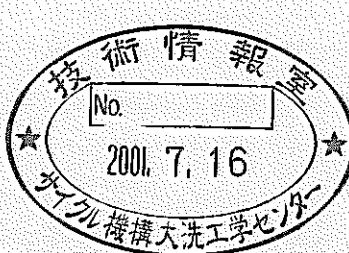


もんじゅ二次系床ライナ材の機械的
健全性判断のためのひずみ目安値
(研究報告)



2001年1月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

もんじゅ二次系床ライナ材の機械的健全性判断のためのひずみ目安値
(研究報告)

浅山 泰¹、小井 衛¹

要旨

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、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、

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

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

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、上記の目安値は、下記の膜ひずみの参考値を考慮して適用するものとする。この参考値は、高温引張試験で得られた一様伸びデータを参照して定めた。

膜 ε_m の参考値を、

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

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

とする。

実機ライナ材料は、漏洩ナトリウムの燃焼による温度変動下において多軸応力状態で変形するが、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妥当であることを確認した。

¹ 大洗工学センター システム技術開発部 構造・材料技術開発 Gr

The strain criterion of the liner material of the secondary coolant system of Monju

Tai ASAYAMA¹, Mamoru KOI¹

ABSTRACT

Based on the lower limit of high temperature tensile and bending test results of SM400B, a criterion of strain for the Monju liner was proposed:

Membrane and bending strain : $\varepsilon_m + \varepsilon_b$

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

This criterion must be applied with considering the following reference value for membrane strain, in order to prevent instable fracture arising from necking. This reference value was determined based on uniform elongation obtained by high temperature tensile tests.

Membrane strain : ε_m

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

The liner is subject to multiaxial stress state under temperature history due to heating by contacting to high temperature sodium and subsequent cooling. It was shown that the above strain criterion was valid under such circumstances, including other factors that could affect material properties.

¹ Structure and Material Research Group, System Engineering Technology Division, Oarai Engineering Center

目次

1. はじめに	1
2. ひずみ目安値	2
3. ひずみ目安値の根拠	3
3. 1 破損の形態とその防止	3
3. 2 材料試験	3
3. 2. 1 材料	
3. 2. 2 引張試験	
3. 2. 3 曲げ試験	
3. 3 影響因子	6
3. 3. 1 多軸効果	
3. 3. 2 環境効果	
3. 3. 3 クリープひずみの効果	
3. 4 ひずみ目安値設定の方針と結果	7
3. 4. 1 方針	
3. 4. 2 設定結果	
4. まとめ	10
謝辞	11
参考文献	12
付録A 高温における一様伸びの算出方法	A 1
付録B ナトリウム浸漬が引張一様伸びおよび引張破断伸びに及ぼす影響	B 1

表リスト

表1	供試材の寸法形状および化学成分	13
表2	試験片の寸法形状	14

図リスト

図 1	膜ひずみの目安値と引張試験での伸びの対応関係	1 5
図 2	引張破断伸びとその工学的下限値	1 6
図 3	引張一様伸びとその工学的下限値	1 7
図 4	曲げ試験の概念	1 8
図 5	曲げ破断伸びとその工学的下限値	1 9
図 6	実機解析における3軸係数の履歴	2 0
図 7	部分構造模擬試験における3軸係数の履歴	2 1

1. はじめに

高速増殖炉「もんじゅ」の二次系ライナは、ナトリウム漏えい事故時に漏えいナトリウムを貯留すると共に、ナトリウムと建屋コンクリートの直接接触による反応を防止するため設置されている。

漏えいナトリウムがライナ上に滴下すると、ライナに局所的な温度分布が生じる。この温度分布により、熱ひずみが発生する。従来は、530°Cを最高温度として想定し、このような変形が生じた場合でもライナと建屋コンクリートが接触しないよう設計が行われてきた。この設計の妥当性は、平成7年の二次冷却系熱電対ウェル損傷によるナトリウム漏えいにおいても、局部的に530°Cを超える部位が生じても熱変形によりライナが建屋に荷重を与えたかったことで確認できた。

本報では、より広い温度域において、ライナ材が機械的健全性を保ち得る条件を明らかにすることを目的として、もんじゅ二次系床ライナ材の機械的健全性判断のためのひずみ目安値（以下、ひずみ目安値と呼ぶ）を設定した。実機ライナ材料は、漏洩ナトリウムの滴下による加熱とその後の冷却による温度変動下において多軸応力状態で変形するが、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を考慮した上で設定した。

2章でひずみ目安値を、3章でその設定根拠を示した。

2. ひずみ目安値

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、ひずみ目安値を以下のように定めた。根拠は、第3章に述べる。

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、上記の目安値は、下記の膜ひずみの参考値を考慮して適用するものとする。この参考値は、高温引張試験で得られた一様伸びデータを参照して定めたものである。

膜 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。

実機ライナ材料は、漏洩ナトリウムの滴下による加熱とその後の冷却による温度変動下において多軸応力状態で変形するが、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妥当であることを確認した。

3. ひずみ目安値の根拠

3. 1 破損の形態とその防止

本節では、実機ライナに漏えいナトリウムが落下した場合に、ライナに想定される破損の形態とその防止の考え方を示す[1]。

ナトリウム漏えい時に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、それぞれライナ材に生じる。ライナ材は基本的にひずみ制御型の挙動を示す。

ライナ材に起こり得る破損形態は、膜ひずみが限界値に達して生じる引張型と、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 規格に従えば破断伸びである[2]。これは破断時の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。ただし、破断部近傍の真破断延性よりもかなり小さな値となるのが普通である。これに対して、局所的な絞りを除いた一様伸びという量もある。荷重制御形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。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至らないためである。この考え方を模式的に図1に示す。

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形応力では塑性不安定の防止を考慮する必要があるが、曲げ試験でこのひずみを特定することは困難である。また、引張試験の破断伸びに対応するのは、曲げ破断であると考えられるが、表面でのひび割れの発生点を延性の限界と考えておけば安全側となる。

以上の観点から、膜ひずみは、引張試験での破断伸びを基本としながら一様伸びも考慮して定めることとする。また、曲げひずみは、曲げ試験での表面での割れ限界伸びから定まる値に基づいて定めることとする。

3. 2 材料試験

本節では、ひずみ目安値を策定するために用いた材料試験の概要を述べる。

3. 2. 1 材料

ひずみの目安値を定めるために、「もんじゅ」二次系床ライナ材と同じ規格の

SM400B 材（溶接構造用圧延鋼材 JIS G3106-1995 SM400B）を 7 ヒート用いた。これらをそれぞれ、CS0 ヒート、CS1 ヒート、CS2 ヒート[3]、CS3 ヒート、CS4 ヒート、CS5 ヒート、CS6 ヒートとする。各ヒートの製品形状および化学成分を表 1 に示す。

3. 2. 2 引張試験

(1) 試験片

引張試験片の形状は中実丸棒を基本として、JIS 規格[4]の II 型試験片（つば付き丸棒試験片）に準拠した。試験片は素材の圧延方向に板厚中央から採取した。ヒートと試験片形状の対応を表 2 に示す。

(2) 試験方法

引張試験はに基づき、JIS 規格[4]に準拠して実施した。試験温度は、ナトリウム漏えい時にライナで発生すると考えられる上限温度よりも高い範囲までとし、室温～1000°Cとした。ひずみ制御とし、ひずみが約 3% に至るまでひずみ速度 0.3%/min、それ以上のひずみではクロスヘッドの速度を 7.5%/min とした。

(3) 試験結果

① 一様伸び

一般に、一様伸びは応力ひずみ線図上の最高荷重点に対応するひずみとして定義されるが、高温においては、この定義は必ずしも厳密な一様伸びを表さない可能性がある。最高荷重点は、材料の加工硬化と引張伸びによる断面減少のバランスで決定される。引張伸びによる断面減少が卓越すれば、局所的な絞り（ネッキング）を生ずることなく、一様に変形していくても荷重は減少する。一様伸びは、その後ネッキングを生じる瞬間ににおける伸びと考えるべきである。最高荷重点とネッキングの開始時点は、比較的低い温度域では大差がないが、高温では差が大きくなる傾向がある。そこで、本報では、一様伸びを、ネッキングの開始時点と定義した。具体的には、試験後に、試験片上の伸びの分布を求めることにより一様伸びを算出した。算出方法の詳細を付録 1 に示す。

一様伸びを図 2 に示す。同図には既往研究結果をとともに示す。一様伸びは、室温から温度の上昇とともに減少し、200°C 付近で最小値をとる。これは青熱脆性の効果であると考えることができる。その後は温度の上昇とともに増加に転じ、ややばらつきはあるが 800°C 付近で最大値を取り、900°C 以上で再び減少する傾向を示す。最小値は、200°Cにおいて CS4 ヒートの 7% であった。一様伸びが 10% 未満となったのは、200°C のみであった。

図 2 には、350°C（告示温度域の上限）を区分点として、350°C 以下および 350°C を越える温度で、それぞれ温度依存性を持たないように設定した工学的下限値を示す。本下限値は、ひずみ目安値の設定に資することを目的として、できるだけ簡明に、かつ材料

特性を有効に引き出せるように設定したものである。350°C以下では5%、350°Cを越える温度では10%とした。

② 破断伸び

破断伸びを既往研究結果とともに図3に示す。破断伸びは、一様伸びと同じく室温から温度の上昇とともに減少し、200°C付近で最小値を取ったあと増加に転じ800°C付近で最大値を取り、900°C以上で再び減少する傾向を示す。最小値は、200°CにおいてCS4ヒートの14%であった。

図3には、一様伸びと同様に、350°C（告示温度域の上限）を区分点として、350°C以下および350°Cを越える温度で、それぞれ温度依存性を持たないように設定した工学的下限値を示す。本下限値は、ひずみ目安値の設定に資することを目的として、できるだけ簡明に、かつ材料特性を有効に引き出せるように設定したものである。350°C以下では10%、350°Cを越える温度では20%とした。

3. 2. 3 曲げ試験

(1) 試験片

試験片は素材の圧延方向に採取した。試験片形状はJIS規格[5]の1号試験片に準拠して製作した。また、CS5(母材)については、試験機容量の関係上、表側と裏側を約1mmずつ切削して試験片を製作した。

(2) 試験方法

JIS規格[6]の押し曲げ法に準拠して曲げ試験を実施した。室温～1000°Cの温度範囲で試験を実施した。試験片を試験機に据え付け所定の温度まで加熱した後押し曲げた。そして炉冷または空冷にて室温まで冷却した後、試験片の表面に割れが発生したかを肉眼にて確認した。割れないものについてはさらに所定の温度まで加熱し180°曲げまたは密着曲げを行い、冷却後に割れの有無を目視にて観察した。曲げ試験の概念図を図4に示す。

(3) 試験結果

小型曲げ試験結果を図5に示す。最も厳しい温度は200°Cであり、曲げひずみ33%でCS6ヒートの試験片表面に割れが観察された。次に厳しい温度は300°Cであり、曲げひずみ40%でCS5ヒートに割れが観察された。この他に350°Cでも割れが観察されたが、これ以外の温度では割れは観察されなかった。割れが観察された温度域は、青熱脆性が現われる温度域と考えることができる。

図5には、一様伸びと同様に、350°C（告示温度域の上限）を区分点として、350°C以下および350°Cを越える温度で、それぞれ温度依存性を持たないように設定した工学的

下限値を示す。本下限値は、ひずみ目安値の設定に資することを目的として、できるだけ簡明に、かつ材料特性を有効に引き出せるように設定したものである。350°C以下では15%、350°Cを越える温度では30%とした。

3. 3 影響因子

本節では、3. 2節で検討した小型材料試験結果をもとにひずみ目安値を定めることの妥当性を検討するため、小型材料試験には現れないが、実機ライナでは考慮すべきと考えられる影響因子について検討する。

3. 3. 1 多軸効果

3. 2節では、単軸引張試験及び三点曲げ試験により材料の延性限界を検討し、引張破断伸び、引張一様伸び、曲げ破断伸びについて工学的下限値を設定したが、ナトリウム漏洩・燃焼が生じた場合には実機ライナはその構造上の特徴により多軸応力状態となると考えられる[1]。そこで、本項では、実機で生じると考えられる多軸応力状態が延性限界に及ぼす効果を検討する。

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[7]。

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

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

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6に示す[1]。減肉形状に係らず、3軸係数は、概ね 1.6 から 2.0 程度の値で推移している。試験温度はナトリウムの滴下と冷却により変化するが、最大ひずみは約 800°Cにおいて生じ、その値は相当塑性ひずみで約 22% と評価された。

(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[1]。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

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。これと（1）の知見から、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塑性ひずみは 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

880°Cにおいて、実機と同等以上の多軸性を有する部分構造模擬試験約 40%のひずみを与えても損傷は観察されなかったことから、実機で生じる多軸性の下でも、3. 2 節で定めた工学的下限値は妥当であると結論できる。また、880°Cにおける延性は、引張破断伸びでばらつきはあるが約 80%程度、曲げ破断伸びは 100%以上である（図 2、図 5）。このことから、多軸性による延性限界の低下は、引張破断伸びに着目して、最も大きくて 1/2 未満であると判断できる。

3. 3. 2 環境効果

（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程度低下する場合があるが、データのはらつき程度で有意な影響は及ぼしていない（付録 2 参照）。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[1]。

（2）亜鉛

もんじゅライナの下塗り塗装の主成分は亜鉛で約 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[1]。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。

3. 3. 3 クリープひずみの効果

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、引張試験とほぼ同等の破断伸びとなっている[3]。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。

3. 4 ひずみ目安値設定の方針と結果

3. 4. 1 方針

(1) 基本的考え方

3. 1 節で検討したように、後者は、膜ひずみは、引張試験での破断伸びを基本としながら一様伸びも考慮して決定することとする。

ライナの変形モード、および、3. 2 節で検討したように、引張破断伸びおよび曲げ破断伸びは各温度域で十分な値を有していることを考慮すると、ひずみ目安値は、膜ひずみと曲げひずみの和について設定することが現実的である。

ライナのひずみ分布は局所的であり、最大ひずみが生じる領域は極めて小さいため[1]、不安定変形が生じる恐れはないと考えられるが、膜ひずみの値が相対的に大きい場合には、その分布が局所的であり、不安定変形が発生しないことを確認しておくことが望ましい。したがって、このような確認を行うべき膜ひずみの値を参考値として設定する。

(2) 温度依存性

3. 2 節の引張試験結果より、一様伸び、破断伸び、割れ発生曲げひずみとも、明確な温度依存性を示すことが分かる。ひずみ目安値設定に当たっては、以下の方針を採用することとする。

①ライナで想定される温度域を十分保守的にカバーすること

ナトリウム燃焼が生じた場合にライナ材料で想定される最高温度は、880°Cである。最も保守的に想定しても 950°C である[1]。したがって、ひずみ目安値は、室温～1000°C の範囲で設定する。

②ライナ材料の特性を生かせるようにすること

3. 2 節で検討した通り、約 350°C 以下では、延性限界は青熱脆性の影響を受けるが、これ以上の温度域では延性限界は高くなる。この特性を生かすために、350°C を区分点として、350°C 以下では低めの目安値を、350°C を越える温度では高い目安値を設定する。

④簡明かつ保守的であること

ひずみ目安値はライナ材の機械的健全性判断に用いるものであるため、簡明かつ保守的であることが望ましい。したがって、②で設けた温度区分内（350°C 以下および 350°C を越える）では、目安値は一定とする。

(3) 影響因子の取扱

3. 2 節で検討したように、ライナ材料の延性限界は、基本的に引張試験および曲げ試験の結果に基づいて合理的に設定できるが、多軸効果に関しては、保守性を考慮して最大 1/2 程度の延性限界の低下を見込むこととする。

3. 4. 2 設定結果

膜+曲げひずみの目安値を、引張破断伸びおよび曲げ破断伸びの工学的下限値に基づき、以下のように定める。

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、上記の目安値は、膜ひずみの参考値を考慮して適用するものとする。この参考値は、高温引張試験で得られた一様伸びの工学的下限値に基づき、以下のように定める。

膜 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。

4. まとめ

本報では、高速増殖炉「もんじゅ」の二次系ライナ材が機械的健全性を保ち得る条件をあきらかにすることを目的として、広い温度域において、引張試験と曲げ試験を実施し、その結果を基本としてライナの機械的健全性を判断のためのひずみ目安値を明らかにした。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、和田（現）要素技術開発部長、一宮（現）システム技術開発部FBRシステムグループリーダー・研究主席および森下システム技術開発部構造・材料技術開発グループリーダーには大所高所から材料強度の本質に迫るご指導をいただいた。また、試験結果の整理には、システム技術開発部構造・材料技術開発グループ安藤昌教氏にご尽力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

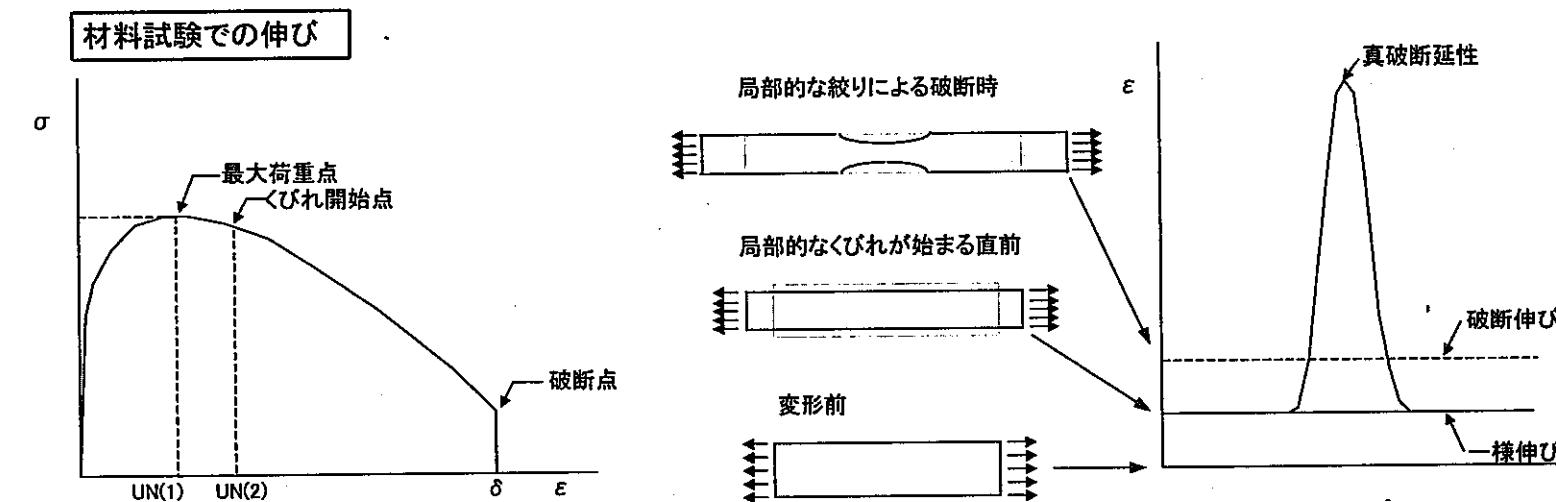
- [1] 一宮他、もんじゅ 2 次系床ライナの機械的健全性について、JNC TN2400 2000-005 (2000)
- [2] 日本工業規格 金属材料引張試験方法 JIS Z 2241-1993 (1993)
- [3] 加藤他、ライナ材の高温強度試験〔第 1 報〕SM400B 高温引張及びクリープ特性、PNC ZN9450 97-011 (1996)
- [4] 日本工業規格、鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法、JIS G0567-1993 (1993)
- [5] 日本工業規格、金属曲げ試験片、JIS Z2204-1996 (1996)
- [6] 日本工業規格、金属材料曲げ試験方法、JIS Z2248-1996 (1996)
- [7] ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Subsection NH (1998)

表1 供試材の寸法形状および化学成分

素材識別番号	製品形状・T×W×L(mm)	主要化学成分(%)					熱処理
		C ≤0.20	Si ≤0.35	Mn 0.60-1.40	P ≤0.035	S ≤0.035	
CS0	8×2,500×4,100	0.13	0.27	1.12	0.014	0.002	焼きならし
CS1	25×1,524×3,048	0.13	0.23	1.15	0.018	0.003	無し
CS2	16×2,438×9,144	0.13	0.20	0.64	0.021	0.002	無し
CS3	16×2,438×6,096	0.15	0.20	1.07	0.018	0.001	無し
CS4	6×2,000×6,000	0.13	0.21	0.71	0.026	0.005	無し
CS5	6×2,000×6,000	0.10	0.14	0.72	0.009	0.002	無し
CS6	6×2,000×6,000	0.12	0.16	0.76	0.015	0.004	無し

表2 試験片の寸法形状

ヒート	引張試験	出典	曲げ試験	出典
CS0	φ 6mm × GL30mm	[3]	—	—
CS1	φ 10mm × GL50mm	—	—	—
CS2	φ 10mm × GL50mm	[4]	—	—
CS3	φ 4mm × GL20mm	[4]	—	—
CS4	φ 4mm × GL20mm	—	—	—
CS5	—	—	W20 × 60L × 4t	—
CS6	φ 4mm × GL20mm	—	W20 × 60L × 4t	—



UN(1) : 工学的な一様伸び - 荷重制御型応力下でのひずみ制限
 UN(2) : 理論的な一様伸び
 δ : 破断伸び — 変位制御型応力下でのひずみ制限

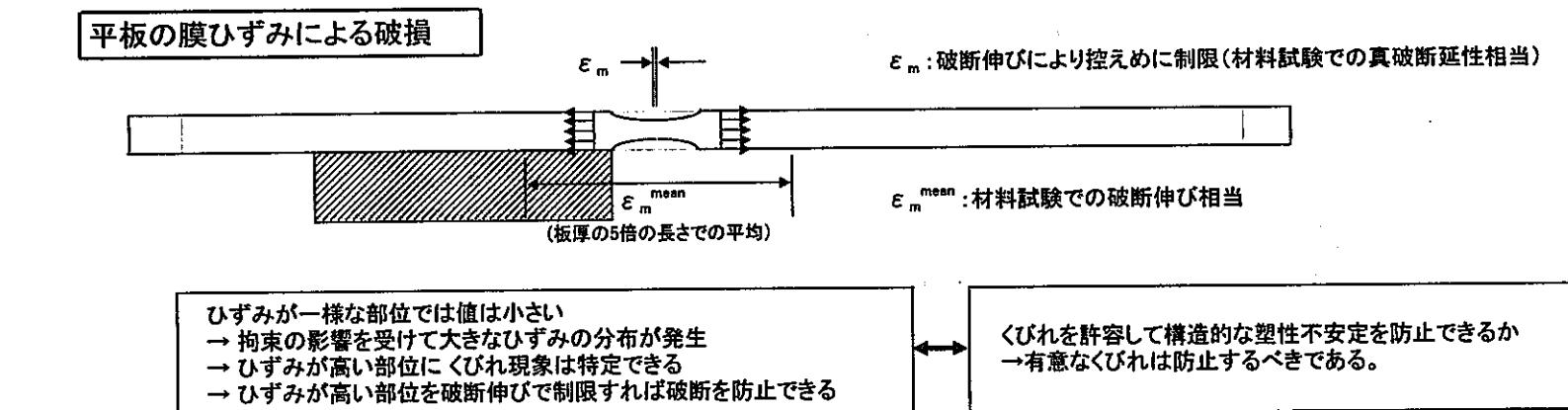


図1 膜ひずみの目安値と引張試験での伸びの対応関係

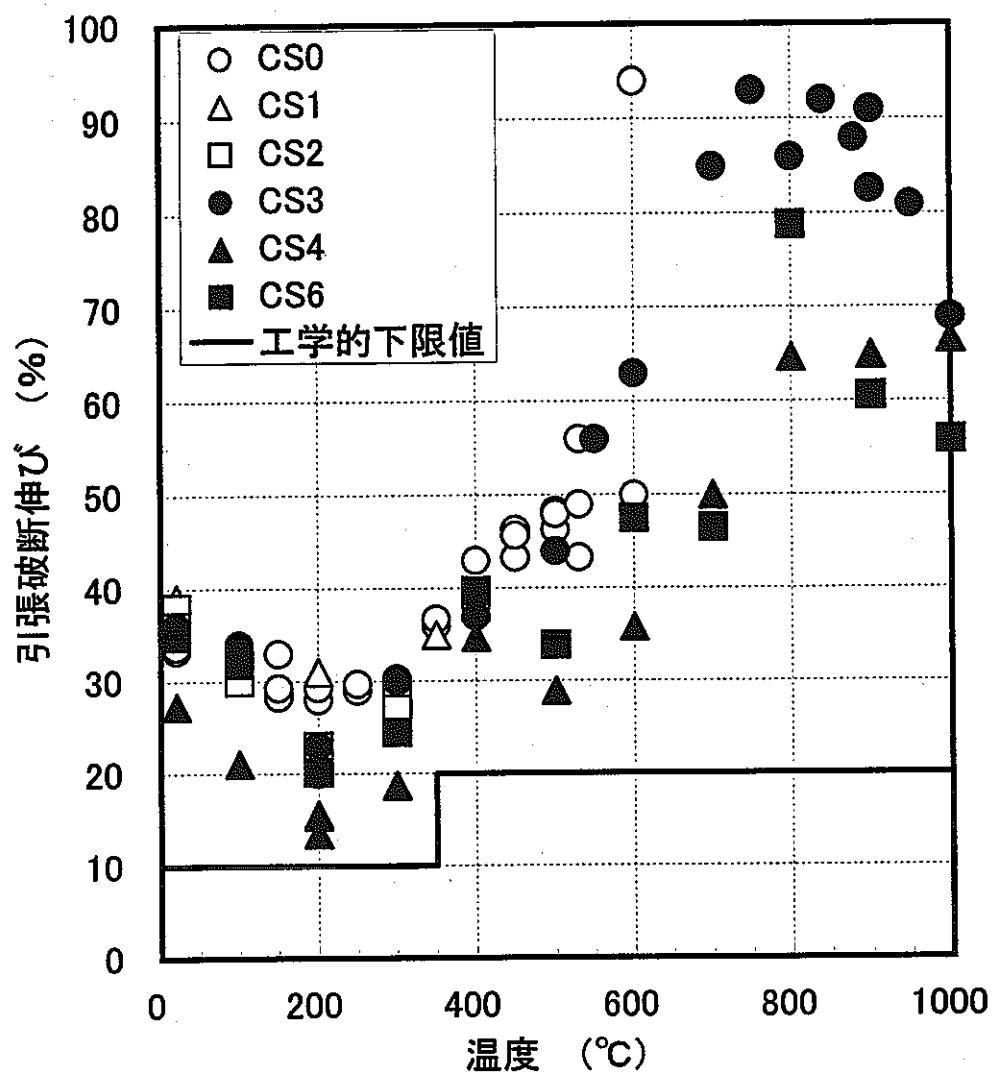


図2 引張破断伸びとその工学的下限値

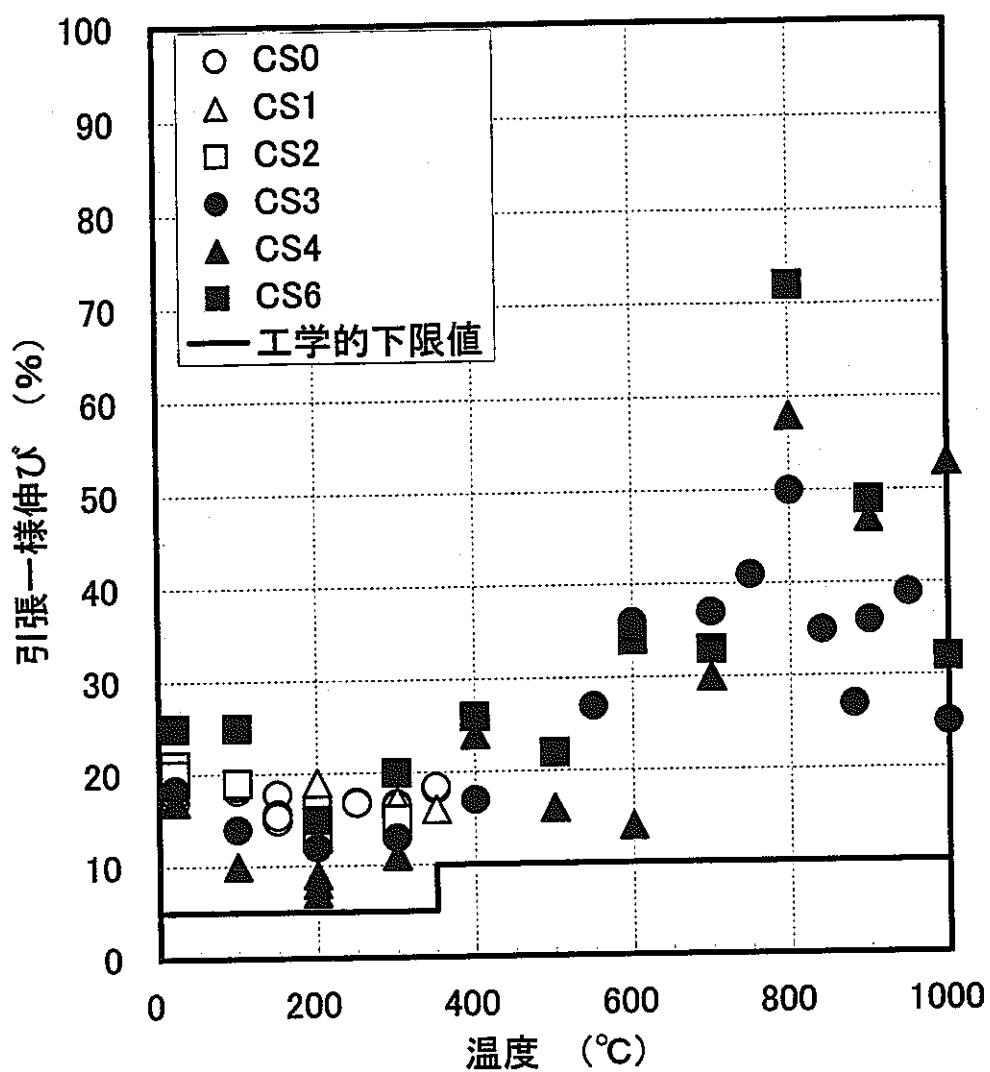
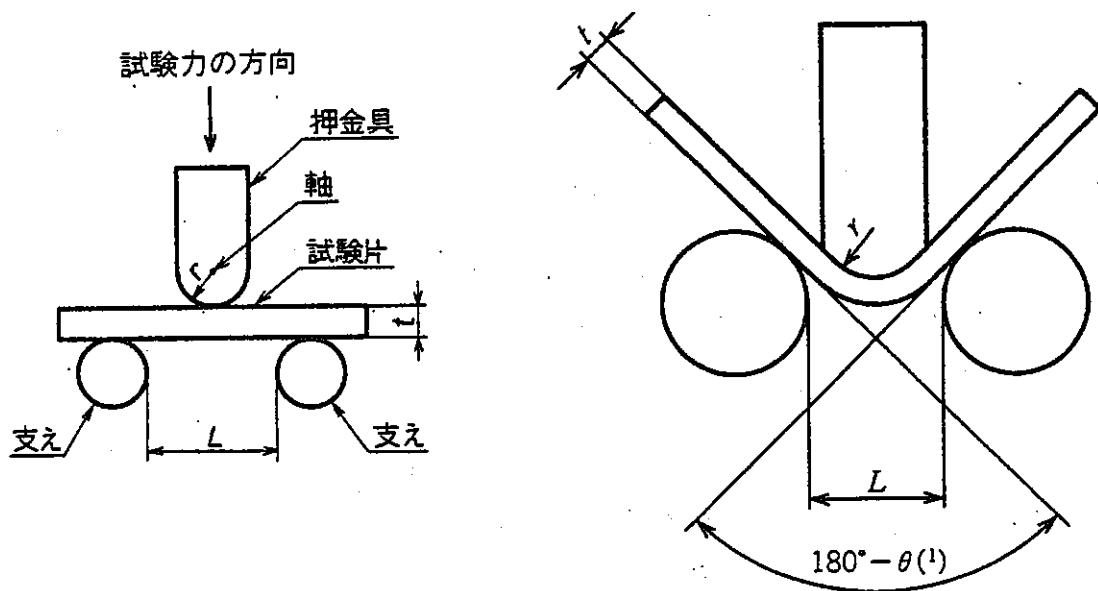
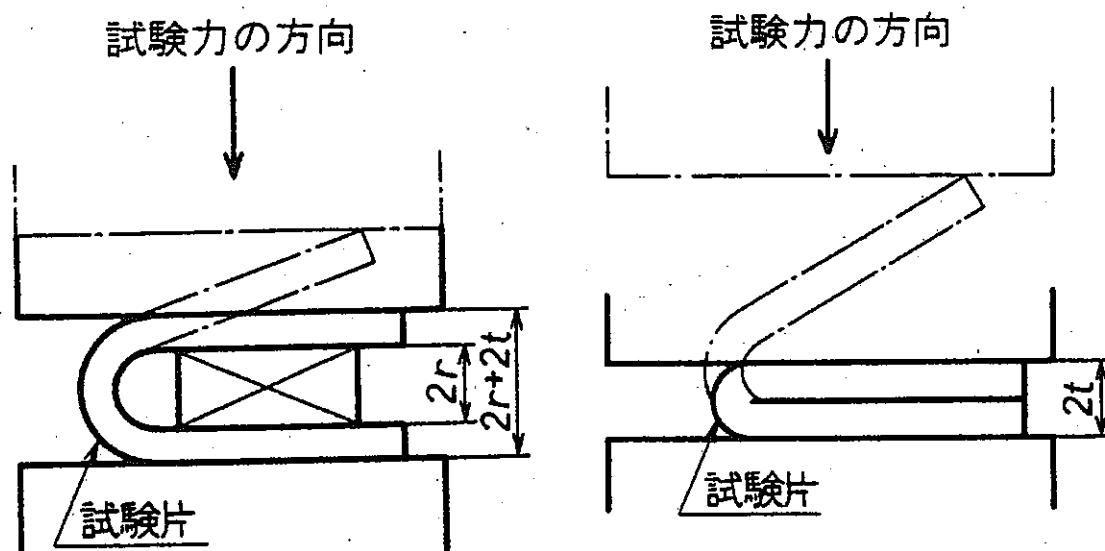


図3 引張一様伸びとその工程的下限値



(1) 押し曲げ法



(2) 180 度曲げ

(3) 密着曲げ

図4 曲げ試験の概念

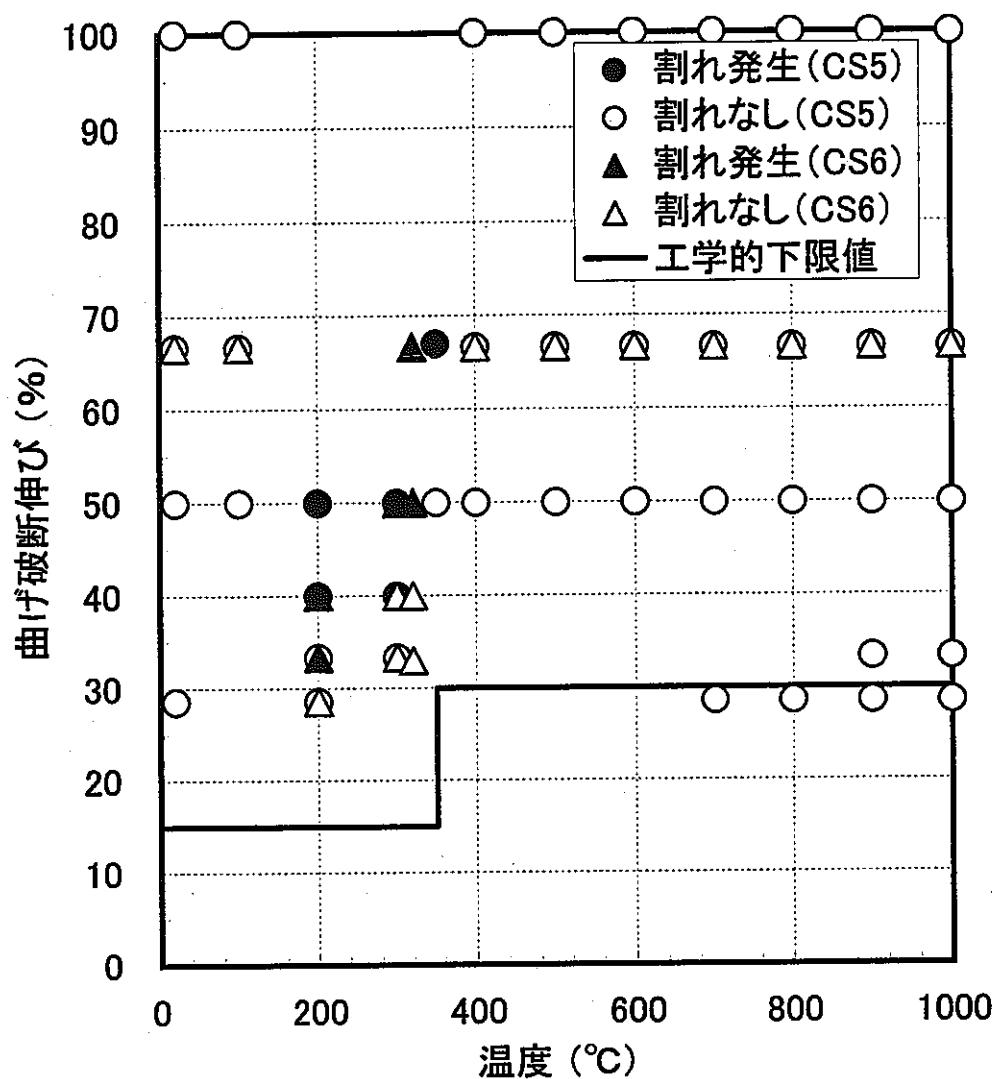


図5 曲げ破断伸びとその工学的下限値

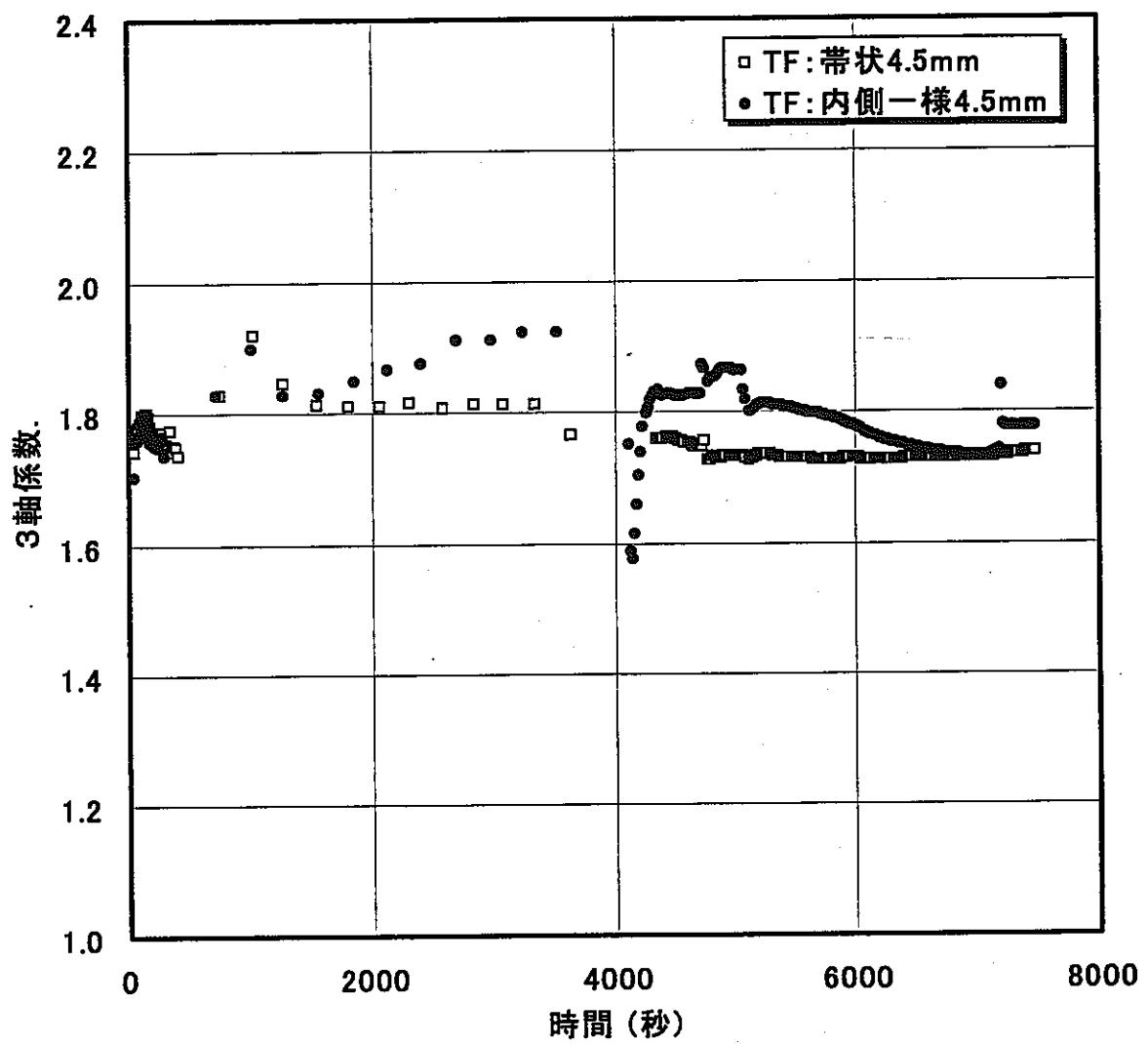


図6 実機解析における3軸係数の履歴

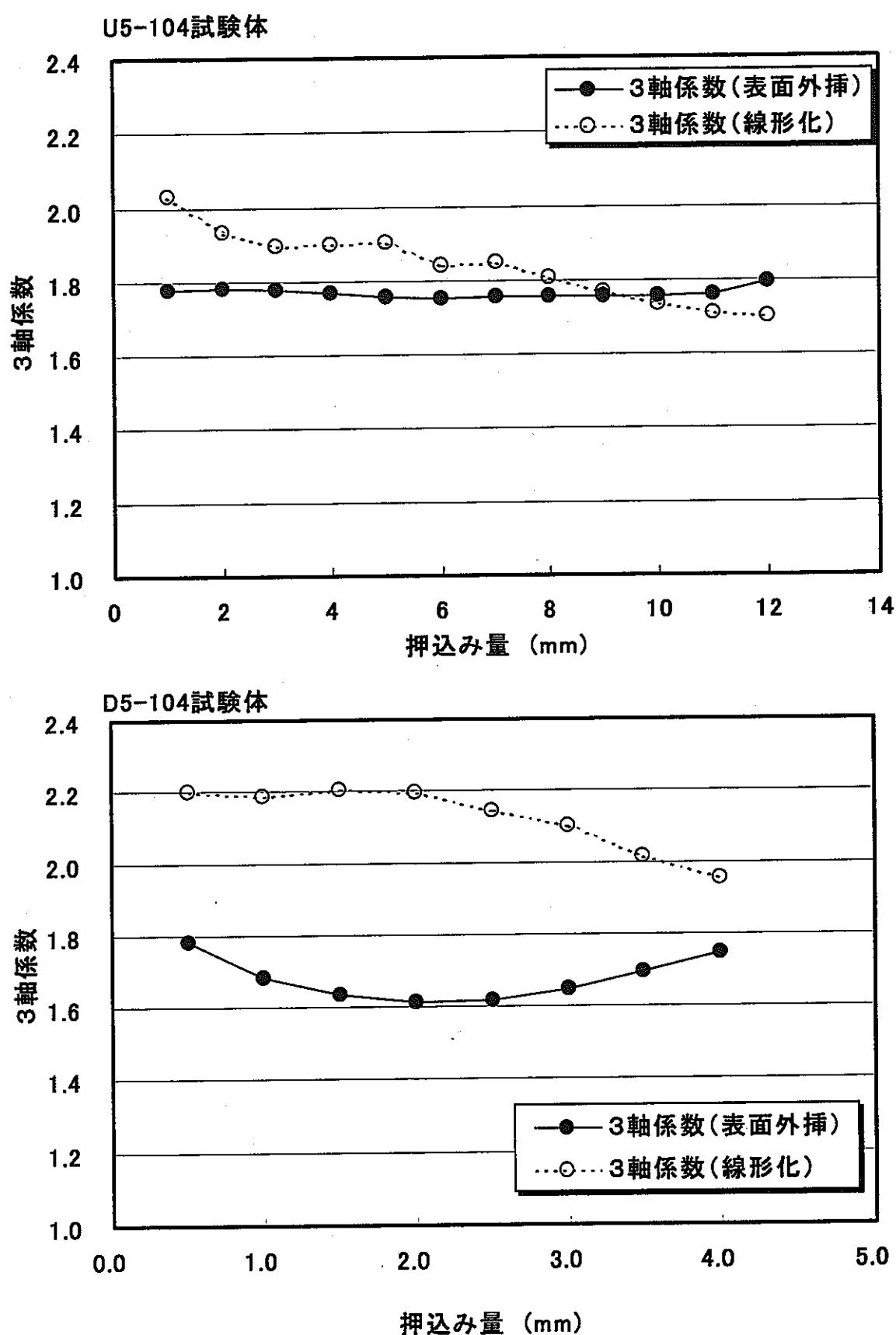


図7 部分構造模擬試験における3軸係数の履歴

付録 A

高温における一様伸びの算出方法

付録 A 一様伸びの算出方法

1 一様伸びの定義

一様伸びは、引張試験において試験片平行部がほぼ一様に変形する永久伸びの限界値である。通常、最大荷重に対応する永久伸びとして求められる[1]。

しかしながら、今回実施した一連の引張試験のように高温で試験を実施した場合には、最大引張荷重到達後に急激にくびれが生じて破断に至ることはなく、最大引張荷重到達後も荷重低下が顕著ではなく試験片平行部全体が伸びる。したがって、最大荷重に対する永久伸びは一様伸びを過小に評価する。

そこで、今回の研究では最大荷重に対する永久伸びではなく、図 A.1 に示す試験片のひずみ分布から算出される均一な伸びを一様伸びと定義する[2]。

2 一様伸びの算出方法

今回実施した一様伸びの算出手順を図 A.2 に示す。

破断後の試験片の標点間をポンチにて分割し、各ポンチ位置における断面積の変化からひずみを算出する。そして、ポンチ間の平均ひずみから試験前の距離(原距離)を算出する。原距離と試験後の距離の関係をグラフにプロットし、このグラフの傾きから一様伸びを決定する。

3 一様伸びの算出結果

付録 B に掲載した既存研究[3]の試験片を対象に、一様伸びを算出した例を図 A.3 ならびに図 A.4 に示す。

図 A.3 の累積伸びの傾きから算出された一様伸びは図 A.4 に示す標点間の均一なひずみ分布をよく表現している。

室温から 1000°C の区間で母材(CS3 ヒート)の一様伸びと最大引張荷重点におけるひずみを比較した結果を図 A.5 に示す。表 A.1 にはその応力ひずみ曲線の値を、表 A.2 には一様伸びと最大荷重点でのひずみの値をそれぞれ示す。

室温から 300°Cまでの区間では、最大荷重点のひずみと算出された一様伸びの値は良く一致している。また、400°C以上では最大荷重点のひずみは一様伸びを過小に評価していることがわかる。

そこで、新規に行った引張試験では上記方法によって一様伸びを算出するとともに、既存研究による引張試験データについては、400°C未満の場合は最大荷重点のひずみを一様伸びと見なし、400°C以上の場合はその値を使用しないこととした。

参考文献

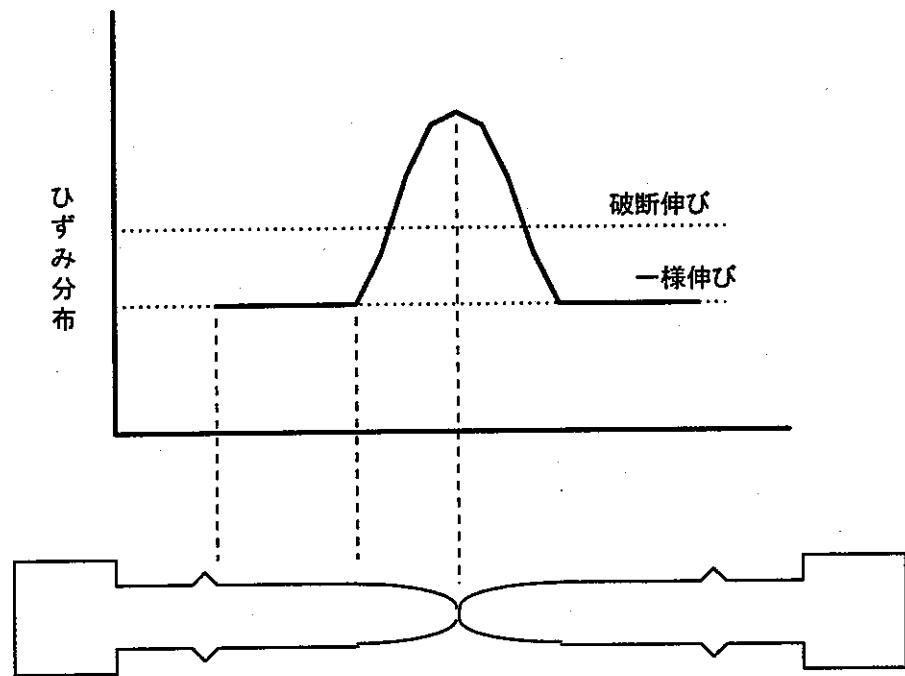
- [1] JIS G 0202-1987 鉄鋼用語(試験), p6
- [2] 中川 元ほか, 新選 材料試験方法, 養賢堂, 1970, pp25-28
- [3] 青砥 紀身ほか, 溶接構造用圧延鋼板(SM400B)の材料特性, PNC TN9410 97-037(1996)

表A.1 母材(CS3)の公称応力ひずみ曲線

室温(ESML06)		100°C(ESML07)		200°C(ESML08)		300°C(ESML09)	
ひずみ(%)	応力(MPa)	ひずみ(%)	応力(MPa)	ひずみ(%)	応力(MPa)	ひずみ(%)	応力(MPa)
0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	296	0.2	276	0.2	263	0.1	188
1.7	299	1.4	277	0.8	263	0.1	196
3.1	354	2.6	324	1.7	343	0.3	196
4.9	404	4.9	375	3.0	400	0.7	254
9.0	449	8.5	411	5.3	434	2.9	380
12.8	466	13.6	431	7.7	458	4.8	443
18.3	472	16.8	435	10.0	469	7.7	481
18.3	472	19.2	435	13.1	473	12.4	502
24.1	467	24.1	426	14.8	469	18.4	499
28.3	443	28.3	380	17.9	445	22.8	469
31.7	392	30.8	329	20.6	395	27.1	386
35.5	294	32.6	274	22.3	347	29.2	319
400°C(ESML11)		500°C(ESML12)		600°C(ESML03)		700°C(ESML04)	
ひずみ(%)	応力(MPa)	ひずみ(%)	応力(MPa)	ひずみ(%)	応力(MPa)	ひずみ(%)	応力(MPa)
0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	158	0.2	116	0.2	94	0.2	49
0.8	235	0.5	180	0.5	112	0.4	52
1.7	283	1.7	223	1.5	119	1.0	53
3.0	340	2.7	240	3.3	122	2.3	67
5.0	391	3.0	243	3.6	125	4.0	81
7.9	422	3.9	279	5.7	155	6.8	83
12.4	436	6.6	304	7.2	166	15.0	81
18.3	435	13.1	309	12.4	169	21.4	77
24.2	421	25.1	291	26.8	159	39.1	65
28.8	386	33.5	257	47.6	128	57.2	52
33.8	298	39.4	196	57.9	90	75.0	33
37.2	196	44.2	107	64.5	36	89.1	3
800°C(ESML05)		900°C(ESML15)		1000°C(ESML26)			
ひずみ(%)	応力(MPa)	ひずみ(%)	応力(MPa)	ひずみ(%)	応力(MPa)		
0	0	0	0	0	0		
0.2	30	0.1	20	0.2	14		
0.4	33	0.3	24	0.8	17		
1.0	34	0.9	26	1.7	22		
2.1	43	2.3	35	3.0	26		
3.9	53	4.2	44	5.3	30		
7.3	58	7.7	48	7.7	32		
12.9	60	11.4	50	13.8	34		
21.4	60	15.1	51	20.5	32		
37.3	55	29.4	45	28.2	30		
70.4	41	49.1	37	42.9	24		
84.6	30	70.2	24	59.3	13		
90.7	19	85.3	2	70.1	1		

表A.2 一様伸びと最大荷重点の比較

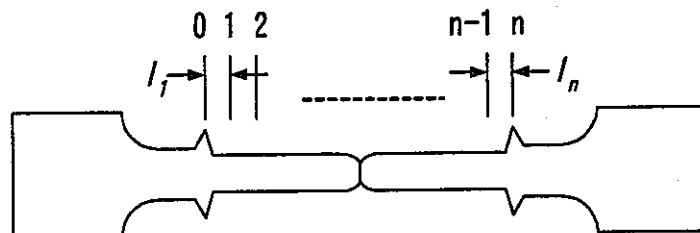
TPNo.	温度(°C)	一様伸び		最大荷重点		備考
		ε_u (%)	応力(MPa)	ε_m (%)	応力(MPa)	
ESML06	20	18	472	18	472	
ESML07	100	14	431	19	435	
ESML08	200	12	471	13	473	$\varepsilon_u \approx \varepsilon_m$
ESML09	300	13	502	15	503	
ESML11	400	17	437	15	437	
ESML12	500	22	296	11	310	
ESML03	600	36	146	11	170	
ESML04	700	37	66	7	83	$\varepsilon_u > \varepsilon_m$
ESML05	800	50	49	16	60	
ESML15	900	36	42	15	51	
ESML26	1000	25	31	14	35	



図A.1 一様伸びの定義

手順 1

試験後の試験片の標点間をポンチで区切り、ポンチ間距離 I_i を計測する。



破断後の試験片

[注] $I_i = GL/10$ を目標

φ10, GL=50の試験片 5mm毎

φ4, GL=20の試験片 2mm毎

手順 2

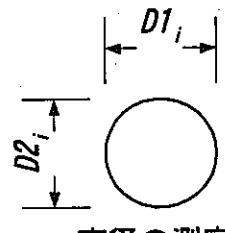
ポンチの位置での直径を計測し、断面積 A_i とひずみ ε_i を算出する。

$$D_i = (D_{1,i} + D_{2,i}) / 2$$

$$A_i = \pi D_i^2$$

$$\varepsilon_i = (A_0 - A_i) / A_i$$

ただし、 A_0 は試験前の原断面積



手順 3

ポンチ間の平均ひずみ $\bar{\varepsilon}_i$ から、試験前のポンチ間の距離を推定する。

$$\bar{\varepsilon}_i = (\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}) / 2$$

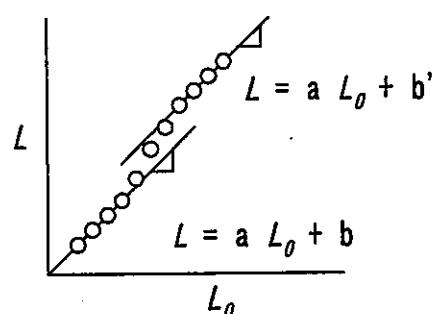
$$I_{0i} = I_i / (1 + \bar{\varepsilon}_i)$$

手順 4

標点間の原距離 L_0 と試験後の距離 L をプロットし、最小自乗法を用いて平行となる傾きを算出する。

$$L_0 = \sum_{i=1}^k I_{0i}$$

$$L = \sum_{i=1}^k I_i$$



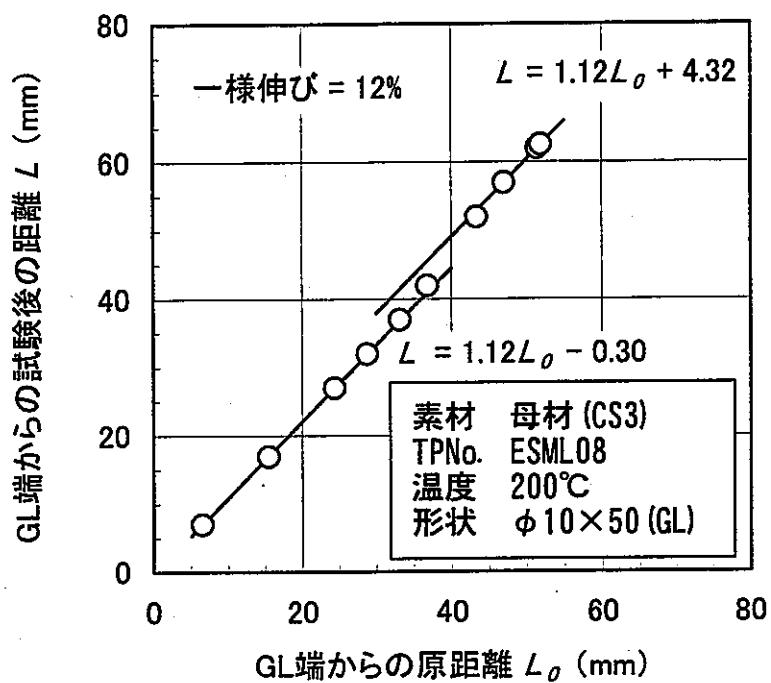
一様伸びの算出

手順 5

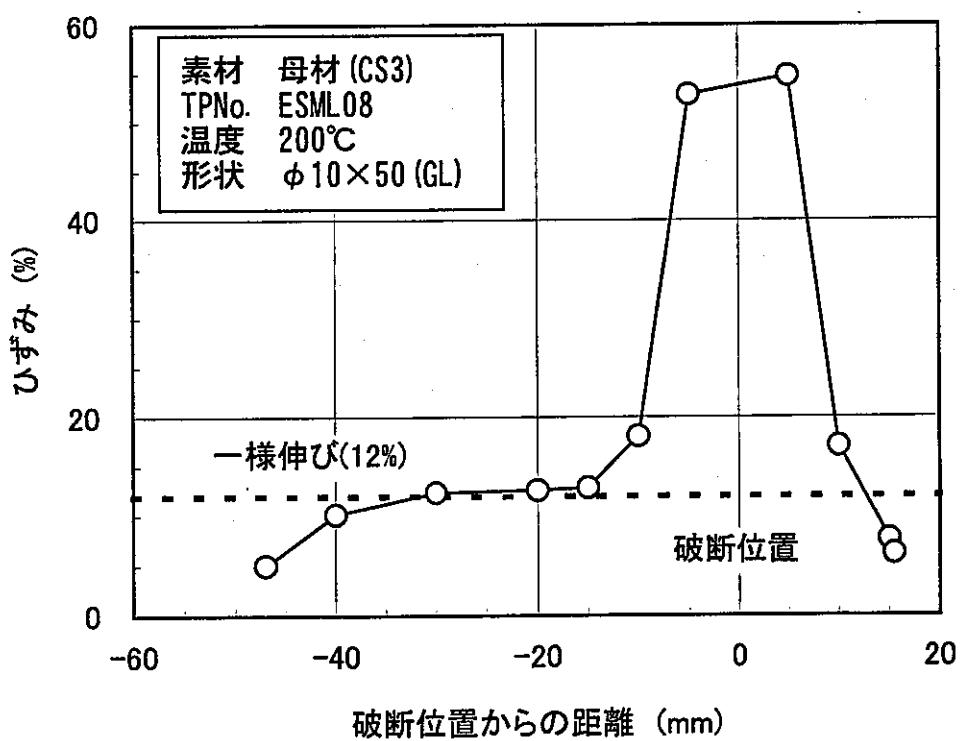
得られた傾きから一様伸びを決定する。

$$\varepsilon_u = a - 1$$

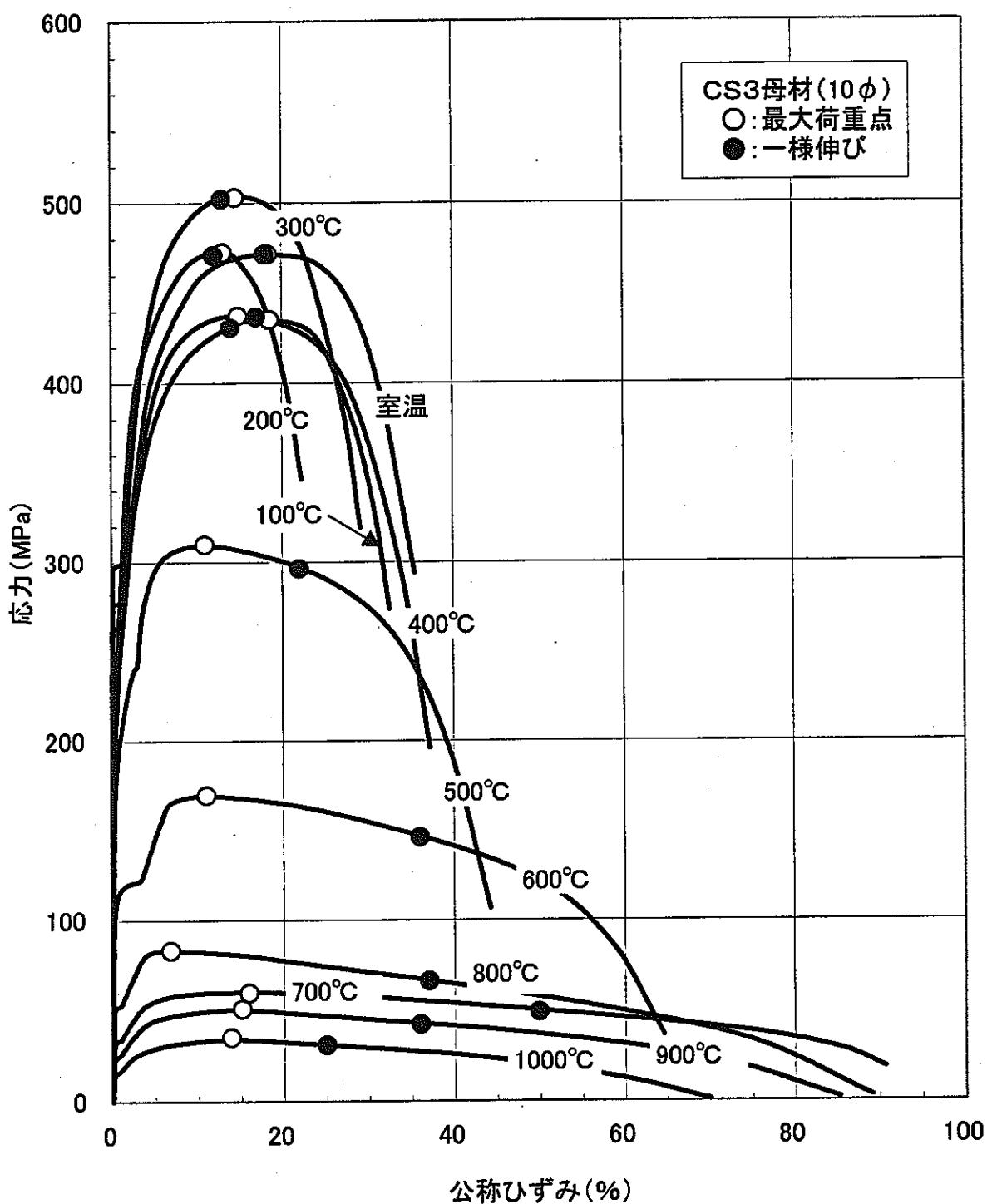
図A.2 一様伸びの算出手順



図A.3 一様伸びの算出



図A.4 ひずみ分布と一様伸び



図A.5 一様伸びと最大荷重点の関係

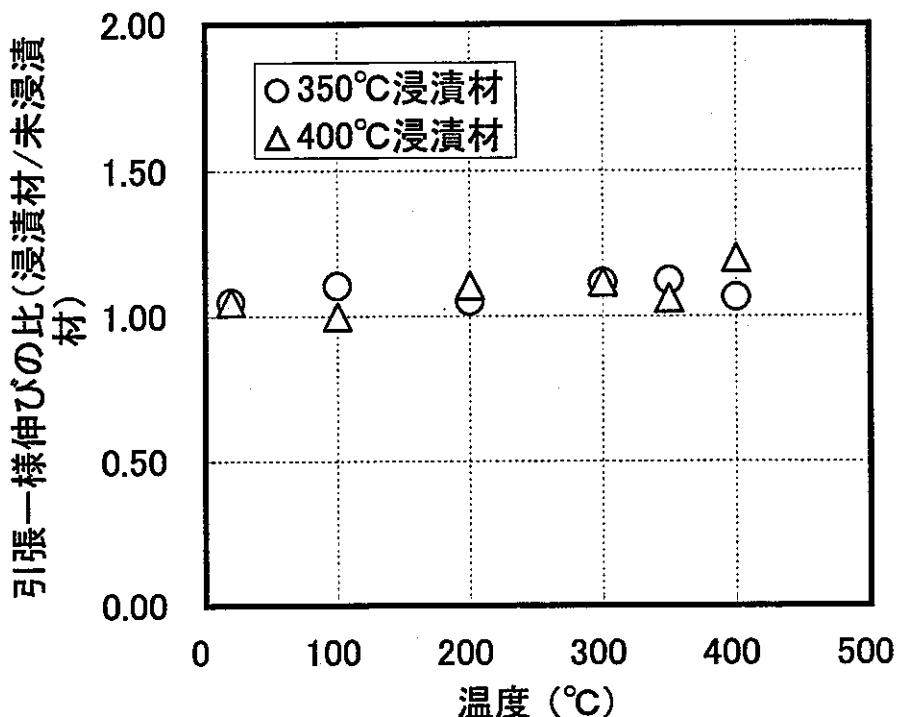
付録 B

ナトリウム浸漬が引張一様伸び
および引張破断伸びに及ぼす影響

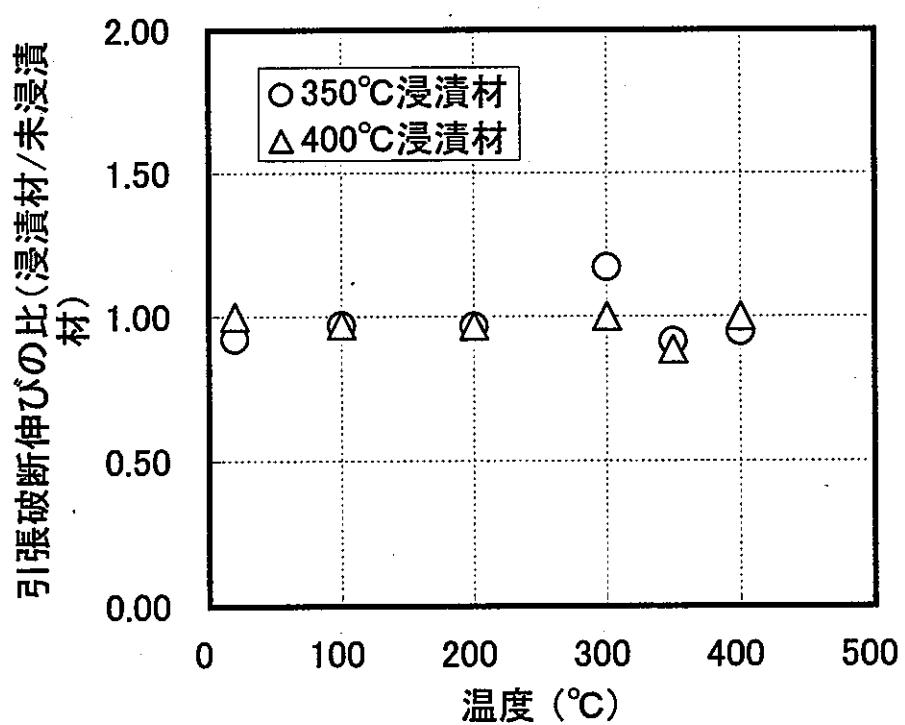
付録 B

B.1 ナトリウム浸漬が引張一様伸びおよび引張破断伸びに及ぼす影響

CS2 ヒートについて、ナトリウム浸漬が引張一様伸びおよび引張破断伸びに及ぼす影響を検討した結果を図 B.1 に示す。ナトリウム浸漬時間は 3000 時間である。浸漬ナトリウム温度が 350℃ の場合と 400℃ の場合を検討した。図 B.1(a)に引張一様伸びを、(b)に引張破断伸びを示す。引張破断伸びについては最大で約 10% の低下が観察されるものの、引張破断伸びおよび引張一様伸びの両者とも、ナトリウム浸漬の影響は小さく、データのばらつき程度である。



(a) 引張一様伸び(浸漬時間:3000時間)



(a)引張破断伸び(浸漬時間:3000時間)

図B. 1 ナトリウム浸漬が引張一様伸びおよび引張破断伸びに及ぼす影響