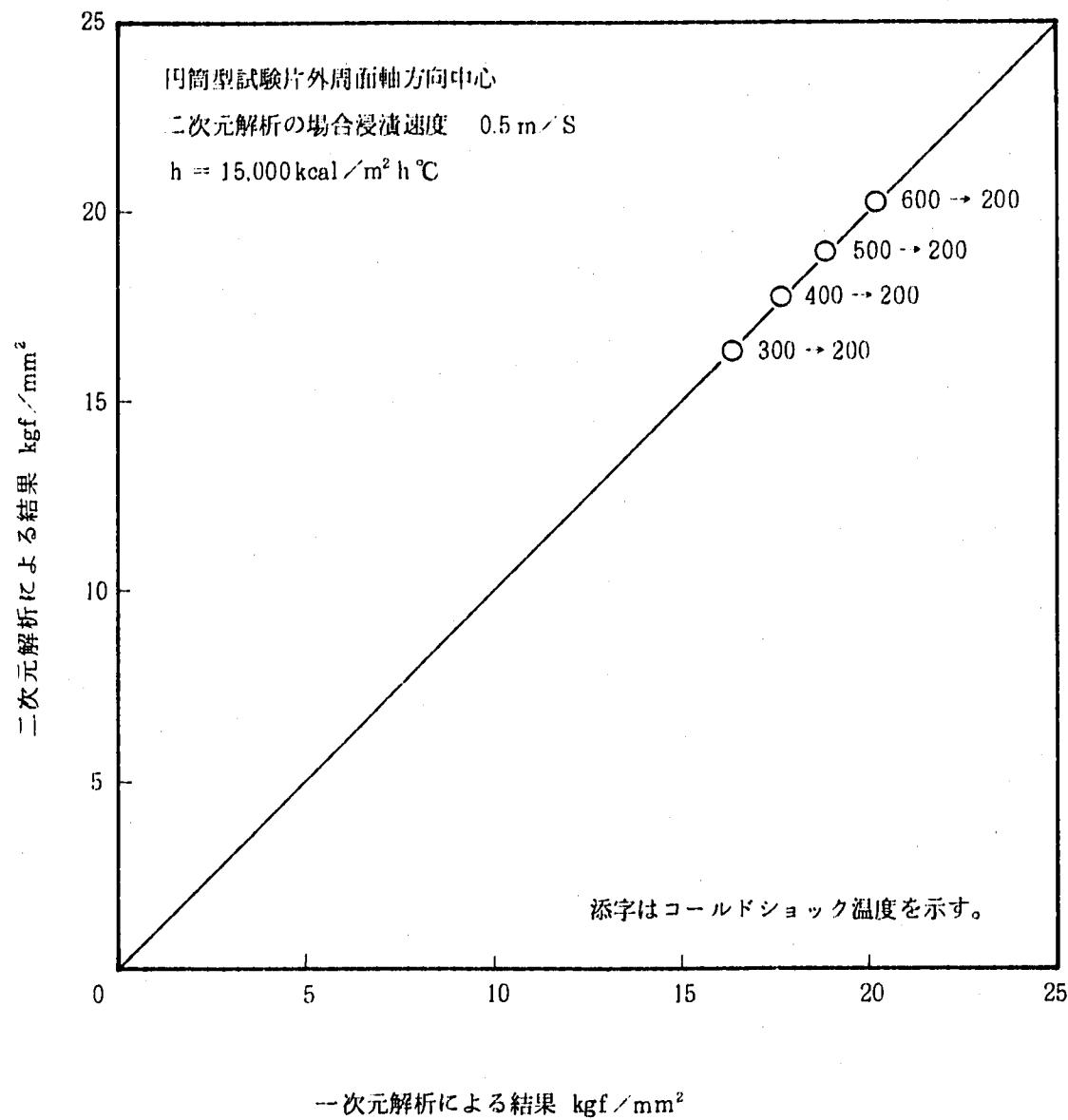


図 3.12 一次元解析結果と二次元解析結果の比較  
(相当応力)

## 4. 浸漬速度の影響に関する解析

### 4.1 解析の目的及び解析条件

本試験機では、試験片のナトリウム浸漬速度が  $0.1 \sim 1.0 \text{ m/sec}$  程度の範囲で調整可能となっている。本章では、試験片のナトリウム浸漬速度が熱伝導及び応力、ひずみの大きさ、分布に与える影響を検討する。

試験片浸漬速度は、本試験では主に  $0.5 \text{ m/sec}$  前後を用いると予想される。本章では、これを考慮するとともにさらに広範な傾向を検討するため、浸漬速度  $v = 0.01, 0.5, 1.5 \text{ m/sec}$  について解析した。

ナトリウム温度は  $600 - 200^\circ\text{C}$  (温度差  $400^\circ\text{C}$ ) の場合と  $400 - 200^\circ\text{C}$  (温度差  $200^\circ\text{C}$ ) の場合を検討した。熱伝達係数は  $h = 15000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  に固定した。解析条件の一覧を表 4.1 に、FEM の詳細条件を表 4.2 にしめす。

### 4.2 解析結果

ナトリウム温度  $600 - 200^\circ\text{C}$  の場合の結果を図 4.1 ~ 6 に示す。このうち、図 4.1 ~ 3 は浸漬速度が  $0.01 \text{ m/sec}$  の場合、図 4.4 ~ 6 は  $1.5 \text{ m/sec}$  の場合の結果である。これらの図には試験片上端部、下端部における温度の経時変化、Mises 型相当塑性ひずみおよび相当応力の軸方向分布を示した。図 4.3 の応力のハンチングは、タイムステップの取り方が原因ではないかと思われる。ナトリウム温度  $400 - 200^\circ\text{C}$ 、浸漬速度  $0.01 \text{ m/sec}$  の場合の結果を図 4.7 ~ 9 に示す。いずれの場合も浸漬速度の低下とともに試験片最上部と最下部のあいだに生じる温度差が大きくなることが分かる(図 4.1, 4.7)。これ以外の定性的な傾向は前章で検討した  $v = 0.5 \text{ m/sec}$  の場合と同一である。

### 4.3 試験片浸漬速度の影響

試験片浸漬速度が試験片に生じる軸方向最大温度差、発生する Mises 型相当塑性ひずみ、応力に及ぼす影響をそれぞれ図 4.10, 11, 12 に示す。

軸方向最大温度差は、熱過渡温度差が大きく、試験片浸漬速度が遅い場合に大きくなり、本章の解析においてはナトリウム温度  $600 - 200^\circ\text{C}$ 、浸漬速度  $0.01 \text{ m/sec}$  の時に最も大きく、約  $365^\circ\text{C}$  となっている。発生温度差は浸漬速度の増加とともに小さくなるが、 $0.5 \text{ m/sec}$  以上の領域では変化は僅かである。

Mises 型相当塑性ひずみに対する試験片浸漬速度の影響は図 4.11 に示す通りであり、軸方向温度差に比べて浸漬速度に対する依存性は小さいと言える。解析を行った範囲内では浸漬速度が  $0.5 \text{ m/sec}$  で最大となっているが、浸漬速度が  $0.01 \sim 1.5 \text{ m/sec}$  における発生ひずみの変動はたかだか  $5\%$  程度である。

Mises 型相当応力に対する試験片浸漬速度の影響は図 4.12 に示す通りであり、相当ひずみの場合とは逆に浸漬速度が小さいほど大きな応力が発生するという結果になっている。この場合も浸漬速度が 0.5 m / sec 以上の領域では発生応力は浸漬速度にはほとんど依存しない。

横軸に軸方向最大温度差をとり、縦軸に Mises 型相当塑性ひずみ及び相当応力をとて整理した結果を図 4.13 ~ 14 に示す。

表 4.1 解析条件一覧表(浸漬速度の影響に関する解析)

浸漬時間 = 600 sec

高温ナトリウム 温度 °C	低温ナトリウム 温度 °C	浸 漬 速 度 m/sec	熱伝達係数 kcal/m <sup>2</sup> h °C	温度変化速度 °C/sec
600	200	0.01	15,000	909
		1.5		136,379
400		0.01		455

表 4.2 FEM 解析条件  
(熱伝導解析および熱応力解析)

- (1) 使用コード FINAS
- (2) 使用要素 热伝導解析………HQAX 8：热伝導 8 節点 4 边形軸対称要素  
热応力解析………QAX 8：8 節点 4 边形軸対称要素

(3) モデルの寸法および要素分割

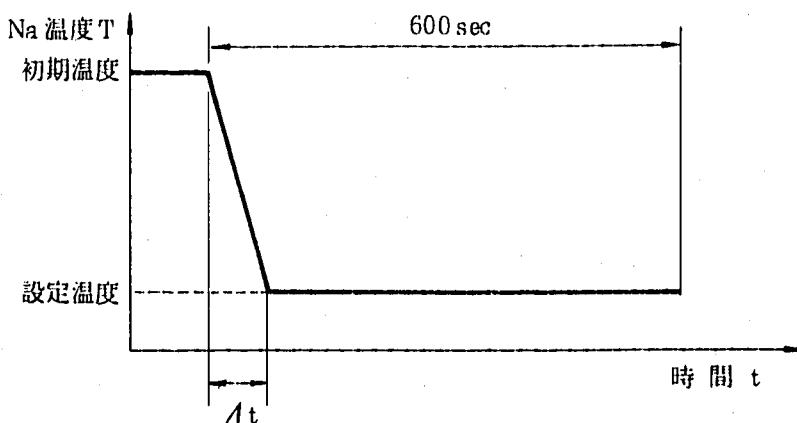
図 3.2 に示す。

- (4) 境界条件 図 3.2 に示す。
- (5) 热過渡解析 热過渡面(図 3.2 に示す)に接液するナトリウム温度を設定温度(表 4.1 に示す)まで下記の時間  $\Delta t$  で变化させる(下図参照)。
  - ・浸漬速度 0.01 m/sec の場合 0.44 sec
  - 0.5                          0.0088
  - 1.5                          0.002933

(6) 応力解析における物性値

FINAS に組み込みの物性値(SUS 304)を使用。綫弾性係数、ポアソン比、線膨張係数を表 2.2(2)に、降伏応力、加工硬化係数は表 2.2(3)に示す。ただし、最大負荷レベルは 1 % を想定した。いずれも温度依存性を考慮した。

- (7) 応力ひずみ関係 2 直線近似とし、弾塑性解析を行った。
- (8) ひずみ硬化則 移動硬化則を用いた。



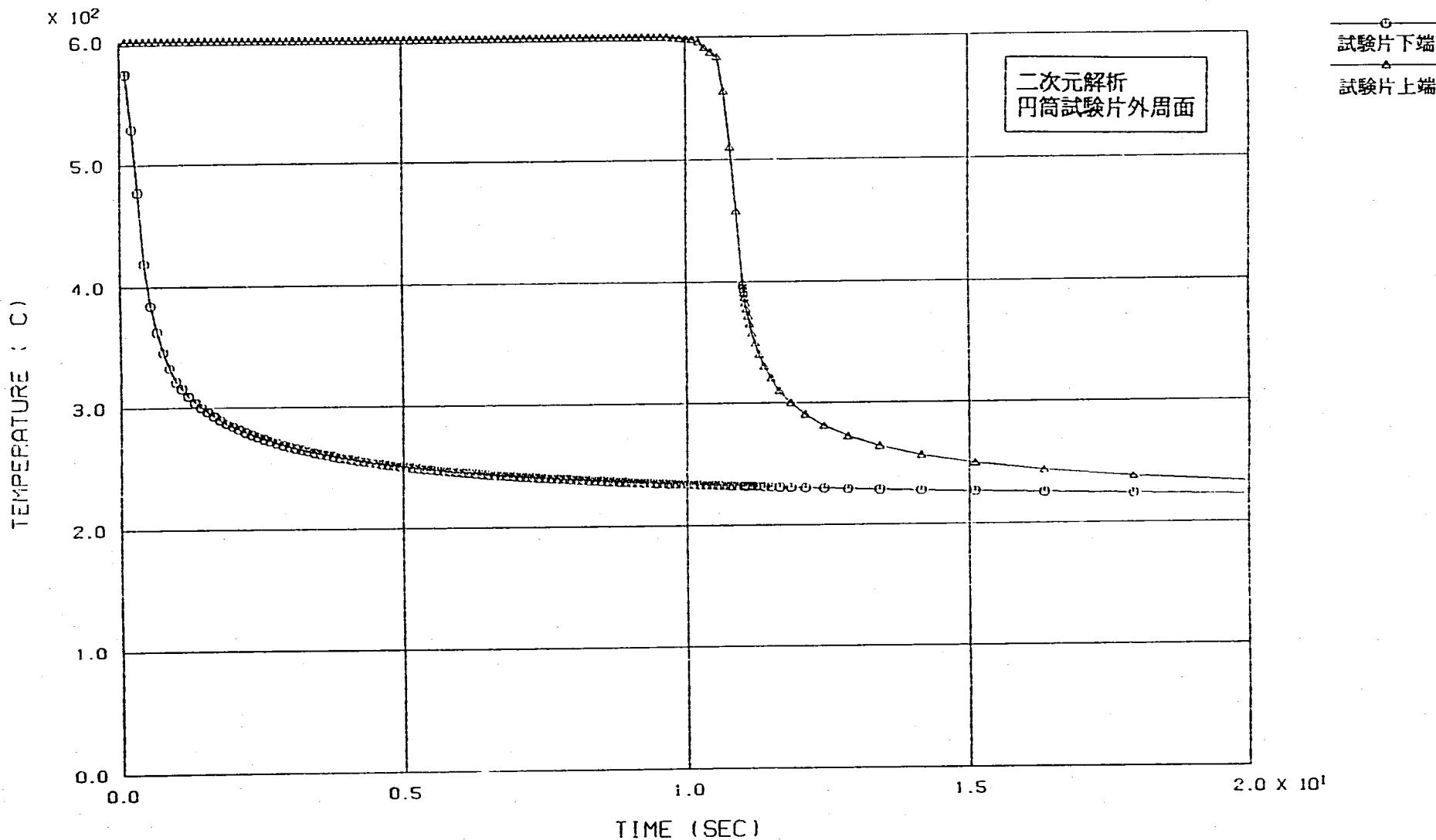


図 4.1 热伝導解析の結果 (0.01 m/s, 600 - 200°C の場合)

FINAS

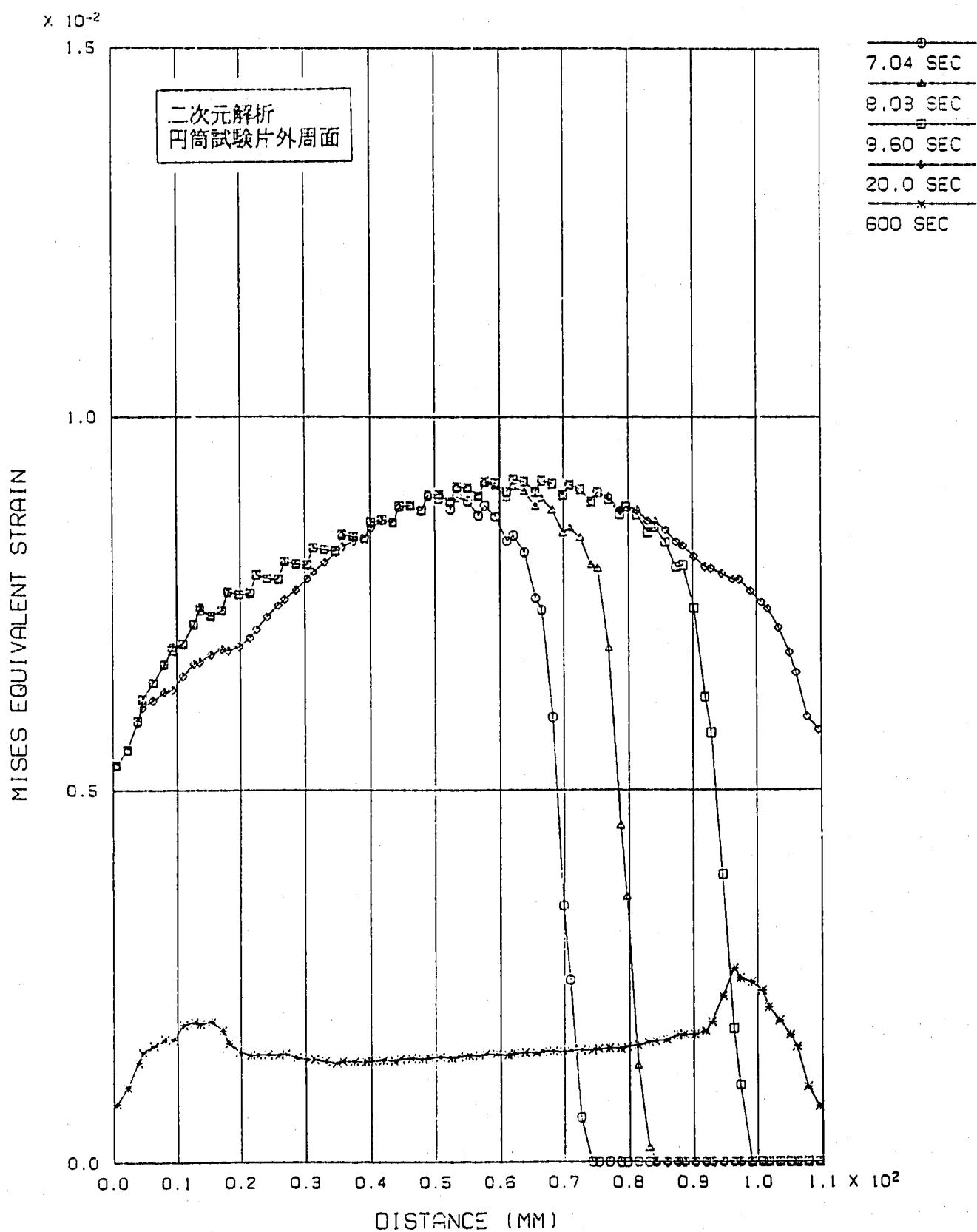


図 4.2 相当塑性ひずみの軸方向分布の経時変化 (0.01 m/s, 600 - 200°C の場合)

FINAS

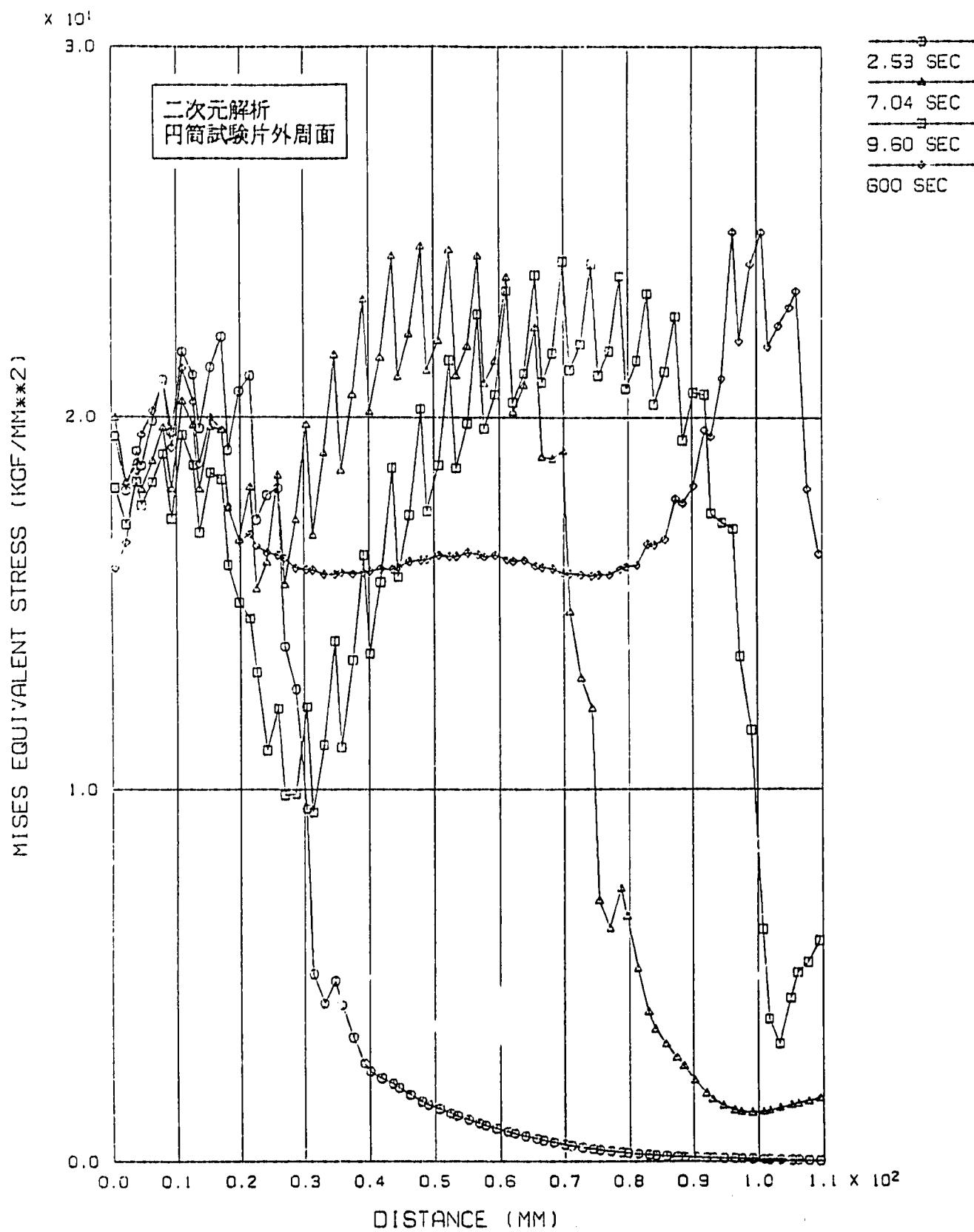


図 4.3 相当応力の軸方向分布の経時変化 (0.01 m/s, 600 -- 200°C の場合)

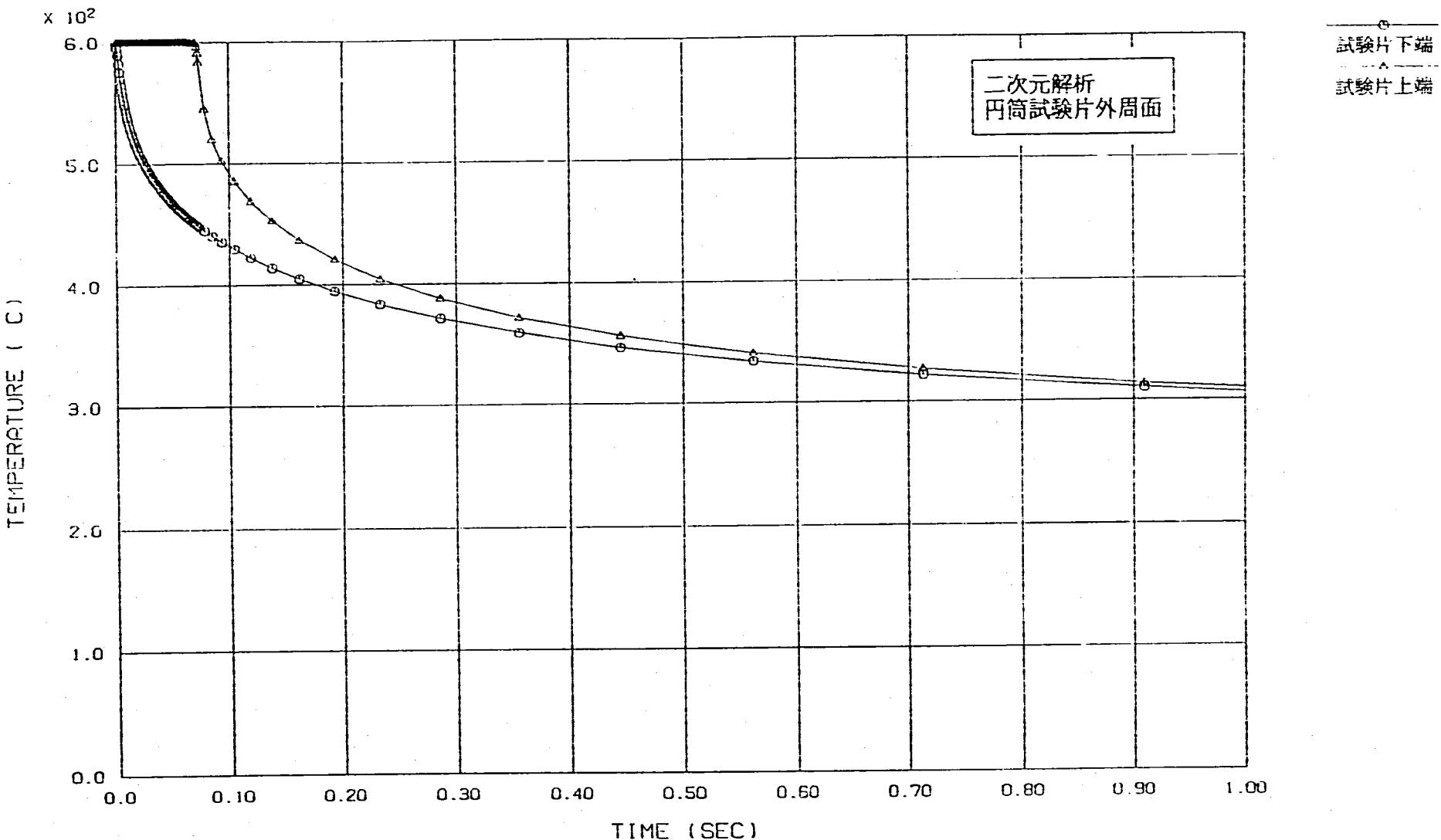


図 4.4 热伝導解析の結果 (1.5 m/s, 600 - 200°C の場合)

FINAS

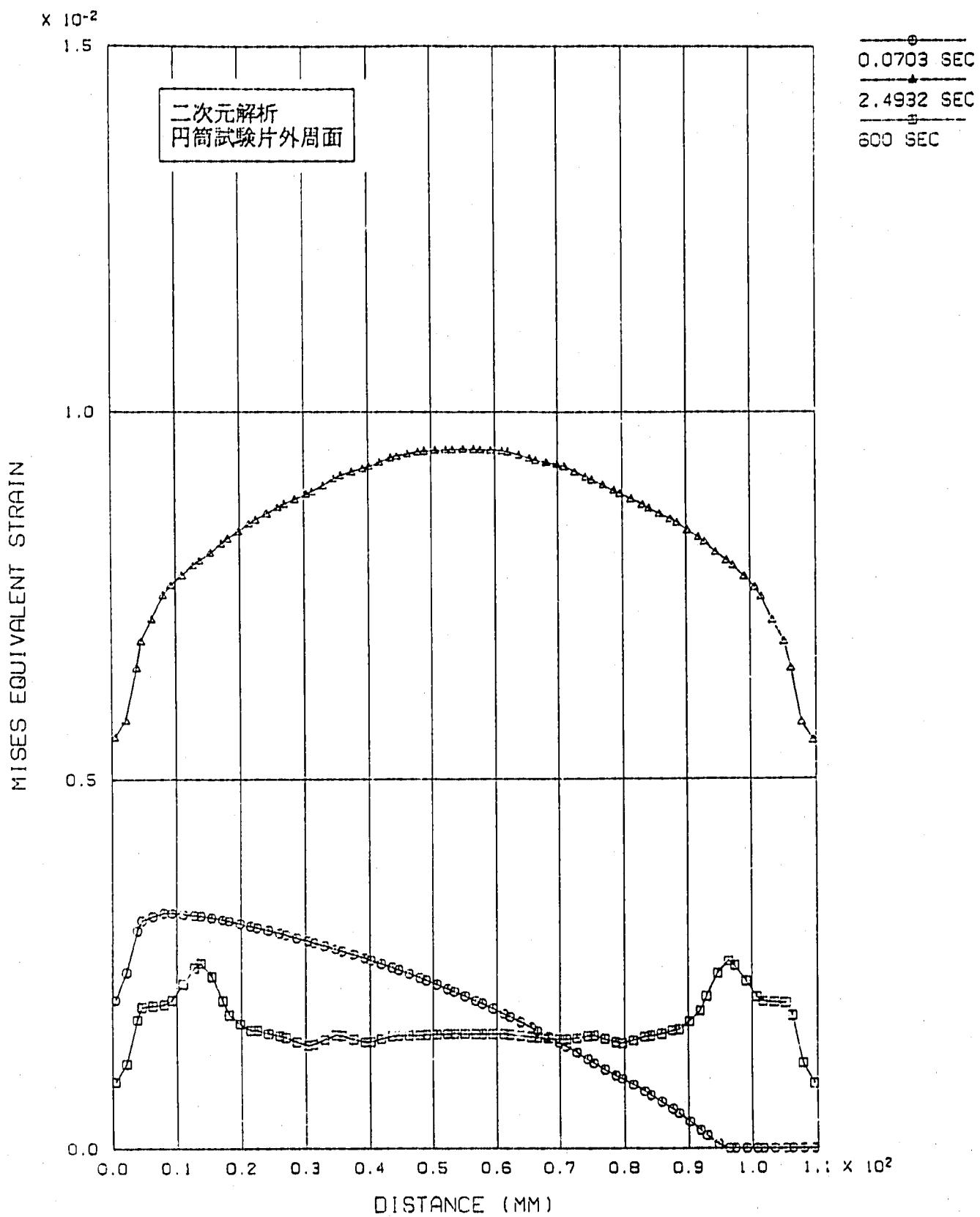


図 4.5 相当塑性ひずみの軸方向分布の経時変化 (1.5 m/s, 600 - 200°C の場合)

FINAS

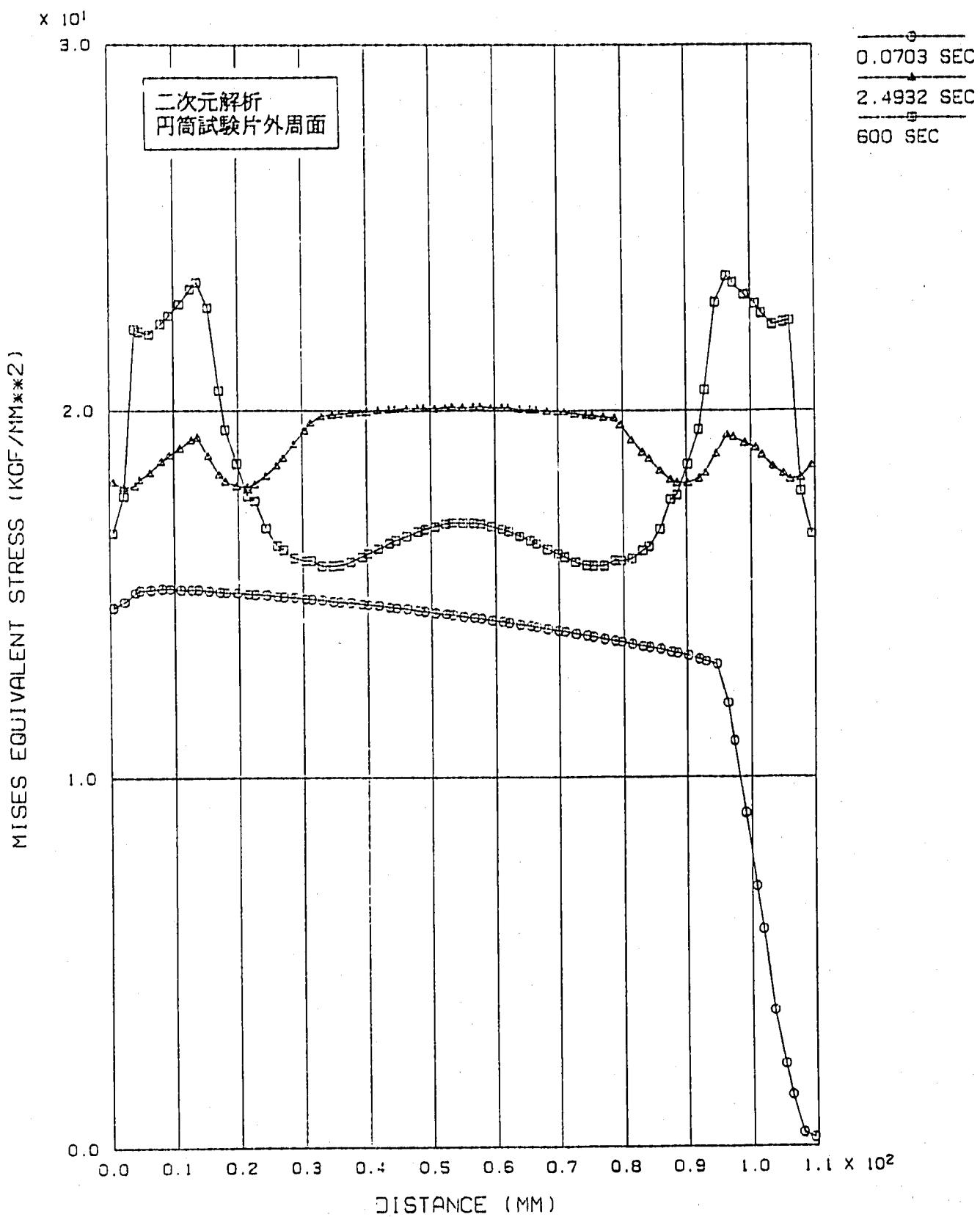


図 4.6 相当応力の軸方向分布の経時変化 (1.5 m/s, 600 - 200°C の場合)

FINAS

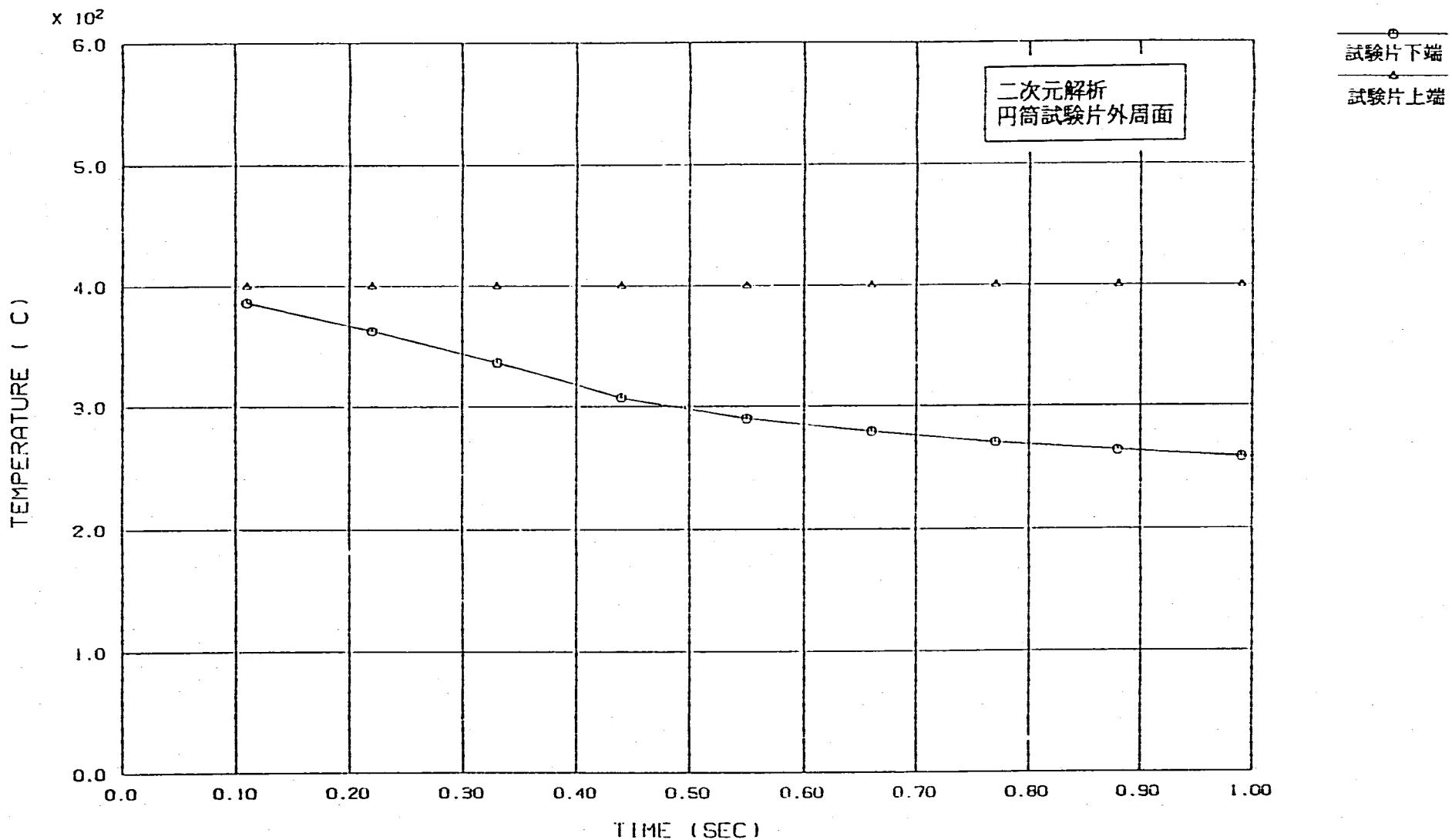


図 4.7 热伝導解析の結果 (0.01 m/s, 400 - 200°C の場合)

FINAS

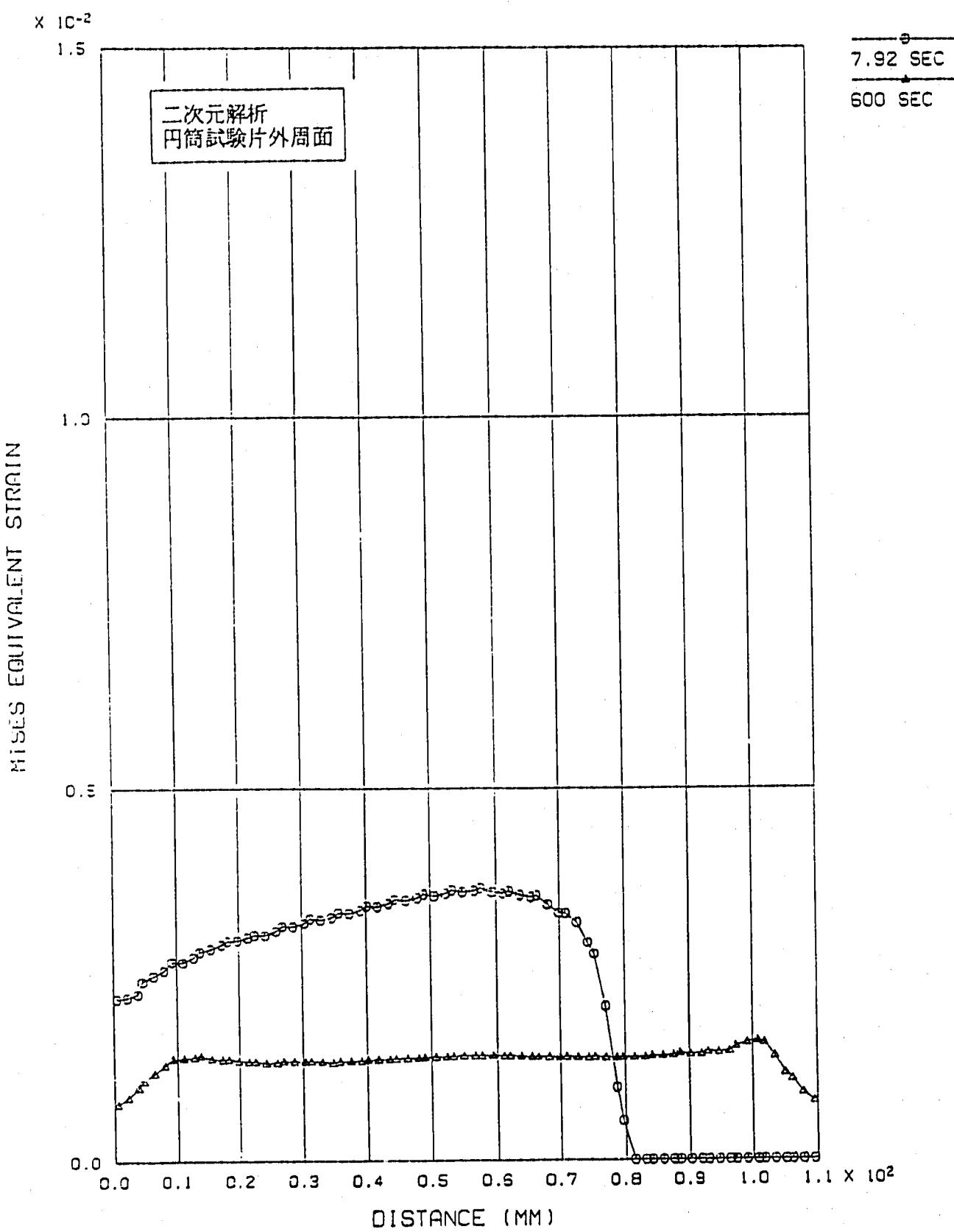


図 4.8 相当塑性ひずみの軸方向分布の経時変化 (0.01 m/s, 400 - 200°C の場合)

FINAS

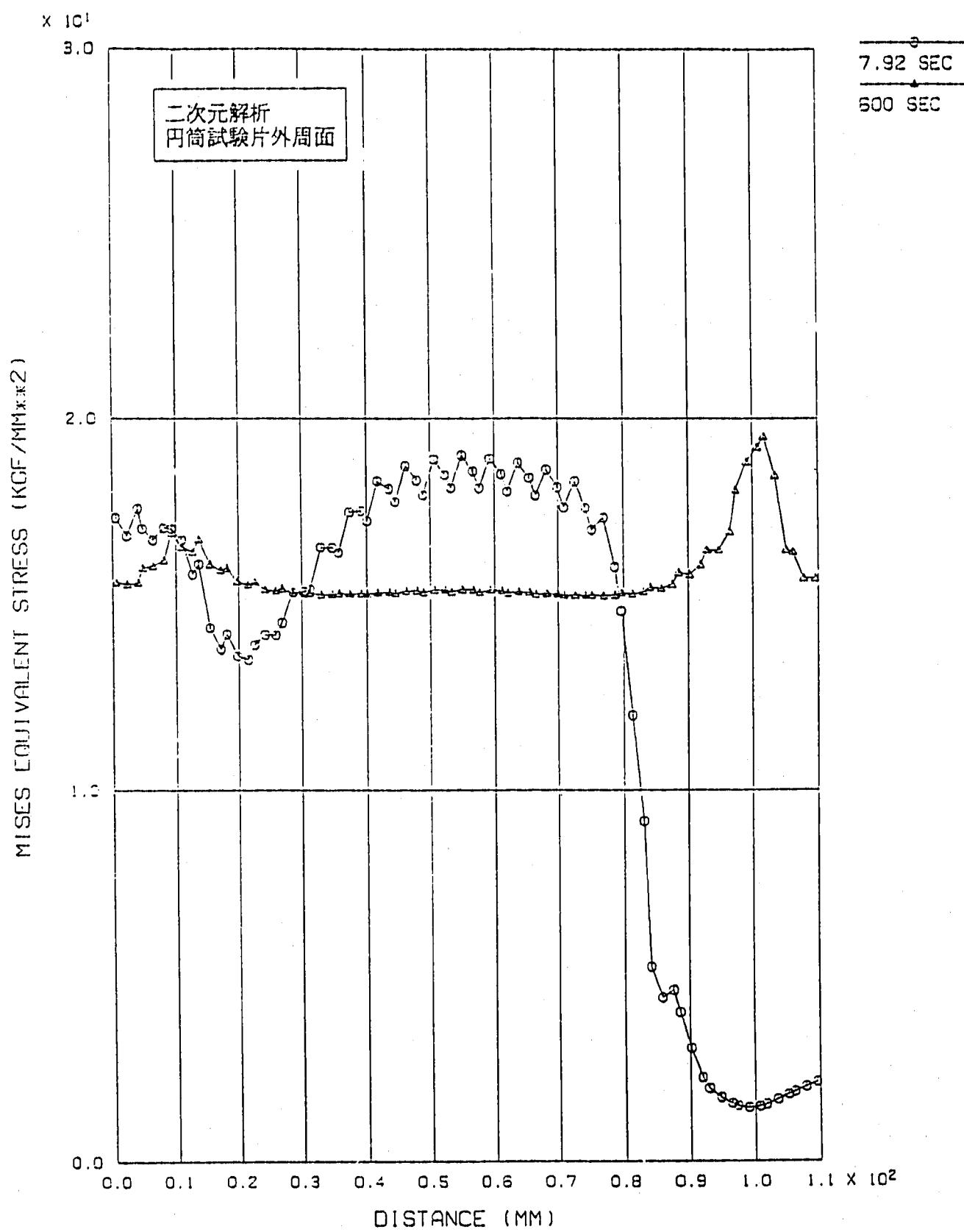


図 4.9 相当応力の軸方向分布の経時変化 (0.01 m/s, 400 – 200°C の場合)

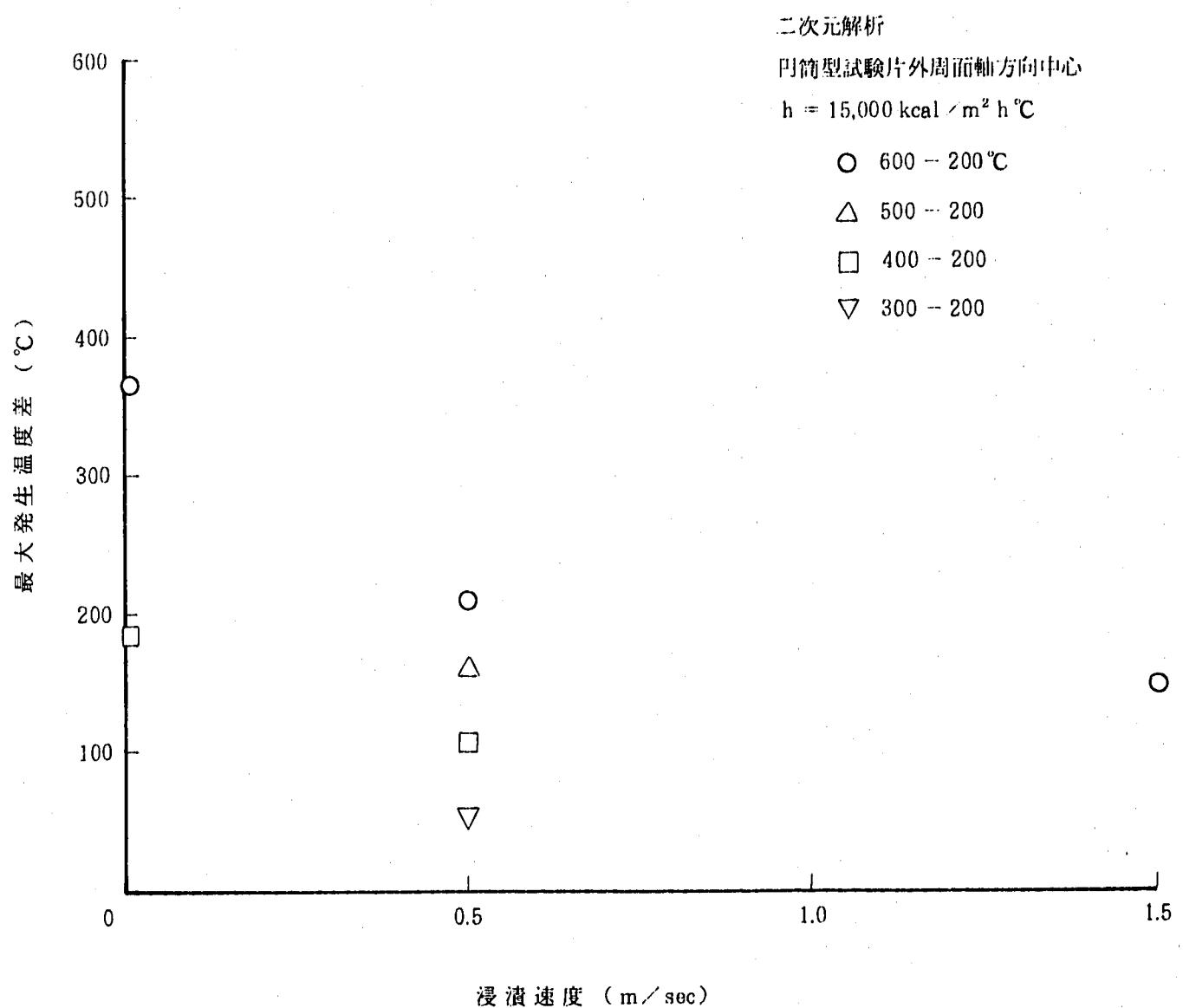


図 4.10 軸方向最大温度差に与える浸漬速度の影響

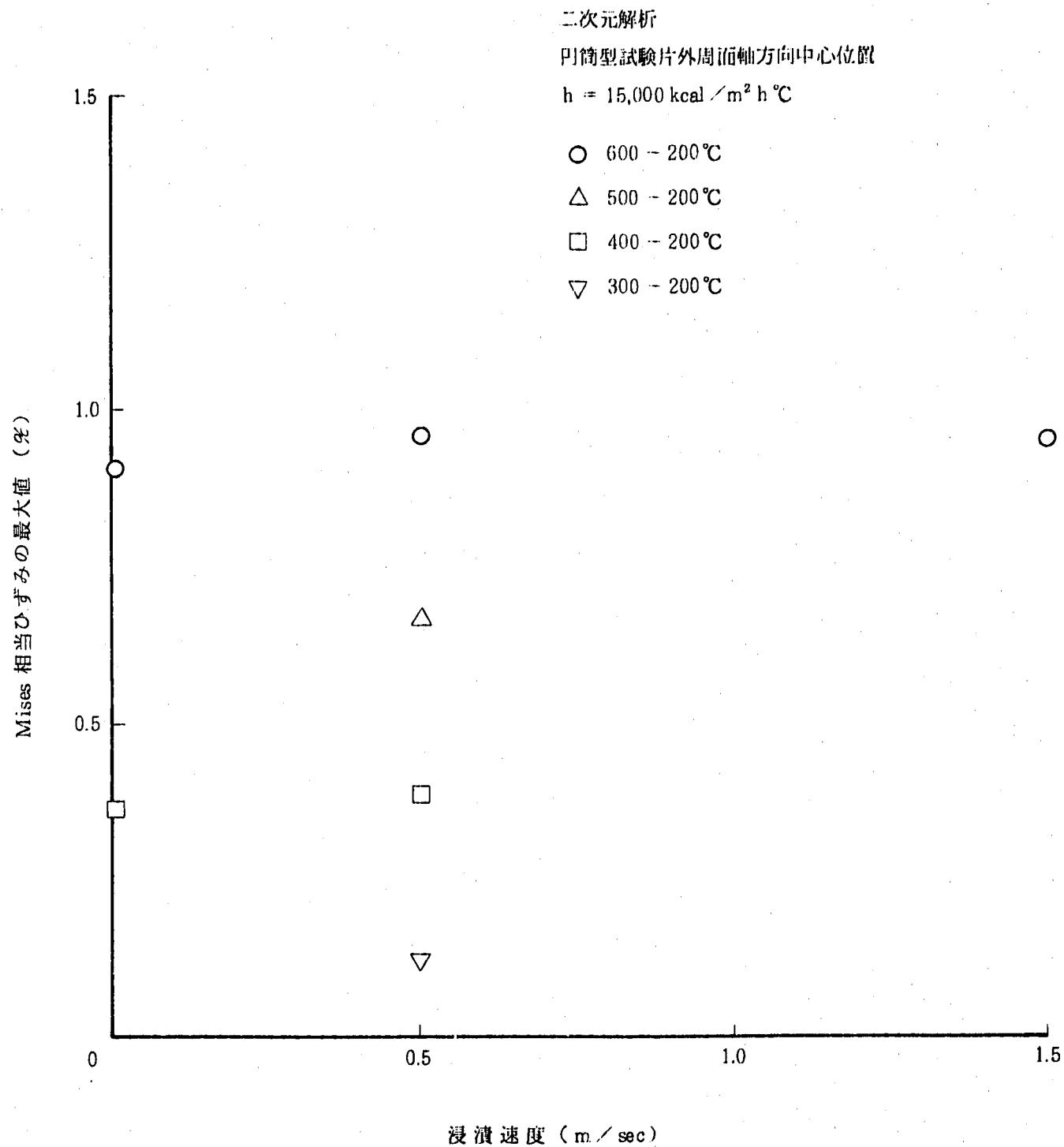


図 4.11 軸方向最大相当塑性ひずみに与える浸漬速度の影響

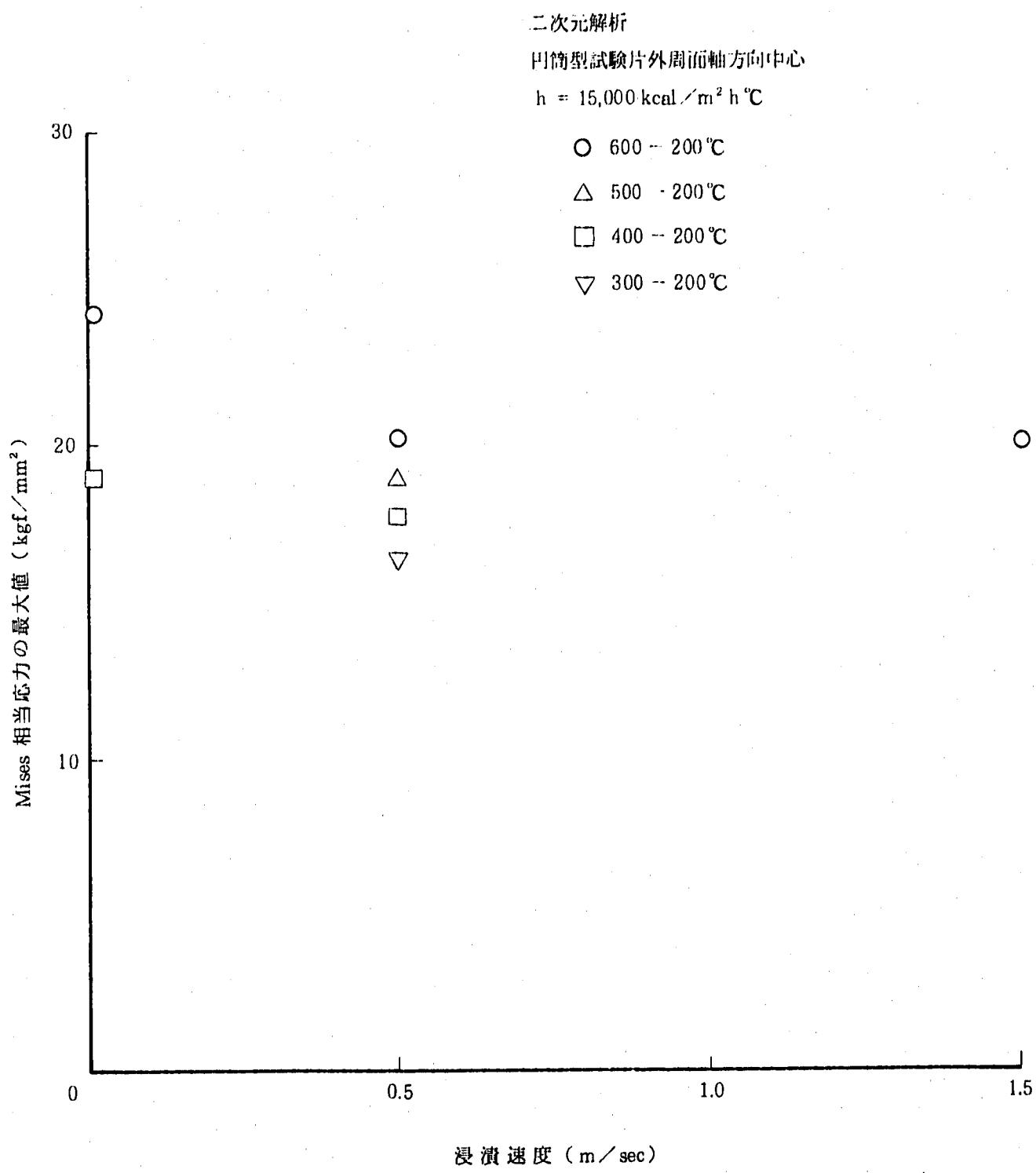


図 4.12 軸方向最大相当応力に与える浸漬速度の影響

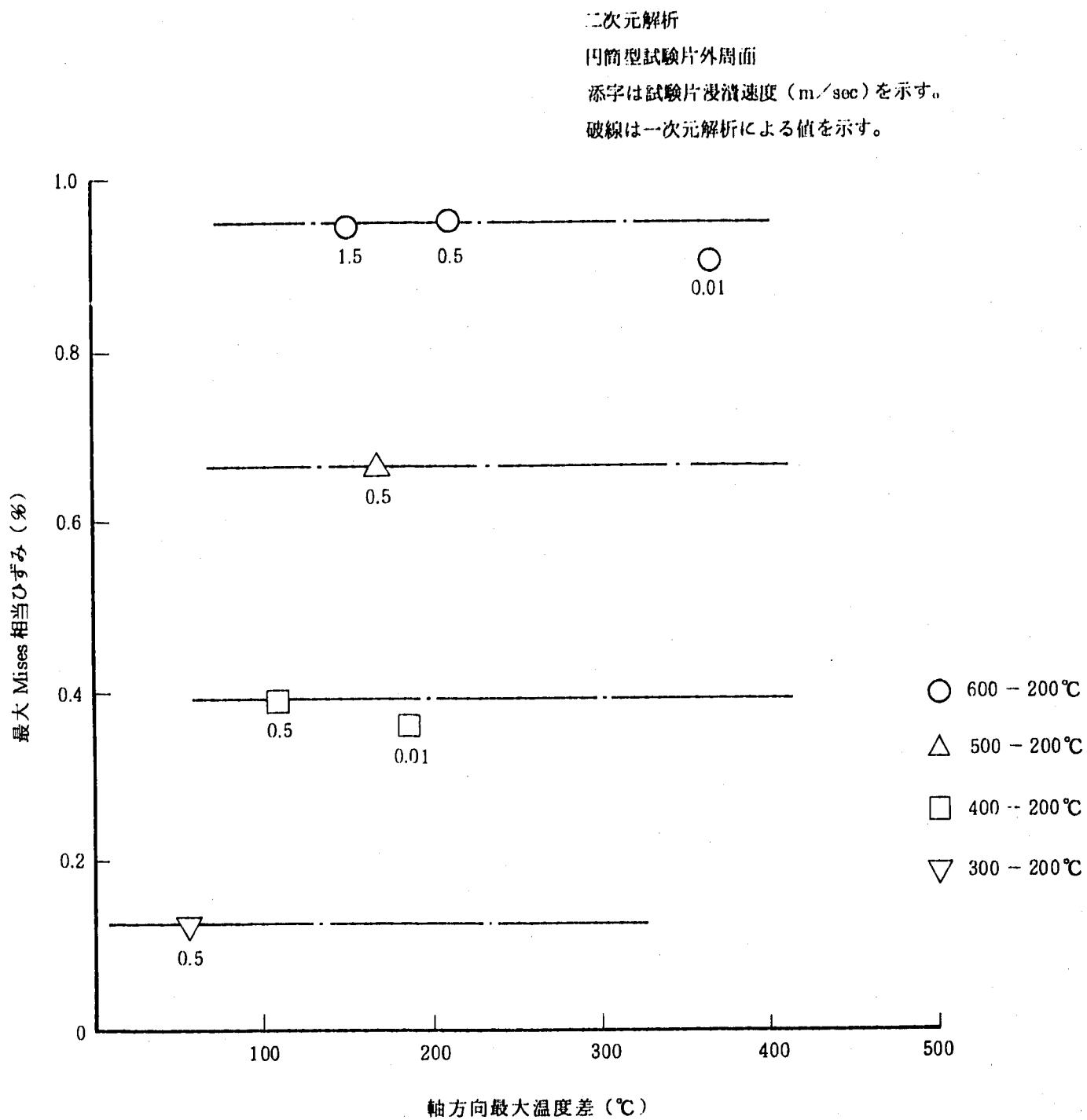


図 4.13 最大温度差と最大 Mises 相当塑性ひずみの関係

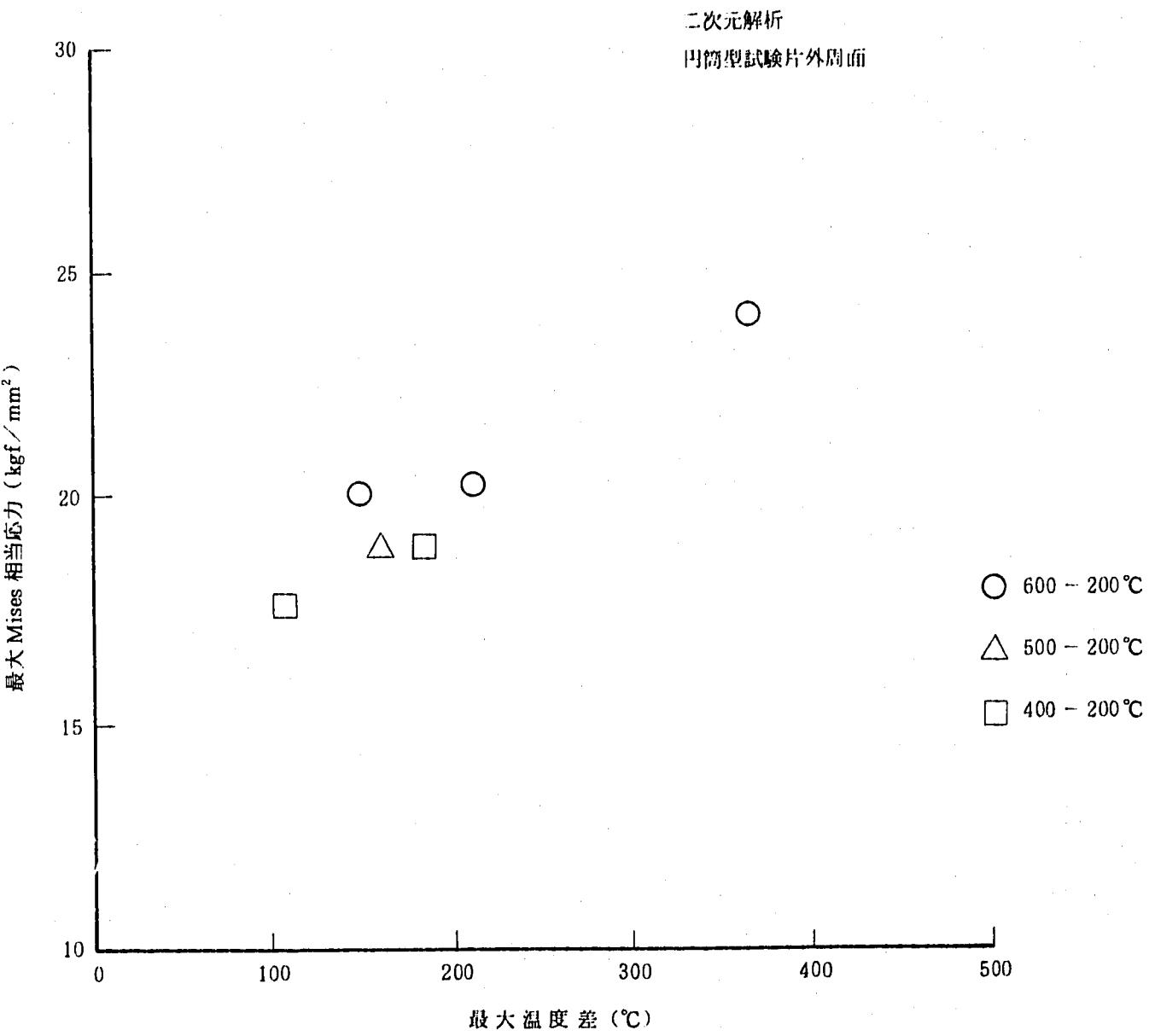


図 4.14 最大温度差と最大 Mises 相当応力の関係

## 5. クリープ疲労損傷の検討

### 5.1 解析の目的及び解析条件

本試験においては、熱疲労き裂は試験片の治具等ではなく本体（円筒試験片あるいは中空円筒試験片ならば円筒部分）から発生することはもちろん、なるべく本体の中心部分から発生することが望ましい。このため、本試験開始に先立ち、損傷解析によりき裂発生位置の評価を行っておくことが必要である。本章では、4章まで行った熱応力解析の結果に基づき損傷評価を行ってみた。

解析の対象条件は、ナトリウム温度 600 – 200°C、熱伝達係数 15000 kcal / m<sup>2</sup>h°C、試験片浸漬速度 0.5 m / sec の場合とした（熱伝導解析及び応力解析の結果は3章参照）。

### 5.2 疲労損傷のみを考慮した場合の検討結果

本節では、疲労損傷のみを考慮した場合について述べる。

熱応力解析を基に Mises 型相当塑性ひずみ範囲と疲労寿命の関係を求めた結果を図 5.1 に示す。この結果は次の仮定に基づいて最適疲労破損式から求められたものである。

- I) 疲労損傷の評価点は、代表として円筒試験片の外表面軸方向中心位置について求めた。これは、最大ひずみが試験片軸方向中心位置に生じる（3, 4章参照）ことに基づく。
- II) 疲労損傷のみを考慮し、クリープ損傷は考慮しない。
- III) 多軸疲労寿命は Mises 型相当ひずみ範囲により単軸疲労寿命と対応づけることができる（注1）。
- IV) 热過渡下の疲労寿命は試験片の経験する最高温度における疲労特性によって表せる。
- V) 热過渡時のひずみ速度は 0.1% / s と考えてよい。
- VI) ホットショックおよびコールドショックで応力ひずみ挙動（ひずみ振幅）は対称である。

図 5.1 より、当然のことながら、熱過渡温度差の低下とともに疲労寿命が伸びることが分かる。この傾向は、熱過渡温度差が 200°C 以下で顕著となり、温度差が 100°C の場合の寿命は約 10<sup>7</sup> サイクルであり、1 サイクル 20 分で試験を行った場合には破断までに約 380 年要することになる（この場合のひずみ範囲は約 0.24% である）。温度差が 200°C の場合は寿命は約 7000 サイクルであり、1 サイクル 20 分の場合、破断までの所要時間は約 100 日程度となる（この場合のひずみ範囲は 0.77% である）。

---

(注1) 本解析では、簡単のため、熱応力解析で得られた Mises 型相当塑性ひずみ範囲をそのまま材料強度基準で策定されている「最適疲労破損式」（全ひずみ範囲と寿命の関係）に適用して疲労寿命を求めた。従って実際の寿命は本解析で求められた寿命より若干みじかくなることが予想される。

これを熱過渡温度差を縦軸にとって整理しなおした結果を図 5.2 に示す。図 5.2 には試験片浸漬速度の異なる場合の解析結果も示してある。この図から試験片浸漬速度が疲労寿命に及ぼす影響を検討すると、浸漬速度が  $0.01 \sim 1.5 \text{ m/sec}$  の範囲で変化した場合の寿命の変動は約 10% 程度であることが分かる。

次に上記仮定のうち、IVについて、実際の（熱応力解析によって求められる）ひずみ速度（Mises 型相当塑性ひずみ速度）を考慮した場合の結果を検討する。熱過渡時の相当塑性ひずみ速度（ひずみ 0 の状態から相当ひずみ最大値に至るまでの平均相当ひずみ速度）を試験片浸漬速度で整理した結果を図 5.3 に示す。熱過渡温度差が  $200 \sim 400^\circ\text{C}$ 、試験片試験片が  $0.01 \sim 1.5 \text{ m/sec}$  の範囲内では、相当ひずみ速度は約  $0.05 \sim 0.4\%/\text{s}$  という値をとることが分かる。この結果を用いて、ひずみ速度の効果を考慮して寿命を評価した結果を図 5.4 に示す。ひずみ速度を考慮することによる評価寿命の変動は少なく、最も大きい場合（ナトリウム温度  $600 - 200^\circ\text{C}$ ）でも 10% 以内である。また、ひずみ速度を考慮すると、試験片浸漬速度による寿命の変動は小さくなるようである。

### 5.3 クリープ疲労損傷を考慮した場合

試験片がコールドショック及びホットショックを受ける場合の試験片外表面における応力ひずみ挙動を概念的に図 5.5<sup>(4)</sup> に示す。この挙動は、軸方向応力あるいは周方向応力に対応する。まず、コールドショックを受けると試験片外周面に引張ひずみが生じる。この間のひずみ速度は比較的速い。やがて熱伝導が試験片の内側に及ぶに従って外周面のひずみは 0 にもどる。この間のひずみ速度は比較的遅い。ひずみがほぼ 0 に戻った時点で定常状態に達する。この時の状態はひずみ保持と考えてよい。従って応力緩和が生じると考えられる。コールドショックの場合は残留応力が負となる。ホットショックの場合もこれと同様の過程が生じる。ただし、ホットショックの場合はひずみ保持時の残留応力は正となる。

試験片外周面軸方向中心位置における Mises 型相当ひずみ、応力の経時変化をそれぞれ図 5.6～7 に示す。ただし、図 5.6～7 は弾塑性解析の結果であり、定常状態の応力緩和は考慮されていない。

次に以下の仮定を設けた上で円筒試験片のクリープ疲労損傷の試算を行った。この試算では試験片軸方向の 7 点について評価を行い、クリープ疲労損傷の分布を検討した。解析条件はナトリウム温度  $600 - 200^\circ\text{C}$ 、試験片浸漬速度  $0.5 \text{ m/sec}$ 、熱伝達係数  $15000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  とした。

- I) 疲労損傷は 5.1 に示した仮定のもとで求める。
- II) クリープ損傷の計算に当たっては、応力緩和を考慮しない。これは、実際の試験結果を解析するにあたっては適切な仮定でないと考えられるが、ここでは単純化された 0 次近似としてこの仮定を設けた。
- III) クリープ損傷は通常次式で求め、積分はひずみ保持時間について行うが、本試算においては、ひずみがほぼ定常状態をとる時間がひずみが変動する時間に比べて非常に長いことから、

ひずみ変動部とひずみ保持部の区別は行わない。また、クリープ損傷はホットショック時のみ発生すると考える。これらの仮定により、積分はホットショックの全期間について行う。

IV) 多軸クリープ破壊特性は、Mises型の相当応力で整理することにより、単軸クリープ破壊特性と対応付けることができる。

$$D_c = \int dt / t_r (\sigma) \quad (5.1)$$

クリープ破壊特性は、材料強度基準で定められた主破壊クリープ式によった。この結果を図5.8に示す。図5.8によると、疲労損傷(図中○で示す)は軸方向中心位置で最大値をとるが、クリープ損傷(図中△で示す)は軸方向中心位置ではなく、試験片両端から約15mmの2点で最大となることが分かる。これは、3章の解析で示した通り、残留応力の最大値が軸方向中心位置ではなく、試験片両端から約15mmの2点で生じることによる(例えば図3.7(a)の△印参照)。さらに図5.8には、このようにして求めた疲労及びクリープ損傷に線型損傷則を適用することによって求めた破壊寿命(図中●)を示した。これによると、寿命はクリープ損傷が最大値をとる試験片両端から約15mmの2点で最も短くなる。これは、これらの2点で最初にき裂が発生することを意味する。

この結果を疲労損傷のみを考慮して予測寿命を求めた結果と比較すると、疲労損傷のみを考慮した場合の予測寿命が433であったのに対し、クリープ損傷をも考慮した場合の予測寿命は205となっており、クリープ損傷の効果により寿命が1/2程度に低下することが分かる。また、疲労損傷のみを考慮した場合は試験片の軸方向中心部でき裂が生じるのに対し、クリープ損傷をも考慮した場合には試験片両端から軸方向に約15mmの点でき裂が発生するという結果になっており、き裂発生位置の予想も異なる結果となっている。

本試験片は断熱層や治具の影響により、応力分布は本解析とは若干異なることも予想される。従って本試験の結果の評価にあたっては断熱層や治具をも考慮した詳細解析もあわせて行い、本解析の結果と比較検討を行うことが望ましい。

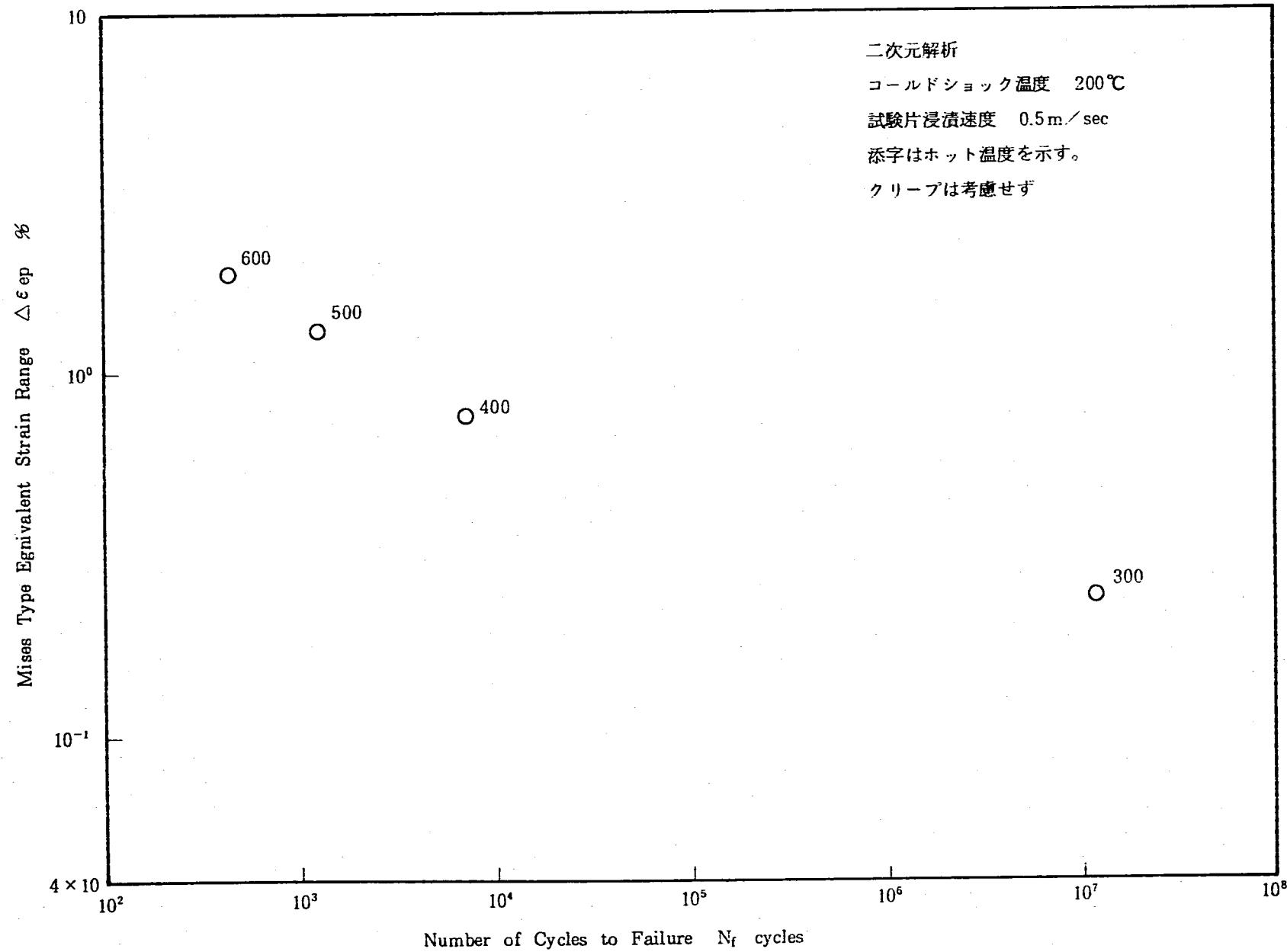


図 5.1 疲労寿命の評価結果

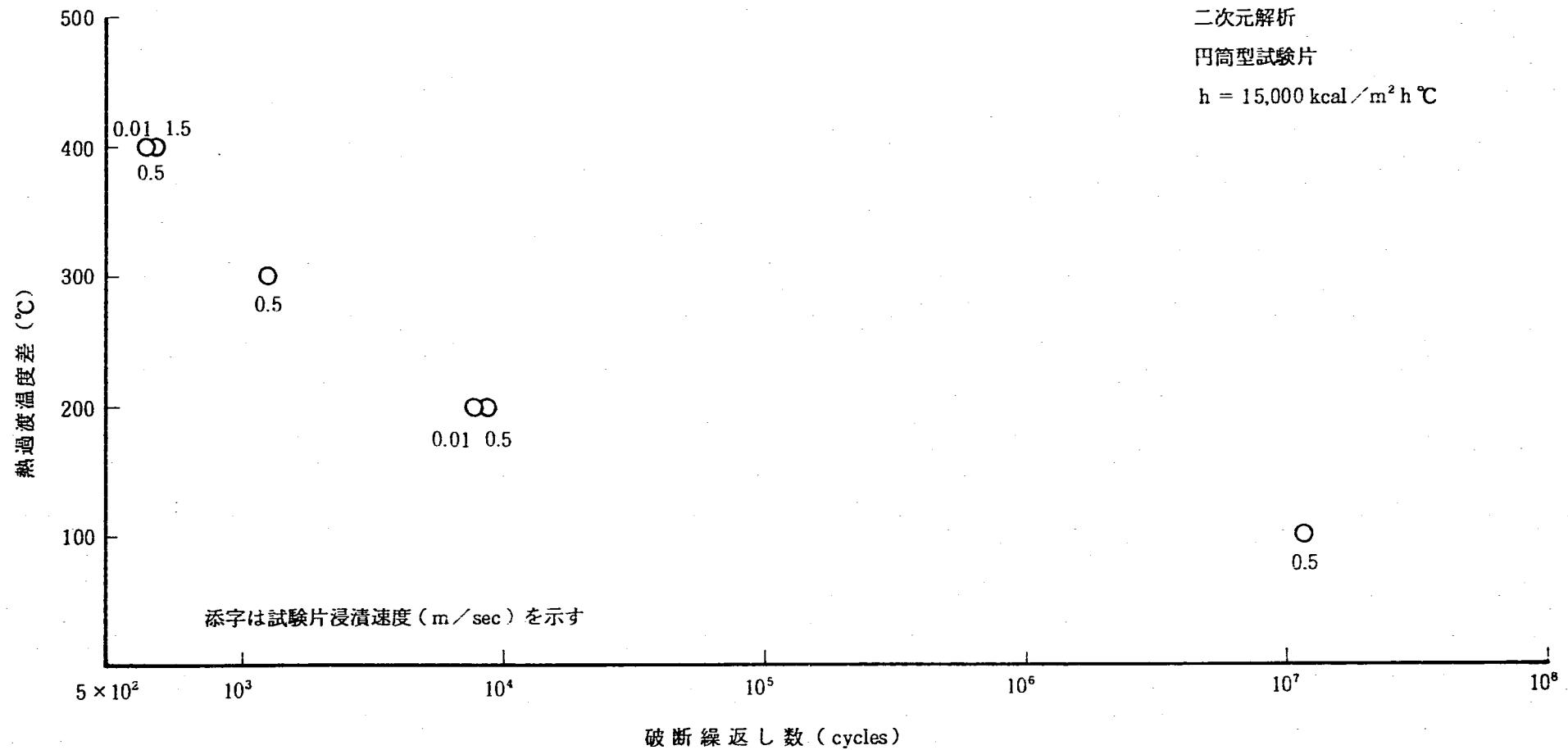


図 5.2 热過渡温度差と疲労寿命の関係

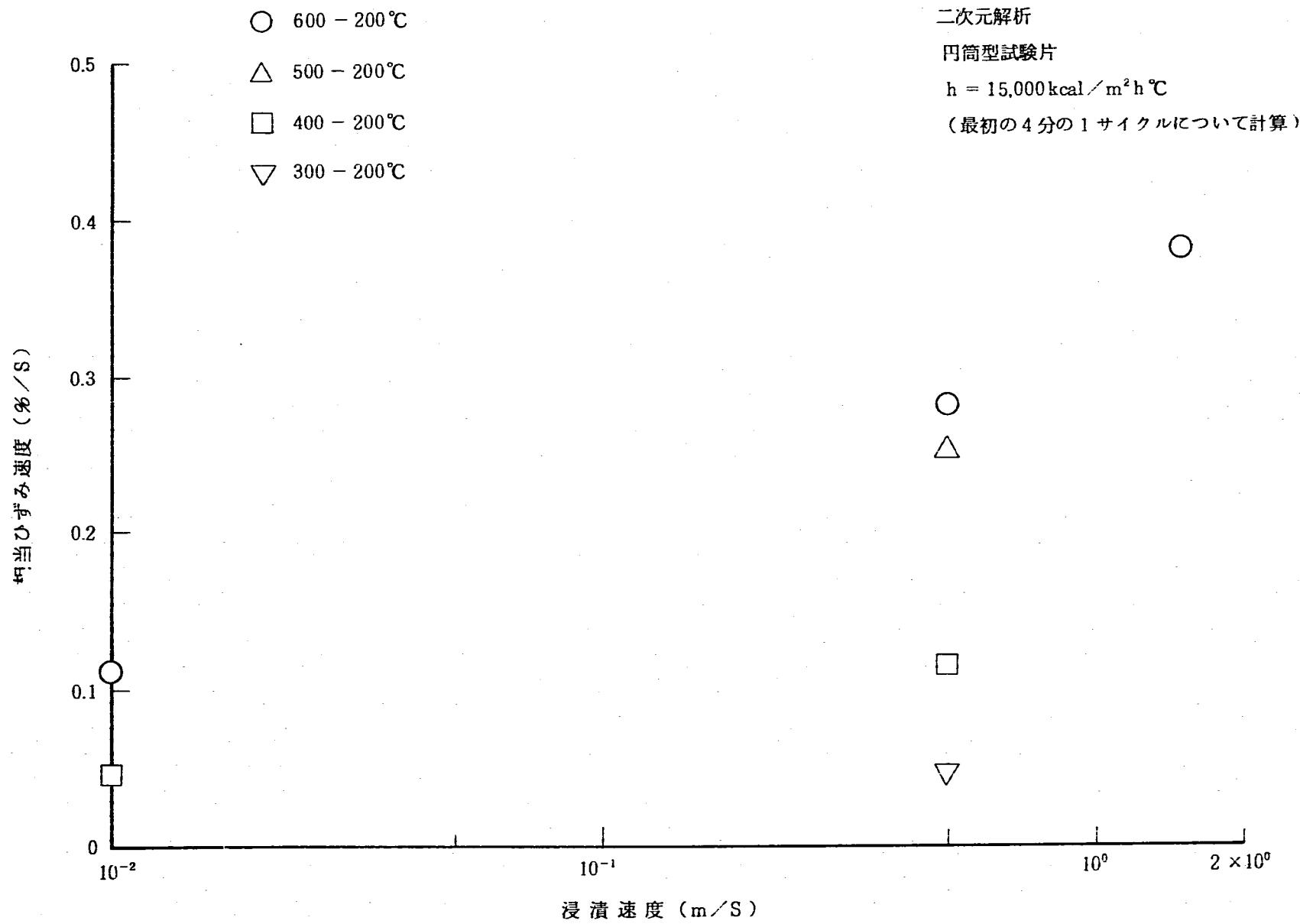


図 5.3 試験片浸漬速度と相当ひずみ速度の関係

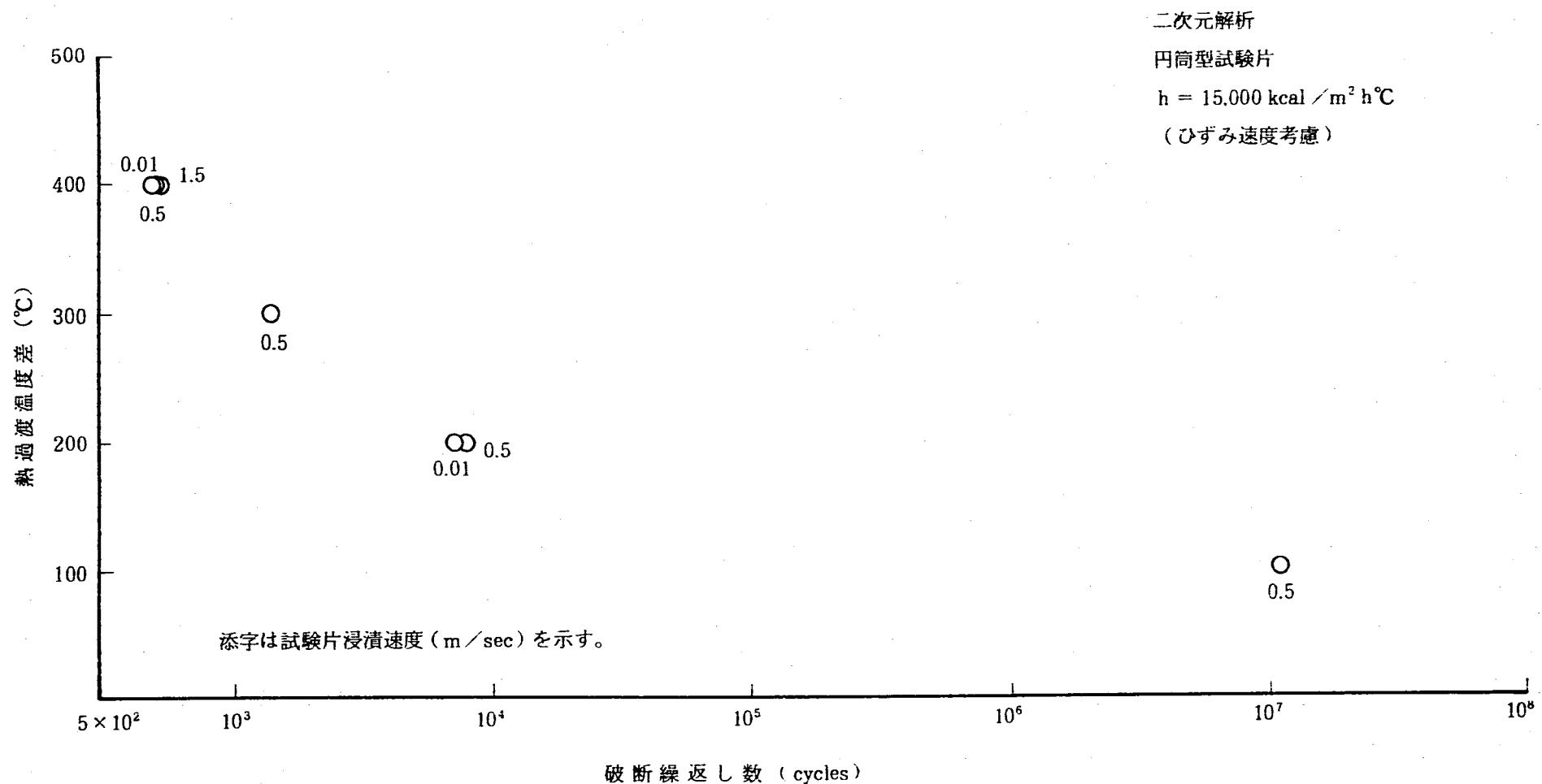


図 5.4 試験片浸漬速度の相違による相当ひずみ速度の相違を考慮した場合の熱過渡温度差と疲労寿命の関係

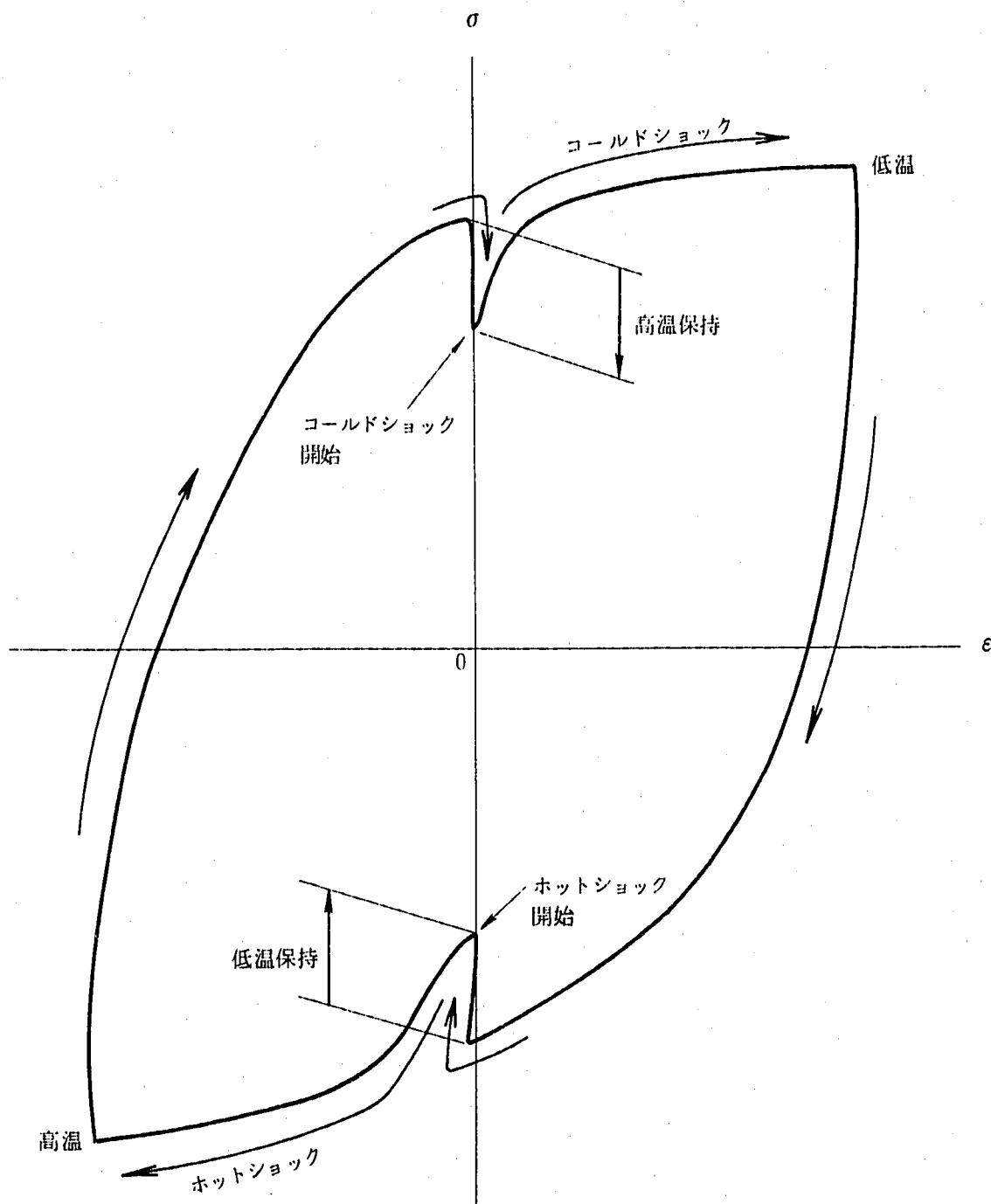


図 5.5 熱過渡サイクルの概念図

FINAS

PNC SN9410 90-054

IP=CENTER

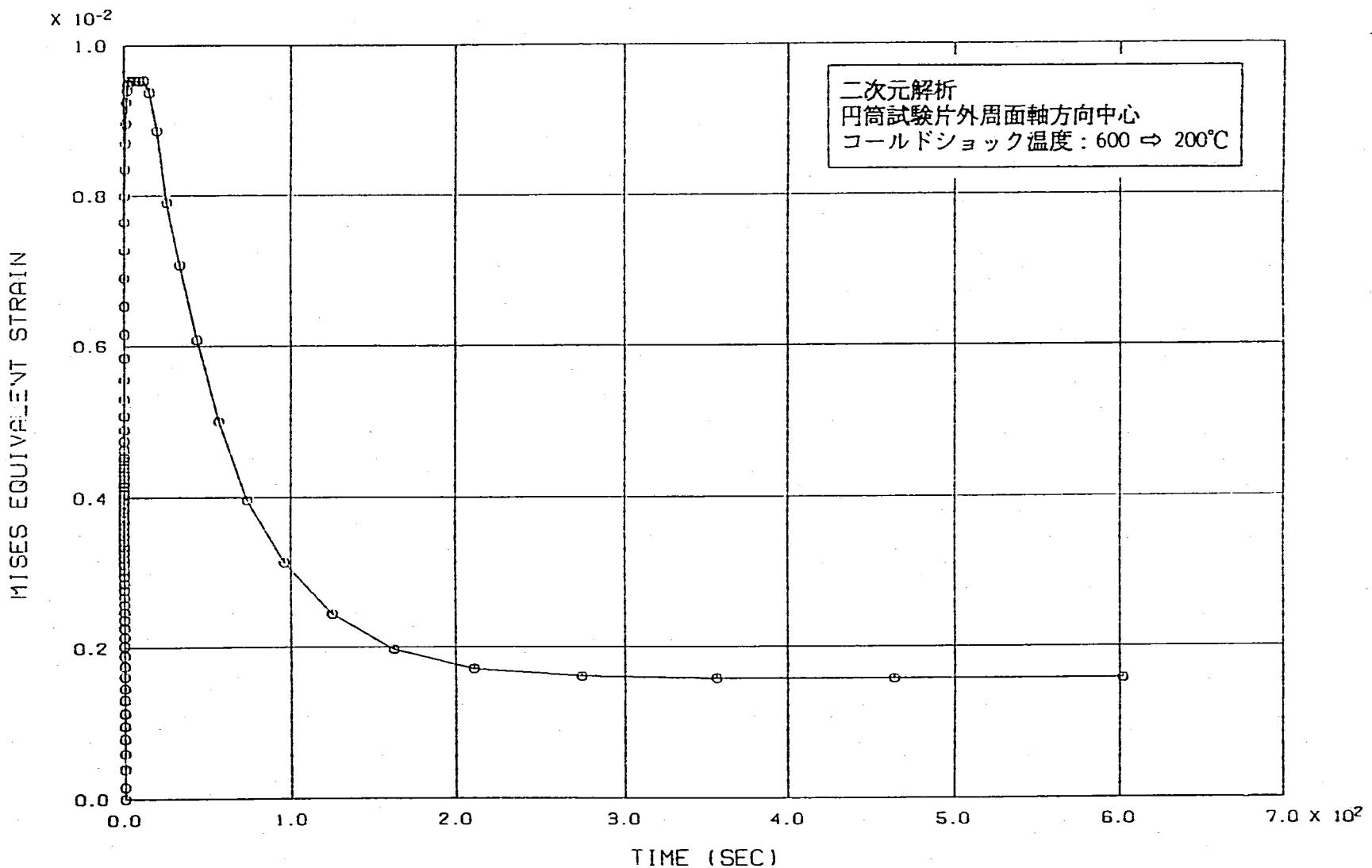


図 5.6 相当ひずみの経時変化

FNUGS

$\times 10^4$   
2.5

IP=CENTER

MISES EQUIVALENT STRESS (KGF/MM<sup>2</sup>)

2.0

1.5

1.0

0.5

0.0

0.0

1.0

2.0

3.0

4.0

5.0

6.0

$7.0 \times 10^2$

TIME (SEC)

二次元解析  
円筒試験片外周面軸方向中心  
コールドショック温度: 600  $\Rightarrow$  200°C

図 5.7 相当応力の経時変化

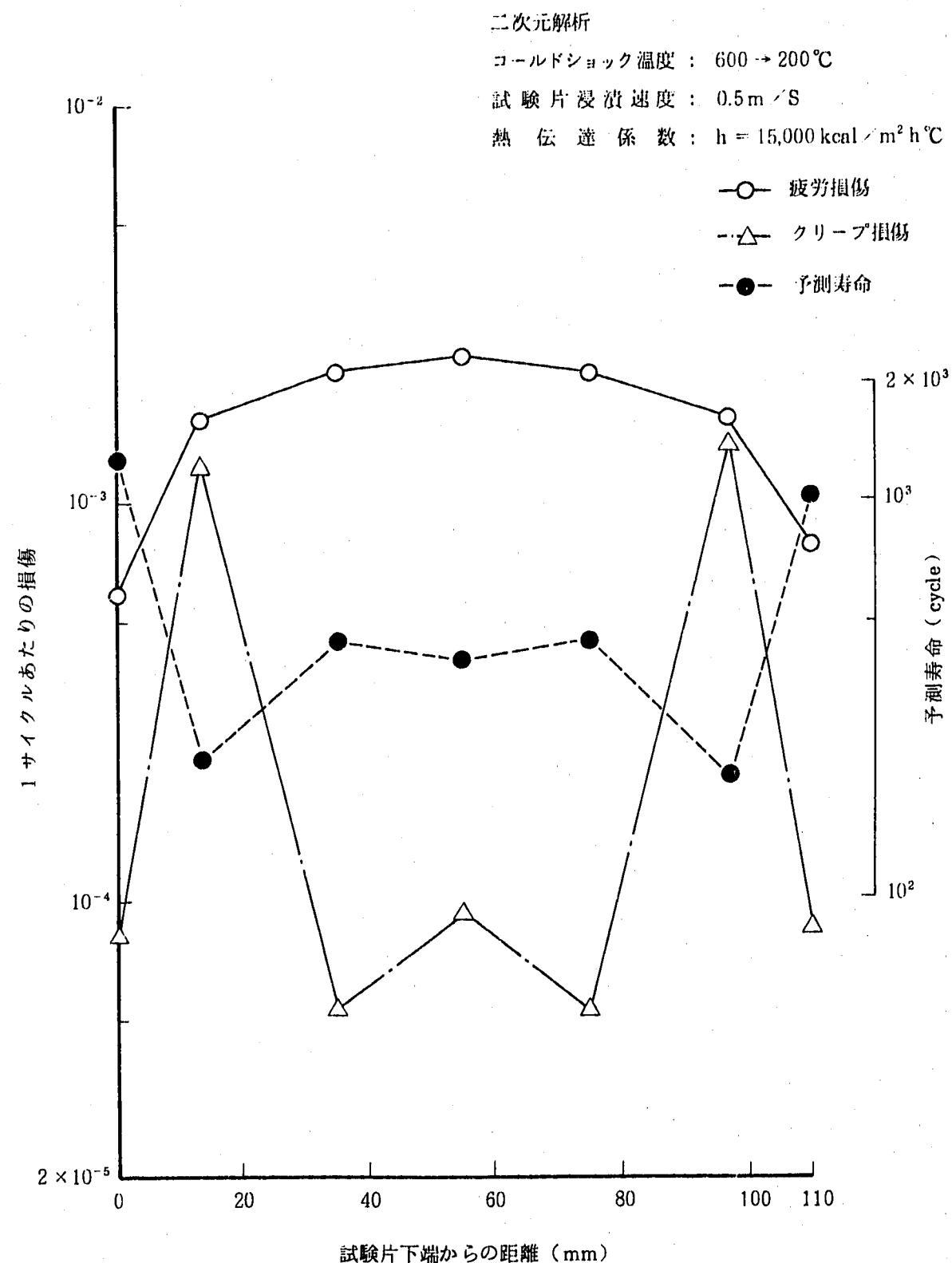


図 5.8 疲労損傷とクリープ損傷の軸方向分布

## 6. 溶接継手試験片の解析

### 6.1 解析の目的および解析条件

本章では本試験装置建設の本来の目的である溶接継手の熱疲労の予備解析を、2～5章で行った母材に関する解析を基礎として行う。

本試験で最初に用いる予定の溶接継手試験片は、周方向TIG溶接である。開先形状の概念図を図6.1に示す。本予備解析ではこれを図6.2のようにモデル化した。溶接部の幅は10mmで肉厚方向に一定とした。有限要素解析におけるメッシュ分割は図6.3の通りとした。この時、溶接金属部の特性は、応力ひずみ挙動の2直線近似における降伏点を母材の80%（図6.4参照）とした。加工硬化係数等他の特性は母材と同一とした。

### 6.2 解析結果

解析条件はナトリウム温度600～200°C、熱伝達係数15000 kcal/m<sup>2</sup>h°Cとした。解析条件を表6.1に示す。FEMの詳細条件を表6.2に示す。相当ひずみ及び応力が軸方向中心位置で最大値をとる時点におけるこれらのコンター図を図6.5～6にそれぞれ示す。また、Mises型相当塑性ひずみ、相当応力の試験片軸方向の分布の経時変化を図6.7～8に示す。図には、これらが軸方向中心位置で最大値をとる時点及び十分時間が経過したと考えられる時点（浸漬開始後10分）についてプロットしてある。軸方向中心位置で相当ひずみがピーク値をとる時点では溶接部にひずみの集中がみられるが、定常状態では逆に周辺の母材と比較してやや小さめのひずみを示している。ピーク時のひずみ集中は（溶接部のひずみ）/（母材のひずみ）なる比で表すと、約1.15程度となっている。相当応力について見ると、軸方向中心位置で相当応力がピークをとる時点においても定常状態においても溶接部では母材に比べて低めの応力を示している。また、定常状態においてピーク値が中心部ではない点に発生する傾向を示しており、これは母材試験片の場合と同一である。

本試験片では、溶接部と母材部で特性が異なるほか、母材硬化部の特性もこれらとは異なる可能性が強く、本予備解析の結果よりも複雑な挙動を示すことが予想される。

### 6.3 熱過渡負荷と機械負荷の関係

溶接継手試験片に熱過渡負荷を与えた場合のひずみ集中挙動は6.2節で検討したが、本節ではこれを機械負荷の場合と比較するため、機械荷重を負荷した場合の解析を行った。

この場合のモデルを図6.9に示す。端面は拘束し、試験片端部の変位が1%となるまで引張変位を与えた。

Mises型相当塑性ひずみ、相当応力の軸方向分布を図6.10～11に示す。これらの図にはひずみ及び応力の各成分（r, θ, z）も併せて示してある。溶接部におけるMises型相当塑性ひずみの母材

部に対する集中率は 1.15 程度であり、熱過渡荷重の場合と一致しており、機械荷重の場合に熱過渡荷重と比較して顕著なひずみ集中が生じるという傾向は見られなかった。相当応力についてみると、やはり熱過渡荷重の場合と同様に溶接部では母材部と比較してやや小さな値となっている。

表 6.1 解析条件一覧表  
(溶接継手の解析)

<熱負荷>

ナトリウム温度: 600 - 200°C

浸漬速度: 0.5 m/sec

熱伝達係数: 15000 kcal/m<sup>2</sup>h°C

浸漬時間: 600 sec

<機械負荷>

端面を拘束し、試験片端部の変位が 1% (1.1 mm) となるように引張変位を与える。

表 6.2 FEM 解析条件  
(熱伝導解析および熱応力解析)

- (1) 使用コード FINAS  
 (2) 使用要素 热伝導解析………HQAX 8：热伝導 8 節点 4 边形軸対称要素  
                   热応力解析………QAX 8：8 節点 4 边形軸対称要素

## (3) モデルの寸法および要素分割

図 6.3 に示す。

## (4) 境界条件 図 6.3 に示す。

(5) 热過渡解析 热過渡面（図 6.3 に示す）に接液するナトリウム温度を設定温度（表 6.1 に示す）まで 0.0088 秒で变化させる（下図参照）。

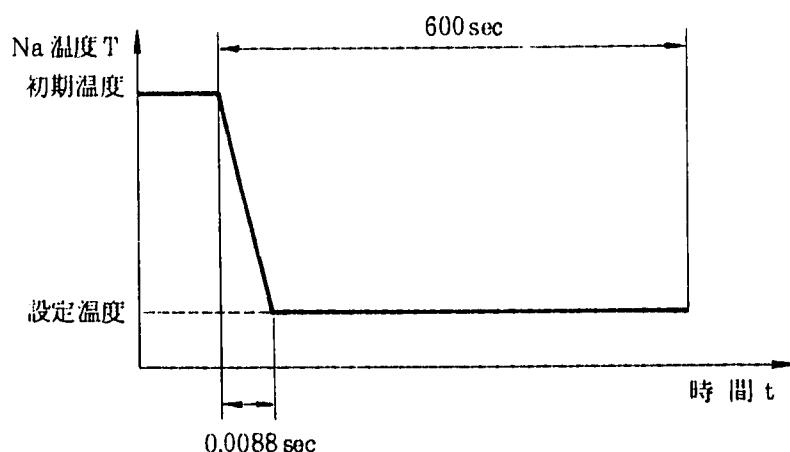
## (6) 応力解析における物性値

FINAS に組み込みの物性値 (SUS 304) を使用。継弾性係数、ポアソン比、線膨張係数を表 2.2(2) に、降伏応力、加工硬化係数は表 2.2(3) に示す。ただし、最大負荷レベルは 1 % を想定した。いずれも温度依存性を考慮した。

## (7) 応力ひずみ関係 2 直線近似とし、弾塑性解析を行った。

## (8) ひずみ硬化則 移動硬化則を用いた。

溶接金属部の降伏応力は、当該温度における母材の降伏応力の 80 パーセントと仮定した。そのたの特性は母材と同等とした。



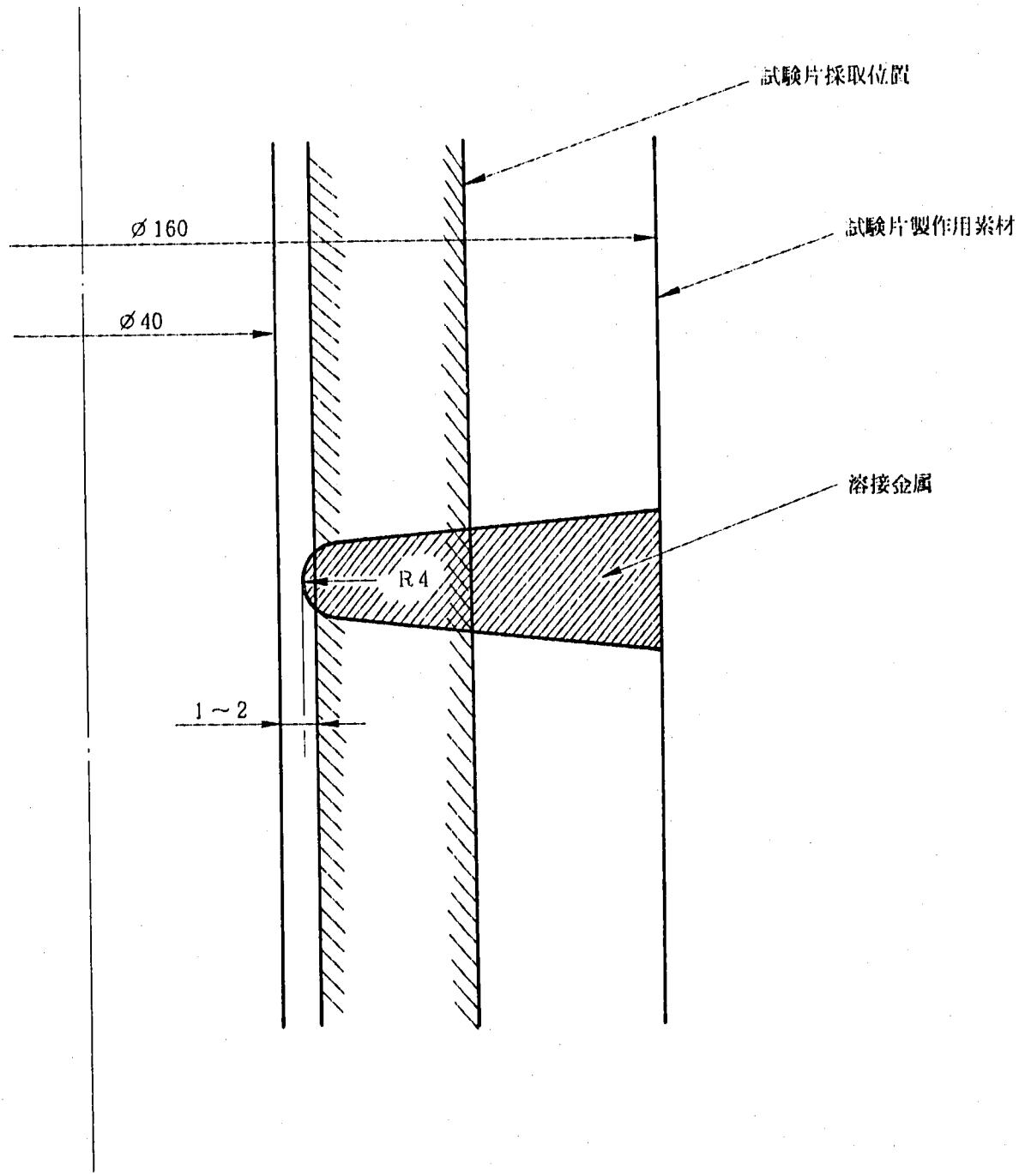


図 6.1 溶接継手の概念図  
(素材を溶接後試験片を切断・採取する)

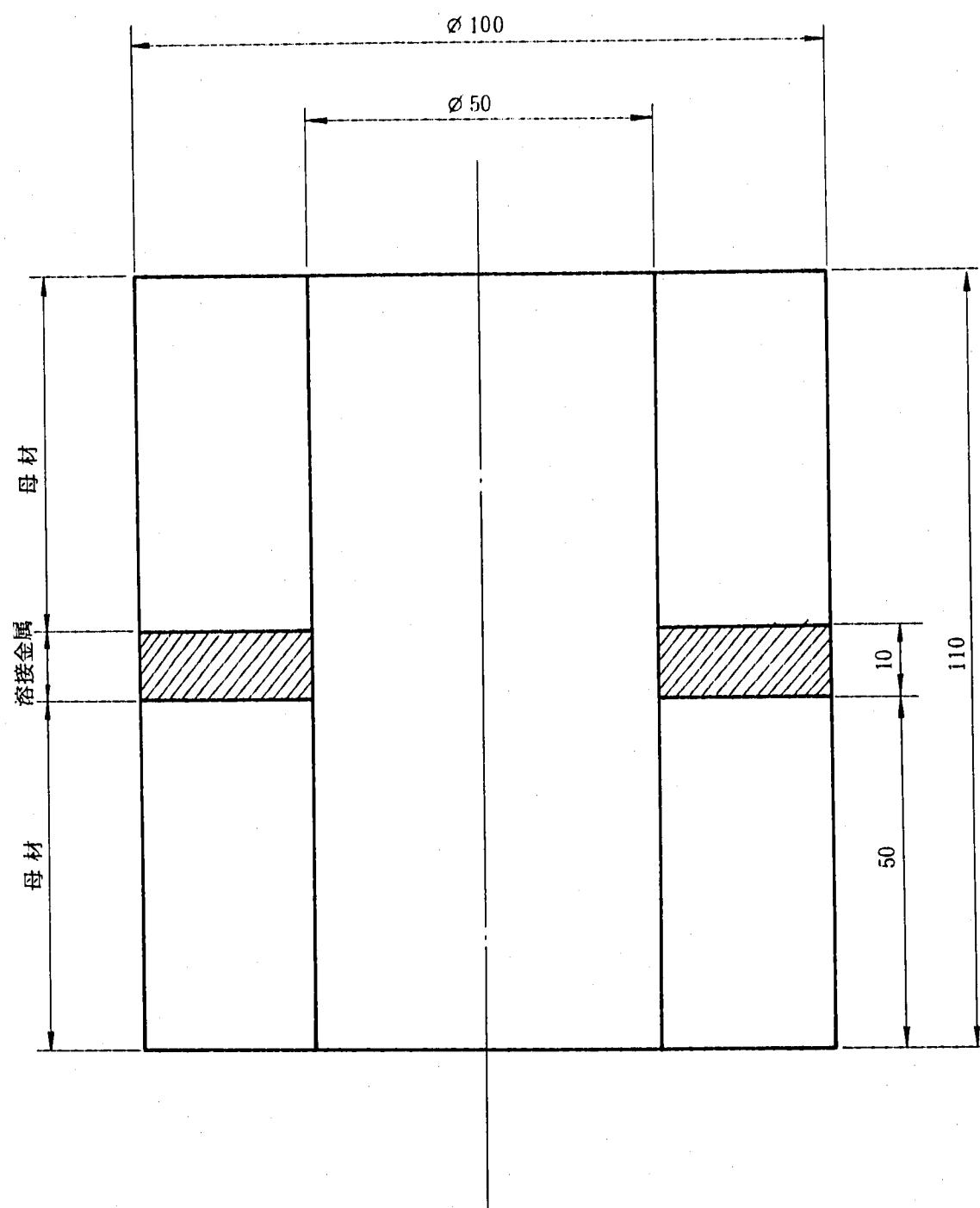


図 6.2 溶接継手試験片のモデル化

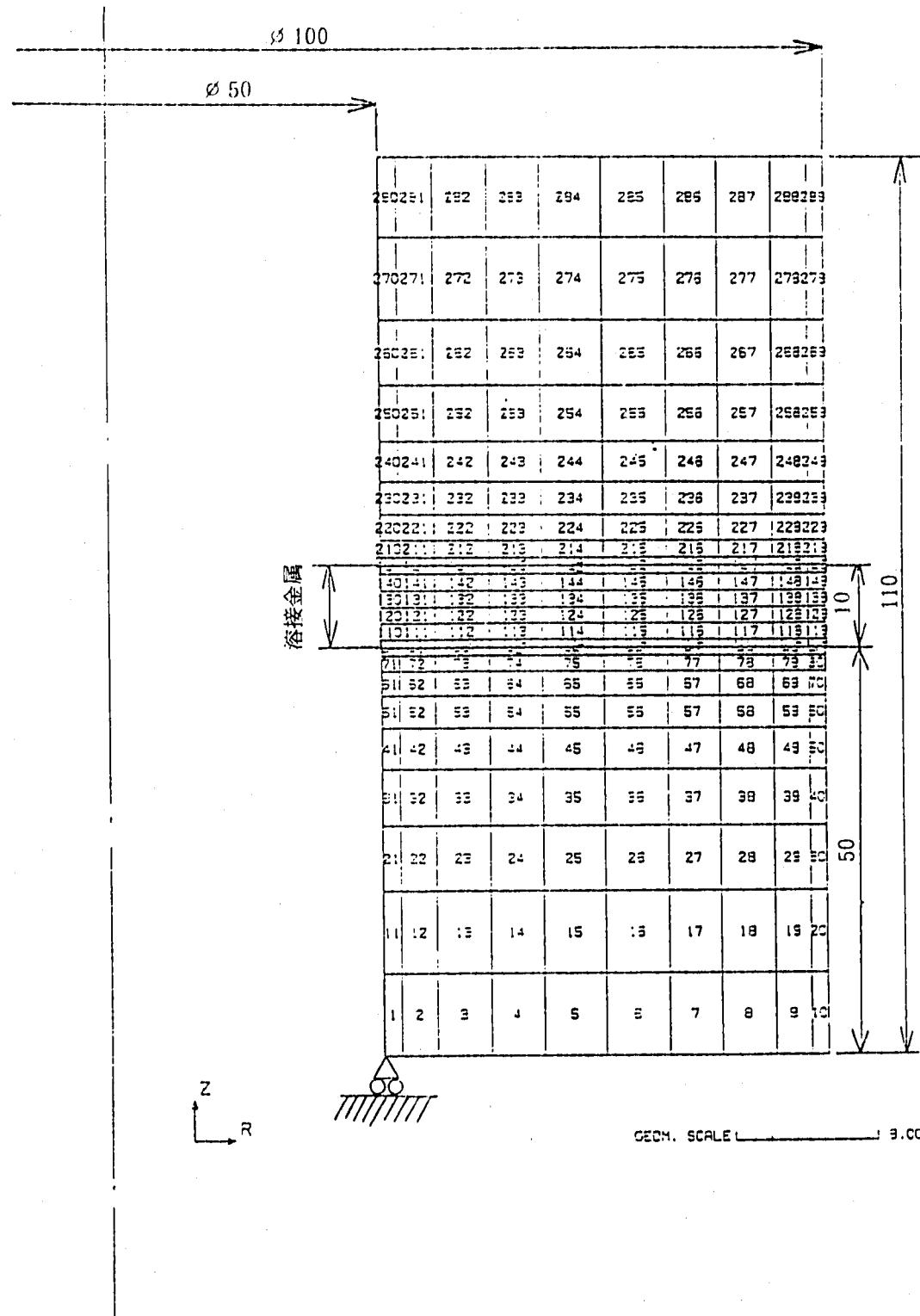


図 6.3. 溶接継手試験片のメッシュ分割

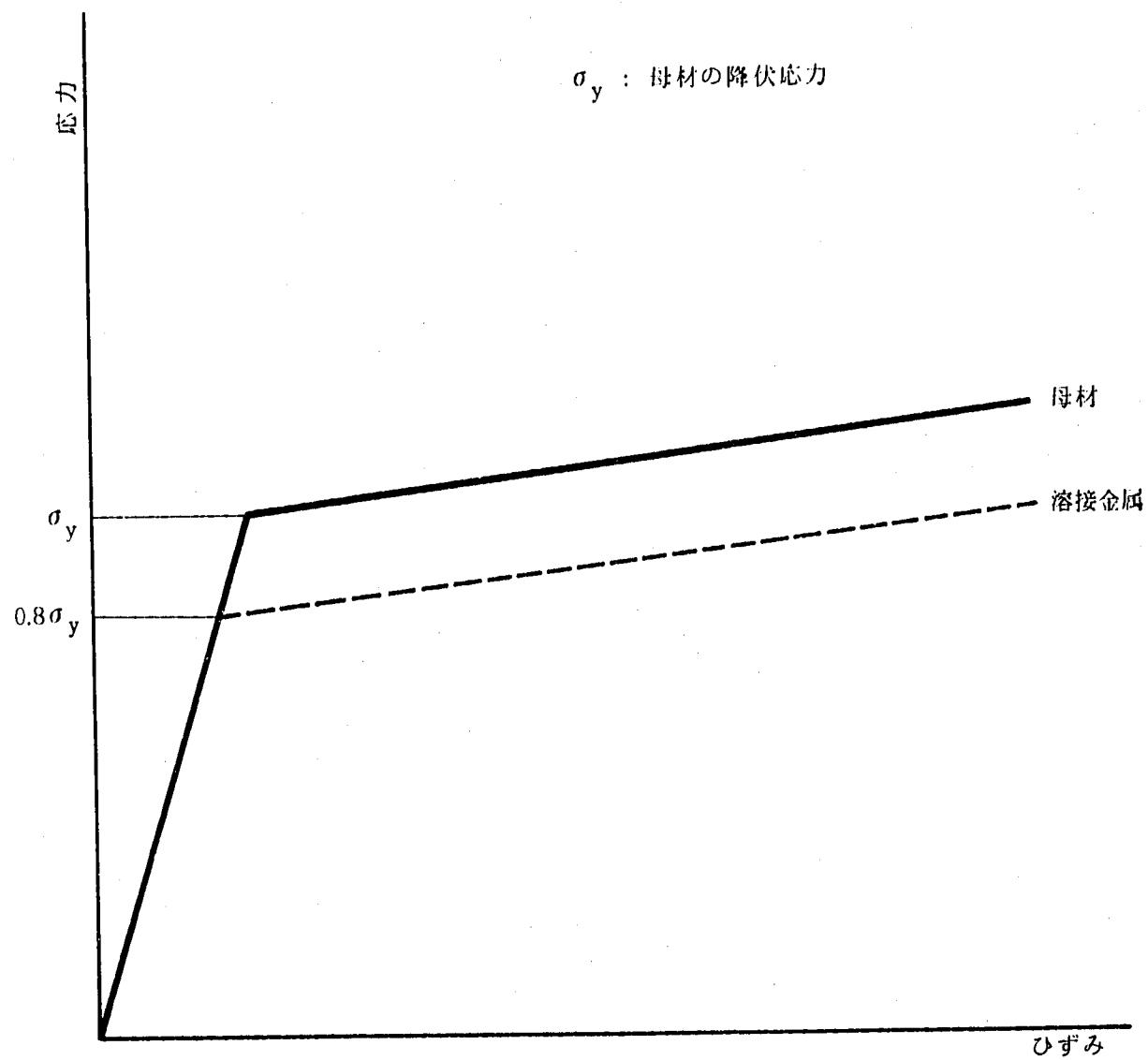


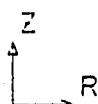
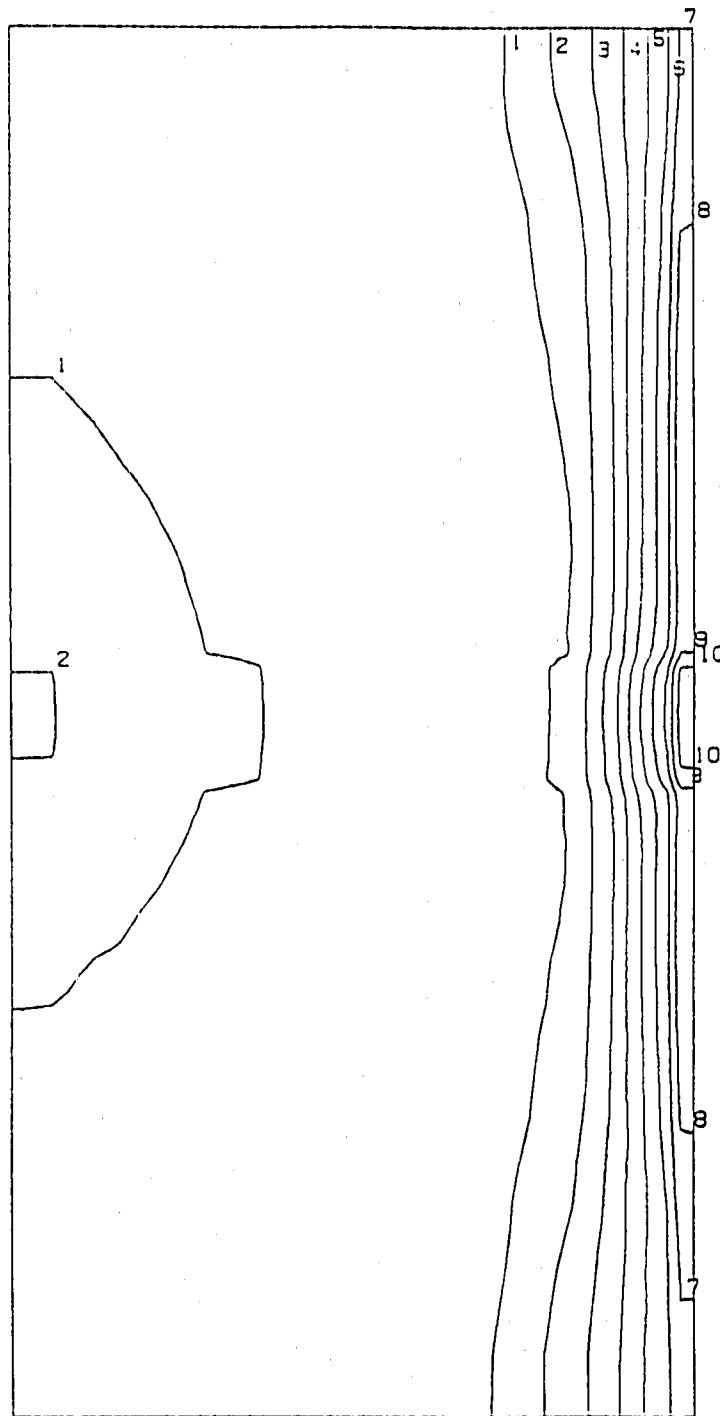
図 6.4 母材および継手の応力ひずみ関係のモデル化

FINAS

EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

## CONTOUR VALUES

1	3.700-04
2	1.120-03
3	1.870-03
4	2.620-03
5	3.370-03
6	4.120-03
7	4.870-03
8	5.620-03
9	6.370-03
10	7.120-03



STEP NO. 130

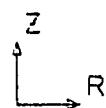
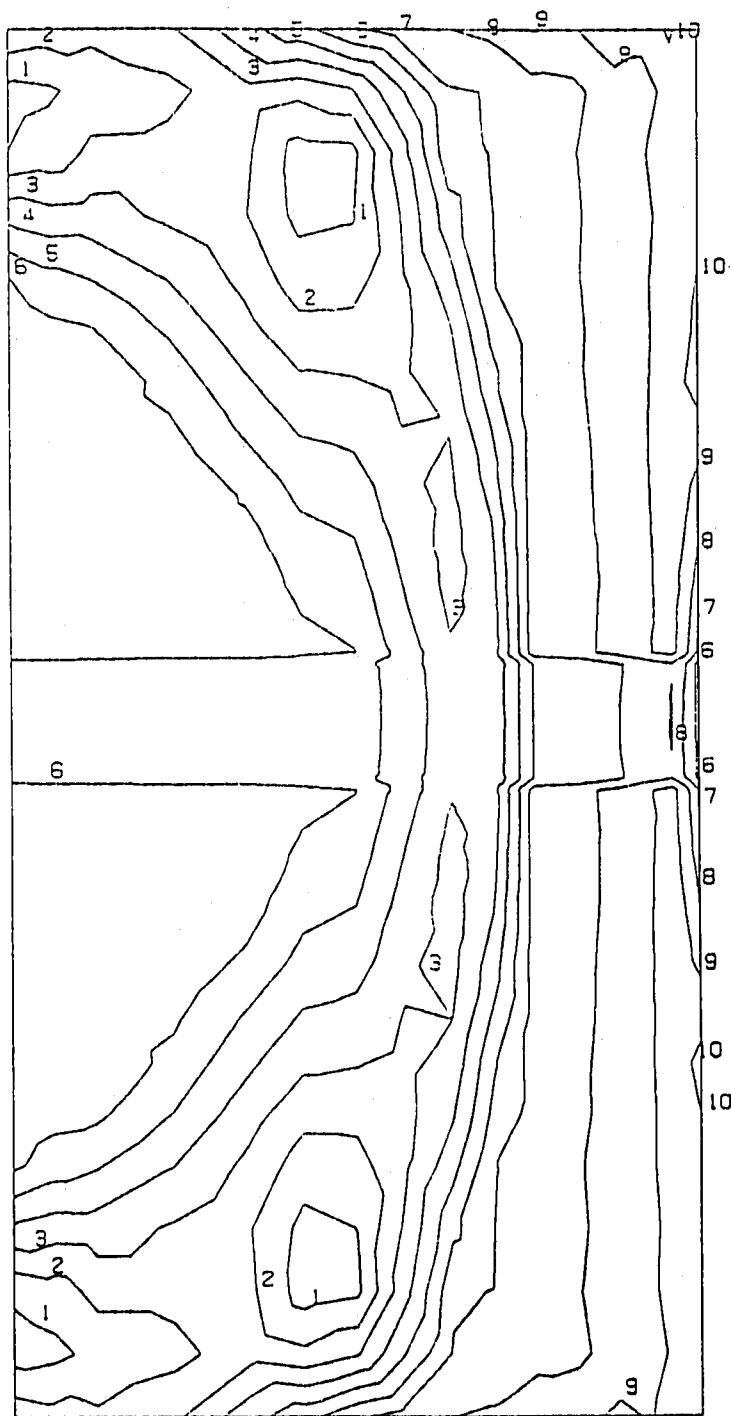
GEOM. SCALE 1 : 8.00000

図6.5 相当塑性ひずみのコンター図（軸方向中心位置の相当ひずみ最大時）

FINAS  
VON MISES STRESS

## CONTOUR VALUES

1	2.599998
2	4.399997
3	6.199996
4	7.999996
5	9.799995
6	11.599998
7	13.399999
8	15.199999
9	16.999998
10	18.799997



STEP NO. 130

GEOM. SCALE 1 : 8.00000

図 6.6 相当応力のコンター図（軸方向中心位置の相当応力最大時）

FINAS

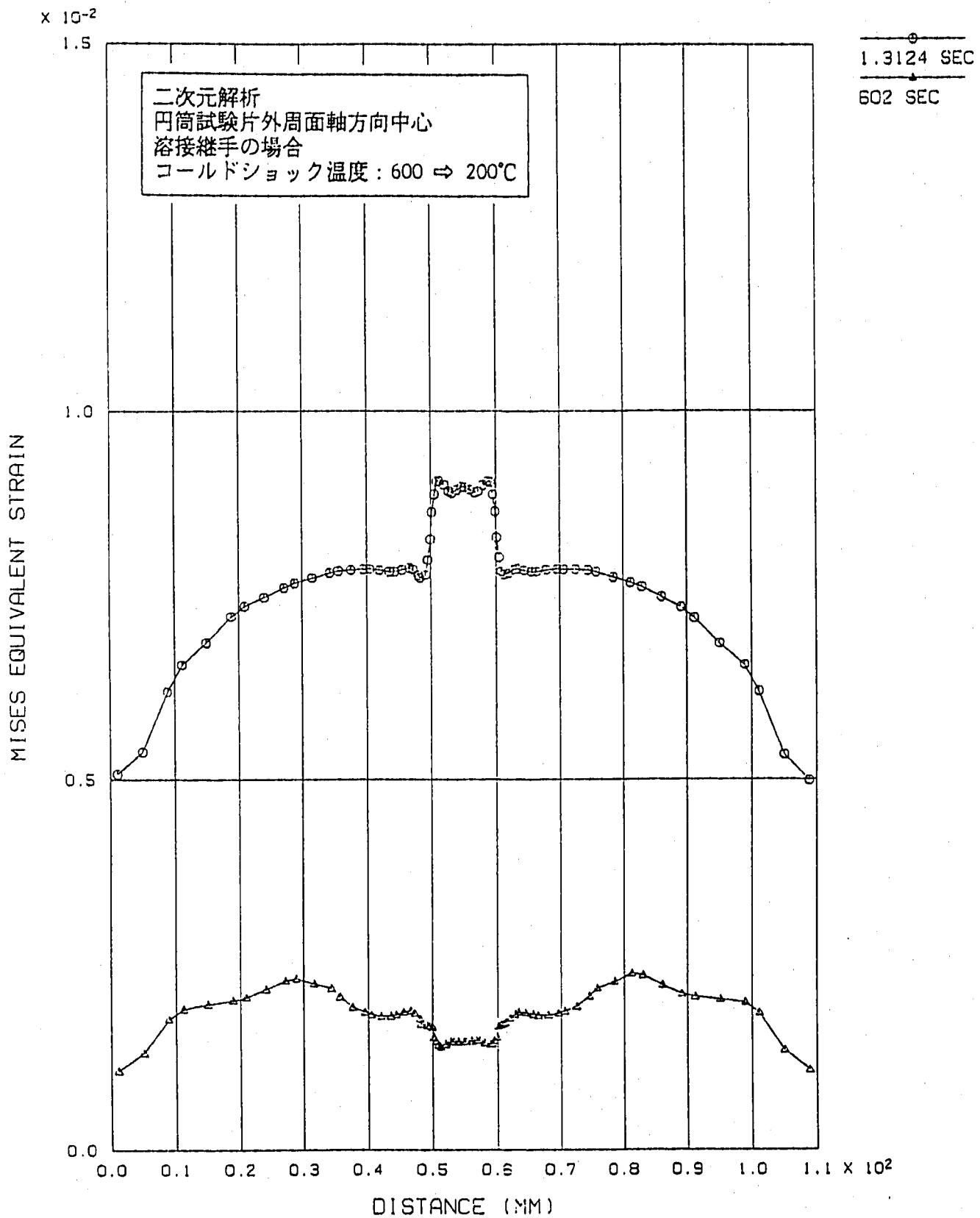


図 6.7 相当塑性ひずみの軸方向分布の経時変化

FINAS

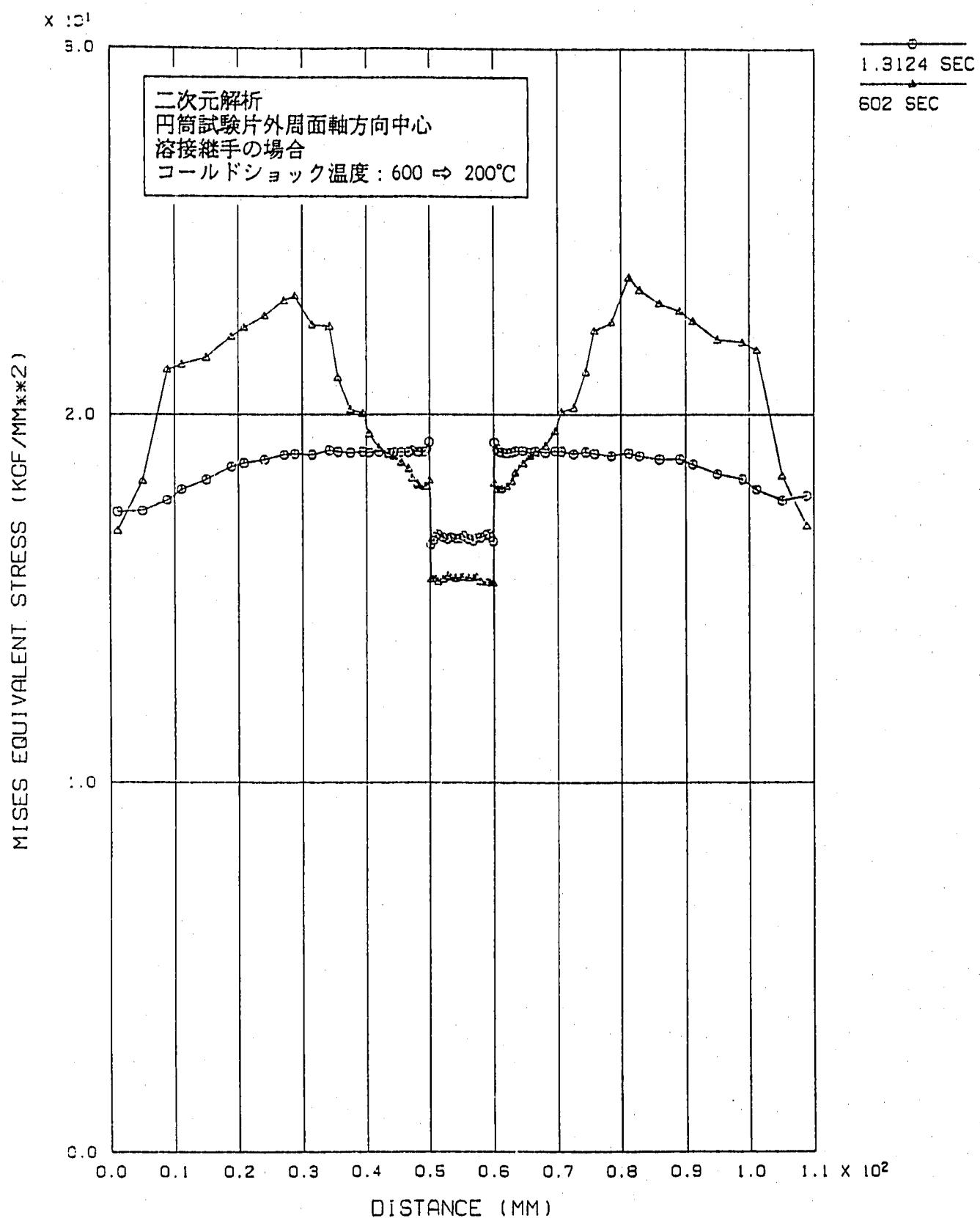


図 6.8 相当応力の軸方向分布の経時変化

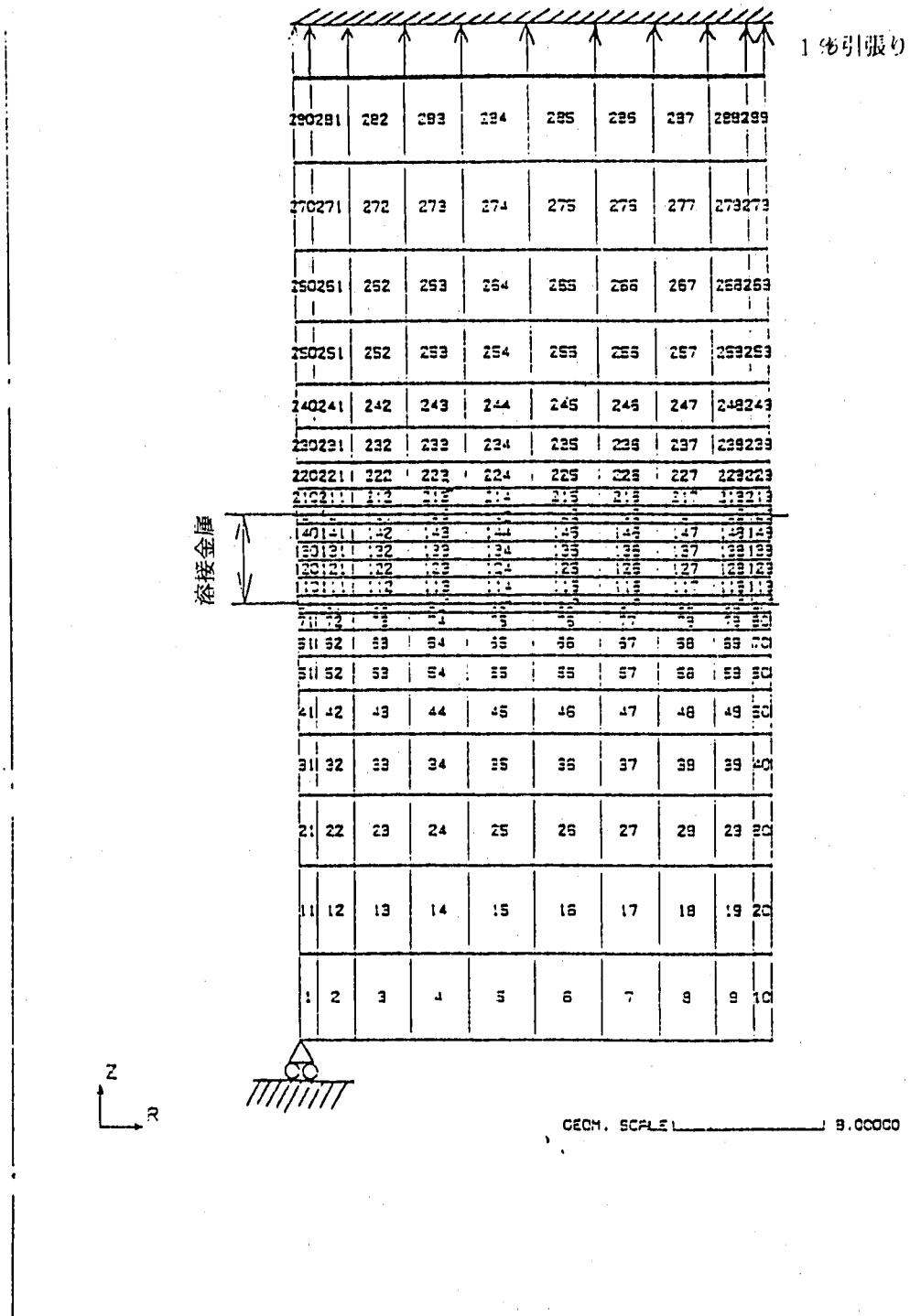
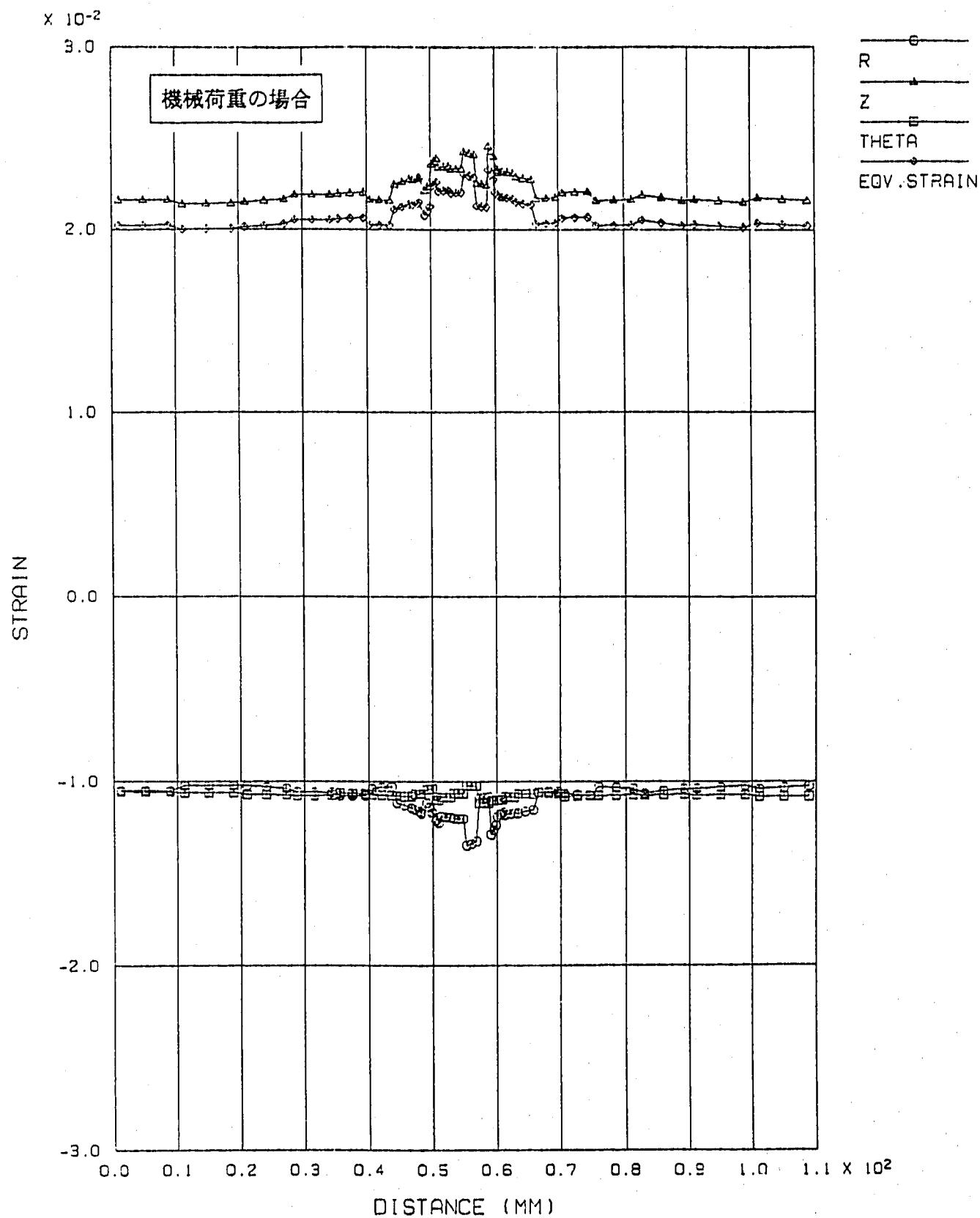


図 6.9 機械荷重のモデル化

FINAS



MECHANICAL LOAD (WELD METAL)

図 6.10 機械荷重負荷の場合の相当塑性ひずみの軸方向分布

FINES

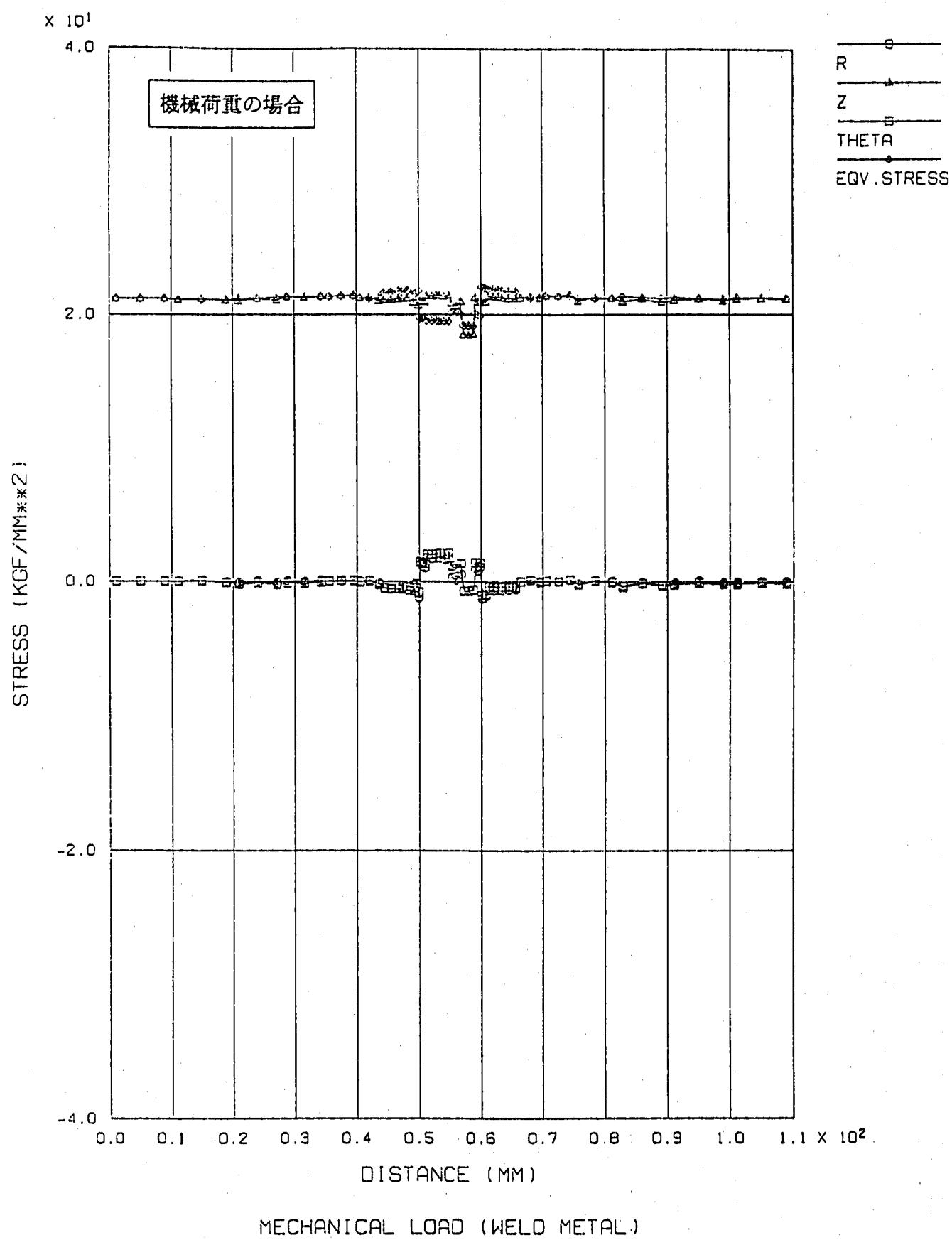


図 6.11 機械荷重負荷の場合の相当応力の軸方向分布

## 7. まとめ及び今後の課題

### 7.1 まとめ

本報では、溶接部熱疲労試験装置の運転開始に先立ち、FEM (FINAS) による試験体の熱応力解析を行い、本試験時に主に問題となると考えられるパラメータが、試験体に発生する温度分布、応力分布に及ぼす影響を定量的に検討した。この結果以下の知見が明らかになった。

母材試験片の解析により、次の知見が明らかになった。

- (1) 热過渡により生じるひずみ、応力の大きさは円筒試験片の外周面、中空円筒試験片の内、外周面で大きな差はない。
- (2) 热過渡により生じるひずみ、応力の大きさは熱伝達係数が  $50000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  程度までは熱伝達係数の増加とともに大きくなるが、熱伝達係数が大きくなるとともに増加率は小さくなり、 $50000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  以上ではほぼ一定値をとる。
- (3) 本試験で実現すると考えられる  $7000 \sim 15000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  の範囲では、円筒試験片の外周面の場合、熱伝達係数の 10% の変化に対するひずみの変化は 3 % 程度である。
- (4) 発生するひずみ範囲、応力範囲は高温および低温ナトリウム温度差の増加とともに比例的に増加し、最大温度差 ( $400^\circ\text{C}$ ) の場合はそれぞれ Mises 型の相当塑性ひずみ、相当応力で表すと、約 2 %、約  $40 \text{ kgf/mm}^2$  である。これが本装置で負荷しうる最大値と考えられる。
- (5) 試験片をナトリウムに浸漬する際に生じる試験片軸方向の温度分布を考慮しない一次元解析の結果を、試験片軸方向の温度分布を考慮する二次元解析と比較すると、軸方向中心位置における応力ひずみ挙動に関しては良好な一致を見る。二次元解析の結果によると、軸方向中心部で最大ひずみ（応力）が生じる時点では、軸方向中心部から端部に向かうに従ってひずみ（応力）の値は減少する。
- (6) 二次元解析の結果によると、試験片の均熱状態で生じる残留応力は試験片軸方向中心ではなく、軸方向両端から  $15 \text{ mm}$  程度の 2 点で最大となる。
- (7) ホットショック時の応力ひずみ挙動とコールドショック時の応力ひずみ挙動は対称であると考えてよい。
- (8) 試験片のナトリウム浸漬速度が低下すると、試験片軸方向に生じる温度差は大きくなる。発生するひずみの大きさはこの温度差の影響を殆ど受けないが、応力は温度差の増加とともに大きくなる傾向がある。
- (9) 热応力解析の結果に基づき損傷評価を行い、寿命の概算値を求めるとき、高温ナトリウム温度差が  $100 \sim 400^\circ\text{C}$  の範囲でクリープ疲労寿命は  $4 \times 10^2 \sim 1 \times 10^7$  程度となり、妥当な寿命の試験を行うことが可能である。
- (10) 試験片軸方向の損傷の分布に関しては、試験片の治具や断熱層も考慮したさらに詳細な解析

を併せて行うことが望ましい。

溶接継手試験片の解析を行うことにより、次の知見が明らかになった。

- (11) 溶接継手の特性を、溶接金属部の降伏応力を母材部の 80% と仮定することによってモデル化すると、溶接金属部の母材部に対するひずみ集中は温度差 400°C の熱過渡負荷の場合で 1.15 程度である。
- (12) 溶接継手に端部を 1% 引張るような機械荷重を負荷した場合の、溶接金属部の母材部に対するひずみ集中は 1.15% 程度であり、熱過渡負荷の場合と同一である。

## 7.2 今後の課題

本報で行った解析に統いてさらに検討すべきポイントとして次のような点が考えられる。

### 7.2.1 流体一構造連成解析

本報における予備解析では、ナトリウムは常に指定された温度を保ち、さらにナトリウムと試験片の間の熱伝達係数も常に一定値を保つものとして解析を進め、ナトリウムと試験片の相互作用、例えば、ホットショック時にナトリウムから試験片へ熱が授与されることによるナトリウムの冷却等は考慮していない。また、本試験では試験片は案内管内のナトリウム流（試験片浸漬方向とは逆方向の流れ）に浸漬されるわけであり、浸漬直後には特に試験片下部においては流れの乱れが生じる可能性があるが、この効果も考慮していない。本試験においてはこれらの効果が無視できなくなる可能性もある。もし、これらの効果が無視できないとすると、それは主に試験片の軸方向における熱過渡条件の変化（ばらつき）として現れると考えられる。さらに、これらのばらつきが、発生するひずみや応力の状態に無視できない影響を及ぼす可能性がある。従って解析的な立場から考えると、試験片軸方向のナトリウム初期温度及び熱伝達係数の変化（ばらつき）を考慮しなければならないことになる。このような効果を考慮するためには、本予備解析のように単純化された解析では無理があり、流体一構造連成解析の行える解析コードを用いる等の対策が必要となる可能性もある。

### 7.2.2 試験片形状の詳細解析

本報における予備解析では、試験片形状は 2 次元モデルにおいても単純な円筒として近似し、本試験では採用予定の断熱層や治具の効果は無視している。実際にはこれらの部分が試験片の円筒部分の応力ひずみ分布にも影響を与える可能性がある。従って、本格的に本試験を行うまでには、試験片の詳細形状に関する応力解析も併せて行い、その結果を本解析の結果と比較検討することが望ましいと考えられる。

### 7.2.3 実測温度分布による応力解析

本報における予備解析では、有限要素コード（FINAS）で行った熱伝導解析の結果に基づき応力解析を行った。従って、熱伝導の解析結果が実際の現象と異なっているとすれば応力解析の結果も現実と異なることになる。一連の解析における誤差要因を少しでも少なくするためにには、解析による熱伝導（温度分布）と、実測による熱伝導（温度分布）の差、また、これらに基づき行った応力解析の結果の差を検討する必要がある。このため、本報におけるような解析による熱伝導の他に実測温度分布に基づく応力解析も行っておくことが望ましい。

### 7.2.4 複数のき裂が発生することの影響等の検討

本試験で予定しているような厚肉円筒試験片で熱過渡試験を行うと、熱過渡面には亀甲状に多数のき裂が発生する可能性がある。単独き裂の場合と多数き裂の場合ではその進展挙動が異なることが予想され、詳細解析においてはこの点も考慮しなければならない可能性がある。

また、厚肉円筒試験片の場合、熱過渡により発生する応力・ひずみは板厚方向に分布し、熱過渡を行う表面で最大値をとる。熱過渡表面から遠ざかるに連れて応力・ひずみの値は減少するため、表面で発生したき裂がある程度進展してき裂先端が熱過渡表面から遠くなると、き裂の進展が停止することが考えられる。この問題も詳細解析においてはポイントとなることが予想される。

## 謝　　辞

本報告書をまとめるにあたり、構造工学室の永田敬主任研究員、谷川雅之副主任研究員、笠原直人研究員には極めて貴重な助言をいただいた。また、材料開発室・常陽産業(株)の加藤猛彦氏には FINAS のオペレーションの面で非常に多くのご支援をいただいた。この場を借りて改めて謝意を表する。

## 参考文献

- (1) 青木他, 溶接部ナトリウム中熱疲労試験装置の概要, PNC SN 9410 89 -
- (2) Skelton, R. P, ASTM STP 770, 1982, 337.