

一次応力が無い場合の3本棒熱ラチェット挙動の検討

1991年11月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

一次応力が無い場合の3本棒熱ラチェット挙動の検討

柄谷 和輝*, 山下 卓哉*, 月森和之*

中村 貢**, 岩田 耕司*

要 旨

FBRをはじめとする各種原子力機器の設計において熱応力ラチェット変形は防止すべき重要な破損様式のひとつである。このような変形を制限するため、FBRの設計では1次応力と2次応力の相互作用を考慮したBree線図が用いられている。しかし大きな温度変動が局所的に存在する場合、降伏応力の温度依存性により1次応力が無くとも2次応力のみでラチェット変形が発生する可能性がある。本研究はこの現象を試験およびFEM解析により確認し、さらにそのメカニズムを理論的に検証することを目的とするものである。

本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる

- (1) 両端を互いに拘束したSUS304鋼の3本棒熱ラチェット試験体の中央の棒に室温(20°C)~500°Cの繰返し熱負荷を与えると、圧縮側にラチェット変形が発生することを実験により確認した。
- (2) 汎用構造解析システムFINASにより、構成モデルとして非線形繰返し非硬化領域モデル(大野モデル)を用いて試験を模擬したFEM解析を実施した。これより試験で計測されたラチェット変形を精度よく予測することができた。
- (3) 降伏応力の温度依存性を考慮した弾完全塑性モデルにより、3本棒熱ラチェット試験において1サイクルあたりに発生するラチェットひずみ ϵ^R を理論的に導き以下の式を得た。

$$\epsilon^R = - \{ \alpha \Delta T / 2 - \sigma_y^h / E \} \quad : \text{第1サイクル} \quad \text{a)}$$

$$\epsilon^R = - \{ \alpha \Delta T / 2 - (\sigma_y^h + \sigma_y^c) / E \} \quad : \text{以降のサイクル} \quad \text{b)}$$

α : 線膨張係数, ΔT : 温度変化幅, E : ヤング率, σ_y^h, σ_y^c : 高温側, 低温側降伏応力

ただしラチェットはb)式右辺第1項が第2項より大きい場合に発生する。

- (4) (3)で示した理論解は試験の初期数サイクルのラチェット変形量を予測した。これより、このラチェットの発生が降伏応力の温度依存性に起因することを確認した。

*機器構造開発部・構造工学室, **現在, 川崎重工業株式会社

Study on Thermal Ratchetting of a Three Bar Specimen without Primary Stress

Kazuteru Garatani* Takuya Yamashita* Kazuyuki Tsukimori*
Mitsugu Nakamura** and Koji Iwata *

Abstract

The thermal stress ratchetting is one of the important failure modes to be prevented in the design of FBR components. To avoid this kind of deformation, the Bree diagram expressed by the combination of primary and secondary stresses has been used in the design of FBR. However, even without primary stress, there is a possibility of ratchetting due to temperature dependence of yield stress when large variations of temperature exist locally. The purpose of this study is to confirm those phenomena by experiment and FEM analysis, and to prove this mechanism by a theoretical model.

The following results were obtained.

- (1) The occurrence of compressive ratchetting deformation was demonstrated by a three bar thermal ratchetting test where the temperature of the central bar was varied cyclically from 20°C to 500°C.
- (2) The analysis of the three bar ratchetting test was performed by using the nonlinear cyclic hardening model (Ohno model) installed in FINAS***. It is confirmed that the result of analysis represents the experimental ratchetting behavior well.
- (3) The ratchetting strain per one cycle : ϵ^R of a three bar thermal ratchetting model was derived by using the elastic-perfect plastic model in consideration of temperature dependence of yield stress.

$$\epsilon^R = - \{ \alpha \Delta T / 2 - \sigma_y^h / E \} \quad : \text{the first cycle} \quad \text{a)}$$

$$\epsilon^R = - \{ \alpha \Delta T / 2 - (\sigma_y^h + \sigma_y^c) / E \} \quad : \text{following cycle} \quad \text{b)}$$

α : thermal expansion ratio, ΔT : variation of temperature, E : Young's modulus, σ_y^h, σ_y^c : yield stress at higher and lower temperature respectively

The ratchetting occurs when the first term of right side is greater than the second term of b) equation.

- (4) The analytical solution by (3) represents well the initial ratchetting behavior of the test. This type of ratchetting occurs due to the temperature dependence of the yield stress of the material.

* Structural Engineering Section, Oarai engineering Center, PNC
** Currently with Kawasaki Heavy Industries Co. Ltd.
*** General Purpose Finite Element Nonlinear Structural Analysis System

目 次

緒 言	1
1. 試験方法	2
1.1 概 要	2
1.2 試験体	2
1.2.1 試験体仕様	2
1.2.2 試験体の試験検査成績	3
1.3 試験装置	3
1.4 計 測	3
1.4.1 温度計測	3
1.4.2 ひずみ計測	4
1.4.3 変位計測	4
1.5 試験条件	4
2. 試験結果	5
2.1 概 要	5
2.2 計測結果	5
2.2.1 温度計測結果	5
2.2.2 ひずみ計測結果	5
2.2.3 変位計測結果	5
2.3 考 察	6
2.3.1 温 度	6
2.3.2 ひずみ	7
3. 解析方法	9
3.1 概 要	9
3.2 F E Mモデル	9
3.2.1 構造のモデル化	9
3.2.2 材料のモデル化	11

3.3	弾完全塑性モデルによる簡易法	11
4.	解析結果	13
4.1.	FEM解析結果	13
4.2.	弾完全塑性モデルによる簡易法の結果	13
4.3.	考察	13
	結 言	15
	参考文献	16
	付 録. 降伏応力の温度依存性を考慮した2次応力ラチェットのメカニズム	17

List of Tables

Table 1.5-1	Loading Condition	22
Table 2.1-1	Temperature Output Points	22
Table 2.1-2	Strain Output Points	23
Table 2.1-3	Displacement Output Points	23
Table 2.3-1	Averaged Peak Temperature at each Cycle	24
Table 3.2-1	List of FEM Analysis Model	24
Table 3.2-2	Material Constants (Elastic Perfect Plastic Model)	25
Table 3.2-3	Material Constants (Ohno Model)	26

List of Figures

Fig. 1.2-1	Configuration and Dimensions of the Test Assembly	27
Fig. 1.3-1	Heating System	28
Fig. 1.3-2	Water Cooling System	29
Fig. 1.3-3	Heater and Cooler Arrangements	30
Fig. 1.4-1	Measuring System	31
Fig. 1.4-2	Thermal Couple Locations	32
Fig. 1.4-3	Strain Gauge Locations	33
Fig. 1.4-4	Dial Gauge Locations	34
Fig. 2.2-1	Temperature History (TC-No.1)	35
Fig. 2.2-2	Temperature History (TC-No.2)	35
Fig. 2.2-3	Temperature History (TC-No.3)	36
Fig. 2.2-4	Temperature History (TC-No.4)	36
Fig. 2.2-5	Temperature History (TC-No.5)	37
Fig. 2.2-6	Temperature History (TC-No.6)	37
Fig. 2.2-7	Strain History (RTG-No. 1)	38
Fig. 2.2-8	Strain History (RTG-No. 2)	38
Fig. 2.2-9	Strain History (RTG-No. 3)	39
Fig. 2.2-10	Strain History (RTG-No. 4)	39
Fig. 2.2-11	Strain History (RTG-No. 5)	40
Fig. 2.2-12	Strain History (RTG-No. 6)	40
Fig. 2.2-13	Strain History (RTG-No. 7)	41
Fig. 2.2-14	Strain History (RTG-No. 8)	41
Fig. 2.2-15	Strain History (RTG-No. 9)	42
Fig. 2.2-16	Strain History (RTG-No.10)	42
Fig. 2.3-1	Temperature History of Bar-B (Time Base)	43
Fig. 2.3-2	Temperature History of Bar-B (Cycle Count Base)	43

Fig. 2. 3-3	Temperature Distribution of Bar-B (The 3rd Cycle)	44
Fig. 2. 3-4	Averaged Temperature History of Bar-B	44
Fig. 2. 3-5	Strain History of Bar-A1 (Cycle Count Base)	45
Fig. 2. 3-6	Strain History of Bar-A2 (Cycle Count Base)	45
Fig. 2. 3-7	Averaged Strain History of Bar-A	46
Fig. 2. 3-8	Ratchetting Strain at each Cycle	46
Fig. 3. 2-1	Structural Analysis Model (Only Parallel Part)	9
Fig. 3. 2-2	Applied Temperature History of Bar-B	10
Fig. 3. 2-3	Structural Analysis Model (Include Tapered Part)	10
Fig. 4. 1-1	Stress-Strain Relationship of Bar-A (Analysis type-1)	47
Fig. 4. 1-2	Stress-Strain Relationship of Bar-B (Analysis type-1)	47
Fig. 4. 1-3	Stress-Strain Relationship of Bar-A (Analysis type-2)	48
Fig. 4. 1-4	Stress-Strain Relationship of Bar-B (Analysis type-2)	48
Fig. 4. 1-5	Stress-Strain Relationship of Bar-A (Analysis type-3)	49
Fig. 4. 1-6	Stress-Strain Relationship of Bar-B (Analysis type-3)	49
Fig. 4. 1-7	Ratchetting Strain (with/without Tapered Part)	50
Fig. 4. 1-8	Experimental and Analytical Ratchetting Strain	50

List of Photographs

Photo.1	Test Assembly	52
Photo.2	Scene of the Experiment	52

緒 言

高速増殖炉の経済性を向上させるため、プラントの高温化がひとつの課題として挙げられており、使用する各種の機器・配管は今後さらに過酷な温度変動を受けることが予測される。このような構造物の設計を合理的におこなうためには構造設計の面で設計基準をより高度化することが必要となる。

さて高温機器の構造設計においてラチェット変形は防止すべき重要な破壊様式のひとつであり、熱応力ラチェットは定常的な1次応力と繰返し作用する熱応力（2次応力）の組み合わせがある限界を越えたときに生じる進行性変形として知られている。高速増殖炉機器の設計においても1次応力と2次応力を組み合わせたBree線図がラチェット防止の評価に用いられ、その発生は一定の1次応力と繰返し2次応力の相互作用によるものと考えられている。

これに対して1次応力が無視できる範囲でも、繰返し2次応力のみによりラチェットが発生し得ることが知られている。この代表的なものとして軸対称の薄肉円筒が円周方向に均一で、かつ軸方向にこう配を有する温度分布による熱応力を受けた場合があり、これは高速増殖炉の炉容器における液面近傍ラチェットに対応している。このようなラチェット変形に対しては軸方向温度分布の移動がその発生原因と考えられている⁽¹⁾。しかし、温度分布の移動に起因するラチェット以外にも降伏応力の温度依存性により2次応力のみでラチェット変形が発生することを弾完全塑性モデルを用いた簡単な2本棒モデルにより示すことができる。

本報告では、まず1次応力の無い場合にラチェット変形が発生することを試験により確認し、さらに高精度な構成モデルを用い試験条件を模擬した詳細なFEM解析を行いその挙動の検証を行う。そして弾完全塑性モデルより導かれる理論的な簡易法によりこのラチェットの発生メカニズムが降伏応力の温度依存性にあることを検証するものである。

1. 試 験 方 法

1.1 概 要

1次応力が無い状態で繰返し2次応力のみにより熱応力ラチェット変形が発生することを検証するために、簡単な3本棒構造の試験体（3本棒熱ラチェット試験体）に繰返し熱負荷を与える試験を実施した。今回用いる3本棒熱ラチェット試験体は概念的には2本棒熱応力ラチェットモデルと一般に呼ばれているものに対応し、試験体の曲げ変形を防ぐため一定温度に保つ棒Aの断面積を半分にして両端に配し3本棒構造としたものである。

1.2 試験体

1.2.1 試験体仕様

試験体は室温及び高温における材料特性データが整備されている当事業団大洗工学センター機器構造開発部材料開発室で保管していたSUS304鋼（A7材，もんじゅ原子炉容器と同一ヒート材）を機械加工して製作した。

試験体形状は、全長480mm，全幅320mm，標点間長さ100mm，標点間の板厚16mm，中央棒の幅20mm，端部棒の幅10mmとした。試験体の形状・寸法をFig.1.2-1に，外観をPhoto.1に示す。またFig.1.2-1に記すように試験体における3本の棒状部について両端をA1棒，A2棒（または総称してA棒），中央をB棒と呼び，さらに各々の棒について平行部，テーパ部，拘束部の呼称を用いる。試験体は次のような工程にて製作した。

- 1) 試験体材料を1000mm×1000mmの平板から490mm×330mmのもの6体にする。
- 2) 試験体を旋盤にのせてドリルで穴をあけ切削機の刃を通して切削加工する。
その時試験体の温度が上がらないように油を流して冷却する。
- 3) 試験体の形状がほぼできあがった状態で切削加工で残った削りしろをバフ仕上げで仕上げる。
- 4) 試験体のB棒の両端（拘束部）に，水冷ジャケットを取り付ける。

1. 2. 2 試験体の試験検査成績

熱応力ラチェット試験に用いた試験体の製作前及び完成時における試験検査結果は次の通りである。

1) 素材の検査

素材のミルシートに記載されている化学成分及び機械的性質がJISの規格に合格していることを確認した。

2) 製品検査（形状・寸法検査）

試験体の形状・寸法はJIS Z7701に基づいて製作されたが、仕上がった段階で寸法計測した結果寸法誤差は許容範囲内であることを確認した。

1. 3 試験装置

今回は1次応力を加える必要がないために特別な試験機は使用せず、試験体を水平な台に載せた状態で試験を実施した。また試験体のB棒に2次熱応力を加えるための加熱装置はこの試験のためのものを製作して使用した。これは加熱ヒーターと制御設備から成っており最高600℃までB棒を昇温させ、一定温度に保つことができる。加熱装置の形状・寸法をFig. 1.3-1に示す。また試験では試験体の中央棒のみを加熱し、その他は室温状態に保つ必要があるため、加熱炉の脇に水冷ジャケット（Fig. 1.3-2）や空気冷却ファンを設置した（Photo. 2参照）。これら加熱装置、冷却ジャケットの配置をFig. 1.3-3に示す。

1. 4 計測

熱応力ラチェット試験では試験体に温度変動を繰返し与えた時の試験体温度、ひずみ及び標点間変位を計測した。Fig. 1.4-1に計測系統図を示す。

計測したデータは増幅器を経てデータ集録装置へ送られ、磁気テープへデジタル値に変換されて記録した。磁気テープに記録されたデータは大型コンピュータのデータ処理プログラムによって処理した。

1. 4. 1 温度計測

試験体の温度計測は、スポット式ネクステル被覆（セラミックス被覆）熱電対及び

シース型熱電対を使用した。熱電対の配置図をFig.1.4-2に示す。

1.4.2 ひずみ計測

試験体のひずみ計測は、抵抗線型の室温用箔大ひずみゲージ及び室温用箔ひずみゲージを使用した。ひずみゲージの配置図をFig.1.4-3に示す。

1.4.3 変位計測

試験体の標点間変位は、ダイヤルゲージ（ひずみゲージ変換式）により計測した。

Fig.1.4-4にダイヤルゲージの配置図を示す。

1.5 試験条件

試験条件は、まず試験体全体を室温に保ち、その後B棒の平行部が室温（約20℃）から500℃になるように加熱装置により30サイクルの繰返し温度変動を与えた。温度制御を手動で行ったため、各サイクルの加熱、冷却時間は一定ではないが、各々1～2時間、1.5～2.5時間程度であった。この間B棒の平行部以外の部分は室温のままに保った。これにより試験体には1次応力が無い条件下で室温から500℃の2次熱応力が30サイクル加えられることになる。Table 1.5-1に負荷条件を示す。また試験は昼間にのみ実施したため3, 5, 8, 11, 13, 15, 18, 21, 23, 25, 27, 29サイクルの前に運転停止期間がある。この間試験体は室温に放置し計測は行っていない。

2. 試験結果

2.1 概要

試験結果は各計測点の中から有意なものを選択し、以下の3項目、計20点を出力対象とした。Table 2.1-1, 2, 3に各々温度、ひずみ、変位出力位置の一覧を示す。各データは10秒間に1回の計測が行なわれており、30サイクルにて各々54,000個のデータから成る。よって計測データ個数が膨大で扱いが不便なため、サンプリング処理によりその個数を減らしている。この処理については2.3.1節に記す。

- ・温度：B棒上下面のシース型熱電対6点 (Fig.1.4-2参照)
- ・ひずみ：A1, A2棒各々上面5点と下面1点の12点 (Fig.1.4-3参照)
- ・変位：A1棒側, A2棒側の2点 (Fig.1.4-4参照)

2.2 計測結果

2.2.1 温度計測結果

各点の温度履歴をFig.2.2-1～Fig.2.2-6に示す。ただし横軸は計測時間とした。この図より温度計測値は同じB棒であっても、その計測位置によりかなりのばらつきが見られる。また1サイクルあたりの経過時間が異なるのは温度制御を手動で行ったことと、加熱装置の起動停止が含まれていることによる。

2.2.2 ひずみ計測結果

ひずみ計測結果をFig.2.2-7～Fig.2.2-16に示す。A棒のひずみより全体的に圧縮方向のラチェットが発生していることが認められるが、曲げ変形が重畳して発生したために部分的には引張り側の変形も見られる。ひずみゲージRTG-NO.2, 3は計測の途中でゲージの断線が起こり、RTG-NO.11, 12についてはアンプ不良のため有意な計測値が得られなかった。

2.2.3 変位計測結果

変位計測結果についてはアンプの不良のため有意な計測値が得られなかった。

2.3 考察

2.3.1 温度

Fig. 2.2-1~6に示したように横軸に計測時間を取ると、1サイクルあたりの計測回数が一定ではないために負荷サイクルとの関係が不明確となる。また各計測点には54000個のデータが含まれ取扱いが不便なため、計測値に以下の操作を加えた。

① 温度の平均化

各計測位置でばらつきのある温度を総合的に評価するため、計測点6点より平均化した温度を求めた。平均温度はB棒の温度計測値を長さ方向に2次、高さ方向に1次近似することにより定めている。上面 (Top) における左、中央、右の温度を各々 T_{TL} , T_{TC} , T_{TR} , 同じく下面 (Bottom) を T_{BL} , T_{BC} , T_{BR} とすれば、平均温度 T_{ave} は以下の式で表される。

$$T_{ave} = \frac{1}{12} \{ (T_{TL} + 4T_{TC} + T_{TR}) + (T_{BL} + 4T_{BC} + T_{BR}) \}$$

② サイクル軸の設定

計測は10秒に一回行なわれているが、Fig. 2.3-1に示すように各温度サイクルの経過時間 (計測数) は一定ではなく、時間軸に対してプロットすると負荷サイクルとの関係が不明確となる。従って時間軸のかわりにサイクル軸を設定した。これは平均温度において各負荷サイクルの最低温度から最高温度までと最高温度から最低温度までを各々0.5サイクルとし、この間の温度履歴がFig. 3.2-2に示すような折れ線となるように横軸を定めたものである。従ってこの軸上でB棒はほぼ一定 (計測値によれば最低温度から最高温度の幅は必ずしも一定ではないために若干の差がある) の温度変化を受けることになる。

③ 計測値のサンプリング

計測値は各点毎に5,4000個のデータがあり取扱いが不便なため、データのサンプリングを行うことによりこれを2,000弱に減らしている。サンプル方法は平均温度がほぼ一定の温度差を持ち、かつ各ピーク温度は必ずサンプルするように定めている。またひずみ計測値は20サイクル以降変動が大きく信頼性がひくいため、20サイクルまでのデータを処理対象とした。

以上の処理により横軸をサイクル数にしてFig. 2.3-2に示す。横軸を計測時間のままとしたFig. 2.3-1と比較すると以下のことが考察される。

- ・ 各サイクルの最低温度は計測場所に関わらずほぼ一樣になるが、加熱、冷却過程においては、かなりの温度差が生じている。
- ・ 上面と下面では上面の方が加熱時に若干高くなるが、その差は高々数十℃程度にとどまる。
- ・ 加熱時にはB棒の両端の温度が高く、冷却時には逆に両端の温度が低くなり、差は最大100℃程度に達する。この関係をFig. 2.3-3に示す。これは加熱ヒータをB棒平行部の外に、冷却ジャケットをさらにその外に設置しているために(Fig. 1.2-3参照)、加熱時は両端より温度が上がり、冷却時は逆に両端より温度が下がったためと思われる。

このように温度計測値はその計測位置によりかなりのばらつきが見られるが平均温度は安定しており、ほぼ20℃から500℃の温度サイクルとなっている。これをTable. 2.3-1, Fig. 2.3-4に示す。

従って、実験結果ではB棒の温度は平均温度によって代表され、2次応力の温度サイクルが試験条件通り、ほぼ20℃から500℃であったとみなすことができる。

2.3.2 ひずみ

試験体の拘束部では高々 2×10^{-4} 程度のひずみが温度負荷と同位相で観察された。これは平行部で発生する応力によるもの(平行部との断面比率が9.5倍なので 1×10^{-4} 程度)と温度変動によるもの(残り 1×10^{-4} であれば6℃程度)が重畳されたものと考えられる。しかしこれらは平行部で発生したひずみに比較して十分小さいため、以降平行部のひずみのみに注目する。

Fig. 2.3-5, 6にA1, A2棒のひずみ履歴を前節で平均温度より定めたサイクル数を横軸に示す。このようにひずみ計測結果は計測位置によりかなりのばらつきが見られるが全体的な傾向としては圧縮側にラチェット変形が進行している。考察を以下に示す。

- ・ A1, A2棒中央上下面4点のひずみ計測結果より、A1, A2棒とも上面より下面で圧縮方向のラチェット量が大きい。従って中央部ではいずれの棒も上に凸の曲げ変形が重畳したと考えられる。

- ・ A1棒では右，A2棒では左側で引張方向への変形の進行が見られる。これは量的には微少であるものの他の計測点と逆の傾向となり，また位相においてもサイクルの進行に従ってかなりのずれが発生している。
- ・ A1棒の左側ではこれとは逆に圧縮方向へのひずみの進行が中央より大きい。

以上のようにひずみ計測値はA1，A2棒各々に圧縮変形に伴い上下方向の曲げ変形が重畳したことを示唆している。また試験後の供試体を観察しても，A1棒の左が下に凸，右が上に凸，またA2棒の左が上に凸の曲げ変形が認められ，計測結果を裏付けている。この曲げ変形はラチェット変形が圧縮であることによって生じた塑性座屈と見られる。よって純粋な軸方向のラチェットを議論するためにはこれら曲げ変形を除去する必要がある。そこで上下面のデータが得られている中央の値のみに注目する。さてFig. 2.3-7はA1，A2棒，各々の中央における上下面のひずみを平均したものである。このようにA1，A2棒の平均ひずみは17サイクル目までにおいて，3サイクル目のノイズを除けば非常によく一致しており，この値が軸方向の変形を代表していると見ることができる。ただし，A1棒の平均値では3サイクル目のノイズと17サイクル以降のひずみゲージの劣化と考えられる振幅の減少が見られるため，以降軸方向のひずみはA2棒の中央における上下面平均値で代表させる。

Fig. 2.3-7に実験により計測されたひずみ（A2棒の中央における上下面平均値）を，Fig. 2.3-8にラチェットひずみを示す。このように実験では1次応力が無くとも圧縮のラチェット変形が発生することが確認された。また発生する1サイクルあたりのラチェット変形量はサイクル数の進行とともに減少する傾向を示した。

3. 解析方法

3.1 概要

試験条件を模擬し、FEMモデルと理論的な解析解（簡易法）による解析を実施した。この結果を試験と比較することにより、ラチェット発生メカニズムについて検討する。FEM解析には汎用構造解析プログラムFINASにより、SUS304鋼の繰返し硬化挙動を精度よく記述することのできる大野らの構成モデルを用いた。また簡易法は降伏応力の温度依存性を考慮した弾完全塑性モデルよりラチェット量を解析的に求めている。

3.2 FEMモデル

3本棒熱ラチェット試験を有限要素によりモデル化し、汎用構造解析プログラムFINAS (V11.0 ED05) を用いて解析を行なった。構造モデルとしては平行部のみの簡易なモデルとテーパ部を含めたモデルの2種類、構成モデルとしては簡易法を模擬した弾完全塑性モデル、大野による非線形繰返し非硬化領域モデル（大野モデル）⁽²⁾を用いた。これらFEMモデルによる解析の一覧をTable 3.2-1に示す。

3.2.1 構造のモデル化

解析において構造は以下に示す2種類のモデル化を行った。

(a) 平行部のみのモデル

まず供試体の平行部のみをモデル化した。これはA1, A2棒を①の要素、棒Bを②の要素とし、2つの要素を同一の節点に結合したものであり、解析-1, 2に使用されている。また解析は10℃1ステップとした。このモデルを以下に示す。

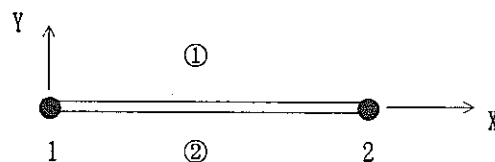


Fig.3.2-1 Structural Analysis Model (Only Parallel Part)

要素①：断面積320mm²，長さ100mm²（A1, A2棒二本をモデル化）

要素②：断面積320mm²，長さ100mm²（B棒をモデル化）

・要素

ROD2 (3次元棒要素)

・境界条件

節点1において $U_x=U_y=U_z=0$ ，節点2において $U_y=U_z=0$

・負荷条件

①要素の温度を20℃一定とし，②要素を初期温度20℃より最高500℃，最低20℃のサイクリックなFig.3.2-2に示す温度変動を20サイクル与える。

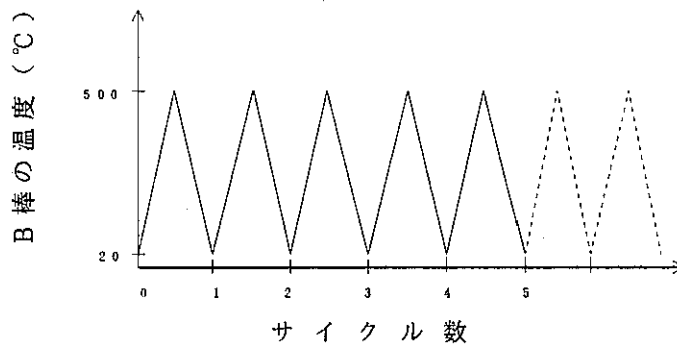


Fig.3.2-2 Applied Temperature History of Bar-B

(b) テーパー部を考慮したモデル

3本棒ラチェット試験体は，加熱ヒーターを平行部でなく拘束部との接続部分であるテーパー部に取り付け，その外に冷却ジャケットを置いている。(Fig.1.2-1,2参照) 従ってB棒は加熱時に100mmの平行部だけでなくその外側，両側40mmのテーパー部も温度上昇を受けたと考えられる。これをモデル化するために(a)のモデルにテーパー部の要素を付加した。この部分は平行部に比べ断面積が大きく塑性状態にならないと考えられるため，両側40mm計80mmの棒要素1本でモデル化する。またその断面積は軸剛性が等しくなるよう設定した。このモデルは解析-3にて使用した。

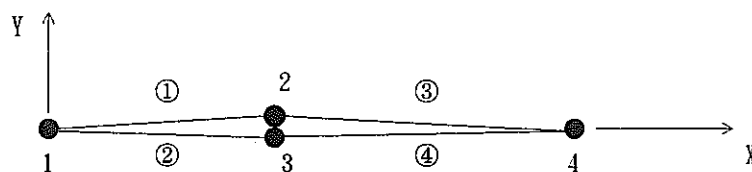


Fig.3.2-3 Structural Analysis Model (Include Tapered Part)

要素①：断面積 1128.36mm^2 ，長さ 80mm （A1，A2棒のテーパ部をモデル化）

要素②：断面積 1128.36mm^2 ，長さ 80mm （B棒のテーパ部をモデル化）

要素③ 断面積 320mm^2 ，長さ 100mm （A1，A2棒の平行部をモデル化）

要素④：断面積 320mm^2 ，長さ 100mm （B棒の平行部をモデル化）

（節点2，3は図を見やすくするためにずらしているが解析では同じ座標位置にある）

・要素

ROD2（3次元棒要素）

・境界条件

節点1において $U_x=U_y=U_z=0$ ，節点2，3，4において $U_y=U_z=0$

・負荷条件

①，③要素の温度を 20°C 一定とし，②，④要素を初期温度 20°C より最高 500°C ，最低 20°C のサイクリックなFig. 2.1-2に示す温度変動を20サイクル与える。

3.2.2 材料のモデル化

試験体の材料はSUS304であり，解析では以下の2種類の材料モデルを用いた。

(a) 弾完全塑性モデル

簡易法を模擬して，降伏応力にのみ温度依存性を持たせた弾完全塑性モデルであり，使用した材料定数をTable 3.2-2に示す。ただし降伏応力は（ $1.5S_m$ ， S_m ：設計応力強さ）より定めている

(b) 非線形繰返し非硬化領域モデル（大野モデル）(2)

非線形繰返し非硬化領域モデルは大野らによって提案された構成モデルである。このモデルは降伏曲面と限界曲面の2曲面により非線形硬化特性を，非硬化ひずみ領域の概念により繰返し硬化を精度よく表現することができる。解析に使用した材料データは参考文献(3)による。この値をTable 3.2-3に示す。

3.3 弾完全塑性モデルによる簡易法

ラチェット発生のメカニズムを検討するため，降伏応力の温度依存性のみを考慮した理論的な解析解を導出した。式の導き方については付録に示すが，これにより1次応力の無い場合についても圧縮側にラチェットが発生することが予測でき，その量を解析的

に求めることができる。この簡易法によると1サイクルあたりのラチェットひずみ量は以下の式で与えられる。

- ・ 簡易法による1サイクルあたりのラチェットひずみ量

はじめの1サイクル

$$- \{ \alpha \Delta T / 2 - \sigma_y^h / E \}$$

2サイクル以降

$$- \{ \alpha \Delta T / 2 - (\sigma_y^h + \sigma_y^c) / E \}$$

α : 線膨張係数、 ΔT : 2次応力の温度振幅、 E : ヤング率

σ_y^h : 最高温度時の降伏応力、 σ_y^c : 最低温度時の降伏応力、

上式は $\alpha E \Delta T / 2 > (\sigma_y^h + \sigma_y^c)$ の時のみ成り立つ式であることに注意

さてこのモデルでは $\alpha = 1.812 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, $\Delta T = 480^\circ\text{C}$, $E = 18000 \text{ kg/mm}^2$,

$\sigma_y^h = 15.0 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_y^c = 21.0 \text{ kg/mm}^2$ (1.5 S mより) とすると1サイクルあたりラチェットひずみ量は以下のようなになる。

1サイクル目 : -3.52×10^{-3} , 2サイクル目以降 : -2.35×10^{-3}

4. 解析結果

4.1 FEM解析結果

Fig. 4.1-1～6に各FEM解析における棒A, Bの応力-ひずみ関係を, またラチェットひずみについては試験結果と合わせてFig. 4.1-8に示す。非線形繰返し非硬化領域モデルによる解析結果は複雑な応力ひずみヒステリシスループ形状と, 繰返し硬化によりループが拡大していく過程を表現し, これによりラチェット量がサイクル数の進行に従って減少する特性を表現している。

4.2 弾完全塑性モデルによる簡易法の結果

簡易法により計算されるラチェットひずみをFig. 4.1-8に試験, FEM解析結果と合わせて示す。ただし, 簡易法は途中経過を追えないので各ステップ間の値を直線で結んでいる。

4.3 考察

Fig. 4.1-7に非線形繰返し非硬化領域モデル(大野モデル)において平行部のみモデル(解析-1)とテーパ部を考慮したモデル(解析-2)の解析結果を示す。解析モデルにおいて, 前者は平行部のみが加熱されたとするモデルであり, 後者はテーパ部も平行部と同じ温度変動があったとするものである。図は発生したラチェットひずみをプロットしたもので, テーパ部を考慮すると各サイクルにおけるひずみの振幅, ラチェットひずみ量が増加している。しかしFig. 4.7-8に示すようにテーパ部を考慮した方が実験結果にはよく一致することからこの方が実験をよく模擬したモデルになっていると考えられる。ただし, 試験においてただし実験結果では10サイクル以降もラチェットひずみの進行が観察されるが, テーパ部を考慮した大野モデルでは10サイクル以降その進行が観察されない。

またFig. 4.1-8には弾完全塑性モデルによる解析(解析-1)と簡易法により得られたラチェットひずみを合わせて示している。弾完全塑性モデルによる解析は簡易法を模擬しているので両者はよく一致するが, 両者ともサイクル数の進行に従い一定のラチェッ

トひずみが累積し実験結果には対応しない。ただし初期のサイクルではこれらが実験によく対応し、サイクル数の進行とともに差が大きくなることより、この原因が繰返し硬化にあると考えられる。また詳細に見ると初期のサイクルでも解析値の方が若干低めとなっている。これは弾完全塑性モデルおよび簡易解析法では、平行部のみのモデル化でテーパー部を考慮していないこと、降伏応力として $1.5S_m$ を採用したことによると考えられる。しかし初期のサイクルでは簡易法と試験結果はほぼ一致することより、簡易法は加工硬化の影響を考慮していないものの、このラチェットの発生原因が降伏応力の温度依存性にあることを捉えたものと考えられる。

結 言

本報は1次応力が無い場合、降伏応力の温度依存性により2次応力のみで熱応力ラチェットが発生することを試験、FEM解析により確認し、理論的な簡易法によりその発生メカニズムを検証したものである。以下に本報の結論をまとめる。

- (1) 試験により1次応力が無くとも、温度変動により圧縮方向のラチェット変形が発生することを確認できた。
- (2) 構成モデルとして繰返し硬化挙動を表現できる非線形繰返し非硬化領域モデルを用い、試験条件を模擬した構造モデルによるFEM解析を行なうことにより、実験で計測されたラチェット変形を精度よく再現することができた。また1温度サイクルあたりに発生するラチェット量はサイクル数の進行とともに次第に減少しているが、これは材料の繰返し硬化によるものと考えられる。
- (3) 降伏応力の温度依存性を考慮した弾完全塑性モデルを用い、3本棒熱ラチェット試験のラチェット発生メカニズムを検討すると、低温側では系全体が同一の温度となり全体が降伏するのに対し、高温側では降伏応力が低下するために高温部分のみで降伏が起こりラチェットが発生することが解った。さらに1サイクルあたりに発生するラチェットひずみ ε^R を理論的に導き以下の式を得た。

$$\varepsilon^R = - \{ \alpha \Delta T / 2 - \sigma_y^h / E \} \quad : \text{第1サイクル} \quad \text{a)}$$

$$\varepsilon^R = - \{ \alpha \Delta T / 2 - (\sigma_y^h + \sigma_y^c) / E \} \quad : \text{以降のサイクル} \quad \text{b)}$$

α : 線膨張係数, ΔT : 温度変化幅, E : ヤング率, σ_y^h, σ_y^c : 高温側, 低温側降伏応力

ここにラチェットはb)式右辺第1項が第2項より大きい場合に発生する。

- (4) 上に示した理論解は試験の初期数サイクルのラチェット変形量を予測した。これより、このラチェットの発生が降伏応力の温度依存性に起因することを確認した。

参 考 文 献

- (1) 和田, 猪狩, 北出: 軸方向に温度分布移動を受ける円筒の熱ラチェット変形の推定法
日本機化学会論文集 (A編), 55巻, 512号, p985-993 (昭64)
- (2) 大野, 佐藤, 高橋, 桑原: 温度変動下のSUS304の繰返し塑性構成方程式 日本機化学
会論文集 (A編), 54巻, 501号, 1140-1150 (昭63)
- (3) PNC SN9410 90-108 「SUS304繰返し塑性構成モデルの検討」平成2年6月

付録 降伏応力の温度依存性を考慮した
2次応力ラチェットのメカニズム

断面積及び長さの等しい2本の棒からなる体系を考える。2本の棒は、Fig.付-1に示すように常に長さが等しくなるような拘束条件が与えられているものとする。

2本棒の一方（棒A）は温度一定に保持され（ $T_A = T_{cold}$ ），他方（棒B）は低温と高温のサイクル（ $T_{cold} \leftrightarrow T_{hot}$ ）を繰り返し与えられるものとする（Fig.付-2）。また、材料は弾完全塑性体を仮定する。

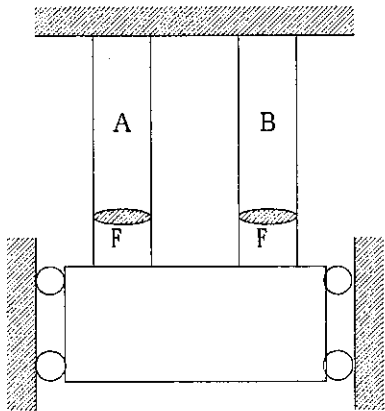


Fig. 付-1 2本棒モデル

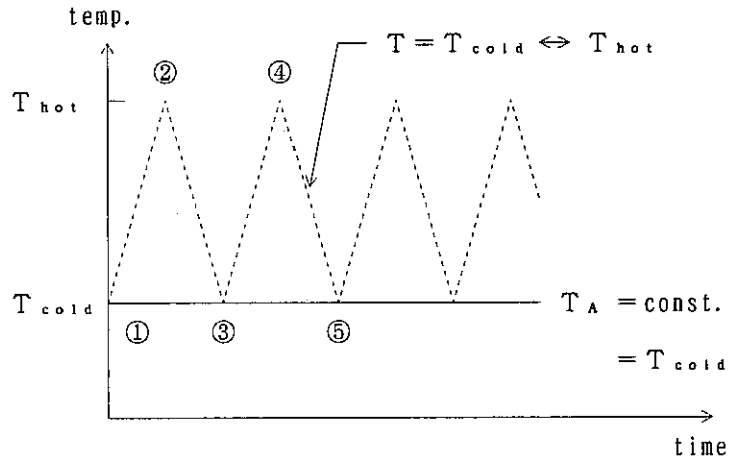


Fig. 付-2 2本棒の温度履歴

棒Bの降伏応力は、考えている時点の温度の関数

$$S_{yB} = S_y (T) \quad (1)$$

であるが、以下の議論では簡単のため温度が上がる過程（① → ②）では、

$$S_{yB} = S_{yH} = S_y (T_{hot}) = \text{const.} \quad (2)$$

また、温度が下がる過程（② → ③）では、

$$S_{yB} = S_{yC} = S_y (T_{cold}) = \text{const.} \quad (3)$$

とする。このように考えても結果は変わらない。

外力は作用しないものとする、力の釣り合いより

$$\sigma_A F + \sigma_B F = 0 \quad (4)$$

即ち、

$$\sigma_A = -\sigma_B \quad (5)$$

が常に成り立っている。

先ず昇温過程 (① → ②) を考える。2本の棒の長さは常に等しくなるように拘束されているため、この過程で棒Bは圧縮力、棒Aは引張力を受ける。弾性範囲では、それぞれの応力は

$$\sigma_A = -\sigma_B = E \alpha \Delta T / 2 \quad (6)$$

となる。ここに、Eはヤング率、 α は熱膨張率、 ΔT は棒Bと棒Aの温度差である。

(注：厳密にはヤング率も温度の関数であるが、簡単のため温度依存性は無いものとする。)

更に温度を上げると、棒Bは降伏応力が低いため、棒Aよりも先に降伏応力に達する。

$$\sigma_B = -S_{yH} \quad (7)$$

このとき、棒Aの応力は式(5)より

$$\sigma_A = S_{yH} \quad (8)$$

となるが、棒Aは低温のままなので、弾性範囲である。

$$\sigma_A = S_{yH} < S_{yC} \quad (9)$$

従って、棒Bが降伏応力に達した後、棒Bに生じる熱膨張変位は全て降伏した棒Bの塑性変形によって吸収されることになる (Fig. 付-3)。

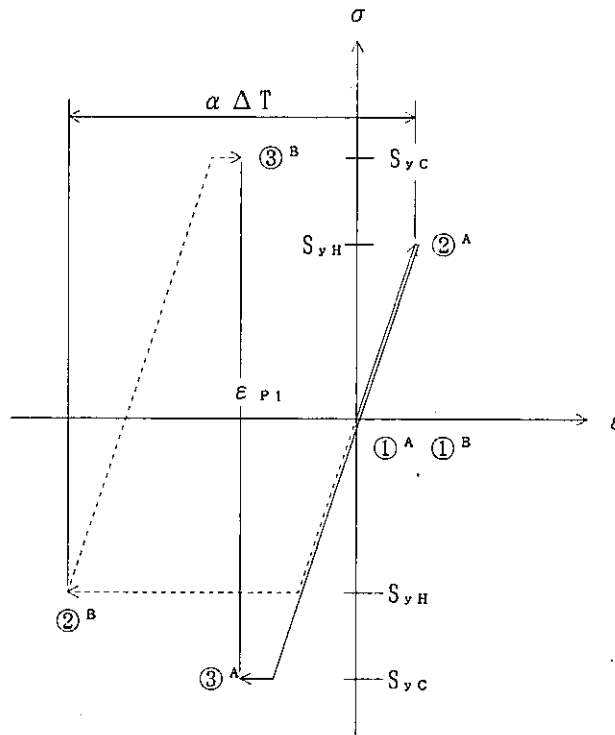


Fig. 付-3 第1サイクル目の応力-ひずみ履歴

次に、棒Bを降温する過程を考える（② → ③）。棒Bを降温するときは、棒A、Bともに降伏応力が等しいため同時に降伏応力に達する。降伏応力に達した後の熱膨張（降温過程であるから熱収縮と言った方が厳密である）変形は、熱ひずみが0になるまで続く。Fig. 付-3からわかるように、この1サイクルの過程で棒A、Bには圧縮ひずみが残留ひずみとして残る。第1サイクル目の残留ひずみは、Fig. 付-3から

$$\epsilon_{P1} = -\alpha \Delta T / 2 + S_{yH} / E \quad (10)$$

であることがわかる。

次に、第2サイクル目の挙動を考える。第1サイクル目と同様に挙動を追って行くと、昇温終了時の棒A及びBの応力とひずみの状態は、それぞれFig. 4に示した④^Aと④^Bで表される。また、降温終了時の状態は⑤^Aと⑤^Bで表される。降温終了時の残留ひずみを同様に求めると、

$$\epsilon_{P2} = \epsilon_{P1} - \{ \alpha \Delta T - 2 (S_{yH} + S_{yC}) / E \} / 2 \quad (11)$$

となる。

第3サイクル目以降は、第2サイクル目開始時の応力状態が第3サイクル目開始時の応

力状態（第2サイクル目終了時の応力状態）に等しいことから、第2サイクル目と全く同じ挙動を繰り返す。即ち、定常サイクルになる。従って、第2サイクル目以降の1サイクル当たりのラチェットひずみの量は式(11)より、

$$\Delta \epsilon_R = \epsilon_{P2} - \epsilon_{P1} = -\alpha \Delta T / 2 + (S_{yH} + S_{yC}) / E \quad (12)$$

となる。

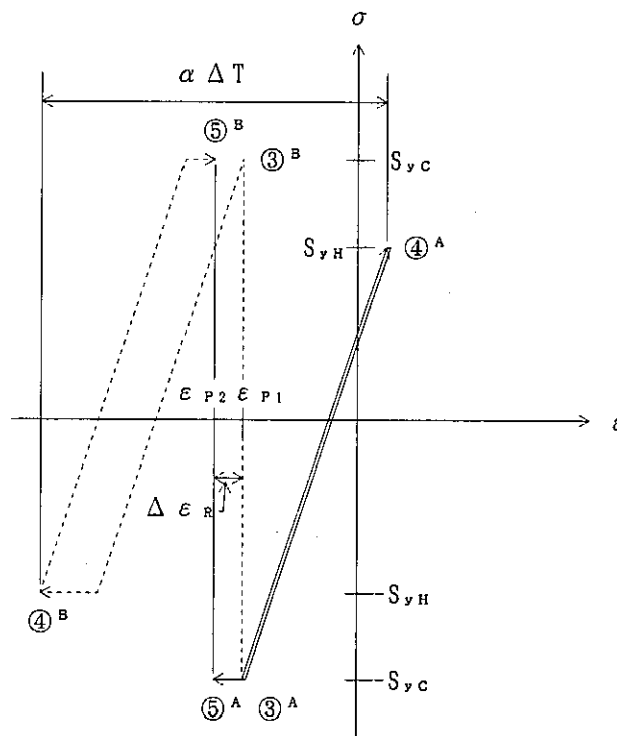


Fig. 付-4 第2サイクル目の応力-ひずみ履歴

また、2次応力ラチェットが発生する条件は負の塑性ひずみが生じる条件

$$\Delta \epsilon_R < 0 \quad (13)$$

であるから、式(12)より

$$\alpha \Delta T / 2 > (S_{yH} + S_{yC}) / E$$

となる。

以上の議論では、棒Aが低温に保持され、棒Bに低温と高温の繰り返し熱荷重が与えられる場合を考えた。そして、定常サイクルの1サイクル当たりのラチェットひずみの量は式(12)で与えられる圧縮ひずみであることがわかった。逆に、棒Aが高温に保持され、棒Bに高温と低温の繰り返し熱荷重が与えられる場合にもラチェットひずみは圧縮ひずみであ

ることがいえる。即ち2本棒の2次応力ラチェットは、2本の棒の間の熱膨張差が降伏応力の低い棒に累積することによって生じる。降伏応力の低い側は常に高温であり、高温側は常に圧縮力が作用するため、ラチェットひずみはどんな場合にも圧縮ひずみになる。

以上は1次荷重が無い場合であるが、より一般的な1次荷重が作用している場合の2本棒ラチェットの条件は、Fig. 付-5に示す一般化した2本棒モデルのラチェット線図によって与えられる。

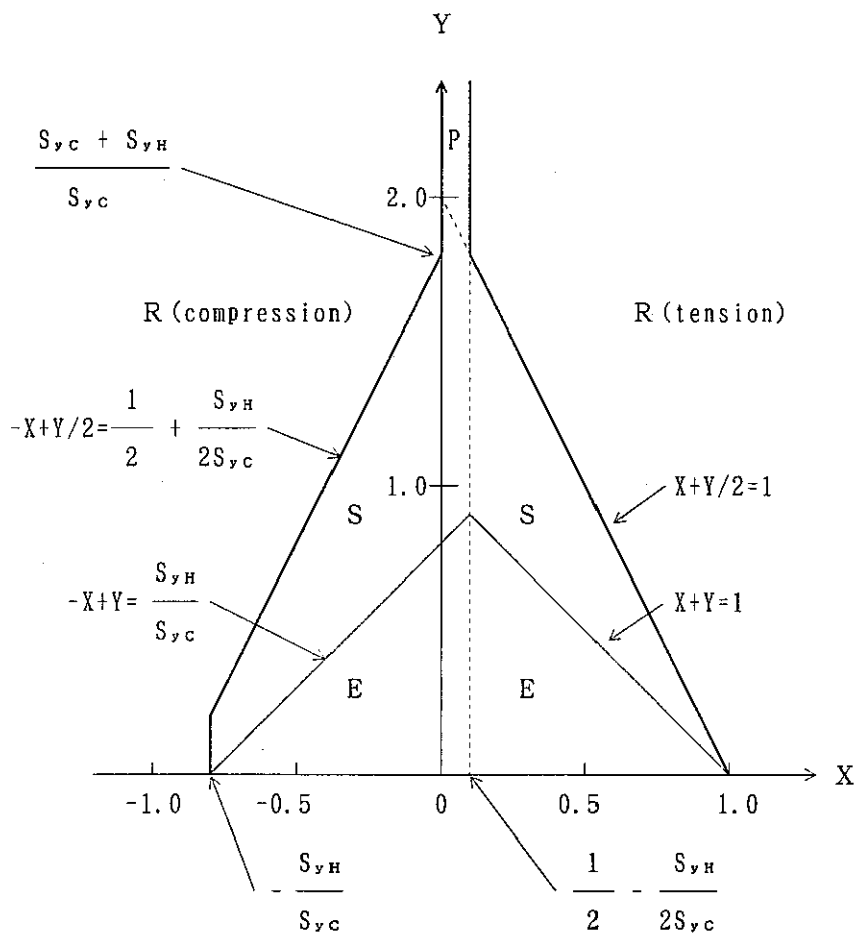


Fig. 付-5 降伏応力の温度依存性を考慮した2本棒のラチェット線図

Table.1.5-1 Loading Condition

負荷種別	負 荷 条 件		
1 次応力	0 (0 kg/mm ²)		
2 次応力	最低	最高	Δ T
	室温 (20℃)	500℃	480℃

- ・ 棒 A は室温 (20℃) にて一定とする。
- ・ 棒 B には上表に示す 2 次応力の温度変化を 30 サイクル与える。

Table.2.1-1 Temperature Output Points

項 目	計測位置	備 考
TC-NO.1	B 棒- 左 -上面	試験体中央より左へ 50mm 位置
TC-NO.2	B 棒-中央-上面	温度制御に使用
TC-NO.3	B 棒- 右 -上面	試験体中央より右へ 50mm 位置
TC-NO.4	B 棒- 左 -下面	
TC-NO.5	B 棒-中央-下面	
TC-NO.6	B 棒- 右 -下面	

* 上表の計測位置の呼称は Fig.1.3-1 に従う。

Table.2.1-2 Strain Output Points

項目	計測位置	備考
RTG-NO.1	A1棒-左付根-上面	試験体中央より左へ110mm位置
RTG-NO.2	A1棒-左-上面	試験体中央より左へ40mm位置
RTG-NO.3	A1棒-中央-上面	
RTG-NO.4	A1棒-中央-下面	試験体中央より右へ40mm位置
RTG-NO.5	A1棒-右-上面	試験体中央より右へ110mm位置
RTG-NO.6	A1棒-右付根-上面	
RTG-NO.7	A2棒-左付根-上面	
RTG-NO.8	A2棒-左-上面	
RTG-NO.9	A2棒-中央-上面	
RTG-NO.10	A2棒-中央-下面	
RTG-NO.11	A2棒-右-上面	計測不良
RTG-NO.12	A2棒-右付根-上面	計測不良

* 上表の計測位置の呼称はFig.1.3-1に従う。

Table.2.1-3 Displacement Output Points

項目	計測位置	備考
DG-NO.1	A1棒側	計測不良
DG-NO.2	A2棒側	計測不良

* 上表の計測位置の呼称はFig.1.3-1に従う。

Table.2.3-1 Averaged Peak Temperature at each Cycle

サイクル数	最低温度	最高温度	サイクル数	最低温度	最高温度
0	20.4℃	——	——	——	——
1	25.2℃	501.7℃	11	23.4℃	498.3℃
2	19.9℃	519.3℃	12	20.1℃	513.5℃
3	27.7℃	508.6℃	13	22.8℃	509.2℃
4	20.8℃	518.6℃	14	20.7℃	506.2℃
5	21.4℃	511.2℃	15	22.6℃	515.8℃
6	29.7℃	511.3℃	16	19.4℃	514.6℃
7	20.0℃	527.3℃	17	20.6℃	510.9℃
8	23.7℃	501.8℃	18	31.3℃	536.6℃
9	29.6℃	504.3℃	19	32.7℃	500.8℃
10	20.0℃	499.4℃	20	19.9℃	492.8℃
			平均	23.4℃	510.1℃

Table.3.2-1 List of FEM Analysis Model

解析No.	構造モデル	構成モデル	備 考
解析-1	平行部のみ	弾完全塑性	簡易法を模擬
解析-2	平行部のみ	大野モデル	
解析-3	テーパー部を考慮	大野モデル	

Table 3.2-2 Material Constants (Elastic Perfect Plastic Model)

ヤング率 : $E = 1800\text{kg/mm}^2$

線膨張係数 : $\alpha = 1.812 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$

加工硬化係数 : $H' = 0\text{kg/mm}^2$

降伏応力

温 度	降伏応力	温 度	降伏応力	温 度	降伏応力
20	21.0	—	—	—	—
50	21.0	250	18.6	450	15.6
100	21.0	300	17.6	500	15.0
150	21.0	350	17.0	550	14.6
200	19.8	400	16.4	600	14.1

(温度 : $^\circ\text{C}$, 降伏応力 : kg/mm^2)

Table 3.2-3 Material Constants for nonlinear cyclic hardening model (Ohno model)

	20°C	50°C	100°C	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C
E [kg/mm ²]	1.99E4	1.97E4	1.94E4	1.90E4	1.87E4	1.84E4	1.80E4	1.76E4	1.72E4	1.67E4	1.62E4	1.57E4	1.52E4
ν	0.264	0.267	0.272	0.276	0.280	0.284	0.288	0.292	0.295	0.300	0.302	0.306	0.310
α [°C]	15.15E-6	15.65E-6	16.48E-6	17.22E-6	17.85E-6	18.36E-6	18.79E-6	19.19E-6	19.57E-6	19.93E-6	20.28E-6	20.60E-6	20.87E-6
κ_0 [kg/mm ²]	19.54	18.18	16.28	14.79	13.65	12.80	12.19	11.77	11.48	11.26	11.05	10.81	10.47
A	451	498	588	683	773	859	946	1046	1173	1351	1628	2142	3814
κ_0^* [kg/mm ²]	26.04	24.28	21.79	19.81	18.27	17.07	16.15	15.42	14.83	14.32	13.82	13.28	12.61
H ₁ [kg/mm ²]	285.7												
H ₂ (L) [kg/mm ²]	200												
m	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5866	0.4365	0.3589	0.3072	0.2662	0.2293	0.1927
c	0.1149	0.1311	0.1468	0.1468	0.1354	0.1192	0.07850	0.04989	0.03185	0.02101	0.01485	0.01179	0.01113

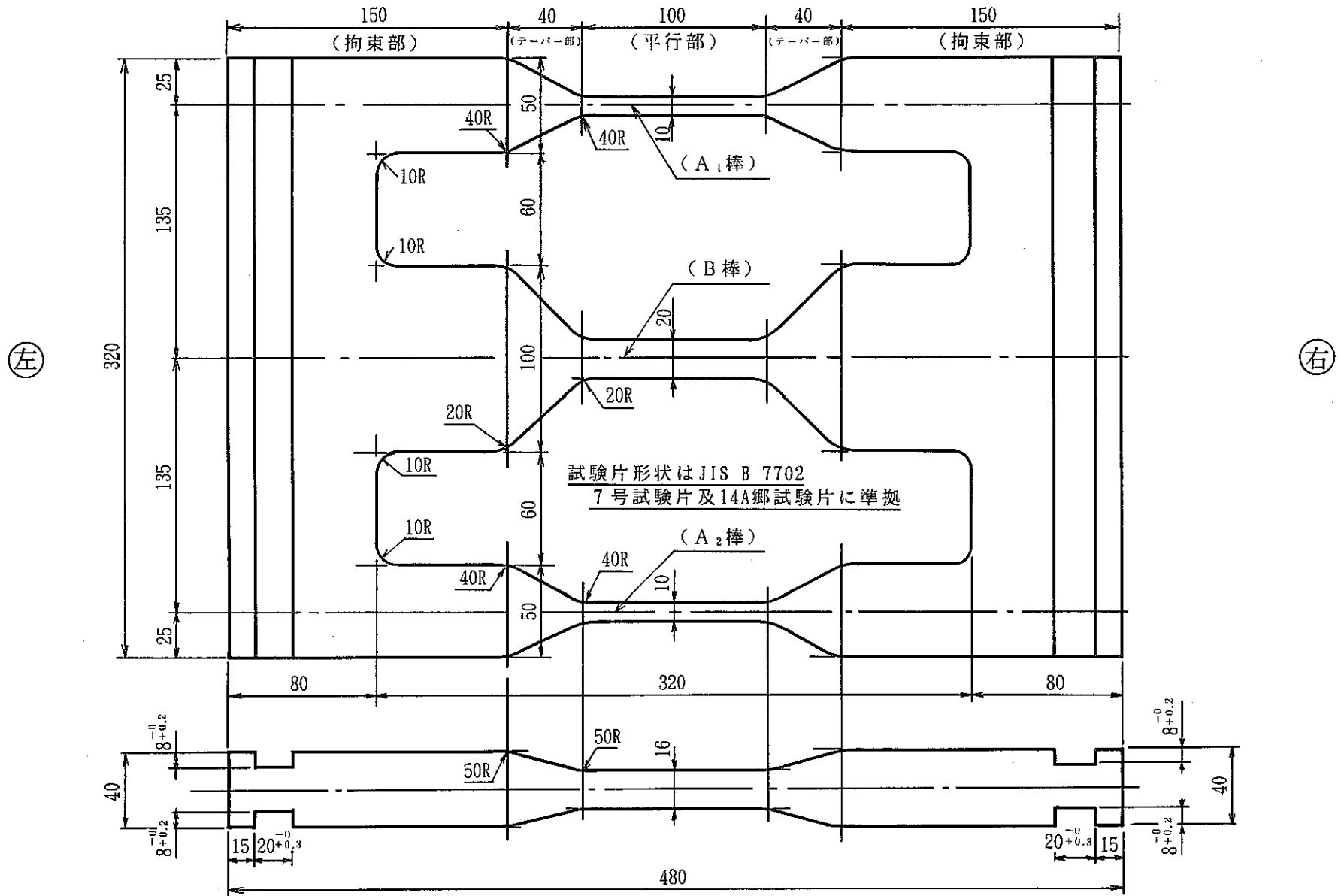


Fig.1.2-1 Configuration and Dimensions of the Test Assembly

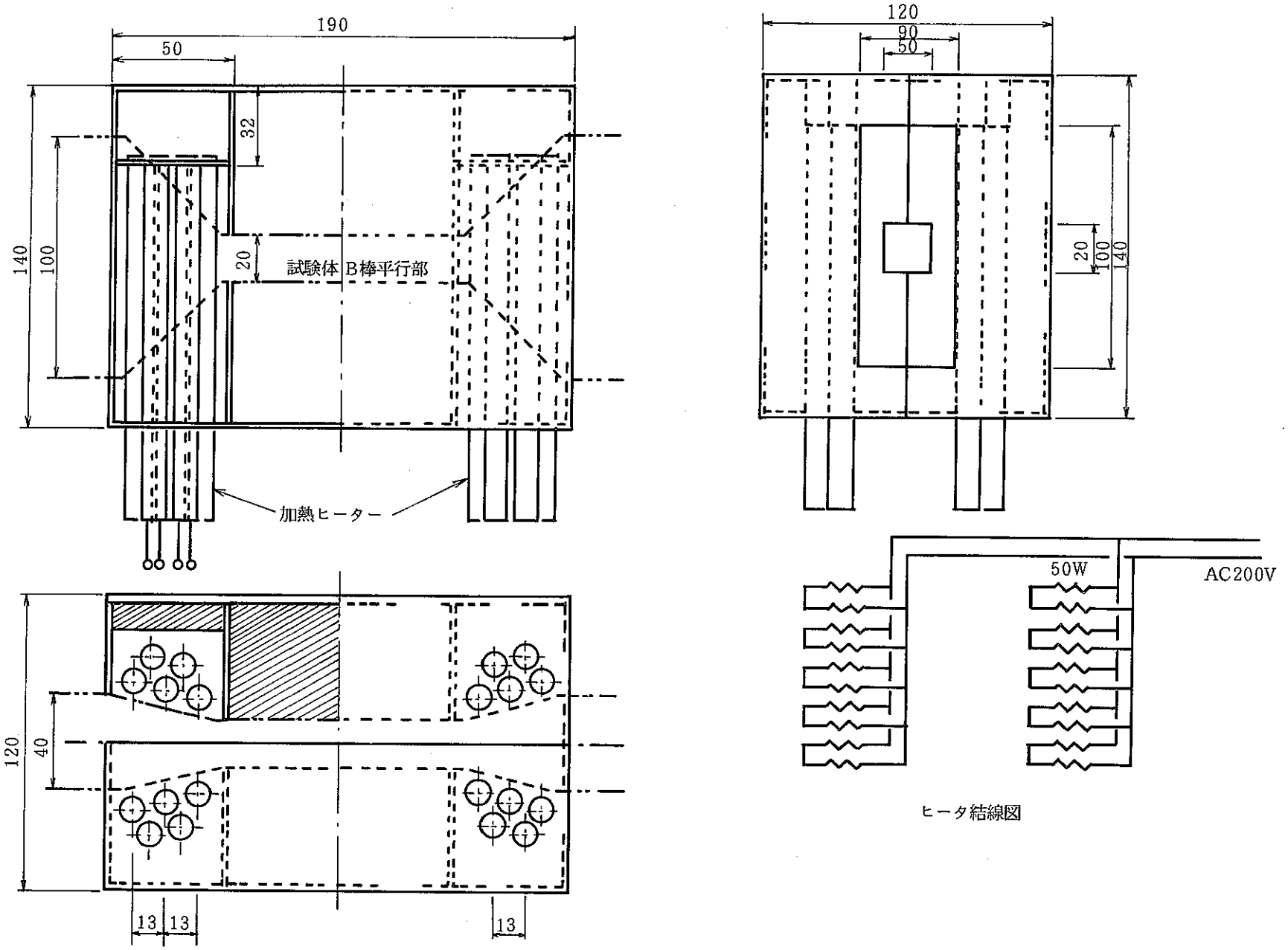


Fig.1.3-1 Heating System

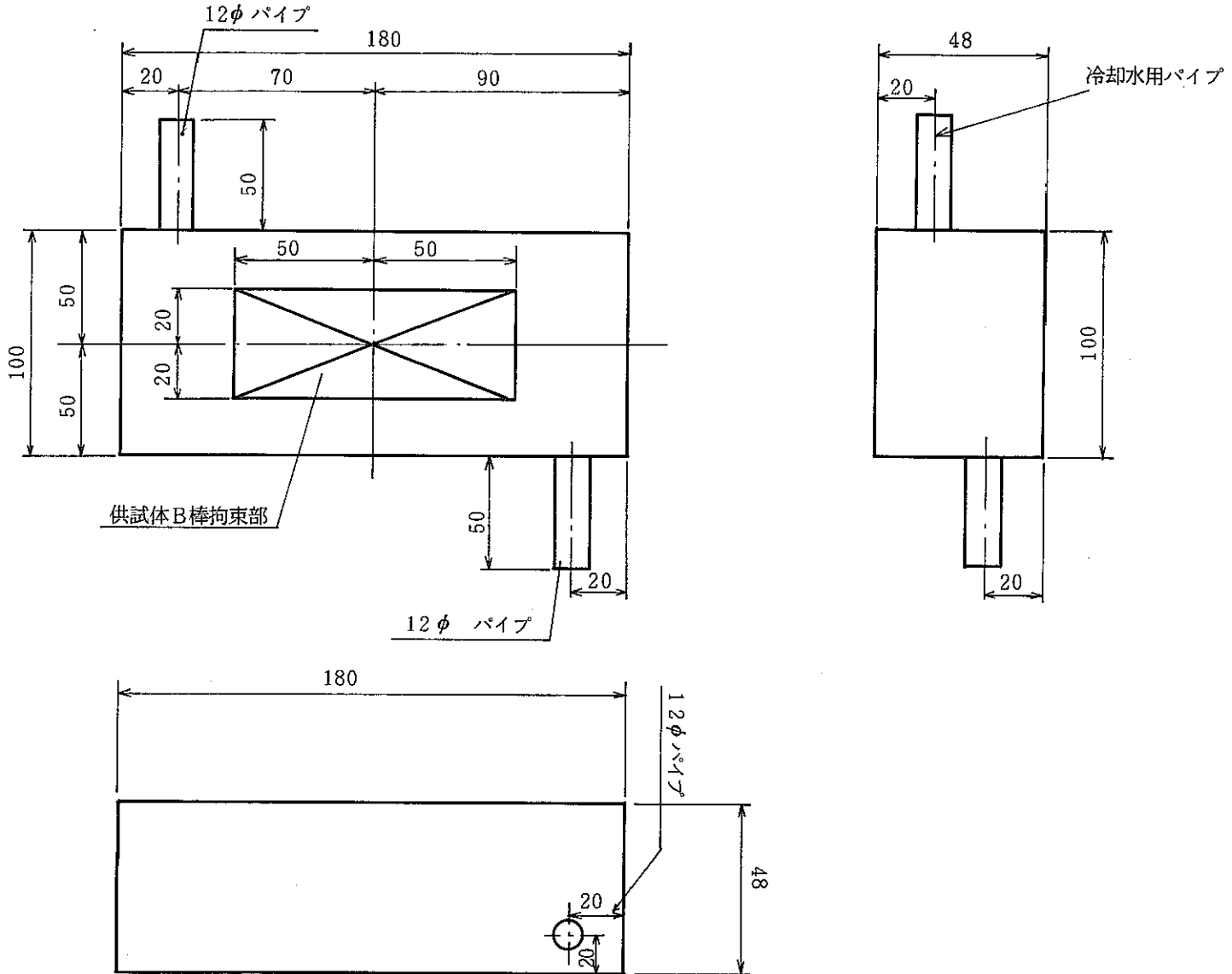
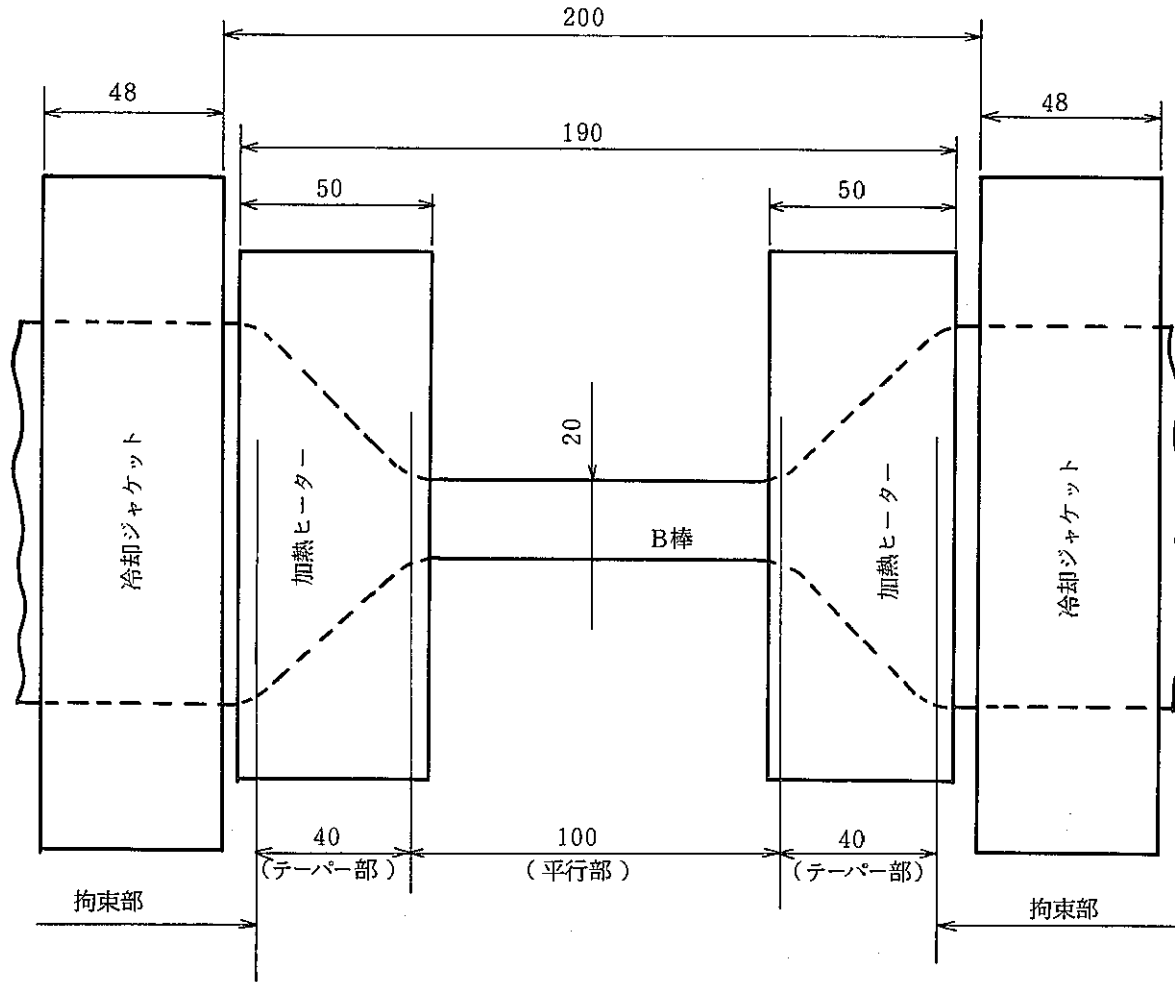


Fig.1.3-2 Water Cooling System



供試体B棒における加熱ヒーター，冷却ジャケットの配置

Fig.1.3-3 Heater and Cooler Arrangements

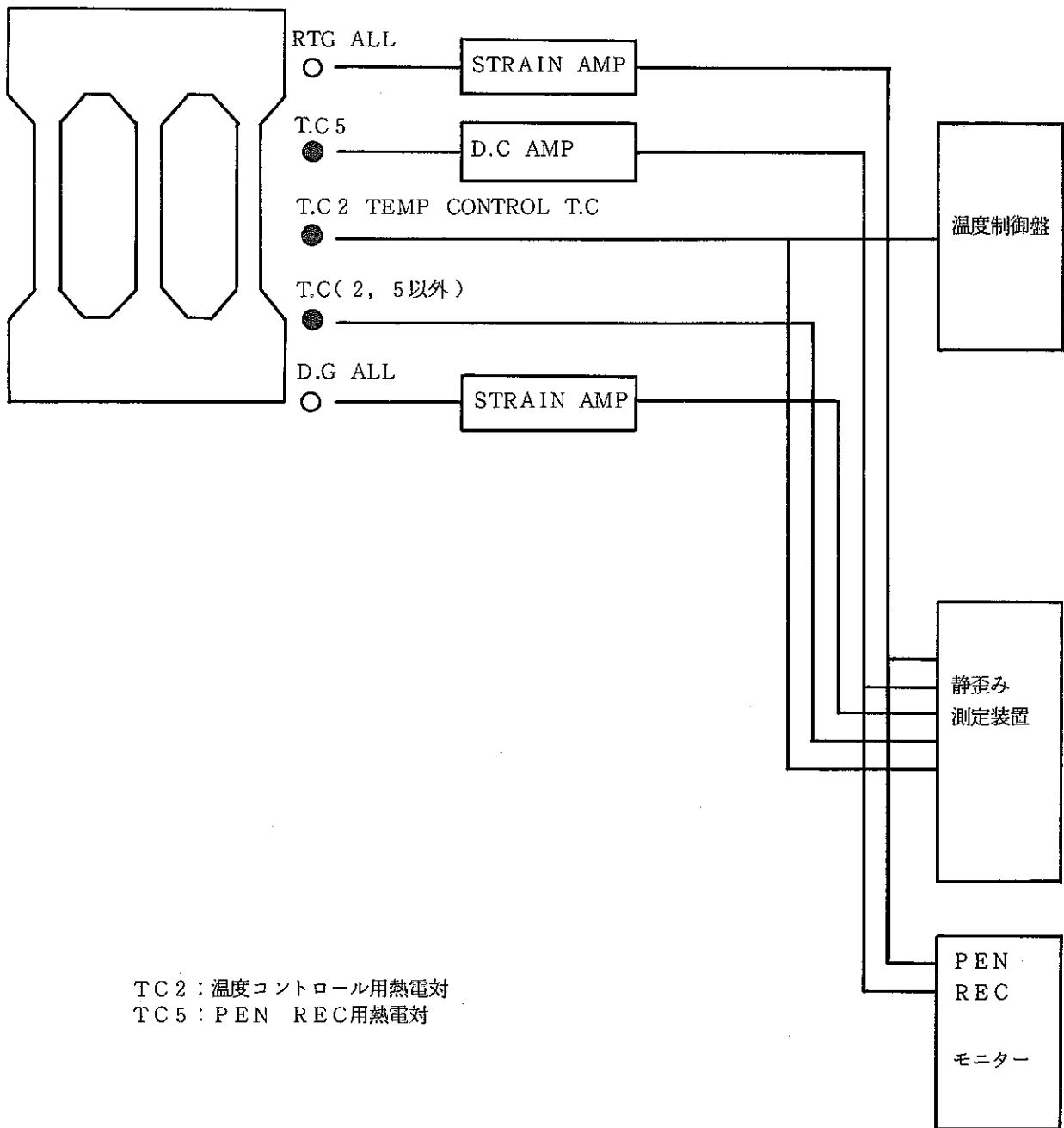
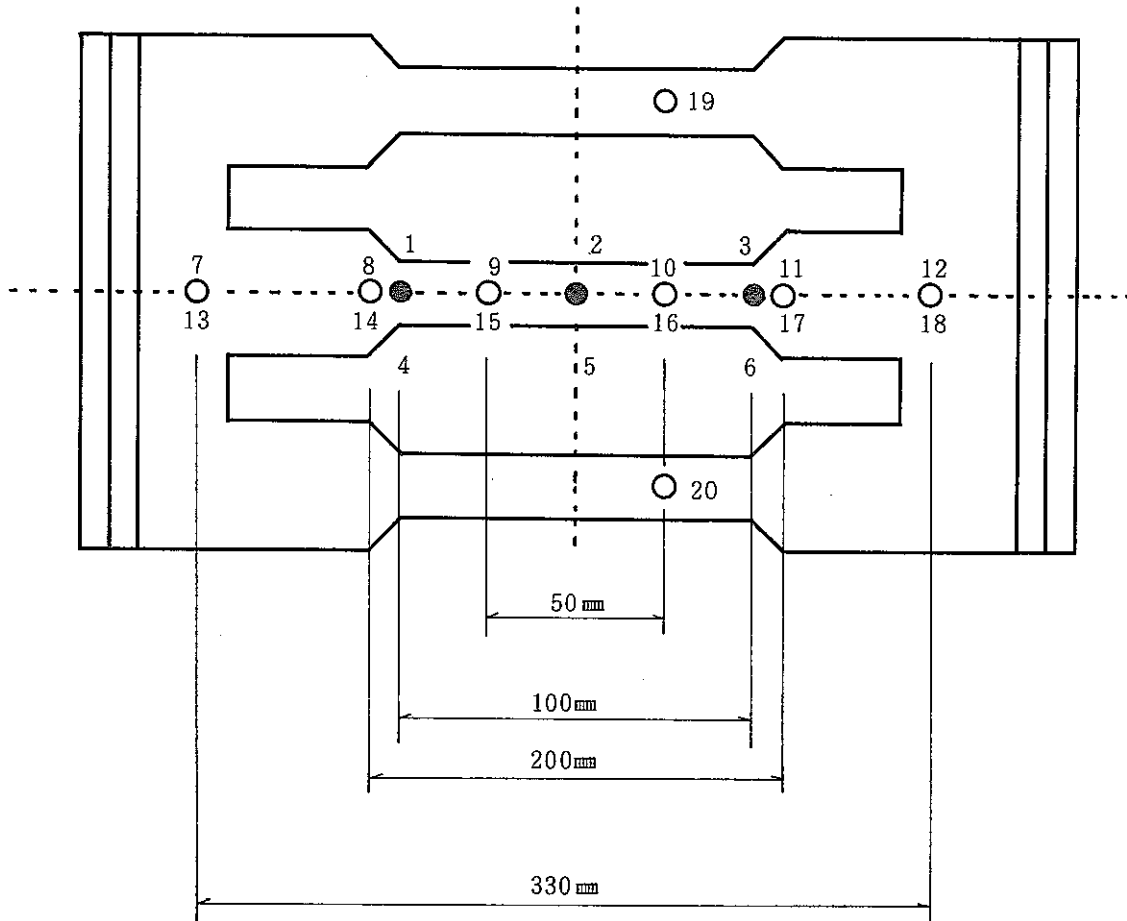


Fig.1.4-1 Measuring System

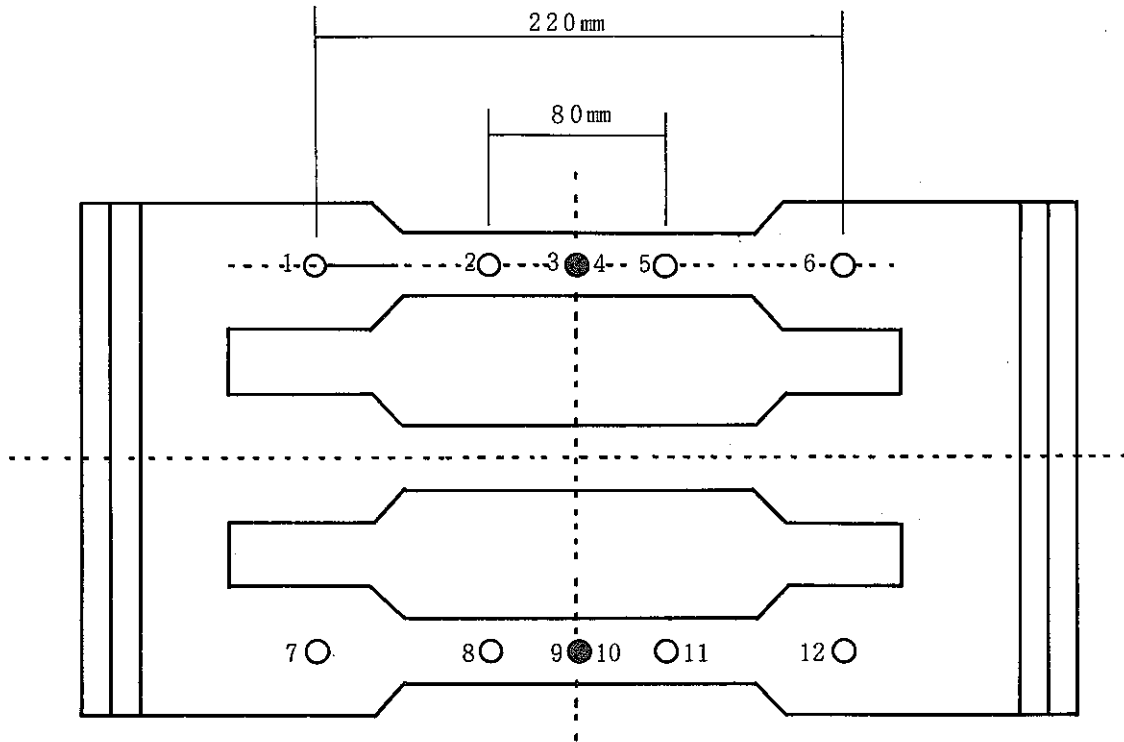
熱電対取付位置



- シース型熱電対 上面T.C 1, 2, 3 (2番は温度制御に使用)
下面T.C 4, 5, 6
- スポット式熱電対 上面T.C 7, 8, 9, 10, 11, 12
下面T.C 13, 14, 15, 16, 17, 18
サイドT.C 19, 20

Fig.1.4-2 Thermal Couple Locations

歪みゲージ位置



- : 室温用単軸箔ひずみゲージ (KFC-3-C1-16)
表, 裏両側貼付
裏GNo4, 10
- : 室温用単軸箔ひずみゲージ (KFC-3-C1-16)
表側貼付
GNo 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12

Fig.1.4-3 Strain Gauge Locations

変位計取付位置

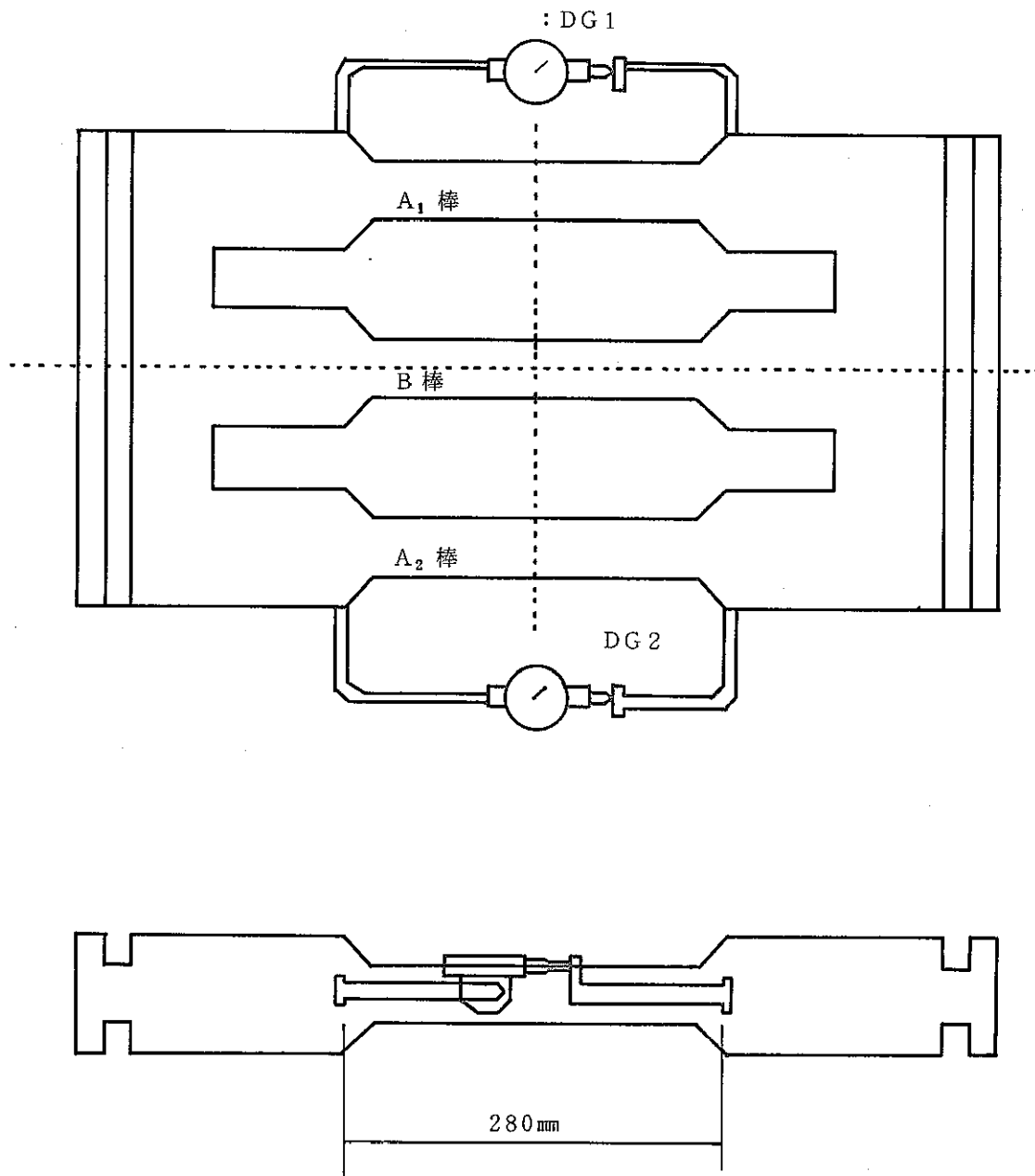


Fig.1.4-4 Dial Gauge Locations

FINAS

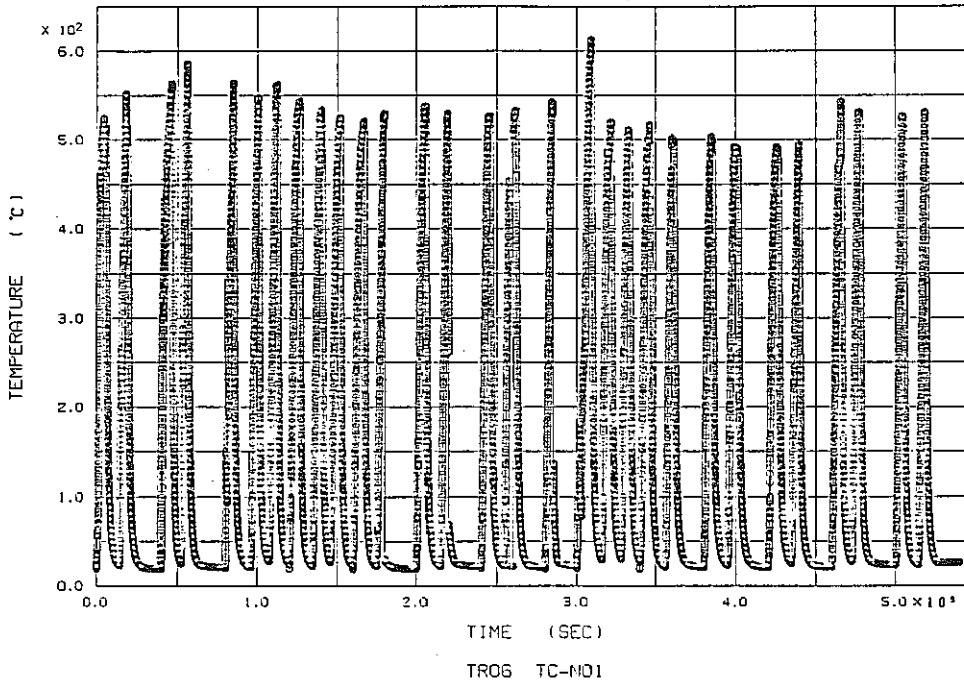


Fig. 2.2-1 Temperature History (TC-No.1)

FINAS

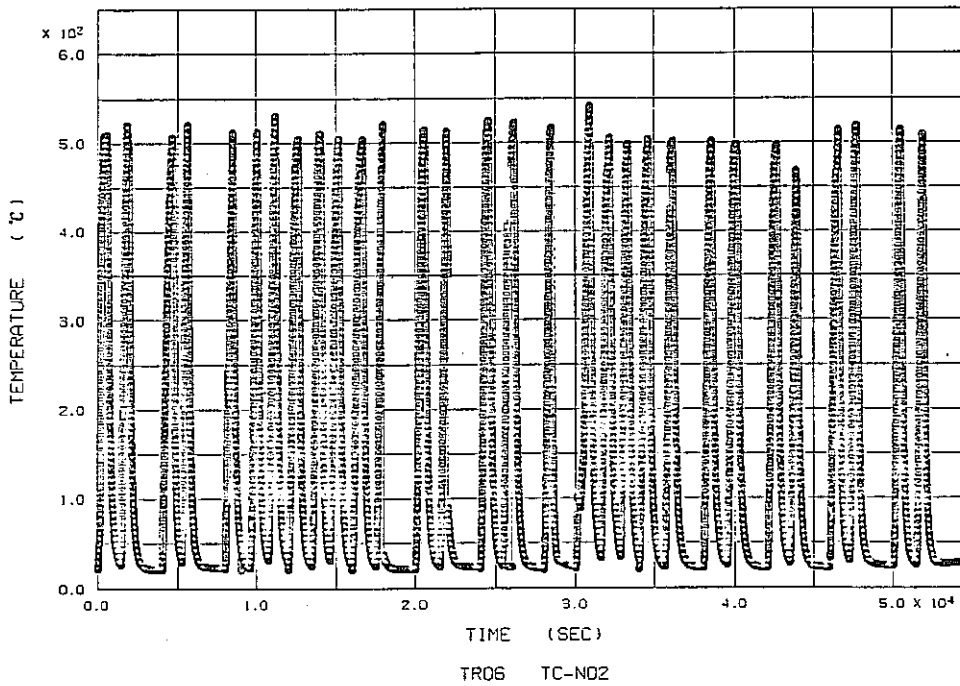


Fig. 2.2-2 Temperature History (TC-No.2)

FINAS

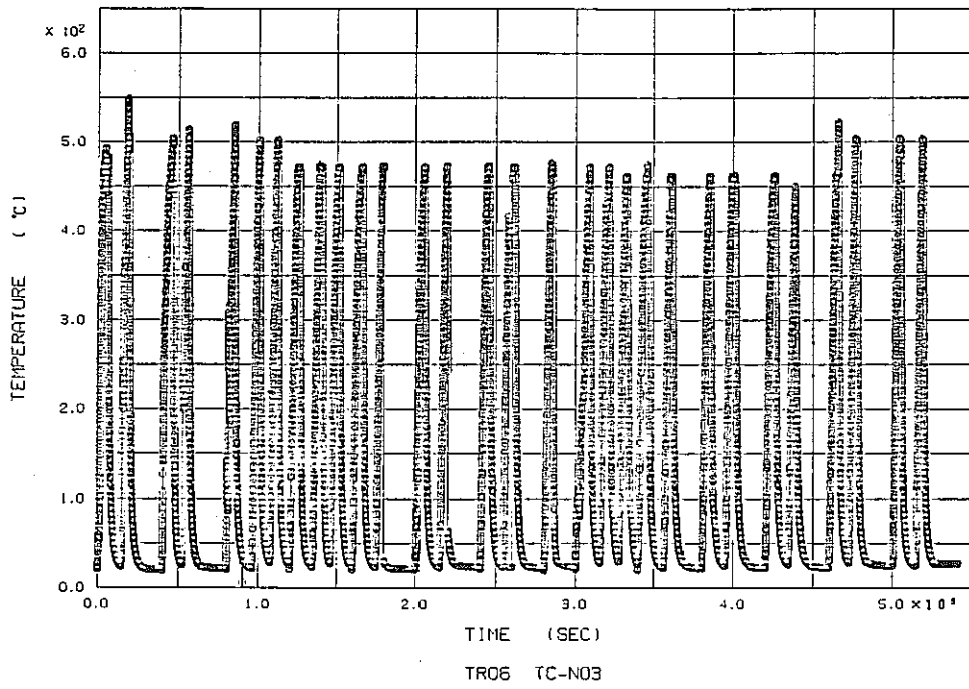


Fig. 2.2-3 Temperature History (TC-No.3)

FINAS

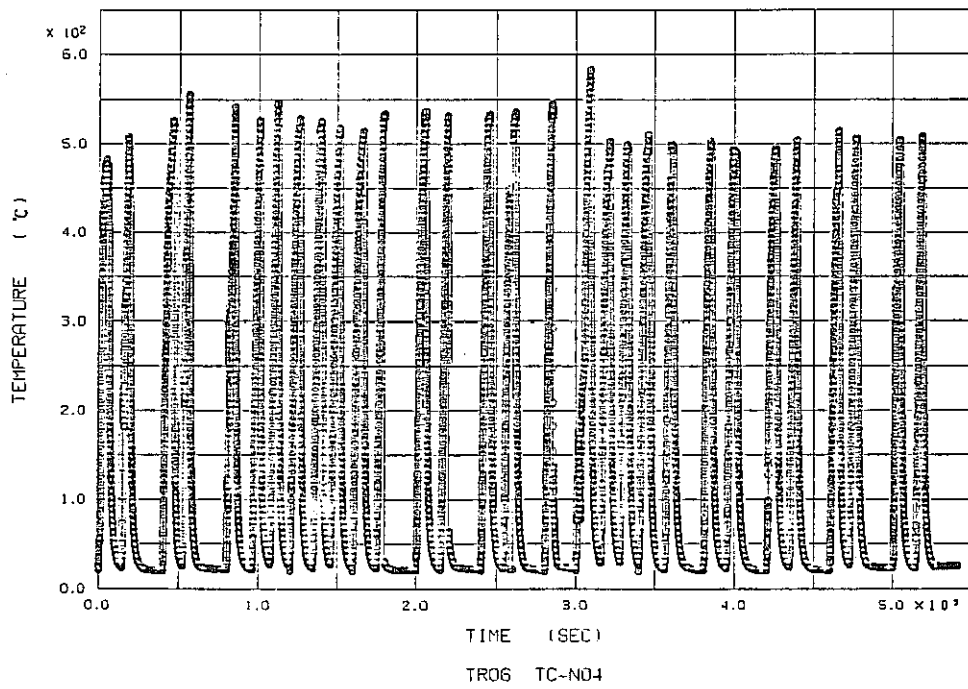


Fig. 2.2-4 Temperature History (TC-No.4)

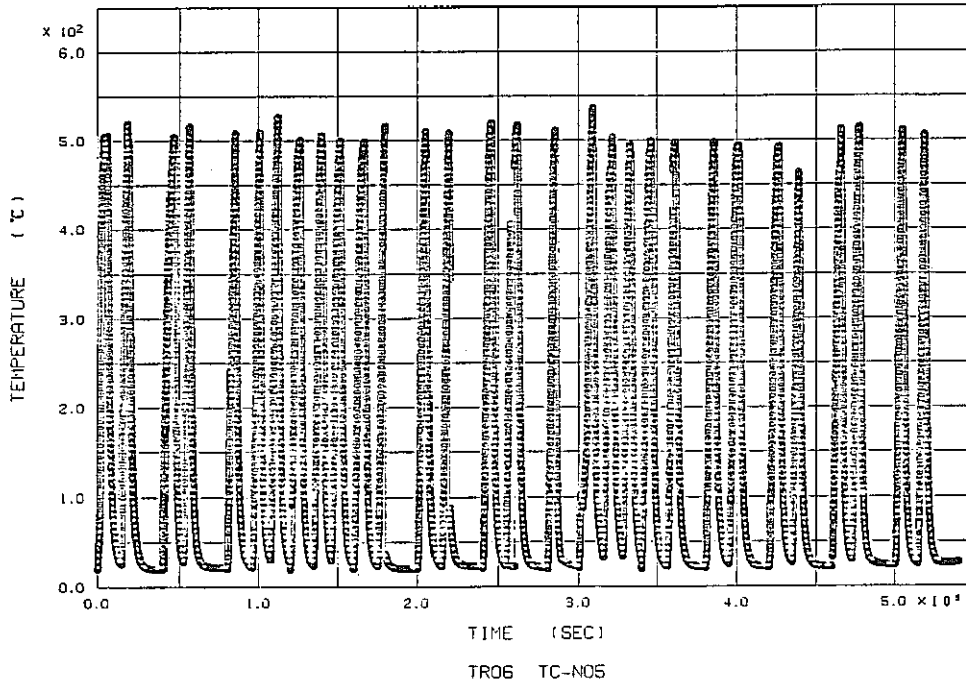


Fig. 2.2-5 Temperature History (TC-No.5)

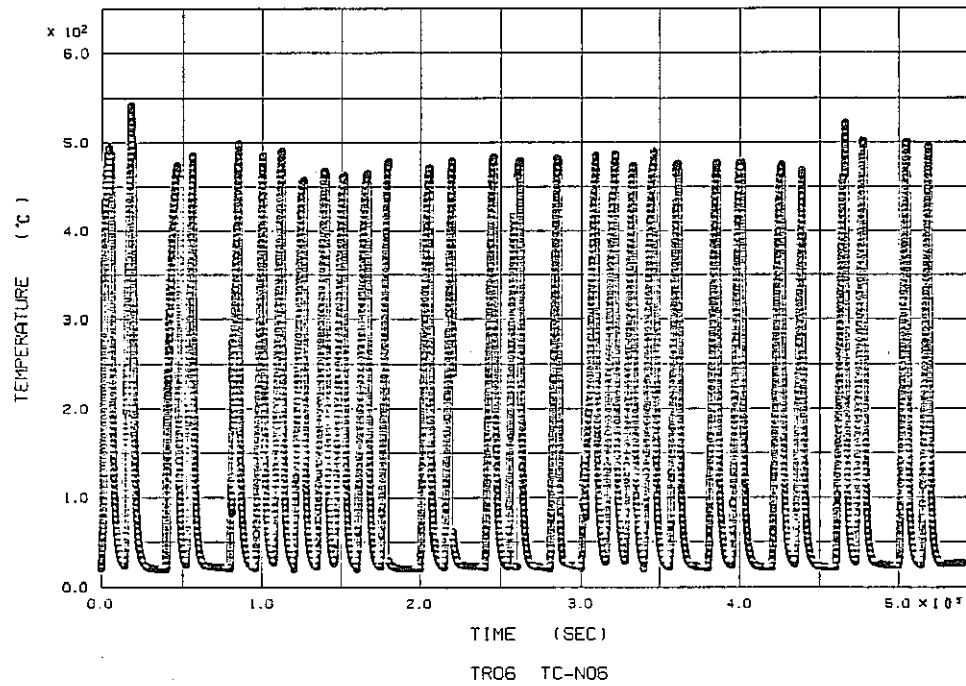


Fig. 2.2-6 Temperature History (TC-No.6)

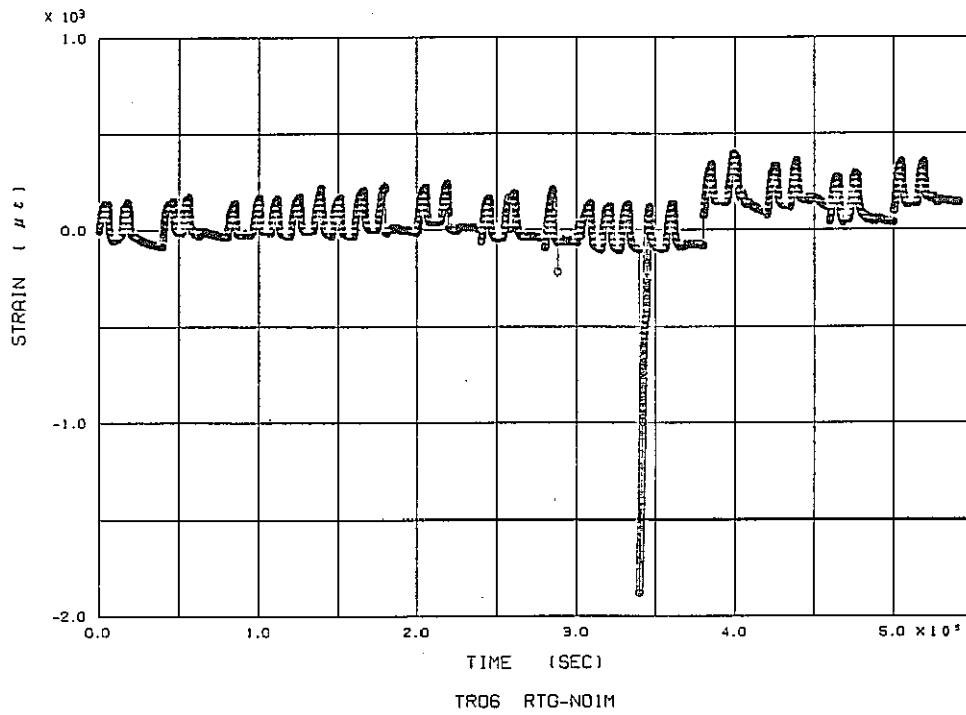


Fig.2.2-7 Strain History (RTG-No.1)

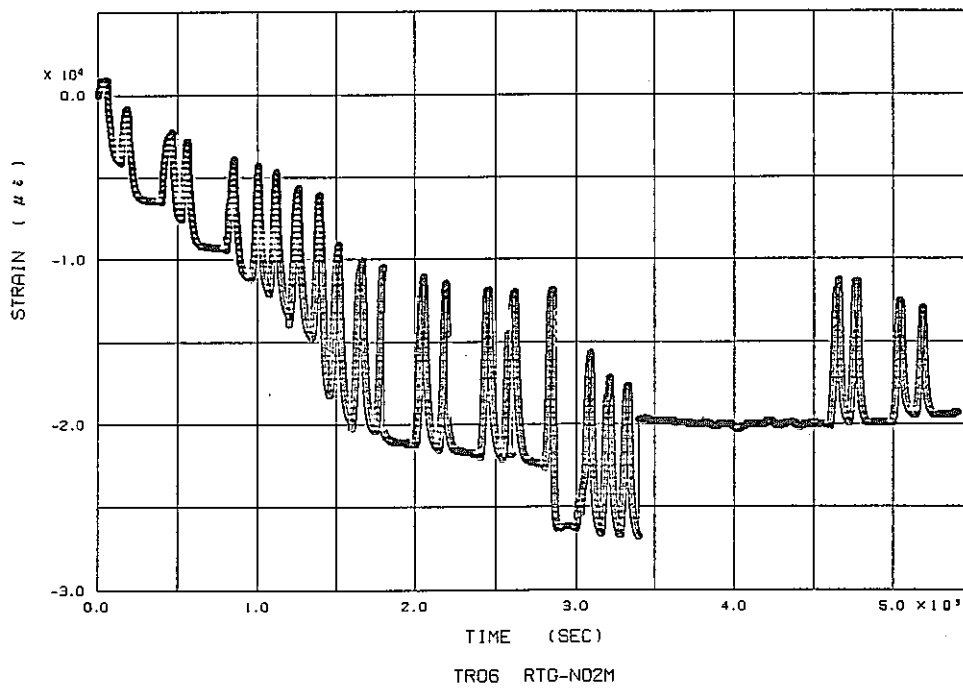


Fig.2.2-8 Strain History (RTG-No.2)

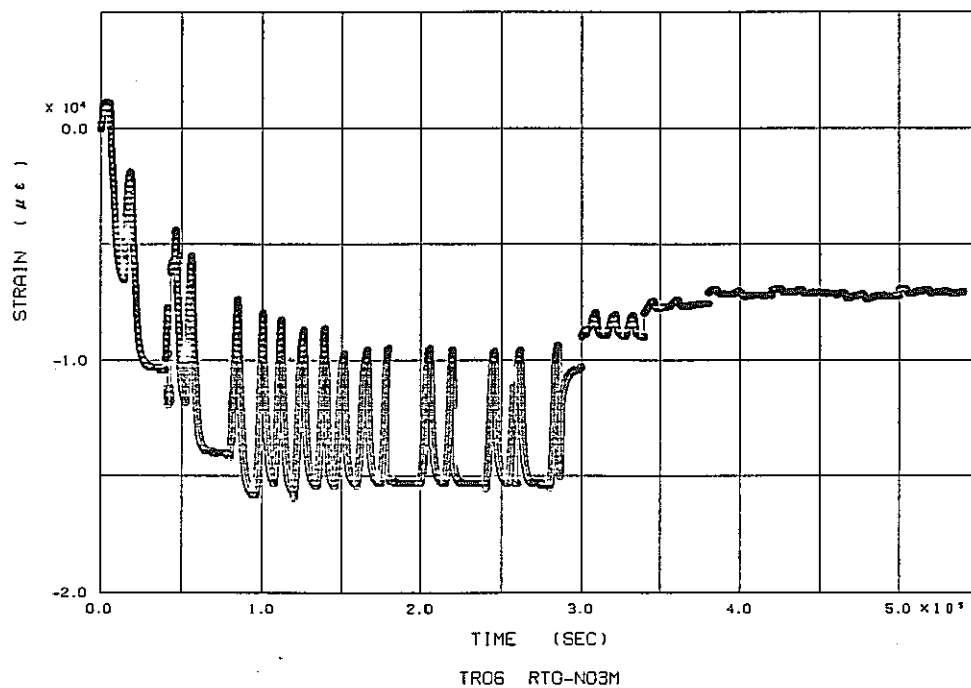


Fig. 2.2-9 Strain History (RTG-No.3)

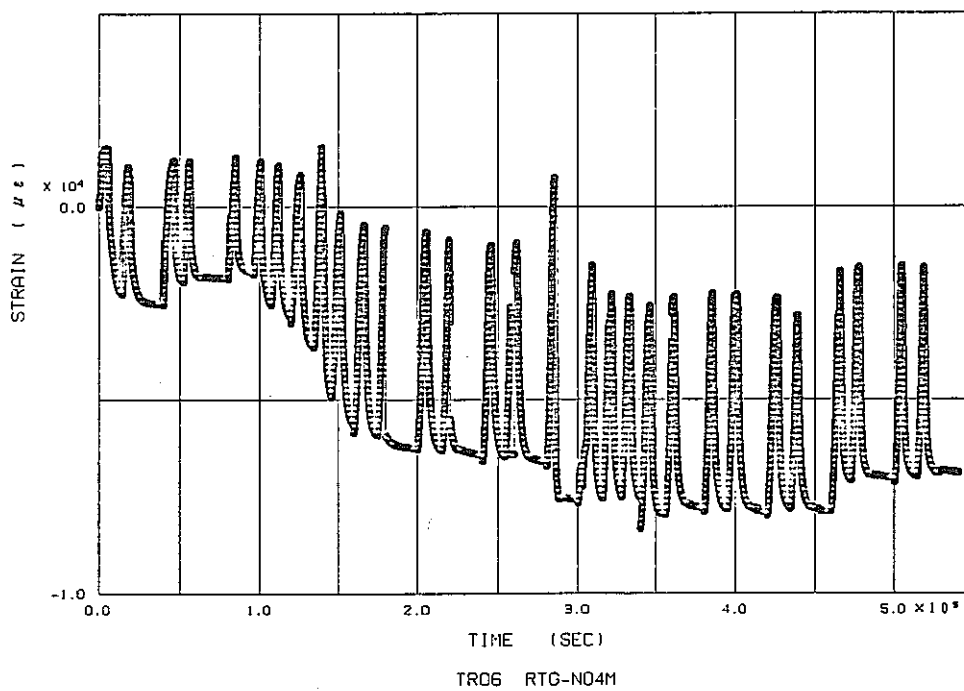


Fig. 2.2-10 Strain History (RTG-No.4)

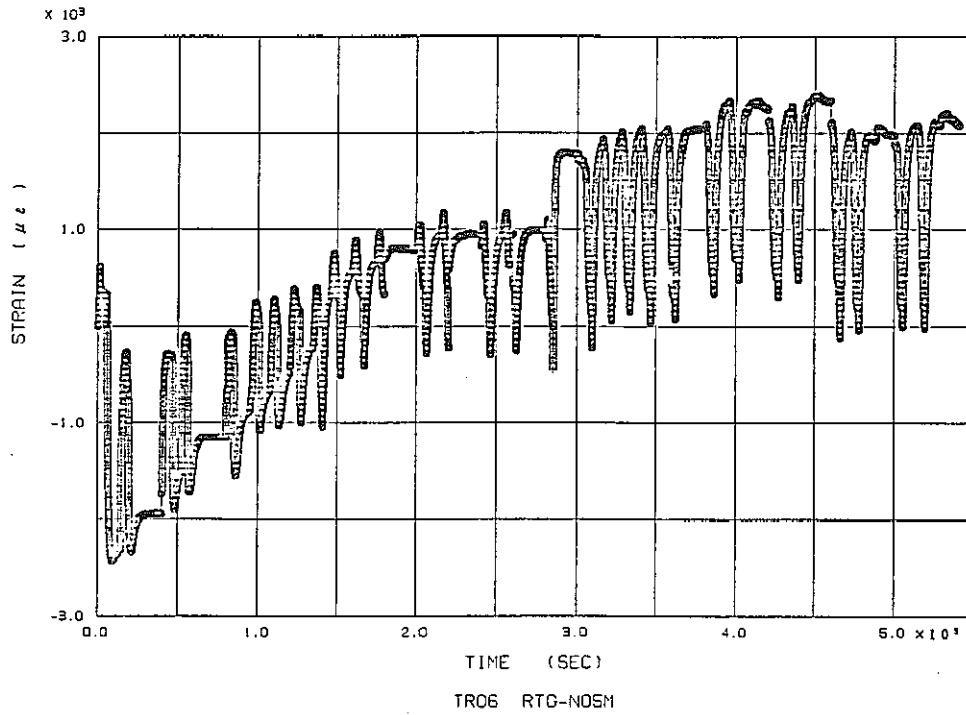


Fig. 2.2-11 Strain History (RTG-No.5)

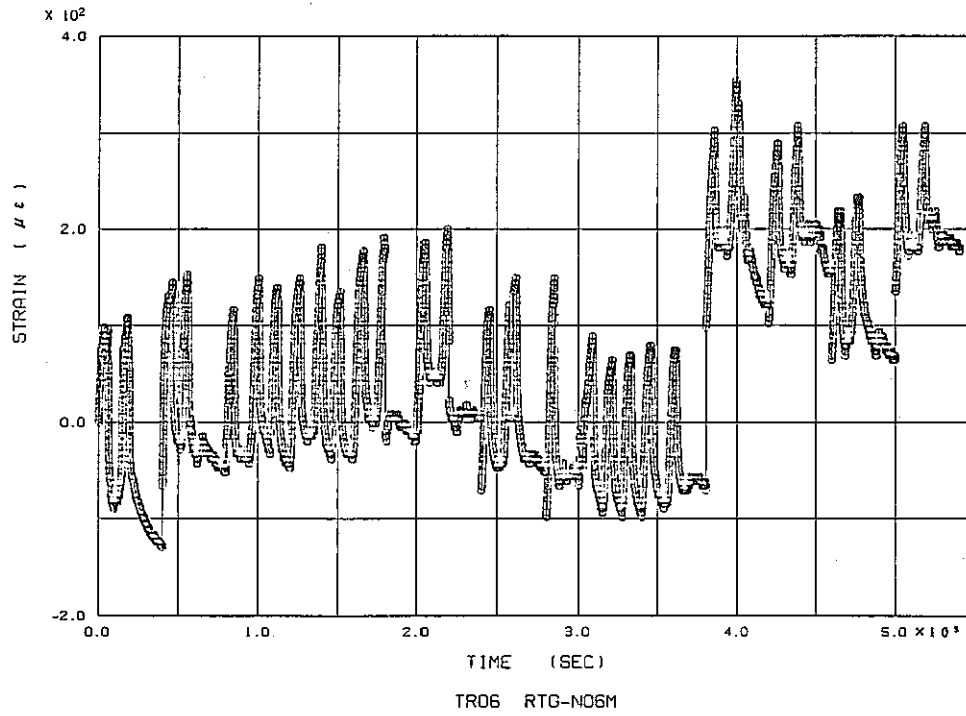


Fig. 2.2-12 Strain History (RTG-No.6)

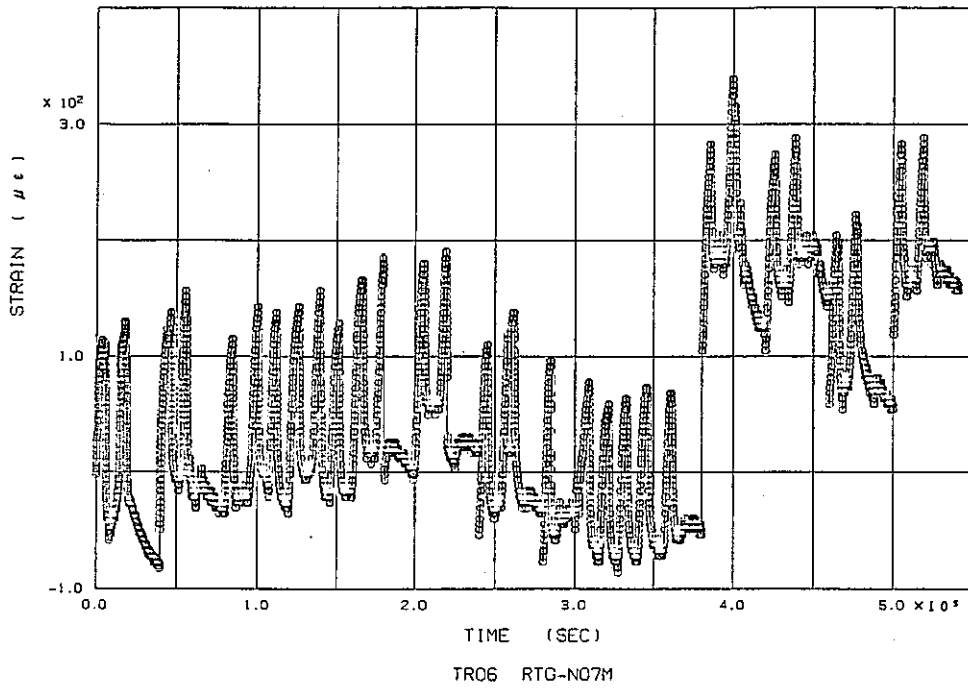


Fig.2.2-13 Strain History (RTG-No.7)

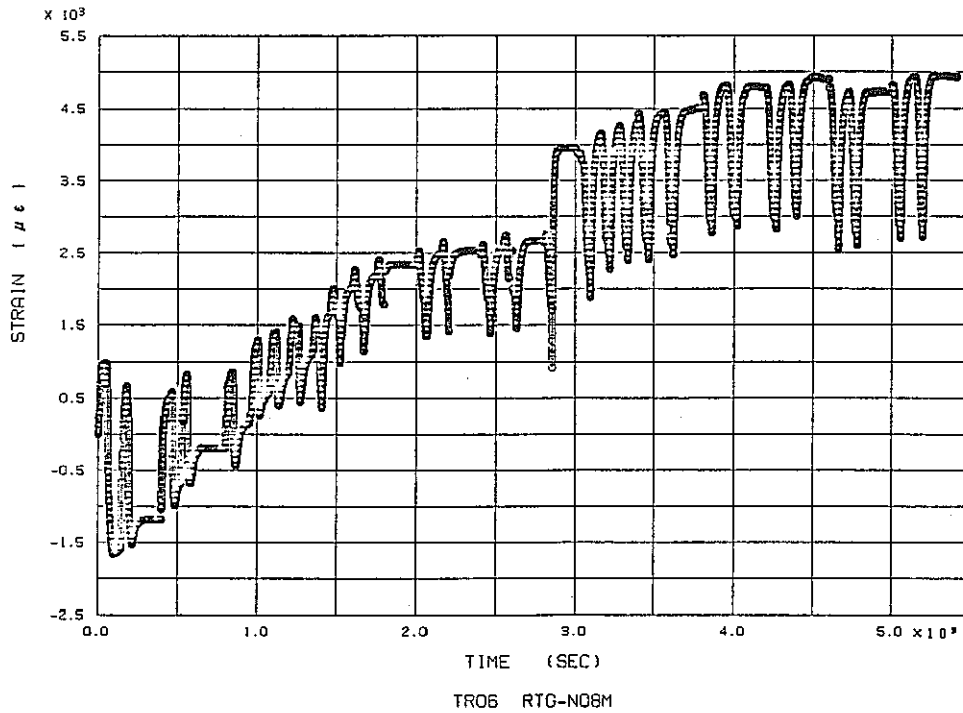


Fig.2.2-14 Strain History (RTG-No.8)

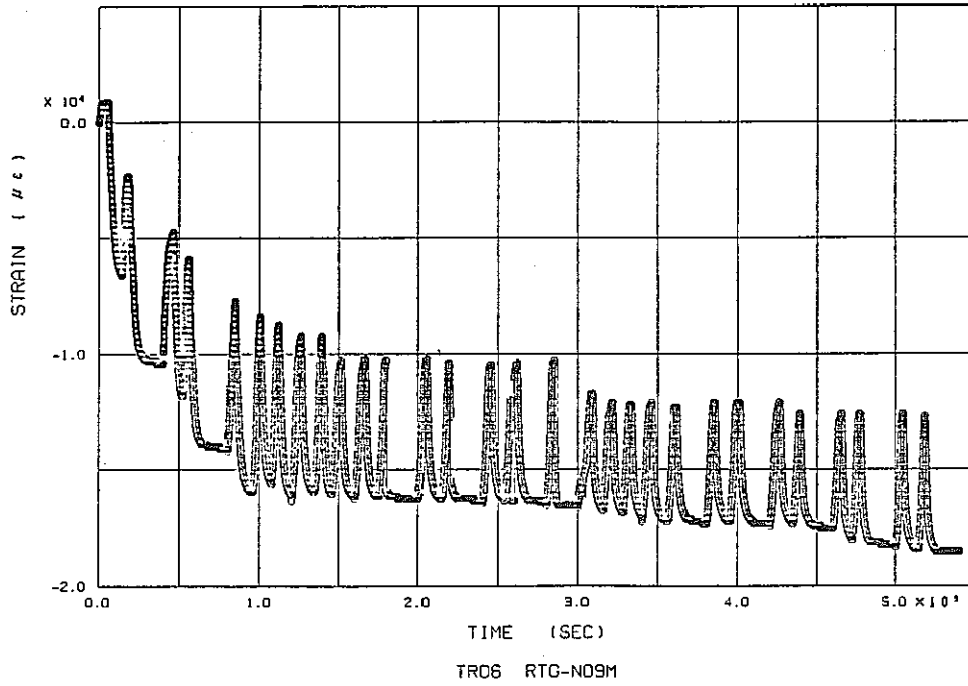


Fig. 2.2-15 Strain History (RTG-No.9)

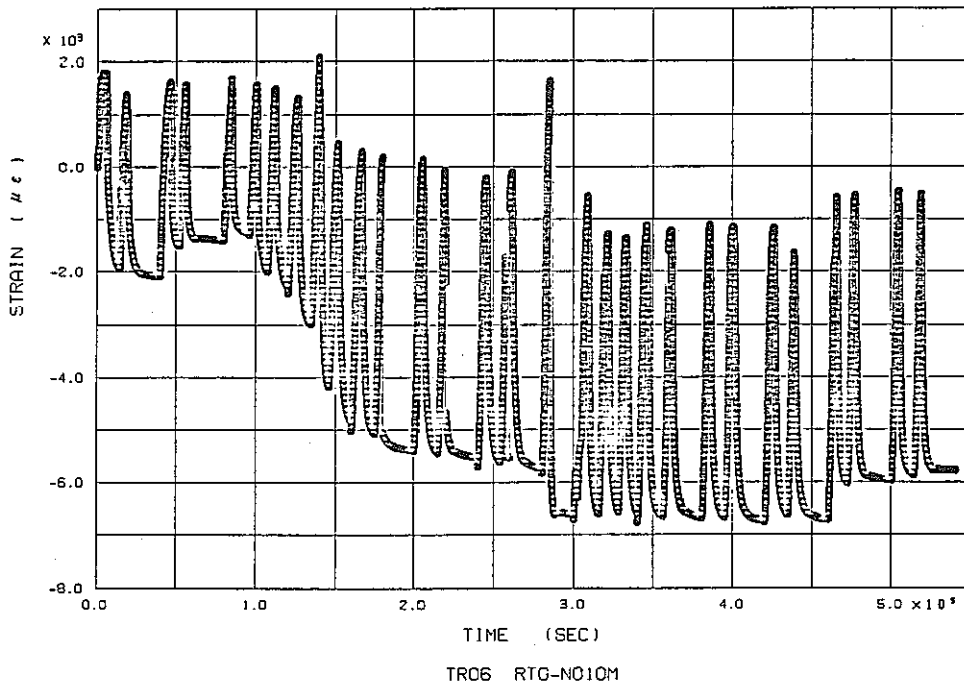


Fig. 2.2-16 Strain History (RTG-No.10)

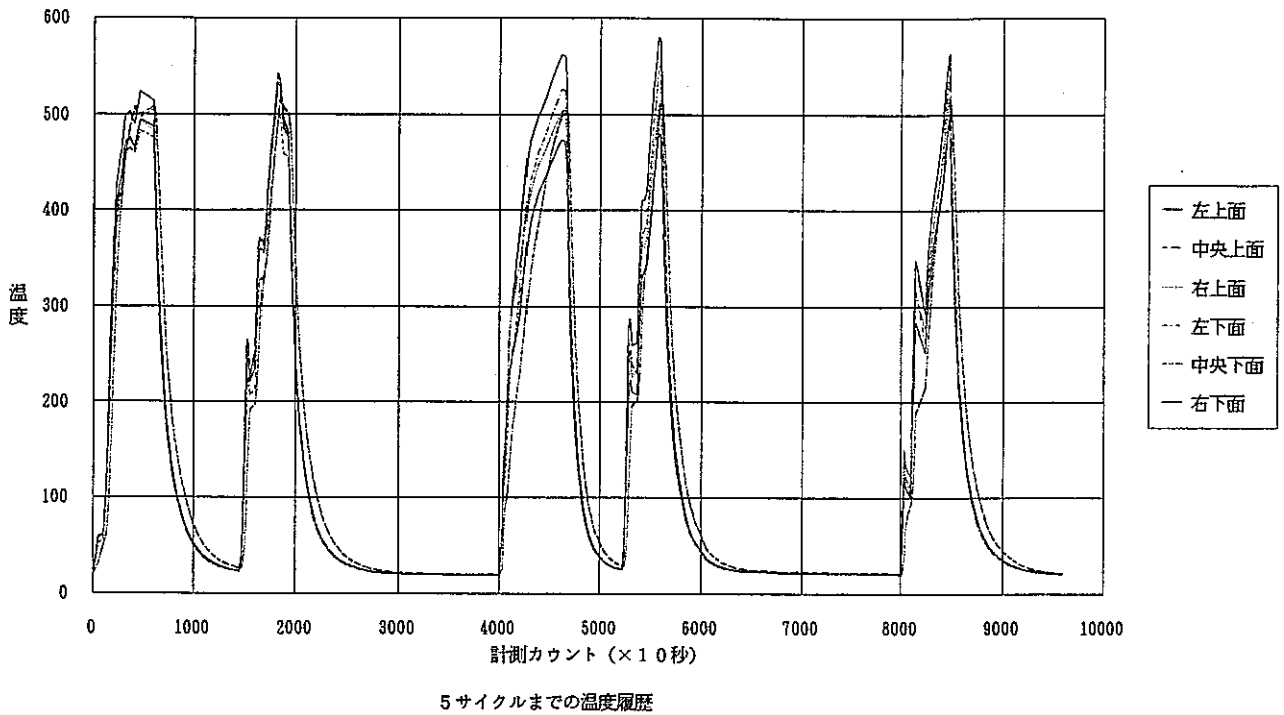


Fig.2.3-1 Temperature History of Bar-B (Time Base)

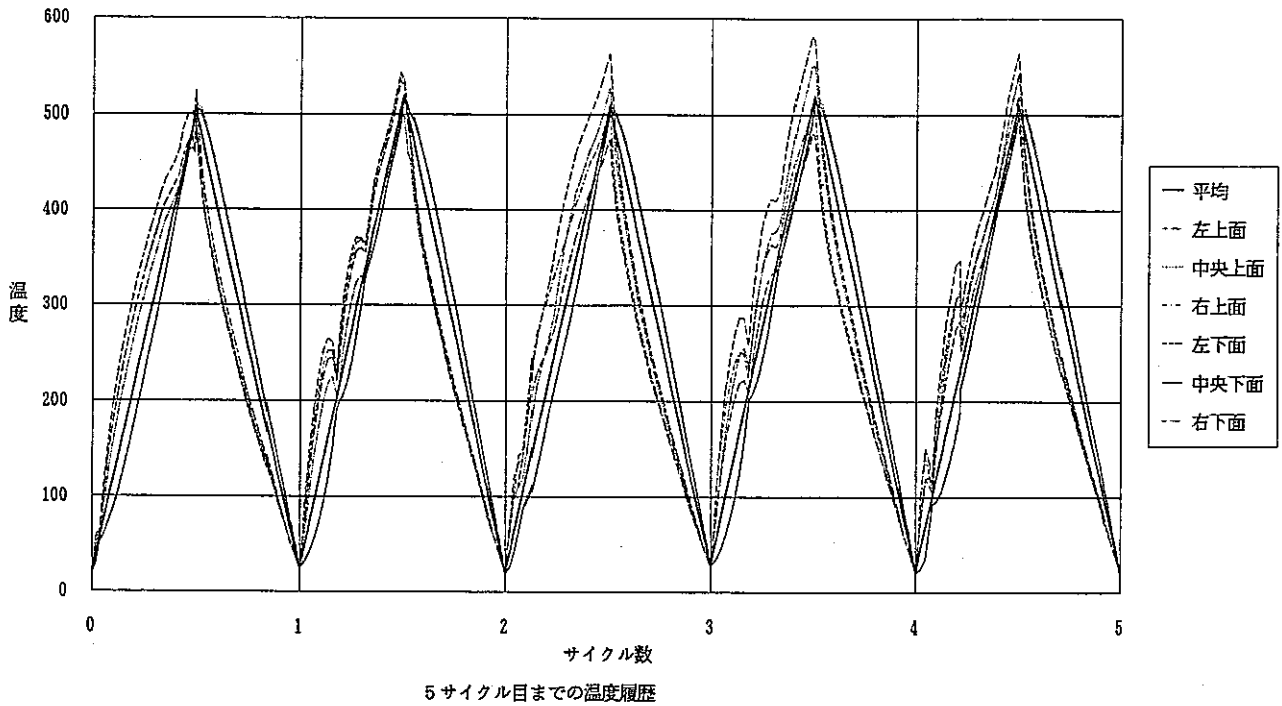


Fig.2.3-2 Temperature History of Bar-B (Cycle Count Base)

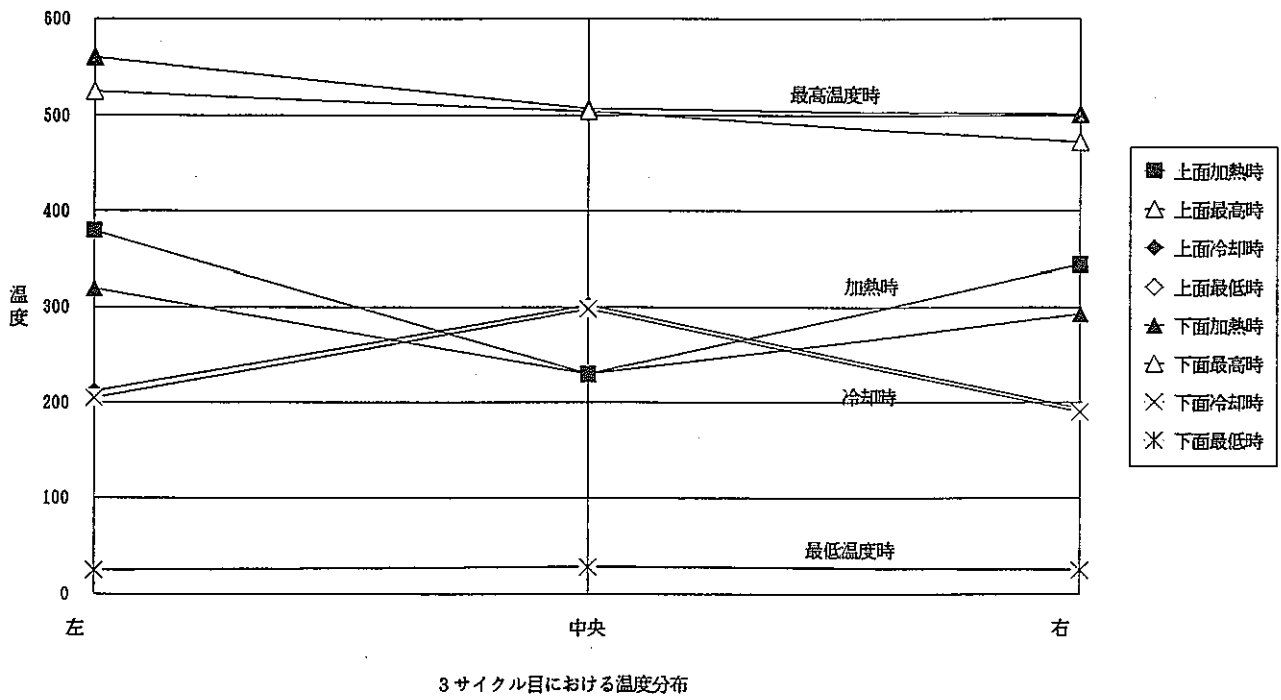


Fig. 2.3-3 Temperature Distribution of Bar-B (The 3rd Cycle)

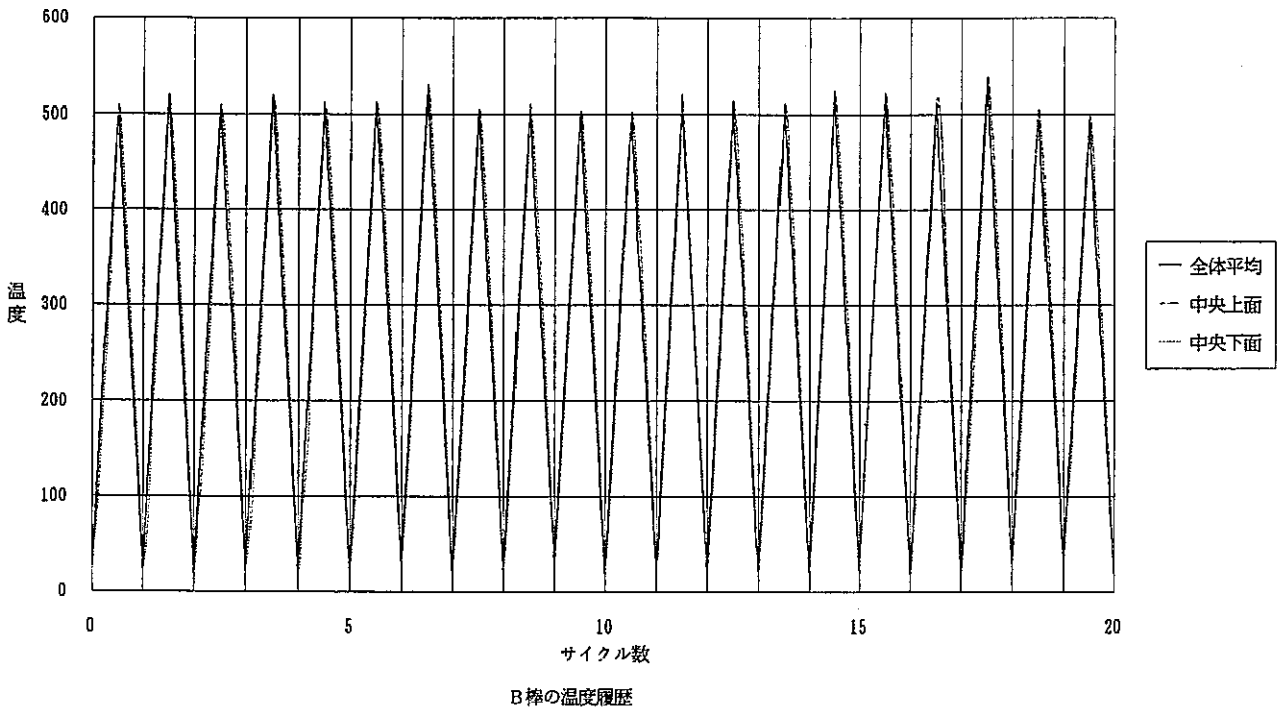


Fig. 2.3-4 Averaged Temperature History of Bar-B

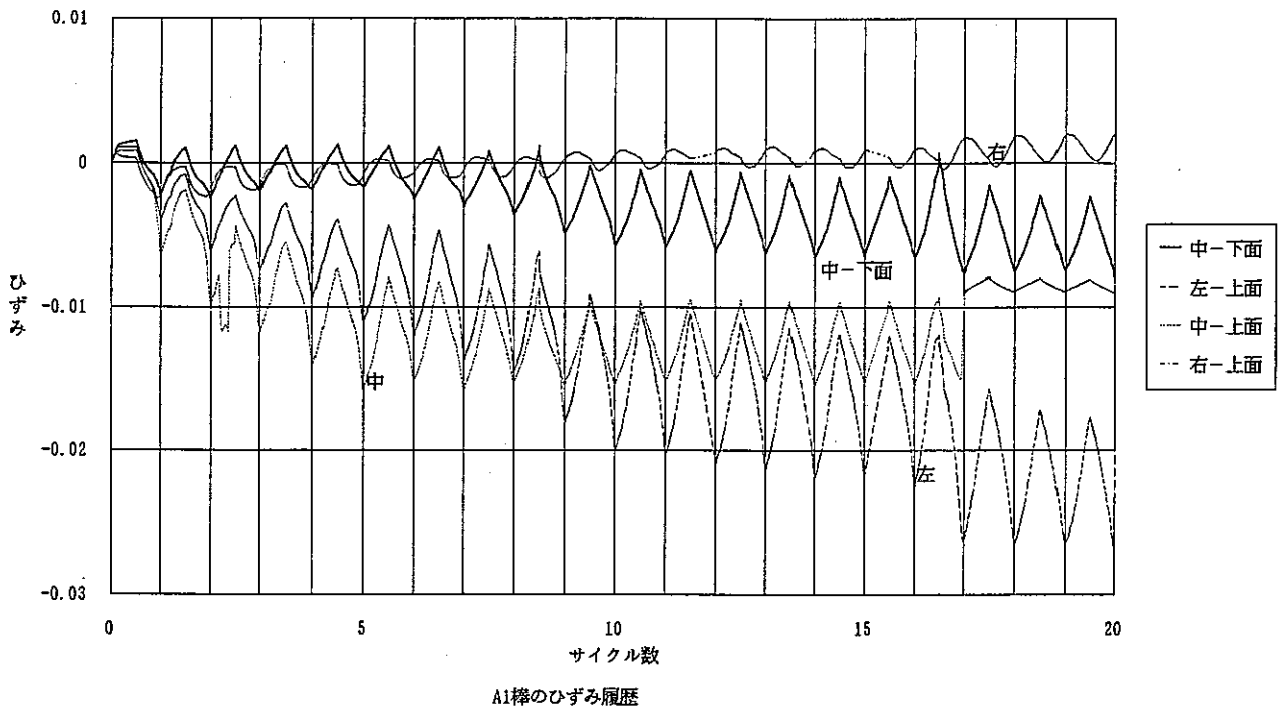


Fig. 2.3-5 Strain History of Bar-A1 (Cycle Count Base)

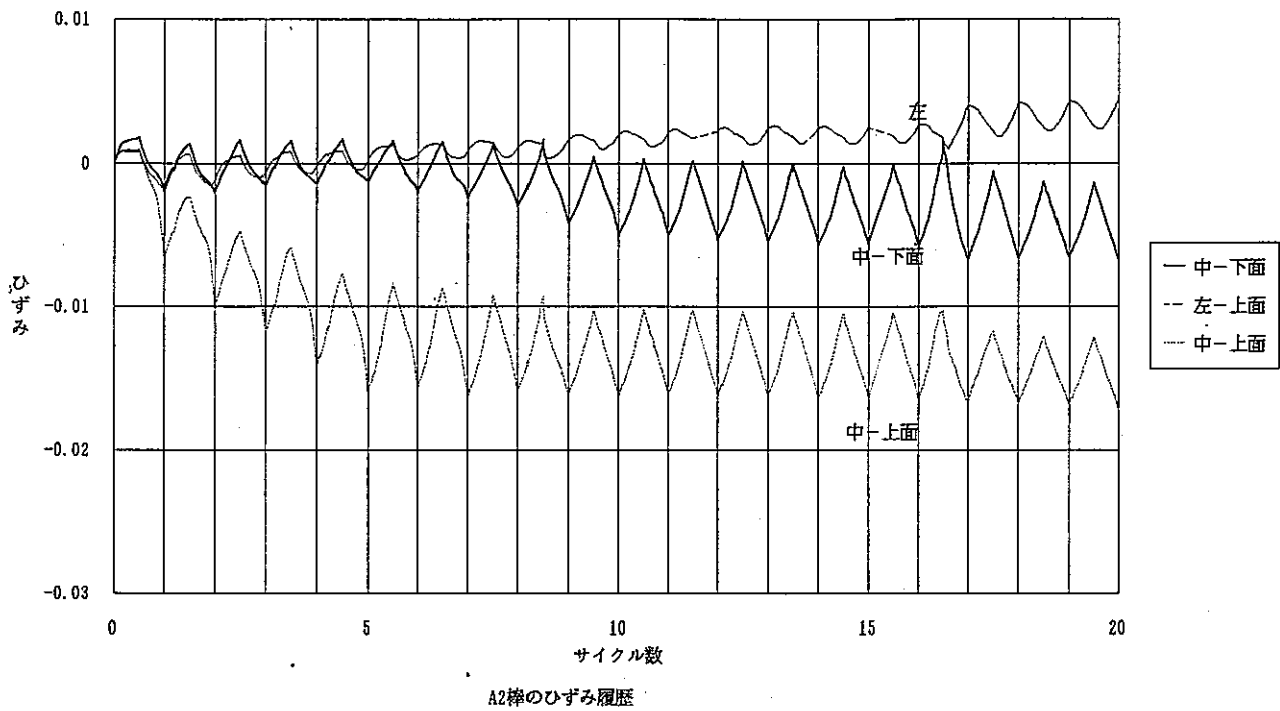
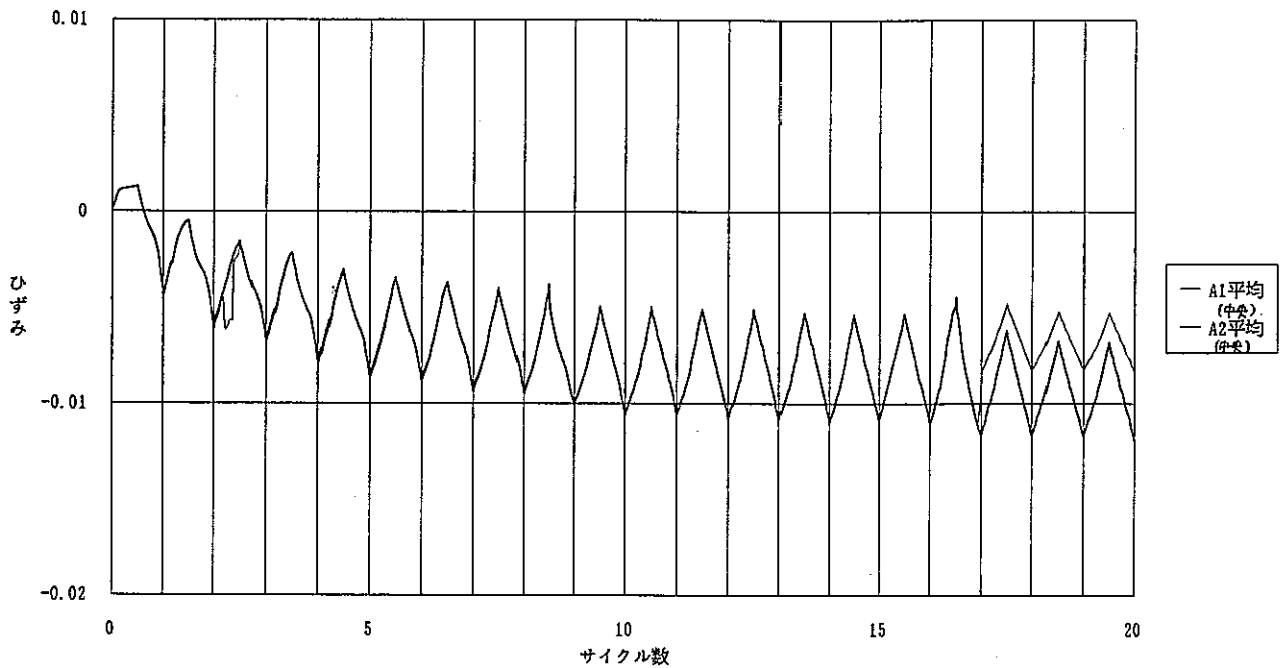


Fig. 2.3-6 Strain History of Bar-A2 (Cycle Count Base)



A1, A2棒の上下面平均ひずみ履歴

Fig. 2.3-7 Averaged Strain History of Bar-A

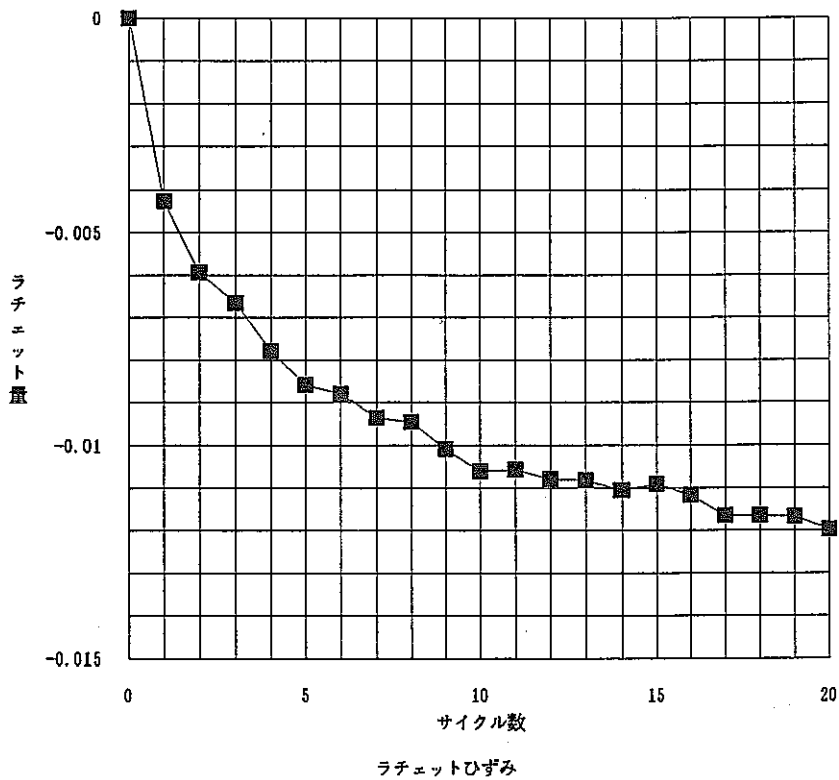
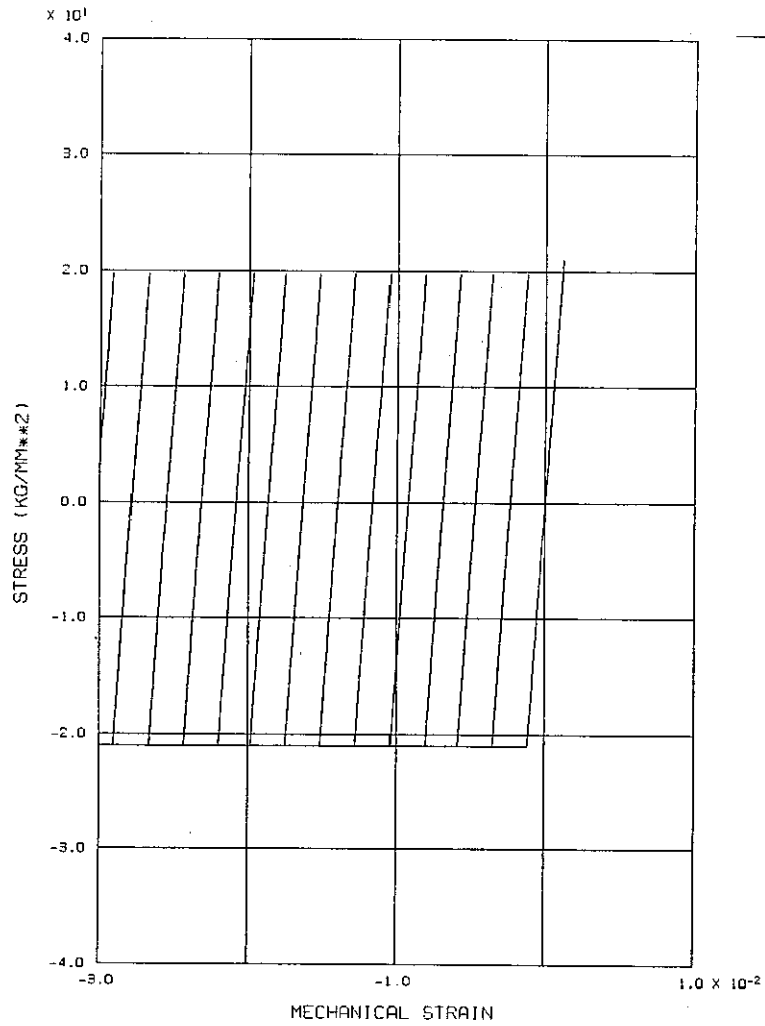
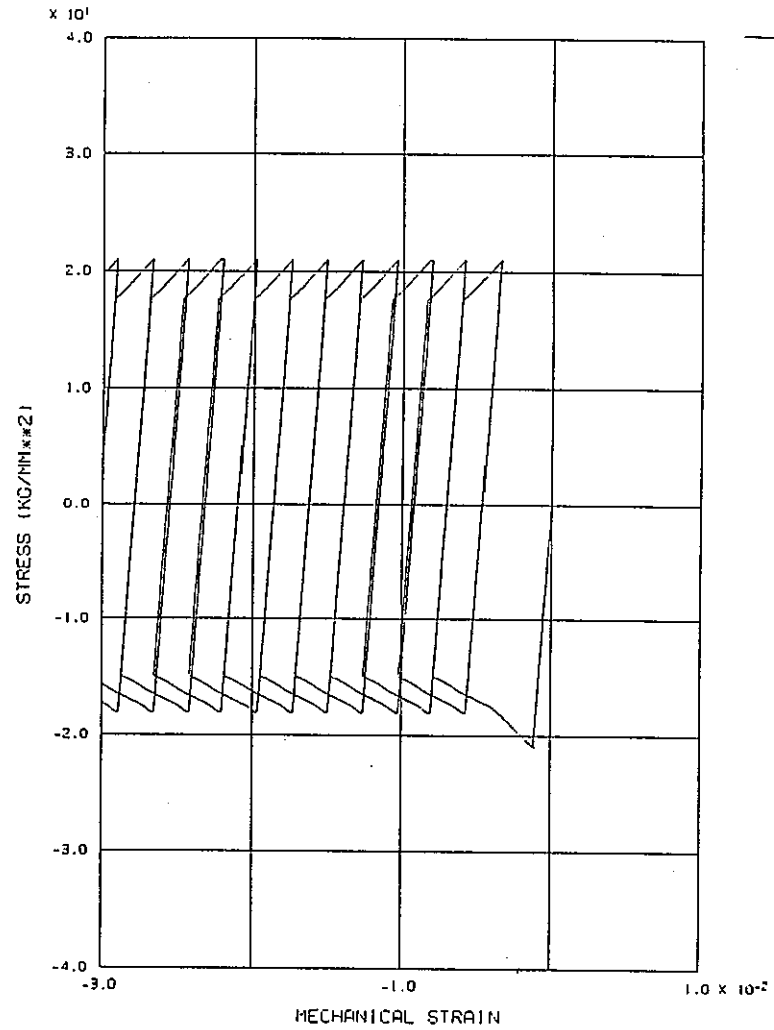


Fig. 2.3-8 Ratchet Strain at each Cycle



STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP BAR-A
 3-BAR RATCHET ANALYSIS (EL. P. PL. MODEL-2 TR-06)
 P=0.10=20.DELTA-T=480

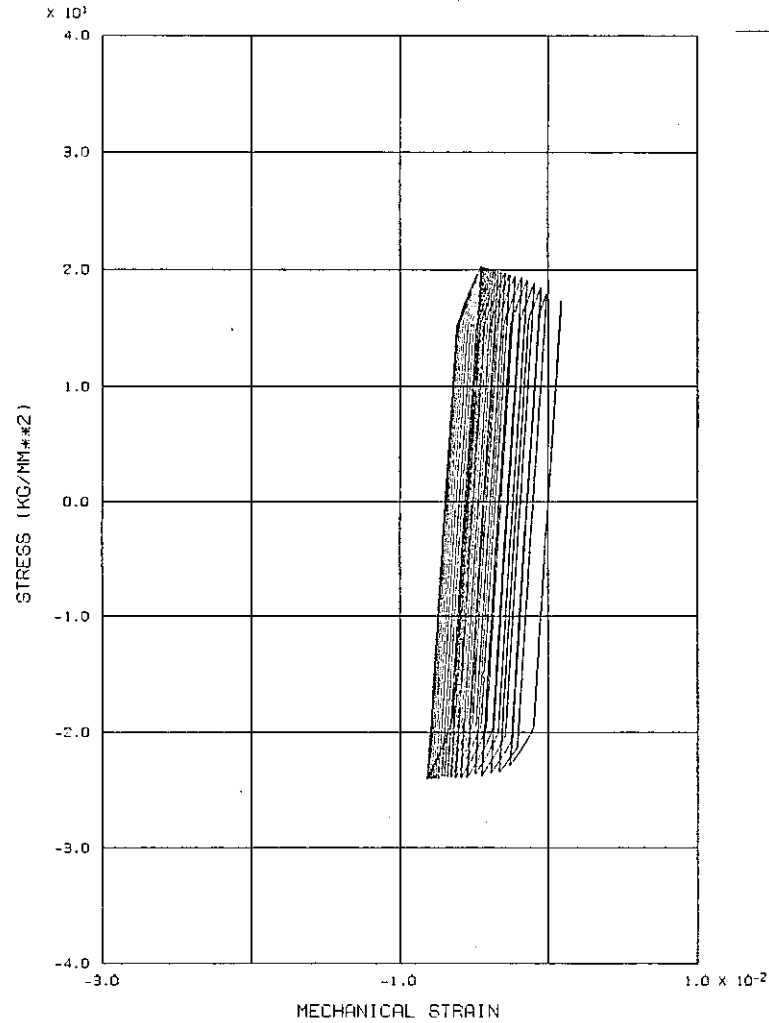
Fig. 4.1-1 Stress-Strain Relationship of Bar-A
 (Analysis type-1)



STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP BAR-B
 3-BAR RATCHET ANALYSIS (EL. P. PL. MODEL-2 TR-06)
 P=0.10=20.DELTA-T=480

Fig. 4.1-2 Stress-Strain Relationship of Bar-B
 (Analysis type-1)

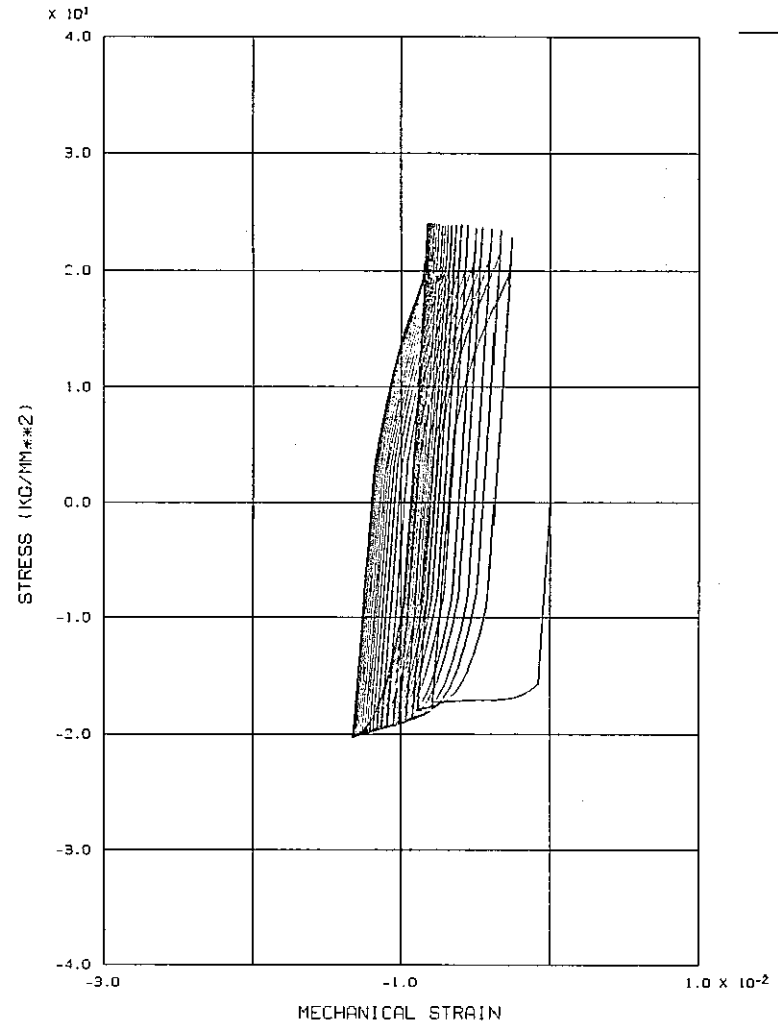
FINAS STATIC ANALYSIS



STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP BAR-A
3-BAR RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL TR-06)
P=0.T0=20.DELTA-T=480

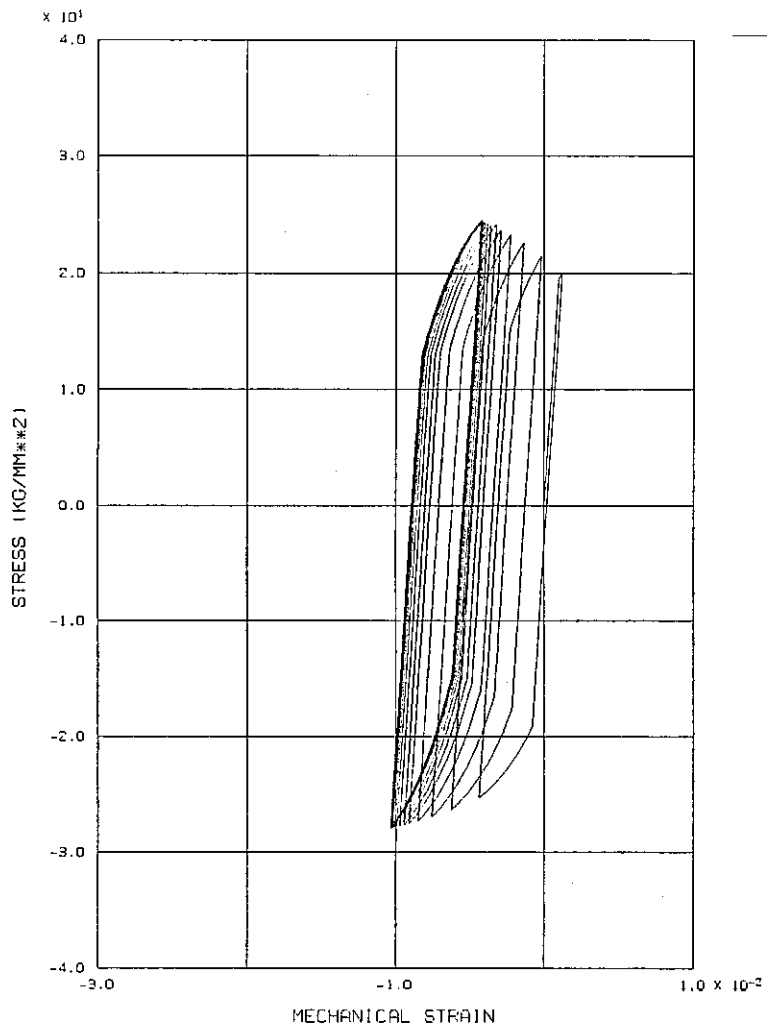
Fig. 4.1-3 Stress-Strain Relationship of Bar-A
(Analysis type-2)

FINAS STATIC ANALYSIS



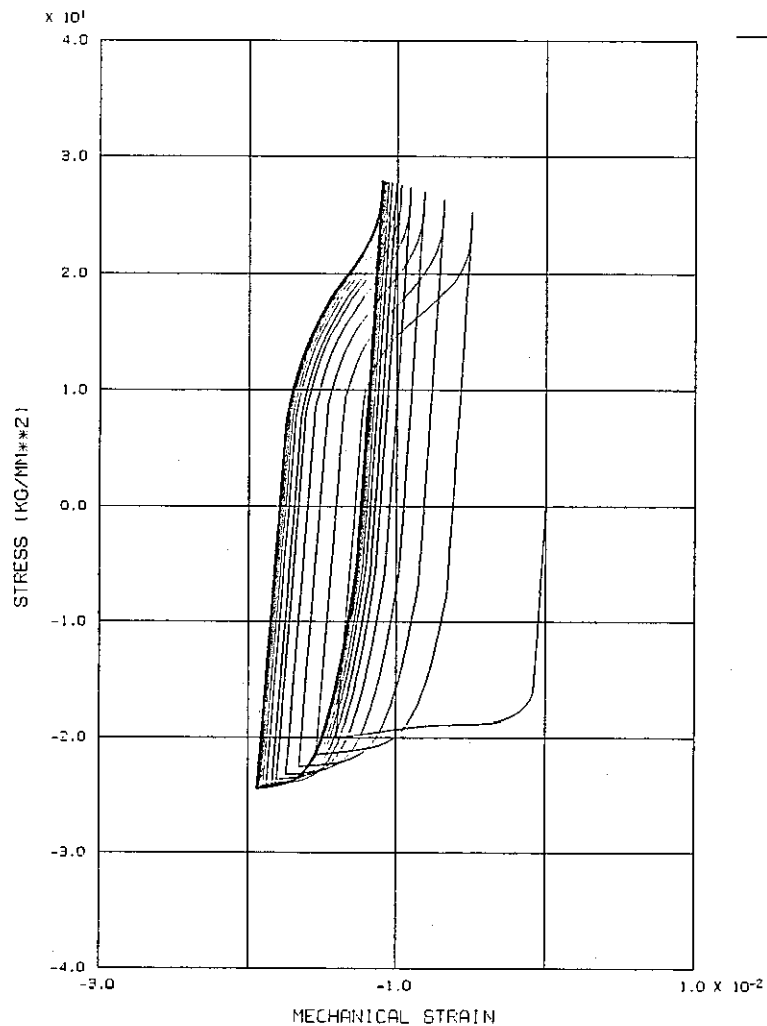
STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP BAR-B
3-BAR RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL TR-06)
P=0.T0=20.DELTA-T=480

Fig. 4.1-4 Stress-Strain Relationship of Bar-B
(Analysis type-2)



STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP BAR-A
 3-BAR RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL-2 TR-06)
 / WITH ROOT / P=0.T0=20.DELTA-T=480.0

Fig. 4.1-5 Stress-Strain Relationship of Bar-A
 (Analysis type-3)



STRESS-MECHANICAL STRAIN RELATIONSHIP BAR-B
 3-BAR RATCHET ANALYSIS (OHNO MODEL-2 TR-06)
 / WITH ROOT / P=0.T0=20.DELTA-T=480.0

Fig. 4.1-6 Stress-Strain Relationship of Bar-B
 (Analysis type-3)

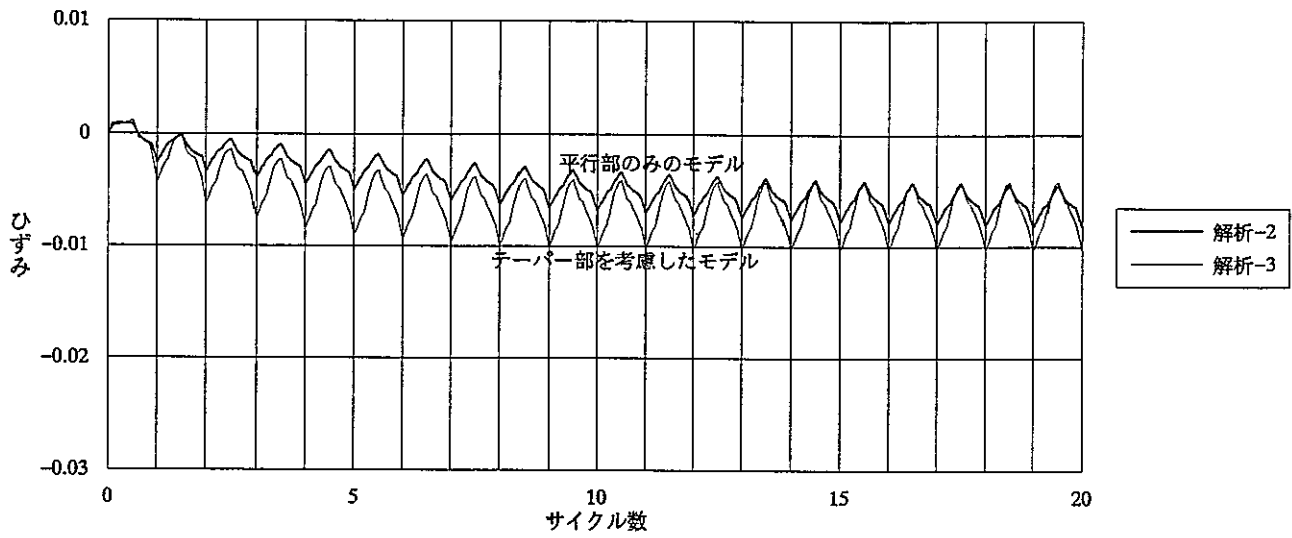


Fig. 4.1-7 Ratchetting Strain (with/without Tapered Part)

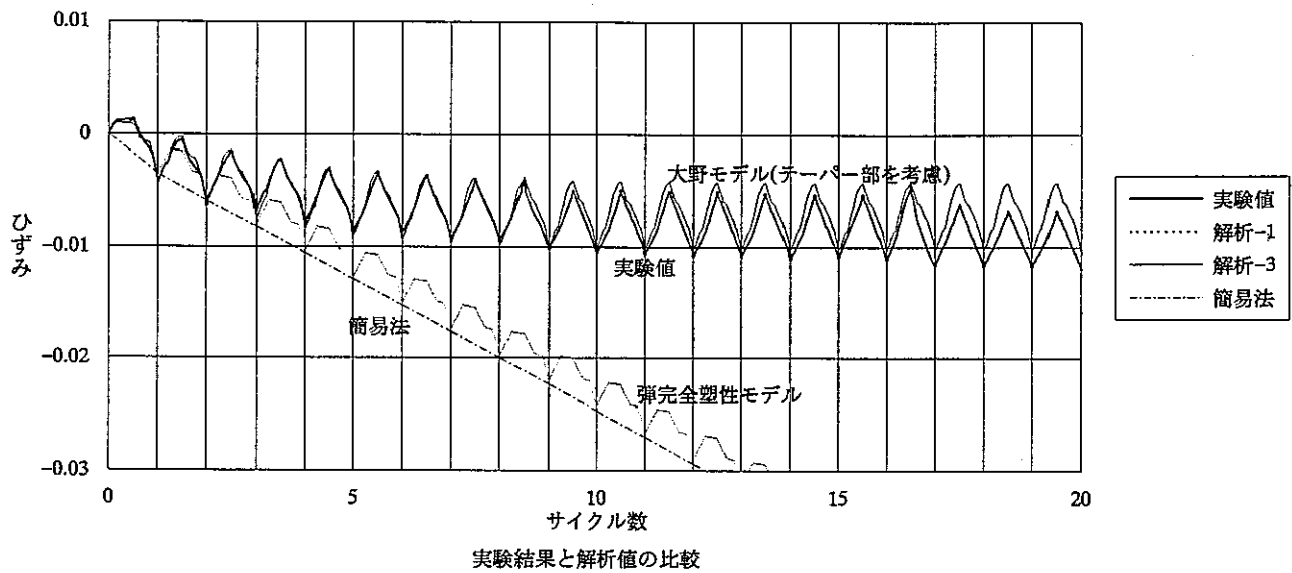
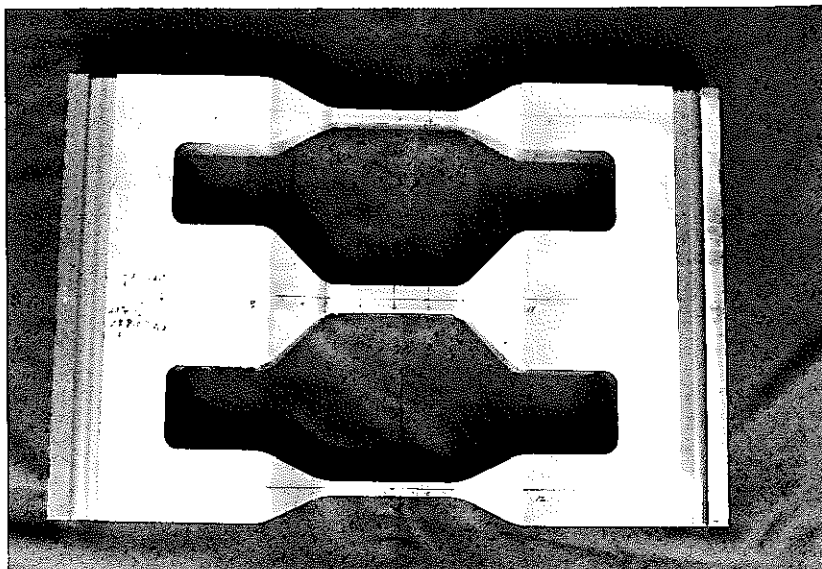
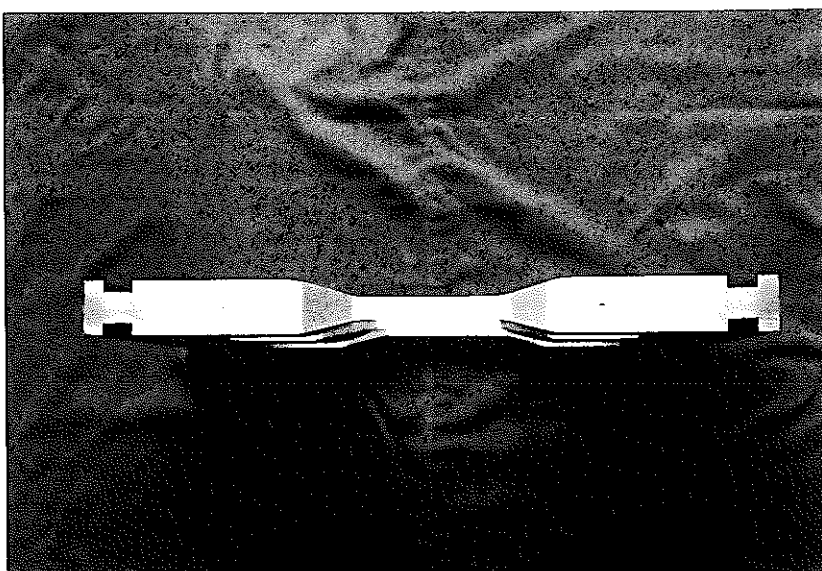


Fig. 4.1-8 Experimental and Analytical Ratchetting Strain

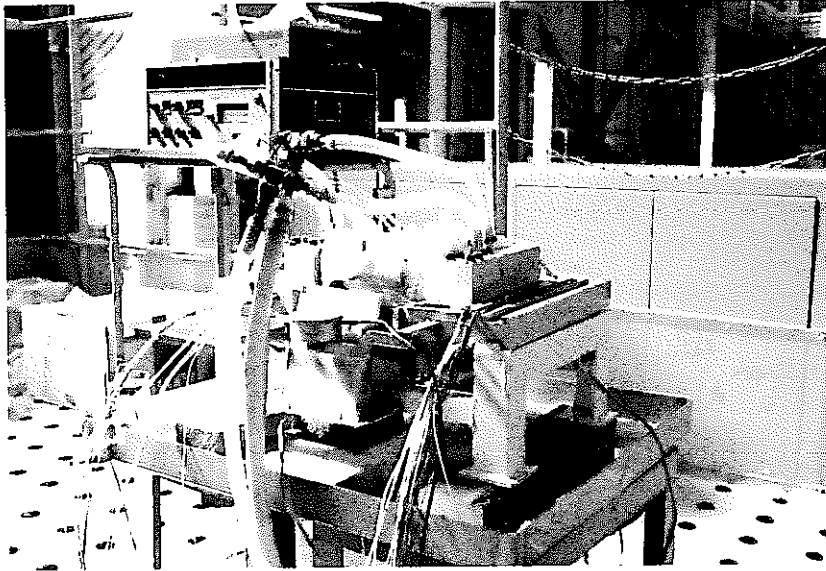


供 試 体 (上面)

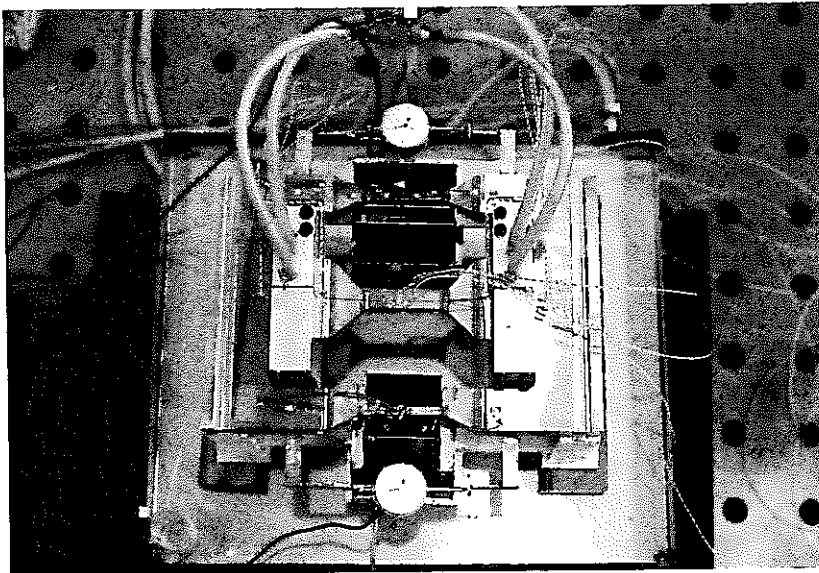


供 試 体 (側面)

Photo.1 Test Assembly



試 験 装 置



試験装置（加熱装置を外したところ）

Photo.2 Scene of the Experiment