



もんじゅ2次系床ライナの機械的健全性について
(研究報告書)

2000年12月

核燃料サイクル開発機構
高速増殖炉もんじゅ建設所

2000年12月

もんじゅ2次系床ライナの機械的健全性について

一宮 正和^{*1}, 堂崎 浩二^{*2}, 上野 文義^{*3}
 森下 正樹^{*4}, 浅山 泰^{*4}, 月森 和之^{*4}
 小井 衛^{*4}, 小林 孝良^{*5}, 奥田 英一^{*5}
 嵐田 源二^{*5}

要旨

もんじゅ2次系床ライナについて、漏えいナトリウムの燃焼による熱荷重条件に対するライナの機械的健全性を、溶融塩型腐食による減肉を考慮したうえで、非弾性解析及び部分構造模擬試験により評価した。

非弾性解析の結果、減肉が著しく進行しても、ライナに生じるひずみ値は材料固有の延性限度内にあるため、ライナに貫通性損傷が発生することではなく、その機械的健全性が確保されることを確認した。また、部分構造模擬試験の結果、非弾性解析による推定値を大幅に上回るひずみを与えて貫通性損傷はなく、機械的健全性を維持することを確認した。

*1 大洗工学センター システム技術開発部 FBRシステムグループ
 *2 経営企画本部 FBRサイクル開発推進部 炉システムグループ
 *3 大洗工学センター 要素技術開発部 機器・構造安全工学グループ
 *4 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
 *5 高速増殖炉もんじゅ建設所 改革推進グループ

December, 2000

Mechanical Integrity of Floor Liner
in Secondary Heat Transport System Cells of Monju

Masakazu Ichimiya^{*1}, Koji Dozaki^{*2}, Fumiyoishi Ueno^{*3}
Masaki Morishita^{*4}, Tai Asayama^{*4}, Kazuyuki Tsukimori^{*4}
Mamoru Koi^{*4}, Takayoshi Kobayashi^{*5}, Eiichi Okuda^{*5}
Genji Arashida^{*5}

ABSTRACT

Inelastic analyses of the floor liner subjected to thermal loading due to sodium leakage and combustion were carried out, considering thinning of the liner plate due to molten salt type corrosion. Because the inelastic strain obtained by the analyses stayed below the ductility limit of the material, mechanical integrity, i.e., there exist no through-wall crack on the floor liner, was confirmed.

Partial structural model tests were conducted, with a band of local thinning of the liner plate. Displacements were controlled to give specimens much larger strains than those obtained by the inelastic analyses above. No through-wall crack was observed by these tests.

Mechanical integrity of the floor liner was confirmed by these results of the inelastic analyses and the partial structural model tests.

*1 FBR System Engineering Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center
*2 Reactor System Evaluation Group, FBR Cycle System Development Office, Executive Office for the Policy Planning and Administration
*3 Structure Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center
*4 Structure and Material Research Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center
*5 Plant Improvement Planning Group, Monju Construction Office

目 次

	頁
1. 緒言	1
2. もんじゅ 2次系ライナの構造について	2
3. 床ライナ機械的健全性評価	8
3.1 「燃焼実験Ⅱ」の床ライナの観察結果	8
3.2 非弾性解析による健全性確認	12
3.2.1 機械的健全性評価のための力学モデル	12
3.2.2 解析方法	14
3.2.3 解析条件	15
3.2.4 解析結果	15
3.2.5 機械的健全性判断のためのひずみの目安値について	17
3.2.6 機械的健全性評価結果	18
3.2.7 機械的健全性の裕度確認	18
3.3 部分構造模擬試験による健全性確認	35
3.3.1 試験目的	35
3.3.2 試験体および試験方法	35
3.3.3 試験結果	36
4. 結言	48
5. 謝辞	49
 付録	
A. 境界帯状減肉モデルにおける減肉断面形状の設定	50
B. 減肉を伴う非弾性解析方法の妥当性	55
C. 機械的健全性判断のためのひずみ目安値	83
参考-1 もんじゅ 2次系ライナ材の熱膨張係数	94
参考文献	95

図表及び写真リスト

第1章

図表写真なし

第2章

- 図 2-1 もんじゅ 2 次系ライナ構造概念図
- 図 2-2 ライナの基本構造
- 図 2-3 フローティング方式キャッチパン型ライナの熱膨張挙動
- 図 2-4 ライナプレートの変形概念

第3章

3.1 節

- 図 3.1-1 「燃焼実験Ⅱ」の床ライナ
- 図 3.1-2 「燃焼実験Ⅱ」ライナの破損部外観写真及び断面形状測定位置
(切り出した後堆積物を除去したもの)
- 図 3.1-3 「燃焼実験Ⅱ」破損口 C 近傍のライナ断面形状及び組織観察結果

3.2 節

- 図 3.2-1 非弾性解析によるライナの機械的健全性評価の流れ
- 図 3.2-2 入熱領域設定のための基本パラメータサーベイ
- 図 3.2-3 入熱領域設定のための絞り込みパラメータサーベイ
- 図 3.2-4 基本パラメータサーベイ解析結果
- 図 3.2-5 絞り込みサーベイ解析結果
- 図 3.2-6 減肉を想定した床ライナの機械的健全性評価のための工学モデル
- 図 3.2-7 境界帯状減肉モデル
- 図 3.2-8 溶融塩型腐食試験結果と減肉速度評価線
- 図 3.2-9 減肉量の設定 (最終減肉 4.5 mm の場合)
- 図 3.2-10 3 種類の工学モデルによる減肉底のひずみ履歴解析結果
- 図 3.2-11 境界帯状減肉モデルによる解析結果 (内側リブ端部減肉底のひずみの時間変化)

- 図 3.2-12 昇温時の相当非弾性ひずみの分布(境界帶状減肉、最高温度 880°C、747.5 秒後)
- 図 3.2-13 より深い減肉を仮定した境界帶状減肉モデルによるひずみ履歴解析結果
- 図 3.2-14 より厳しい最高温度を仮定した解析によるひずみ履歴
- 図 3.2-15 床ライナの非弾性ひずみに及ぼすその他のパラメータの効果

3.3 節

- 図 3.3-1 ライナ構造部分模擬試験体
- 図 3.3-2 ライナ部分構造模擬試験体の減肉形状
- 図 3.3-3 試験装置詳細
- 図 3.3-4 部分構造模擬試験結果
- 写真 3.3-1 リブ上付きモデル(3mm 減肉)の試験後外観観察
- 写真 3.3-2 リブ上付きモデル(4.5mm 減肉)の試験後外観観察
- 写真 3.3-3 リブ下付きモデル(3mm 減肉)の試験後外観観察
- 写真 3.3-4 リブ下付きモデル(4.5mm 減肉)の試験後外観観察
- 写真 3.3-5 リブ上付きモデル(4.5mm 減肉)の断面観察
- 写真 3.3-6 リブ下付きモデル(4.5mm 減肉)の断面観察

第4章

図表写真なし

付録

付録 A

- 図 A-1 「燃焼実験Ⅱ」ライナの減肉断面形状測定結果
- 図 A-2 減肉底を基準とした「燃焼実験Ⅱ」ライナ減肉断面形状を用いた減肉モデルの設定
- 図 A-3 減肉底のひずみ量の解析方法
- 図 A-4 「燃焼実験Ⅱ」減肉断面形状と減肉モデルとの相当塑性ひずみの比

付録B

- 図 B-1 減肉進行を伴う解析における減肉の取扱い
 図 B-2 平板4点曲げモデル
 図 B-3 減肉の取り扱いの違いによる長手方向全ひずみ分布解析結果の比較
 図 B-4 減肉の取り扱いの違いによる長手方向全ひずみの肉厚方向分布解析結果の比較
 図 B-5 片面減肉解析におけるひずみ分布
 図 B-6 両面減肉解析におけるひずみ分布
 図 B-7 減肉に伴う応力再配分
 図 B-8 減肉に伴うひずみの再配分
 図 B-9 片面減肉（ソリッド要素）解析と両面減肉（シェル要素）解析による反力の比較
 図 B-10 片面減肉（ソリッド要素）解析と両面減肉（シェル要素）解析による鉛直変位の比較
 図 B-11 片面減肉と両面減肉の違いによる長手方向全ひずみ分布解析結果の比較
 図 B-12 片面減肉と両面減肉の違いによる長手方向全ひずみの肉厚方向分布解析結果の比較
 図 B-13 片面減肉（ソリッド要素）解析と両面減肉（シェル要素）解析による反力の比較（減肉中除荷の場合）
 図 B-14 片面減肉（ソリッド要素）解析と両面減肉（シェル要素）解析による鉛直変位の比較（減肉中除荷の場合）
 図 B-15 片面減肉と両面減肉の違いによる長手方向全ひずみ分布解析結果の比較（減肉中除荷の場合）
 図 B-16 片面減肉と両面減肉の違いによる長手方向全ひずみの肉厚方向分布解析結果の比較（減肉中除荷の場合）
 図 B-17 両面減肉条件における膜ひずみ増分の概念
 図 B-18 片面減肉条件における膜ひずみ増分の概念
 図 B-19 部分ソリッドモデルによる解析手法の概念
 図 B-20 確認のためのライナ部分モデル
 図 B-21 Z方向変位分布
 図 B-22(a) 全体シェル要素モデル
 図 B-22(b) 部分ソリッド要素モデル

- 図 B-23 部分ソリッド要素モデルによる相当ひずみコンター（非弾性ひずみピーク時）
- 図 B-24 内側リブ端のひずみ挙動と温度
- 図 B-25 部分ソリッド要素モデルによる非弾性ひずみ分布
- 図 B-26 移動硬化則と等方硬化則の違いによる非弾性ひずみ解析結果の比較
- 表 B-1 減肉の取扱いの違いによる上下表面の全ひずみ解析結果の比較（ケース 1）
- 表 B-2 減肉の取扱いの違いによる上下表面の全ひずみ解析結果の比較（ケース 2）
- 表 B-3 両面減肉解析結果から求めた片面減肉条件に対する推定値と解析値の比較（ケース 1）
- 表 B-4 両面減肉解析結果から求めた片面減肉条件に対する推定値と解析値の比較（ケース 2）
- 表 B-5 両面減肉解析結果から求めた片面減肉条件に対する推定値と解析値の比較
- 表 B-6 シェル要素モデルとソリッド要素モデルの剛性の比較

付録 C

- 図 C-1 膜ひずみの目安値と引張試験での伸びの対応関係
- 図 C-2 引張破断伸びとその工学的下限値
- 図 C-3 曲げ破断伸びとその工学的下限値
- 図 C-4 引張一様伸びとその工学的下限値
- 図 C-5 曲げ試験の概念
- 図 C-6 実機解析結果の 3 軸係数
- 図 C-7 部分構造模擬試験体の 3 軸係数

1. 緒言

もんじゅの2次系床ライナ（以下、ライナという）は、漏えいナトリウムとコンクリートとの直接接触を防止するために設置されており、ナトリウム漏えい時にあってもその機械的健全性を失わないことが要求される。

ここで、機械的健全性とは、ライナに貫通性の損傷が発生しないことを意味する。

本報告書は、ASSCOPS コードによるナトリウム燃焼解析結果⁽¹⁾、及び「ナトリウム漏えい燃焼実験 II」⁽²⁾⁽³⁾（以下、「燃焼実験 II」という）における床ライナの観察結果を踏まえ、ナトリウム漏えい時の熱荷重条件に対するもんじゅ2次系ライナの機械的健全性を、溶融塩型腐食⁽⁴⁾による減肉を考慮したうえで、非弾性解析及び部分構造模擬試験により評価したものである。

2. もんじゅ 2次系ライナの構造について

2次冷却系機器室に設置されているライニング設備は、フローティング方式キャッチパン型を採用し、ライナの一様熱膨張を拘束しない構造としている(図2-1)。さらに、あらかじめ建物壁とのギャップを適切に設定することにより、ナトリウム大漏えいを想定しても、ライナが熱膨張*により建物壁と干渉し破損することのない設計としている。

ライナの基本構造を図2-2に示す。ライナプレートは、肉厚6mmの溶接構造用圧延鋼材SM400B(JIS G3106)製である。プレート寸法は1.5m×3mを標準とし、他の寸法のものと併せて部屋の大きさ、開口部、機器配置等に適合するようしている。ライナプレートは現地にてライナフレーム上で突き合わせ溶接されている。ライナフレームはSM400B製のみぞ形鋼で、断面の寸法は100mm×50mm×5mm×7.5mmである。ライナプレート裏面には、溶接によるライナプレートのひずみ発生防止対策として、ひずみ防止リブ(以下、リブという)が格子状に取り付けられている。リブはSS400製の平鋼で、寸法は50mm×6mmである。ライナプレートへの取り付けは隅肉溶接で、工場で施工される。

フローティング方式キャッチパン型ライナのナトリウム大漏えい時の挙動概念を図2-3に示す。ライナプレートは、ライナフレームに溶接支持されている。ライナフレームのうち直交する1組は振れ止めアンカーフレームである。振れ止めアンカーフレームは、床に固定されたベースプレート上面を軸方向にスライドするが、地震時の振れ止め機能を持たせるために、アンカークリップにより軸と直交方向の変位を拘束されている。他のライナフレームは変位拘束がなく、ベースプレート上をスライドできる。大規模なナトリウム漏えい時には、ライナ全体がほぼ一様に温度上昇すると考えられるが、フローティング方式は、振れ止めアンカーフレームを中心としたライナフレームのスライドによって、このような場合の熱膨張を自由に逃がす構造である。

一方、中小漏えい時に漏えいナトリウムがライナの一部に滞留して燃焼する場合には、ライナプレートは局所的に加熱され、周囲の温度は熱伝導等によって遅れて上昇する。このため、局所的な熱膨張による曲げ変形が生じる。さらに、ライナは面外剛性の低いライナプレートと剛性の高いリブ及びフレームとの複合構造なので、構造不連続による応力及びひずみ集中の効果がこれに重畠する場合がある。すなわち、ライナプレートの曲げ変形を拘束する部位に、これら剛性の高い部材が存在することで拘束の度合いが高まり、熱応力は増大する(図2-4)。

*もんじゅ 2次系ライナ材の熱膨張係数を参考1に示す。

ライナの機械的健全性評価にあたっては、このようなライナの熱応力発生機構を適切に考慮することが重要である。

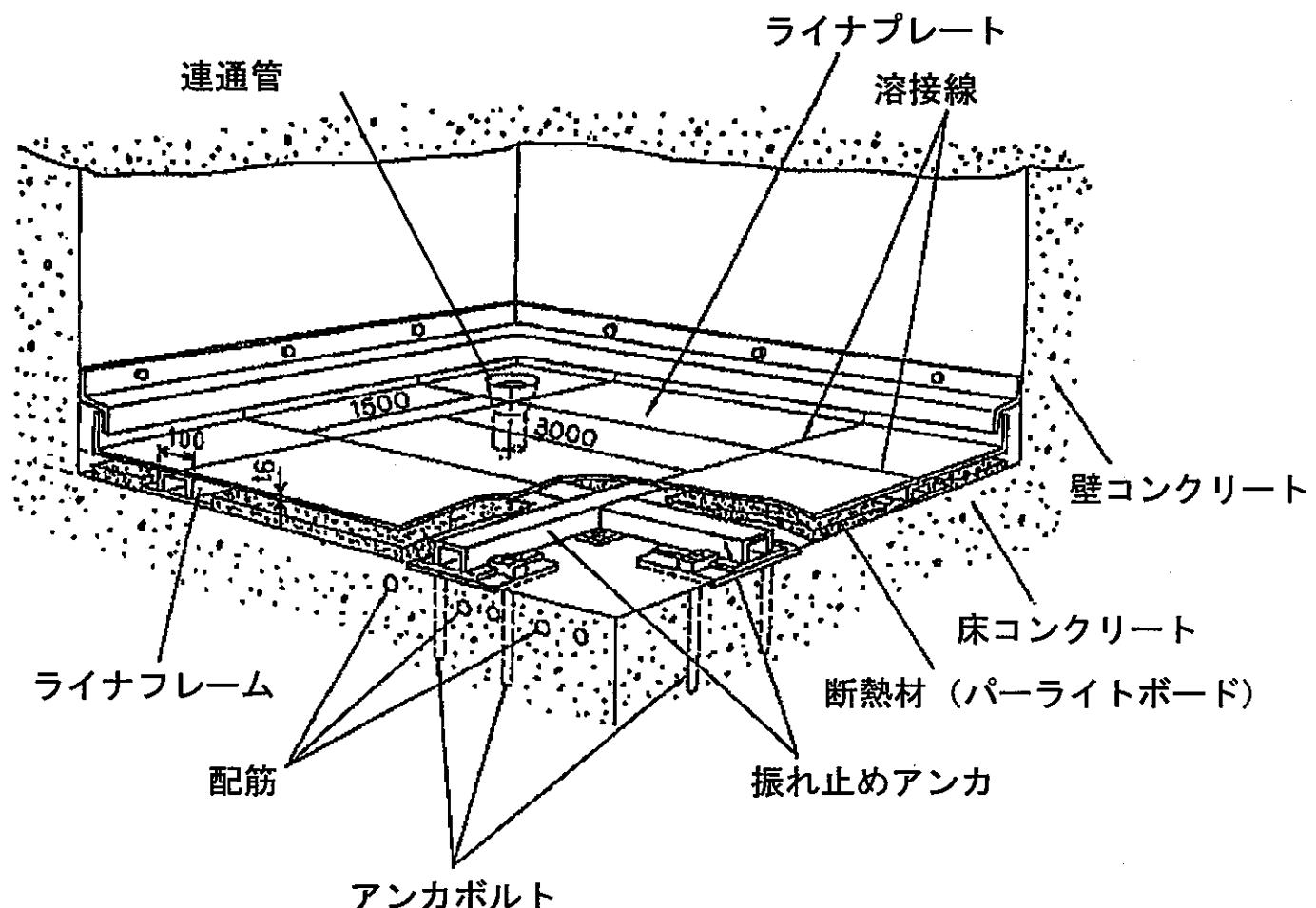


図2-1 もんじゅ 2次系ライナ構造概念図

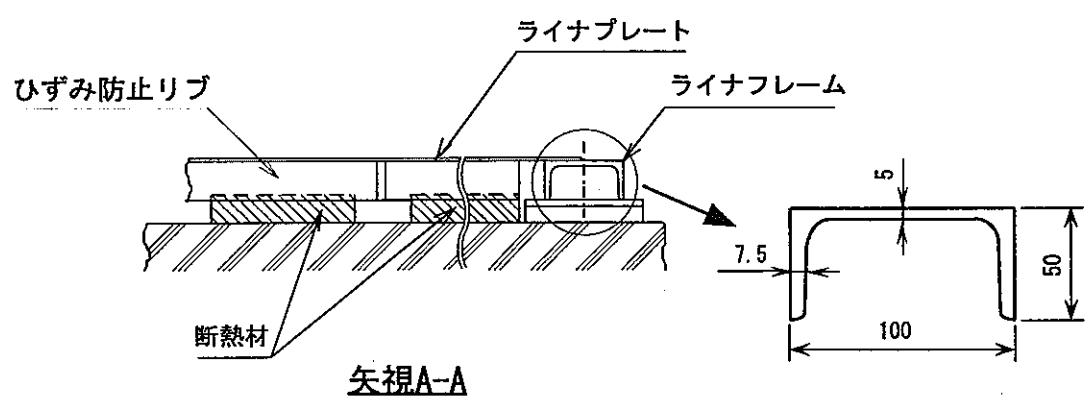
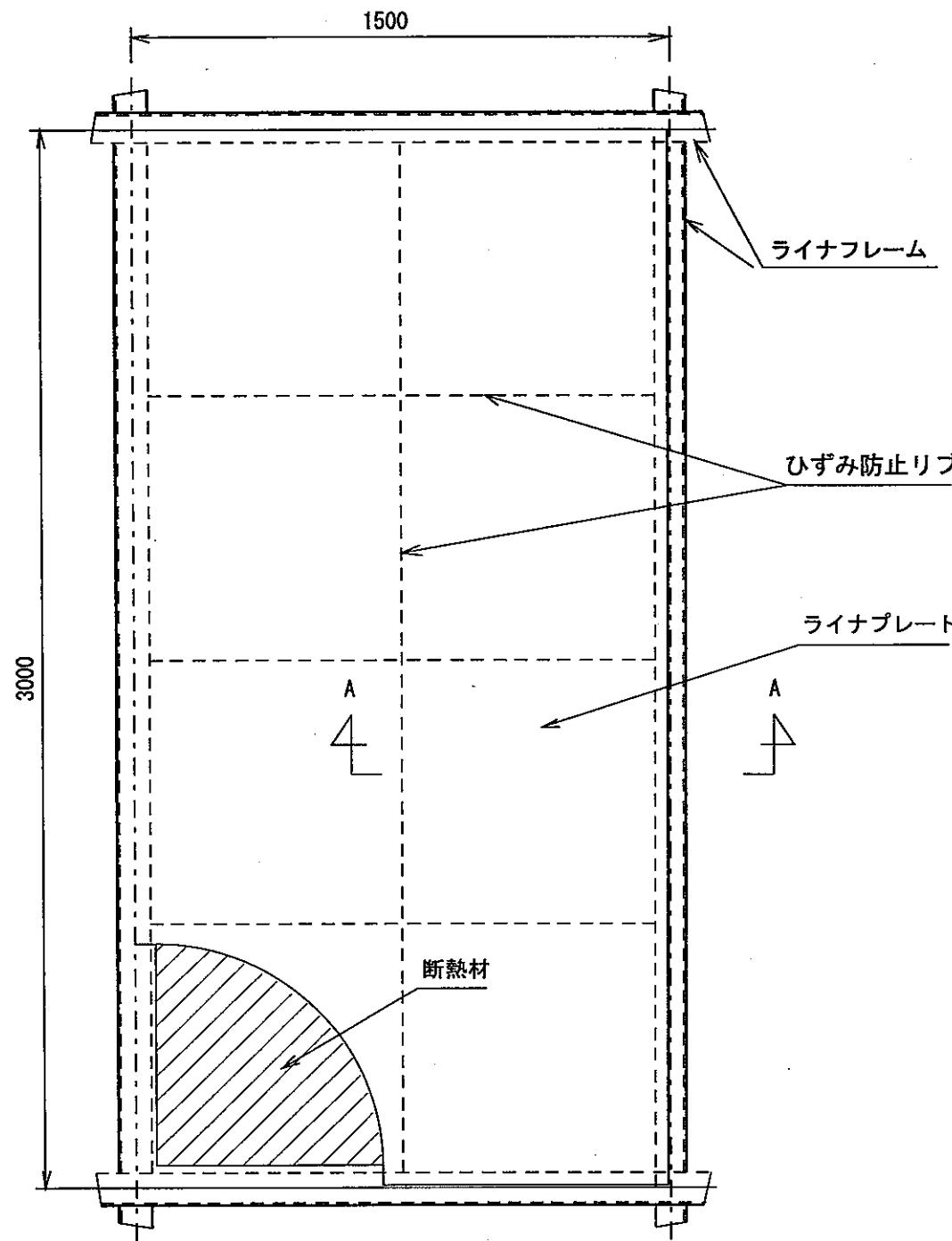
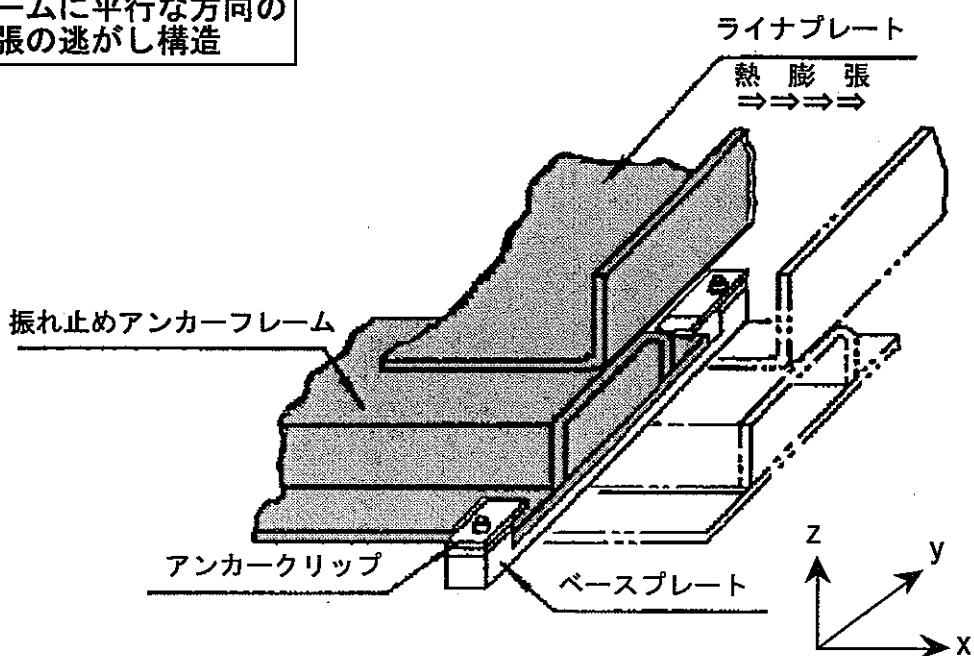


図2-2 ライナの基本構造

フレームに平行な方向の
熱膨張の逃がし構造



フレームに垂直な方向の
熱膨張の逃がし構造

構 造 概 要	フローティング方式キャッチパン 型ライナ*)	
	ライナフレーム アンカボルト 振れ止めアンカ ライナプレート 断熱材 (バーライトボード)	z x y
変 形 動		

ライナプレートの熱膨張は、振れ止めアンカを中心にはく離する

*) キャッチパン型ライナ：漏えいナトリウムを保持するため、端部を折り曲げて受け皿型としたライナ構造

図2-3 フローティング方式キャッチパン型ライナの熱膨張挙動

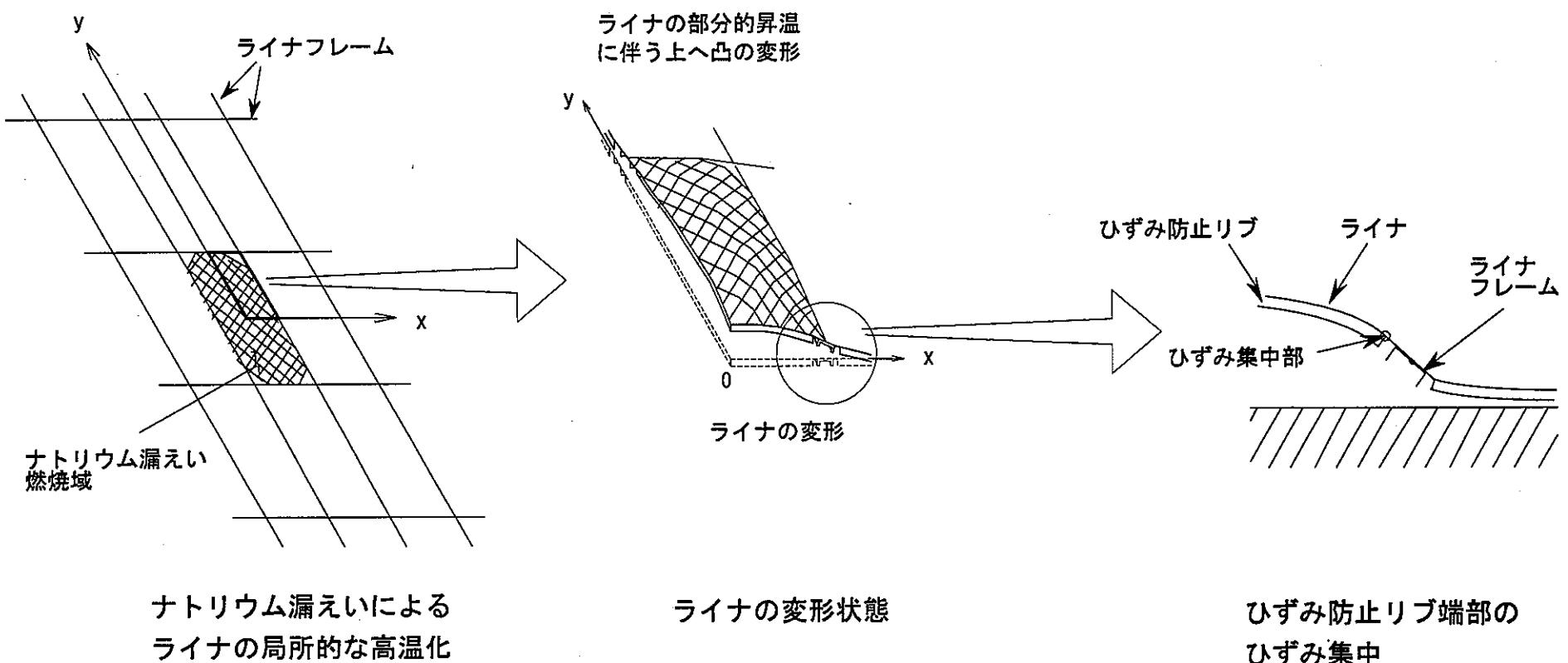


図2-4 ライナプレートの変形概念

3. 床ライナ機械的健全性評価

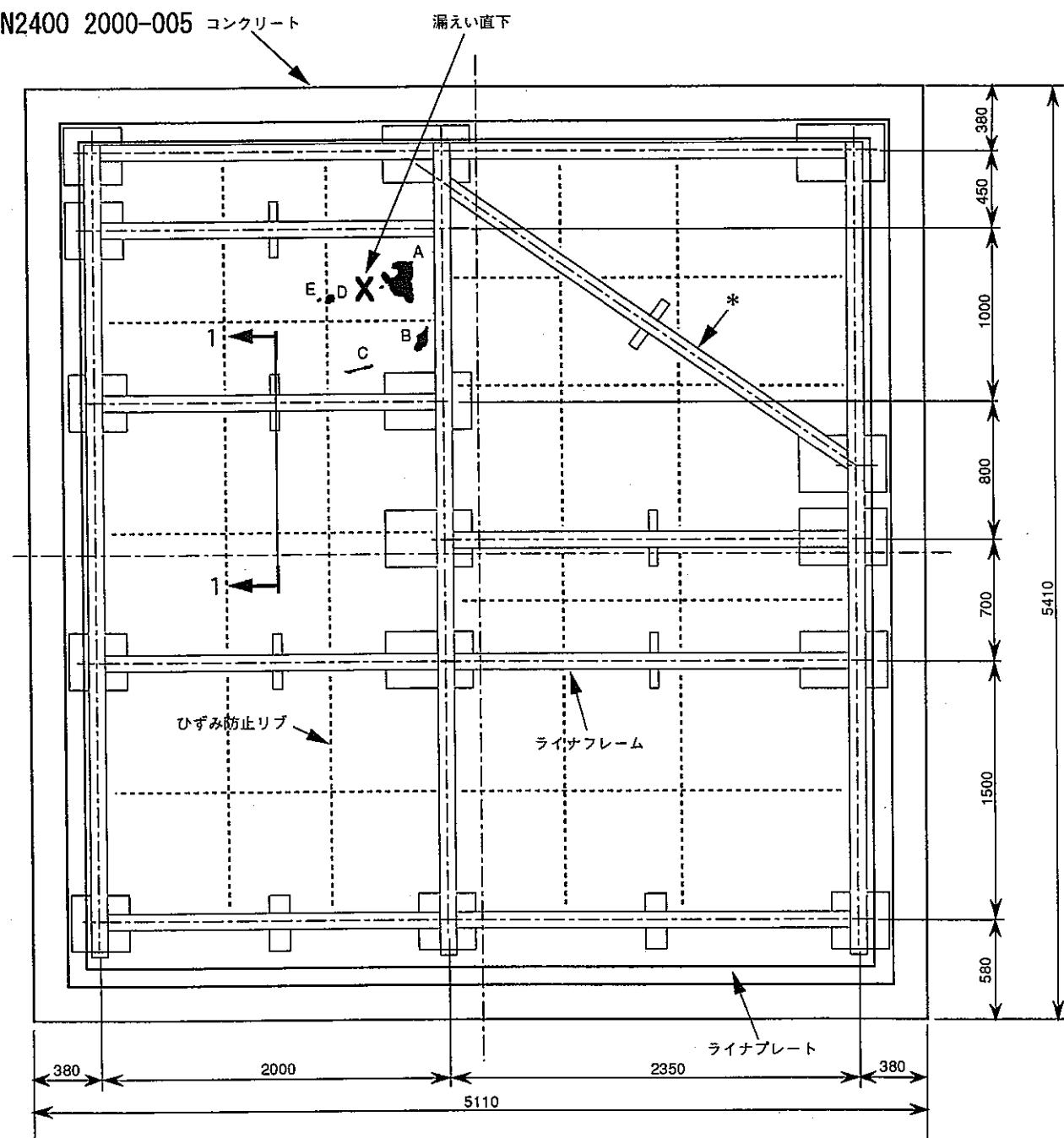
3.1 「燃焼実験Ⅱ」の床ライナの観察結果

「燃焼実験Ⅱ」において用いられた床ライナは、もんじゅ2次系床ライナと同じ肉厚6mmの溶接構造用圧延鋼材SM400B（JIS G3106）製であり、床ライナ下部構造に関しても、ライナフレーム（SM400B製みぞ形鋼100mm×50mm）およびリブ（SS400製平鋼50mm×6mm）を設け、もんじゅ2次系床ライナの基本構造を模擬している（図3.1-1）。

燃焼実験後のライナには5箇所の破損口が見られた。それらは、ナトリウム滴下部を中心とした深い減肉域の中の3箇所（図3.1-1及び図3.1-2中の破損口A、D、E）、及び周辺環状の腐食段差の中の2箇所（図3.1-1及び図3.1-2中の破損口B、C）である。破損口B、Cの近傍において最も著しい減肉が生じたのは、溶融体界面付近（液面レベルの腐食段差）と推定されている。特に、破損口Cの近傍において腐食段差が見られた。このため、破損口Cの近傍において、図3.1-2に示す位置で試験片を切りとってライナプレートの断面観察を行った。観察結果の典型的な例を図3.1-3に示す。この例では、最も変形の大きい（裏面の曲率半径の小さい）位置2箇所を観察視野とする写真を示している。

観察の結果、次の知見が得られた。

- (1) 破損口回りの極薄の箇所に至るまで、き裂等割れ状の損傷は観察されなかった。
- (2) 面外変形が卓越する破損口回りについての金属組織観察から、著しい塑性変形の痕跡を示す結晶粒の変形は認められなかった。



*）一部のライナフレームは、拘束条件をもんじゅ2次系ナトリウム漏えい事故の状況に近づけることを目的とした配置としている。

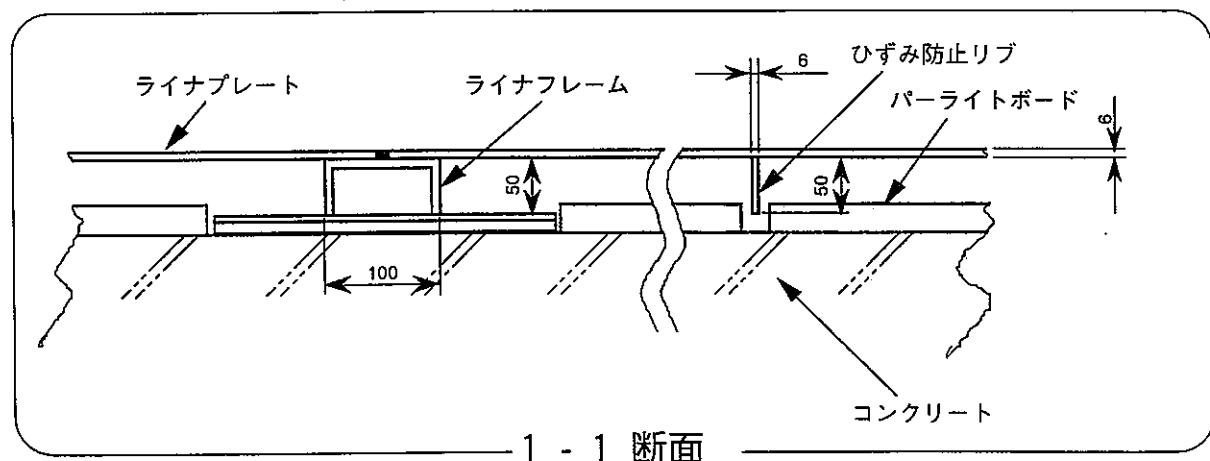


図 3.1-1 「燃焼実験Ⅱ」の床ライナ

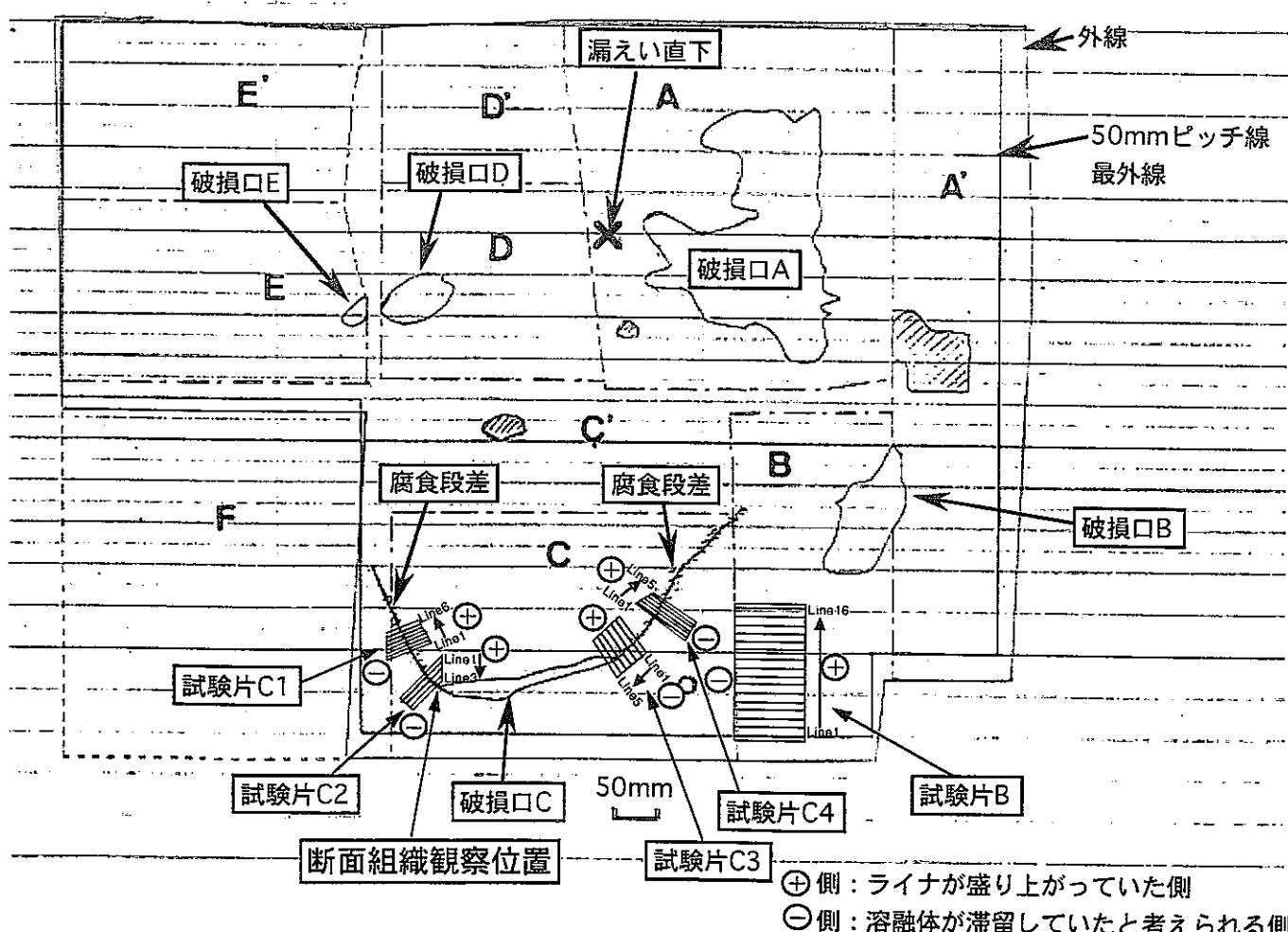
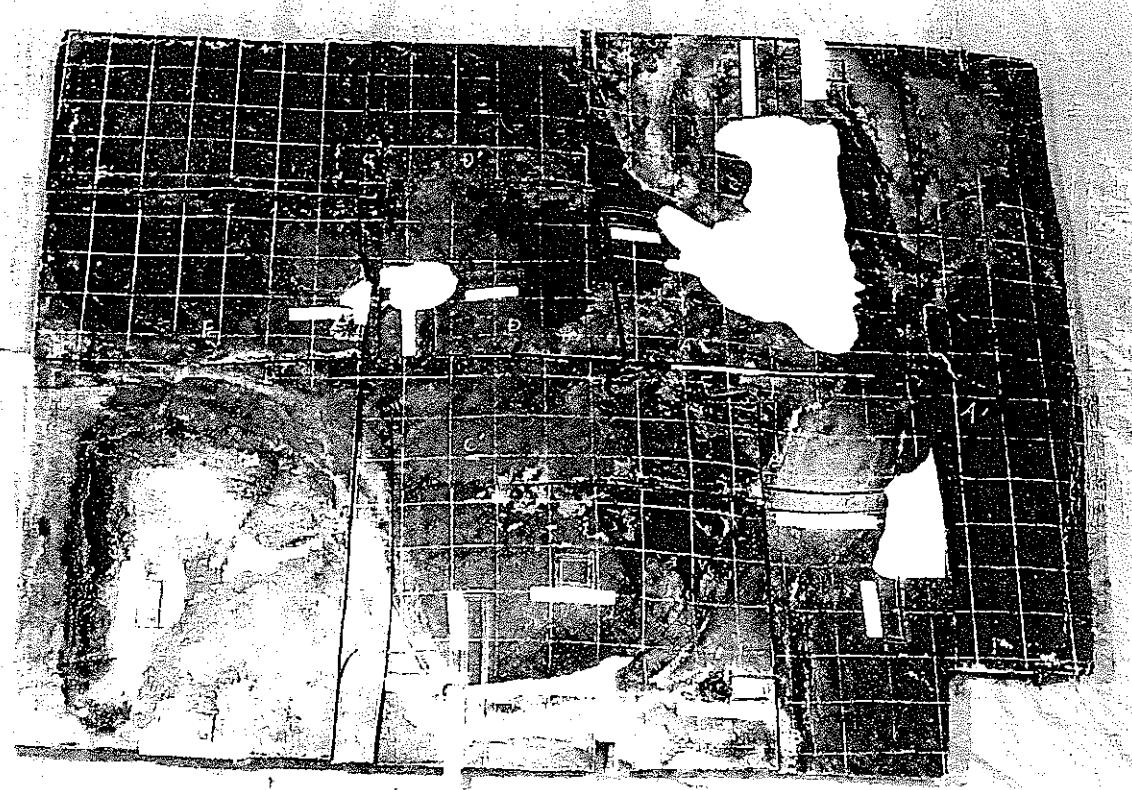


図3.1-2 「燃焼実験Ⅱ」ライナの破損部外観写真及び断面形状測定位置
(切り出した後堆積物を除去したもの)

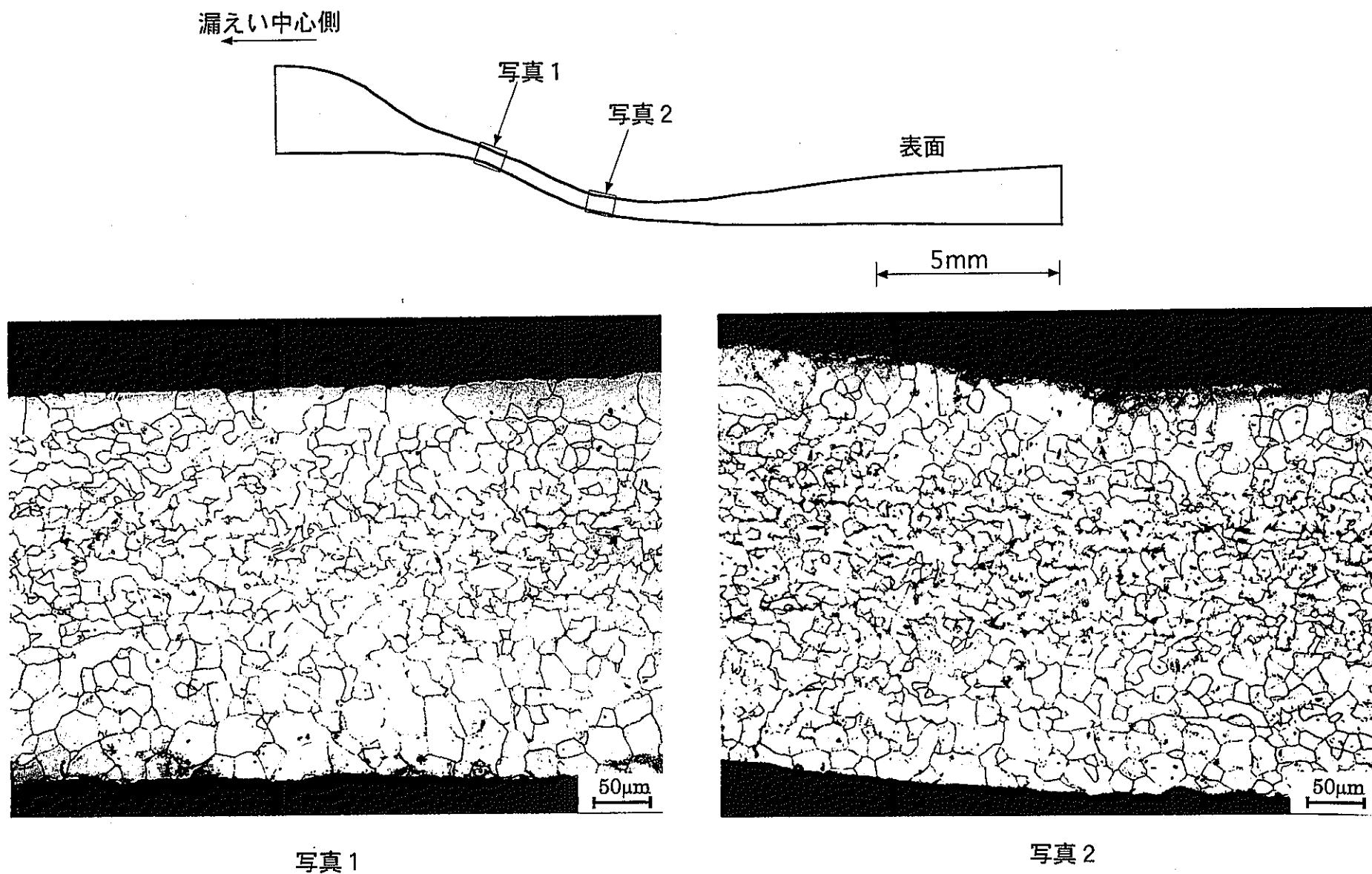


写真 1

写真 2

図3.1-3 「燃焼実験Ⅱ」破損口C近傍のライナ断面形状及び組織観察結果

3.2 非弾性解析による健全性確認

3.2.1 機械的健全性評価のための力学モデル

中小規模のナトリウム漏えい時、ライナは漏えいナトリウムとその燃焼によって局部的に加熱され、当該領域とその周辺に生じる温度分布によって、面外の曲げ変形を生じる。

ライナは、面外剛性の低いライナプレートと剛性の高いリブ及びライナフレームとの複合構造なので、ライナに生じる曲げひずみは、構造不連続によって局所的に集中・増大する。

さらに、漏えいナトリウムによる溶融塩型腐食が生じてライナが減肉する場合を想定し、その効果によってライナに生じるひずみが増大する可能性を考える。

このように、構造不連続効果と減肉の効果を同一の場所で重ねて想定するという保守的な仮定のもとで、ナトリウム漏えいに対するライナの機械的健全性を非弾性解析によって評価する。評価のための力学モデルは、ライナの構造的特徴を踏まえ、漏えいナトリウムにより加熱される領域（以下、入熱領域という）の形状、大きさ及び配置、並びに溶融塩型腐食によるライナの減肉の態様を考慮して保守的な結果を与えるように構築する必要がある。

このため、図3.2-1に示す流れに沿って、初めにライナの構造的特徴を踏まえた入熱領域のモデル化の検討を行い、次に溶融塩型腐食によるライナ減肉のモデル化の検討を行った。

(1) 入熱領域のモデル化

最初の影響因子として、入熱により高温となる領域^{*}の形状と大きさについて、楕円形を基本として3種類の大きさを考え、それぞれのケースについて、入熱領域と拘束部材の位置関係をさまざまに変化させるという方法でパラメータサーベイを行った。

パラメータサーベイは次の2段階で行った。まず、図3.2-2に示すように、入熱領域の大きさをリブスパン規模、フレームスパン規模及びフレームスパンの数倍規模の3段階に分けて入熱領域の位置・形状に関する基本パラメータサーベイを実施し、その結果から相対的に厳しいケースを選択した。次に、選択したケースを基準として図3.2-3に示す絞り込みサーベ

* 基本パラメータサーベイにおいては、分布のない一様な温度領域を設定しており高温領域と呼ぶ方が適切であるが、基本パラメータサーベイと、絞り込みサーベイ及び詳細モデルによる減肉進行を伴う解析における領域名称との混乱を避けるため、あえて一貫して入熱領域と呼ぶこととする。

イを実施し、最も厳しいケースを詳細解析モデルとして選択した。なお、パラメータサーベイは、後述（「3.2.2 解析方法」）の手法（汎用非線形解析プログラム FINAS を使用したシェルモデルによる大変形弾塑性解析）と基本的に同一の手法によっているが、入熱領域と拘束部材の位置関係による発生ひずみへの影響をサーベイすることを目的としているので、ライナの減肉を考慮しないモデルで実施している。

基本パラメータサーベイによって得られた最大相当非弾性ひずみを入熱領域面積に対してプロットした結果を図 3.2-4 に示す。ここで、最大相当非弾性ひずみは、入熱領域をフレームに内接する橒円としたケースの結果で正規化している。この結果から、振れ止めアンカーフレームが近傍に存在しない場合のフレームスパン規模の条件が相対的に厳しいことが判明した。次にこのケースを基に、絞り込みサーベイとして図 3.2-3 に示す種々の橒円領域を想定した解析を行い、最も厳しいケースを探索した。解析の結果、図 3.2-5 に示すように、入熱領域が周囲のフレーム位置を相当に覆う橒円のケースで、リブの端部に最も大きいひずみが発生することがわかった。

この結果を踏まえ、入熱領域として、フレームスパン規模の橒円形で周囲のフレーム位置を相当に覆う領域を考えることとした（図 3.2-3 の右図）。

(2) ライナ減肉のモデル化

構造不連続に加えて、溶融塩型腐食による減肉の効果を重畠する。減肉の断面形状とその領域の配置については、評価上厳しいひずみが生じるよう設定する。そこで、以下に述べる 3 種類の工学モデルにより実機条件を包絡することを考える（図 3.2-6）。

(i) 境界帯状減肉モデル

局所減肉によるひずみ集中の影響を極端にした場合として V 字型断面の帶状減肉域を仮定する。帶状減肉域の配置については、局所減肉と構造不連続の重畠を仮定し、減肉底最深部をリブ端部のひずみ集中位置に一致させる。帶状減肉域の断面形状については、「燃焼実験 II」のライナ観察結果を参考にして、漏えい中心側では傾斜を 6/50 に、またその反対側（溶融体側）では傾斜を 6/40 と設定した（図 3.2-7 参照）。減肉断面形状の設定の詳細は付録 A に示す。

(ii) 部分一様減肉モデル

減肉による剛性の低下とひずみ集中の重ね合せとして厳しい条件

を追及する観点から、部分一様減肉を仮定する。具体的には、減肉部境界の内側領域において一様に減肉が進行するものと考える。減肉部境界の配置については、上記（i）のモデルと同様の考え方から、局所減肉と構造不連続の重畠を仮定し、減肉部境界をリブ端部のひずみ集中位置に一致させる。減肉部境界の断面形状については（i）のモデルに準拠して定めている。

（iii）全面一様減肉モデル

3番目のモデルとして、減肉による剛性の低下を極端に仮定し、ライナの全面にわたる一様な減肉を仮定したモデルを考える。

このような3種類のモデルを、ライナの構造上の特徴から生じるひずみ集中と、減肉による剛性の低下の組み合わせの観点から整理すると、（i）はひずみ集中を極端にしたモデル、（ii）は剛性の低下を極端にしたモデルであり、（iii）はそれらの中間に位置するモデルであるといえる。ひずみ集中と剛性の低下はそれぞれ（i）、（iii）のモデルにより実際よりも十分保守的にモデル化されていることから、実機条件はこれら3種類のモデルにより包絡されていると考えることができる。

3.2.2 解析方法

減肉進行を伴う大変形弾塑性クリープ解析を行う。解析プログラム及び使用要素は以下のとおりである。

- ・解析プログラム：FINAS v. 13.0⁽⁵⁾
- ・使用要素：4節点四辺形シェル要素（QFLA4S）

減肉進行を伴う解析手法の概要は以下のとおりである。なお、解析手法の詳細とその妥当性については付録Bに示す。

減肉の模擬は、与えられた減肉進行履歴に従い、減肉により新たに生じた自由表面を力学的に等価な形で生成するという方法による。具体的には、ある時点で減肉領域に入った積分点について、そこに生じている応力を解放（緩和）してゼロにするような擬クリープひずみを与える。この過程で、残存肉厚部分では平衡条件及び適合条件を満足するように応力ひずみが再配分される。同時に、減肉域の全積分点領域には応力増分が発生しないよう、当該領域の縦弾性係数を十分小さくする。

3.2.3 解析条件

減肉進行を伴うライナの熱変形解析の基本的な解析条件は、以下のとおりである。

(1) 熱的条件

ライナの入熱領域における温度履歴中の最高温度を 880°C とした。この温度は、ASSCOPS コードによりナトリウム燃焼解析⁽¹⁾から得られたライナの最高温度を包絡する値として定めたものである。ASSCOPS コードによるナトリウム燃焼解析から得られたライナへの入熱量を基本として、最高温度が 880°C となるよう、これより大きめの入熱条件を設定して、ライナの温度分布の履歴を熱伝導解析により求めた。

(2) その他の荷重条件

ライナ自重と漏えいナトリウムの載荷重を負荷した。

(3) 減肉条件

溶融塩型腐食によるライナの最終減肉深さは、ASSCOPS コードにより得られた床ライナ減肉量上限値(1)を参照し、これを十分上回る値として 4.5mm と設定した。

減肉量の時間変化は、減肉速度式をライナの温度履歴のもとで積分して評価した。減肉速度式は、最も厳しい減肉速度を得る目的で実施した腐食減肉試験結果に基づき、減肉速度評価データ(3)（図 3.2-8 に示す）の 95% 信頼幅の上限値を温度の関数として定めた式を用いている。ライナの温度履歴は、上記熱的条件で得られたものと基本的に同一であるが、減肉量が 4.5mm となるように継続時間を設定したものである。

このようにして設定したライナの減肉量の時間変化を、温度履歴とともに図 3.2-9 に示す。

なお、「3.2.7 機械的健全性の裕度確認」で述べるように、4.5mm よりもさらに深い減肉を仮定した場合についても解析を実施し、機械的健全性に対する裕度を確認している。

3.2.4 解析結果

(1) 解析結果

減肉進行を伴う弾塑性クリープ解析の結果を、減肉の態様についての 3 種類のモデルごとに以下に述べる。

(i) 境界帶状減肉モデルの解析結果

境界帶状減肉モデルによる解析の結果を図 3.2-10 に示す。最大相当非弾性ひずみの値は、膜+曲げひずみ=23%（膜ひずみ=約 3%）であった。

最大のひずみは、ひずみ集中によって内側リブの端部に生じるが、ここでの肉厚内の各点における相当非弾性ひずみの時間変化を、図 3.2-11 に示す。ライナプレート上面から順次減肉が進行して表面が消失するため、各点のひずみの最終値を結んだ曲線が減肉底のひずみ履歴を表わすことになる。減肉底のひずみの履歴は概ね以下のようである。

- ① 漏えい燃焼開始の直後からひずみは急増し、約 600 秒で最大値に達する。
- ② その後、減肉の進行に伴い残留ひずみを有する領域が表面から消失し、減肉底のひずみは減少していく。
- ③ 最終減肉底が現れた時点辺りで、相当非弾性ひずみは時間的に最小になる。
- ④ その後、降温に伴う除荷によってひずみが反転し、圧縮ひずみが発生する。このため、相当ひずみとしては再び漸増に転じる。

非弾性ひずみが最大となる時点の、内側リブ端部、外側リブ端部、及びライナフレーム部を含むひずみ集中部近傍の、ライナプレート上表面における非弾性ひずみ分布を、図 3.2-12 に示す。このひずみ分布から、内側及び外側リブ端部において極めて局所的なひずみ集中が生じていることがわかる（相当非弾性ひずみの大きさは外側リブ端部の方が大きいが、圧縮の曲げひずみである。内側リブ端部は引張の曲げひずみとなっている）。

(ii) 部分一様減肉モデルによる解析結果

部分一様減肉モデルによる解析の結果を図 3.2-10 に示す。最大相当非弾性ひずみの値は、膜+曲げひずみ=22%（膜ひずみ=約 3%）であった。

全体的な挙動としては (i) のモデルと同じ傾向であり、相当ひずみの最大値は (i) のモデルに比べると膜+曲げひずみは僅かに小さかった（膜ひずみは同等）。

(iii) 全面一様減肉モデルによる解析結果

全面一様減肉モデルによる解析の結果を図 3.2-10 に示す。最大相当非弾性ひずみの値は、膜+曲げひずみ=22%（膜ひずみ=約 3%）であ

った。(i)のモデルに比べると膜+曲げひずみは僅かに小さかった(膜ひずみは同等)。

(2) 解析結果のまとめ

図3.2-10に示した各モデルによる解析結果(図中には比較のため、減肉なしの場合の解析結果も合わせて示している)から、以下のことがわかる。

降温開始点までの時間で3種類のモデルを比較すると、いずれのモデルもひずみ履歴は大差がなく、昇温初期に最大ひずみが発生する。これらの最大値は、減肉なしの場合も含め、減肉の態様によらずほぼ同じ値を示している。

降温開始点以降ではひずみの挙動がモデルによって異なっているが、これらは負荷反転後の圧縮ひずみである。

これらのことから、健全性評価のための最大ひずみについては、減肉深さが4.5mm程度であればモデル間の差はほとんどなく、いずれも減肉なしの解析と概ね同等のひずみの評価結果を与えることがわかった。

3.2.5 機械的健全性判断のためのひずみの目安値について

ライナ材料SM400Bの高温材料試験で得られた引張破断伸び及び曲げ破断伸びの下限値を基本として、膜+曲げひずみの目安値を以下のように定めた。

膜+曲げひずみ $\varepsilon_m + \varepsilon_b$ の目安値を

$$\varepsilon_m + \varepsilon_b \leq 15\% \quad \text{室温} \leq T \leq 350^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_m + \varepsilon_b \leq 30\% \quad 350^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C}$$

とする。

なお、ネッキング(断面のくびれ)による不安定変形防止の観点から、高温材料試験で得られた引張一様伸びの下限値を基本として、膜ひずみの参考値を以下のように定めた。

膜ひずみ ε_m の参考値を、

$$\varepsilon_m \leq 5\% \quad \text{室温} \leq T \leq 350^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_m \leq 10\% \quad 350^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C}$$

とする。

実機のライナ材料は、漏えいナトリウムの滴下・燃焼による温度変動下における多軸応力状態での変形を受けるが、上記のひずみ目安値はこのような条件およびその他想定される影響因子の下でも妥当であることを確認している（詳細は付録Cによる）。

3.2.6 機械的健全性評価結果

減肉深さ 4.5mm の基本ケースに対する解析から推定されたひずみの最大値は、機械的健全性のひずみの目安値を十分下回っており、2次系ライナの機械的健全性は確保される。

3.2.7 機械的健全性の裕度確認

減肉深さ 4.5mm に対してライナの機械的健全性は確保されるが、裕度確認のため、より深い減肉を仮定した場合、及びライナ最高温度をさらに高く設定した場合について同様の解析を行った。また、その他の解析条件として、減肉位置とリブの隅肉溶接部形状について、解析条件設定の妥当性の確認のための解析を行った。それぞれについての検討内容及び検討結果を以下に示す。

(1) 減肉深さに対する裕度

減肉 4.5mm の基本ケースに加え、減肉深さに対する裕度を確認するため、境界帯状減肉の場合について、減肉深さを 5.5mm とした解析を行った。

解析の結果を図 3.2-13 に示す。減肉深さ 5.5mm まで、最大非弾性ひずみは機械的健全性の目安値を下回っており、健全であるとの結果を得た。また、漏えい初期に生じる最大非弾性ひずみの値は、減肉なしの場合も含め減肉深さによらずほぼ一定である。なお、降温後に生じているひずみは、負荷反転後の圧縮ひずみである。

(2) 最高温度に対する裕度

基本ケースの解析におけるライナ最高温度は、ASSCOPS コードによるナトリウム燃焼解析から得られたライナの最高温度を上回る約 880°C としているが、最高温度に対する裕度を確認するため、これをさらに上回る条件として、最高温度が 950°C になるような熱的条件を仮定した解析を行った。減肉条件は、境界帯状減肉、深さ 4.5mm とした。

解析の結果を図 3.2-14 に示す。最大非弾性ひずみは機械的健全性の目安値を十分下回っており、床ライナ最高温度 950°C の範囲まで機械的に健全であるとの結果を得た。なお、降温後に生じているひずみは、この場合

も負荷反転後の圧縮ひずみである。

(3) その他の解析パラメータの結果に及ぼす効果

各解析パラメータごとに、解析で得られた引張場の最大相当非弾性ひずみを、図 3.2-15 に比較して示す。これからわかるように、減肉位置を変えた場合はその差が無視できる程度に小さく、また、隅肉溶接部形状を変えた場合はひずみが減少しており、このことから、基本ケースによる非弾性ひずみの判断は妥当であると考えられる。

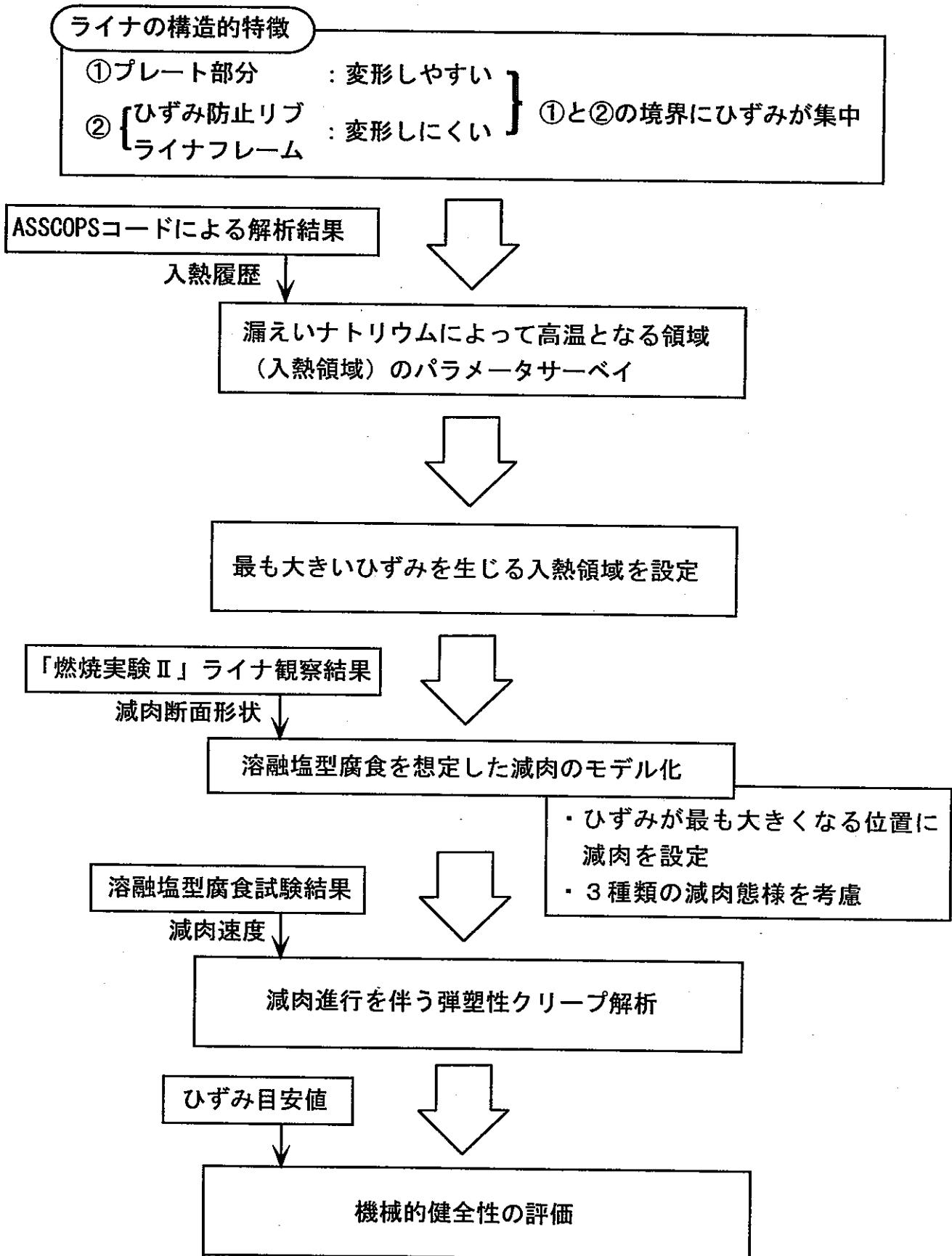
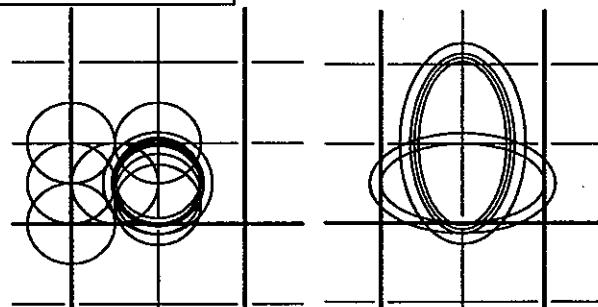


図3.2-1 非弾性解析によるライナの機械的健全性評価の流れ

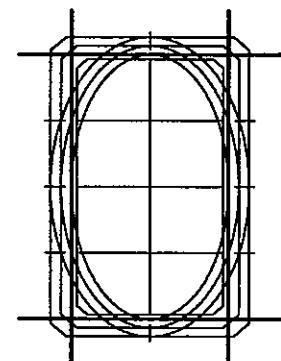
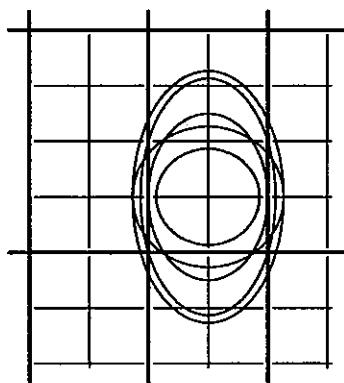
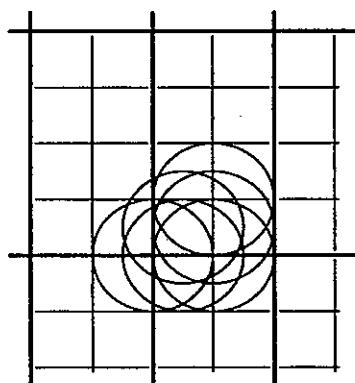
リブスパン規模



— ライナフレーム
— ひずみ防止リブ

ε_{\max} リブスパン規模
 $< \varepsilon_{\max}$ フレームスパン規模

フレームスパン規模



フレームスパン数倍規模

ε_{\max} 複数フレームスパン規模
 $\leq \varepsilon_{\max}$ フレームスパン規模

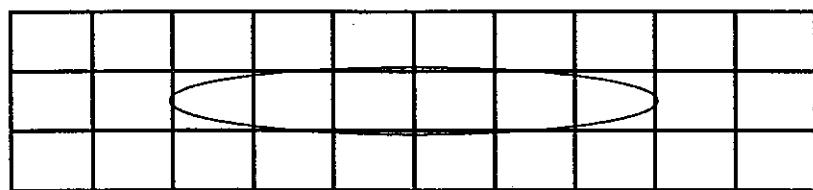
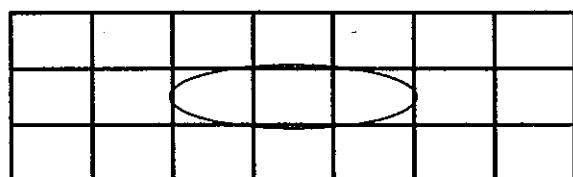
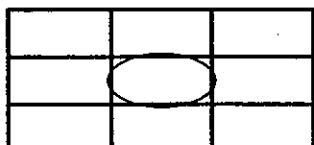
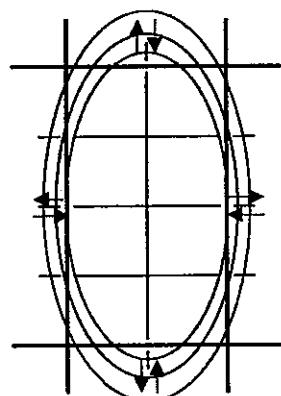
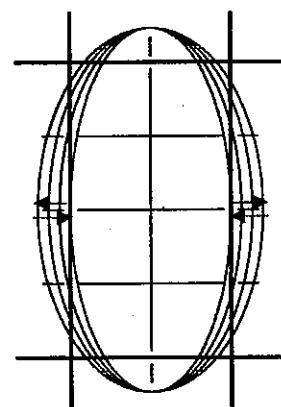


図3.2-2 入熱領域設定のための基本パラメータサーベイ

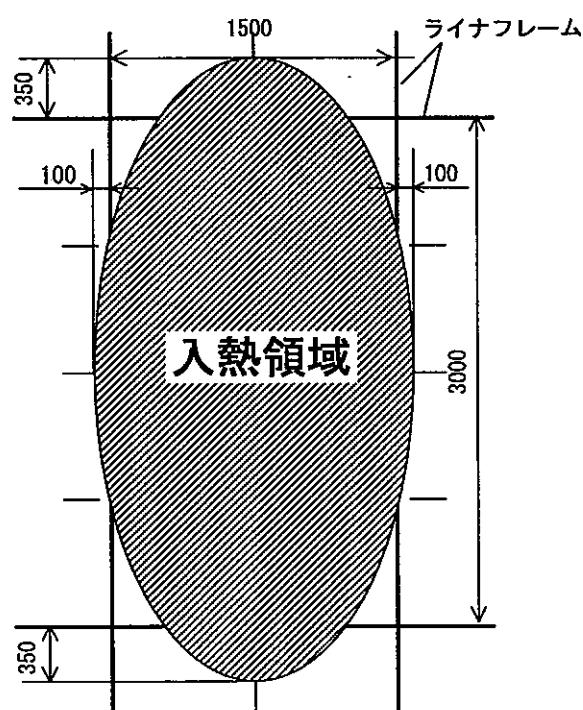
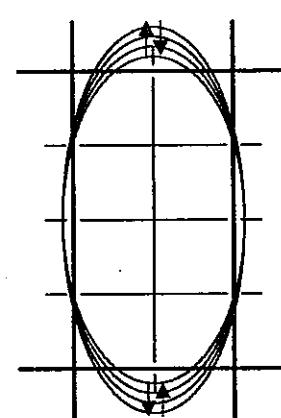
①長短半径同時増減



②短半径のみ増減



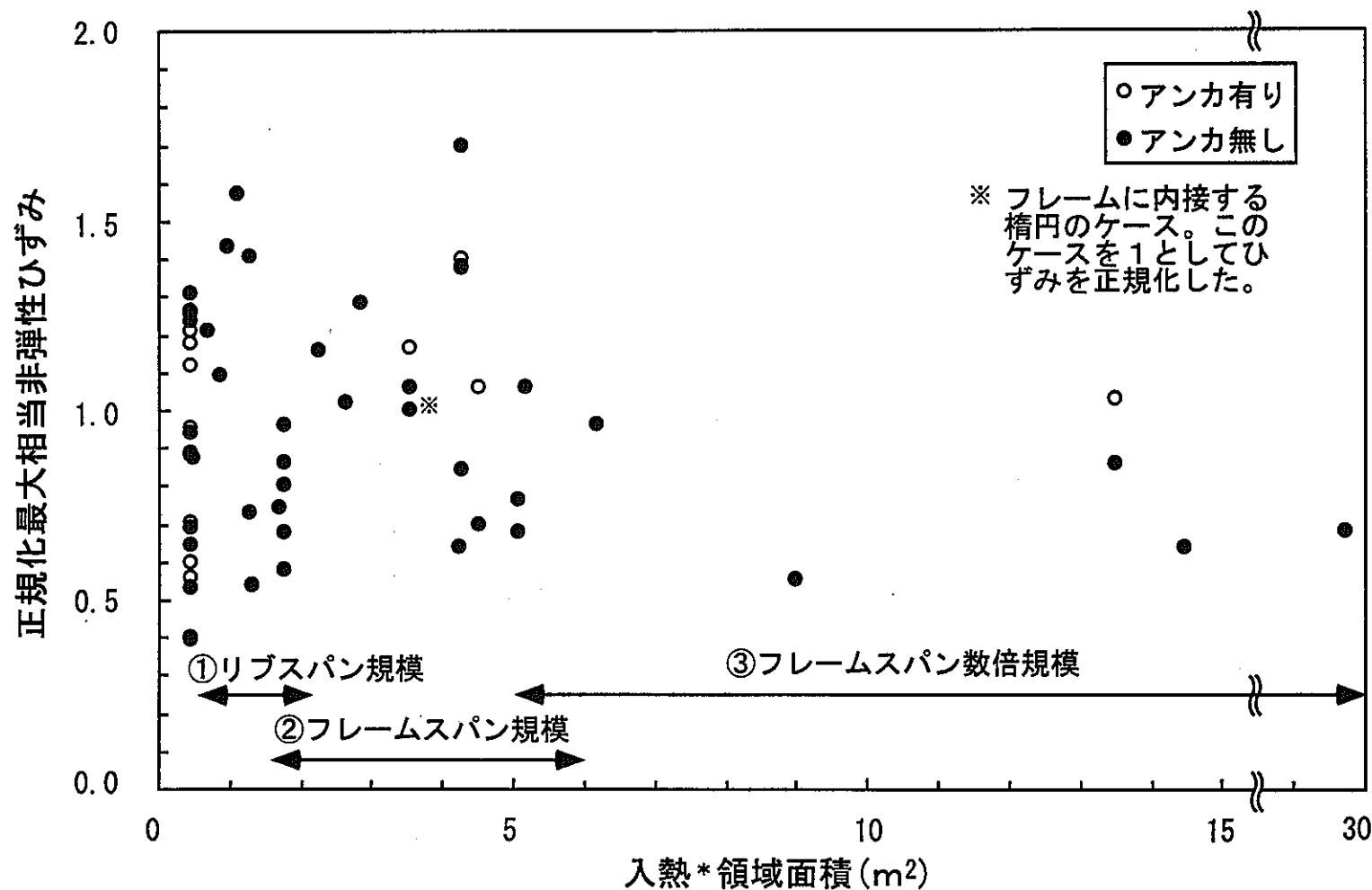
③長半径のみ増減



詳細解析モデル

フレームスパン規模で、周囲のフレーム位置を相当に覆う
橿円形状のとき、最大ひずみが発生する。

図3. 2-3 入熱領域設定のための絞り込みパラメータサーベイ



*) 基本パラメータサーベイにおいては、分布のない一様な温度領域を設定しており高温領域と呼ぶ方が適切であるが、綴り込みサーベイ及び詳細モデルによる減肉進行を伴う解析における領域名称との混乱を避けるため、あえて一貫して入熱領域と呼んでいる。

図3.2-4 基本パラメータサーベイ解析結果

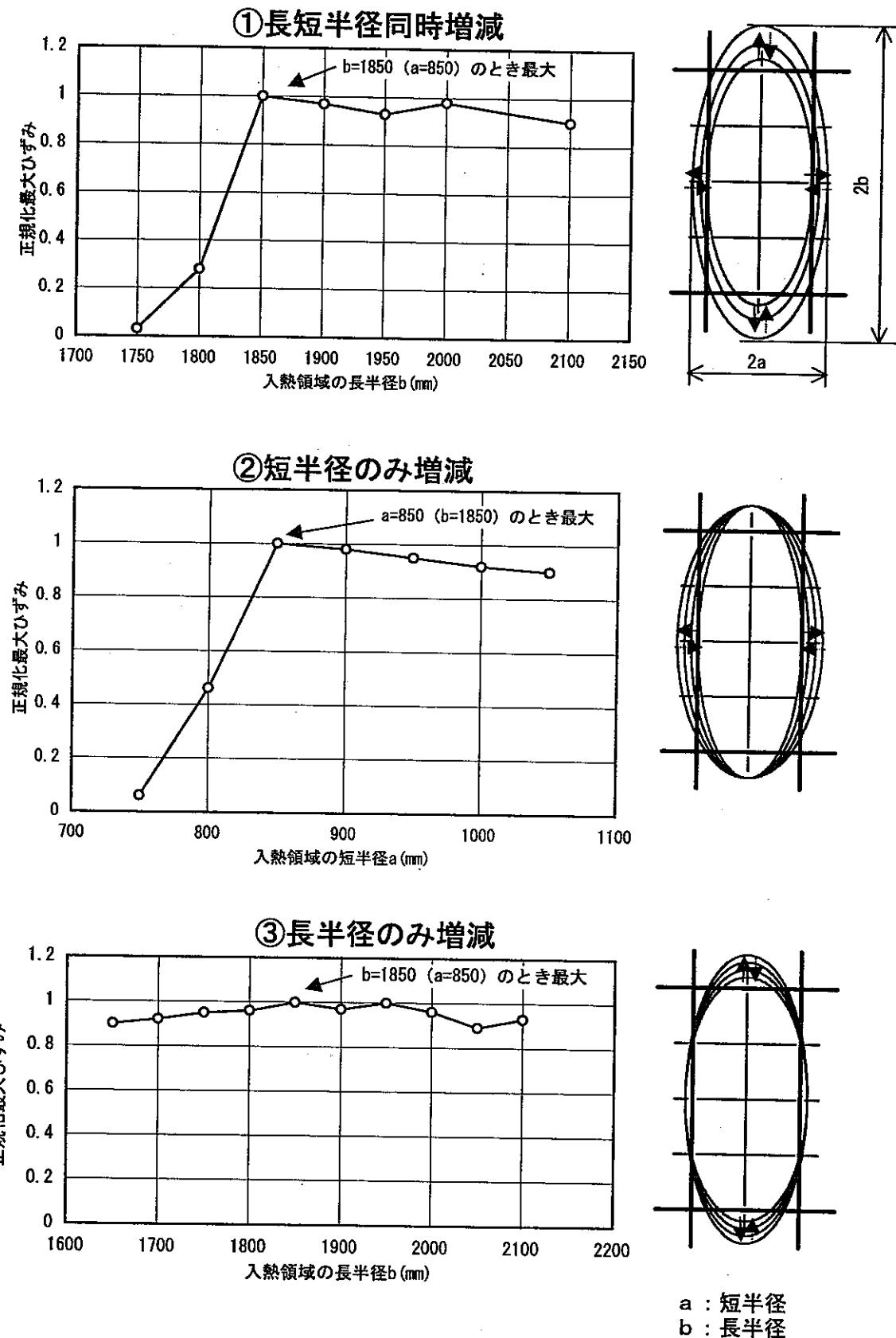
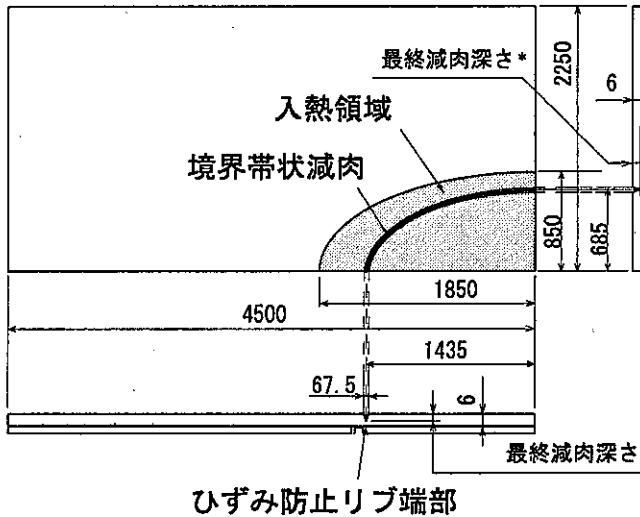
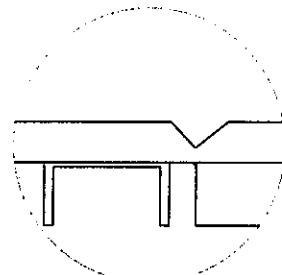


図3.2-5 絞り込みサーベイ解析結果

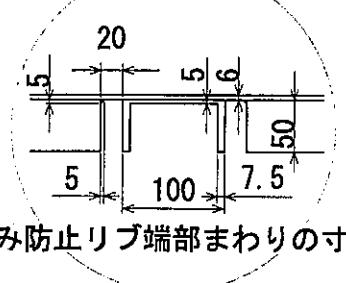
1. 境界帯状減肉



ひずみ防止リブ端部

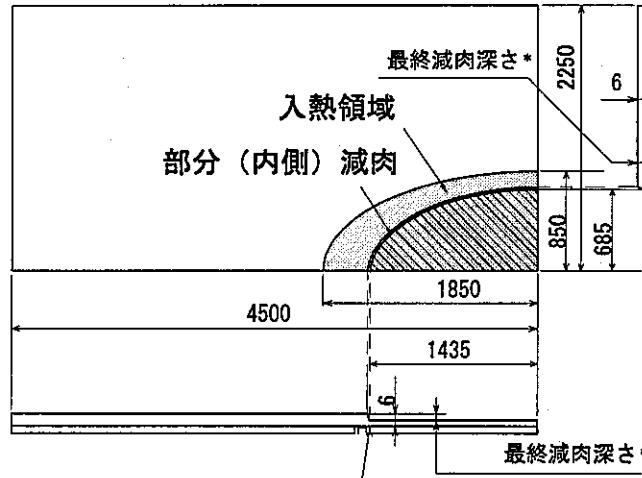


減肉部断面

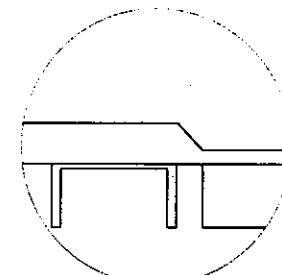


ひずみ防止リブ端部まわりの寸法

2. 部分一様減肉

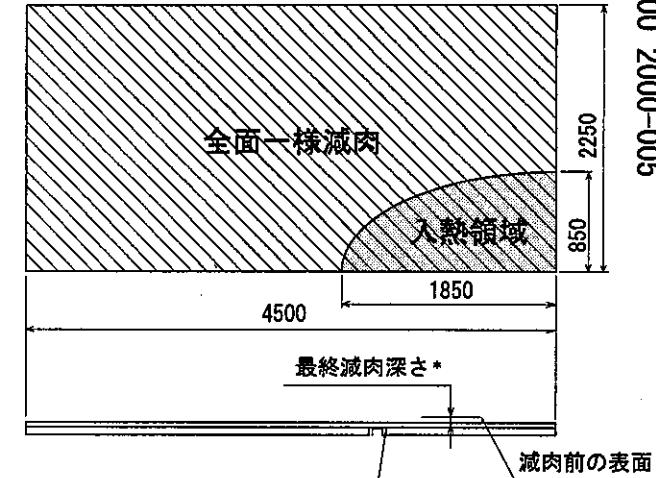


ひずみ防止リブ端部

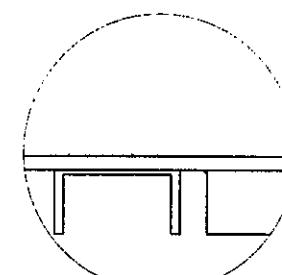


減肉境界部断面

3. 全面一様減肉



ひずみ防止リブ端部



減肉部断面

*) 最終減肉深さは、4.5mmとした。
ただし、裕度検討用の解析においては、
さらに深い最終減肉深さを想定したモデル
も用いた。

図3.2-6 減肉を想定した床ライナの機械的健全性評価のための工学モデル（図は減肉終了後を示す）

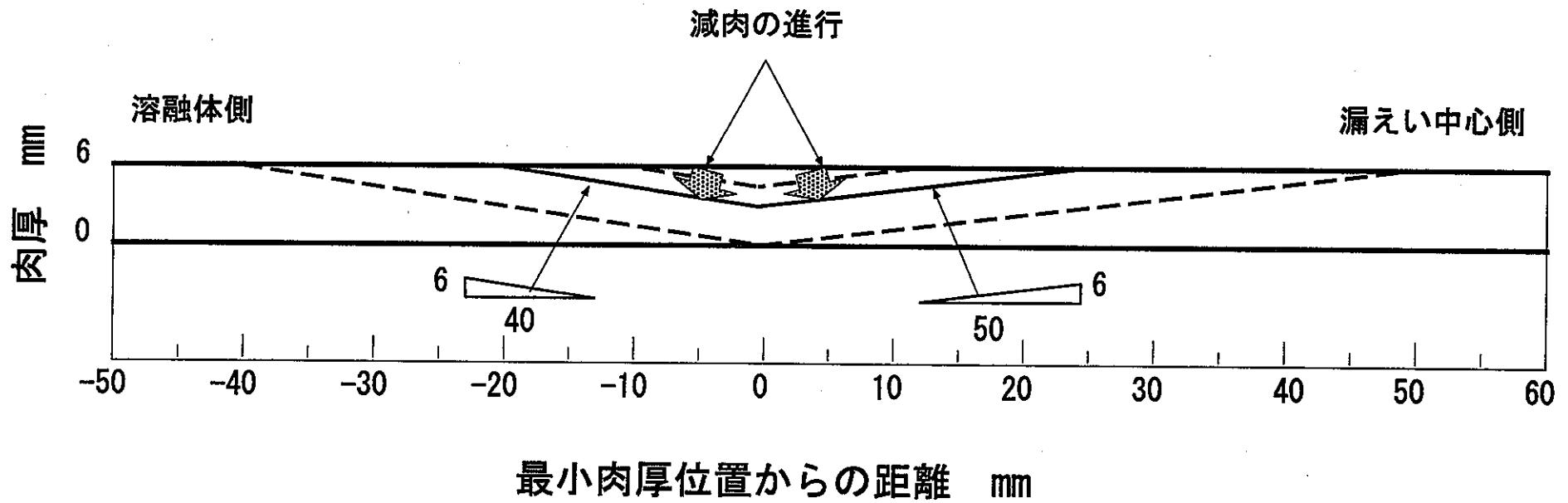


図3.2-7 境界帶状減肉モデル

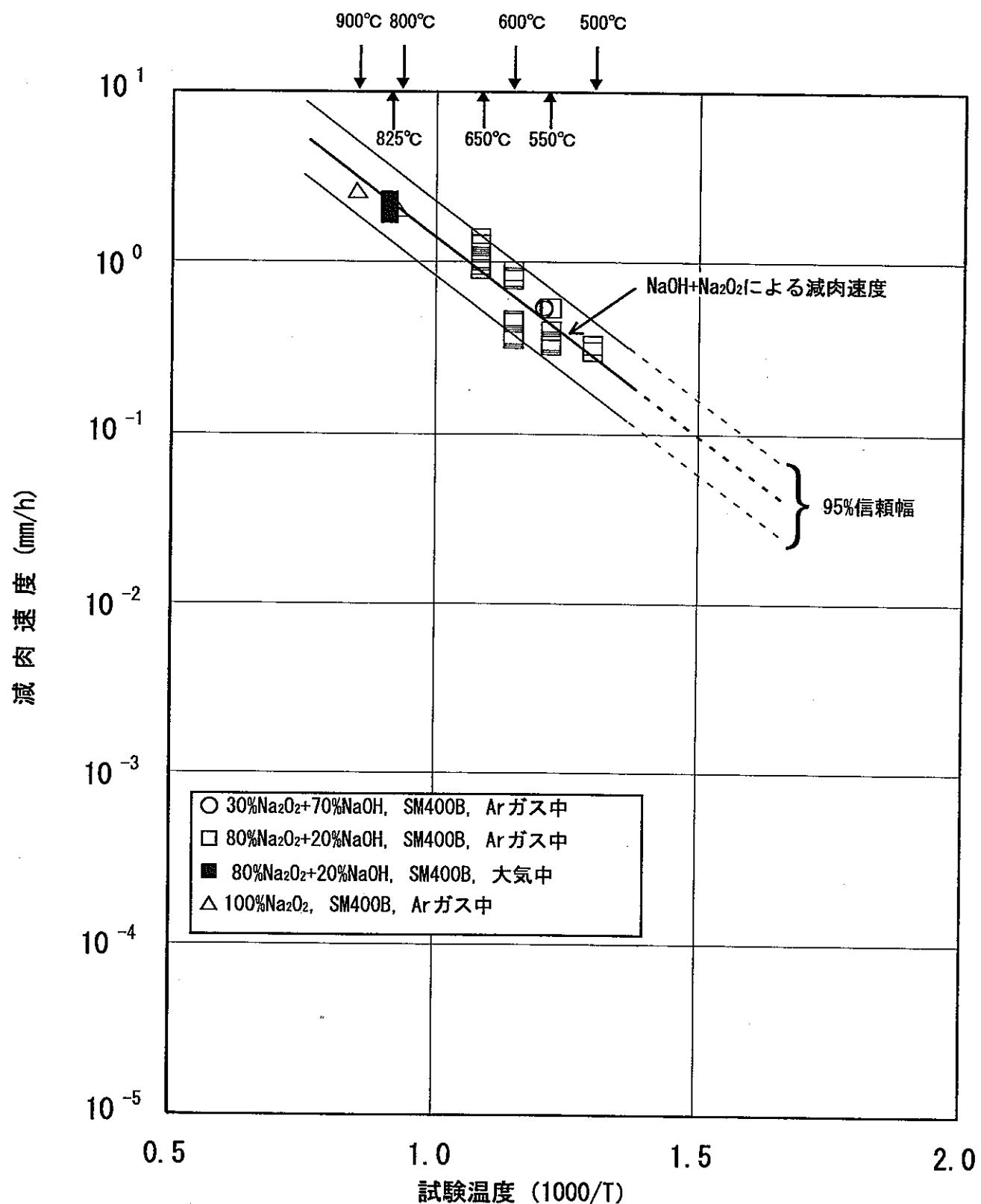


図3.2-8 溶融塩型腐食試験結果と減肉速度評価線
(文献(4)の図7(b)より引用)

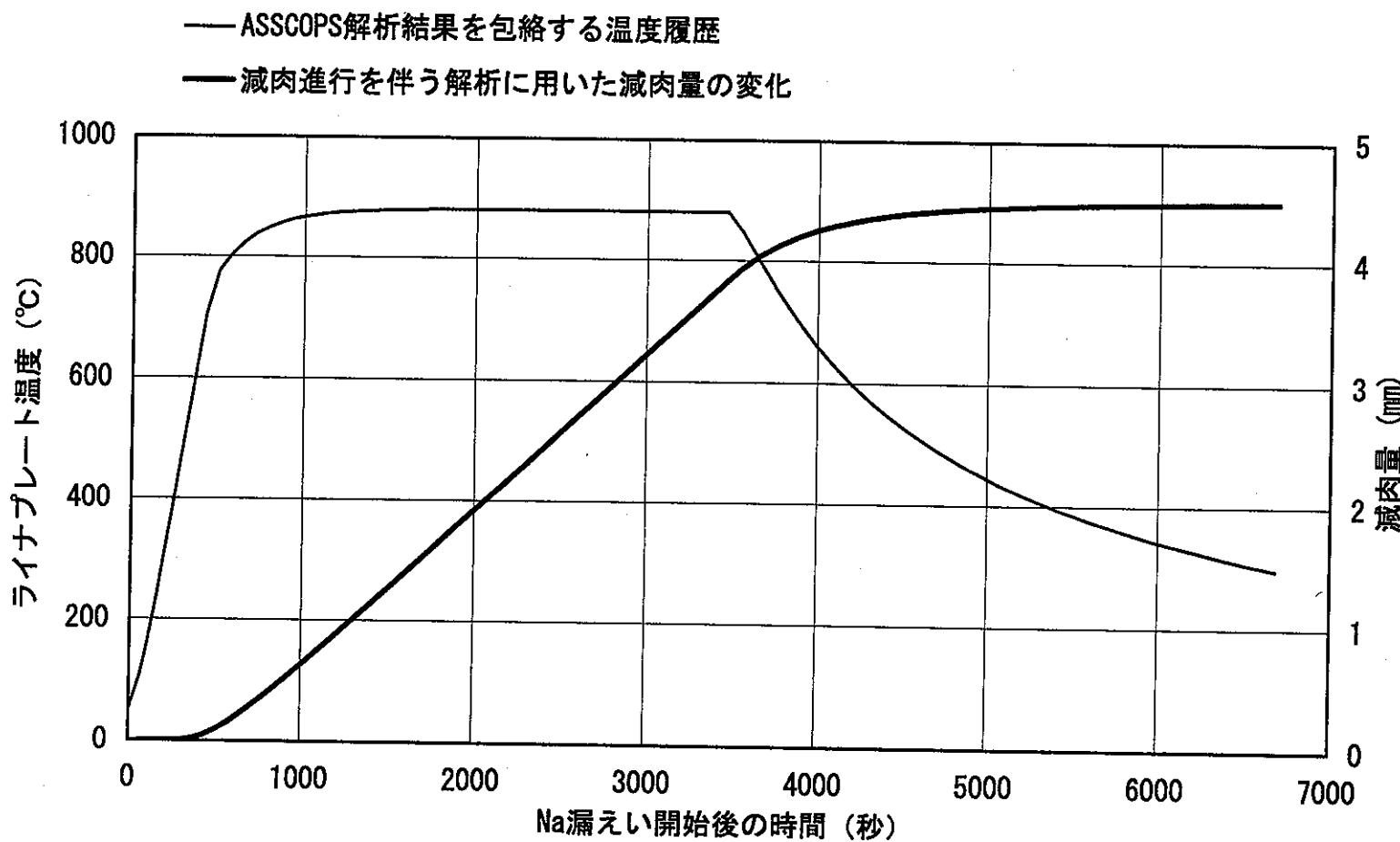


図3.2-9 減肉量の設定（最終減肉4.5mmの場合）

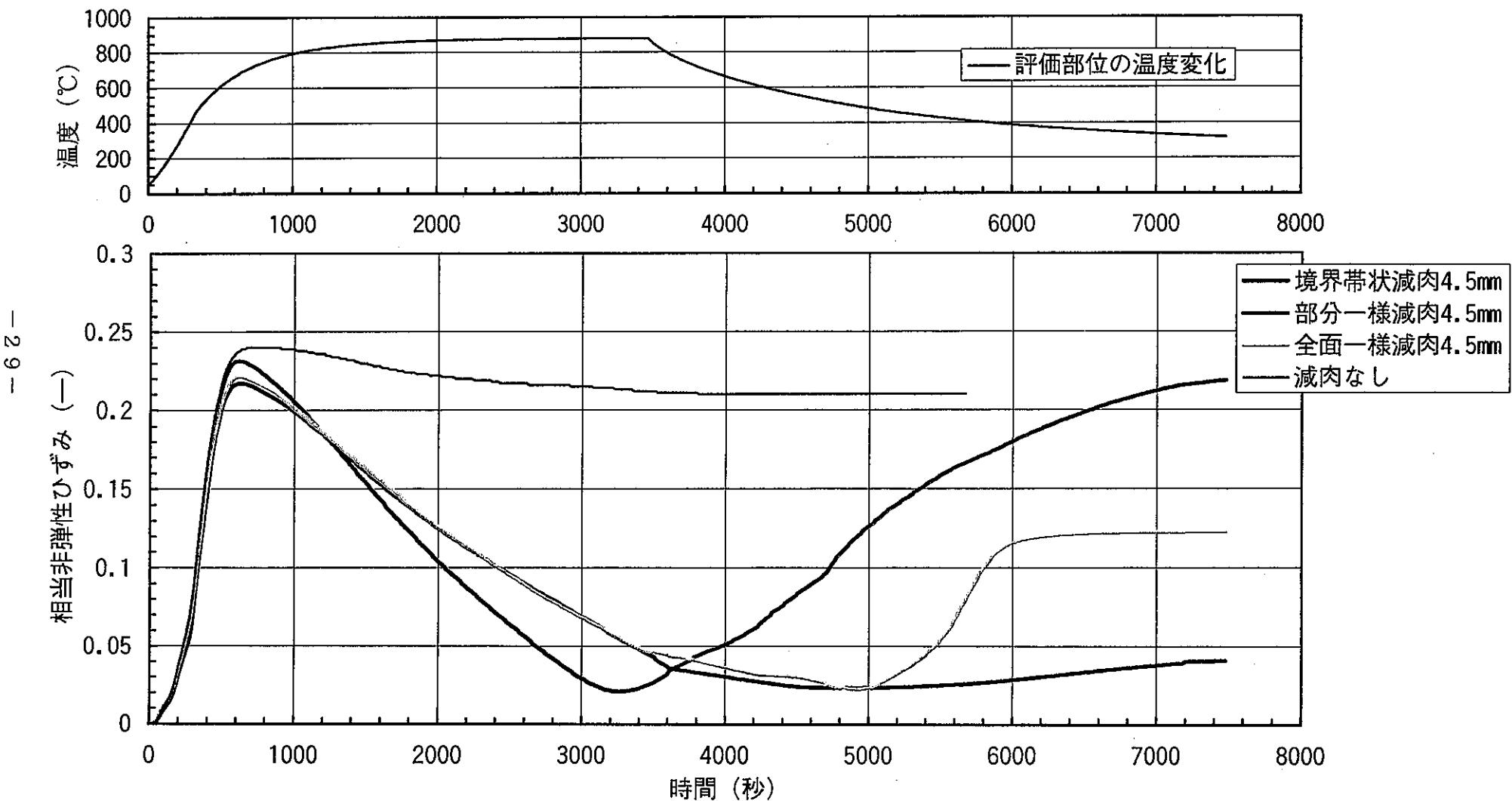


図3.2-10 3種類の工学モデルによる減肉底のひずみ履歴解析結果

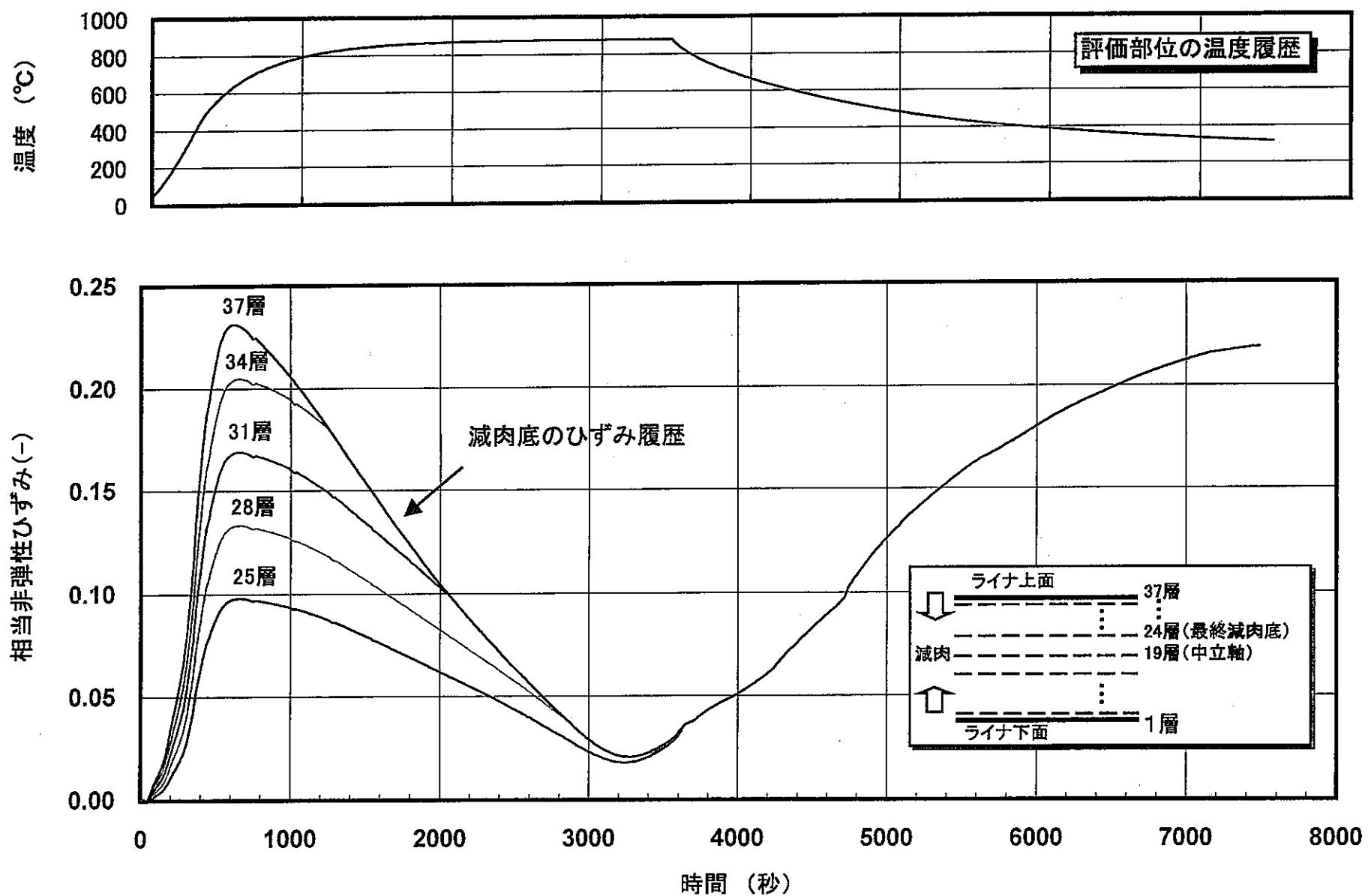


図3.2-11 境界帶状減肉モデルによる解析結果(内側リブ端部減肉底のひずみの時間変化)

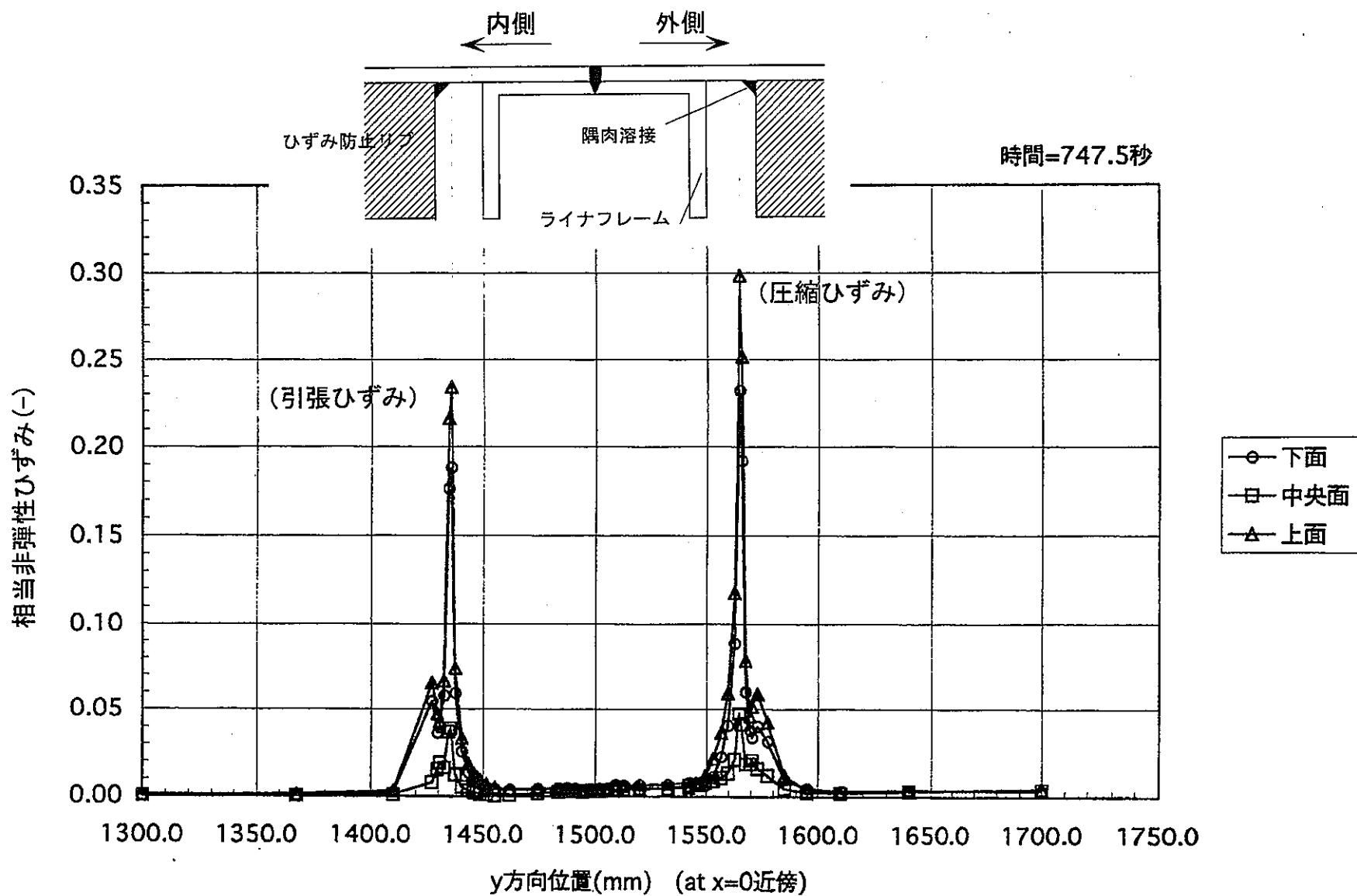


図3.2-12 昇温時の相当非弾性ひずみの分布（境界帶状減肉、最高温度880°C、747.5秒後）

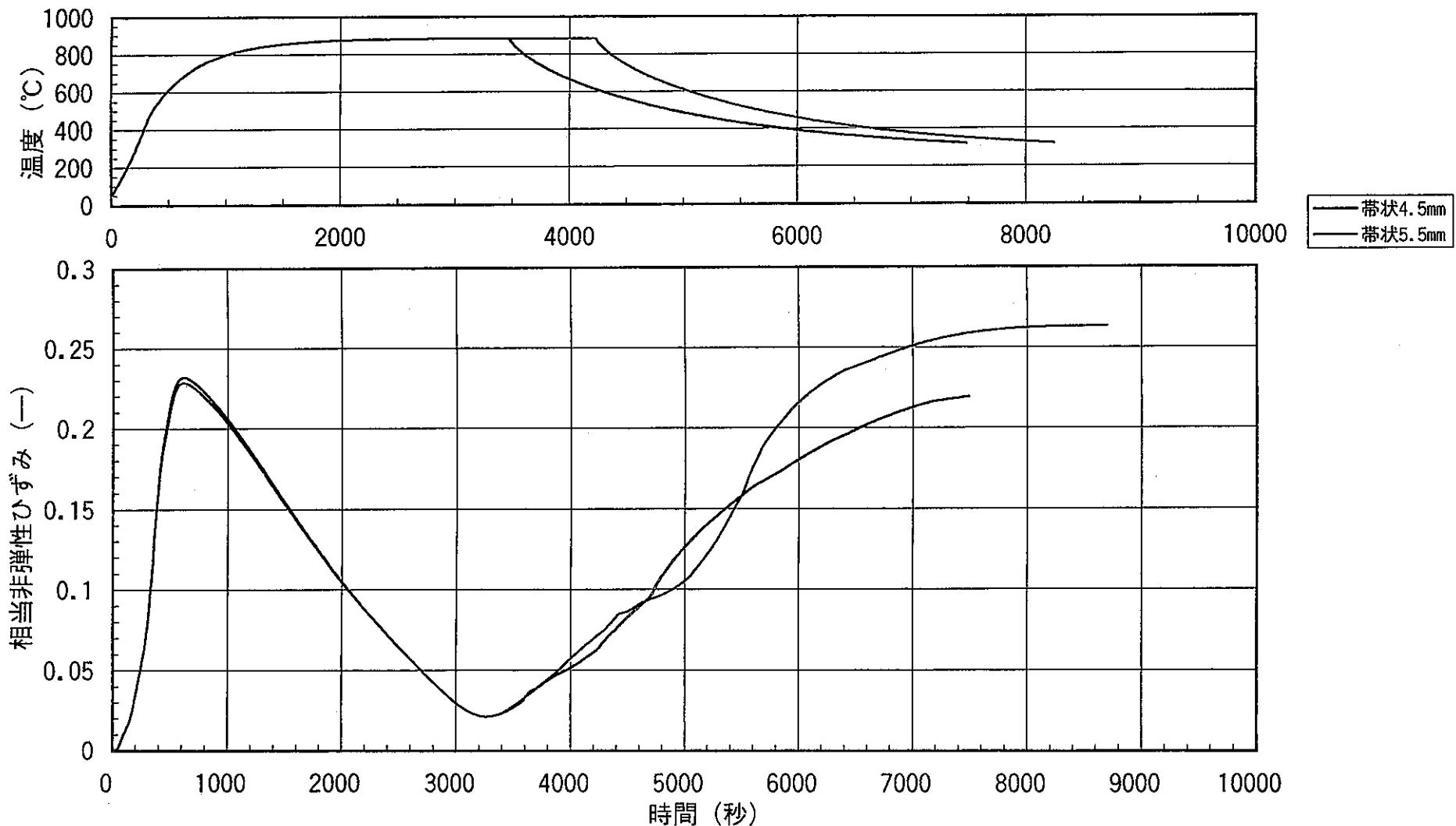


図3.2-13 より深い減肉を仮定した境界帯状減肉モデルによるひずみ履歴解析結果

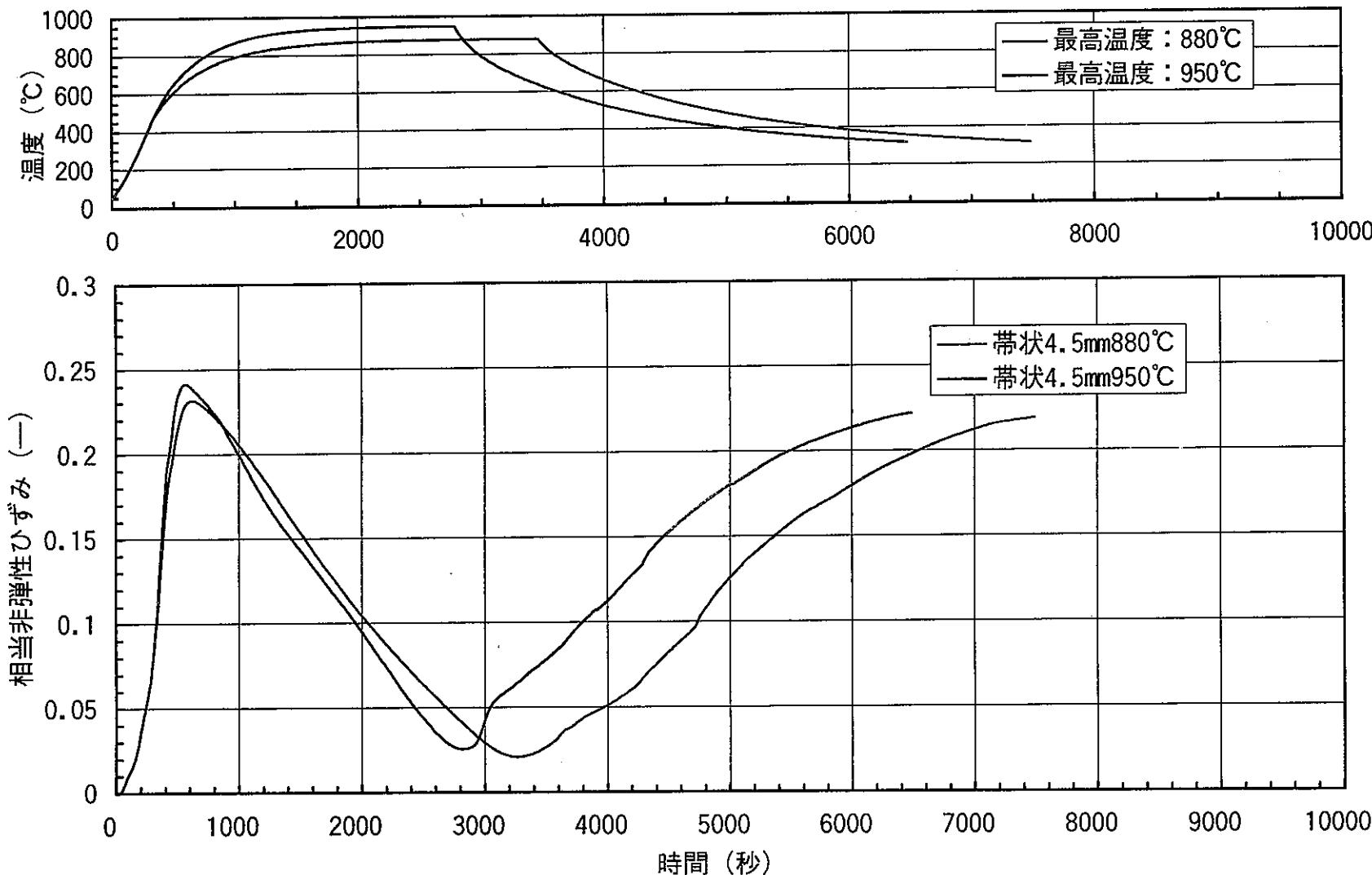
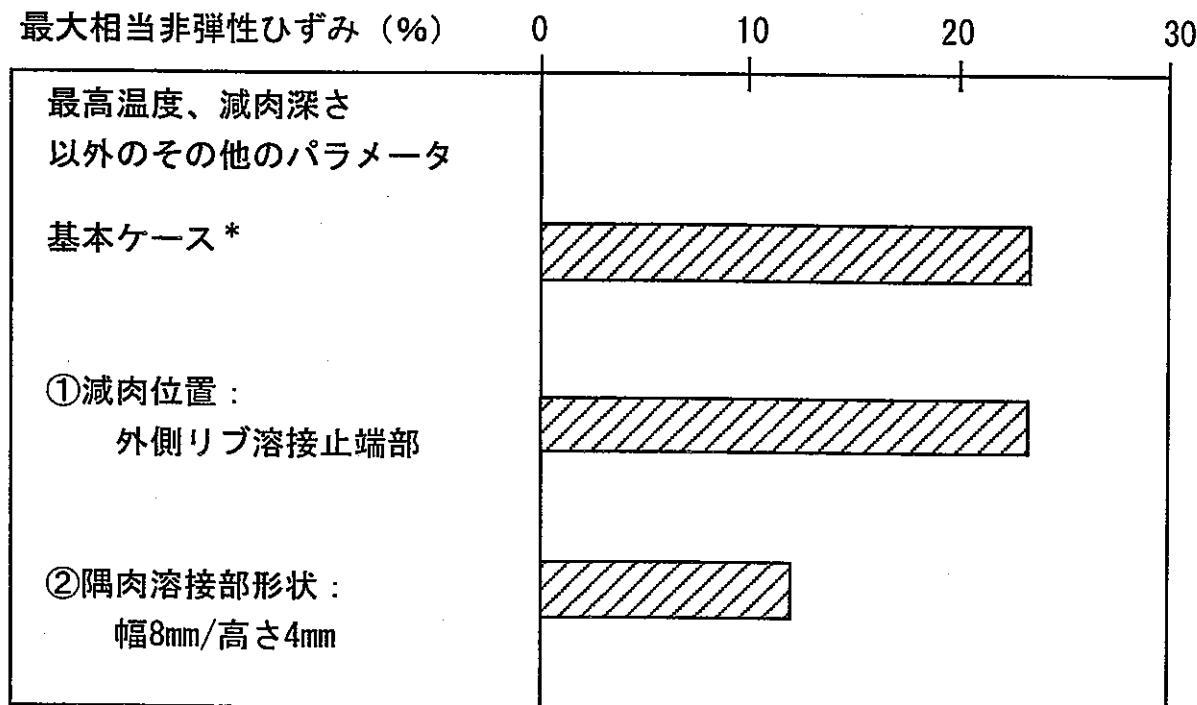


図3.2-14 より厳しい最高温度を仮定した解析によるひずみ履歴

引張場の最大相当非弾性ひずみ



* パラメータサーベイ用基本ケースの仕様

- (1) 最高温度 : 880°C
- (2) 減肉領域 : 境界帶状減肉
- (3) 減肉深さ 4.5mm (最終形状)
- (4) その他のパラメータ
 - ① 減肉位置 : 内側ひずみ防止リブ端部
 - ② 隅肉溶接部形状 : 幅5mm/高さ5mm

図3.2-15 床ライナの非弾性ひずみに及ぼすその他のパラメータの効果

3.3 部分構造模擬試験による健全性確認

3.3.1 試験目的

前節において、ナトリウム漏えいに対するライナの機械的健全性を非弾性解析によって示した。その評価が妥当であることを確認するために、大きな曲げひずみに対するライナの健全性を実験的に確認する。具体的には、ライナの構造不連続部位に溶融塩型腐食による局所的な減肉を重畠して模擬した部分構造模擬試験体に、3.2 節で述べた非弾性解析による最大ひずみの推定値を大幅に上回り、かつ、ひずみの目安値を上回るひずみを与えた場合においても、ライナプレートに貫通性の損傷が発生しないことを確認する。

3.3.2 試験体および試験方法

部分構造模擬試験の試験体形状を図 3.3-1 に示す。ここで、リブを取り付けた面の反対側が実際のライナプレートの上面に対応する。ライナプレートの上面に引張の曲げひずみが負荷される試験体をリブ上付きモデルと呼び、またリブが溶接されている面（下面）に引張の曲げひずみが負荷される試験体をリブ下付きモデルと呼ぶことにする。試験体の材料はもんじゅ 2 次系ライナ材と同一であり、溶融塩型腐食による減肉を模擬して、ひずみ防止リブ端部のライナプレートを V 字型に減肉加工した。減肉形状を図 3.3-2 に示す。

試験装置の詳細を図 3.3-3 に示す。試験体のリブを治具でつかみ、これを押込むことによって試験体に曲げ変形を生じさせる。

試験条件は以下の通りである。

a. 減肉深さ : 0mm(減肉なし)、3mm(残存肉厚 3mm)、4.5mm(残存肉厚 1.5mm)

なお、極端なケースとして、残存肉厚 1mm の試験も実施。

b. 減肉形状 : 解析で想定したものと基本的に同一形状の V 字型とする（図 3.2-7）。

試験体	減肉幅 (リブ側 (mm) / プレート側 (mm))
3mm 減肉モデル	20/25 及び 25/20
4.5mm 減肉モデル	30/37.5 及び 37.5/30

なお、減肉幅の狭いモデルとして、5/20 (3mm 減肉) 及び 7.5/30、30/7.5 (4.5mm 減肉) の試験も実施。

c. 試験温度 : 880°C (一部 860°C、900°C)、300°C、室温

(880°C は ASSCOPS 解析によるライナ最高温度を包絡する温度、300°C 及び室温は昇温途上の健全性確認のため)

- d. ひずみ量：3.2節の非弾性解析において求められたライナの発生ひずみ、及びひずみの目安値を上回るひずみを与える。なお、試験体のひずみは、予め試験体の非弾性解析を行って押込み量と発生ひずみの関係を求めておき、目標のひずみに対応する押込み量を試験条件として設定。
- e. 載荷時間：約10分で所定量まで押し込み、押し込み量を2時間保持した後除荷。
- f. 試験後の確認：液体浸透探傷試験を実施し、割れの有無を確認。なお、割れが発見された場合は、その断面を観察し、貫通性損傷の有無を確認。

3.3.3 試験結果

試験結果を図3.3-4に示す。また、代表的試験体の試験後の外観を写真3.3-1～4に示す。

リブ上付き試験体（ライナプレート上面が引張の曲げひずみとなる）、及びリブ下付き試験体（ライナプレート下面が引張の曲げひずみとなる）とともに、試験条件の範囲内においてライナプレートに貫通性の損傷は認められなかった。さらに、減肉底のひずみが45%程度までの場合、ライナプレートには表面割れの発生を含む何らの損傷も認められなかった。

ただし、一部の厳しい条件では、割れが認められたものがあった。リブ上付きモデル(4.5mm及び5mm減肉)では、ひずみの目安値を大幅に越える試験条件(膜+曲げひずみ=50.8%、54.1%、76.9%)で、引張ひずみ場となるライナプレート上表面に割れが認められた。写真3.3-5に代表的な断面観察結果を示す(減肉4.5mm、膜+曲げ相当ひずみ=50.8%)。なお、何れのケースもライナプレート表面の割れであって、ライナプレートの貫通には至っていないことが確認された。

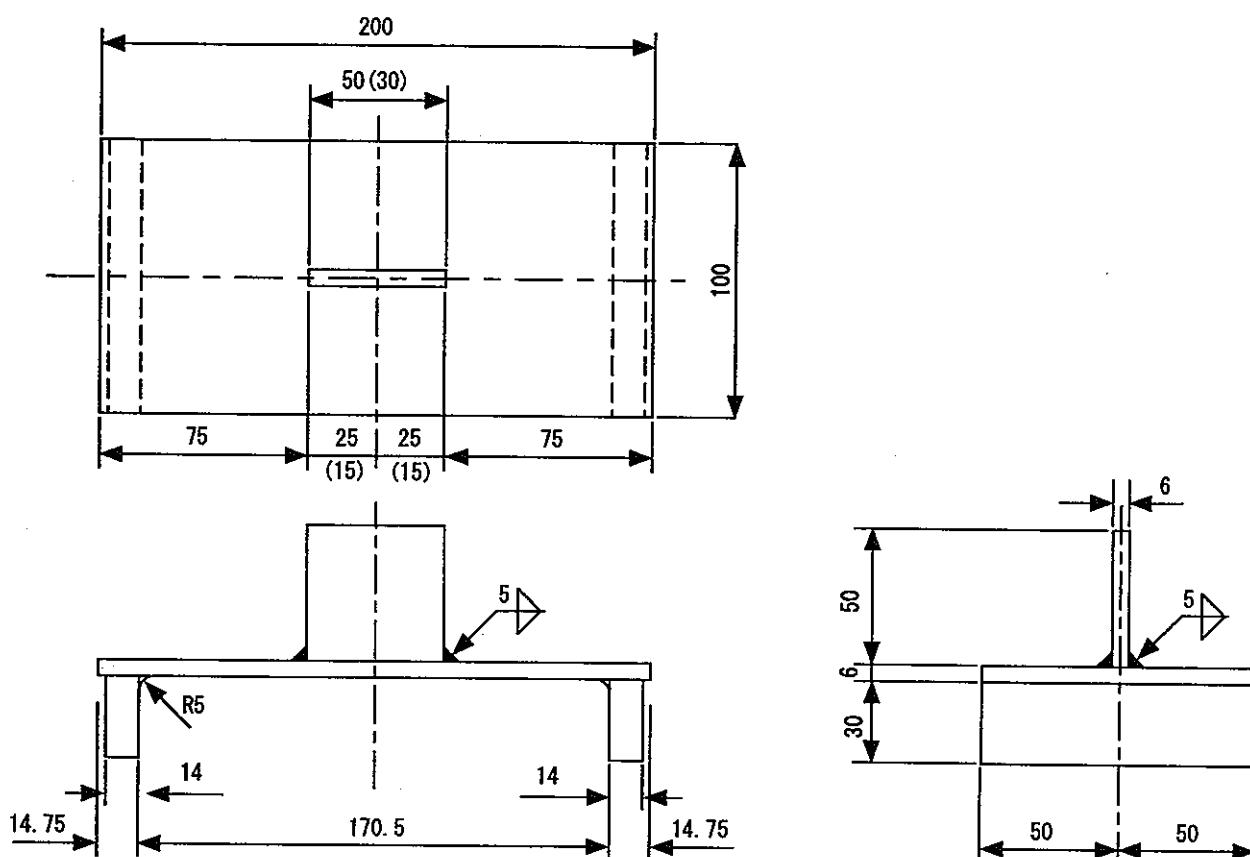
一方、リブ下付き試験体では、ひずみの目安値を上回る条件で、すみ肉溶接部の溶接金属に剥離が発生した場合があった。写真3.3-6(減肉4.5mm、膜+曲げ相当ひずみ=80%以上)に代表的な断面観察結果を示す。熱荷重主体の場においても、ライナ下面に過大な引張ひずみが発生した場合には、ライナプレートとリブを接合している溶接金属の剥離が生じるものと考えられる。

(4) 試験結果のまとめ

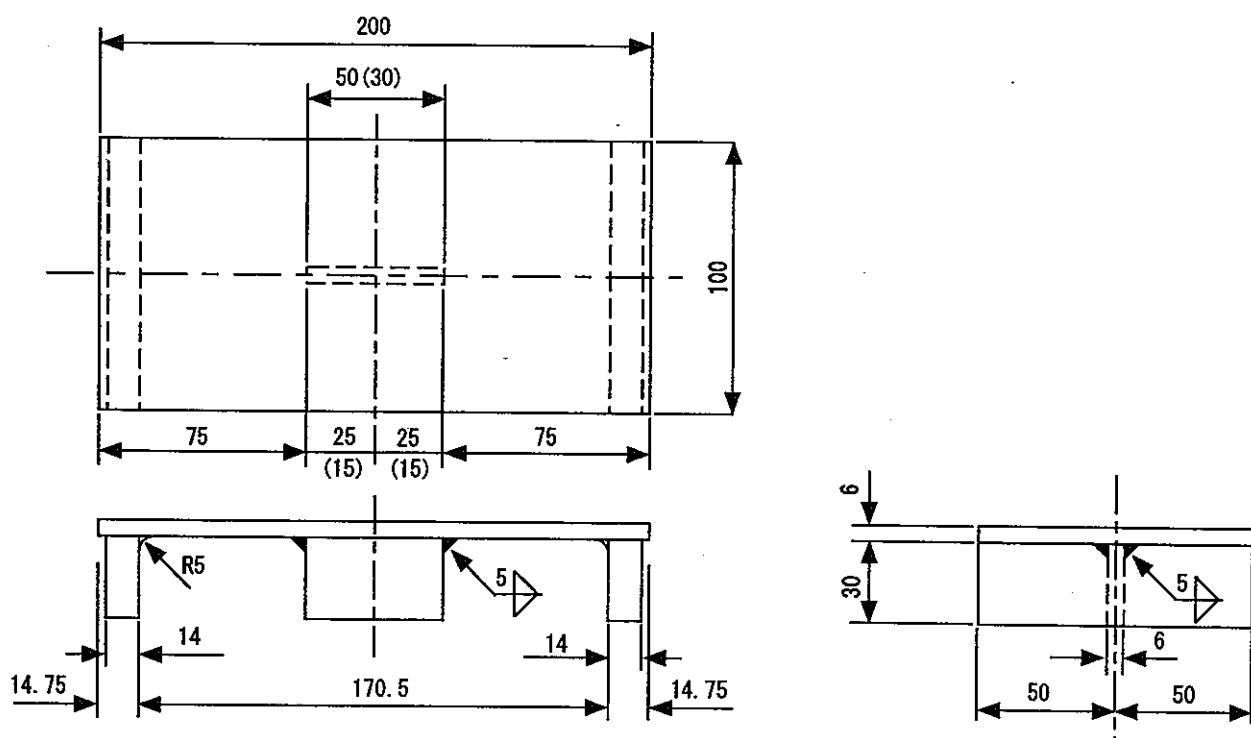
もんじゅ2次系ライナの非弾性解析において、ひずみが集中するひずみ防止リブ端部と溶融塩型腐食による減肉を模擬した試験体を用いた部分構造模擬試験を実施した。

減肉深さ3mm及び4.5mmの試験結果から、3.2節の非弾性解析による最大ひ

みの推定値を大幅に上回り、かつ、ひずみの目安値を上回るひずみを与えた場合でも、ライナプレートに貫通性の損傷は発生せず、機械的健全性が維持されることを確認した。

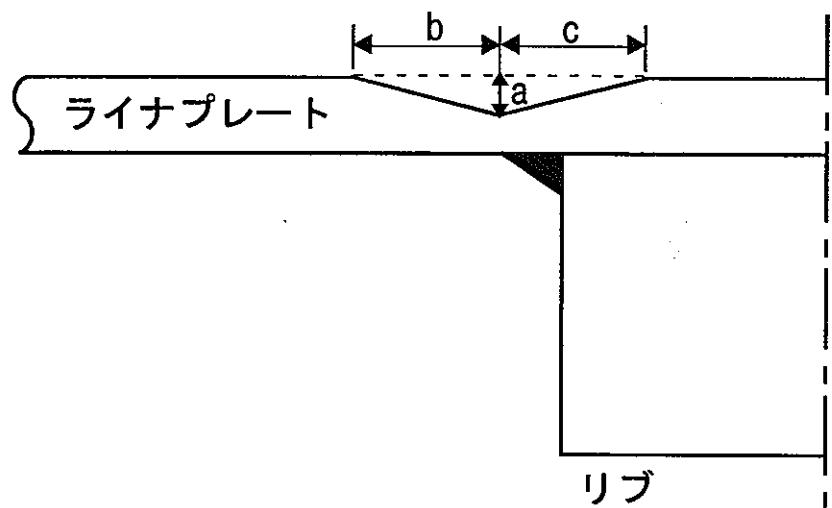


リブ上付きモデル



リブ下付きモデル

図3.3-1 ライナ構造部分模擬試験体



	減肉深さ a (mm)	減肉幅 b (mm)	減肉幅 c (mm)
リブ上付きモデル	0	—	—
	3	25	20
		20	25
		20	5
	4.5	37.5	30
		30	37.5
		7.5	30
		30	7.5
		33.3	41.7
リブ下付きモデル	0	—	—
	4.5	20	25
		30	37.5
		37.5	30
		7.5	30
		30	7.5

図 3.3-2 ライナ部分構造模擬試験体の減肉形状

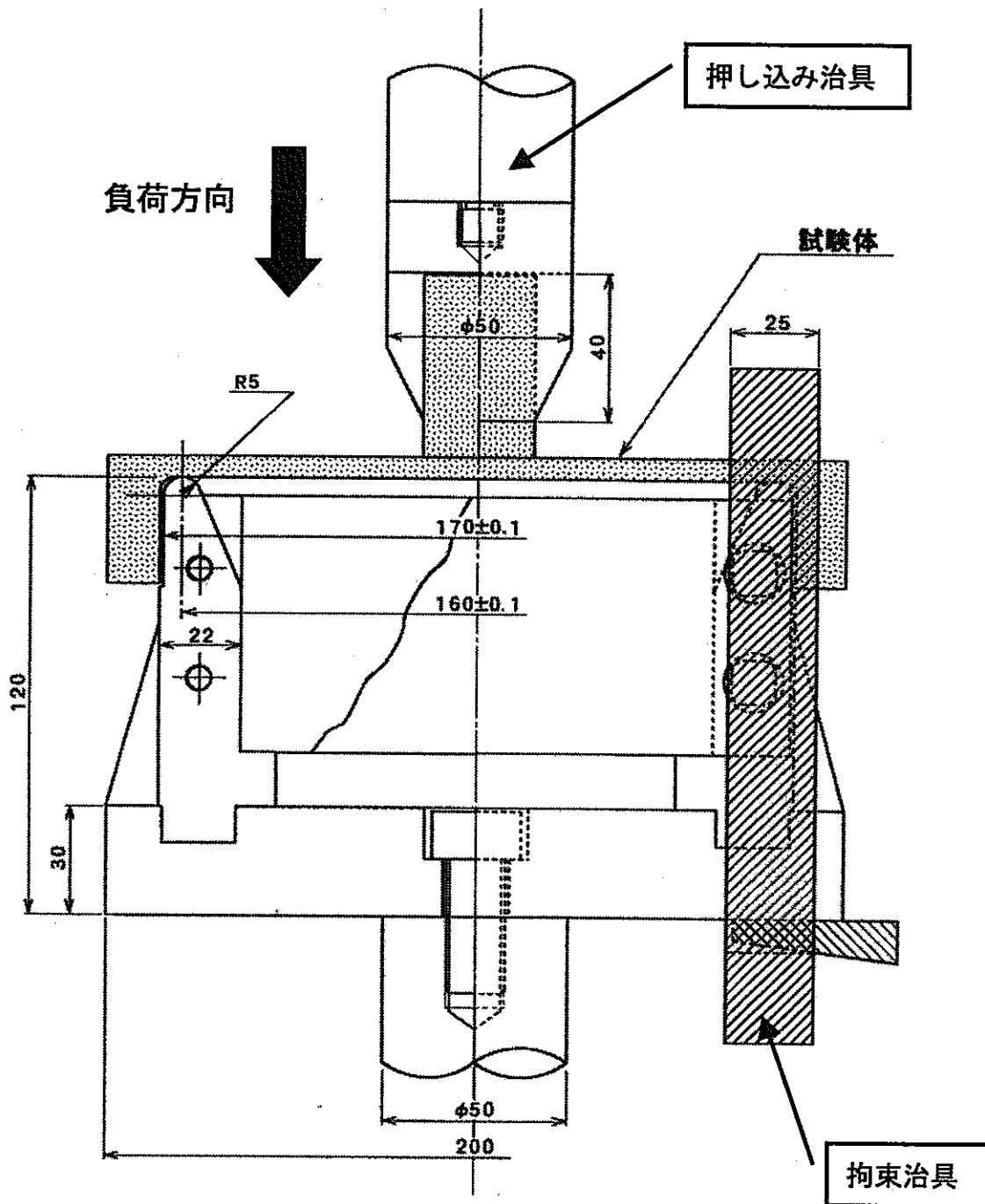


図 3.3-3 試験装置詳細

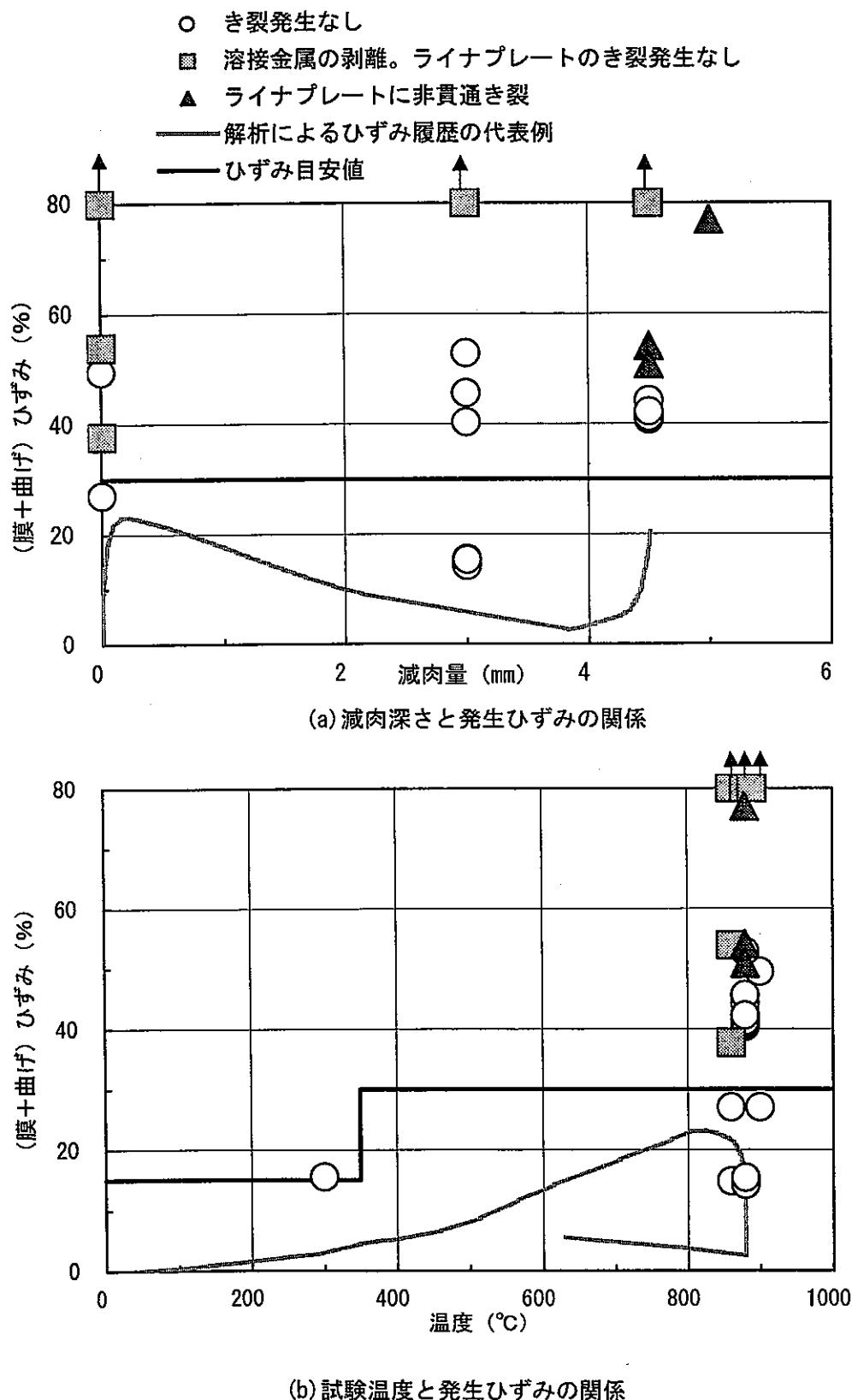
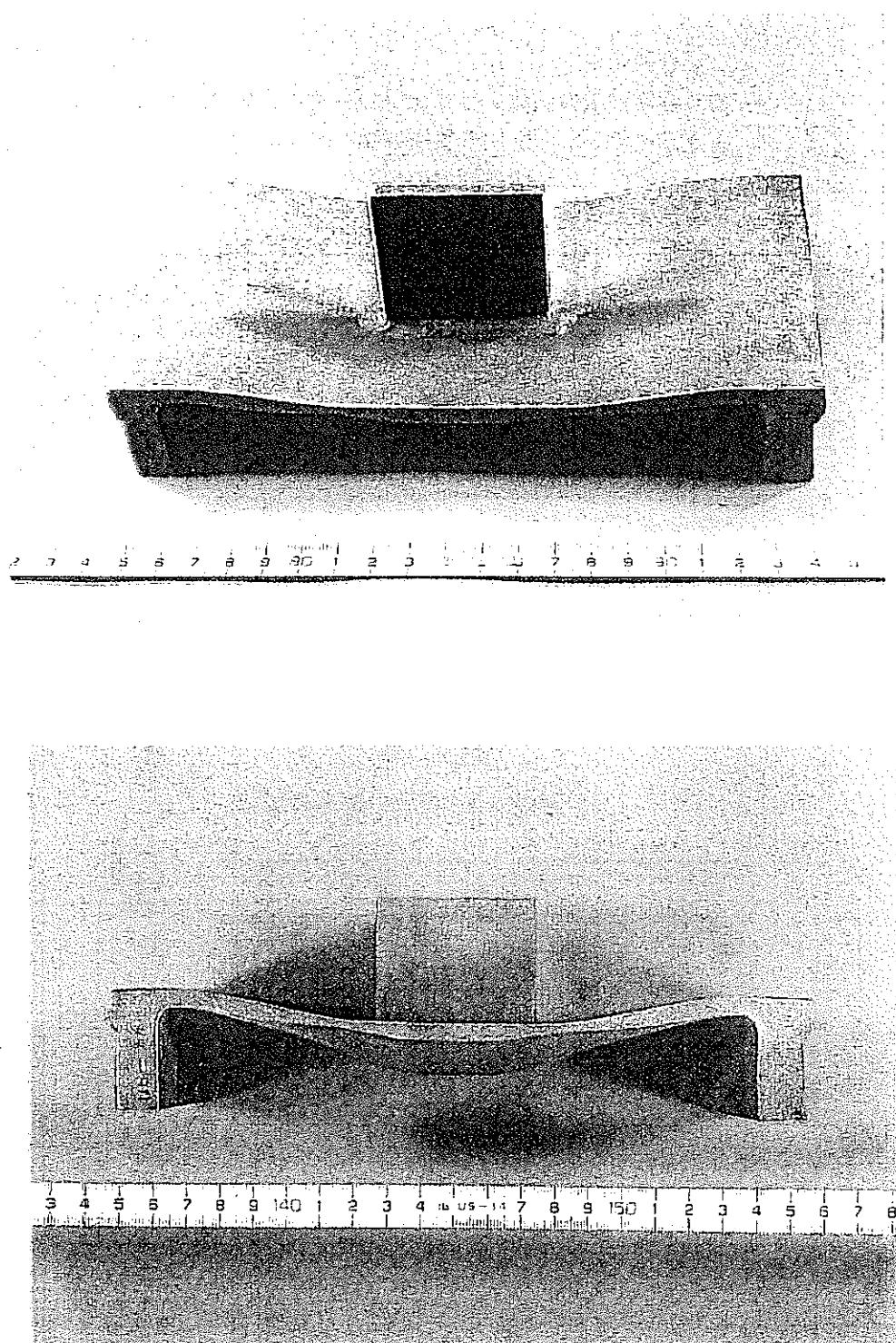
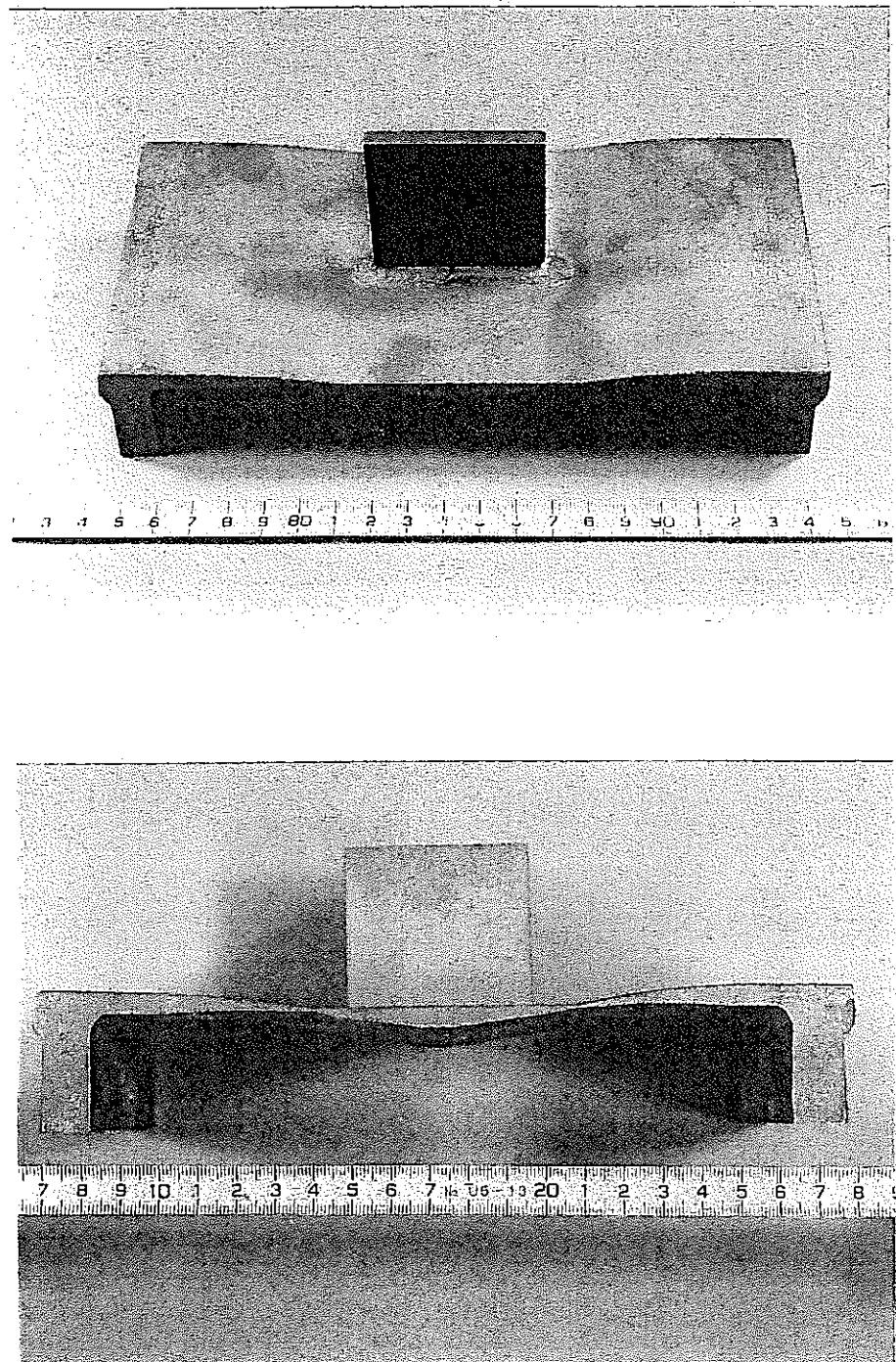


図3.3-4 部分構造模擬試験結果

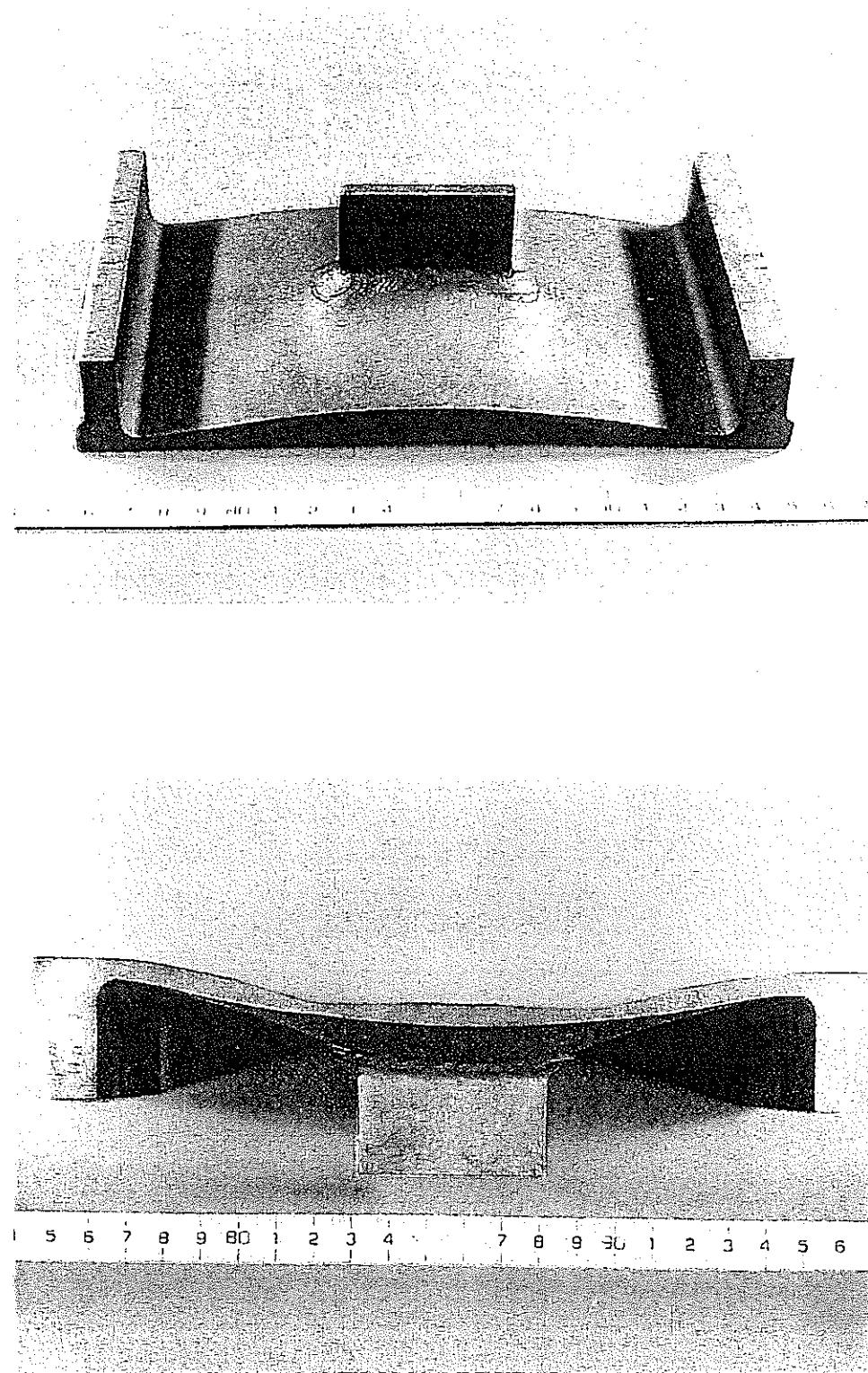


試験条件：温度880°C 膜+曲げひずみ=53% 膜ひずみ=38%

写真3.3-1 リブ上付きモデル(3mm減肉)の試験後外観観察

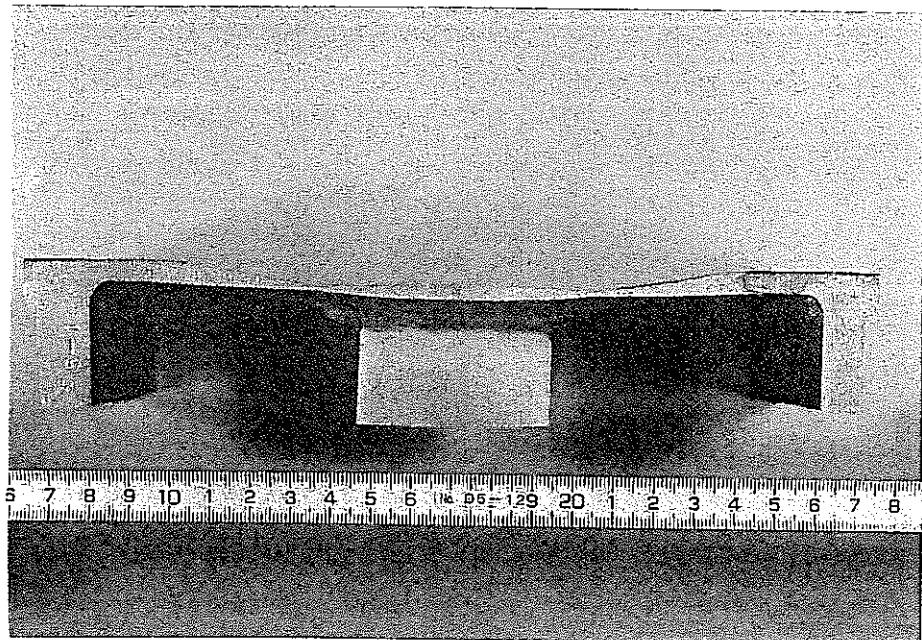
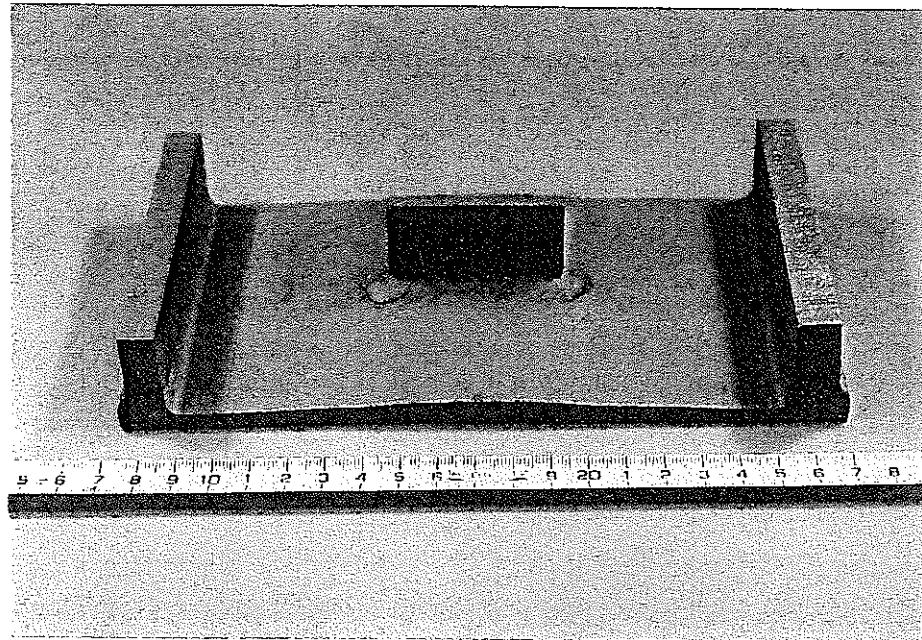


試験条件：温度 880°C 膜十曲げひずみ=21%，膜ひずみ=9.8%
写真 3.3-2 リブ上付きモデル（4.5mm 減肉）の試験後外観観察

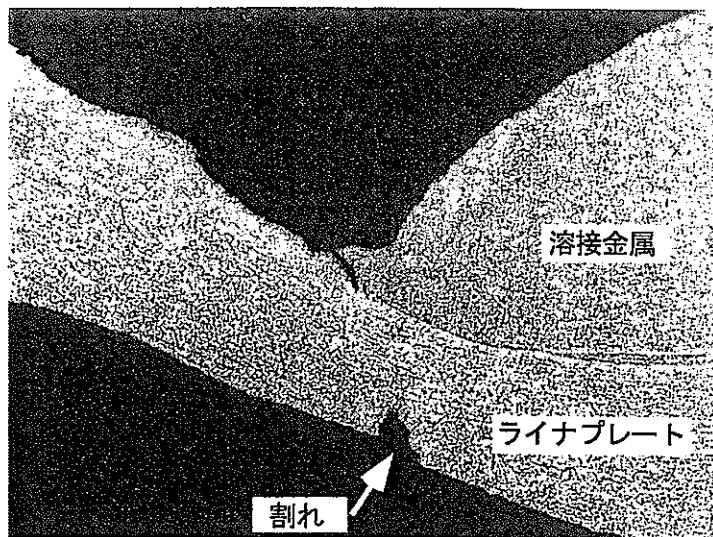
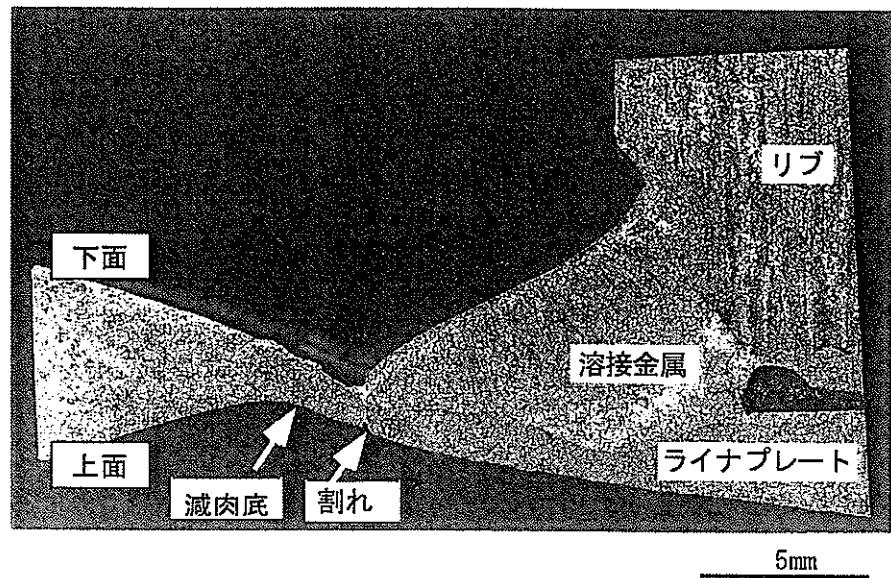


試験条件：温度880°C 膜+曲げひずみ=80%以上 膜ひずみ=80%以上

写真3.3-3 リブ下付きモデル(3mm減肉)の試験後外観觀察



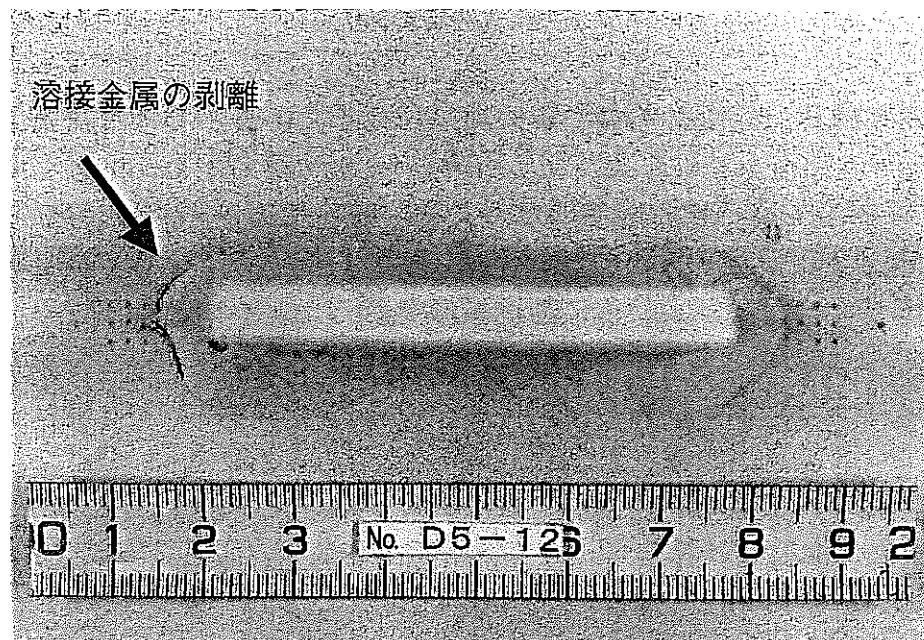
試験条件：温度 880°C 膜十曲げひずみ=80%以上、膜ひずみ=80%以上
写真 3.3-4 リブ下付きモデル（4.5mm 減肉）の試験後外観観察



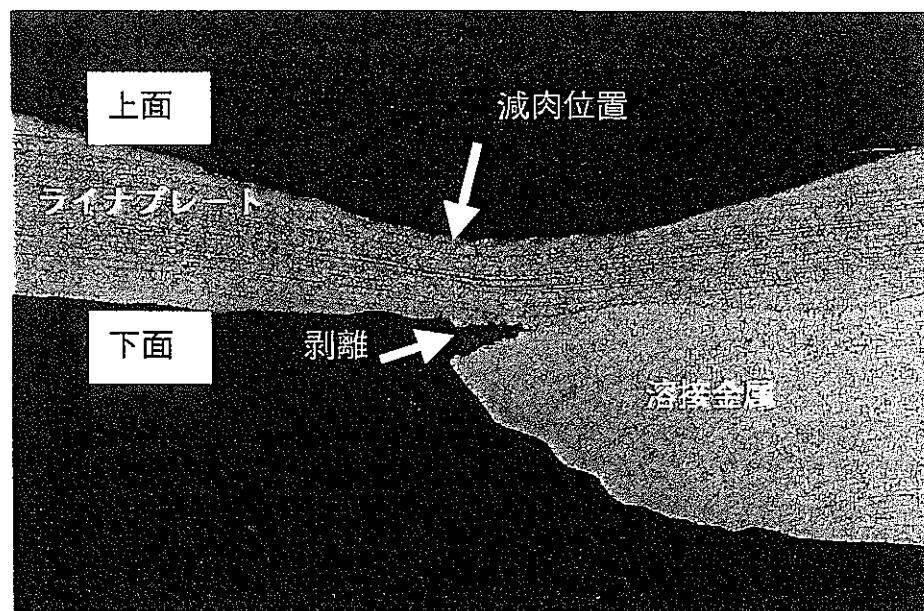
拡大図 ($\times 20$)

試験条件：温度 880°C 膜+曲げひずみ=50.8%，膜ひずみ=26.9%

写真 3.3-5 リブ上付きモデル (4.5mm 減肉) の断面観察



(1) 試験後浸透探傷試験結果



×15

(2) 断面ミクロ組織観察

試験条件：温度 880°C 膜+曲げひずみ=80%以上, 膜ひずみ=80%以上

写真 3.3-6 リブ下付きモデル (4.5mm 減肉) の断面観察

4 結言

「燃焼実験Ⅱ」の床ライナの観察結果を踏まえ、もんじゅ2次系ナトリウム漏えい時の熱荷重条件に対するライナの機械的健全性を、溶融塩型腐食による減肉の発生を保守的に仮定したうえで評価した。

- (1) もんじゅ2次系ライナと同様な型式・構造を有する「燃焼実験Ⅱ」の床ライナについて、燃焼実験後に断面観察を行った。その結果、破損口回りの極薄の箇所に至るまで、き裂等割れ状の損傷や、著しい塑性変形のあとは観察されず、破損口は腐食減肉によって貫通に至ったものと推定される。
- (2) ライナ最高温度 880°Cを中心に、950°Cまで範囲を拡げて、非弾性解析により、ライナに生じる非弾性ひずみを推定した。その結果、最終減肉深さを4.5mmとした場合であっても、ひずみ値は材料固有の延性限度内にあるため、ライナに貫通性損傷が発生することではなく、その機械的健全性が確保されることを確認した。
- (3) ライナ構造を部分的に模擬した試験体に、上記非弾性解析による推定値を大幅に上回るひずみを与えて貫通性損傷は生じなかつたことから、機械的健全性が確保されることを確認した。

5. 謝　　辞

本研究を進めるにあたり、大洗工学センターシステム技術開発部研究主席の岩田耕司氏および大洗工学センター要素技術開発部長の和田雄作氏のご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

付録A 境界帶状減肉モデルにおける減肉断面形状の設定

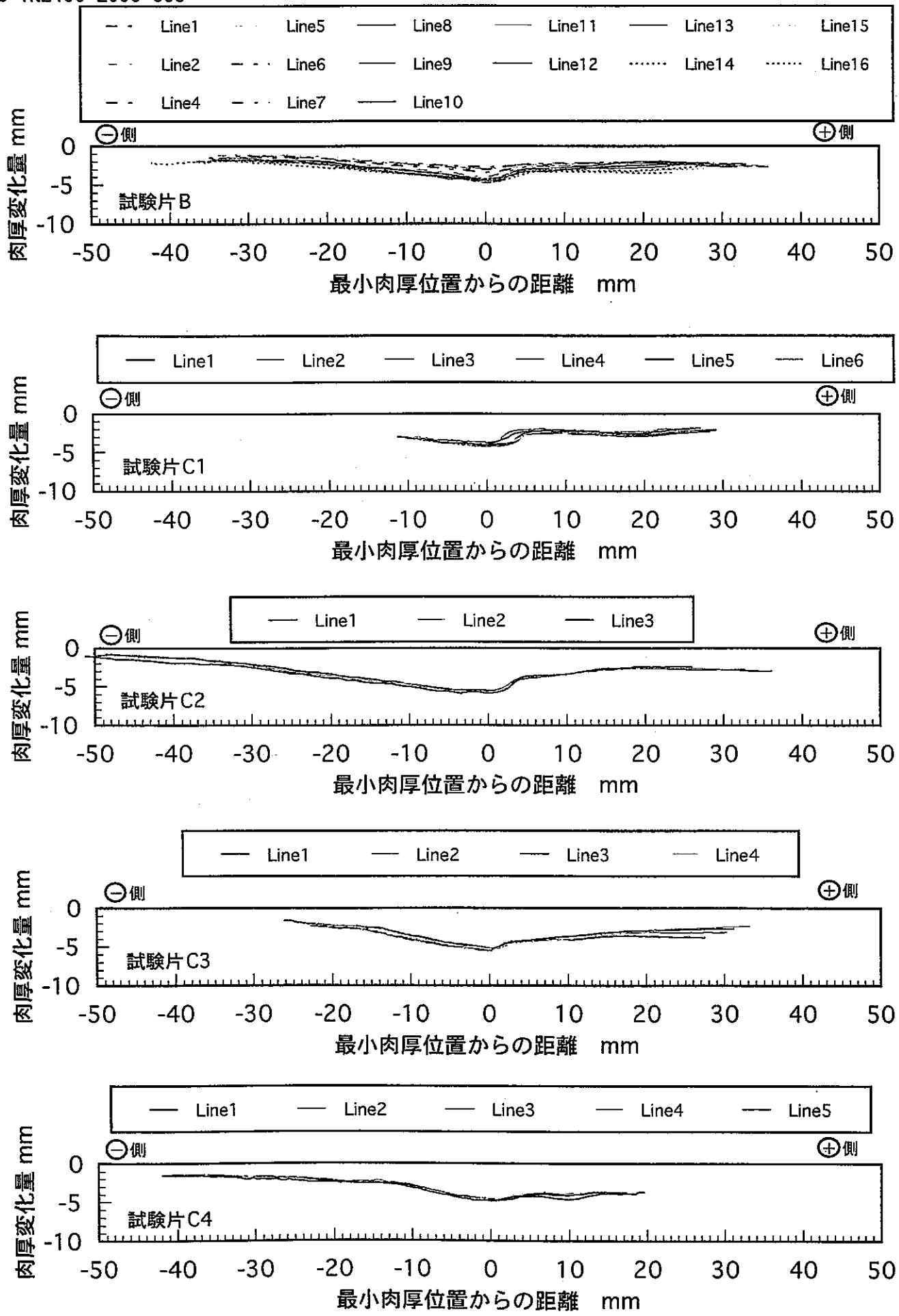
1. 「燃焼実験Ⅱ」ライナの減肉断面形状の測定

「燃焼実験Ⅱ」ライナにおいて観察された最も激しい腐食減肉は、溶融体液面付近で生じたと考えられる。また、破損口近傍に見られた溝状の腐食段差は、溶融体液面レベルで生じたと考えられる。このことから、ライナ健全性評価に適用する減肉断面形状モデルは、この溶融体液面レベルの減肉断面形状に基づいて設定することとした。材料分析のために切り出し後洗浄された「燃焼実験Ⅱ」ライナを用い、破損口近傍のライナ断面形状を、試験片B、C1、C2、C3、C4について、最急勾配方向（最も厳しい傾斜角となる方向）に測定した。測定に用いたライナの外観と測定位置を図3.1-2に示す。断面形状の測定は合計35箇所について行った。測定の向きは、溶融体が滞留していたと考えられる側をマイナス側、ライナが盛り上がっていた側をプラス側とした。付着物等による突起が減肉底付近に見られた箇所が2点あったが、これらは検討対象から除外した。測定箇所のライナには面外変形が認められるため、減肉断面形状は原肉厚6mmからの肉厚変化量として表した。その結果を図A-1に示す。横軸は、減肉断面形状を重ねるため最小肉厚位置を水平方向の原点とし、上記のようにプラス側及びマイナス側が一致するよう表示した。

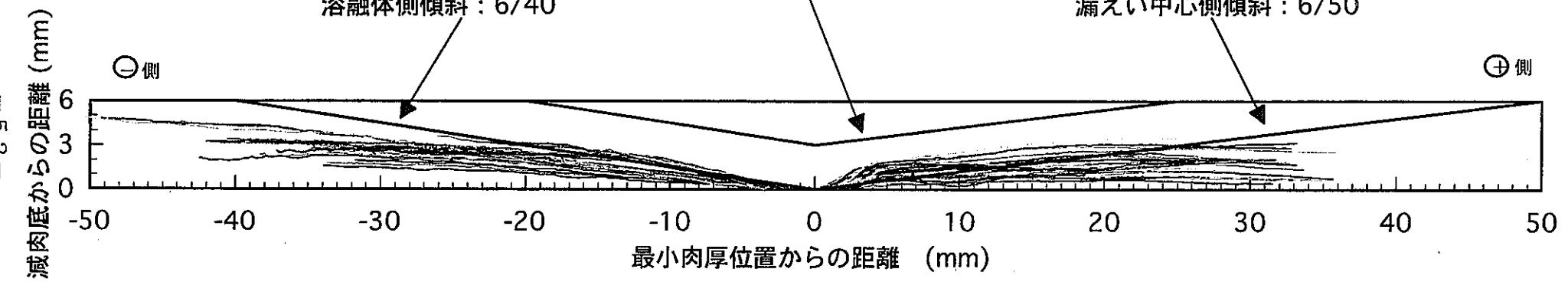
2. 減肉断面形状モデルの設定

減肉断面形状モデルを検討するため、各測定点の減肉断面形状曲線の減肉底の表面位置をそろえてオーバープロットした。これを図A-2に示す。減肉モデルはV字型とし、その傾斜は溶融体側（マイナス側）については減肉底近傍の傾斜から $6/40$ と設定できる。一方、漏えい中心側（プラス側）については、減肉断面に認められる段差を含めた一定範囲についての剛性変化を模擬し、傾斜を $6/50$ に設定するものとした。これらについて、減肉底近傍のひずみ集中への適用性を検討した。減肉底のひずみ集中の解析方法を図A-3に示す。ここでは、3.2節において用いられたライナ健全性評価解析モデルに従い、もっとも高いひずみが生じるひずみ防止リブ溶接止端部を対象に、減肉断面形状モデルと、「燃焼実験Ⅱ」ライナの減肉断面形状（33ケース）を当てはめ、最小肉厚を1.5mmに固定し、曲げ荷重を与えた場合に生じる減肉底の相当塑性ひずみを非弾性解析により求めた。その結果を図A-4に示す。設定した減肉断面形状モデルは、「燃焼実験Ⅱ」ライナの減肉断面形状を当てはめた場合よりも大きいひずみを与えることがわかった。

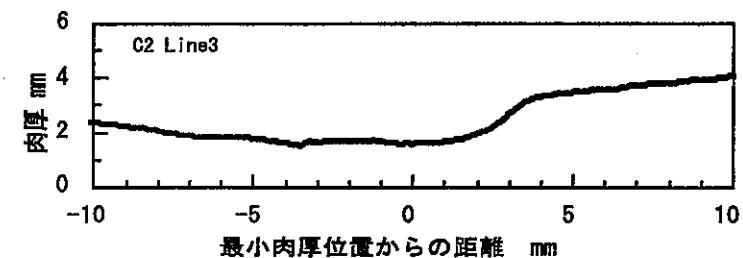
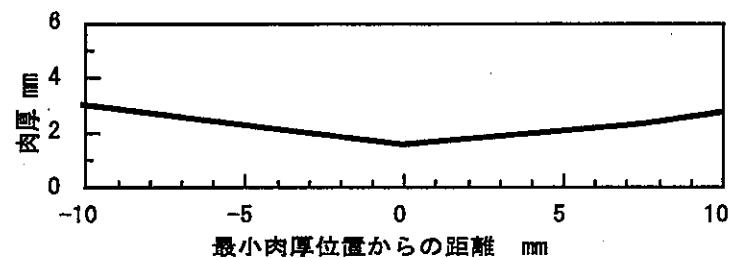
以上の検討結果から、図3.2-7のモデルを決定した。



図A-1 「燃焼実験Ⅱ」 ライナの減肉断面形状測定結果
- 5 1 -



図A-2 減肉底を基準とした「燃焼実験Ⅱ」ライナ減肉断面形状を用いた減肉モデルの設定



減肉モデル

「燃焼実験Ⅱ」ライナの減肉形状
(33ケース)最小肉厚1.5mmとおいて、減肉モデルと減肉
形状(計34ケース)を当てはめる

溶融体側

漏えい中心側

減肉形状

曲げ荷重
負荷点

固定端

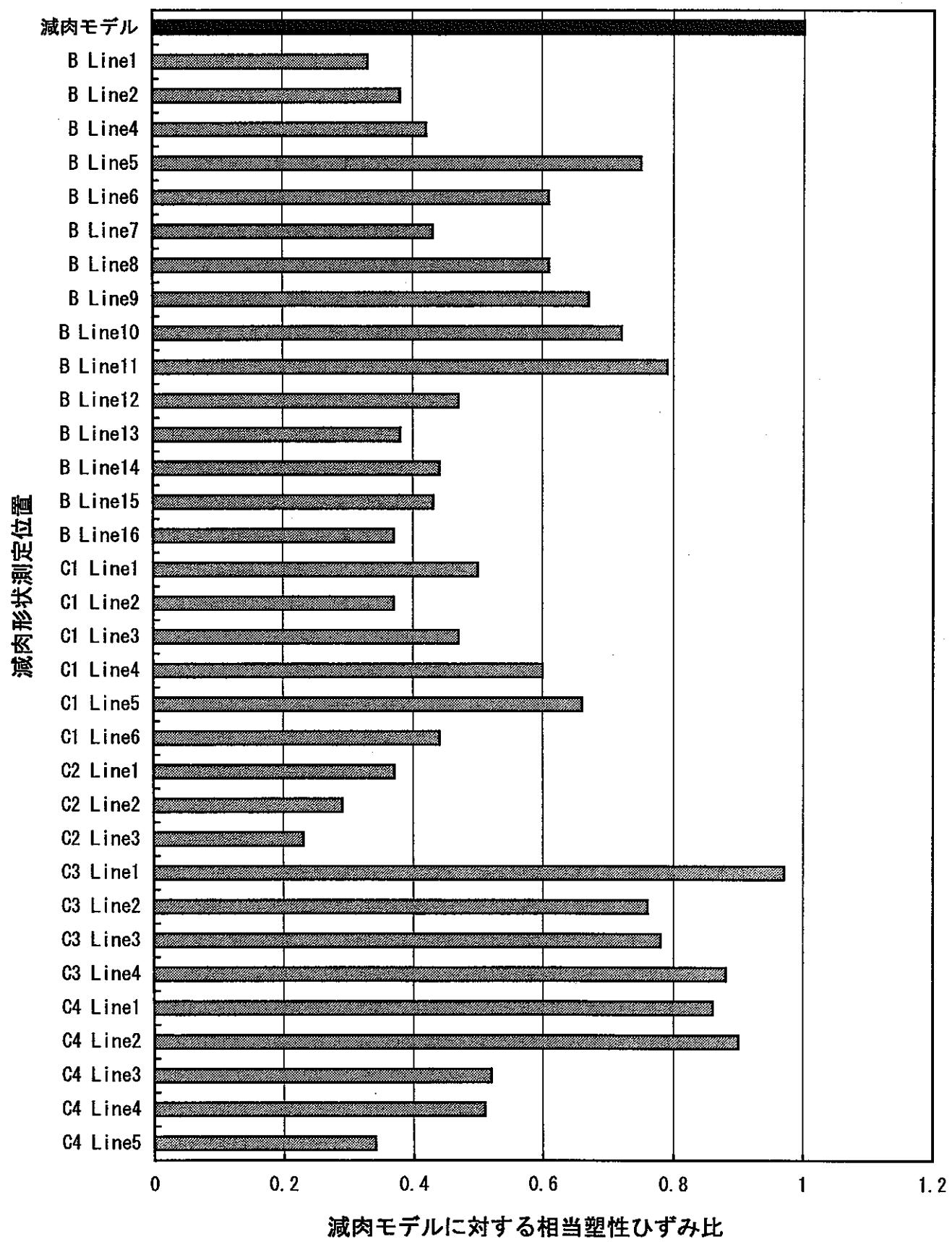
ライナ

隔壁溶接部

ひずみ防止リブ

減肉底(最小肉厚位置)での相当塑性ひずみ量
を求め、減肉モデルの妥当性を確認する

図A-3 減肉底のひずみ量の解析方法



図A-4 「燃焼実験Ⅱ」減肉断面形状と減肉モデルとの相当塑性ひずみの比

付録B 減肉を伴う非弾性解析方法の妥当性

減肉進行を伴う非弾性解析は、シェル要素を用いた有限要素法解析である。この解析方法には次のような減肉過程の模擬方法の特徴及びシェル解析の制約がある。

①減肉の模擬方法の特徴

減肉の模擬方法は図B-1に模式的に示すように、与えられた温度履歴から定まる減肉速度に従い、ある積分点まで減肉域に入った時、減肉により新たに生じた自由表面を力学的に創出するために、当該積分点に生じていた応力を解放（緩和）してゼロにするような擬クリープひずみを与える。この過程で、減肉対象以外の部分は平衡条件及び適合条件を満足するように応力ひずみが再配分される。同時に、減肉域の全積分点領域は応力増分が発生しないように当該領域の縦弾性係数を十分小さくする。

②シェル解析の制約

実際の減肉はプレート上面にのみ生じるが、解析ではシェル要素を用いているため、減肉はプレートの上面及び下面から中立面に対し対称に進行するようモデル化される。（制約1）

また、シェル要素では肉厚方向のひずみを線形分布として定式化するため、ライナと、それに溶接されたリブの取付部近傍のような局所構造不連続部において生じるピークひずみを取り扱うには限界がある。（制約2）

これらの解析方法の特徴及び制約について、解析方法の妥当性を確認するため、以下のような検討を行った。

- B. 1 減肉進行解析の妥当性（減肉の模擬方法の特徴に対応）
- B. 2 両面減肉と片面減肉の関係（シェル解析の制約1に対応）
- B. 3 局所ひずみ集中部の解析的取扱い（シェル解析の制約2に対応）

また、減肉を伴う非弾性解析においては、材料特性として等方硬化モデルを用いているが、解析条件のライナ温度履歴に起因して、途中段階で応力の符号が反転することから、次のような検討も行うこととした。

B. 4 等方硬化と移動硬化

それぞれの検討内容及び検討結果を以下に述べる。

B. 1 減肉進行解析の妥当性

積分点の応力を解放する上述の方法（シェル要素使用）の他に、図B-1に示す減肉した領域の要素を除去する模擬方法（ソリッド要素使用^{*1}）の2通りの減

*1 この解析のみ、汎用有限要素法コード「ABAQUS」を用いている。

肉模擬方法を用いて、減肉進行を伴う平板4点曲げ解析を実施し、両者を比較して積分点の応力を解放する方法の妥当性を確認することとした。なお、ここでは、減肉模擬方法の妥当性確認の目的に沿って、ソリッド解析においても両面から減肉が生じるようモデル化した。平板4点曲げモデルを図B-2に示す。また、解析条件は以下のとおりである。

(ケース1) 減肉中の負荷の増加がない場合

温度 : 880°C

負荷 : 荷重負荷点の強制変位を5mm一定とする

減肉量 : 3mm

(ケース2) 減肉中に負荷の増加がある場合

温度 : 880°C

負荷 : 荷重負荷点の強制変位を減肉前に5mmとし、減肉中にさらに3mmの変位を加える

減肉量 : 3mm

表B-1(ケース1)及び表B-2(ケース2)に上下表面の全ひずみ解析結果の比較を示す。いずれのケースにおいても、減肉模擬方法によらず、上面及び下面のひずみは良好な一致を見た。また、図B-3に長手方向全ひずみ分布解析結果を、図B-4に肉厚方向全ひずみ分布解析結果をそれぞれ比較して示したとおり、減肉模擬方法によらず解析結果はよく一致している。このことから、積分点の応力を解放する方法は減肉進行の模擬方法として妥当と考えられる。

表B-1 減肉の取扱いの違いによる上下表面の
全ひずみ解析結果の比較(ケース1)

強制変位量 減肉量		ソリッド解析(%) (両面減肉)	シェル解析(%) (両面減肉)
5mm	上面	0.52	0.52
	下面	-0.52	-0.52
3mm	上面	0.26	0.26
	下面	-0.26	-0.26

表 B-2 減肉の取扱いによる上下表面の
全ひずみ解析結果の比較（ケース 2）

強制変位量 減肉量		ソリッド解析(%) (両面減肉)	シェル解析(%) (両面減肉)
5mm	上面	0.52	0.52
	下面	-0.52	-0.52
8mm	上面	0.42	0.42
	下面	-0.42	-0.42

B. 2 両面減肉と片面減肉の関係

B. 2.1 減肉中に負荷される場合

片面減肉と両面減肉それぞれについて、純曲げの場合、減肉開始までに生じたひずみ（表面で ϵ_0 とする）分布と、減肉中の負荷によって新たに生じるひずみ（単位負荷当たり、表面で $\Delta\epsilon_L(h)$ とする）分布を図 B-5 及び図 B-6 に示す。

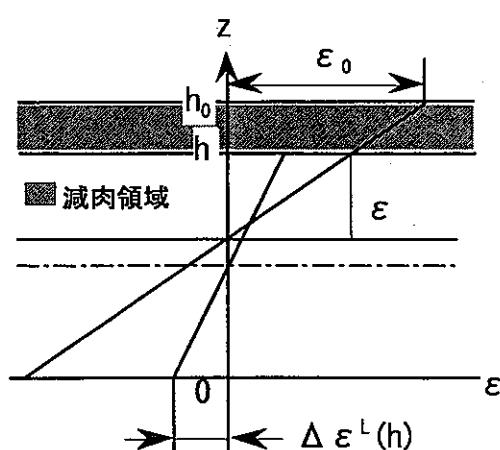


図 B-5 片面減肉解析に
おけるひずみ分布

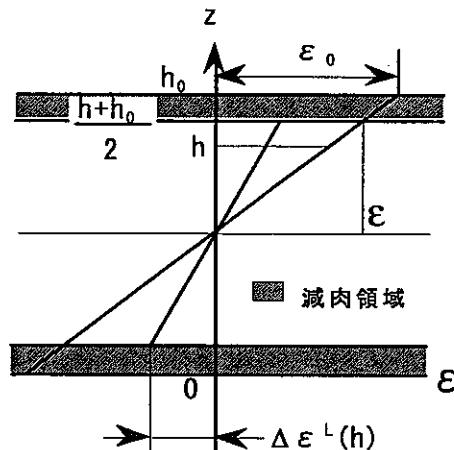


図 B-6 両面減肉解析に
おけるひずみ分布

これらのひずみ分布を重ね合せ、片面減肉解析のひずみ分布 $\epsilon_1(z)$ 及び両面減肉解析のひずみ分布 $\epsilon_2(z)$ をそれぞれ求めると、

$$\epsilon_1(z) = \frac{2\epsilon_0}{h_0} \left(z - \frac{h_0}{2} \right) + \int_h^{h_0} \frac{2\Delta\epsilon^L(h)}{h} \left(z - \frac{h}{2} \right) \frac{\partial L}{\partial h} dh + \Delta\epsilon_r(z) \quad ①$$

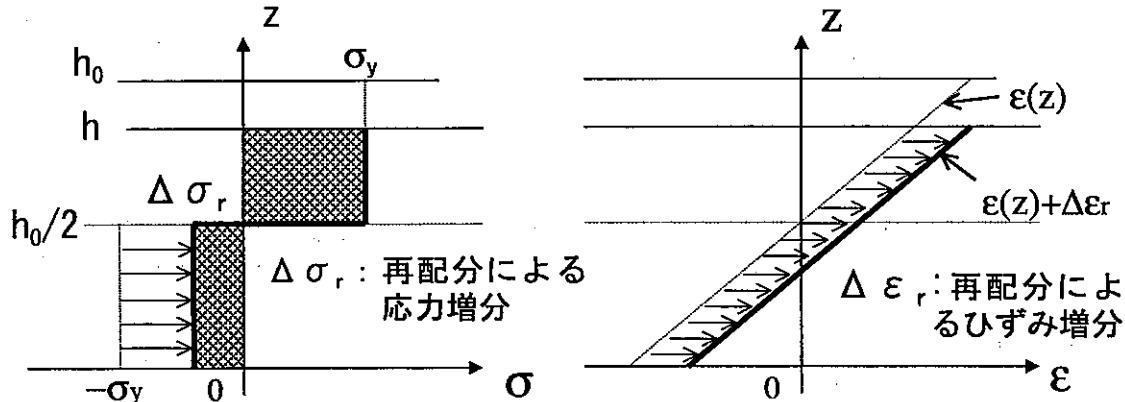
$$\epsilon_2(z) = \frac{2\epsilon_0}{h_0} \left(z - \frac{h_0}{2} \right) + \int_h^{h_0} \frac{2\Delta\epsilon^L(h)}{h} \left(z - \frac{h_0}{2} \right) \frac{\partial L}{\partial h} dh \quad ②$$

ここに、Lは減肉中に与えられる負荷を表わす。

また、片面減肉解析の場合は、減肉前の応力分布の中立軸に対して、減肉の進行に伴い応力分布が対称でなくなるため、応力に対する平衡条件（純曲げを想定しているため、膜応力=0）を満たすように応力分布を再配分させる必要がある。応力再配分により、再配分されるひずみを $\Delta\epsilon_r(z)$ とする。

ここで、より厳密には、減肉中に加えられた負荷（モーメント）に釣り合うようさらなる応力の増分があるはずで、従ってそれに伴うひずみ増分も生じることになるが、簡単のため、ここではこの応力やひずみの増分は考えないこととする。

図B-7及び図B-8に示すように、肉厚 h_0 から h まで減肉した後に再配分された応力分布を $\sigma(z) + \Delta\sigma_r$ （ $\Delta\sigma_r$ は再配分による応力）とし、応力再配分によって生じるひずみ増分を $\Delta\epsilon_r$ とする。発生ひずみが降伏ひずみを十分に超える場合を想定し、



図B-7 減肉に伴う応力再配分

図B-8 減肉に伴うひずみの再配分

全断面降伏状態^{注)}を考える。減肉前のひずみ分布を $\epsilon(z) = \frac{2\epsilon_0}{h_0} \left(z - \frac{h_0}{2} \right)$ とおけば、再配分後に膜応力=0の条件より、図B-7の2つの■部の面積を等しいと置くと、

注) 全断面降伏を仮定しない場合には、減肉後の上面で再配分後の応力が降伏応力に達していないとすると、⑥式に相当する式は $\Delta\epsilon_{us} = \epsilon_0 \left\{ \left(\frac{h}{h_0} - 1 \right) + \left(\frac{h_0}{h} - 1 \right) - \left(\frac{h_0}{2h} \right)^2 \right\} + \left(\frac{h_0}{2h} \right) \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) - \frac{1}{4\epsilon_0} \left(\frac{\sigma_y}{E} \right)^2$ となる。初期の肉厚の半分まで減肉した条件下比較してみると、上式の値は $\Delta\epsilon_{us} = -\frac{1}{2}\epsilon_0 + \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) - \frac{1}{4\epsilon_0} \left(\frac{\sigma_y}{E} \right)^2$ となるが、 ϵ_0 が0.2%程度以上であれば、第3項の大きさは第1項、第2項に比べてひと桁以上小さい。一方、同じ条件で⑥式を用いると $\Delta\epsilon_{us} = -\frac{1}{2}\epsilon_0 + \left(\frac{\sigma_y}{E} \right)$ となり、全断面降伏を仮定する場合、しない場合ともにほぼ等しい推定値を与えることがわかる。

$$\Delta\sigma_r = 2 \left(1 - \frac{h}{h_0} \right) \sigma_y \quad (3)$$

従って、再配分によるひずみ増分 $\Delta\varepsilon_r$ は

$$\Delta\varepsilon_r = 2 \left(1 - \frac{h}{h_0} \right) \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) \quad (4)$$

(4)式を(1)式に代入すると、片面減肉解析のひずみ分布は

$$\varepsilon_1(z) = \frac{2\varepsilon_0}{h_0} \left(z - \frac{h_0}{2} \right) + 2 \left(1 - \frac{h}{h_0} \right) \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) + \int_h^{h_0} \frac{2\Delta\varepsilon^L(h)}{h} \left(z - \frac{h}{2} \right) \frac{\partial L}{\partial h} dh \quad (5)$$

のようになる。

(5)式及び(2)式から、片面減肉解析及び両面減肉解析の上面におけるひずみをそれぞれ求めると、

$$\varepsilon_1(z=h) = \frac{2\varepsilon_0}{h_0} \left(h - \frac{h_0}{2} \right) + 2 \left(1 - \frac{h}{h_0} \right) \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) + \int_h^{h_0} \Delta\varepsilon^L(h) \frac{\partial L}{\partial h} dh \quad (6)$$

$$\varepsilon_2\left(z=\frac{h+h_0}{2}\right) = \frac{2\varepsilon_0}{h_0} \left(\frac{h}{2} \right) + \int_h^{h_0} \Delta\varepsilon^L(h) \frac{\partial L}{\partial h} dh \quad (7)$$

となり、両者の差を $\Delta\varepsilon_{us}$ とすると、

$$\Delta\varepsilon_{us} = \varepsilon_0 \left(\frac{h}{h_0} - 1 \right) + 2 \left(1 - \frac{h}{h_0} \right) \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) \quad (8)$$

従って、両面減肉解析で得られた上面ひずみに、(8)式で得られた $\Delta\varepsilon_{us}$ を加える補正を行えば、片面減肉解析の上面ひずみが得られる。また、同様に下面のひずみ差を $\Delta\varepsilon_{bs}$ を求めると、全く(8)式と同じ値となる。

これを検証するために、平板4点曲げモデルによる有限要素法弾塑性解析を片面減肉条件及び両面減肉条件で実施し、両面減肉解析結果から(8)式を用いて求めた片面減肉条件に対する推定値と片面減肉解析結果を比較することとした。

解析条件はB.1の検討と同じである。

図B-9及び図B-10に示すように、片面減肉（ソリッド要素）解析と両面減肉（シェル要素）解析で得られた反力、及び鉛直変位は解析方法によらずよく一致しており、解析結果が有効であることがわかる。

上下表面における全ひずみの推定値と解析値の比較を表B-3（ケース1）及び表B-4（ケース2）に示す。また、図B-11及び図B-12にそれぞれ長手方向全ひずみ分布及び肉厚方向全ひずみ分布の解析結果を両面減肉及び片面減肉条件で比較して示す。

表 B-3 両面減肉解析結果から求めた片面減肉条件に対する
推定値と解析値の比較（ケース 1）

強制変位量 減肉量		両面減肉解析 解析値(%)	⑧式を用いた 片面減肉条件でのひ ずみの推定値(%)	片面減肉解析 解析値(%)
5mm	上面	0.52	0.52	0.52
0mm	下面	-0.52	-0.52	-0.53
5mm	上面	0.26	0.06	0.07
3mm	下面	-0.26	-0.45	-0.46

表 B-4 両面減肉解析結果から求めた片面減肉条件に対する
推定値と解析値の比較（ケース 2）

強制変位量 減肉量		両面減肉解析 解析(%)	⑧式を用いた 片面減肉条件でのひ ずみの推定値(%)	片面減肉解析 解析(%)
5mm	上面	0.52	0.52	0.52
0mm	下面	-0.52	-0.52	-0.53
8mm	上面	0.42	0.22	0.23
3mm	下面	-0.42	-0.61	-0.62

⑧式によるひずみ差を求める際、 σ_y 及び E の値は材料試験結果に基づき設定した 880°Cにおける $\sigma_y=3.7\text{kgf/mm}^2$ 、 $E=5300\text{ kgf/mm}^2$ を用いて計算した。

ケース 1、ケース 2 とともに、両面減肉解析結果から⑧式を用いて求めた片面減肉条件に対する推定値と片面減肉解析結果（解析値）を比較すると、誤差は最大で約 10%である。この誤差の理由としては、解析においてはひずみ硬化を考慮した応力ひずみ関係を用いているのに対し、⑧式の導出においては簡単のため完全塑性体を仮定していることが考えられる。実際、上述の応力ひずみ関係を用いて、減肉前に強制変位によって生じたひずみ ϵ_0 に対応する応力を求めると約 4.0 kgf/mm^2 となるが、⑧式においてこの値を σ_y のかわりに代入して同じように推定値と解析値を比較すると、誤差は最大で約 5%と予測精度は高くなる。

のことから、⑧式の σ_y を、減肉前に強制変位によって生じたひずみ ϵ_0 に対して応力ひずみ関係から求めた応力 $\sigma(\epsilon_0)$ に読み替え、次の⑨式

$$\Delta \epsilon_{us} = \epsilon_0 \left(\frac{h}{h_0} - 1 \right) + 2 \left(1 - \frac{h}{h_0} \right) \left(\frac{\sigma(\epsilon_0)}{E} \right) \quad ⑨$$

を用いることが考えられる。ただし、減肉前のひずみ ϵ_0 が十分に大きい場合には、⑧式と⑨式の差はほとんどないため、⑧式を用いても差し支えない。

なお、初期から強制変位を与えながら同時に減肉させた場合には、上述の検討

の特殊なケースとして、⑧式において $\epsilon_0=0$ とおくことで予測可能である。

B. 2. 2 減肉中に除荷される場合

減肉中に除荷される場合についても、上記 B. 2. 1 と同様の考察及び検証解析を実施した。

除荷を伴う減肉後における片面減肉解析及び両面減肉解析のひずみ分布は、負荷を伴う場合と比べて、減肉中の負荷増分の符号が反対になる点が異なるだけであり、予測式は B. 2. 1 で求めた式がそのまま使用できる。このため、上面及び下面における、片面減肉解析及び両面減肉解析のひずみ差は、⑧式を用いて算出できる。

このことを検証するため、B. 2. 1 と同じ平板 4 点曲げモデルを用いて、次の条件で片面減肉解析及び両面減肉解析をそれぞれ実施した。

温度 : 880°C

負荷 : 荷重負荷点の強制変位を減肉前に 8mm とし、減肉中に変位を 3mm 減少させる（減肉後の変位は 5mm となる）

減肉量 : 3mm

片面減肉（ソリッド要素）解析と両面減肉（シェル要素）解析で得られた反力及び鉛直変位の履歴を図 B-13 及び図 B-14 に示す。これらの図から、反力及び鉛直変位は解析方法によらずよく一致しており、解析結果が有効であることがわかる。

上下表面における全ひずみの推定値と解析値の比較を表 B-5 に示す。推定値は解析値とよく一致しており、減肉中に除荷される場合も、両面減肉解析の結果と⑧式を用いて片面減肉解析結果が予測可能であることが確認された。また、図 B-15 及び図 B-16 にそれぞれ長手方向全ひずみ分布及び肉厚方向全ひずみ分布の解析結果を両面減肉及び片面減肉条件で比較して示す。

表 B-5 両面減肉解析結果から求めた片面減肉条件に対する
推定値と解析値の比較

強制変位量 減肉量		両面減肉解析 解析(%)	⑧式を用いた 片面減肉条件でのひ ずみの推定値(%)	片面減肉解析 解析(%)
8mm	上面	0.86	0.86	0.86
0mm	下面	-0.86	-0.86	-0.86
5mm	上面	0.29	0.07	0.06
3mm	下面	-0.29	-0.65	-0.65

B. 2.3 片面減肉条件への変換における膜ひずみの取扱いについて

片面減肉条件への変換における膜ひずみの取扱いについては、減肉進行下で残留曲げひずみが減肉表面で消失していくことによる膜ひずみ値の形式的増加を避けるため、ここでは膜ひずみ値を各ステップにおける変形に伴う実質的な膜ひずみ増分の積算として定義する。

すなわち、図B-17において、1回の減肉ステップ当たりの変形による実質的な膜ひずみ増分を $\Delta\epsilon_m$ とすると、膜ひずみ ϵ_m は⑩式で表される。

$$\epsilon_m = \int_s \Delta\epsilon_m ds \quad (s \text{ は全ステップについての積分を意味する}) \quad ⑩$$

このように定義することにより、膜ひずみについては両面減肉条件の解析結果を用いることができる。

なお、片面減肉条件への変換によって生じる見かけのひずみ増分を $\Delta\epsilon_{app}$ とすると、図B-18に示すように、 $\Delta\epsilon_{app}$ は片面減肉条件における曲げひずみの中に自動的に組み込まれるため、(膜+曲げ)ひずみについては片面減肉条件への変換後の値で評価することにより、 $\Delta\epsilon_{app}$ を考慮することができる。

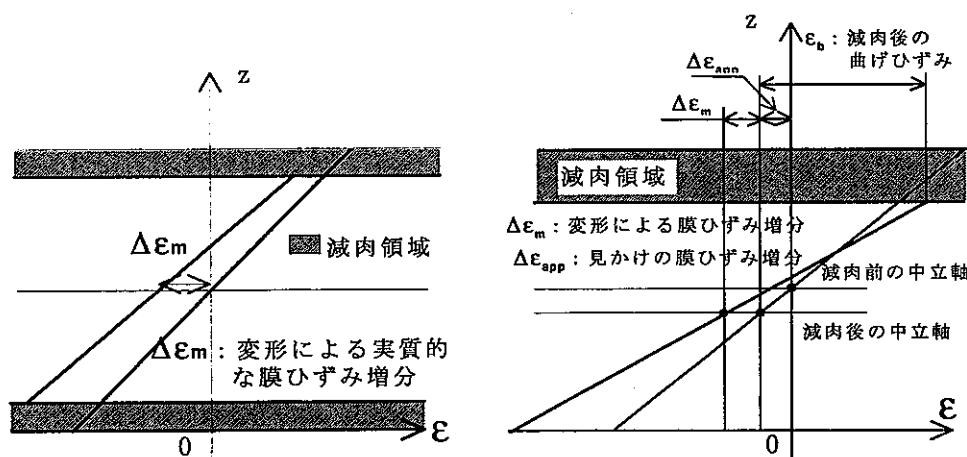


図 B-17 両面減肉条件における
膜ひずみ増分の概念

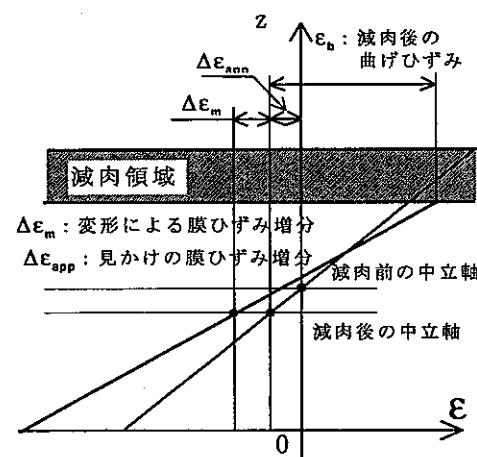


図 B-18 片面減肉条件における
膜ひずみ増分の概念

B. 3 局所ひずみ集中部の解析的取扱い

ライナ構造にはリブやフレームとライナプレートとの接合部があり、このような構造不連続に起因する局所的なひずみ集中の影響を含めて発生するひずみは、3次元ソリッド要素による解析によって厳密に評価できるものと考えられる。

ここでは、シェル要素モデルによる実機ライナの解析が機械的健全性の評価の観点から妥当あるいは保守的な結果を与えていていることを、「部分ソリッドモデル」による解析手法を用いて確認する。

B. 3. 1 部分ソリッドモデルによる解析手法の概要

図 B-19 に「部分ソリッドモデル」による解析手法の概念を示す。これは、構造全体をシェル要素で解析し、その結果を使って注目する部分構造をソリッド要素で解析するというものである。具体的には、評価すべき大きなひずみは解析対象全体ではなくリブ接合部等を含むごく小領域に限られる点に着目し、評価部位を含む部分領域を 3 次元ソリッド要素でモデル化し、このモデルに負荷すべき温度ならびに境界変位の時間的な推移についてはシェル要素による全体解析の結果から与える。

通常の全体シェル要素モデルと、注目する部位を含んで切出した部分構造のソリッド要素モデルを用意しておき、まず全体シェル要素モデルにより通常の解析を行う。次に、部分ソリッド要素モデルの境界に対応した位置における変位条件を生成する。この境界変位条件と、全体シェル要素モデルの温度解析から得られた温度条件を使って部分ソリッド要素モデル単独の解析を行う。この方法では、2段階、2つの解析が必要となるが、部分ソリッド要素モデルは全体シェル要素モデルと同程度あるいはそれよりも小さい規模にすることができるので、ライナのリブやフレーム接合部近傍の構造不連続部での局所的なひずみの評価が実際的な計算レベルで可能となる。

ただし、この方法は、全体構造の中の部分構造について、シェル要素モデルからソリッド要素モデルに置き換えるものであり、大局的には要素分割を含めて両者の変形特性がほぼ等価であることが前提となる。ライナ構造について注意すべき部分は、ライナプレートとライナフレームの結合構造と、ライナプレートとひずみ防止リブの結合構造である。このような構造について、シェル要素とソリッド要素によって力学的にほぼ等価なモデル化が可能であることを確認するために、図 B-20 に示すようにライナプレートとライナフレームの結合部分を含むモデル（モデル 1）と、ライナプレートとひずみ防止リブの結合部分を含むモデル（モデル 2）を設定し、要素分割の適切さも含め、予備的な検討解析を行った。その結果、ソリッド要素モデルとシェル要素モデルによって得られた構造の剛性およびたわみ曲線はほぼ一致することを確認した。

表 B-6 は、モデル 1 およびモデル 2 について、図 B-20 中に矢印で示す荷重パターンに対して得られた剛性を、シェル要素モデルとソリッド要素モデルで比較した結果を示したものである。また、図 B-21(a)および(b)は、モデル 1 の荷重パターン F1-1 および F2-1 に対して、得られたたわみ曲線をシェル要素モ

ルとソリッド要素モデルで比較した結果を示したものである。図中、ソリッド・プレート、ソリッド・フレームはソリッド要素モデルのライナプレート部分およびライナフレーム部分、シェルプレート、シェルフレームはシェル要素モデルのライナプレート部分およびライナフレーム部分のたわみ曲線であることを意味し、(a) は中央 YZ 断面、(b) は中央 XZ 断面でのたわみ曲線を比較している。

表 B-6 シェル要素モデルとソリッド要素モデルの剛性の比較

ケース名	剛性 (kg/mm)		
	ソリッド要素	シェル要素	(比率)
モデル(F1-1)	245.8	248.4	(1.011)
モデル(F1-2)	345.8	336.7	(0.974)
モデル(F2-1)	439.9	450.1	(1.023)
モデル(F2-2)	583.2	602.8	(1.034)
モデル(R)	58.50	59.48	(1.017)

【比率：(シェル要素モデルの反力) / (ソリッド要素モデルの反力)】

B. 3.2 解析結果

例として、境界帯状減肉のケースを取り上げて本解析方法で計算し、シェル要素による計算結果と比較する。

使用プログラムは FINAS、ソリッド要素としては 20 節点六面体要素 (HEX20) を用いている。全体シェル要素モデルと部分ソリッド要素モデルをそれぞれ図 B-22 の(a)と(b)に示す。その他の解析条件は本文中の境界帯状減肉のケースと同一である。

図 B-23 に部分ソリッド要素モデルの場合についての非弾性ひずみピーク時の相当ひずみコンター図を示す。最大ひずみはリブ溶接止端部で発生する。この部分の内外表面でひずみは大きな値をとり、概ね曲げが支配的な場となっているが、リブ端近傍に形状不連続に起因するひずみの集中が見られる。これに比べると、上面のひずみの勾配は緩やかである。図 B-24(a)、(b)はそれぞれシェル要素解析、部分ソリッド要素モデルについての内側リブ端近傍のひずみ挙動、

併せて温度の推移を示している。部分ソリッド要素モデルによる上面のひずみの最大値は、シェル要素解析によるそれの半分程度であり、シェル要素による解析は、より厳密なソリッド要素による解析に比べて保守的であるといえる。また、ひずみの時間的な増減のパターンについても、シェル要素解析とソリッド要素モデルはよく対応している。図 B-25 は、ソリッド要素モデルの結果についてリブ方向に沿った上面のひずみ分布を示している。図 3.2-12 に示したシェル解析と同様に、リブ端部におけるひずみ集中が著しい。

B.4 等方硬化と移動硬化

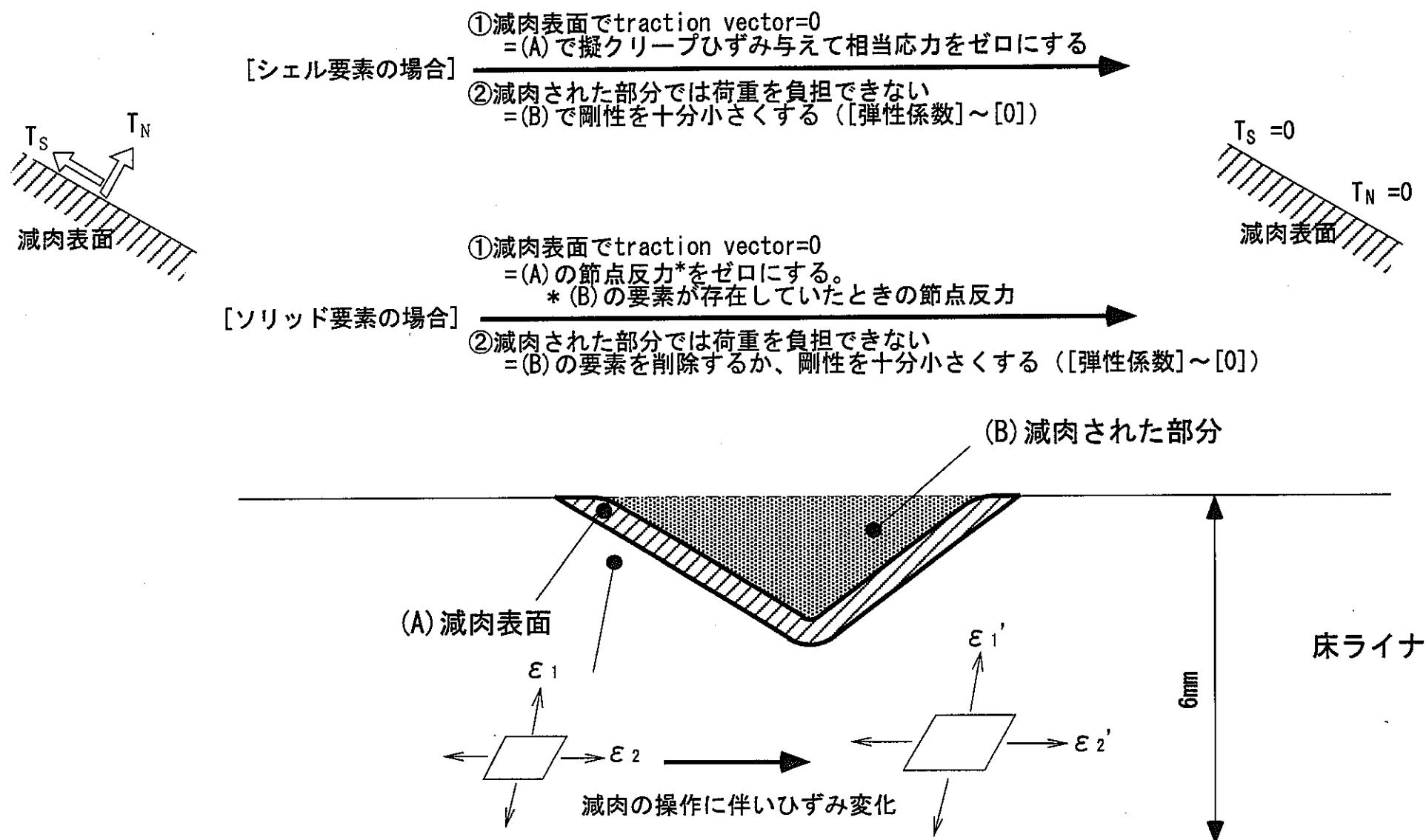
減肉を伴う非弾性解析においては、材料特性として等方硬化モデルを用いているが、ライナ温度の昇温時と降温時では応力の符号が反転することから、応力の符号反転後の発生ひずみに及ぼす材料の移動硬化特性の影響を確認しておく必要がある。

このため、移動硬化特性を考慮した構成モデル（大野モデル⁽⁶⁾）を用い、減肉を伴う非弾性解析を行って、等方硬化モデルと比較して発生ひずみに及ぼす硬化特性の影響を把握・評価することとした。

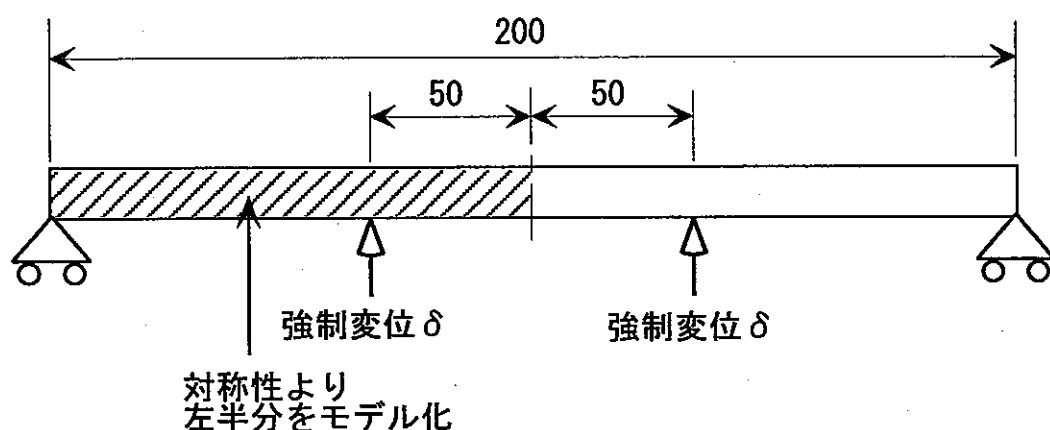
解析モデルは境界帶状減肉モデルとした。

解析結果を図 B-26 に示す。非弾性ひずみ履歴は、等方硬化則でも移動硬化則（大野モデル）でも大差がなく、等方硬化則を用いたひずみの評価が妥当であることが示された。

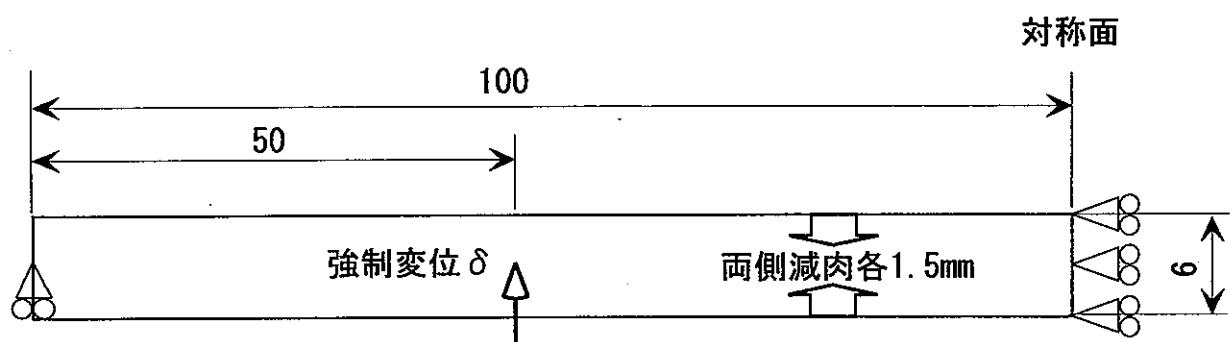
減肉の力学的取扱い



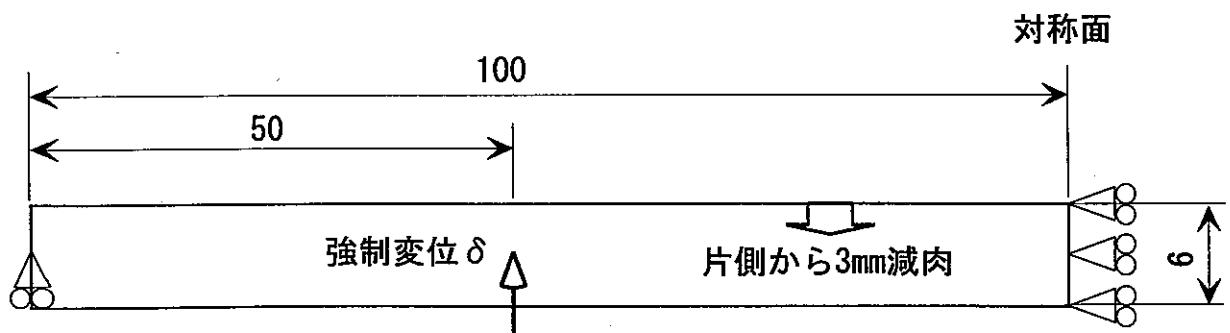
図B-1 減肉進行を伴う解析における減肉の取扱い



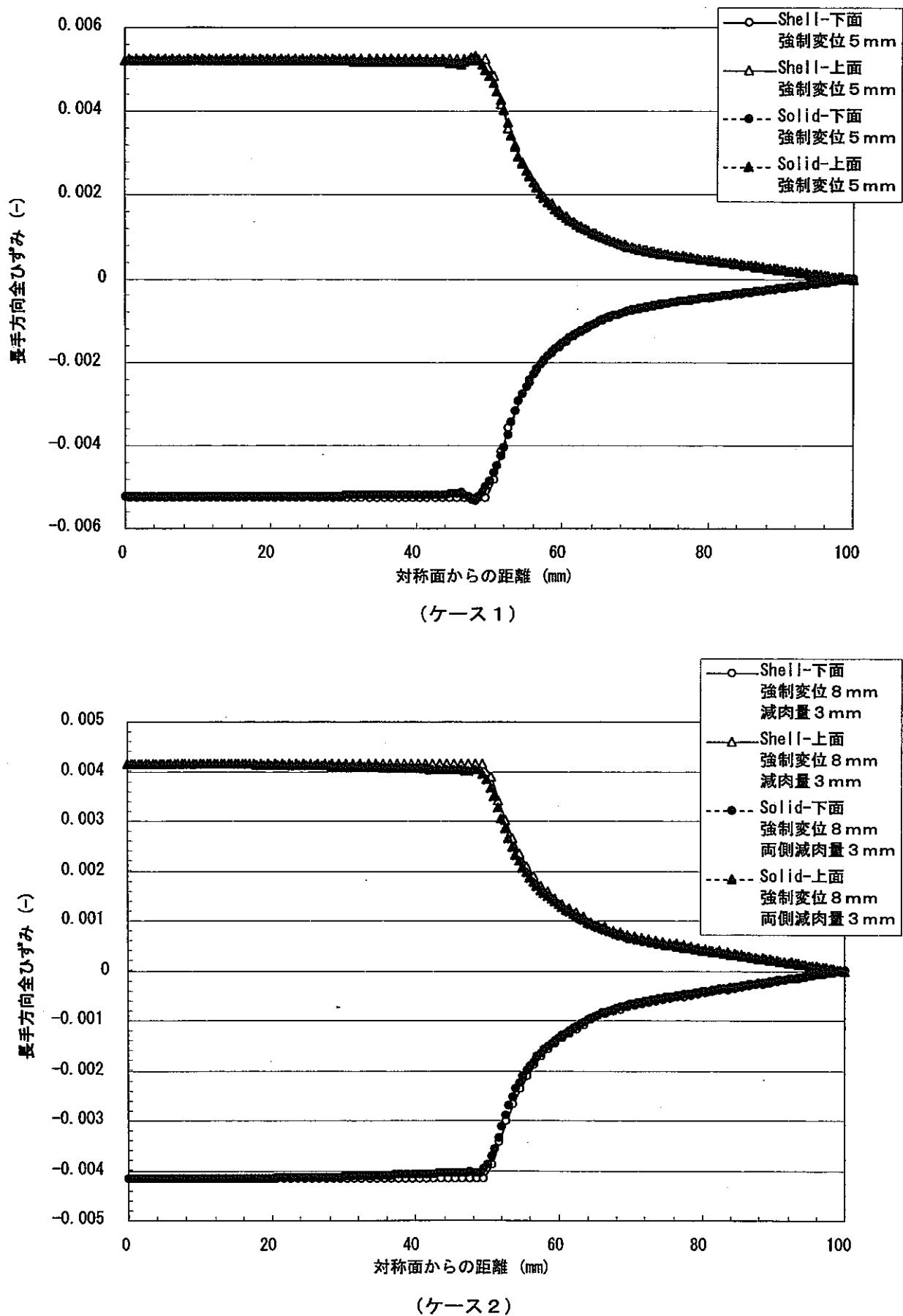
(1) 両面減肉の場合



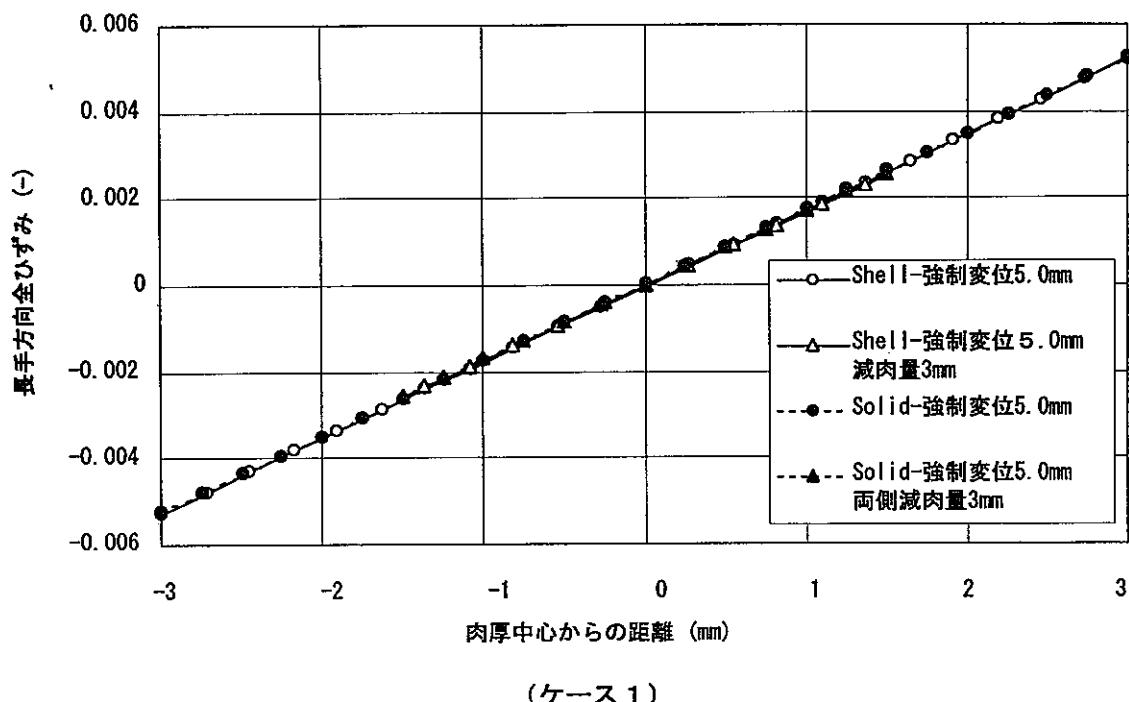
(2) 片面減肉の場合



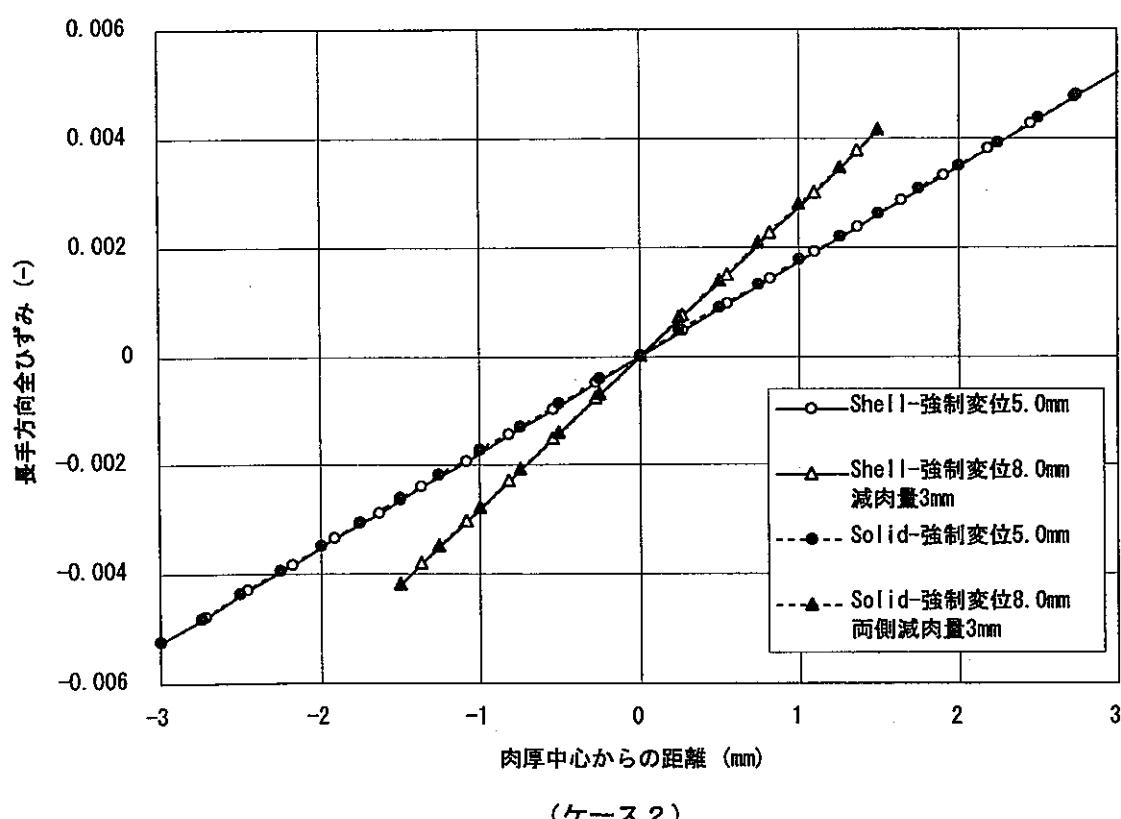
図B-2 平板4点曲げモデル



図B-3 減肉の取り扱いの違いによる長手方向全ひずみ分布解析結果の比較

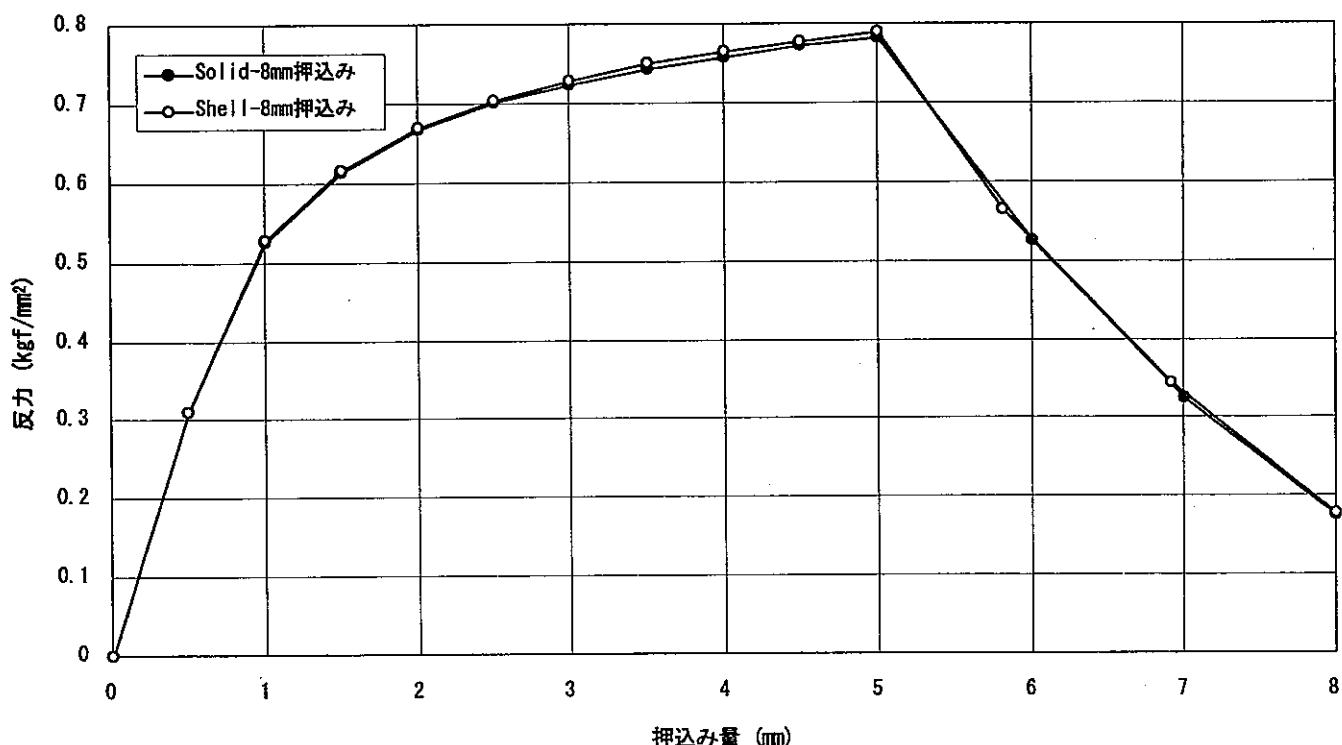


(ケース 1)

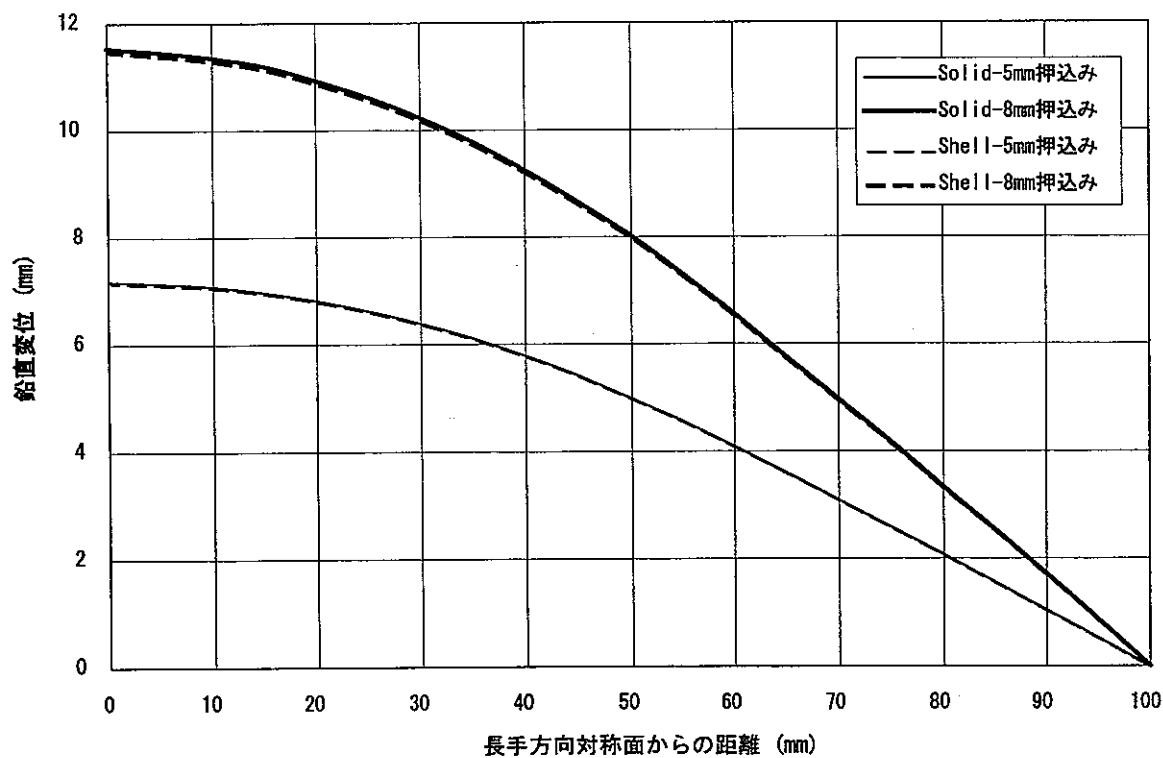


(ケース 2)

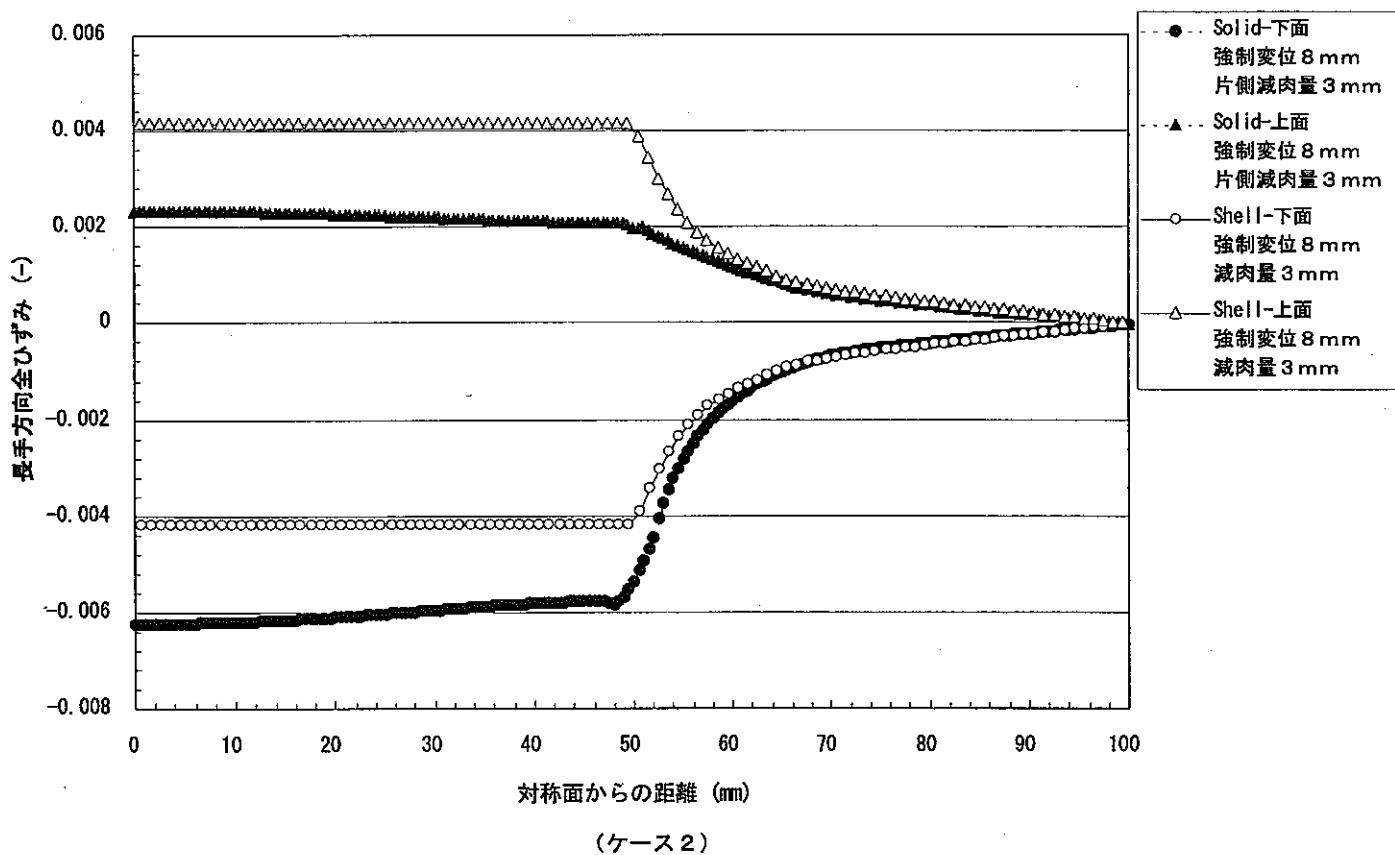
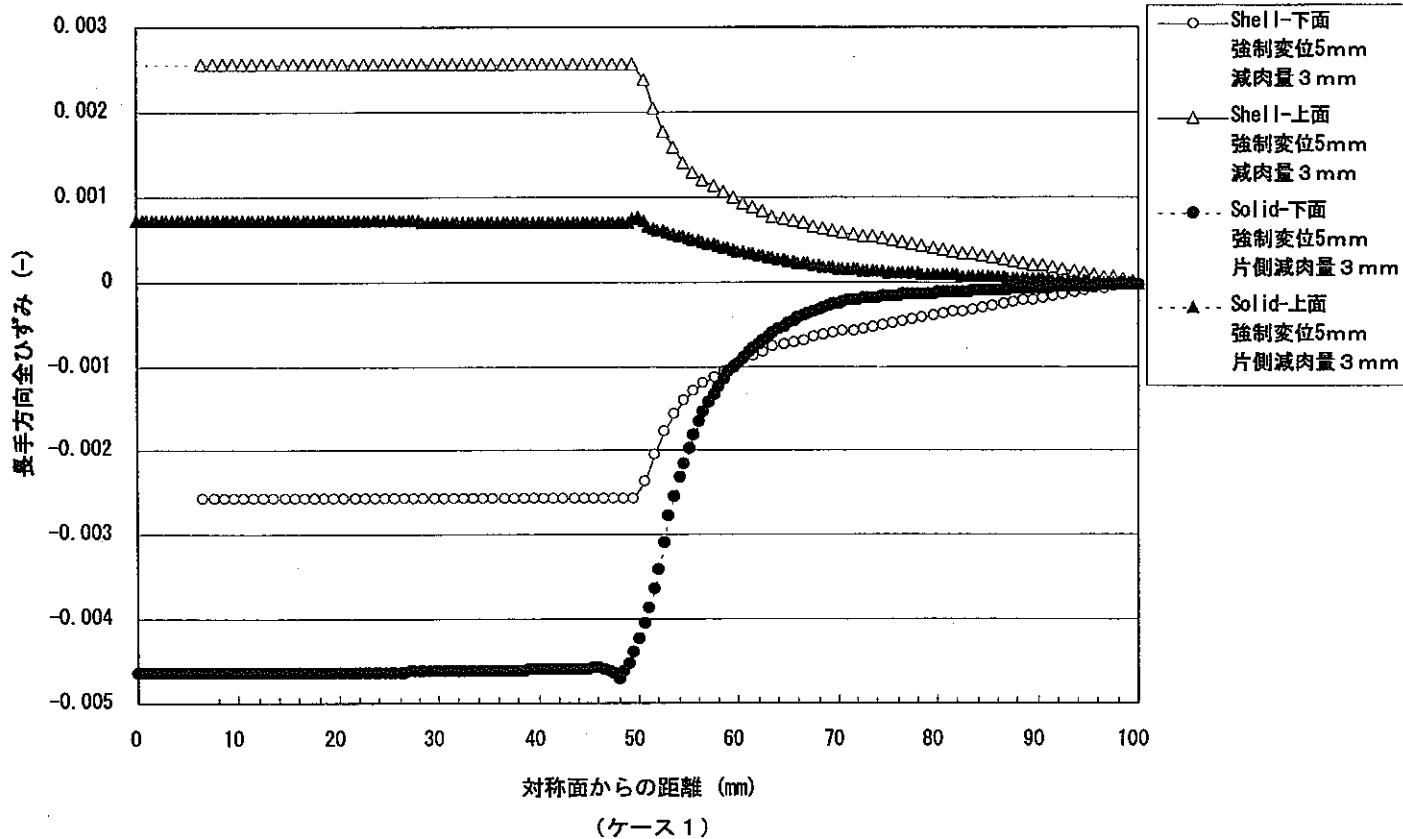
図B-4 減肉の取り扱いの違いによる長手方向全ひずみの肉厚方向分布解析結果の比較



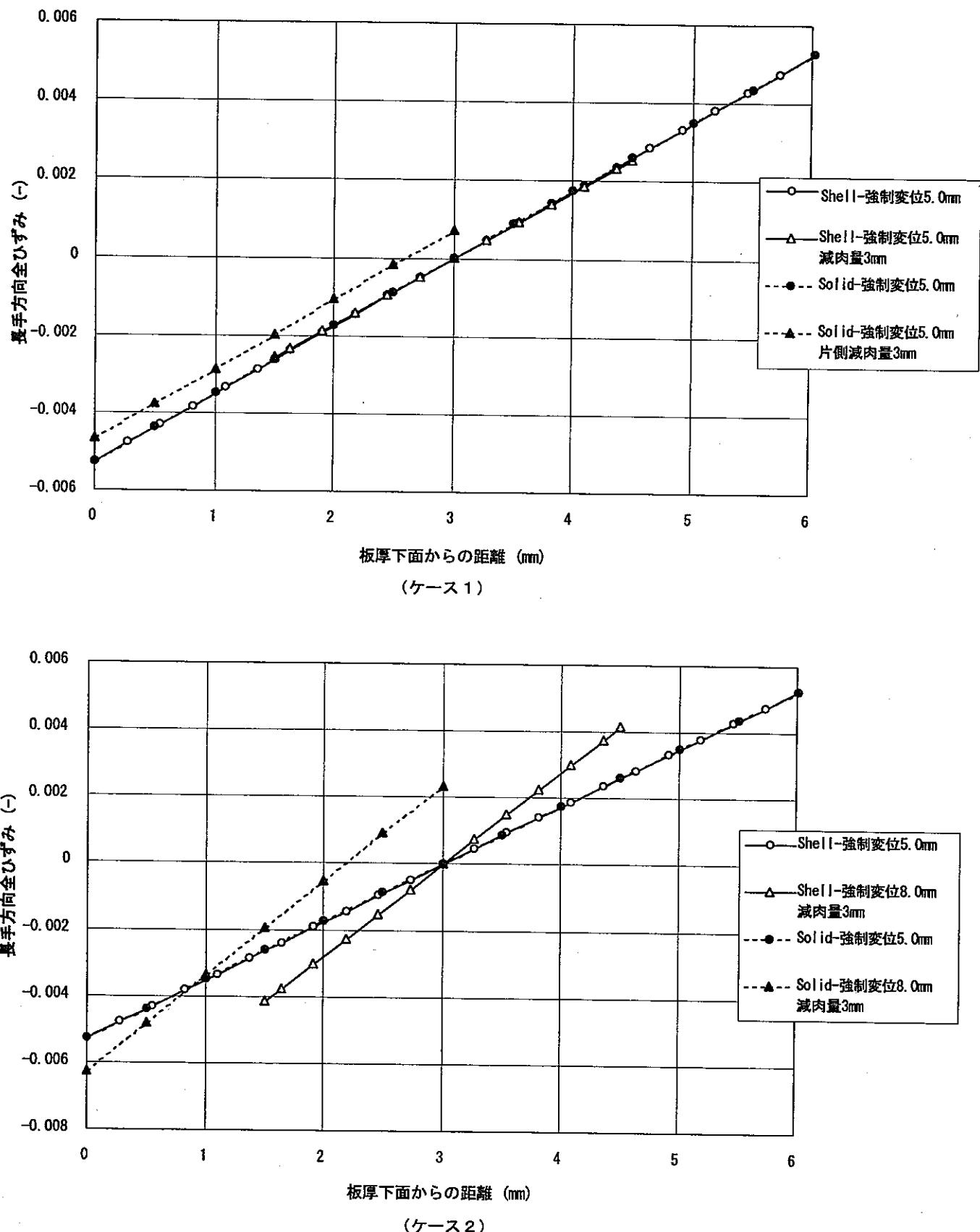
図B-9 片面減肉（ソリッド要素）解析と両面減肉（シェル要素）解析による反力の比較



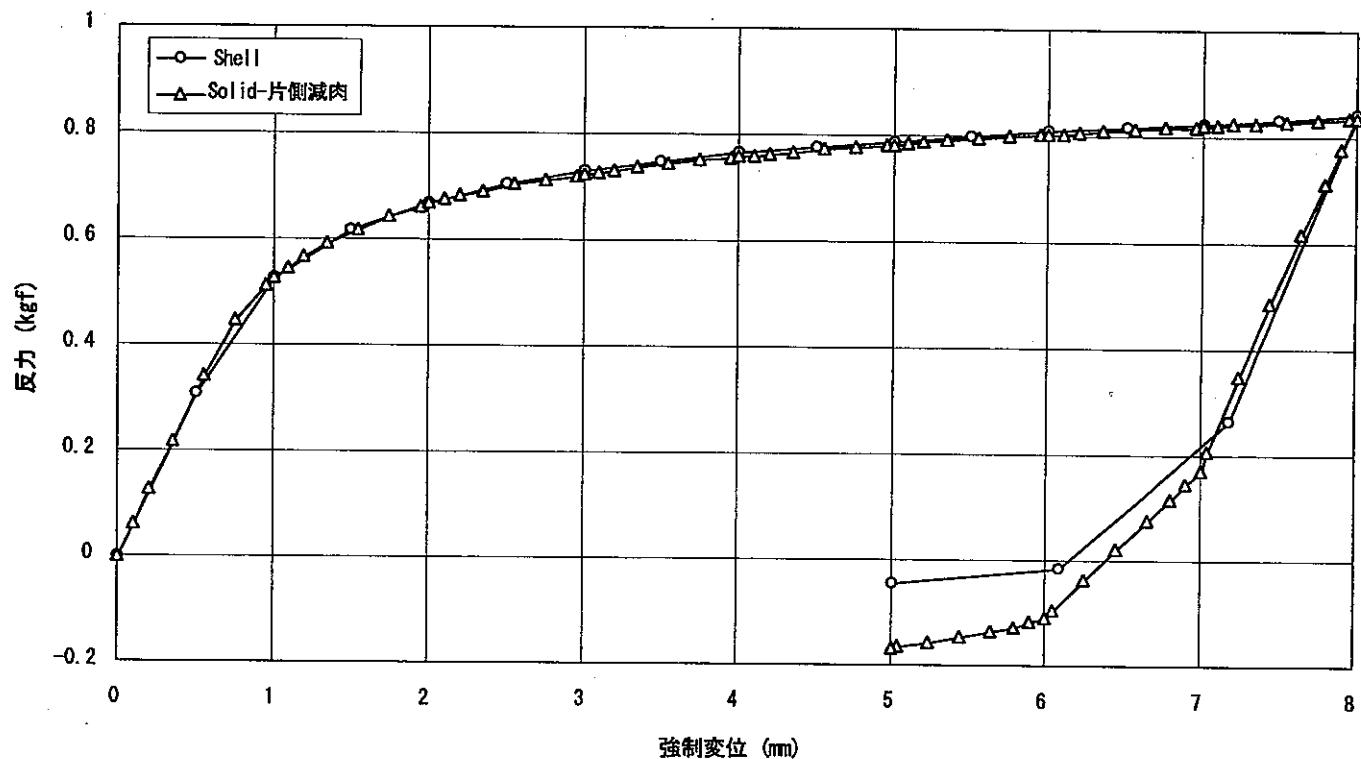
図B-10 片面減肉（ソリッド要素）解析と両面減肉（シェル要素）解析による鉛直変位の比較



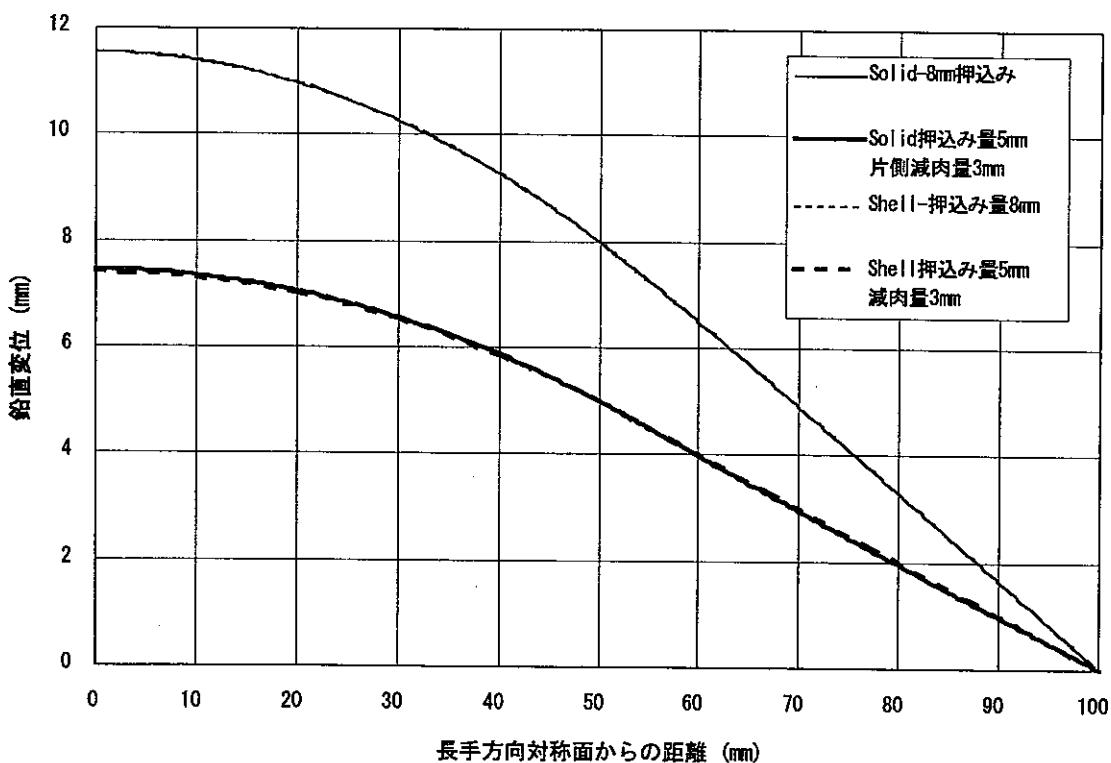
図B-11 片面減肉と両面減肉の違いによる長手方向全ひずみ分布解析結果の比較



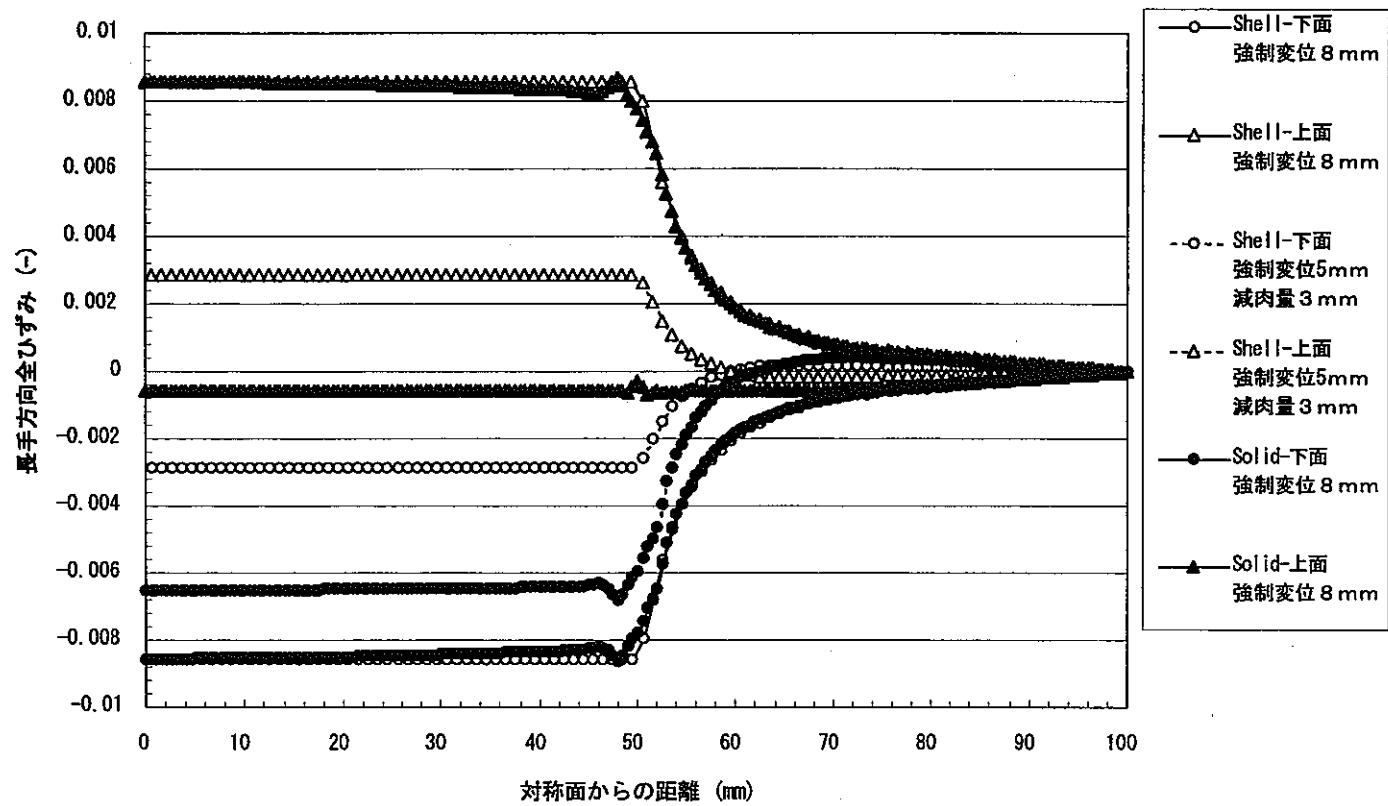
図B-12 片面減肉と両面減肉の違いによる長手方向全ひずみの肉厚方向分布解析結果の比較



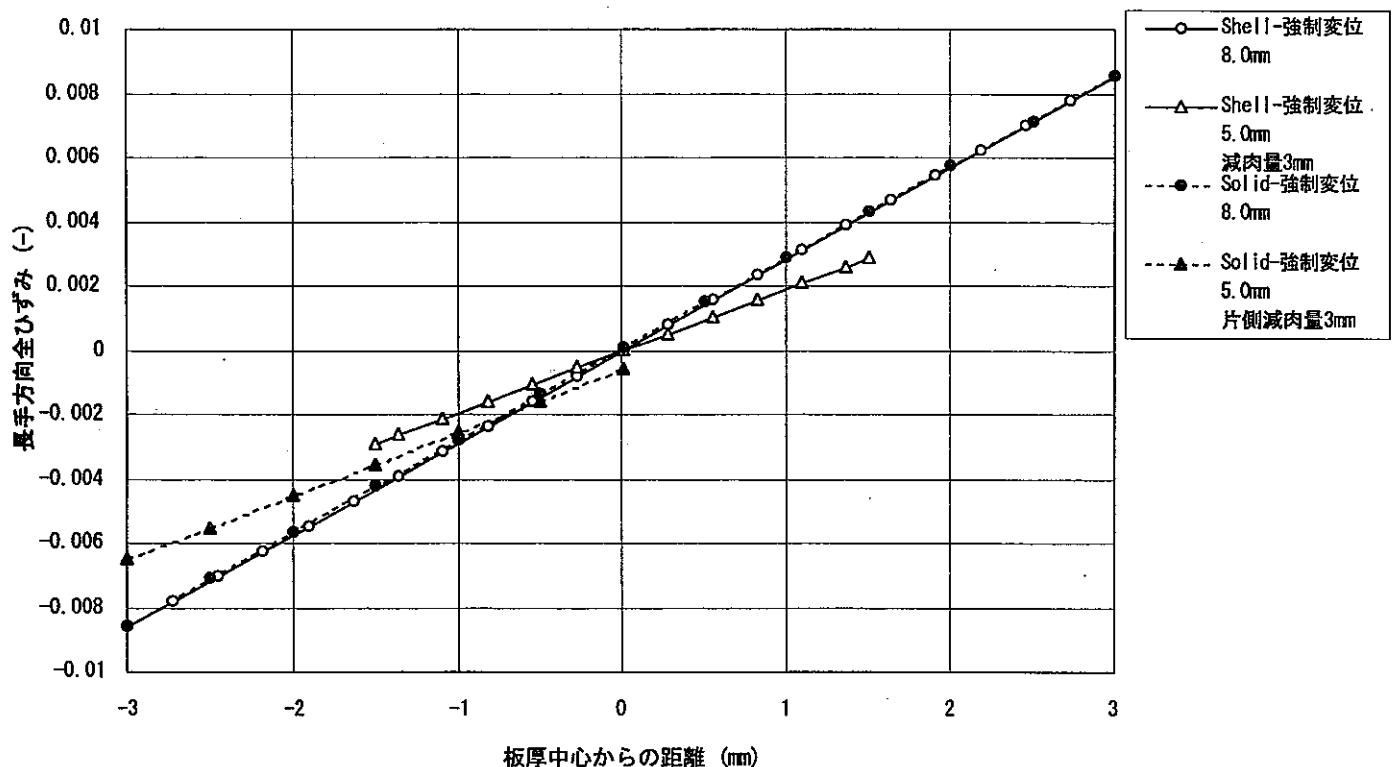
図B-13 片面減肉（ソリッド要素）解析と両面減肉（シェル要素）解析による反力の比較
(減肉中除荷の場合)



図B-14片面減肉（ソリッド要素）解析と両面減肉（シェル要素）解析による鉛直変位の比較
(減肉中除荷の場合)



図B-15 片面減肉と両面減肉の違いによる長手方向全ひずみ分布解析結果の比較
(減肉中除荷の場合)



図B-16 片面減肉と両面減肉の違いによる長手方向全ひずみの肉厚方向分布解析結果の比較
(減肉中除荷の場合)

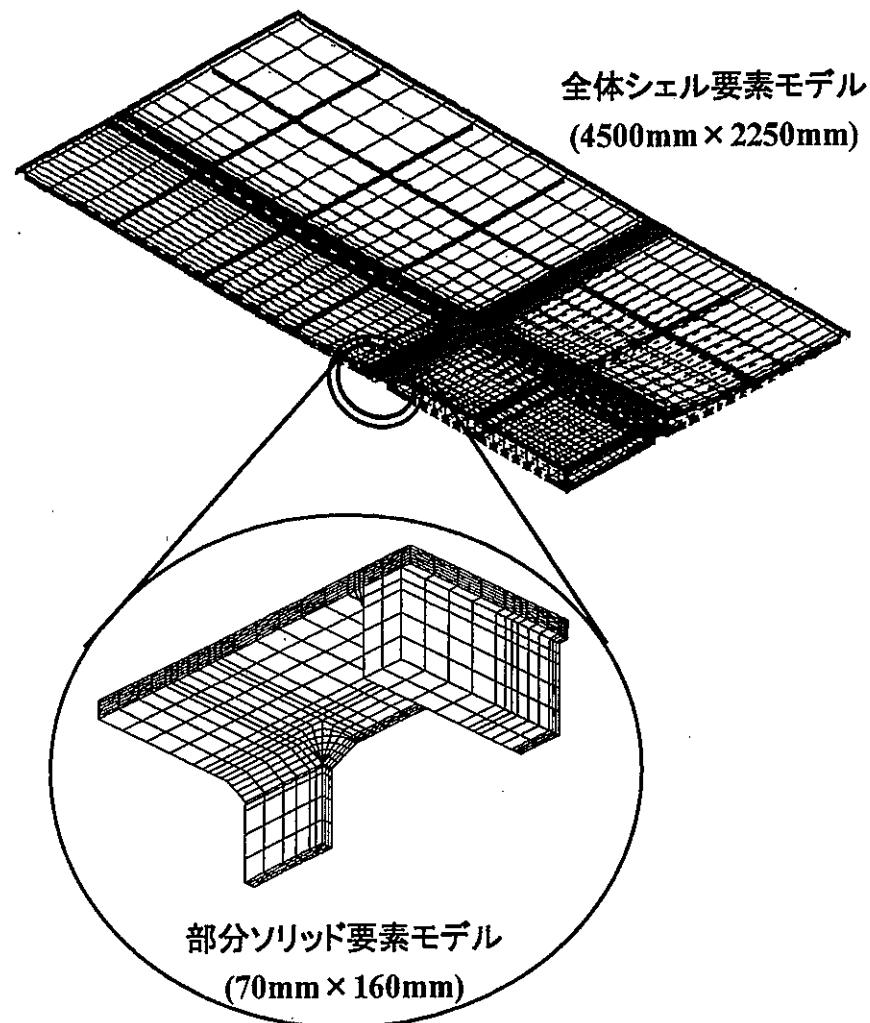
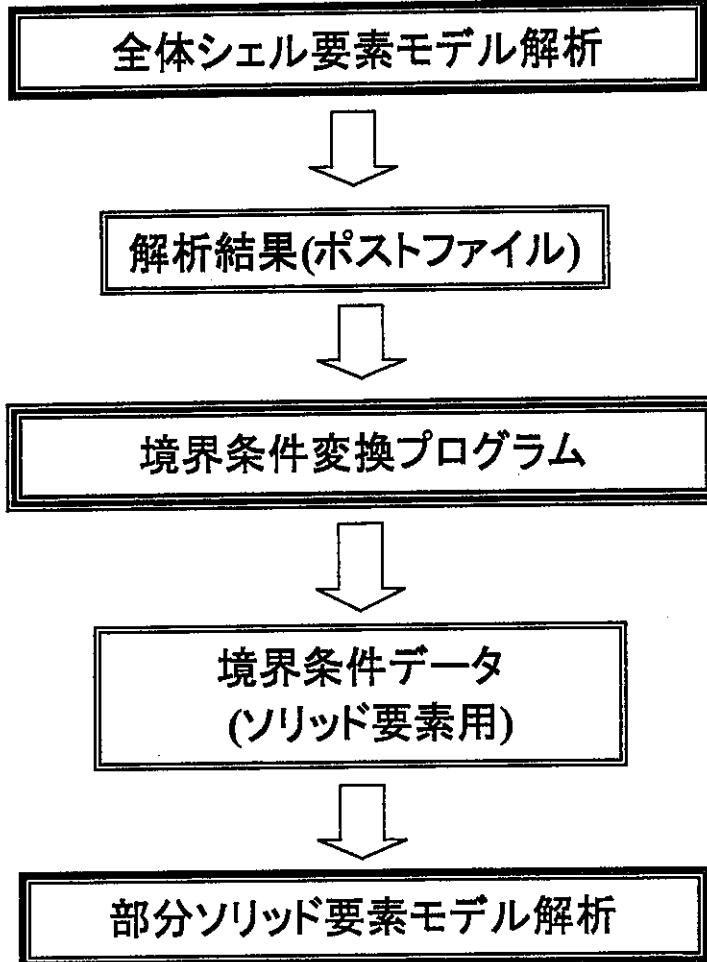


図 B-19 部分ソリッドモデルによる解析手法の概念

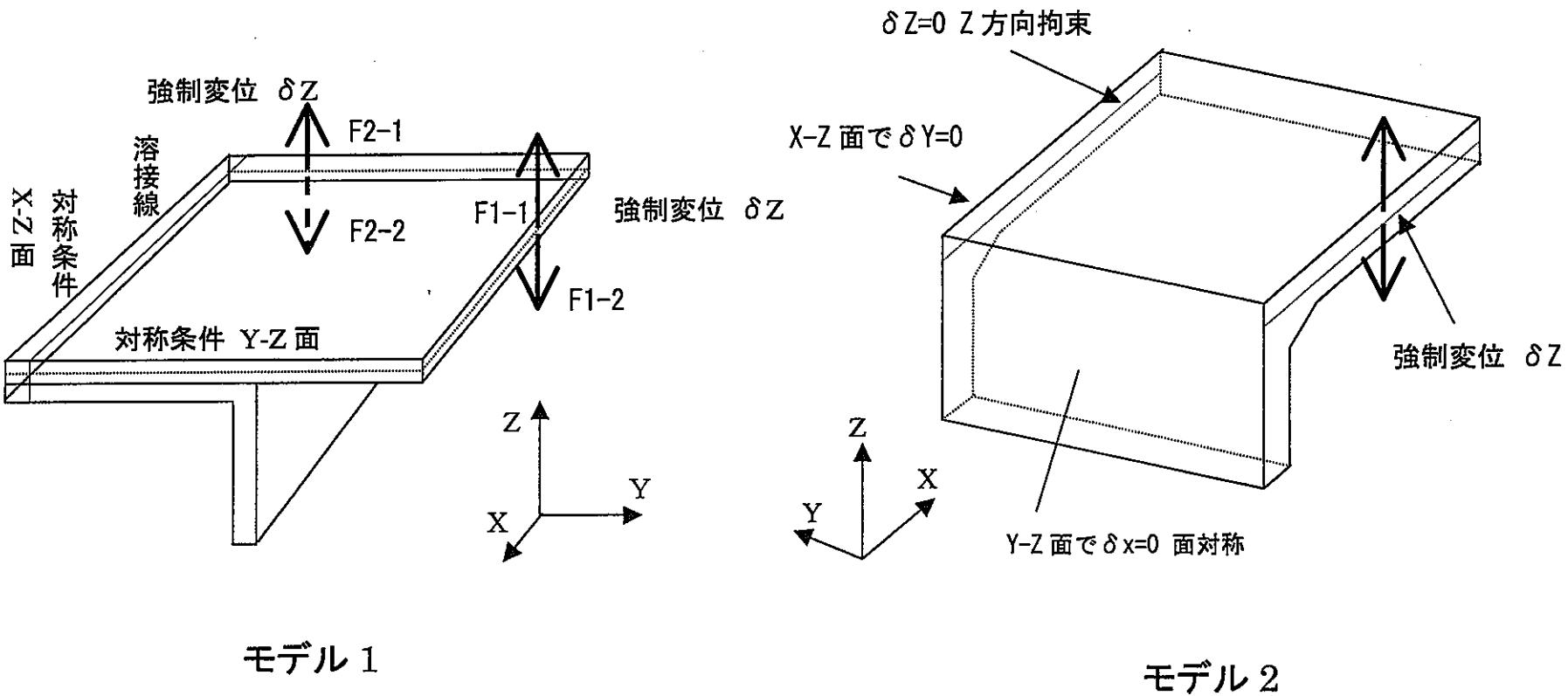
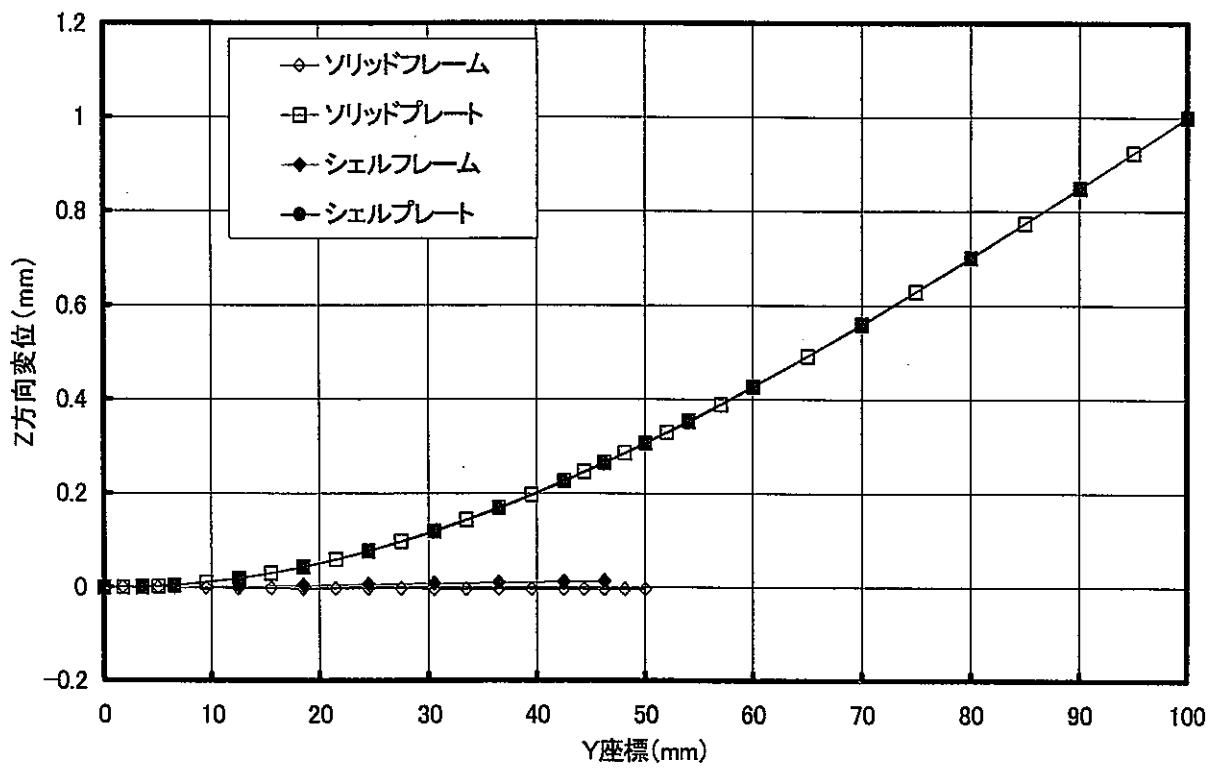
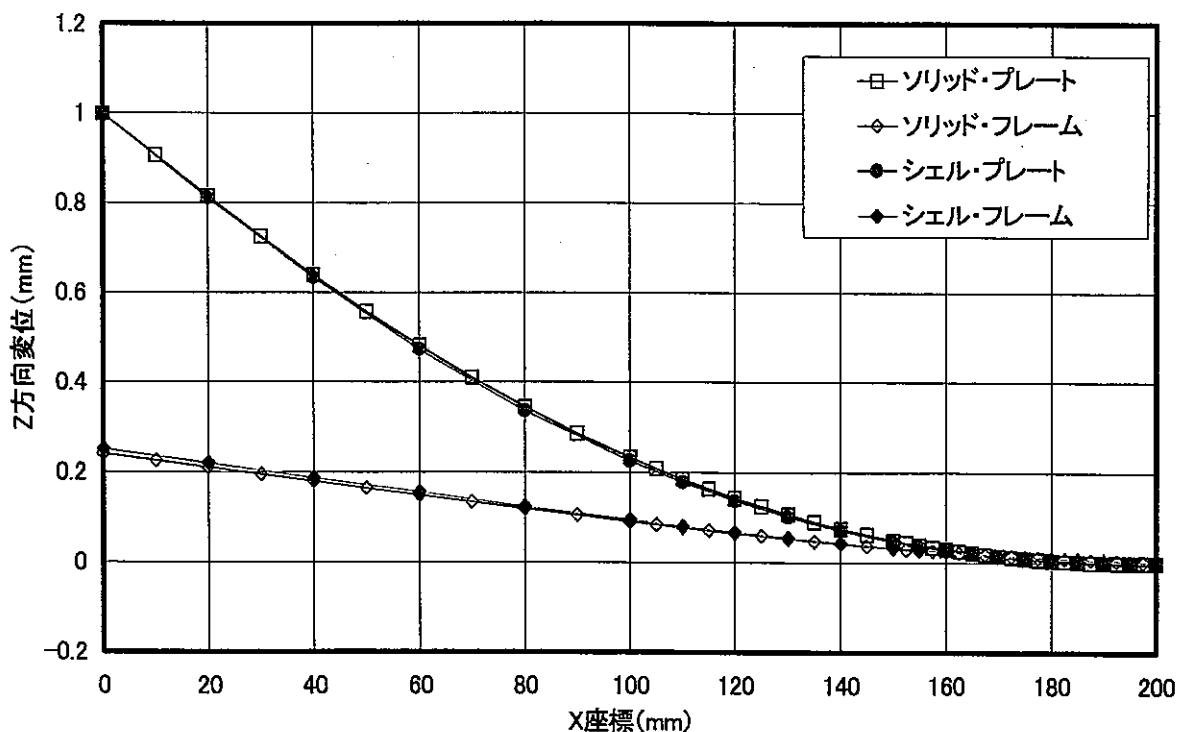


図 B-20 確認のためのライナ部分モデル

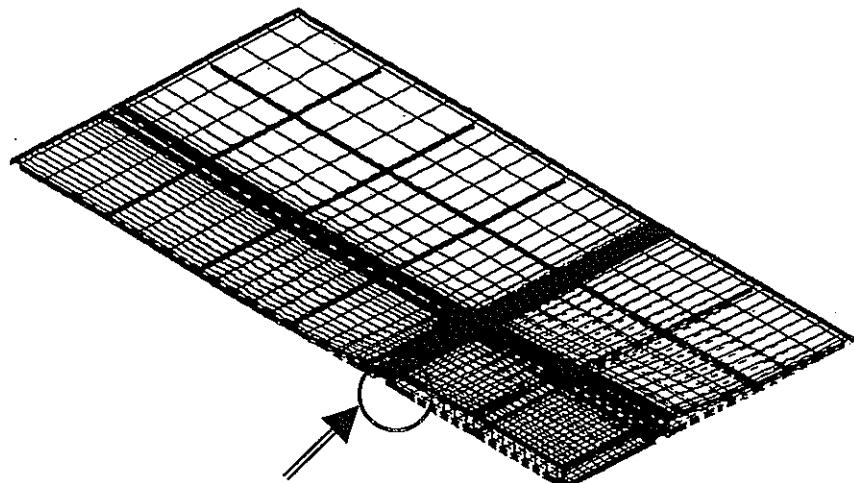


(a) Y方向分布(モデル1、F1-1)



(b) X方向分布(モデル1、F2-1)

図B-21 Z方向変位分布



部分ソリッド要素モデル

図 B-22(a) 全体シェル要素モデル

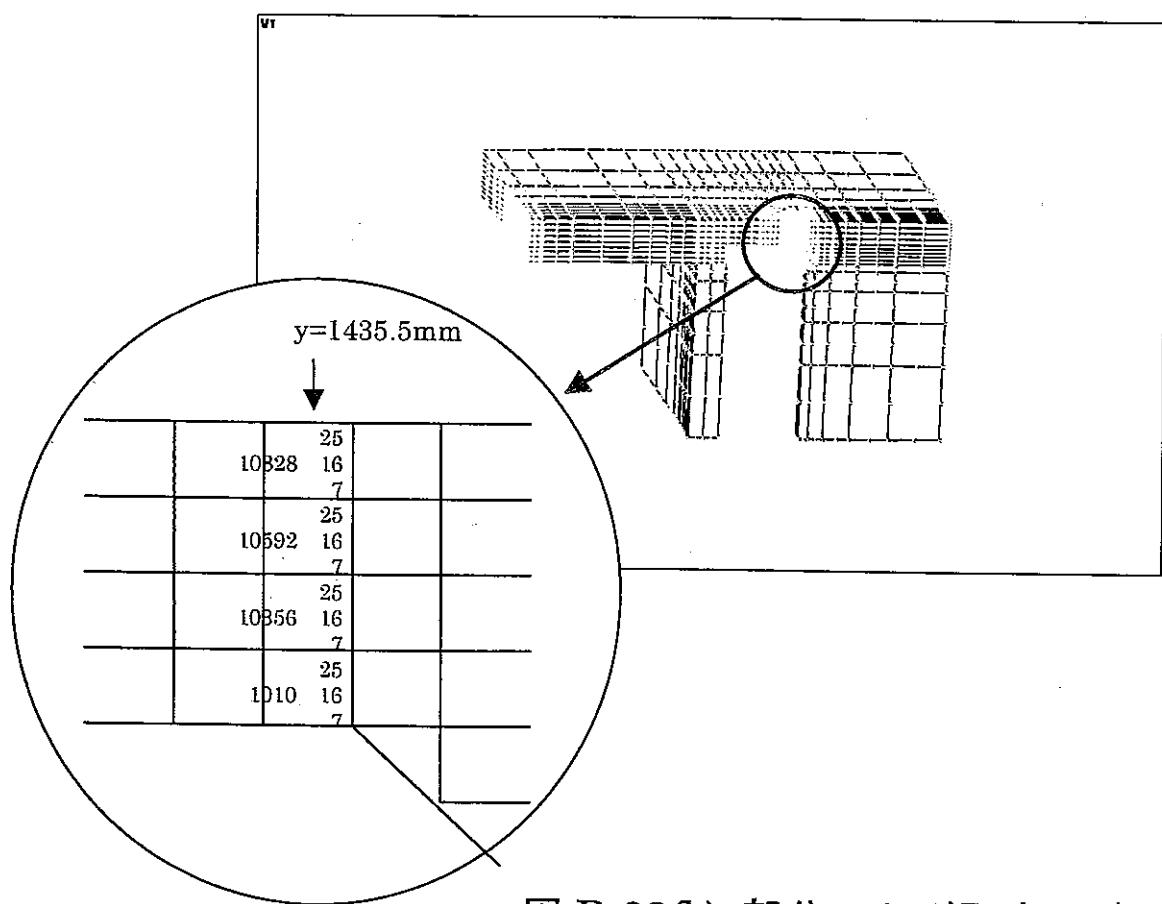


図 B-22(b) 部分ソリッド要素モデル

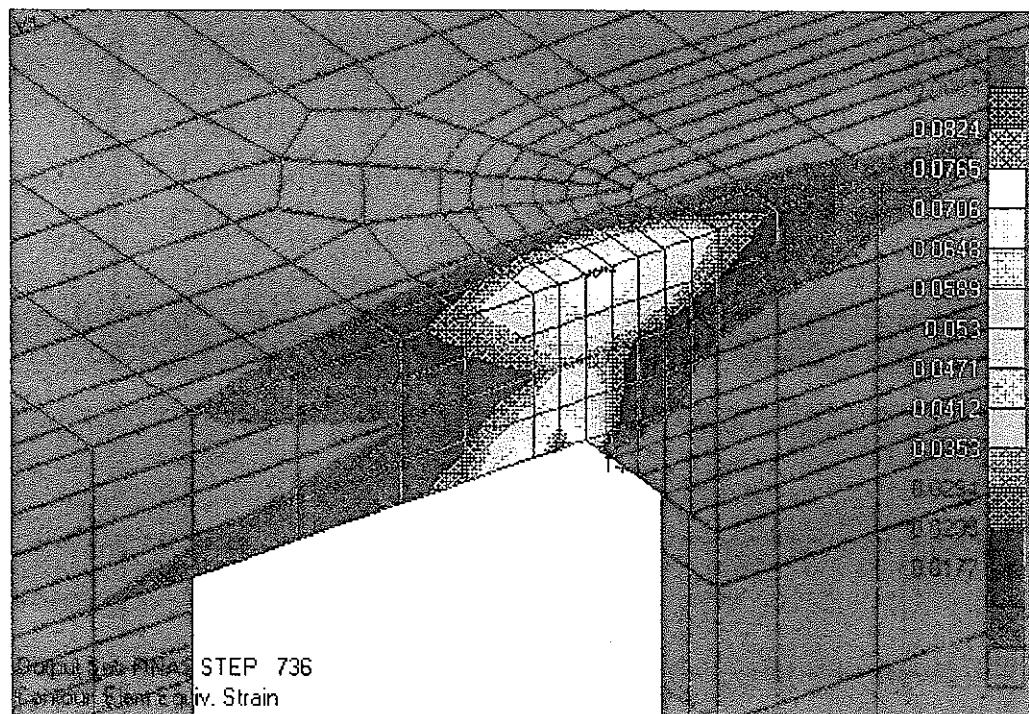
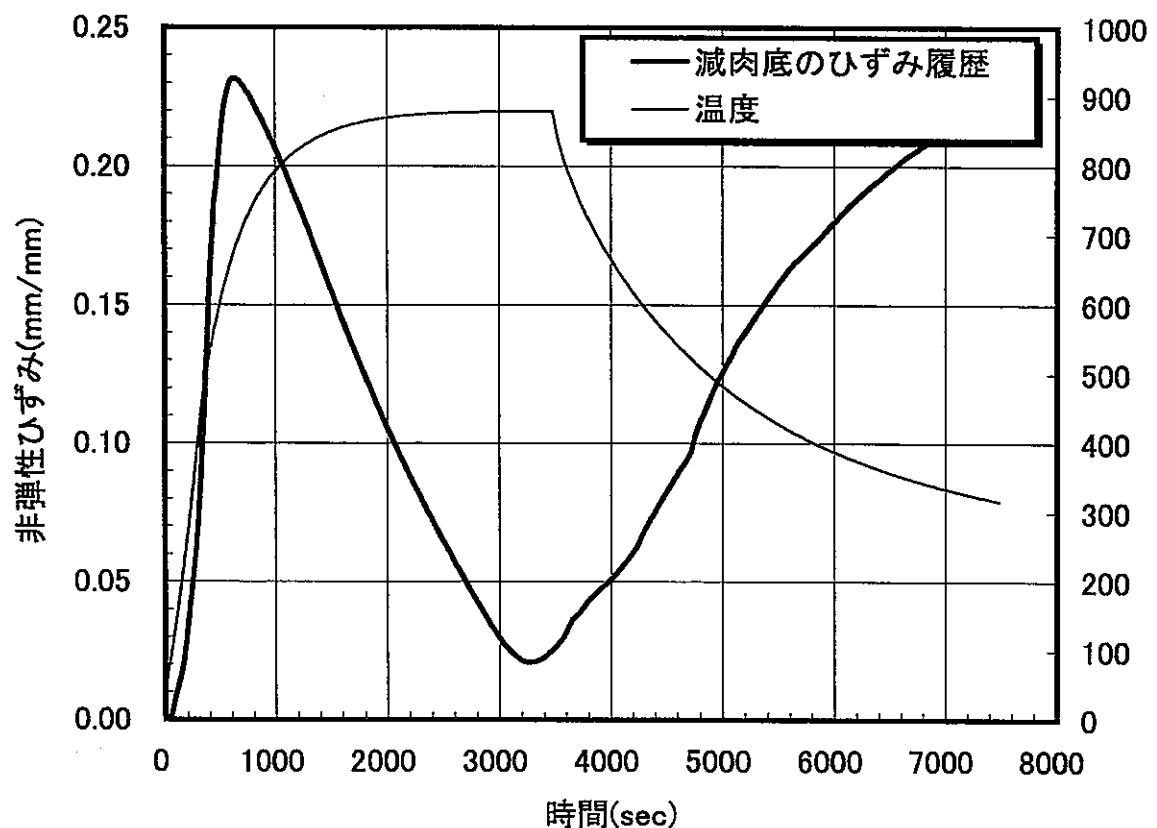
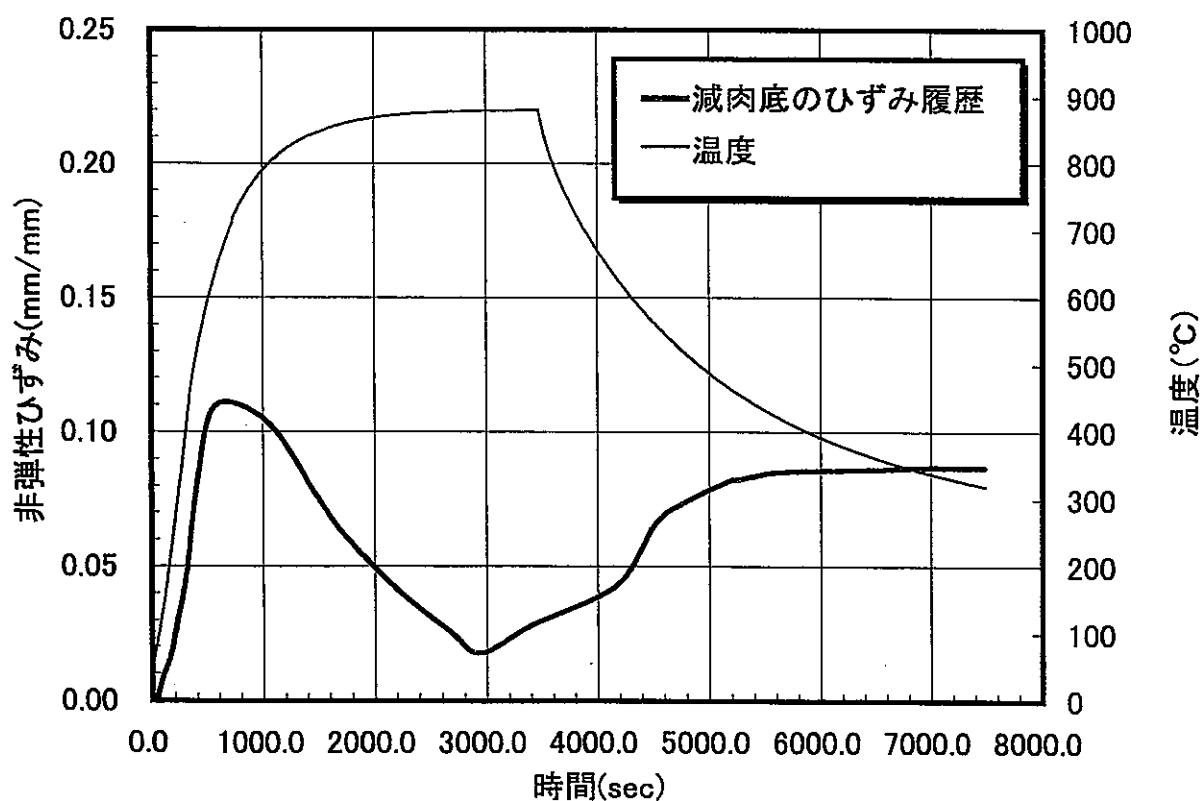


図 B-23 部分ソリッド要素モデルによる相当ひずみコンター
(非弾性ひずみピーク時)



(a) シェル要素モデル



(b) ソリッド要素モデル

図B-24 内側リブ端のひずみ挙動と温度

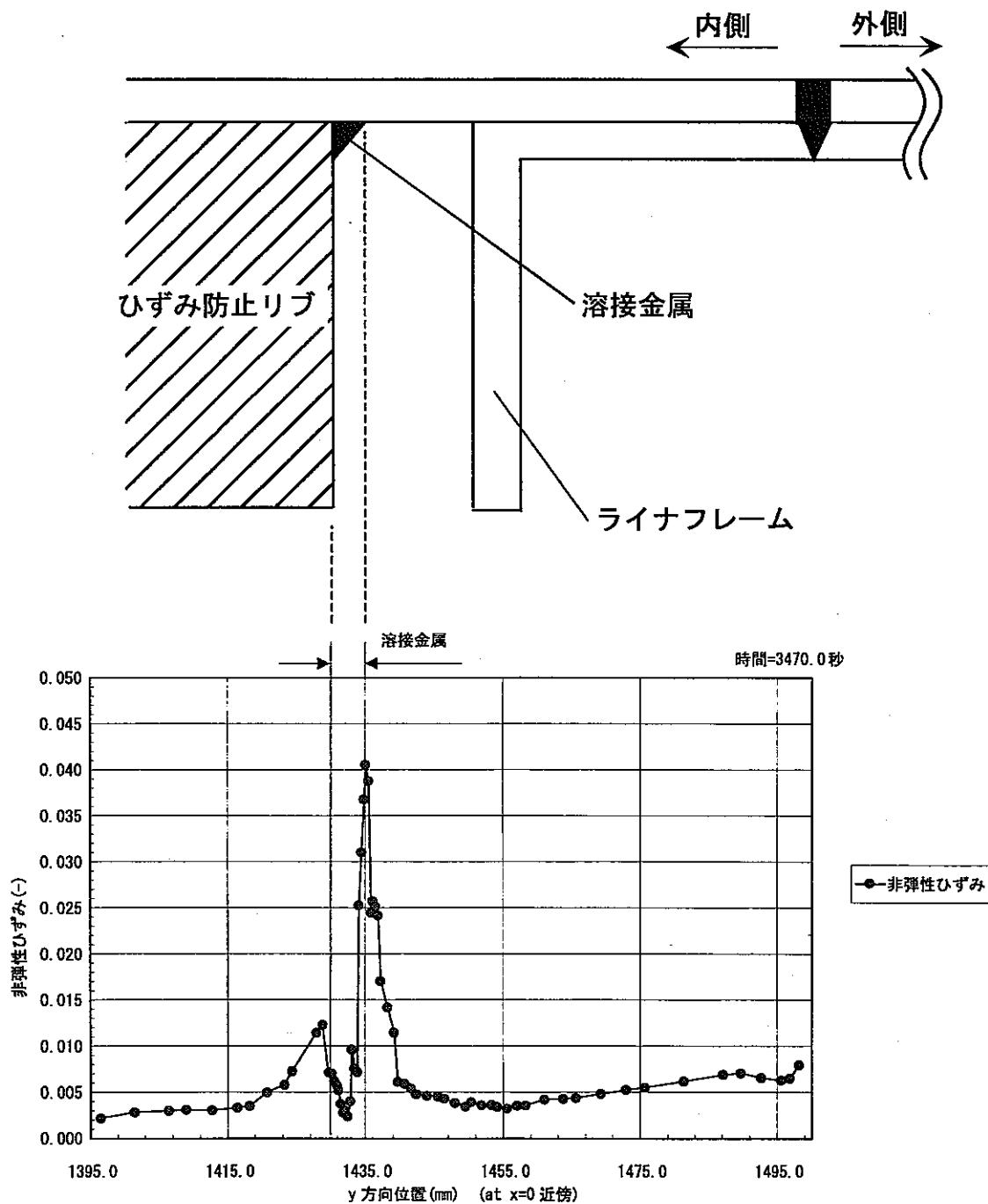
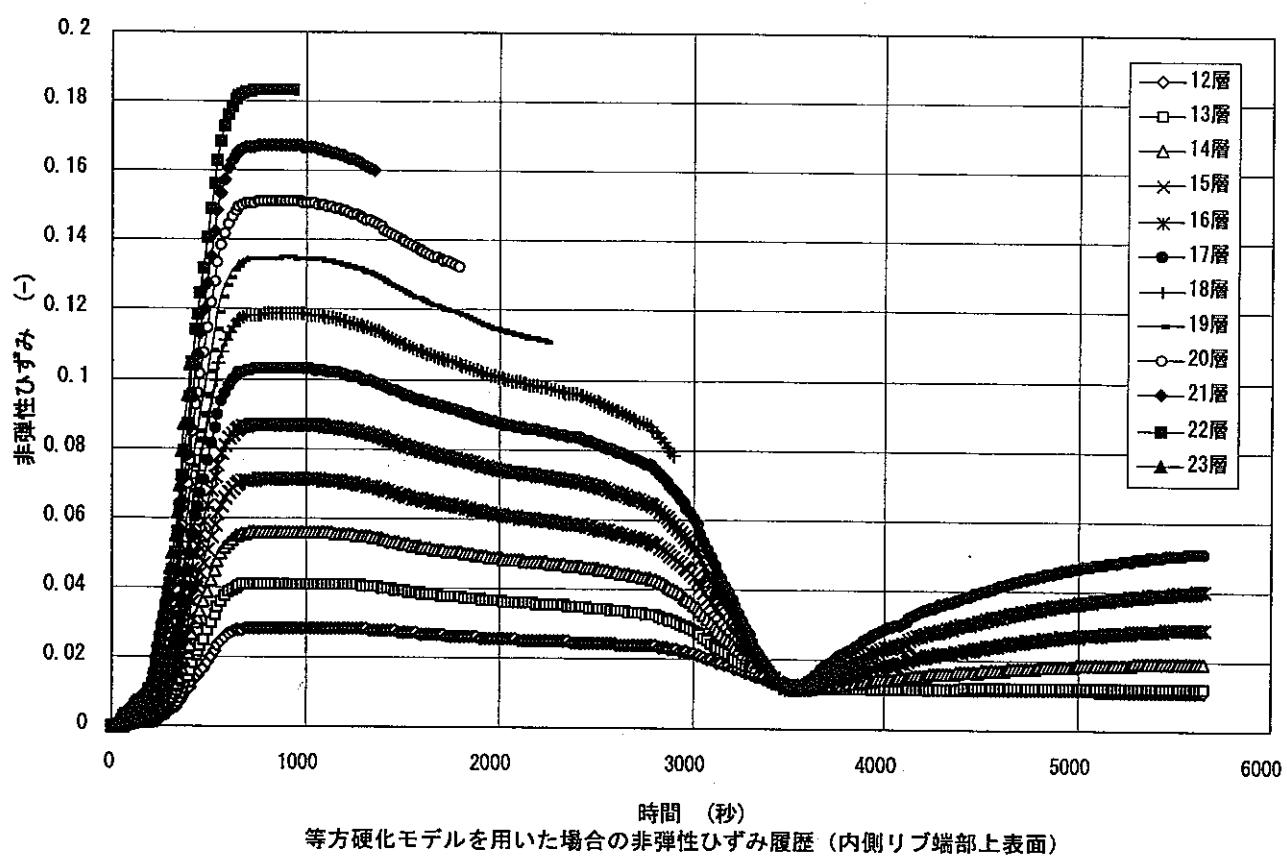
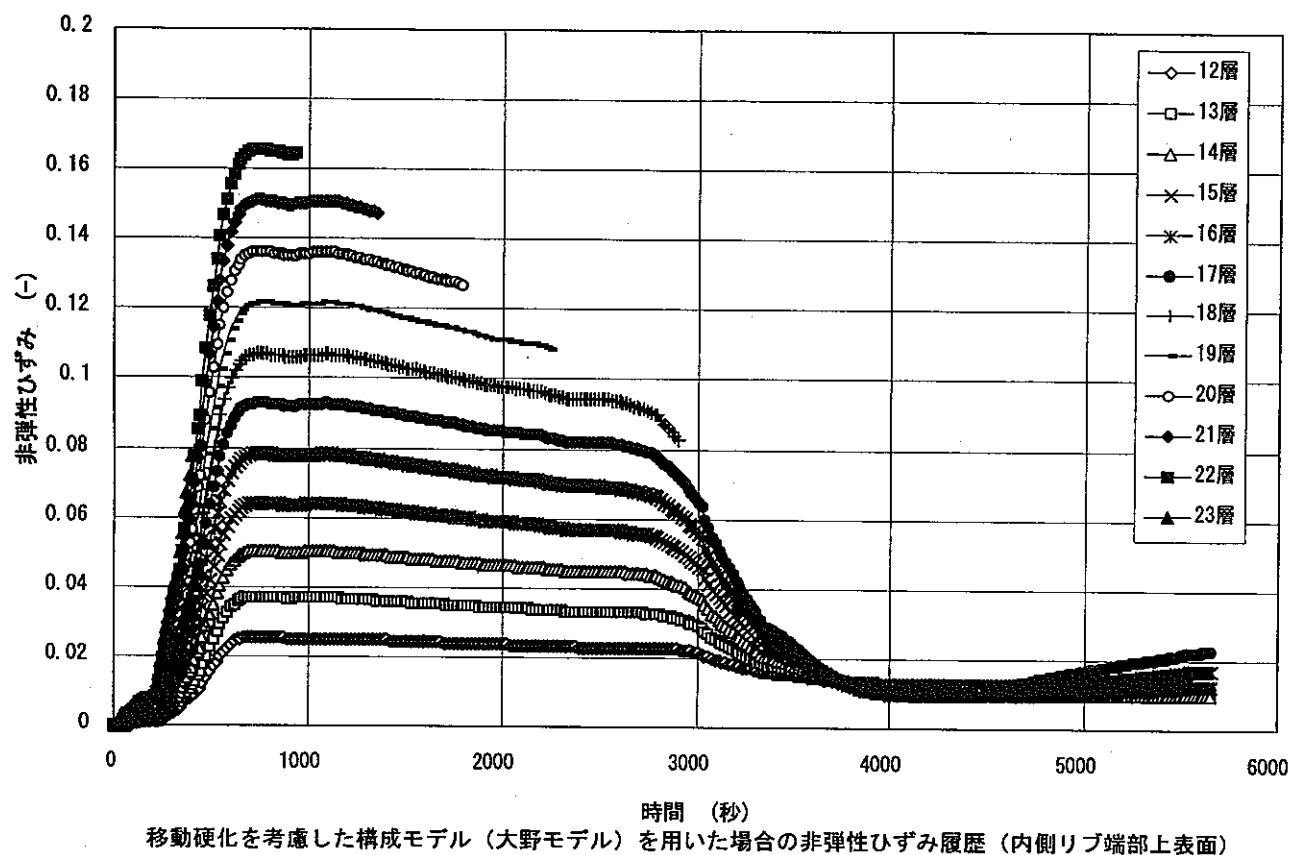


図 B-25 部分ソリッド要素モデルによる非弾性ひずみ分布



図B-26 移動硬化則と等方硬化則の違いによる非弾性ひずみ解析結果の比較

付録 C 機械的健全性判断のためのひずみ目安値

C.1 考えられる破損の形態とその防止

ライナが受ける主要な荷重は熱膨張に起因するものであり、熱膨張を面内変位として吸収すると膜ひずみが、面外変位として吸収すると曲げひずみが、それぞれライナに生じる。

ライナ材に起こり得る破損の形態は、膜ひずみが限界値に達して生じる引張り型と、曲げひずみが限界値に達して生じる曲げ型が想定される。こうした破損に対するひずみ限界値は、引張試験と曲げ試験を基本として定めることができる。

引張試験における伸びは、JIS 規格⁽⁷⁾に従えば破断伸びである。これは破断時における試験片の標点間の伸びであり、局所的な絞りを含んだ量である。概念的には、荷重制御型応力では塑性不安定の防止の観点から一様伸びが、変位制御型応力では直接的に破断伸びが、それぞれ引張試験に対応させた延性の限界として想定できる（図 C-1 参照）。この違いは、荷重制御型応力では局所的な絞りが発生すると一気に破損に至るが、変位制御型応力では局所的な絞りが生じても破断伸びまでは破損には至らないためである。

曲げ試験における伸びは、曲率半径によって定まる。概念的には、引張試験の場合と同じく荷重制御型応力では塑性不安定の防止を考慮する必要があるが、変位制御型応力では表面のひび割れの発生点が延性の限界と考えられる。

C.2 ライナ構造での局部的なくびれ現象に対する配慮

ライナ構造では、大きなひずみはライナプレートの自由熱膨張変形が拘束されることによって生じ、くびれが生じるとすればその位置はひずみの大きい位置に特定できる。このため、そのひずみを破断伸びで制限すれば基本的には破損を防止することができる。しかし、大きくくびれを許容することは、構造的な要因による不安定な変形進行への裕度を損なうことにもなる。したがって、膜ひずみについては、一様伸びを参照することにより参考値を定めておくことが望ましい。

C.3 小型試験片による引張および曲げ試験での伸びとその下限値

引張試験から得られた引張破断伸びの下限値、曲げ試験における表面での割れ限界伸び（曲げ破断伸び）の下限値、および引張試験から得られた引張一様伸びの下限値を、温度依存のない控えめな丸めた数値として工学的に定めようすると、それぞれ図 C-2、図 C-3 および図 C-4 に示すように、告示上

限温度（350°C）を境に傾向の相違が認められる。これは、告示上限温度以下（非クリープ温度域）では青熱脆性によると推定される延性の低下が観察されるが、告示上限温度以上（クリープ領域）では延性が向上するためである。なお、曲げ試験の試験方法を図C-5に示す。

C.4 健全性判断のためのひずみ目安値

ライナ材料SM400Bの高温引張および曲げによる材料試験から求まる伸びの工学的下限値は図C-2および図C-3のように整理される。この下限値をベースとして、膜ひずみおよび曲げひずみに対する健全性判断のための目安値を、下記に従って定めるものとする。

膜+曲げひずみ $\varepsilon_m + \varepsilon_b$ の目安値を、

$$\begin{array}{ll} \varepsilon_m + \varepsilon_b \leq 15\% & \text{室温} \leq T \leq 350^\circ\text{C} \\ \varepsilon_m + \varepsilon_b \leq 30\% & 350^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C} \end{array}$$

とする。

なお、ネッキング（断面のくびれ）による不安定変形防止の観点から、膜ひずみに対する参考値を定める。高温引張試験から求まる一様伸びの工学的下限値は図C-4のように整理される。この下限値をベースとして、膜ひずみに対する健全性判断のための参考値を、下記に従って定める。

膜ひずみ ε_m の参考値を、

$$\begin{array}{ll} \varepsilon_m \leq 5\% & \text{室温} \leq T \leq 350^\circ\text{C} \\ \varepsilon_m \leq 10\% & 350^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C} \end{array}$$

とする。

C.5 延性に影響を及ぼす主要な因子に対する検討

C.5.1 応力の多軸性

ライナの機械的健全性評価において用いるひずみの目安値は、単軸応力状態の材料試験（引張試験及び曲げ試験）の下限値を基本として定めており、特に高温では余裕を持った値となっている。仮に、実機で生じる多軸応力下で材料の延性が低下するとしても、この効果はこの余裕の中に見込まれているという判断をしている。ここでは、この判断の妥当性を、ライナ非弾性解析におけるひずみ履歴の結果及びライナ部分構造模擬試験の結果に基づき示す。

多軸応力状態の指標として、下式で定義される 3 軸係数 (Triaxiality Factor, T.F.)を採用する⁽⁸⁾。

$$T.F. = \frac{|\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3|}{\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}}^{\frac{1}{2}}$$

ただし、 σ_i ($i = 1, 2, 3$) は主応力である。

(1) 実機解析結果における応力状態

3 章で述べた実機の応力解析結果から最大ひずみを生じる点を選定し、3 軸係数の履歴を計算した結果の例を、図 C-6 に示す。減肉形状にかかわらず、3 軸係数は、概ね 1.6 から 2.0 程度の値で推移している。温度は漏えいナトリウムの燃焼と冷却により変化するが、最大ひずみの生じた温度は約 880°C であり、最大ひずみの値は約 22% であった。

(2) 部分構造模擬試験の応力状態

部分構造模擬試験の代表的試験体として、4.5mm 減肉（減肉幅 37.5mm および 30mm）のリブ上付きモデル（試験体 A）およびリブ下付きモデル（試験体 B）を対象とした。試験温度は、実機ライナで最大ひずみが生じる温度と同等の 880°C である。非弾性解析結果をもとに最大ひずみが生じる個所を選定し、3 軸係数の履歴を算定した。結果を図 C-7 に示す。

3 軸係数は押込み量に敏感ではなく、概ね 1.6 から 2.2 程度の値で推移する。これより、部分構造模擬試験は、実機の多軸性をやや保守的にモデル化していることが分かる。これらの試験体の最終的な相当非弾性ひずみは 40% 程度であった。この状態において、いずれの試験片においても割れ等の損傷は生じていなかった。

(3) ひずみ目安値の妥当性

実機と同等以上の多軸性を有する部分構造模擬試験でひずみ目安値を上回る約 40% のひずみを与えると損傷は観察されなかつたことから、実機で生じる程度の多軸性の下でも、ひずみ目安値（膜+曲げひずみ $\leq 30\%$ ）は妥当であると結論できる。

C. 5.2 環境の影響

(1) ナトリウム反応生成物による腐食の効果

ナトリウムと鉄の複合酸化物生成は、基本的には全面腐食による肉減り

となる。長時間ナトリウム浸漬後の破断伸びは、浸漬前と比較して最大で一割の低下があるが、データのばらつき程度で有意な影響は及ぼしていない。実際の現象は短時間に肉減りを伴うことから、この効果による延性低下は考慮しなくともよいと判断できる。また、「燃焼実験Ⅱ」で、約 900°C に加熱された部位の材料試験でも十分な延性が確保されている⁽⁹⁾。

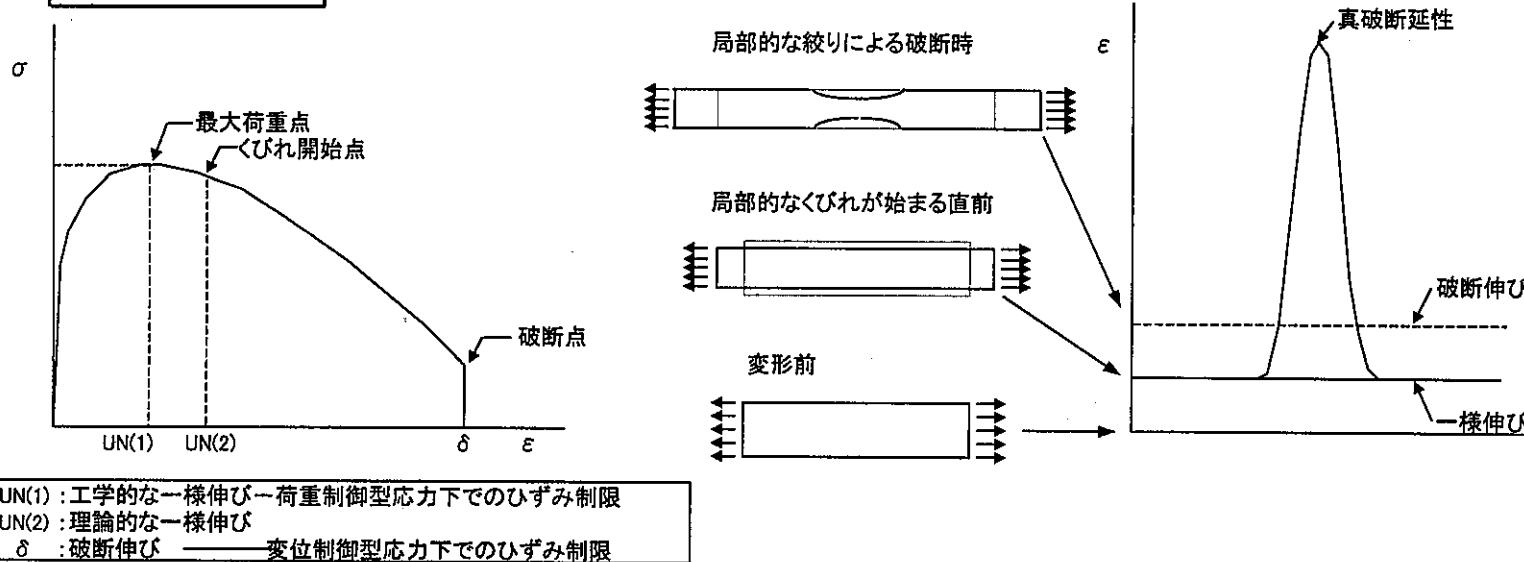
(2) 亜鉛による効果

もんじゅライナの下塗り塗装の主成分は亜鉛で 76% 含有しているが、もんじゅナトリウム漏洩・燃焼後のライナ断面の EPMA 分析では、亜鉛の浸透は観察されていない。また、「燃焼実験Ⅱ」で、約 900°C に加熱された部位の材料試験でも十分な延性が確保されている⁽⁹⁾。よって、亜鉛はナトリウムに捕獲され、鋼中にはほとんど浸透せず、脆化を生じさせないと考えられる。

C.5.3 クリープひずみを伴う場合の延性

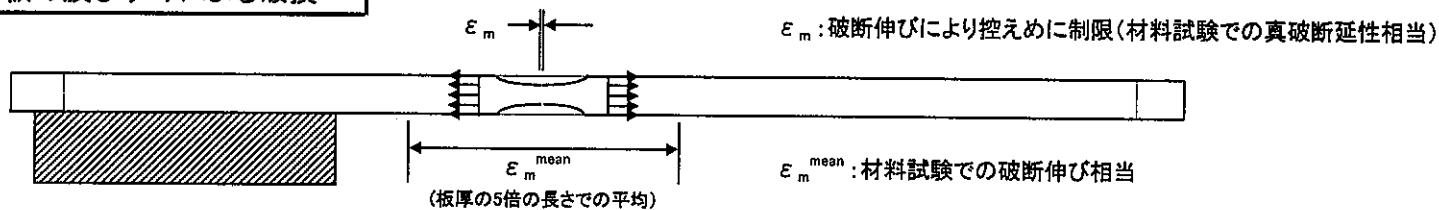
高温での引張試験は、クロスヘッドの変位によるひずみ速度がクリープ速度より遅いため、クリープひずみを伴う試験となっている。また、短時間のクリープ試験結果も、引張試験と同等の破断伸びとなっている。このことから、クリープひずみを伴っても短時間ならばその影響はないと判断できる。

材料試験での伸び



- 87 -

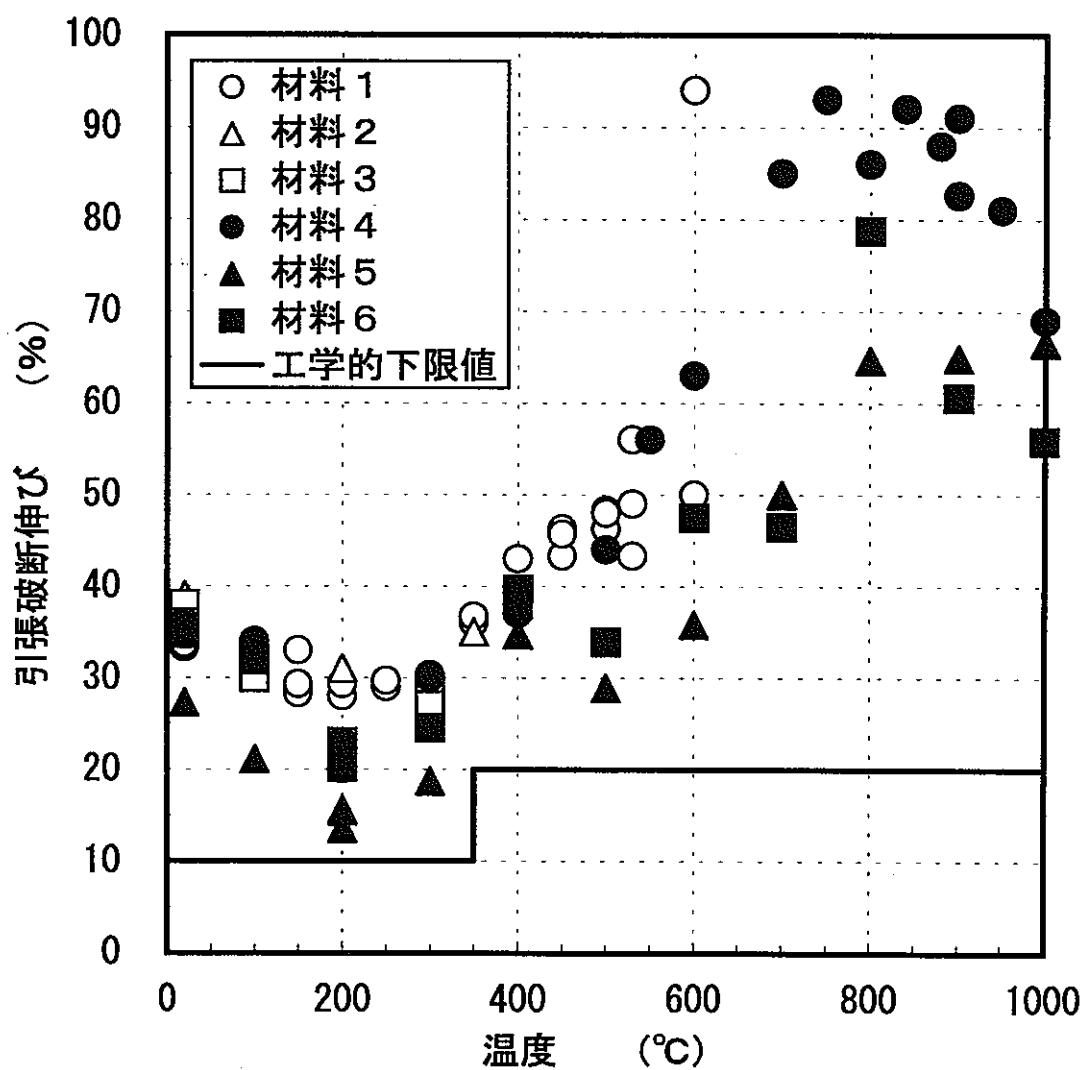
平板の膜ひずみによる破損



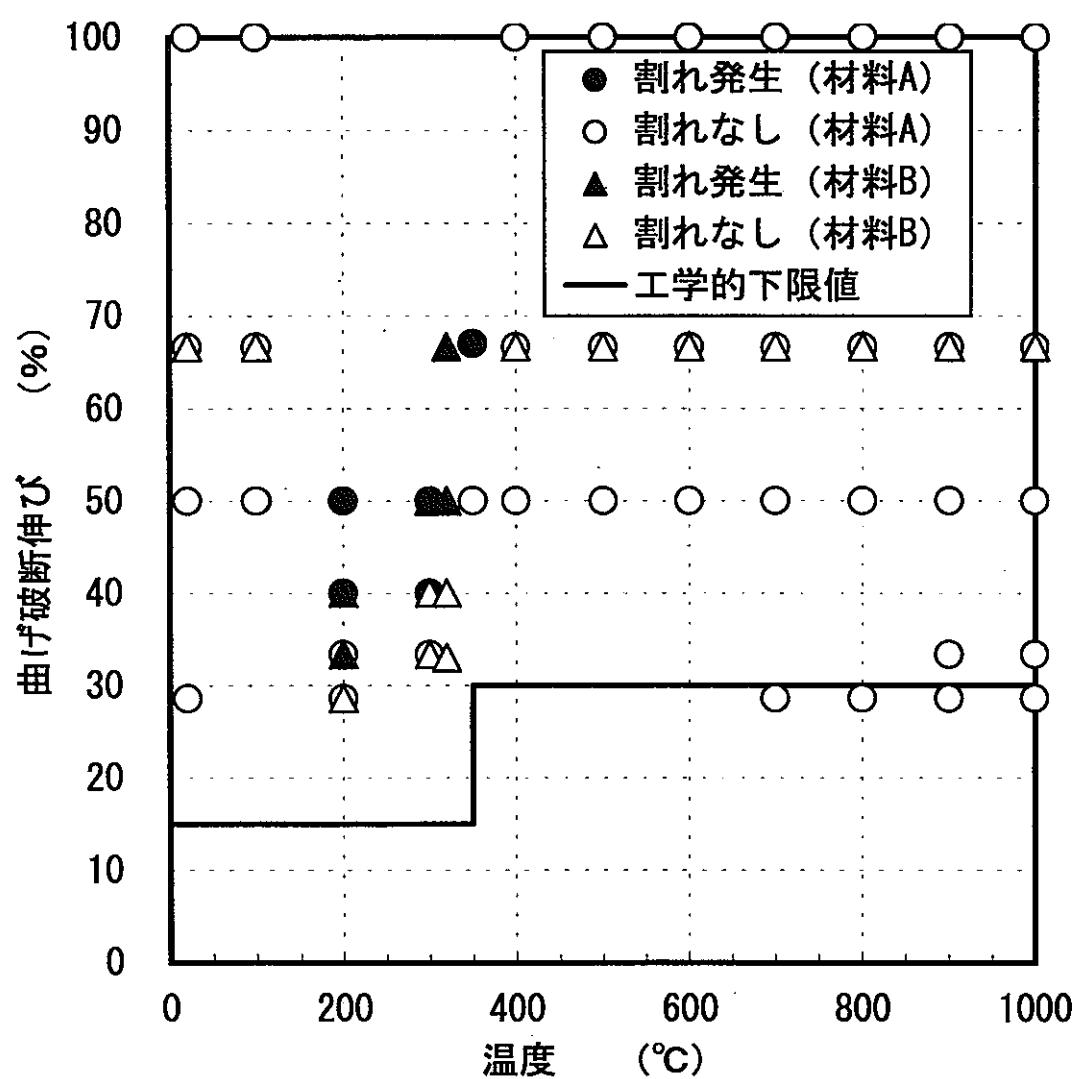
ひずみが一様な部位では値は小さい
→ 拘束の影響を受けて大きなひずみの分布が発生
→ ひずみが高い部位にくびれ現象は特定できる
→ ひずみが高い部位を破断伸びで制限すれば破断を防止できる

くびれを許容して構造的な塑性不安定を防止できるか
→ 有意なくびれは防止するべきである。

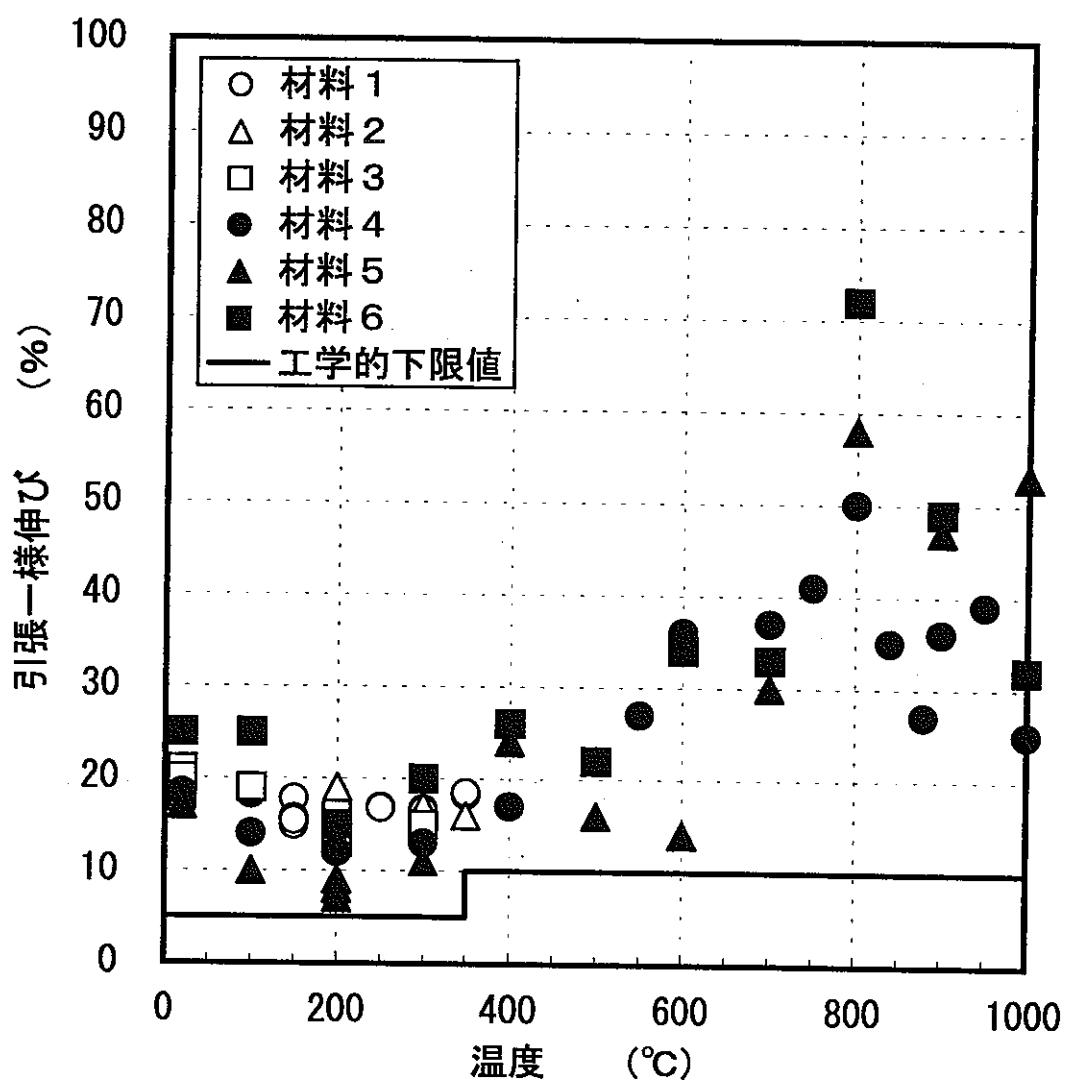
図C-1 膜ひずみの目安値と引張試験での伸びの対応関係



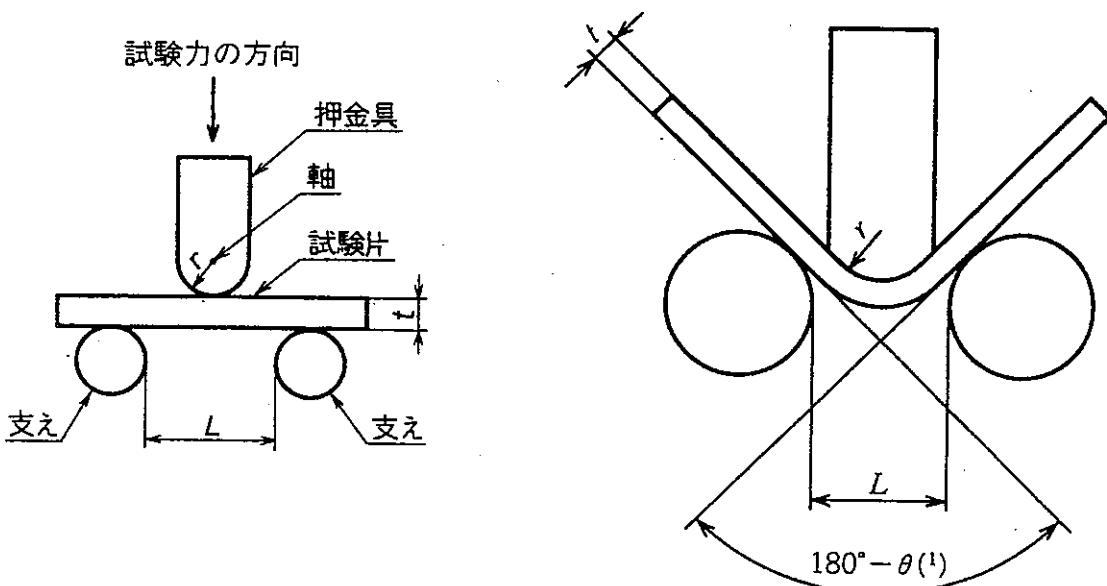
図C-2 引張破断伸びとその工学的下限値



図C-3 曲げ破断伸びとその工学的下限値

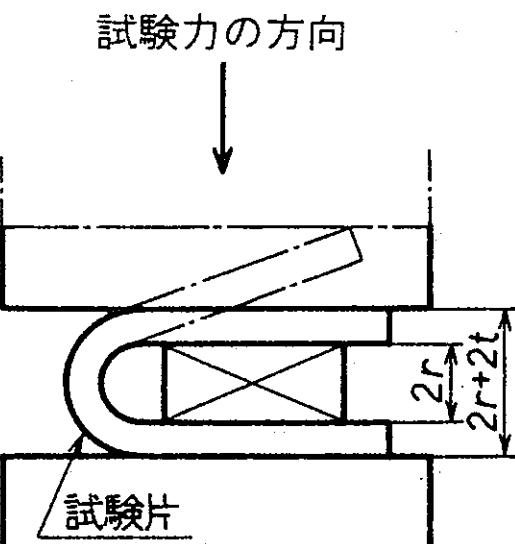


図C-4 引張一様伸びとその工学的下限値

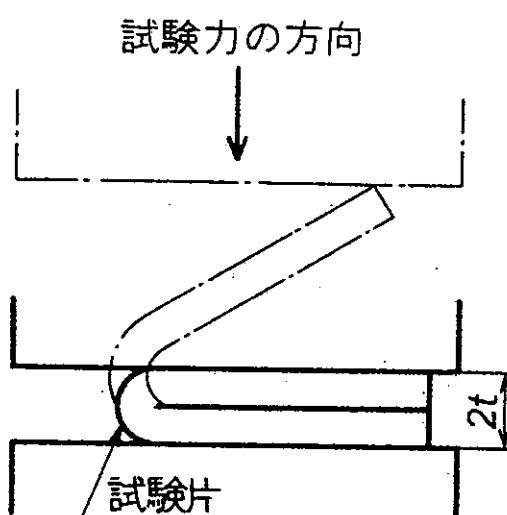


(1) JIS Z 2204-1986「金属材料曲げ試験片」

(a) 押し曲げ法

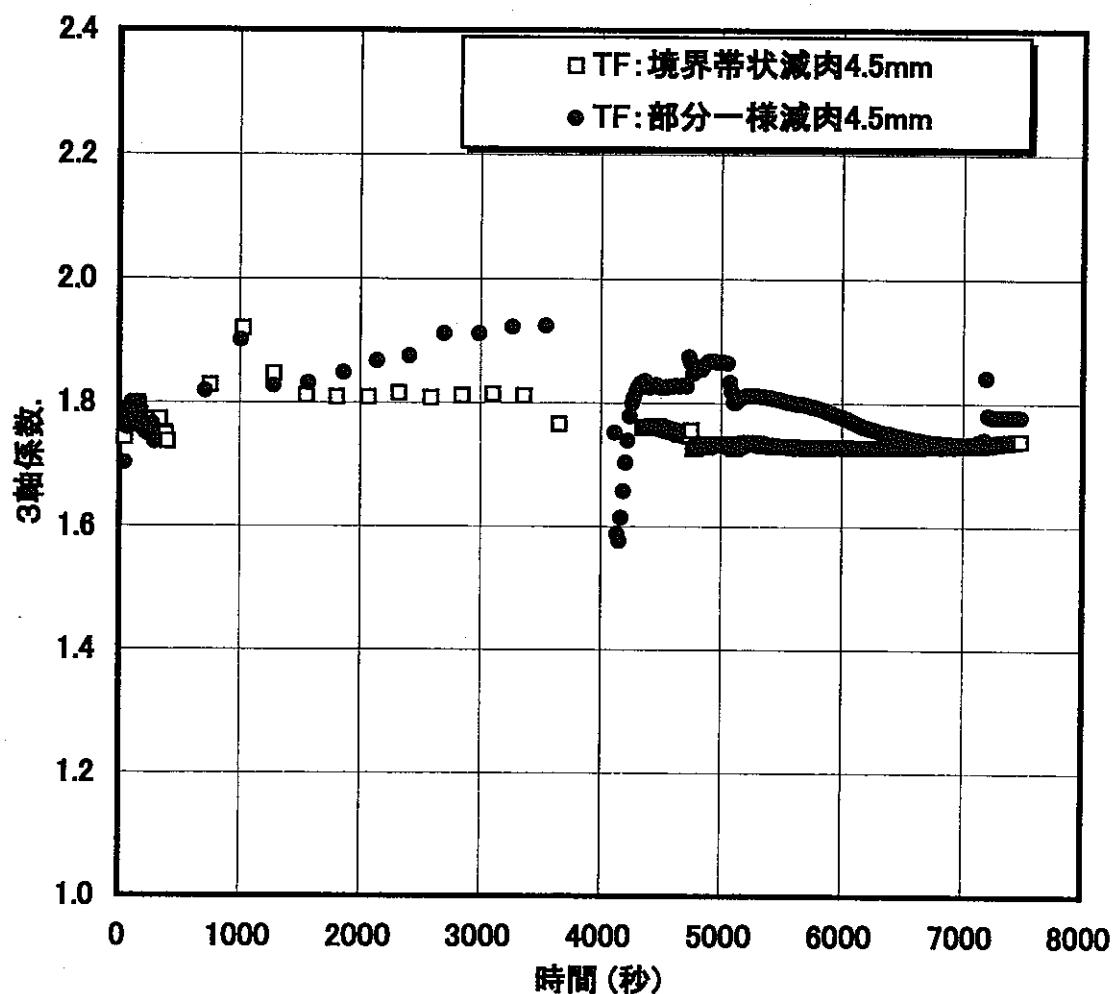


(b) 180 度曲げ

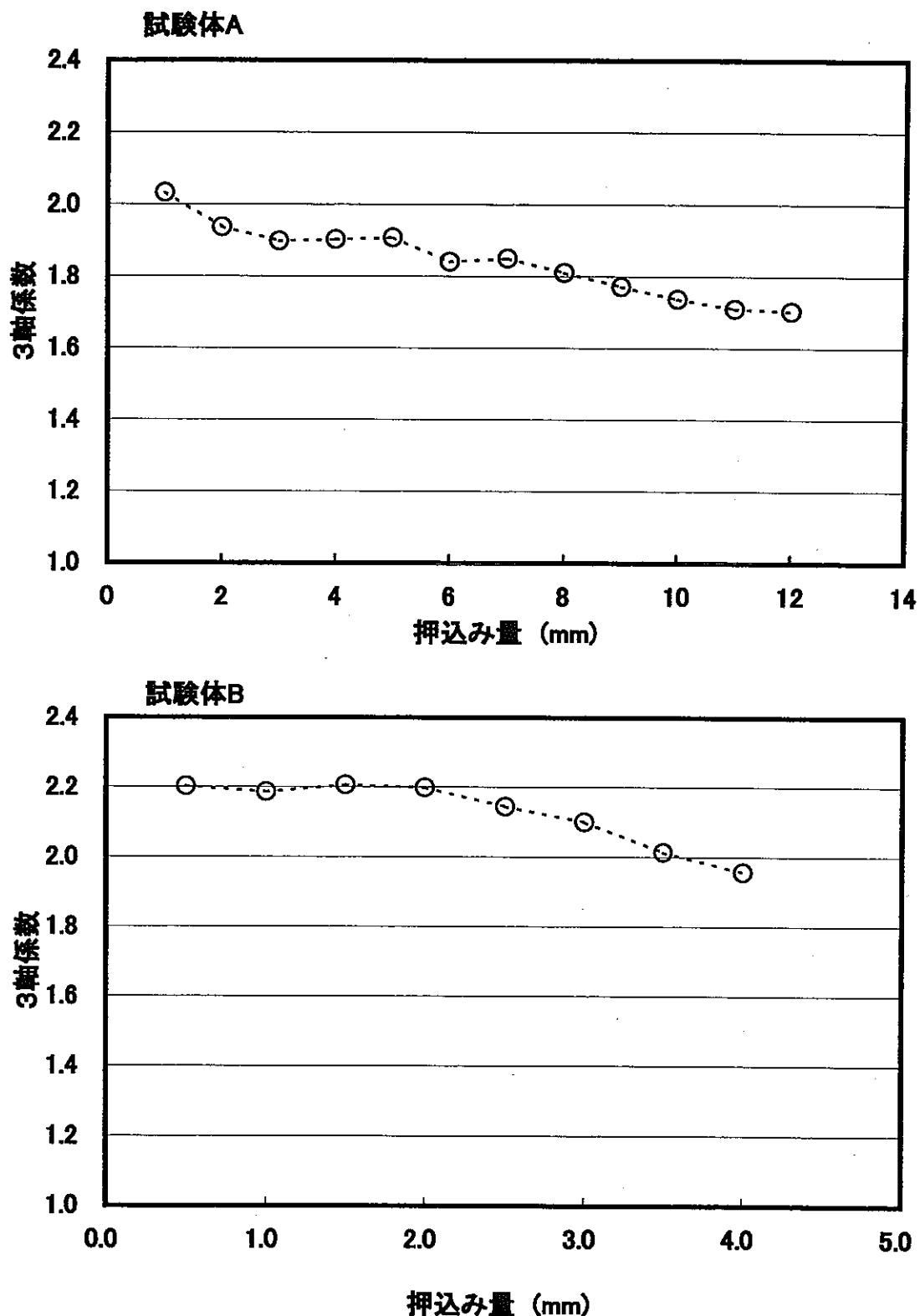


(c) 密着曲げ

図 C-5 曲げ試験の概念



図C-6 実機解析結果の3軸係数



図C-7 部分構造模擬試験体の3軸係数

参考-1 もんじゅ 2次系ライナ材の熱膨張係数

SM400B の瞬時熱膨張係数 α_A と平均熱膨張係数 α_B を次の通り定めた。

表 ライナ材の熱膨張係数

〔単位 : $\times 10^{-6}$ mm/mm°C〕

温度 (°C)	SM400B	
	瞬時熱膨張係数 α_A	平均熱膨張係数 α_B
20	9.1	—
50	11.2	12.2
100	13.4	12.5
150	14.4	12.8
200	14.7	13.2
250	14.8	13.5
300	14.8	13.7
350	15.0	14.0
400	15.5	14.2
450	16.2	14.4
500	16.8	14.6
550	17.3	15.8
600	17.1	15.0
650	15.8	15.1
700	12.7	15.0
750	7.1	14.7
800	-1.9	13.9
850	-15.1	12.6
865 (A_{c3} 変態点)	0.0	11.7
900	19.3	11.9
950	22.3	12.5
1000	25.3	13.0

(備考)

1. α_A は瞬時熱膨張係数
2. α_B は室温からその温度までの平均熱膨張係数
(昇温速度は 5°C/min、昇温過程のデータによる)
3. 変態点付近では変態に伴う体積変化も含む。
4. 変態点で瞬時熱膨張係数を 0 とした。
5. 解析では表の値を線形補間して用いる。

参考文献

- (1) 宮園敏光, 大野修司, 中井良大: 高速増殖原型炉「もんじゅ」2次主冷却系設備におけるナトリウム燃焼解析, JNC TN2400 2000-006, (2000)
- (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—I, PNC TN9410 97-051, (1997)
- (3) 青砥紀身, 平川康, 黒田哲宏: ナトリウム漏えい燃焼実験II報告書—ライナ材料分析結果—, PNC TN9410 97-055, (1996)
- (4) 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, (1997)
- (5) 岩田耕司, 月森和之: 汎用非線形構造解析システム FINAS Version 13.0 使用説明書, PNC TN9520 95-014, (1995)
- (6) 大野信忠, 佐藤守, 高橋由紀夫, 桑原和夫: 温度変動下の SUS304 の繰返し塑性構成式, 機論, 54-501, A(昭 63-5), 1140
- (7) 日本工業規格: 金属材料引張試験方法, JIS Z 2241-1993, (1993)
- (8) ASME: Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Subsection NH
- (9) 内山尚基, 高井俊秀, 宮原信哉, 三宅収, 田辺裕美: ナトリウム漏えい燃焼実験-II 実験データ集, JNC TN9450 97-006, (1997)