

原子炉容器液面近傍を対象とした非弾性解析解
の構成式依存性に関する検討

(研究報告)

2003年4月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division ,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu , Tokai-mura , Naka-gun , Ibaraki 319-1184 ,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

原子炉容器液面近傍を対象とした非弾性解析解の

構成式依存性に関する検討

(研究報告)

安藤昌教*¹

要旨

高速炉の原子炉容器は、上端をコンクリート建屋により支持され、炉心上部プレナムに高温の冷却材を有することから、冷却材液面から上端支持部に至る鉛直方向に大きな温度勾配が生じる。その結果炉壁液面近傍部には降伏応力を超える高い応力が発生することになり、同部位の詳細な挙動を予測するためには非弾性解析が必要不可欠となる。しかしながら、非弾性解析には未だ決定的な構成方程式が存在しないことから、解析者による解の差異が生じやすく、設計への適用が難しいとされている。そこで本研究では、様々な非弾性構成方程式を用いて同部位について非弾性解析を行い、得られた結果を比較することで解の構成式依存性についての検討を行った。本研究により得られた主な結果は以下のとおりである。

- ・ 単調負荷条件下の非弾性解析から得られた解は、構成方程式に依存するが、その最終点は構成方程式に拠らず同一の応力緩和曲線上に存在する傾向があることがわかった。
- ・ 弾塑性解析結果と、弾性クリープ解析結果において、発生応力値の一致する点では、非線形ひずみの分布が概ね一致することを確認した。
- ・ 繰返し負荷条件による非弾性解析から得られた解は、応力緩和曲線から外れることがわかった。
- ・ 上記理由として、ラチェットひずみにより非線形ひずみの分布が変化することがあげられる。
- ・ 起動一定常運転一手动トリップの一連の事象を繰返した場合の非弾性解析を行い、応力-ひずみ関係に繰返し応力-ひずみ曲線を使用した場合に対し、単調応力-ひずみ曲線を用いるとラチェットひずみが大きめに評価されることがわかった。

*¹大洗工学センター 要素技術開発部 構造信頼性研究グループ

Study about Dependence of Constitutive Equations for Inelastic Analysis
Results at the Reactor Vessel Near the Sodium Surface

Masanori ANDO*¹

Reactor vessel of fast reactor plant contains high temperature liquid sodium in its inside and its upper end is supported by a low temperature structure made of concrete. Therefore, a sharp temperature gradient will arise at the vessel wall near the sodium surface. For this reason, generated thermal stress around this part might be larger than yield stress of that material. Then it is necessary to use inelastic analysis for predicting detailed behavior of it. However, there are no complete constitutive equations for inelastic analysis until now. Therefore inelastic analysis results will depend on the selected constitutive equation, and it is not easy to apply to a design. In this research, author analyzed about mentioned part by using some kinds of constitutive equations, and compared their results each other to research about dependence of analysis results on constitutive equations. The results obtained in this research are as follows.

- Results from inelastic analyses under monotonic load depend on constitutive equations, however they tend to be on the unique stress relaxation curve.
- When both stress values in results from elastic-plastic analysis and elastic-creep analysis are the same, their inelastic strain would have also similar distributions.
- The inelastic analysis results under cyclic loads are not on the stress relaxation curve. One of this reason, ratchet strain might change the distribution of inelastic strain.
- On the cyclic analysis case (start-up—normal operation—trip), analysis results using monotonic stress-strain curve predicted larger ratchet strain than that of the results using cyclic stress-strain curve.

*¹:Structural Mechanics Research Group, Advanced Technology Division,
O-arai Engineering Center, JNC

目 次

目次.....	iii
表リスト	iv
図リスト	v
1.緒言.....	1
1.1 弾塑性構成式	1
2.原子炉容器液面近傍の解析方法.....	6
2.1 形状と解析モデル	6
2.2 物性値	6
2.3 解析条件とそのモデル化	7
2.3.1 一次応力.....	7
2.3.2 熱過渡条件	7
(a) ナトリウム液面の移動.....	7
(b) 温度成層界面の発生及び上昇.....	7
2.3.3 境界条件.....	8
(a) 拘束条件.....	8
(b) 熱的境界条件.....	8
2.4 構成方程式.....	9
(a) 弾塑性構成方程式	9
(1) 起動時を対象とした解析（単調負荷）	9
(2) 起動一定常運転—手動トリップを対象とした解析（繰返し負荷）	10
(b) クリープひずみ式	10
3.解析結果	11
4.考察.....	12
4.1 無次元化による解の比較	12
4.2 解析結果に関する検討.....	12
4.2.1 単調負荷に対する解析結果の傾向.....	12
4.2.2 繰返し負荷に対する解析結果の傾向.....	12
4.2.3 ラチェットひずみについて.....	13
5.謝辞.....	15
参考文献	16

表リスト

表 1	有限要素モデル作成要素.....	17
表 2	一次荷重により生じる応力	17
表 3	熱過渡（起動時）	18
表 4	熱過渡（起動—一定常運転—手動トリップ）	19
表 5	316FR 物性値.....	20
表 6	図中で使用した記号.....	20

図リスト

図 1	原子炉容器及び液面近傍拡大図.....	21
図 2	解析モデル.....	21
図 3	解析に用いたメッシュ.....	22
図 4	拘束条件概念図.....	23
図 5	手動トリップ時熱過渡条件.....	24
図 6	構成方程式（二直線近似）.....	25
図 7	熱的境界条件.....	26
図 8	弾性解析から得られた軸方向相当応力分布.....	26
図 9	応力-ひずみ関係（半径方向）.....	26
図 10	応力-ひずみ関係（軸方向）.....	27
図 11	応力-ひずみ関係（周方向）.....	27
図 12	単調荷重解析から得られた応力-ひずみ関係（mises 相当応力-相当ひずみ）.....	28
図 13	クリープ解析結果（mises 相当応力-相当ひずみ）.....	28
図 14	弾性解析 径方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	29
図 15	弾塑性解析モニタリック 径方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	29
図 16	弾塑性解析サイクリック 径方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	30
図 17	弾塑性解析弾完全塑性 径方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	30
図 18	弾性解析 軸方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	31
図 19	弾塑性解析モニタリック 軸方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	31
図 20	弾塑性解析サイクリック 軸方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	32
図 21	弾塑性解析弾完全塑性 軸方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	32
図 22	弾性解析 周方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	33
図 23	弾塑性解析モニタリック 周方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	33
図 24	弾塑性解析サイクリック 周方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	34
図 25	弾塑性解析弾完全塑性 周方向応力-ひずみ曲線（保持無し）.....	34
図 26	弾性解析 径方向応力-ひずみ曲線（保持あり）.....	35
図 27	弾塑性解析モニタリック 径方向応力-ひずみ曲線（保持あり）.....	36
図 28	弾塑性解析サイクリック 径方向応力-ひずみ曲線（保持あり）.....	36
図 29	弾塑性解析弾完全塑性 径方向応力-ひずみ曲線（保持あり）.....	36
図 30	弾性解析 軸方向応力-ひずみ曲線（保持あり）.....	37
図 31	弾塑性解析モニタリック 軸方向応力-ひずみ曲線（保持あり）.....	37
図 32	弾塑性解析サイクリック 軸方向応力-ひずみ曲線（保持あり）.....	38
図 33	弾塑性解析弾完全塑性 軸方向応力-ひずみ曲線（保持あり）.....	38
図 34	弾性解析 周方向応力-ひずみ曲線（保持あり）.....	39

図 35	弾塑性解析モノトニック 周方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)	39
図 36	弾塑性解析サイクリック 周方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)	40
図 37	弾塑性解析弾完全塑性 周方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)	40
図 38	繰返し負荷 (保持無し) 解析結果と弾クリープ解析結果との比較	41
図 39	繰返し負荷 (保持あり) 解析結果と弾クリープ解析結果との比較	41
図 40	非弾性解析結果の比較	42
図 41	ひずみ分布の評価点	42
図 42	交点の相当クリープひずみと相当塑性ひずみ分布の比較	43
図 43	相当塑性ひずみ分布 1 サイクル目 相当塑性ひずみ分布 2 サイクル目	44
図 44	相当塑性ひずみ分布 3 サイクル目 相当塑性ひずみ分布 4 サイクル目	44
図 45	相当塑性ひずみ分布 5 サイクル目 相当塑性ひずみ分布 6 サイクル目	44
図 46	相当塑性ひずみ分布 7 サイクル目 相当塑性ひずみ分布 8 サイクル目	45
図 47	相当塑性ひずみ分布 9 サイクル目 相当塑性ひずみ分布 10 サイクル目	45

1. 緒言

高速炉の原子炉容器は、上端をコンクリート建屋により支持され、炉心上部プレナムに高温の冷却材を有することから、冷却材液面から上端支持部に至る鉛直方向に大きな温度勾配が生じる。その結果炉壁液面近傍部に原理的に高い応力が発生することになる。さらに高温状況下での使用では、材料の降伏点の低下も考慮する必要がある。同部位に生じる熱応力は弾塑性領域のひずみを発生させることが予想される。そのために、同部位の詳細な挙動を予測するためには非弾性解析が必要不可欠となる。しかしながら、非弾性解析には未だ決定的な構成方程式が存在しない。このことから、解析者や構成式の選択による解の差異が生じやすく、設計への適用が難しいとされている。そこで本研究では、高温かつ高応力の発生が予想される原子炉容器液面近傍部を対象とし、様々な非弾性構成方程式を用いて非弾性解析を行い、解の構成式依存性を明らかにすることを目的とする。また、原子炉容器をはじめ、高速増殖炉の高温下で使用される機器では、繰返し応力によるラチェット変形、およびクリープ疲労によるき裂の発生が主な破損モードとして想定されている。本研究では、解の繰返しによる効果を調査するため、起動時を対象としたケースに加え、起動一定常運転—手動トリップの一連のサイクルを繰返し行ったケースを解析対象とした。

1.1 弾塑性構成式

前述の通り非弾性解析の解は構成式に依存する。ここでは材料の挙動を予測するために考案されてきた構成式について述べる。材料の変形挙動は弾性変形と非弾性（塑性）変形とに分類することができる。固体に外力を加えると、ある荷重の範囲までは弾性的に変形し、荷重を取除くと完全にもとの形に戻る。これを弾性変形という。しかし材料にある限界以上の荷重を作用させると、荷重を除去しても永久変形が残る。この永久変形のうち、時間非依存部分を塑性変形と呼ぶ。材料に降伏点を越えた負荷を加え続けると、一般には加工硬化、移動硬化および繰返し硬化を生じながら塑性変形が進行する。この挙動は極めて多くのパラメータに依存するため、理論を実験結果と厳密に一致させることが困難である。これまでに提案されている、代表的な塑性の構成式について以下に説明する。⁽¹⁾

(1) 等方硬化則 (isotropic hardening rule)

等方硬化則は、降伏曲面は加工硬化に伴ってその大きさが等方的に増大するが、応力空間内での原点の位置は変わらないとするものであり

$$f = F(\sigma_{ij}) - R(\xi_k) \quad (1)$$

と表される。R は流れ応力で初期状態において $R=Y$ となる単軸降伏応力を与える。ここで $F(\sigma_{ij})$ に von Mises の相当応力

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\} \right]^{1/2} \quad (2)$$

を用いた

$$f = \bar{\sigma} - R = 0 \quad (3)$$

となる Mises 型の後続降伏条件は、初期の降伏条件式

$$f = \bar{\sigma} - Y = 0 \quad (4)$$

と同様、簡単なためしばしば用いられるが、バウシニング効果を説明できないという欠点がある。

(2) 移動硬化則 (kinematic hardening rule)

等方硬化則では、反転負荷におけるバウシニング効果を表現することができないが、これを可能にしたものに移動硬化則がある。これは後続降伏条件を次の式により表すものである。

$$f = F(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) - Y = 0 \quad (5)$$

移動硬化則は降伏曲面が塑性変形の進行中でもその形を変えず、応力空間を移動すると仮定したもので、式中の α は降伏曲面の中心の移動量を表す背応力である。後続降伏条件 f の具体的な形は、 $\alpha_{ij}=0$ つまり初期降伏曲面の形とともに α_{ij} が硬化に伴ってどのように決まるのかを規定して、初めて定められる。これまでにいくつかの規定式 (背応力の移行式: evolution equation of back stress) が提案されてきた。Melan は α_{ij} の 2 つの規定式

$$d\alpha_{ij} = cd\epsilon_{ij}^p \quad (c \text{ は定数}) \quad (6)$$

$$d\alpha_{ij} = d\sigma_{ij} \quad (7)$$

を提案している。式 (6) は線形塑性硬化に限定されるが、式 (7) は任意の非線形塑性硬化に対し適用される。式 (6) は後に Ishlinsky と Prager により発展され、今では単に Prager の硬化則と呼ばれている。式 (7) を後に Phillips と Lee は実験結果より

$$d\alpha_{ij} = \mu ds_{ij} \quad (8)$$

と発展させ、さらに Ellyin と Xia は

$$d\alpha_{ij} = \mu d\sigma_{ij} \quad (9)$$

として理論の展開を行った。なお式 (8) の ds_{ij} は偏差応力の増分であり、 μ は正のスカラーである。

(3) 複合硬化則 (combined hardening)

繰返し負荷を与えた実験値を模擬する場合、等方硬化則では式 (1) における流れ応力 R を累積塑性ひずみの関数と置いているため、繰返しに伴う加工硬化を大きく見積もりすぎる結果となる。一方、移動硬化則では、繰返し加工効果は表現できない。このようにいずれの硬化則においても、単独では実験値を表現することができない。そこで、等方硬化と移動硬化を組み合わせた複合硬化則が考えられ、式 (1) と式 (5) を考慮した次式で表される

$$f = F(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) - R(\xi_k) = 0 \quad (10)$$

しかし、この複合硬化則においても、繰返し負荷に対し、流れ応力 R をどのような負荷履歴パラメータの関数形で与えるべきか、依然として問題が残っている。このように、繰返し負荷における応力-ひずみ関係を確立する研究は、繰返し塑性 (cyclic plasticity) 問題と呼ばれ、とりわけ高応力低サイクル疲労が問題となる構造物の解析のためには重要である。

(4) Mroz の多面硬化則 (Mroz' s multi-surface hardening rule)

式 (6) で示された応力-ひずみ曲線で弾性域から塑性域への丸みのない遷移、つまり直線硬化の修正の別の方法として Mroz は式 (6) の c を一定とせず、多くの硬化率で表す多面硬化則を提案した。次の式で表される

$$d\alpha_{ij} = c(\varepsilon_{ij}^p)^p d\varepsilon_{ij}^p \quad (11)$$

まず、単軸応力-ひずみ曲線を一定の塑性係数を有する有限個の直線に分割する。変形開始時にすべての中心が応力原点にある相似形の有限個の降伏曲面を考える。変形と共に各降伏曲面は交差することなく、接触するだけである。Mroz の提案する多面硬化則では、各降伏曲面において、それぞれの硬化率を決める必要があり、多軸状態では煩雑となる。しかもこの硬化則には単軸ラチェットが生じず、多軸ラチェットを過大に見積もるという欠点もある。

(5) 二面硬化則 (two surface hardening rule)

多面硬化則を実際の構造解析に用いる場合、前述のように多軸応力-ひずみ経路での各降伏曲面の硬化率をすべて知っておく必要があり、煩雑となる。これ

を避けるため、最近二面硬化則がよく用いられている。二面硬化則では、降伏曲面を表す同心円のうち、いちばん内側の小さな円（降伏面）と外側の大きな円（限界降伏面）を用いる。限界降伏面は、応力空間における降伏面のあらゆる可能な動きの限界として定義される。幾何学的には両面は類似のものであり、はじめに両面の中心は原点にある。塑性変形が生ずると降伏面は限界降伏面と交差せずに接触するように動く。この二面硬化則は、煩雑な硬化則に比べ、容易に使用することができるが、Mroz の曲面移動則を採用しているため、多軸ラチェットを過大評価してしまうという欠点を持つ。他に Krieg のモデルがあるが、同様に種々の欠陥を有している。

(6) Armstrong-Frederick モデル

Armstrong と Frederick のモデルでは、 α_i の動的回復は単純に α_i に比例すると仮定され

$$\dot{\alpha}_i = \zeta_i \left[\left(\frac{2}{3} \right) r_i \dot{\epsilon}^p - \alpha_i \dot{p} \right] \quad (14)$$

$$\dot{p} = \left[\left(\frac{2}{3} \right) \dot{\epsilon}^p : \dot{\epsilon}^p \right]^{1/2} \quad (p \text{ は累積非弾性ひずみ})$$

と表される。このモデルは実験値をかなり正確に模擬することができるが、一方で単軸ラチェット、多軸ラチェットを共に過大評価するという短所がある。

(7) 臨界動的回復モデル（大野-王モデル Ohno-Wang）

前述した移動硬化則を用いて、実際の材料挙動をより高精度に表すため、背応力を複数の部分に分けて考えることが多い。この過程は最初に Chaboche らにより導入されたものであり、Chaboche らは背応力が3つの部分からなると仮定した。その後大野-王は、背応力がさらに多くの部分からなると仮定すると共に、各部分の進展に対して動的回復の臨界状態を設けた。すなわち背応力の第 i 番目の部分 α_i の動的回復項は、 α_i の大きさが臨界値 r_i に達した時にのみ生じるとし、次のように規定した。

$$\dot{\alpha}_i = \zeta_i \left[\frac{2}{3} r_i \dot{\epsilon}^p - H(f_i) \left\langle \dot{\epsilon}_i^p : \frac{\alpha_i}{r_i} \right\rangle \alpha_i \right] \quad (12)$$

$$f_i = \frac{3}{2} \alpha_i : \alpha_i - r_i^2$$

$H(f_i)$: Heaviside のステップ関数 $\langle \rangle$: Macauley 括弧

このモデルは、材料定数が応力-ひずみ曲線の多直線近似により系統的に決定されるという長所を有する。一方で応力-ひずみヒステリシスループが完全に閉じるため、単軸ラチェットが生じないという短所がある。そのため

$$H(f_i) \rightarrow \left(\frac{\bar{\alpha}_i}{r_i} \right)^m \quad (13)$$

とする補正が提案されている。また、前述した Armstrong-Frederick モデルとの重ね合わせモデルとして

$$\dot{\alpha}_i = \varsigma_i \left[\frac{2}{3} r_i \dot{\varepsilon}^p - \mu_i \alpha_i \dot{p} - H(f_i) \left\langle \dot{\varepsilon}_i^p : \frac{\alpha_i}{r_i} \right\rangle \alpha_i \right] \quad (14)$$

$$\dot{p} = \left[\left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}^p : \dot{\varepsilon}^p \right) \right]^{1/2} \quad (p \text{ は累積非弾性ひずみ})$$

とするモデルも提案されているが、Armstrong-Frederick モデルとの重ね合わせの度合いを決定する μ の設定に試行錯誤（実験値とのフィッティング）や経験を必要とすることなどから、実用には依然問題が残る。

(8) 電中研推奨構成則⁽²⁾

前述した臨界動的回復モデル（大野一王モデル）では、温度依存性や繰返し硬化・軟化による影響が考慮されていない。移動硬化の成分は、単軸応力下では、塑性ひずみと共に変化し、変化の割合の値は r_i で飽和する。従って r_i を通して、塑性変形特性の温度依存性や、繰返し硬化の影響を表すことができる。温度変動や繰返し硬化によって r_i の変化が起きる場合、その影響を考慮するための項を付加する必要がある。大野一王モデルをベースとし、以上のことを考慮に入れ、電中研では以下の移動硬化式を推奨している。

$$\dot{\alpha}_i = \varsigma_i \left[\frac{2}{3} r_i \dot{\varepsilon}^p - H(f_i) \left\langle \dot{\varepsilon}_i^p : \frac{\alpha_i}{r_i} \right\rangle \alpha_i \right] + \frac{\dot{r}_i}{r_i} \alpha_i \quad (15)$$

$$f_i = \frac{3}{2} \alpha_i : \alpha_i - r_i^2$$

2.原子炉容器液面近傍の解析方法

図1に示す原子炉容器液面近傍部を解析対象とし、汎用非線形構造解析システムFINAS for Windows version14.0^[3]を用いて有限要素解析を実施した。解析は始めに熱伝導解析を行い、その解析結果を応力解析における入力温度条件とした。応力解析は、弾性解析と、非弾性解析（弾塑性解析及び弾性クリープ解析）を行った。非弾性解析においては、種々の弾塑性構成則を用いてその違いを調査した。構成方程式の詳細は2.2で述べることとする。尚、解析は起動時のみを対象としたケースと、起動から停止までの一連の変化を数サイクル繰り返したケースを行った。それぞれのケースについて、種々の構成方程式を用いて解析を行い相互に比較することで、構成方程式の違いが計算結果に与える影響についての考察を行った。

2.1 形状と解析モデル

原子炉容器上端支持部から液面近傍部にかけて解析対象とした。前述の通り、原子炉容器は内部に高温ナトリウムの自由液面を有し、上端を低温のコンクリート建屋により支持されることから、液面近傍に大きな熱応力を生じる。原子炉容器と、液面近傍部の拡大図を図1に示す。同部位を対象とした有限要素解析を行うため、実用化戦略調査研究における設計条件^[4]をもとに解析モデルを作成した。解析モデルは図2に示すように容器内径9600mm、全長7500mm、板厚30mmの縦型円筒容器とする。

有限要素モデルを作成するにあたって、板厚方向には表面付近でメッシュ巾2mmの要素を、また軸方向には液面近傍部においてメッシュ長10mmの要素を使用した。これらのメッシュサイズは、メッシュの粗さが解へ及ぼす影響を調査した結果^[5]、必要十分なサイズと考えられる。図3に解析に用いたメッシュモデルを示す。モデルは実構造物の挙動を考慮し、上端部に軸方向のみ拘束を設け、下端部については自由端とした。拘束条件の概念図を図4に示す。また、表1にモデルを作成する際使用した要素の一覧を示す。

2.2 物性値

研究対象とする原子炉容器の材料は316FR鋼製である。解析に使用した物性値を表5に示す。

2.3 解析条件とそのモデル化

2.3.1 一次応力

一次応力として内圧 $1.47 \times 10^5 \text{Pa}$ (差圧) を容器内面に、自重 $1.77 \times 10^6 \text{kg}$ (吊下重量、コアキャッチャ含む) と容器下部に内圧が及ぼす分の荷重を、容器下端に一樣な圧力荷重として加えた。一次応力のみ負荷した場合の原子炉容器液面近傍部の応力解析結果を表 2 に示す。

2.3.2 熱過渡条件

(a) ナトリウム液面の移動

起動時のみを対象としたケースでは、温度条件として内部ナトリウム温度を 200°C から 550°C まで変化させて解析を行った。その際、ナトリウムの熱膨張及び圧損を考慮し、液温 200°C から 400°C の間に 880mm 、 400°C から 550°C の間に 350mm 、ナトリウム液位が上昇するものとした。起動時に加わる熱過渡条件を表 3 に示す。

起動から停止までの一連の変化を対象としたケースでは、厳しい熱過渡を考慮するため、通常起動、定常運転状態及び手動トリップの一連の事象を熱過渡条件として設定した。起動時にはナトリウムの熱膨張及び圧損を考慮し、液温 200°C から 400°C の間に 80mm 、 400°C から 550°C の間に 350mm ナトリウムの液位が液温に比例して上昇するものとした。

起動後の定常運転期間は、ナトリウム液温 550°C 一定のまま 1000 時間保持して模擬した。

(b) 温度成層界面の発生及び上昇

停止時には温度成層界面の発生を模擬した。スクラム開始後 10 分までに H/L 吸い込み口に温度成層界面が発生し、ナトリウム液面が 200mm 低下する。温度成層界面は一定速度で上昇し、 2 時間 10 分後温度成層界面がディッププレートに達するまでにナトリウム液面はさらに 120mm 低下する。温度成層界面がディッププレートに達した後、ディッププレート上部のナトリウム領域は熱伝導により冷却され、トリップ後約 14 時間でナトリウム温度が 400°C 一定となる。その後ナトリウム温度は 200°C まで降下し、その温度変化に比例して液面が 880mm 低下する。温度成層界面の影響は、モデル内壁に貼り付けた熱伝達 3 節点軸対称要素 (FCAX3) への流体温度増分 (convection データ) として模擬した。また、温度成層界面がディッププレートに達した後、熱伝導によるナトリウムの温度変動を模擬するため、ナトリウムのみを対象とした別モデルを作成し、別途熱伝導解析を行った。そこから得られた温度分布データを、同じく熱伝達 3 節点軸対称要素 (FCAX3) への温度増分として入力することで、時刻の経過に伴うナトリウムの熱伝導を模擬した。

手動トリップ時の熱過渡を模式的に表したものを図 5 に示す。解析では起動一定常運転－手動トリップの組み合わせを 1 サイクルとし、連続 10 サイクルの繰返し解析を行った。一連の事象を時間変化とともにまとめたものを表 4 に示す。

2.3.3 境界条件

解析にあたって、境界条件を以下のように設定した。

(a) 拘束条件

原子炉容器上端を固定とする。ただし半径方向には自由度を持たせる。また原子炉容器下端を自由端とする。一般に円筒の長さが $2.5\sqrt{rt}$ 以上である場合、端部の影響は考慮しなくてよいとされる^[6]。今回の解析では解析モデルが軸方向に十分長いと見做すため、上端部の拘束が液面近傍の応力値に大きな影響を与えることはないと考えられる。

(b) 熱的境界条件

解析に用いた熱的境界条件を図 7 に示す。詳細は以下のとおり^[6]。

- ・ 原子炉容器上端を 100℃一定とする。
- ・ 原子炉容器外面の上端から 100mm の範囲を 100℃の外部ガスとの熱伝達境界とする。
- ・ 壁面と外部ガスとの熱伝達係数は文献値^[4]を参照し $\alpha = 5.82\text{W/m}^2\text{K}$ とする。
- ・ 原子炉容器内面の上端から 1300mm までの範囲は熱遮蔽板が設置されており、熱伝達率 $\alpha = 0.64\text{W/m}^2\text{K}$ で、カバーガスと熱伝達するものとする。このときカバーガス温度は、ナトリウム温度に追従して変化することとし、以下のように設定した。

$$T_{\text{gas}} = 0.89T_{\text{Na}} - 19(\text{℃})$$

- ・ 原子炉容器内側の熱遮蔽板下端からナトリウム液面までの範囲は、熱伝達率 $\alpha = 3.49\text{W/m}^2\text{K}$ でカバーガスと熱伝達するものとする。(カバーガス温度は上式と同じ)

原子炉容器内面液面以下は、炉内ナトリウムとの熱伝達境界とする。炉壁にかかる熱負荷を低減させる目的で、炉壁にはサーマルライナをもうけることとし、その熱抵抗は文献値を参照し^[4]、熱伝達率中に考慮することで模擬した。サーマルライナを介したナトリウムと炉壁との熱伝達係数を $\alpha = 930\text{W/m}^2\text{K}$ と設定した。なお原子炉容器外面 1000mm 以下及び上端、下端部は断熱とした。炉容器外面 1000mm以下の部分は、実際には外部ガスとの熱交換があるものと

思われるが、外部ガスの容積が小さいため、ガス温度はナトリウム液温にほぼ追従すると考えられることから、断熱状態とみなすことができる。

2.4 構成方程式

種々の負荷が繰り返しかかる構造物の応力解析のために、適正な繰返し塑性構成式が必要である。以下にひずみ制御と応力制御の各条件により得られる代表的な応力-ひずみ特性をあげる。

(1) ひずみ制御 (strain control)

ひずみを一定の ε_{\max} と ε_{\min} の間で、つまり一定ひずみ振幅 $\Delta\varepsilon$ ($=\varepsilon_{\max}-\varepsilon_{\min}$) で繰返し負荷を行う。 $|\varepsilon_{\max}|=|\varepsilon_{\min}|$ の場合、一般に材料の機械的性質により二つの典型的挙動が得られる。ひずみサイクルを受けて、初期の応力振幅が繰返しサイクル数の増すごとに増加し、最終的に安定する場合を、繰返し硬化 (cyclic hardening)、逆に初期の応力振幅がサイクル数とともに減少する場合を、繰返し軟化 (cyclic softening) と呼ぶ。

(2) 応力制御 (stress control)

応力一定の σ_{\max} と σ_{\min} の間で、つまり一定応力振幅 $\Delta\sigma$ ($=\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$) で繰返し負荷を行う。 $|\sigma_{\max}|=|\sigma_{\min}|$ の場合、一般にサイクル数の増加とともにひずみ振幅の減少する繰返し安定硬化と、サイクル数の増加とともにひずみ振幅も増加する繰返し安定軟化と呼ばれる挙動があげられる。これらの安定化現象とは異なり、 $|\sigma_{\max}|>|\sigma_{\min}|$ の場合、各応力サイクル毎にほぼ一定の塑性ひずみが蓄積される (strain accumulation)、構造物としては危険な現象が生じる。この現象は時間非依存であるが、時間依存のクリープと類似しているため、繰返しクリープ (cyclic creep)、または単軸ラチェット (uniaxial ratchetting) と呼ばれる。これは例えば、せん断負荷を受けた後に繰返し引張圧縮負荷サイクルを受ける場合、サイクル数の増加とともにせん断ひずみが著しく増加する現象で、機械的ラチェット (mechanical ratchetting) とも呼ばれる。

簡単な繰返し負荷を受ける場合の応力-ひずみ特性はこれまで提案された繰返し塑性構成式で、例えば繰返し安定硬化や、軟化はよく記述できるが、ラチェット現象を正確に記述できる構成式は今のところない。

(a) 弾塑性構成方程式

解析に使用する弾塑性構成方程式は、その影響を調べるために以下のようなパラメータとした。

(1) 起動時を対象とした解析 (単調負荷)

Ramberg-Osgood 型

$$\varepsilon = \sigma/E + A\sigma^n \quad (E=154000\text{N/mm}^2, A=1.0 \times 10^{-8}, n=3, 5, 7)$$

Ludwik 型

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left\{ \frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right\}^n \quad (\sigma > \sigma_p, \sigma = 7.5, n=3,5,7)$$

弾完全塑性体

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (E=154000\text{N/mm}^2, \text{ 降伏点以降はひずみのみ増加})$$

この3つに加え、2種類の想定最大ひずみ範囲（0.5%、1.0%）に対する2直線応力ひずみ関係式を使用した。硬化則には等方硬化則を使用した。

(2) 起動—一定常運転—手動トリップを対象とした解析（繰返し負荷）

解析には弾完全塑性体および、バイリニア（応力—ひずみ関係を2直線近似した移動硬化モデル）+ α リセットを使用した。バイリニア+ α リセットモデルは、加工硬化を考慮し応力ひずみ関係を2直線で近似した移動硬化則において、繰返しによる背応力をサイクル毎にリセットする。これにより、保守性を担保しつつ、他の簡易構成則と比較して合理的な評価が可能であると考えられる。応力—ひずみ関係は単調応力—ひずみ関係の2直線近似（以下モニトニックカーブ）と繰返し応力—ひずみ関係の2直線近似（以下サイクリックカーブ）の2種類を使用する。応力ひずみ関係を図6に示す。また、非弾性解析を行う際の硬化則には移動硬化則を用いた。

(b) クリープひずみ式

起動時を対象とした解析では、応力の最大となるステップにて保持し、起動—一定常運転—手動トリップを対象とした解析では定常運転時に保持し、液面近傍部の応力緩和時のひずみ集中挙動を調べた。クリープひずみ式の影響を調べるため、以下の式でそれぞれ近似して非弾性有限要素解析を行った。

Norton 則

$$\dot{\varepsilon}_c = B\sigma^m \quad (B=5.86 \times 10^{-15}, m=3,5,7)$$

Blackburn 型

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

3.解析結果

弾性解析における炉容器外面の応力強さ範囲 S_n の分布を図 8 に示す。グラフより定常運転時のナトリウム液面位置 (5800mm) 以下 50mm の位置において、相当応力値が最大値を示していることがわかる。この結果を考慮し、以下弾性および弾塑性解析結果における応力およびひずみの評価点は、定常運転時のナトリウム液面以下 50 mm の炉壁外面とする。

起動時の単調負荷に対する各弾塑性解析結果を、成分ごとに応力-ひずみ線図上に示した。図 9～図 11 に各ケースを比較した結果を示す。さらに、図 12 に *mises* 相当応力、相当ひずみにより各ケースを比較した結果を示す。図 13 に種々のクリープひずみ式を用いて、100万時間の応力緩和クリープ解析を行った結果を示す。グラフは、*mises* 相当応力、相当ひずみにより整理し、各ケースから得られた結果をオーバープロットして比較した。各ケースにおいて用いた非弾性構成方程式を表 6 に示す。

起動-定常運転-手動トリップの繰返し負荷を与えた場合の解析結果を図 14～図 37 に示す。グラフは各非弾性構成方程式を用いた解析ケースにおける、各成分の応力とひずみの関係を表す。

4. 考察

4.1 無次元化による解の比較

非弾性解析の結果は構成式に依存するが、構造には構成式や荷重に対して鈍感な応力ひずみ再配分特性が存在することが指摘されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。またその特性は無次元化することで一本の応力-ひずみ線図上の応力緩和曲線で記述できることがわかっている。単調負荷を加えた解析結果に関しては、非弾性解析より得られたそれぞれの値を弾性解析より得られたそれぞれのステップの値で割ることで無次元化を行った。応力緩和曲線は、保持応力（弾性解析の対応する解析ステップでの発生応力）とその時のひずみ値にて、各ステップの応力、ひずみの値を割ることで無次元化した。繰返し負荷による解析結果に関しては、弾性解析における最大応力範囲と、その時点のひずみの範囲（最大値と最小値の差）で、非弾性解析における1サイクル毎の応力範囲および最大ひずみ範囲を割ることで無次元化を行った。それぞれの方法で無次元化した結果をオーバープロットして図 38、図 39 に示す。

4.2 解析結果に関する検討

図 12 に示されるように起動時を対象とした解析結果によると、非弾性解析の解は弾塑性構成方程式に依存することがわかる。同じ Ramberg-Osgood 型の構成方程式を用いた解析でも、乗数が 3,5,7 と変化するにつれ解が変化する。乗数が増加するにつれ、相当ひずみが増加し応力値が低くなる。この挙動は Ludwik 型に関しても同様である。

4.2.1 単調負荷に対する解析結果の傾向

ここで注目すべきことは、弾塑性解析における解の分布に、弾性クリープ解析から得られた応力緩和曲線をオーバープロットした結果である（図 40）。弾塑性解析の解に関しては、負荷条件が等しいにもかかわらず、構成方程式に依存しそれぞれ様々な挙動を示しているように見える。これに応力緩和曲線をオーバープロットすると、弾塑性解析における解の最終点が概ね弾性クリープ解析結果から得られた応力緩和曲線上に乗っていることがわかる。このことは、原子炉容器液面近傍部において、弾塑性構成方程式に依存しない応力-ひずみ再配分特性が存在し、弾性クリープ解析から得られる応力緩和曲線を算出することで、構成方程式に拠らない構造物特有の非線形挙動を予測することができるという知見を裏付けるものである⁽⁸⁾。

4.2.2 繰返し負荷に対する解析結果の傾向

単調付加に対して見られた傾向が、繰返し負荷を対象とした解析においても存

在するかどうかについて考察を行った。繰返し負荷を対象とした解析では、それぞれ使用した構成方程式により得られた結果を、応力成分毎に比較した。各成分に共通して見られる傾向として、モニトニックカーブを使った解析結果において、ひずみが進行するラチェット現象が顕著に表れていることがわかる。サイクル数が増えるに従い、ひずみ範囲が増加し応力範囲が減少する傾向にあるため、無次元化して応力緩和曲線と重ねた時、他の構成式に比べ、分布が右下に移動する（図 38、39）。

4.2.3 ラチェットひずみについて

繰返し負荷を加えると、応力緩和曲線から右より、即ち単調付加と比較してひずみが増加する傾向に解が分布する。原因を調べるため、モニトニックカーブを用いて繰返し負荷を加えた解析結果について相当応力、相当ひずみを算出し、弾性クリープ解析より得られた応力緩和曲線にオーバープロットした。また、それぞれの曲線が交わる点において、非弾性ひずみの分布を調べた。さらに、繰返し負荷を与えた解析結果の、サイクル毎で相当ひずみ値が最大となる点の非弾性相当ひずみの分布を調べた。図 41 に相当ひずみ分布の評価点を図示する。

図 42 に相当応力-ひずみ曲線とクリープ解析から得られた応力緩和曲線の交点における相当非弾性ひずみ分布を示す。図 42 からわかるように、それぞれの非弾性ひずみ分布を比較すると、繰返し非弾性解析から得られた相当塑性ひずみ分布と、弾性クリープ解析から得られた相当クリープひずみ分布は、概ね一致することがわかる。

図 43～図 47 に、各サイクルの最大相当ひずみ発生点における非弾性ひずみ分布を示す。各図の比較より、繰返し数が増すにつれ、相当塑性ひずみ分布が変化していく様子がわかる。これは繰返し負荷を与えることにより非弾性ひずみが進行するラチェット現象であると考えられる。これらのことより、繰返し負荷によりラチェット現象が生じるようなケースを対象とする場合、ひずみ分布の変化より応力-ひずみ再配分特性が変化することが明らかになった。

以上考察をまとめると

- ・弾塑性解析の解は構成方程式に依存する。
- ・単調負荷が加えられた場合の解の最終点は、構成方程式に拠らず一本の応力緩和曲線上に存在する傾向がある。
- ・弾塑性解析結果と、弾性クリープ解析結果の応力、ひずみの一致する点では、非弾性ひずみの分布が概ね一致する。
- ・繰返し負荷が与えられた場合、サイクリックカーブに比べモニトニックカーブを用いるとラチェットひずみが大きめに評価される。

- ・ 繰返し負荷条件で得られた特性は、応力緩和曲線から外れる。
- ・ 上記理由として、ラチェットひずみにより非線形ひずみの分布が変化することがあげられる。

5.謝辞

本研究の遂行にあたり、大洗工学センター要素技術開発部構造信頼性研究グループ森下正樹氏、笠原直人氏はじめ、同グループ各位から、また有限要素解析の実施に関しては、常陽産業株式会社の高正英樹氏に多大なご助言を頂き、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 材料力学ハンドブック〈基礎編〉、日本機械学会、1999年2月
- [2] 「平成12年度発電用新型炉技術確証試験（高速増殖炉技術確証試験）調査報告書 高温構造健全性評価指針（案）」、電力中央研究所、平成13年
- [3] 「汎用非線形構造解析システムF I N A S使用説明書」、PNC TN9520 95-014、1995年7月
- [4] 「高温構造設計高度化研究 平成12年度共同研究報告書」、JNC TY9400 2001-026、2001年1月
- [5] 安藤昌教、「原子炉容器液面近傍熱応力に及ぼす設計因子の感度解析（研究報告）」、JNC TN9400 2001-088、2001年7月
- [6] 古橋一郎、「大型高速増殖炉要素技術設計研究（Ⅱ）簡易熱応力評価線図（不連続熱応力の簡易解析）」、PNC TN9410 87-158、1987年11月
- [7] N.Kasahara、Strain concentration at structural discontinuities and its prediction based on characteristics、JSME、JSME Int.J.Series A Vol.44,No.3、2001年
- [8] N.Kasahara、Creep-Fatigue life evaluation based on stress redistribution locus method、JPVRC Symposium 2002.、2002年

表 1 有限要素モデル作成要素

有限要素モデル作成に用いた要素	
熱伝導解析	熱伝導8節点四辺形軸対称要素(HQAX8)
	熱伝達3節点軸対称要素(FCAX3)
応力解析	8節点四辺形軸対称要素(QAX8)

表 2 一次荷重により生じる応力

	mises	r	z	th
内圧1.47E5Pa	20.31	0.01	11.86	23.45
自重(コアキャッチャー有)	19.11	0.00	19.11	0.00
合計(コアキャッチャー有)	28.01	0.01	31.01	23.45
合計(コアキャッチャー無)	27.84	0.01	30.76	23.45
				(MPa)

表 3 熱過渡 (起動時)

運転状態	時間	現象	ナトリウム液温	ナトリウム液面変動	温度成層界面
起動	0~48000 秒	ナトリウム昇温	200°Cから 400°Cへ昇温	880mm 上昇	-
	48000~84000 秒	ナトリウム昇温	400°Cから 550°Cへ昇温	350mm 上昇	-

表 4 熱過渡（起動一定常運転—手動トリップ）

運転状態	時間	現象	ナトリウム液温	ナトリウム液面変動	温度成層界面
起動	0～48000 秒	ナトリウム昇温	200°Cから 400°Cへ昇温	880mm 上昇	-
	48000～84000 秒	ナトリウム昇温	400°Cから 550°Cへ昇温	350mm 上昇	-
定常運転	84000～3684000 秒	液温一定	550°C一定	-	-
手動トリップ	3684000～3684600 秒	温度成層界面発生	温度成層界面以上 550°C一定	200mm低下	H/L吸い込み口に温度 成層界面発生
	3684600～3691800 秒	温度成層界面上昇	温度成層界面以上 550°C一定	120mm低下	ディッププレートに温度 成層界面が到達
	3691800～373440 秒	温度成層界面以上 ナトリウム熱伝導	熱伝導により400°C一 定	30mm低下	-
	373440～3763200 秒	ナトリウム降温	400°Cから200°Cへ降 温	880mm低下	-

表 5 316FR 物性値

温度 (°C)	ヤング係数 (N/mm**2)	ポアソン 比	瞬時熱膨張係数 (10E-6 mm/mm/°C)	密度(×E+3 kg/m**3)	熱伝導率(×E-6 kcal/mm・s・°C)	比熱 (kcal/kg・°C)
20	1.54E+05	0.3	15.15	7.97	3.5556	0.114
50	1.54E+05	0.3	15.65	7.97	3.6389	0.117
75	1.54E+05	0.3	16.07	7.97	3.7500	0.118
100	1.54E+05	0.3	16.48	7.97	3.8611	0.120
125	1.54E+05	0.3	16.86	7.97	3.9722	0.122
150	1.54E+05	0.3	17.22	7.97	4.0556	0.123
175	1.54E+05	0.3	17.55	7.97	4.1667	0.125
200	1.54E+05	0.3	17.85	7.97	4.2778	0.127
225	1.54E+05	0.3	18.12	7.97	4.3611	0.127
250	1.54E+05	0.3	18.36	7.97	4.4722	0.128
275	1.54E+05	0.3	18.58	7.97	4.5556	0.129
300	1.54E+05	0.3	18.79	7.97	4.6111	0.130
325	1.54E+05	0.3	18.99	7.97	4.7222	0.130
350	1.54E+05	0.3	19.19	7.97	4.8056	0.132
375	1.54E+05	0.3	19.39	7.97	4.8889	0.133
400	1.54E+05	0.3	19.57	7.97	4.9722	0.133
425	1.54E+05	0.3	19.75	7.97	5.0278	0.133
450	1.54E+05	0.3	19.93	7.97	5.1389	0.134
475	1.54E+05	0.3	20.11	7.97	5.2222	0.136
500	1.54E+05	0.3	20.28	7.97	5.3056	0.136
525	1.54E+05	0.3	20.45	7.97	5.3889	0.137
550	1.54E+05	0.3	20.60	7.97	5.5000	0.137
575	1.54E+05	0.3	20.74	7.97	5.5556	0.138
600	1.54E+05	0.3	20.87	7.97	5.6389	0.138

表 6 図中で使用した記号

使用した構成式およびクリープひずみ式	図中の表記
弾性解析	te
Ramberg-Osgood型(n=3)	ro3
Ramberg-Osgood型(n=5)	ro5
Ramberg-Osgood型(n=7)	ro7
Ludwik型(n=3)	ldw3
Ludwik型(n=5)	ldw5
Ludwik型(n=7)	ldw7
2直線近似(想定ひずみ範囲0.5%)	bl5
2直線近似(想定ひずみ範囲1.0%)	bl10
弾完全塑性	pp
Norton則(n=3)	norton n=3
Norton則(n=5)	norton n=5
Norton則(n=7)	norton n=7
Blackburn型	ecbb
モニツクカーブ	mono
サイクリックカーブ	cyclic

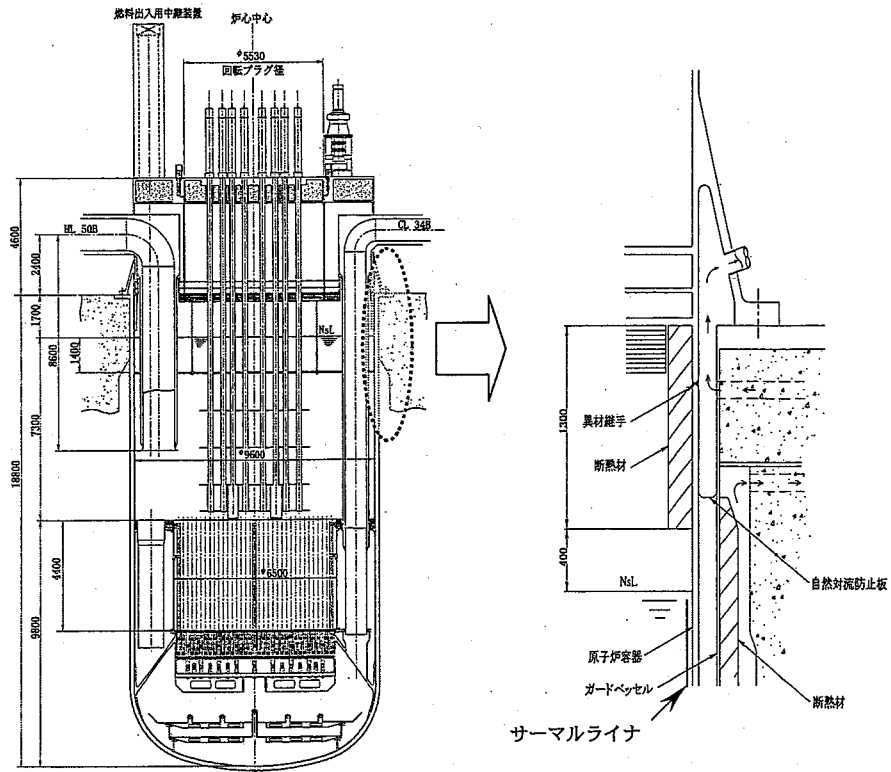


図 1 原子炉容器及び液面近傍拡大図

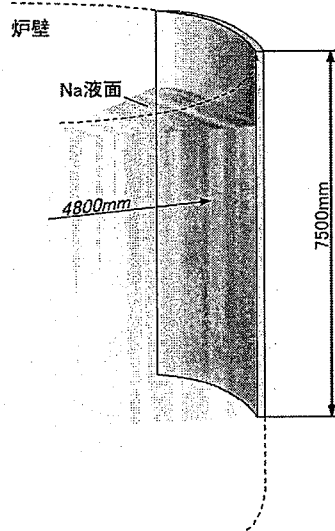
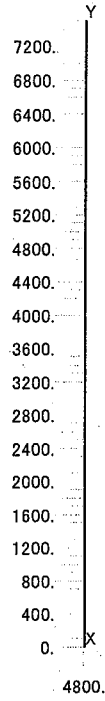
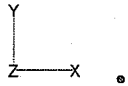


図 2 解析モデル

V1



メッシュ全体

V1



液面付近拡大図

図3 解析に用いたメッシュ

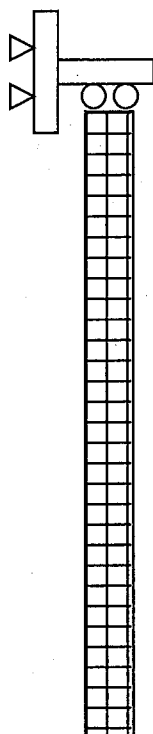
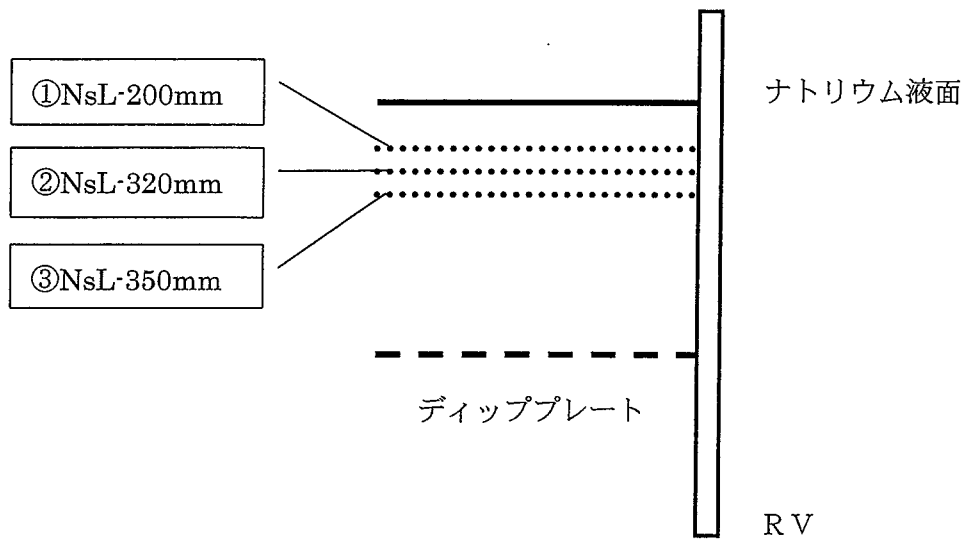


图 4 拘束条件概念图



- ① H/L 吸込口に温度成層界面が発生した時のナトリウム液面レベル (スクラム開始後 600 秒)
- ② ディッププレートに温度成層界面が到達した時のナトリウム液面レベル (①から 2 時間)
- ③ ナトリウム温度が 400℃ 一様になったときのナトリウム液面レベル

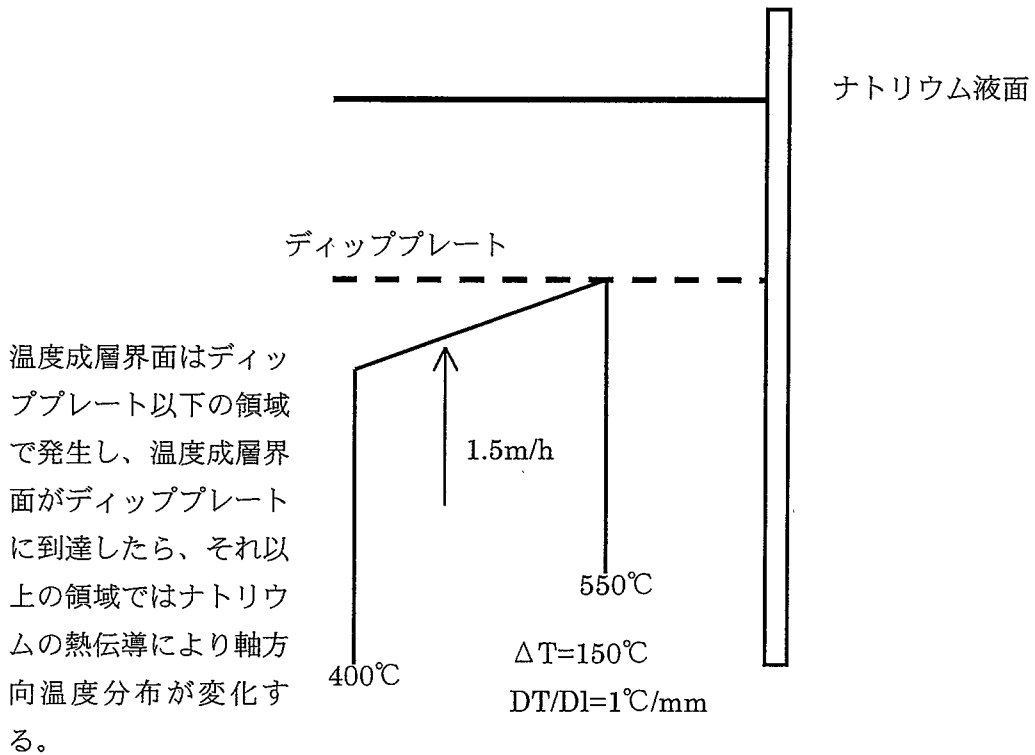


図 5 手動トリップ時熱過渡条件

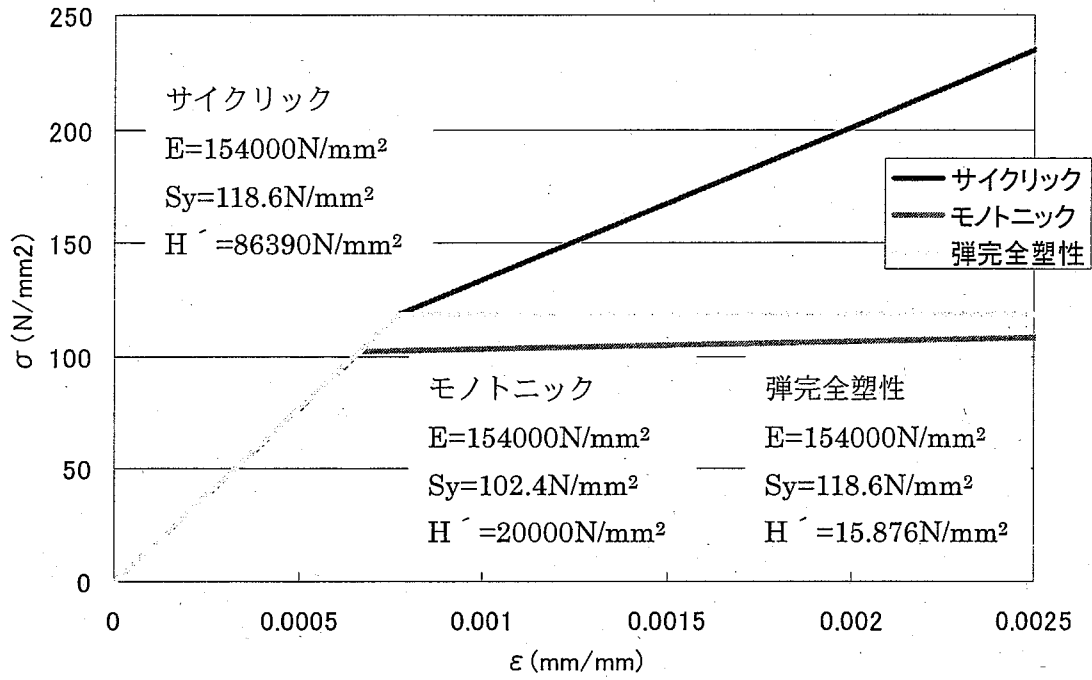


図6 構成方程式 (二直線近似)

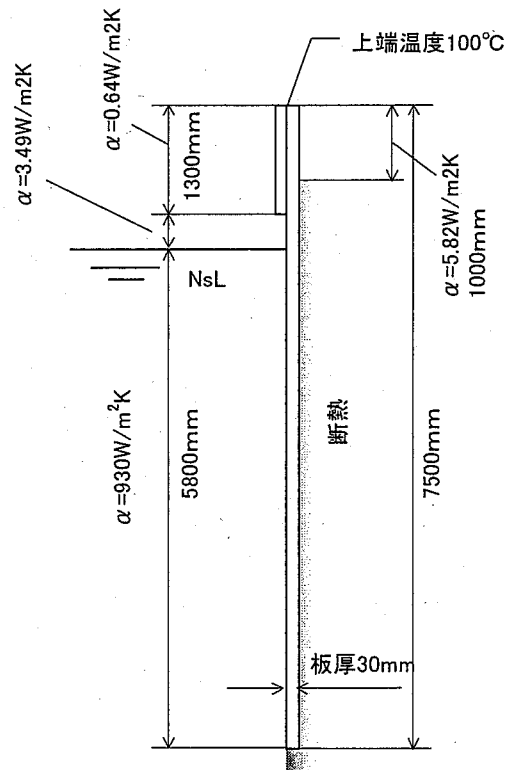


図7 熱的境界条件

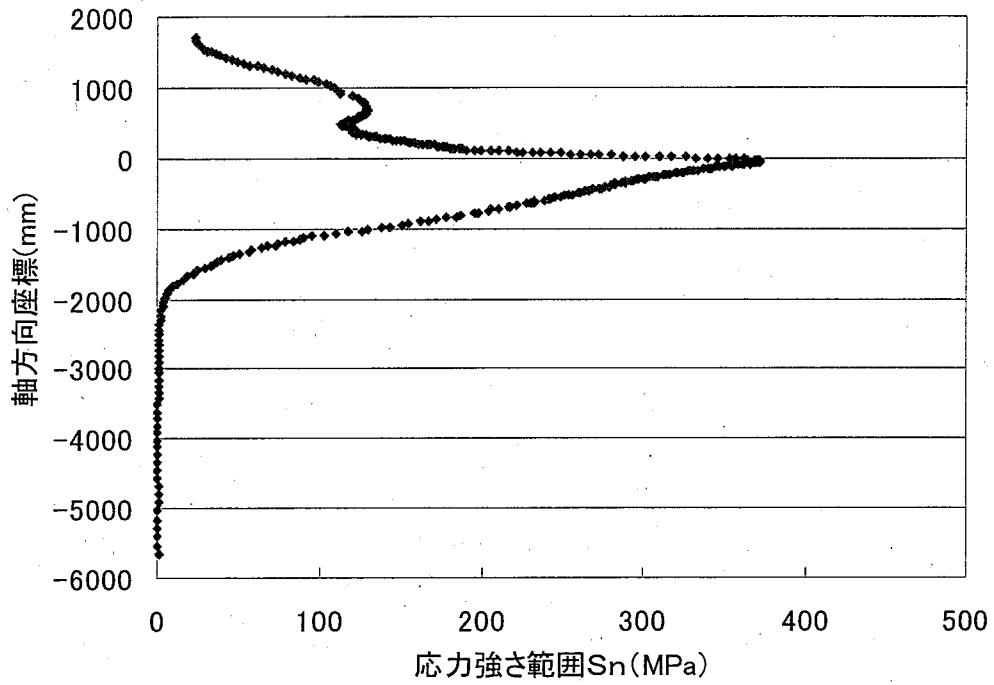


図 8 弾性解析から得られた軸方向相当応力分布

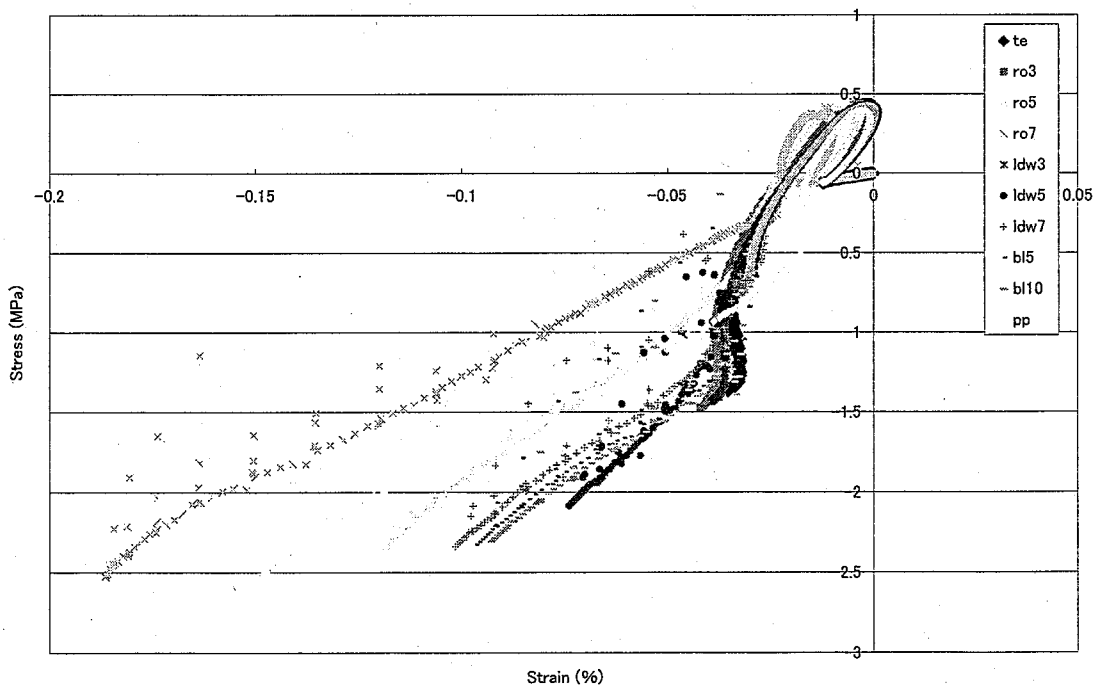


図 9 応力-ひずみ関係 (半径方向)

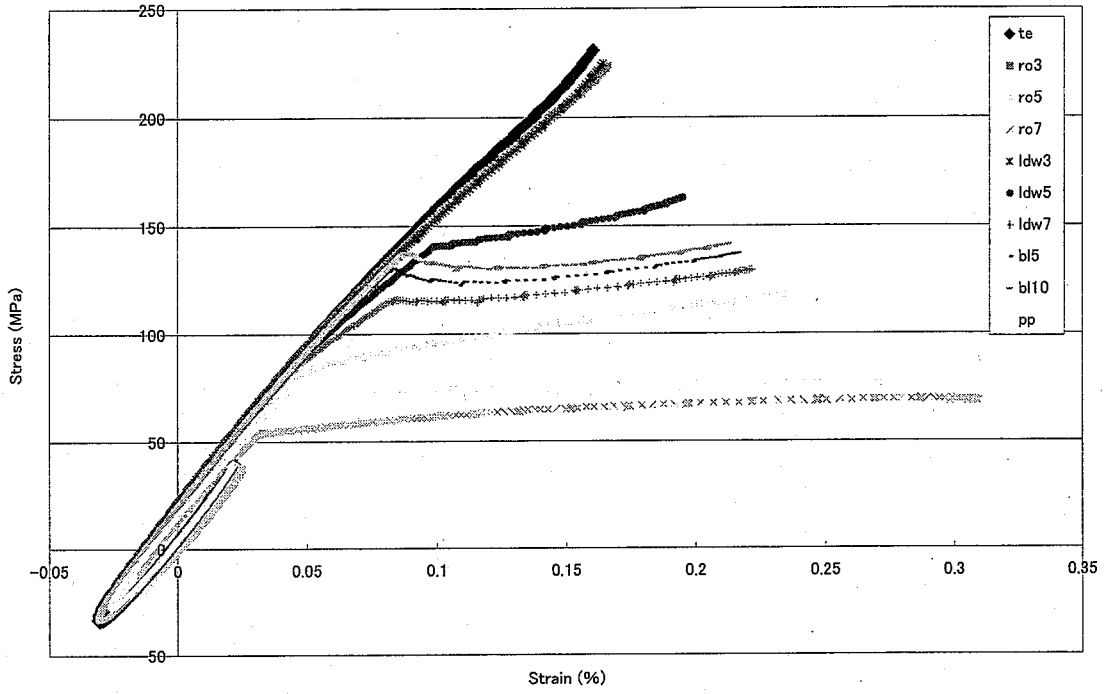


図 10 応力-ひずみ関係 (軸方向)

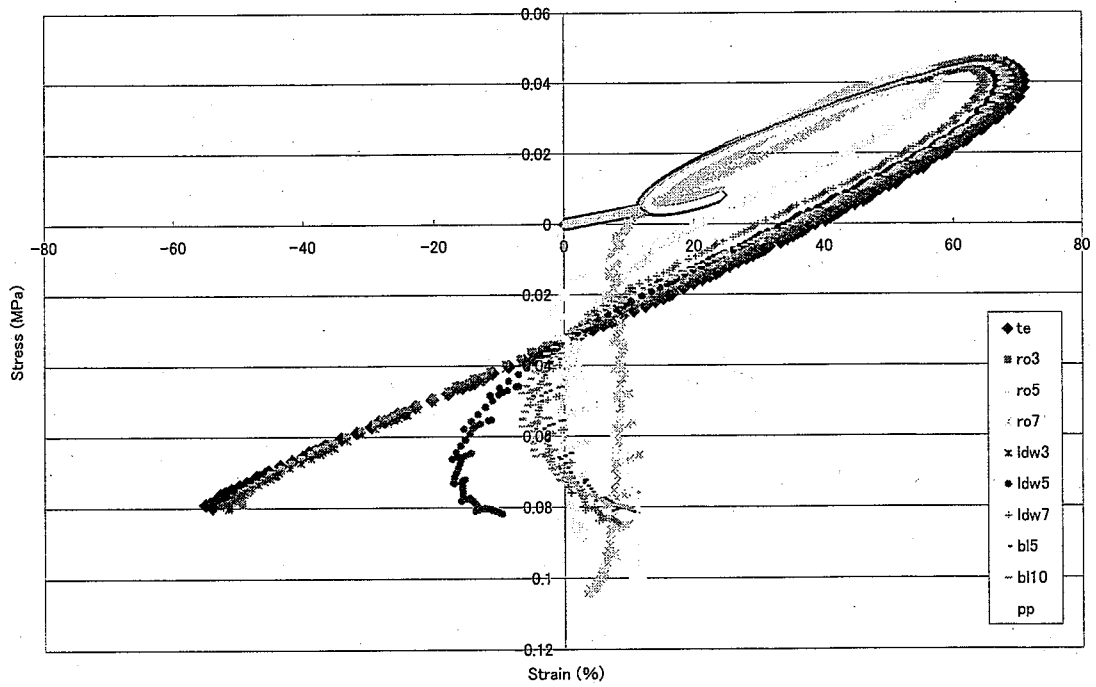


図 11 応力-ひずみ関係 (周方向)

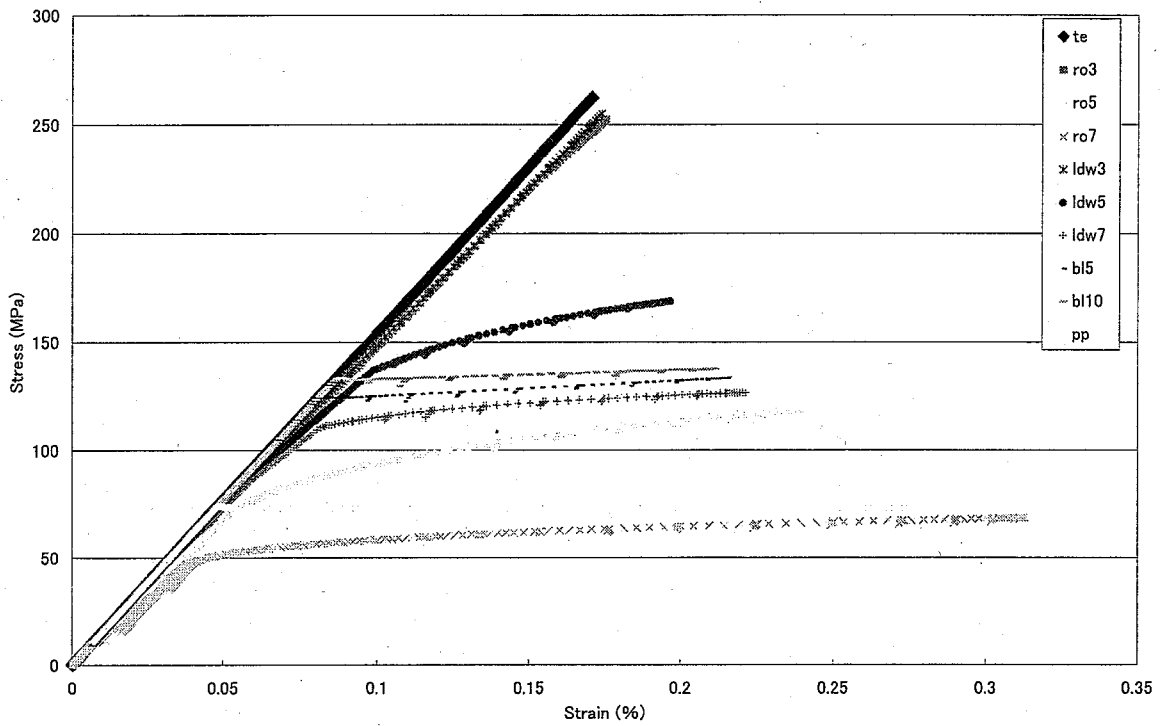


図 12 単調負荷解析から得られた応力-ひずみ関係 (mises 相当応力-相当ひずみ)

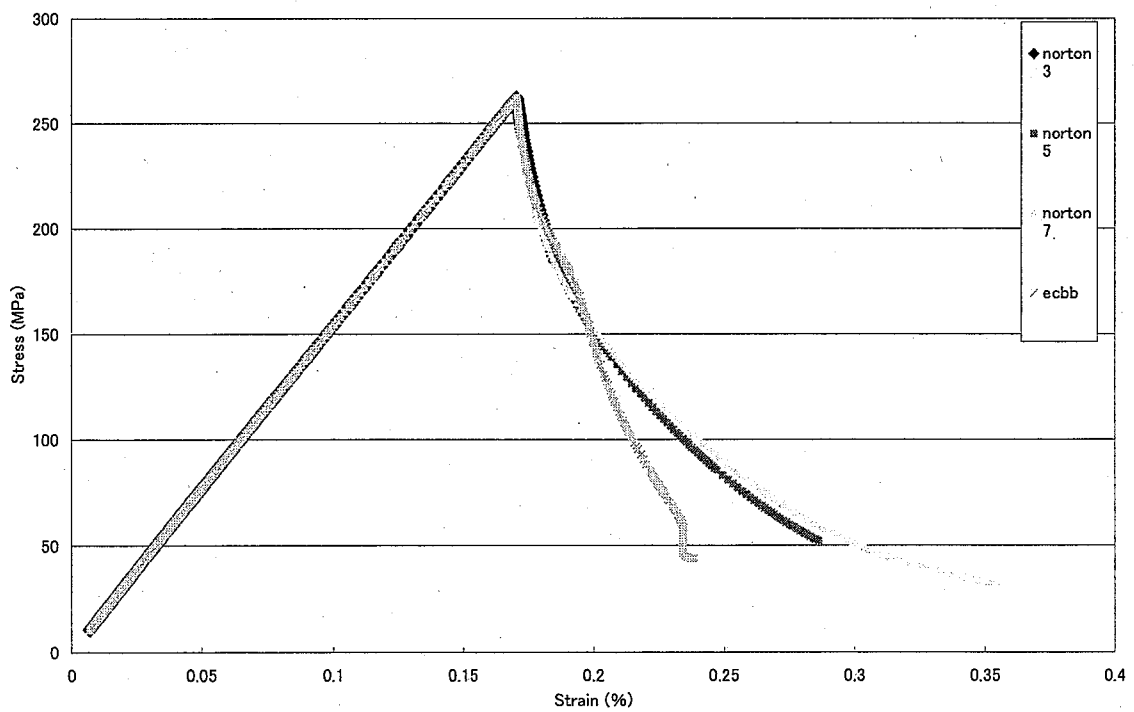


図 13 クリープ解析結果 (mises 相当応力-相当ひずみ)

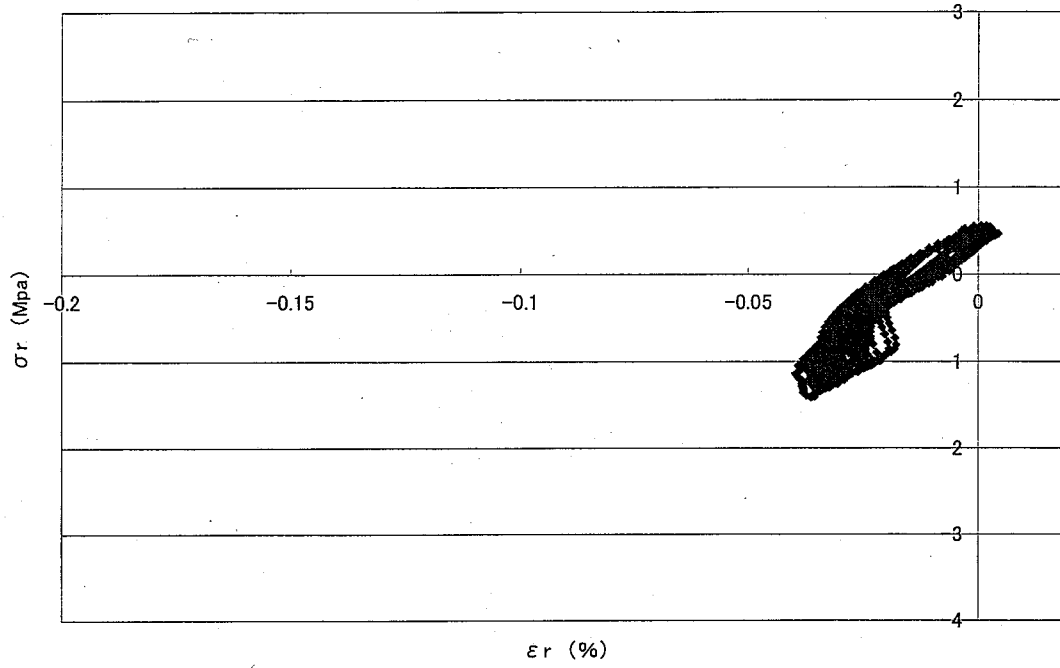


図 14 弾性解析 径方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

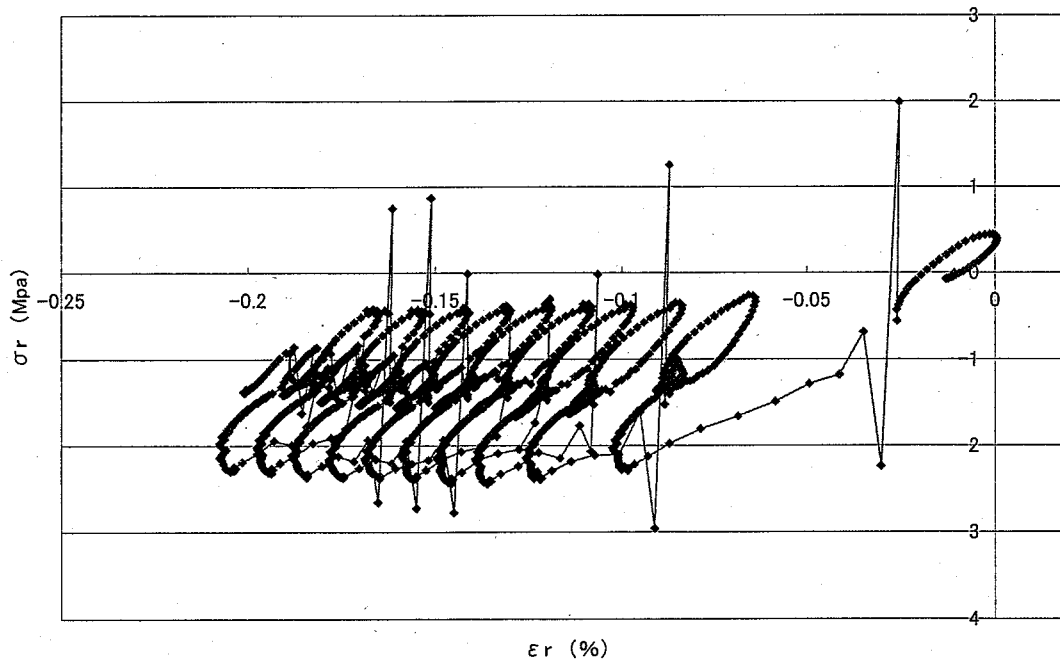


図 15 弾塑性解析モニタック 径方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

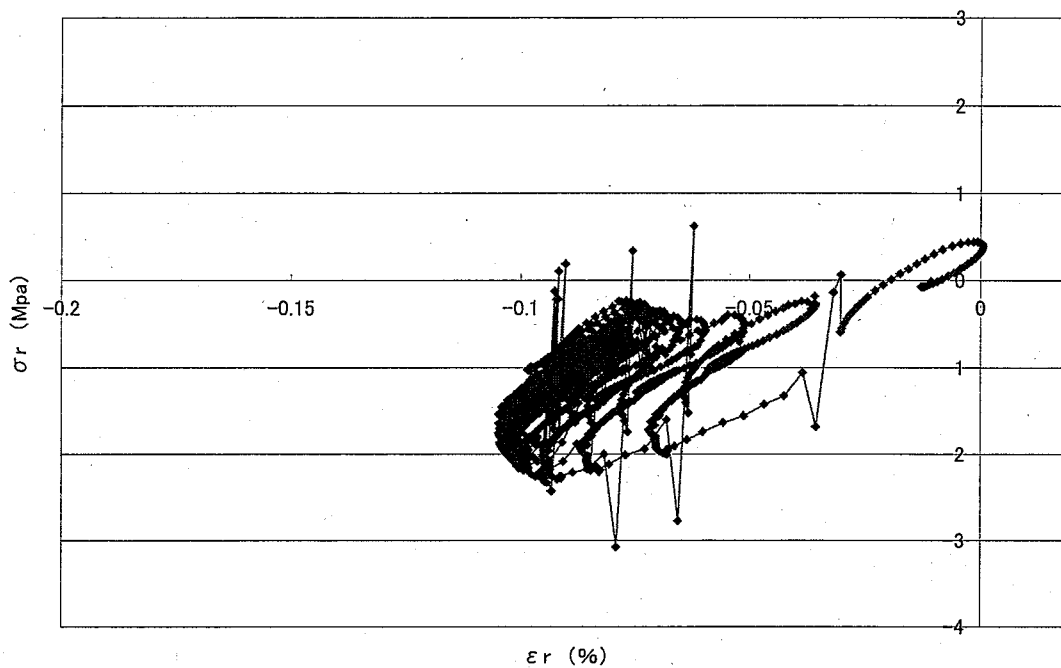


図 16 弾塑性解析サイクリック 径方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

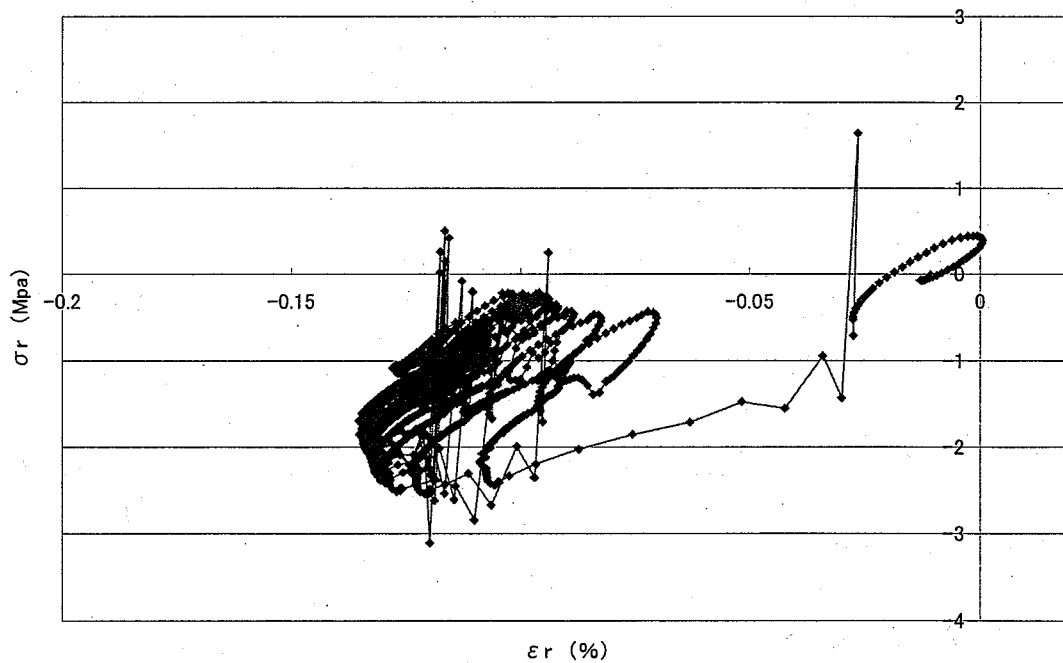


図 17 弾塑性解析弾完全塑性 径方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

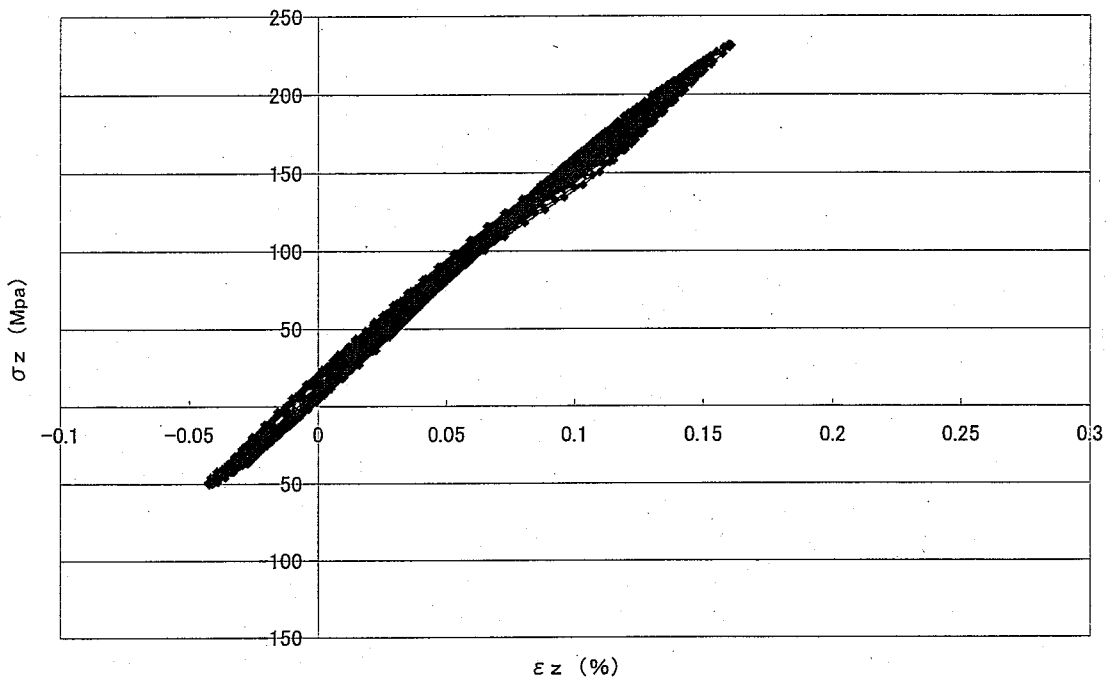


図 18 弾性解析 軸方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

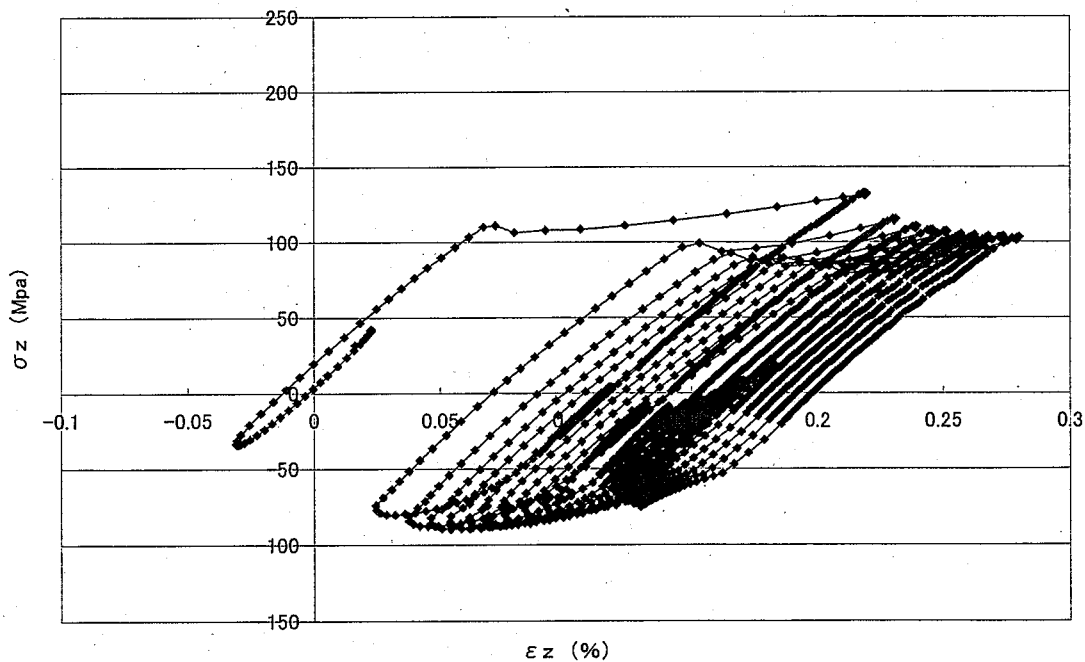


図 19 弾塑性解析モニトニック 軸方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

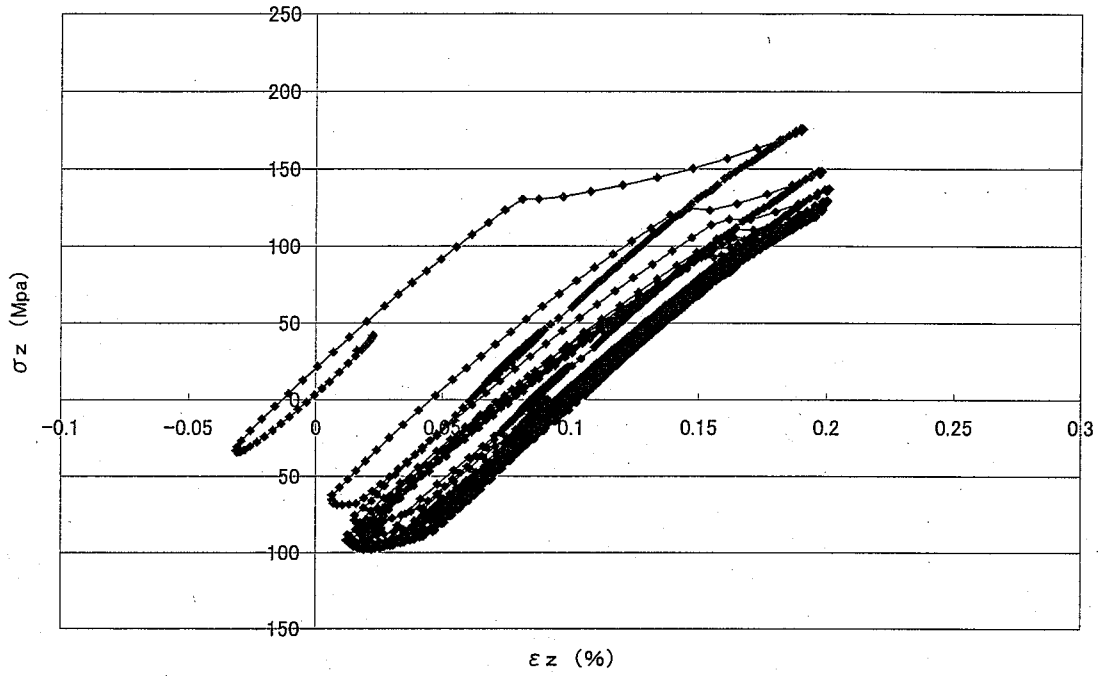


図 20 弾塑性解析サイクリック 軸方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

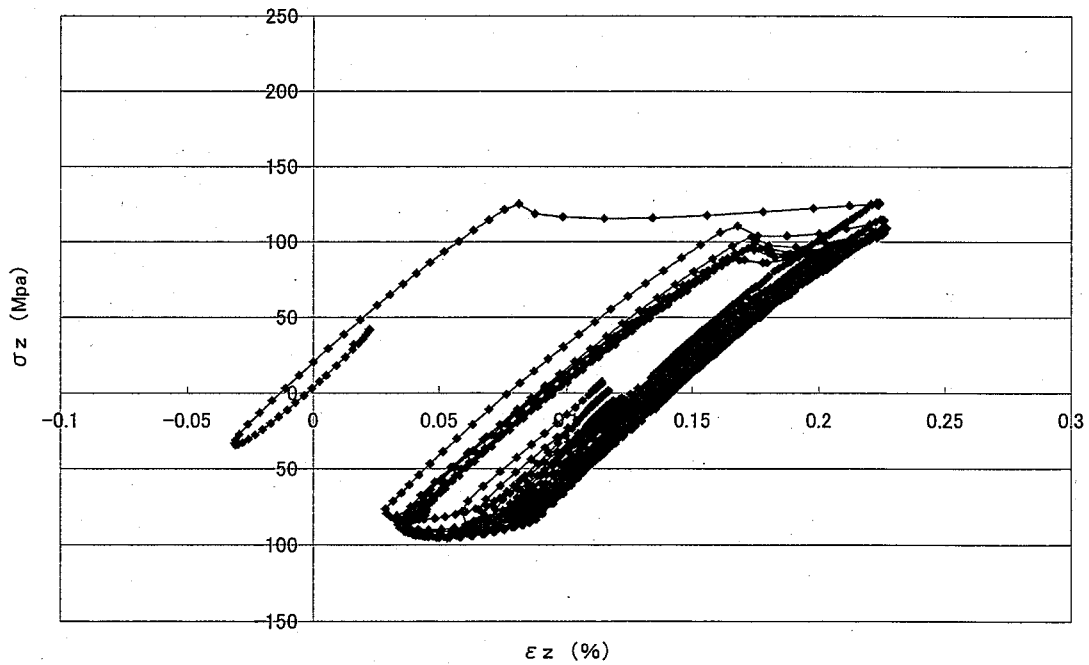


図 21 弾塑性解析弾完全塑性 軸方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

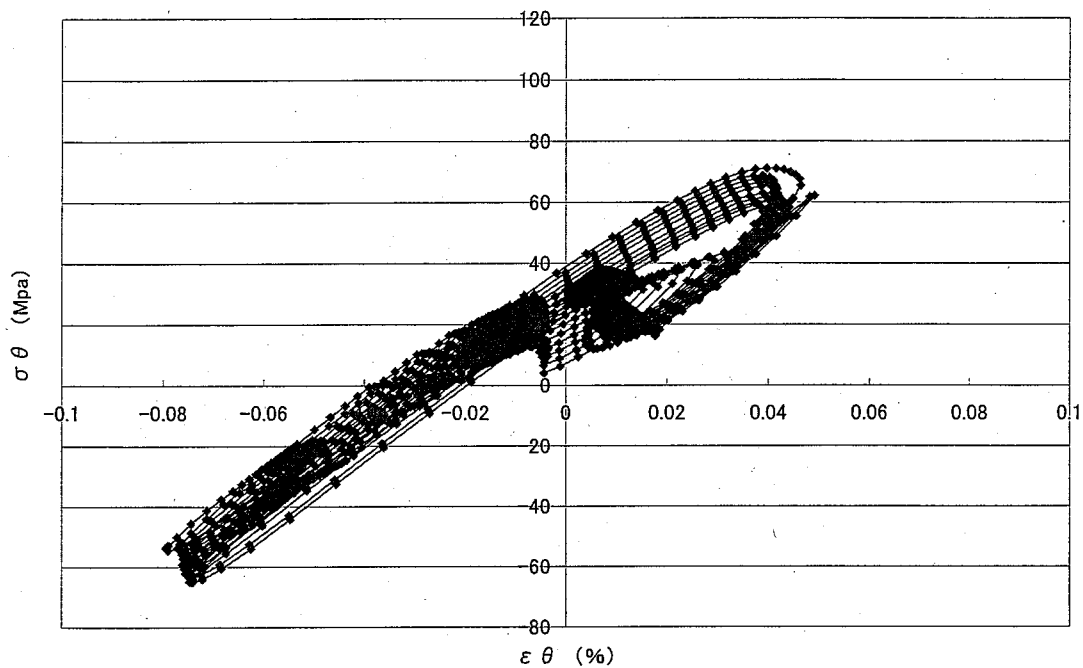


図 22 弾性解析 周方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

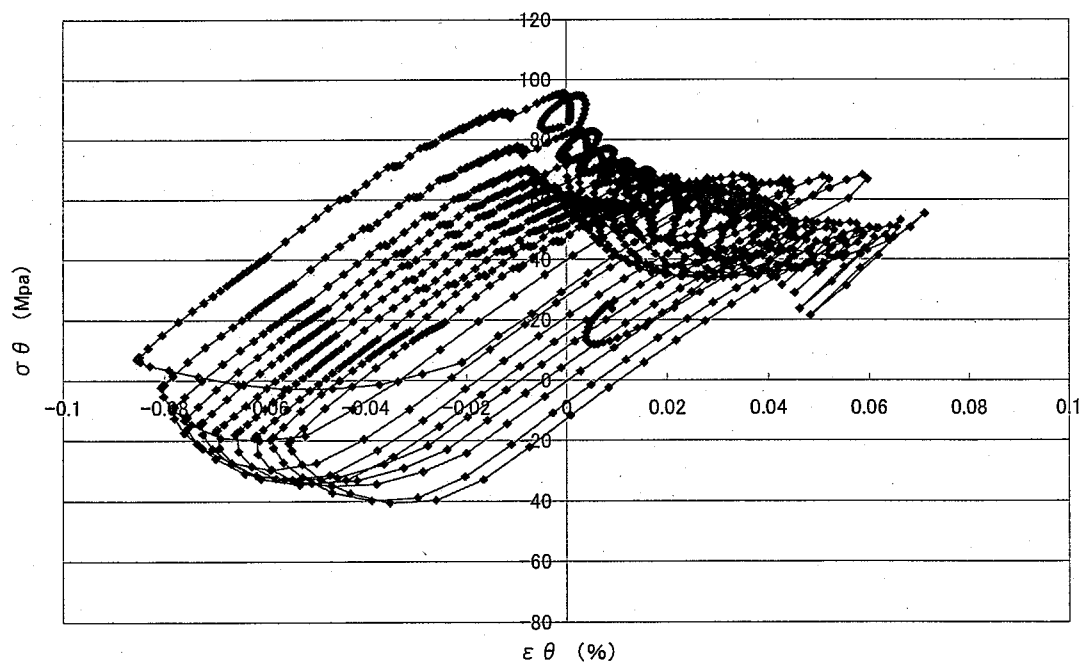


図 23 弾塑性解析モノトニック 周方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

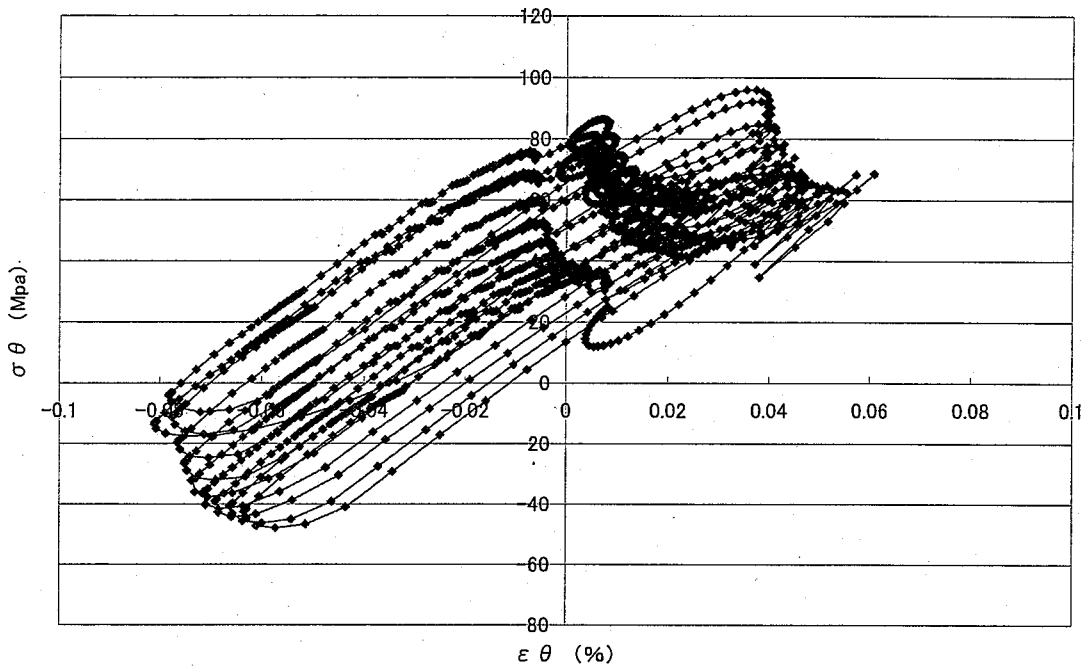


図 24 弾塑性解析サイクリック 周方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

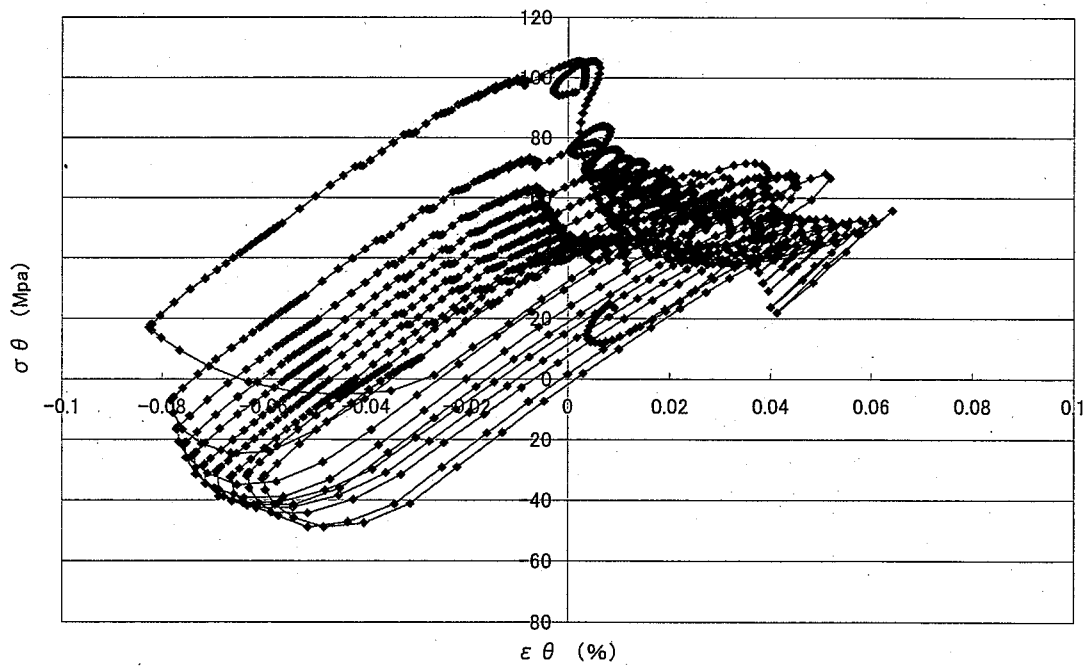


図 25 弾塑性解析弾完全塑性 周方向応力-ひずみ曲線 (保持無し)

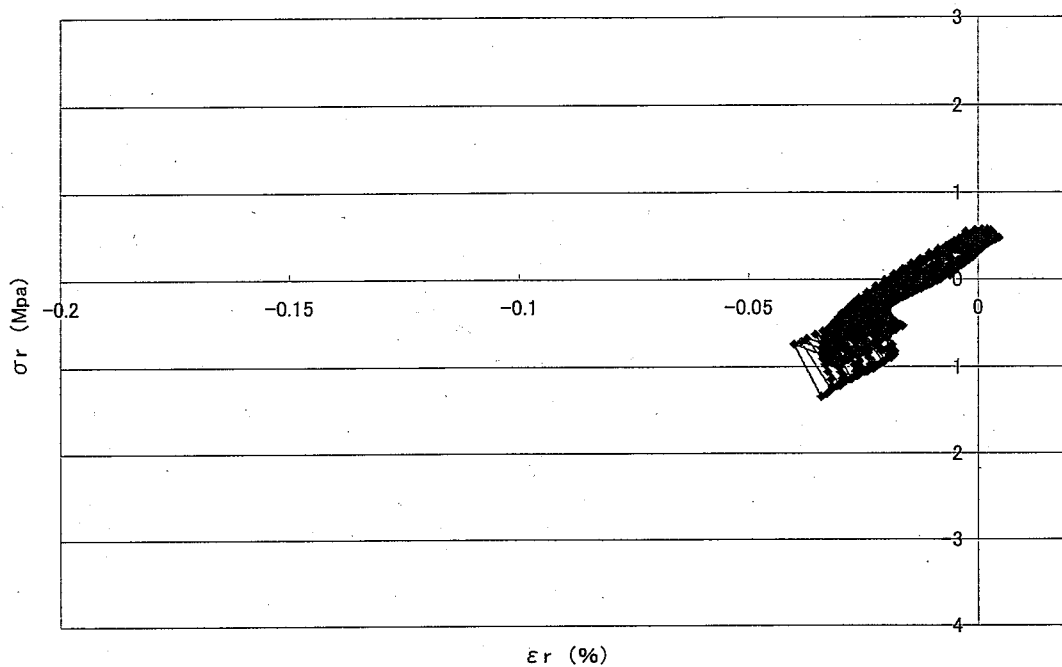


図 26 弾性解析 径方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

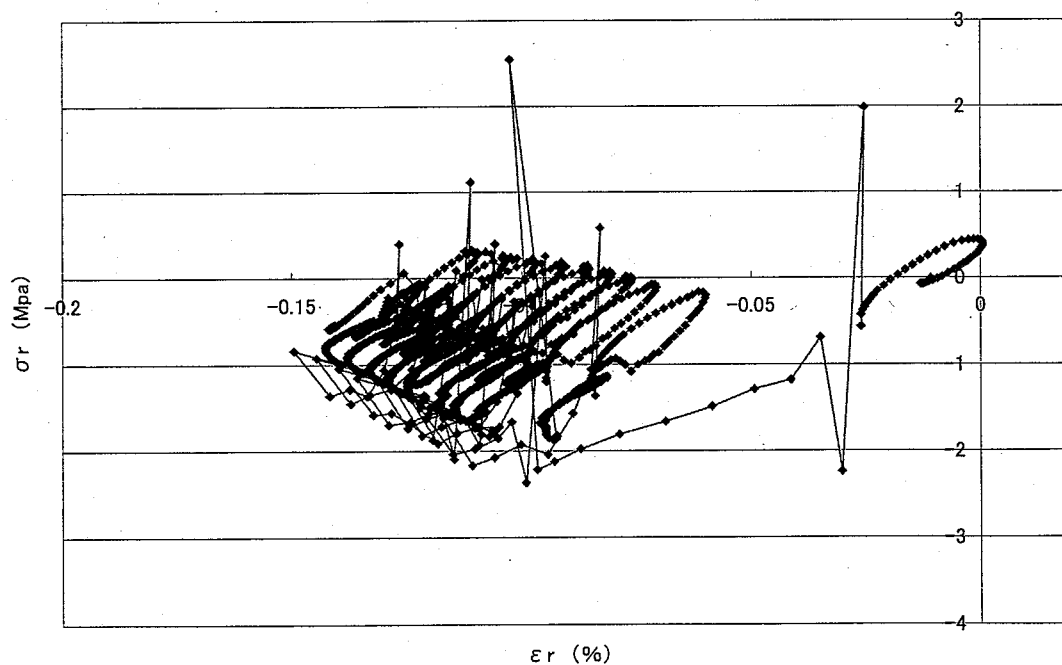


図 27 弾塑性解析モノトニック 径方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

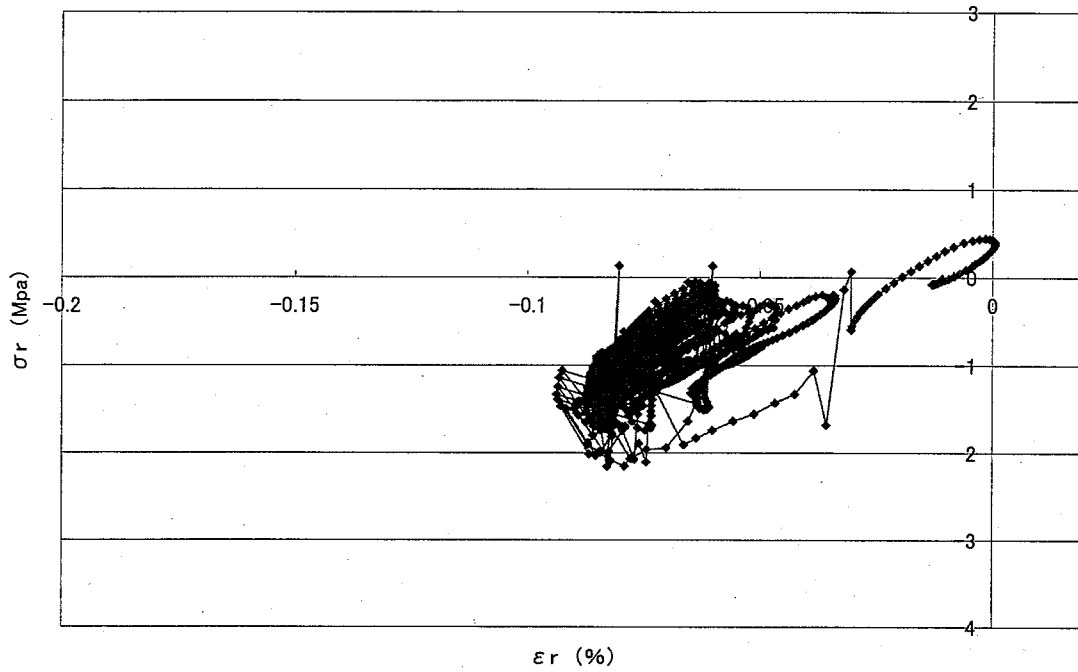


図 28 弾塑性解析サイクリック 径方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

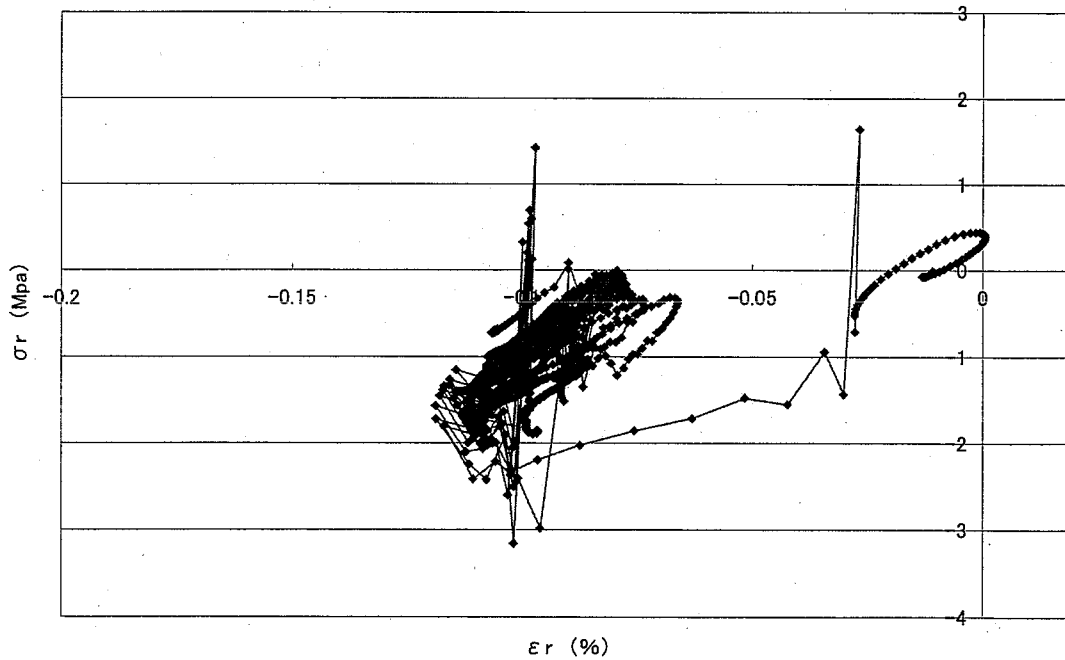


図 29 弾塑性解析弾完全塑性 径方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

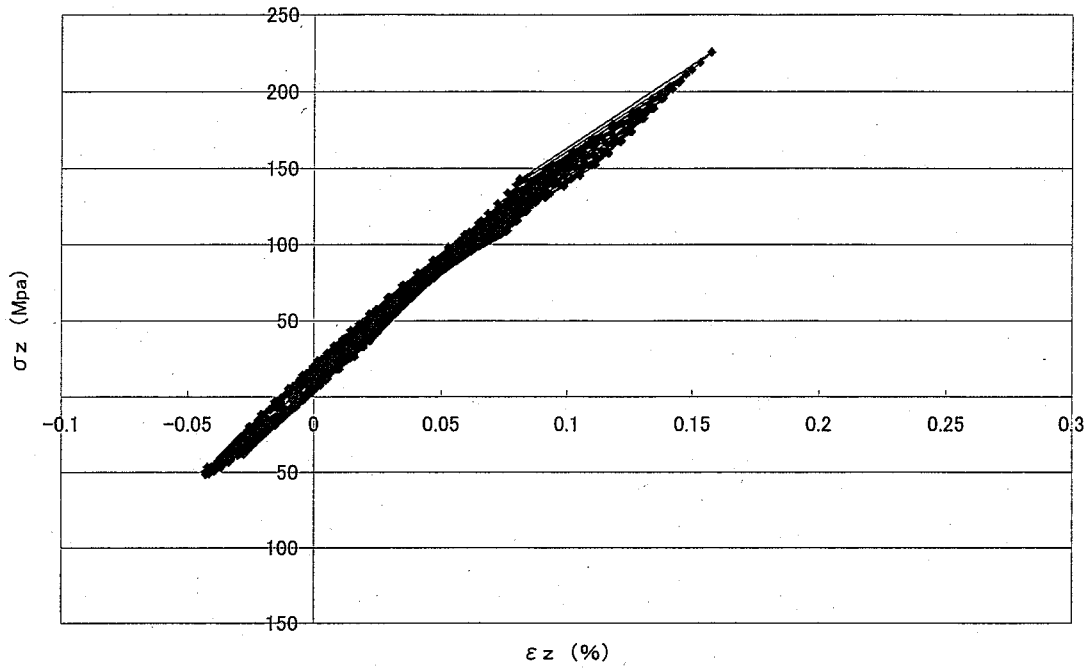


図 30 弾性解析 軸方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

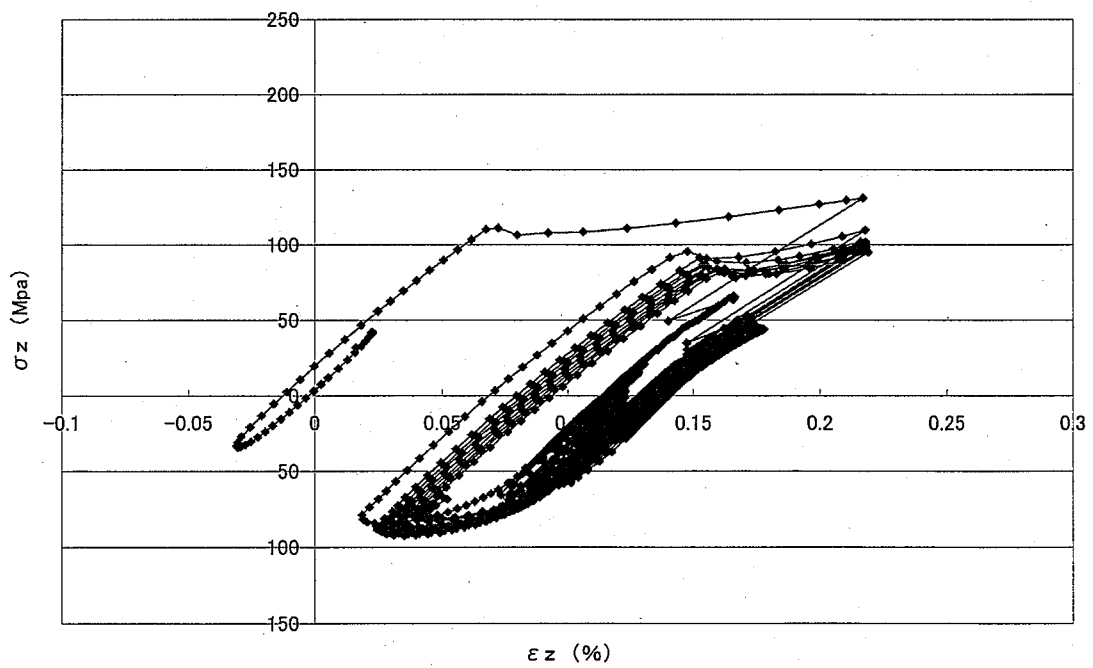


図 31 弾塑性解析モノトニック 軸方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

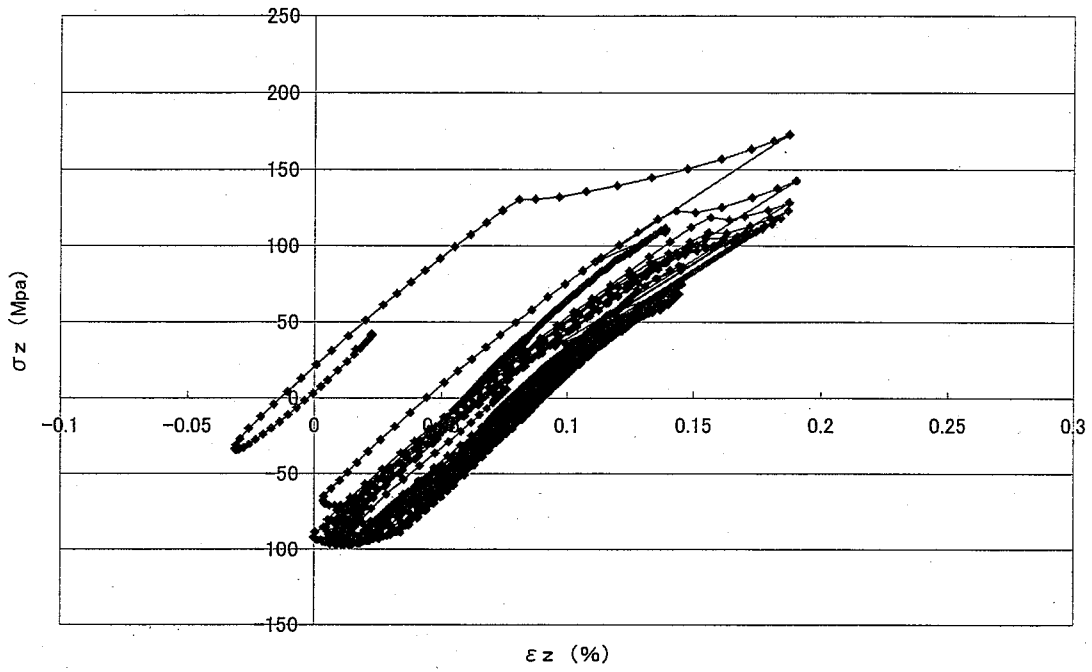


図 32 弾塑性解析サイクリック 軸方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

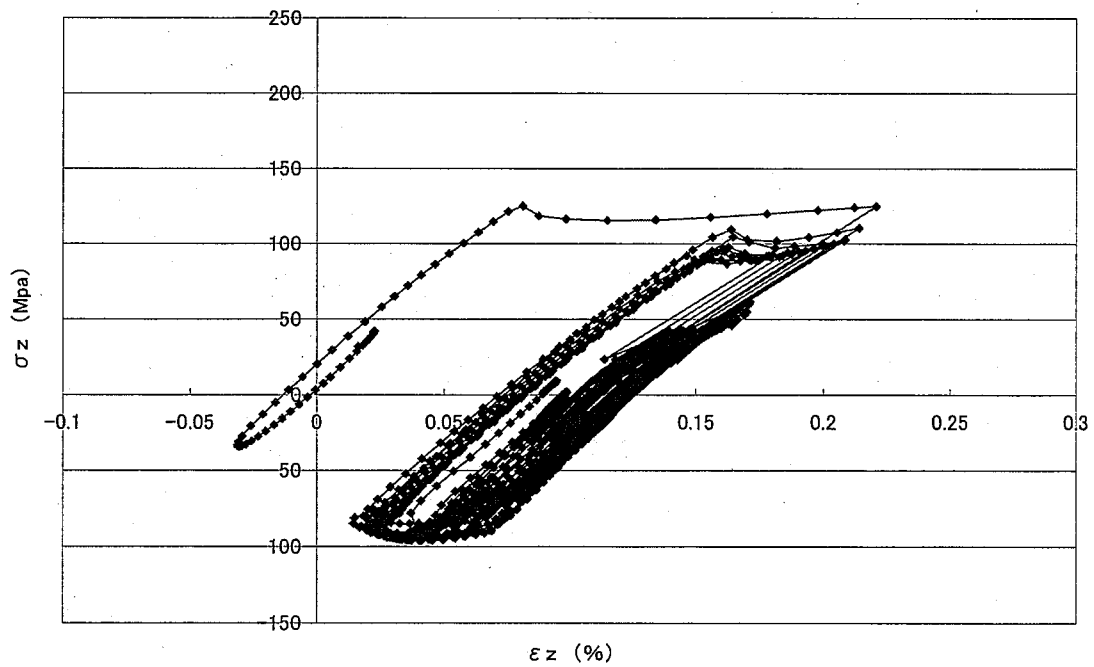


図 33 弾塑性解析弾完全塑性 軸方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

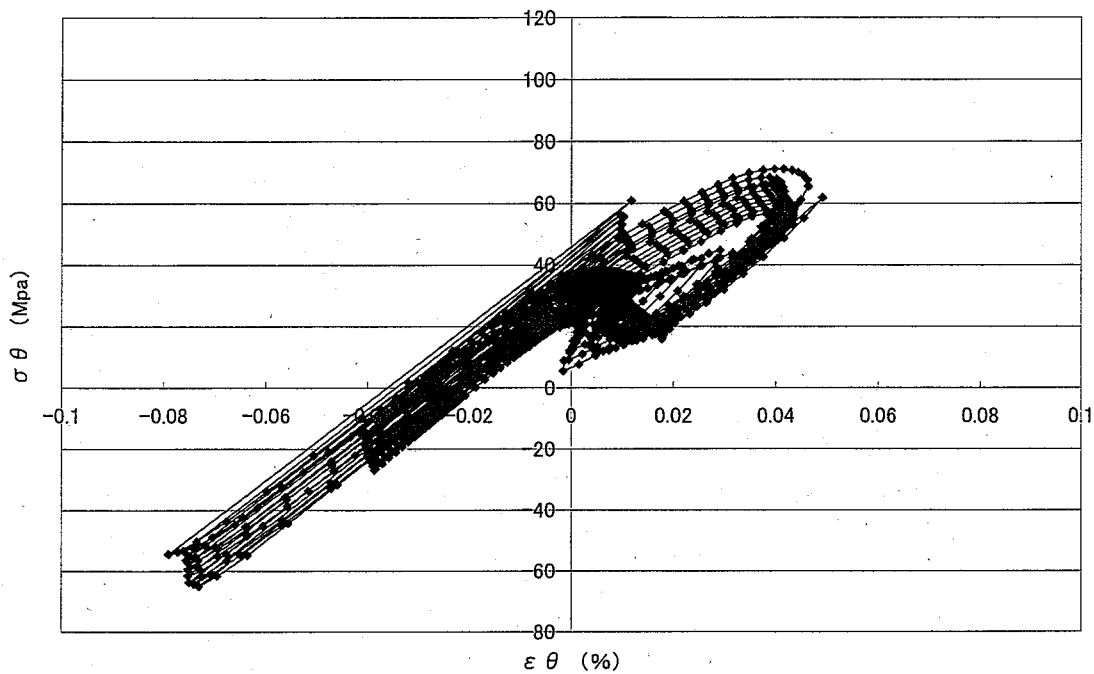


図 34 弾性解析 周方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

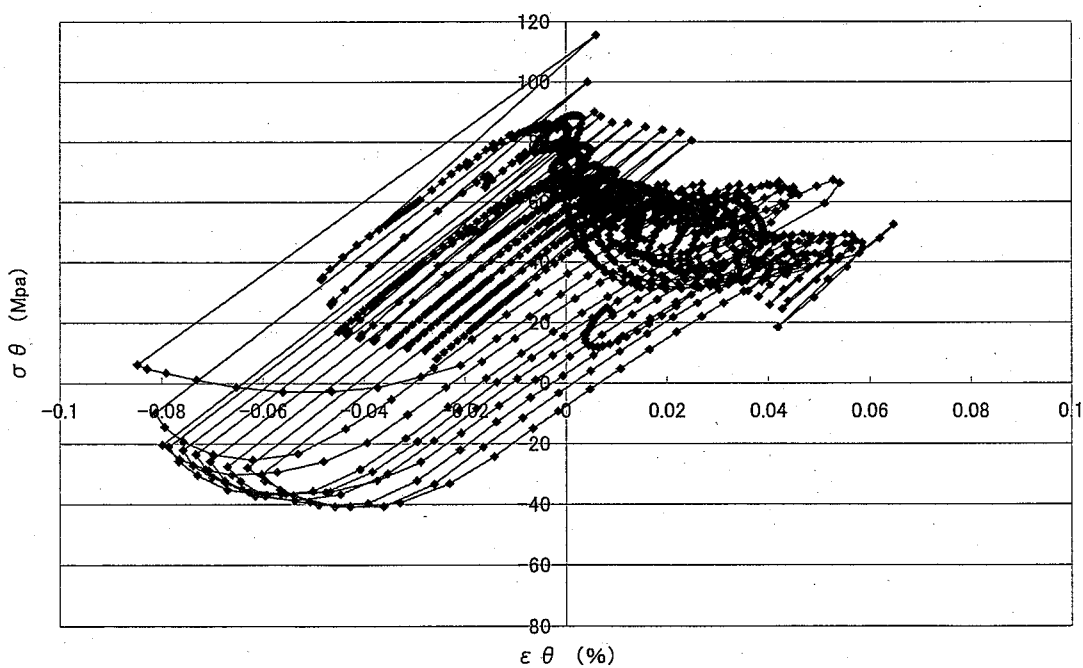


図 35 弾塑性解析モノトニック 周方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

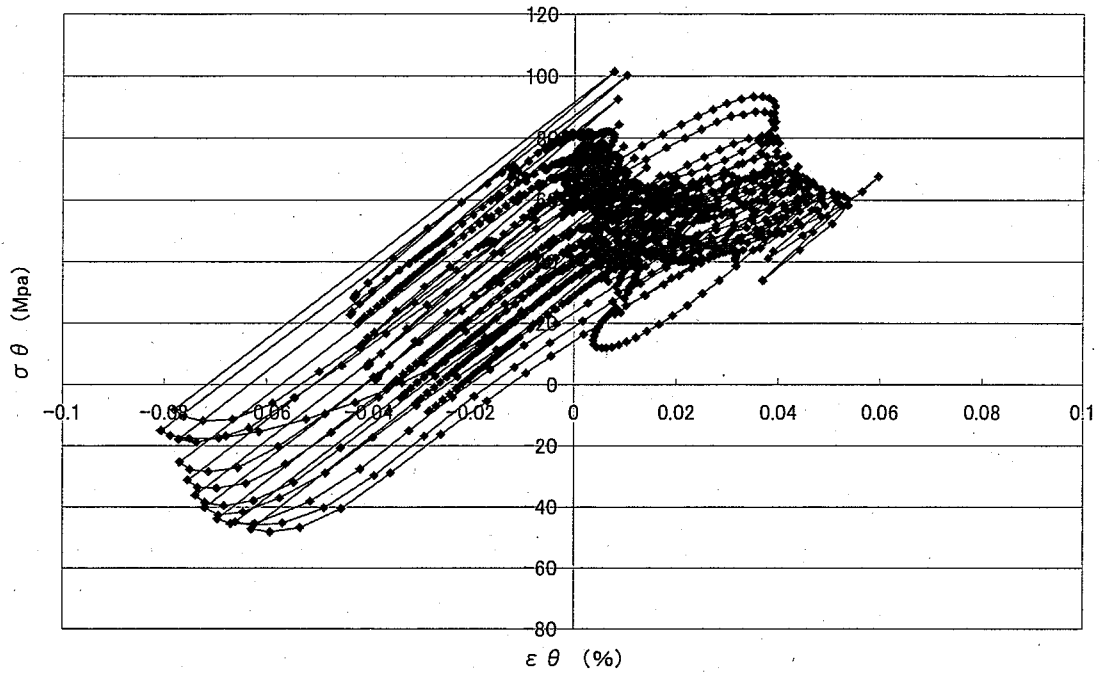


図 36 弾塑性解析サイクリック 周方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

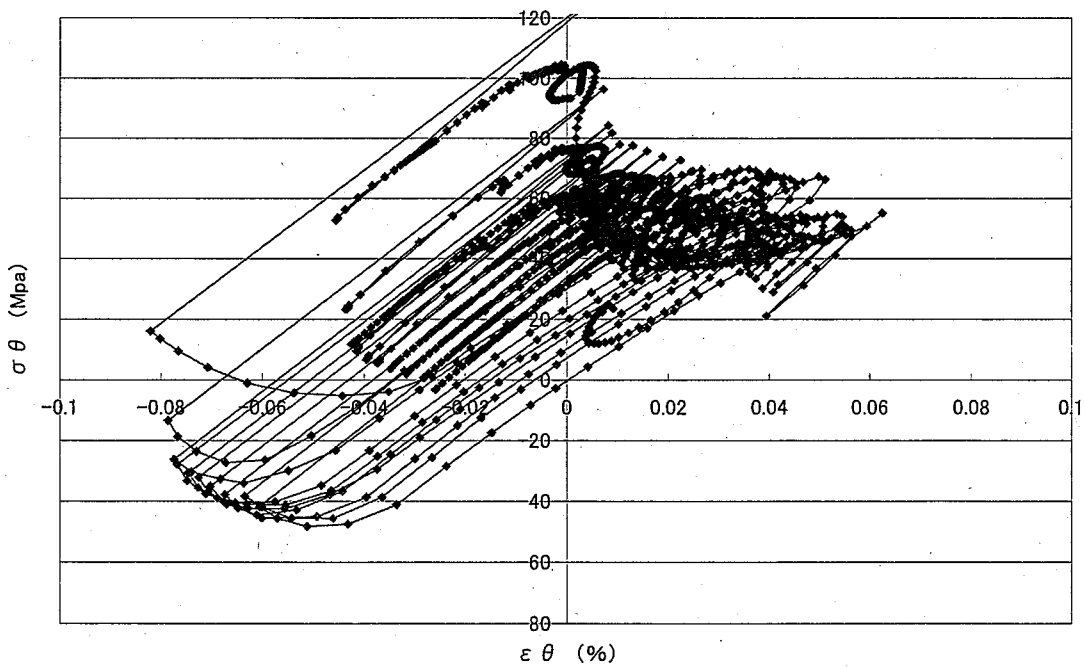


図 37 弾塑性解析弾完全塑性 周方向応力-ひずみ曲線 (保持あり)

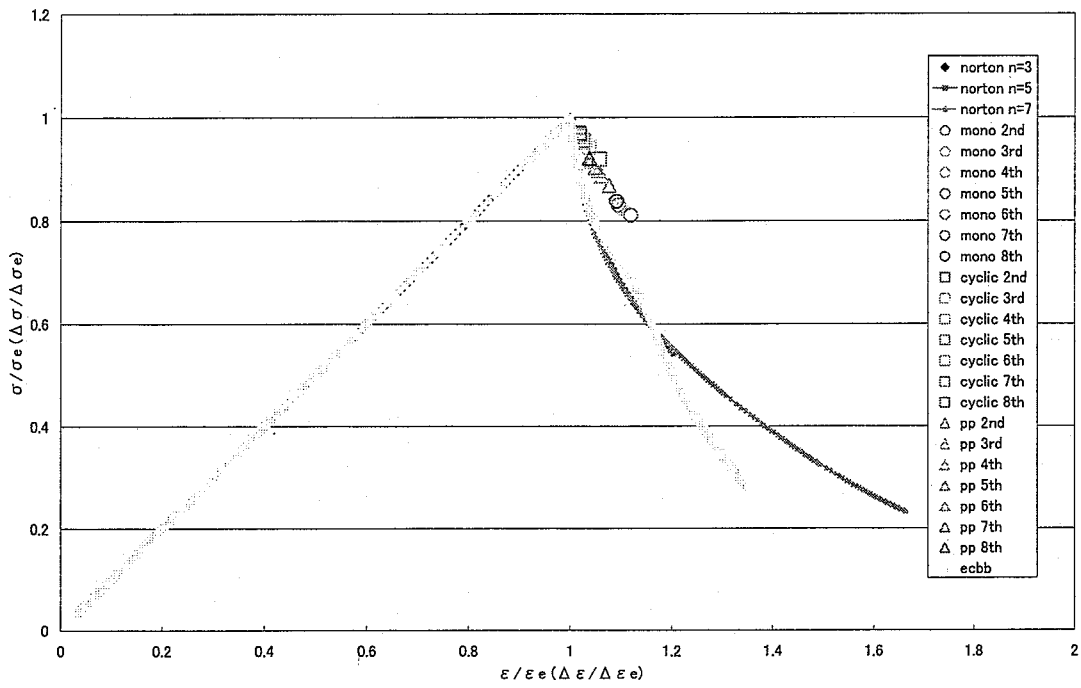


図 38 繰返し負荷（保持無し）解析結果と弾クリープ解析結果との比較

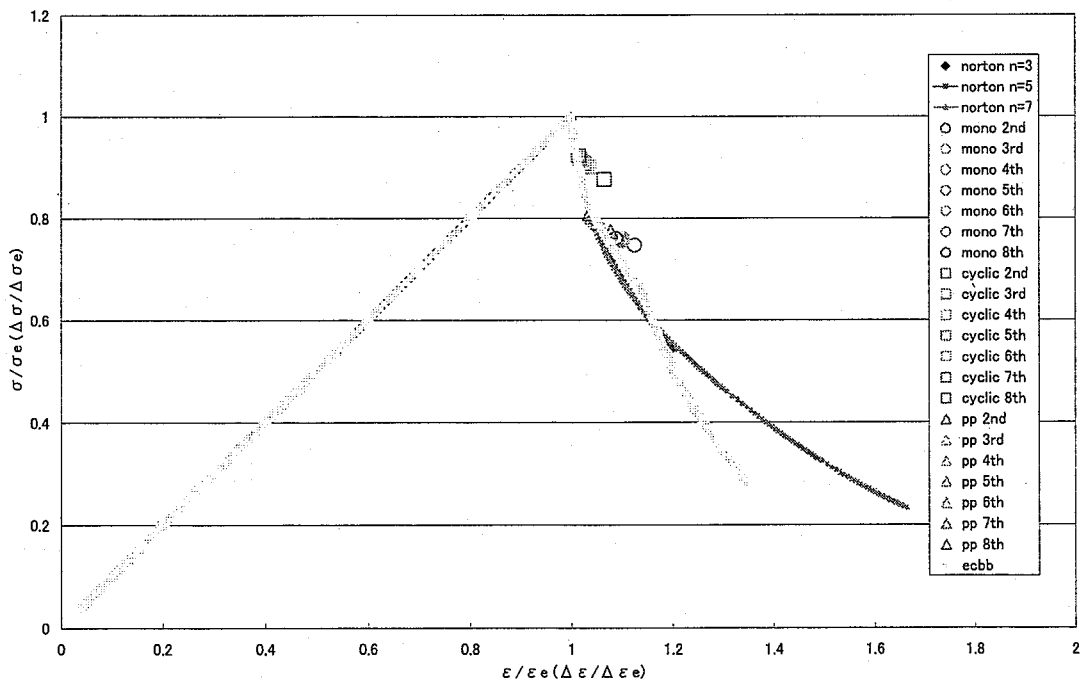


図 39 繰返し負荷（保持あり）解析結果と弾クリープ解析結果との比較

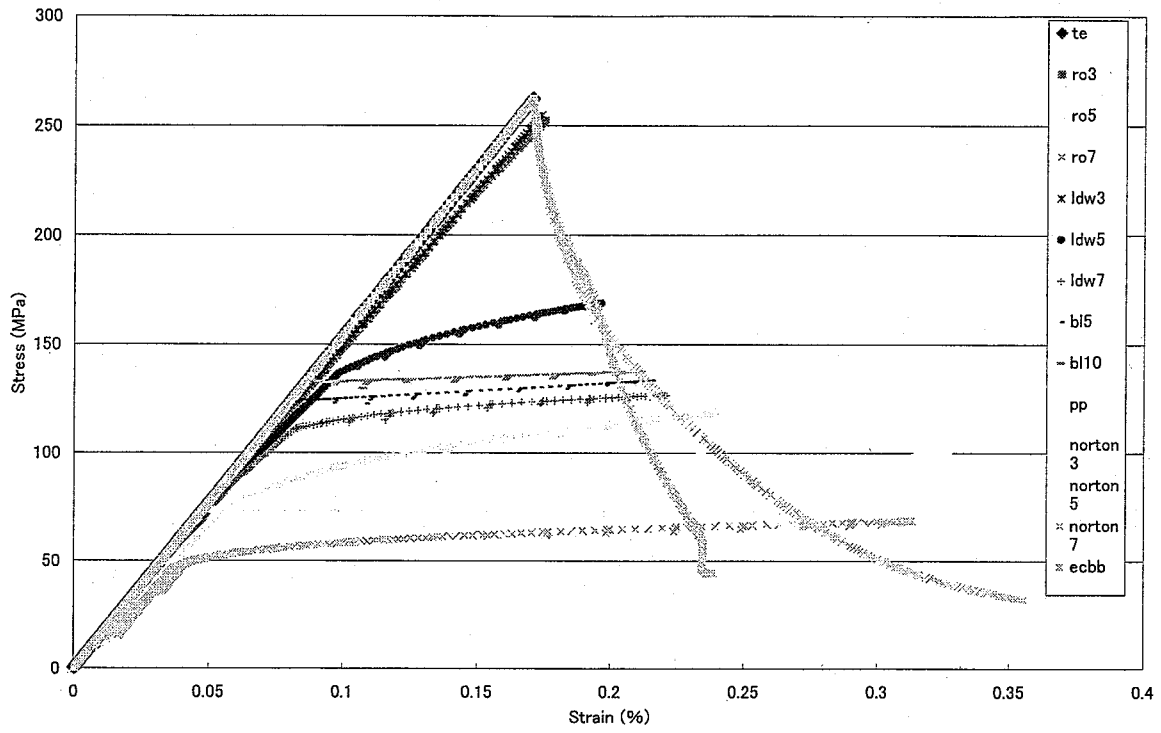


図 40 非弾性解析結果の比較

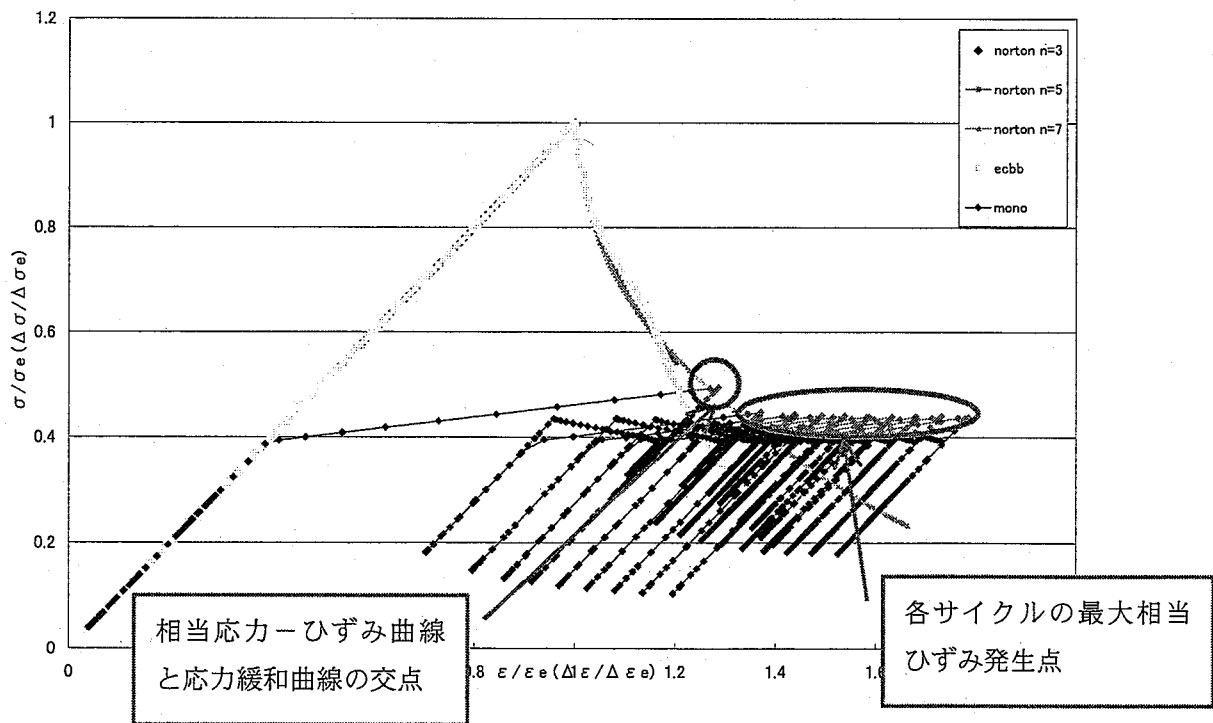


図 41 ひずみ分布の評価点

FINAS
EQUIVALENT CREEP STRAIN

CONTOUR VALUES
1 1.00E-03
2 2.00E-03
3 3.00E-03
4 4.00E-03
5 5.00E-03
6 6.00E-03
7 7.00E-03
8 8.00E-03
9 9.00E-03
10 1.22E-02



STEP NO. 61

GEN. SCALE 60,000

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 2.00E-02
2 4.00E-02
3 6.00E-02
4 8.00E-02
5 1.00E-01
6 1.20E-01
7 1.40E-01
8 1.60E-01
9 1.80E-01
10 1.22E-01



STEP NO. 61

GEN. SCALE 60,000

図 42 交点の相当クリープひずみと相当塑性ひずみ分布の比較

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 5.00E-03
2 1.00E-02
3 1.50E-02
4 2.00E-02
5 2.50E-02
6 3.00E-02
7 3.50E-02
8 4.00E-02
9 4.50E-02
10 1.22E-02



STEP NO. 61

GEN. SCALE 60,000

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 5.00E-03
2 1.00E-02
3 1.50E-02
4 2.00E-02
5 2.50E-02
6 3.00E-02
7 3.50E-02
8 4.00E-02
9 4.50E-02
10 1.50E-02



STEP NO. 261

GEN. SCALE 60,000

図 43 相当塑性ひずみ分布 1 サイクル目 相当塑性ひずみ分布 2 サイクル目

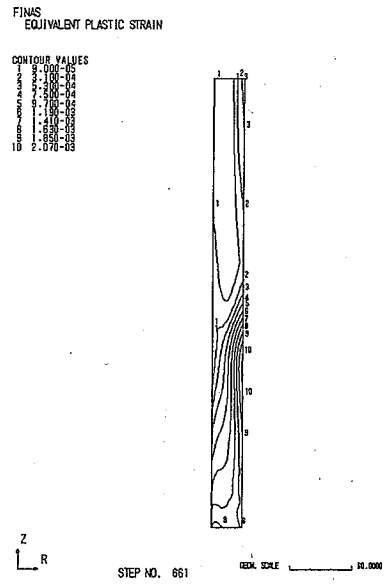
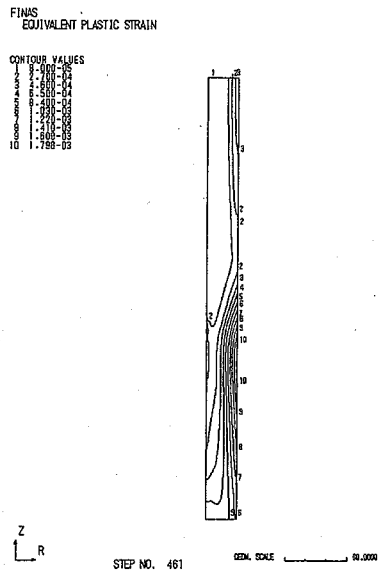


図 44 相当塑性ひずみ分布 3 サイクル目 相当塑性ひずみ分布 4 サイクル目

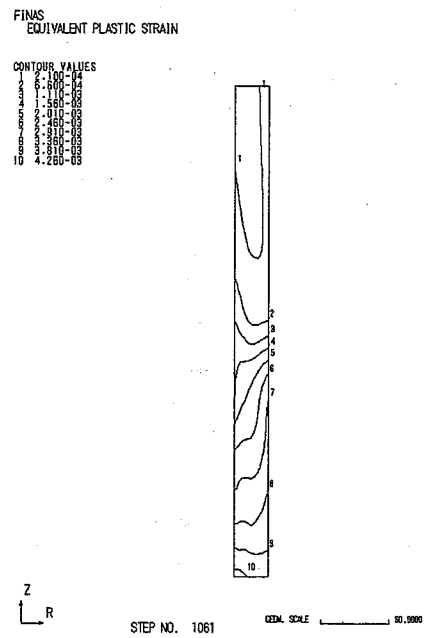
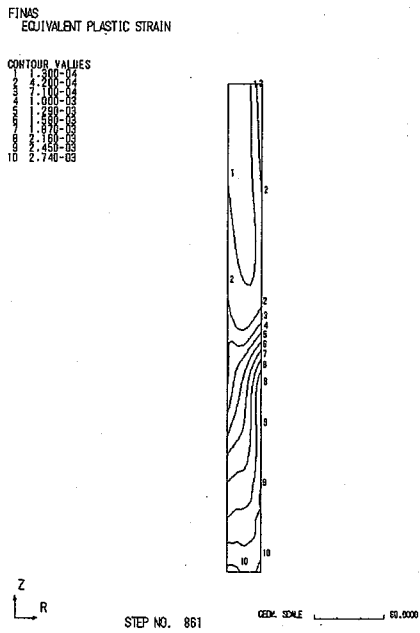


図 45 相当塑性ひずみ分布 5 サイクル目 相当塑性ひずみ分布 6 サイクル目

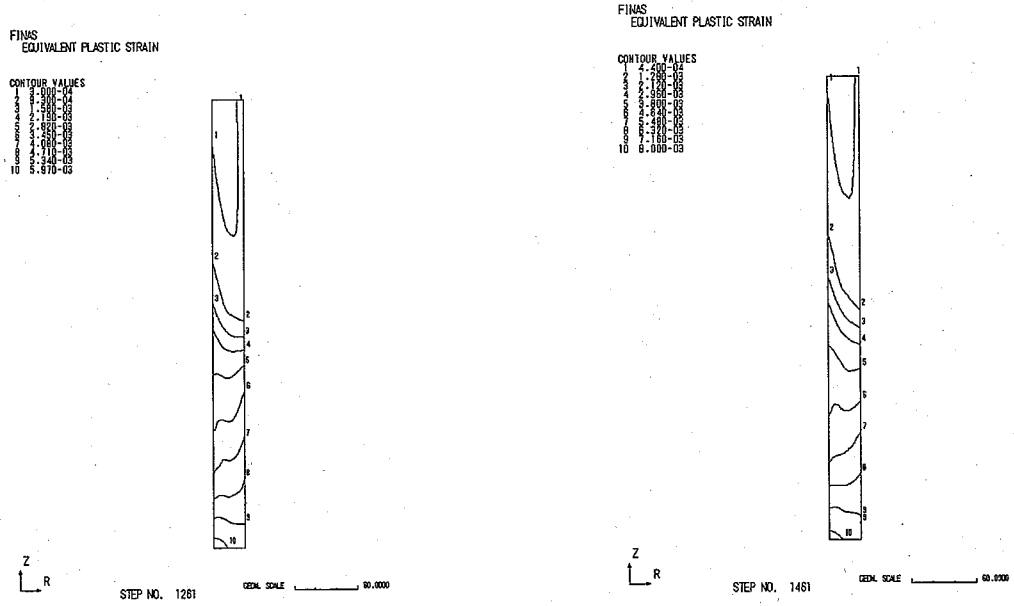


図 46 相当塑性ひずみ分布 7 サイクル目 相当塑性ひずみ分布 8 サイクル目

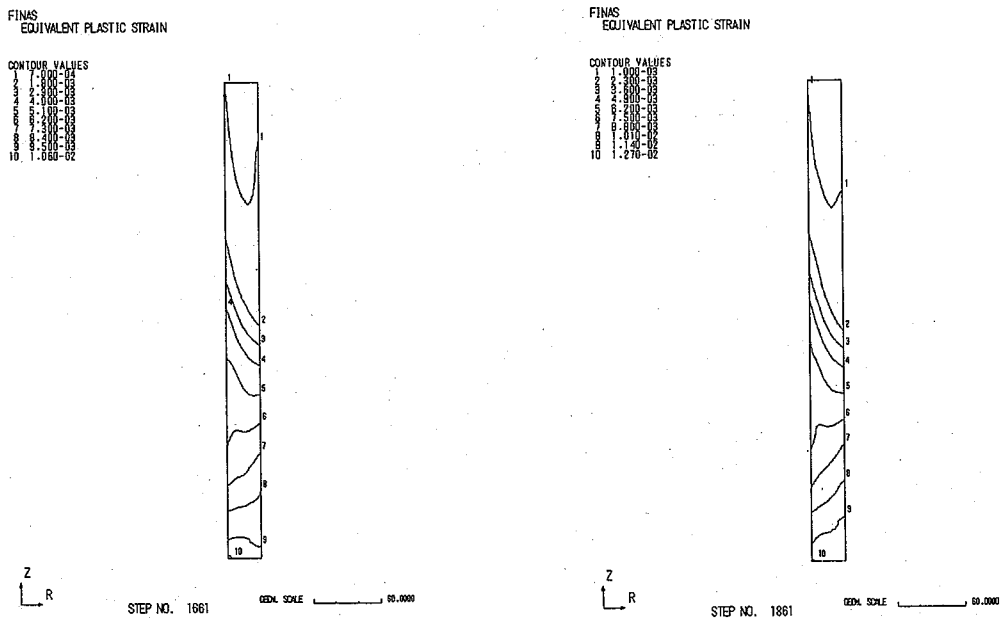


図 47 相当塑性ひずみ分布 9 サイクル目 相当塑性ひずみ分布 10 サイクル目