

# 非弾性解析による設計法策定のための 解析および調査

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2003年3月

川崎重工業株式会社

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

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

## 非弾性解析による設計法策定のための解析および調査

島川 貴司\*、中村 協正\*

### 要旨

実用化戦略調査研究の一貫として、小型簡素なプラント機器を実現するため高温構造設計法の抜本的な高度化が求められている。その具体化方策として、非弾性解析による設計の実現を目指している。

非弾性解析を活用した FBR 設計の合理化のための検討として、平成 13 年度までに、設計上想定される破損様式を安全側かつ従来の弾性解析による予測法より合理的に評価可能な、古典的非弾性構成則を用いた設計法を提案した。

本研究では、古典的非弾性構成則による予測が実機で想定される負荷履歴に対しても安全側となることを確認した。また、予測精度の一層の向上が期待される詳細構成式の設計への適用上の課題を調査した。さらに、非弾性解析結果に基づく強度評価上の課題である、中間保持状態のクリープ疲労損傷評価クライテリオンの調査を行った。

---

本報告書は、川崎重工業株式会社が核燃料サイクル開発機構殿との契約を基に実施した調査の成果である。  
サイクル機構担当部及び担当者： 大洗工学センター 要素技術開発部 構造信頼性研究 Gr 笠原 直人

\* 川崎重工業株式会社

## 目次

1. 研究目的および内容 .....	1
2. 研究成果 .....	2
2.1 非弾性解析における負荷履歴依存性の確認に必要な解析 .....	2
2.2 詳細構成式の設計への適用上の課題の調査 .....	41
2.3 中間保持クリープ疲労損傷評価クライテリオンの調査 .....	44
3. まとめ .....	48

## 表リスト

表 2.1-1	サーベイモデルの 2 直線近似の係数 .....	7
表 2.1-2	解析モデルのサーベイ範囲 .....	7
表 2.1-3	負荷パターン .....	8
表 2.1-4	負荷履歴検討の 2 直線近似の係数 .....	9

## 図リスト

図 2.1-1	解析モデル .....	10
図 2.1-2(1)	上下変位負荷側バネ端の Y 反力(ケース 1) .....	11
図 2.1-2(2)	上下変位負荷側バネ端の Y 反力(ケース 2) .....	11
図 2.1-2(3)	上下変位負荷側バネ端の Y 反力(ケース 3) .....	12
図 2.1-2(4)	上下変位負荷側バネ端の Y 反力(ケース 4) .....	12
図 2.1-2(5)	上下変位負荷側バネ端の Y 反力(ケース 5) .....	13
図 2.1-2(6)	上下変位負荷側バネ端の Y 反力(ケース 6) .....	13
図 2.1-3(1)	上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 1) .....	14
図 2.1-3(2)	1 要素との接続側バネ端の変位(ケース 1) .....	14
図 2.1-3(3)	上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 2) .....	15
図 2.1-3(4)	1 要素との接続側バネ端の変位(ケース 2) .....	15
図 2.1-3(5)	上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 3) .....	16
図 2.1-3(6)	1 要素との接続側バネ端の変位(ケース 3) .....	16
図 2.1-3(7)	上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 4) .....	17
図 2.1-3(8)	1 要素との接続側バネ端の変位(ケース 4) .....	17
図 2.1-3(9)	上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 5) .....	18
図 2.1-3(10)	1 要素との接続側バネ端の変位(ケース 5) .....	18
図 2.1-3(11)	上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 6) .....	19
図 2.1-3(12)	1 要素との接続側バネ端の変位(ケース 6) .....	19
図 2.1-4(1)	一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 1) .....	20
図 2.1-4(2)	強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 1) .....	20
図 2.1-4(3)	一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 2) .....	21
図 2.1-4(4)	強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 2) .....	21
図 2.1-4(5)	一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 3) .....	22
図 2.1-4(6)	強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 3) .....	22
図 2.1-4(7)	一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 4) .....	23

図 2.1-4(8) 強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 4) .....	23
図 2.1-4(9) 一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 5) .....	24
図 2.1-4(10) 強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 5) .....	24
図 2.1-4(11) 一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 6) .....	25
図 2.1-4(12) 強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 6) .....	25
図 2.1-5(1) バネ定数 3080000N/mm( $q=1$ )の累積非弾性ひずみ履歴 .....	28
図 2.1-5(2) バネ定数 154000N/mm( $q=2$ )の累積非弾性ひずみ履歴 .....	28
図 2.1-5(3) バネ定数 77000N/mm( $q=3$ )の累積非弾性ひずみ履歴 .....	29
図 2.1-6 強制変位方向バネ定数の負荷履歴への影響 .....	29
図 2.1-7(1) 平面応力要素の累積非弾性ひずみ履歴 .....	30
図 2.1-7(2) 一般化平面ひずみ要素(バネ 15400N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴.....	30
図 2.1-7(3) 一般化平面ひずみ要素(バネ 154000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴.....	31
図 2.1-7(4) 一般化平面ひずみ要素(バネ 200000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴.....	31
図 2.1-7(5) 一般化平面ひずみ要素(バネ 300000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴.....	32
図 2.1-7(6) 一般化平面ひずみ要素(バネ 400000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴.....	32
図 2.1-7(7) 一般化平面ひずみ要素(バネ 1540000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴.....	33
図 2.1-7(8) 一般化平面ひずみ要素(バネ 15400000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴....	33
図 2.1-7(9) 平面ひずみ要素の累積非弾性ひずみ履歴 .....	34
図 2.1-8 面方向バネ定数の負荷履歴への影響 .....	34
図 2.1-9 負荷パターン 1～4 の比較.....	35
図 2.1-10 負荷パターン 1、2 の比較.....	36
図 2.1-11 負荷パターン 3、4 の比較.....	36
図 2.1-12(1) 応力ひずみ履歴(2 直線式、負荷パターン 1) .....	37
図 2.1-12(2) 応力ひずみ履歴(2 直線式、負荷パターン 2) .....	37
図 2.1-12(3) 応力ひずみ履歴(2 直線式、負荷パターン 3) .....	38
図 2.1-12(4) 応力ひずみ履歴(2 直線式、負荷パターン 4) .....	38
図 2.1-12(5) 応力ひずみ履歴(大野一王、負荷パターン 1).....	39
図 2.1-12(6) 応力ひずみ履歴(大野一王、負荷パターン 2).....	39
図 2.1-12(7) 応力ひずみ履歴(大野一王、負荷パターン 3).....	40
図 2.1-12(8) 応力ひずみ履歴(大野一王、負荷パターン 4).....	40
図 2.3-1 中間保持位置.....	46
図 2.3-2 2 直線近似式と詳細構成式のヒステリシスループ比較(概念図) .....	46
図 2.3-3 保持位置と破損寿命の関係(概念).....	47

## 1. 研究目的および内容

実用化戦略調査研究の一貫として、小型簡素なプラント機器を実現するため高温構造設計法の技術的な高度化が求められている。その具体化方策として、非弾性解析による設計の実現を目指している。

非弾性解析を活用した FBR 設計の合理化のための検討として、平成 13 年度までに、設計上想定される破損様式を安全側かつ従来の弾性解析による予測法より合理的に評価可能な、古典的非弾性構成式を用いた設計法を提案した。

本研究では、古典的非弾性構成式による予測が実機で想定される負荷履歴に対して安全側となることを確認する。また、予測精度の一層の向上が期待される詳細構成式の設計への適用上の課題を調査する。さらに、非弾性解析結果に基づく強度評価上の課題である、中間保持状態のクリープ疲労損傷評価ロジックの検討を行う。

## 2. 研究成果

### 2.1 非弾性解析における負荷履歴依存性の確認に必要な解析

非弾性解析による設計法として提案されている古典的非弾性構成式について、負荷履歴の影響の検討を行った。検討は、実機で想定される、非弾性解析の対象となる部位および荷重について、

- ・負荷履歴に関してどのようなことが問題となるかを抽出
- ・解決のための解析計画の検討

により設定した荷重に対して、古典的非弾性構成式による非弾性解析と、詳細構成式による非弾性解析とを比較し、負荷履歴の影響を検討した。

#### (1) 負荷履歴に関してどのようなことが問題となるかを抽出

設計において、全ての部位・荷重で非弾性解析が必要ではなく、非弾性解析が必要と考えられる部位および荷重について、想定している事象、考慮している破損モード、などの点について整理し、非弾性解析を適用した際に負荷履歴に関して問題となる課題について検討した。

##### a. 事象

原子炉容器液面近傍では、起動+手動トリップで全ての事象を包絡するため、事象による履歴の影響は考えられない。一方、炉心支持構造については、手動トリップ+主蒸気管破損の組合せで大きな疲労損傷が発生し、手動トリップ+起動の組合せでも若干の疲労損傷となっており、2つの組合せの発生順序が負荷履歴となることが考えられる。

##### b. 破損モード

炉心支持構造では、手動トリップ、主蒸気管破断の過渡を Negligible Creep の適用範囲内としているので、破損モードにクリープは考慮しないことになる。よって、対象となる破損モードは疲労損傷とラチエットひずみであるが、これらについては次の理由により履歴の影響はあるが安全側であるものと考えられる。

##### c. 安全側と考えられる理由

非弾性解析での構成式においては、①加工硬化、②累積ひずみによる移動硬化、③

繰返し硬化、の 3 つの非線形挙動を考慮することが考えられるが、指針案で提案している構成式は 2 直線近似式に  $\alpha$  リセットを適用するものであり、加工硬化のみを考慮している。累積ひずみによる移動硬化、繰返し硬化を適用した場合、荷重履歴、繰返し回数などの負荷履歴によってループが変化するが、加工硬化だけでは変化しない。実挙動では繰返し硬化によりループが動的応力ーひずみ関係となり、繰返し初期に比べ小さなひずみ範囲となるが、指針案では疲労損傷が主体となる場合には、ひずみ範囲を大きく予測する単調応力ーひずみ関係の 2 直線近似式を用いるものとしており、負荷履歴によらず最も安全側の評価結果となる。ラチェットに対して指針案では、弾性追従係数と一次応力から単調、動的のいずれかの応力ーひずみ関係の 2 直線近似式が選択できるが、いずれにしても 2 直線式ではラチェットひずみは線形に増加するのに対し、実挙動では繰返しとともに増分が減少してゆくため、単調応力ーひずみ関係の 2 直線近似式を用いれば負荷履歴によらず最も安全側の評価結果を得ることができる。

#### d. 負荷履歴に関する課題点

以上より、負荷履歴について検討すべき部位は炉心支持構造で、おもな荷重として手動トリップ、主蒸気管破損などが考えられることがわかった。

これらの実機条件に加えて、解析結果への負荷履歴の影響については、着目する部位の周辺状況の変化に注意しなければならない。すなわち、負荷される過渡によって周辺の弾性追従係数が変化した場合、履歴の違いにより、同じ負荷を与える異なった結果となることが予想されるからである。

#### (2) 解決のための解析計画の検討

前項での検討結果を受け、負荷履歴の解析結果への影響を確認するための解析計画を検討した。現象を単純化して、負荷履歴のメカニズムの考察等を容易にする観点から、実際の熱過渡応力を模擬単純化した繰返し強制変位を簡易的なモデルに負荷して解析することを計画の基本方針とし、①解析モデル、②構成式、③負荷条件、について定めた。解析モデルについては、負荷履歴の影響が着目する部位の周辺状況の変化に関係していることから、周辺状況が履歴とともに変化するものをサーベイした。

#### a. モデルの基本構成

検討に用いるモデルの基本構成は、既往の研究[1]で用いられている、構造系の弾性追従挙動を簡易的に模擬するモデルを参考とするものとした。図 2.1-1 にモデルの基本構成を示す。モデルは、1 つの平面要素とバネ要素とから構成される。バネは変位負荷方向に配置し、構造の弾性追従挙動を模擬できるようになっている。平面要素の要素タイプは 8 節点 2 次元平面要素とし、材料は 316FR 鋼、温度は 550°C で、解析コードは ABAQUS を用いた。バネ定数は、弾性追従係数  $q$  が実構造に近い 2.0 程度となる、154000N/mm<sup>2</sup> とした。

#### b. モデルのサーベイ

前項で定めた基本構成に対し、いくつかのモデル条件をパラメータとして負荷履歴検討用のモデルをサーベイした。サーベイでは、①要素タイプ、②付加バネタイプ、などを変え、 $q=2$ 、一次荷重  $P_m=20\text{ MPa}$ 、応力範囲 350MPa 相当の強制変位の繰返し両振サイクル条件で、バネの反力と変位、および累積非弾性ひずみの履歴に着目して確認した。サーベイに用いる構成式は弾塑性応力ひずみ関係式の 2 直線近似+ $\alpha$  リセットオプションとし、条件の弾性追従係数、応力範囲から決まるひずみ範囲を最大想定ひずみ範囲として表 2.1-1 のように 2 直線近似式を設定した。サーベイした条件範囲を表 2.1-2 に示す。繰返し負荷の進行とともに形状が変化、すなわち周辺状況が変化するような場合には大変形オプションが必要と考えられ、これをサーベイ項目とした。また、バネ要素が非線形特性の場合では、平面要素と同じ降伏点、ヤング率の弾完全塑性体相当のものとした。一般化平面ひずみ要素では面方向の自由度があり、その自由度を拘束しなければ平面応力要素、拘束すれば平面ひずみと等価であり同様な挙動を示すと考えられるが、本サーベイでは、面方向にバネ要素を付加し、前記の 2 要素タイプの中間的挙動を狙った。バネ定数は強制変位負荷方向に設置しているバネと同じ場合と、10 倍の場合の 2 通りをサーベイした。

図 2.1-2 に、各ケースの上下変位負荷側バネ端の Y 方向反力履歴を示す。X 方向反力および 1 要素との接続側バネ端の反力は全てゼロである。Y 方向反力は強制変位とともに変動しているが、負荷終了時の解析インクリメント 400 ではラチエット変形に応じた反力が現れており、いずれのケースでも負荷履歴検討の条件を満たしているものと考えられる。

図 2.1-3 には、各ケースのバネ両端の Y 方向変位履歴を示す。どのケースも上下変位負荷側バネ端は強制変位を与えてるので一定したサイクルを繰り返している。1

要素との接続側バネ端においてもバネの変形分を減じた一定サイクルの繰り返しのように見えるが、詳細には、大変形の平面応力要素(ケース 2)、一般化平面ひずみ要素(ケース 5、6)では、強制変位方向にもラチエットが進行しているので 1 要素との接続側バネ端の変位は変動している。

累積非弾性ひずみの履歴は、図 2.1-4 に示すようになっている。平面ひずみ要素(ケース 4)では数サイクルで一定値に到達し、大変形なしの平面応力要素(ケース 1)では繰返しとともに完全な線形増加である。大変形オプションを設定することにより(ケース 2)、僅かであるが強制変位方向の累積非弾性ひずみが減少傾向となり、一次荷重方向では僅かに非線形な増加挙動になっている。非線形バネを用いると(ケース 3)、初期の数サイクルで、直線的でなく比較的緩やかに一次荷重方向の累積非弾性ひずみが増加傾向となるが、逆に後半では線形の傾向となっている。一般化平面ひずみ要素(ケース 5、6)ではこれらの非線形な増加挙動が顕著である。大変形なしの平面応力要素、平面ひずみ要素、非線形バネでは、負荷履歴検討には不向きと思われる。

サーベイした全てのモデルで、Y 方向のラチエット変形に応じたバネの変位、反力が生じ、負荷履歴を生じるモデルとなっていることがわかったが、以上の結果から、以降の負荷履歴検討には、平面応力要素および一般化平面ひずみ要素を用いて大変形解析オプションで行うものとした。

### c.構成式および負荷パターン条件

履歴効果の確認のために、先のサーベイにおいても累積非弾性ひずみに着目して検討したが、以降においても同様とするものとし、2 直線モデルの構成式には、弾塑性応力ひずみ関係式の 2 直線近似 +  $\alpha$  リセットモデルを用い、2 直線モデルの保守性確認のリファレンスには電中研モデルより保守的な結果になると言われている大野一王モデルを用いるものとする。

検討では簡易モデルに繰返しの強制変位を負荷するものとする。用いる負荷パターンは、負荷履歴が大きくなると考えられる片振り負荷を基本とし、前項で検討した炉心支持構造での事象組合せを参考に単純化して以下のように作成した。

一次荷重 Pm : 25MPa

保持 : なし

弾性追従係数 : 2

負荷パターン : 表 2.3.1-3(検討に応じて適宜必要なパターンを用いる)

負荷パターンに示す、「強制変位 A」は片振り引張のみで弾性 300MPa 相当となる変位を与えるものである。また、「強制変位 B」は片振り圧縮のみで弾性 500MPa 相当となる変位を与えるものである。各負荷パターンとも、強制変位 A(引張)を 20 サイクル後半に追加して、負荷パターン終了時の条件(引張で終了)が同じとなるようにした。また、2 直線近似式は上記 2 変位のうち大きい方の弾性応力 500MPa、 $q=2$  の条件から決まるひずみ範囲を最大想定ひずみ範囲として表 2.1-4 のように設定した。

表 2.1-1 サーベイモデルの 2 直線近似の係数

応力強さ範囲 Sn(MPa)	弾性追従係数 q(-)	最大想定ひずみ 範囲 $\Delta \cdot \varepsilon$ (%)	降伏応力 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	加工硬化係数 $H'(N/mm^2)$
350	2	1.500E-01	99.3	24548.7

表 2.1-2 解析モデルのサーベイ範囲

No.	要素タイプ	バネ要素	解析オプション	その他
1	平面応力	線形	なし	従来ケース
2	〃	〃	大変形	
3	〃	非線形	〃	
4	平面ひずみ	線形	〃	
5	一般化平面ひずみ	〃	〃	面方向バネ付加(変位方向バネと同剛性)
6	〃	〃	〃	面方向バネ付加(変位方向バネの剛性 10 倍)

表 2.1-3 負荷パターン

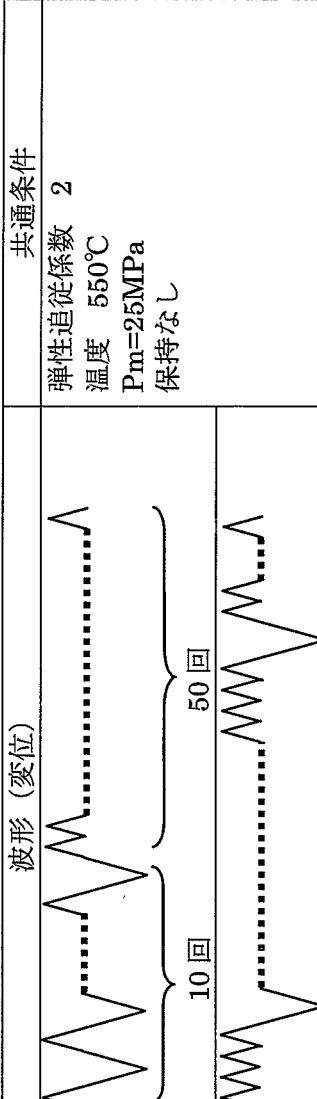
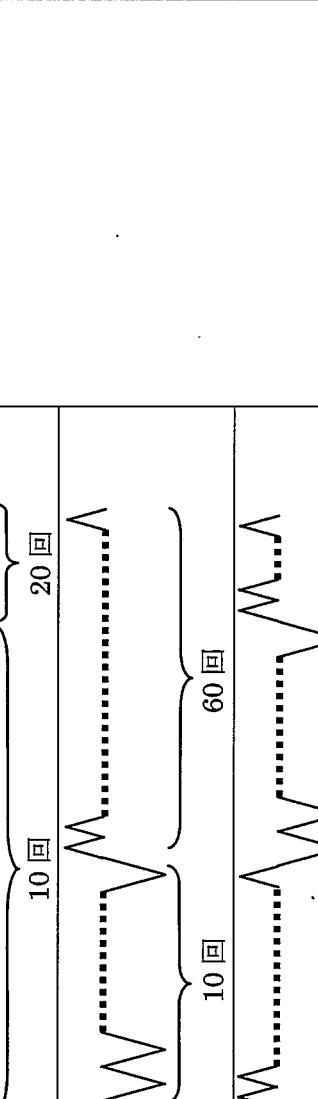
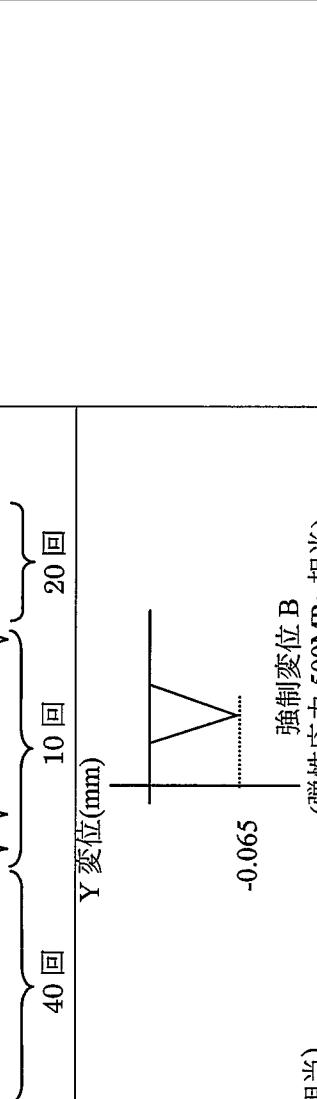
No	ペターン	波形(変位)	共通条件
1	(A+B)*10+A*50		弹性追従係数 2 温度 550°C Pm=25MPa 保持なし
2	(A*4+B)*10+A*20		
3	B*10+A*60		
4	A*40+B*10+A*20		
	Y 変位(mm)	Y 変位(mm)	強制変位 A (弹性応力 300MPa 相当) -0.065 強制変位 B (弹性応力 500MPa 相当)

表 2.1-4 負荷履歴検討の 2 直線近似の係数

応力強さ範囲 Sn(MPa)	弾性追従係数 q(-)	最大想定ひずみ 範囲 $\Delta \varepsilon$ (%)	降伏応力 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	加工硬化係数 $H'(N/mm^2)$
500	2	5.511E-01	118.1	8427.3

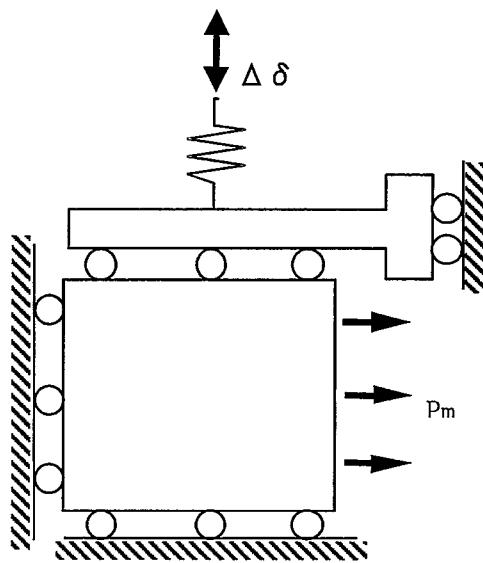


図 2.1-1 解析モデル

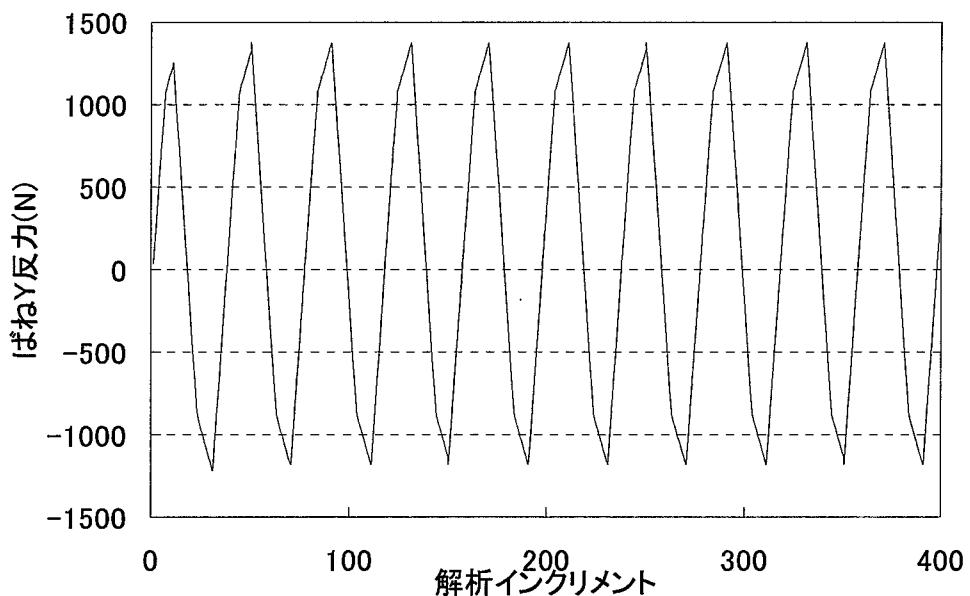


図 2.1-2(1) 上下変位負荷側バネ端の Y 反力(ケース 1)

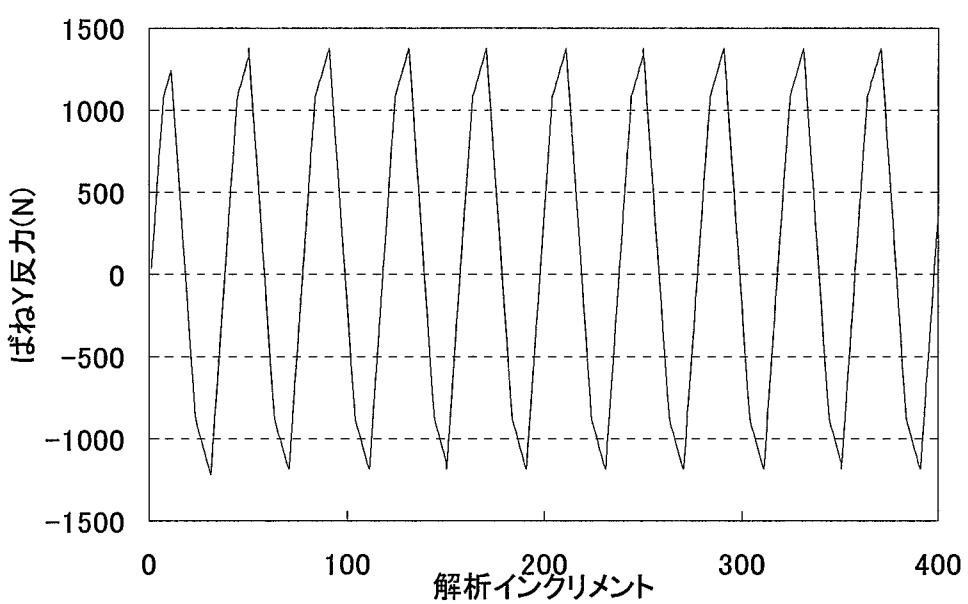


図 2.1-2(2) 上下変位負荷側バネ端の Y 反力(ケース 2)

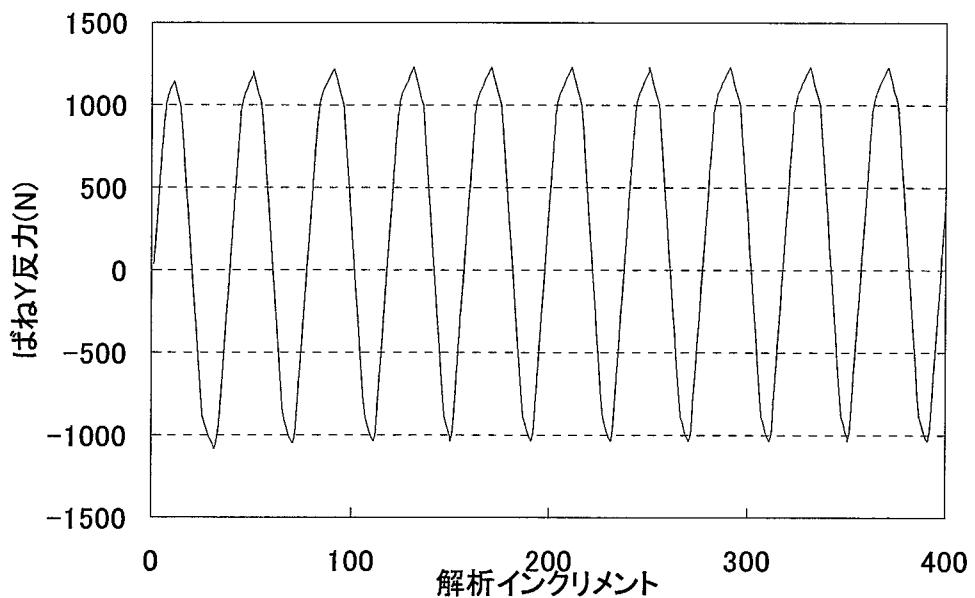


図 2.1-2(3) 上下変位負荷側バネ端の Y 反力(ケース 3)

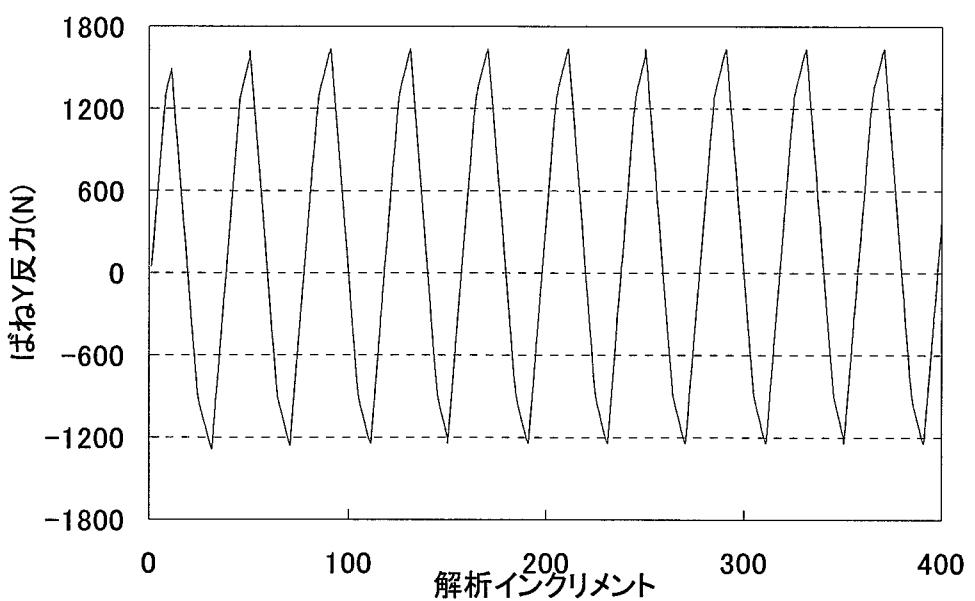


図 2.1-2(4) 上下変位負荷側バネ端の Y 反力(ケース 4)

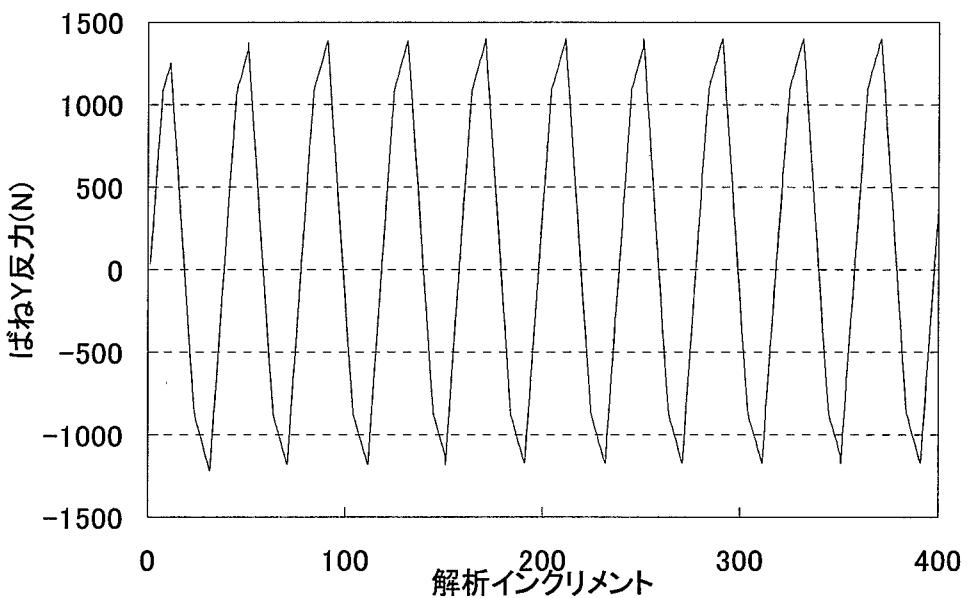


図 2.1-2(5) 上下変位負荷側バネ端の  $Y$  反力(ケース 5)

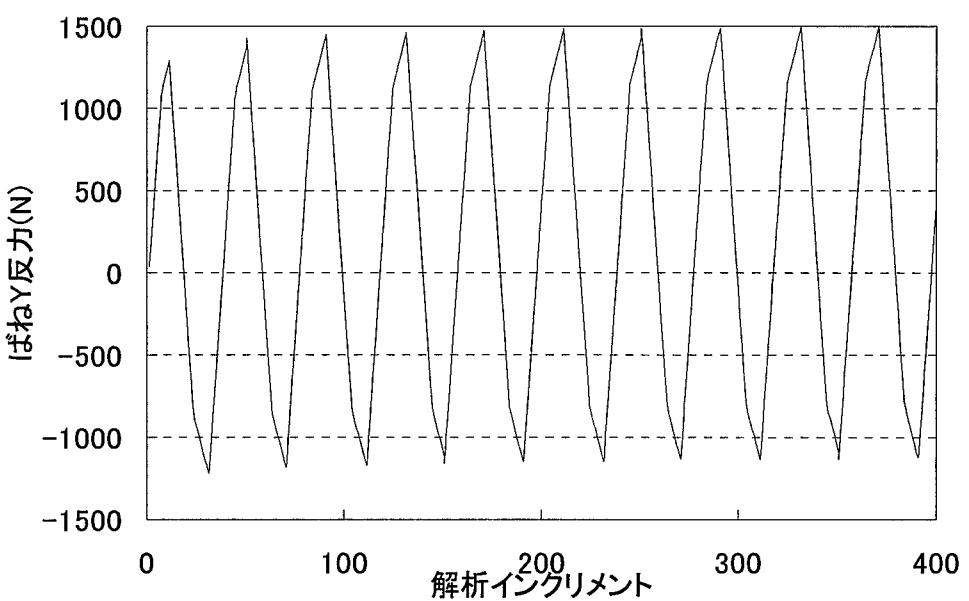


図 2.1-2(6) 上下変位負荷側バネ端の  $Y$  反力(ケース 6)

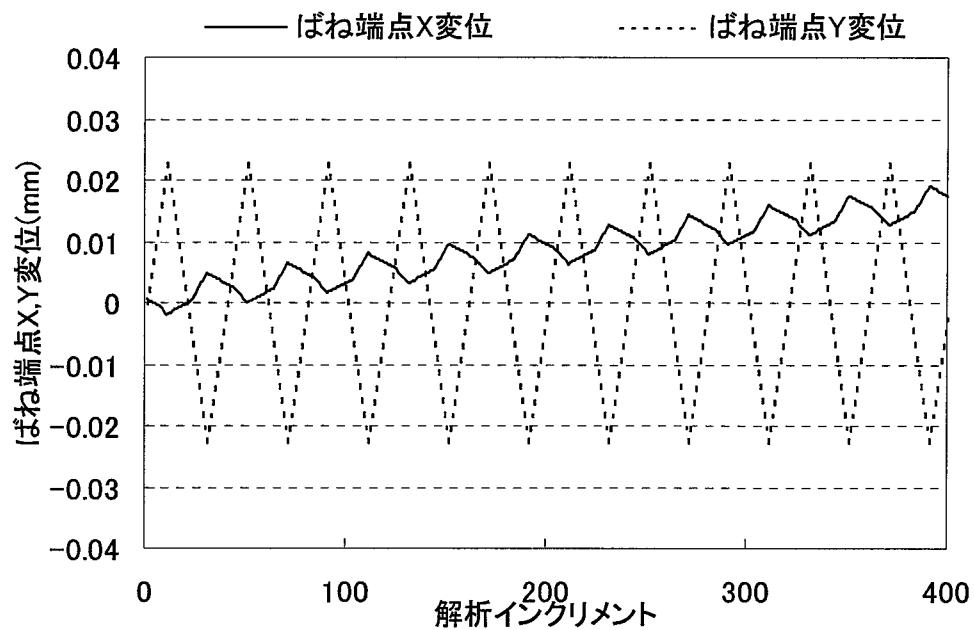


図 2.1-3(1) 上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 1)

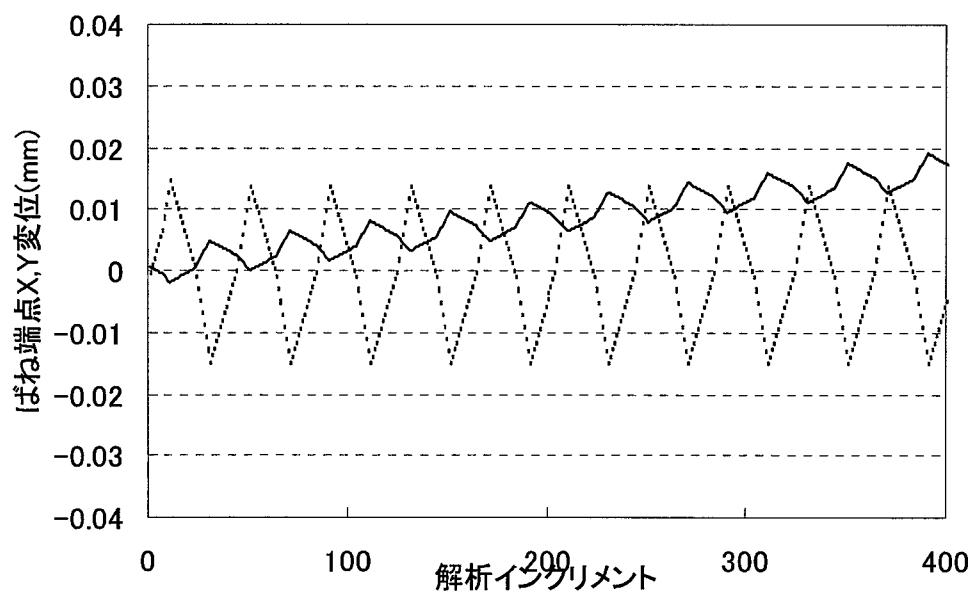


図 2.1-3(2) 1要素との接続側バネ端の変位(ケース 1)

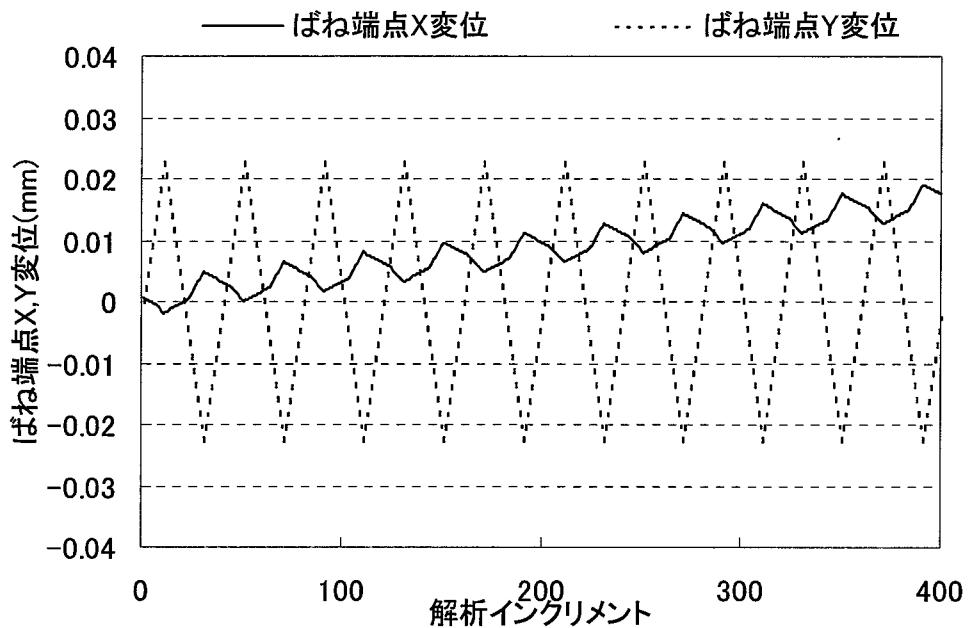


図 2.1-3(3) 上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 2)

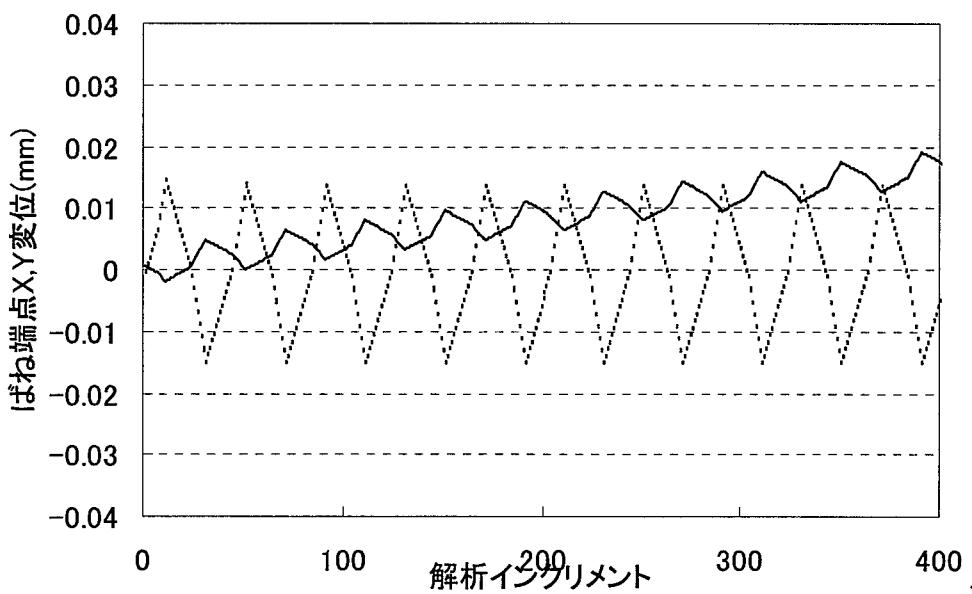


図 2.1-3(4) 1要素との接続側バネ端の変位(ケース 2)

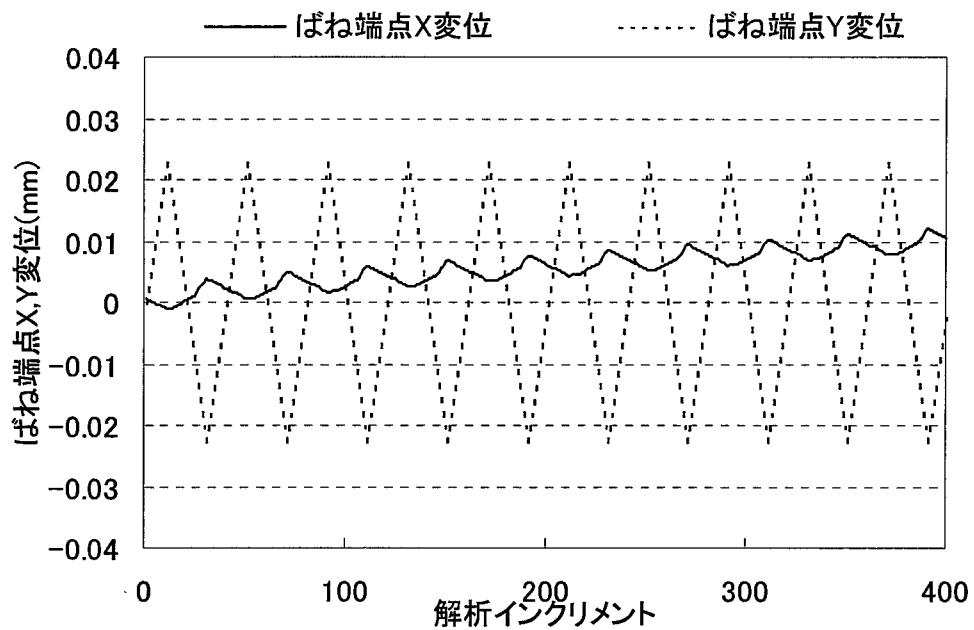


図 2.1-3(5) 上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 3)

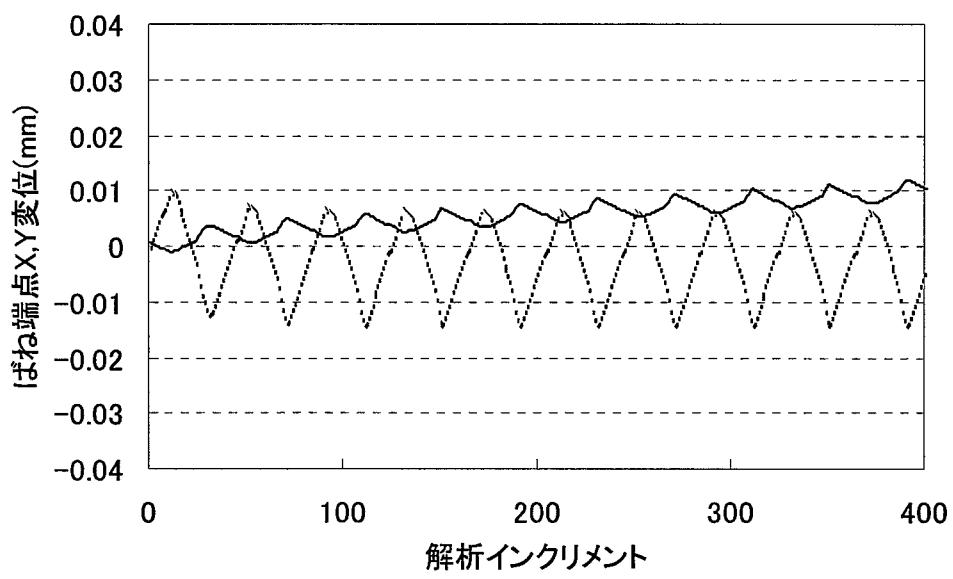


図 2.1-3(6) 1要素との接続側バネ端の変位(ケース 3)

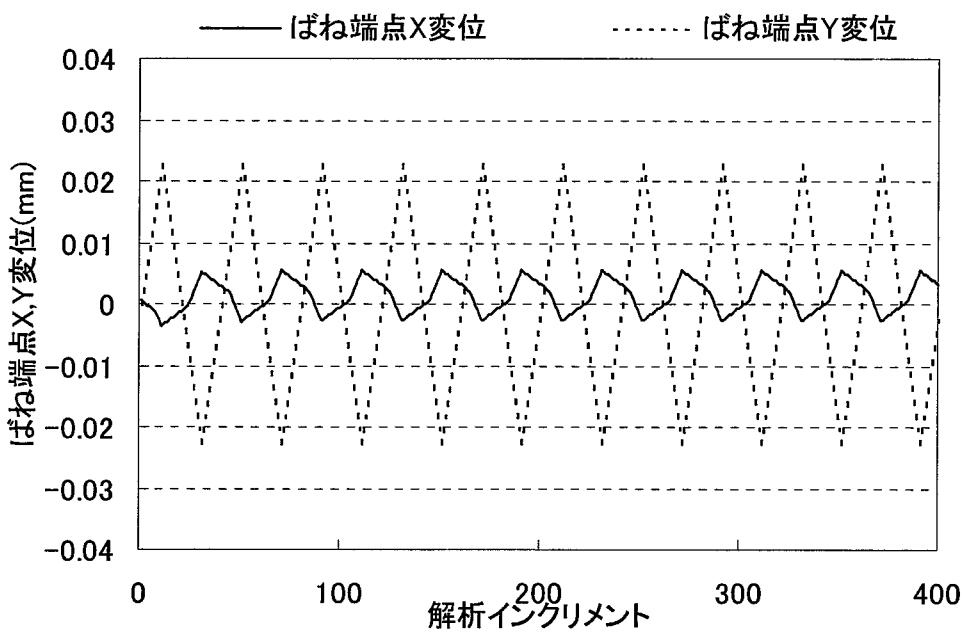


図 2.1-3(7) 上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 4)

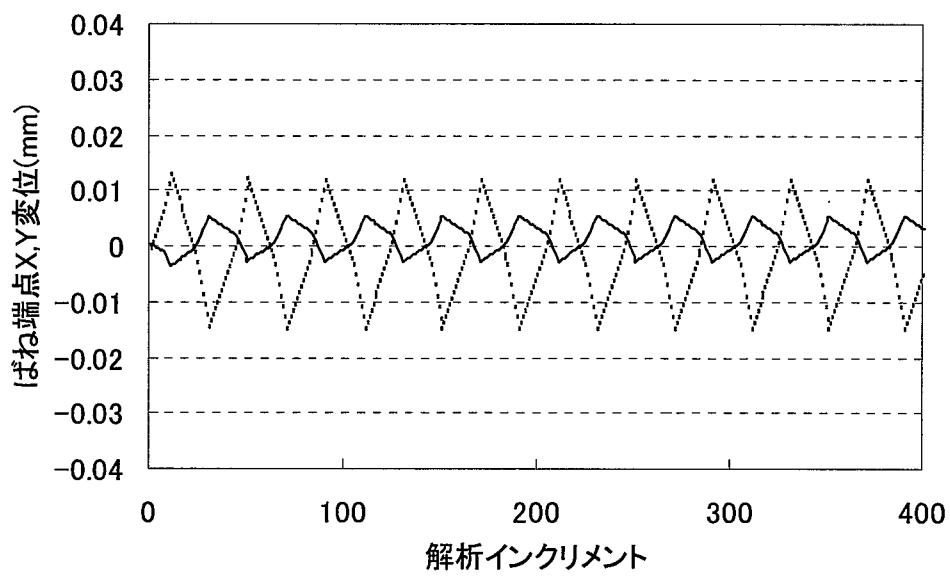


図 2.1-3(8) 1 要素との接続側バネ端の変位(ケース 4)

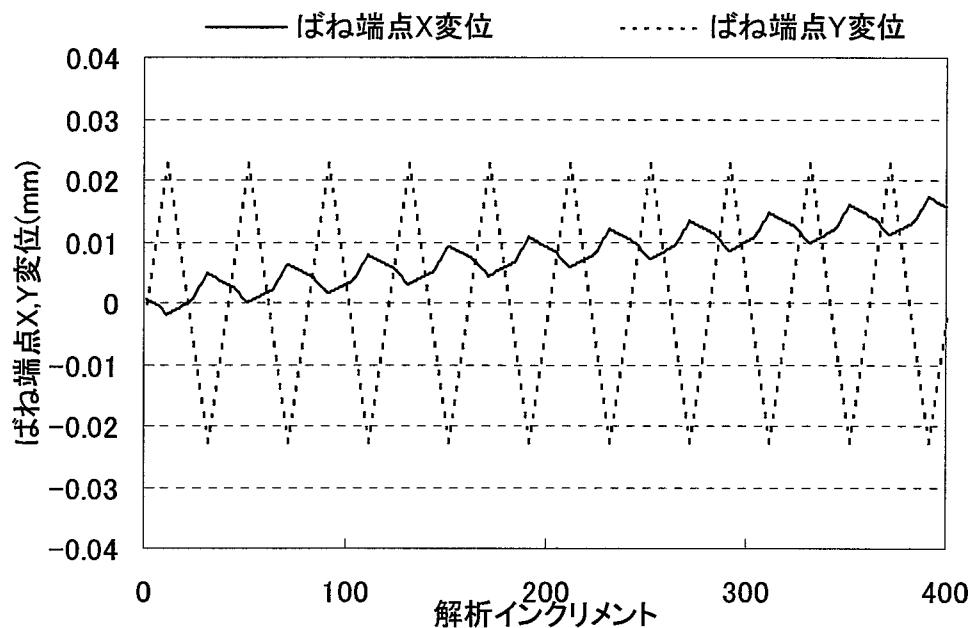


図 2.1-3(9) 上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 5)

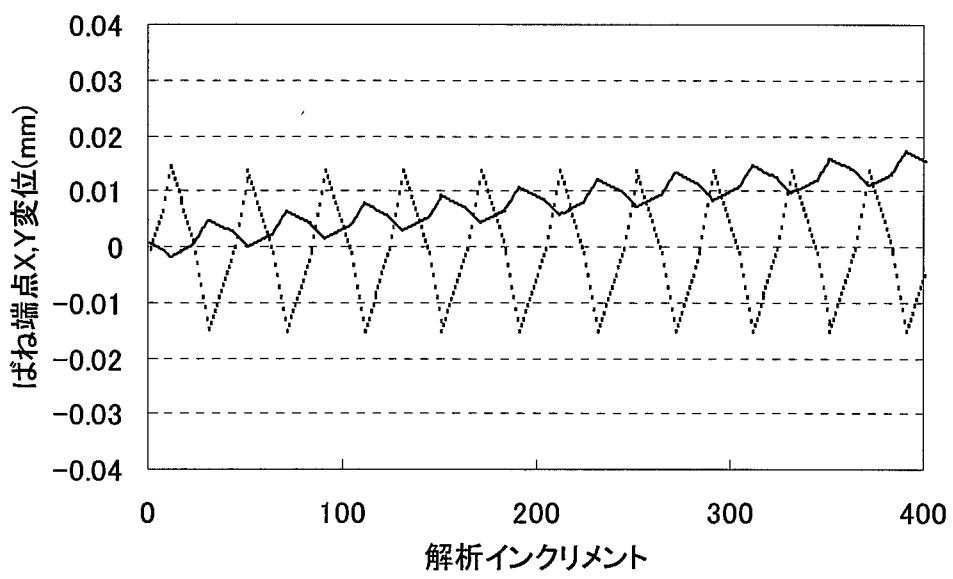


図 2.1-3(10) 1 要素との接続側バネ端の変位(ケース 5)

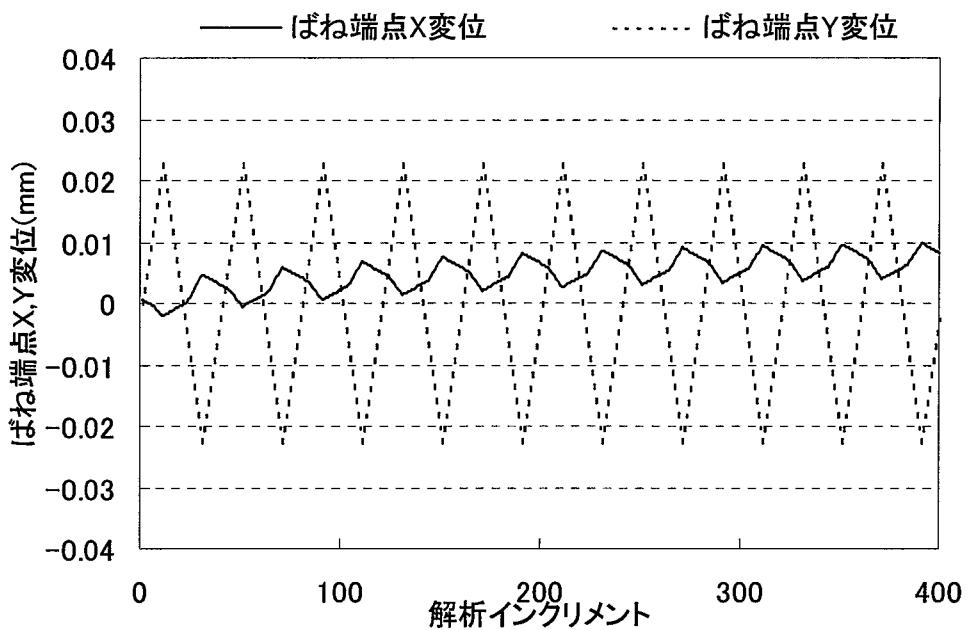


図 2.1-3(11) 上下変位負荷側バネ端の変位(ケース 6)

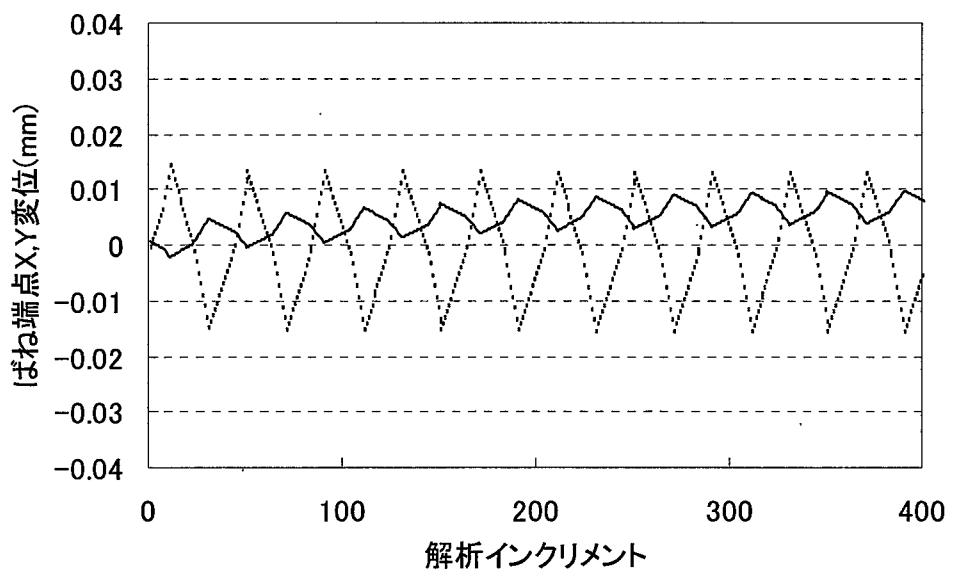


図 2.1-3(12) 1 要素との接続側バネ端の変位(ケース 6)

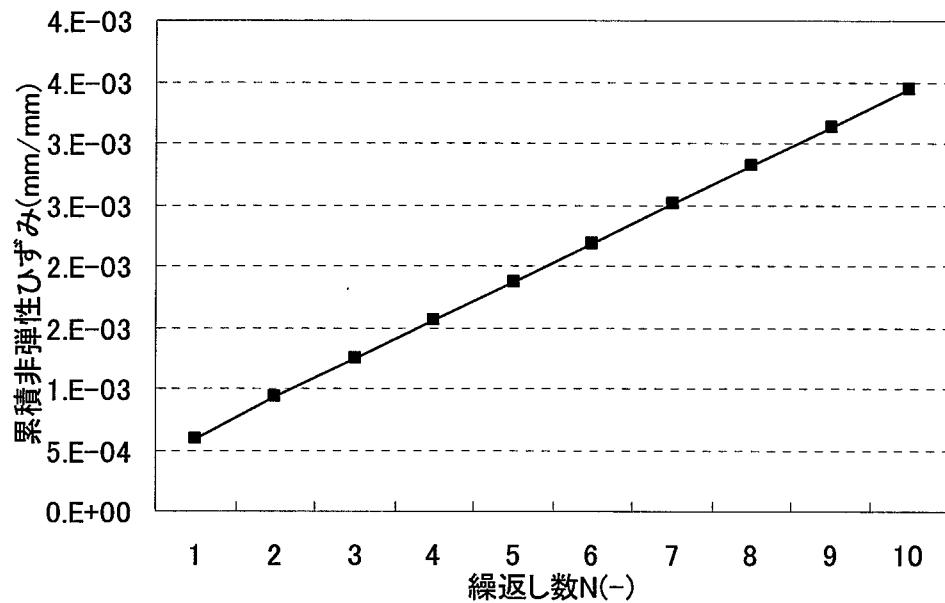


図 2.1-4(1) 一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 1)

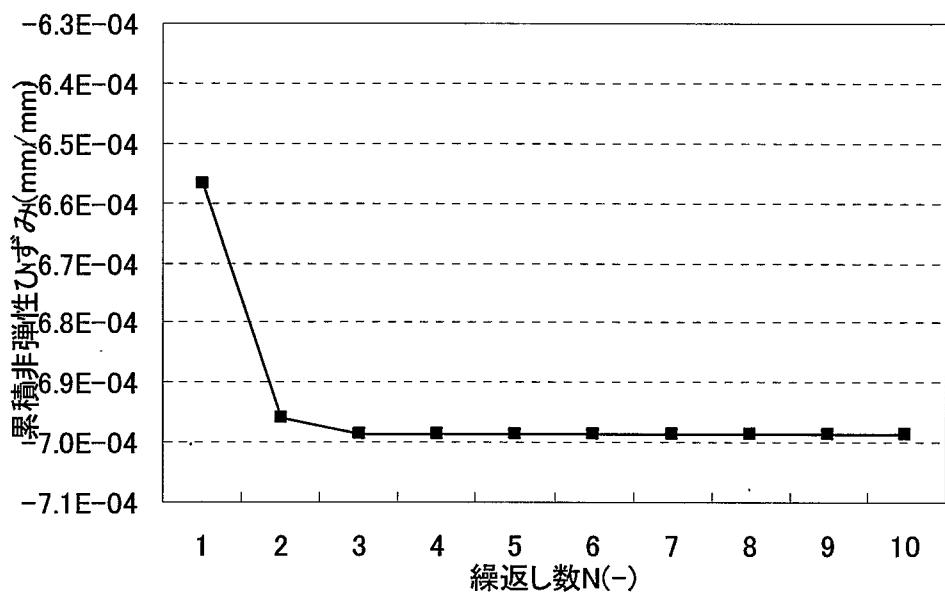


図 2.1-4(2) 強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 1)

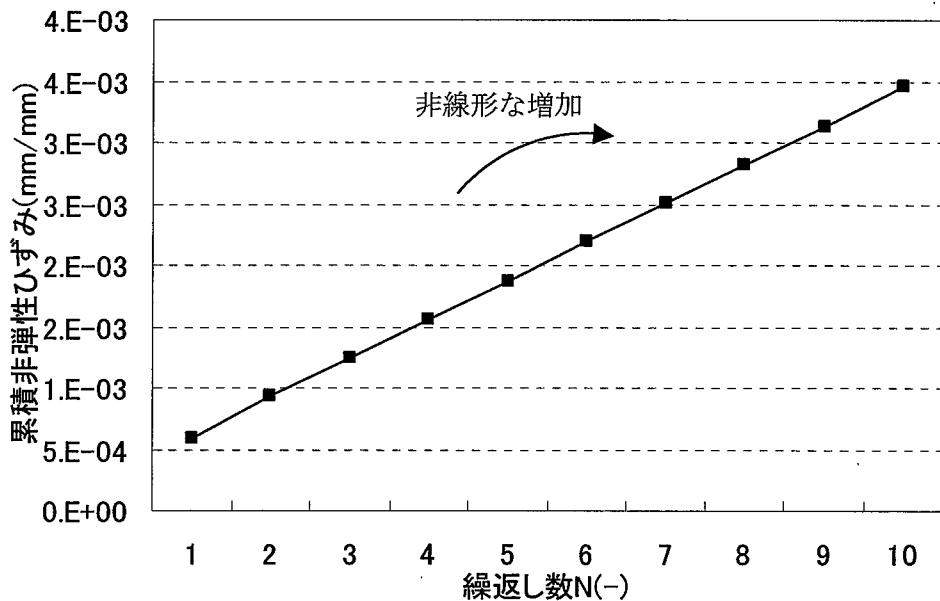


図 2.1-4(3) 一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 2)

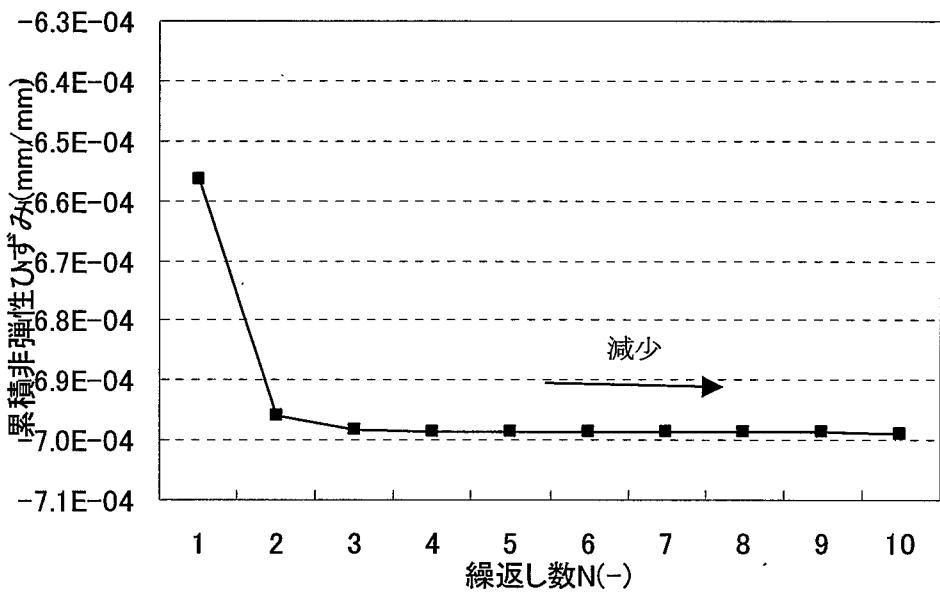


図 2.1-4(4) 強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 2)

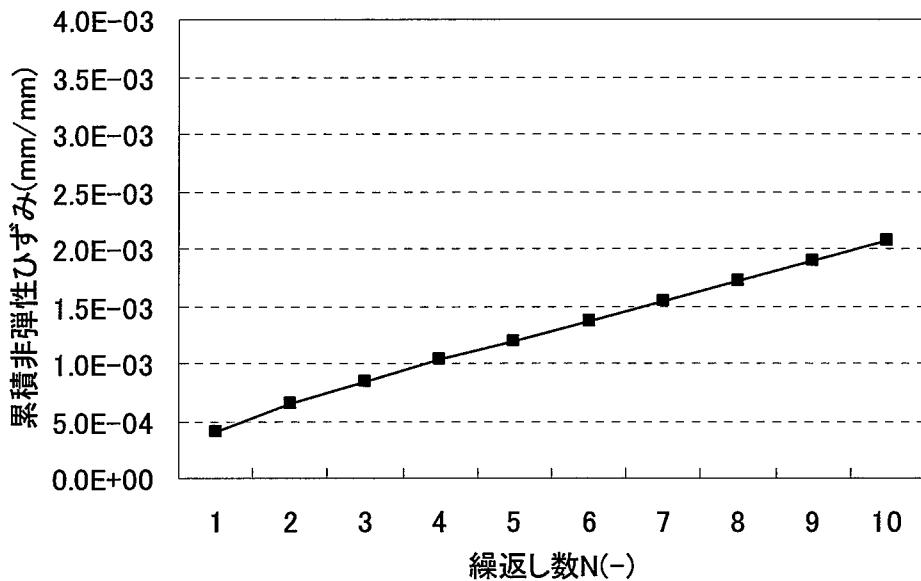


図 2.1-4(5) 一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 3)

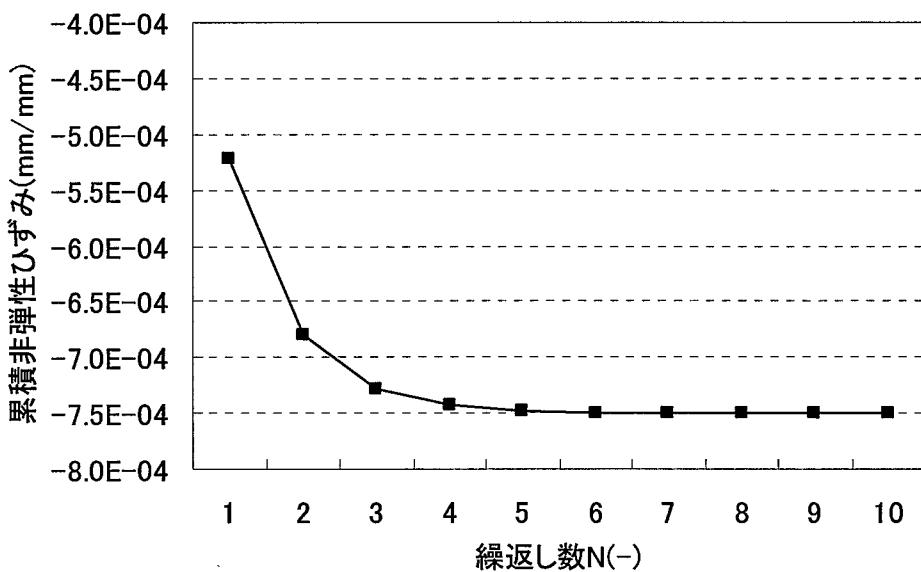


図 2.1-4(6) 強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 3)

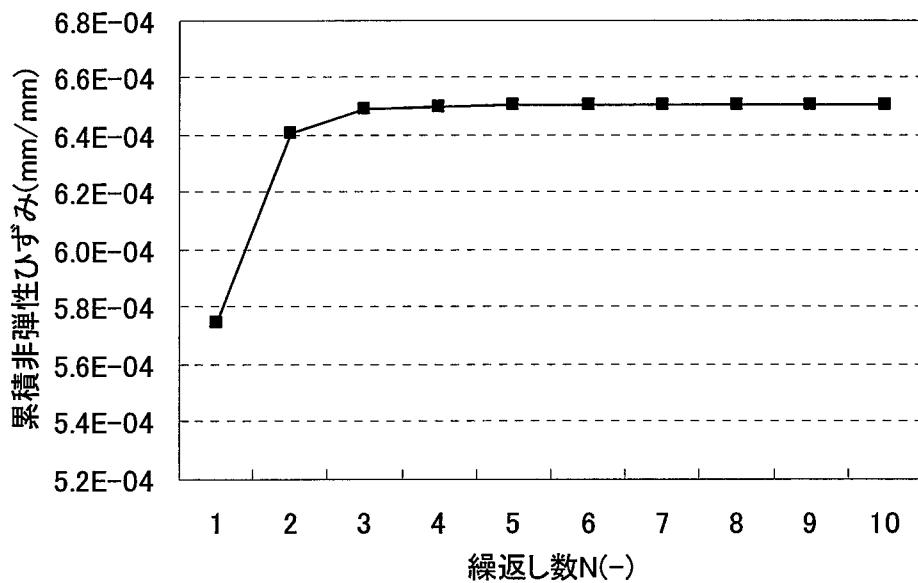


図 2.1-4(7) 一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 4)

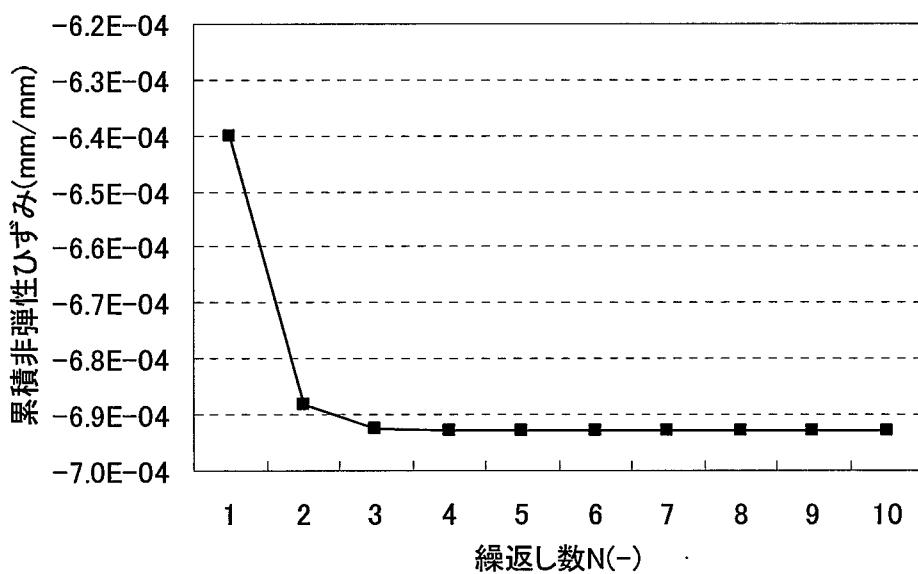


図 2.1-4(8) 強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 4)

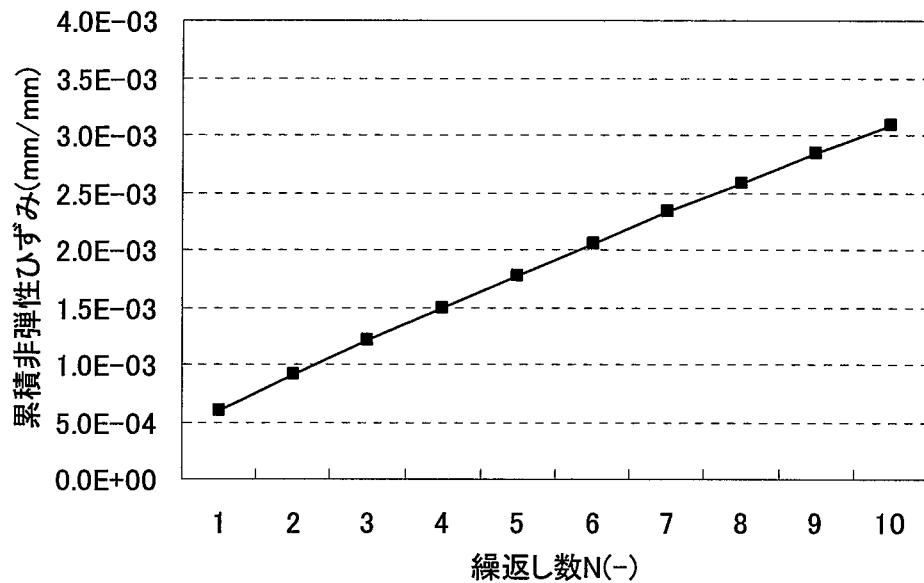


図 2.1-4(9) 一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 5)

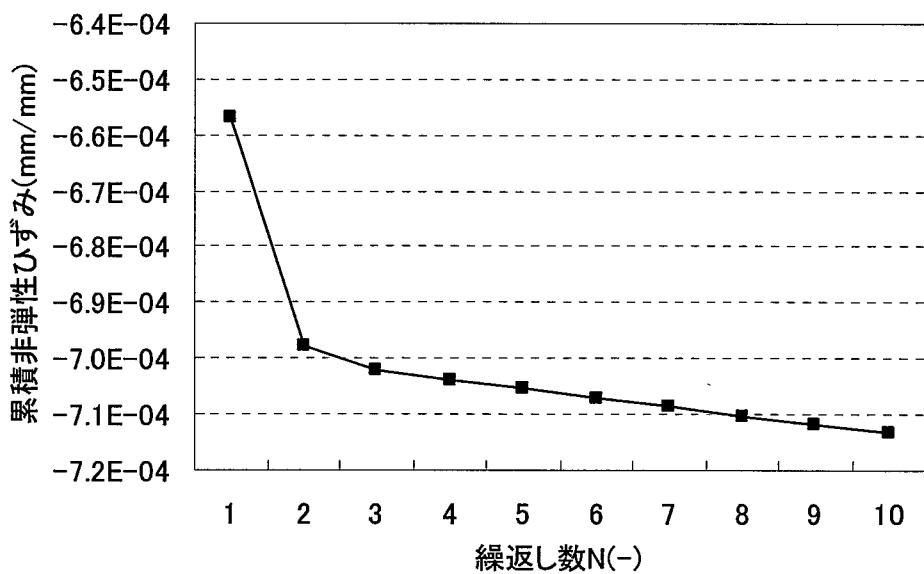


図 2.1-4(10) 強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 5)

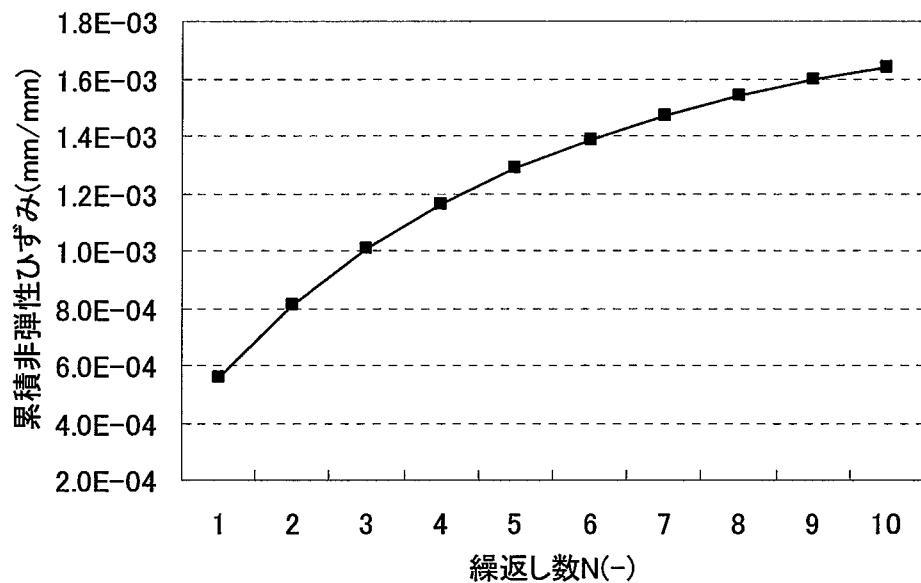


図 2.1-4(11) 一次荷重方向累積非弾性ひずみ(ケース 6)

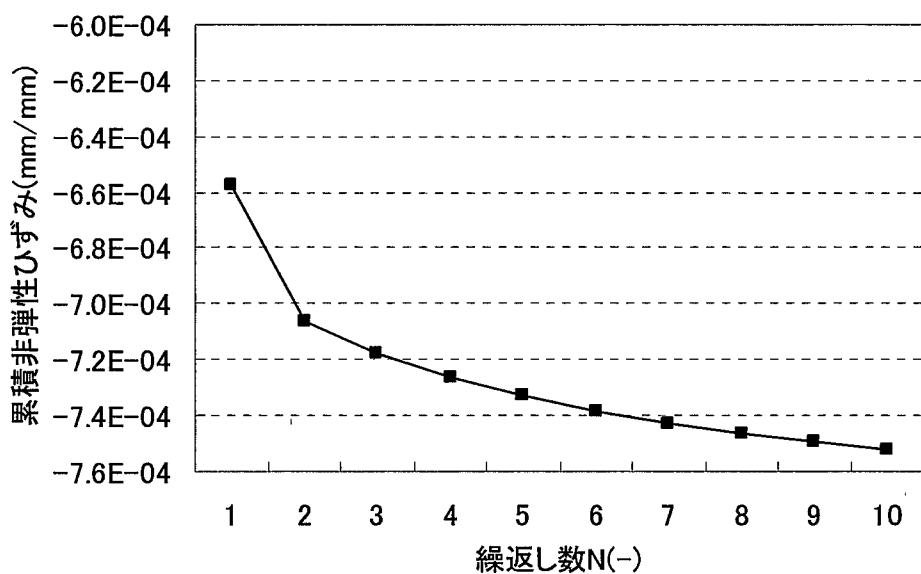


図 2.1-4(12) 強制変位方向累積非弾性ひずみ(ケース 6)

### (3)簡易モデルによる負荷履歴検討解析

簡易モデルによる負荷履歴検討を行った。検討は、前項で決定したモデルを基本としているが、設定した負荷パターン条件において、モデルの違いによる影響を確認し、そして、詳細構成式との比較を行った。

#### a.モデルの違いによる影響

##### (a)強制変位方向バネ定数の影響

平面応力要素を用い、繰返し強制変位方向バネ要素のバネ定数が負荷履歴に与える影響を、負荷パターン 1 および 2 の場合について確認した。バネ定数は弾性追従係数  $q=1$  となるバネ定数 3080000N/mm、 $q=2$  程度となる 154000N/mm、および  $q=3$  となる 77000N/mm の 3 種類について解析した。解析結果の一次荷重方向累積非弾性ひずみ履歴を図 2.1-5 に示す。また、負荷パターン 1 と 2 の一次荷重方向累積非弾性ひずみの差(負荷終了時)を比較して図 2.1-6 に示す。バネ定数が大きいほど負荷履歴の影響は大きいようである。

##### (b)面方向バネ定数の影響

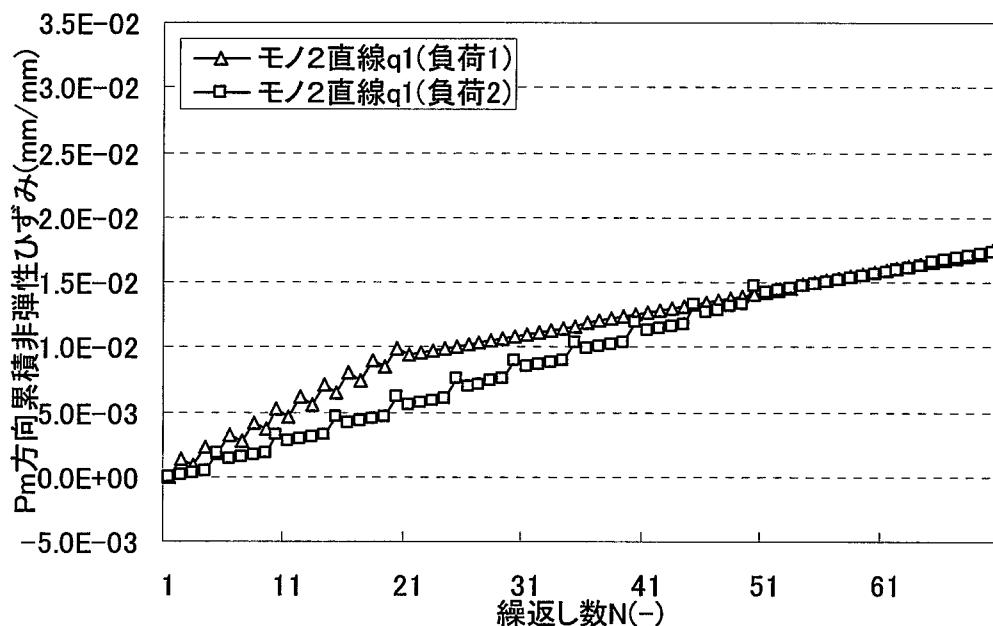
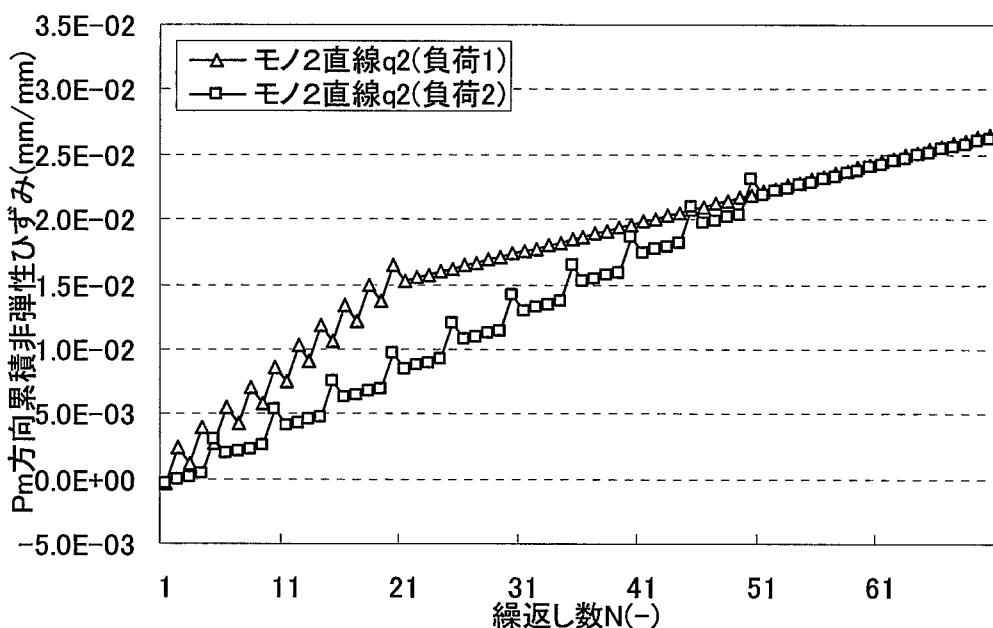
前項でのサーベイの結果、平面応力要素では単調に累積非弾性ひずみが増加し、平面ひずみ要素では数サイクルで頭打ちとなる傾向であった。両要素の違いは、前者が板厚方向のひずみをゼロとしているのに対し、後者ではひずみが変化することである。このことから、面方向のひずみの変化が累積非弾性ひずみの増加挙動に関与していることが考えられる。そこで、面方向に自由度を持つ一般化平面ひずみ要素にて、面方向にバネ要素を取り付け、バネ定数が 15400、154000、200000、300000、400000、1540000、15400000 の 7 通りについて、負荷パターン 1 と 2 の解析を行って比較した。その他の条件は  $q=2$  の場合のこれまでの解析と同様である。解析結果の一次荷重方向累積非弾性ひずみ履歴を図 2.1-7 に示す。比較のため、図 2.1-7(1)に平面応力要素の場合、図 2.1-7(9)に平面ひずみ要素の場合の解析結果を示した。また、負荷パターン 1 と 2 の一次荷重方向累積非弾性ひずみの差(負荷終了時)を比較して図 2.1-8 に示す。累積非弾性ひずみへの負荷履歴効果に関して、面方向のバネ定数の与え方により一般化平面ひずみ要素が、平面応力要素的挙動から平面ひずみ要素的挙動へ移行していく様子がわかるが、途中、バネ定数 1000000N/mm 付近に極値を持つよう

ある。また、図 2.1-7 からわかるように、バネ定数 200000N/mm まではひずみは増加傾向であったものが、300000N/mm 以降は一旦増加して減少する傾向に変わっている。

#### b. 詳細構成式との比較

平面応力要素で負荷パターン 1~4 について、2 直線式(弾塑性応力ひずみ関係式の 2 直線近似 +  $\alpha$  リセットモデル)と詳細構成式(大野ー王モデル)とを比較解析した。解析結果の一次荷重方向累積非弾性ひずみ履歴を図 2.1-9 に示す。図 2.1-10 に示すように負荷パターン 1 と 2、および、図 2.1-11 のように 3 と 4 とでは構成式が同じであれば、最終的な累積非弾性ひずみの値の差は小さい。しかし、1・2 と 3・4 とでは明らかに履歴の差がある。これは、圧縮時(強制変位 B)の累積非弾性ひずみの増分が、直前に引張(強制変位 A)がある場合とそうでない場合とで大きな差があるためである。図 2.3.1-12 にそれぞれの上下変位負荷方向の応力ひずみ履歴を示す。

負荷履歴の差は見られるが、いずれの負荷パターンによっても、2 直線式は大野ー王に比べて数倍大きな予測となっており、十分に安全側の予測となることが確認された。

図 2.1-5(1) バネ定数  $3080000\text{N/mm}$ ( $q=1$ ) の累積非弾性ひずみ履歴図 2.1-5(2) バネ定数  $154000\text{N/mm}$ ( $q=2$ ) の累積非弾性ひずみ履歴

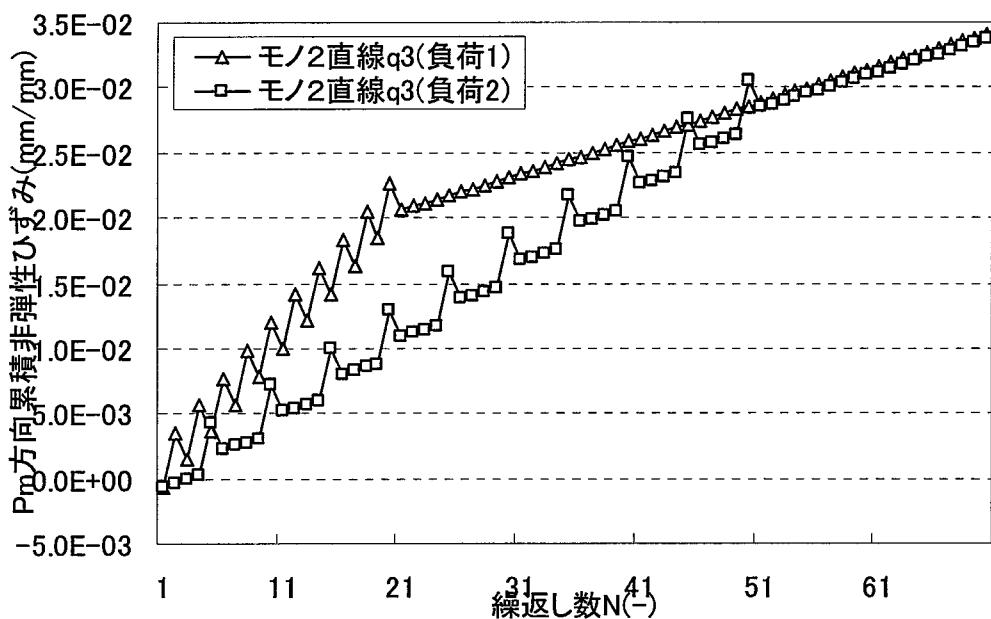


図 2.1-5(3) バネ定数 77000N/mm( $q=3$ )の累積非弾性ひずみ履歴

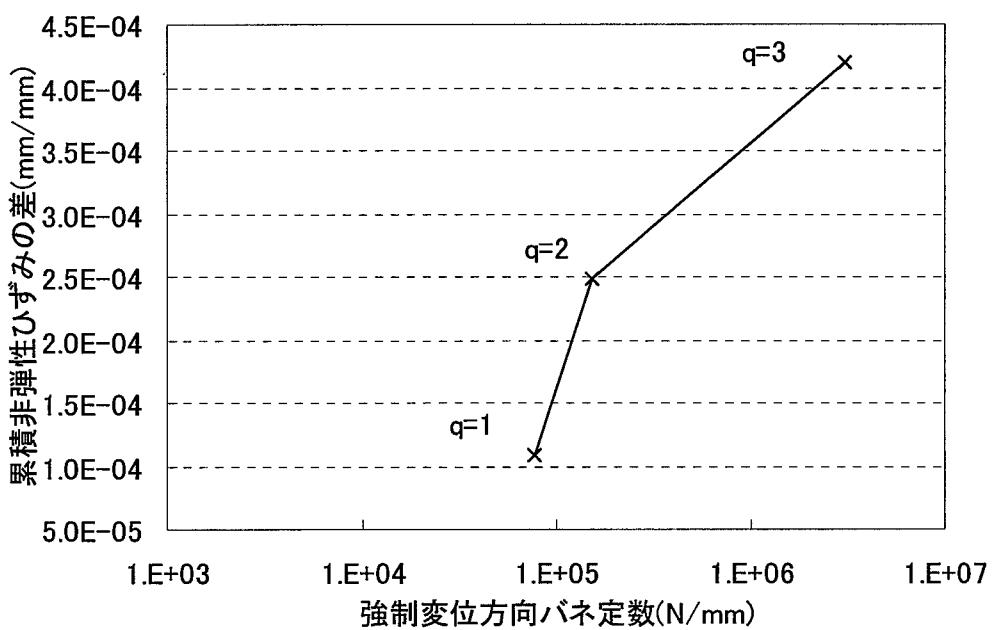


図 2.1-6 強制変位方向バネ定数の負荷履歴への影響

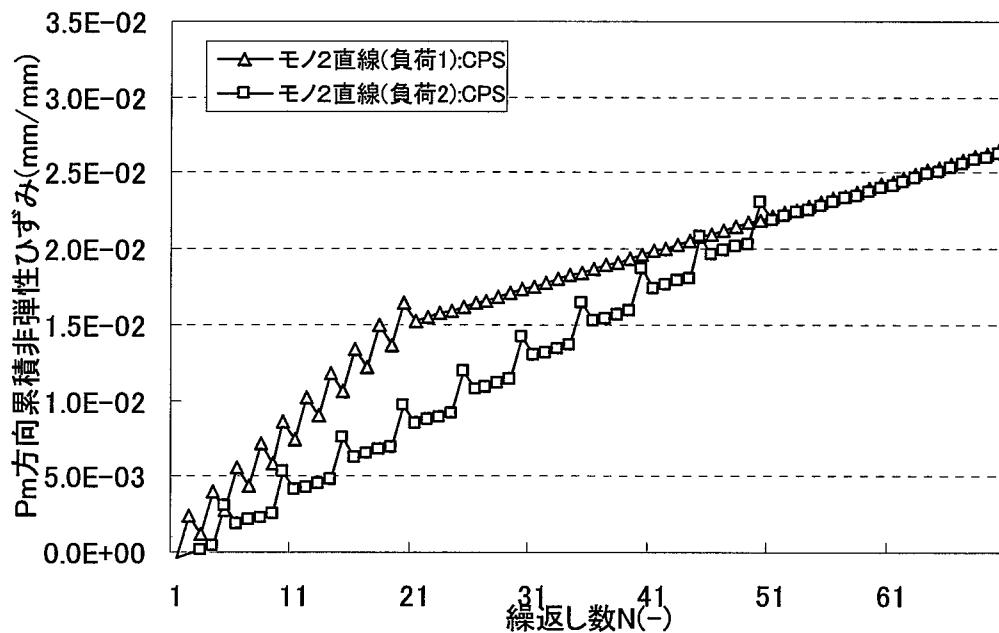


図 2.1-7(1) 平面応力要素の累積非弾性ひずみ履歴

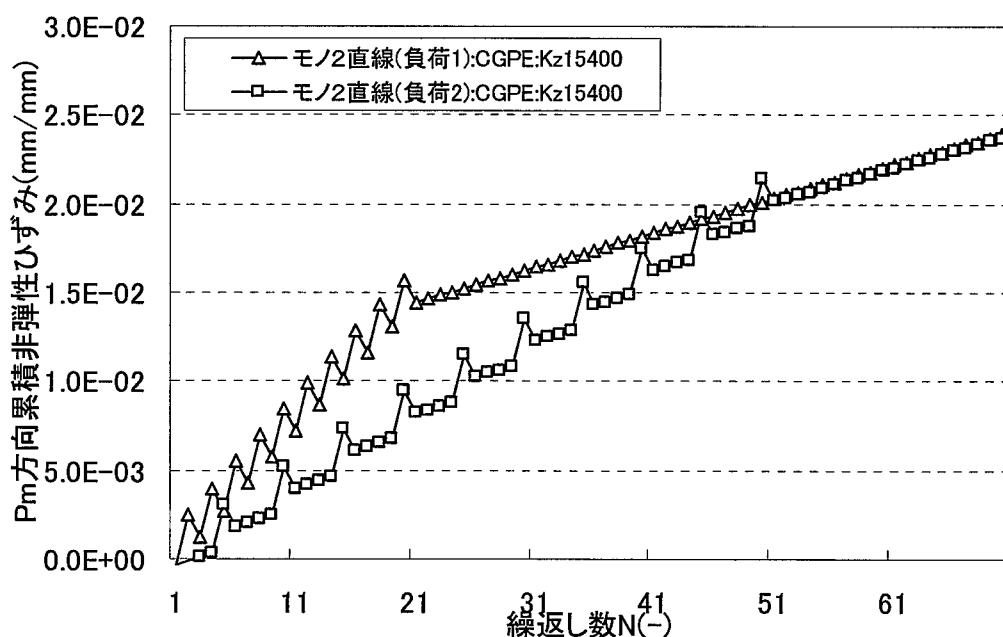


図 2.1-7(2) 一般化平面ひずみ要素(バネ 15400N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴

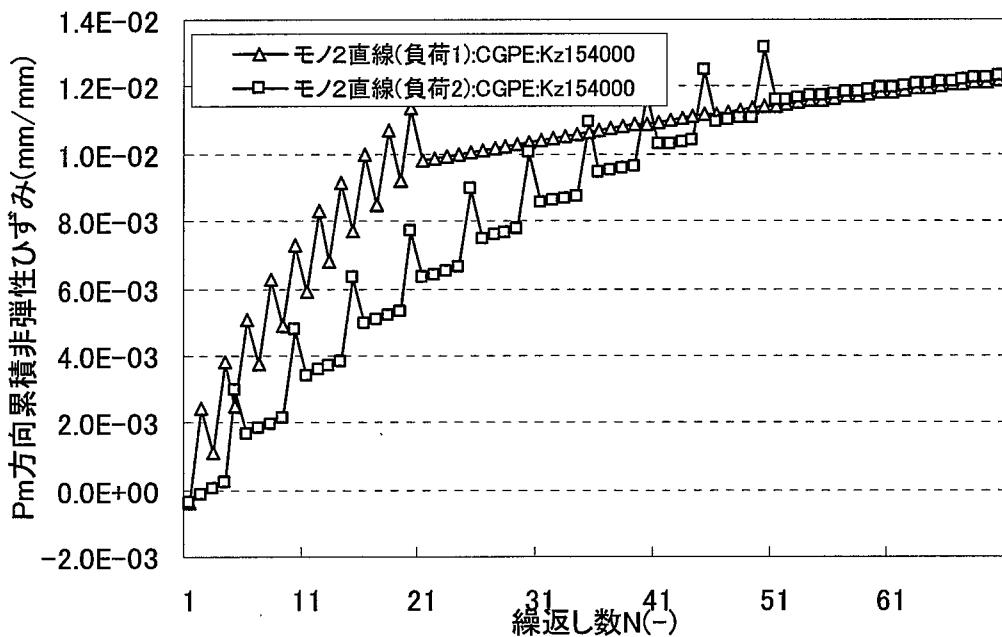


図 2.1-7(3) 一般化平面ひずみ要素(バネ 154000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴

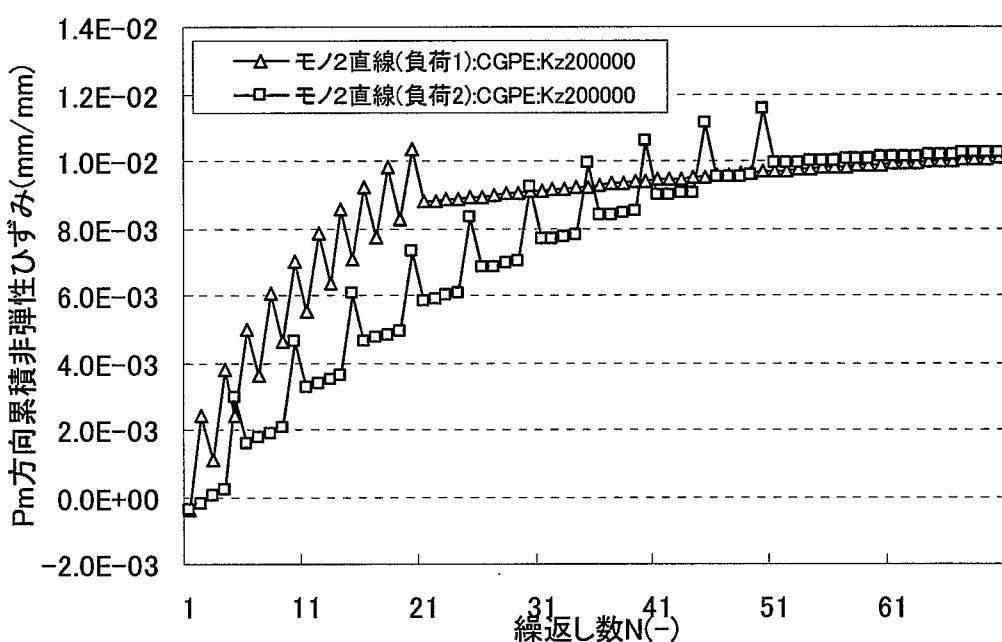


図 2.1-7(4) 一般化平面ひずみ要素(バネ 200000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴

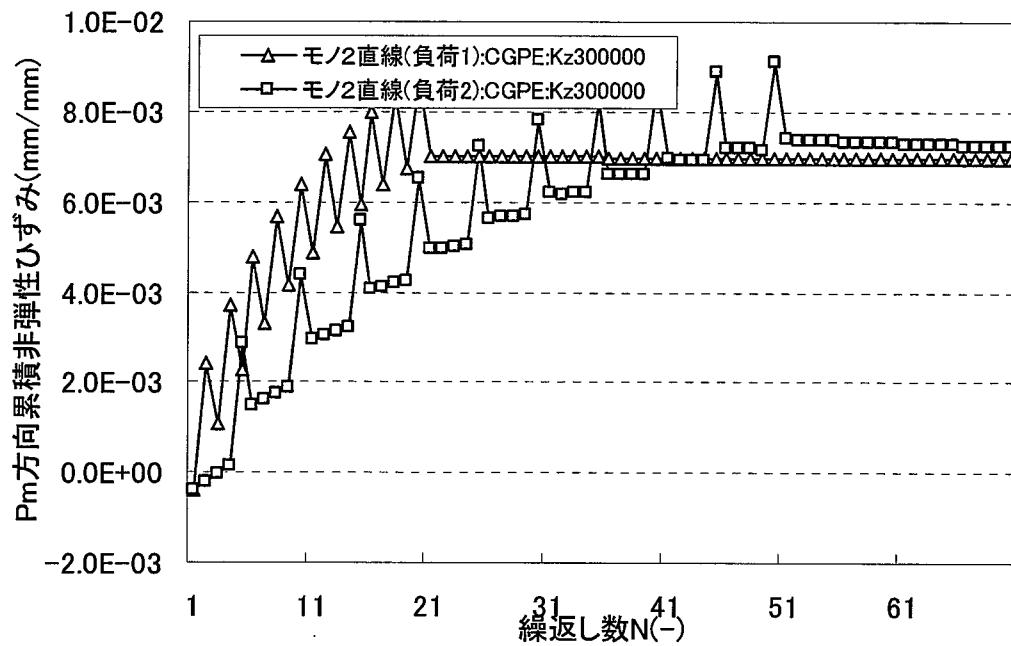


図 2.1-7(5) 一般化平面ひずみ要素(バネ 300000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴

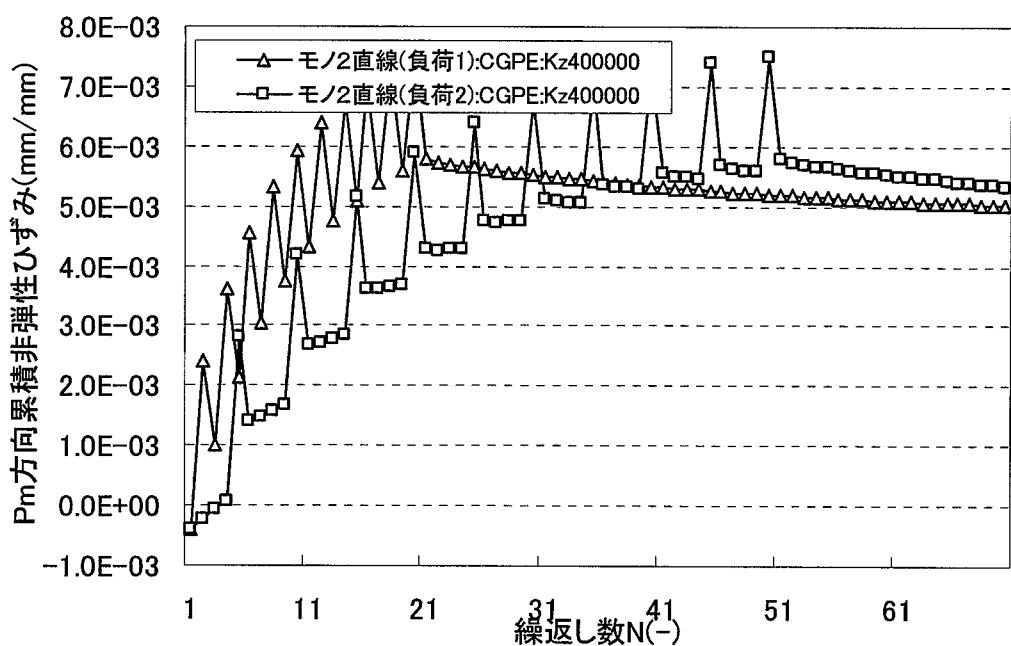


図 2.1-7(6) 一般化平面ひずみ要素(バネ 400000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴

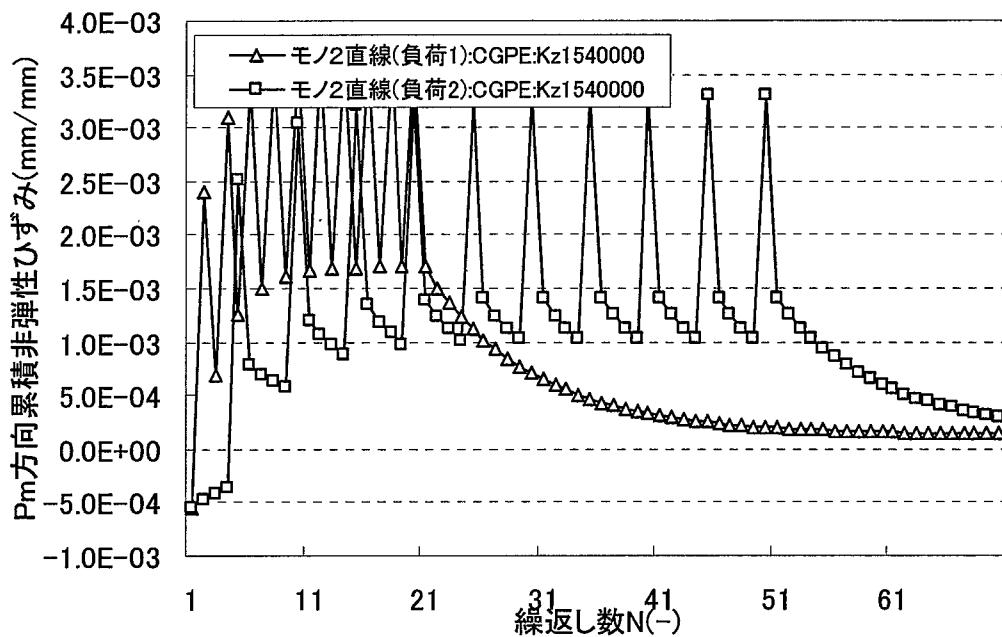


図 2.1-7(7) 一般化平面ひずみ要素(バネ 1540000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴

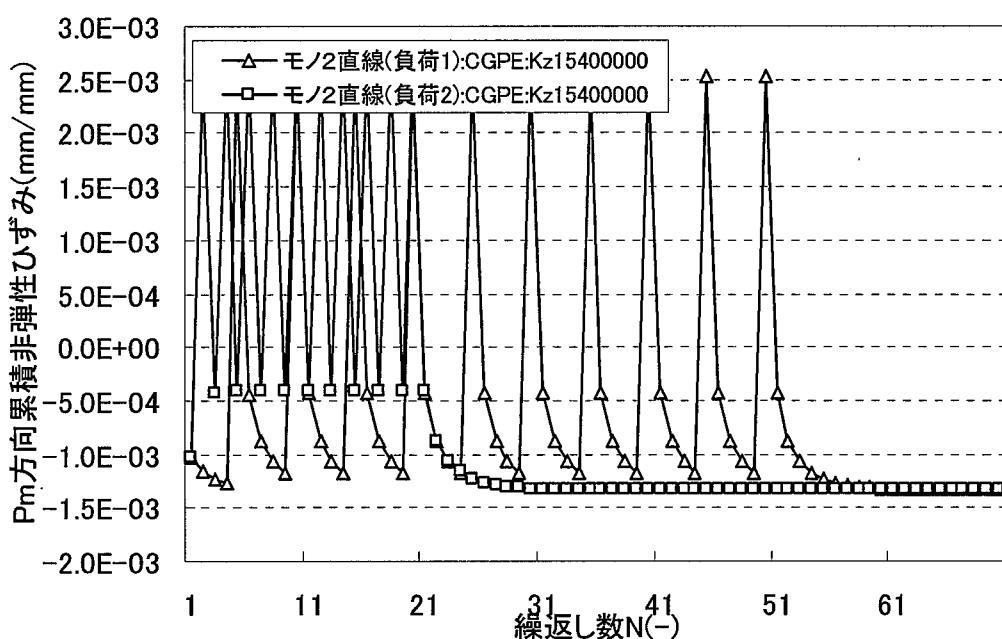


図 2.1-7(8) 一般化平面ひずみ要素(バネ 15400000N/mm)の累積非弾性ひずみ履歴

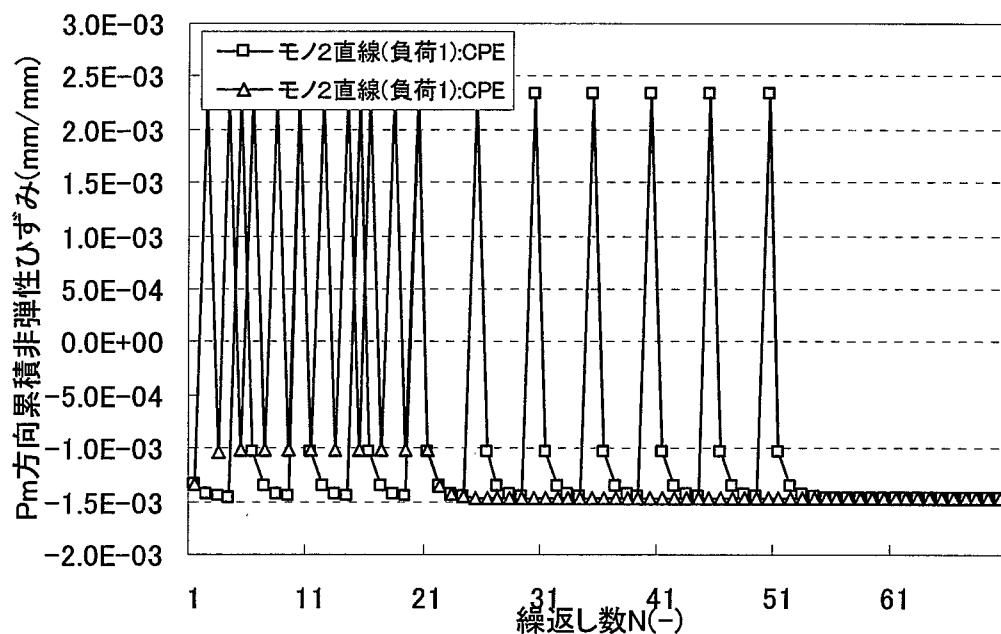


図 2.1-7(9) 平面ひずみ要素の累積非弾性ひずみ履歴

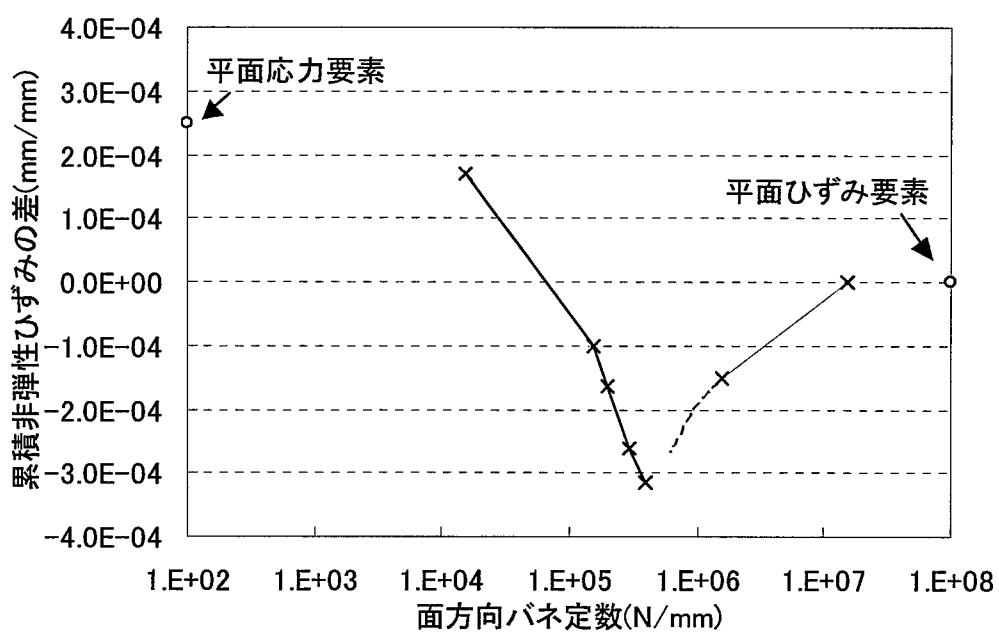


図 2.1-8 面方向バネ定数の負荷履歴への影響

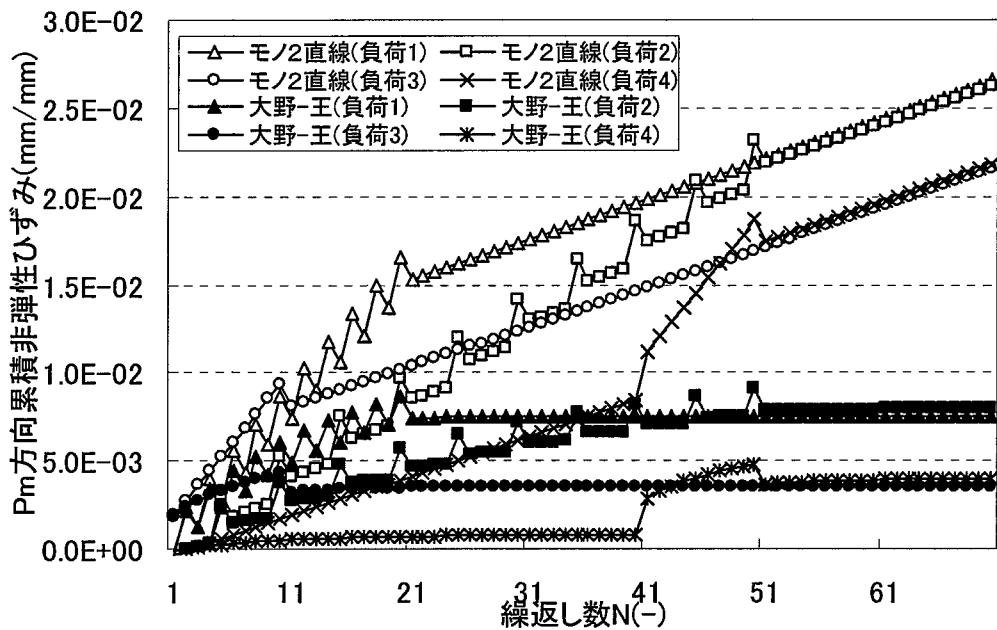


図 2.1-9 負荷パターン 1~4 の比較

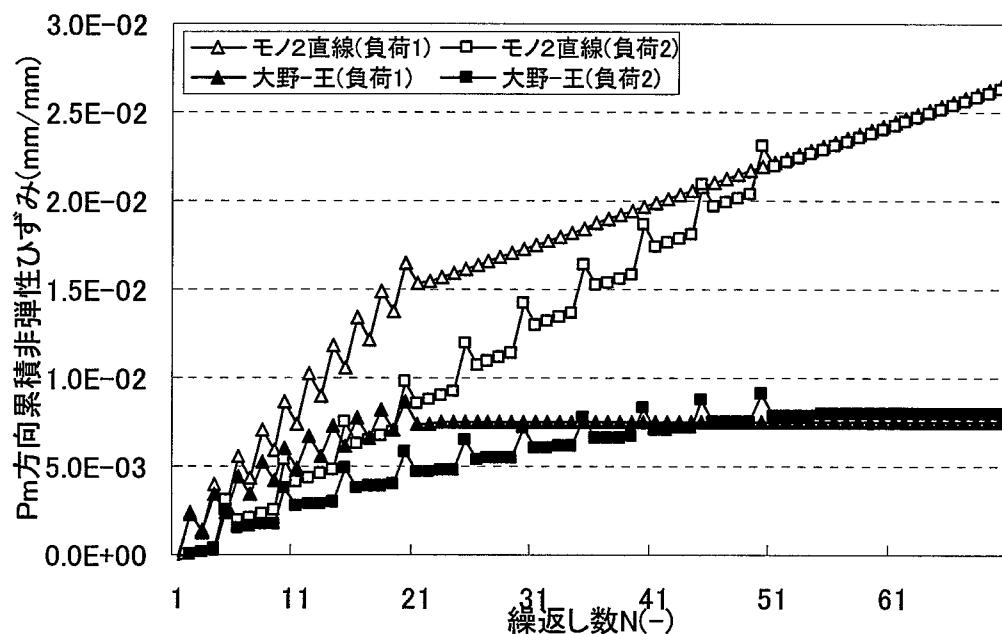


図 2.1-10 負荷パターン 1、2 の比較

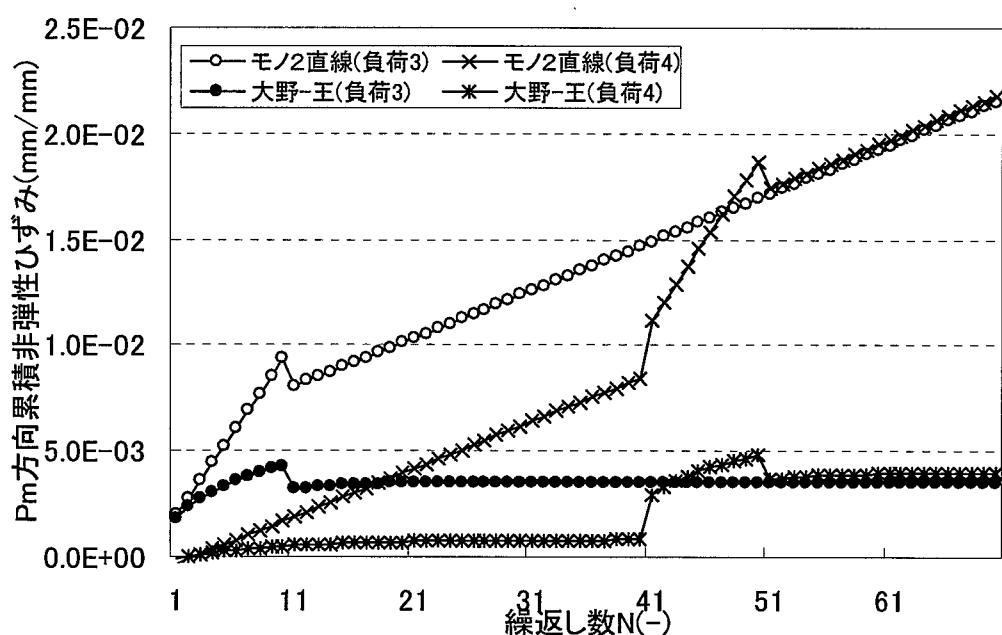


図 2.1-11 負荷パターン 3、4 の比較

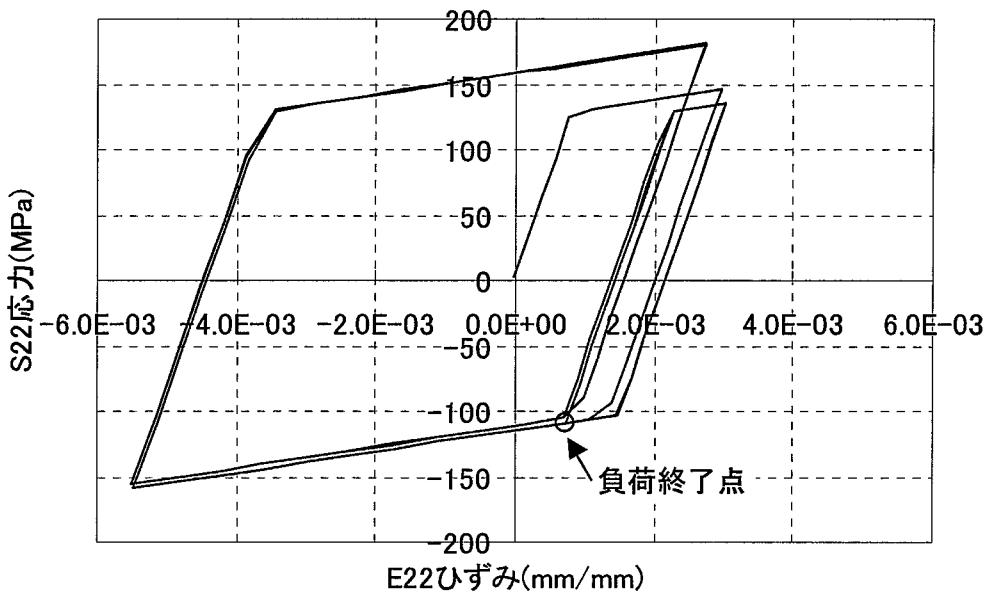


図 2.1-12(1) 応力ひずみ履歴(2 直線式、負荷パターン 1)

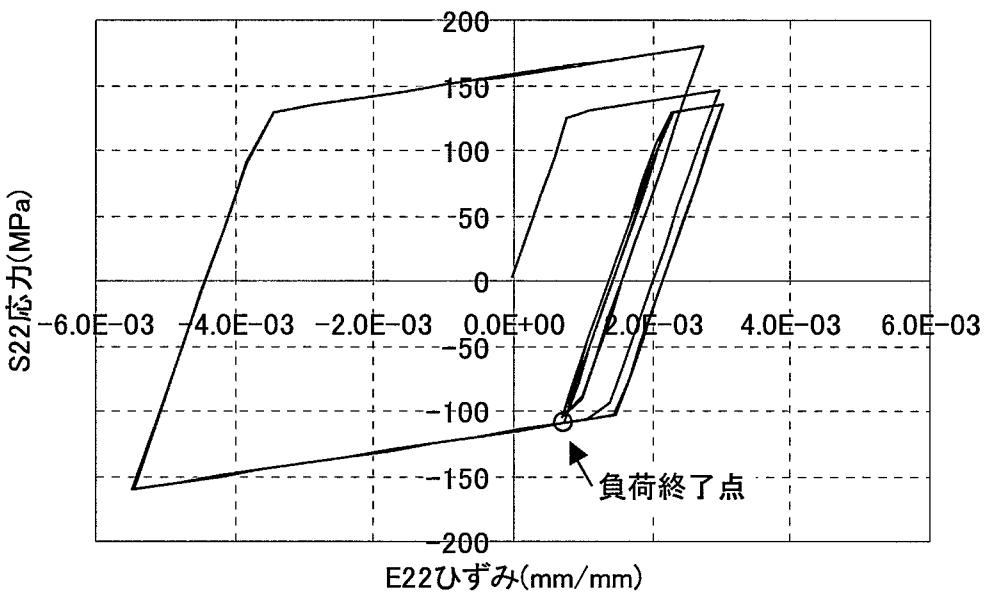


図 2.1-12(2) 応力ひずみ履歴(2 直線式、負荷パターン 2)

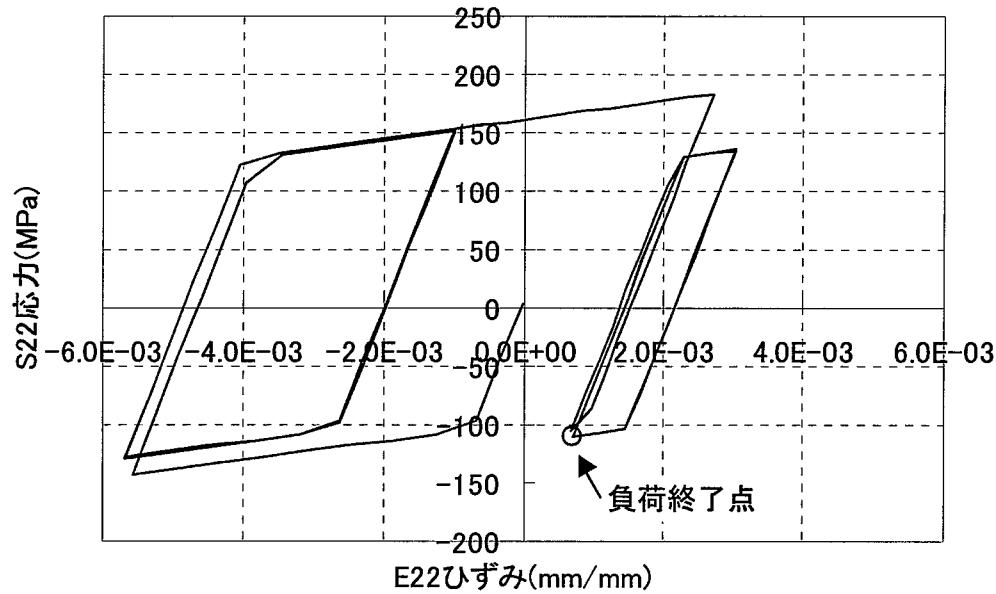


図 2.1-12(3) 応力ひずみ履歴(2直線式、負荷パターン3)

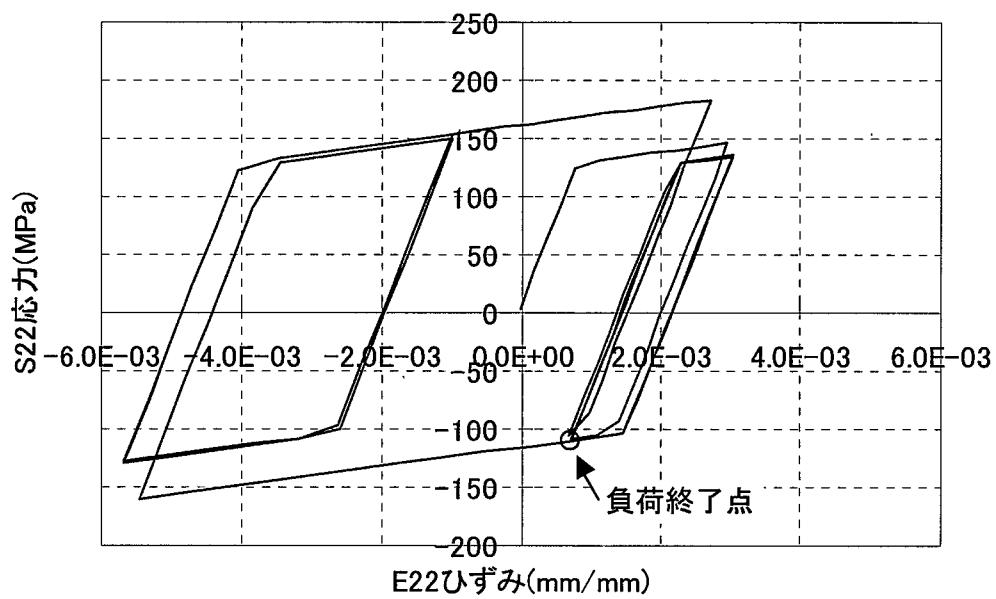


図 2.1-12(4) 応力ひずみ履歴(2直線式、負荷パターン4)

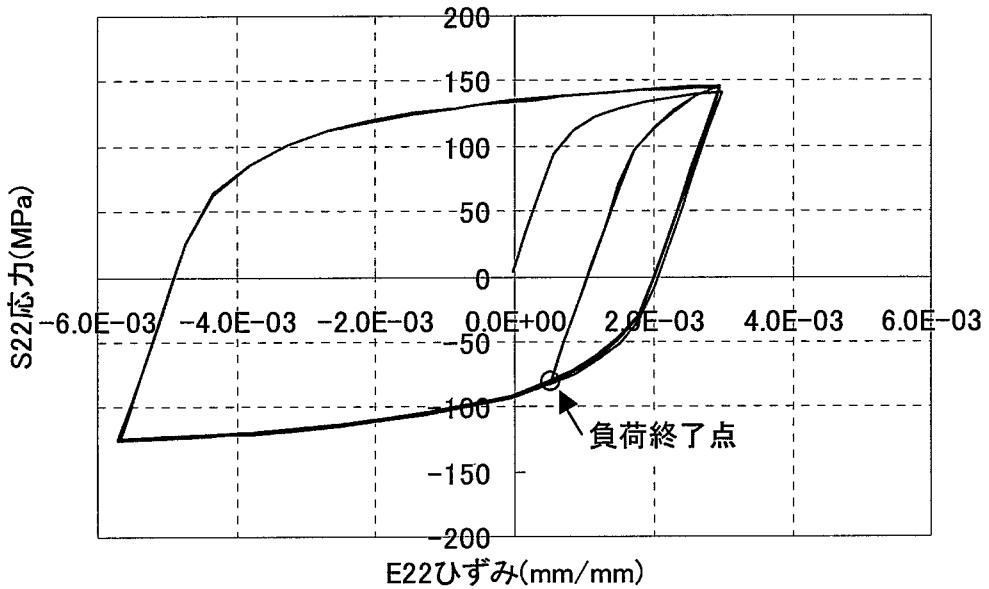


図 2.1-12(5) 応力ひずみ履歴(大野一王、負荷パターン 1)

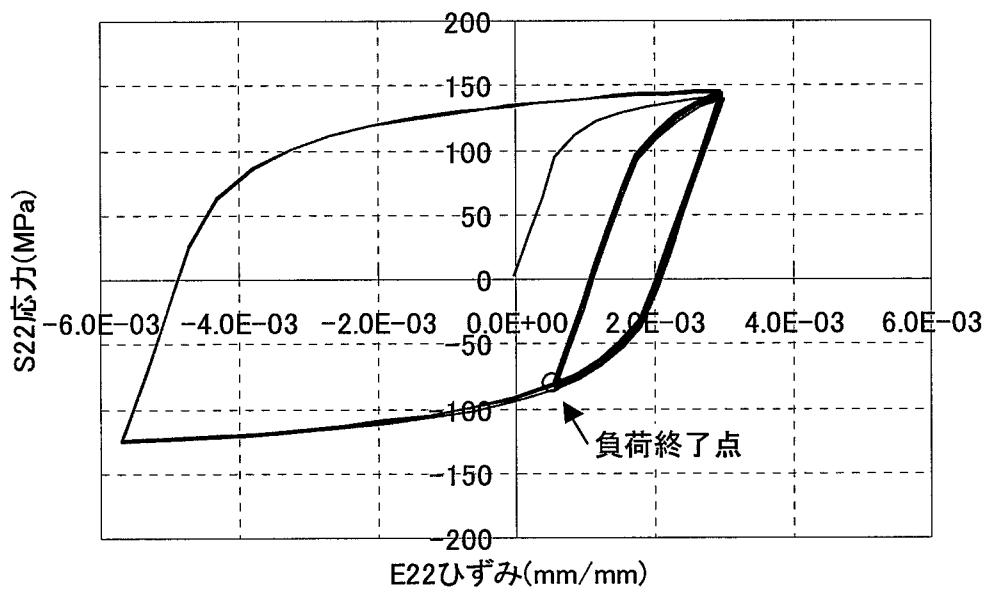


図 2.1-12(6) 応力ひずみ履歴(大野一王、負荷パターン 2)

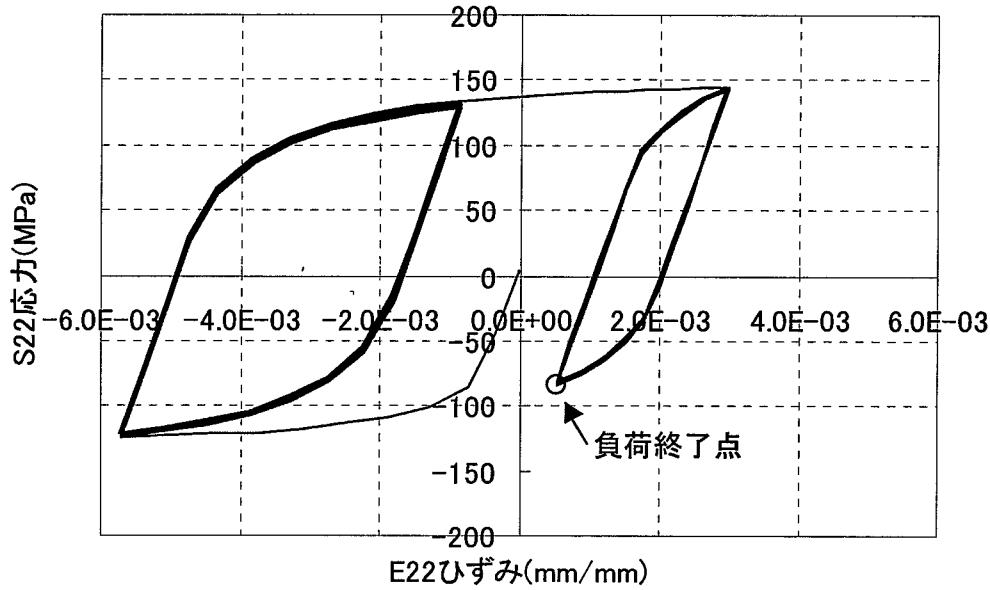


図 2.1-12(7) 応力ひずみ履歴(大野一王、負荷パターン 3)

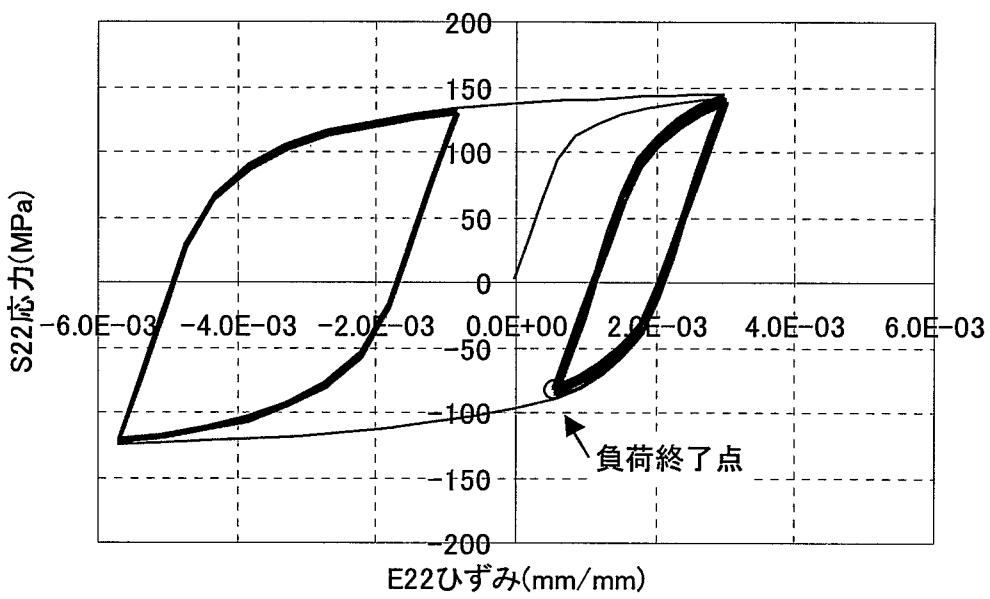


図 2.1-12(8) 応力ひずみ履歴(大野一王、負荷パターン 4)

## 2.2 詳細構成式の設計への適用上の課題の調査

FBR 高温構造設計法の高度化の一環として、非弾性解析による設計の検討がなされている。これまでに、古典的構成則を用いた非弾性解析設計法が提案されているが、今後のさらなる設計の進捗、設計の合理化のために、より高精度な非弾性解析評価の必要性が高まつてくるものと思われる。そこで、予測精度の一層の向上が期待される詳細構成式の設計への適用上の課題を調査した。

### (1) 詳細構成式について

材料の詳細構成式は、統一型と分離型に大きく分けられる。統一型は、全ての非弾性挙動すなわち、クリープも含めてひとつの式で表すものであるが、分離型は時間依存無しの塑性構成式と時間依存有りのクリープ構成式とから成る。また、塑性構成式には数々のものが提案されている。

### (2) 電中研モデルについて

高速炉材料関連として特別に開発されてきた詳細構成式には、(財)電力中央研究所を中心に開発されてきた構成式(以下、電中研モデルと呼ぶ)がある。電中研モデルでは分離型を採用している。これは、対象としているステンレス鋼が統一型で表すのに不向きであり、これまでに良いモデルが開発されていないことや、統一型で開発するには分離型に比べ困難である、などの理由のためである。また、塑性構成式には当初、2曲面モデルを採用していたが、最新の電中研モデルでは、名古屋大学大野教授を中心に行開発されてきた構成式(大野・王モデル)に材料の温度依存性と繰返し硬化特性を導入して改良したものであり、非線形移動硬化モデルとなっている。電中研モデルについては、これまでに多くの時間を掛けて開発・検証されてきており、今後、FBR 設計における非弾性解析に詳細構成式を採用する場合に新たな詳細構成式を開発するのではなく、これを有効に活用してゆくべきものと考えられる。そこで以下に、電中研モデルを設計に用いる際に考えられる課題点を整理し、対応について検討した。

### (3) 電中研モデルの課題点および現状の整理

電中研モデルに関する現状、および、今後設計に用いるにあたり課題と考えられる点について以下に整理した。

a.汎用性

- ・当初、電中研の内部解析コード向けに開発されてきたが、平成12年度からABAQUSおよびMARCに対して、電中研モデルを稼動させるためのユーザサブルーチンが用意されるようになった。現状では、これら以外の汎用コードには用意されていないが、上記2コードをサポートすることで、かなり多くのユーザをカバーできるものと思われる。他の汎用コードへの組み込みについては、開発元以外での対応は難しいものと思われる。
- ・前記のように、ABAQUSおよびMARCでのユーザサブルーチンが用意されているが、2者で同一問題を解析した場合に解に若干の差異のあることが指摘されている。将来的に工認で用いた場合に、別機関で行うクロスチェックでのコードが異なつていると問題となる可能性がある。
- ・有償公開であるので導入コストは掛かるが、導入に際しての技術的な問題はない。

b.難易度

- ・電中研モデルでは、材料物性なども含めてサブルーチンに含まれており、解析までの入力条件の準備は古典的構成則に比べるかに容易である。また、荷重ステップ、モデル化において特別な考慮をする必要はない。
- ・取り扱い自体が容易するために、サブルーチンの内容を理解せずとも使える。しかし逆に、サブルーチンの内容は高度で難解であるため、例えば解析が収束しないなど、問題が発生すると原因を究明することが難しく、問題への対処は容易でない。

c.検証状況

- ・電中研モデルは、長年にわたり実試験による検証が行われながら開発されてきている。検証では、単軸ベースの材料試験での繰返し負荷、温度変動負荷によるヒステリシスループ、ピーク応力の比較確認、同じく単軸ベースでの保持中の応力緩和挙動の比較確認、および、円筒(平滑、段付き)、Yピース(小型、大型)、管板、炉容器モデルなどの構造物試験による損傷評価やラチエット変形の比較確認など、非常に多くの事例が行われている。
- ・非比例負荷や、多軸場で加工硬化と移動硬化が重なったときなど、実現象でのひず

み等の詳細な検証が難しいような場合、解析結果が高精度で一致するとは限らないことも考えられる。

d.一般性

- ・電中研モデルは高速炉開発の場では、長らく各種の研究開発と共に進められてきており、十分に認知された、優れた構成式である。
- ・詳細構成式を用いた解析結果は、構造物の正確な挙動を示すものであり、これまで解析や計算に暗に含まれていた「裕度」が無くなるため、設計での使用時には運用上の工夫が必要である。
- ・材料定数は、開発元において十分な研究開発の結果、決定されているものであるが、ユーザの理解を向上し正しく利用するため、あるいは、将来的な許認可での対応を考えると、決定手法、決定理由などを明確に提示することが今後必要になってくることも考えられる。また、加工硬化に関する定数などユーザが調節することの許されるものと、そうでないものとの区別を明らかにしておく必要がある。

e.拡張性

- ・SUS304、316FR 鋼用サブルーチンが開発され公開されている。また、改良 9Cr-1Mo 鋼についても、前記ステンレス鋼同様の分離型構成式での開発が既に完了している。HCM12A 鋼等他の鋼種に対してもデータが揃えば、短期間で開発が可能と言われている。

f.整合性

- ・電中研モデルの開発においては、クリープ損傷評価に延性消耗則を用いた評価体系が推奨されている。弾性解析ベース、時間消費則を用いた体系との整合性、両クライテリアの違いをどうするか課題である。

(4)対応について

以上の課題点は、①高度な内容、②透明性・検証、③クリープ損傷則、に関するものに分けられるが、それぞれの対応には、①使用する解析者に能力を求める(技能認定等)、②開発元への要望、③今後の議論待ち、が考えられる。

### 2.3 中間保持クリープ疲労損傷評価クライテリオンの調査

非弾性解析での算定応力が弾性解析より低いことを考慮しても、中間保持緩和クリープ損傷を安全側に評価するロジックの検討を行った。

#### (1)課題点

既往研究[1]での真空中での中間保持試験では、引張側応力ゼロ付近(図 2.3-1 に示す A 点)での中間保持による損傷は、ピーク保持に比べ明らかに少ないことが確認されている。他の中間保持位置での損傷もピーク保持に比べたら低いことが予想され、このように、損傷の少ないことが期待できる中間保持ではあるが、非弾性解析を用いても安全側に評価されなければならない。前述の予備試験での保持位置では、十分に安全側の評価となることが確認されているものの、2 直線近似の構成式での保持応力は必ずしも安全側の予測とはならない場合も考えられ、安全側に評価されるロジックが必要である。

図 2.3-2 に示すように、2 直線近似式と、詳細構成式(電中研モデル)のヒステリシスループには若干のずれがあることが考えられる。図 2.3-3 は、それぞれの構成式について、保持位置  $\varepsilon_x$  を変えた場合の破損寿命  $N_f$  の変化を示す概念図である。図に示すように、ある保持位置で  $N_f$  がピークを持つ曲線となることが予想されるが、ヒステリシスループのずれによりピーク位置がずれ、詳細構成式(電中研モデル)と比較すると、非安全側の領域が考えられるものである。

#### (2)対応策

前項の問題点の解析評価における非安全部分の対応として、次の案が考えられる。

高速増殖実証炉高温構造設計方針案で採用されている、定常応力によるクリープ損傷が適切となる応力水準  $S_g$  の概念を採用する。 $S_g$  を導入した場合には、中間保持では最低  $S_g$  レベル以上の保持応力で評価する、というような運用とするものである。ただし、前項で述べたような構成式の違いによる中間保持応力への影響が、 $S_g$  で包絡されることの検討が、今後必要である。

そのほか、上記  $S_g$  概念の導入に代わる案としては、以下の 2 つのものが考えられる。

代案①：設計疲労曲線の安全率の範囲内と判断し、評価対象外とする

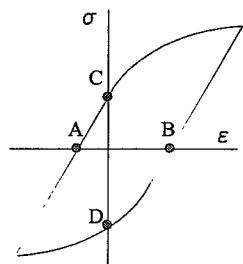
中間保持による損傷は小さく、無視できるものとして、評価の対象から除外する。

詳細構成式によるクリープ損傷量の確認などの検討が、今後必要である。

代案②：中間保持時間を考慮したひずみ速度での評価

保持時のクリープ損傷に上乗せして、保持時以外でのひずみ速度を中間保持時間で割減らして疲労評価を行う。二重にクリープ損傷を評価することとなり、過度に保守的となる考え方であるが、保守性の確認も必要かと思われる。

[1] 平成 13 年度 発電用新型炉技術確証試験 事業報告書 その 1 設計手法高度化確証試験 平成 14 年 3 月 日本原子力発電株式会社



保持位置

図 2.3-1 中間保持位置

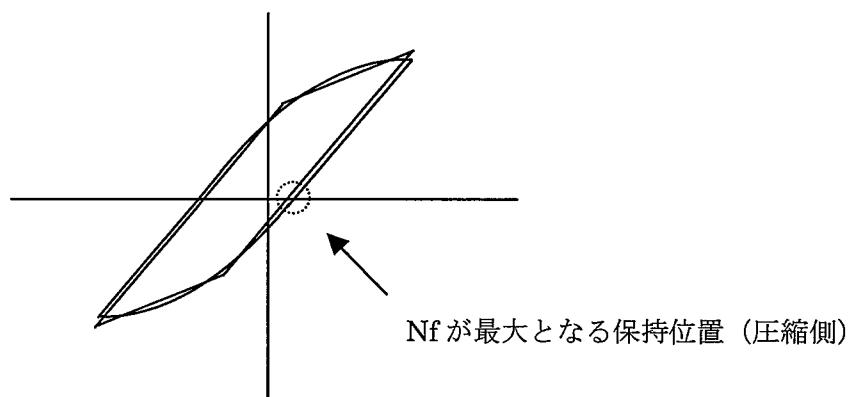


図 2.3-2 2直線近似式と詳細構成式のヒステリシスループ比較(概念図)

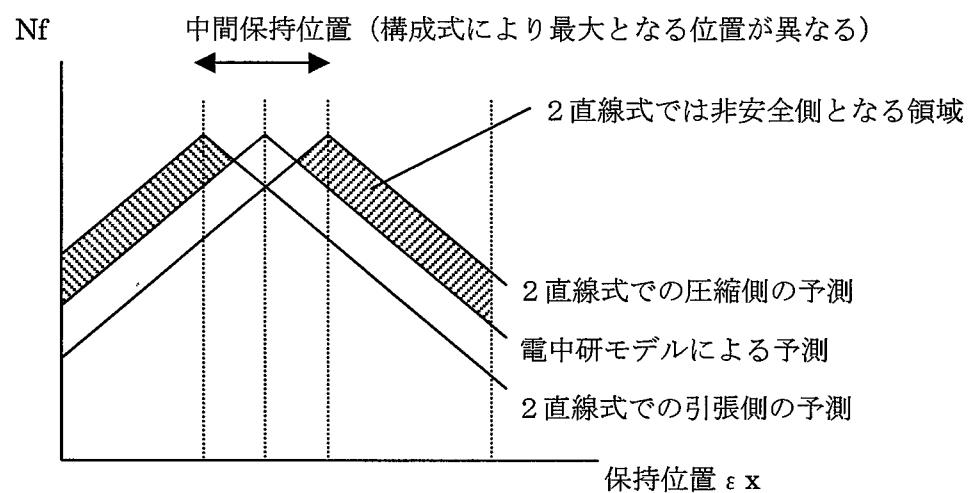


図 2.3-3 保持位置と破損寿命の関係(概念)

### 3. まとめ

非弾性解析による設計法として提案されている構成式、解析手順において、負荷履歴の影響の検討を行った。検討は、実機で想定される、非弾性解析の対象となる部位および荷重について整理し、簡易単純モデルを用いて、古典的非弾性構成式による非弾性解析結果に対する負荷履歴の影響を検討した。また、詳細構成式による非弾性解析結果との比較の結果、古典的非弾性構成式による予測が実機で想定される負荷履歴に対しても安全側となることを確認した。

また、予測精度の一層の向上が期待される詳細構成式の設計への適用上の課題を調査し、非弾性解析結果に基づく強度評価上の課題である、中間保持状態のクリープ疲労損傷評価ロジックについての検討を行った。