

ライナ構造健全性評価のための解析手法
—腐食減肉過程のモデル化—
(研究報告)

1999年6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。

〒319-1194 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 319-1194,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

ライナ構造健全性評価のための解析手法

-腐食減肉過程のモデル化-

(研究報告)

月森和之*1、加藤猛彦*2、古橋一郎*3、
岩田耕司*4、赤津実*5

要 旨

ナトリウムを冷却材とする高速増殖炉では、床ライナはナトリウム漏えい事故時に漏えいナトリウムと床コンクリートとの直接接触を防止する機能を有し、事故の拡大防止の観点から重要な構造である。したがって、ナトリウム漏えい事故時にはその終息に到るまでライナの機能が維持されなければならない。

ナトリウム漏えい時のライナの温度は、初期段階で漏えいナトリウムと接する領域を中心に急速に上昇する。一方、腐食によるライナの減肉については溶融塩型腐食を想定した厳しい減肉速度に従うとしても、ライナの温度上昇よりかなり遅れて進行する。このため、ライナに生じるひずみの最大値はこの初期段階に生じることになる。したがって、ひずみの解析評価において、最終的に到達する減肉量を最初から仮定したモデル化を用いるとひずみの最大値を過大に評価することになる。そこで、現象面から実態に合った解析を実現するためにライナの減肉の進行過程をモデル化する方法を検討した。

具体的には、擬似的なクリープによる応力緩和と剛性の低減により減肉部分の応力を解放する方法をとった。さらに、この方法を FINAS に適用して事例計算を行うことにより、その妥当性を検証した。

*1 大洗工学センター システム技術開発部 構造・材料技術開発グループ

*2 常陽産業株式会社

*3 株式会社 CRC 総合研究所

*4 大洗工学センター システム技術開発部

*5 大洗工学センター システム技術開発部 プラント工学グループ

STRUCTURAL ANALYSIS METHODS FOR LINER INTEGRITY EVALUATION
-MODELING OF THINNING PROCESS OF LINER DUE TO CORROSION-

Kazuyuki TSUKIMORI *¹, Takehiko KATO *²,
Ichiro FURUHASHI *³, Koji IWATA*⁴
and Minoru AKATSU*⁵

Abstract

The lining structure of LMFBR has an important function to prohibit leaked sodium from having contact with floor concrete at sodium leakage accident. Therefore, the integrity of the liner during the sodium leakage accident should be confirmed.

The maximum temperature of the liner at the sodium leakage accident rises very quickly. On the other hand, thinning of the liner due to corrosion progresses gradually compared with the rise of temperature even if the thinning rate in case of molten salt type corrosion is assumed. Therefore, there is a possibility to estimate maximum strain of the liner excessively large compared with the actual value. In this study the modeling of thinning process of liner was developed in order to realize reasonable analysis from the point of view of actual phenomena.

The concept of the method is to release the stress of the losing region by using artificial creep and reducing Young's modulus. The validity of this method was verified through some example analyses by FINAS equipped with this thinning model as users' subroutines.

*1 Structure and Material Research Group, System Engineering Technology Division

*2 Joyo Industry Co. Ltd.

*3 CRC Research Institute, Inc.

*4 System Engineering Technology Division

*5 Plant Engineering Group, System Engineering Technology Division

目 次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1. 緒言 | 1 |
| 2. 減肉過程のモデル化 | 4 |
| 2.1 減肉過程モデル化の方法 | 4 |
| 2.2 シェル要素への適用 | 8 |
| 2.2.1 概要 | |
| 2.2.2 荷重制御型荷重問題 | |
| 2.2.3 変位制御型荷重問題 | |
| 2.3 ソリッド要素への適用 | 18 |
| 2.3.1 概要 | |
| 2.3.2 はりの4点曲げ問題 | |
| 3. FINASへのモデルの適用 | 27 |
| 3.1 ユーザーサブルーチンによるアルゴリズムの組込み | 27 |
| 3.2 減肉のタイミングと板厚の関係 | 32 |
| 3.3 解析例 | 38 |
| 4. 結言 | 43 |
| 参考文献 | 44 |
| 付録 板の微小変形理論における板厚減少の影響評価 | 45 |
| 補遺 減肉過程を考慮したひずみ挙動について | 50 |

図表リスト

| | | |
|------------|---|----|
| 図 1.1 | ライナ健全性検討のフロー | 3 |
| 図 2.1.1 | 手法の概念 | 5 |
| 図 2.1.2(a) | 擬似的なクリープおよび弾性定数低減による減肉過程の表現 | 6 |
| 図 2.1.2(b) | 擬似的なクリープおよび弾性定数低減による減肉過程の表現 | 7 |
| 図 2.2.1 | 解析モデル | 13 |
| 図 2.2.2 | 応力 σ_x の板厚内分布 ($\sigma \rightarrow 0$ 、弾性定数低減) | 14 |
| 図 2.2.3 | 板厚内各積分点の応力 σ_x の履歴 ($\sigma \rightarrow 0$ 、弾性定数低減) | 14 |
| 図 2.2.4 | 板厚内各積分点の応力 σ_x の履歴 ($\sigma \rightarrow 0$ 、弾性定数低減なし) | 15 |
| 図 2.2.5 | 変位 U_z の x 方向分布 (変位制御引張) | 15 |
| 図 2.2.6 | 減肉領域の応力 σ_x の板厚内分布 (変位制御引張) | 16 |
| 図 2.2.7 | 荷重端の応力 σ_x の板厚内分布 (変位制御引張) | 16 |
| 図 2.2.8 | 減肉領域の板厚内各積分点の応力 σ_x の履歴 (変位制御引張) | 17 |
| 図 2.3.1 | 構造モデル (断面図) | 18 |
| 図 2.3.2 | 境界条件 (Y-Z 断面) | 18 |
| 図 2.3.3 | 境界条件 (X-Y 断面) | 19 |
| 図 2.3.4 | 要素分割図 (鳥瞰図) | 19 |
| 図 2.3.5 | ケース 1 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析反力履歴図 | 21 |
| 図 2.3.6 | ケース 2 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析反力履歴図 | 21 |
| 図 2.3.7 | ケース 3 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析反力履歴図 | 22 |
| 図 2.3.8 | ケース 1 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析変位分布図 | 22 |
| 図 2.3.9 | ケース 2 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析変位分布図 | 23 |
| 図 2.3.10 | ケース 3 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析変位分布図 | 23 |
| 図 2.3.11 | ケース 1 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析 長手方向ひずみ板厚分布図 | 24 |
| 図 2.3.12 | ケース 2 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析 長手方向ひずみ板厚分布図 | 24 |
| 図 2.3.13 | ケース 3 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析 長手方向ひずみ板厚分布図 | 25 |
| 図 2.3.14 | ケース 1 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析 長手方向ひずみ分布図 | 25 |
| 図 2.3.15 | ケース 2 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析 長手方向ひずみ分布図 | 26 |
| 図 2.3.16 | ケース 3 : ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析 長手方向ひずみ分布図 | 26 |

| | | |
|---------|--|----|
| 図 3.1.1 | V字減肉の場合の減肉状態 | 28 |
| 図 3.1.2 | 減肉部の応力状態 | 28 |
| 図 3.2.1 | 腐食減肉max 3 mm時の熱過渡と減肉量 | 33 |
| 図 3.2.2 | 実際の減肉位置と処理上の減肉位置の関係 | 36 |
| 図 3.2.3 | フレーム部のモデル化 | 37 |
| 図 3.2.4 | リブ部のモデル化 | 37 |
| 図 3.3.1 | 構造モデル(断面図) | 38 |
| 図 3.3.2 | 境界条件(断面) | 38 |
| 図 3.3.3 | 境界条件(Z軸上面) | 38 |
| 図 3.3.4 | 強制変位 5 mm→ 8 mm強制変位位置反力比較 | |
| | 4点曲げモデル上向き強制変位単純支持位置長手方向拘束無し | 39 |
| 図 3.3.5 | 板厚方向長手方向全ひずみ分布(対称位置) | |
| | 4点曲げモデル上向き強制変位単純支持位置長手方向拘束無し | 40 |
| 図 3.3.6 | 強制変位 8 mm減肉量 3 mm時の長手方向全ひずみ分布比較 | |
| | 4点曲げモデル上向き強制変位単純支持位置長手方向拘束無し | 40 |
| 図 3.3.7 | 強制変位 8 mm→ 5 mm減肉量 3 mm強制変位位置反力比較 | |
| | 4点曲げモデル上向き強制変位単純支持位置長手方向拘束無し | 41 |
| 図 3.3.8 | 強制変位 8 mm→ 5 mm減肉量 3 mm板厚方向長手方向全ひずみ分布 (対称位置) 4点曲げモデル上向き強制変位単純支持位置長手方向拘束 無し | 41 |
| 図 3.3.9 | 強制変位 8 mm→ 5 mm減肉量 3 mm時の手方向全ひずみ分布 | |
| | 4点曲げモデル上向き強制変位単純支持位置長手方向拘束無し | 42 |
| 表 2.2.1 | 解析結果および対応するステップの減肉量 | 10 |
| 表 2.2.2 | 解析結果(減肉領域右端)および対応するステップの減肉量 | 12 |
| 表 2.2.3 | 荷重端変位のFEM解と板シェル理論解との比較 | 12 |
| 表 3.2.1 | 板厚 6 mmに対する積分点層数と減肉量の関係 | 35 |
| 表 3.2.2 | 処理上の減肉量と与えられた減肉量の関係 | 36 |

1. 緒 言

ナトリウムを冷却材とする高速増殖炉では、床ライナはナトリウム漏えい事故時に漏えいナトリウムと床コンクリートとの直接接触を防止する機能を有し、事故の拡大防止の観点から重要な構造である。したがって、ナトリウム漏えい事故時にはその終息に到るまでライナの機能が維持される必要がある。空気雰囲気にある2次系配管室のライナについては、漏えいしたナトリウムが燃焼するため熱的荷重が大きくなるほか腐食を誘起する環境を形成する可能性があることから、条件的には1次系のライナよりも厳しくなる。

1995年12月8日に「もんじゅ」2次主冷却系配管からのナトリウム漏えい事故が発生して以来、その原因究明のため幅広い調査、検討が進められてきたが、ライナについても事故後に観察された変形やその健全性を裏付けるための実験および解析が行われた*。一方、「もんじゅ」の運転再開に向けて1997年から、ライナの健全性評価のための解析が進められている。この場合、シミュレーション解析とは異なり、考えうるあらゆる条件から最も厳しい場合を想定してライナの健全性を評価しなければならない。そのために、ライナに負荷される荷重条件等についてライナの応答を調べて最も厳しいケースを探索するとともに、ライナの挙動自体についても実態にできるだけ近づけるべく詳細化を図っている。本報告書は、こうした取り組みの結果をまとめた報告書のひとつであり、ナトリウム漏えい時のライナの腐食による減肉進行過程を構造解析のなかで実現する手法に関して検討結果をまとめている。

ライナ構造健全性検討の流れの概要を図.1.1に示す。ライナの構造モデルの設定にあたっては、ライナプレート、ひずみ防止リブおよびライナフレームからなる床ライナの構造的特徴が考慮される。ライナに負荷される熱荷重については、ASSCOPS[1]による解析結果が用いられる。この段階で、漏えい規模、漏えい位置などをパラメータとして相対的にライナに最も大きなひずみを生じさせる条件を探索し、詳細検討のための解析モデルを選定する。この解析モデルについて、熔融塩型腐食を想定したライナの減肉を考慮する。減肉断面形状については「燃焼実験Ⅱ」[2]の事後測定データを参考にして設定する。減肉を生じる領域については、事前の解析でひずみが最も大きくなる位置に減肉領域境界近傍を配置し、いくつかの減肉態様を考慮する。ライナの最大減肉量の算定には熔融塩型腐食試験結果[3]から得られた腐食減肉速度の95%信頼幅の上限値

* 40%出力試験中における2次主冷却系ナトリウム漏えい事故について(第4報報告書)、動力炉・核燃料開発事業団 高速増殖炉もんじゅ建設所(平成8年9月)

を用いる。減肉の進行過程を考慮するために、各時刻の最大減肉量を、温度の関数として与えられる先の腐食減肉速度式を温度の推移に合わせて初期から当該時間まで時間積分することで求める。減肉過程をこのように考慮して行った解析から得られた最大ひずみをもとにライナの健全性を評価する。

本報告書は、ライナの構造解析のなかで適用するライナの腐食減肉過程のモデル化の方法を示し、その妥当性を検討した結果をまとめたものである。物質が喪失する過程における系の力学的バランスは該当する領域の応力を解放することで表現できる。ここでは、有限要素法による解析モデルを構成する各要素の板厚方向に分布する積分点のうち、腐食による減肉を生じた領域に該当する積分点の応力を擬似的なクリープにより強制的に開放するとともに剛性についてもほぼゼロに低減することにより変形増分間における応力の増加を防ぐことで、これを表現する方法をとっている。以下、第2章において減肉表現の手法について示し、この方法を具体的に有限要素法に展開するためにシェル要素およびソリッド要素への適用およびその場合の妥当性について検討する。第3章において有限要素法による汎用構造解析ソフトである FINAS にユーザーサブルーチンとして減肉過程のモデル組込みについて示す。

なお、巻末に補遺として、温度のピーク発生時間に比べて減肉の飽和が遅れる場合に、その過程まで考慮したときのひずみはその過程を考慮しない条件で発生するひずみに比べて小さくなることを簡単なモデルを使って示した。

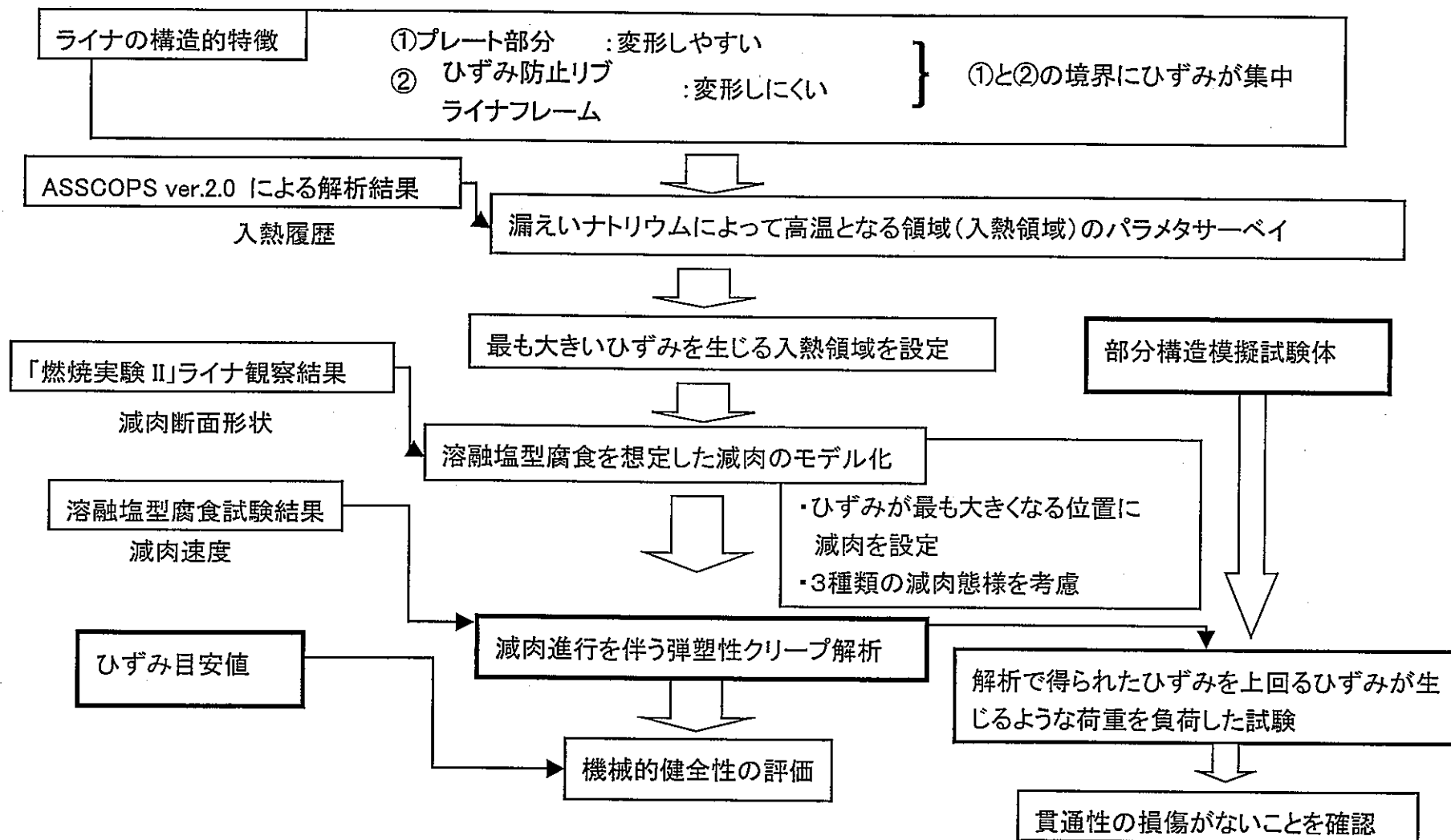


図.1.1 ライナ健全性検討のフロー

2. 減肉過程のモデル化

2.1 減肉過程モデル化の方法

構造の表面が変形によって単に移動するだけではなく、腐食等によって構造を構成する物質が消滅して新生面を生じ、解析の対象とする領域が時間とともに変化する状況を既存の有限要素法による構造解析コードの中で厳密に取り扱うことは困難である。そこで、解析の対象とする領域は初期のままとして、消失する領域の応力を解放することによって物質が喪失する過程における系の力学的バランスを表現する方法を採る。これは、有限要素法をベースとした構造最適化手法(各要素の物性を変化させて最適化を図る)と類似性がある。この方法の概念を図に示すと図 2.1.1 のようになる。

時間 Δt の間に図に示す部分領域が消滅するものとする。この場合に解析対象領域自体は変わらない。しかし、消失する領域に属する応力 σ' を解放する。すなわち、時刻 t_0 時点での応力と時間増分間での応力増分をゼロにする。

$$\sigma'_0 = 0 \quad (\sigma_0 \rightarrow 0) , \quad \Delta \sigma' = 0 \quad (E \rightarrow 0)$$

増分計算では、各増分間で収束計算するなどして不釣合いを補正するので、上の第2式の条件を付与せずに、時刻 $t_0 + \Delta t$ での応力 σ' をゼロに置くことでもよいことになるが、弾性定数を低減することで高い計算効率が得られる。これについては、後述の解析事例で示す。

上述の手法を有限要素法解析に適用する場合、要素レベルで扱い、該当する要素の節点力を開放することも考えられるが、ここではより細かく要素内の積分点の応力を解放する方法をとる。要素内の該当する積分点の応力を解放するには、要素内の応力を積分して釣合い補正ベクトルを構成するルーチンに介入して該当する積分点の応力を減少させ、一方、要素剛性マトリクスを形成するルーチンで該当する積分点の弾性定数を低減すればよい。ここでは、既存の解析コードの機能を活用し、新たに手を加える部分を極力少なくする観点から、変位制御型荷重下での擬似的なクリープを使って該当する積分点の応力を緩和減少させ、かつ、該当する積分点の弾性定数を低減させる方法によった。具体的には、応力 σ に対して、これを完全に緩和させるクリープひずみ σ/E を与える。単一部材の変位制御クリープなら、1回のクリープ計算で応力0に緩和するが、一般には一部の積分点位置のみの応力緩和クリープであり、要素内および全体モデル内で荷重再配分が生じるので、1回のクリープ計算では応力0まで緩和しない。そのため、複数ステップのクリープ計算を繰り返し、指定位置の応力を0に十分に近い値まで緩和させる。さらに、該当する積分点では、以後の計算では弾性定数を減肉の無い場合の数百分の1に低減する。これにより一度消失した部分が再び荷重(応力)を負担することがないようにし、消失状態を維持する。

この方法を概念的に示したのが図 2.1.2 である。図 2.1.2(a)は、ライナ構造を対象として腐食による減肉を考えた場合について、減肉領域の断面を拡大して、既減肉領域、減肉しつつある領域、未減肉領域と要素内の積分点との関係を示している。薄墨の三角形領域が既に n ステップまでに減肉している領域、V字領域が n ステップから $n+1$ ステップの間に減肉する領域、他は $n+1$ ステップまで減肉しない領域である。丸印は3つの領域に属する積分点を表しており、3つの領域を代表する積分点での応力と弾性定数の n ステップ $n+1$ ステップにかけての振る舞いを図 2.1.2(b)に示している。応力は、三角形領域ではほぼゼロを維持し、V字領域ではゼロに低減し、他の領域では外力に対して減肉による内力の消失を補償するようにバランスする。弾性定数は、三角形領域ではゼロを維持し、V字領域ではゼロに低減し、他の領域では温度変化による変動などを考慮しなければ一定値を保つ。

実際の解析では、消失した領域のひずみも計算結果として出力されるが、当然のことながら、消失領域を除いた領域について評価する。また、この方法は基本的な構造部材要素である、はり、板、シェル、ソリッドなどいずれの要素にも適用できる。本報告では、シェル要素およびソリッド要素への適用事例を具体的に示す。

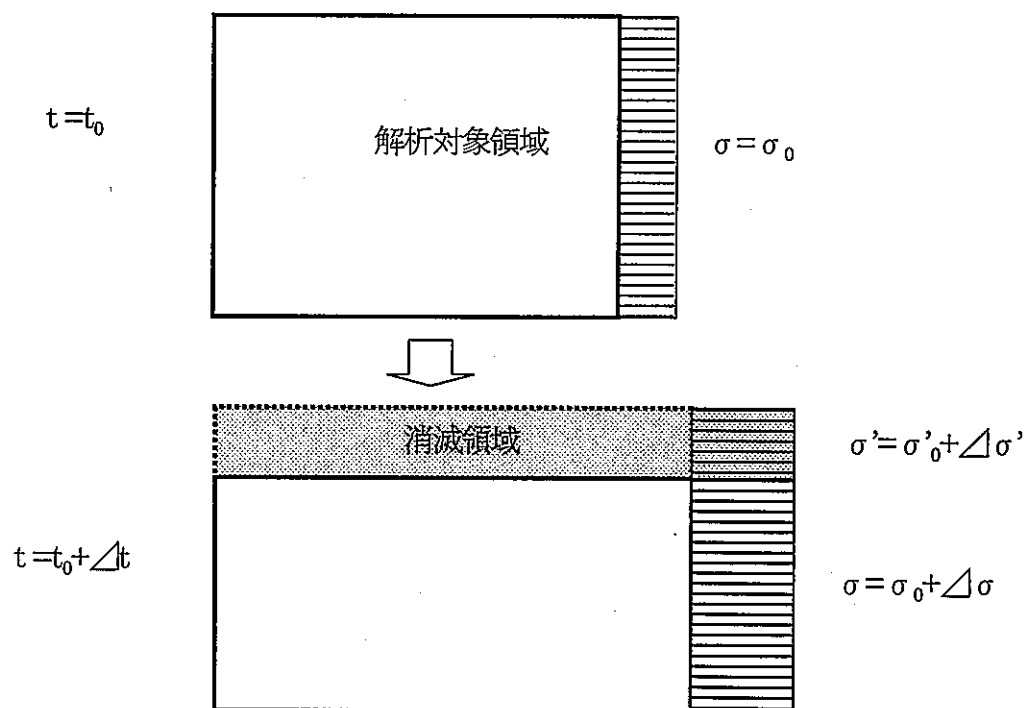


図 2.1.1 手法の概念

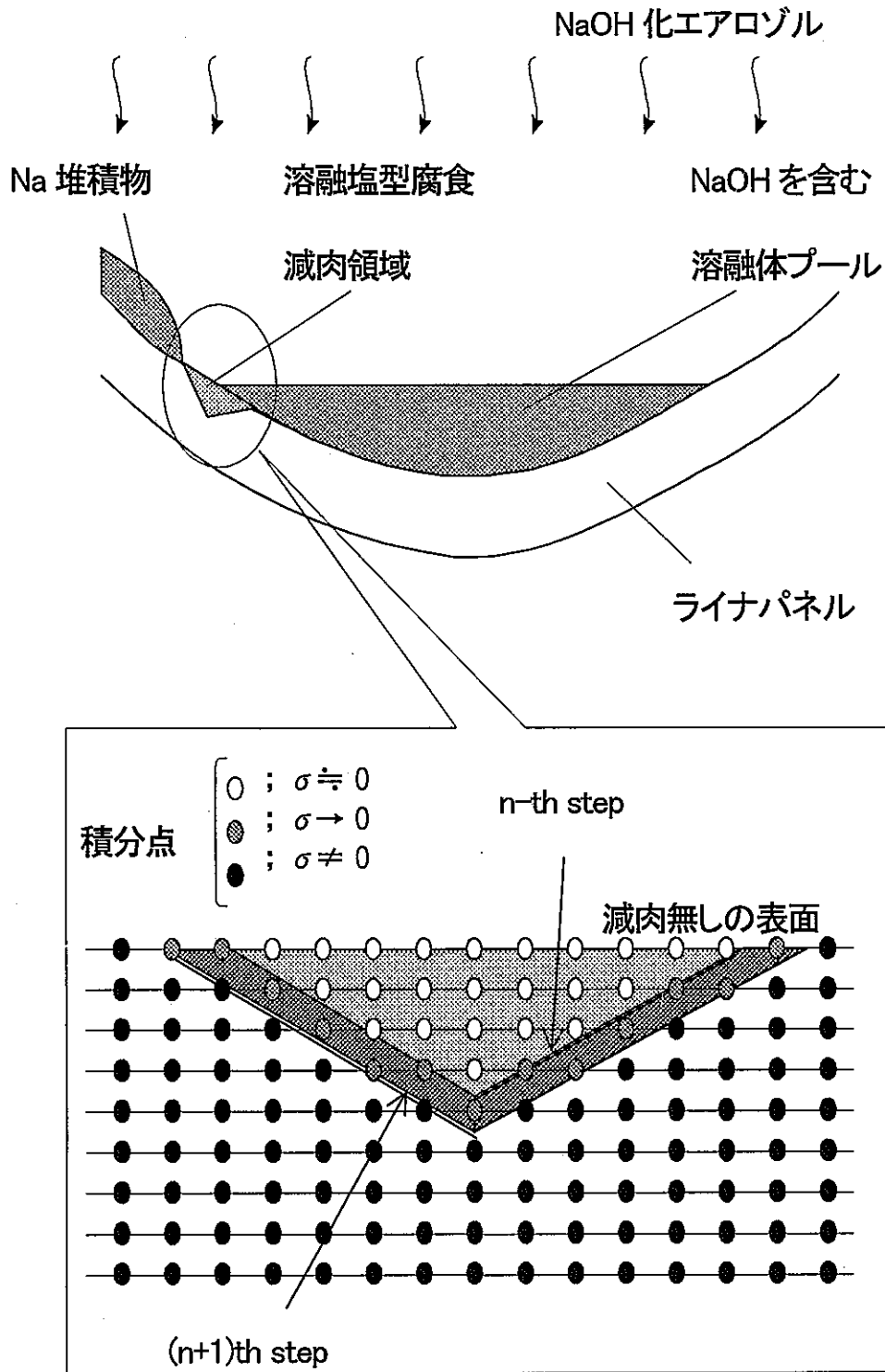


図 2.1.2(a) 擬似的なクリープおよび弾性定数低減による減肉過程の表現

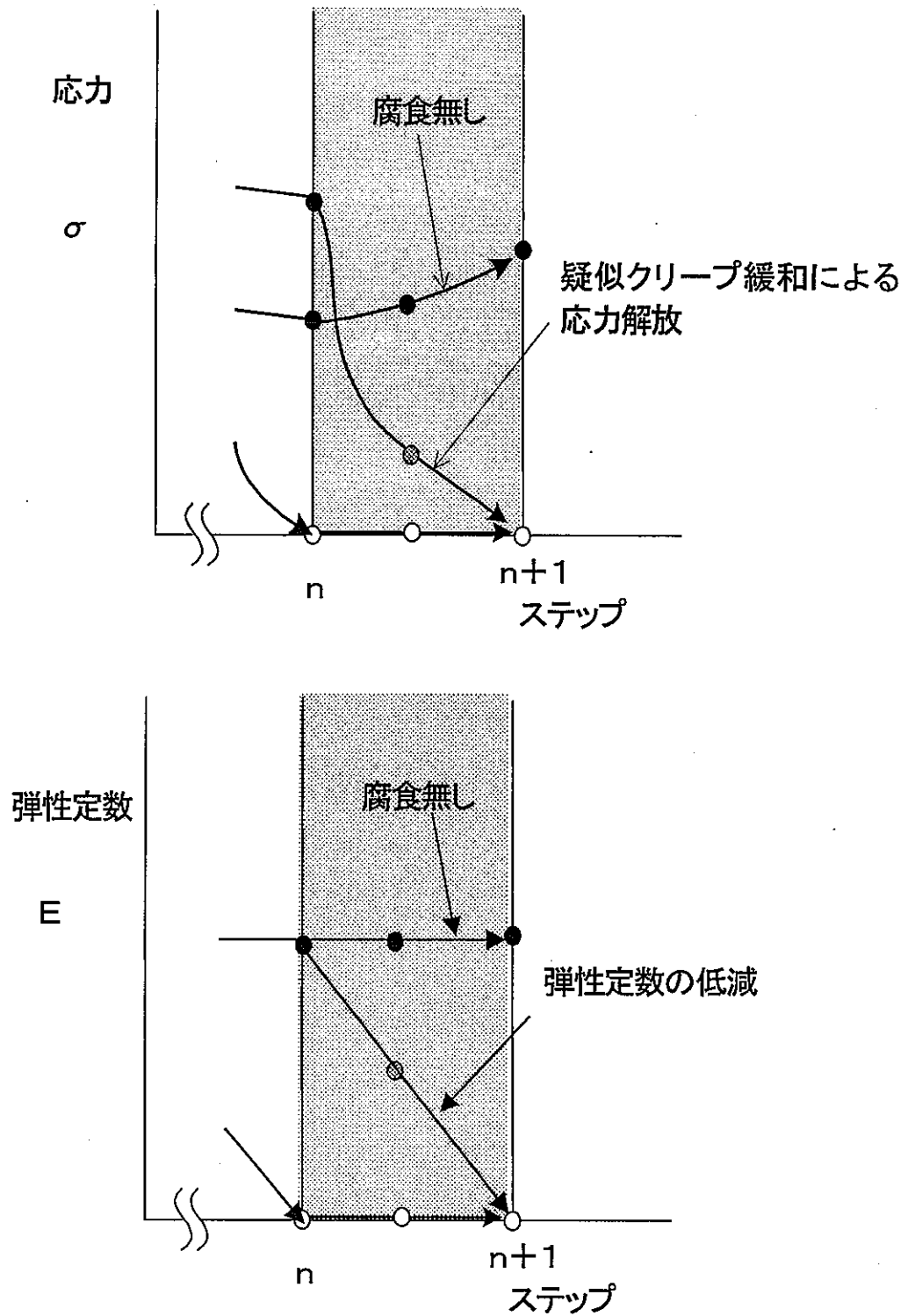


図 2.1.2(b) 擬似的なクリープおよび弾性定数低減による減肉過程の表現

2. 2 シェル要素への適用

2. 2. 1 概要

ここでは、前節で述べた減肉過程モデル化の手法を有限要素法による構造解析で具体化するために、まずシェル要素への適用を行い、荷重制御型および変位制御型の基本的な問題を解くことによって、その特性を確認する。シェル要素の場合、板厚の減少は厚さ方向の積分点の応力を段階的に解放することでモデル化する。

2. 2. 2 荷重制御型荷重問題

一定の引張荷重を受ける板の表面が腐食等により消失し、板厚が次第に減少するような体系をシェル要素を用いて表現する。以下、具体的な荷重制御型問題に則して進める。

(1) 解析モデル

x y 平面上の厚さ t mm の広い平板が x 方向の引張荷重を受けた状態で減肉するものとする。この一部を切り出して図 2.2.1 に示す境界条件のもとで、一つのシェル要素でモデル化する。

・使用コード FINAS

・使用要素 4 節点 4 辺形 3 次元シェル要素 QFLA4S

面内 5 点 × 板厚方向 9 層 (8 等分割) = 合計 45 点の内部積分点

・材料特性 $E = 10000 \text{ kgf/mm}^2$

$\nu = 0.3$

・形状 x 方向幅 ; $L = 10 \text{ mm}$ 、 y 方向幅 ; $H = 10 \text{ mm}$

z 方向板厚 ; $t = 10 \text{ mm}$

・境界条件

$x = 0$ の面 (固定端、対称境界条件) $u_x = u_z = \theta_y = 0$

$x = 10$ の面 (ピン支持の荷重端条件) u_x 共通、 u_z 共通、 θ_y 共通

$y = 0$ の面 (対称境界条件) $u_y = \theta_x = \theta_z = 0$

$y = 10$ の面 (平面ひずみ条件) $\theta_x = \theta_z = 0$ 、 u_y 共通

x z 断面は y 方向に平面ひずみ条件を仮定したことになる。

・荷重条件

引張荷重 $F_x = 1000 \text{ kgf}$ (膜応力 $\sigma_x = 10 \text{ kgf/mm}^2$ 相当)

・消失進行の模擬

ステップ 1 荷重負荷 (引張荷重 $F_x = 1000 \text{ kgf}$)

ステップ 2 ~ 11 積分点 41 ~ 45 (下面から 9 層目 = 上面) でクリープ応力緩和

ステップ 12 ~ 31 積分点 36 ~ 40 (下面から 8 層目) でクリープ応力緩和

積分点 41 ~ 45 (下面から 9 層目) は弾性定数低減

ステップ 32 ~ 61 積分点 31 ~ 35 (下面から 7 層目) でクリープ応力緩和

積分点 36 ~ 45 (下面から 8 ~ 9 層目) は弾性定数低減

ステップ 62 ~ 101 積分点 26 ~ 30 (下面から 6 層目) でクリープ応力緩和

積分点 31 ~ 45 (下面から 7 ~ 9 層目) は弾性定数低減

指定積分点の現在の Mises の相当応力 σ_{EQ} に対して、相当クリープひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{C,EQ}$ を次式で与える。

$$\Delta \varepsilon_{C,EQ} = \sigma_{EQ} / E \quad (2. 1)$$

これは1要素の変位制御クリープでは1ステップで応力が0に緩和するようなクリープひずみ増分である。ただし、本解析は荷重制御であり、また1要素内の一部の積分点におけるクリープであり、顕著な応力再配分が生じるので、1ステップでは応力が十分に緩和しない。

(2) 解析結果

- ・この解析では上面から一様に減肉が進行することから、板厚中心が下方に移動し、負荷位置とのオフセットが生じ、付録に示す式 (A. 9) の曲げモーメント M_y が要素内に生じる。x z 断面はy方向に平面ひずみ条件であるから、x軸回りの曲げ変形が拘束され、板シェル理論により次の曲げモーメント M_x が生じる。

$$M_x = \nu M_y = \nu F_x \delta / 2 \quad (2. 2)$$

- ・FEM解析による荷重端節点の変位解 u_x 、 u_z 、 θ_y および反力解 M_x を表 2.2.1 に示す。同表には反力解 M_x を用いて上式から計算された減肉量 δ を参考に示した。
- ・また、同表から、解析結果について付録の理論式 (A. 11) における θ_y と u_z の関係 ($u_z = -L \theta_y / 2$) が成立していることが確認できる。
- ・ステップ1、11、31、61、101の板厚内応力 σ_x 分布を図 2.2.2 に示す。減肉を生じている個所の応力値がステップを追って消失し、残存板厚内の応力再配分が生じている様子がわかる。
- ・積分点5、10、15、20、25、30、35、40、45の応力 σ_x の履歴を図 2.2.3 に示す。4段階の各減肉のステージでクリープ緩和が生じている様子がわかる。この問題では、減肉とともにオフセットが生じるために、残存する板厚方向に膜・曲げが重畳した応力分布となっている。参考のため、弾性定数を低減する操作を省いた場合の積分点5、10、15、20、25、30、35、40、45の応力 σ_x の履歴を図 2.2.4 に示す。明らかに既に消失した個所の応力が次の減肉のステージで立ちあがっており、既に消失したはずの個所に現れた応力も含めてクリープ緩和の操作が必要となっている。したがって、構造によっては計算効率を著しく損なうことが予想される。

(3) 評価

理論的な扱いとの照合も含めて、前節で示した減肉過程のモデル化手法がシェル要素に適用できることが確認された。

なお、この問題では板上面から一様に減肉させ、負荷位置は初期の位置を保ったために曲げ応力が発生したが、減肉とともに負荷位置も移動する場合は曲げ応力は発生しない

め、このような場合をシェル要素で扱うときはむしろ両側から均等に減肉させた方が実態に合っていると考えられる。

表 2.2.1 解析結果および対応するステップの減肉量 δ

| step | u_x (mm) | u_z (mm) | θ_y (rad.) | M_x (kgfmm) | δ (mm) |
|------|------------|------------|-------------------|---------------|---------------|
| 1 | 1.0 E-2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 11 | 1.0494E-2 | -1.3649E-3 | 2.7299E-4 | 65.22 | 0.435 |
| 31 | 1.5107E-2 | -1.1762E-2 | 2.3524E-3 | 315.89 | 2.106 |
| 61 | 2.0911E-2 | -2.3103E-2 | 4.6205E-3 | 441.30 | 2.942 |
| 101 | 5.5235E-2 | -8.0032E-2 | 1.6006E-2 | 695.14 | 4.634 |

2. 2. 3 変位制御型荷重問題

前節では減肉が進行する局所部分を取り出した 1 要素モデルの荷重制御問題について解析をおこなったが、本節では解析範囲を拡大した複数要素モデルの変位制御問題を解析し、全体が変位制御状態にあり、一部領域で減肉が進行するような場合に対する本手法の有効性を確認する。

(1) 解析モデル

板厚 10 mm, x 方向の幅 100 mm で y 方向に長い平板を考える。x 方向の両端境界で変位制御荷重 (x 方向の引張り変位) を負荷維持する。x 方向の幅 20 mm で y 方向に長い、板の中央部の帯状領域で板の上面から減肉が進行する場合とする。

- ・材料特性 $E = 10000 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $\nu = 0.3$
- ・形状 x 方向幅 ; $L = 50 \text{ mm}$ (右側半分) $= L_1 + L_2$
 $L_1 = 10 \text{ mm}$ (減肉領域)、 $L_2 = 40 \text{ mm}$ (非減肉領域)
- y 方向幅 ; $H = 10 \text{ mm}$
- z 方向板厚 ; $t = 10 \text{ mm}$

これを x 方向幅 10 mm のシェル要素 QFLA4S を 5 要素でモデル化した。

- ・境界条件 $x = 0$ 対称境界条件 $u_x = u_z = \theta_y = 0$
 $x = 50$ 荷重端 u_x 共通、 u_z 共通、 θ_y 共通、 $\theta_x = \theta_z = 0$
 $y = 0$ 対称境界条件 $u_y = \theta_x = \theta_z = 0$
 $y = 10$ 平面ひずみ条件 u_y 共通、 $\theta_x = \theta_z = 0$

・荷重条件

ステップ 1 で変位荷重 ($u_x = 0.05 \text{ mm}$) を負荷し、以後左端の 1 要素の指定積分点位置で以下のようなクリープ計算および弾性定数低減の操作をおこなう。

- ステップ 2 ~ 11 積分点 41 ~ 45 (下面から 9 層目 = 上面) でクリープ応力緩和
- ステップ 12 ~ 26 積分点 36 ~ 40 (下面から 8 層目) でクリープ応力緩和
 積分点 41 ~ 45 (下面から 9 層目) は弾性定数低減
- ステップ 27 ~ 46 積分点 31 ~ 35 (下面から 7 層目) でクリープ応力緩和
 積分点 36 ~ 45 (下面から 8 ~ 9 層目) は弾性定数低減

ステップ47～71 積分点26～30（下面から6層目）でクリープ応力緩和
積分点31～45（下面から7～9層目）は弾性定数低減
なお、本節の解析では相当クリープひずみ増分を次式で与え、応力緩和を促進させた。

$$\Delta \varepsilon_{c, \text{BQ}} = \omega \sigma_{\text{BQ}} / E, \quad \omega = 1.1 \quad (2.3)$$

上式で、 ω は擬似的なクリープを加速するための係数である。

(2) 解析結果

- ・全体のz方向変位 u_z の分布を図2.2.5に示す。減肉の進行とともに生じる減肉部の曲げ変形によって全体が上に凸に変形して行く。非減肉部はほとんど変形せず、直線であり、減肉部にそのしわ寄せがいつている。
- ・減肉領域の各ステップの板厚内応力 σ_x 分布を図2.2.6に、荷重端(非減肉部)の各ステップの板厚内応力 σ_x 分布を図2.2.7に示す。減肉部については、減肉を生じている個所の応力値がステップを追って消失し、残存板厚内の応力再配分が生じている様子がわかる。一方、非減肉部については、板厚内の応力は一様で、減肉を追って減少している。全体として典型的な弾性追従が、部分的な減肉によって生じていることがわかる。
- ・減肉領域の積分点5、10、15、20、25、30、35、40、45の応力 σ_x の履歴を図2.2.8に示す。残存する板厚方向に膜・曲げが重畳した応力分布となっている。
- ・減肉領域右端節点の u_x 、 u_z 、 θ_y 、荷重端の反力 F_x を表2.2.2に示す。同表には、 θ_y と F_x を付録の理論式(A.10)に代入して、計算された減肉量 δ を参考として示した。計算された δ は、すべての時点において応力緩和積分点と非緩和積分点の中間領域にある。最終時点の F_x および δ を用いて付録の式(A.13)および式(A.14)式を用いて消失領域の応力 σ_x を計算すると以下ようになり、これはFEM解と良好に合致している。

$$\sigma_x \text{ (膜)} = 9.74 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma_x \text{ (曲げ)} = 25.05 \text{ kgf/mm}^2$$

- ・荷重端節点の u_x 、 u_z および θ_y を表2.2.3に示す。同表には上で計算された δ と F_x を用いて式(A.15)～(A.17)式から計算された u_x 、 u_z および θ_y を比較して示した。これらは十分な精度でFEM解と合致した。

(3) 評価

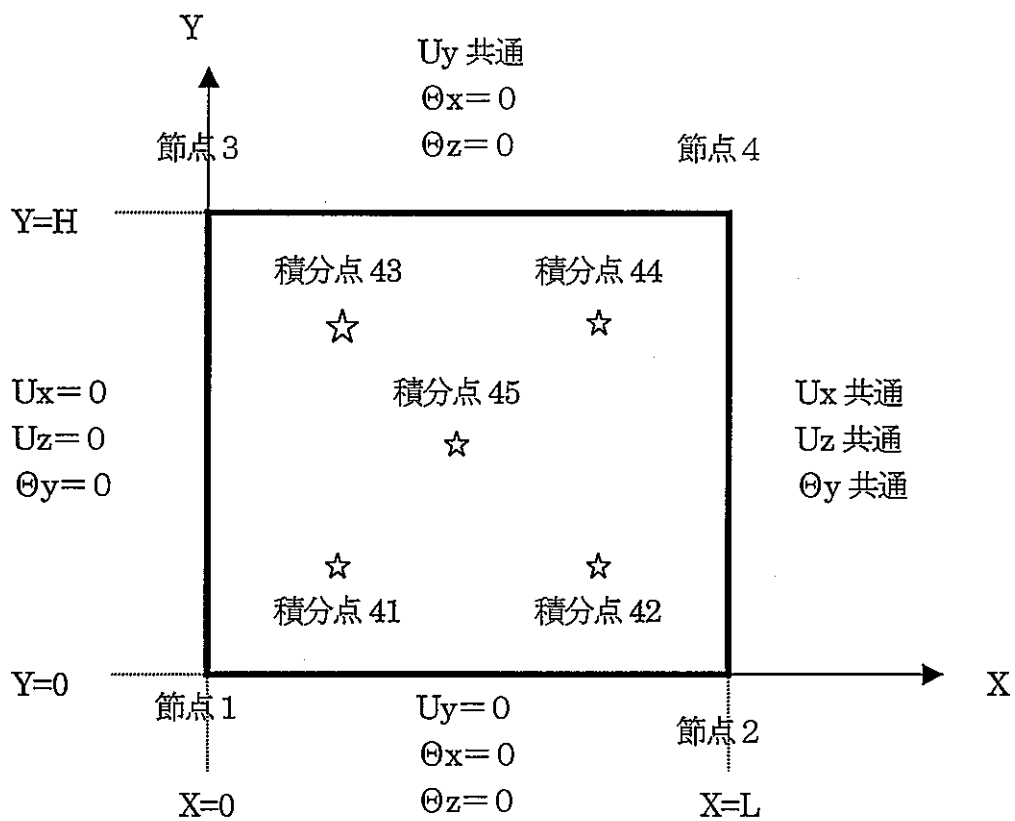
理論的な扱いとの照合も含めて、前節で示した減肉過程のモデル化手法が荷重制御型の問題同様、変位制御型問題についても、シェル要素に適用できることが確認された。

表 2.2.2 解析結果(減肉領域右端)および対応するステップの減肉量 δ

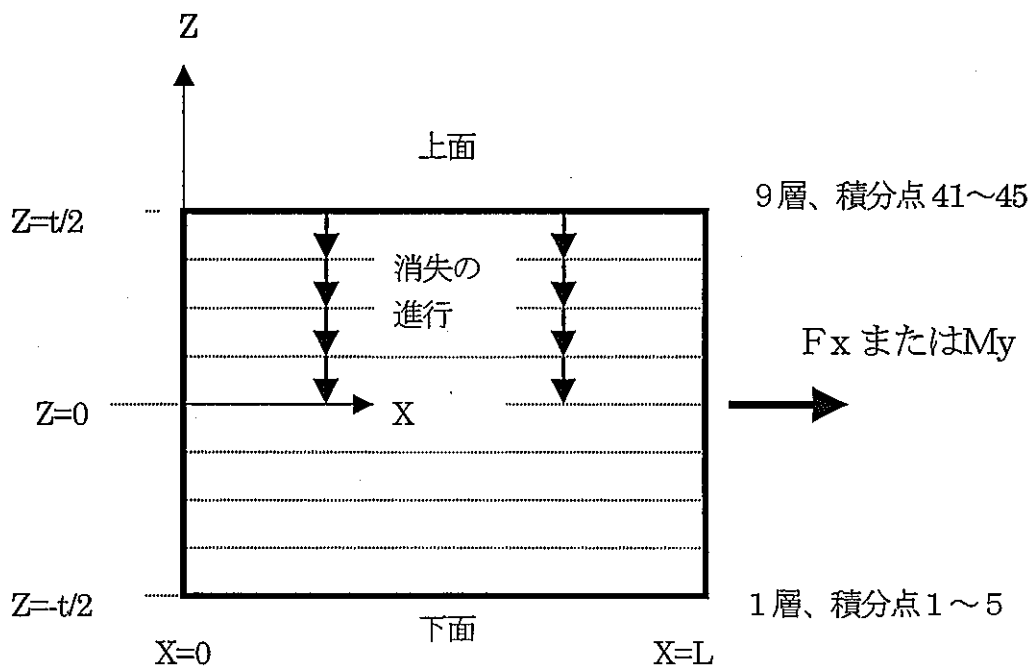
| step | FEM変位解 (x=10mm 位置) | | | FEM解 | 計算値 |
|------|--------------------|------------|-------------------|-------------|---------------|
| | u_x (mm) | u_z (mm) | θ_y (rad.) | F_x (kgf) | δ (mm) |
| 1 | 1.0 E-2 | 0.0 | 0.0 | 1000.0 | 0.0 |
| 11 | 1.0360E-2 | -1.3517E-3 | 2.7033E-4 | 990.24 | 0.437 |
| 26 | 1.3537E-2 | -1.0677E-2 | 2.1353E-3 | 908.03 | 2.113 |
| 46 | 1.6929E-2 | -1.8983E-2 | 3.7966E-3 | 822.19 | 2.956 |
| 71 | 2.8824E-2 | -4.2347E-2 | 8.4695E-3 | 524.62 | 4.615 |

表 2.2.3 荷重端変位のFEM解と板シェル理論解との比較

| step | FEM変位解 (x=50mm 位置) | | | 付録 (F_x と δ 使用) | | |
|------|--------------------|------------|-------------------|---------------------------|-------------|-------------------|
| | u_x (mm) | u_z (mm) | θ_y (rad.) | u_x (mm) | u_z (mm) | θ_y (rad.) |
| 1 | 5.0 E-2 | 0.0 | 0.0 | 5.0 E-2 | FEM解 に一致 | FEM解 に一致 |
| 11 | 5.0 E-2 | -1.2165E-2 | 2.7033E-4 | 5.002E-2 | | |
| 26 | 5.0 E-2 | -9.6090E-2 | 2.1353E-3 | 5.009E-2 | | |
| 46 | 5.0 E-2 | -1.7085E-1 | 3.7966E-3 | 5.017E-2 | | |
| 71 | 5.0 E-2 | -3.8113E-1 | 8.4695E-3 | 5.027E-2 | | |
| | | | | (A.17)式 | (A.16)式 | (A.15)式 |



上面図



側面図

図 2.2.1 解析モデル

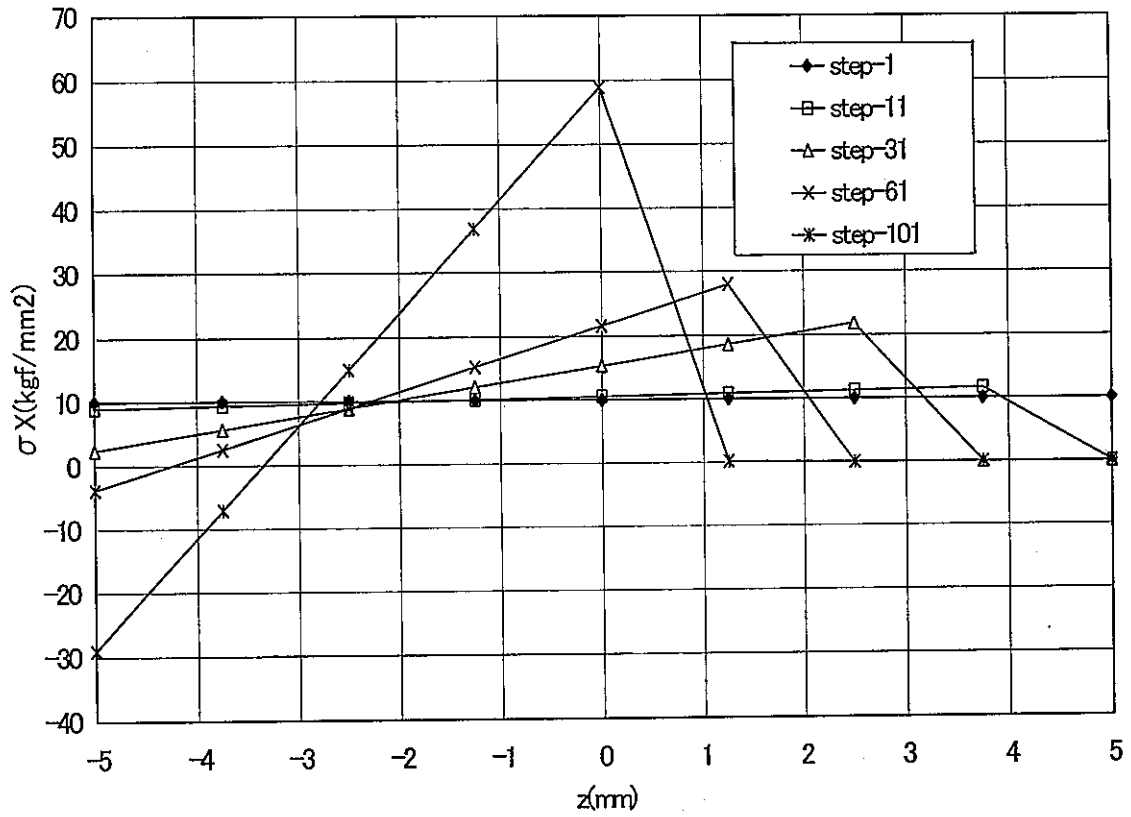


図 2.2.2 応力 σ_x の板厚内分布($\sigma \rightarrow 0$, 弾性定数低減)

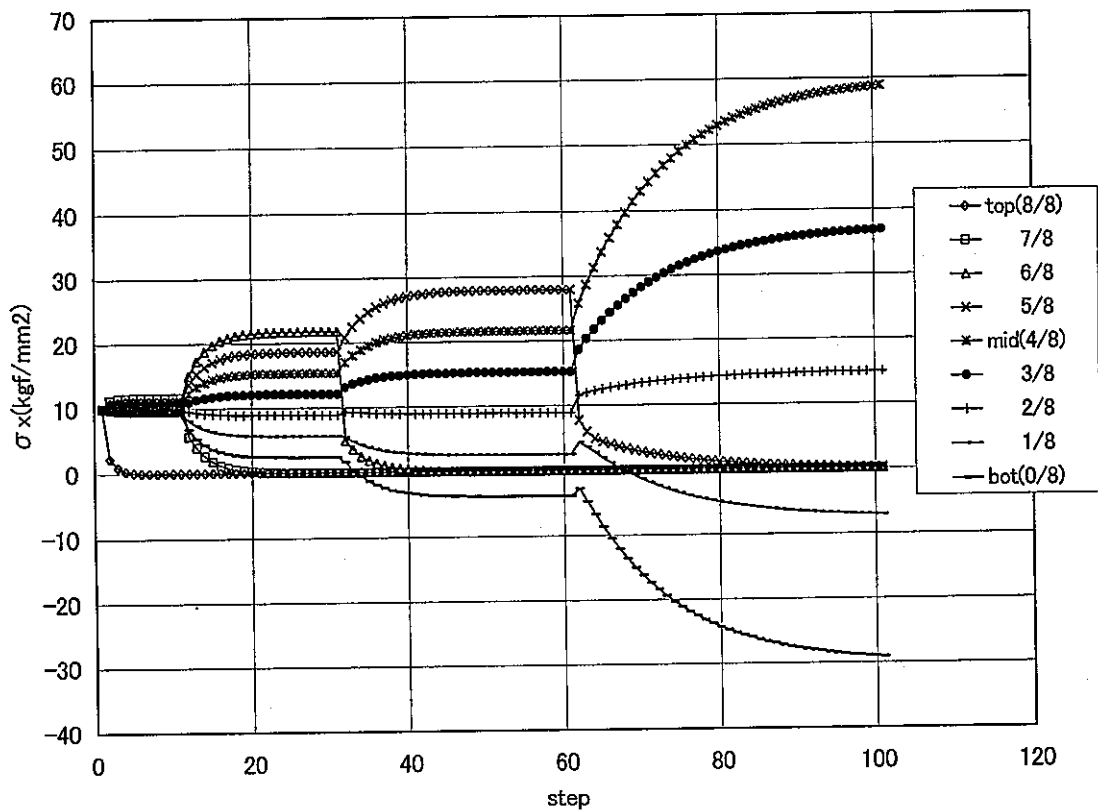


図 2.2.3 板厚内各積分点の応力 σ_x の履歴($\sigma \rightarrow 0$, 弾性定数低減)

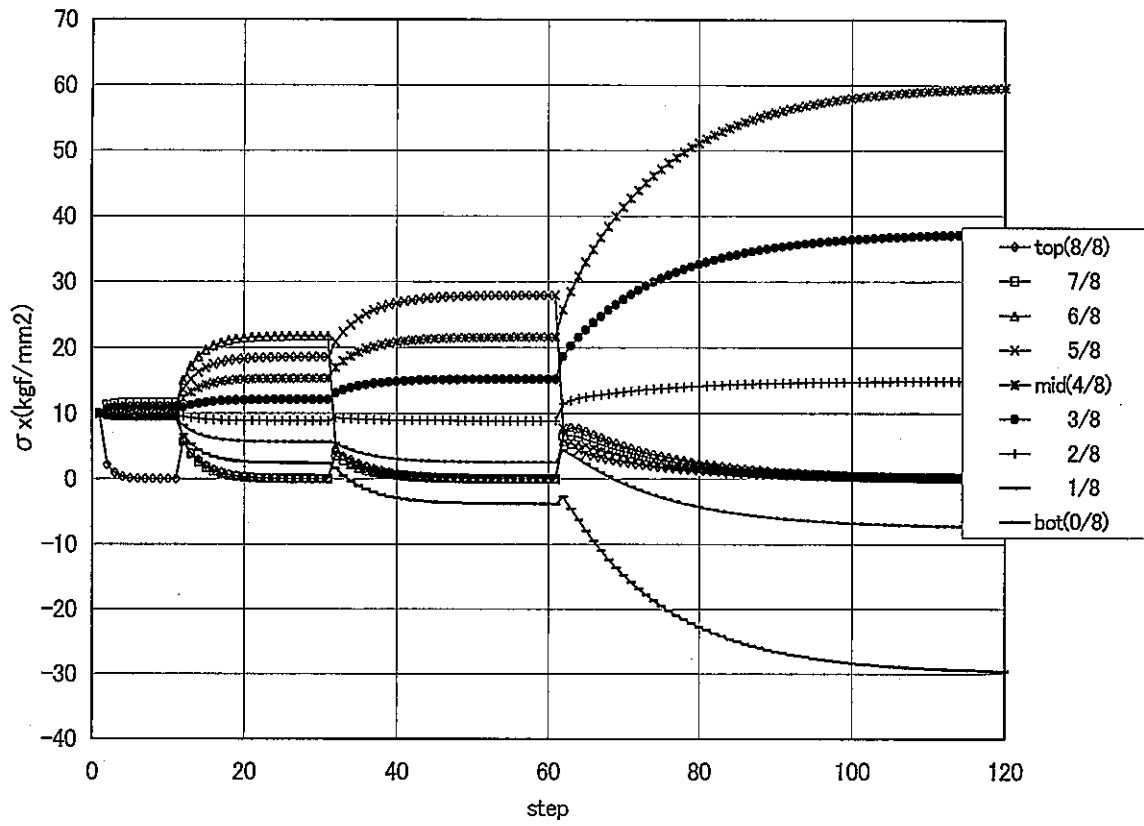


図 2.2.4 板厚内各積分点の応力 σ_x の履歴($\sigma \rightarrow 0$, 弾性定数低減なし)

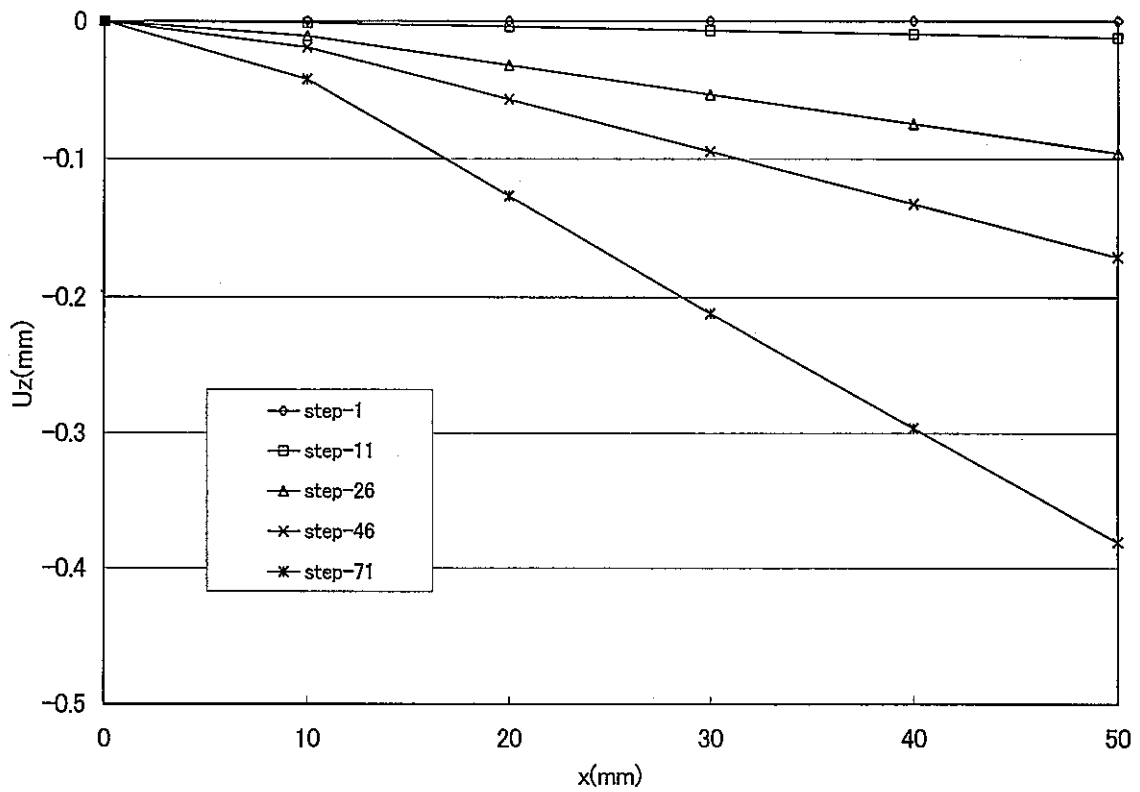


図 2.2.5 変位 U_z のx方向分布(変位制御引張)

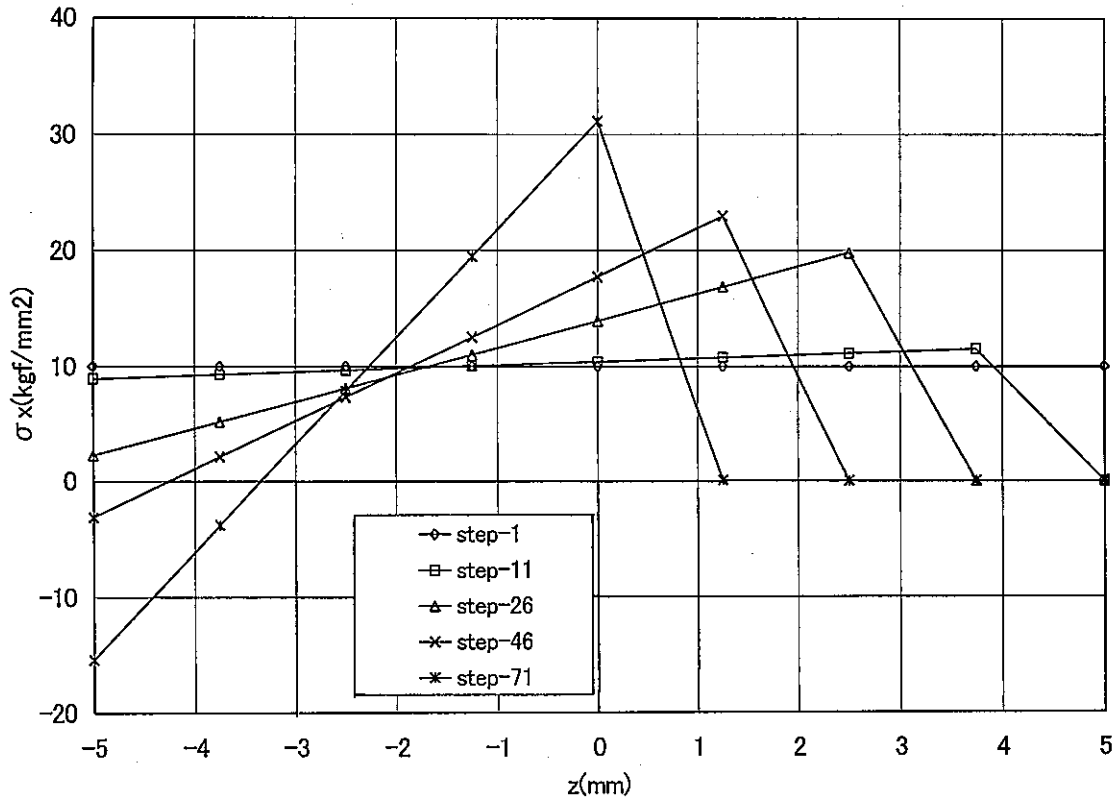


図 2.2.6 減肉領域の応力 σ_x の板厚内分布(変位制御引張)

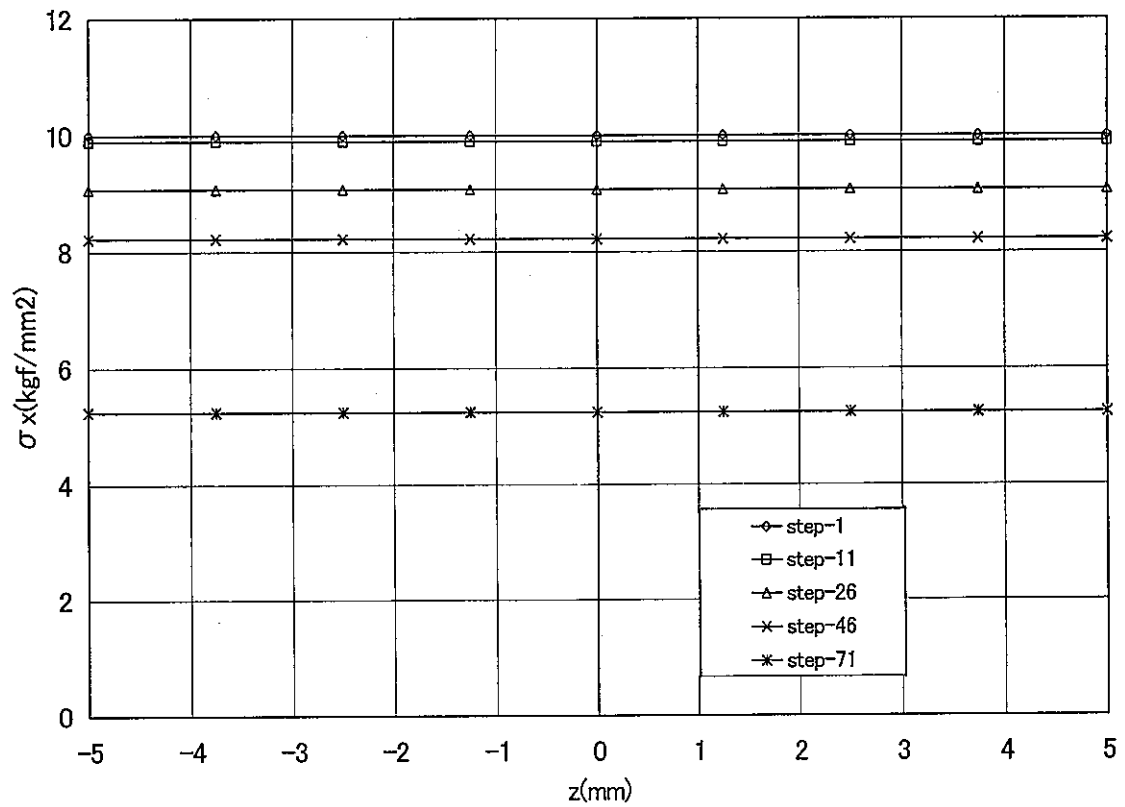


図 2.2.7 荷重端の応力 σ_x の板厚内分布(変位制御引張)

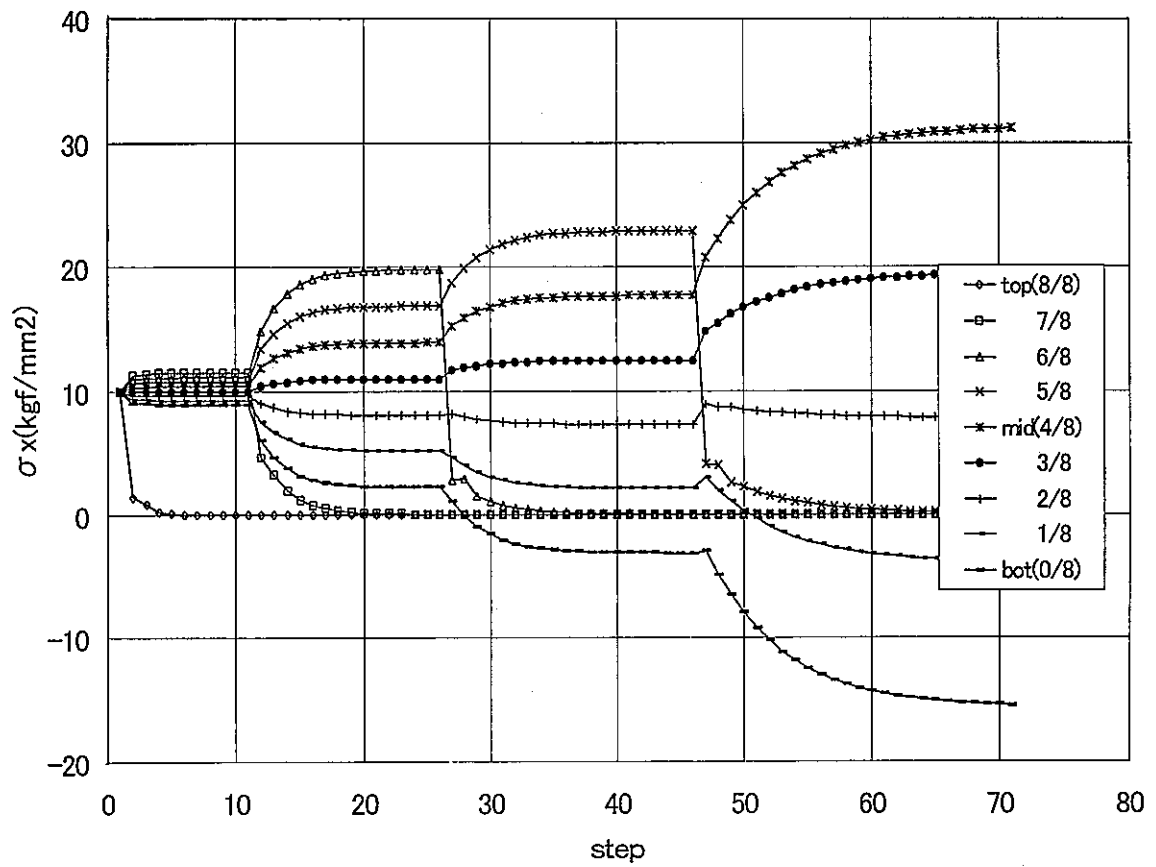


図 2.2.8 減肉領域の板厚内各積分点の応力 σ_x の履歴(変位制御引張)

2. 3 ソリッド要素への適用

2. 3. 1 概要

ここでは、前節で述べた減肉過程モデル化の手法を有限要素法のソリッド要素への適用を行い、基本的な問題の解析からその特性を確認する。ソリッド要素の場合も板厚の減少は厚さ方向の積分点の応力を段階的に解放することでモデル化するが、板厚方向に要素分割がある場合は要素を跨いで減肉が進行する。

2. 3. 2 はりの4点曲げ問題

(1) 解析モデル(図 2.3.1 参照)

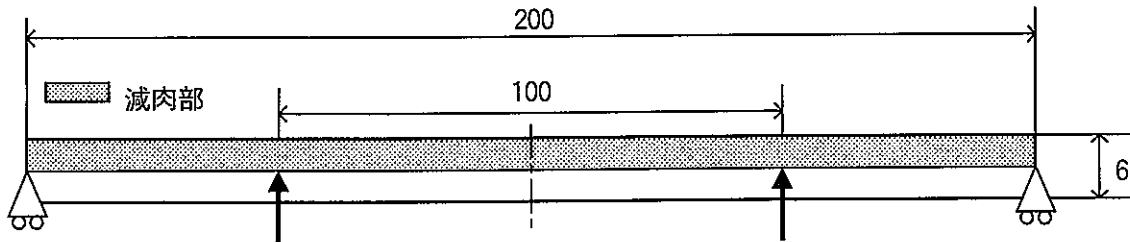
4点曲げ簡易モデル(対称性から 1/2 をモデル化)である。板厚 6mm 無限平板、減肉量 3mm を想定。

解析方法 : 片側減肉過程弾塑性解析

使用要素 : 20 節点 27 積分点ソリッド要素 HEX20

物性値 : 880℃, SM400B 材料特性を使用[4]

要素分割図 : 図 2.3.4 参照



・4点曲げ簡易モデル

図 2.3.1 構造モデル(断面図)

(2) 境界条件(図 2.3.2 および図 2.3.3 参照)

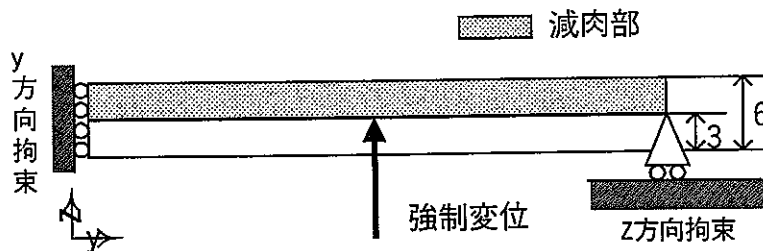


図 2.3.2 境界条件 (Y-Z 断面)

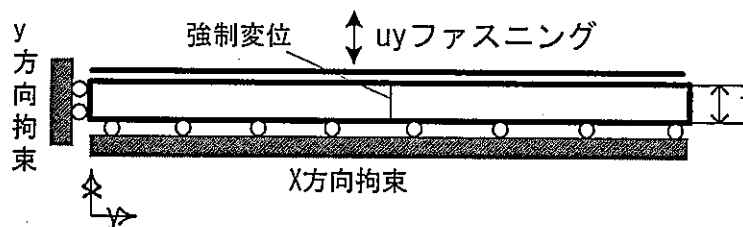
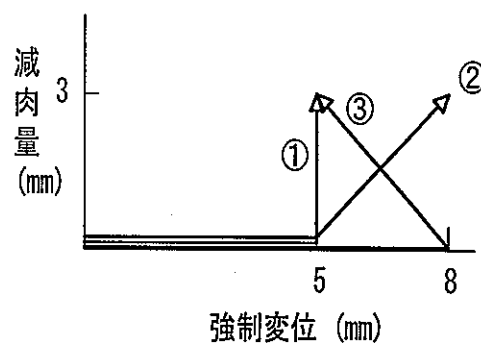


図 2.3.3 境界条件 (X-Y 断面)

(3) 解析ケース

・解析ケース一覧

| 解析ケース | 負荷形態 |
|---------|----------------|
| ① ケース 1 | 5mm→保持 3mm 減肉 |
| ② ケース 2 | 5mm→8mm,3mm 減肉 |
| ③ ケース 3 | 8mm→5mm,3mm 減肉 |



V1
L1
C4

要素数 : 400
節点数 : 3323

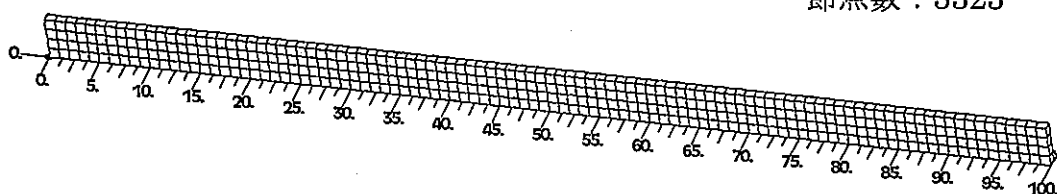


図 2.3.4 要素分割図 (鳥瞰図)

(4) 解析結果

強制変位を与えた節点に生じた反力の履歴を図 2.3.5～図 2.3.7 に示す。FINAS による解析では、積分点単位で階段状に減肉を進めることから実態に合った変位・反力関係の履歴を捉えるために、ある積分点で減肉処理が終了した時点から次の積分点の減肉処理が開始する時点までの中間の時点での結果を結んでいる。3つのケースについて、両者はほぼ一致することがわかる。なお、ABAQUS[5]は、要素単位で減肉を処理する方法を採っており、減肉対象となった要素について荷重を線形的に零にすることができる。FINAS、ABAQUS とも、要素数を増やすことで、より滑らかな減肉挙動を表現できる点で違いはない。実際、後述する最終ステップ（減肉量 3mm）時の鉛直変位やひずみ分布の比較からわかるように、両者の差は無視できる程度であり、手法の差による最終ステップへの影響はほとんど無い。さらに、板厚方向の要素数を増やせば、両者の履歴の差はさらに小さくなり、減肉過程をより精度良く記述することが可能であると考えられる。

鉛直変位分布は、どのケースも同等である（図 2.3.8～図 2.3.10）。長手方向ひずみの板厚方向および長手方向の分布については、負荷が増加しながら減肉していくケース 2 においてはわずかに違いが見られるが、他のケースは、ABAQUS の結果とほぼ同等の結果が得られた（図 2.3.11～図 2.3.16）。

(5) 評価

既存の汎用コードとの比較から、前節で示した減肉過程のモデル化手法がソリッド要素に適用できることが確認された。

反力、鉛直変位及びひずみ分布の ABAQUS との比較図

・強制変位節点での反力履歴

ケース 1

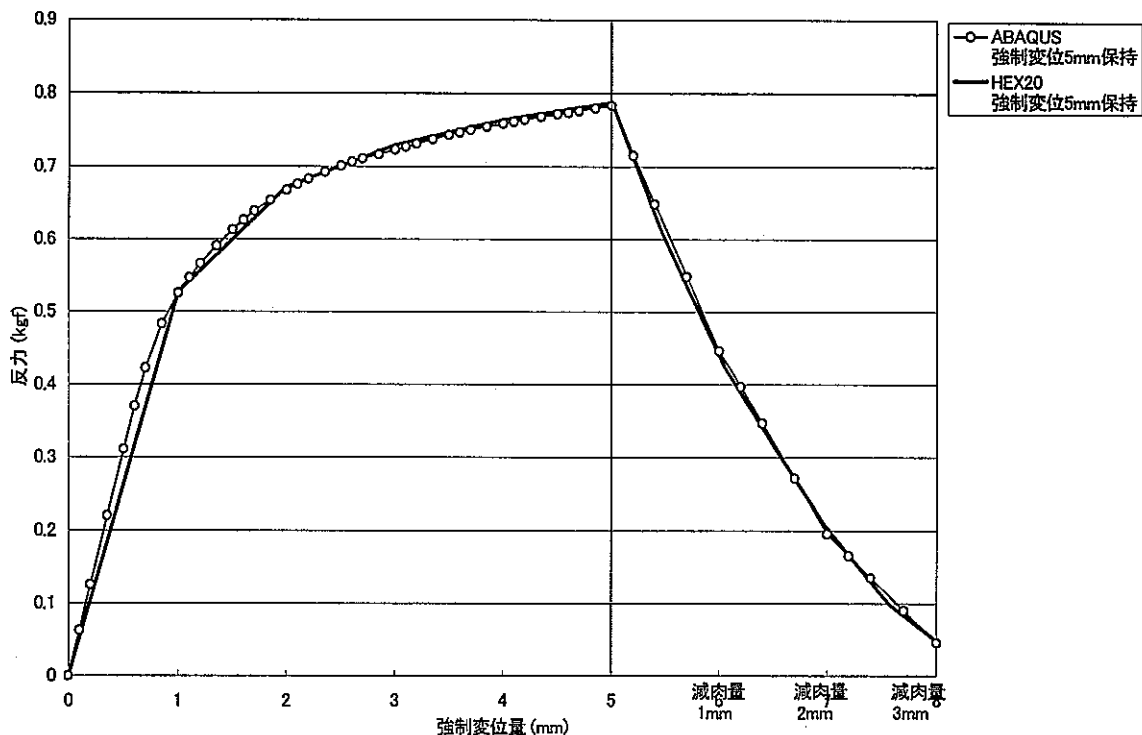


図2.3.5 ケース1:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析反力履歴図

ケース 2

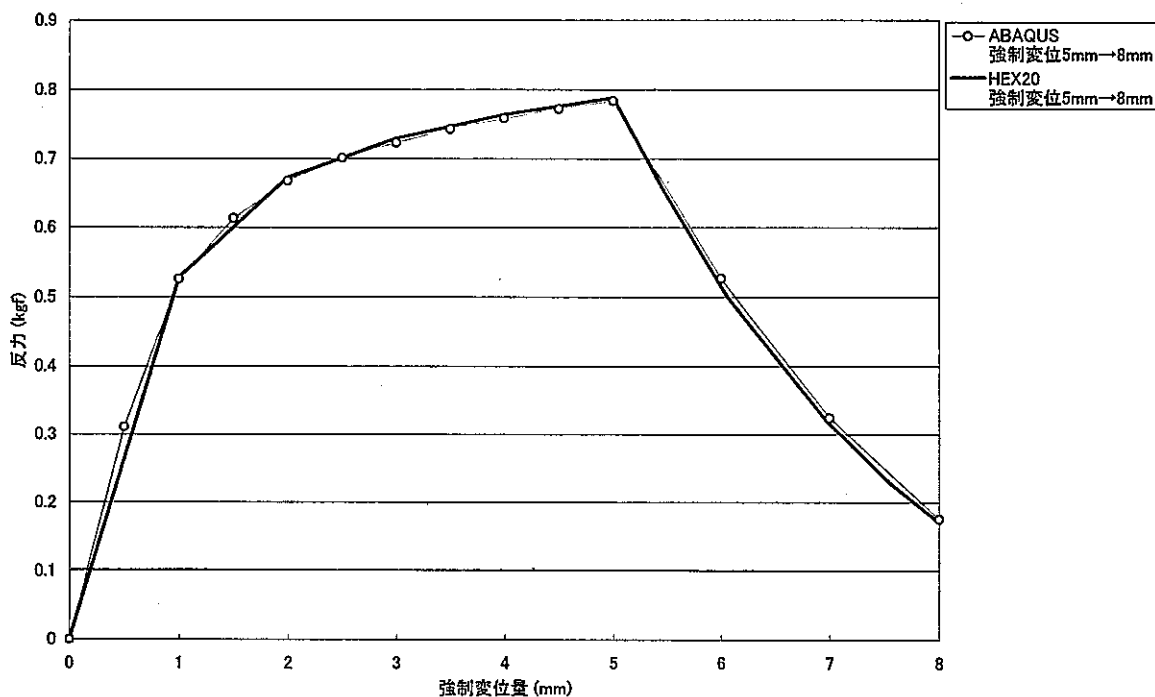


図2.3.6 ケース2:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析反力履歴図

ケース 3

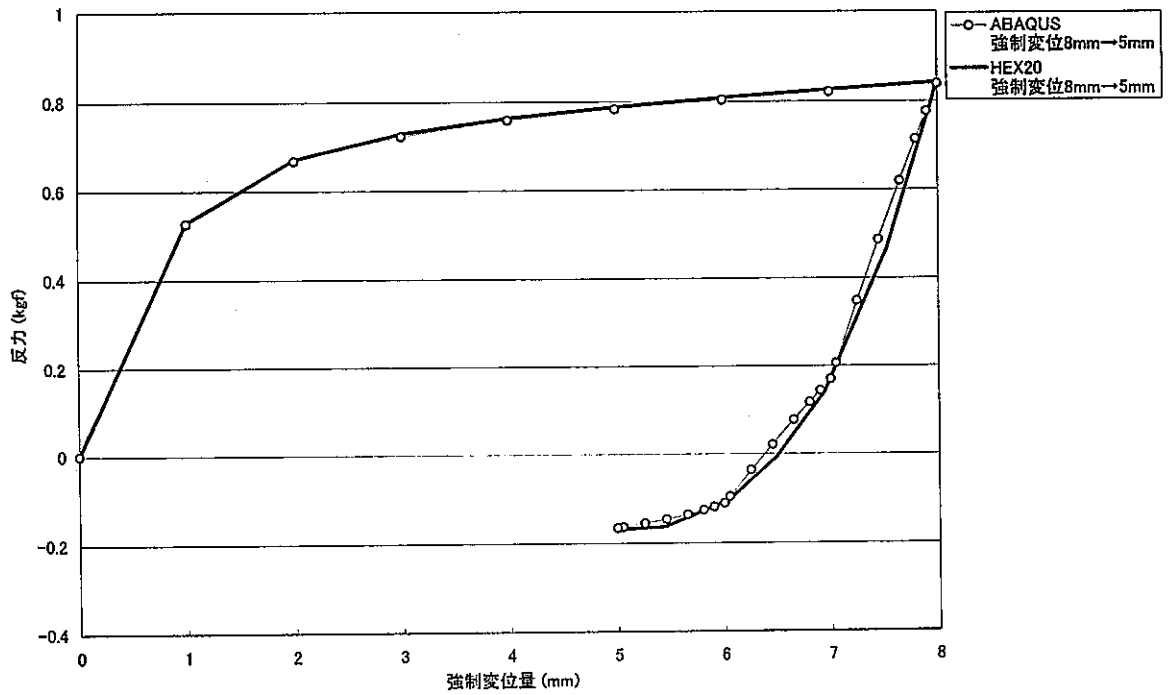


図2.3.7 ケース3:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析反力履歴図

・減肉直前及び 3mm 減肉時の鉛直方向変位分布

ケース 1

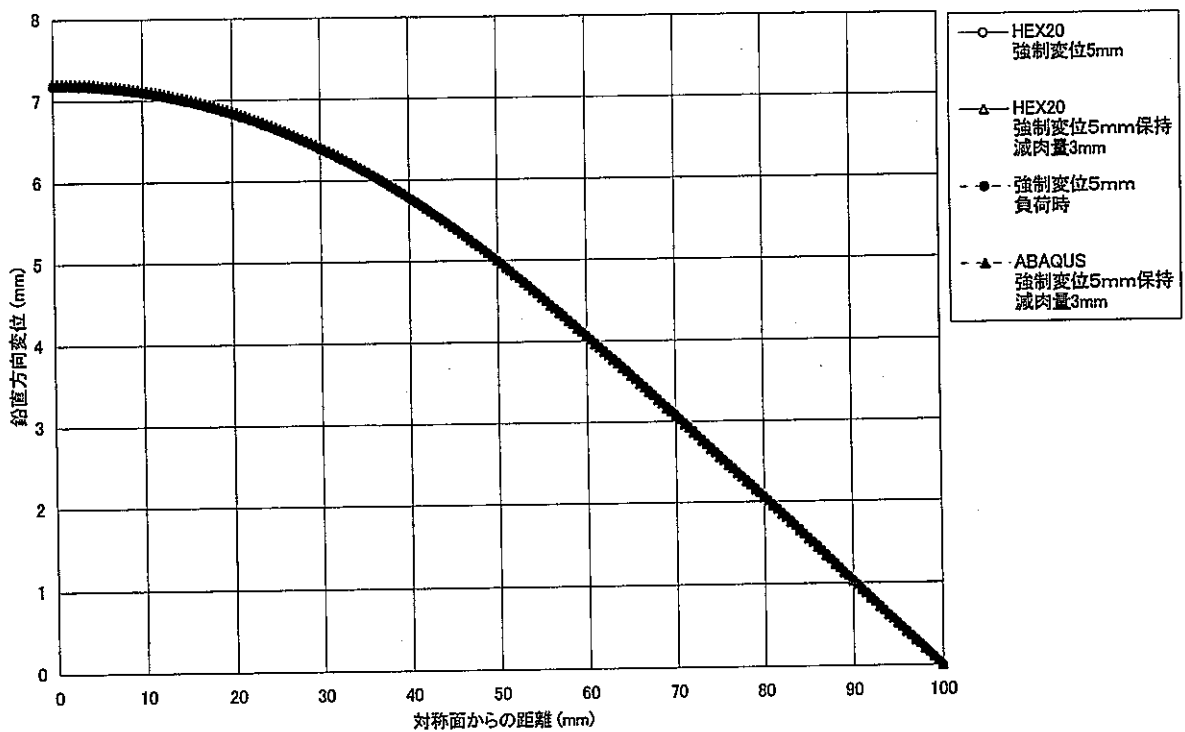


図2.3.8 ケース1:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析変位分布図

ケース 2

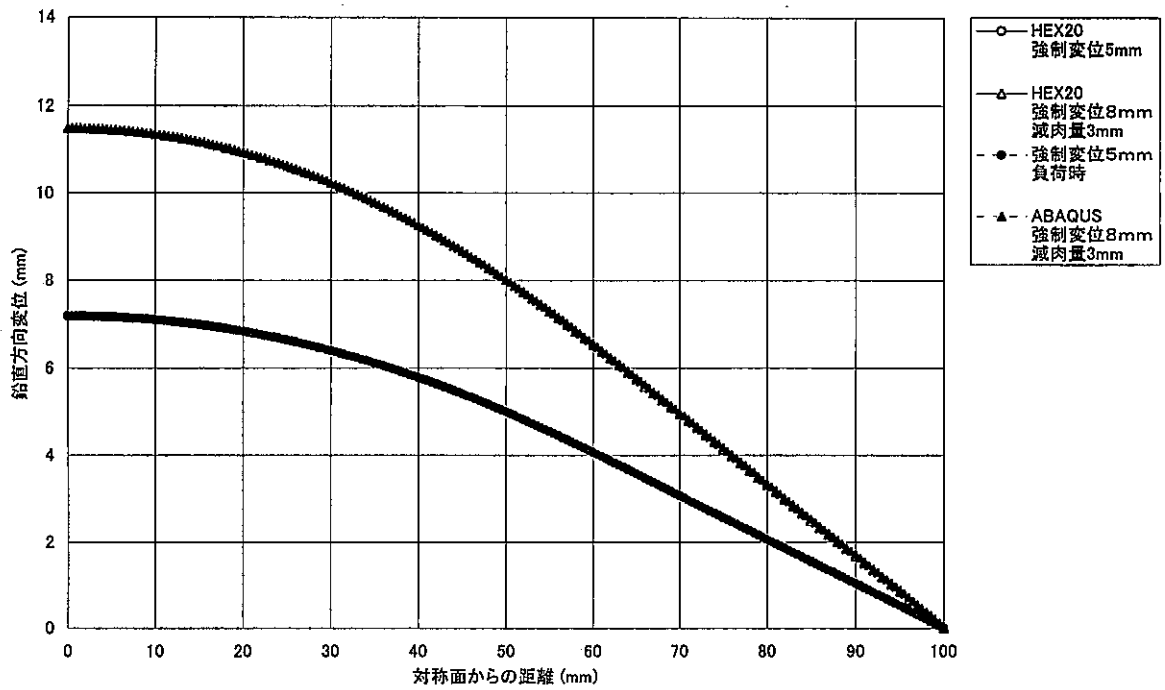


図2.3.9 ケース2:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析変位分布図

ケース 3

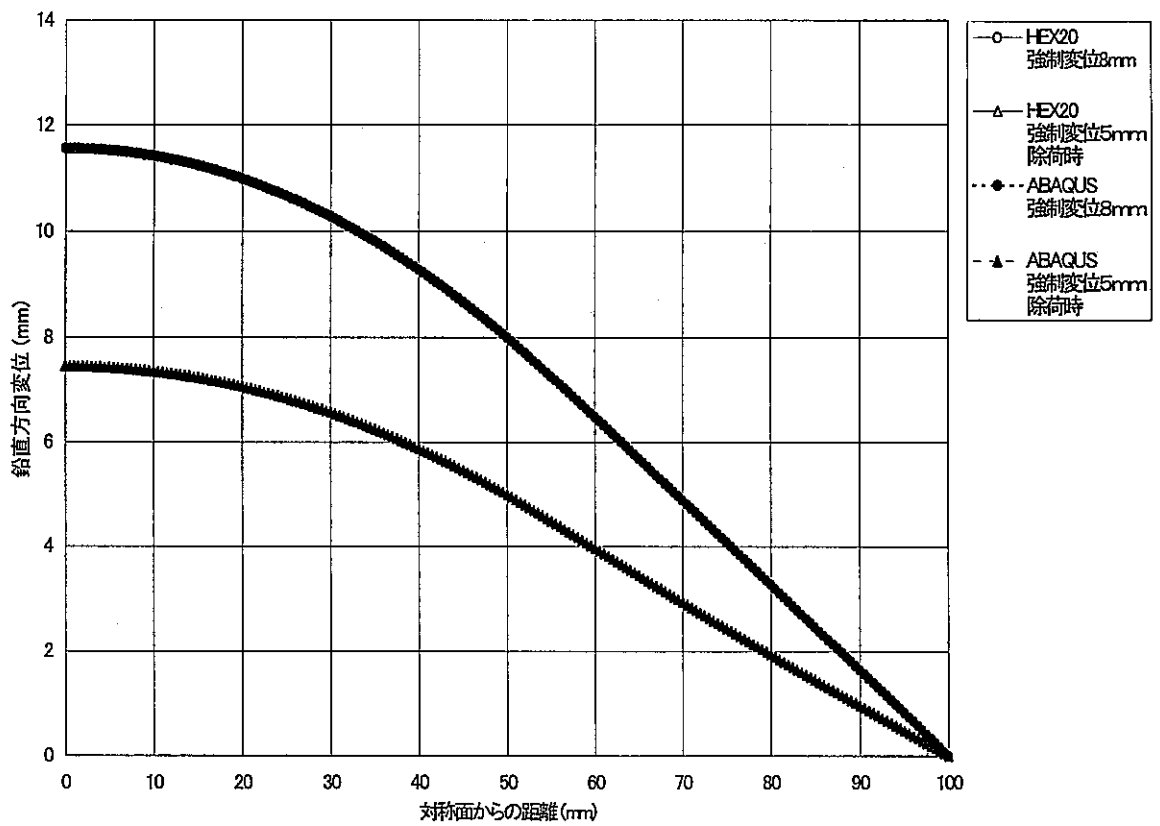


図2.3.10 ケース3:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析変位分布図

・減肉直前及び3mm 減肉時のひずみ分布（板厚方向）

ケース 1

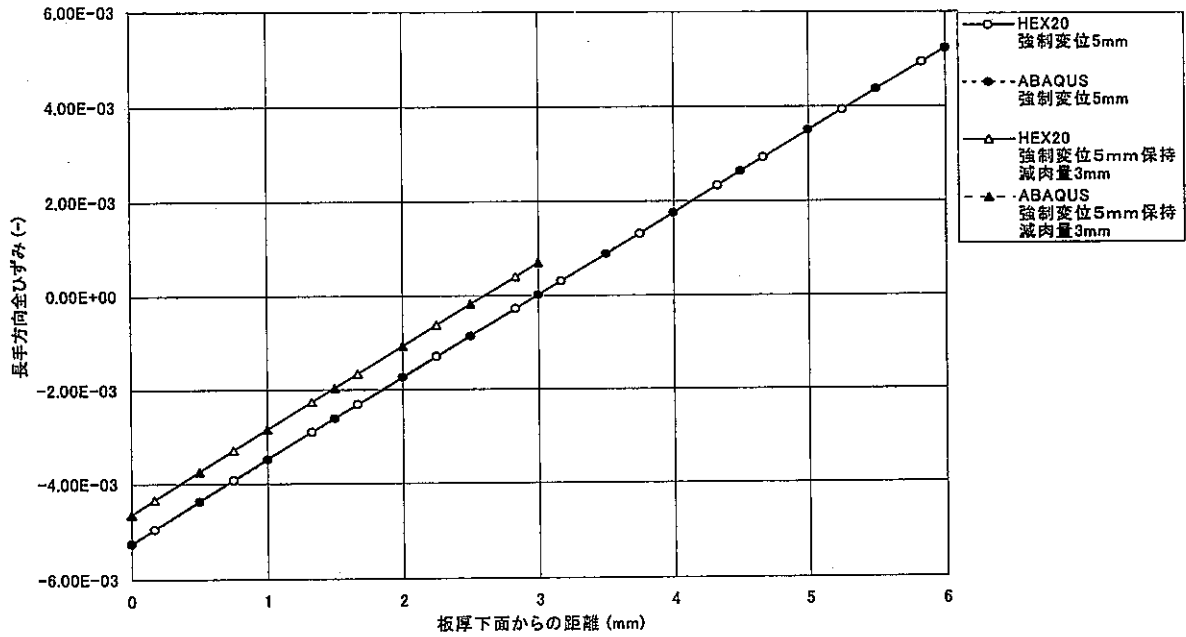


図2.3.11 ケース1:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析長手方向ひずみ板厚分布図

ケース 2

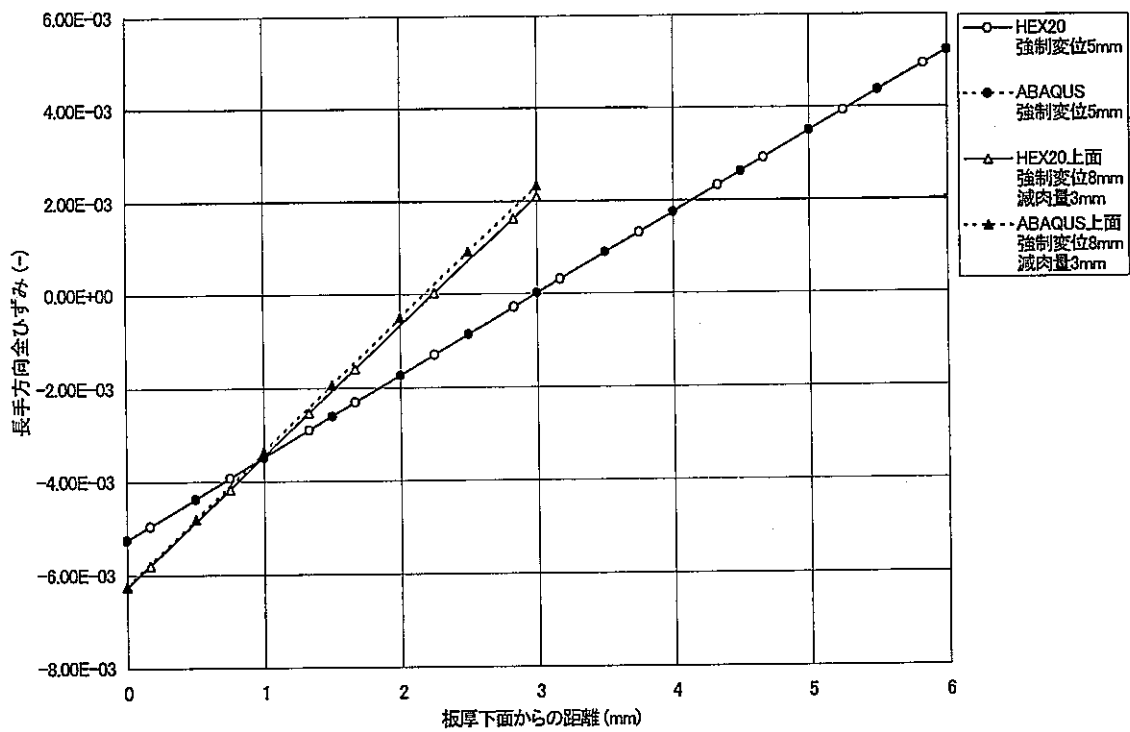


図2.3.12 ケース2:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析長手方向ひずみ板厚分布図

ケース 3

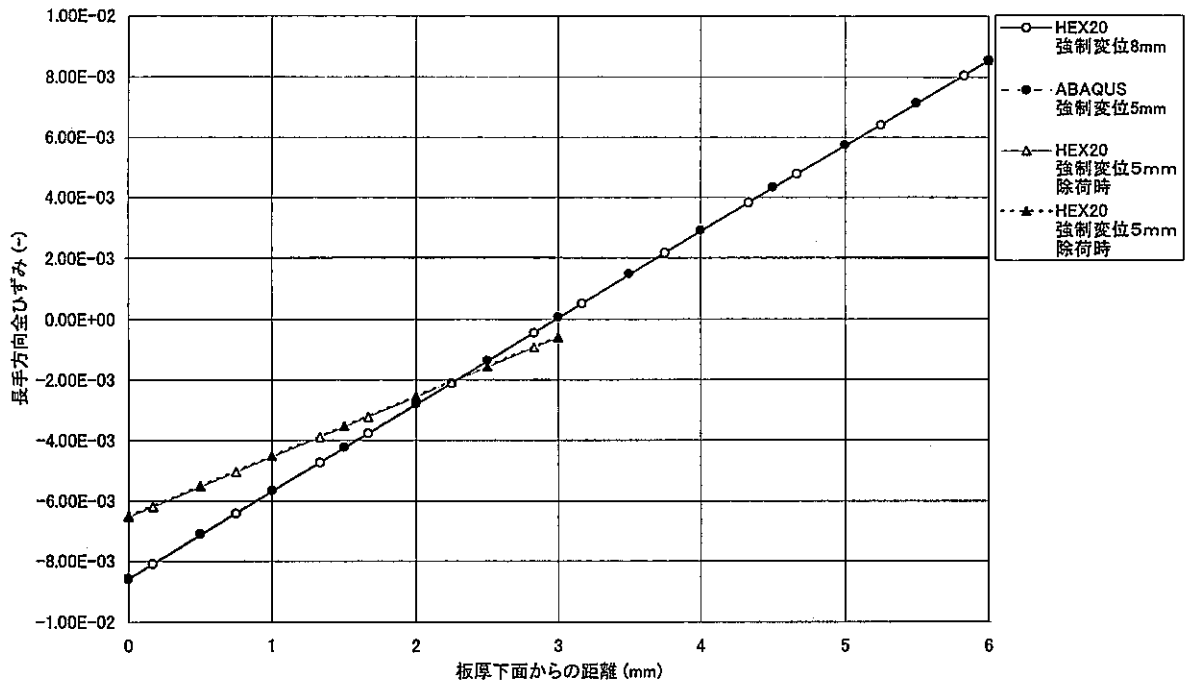


図2.3.13 ケース3:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析長手方向ひずみ板厚分布図

・ 減肉直前及び 3mm 減肉時の上面及び仮面のひずみ分布 (長手方向方向)

ケース 1

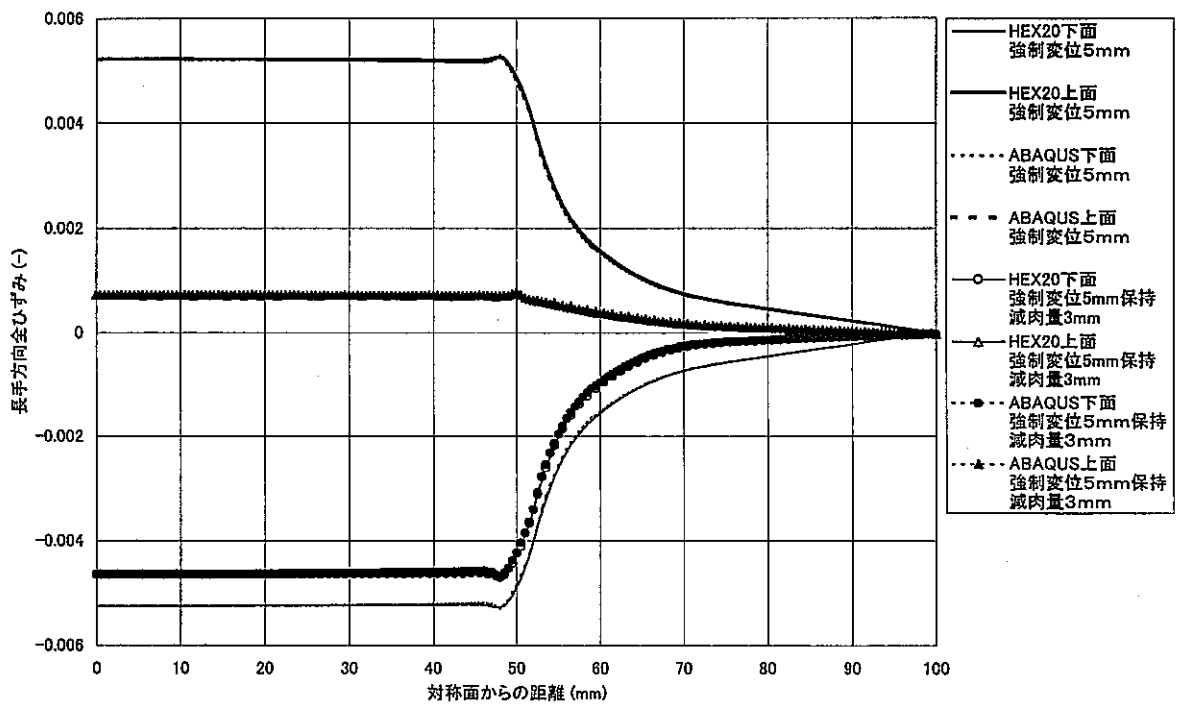


図2.3.14 ケース1:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析長手方向ひずみ分布図

ケース2

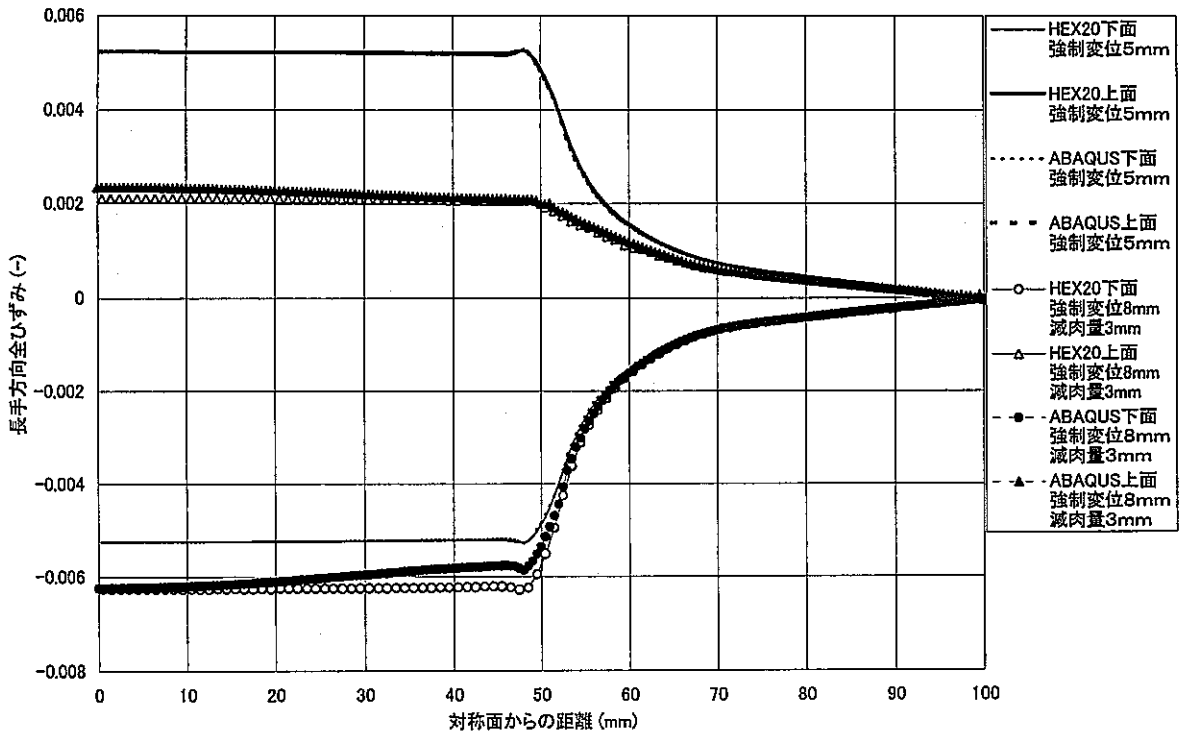


図2.3.15 ケース2:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析長手方向ひずみ分布図

ケース3

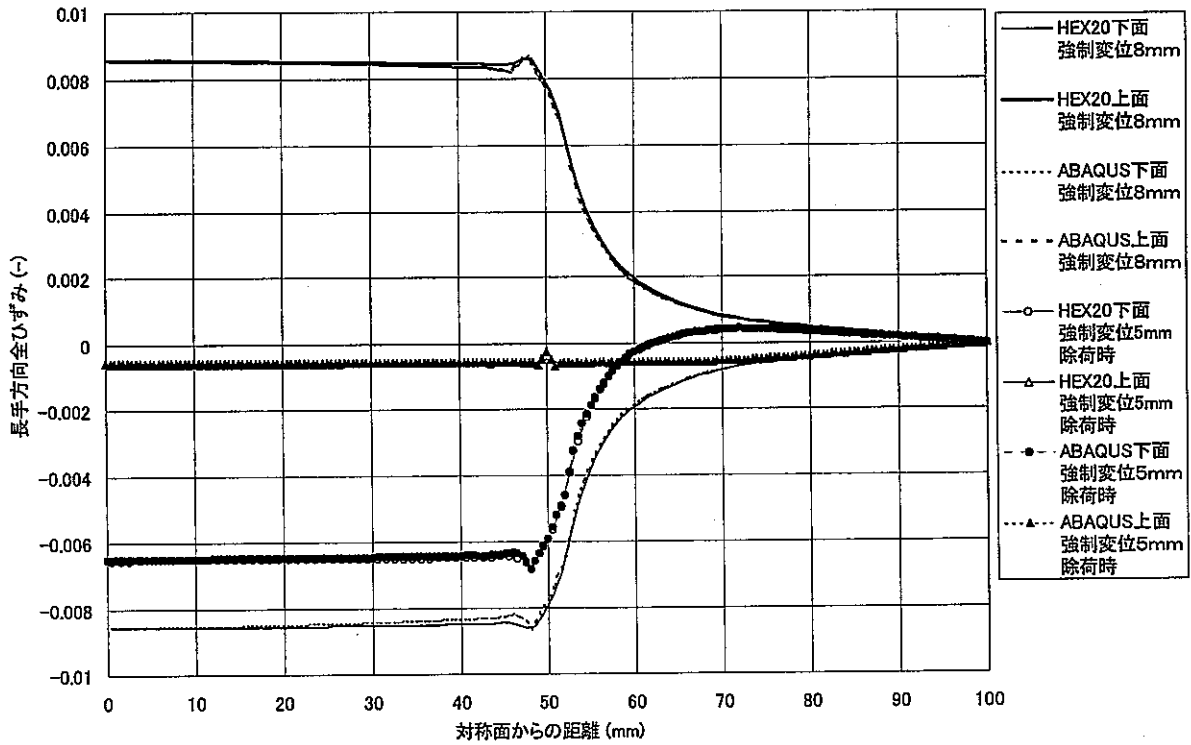


図2.3.16 ケース3:ソリッド用減肉プログラムによる曲げ解析長手方向ひずみ分布図

3. FINASへのモデルの適用

3. 1 ユーザサブルーチンによるアルゴリズム

減肉過程モデル化のサブルーチンは、「FINAS」[6]のユーザサブルーチン「XELMAT」及び「XCREEP」を利用して作られている。ユーザサブルーチン「XELMAT」は、減肉対象となる積分点について弾性特性マトリックスの弾性定数のみ小さくして、次ステップで残差荷重の増大を抑制し、発生応力を抑える。ユーザサブルーチン「XCREEP」は、減肉対象となる要素の積分点に擬似クリープひずみを与え応力を緩和させる。これら2つのサブルーチンを同期させ、両者の効果により、要素（積分点）の応力を無視できる程度に零に近づけ、減肉された状態を模擬する。

ここで、減肉過程を段階的により精度良く模擬するため、「FINAS」ではシェル要素の積分点の層数は従来9層であるところを49層まで解析可能なサブルーチンも追加している。図3.1-1は、減肉過程のイメージ図である。積分点○は、既に減肉された状態で、荷重再配分により応力が発生するため、この領域は常に減肉処理をする。積分点●は、次のステップで減肉対象となった領域で、応力を緩和させる減肉処理を施す。●は次のステップまで減肉対象外の積分点である。

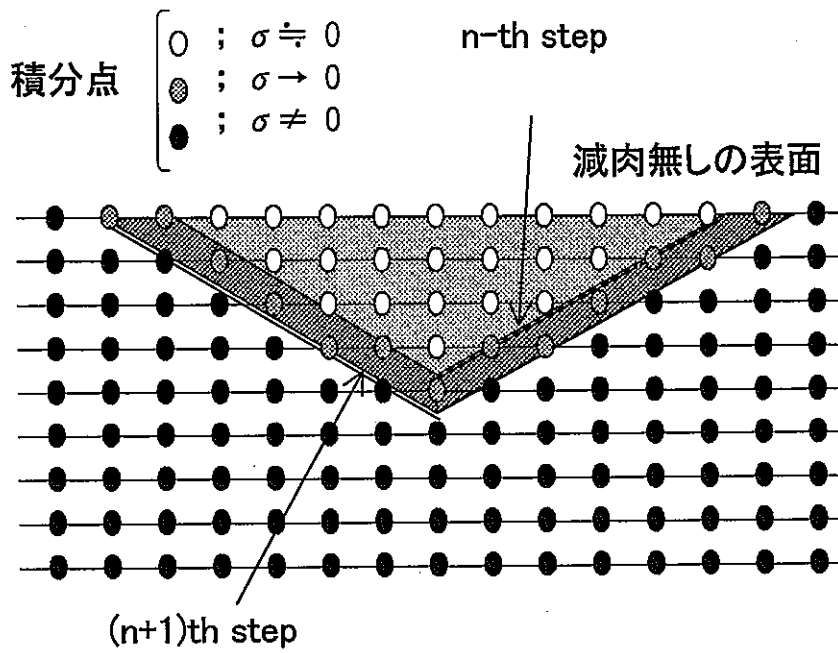


図 3.1-1 v字減肉の場合の減肉状態

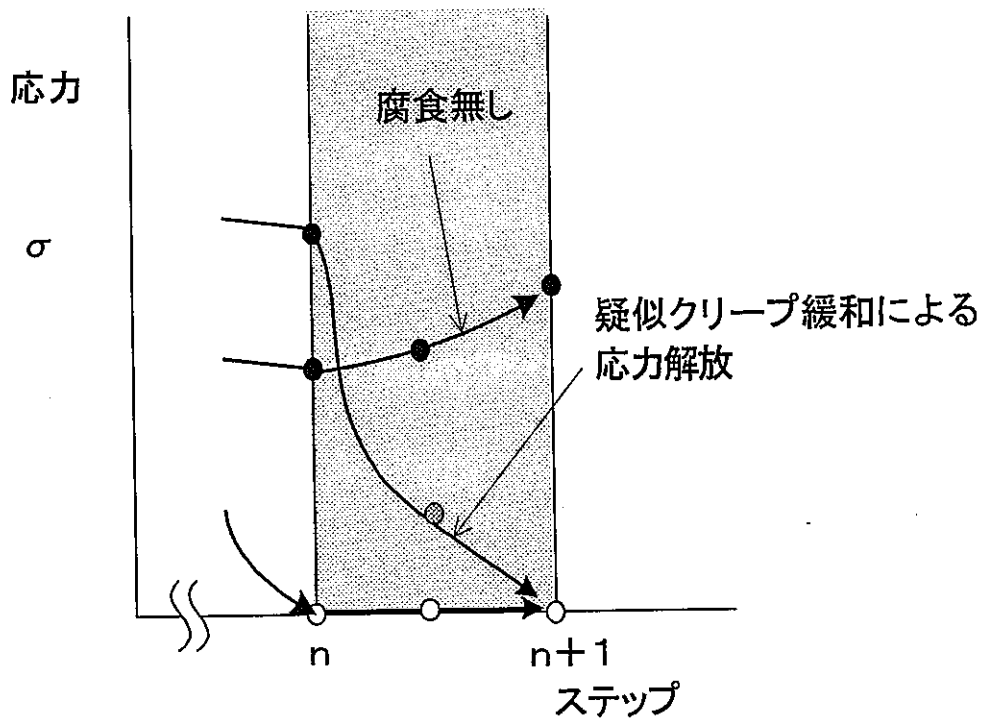
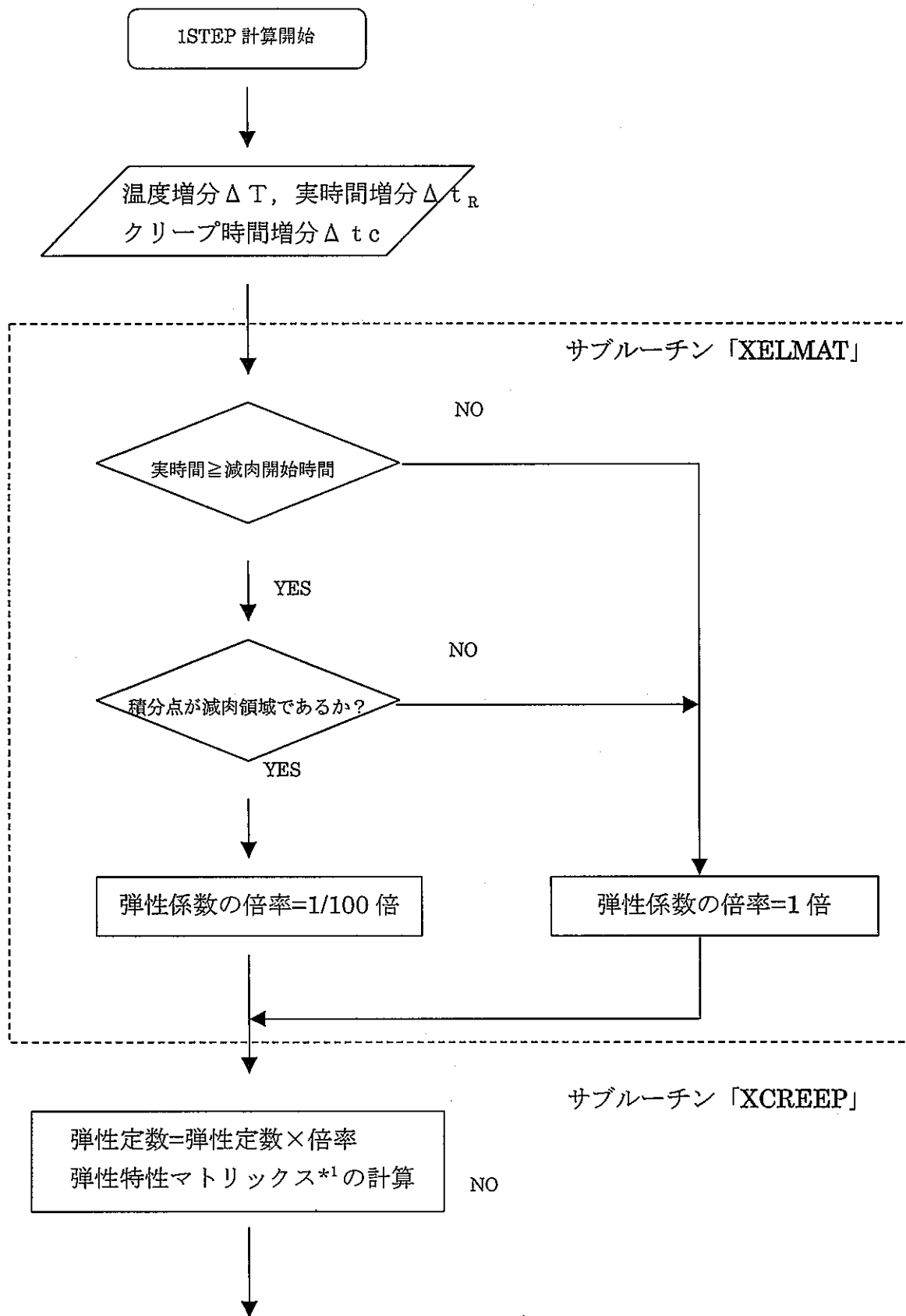
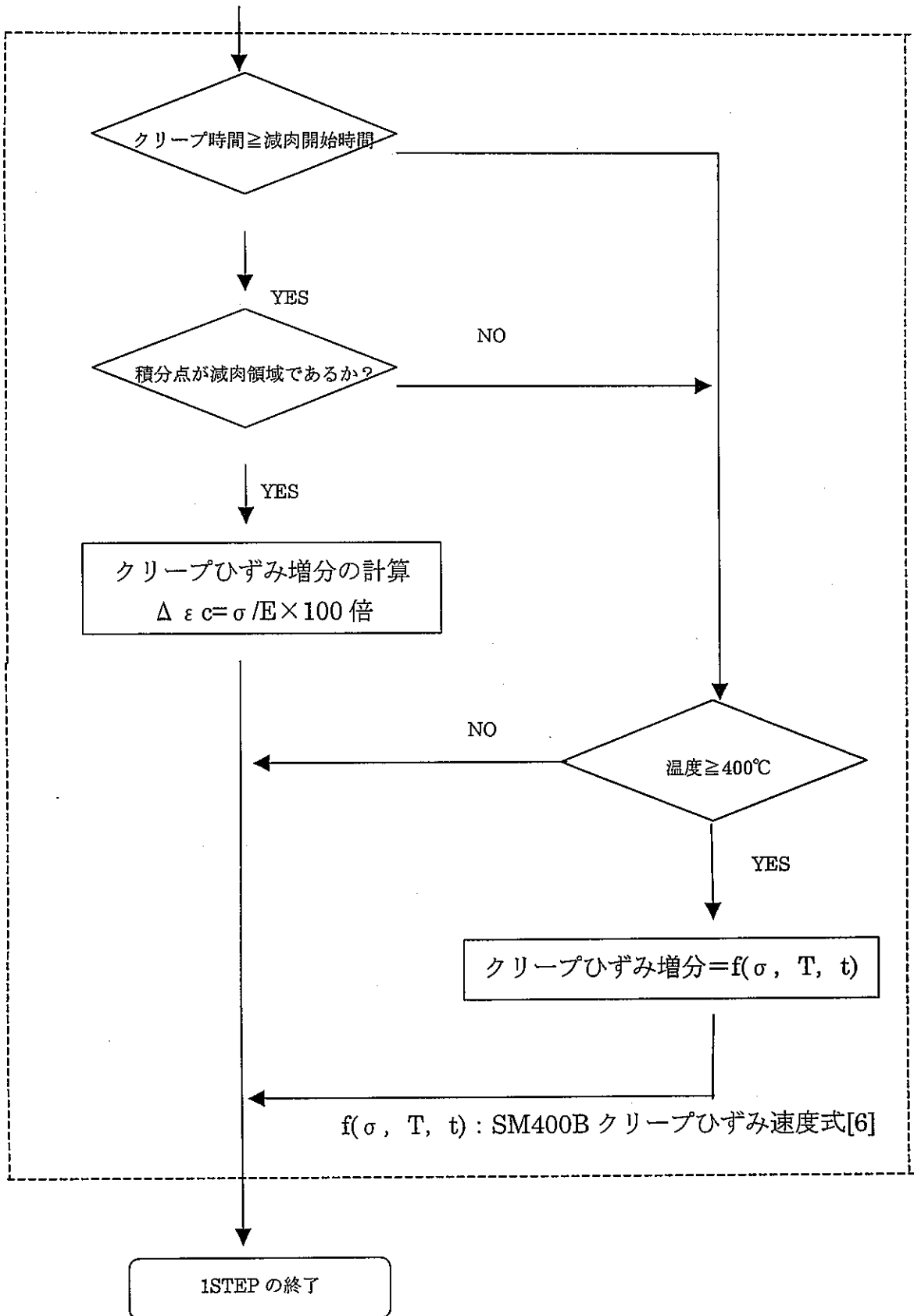


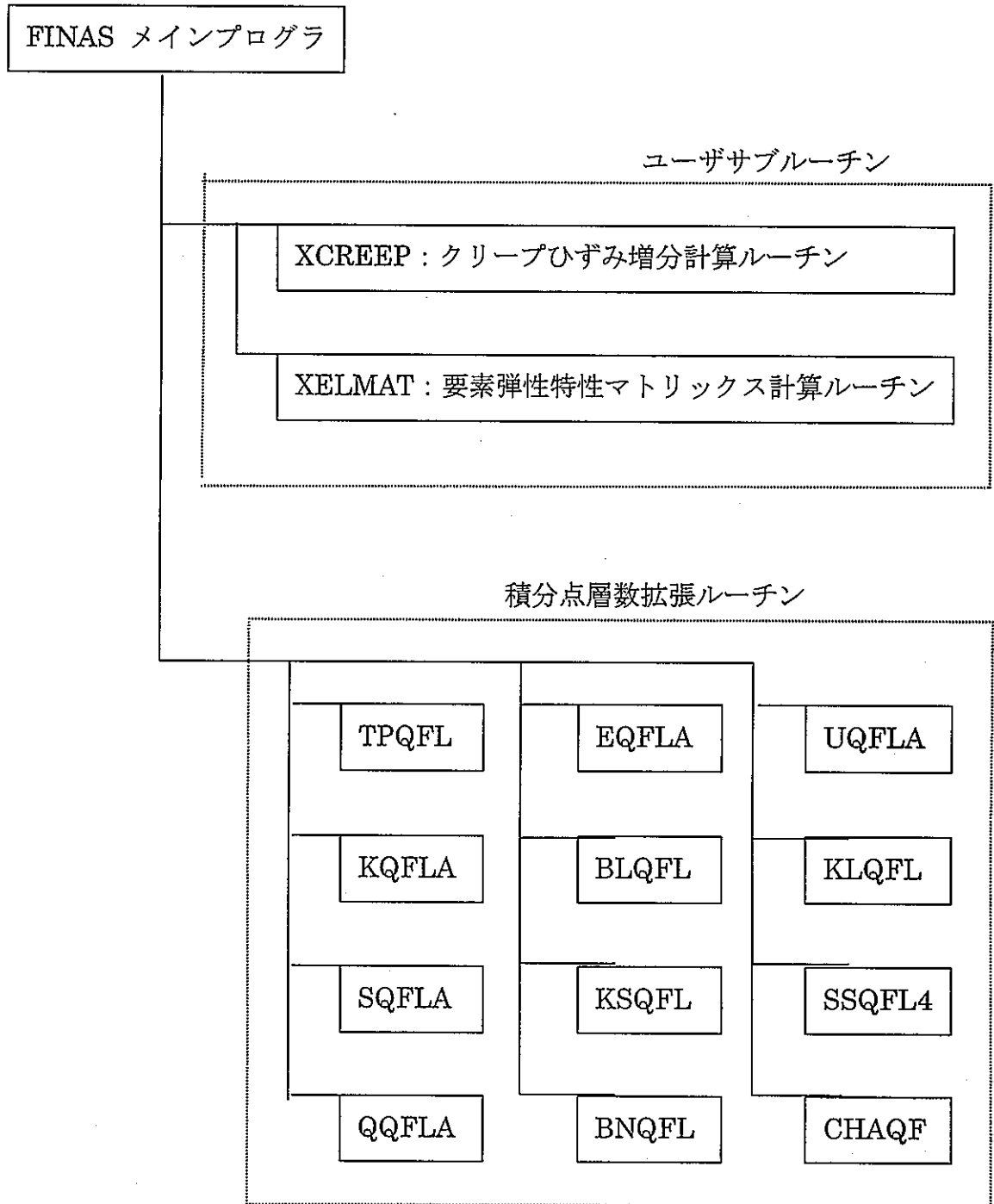
図 3.1-2 減肉部の応力状態

F I N A S 実行手順に従った 1STEP 当りの具体的な処理手順を以下に示す。





FINAS メインプログラム及びサブルーチンの構成



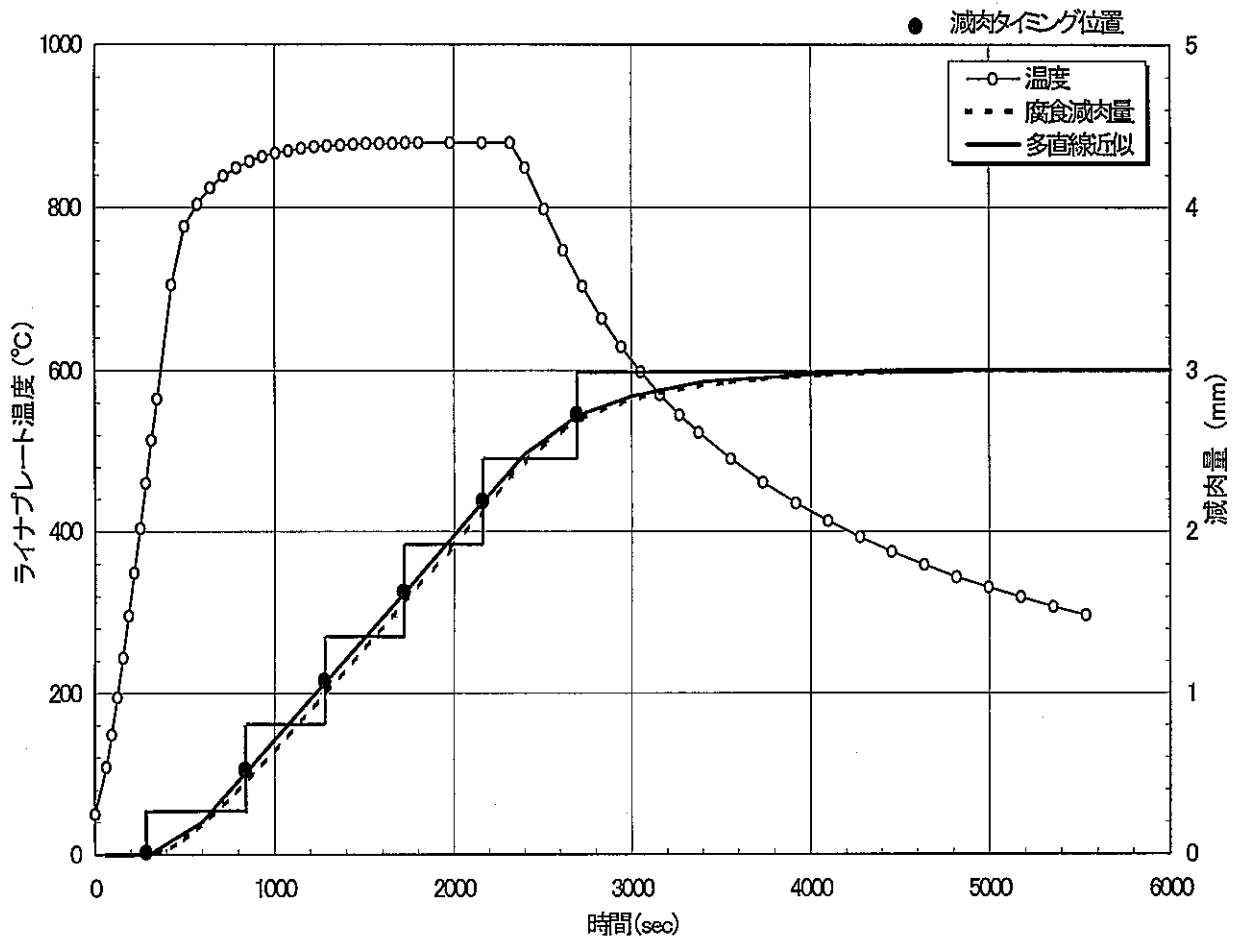
*1 ; シェル要素の弾性特性マトリックス[7]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ \nu & 1 & & & \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2k} & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix}$$

k=1, 2

3. 2 減肉タイミングと板厚の関係

本減肉プログラムは、減肉領域に達した積分点に対し便宜上、数ステップで荷重を零に近づける操作を行い、減肉過程を模擬している。本来、積分層の間は減肉曲線に合うように荷重を徐々に軽減していくべきだが、この方法の場合、積分点の層で離散化するため、層間隔に対応した階段状に進行させることになる。具体的には、図 3.2-1 に示すような階段状の近似となる。なお、減肉過程における擬似的な応力緩和については、応力の再配分等により応力の減衰が鈍化することから、第 2 章の式(2-3)における ω を 100 として緩和を加速している。また、弾性定数の低減については、減肉前の値の 100 分の 1 としている。シェル要素の積分点層数については、ライナプレート厚さ 6mm に対し減肉量 3mm を満たす積分点層数のなかから、精度と計算時間の観点から 23 層を選び、これに対応したプログラミングを行った (表 3.2-1 参照)。



図B.2-1 腐食減肉max3mm時の熱過渡と減肉量

【要素について】

要素 : 4 節点四辺形シェル要素 QFLA4S

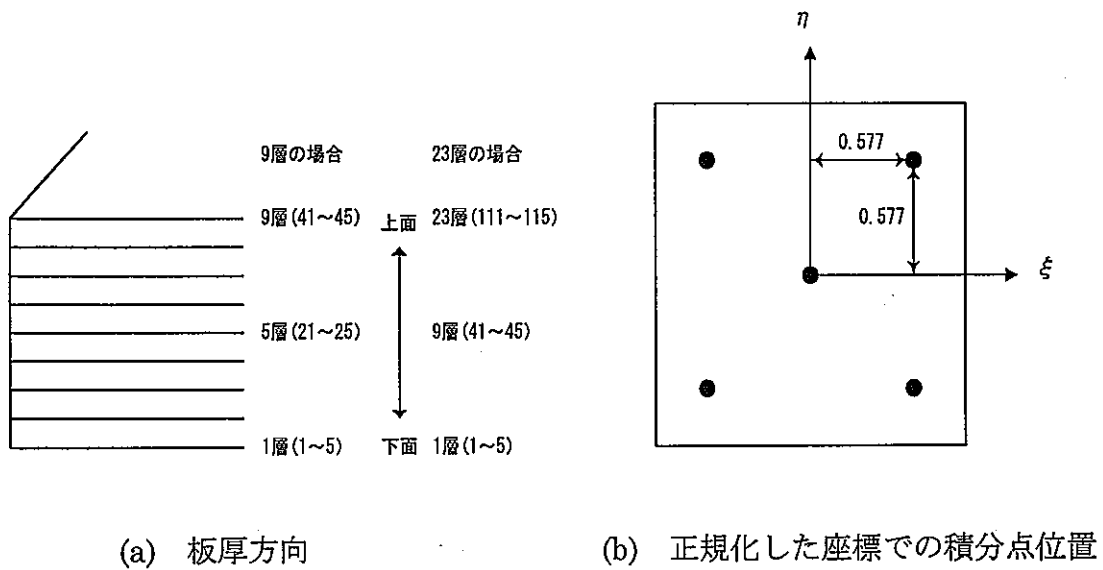
節点数 : 4

節点座標 : X, Y, Z 座標

変位関数 : Lagrange の 2 次元 1 次補間式

積分点 : 45 点(面内 5 点、板厚方向 9 層) から 245 点(面内 5 点、板厚方向 49 層) まで拡張可能。

積分点位置 : 次図参照。



【積分点層数と厚さの関係】

減肉過程をより精密に解析しようとする場合、積分点の層数を増やすほど滑らかな減肉曲線に近づくが、同時に積分点数も増加するため、計算時間の増加や作業エリアが増大し結果出力までに多大な時間を用する。反対に、積分点層数が少ないと1層当たりの減肉量が大きく、減肉曲線を精度良く模擬することが困難になる。前述のように、積分点層数23層はこのような点を考慮して決めた。

シェル要素の積分点層数と減肉量の関係を以下に示す。

$$\text{減肉量} = (n/2 - 0.5) \times dt \times 2$$

dt : 1層当り板厚

n : 減肉する積分点層数 (両面減肉)

板厚 6mm に対する積分点層数と減肉量の関係を表にまとめると以下の様になる。

表 3.2-1 板厚 6mm に対する積分点層数と減肉量の関係

| 片側減肉 層数 n/2 | 積分点層数 | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | 33 |
| 1 | 0.60 | 0.50 | 0.43 | 0.38 | 0.33 | 0.30 | 0.27 | 0.25 | 0.23 | 0.21 | 0.20 | 0.19 |
| 2 | 1.80 | 1.50 | 1.29 | 1.13 | 1.00 | 0.90 | 0.82 | 0.75 | 0.69 | 0.64 | 0.60 | 0.56 |
| 3 | 3.00 | 2.50 | 2.14 | 1.88 | 1.67 | 1.50 | 1.36 | 1.25 | 1.15 | 1.07 | 1.00 | 0.94 |
| 4 | 4.20 | 3.50 | 3.00 | 2.63 | 2.33 | 2.10 | 1.91 | 1.75 | 1.62 | 1.50 | 1.40 | 1.31 |
| 5 | 5.40 | 4.50 | 3.86 | 3.38 | 3.00 | 2.70 | 2.45 | 2.25 | 2.08 | 1.93 | 1.80 | 1.69 |
| 6 | | 5.50 | 4.71 | 4.13 | 3.67 | 3.30 | 3.00 | 2.75 | 2.54 | 2.36 | 2.20 | 2.06 |
| 7 | | | 5.57 | 4.88 | 4.33 | 3.90 | 3.55 | 3.25 | 3.00 | 2.79 | 2.60 | 2.44 |
| 8 | | | | 5.63 | 5.00 | 4.50 | 4.09 | 3.75 | 3.46 | 3.21 | 3.00 | 2.81 |
| 9 | | | | | 5.67 | 5.10 | 4.64 | 4.25 | 3.92 | 3.64 | 3.40 | 3.19 |
| 10 | | | | | | 5.70 | 5.18 | 4.75 | 4.38 | 4.07 | 3.80 | 3.56 |
| 11 | | | | | | | 5.73 | 5.25 | 4.85 | 4.50 | 4.20 | 3.94 |
| 12 | | | | | | | | 5.75 | 5.31 | 4.93 | 4.60 | 4.31 |
| 13 | | | | | | | | | 5.77 | 5.36 | 5.00 | 4.69 |

プレート部については基本的に積分点層数は23層とし、プレート以外のリブ及びフレーム部は直接減肉処理に関係しないことから積分点層を5層とした。

【減肉のタイミング】

減肉過程は、与えられた減肉曲線をステップ状に近似し（図 3.2-1）、下面及び上面からの両面減肉処理で模擬している。したがって、減肉過程についてのプログラム上の処理では、減肉量がある積分点の位置に到達すると、その積分点の占める層については減肉したものとして扱うことになる。つまり、もとの減肉の進行に対してサブルーチンで処理される減肉の進行とはタイミングが異なってくる。以下に示す 23 層を採用しているライナ解析の減肉量の処理上の値ともとの減肉量（表面からの距離）の関係を例にとると、減肉開始時の表面からの距離はほぼ零であるのに対し、処理上は既に表面の積分点が減肉処理されているため 0.27mm 減肉したことになる。実際には上下 6 層目の積分点まで減肉対象となった時、表面からの距離は 2.73mm であるが、処理上は減肉量 3mm（残存板厚 3mm）となる。したがって、このステップ状の近似は最終的な減肉量を実際よりも早目に設定することになる（図 3.2-1）。また、減肉量 4mm 及び 5mm 減肉解析に対しても、それぞれ 4.09、5.18mm となり、もとの値に対して保守的な評価となる（表 3.2-2）。

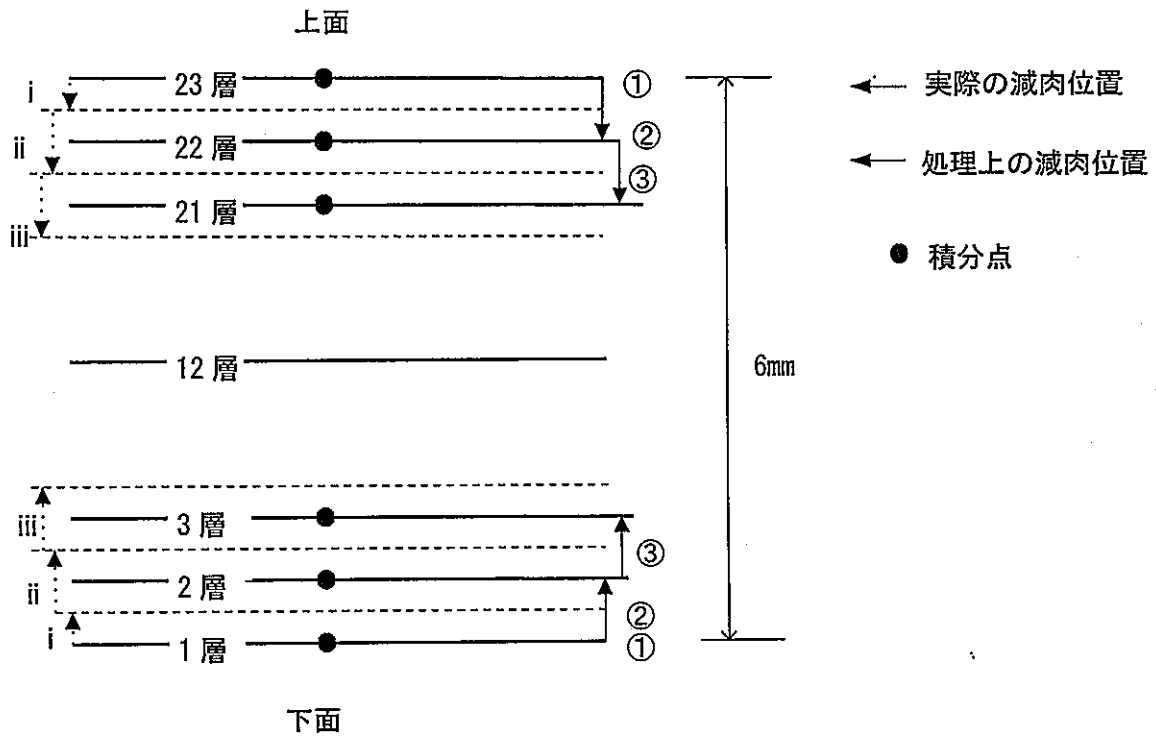


図 3.2-2 実際の減肉位置と処理上の減肉位置の関係

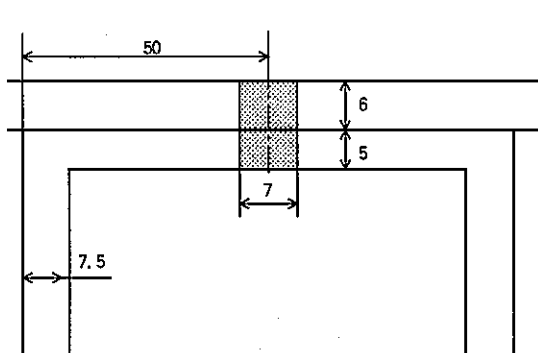
プログラム上で①=第1層，第23層の積分点が減肉処理されると、図 3.2-2 において板厚 i が減肉した量に相当する。時間が進み、②=第2層，第22層が減肉処理されると、減肉量は i と ii の和に相当する。以降、次の2層が減肉されると、減肉量は直前の減肉量に ii と同じ減肉増分量を加算した量になる。

表 3.2-2 処理上の減肉量と与えられた減肉量の関係

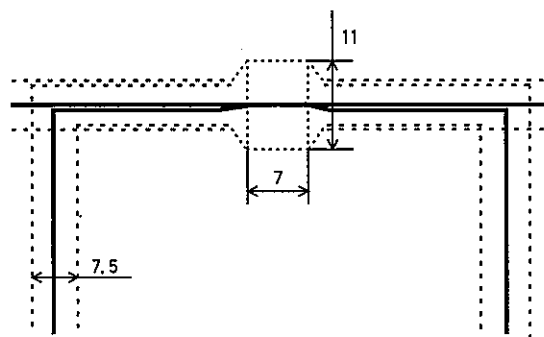
| 減肉層数 (片側分) | プログラム処理上の 減肉量 (mm) | 処理開始時点の実際の 減肉量 (mm) |
|---------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 0.27 | 0 |
| 2 | 0.82 | 0.55 |
| 3 | 1.36 | 1.09 |
| 4 | 1.91 | 1.64 |
| 5 | 2.45 | 2.18 |
| 6 | 3.00 | 2.73 |
| 7 | 3.55 | 3.27 |
| 8 | 4.09 | 3.82 |
| 9 | 4.64 | 4.36 |
| 10 | 5.18 | 4.91 |

【溶接部の取扱い】

溶接部の種類は、リブとプレートの接続部とフレームとプレートの接続部に分けられる。溶接部については、図 3.2-3 および図 3.2-4 の左図に示すようにプレートの中央面に対して対称にはならない。シェル要素では、各節点で形状パラメータとして厚さを入力することが可能であるが、片側のみ厚さを変えることはできない。そこで、リブとプレートの溶接部の剛性については、プレート板厚に隅肉溶接部の厚さを加算した板厚で評価、フレームとプレートの溶接部は、突合せ溶接であることから両者の板厚の合計を 1 枚のシェル要素の板厚として近似的に評価した。

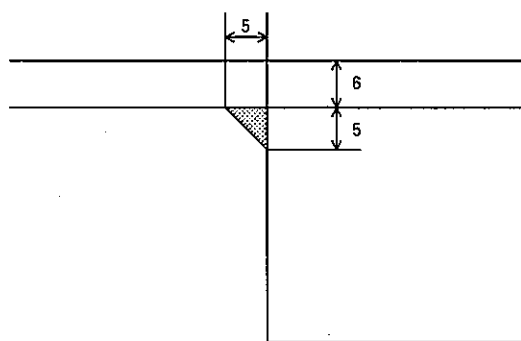


(a) 形状 (一部拡大)

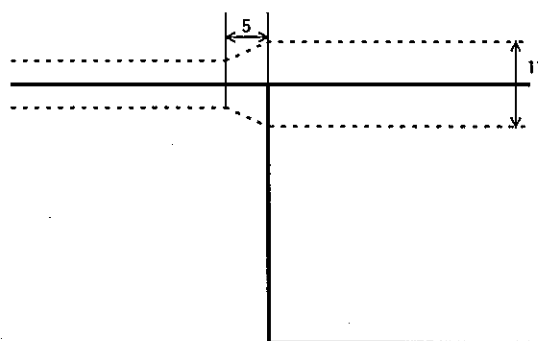


(b) シェル要素によるモデル化

図 3.2-3 フレーム部のモデル化



(a) 形状 (一部拡大)



(b) シェル要素によるモデル化

図 3.2-4 リブ部のモデル化

3. 3 解析例

(1) 問題の設定

積分点層数 2 3 層のシェル要素による板厚 6mm の無限板について、強制変位を与える。両面減肉解析を行い、ABAQUS[5]によるソリッド要素と両面減肉解析結果と比較する。

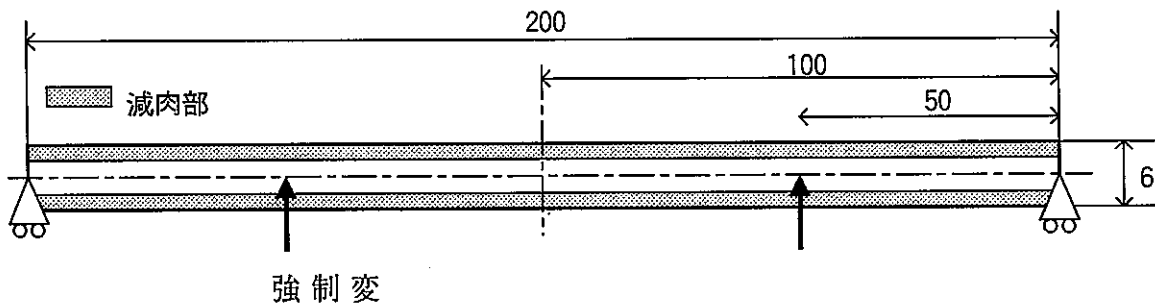


図 3.3-1 構造モデル(断面図)

(2) モデル及び境界条件

解析モデルは、長さ 100mm, 板幅 1mm, 板厚 6mm の 1/2 対称モデルとした。

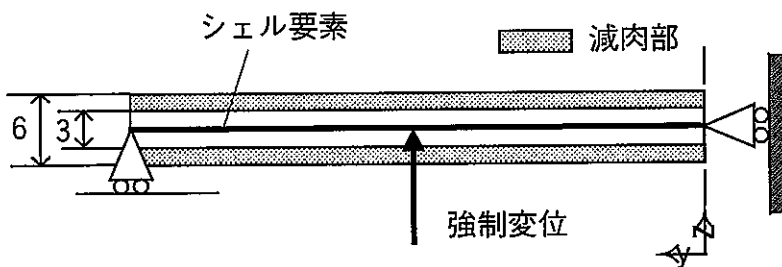


図 3.3-2 境界条件 (断面)

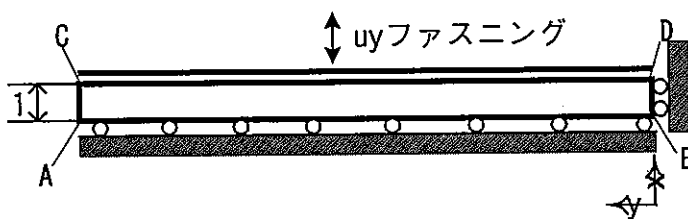


図 3.3-3 境界条件 (Z軸上面)

A-B に沿って $u_x=0, \theta_y=0, \theta_z=0$

B-D に沿って $u_y=0, \theta_x=0, \theta_y=0, \theta_z=0$

A-C に沿って $u_z=0, \theta_y=0, \theta_z=0$

C-D に沿って $\theta_y=0$, $\theta_z=0$

(3) 負荷条件

次の2ケースについて、解析を行った。

ケース1：z軸負の方向に強制変位 5mm を与え、その後減肉しながら 8mm まで強制変位を与える。

ケース2：z軸負の方向に強制変位 8mm を与え、その後減肉しながら 5mm まで強制変位を除荷する。

(4) 解析結果

ケース1及びケース2とも、ソリッド要素で計算した ABAQUS の結果と比較したところ、反力及びひずみはほぼ一致しており、シェル要素を用いた減肉処理プログラムが減肉過程を十分記述していることを確認した。

ケース1

・節点（強制変位）における反力履歴

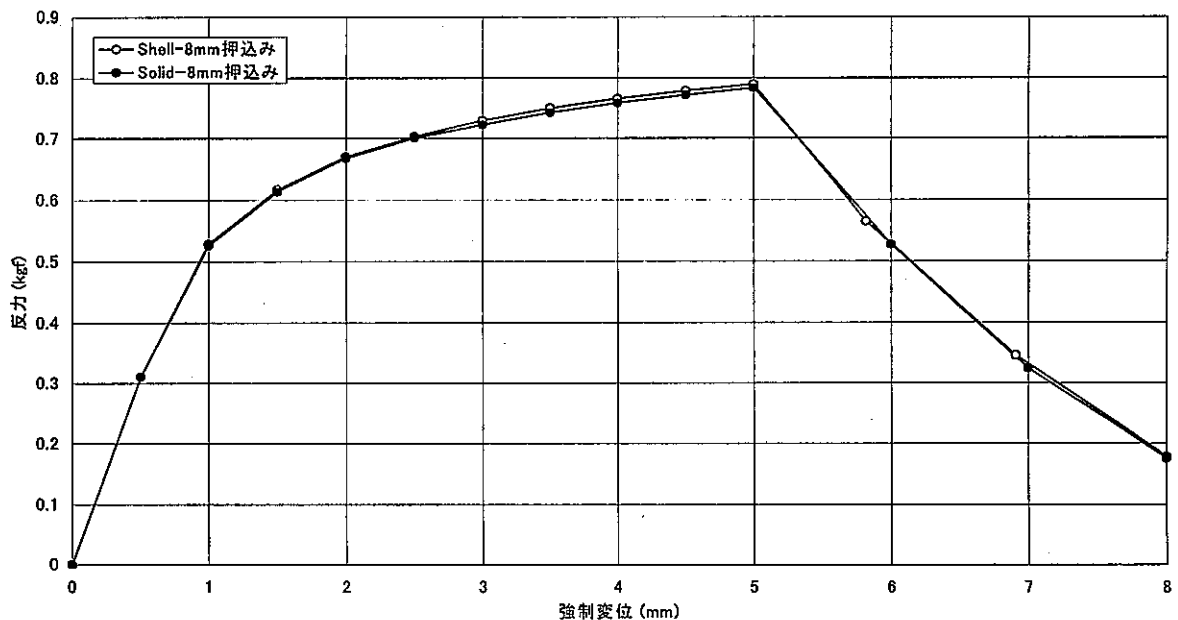


図3.3-4 強制変位5mm→8mm減肉3mm強制変位位置反力比較
4点曲げモデル 上向き強制変位 単純支持位置長手方向拘束無し

・対称面 (y=0) における板厚の長手方向 (y 方向) 全ひずみ分布

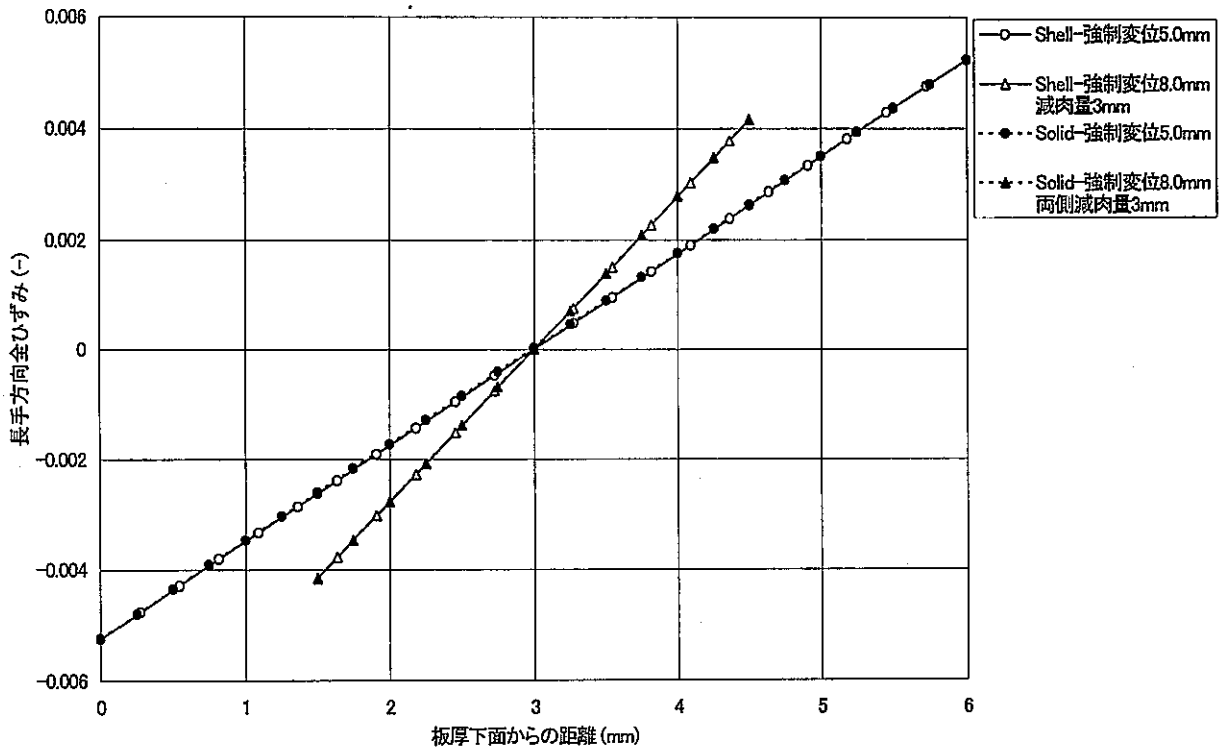


図3.3-5 板厚方向長手方向全ひずみ分布(対称位置)
4点曲げモデル 上向き強制変位 単純支持位置長手方向拘束無し

・長手方向における長手方向 (y 方向) 全ひずみ分布

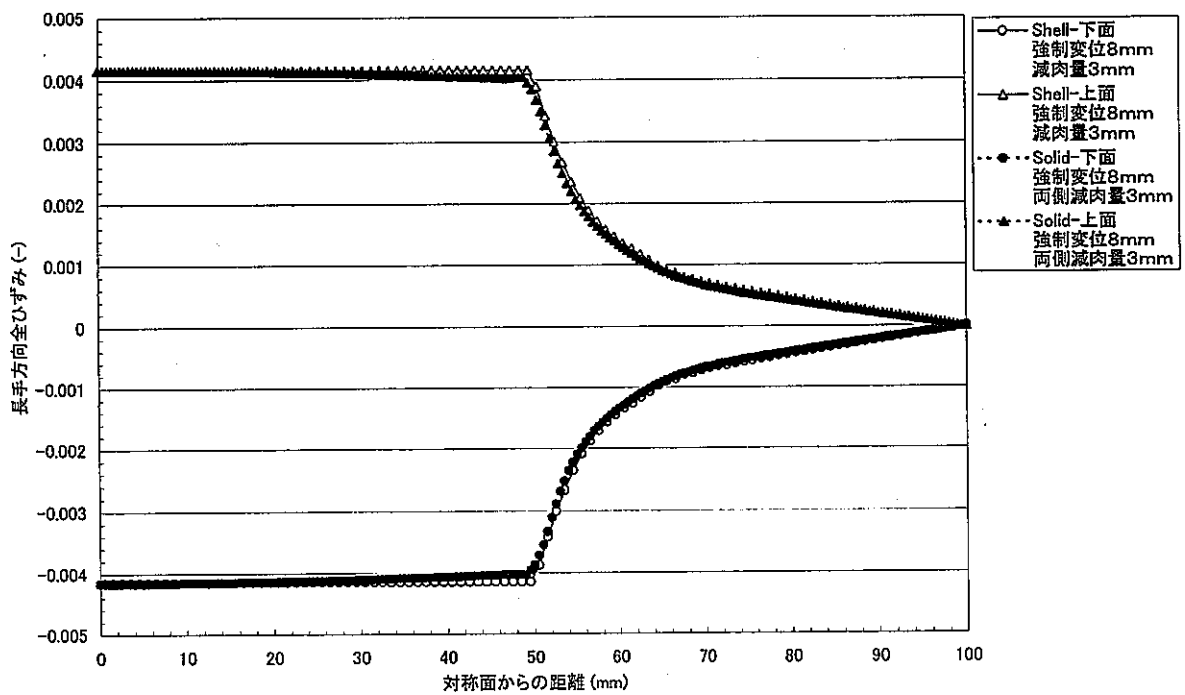


図3.3-6 強制変位8mm減肉量3mm時の長手方向全ひずみ分布比較
4点曲げモデル上向き強制変位 単純支持位置長手方向拘束無し

ケース 2

・ 節点 (強制変位) における反力履歴

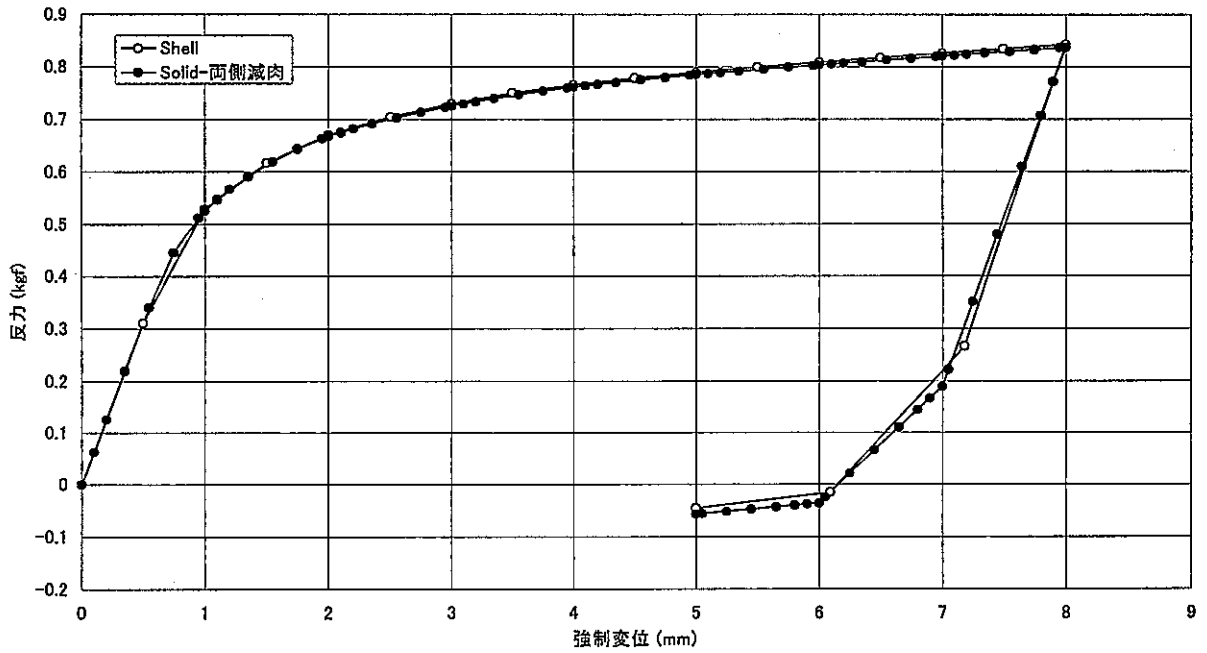


図3.3-7 強制変位8mm→5mm減肉3mm強制変位位置反力比較
4点曲げモデル 上向き強制変位 単純支持位置長手方向拘束無し

・ 対称面 (y=0) における板厚の長手方向 (y 方向) 全ひずみ分布

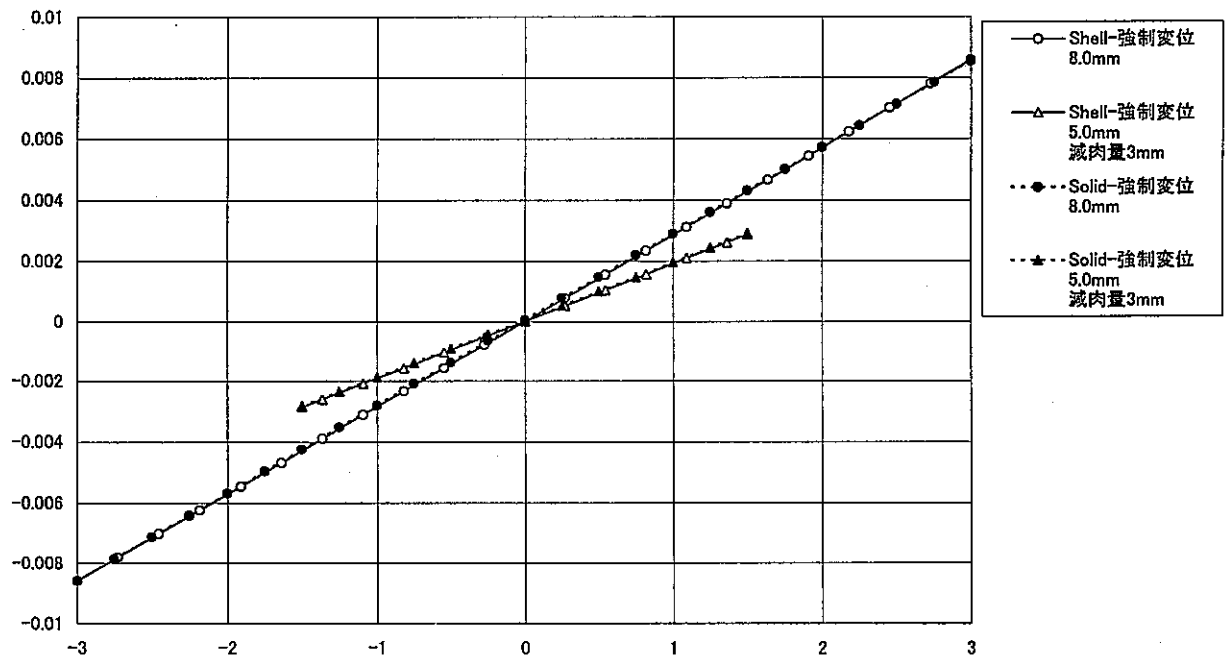


図3.3-8 強制変位8mm→5mm減肉3mm板厚方向長手方向全ひずみ分布(対称位置)
4点曲げモデル 上向き強制変位 単純支持位置長手方向拘束無し

・長手方向における長手方向（y方向）全ひずみ分布

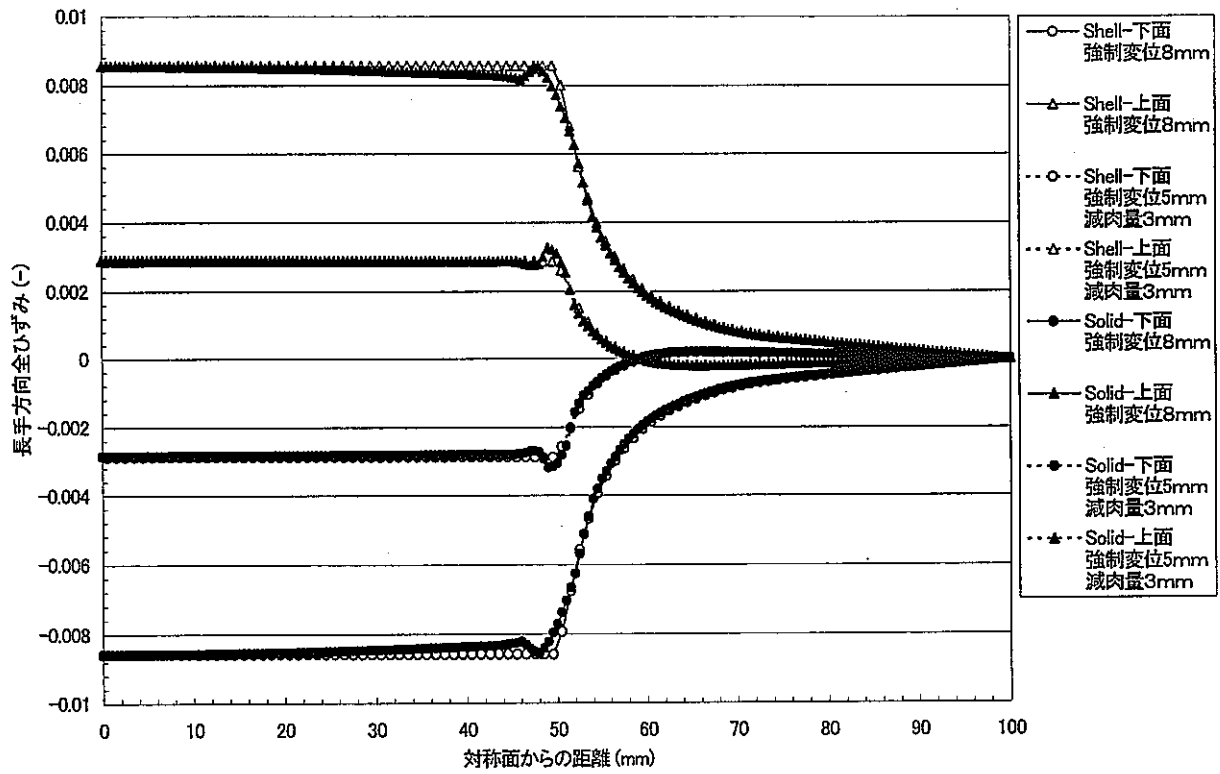


図3.3-9 強制変位8mm→5mm減肉3mm時の長手方向全ひずみ分布
4点曲げモデル上向き強制変位 単純支持位置長手方向拘束無し

4. 結 言

ナトリウムを冷却材とする高速増殖炉では、床ライナはナトリウム漏えい事故時に漏えいナトリウムと床コンクリートとの直接接触を防止する機能を有し、事故の拡大防止の観点から重要な構造である。したがって、ナトリウム漏えい事故時にはその終息に到るまでライナの機能が維持されなければならない。

ナトリウム漏えい時のライナの温度は、初期段階で漏えいナトリウムと接する領域を中心に急速に上昇する。一方、腐食によるライナの減肉については熔融塩型腐食を想定した厳しい減肉速度に従うとしても、ライナの温度上昇よりかなり遅れて進行する。このため、ライナに生じるひずみの最大値はこの初期段階に生じることになる。したがって、ひずみの解析評価において、最終的に到達する減肉量を最初から仮定したモデル化を用いるとひずみの最大値を過大に評価することになる。そこで、現象面から実態に合った解析を実現するためにライナの減肉の進行過程をモデル化する方法を検討した。

具体的には、擬似的なクリープによる応力緩和と剛性の低減により減肉部分の応力を解放する方法をとった。さらに、この方法を FINAS に適用して事例計算を行うことにより、その妥当性を検証した。

参考文献

- [1] 石川浩康、二神敏、大野修司、清野裕、三宅収、「ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS Version 2.0 使用説明書」, PNC TN9520 97-001 (1997年12月)
- [2] 内山尚基、高井俊秀、西村正弘、宮原信哉、三宅収、田辺裕美, 「もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明－ナトリウム漏えい燃焼実験-II－」, PNC TN9410 97-051 (1997年3月)
- [3] 青砥紀身, 大気中ナトリウム漏洩流下部における鉄系材料の腐食機構, 動燃技報 No.103, PNC TN1340 97-003, p35-45 (1997年9月)
- [4] 小峰龍司, 青砥紀身, 加藤章一, 溶接構造用圧延鋼板 (SM400B) の材料特性, PNC TN9410 97-037 (1996年11月)
- [5] ABAQUS/Standard User's Manual Version 5.8
- [6] 汎用非線形構造解析システム FINAS Ver.13 使用説明書, 動燃事業団, 1995 (PNC TN9520 95-014)
- [7] O.C. ツィエンキーヴィッツ著 吉識雅夫、山田嘉昭監訳、マトリックス有限要素法(三訂版), 培風館, 1993年, p397-399.

付録 板の微小変形理論による板厚減少の影響評価

図A. 1に示すようなx y平面上の板を考える。ヤング率をE、ポアソン比を ν とする。x方向の長さを $2L$ 、y方向の幅を H 、z方向の板厚を t とする。x方向の中心位置を $x=0$ とし、xの範囲を $[-L \leq x \leq L]$ とする。yの範囲を $[0 \leq y \leq H]$ とする。板厚中心面を $z=0$ とする。x z断面はy方向に平面ひずみ状態にあるとする。すなわちy方向の両端境界では以下の境界条件が保持されている場合とする。

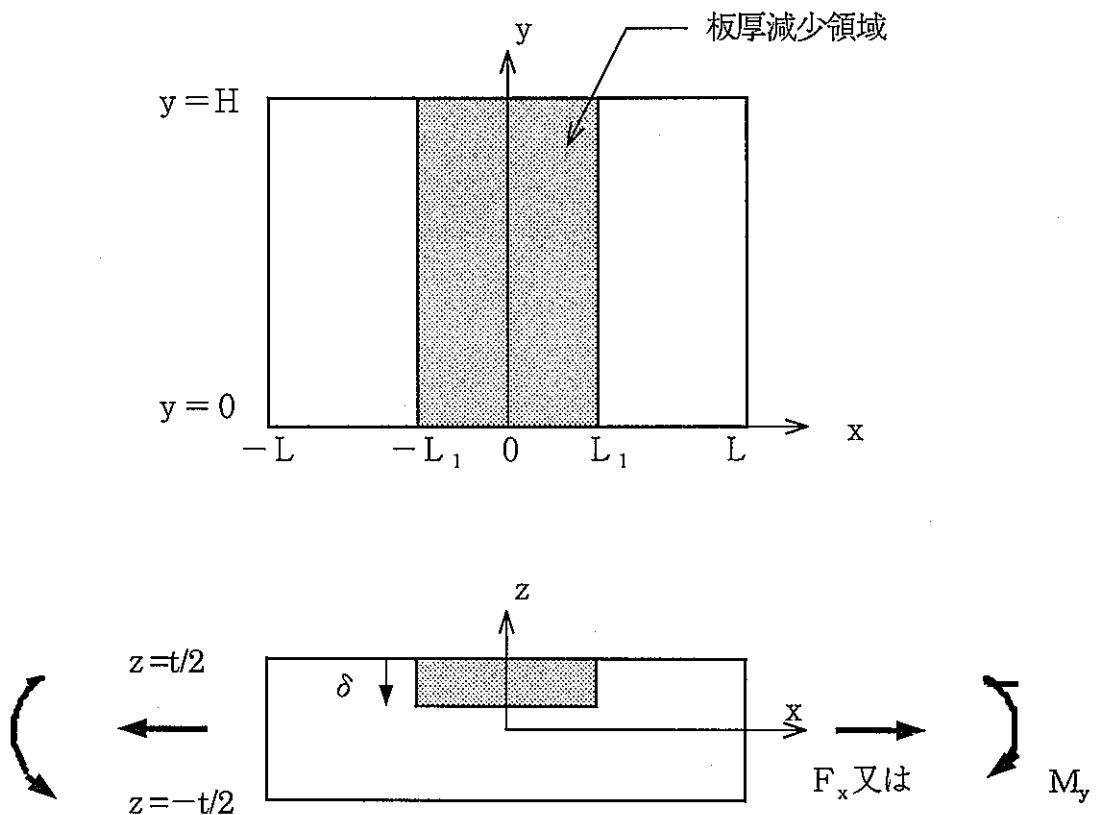
$$y=0 \text{の境界面 } u_y \text{ (y方向変位)} = 0, F_y \text{ (y方向断面合計引張力)} = 0$$

$$\theta_x \text{ (x軸回り曲げ変位、回転角)} = \theta_z = 0$$

$$y=H \text{の境界面 } u_y \text{ が全断面で一様共通、} F_y \text{ (y方向断面合計引張力)} = 0$$

$$\theta_x = \theta_z = 0$$

x方向中央部の長さ $2L_1$ の消失領域 $[-L_1 \leq x \leq L_1]$ では、上面側から腐食溶解などにより厚さ δ 相当を消失し、板厚が $t - \delta$ に減少した場合を考える。



図A. 1 引張または曲げを受ける板の一部が板厚減少する場合

A. 1 曲げの理論解

右端 ($x=L$) で y 軸回りの曲げモーメント M_y を負荷し、左端 ($x=-L$) では逆向き $-M_y$ を負荷した場合を考える。左右対称であり右側半分について記述する。

(a) 消失領域 [$0 \leq x \leq L_1$] の解

任意位置の y 軸回りの曲げ変位 θ_y は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\theta_y &= M_y x (1 - \nu^2) / (E I_{y1}) \\ &= 12 M_y x (1 - \nu^2) / \{E H (t - \delta)^3\} \quad (A. 1)\end{aligned}$$

ここに $I_{y1} = H (t - \delta)^3 / 12$ は消失領域の y 軸回りの断面二次モーメントである。任意位置の z 方向変位 u_z は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}u_z &= -M_y x^2 (1 - \nu^2) / (2 E I_{y1}) = -x \theta_y / 2 \\ &= -6 M_y x^2 (1 - \nu^2) / \{E H (t - \delta)^3\} \quad (A. 2)\end{aligned}$$

消失後の板厚中心面 ($z = -\delta / 2$) では x 方向変位 u_x は 0 であるが、消失前の板厚中心面 ($z = 0$) では (曲げ変位 θ_y) \times (中心面移動量 $\delta / 2$) だけ x 方向にずれることになり、次式の x 方向変位が生じる。

$$\begin{aligned}u_x [z=0 \text{面}] &= \theta_y \delta / 2 \\ &= 6 M_y x \delta (1 - \nu^2) / \{E H (t - \delta)^3\} \quad (A. 3)\end{aligned}$$

x 方向応力 σ_x は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\sigma_x (\text{曲げ}) &= M_y (t - \delta) / (2 I_{y1}) \\ &= 6 M_y / \{H (t - \delta)^2\} \quad (A. 4)\end{aligned}$$

(b) 無消失領域 [$L_1 \leq x \leq L$] の解

y 軸回りの曲げ変位 θ_y は、消失領域右端の $\theta_{y,x=L_1}$ に無消失領域側の曲げを加えて、次式で与えられる。

$$\theta_y = \theta_{y,x=L_1} + M_y (x - L_1) (1 - \nu^2) / (E I_{y2})$$

$$\begin{aligned}
&= 12M_y L_1 (1-\nu^2) / \{EH(t-\delta)^3\} \\
&+ 12M_y (x-L_1) (1-\nu^2) / (EHt^3) \quad (A. 5)
\end{aligned}$$

ここに $I_{y2} = Ht^3 / 12$ は無消失領域の y 軸回りの断面二次モーメントである。 z 方向変位 u_z は、消失領域右端の $u_{z,x=L_1}$ および $\theta_{y,x=L_1}$ を考慮し、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
u_z &= u_{z,x=L_1} - \theta_{y,x=L_1} (x-L_1) \\
&- M_y (x-L_1)^2 (1-\nu^2) / (2EI_{y2}) \\
&= -6M_y L_1 (2x-L_1) (1-\nu^2) / \{EH(t-\delta)^3\} \\
&- 6M_y (x-L_1)^2 (1-\nu^2) / (EHt^3) \quad (A. 6)
\end{aligned}$$

x 方向変位 u_x は、消失領域右端の $u_{x,x=L_1}$ に等しい。

$$u_x = u_{x,x=L_1} = 6M_y L_1 \delta (1-\nu^2) / \{EH(t-\delta)^3\} \quad (A. 7)$$

x 方向応力 σ_x は次式で与えられる。

$$\sigma_x (\text{曲げ}) = M_y t / (2I_{y2}) = 6M_y / (Ht^2) \quad (A. 8)$$

A. 2 引張の理論解

右端 ($x=L$) で x 方向の引張力 F_x を負荷し、左端 ($x=-L$) では逆向きの $-F_x$ を負荷した場合を考える。左右対称であり右側半分について記述する。

(a) 消失領域 [$0 \leq x \leq L_1$] の解

消失領域では中心面が下方に $-\delta/2$ 移動するので、次式の曲げモーメント M_y が作用し、引張力 F_x と曲げモーメント M_y が重畳した状態となる。

$$M_y = F_x \delta / 2 \quad (A. 9)$$

θ_y および u_z は (A. 1) および (A. 2) 式に (A. 9) 式を代入して、次式で与えられる。

$$\theta_y = M_y x (1-\nu^2) / (EI_{y1})$$

$$= 6 F_x \delta x (1 - \nu^2) / \{EH (t - \delta)^3\} \quad (\text{A. 10})$$

$$u_z = -M_y x^2 (1 - \nu^2) / (2 E I_y) = -x \theta_y / 2$$

$$= -3 F_x \delta x^2 (1 - \nu^2) / \{EH (t - \delta)^3\} \quad (\text{A. 11})$$

u_x [z=0面] は、中心面移動と曲げの効果 $\theta_y \delta / 2$ に、引張力 F_x による伸びを加え、次式で与えられる。

$$u_x [z=0面] = \theta_y \delta / 2 + F_x x / (E A_1)$$

$$= 3 F_x \delta x (1 - \nu^2) / \{EH (t - \delta)^3\}$$

$$+ F_x x / \{EH (t - \delta)\} \quad (\text{A. 12})$$

ここに $A_1 = H (t - \delta)$ は消失領域の x 方向断面積である。

x 方向応力 σ_x は次式で与えられる。

$$\sigma_x (\text{膜}) = F_x / A_1 = F_x / \{H (t - \delta)\} \quad (\text{A. 13})$$

$$\sigma_x (\text{曲げ}) = M_y (t - \delta) / (2 I_y)$$

$$= 3 F_x \delta / \{H (t - \delta)^2\} \quad (\text{A. 14})$$

(b) 無消失領域 [$L_1 \leq x \leq L$] の解

無消失領域は純引張状態となり θ_y 、 u_z および u_x は次式で与えられる。

$$\theta_y = \theta_{y,x=L_1}$$

$$= 6 F_x \delta L_1 (1 - \nu^2) / \{EH (t - \delta)^3\} \quad (\text{A. 15})$$

$$u_z = u_{z,x=L_1} - \theta_{y,x=L_1} (x - L_1)$$

$$= -3 F_x \delta L_1 (2x - L_1) (1 - \nu^2) / \{EH (t - \delta)^3\} \quad (\text{A. 16})$$

$$u_x = u_{x,x=L_1} + F_x (x - L_1) / (E A_2)$$

$$\begin{aligned}
&= 3 F_x \delta L_1 (1 - \nu^2) / \{ E H (t - \delta)^3 \} \\
&\quad + F_x L_1 / \{ E H (t - \delta) \} \\
&\quad + F_x (x - L_1) / (E H t) \qquad \qquad \qquad (A. 17)
\end{aligned}$$

ここに $A_2 = H t$ は無消失領域の x 方向断面積である。 x 方向応力 σ_x は次式で与えられる。

$$\sigma_x (\text{膜}) = F_x / A_2 = F_x / (H t) \qquad \qquad \qquad (A. 18)$$

補遺 減肉過程を考慮したひずみ挙動について

図1(a)は、ライナの解析結果の一般的な傾向を想定しており、横軸が時間、縦軸が最大ひずみ発生部位のひずみを示す。図1(b)は、横軸を同様に時間としてライナの肉厚の変化を示している。

図1(a)の曲線(1)と(2)はそれぞれ、減肉なし(肉厚 h_0)、事象終了時の最大減肉 (h_{\min}) を想定した解析結果で、前者はひずみの制限を満足しており、後者は満足していない。

(言うまでもなく、両者が満足していれば無条件に成立であり、両者とも満足していなければ不成立である)。ひずみの減少過程(温度降下過程)において曲線(1)が曲線(2)を上回っているのは、減肉がある方が柔構造であり、周囲に対する追従性が高いためである。^{*1} 曲線(3)は、最大ひずみが発生する時刻(t_1)における減肉を考慮したモデルによる解析結果であり、曲線(1)と(2)の交叉部付近を除いて、曲線(1)と(2)の間にある。曲線(4)は、徐々に減肉する実際の挙動の想像線である。つまり、ひずみの増加過程では、曲線(1)(減肉無し)から曲線(3)(最大ひずみが発生する時刻における減肉モデル)に次第に近づき(ただし、ピークでも曲線(3)を下回っていることが期待される)、ひずみの減少過程で曲線(3)を下回り、曲線(2)(事象終了時の最大減肉モデル)に漸近する。曲線(3)を下回る理由は、減肉の進行により、周囲に対する追従性が加速するためである。

^{*1} 疲労等による損傷を問題とする場合は、累積非弾性ひずみとしてカウントするが、ここでは1回の事象を対象としているので、初期状態から観測したひずみとして捉えている。

現象を支配すると考えられるメカニズムを単純化した弾性追従系のモデルを使って次のように解釈する。

右の図のように、左端固定の単位幅、肉厚 $h(t)$ 、長さ l の1次元構造にバネ（バネ定数 $K(T)$ ）が繋がっている単純な弾性追従系を考える。 t, T はそれぞれ時刻および温度である。

端部に変位 $\delta(t)$ が作用し、このときの構造の変位を Δl 、反力を $F(t)$ とする。負荷変位 $\delta(t)$ は熱膨張変位に相当し、温度上昇時圧縮（図の矢印の方向）となる。バネは注目する構造の周囲構造の剛性を模擬する。

材料については、簡単のため、右に示す弾完全塑性体を仮定する。さらに、 $K(T), \sigma_y(T)$ の温度による変化を無視する。

温度上昇時について、釣合い式は、

$$F(t) = h(t)\sigma_y = K(\delta(t) - \Delta l) \quad (A1)$$

さらに、 $\Delta l = l(-\varepsilon)$ から、

$$(-\varepsilon) = \frac{1}{l} \left\{ \delta(t) - \frac{h(t)\sigma_y}{K} \right\} \quad (A2)$$

最高温度において、

$$(-\varepsilon)_{\max} = \frac{1}{l} \left\{ \delta_{\max} - \frac{h(t)\sigma_y}{K} \right\} \quad (A3)$$

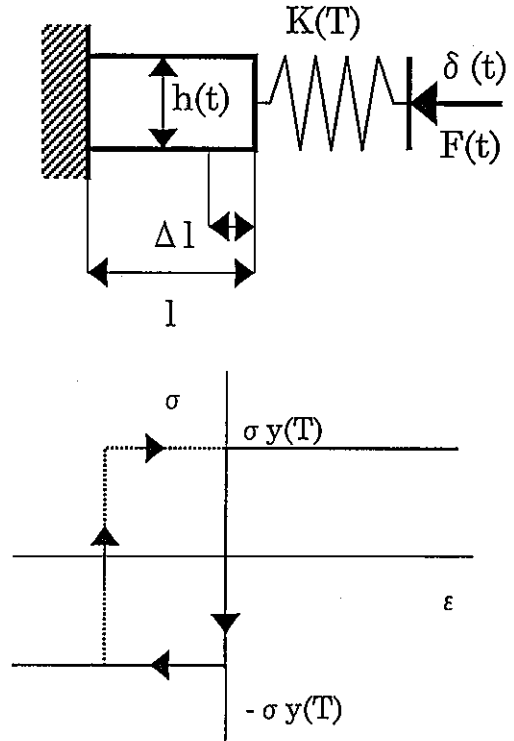
温度下降時については、

$$-2h(t)\sigma_y = K \{ \delta(t) - \delta_{\max} + (\Delta l_{\max} - \Delta l) \} \quad (A4)$$

したがって、

$$\begin{aligned} (-\varepsilon) &= (-\varepsilon)_{\max} - \frac{1}{l} \left\{ \delta_{\max} - \delta(t) - \frac{2h(t)\sigma_y}{K} \right\} \\ &= \frac{1}{l} \left\{ \delta(t) + \frac{h(t)\sigma_y}{K} \right\} \end{aligned} \quad (A5)$$

基本的には、式(A2), (A5)で肉厚減少の推移を考慮したひずみの履歴を表せることになるが、弾完全塑性体を仮定しているため、変位負荷開始時と除荷時において降伏点あるいは再降伏点に達するまで着目する構造は変形しない。したがって、この領域でのひ



ずみの停留を考え合わせる必要がある。

(計算例)

上の単純な弾性追従系のモデルによる計算事例を示す。

- $l=75\text{mm}$, $\sigma_y=15\text{kg/mm}^2$, $K=50\text{kg/mm}^2$
- $h_0=6\text{mm}$ (初期肉厚), $h_\infty=3.25\text{mm}$ (最終肉厚)
- 負荷変位

$$\delta(t) = \frac{2\delta_{\max}t_1t}{t^2 + t_1^2}, \quad t_1 = 1000(\text{sec}), \quad \delta_{\max} = 8.6(\text{mm})$$

- 肉厚

$$h(t) = h_0 - \frac{(h_0 - h_\infty)t^2}{t^2 + 9.0 \times 10^5}, \quad h_0 = 6.0(\text{mm}), \quad h_\infty = 3.25(\text{mm})$$

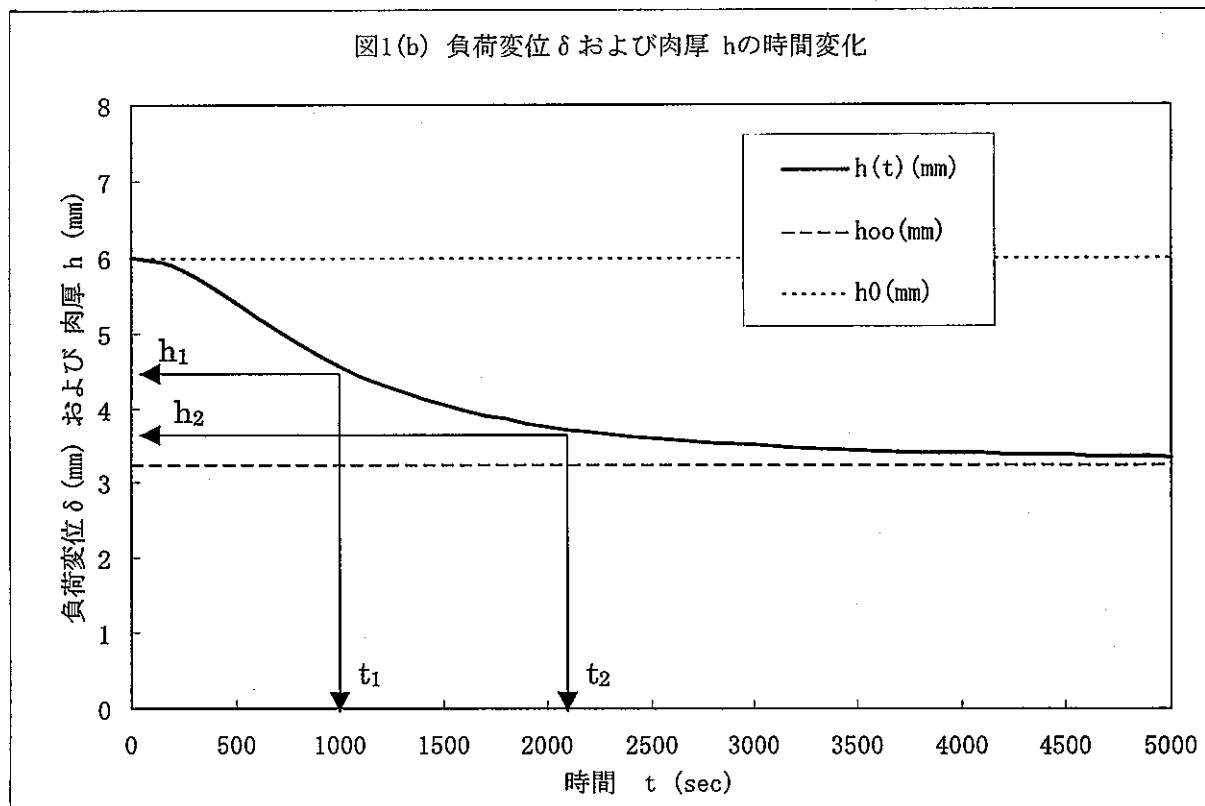
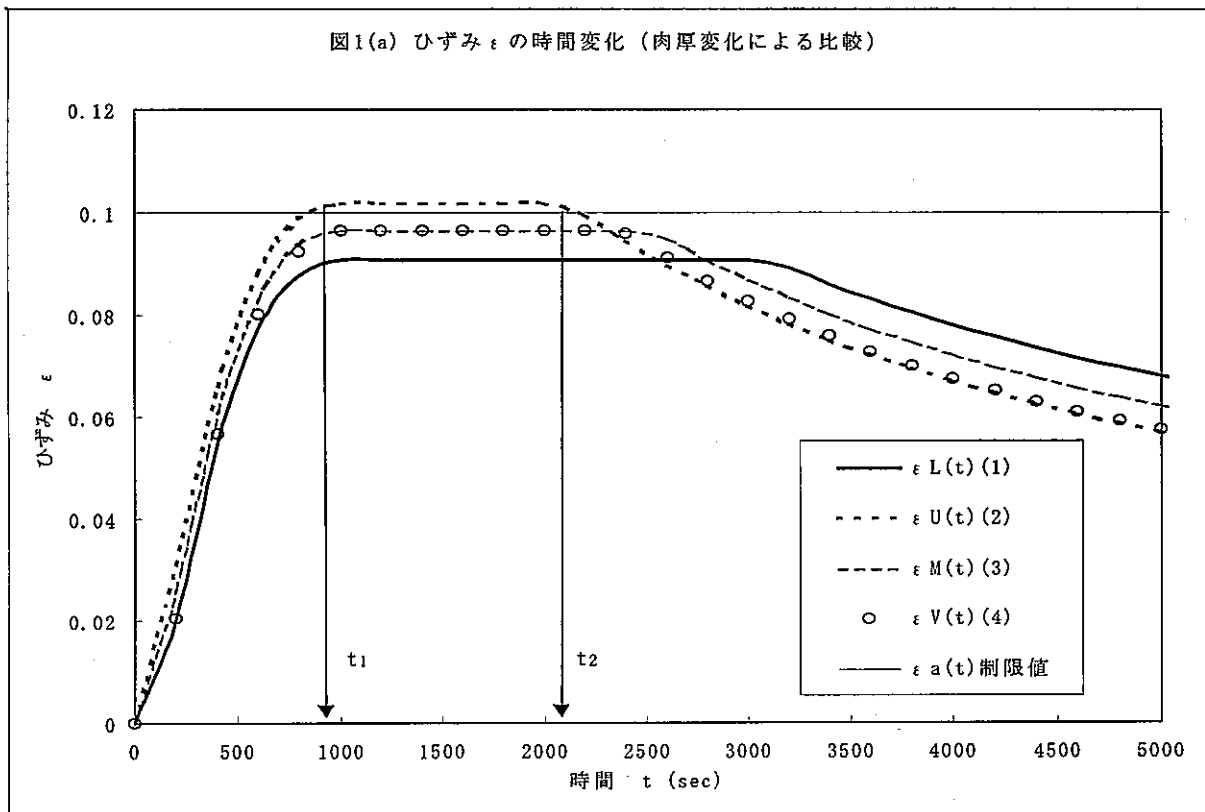
*負荷変位、肉厚の推移については、図 A1 (a) 参照。

- ひずみの制限値; $\varepsilon_a = 0.1$
- $t_1=1000(\text{sec})$ (最大ひずみ発生時刻)
- $t_2=2000(\text{sec})$ (ひずみ減少過程において ε_U が ε_a と交差する点の近傍時刻; 計算結果から割出す (図 A1 (b) 参照))
- $h_1=h(t_1)=4.55(\text{mm})$, $h_2=h(t_2)=3.76(\text{mm})$

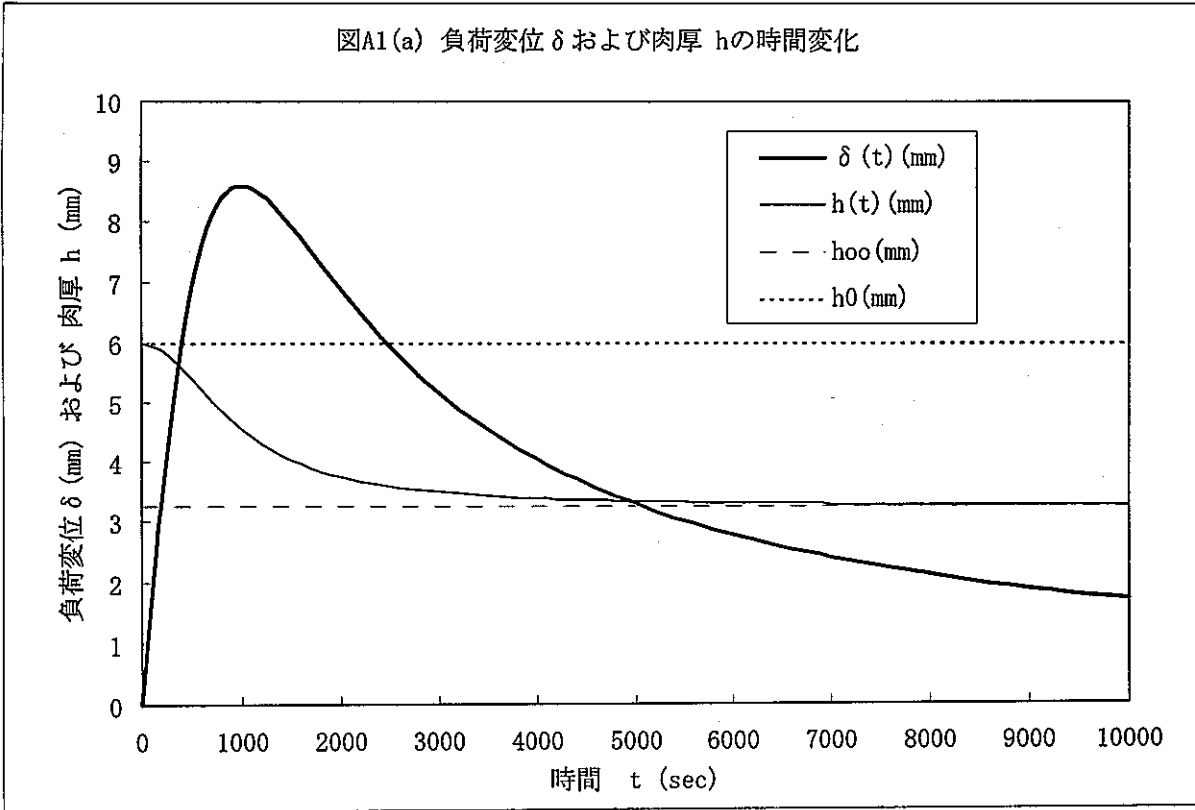
*計算結果; 図 A1 (b)、図 A1 (c)

$$\begin{aligned} \varepsilon_L(t); & \quad h(t) = h_0 = 6(\text{mm}) \quad (\text{const.}) \\ \varepsilon_U(t); & \quad h(t) = h_\infty = 3.25(\text{mm}) \quad (\text{const.}) \\ \varepsilon_V(t); & \quad h(t) \quad (\text{variable}) \\ \varepsilon_{M'}(t); & \quad h(t) = h_1 = 4.55(\text{mm}) \quad (\text{const.}) \\ \varepsilon_M(t); & \quad h(t) = h_2 = 3.76(\text{mm}) \quad (\text{const.}) \\ \varepsilon_a(t) & = 0.1 \end{aligned}$$

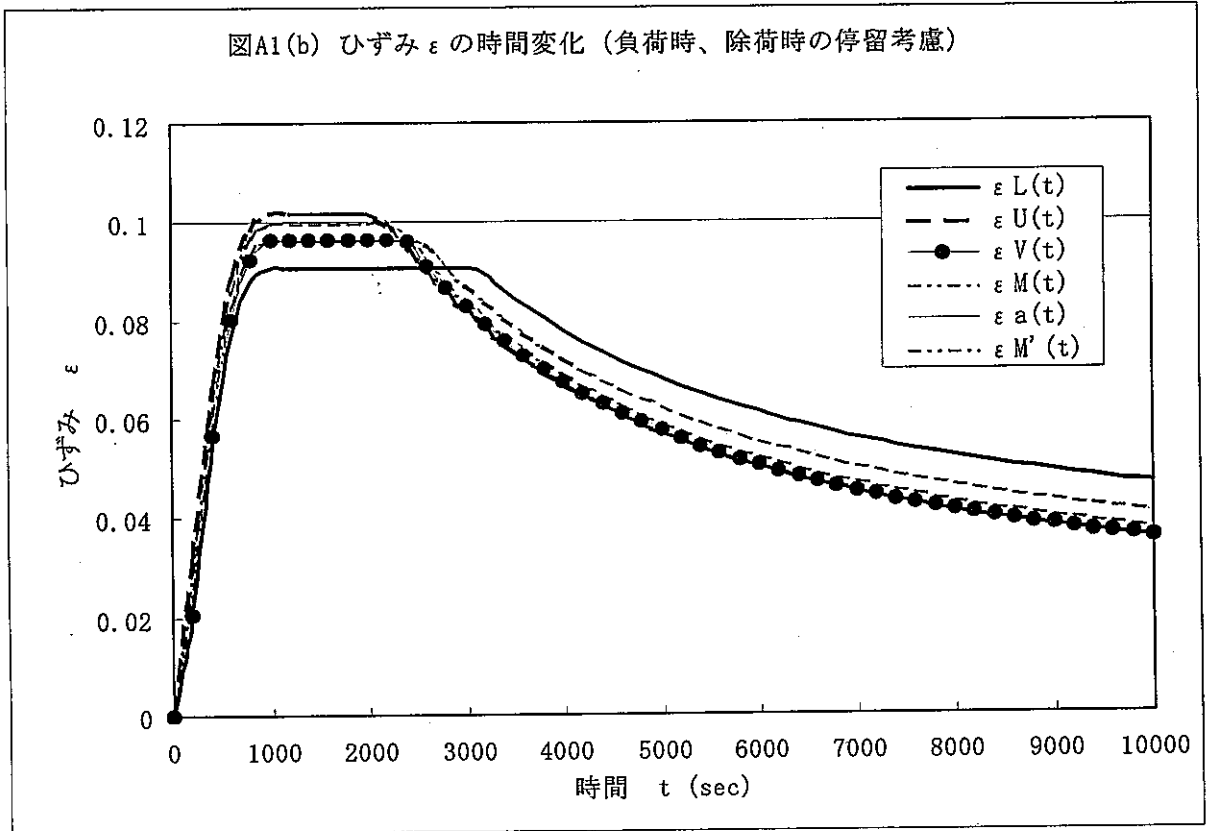
図 A1 (b) あるいは図 A1 (c) からわかるように、最終的な板厚を想定した場合はひずみの制限値を超え、時刻 t_2 での板厚を想定した場合はほぼ制限値に一致する。一方、板厚の時間的な変化を考慮した場合は、最終的には大きな板厚減少を伴うにもかかわらず、最大ひずみは時刻 t_1 での板厚を想定した場合の最大ひずみ程度に留まっており、厳しい負荷がかかる時間帯をやり過ぎしていることがわかる。板厚の減少が厳しい負荷に遅れて発生するような場合、板厚の時間的な変化を考慮することで過度に厳しく評価することを避けることができる。



図A1(a) 負荷変位 δ および肉厚 h の時間変化



図A1(b) ひずみ ϵ の時間変化 (負荷時、除荷時の停留考慮)



図A1(c) ひずみ ϵ の時間変化 (負荷時、除荷時の停留考慮) 拡大図

