

## 解 説

# 高速原型炉第 1 種機器の高温構造設計方針

昭和 59 年 12 月

動力炉・核燃料開発事業団

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

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

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

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

## ま え が き

本解説書は、動力炉・核燃料開発事業団（以下、「動燃事業団」という。）が高速増殖炉もんじゅ発電所（以下、単に「もんじゅ」という。）の建設に当って、原子炉施設の第1種機器の構造設計に適用することを計画している次の設計方針について、できるだけ逐条的に解説するものである。

- (1) 「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」 PNC N241 84-08 (1), 動力炉・核燃料開発事業団, 昭和59年9月
- (2) 「高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等」 PNC N241 84-08 (2), 動力炉・核燃料開発事業団, 昭和59年9月

この設計方針は、もんじゅの原子炉施設の第1種機器にあって現行国内法規に基づく構造設計基準の適用範囲を超える高温構造に関して、設計の基準を策定するものである。

なお、この設計方針は「高速増殖炉もんじゅ発電所 原子炉設置許可申請書」（動燃事業団, 昭和55年12月（昭和56年12月一部補正））添付書類八 追補「I. 構造設計方針」により位置づけられるので、本解説書では冒頭にその全文を掲載し、関連部分の解説を示す。

本解説書の作成に当っては、設計方針を策定する上での基本概念の説明及び各条項の内容の説明並びに各条項の解釈を統一するための解説及び適用に当っての具体的な運用方針を盛り込むようにした。

本解説書については今後、設計方針の試用を重ねることにより、解説内容の不十分な点について追加解説を行う等、内容の充実を図っていく考えである。

昭和59年12月

動力炉・核燃料開発事業団  
高速増殖炉開発本部

# 目 次

## ま え が き

### I. 構造設計方針

	[ 条文 ]	[ 解説 ]
1. 基本方針 .....	3	
2. 設計方針を定める範囲 .....	3	
3. 機器分類の方針 .....	4	
4. 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針 .....	4	8
5. 高速原型炉第3種機器の解析による設計の方針 .....	6	

### II. 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針

1. 序 .....	21	21
1.1 定 義 .....	21	21
1.2 適用範囲 .....	21	22
2. 設計の方法 .....	24	24
2.1 解析による設計 .....	24	24
2.2 その他の方法による設計 .....	24	25
3. 一般設計方針 .....	26	26
3.1 解析の方法 .....	26	26
3.2 1次応力の制限 .....	38	41
3.3 特別な応力制限 .....	59	60
3.4 ひずみの制限 .....	65	72
3.5 クリープ疲労損傷の制限 .....	120	128
4. 容器の設計方針 .....	169	163
4.1 適用範囲 .....	169	169
4.2 穴と補強 .....	169	170
4.3 座屈の防止 .....	171	171

		〔条文〕	〔解説〕
5. 管の設計方針	.....	173	173
5.1 設計の方法	.....	173	173
5.2 1次応力の制限	.....	195	199
5.3 特別な応力制限	.....	206	206
5.4 穴と補強	.....	207	207
5.5 ひずみの制限	.....	207	210
5.6 クリーブ疲労損傷の制限	.....	216	216
5.7 座屈の防止	.....	217	217
		〔表〕	〔解説〕
別表	.....	219	219
(別表1は材料強度基準等に掲載)			
別表2.1 応力分類の例	.....	219	222
別表2.2 断面形状係数 $K_s$	.....	226	226
別表2.3 2次応力 $Q$ , $Q^*$ の分類の例(長期1次応力が低い場合)	.....	227	228
別表2.4 座屈に関する安全係数	.....	231	231
		〔付録〕	〔解説〕
付録	.....	233	233
付録A 環境効果の評価	.....	233	233
付録B 弾性追従の判定	.....	234	236
付録C 累積クリーブ疲労損傷係数の制限値 $D$	.....	248	248
付録D 応力水準 $S_g$ 及び倍率 $g$	.....	257	257
付録E 1次及び2次応力に関する緩和クリーブ損傷係数 $D^*$	.....	261	261
付録F ピーク応力に関する緩和クリーブ損傷係数 $D^{**}$	.....	288	288
付録G 圧縮及び曲げ座屈の評価	.....	356	357
付録H 応力集中係数	.....	361	361
			〔解説〕
材料強度基準等	.....		367
別表1.1 最大許容応力強さ	.....		368
別表1.2 設計応力強さ	.....		369

	〔解説〕
別表 1.3 設計応力強さ .....	370
別表 1.4 設計降伏点 .....	372
別表 1.5 設計クリーブ破断応力強さ .....	373
別表 1.6 設計引張強さ .....	373
別表 1.7 設計緩和強さ .....	374
別表 1.8 縦弾性係数 .....	374
別表 1.9 ポアソン比 .....	375
別表 1.10 熱膨張係数 .....	375
別表 1.11 許容ひずみ範囲(A) .....	376
別表 1.12 許容ひずみ範囲(B) .....	376
別表 1.13 許容ひずみ範囲(C) .....	377
別表 1.14 許容引張応力 .....	377
別図 1.1 最大許容応力強さ .....	378
別図 1.2 設計応力強さ .....	378
別図 1.3 設計応力強さ .....	378
別図 1.4 設計降伏点 .....	378
別図 1.5 設計クリーブ破断応力強さ .....	378
別図 1.6 設計引張強さ .....	378
別図 1.7 設計緩和強さ .....	378
別図 1.8 許容ひずみ範囲(A) .....	378
別図 1.9 許容ひずみ範囲(B) .....	378
別図 1.10 許容ひずみ範囲(C) .....	378
別図 1.11 等時応力-ひずみ線図 .....	378
別図 1.14 許容引張応力 .....	379

	〔付録〕	〔解説〕
付録MA 環境効果 .....	381	382
MA.1 ナトリウム環境効果 .....	381	382
MA.2 中性子照射効果 .....	387	390

[ 解説 ]

付録MB	設計応力強さ $S_t$ 及び設計クリープ破断応力強さ $S_R$ の外挿値	395
付録MC	SUSF304 大型鍛鋼品の規格引張強さ $49\text{kg/mm}^2$ 級の材料強度基準等	395
付録MD	SUSF321 大型鍛鋼品の材料強度基準等	396
付録	解説 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針	397

# I. 構造設計方針

高速増殖炉もんじゅ発電所 原子炉設置許可申請書  
添付書類八追補 I. 構造設計方針

## 1. 基本方針

原子炉施設の安全上重要な機器の構造設計は、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」(昭和40年通商産業省令第62号)の規定に基づく「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準を定める告示」(昭和55年通商産業省告示第501号。以下、単に「告示」という。)に定める「構造の規格」に適合しないものでないようにする。

ただし、告示の「構造の規格」により難しい特殊な設計の部分については、次の考え方により、設計方針を定め、これにより構造設計を行う。

- (イ) A S M E規格等、国外の規格、基準を十分参照したものであること。
- (ロ) 試験結果、モックアップ実験結果等から導かれた知見等により支障ないものであること。

## 2. 設計方針を定める範囲

### (1) 機器分類の方針

液体金属冷却型高速増殖炉の設計上の特徴を踏まえて作成された「液体金属冷却型高速増殖炉施設の安全設計方針」(添付書類八、1.2、以下単に「安全設計方針」という。)に基づき、機器分類を行う。

### (2) 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針

告示の適用温度範囲を超える金属温度で使用する高速原型炉第1種機器に対する構造設計方針を定め、これにより設計を行う。なお、本設計方針はナトリウム環境及び中性子照射環境の評価に関する設計方針を含むものとする。

### (3) 高速原型炉第3種機器の解析による設計の方針

高速原型炉第3種機器にあって、解析による設計をすべき機器に対して、その設計方針を定め、これにより設計を行う。

### 3. 機器分類の方針

#### 3.1 適用範囲

原子炉施設の安全上重要な機器に告示を適用するに当たって、告示第1条及び第2条第1号から第6号を、本章3.2及び3.3により読替えるものとする。

#### 3.2 機器等の区分

原子炉施設の安全上重要な機器等の区分は、告示第1条に定める機器等の区分と対応するものとし、次のように区分する。

- (1) 高速原型炉第1種機器
- (2) 同 第2種容器
- (3) 同 第3種機器
- (4) 同 第4種機器
- (5) 同 第5種管
- (6) 同 第1種支持構造物
- (7) 同 第2種支持構造物
- (8) 同 第3種支持構造物
- (9) 同 炉心支持構造物

#### 3.3 機器等の分類

上記区分に対する機器等の分類は、安全設計方針に定める原子炉冷却材バウンダリ等の考え方に基づき、表1に示す定義により行うものとする。

### 4. 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針

#### 4.1 適用範囲

高速原型炉第1種機器の使用中の金属温度が告示の適用温度範囲を超える場合は、「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」<sup>(1)(2)</sup>（以下、本章では単に「本方針」という。）

を適用するものとする。

#### 4.2 設計方針

本方針は、以下の(1)から(9)に示す事項を基本方針とする設計方針である。

##### (1) 告示との対応

本方針は告示に定める第1種機器の「構造の規格」に対応するものとする。

##### (2) 国外の高温構造設計基準との対応

本方針はASME Code Case N-47<sup>(3)</sup>の規定を十分参照したものとする。なお、Code Case N-47が概念規定に止めているものをできるだけ具体的規定にすると共に適切な設計を行うために必要な規定を付加するものとする。

##### (3) 防止すべき破損様式

本方針は、次の様式の破損の防止を計るものとする。

- 1) 延性破断
- 2) 過大な塑性変形
- 3) 疲労破損
- 4) 弾塑性座屈
- 5) クリープ破断
- 6) 過大なクリープ変形
- 7) クリープ疲労破損
- 8) クリープ座屈

##### (4) 研究開発の成果の反映

本方針は構造材料、構造強度及び非弾性解析技術等に関する研究開発の成果を反映したものとする。

##### (5) 設計の方法

本方針は弾性解析による設計を基本とし、必要に応じて非弾性解析による設計ができるものとする。

##### (6) 使用環境の評価

本方針はナトリウム環境及び中性子照射環境の評価に関する設計方針を含むものとする。

(7) もんじゅの設計上の特徴に対する配慮

本方針はもんじゅの機器が薄肉構造であることを考慮すると共に、定常的及び過渡的熱応力による破損の防止に特に注意を払うものとする。

(8) 耐震許容応力

高温領域では地震による短期応力と長期にわたって作用する応力との間に相互作用があることを考慮し、本方針は耐震許容応力に関する設計方針を含むものとする。

(9) 材料強度基準等

本方針における材料強度基準等の策定に当っては、クリープ強度等の時間に依存する材料特性を含めて、できるだけ国産材料データを中心にデータを集積し、定式化するものとする。設計許容値の策定に当っては、妥当と認められる安全係数を用いるものとする。

## 5. 高速原型炉第3種機器の解析による設計の方針

### 5.1 適用範囲

高速原型炉第3種機器は告示に定める「構造の規格」により設計を行うことを基本とするが、熱応力に関する設計解析を行うことが適切と考えられる機器、機能上告示に定める形状制限に適合しない機器等にあつては、高速原型炉第3種機器の解析による設計の方針を適用して、解析による設計を行うものとする。

### 5.2 設計方針

高速原型炉第3種機器について解析による設計を行う場合は、原則として「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」を準用するものとする。ただし、機器の使用中の金属温度が告示別表第2の適用温度範囲内にある場合は、告示第1種機器の構造の規格を準用するものとする。

これらの準用は、次の方針により行うものとする。

- (1) 最高使用温度及び最高使用圧力は、運転状態Ⅰにより定めるものとする。
- (2) 設計条件に関する許容応力は、告示に定めるS値及び継手効率 $\eta$ を用いて定めるも

のとする。

参考文献

- (1) 「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」PNC N241 81-25(1), 動力炉・核燃料開発事業団, 昭和56年11月
- (2) 「高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等」PNC N241 81-25(2), 動力炉・核燃料開発事業団, 昭和56年11月
- (3) "Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Case N-47-17, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, Section III, Division I" ASME, August 1979

表1 機器等の区分の定義

機器等の区分	定義
高速原型炉第1種機器	原子炉冷却材バウンダリを構成する機器
高速原型炉第2種容器	原子炉格納容器及びこれに接続する容器であって、原子炉格納容器及びこれに接続する容器内の機械又は器具から放出される放射性物質等の有害な物質の漏えいを防止するために設けられるもの
高速原型炉第3種機器	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 原子炉カバーガス等のバウンダリを構成する機器</li><li>2. 原子炉を安全に停止するために必要な設備又は非常時に安全を確保するために必要な設備であって、その故障、損壊等により公衆に放射線障害を及ぼすおそれを間接に生じさせるものに属する機器</li><li>3. 格納容器バウンダリを構成する機器</li><li>4. 2次冷却材を内蔵し、主冷却系を構成する機器</li><li>5. 原子炉冷却材バウンダリに接続されていて、かつ1次冷却材を内蔵する機器</li></ol>

機器等の区分	定義
高速原型炉第4種機器	<p>6. 炉外燃料貯蔵槽及び炉外燃料貯蔵槽冷却系を構成する機器</p> <p>7. 燃料出入設備に属する機器</p> <p>8. 放射性物質の放出を伴うような事故の際に、その外部放散を抑制するために必要な機器</p> <p>高速原型炉第1種機器，第2種容器，第3種機器及び放射線管理設備に属するダクト以外の容器又は管（内包する流体の放射性物質の濃度が<math>1\mu\text{Ci}/\text{cm}^3</math>（流体が液体の場合にあっては，<math>1\mu\text{Ci}/\text{cm}^3</math>）以上の管又は最高使用圧力が<math>0\text{ kg}/\text{cm}^2\text{G}</math>を超える管に限る）</p>
高速原型炉第5種管	放射線管理設備に属するダクトであって、内包する流体の放射性物質の濃度が $1\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以上のもの（高速原型炉第3種管に属する部分を除く）
高速原型炉第1種支持構造物，高速原型炉第2種支持構造物，高速原型炉第3種支持構造物	それぞれ高速原型炉第1種機器，第2種容器又は第3種機器の支持構造物
高速原型炉炉心支持構造物	原子炉容器内の燃料体を支持する構造物

【解説】

本解説では高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針に関連する第4章について説明する。

- 1 4.1は、高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針の適用範囲を定めるものである。ここに、「高速原型炉第1種機器」とは、3. 機器分類の方針に基づき、「原子炉冷却材パウンダリを構成する機器」の定義により分類される機器である。また、告示では使用材料別に適用できる温度範囲が限定されている。「告示の適用温度範囲」とは、このような意味で告示を適用できる範囲を指しており（ここでは告示で第1種機器に対して定められた許容応力の適用温度範囲を意味する。）オーステナイト系材料及び高ニッケル合金にあっては $425\text{ }^\circ\text{C}$ 、フェライト系材料にあっては $375\text{ }^\circ\text{C}$ が上限温度である。

2 4.2(1)は告示との対応を示す。

告示では発電用原子力設備の技術基準として、第1種から第5種にわたる容器、管、ポンプ、弁、支持構造物及び炉心支持構造物に対する材料及び構造の規格を定めている。

これに対し、本方針は高速原型炉第1種容器及び高速原型炉第1種管の高温構造の規格を定めるものであり、告示における第1種容器（第12条～第19条）及び第1種管（第45条～第53条）の構造の規格に対応する。

3 4.2(2)は、国外の高温構造設計基準との対応を示すものである。

本方針は、ASME Code Case N-47の規定を十分に参照したものである。ただし、Code Case N-47が各種原子力施設に適用される一般的なものであるのに対して、本方針の適用が高速原型炉に限定されていることを考慮し、次のような措置を講じている。

(1) Code Case N-47が概念的な規定に止めているものをできるだけ具体的な規定にすると共に、対応する設計解析手順を明確に規定する。

(2) 設計解析の方法として弾性解析を用いる場合と非弾性解析を用いる場合のいずれにも対応する規定を設定する。ただし、弾性解析による場合の規定の拡充に重点を置く。

表-1に本方針とCode Case N-47との主要な対比を示す。

4 4.2(3)は、防止すべき破損様式を定めるものである。

告示では、以下に示す様式の破損を防止する規定を定めている。

(a) 延性破断

(b) 過大な塑性変形

(c) 疲労破損

(d) 弾塑性座屈

本方針では、原型炉機器と軽水炉機器との構造上の相違（低圧、薄肉、高温）に注意しながら、上記の様式の破損の防止に関する規定を高温域に拡張している。これに加えて、本方針では、材料のクリープ特性に関係する下記の時間依存型の様式の破損の防止に関する規定を追加している。

(e) クリープ破断

(f) 過大なクリープ変形

表-1 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針と  
ASME Code Case N-47との主要対比

	本 方 針	ASME CC N-47	備 考
範 囲	高速原型炉高温第1種機器	ASME Sec III NBの適用温度範囲を上まわる温度で使用される第1種機器	
対象材料	SUS304, SUS316, SUS321, 2 1/4 Cr-1Mo	Type304SS, Type316SS, Alloy 800H, 2 1/4 Cr-1Mo, (Alloy 718)	N-47におけるAlloy718はボルト材としてのみ適用
温度上限	SUS304, SUS316, SUS321:650°C 2 1/4 Cr-1Mo :550°C	304SS, 316SS:1500°F(816°C) Alloy 800H:1400°F(760°C) 2 1/4 Cr-1Mo:1200°F(649°C)	N-47における温度上限は許容値により異なる。
環境効果	ナトリウム環境効果・中性子照射効果の評価方法を規定	規定せず	
評価方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>○長期荷重・短期荷重を区分</li> <li>○弾性追従の判定法を規定</li> <li>○ひずみの制限・クリープ疲労の制限は               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 一般規定</li> <li>2) 長期1次応力が低い場合</li> <li>3) クリープ効果が顕著でない場合</li> </ol>               に区分して規定             </li> <li>○ひずみ速度効果を含む設計疲労線図(保持時間効果は、クリープ損傷として評価)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○長期荷重・短期荷重の区分は、部分的(クリープ損傷評価)</li> <li>○弾性追従の具体的評価方法をなし</li> <li>○ひずみの制限・クリープ疲労の制限は               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 一般規定</li> <li>2) クリープ効果が顕著でない場合(Test 164)</li> </ol>               に区分して規定             </li> <li>○保持時間効果を含む弾性解析用設計疲労線図(保持時間効果は疲労損傷として評価)</li> </ul>	

(g) クリープ疲労破損

(h) クリープ座屈

これ等の様式の破損の防止に関する本方針の規定を表-2 に示す。

表-2 防止すべき破損様式と本方針の規定の対応

防止すべき破損様式	本方針の規定	1次応力の制限	特別な応力制限	ひずみの制限	クリープ疲労損傷の制限	座屈の防止
延性破断		○	△	△		
過大な塑性変形		○	△	○		
疲労破損				△	○	
弾塑性座屈		◇		△		○
クリープ破断		○	△	△		
過大なクリープ変形		○	△	○		
クリープ疲労破損				△	○	
クリープ座屈		△		△		○

○ 主要な規定                      △ 補助的规定

◇ 崩壊の防止

5 本方針の作成に当って、高温構造設計に関連する構造材料並びに構造物の試験及び非弾性解析技術等に関する内外の研究開発の成果を反映している。これらを要約すると以下の通りとなる。

(1) 構造材料の強度及び挙動

(ア) 大気中の材料データ

本方針の策定の基礎となった構造材料の大気中における強度及び挙動データは、主として国内で得られている公表データに加えて、動燃事業団において取得したデータを利用している。また国外では米国のデータあるいは研究成果も利用した。動燃事業団における材料試験は、先行的な試験に引き続き、昭和52年度より高速原型炉に使用予定の構造材料を対象とする総合的な一連の試験研究が実施されてきた。こ

の試験にはクリープ試験，疲労試験，クリープ疲労試験，応力緩和試験等を含んでおり，得られたデータは本方針における材料強度基準の裏付けデータとして，あるいはその作成のための基礎データとして活用した。

(イ) ナトリウム環境効果

昭和45年度より動燃事業団大洗工学センターに材料試験ループが設置され，またその後いくつかのナトリウム中材料試験装置が設置され，腐食・質量移行などの現象を中心にナトリウムと構造材料の共存性に関する試験研究が実施されてきた。それにより腐食・質量移行やナトリウム中の材料強度に関して取得したデータに米国のデータや知見を加えて本方針のナトリウム環境効果に関する規定の策定に反映した。

(ウ) 中性子照射効果

構造材料に及ぼす中性子照射効果に関しては昭和45年以来主として日本原子力研究所材料試験炉J M T Rによる照射試験及び動燃事業団照射材料試験室における照射後試験の組合せにより試験研究が実施され，引張強度，クリープ強度，疲労強度等に関する中性子照射効果に関して知見が得られてきた。

高速炉用構造材料強度特性に及ぼす中性子照射効果をできるだけ定量的に評価するために，国内データだけでなく，米国の高速実験炉F F T F (Fast Flux Test Facility)の設計に採用された方法を参照し，国内データによって確認し，あるいは一部修正しながら，本方針の中性子照射効果に関する規定を定めている。

(2) 構造物の強度及び挙動

(ア) 配管構造物の試験研究

高速原型炉のようなループ型高速炉の設計の重点となる高温配管に関しては，動燃事業団において昭和48年度以来，配管要素又はループのモックアップ構造物を用いてクリープ変形，クリープ座屈，クリープ疲労，塑性崩壊，クリーブラチェット，弾性追従等の高温特性に起因する挙動，強度等に関するいろいろな試験が実施されてきた。

高温設計基準が対処すべき主要な破損様式に関してこれらの試験により得られた知見ならびに海外の公表された研究成果を本方針に反映している。

(イ) 機器構造の耐熱過渡強度試験研究

動燃事業団大洗工学センターにおいて昭和47年度に機器構造のモックアップを供試

体とするナトリウム熱過渡試験装置が設置され、ミキシングティ、各種大型ナトリウム弁、原子炉容器出入口ノズルについて寿命中に想定される回数<sup>6</sup>の熱過渡試験が実施され機器の構造健全性ととも<sup>6</sup>に設計評価法の妥当性を確認してきた。また、これらの試験において構造各部の温度変化やひずみ変化の測定値と熱過渡解析結果との比較検討を通して熱応力解析技術は実用的水準に達しており、このような技術を踏まえて本方針は作成されている。

(ウ) 基本的構造要素の試験研究

本方針の各種設計係数値の妥当性を確認する試験データは、動燃事業団において基本的な形状の各種構造要素に対して典型的な荷重を作用させ、変形挙動を調べる試験を実施して得られた。

(3) 構造解析技術

適切な高温設計基準を確立するためには、材料の塑性及びクリープによる非弾性挙動を考慮した構造解析技術が必要である。このため動燃事業団では昭和48年度以来、日本機械学会への委託等により、主として米国の技術を参考にしながら研究開発を実施し、非弾性解析手法の確立をはかってきた。この構造解析技術は、本方針に現われる諸々の設計データや評価方法の確立のために利用してきた。非弾性構造解析を実行する計算機プログラムとしてはMARC、ANSYS、ADINA、NASTRAN等、海外のプログラム、動燃事業団において開発されたFINAS、メーカ各社の自主開発プログラム等が利用できる状況にあり、それぞれ本方針の裏付けとなるデータを提供してきた。

6 4.2(5)は本方針における設計の方法を示すものである。

機器の構造解析方法としては、弾性解析と非弾性解析とがある。

弾性解析は、構造材料が弾性体（応力とひずみが比例関係にある）であることを前提として構造解析を行うものである。非弾性解析は、構造材料が塑性とクリープにより非弾性挙動を示すことを計算に入れながら、構造解析を行うものである。

微小変形のもとでの弾性解析は線形解析であり、単位荷重に対する解析結果を重ね合わせることにより、複雑な組合せ荷重に関する解も容易に得られる。たいていの機器では、微小変形の仮定が成立する。微小変形理論のもとでも、非弾性解析は、材料の非線形性により非線形解析となり、荷重又は時間ステップ毎に一般に繰返し計算が必要となり、単位荷

重に関する解析でも、弾性解析よりはるかに多額の計算費を要する。

そこで設計解析の方法としては、構造の非弾性挙動に対して適切な工学的判断による設計係数で対処することにより、できるだけ弾性解析による設計ができるようにすることに注意を払っている。すなわち原型炉機器若しくは部材又はこれらのモデルについて、非弾性解析を実施し、実験研究がある場合について、解析と実験の照合を行うと共に、実験研究が及ばない場合についても解析を行い、構造の非弾性挙動を把握し、適切な工学的判断により設計係数を策定する根拠としている。

なお「適切な設計係数を用いた弾性解析」の範囲では適切な設計が行えない場合は、設計解析において、部分的あるいは全面的に非弾性解析によることになる。

7 4.2(6)は本方針における使用環境の評価に関する取扱いについて示したものである。

本方針では適用対象を高速原型炉に限定しているため、高速原型炉に特有な環境効果についてはその評価に関する規定を含むものとする。すなわち、本方針では、液体ナトリウム環境及び中性子照射環境の評価に関する設計方針を本方針付録 A に示している。

8 4.2(7)はもんじゅの設計上の特徴に対する配慮を示すものである。

高速原型炉は軽水炉に比べて内圧が低いことなどのため、一般に薄肉構造であることを考慮して本方針では塑性崩壊、弾塑性座屈、クリープ座屈などの防止に注意を払っている。

一方、高速原型炉第 1 種機器ではその構造材料として、オーステナイト系ステンレス鋼が広く使用されているが、オーステナイト系ステンレス鋼の熱膨張率はフェライト系鋼等の材料に比べて大きく、また、ナトリウムの熱容量が小さいので構造材料の温度変化及び変化率も大きい。本方針ではこれに伴って発生する定常的及び過渡的熱応力を慎重に取扱い熱応力を主体とする 2 次応力及びピーク応力に対する評価に注意を払っている。

9 4.2(8)は本方針における耐震許容応力の取扱いを示すものである。

告示では、耐震設計に関する許容応力は含まれておらず、別途の基準により定められるものとされている。これは我が国が有数の地震国であるという事情を反映したものと考えられる。

本方針は、このような取扱いに十分注意を払いながら、高温領域では地震による短期応

力と長期にわたって作用する応力との間に相互作用があることを考慮して、耐震設計に関する許容応力を含むものとしている。ここで、高温領域での地震による短期応力と長期にわたって作用する応力との間の相互作用に対する考慮とは、クリープ疲労損傷の評価及びクリープラチェットの評価（促進クリープひずみの算定）に当って、地震荷重による残留応力の効果を含めることなどを指している。

10 4.2(9)は材料強度基準等の策定方針を示すものであり、基本方針は次のとおりである。

- (1) 材料強度基準等は大気中材料試験データに基づき定めるものとし、原型炉において考慮すべき環境の効果については、別途その評価方針を定めるものとする。
- (2) 国産データを中心とする材料試験データに基づいて、時間に依存するものを含む材料特性を定式化する。定式化の理論的根拠は普遍性のあるものとし、材料特性の統計的性質に対する配慮は、工業製品という観点から一般性のあるものとする。
- (3) 材料強度特性に基づいて設計許容値を策定するに当っての安全係数の設定値は、現時点で一般に妥当と認められる値とする。本方針における安全係数の総覧を長期1次応力が低い場合を例にとり図-1に示す。
- (4) 告示に定める材料強度基準等は、国の法規に基づくものとして尊重する。なおASME Code Case N-47に定める材料強度基準等については、国際的な調和を計るために、これを参酌する。

材料強度基準等作成の対象とした材料は、高速原型炉のナトリウム機器にあって、本方針の適用又は準用が考えられるものに使用する可能性がある主要材料である。

このような構造材料としてオーステナイト系ステンレス鋼3鋼種（SUS304, 316及び321）及び低合金鋼1鋼種（ $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo）の4鋼種がある。これらの鋼種について、その成品形状別に示すと表3のようになる。

これらの材料について高速原型炉で使用する上での製造仕様等を考慮した結果、材料強度基準等上の材料区分は表-3の右端に示す6区分とし、これにより使用する可能性のある鋼種及び成品区分に対処することが適切と判断した。

表-3 材料強度基準等の対象材料及びその区分

番号	鋼種	成品形状	J I S 記号	材料強度基準等 上の材料区分
1.	S U S 3 0 4	圧延板等 鍛造品 伝熱管	S U S 3 0 4 <sup>1)</sup> S U S F 3 0 4 { S U S 3 0 4 T B S U S 3 0 4 H T B	S U S 3 0 4
2.	S U S 3 1 6	圧延板等 鍛造品 伝熱管	S U S 3 1 6 <sup>1)</sup> S U S F 3 1 6 { S U S 3 1 6 T B S U S 3 1 6 H T B	S U S 3 1 6
3.	S U S 3 2 1	鍛造品	S U S F 3 2 1	( S U S 3 2 1 )
		伝熱管	{ S U S 3 2 1 T B S U S 3 2 1 H T B	S U S 3 2 1 伝熱管 <sup>2)</sup>
4.	2 ¼ Cr-1Mo	圧延板	S C M V 4	2 ¼ Cr-1Mo (NT) 板 <sup>3)</sup>
		鍛造品	S F H V 2 4 B	
		伝熱管	S T B A 2 4	2 ¼ Cr-1Mo (NT) 伝熱管 <sup>3)</sup>

注) 1) 鋼棒, 配管用 T P, H T P, T P Y を含む。

2) 材料強度基準等において, 単に S U S 3 2 1 と標記したものは成品形状によらず適用できる。

3) 脱炭抑制の観点から焼ならし後焼もどし (N T) とする。材料強度基準等において単に 2 ¼ Cr-1Mo (N T) と標記したものは成品形状によらず適用できる。

2 ¼ Cr-1Mo (N T) 板と標記したものは圧延板及び鍛造品に適用する。

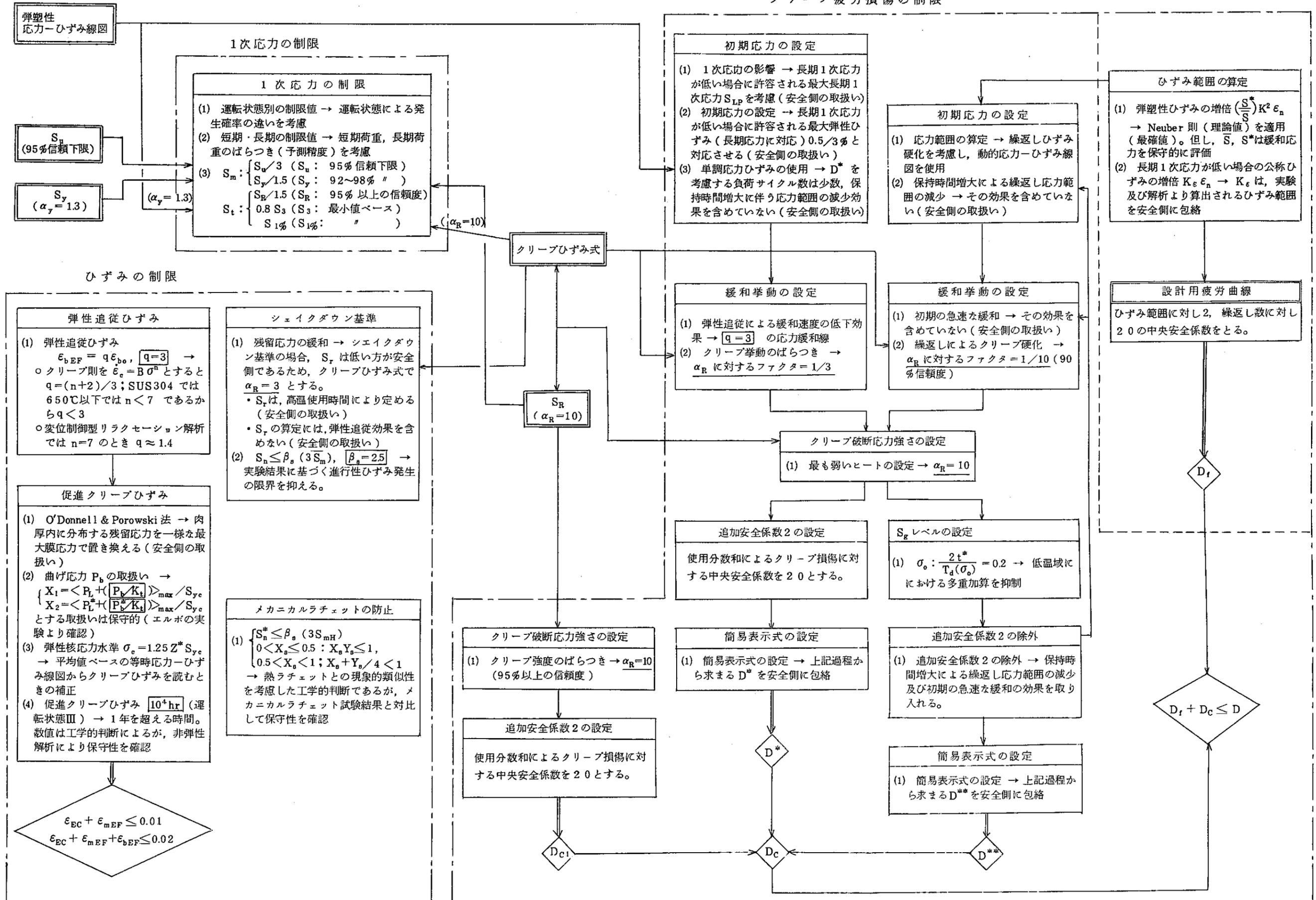


図-1 設計方針における安全係数の総覧(長期1次応力が低い場合)

## Ⅱ. 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針

# 1. 序

## 1.1 定 義

### 1.1.1 用語の定義

「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」(以下単に「本方針」という。)の用語の意義は、本方針において特に定義する場合を除いて、「構造設計方針」(「高速増殖炉もんじゅ発電所原子炉設置許可申請書」添付書類八、昭和55年12月、動力炉・核燃料開発事業団)及び「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準を定める告示」(昭和55年通商産業省告示第501号。以下単に「告示」という。)に定めるところによる。

### 1.1.2 本方針の定義

本方針は告示の適用温度範囲を超える金属温度において使用する高速原型炉第1種機器の設計方針を定めるものである。なお、本方針は今後新たな知見と経験の蓄積により、必要に応じて見直しを行うものとする。

## 1.2 適用範囲

### 1.2.1 使用温度及び使用時間

- (1) 高速原型炉第1種機器の使用中の金属温度が告示の適用温度範囲を超える場合は本方針を適用するものとする。
- (2) 高速原型炉第1種機器の使用中の金属温度又は高温使用時間が別表1において材料強度基準等を定めている温度又は時間を超える場合は本方針を適用しないものとする。高温使用時間とは告示の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和をいう。

### 1.2.2 使用環境

本方針は液体ナトリウム環境及び中性子照射環境の評価に関する設計方針を含む。これらの環境効果は付録Aにより評価することができる。

## 【解 説】

- 1 1.1.1は、本方針における用語の意義を示したものである。

高速原型炉第1種機器とは、高速原型炉第1種容器及び高速原型炉第1種管の総称であり、構造設計方針の機器分類の方針に従って分類されるものである。

- 2 1.1.2 は本方針の定義を示すものである。本方針は告示に定める第1種機器の「構造の規格」に相当するものである。
- 3 1.2.1 は本方針の適用される使用温度及び使用時間の範囲を定めたものである。ここで「告示の適用温度範囲」とは、オーステナイト系ステンレス鋼では425℃以下、また、フェライト系鋼の場合は375℃以下を指す。なお、本方針が適用される運転状態において使用期間中に一回でも告示の適用温度範囲を超える場合は「告示の適用温度範囲を超える」場合に該当する。
- 4 1.2.2 は、本方針の適用範囲に関し環境効果の評価について定めたものである。
- 5 本方針の条項の構成を図1.1.1に示す。

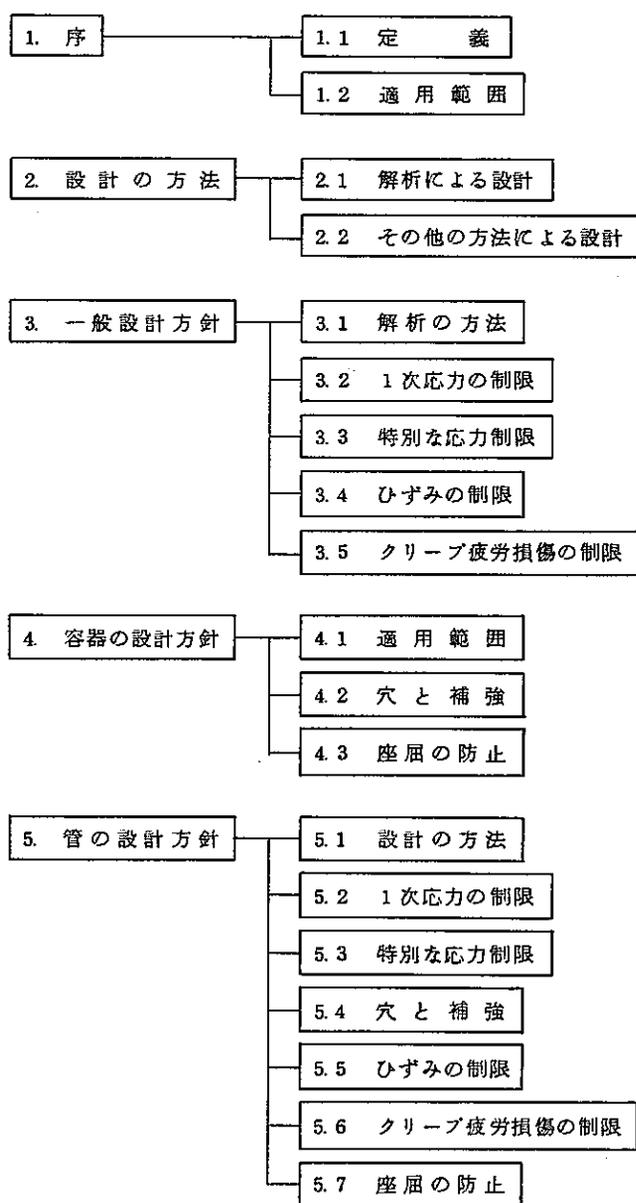


図 1.1.1 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針の条項構成

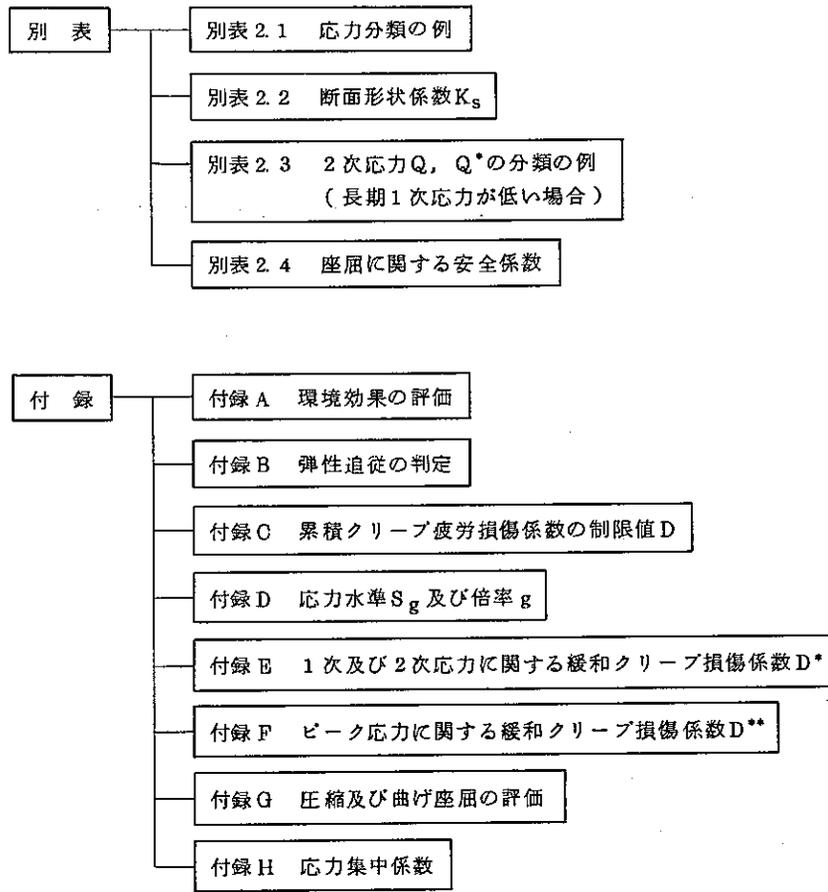


図 1. 1. 1 (続) 高速原型炉第 1 種機器の高温構造設計方針の条項構成

## 2. 設計の方法

### 2.1 解析による設計

高速原型炉第1種機器の設計は原則として解析による設計とする。ここに解析とは弾性解析及び非弾性解析をいう。

ただし、2.2に定めるところによる場合は、この限りでない。

### 2.2 その他の方法による設計

その妥当性が証明される場合は、実験等の適切な方法により、高速原型炉第1種機器の設計を行うことができる。

#### 【解説】

2.は、高速原型炉第1種機器の設計を、原則として弾性解析又は非弾性解析を用いた「解析による設計」によって行うことを規定している。但しその妥当性が証明される場合は、実験等の適切な方法による「その他の方法による設計」によって行うことができるとしている。

告示では、設計の方法について特に項を設けて説明しているわけではないが、第1種容器及び第1種管に対しては、応力解析による応力強さに対する限界をそれぞれ第13条及び第45条で規定している。さらに、第1種容器に関しては、第17条（穴と補強）において、穴を設ける場合の補足的な設計規則（公式による設計）を示す事によって、解析による設計に替わる方法を認めている。本方針においても、高速原型炉第1種容器の穴と補強に関し、基本的に告示の規定を準用し原則として解析による設計を規定している中で、部分的には公式による設計も取り入れている。

なお、本方針でとられる設計の方法を便宜上大別すると、下記のようになる。

- (1) 解析による設計
  - イ) 弾性解析
  - ロ) 非弾性解析
- (2) 実験等その他の方法による設計

- 1 「弾性解析による設計」は、容器及び配管の設計に広く用いられている一般的な弾性解析による方法をさす。

一般的な弾性解析は、現在では有限要素法に基づく計算プログラムを使用することが多いが、各種の解析解、差分法による数値解析法に基づくものによることもある。これらの解析手法は、実験及び理論解析等との比較・検証により確立されたものであり、複雑な構造物に対してもその有用性が数々の解析により示されている。

配管の設計では容器と同様に一般的な弾性解析による設計方法を用いることができるが、一般の配管は、エルボ、ティー、レジューサ等を含め、配管要素主要寸法が標準化されているため標準の配管要素に対する応力係数を求めておけば、公称応力を求めることにより評価に必要な応力強さが得られる。そこで本方針では高速原型炉での配管は薄肉配管となることを考慮した上で応力係数を用いた簡易弾性解析法による場合の規定を設けている。

- 2 「非弾性解析による設計」は、材料の非線形性、すなわち、塑性及びクリープ特性を考慮した解析による設計をさす。

クリープ特性が無視できない高温においては構造物上における応力ひずみ挙動は一般に非線形となるので、弾性解析により設計を行なう場合には、応力の評価にあたって個々の手順に対して適用される安全裕度が重ね合わされる結果、総合的には、極めて大きな安全裕度をもたらされる場合も起こりうる。従って構造物の挙動を適確に把握できる非弾性解析による設計が場合によっては必要となる。

- 3 2.2 は、その妥当性が証明される場合は実験等の適切な方法により、高速原型炉第1種機器の設計を行なうことができることを定めるものである。2.2 に沿う設計例としてはペローズの実験データに基づく設計あるいはその他の実験的な検証に基づく設計法などが考えられる。

### 3. 一般設計方針

#### 3.1 解析の方法

3.2 及び 3.3 の規定に関しては弾性解析により、これを満足するものとする。3.4 及び 3.5 の規定に関しては弾性解析又は非弾性解析により、これを満足するものとする。

弾性解析による場合は荷重又は応力を長期荷重（応力）又は短期荷重（応力）に区分するものとする。ここに長期荷重（応力）とは材料のクリープ効果を見逃し得ないような持続時間を有する荷重又はそれによる応力をいい、短期荷重（応力）とは長期荷重（応力）に該当しないものをいう。

#### 【解説】

3.は、本方針における一般設計方針について定めたものである。

1 一般設計方針は容器の設計方針及び管の設計方針の基本となるものである。容器の設計方針及び管の設計方針はそれぞれ、一般設計方針に対して容器及び管の特長を踏まえて規定の付加あるいは読み替えを行っている。一般設計方針の評価フローチャートを図 3.1.1 に示す。

2 一般設計方針と告示、ASME Sec III 及び ASME Code Case N-47 の制限を比較した結果を図 3.1.2 に模式的に示す。

3 3.1 は、1 次応力の制限及び特別な応力制限に関しては弾性解析によりこれらを満足し、ひずみの制限及びクリープ疲労損傷の制限に関しては弾性解析又は非弾性解析によりこれらを満足するよう定めたものである。

また、弾性解析による場合の荷重又は応力を長期荷重（応力）又は短期荷重（応力）に区分する基本的な考え方は以下に示すとおりである。

材料のクリープ特性を見逃しできない温度において、長時間にわたり作用する荷重制御型荷重に対しては、クリープ破断、過大なクリープ変形、クリープ座屈の防止を計る必要がある。変形制御型荷重についても、長時間にわたり作用する場合には、構造物内における応力の再配分により、局所にクリープひずみが集中する可能性がある。しかしながら、高速原型炉第 1 種機器の使用条件下では、上述のように高温で長時間にわたり作用する荷重とともに地震荷重又は運転時の過渡変化に伴い発生する荷重のように、高温

で作用するとしても短時間しか作用しない荷重もある。このような短時間しか作用しない荷重による構造物の変形又は局所の応力ひずみ挙動は、長時間作用する荷重によるものとはかなり異ったものとなる。従って、高温構造設計基準を合理的に策定するためには、荷重及び応力を長期、短期に区分し、その特徴に応じた制限を設ける必要がある。

本方針における長期荷重、短期荷重の区分の基本概念は、防止すべき破損様式の観点から材料のクリープ特性に注目し、これが無視できない温度において長時間にわたり作用する荷重であって、その荷重によるクリープ変形若しくはクリープひずみが無視できない量になるような荷重を長期荷重とし、それ以外の荷重を短期荷重として想定したものである。従って、前述の荷重の内、通常高温で使用される高速原型炉第1種機器における主要荷重（圧力荷重、衝撃荷重、自重、熱膨張反力、地震、熱的荷重）については、一般に圧力荷重、自重、熱膨張反力等が長期荷重に分類され、衝撃荷重や地震荷重が短期荷重に分類される。また、熱的荷重については、それによる応力が比較的高く、比較的短時間でクリープ効果が生じる可能性があるため、通常起動・停止に伴う $^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ オーダーの過渡的熱荷重については使用条件を考慮し、必要に応じ長期荷重に分類することが適切である。ただし、この分類は個々の評価式における材料のクリープ効果の取扱い方を勘案して定める必要があり、制限条項の別によって、ひとつの荷重又は応力を異なる分類とすることがある。例えば、3.5.3の一般規定によりクリープ損傷を算定する場合、(3.5.2.2)式の $\langle P_L + P_b + Q \rangle$ は定常又は準定常状態で発生する応力を考慮するためのものであるため、本評価方式を適用する場合には、通常起動・停止に伴い発生する過渡的熱荷重は短期荷重に分類することになる。

- 4 長期及び短期の用語に関しては、建築基準法施行令においても用いられているため、紛れないように解説する。

建築における用語の使用について文献(1)で次のように説明されている。「常時作用する荷重には死荷重、活荷重、衝撃、プレストレスの影響、土圧、静水圧などがあり、まれにあるいは突発的にしか作用しない非定常時荷重としては、風荷重、雪荷重、地震の影響、衝突荷重などがある。建築では前者を長期荷重、後者を短期荷重と称している。」

このように建築における長期、短期の区別は単に載荷時間あるいは生起頻度に基づいているのに対し、本方針における長期、短期はクリープ特性の観点から区別している。

#### 参考文献

- (1) 土木学会構造工学委員会 構造物安全性研究小委員会編、構造物の安全性・信頼性、昭52。

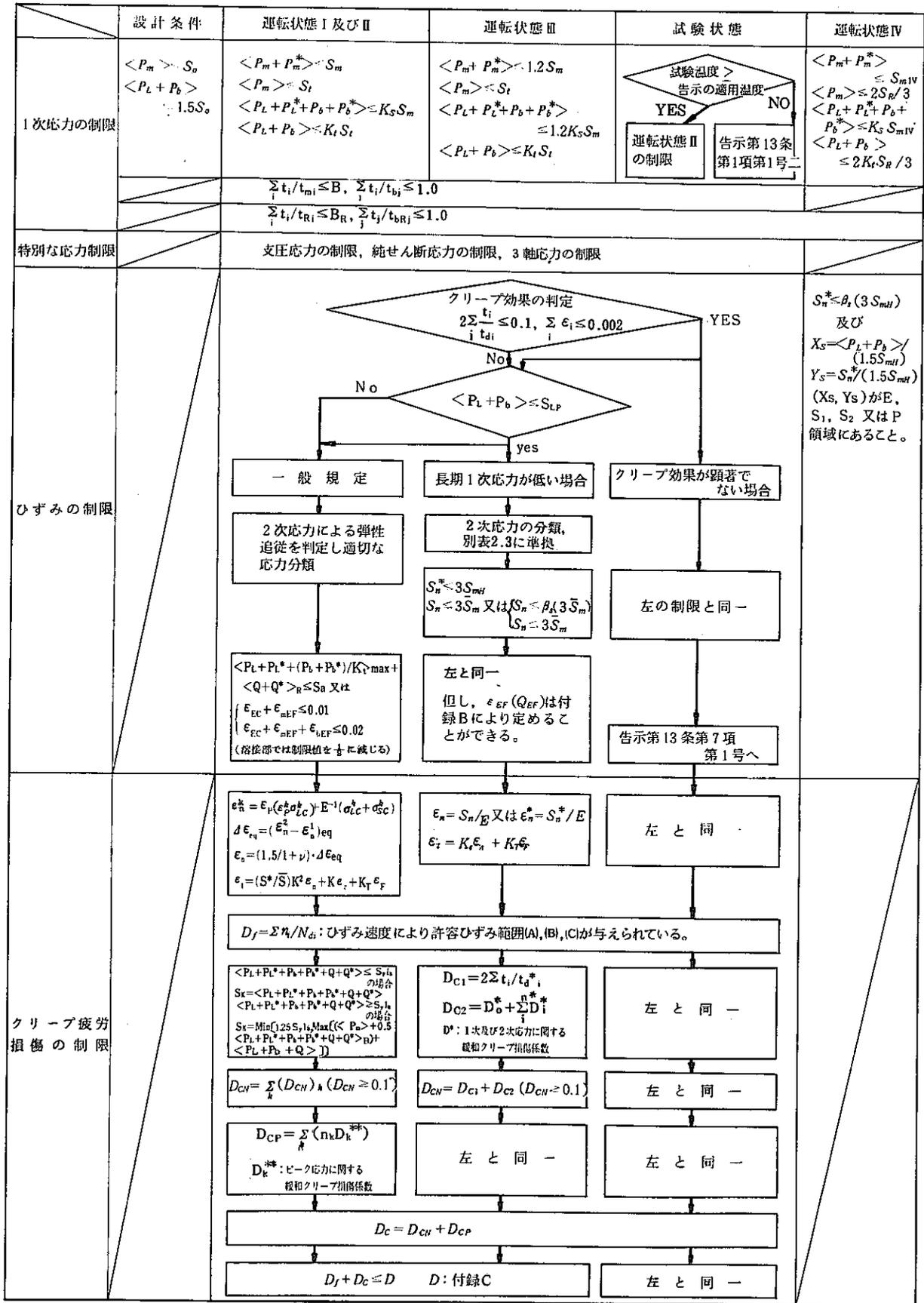


図 3.1.1 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針の評価フローチャート

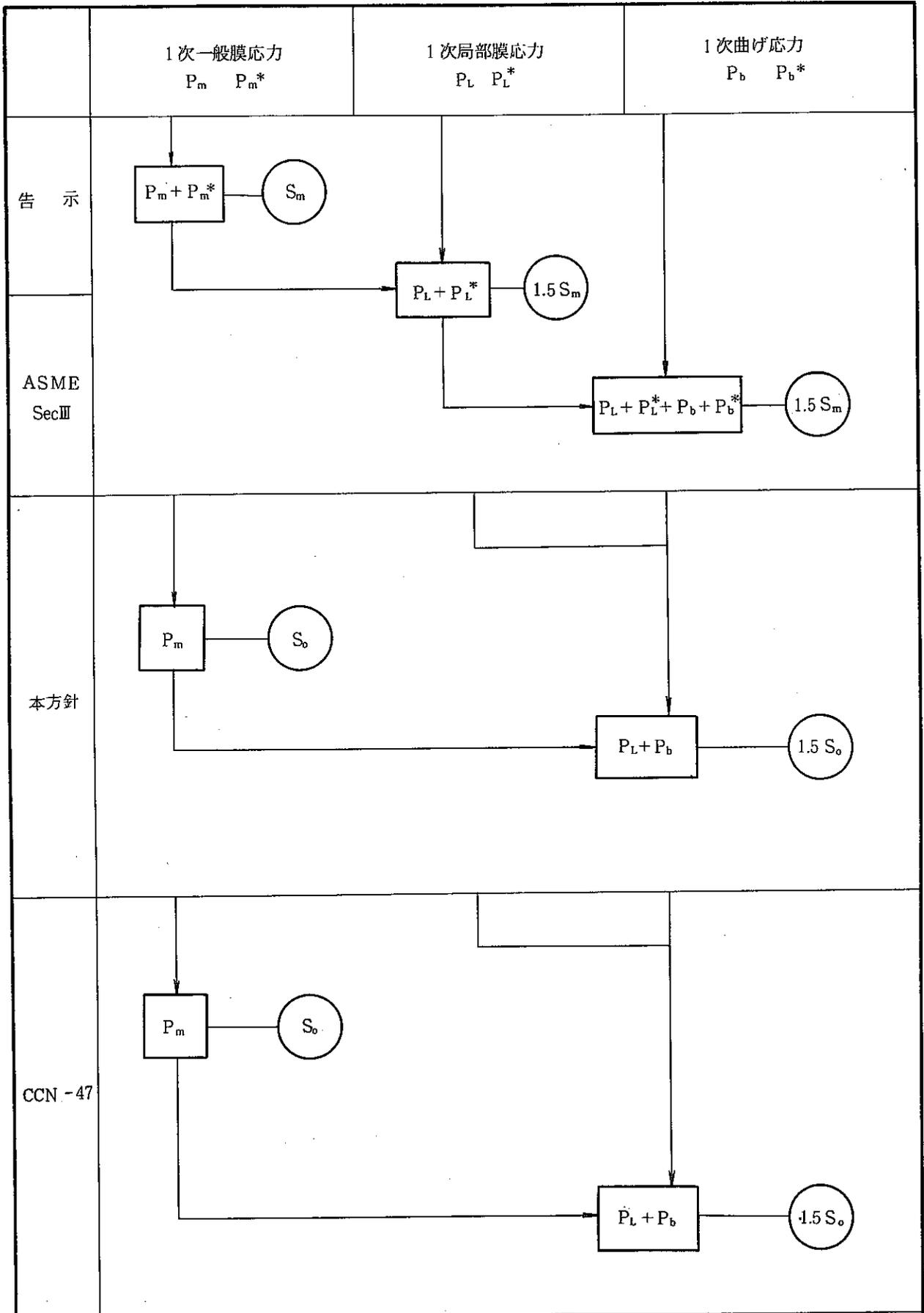


図 3.1.2 (1/9)

設計条件における1次応力制限

	1次一般膜応力 $P_m$ $P_m^*$	1次局部膜応力 $P_L$ $P_L^*$	1次曲げ応力 $P_b$ $P_b^*$
告示			
ASME SecIII			
本方針			
CCN -47			

図 3. 1. 2 ( 2 / 9 )

運転状態 I, II (Level A, B) における 1 次応力制限

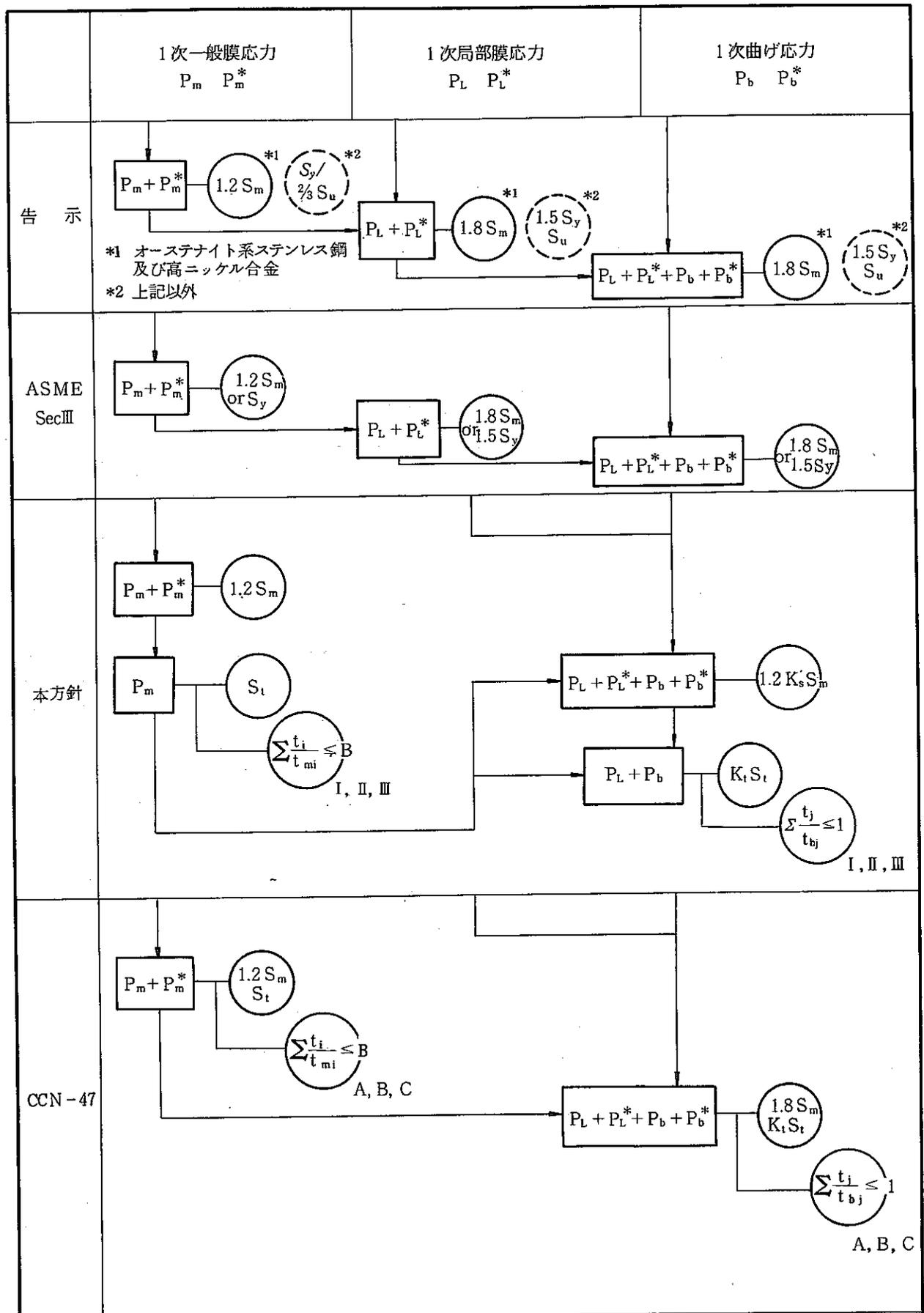


図 3.1.2 (3/9)

運転状態Ⅲ (Level C) に対する1次応力制限

	1次一般膜応力 $P_m$ $P_m^*$	1次局部膜応力 $P_L$ $P_L^*$	1次曲げ応力 $P_b$ $P_b^*$
告示	$P_m + P_m^*$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \begin{array}{c} 2.4 S_m \\ \frac{2}{3} S_u \end{array} \right)^{*1}</math> <math>\left( \frac{2}{3} S_u \right)^{*2}</math> </div>	$P_L + P_L^*$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \begin{array}{c} 3.6 S_m \\ S_u \end{array} \right)^{*1}</math> <math>\left( S_u \right)^{*2}</math> </div>	$P_L + P_L^* + P_b + P_b^*$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \begin{array}{c} 3.6 S_m \\ S_u \end{array} \right)^{*1}</math> <math>\left( S_u \right)^{*2}</math> </div>
ASME SecIII	$P_m + P_m^*$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \begin{array}{c} 2.4 S_m \\ 0.7 S_u \end{array} \right)^{*1}</math> <math>\left( 0.7 S_u \right)^{*2}</math> </div>	$P_L + P_L^*$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \begin{array}{c} 3.6 S_m \\ 1.05 S_u \end{array} \right)^{*1}</math> <math>\left( 1.05 S_u \right)^{*2}</math> </div>	$P_L + P_L^* + P_b + P_b^*$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \begin{array}{c} 3.6 S_m \\ 1.05 S_u \end{array} \right)^{*1}</math> <math>\left( 1.05 S_u \right)^{*2}</math> </div>
本方針	$P_m + P_m^*$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \begin{array}{c} 2.4 S_m \\ \frac{2}{3} S_u \end{array} \right)^{*1}</math> <math>\left( \frac{2}{3} S_u \right)^{*2}</math> </div> $P_m$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \frac{2}{3} S_R \right)</math>   <math>\left( \frac{\sum t_i}{t_{Ri}} \leq B_R \right)</math>             I, II, III, IV         </div>	$P_L + P_L^* + P_b + P_b^*$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \begin{array}{c} 2.4 K_t S_m \\ \frac{2}{3} K_s S_u \end{array} \right)^{*1}</math> <math>\left( \frac{2}{3} K_s S_u \right)^{*2}</math> </div> $P_L + P_b$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \frac{2}{3} K_t S_R \right)</math>   <math>\left( \frac{\sum t_i}{t_{Rbj}} \leq 1 \right)</math>             I, II, III, IV         </div>	
CCN-47	$P_m + P_m^*$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \begin{array}{c} 2.4 S_m \\ 0.7 S_u \\ 0.67 S_R \end{array} \right)</math>   <math>\left( \frac{\sum t_i}{t_{Ri}} \leq B_R \right)</math>             A, B, C, D         </div>	$P_L + P_L^* + P_b + P_b^*$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <math>\left( \begin{array}{c} 3.6 S_m \\ 1.05 S_u \\ 0.67 K_t S_R \end{array} \right)</math>   <math>\left( \frac{\sum t_i}{t_{Rbj}} \leq 1 \right)</math>             A, B, C, D         </div>	

図 3.1.2 (4/9)

運転状態IV (Level D) に対する1次応力制限

	1次一般膜応力 $P_m, P_m^*$	1次局部膜応力 $P_L, P_L^*$	1次曲げ応力 $P_b, P_b^*$
告示	$P_m + P_m^*$ (0.9S <sub>y</sub> )	$P_L + P_L^*$ (1.35S <sub>y</sub> )	$P_L + P_L^* + P_b + P_b^*$ (1.35S <sub>y</sub> )
ASME Sec III	$P_m + P_m^*$ (0.9S <sub>y</sub> )		$P_m + P_m^* + P_b + P_b^*$ (1.35S <sub>y</sub> ) $(2.15S_y - 1.2P_m)$
本方針	<p>高温では 運転状態Ⅱとして扱う</p> <p>低温では 告示の規定に従う</p>		
CCN-47	$P_m + P_m^*$ (0.9S <sub>y</sub> )		$P_L + P_L^* + P_b + P_b^*$ (1.35S <sub>y</sub> )

図 3.1.2 (5/9)

試験状態に対する1次応力制限

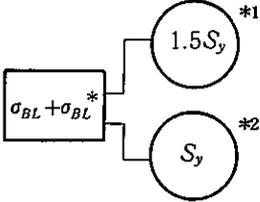
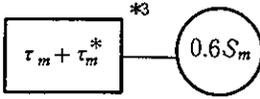
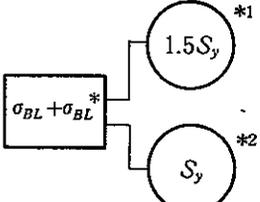
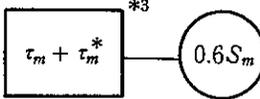
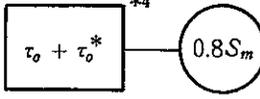
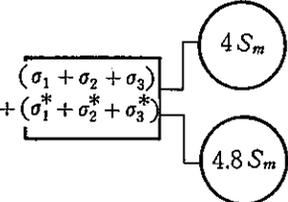
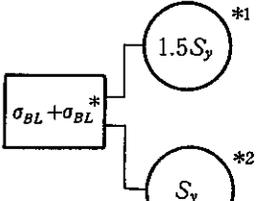
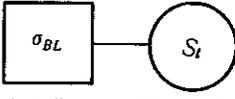
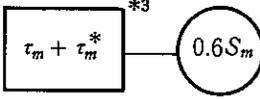
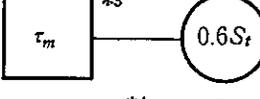
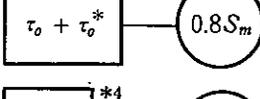
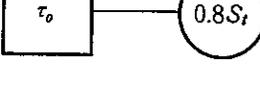
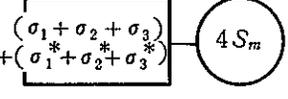
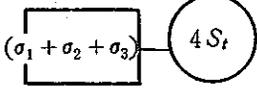
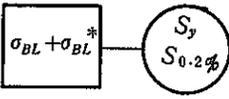
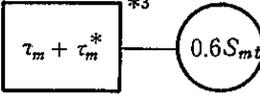
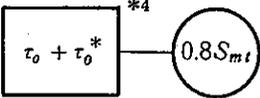
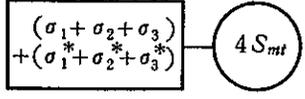
	支 圧 荷 重	純せん断を受ける場合	3 軸 応 力
告 示			
ASME Sec III		 	 <p style="text-align: right;">Level C</p>
本方針	  <p>*1 支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅よりも大きい場合 *2 上記以外</p>	   	 
CCN - 47		  <p>*3 断面平均せん断応力 *4 中実円断面の最大せん断応力</p>	

図 3. 1. 2 ( 6 / 9 )

運転状態 I, II, III (Level A, B, C) 及び試験状態に対する特別な応力制限

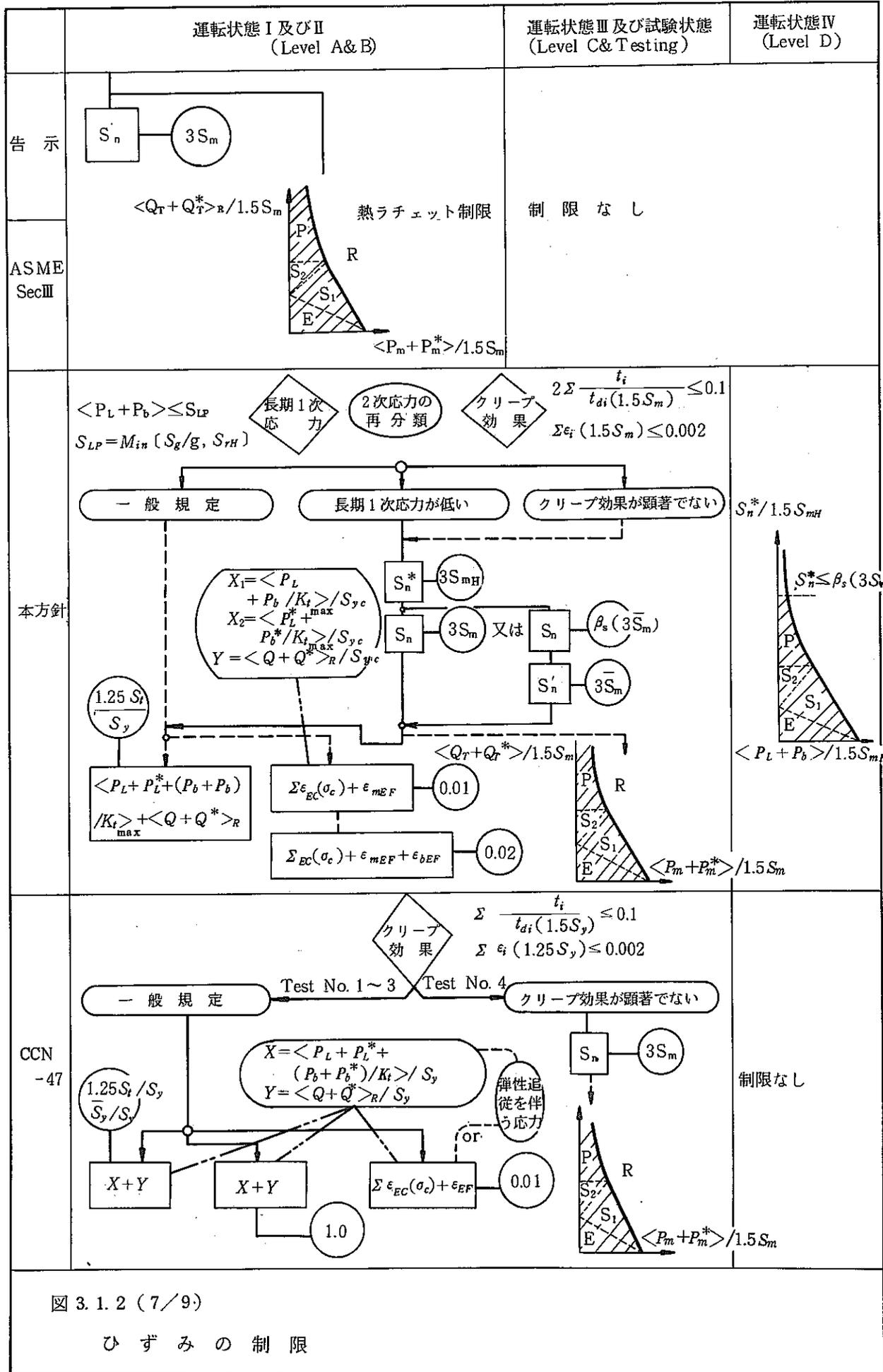


図 3.1.2 (7/9)

ひずみの制限

	運転状態 I 及び II (Level A&B)	運転状態 III 及び試験状態 (Level C & Testing)
告示		疲労評価 免除規定  評価の対象とせず
ASME Sec III		
本方針	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px;">一般規定</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px;">長期1次応力が低い</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px;">クリープ効果が顕著でない</div> </div> $\epsilon_t = (S^*/\bar{S})K^2 \epsilon_n + K \epsilon_c + K_T \epsilon_F$ $\epsilon_n^k = \epsilon_p^k (\epsilon_p^k \sigma_{LC}^k) + E^{-1} (\sigma_{LC}^k + \sigma_{SC}^k)$ <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center;"> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border-top: 1px solid black; width: 80%;"></div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px;">ひずみ速度 効果</div> </div> $D_f = \Sigma n / N_d$	
CCN -47	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px;">一般規定</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px;">クリープ効果が顕著でない</div> </div> $\epsilon_t = (S^*/\bar{S})K^2 \epsilon_n + K \epsilon_c + K_T \epsilon_R$ $\epsilon_n^k = \epsilon_p^k (\epsilon_p^k \sigma_{LC}^k) + E^{-1} (\sigma_{LC}^k + \sigma_{SC}^k)$ <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: center;"> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border-top: 1px solid black; width: 80%;"></div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px;">保持時間 効果</div> </div> $D_f = \Sigma n / N_d$	

図 3.1.2 (8/9)

疲労損傷の評価

運転状態 I, II, III 及び試験状態  
(Level A, B, C & Testing)

告示

適用温度制限により評価不要

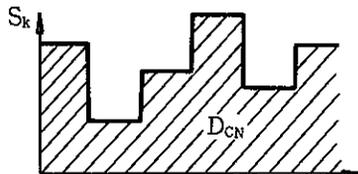
SecIII

$D_{CN}$

一般規定

長期1次応力が低い

クリープ効果が顕著でない

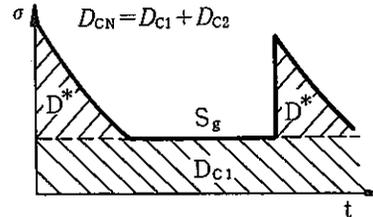


$$S_k = \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle$$

or

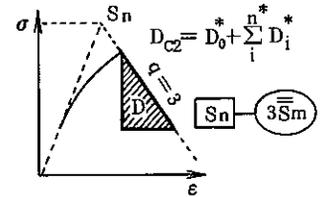
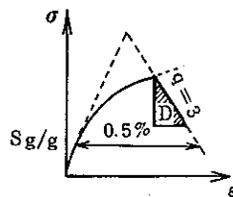
$$S_k = \text{Min} \{ 1.25 S_y, \text{Max} \{ \langle P_m \rangle + 0.5 \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle_R, \langle P_L + P_b + Q \rangle \} \}$$

本方針



(i) SUS304, SUS316及びSUS321伝熱管の場合

(ii) 2 1/4 Cr-1Mo (NT) の場合



$D_{CP}$

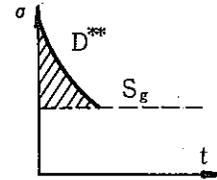
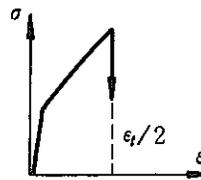
$$D_{CP} = \Sigma (n_k D_k^{**})$$

(i) SUS304, SUS316 及び SUS321 伝熱管の場合

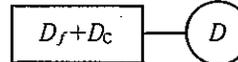
$$D^{**} = \text{Max} \left[ D_{po} \left( \frac{S_i - S_g}{C_o} \right)^{n_{po}}, 10^{-4} \right]$$

(ii) 2 1/4 Cr-1Mo (NT) の場合

$$D^{**} = \text{Max} \left[ D_{po} \left( \frac{S_i - S_g}{C_o} \right)^{n_{po}}, D_{pi} \left( \frac{S_i - S_g}{C_i} \right)^{n_{pi}}, 10^{-4} \right]$$



$$D_C = D_{CN} + D_{CP}$$

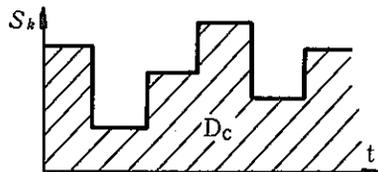


CCN

-47

一般規定

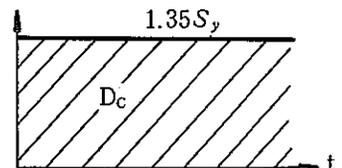
クリープ効果が顕著でない



$$S_k = \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle$$

or

$$S_k = \text{Min} \{ 1.35 S_y, \text{Max} \{ \langle P_m \rangle + 0.5 \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle_R, \langle P_L + P_b + Q \rangle \} \}$$



$$D_c = 0.1$$

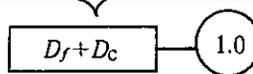


図 3.1.2 (9/9)

クリープ損傷及びクリープ疲労損傷評価

## 3.2 1次応力の制限

### 3.2.1 適用範囲

- (1) 3.2の規定は設計条件、運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ及び試験状態に対して適用する。
- (2) 3.2の規定の適用にかかわる応力分類は別表2.1に準拠して行うものとする。

### 3.2.2 設計条件に関する制限

設計条件に関して、次の(1)及び(2)の制限を満足しなければならない。この場合、厚さとして最小厚さからくされ代を減じた値(mm)を考慮するものとする。液体ナトリウム接液面のくされ代は付録Aにより定めることができる。

$$(1) \quad \langle P_m \rangle \leq S_o \quad (3.2.1)$$

記号 $\langle \sigma \rangle$ は応力 $\sigma$ の応力強さを表わすものであり、以下本方針においてこの定義により本記号を用いる。

$P_m$  : 長期荷重による1次一般膜応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$S_o$  : 最高使用温度に対して別表1.1(別図1.1)に定める値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )。

ただし、最高使用温度が告示の適用温度範囲内にある場合は $S_o$ を告示別表第6に定める値に読み替えるものとする。

$$(2) \quad \langle P_L + P_b \rangle \leq 1.5 S_o \quad (3.2.2)$$

$P_L$  : 長期荷重による1次局部膜応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$P_b$  : 長期荷重による1次曲げ応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$S_o$  : 3.2.2(1)に定めるところによる。

### 3.2.3 運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及びⅣに関する制限

#### (1) 運転状態Ⅰ及びⅡに関する制限

運転状態Ⅰ及びⅡに関して、次の1)及び2)の制限を満足しなければならない。

$$1) \quad \left\{ \begin{array}{l} \langle P_m + P_m^* \rangle \leq S_m \quad (3.2.3) \\ \langle P_m \rangle \leq S_t \quad (3.2.4) \end{array} \right.$$

$P_m$  : 3.2.2(1)に定めるところによる。

$P_m^*$  : 短期荷重による1次一般膜応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$S_m$  : 考えている負荷状態における最高壁厚平均金属温度に対して別表1.2(別図1.2)に定める値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$S_t$  : 考えている負荷状態の最高壁厚平均金属温度及びその状態の累積持続時間に対して別表 1.3 (別図 1.3) に定める値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$$2) \left\{ \begin{array}{l} \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle \leq K_s S_m \quad (3.2.5) \\ \langle P_L + P_b \rangle \leq K_t S_t \quad (3.2.6) \end{array} \right.$$

ここに

$$\left\{ \begin{array}{l} K_t = 1 + k_s \left( 1 - \frac{\langle P_L \rangle}{S_t} \right) \quad (3.2.7) \\ k_s = \alpha_c (K_s - 1) \quad (3.2.8) \end{array} \right.$$

$P_L, P_b$  : 3.2.2(2)に定めるところによる。

$P_L^*$  : 短期荷重による1次局部膜応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$P_b^*$  : 短期荷重による1次曲げ応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$\alpha_c$  : クリープ係数。  $\alpha_c = 0.5$  とする。

$K_s$  : 断面形状係数。別表 2.2 に準拠して定めるものとする。

$S_m, S_t$  : 3.2.3(1)1) に定めるところによる。

## (2) 運転状態Ⅲに関する制限

運転状態Ⅲに関して、次の1)及び2)の制限を満足しなければならない。

$$1) \left\{ \begin{array}{l} \langle P_m + P_m^* \rangle \leq 1.2 S_m \quad (3.2.9) \\ \langle P_m \rangle \leq S_t \quad (3.2.10) \end{array} \right.$$

ここに用いる記号の意義はすべて3.2.3(1)1)に定めるところによる。

$$2) \left\{ \begin{array}{l} \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle \leq 1.2 K_s S_m \quad (3.2.11) \\ \langle P_L + P_b \rangle \leq K_t S_t \quad (3.2.12) \end{array} \right.$$

ここに用いる記号の意義はすべて3.2.3(1)2)に定めるところによる。

## (3) 運転状態Ⅰ, Ⅱ及びⅢにわたる制限

運転状態Ⅰ, Ⅱ及びⅢにわたって、使用分数に関する次の制限を満足しなければならない。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i \frac{t_i}{t_{mi}} \leq B \quad (3.2.13) \\ \sum_j \frac{t_j}{t_{bj}} \leq 1.0 \quad (3.2.14) \end{array} \right.$$

$t_i$  : 壁厚平均金属温度が  $T_i$ , 1次一般膜応力強さが  $\langle P_m \rangle_i$  である負荷状態  $i$  の累積持続時間 (hr)。 $\sum_i t_i$  は 1.2.1(2)に定める高温使用

時間を下回ってはならない。

$t_{mi}$  : 温度  $T_i$  , 応力強さ  $\langle P_m \rangle_i$  に対して別表 1.3 (別図 1.3) に定める許容時間 (hr)

$t_j$  : 壁厚平均金属温度が  $T_j$  , 1 次応力強さが  $\langle P_L + P_b \rangle_j$  である負荷状態  $j$  の累積持続時間 (hr)。 $\sum_j t_j$  は 1.2.1 (2) に定める高温使用時間を下回ってはならない。

$t_{bj}$  : 温度  $T_j$  , 応力強さ  $(\langle P_L + P_b \rangle / K_t)_j$  に対して別表 1.3 (別図 1.3) に定める許容時間 (hr)

ここに  $P_m$  ,  $P_L$  ,  $P_b$  及び  $K_t$  は 3.2.3 (1) に定めるところによる。B は運転状態 I , II 及び III にわたる使用分数の制限値であって、 $B = 1.0$  とする。

#### (4) 運転状態 IV に関する制限

運転状態 IV に関して次の 1) 及び 2) の制限を満足しなければならない。

$$1) \begin{cases} \langle P_m + P_m^* \rangle \leq S_{mV} & (3.2.15) \\ \langle P_m \rangle \leq 2 S_R / 3 & (3.2.16) \end{cases}$$

ここに

$$S_{mV} = 2 S_u / 3 \quad (3.2.17)$$

ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあつては、

$$S_{mV} = \text{Min} \{ 2.4 S_m , 2 S_u / 3 \} \quad (3.2.18)$$

記号  $\text{Min} \{ x , y \}$  は  $x$  又は  $y$  のいずれか小さい方の値を表わすものであり、以下本方針においてこの定義により本記号を用いる。

$P_m$  ,  $P_m^*$  ,  $S_m$  : 3.2.3 (1) 1) に定めるところによる。

$S_u$  : 考えている負荷状態における最高壁厚平均金属温度に対して別表 1.6 (別図 1.6) に定める値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$S_R$  : 考えている負荷状態の最高壁厚平均金属温度及びその状態の持続時間に対して別表 1.5 (別図 1.5) に定める値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$$2) \begin{cases} \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle \leq K_s S_{mV} & (3.2.19) \\ \langle P_L + P_b \rangle \leq 2 K_t S_R / 3 & (3.2.20) \end{cases}$$

$P_L$  ,  $P_L^*$  ,  $P_b$  ,  $P_b^*$  ,  $K_s$  ,  $K_t$  : 3.2.3 (1) 2) に定めるところによる。

ただし、(3.2.7) 式により  $K_t$  を定める時、同式右辺の  $S_t$  を

2 S<sub>R</sub>/3 に読み替えるものとする。

S<sub>mV</sub>, S<sub>R</sub>: 3.2.3(4) 1) に定めるところによる。

(5) 運転状態 I, II, III 及び IV にわたる制限

運転状態 I, II, III 及び IV にわたって、使用分数に関する次の制限を満足しなければならない。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i \frac{t_i}{t_{Ri}} \leq B_R \quad (3.2.21) \\ \sum_j \frac{t_j}{t_{Rbj}} \leq 1.0 \quad (3.2.22) \end{array} \right.$$

$t_i, t_j$ : 3.2.3(3) に定めるところによる。

$t_{Ri}$ : 温度  $T_i$ , 応力強さ  $1.5 \langle P_m \rangle_i$  に対して別表 1.5 (別図 1.5) に定める許容時間 (hr)

$t_{Rbj}$ : 温度  $T_j$ , 応力強さ  $1.5 (\langle P_L + P_b \rangle / Kt)_j$  に対して別表 1.5 (別図 1.5) に定める許容時間 (hr)

ここに  $P_m, P_L, P_b$  及び  $Kt$  は 3.2.3(4) に定めるところによる。 $B_R$  は運転状態 I, II, III 及び IV にわたる使用分数の制限値であって  $B_R = 1.0$  とする。

3.2.4 試験状態に関する制限

- (1) 告示の適用温度範囲内の試験状態に関しては告示第 13 条第 1 項第 1 号 = に定めるところによる。
- (2) 告示の適用温度範囲を超える試験状態に関しては 3.2.3(1), (3) 及び (5) に定める運転状態 II に関する制限を満足しなければならない。

【解説】

1. 3.2 は 1 次応力の制限について定めたものである。1 次応力の制限の目的は以下に示すとおりである。

1 次応力は外力, 外モーメントに対し単純な平衡条件を満足するために必要な非自己制限型の応力である。材料のクリープ温度領域未満で使用する機器の設計においては次の目

的で1次応力を制限する。

- (1) 延性破断を防止する。
- (2) 塑性崩壊を防止する。
- (3) 過大な塑性変形を防止する。

上記(2)は構造物として強度が維持される限度を塑性崩壊荷重に基づいて考えることを意味し、(3)は構造物を総体として弾性領域におき弾性応力解析を妥当にしている。また許容値の体系は基本的には材料の引張強さおよび降伏応力から定まる時間に依存しない設計応力強さ  $S_m$  によって構成される。

一方、材料のクリープ温度領域で使用する機器の設計においては上記(1)、(2)及び(3)に以下の目的が加えられる。

- (4) クリープ破断を防止する。
- (5) 過大なクリープ変形を防止する。

上記(5)は過大なクリープ変形を防止するとともに微小変形理論による弾性応力解析を妥当にするために必要である。これらの目的に対する許容値の体系は、基本的には材料のクリープ挙動から定まる時間に依存する設計応力強さ  $S_t$  によって構成される。

1次応力による破損様式として以上のほかに座屈を考慮する必要があるが、本方針では別にこの防止規定を設けている。

2 3.2.1は、1次応力の制限を設計条件、運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ及び試験状態に対して適用することを定めたものである。また、本制限を適用する場合の応力分類は、別表2.1に準拠して行うことを定めたものである。

3 3.2.2は設計条件に関する1次応力の制限について定めたものである。

設計条件に関する1次応力の制限は、運転状態Ⅰ及びⅡに関する1次応力の制限を3.2.3に規定していることを考えると、運転状態Ⅰにおいて考慮すべき応力に関し、二重の規定となっている。

これは、本方針策定にあたり、ASME Code Case N-47において、Sec I及びⅧの実績を重視し運転状態別の制限体系とは異なる観点から設計条件の規定を定めた経緯を考慮して本規定を設けたことによる。但し、ASME Code Case N-47では明確にさ

れてはいないが、高温では制限値  $S_0$  がクリープ特性で定まる事を考慮し、制限の対象とする応力は長期荷重による 1 次応力であることを明記した。

- 4 本方針ではナトリウム環境効果は付録 A にその評価方法を規定している。高速原型炉第 1 種機器で使用が予定されるオーステナイト系ステンレス鋼は、ナトリウム環境効果をくされ代として評価すべきことを規定している。

これまでの研究の結果原型炉の使用条件ではナトリウム接液部のくされ代は一般に壁厚にくらべ僅かな量であることが明らかになったが、本方針では、設計条件においてくされ代を評価し、くされ代が壁厚にくらべ僅少であることを確認する意味で本規定を設けている。なお、くされ代が壁厚にくらべ無視しえないほど大きい場合には、設計条件のみでなく、運転状態 I ~ IV の制限においてもくされ代を考慮する必要がある。

- 5 3.2.2 (1) で規定している「最高使用温度が告示の適用温度範囲内にある場合」とは、最高使用温度が 1.2.1 の解説で示した温度範囲にある場合をいう。

- 6 3.2.3 は運転状態 I, II, III, 及び IV に関する 1 次応力の制限について定めたものである。

- 7 1 次応力に関する長期荷重と短期荷重の取扱いの基本的考え方は以下に示すとおりである。

材料のクリープ温度領域における設計においても地震荷重や衝撃圧力のように極めて短時間しか作用せず、事実上クリープ変形を生じさせない荷重が存在する。これらの荷重と、定常内圧および自重のように長期間定常的に作用する荷重とは評価基準を別にすることが合理的であると考えられる。本方針においては、1 次応力を生じさせる荷重を短期荷重と長期荷重に分類し、(短期+長期)荷重による 1 次応力を時間に依存しない  $S_m$  値ベースで制限し、長期荷重による 1 次応力を時間に依存する  $S_t$  値ベースで制限するものとしている。ASME Code Case N-47 では、特に明確にこのような分類はされていないが、負荷の持続時間と  $S_m$  値の関連において本方針と同様な評価がなされているものと考えられる。表 3.2.1 に 1 次応力の制限における短期荷重と長期荷重の取扱い方の例を示す。

表 3. 2. 1 短期荷重と長期荷重

	荷重の例	破損様式の例	制限基準
短期荷重	地震荷重 衝撃荷重	延性破断	長期荷重と合せて $S_m$ 基準
長期荷重	定常内圧 自重	クリープ破断	$S_t$ 基準

8 3.2.3 (1)の規定は運転状態 I 及び II に関する 1 次応力の制限について定めたものである。

ASME Code Case N-47 においては 1 次一般膜応力に対して  $S_{mt}$  (ある温度, 荷重の持続時間に対して  $S_m, S_t$  の小なる方), 及び 1 次 (膜+曲げ) 応力に対して  $\text{Min} [1.5 S_m, K_t S_t]$  の制限を設けている。しかし  $S_t$  が支配的となるのは, 長時間側であり, 本方針で規定している短期荷重+長期荷重は, ASME Code Case N-47 においても  $S_m$  により制限されることになる。従って, 本方針の規定と ASME Code Case N-47 の規定は実質的には同等であるが, 本方針の方がより明確な規定をしているといえる。

9 3.2.3 (1)の規定で定義している  $K_s$  の考え方は以下に示すとおりである。

(長期荷重+短期荷重)による 1 次 (膜+曲げ) 応力強さ  $\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle$  に対する制限は, 基本的には, 告示又は ASME Sec III における 1 次 (膜+曲げ) 応力強さの制限と同一である。それぞれの制限値の比較を表 3. 2. 2 に示すが, 容器を考える際に基本となる矩形断面に対しては全く同一値  $1.5 S_m$  になることがわかる。

表 3. 2. 2 長期荷重及び短期荷重による 1 次 (膜+曲げ) 応力強さに対する制限値<sup>(\*)</sup>

設計基準	制限値	備考
設計方針	$K_s S_m$	$K_s$ は別表 2. 2 に与える。 (矩形断面: 1.5 薄肉円管: 1.27)
告示	$1.5 S_m$	第 13 条第 1 項第 1 号イ)
ASME Sec III	矩形断面 $1.5 S_m$ 矩形断面以外 $\alpha S_m$	NB 3221.3 $\alpha$ は 1.5 及び曲げのみによる値を上まわってはならない。
ASME Code Case N-47	$1.5 S_m$	3223(c)

注 \*) 運転状態 I 及び II (又は Level A 及び B) 又は設計条件に対する制限値

弾塑性挙動に対する1次（膜+曲げ）応力の制限値は、基本的には膜応力の制限値に、弾完全塑性体を材料挙動として想定したはりの崩壊荷重に対して弾的に計算された最大応力と想定された降伏応力の比（断面形状係数）を乗ずることにより定める。崩壊荷重に対する弾的に計算された最大応力と想定された降伏応力の比は、膜応力が重畳する場合には必ずしも一様でなく図3.2.1に図示されるように膜応力依存性を有するが、矩形断面に対しては膜応力を0として計算された値で制限すれば安全側の制限となることが理解できる。

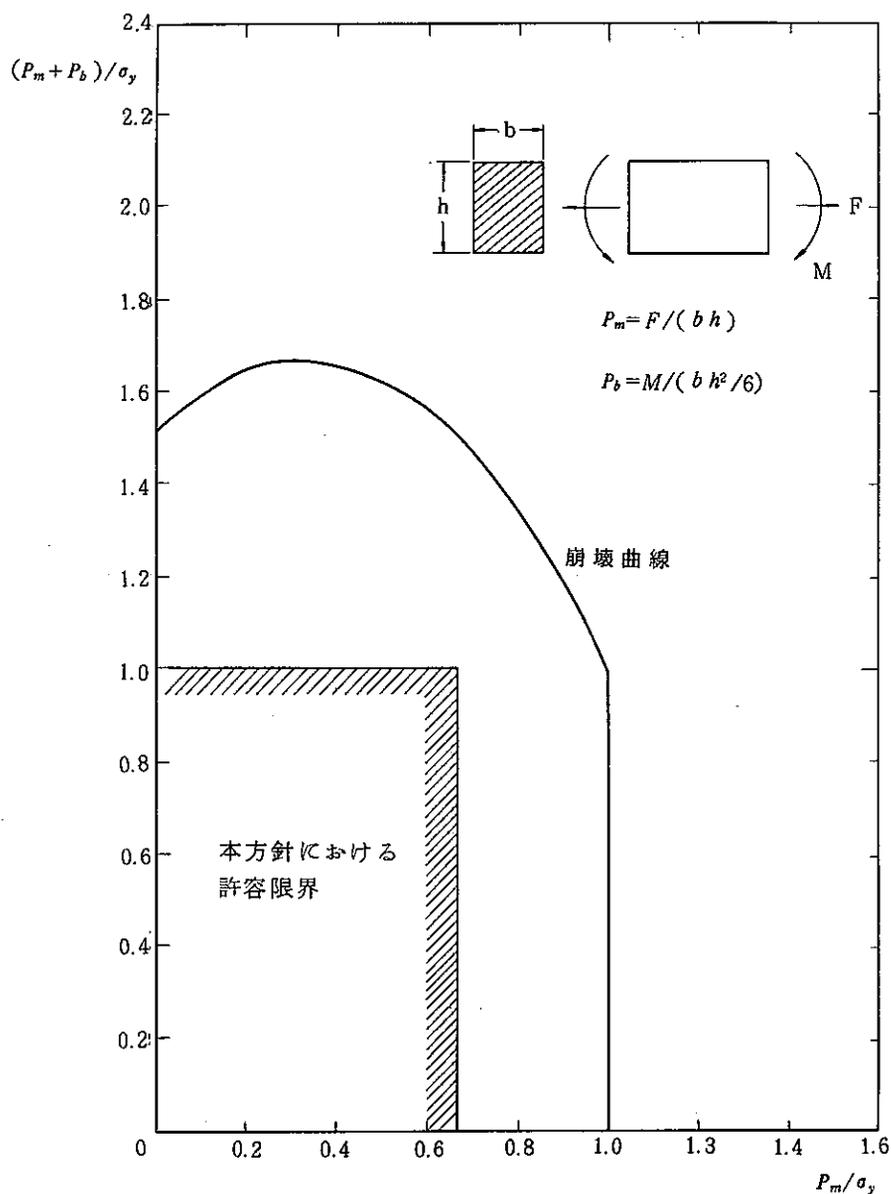


図 3.2.1 矩形断面に対する崩壊曲線

容器の設計においては、通常対象とする断面は矩形断面となるため制限値を膜応力に対する値の1.5倍とすれば良いが一般設計方針が管など種々の構造物の設計基準の基本となる事を考えると、より一般的な形で規定することが好ましい。これを考慮して、本方針あるいはASME Sec IIIでは矩形断面以外の断面に対する制限値をも規定する構成としている。矩形断面以外の断面に対する断面形状係数は本方針別表2.2に規定されており、その値及び考え方はASME Appendix A-9500と同一である。但し、ASME NB3221.3では、本方針の断面形状係数 $K_s$ にかえ、係数 $\alpha$ の使用を規定しており $\alpha$ は1.5を上まわらぬ値としている。これは、ASME Sec IIIでは、1次局部膜応力 $P_L$ の制限を $1.5 S_m$ としているため、1.5を上まわる断面形状係数の場合には、部分的に許容限界が崩壊曲線に接近する部分が生ずる恐れがあることを配慮した結果と考えられる。図3.2.2及び図3.2.3に

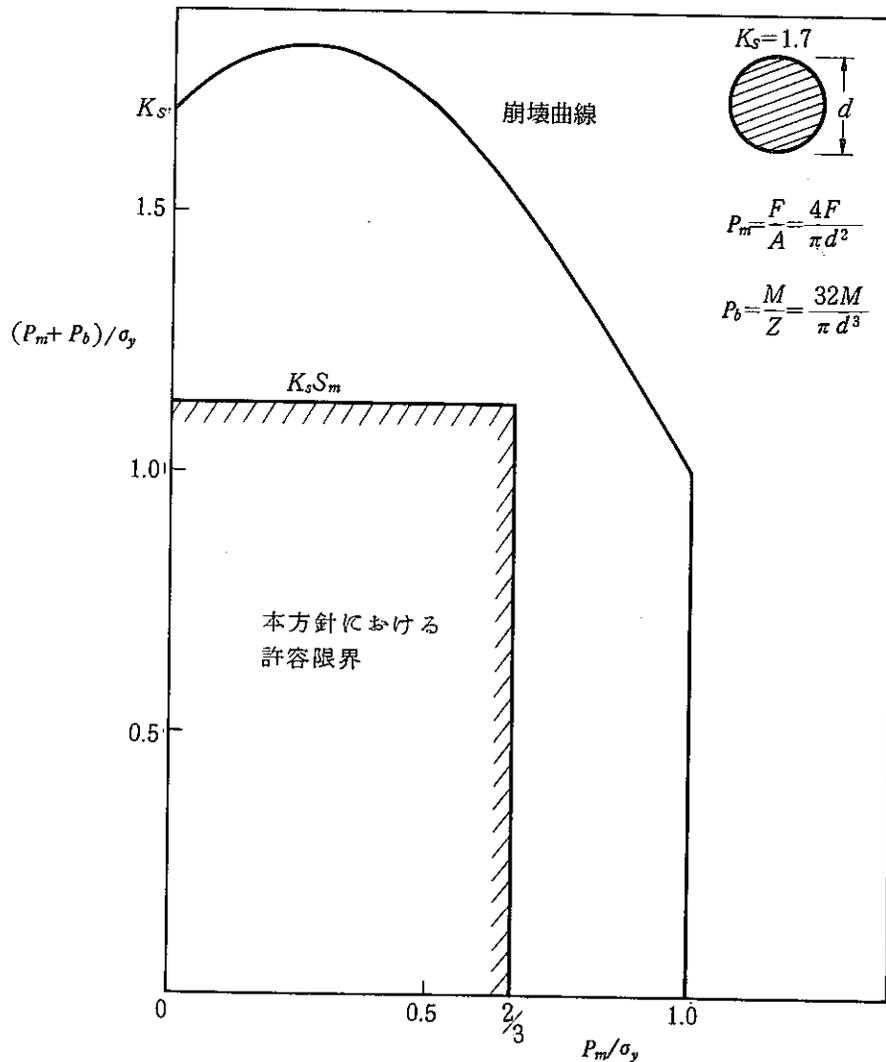


図 3.2.2 中実円断面に対する崩壊曲線

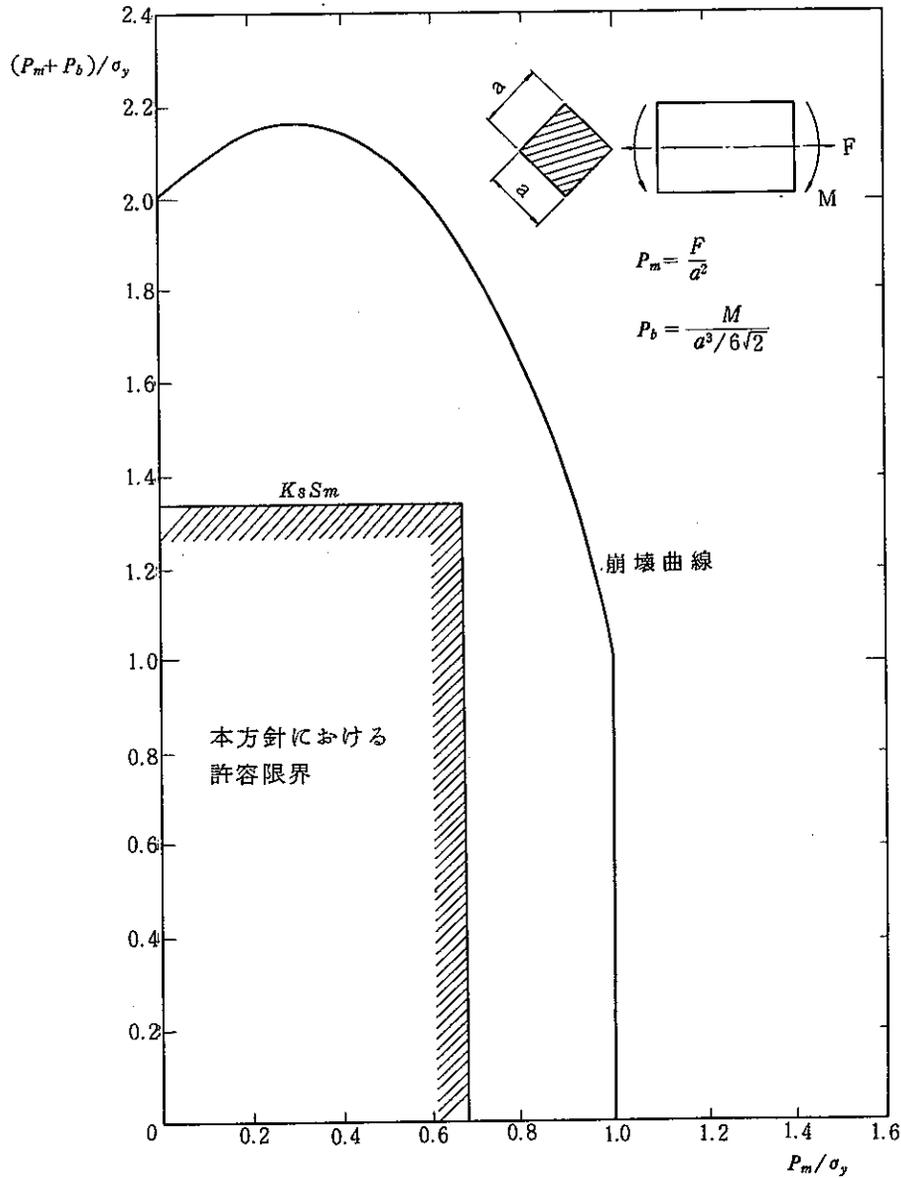


図 3.2.3 菱形断面に対する崩壊曲線

矩形断面以外の断面について塑性崩壊曲線と許容限界の対応を示すが、 $\sigma_y = 1.5 S_m$  として、1次膜応力を  $S_m$  ( $\frac{2}{3} \times 1.5 S_m$ ) に制限すれば 1.5 を上まわる断面形状係数に対しても許容限界は、崩壊曲線に対して適切な裕度を有することが理解できる。本方針では1次局部膜応力が1次一般膜応力を大幅に上まわる場合は稀であると考え、1.5 を上まわる断面形状係数  $K_s$  の使用も許容しているが、1次膜応力が比較的大きい場合には運用上1次(膜+曲げ)応力の制限における 1.5 を上まわる  $K_s$  値の使用には十分な注意が必要である。

10 3.2.3.(1)で定義する $K_t$ 及び $\alpha_c$ の考え方は次のとおりである。

本方針では、運転状態Ⅰ及びⅡの長期荷重による1次応力に対する制限式として(3.2.4)及び(3.2.6)を規定している。

(3.2.4)式と(3.2.6)式を比較すると、1次(膜+曲げ)応力強さに対する制限値は1次一般膜応力強さに対するものに比べ $K_t$ 倍になっている。これは、膜応力は、断面平均応力に該当し、断面としての挙動は基本的に弾性計算により得られた膜応力 $P_m$ 又は $P_L$ により規定されるのに対し(膜+曲げ)応力は断面内に応力分布を生じ、弾性的に計算された応力強さ $\langle P_L + P_b \rangle$ は、単に弾性応力分布における断面内最大応力強さを示すにすぎないためである。特に応力に対して非線形挙動を呈するクリープ変形下においては、曲げモーメントに対する応力は壁厚内で再配分され、表面応力についても弾性計算で求めた応力値より小さな値となる。

曲げモーメントに対するクリープ変形下での定常状態における表面応力は、定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_c$ を次式のように指数則で記せば比較的簡単な計算で求めることができる<sup>(1)</sup>。

$$\dot{\epsilon}_c = B \sigma^n \quad (1)$$

純粋曲げに対しては、中立軸からの距離 $y$ での定常状態におけるクリープひずみ速度は $y$ に比例するから、距離 $y$ での応力 $\sigma(y)$ は、外表面での最大応力を $P_{bc}$ として

$$\sigma(y) = P_{bc} |2y/h|^{1/n} \text{sign}(y) \quad (2)$$

$h$  : はりの深さ

$\text{sign}(y)$  :  $y$ の符号

矩形断面に対しては、はりに作用しているモーメントの釣合条件よりはりの幅を $b$ として

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) by dy = \frac{n}{2(2n+1)} P_{bc} bh^2 \quad (3)$$

一方、弾性計算により得られる表面応力 $P_b$ は同様にモーメント $M$ との釣合条件から

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{2y}{h} P_b by dy = P_b \frac{1}{6} bh^2 \quad (4)$$

従って、弾性計算による表面応力 $P_b$ と定常クリープ変形下での表面応力 $P_{bc}$ の比は、

$$P_{bc}/P_b = \frac{2n+1}{3n} \quad (5)$$

はりの壁厚内の定常クリープ状態での応力分布は、図3.2.4に示すとおりであるが、ク

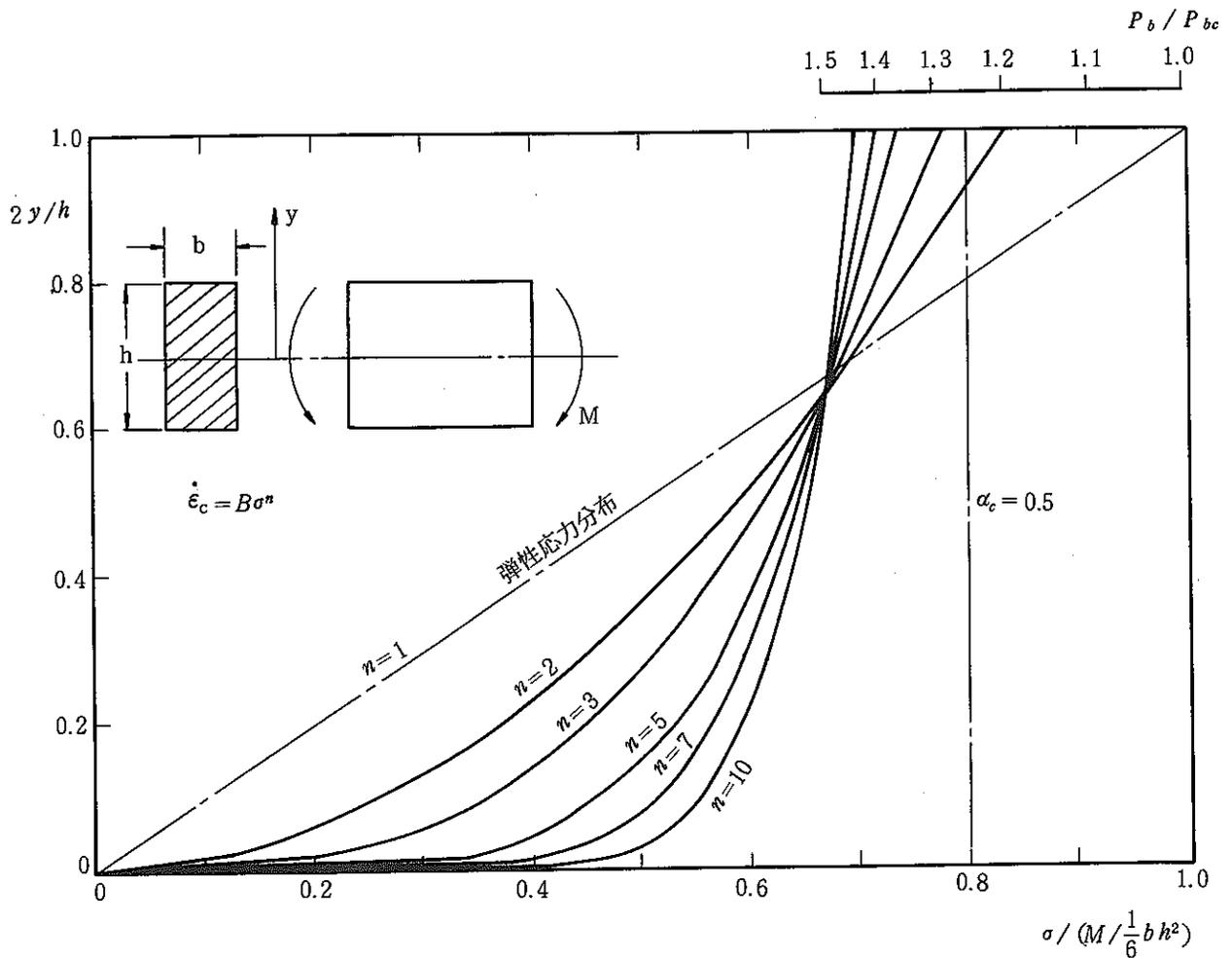


図 3.2.4 定常クリープ状態における応力分布 (矩形断面)

クリープ破断・3次クリープの開始等が問題となるような状況下では、壁厚内での応力再配分は既に十分進行しほぼ定常クリープ変形下での応力分布となることが予想されるので、少なくとも再配分後の応力が膜応力に対する制限値を上まわらなければ、曲げモーメントによりクリープ破断が生じたり、過大なクリープ変形が生じたりすることはない。従って、矩形断面に対する  $Kt$  値の安全側としては

$$Kt = \frac{3n}{2n+1}$$

とすれば良いことがわかる。本方針では、 $Kt$  を (3.2.7) 及び (3.2.8) のように (塑性) 断面形状係数  $Ks$  と 1次局部膜応力強さ  $\langle PL \rangle$  の関数として表わしており、クリープ係数  $\alpha_c$  は、ここでのケースに対しては、

$$\alpha_c = \frac{K_t - 1}{K_s - 1} = \frac{2(n-1)}{2n+1} \quad (6)$$

$K_s = 1.5$  (矩形断面の場合)

代表的な  $n$  に対して  $\alpha_c$  の値を計算すると表 3.2.3 のようになり、これにより  $n = 2.5$  であれば  $\alpha_c = 0.5$  とすることは再配分後の最大応力を膜応力に対する制限値以下に抑えることが理解できる。

表 3.2.3 定常クリープ状態における断面内最大応力に対応する  $\alpha_c$

(純粋曲げを受ける矩形断面はり)

指 数 $n$	2.5	3	4	5	7	$\infty$
$\alpha_c$	0.5	0.57	0.67	0.73	0.80	1.0

軸力が重畳する場合は、若干複雑になるが、同様に定常クリープ状態での最大応力を求めることができる。軸力が重畳する場合には、変形の中立軸は、はりの中央面からずれるがその距離を  $y_1$  としかつ距離  $y_1$ 、 $y$  をはりの深さ  $h$  で規格化し、 $\eta = 2y/h$ 、 $\eta_1 = 2y_1/h$  とする。

また、定常クリープひずみ速度を(1)式とすれば、弾性計算及び定常クリープ変形下での軸力とモーメントを等しくおくことにより(7)及び(8)式が得られる。

$$P_L/P_c = \frac{n}{2(n+1)} \left\{ (\eta_1+1) - |\eta_1-1| \left( \frac{|\eta_1-1|}{\eta_1+1} \right)^{\frac{1}{n}} \right\} \quad (7)$$

$$P_b/P_c = \frac{3n}{2(2n+1)} \left\{ (\eta_1+1)^2 - (\eta_1-1)^2 \left( \frac{|\eta_1-1|}{\eta_1-1} \right)^{\frac{1}{n}} \text{sign}(\eta_1-1) \right\} \\ - \frac{3n}{2(n+1)} \eta_1 \left\{ (\eta_1+1) - |\eta_1-1| \left( \frac{|\eta_1-1|}{\eta_1+1} \right)^{\frac{1}{n}} \right\} \quad (8)$$

(7)及び(8)式において、長期1次一般膜応力強さの制限値が  $S_t$  である事を考慮し、 $P_c = S_t$  として、 $P_L$ 、 $P_b$  の種々の組合せについて定常クリープ状態での最大応力が  $S_t$  となる条件を  $\eta$  の代表的な値についてサブパラメータ  $\eta_1$  を  $0 \sim \infty$  とすることにより計算してプロットすると図 3.2.5 のようになる。図 3.2.5 より (3.2.7) 式及び (3.2.8) 式は、種々の1次応力の組合せに対し、安全側の制限を与えることが理解される。

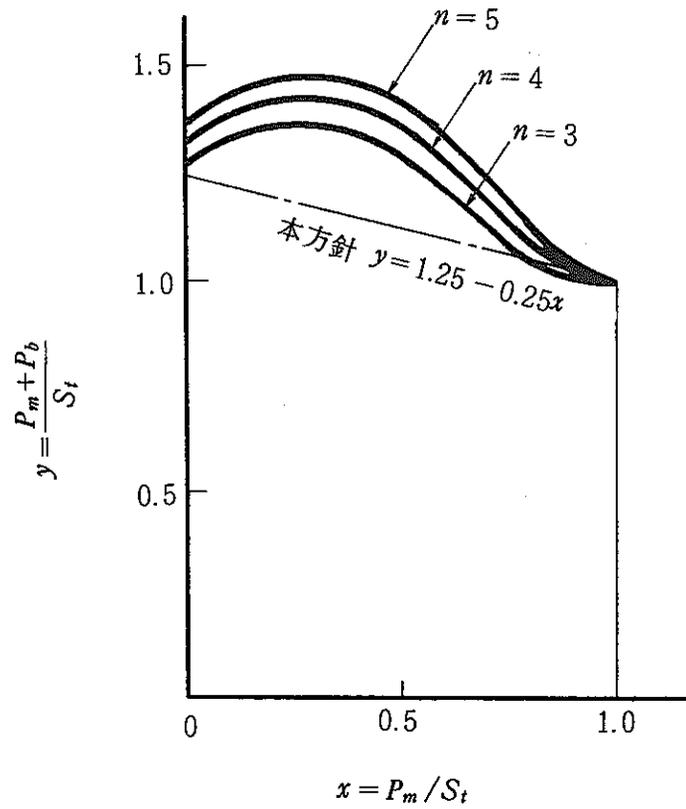


図 3.2.5 クリープ材料における軸力と曲げモーメントの組合せの許容限界 (矩形断面)

以上の議論は、基本的に 1 次膜応力と 1 次曲げ応力が重畳した場合の定常クリープ状態における最大応力に注目し最大応力を膜応力に対する制限値に抑えとした場合についてであるが、図 3.2.4 に示されるように曲げ応力が重畳する場合には、壁厚内で応力は一様でなく、指数  $n$  に依存する分布を示す。従って定常応力状態の最大値を膜応力に対する制限値で制限するのは、かなり保守的な制限といえる。例えば図 3.2.4 に示されように  $n = 2$  の場合には、壁の表面の近傍においては、 $\alpha_c = 0.5$  として評価される応力値を上まわるが、断面の大部分は  $\alpha_c = 0.5$  として評価される応力より十分低い応力レベルに留まる。

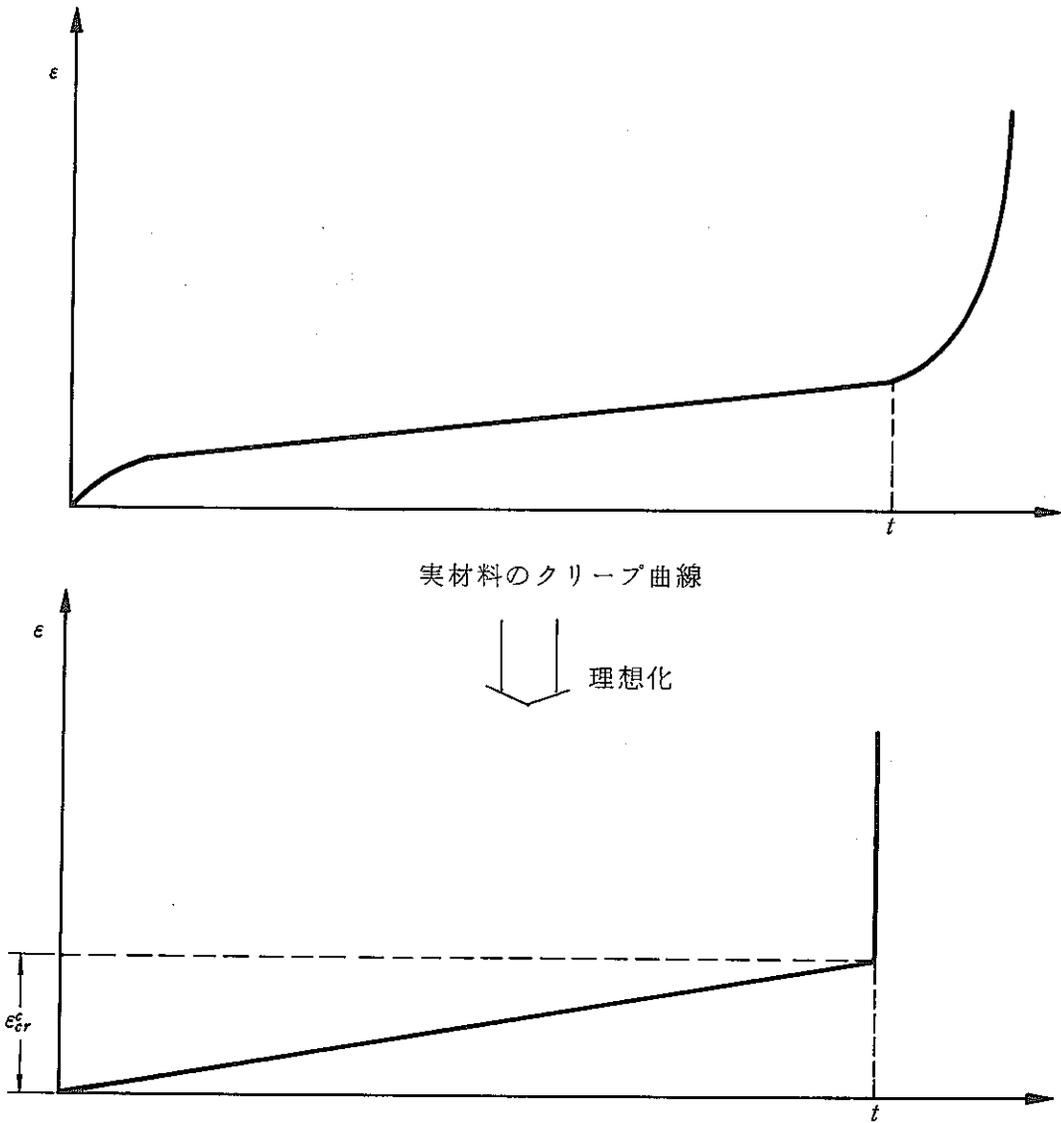


図 3.2.6 理想化されたクリープ曲線

1次膜応力と1次曲げ応力が重畳した場合の設計係数 $Kt$ 、 $\alpha_c$ についてはクリープ曲線を図3.2.6のように理想化して崩壊の考え方からも導出することができる。<sup>(2)</sup>

この方法は、図3.2.7に示すように、はり上のクリープひずみが限界クリープひずみ $\epsilon_{cr}^c$ に到達する迄は先の計算方法で求めたのと同様の応力分布を想定するが、その後部分的に限界クリープひずみ $\epsilon_{cr}^c$ を上まわるクリープひずみが生ずる部分は、安全側想定として載荷能力が無くなるものとしてはりのクリープ変形を解くものである。従って、変形が進行するにつれ、載荷能力のなくなる部分が増大し、次第に変形は加速されるが、限界クリープひずみ $\epsilon_{cr}^c$ が応力又はクリープ破断時間に依存しなければモーメントに対して弾性的に計算される表面応力 $P_b$ と当該モーメントを負荷したはりがクリープ崩壊(載荷部の消失)に到る時間で限界クリープひずみ $\epsilon_{cr}^c$ に達する応力 $\sigma^*$ との比は、限界クリープひずみ又

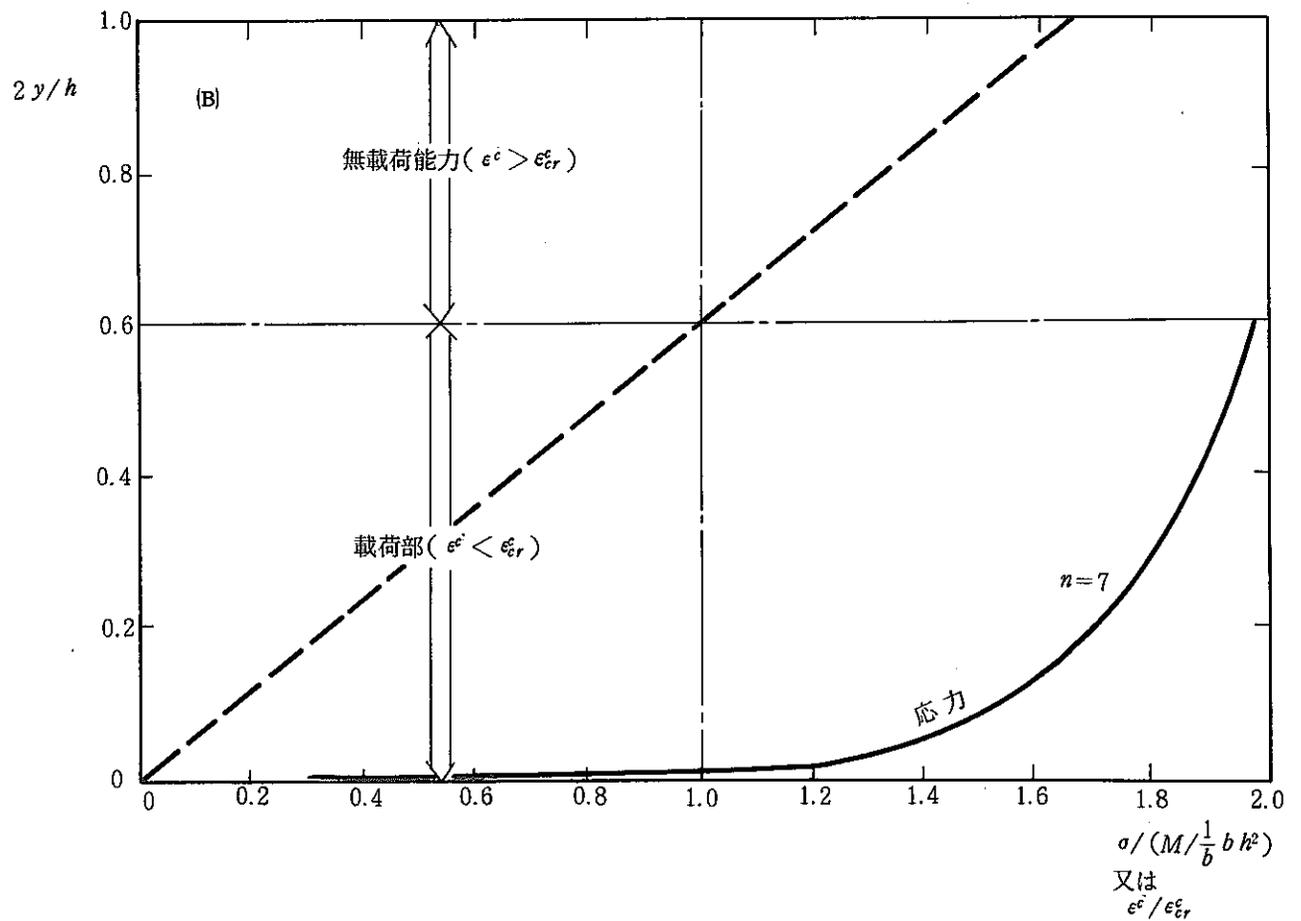
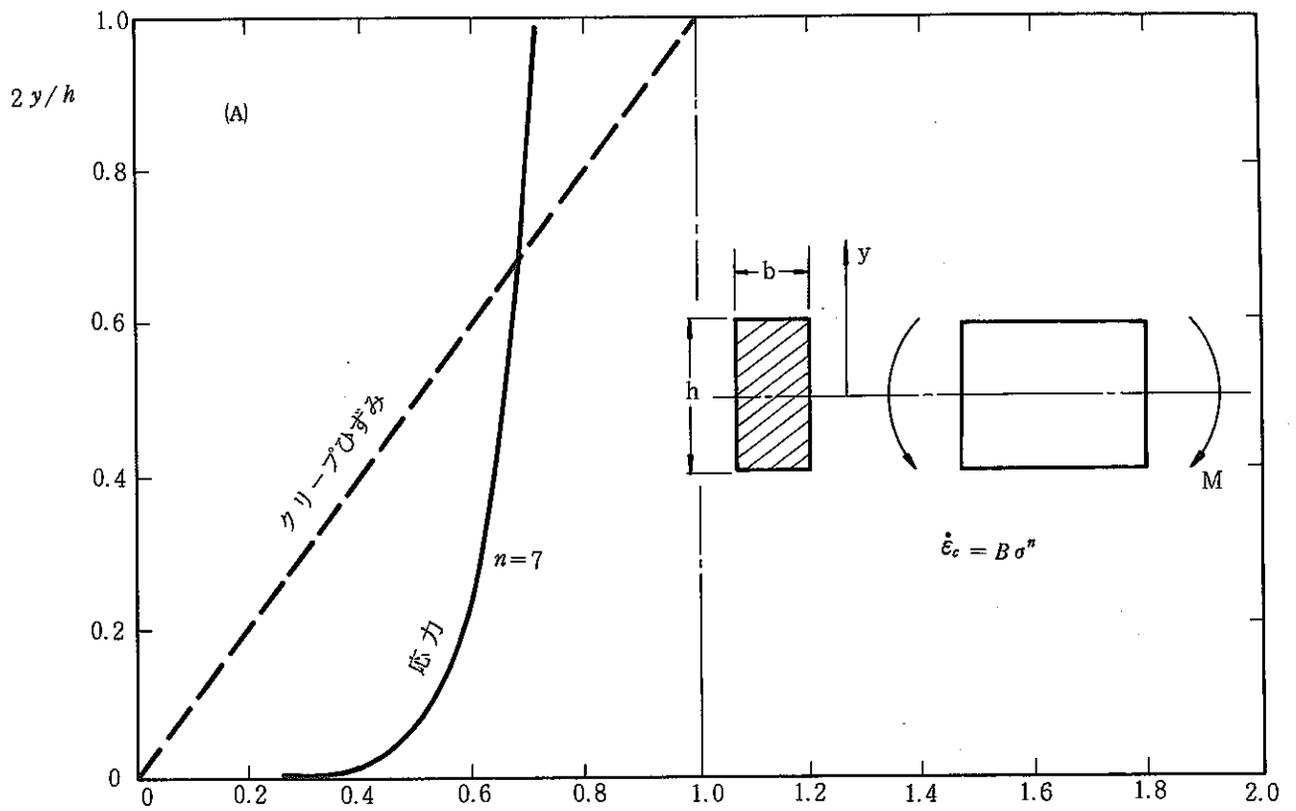


図 3. 2. 7 クリープ崩壊の考え方における応力分布形態 (矩形断面)

は応力に無関係に下式で与えられる。

$$P_b/\sigma^* = \frac{h^4}{8I} \int_0^1 \eta^{1+\frac{1}{n}} (b/h) d\eta \left[ \frac{1 + \int_0^1 \left\{ \int_0^\xi \eta^{1+\frac{1}{n}} (b/h) d\eta \right\}^n \xi^{-2} d\xi}{\left\{ \int_0^1 \eta^{1+\frac{1}{n}} (b/h) d\eta \right\}^n} \right]^{\frac{1}{n}}$$

ここに I は断面 2 次モメント，その他の記号は図 3. 2. 7 に示される通りである。

代表的な断面形状に対する上記比は，表 3. 2. 4 に与えられる。

表 3. 2. 4 クリープ崩壊の考え方により求められる  $K_t$ ,  $\alpha_c$  (純粋曲げを受ける場合)<sup>(2)</sup>

	$K_t$							(*) $\alpha_c$
	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 5$	$n = 7$	$n = 10$	$n = \infty$	
矩形断面	1.5	1.34	1.35	1.39	1.41	1.44	1.5	0.68
中実円断面	$\frac{16}{3\pi}$	1.50	1.51	1.55	1.58	1.61	$\frac{16}{3\pi}$	0.71
薄肉円筒	$\frac{4}{\pi}$	1.17	1.18	1.21	1.22	1.24	$\frac{4}{\pi}$	0.62

注 (\*) 任意の  $n$  に対する  $K_t$  の最小値に対応

表 3. 2. 4 の値を  $K_t$  として (3. 2. 7) 式及び (3. 2. 8) 式に従って  $\alpha_c$  を求めてプロットすると図 3. 2. 8 のようになり  $\alpha_c$  として 0.6 程度の値を採用すれば，任意の指数  $n$  に対し安全側の  $K_t$  が得られることがわかる。なお，膜応力が重畳する場合についても同様に，軸力が比較的小さい条件についての近似解から図 3. 2. 9 に示されるようなクリープ挙動に対する崩壊曲線が得られ，(3. 2. 7) 式及び (3. 2. 8) 式において  $\alpha_c = 0.6$  とすれば，膜応力の重畳を考慮しても，1 次 (膜 + 曲げ) 応力に対する適切な制限が与えられることが示されている。

この方法は，限界クリープひずみを超える部分では载荷能力を期待しない点で安全側であるため，クリープ効果が顕著な温度領域における 1 次 (膜 + 曲げ) 応力の制限の構成により厳密な根拠が与えられるものであるが本方針においては，クリープ係数  $\alpha_c$  として十分に保守的であり，ASME Code Case N-47 と同じ係数の 0.5 を採用している。

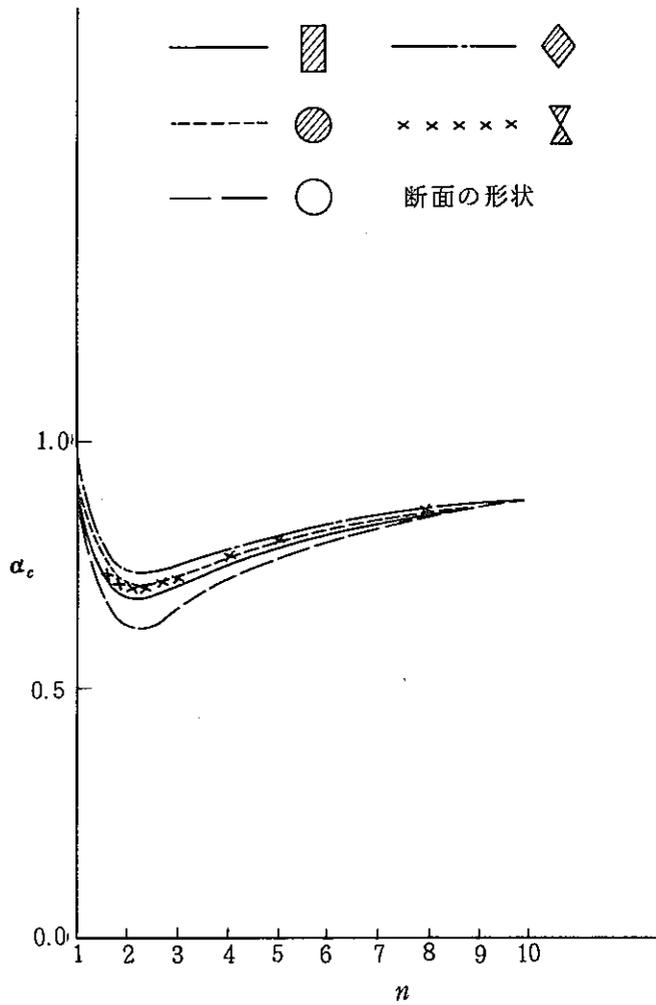


図 3.2.8 種々の断面はり  $\alpha_c$  値

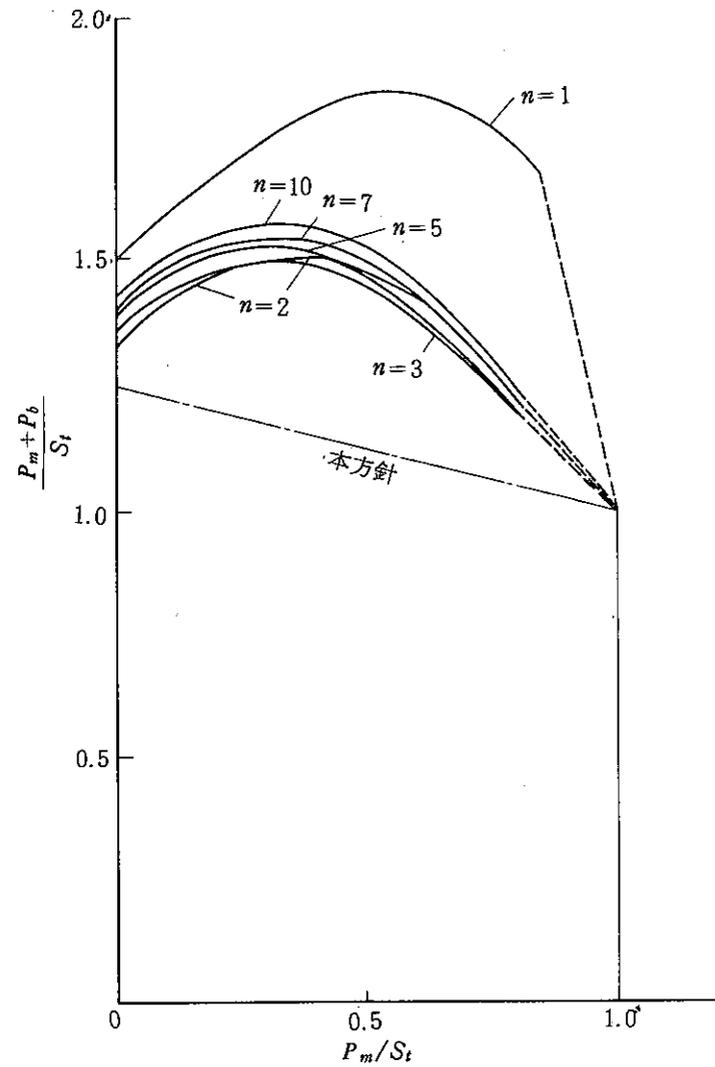


図 3.2.9 クリープ材料における軸力と曲げモーメントの組合せの許容限界 (矩形断面) — クリープ崩壊荷重を考えた場合

参考文献

- (1) 安藤, 岡林, 原子力工学シリーズ3「原子力プラントの構造設計」東京大学出版会
- (2) 鈴木, “クリープ域での極限解析” 機講論No764-10 (1976)

11 3.2.3(2)の規定は, 運転状態Ⅲに関する1次応力の制限について定めたものである。

運転状態Ⅲにおける短期荷重による1次一般応力の制限は各基準によってその規定に差がみられるが, 本方針の規定はそれらを保守的に包括したかたちになっており, ASME Code Case N-47 と同一である。参考として表3.2.5に各基準の許容値を比較して示す。

表3.2.5 運転状態Ⅲにおける1次一般膜応力制限の比較

設計基準	制限値
告示	$1.2 S_m$ <span style="float: right;"><math>\text{Min} [S_y, 2/3 S_u]</math></span> (オーステナイト系ステンレス鋼 (左以外の場合) 及び高ニッケル合金の場合)
ASME Sec Ⅲ NB	$\text{Max} [1.2 S_m, S_y]$ <span style="float: right;"><math>\text{Max} [1.1 S_m, 0.9 S_y]</math></span> (右以外の場合) <span style="float: right;">(フェライト系鋼)</span>
ASME Code Case N-47	$1.2 S_m$
本方針(短期荷重による1次応力に対して)	$1.2 S_m$

一方, 長期荷重による1次応力に対しては運転状態Ⅰ及びⅡと同じ制限を設けており, 割増しはしていない。しかし, 運転状態Ⅲの事象は発生確率が低く, 負荷状態の累積持続時間が運転状態Ⅰ及びⅡに比べて極めて短いために $S_t$ は大きな値となり, 実質的には割増しがあると考えられる。

12 3.2.3(3)の規定は運転状態Ⅰ, Ⅱ及びⅢにわたる1次応力の制限について定めたものである。

時間に依存する設計応力強さ  $S_t$  によって運転状態Ⅰ、Ⅱ及びⅢの各負荷状態における長期荷重による1次応力を個々に制限しているが、それらの異なった負荷状態に対してクリープ効果が累積することにより過大なクリープ変形やクリープ破断に至らないようにするために使用分数和の制限を設けている。使用分数和は1次応力による累積クリープ損傷和ということもでき、異なる負荷状態に対して線形重ね合せによる損傷則が成立することを前提としている。

運転状態Ⅰ、Ⅱ及びⅢにわたる制限では、使用分数の分母としてクリープ破断応力強さ線図ではなくて、全ひずみ1%および3次クリープの開始をも制限の対象とした設計応力強さ  $S_t$  線図より求めた時間を用いる。

また、1次一般膜応力強さに関する使用分数は  $B$  以下に制限している。これは一般的には  $B=1.0$  として良いと考えられるがクリープ損傷の非線形性が無視できない場合は  $B$  として  $1.0$  以外の値を設定する余地を残したためである。本方針では限定された材料を対象として  $B=1.0$  としている。1次(膜+曲げ)応力強さに関しては、十分安全側の係数  $K_t$  を用いて等価な膜応力に置換えて評価していることを考慮し、その使用分数和を  $1.0$  に制限している。

13 3.2.3(4)の規定は運転状態Ⅳに関する1次応力の制限について定めたものである。

運転状態Ⅳの1次応力の制限は、ASME Sec III Appendix F中の「Elastic system analysis and component elastic analysis」の制限によっており、短期荷重による1次応力に対しては、 $S_m$ 値基準で運転状態Ⅰ及びⅡ(告示では設計条件に対応)の2.4倍の割増しを行なうとともに設計引張強さ  $S_u$  による制限をも行なっている。本方針ではこれらの制限値をまとめて  $S_{mV}$  と定義する。一方、長期荷重による1次応力に対しては、前述の短期荷重による1次応力制限がかなり大きなひずみを許容することに対応し、全ひずみが1%に達する応力を基礎の一つにおく  $S_t$  値ではなく、設計クリープ破断応力強さ  $S_R$  を考えその  $2/3$  に許容限度をおく。

14 3.2.3(5)の規定は、運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及びⅣにわたる1次応力の制限について定めたものである。

運転状態Ⅳも含めた全状態にわたる1次応力による累積クリープ損傷和を表わす使用分

数和に関しては、その分母に1次応力の1.5倍に対してクリープ破断応力線図より求めた時間を用いる。これは、運転状態Ⅳにおける長期荷重による1次応力の制限が $S_R$ の $2/3$ をベースにしていることに対応したものである。

15 3.2.4の規定は試験状態に関する制限について定めたものである。

告示の適用温度範囲内の試験状態については、告示と同じ制限である。一方高温では高温機器の特殊性も考えて、告示のような許容応力の割増しや、免除規定を与えずに運転状態Ⅱとして評価を要求している。

### 3.3 特別な応力制限

#### 3.3.1 適用範囲

- (1) 3.3の規定は運転状態Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ及び告示の適用温度範囲を超える試験状態に対して適用するものとする。
- (2) 3.3の規定が適用される特定の場合において，3.2の規定と3.3の規定が異なるときは3.3の規定によるものとする。

#### 3.3.2 支圧応力の制限

支圧荷重を受ける部分にあっては次の(1)及び(2)の制限を満足しなければならない。

- (1) 支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合

$$\begin{cases} \sigma_{BL} + \sigma_{BL}^* \leq 1.5 S_y & (3.3.1) \\ \sigma_{BL} \leq S_t & (3.3.2) \end{cases}$$

$\sigma_{BL}$  : 長期支圧荷重による平均支圧応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{BL}^*$  : 短期支圧荷重による平均支圧応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

$S_y$  : 支圧荷重を受ける部分の金属温度に対して別表1.4 (別図1.4)に定める値 (kg/mm<sup>2</sup>)

$S_t$  : 考えている負荷状態における支圧荷重を受ける部分の金属温度及びその状態の累積持続時間に対して別表1.3 (別図1.3)に定める値 (kg/mm<sup>2</sup>)

- (2) (1)以外の場合

$$\begin{cases} \sigma_{BL} + \sigma_{BL}^* \leq S_y & (3.3.3) \\ \sigma_{BL} \leq S_t & (3.3.4) \end{cases}$$

ここに用いる記号はすべて3.3.2(1)に定めるところによる。

#### 3.3.3 純せん断応力の制限

純せん断荷重を受ける部分にあっては次の(1)及び(2)の制限を満足しなければならない。

- (1) 
$$\begin{cases} \tau_m + \tau_m^* \leq 0.6 S_m & (3.3.5) \\ \tau_m \leq 0.6 S_t & (3.3.6) \end{cases}$$

$\tau_m$  : 長期純せん断荷重による断面平均せん断応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\tau_m^*$  : 短期純せん断荷重による断面平均せん断応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

$S_m, S_t$  : 3.2.3(1)に定めるところによる。ただし壁厚平均金属温度を断面平均金属温度に読み替えるものとする。

(2) 中実円断面の部分がねじり荷重を受ける場合

$$\begin{cases} \tau_o + \tau_o^* \leq 0.8 S_m & (3.3.7) \\ \tau_o \leq 0.8 S_t & (3.3.8) \end{cases}$$

$\tau_o$  : 長期ねじり荷重による最大せん断応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )。ただし応力集中によるものを除く。

$\tau_o^*$  : 短期ねじり荷重による最大せん断応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )。ただし応力集中によるものを除く。

$S_m, S_t$  : 3.3.3(1)に定めるところによる。

### 3.3.4 3軸応力の制限

1次応力に関して次の制限を満足しなければならない。

$$\begin{cases} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + (\sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^*) \leq 4 S_m & (3.3.9) \\ \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leq 4 S_t & (3.3.10) \end{cases}$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  : 長期荷重による1次応力の主応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$\sigma_1^*, \sigma_2^*, \sigma_3^*$  : 短期荷重による1次応力の主応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

ここに応力分類は3.2.1(2)に定めるところによる。

#### 【解説】

- 3.3は特別な応力制限として支圧応力の制限、純せん断力の制限及び3軸応力の制限を定めたものである。
- 3.3.1(1)の規定は、特別な応力制限を運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及び告示の適用温度範囲を超える試験状態に対して適用することを定めたものである。
- 3.3.1(2)の規定は、特別な応力制限が適用される特定の場合において特別な応力制限の規定と1次応力の制限の規定が異なる場合は、本節の規定が適用されることを定めたものである。

4 3.3.2 (1)及び(2)の(3.3.1)式及び(3.3.3)式による支圧応力の制限は告示と同じであり、基本的な考え方については告示解説書に下記の説明が与えられている。「支圧応力の許容値を降伏点( $S_y$ )としたのは、図3.3.1(a)においてABのそれぞれが一次応力の許容値を満足している状態において、ABの一方又は両方の一部分が降伏しても全体としては降伏していないような点を許容限度としたものである。また、図3.3.1(b)において、支圧荷重の作用端から自由端までの距離( $l_1$ )

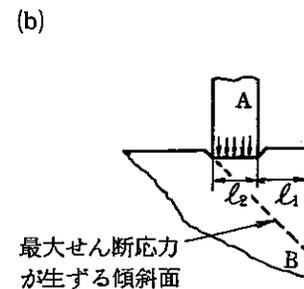
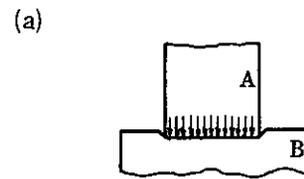


図 3.3.1 支圧応力の制限

が次第に大きくなると、部材Bの最大せん断応力が生ずる傾斜面に破壊は起きにくくなり、 $l_1$ が支圧荷重の作用幅( $l_2$ )よりも大きくなると、接触面での支圧応力が $1.5 S_y$ となっても損傷に至らない。従って、上記のような形状に対しては、 $1.5 S_y$ を支圧応力の許容値とした。」

1次応力に関する制限では、この支圧応力の制限のみが $S_m$ でなく $S_y$ による制限となっているが、これは圧縮荷重となる特定の負荷条件に限定した上での取扱いである。

5 3.3.2 (1)及び(2)の(3.3.2)式及び(3.3.4)式の長期荷重による支圧応力の制限は、作用端から自由端までの距離とは無関係に $S_t$ としている。これは $S_t$ を上まわる例えば $1.1 S_t$ 又は $1.5 S_t$ 等とした場合にどの程度のひずみ量に抑えられるか必ずしも明確でないためである。一方、ASME Code Case N-47には当初支圧荷重に対するクリープ特性の面からの制限は具体的に規定されてはいなかったが、第15版において等時応力ひずみ線図を用いて得られる0.2%オフセットひずみを生じる応力で制限することが新たに規定された。

Code Case N-47の規定と本方針の規定の対応は、図3.3.2に示す通りほぼ同等であるとともに、特に高速原型炉設計上重要な温度領域では本方針における $S_t$ 制限の方が厳しい制限となっている。本方針でCode Case N-47と同一の規定を取って避けているのは、新たな制限値を定義すること及び1次応力に関する制限で等時応力ひずみ線図を使用するのは適切でないと判断したためである。

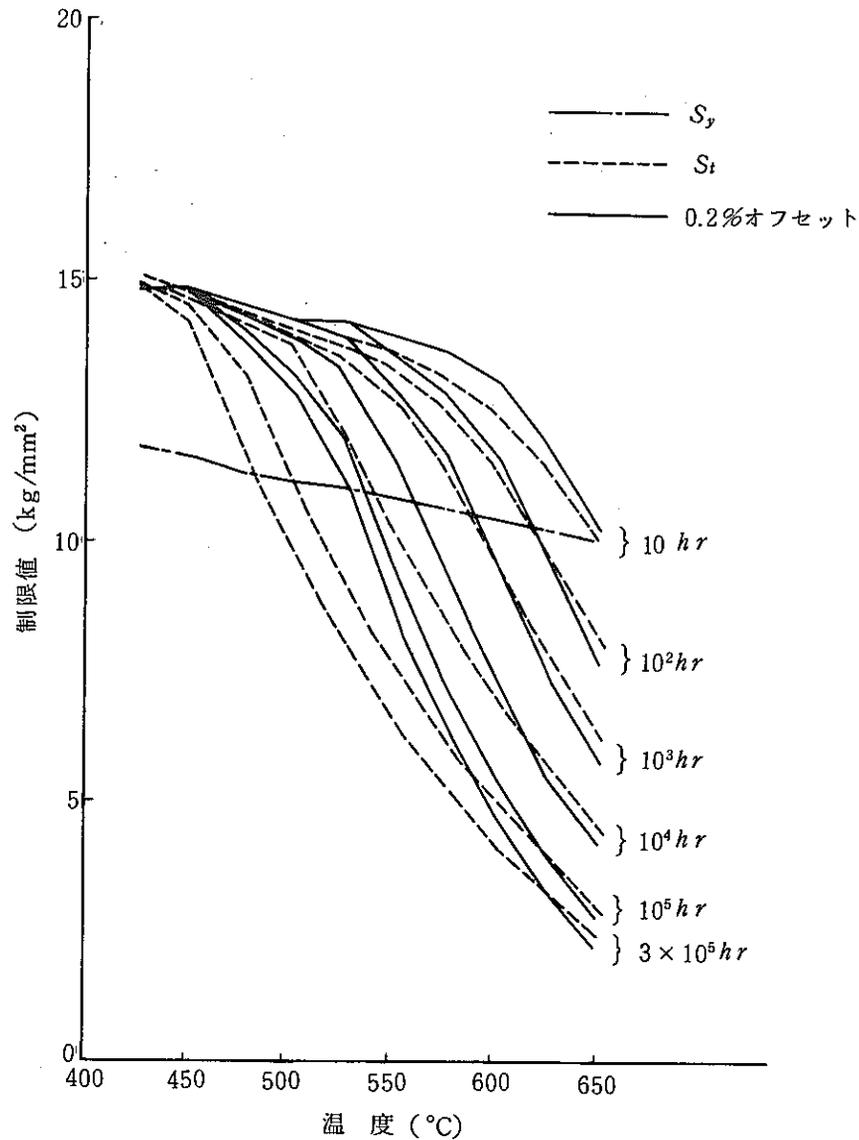


図 3.3.2 長期支圧応力の制限値の比較 (SUS 304)

6 3.3.3(1)の(3.3.5)式による純せん断力の制限についても告示の制限と同じであり、その基本的考え方は、告示解説書に下記のように記されている。

「最大せん断応力に基づく降伏条件 (トレスカの降伏条件) に従うと、平均せん断応力の許容値は  $0.5 S_m$  となるが、純せん断荷重を受ける部分については、実際の現象により近いせん断ひずみエネルギー説に基づく降伏条件 (ミーゼスの降伏条件) に従うと、引張降伏応力とせん断降伏応力との比は  $1 : 1/\sqrt{3}$  である。従って、純せん断荷重の場合には、平均せん断応力の許容値を  $S_m/\sqrt{3} \doteq 0.6 S_m$  と定めている。」

7 3.3.3(2)の(3.3.7)式の中実円断面の部分がねじり荷重を受ける場合は、告示では1種容器に対する材料の応力強さの限界及び許容応力を定めた第13条には規定はないが、告示では炉心支持構造物に対する材料の応力強さの限界及び許容応力を定めた第96条では、本方針におけると同等の規定があり、告示解説書では次のように説明している。

「中実円断面がねじり荷重を受ける場合に外周のみが降伏する時のねじりモーメントと、全断面が降伏する時のねじりモーメントの比は1 : 4/3である。従って、外周における最大ねじりせん断応力の許容値を  $0.6 S_m \times 4/3 = 0.8 S_m$  と定めた。

なお、最大ねじりせん断応力は、一次応力を対象としているので、応力集中を考える必要はない。」

8 3.3.3(1)及び(2)の(3.3.6)式及び(3.3.8)式による長期荷重に対するねじりせん断応力の制限はASME Code Case N-47と同等であるが、これは1次応力の制限にみられるように、短期荷重によるものを含めた1次応力に対する制限値  $S_m$  と長期荷重による1次応力に対する制限値  $S_t$  は同等であるとの考えに立脚するものである。

9 3.3.3の3軸応力の制限については告示に導入されていないが、3つの主応力が接近しているような状態に対し制限が必要と考え、ASME Code Case N-47の制限を採用した。長期荷重及び短期荷重による三軸応力の制限値として  $4 S_m$  を採用している理由は、下記の通りである。

1点における主応力を  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  としかつ  $\sigma_1 = \sigma_2$  とする。Nadaiの著書“Theory of Flow and Fracture of Solid”によれば「金属材料が純粋に等値引張の3軸応力を受けるときは、単軸引張における強さの約2倍で破壊する」と記されている。 $S_m$ は、設計引張強さ  $S_u$  の1/3等で規定されているが議論の簡略化のため  $S_m = S_u/3$  とし、上記Nadaiの著書に示される多軸応力場で破壊が生ずると予想される境界及び安全率を3として許容される領域を図示すると図3.3.3のようになる。

一方、本方針では、運転状態Ⅰ及びⅡにおける1次一般膜応力に対する制限として

$$|\sigma_1 - \sigma_3| \leq S_m \quad (1)$$

又、3軸応力の制限として

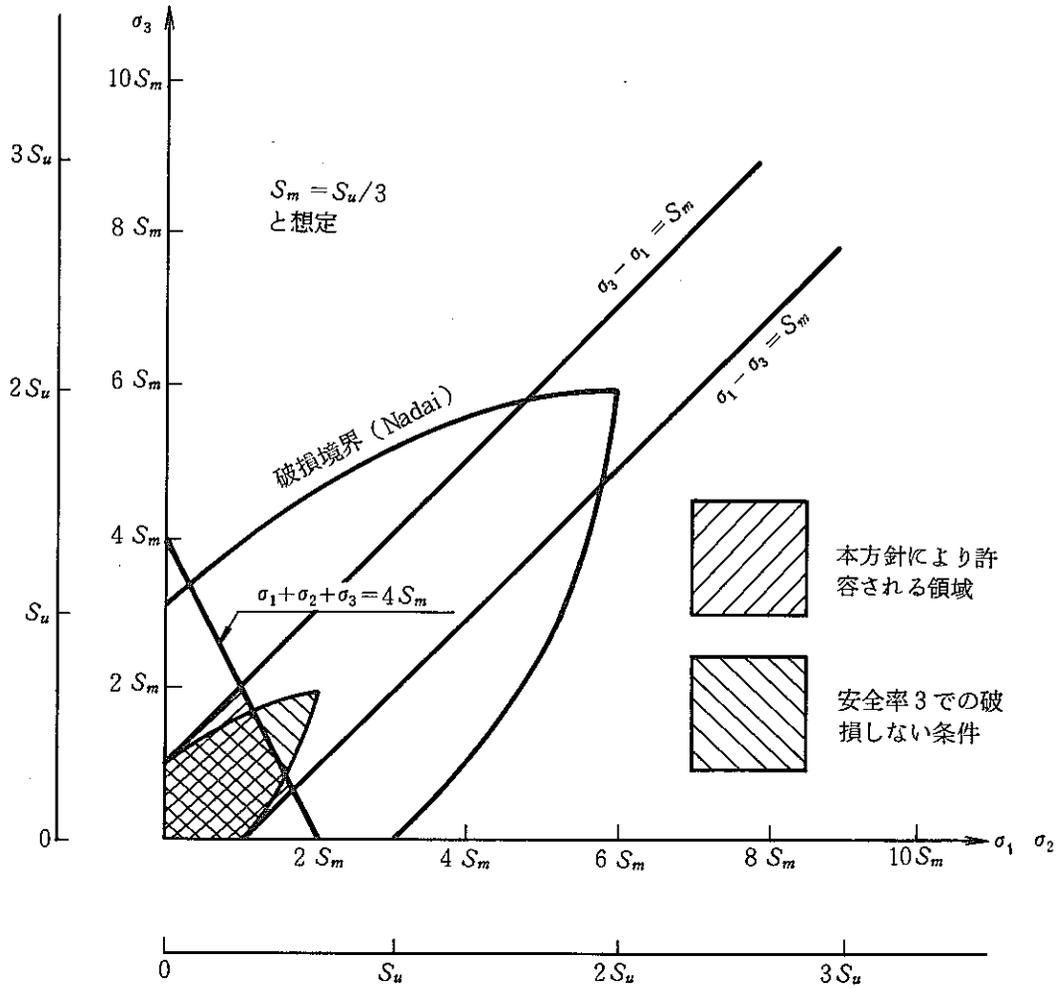


図 3. 3. 3 3 軸応力の制限

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leq 4 S_m \quad (2)$$

を与えている。(1)及び(2)式で制限される領域も図 3. 3. 3 にハッチングをほどこして示してあるが、これから、(1)及び(2)式による制限は、Nadai による多軸応力下での破壊条件に対する安全率 3 での制限と同等であるといえることができる。

### 3.4 ひずみの制限

#### 3.4.1 適用範囲

- (1) 運転状態Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ及び試験状態に対して，3.4.2の規定を適用する。
- (2) 運転状態Ⅳに対して，3.4.3の規定を適用する。

#### 3.4.2 運転状態Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ及び試験状態に関する制限

##### (1) 一般規定

- 1) 機器の累積非弾性ひずみは，次の a) 及び b) の制限値を超えてはならない。  
この制限は3つの主ひずみのうちの最大正值に対して適用する。溶接部にあっては，それぞれの制限値を1/2に減じて適用するものとする。

a) 壁厚平均ひずみ 0.01

b) 壁厚内の等価線形ひずみ分布により定める表面ひずみ 0.02

ここにひずみの単位はmm/mmであり，以下本方針におけるひずみの単位はmm/mmとする。

- 2) 弾性解析により，次の a) 又は b) のいずれかの制限を満足する場合は，3.4.2 (1) 1) を満足するものとすることができる。この場合に，2次応力による弾性追従を判定し，適切な応力分類を行わなければならない。

a) 運転状態Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ及び試験状態のすべての負荷サイクルにおける $\langle Q + Q^* \rangle_R$  に関して次式を満足すること。

$$\langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / K_t \rangle_{\max} + \langle Q + Q^* \rangle_R \leq S_a \quad (3.4.1)$$

ここに記号 $\langle \sigma \rangle_R$  は応力 $\sigma$ に関する負荷サイクル中の応力強さ範囲を表わすものであり，以下本方針においてこの定義により本記号を用いる。下つき添字maxは添字を付した量の運転状態Ⅰ，Ⅱ及び試験状態を通しての最大値を表わす。

$P_L, P_L^*, P_b, P_b^*$  : 3.2.3 (1) 2) に定めるところによる。ただし弾性追従の判定による $P_L$ 及び $P_b$ を含む。

$Q$  : 長期2次応力 (kg/mm<sup>2</sup>)。ただし弾性追従の判定により $P_L$ 又は $P_b$ とするものを除く。

$Q^*$  : 短期2次応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

$K_t$  : 3.2.3 (1) 2) に定めるところによる。ただし(3.2.7)式右辺の $P_L$

は 3.4.2 (1) 2) に定めるところによる。

$S_a$  は次のイ) 又は ロ) に定める値のうちいずれか小さい方の値とする。

- イ) 運転状態 I, II 及び試験状態を通しての最高壁厚平均金属温度に対して時間を  $10^4$  hr として別表 1.3 (別図 1.3) に定める値の 1.25 倍の値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )
- ロ) 評価の対象とする  $\langle Q + Q^* \rangle_R$  が属する負荷サイクルの最高壁厚平均金属温度及び最低壁厚平均金属温度のそれぞれに対して別表 1.4 (別図 1.4) 又は告示別表第 9 に定める値の平均値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

ただし評価の対象とする  $\langle Q + Q^* \rangle_R$  を定める応力状態のうち少くともひとつの状態における壁厚平均金属温度が次に定める温度  $T_0$  より低い場合は、イ) の値にかかわらずロ) の値によって  $S_a$  の値を定めることができる。ここに温度  $T_0$  は、別表 1.2 (別図 1.2) に定める値が時間を  $10^5$  hr として別表 1.3 (別図 1.3) に定める値に等しい温度 (C) である。

- b) 次の制限を満足すること。ただし溶接部にあってはそれぞれの制限値を  $1/2$  に減じて適用するものとする。

$$\begin{cases} \epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF} \leq 0.01 & (3.4.2) \\ \epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF} + \epsilon_{bEF} \leq 0.02 & (3.4.3) \end{cases}$$

$\epsilon_{EC}$  : 促進クリープひずみ。  $\epsilon_{EC}$  は膜ひずみとする。

$\epsilon_{mEF}$  : 長期 2 次膜応力による弾性追従ひずみ (膜ひずみ)

$\epsilon_{bEF}$  : 長期 2 次曲げ応力による弾性追従ひずみ (等価線形ひずみ)

機器の軸対称構造にあって、評価すべきすべての負荷サイクルにおいて 2 次応力強さ範囲  $\langle Q + Q^* \rangle_R$  を定める応力状態のうち少くともひとつの状態における壁厚平均金属温度が 3.4.2 (1) 2) a) に定める温度  $T_0$  より低い場合は次のイ) からホ) に定めるところより  $\epsilon_{EC}$  を定めることができる。ここに 3.4.2 (1) 2) a) を満足する負荷サイクルは評価することを要しない。

- イ) パラメータ  $X_1$ ,  $X_2$  及び  $Y$  を次のとおり定める。

$$\begin{cases} X_1 = \langle P_L + (P_b / K_t) \rangle_{\max} / S_{yc} & (3.4.4) \\ X_2 = \langle P_L^* + (P_b^* / K_t) \rangle_{\max} / S_{yc} & (3.4.5) \\ Y = \langle Q + Q^* \rangle_R \max / S_{yc} & (3.4.6) \end{cases}$$

ここに下つき添字 max は (3.4.4) 式においては添字を付した量の運転状態

I, II 及び試験状態における最大値を表わし, (3.4.5) 及び (3.4.6) 式においては添字を付した量の運転状態 I, II, III 及び試験状態における最大値を表わす。

$P_L, P_L^*, P_b, P_b^*, Q, Q^*, K_t$ : 3.4.2 (1)(2) a) に定めるところによる。

$S_{yc}$ : 評価の対象とする状態の最低壁厚平均金属温度に対して別表 1.4 (別図 1.4) 又は告示別表第 9 に定める値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

ロ) 図 3.4.1 において点  $(X_1, Y)$  が E 領域又は  $S_1$  領域にあり, 点  $(X_1 + X_2, Y)$  が  $S_1$  領域にある場合は

$$Z^* = 1 + Y - 2 \sqrt{(1 - X_1 - X_2) Y - X_2} \quad (3.4.7)$$

とする。

ハ) 図 3.4.1 において点  $(X_1, Y)$  が  $S_2$  領域又は P 領域にあり, 点  $(X_1 + X_2, Y)$  が  $S_1$  領域,  $S_2$  領域又は P 領域にある場合は

$$Z^* = 1 + Y - \sqrt{(1 + Y - X_1 Y)^2 - 4 X_2 Y - X_2} \quad (3.4.8)$$

とする。

ニ) 応力  $\sigma_c$  を次式により定める。

$$\sigma_c = 1.25 Z^* S_{yc} \quad (3.4.9)$$

ただし, ロ) 又はハ) により定める  $Z^*$  が次式を満足しない場合は (3.4.9) 式を適用してはならない。

$$Z^* \leq S_{yH} / S_{yc} \quad (3.4.10)$$

$S_{yH}$ : 評価の対象とする状態の最高壁厚平均金属温度に対して別表 1.4 (別図 1.4) に定める値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

ホ) 促進クリープひずみ  $\epsilon_{BC}$  を次式により定める。

$$\epsilon_{BC} = \sum_i \{ \epsilon_c(\sigma_0) \}_i \quad (3.4.11)$$

ここに  $\{ \epsilon_c(\sigma_0) \}_i$  は壁厚平均金属温度  $T_i$  において応力  $\sigma_0$  及び温度  $T_i$  の累積持続時間  $t_i$  に対して別図 1.11 によって定めるクリープひずみである。 $\sum_i t_i$  は 1.2.1 (2) に定める高温使用時間を下回ってはならない。

ただし,  $\sigma_0$  が運転状態 III にかかわる負荷サイクルによって定められる場合には, 運転状態 III の事象 1 回当たりの促進クリープ時間を  $10^4 \text{ hr}$  として,

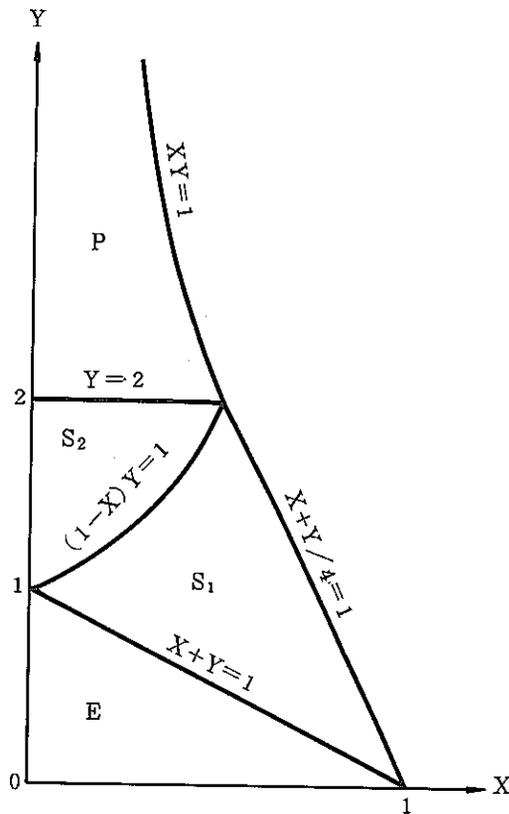


図 3.4.1 領域の区分

促進クリープひずみを算定し，残余の高温使用時間に関しては運転状態Ⅰ，Ⅱ及び試験状態により定められる $\sigma_0$ により促進クリープひずみを算定することができる。

3) 弾性解析により 3.4.2 (2)又は(3)の規定に適合する場合は 3.4.2 (1)の規定に適合するものとすることができる。

(2) 長期1次応力が低い場合

1) 「長期1次応力が低い場合」とは告示の適用温度範囲を超える運転状態Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ及び試験状態において，長期荷重による1次応力が次の条件を満足する場合をいう。

$$\langle P_L + P_b \rangle \leq S_{LP} \quad (3.4.12)$$

$$S_{LP} = \text{Min} [ S_{rH}, S_g/g ] \quad (3.4.13)$$

$P_L, P_b$  : 3.4.2 (1) 2) a) に定めるところによる。

$S_{rH}$  : 運転状態Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ及び試験状態における高温使用時間及び評価点の金属温度履歴に基づき，別表 1.7 (別図 1.7) により定める値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$S_g$  : 高温使用時間中，常に存在するとしてもクリープ損傷上許容しうる応力

水準 (kg/mm<sup>2</sup>) であつて、付録Dにより定めるものとする。

g : 応力水準  $S_g$  が長期1次応力の上限に対して有すべき倍率であつて、付録Dにより定めるものとする。

2) 長期1次応力が低い場合は、長期2次応力  $Q$  及び短期2次応力  $Q^*$  を別表2.3に準拠して分類するものとする。

3) 長期1次応力が低い場合は、次の a) 及び b) の制限を満足することにより、3.4.2(1)の規定に適合するものとすることができる。

a) 3.4.2(1)に定めるところ。

ただし、この場合は、別表2.3注2)により弾性追従の判定を行い、付録Bにより  $\epsilon_{EF}$  ( $Q_{EF}$ ) を定めることができる。

$$b) \begin{cases} S_n^* \leq 3 S_{mH} & (3.4.14) \\ S_n \leq 3 \overline{S_m} & (3.4.15) \end{cases}$$

ただし、次の (3.4.16) 及び (3.4.17) 式を満足する場合は、(3.4.15)式を満足することを要しない。

$$\begin{cases} S_n \leq \beta_s (3 \overline{S_m}) & (3.4.16) \\ S'_n \leq 3 \overline{S_m} & (3.4.17) \end{cases}$$

ここに

$$S_n^* = \langle P_L^* + P_b^* + Q^* \rangle_R \quad (3.4.18)$$

$$S_n = \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle_R \quad (3.4.19)$$

$$S'_n = \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* - Q_{Tb} - Q_{Tb}^* \rangle_R \quad (3.4.20)$$

$S_{mH}$  : 考えている負荷サイクル中の最高金属温度に対して別表1.2 (別図1.2) に定める値 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\beta_s$  : 進行性ひずみの防止に係わる設計係数であつて、 $\beta_s = 2.5$  とする。

(3.4.15), (3.4.16) 及び (3.4.17) 式における  $3 \overline{S_m}$  は次のイ) 又はロ) のいずれかにより定めるものとする。

イ) 考えている負荷サイクルにおいて  $S_n$  を定める応力状態のひとつにおける金属温度  $T_c$  が告示の適用温度範囲内にある場合

$$3 \overline{S_m} = S_{rH} + 1.5 S_{m0} \quad (3.4.21)$$

$S_{m0}$  : 温度  $T_0$  に対して告示別表第2に定める値 (kg/mm<sup>2</sup>)

ロ) 考えている負荷サイクルにおいて  $S_n$  を定める応力状態のいずれにおける

金属温度も告示の適用温度範囲を超える場合

$$3 \overline{S_m} = S_{rH} + S_{rC} \quad (3.4.22)$$

(3.4.21) 及び (3.4.22) 式における  $S_{rH}$  は 3.4.2(2)1) に定めるところによるものとする。

(3.4.22) 式における  $S_{rC}$  は次に定める温度  $T_s$  及び時間  $t_s$  に対して別表 1.7 (別図 1.7) に定める値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ ) とする。

$T_s$  :  $S_n$  を定める 2 つの応力状態のうち、いずれか定常状態の温度との差が大きい方の温度( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_s$  : 考えている負荷サイクル内において温度が  $T_s$  になってから定常状態の温度に復帰するまでの時間又は告示の適用温度範囲内の温度に到達するまでの時間のうちいずれか短い方の時間 (hr)

ただし、(3.4.18) 式は地震のみによる応力範囲に適用するものとし、(3.4.19) 式によって  $S_n$  を算定する時は、 $S_n^*$  に該当する応力強さ範囲を除外するものとする。その他の記号の意義は次に定めるところによる。

$P_L, P_L^*, P_b, P_b^*$  : 3.2.3(1)2) に定めるところによる。ただし別表 2.3 注 2) による  $P_L$  及び  $P_b$  を含む。

$Q$  : 長期 2 次応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )。ただし別表 2.3 注 2) により  $P_L$  又は  $P_b$  とするものを除く。

$Q^*$  : 短期 2 次応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$Q_{Tb}$  : 長期熱曲げ応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )。ただし別表 2.3 注 2) により  $P_b$  とするものを除く。

$Q_{Tb}^*$  : 短期熱曲げ応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

(3) クリープ効果が顕著でない場合

1) 「クリープ効果が顕著でない場合」とは次の a) 及び b) の条件を満足する場合をいう。

$$a) \quad 2 \sum_i \frac{t_i}{t_{di}} \leq 0.1 \quad (3.4.23)$$

$t_i$  : 金属温度  $T_i$  における累積使用時間 (hr)。  $\sum_i t_i$  は 1.2.1(2) に定める高温使用時間を下回ってはならない。

$t_{di}$  : 温度  $T_i$  に対して別表 1.2 (別図 1.2) に定める値の 1.5 倍の応力

(これを  $1.5 S_m | T_i$  とする)。に対して別表 1.5 (別図 1.5) に定める許容時間 (hr)。  $1.5 S_m | T_i$  が別表 1.5 (別図 1.5) において許容時間が与えられている応力値を超える場合は本条件は満足されない。

$$b) \sum_i \epsilon_i \leq 0.002 \quad (3.4.24)$$

$\epsilon_i$  : 金属温度  $T_i$  における累積使用時間  $t_i$  の全期間において、応力が  $T_i$  に対して別表 1.2 に定める値の 1.5 倍の値であるとして定めるクリープひずみであって、別図 1.11 により定めるものとする。  $\sum_i t_i$  は 1.2.1(2) に定める高温使用時間を下回ってはならない。

2) クリープ効果が顕著でない場合は、次の a) 及び b) の制限を満足することにより、3.4.2(1) の規定に適合するものとすることができる。

a) 告示第 13 条第 1 項第 1 号へに定めるところ。ただし、「容器」、「運転状態 I 及び運転状態 II」、「別表第 9」及び「別表第 2」をそれぞれ「機器」、「運転状態 I, II, III 及び試験状態」、「本方針別表 1.4 又は告示別表第 9」及び「本方針別表 1.2 又は告示別表第 2」に読み替えるものとする。

b) 3.4.2(2) 3) b) に定めるところ。ただし、この場合は 2 次応力に関する弾性追従の判定を要しない。

### 3.4.3 運転状態 IV に関する制限

運転状態 IV の短期荷重が繰返し性を有する場合は進行性変形に注意しなければならない。弾性解析により、次の(1)及び(2)を満足する場合は進行性変形は防止されることができるとすることができる。

$$(1) S_n^* \leq \beta_s (3 S_{mH}) \quad (3.4.25)$$

ここに用いる記号の意義はすべて 3.4.2(2) 3) に定めるところによる。

(2) 次に定める  $X_s$  及び  $Y_s$  による点 ( $X_s, Y_s$ ) が 図 3.4.1 において、E,  $S_1, S_2$  又は P 領域にあること。

$$X_s = \langle P_L + P_b \rangle / (1.5 S_{mH}) \quad (3.4.26)$$

$$Y_s = S_n^* / (1.5 S_{mH}) \quad (3.4.27)$$

ここに用いる記号の意義はすべて 3.4.2(2) 3) に定めるところによる。

## 【解説】

1 構造物における過大な非弾性変形を防止するために、1次応力の制限が設けられているが、1次応力に加え元来はひずみ制御型の2次応力が重畳することにより、1次応力単独の場合より大きな非弾性変形をもたらされることがある。（後述するように熱応力ラチェットはその例である。）従って過大な非弾性変形を防止するためには、1次応力を制限すると同時に、1次応力と2次応力の組合せに対する制限が必要となる。

3.4 ひずみ制限の主目的は、1次応力と2次応力の組合せのもとでの過大な非弾性変形の防止にあるが、同時に下記の目的も有している。

### (1) クリープ疲労損傷評価の前提条件

本方針は、弾性解析による設計に重点を置いているが、ひずみの制限では弾性解析によるクリープ疲労損傷評価を可能とするための条件が規定されている。

### (2) 延性破断及びクリープ破断の防止

累積非弾性ひずみを制限することにより、延性破断及びクリープ破断の防止をはかることができる。著しいひずみが生ずる場合には、構造物上で応力が一様に近くてもひずみが一部に集中し、くびれなどが生ずるおそれがあるが、累積非弾性ひずみを制限すればこのような現象も防止できる。また、溶接部では延性の低下を生ずる場合があるが、一層厳しい累積非弾性ひずみの制限値を溶接部に課すことにより、適切な設計とすることができる。

### (3) 微小変形理論による構造解析の保証

構造解析の多くは、微小変形理論による解析であるが、適切なひずみ制限によりこの微小変形理論による解析を妥当ならしめることができる。

### (4) 座屈・崩壊の防止

累積非弾性ひずみを制限することにより、多くの場合、構造物の座屈及び崩壊が防止できると期待される。

3.4 はこの様な目的で定められたものであり、告示における1次応力と2次応力を加えて求めた応力強さに対する制限および熱ラチェットに対する制限に対応するものである。

2. 溶接部における累積非弾性ひずみの制限は以下に示す考え方にもとづく。

(1) 累積非弾性ひずみの制限値について

ひずみの制限では、1次応力と2次応力との組合せのもとで過大な非弾性（塑性又はクリープ）変形を防止する観点から、以下の制限を規定している。

機器の累積非弾性ひずみは、次のa)及びb)の制限値を超えてはならない。この制限は3つの主ひずみのうちの最大正值に対して適用する。 <u>溶接部にあつては、それぞれの制限値を1/2に減じて適用するものとする。</u>	
a) 壁厚平均ひずみ	0.01
b) 壁厚内の等価線形ひずみ分布により定める表面ひずみ	0.02

ここで、壁厚平均ひずみの制限値1%は、ボイラ及び圧力容器の許容応力として使用実績の豊富な許容引張応力S（告示別表第6）の策定方法のうち、“1000時間に0.01%のクリープひずみを生ずる応力の平均値”（1%クリープひずみ/10<sup>5</sup>時間）に対応するものである。また、等価線形ひずみの制限値2%は、1次応力の制限における応力に対する係数K<sub>s</sub>又はK<sub>t</sub>を、ひずみに対する係数2におきかえ、1%×2=2%として与えられるものである。

すなわち、母材についての累積非弾性ひずみの制限値は、延性破断又はクリープ破断のような破損様式に直接対応する制限値というよりは、むしろ、従来からの高温設計での許容応力の使用実績から、工学的に定めた値といえる。

なお、1%又は2%という値自体は、引張試験又はクリープ試験で得られる破断延性値と比較しても通常かなり低い水準にあり、また、各部でのひずみがこの程度以下であれば、構造物としての変形もかなり低い水準に抑制されることになる。したがって、累積非弾性ひずみを壁厚平均で1%また等価線形で2%以下となるよう制限することにより、以下の事項に関する補助的役割も果しうると考えられる。

- |                           |               |
|---------------------------|---------------|
| (イ) 延性破断又はクリープ破断の防止       | <1次応力の制限>     |
| (ロ) クリープ疲労破損の防止           | <クリープ疲労損傷の制限> |
| (ハ) 座屈の防止                 | <座屈の防止>       |
| (ニ) 微小変形理論に基づく構造解析の妥当性の確保 |               |

## (2) 溶接部の累積非弾性ひずみの制限値

溶接部の非弾性変形について、溶接金属の延性は母材と比較して一般に低いことを十分考慮する必要がある。

したがって、溶接部については、母材の累積非弾性ひずみの制限値と比較して、より小さい制限値を規定するのが適切と考えられる。高温構造設計方針では、前節に記すように、溶接部の累積非弾性ひずみの制限値を、母材の制限値の $1/2$ としている。

前節に記したように、母材の累積非弾性ひずみの制限値自体工学的判断により定めたものであり、この溶接部に対する係数 $1/2$ も、同様に工学的判断によるものであるが、溶接部の累積非弾性ひずみの制限値を母材の制限値より低い水準に制限することにより、応力集中部から溶接部を遠ざけることをこの規定は示唆している。

以下にクリーブ破断延性の観点から係数 $1/2$ の妥当性を検討する。

## (3) 溶接金属のクリーブ破断延性

延性破断時の破断延性は、母材及び溶接金属とも、クリーブ破断延性と比較して一般に大きく、累積非弾性ひずみの制限値 $1\%$ 若しくは $2\%$ 又はその $1/2$ の値と比較して十分に大きい。

クリーブ破断延性は、一般に、破断時間が長くなる程低下する傾向にある。図3.4.1は、ASME Code Case N47（以下CCN-47という）のバックグラウンドドキュメント中に記されている累積非弾性ひずみの制限値の策定時に参考とされたデータである。母材については、破断時間が長くなるにつれてクリーブ破断延性は低下するが、 $1\%$ 又は $2\%$ の累積非弾性ひずみの制限値がほぼ妥当な制限値となっていることが理解できる。

溶接金属については、母材と比較し若干低い傾向にあるが、母材の平均傾向の $1/2$ （図中の破線）とすれば、ほぼ保守的な推定値を与える。したがって、溶接部の累積非弾性ひずみの制限値を母材の $1/2$ とすれば、クリーブ破断延性の観点からは母材と同等又は若干保守的な制限を与えることになる。

図3.4.2は、国産材についてのクリーブ破断延性のデータをプロットしたものであり、図3.4.1のデータとの比較を母材については図3.4.3に、また溶接金属については図3.4.4に与えている。

図3.4.3より、国産母材のクリーブ破断延性は、相対的に、米国データと比較して高い位置にある。これは、近年の製鋼法の進歩及び米国と我国の製鋼技術の差異によるものと考えら

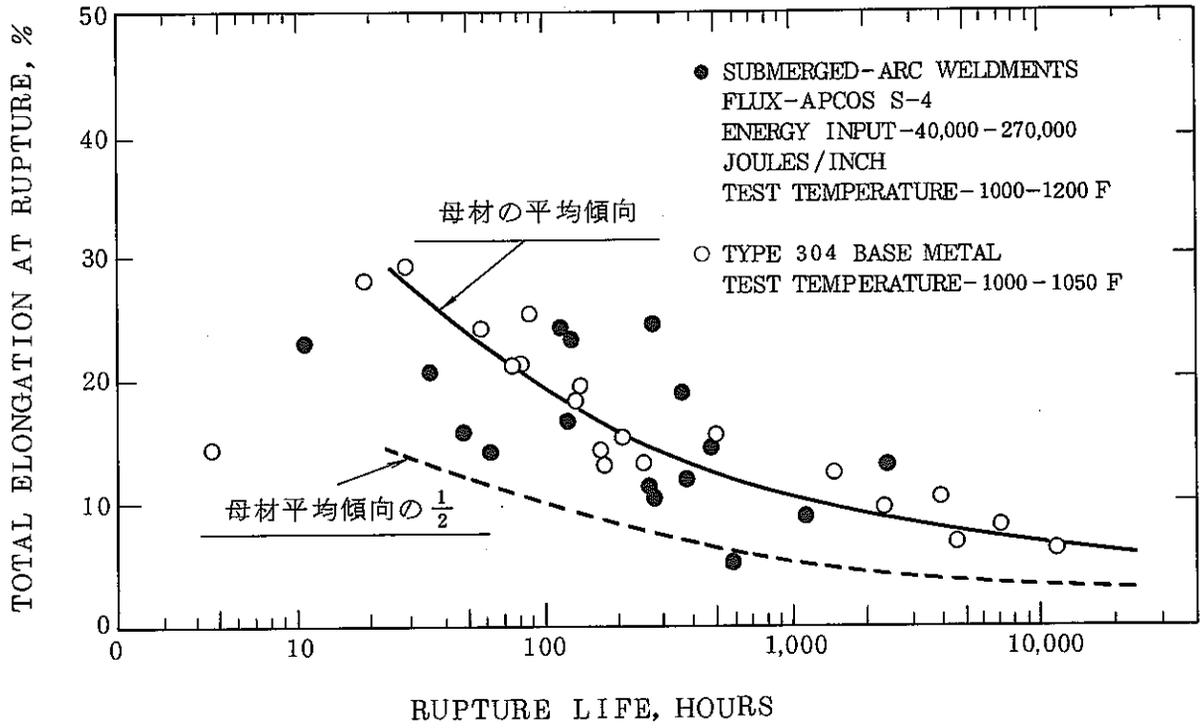


図 3.4.1 米国材におけるクリープ破断延性  
 (出典：ASME Code Case N-47 バックグラウンドドキュメント)

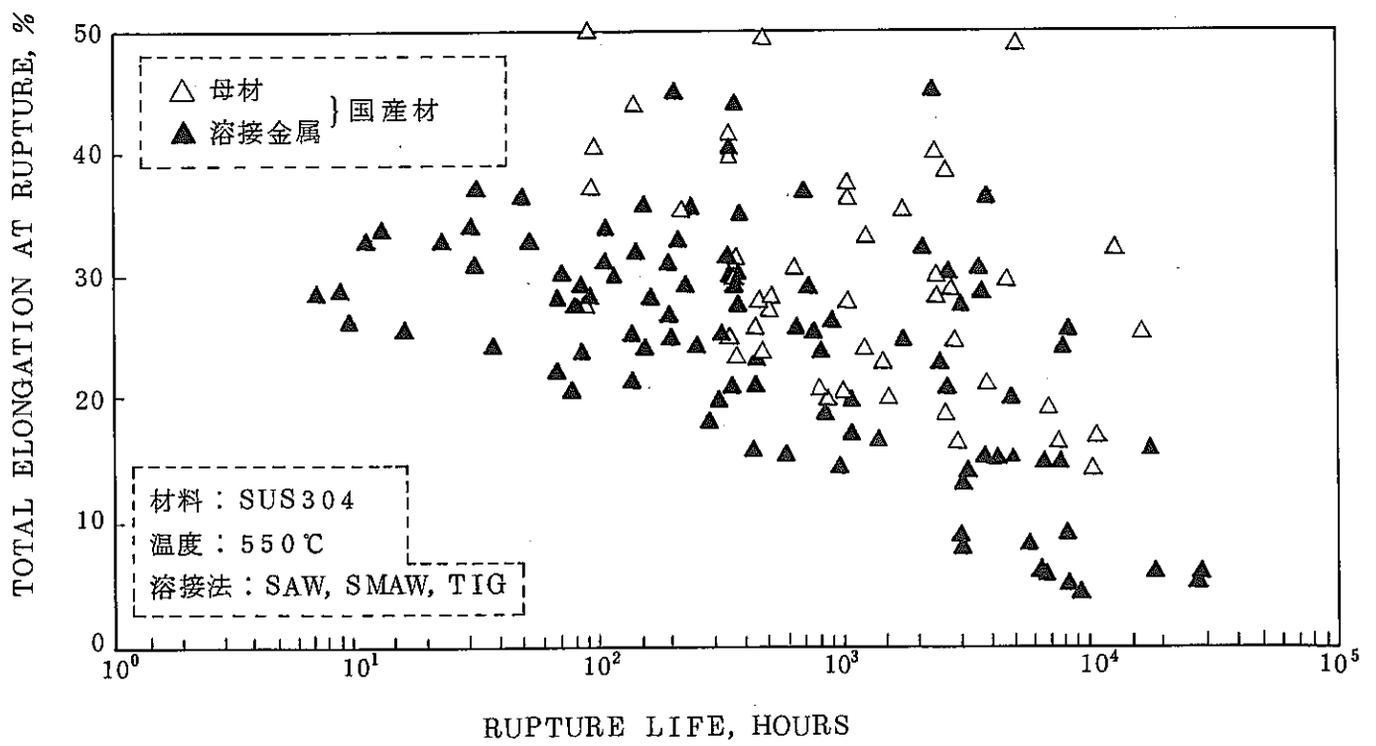


図 3.4.2 国産材におけるクリープ破断延性  
 (出典：PNC採集データ及び金材研データ)

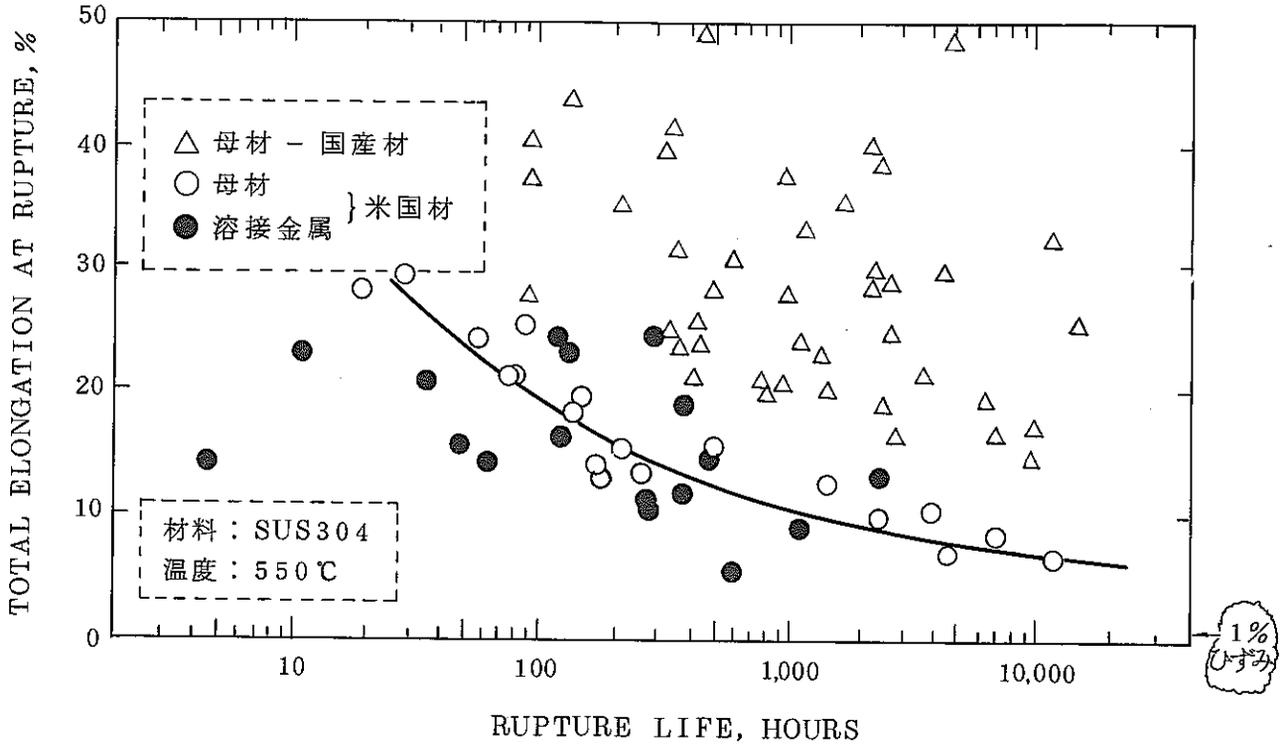


図 3.4.3 クリープ破断延性の米国材と国産材母材の比較

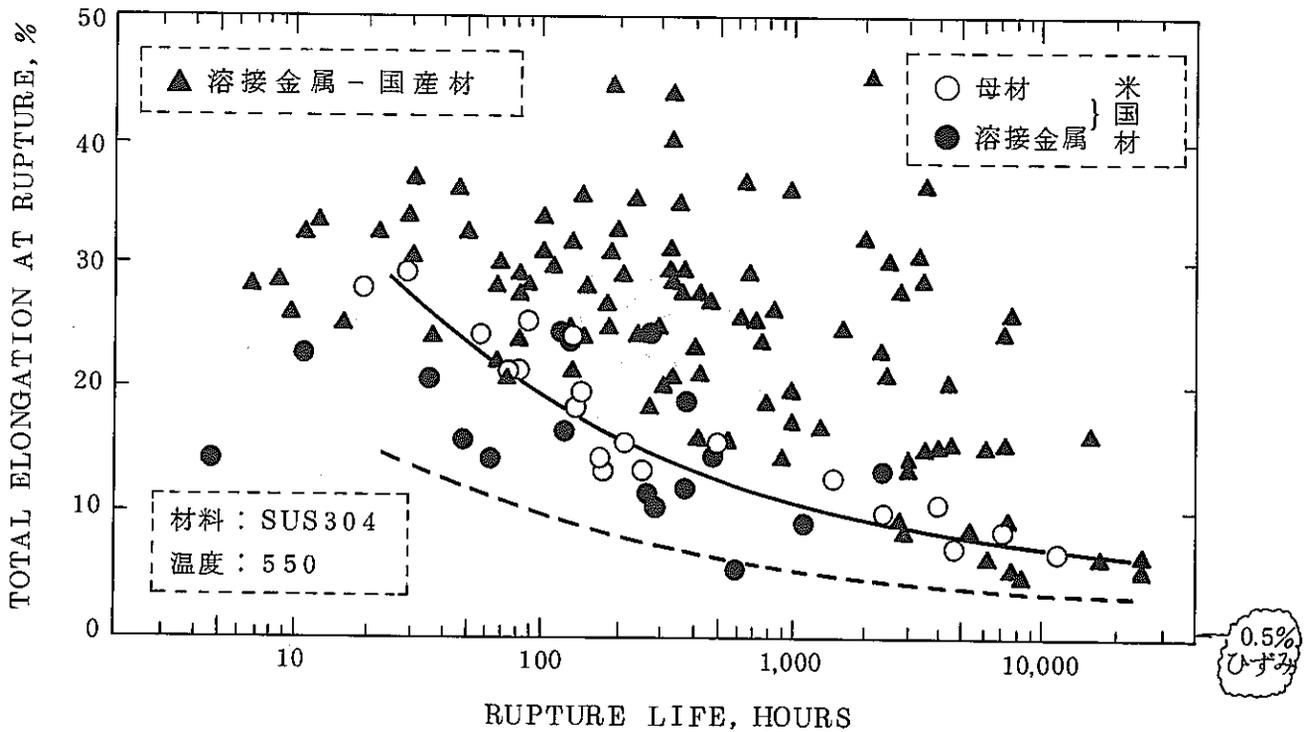
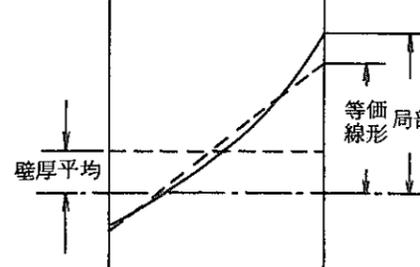
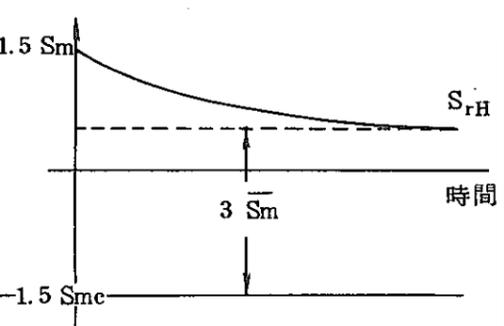
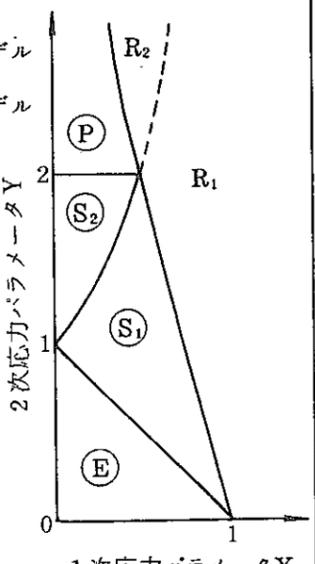
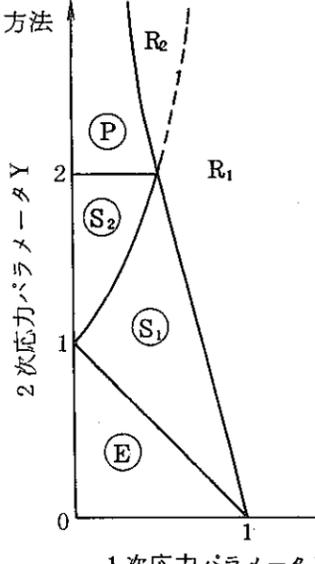


図 3.4.4 クリープ破断延性の米国材と国産材溶接金属の比較

表 3.4.1 高速炉原型炉第1種機器のひずみの制限の比較

	告示	本方針	ASME Code Case N-47
対象とする運転状態 <sup>*1</sup>	運転状態 I, II	運転状態 I, II, III 及び試験状態	Level A, B, C 及び試験状態
累積非弾性ひずみの制限値	—	壁厚平均：1% 等価線形：2% 	{ 壁厚平均 1% 等価線形 2% 局 部 5% }
弾性解析によりひずみの制限を満足する条件	シェイクダウンに関する制限 (1次+2次)応力範囲 $\begin{cases} S_n \leq 3 S_m \\ \text{又は} \\ S_n' \leq 3 S_m \end{cases}$ 簡易弾塑性解析 熱曲げ応力を除く (1次+2次)応力強さ範囲	クリープ効果が顕著でない場合 長期1次応力が <sup>*2</sup> 低い場合 一般規定 <sup>*2</sup> 地震のみによる(1次+2次)応力範囲 $S_n^* \leq 3 S_{mH}$ $\begin{cases} S_n \leq 3 \overline{S_m} \\ \text{又は} \\ S_n \leq \beta_s (3 \overline{S_m}) \\ S_n' \leq 3 \overline{S_m} \end{cases}$ 	Test № 1 ~ 3 <sup>*2</sup> Test № 4 $S_n \leq \text{Min} \left[ 3 S_m, \overline{3 S_m} \right]$
	熱ラチェット制限 { Miller のモデル Bree のモデル } ラチェットに関する制限 (X, Y) が E, S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , あるいは P 領域にあること。 	クリーブラチェット制限 O' Donnell & Porowski の方法 (X, Y) が E, S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> あるいは P 領域にあるときは, 上記評価法を使用することができる。 	熱ラチェット制限 { Miller のモデル Bree のモデル } (X, Y) が E, S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , あるいは P 領域にあること。

\* 1 本方針では運転状態 IV における繰返し性を有する短期荷重(地震)に対する制限を別途規定している。

\* 2 2次応力を弾性追従の程度に応じて1次応力と2次応力に再分類する。

れる。図 3.4.3 によれば、国産材を使用するもんじゅでは、母材の累積非弾性ひずみの制限値を CCN-47 に比較し大きくとって良いとも考えられるが、高温構造設計方針では、CCN-47 と同一の制限値としている。

図 3.4.4 より、溶接金属についても、国産データは、相対的に高い位置にあるが、 $10^4$ 時間を上まわる長時間側では、同程度のクリーブ破断延性となるデータも見られる。したがって、溶接部の累積非弾性ひずみを 1% 又は 2% の  $1/2$  とすることにより、適当な制限が課せられると考えられる。

クリーブ破損は厳密には、クリーブ疲労損傷の制限において、クリーブ損傷を詳細に評価し制限することにより防止される。したがって、クリーブ破断延性の面からの検討は相対的な尺度を与えるものにすぎないが、上記検討により、溶接部について累積非弾性ひずみを壁厚平均 0.5% 等価線形 1% と制限するのは妥当であると考えられる。

3 ひずみの制限に関して、本方針と告示及び N-47 との比較は表 3.4.1 に示すとおりである。

(1) 告示又は ASME Sec III との対応

本方針のひずみ制限を特に長期 1 次応力が低い場合について告示及び ASME Sec III の規定と比較すると下記の特徴がある。

- 1) 2 次応力をその弾性追従の程度に応じて再分類し必要な場合には 1 次応力とすべき事を規定するとともに、その判定基準を与えている。
- 2) 寿命中における 1 次応力と 2 次応力の組合せによる累積非弾性ひずみを評価し、これを一定値以下に制限するという方法を採用している。
- 3) 弾性シェイクダウン条件として  $3 \bar{S}_m$  におきかえている。
- 4) ラチェット制限において、1 次応力として 1 次一般膜応力のみでなく 1 次局部膜応力及び 1 次曲げ応力を考慮している。
- 5) ラチェット制限において、2 次応力として壁厚方向温度勾配のみでなく、全ての 2 次応力を対象としている。
- 6) ラチェット制限において考慮すべき降伏応力として  $1.5 S_m$  ではなく  $S_{yc}$  としている。
- 7) ラチェット制限において、R 領域以外の B, S1, S2, P 領域において、促進クリーブを評価する規定を与えている。

8) 熱曲げ応力を除く(1次及び2次)応力範囲  $S_n$  を  $3 S_m$  相当値  $3 \overline{S_m}$  で制限するとともに、地震に伴う(1次及び2次)応力範囲  $S_n^*$  は  $3 S_m H$  に、又(1次及び2次)応力範囲自体を  $\beta_s (3 \overline{S_m})$  ( $\beta_s = 2.5$ ) に制限している。

9) 適用すべき運転状態は、I及びIIに加えて、運転状態III及び試験状態とする。

これらは、材料のクリープ特性を考慮するところによる点も多いが、同時に、高速炉では相対的に熱膨張差に起因する2次応力が大きいため、2次応力の取扱いに特別な注意を払ったことによる。

本方針におけるクリープ効果が顕著でない場合の規定は、告示とクリープ効果が顕著である場合の規定の中間規定となっている。

## (2) ASME Code Case N-47 との対応

高温構造設計基準として、本方針とASME Code Case N-47とは類似した構成となっているが、両者を比較すると下記のようになる。

1) ASME Code Case N-47は、一般規定とクリープ効果が顕著でない場合の2種であるが、本方針は原型炉の使用条件を考慮し長期1次応力が低い場合を設けている。

2) ASME Code Case N-47では、壁厚平均ひずみ、壁厚内線形化表面ひずみ、局部ひずみについて累積非弾性ひずみの制限値を規定しているのに対し本方針では局部ひずみに対する制限は規定していない。

3) 促進クリープひずみの評価において本方針では短期1次応力を区分して評価することにより合理的な規定を与えている。

4) ASME Code Case N-47では、壁厚方向温度勾配による応力を除く2次応力について弾性追従を考慮した取扱いをすべきことを規定しているが、具体的な規定はないのに対し本方針では具体的な規定を設けている。

## 4 3.4.1 はひずみの制限の適用範囲を定めたものである。

告示においては1次応力と2次応力を加えて求めた応力強さに対する制限及び熱応力ラケットに対する制限を運転状態I及びIIのみに適用しているがこれは「運転状態III及び運転状態IVについては発電設備の寿命中において、発生する回数が非常に少なく、疲れ破壊には顕著な影響を与えないため」、「疲れ解析は不要」とする考え方と対応している。

これに対し、本方針がひずみの制限において運転状態IIIおよび試験状態を評価の対象に

加えているのはクリープ効果が無視できない場合は、数少ない事象であっても、残留応力によるクリープ損傷あるいはクリープひずみとして無視できない値をもたらす恐れがあることを考慮したためである。

さらに本方針においては運転状態Ⅳの短期応力が繰返し性を有する場合（ $S_2$  地震を想定）について、1次応力の制限とともに、ひずみの制限の一部として1次応力と2次応力の組合せに対する制限を規定している。

これは、荷重が繰返し性を有する場合は、荷重の繰返しとともに変形が進行し最終的には破損に到る可能性があることを考慮したものである。この規定をひずみの制限の一部としているのは、繰返しに伴う変形の進行と、クリーブラチェット（ひずみの制限の解説10で説明する）との現象的類似性を考慮したためである。

#### 5 3.4.2 (1) 1) はひずみの制限に関する基本的制限を定めている。

本規定は、局部のひずみに対する制限を除けばASME Code Case N-47の規定と同一である。制限値は、長時間下では、クリープ延性が低下する傾向にあること及び微小変形理論による解析法を妥当とする等の目的を総合的に考慮して定めたものであるが同制限値は、1次応力に対する制限値 $S_0$ 、 $S_m$  および $S_t$  値における変形制限の考え方も対応している。

1次応力の制限のうち、変形の制限に関する事項とひずみの制限との対応を表4.3.2に示す。1次応力の制限値 $S_0$ 、 $S_m$ 、 $S_t$ は各々変形に関する事項ばかりでなく短時間強さ、クリープ破断強さ等も含めて定められるが、ここでは変形に関する事項のみを取り出している。クリープひずみ値に関しては、 $S_t$ が1%全ひずみを生ずる最小応力を規定要因としており、壁厚平均の累積非弾性ひずみの制限1%に直接対応している。また $S_0$ は $10^5$ 時間をベースとしているため1%クリープひずみを制限値としていることに相当し、壁厚平均の累積非弾性ひずみ制限値1%と対応しているといえる。

曲げ成分を含めた表面ひずみの制限値としては、1次応力制限における膜応力に対する制限値と（膜+曲げ）応力に対する制限値との対応から膜ひずみの2倍としている。

ASME Code Case N-47のひずみの制限では、本方針における規定に加え、局部累積非弾性ひずみを5%に制限することを規定している。

ASME Code Case N-47の策定過程において、ひずみの制限として局部累積非弾性

表 3. 4. 2 制 限 値 の 比 較

	制 限 値 <sup>(1)</sup>	材 料 特 性 <sup>(2)</sup>	温 度 <sup>(3)</sup>	時 間 <sup>(3)</sup>	応 力	運 転 状 態	曲 げ 成 分 <sup>(4)</sup>
So	$\frac{5}{8}\sigma_y (0.9\sigma_y)$  $0.01\%/10^3\text{hr}$	最 小  平 均	最高使用温度	—	1 次 応 力	(設計条件)	1.5 × 応力
Sm	$\frac{2}{3}\sigma_y (0.9\sigma_y)$	最 小	各負荷状態に おける最高壁 厚平均金属温 度	—		I, II, III, 試験 (IIIでは1.2倍)	Ks × 応力
St	1%全ひずみ			各負荷状態の 累積持続時間		I, II, III, 試験	Kt × 応力
ひずみの制限	1%累積非弾性 ひずみ			全 寿 命	1次応力+2次応力	I, II, III, 試験	2 × ひずみ

(1) 変形の制限に関連すると考えられるもののみを記載

(2) So, Sm, St については, 制限値を規定する条件

(3) St を用いた制限及びひずみの制限は, 各運転状態各々における温度, 高温使用時間に基づき評価

(4) 1次応力の制限では, 応力の壁厚内再配分を考慮して許容応力を各々 1.5, Ks 又は Kt 倍。一方, ひずみの制限では許容ひずみを 2 倍にする。

ひずみ 5% の制限を規定した理由について、バックグラウンドドキュメントの中ではクリープ破断延性が 10% 以下になる可能性があることを考慮して局部クリープひずみを 5% 以下にすべきと考えたとの記述があるのみで、クリープ疲労損傷の制限との対応の上での必要性に関する記述はない。

一方、告示又は ASME Sec III では、局部ひずみに対応するピーク応力に関する制限は、単に疲労損傷の制限のみにあるだけである。告示又は ASME Sec III における「ひずみの制限」に該当する規定は（1 次及び 2 次）応力強さ範囲並びに最大 1 次一般膜応力強さと熱応力変動値の組合せに対する制限であり、ピーク応力は制限の対象とされていない。従って告示又は ASME Sec III の規定を高温域に拡張する観点からは、ピーク応力に対応する局部ひずみは、クリープ効果を考慮してクリープ疲労破損を防止するという点から制限されるべき性格のものである。また、繰返し性を有する熱荷重が支配的な原型炉機器の使用条件においては、局部累積非弾性ひずみの制限は、その部位における割れの発生の防止規定とはならない。

以上を考慮して、本方針は局部累積非弾性ひずみの制限値は規定せず、局部ひずみはクリープ疲労破損を防止するという点から制限を規定している。

しかしながら、結果としては、下記の理由により、本方針は ASME Code Case N-47 の規定と同等な規定となっている。

- (1) 壁厚平均ひずみ及び等価線形ひずみを適切に制限すれば局部ひずみが無制限に大きくなることは避けられる。
- (2) 局部ひずみは、弾性ひずみも加え全ひずみ範囲としてクリープ疲労損傷の制限の中で制限される。設計疲労線図における許容ひずみ範囲は、線図(A)の任意の温度においても 5% を上まわらない。

6 3.4.2(1)の適用に際し、等価線形ひずみ分布は壁厚内のひずみ分布  $\epsilon(Z)$  から以下の様に算出する事ができる。

等価線形ひずみを  $\epsilon_m + \epsilon_b \left(\frac{z}{2}\right)$  とすると、 $\epsilon_m$  及び  $\epsilon_b$  は

$$\epsilon_m = \frac{\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \epsilon(z)W(z) dz}{\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} W(z) dz} \qquad \epsilon_b = \frac{\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \epsilon(z)W(z)z dz}{\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{z}{2} W(z)z dz}$$

ここで、 $W(z)$ は座標  $Z$  に関する重み関数であり、上述のように決定された等価線形ひずみ分布による応力分布が、断面内応力分布  $\sigma(z)$  と同一の合応力、合モーメントを有するよ様に定める。通常の中実矩形断面では  $W(z)=1$  とする。

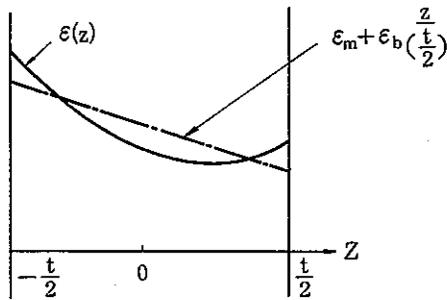


図 3.4.5 等価線形ひずみの定め方

7 3.4.2.(1)2) は、弾性解析による場合のひずみの制限を示すものである。

弾性解析によるひずみの制限のフローチャートを図3.4.6に示す。

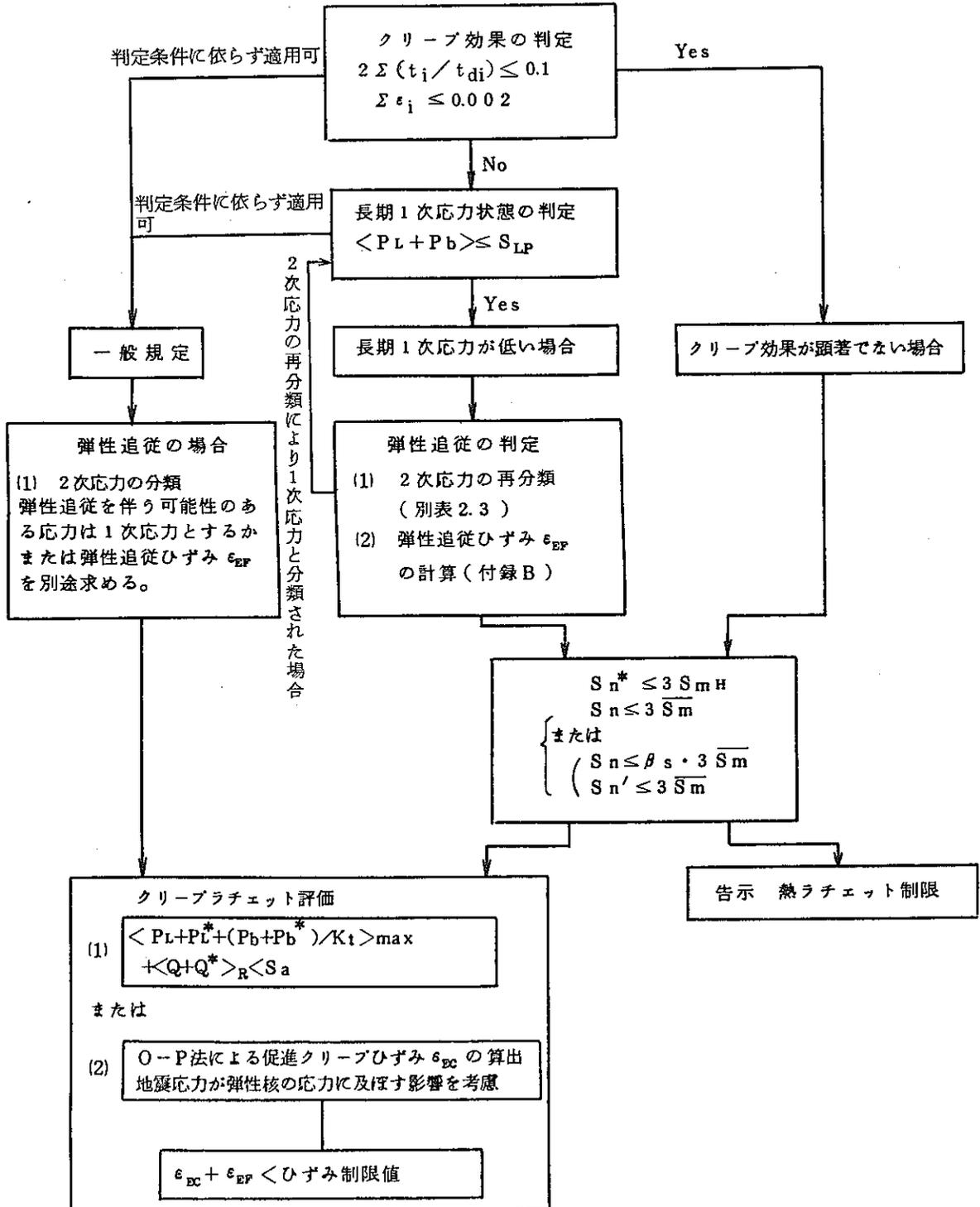


図3.4.6 弾性解析によるひずみの制限フローチャート

弾性解析によりひずみの制限を満足するための本方針の基本方針は下記のとおりである。

- (1) クリーブラチェットによる平均ひずみの増大を一定限度内に制限する。
- (2) クリーブラチェットひずみの評価にあたって、2次応力に分類した応力はひずみ制御型であるとし、促進クリープひずみ $\epsilon_{EC}$ としてクリーブラチェットひずみを算出する。
- (3) 上記算出値に2次応力に分類した応力の弾性追従によるひずみ増大量については、弾性追従ひずみ $\epsilon_{EF}$ を加算する。
- (4) 弾性追従ひずみ $\epsilon_{EF}$ の算出法及びクリープ疲労の制限におけるひずみ範囲算出法の妥当性を保証するための追加規定を設ける。
- (5) (1)～(4)の制限を適切に規定するため、「一般規定」「長期1次応力が低い場合」及び「クリープ効果が顕著でない場合」に区分して制限を規定する。

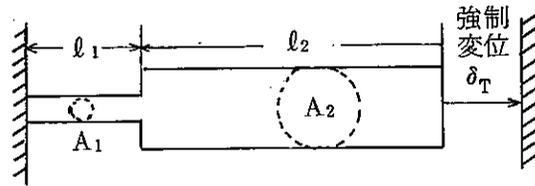
本方針では主にシェイクダウン領域内において、以上の方針に基づく具体的な評価法が用意されている。

弾性解析によってひずみの制限を満足しようとする場合は、弾性解析から得られた応力を基に、高温非弾性領域における非弾性ひずみの挙動を考察し、累積非弾性ひずみを保守的に推定する必要がある。本方針では非弾性ひずみ挙動に関する考察を行い、かつ高速原型炉第1種機器の荷重の特徴（相対的に内圧荷重が小さく熱荷重が大きい）を考慮して、弾性解析により累積非弾性ひずみの制限を満足する条件を与えている。この場合、ひずみが弾性解析による場合に比べて大きくなる可能性、特に剛性の大きな部材と剛性の小さな部材が直列につながっている場合、剛性の大きな部材に生じた変形の一部が剛性の小さな部分の非弾性挙動によりこの部分に移動する現象（「弾性追従」と呼ぶ。）には注意を払っている。

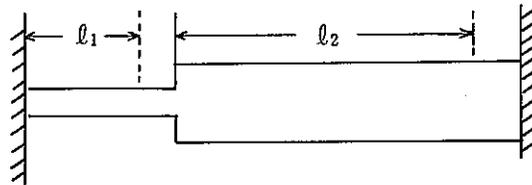
このような現象は低温領域においても塑性変形によって生じ得るものであるが、告示は材料が原則として弾性挙動の範囲内（シェイクダウン領域）において使用されるように制限しているため、弾性追従の概念は基準の体系において大きな要素とはならず、簡易弾塑性解析による疲労評価の条項（第14条第5号）のみに現れている。

これに対し、クリープ温度領域においては、クリープによる非弾性変形に注意を払い、弾性追従を十分に考慮して設計することが必要となる。

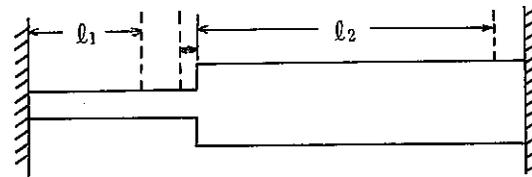
8 クリープによる弾性追従の最も単純な例として、図 3. 4. 7(a)に示すような直列に結合された2本の棒に強制変位  $\delta_T$  が与えられた場合につき考える。2本の棒を棒1および棒2とし、それぞれの断面積を  $A_1$ 、 $A_2$  とし長さを  $l_1$ 、 $l_2$  とする。



(i) 直列に結合された2本の棒

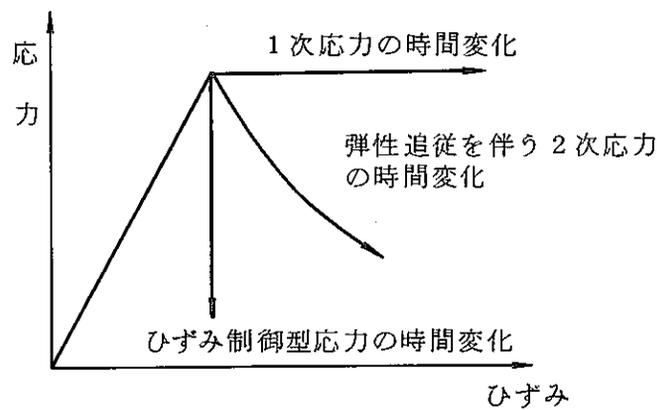


(ii) 初期の弾性変形状態



(iii) 弾性追従後の状態

(a) 弾性追従の基本モデル



(b) 弾性追従概念図

図 3. 4. 7 弾 性 追 従

2本の棒の材料・温度は同一とし、ヤング率をE、クリープ則を $\dot{\epsilon}^c = B\sigma^n$ とする。断面積は $A_1 < A_2$ とし、断面積比 $A_1/A_2$ を $\xi$  ( $0 < \xi < 1$ )と表わす。

$\Delta t$ 時間における棒1および棒2のひずみ増分を $\Delta \epsilon_1$ ,  $\Delta \epsilon_2$ とすると、全体の変位は一定であるから

$$\Delta \epsilon_1 l_1 + \Delta \epsilon_2 l_2 = 0 \quad (1)$$

である。 $\Delta \epsilon_1, \Delta \epsilon_2$ はそれぞれ弾性ひずみ増分 $\Delta \epsilon_1^e, \Delta \epsilon_2^e$ , 及びクリープひずみ増分 $\Delta \epsilon_1^c, \Delta \epsilon_2^c$ の和であるとし、

$$\Delta \epsilon_1^e = \frac{\Delta \sigma_1}{E}, \quad \Delta \epsilon_2^e = \frac{\Delta \sigma_2}{E} = \frac{\xi \Delta \sigma_1}{E} \quad (2)$$

$$\Delta \epsilon_1^c = B \sigma_1^n \Delta t, \quad \Delta \epsilon_2^c = B \sigma_2^n \Delta t = B \xi^n \sigma_1^n \Delta t \quad (3)$$

を考慮すると(1)式より $\sigma_1$ に関する微分方程式

$$\frac{d\sigma_1}{dt} = - \left( 1 - \frac{\xi - \xi^n}{\frac{l_1}{l_2} + \xi} \right) E B \sigma_1^n \quad (4)$$

を得る。単純な応力緩和の場合、これに対応する式は $\frac{d\sigma}{dt} = -EB\sigma^n$  となり、(4)式の右辺カッコ内第2項は弾性追従による応力緩和速度の低下を表わしている。

また、棒1の全ひずみの変化速度

$$\frac{d\epsilon_1}{dt} = \frac{\xi - \xi^n}{\frac{l_1}{l_2} + \xi} B \sigma_1^n \quad (5)$$

となり、 $\xi = 0$  又は  $1$ , 又は  $n = 1$  又は  $l_1 \gg l_2$  でない限り  $\epsilon_1$  は時間とともに増大することがわかる。

このように、弾性追従を伴う2次応力は、図3.4.7(b)に模式的に示すようにひずみの増大、応力緩和速度の低下等、1次応力に似た性質を帯びるようになる。従って応力の基本的性質により一旦2次応力として分類されたものも弾性追従により再分類する必要がある。

### 9 3.4.2(1)(2)の2次応力の再分類は次の考え方に基づいたものである。

#### (1) 多量の弾性追従を伴う2次応力

基本的には2次応力であるが、弾性追従のために荷重制御型応力に近い挙動を示し、弾

性解析による評価の際には、1次応力と同等の取扱いが必要と考えられるもので本来の1次応力と合わせて荷重制御型応力として評価する。

(2) 若干の弾性追従を伴う2次応力

ある程度の弾性追従は伴うが弾性追従によるひずみの増大は著しくなく、弾性追従を伴わない2次応力とともに取扱うことが適当な2次応力で、通常、多くの2次応力はこの範囲に属する。但し、本方針では弾性追従を無視するのではなく、ひずみの制御及びクリープ疲労損傷の制限において、2次応力に区分されたものについて弾性追従の効果を安全側に考慮した上で評価するような規定を設けている。

(3) 弾性追従を伴わない2次応力

クリープが進行する際、単に弾性ひずみがクリープひずみに置換わるだけで全ひずみは増加せず一定の値を保つ場合である。この種の2次応力の例としては機器の壁厚方向温度分布により生じる熱応力を挙げることができる。

2次応力は弾性追従の程度に従い再分類を行った上で、図3.4.8に示す様に、本方針の各制限を適用することが必要である。

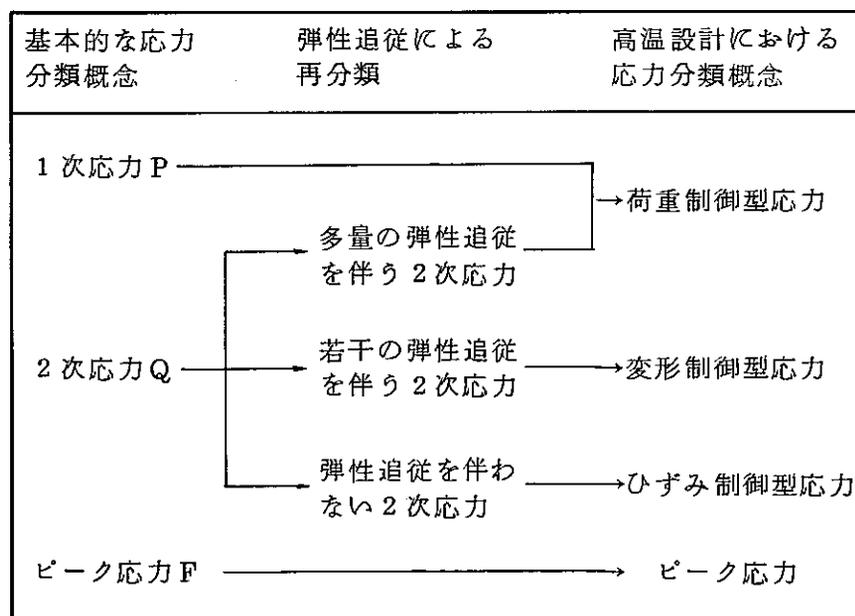


図 3.4.8 弾性追従による応力の再分類

10 クリープラチェットの基本的考え方は、次のとおりである。

1次応力と2次応力が組合せられ、2次応力が繰返し発生し、これらがある限界を超えた組合せになった時、ひずみ又は変形が2次応力サイクルと共に進行することがある。このような進行性変形の中で、2次応力が熱応力である場合は、これを熱応力ラチェットという。

その典型的な例として、定常内圧を受ける円筒容器に肉厚方向温度勾配による熱応力が繰返し作用する場合を考える。ここでは容器の材料は弾完全塑性体であるとし、クリープは生じないものとする。この場合の円筒殻の応力及びひずみ状態は図 3. 4. 9 (a) のようになる。いま、最大の1次応力成分が生じる円周方向に着目し、図 3. 4. 9 (a) を同図 (b) に示すような単軸モデル(「Breeモデル」と呼ぶ。)によって近似し、簡易な弾塑性解析を行うと、図 3. 4. 10 に示すような熱応力ラチェット線図(「Breeの線図」と呼ぶ。)が得られる。

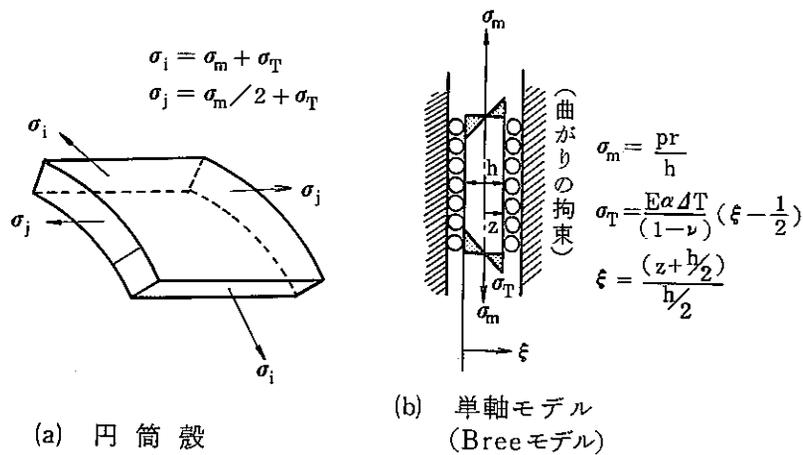


図 3. 4. 9 円筒殻の応力及びひずみ状態の単軸モデルによる近似

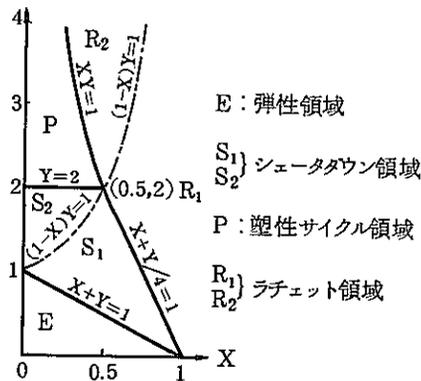


図 3. 4. 10 熱応力ラチェット線図 (Breeの線図)

この熱応力ラチェット線図の各領域の応力分布パターンを示すと図 3.4.11 のようになる。この図から、非ラチェット領域、すなわち E、S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 及び P 領域では熱応力除荷時に応力が  $\sigma_c$  の平坦な部分があることが知られる。この部分は熱応力サイクルに対して、常に弾性挙動を示すので、弾性核 (Elastic Core) と呼ばれる。

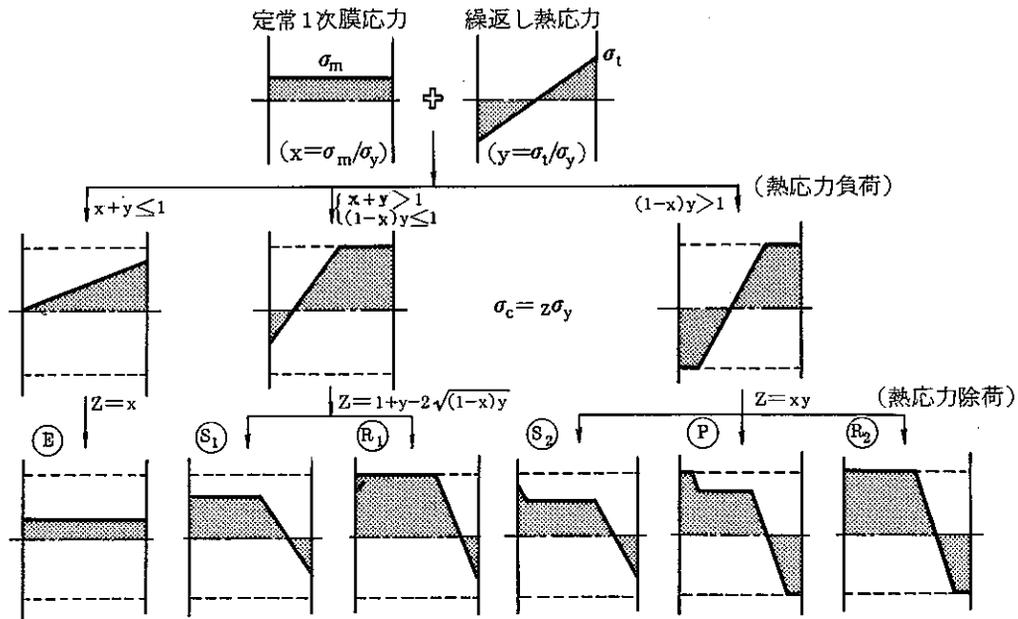


図 3.4.11 熱応力ラチェット線図の各領域の応力分布パターン

図 3.4.10 の非ラチェット領域においても、材料のクリープ効果が有意な場合には、進行性の繰返し非弾性ひずみ挙動が生じ、これはクリーブラチェット (Creep Ratcheting) と呼ばれている。クリーブラチェットの発生機構として、次の 2 つを挙げることができる。

- (1) クリープ効果のために塑性ラチェットの防止にとって有効な残留応力分布がキャンセルされ、クリープ効果がない場合は進行性の塑性ひずみが生じない熱応力サイクルにおいても進行性の塑性ひずみが生じる可能性がある。
- (2) 1 次膜応力と熱応力の相互作用により、1 次膜応力によるクリープが促進される可能性がある。この機構を促進クリープ (Enhanced Creep) という。

本方針では、両者による非弾性ひずみを総称して促進クリープひずみと呼んでいる。

11 3.4.2 (1) 2) a) は 1 次応力と 2 次応力の組合せに対し、累積される非弾性ひずみが無視できる範囲を定めたものである。

1次応力と過渡的2次応力が重畳しても、その際の挙動が弾性的であればクリーブラッチェットは生じない。このような条件は図3.4.10のBreeの線図上ではE領域に対応する。1次膜応力を $\langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / Kt \rangle$ , 過渡的2次曲げ応力を $\langle Q + Q^* \rangle_R$  また降伏応力を設計降伏点 $S_y$ としてE領域を表わせば

$$\langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / Kt \rangle + \langle Q + Q^* \rangle_R \leq S_y \quad (6)$$

となる。

ここで1次応力は一定として2次応力が重畳する時点においてもクリーブ効果が著しい場合の挙動について検討してみる。前述したように1次応力を膜応力、2次応力を過渡的曲げ応力とするBreeモデルで2次応力が重畳する時間内にクリーブ効果が著しく現われる場合には図3.4.12に示すように2次応力の負荷は弾性的であったとしても、2次応力の

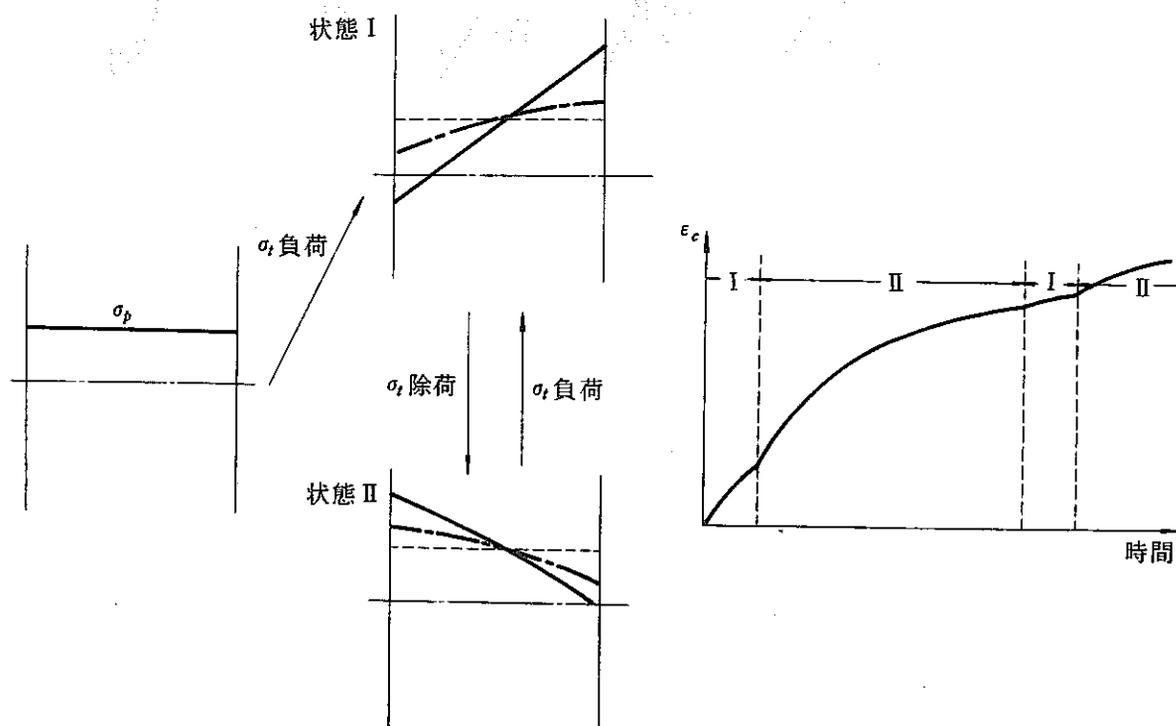


図 3.4.12  $\langle Q + Q^* \rangle_R$  を定める応力状態がともにクリーブ温度域にある場合

再配分が生ずると同時に1次応力単独の場合よりやや大きなクリープひずみが生じる。引き続き除荷状態で(図中状態Ⅱ),クリープ効果が著しくなければ,次の2次応力負荷時においては先の負荷時の最終応力状態と同一の応力場が形成される。そのため1次応力単独の場合に比べクリープ変形が若干加速されたとしても,その量は高々降伏応力に対応する弾性ひずみ(≤0.1%)程度に留まる。しかしながら2次応力除荷時にもクリープ効果が著しい場合には2次応力が除荷された状態の中でも促進クリープ挙動が示されると共に残留応力の再配分が進行し,次の2次応力負荷時には前回の負荷時の最終応力状態にくらべより大きな促進クリープを生じるような応力場が形成される。

これを考慮して本規定では,クリーブラチエットによる累積非弾性ひずみが無視できる条件として $\langle Q + Q^* \rangle_{R, \max}$ を定める時点の両者がクリープ効果が著しい温度域にある場合は,(6)式の右辺の $S_y$ を材料のクリープ特性を考慮して必要な場合には次のように減すべき事を規定している。

本規定では(6)式の制限値を考える上でのクリープ効果が著しいか否かの判定温度 $T_0$ は「 $10^5$ 時間に対する $S_t$ 値が $S_m$ 値と等しくなる温度」とし,また,(6)式のクリープ効果を考慮した制限値 $S_a$ は「 $10^4$ 時間に対する $S_t$ 値の1.25倍」とASME Code Case N-47と同等の規定を設けている。

以上を考慮して本規定では(6)式の右辺 $S_y$ を $S_a$ として

$$\langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / Kt \rangle_{\max} + \langle Q + Q^* \rangle_R \leq S_a \quad (7)$$

をクリーブラチエットによる累積非弾性ひずみが無視できる条件としている。なお(7)式が満足される場合には,2次応力による弾性追従ひずみも十分小さく抑えられる。

(7)式の右辺の制限値としては $\langle Q + Q^* \rangle_R$ を定める両方の応力状態でクリープ効果が著しければ

イ) 運転状態Ⅰ,Ⅱ及び試験状態を通しての最高壁厚平均金属温度における $10^4$ 時間に対する $S_t$ 値の1.25倍

ロ) 評価の対象とする $\langle Q + Q^* \rangle_R$ が属する負荷サイクルの最高壁厚平均金属温度と最低壁厚平均金属温度の $S_y$ の平均値

の内小さい方を選択し,一方の応力状態においてクリープ効果が著しくない場合には,ロ)

のみによって定める事を規定している。

(7)式の $\langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / Kt \rangle$ は、1次応力の組合せに対する等価な膜応力を表わす項であるが、本方針では、1次応力制限において

$$\langle P_m \rangle \leq S t \quad (8)$$

$$\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle \leq K t S t \quad (9)$$

であるから

$$\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle / K t \quad (10)$$

とおいに良いように見える。しかし $P_b + P_b^* = 0$ の場合は

$$\langle P_L + P_L^* \rangle \quad (11)$$

となるべきであるから、(8)式および(9)式を安全側に包含する式として

$$\langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / K t \rangle \quad (12)$$

を用いた。

(7)式の左辺の $\langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / K t \rangle_{\max}$ は、運転状態I、II及び試験状態を通しての最大値と規定している。これは、異なる負荷サイクルの間の相互作用の安全側評価をはかるために最大値を採用することにしたものである。左辺第2項の $\langle Q + Q^* \rangle_R$ としては、運転状態I、II、III及び試験状態を通しての負荷サイクルについて検討すべき事を規定している。これは高速炉では熱応力に特に留意すべき事、運転状態IIIによる過渡的2次応力であっても残留応力としてひき続く負荷サイクルにおけるひずみ挙動に影響を及ぼす可能性がある事を考慮したためである。

12 3.4.2(1)2)b)は、弾性解析による場合の累積非弾性ひずみの制限を定めており累積非弾性ひずみを促進クリープひずみと弾性追従ひずみの和とし、3.4.2(1)1)の制限を適用している。

本方針では、促進クリープひずみの上限値がO'Donnell & Porowski法によって算定できるものとしている。

この方法は、弾性核に見られる平坦な応力 $\sigma_c$ (ひずみ制限解説10参照)を肉厚全体に一樣に作用する膜応力と見なして、クリープひずみを算定することにより、促進クリープひずみの上限を評価するものである。弾性核の応力 $\sigma_c = z \sigma_y$ は有効なクリープ応力(Effective Creep Stress)と呼ばれる。

ここで、図 3.4.11 に示す  $S_1$  領域の応力分布を例にとつて、クリープ効果を考えて見る。図 3.4.13 に示すように、弾性核の部分を中心にクリープひずみが生じると、拘束条件により肉厚全体のひずみが進行して、応力の再配分が生じ、点線で示すような応力分布になる。クリープが顕著な場合は応力分布がまったく平坦化し、最初の膜応力のみ状態に戻ることになる。この間に弾性核において生じたクリープひずみを  $\Delta \epsilon_k$  とし、肉厚全体のひずみの増分を  $\Delta \epsilon_t$  及び  $0 \rightarrow \sigma_y$  に至るときに生じる弾性ひずみを  $\epsilon_y$  とすれば

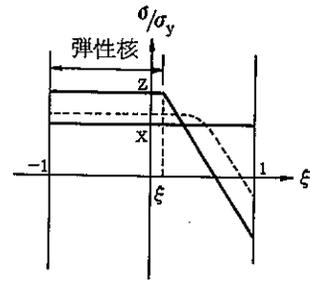


図 3.4.13 クリープによる  $S_1$  領域の応力分布の変化

$$\Delta \epsilon_t = \Delta \epsilon_k - \epsilon_y (z - x) \quad (13)$$

となる。ここに右辺第 2 項は弾性核の応力が  $z \sigma_y$  から  $x \sigma_y$  に減少することによって生じる弾性ひずみの減少を表わしている。

このようにして残留応力がキャンセルされると、次に熱応力を負荷した時に、ひずみ増分

$$\Delta \epsilon^* = \epsilon_y (z - x) \quad (14)$$

が生じる。すなわち、塑性ラチェットの増分は最初の半サイクルだけに見られるひずみ増分  $\Delta \epsilon^*$  が、顕著なクリープ効果の下では、各熱応力サイクルごとに生じることになる。これが解説 10 で示したクリープラチェット発生機構の(1)に相当する。

クリープラチェットによる熱応力 1 サイクル当りの進行性ひずみを  $\Delta \epsilon_{CR}$  とすれば、 $\Delta \epsilon_{OR}$  は上記の 2 つの要因による進行性ひずみ増分を加えたものであるから、(13) 及び (14) 式から

$$\Delta \epsilon_{OR} = \Delta \epsilon_t + \Delta \epsilon^* = \Delta \epsilon_k \quad (15)$$

を得る。しかるに  $\Delta \epsilon_k$  は初期応力を  $z \sigma_y$  とし末期応力を  $x \sigma_y$  とするときのクリープひずみであるから、応力を  $\sigma_c = z \sigma_y$  (一定) としたときの 1 サイクル当りのクリープひずみを  $\Delta \epsilon_c$  とすれば、 $\Delta \epsilon_k < \Delta \epsilon_c$  である。従つて

$$\Delta \epsilon_{OR} < \Delta \epsilon_c \quad (16)$$

となる。

以上から有効クリープ応力 $\sigma_c$ を用いてクリープひずみを評価すれば、促進クリープの上限を評価するだけでなく、2つの要因からなるクリーブラチェットひずみの上限を評価することになると考えられる。

本方針では、このO'Donnell & Porowski法に基づき、1次応力が過渡的応力( $S_1$ 地震を想定している。)を含む場合に対しても適切な評価を与える様に考慮して、促進クリープひずみの上限値の算出法を3.4.2(1)2) b)イ)~ホ)に与えている。

13 3.4.2(1)2) b)ロ),ハ)の(3.4.7)式及び(3.4.8)式の導出は次の通りである。

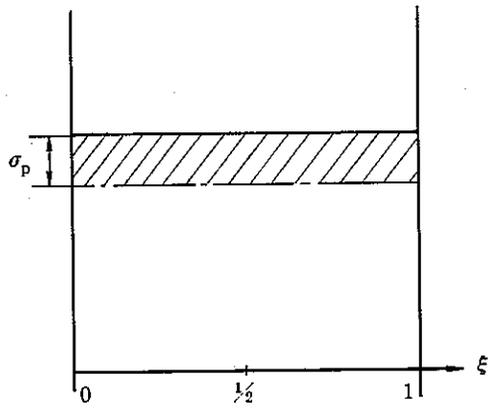
図3.4.9に示した単軸モデルを用いて、短時間内に1次応力が変動する場合のクリープ・ラチェット評価に使用する弾性核応力について考察する。ここで、短時間内の1次応力の変動とは、地震荷重あるいは衝撃圧等の短期1次応力を意味する。

非弾性挙動を伴う負荷の重ね合せは、一般に負荷順序により挙動が異なるため、短期1次応力をどの時点で組み合わせるかをまず検討する。

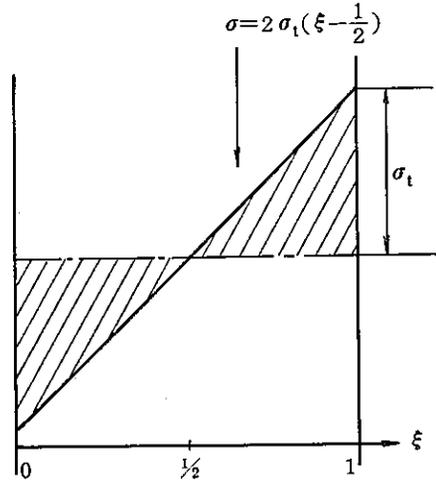
ラチェットひずみは、1次膜応力作用方向に生じる塑性ひずみ量が、逆方向に生じる塑性ひずみ量を上回る場合に生じ、一般にその差が大きいほど大きなラチェットひずみを生じる。従って短期1次応力を重畳させる時点については、2次曲げ応力が負荷されている時点の方が、除荷されている時点より、より大きな塑性ひずみを生じる可能性がある。また、定常的1次膜応力と逆方向の短期1次応力の負荷は、ラチェットひずみを減少させる。従って、2次曲げ応力が負荷されている時点において、定常的1次膜応力と同一方向の短期1次膜応力を重畳させる場合が最も厳しい条件となる。

以上の負荷順序に対する考察に基づき、式(3.4.7)及び式(3.4.8)の導出に当って、以下の負荷過程を考える。

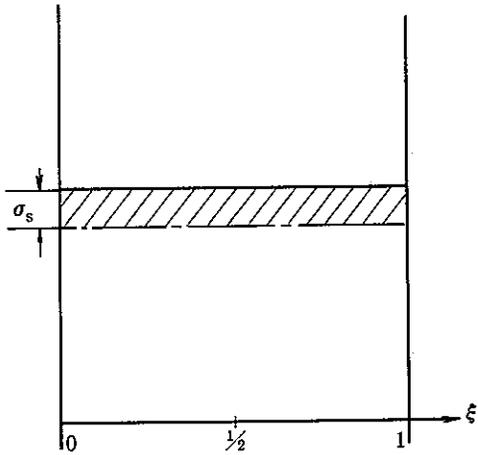
- 状態① 定常1次膜応力 $\sigma_p$ の負荷 :  $\sigma_p$   
 " ② 2次曲げ応力 $2\sigma_t$  ( $\xi - \frac{1}{2}$ )の負荷 :  $\sigma_p + \sigma_t$   
 " ③ 短期1次膜応力 $\sigma_s$ の負荷 :  $\sigma_p + \sigma_t + \sigma_s$   
 " ④ 短期1次膜応力 $\sigma_s$ の除荷 :  $\sigma_p + \sigma_t + \sigma_s - \sigma_s$   
 " ⑤ 2次曲げ応力 $2\sigma_t$  ( $\xi - \frac{1}{2}$ )の除荷 :  $\sigma_p + \sigma_t + \sigma_s - \sigma_s - \sigma_t$



定常 1 次膜応力



2 次曲げ応力



短期 1 次膜応力

記 号

$\sigma_p$  = 定常 1 次膜応力

$\sigma_t$  = 2 次曲げ応力

$\sigma_s$  = 短期 1 次膜応力

$\sigma_{yI}$  = 2 次曲げ応力負荷時の降伏点

$\sigma_{eI}$  = 短期 1 次膜応力  $\sigma_s$  が不在の場合の弾性核応力

$\sigma_{eI}^*$  = 短期 1 次膜応力  $\sigma_s$  が存在する場合の弾性核  
応力

$\xi$  = 肉厚方向にとつた無次元化座標

(表面を  $\xi = 0, 1$  とする。)

図 3.4.14 負 荷 形 態

(1) 式 (3.4.7) の導出

(点  $(X_1, Y)$  が E 又は  $S_1$  領域及び  $(X_1 + X_2, Y)$  が  $S_1$  領域にある場合)

定常 1 次膜応力  $\sigma_p$  が負荷されている状態①より, 前述した負荷過程②~④を考える (図 3.4.15 参照)。

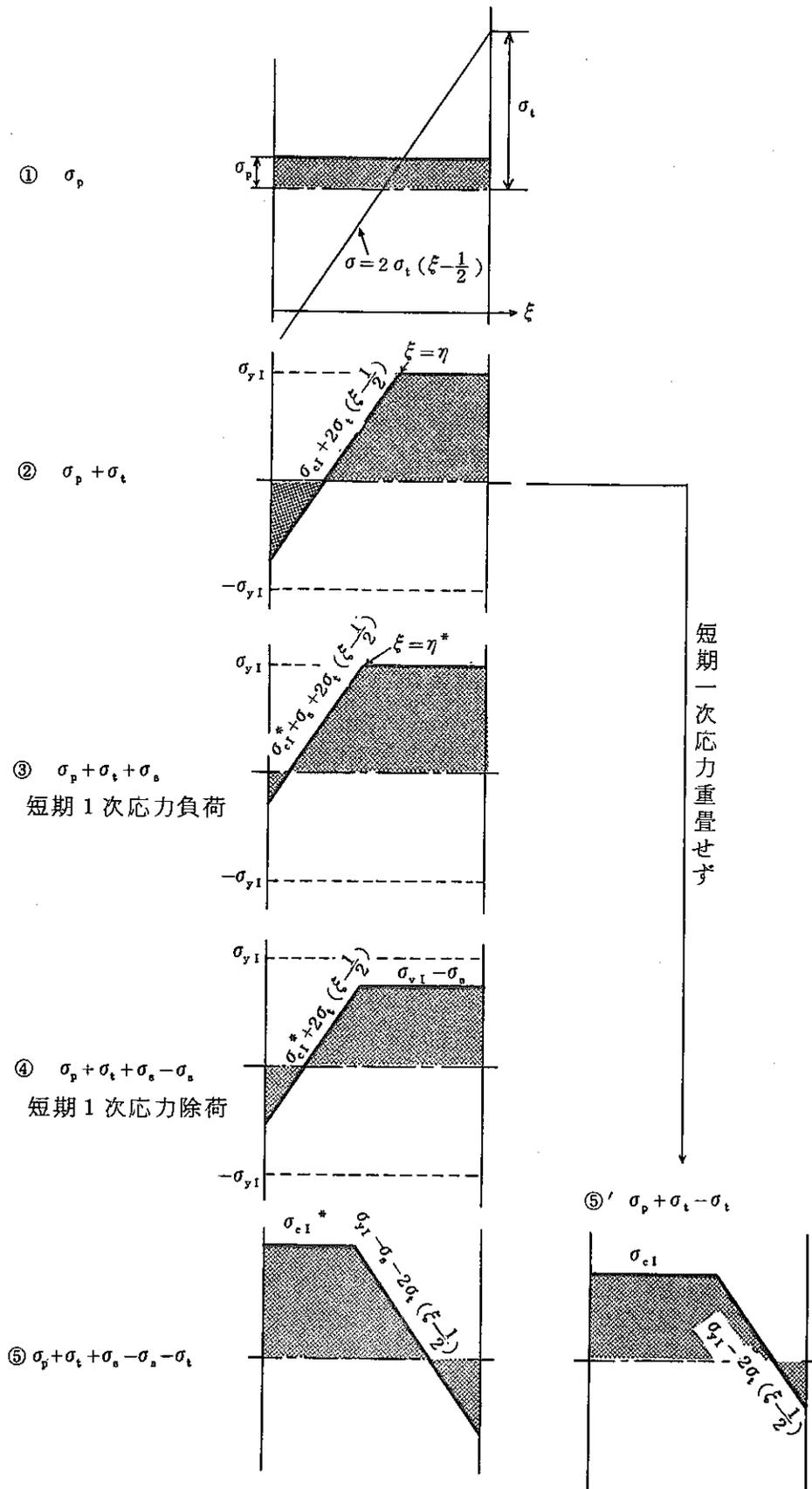


図 3. 4. 15 短期1次応力の重畳 ( $(\sigma_{y1} - \sigma_p) \sigma_t \leq \sigma_{y1}^2$  の場合)

状態①の肉厚応力分布  $\sigma = \sigma_p$  (17)

2次曲げ応力  $\sigma = 2\sigma_t (\xi - \frac{1}{2})$  (18)

② 2次曲げ応力  $2\sigma_t (\xi - \frac{1}{2})$  の負荷時の肉厚内応力分布

肉厚内応力分布を以下のように仮定する。

$0 \leq \xi \leq \eta$   $\sigma = A + B\xi$  (19)

$\eta < \xi \leq 1$   $\sigma = \sigma_{yI}$  (20)

未知数A, B及び $\eta$ を定める条件

(ア)  $0 < \xi \leq \eta$ での肉厚内応力分布の勾配:  $B = 2\sigma_t$  (21)

(イ)  $\xi = \eta$ での応力連続条件:  $A + B\eta = \sigma_{yI}$  (22)

(ウ) 釣合条件:  $\int_0^\eta (A + B\xi) d\xi + \int_\eta^1 \sigma_{yI} d\xi = \int_0^1 \sigma_p d\xi$  (23)

上記条件を解いて

$A = \sigma_{yI} - 2\sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p)\sigma_t}$  (24)

$B = 2\sigma_t$  (25)

$\eta = \sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p) / \sigma_t}$  (26)

従って、肉厚内応力分布は以下のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \xi \leq \eta \quad \sigma = \sigma_{yI} - 2\sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p)\sigma_t} + 2\sigma_t \xi \\ \hspace{10em} = \underbrace{(\sigma_{yI} + \sigma_t - 2\sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p)\sigma_t})}_{\sigma_{cI}} + 2\sigma_t (\xi - \frac{1}{2}) \\ \eta < \xi \leq 1 \quad \sigma = \sigma_{yI} \\ \text{ここに,} \quad \eta = \sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p) / \sigma_t} \end{array} \right. \quad (27)$$

(20)

(26)

なお、以上では $\xi = 0$ で降伏しないという前提(式(15)参照)に基づいて式の導出を進めていた。この $\xi = 0$ で降伏しないための条件は式(23)より

$\sigma_{yI} - 2\sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p)\sigma_t} > -\sigma_{yI}$  (28)

$\therefore (\sigma_{yI} - \sigma_p)\sigma_t \leq \sigma_{yI}^2$  (29)

(注) 上式(29)は後述する式(40)~(42)の置き換えにより

$$(1 - X_1) \cdot Y \leq 1 \quad (30)$$

となる。ここでは、点 $(X_1, Y)$ はE又は $S_1$ 領域にあるので上式(26)は成り立っている。

③ 短期1次膜応力 $\sigma_s$ の負荷時の肉厚内応力分布

短期1次膜応力 $\sigma_s$ が負荷された時の肉厚内応力分布は、状態②の応力分布において $\sigma_p$ を $\sigma_p + \sigma_s$ に置き換えることにより算出することができる。従って

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \xi \leq \eta^* \quad \sigma = (\sigma_{yI} + \sigma_t - 2\sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p - \sigma_s)\sigma_t}) + 2\sigma_t(\xi - \frac{1}{2}) \\ \qquad \qquad \qquad = \underbrace{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \sigma_s - 2\sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p - \sigma_s)\sigma_t})}_{\sigma_{cI}^*} + 2\sigma_t(\xi - \frac{1}{2}) \end{array} \right. \quad (31)$$

$$\eta^* \leq \xi \leq 1 \quad \sigma = \sigma_{yI} \quad (32)$$

$$\text{ここに, } \eta^* = \sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p - \sigma_s) / \sigma_t} \quad (33)$$

④ 短期1次膜応力 $\sigma_s$ の除荷時の肉厚内応力分布

短期1次膜応力 $\sigma_s$ が除荷された時の肉厚内応力分布は、状態③の応力から $\sigma_s$ を減ずることにより算出することができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \xi \leq \eta^* \quad \sigma = \underbrace{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \sigma_s - 2\sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p - \sigma_s)\sigma_t})}_{\sigma_{cI}^*} + 2\sigma_t(\xi - \frac{1}{2}) \end{array} \right. \quad (34)$$

$$\eta^* < \xi \leq 1 \quad \sigma = \sigma_{yI} - \sigma_s \quad (35)$$

$$\text{ここに, } \eta^* = \sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p - \sigma_s) / \sigma_t} \quad (33)$$

⑤ 2次曲げ応力 $2\sigma_t(\xi - \frac{1}{2})$ の除荷時の肉厚内応力分布

2次曲げ応力 $2\sigma_t(\xi - \frac{1}{2})$ が除荷された時の肉厚内応力分布は状態④の応力から

$2\sigma_t(\xi - \frac{1}{2})$ を減じて算出する。

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \xi \leq \eta^* \quad \sigma = \sigma_{yI} + \sigma_t - \sigma_s - 2\sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p - \sigma_s)\sigma_t} \quad (= \sigma_{cI}^*) \quad (3.6) \\ \eta^* < \xi \leq 1 \quad \sigma = \sigma_{yI} - \sigma_s - 2\sigma_t \left(\xi - \frac{1}{2}\right) \quad (3.7) \\ \text{ここに,} \quad \eta^* = \sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p - \sigma_s) / \sigma_t} \quad (3.8) \end{array} \right.$$

以上から、短期1次応力を重畳した場合の弾性核は、式(3.6)より

$$\sigma_{cI}^* = \sigma_{yI} + \sigma_t - \sigma_s - 2\sqrt{(\sigma_{yI} - \sigma_p - \sigma_s)\sigma_t} \quad (3.8)$$

$\sigma_{yI}$ で除して

$$\sigma_{cI}^* / \sigma_{yI} = 1 + (\sigma_t / \sigma_{yI}) - (\sigma_s / \sigma_{yI}) - 2\sqrt{(1 - \sigma_p / \sigma_{yI} - \sigma_s / \sigma_{yI}) \sigma_t / \sigma_{yI}} \quad (3.9)$$

上式(3.9)において、 $\sigma_p / \sigma_{yI}$ 、 $\sigma_s / \sigma_{yI}$  及び  $\sigma_t / \sigma_{yI}$  を以下のように置き換える。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_p / \sigma_{yI} \longrightarrow X_1 \quad (4.0) \\ \sigma_s / \sigma_{yI} \longrightarrow X_2 \quad (4.1) \\ \sigma_t / \sigma_{yI} \longrightarrow Y \quad (4.2) \end{array} \right.$$

式(4.0)～(4.2)の置き換えにより

$$Z^* = \sigma_{cI}^* / \sigma_{yI} = 1 + Y - X_2 - 2\sqrt{(1 - X_1 - X_2)Y} \quad (4.3)$$

(2)式(3.4.8)の導出

(点(X<sub>1</sub>, Y)がS<sub>2</sub>又はP領域及び(X<sub>1</sub>+X<sub>2</sub>, Y)がS<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>又はP領域にある場合)

式(3.4.8)の導出は、前述した式(3.4.7)の場合と全く同様である(図3.4.16参照)。

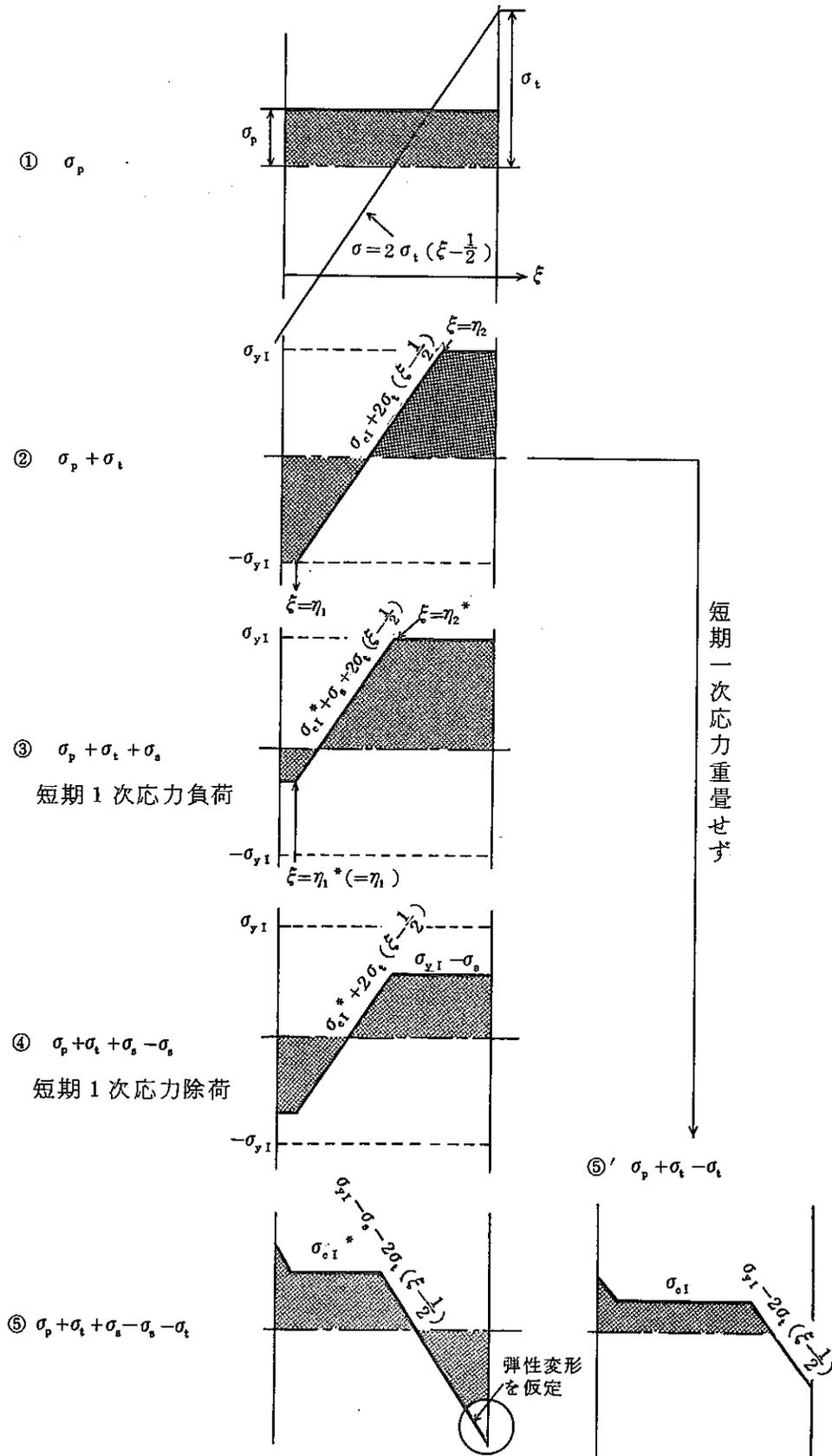


図 3. 4. 16 短期1次応力の重畳 ( $(\sigma_{y1} - \sigma_p) \sigma_t \geq \sigma_{y1}^2$  の場合)

- ② 2次曲げ応力  $2\sigma \left(\xi - \frac{1}{2}\right)$  の負荷時の肉厚内応力分布  
肉厚内応力分布を以下のように仮定する。

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0 \leq \xi \leq \eta_1 & \sigma = -\sigma_{yI} \end{array} \right. \quad (44)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \eta_1 < \xi \leq \eta_2 & \sigma = A + 2\sigma_t \xi \end{array} \right. \quad (45)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \eta_2 < \xi \leq 1 & \sigma = \sigma_{yI} \end{array} \right. \quad (46)$$

未知数  $A$ ,  $\eta_1$  及び  $\eta_2$  を定める条件

$$(ア) \quad \xi = \eta_1 \text{ での応力連続条件: } -\sigma_{yI} = A + 2\sigma_t \eta_1 \quad (47)$$

$$(イ) \quad \xi = \eta_2 \text{ での応力連続条件: } \sigma_{yI} = A + 2\sigma_t \eta_2 \quad (48)$$

$$(ウ) \quad \text{釣合条件: } \int_0^{\eta_1} \sigma_{yI} d\xi + \int_{\eta_1}^{\eta_2} (A + 2\sigma_t \xi) d\xi + \int_{\eta_2}^1 \sigma_{yI} d\xi = \int_0^1 \sigma_p d\xi \quad (49)$$

上記条件を解いて

$$A = (\sigma_p \sigma_t / \sigma_{yI}) - \sigma_t \quad (50)$$

$$\eta_1 = \frac{-\sigma_{yI} + \sigma_t - (\sigma_p \sigma_t / \sigma_{yI})}{2\sigma_t} \quad (51)$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma_{yI} + \sigma_t - (\sigma_p \sigma_t / \sigma_{yI})}{2\sigma_t} \quad (52)$$

従って、肉厚内応力分布は以下のようなになる。

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0 \leq \xi \leq \eta_1 & \sigma = -\sigma_{yI} \end{array} \right. \quad (44)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \eta_1 < \xi \leq \eta_2 & \sigma = \{ (\sigma_p \sigma_t / \sigma_{yI}) - \sigma_t \} + 2\sigma_t \xi \\ & = \underbrace{\sigma_p \sigma_t / \sigma_{yI}}_{\sigma_{cI}} + 2\sigma_t \left(\xi - \frac{1}{2}\right) \end{array} \right. \quad (53)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \eta_2 < \xi \leq 1 & \sigma = \sigma_{yI} \end{array} \right. \quad (54)$$

- ③ 短期1次膜応力  $\sigma_s$  の負荷時の肉厚内応力分布

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0 \leq \xi \leq \eta_1^* & \sigma = -\sigma_{yI} + B \end{array} \right. \quad (55)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_1^* < \xi \leq \eta_2^* \\ \eta_2^* < \xi \leq 1 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \sigma = (\sigma_p \sigma_t / \sigma_{yI}) + 2\sigma_t (\xi - \frac{1}{2}) + B \\ \sigma = \sigma_{yI} \end{array} \quad \begin{array}{l} (56) \\ (57) \end{array}$$

未知数  $B$ ,  $\eta_1^*$  及  $\eta_2^*$  を定める条件

$$(ア) \quad \xi = \eta_1^* \text{ での応力連続条件: } -\sigma_{yI} + B = \left( \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}} \right) + 2\sigma_t \left( \eta_1^* - \frac{1}{2} \right) + B \quad (58)$$

$$(イ) \quad \xi = \eta_2^* \text{ での応力連続条件: } \sigma_{yI} = \left( \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}} \right) + 2\sigma_t \left( \eta_2^* - \frac{1}{2} \right) + B \quad (59)$$

$$(ウ) \quad \text{釣合条件: } \int_0^{\eta_1^*} (-\sigma_{yI} + B) d\xi + \int_{\eta_1^*}^{\eta_2^*} \left\{ \left( \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}} \right) + 2\sigma_t \left( \xi - \frac{1}{2} \right) + B \right\} d\xi +$$

$$\int_{\eta_2^*}^1 \sigma_{yI} d\xi = \int_0^1 (\sigma_p + \sigma_s) d\xi \quad (60)$$

上記条件を解いて

$$B = \sigma_{yI} + \sigma_t - \sqrt{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \sigma_p \sigma_t / \sigma_{yI})^2 - 4\sigma_s \sigma_t} - \sigma_p \sigma_t / \sigma_{yI} \quad (61)$$

$$\eta_1^* = \frac{-\sigma_{yI} + \sigma_t - \left( \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}} \right)}{2\sigma_t} \quad (= \eta_1) \quad (62)$$

$$\eta_2^* = \frac{\sqrt{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}})^2 - 4\sigma_s \sigma_t}}{2\sigma_t} \quad (63)$$

従って、肉厚内応力分布は以下のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \xi \leq \eta_1^* \\ \eta_1^* < \xi \leq \eta_2^* \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \sigma = \sigma_t - \sqrt{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \sigma_p \sigma_t / \sigma_{yI})^2 - 4\sigma_s \sigma_t} - \sigma_p \sigma_t / \sigma_{yI} \\ \sigma = \sigma_{yI} + \sigma_t - \sqrt{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \sigma_p \sigma_t / \sigma_{yI})^2 - 4\sigma_s \sigma_t} \\ \quad + 2\sigma_t \left( \xi - \frac{1}{2} \right) \end{array} \quad (64)$$

$$\left. \begin{aligned}
 &= \underbrace{\sigma_{yI} + \sigma_t - \sigma_s - \sqrt{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}})^2 - 4\sigma_s \sigma_t}}_{\sigma_{cI}^*} \quad (65) \\
 &+ \sigma_s + 2\sigma_t \left(\xi - \frac{1}{2}\right) \\
 \eta_2^* < \xi \leq 1 \quad \sigma = \sigma_{yI} \quad (54)
 \end{aligned} \right\}$$

④ 短期1次膜応力  $\sigma$  の除荷時の肉厚内応力分布

状態③から短期1次膜応力  $\sigma_s$  を減ずる。

$$\left. \begin{aligned}
 0 \leq \xi \leq \eta_1^* \quad \sigma = \sigma_t - \sigma_s - \sqrt{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}})^2 - 4\sigma_s \sigma_t} - \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}} \quad (66) \\
 \eta_1^* < \xi \leq \eta_2^* \quad \sigma = \underbrace{\sigma_{yI} + \sigma_t - \sigma_s - \sqrt{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}})^2 - 4\sigma_s \sigma_t}}_{\sigma_{cI}^*} + 2\sigma_t \left(\xi - \frac{1}{2}\right) \quad (67) \\
 \eta_2^* < \xi \leq 1 \quad \sigma = \sigma_{yI} - \sigma_s \quad (68)
 \end{aligned} \right\}$$

⑤ 2次曲げ応力  $2\sigma_t \left(\xi - \frac{1}{2}\right)$  の除荷時の肉厚内応力分布

2次曲げ応力  $2\sigma_t \left(\xi - \frac{1}{2}\right)$  の除荷時の肉厚内応力分布は、弾性変形を仮定すると状態④

の応力から  $2\sigma_t \left(\xi - \frac{1}{2}\right)$  を減じて算定される。

$$\left. \begin{aligned}
 0 \leq \xi \leq \eta_1^* \quad \sigma = \sigma_t - \sigma_s - \sqrt{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}})^2 - 4\sigma_s \sigma_t} - \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}} - 2\sigma_t \left(\xi - \frac{1}{2}\right) \quad (69) \\
 \eta_1^* < \xi \leq \eta_2^* \quad \sigma = \sigma_{yI} + \sigma_t - \sigma_s - \sqrt{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}})^2 - 4\sigma_s \sigma_t} \quad (= \sigma_{cI}^*) \quad (70) \\
 \eta_2^* < \xi \leq 1 \quad \sigma = \sigma_{yI} - \sigma_s - 2\sigma_t \left(\xi - \frac{1}{2}\right) \quad (71)
 \end{aligned} \right\}$$

以上から、短期1次応力を重畳した場合の弾性核は、

$$\sigma_{cI} = \sigma_{yI} + \sigma_t - \sigma_s - \sqrt{(\sigma_{yI} + \sigma_t - \frac{\sigma_p \sigma_t}{\sigma_{yI}})^2 - 4 \sigma_s \sigma_t} \quad (72)$$

上式において、 $\sigma_p / \sigma_{yI}$ 、 $\sigma_s / \sigma_{yI}$  及び  $\sigma_t / \sigma_{yI}$  を以下のように置き換える。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_p / \sigma_{yI} \longrightarrow X_1 \\ \sigma_s / \sigma_{yI} \longrightarrow X_2 \\ \sigma_t / \sigma_{yI} \longrightarrow Y \end{array} \right. \quad (73)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_p / \sigma_{yI} \longrightarrow X_1 \\ \sigma_s / \sigma_{yI} \longrightarrow X_2 \\ \sigma_t / \sigma_{yI} \longrightarrow Y \end{array} \right. \quad (74)$$

従って

$$Z^* = \sigma_{cI}^* / \sigma_{yI} = 1 + Y - X_2 - \sqrt{(1 + Y - X_1 Y)^2 - 4 X_2 Y} \quad (76)$$

なお、上式(72)は状態⑤で弾性変形を仮定している(図3.4.15⑤参照)ため、 $\xi = 1$ で塑性変形が生じる場合には弾性核の応力水準を高目に評価する傾向にあるが、実際の弾性核の応力水準と比較して適度に保守的であることを、表3.4.4に示す数値計算例により確認している。

表 3.4.4 弾性核の無次元化応力Zと略近解Z\*の比較

Case No	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y	Z	Z*	Region of(X <sub>1</sub> ,Y)	Z' (注)
①	0.1	0.3	1.0	0.151	0.151	S <sub>1</sub>	0.451
②	0.1	0.3	2.0	0.359	0.368	S <sub>2</sub>	0.8
③	0.1	0.4	1.0	0.186	0.186	S <sub>1</sub>	0.586
④	0.1	0.4	2.0	0.431	0.446	S <sub>2</sub>	1.0
⑤	0.1	0.5	1.0	0.235	0.235	S <sub>1</sub>	0.735
⑥	0.1	0.5	1.6	0.439	0.441	S <sub>2</sub>	1.0
⑦	0.1	0.6	0.6	0.151	0.151	E	0.751
⑧	0.1	0.6	1.2	0.397	0.397	S <sub>2</sub>	1.0

(注) Z' は{(X<sub>1</sub>+X<sub>2</sub>), Y}に対してCode Case N-47, Test No.3の方法で求めたZの値

Z\* は状態⑤で弾性変形を仮定した解

Z は状態⑤での弾塑性変形を厳密に扱った解

14 3.4.2(1)2) b) イ)は、クリーブラチェット評価に用いるパラメータを定めたものである。ここで、長期1次膜応力パラメータ  $X_1 = \langle P_L + (P_b / K_t) \rangle_{\max} / S_{yc}$ 、短期1次膜応力パラメータ  $X_2 = \langle P_L^* + (P_b^* / K_t) \rangle_{\max} / S_{yc}$  及び2次応力パラメータ  $Y = \langle Q + Q^* \rangle_{R. \max} / S_{yc}$ における添字 max は、 $X_1$  については運転状態 I, II 及び試験状態における最大値、 $X_2$  及び Y は運転状態 I, II, III 及び試験状態における最大値を表わし、それぞれのパラメータの最大時に対応している。これは異なる負荷サイクル間の相互作用について安全側評価をはかるためのものである。

15 3.4.2(1)2) b) ニ)は、促進クリーブひずみ評価に用いる弾性核応力を定めたものである。本方針では弾性核応力を用いて促進クリーブひずみを評価する際に平均挙動に基づく等時応力ひずみ線図を使用することを考慮し、弾性核応力  $\sigma_c$  としては

$$\sigma_c = 1.25 Z^* S_{yc} \quad (77)$$

として応力を係数 1.25 倍して評価すべきことを規定している。

また、降伏応力の温度依存性を考慮した時に塑性ラチェットが生じない条件として

$$Z^* \leq S_{yH} / S_{yc} \quad (78)$$

を本規定の適用条件としている。

16 3.4.2(1)2) b) では、弾性核応力  $\sigma_c$  が運転状態 III にかかわる負荷サイクルによって定められる場合は運転状態 III の事象 1 回当たりの促進クリーブ時間を  $10^4$  時間として促進クリーブひずみ  $\epsilon_{EC}$  を算出し、残余の高温使用時間に関しては運転状態 I, II 及び試験状態により定められる  $\sigma_c$  により促進クリーブひずみ  $\epsilon_{EC}$  を算出することができることを定めている。

これはクリーブラチェットのメカニズムにより促進クリーブが顕著に生じれば同時に弾性核応力水準の低下が生じるため弾性核応力水準を一定として評価する時間を  $10^4$  時間と限定して評価しようとするものである。ここで、 $10^4$  時間という時間は以下に示すような非弾性解析結果に基づき定めたものである。

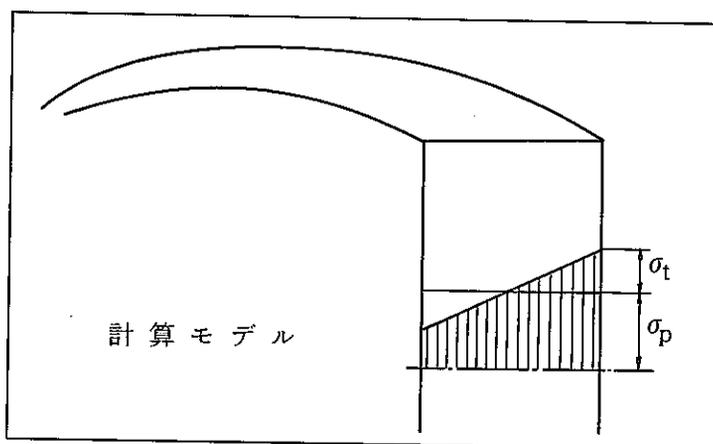
本方針の規定を策定するに当って実施した非弾性解析の条件を表 3.4.5 に示す。計算モデルは、軸方向に荷重制御型膜応力  $\sigma_p$  及び壁厚方向に温度勾配に対応する繰返し過渡曲げ応力  $\sigma_t$  を受ける直管 (平均径/壁厚 = 20) である。

表 3.4.5 計 算 条 件

材 料： SUS304（降伏応力を  $1.5 S_m$  とする弾完全塑性体）

形 状： 平均径／肉厚 = 20 の形状比を有する直管

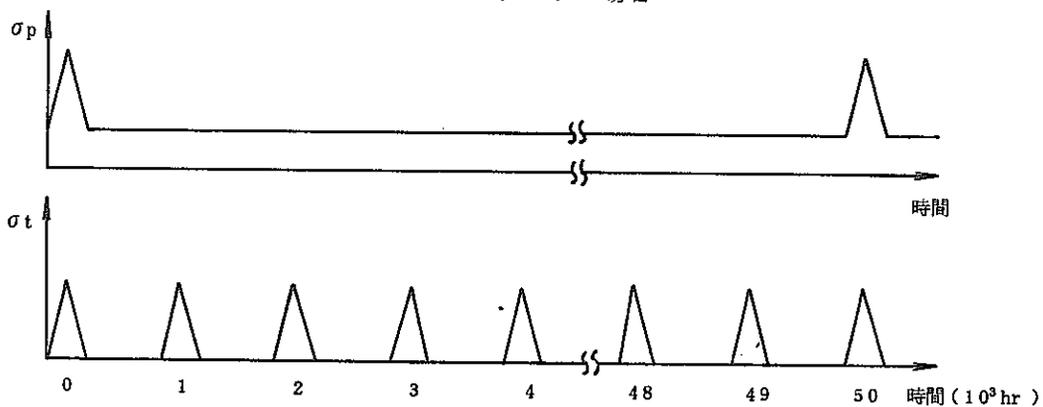
計算モデル： 軸方向定応力  $\sigma_p$  と肉厚方向繰返し熱曲げ応力  $\sigma_t$  を受ける直管



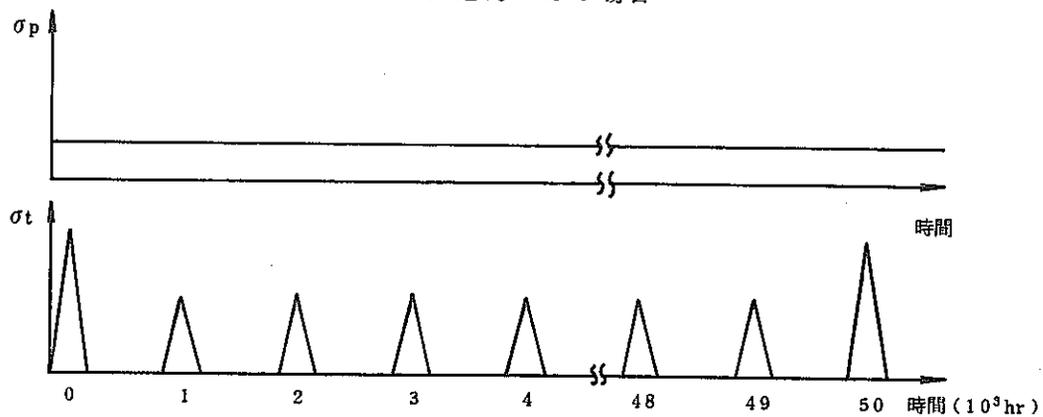
解析時間：  $3 \times 10^5$  hr

負荷条件： 過渡的荷重は 1,000 hr 毎，過渡的過大荷重は 5,000 hr 毎とする。

(イ) 数少ない過大事象が過渡的 1 次応力である場合



(ロ) 数少ない過大事象が過渡的 2 次応力である場合



材料の降伏応力に関しては、実験的に得られたクリープラチェット挙動が降伏応力の1.35倍を想定した弾完全塑性体モデルで良好に近似できるため、ここでは降伏応力を $1.5 S_m$ とする弾完全塑性体とし、 $S_m$ 値としてはSUS 304に対して材料強度基準で与える値を使用した。

負荷条件は、数少ない過大事象が過渡的1次応力による場合及び過渡的2次応力による場合の両ケースを想定している。いずれも通常の状態では、1次応力は膜応力として一定

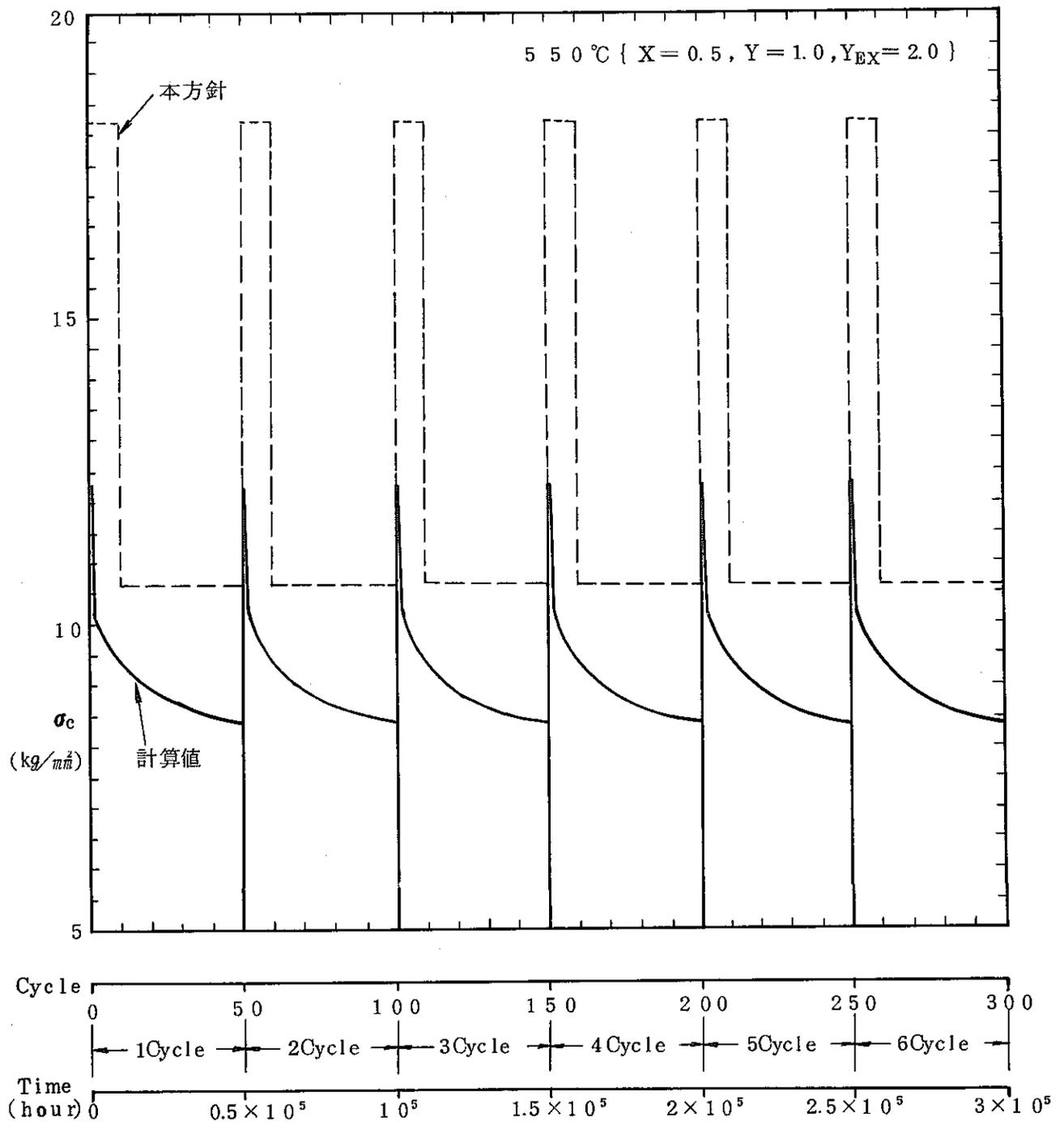


図 3.4.17 弾性核応力の時間履歴

であり、2次応力は $10^3$  hr 毎に過渡的に負荷されるとしている。過大荷重は $5 \times 10^4$  hr 毎に負荷されるとしている。

図3.4.17は、温度が $550^\circ\text{C}$ のときの対象とする弾性核応力 $\sigma_c$ の時間的变化を示したものである。ここに示すように、過渡的な過大応力によって高い残留応力場が形成されるが、短い時間でその影響は消失する。このような場合、促進クリープひずみの算定に当たって、一時的に高い残留応力場の緩和現象を考慮しないとすると、O'Donnell & Porowski法では、基本的には一時的に形成された高い弾性核の応力水準が全寿命にわたって維持されるものとして評価することになる。この高い弾性核の応力水準が $10^4$  hr 持続するとして評価する方法は、残留応力の緩和を適切に取り入れており合理的な評価結果を与える。

図3.4.18は、温度 $550^\circ\text{C}$ の場合の累積非弾性ひずみの結果である。本規定では評価応力水準は、弾性核応力に安全係数1.25を乗じた値となっているが、図3.4.18では安全係数1.25は材料定数のばらつきを考慮したものであるとの立場から、これを除いた評価応力水準によって累積非弾性ひずみを算定している。同図より本評価法は安全側となっていることがわかる。

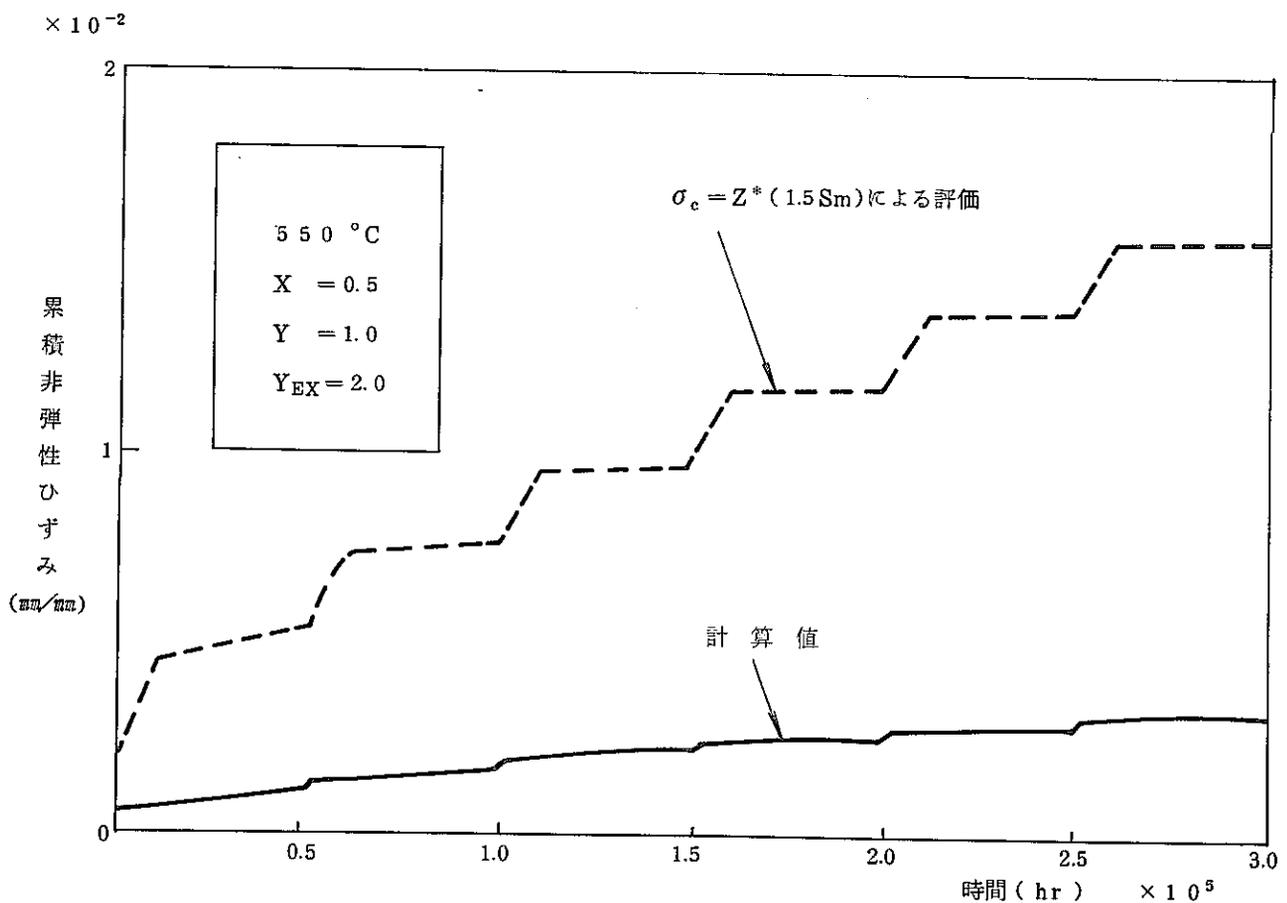


図3.4.18 累積非弾性ひずみ (SUS304,  $550^\circ\text{C}$ )

17 本方針は、ひずみの制限及びクリープ疲労損傷の制限において、一般規定とともに高速原型炉の荷重条件の特徴を勘案して一定の条件が満たされる場合に適用できる特別な規定（「長期1次応力が低い場合」及び「クリープ効果が顕著でない場合」）を設けている。

3.4.2 (1) 3) は、ひずみの制限において、この特別な規定を一般規定の代替とすることができることを定めたものである。

この特別な規定の考え方は次のとおりである。

金属温度が第1種機器に関する「告示」の適用温度範囲を超える領域を、材料のクリープ特性を考慮すべき領域として高温領域と呼んでいるが、この領域内においても、温度、高温使用時間、材料、応力の組合せ等により、応力挙動又はクリープ効果は異なったものとなる。本方針では、このような条件の違いによって生じる応力挙動又はクリープ効果の差異に基づき一般規定の他に特別な規定として

- (1) 長期1次応力が低い場合
  - (2) クリープ効果が顕著でない場合
- を定めている。

これら特別な規定は、各々の領域毎に合理的な規定を与えることを目指しており、特に高速原型炉第1種機器が置かれる条件（内圧が低く、熱応力が大きい）を考慮して、そこでの設計評価法の詳細化、合理化がはかられている。長期1次応力が低い場合とは、長期1次応力が低い場合における応力ひずみ挙動は2次応力のみの場合とほぼ同じ挙動をすることに注目し、ひずみの評価及びクリープ疲労の評価等を規定しようとするものである。また、クリープ効果が顕著でない場合とは、ASME Code Case N-47のT-1325 TEST No.4と基本的には同一であり、クリープ効果がある一定値以下で十分に評価できるような条件について、告示の規定に類示した簡素な評価方法を規定しようとするものである。

この領域区分の考え方は、「ひずみの制限」および「クリープ疲労損傷の制限」等に適用され、「1次応力の制限」および「特別な応力制限」には領域区分は適用されない。

長期1次応力が低い場合及びクリープ効果が顕著でない場合の内容を一般規定と比較して表3.4.6に示す。

表3.4.6に示されるように、一般規定は、ASME Code Case N-47と同様な規定であるが、一般には長期1次応力の存在は2次応力の挙動に影響を及ぼすため、一般規定による評価を行うにあたっては、以下の点に注意を払う必要がある。

表 3.4.6 各 領 域 の 内 容

	一 般 規 定	長期 1 次応力が低い場合	クリープ効果が顕著でない場合
判定基準	一般的な場合	長期 1 次応力強さが, $S_{LP}$ 以下の場合	1.5 $S_m$ の一定の応力が作用してもクリープ損傷係数 $\leq 0.1$ 及びクリープひずみ $\leq 0.002$ を満足する場合
適用状態	高温領域での一般的な場合	長期 1 次応力が小さく, 温度がそれほど高くない場合	「告示」の適用温度範囲をわずかしか超えないか, あるいは高温持続時間が短い場合
特 徴		2 次応力の挙動に及ぼす長期 1 次応力の影響は軽微である。	クリープ効果は十分軽微である。
本方針における特記事項	ASME Code Case H-47 とほぼ同等	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 2 次応力の再分類のしかたを規定</li> <li>○ 弾性追従の判定法・評価法を規定</li> <li>○ ひずみ範囲評価において公称ひずみの拡大の評価方法を規定</li> <li>○ クリープ損傷評価において 2 次応力の緩和過程におけるクリープ損傷係数を規定</li> </ul>	長期 1 次応力が低い場合に近い評価を行う。但し ASME Code Case N-47 T-1435 と同様に, 1 次及び 2 次応力に伴うクリープ損傷係数は定額値とする。
そ の 他		高速原型炉第 1 種機器は大部分がこの領域にある。	通常運転時の温度が相対的に低く, 限定された時間だけ高温になる機器に適用する。

(1) 弾性追従が顕著な2次応力は、ひずみの制限及びクリープ疲労損傷の制限において1次応力として取扱う必要がある。設計者は対象とする機器の形状・使用される条件(温度・時間・荷重要因等)を考慮して、2次応力の再分類を適切に行わなければならない。

(2) クリープ疲労損傷の制限において設計者は上記と同様、対象とする機器の形状・使用される条件を考慮して、クリープ損傷算出法を適用するようにしている。

長期1次応力が低い場合は、上記に対する適切な手法を具体的に規定しているとともに、2次応力の緩和挙動を考慮して、クリープ損傷算出法を規定している。

一方、クリープ効果が顕著でない場合は、告示の適用温度範囲を僅かしか上まわらないか又は高温での使用時間が比較的短く、クリープ特性の影響が軽微である使用条件における評価の合理化・簡素化をはかっている。クリープ効果が顕著でない場合は、いわば、クリープ特性を無視できる告示の適用範囲に隣接する条件に対する規定であり、告示の規定と、クリープ特性を本格的に考慮した高温構造設計法の中間的規定を構成する。従って規定を構成するにあたっては告示の規定の外挿又は高温側での規定からの内挿の選択があるが、概して本方針では高温側の長期1次応力が低い場合に準じて定められている。

クリープ効果が顕著でない場合は、応力状態とは無関係に使用温度及び高温使用時間のみから適合の可否が判定される。一方、長期1次応力が低い場合は、当該部位における長期1次応力が使用温度及び高温使用時間から定まる制限値 $S_{LP}$ を上まわらないかどうかで適合が判定される。従って条件によっては、どちらの判定条件も満足する場合がある。このような場合には評価はいずれの手法を用いても良い。

18 3.4.2 (2) 1)は、「長期1次応力が低い場合」の定義を示したものである。

ここで、長期1次応力が低い場合を定める条件 $S_{LP} = \text{Min} [ S_{rH}, S_g / g ]$ のうち $S_{rH}$ は初期応力を $1.5 S_m$ とし、単純な応力緩和過程を想定して求められる緩和応力強さである。逆にいえば $S_{rH}$ 以下の応力が常に存在したとしても、生ずるクリープひずみは、 $(1.5 S_m - S_{rH}) / E \leq 0.001$ よりさらに小さな値となる。すなわち許容される長期1次応力単独では、寿命全期間を通じ生ずるクリープひずみが、極めて僅かなものとなる事を規定している。

一方、 $S_g / g$ はクリープ損傷評価に当て想定した応力緩和挙動を保証するための条件であり後述する(付録D.2の解説を参照)。

長期1次応力が低い場合のひずみの制限の規定には、次のような特徴がある。

- (a) 2次応力の再分類方法を規定している。
- (b) 弾性追従ひずみの算出法を規定している。
- (c) 1次及び2次応力範囲に対する追加規定を設けている。

19 3.4.2 (2)2) はひずみの制限の適用に当って、長期1次応力が低い場合を対象として2次応力の再分類の方法を具体的に規定したものである。

20 3.4.2 (2)3) a) のただし書は、2次応力の再分類によって若干の弾性追従を伴う応力、と分類されたものによる弾性追従ひずみの上限値が、付録Bによって具体的に定めることができることを示したものである。

21 3.4.2 (2)3) ) は、長期1次応力が低い場合のひずみの制限における1次及び2次応力範囲に対する追加規定である。

本方針では、長期1次応力が低い場合における2次応力の再分類、弾性追従ひずみの算出、クリープ疲労損傷の制限におけるひずみ範囲の算定、1次及び2次応力の応力緩和の想定等において、2次応力の挙動について、一定程度の弾性追従を考慮している。ひずみの制限における1次及び2次応力範囲に対する追加規定は、そこで想定する弾性追従の程度が妥当であることを保証する規定であるとともに、1次及び2次応力による過大なひずみの発生を防止を規定したものである。

本規定における  $S_n \leq 3 \overline{S_m}$  は図 3.4.19 に示すように高温におけるシェイクダウン基準である。

ここで、 $3 \overline{S_m}$  は、応力緩和を考慮した弾性シェイクダウン条件といふことができ告示の規定するクリープ特性が無視しうる温度領域における弾性シェイクダウン条件  $3 \overline{S_m}$  に対応する。また、地震荷重による1次及び2次応力範囲  $S_n^*$  については地震の継続時間における応力緩和は無視できることから告示と同一のシェイクダウン基準を適用している。

なお、本規定では告示がシェイクダウン基準を一つの日安としながらも、シェイクダウン基準が満足されない場合の救済規定として簡易弾塑性解析を行うことを許容しているのと同様に、 $S_n$  が  $3 \overline{S_m}$  を超えた場合の規定として次の2式が満足すれば良いとしている。

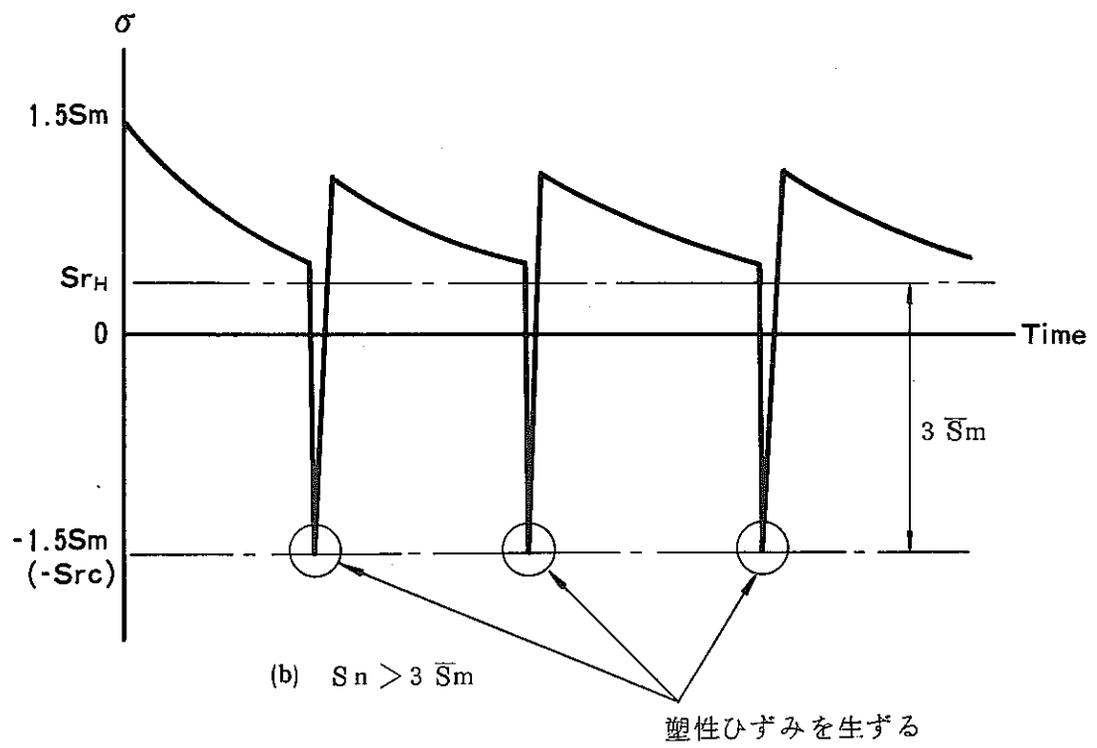
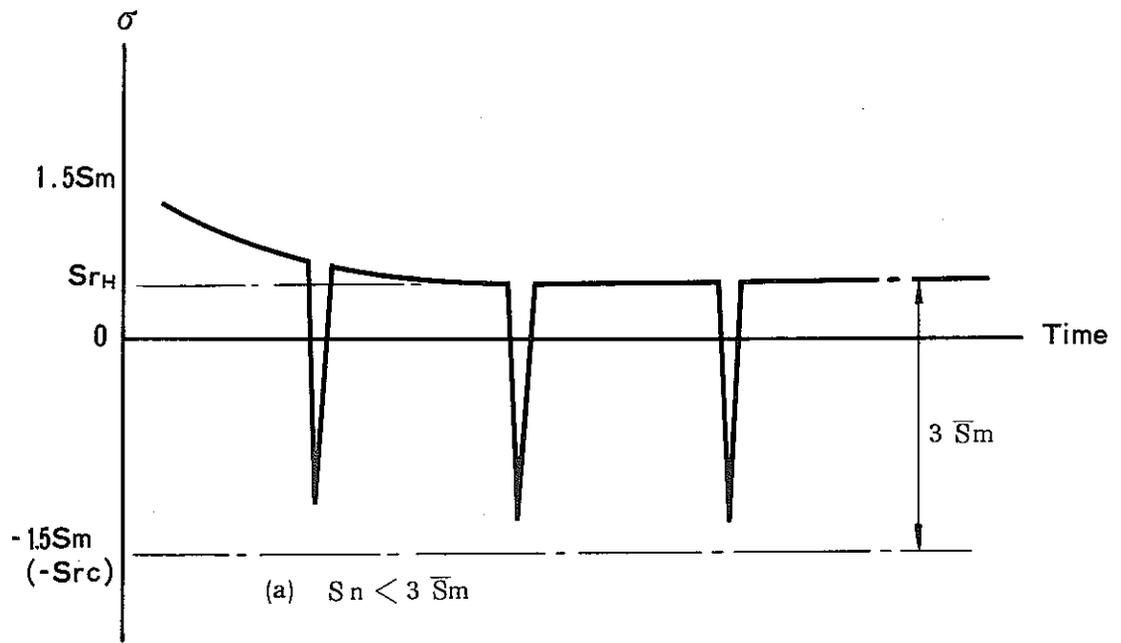


図 3. 4. 19 高温におけるシェイクダウン基準

$$S_n \leq \beta_s (3S_m) \quad \beta_s = 2.5 \quad (79)$$

$$S_n' \leq 3S_m \quad (80)$$

ここで(79)式に相当する制限は告示及びASME Sec IIIにはないが、1次応力が十分小さい場合においても無制限に2次応力を許容しないことを目的として、その上限値を規定したものである。この上限値は図3.4.20に示すエルボの繰返し面内曲げ疲労試験の結果を参照して設定されている。図3.4.20によるとひずみ範囲が著しく大きくなると表面ひずみの増大がみられるが、

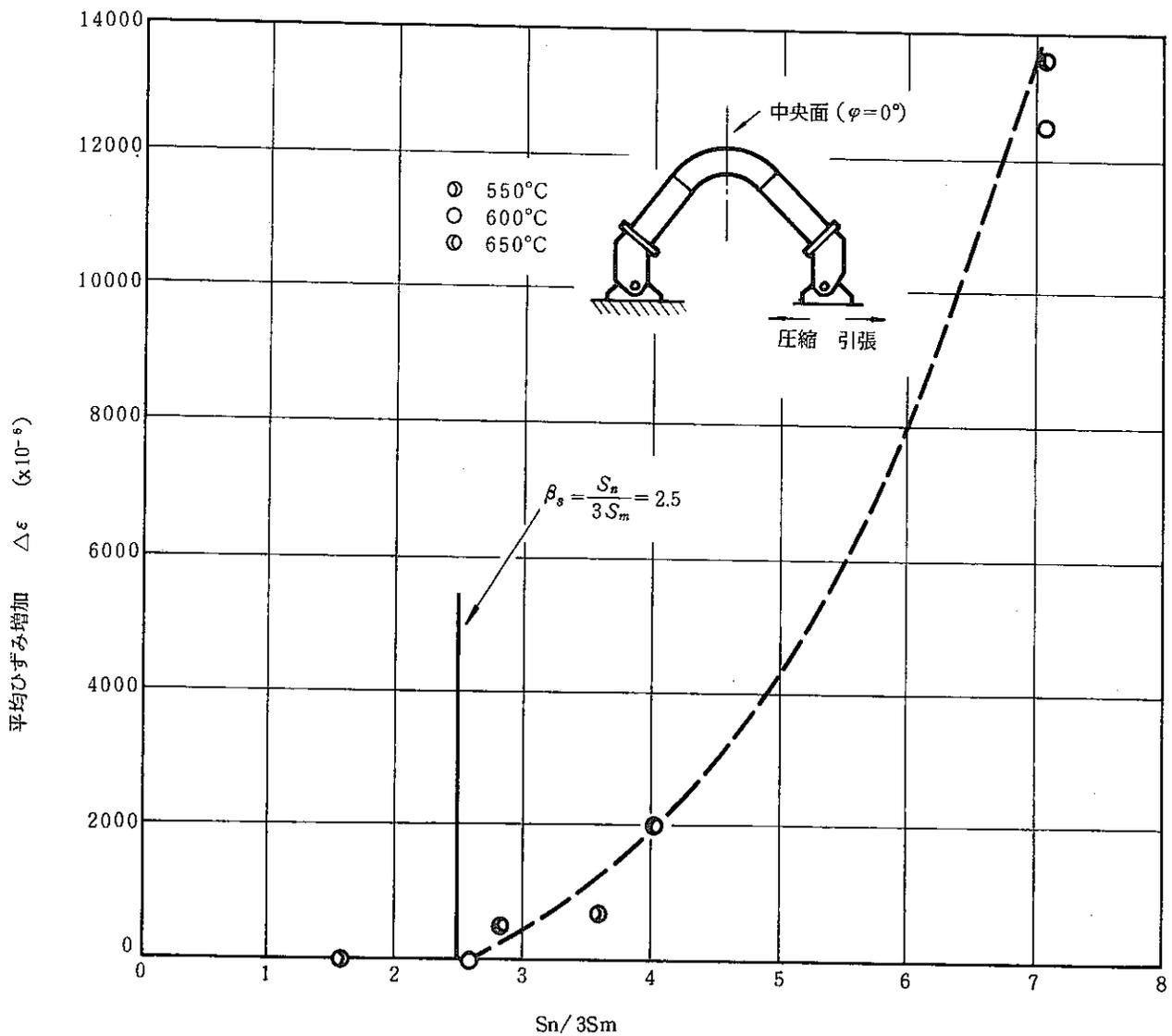


図 3.4.20 繰返し面内曲げ荷重をうけるエルボにおけるひずみの増大

$$S_n \leq 2.5 \times 3S_m$$

(81)

の領域では繰返しに伴い表面ひずみの増大はみられない。(79)式は、同実験結果に基づき(81)式において、 $3S_m$ をクリーブ効果を考慮したシェイクダウン基準値 $\overline{3S_m}$ に置換えたもので、2次応力の繰返しによる進行性ひずみの発生を制限するものである。

(80)式は告示及びASME SecⅢの簡易弾塑性解析適用の条件と同等であり、 $3S_m$ を $\overline{3S_m}$ で置換えた制限となっている。即ち、弾性追従が著しくない熱曲げ応力を除く1次及び2次応力範囲をクリーブ効果を考慮したシェイクダウン条件内に制限し、本方針での想定を上回る弾性追従を防止するものである。

22 3.4.2(3)1)は、「クリーブ効果が顕著でない場合」の定義を示したものである。

(3.4.23)式は、設計上考慮する降伏応力 $1.5S_m$ の応力が常に作用していると仮定しても、全寿命期間を通じての累積クリーブ損傷係数は0.1以下であることを示している。

(3.4.24)式は、設計上考慮する降伏応力 $1.5S_m$ の応力が常に作用していると仮定しても、全寿命期間を通しての累積クリーブひずみが、曲げひずみに対する累積非弾性ひずみの制限である2%に対して、十分に小さな値として0.002以下であることを示している。

23 3.4.2(3)2)は、クリーブ効果が顕著でない場合に、一般規定の代替とすることができる制限式を定めたものであり、次の2規定から成っている。

- (1) 告示の熱応力ラチェットの制限規定の準用
- (2) 長期1次応力が低い場合の $S_n$ ,  $S_n^*$ ,  $S_r$ に対する制限の準用

24 3.4.2(3)2)a)は、告示の熱応力ラチェットの制限規定を準用することを定めており一般規定又は長期1次応力が低い場合の累積非弾性ひずみの制限にかわるものである。クリーブ効果が顕著でない場合は、促進クリーブひずみは十分小さくなる事が予想されるため、1次応力と2次応力の組合せによる進行性ひずみの防止の規定として告示第13条第1項第1号へに規定される熱ラチェット制限を準用している。

但し告示は適用対象を運転状態Ⅰ及びⅡに限定しているが、本方針では、クリーブ温度域では残留応力に注意する必要があることを考慮して適用対象を運転状態Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ及び試験状態としている。

25 3.4.2(3)2)b) は、長期1次応力が低い場合の  $S_n$ ,  $S_n^*$ ,  $S_n'$  に対する制限の準用を定めており、クリープ効果が顕著でない場合の2次応力の取扱い、クリープ疲労損傷評価等を長期1次応力が低い場合の規定を準用して行うことの妥当性を保証するとともに、同時に1次及び2次応力により過大なひずみが生ずることの防止をはかったものである。

26 3.4.3は、運転状態Ⅳの短期荷重が繰返し性を有する場合 ( $S_2$  地震を想定) における進行性変形の制限を定めたものである。

本方針では繰返し短期荷重による(1次+2次)応力範囲をYパラメータ、長期荷重による1次応力をXパラメータとして、Breeモデルから求まる熱ラチェット限界と運転状態Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ及び試験状態に対する(1次+2次)応力範囲の制限値に対応する  $\beta_s$  ( $3\overline{S_m}$ ) の範囲内であれば、進行性変形は防止されることができるとした。

図3.4.21は、運転状態Ⅳのひずみの制限と試験結果との関係である。同図に示すように、設計許容限界を満足すれば、例えば10%ひずみとなる繰返し数は極めて大きく、実際に想定する繰返し数を十分に上回るものである。

記号	材 料	負 荷 形 式	
		定 常	くりかえし
△	SUS 304	ねじり	軸方向
○	SUS 316	内 左	軸方向
◇	SUS 316L	軸方向	ねじり
◊	SUS 304L	”	”

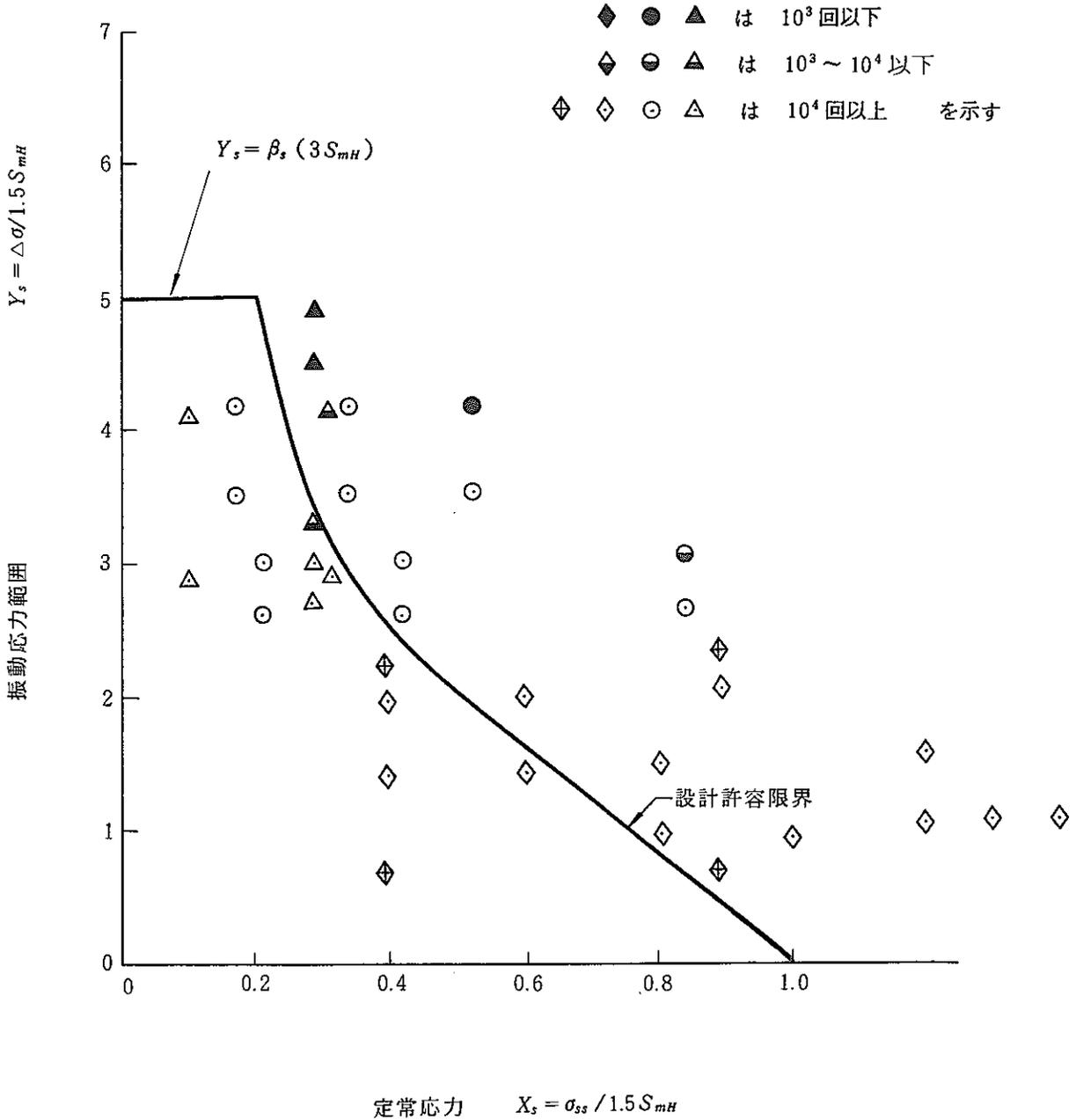


図 3. 4. 21 10%ひずみを生じるくり返し数

### 3.5 クリープ疲労損傷の制限

#### 3.5.1 適用範囲

- (1) 3.5の規定は運転状態Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ及び試験状態に対して適用するものとする。
- (2) 使用中の金属温度が告示の適用温度範囲を超える場合は，原則としてクリープ疲労解析を行うものとする。
- (3) 弾性解析により，3.5.3の規定を適用する場合，3.5.3(1)，(2)又は(3)の規定はそれぞれ3.4.2(1)2)，(2)又は(3)の規定を満足する場合に適用することができる。ここに，(3.4.1)式の適用において左辺第2項の対象とする応力から壁厚方向温度分布による2次応力を除外することによりこれに適合する場合は，3.4.2(1)2) a)の規定を満足するものとみなすことができる。

#### 3.5.2 一般規定

- (1) 累積疲労損傷係数 $D_f$ と累積クリープ損傷係数 $D_c$ の和を次式により制限する。

$$D_f + D_c \leq D \quad (3.5.1)$$

$D$ ：累積クリープ疲労損傷係数の制限値であって，付録Cにより定めるものとする。

- (2) 累積疲労損傷係数 $D_f$ は次式により定めるものとする。

$$D_f = \sum_i \frac{N_i}{N_{di}} \quad (3.5.2)$$

$n_i$ ：サイクル中の最高金属温度が $T_i$ ，相当ひずみ範囲が $\epsilon_{ti}$ であるひずみサイクルの繰返し回数

$N_{di}$ ：温度 $T_i$ ，相当ひずみ範囲 $\epsilon_{ti}$ に対して別表1.11(別図1.8)から別表1.13(別図1.10)に定める許容繰返し回数。考えているひずみサイクルの繰返しひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ により，次のように適用する別表(別図)を定めるものとする。

繰返しひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ (mm/mm/sec)	別表 (別図)
$10^{-3}$ 以上	別表 1.11 (別図 1.8)
$10^{-6}$ 以上	別表 1.12 (別図 1.9)
任意	別表 1.13 (別図 1.10)

(3) 累積クリープ損傷係数  $D_c$  は次の方式により定めるものとする。

$$D_c = 2 \int_0^{t^*} \frac{dt}{T_d} \quad (3.5.3)$$

$t^*$  : 1.2.1(2)に定める高温使用時間を下回らない時間 (hr)

$T_d$  : 各時刻における相当応力及びその時刻における金属温度に対して別表 1.5 (別図 1.5) に定める許容時間 (hr)

### 3.5.3 弾性解析による場合

#### (1) 一般規定

1) 累積疲労損傷係数  $D_f$  及び累積クリープ損傷係数  $D_c$  の和を (3.5.1) 式により制限する。

2) 累積疲労損傷係数  $D_f$  は (3.5.2) 式により定めるものとする。ただし、告示の適用温度範囲内のひずみサイクルにあつては、告示の該当条項に定めるところにより、「疲れ累積係数」を算定し、これを  $D_f$  に加算するものとする。

ひずみ範囲  $\epsilon_t$  は次の a) から f) により定めるものとする。ただし、告示の適用温度範囲内のひずみサイクルは除外するものとする。

a) 設計仕様書において特定の負荷順序が規定されている場合は、その負荷順序によりひずみ範囲及びその繰返し回数を算定するものとする。

設計仕様書において事象の発生回数のみが規定されている場合は、各事象について応力解析を行った後、次のイ) からハ) に定める組合せ法により、ひずみ範囲及びその繰返し回数を定めるものとする。

イ) 各事象間のすべての組合せの中から最大のひずみ範囲  $\epsilon_{t1}$  を与える組合せを選定し、その繰返し回数  $n_1$  を定める。

ロ) 与えられた事象の発生回数からイ) の組合せに消費した回数を差引いた残余の発生回数について、各事象間のすべての組合せの中から最大のひずみ範囲  $\epsilon_{t2}$  を与える組合せを選定し、その繰返し回数  $n_2$  を定める。

ハ) 以下同様にして、与えられた発生回数を完全に消費するまで順次  $\epsilon_{ti}$  及び  $n_i$  を定める。

b) 上記 a) に定める評価すべきひずみサイクルについて、ひずみ範囲を定める 2 つの極値状態が生じる時点 1 及び 2 を適切に選定する。

c) 評価すべきひずみサイクルの時点  $k$  ( $k = 1$  又は  $2$ ) における公称ひずみ  $\epsilon_n^k$  を (3.5.4) 及び (3.5.5) 式により定めるものとする。(時点  $k$  における状態を上つき添字  $k$  を付して表わす。)

$$\epsilon_n^k = \epsilon_p (\epsilon_p^k, \sigma_{LC}^k) + E^{-1} \cdot (\sigma_{LC}^k + \sigma_{SC}^k) \quad (3.5.4)$$

$$\epsilon_n^k = \epsilon_0 (\langle \sigma_{LC}^k \rangle) - \langle \sigma_{LC}^k \rangle / E \quad (\epsilon_p^k \geq 0) \quad (3.5.5)$$

(3.5.4) 及び (3.5.5) 式における関数記号の意義は次に定めるところによる。

$\epsilon_p (\epsilon_p, \sigma)$  : 相当塑性ひずみ  $\epsilon_p$ , 応力  $\sigma$  に対して全ひずみ理論により算定する塑性ひずみ (テンソル)

$\epsilon_0 (\langle \sigma^k \rangle)$  : 時点  $k$  における金属温度において、応力強さを  $\langle \sigma^k \rangle$  とするとき、別図 1.11 に定める 0 hr の等時応力—ひずみ曲線により定められる全ひずみ

その他の記号の意義は次に定めるところによる。

$\sigma_{LC}$  : 荷重制御型応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )。荷重制御型応力とは長期及び短期の 1 次一般膜応力, 1 次局部膜応力, 1 次曲げ応力及び多量の弾性追従を伴う 2 次応力をいう。

$\sigma_{SC}$  : 弾性追従を伴わない 2 次応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )。若干の弾性追従を伴う 2 次応力にあつては、適切な補正を加えることにより、基本的には  $\sigma_{SC}$  と同等に取扱うことができる。

$E$  : 時点  $k$  における金属温度に対して別表 1.8 に定める値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$E$  : 上記  $E$  及び時点  $k$  における金属温度に対して別表 1.9 に定めるポアソン比により定める弾性係数テンソル

d) 時点 1 と時点 2 の間における相当公称ひずみ範囲  $\Delta \epsilon_{eq}$  を次の方法により定める。

イ)  $\epsilon_p^1 = 0$  のとき :  $\Delta \epsilon_{eq} = (\epsilon_n^2 - \epsilon_n^1)_{eq} \quad (3.5.6)$

ロ)  $\epsilon_p^1 > 0$  のとき : 時点 1 から時点 2 への応力の変化 (負荷又は除荷) に基づき、適切な方法により  $\Delta \epsilon_{eq}$  を定めるものとする。ロ) の場合に対して

( 3.5.6 ) 式を用いることができる。

記号  $(\boldsymbol{\varepsilon})_{\text{eq}}$  の意義はひずみ  $\boldsymbol{\varepsilon} (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})$  に対して次式により定めるものとする。

$$(\boldsymbol{\varepsilon})_{\text{eq}} = (\sqrt{2}/3) \{ (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + (3/2) (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \}^{1/2} \quad (3.5.7)$$

ただし、 $\boldsymbol{\varepsilon}_n^2$  の主ひずみ  $(\varepsilon_1^2, \varepsilon_2^2, \varepsilon_3^2)$  の方向が  $\boldsymbol{\varepsilon}_n^1$  の主ひずみ  $(\varepsilon_1^1, \varepsilon_2^1, \varepsilon_3^1)$  の方向と同一であって、その間に主ひずみ方向の回転がない場合は次式により  $\Delta\varepsilon_{\text{eq}}$  を定めることができる。

$$\Delta\varepsilon_{\text{eq}} = (\sqrt{2}/3) \{ \{ (\varepsilon_1^2 - \varepsilon_2^2) - (\varepsilon_1^1 - \varepsilon_2^1) \}^2 + \{ (\varepsilon_2^2 - \varepsilon_3^2) - (\varepsilon_2^1 - \varepsilon_3^1) \}^2 + \{ (\varepsilon_3^2 - \varepsilon_1^2) - (\varepsilon_3^1 - \varepsilon_1^1) \}^2 \}^{1/2} \quad (3.5.8)$$

e) 時点 1 と時点 2 の間における公称ひずみ範囲  $\varepsilon_n$  を次式により定める。

$$\varepsilon_n = \frac{1.5}{1 + \nu} \Delta\varepsilon_{\text{eq}} \quad (3.5.9)$$

$\nu$  : 時点 1 及び時点 2 の金属温度に対して、別表 1.9 に定める値の平均値。告示の適用温度範囲の金属温度に対しては  $\nu = 0.3$  とする。

f) ひずみ範囲  $\varepsilon_t$  を次の方法により定める。

$$\varepsilon_t = (S^*/\bar{S}) K^2 \varepsilon_n + K\varepsilon_c + K_T \varepsilon_F \quad (3.5.10)$$

$\varepsilon_n$  : 3.5.3(1)2) e) に定めるところによる。

$\varepsilon_c$  : 長期荷重制御型応力により考えているひずみサイクルにおいて生じる相当クリープひずみ。 $\varepsilon_c$  は考えているひずみサイクルにおける最大長期荷重制御型応力強さ、最高金属温度及び経過時間に対して別図 1.11 に定める等時応力-ひずみ曲線における該当曲線と 0 hr の曲線の間のひずみ差として定めることができる。

$\varepsilon_F$  : 考えているひずみサイクルにおけるピーク熱ひずみ範囲であって、ピーク熱応力強さ範囲に基づき、修正ポアソン比を用いて算定するものとする。

$\epsilon_F$  の算定に用いる修正ポアソン比  $\bar{\nu}$  は次のとおりとする。

$$\bar{\nu} = 0.5 - (0.5 - \nu) \cdot (3\bar{S}_m / (E\epsilon_{ta})) \quad (\bar{\nu} \geq \nu) \quad (3.5.11)$$

$\nu$  : 考えているひずみサイクル中の最高金属温度に対して別表 1.9 に定める値

$3\bar{S}_m$  : 考えているひずみサイクルに対して (3.4.21) 又は (3.4.22) 式により定める値 (kg/mm<sup>2</sup>)

$E$  : 考えているひずみサイクル中の最高金属温度に対して別表 1.8 に定める値 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\epsilon_{ta}$  : 考えているひずみサイクルの繰返し回数  $n_i$  に対して当該ひずみサイクル中の最高金属温度において  $N_{di}$  の算定に用いる別表 (別図) に定める許容ひずみ範囲

$K$  : 弾性解析に基づくピーク応力強さと 1 次及び 2 次応力強さの比により定める応力集中係数

$K_T$  : ピーク熱ひずみに関する弾性応力集中係数

$S^*$  及び  $\bar{S}$  は次式により定めるものとする。

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_n \leq S_{rH} / E \text{ のとき} \\ \epsilon_n > S_{rH} / E \text{ のとき} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} S^* = E\epsilon_n \\ S^* = S(\epsilon_n - S_{rH}/E) + S_{rH} \end{array} \quad (3.5.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K\epsilon_n \leq S_{rH} / E \text{ のとき} \\ K\epsilon_n > S_{rH} / E \text{ のとき} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \bar{S} = KE\epsilon_n \\ \bar{S} = S(K\epsilon_n - S_{rH}/E) + S_{rH} \end{array} \quad (3.5.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K\epsilon_n \leq S_{rH} / E \text{ のとき} \\ K\epsilon_n > S_{rH} / E \text{ のとき} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \bar{S} = KE\epsilon_n \\ \bar{S} = S(K\epsilon_n - S_{rH}/E) + S_{rH} \end{array} \quad (3.5.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K\epsilon_n \leq S_{rH} / E \text{ のとき} \\ K\epsilon_n > S_{rH} / E \text{ のとき} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \bar{S} = KE\epsilon_n \\ \bar{S} = S(K\epsilon_n - S_{rH}/E) + S_{rH} \end{array} \quad (3.5.15)$$

$S(x)$  : 考えているひずみサイクル中の最高金属温度において、ひずみ  $x$  に対して別図 1.11 の 0 hr の等時応力—ひずみ曲線により定める応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

$S_{rH}$  : 3.4.2(2)1) に定めるところによる。

$E$  : 3.5.3(1)2) f) に定めるところによる。

ただし (3.5.10) 式において右辺第 1 項を次式により定める  $\epsilon_M$  に置換えることができる。

$$\epsilon_M = \epsilon_o(S) + S_{rH}/E \quad (3.5.16)$$

ここに応力強さ  $S$  ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ ) は次の方程式の解である。

$$(S + S_{rH}) \{ \epsilon_0(S) + S_{rH}/E \} = S^* K^2 \epsilon_n \quad (3.5.17)$$

(3.5.16) 及び (3.5.17) 式における記号  $\epsilon_0(\dots)$  の意義は 3.5.3(1) 2) c) に定めるところによる。その他の記号は 3.5.3(1) 2) f) に定めるところによる。

3) 累積クリープ損傷係数  $D_0$  は次の方式により定めるものとする。

$$D_0 = D_{CN} + D_{CP} \quad (3.5.18)$$

ここに  $D_{CN}$  は 1 次及び 2 次応力に伴うクリープ損傷係数を意味し、 $D_{CP}$  はピーク応力に伴うクリープ損傷係数を意味する。

$D_{CN}$  及び  $D_{CP}$  は、それぞれ次の a) 及び b) により定めるものとする。

$$a) D_{CN} = \sum_k (D_{CN})_k \quad (D_{CN} \geq 0.1) \quad (3.5.19)$$

ここに  $(D_{CN})_k$  はひずみサイクル  $k$  における 1 次及び 2 次応力に伴うクリープ損傷係数であって、次の 1) から 4) により定めるものとする。

1) ひずみサイクル  $k$  の最高及び最低壁厚平均金属温度に対して別表 1.4

(別図 1.4) に定める値の平均値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ ) を  $S_y|_k$  とする。

2) ひずみサイクル  $k$  の各時刻における応力強さ  $\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle$  を算定する。

3) ひずみサイクル  $k$  の任意の時刻において

$$\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle \leq S_y|_k \quad (3.5.20)$$

が満足される場合は  $S_k$  を次式により定める。

$$S_k = \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle \quad (3.5.21)$$

4) 3) 以外の場合は次式により  $S_k$  を定める。

$$S_k = \text{Min} \{ 1.25 S_y|_k, \text{Max} [ (\langle P_m \rangle + 0.5 \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle_R), \langle P_L + P_b + Q \rangle ] \} \quad (3.5.22)$$

記号  $\text{Max} [ x, y ]$  は  $x$  又は  $y$  のいずれか大きい方の値を表わすものであり、以下本方針においてこの定義により本記号を用いる。

5) 3) 又は 4) に定める  $S_k$  が付録 D により定める応力水準  $S_g$  ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ ) を下回る場合は  $S_k = S_g$  とする。

へ) ハ), ニ) 及びホ) により定める  $S_k$  に対して, 別表 1.5 (別図 1.5) により使用分数を定め, これを係数 2.0 を乗じることにより,  $(D_{CN})_k$  を定める。ここにハ) 及びホ) により定める  $S_k$  に関して, (3.5.3) 式により  $(D_{CN})_k$  を定めることができる。この場合は  $t^*$  をひずみサイクル  $k$  における高温使用時間 (hr) に読み替えるものとする。

$$b) D_{CP} = \sum_k (n_k D_k^{**}) \quad (3.5.23)$$

$n_k$  : ひずみ範囲が  $\epsilon_{tk}$  であるひずみサイクル  $k$  の繰返し回数。 $\epsilon_{tk}$  は 3.5.3(1)2) に定めるところによる。

$D_k^{**}$  はひずみサイクル  $k$  のひずみ範囲  $\epsilon_{tk}$  に対するクリープ損傷係数であって, 付録 F により定めることができる。

(2) 長期 1 次応力が低い場合

- 1) 「長期 1 次応力が低い場合」の定義は 3.4.2(2)1) に定めるところによる。
- 2) 長期 1 次応力が低い場合は 3) に定める累積疲労損傷係数  $D_f$  及び 4) に定める累積クリープ損傷係数  $D_c$  の和を (3.5.1) 式により制限する。
- 3) 累積疲労損傷係数  $D_f$  は (3.5.2) 式により定めるものとする。ただし, ひずみ範囲  $\epsilon_t$  は次の a) から d) により定めるものとする。
  - a) 評価すべきひずみサイクルを 3.5.3(1)2) a) により定める。
  - b) 評価すべきひずみサイクルのひずみ範囲を定める 2 つの極値状態を適切に選定する。
  - c) 3.4.2(2)3) b) に定めるところにより両極値状態間の 1 次及び 2 次応力強さ範囲  $S_n$  又は  $S_n^*$  を算定する。
  - d) ひずみ範囲  $\epsilon_t$  の算定
    - イ) 公称ひずみ範囲  $\epsilon_n$  を次式により定める。

$$\epsilon_n = \frac{S_n}{E} \quad \text{又は} \quad \epsilon_n = \frac{S_n^*}{E} \quad (3.5.24)$$

$S_n, S_n^*$  : 考えているひずみサイクルに対して 3.5.3(2)3) c) により定める 1 次及び 2 次応力強さ範囲 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$E$  : 3.5.3(1)2) f) に定めるところによる。

ロ) ひずみ範囲  $\epsilon_t$  を次式により定める。

$$\epsilon_t = K_E \epsilon_n + K_T \epsilon_F \quad (3.5.25)$$

$\epsilon_n$  : 1) に定める公称ひずみ範囲

$K_E$  : ひずみ集中係数

$\epsilon_F, K_T$  : 3.5.3(1)2) f) に定めるところによる。

ハ)  $K_E$  は次式により定めるものとする。

$$\begin{cases} S_n \leq 3\bar{S}_m \text{ のとき } K_E = (S^*/\bar{S})K^2 & (3.5.26) \\ S_n > 3\bar{S}_m \text{ のとき } K_E = \text{Max}[(S^*/\bar{S})K^2, KK'_0] & (3.5.27) \end{cases}$$

$$K'_0 = 1 + (q-1) \{ 1 - (3\bar{S}_m/S_n) \}, \quad q=3.0 \quad (3.5.28)$$

$S^*$  及び  $\bar{S}$  は, (3.5.12) 式から (3.5.15) 式により定めるものとする。

ただし, これらの式における  $\epsilon_n$  及び  $E$  は 3.5.3(2)3) d) 1) に定めるところによるものとする。

$\epsilon_n$  を  $S_n^*$  によって定める場合は (3.5.26) 式において,  $S_n$  を  $S_n^*$  に,  $3\bar{S}_m$  を  $3S_{mH}$  に読み替え, (3.5.12) 式から (3.5.15) 式において  $S_{rH}$  を  $1.5S_{mH}$  に読み替えるものとする。

その他の記号の意義は次のとおり。

$S_n, S_n^*$  : 3.5.3(2)3) d) 1) に定めるところによる。

$3\bar{S}_m, S_{mH}$  : 3.4.2(2)3) b) に定めるところによる。

$K$  : 3.5.3(1)2) f) に定めるところによる。

4) 累積クリープ損傷係数  $D_c$  は (3.5.18) 式により定めるものとする。ただし,  $D_{CN}$  及び  $D_{CP}$  はそれぞれ次の a) 及び b) により定めるものとする。

$$a) \quad D_{CN} = D_{C1} + D_{C2} \quad (D_{CN} \geq 0.1) \quad (3.5.29)$$

$D_{C1}$  及び  $D_{C2}$  はそれぞれ次の 1) 及びロ) により定めるものとする

$$1) \quad D_{C1} = 2 \sum_i \frac{t_i}{t_{di}^*} \quad (3.5.30)$$

$t_i$  : 金属温度  $T_i$  における累積使用時間 (hr)。 $\sum_i t_i$  は 1.2.1(2) に定める高温使用時間を下回ってはならない。

$t_{di}^*$  : 温度  $T_i$  において応力強さ  $S_g$  に対して別表 1.5 (別図 1.5) に定

める許容時間 (hr)。  $S_g$  は 3.4.2 (2) 1) に定めるところによる。

$$\text{ロ) } D_{C2} = D_o^* + \sum_i^{n^*} D_i^* \quad (3.5.31)$$

ここに  $n^*$  は次の条件を満足しないひずみサイクルの回数である。

$$S_n \leq 3 \overline{S_m} \quad (3.5.32)$$

$$3 \overline{S_m} = 3 \overline{S_m} + S_g - S_{rH} \quad (3.5.33)$$

$S_n$ ,  $3 \overline{S_m}$ ,  $S_g$ ,  $S_{rH}$  : 3.4.2 (2) に定めるところによる。

$D_o^*$  及び  $D_i^*$  は 1 次及び 2 次応力に関する緩和クリープ損傷係数であって、付録 E により定めることができる。

b)  $D_{CP}$  は 3.5.3 (1) 3) b) に定めるところによる。ただし、 $\epsilon_{tk}$  は 3.5.3 (2) 3) に定めるところによる。

(3) クリープ効果が顕著でない場合

1) 「クリープ効果が顕著でない場合」の定義は 3.4.2 (3) 1) に定めるところによる。

2) クリープ効果が顕著でない場合は、3) に定める累積疲労損傷係数  $D_f$  及び 4) に定める累積クリープ損傷係数  $D_C$  の和を (3.5.1) 式により制限する。

3) 累積疲労損傷係数  $D_f$  は 3.5.3 (2) 3) に定めるところにより算定するものとする。

4) 累積クリープ損傷係数  $D_C$  は 3.5.3 (2) 4) に定めるところにより算定するものとする。

## 【解 説】

1 3.5 はクリープ疲労損傷の評価法と制限値を定めたものである。高温で繰返し荷重を受ける材料の強度は負荷速度、負荷波形などの時間因子を含む諸量の影響を受ける。例えば、高温での台形波ひずみ保持繰返し試験においては、保持時間が増大すると、破損に至る寿命が低減する。このような高温での時間因子を含む材料の繰返し強度は、総称してクリープ疲労強度と呼ばれる。

高速原型炉第 1 種機器でオーステナイト系ステンレス鋼が使用される場合には、オーステナイト系ステンレス鋼の熱膨張係数がフェライト系鋼等他の材料に比べて大きく、また、

ナトリウムの熱容量が小さいので構造材料の温度変化及び変化率も大きいため、機器に生ずる種々の応力の中で定常的及び過渡的熱応力の占める割合が大きい。従って、原子炉の起動、停止または定常的及び過渡的熱応力を主とする繰返し応力によるクリープ疲労破損を防止することが高速原型炉第1種機器の高温構造設計において必要となる。

- 2 3.5.1はクリープ疲労損傷の制限規定の適用範囲を定めたものである。
- 3 3.5.1(1)は告示の疲れ解析で評価が要求される運転状態Ⅰ及びⅡに加えて高温におけるクリープ疲労評価の重要性から数少ない運転状態Ⅲと試験状態の負荷サイクルも対象とすることを規定したものである。
- 4 3.5.1(2)は使用中の金属温度がクリープ領域に入る場合には運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及び試験状態のすべての負荷サイクルに対してクリープ疲労解析を行うべきことを規定したものである。同規定中「原則として」とは、高温におけるクリープ疲労損傷評価においては、告示で認められている疲れ解析の免除(告示第13条第1項第3号)を適用しないことを意味するものである。
- 5 3.5.1(3)は、弾性解析による場合の3.5.3(1)(一般規定)、3.5.3(2)(長期1次応力が低い場合)及び3.5.3(3)(クリープ効果が顕著でない場合)のクリープ疲労損傷の制限規定の適用条件を定めたものであり、それぞれ3.4の弾性解析によるひずみの制限における対応する場合の規定を満足している必要がある。これは弾性解析によるクリープ疲労損傷の評価において、特に2次応力の弾性追従によるひずみ範囲の拡大及びクリープ損傷の増大に関して、その規定がひずみの制限における規定と対応している必要があるからである。

長期1次応力が低い場合は、本方針3.4.2(2)3)b)の規定が、ひずみ集中係数 $K_{\epsilon}$ を用いたひずみ範囲評価の前提となり、また同規定及び別表2.3注2)の規定が、1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 $D^*$ を算定する上での前提となっている。クリープ効果が顕著でない場合は、ひずみ集中係数 $K_{\epsilon}$ を適切に使用できる前提が3.4.2(3)2)b)の規定となっている。一般規定の場合は、ひずみの制限の規定とクリープ疲労損傷の制限の規定の対応は必ずしも明瞭ではないが、弾性解析によるひずみの制限を満足することを弾性解析によるクリープ疲労損傷の制限の前提としているのは、弾性追従の程度による2次応力の再分類、弾性追従ひずみの算出及び弾性追従の程度に応じた公称ひずみを算出する際の適切な補正等2次応力の取扱いについて、ひずみの制限及びクリープ疲労損傷の制限において長期1次応力が低い場合におけるように整合のとれた取扱いをすべきことを意味する。

したがって、1次及び2次応力が弾性的挙動を呈する条件（（3.4.1）式）への適合にあたり、クリープ疲労損傷の制限においては弾性追従が無視できる壁厚方向温度分布による2次応力は除外してもよい。

- 6 3.5.2はクリープ疲労損傷制限式を、非弾性解析による場合も含めて一般に規定したものである。
- 7 3.5.2(1)はクリープ疲労損傷の制限式であり、ASME Code Case N-47と同様である。これは累積疲労損傷係数と累積クリープ損傷係数を、本方針付録Cに示される累積クリープ疲労損傷係数の制限値Dで制限する方法である。クリープ疲労強度の評価式としては、現在までに様々な形態の実験式で提案されているが、その中で上記制限式を採用したのは、設計基準として用いる上で比較的簡明であり低温設計法との整合性が良いこと、また、各々の損傷を算出する基礎データが充実しており、かつ各々の損傷を妥当に評価すれば総合的に適切な安全裕度が確認されることなどの理由による。
- 8 3.5.2(2)は累積疲労損傷係数の算定法を定めたものである。累積疲労損傷係数は、線形則に基づき繰返し数と許容繰返し数の比の和として算出する。

クリープ疲労を高温疲労として見た場合、必ずしもクリープ損傷だけでは説明しきれないひずみ速度効果が見られるので、多くの場合2重加算となることを理解しながらも、疲労損傷項にひずみ速度効果を含める体系とし、安全側評価が得られるよう配慮している。

別表（別図）には、1鋼種に対し、ひずみ速度を $10^{-3}$  mm/mm/sec（線図A）、 $10^{-6}$  mm/mm/sec（線図B）、 $10^{-8}$  mm/mm/sec（線図C）として求めた3種の設計用疲労線図を用意している。このひずみ速度は、本方針の対象とする高速原型炉の設計における地震、熱過渡、起動停止のそれぞれに伴うひずみ速度をほぼ安全側に包含するものとして定めた値である。本方針を運用するに当たって設計時に対象とするひずみサイクルの繰返しひずみ速度を正確に算定するのは困難であり、先に記した2重加算性及び実際に生ずるひずみ速度を考慮すると、以下に示す方法で使用するのが適切である。

- a) 地震の両振幅でひずみ範囲が定まるひずみサイクル……………線図(A)を適用
- b) ひずみ範囲を定めるひずみ極値の少なくとも1つがプラントの起動停止に伴う時点となるひずみサイクル……………線図(C)を適用
- c) 上記 a) 又は、b) 以外のひずみサイクル……………線図(B)を適用

9 3.5.2.(3)は累積クリープ損傷係数の算定法を定めたものである。クリープ損傷係数は基本的に、高温使用時間中における応力の時刻歴から、クリープ破断時間の逆数の積分値として算定する。本方針の(3.5.3)式において導入している追加安全係数2は、設計クリープ破断応力強さが時間に関して安全係数が1.0であることを前提として、クリープ損傷評価における基本的な安全係数が2.0となるよう設定したものである。

(3.5.3)式は非弾性解析による評価において、そのまま適用されると共に、弾性解析による場合の規定の基礎となっている。弾性解析による場合は材料の非弾性挙動を含めた応力の時刻歴を推定し、(3.5.3)式による損傷値を簡易的に与える方法を規定している。

10 3.5.3は弾性解析によってクリープ疲労損傷評価を行う場合の方法と制限値を規定したものである。弾性解析によるクリープ疲労損傷制限の規定の概要を告示及びASME Code Case N-47と比較しながら表3.5.1に示す。

本方針は、弾性解析に重点を置いた構成となっている。これは、多くの使用実績に基づく弾性解析の手法としての信頼性、事象重ね合せの容易さ、解析費用の低廉さなどの理由によるものである。

弾性解析による設計では、応力を1次応力・2次応力・ピーク応力に区分し、設計法は各応力の挙動特性に応じて規定される。ここで注意を要するのは、2次応力の取扱いである。本方針におけるクリープ疲労損傷の制限では、多量の弾性追従を伴う2次応力は1次応力として評価することを規定するとともに、2次応力として評価するものであっても弾性追従を考慮した評価とすることを規定している。

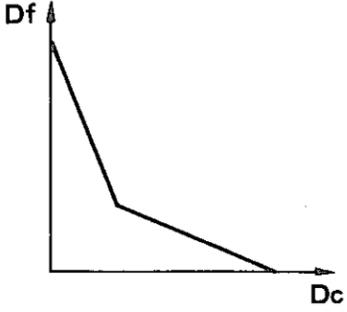
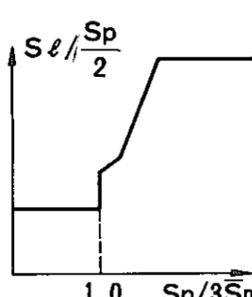
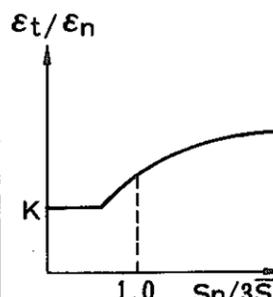
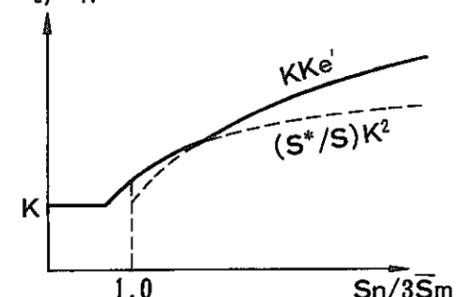
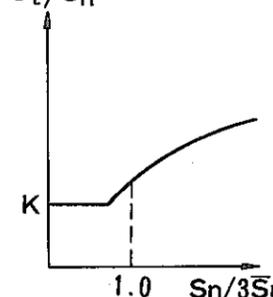
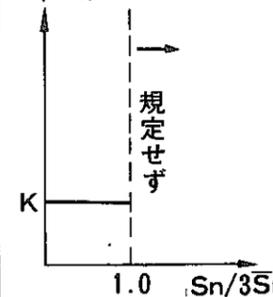
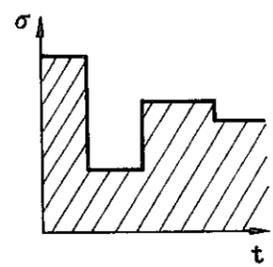
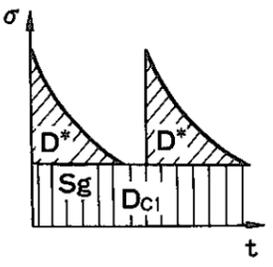
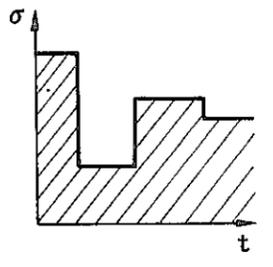
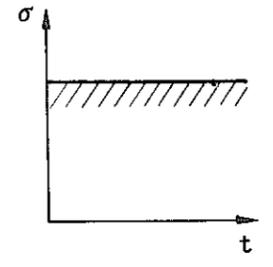
本方針における弾性解析によるクリープ疲労損傷の制限は、一般規定、長期1次応力が低い場合、クリープ効果が顕著でない場合に区分されている。

一般規定に従って設計を行う場合には、設計者は対象とする構造物及び荷重条件を考慮して、適切な弾性追従を考慮した応力再分類、ひずみ範囲の評価を行わなければならない。

長期1次応力が低い場合は、弾性追従パラメータ $q = 3$ <sup>1)</sup>で緩和過程にて0.5%<sup>2)</sup>の非弾性ひずみを生じる2次応力を代表挙動とする弾性追従判定基準及びクリープ疲労評価体系が構成されている。

クリープ効果が顕著でない場合は、本方針の構成に際し実効的降伏応力として想定される $1.5 S_m$ の応力水準が寿命期間中維持されたとしても、クリープ損傷及びクリープひずみ

表 3.5.1 弾性解析によるクリープ疲労損傷の制限の概要(一覧)

	告 示	本 方 針		ASME Code Case N-47		
	$D_f \leq 1.0$ $D_f = \sum \frac{n_i}{N_{d_i}}$	$D_f + D_c \leq D$ $D_f = \sum \frac{n_i}{N_{d_i}}$ $D_c = 2 \int \frac{dt}{T_d(\sigma)}$		$D_f + D_c \leq D$ 但し弾性解析によれば $D=1.0$ $D_f = \sum \frac{n_i}{N_{d_i}}$ $D_c = \int \frac{dt}{T_d(\sigma/K')}$ $K'=0.9$		
		一 般 規 定	長期1次応力が低い 場合 $\langle P_L + P_b \rangle \leq S_{LP}$ $S_{LP} = \text{Min}[S_{g/g}, S_{RH}]$	クリープ効果が顕著で ない場合 $2 \sum \frac{t_i}{T_d(1.5S_m)} \leq 0.1$ $\sum \epsilon^c (1.5S_m) \leq 0.002$	一 般 規 定	クリープ効果が顕著で ない場合 $\sum \frac{t_i}{T_d(1.5S_y)} \leq 0.1$ $\frac{1.35S_y}{0.9}$ $\sum \epsilon^c (1.25S_y) \leq 0.002$
疲 勞 損 傷  Df	ピーク塑性ひずみ集中の 効果 Ao係数	Neuber則 $K_o K_\epsilon = K^2$		Neuber則	$S_n > 3\bar{S}_m$ の場合に 対する規定なし	
	公称ひずみの非弾性 再配分の効果 Ke係数	$\epsilon_n$ 算出時に適切な 補正を行う	Ke'係数	明瞭な規定なし		
	$S_n \leq 3\bar{S}_m$ $S_\ell = \frac{S_p}{2}$ $S_n > 3\bar{S}_m$ $S_\ell = \text{Max} \left\{ \frac{K_e S_p}{2}, \frac{1}{2} \left[ S_p + A_o \left( \frac{S_p}{3\bar{S}_m} - 1 \right) \right] \right\}$	$\epsilon_t = (S^*/S) K^2 \epsilon_n + K \epsilon_c + K_T \epsilon_F$	$\epsilon_t = K \epsilon \epsilon_n + K_T \epsilon_F$	$\epsilon_t = (S^*/S) K^2 \epsilon_n + K \epsilon_c + K_T \epsilon_F$	$\epsilon_t = K \epsilon_n$	
	 ↓ 設計疲労線図		 ↓ ひずみ速度効果を考慮した 設計疲労線図		 ↓ 保持時間効果を考慮した 設計疲労線図	
ク リ ー プ 損 傷 Dc		$D_{cN} = 2 \sum \frac{t_R}{T_d(S_k)}$	$D_{cN} = D_{c1} + D_{c2}$ $D_{c1} = 2 \sum \frac{t_i}{T_d(S_g)}$ $D_{c2} = D_o^* + \sum_i D_i^*$	$D_c = \sum \frac{t_R}{T_d(S_k/K')}$	$D_c = 0.1$	
						

は十分小さい値に留まる条件で規定され、材料のクリープ特性が無視できるとする告示の規定に従う条件に隣接するものである。

- 注1) 弾性追従パラメータ  $q$  は、弾性追従ひずみ ( $\epsilon_{EF}$ ) と弾性解析により算出されるひずみとの比を表わす。  
 長期1次応力が低い場合の2次曲げ応力  $Q_{bEF}$  による曲げひずみでは、本方針付録B注1)に示すように、その上限値を  $q=3$  とすることができる。  
 2) 本方針別表2.3注2)より長期1次応力が低い場合、長期2次応力  $Q_{mEF}$ 、 $Q_{bEF}$  による弾性追従ひずみは0.005を超えることはない。

- 11 3.5.3(1)1) はクリープ疲労損傷制限式を規定しており、3.5.2と同一である。  
 12 3.5.3(1)2) は累積疲労損傷係数の算定法を定めたものであり、3.5.2と同一であるが、告示の適用温度範囲内のひずみサイクルによる疲労損傷は、告示に従って算定した「疲れ累積係数」として加算することを規定している。  
 13 3.5.3(1)2)a) はひずみ範囲及びその繰返し回数の算定における負荷順序を規定したものである。負荷順序が規定されていない場合の事象組合せの方法は図3.5.1の通りである。

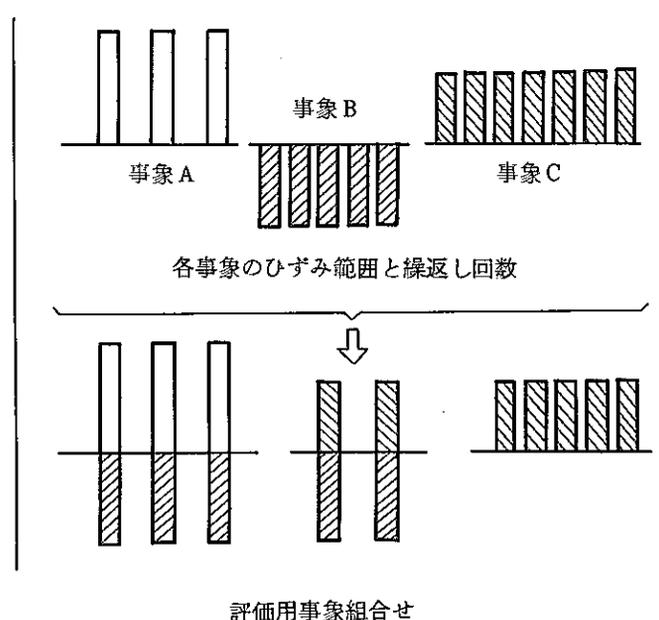


図 3.5.1 事象組合せの方法

14 3.5.3(1)2) c) は公称ひずみの算定について定めたものである。同規定の考え方は次のとおりである。

ひずみ制御型応力による弾塑性ひずみは、弾性的に計算された応力を弾性関係式を用いてひずみに直すことによって算出されるが、荷重制御型応力に対しては塑性関係式を用いて求めた塑性ひずみと弾性関係式を用いて求めた弾性ひずみの和となる。したがって、時点  $k$  における公称ひずみ(弾塑性)は

$$\boldsymbol{\varepsilon}_n^k = \boldsymbol{\varepsilon}_p(\boldsymbol{\varepsilon}_p^k, \boldsymbol{\sigma}_{LC}^k) + \mathbf{E}^{-1}(\boldsymbol{\sigma}_{LC}^k + \boldsymbol{\sigma}_{SC}^k) \quad (1)$$

となる。ここで(1)式の第1項  $\boldsymbol{\varepsilon}_p(\boldsymbol{\varepsilon}_p^k, \boldsymbol{\sigma}_{LC}^k)$  は全ひずみ理論による塑性関係式を表わし、例えば軸対称構造物であれば

$$\begin{aligned} \varepsilon_{pr} &= \frac{1}{(\sigma_{LC})_{eq}} \times \varepsilon_p \times (\sigma_{LCr} - \frac{1}{2}(\sigma_{LC\theta} + \sigma_{LCz})) \\ \varepsilon_{p\theta} &= \frac{1}{(\sigma_{LC})_{eq}} \times \varepsilon_p \times (\sigma_{LC\theta} - \frac{1}{2}(\sigma_{LCz} + \sigma_{LCr})) \\ \varepsilon_{pz} &= \frac{1}{(\sigma_{LC})_{eq}} \times \varepsilon_p \times (\sigma_{LCz} - \frac{1}{2}(\sigma_{LCr} + \sigma_{LC\theta})) \\ \gamma_{p2r} &= \frac{3}{(\sigma_{LC})_{eq}} \times \varepsilon_p \times \tau_{LCzr} \end{aligned}$$

ただし、

- $\varepsilon_{pr}, \varepsilon_{p\theta}, \varepsilon_{pz}$  : 各々  $r, \theta, z$  方向の塑性ひずみテンソル成分
- $\gamma_{p2r}$  :  $z-r$  面内の塑性せん断ひずみテンソル成分
- $(\sigma_{LC})_{eq}$  : 応力テンソル  $\sigma_{LC}$  の Mises の相当応力
- $\sigma_{LCr}, \sigma_{LC\theta}, \sigma_{LCz}$  : 各々  $r, \theta, z$  方向の  $\sigma_{LC}$  のテンソル成分
- $\tau_{LCzr}$  :  $\sigma_{LC}$  の  $zr$  面内のせん断応力テンソル成分

である。

また(1)式の第2項  $\mathbf{E}^{-1}(\boldsymbol{\sigma}_{LC} + \boldsymbol{\sigma}_{SC})$  は、簡単のため  $\boldsymbol{\sigma}_{LC} + \boldsymbol{\sigma}_{SC}$  を  $\boldsymbol{\sigma}_A$  とすれば、具体的に各ひずみ成分が以下のように表されるものである。

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} \{ \sigma_{Ar} - \nu(\sigma_{A\theta} + \sigma_{Az}) \} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} \{ \sigma_{A\theta} - \nu(\sigma_{Az} + \sigma_{Ar}) \} \end{aligned}$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} \{ \sigma_{Az} - \nu (\sigma_{Ar} + \sigma_{A\theta}) \}$$

$$\gamma_{zr} = \frac{1}{E} \times 2 \times (1 + \nu) \tau_{Azr}$$

ただし、 $\epsilon$ 、 $\nu$ 、 $\sigma$ 、 $\tau$ の各記号および、下付き添字の意味は $\epsilon_p$  ( $\epsilon_p, \sigma_{LC}$ )の所で記載したものと同様、また $\nu$ は同時点での金属温度における材料の弾性ポアソン比である。

ここで注意すべき点は若干の弾性追従を伴う2次応力については $E^{-1}(\sigma_{SC})$ を算出する際に弾性追従を考慮して適切な補正を行う必要があることである。弾性追従によるひずみ範囲の増大を保守的に評価するように $\sigma_{SC}$ の値を割増して評価するか、別途求めておいた弾性追従ひずみを加えるか若しくは他の方法を採用するか設計者が適切に判断して、これを行わなければならない。

- 15 3.5.3(1)2)d)は相当公称ひずみ範囲の算定について定めたものである。

時点1と時点2との間の相当公称ひずみ範囲 $\epsilon_{eq}$ は $\epsilon_p^1 = 0$ の場合は時点1が弾性状態にあることを示すので、時点2でのひずみテンソルから時点1のひずみテンソルを差引いたものについての相当ひずみを求めればよい。すなわち

$$\Delta \epsilon_{eq} = (\epsilon^2 - \epsilon^1)_{eq} \quad (2)$$

である。しかし、 $\epsilon_p^1 > 0$ の場合は、1→2が除荷過程か負荷過程によって $\epsilon_{eq}$ の計算法が変わって来る。(2)式は負荷過程に対して用いられ、除荷過程に対して(2)式を用いることはひずみ範囲を過大に見つめることになる。本方針においては、除荷過程を考慮して適切に公称ひずみ範囲を計算することを認めているが、安全側の別法として(2)式を用いることもできる。

- 16 3.5.3(1)2)e)は公称ひずみ範囲の算定について定めたものである。

本方針では von Misesの相当ひずみ $\epsilon_{eq}$ から公称ひずみ範囲 $\epsilon_n$ を求める公式として

$$\epsilon_n = \frac{1.5}{1 + \nu_0} \Delta \epsilon_{eq} \quad (3)$$

を与えている。この考え方は、次のとおりである。

多軸疲労試験の強度に関し、次式のような変動ポアソン比を用いた相当ひずみ $\epsilon_{eq}$ を用いれば、多軸疲労強度は単軸疲労強度を用いて適切に記述できることが示されている。

$$\varepsilon_{\text{e}q} = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (4)$$

$$\bar{\nu} = 0.5 - (0.5 - \nu_e) \varepsilon_Y / \varepsilon_{\text{e}q}, \quad \bar{\nu} \geq \nu_e \quad (5)$$

(4)式を、von Mises の相当ひずみ範囲

$$\Delta \varepsilon_{\text{e}q} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (6)$$

を用いて書き直すと

$$\varepsilon_{\text{e}q} = \frac{1.5}{1+\bar{\nu}} \Delta \varepsilon_{\text{e}q} \quad (7)$$

従って、von Misesによる相当ひずみ範囲を用いた場合、弾性ひずみ成分の占める割合が大きいくらい、ひずみ範囲を過少評価することになる。弾性応力場の場合、もともと差が大きく、 $\bar{\nu} = \nu_e$  による補正が必要である。一方、非弾性応力場では  $\bar{\nu} > \nu_e$  であるが、 $\mathbf{E}^{-1} \boldsymbol{\sigma}$  によるひずみの過小評価傾向を補正する意味で、 $\bar{\nu} = \nu_e$  としている。

17 3.5.3 (1) 2) f) はひずみ範囲の算定について定めるものである。

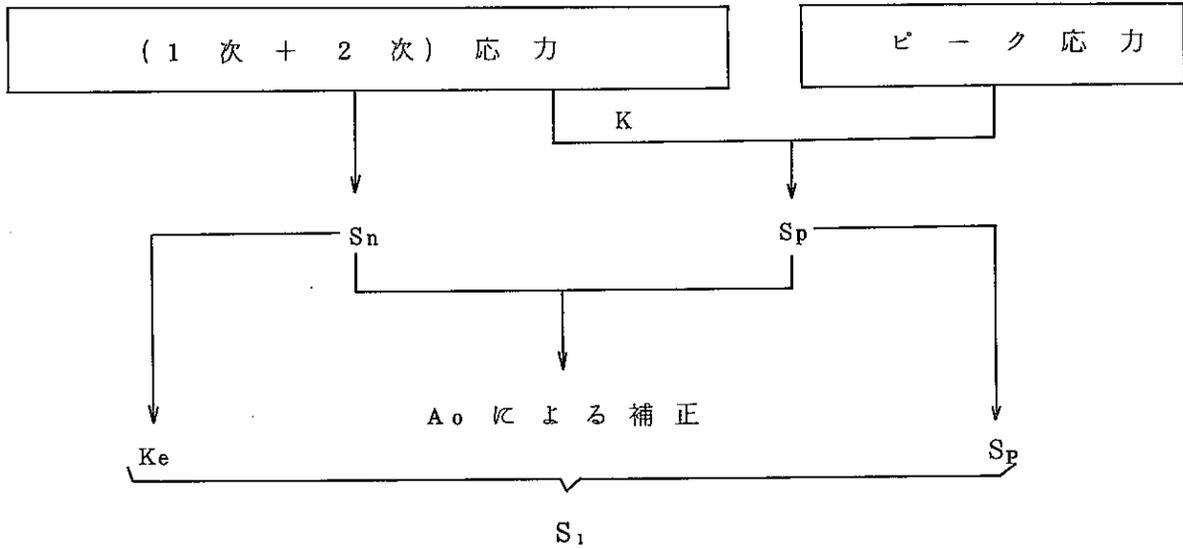
本方針では一般規定に適用されるひずみ範囲の評価式として次式を定めている（図 3.5.2 参照）。

$$\varepsilon_t = (S^* / \bar{S}) K^2 \varepsilon_n + K \varepsilon_c + K_T \varepsilon_F \quad (8)$$

(8)式の右辺第1項は弾塑性ひずみの範囲、第2項はクリープひずみの範囲および第3項はピーク熱ひずみによるひずみ範囲を表わし、それぞれ公称ひずみ範囲  $\varepsilon_n$ 、公称クリープひずみ  $\varepsilon_c$  およびピーク熱ひずみ範囲  $\varepsilon_F$  に形状不連続に起因する集中係数を乗じたものになっている。(8)式でひずみを3つの成分に分け各々に対して別個にその集中率を評価しているのは、形状不連続部におけるひずみ集中の様相が各々の成分によって異なるからである。すなわち弾塑性ひずみ集中とクリープひずみ集中はその現象の生ずる時刻にずれがあるし、また集中の度合いも異なっている。さらにピーク熱ひずみはそれ自身非常に局所的な性格を持っていて、弾塑性およびクリープひずみの集中に対して考える形状不連続よりもっと小さな形状不連続を考える必要があるので別個に取扱っている。(8)式におけるひずみ範囲の算定の考え方は次の通りである。

(1) 弾塑性ひずみ範囲の評価はNeuber則にもとづいている。

< 告 示 >



< 一般規定 > (ASME Code Case N-47 と基本的には同一)

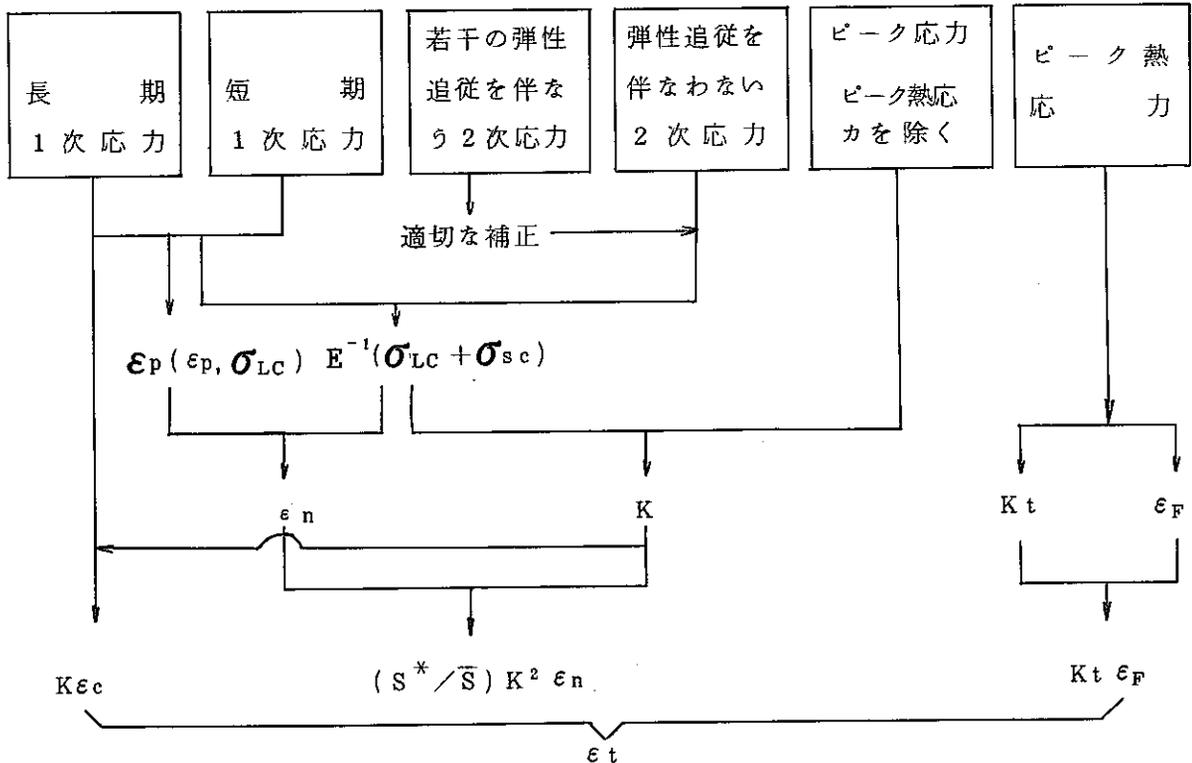


図 3.5.2 弾性解析によるひずみ範囲評価  
(告示及び一般規定の場合)

Neuber 則とは、切欠を有する棒がせん断力を受ける場合の切欠底における応力集中率 $K_\sigma$ 及びひずみ集中率 $K_\epsilon$  に対してNeuber<sup>(1)</sup>が与えた次の関係式(9)である。

$$K_\sigma \cdot K_\epsilon = K^2 \quad (9)$$

K：弾性応力集中係数

(9)式を切欠底の応力・ひずみを $\sigma$ ， $\epsilon$ ，公称応力，公称ひずみを $\sigma_n$ ， $\epsilon_n$ としておきかえ，ひずみについて解くと

$$\epsilon = \frac{\sigma_n}{\sigma} K^2 \epsilon_n \quad (10)$$

(9)式又は(10)式がNeuberが対象とした条件以外についても応力集中部のひずみを推定する上で妥当な記述式になっていることが，実験及び解析的に確かめられている。

告示では，疲労評価で考慮すべきひずみの集中に関して，下記の2つの効果を考慮すべきことを，その解説書中で記載している。

(a) ピーク塑性ひずみ集中の効果 ..... A。係数

(b) 公称ひずみの塑性再配分の効果 ..... K。係数

Neuber 則は主として，ピーク塑性ひずみ集中の効果に対応するものであるが，元来一定程度の公称ひずみの塑性再配分の効果も包含するものと考えられる。弾性解析による一般規定では，Neuber則によってひずみ集中の評価を行うが，公称ひずみの塑性再配分（弾性追従による公称ひずみの増大）の効果は，公称ひずみ $\epsilon_n$ を算出する時点において適切な補正を行うべきことを規定している。

(ロ) (10)式による評価は，応力—ひずみが非線形関係を呈する場合は一般に算術的に求めるのは困難であり，図式解法によるかあるいは数値解法によるかのいずれかとなる。そこで本方針では応力ひずみ曲線及び(10)式が単調曲線になることを考慮して，簡易に安全側の解を与える方式も規定している。

ひずみ集中係数は1より大きくなるので，ひずみを $K\epsilon_n$ として評価した応力は切欠底の応力について小さめの評価値を与える。従って図3.5.3に示すように，ひずみ $\epsilon_n$ に対する応力を $S^*$ ，ひずみ $K\epsilon_n$ に対する応力を $\bar{S}$ として得られるひずみ $(S^*/\bar{S})K^2\epsilon_n$ は厳密な値（図3.5.3での $\epsilon_M$ ）に対して大きめの評価値となる

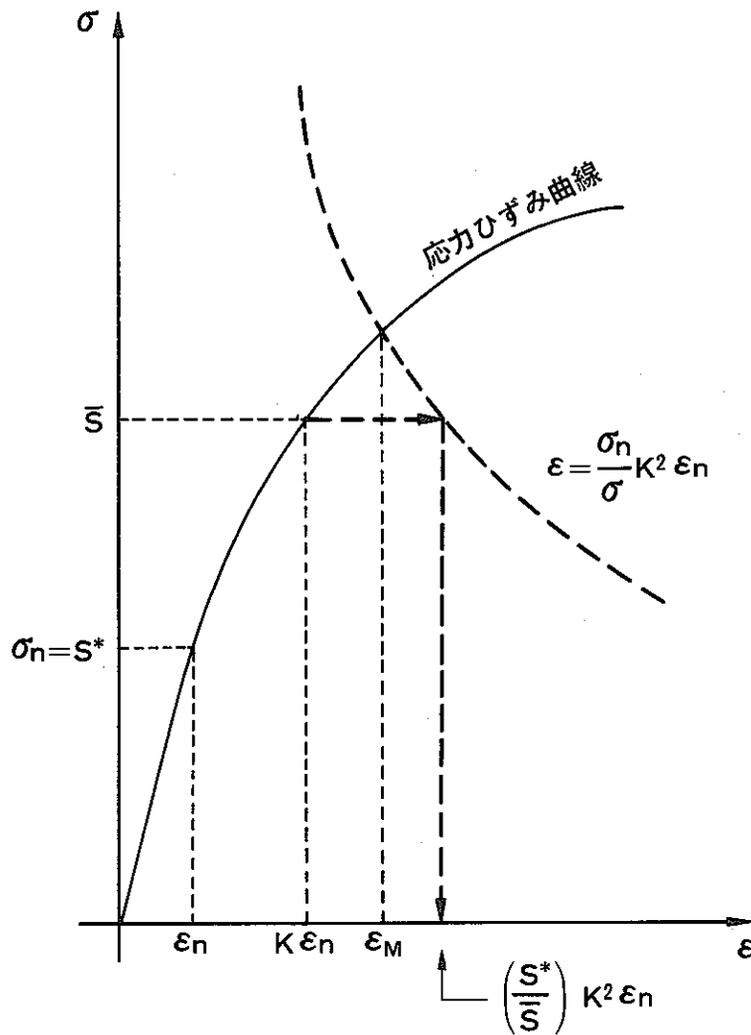


図 3.5.3 Neuber 則の近似解

(c) これまでは、単調負荷の場合の応力集中部でのひずみ集中についての議論であるが、本方針においては、繰返し負荷に対する応力集中部のひずみ範囲の評価が問題となる。

応力反転を含む繰返し負荷の場合、応力ひずみ挙動における比例限の大きさは、一般に単調負荷の場合の2倍となることが知られている。クリープ効果が無視できる場合には、繰返し負荷に対しては片側  $1.5 S_m$  の線形挙動区間が期待されるが、高温では保持時間中の応力緩和等により片側  $1.5 S_m$  の線形挙動区間を期待するのは困難であると判断される。そこで本方針では繰返し負荷の際に期待できる線形挙動区間の増大量としては、設計緩和強さ  $S_r$  とし、0時点等時応力ひずみ線図にさらに  $S_r$  の線形挙動区間を見込んで、Neuber 則を適用するものとした。図 3.5.4 は、連続サイクルに対して切欠底部

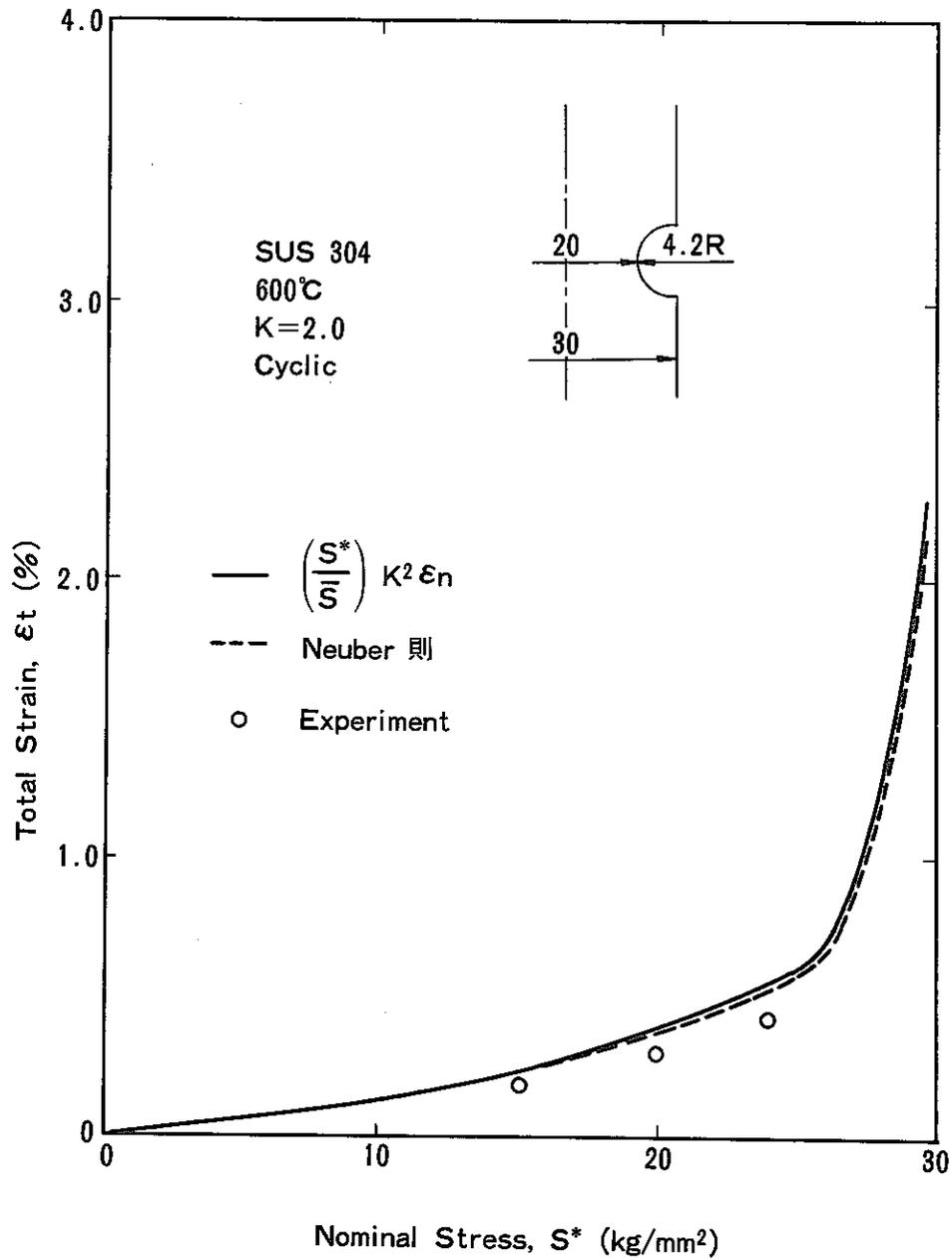


図 3.5.4 繰返し負荷の場合における  
(Neuber 則の検証例)

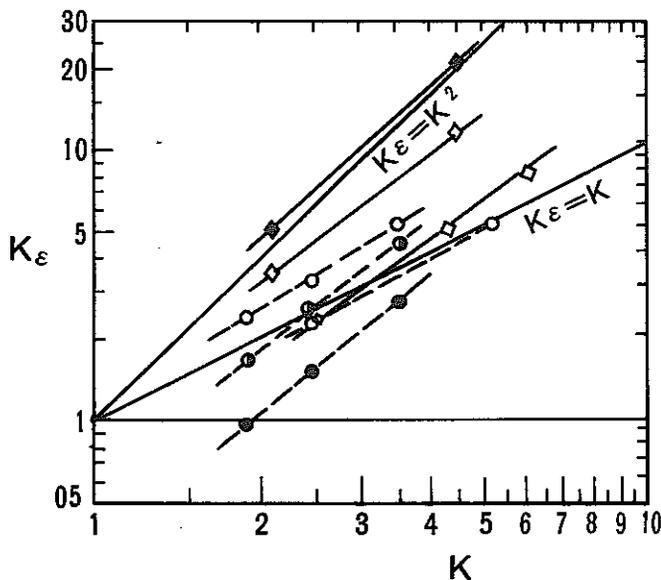
のひずみを実験的に求めた結果と、本方針の手法に基づく解（ここでは  $S_{rH} = 1.5 S_m$ ）を比較した例である。これより Neuber 則はひずみ集中部のひずみ範囲に対して妥当な推定値を与えることが理解できる。

(⇒) 弾性的な応力集中係数  $K$  は弾性解析に基づくピーク応力強さと 1 次及び 2 次応力強さの比として定義される。ただしピーク熱応力によるものは除く。これはピーク熱ひずみ

が、Neuber 則または修正 Neuber 則を用いて評価されるピークひずみと性質を異にし、別途評価され加算されるからである。応力集中係数  $K$  の値は局所的な形状不連続を詳細にモデル化した有限要素法による解析を行う場合は定義通りに計算することができる。詳細な形状不連続を除外した形で解析を実施した場合は、別途得られている厳密解、実験解などを利用して応力集中係数  $K$  の値を定めて良いが、その際、本方針では応力成分、またはひずみ成分に基づく評価を規定していることを考慮し、各応力成分を適切に評価することが必要である。

- (b) クリープひずみ範囲については理論的弾性ひずみ集中係数を用いてその局所的な増倍を評価する。

クリープひずみの集中に関しては、従来幾つかの研究が行われている。図 3.5.5 は、



注) 記号(◆◇○●●◇)の相違は、材料定数(ノルトン則の指数)の違いによる。

図 3.5.5 クリープひずみ集中係数

有限要素法によるクリープ解析結果について、弾性応力集中係数  $K$  と解析結果<sup>(2)</sup>におけるクリープひずみ集中係数  $K_\epsilon$  の関係をまとめたものである。平面応力解の 2 ケース(図中◆◇)を除けば、ほとんどの解析解は  $K_\epsilon = K$  でほぼ近似できる。

従って、従来からのクリープひずみ集中に関する研究より次のことがいえる。

- (a) 平面ひずみ状態におけるクリープひずみの集中は、理論的弾性ひずみ集中係数  $K$  で近似できる。

(b) 平面応力下では、クリープひずみ集中係数 $K^2$ 程度の大きさを有する。

本方針では、局所的な応力集中部におけるクリープひずみの増倍を理論的弾性ひずみ集中係数 $K$ により補正しているが、平面応力下におけるクリープひずみ集中に対しては以下の解析例にそってその妥当性が説明できる。解析対象は、中心部に円孔を有する平板（図 3.5.6 参照）であり、その端部 AA に繰返し負荷が与えられる。応力集中部として円孔端（図 3.5.6 における評価対象点）を選定し、その応力に注目すると第 1 サイク

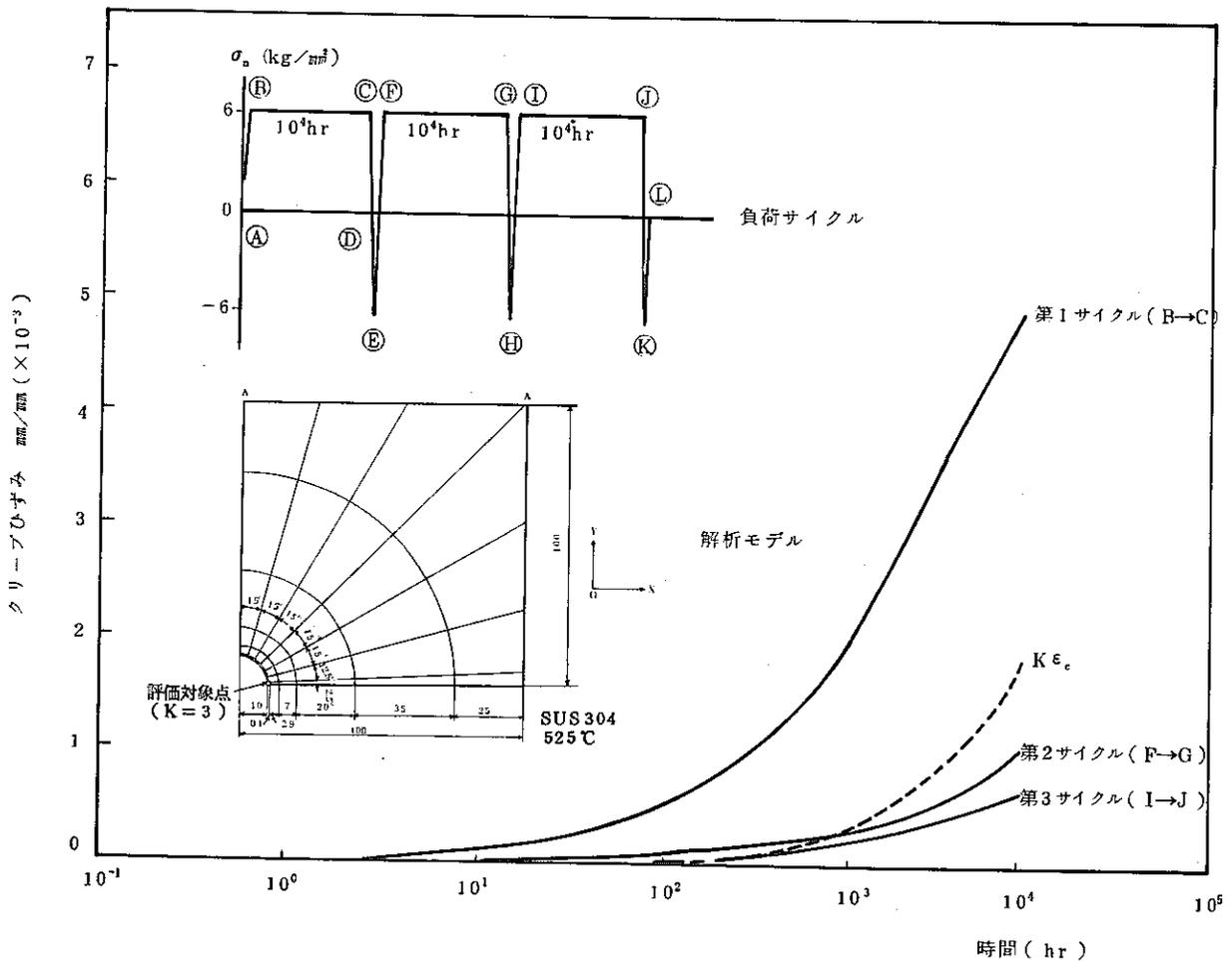


図 3.5.6 クリープひずみの集中(解析結果)

ルでは初期の弾塑性応力状態からクリープ下の定常的な応力状態に移行する際の応力再配分の影響のため長時間側ではむしろ応力が上昇する。一方、第 2 サイクル以降では定常的な応力分布に近づくため、第 1 サイクルのような応力上昇は見られず、応力は連続的に緩和する。

クリープひずみ集中に関する非弾性解析結果を本方針の評価とともに図 3.5.6 に示す。同図に示すように、第 2 サイクル目以降では発生するクリープひずみは減少するが、本方針では常に遷移クリープを含むクリープひずみ量を対応させるため安全側の評価となる。

従って、クリープ疲労損傷の評価が多数回の負荷サイクルを対象としていることを考えると、クリープひずみ集中を  $K\epsilon_c$  とする取扱いは平面応力状態でも妥当である。

(f) ピーク熱ひずみの評価項については、ASME Code Case N-47 を参考として、非弾性ひずみの部分からピーク熱ひずみを分離し、ピーク熱ひずみは別の手法で算定の上、ひずみ範囲の算出の過程で加算するようにしている。すなわち、 $K_T \epsilon_F$  がひずみ範囲の算出の第 3 項として加算される。 $K_T$  は付録 H を参照して定める。

(h) (3.5.11) 式で定められる修正ポアソン比の考え方は以下の通りである。

(1 次 + 2 次) 応力範囲は著しい塑性サイクルを呈しない程度に制限されるが、ピーク熱応力を加えたピーク応力は、クリープ疲労損傷が許容限度内に納まる範囲で、非弾性サイクルを呈することが起りうる。

これを考慮して、ASME Sec III NB-3227.6(b) では、局所熱ひずみの算出に当たっては、下式の形の修正ポアソン比を使用すべきことを規定している。

$$\nu = 0.5 - 0.2(S_y/S_a), \text{ 但し } \nu \geq 0.3 \quad (11)$$

$S_y$  : サイクルの平均温度に対する降伏点

$S_a$  : 当該サイクル数に対する繰返しピーク応力強さ

告示では、これに対応する規定はない。

ASME Code Case N-47 では、T-1431(c) において(11)式に対応する形として下式による修正ポアソン比を規定している。

$$\nu = 0.5 - (0.5 - \nu_0) \frac{3\overline{S_m}}{E\epsilon_t} \quad \text{但し } \nu \geq \nu_0. \quad (12)$$

(11)式と(12)式を比較すると、ASME Code Case N-47 では、 $\nu_0 = 0.3$  として記述している Sec III の規定をより一般的に示すとともに降伏応力を高温域でのシェイクダウン基準  $3\overline{S_m}$  に置換えている。

本方針では、上記 ASME Code Case N-47 と基本的に同一の式を与えている。

(12)式の妥当性は、下記のように説明できる。

局所熱ひずみの代表的な場合として、壁厚方向温度勾配によるひずみを考える。座標軸を壁厚方向に  $z$ 、壁厚表面方向に  $x$ 、 $y$  とし、また熱ひずみを  $\varepsilon_0$  とする ( $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_0$ )  $\sigma_x = \sigma_y$ 、 $\sigma_z = 0$  とすると、降伏条件はMises型で考えても、Tresca型で考えても同一であり、降伏応力を  $\sigma_Y$  として降伏条件は

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_Y \quad (13)$$

各方向のひずみは、 $x$  又は  $y$  方向の塑性ひずみを  $\varepsilon_{p0}$  として

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_0 = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) + \varepsilon_{p0} \\ \varepsilon_y = \varepsilon_0 = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) + \varepsilon_{p0} \\ \varepsilon_z = -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) - 2\varepsilon_{p0} \end{cases}$$

降伏ひずみ ( $\sigma_Y/E$ ) を  $\varepsilon_Y$  として書き改めると

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_0 = (1 - \nu_e) \varepsilon_Y + \varepsilon_{p0} \\ \varepsilon_z = -2\nu_e \varepsilon_Y - 2\varepsilon_{p0} \end{cases} \quad (14)$$

Zamrik は、多軸疲労試験について、下式のような変動ポアソン比  $\bar{\nu}$  を用いた等価ひずみを用いると、多軸疲労強度と単軸疲労強度は良好な対応を示すことを確認している。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2(1+\bar{\nu})}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{eq} \geq \varepsilon_Y \quad \bar{\nu} = 0.5 - (0.5 - \nu_e) \varepsilon_Y / \varepsilon_{eq}$$

$$\varepsilon_{eq} < \varepsilon_Y \quad \bar{\nu} = \nu_e$$

$\varepsilon_{eq} = \varepsilon$  の場合の Zamrik による等価ひずみはMises型の等価ひずみを  $\bar{\varepsilon}_{eq}$  として、簡単に下式のように表わせる。

$$\varepsilon_{eq} = \bar{\varepsilon}_{eq} + \frac{2}{3} (0.5 - \nu_e) \varepsilon_Y \quad (16)$$

$$\bar{\varepsilon}_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

ここで考えている問題では、 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  は主ひずみとなるから、(14)式から  $\epsilon_{p0}$  を消去して(16)式に代入すると、評価すべき等価ひずみ  $\epsilon_{eq}$  として

$$\epsilon_{eq} = 2\epsilon_0 - (1 - 2\nu_e)\epsilon_y \quad (17)$$

一方、ここで考えている問題について、ポアソン比を  $\nu$  として弾性解析的にひずみ成分を算出すると、仮想的な応力を  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$  として

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \epsilon_0 = \frac{1-\nu}{E} \sigma_0 \\ \epsilon_y &= \epsilon_0 = \frac{1-\nu}{E} \sigma_0 \\ \epsilon_z &= \frac{-2\nu}{E} \sigma_0 \end{aligned} \quad (18)$$

(3.5.9)式のように、等価ひずみを求め、これを  $\epsilon_{eq}'$  とすると

$$\epsilon_{eq}' = \frac{1}{1-\nu} \epsilon_0 \quad (19)$$

(17)式及び(19)式で  $\epsilon_{eq} = \epsilon_{eq}'$  としかつ  $\epsilon_0$  を消去すると

$$\nu = 0.5 - (0.5 - \nu_e) 2\epsilon_y / \epsilon_{eq} \quad (20)$$

(19)式より、 $\nu$  の値としては大きくとった方が評価は安全側になる。(20)式より、 $\nu$  は  $\epsilon_{eq}$  を大きく想定した方が大きな値となる。

従って、(20)式において  $\epsilon_{eq}$  としては許容ひずみ範囲をとり、 $2\epsilon_y$  としては、高温におけるシェイクダウン基準から  $3\bar{S}_m/E$  を用いてやれば、弾性解析によりひずみ範囲を安全側に推定することができる。

SUS304 について設計疲労線図(B)を用いて修正ポアソン比  $\bar{\nu}$  を計算すると図 3.5.7 のようになる。

#### 参考文献

- (1) Neuber, H., "Theory of Stress Concentration for Shear Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Non-Linear Stress-Strain Law", Trans. ASME. J. of Applied Mechanics, Dec. 1961, PP. 544~550.
- (2) 大谷隆一, "切欠き材のクリープにおける応力集中とひずみ集中", 材料, 25-270 (昭51), PP. 230.

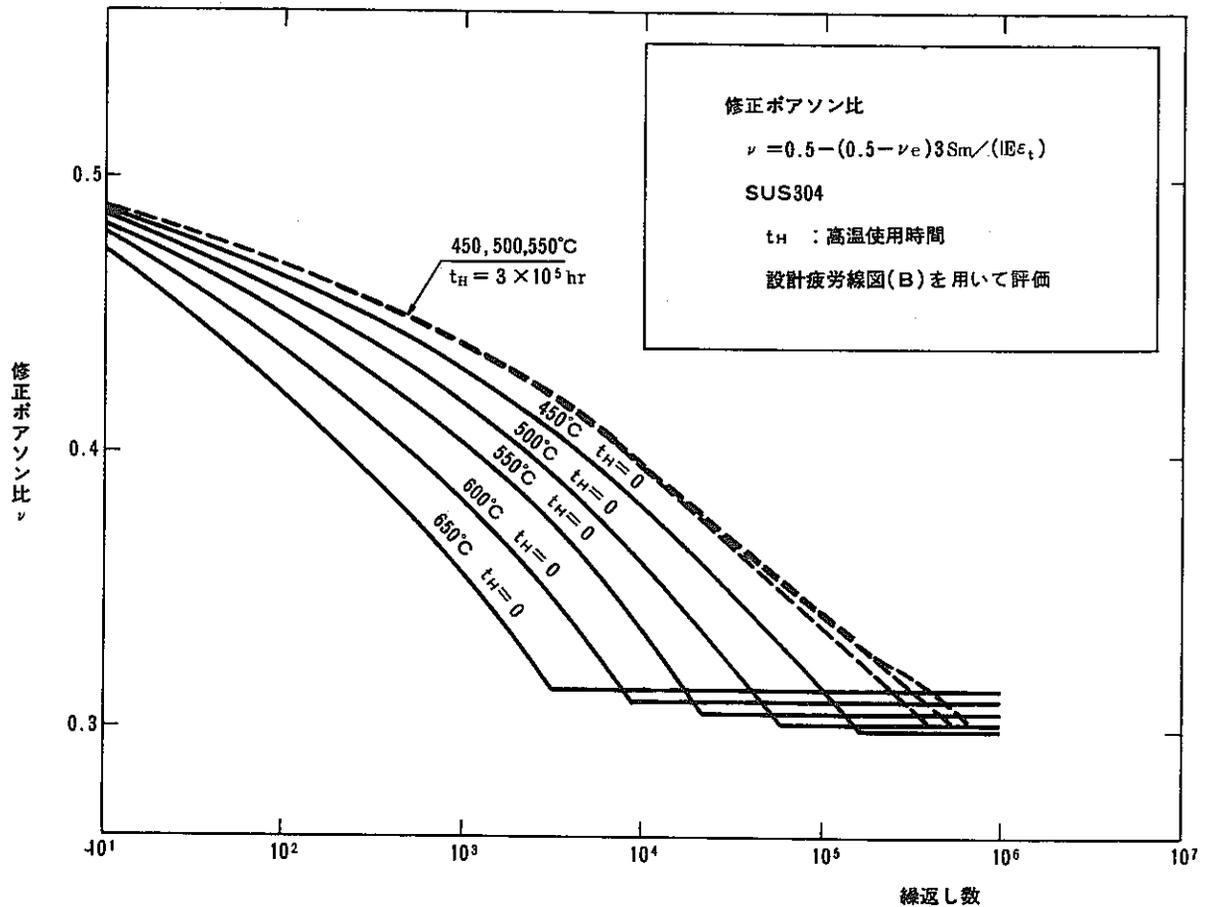


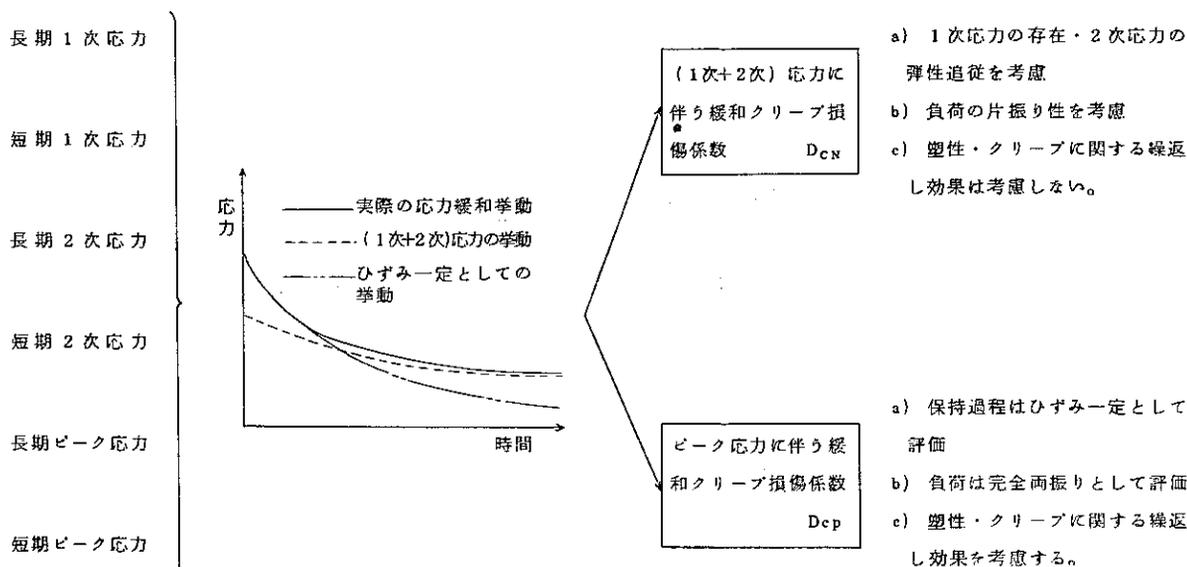
図 3.5.7 SUS304 の修正ポアソン比の計算例

18 3.5.3(1)3) は累積クリープ損傷係数の算定法を定めたものである。

弾性解析による場合、本方針は、1次及び2次応力に伴うクリープ損傷係数 ( $D_{CN}$ ) 並びに応力に伴うクリープ損傷係数 ( $D_{CP}$ ) を独立に算定しその和によってクリープ損傷係数 ( $D_C$ ) を算出する。

$$D_C = D_{CN} + D_{CP} \quad (2)$$

ここで  $D_{CN}$  は、弾性追従を考慮した1次及び2次応力の挙動に対応するクリープ損傷係数であり、 $D_{CP}$  は応力緩和過程においてひずみが一定に保たれるとしたときのクリープ損傷係数である。 $D_{CN}$  及び  $D_{CP}$  の考え方を図 3.5.8 に示す。



実際の応力緩和挙動

弾性解析による評価法

図 3.5.8 弾性解析によるクリープ損傷評価

一方、ASME Code Case N-47 においては、 $D_{CP}$  に該当する算出方法はないが、低ひずみ速度及び保持時間効果を含む弾性解析用疲労線図が規定されており、ピーク応力に関する緩和クリープ損傷は同疲労線図に含まれていると考えられる。

ASME Code Case N-47 で、弾性解析用設計疲労線図にピーク応力の緩和に伴うクリープ損傷を含めているのに対し、本方針でクリープ損傷として独立させたのはピーク応力の緩和に伴うクリープ損傷は、疲労線図として評価するより、クリープ損傷項としてとらえた方が合理的であるためである。なお、現行の設計クリープ破断時間は長時間側への外挿性に対し安全側となるような配慮を含むため、これとクリープひずみ式を用いて計算された応力緩和曲線とに基づいて十分に長い保持時間中のピーク応力の緩和に伴うクリープ損傷値を算出すると、クリープ損傷値はかなり大きな値となる。したがって、1次応力及び2次応力に関する累積クリープ損傷係数  $D_{CN}$  との多重加算を抑制するように配慮せず、ピーク応力の緩和に伴うクリープ損傷を求め、ASME Code Case N-47 の弾性解析用設計疲労線図に該当する線図を策定すると保守的過ぎる評価を与えるのに比べ、本方

針によると合理的にクリープ損傷が算定されることになる。

(2)式の様に機器のある評価点に対し、異なる挙動を示す2種類の応力状態を想定して各々に対するクリープ損傷を求めその和をその評価点のクリープ損傷とすることは3.5.2の一般規定におけるクリープ損傷の定義式と形式的には異なっているが、この規定は1次及び2次応力とピーク応力の重なった一般の応力状態に対するクリープ損傷を簡易的に与えるものと考えることができる。

19 弾性解析による場合、一般規定で $D_{CN}$ の算出は次のとおりである。

各ひずみサイクル $k$ に対し、残留応力を適切に評価した応力レベル $S_k$ を設定して、この値から求められる使用分数(ひずみサイクル $k$ 中の高温使用時間と設計クリープ破断時間の比・応力又は温度が変動する場合には積分値として算出する)に安全係数2を乗じて、そのサイクルにおけるクリープ損傷係数 $(D_{CN})_k$ とする。全寿命中のクリープ損傷は各ひずみサイクルに対する損傷値の和として求められる。

$$D_{CN} = \sum_k (D_{CN})_k \quad (22)$$

ここで $S_k$ は次のようにして求められる。

(イ) 降伏応力をサイクル中の最高及び最低壁厚平均金属温度に対する設計降伏点の平均値として定める。

(ロ) ひずみサイクル $k$ の各時刻において1次及び2次応力強さを求める。

(ハ) ひずみサイクル $k$ の任意の時刻において1次および2次応力強さが降伏応力 $S_y|_k$ を超えない場合塑性挙動による残留応力は生じないと考えられるため、各時刻において弾性的に計算された1次および2次応力強さを $S_k$ とする。

$$S_k = \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle \quad (23)$$

(ニ) ひずみサイクル $k$ のある時刻において、1次および2次応力強さが $S_y|_k$ を超える場合には残留応力を考慮して次式により $S_k$ を定める。

$$S_k = \text{Min} \{ 1.25 S_y|_k, \text{Max} [ (\langle P_m \rangle + 0.5 \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle_R), \langle P_L + P_b + Q \rangle ] \} \quad (24)$$

(24)式は、ASME Code Case N-47の規定に準拠して、降伏応力、負荷サイクル中の応力範囲及びクリープ損傷を生じる定常時の応力に基づいて設定されたものである。式中の第3項 $\langle P_L + P_b + Q \rangle$ はクリープ損傷が問題となる定常状態において作用してい

る長期荷重による1次及び2次応力強さである。

(付) この様にして定められた  $S_k$  が  $S_g$  値を下回る場合には  $S_k = S_g$  とする。これは  $D_{CP}$  を定める緩和クリープ損傷  $D^{**}$  値が、 $D_{CN}$  評価において考慮されている最低応力レベルにまで低下する間に生じる損傷値と定義されているため、 $S_k$  の最小値を設定する必要があり、これを長期1次応力が低い場合における最低応力レベル  $S_g$  に合わせたものである。

(イ) 以上によって定めた  $S_k$  より使用分数を定め、安全係数 2.0 を乗じることにより  $(D_{CN})_k$  が算定される。

ここで(イ)及び(付)によって定める  $S_k$  に関して、一般式((3.5.3)式)を用いて  $(D_{CN})_k$  を定めてもよい。

なお、この規定においては、各ひずみサイクルは互いに独立であり、あるひずみサイクル  $k$  において生じた応力はそのサイクル中のクリープ、損傷  $(D_{CN})_k$  に関係し、以降のサイクルにおける残留応力には影響を及ぼさないことを前提としている。

20 ピーク応力に伴うクリープ損傷係数  $D_{CP}$  は  $D^{**}$  値を用いて以下のように算定される。

$$D_{CP} = \sum_k n_k D_k^{**} \quad (25)$$

ここで  $D_k^{**}$  は付録 F の解説で説明するように、ピーク応力が最低応力レベル  $S_g$  にまで緩和する間に生じる緩和クリープ損傷であり、温度  $T$ 、高温使用時間  $t^*$  及びひずみサイクル  $k$  に対するひずみ範囲  $\epsilon_t$  の関数として与えている。 $D^{**}$  策定の流れを図 3.5.9 に示す。なお図中の  $D^*$ 、 $D_{e1}$  については後に解説する。 $n_k$  はひずみサイクル  $k$  の回数であり、ピーク応力は一回毎に  $S_g$  にまで緩和するとして  $D_{ep}$  を上式で算定することとしている。

(25)式の適用に際し、 $D_k^{**}$  を求めるための温度、高温使用時間は最低応力レベル  $S_g$  と関連づけられるため、考えているひずみサイクル  $k$  に対するものでなく、全寿命に対する値を用いることが必要である。また、 $D^{**}$  は上記のようにひずみ範囲  $\epsilon_t$  の関数であるから、 $\epsilon_t$  として疲労損傷の評価に用いた値をとれば安全側である。

21 3.5.3(2)1)は「長期1次応力が低い場合」が3.4ひずみの制限における3.4.2(2)1)の規定によって定義されることを定めたものである。

22 3.5.3(2)2)はクリープ疲労損傷制限式を規定しており、3.5.2と同一である。

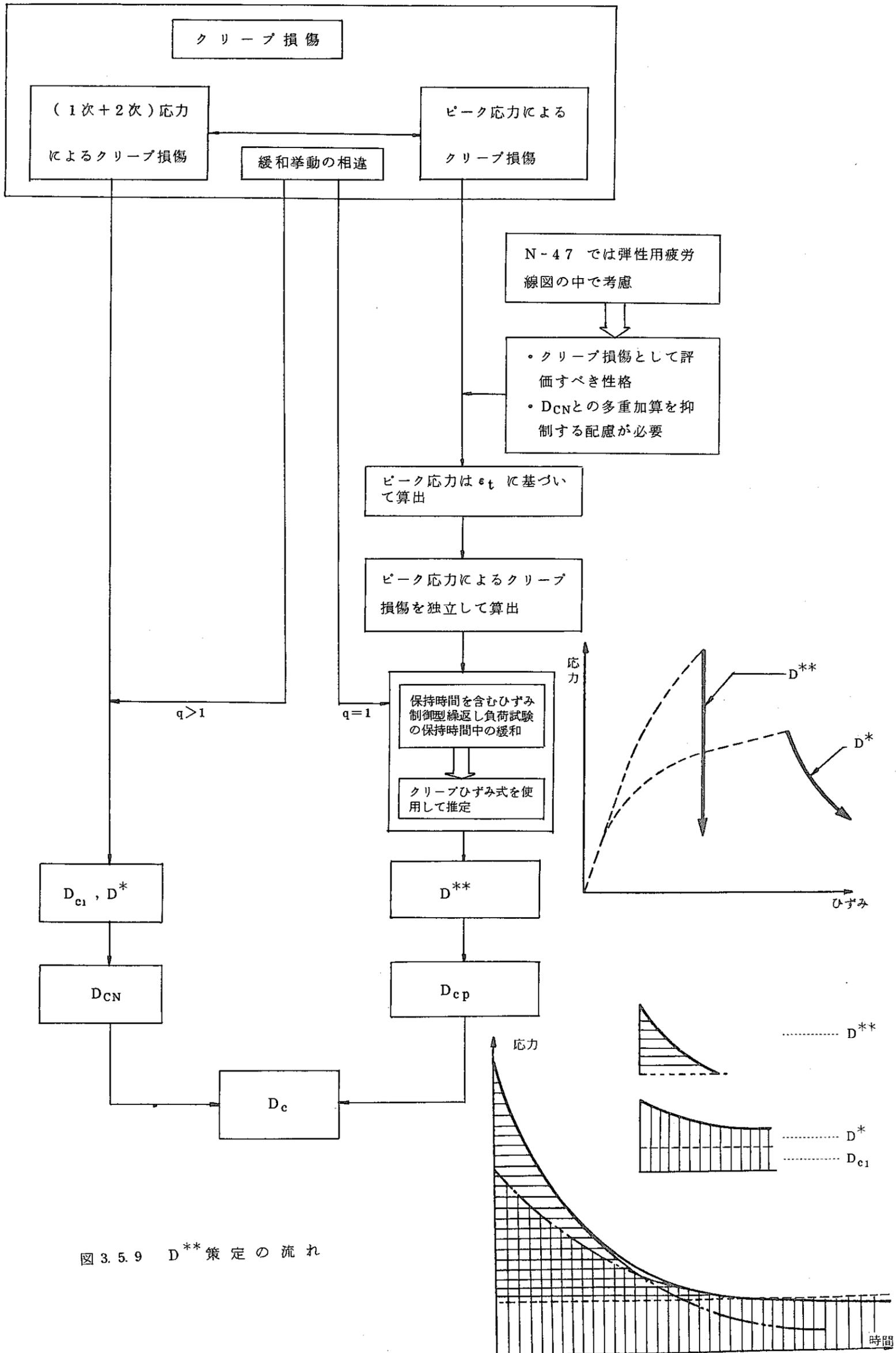


図 3.5.9  $D^{**}$  策定の流れ

23 3.5.3(2)3)は 累積疲労損傷係数の算定法を定めたものであり、3.5.2と同一であるが、ひずみ範囲の算定は以下の手順による。

- a) 事象の組合せ法は3.5.3(1)2)a)と同一である。
- b) 極値の選定も3.5.3(1)2)b)と同一である。
- c) 1次及び2次応力強さ範囲は3.4.2(2)3)b)により定める。
- d) ひずみ範囲の算定

ひずみ範囲の算定の考え方は次のとおりである。

イ) 公称ひずみ範囲の算定

本方針においては長期1次応力が低い場合の公称ひずみ範囲  $\epsilon_n$  を次式によって求める (図3.5.10 参照)。

$$\epsilon_n = S_n / E \tag{26}$$

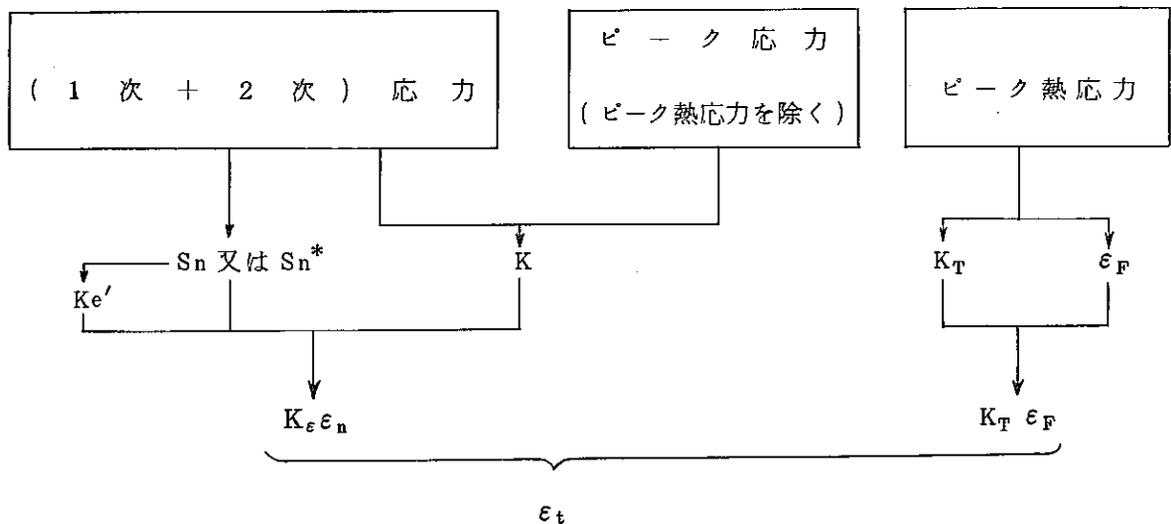


図 3.5.10 弾性解析によるひずみ範囲評価

(長期1次応力が低い場合又はクリープ効果が顕著でない場合)

すなわち公称ひずみ  $\epsilon_n$  の計算において荷重制御型応力による塑性ひずみおよびクリープひずみを省略するとともに、ひずみを成分に分解せず単に  $S_n/E$  としているが、これは次の事項を考慮して定めたものである。

- (a) 実際の評価において最も多く用いられるケースであり、ある程度保守的な手法であっても簡易的な手法が望ましい。
- (b) 長期1次応力が低い場合は1次応力を十分低く抑えているため、荷重制御型応力による塑性ひずみ及びクリープひずみは事実上無視できる。
- (c) 2次応力は弾性追従の有無によって区別せずに同等の取扱いとし、その効果は公称ひずみ範囲  $\epsilon_n$  には含めず、ひずみ集中係数  $K_\epsilon$  の中で考慮する。

なお、ここでは最大せん断ひずみ説に対応する  $S_n/E$  により公称ひずみ範囲  $\epsilon_n$  を定めるものとしているが、基本概念としては構造物の多軸応力場における公称ひずみ範囲は、せん断ひずみエネルギー説に基づく相当ひずみ範囲によって評価すべきものと考えられるので、この方法は一種の簡易評価法として位置付けられる。

ロ) ひずみ範囲の算定

ひずみ範囲  $\epsilon_t$  は公称ひずみ範囲と長期1次応力が低い場合のひずみ集中係数の積に 3.5.3(1)2) f) と同一のピーク熱ひずみを加算して求める。

ハ) ひずみ集中係数

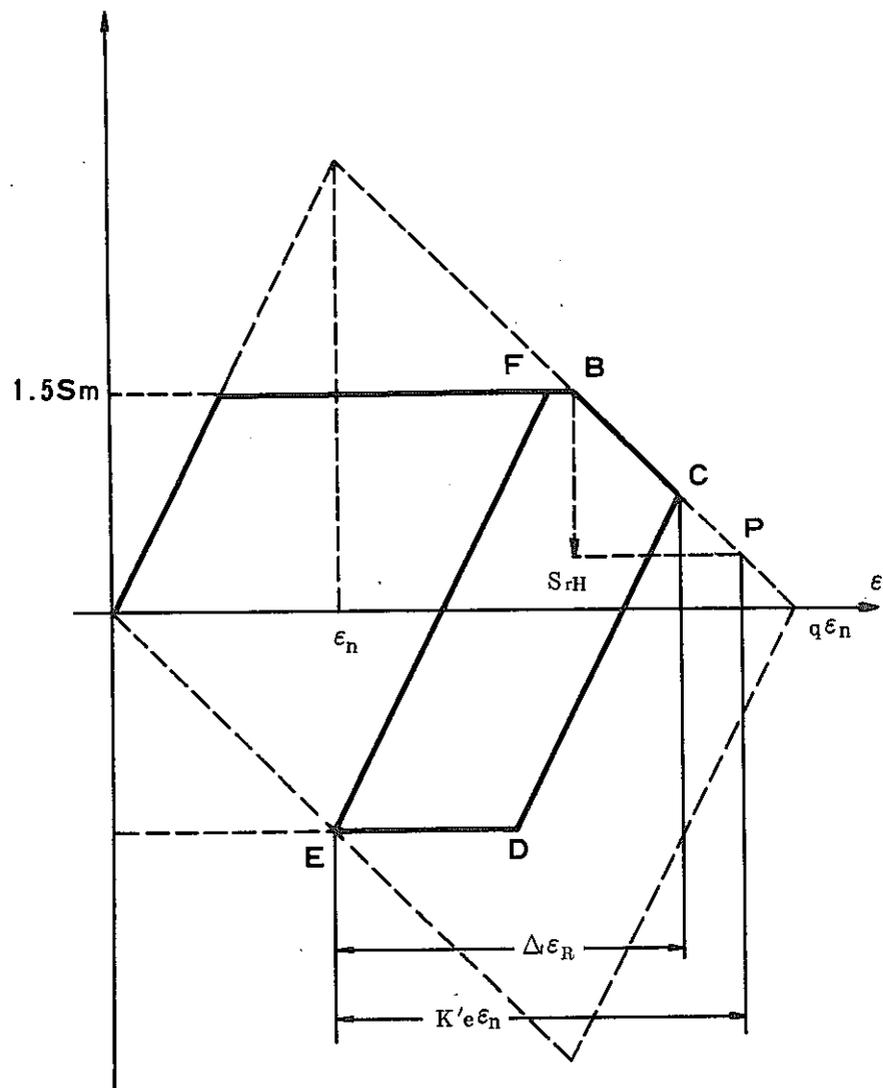
本方針では、長期1次応力が低い場合について、公称ひずみ範囲  $\epsilon_n$  に対するひずみ集中係数として、下式による  $K_\epsilon$  を定めている。

$$\begin{cases} S_n \leq 3\bar{S}_m & K_\epsilon = (S^*/\bar{S})K^2 \\ S_n > 3\bar{S}_m & K_\epsilon = \text{Max} \{ (S^*/\bar{S})K^2, KK'_0 \} \\ K'_0 = 1 + (q-1) \{ 1 - (3\bar{S}_m/S_n) \} & q = 3 \end{cases} \quad (27)$$

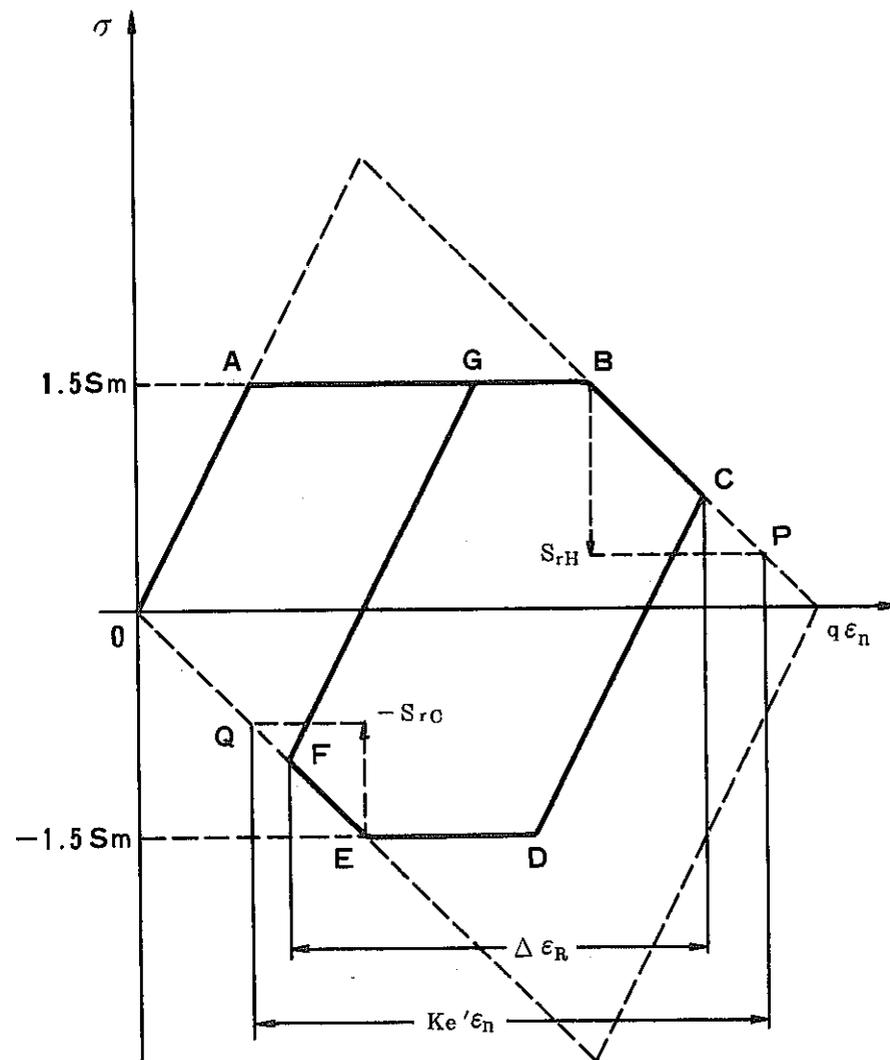
ここで  $(S^*/\bar{S})K^2$  は、Neuber 則に対する簡易解である。

$K'_0$  は、基本的には、弾性追従を考慮した公称ひずみの非弾性再配分に関する係数で図 3.5.11 のように説明される。

図 3.5.11 では、材料特性としては、降伏応力  $1.5 S_m$  の弾完全塑性体を考慮し、弾性追従パラメータ  $q$  で表わされる弾性追従挙動を呈するとしている。一般的な場合として図 3.5.11 (A) に示す片側でのみ応力緩和がある場合を考える。図中の点 X に対する応力



(A) 片側でのみ応力緩和がある場合



(B) 両側で応力緩和がある場合

図 3.5.11 係数  $Ke'$  の導出方法

ひずみをそれぞれ  $\sigma_x$ ,  $\epsilon_x$  で表わす。

公称応力  $S_n$  公称ひずみ  $\epsilon_n (= S_n/E)$  表わされる負荷が加わり、弾性追従を伴う応力緩和を生じ、除荷される。除荷時においては応力緩和を生じないで、その後再負荷される応力ひずみ径路は図中の点の記号で表わすと

$$0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow B$$

となり、疲労損傷評価上評価すべきひずみ範囲  $\Delta \epsilon_R$  は

$$\Delta \epsilon_R = \epsilon_C - \epsilon_E \quad (28)$$

で表わされる。

弾性追従を伴う応力緩和速度は、応力緩和強さを導出する際に想定されるひずみ一定下での応力緩和速度より遅いので

$$\sigma_C > S_{rH}$$

従って、

$$\epsilon_p > \epsilon_C$$

$$\therefore \Delta \epsilon_R < \epsilon_p - \epsilon_E = q\epsilon_n - (S_{rH} + 1.5S_m)(q-1)/E = q\epsilon_n - (q-1)3\bar{S}_m/E \quad (29)$$

これから

$$\Delta \epsilon_R / \epsilon_n < q - (q-1)3\bar{S}_m / (E\epsilon_n) = \underbrace{1 + (q-1) \{ 1 - 3\bar{S}_m / (E\epsilon_n) \}}_{K_e'} \quad (30)$$

Neuber 則によるひずみ範囲の拡大の評価は、基本的には公称ひずみに対する局所ひずみの集中の程度を表わし、一方  $K_e'$  係数は弾性追従による公称ひずみの集中の程度を表わすことを考えると、評価すべきひずみ集中に対する係数としては、両者の積を採用すべきように見える。

しかしながら、Neuber 則は、一定程度の弾性追従を伴う系についても安全側の評価を与える。特に  $(S^*/\bar{S})K^2$  とした簡易評価式を使用する場合は、かなり安全側の評価が与えられる。また、 $K_e'$  係数も安全側の配慮を含んでおり、両者の積を使用する場合には、過大に安全側の評価になると考えられる。

公称ひずみがかなり大きくなった場合の公称ひずみに対する局所ひずみの集中係数は、弾性応力集中係数  $K$  に漸近する。

一般に材料は塑性域に入っても一定の硬化傾向を示す。そこで降伏応力を  $\sigma_Y$ 、ヤング

率をEとして、弾塑性応力ひずみ関係式を下記のような2直線応力ひずみ関係で表わすものとする。

$$\begin{cases} \sigma \leq \sigma_Y & \sigma = E \varepsilon \\ \sigma > \sigma_Y & \sigma = H' (\varepsilon - \sigma_Y / E) + \sigma_Y \end{cases} \quad (31)$$

公称応力、公称ひずみを $\sigma_n$ ,  $\varepsilon_n$ とし、また弾性応力集中係数Kの応力集中部と想定し、応力集中部の応力ひずみを $\sigma$ ,  $\varepsilon$ とする。公称応力が降伏応力 $\sigma_Y$ を上まわっているとすると

$$\begin{cases} \sigma_n = H' (\varepsilon_n - \sigma_Y / E) + \sigma_Y \\ \sigma = H' (\varepsilon - \sigma_Y / E) + \sigma_Y \end{cases} \quad (32)$$

Neuber 則

$$\varepsilon = \frac{\sigma_n}{\sigma} K^2 \varepsilon_n \quad (33)$$

に上記応力ひずみ関係を代入し $\varepsilon$ について解くと

$$\varepsilon = \frac{1}{2H'/E} \left[ - (1 - H'/E) (\sigma_Y / E) \right. \quad (34)$$

$$\left. + \sqrt{\{ (1 - H'/E) (\sigma_Y / E) \}^2 + 4K^2 H'/E \{ (H'/E) \varepsilon_n^2 + (1 - H'/E) (\sigma_Y / E) \varepsilon_n \}} \right] \quad (35)$$

$$\therefore \varepsilon / \varepsilon_n = -\xi + \sqrt{(1 + 2\xi)K^2 + \xi^2} \quad (36)$$

$$\xi = \frac{1 - H'/E}{2H'/E} \frac{\sigma_Y / E}{\varepsilon_n} \quad (37)$$

$\varepsilon_n \rightarrow \infty$ にて、 $\xi \rightarrow 0$ となり、この時 $\varepsilon / \varepsilon_n \rightarrow K$ となる。

以上の考察に基づき本方針では、ひずみ範囲 $\varepsilon_n$ が大きいところでは $K_\varepsilon$ が $KK_0'$ となるように、

$$K_\varepsilon = \text{Max} \left[ \left( S^* / \bar{S} \right) K^2, KK_0' \right] \quad (38)$$

と定めた。

本方針のひずみ集中評価法の妥当性の検証に関して、片持ちはり固定端近傍の切欠きに変位制御型負荷を与えた場合の有限要素解析結果を図 3. 5. 1 2 に示す。ここで、解析には繰返し硬化が十分進んだ場合の切欠底のひずみ範囲の挙動を表すと考えられる動的応力ひずみ関係式を用いている。これより本方針はひずみ集中を適切に評価していることがわかる。

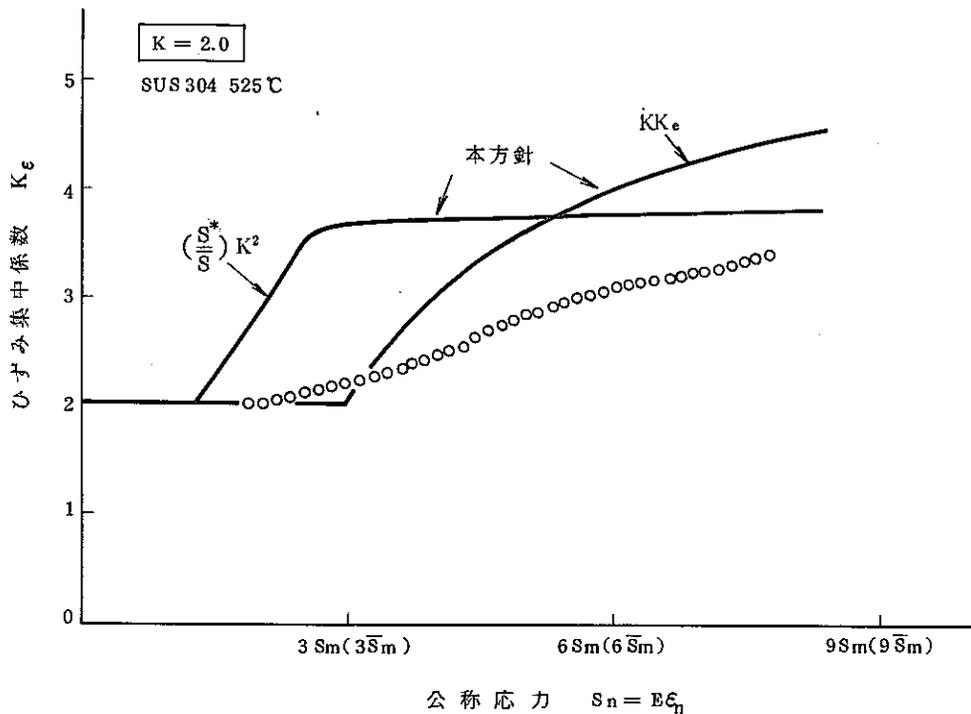


図 3. 5. 1 2  $K\epsilon$  の検証 (切欠付片持ちはりの解析例)

本方針の  $K\epsilon$  係数と通産省告示および ASME Sec. III に与えられているひずみ割増し係数との比較を  $K = 2$  の場合について、図 3. 5. 13 に示す。ASME Sec. III では公称応力範囲が  $3 S_m$  を超える場合について、Tagart<sup>(1)</sup> および Langer<sup>(2)</sup> の解析に基づいたピーク応力の割増し係数  $K_0$  を与えている。割増し係数  $K_0$  の妥当性については、実験的な検討がいくつか行われており、その結果として  $3 S_m$  の近傍を除き ASME Sec. III の係数は安全側の値を与えることが認められている。  $3 S_m$  の近傍で  $K_0$  の値が非安全側になるのは、応力集中点における局所塑性ひずみ集中の効果が十分取り入れられていないからである。告示においてはこの欠点を除くため、Sec. III の  $K_0$  係数に  $3 S_m$  近傍で  $A_0$  係数による補正を施した割増し係数を用いている。  $A_0$  係数は局所塑性ひずみ集中を表わすもので切欠き付材の疲労実験から得られる疲労強度減少係数  $K_f$  から求められる。告示においては  $A_0$  係数による補正は図 3. 5. 13 に示す直線で与えられるが、  $S_n < 3 S_m$

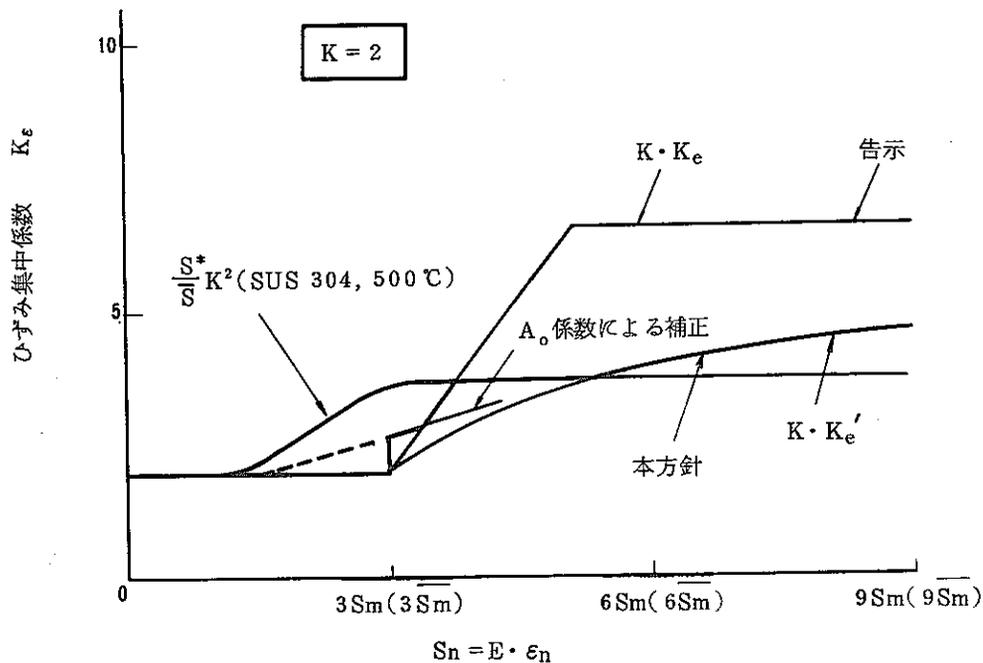


図 3.5.13 ひずみ集中係数  $K_e$  と告示の規定との比較

の部分（図中破線部）は、これを考えなくても良いとしている。これは、 $S_n < 3S_m$ において割り増し係数を考えない方が疲労設計が容易であり、かつ実構造物においては $S_n$ が $3S_m$ に近い値となる事象の繰返し回数は許容繰返し数に対して十分小さい場合が殆んどであり、図中の破線部で示される割り増し係数を用いてもこれを無視した場合と殆んど差が生じないからである。ただし告示解説書において $S_n$ が $3S_m$ に近い事象の繰返し数が多い場合には図3.5.13の破線で示される割り増し係数を用いて疲れ解析を行うのが妥当であるとしている。

本方針におけるひずみ集中係数  $K_e$  は告示のピーク応力の割り増し係数と比較すると  $S_n$  が  $3S_m$ （高温設計では  $3\bar{S}_m$ ）近傍では  $A_0$  係数によるものかわりにノイバー則（の安全側の簡易式）より得られるものを、 $S_n$  が  $3S_m$ （高温計では  $3\bar{S}_m$ ）以上においては  $K_e$  のかわりに  $K_e'$  を用いたものになっている。

これは以下の理由による。

- (a)  $A_0$  係数は疲労強度減少係数  $K_f$  より得られるものであるが、高温域においては  $K_f$  が得られにくいことと、高温設計における疲労評価はひずみ範囲の推定を基礎として行う体系となっているため局所ひずみの推定としてより理論的なNeuber則を用いている。Neuber則は、 $S_n < 3S_m$ （ $3\bar{S}_m$ ）において、多くの場合、局所ひずみの安全側の推

定値を与えることが認められている（図 3.5.4 参照）。

また、本方針において  $S_n$  が  $3 S_m$  ( $3 \bar{S}_m$ ) 以下においても塑性ひずみ集中係数を考えるのは高温設計においては  $S_n$  が  $3 \bar{S}_m$  近傍になる事象の回数が許容繰返し数に比べて十分小さいとはいいがたいからである。

(b) Sec. III（および告示）の  $K_e$  係数は公称ひずみの塑性再分布効果を表わしたものと考えられる。一方、弾性追従パラメータ  $q$  を考慮して、この効果を評価すると公称ひずみの塑性再分布効果として  $K'_e$  が得られる。 $q = 3$  とした場合の  $K'_e$  の妥当性は実験データおよび非弾性解析結果より確認されている（図 3.5.14 参照）。

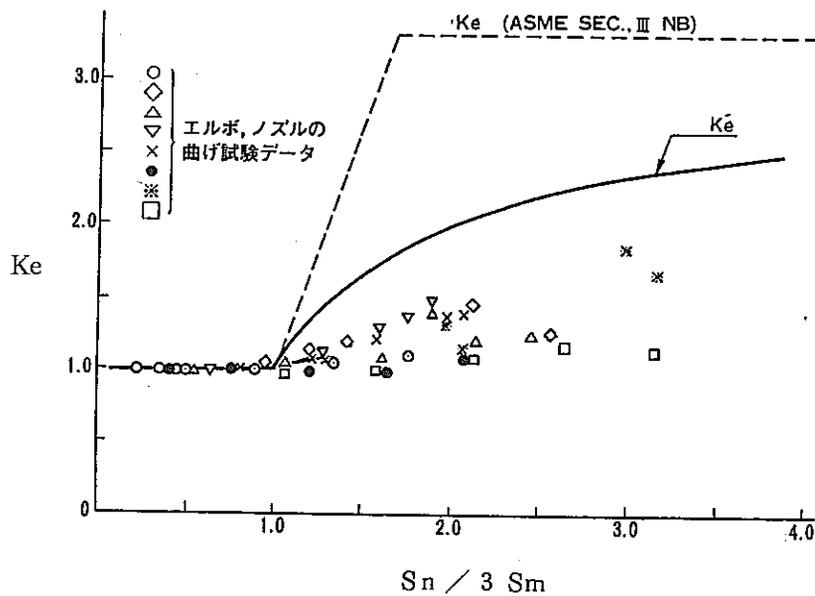


図 3.5.14  $K'_e$  係数

参考文献

- (1) Tagart, S. W. Jr., "Plastic Fatigue Analysis of Pressure Component", ASME Pap. No. 68-PVP-3.
- (2) Langer, B. F., "Design-Stress Bases for Pressure Vessels", Experimental Mechanics, (1971. 1).

24 3.5.3(2)4) は長期1次応力が低い場合の累積クリープ損傷係数の算定法を定めたものである。

25 長期1次応力が低い場合の $D_{CN}$ は一定応力レベル $S_g$ によるクリープ損傷係数 $D_{c1}$ と1次および2次応力が $S_g$ にまで緩和する間の緩和クリープ損傷係数 $D_{c2}$ の和として求める。

$D_{c1}$ と $D_{c2}$ 互いに密接に関連しているのでここでは3.5.3(2)4)a)イ)と3.5.3(2)4)ロ)をまとめて、ASME Code Case N-47と比較しながら解説する。

ASME Code Case N-47におけるクリープ損傷の評価法は、ある応力水準を設定し、これが負荷サイクル間にわたって維持されるものと想定してクリープ損傷値を算出する方法である。この方法によると、たとえ2次応力であってもこれが相当大きい値となると、応力水準が $1.25 S_y$ で定まるようになり、応力緩和挙動を評価の中で十分に反映することが困難となる。すなわち、ASME Code Case N-47の評価法は、応力緩和の小さい1次応力主体の応力場に対しては適切な評価を与えられると考えられるが、2次応力主体の緩和型挙動を呈する応力場に対しては安全側過ぎる取扱いとなっていると考えられる。

これに対し、高速原型炉の負荷条件を考慮した場合、緩和型挙動を適切に評価する必要があると考えられる。

本方針では高速原型炉機器における応力挙動を理解し、緩和型挙動を呈する応力履歴下でのクリープ損傷を合理的に評価することが重要であるとの考えに基づいて、高速原型炉の特徴である長期1次応力が低いことを背景として、そのクリープ損傷の合理的な評価方法を策定した。

なお、応力の緩和に際してひずみの増加を伴う弾性追従は単純緩和と比べ緩和速度を遅らせ、クリープ損傷を増加させる効果があるため、本方針の評価法策定に当っては、この弾性追従効果に十分注意を払い更にその取扱いを具体化した。

本方針における緩和型挙動を呈する応力履歴下のクリープ損傷評価法の策定の流れを示すため、高速原型炉条件で一般的なモデルとなっている片持ちはり<sup>1)</sup>を例にとり、定量的にASME Code Case N-47との比較を行う。

図3.5.15は、片持ちはり<sup>1)</sup>先端に強制変位を与えたときの応力挙動を示したものである。同モデルは、はり<sup>1)</sup>固定端部で時間の経過とともにひずみが蓄積され、弾性追従を呈するので弾性追従場の挙動を調べるにも良好なモデルとなっている。

図3.5.15に示す片持ちはり<sup>1)</sup>固定端部のクリープ損傷をASME Code Case N-47に従っ

応力  
( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

SUS 304 525°C

評価法	評価クリープ損傷値 ( $D_{CN}$ )
$2 \int_0^{t^*} \frac{dt}{T_d^{(*)}}$ による場合	0.052
評価水準 $1.25 S_y$	5.51
$D_{C1} + D^*$ (本方針付録E使用)	$0.325 + 0.017$ ( $0.325 + 0.020$ )

注(※)

$T_d$  = 設計クリープ  
破断時間

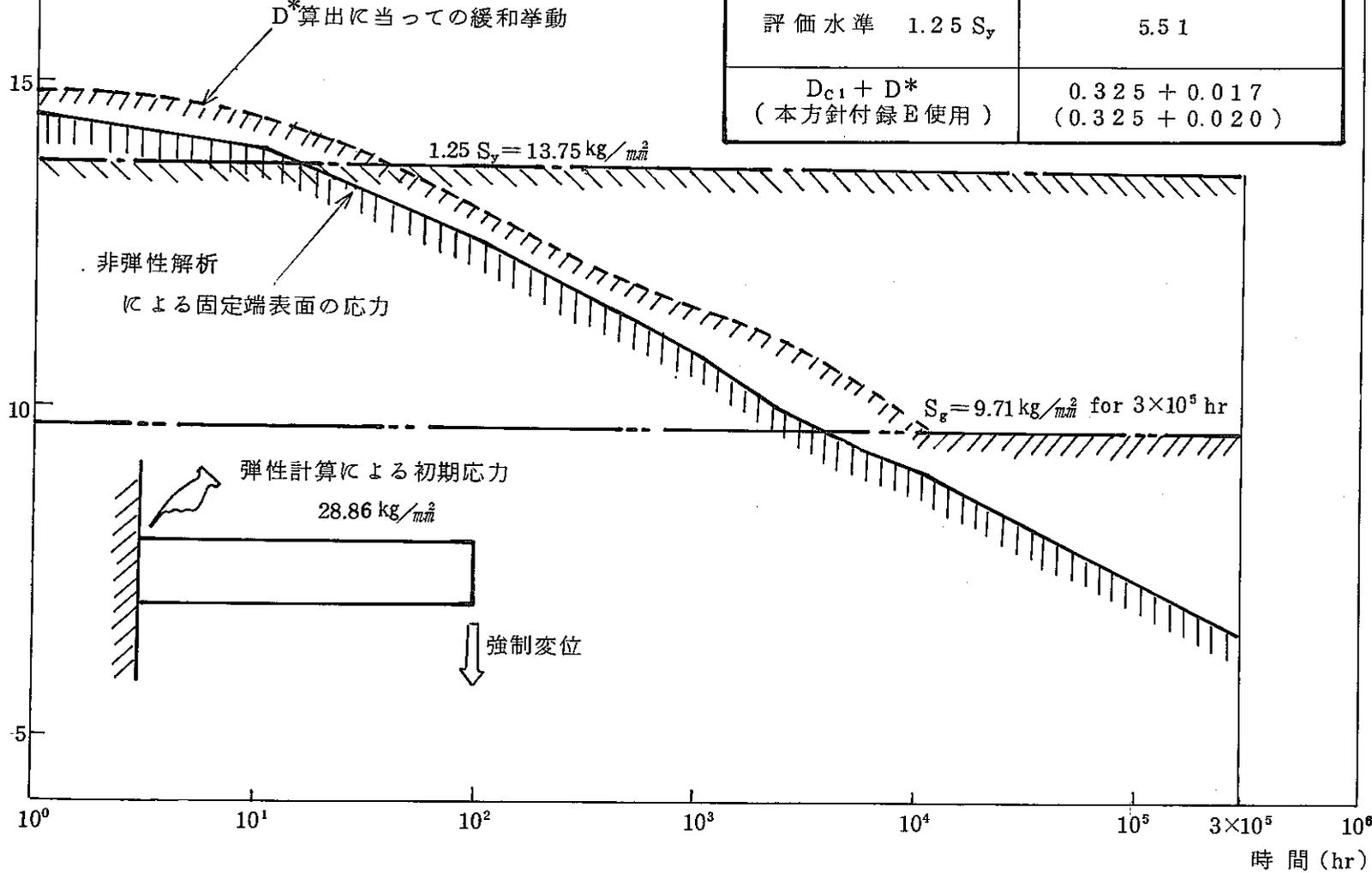


図 3.5.15 クリープ損傷評価応力水準 SUS304 525°C

て評価した場合、弾性計算による初期応力が相当高いため、評価応力水準は  $1.25 S_y$  によって定められる。仮に、安全側にこの応力水準が全寿命に亘って維持されるものとして評価すると、評価応力水準は、時間の経過とともに実際の応力挙動に比べ著しく高い評価応力を与え、結果として極めて保守的なクリープ損傷値を与えることになる。

本方針では、高速原型炉の負荷条件である長期1次応力が低いという特徴を背景として、より合理的なクリープ損傷評価を行うため、「長期1次応力が低い場合」を  $\langle P_L + P_b \rangle \leq S_{LP}$  と定義し、この中で応力緩和挙動を考慮したクリープ損傷評価の具体的な取扱い方法を示している。図 3.5.16 に、長期1次応力が低い場合の（1次+2次）応力に伴うクリープ損傷評価法の策定の流れを示す。

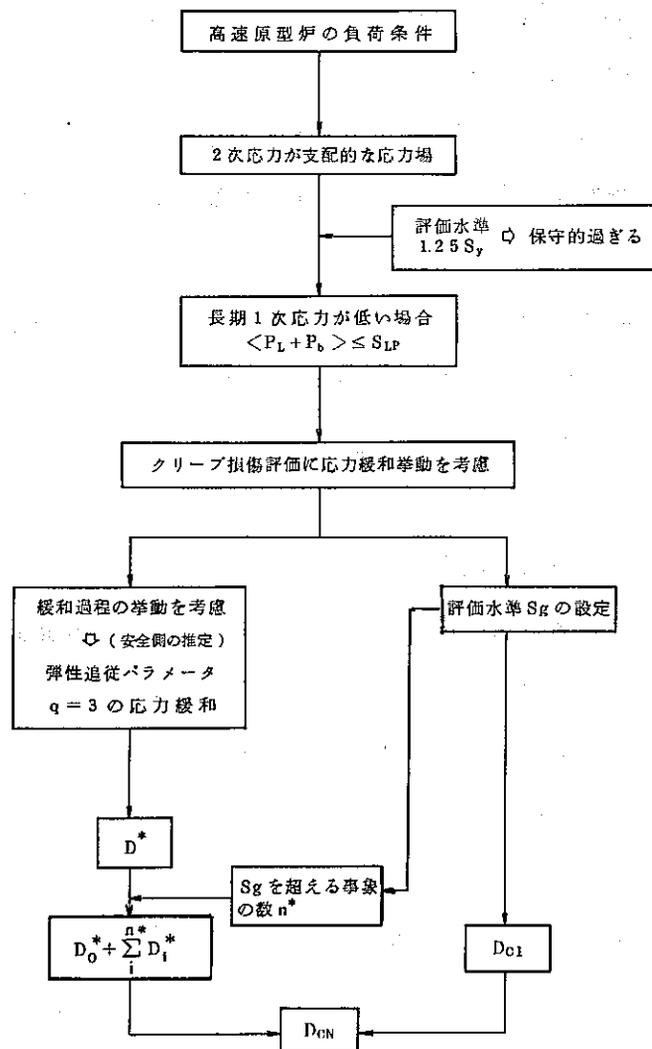


図 3.5.16 長期1次応力が低い場合における  
クリープ損傷評価法策定の流れ

まず同評価法では、評価応力水準を応力の緩和挙動を十分に反映した水準に設定し、これを応力水準  $S_g$  として本方針付録 D に与えた。図 3.5.15 に片持ちはりの場合について、この応力水準  $S_g$  を示す。同図に示すように、評価応力水準  $S_g$  は ASME Code Case N-47 の評価水準  $1.25 S_y$  に比べ実際の緩和挙動により近いものとなっている。

次に、応力水準  $S_g$  による評価の場合、 $S_g$  に到達する時間が長くなるので、その間のクリープ損傷については、別途その緩和挙動を考慮して算定し、このクリープ損傷 ( $D^*$ ) を一定応力水準  $S_g$  に対応するクリープ損傷 ( $D_{c1}$ ) に加算することを規定している。この  $S_g$  に到達するまでのクリープ損傷  $D^*$  は、厳密には応力の組合せ、大きさ及び構造物の形状等により緩和挙動が異なるためそれぞれの場合に応じて異なった値となるが、本方針ではひずみの制限の上から許容される 2 次応力の大きさ、想定すべき弾性追従の程度及び材料のクリープ挙動の統計的ばらつきについて安全側に考慮して緩和挙動を定め、これに基づき  $D^*$  を算出している。

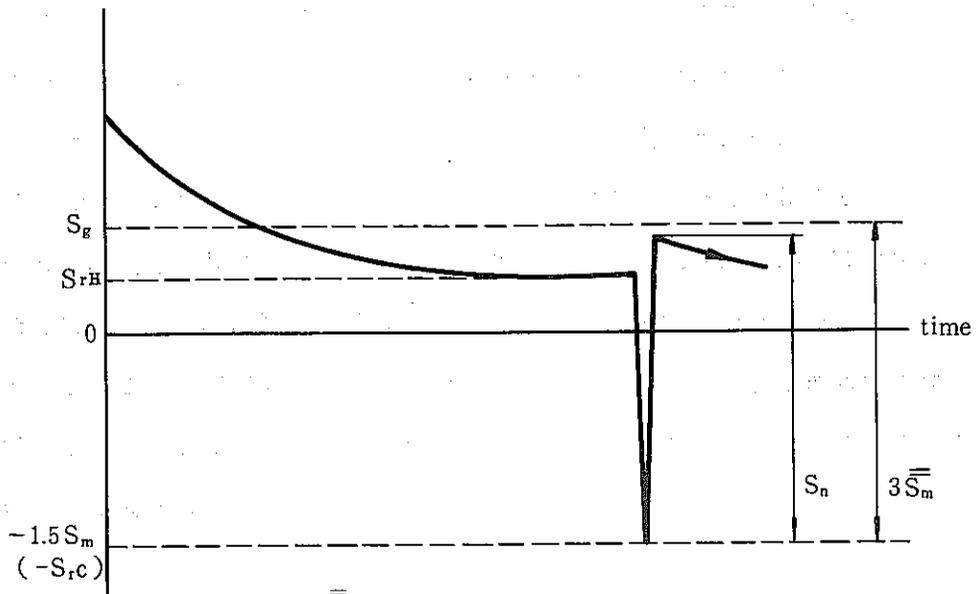
図 3.5.15 の片持ちはりの場合について、 $S_g$  までのクリープ損傷の検討を行う。同図のはり固定端部では弾性追従を呈し応力緩和が遅れる傾向にあるが、本方針ではこのような弾性追従場の応力緩和に対して安全側の取扱いとして弾性追従パラメータ  $q = 3$  の緩和挙動を想定している。なお、初期応力は  $D^*$  算出時のそれと同一である。

図 3.5.15 に示すように、 $D^*$  算出に当って想定した緩和挙動 ( 図中破線 ) は、はり固定端表面の応力挙動 ( 図中実線 ) に対して、安全側でしかも応力緩和を適切に考慮した推定値となっている。

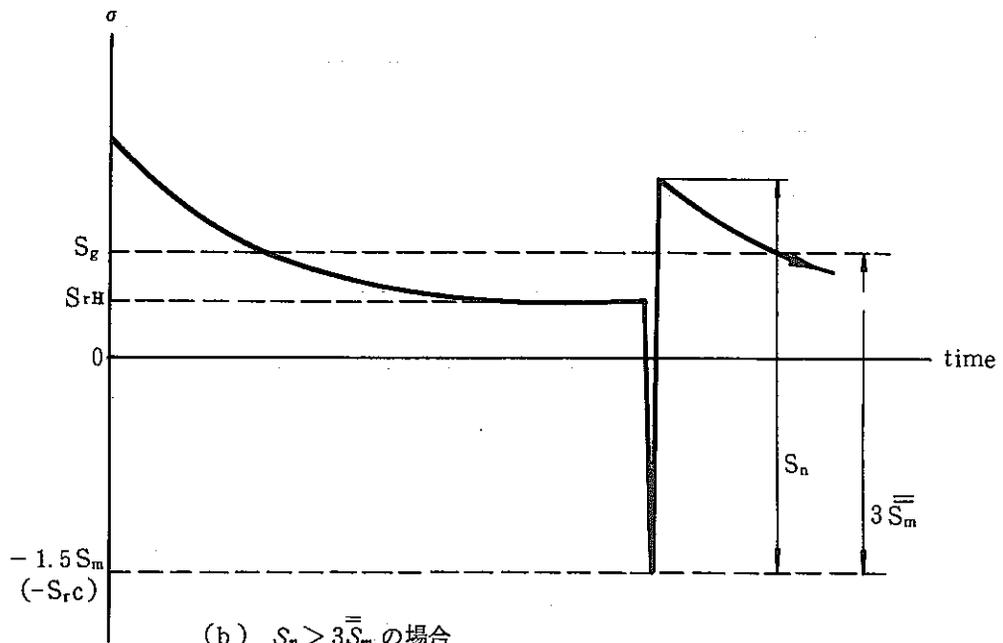
更に、それぞれの評価方法によるクリープ損傷値を同図に示す。同図の評価クリープ損傷値を見ると、評価水準  $1.25 S_y$  による方法が著しく大きい損傷値を与えるのに比べ、本方針による評価結果は実際の応力履歴による値に大幅に近づいており極めて合理的な方法となっている。

本方針では、以上に示した検討例等に基づいて、「長期 1 次応力が低い場合」に緩和挙動を考慮したクリープ損傷評価法を規定した。

本方針では、 $D^*$  を使用してクリープ損傷を算出する回数を  $n^*$  としている。ここで、 $n^*$  は応力サイクルに伴う残留応力が応力水準  $S_g$  を上まわる可能性のある応力サイクル数であり、弾性計算により 1 次及び 2 次応力範囲  $S_n$  と  $3 S_m$  を比較することにより簡便に求められる。この概念を図 3.5.17 に示す。なお、 $D^*$  は片振りに近い負荷に対してはその応力



(a)  $S_n \leq 3\bar{S}_m$  の場合



(b)  $S_n > 3\bar{S}_m$  の場合

図 3.5.17  $3\bar{S}_m$  制限の概念

強さ範囲が  $3\bar{S}_m$  以下であっても第1サイクルの初期値で  $S_g$  を上回る可能性があることを考慮したものである。

26 3.5.3(2)4)b) は長期1次応力が低い場合の  $D_{CP}$  の算定について定めたものである。

$D_{CP}$  は一般規定と同様にして算定されるが、ひずみ範囲  $\epsilon_t$  としては、長期1次応力が

低い場合の算定法(3.5.3(2)3))を用いる。

27 3.5.3(3)1) は「クリープ効果が顕著でない場合」が3.4.ひずみの制限における3.4.2(3)1)の規定によって定義されることを定めたものである。

28 3.5.3(3)2) はクリープ効果が顕著でない場合におけるクリープ疲労損傷制限式を規定したものである。クリープ効果が顕著でない場合は、告示が規定する使用条件(材料のクリープ特性が無視できる条件)に隣接する条件であり、告示の規定( $D_f \leq 1$ )との整合性が良いことが望ましいが、ここでは一般的なクリープ疲労損傷制限式をそのまま採用するものとし、むしろ、高温構造設計としての整合性に重点をおくものとしている。

29 3.5.3(3)3) は累積疲労損傷の算定法を定めたものであり、3.5.3(2)3)と同一である。クリープ効果が顕著でない場合は告示並みの評価で十分であると考えられるが、安全側の評価として長期1次応力が低い場合の評価法を適用することを規定している。

30 3.5.3(3)4) は累積クリープ損傷の算定法を定めたものであり、3.5.3(2)4)と同一としている。

クリープ効果が顕著でない場合は、各温度条件で  $S_g = 1.5 S_m$  としても、 $D_{c1} \leq 0.1$  が満足される条件であり、この条件を考慮した評価法も考えられるが、緩和クリープ損傷係数  $D^*$  及び  $D^{**}$  の策定法との整合性をより良好とする観点から、長期1次応力が低い場合に準じたクリープ損傷評価法を規定したものである。

## 4. 容器の設計方針

### 4.1. 適用範囲

高速原型炉第1種容器について解析による設計を行う場合は、3.に定める一般設計方針及び4.に定めるところを満足するものとする。

#### 【解説】

4.1は高速原型炉第1種容器を「解析による設計」によって設計する場合に、本方針本文第3章に定める一般設計方針の他に、穴と補強に関する制限及び座屈の防止に関する制限を満足する必要があることを定めたものである。

### 4.2 穴と補強

#### 4.2.1 穴の制限

容器に穴を設ける場合は次の規定によるものとする。

- (1) 告示第17条第1項第3、4及び5号の制限を満足し、かつ4.2.3に定めるところにより穴を補強すること。
- (2) 穴の周辺部について応力解析を行い、3.2の制限を満足する場合は、4.2.1(1)の規定によることを要しない。
- (3) 円形の穴であって、告示第17条第3項第1、2、3及び4号の規定に適合する場合は、4.2.1(1)及び(2)の規定にかかわらず、穴の補強をすることを要しない。

#### 4.2.2 1次応力の制限に関する解析の免除

4.2.1(1)又は(3)の規定を満足する穴にあっては、穴の周辺部について1次応力の制限に関する解析を行うことを要しない。

#### 4.2.3 穴の補強

穴を補強する場合は告示第17条第4項に定めるところによるものとする。

ただし、同項第1号ロ及びハに定める「1次一般膜応力強さに基づいて要求される厚さ」及び「1次一般膜応力強さ又は1次膜応力と1次曲げ応力を加えて求めた応力強さのいずれか大きい方に基づいて要求される厚さ」は本方針3.2.3(1)に定め

るところにより算定するものとする。又、同項第3号に定める「別表第12」を本方針の「別表1.10」に、同項第6及び7号に定める「別表第2」を本方針の「別表1.1」にそれぞれ読み替えるものとする。

【解説】

1 4.2.1は、穴の制限について規定したものである。第1種容器の穴と補強に関する告示の規定は第17条に示されている。告示と、本方針における容器に穴を設ける場合の規定の概要を図4.2.1に示す。図4.2.1で……条……項……と記してあるのは告示の該当条項である。

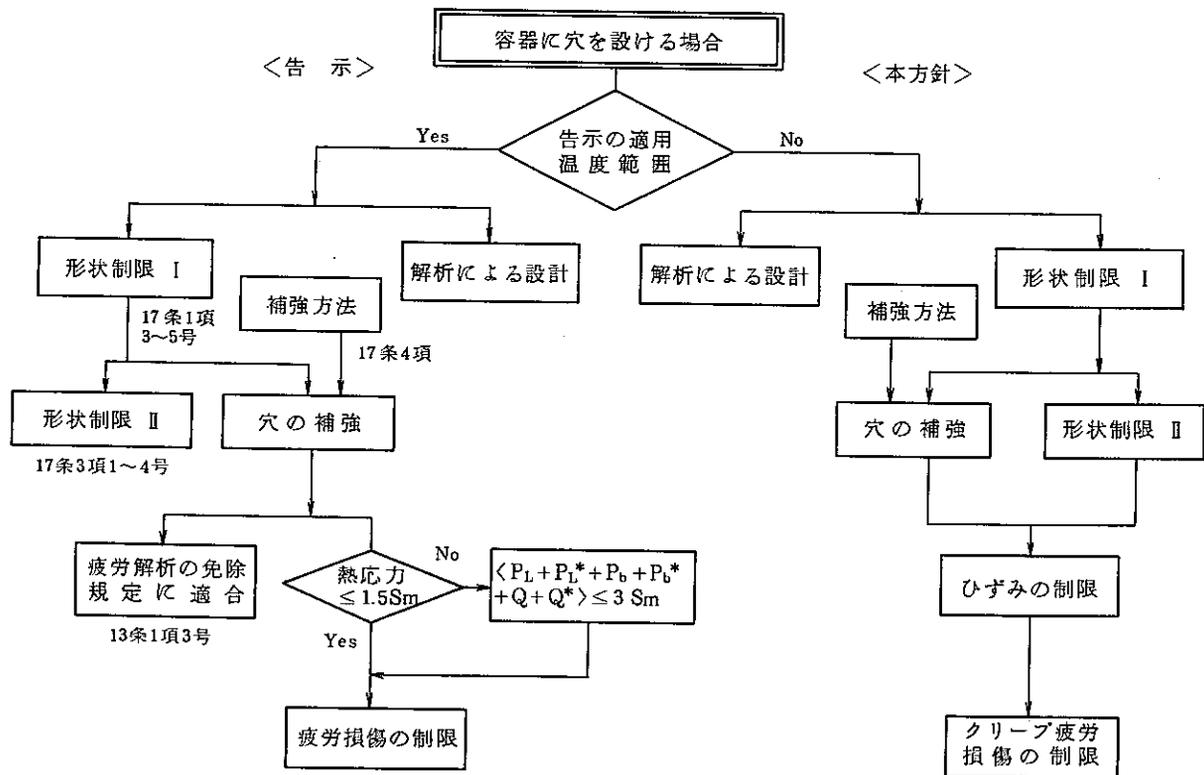


図 4.2.1 容器に穴を設ける場合

穴の補強についての考え方は基本的には告示に準じているが、高速炉機器の使用条件を考慮して告示より相対的に厳しい制限を課している。

2 4.2.2は、1次応力の制限に関する解析の免除について規定したものである。本方針では穴の補強の如何にかかわらず、免除される場合があるとしても1次応力の制限

のみであり、ひずみの制限以降は容器の設計と同一である。これは軽水炉では内圧による応力が支配的であり、1次応力の制限が満足されれば、1次及び2次応力に対する制限は自動的に満足されることが多いが、一方高速炉では、熱応力に代表される2次応力が主要であり、1次及び2次応力としての制限に十分な注意を払うべきと判断したためである。

- 3 4.2.3は、穴の補強について規定したものである。補強面積に関連して計算が要求される「必要板厚」については、告示においては、「1次一般膜応力強さ」若しくは「1次一般膜応力強さ又は1次膜応力強さと1次曲げ応力強さを加えて求めた応力強さのいずれか大きい方」に基づいて要求される板厚と規定し、軽水炉においては実質的には設計条件を満足すれば他の条件は満足することになるが、本方針においては運転状態Ⅰ、Ⅱに対して必要な板厚であることを明記した。

#### 4.3 座屈の防止

- (1) 設計条件、運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ及び試験状態において考えられる座屈様式（時間に依存する座屈を含む。）に関して別表2.4に定める安全係数により、座屈が生じないことを示すものとする。
- (2) 外面に圧力を受ける容器にあつては、次の1)又は2)の付帯規定により、告示第13条第2項及び第19条の規定を満足するものとする。
- 1) 告示の適用温度範囲を超える金属温度にあつては、告示第13条第2項に定める「別表第2」を「別表1.2（別図1.2）」に、「別表第9」を「別表1.4（別図1.4）」にそれぞれ読み替えるものとする。
- 2) 告示第19条に定める容器の形状制限に関しては、該当する座屈様式に関して4.3(1)に定めるところによる場合は、これを満足することを要しない。
- (3) 軸方向の圧縮荷重及び（又は）曲げ荷重を受ける容器にあつては、時間に依存しない座屈に関して付録Gにより4.3(1)に適合することができる。

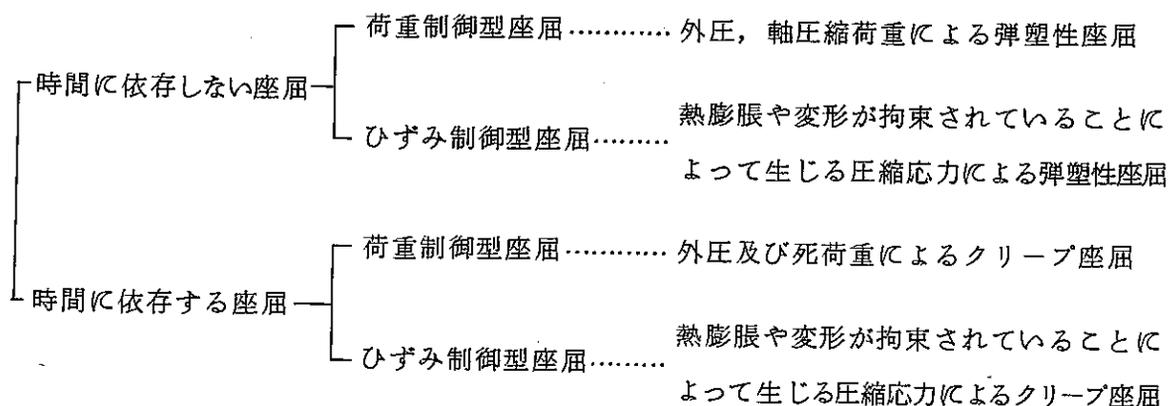
#### 【解説】

- 1 4.3は高速原型炉第1種容器の座屈の防止規定について定めたものである。

2 4.3(1)では運転状態及び座屈様式によって別表2.4のように定まる安全係数により座屈が生じないことを示すことを要求している。

原型炉において防止すべき様式の座屈は、時間依存性及び荷重制御かひずみ制御かによって下記4種に区別される。

(例)



3 4.3(2)では、外圧を受ける容器に関しては告示の規定（形状制限及び許容外圧）に依ることを定めている。ただし、上記の安全係数の確保が別途示される場合は形状に関する制限は満足する必要はない。

4 4.3(3)では、軸圧縮及び（又は）曲げ荷重を受ける円筒容器の時間に依存しない座屈に対しては付録Gに与えられている評価式を用いることができることを定めている。

## 5. 管の設計方針

### 5.1 設計の方法

高速原型炉第1種管について応力係数による弾性解析を用いて設計を行う場合は5の規定によるものとする。

高速原型炉第1種管について5の規定によらず、「4.容器の設計方針」により設計を行うことができる。ただし、この場合は運転状態に関する1次応力の制限を適用する時に、熱膨張応力に関して弾性追従の判定を行い、熱膨張応力を1次応力又は2次応力のいずれかに定めるものとする。

#### 【解説】

1 管の設計方針の規定及び制限値は、基本的に一般設計方針と同一であるが、配管系の特徴に基づき以下の点を考慮している。

(1) 配管系では、荷重を明示できることが多いため、管の設計方針では、一般設計方針の各応力強さを、応力係数を用いて具体的に記述している。

(2) 高速炉の配管系では、運転温度が高く、相対的に大きな熱膨張応力が発生する可能性があるため、一般設計方針の追加事項として熱膨張応力の取扱いに特別の注意を払っている。

2 5.1は高速原型炉第1種管の設計の方法を定めたものである。

管の構造設計法としては、従来応力係数による弾性解析に基づいて簡便に設計する方法が採用されてきた。本方針では、管の設計方針は容器の設計方針に従うか又は、応力係数による簡易解析法を用いる設計方針に従うかいずれを採用しても良いと規定した。

管の設計に簡易解析法を採用したのは下記の理由による。

(1) 告示において、管の設計基準に応力係数による簡易解析法が採用されており、本方針においても告示と同種の方法を採用することが望ましい。

(2) 配管系では、エルボ・分岐管等の応力評価が必要とされる個所が非常に多い。また、配置は3次元的であり複雑となる。そのため、容器と同様な解析を行うのは設計の経済性、迅速性の上から配慮が必要である。

(3) 配管要素は、JIS規格等によりその形状・主要寸法が規格化されているため、いちいち詳細解析を行うことは得策ではない。

- 3 5.の規定によらず 4.容器の設計方針による詳細な応力解析を行う場合、熱膨張応力は、弾性追従の判定を行い、1次応力又は2次応力のいずれかに分類した上で1次応力の制限を適用しなければならない。
- 4 管の設計方針と一般設計方針、告示第1種管及びASME SecIII Class 1 Pipingの規定との比較を表 5.1.1 に示す。

表 5.1.1 管の設計方針と他の設計基準の規定との比較

制限項目		一般設計方針	管の設計方針	告示第1種管	ASME Sec. III Class 1 piping
1 次 応 力 の 制 限	設計条件	$\langle P_m \rangle \leq S_o$ $\langle P_L + P_b \rangle \leq 1.5 S_o$ $\langle P_m + P_m^* \rangle \leq S_m$	$t_m \geq \frac{P_d D_o}{200 S_o + 0.8 P_d} + a$ $\frac{B_1 P_d D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2 I} + \frac{ F_d }{A} \leq 1.5 S_o$ $P_s^* = \text{Max} \left[ \frac{B_1' P D_o}{200 t}, \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{ F_a + F_a^* }{A} \right] \leq S_m$	$t \geq \frac{P D_o}{200 S_m + 0.8 P}$ $\frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 M_i P}{Z_i} \leq 1.5 S_m$	$t_m \geq \frac{P D_o}{2(S_m + P_y)} + A \quad (y=0.4)$ $B_1 \frac{P D_o}{2 t} + B_2 \frac{D_o}{2 I} M_i \leq 1.5 S_m$
	運転状態 I 及び II	$\langle P_m \rangle \leq S_t$ $\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle \leq K_s S_m$ $\langle P_L + P_b \rangle \leq K_t S_t$ $\begin{cases} K_t = 1 + k_s \left( 1 - \frac{\langle P_L \rangle}{S_t} \right) \\ k_s = \alpha_c (K_s - 1) \end{cases}$	$P_s = \text{Max} \left[ \frac{B_1' P D_o}{200 t}, \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{ F_a }{A} \right] \leq S_t$ $\frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o}{2 I} (M_i + M_i^*) + \frac{ F_a + F_a^* }{A} \leq K_s S_m$ $\frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2 I} + \frac{ F_a }{A} \leq K_t S_t$ $\begin{cases} K_t = 1 + k_s \left( 1 - \frac{P_s}{S_t} \right) \\ k_s = \alpha_c (K_s - 1) \end{cases}$		(Level B に対して) $B_1 \frac{P D_o}{2 t} + B_2 \frac{D_o}{2 I} M_i \leq \text{Min} (1.8 S_m, 1.5 S_y)$
	運転状態 III	$\langle P_m + P_m^* \rangle \leq 1.2 S_m$ $\langle P_m \rangle \leq S_t$ $\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle \leq 1.2 K_s S_m$ $\langle P_L + P_b \rangle \leq K_t S_t$	$P_s^* = \text{Max} \left[ \frac{B_1' P D_o}{200 t}, \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{ F_a + F_a^* }{A} \right] \leq 1.2 S_m$ $P_s = \text{Max} \left[ \frac{B_1' P D_o}{200 t}, \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{ F_a }{A} \right] \leq S_t$ $\frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o}{2 I} (M_i + M_i^*) + \frac{ F_a + F_a^* }{A} \leq 1.2 K_s S_m$ $\frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2 I} + \frac{ F_a }{A} \leq K_t S_t$	$P' \leq 1.5 P$	$P' \leq 1.5 P$ $B_1 \frac{P D_o}{2 t} + B_2 \frac{D_o}{2 I} M_i \leq \text{Min} (2.25 S_m, 1.85 S_y)$
	運転状態 II 及び III における制限	$\begin{cases} \sum_i \frac{t_i}{t_{mi}} \leq B \\ \sum_j \frac{t_j}{t_{bj}} \leq 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \sum_i \frac{t_i}{t_{mi}} \leq B \\ \sum_j \frac{t_j}{t_{bj}} \leq 1.0 \end{cases}$		

制限項目		一般設計方針	管の設計方針	告示第1種管	ASME Sec. III Class 1 piping
1 次 応 力 の 制 限	運 転 状 態 Ⅳ	$\langle P_m + P_m^* \rangle \leq S_m V$ $\langle P_m \rangle \leq 2 S_R / 3$ $\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle \leq K_s S_m V$ $\langle P_L + P_b \rangle \leq 2 K_t S_R / 3$	$P_s^* = \text{Max} \left[ \frac{B_1' P D_0}{200t}, \frac{B_1 P D_0}{200t} + \frac{ F_a + F_a^* }{A} \right]$ $\leq 2 S_m$ $P_s = \text{Max} \left[ \frac{B_1' P D_0}{200t}, \frac{B_1 P D_0}{200t} + \frac{ F_a }{A} \right]$ $\leq 2 S_R / 3$ $\frac{B_1 P D_0}{200t} + \frac{B_2 D_0}{2I} (M_i + M_i^*) + \frac{ F_a + F_a^* }{A}$ $\leq 2 K_s S_m$ $\frac{B_1 P D_0}{200t} + \frac{B_2 D_0 M_i}{2I} + \frac{ F_a }{A} \leq 2 K_t S_R / 3$	$P' \leq 2 P$ $\frac{B_1 P_4 D_0}{200t} + \frac{B_2 M_i p}{Z_i} \leq 3 S_m$	Appendix F
	運 転 状 態 Ⅲ 及 Ⅳ に わ た る	$\begin{cases} \sum_i \frac{t_i}{t_{Ri}} \leq B_R \\ \sum_j \frac{t_j}{t_{Rbj}} \leq 1.0 \end{cases}$	$\begin{cases} \sum_i \frac{t_i}{t_{Ri}} \leq B_R \\ \sum_j \frac{t_j}{t_{Rbj}} \leq 1.0 \end{cases}$		
限	試 験 状 態	告示の適用温度範囲内 →告示第13条第1項第1号二  告示の適用温度範囲を超える場合 →運転状態Ⅱとして扱う	告示の適用温度範囲を超える場合 →運転状態Ⅱとして扱う	$\langle P_m + P_m^* \rangle \leq 0.9 S_y$ $\langle P_m + P_m^* \rangle + \begin{cases} 1.35 S_y \\ (\langle P_m + P_m^* \rangle \leq 0.67 S_y) \end{cases}$ $P_b + P_b^* \leq \begin{cases} 2.15 S_y - 1.25 \langle P_m + P_m^* \rangle \\ (0.67 S_y \leq \langle P_m + P_m^* \rangle \leq 0.9 S_y) \end{cases}$	
特 別 な 応 力 制 限	支 圧 力 の 制 限	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;">           支圧荷重を受ける部分又は純せん断荷重を受ける部分は、一般設計方針に定めるところによる。         </div>			
	純 せん 断 力 の 制 限				
制 限	3 軸 力 の 制 限	$(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + (\sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^*) \leq 4 S_m$ $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leq 4 S_t$			
穴と補強		告示第1種管の規定に準じる。			

制限項目	一般設計方針	管の設計方針	告示第1種管	ASME Sec. III Class 1 piping
<div data-bbox="231 268 448 359" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">ひずみの制限</div> <div data-bbox="216 478 463 569" style="margin-bottom: 10px;">クリープラチエットの制限</div> <div data-bbox="216 1129 463 1276" style="margin-bottom: 10px;">促進クリープひずみ評価に用いるパラメータ</div> <div data-bbox="216 1906 463 1997" style="margin-bottom: 10px;">「長期1次応力が低い場合」の判定条件</div>	<div data-bbox="617 237 1489 401" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">ひずみの制限の規定は、下記のとおり、式の読み替えを行い、一般設計方針の3.4の弾性解析による場合の規定を適用する。</div> <div data-bbox="507 464 1012 569" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">\langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / K_t \rangle_{\max} + \langle Q + Q^* \rangle_R \leq S_a</math> </div> <div data-bbox="552 1129 1041 1171" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">X_1 = \langle P_L + (P_b / K_t) \rangle_{\max} / S_{yc}</math> </div> <div data-bbox="552 1318 1041 1371" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">X_2 = \langle P_L^* + (P_b^* / K_t) \rangle_{\max} / S_{yc}</math> </div> <div data-bbox="552 1444 923 1497" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">Y = \langle Q + Q^* \rangle_{R\max} / S_{yc}</math> </div> <div data-bbox="552 1906 834 1948" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">\langle P_L + P_b \rangle \leq S_{LP}</math> </div>	<div data-bbox="1101 464 1620 600" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">\langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / K_t \rangle = \frac{C_1 P D_0}{200t} + \frac{C_2 D_0}{2K_t I} (M_i + M_i^*) + \frac{ F_a + F_a^* }{A}</math> </div> <div data-bbox="1101 663 1561 737" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">\langle Q + Q^* \rangle_R = \frac{C_2 D_0}{2I} (M_i^{**} + M_i^{***})_R</math> </div> <div data-bbox="1086 747 1531 821" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">+ \frac{E_0 \alpha_0  \Delta T_1 }{2(1-\nu)} + (K_I' - 1) \frac{C_1 P_0 D_0}{200t}</math> </div> <div data-bbox="1086 852 1442 894" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">+ C_3 E_{ab}  \alpha_a T_a - \alpha_b T_b </math> </div> <div data-bbox="1101 905 1590 1020" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">\left\{ \begin{array}{l} K_t = 1 + k_s \left( 1 - \frac{C_1 P D_0}{200t S_t} - \frac{ F_a }{A S_t} \right) \\ k_s = \alpha_c (K_s - 1), K_s = 1.5 \end{array} \right.</math> </div> <div data-bbox="1101 1104 1590 1178" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">\langle P_L + (P_b / K_t) \rangle = \frac{C_1 P D_0}{200t} +</math> </div> <div data-bbox="1294 1209 1561 1283" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">\frac{C_2 D_0 M_i}{2K_t I} + \frac{ F_a }{A}</math> </div> <div data-bbox="1101 1304 1635 1377" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">\langle P_L^* + (P_b^* / K_t) \rangle = \frac{C_2 D_0 M_i^*}{2K_t I} + \frac{ F_a^* }{A}</math> </div> <div data-bbox="1086 1430 1590 1503" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">\langle Q + Q^* \rangle_R = \frac{C_2 D_0}{2I} (M_i^{**} + M_i^{***})_R</math> </div> <div data-bbox="1086 1535 1590 1608" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">+ \frac{E_0 \alpha_0  \Delta T_1 }{2(1-\nu)} + (K_I' - 1) \frac{C_1 P_0 D_0}{200t}</math> </div> <div data-bbox="1086 1650 1501 1692" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">+ C_3 E_{ab}  \alpha_a T_a - \alpha_b T_b </math> </div> <div data-bbox="1101 1881 1620 1955" style="margin-bottom: 10px;"> <math display="block">\langle P_L + P_b \rangle = \frac{C_1 P D_0}{200t} + \frac{C_2 D_0 M_i}{2I} + \frac{ F_a }{A}</math> </div>		

制限項目	一般設計方針	管の設計方針	告示第1種管	ASME Sec. III Class 1 piping
	$S_n^* < P_L^* + P_b^* + Q^* >_R$ $S_n = < P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* >_R$ $S'_n = < P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* - Q_{Tb} - Q_{Tb}^* >_R$	$S_n^* = \frac{C_2 D_0}{2 I} (M_i^* + M_i^{***})_R + \frac{1}{A} (F_a^*)_R$ $S_n = \frac{K_1' C_1 P_0 D_0}{200 t} + \frac{C_2 D_0}{2 I} (M_i + M_i^* + M_i^{**} + M_i^{***})_R + \frac{E_0 \alpha_0  \Delta T_1 }{2(1-\nu)} + C_3 E_{ab}  \alpha_a T_a - \alpha_b T_b  + \frac{1}{A} (F_a + F_a^*)_R$ $S'_n = \frac{C_1 P_0 D_0}{200 t} + \frac{C_2 D_0}{2 I} (M_i + M_i^* + M_i^{***})_R + C_4 E_{ab}  \alpha_a T_a - \alpha_b T_b  + \frac{1}{A} (F_a + F_a^*)_R$	$S_n = \frac{C_1 P_0 D_0}{200 t} + \frac{C_2 M_i s}{Z_i} + \frac{E \alpha  \Delta T_1 }{1.4} + C_3 E_{ab}  \alpha_a T_a - \alpha_b T_b $ $S'_n = \frac{C_1 P_0 D_0}{200 t} + \frac{C_2 M_i s}{Z_i} + C_4 E_{ab}  \alpha_a T_a - \alpha_b T_b $	$S_n = C_1 \frac{P_0 D_0}{2 t} + C_2 \frac{D_0}{2 I} M_i + C_3 E_{ab}  \alpha_a T_a - \alpha_b T_b $ $S'_n = C_1 \frac{P_0 D_0}{2 t} + C_2 \frac{D_0 M_i}{2 I} + C_3 E_{ab}  \alpha_a T_a - \alpha_b T_b $
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">補足規定</div> 熱膨張応力強さ範囲の制限  熱応力ラチェットの制限	告示第13条第1項第1号へ (運転状態Ⅲ及び試験状態まで読替え)	$\frac{C_2 D_0}{2 I} (M_i^{**})_R \leq 3 \bar{S}_m$ $X_p = P_s / 1.5 S_{mH}$ $Y_p = \frac{1}{1.5 S_{mH}} \cdot \frac{E_0 \alpha_0  \Delta T_1 }{2(1-\nu)}$ <p>(X<sub>p</sub>, Y<sub>p</sub>)がE, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>又はP領域にあること。</p>	$\frac{C_2 M_i s}{Z_i} \leq 3 S_m$	$C_2 \frac{D_0}{2 I} M_i^* \leq 3 S_m$ $\Delta T_1 \text{ range} \leq \frac{y' S_y}{0.7 E \alpha} C_4$ $C_4 = \begin{cases} \left( \begin{array}{l} y' \text{は } x = \left( \frac{P D_0}{2 t} \right) / S_y \text{ に対して以下のとおり} \\ x = 0.3 \quad \left. \begin{array}{l} 0.5 \\ y' = 3.33 \end{array} \right) , \quad \left. \begin{array}{l} 0.7 \\ 2.00 \end{array} \right) , \quad \left. \begin{array}{l} 0.8 \\ 1.20 \end{array} \right) , \\ 0.8 \\ 0.80 \end{array} \right. \\ \left. \begin{array}{l} 1.1 \text{ (フェライト系)} \\ 1.3 \text{ (オーステナイト系)} \end{array} \right) \end{cases}$

制限項目	一般設計方針	管の設計方針	告示第1種管	ASME Sec. III Class 1 piping
<div data-bbox="210 268 465 415" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">           クリープ疲労損傷の制限         </div> <p data-bbox="210 527 457 674">「長期1次応力が低い場合」の公称ひずみ範囲 <math>\epsilon_n</math> の算定</p> <p data-bbox="210 1100 465 1247">「長期1次応力が低い場合」のピーク熱ひずみ範囲 <math>\epsilon_F</math> の算定</p>	<div data-bbox="605 275 1534 449" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">           クリープ疲労損傷の制限は、下記のとおり、式の読替えを行い、一般設計方針の3.5の弾性解析による場合の規定を適用する。         </div> $\epsilon_n = \frac{S_n}{E} \text{ 又は } \epsilon_n = \frac{S_n^*}{E}$ $\epsilon_t = K_e \epsilon_n + K_T \underline{\epsilon_F}$	$S_n = \frac{K_1' C_1 P_0 D_0}{200t} + \frac{C_2 D_0}{2I} (M_i + M_i^* + M_i^{**} + M_i^{***})_R + \frac{E_0 \alpha_0  \Delta T_1 }{2(1-\nu)} + C_3 E a b  \alpha_a T_a - \alpha_b T_b  + \frac{1}{A} (F_a + F_a^*)_R$ $S_n^* = \frac{C_2 D_0}{2I} (M_i^* + M_i^{***})_R + \frac{1}{A} (F_a^*)_R$ $\epsilon_F = \frac{E_0 \alpha_0  \Delta T_2 }{E(1-\nu)}$	<p data-bbox="1644 1100 1941 1129">○ピーク応力強さ範囲 <math>S_p</math></p> $S_p = \frac{K_1 C_1 P_0 D_0}{200t} + \frac{K_2 C_2 M_i s}{Z_i} + \frac{K_3 E \alpha  \Delta T_1 }{1.4} + K_3 C_3 E a b  \alpha_a T_a - \alpha_b T_b  + \frac{E \alpha  \Delta T_2 }{0.7}$ <p data-bbox="1644 1486 1941 1516">○繰返し応力強さ範囲 <math>S_L</math></p> $S_n \leq 3 S_m : S_L = \frac{S_p}{2}$ $3 S_m < S_n \leq 3 m S_m : S_L = \text{Max} \left\{ \frac{K_e S_p}{2}, \frac{1}{2} \left\{ S_p + A_0 S_n \left( \frac{S_p}{3 S_m} - 1 \right) \right\} \right\}$ <p data-bbox="1685 1766 2169 1822"><math>c &gt; c_c, K_e = 1 + \frac{1-n}{n(m-1)} \left( \frac{S_n}{3 S_m} - 1 \right)</math></p> $S_n > 3 m S_m : S_L = \frac{S_p}{2n}$	<p data-bbox="2211 1100 2507 1129">○ピーク応力強さ範囲 <math>S_p</math></p> $S_p = K_1 C_1 \frac{P_0 D_0}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_0}{2I} M_i + \frac{1}{2(1-\nu)} K_3 E \alpha  \Delta T_1  + K_3 C_3 E a b  \alpha_a T_a - \alpha_b T_b  + \frac{1}{1-\nu} E \alpha  \Delta T_2 $ <p data-bbox="2211 1478 2507 1507">○繰返し応力強さ範囲 <math>S_L</math></p> $S_n \leq 3 S_m : S_L = \frac{S_p}{2}$ $3 S_m < S_n \leq 3 m S_m : S_L = \frac{K_e S_p}{2}$ <p data-bbox="2252 1675 2724 1732"><math>c &gt; c_c, K_e = 1 + \frac{1-n}{n(m-1)} \left( \frac{S_n}{3 S_m} - 1 \right)</math></p> $S_n > 3 m S_m : S_L = \frac{S_p}{2n}$

表 5. 1. 2 表 5. 1. 1 に用いられている記号一覧表

制限項目	一般設計方針			管の設計方針			告示第1種管			ASME Sec. III Class 1 Piping		
	記号	単位	定義	記号	単位	定義	記号	単位	定義	記号	単位	定義
1次応力制限	P <sub>m</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	長期荷重による1次一般膜応力	t <sub>m</sub>	mm	管の最小厚さ	t	mm	管の計算上必要な厚さ	t <sub>m</sub>	in	the minimum required wall thickness
	S <sub>o</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	最高使用温度に対して別表 1.1 に定める値。ただし、最高使用温度が告示の適用温度範囲内にある場合は S <sub>o</sub> を告示別表第 6 に定める値に読替える。	S <sub>o</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	同左 <sup>*</sup> ( <sup>*</sup> 一般設計方針の当該記号に同じ。以下同様)	S <sub>m</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	最高使用温度における別表第 2 に規定する材料の設計応力強さ	S <sub>m</sub>	psi	maximum allowable stress intensity for the material at the Design Temperature taken from Tables I-1.0
	P <sub>L</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	長期荷重による1次局部膜応力	D <sub>o</sub>	mm	管の外径	P	kg/cm <sup>2</sup>	最高使用圧力	P	psi	internal Design Pressure
	P <sub>b</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	長期荷重による1次曲げ応力	a	mm	くされ代	D <sub>o</sub>	mm	管の外径	D <sub>o</sub>	in	outside diameter of the pipe
	P <sub>m</sub> <sup>*</sup>	kg/mm <sup>2</sup>	短期荷重による1次一般膜応力	B <sub>1</sub>	—	告示第 4 8 条に定める応力係数	B <sub>1</sub>	—	応力係数	A	in	an additional thickness to provide for material removed in threading, corrosion or erosion allowance, and material required for structural strength of the pipe during erection, as appropriate
	S <sub>m</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	考えている負荷状態における最高壁厚平均金属温度に対して別表 1.2 に定める値	B <sub>2</sub>	—	同上	t	mm	管の厚さ	B <sub>1</sub> , B <sub>2</sub>	—	primary stress indices for the specific product under investigation (NB-3680)
	S <sub>t</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	考えている負荷状態の最高壁厚平均金属温度及びその状態の累積持続時間に対して別表 1.3 に定める値	t	mm	管の厚さ	M <sub>i p</sub>	kg・mm	管の機械的荷重により生ずるモーメント	t	in	nominal wall thickness of product (NB-3683)
	P <sub>L</sub> <sup>*</sup>	kg/mm <sup>2</sup>	短期荷重による1次局部膜応力	I	mm <sup>4</sup>	管の断面2次モーメント	Z <sub>i</sub>	mm <sup>3</sup>	管の断面係数	M <sub>i</sub>	in-lb	resultant moment due to a combination of Design Mechanical Loads, in.-lb. All Design Mechanical Loads and combinations thereof shall be provided in the Design Specification. In the combination of loads, all directional moment components in the same direction shall be combined before determining the resultant moment (i.e., resultant moments from different load sets shall not be used in calculating the moment M <sub>1</sub> ). If the method of analysis for earthquake or other dynamic loads is such that only magnitudes without relative algebraic signs are obtained, the most conservative combination shall be assumed.
	P <sub>b</sub> <sup>*</sup>	kg/mm <sup>2</sup>	短期荷重による1次曲げ応力	M <sub>i</sub>	kg・mm	自重によるモーメント(注1)	P <sub>3</sub>	kg/cm <sup>2</sup>	運転状態Ⅲにおいて生ずる圧力(運転状態Ⅲの配管方程式中で使用)	P <sub>3</sub>	in	
	K <sub>s</sub>	—	断面形状係数。別表 2.2 に準拠して定める。	F <sub>d</sub>	kg	自重による軸力	P <sub>4</sub>	kg/cm <sup>2</sup>	運転状態Ⅳにおいて生ずる圧力(運転状態Ⅳの配管方程式中で使用)	P <sub>4</sub>	in-lb	
	α <sub>c</sub>	—	クリープ係数。α <sub>c</sub> = 0.5	A	mm <sup>2</sup>	管の断面積	P'	kg/cm <sup>2</sup>	運転状態Ⅲ及び運転状態Ⅳにおいて管の内面に受ける圧力	P'	in-lb	
	t <sub>i</sub>	hr	壁厚平均金属温度が T <sub>i</sub> , 1次一般膜応力強さが <P <sub>m</sub> > <sub>i</sub> である負荷状態 i の累積持続時間。	S <sub>m</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	同左	B <sub>1</sub> '	—	応力係数 ○ 曲管又はエルボ $B_1' = \frac{2R - r}{2(R - r)}$ ○ その他の配管要素 B <sub>1</sub> ' = 1.0	B <sub>1</sub> '	in-lb	
	t <sub>m i</sub>	hr	温度 T <sub>i</sub> , 応力強さが <P <sub>m</sub> > <sub>i</sub> に対して別表 1.3 に定める許容時間	S <sub>t</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	同左	R	mm	曲管又はエルボの曲げ半径	I	in <sup>4</sup>	moment of inertia (NB-3683)
				r	mm	管断面の平均半径	r	mm	管断面の平均半径			

制限項目	一般設計方針			管の設計方針			告示第1種管			ASME Sec. III Class 1 Piping		
	記号	単位	定義	記号	単位	定義	記号	単位	定義	記号	単位	定義
1 次 応 力 の 制 限	$t_j$	hr	壁厚平均金属温度が $T_j$ , 1次応力強さが $\langle P_L + P_b \rangle_j$ である負荷状態 $j$ の累積持続時間	$P$	$\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$	運転圧力						
	$t_{bj}$	hr	温度 $T_j$ , 応力強さ $(\langle P_L + P_b \rangle / K_t)_j$ に対して別表 1.3 に定める許容時間	$F_a$	kg	自重, 熱膨張及びアンカー点の熱変位による軸力(注2)						
	$B$	—	運転状態 I, II 及び III にわたる使用分数の制限値。 $B = 1.0$	$F_a^*$	kg	地震時の管の慣性動及びアンカー点の動的強制変位による軸力						
	$S_{mw}$	$\text{kg}/\text{mm}^2$	$S_{mw} = \text{Min} [2.4 S_m, 2 S_u / 3]$	$M_i^*$	$\text{kg} \cdot \text{mm}$	地震時の管の慣性動によるモーメント						
	$S_u$	$\text{kg}/\text{mm}^2$	考えている負荷状態における最高壁厚平均金属温度に対して別表 1.6 に定める値	$K_s$	—	同左。ただし厚さと外径の比が 0.05 以下の管断面に対して $K_s = 1.27$						
	$S_R$	$\text{kg}/\text{mm}^2$	考えている負荷状態の最高壁厚平均金属温度及びその状態の持続時間に対して別表 1.5 に定める値	$\alpha_c$	—	同左						
	$t_{Ri}$	hr	温度 $T_i$ , 応力強さ $1.5 \langle P_m \rangle_i$ に対して別表 1.5 に定める許容時間	$t_i$	hr	壁厚平均金属温度が $T_i$ , 応力強さが $(P_s)_i$ である負荷状態 $i$ の累積持続時間						
	$t_{Rbj}$	hr	温度 $T_j$ , 応力強さ $1.5 (\langle P_L + P_b \rangle / K_t)_j$ に対して別表 1.5 に定める許容時間	$t_{mi}$	hr	温度を $T_i$ として $t_i$ を定めた応力強さに対して別表 1.3 に定める許容時間						
	$B_R$	—	運転状態 I, II, III 及び IV にわたる使用分数の制限値。 $B_R = 1.0$	$t_j$	hr	壁厚平均金属温度が $T_j$ , 応力強さが $\left\{ \frac{1}{K_t} \left( \frac{B_1 P D_o}{200t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2I} + \frac{ F_a }{A} \right) \right\}_j$ である負荷状態 $j$ の累積持続時間						
				$t_{bj}$	hr	温度を $T_j$ として $t_j$ を定めた応力強さに対して別表 1.3 に定める許容時間						
			$B$	—	同左							
			$S_R$	$\text{kg}/\text{mm}^2$	同左							
			$t_{Ri}$	hr	温度 $T_i$ , 応力強さ $(1.5 P_s)_i$ に対して別表 1.5 に定める許容時間							

制限項目	一般設計方針			管の設計方針			告示第1種管			ASME Sec. III Class 1 Piping		
	記号	単位	定義	記号	単位	定義	記号	単位	定義	記号	単位	定義
1 次 応 力 の 制 限				$t_{Rbj}$	hr	温度 $T_j$ , 応力強さ $\left\{ \frac{1.5}{Kt} \left( \frac{B_1 P D_o}{200t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2I} + \frac{ F_a }{A} \right) \right\}_j$ に対して別表1.5に定める許容時間						
				$B_R$	—	向左  (注1) $M_i$ <ul style="list-style-type: none"> <li>○運転状態 I, II, III に関して 熱膨張応力を1次応力とする場合は熱膨張及びアンカー点の熱変位によるモーメントを加える。</li> <li>○運転状態 IV に関して 考えている負荷状態における自重によるモーメントを含む荷重制御型モーメント。ただし, <math>M_i^*</math> を除く。</li> </ul> (注2) $F_a$ <ul style="list-style-type: none"> <li>○運転状態 IV に関して 考えている負荷状態における自重及び熱膨張による軸力を含む荷重制御型軸力。ただし, <math>F_a^*</math> を除く。</li> </ul>						
特別な 応力 制限	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: 0 auto;">           特別な応力制限に関しては一般設計方針に定めるところによる。         </div>											

制限項目	一般設計方針			管の設計方針			告示第1種管			ASME Sec. III Class 1 Piping			
	記号	単位	定義	記号	単位	定義	記号	単位	定義	記号	単位	定義	
ひ ず み の 制 限	Q	kg/mm <sup>2</sup>	長期2次応力。ただし弾性追従の判定によりP <sub>L</sub> 又はP <sub>b</sub> とするものを除く。	C <sub>1</sub>	—	告示第48条に定める応力係数	C <sub>1</sub>	—	応力係数	C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	—	secondary stress indices for the specific component under investigation (NB-3680)	
	Q*	kg/mm <sup>2</sup>	短期2次応力	C <sub>2</sub>	—	同上	C <sub>2</sub>	—	同上	P <sub>0</sub>	psi	range of service pressure	
	S <sub>a</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	下記のいずれか小さい方の値 イ) 運転状態I, II及び試験状態を通しての最高壁厚平均金属温度に対して時間を10 <sup>4</sup> hrとして別表1.3に定める値の1.25倍の値 ロ) 評価の対象とする<Q+Q*> <sub>R</sub> が属する負荷サイクルの最高壁厚平均金属温度及び、最低壁厚平均金属温度のそれぞれに対して別表1.4又は告示別表第9に定める値の平均値 (設計方針ただし書き参照のこと)	C <sub>3</sub>	—	同上	C <sub>3</sub>	—	同上	Mi	in-lb	resultant range of moment which occurs when the system goes from one service load set to another, in.-lb. Service loads and combinations thereof shall be provided in the Design Specification. In the combination of moments from load sets, all directional moment components in the same direction shall be combined before determining the resultant moment (i.e., resultant moments from different load sets shall not be used in calculating the moment range M <sub>1</sub> ). Weight effects need not be considered in determining the loading range since they are noncyclic in character. If the method of analysis is such that only magnitudes without relative algebraic signs are obtained, the most conservative combination shall be assumed. If a combination includes earthquake effects, M <sub>1</sub> shall be either: (1) the resultant range of moment due to the combination of all loads considering one-half the range of the earthquake; or (2) the resultant range of moment due to the full range of the earthquake alone, whichever is greater.	
				K <sub>i</sub>	—	告示第48条備考第2号に定める係数K	P <sub>0</sub>	kg/cm <sup>2</sup>	運転状態I及び運転状態IIにおいて生ずる圧力	Mis	kg・mm		管の熱膨張、支持点の変位及び機械的荷重により生ずるモーメント
				P <sub>0</sub>	kg/cm <sup>2</sup>	運転圧力の変動範囲	E	kg/mm <sup>2</sup>	室温における別表第11に規定する縦弾性係数	α	mm/mm/°C		室温における別表第12に規定する熱膨張係数
				Mi**	kg・mm	熱膨張及びアンカー点の熱変位によるモーメント。ただし、熱膨張応力を1次応力とする場合は設計方針(5.5.2)式におけるMi**を除外する。	ΔT <sub>1</sub>	°C	線形化した厚さ方向の温度分布における管の内外面の温度差	Eab	psi		average modulus of elasticity of the two sides of a gross structural discontinuity or material discontinuity at room temperature (Table I-6.0)
				Mi***	kg・mm	地震時のアンカー点の動的強制変位によるモーメント	Eab	kg/mm <sup>2</sup>	構造上の不連続部分のうち応力集中度が最も高いと推定した点又は材質を異にする点を境とするそれぞれの側の室温における別表第11に規定する縦弾性係数の平均値	α <sub>a</sub> (α <sub>b</sub> )	in/in/°F		coefficient of thermal expansion on side a(b) of a gross structural discontinuity or material discontinuity at room temperature, psi (Table I-5.0)
		S <sub>yc</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	評価の対象とする状態の最低壁厚平均金属温度に対して別表1.4又は告示別表第9に定める値	E <sub>0</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	温度200°Cに対して告示別表第11に定める値	α <sub>a</sub>	mm/mm/°C	構造上の不連続部分のうち応力集中度が最も高いと推定した点を境とするそれぞれの側における室温における別表第12に規定する熱膨張係数	T <sub>a</sub> (T <sub>b</sub> )	°F	range of average temperature on side a(b) of gross structural discontinuity or material discontinuity, °F. For generally cylindrical shapes, the averaging of T(NB-3653.2) shall be over a distance of $\sqrt{d_a t_a}$ for T <sub>a</sub> and over a distance of $\sqrt{d_b t_b}$ for T <sub>b</sub> .
		S <sub>LP</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	Min(S <sub>RH</sub> , S <sub>g</sub> /g)	α <sub>0</sub>	mm/mm/°C	温度200°Cに対して別表1.10に定める瞬時熱膨張係数	α <sub>b</sub>	mm/mm/°C	構造上の不連続部分のうち応力集中度が最も高いと推定した点を境とするそれぞれの側における平均温度 (計算式: 略)	T <sub>a</sub> T <sub>b</sub>	°C	d <sub>a</sub> (d <sub>b</sub> ) inside diameter on side a(b) of a gross structural discontinuity or material discontinuity, in.
		S <sub>RH</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	運転状態I, II, III及び試験状態における高温使用時間及び評価点の金属温度履歴に基づき別表1.7により定める値	ν	—	考えている負荷サイクル中の最高金属温度に対して別表1.9に定める値。告示の適用温度範囲内ではν=0.3	T <sub>a</sub> T <sub>b</sub>	°C	構造上の不連続部分のうち応力集中度が最も高いと推定した点を境とするそれぞれの側における平均温度 (計算式: 略)	C <sub>4</sub>	—	t <sub>a</sub> (t <sub>b</sub> ) average wall thickness through the length $\sqrt{d_a t_a}(\sqrt{d_b t_b})$ , in. A trial and error solution for t <sub>a</sub> and t <sub>b</sub> may be necessary.
		S <sub>g</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	高温使用時間中、常に存在するとしてもクリープ損傷上許容しうる応力水準	ΔT <sub>1</sub>	°C	モーメント等価線形温度分布を仮定した場合における管壁の内外面の温度差の変動範囲	C <sub>4</sub>	—	応力係数	C <sub>3'</sub>	—	values in Table NB-3681(a)-1
		g	—	応力水準S <sub>g</sub> が長期1次応力の上限に対して有すべき倍率	Eab α <sub>a</sub> α <sub>b</sub> T <sub>a</sub> T <sub>b</sub>		総体的構造不連続又は材質的不連続による熱応力を表わすパラメータであり、告示第46条第4号に定めるところによる。ただし同号に定める「室温における」及び「別表第12」をそれぞれ「200°Cにおける」及び「本方針別表1.10」に読替える。						
		Q <sub>Tb</sub>	kg/mm <sup>2</sup>	長期熱曲げ応力。ただし別表2.3注2)によりP <sub>b</sub> とするものを除く。									

制限項目	一般設計方針			管の設計方針			告示第1種管			ASME Sec. III Class 1 Piping				
	記号	単位	定義	記号	単位	定義	記号	単位	定義	記号	単位	定義		
ひずみの制限	$Q_{Tb}^*$	kg/mm <sup>2</sup>	短期熱曲げ応力	$C_4$	—	告示第48条に定める応力係数				$M_i^*$	in-lb	same as $M_i$ in Eq.(7) except it includes only moments due to thermal expansion and thermal anchor movements		
				$S_{mH}$	kg/mm <sup>2</sup>	考えている負荷サイクル中の最高金属温度に対して別表1.2に定める値								
クリープ疲労損傷の制限	$K_g$	—	ひずみ集中係数	$\Delta T_2$	°C	壁厚方向温度分布とモーメント等価温度分布の間の最大温度差の変動範囲	$K_1$	—	応力係数	$K_1, K_2$	}	—	local stress indices for the specific component under investigation (NB-3680)	
	$K_T$	—	ピーク熱ひずみに関する弾性応力集中係数				$K_2$	—	同上	$K_3$				$E\alpha$
				$\nu$	—	修正ポアソン比	$K_3$	—	同上	$\nu$	—		Poisson's ratio = 0.3	
							$\Delta T_2$	°C	管の内面又は外面において生ずる温度とそれに対応する線形化した温度との差のうちいずれか大きい方の温度 (負の場合は, 0とする)	$ \Delta T_1 $	°F		absolute value of the range of the temperature difference between the temperature of the outside $T_o$ and the temperature of the inside surface $T_i$ of the piping product assuming moment generating equivalent linear temperature distribution	
							$m$	}	—	材料の種類に応じ定められる係数	$ \Delta T_2 $	°F		absolute value of the range for that portion of the nonlinear thermal gradient through the wall thickness not included in $\Delta T_1$ as shown below
							$n$						$m, n$	—
						$A_0$								

## 5.2 1次応力の制限

### 5.2.1 適用範囲

5.2の規定は設計条件，運転状態Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ及び試験状態に対して適用するものとする。

### 5.2.2 設計条件に関する制限

設計条件に関して次の(1)及び(2)の制限を満足しなければならない。

$$(1) \quad t_m \geq \frac{P_d D_o}{200S_o + 0.8 P_d} + a \quad (5.2.1)$$

$t_m$  : 管の最小厚さ (mm)

$S_o$  : 最高使用温度に対して別表 1.1 (別図 1.1) に定める値 (kg/mm<sup>2</sup>)。  
ただし，最高使用温度が告示の適用温度範囲にある場合は  $S_o$  を告示別表第 6 に定める値に読み替えるものとする。

$P_d$  : 最高使用圧力 (kg/cm<sup>2</sup>g)

$D_o$  : 管の外径 (mm)

$a$  : くされ代 (mm)。液体ナトリウム接液面のくされ代は付録 A により定めることができる。

$$(2) \quad \frac{B_1 P_d D_o}{200t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2I} + \frac{|F_d|}{A} \leq 1.5 S_o \quad (5.2.2)$$

$B_1, B_2$  : 告示第 48 条に定める応力係数

$t$  : 管の厚さ (mm)

$I$  : 管の断面 2 次モーメント (mm<sup>4</sup>)

$M_i$  : 自重によるモーメント (kg・mm)

$F_d$  : 自重による軸力 (kg)

$A$  : 管の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$S_o, P_d, D_o$  : 5.2.2 (1) に定めるところによる。

### 5.2.3 運転状態Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ及びⅣに関する制限

#### (1) 弾性追従の判定

1) 熱膨張応力に関して弾性追従の判定を行い，熱膨張応力を 1 次応力又は 2 次

応力のいずれかに定めるものとする。

2) 弾性追従の判定に関して付録Bにすることができる。

(2) 運転状態Ⅰ及びⅡに関する制限

運転状態Ⅰ及びⅡに関して次の1)及び2)の制限を満足しなければならない。

$$1) \begin{cases} P_s^* \leq S_m & (5.2.3) \\ P_s \leq S_t & (5.2.4) \end{cases}$$

$$P_s^* = \text{Max} \left\{ \frac{B_1' P D_o}{200 t}, \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{|F_a + F_a^*|}{A} \right\} \quad (5.2.5)$$

$$P_s = \text{Max} \left\{ \frac{B_1' P D_o}{200 t}, \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{|F_a|}{A} \right\} \quad (5.2.6)$$

$S_m, S_t$  : 3.2.3(1)1)に定めるところによる。

$B_1'$  : 応力係数。曲管又はエルボに関して、

$$B_1' = \frac{2R-r}{2(R-r)} \quad (5.2.7)$$

とし、その他の配管要素に関しては、 $B_1' = 1.0$ とする。ここに $R$ は曲管又はエルボの曲げ半径(mm)、 $r$ は管断面の平均半径(mm)である。

$P$  : 運転圧力(kg/cm<sup>2</sup>g)

$F_a$  : 自重、熱膨張及びアンカー点の熱変位による軸力(kg)

$F_a^*$  : 地震時の管の慣性動及びアンカー点の動的強制変位による軸力(kg)

$B_1, D_o, t, A$  : 5.2.2(2)に定めるところによる。

$$2) \begin{cases} \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o}{2 I} (M_i + M_i^*) + \frac{|F_a + F_a^*|}{A} \leq K_s S_m & (5.2.8) \\ \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2 I} + \frac{|F_a|}{A} \leq K_t S_t & (5.2.9) \end{cases}$$

ここに

$$\begin{cases} K_t = 1 + k_s (1 - P_s / S_t) & (5.2.10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} k_s = \alpha_c (K_s - 1) & (5.2.11) \end{cases}$$

$S_m, S_t, P, F_a, F_a^*$  : 5.2.3(2)1) に定めるところによる。

$M_i$  : 自重によるモーメント (kg・mm)。ただし、熱膨張応力を1次応力とする場合は、熱膨張及びアンカー点の熱変位によるモーメントを加えるものとする。

$M_i^*$  : 地震時の管の慣性動によるモーメント (kg・mm)

$\alpha_c$  : 3.2.3(1)2) に定めるところによる。

$K_s$  : 断面形状係数 (厚さと外径の比が0.05以下の管断面に対して  $K_s = 1.27$  とする。)

$B_1, B_2, D_o, t, I, A$  : 5.2.2(2)に定めるところによる。

### (3) 運転状態Ⅲに関する制限

運転状態Ⅲに関して次の1)及び2)の制限を満足しなければならない。

$$1) \begin{cases} P_s^* \leq 1.2 S_m & (5.2.12) \\ P_s \leq S_t & (5.2.13) \end{cases}$$

ここに用いる記号の意義はすべて5.2.3(2)1)に定めるところによる。

$$2) \begin{cases} \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o}{2 I} (M_i + M_i^*) + \frac{|F_a + F_a^*|}{A} \leq 1.2 K_s S_m & (5.2.14) \\ \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2 I} + \frac{|F_a|}{A} \leq K_t S_t & (5.2.15) \end{cases}$$

ここに用いる記号の意義はすべて5.2.3(2)2)に定めるところによる。

### (4) 運転状態Ⅰ、Ⅱ及びⅢにわたる制限

運転状態Ⅰ、Ⅱ及びⅢにわたって、使用分数に関する次の制限を満足しなければならない。

$$\begin{cases} \sum_i \frac{t_i}{t_{mi}} \leq B & (5.2.16) \\ \sum_i \frac{t_j}{t_{bj}} \leq 1.0 & (5.2.17) \end{cases}$$

$t_i$  : 壁厚平均金属温度が  $T_i$ 、応力強さが  $(P_s)_i$  である負荷状態  $i$  の累積持続時間 (hr)。 $\sum_i t_i$  は1.2.1(2)に定める高温使用時間を下回ってはなら

ない。

$t_{mi}$  : 温度を  $T_i$  として  $t_i$  を定めた上記の応力強さに対して別表 1.3 (別図 1.3) に定める許容時間 (hr)

$t_j$  : 壁厚平均金属温度が  $T_j$ , 応力強さが

$$\left\{ \frac{1}{K_t} \left( \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2 I} + \frac{|F_a|}{A} \right) \right\}_i$$

である負荷状態  $j$  の累積持続時間 (hr)。 $\sum_j t_j$  は 1.2.1 (2) に定める高温使用時間を下回ってはならない。

$t_{bj}$  : 温度を  $T_j$  として  $t_j$  を定めた上記の応力強さに対して別表 1.3 (別図 1.3) に定める許容時間 (hr)

$t_i$  及び  $t_{mi}$  を定める応力強さを規定する記号はすべて 5.2.3 (1) に定めるところにより、 $t_j$  及び  $t_{bj}$  を定める応力強さを規定する記号はすべて 5.2.3 (2) (2) に定めるところによる。B は 3.2.3 (3) に定めるところによる。

(5) 運転状態  $N$  に関する制限

運転状態  $N$  に関して次の 1) 及び 2) の制限を満足しなければならない。

$$1) \left\{ \begin{array}{l} P_s^* \leq 2 S_m \quad (5.2.18) \\ P_s \leq 2 S_R / 3 \quad (5.2.19) \end{array} \right.$$

$S_R$  : 3.2.3 (4) (1) に定めるところによる。

その他の記号の意義は 5.2.3 (2) (1) に定めるところによる。ただし  $P$  は考えている負荷状態における過渡的内圧を含む内圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2 g$ ) とする。

$$2) \left\{ \begin{array}{l} \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o}{2 I} (M_i + M_i^*) + \frac{|F_a + F_a^*|}{A} \leq 2 K_s S_m \quad (5.2.20) \\ \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2 I} + \frac{|F_a|}{A} \leq \frac{2}{3} K_t S_R \quad (5.2.21) \end{array} \right.$$

$S_R, P$  : 5.2.3 (5) (1) に定めるところによる。

$S_m, B_1, B_2, D_o, t, K_s, M_i^*, F_a^*$  : 5.2.3 (2) (2) に定めるところによる。

$K_t$  : 5.2.3 (2) (2) に定めるところによる。ただし、(5.2.10) 式における  $P_s$

は 5.2.3(5)1) に定めるところによるものとし、同式右辺の  $S_t$  を  $2 S_R / 3$  に読み替えるものとする。

$M_i$  : 考えている負荷状態における自重によるモーメントを含む荷重制御型モーメント (kg/mm)。ただし、 $M_i^*$  を除く。

$F_a$  : 考えている負荷状態における自重及び熱膨張による軸力を含む荷重制御型軸力 (kg)。ただし、 $F_a^*$  を除く。

(6) 運転状態 I, II, III 及び IV にわたる制限

運転状態 I, II, III 及び IV にわたって、使用分数に関する次の制限を満足しなければならない。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i \frac{t_i}{t_{Ri}} \leq B_R \quad (5.2.22) \\ \sum_j \frac{t_j}{t_{Rbj}} \leq 1.0 \quad (5.2.23) \end{array} \right.$$

$t_i, t_j$  : 5.2.3(4)に定めるところによる。

$t_{Ri}$  : 温度  $T_i$ , 応力強さ  $(1.5 P_s)_i$  に対して別表 1.5 (別図 1.5) に定める許容時間 (hr)

$t_{Rbj}$  : 温度  $T_j$ , 応力強さ

$$\left\{ \frac{1.5}{K_t} \left( \frac{B_1 P D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2 I} + \frac{|F_a|}{A} \right) \right\}_j$$

に対して別表 1.5 (別図 1.5) に定める許容時間 (hr)

$t_i$  及び  $t_{Ri}$  を定める応力強さを規定する記号はすべて 5.2.3(5)1) に定めるところによる。 $t_j$  及び  $t_{Rj}$  を定める応力強さを規定する記号はすべて 5.2.3(5)2) に定めるところによる。 $B_R$  は 3.2.3(5)に定めるところによる。

5.2.4 試験状態に関する制限

告示の適用温度範囲を超える試験状態に関しては 5.2.3(2), (4)及び(6)に定める運転状態 II に関する制限を満足するものとする。

【解説】

1 5.2 は高速原型炉第 1 種管の 1 次応力の制限について定めたものである。管の 1 次応力

制限は、基本的に告示に定める応力係数を用いた第1種管の設計方法を、クリーブ温度領域においても適用できるように拡張した規定となっている。

2 5.2.2(1)は、高速原型炉第1種管の最小厚さについて定めたものである。(5.2.1)式は、告示第49条第1項第1号の管の厚さの計算式と対応するものであるが、クリーブ効果を考慮して $S_m$ を $S_0$ と読み替え、さらに液体ナトリウム接液面のくされ代を考慮して定めている。

3 5.2.2(1)は3.2.2(1)を管について具体的に規定したものである。

4 5.2.3(1)は、弾性追従の判定について定めたものである。

一般設計方針では2次応力の再分類に当たっての弾性追従の判定はひずみの制限の冒頭で行われるが、管の設計方針においてはまず熱膨張応力に対する弾性追従の判定を行い熱膨張応力を1次応力又は2次応力に分類した上で、1次応力の制限を適用する必要がある。

5 5.2.3(2)1)、5.2.3(3)1)及び5.2.3(5)1)は、それぞれ一般設計方針における3.2.3(1)1)、3.2.3(2)1)及び3.2.3(4)1)に対応する1次一般膜応力に対する制限である。

告示及びASME Sec.Ⅲでは、1次一般膜応力に対する制限は、板厚制限式の中に含まれるとして、特別に規定を設けていない。しかし管の設計方針の1次応力制限では、1次一般膜応力に対して、一般設計方針と同様に各運転状態別にその制限を規定している。このため、管の設計方針では内圧による1次一般膜応力の制限において、告示にない新たな応力係数 $B_1'$ 係数を導入し、内圧による延性破断、クリーブ破断を防止している。

ここで、 $B_1'$ 係数により定まる応力強さは、内圧により生じる膜応力を表わしており、又その係数の値はエルボに対して $\frac{2R-r}{2(R-r)}$ 、その他の配管要素に対して1と与えられる。なお、エルボに対する $B_1$ 係数は回転半径 $R$ 、断面円半径 $r$ の円環に内圧が作用したときの最大応力と一致するように導出されたものである。

6 管の設計方針では、配管方程式の中に従来考えられていなかった軸力の項を追加している。これは以下の理由による。

(1) 原型炉では、内圧が低いいため配管方程式の中で軸力の占る割合が軽水炉の場合に比べ相対的に大きくなり同項を無視できないので、これを追加する必要がある。

(2) 「原子力発電所の耐震設計基準において、軸力による全断面平均応力を制限する規定がある。本方針は耐震設計に関する許容応力も含むため、同耐震設計基準(案)と整合をとり軸力項を追加した。

(3) 熱膨張軸力による膜応力に関しては、上述(1)及び(2)の他に、Code Case N-47においてこれを1次応力と分類していることを配慮して、配管方程式の中に1次応力として追加した。

7 5.2.3(2)2), 5.2.3(3)2), 5.2.3(5)2)における長期荷重及び短期荷重が加わったときの1次膜応力に1次曲げ応力を加えて求めた応力強さに対する制限は主に延性破断、過大な塑性変形を防止する目的で定めたものである。対象荷重は内圧、自重、地震時の管の慣性動によるモーメント及び軸力として寄与する荷重である。

この制限が保守的であることは、次に示す配管各要素に対する検討結果から導びかれる。

#### (1) 直 管

1次膜応力に1次曲げ応力を加えて求めた応力強さの制限を極限解析により示すことを規定したASME Sec III NB-3228.2の規定に従って、運転状態I, II, IIIに対し応力係数を用いた1次応力制限が崩壊に対して妥当な防止規定となっていることを確かめる。但しオーステナイト系ステンレス鋼では、 $S_m = 0.9 S_y$ としていることから、極限解析によるモーメント下限界 $M_L$ と許容モーメント $M_a$ の関係は $M_a = 0.9 M_L$ で表わされるとする。運転状態I, IIに対する許容モーメントを $M_{a1}$ 、モーメント下限界を $M_{L1}$ とすると

$$M_{L1} = Z_p S_y = Z_p \cdot \frac{S_m}{0.9}$$

ここに、 $Z_p$  : 塑性断面係数  $= K_s \frac{2I}{D_o}$

$$M_{a1} = 0.9 M_{L1}$$

よって $B_2 = 1.0$ として次の形に書ける。

$$B_2 \frac{D_o M_{a1}}{2I} = K_s S_m$$

運転状態IIIでは、上記の1.2倍が許容される(Sec III NB3224.1)から、許容モーメントを $M_{a3}$ とすると、

$$B_2 \frac{D_o M_{a3}}{2I} = 1.2 K_s S_m$$

運転状態IVに対してはSec III Appendix Fより、降伏応力を $2.3 S_m$ とした下界極限解

析による崩壊モーメント  $M_{L4}$  を基準として、許容モーメントは次のようになる。

$$M_{L4} = Z_p (2.3 S_m)$$

$$M_{a4} = 0.9 M_{L4}$$

したがって

$$B_2 \frac{D_o M_{a4}}{2I} = 2.07 K_s S_m$$

となって、1次応力制限はすべての運転状態において崩壊の防止と整合している。

(ロ) エルボ及びティー

図 5. 2. 1, 図 5. 2. 2 はそれぞれエルボの面内曲げにおける実験結果及びティーの面内曲げにおける解析結果の例であるが、各運転状態における制限が保守的であることを示している。

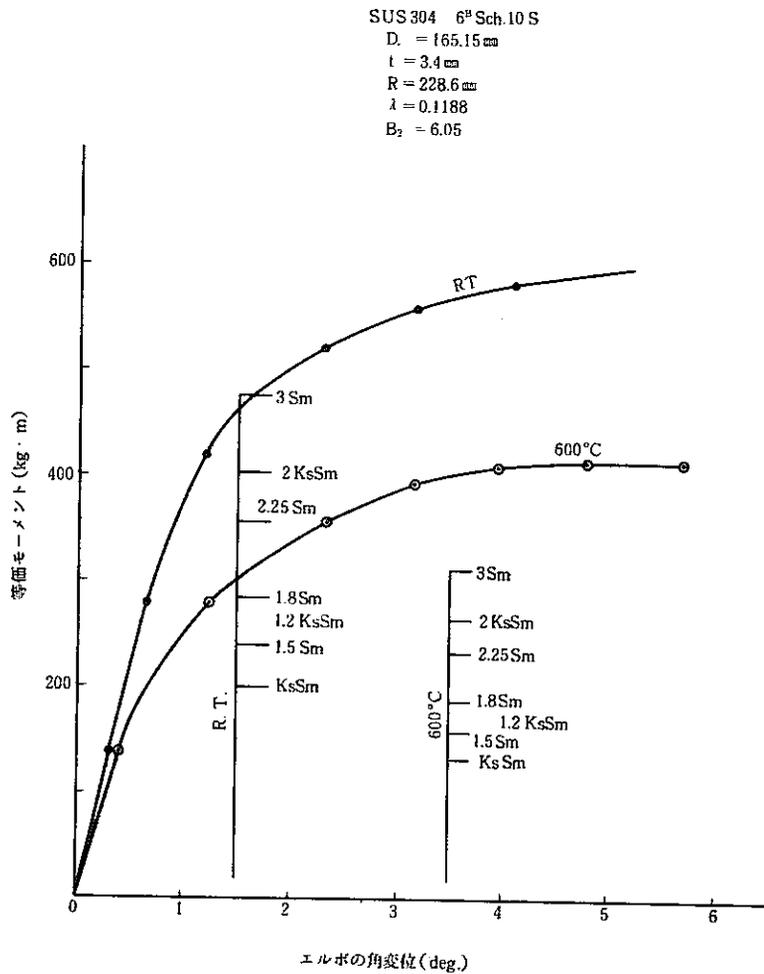


図 5. 2. 1 エルボの面内曲げにおけるモーメントと角変位の関係

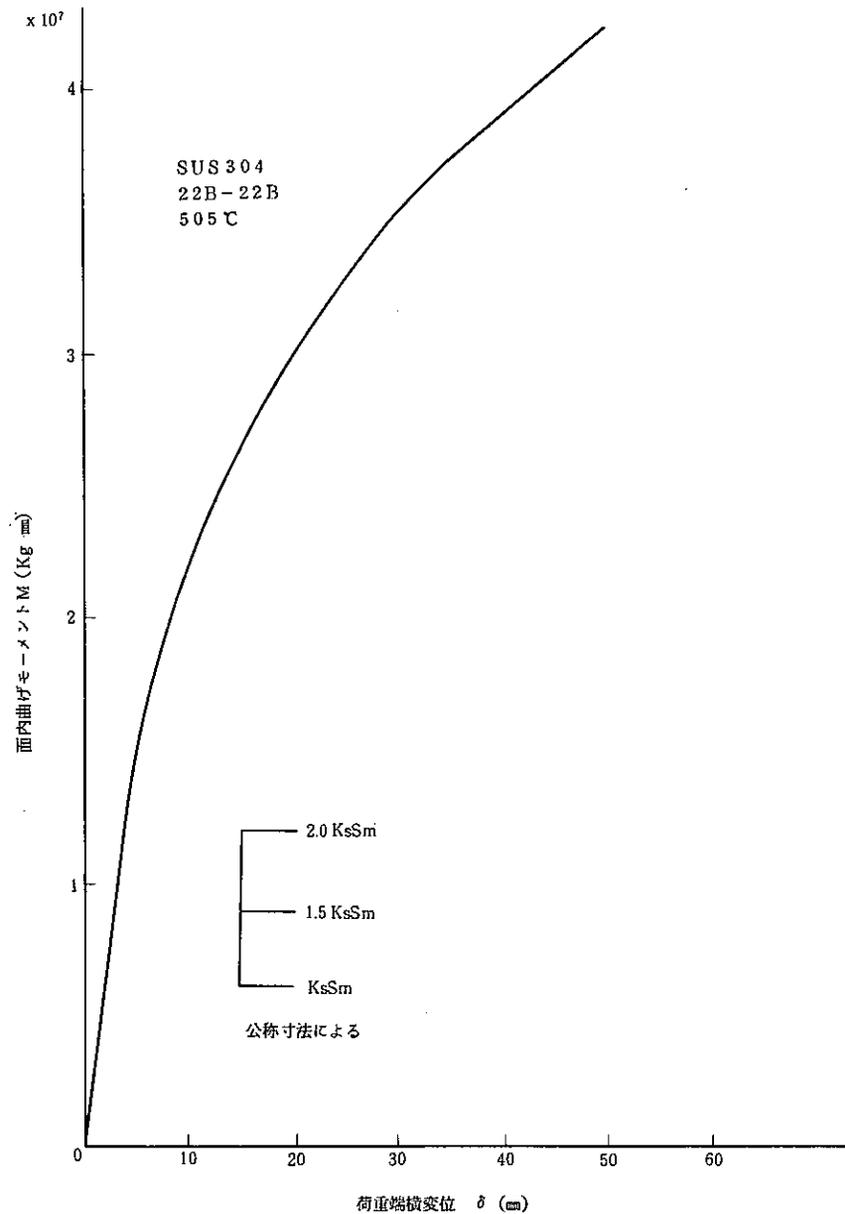


図 5. 2. 2 ティーの面内曲げにおけるモーメントと横変位

8. 5. 2. 3 (2) 2), 5. 2. 3 (3) 2) 及び 5. 2. 3 (5) 2) における長期荷重が負荷されたときの 1 次膜応力に 1 次曲げ応力を加えて求めた応力強さに対する制限の考え方は次のとおりである。

上述の規定では、B 係数は延性破断、過大な塑性変形、クリーブ破断及び過大なクリーブ変形を防止するために用いられている。一方告示 48 条の応力係数  $B_1$  及び  $B_2$  は、延性破断及び過大な塑性変形を防止するために使用されていると考えられるため、これを告示の温度範囲外で用いるときはクリーブ破断及び過大なクリーブ変形の防止という点から検討する必要がある。この検討を配管の主要素であるエルボについて以下に示す。

エルボの長期曲げ荷重に対して，1次応力制限では

- a) 偏平化の進行による応力及び変形（ひずみ，角変位等）の加速度的増加
- b) クリープによる偏平化に帰因する耐荷能力の低下
- c) 微小変形理論からの逸脱

を防止する必要がある。これは「1次応力によって使用期間にわたって実質的に断面の偏平化が進行しない」ことによって防止できる。

図 5. 2. 3，図 5. 2. 4 及び図 5. 2. 5 は一定モーメントの下でのエルボのクリープ変形を次の条件のもとに解析した結果である。

- 形状，寸法：平均半径 400.85 mm，板厚 11.1mm，曲り半径 1219.2 mm
- 材 料：SUS 304
- 使用期間： $2.1 \times 10^5$  時間

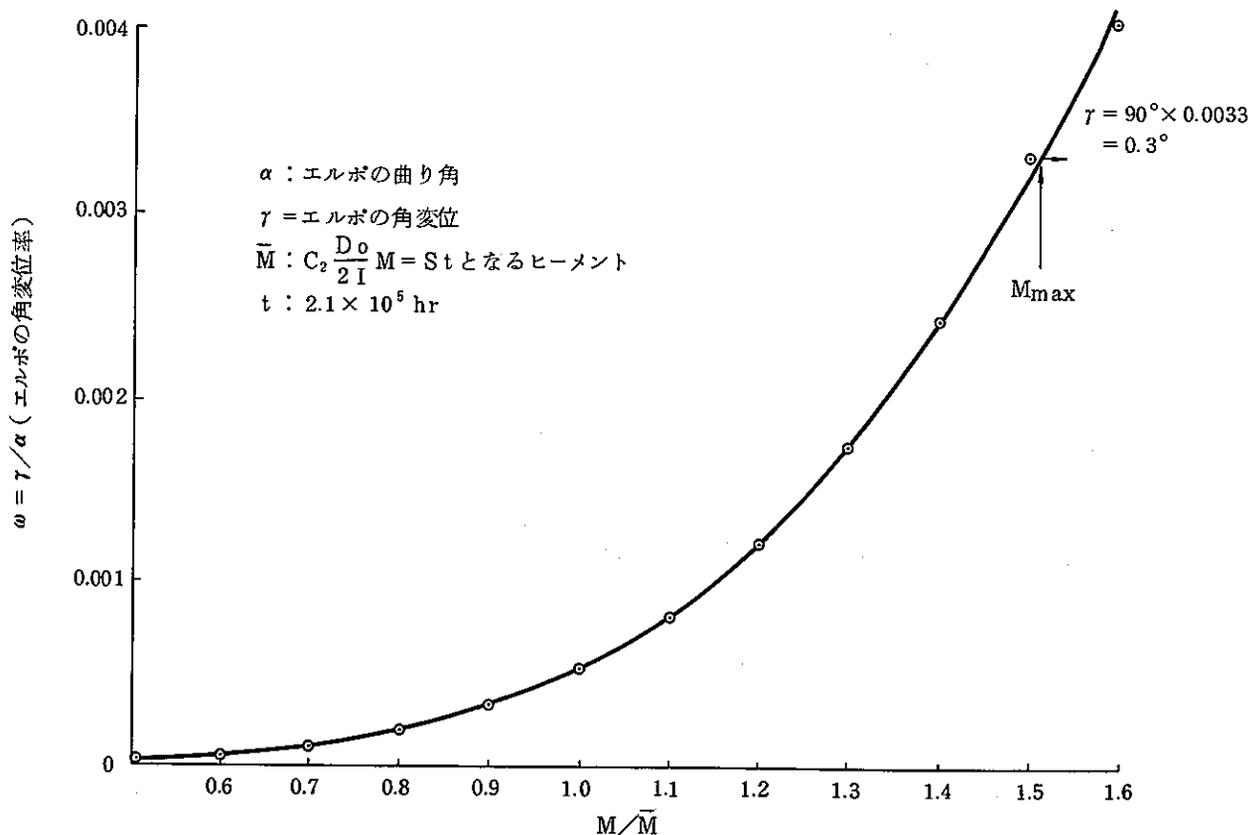


図 5. 2. 3 エルボの面内曲げ定モーメント・クリープによる角変位とモーメントの関係

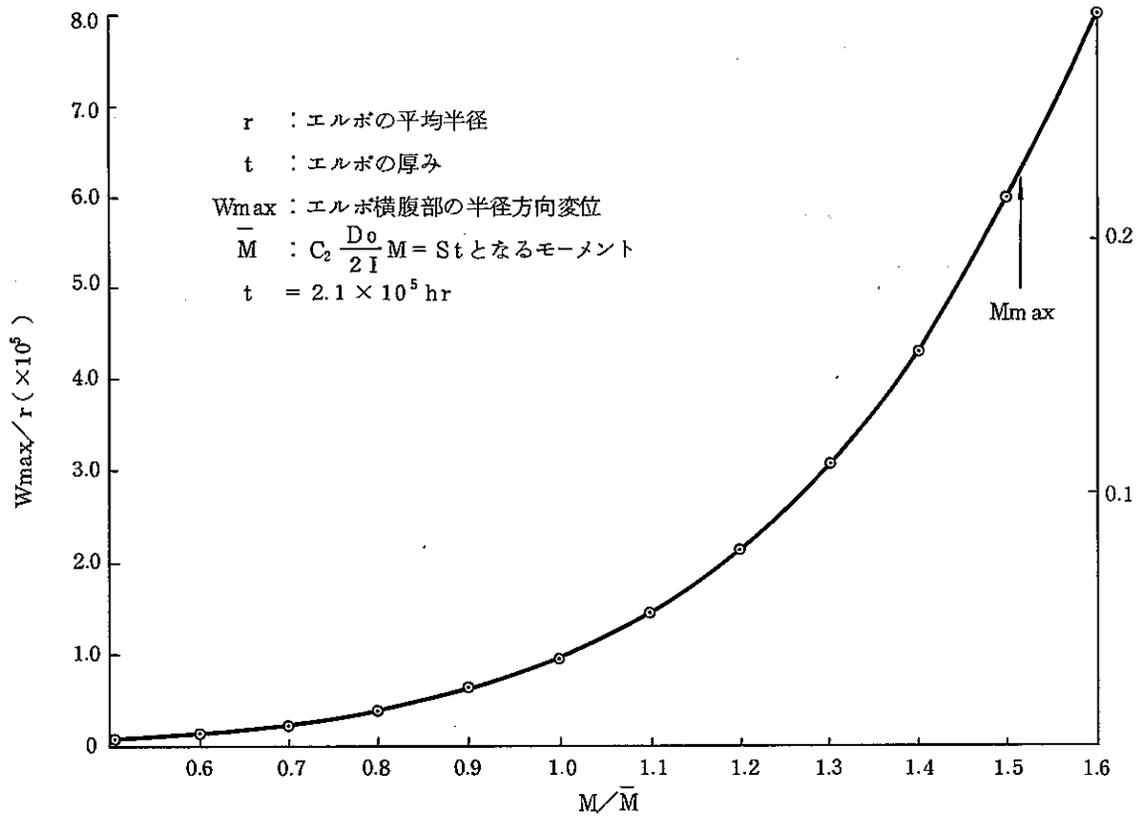


図 5.2.4 エルボの面内曲げ定モーメント・クリープによる  $w_{max}$  とモーメントの関係

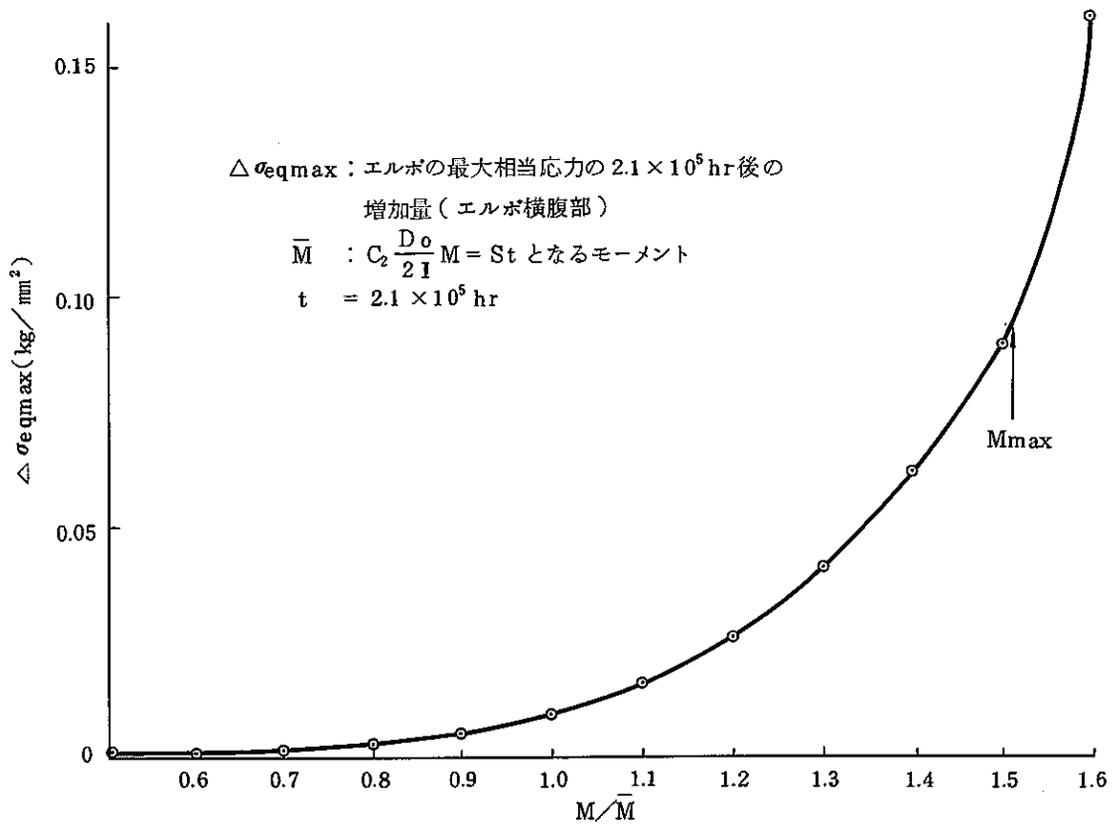


図 5.2.5 エルボの面内曲げ定モーメント・クリープによる最大相当応力増加とモーメントの関係

これらの図において $\bar{M}$ は、弾性計算による最大応力が $S_t$ となるモーメント ( $C_2 \frac{D_0 \bar{M}}{2I} = S_t$ ) であり、また  $M_{\max}$  は  $B_2$  指数を用いる場合に許容されるモーメントの最大値であり、 $\frac{M_{\max}}{\bar{M}} = \frac{C_2}{B_2} K_t = \frac{4}{3} \times 1.135 = 1.513$  である。図 5.2.3, 図 5.2.4 及び図 5.2.5 より、 $M_{\max}$  であっても上述の a) ~ c) が十分に防止されることがわかる。

### 5.3 特別な応力制限

高速原型炉第 1 種管にあって、支圧荷重を受ける部分又は純せん断荷重を受ける部分にあっては、3.3 に定めるところによるものとする。

#### 【解説】

1. 5.3 では、純せん断荷重を受ける部分においては、次式を満足しなければならないとしている。

$$\tau_m + \tau_m^* \leq 0.6 S_m \quad (1)$$

$$\tau_m \leq 0.6 S_t \quad (2)$$

純せん断荷重が加わる場合を配管方程式により表わすとすれば、直管の場合は次のようになる。

$$\tau_m + \tau_m^* = \frac{B_2 D_0}{4I} (M_i + M_i^*) \quad (3)$$

$$\tau_m = \frac{B_2 D_0}{4I} M_i \quad (4)$$

ただし、記号は本方針に定めるところによる。又  $M_i$  及び  $M_i^*$  は振りモーメントである。以上の 4 式より

$$\frac{B_2 D_0}{2I} (M_i + M_i^*) < 1.2 S_m \quad (5)$$

$$\frac{B_2 D_0}{2I} M_i < 1.2 S_t \quad (6)$$

従って、直管の場合、振りモーメントによるせん断応力を(5), (6)式により制限するならば(1), (2)式を満足したことになる。

## 5.4 穴と補強

管に穴を設ける場合は告示第51条第1項及び第2項に定めるところによらなければならない。ただし、同条の次の規定はそれぞれ(1)及び(2)に定めるとおり読み替えるものとする。

- (1) 「第1項第2号イ」を次のとおり読み替える。

「穴の周辺部に対して本方針4.を適用し、これに適合する場合」

- (2) 第2項第1号に定める「第49条第1号」における $S_m$ を $S_{mt}$ に読み替える。ここに $S_{mt}$ は5.2.3(2)1)に定める $S_m$ 及び $S_t$ により定める $M_{in} [S_m, S_t]$ (kg/mm<sup>2</sup>)である。

### 【解説】

穴と補強についての考え方は、告示に準じているが、高速炉機器の使用条件を考慮して相対的に厳しい条件を(1)(2)に課している。

## 5.5 ひずみの制限

### 5.5.1 適用範囲

管について応力係数による弾性解析を用いて設計を行う場合は、5.5.2及び5.5.3の規定を付帯規定として、3.4の弾性解析による場合の規定を適用するものとする。

### 5.5.2 応力強さ及び応力強さ範囲

応力係数による場合は、3.4における応力強さ及び応力強さ範囲を次に定めるところにより算定するものとする。

- (1) (3.4.1)式における応力強さ及び応力強さ範囲

$$\begin{aligned} \langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / K_t \rangle &= \frac{C_1 P D_o}{200t} + \frac{C_2 D_o}{2K_t I} (M_i + M_i^*) \\ &+ \frac{|F_a + F_a^*|}{A} \end{aligned} \quad (5.5.1)$$

$$\begin{aligned} \langle Q + Q^* \rangle_R &= \frac{C_2 D_o}{2I} (M_i^{**} + M_i^{***})_R + \frac{E_o \alpha_o |\Delta T_1|}{2(1-\nu)} + (K_1' - 1) \frac{C_1 P_o D_o}{200t} \\ &+ C_3 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \end{aligned} \quad (5.5.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_t = 1 + k_s \left( 1 - \frac{C_1 P D_o}{200 t S_t} - \frac{|F_a|}{A S_t} \right) \\ k_s = \alpha_c (K_s - 1), \alpha_c = 0.5, K_s = 1.5 \end{array} \right. \quad (5.5.3)$$

$C_1, C_2, C_3$  : 告示第 4 8 条に定める応力係数

$D_o, t, I, A, P, M_i, M_i^*, F_a, F_a^*, S_t$  : 5.2.3(2)2) に定めるところにある。

$K_t'$  : 告示第 4 8 条備考(2)に定める係数  $K$

$P_o$  : 運転圧力の変動範囲 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$M_i^{**}$  : 熱膨張及びアンカー点の熱変位によるモーメント ( $\text{kg} \cdot \text{mm}$ )。ただし、熱膨張応力を 1 次応力とする場合は (5.5.2) 式における  $M_i^{**}$  を除外するものとする。

$M_i^{***}$  : 地震時のアンカー点の動的強制変位によるモーメント ( $\text{kg} \cdot \text{mm}$ )

$E_o$  : 温度 200 °C に対して告示別表第 1 1 に定める値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$\alpha_o$  : 温度 200 °C に対して別表 1.10 に定める瞬時熱膨張係数 ( $\text{mm}/\text{mm}/\text{C}$ )

$\nu$  : 考えている負荷サイクル中の最高金属温度に対して別表 1.9 に定める値。

告示の適用温度範囲内にあつては  $\nu = 0.3$  とする。

$\Delta T_1$  : モーメント等価線形温度分布を仮定した場合における管壁の内外面の温度差の変動範囲 ( $\text{C}$ )

$E_{ab}, \alpha_a, \alpha_b, T_a, T_b$  : これらは総体的構造不連続又は材質的不連続による熱応力を表わすパラメータであつて、その意義は告示第 4 6 条第 4 号に定めるところによる。ただし、同号に定める「室温における」及び「別表第 1 2」をそれぞれ「200 °C における」及び「本方針別表 1.10」に読み替えるものとする。

(5.5.2) 式における (……)<sub>R</sub> は ( ) 内の値の最大変動範囲を表わすものであり、以下本方針においてこの定義により本記号を用いる。

(5.5.2) 式において  $M_i^{**}$  を計算する場合は、考えている負荷サイクル中の最高壁厚平均金属温度における縦弾性係数  $E_h$  を用いてモーメントを計算した後、これに  $E_c/E_h$  ( $E_c$  はその負荷サイクルの最低壁厚平均金属温度における縦弾性係数。) を乗じて算出するものとする。  $E_h$  及び  $E_c$  は当該温度に対して別表 1.8 又は

告示別表第 11 に定める値 (kg/mm<sup>2</sup>) とする。

- (2) ( 3.4.4 ) 式から ( 3.4.6 ) 式における応力強さ及び応力強さ範囲

$$\langle P_L + (P_b / K_t) \rangle = \frac{C_1 P D_o}{200t} + \frac{C_2 D_o M_i}{2K_t I} + \frac{|F_a|}{A} \quad (5.5.5)$$

$$\langle P_L^* + (P_b^* / K_t) \rangle = \frac{C_2 D_o M_i^*}{2K_t I} + \frac{|F_a^*|}{A} \quad (5.5.6)$$

$\langle Q + Q^* \rangle_R$  : ( 5.5.2 ) 式による。

ここに用いる記号の意義はすべて 5.5.2 (1) に定めるところによる。

- (3) ( 3.4.12 ) 式における応力強さ

$$\langle P_L + P_b \rangle = \frac{C_1 P D_o}{200t} + \frac{C_2 D_o M_i}{2I} + \frac{|F_a|}{A} \quad (5.5.7)$$

ここに用いる記号の意義はすべて 5.5.2 (1) に定めるところによる。

- (4) ( 3.4.14 ) 式から ( 3.4.17 ) 式における応力強さ範囲

$$S_n^* = \frac{C_2 D_o}{2I} (M_i^* + M_i^{***})_R + \frac{1}{A} (F_a^*)_R \quad (5.5.8)$$

$$S_n = \frac{K'_1 C_1 P_o D_o}{200t} + \frac{C_2 D_o}{2I} (M_i + M_i^* + M_i^{**} + M_i^{***})_R \\ + \frac{E_o \alpha_o | \Delta T_1 |}{2(1-\nu)} + C_3 E_{ab} | \alpha_a T_a - \alpha_b T_b | + \frac{1}{A} (F_a + F_a^*)_R \quad (5.5.9)$$

$$S_n' = \frac{C_1 P_o D_o}{200t} + \frac{C_2 D_o}{2I} (M_i + M_i^* + M_i^{***})_R \\ + C_4 E_{ab} | \alpha_a T_a - \alpha_b T_b | + \frac{1}{A} (F_a + F_a^*)_R \quad (5.5.10)$$

$C_4$  : 告示第 48 条に定める応力係数

その他の記号の意義はすべて 5.5.2 (1) に定めるところによる。

( 5.5.9 ) 式において  $M_i^{**}$  を計算する場合は、( 5.5.2 ) 式における場合と同様に縦弾性係数に関する補正を行うものとする。

- (5) ( 3.4.25 ) 式から ( 3.4.27 ) 式における応力強さ範囲

$S_n^*$  : ( 5.5.8 ) 式による。

$\langle P_L + P_b \rangle$  : ( 5.5.7 ) 式による。

### 5.5.3 補足規定

#### (1) 熱膨張応力に関する弾性追従ひずみ

3.4.2(1)2)の規定の適用に当って、熱膨張応力に関する弾性追従ひずみ  $\epsilon_{EF}$  は付録Bにより定めることができる。 $\epsilon_{EF}$  は等価線形ひずみとする。ただし、熱膨張応力を1次応力とする場合は  $\epsilon_{EF} = 0$  とする。

#### (2) 熱膨張応力強さ範囲の制限

3.4.2(2)3)b)の規定の適用に当って、(3.4.15)式を満足することを要しない場合の条件として、(3.4.16)及び(3.4.17)式を満足することに加えて、次の(5.5.11)式を満足しなければならない。

$$S_e \leq 3 \bar{S}_m \quad (5.5.11)$$

$$S_e = \frac{C_2 D_o}{2I} (M_i^{**})_R \quad (5.5.12)$$

$3 \bar{S}_m$  : 3.4.2(2)3)b)に定めるところによる。

$C_2, D_o, I, M_i^{**}$  : 5.5.2(1)に定めるところによる。

#### (3) 熱応力ラチェットの制限

1) 3.4.2(3)2)の規定の適用に当って、次の2)を満足する場合は、3.4.2(3)2)a)の制限を満足することができる。

2) 次に定める  $X_P$  及び  $Y_P$  による点 ( $X_P, Y_P$ ) が図3.4.1において、E,  $S_1, S_2$  又はP領域にあること。

$$X_P = \frac{P_s}{1.5 S_{mH}} \quad (5.5.12)$$

$$Y_P = \frac{1}{1.5 S_{mH}} \cdot \frac{E_o \alpha_o |\Delta T_1|}{2(1-\nu)} \quad (5.5.13)$$

$S_{mH}$  : 3.4.2(2)3)b)に定めるところによる。

$P_s$  : 5.2.3(2)1)に定めるところによる。

$E_o, \alpha_o, \nu, \Delta T_1$  : 5.5.2(1)に定めるところによる。

### 【解説】

1. 5.5.2は、一般設計方針の3.4の弾性解析で用いられる応力強さ及び応力強さ範囲を管

について応力係数によって具体的に規定するものである。5.5.2(1)~(4)はひずみの制限における読み替えを示したものである。

2. 5.5.2(1)は、一般設計方針(3.4.1)式の読み替えを示したものである。

3. 管の設計方針では、ひずみの制限のクリープラチェット評価において、 $K_t$ の算出時に、容器の場合と同様に管肉厚方向の応力再配分に注目して $K_s = 1.5$ としている。

配管系では、一般にエルボの撓性が最も大きいため、進行性変形の制限の主たる対象をエルボとするのは適切であると考えられる。設計方針では、この考え方に基づき、管の設計方針(5.5.1)~(5.5.6)式の主たる対象をエルボとして $K_s = 1.5$ とした。

4. 管の設計方針における熱応力範囲の算定の考え方は次のとおりである。

熱応力範囲には配管の平均温度より計算される熱膨張応力範囲と熱過渡により配管壁厚内に生じる温度勾配より計算される熱過渡応力範囲がある。本方針の(5.5.2)、(5.5.9)にみられるように両者は分けて計算されるが、その求め方は次のとおりである。

#### (1) 熱膨張応力範囲

通常考えている運転サイクルにおける最高壁厚平均温度におけるモーメントと最低壁厚平均温度におけるモーメントとの差から計算される応力範囲である。

#### (2) 過渡的熱応力範囲

考えている運転サイクルにおける配管壁厚内温度差の変動範囲から次式により求まる応力範囲である。

$$\frac{E_0 \alpha_0 |\Delta T_1|}{2(1-\nu)}$$

対応する告示第46条第4号又は第5号では、上式中の弾性ポアソン比 $\nu$ を0.3として計算される値を規定すると共に、縦弾性係数、熱膨張係数としては室温の値を用いるべきことを規定している。

一方、本方針では使用すべき縦弾性係数と熱膨張係数については200℃における縦弾性係数( $E_0$ )と瞬時熱膨張係数( $\alpha_0$ )を用いることを規定している。これは以下の事項を考慮したものである。

(1) 告示では、 $E\alpha$ の値は温度による変化は小さいという判断から、熱応力の起点である室温の値を用いているものと考えられる。一方、原型炉では原子炉停止時にもナトリウムの凍結を避けるため約180℃以上の温度に維持される。従って、熱応力の起

点は200℃程度となることが多い。

- (2)  $E\alpha$ の温度依存性を図5.5.1に示す。同図に示す様に200℃の $E\alpha$ の値は最大値に近く、この値を用いて熱応力を算出することは安全側の取扱いである。

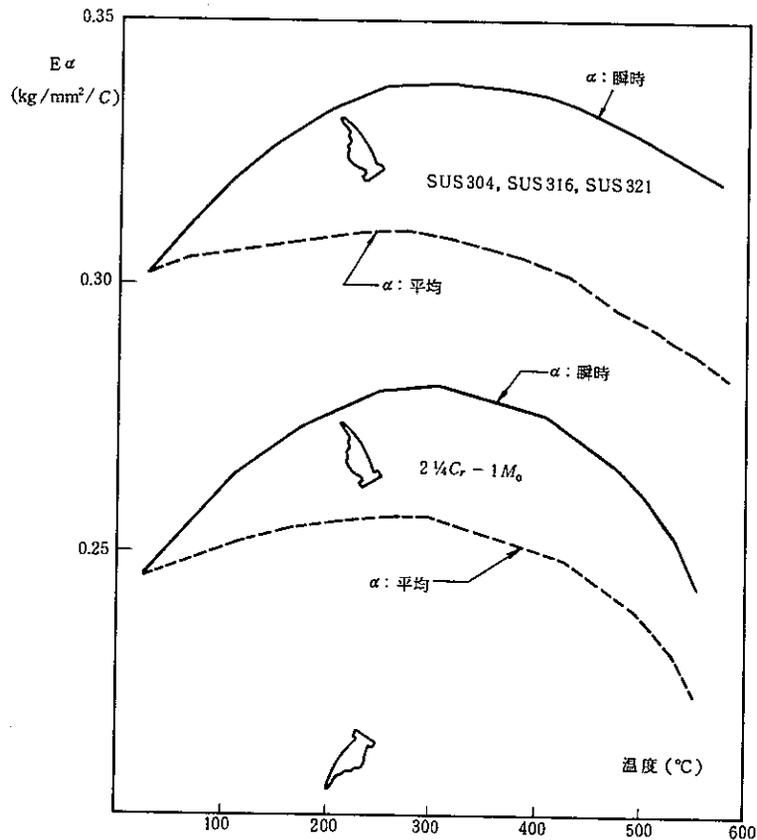


図 5.5.1  $E\alpha$  の温度依存性

ポアソン比 $\nu$ に関して、告示第46条では0.3として規定しているが、本方針では高温でポアソン比が0.3を上回る場合があることを考慮し、一般設計方針と同様にポアソン比 $\nu$ の値をそのまま用いている。又、ピーク熱ひずみについても、一般設計方針と同様に $\bar{\nu}$ を用いている。

5. 5.5.2 (1) の (5.5.2) 式の  $K_1'$  の考え方は次のとおりである。なお応力係数  $K_1'$  は告示第48条第1項に定める係数  $K$  に等しい。

応力係数  $K_1'$  は偏平度（管の最大外径と最小外径の差）を有する管に内圧が負荷される場合に関する係数である。だ円状の偏平な初期断面を有する管に内圧が負荷された時、管断面は真円断面形状に変形しようとする。このために断面の各部分で曲率変化が生じ、管

肉厚内に曲げ応力が発生する。この曲げ応力の大きさを評価するために、図 5. 5. 2 に示すような初期偏平度を有する薄肉円筒が内圧を受ける場合の応力解析を行なうと次のようになる。

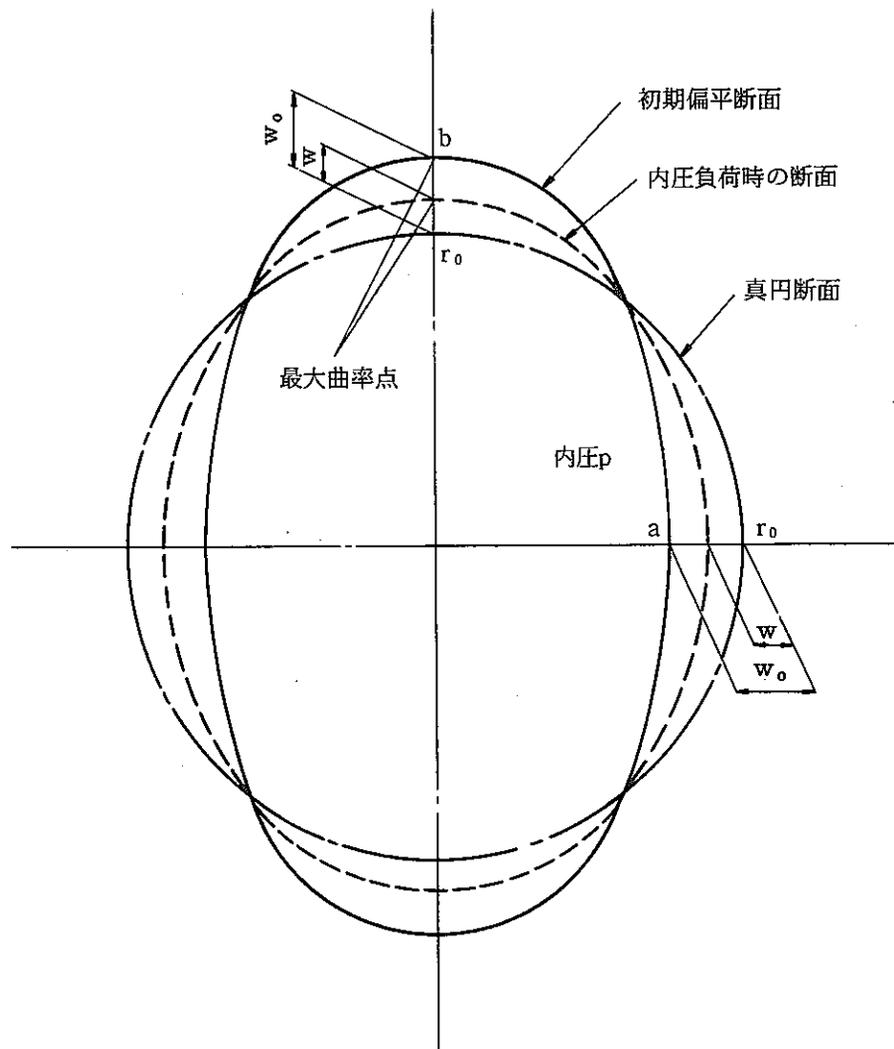


図 5. 5. 2 偏平度を有する薄肉円筒が内圧を受ける時の変形

いま、偏平量が  $w$  の時、内圧  $p$  によって図 5. 5. 2 に示す最大曲率点に生じる曲げモーメントを  $M_p$  とすれば

$$M_p = pr_0 w \quad (2)$$

となる。一方、偏平量が  $w_0$  から  $w$  に変化した時に、最大曲率点において曲率変化に伴っ

て生じる曲げモーメント（抗モーメント）を  $M_R$  とすれば

$$M_R = D \left( \frac{1}{r'_{\max}} - \frac{1}{r'} \right) \quad (2)$$

となる。ここに

$$D = \frac{Et^2}{12(1-\nu^2)}, \quad r'_{\max} = \frac{a^2}{b}, \quad r' = \frac{(a')^2}{b'} \quad (3)$$

であり、 $a$ 、 $a'$ 等は次のように表わされる。

$$a = r_o - w_o, \quad b = r_o + w_o \quad (4)$$

$$a' = r_o - w, \quad b' = r_o + w$$

(1)および(2)式から内圧によるモーメントと抗モーメントの平衡状態 ( $M_P = M_R$ ) における偏平量  $w^*$  を求めると

$$w^* = \frac{w_o}{1 + (pr_o^3/3D)} \quad (5)$$

を得る。 $w^*$  に対応する平衡モーメントを  $M^*$  とし、この時に肉厚内に生じる外皮曲げ応力を  $\sigma_{pb}$  とすれば

$$\sigma_{pb} = \frac{M^*}{Z} = \frac{6pr_o}{t^2} \cdot \frac{w_o}{1 + (pr_o^3/3D)} \quad (6)$$

となる。ところで内圧  $p$  によって生じる膜応力を  $\sigma_{pm}$  とすれば

$$\sigma_{pm} = \frac{pr_o}{t} \quad (7)$$

である。しかるに管断面の偏平度に関する応力係数  $K_1'$  は偏平断面の薄肉同筒の肉厚内に生じる最大応力 ( $\sigma_{pm} + \sigma_{pb}$ ) と基準応力  $\sigma_{pm}$  の比として定義することができるから

$$K_1' = \frac{\sigma_{pm} + \sigma_{pb}}{\sigma_{pm}} = 1 + \frac{6w_o}{t} \cdot \frac{1}{1 + pr_o^3/3D} \quad (8)$$

となる。しかるに  $w_o = (b - a)/2 = (D_{\max} - D_{\min})/4$  であるから、 $r_o = D_o/2$  とし、 $\nu = 0.3$  とすれば

$$K_1' = 1 + \frac{D_{\max} - D_{\min}}{t} \cdot \frac{1.5}{1 + 0.455(D_o/t)^3(p/E)} \quad (9)$$

を得る。すなわち告示第48条に定める応力係数には、このような解析に基づいて定めら

る係数であると理解することができる。

以上の考察から明らかなように $K'_1$ は管壁の中実断面に作用する線形な曲げ応力の寄与を表わしており、2次応力的な性質を有するものといえる。一方、中空薄肉断面全体から見れば、 $K'_1$ は比較的局所的な応力を表わすものといえる。これに対して告示では $K$ を応力係数 $K_1$ の構成因子として規定しているので、告示での取扱いとしては、1次+2次応力制限(3 $S_m$ 制限)では $K$ を考慮せず、疲労解析において $K$ を考慮するものとしている。本方針においては、 $K'_1$ に対して少し厳しめの取扱いをしている。すなわち、(5.5.2)式における $\langle Q + Q^* \rangle_R$ 、(5.5.9)式における $S_n$ の規定において $K'_1$ を考慮しているため、自動的にひずみの評価、クリープ疲労損傷の評価において、 $K'_1$ を考慮していることになる。ただし、後者に関しては、 $K'_1$ は2次応力の変動範囲の構成因子として取扱い、局部的構造不連続によるピーク応力因子からは除外している(付録H(1)参照)。これは前述のように $K'_1$ が管壁の中実断面において2次応力的なものを表わしているにもかかわらず、これを局部的構造不連続による応力集中係数と見なして(3.5.26)、(3.5.27)式を適用すると、Neuber則によるひずみ集中の評価( $K^2$ の項)によってひずみ範囲を過大に評価することになるという判断に基づく。

- 6 5.5.2(2)は促進クリープひずみ評価に用いるパラメータ $X_1$ 、 $X_2$ 、 $Y$ を求める場合の応力強さ(3.4.4)式～(3.4.6)式の配管における読み替えを規定したものである。
- 7 5.5.2(3)は長期1次応力が低い場合の判定条件における応力強さ(3.4.12)式の配管における読み替えを規定したものである。
- 8 5.5.2(4)は3.4.2(2)3)b)において用いられる応力強さを配管について読み替えたものである。
- 9 5.5.2(5)は運転状態Ⅳの短期荷重が繰返し性を有する場合の制限に用いる応力強さ(3.4.25)～(3.4.27)式を配管について読み替えたものである。
- 10 5.5.3(1)は熱膨張応力に関する弾性追従ひずみに対する規定である。
- 11 5.5.3(2)の規定は高温でのクリープ効果を考慮したシェイクダウン領域を上廻る場合の制限であり告示47条第6号を考慮したものである。
- 12 5.5.3(3)はクリープ効果が顕著でない場合の熱応力ラチェットの制限であり、告示第1種容器に対する熱ラチェットの制限における考え方と同様にMillerの理論に基づき、配管に対して具体的に規定したものである。

## 5.6 クリープ疲労損傷の制限

### 5.6.1 適用範囲

管について応力係数による弾性解析を用いて設計を行う場合は、5.6.2及び5.6.3の規定を付帯規定として、3.5の弾性解析による場合の規定を適用するものとする。

### 5.6.2 応力強さ範囲等

応力係数による場合は、3.5における応力強さ範囲等を、次に定めるところにより算定するものとする。

#### (1) (3.5.24)式における応力強さ範囲

$S_n^*$  : (5.5.8)式により定める。

$S_n$  : (5.5.9)式により定める。

#### (2) (3.5.25)式におけるピーク熱ひずみ範囲

$$\epsilon_F = \frac{E_o \alpha_o |\Delta T_2|}{E(1-\bar{\nu})} \quad (5.6.1)$$

$\Delta T_2$  : 壁厚方向温度分布とモーメント等価温度分布の間の最大温度差の変動範囲(°C)

$E_o, \alpha_o$  : 5.5.2(1)に定めるところによる。

$E$  : 3.5.3(2)3 d1)に定めるところによる。

$\bar{\nu}$  : (3.5.11)式により定める。

### 5.6.3 補足規定

#### (1) 係数K及び $K_T$

(3.5.25)式におけるピーク熱ひずみ係数 $K_T$ 及び(3.5.26)及び(3.5.27)式における応力集中係数Kは付録Hにより定めることができる。

## 【解説】

- 5.6の規定は、管について応力係数による弾性解析を用いて設計を行う場合の一般設計方針に対する付帯規定である。
- 5.6.2.(1)はクリープ疲労損傷の制限において使用される1次及び2次応力範囲 $S_n^*$ ,  $S_n$ の配管に対する読み替えを規定したものである。

- 3 5.6.2 (2)は塑性の影響を考慮した修正ポアソン比 $\bar{\nu}$ 、200℃における縦弾性係数と瞬時熱膨張係数を使用したピーク熱ひずみ範囲に対する規定である。
- 4 5.6.3 ではピーク熱ひずみ係数 $K_T$ 及び応力集中係数 $K$ は付録Hにより定めることができることを示している。

## 5.7 座屈の防止

### (1) 適用範囲

5.7の規定は設計条件、運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ及び試験状態に適用するものとする。

5.7(3)及び(4)における場合の区分は5.5に定める場合の区分を準用するものとする。

### (2) 一般規定

4.3の規定を準用するものとする。

### (3) 長期1次応力が低い場合

1) 告示第49条第1項第2号に定めるところを満足すること。

2) 付録Gに適合すること。

### (4) クリープ効果が顕著でない場合

5.7(3)に定めるところによる。

## 【解説】

- 1 5.7は高速原型炉第1種管の座屈の防止について定めたものである。
- 2 5.7(1)では、5.7の規定が設計条件、運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ及び試験状態に適用されることを示すとともに、5.7の規定において用いられる「長期1次応力が低い場合」及び「クリープ効果が顕著でない場合」の区分は、5.5で定めたものを準用することを示している。
- 3 5.7(2)では、高速原型炉第1種管の場合も一般には4.3の容器の座屈防止の規定を準用することを定めている。
- 4 5.7(3)は、長期1次応力が低い場合には、告示第49条第1項第2号に定められている外圧を受ける場合の規定を満足するとともに付録Gに適合しなければならないことを示している。

長期1次応力が低い場合にはクリープ座屈の評価を行う必要がない。これは、配管部材の中で最も撓性の大きいエルボに注目して、

a) 初期偏平量の上限值

b) 熱膨張に基く弾性追従によるエルボの偏平量の上限值

の2つの和を初期変形量とみなして、長期1次応力が低い場合に許容される荷重制御型荷重の1.5倍以上の荷重が全期間にわたって作用するとしたときにもクリープ座屈が生じないことを解析により確認し、これから定めたものである。図5.7.1は解析結果を示したものである。同図は、クリープ座屈時間  $t_{cr}$  とパイプ係数  $\lambda (= tR/r^2, t$  は板厚,  $R$  は管の中心軸の曲り半径,  $r$  は管断面の平均半径) の関係を示したもので、初期変形(偏平率すなわち断面の長径と短径の比  $a/b$  で表わす) が1.2の場合についてのものである。

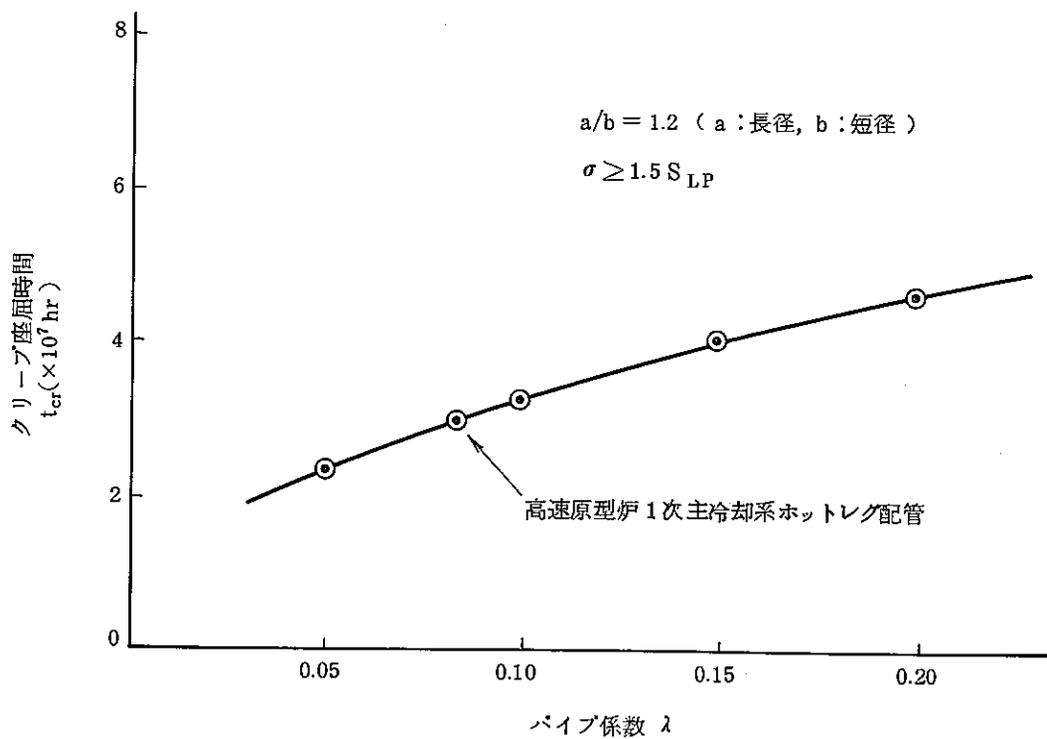


図 5.7.1 クリープ座屈時間に及ぼす係数の影響

5 5.7(4)は、クリープ効果が顕著でない場合には、上記(3)の長期1次応力が低い場合の規定を準用することを定めたものである。

# 別 表

## 別表1（別図1） 材料強度基準等

別冊「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等」に示す。

## 別表2 応力分類例等

＜内 容＞

- 別表 2.1 応力分類の例
- 別表 2.2 断面形状係数  $K_S$
- 別表 2.3 2次応力  $Q$ ， $Q^*$  の分類の例（長期1次応力が低い場合）
- 別表 2.4 座屈に関する安全係数

### 【解説】

1. 本方針では、別表1（別図1）材料強度基準等を別冊「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等」に記載している。
2. 別表2では、応力分類の例、断面形状係数  $K_S$ ，2次応力  $Q$ ， $Q^*$  の分類の例（長期1次応力が低い場合）及び座屈に関する安全係数について定めている。

別表2.1 応力分類の例

機器部材	応力評価位置	応力源	応力の種類	応力分類 <sup>1)</sup>
円筒殻又は球殻	板殻部	内圧	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 一般膜応力</li> <li>○ 構造の中実断面内での一般膜応力からの偏差応力</li> </ul>	$P_m$ $Q$
		軸方向温度分布	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 膜応力</li> <li>○ 曲げ応力</li> </ul>	$Q$ $Q$

（続く）

機器部材	応力評価位置	応力源	応力の種類	応力分類 <sup>1)</sup>
	鏡板又はフランジとの結合部	内 圧	○膜応力 ○曲げ応力	$P_L$ $Q^{2)}$
任意の殻又は鏡板	容器の全体に関する任意の断面	外力（外モーメント）又は内圧	○全体断面に対する平均として一般膜応力であって，中実断面に垂直な応力成分	$P_m$
		外力（外モーメント）	○全体断面に対する曲げ応力であって，中実断面に垂直な応力成分	$P_m$
	管台又は他の開口の近傍	外力（外モーメント）又は内圧	○局部膜応力 ○曲げ応力 ○ピーク応力（すみの丸み部）	$P_L$ $Q$ $F$
	任意の位置	殻と鏡板の間の温度差	○膜応力 ○曲げ応力	$Q$ $Q$
皿形鏡板又は円錐形鏡板	頂部	内 圧	○膜応力 ○曲げ応力	$P_m$ $P_b$
	ナックル部又は殻との結合部	内 圧	○膜応力 ○曲げ応力	$P_L^{3)}$ $Q$
平鏡板	中央部	内 圧	○膜応力 ○曲げ応力	$P_m$ $P_b$
	殻との結合部	内 圧	○膜応力 ○曲げ応力	$P_L$ $Q^{2)}$
多孔を有する鏡板又は殻	一様な孔配置の規則的リガメント	圧 力	○（断面に対する平均としての）膜応力 ○（肉厚方向には勾配を有するがリガメントの幅に対しては平均としての）曲げ応力 ○ピーク応力	$P_m$ $P_b$ $F$

（ 続 く ）

機器部材	応力評価位置	応力源	応力の種類	応力分類 <sup>1)</sup>
	孔が孤立又は不規則に配置されたりガメント	圧力	<ul style="list-style-type: none"> <li>○膜応力</li> <li>○曲げ応力</li> <li>○ピーク応力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Q</li> <li>F</li> <li>F</li> </ul>
管台	管台の軸に垂直な断面	内圧又は外力(外モーメント)	○管台の全体断面に対する平均として一般膜応力であって中実断面に垂直な応力成分	$P_m$
		外力(外モーメント)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○管台の全体断面に関する曲げ応力</li> <li>○管台の中実断面に関する曲げ応力</li> </ul>	$P_m$ <sup>4)</sup> Q
	管台の壁	内圧	<ul style="list-style-type: none"> <li>○一般膜応力</li> <li>○局部膜応力</li> <li>○曲げ応力</li> <li>○ピーク応力</li> </ul>	$P_m$ $P_L$ Q F
	管台の壁	熱膨張差	<ul style="list-style-type: none"> <li>○膜応力</li> <li>○曲げ応力</li> <li>○ピーク応力</li> </ul>	Q Q F
任意	任意	壁厚方向温度分布	<ul style="list-style-type: none"> <li>○等価線形応力</li> <li>○等価線形応力からの偏差応力</li> </ul>	Q F
任意	任意	任意	○応力集中(切欠効果)	F

別表 2.1 の注

- 1) 本表の応力分類による2次応力Qは「3.4ひずみの制限」以降において、再分類しなければならない。
- 2) 鏡板又はフランジの1次応力評価において、この曲げ応力の寄与を計算に入れる場合は、この曲げ応力を  $P_b$  とすること。
- 3) 機器の直径と当該鏡板の厚さとの比が大きい場合は、しわ又は過大変形が発生しないように注意すること。
- 4) この分類例は管台のうち、4.2に定める補強に有効な範囲内のみ適用する。

## 【解説】

本表の  $P_m$ ,  $P_L$  及び  $P_b$  は 1 次応力を表わし,  $Q$ ,  $F$  はそれぞれ 2 次応力及びピーク応力を表わす。これらは基本的に次のような考え方に基づいて分類されたものである。

1 次応力 : 外力及び外モーメントに対して, 単純な平衡を満足するために必要な荷重制御型の応力であって, 構造系の変形により緩和されることがなく, これが過大になると直接延性破断又はクリーブ破断に至る恐れがあるものである。

2 次応力 : 隣接部分の拘束又は自己拘束によって生じる変形制御型の応力であって, これに伴う変形又はひずみが自己制御性を有するため直接延性破断と結びつくことはないが, これが繰返されることによって進行性の変形が生じる可能性がある。

ピーク応力 : 応力集中又は局部熱応力により, 1 次応力又は 2 次応力に付加される応力の増加分であって, 構造系の変形に結びつくことはないが, 疲労又はクリーブ疲労によるき裂の発生に結びつく可能性のあるものをいう。

1 次応力と 2 次応力は評価対象とする断面内での分布の仕方により, 更に断面平均値としての膜応力  $\sigma_m$  と平均値からの偏差分としての曲げ応力  $\sigma_b$  に分類される。これらは応力テンソルの各成分ごとに計算される。

2 本表の応力分類による 2 次応力  $Q$  は, 本表注 1) に定めるように「3.4 ひずみの制限」以降において再分類しなければならない。これは, 2 次応力は元来ひずみ制御型応力であるため, ひずみの制限以降においては弾性追従の程度に応じてその挙動を注意深く評価する必要があるためである。この再分類については「3.4 ひずみの制限」の解説で説明する。

3 本表を用いた応力分類の一例を図 1 に示す内圧を受ける平蓋付円筒殻によって説明する。

内圧を受ける平蓋及び円筒殻について図 2-(a), (b)を用いてそれぞれ単独に算出された応力, 及び平蓋と円筒殻との結合部での不連続変位を解消すべき剪断力  $Q_0$  と曲げモーメント  $M_0$  を端部に与えて算出された応力, この両者の応力の和によって円筒殻部の応力が図 3-(a)及び図 3-(b)のように算出される。

図 3-(a)及び図 3-(b)において, 平蓋と円筒殻との結合部から離れた部分では膜応力は内圧  $P$  との平衡法則を満たすので  $P_m$  に分類する。一方, 結合部で発生する曲げ応力は図 2-(b)及び図 2-(c)に示すように変形の不連続に基づく不連続応力であり, 応力が増加す

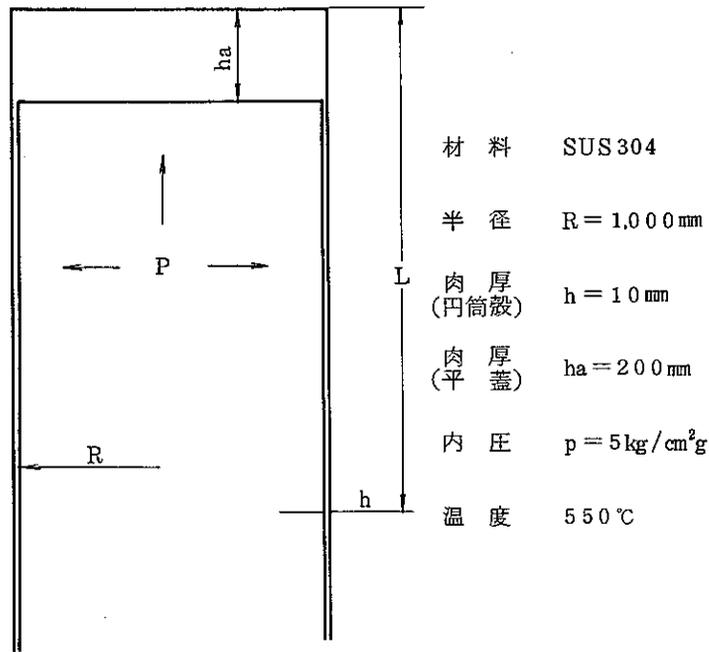


図 1 内圧を受ける平蓋付円筒殻

円筒殻部に関する解析モデルを図 2-(a), 2-(b), 及び 2-(c)に示す。

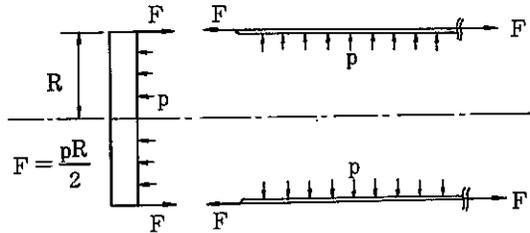


図 2-(a) 分割境界の剛体力学的境界条件

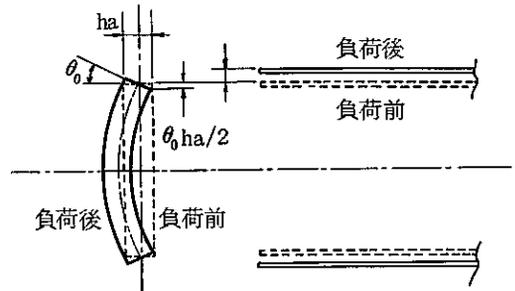


図 2-(b) 分割境界における半径方向変位と角変位の不連続

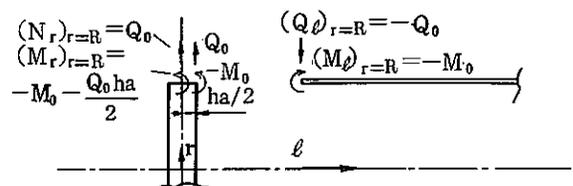


図 2-(c) 分割境界の弾性支持境界条件

れば塑性流動を生じ低減する自己制御的性質を有するため2次応力Qと分類する。但し、結合部では内圧Pが増加すれば同曲げ応力は低減するため、同曲げ応力をQと分類したときは、平蓋中央部の曲げ応力算出に当って結合部の曲げ応力の寄与を期待しない境界条件によって計算を行うことが必要である。すなわち、この端部曲げモーメントが平蓋中央部の曲げ応力を許容限界内におさえるために必要な場合には端部曲げ応力は $P_b$ に分類し、又そうでない場合はQに分類することになる。本表注2)は、このような不連続曲げ応力に対する注意を示したものである。

各部の応力は次のように分類される。

機器部材	応力評価位置	応力源	応力の種類	応力分類
円筒殻	板殻部	内 圧	○一般膜応力	$P_m$
			○構造の中実断面内での一般膜応力からの偏差応力	Q
	平蓋との結合部	内 圧	○膜応力	$P_L$
			○曲げ応力	Q
平鏡板	中央部	内 圧	○膜応力	$P_m$
			○曲げ応力	$P_b$

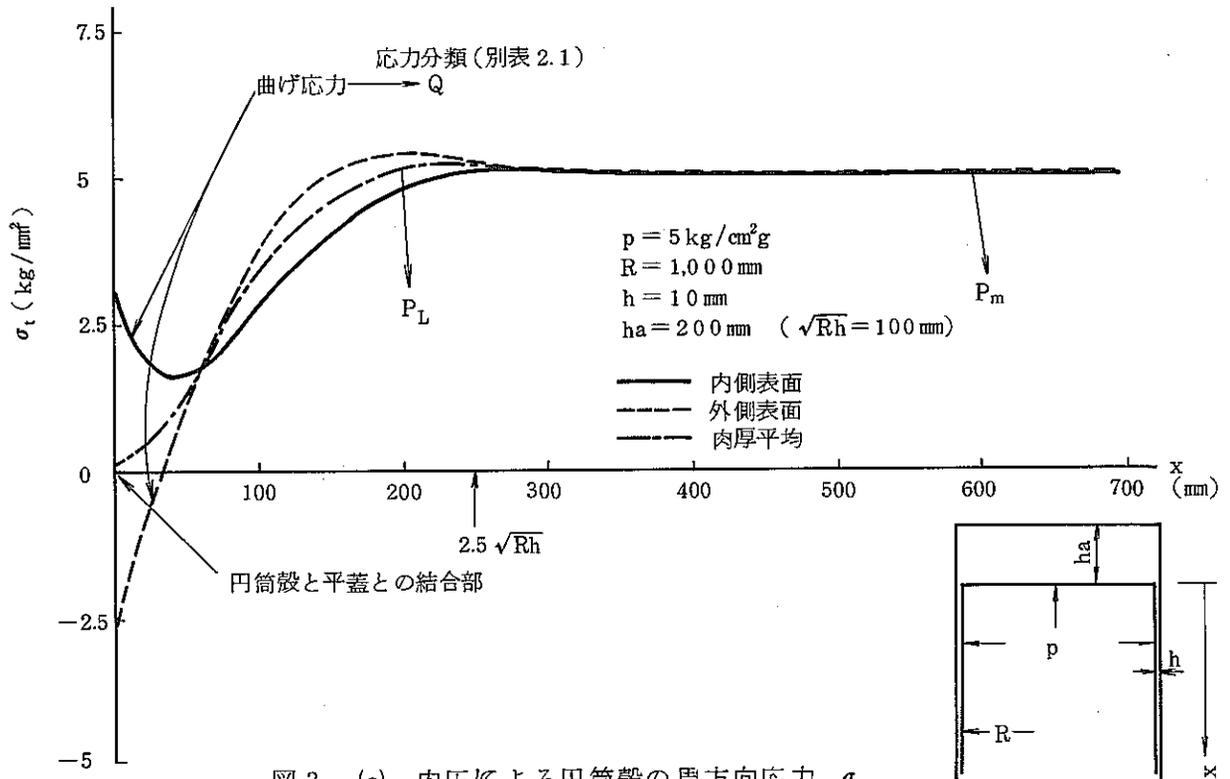


図 3 - (a) 内圧による円筒殻の周方向応力  $\sigma_t$   
 (内圧が  $5 \text{ kg/cm}^2\text{g}$  の場合)

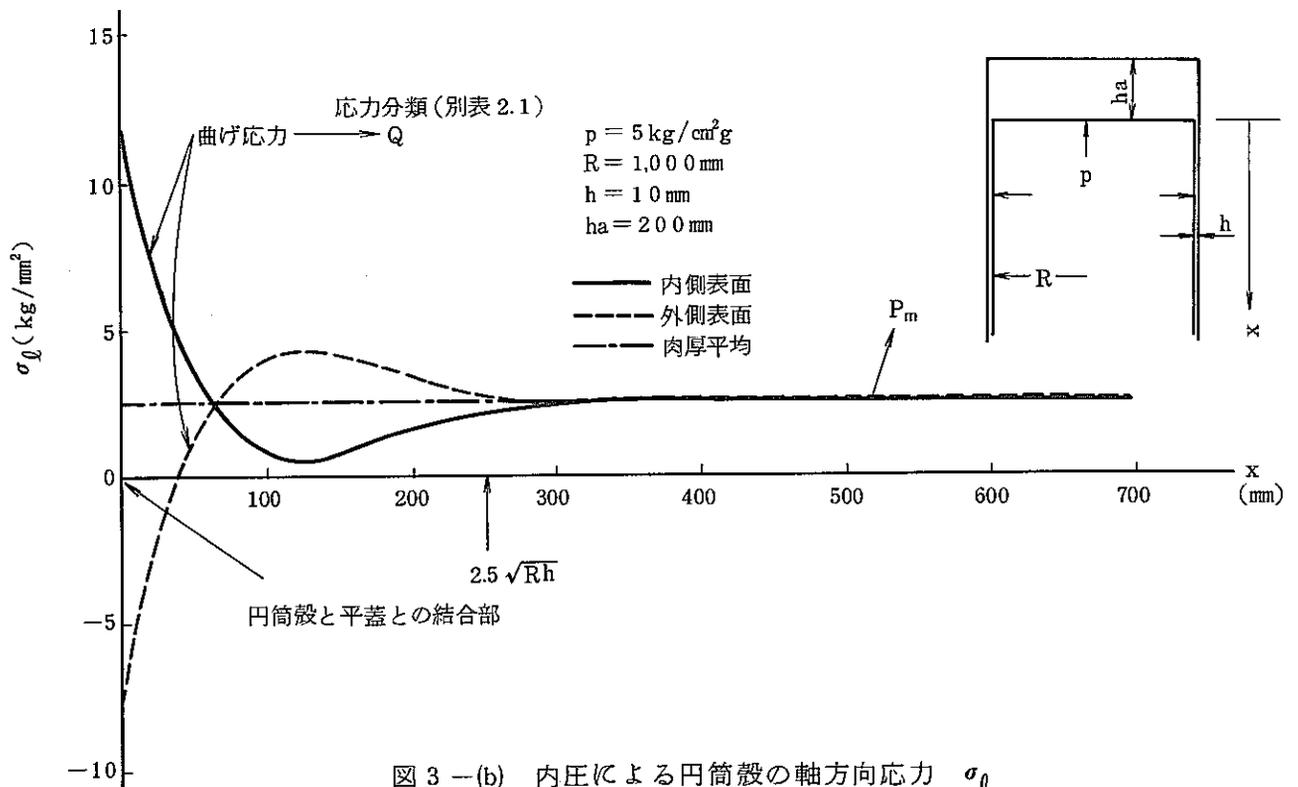
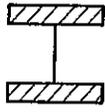
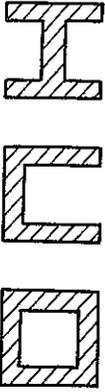
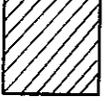
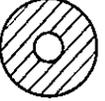
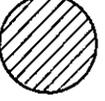


図 3 - (b) 内圧による円筒殻の軸方向応力  $\sigma_l$   
 (内圧が  $5 \text{ kg/cm}^2\text{g}$  の場合)

別表 2.2 断面形状係数  $K_s$

断 面 形 状		$K_s$
フ ラ ン ジ		1
—		1 ~ 1.5
—		1.33
中実矩形断面		1.5
薄肉円筒断面		1.27
厚肉円筒断面		1.28 ~ 1.70
中実円断面		1.7
—		2.0

【解説】

本表は各断面形状に対する形状係数を示したものである。

別表 2.3 2次応力 $Q$ ,  $Q^*$ の分類の例(長期1次応力が低い場合)

機器部材	応力評価位置	応力源	応力の種類	応力分類 <sup>1)</sup>
円筒殻又は球殻	板殻部	内圧	○構造の中実断面での一般膜応力からの偏差応力	$Q_{Po}$ , $Q_P^*$
		軸方向温度分布	○膜応力 ○曲げ応力	$Q_{mo}$ , $Q_m^*$ $Q_{TbEF}$ , $Q_{Tb}^*$
	鏡板又はフランジとの結合部	内圧	○曲げ応力	$Q_{bEF}$ , $Q_b^*$
任意の殻又は鏡板	管台又は他の開口の近傍	外力(外モーメント)又は内圧	○曲げ応力	$Q_{bEF}$ , $Q_b^*$
	任意の位置	殻と鏡板の間の温度差	○膜応力 ○曲げ応力	$Q_{mEF}$ , $Q_m^*$ $Q_{TbEF}$ , $Q_{Tb}^*$
皿形鏡板又は円錐形鏡板	ナックル部又は殻との結合部	内圧	○曲げ応力	$Q_{bEF}$ , $Q_b^*$
平鏡板	殻との結合部	内圧	○曲げ応力	$Q_{bEF}$ , $Q_b^*$
多孔を有する鏡板又は殻	孔が孤立又は不規則に配置されたりガメント	圧力	○膜応力	$Q_{mo}$ , $Q_m^*$
管台	管台の軸に垂直な断面	内圧又は外力(外モーメント)	○管台の中実断面に関する曲げ応力	$Q_{bEF}$ , $Q_b^*$
		内圧	○曲げ応力	$Q_{bEF}$ , $Q_b^*$
	管台の壁	熱膨張差	○膜応力 ○曲げ応力	$Q_{mEF}$ , $Q_m^*$ $Q_{TbEF}$ , $Q_{Tb}^*$
任意	任意	壁厚方向温度分布	○等価線形応力	$Q_{Tbo}$ , $Q_{Tb}^*$

別表 2.3 の注

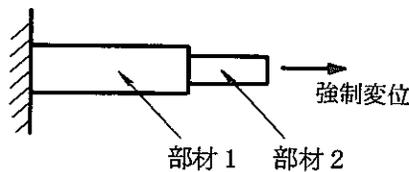
- 1) 応力分類記号の意義は次に定めるところによる。
  - a) 上つき記号\*は短期2次応力を示し、記号\*のないものは長期2次応力である。 $Q$ は $Q^*$ を含まない。  
 $Q^*$ に関しては弾性追従を考慮しなくてよい。
  - b)  $Q$ に対する下つき添字oは弾性追従を考慮しなくてよい長期2次応力を示し、下つき添字EFは弾性追従を考慮すべき長期2次応力を示す。

- c) 下つき添字Pは板殻部における内圧による2次応力を表わす。
  - d) 下つき添字mは膜応力を表わし、下つき添字bは曲げ応力を表わす。
  - e) 下つき添字Tは熱応力を特に区別する場合に付される。
- 2)  $Q_{mEF}$  又は  $Q_{bEF}$  による弾性追従ひずみ  $\epsilon_{mEF}$  又は  $\epsilon_{bEF}$  (これらは付録Bにより定めることができる。) が0.005を超える場合は、3.4以降において、 $Q_{mEF}$  の場合は  $P_L$ 、 $Q_{bEF}$  の場合は  $P_b$  としなければならない。

**【解説】**

- 1 本表は長期1次応力が低い場合の2次応力  $Q$ 、 $Q^*$  の分類の例を示したものである。
- 2 本表注1)a)では、短期2次応力に関する弾性追従は評価しなくてよいと定めている。これは短期2次応力による残留応力場は弾性追従ひずみをむしろ低減する効果を持つからである。これを変断面棒モデルを用いて以下に説明する。

図1のような断面積の変化する棒に変位制御型荷重として端部に強制変位  $\delta$  を負荷する。その後、荷重を除去し(端部変位を0にする)残留応力の生じている状態でクリープさせ断面積の小さい部分に弾性追従を起こさせる。材料挙動としては、弾完全塑性体を仮定する。



断面積	$A_1$	$A_2$	$(A_1 > A_2)$
長さ	$l_1$	$l_2$	

図1 変断面棒モデル

(1) 荷重負荷時(A)

部材2が降伏している状態を考えると部材2の応力  $\sigma_A$ 、ひずみ  $\epsilon_A$  は次式で与えられる。

$$\sigma_A = \sigma_y \quad \epsilon_A = \frac{\delta}{l_2} - \frac{A_2}{A_1} \frac{l_1}{l_2} \frac{\sigma_y}{E}$$

これに対し弾性状態を仮定したときの応力  $\sigma'_A$  , ひずみ  $\epsilon'_A$  は

$$\sigma'_A = E \frac{\delta}{l_2} \left( \frac{A_2}{A_1} \frac{l_1}{l_2} + 1 \right)^{-1} \quad \epsilon'_A = \frac{\delta}{l_2} \left( \frac{A_2}{A_1} \frac{l_1}{l_2} + 1 \right)^{-1}$$

従って実際の塑性ひずみ  $\epsilon_A^{(P)}$  と弾性計算ベースでの塑性ひずみ  $\epsilon'_A$  の比  $q$  は次の様になる。

$$q = \frac{\epsilon_A^{(P)}}{\epsilon'_A} = \frac{\epsilon_A - \sigma_y/E}{\epsilon'_A - \sigma_y/E} = \frac{A_2}{A_1} \frac{l_1}{l_2} + 1$$

$\sigma_y$  : 降伏応力       $E$  : ヤング率

## (2) 除荷時 (B)

除荷時に部材 2 が圧縮側で降伏する状態を考えると, 応力, ひずみは次の様になる。

$$\sigma_B = -\sigma_y \quad \epsilon_B = \frac{A_2}{A_1} \frac{l_1}{l_2} \frac{\sigma_y}{E}$$

部材 2 には引張側のひずみが残る, これは残留応力による部材 1 の圧縮側の弾性ひずみと打消して全体の変形 (端部変位) が 0 になる。

## (3) 除荷後の応力緩和後 (C)

部材 1 に生じるクリープひずみは充分小さく無視できると考えると, 残留応力が充分緩和した状態では, 部材 1, 2 共応力, ひずみは 0 となると考えられる。

$$\sigma_c = \epsilon_c = 0$$

応力緩和後のクリープひずみ  $\epsilon_c^{(C)}$  と状態 B での弾性ひずみの比  $q'$  は次の様になる。

$$q' = \frac{\epsilon_c^{(C)}}{\epsilon_B} = \frac{(\epsilon_c - \sigma_c/E) - (\epsilon_B - \sigma_B/E)}{\sigma_B/E} = \frac{A_2}{A_1} \frac{l_1}{l_2} + 1 = q$$

## (4) 負荷状態での応力緩和後 (D)

部材 1 のクリープひずみを無視すると負荷状態で充分応力緩和させた後の状態は次の様になる。

$$\sigma_D = 0 \quad \epsilon_D = \frac{\delta}{l_2}$$

この状態でのひずみ  $\epsilon_D$  と弾性計算ベースでのひずみ  $\epsilon'_A$  の比  $q''$  は次の様になる。

$$q'' = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_A} = \frac{A_2}{A_1} \frac{l_1}{l_2} + 1 = q$$

以上の解析により部材2の応力-ひずみ挙動は図2に示される様になる。図2より、残留応力場による弾性追従は、負荷時のひずみをむしろ減少させるように作用することがわかる。長期2次応力と短期2次応力の共存状態を考えると、長期2次応力によるクリープ変形によって、弾性追従が生ずると同時に、短期2次応力の残留応力によるクリープ変形が生じこれは逆方向の弾性追従を生じる。したがって短期2次応力に関する弾性追従のひずみはこれを無視することが可能である。

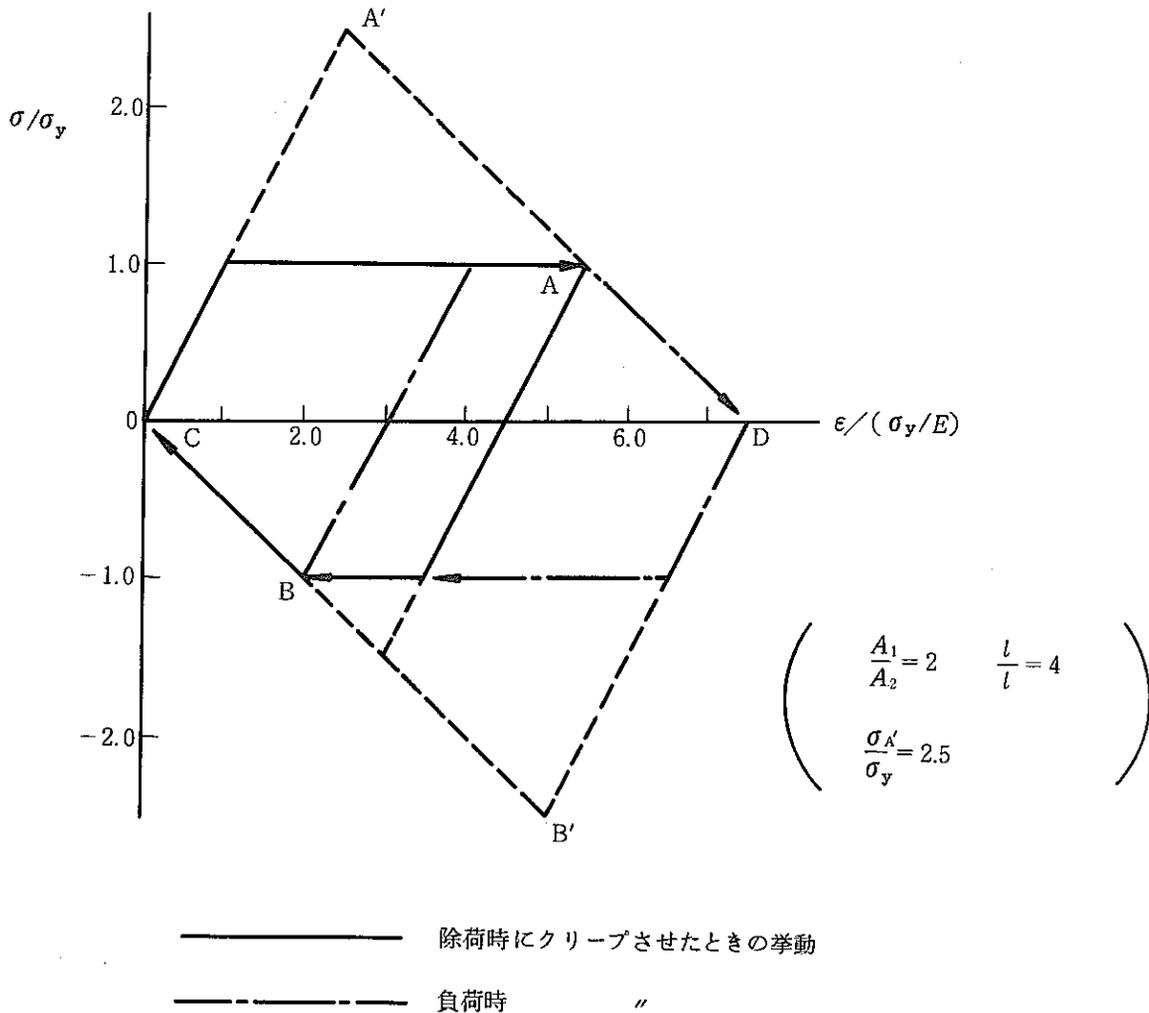


図2 短期2次応力におけるクリープ挙動

別表 2.4 座屈に関する安全係数

	荷重制御型座屈に関する 荷重の安全係数		ひずみ制御型座屈に関する ひずみの安全係数 <sup>2)</sup>	
	時間に依存 しない座屈	時間に依存 する座屈	時間に依存 しない座屈	時間に依存 する座屈
設計条件	3.0	—	1.67	—
運転状態Ⅰ	3.0	1.5	1.67	1.0
運転状態Ⅱ	3.0	1.5	1.67	1.0
運転状態Ⅲ	2.5 <sup>1)</sup>	1.5	1.4	1.0
運転状態Ⅳ	1.5	1.25	1.1	1.0
試験状態	2.25	—	1.67	—

別表 2.4 の注

- 1) 軸方向の圧縮荷重及び（又は）曲げ荷重による座屈に関しては安全係数を 2.0 とする。
- 2) 顕著な弾性追従が生じる可能性がある場合は、ひずみ制御型座屈に対しても荷重制御型座屈に関する安全係数を適用するものとする。

【解説】

1 座屈に関する安全係数の考え方は次のとおりである。

(1) 時間に依存しない座屈

時間に依存しない座屈に対する安全係数は荷重制御型座屈に対しては座屈荷重と負荷荷重との比により定義され、又、ひずみ制御型座屈に対しては座屈を生じさせるために必要な変位（又は温度差）と負荷変位（又は温度差）との比としてそれぞれ定義される。

荷重制御型座屈は、外圧及び地震荷重等による圧縮応力を対象とする座屈で、座屈後も荷重が減少することなく急激な破損に至る可能性があるので十分な安全係数をとる必要がある。

一方、熱膨張を拘束していることにより発生する圧縮熱応力等によって生じるひずみ制御型座屈は構造物が変形することにより荷重が減少し、座屈が生じたとしてもその後も平衡状態を保ち破損に至らないことが期待されるので、荷重制御型座屈に対する安全

係数より低く規定している。

(2) 時間に依存する座屈

荷重制御型座屈の防止は、寿命中の各種運転状態で想定される負荷荷重に各種運転状態の安全係数を乗じた荷重に対して全寿命末期にクリープ座屈しないことを規定している。

ひずみ制御型座屈は、変形の進行とともに負荷荷重が減少することを考え、安全係数をとくにっていない。

## 付 録

### <内 容>

付録 A	環境効果の評価
付録 B	弾性追従の判定
付録 C	累積クリープ疲労損傷係数の制限値 D
付録 D	応力水準 $S_g$ 及び倍率 $g$
付録 E	1 次及び 2 次応力に関する緩和クリープ損傷係数 $D^*$
付録 F	ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 $D^{**}$
付録 G	圧縮及び曲げ座屈の評価
付録 H	応力集中係数

### 【解 説】

環境効果の評価，弾性追従の判定，累積クリープ疲労損傷係数の制限値 D，応力水準  $S_g$  及び倍率  $g$ ，1 次及び 2 次応力に関する緩和クリープ損傷係数  $D^*$ ，ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数  $D^{**}$ ，圧縮及び曲げ座屈の評価，及び応力集中係数は付録によって定めることができる。

### 付録 A 環境効果の評価

#### A.1 ナトリウム環境効果

ナトリウム環境効果は別表 1 付録 MA . 1 により評価することができる。

#### A.2 中性子照射効果

中性子照射効果は別表 1 付録 MA . 2 により評価することができる。

### 【解 説】

1 付録 A はナトリウム環境効果及び中性子照射効果がそれぞれ別表 1 付録 MA . 1 及び MA

.2により評価できることを示したものである。評価の詳細については、それぞれ別表1付録MA.1及び別表1付録MA.2に示す。

## 付録B 弾性追従の判定

### B.1 長期2次応力による弾性追従ひずみ $\epsilon_{EF}(Q_{EF})$

長期1次応力が低い場合にあっては、長期2次応力  $Q_{EF}$  による弾性追従ひずみ  $\epsilon_{EF}(Q_{EF})$  を表B.1により定めることができる。

#### B.1 長期2次応力による弾性追従ひずみ $\epsilon_{EF}(Q_{EF})$

応力分類	応力源	弾性追従ひずみ $\epsilon_{EF}$		
		$\epsilon_{EF}$ の分類	大きさ	方向
$Q_{mEF}$	殻と鏡板の間の 温度差 $\Delta T$	膜ひずみ $\epsilon_{mEF}$	$\alpha  \Delta T $	円周方向
	熱膨張差 $\alpha_a T_a - \alpha_b T_b$	膜ひずみ $\epsilon_{mEF}$	$ \alpha_a T_a - \alpha_b T_b $	円周方向
$Q_{bEF}$	—	等価線形ひずみ $\epsilon_{bEF}$	1) 2) $q \cdot \epsilon_{b0}$	軸方向

注 1)  $q=3.0$  とする。

2)  $\epsilon_{b0}$  :  $Q_{bEF}$  に対する弾性軸方向曲げひずみ

### B.2 熱膨張応力に関する弾性追従の判定

#### (1) 適用範囲

管の熱膨張応力に関する弾性追従の判定において、付録B.2に定めるところにより判定を行い、熱膨張応力を1次応力又は2次応力に定めることができる。

## (2) 解 析

- 1) 最高使用温度における管の熱膨張及びアンカー点の熱変位に関して通常の熱膨張解析を行う。これを解析Ⅰとする。解析Ⅰの結果、最大応力強さが生じた曲り管又はエルボの相当角変位  $\gamma_I$  を次の計算式により定める。

$$\gamma_I = \{ (\gamma_{xI})^2 + (\gamma_{yI})^2 + (\gamma_{zI})^2 \}^{1/2} \quad (\text{B.2.1})$$

$\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$  : 直交座標系におけるエルボ両端の角変位成分

- 2) 解析Ⅰの結果最大応力強さが生じた曲り管又はエルボのみについて、その撓性係数  $k$  を

$$k^* = q' k \quad (\text{B.2.2})$$

に変更し、解析Ⅰと同様の解析を行う。これを解析Ⅱとする。解析Ⅱの結果から解析Ⅰにおいて最大応力強さが生じた曲り管又はエルボの相当角変位  $\gamma_{II}$  を次の計算式により定める。

$$\gamma_{II} = \{ (\gamma_{xII})^2 + (\gamma_{yII})^2 + (\gamma_{zII})^2 \}^{1/2} \quad (\text{B.2.3})$$

(B.2.2)式における係数  $q'$  は次式を満足する値でなければならない。

$$\frac{\gamma_{II}}{\gamma_I} \leq 0.2 q' \quad (\text{B.2.4})$$

ただし、 $q'$  は (B.2.4) 式を満足するできるだけ小さい整数とする。

- 3) 弾性追従ひずみ  $\epsilon_{EF}$  を次の計算式により定める。

$$\epsilon_{EF} = f G(\lambda) \frac{\gamma_{II}}{\alpha_B} \quad (\text{B.2.5})$$

$f$  : ひずみ集中補正係数。  $f = 1.5$  とする。

$$\lambda = \frac{t R}{r^2}$$

$t$  : 厚さ (mm)

$R$  : 曲り管又はエルボの曲げ半径 (mm)

$r$  : 管断面の平均半径 (mm)

$$G(\lambda) = \frac{r}{R} \left\{ 1.044 \lambda^{1/3} + 0.582 \left( \frac{r}{R} \right) \lambda^{2/3} \right\} \quad (\text{B.2.6})$$

$\alpha_B$  : 曲り管又はエルボの曲り角

(3) 判定基準

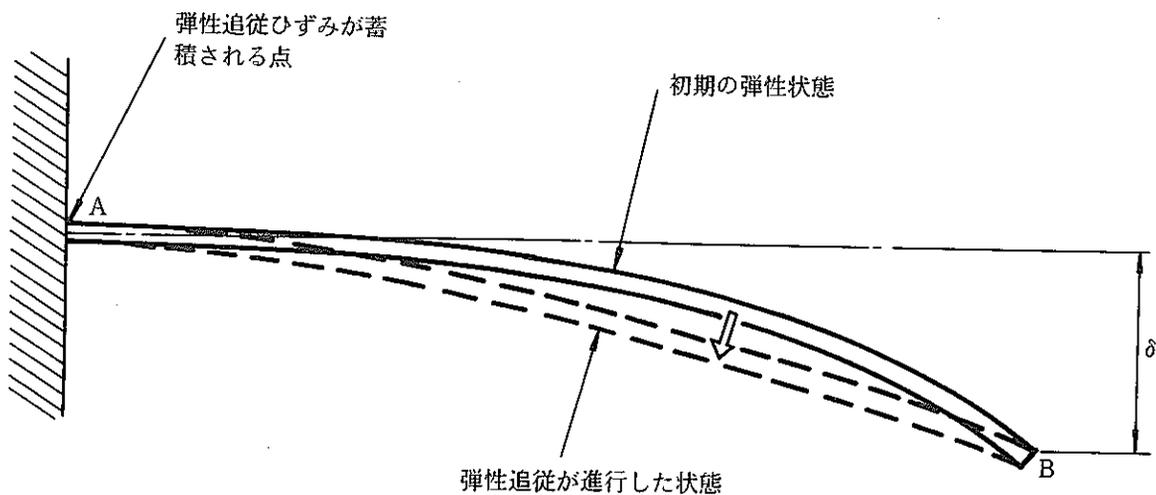
熱膨張応力を除外すれば長期1次応力が低い場合であって、弾性追従ひずみ  $\epsilon_{EF}$  が次の制限を満足する場合は、考えている管系の管台又は溶接ティを除いた配管要素に関して、すべての運転状態及び試験状態において熱膨張応力を2次応力とする。

$$\epsilon_{EF} \leq 0.005 \quad (B.2.7)$$

【解説】

- 1 付録Bは弾性追従の判定について定めたもので、長期2次応力による弾性追従ひずみ上限値算出法と、管の熱膨張応力に関する弾性追従の判定法を示している。
- 2 付録B.1は長期1次応力が低い場合の長期2次応力  $Q_{EF}$  による弾性追従ひずみの上限値の算出法を示したものである。殻と鏡板の間の温度差  $\Delta T$  及び熱膨張差  $\alpha_A T_A - \alpha_B T_B$  による長期2次元周方向膜応力  $Q_{mEF}$  により生じるひずみの上限値が付録B.1に定めるように自明であるので、ここでは長期2次曲げ応力  $Q_{bEF}$  により生じるひずみの上限値  $\epsilon_{bEF} = q\epsilon_{b0}$  について説明する。

軸方向曲げ応力による弾性追従モデルの概念を図B.1に示す。ここで、片持ちはりABの端点Bに強制変位  $\delta$  を与えた状態を初期の弾性状態として実線で示し、これからクリープが進行した状態を破線で示している。初期の弾性状態からクリープが進行するにつれてはりの



図B.1 片持ち梁に強制変位を加えた場合の弾性追従挙動

付け根の点Aにクリープひずみが蓄積していき、点Aとその近傍部が強制変位 $\delta$ のうちの大部分を吸収するようになることが判る。

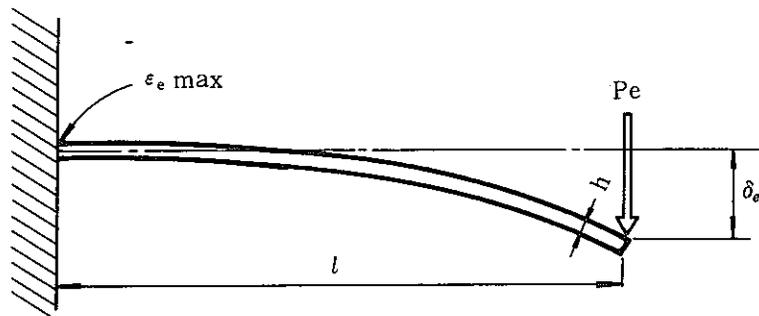
これから、弾性はり<sup>(\*)</sup>とクリープはり<sup>(\*)</sup>の各々に等しい強制変位量を与えたときにはりの付け根部に生じる最大弾性ひずみ $\epsilon_{e\max}$ と最大クリープひずみ $\epsilon_{c\max}$ の比(これを $q$ とする)を求めることができれば

$$\epsilon_{bEF} = \epsilon_{c\max} = q \cdot \epsilon_{e\max}$$

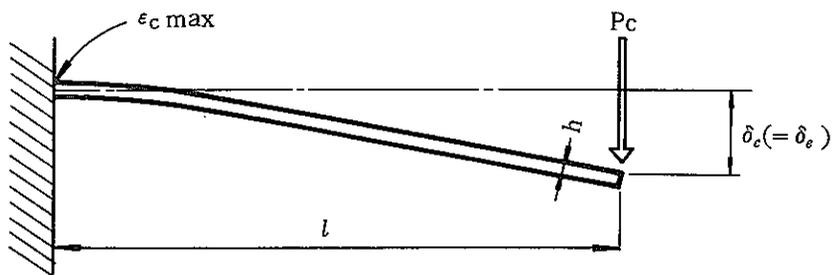
として、弾性追従ひずみの上限値が求められる。

弾性追従ひずみを定めるパラメータ $q$ は、図B.2に示す計算モデルを用いて導出できる。

図B.2(a)は弾性はり(ヤング率、長さ、断面2次モーメント及び高さをそれぞれ $E$ 、 $l$ 、 $I$ 及び $h$ とする。)であり、その先端に集中荷重 $Pe$ を加えたときの先端での変位量を $\delta_e$ 、固定端表面に生じる最大弾性ひずみを $\epsilon_{e\max}$ とする。このとき、先端の変位は、



(a) 弾性梁の場合



(b) クリープ梁の場合

図B.2 弾性梁とクリープ梁の計算モデル

$$\delta e = \frac{Pe l^3}{3EI} \quad (1)$$

$$\text{一方, } \epsilon_{\text{emax}} = \frac{Pe lh}{2EI} \quad (2)$$

$$\text{従って, } \epsilon_{\text{emax}} \text{ は } \epsilon_{\text{emax}} = \frac{3h \delta e}{2l^2} \quad (3)$$

図B.2(b)はクリープはりであり, その先端に集中荷重 $Pc$ を加えたときの先端での変位量を $\delta_c$ , 固定端表面に生じる最大クリープひずみを $\epsilon_{\text{emax}}$ とする。

位置 $(x, z)$ ( $x$ は固定端からの距離,  $z$ ははり中央面からの距離)における定常クリープひずみ速度を,

$$\dot{\epsilon}_c(x, z) = \dot{\kappa}(x) \cdot z \quad (4)$$

とし, クリープ則を $\dot{\epsilon}_c = B\sigma^n$  とすると, 位置 $x$ における曲げモーメント $M(x)$ は,

$$M(x) = 2 \int_0^{\frac{h}{2}} \left\{ \frac{\dot{\kappa}(x)z}{B} \right\}^{\frac{1}{n}} z dz \quad (5)$$

上式より,  $\dot{\kappa}(x)$ に対する次式を得る。

$$\dot{\kappa}(x) = B \left( \frac{2n+1}{2n} \right)^n \left( \frac{2}{h} \right)^{2n+1} \{M(x)\}^n \quad (6)$$

$$\text{次に } \dot{\kappa}(x) = \frac{d^2 \dot{w}}{dx^2} \quad (w: \text{たわみ}) \quad (7)$$

とおくと

$\dot{\delta}_c = \int_0^l \int_0^x \dot{\kappa}(\eta) d\eta dx$  であるから,  $M(x) = Pc(l-x)$  を用いて

$$\dot{\delta}_c = B \left( \frac{2n+1}{2n} \right)^n \left( \frac{2}{h} \right)^{2n+1} \frac{l^{n+2}}{n+2} Pc^n \quad (8)$$

ここで,  $\delta_c = \dot{\delta}_c t$  であるから

$$\delta_c = B \left( \frac{2n+1}{2n} \right)^n \left( \frac{2}{h} \right)^{2n+1} \frac{l^{n+2}}{n+2} Pc^n t \quad (9)$$

一方,  $\dot{\epsilon}_{\text{emax}} = \dot{\kappa}(0) \frac{h}{2}$  であるから,  $\dot{\kappa}(0)$  を計算して

$$\dot{\epsilon}_{\text{emax}} = B \left( \frac{2n+1}{2n} \right)^n l^n \left( \frac{2}{h} \right)^{2n} Pc^n \quad (10)$$

となる。次に  $\epsilon_{cmax} = \dot{\epsilon}_{cmax} t$  であるから

$$\begin{aligned} \epsilon_{cmax} &= \dot{\epsilon}_{cmax} t \\ &= B \left( \frac{2n+1}{2n} \right)^n P_c^n l^n \left( \frac{2}{h} \right)^{2n} t \end{aligned} \quad (11)$$

従って、 $\epsilon_{cmax}$  と  $\delta_c$  との関係は、

$$\epsilon_{cmax} = \frac{(n+2)h}{2l^2} \delta_c \quad (12)$$

となる。

ここで、 $\delta_e = \delta_c = \delta$ ，すなわち弾性はりとかりープはりの各々に等しい強制変位量を与えたときにはり固定端表面に生ずる最大弾性ひずみ  $\epsilon_{emax}$  と最大かりープひずみ  $\epsilon_{cmax}$  との比

$\frac{\epsilon_{cmax}}{\epsilon_{emax}}$  を比較すると、

$$q = \frac{\epsilon_{cmax}}{\epsilon_{emax}} = \frac{n+2}{3} \quad (13)$$

$q$  は弾性解析によって算定したひずみを基準とするときの、かりープによる曲げひずみ増倍率を示すものといえる。

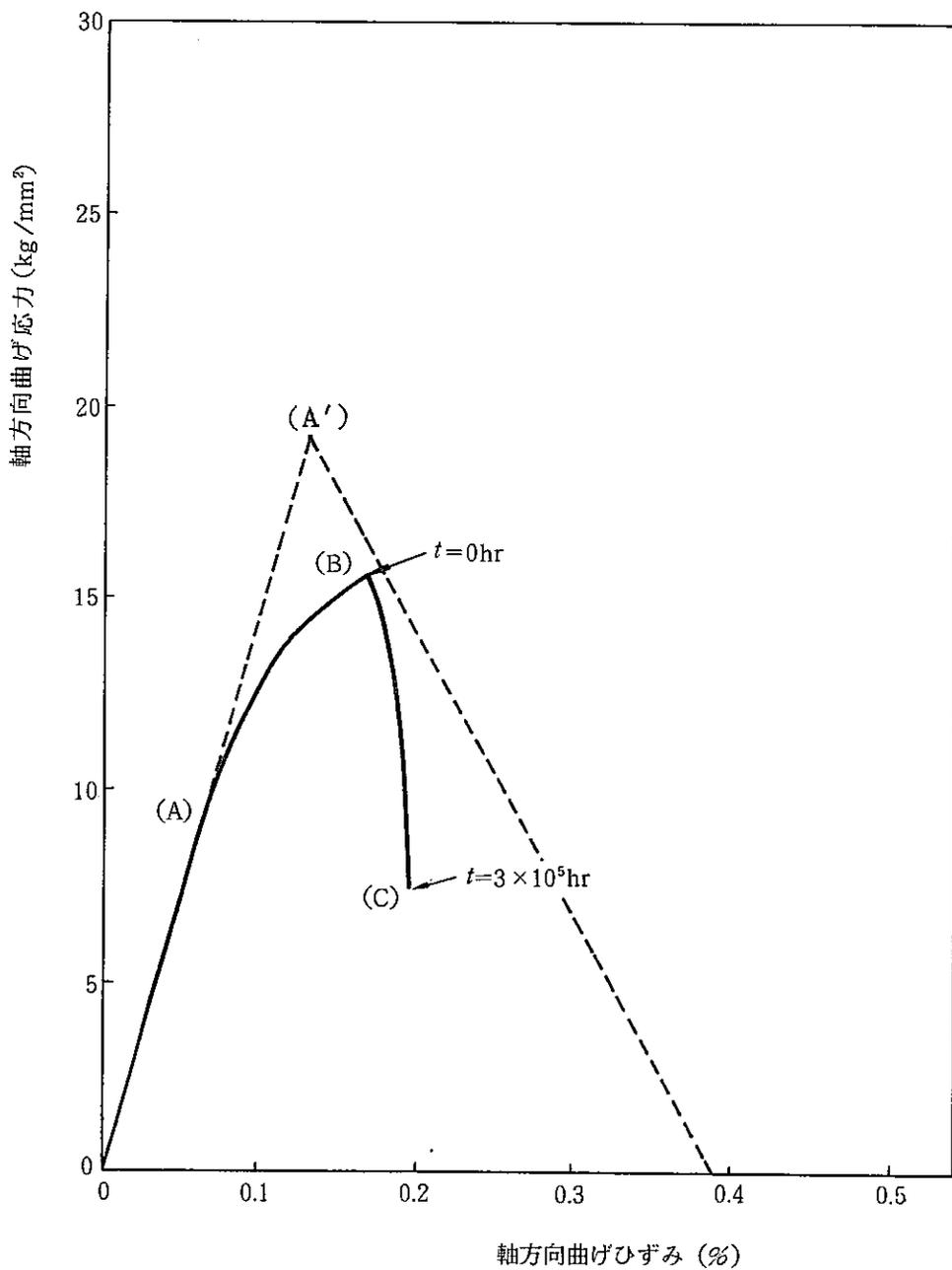
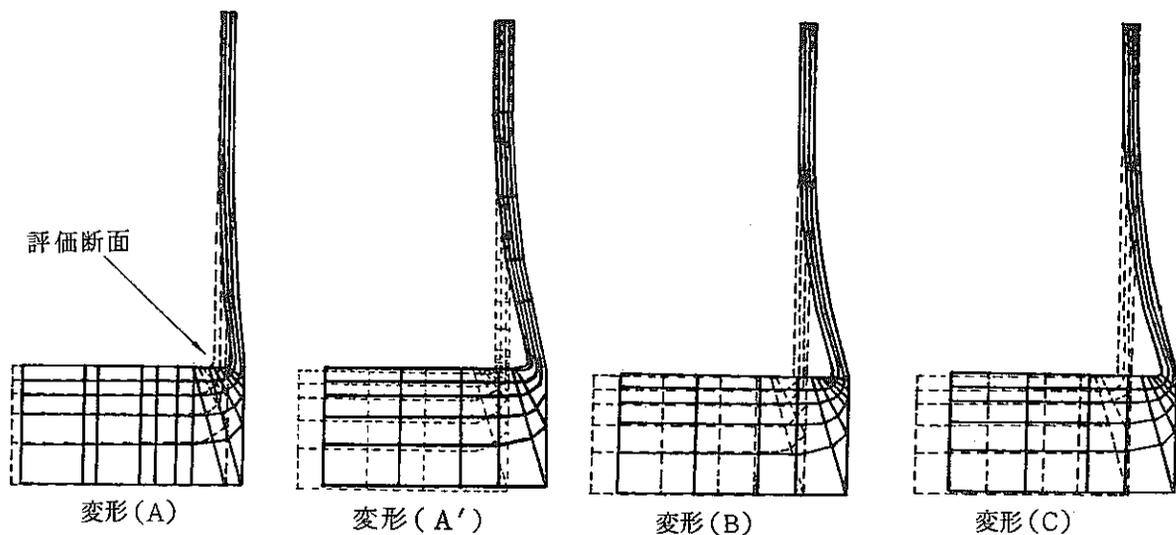
ただし、ここに示した簡易かりープ解析は、片持ちはりの自由端に一定荷重  $P_c$  を負荷し、これを保持した場合の解析であり、(12)式は一定荷重の下で自由端の変位が  $\delta_c$  になった時点での固定端の外皮の曲げひずみを示すものである。これに対して、自由端の変位一定 ( $\delta_c \equiv \delta_0$ ) の条件の下での曲げひずみの再配分による固定端の曲げひずみ増倍はより緩やかなものになる。従って、(13)式は2次曲げ応力の分布による弾性追従の上限を与える保守的な係数と考えることができる。

材料が SUS 304 で、温度 600 °C 以下の場合には  $n < 7$  であるから、 $q$  の上限値として

$$q = 3.0 \quad (n = 7) \quad (14)$$

とする。

管板-円筒胴接合部の応力ひずみ挙動を例として、非弾性解析結果と  $q = 3$  として想定される弾性追従挙動を図 B.3 に示す。図 B.3 において破線は  $q = 3$  として想定した弾性追従挙動、実線は非弾性解析結果の弾性追従挙動で、(B)→(C)は  $3 \times 10^5$  hr までの弾塑性かりープ変形を表わしている。図 B.3 から  $q = 3$  として想定される弾性追従挙動はかなり安全側の想定であることが理解できる。



円筒胴外径 = 1000mm  
 円筒胴板厚 = 20mm  
 管板板厚 = 170mm

注) 変位は誇張して描  
 いている。

図 B.3 管板-円筒胴部の弾性追従挙動の例

注\*) クリープはりについて

材料のクリープ変形挙動は、一般に、定常クリープ（応力が一定であればクリープひずみ速度が一定）に先立って遷移クリープ（応力が一定でもクリープひずみ速度が変化）が現われる。

近年の非弾性解析では、上記材料特性では簡便に応力が一定であればクリープひずみ速度は一定であるとして解析を行う場合が多い（定常クリープの仮定）。

しかしながら構造物のクリープ挙動を解析する場合、材料挙動として定常クリープを仮定しても、クリープ挙動は応力に対して非線形であるため、弾塑性挙動に対する構造物内の応力分布と、クリープ挙動下での応力分布とは異った応力分布となる。そこで、定常クリープを仮定しても、構造物の一定荷重に対する応答には、遷移的挙動が現われる。

上記遷移的過程を含め構造物の弾塑性クリープ挙動を解析するのは一般に数値解法によらざるを得ず、繁雑な計算を必要とする。そこで、古典的クリープ解析では、上記遷移過程は無視し、構造物内の応力分布は負荷当初より定常クリープ側における応力-ひずみ（速度）関係から一義的に定まる応力分布形態にあるとして解析を行うことが多い。従ってこのような解析法は、初期の弾塑性応力ひずみ関係から定まる応力分布形態から、定常的な応力分布形態に移行する過程を無視しているともいえるが、クリープ変形下での挙動を簡便に推定する方法として有力な場合も多い。

クリープはりとは、初期の弾（塑）性変形及び前記遷移過程での変形を無視して、はりの中での応力分布形態は、クリープ則における応力-ひずみ（速度）関係から定まる応力分布であるとして負荷と変形（速度）或いはひずみ（速度）の関係を求めるものである。

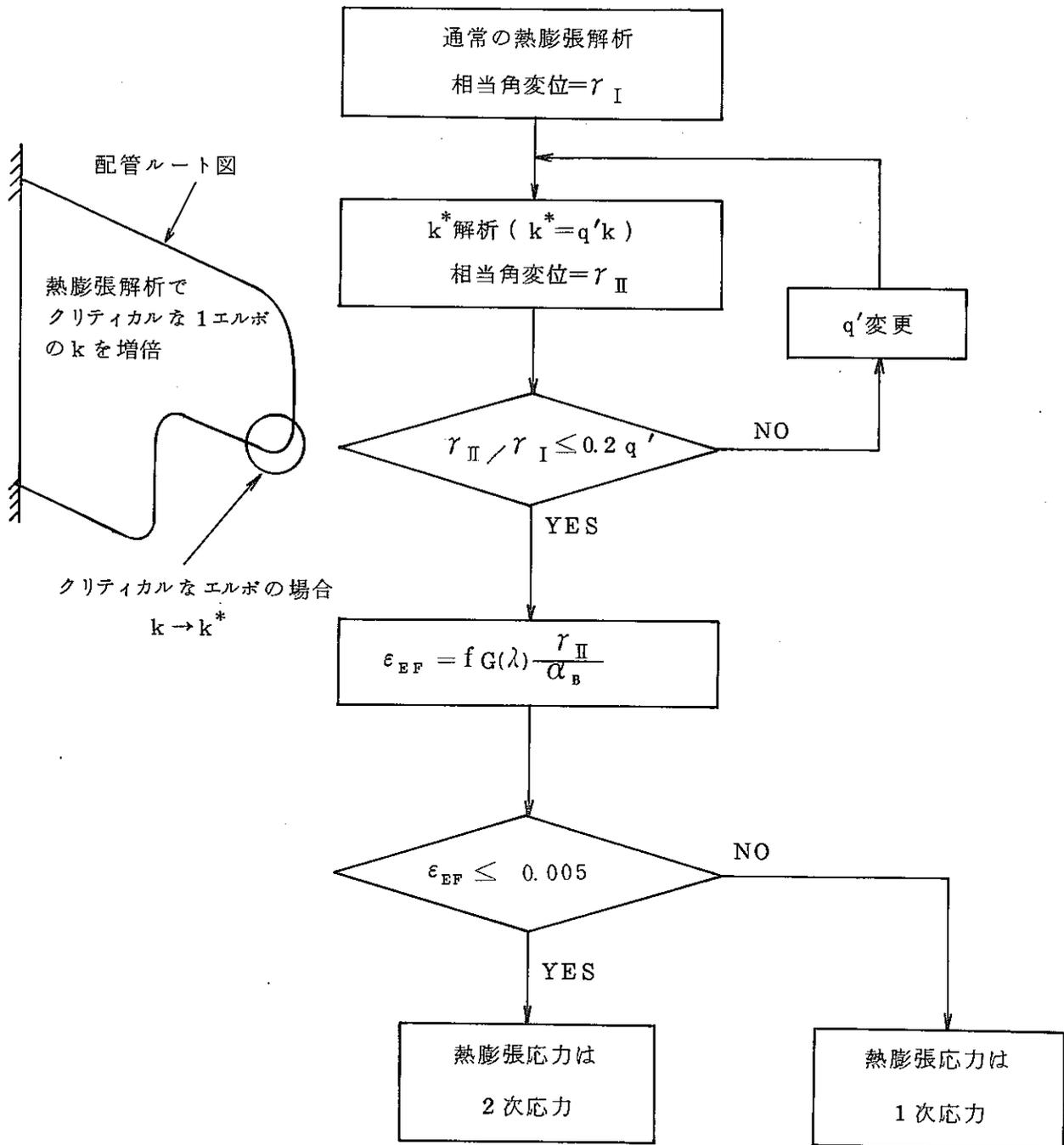
3 付録B.2は、管の熱膨張応力に関する弾性追従の判定について示したものである。

付録B.2の考え方は次のとおりである（図B.4参照）。

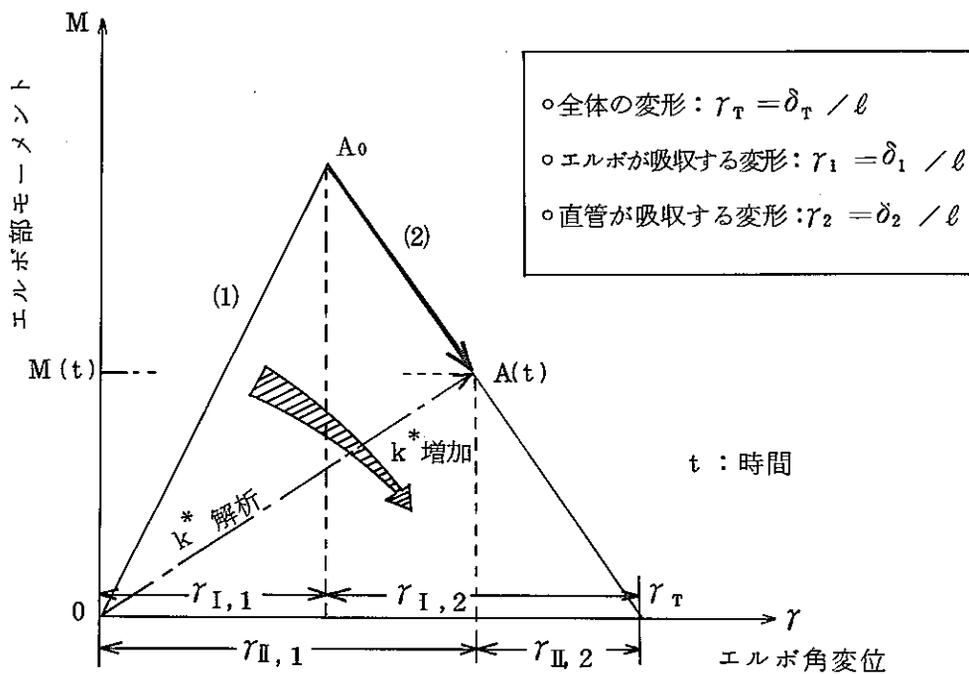
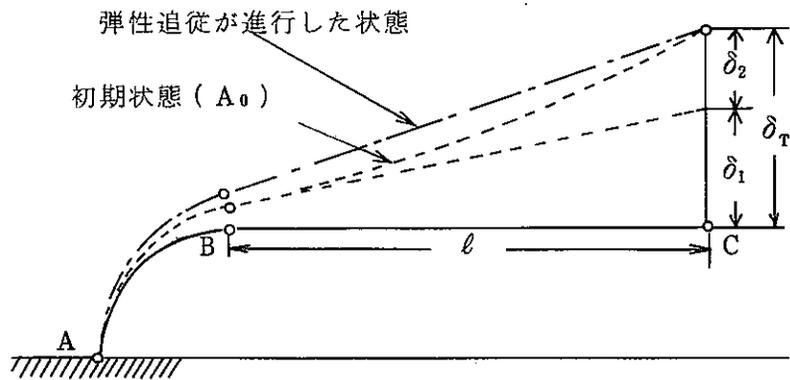
(1) B.2(2)1)及び2)

基礎的検討例として、エルボと直管を結合した単純な平面配管モデルに熱膨張変位に相当する端点変位が与えられた場合について考える。いま、図B.5に示すように90°エルボと直管が結合された配管系のエルボ端Aが固定され、直管端Cに端点変位 $\delta_T$ が与えられたとする。 $\delta_T$ のうち、エルボで吸収する変位を $\delta_1$ 、直管で吸収する変位 $\delta_2$ とする。配管系の弾性追従では、クリープが進行するに従って、撓性の大きいエルボに変形が集中する現象を呈する。弾性追従が進行した状態を一点鎖線で示す。

図B.5で初期の弾性平衡状態をA<sub>0</sub>、又全体で吸収すべき角変位量 $\gamma_T$ のうち、エルボと直管での吸収量をそれぞれ $\gamma_{I,1}$ 及び $\gamma_{I,2}$ とする。この状態A<sub>0</sub>からクリープが開始されると、エルボの高応力部でクリープが進行し、モーメントは低下するが、同時にエルボ部に



図B.4 熱膨張応力の取扱いの流れ  
(本方針付録B.2)



図B.5 配管系の弾性追放

変形が集中し角変位  $\gamma$  が増加するため、平衡点は直線(2)に沿って右下りに移動し、新たな平衡点A(t)に移る。

付録B.2に示す方法は、図B.5に示すように撓性係数  $k$  を  $k^*$  まで増倍させて、クリープ条件下の平衡点A(t)を予測する(以後、「 $k^*$ 解析」と呼ぶ。)ことによって実際の弾性追従挙動を模擬するものである。

図B.6に4エルボモデルにおける  $k^*$  解析結果を示す。同図に示すように、熱膨張応力などの変位制御型荷重による応力が主体の場合には、 $k^*$  解析は弾クリープ解析による弾

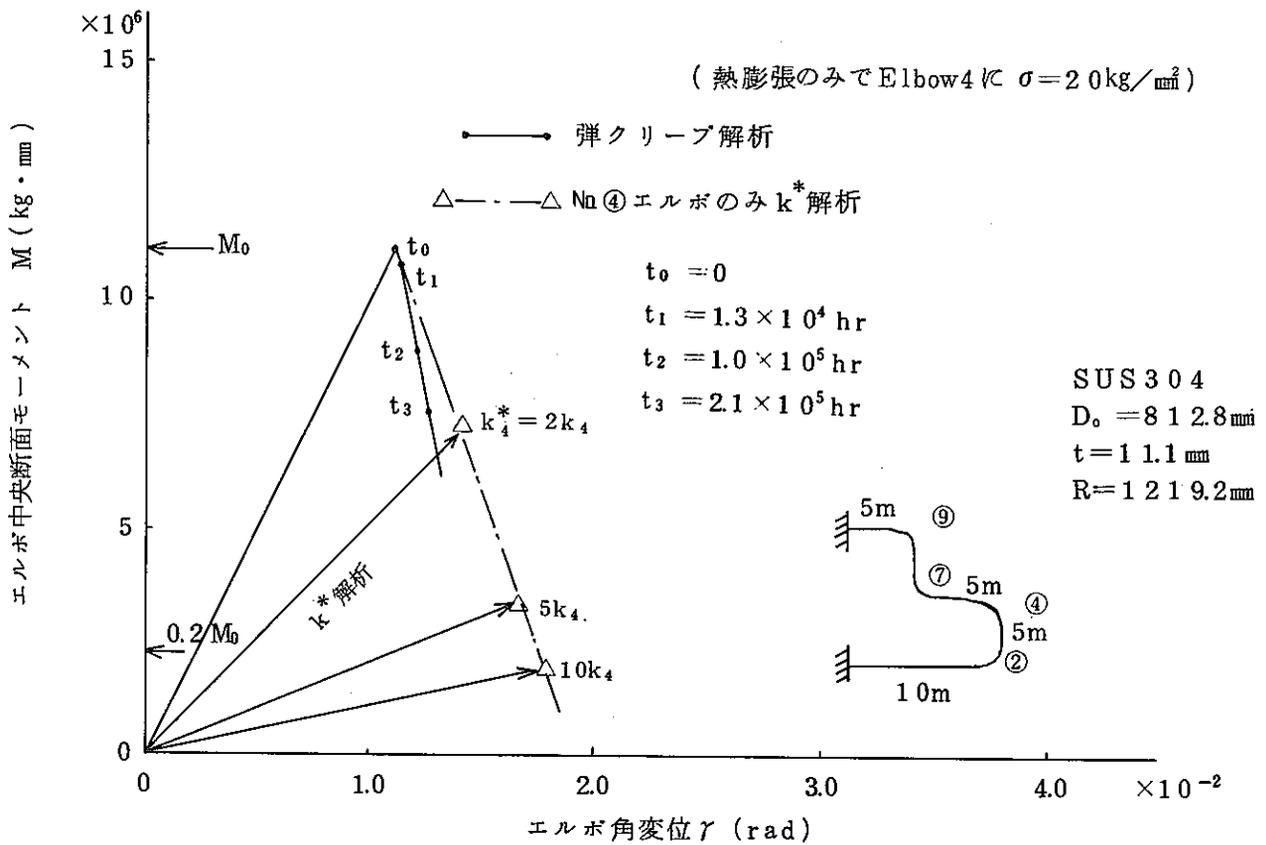


図 B.6 4 エルボモデルにおける  $k^*$  解析  
 (熱膨張 + 荷重)

性追従挙動を良好に若しくは安全側に(弾性追従角変位を大き目に)評価することがわかる。

図 B.7 は、モーメントの緩和が最も速いエルボ単体についての緩和挙動を示したものである。同図より寿命期間中にモーメントは初期のその 20% 以下に低下しないことがわかる。弾性追従を伴う配管系では緩和はこれより遅くなるため、弾性追従の評価に当って初期のモーメント  $M_0$  の 20% までモーメントを低下させるように撓性係数  $k$  を増倍させる ( $k^* = q'k$ ) ことは安全側の取扱いとなる。

本方針では、寿命期間中の弾性追従ひずみの評価を行うに当って、これらの解析結果等を参照し、初期モーメントの 20% までモーメントを緩和させるようにエルボの撓性係数  $k$  を増倍 ( $k^* = q'k$ ) させて、寿命末期における配管系の熱膨張応力による弾性追従量を評価している。

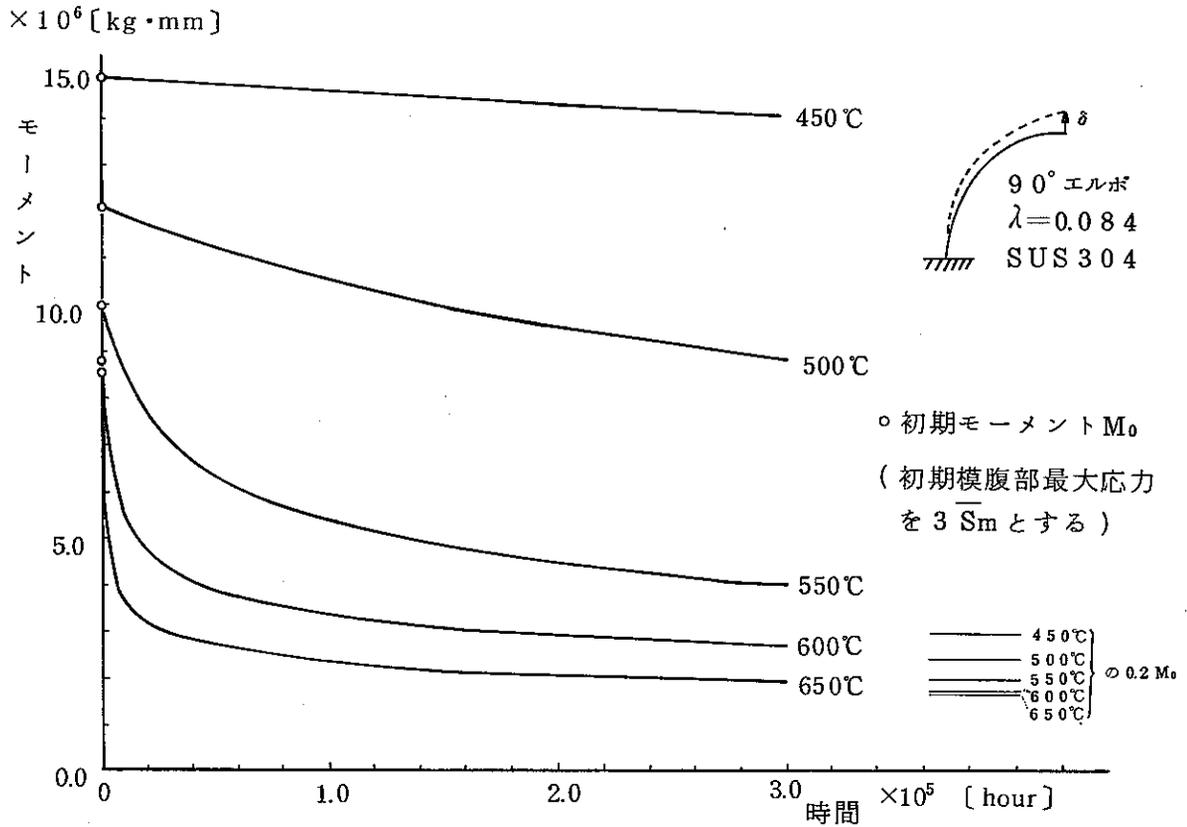


図 B.7 エルボ単体のモーメント緩和 ( $\lambda = 0.0084$ )

(2) B.2(2)3)

B.2(2)3) では、エルボの角変位から非弾性ひずみを含む最大ひずみを評価する方式として次のような定式化を行っている。

$$\epsilon_{\max} = f G(\lambda) \frac{\gamma}{a_B} \quad (15)$$

ここに、

- $\epsilon_{\max}$  : エルボの最大ひずみ
- $\gamma$  : エルボ両端間の角変位(度)
- $f$  : ひずみ補正係数,  $f = 1.5$  とする。

$$\lambda = \frac{t R}{r^2}$$

- $t$  : 肉厚 (mm)
- $R$  : エルボの曲げ半径 (mm)
- $r$  : エルボ断面の平均半径 (mm)

$$G(\lambda) = \frac{r}{R} \left\{ 1.044 \lambda^{1/3} \pm 0.582 \left( \frac{r}{R} \right) \lambda^{2/3} \right\} \quad (16)$$

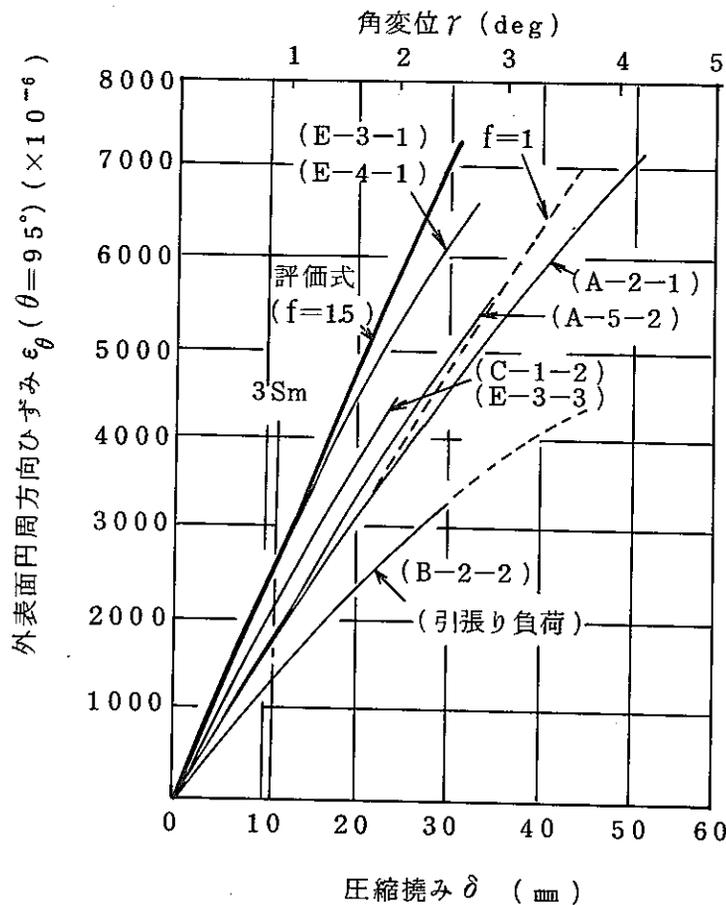
(+ : 内表面ひずみ)  
(- : 外表面ひずみ)

$\alpha_B$  : 曲り管又はエルボの曲り角(度)

(15)式は、応力-ひずみ関係が非線形の場合にも、エルボの角変位とひずみの関係では非線形性が小さいことに着目し、弾性解析による角変位とひずみの関係式を基礎式として非線形性を補う係数  $f$  を導入したものである。

(15)式の  $G(\lambda)$  は Clark & Reissner の弾性近似解に基づいている。

この評価式(15)に対して、高温崩壊試験データ及び繰返し試験の最初の負荷におけるデータに基づき、エルボが単調荷重又は弾性追従によって非弾性変形するときの、エルボ両端間の角変位と最大ひずみの関係について検討(図B.8参照)から(15)式で  $f = 1.5$  とするこ



図B.8 撓みと外表面円周方向ひずみの関係

(試験温度 = 600°C)

(注) (A-2-1), (A-5-2), (B-2-2), (C-1-2), (E-3-1), (E-3-3), (E-4-1) は試験体番号

とによってエルボに発生する最大ひずみを安全側に推定できることがわかる。本方針では、これらの結果に基づき、 $f = 1.5$ と定めた評価式(4)を用いてエルボの最大ひずみを安全側に算定する方法を採用した。

(3) B.2 (3)

弾性追従の程度が顕著であるか否かについては、長期1次応力が低い場合には長期2次応力による弾性追従ひずみの上限が0.005より大きいかどうかによって判定するようにしている。ここで0.005という数値は、累積非弾性ひずみの制限における膜ひずみの制限値0.01の $\frac{1}{2}$ と対応している。

## 付録C 累積クリープ疲労損傷係数の制限値D

累積クリープ疲労損傷係数の制限値Dは次により定めるものとする。

### 材 料

SUS 304

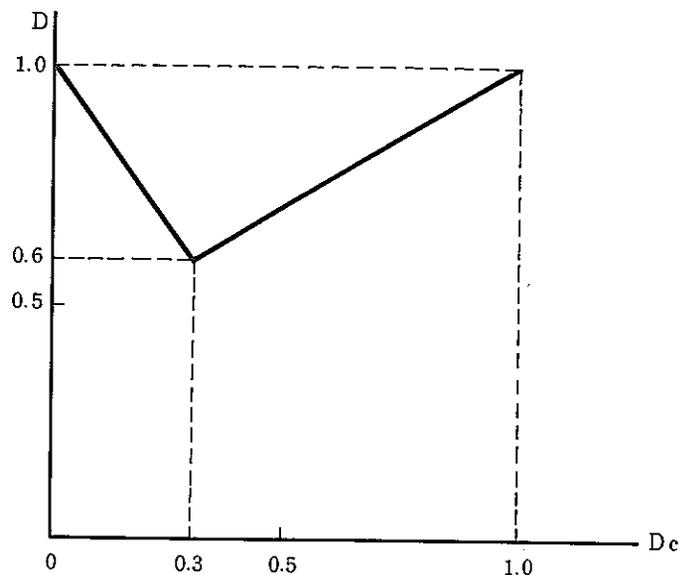
SUS 316

SUS 321 伝熱管

2 ¼ Cr-1 Mo (NT) 板

2 ¼ Cr-1 Mo (NT) 伝熱管

図C.1による。



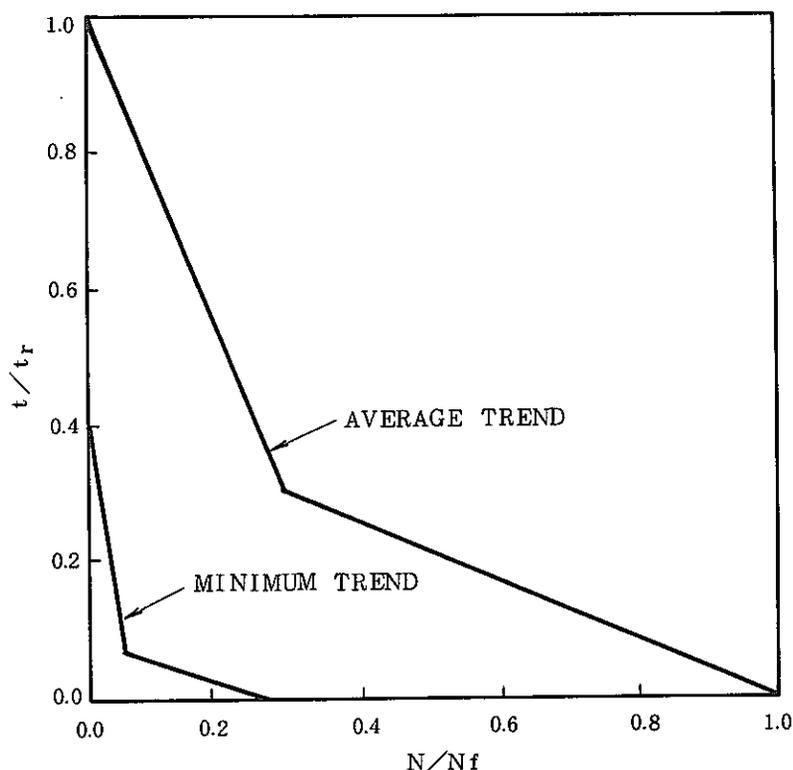
図C.1 累積クリープ疲労損傷係数の制限値D

### 【解 説】

付録Cは、累積クリープ疲労損傷係数の制限値Dを定めたものである。同制限値Dは、ASME Code Case N-47の非弾性解析による場合のクリープ疲労許容限界値と同一であり、クリープ疲労の相互作用を評価するためにCampbell<sup>(1)</sup>らが試験データの平均的傾向として提案したものに基いている。ASME Code Case N-47では弾性解析による場合は設計用疲労

曲線やクリープ損傷評価規定が十分安全側になっていることを考慮して、クリープ疲労累積損傷の制限値としてDを低下させずにD=1と設定したとされている。本方針では弾性解析を使用する場合においても、クリープ損傷をより合理的に評価していること、またクリープ疲労に関する保持時間効果を設計用疲労線図に含めずクリープ損傷として別途評価していることを勘案してASME Code Case N-47の非弾性解析による場合と同一の累積クリープ疲労損傷係数の制限値を採用している。

クリープ疲労相互作用を考慮したクリープ疲労損傷和の制限値は、最初にASME Code Case 1331-5で採用された。Case 1331-5では、Conwayによるオーステナイト系ステンレス鋼のクリープ疲労試験データ及びCampbellによる統計解析に基づき、図CA.1に示す平均傾向の線図を304ステンレス鋼に対して求め、非弾性解析を用いた設計を対象に規定している。なお、図CA.1のもとのデータを図CA.2に示している。



AVERAGE AND MINIMUM TREND CURVES FOR CREEP-FATIGUE INTERACTION FOR TYPES 304 AND 316 STAINLESS STEELS

図CA.1 クリープ疲労損傷和の制限値 (Campbell)

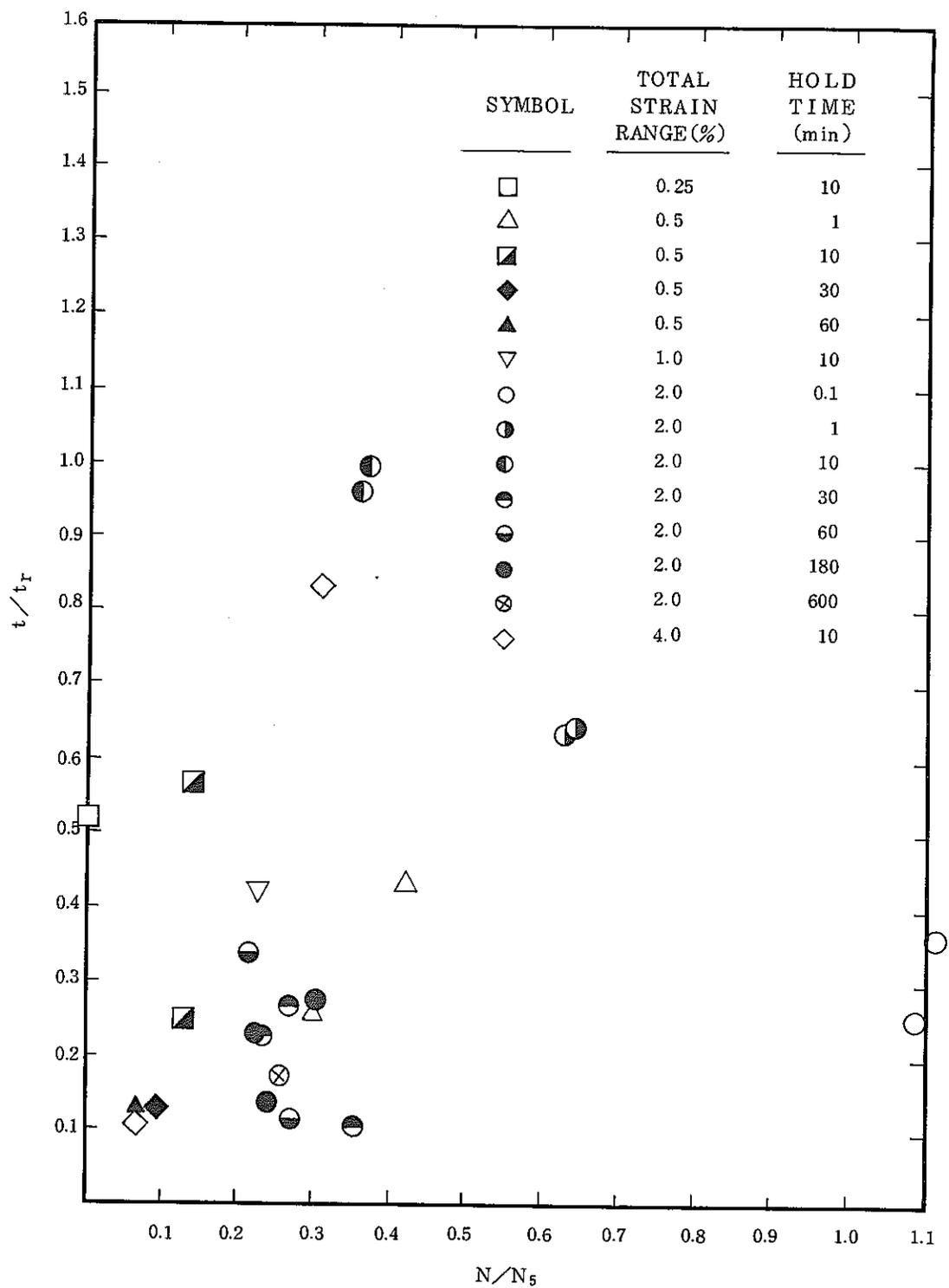


図 CA.2 クリープ疲労損傷

図 CA.2 に示される各データ点は下記に示すクリープ疲労試験に基づいている。

Conway は、図 CA.3 に示す引張ひずみ保持を伴う疲労試験を実施し、ひずみ保持期間中の応力緩和を Norton 型のクリープ式  $\dot{\epsilon}_c = K\sigma \cdot t^m$  から導かれる下式を用いて定式化している。

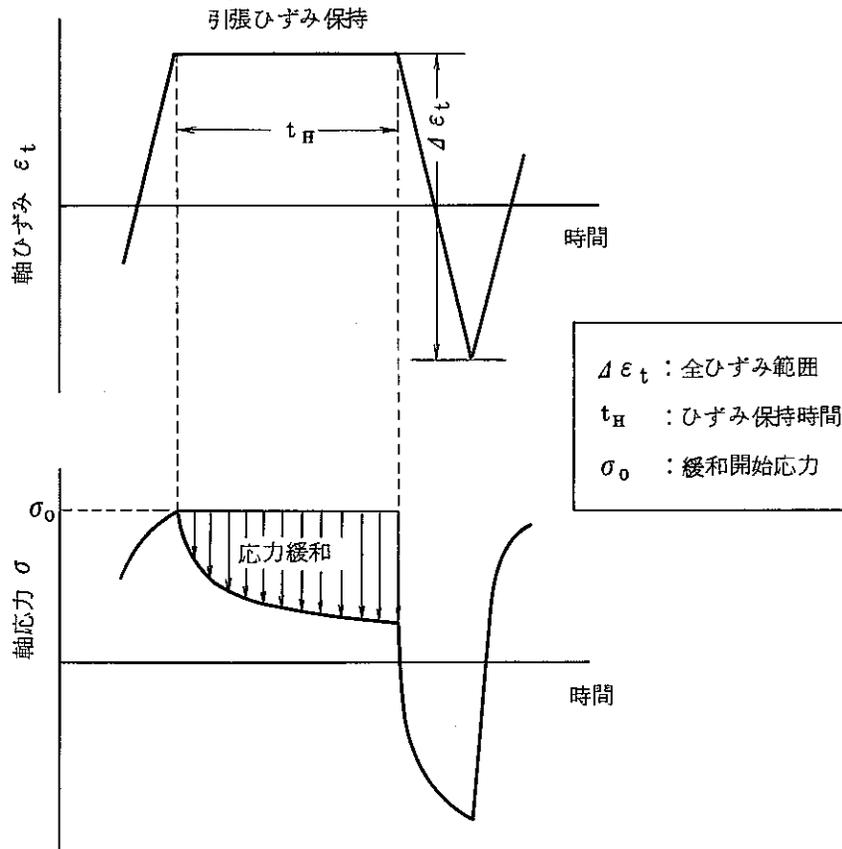


図 CA.3 ひずみ保持を伴うクリープ疲労試験

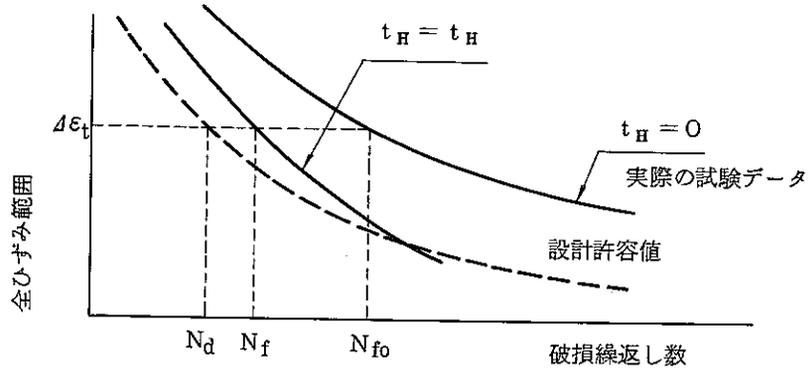
Campbell は、Conway の応力緩和式を用い、疲労損傷及びクリープ損傷を下記のように算出している。

$$\phi_f = \frac{N_f}{N_{f0}} , \quad \phi_c = N_f \int_0^{t_H} \frac{dt}{t^r}$$

算出方法の概念図を図 CA.4 に示す。

<疲労損傷の算出>

$$\phi_f = \frac{N_f}{N_{fo}}$$



<クリープ損傷の算出>

$$\phi_c = N_f \int_0^{t_H} \frac{dt}{t_r}$$

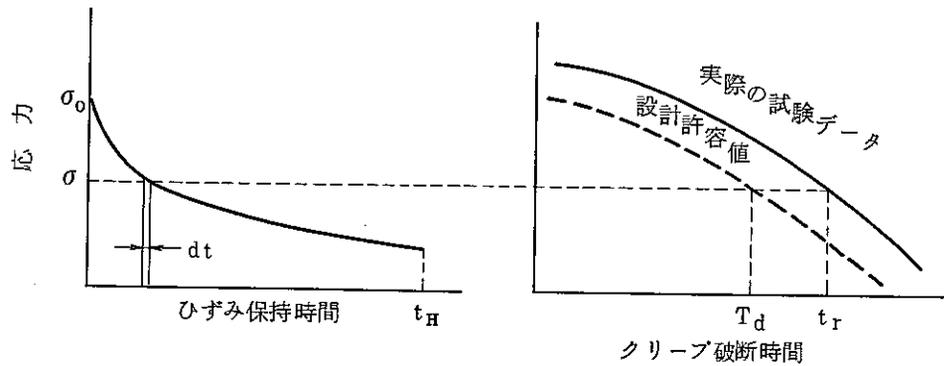


図 CA.4 疲労損傷及びクリープ損傷の算出方法の概念図

Campbellの解析は、データの平均傾向を示したものであるが、これに対しBrinkmanらは、設計における損傷計算が上記 $N_{fo}$ 、 $t_r$ といった平均値ベースではなく、 $N_d$ 、 $T_d$ といった設計許容値ベースであるという観点から、下記の修正によりCode Designベースの損傷値を図CA.5のように求めている。

$$\left( \begin{array}{l} \text{疲労損傷} \\ \text{クリープ損傷} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} D_f = \frac{M_f}{N_d} \\ D_c = N_f \int_0^{t_H} \frac{dt}{T_d} \end{array}$$

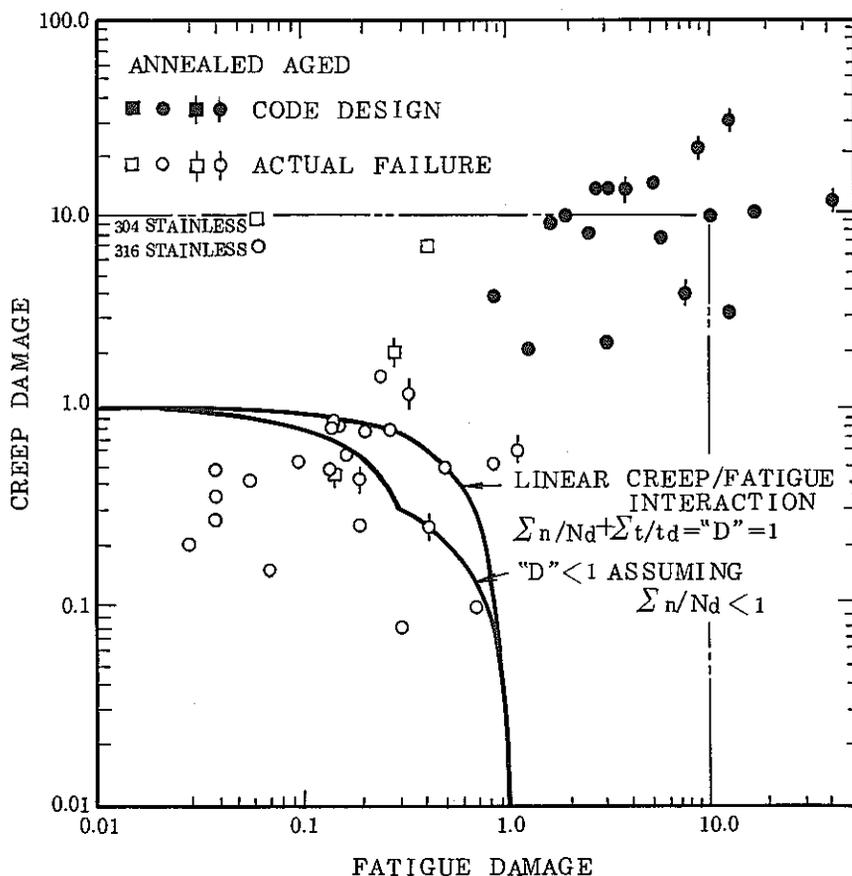


図 CA.5 実際の試験データによる損傷と  
設計許容値 (Case 1331-5) による損傷 (Brinkmanら)

図 CA.5 は、損傷和は約 4~40 以上とデータの幅は大きいですが、下記の Case 1331-5 の規定の妥当性を裏付けている。

$$\sum_i \left( \frac{n}{N_d} \right)_i + \sum_j \left( \beta \frac{t}{T_d} \right)_j \leq D \quad (3)$$

Case 1331-5 の規定は、Case 1952, Case N-47 と引き継がれて、現在に至っている。

SUS 304 の国内データについて、同様の手順で損傷を計算したのが図 CA.6 である。Brinkman らが求めた米国データと比較して、国内のデータはクリープ損傷があまり生じず、疲労損傷主体となっている。

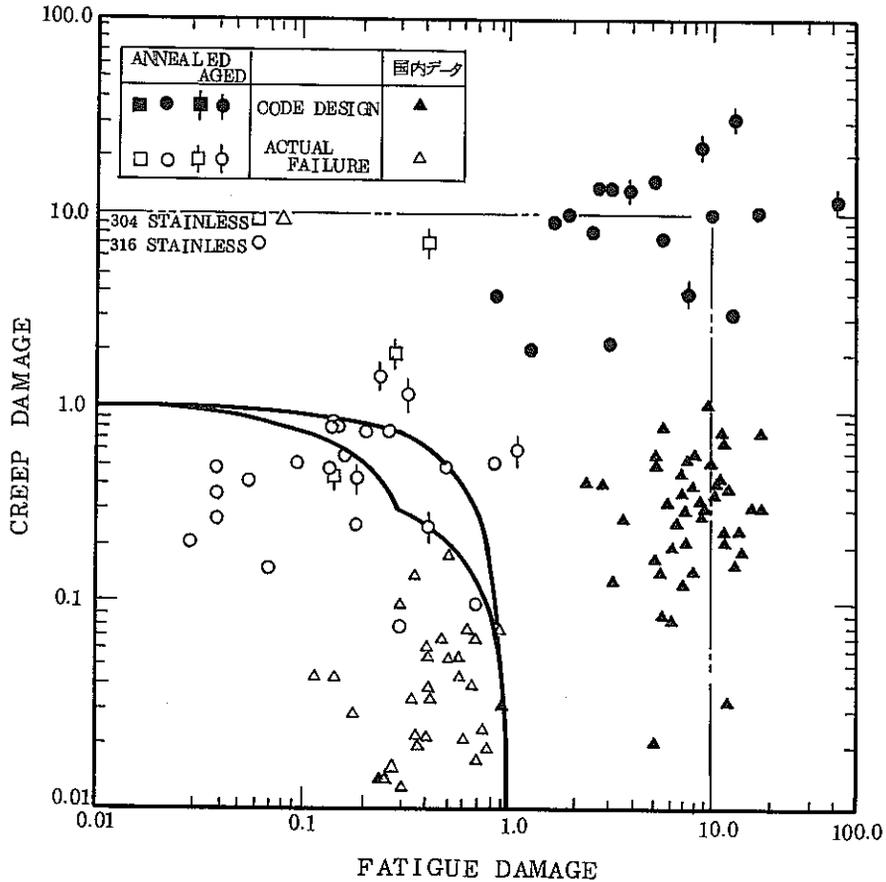


図 CA.6 米国データと国内データの損傷値の比較

国内データの方が米国データと比較してクリープ損傷が少ない理由は下記による。

ステンレス鋼に関し、米国データと国内データのクリープ疲労寿命の比較をしたのが図 CA.7 である。ひずみ保持に伴う寿命の低減は米国データの方が大きい。これは、国産材料が十分なクリープ強度を有し、かつクリープ破断延性に優れ、クリープ損傷が生じにくいことを裏付けるものである。

つぎにクリープ疲労寿命予測による検証を示す。

クリープ疲労損傷和の制限値が、付録 C 図 C.1 で規定される場合に、逆にクリープ疲労寿命予測はどの程度の精度があるかについて検証する。

ここでいうクリープ疲労とは、Conway の場合と同じく引張ひずみ保持を伴う疲労試験である。まず、実際の試験より得られた 1 サイクル当りの緩和クリープ損傷  $\psi_c$  に基づき、クリープ疲労寿命  $N_f$  を推定すると、図 CA.8 に示す結果となる。平均して 2 倍長く予測している。これは、付録 C 図 C.1 が必ずしも国内データの平均傾向を示していないことに対応する。

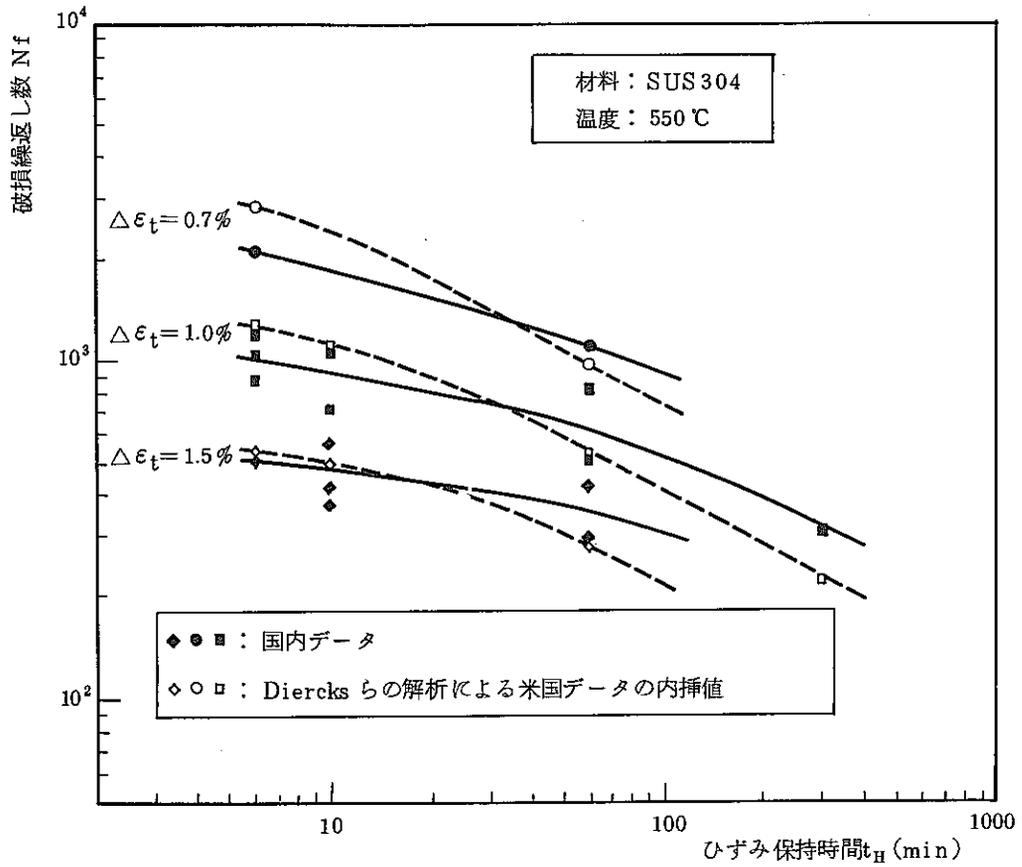


図 CA.7 米国データと国内データのクリープ疲労寿命の比較

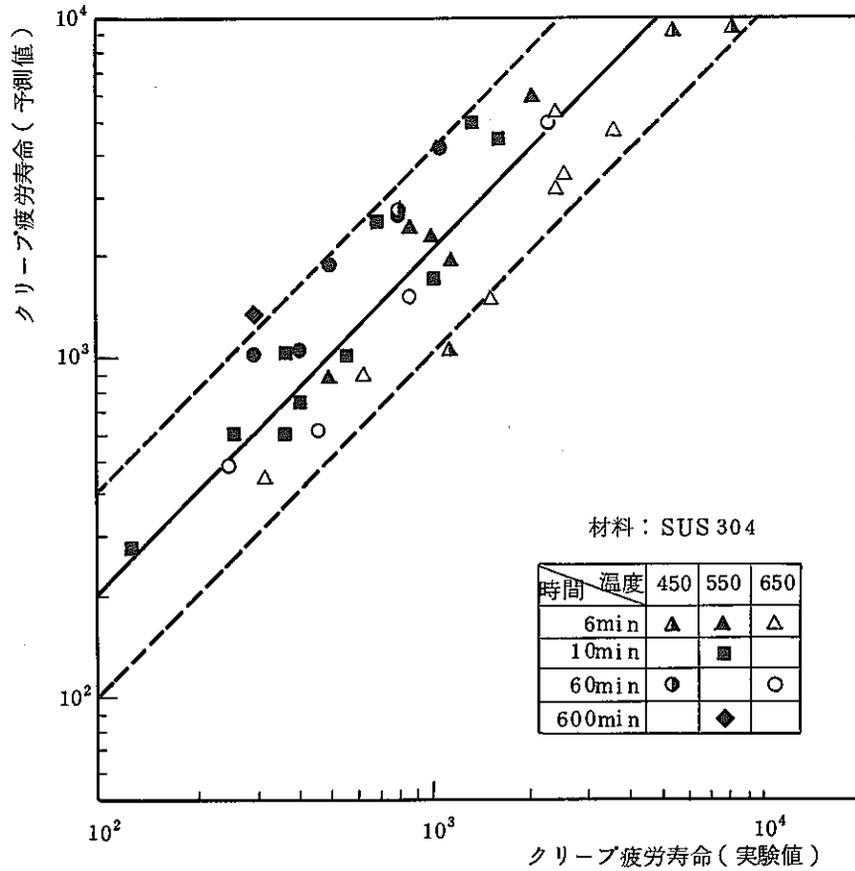


図 CA.8 クリープ疲労損傷和の制限値に基づく寿命予測 (応力緩和は実験式)

ところが、実際の設計評価では、保持期間なしの動的応力-ひずみ曲線（付録 F の解説における動的応力-ひずみ関係式）と、クリープ曲線（材料強度基準等別表 1.3 の解説におけるクリープひずみ式）からひずみ硬化則により解析される緩和挙動に基づいて、寿命予測が行なわれる。この場合のクリープ疲労寿命の推定値は、図 CA.9 に示す通りである。

クリープ損傷及び疲労損傷ともに設計許容値ベース（別表 1.5 及び別表 1.11）で寿命評価を行ない、実際の破損データと比較したものである。

解析結果は図 CA.9 に示す通りであり、寿命比にして約 20 程度の余裕があることを確認した。

設計許容値ベースの寿命予測の余裕度から判断して、本方針の規定によるクリープ疲労評価は、妥当であると考えられる。

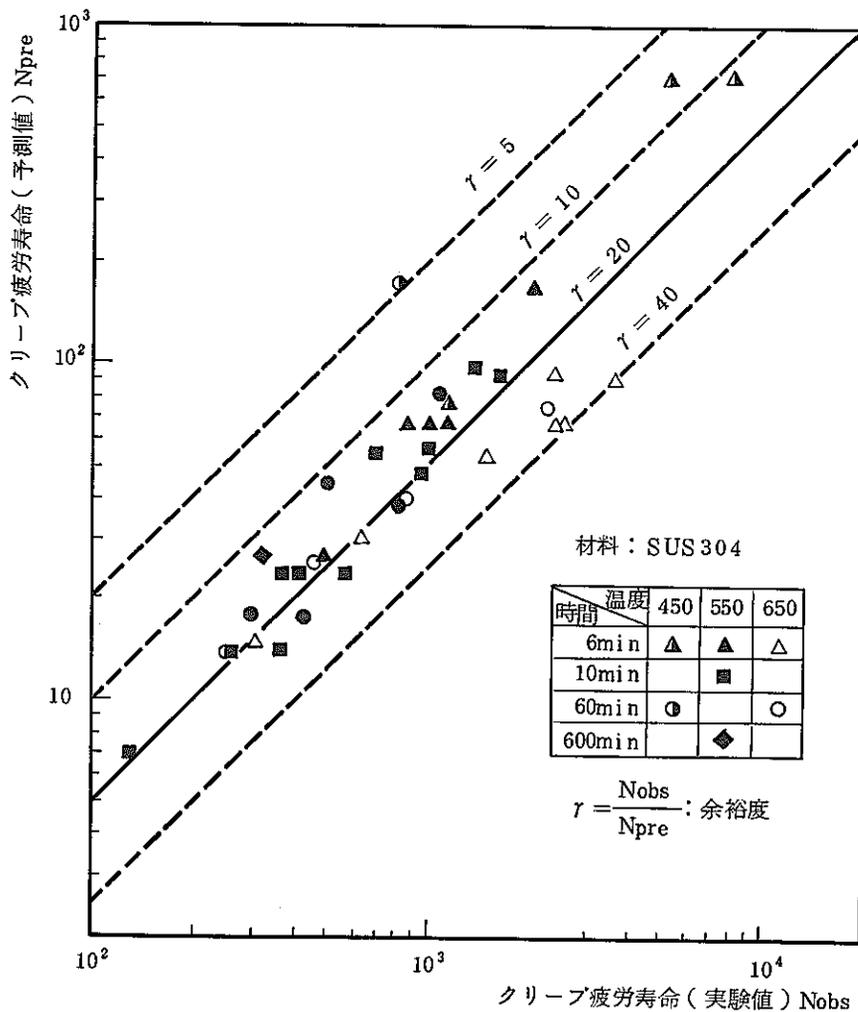


図 CA.9 本方針によるクリープ疲労寿命予測の設計余裕度

## 付録D 応力水準 $S_g$ 及び倍率 $g$

### D.1 応力水準 $S_g$

応力水準  $S_g$  ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ ) は、3.5.3(2)4 a) 1) に定めるところにより計算されるクリープ損傷係数  $D_{C1}$  が適切な水準となる応力水準とする。

### D.2 倍率 $g$

倍率  $g$  は表D.1により定めるものとする。

表D.1 倍率  $g$

	$g$
SUS304	3.0
SUS316	3.0
SUS321 伝熱費	3.0
2¼Cr-1Mo (NT) 板	3.0
2¼Cr-1Mo (NT) 伝熱管	3.0

### 【解説】

1. 付録D.1は、応力水準  $S_g$  の算出法を定めたものである。

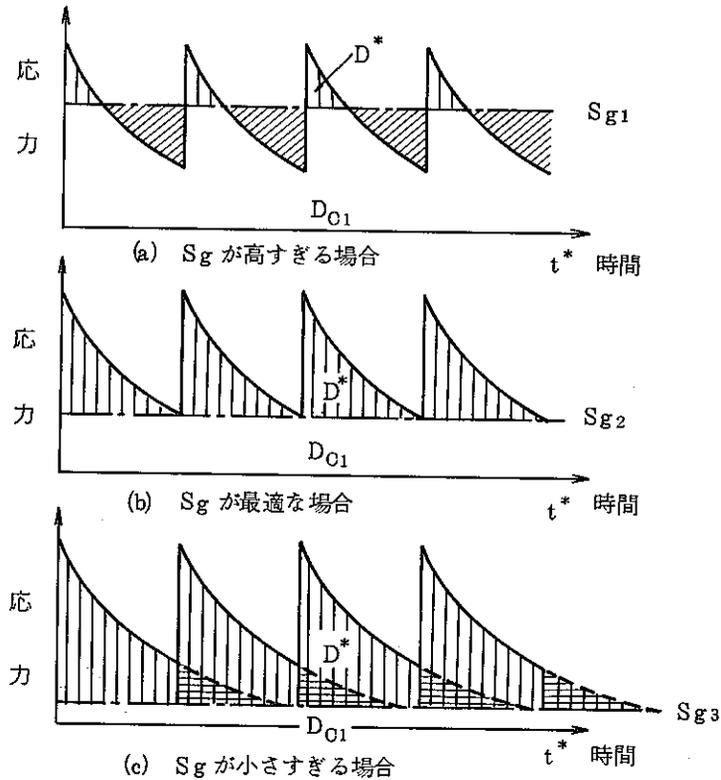
$S_g$  は、一定応力までのクリープ損傷を評価する応力水準を意味する。その水準の設定値は任意であるが、図DA.1に示すように、負荷条件に応じた最適値が存在する。本方針では、 $S_g$  を超える負荷サイクル数により最適値は異なるが、高速原型炉の負荷条件、並びに  $D^*$  値及び  $D^{**}$  値とのバランス等を考慮して、下記に示す応力水準を標準値とする。

(イ) 長期1次応力が低い場合

$$D_{C1} = 0.3 \text{ 程度となる応力水準}$$

(ロ) クリープ効果が顕著でない場合

$$D_{C1} = 0.1 \text{ 程度となる応力水準}$$



図DA.1  $S_g$  レベルの設定方法

$S_g$  の具体的な算出法は下記による。

- ①  $D_{C1}$  及び高温使用時間  $t^*$  (h) より, 時間  $t_R$  を

$$t_R = 2 t^* / D_{C1}$$

に従って求める。

- ② 考えている評価点の金属温度履歴に基づき定める温度  $T$  (°C) 及び上記時間  $t_R$  に対し, 別表 1.5 (別図 1.5) または別表 1 付録 MB より定まる設計クリーブ破断応力強さ  $S_R$  ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ ) を  $S_g$  ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ ) と読み替える。

ただし, ②の算出において別表 1 付録 MB に関し温度あるいは時間に対する内外挿の必要が生じた場合には, 別表 1.5 の解説で示した平均クリーブ破断式に, 上記温度  $T$  及び時間  $t_R$ , 並びに  $\alpha_R$  として 10 を代入することにより求まる応力値 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ ) を  $S_g$  とすることができる。

2. 付録 D.2 は, 倍率  $g$  の算出法を定めたものである。

本方針では, 1 次及び 2 次応力に関する緩和クリーブ損傷係数  $D^*$  の算出に当って, 1 次応力の存在を含めても, 応力水準  $S_g$  までの応力緩和挙動が,  $q = 3$  の弾性追従線によって安

全側に記述されるとしている。すなわち、 $D^*$  値算出に当って図 DA. 2 に示すように  $q=3$  の弾性追従線による応力緩和挙動が実際の構造物における応力緩和より安全側（応力緩和が遅いこと）であることを前提としている。

本方針では、上記前提の妥当性を保証するために、長期 1 次応力  $\langle P_L + P_b \rangle$  を  $S_g / g$  以下に制限することとし、この条件を、 $D^*$  によるクリープ損傷評価法を行なう長期 1 次応力が低い場合の前提条件の一つとして加えた。ここで、倍率  $g$  は、構造物あるいはその解析的モデルにおける応力緩和挙動を参照して定められるべきものである。

図 DA. 3 に構造物モデルの解析結果の例を示す。同図は、1 次応力として一定の軸力  $F$  を受け、更に 2 次応力として端部強制変位  $\delta$  を受ける梁において、最も弾性追従が顕著に現われる固定端部での表面応力を観察したものである。同図から、長期 1 次応力が  $\frac{2}{3} S_g$  程度でも  $q = 3$  の弾性追従線は安全側であることがわかる。

本方針では、このような解析結果を参照して安全側の配慮から、 $g = 3$  と定めている。

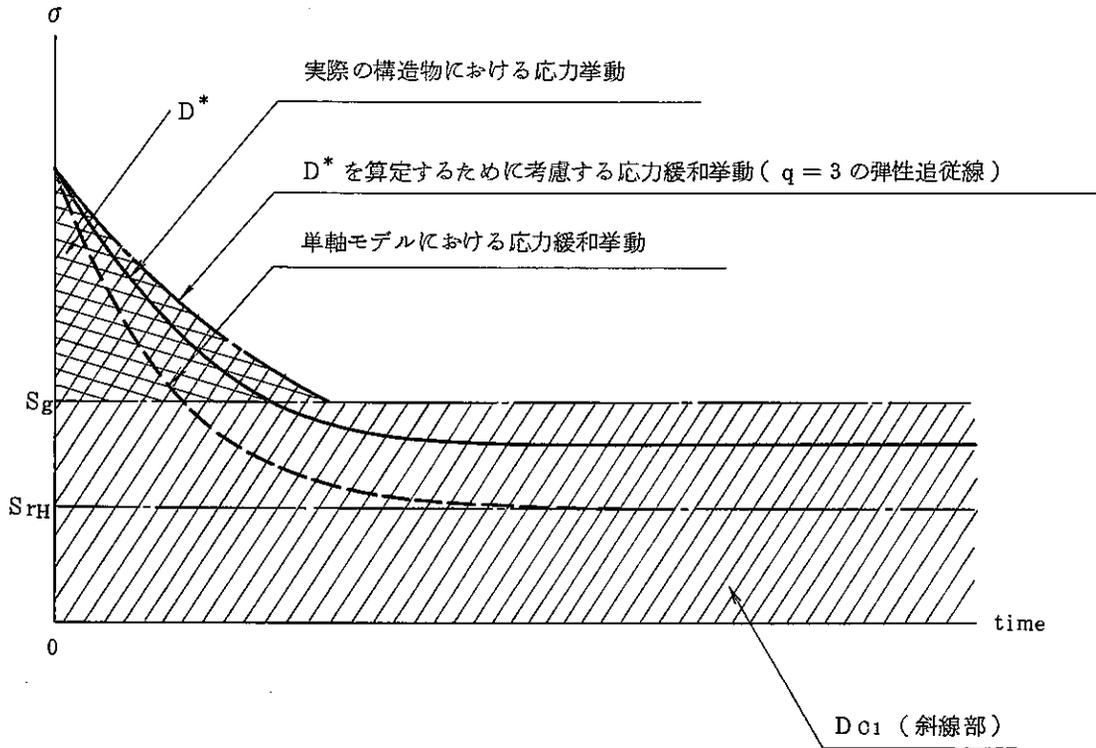


図 DA.2  $D^*$  算定に当たっての応力緩和挙動の仮定

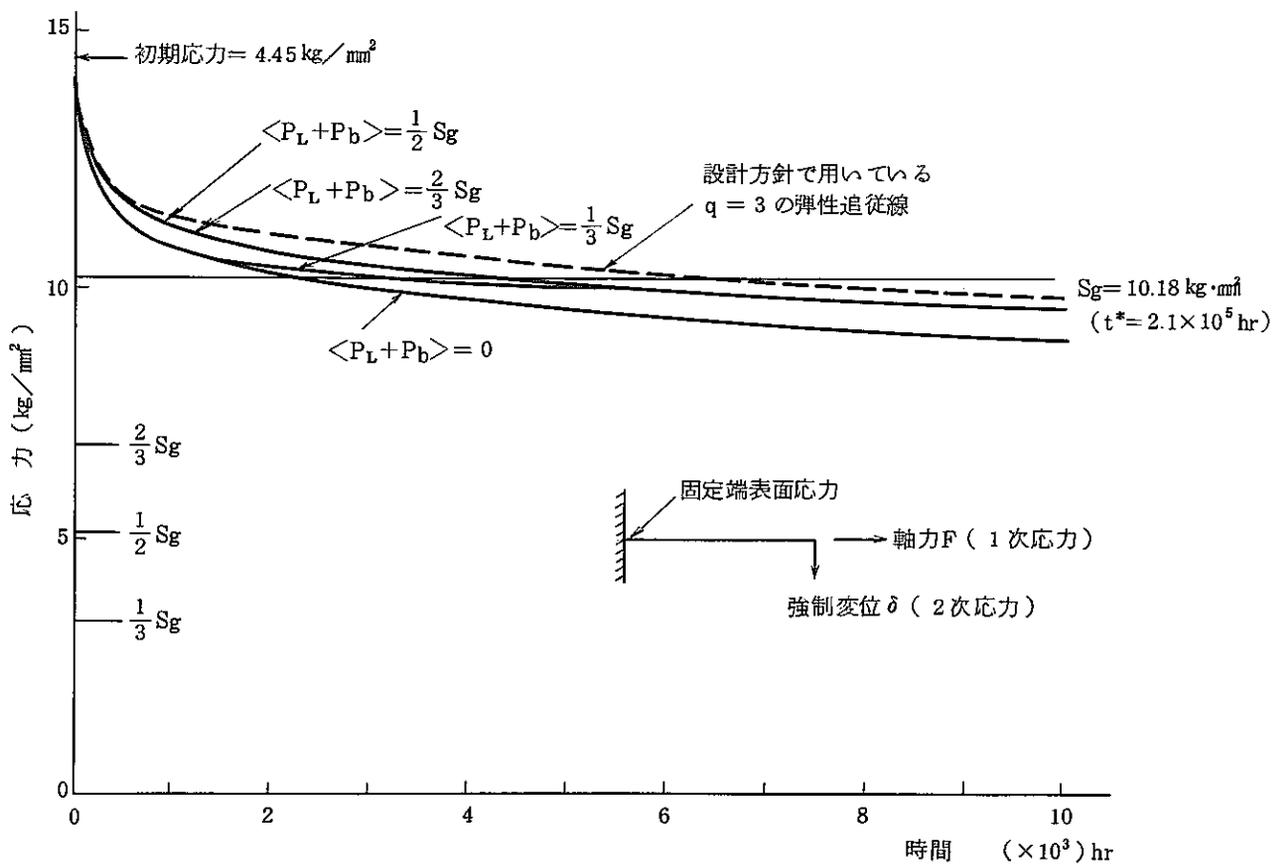


図 DA.3 応力緩和挙動に与える一次応力の影響 (525 °C, SUS304)

## 付録E 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 $D^*$

1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 $D_o^*$ 及び $D^*$ は、以下により定めることができる。

- (1) SUS304, SUS316及びSUS321伝熱管の場合

$$D_o^* = D^*$$

$D^*$ は、温度 $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )、時間 $t^*$ (hr)及びクリープ損傷係数 $D_{C1}$ に対して、図E.1に定める値。

- (2)  $2\frac{1}{4}C_r-1M_o$ (NT)の場合

$D_o^*$ 及び $D^*$ は、温度 $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )、時間 $t^*$ (hr)、クリープ損傷係数 $D_{C1}$ 及び初期応力 $S_i$ ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )に対して、図E.1に定める値。

(イ)  $D_o^* : S_i = \langle P_L + P_b + Q \rangle$

(ロ)  $D^* : S_i = \text{Min} [ S_n/2, S_n - (3\bar{S}_m - S_{rH}) ]$

ここで

$T$  : 考えている評価点の金属温度履歴に基づき定める温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

$t^*$  : 1.2.1(2)に定める高温使用時間(hr)。

$D_{C1}$  : 3.5.3(2)4) a) 1) に定めるところにより算定するクリープ損傷係数。

$\langle P_L + P_b + Q \rangle$  : 長期1次及び2次応力強さ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )。

$S_n, 3\bar{S}_m, S_{rH}$  : 3.4.2(2)に定めるところによる。

### 【解説】

- 付録Eは、1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 $D^*$ の算出法を定めたものである。
- 付録E図E.1は、代表的な温度及び高温使用時間について、以下の式により算出された値を図示したものである。 $2\frac{1}{4}C_r-1M_o$ (NT)については、応力範囲 $S_n$ を定める温度が同一温度にあるとして図示している。中間温度若しくは高温使用時間又は $2\frac{1}{4}C_r-1M_o$ (NT)にあって応力範囲 $S_n$ を定める温度が異なる場合に対する1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 $D^*$ は、以下の式により算出することができる。

- (1) SUS304及びSUS316の場合

$$T \leq T_n ; D^* = 0$$

$$T > T_n ; D^* = (T - T_n) D_o$$

$$T_n = \frac{1}{C_{n1} \log(2t^*/D_{C1}) + C_{n2}} - 273.15$$

$$D_o = D_{n0} (2t^*/D_{C1})^{m_n}$$

(2) SUS321 伝熱管の場合

$$S_g \geq C_{n1} / C_{n2} ; D^* = 0$$

$$S_g < C_{n1} / C_{n2} ; D^* = D_{n0} (C_{n1} - C_{n2} \cdot S_g)^{m_n}$$

(3)  $2\frac{1}{4}C_r - 1M_o$  (NT) の場合

$$S_i \geq S_g ; D^* = 0$$

$$S_i < S_g ; D^* = \max \left[ D_o \left( \frac{S_i - S_g}{C_o} \right)^{m_o}, D_1 \left( \frac{S_i - S_g}{C_1} \right)^{m_n} \right]$$

$$S_i = \min [ S_n / 2, S_n - (3\bar{S}_m - S_{rH}) ]$$

$$D_o = D_{n0} \cdot t_R^{\alpha_n}, D_1 = D_{n1} \cdot (t_R / t_n)^{\beta_n}$$

$$\beta_n = \beta_{n1} - \beta_{n2} \cdot x, m_n = m_{n1} - m_{n2} \cdot x$$

$$x = (T - T_o) / C_n$$

ここで、

$T$  : 考えている評価点の金属温度履歴に基づき定める温度(℃)。ただし、考えている状態における最高金属温度を超えることを要しない。

$t^*$  : 1.2.1(2)に定める高温使用時間(hr)。

$D_{C1}$  : 3.5.3(2)4)a)イ)に定めるところにより算定するクリープ損傷係数。

$S_g$  : 温度  $T$  (℃), 時間  $t^*$  (hr) においてクリープ損傷係数が  $D_{C1}$  となる応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )。

$S_n$  : 考えている負荷サイクルに対し, 3.5.3(2)3)b)の定めるところにより算出される1次及び2次応力強さ範囲 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )。

$t_R$  : 温度  $T$  (℃) 応力  $S_g$  ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ ) に対して別表 1.5 又は別表 1 付録 MB に定める設計クリープ破断時間 (hr)。

$3\bar{S}_m, S_{rH}$  : 3.4.2(2)に定めるところによる。

$C_{n1}, C_{n2}, D_{n0}, m_n$  : 表 EA.1 に定める値。

$D_{n0}, \alpha_{n1}, C_o, m_o, D_{n1}, t_n, \beta_{n1}, \beta_{n2}, C_1, m_{n1}, m_{n2}, T_o, C_n$  : 表 EA.2 に定める値。

表 EA.1 定数  $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $D_{n0}$ ,  $m_n$

	SUS304	SUS316	SUS321 伝熱管
$C_{n1}$	$6.0 \times 10^{-5}$	$6.0 \times 10^{-5}$	15.7
$C_{n2}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$0.96 \times 10^{-3}$	0.93
$D_{n0}$	$1.26 \times 10^{-5}$	$2.1 \times 10^{-6}$	$6.0 \times 10^{-4}$
$m_n$	0.166	0.35	2.9

表 EA.2 定数  $D_{n0}$ ,  $\alpha_{n1}$ ,  $\alpha_{n2}$ ,  $D_{n1}$ ,  $t_n$ ,  $\beta_{n1}$ ,  $\beta_{n2}$ ,  $T_0$ ,  $C_0$

	$2\frac{1}{4}C_r - 1M_o$ (NT) 板・伝熱管
$D_{n0}$	$5.0 \times 10^{-3}$
$\alpha_n$	-0.223
$C_0$	2.0
$m_0$	2.2
$D_{n1}$	$1.0 \times 10^{-2}$
$t_n$	10.0
$\beta_{n1}$	0.28
$\beta_{n2}$	0.25
$C_1$	7.0
$m_{n1}$	4.0
$m_{n2}$	1.1
$T_0$	375
$C_n$	175

3. 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数  $D^*$  を定める温度は、以下に記すところにより定めるものとする。

(1) 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数  $D^*$  は、同一高温使用時間において、温度に対する単調増加関数となるよう定められている。

したがって、高温使用時間中の金属温度が一律でない場合、最高金属温度を使用すれば保守的な評価結果が得られる。

(2) 詳細な金属温度履歴を用いた計算を行う場合は、等価温度を使用することができる。

等価温度  $T_{e,q}$  は高温使用時間  $t^*$  応力水準  $S_g$  において、クリープ損傷係数  $D_{01}$  を与える温度を下まわらない温度とする。即ち、温度  $T$ 、応力  $\sigma$  について、別表 1.5 (別図 1.5) に定める許容時間を  $t_d(\sigma, T)$  とすると等価温度  $T_{e,q}$  は、下式を満足する温度である。

$$2 t^* / t_d(S_g, T_{e,q}) \geq 2 \sum t_i / t_d(S_g, T_i)$$

$t_i$  : 金属温度  $T_i$  における累積使用時間

$$t^* = \sum t_i$$

4.  $D^*$  は、初期負荷又はその後の負荷サイクルにより生じる(1次+2次)応力が、応力水準  $S_g$  まで緩和する過程におけるクリープ損傷量に対応する。

(1次+2次)応力は原則としてシェイクダウン基準内に制限されること、及びもんじゅの代表的使用条件下で規定される  $D^*$  値自体がかなり大きいため  $D^*$  を考慮すべき負荷サイクルの許容回数が小さくおさえられることから、 $D^*$  は単調負荷特性に基づき算出される。

SUS304, SUS316 及び SUS321 伝熱管に関しては、各温度について  $S_n > 3 \bar{S}_m$  の場合、評価の簡便さをはかる観点から  $S_n$  の大きさによらず一律の  $D^*$  が規定されている。

$2\frac{1}{4} C_r - 1 M_o$  (NT) に関しては、各温度について  $S_n$  の大きさに応じて簡便に計算される初期応力  $S_i$  を用いて  $D^*$  を算出すべきことが規定されている。

このため、SUS304 等については  $D_{02} = (1+n^*) D^*$  となるが、一方、 $2\frac{1}{4} C_r - 1 M_o$  (NT) については、第1サイクルに対する  $D^*$  値を  $D_o^*$  とし、 $D_{02} = D_o^* + n^* D^*$  と規定される。後者について、材料を降伏点  $1.5 S_m$  の弾完全塑性体として概念的に示すと図 EA.1 のようになる。

5.  $D^*$  の詳細計算値の算出方法は以下に示すとおりである。

(1) 初期応力  $S_i$

(i) SUS304, SUS316 及び SUS321 の場合

初期応力  $S_i$  は、図 EA.2 に示すように、応力水準  $S_g/g$  の1次応力と、弾性追従が弾性追従パラメータ  $q = 3$  で表わされ、また弾性追従の結果 0.5% ひずみを生じる2次応力との重畳を考慮して定める。

ここで、応力水準  $S_g/g$  の1次応力は、「長期1次応力が低い場合」の制限式

$$\langle P_L + P_b \rangle \leq M_{in} [ S_g/g, S_{rH} ]$$

に対応する1次応力である。

また、想定される2次応力の大きさは、以下の点を考慮して定めたものである。

イ) 構造物における2次応力の弾性追従挙動は、概ね弾性追従パラメータ  $q = 3$  で保守的に包絡できる。(付録B解説参照)

ロ) 弾性追従ひずみが0.5%を超える長期2次応力は、1次応力に区分される。(別表2.3注2)参照)

(ii)  $2\frac{1}{4}C_r - 1M_o$  (NT) の場合

$2\frac{1}{4}C_r - 1M_o$  (NT) の場合は、SUS304等と比較すると、応力水準  $S_g$  と降伏点との差が大きいため、図EA.3に記すように、SUS304等と同一の方法で初期応力  $S_i$  を定めようとした場合には、不必要に大きな初期応力  $S_i$  を規定することになる。

このため、 $2\frac{1}{4}C_r - 1M_o$  (NT) の場合は、(1次+2次)応力強さ範囲  $S_n$  の大きさに応じて初期応力  $S_i$  を定めるものとした。

$S_n$  の大きさに応じた初期応力  $S_i$  は、厳密には弾性追従を考慮した上で等時応力ひずみ線図  $O h_r$  で規定される単調負荷曲線を用いて算出することも考えられるが、付録Eでは以下のように簡便に弾性計算結果を用いて算出すべきことを規定した。

イ) 第1サイクルに対する  $D^*$  ( $D_o^*$ )

定格出力運転時に負荷される(1次+2次)応力を完全片振り型負荷として考慮する。

$$S_i = \langle P_L + P_b + Q \rangle$$

ロ) 第1サイクル以外の負荷サイクルに対する  $D^*$

完全両振り型を考慮した初期応力 ( $S_n/2$ ) と、逆方向降伏を考慮した初期応力 ( $S_n - (3\bar{S}_m - S_{rH})$ ) とのうちの小さい方の値を初期応力とする。

$$S_i = \text{Min} [ S_n/2, S_n - (3\bar{S}_m - S_{rH}) ]$$

(2) 応力緩和挙動

クリープひずみ式とひずみ硬化則とを用いて算出する。弾性追従パラメータ  $q = 3$  の弾性追従を考慮する。

すなわち、

$$d\epsilon^t = d\sigma/E + \dot{\epsilon}^c dt, \quad d\epsilon^t = (1-q) d\sigma/E$$

$$\therefore d\sigma/dt = -E\dot{\epsilon}^c/q \quad \text{ここで } q=3$$

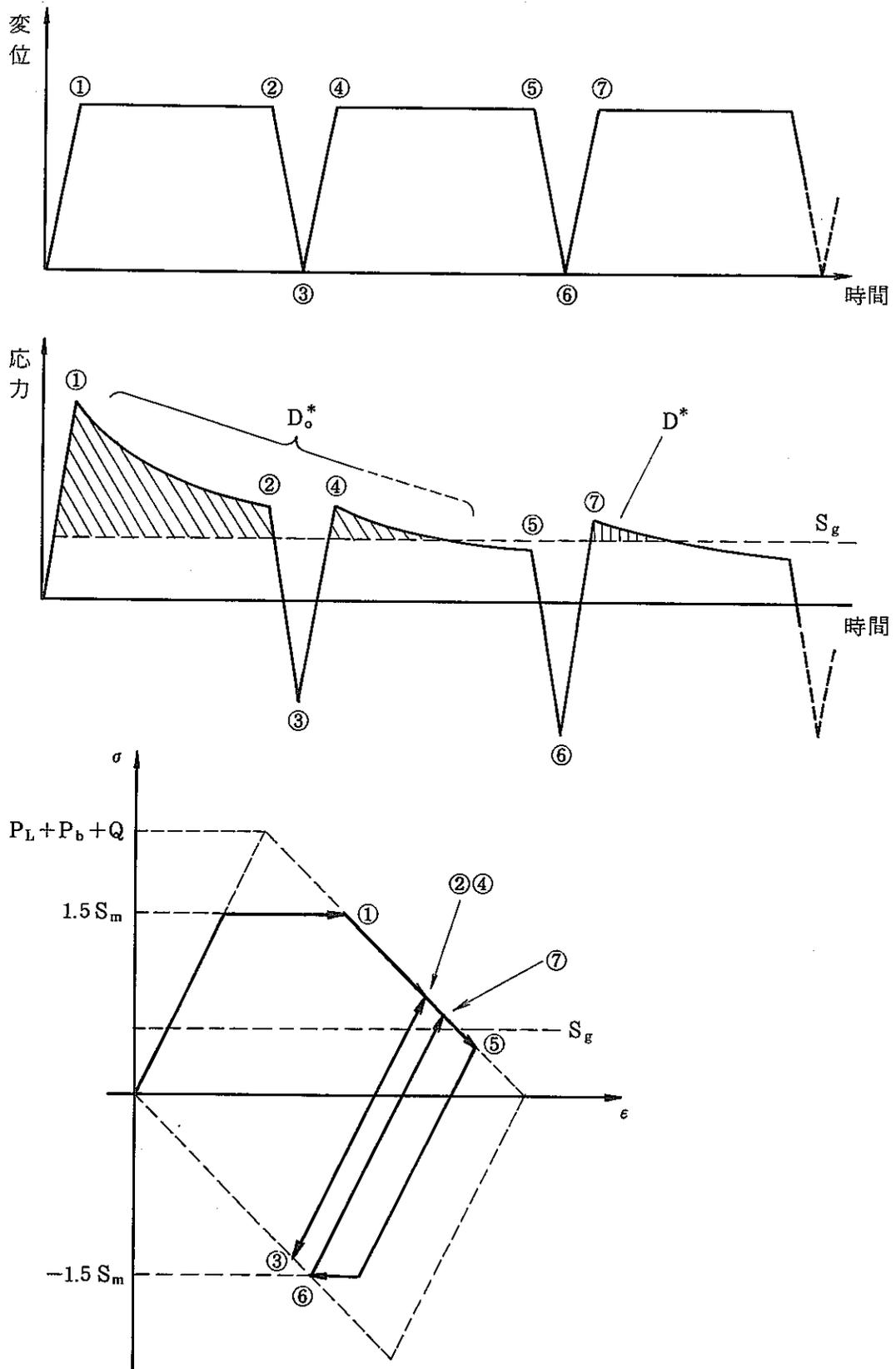


図 EA.1  $D_o^*$  と  $D^*$  の概念 ( $3 S_m > P_L + P_b + Q > 1.5 S_m + S_g$ )



クリープひずみ式における時間係数 $\alpha_c$ としては、設計上考慮すべき最もクリープ強度の低いヒート( $\alpha_R=10$ )について、クリープ挙動のばらつきとしてファクタ3を考慮し

$$\alpha_c = 10 \times 1/3 \div 3$$

として計算する。

(3) 緩和クリープ損傷値

緩和クリープ損傷値は、緩和応力の大きさが応力水準 $S_g$ となる時間( $t_1$ )までの、応力緩和挙動に基づくクリープ損傷 $(\int_0^{t_1} \frac{dt}{t_R(\sigma(t))})$ と応力水準 $S_g$ でのクリープ損傷 $(\frac{t_1}{t_R(S_g)})$ との差として算出する。

クリープ破断式における時間係数 $\alpha_R$ としては、設計上考慮すべき最もクリープ強度の低いヒートに対する値 $\alpha_R=10$ を使用する。さらに、応力水準 $S_g$ でのクリープ損傷 $D_{C1}$ 算出時と同様に追加安全係数2を適用する。

すなわち

$$D_{C1} = 2 \left[ \int_0^{t_1} \frac{dt}{t_R(\sigma(t), \alpha_R=10)} - \frac{t_1}{t_R(S_g, \alpha_R=10)} \right]$$

6. 付録Eでは、設計上簡便に $D^*$ が算出できるよう、簡易式が与えられている。

SUS304及びSUS316について簡易式の作成方法は以下のとおりである。

① 前記 $D^*$ の詳細計算値の算出方法に基づき、温度を25℃ごと、設計クリープ破断時間( $\alpha_R=10$ として算出されるクリープ破断時間)が $10^2, 3 \times 10^2, \dots, 10^6, 3 \times 10^6$ hrとなる応力水準を $S_g$ として $D^*$ を算出すると、図EA.4のようになる。

簡易式は、以下のような形で表わすものとする。

$$D^* = D_0 (T - T_n)$$

② 勾配 $D_0$ は、各 $t_R(S_g)$ について、零以外の値を有するもののうち、低い温度側から、最低温度値を除く3点を採取し、その平均勾配の最適傾向として求めている。(図EA.5参照)

③ 温度 $T_n$ は、初期応力 $S_i$ が応力水準 $S_g$ に等しくなる温度に基づき定める。すなわち、図EA.6に示すように、 $S_{LP} = S_g/g$ とし、各温度で $S_i = S_g$ となる条件を求め、温度と $S_g$ での設計クリープ破断時間( $t_R(S_g)$ )との関係を図示すると、図EA.6のようになる。温

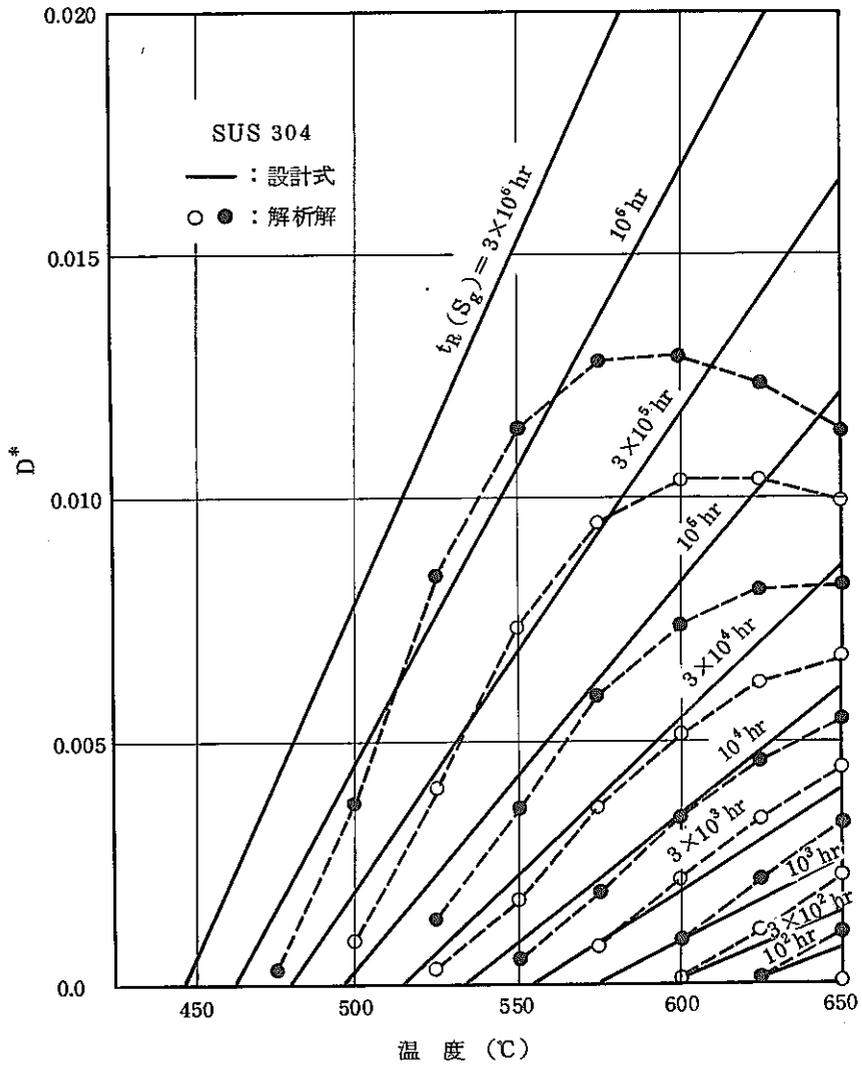


図 EA. 4 - (1)

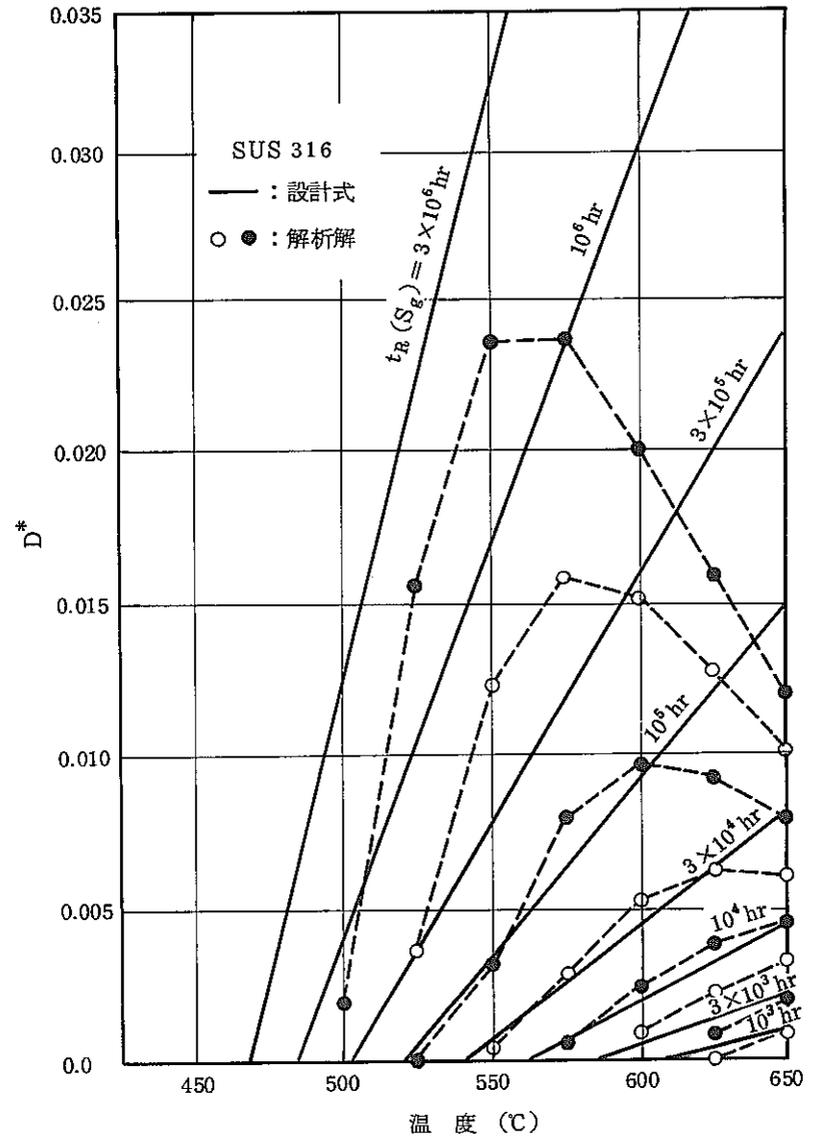
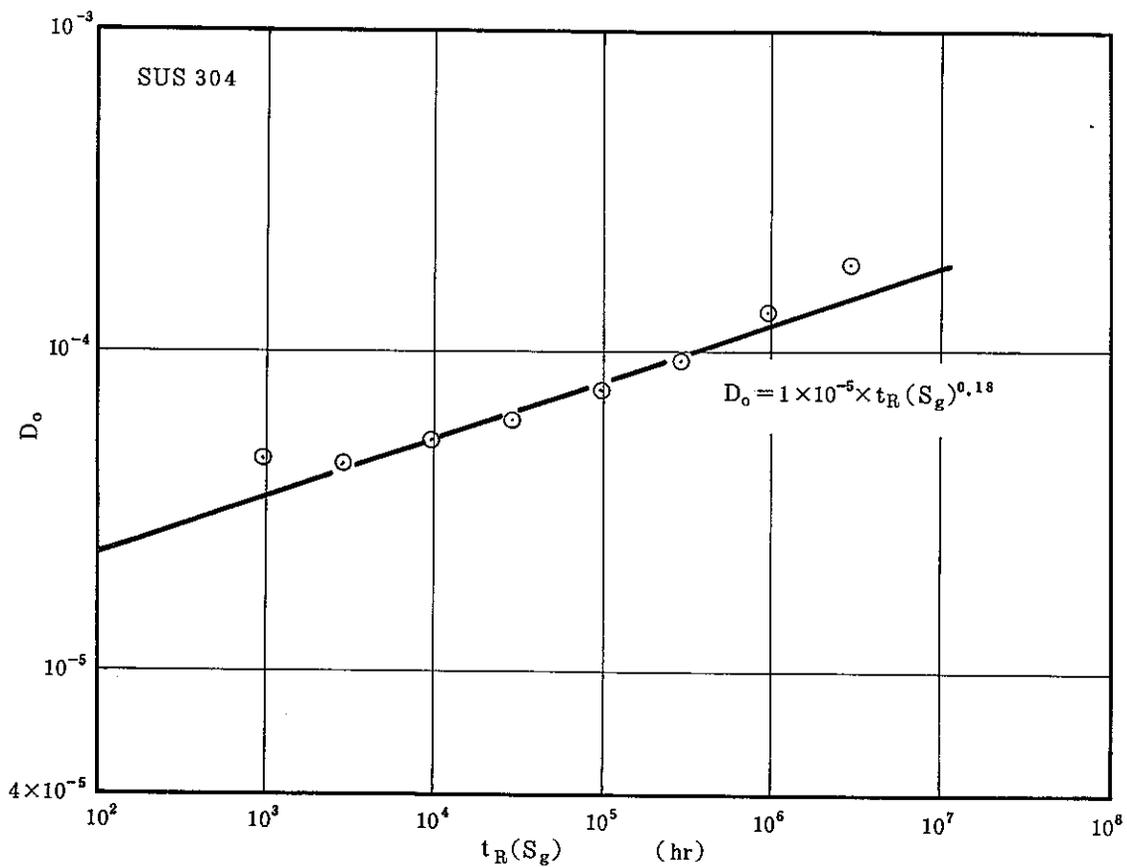
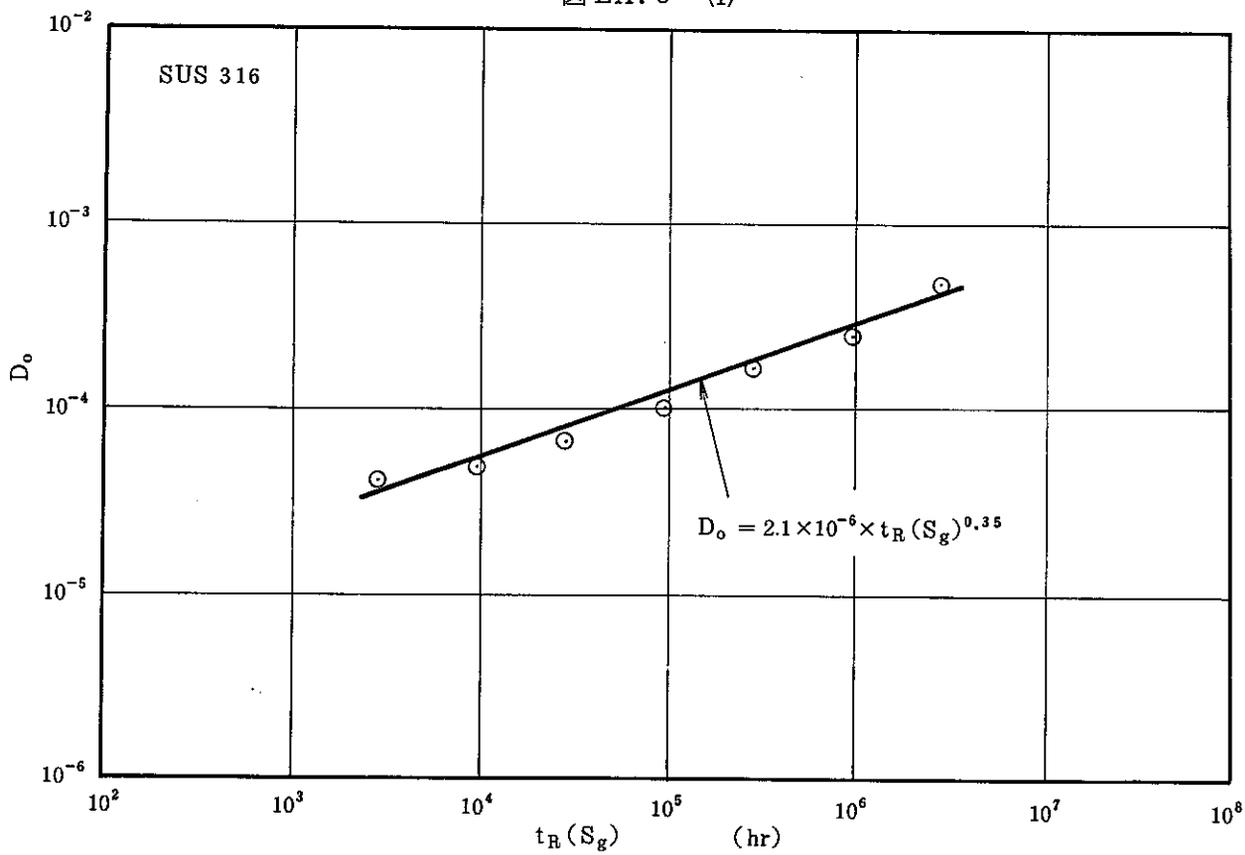


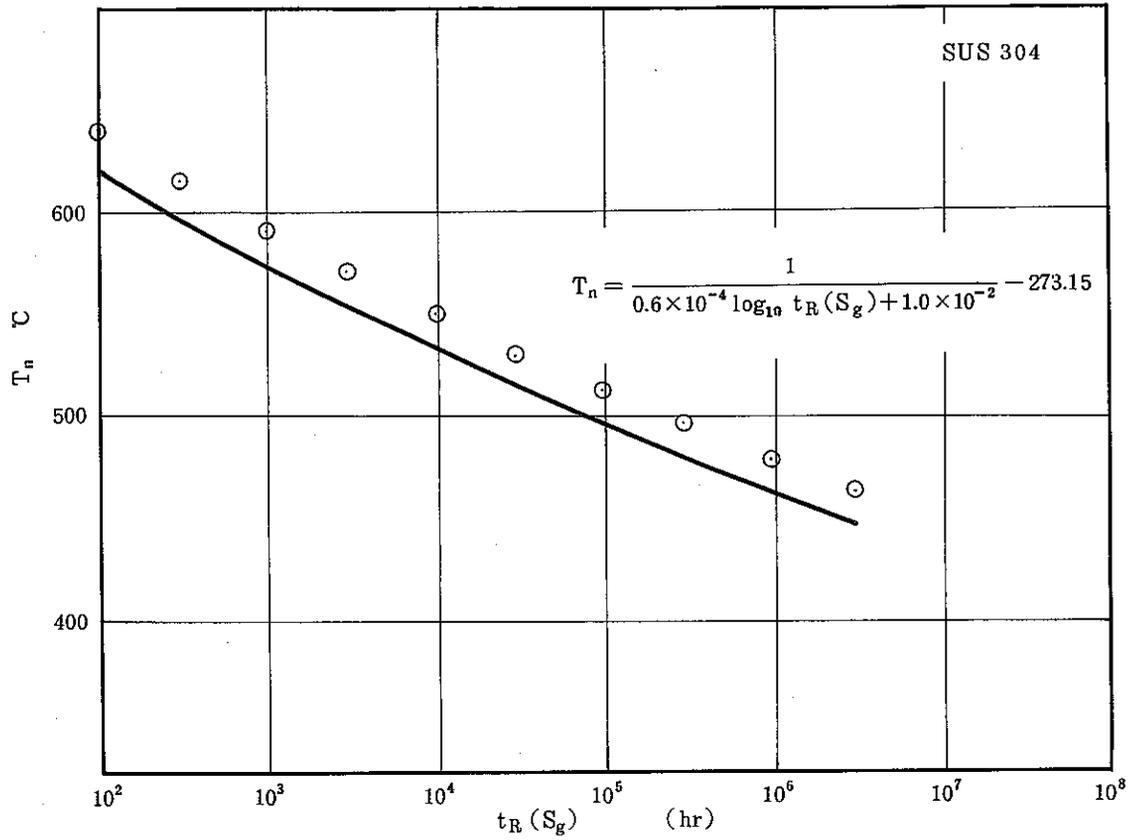
図 EA. 4 - (2)



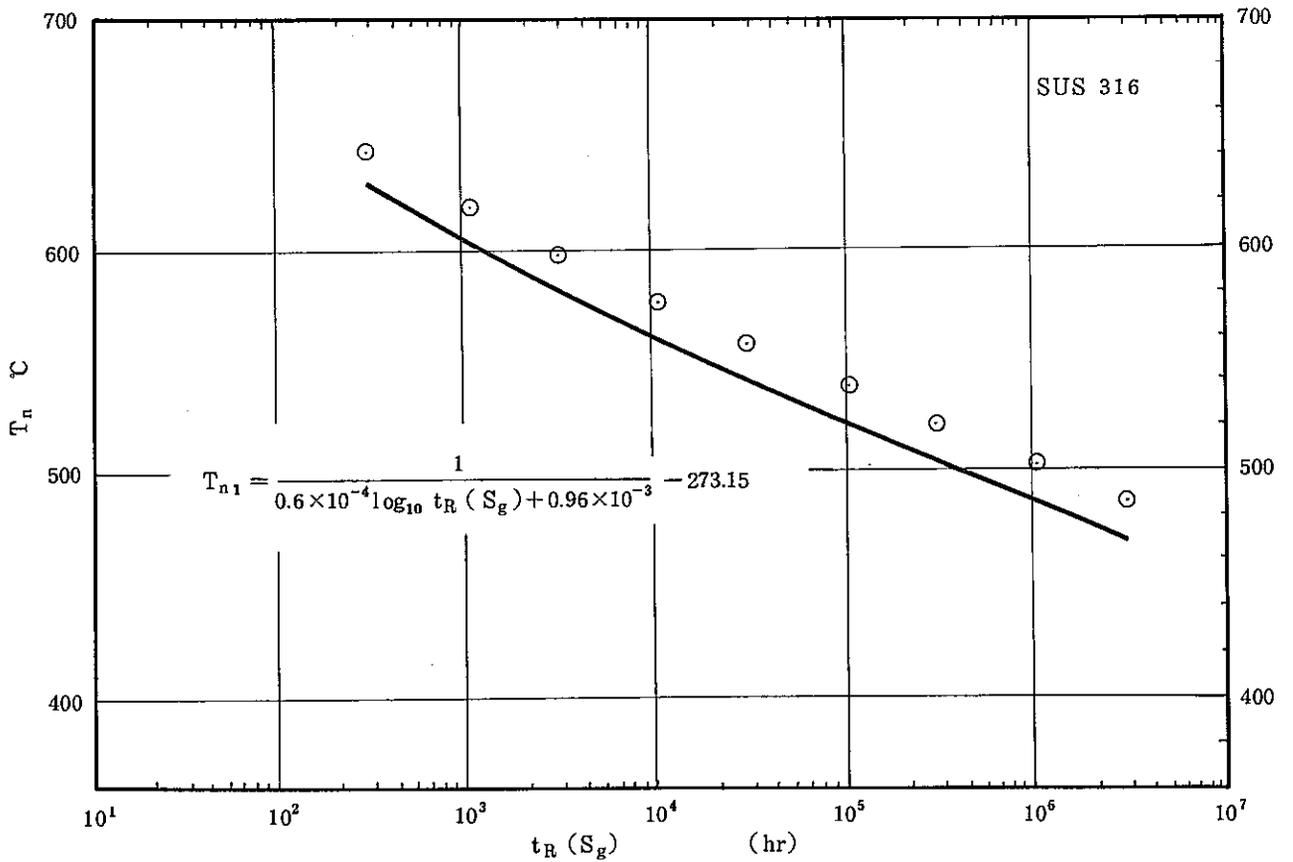
☒ EA. 5 - (1)



☒ EA. 5 - (2)



☒ EA. 6 - (1)



☒ EA. 6 - (2)

度  $T_n$  は、保守的包絡線として求めている。

④ 上記のようにして得られた簡易式が保守的評価値を与えることは、図 EA.4 から確認できる。図 EA.4 から理解できるように簡易式は、温度が高くなるにつれ、また  $t_R(S_g)$  が大きくなるにつれかなり保守的となる。もんじゅの使用条件に比較し高い温度で使用されるものに適用する際には、留意が必要である。

⑤ 評価の簡便さをはかるため、簡易式構成上  $t_R(S_g)$  としているのを、 $2t^*/D_{c1}$  とおきかえている。

7. SUS321 伝熱管の  $D^*$  の簡易式作成方法は以下のとおりである。

① 前記  $D^*$  の詳細計算値の作成方法に基づき、温度を 25℃ごと、設計クリーブ破断時間が  $10^3, 3 \times 10^3, \dots, 10^6, 3 \times 10^6$  hr となる応力水準を  $S_g$  として  $D^*$  を算出すると図 EA.7 のようになる。

図 EA.7 より、以下のことがいえる。

SUS321 伝熱管では、 $D^*$  が 0 となる条件からの立上りは緩やかであるが、その後の温度に対する勾配が急峻なため、SUS304 又は SUS316 と同様な形で簡易式を策定するのは困難である。

② 上記計算結果について、初期応力  $S_i$  と応力水準  $S_g$  との差  $S_i - S_g$  と、緩和クリーブ損傷係数  $D^*$  との関係を両対数グラフ上にプロットすると図 EA.8 のようになる。

図 EA.8 より以下のことがいえる。

応力差  $S_i - S_g$  と  $D^*$  との間には温度又はパラメータとした  $S_g$  レベルに依存しない良好な直線関係が成立する。このため図 EA.8 での最適傾向を簡易式作成の基礎式とすることができる。

③ 一方、応力差  $S_i - S_g$  は、図 EA.9 に示すように、応力水準  $S_g$  と良好な直線関係にある。したがって、応力水準  $S_g$  をパラメータとして応力差  $S_i - S_g$  を保守的に包絡する値（図 EA.9）を簡易式中で使用すれば、 $D^*$  の保守的評価が可能となる。

なお、SUS321 伝熱管でこのように応力差  $S_i - S_g$  が応力水準  $S_g$  で簡便に記述できるのは、SUS321 伝熱管は比較的クリーブ強度が高いため応力水準  $S_g$  を大きくとることができる。もんじゅの使用条件下では  $D^*$  を考慮すべき条件が限定されるためと考えられる。

（図 EA.10 参照）

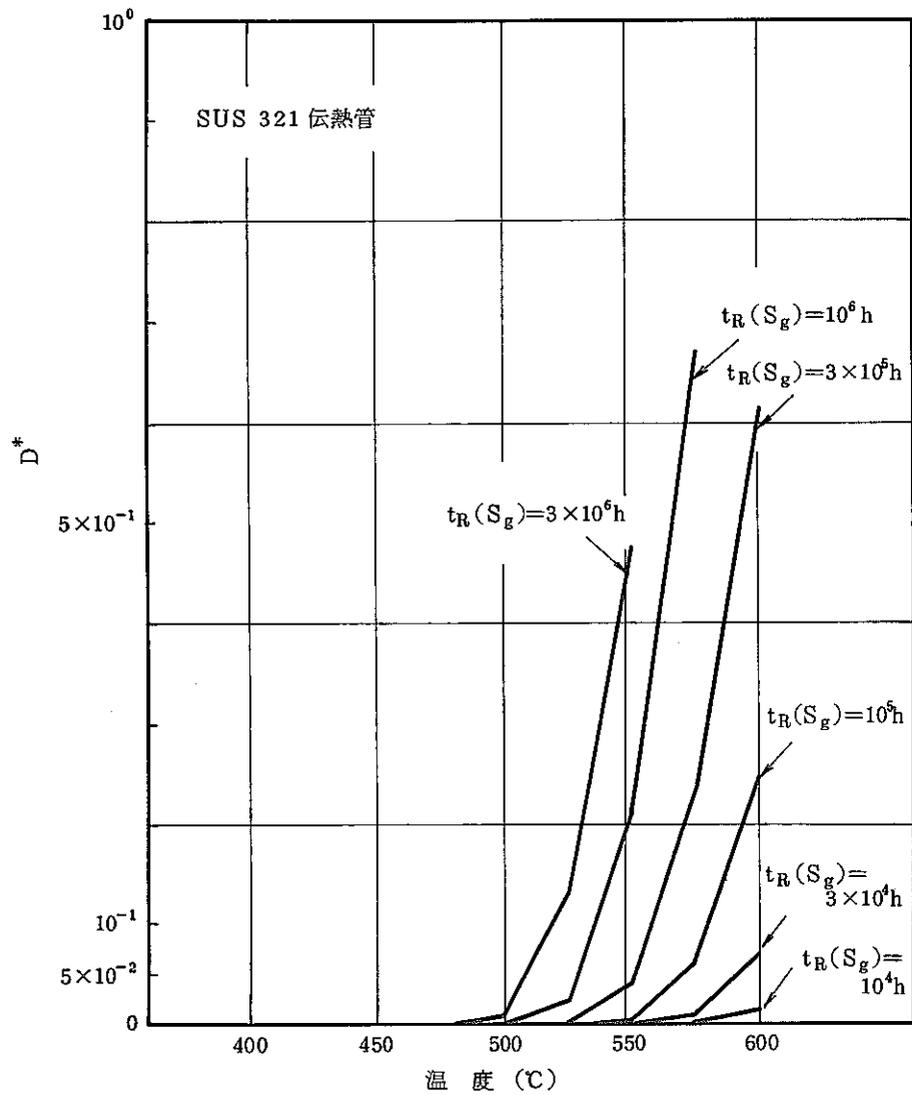


図 EA.7 温度と  $D^*$  の関係

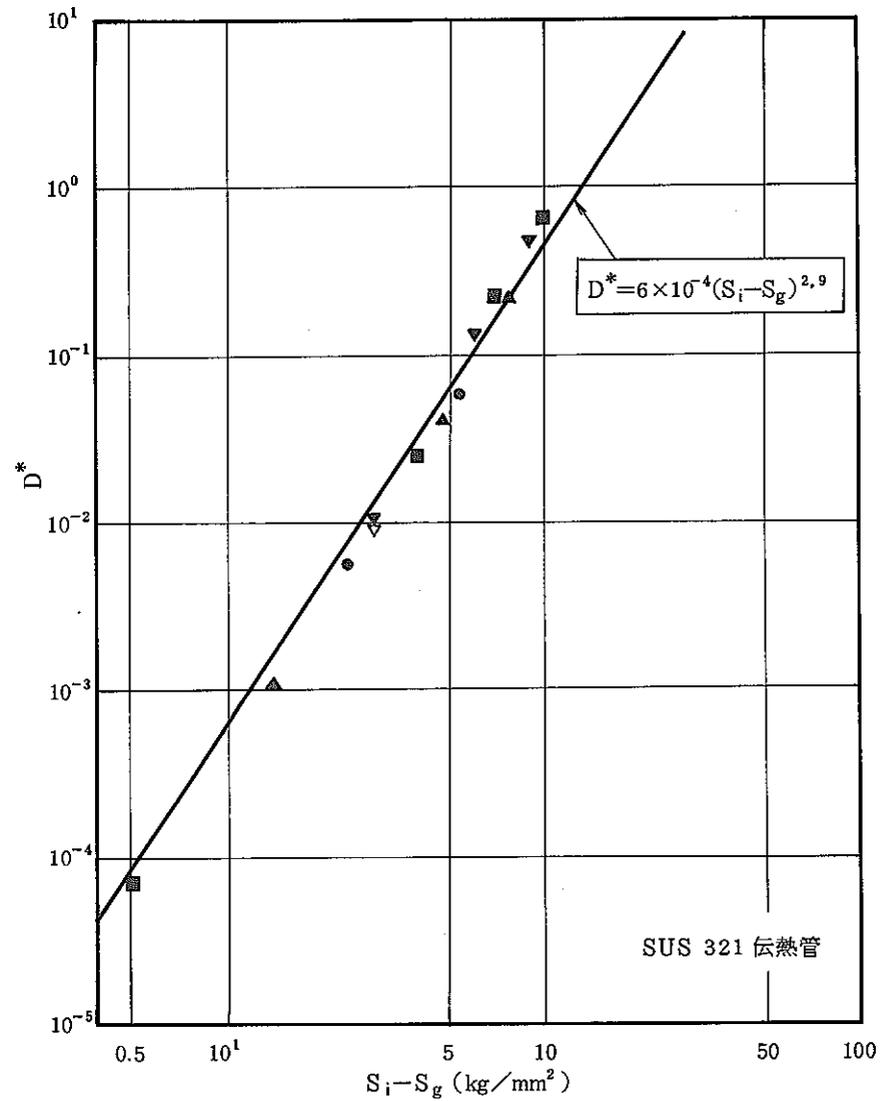


図 EA.8  $S_i - S_g$  と  $D^*$  の関係

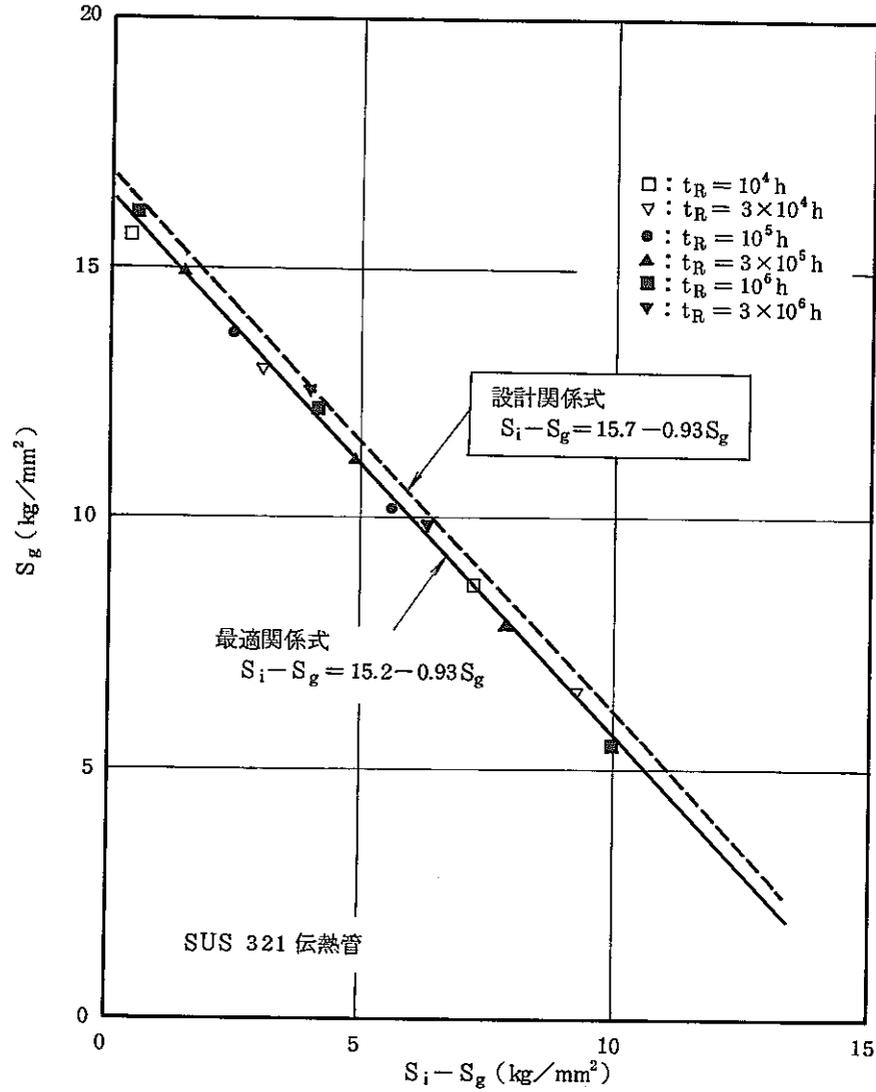


図 EA.9  $S_i - S_g$  と  $S_g$  の関係

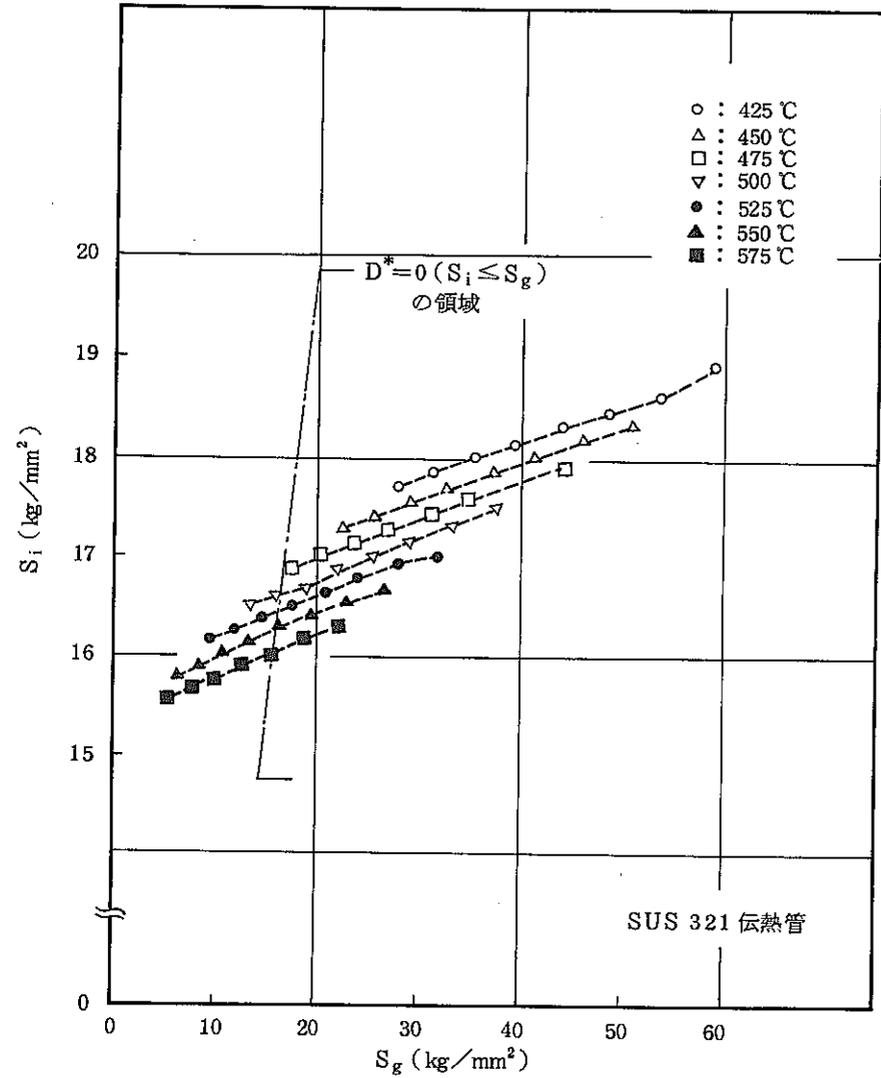


図 EA.10  $S_i$  と  $S_g$  の関係

④ このようにして求めた簡易式と詳細計算値との対応を図 EA.11 に示す。高温長時間側では簡易式が詳細計算値を下まわるおそれがあるため、簡易式の適用温度範囲を 525℃までとしている。この適用温度範囲内では、簡易式は保守的な評価結果を与える。

8.  $2\frac{1}{4}C_r - 1M_o$  (NT) の  $D^*$  の簡易式作成方法は以下のとおりである。

① 前記  $D^*$  の詳細計算値の作成方法に基づき、温度を 400～550℃、応力水準  $S_g$  を  $S_g$  での設計クリープ破断時間が  $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^6$  時間、初期応力  $S_i$  を応力差  $S_i - S_g$  が 1～30 kg/mm<sup>2</sup> となるようにして  $D^*$  を計算し、 $D^*$  と応力差  $S_i - S_g$  の関係を示すと図 EA.12 のようになる。

② 図 EA.12 から以下のことがいえる。

$D^*$  は主たるパラメータを応力差  $S_i - S_g$  とすることにより比較的うまく整理できる。

$D^*$  と  $S_i - S_g$  との関係は  $S_i - S_g$  が比較的小さい領域と比較的大きい領域とに区分して考えることができる。

$S_i - S_g$  が小さい領域では  $D^*$  は温度によらず、 $t_R(S_g)$  と  $S_i - S_g$  とを用いて以下のよう記述できると考えられる。

$$D^* = D_o (t_R(S_g)) \cdot \left( \frac{S_i - S_g}{C_o} \right)^{m_o}$$

$S_i - S_g$  が大きい領域では、 $D^*$  は、温度、 $t_R(S_g)$  及び  $S_i - S_g$  に依存する。両対数上で  $D^*$  と  $S_i - S_g$  は若干上方に凸の勾配を有するが、保守的に直線で近似することも可能と考えられる。

この際の勾配は、温度のみの関係とすることができる。即ち

$$D^* = D_1 (t_R(S_g), T) \left( \frac{S_i - S_g}{C_1} \right)^{m_n(T)}$$

③ 適用温度範囲が 375～450℃であるため、温度  $T$ (℃) は以下の無次元数  $x$  に置きかえる。

$$x = (T - 375) / 175, \quad 0 \leq x \leq 1$$

④ 勾配  $m_o$  と  $m_n$  は、図 EA.12 を参考に以下のように定める。

勾配  $m_n$  :  $S_i - S_g = 5 \sim 7$  kg/mm<sup>2</sup> の区間の勾配の平均的傾向。

( 図 EA.13 (1) )

勾配  $m_o$  :  $S_i - S_g = 1 \sim 2$  kg/mm<sup>2</sup> の区間の勾配の平均的傾向。

( 図 EA.13 (2) )

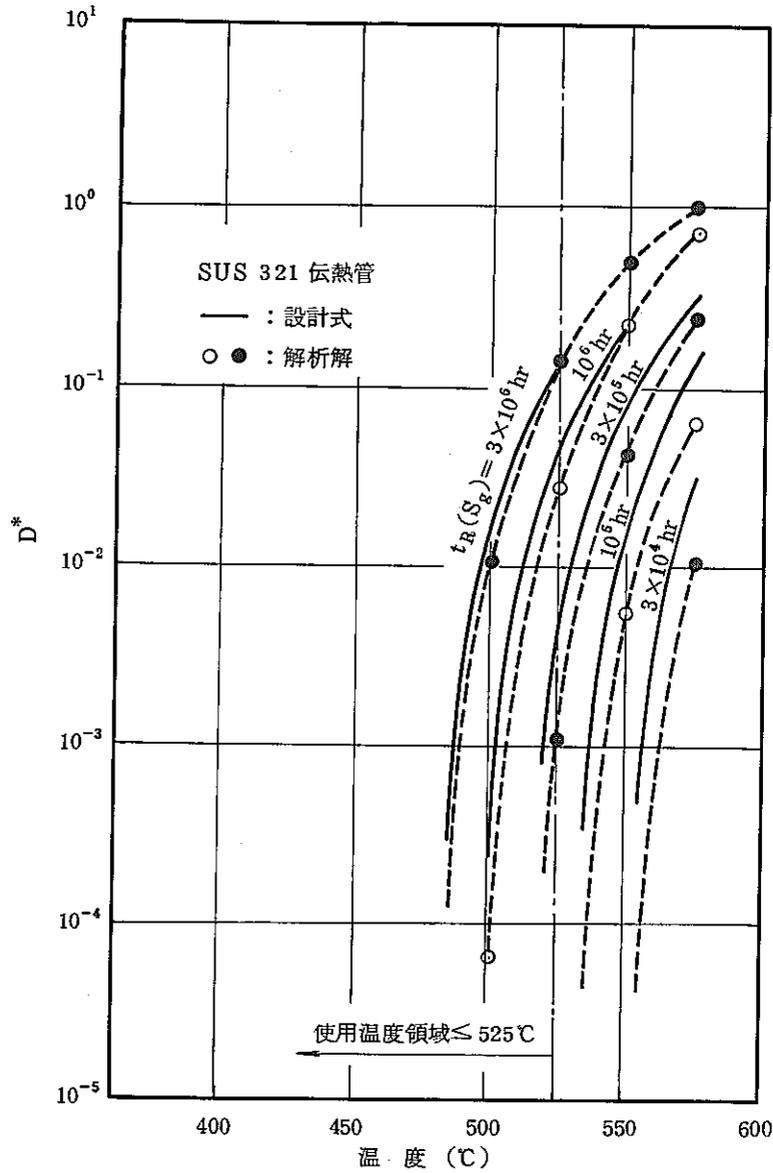


図 EA. 11  $D^*$  と温度の関係

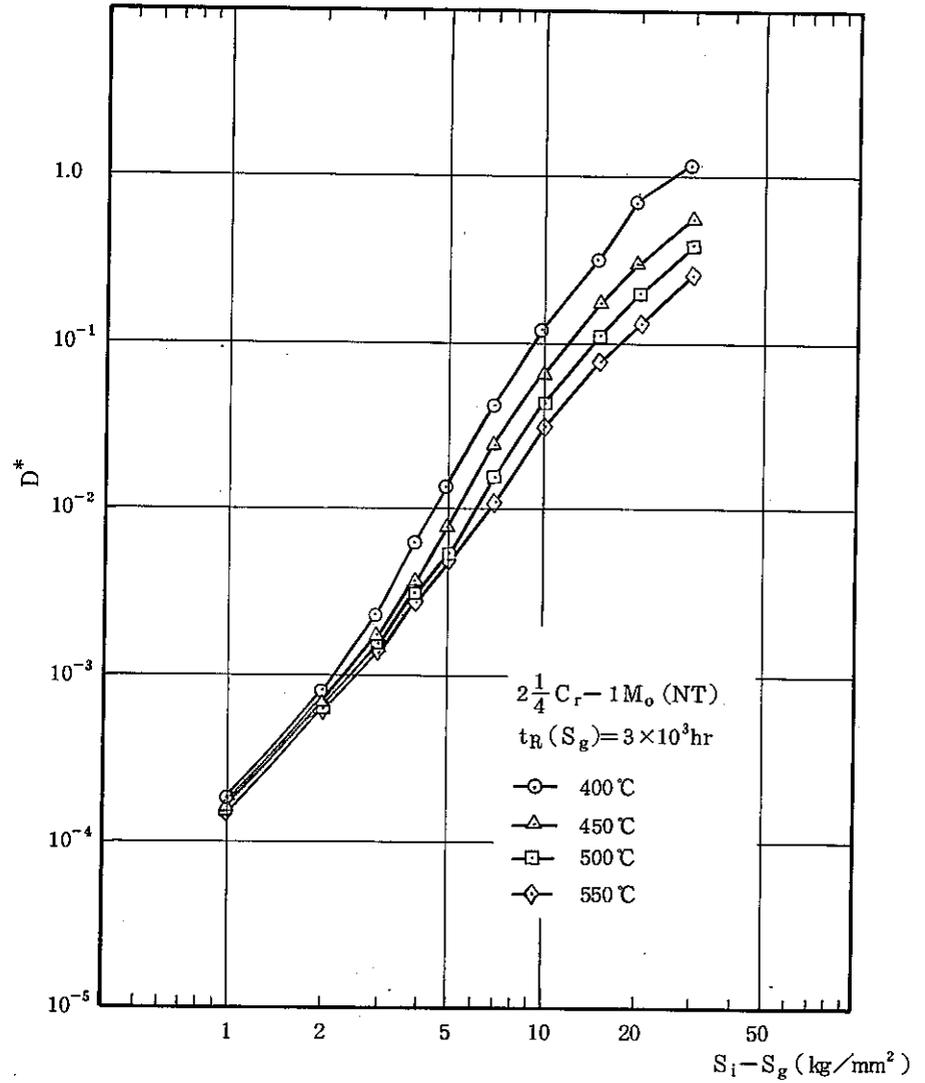


図 EA. 12 (1)  $D^*$  と  $S_i - S_g$  との関係

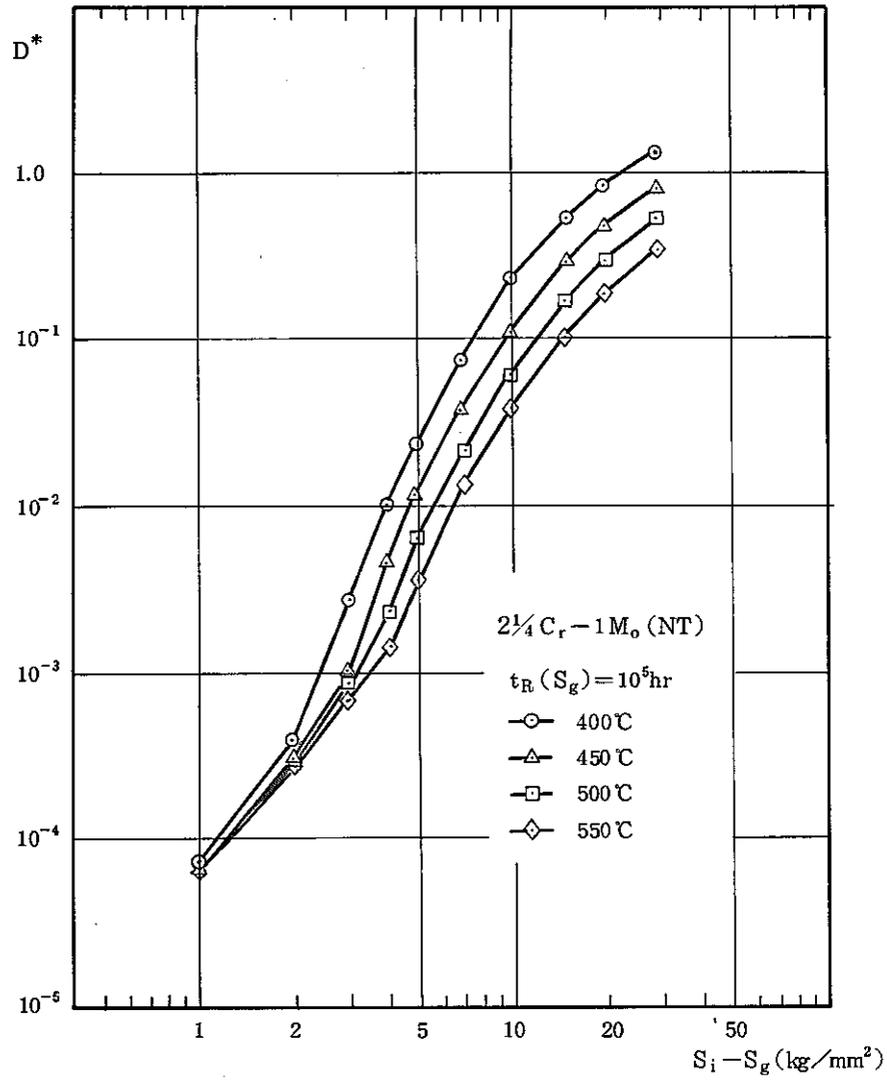


図 EA. 12 (2)  $D^*$  と  $S_i - S_g$  との関係 ( 続き )

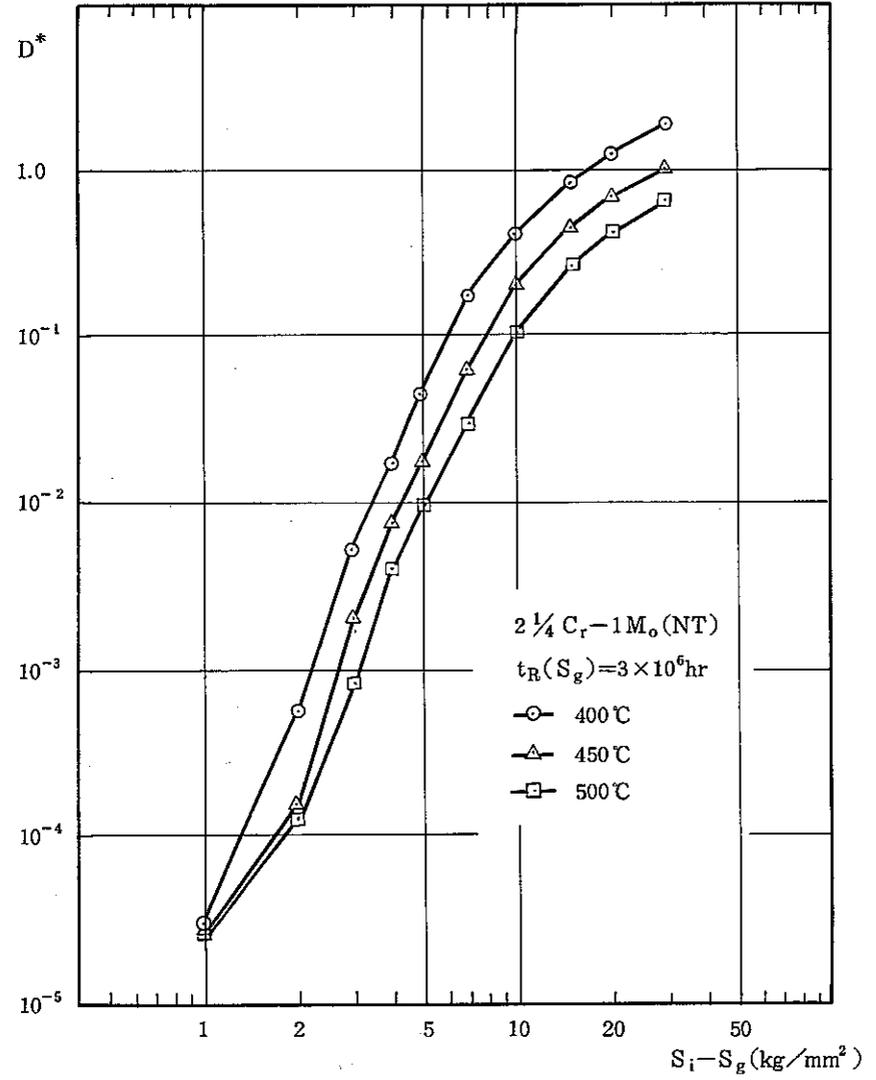


図 EA. 12 (3)  $D^*$  と  $S_i - S_g$  との関係 ( 続き )

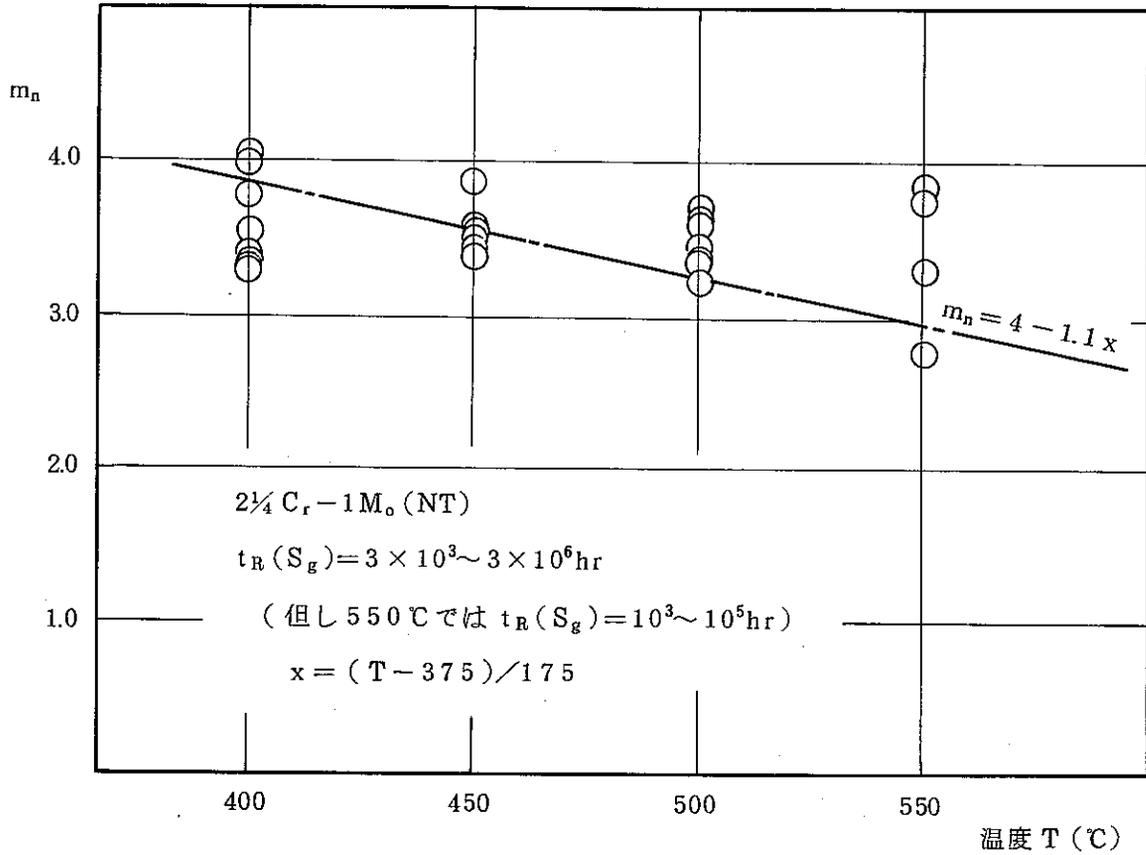


図 EA. 13 (1)  $S_i - S_g = 5 \sim 7 \text{ kg/mm}^2$  区間での勾配

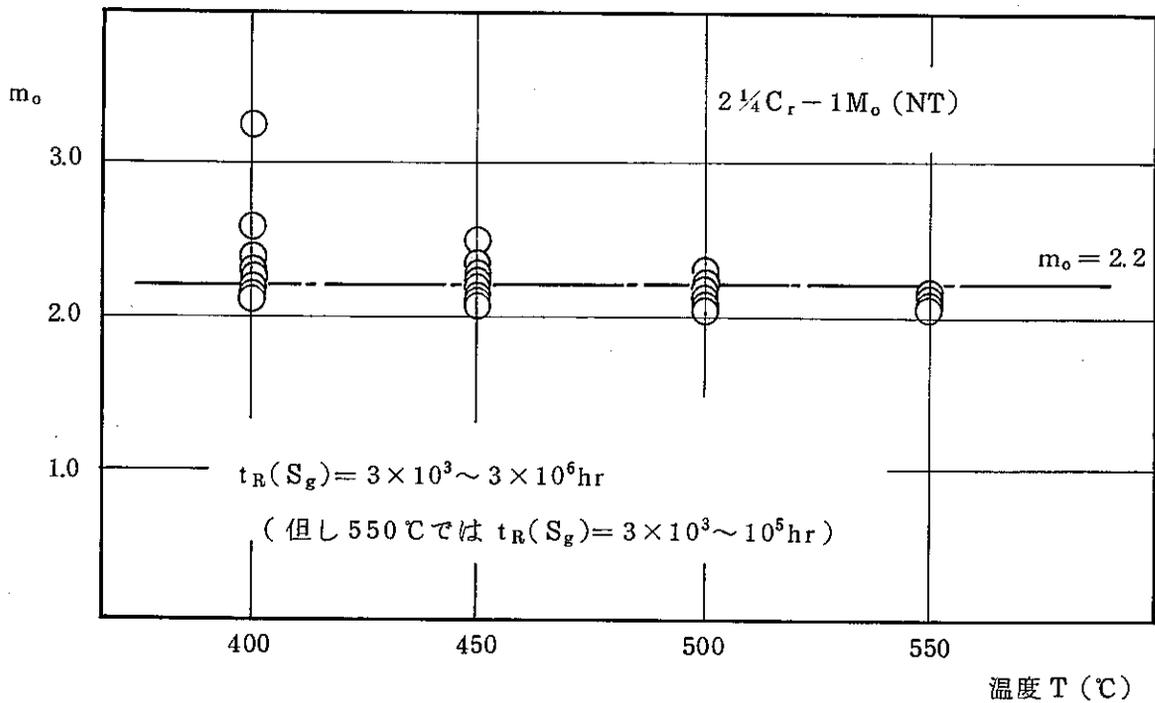


図 EA. 13 (2)  $S_i - S_g = 1 \sim 2 \text{ kg/mm}^2$  区間での勾配

- ⑤ 係数  $D_0$  は,  $S_i - S_g = 2 \text{ kg/mm}^2$  における  $D^*$  値を基本的に包絡するように定める。

( 図 EA.14 )

図 EA.14 で一部低温長時間側データがはずれるが, 図 EA.12 (3) から理解できるように,

低温長時間側では,  $S_i - S_g$  のかなり小さい領域についても  $D_1 \left( \frac{S_i - S_g}{C_1} \right)^{m_n}$  の項で表

わされる傾向が支配的となるためである。

- ⑥ 係数  $D_n$  は,  $S_i - S_g = 7 \text{ kg/mm}^2$  における  $D^*$  値を基本的に包絡するように定める。

係数  $D_n$  は, 温度及び  $S_g$  レベルでの設計クリーブ破断時間の2つの因子を考慮したため, いくつかの式について検討した結果, 最終的には図 EA.15 及び図 EA.16 に示すように,

$t_R(S_g)$  について  $t_R(S_g) = 10 \text{ hr}$  をピボット点と定め, また, 温度傾向については

$t_R(S_g) = 10^6 \text{ hr}$  での傾向を代表傾向として定めた。

この結果, 図 EA.15 に示すように, 低温短時間側で一部非安全側になるケースが考えられるが, 実用上は支障は無いと判断した。

- ⑦ 以上の結果により簡易式は, 以下の形とした。

$$D^* = M_{ax} \left[ D_0 \left( \frac{S_i - S_g}{C_0} \right)^{m_0}, D_n \left( \frac{S_i - S_g}{C_n} \right)^{m_n} \right]$$

ここで得た簡易式と詳細計算値との比較を図 EA.17 に示す。図 EA.17 より簡易式は概ね詳細計算値を保守的に包絡する傾向にあることがわかる。

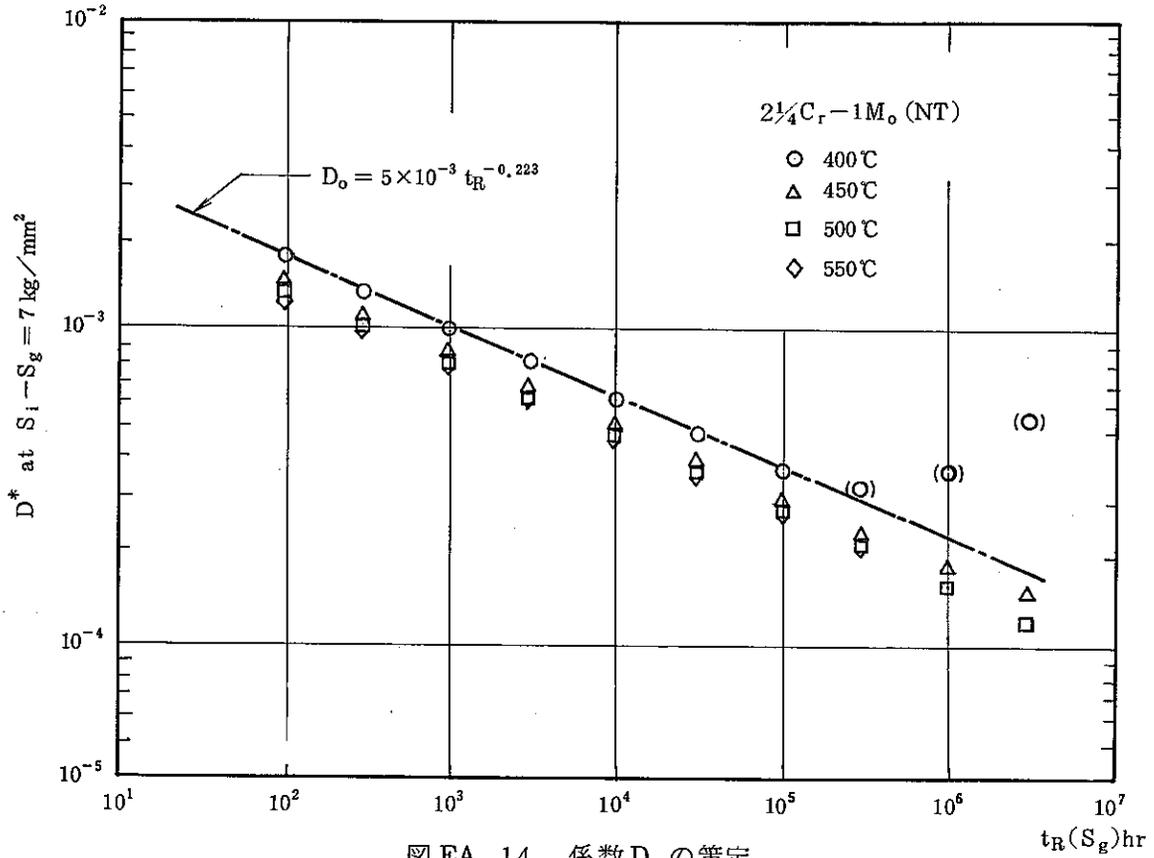


図 EA. 14 係数  $D_0$  の策定

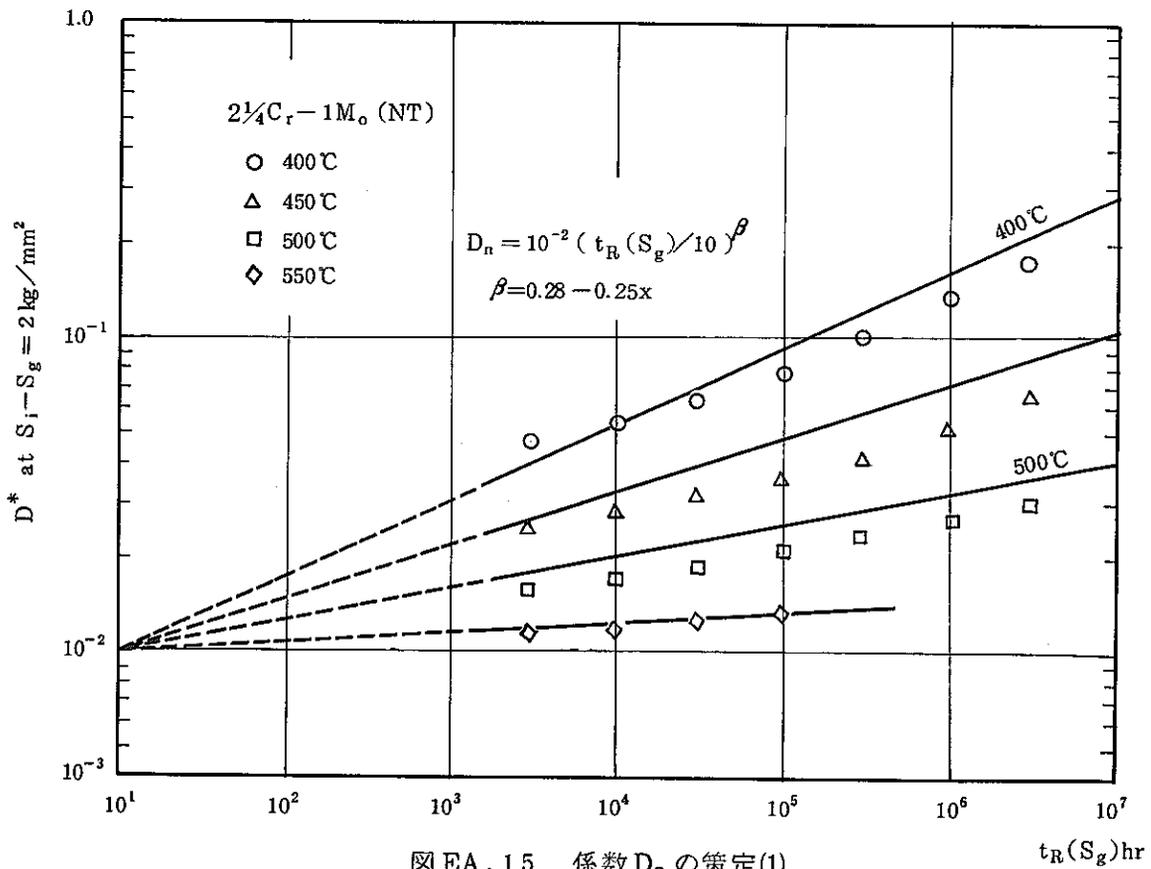


図 EA. 15 係数  $D_n$  の策定(1)

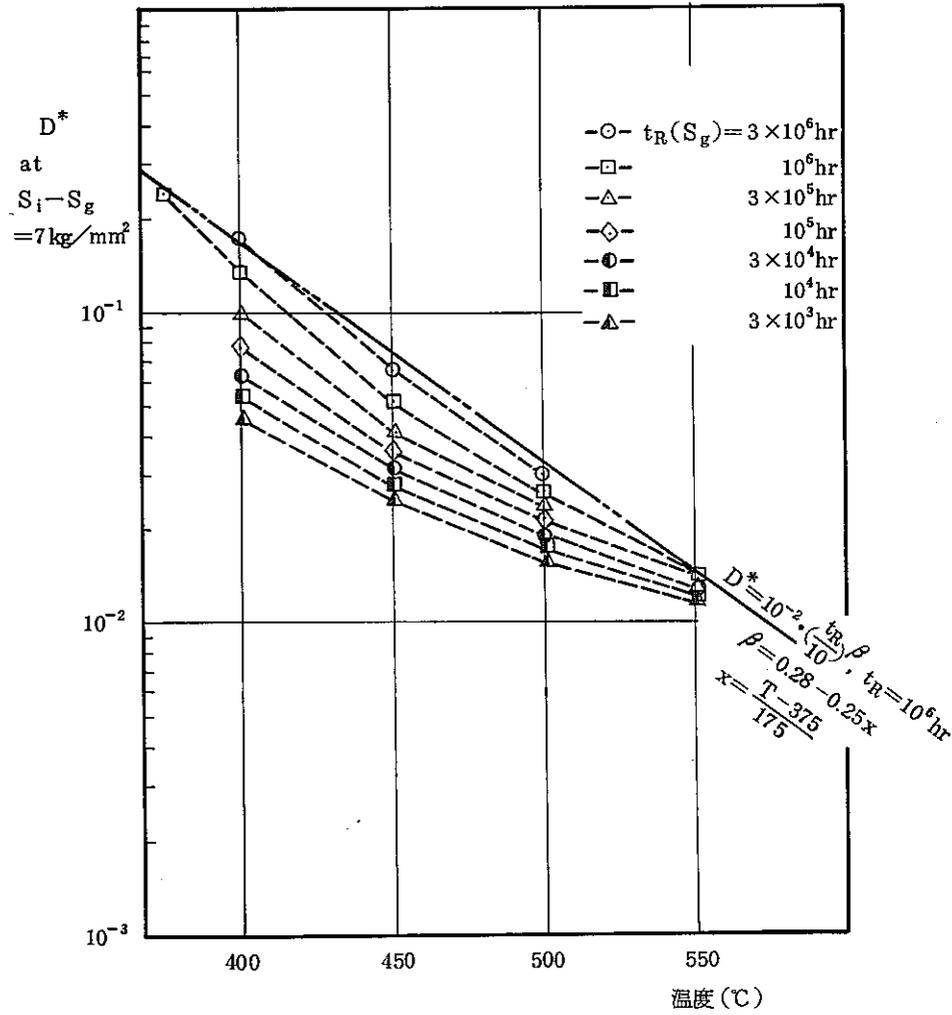


図 EA.16 係数  $D_n$  の策定(2)

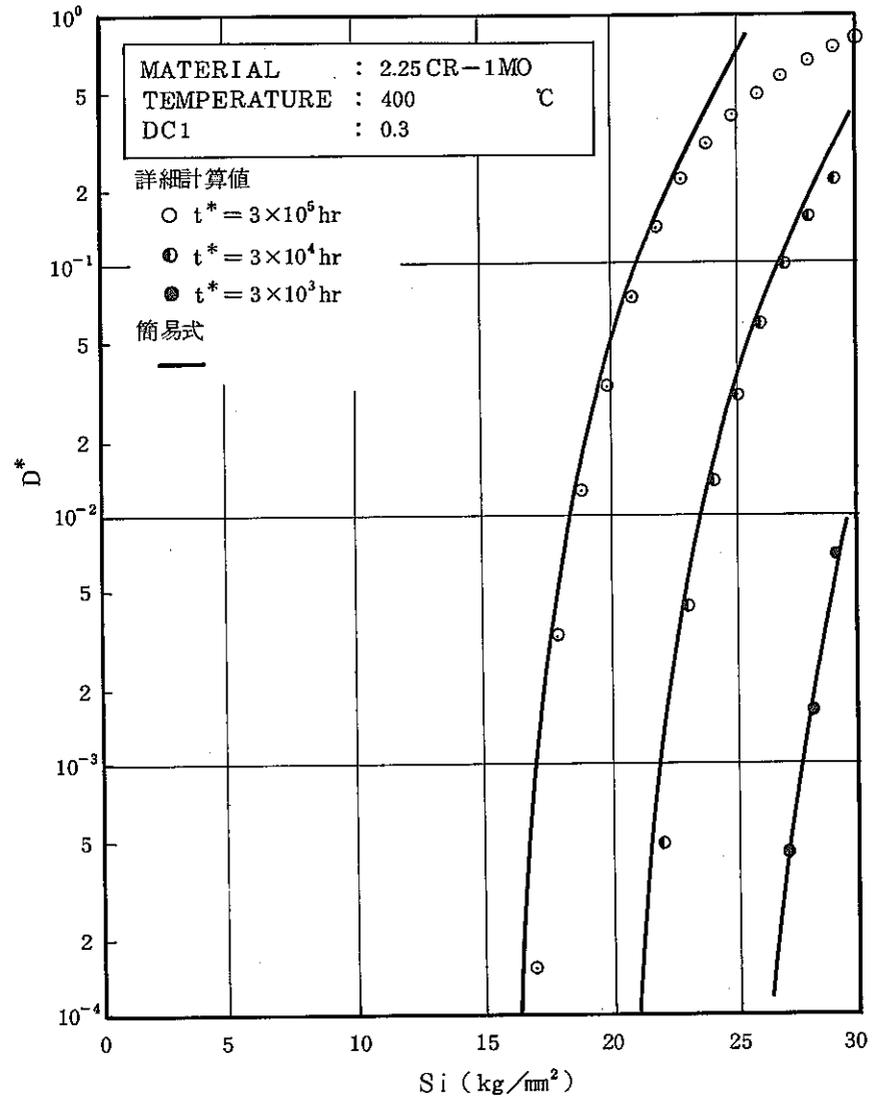


図 EA.17 (1) 簡易式と詳細計算値との比較

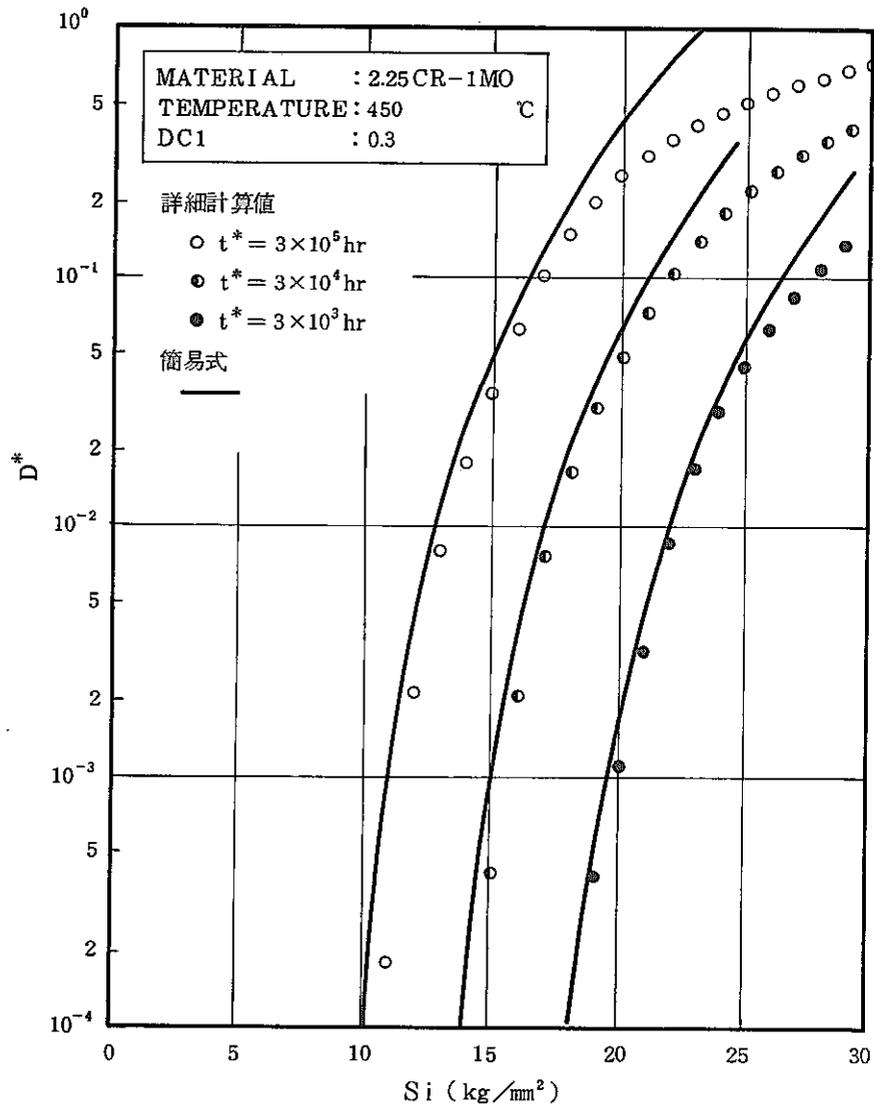


図 EA.17 (2) 簡易式と詳細計算値との比較

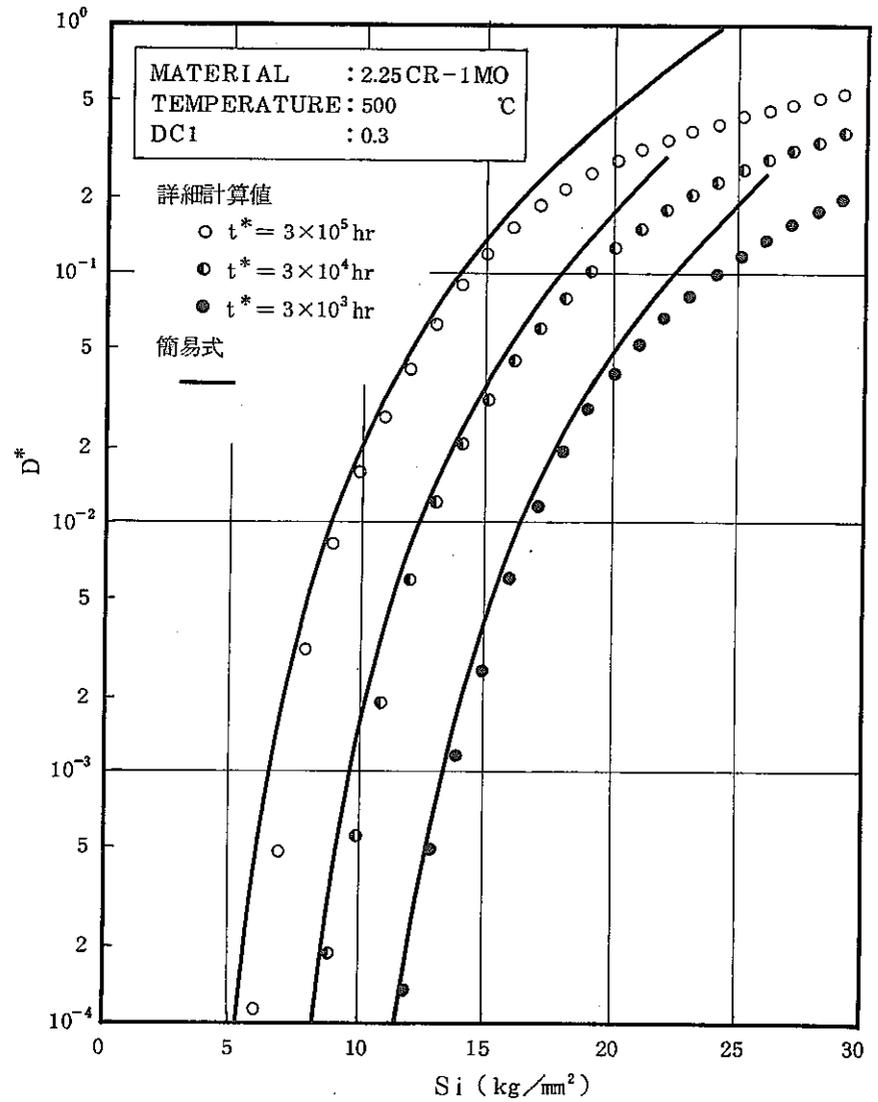


図 EA.17 (3) 簡易式と詳細計算値との比較

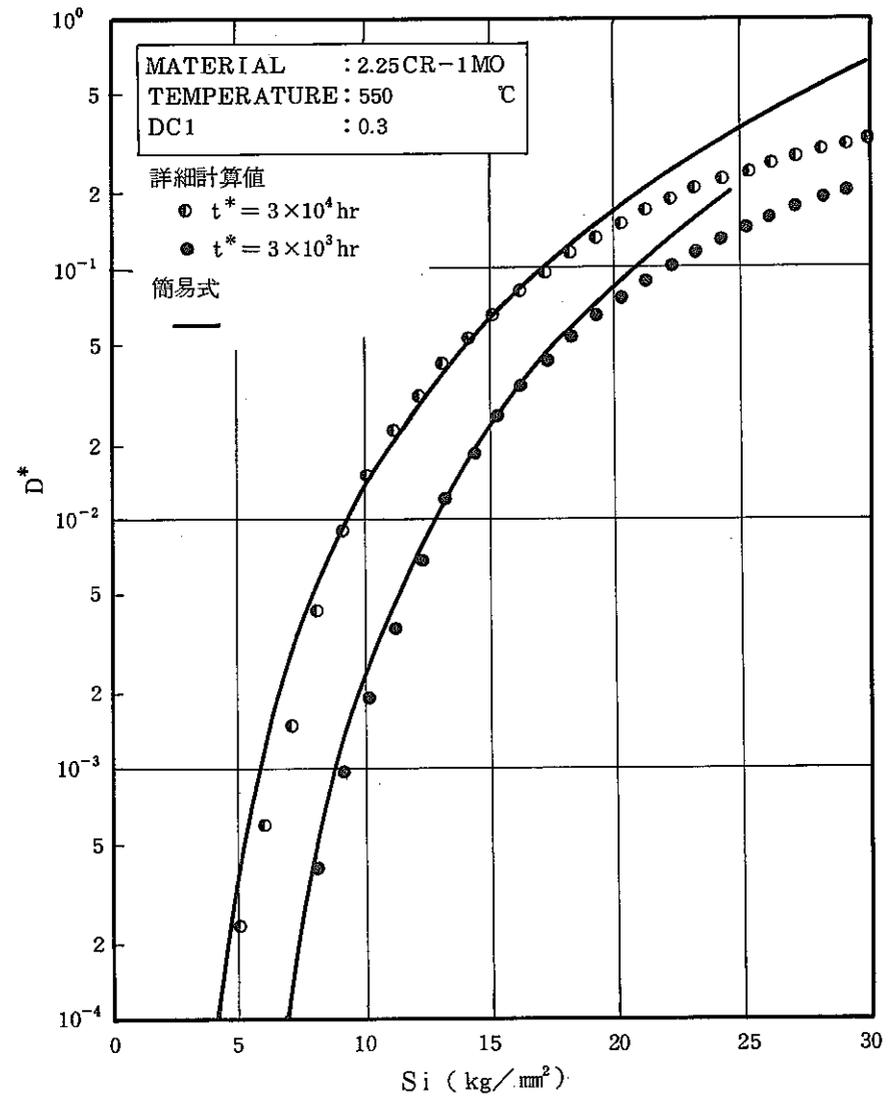
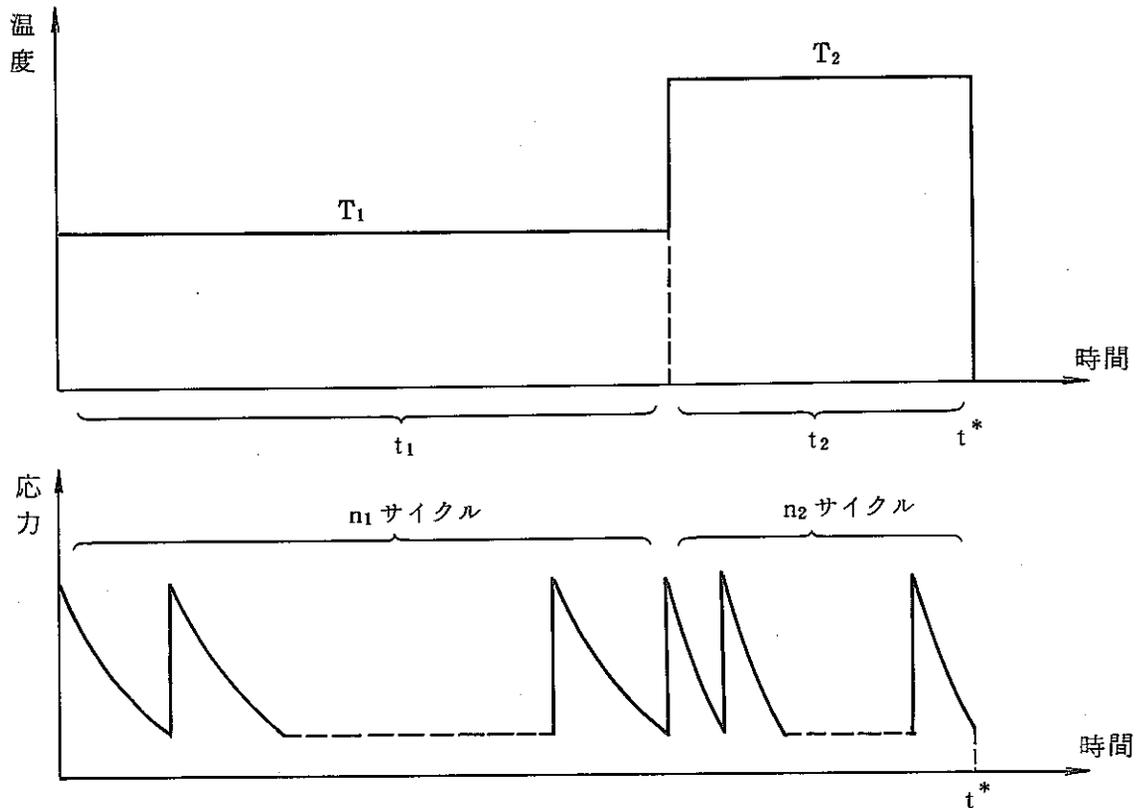


図 EA. 17 (4) 簡易式と詳細計算値との比較

9. 等価温度  $T_{eq}$  は、図 EA.18 に示す計算モデルを用いて妥当性を確認した。計算結果は図 EA.19 に示されるとおりであり、異なる温度条件の組合せについて先に規定した等価温度を使用すれば保守的評価結果が得られる。



$$\text{等価温度 } T_{eq} : D_{C1} = \frac{2 t_1}{t_R(S_g, T_1)} + \frac{2 t_2}{t_R(S_g, T_2)} = \frac{2 t^*}{t_R(S_g, T_{eq})}$$

$t_R(\sigma, T)$  : 温度  $T$ , 応力  $\sigma$  における設計クリープ破断時間

$S_g$  : 適切な  $D_{C1}$  を与える応力

妥当性確認計算

$$\begin{cases} D_{C1} = 0.3 \\ n^* = n_1 + n_2, \quad n^* D^*(T_{eq}, t^*, D_{C1}) = 0.3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_1/n^* \text{ 又は } n_2/n^* = 0, 0.001, 0.003, 0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1 \\ \text{1 サイクル当りの時間 } t_1/n_1, t_2/n_2 \end{cases}$$

$$\text{設計上の評価値 } D_{ON,d} = D_{C1} + (n_1 + n_2) D^*(T_{eq}, t^*, D_{C1})$$

$D^*$  : 付録 E に定める値

$$\text{詳細計算値 } D_{ON,cal} = n_1 \int_0^{t_1/n_1} \frac{2 dt}{t_R(\sigma, T_1)} + n_2 \int_0^{t_2/n_2} \frac{2 dt}{t_R(\sigma, T_2)}$$

計算方法は  $D^*$  の算出法に準じる。

図 EA.18 等価温度の妥当性確認のための計算モデル

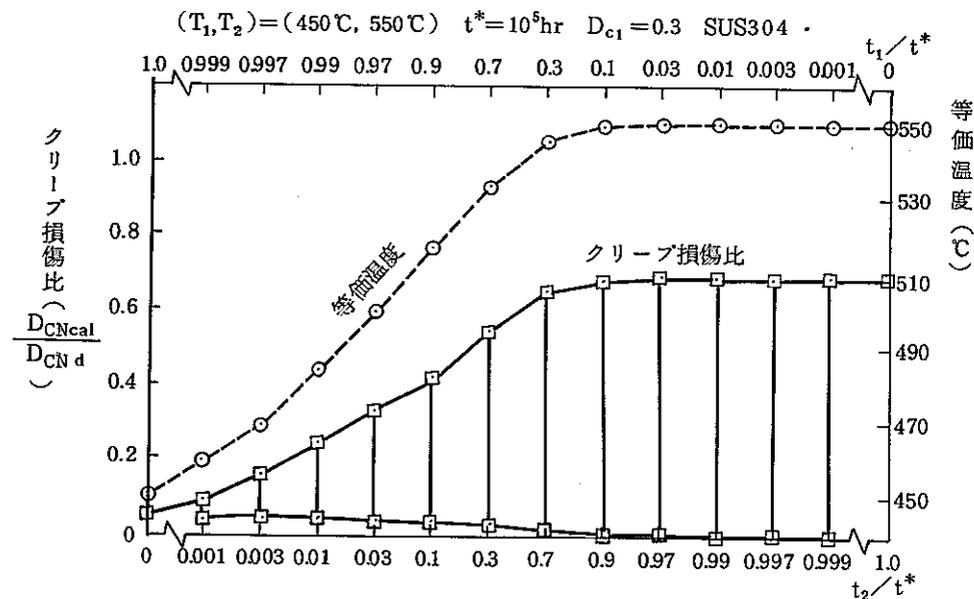


図 EA. 19 (1) 等価温度の妥当性確認

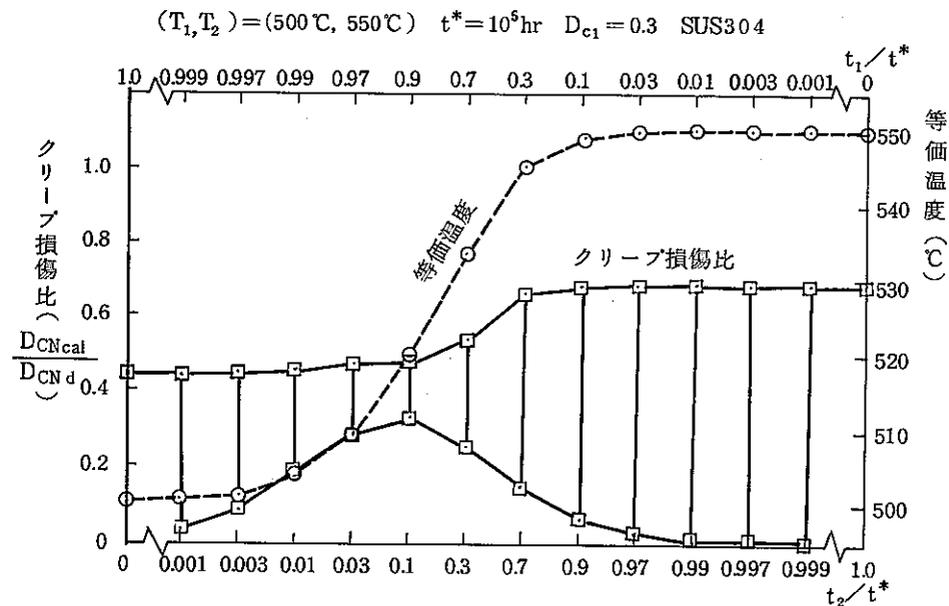


図 EA. 19 (3)

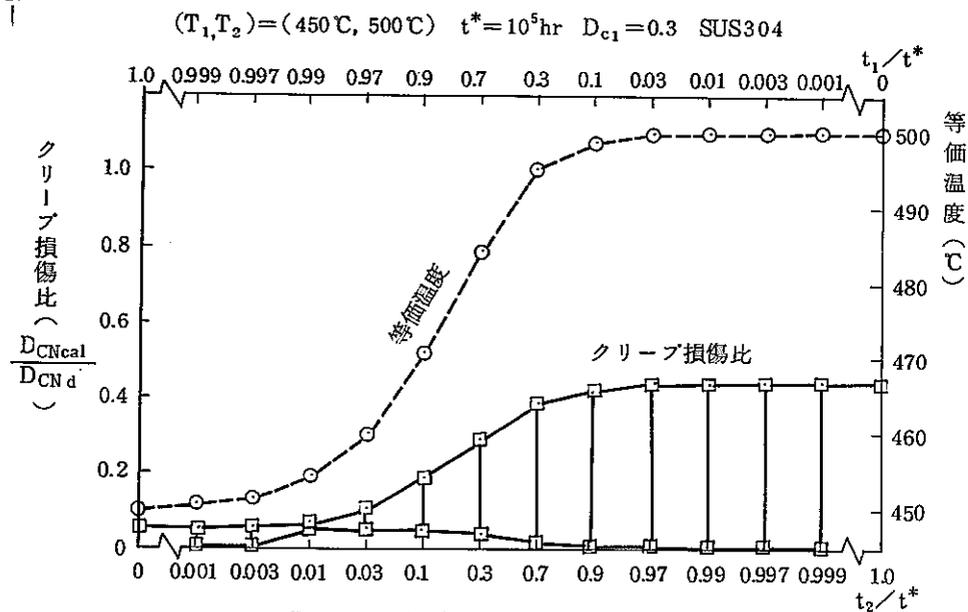


図 EA. 19 (2)

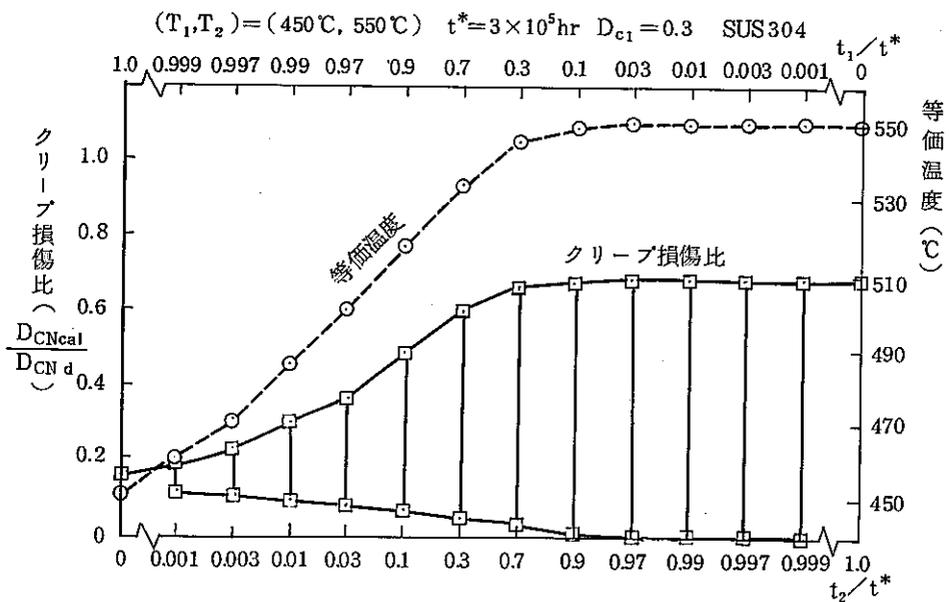


図 EA. 19 (4)

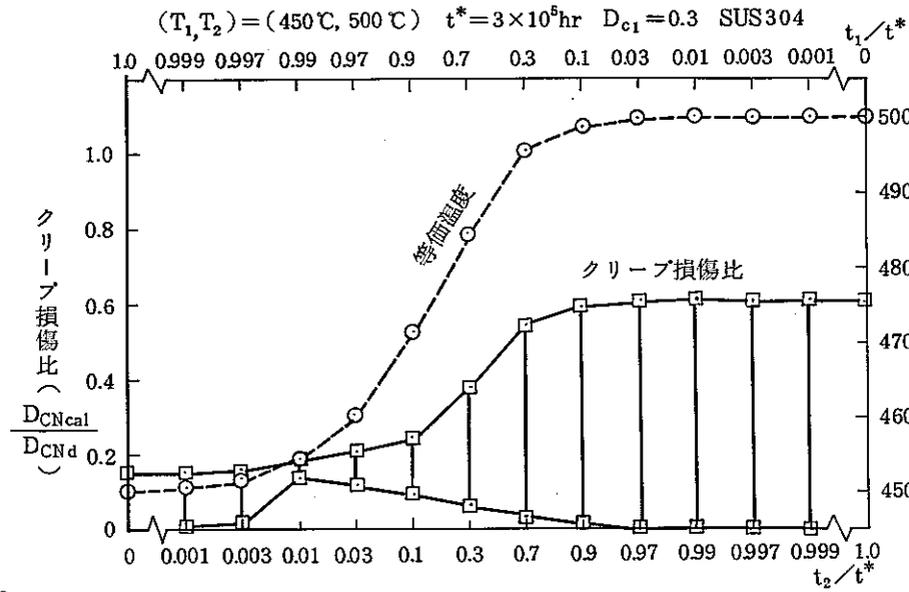


図 EA.19 (5)

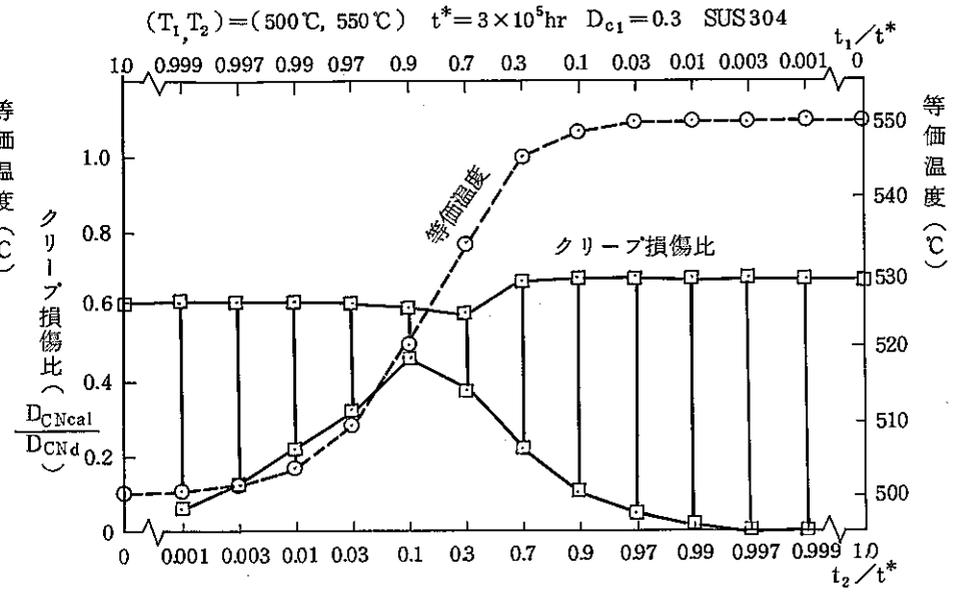


図 EA.19 (6)

付録F ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 $D^{**}$

ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 $D^{**}$ は、次の(1)又は(2)により定めることができる。

- (1) (3.5.10)又は(3.5.25)式により定める $\epsilon_t$ が次式を満足する場合は $D^{**} = 0$ とする。

$$\epsilon_t \leq \max [ 3\bar{S}_m / E, 2S_g / E ] \quad [ F.1 ]$$

ここで、

$3\bar{S}_m$  : 3.5.3 (2) 4) a) ロ) に定めるところによる。

$S_g$  : 付録Dに定めるところによる。

$E$  : 3.5.3 (2) 3) d) イ) に定めるところによる。

- (2) (3.5.10)又は(3.5.25)式により定める $\epsilon_t$ が(F.1)式を満足しない場合は、次により定める。

温度 $T$ 、時間 $t^*$ 、及びクリープ損傷係数 $D_{C1}$ に対して図F.1に定める値

ここで、

$T$  : 考えている評価点の金属温度履歴に基づき定める温度(°C)

$t^*$  : 1.2.1 (2)に定める高温使用時間(hr)

$D_{C1}$  : 3.5.3 (2) 4) a) イ) に定めるところにより算定するクリープ損傷係数

【解説】

1. 付録Fは、ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 $D^{**}$ の計算方法を定めたものである。
2. 付録F図F.1は、代表的な温度及び高温使用時間について、ひずみ範囲を定める応力極値が同一温度とした上で、以下の式により算出された値を図示したものである。中間温度若しくは高温使用時間又はひずみ範囲を定める応力極値の温度が異なる場合に対するピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 $D^{**}$ は、以下の式により算出することができる。

$T \leq T_p$  のとき

- (イ) SUS 304, SUS 316 及び SUS 321 伝熱管の場合

$$D^{**} = \text{Max} \left[ D_{p0} \left( \frac{S_i - S_g}{C_o} \right)^{n_{p0}}, 10^{-4} \right]$$

$$S_i = \text{Min} \left[ \frac{1}{2} \Delta \sigma_R (\epsilon_t), E \epsilon_t - (3\bar{S}_m - S_{RH}) \right]$$

- (ロ)  $2^{1/4} C_r - 1 \text{ Mo (NT)}$  の場合

$$D^{**} = \text{Max} \left[ D_{p0} \left( \frac{S_i - S_g}{C_0} \right)^{n_{p0}}, D_{p1} \left( \frac{S_i - S_g}{C_1} \right)^{n_{p1}}, 10^{-4} \right]$$

$$S_i = \text{Min} \left[ S^{**} \left( \frac{1}{2} \epsilon_t \right), E \epsilon_t - (3 \bar{S}_m - S_{rH}) \right]$$

$T > T_p$  のとき

$$D^{**} = D_p^{**}$$

ここで、

$T$  : 考えている評価点の金属温度履歴に基づき定める温度 (°C)。

$t^*$  : 1.2.1 (2) に定める高温使用時間 (hr)。

$D_{c1}$  : 3.5.3 (2) 4) a) 1) に定めるところにより算定するクリープ損傷係数。

$S_g$  : 温度  $T$  (°C) 時間  $t^*$  (hr) においてクリープ損傷係数が  $D_{c1}$  となる応力 (kg/mm<sup>2</sup>)。

$\Delta \sigma_R (\epsilon_t)$  : 動的応力ひずみ曲線 (表 F.A.2) におけるひずみ範囲  $\epsilon_t$  (mm/mm) に対する応力範囲 (kg/mm<sup>2</sup>)。

$S^{**} \left( \frac{1}{2} \epsilon_t \right)$  : 別図 1.11 の Ohr 等時応力ひずみ線図におけるひずみ振幅  $\frac{1}{2} \epsilon_t$  (mm/mm) に対する応力 (kg/mm<sup>2</sup>)。

$T_p$  : 同一のひずみ範囲, 高温使用時間及びクリープ損傷係数  $D_{c1}$  において,  $D^{**}$  の最大値を与える温度 (°C)。

$D_p^{**}$  : 温度  $T_p$  における  $D^{**}$  の値。

$D_{p0}, C_0, n_{p0}, D_{p1}, C_1, n_{p1}$  : 表 F.A.1 に定める値。

上式を使用する場合, 応力  $S_g$  は, 評価温度  $T$  (°C) 時間  $t^*$  (hr) においてクリープ損傷係数  $D_{c1}$  となる応力としている点に特に注意すること。

表FA.1 パラメータ  $D_{p0}$ ,  $C_0$ ,  $n_{p0}$ ,  $D_p$ ,  $C_1$ ,  $n_{p1}$

鋼種 パラメータ	SUS304	SUS316	SUS321 伝熱管	$2\frac{1}{4}C_r-1M_0$ (NT) 板・伝熱管
$D_{p0}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$425 \leq T \leq 500$ $\exp[7.8 - 2.2 \times 10^{-2}(T + 273.15)]$ $500 \leq T \leq 650$ $1.0 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-3} \times \left(\frac{2t^*}{D_{C1}}\right)^{-0.223}$
$C_0$	1.0	1.0	1.0	5.0
$n_{p0}$	$\frac{2.36 \times 10^3}{T + 273.15} - 1.0$	$\frac{5.22 \times 10^3}{T + 273.15} - 4.2$	$\frac{8.0 \times 10^2}{T + 273.15} + 1.6$	2.0
$D_{p1}$				$1.0 \times 10^{-4}$
$C_1$				3.0
$n_{p1}$				$4.0 - 2.7 \times (T - 375) / 175 + 1.3 [(T - 375) / 175]^2$

3. ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数<sup>\*\*</sup>を定める温度は、以下に記すところにより定めるものとする。

(1) ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数<sup>\*\*</sup>は、同一の高温使用時間において、温度に対する単調増加関数となるよう定められている。

したがって、高温使用時間中の金属温度が一律でない場合、最高金属温度を使用すれば保守的な評価結果が得られる。

(2) 詳細な金属温度履歴を用いた計算を行う場合は、等価温度を使用することができる。

等価温度  $T_{eq}$  は高温使用時間  $t^*$  応力水準  $S_g$  において、クリープ損傷係数  $D_{C1}$  を与える温度を下まわらない温度とする。即ち、温度  $T$ 、応力  $\sigma$  について、別表 1.5 (別図 1.5) に定める許容時間を  $t_d(\sigma, T)$  とすると、等価温度  $T_{eq}$  は、下式を満足する温度である。

$$2 t^* / t_d(S_g, T_{eq}) \geq 2 \sum t_i / t_d(S_g, T_i)$$

$t_i$  : 金属温度  $T_i$  における累積使用時間

$$t^* = \sum t_i$$

4. 温度  $T_p$  によるチェックを規定したのは、以下の理由による。

一般に高温構造設計では、評価温度を高め想定すれば保守的な評価が得られる。前出簡易式でも、実際に設計で使用する低ひずみ範囲の領域では、 $D^{**}$  は温度に対する単調増加関数となっているが、高ひずみ範囲領域では、 $D^{**}$  の温度依存性が単調増加から減少へと変わる場合がある。このため、 $D^{**}$  の温度依存性が負の傾向を示す条件下では、ひずみ範囲、高温使用時間及びクリープ損傷係数  $D_{C1}$  が同一の条件で最大の  $D^{**}$  値を使用すべきことを規定したものである。

但し、通常的设计条件下では  $D^{**}$  は温度に対する単調増加関数となっていること及び  $D^{**}$  の極値は鋭くないことから、実用上は評価温度  $T$  を、例えば  $1^\circ\text{C}$  減じて  $D^{**}$  の温度に対する単調増加領域にあることを確認すれば温度  $T_p$  によるチェックを満足したものとすることができる。

5.  $D^{**}$  の詳細計算値の算出方法は以下に示すとおりである。

(1) 初期応力  $S_i$

SUS 304, SUS 316 及び SUS 321 伝熱管については、ひずみ速度  $10^{-3} \text{ mm/mm/sec}$  に対する動的応力ひずみ関係式を用いて得られる応力範囲の  $1/2$  を基本とする。

$2\frac{1}{4} C_r - 1 \text{ Mo (NT)}$  については、単調負荷時の弾塑性応力ひずみ関係式を用いて、ひずみ振幅  $\frac{1}{2} \epsilon_i$  に対応する応力を基本とする。

上記差違については、次項で解説する。

いずれの鋼種についても、弾性仮定での応力範囲  $E \epsilon_t$  を用いて初期応力を  $E \epsilon_t - (3 \bar{S}_m - S_{rH})$  として算出すれば、保守的想定といえることができる。

以上より、初期応力  $S_i$  は以下のようなになる。

(イ) SUS 304, SUS 316 及び SUS 321 伝熱管

$$S_i = \text{Min} \left[ \frac{1}{2} 4 \sigma_R (\epsilon_t), E \epsilon_t - (3 \bar{S}_m - S_{rH}) \right]$$

(ロ)  $2\frac{1}{4} C_r - 1 Mo (NT)$

$$S_i = \text{Min} \left[ S^{**} \left( \frac{1}{2} \epsilon_t \right), E \epsilon_t - (3 \bar{S}_m - S_{rH}) \right]$$

記号については、解説第 2 項参照。

(2) 応力緩和挙動

ひずみ保持時間中の応力緩和挙動は、クリープひずみ式とクリープひずみに関するひずみ硬化則とによって定める。なお、この応力緩和挙動においては、弾性追従を考慮せず  $q = 1$  の単純緩和として近似的に扱うことができる。これは ASME Code Case N-47 の弾性解析用の設計疲労線図における考え方と同じである。

応力緩和挙動の解析に用いるクリープひずみ式の  $\alpha_c$  は、クリープ破断強度に関し、最も弱い材料である  $\alpha_c = 10$  に対し、クリープ挙動のばらつきを安全側に評価して  $\alpha_c = 3$  とし、 $2\frac{1}{4} C_r - 1 Mo (NT)$  板・伝熱管はこれを使用し、SUS 304, SUS 316 及び SUS 321 伝熱管はさらに繰返しの非弾性ひずみによる硬化を考慮して  $\alpha_c = 1$  としている。

上記による応力緩和挙動の解析結果と試験データの対応を SUS 304 及び SUS 316 について図 FA.1 に示すが、控え目な緩和挙動の評価となっているのが判る。

(3) クリープ損傷値  $D^{**}$  の計算式

ひずみ範囲  $\epsilon_t$  に対するクリープ損傷係数  $D^{**}$  を以下に従って求める。

$$D^{**} = \int_0^{t_1} \frac{dt}{t_R(\sigma(t), \alpha_R = 10)} - \frac{t_1}{t_R(S_g, \alpha_R = 10)}$$

$t_1$  : 緩和応力が  $S_g$  に到達するまでの時間 (hr)

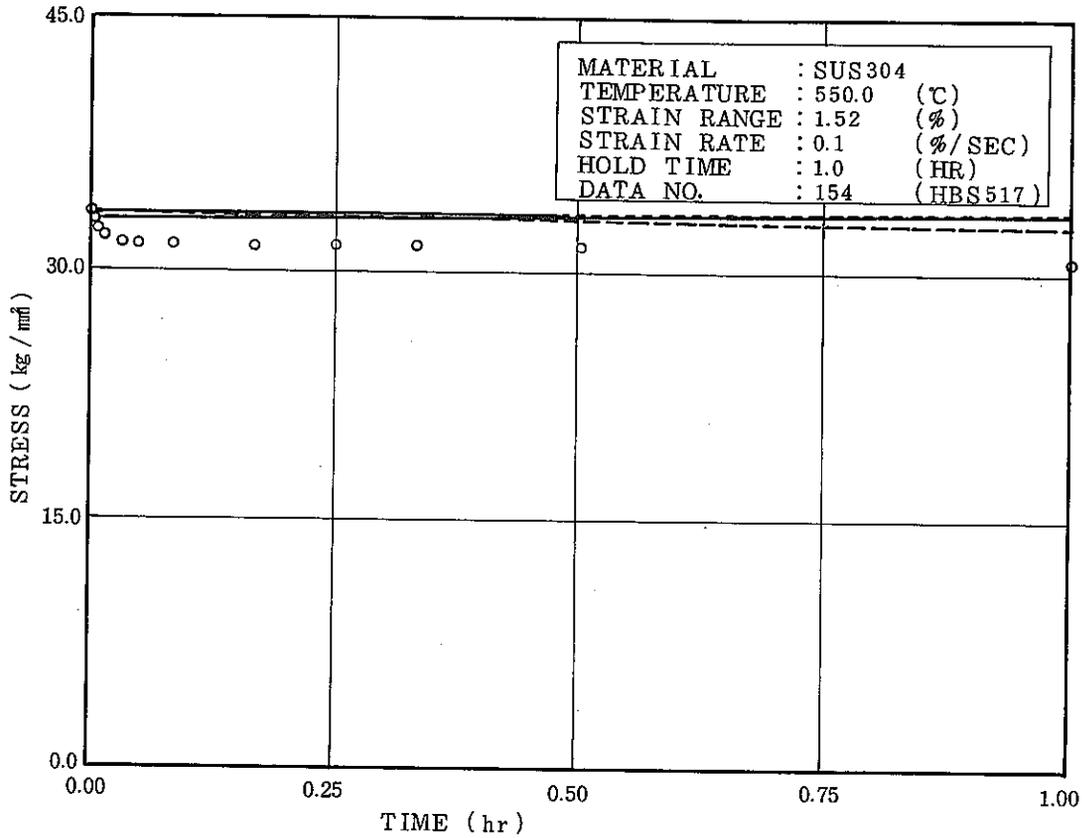
$t^*$  : 高温使用時間

$t_R(\sigma, \alpha_R)$  : 別表 1.5 の解説に示す平均クリープ破断式において、応力  $\sigma$  (kg /  $\text{mm}^2$ ) 時間係数  $\alpha_R$  に対応するクリープ破断時間 (hr)

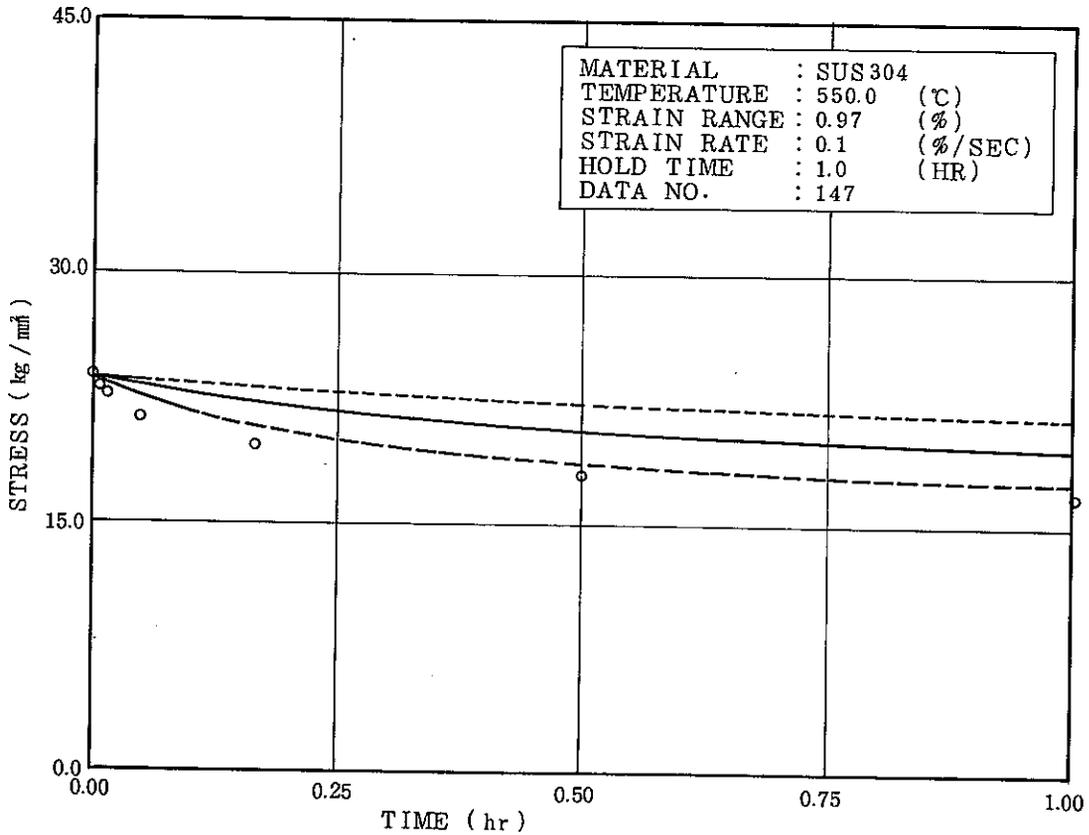
$\sigma(t)$  : 時間  $t$  (hr) における緩和応力 (kg /  $\text{mm}^2$ )

クリープ損傷値 $D^{**}$ を算出するに当たり、本方針で一般に規定されている追加安全係数2を下記の理由により、導入する必要はないとしている。

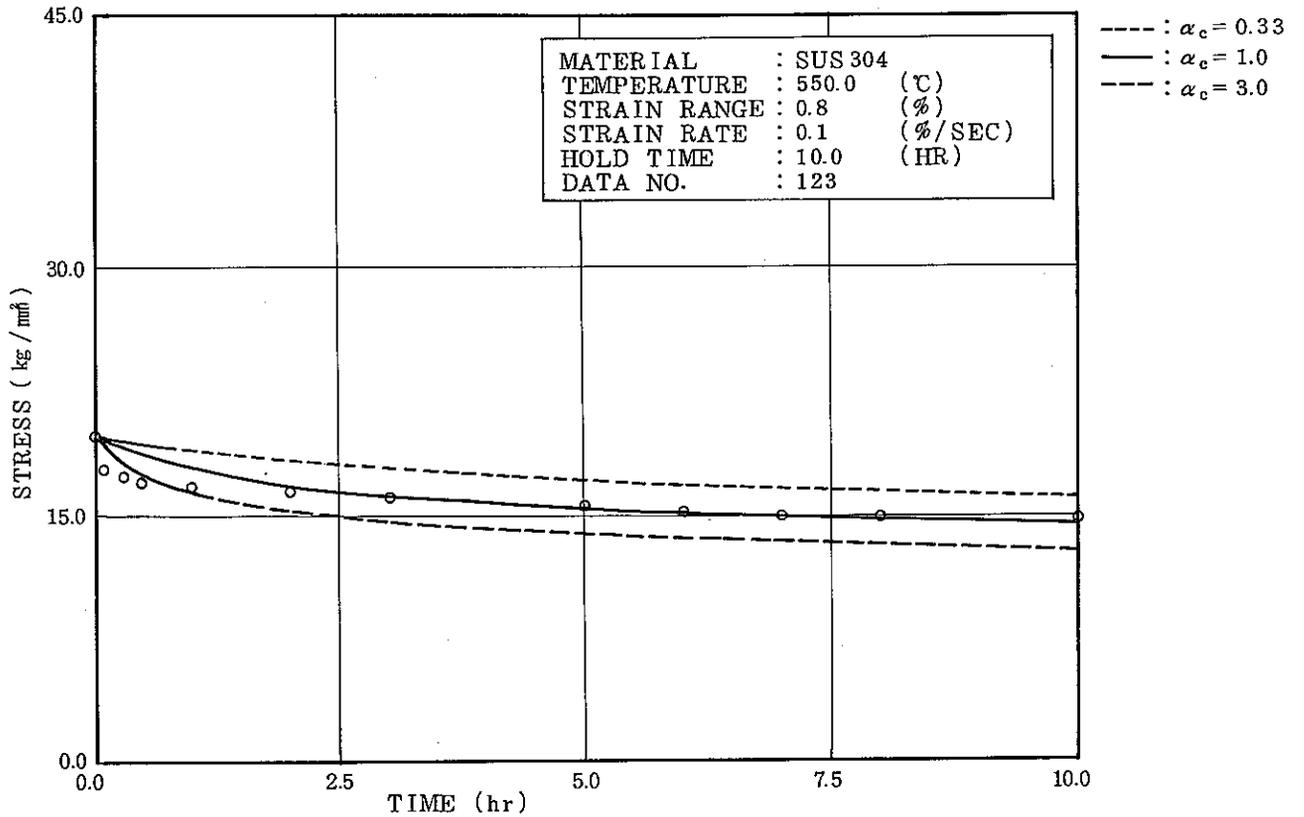
- ① 初期応力算出に当たり初期応力をかなり高く想定している。この傾向は、 $D^{**}$ が有意となる温度領域で顕著となってくる。
- ②  $D^{**}$ 値策定に当たって用いる応力緩和解析では、図FA.1で判るように材料試験で観察される保持開始直後の急激な応力緩和の効果は取り入れていない。



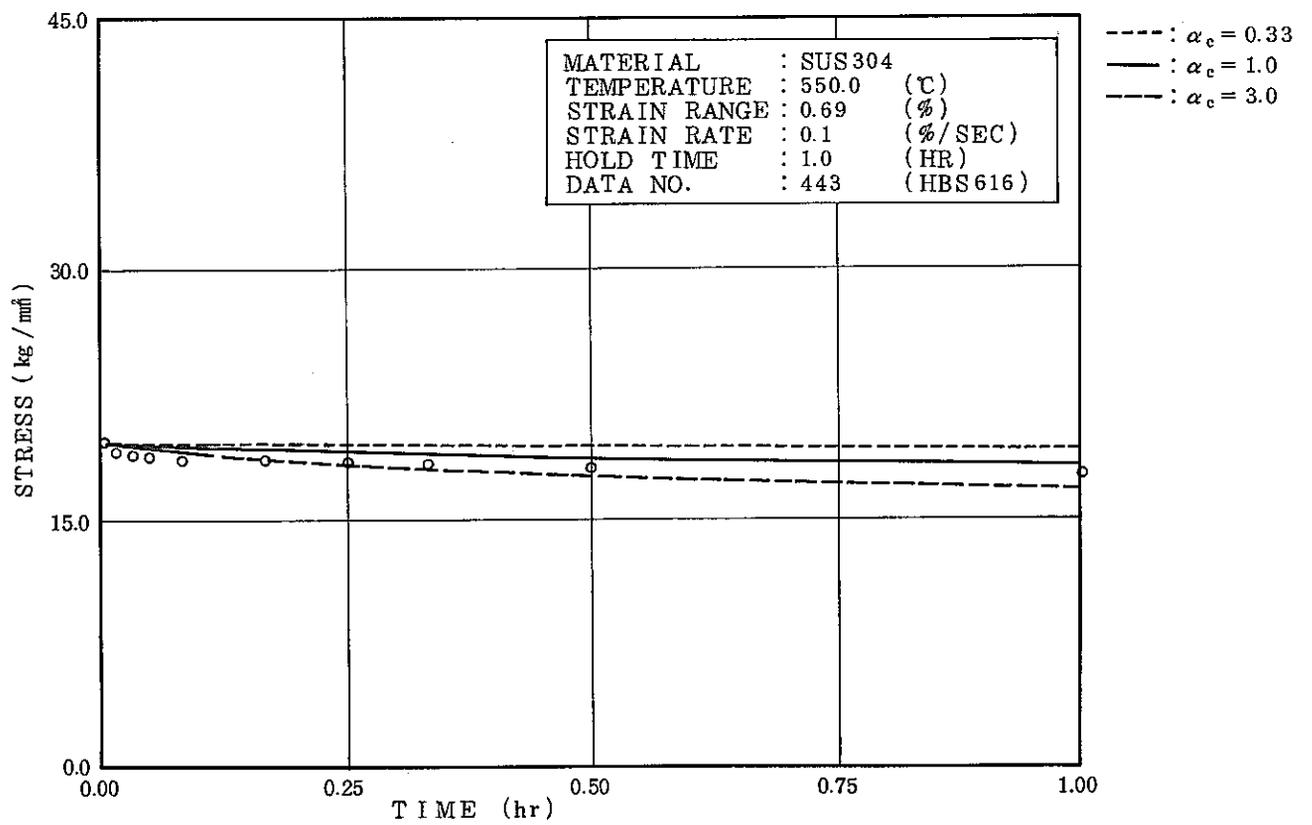
☒ FA. 1 - (1) - (a)



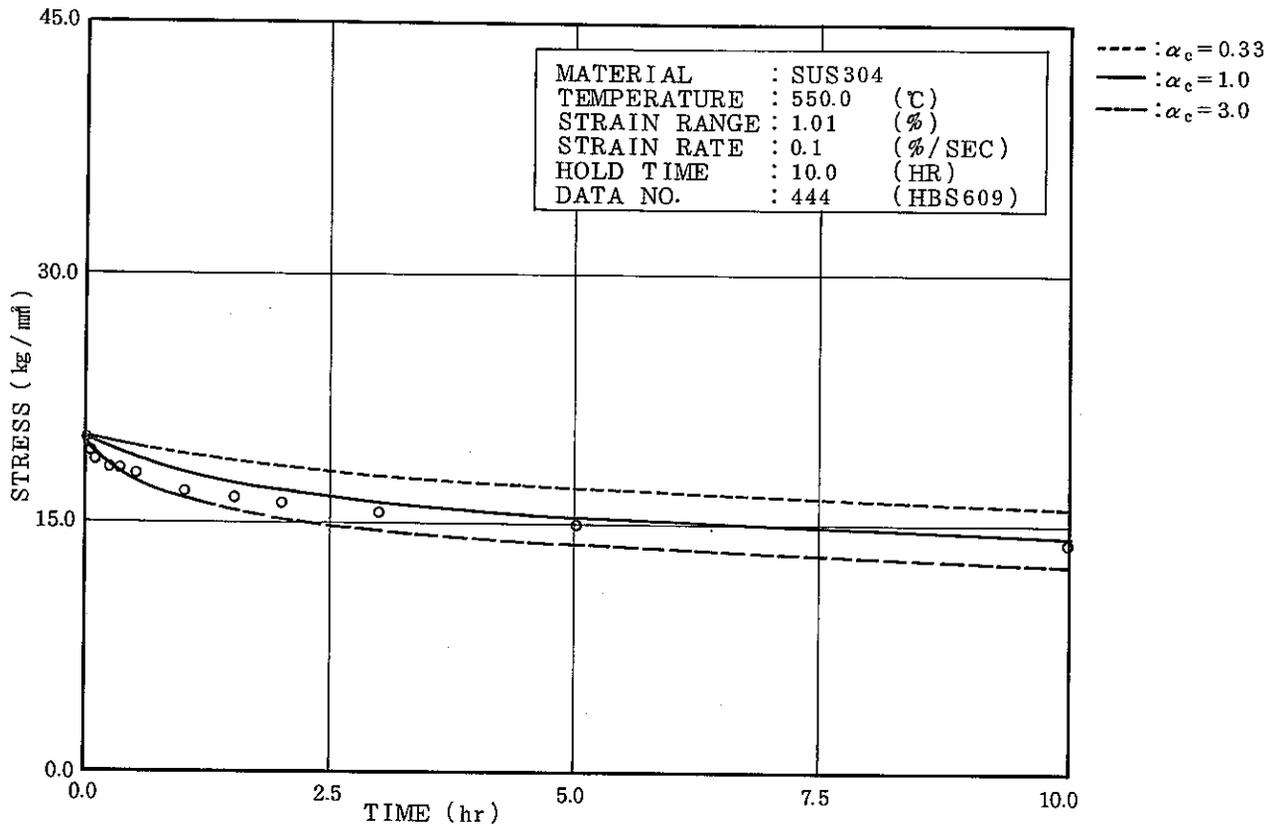
☒ FA. 1 - (1) - (b)



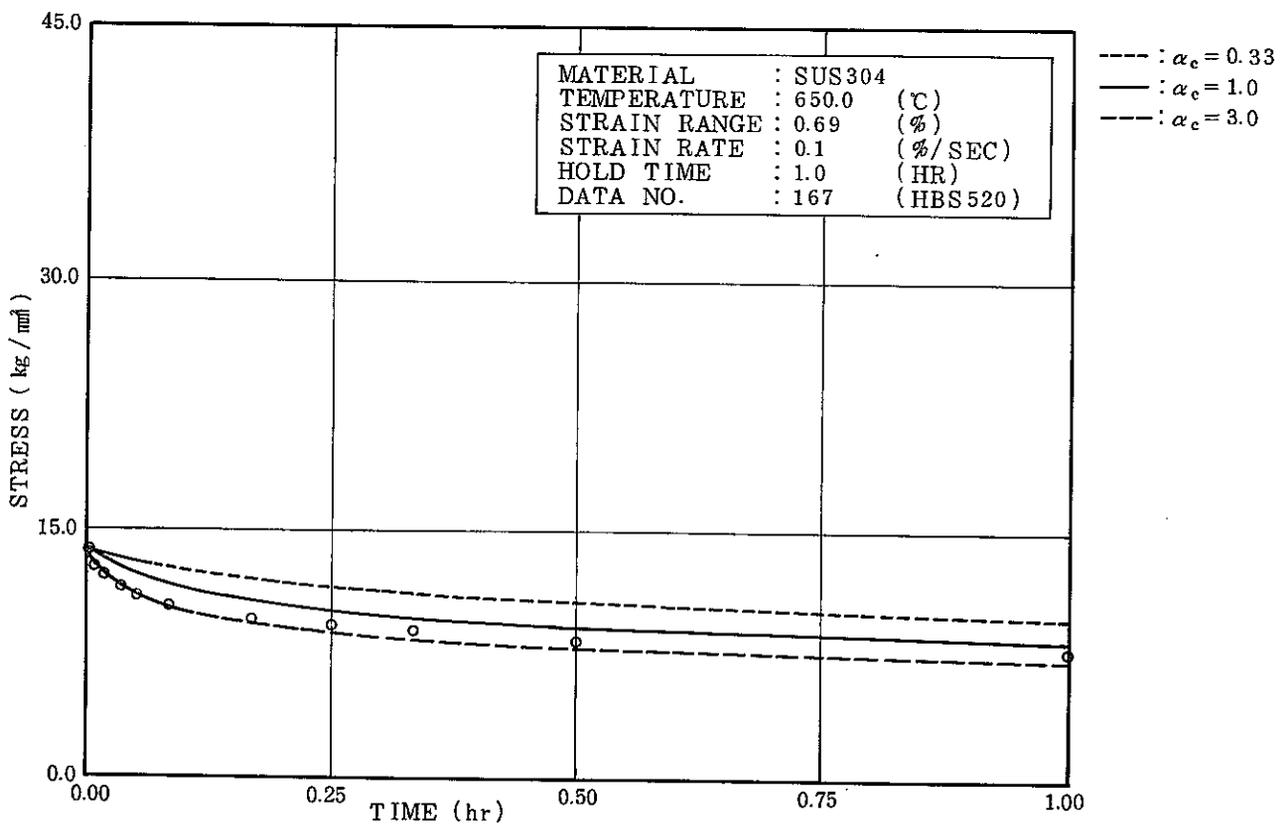
☒ FA. 1 - (1) - (c)



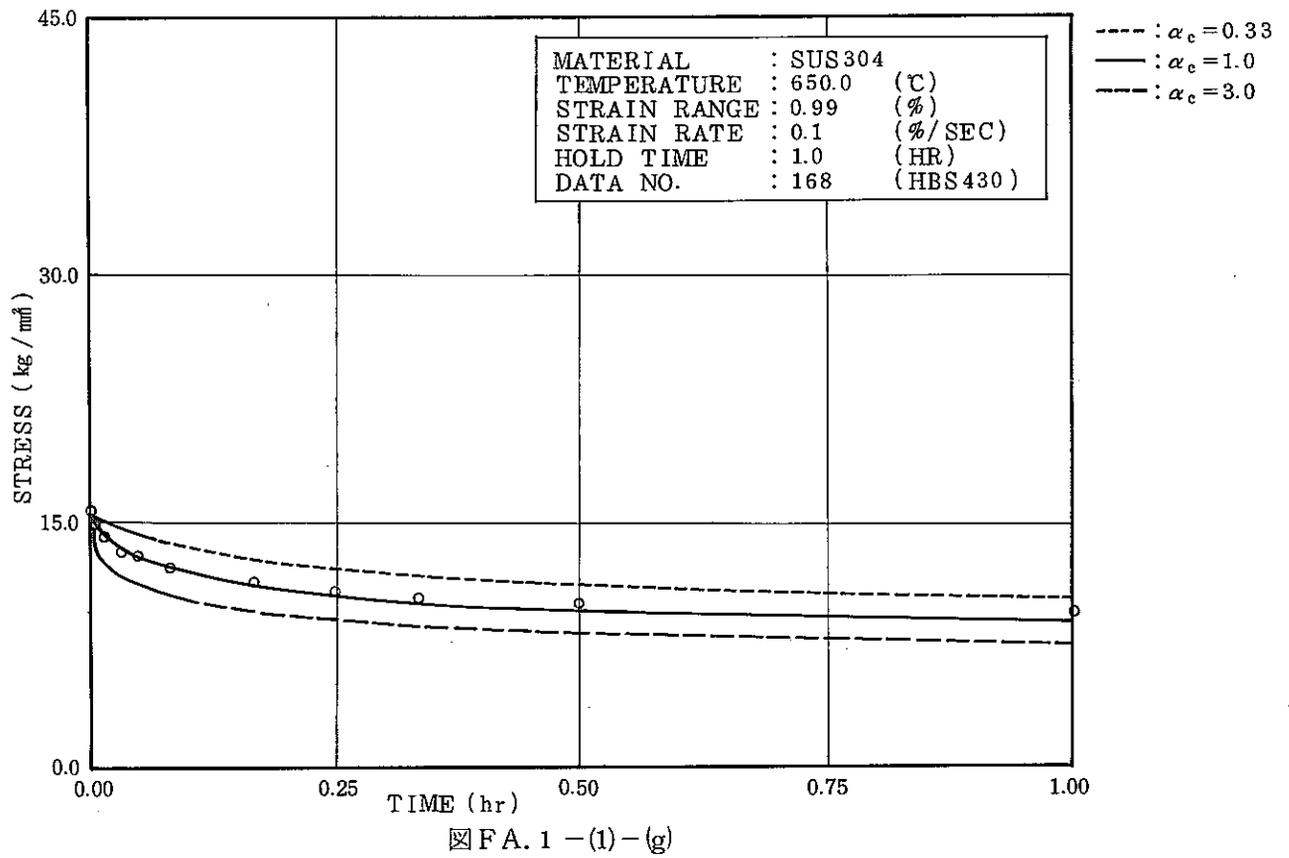
☒ FA. 1 - (1) - (d)

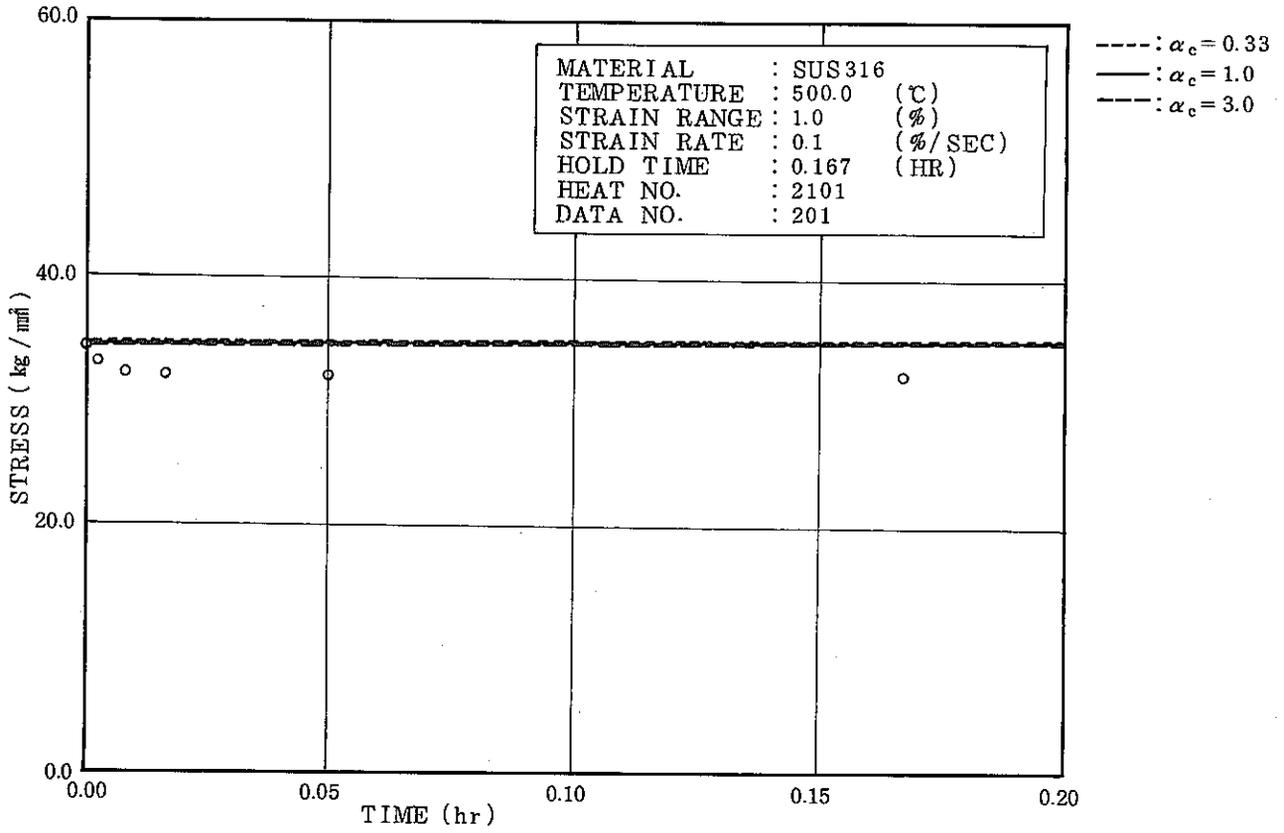


☒ F A. 1 - (1) - (e)

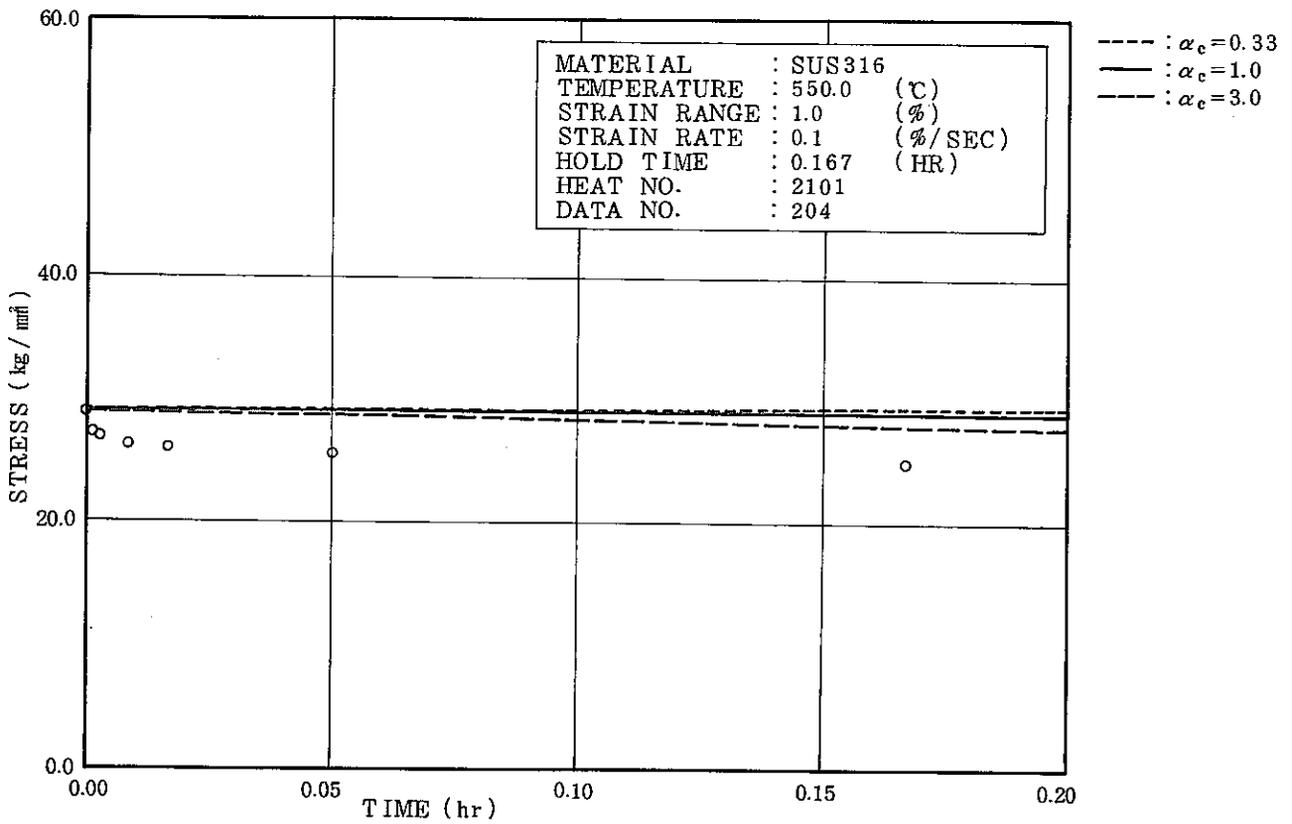


☒ F A. 1 - (1) - (f)

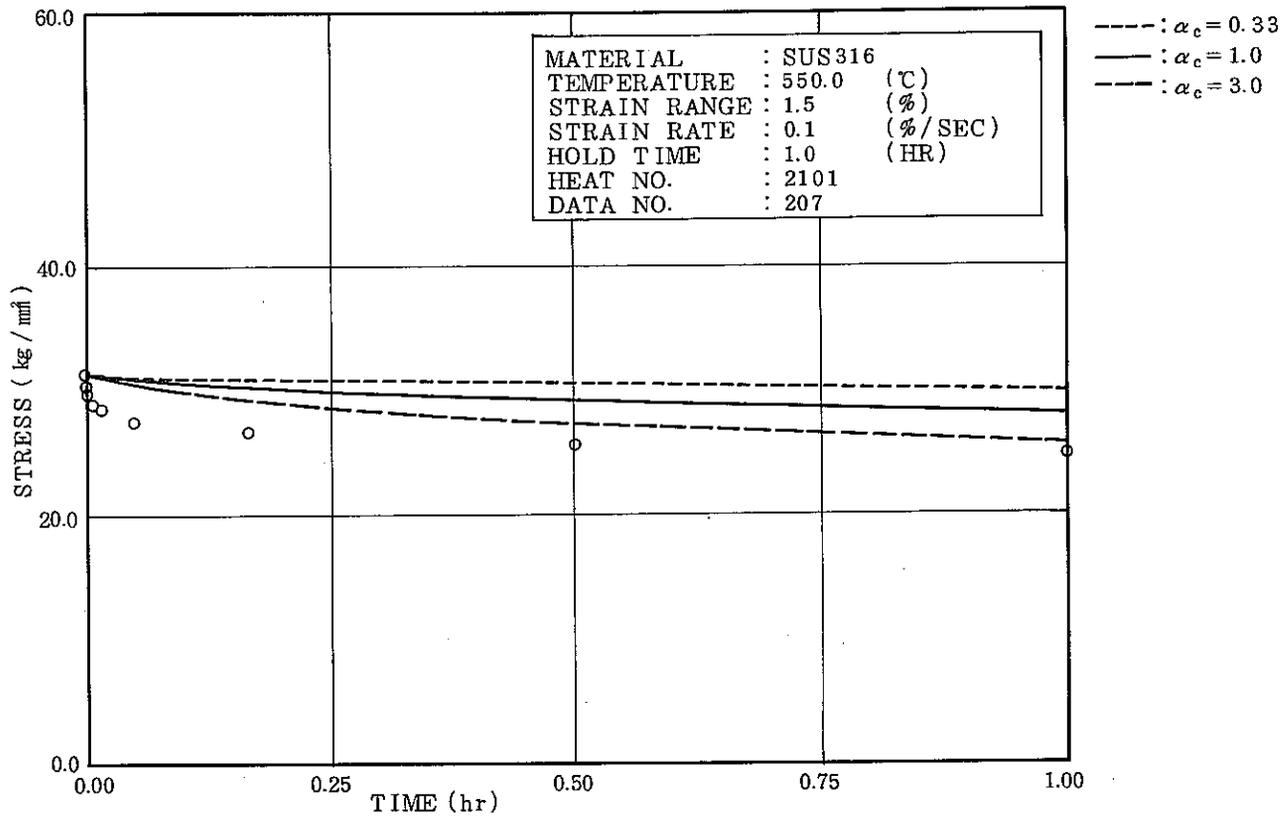




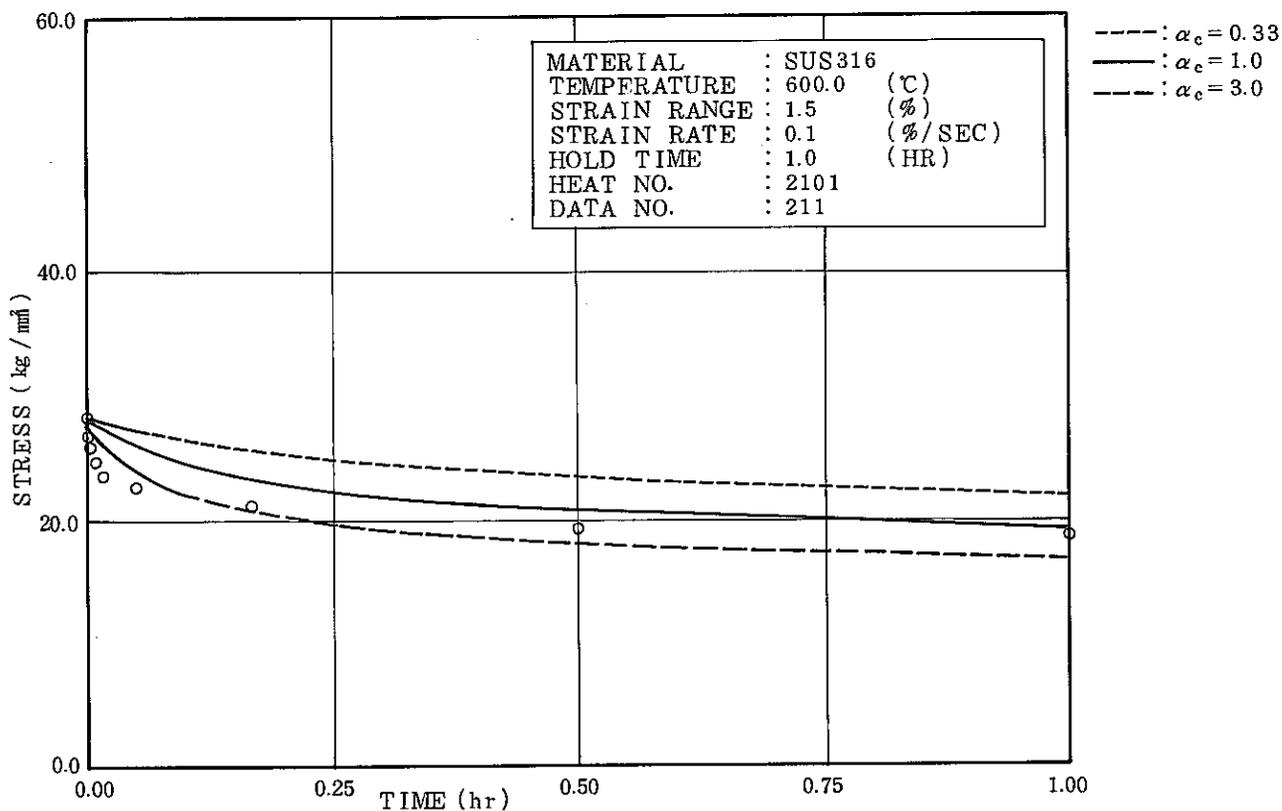
☒ F A. 1 --(2) --(a)



☒ F A. 1 --(2) --(b)



☒ FA. 1 - (2) - (c)



☒ FA. 1 - (2) - (d)

5.  $D^{**}$  策定に際しての材料の繰返し特性に対する考え方は以下のとおりである。

SUS 304 と  $2\frac{1}{4}C_r-1Mo(NT)$  について、繰返し負荷下での挙動の一例を示すと図 F A. 2 のようになる。

両者の比較を図 F A. 3 にまとめて記す。

このことから、 $D^{**}$  策定に際し、SUS 304 等では定常ひずみサイクル下での挙動を念頭において、初期応力を動的応力ひずみ関係から定め、また応力緩和挙動は繰返し硬化性を考慮して  $\alpha_c = 1$  としている。これに対して  $2\frac{1}{4}C_r-1Mo(NT)$  では第 1 サイクルでの挙動を念頭において初期応力を単調負荷下での弾塑性応力ひずみ関係から定め、また応力緩和挙動は繰返し硬化は考慮せず  $\alpha_c = 3$  としている。

6. 前記の  $D^{**}$  詳細計算値について、対応するひずみ保持繰返し疲労試験データを用いて妥当性を確認すると図 F A. 4 のようになる。

図 F A. 4 における予測値は、1 サイクル当りの疲労損傷を設計疲労線図から、また、1 サイクル当りのクリープ損傷を先に記した  $D^{**}$  の詳細計算値を使用して求め、クリープ疲労相互作用を付録 C に規定される相互作用則  $D_f + D_c = D$  として求めたものである。

さらに、構造物を用いた変位保持繰返し疲労試験データを用いて妥当性を確認したのが、図 F A. 5 である。構造物を用いた変位保持繰返しでは、厳密には構造物上での応力分布による弾性追従を考慮することが構造設計上では一般に必要なであるが、図 F A. 5 での予測値は控え目な確認方法として  $D^*$  に相当する緩和クリープ損傷を無視し材料試験の場合と同じ方法で求めた損傷値に基づき計算している。

いずれについても、 $D^{**}$  詳細計算値を用いれば実際の寿命に対しかなり控え目な予測寿命が得られることが示されている。

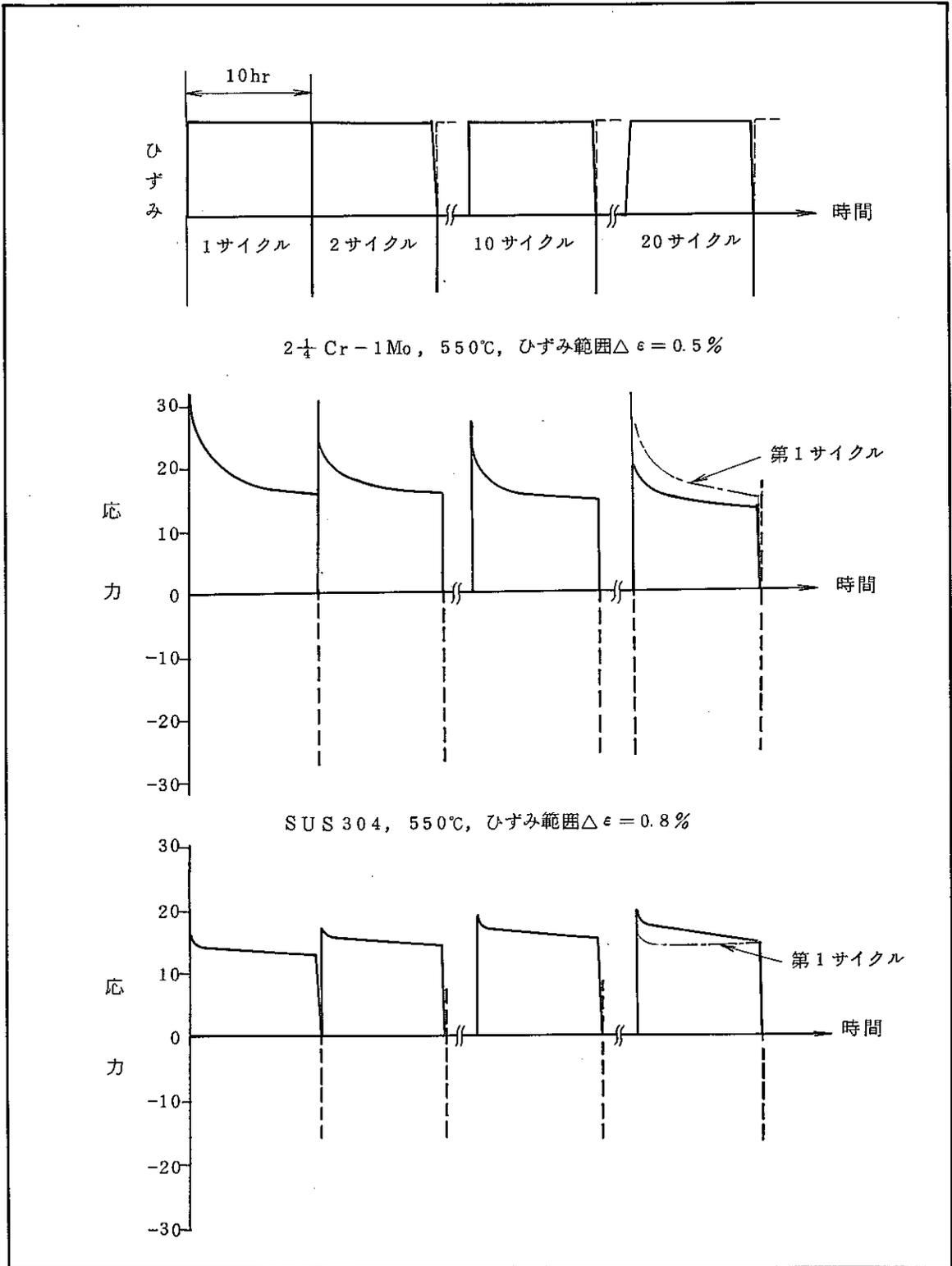
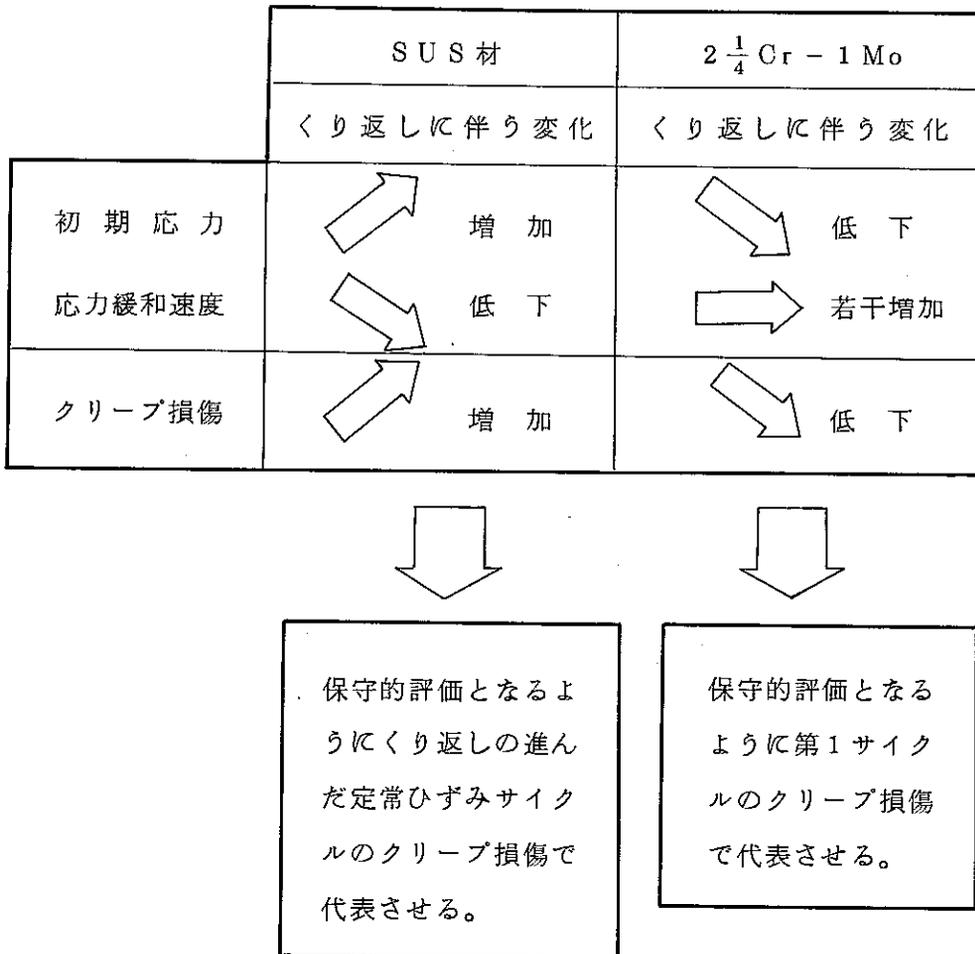
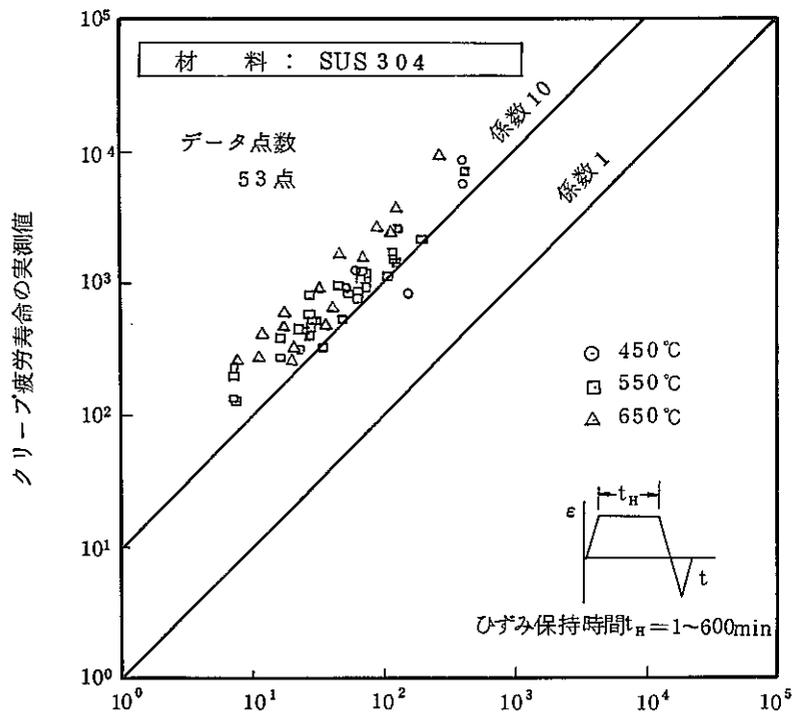


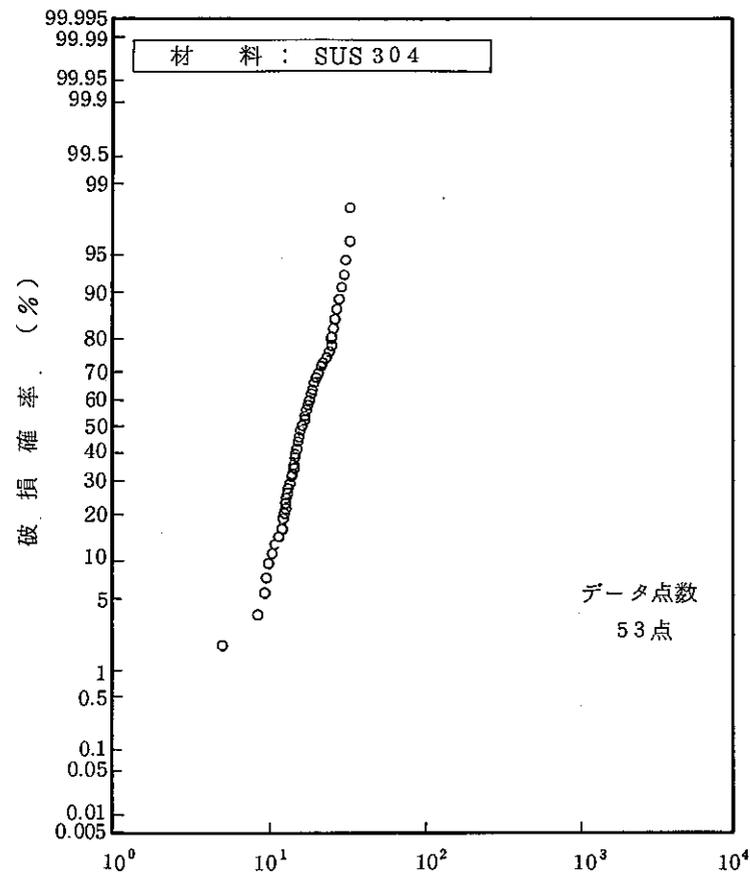
図 F.A. 2 くり返しに伴う応力緩和挙動例



図FA. 3 D\*\*策定に際しての材料の繰返し特性に対する考え方



クリープ疲労寿命の予測値  
(予測は  $\alpha_R = 10$ ,  $\alpha_C = 1$  による)



クリープ疲労寿命の実測値と予測値の比  
(予測はクリープひずみの  $\alpha_C = 1$ ,  
クリープ破断の  $\alpha_R = 10$  による)

図 FA. 4 (1) 材料試験データによる確認 (SUS 304)

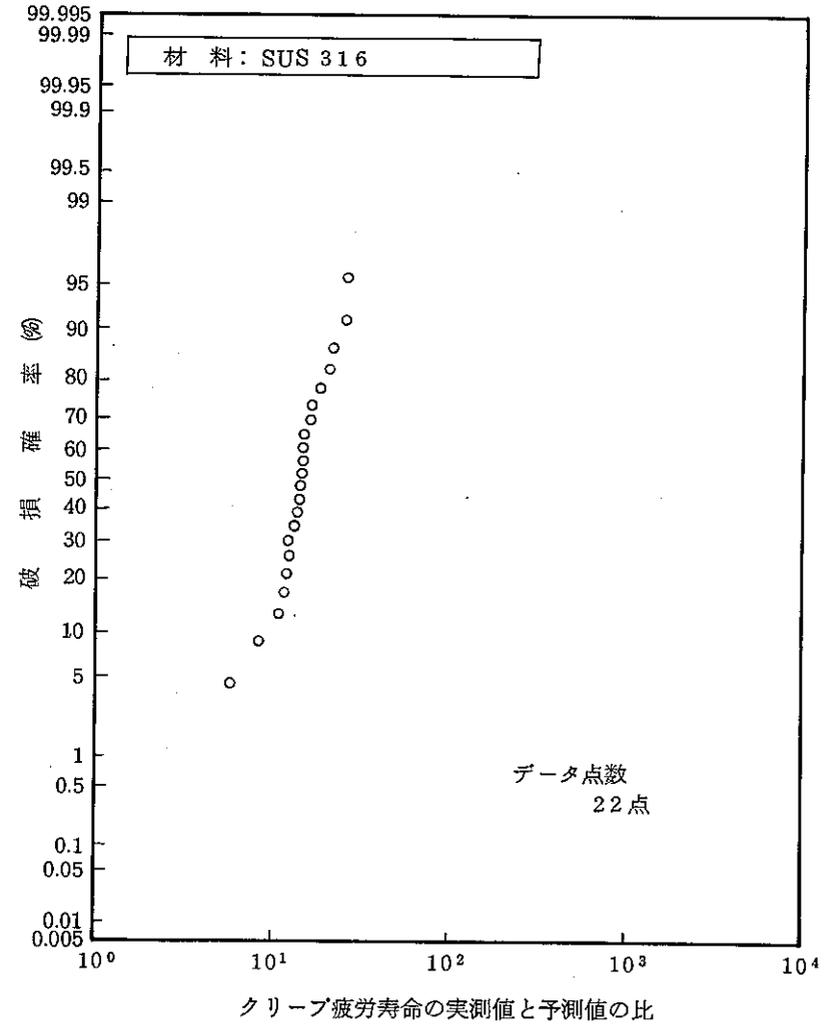
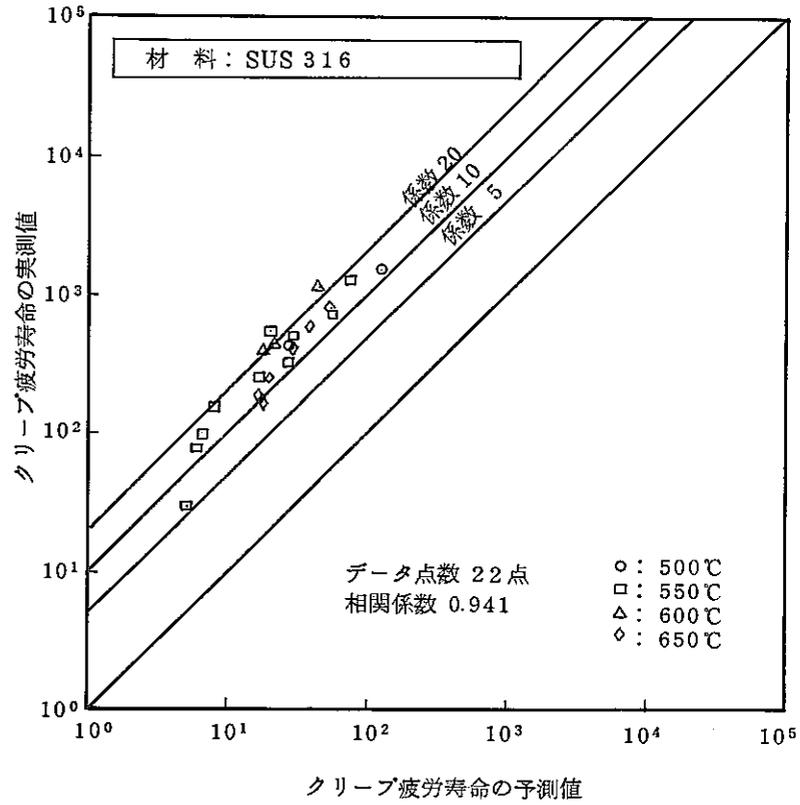


図 F A. 4 (2) 材料試験データによる確認 (SUS 316)

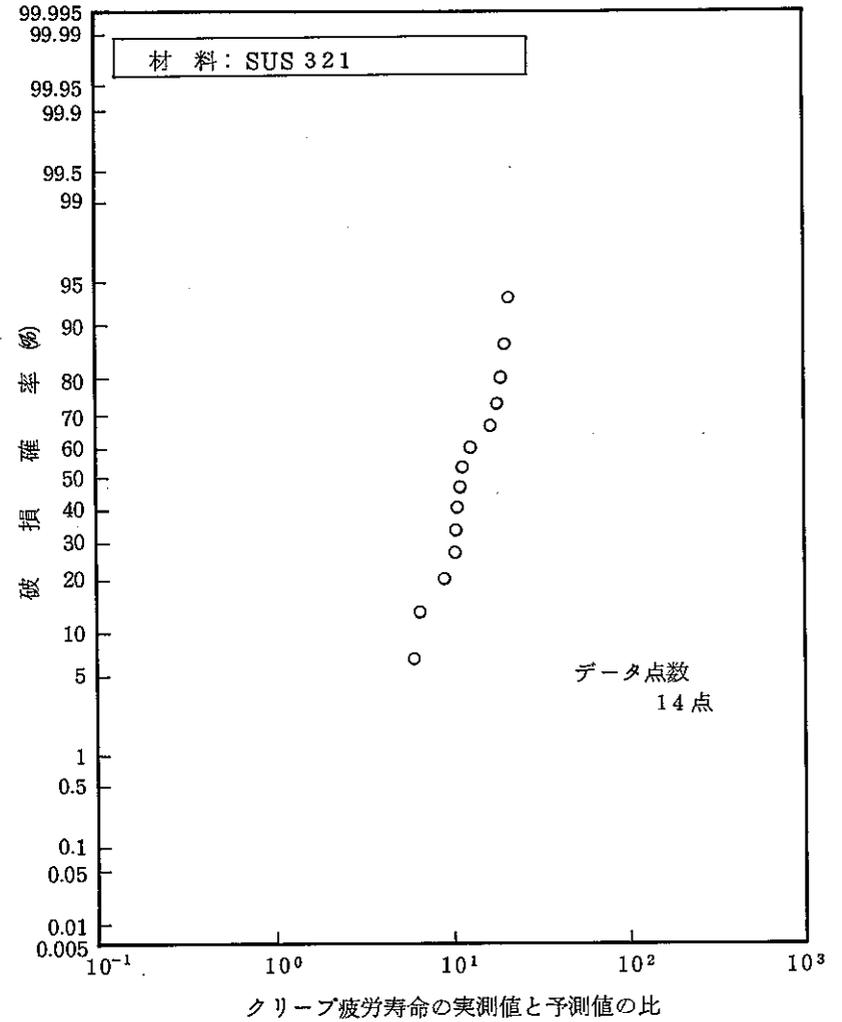
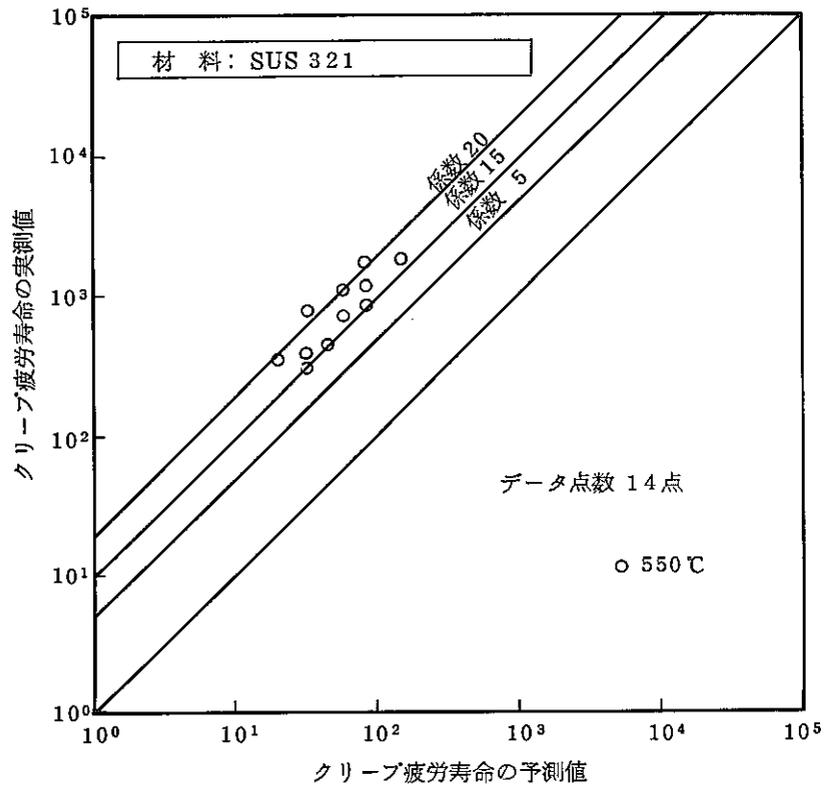


図 F A. 4 (3) 材料試験データによる確認 (SUS 321 伝熱管)

クリープ疲労寿命予測の信頼度

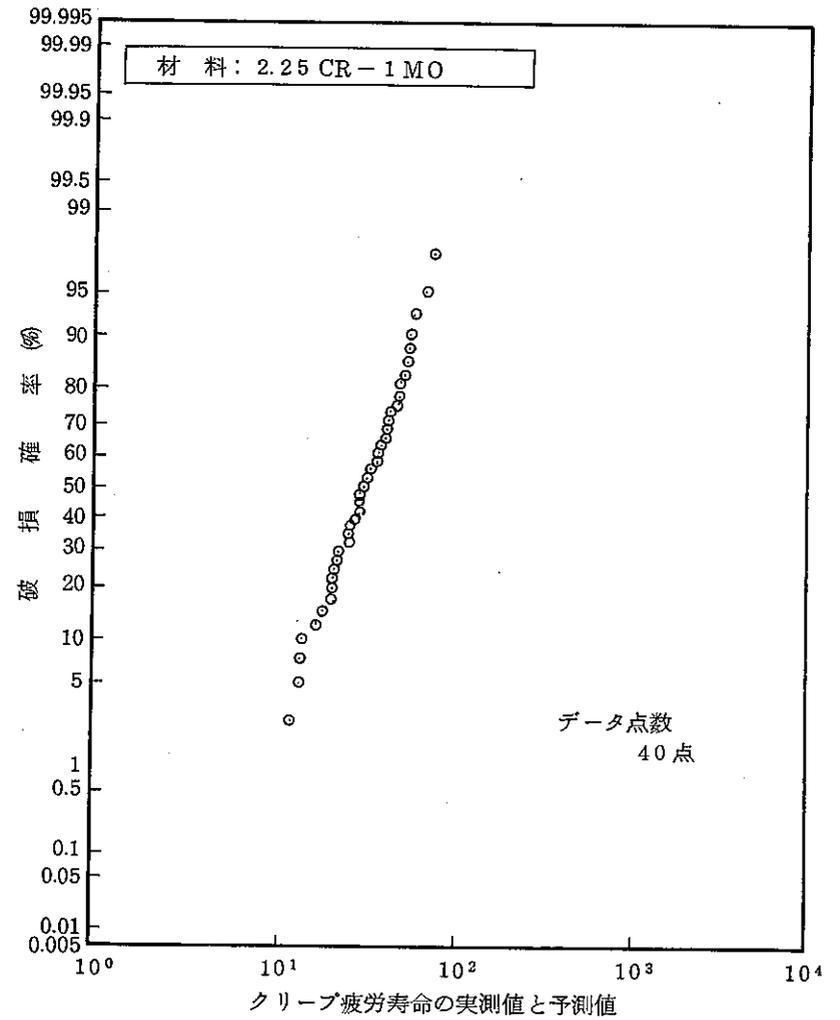
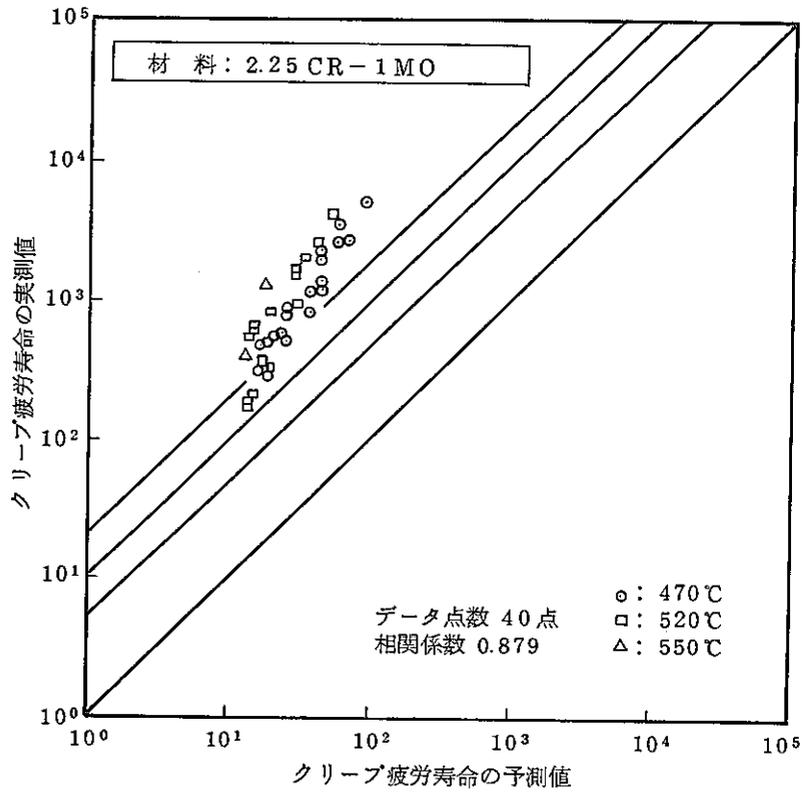


図 F A. 4 (4) 材料試験データによる確認 (  $2\frac{1}{4}$  Cr - 1 Mo (NT) )

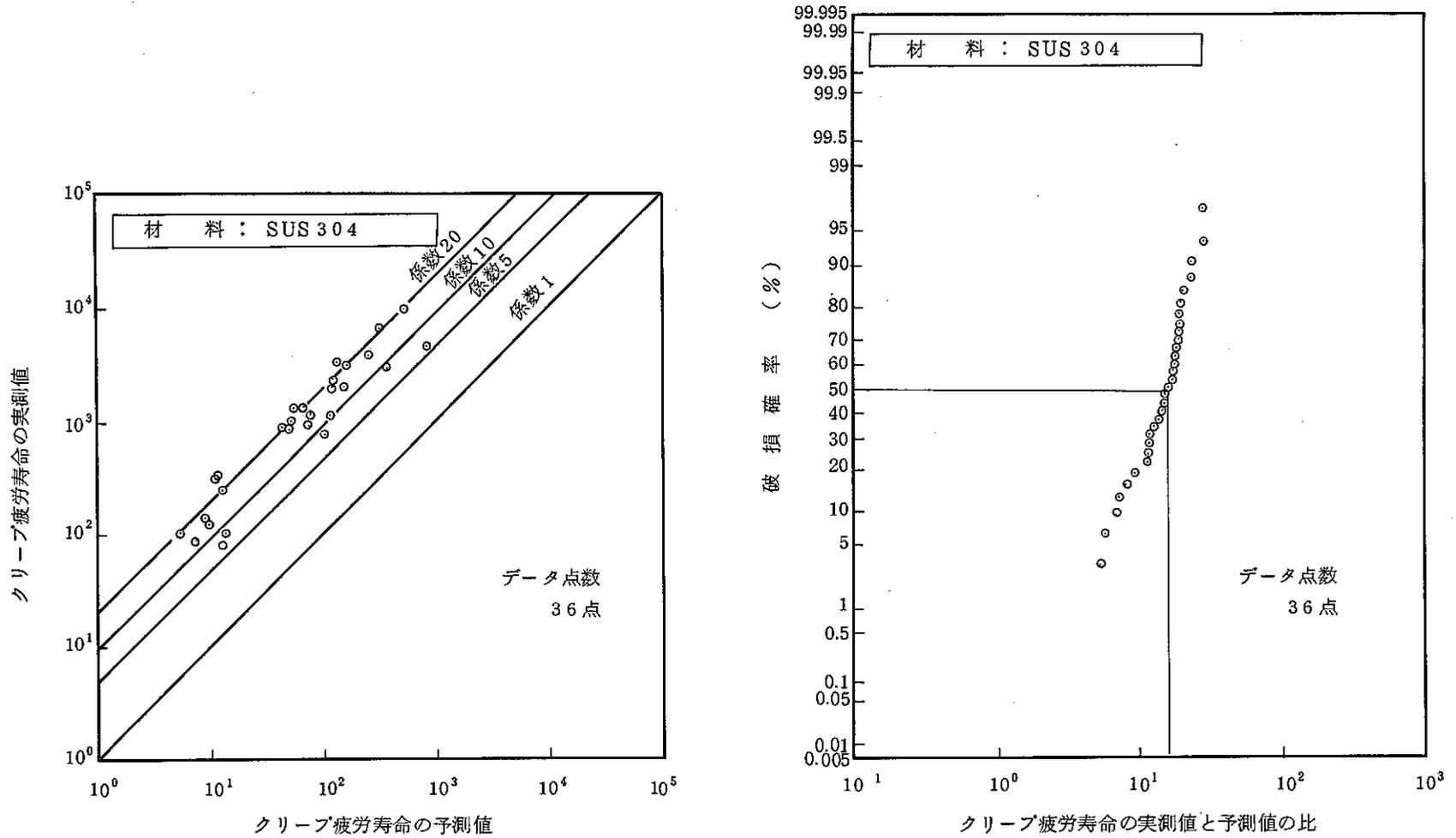


図 FA. 5 構造物試験データによる確認 (SUS 304)

7. 動的応力ひずみ関係式の策定方法及びひずみ速度  $10^{-3}$  mm/mm/sec の動的応力ひずみ関係式を使用する理由は以下に示すとおりである。

- ① ひずみ制御対称三角波による高温疲労試験データの調査結果に基づき、データベースを作成する。ただし、伝熱管の薄肉円筒試験片によるデータ及び SUS 316 に関する(社)日本溶接協会 FCI 小委員会データは、平均疲労破損式のとおり理由で除外する。
- ② 解析に用いる回帰式の型としては Ludwik の式を採用する。ただし、比例限  $\sigma_p$  は単調負荷に対する弾塑性応力-ひずみ関係式の値をそのまま適用する。
- ③ まず SUS 304 に対して、ひずみ速度を含めた解析を実施した。このとき下記の回帰式を用いた。

$$\log_{10} (\Delta\sigma - \Delta\sigma_p) = a_0 + a_1 R + a_2 T + a_3 R^2 + a_4 TR + a_5 T^2 + a_6 R^3 + a_7 R^2 T + a_8 RT^2 + a_9 T^3 + a_{10} S + a_{11} TS + a_{12} T^2 S$$

ただし、 $T = T_c / 100$  ( $T_c$  は温度, °C),  $R = \log_{10} \dot{\epsilon}$  ( $\dot{\epsilon}$  はひずみ速度, mm/mm/sec),  $S = \log_{10} \Delta\epsilon_p$  ( $\Delta\epsilon_p$  は塑性ひずみ範囲, mm/mm),  $\Delta\sigma$  は応力範囲 (kg/mm<sup>2</sup>) である。

ひずみ速度依存性は、動的ひずみ時効とクリープ効果が複雑に作用するため、上記のような単純な回帰式では図 FA.6 に示すように十分なあてはめは得られなかった。ひずみ速度に関する内挿性はあるが、ひずみ速度が遅い側への外挿性に関しては不十分であった。このため、ひずみ速度効果を含めた表示式はその適用に際しては十分注意を用することとした。

- ④ ひずみ速度をデータが最も多い  $10^{-3}$  mm/mm/sec と指定した場合、動的ひずみ時効あるいはクリープ効果が十分に評価できないという問題があるが、データ量が多く回帰式そのものに対する信頼性は高い。このため、動的ひずみ時効あるいはクリープ効果は別途配慮するとして、ここでいう動的応力-ひずみ関係式としては  $10^{-3}$  mm/mm/sec のひずみ速度の場合を採用した。回帰式は下記による。

$$\log_{10} (\Delta\sigma - \Delta\sigma_p) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 S + a_5 TS + a_6 T^2 S + a_7 T^3 S$$

ただし、各記号は③の場合と同じである。

この結果を表 FA.2 に示す。また、解析結果とデータの対応を図 FA.7 に示す。

これに対し、動的ひずみ時効により、ひずみ速度が遅い場合あるいはひずみ保持等を伴う場合において、応力範囲が  $10^{-3}$  mm/mm/sec のひずみ速度による三角波のデータよりも大

きくなる可能性がある。しかし、現実の適用を考えた場合、 $D_c + D_f \leq D$ の制限があり、通常<sup>\*\*</sup> $D$ が厳しくなる温度域では $D_c \geq 0.3$ となるため、許容される繰返し数は最大でも高々 $0.3 N_d$  ( $N_d$ は別表 1.11 ~ 13 で与えられる許容繰返し数)に過ぎない。SUS 304 に関してはひずみ速度が遅くなると応力範囲が大きくなるのは 450 °C から 500 °C の近隣であるが、 $10^{-3}$  mm/mm/sec のひずみ速度における応力範囲は、破損繰返し回数  $N_f / 2$  近傍の値を採っているため、図 F.A.8 に示すように繰返し回数が少なければ  $10^{-4}$  mm/mm/sec のひずみ速度における応力範囲より小さい。他の鋼種についても同様のことがいえる。しかも、 $10^{-4}$  mm/mm/sec のひずみ速度の場合は別表 1.12 が適用されるので、さらに繰返し回数は少なくなる。

このため、逆に遅いひずみ速度あるいはひずみ保持により熱軟化が生じる場合には、極めて保守的な緩和開始の初期応力を与えることになるが、ここでは設計上の簡便さと長時間外挿に対する不確定さを考慮して、 $10^{-3}$  mm/mm/sec のひずみ速度による連続サイクル対称三角波の場合に対する動的応力-ひずみ曲線を採用している。

表FA.2(1) SUS 304 の動的応力-ひずみ関係式

⊙  $\Delta\sigma / 2 > \sigma_p$  のとき

$$\log_{10} (\Delta\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \cdot \log_{10} (\Delta\varepsilon_t - \Delta\sigma / E)$$

⊙  $\Delta\sigma / 2 \leq \sigma_p$  のとき

$$\Delta\sigma = E \cdot \Delta\varepsilon_t$$

使用単位

T : 温度 (°C)       $425 \leq T \leq 650$

$\Delta\sigma$  : 応力範囲 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\Delta\varepsilon_t$  : 全ひずみ範囲 (mm/mm)

E : 縦弾性係数 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_p$  : 比例限 (kg/mm<sup>2</sup>)

$A_0$	$0.9772687 + 0.6446708 \times 10^{-2} \times T - 0.4675557 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.3724201 \times 10^{-8} \times T^3$
$A_1$	$3.690128 - 0.1847969 \times 10^{-1} \times T + 0.3544927 \times 10^{-4} \times T^2 - 0.2297822 \times 10^{-7} \times T^3$
E	$2.10236 \times 10^4 - 9.71895 \times T$
$\sigma_p$	$25.5655 - 5.58937 \times 10^{-2} \times T + 1.04384 \times 10^{-4} \times T^2 - 7.42535 \times 10^{-8} \times T^3 - (44.3068 - 1.78933 \times 10^{-2} \times T) \times (0.002)^{0.279335 + 7.749 \times 10^{-6} \times T}$

表FA.2 (2) SUS 316 動的応力-ひずみ関係式

⊙  $\Delta\sigma / 2 > \sigma_p$  のとき

$$\log_{10} (\Delta\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \cdot \log_{10} (\Delta\epsilon_t - \Delta\sigma / E)$$

⊙  $\Delta\sigma / 2 \leq \sigma_p$  のとき

$$\Delta\sigma = E \cdot \Delta\epsilon_t$$

使用単位

T : 温度 (°C)       $425 \leq T \leq 650$

$\Delta\sigma$  : 応力範囲 (kg / mm<sup>2</sup>)

$\Delta\epsilon_t$  : 全ひずみ範囲 (mm / mm)

E : 縦弾性係数 (kg / mm<sup>2</sup>)

$\sigma_p$  : 比例限 (kg / mm<sup>2</sup>)

$A_0$	$4.139556 - 0.4434273 \times 10^{-2} \times T + 0.1354228 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.1593061 \times 10^{-8} \times T^3$
$A_1$	$2.171727 - 0.7045263 \times 10^{-2} \times T + 0.7832692 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.2083600 \times 10^{-8} \times T^3$
E	$2.10236 \times 10^4 - 9.71895 \times T$
$\sigma_p$	$26.8073 - 5.04547 \times 10^{-2} \times T + 8.03901 \times 10^{-5} \times T^2 - 5.11282 \times 10^{-8} \times T^3$ $- (40.0909 - 9.69990 \times 10^{-3} \times T) \times (0.002)^{0.326245 + 6.13276 \times 10^{-5} \times T}$

表FA.2 (3) SUS 321 伝熱管の動的応力-ひずみ関係式

⊙  $\Delta\sigma / 2 > \sigma_p$  のとき

$$\log_{10} (\Delta\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \cdot \log_{10} (\Delta\epsilon_t - \Delta\sigma / E)$$

⊙  $\Delta\sigma / 2 \leq \sigma_p$  のとき

$$\Delta\sigma = E \cdot \Delta\epsilon_t$$

使用単位

T : 温度 (°C)       $425 \leq T \leq 600$

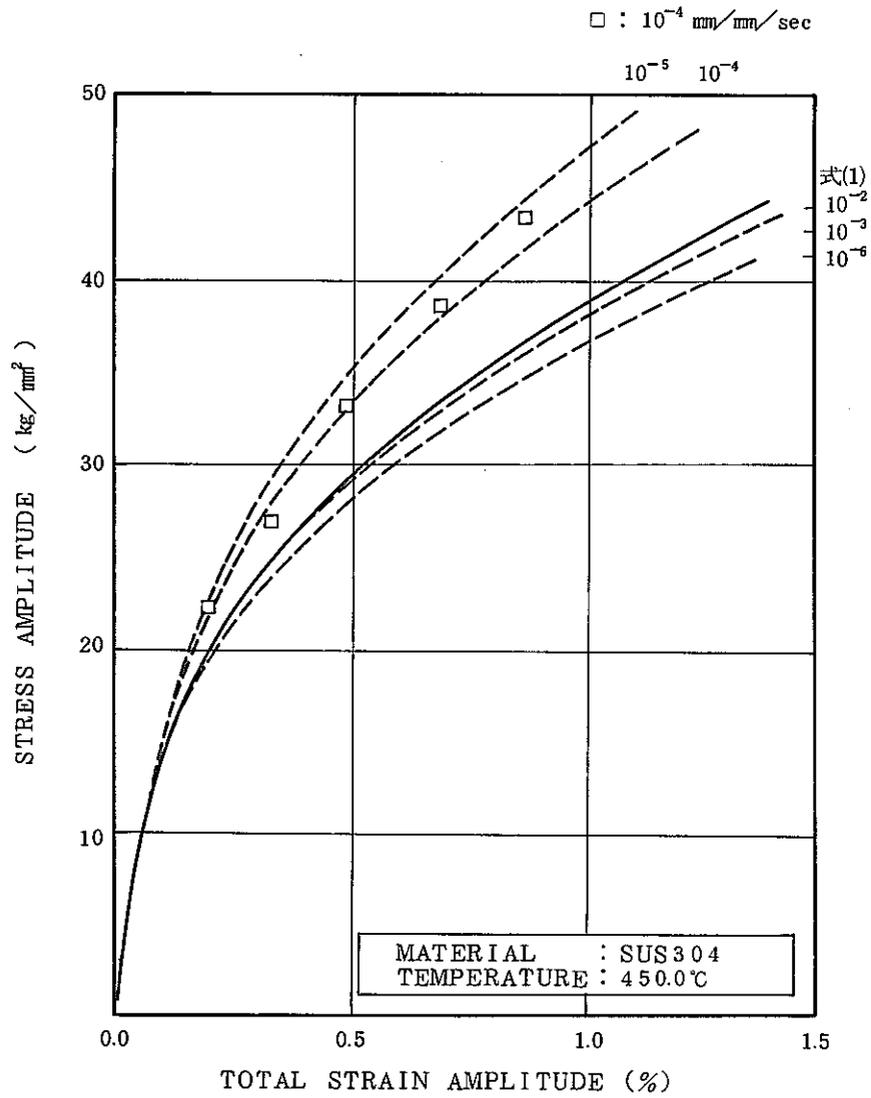
$\Delta\sigma$  : 応力範囲 (kg / mm<sup>2</sup>)

$\Delta\epsilon_t$  : 全ひずみ範囲 (mm / mm)

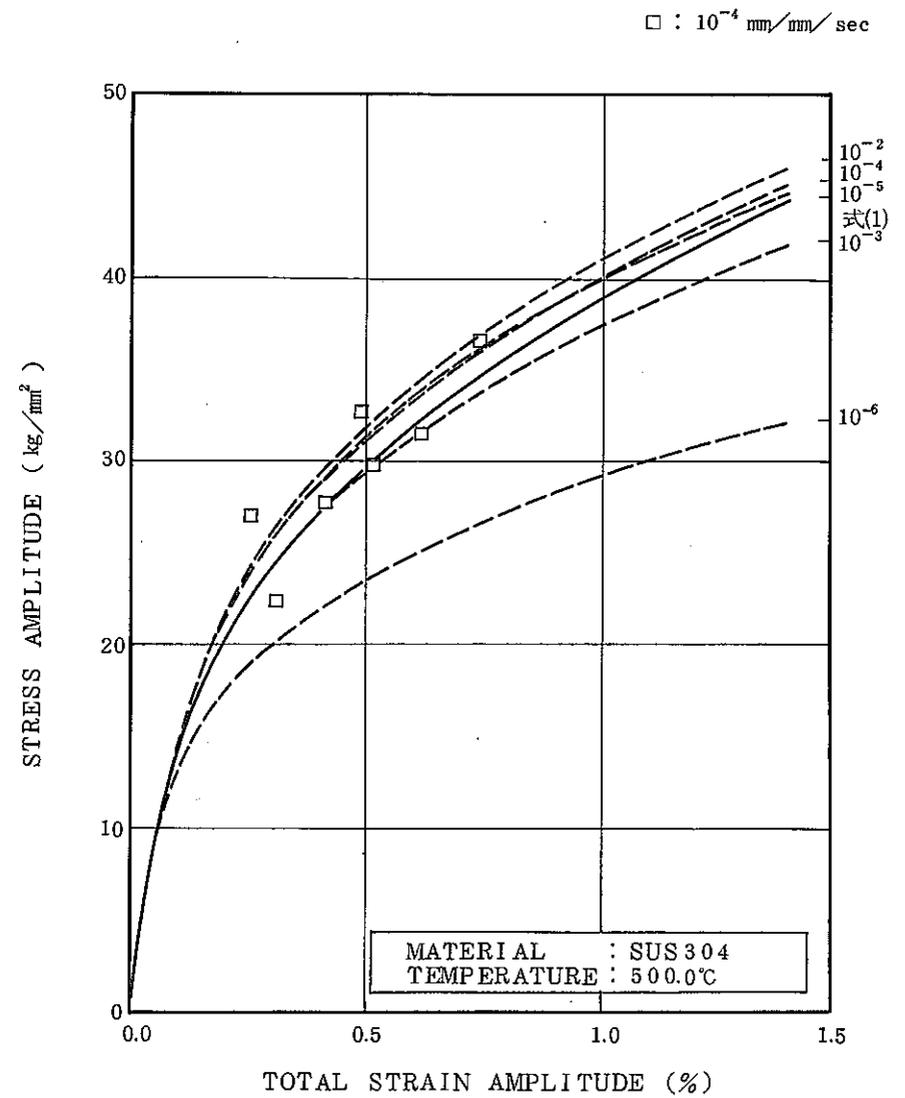
E : 縦弾性係数 (kg / mm<sup>2</sup>)

$\sigma_p$  : 比例限 (kg / mm<sup>2</sup>)

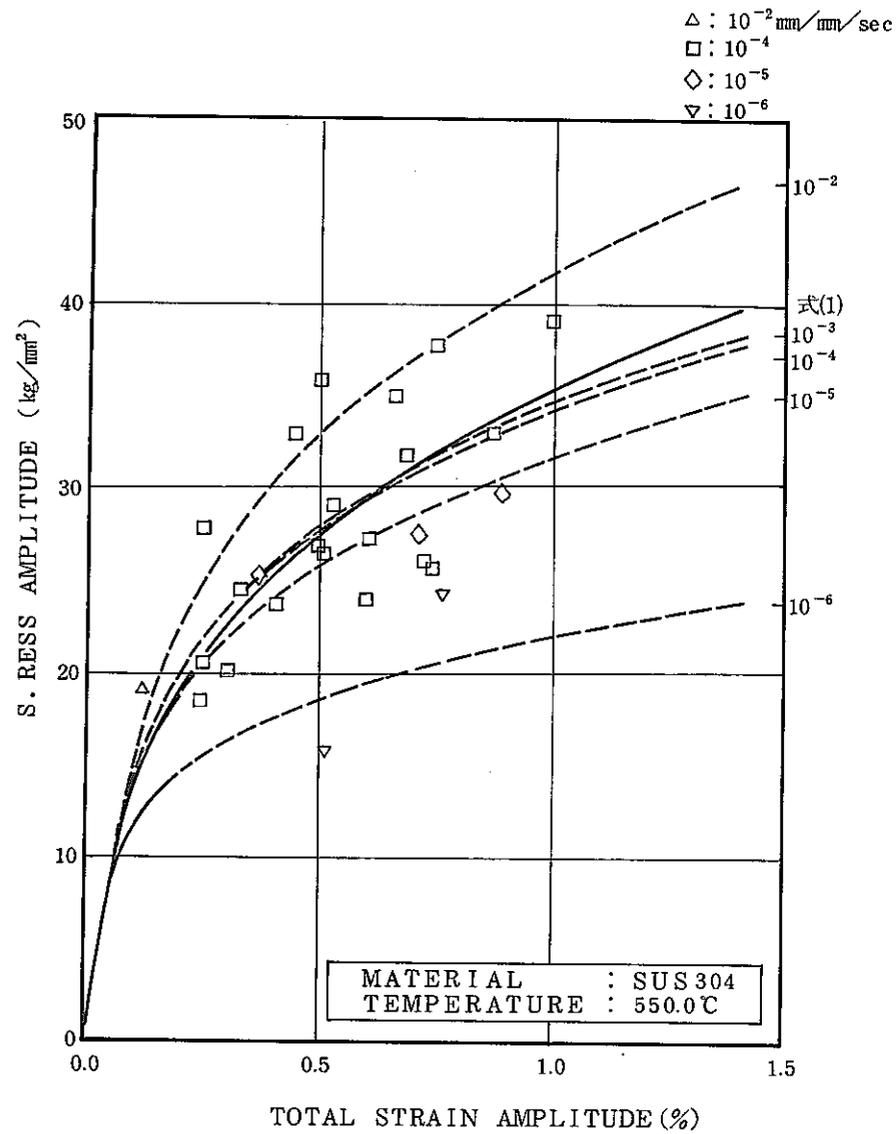
$A_0$	$39.77021 - 0.2107718 \times T + 0.3995122 \times 10^{-3} \times T^2 - 0.2548977 \times 10^{-6} \times T^3$
$A_1$	$20.53651 - 0.1135368 \times T + 0.2139214 \times 10^{-3} \times T^2 - 0.1355191 \times 10^{-6} \times T^3$
E	$2.10236 \times 10^4 - 9.71895 \times T$
$\sigma_p$	$24.4905 - 3.80298 \times 10^{-2} \times T + 6.15139 \times 10^{-5} \times T^2 - 4.06897 \times 10^{-8} \times T^3$ $- (59.517 - 2.6872 \times 10^{-2} \times T) \times 0.154992$



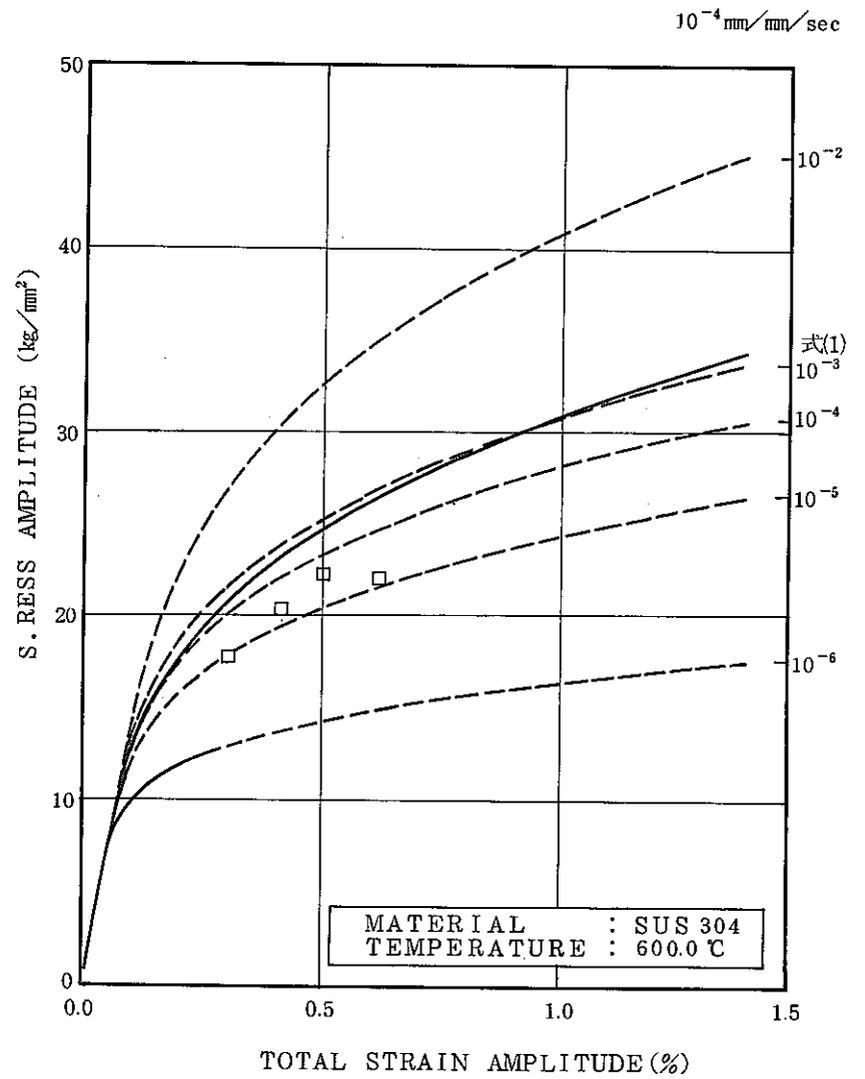
☒ FA. 6 - (1)



☒ FA. 6 - (2)



☒ FA. 6 - (3)



☒ FA. 6 - (4)

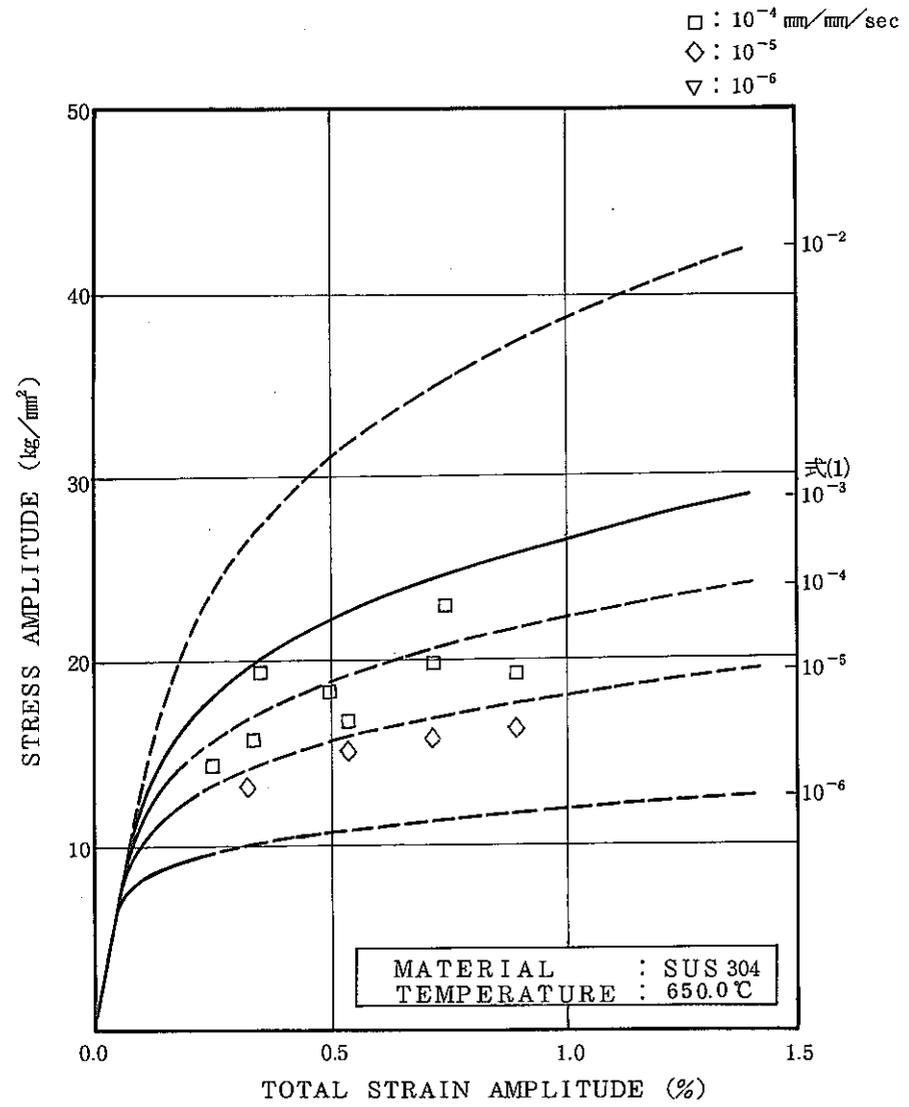


図 FA. 6 - (5)

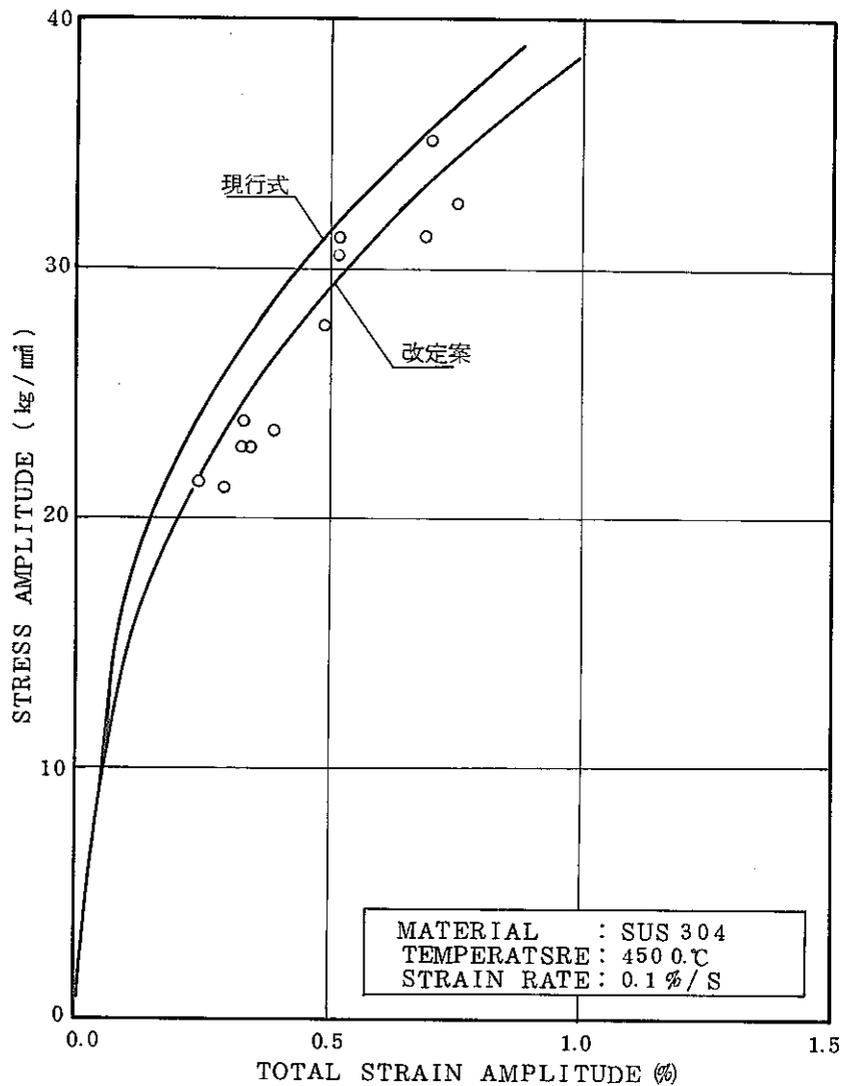


図 FA. 7 - (1) - (a)

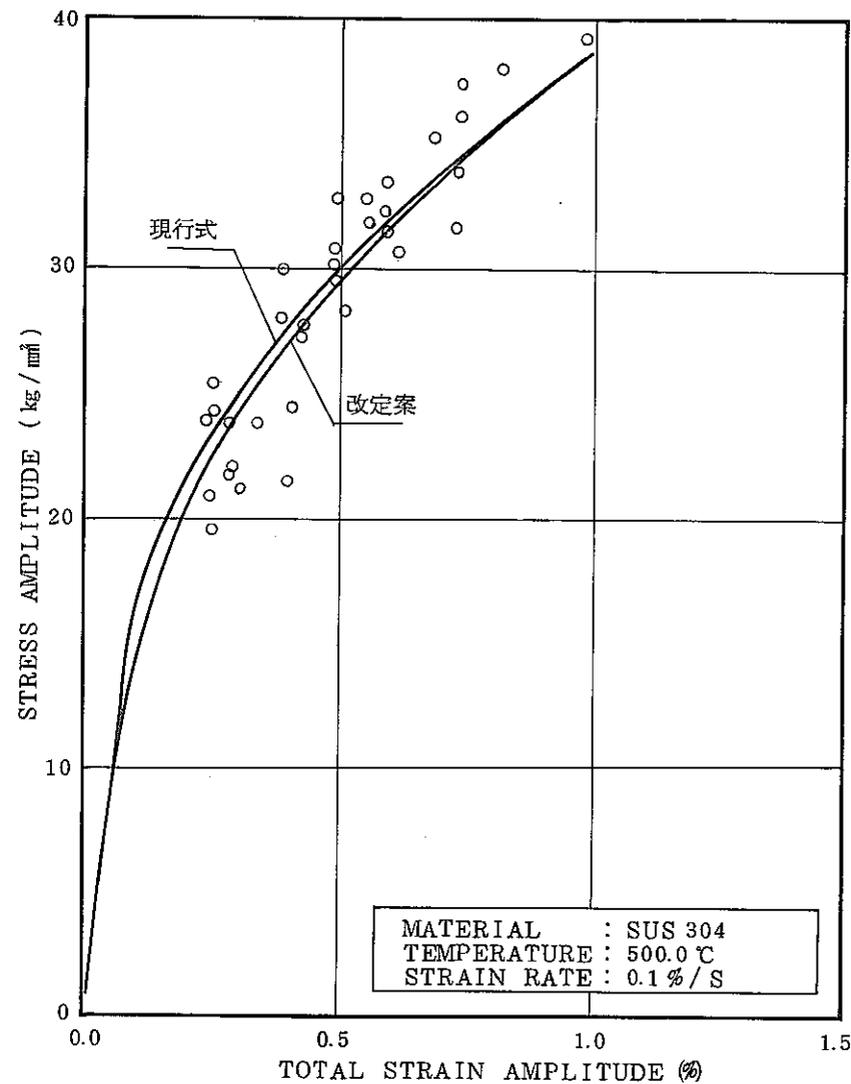


図 FA. 7 - (1) - (b)

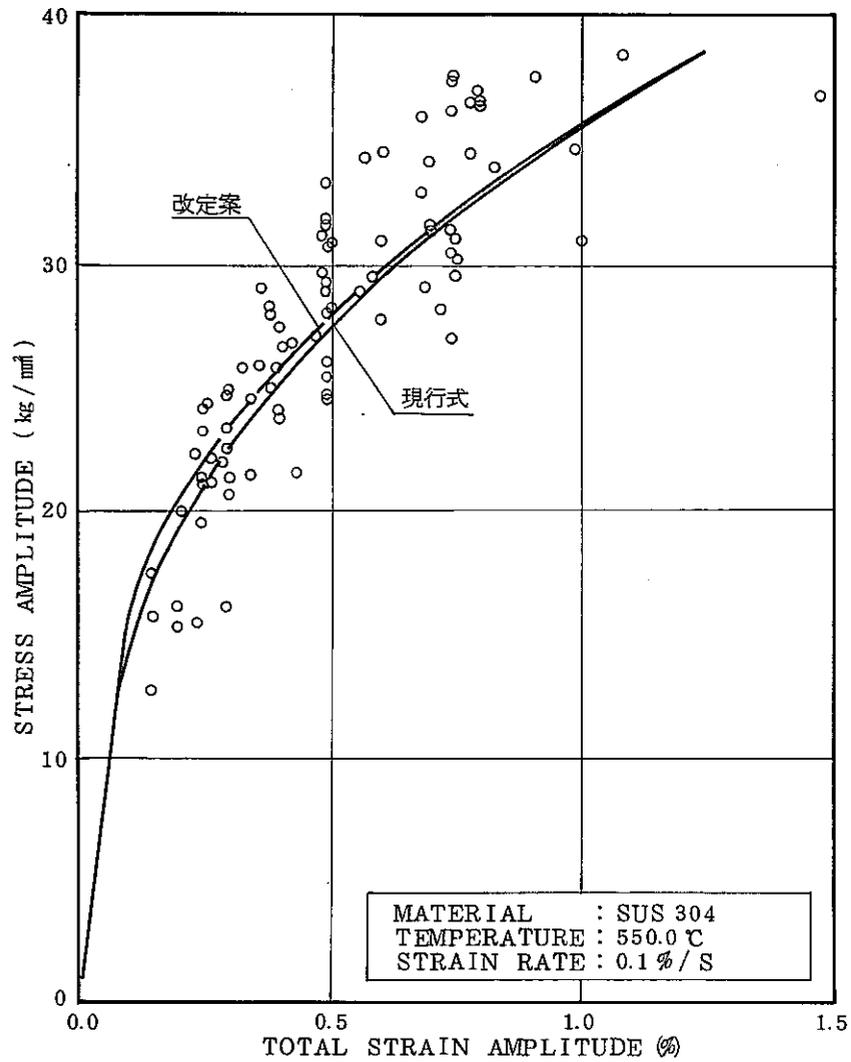


図 FA. 7 - (1) - (c)

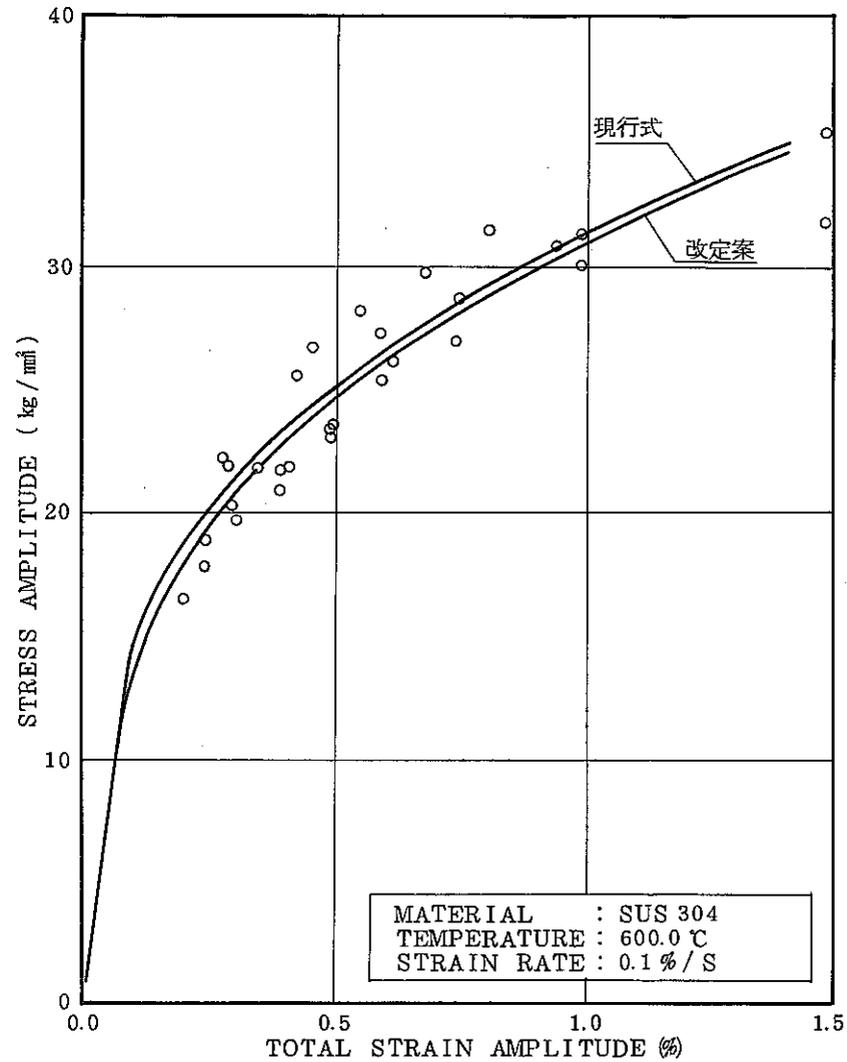


図 FA. 7 - (1) - (d)

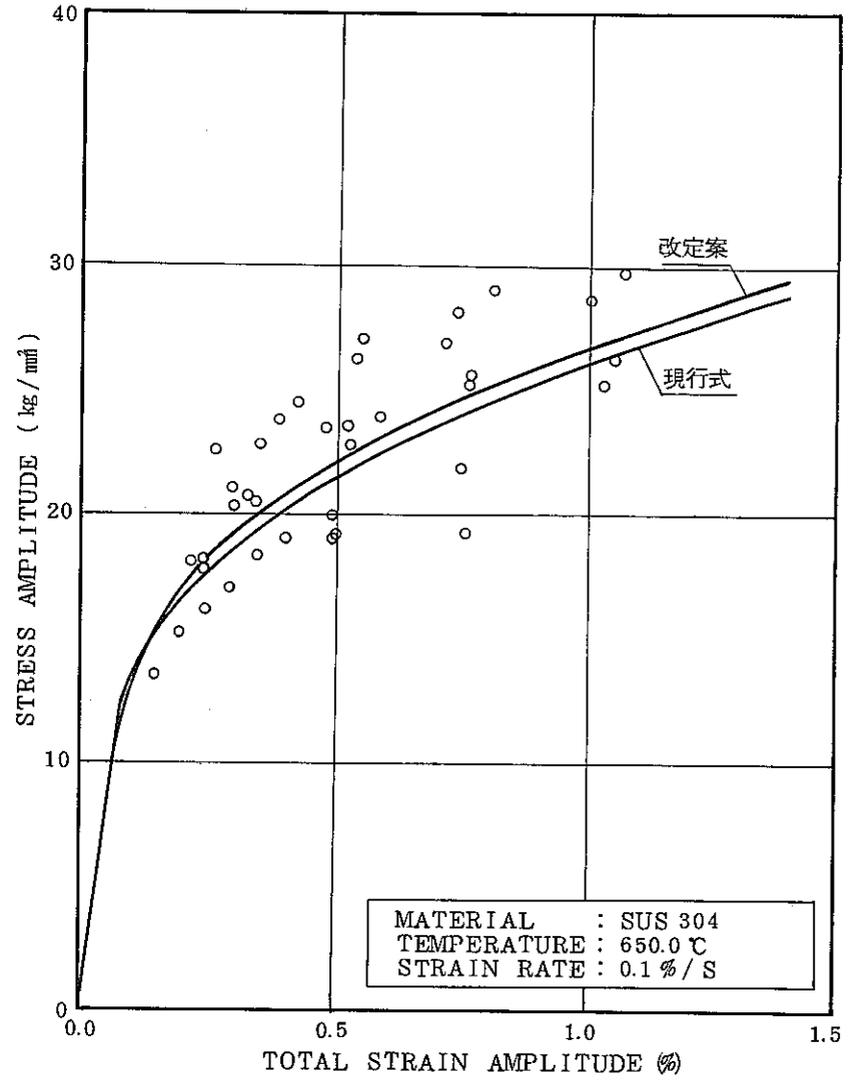
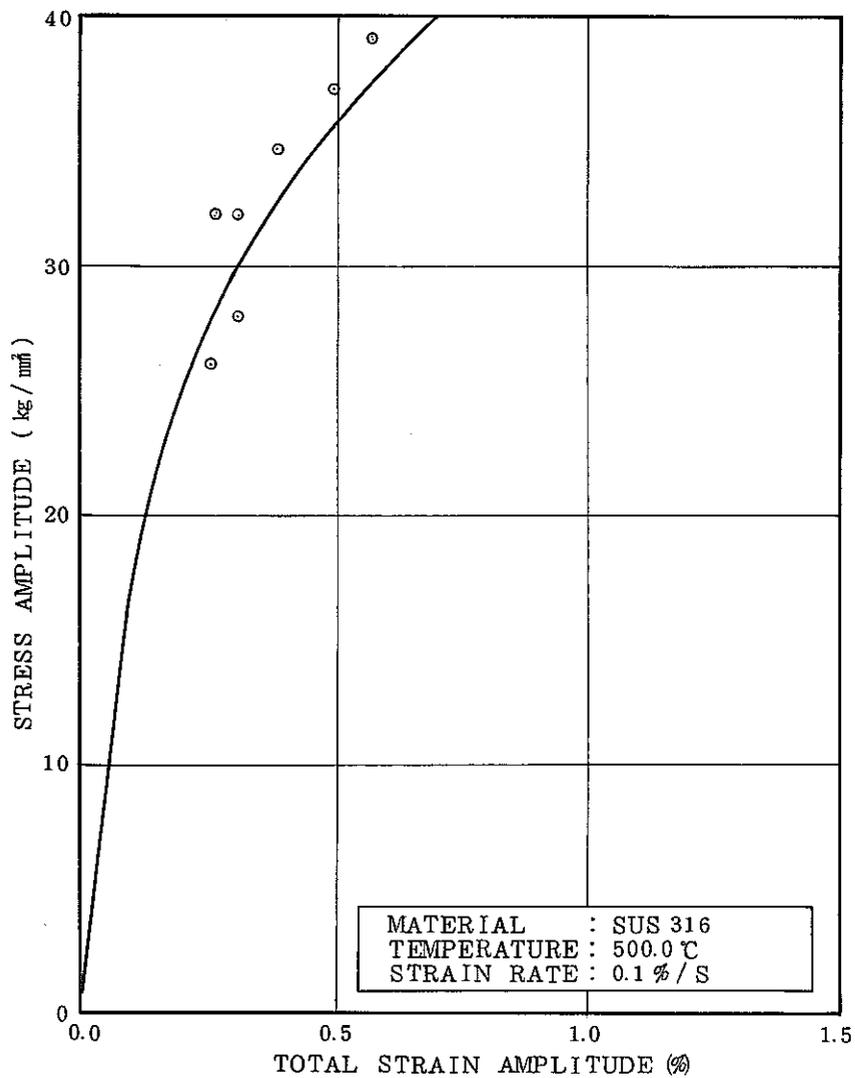
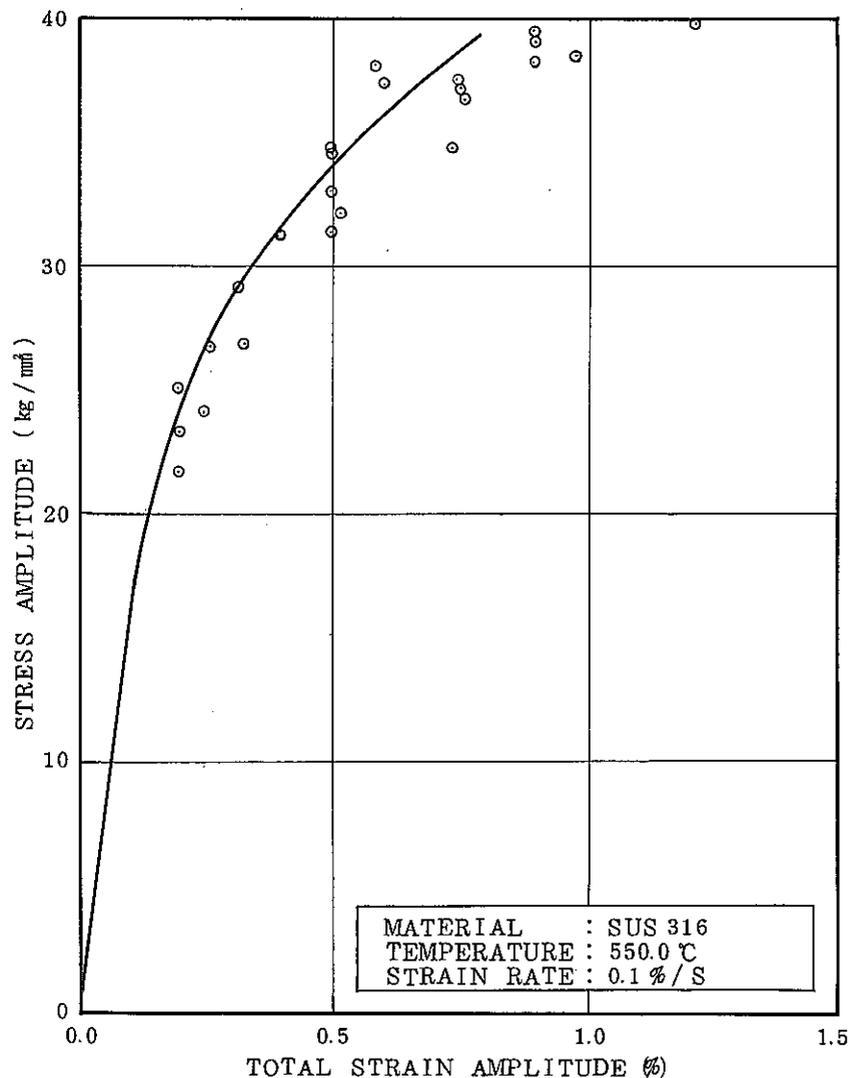


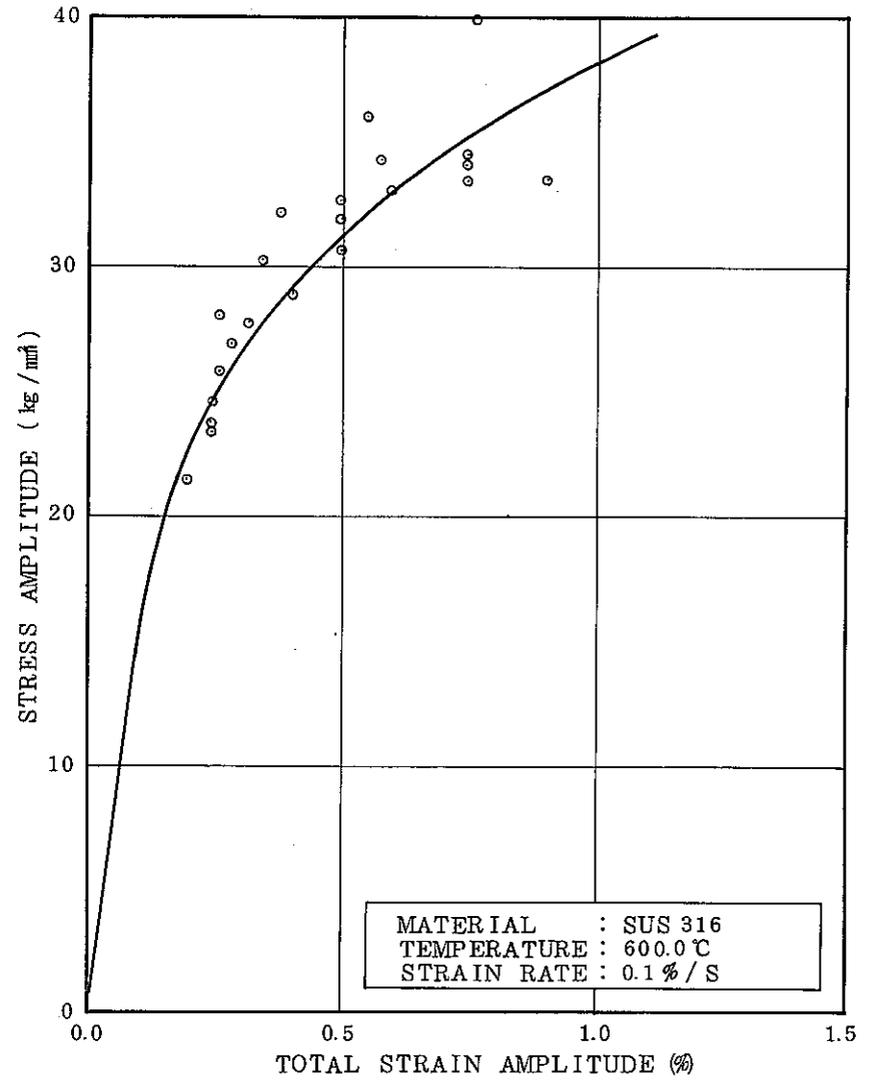
図 FA. 7 - (1) - (e)



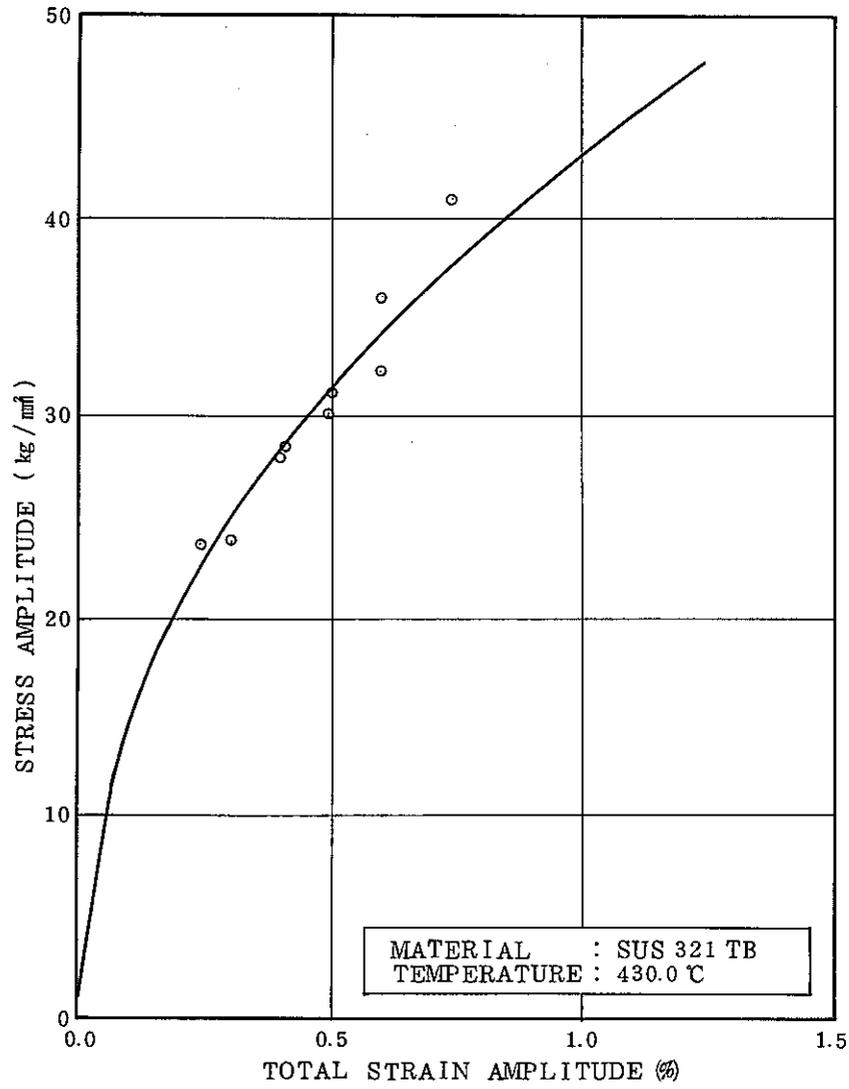
☒ FA. 7 - (2) - (a)



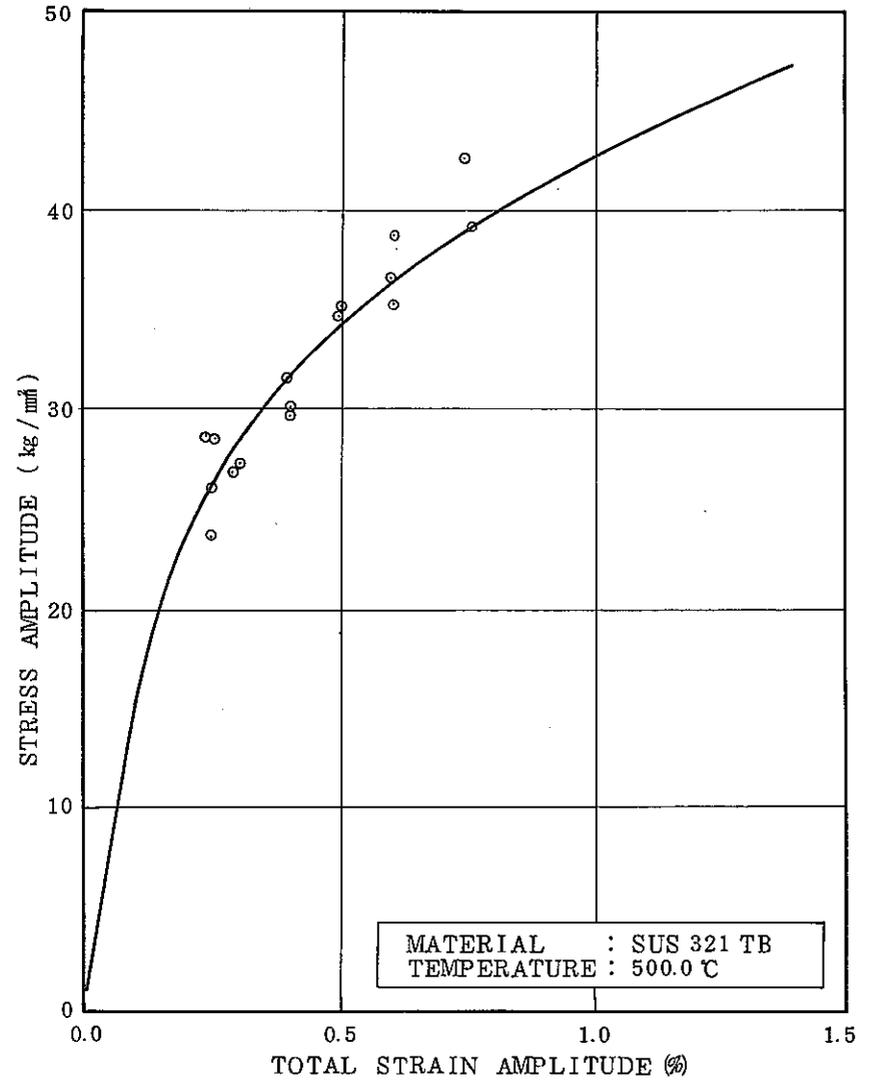
☒ FA. 7 - (2) - (b)



☒ FA. 7 - (2) - (c)



FA. 7 - (3) - (a)



FA. 7 - (3) - (b)

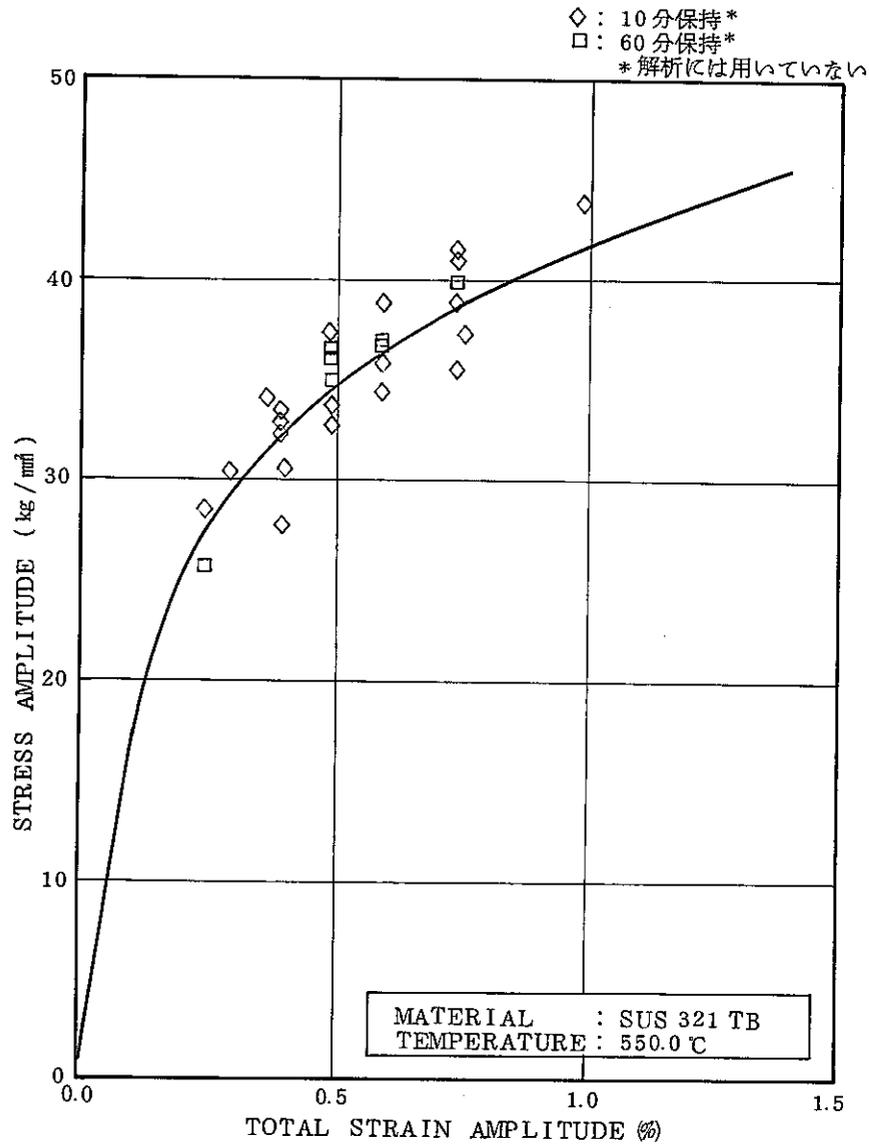


図 F A. 7 - (3) - (c)

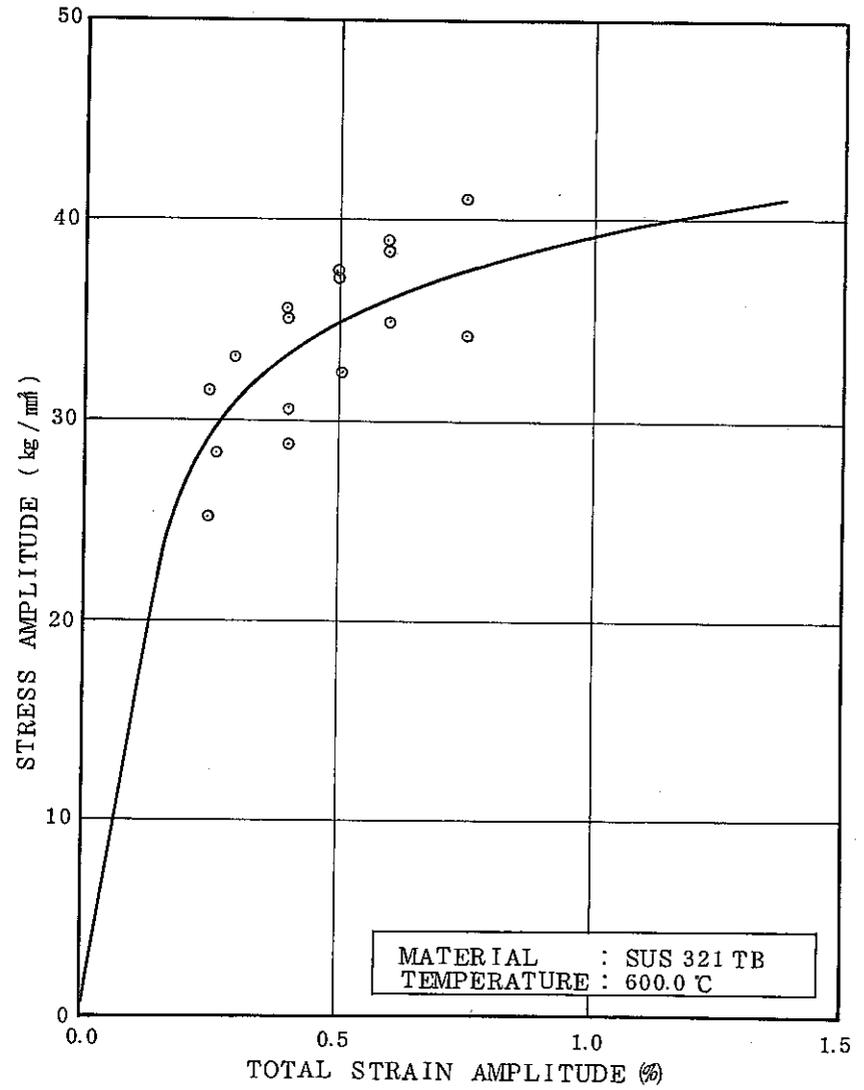
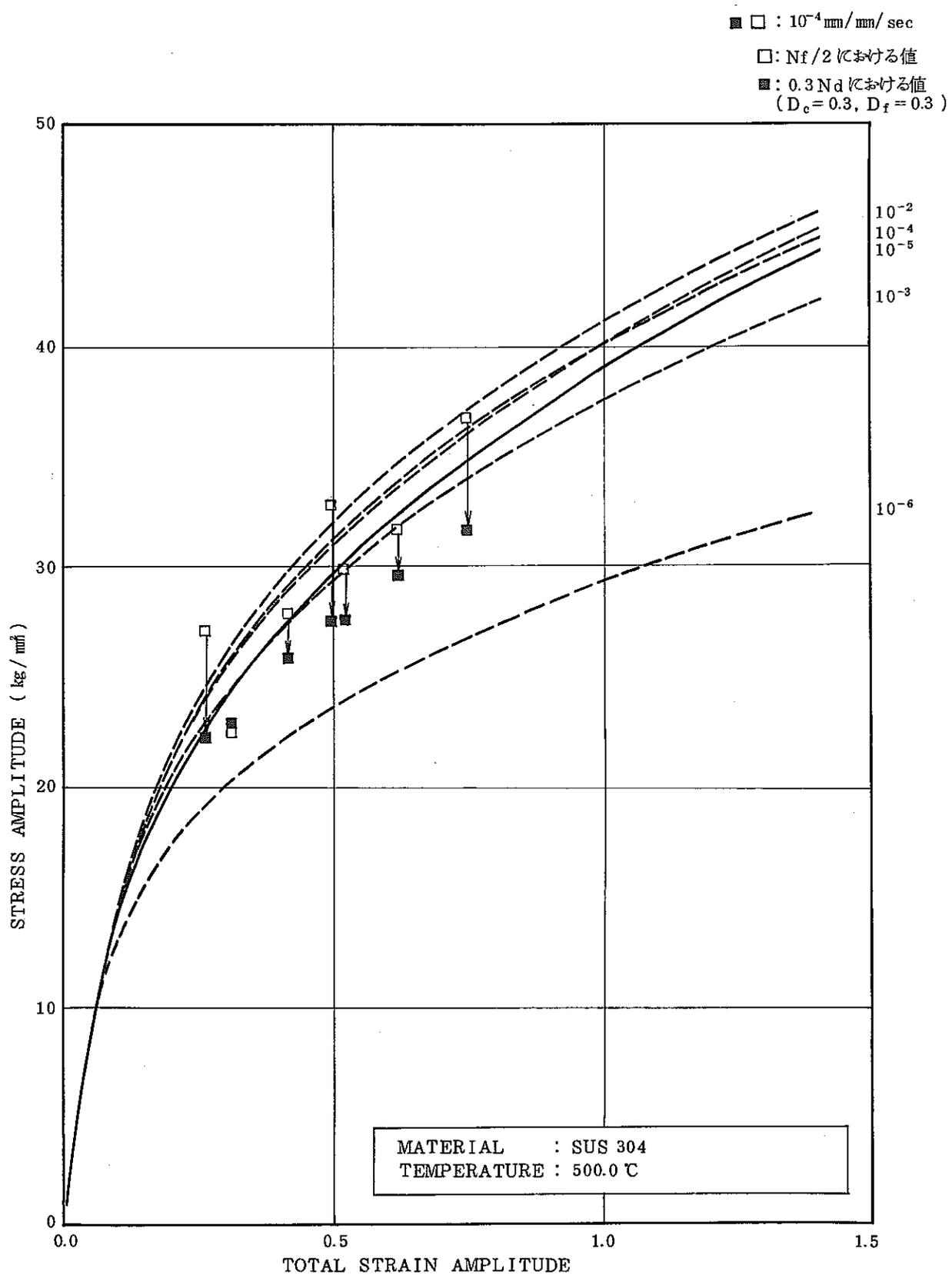


図 F A. 7 - (3) - (d)



☒ F A. 8

8. 付録Fでは、設計上簡便に $D^{**}$ が算出できるよう、簡易式により $D^{**}$ が算出できるようにしている。

簡易式による $D^{**}$ 値と詳細計算値との対応は図FA.9～図FA.12に示すとおりであり、簡易式は詳細計算値を保守的に包絡する値を与える。

9. SUS 304, SUS 316 及び SUS 321 伝熱管の簡易式策定方法は以下のとおりである。

① 温度 425 °C～650 °C, ひずみ範囲 0.1～4%, 応力水準 $S_g$ を設計クリープ破断時間が $10^2 \sim 3 \times 10^6$  hr となる応力として $D^{**}$ との関係をプロットすると図FA.13～図FA.15のようになる。

図FA.13～図FA.15より、各温度について応力水準 $S_g$ に依存しない直線で詳細計算値をほぼ包絡できることがわかる。

② 図FA.13～図FA.15について、勾配は各温度についての平均的勾配とし、かつ $D^{**} = 10^{-4} \sim 10^{-1}$ の区間のデータを包絡できるように直線を平行移動させて包絡線を定める。

ここで $D^{**}$ の区間を $10^{-4} \sim 10^{-1}$ としたのは、 $D^{**}$ と $S_i - S_g$ の両対数上での勾配は若干下に凸の傾向が示されており、全区間を包絡する直線の切片は厳密には若干大きくなるが、

イ)  $\epsilon_t > 3 \bar{S}_m / E$  を超えるひずみサイクルの回数は実際の設計では限られているので、 $D^{**}$ の下限値を $10^{-4}$ とすることが可能である。

ロ)  $D^{**} > 10^{-1}$  となるような著しく大きなひずみサイクルは、実際の設計においてあまり生じることは無いと考えられる。また、 $S_n \leq \beta_s \cdot 3 \bar{S}_m$   $\beta_s = 2.5$  等の制限で、高温構造設計では、ひずみ範囲は自ずと制限される。

ことから暫定的に定めたものである。

③ 上記のようにして定めた包絡傾向をプロットすると図FA.16のようになる。

勾配 $n_p$ については、絶対温度の逆数をパラメータとする1次式で表わすものとした。

④ SUS 304 については、包絡傾向は $S_i - S_g = 2 \text{ kg / mm}^2$  近傍でピボット点を有するような直線群となる。

簡易式としては、式の簡易さから、 $S_i - S_g = 1 \text{ kg / mm}^2$  をピボット点とする形で表わすものとした。 $S_i - S_g = 1 \text{ kg / mm}^2$  における $D^{**}$ 値( $D_{p0}$ )は各温度を包絡する値として $1.2 \times 10^{-4}$ とした。

⑤ SUS 316 については、 $T \geq 500 \text{ °C}$  で包絡傾向は $S_i - S_g = 1 \text{ kg / mm}^2$  近傍でピボット点を有する直線群となるが、 $T < 500 \text{ °C}$  では必ずしもピボット点を有しないような傾向を

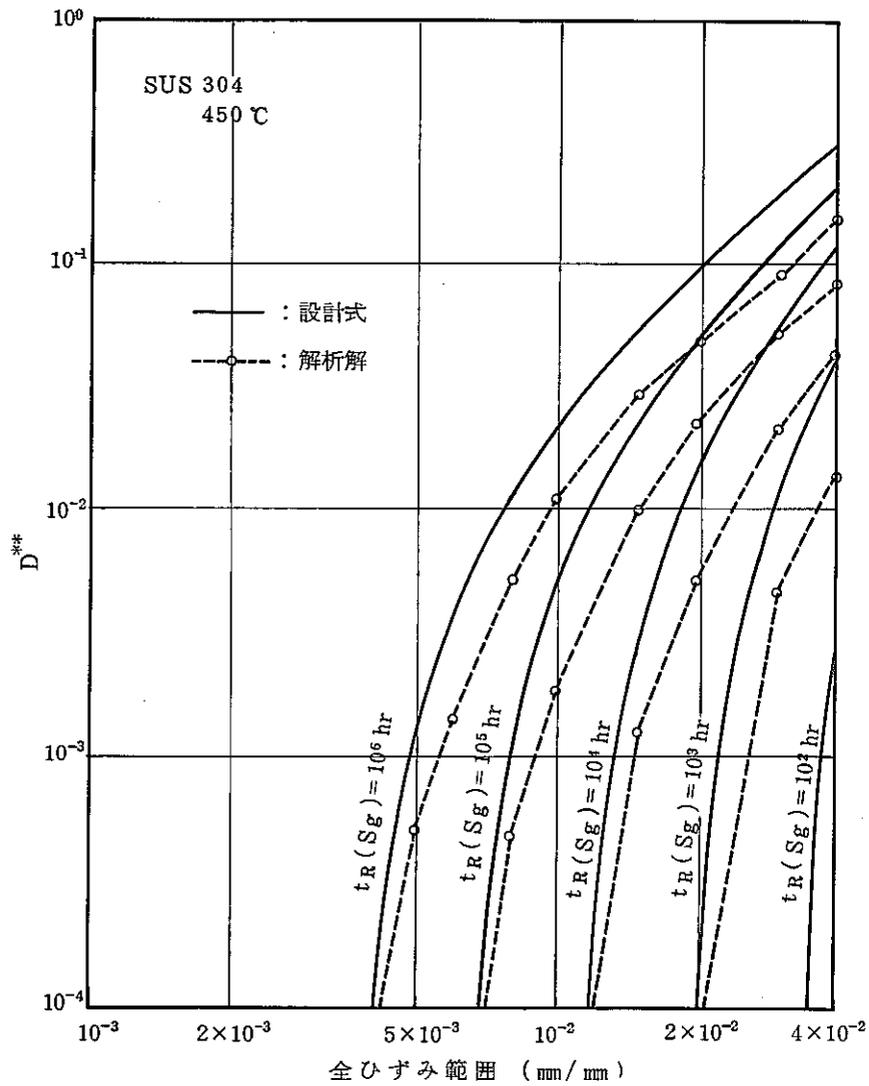
示す。

このため簡易式は、 $T \geq 500 \text{ }^\circ\text{C}$ では、 $S_i - S_g = 1 \text{ kg/mm}^3$ での $D^{**}$ 値 ( $D_{p0}$ )が $10^{-4}$ となる直線で表わし、 $T < 500 \text{ }^\circ\text{C}$ では、 $S_i - S_g = 1 \text{ kg/mm}^3$ の $D^{**}$ を包絡できる値を $D_{p0}$ として簡単な温度の関数で表わすものとした。

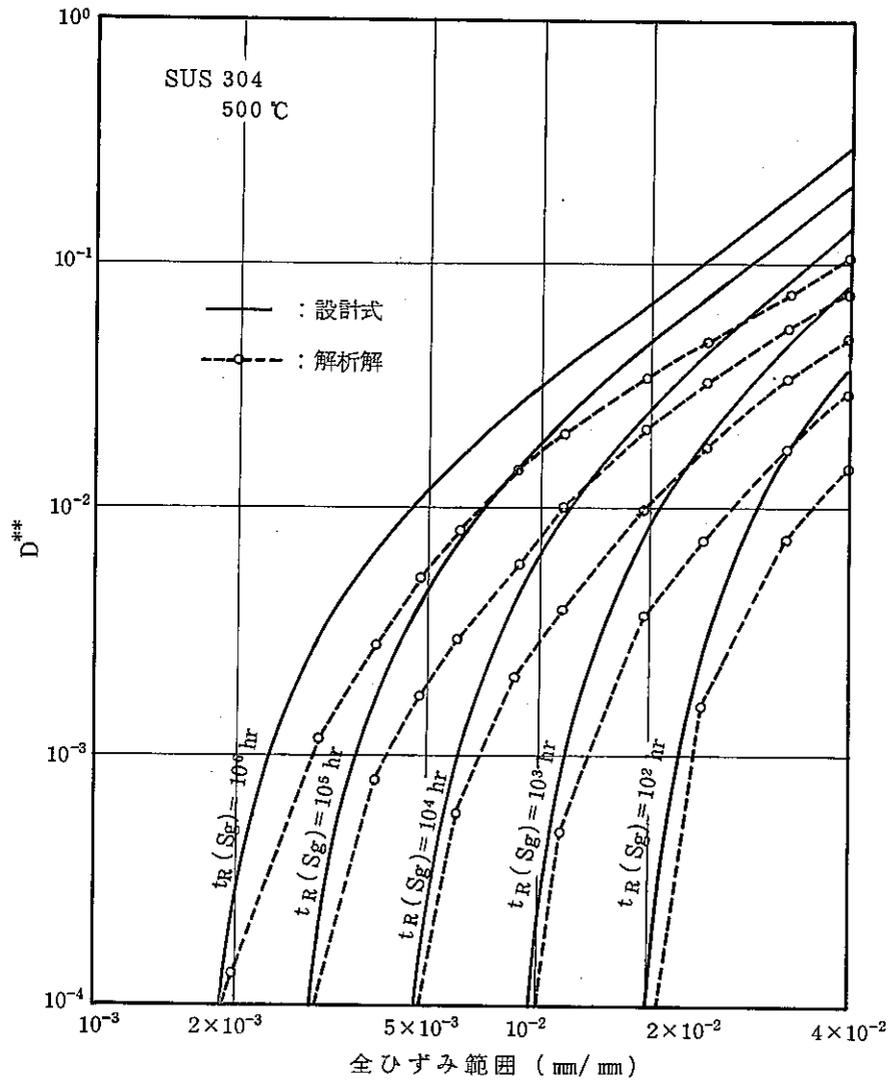
- ⑥ SUS 321 伝熱管については、高温低 ( $S_i - S_g$ ) 領域で $D^{**}$ と $S_i - S_g$ との両対数上の関係に折れ曲り傾向が著しくなってくる。

もんじゅでSUS 321 伝熱管を使用する部位 (蒸気発生器過熱器) の温度は、約 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度であるため、適用温度の上限を $550 \text{ }^\circ\text{C}$ として簡素な式で表わすものとした。

但し策定された簡易式は、図FA.15に示されるように、温度 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ についてもかなりの領域で保守的な評価値を与える。



図FA. 9 - (1)



図FA. 9 - (2)

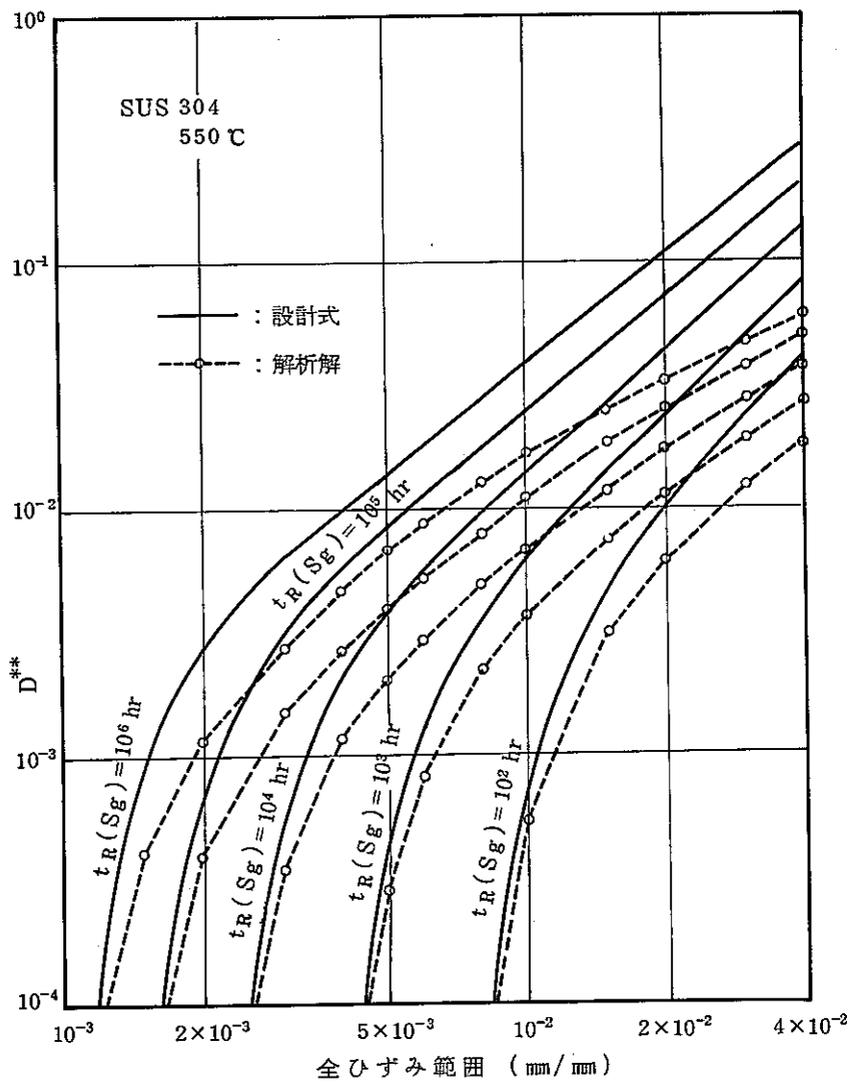


図 F A. 9 - (3)

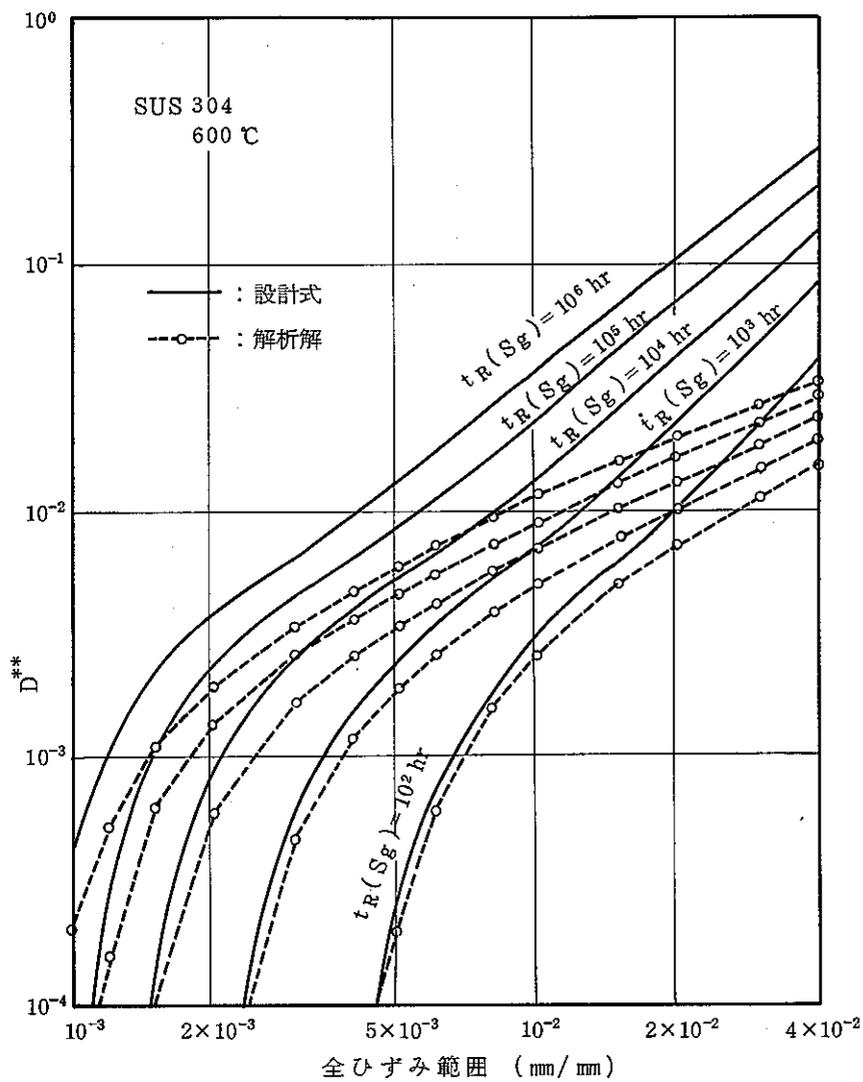
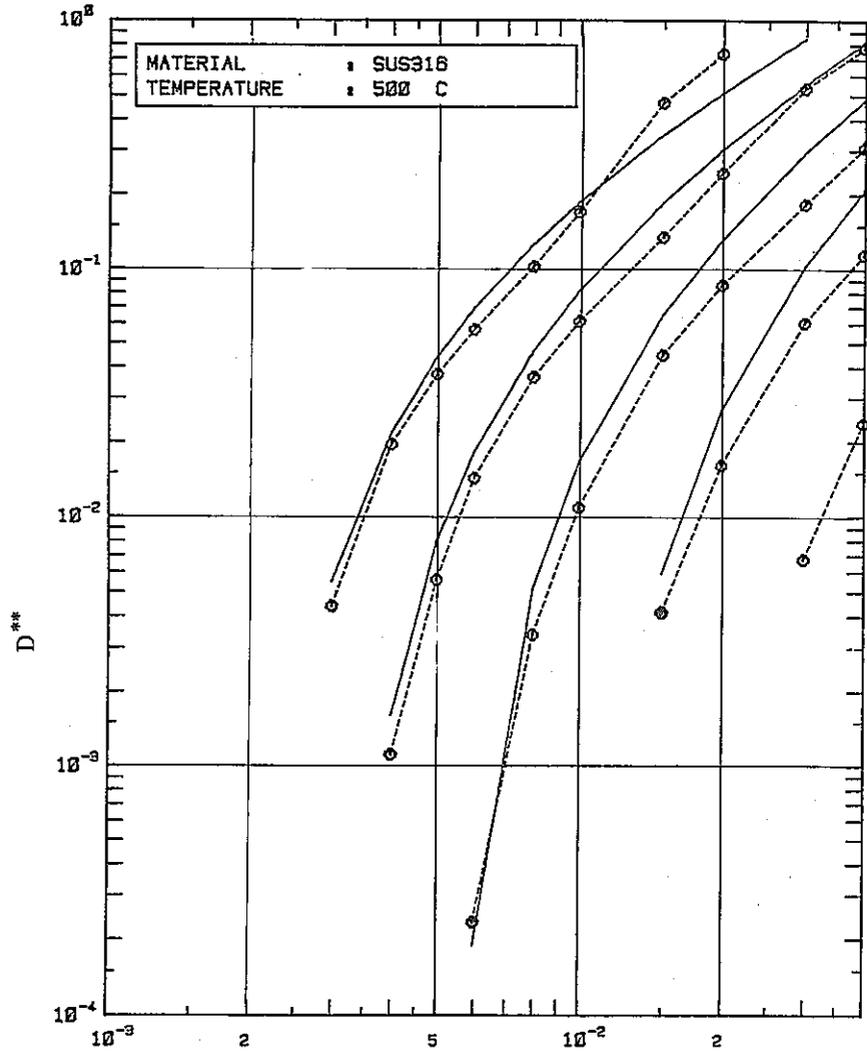
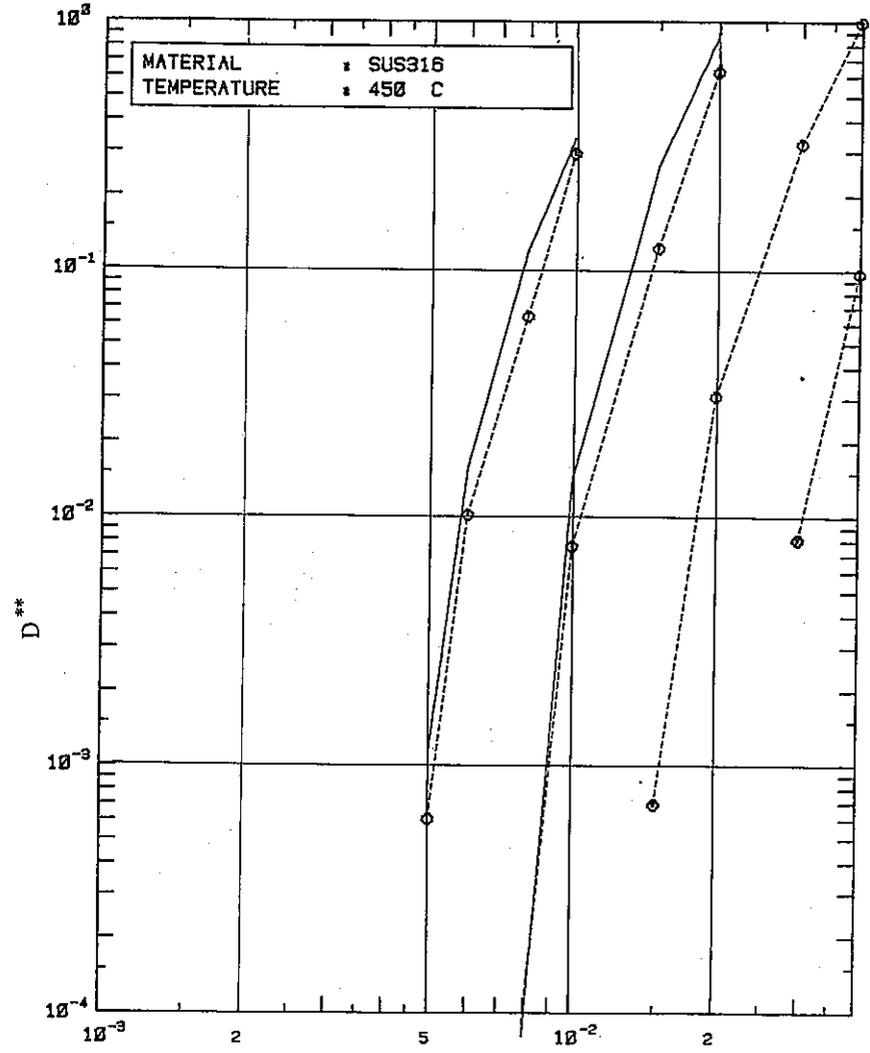


図 F A. 9 - (4)



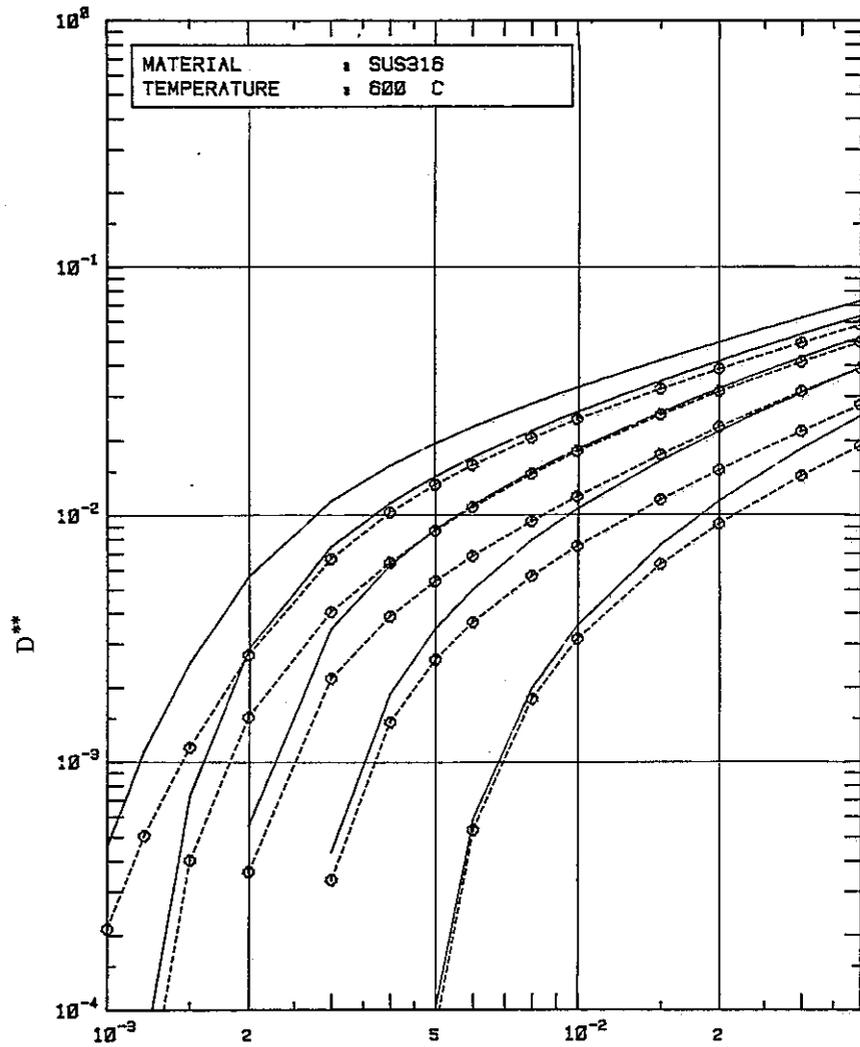
全ひずみ範囲 (mm/mm)

図 F A. 10 - (2)



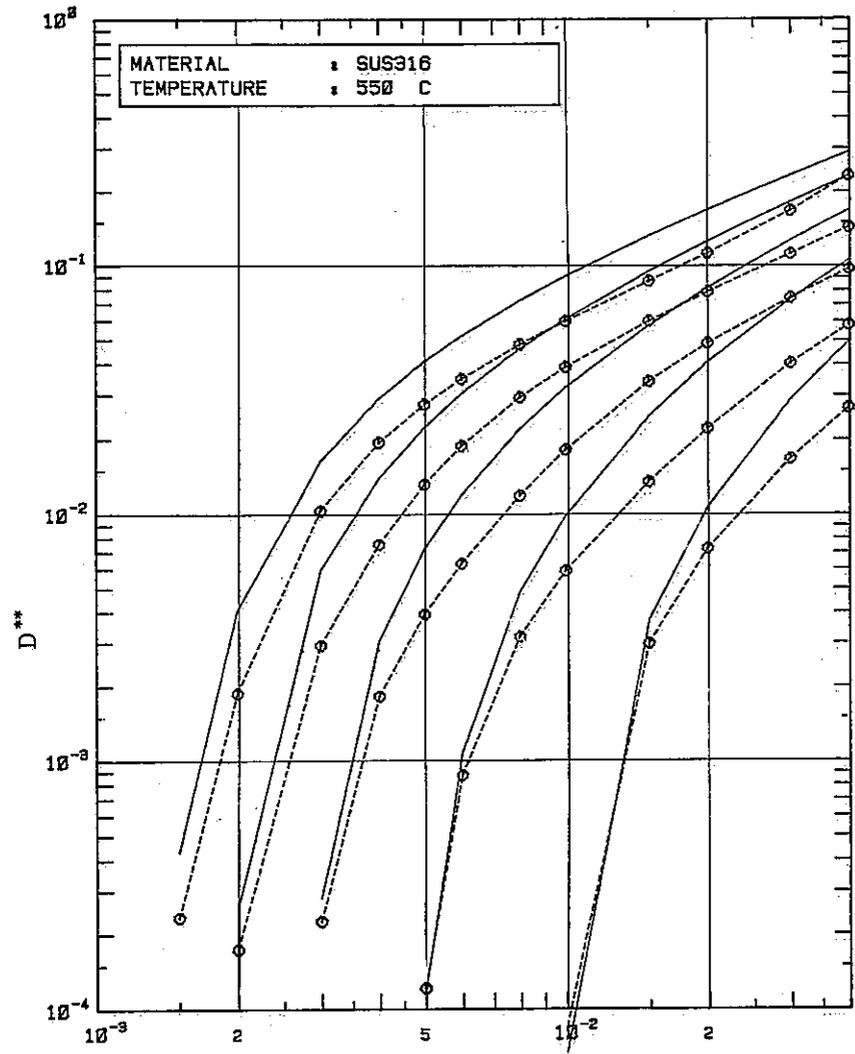
全ひずみ範囲 (mm/mm)

図 F A. 10 - (1)



全ひずみ範囲 (mm/mm)

図 F A. 10 - (4)



全ひずみ範囲 (mm/mm)

図 F A. 10 - (3)

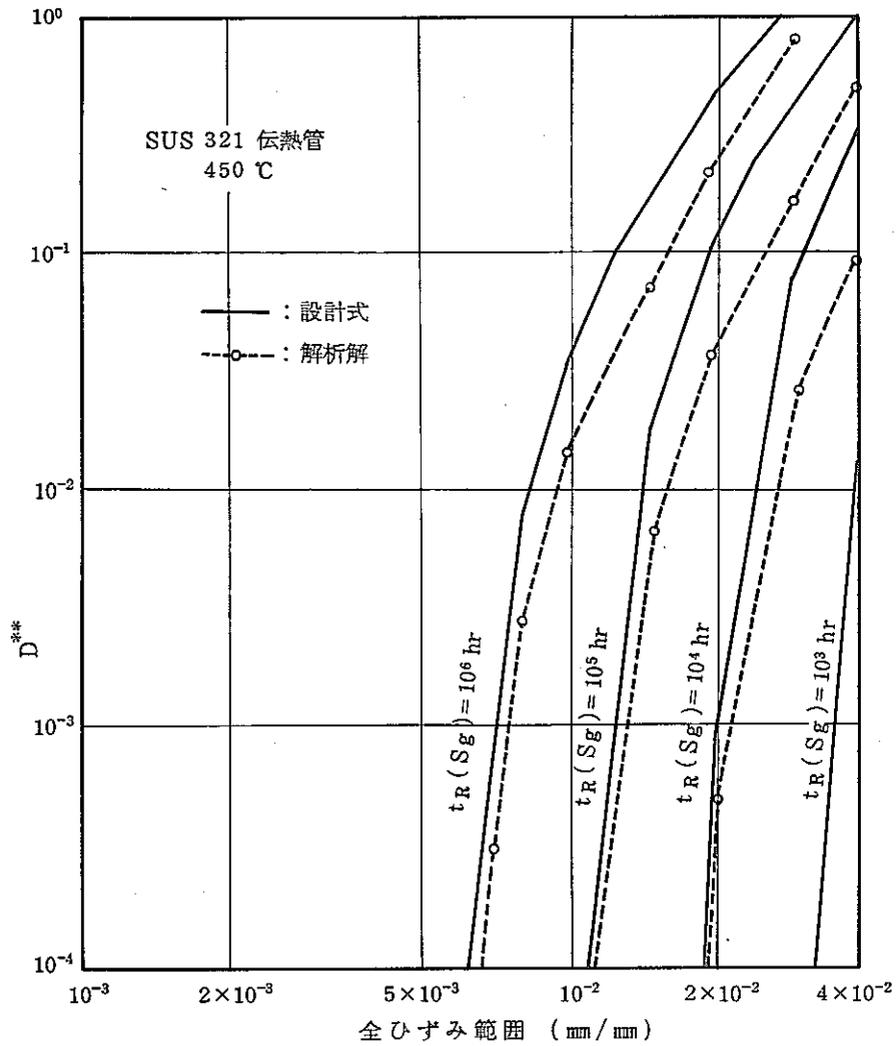


図 FA. 11 - (1)

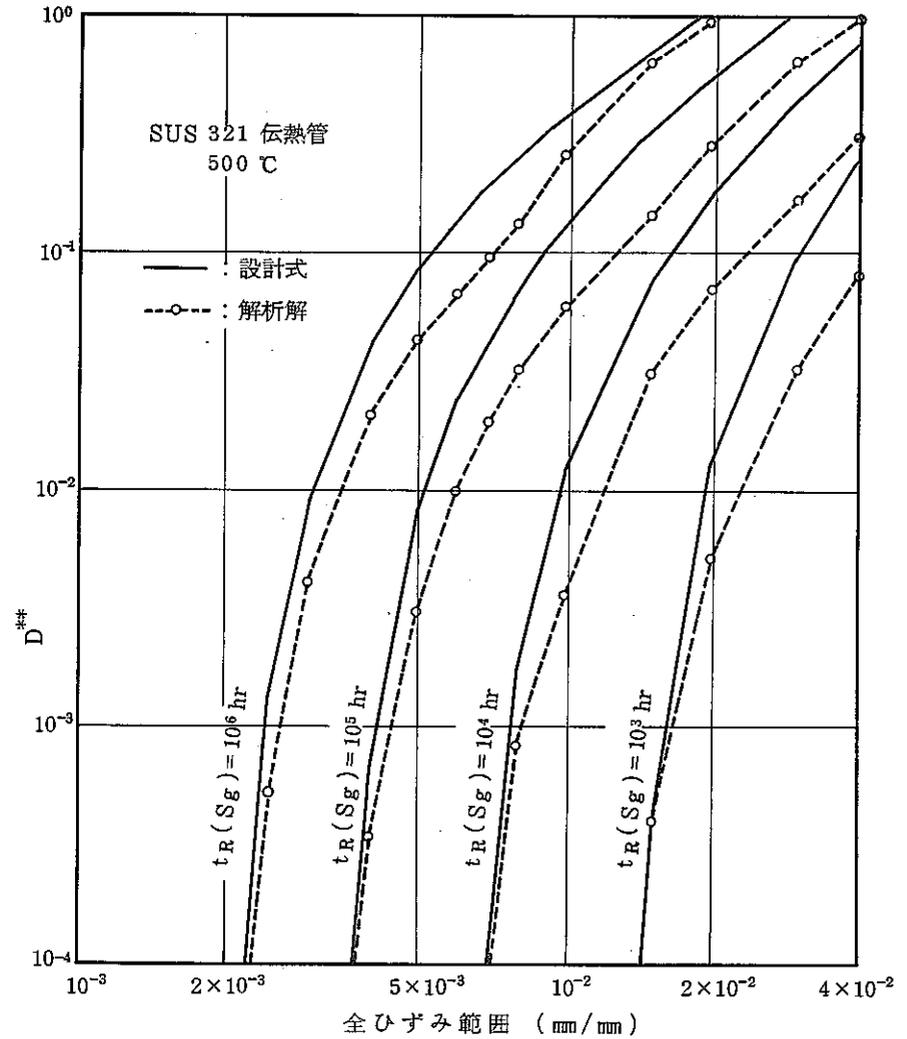


図 FA. 11 - (2)

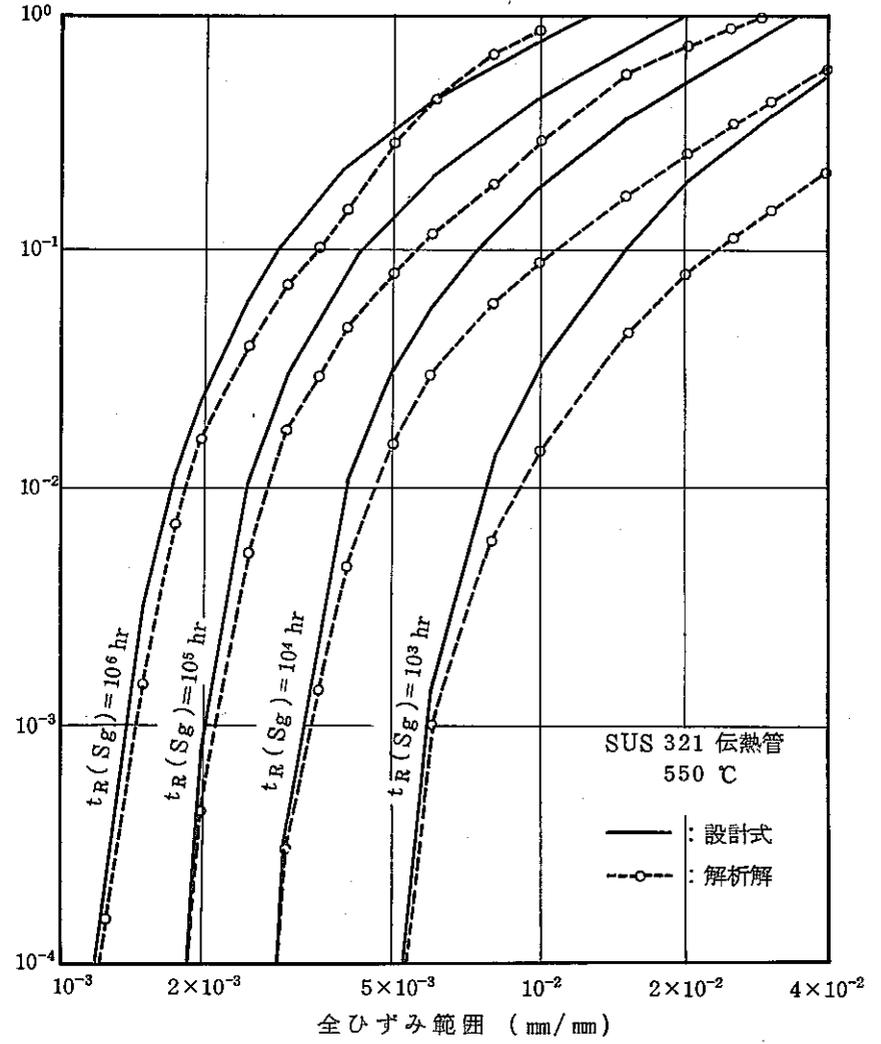


図 FA. 11 - (3)

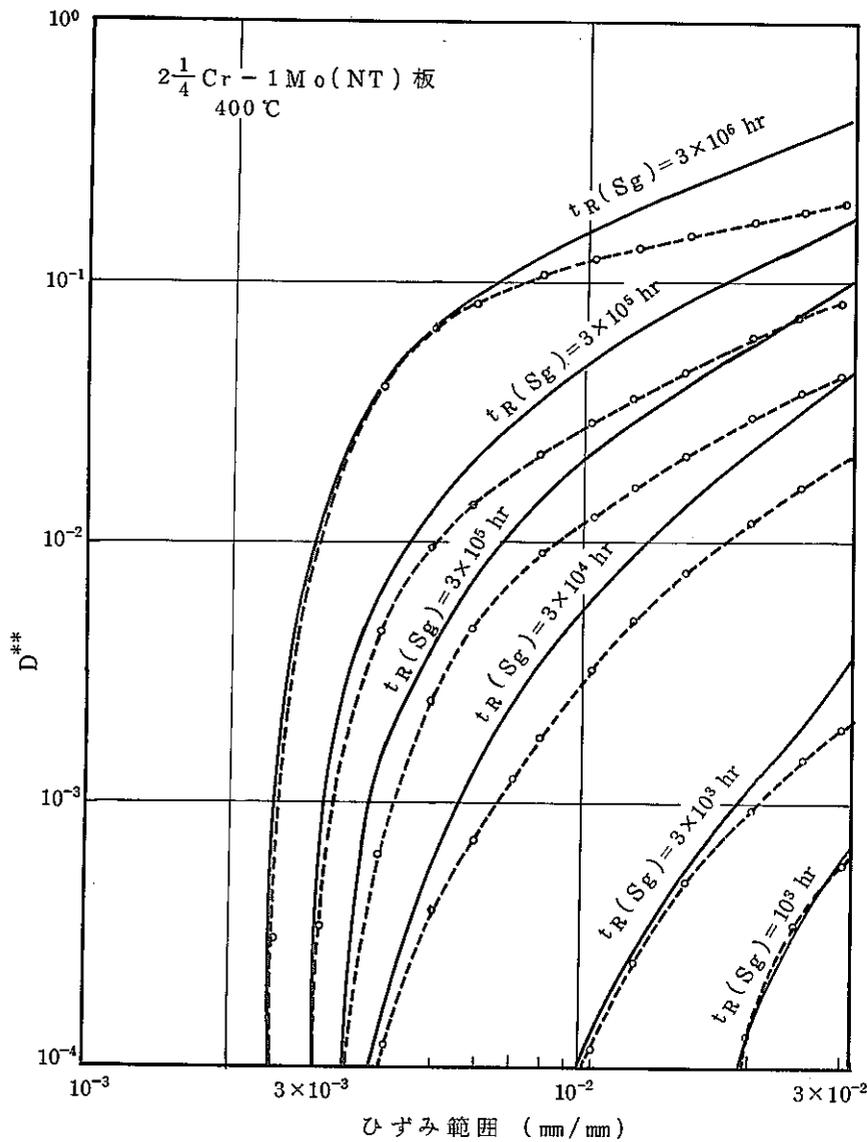


図 F A. 12 - (1)

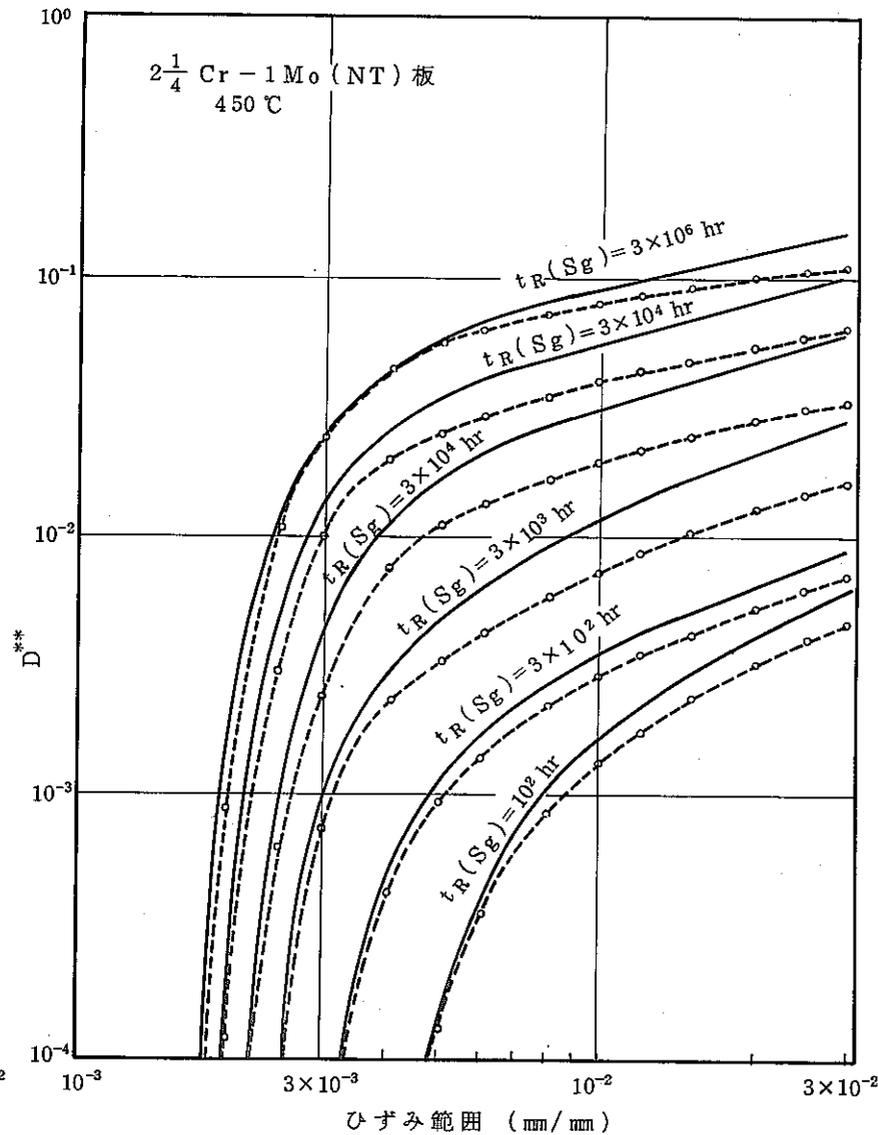
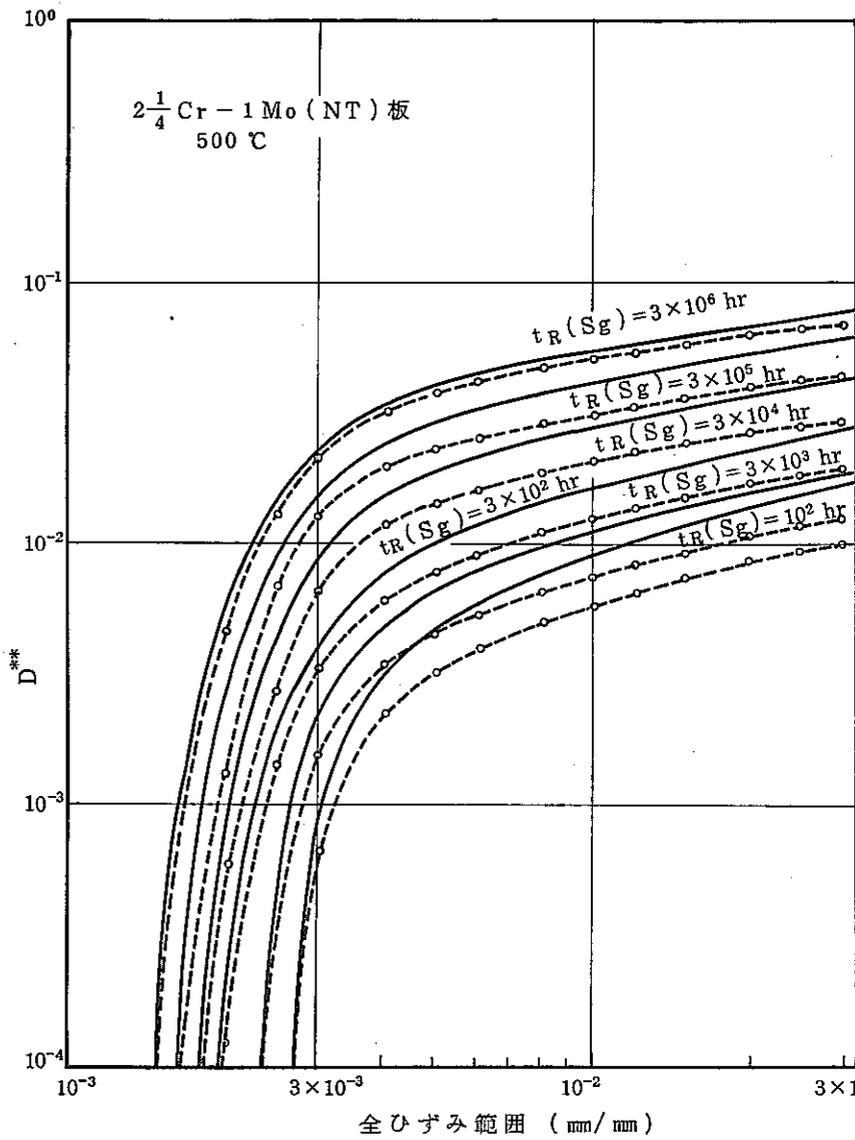
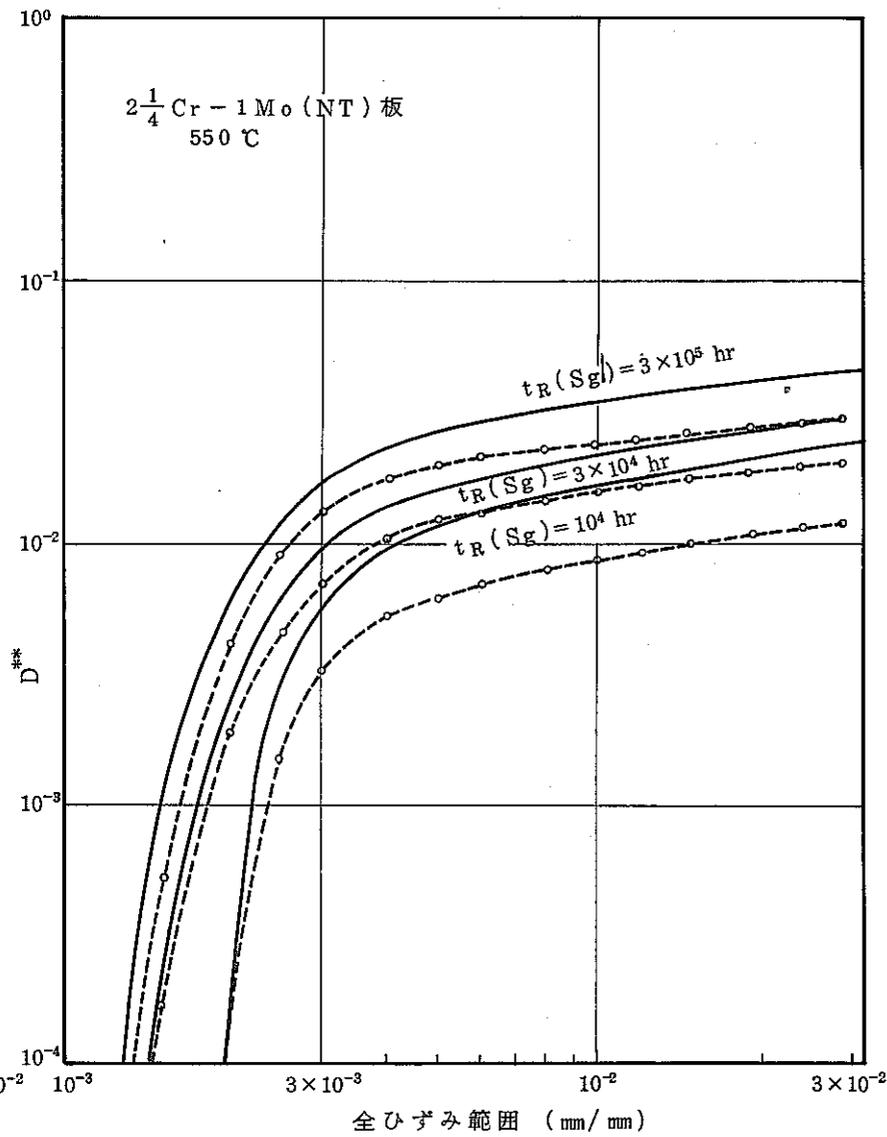


図 F A. 12 - (2)



図FA.12-(3)



図FA.12-(4)

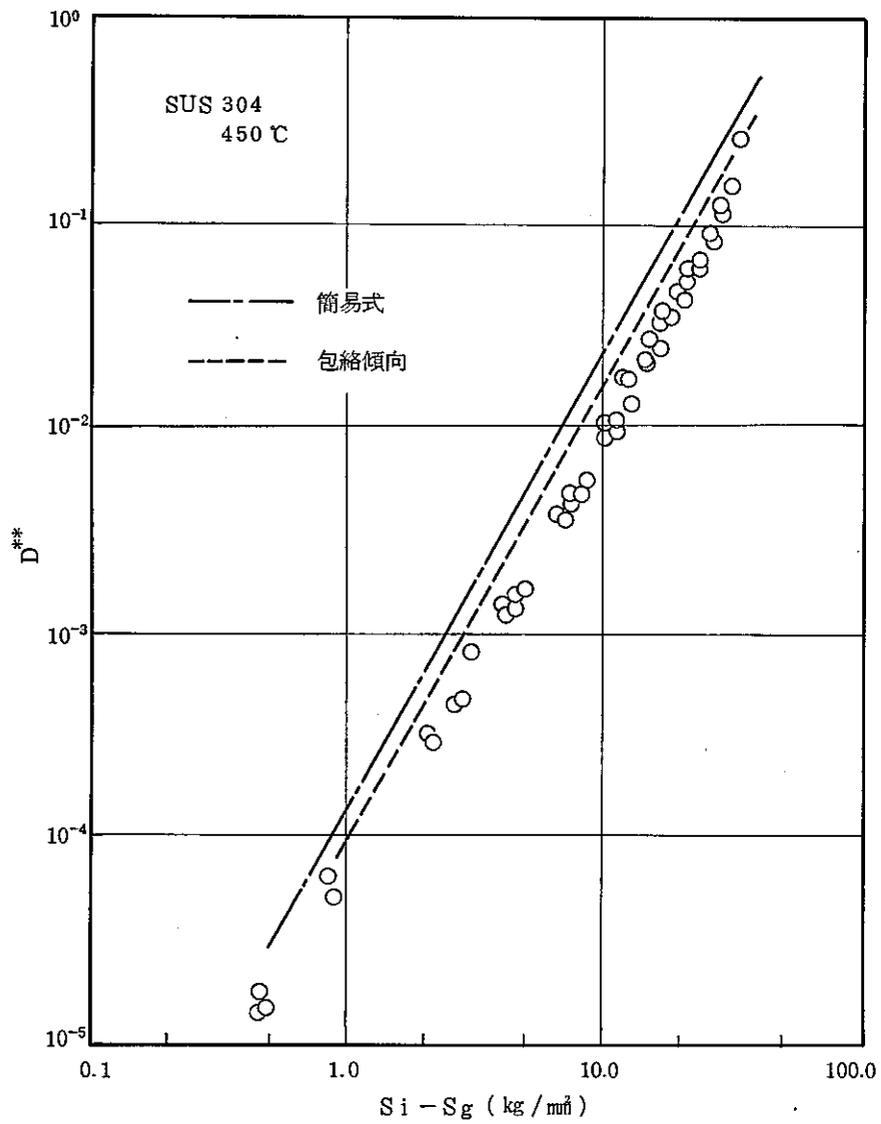


図 F A. 13 - (1)

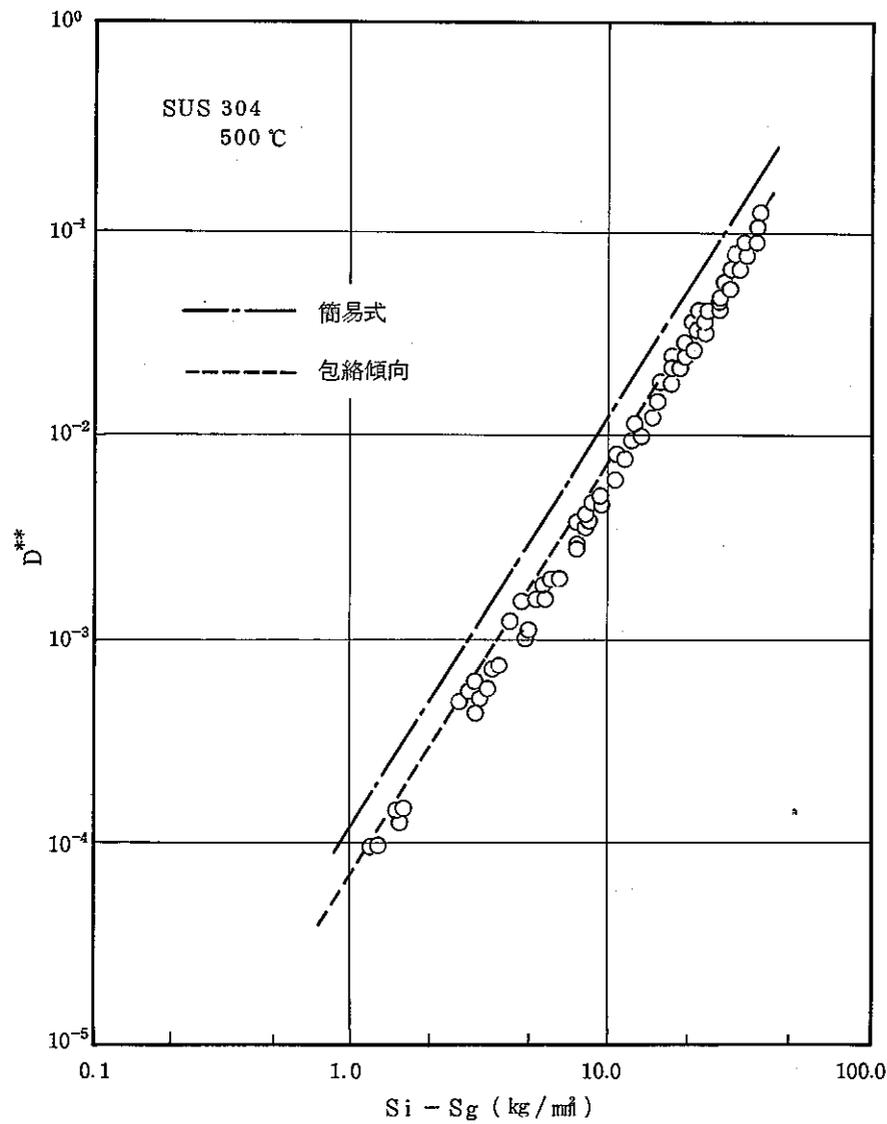


図 F A. 13 - (1)

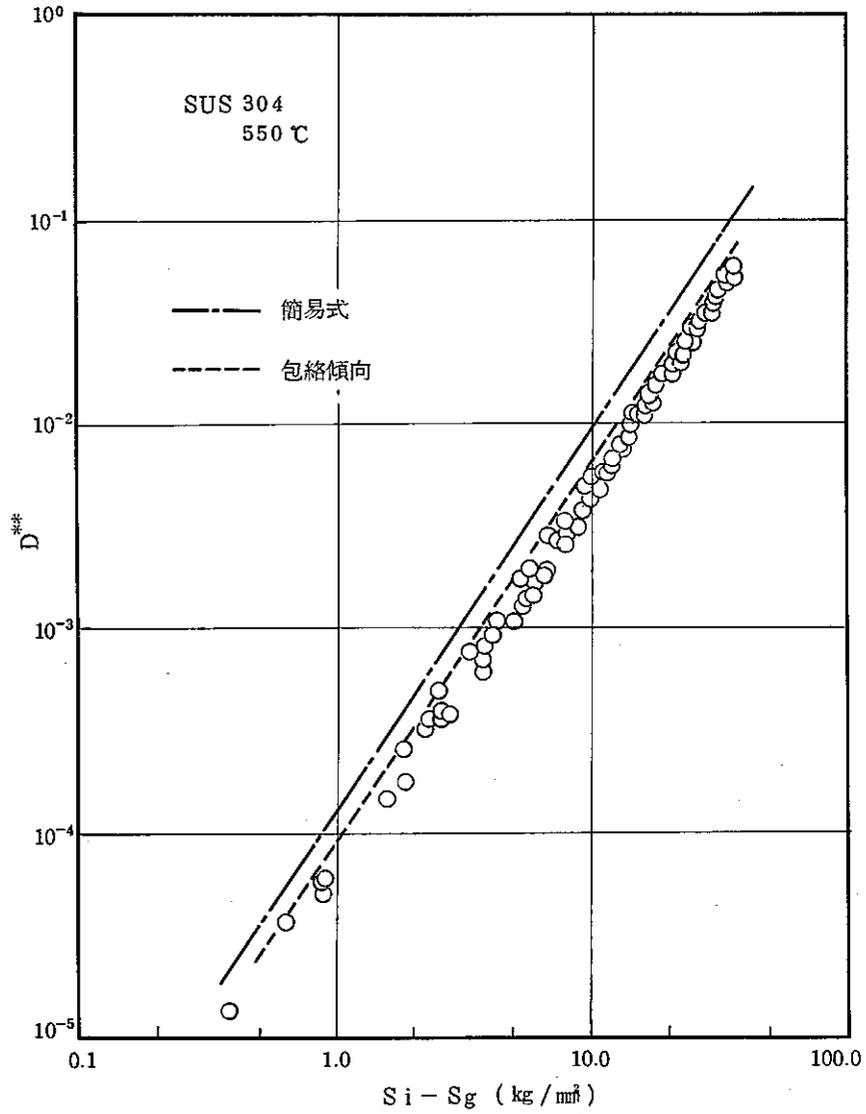


図 F A. 13 - (3)

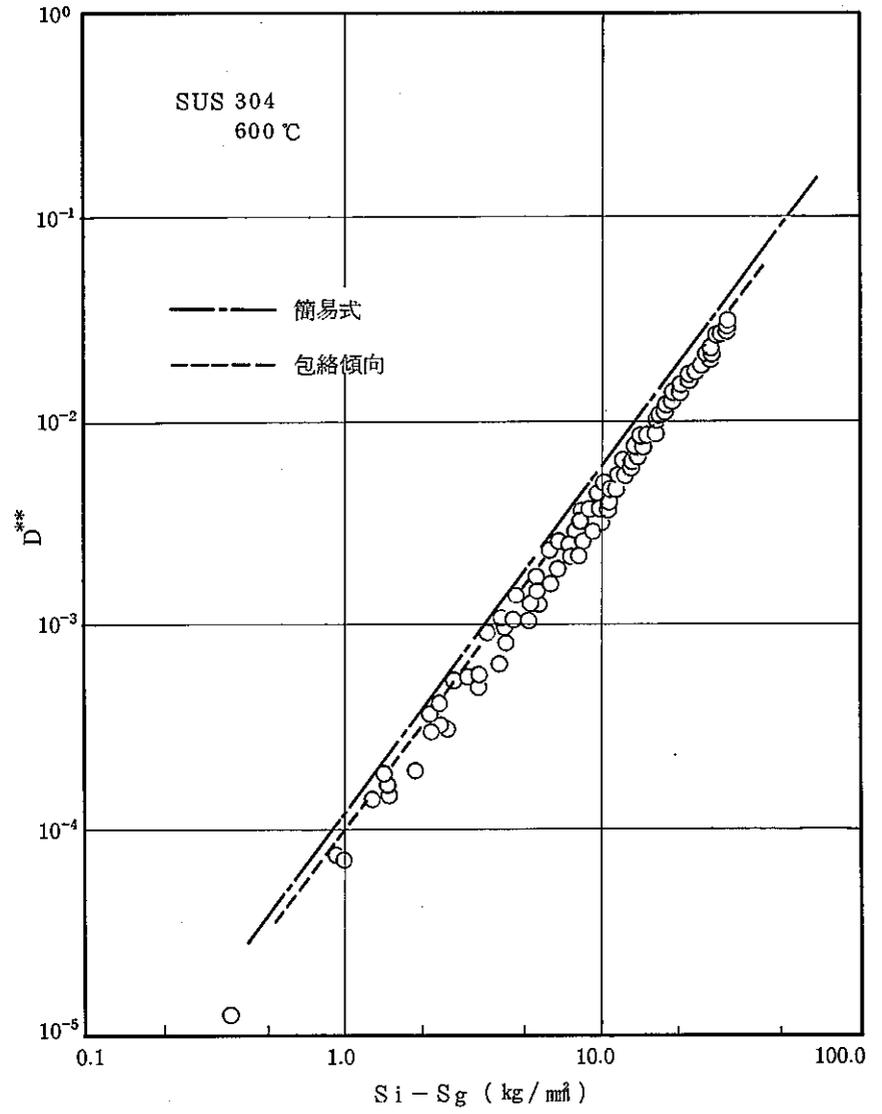


図 F A. 13 - (4)

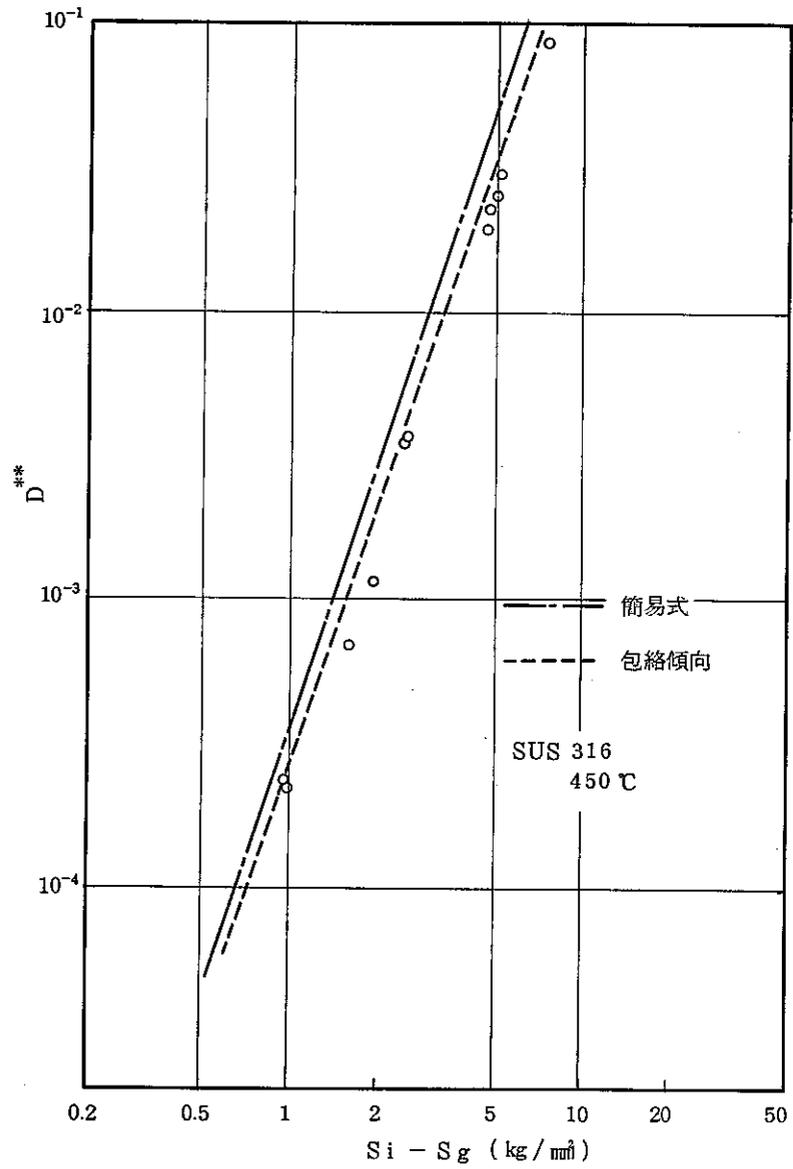


図 F A. 14 - (1)

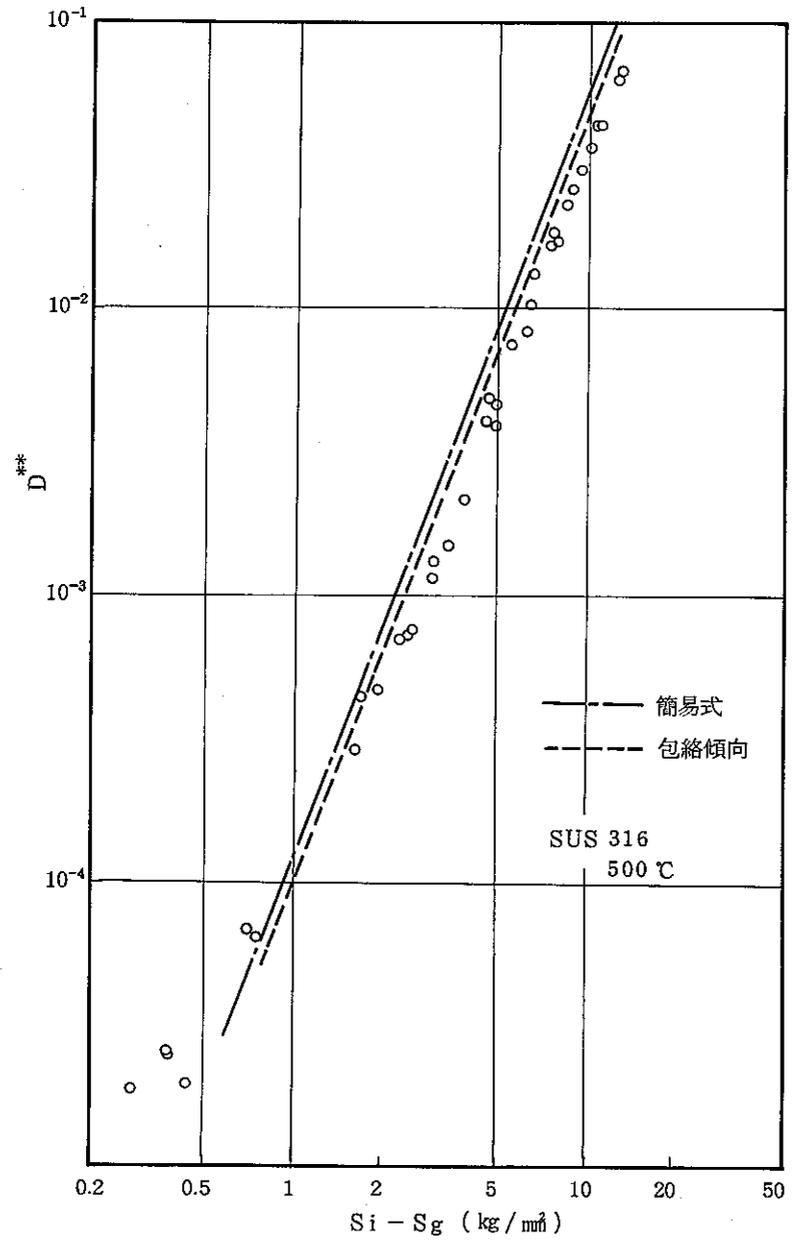


図 F A. 14 - (2)

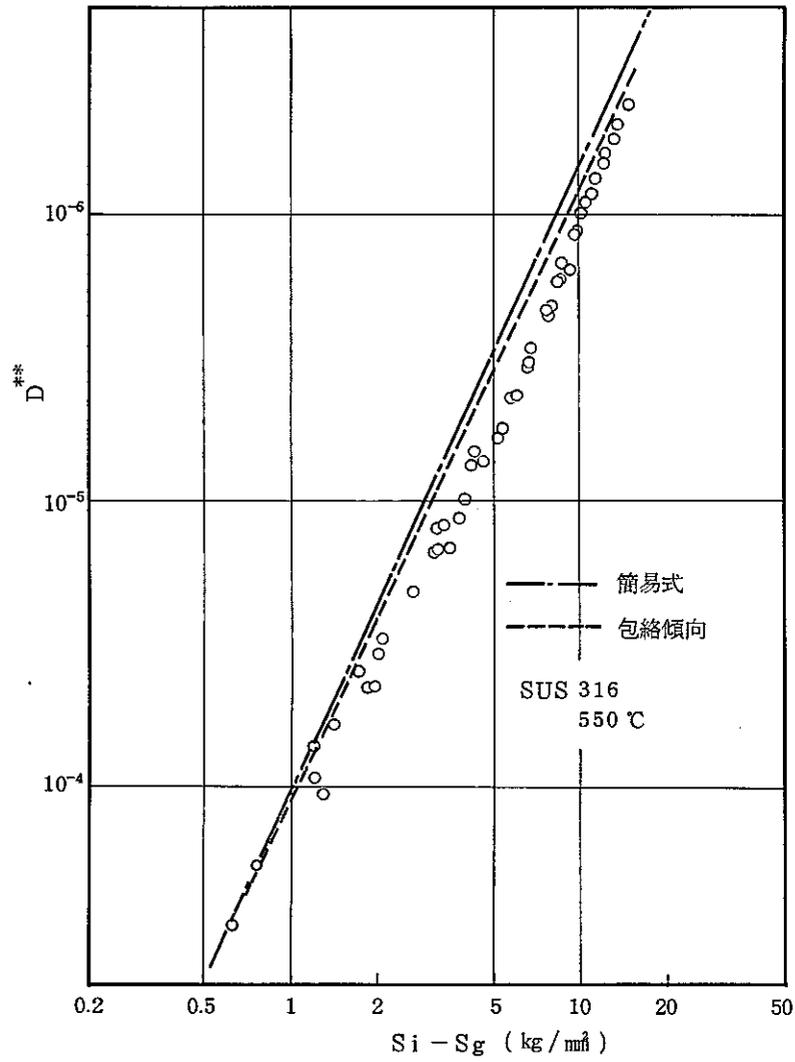


図 F A. 14 - (3)

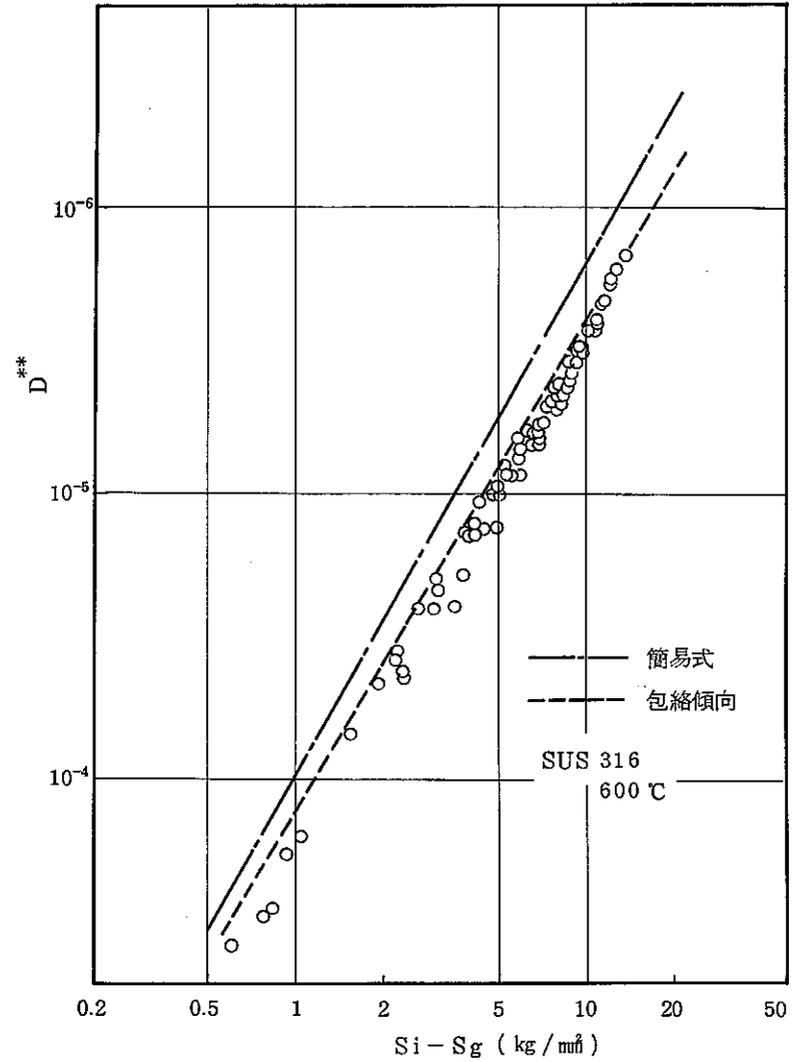


図 F A. 14 - (4)

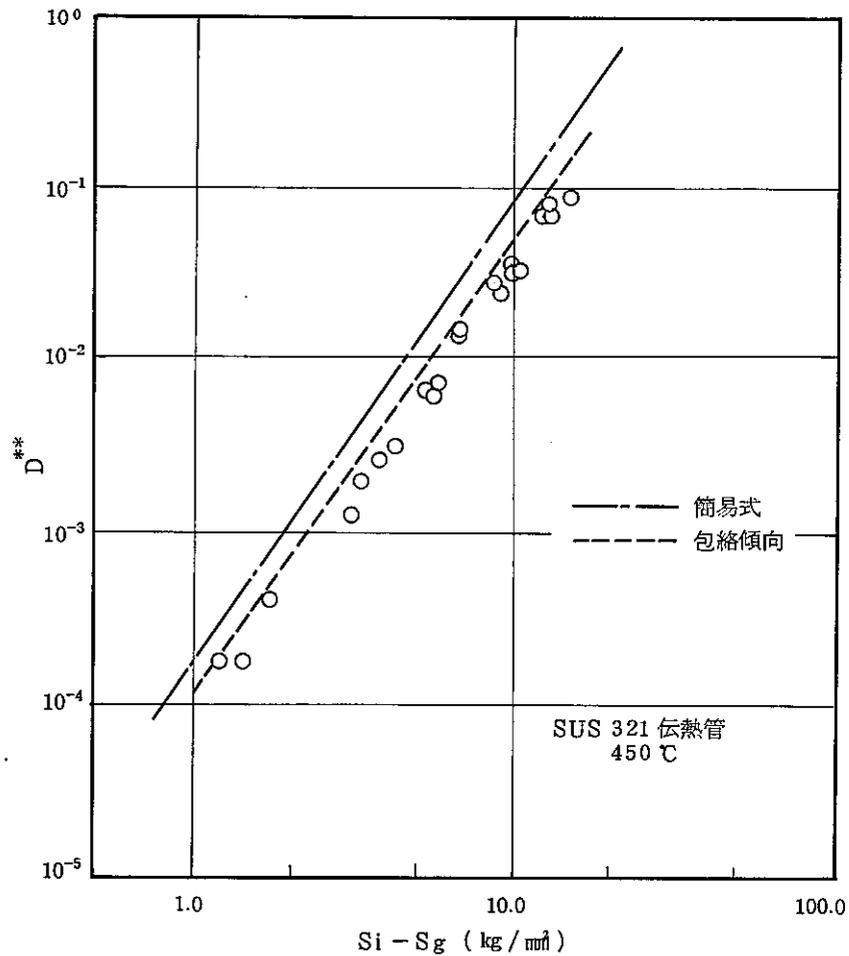


図 F A. 15 - (1)

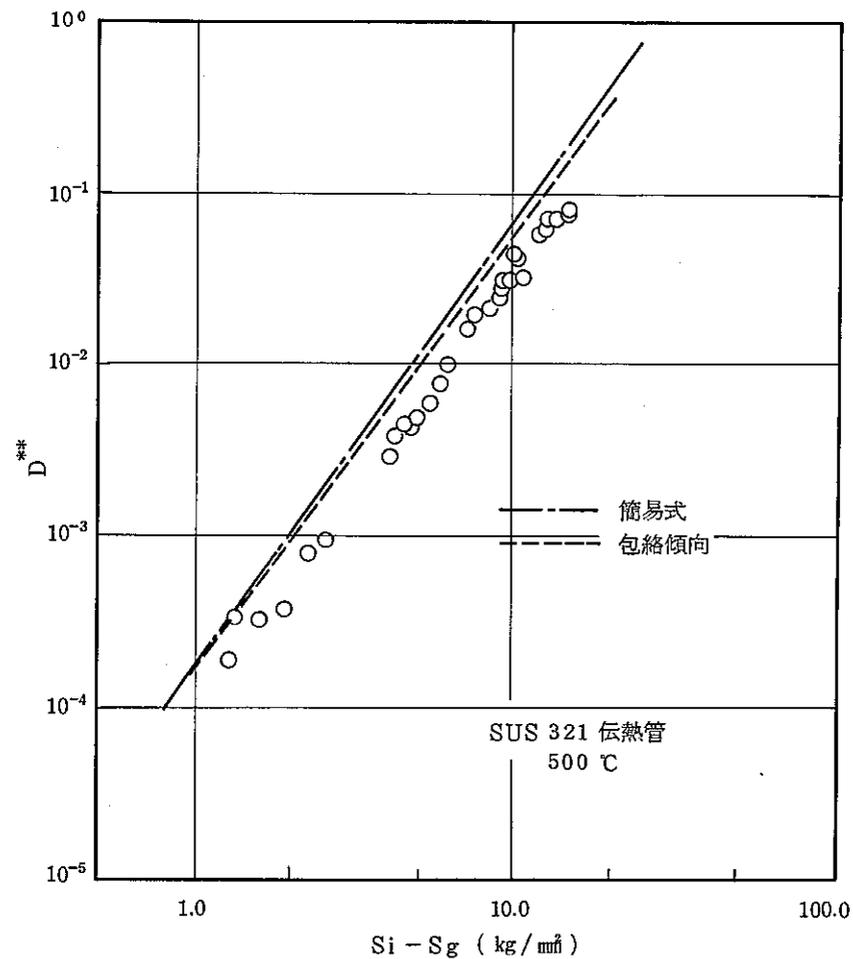


図 F A. 15 - (2)

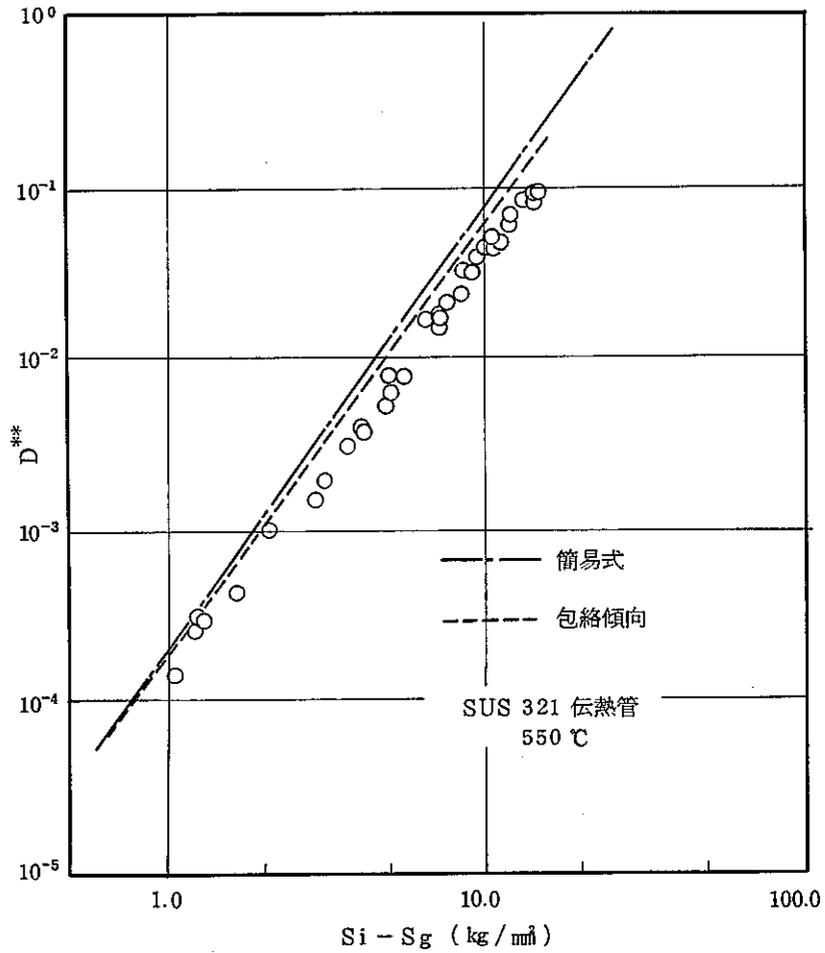


図 F A. 15 - (3)

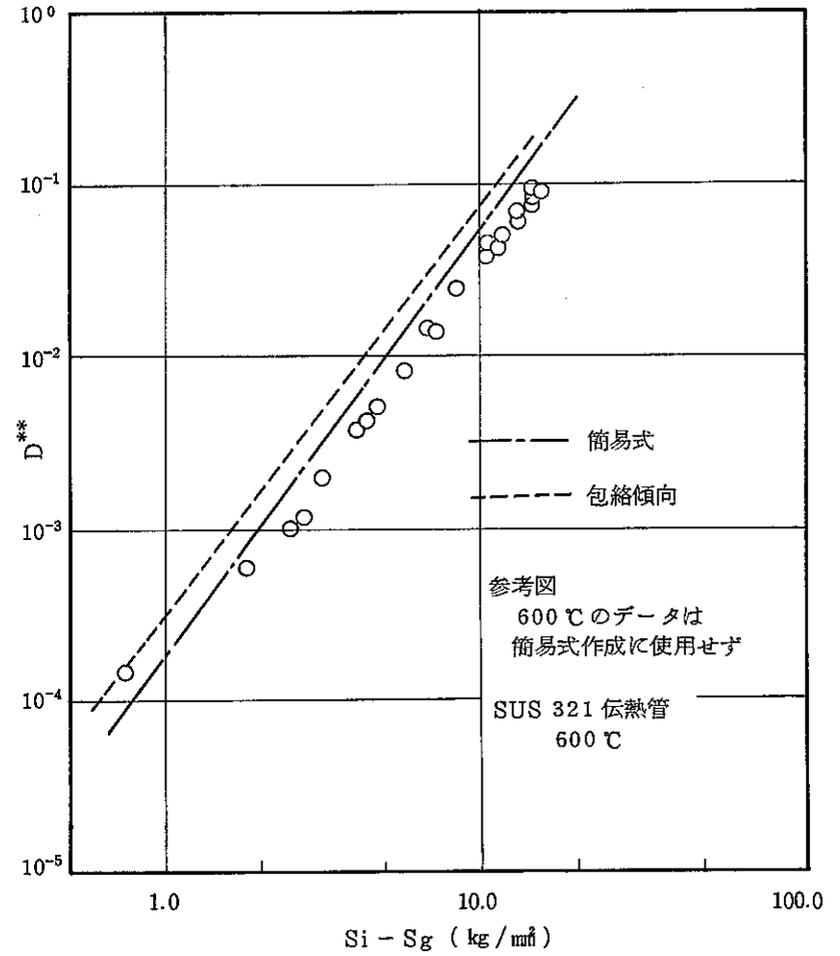


図 F A. 15 - (4)

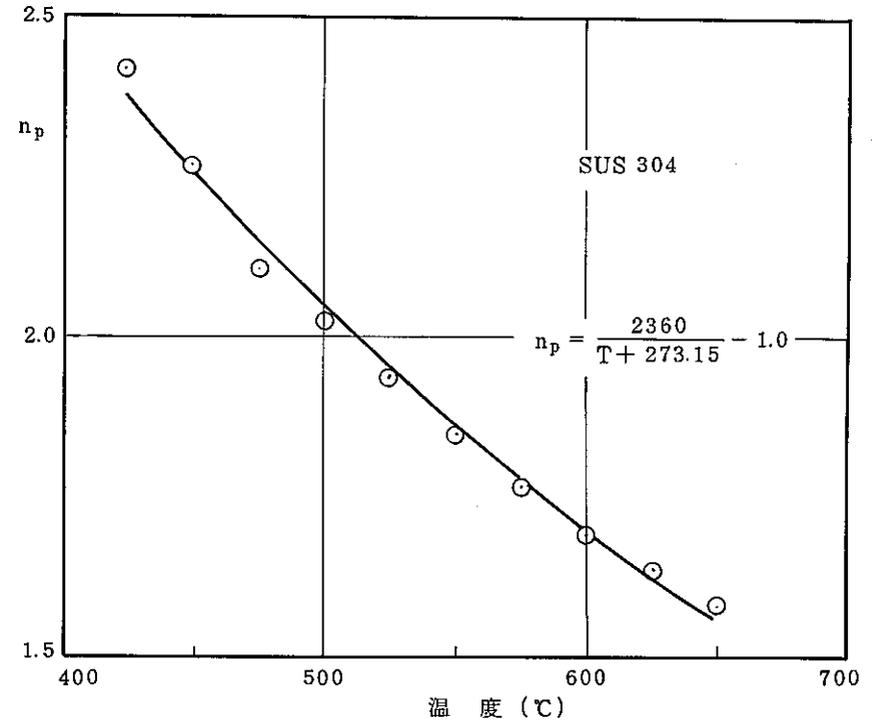
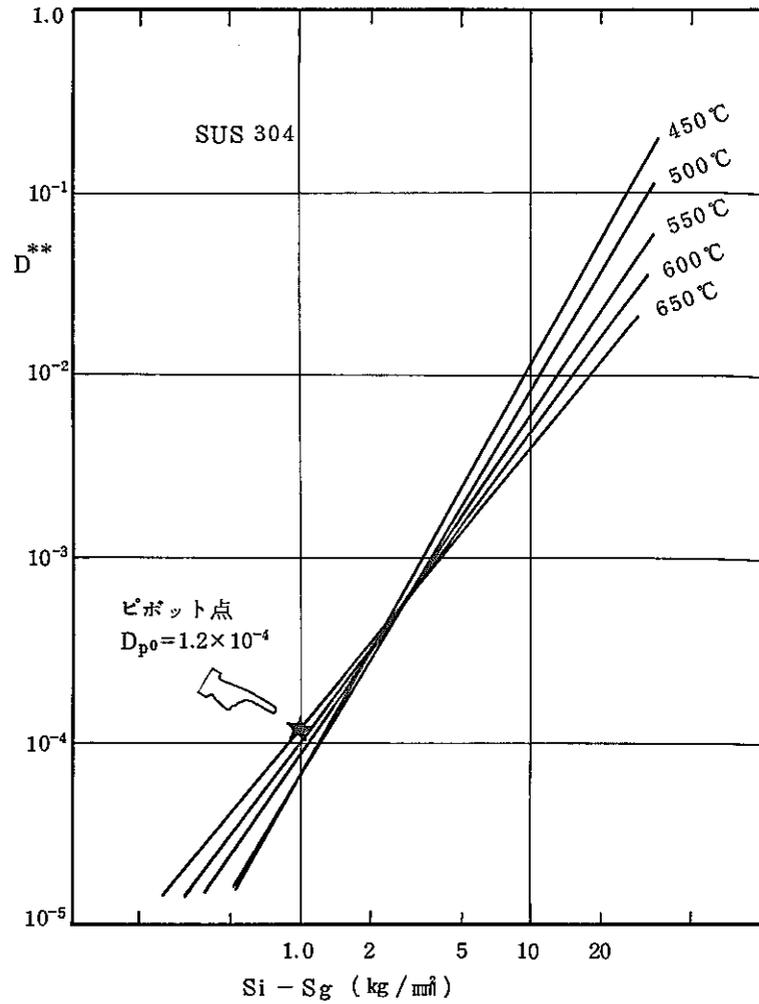


図 FA. 16(1) 包絡線の定式化 (SUS 304)

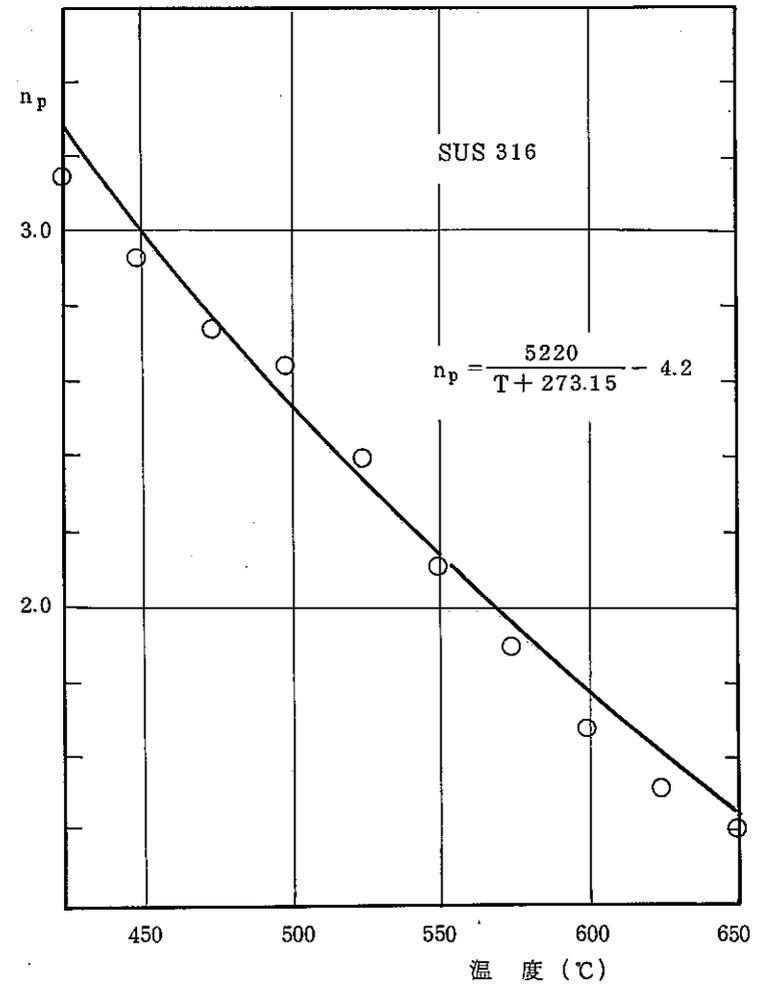
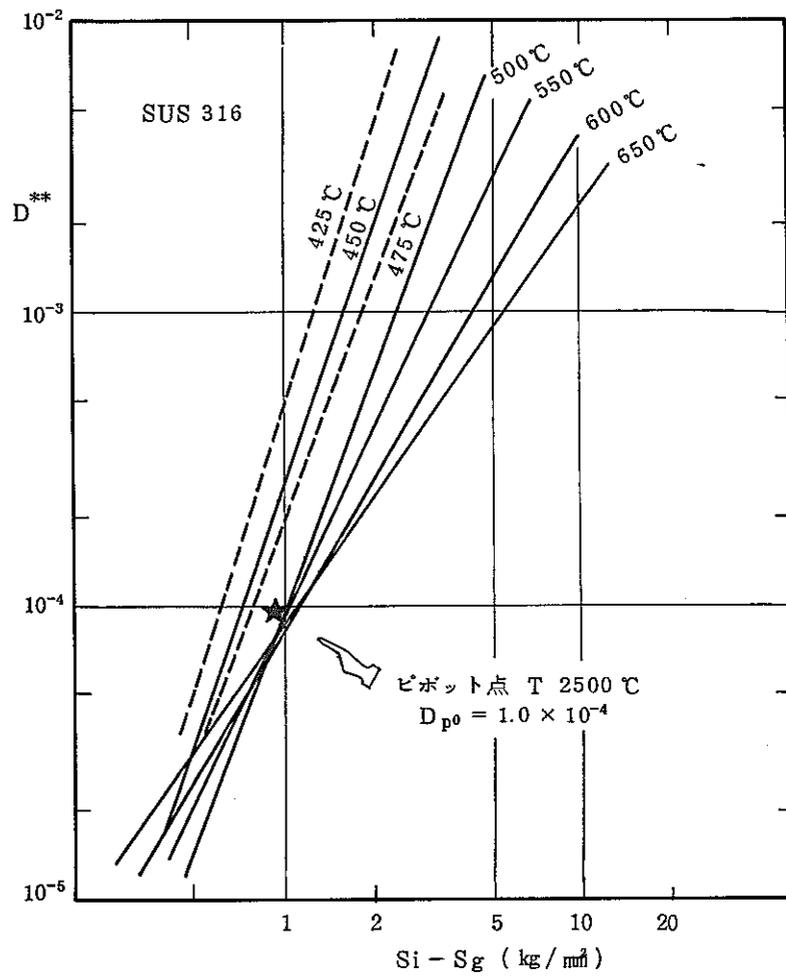


図 F A. 16 (2) 包絡線の定式化 (SUS 316)

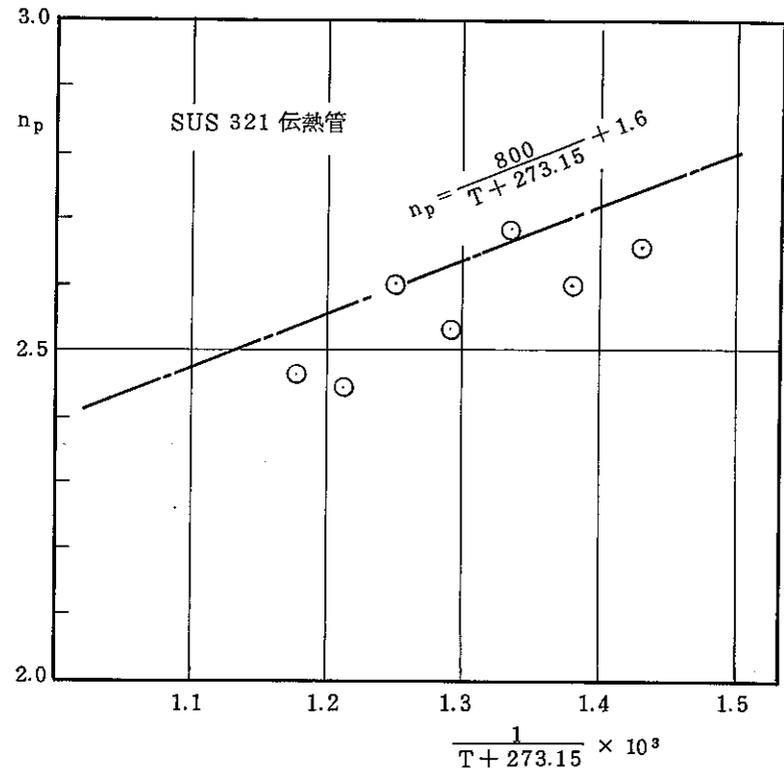
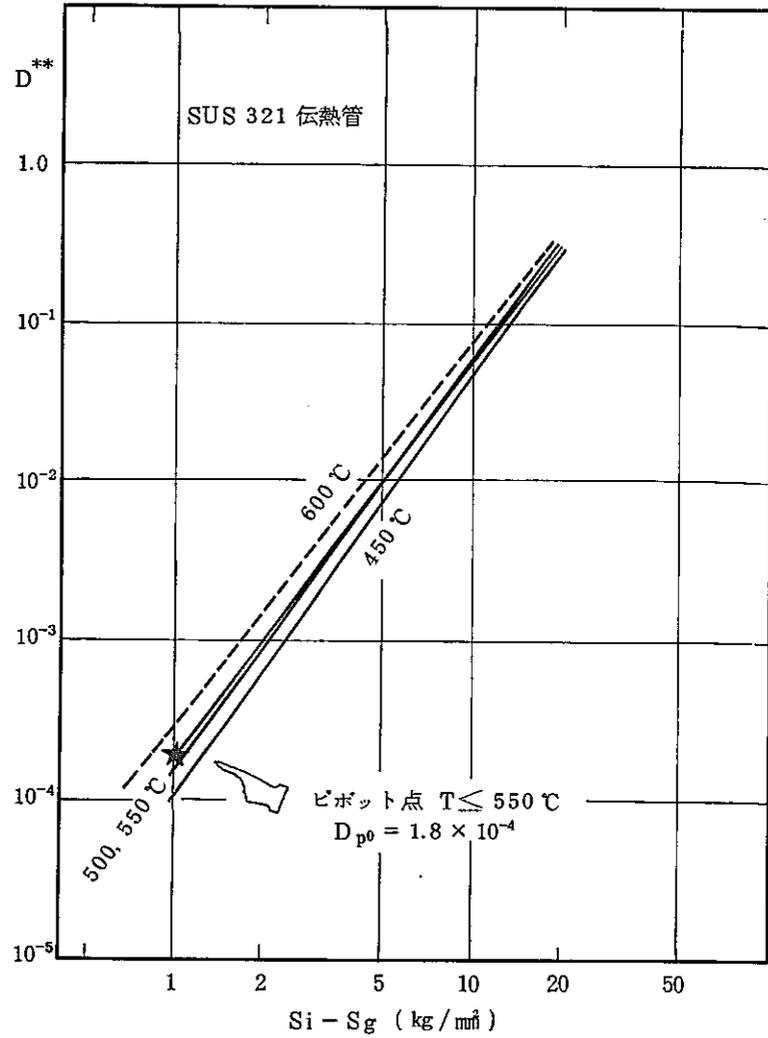


図 F A. 16 (3) 包絡線の定式化 (SUS 321 伝熱管)

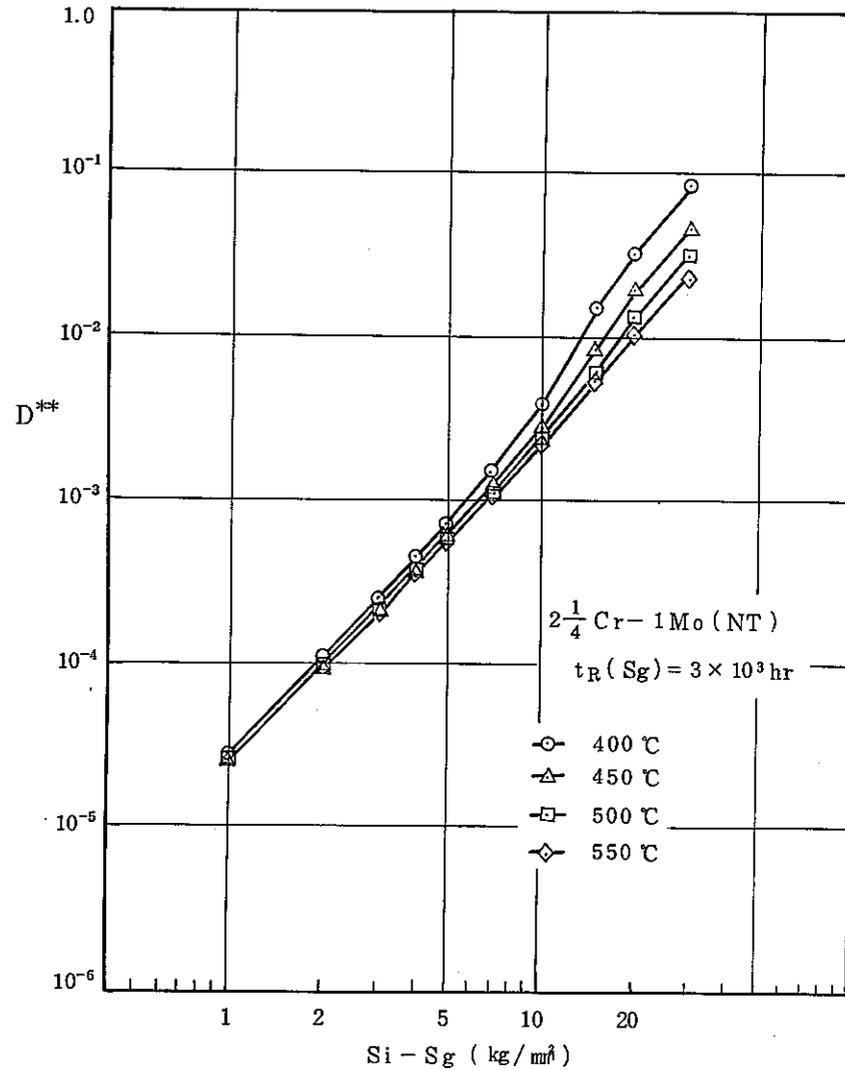
10.  $2\frac{1}{4}C_r - 1M_0$  (NT) の簡易式策定方法は以下のとおりである。

- ① 温度を  $400 \sim 500$  °C, 応力水準  $S_g$  を  $S_g$  での設計クリープ破断時間が  $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^6$  hr, 初期応力  $S_i$  を応力差  $S_i - S_g$  が  $1 \sim 30$  kg/mm<sup>2</sup> となる応力として  $D^{**}$  を計算し,  $D^{**}$  と応力差  $S_i - S_g$  を両対数上にプロットすると図 FA.17 のようになる。

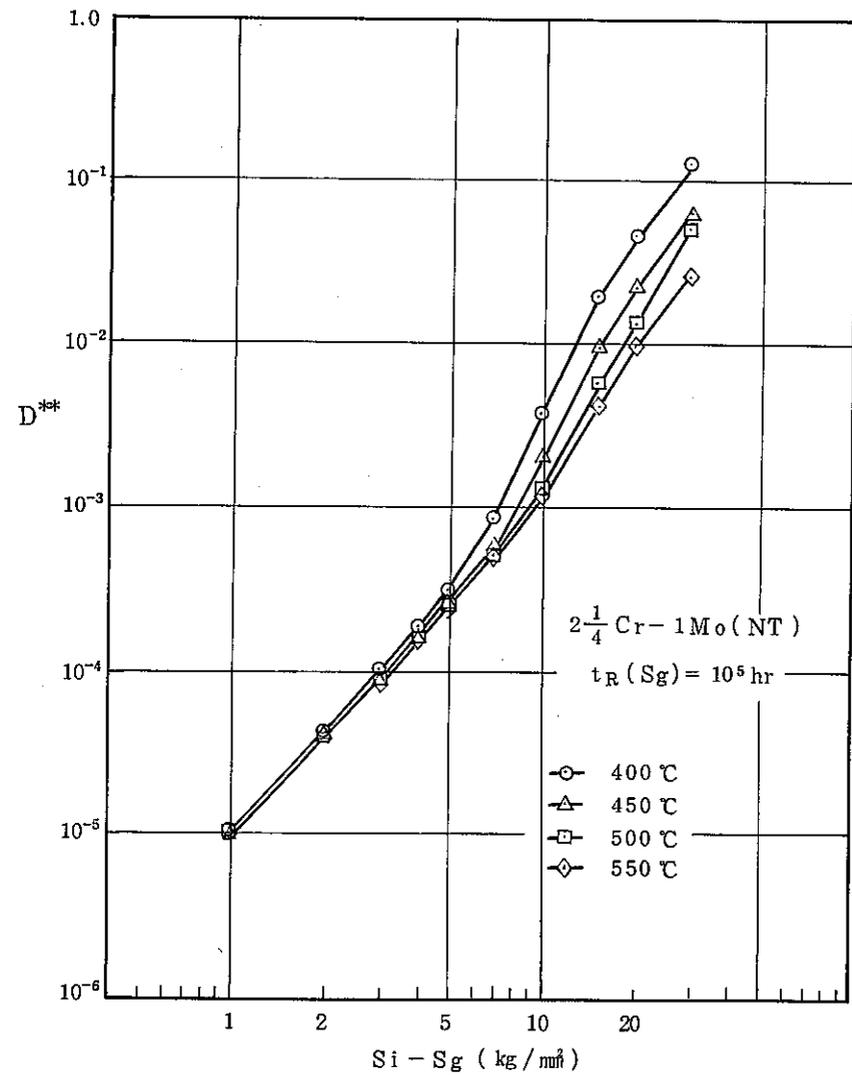
図 FA.17 より, 以下のことがいえる。

- (イ) 両対数上で折線的となる傾向が著しい。  
(ロ) 応力差  $S_i - S_g$  が大きい領域では相対的に応力水準  $S_g$  又は, 応力水準  $S_g$  でのクリープ破断時間  $t_R(S_g)$  への依存性が小さい。  
(ハ) 応力差  $S_i - S_g$  が小さい領域では, 温度によらず, 応力水準  $S_g$  でのクリープ破断時間  $t_R(S_g)$  で整理できる直線的傾向が示されている。
- ② 応力差  $S_i - S_g$  が大きい領域については, 図 FA.18 に示すように,  $S_i - S_g = 3$  kg/mm<sup>2</sup> にて  $D^{**}$  (又は  $D_{p1}$ ) が  $10^{-4}$  となる直線群で包絡するものとした, 勾配  $n_{p1}$  は, 図 FA.19 (1) に示すように, 温度の 2 次式で近似するものとした。
- ③ 応力差  $S_i - S_g$  が小さい領域については, 図 FA.19 (2) に示すように勾配  $n_{p0}$  は温度又は  $t_R(S_g)$  にほとんど依存しないので一定値 2.0 とした。

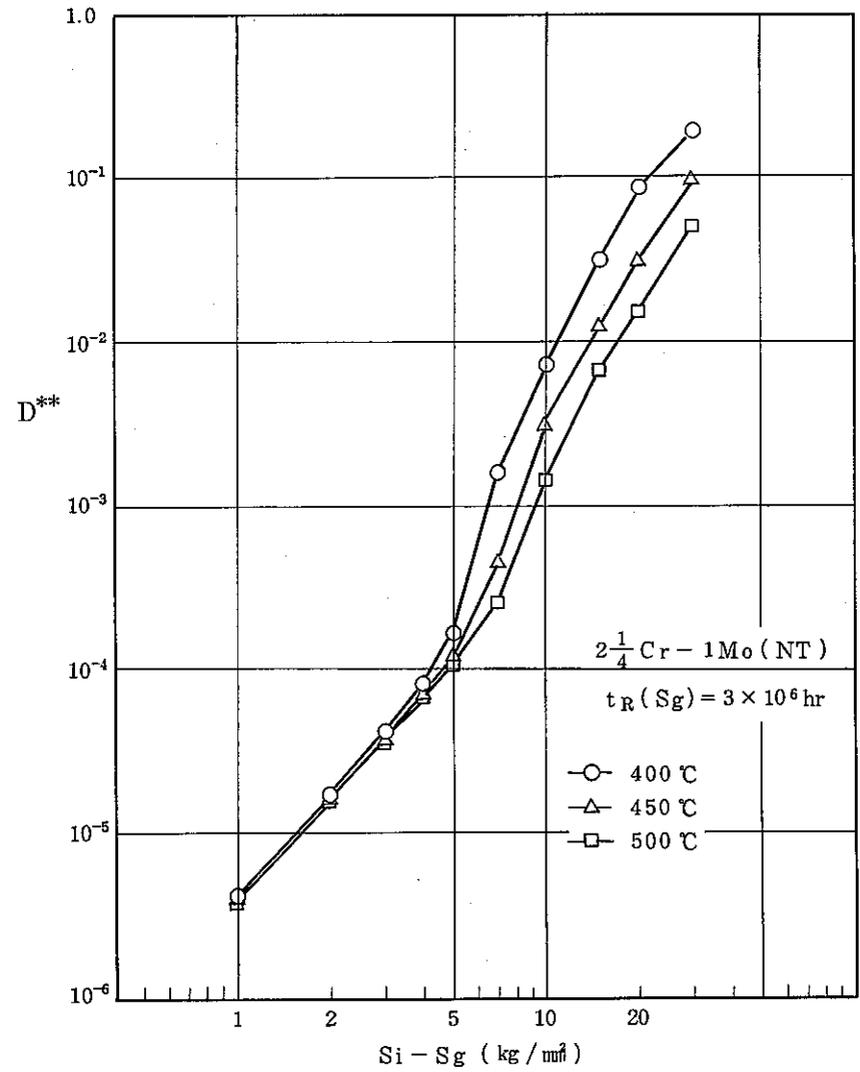
また切片については, 温度及び  $t_R(S_g)$  の大きさにより若干立上り傾向が表われる場合もみられる  $S_i - S_g = 5$  kg/mm<sup>2</sup> の  $D^{**}$  値を包絡できるように定めるものとした (図 FA.20)。



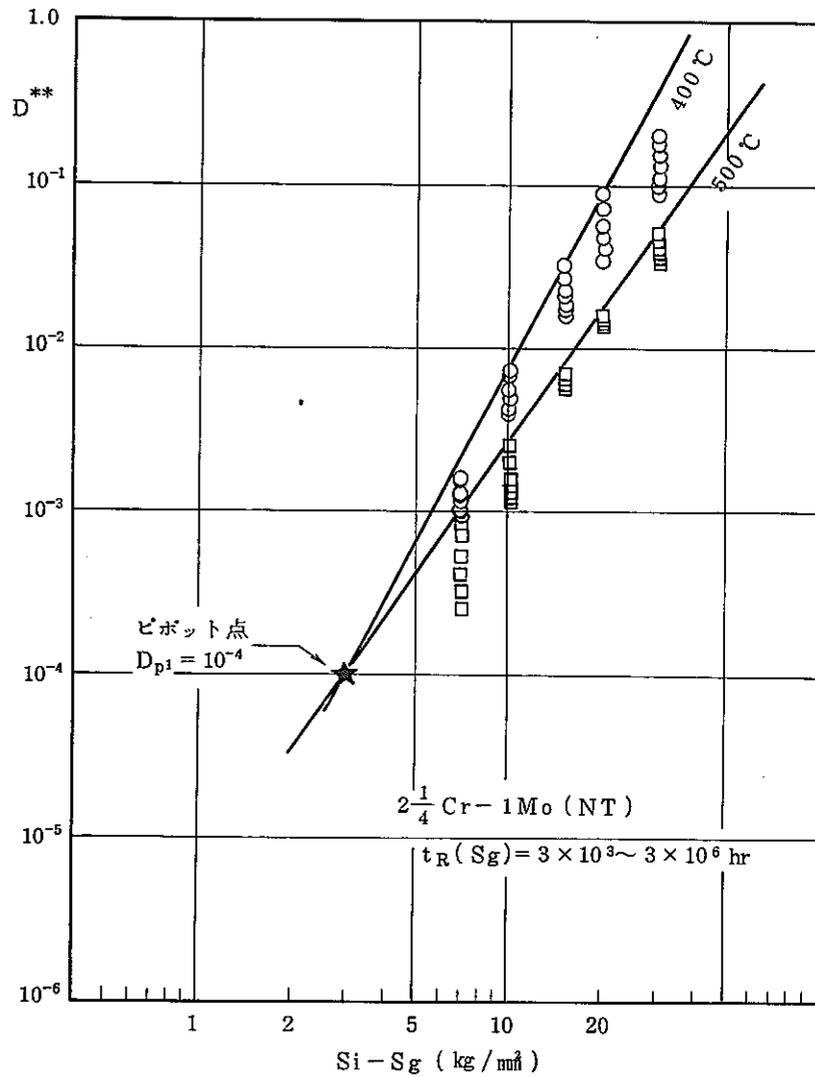
図FA.17(1)  $D^{**}$ とSi-Sgとの関係 ( $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo (NT)}$ )



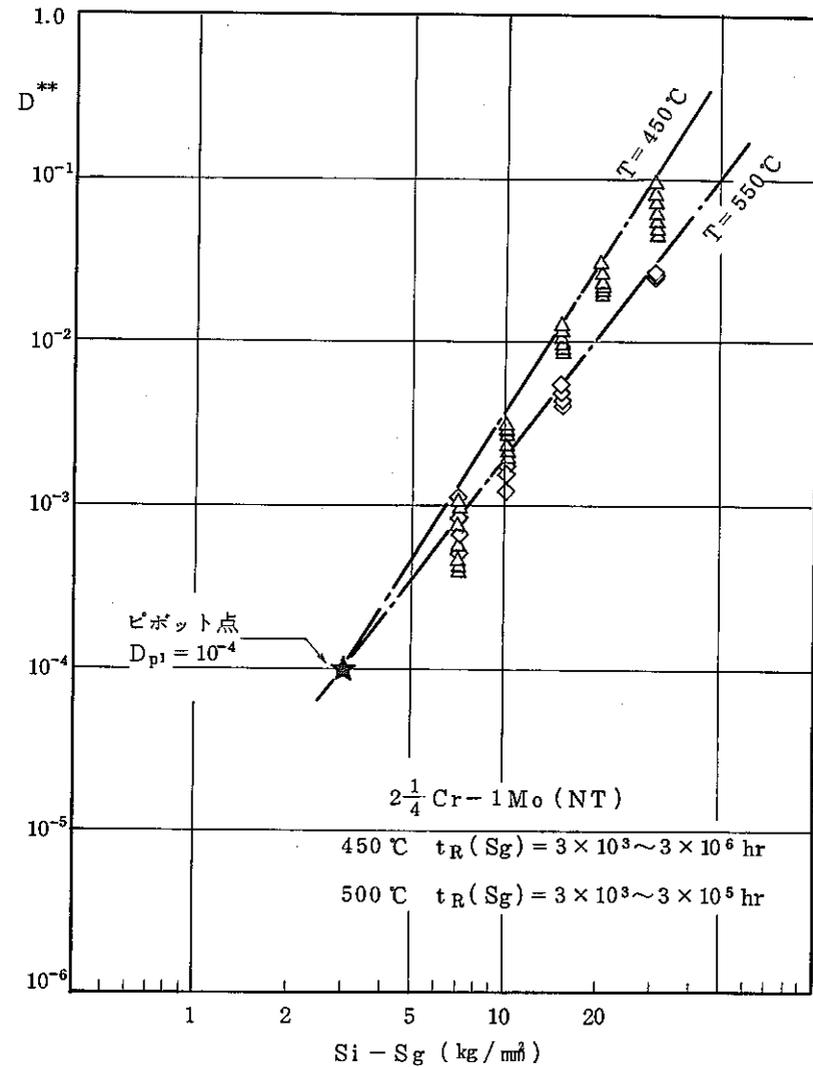
図FA.17(2)  $D^{**}$ とSi-Sgとの関係 ( $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo (NT)}$ )



図FA. 17(3) D<sup>\*\*</sup>とSi-Sgとの関係(2  $\frac{1}{4}$  Cr - 1 Mo (NT))



図FA.18(1) Si-Sgが大きい領域の包絡



図FA.18(2) Si-Sgが大きい領域の包絡

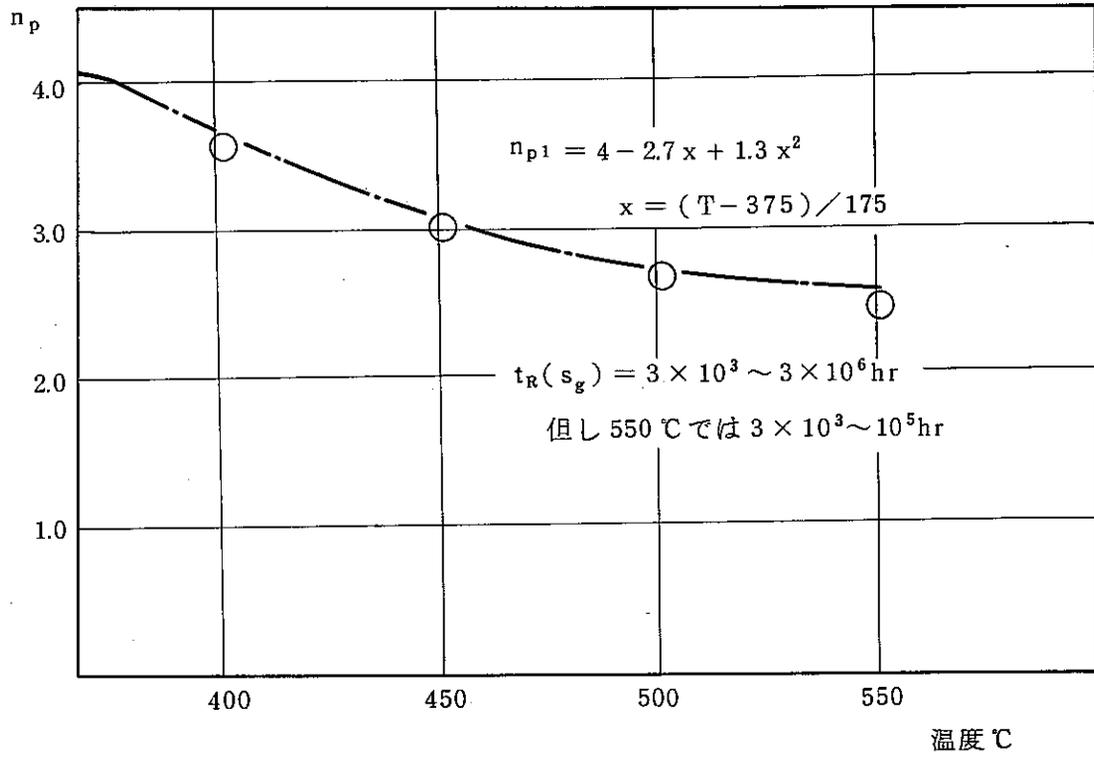


図 FA. 19 (1) Si-Sg > 7 kg/mm<sup>2</sup> を包絡する勾配

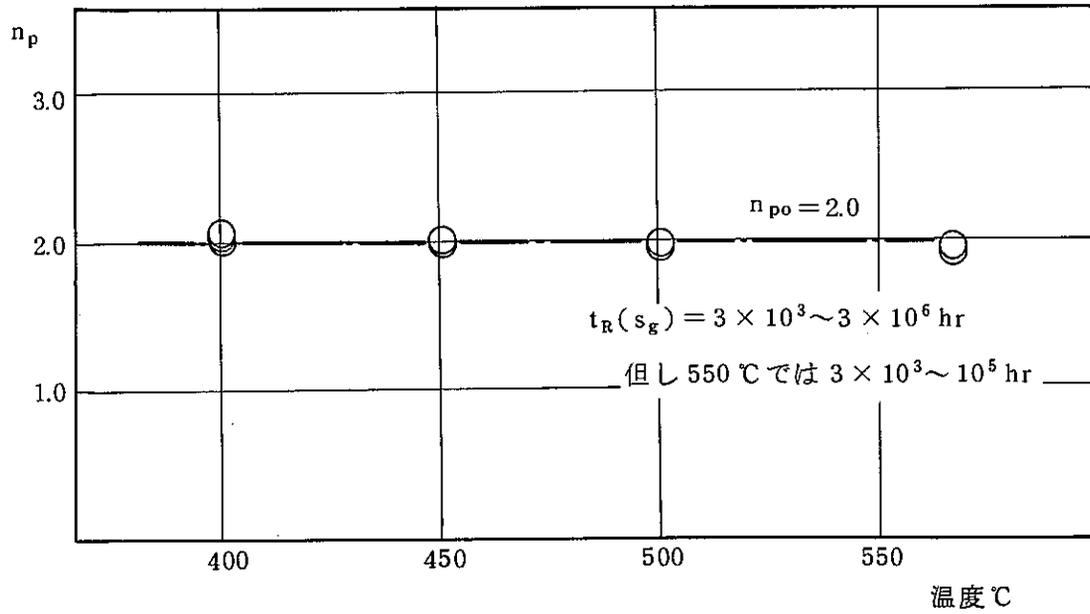
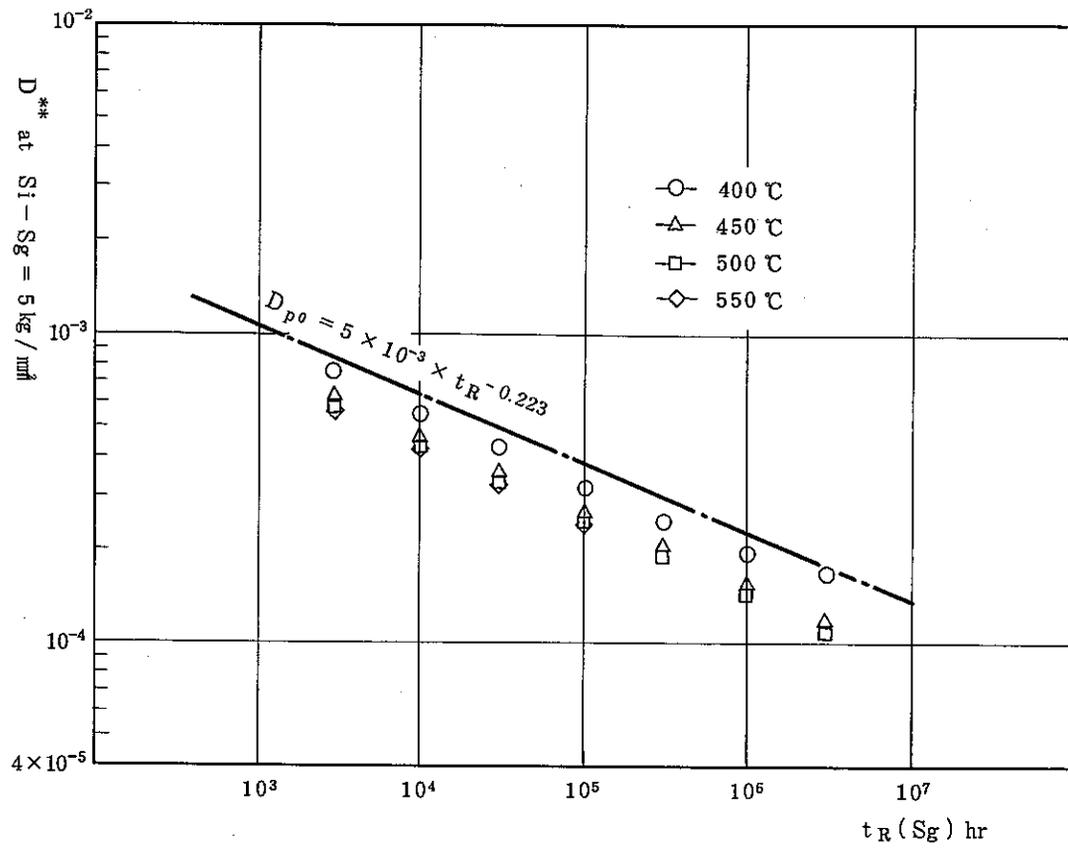
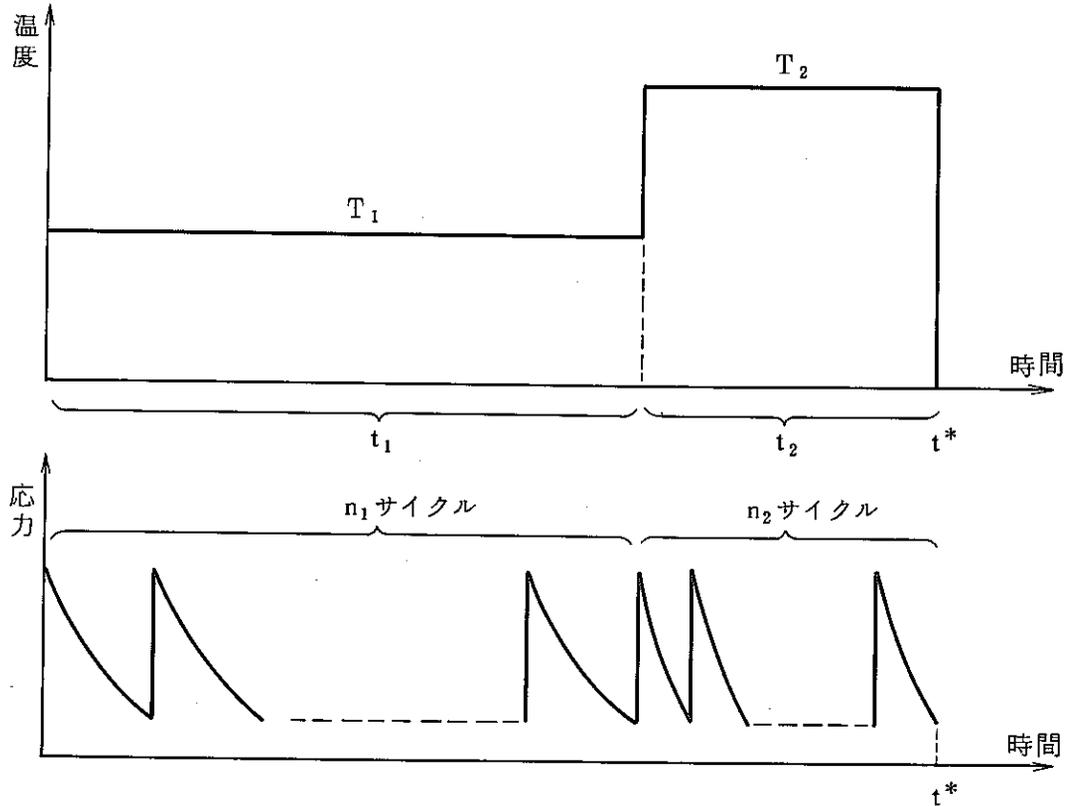


図 FA. 19 (2) Si-Sg = 1 ~ 2 kg/mm<sup>2</sup> における勾配



図FA.20 Si-Sg = 5 kg/mm<sup>2</sup>でのD<sup>\*\*</sup>値の包絡

11. 等価温度採用の妥当性を確認するための計算モデルを図FA.21に、また計算結果を図FA.22に示す。



等価温度  $T_{eq} : D_{C1} = \frac{2 t_1}{t_R(\sigma, T_1)} + \frac{2 t_2}{t_R(\sigma, T_2)} = \frac{2 t^*}{t_R(\sigma, T_{eq})}$

$t_R(\sigma, T)$  : 温度  $T$ , 応力  $\sigma$  における設計クリープ破断時間

$\sigma_g$  : 適切な  $D_{C1}$  を与える応力

妥当性確認計算

$$\begin{cases} D_{C1} = 0.3 \\ n^{**} = n_1 + n_2, (n^{**} D^{**}(\epsilon_t, T_{eq}, t^*, D_{C1} = 0.3) + D_{C1}) + \frac{7}{3} n^{**} / N_f(\epsilon_t, T_{eq}) = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_1/n^{**}, \text{ 又は } n_2/n^{**} = 0, 0.001, 0.003, 0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1 \\ \text{1 サイクル当りの時間 } t_1/n_1, t_2/n_2 \end{cases}$$

設計上の評価値  $D_{C,d} = \frac{1}{2} D_{C1} + (n_1 + n_2) D^{**}$

$\frac{1}{2} D_{C1}$  : 詳細計算との対応をはかった値

$D^{**}$  : 付録 F に定める値

詳細計算値  $D_{C,cal} = n_1 \int_0^{t_1/n_1} \frac{dt}{t_R(\sigma, T_1)} + n_2 \int_0^{t_2/n_2} \frac{dt}{t_R(\sigma, T_2)}$

計算方法は  $D^{**}$  の算出法に準じる。

図 FA.21 等価温度の妥当性確認のための計算モデル

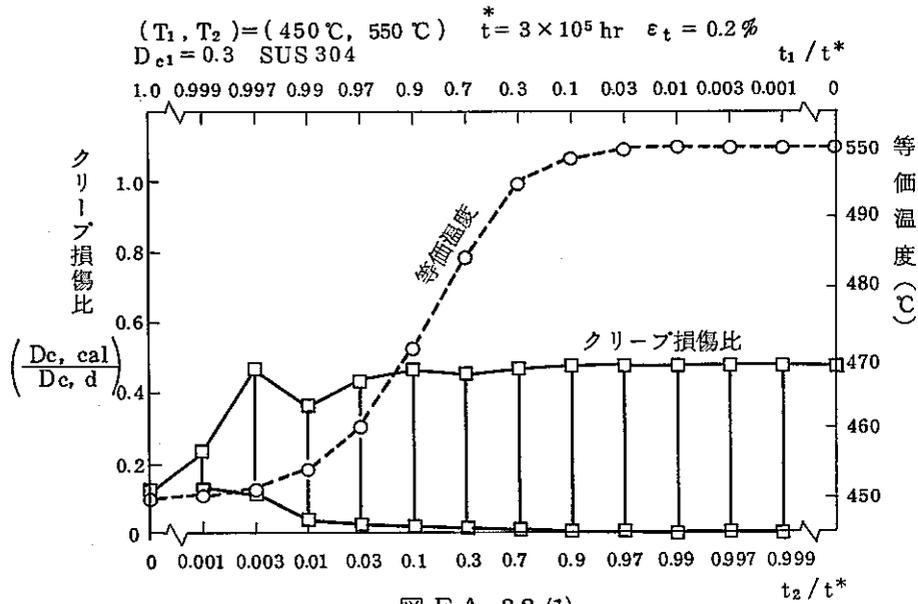


図 F.A. 22 (1)

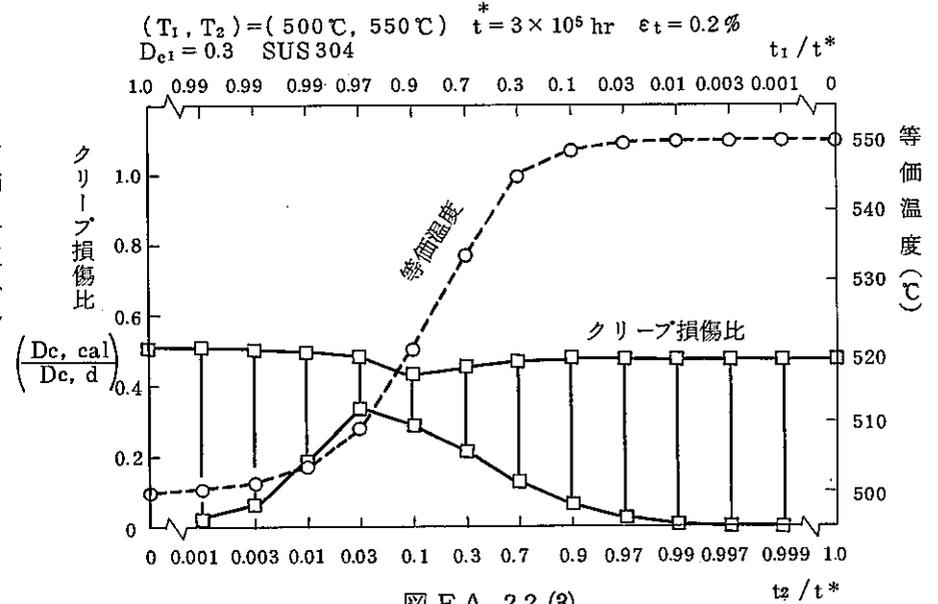


図 F.A. 22 (3)

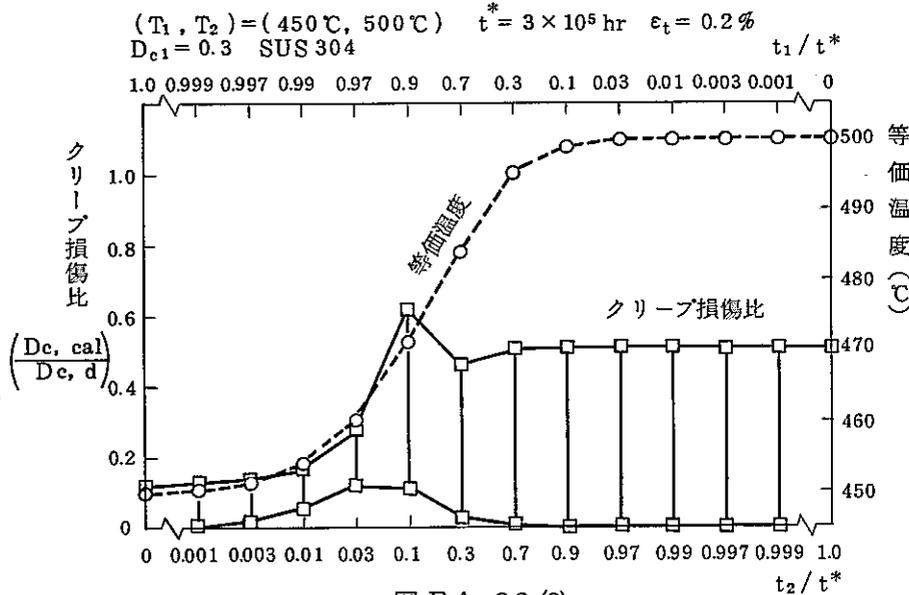


図 F.A. 22 (2)

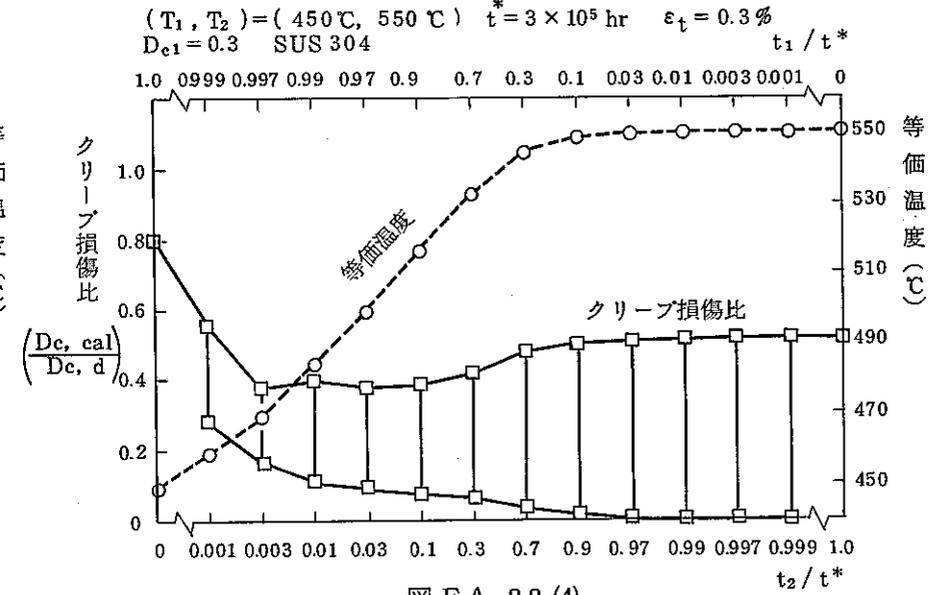


図 F.A. 22 (4)

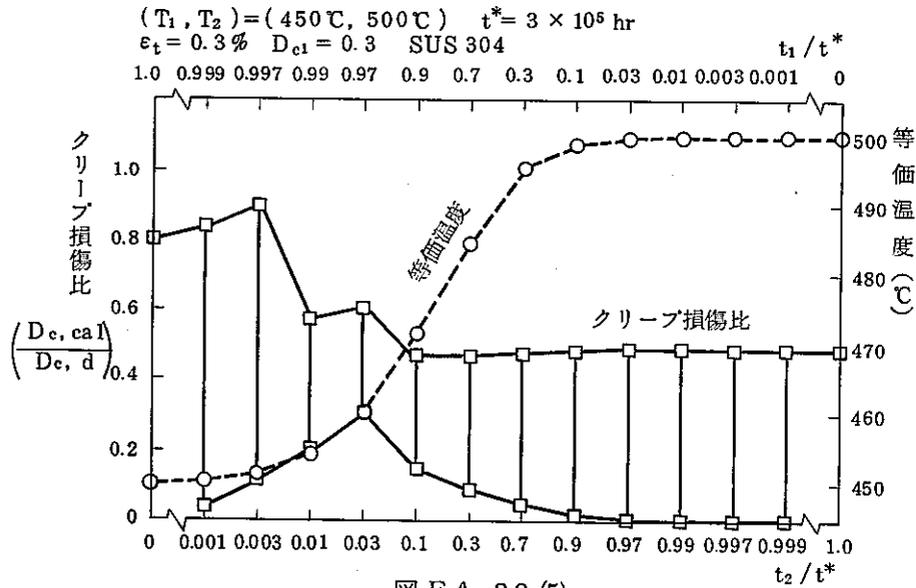


図 F A. 22 (5)

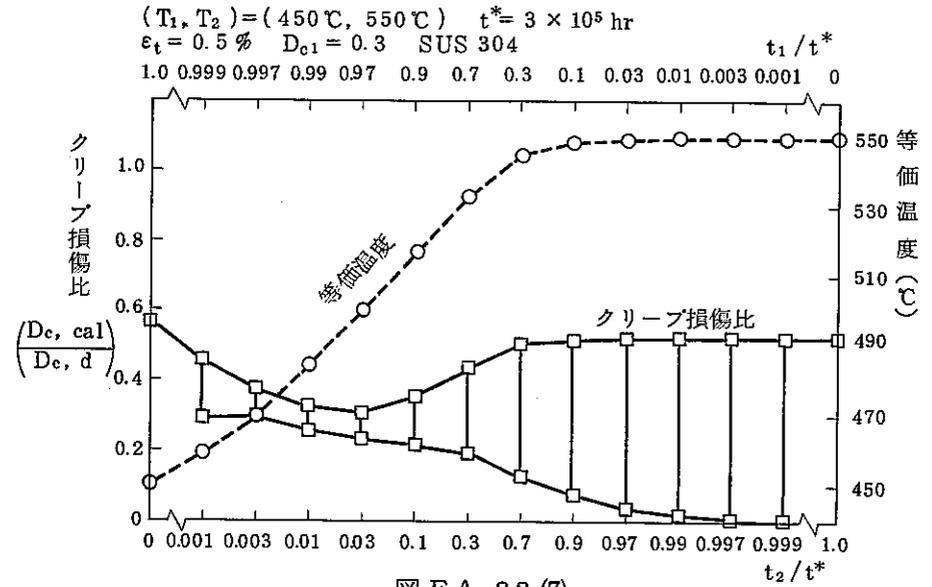


図 F A. 22 (7)

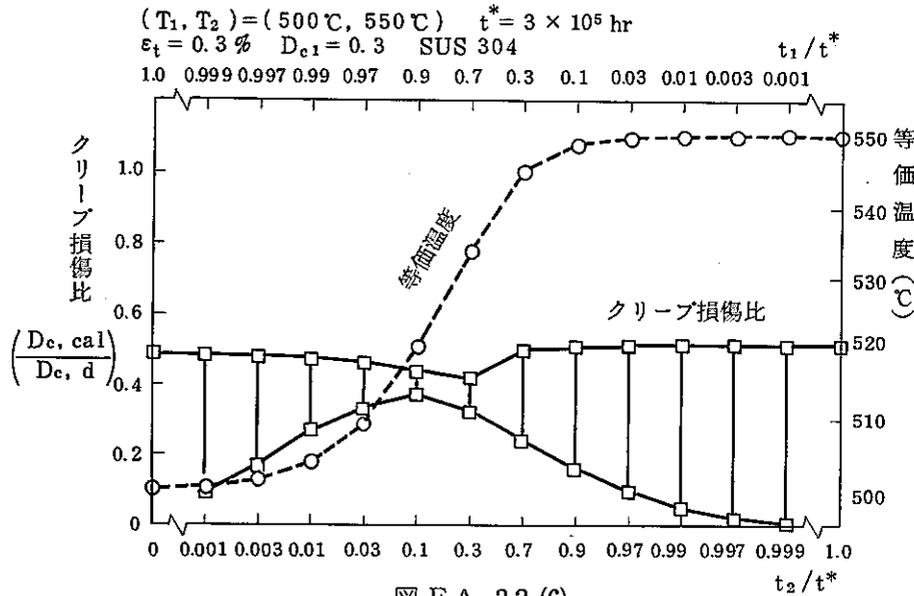


図 F A. 22 (6)

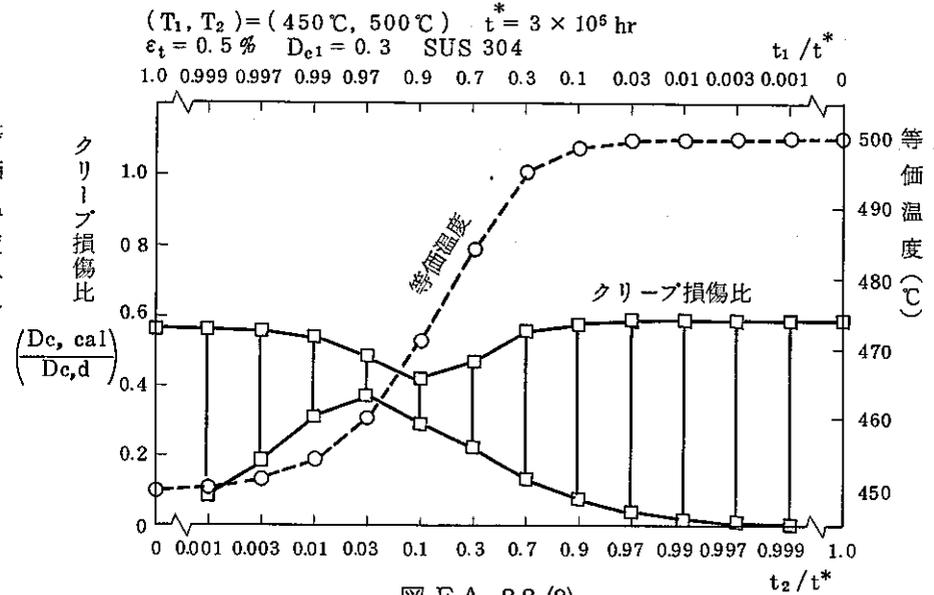


図 F A. 22 (8)

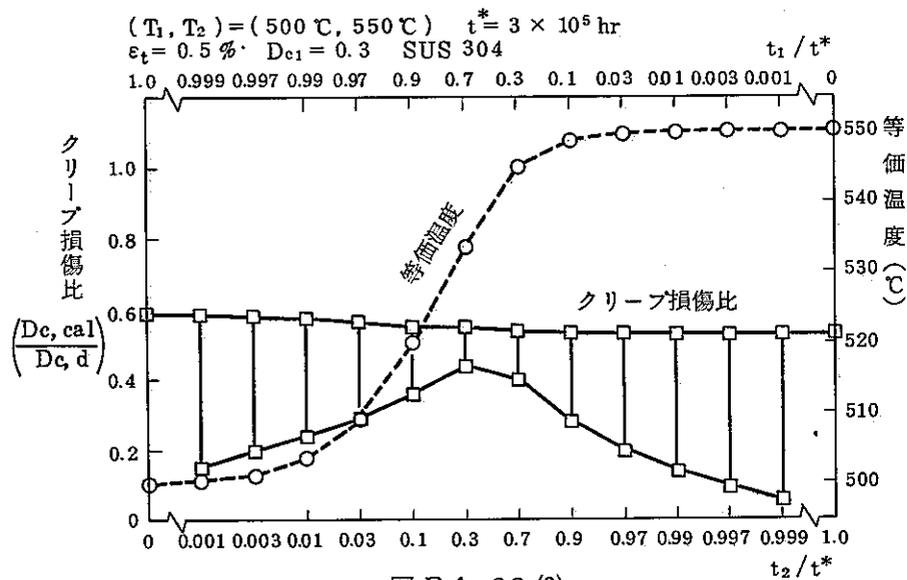


図 F A. 22 (9)

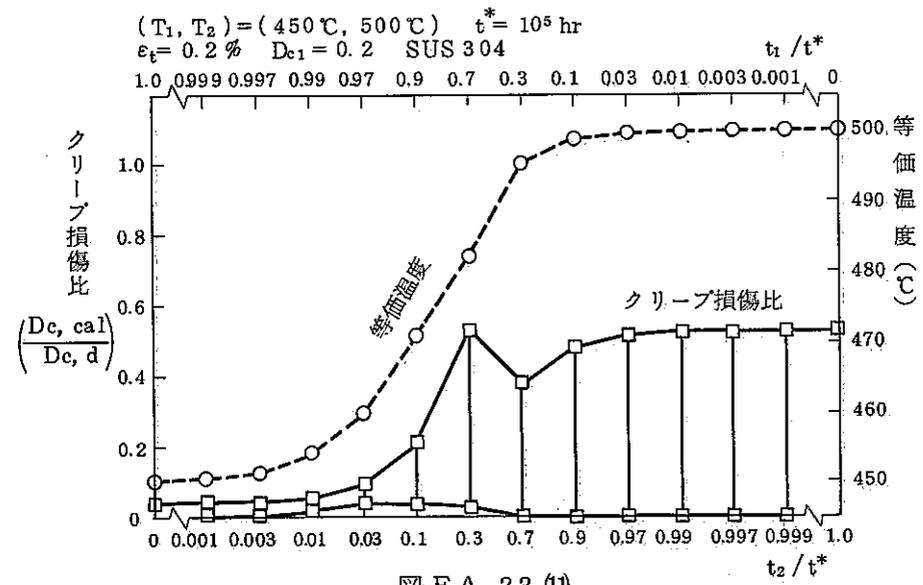


図 F A. 22 (11)

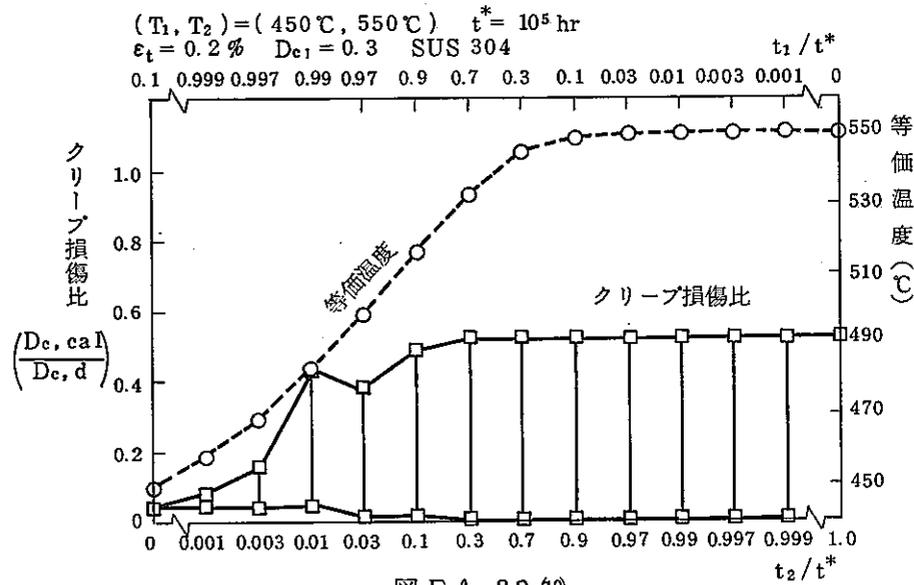


図 F A. 22 (10)

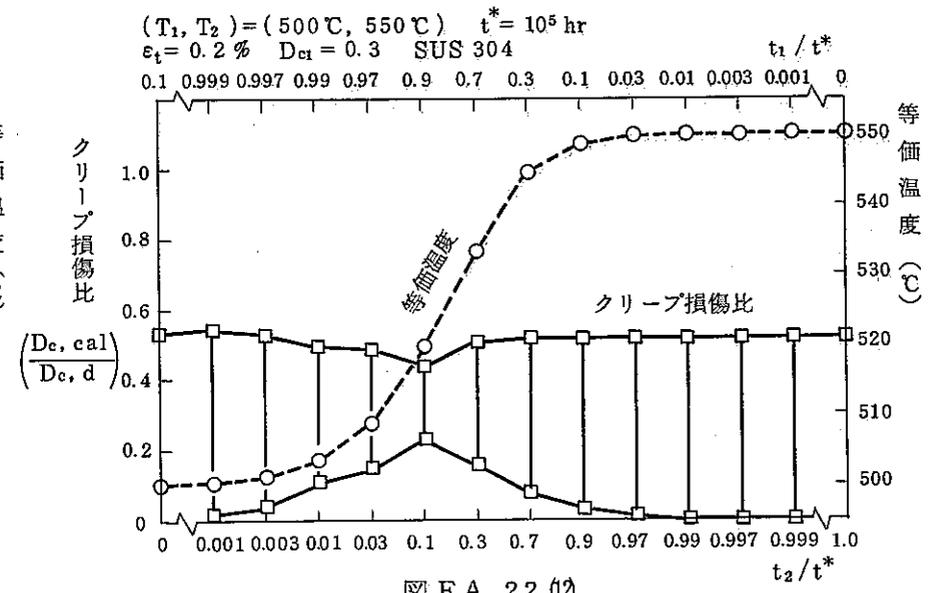


図 F A. 22 (12)

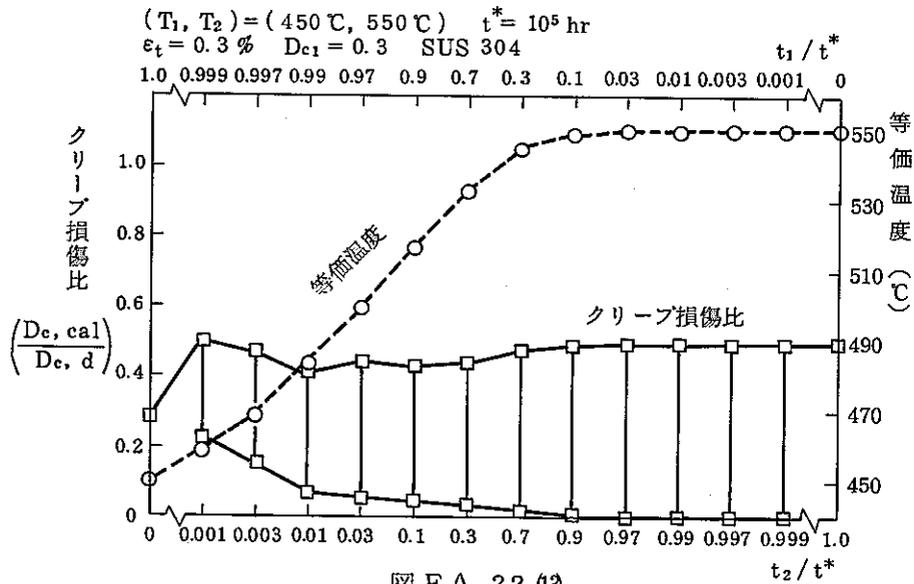


図 F A. 22 (13)

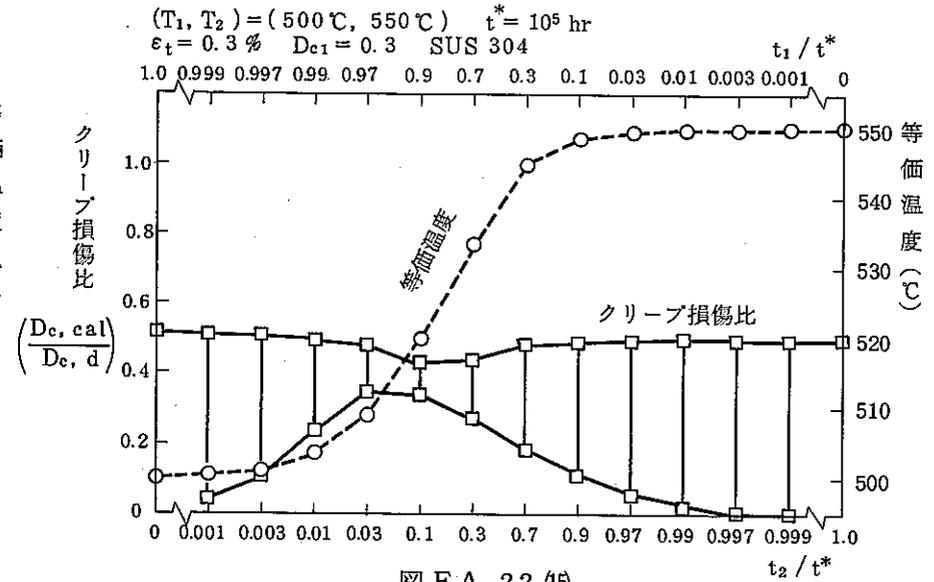


図 F A. 22 (15)

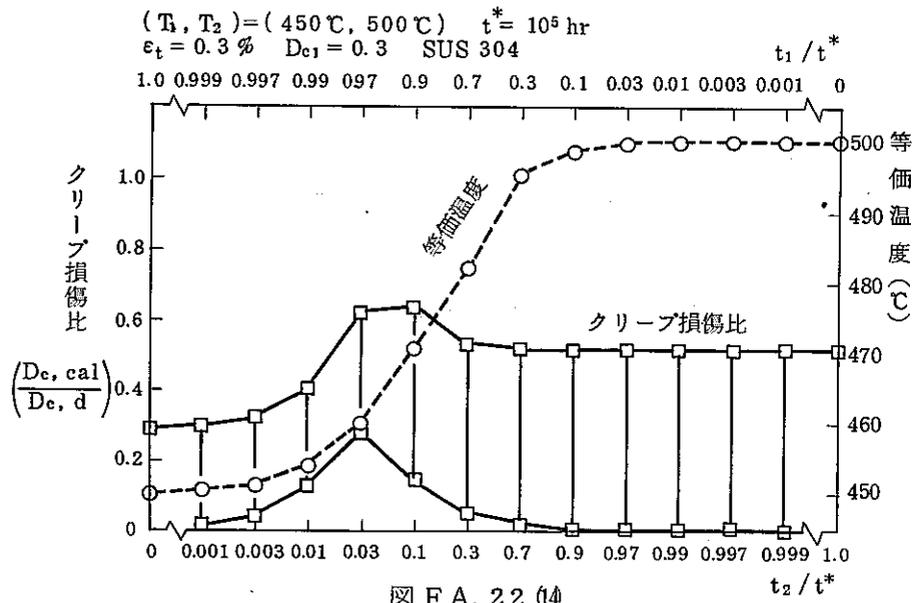


図 F A. 22 (14)

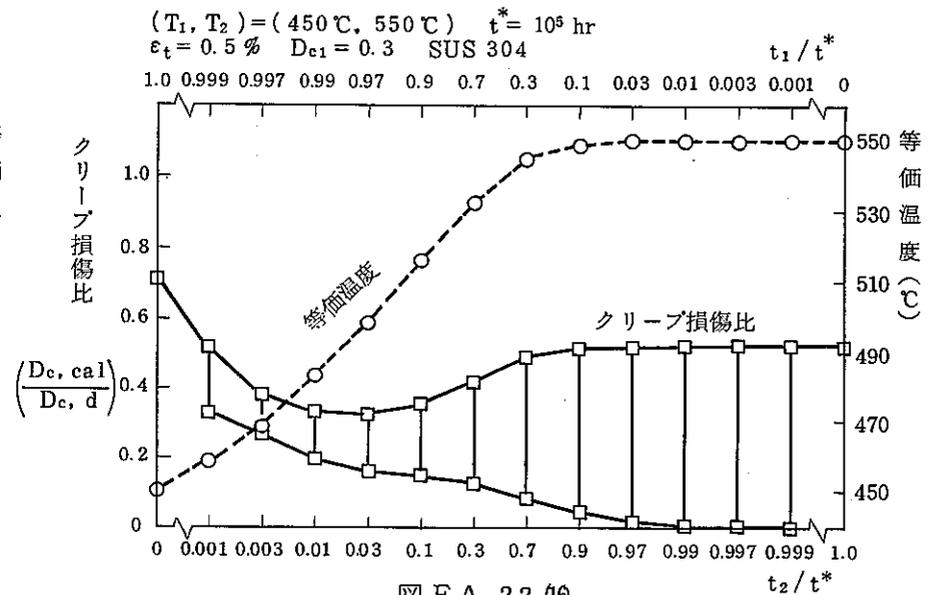


図 F A. 22 (16)

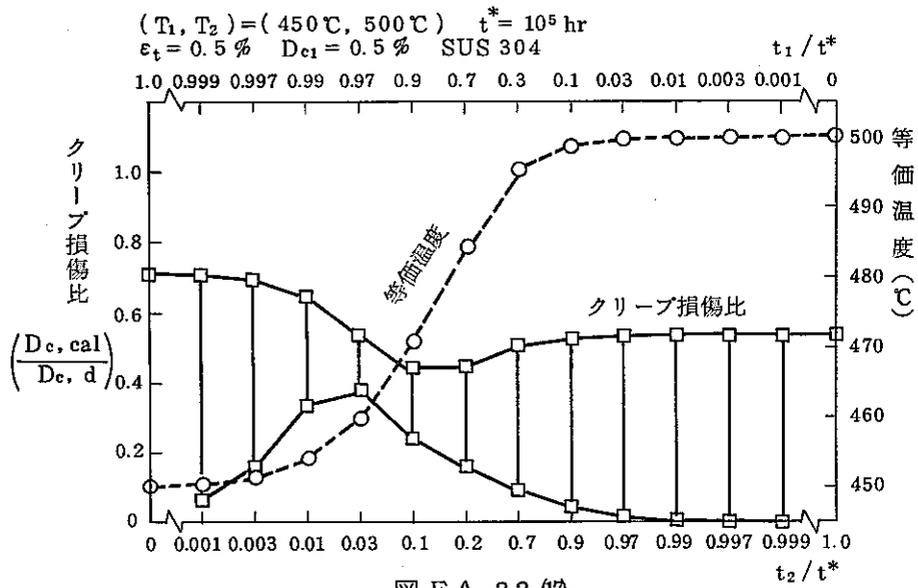


図 F.A. 22 (17)

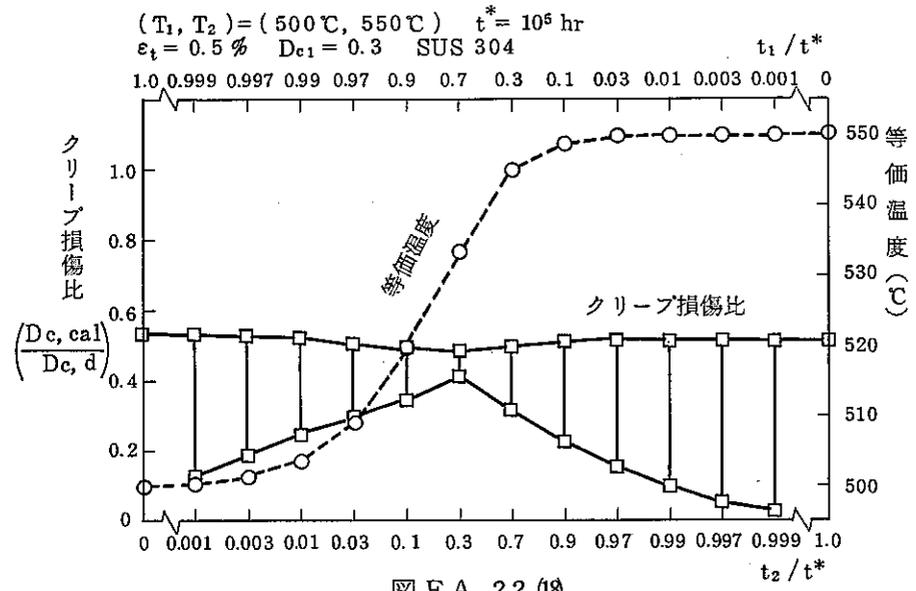


図 F.A. 22 (18)

## 付録 G 圧縮及び曲げ座屈の評価

### G. 1 高速原型炉第 1 種容器

円筒殻が軸方向の圧縮荷重及び（又は）曲げ荷重を受ける場合にあっては、次の式を満足する場合は、時間に依存しない座屈は生じないとすることができる。

$$\frac{F_c}{A} + \frac{D_o M}{2y I} \leq \frac{S_y}{f_B} \quad (G. 1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D_o}{t} \leq 140 : y=1.3 \\ 140 < \frac{D_o}{t} < \frac{2E}{5S_y} : y=1.3 - 0.3 \left( \frac{D_o}{t} - 140 \right) / \left( \frac{2E}{5S_y} - 140 \right) \end{array} \right. \quad (G. 2)$$

$f_B$  : 別表 2.4 に定める安全係数

$E$  : 考えている状態の壁厚平均金属温度に対して別表 1.8 に定める値 ( $kg/mm^2$ )

$S_y$  : 上記の温度に対して別表 1.4 (別図 1.4) に定める値 ( $kg/mm^2$ )

$F_c$  : 軸方向の圧縮荷重 ( $kg$ )

$M$  : 曲げモーメント ( $kg \cdot mm$ )

$D_o, t, A$  : 円筒殻の外径 ( $mm$ ), 肉厚 ( $mm$ ), 断面積 ( $mm^2$ )

$I$  : 円筒殻の断面 2 次モーメント ( $mm^4$ )

ただし、軸長が著しく長い場合は別途オイラー型の座屈の評価をするものとする。

### G. 2 高速原型炉第 1 種管

管の時間に依存しない座屈を防止するために、5.7.(3)1)の規定に加えて、次の(1)及び(2)の評価を行うものとする。

(1) 管台に接続する直管に対して、G.1を適用して評価すること。

(2) 運転状態Ⅳに関して、曲り管又はエルボに対して次の評価を行うこと。

$$\frac{B_2 D_o}{2 I} (M_1 + M_1^*) \leq 1.5 K_s S_m \quad (G. 4)$$

ここに用いる記号の意義はすべて 5.2.3 (5)2) に定めるところによる。

【解 説】

1 本方針では軸圧縮及び（又は）曲げ荷重を受ける容器について具体的評価式を付録G.1に与えている。

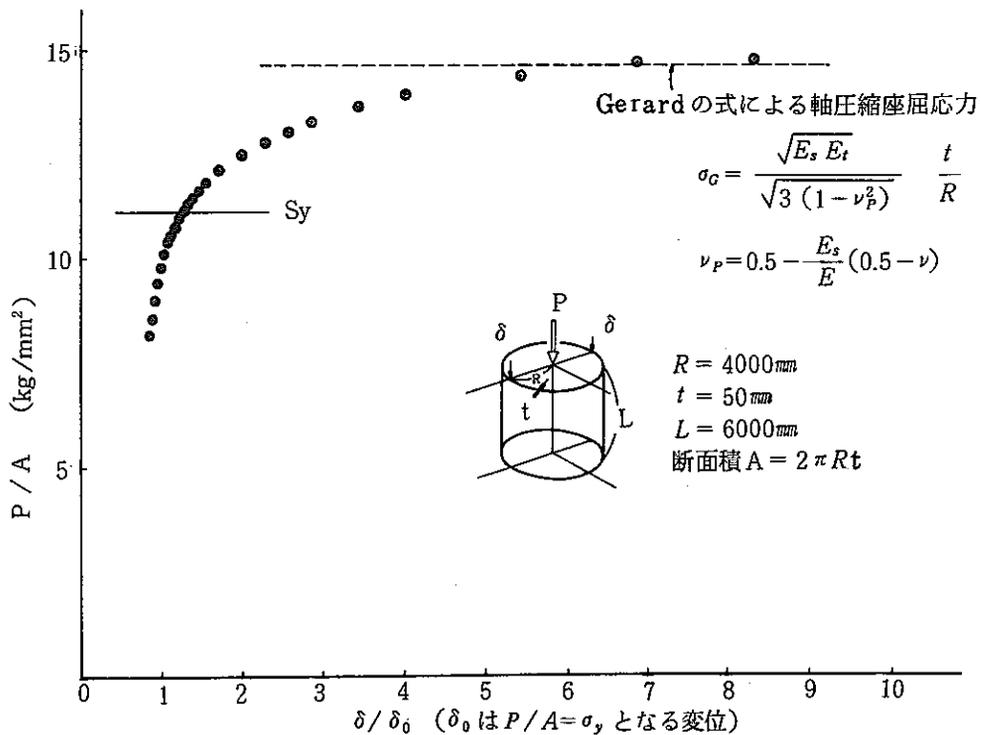
付録G.1に示す評価式を定めるに当って参考とした解析結果例を図G.1，図G.2に示す。図G.1は軸圧縮又図G.2は曲げ荷重をそれぞれ受ける円筒殻の解析結果であるが，この結果から次のことがわかる。

(i) 軸圧縮を受ける円筒殻の座屈応力については，Gerard の式

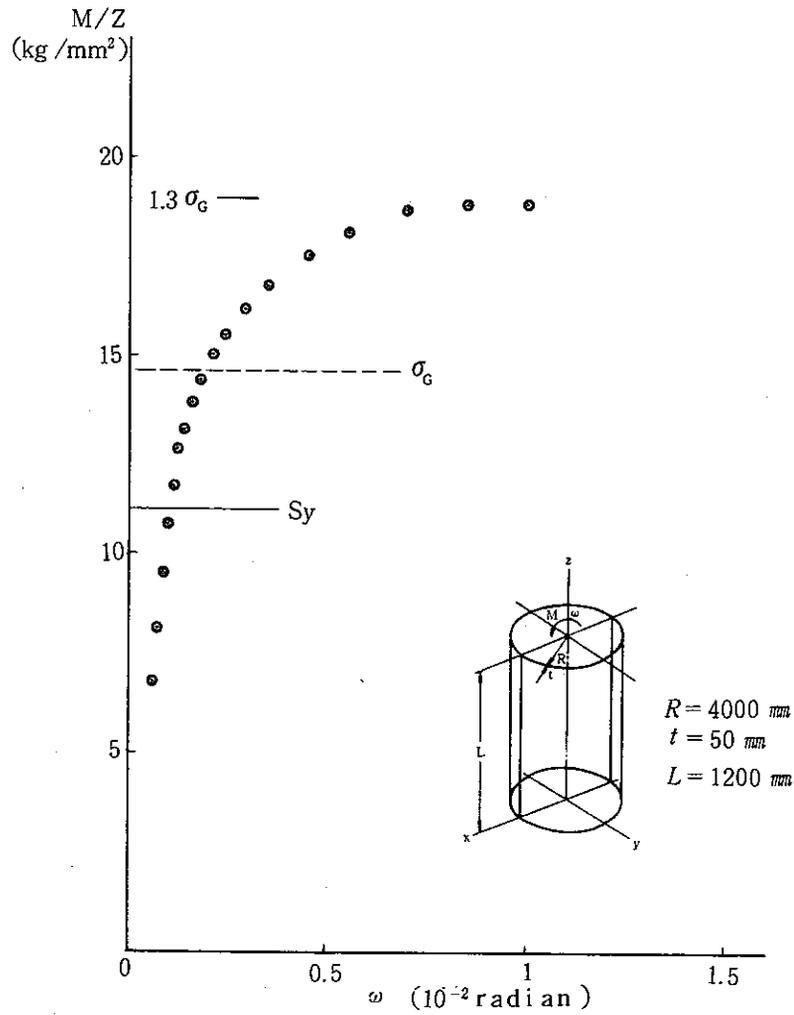
$$\sigma_G = \frac{\sqrt{E_t E_s}}{\sqrt{3(1-\nu_p^2)}} \frac{t}{R}$$

と解析結果は良好に一致する。ここに， $E_t$ ， $E_s$ はそれぞれ接線弾性係数及び割線弾性係数であり， $\nu_p$ は次式により定められる修正ポアソン比である。

$$\nu_p = 0.5 - \frac{E_s}{E} (0.5 - \nu)$$



図G.1 円筒の軸圧縮における荷重と変位の関係



図G.2 円筒に働く曲げモーメントの回転変位の関係

(ii) 曲げ座屈時の軸方向最大応力は、ほぼ  $1.3 \sigma_G$  である。

本方針では、これらの解析結果を参考にして、高速原型炉第1種機器の主要なものの径対板厚比 ( $D/t$ ) を対象とした塑性座屈及び遷移領域 (塑性座屈領域と弾性座屈領域の間) の評価式

$$\frac{F_c}{A} + \frac{D_o M}{2y I} \leq \frac{S_y}{f_B} \quad (\text{G. 1})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D_o}{t} \leq 140 : y = 1.3 \end{array} \right. \quad (\text{G. 2})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 140 < \frac{D_o}{t} < \frac{2E}{5S_y} : y = 1.3 \left( \frac{D_o}{t} - 140 \right) / \left( \frac{2E}{5S_y} - 140 \right) \end{array} \right. \quad (\text{G. 3})$$

を定めた。ここで、

$f_B$  : 別表 2.4 に定める安全係数

$E$  : 考えている状態の壁厚平均金属温度に対して別表 1.8 に定める値 ( $kg/mm^2$ )

$S_y$  : 上記の温度に対して別表 1.4 (別図 1.4) に定める値 ( $kg/mm^2$ )

$F_c$  : 軸方向の圧縮荷重 ( $kg$ )

$M$  : 曲げモーメント ( $kg \cdot mm$ )

$D_o, t, A$  : 円筒殻の外径 ( $mm$ ), 肉厚 ( $mm$ ), 断面積 ( $mm^2$ )

$I$  : 円筒殻の断面 2 次モーメント ( $mm^4$ )

上式 (G.1) においては、座屈限界応力として、Gerard の式  $\sigma_c$  の代わりに加工硬化を無視した設計降伏点を基準値としている。

曲げ座屈値と軸圧縮座屈値の比  $y$  に関しては、前述の解析結果に基づいて、塑性座屈領域では、 $y = 1.3$  とし、遷移領域では塑性座屈領域の  $y = 1.3$  と弾性座屈領域の  $y = 1.0$  の直線内挿とした (図 G.4 参照)。なお、 $D_o/t = 140$  は、 $y = 1.3$  が確保できる領域を解析結果を参照して安全側に取扱ったものである。又、 $D_o/t = 2E/5S_y$  は弾性座屈応力の評価式として、機械工学便覧の式 (同式は、ASME Sec. III の弾性座屈値とほぼ等しい) を参考にして

$$\sigma_{cr} = \frac{2E}{5} \frac{t}{D_o}$$

を用い、 $\sigma_{cr} = S_y$  と置いて定めたものである。

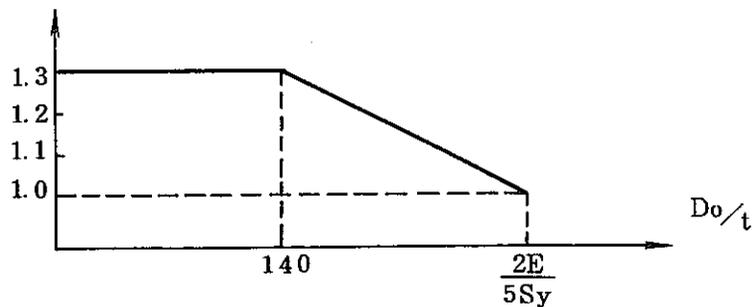


図 G.4 y 値

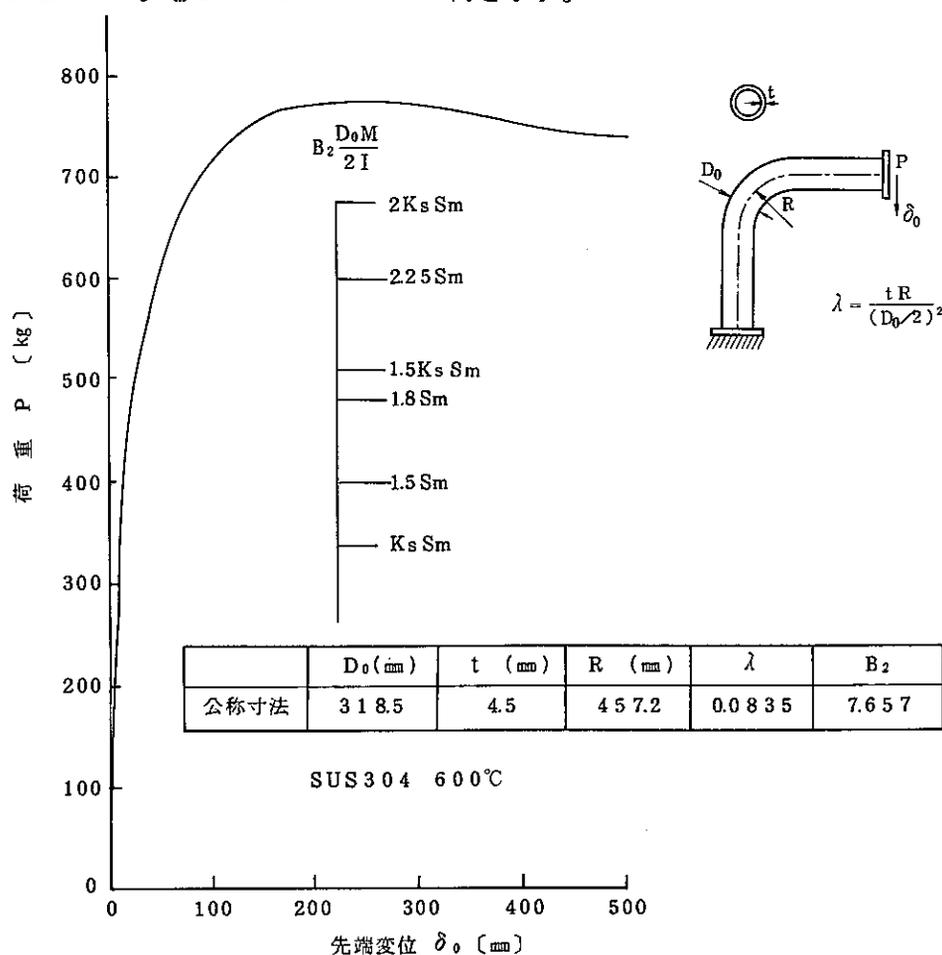
2 G.2は、高速原型炉第1種管の座屈の防止に関するもので、長期1次応力が低い場合及びクリープ効果が顕著でない場合に適用される。

G.2(1)は、管台に接続される直管に対しては、高速原型炉第1種容器に対する規定であるG.1を適用すべきことを定めたものである。

G.2(2)は、運転状態Ⅳにおいて、曲り管又はエルボに負荷される曲げモーメントに対する制限を定めたものである。運転状態ⅣについてのみG.2(2)の規定を設けたのは、以下の理由による。

高速原型炉の配管系では、内圧が低く薄肉大口径であるため、塑性不安定の破損様式に注意を払う必要がある。特に、エルボでは撓性が大きく、変形が集中する可能性があるため注意が必要である。

高温におけるいくつかの塑性不安定試験によると、面内曲げを受けるエルボの塑性不安定モーメント（最高荷重） $M_B$ は、 $B_2$ 係数により応力に換算（ $B_2 \frac{D_o M_B}{2I}$ ）すると、高温ではほぼ  $2 K_s S_m \sim 3 K_s S_m$  となる。図G.5に一例を示す。



図G.5 エルボの面内曲げ試験

このエルボの塑性不安定は、破損様式の点で塑性崩壊と類似しているため、実質的にその防止を1次応力制限で行うこととすると、運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及びⅣで制限値はそれぞれ、 $K_s S_m$ 、 $K_s S_m$ 、 $1.2 K_s S_m$ 及び $2 K_s S_m$ となり、運転状態Ⅳで塑性不安定モーメントに近接する。

本方針では、上述したようにエルボの塑性不安定は、1次応力の制限によりほぼ防止されるが、運転状態Ⅳでは制限値が塑性不安定モーメントに近接することを考慮して、運転状態Ⅳにおけるエルボの塑性不安定の防止規定として、許容値を上述した限界値を安全側に下回る値とする評価式

$$\frac{B_2 D_o}{2 I} (M_1 + M_1^*) \leq 1.5 K_s S_m$$

を追加した。

## 付録H 応力集中係数

### (1) 応力集中係数K

応力集中係数Kは解析対象個所における局部的構造不連続に対して設計者が適切に定めるものとする。管にあってはKの値は告示第48条に定める応力係数 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ のうち最も大きな値を超えることを要しない。ただし、応力係数 $K_1$ に管断面の偏平度に関する係数は含めない。

### (2) ピーク熱ひずみに関する弾性応力集中係数 $K_T$

ピーク熱ひずみに関する弾性応力集中係数 $K_T$ は、解析対象個所における局部的構造不連続に対して設計者が適切に定めるものとする。管にあっては $K_T$ の値は告示第48条に定める応力係数 $K_3$ を超えることを要しない。

### 【解説】

- 1 付録Hは応力集中係数の取扱いについて定めたものである。
- 2 付録H(1)は応力集中係数Kの取扱いを定めたものである。

従来の配管設計法においては、ピーク応力を公称応力に $C \times K$ を乗じた値として求め疲労

損傷を評価する方法が採用されていた。従って、配管設計法におけるK係数は、一般設計方針においてクリープ疲労損傷評価の際に使用する弾性応力集中係数とは性格が異なり、いわば対象とする配管要素の疲労強度減少係数に該当する。

局所的ひずみ集中がある場合の疲労損傷又はクリープ疲労損傷の評価法として、一般設計方針としてNeuber則により弾性応力集中係数を用いた評価法を規定するとともに、管の設計方針にもこれを準用することを規定している。従って、管の設計方針においては、K係数は、基本的には弾性応力集中係数を使用すべきである。

そこで、本方針の運用にあたっては、原型炉で使用される配管要素の代表的なものについては詳細な弾性解析を実施し使用すべき応力係数を定めるものとしたが、その他の配管要素については設計者が告示の規定する、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  係数の最大値を超えない範囲で適宜定めるものとしている。

付録H(1)の管の偏平度に関する応力係数の取扱いは管の設計方針で解説する。

3 付録H(2)は、ピーク熱ひずみに関する弾性応力集中係数の取扱いを定めたものである。

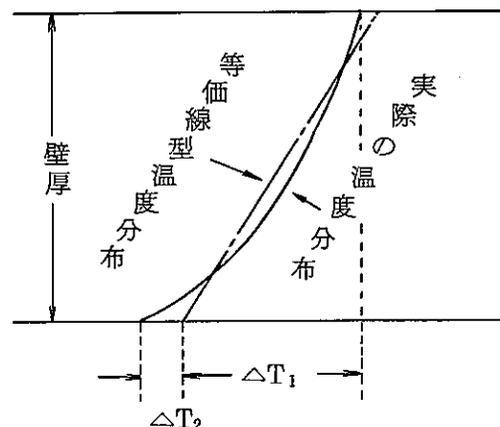
ピーク熱ひずみに対する集中係数 $K_T$ は平滑な表面では1.0であるが、ピーク熱ひずみの生じる表層部の深さに比べ更に小さい表面形状不連続がある場合には1.0より大きい $K_T$ を用いるべきである。平坦に仕上げられていない溶接部の場合等、適切な $K_T$ を別途設計者が適切に定める必要があるものとしている。

4. ピーク熱ひずみに対するひずみ集中係数 $K_T$ の運用について以下に示す。

高温構造設計方針では、一般に、クリープ疲労評価を行う際のひずみ範囲は（1次+2次）応力強さ範囲に対応する公称ひずみ範囲 $\epsilon_n$ と、弾性応力集中係数 $K$ を使用して計算されるが、ピーク熱応力強さ範囲に対応するピーク熱ひずみ範囲 $\epsilon_P$ は、ひずみ集中係数 $K_T$ を乗じて線形加算することを規定している。

ピーク熱ひずみ範囲 $\epsilon_P$ は、右図に示すように、厚さ方向温度勾配の非線形分（ $\Delta T_2$ ）によるものであり、壁厚の表層近傍で生じる応力に対応するものである。

このような応力は、一般に形状不連続の影響を受け難いので、例えば告示第1種管の構造の規格では、特に応力指数 $K$ を乗じずにピーク応力強さが算出できるものとしている。（告示第46条第5号）



高温構造設計方針では、形状及び解析方法が多岐にわたる可能性を考慮して、一般にピーク熱ひずみ範囲 $\epsilon_P$ については、ひずみ集中係数 $K_T$ を乗じるものとしている。ここで $K_T$ としては、ピーク熱ひずみが生じる表層近傍での局部的形状不連続を考慮した弾性応力集中係数の適用が基本となる。

$K_T$ の適用法を概念的に示したのが、図H.1である。図H.1では厚さの異なる円筒を接続した際の応力集中部の簡易なひずみ評価方法を模式的に示している。

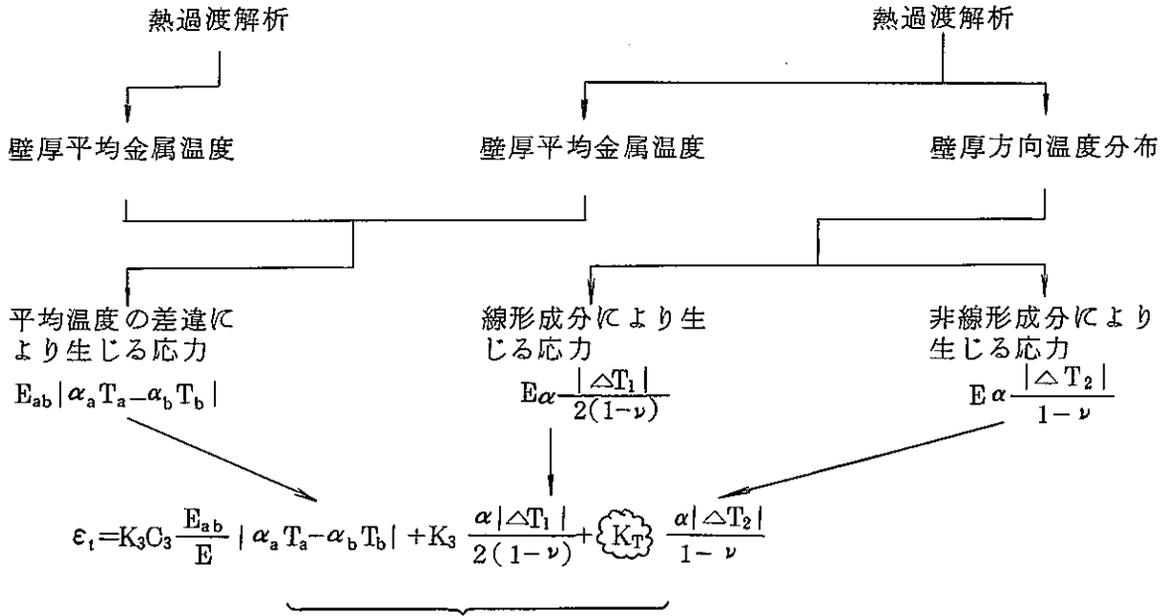
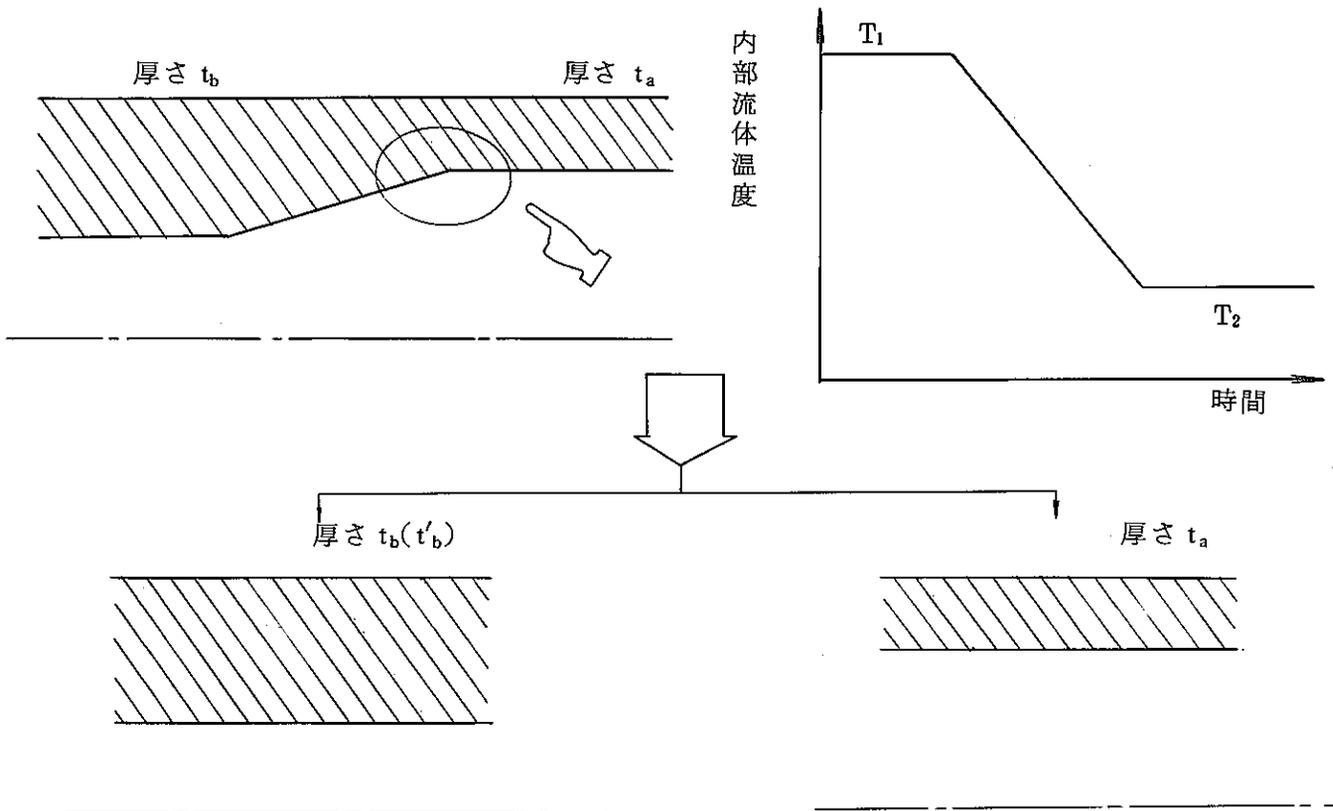
図H.1では、実際の形状に基づき解析するかわりに、解析が容易な厚さ $t_a$ 及び厚さ $t_b$ の無限円筒についての熱過渡解析結果から、対象部位のひずみを求めようとするものである。この場合、厚さ $t_a$ の無限円筒で求めたピーク熱ひずみ $\epsilon_P = \frac{\alpha \cdot |\Delta T_2|}{1-\nu}$ には、対象部位での形状不連続の効果が入っていないので、ひずみ範囲 $\epsilon_T$ を算出する際には、形状不連続に対応する $K_T$ を乗じる必要があると考えられる。

ここで $K_T$ の値は、ピーク熱応力が理想的に表層のみに限定されたものであれば、 $K_T = 1.0$ となり、ピーク熱応力の分布が厚さ方向に深くなるにつれて、等価線形化応力 $\left\{ E\alpha \frac{|\Delta T_1|}{2(1-\nu)} \right\}$ に対する係数 $K_3$ に漸近すると考えられ、簡便には $K_T = K_3$ とすることにより、応力集中係数としては保守的に評価することができる。

一方、近年の大型計算機を利用した有限要素法（FEM）解析の進歩により、多少複雑な形状

の構造物であっても、実際の形状に則したモデルを用いて詳細に応力・ひずみを解析的に求めることが可能となってきている。

実際の形状に則したモデルを用いた F E M 解析を適用した場合には、形状不連続の効果は、計算結果中に含まれる。したがって、この場合では  $K_T=1.0$  としてやれば、一般に保守的評価結果が得られると考えられる。



必要に応じて、非弾性ひずみの再配分による拡大を考慮

図 H. 1 応力集中部のひずみ範囲評価概念図(1)  
(内面にテーパを有する円筒胴の接続)  
簡易解析による場合

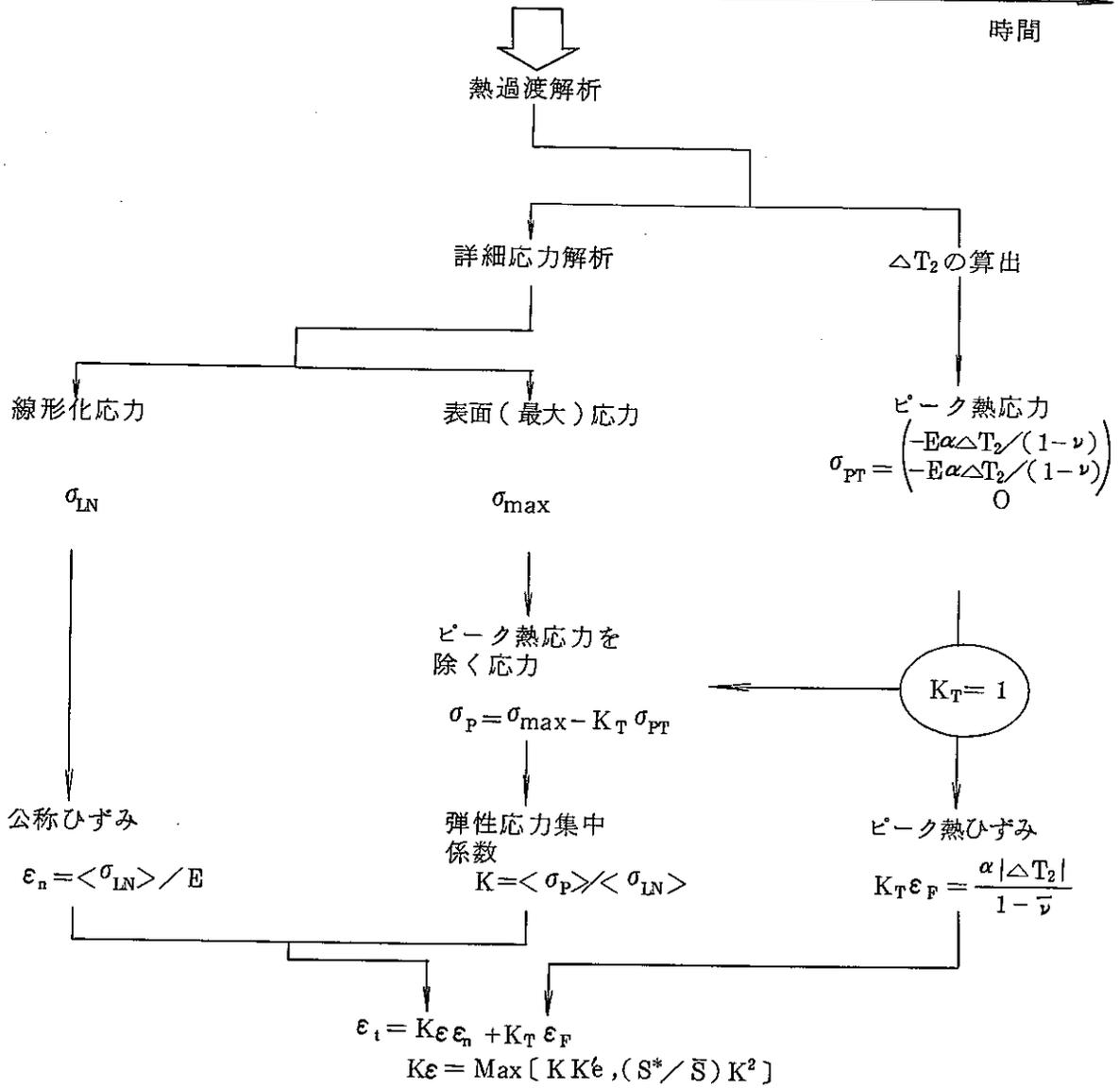
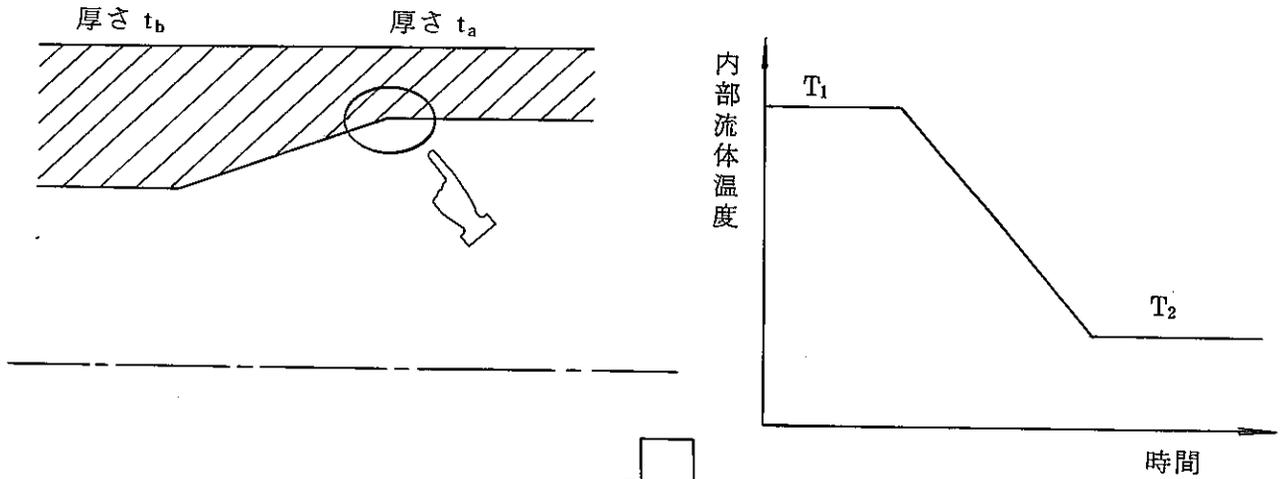


図 H. 2 応力集中部のひずみ範囲評価概念図 (2)  
 (内面にテーパを有する円筒胴の接続)  
 (詳細弾性解析による場合)

【解 説】 材料強度基準等

- 1 材料強度基準等は、高速原型炉第1種機器の設計を「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」に基づき行う場合に使用すべき設計許容値等を定めるもので、表1に示す別表と別図、及び表2に示す付録より構成されている。

表1 材料基準別表1（別図1）の構成

番号	別表番号	別図番号	標 題	告示の対応する別表(別図)	CCN-47の対応する図表
1	1.1	1.1	最大許容応力強さ $S_o$	別表第6	I-1 4.2
2	1.2	1.2	設計応力強さ $S_m$	別表第2	I-1 4.3 ( $S_{mt}$ )
3	1.3	1.3	設計応力強さ $S_t$	*	I-1 4.4
4	1.4	1.4	設計降伏点 $S_y$	別表第9	I-1 4.5
5	1.5	1.5	設計クリープ破断応力強さ $S_R$	*	I-1 4.6
6	1.6	1.6	設計引張強さ $S_u$	別表第10	*
7	1.7	1.7	設計緩和強さ $S_r$	*	*
8	1.8	*	縦弾性係数 $E$	別表第11	I-1 4.7
9	1.9	*	ポアソン比 $\nu$	*	*
10	1.10	*	熱膨張係数 $\alpha$	別表第12	I-1 4.8 I-1 4.9
11	1.11	1.8	許容ひずみ範囲(A) $\epsilon_t$		T-1420-1
12	1.12	1.9	許容ひずみ範囲(B) $\epsilon_t$	別図第2	*
13	1.13	1.10	許容ひずみ範囲(C) $\epsilon_t$		*
14	*	1.11	等時応力-ひずみ線図	*	T-1800
15	1.14	1.12	許容引張応力 $S^*$	別表第6	*

注 1) \*印は対応する図表がないことを示す。

2) 告示別表第1及びASME Code Case N-47 Table I-1 4.1は使用材料の規格を示す表である。

表2 付録の構成

番号	付録番号	標 題	内 要
1	MA	環 境 効 果	○ ナトリウム接液面のくされ代のと り方及び脱炭による強度補正に關す る方針並びに中性子照射効果の評価 に關する方針
2	MB	設計応力強さ $S_t$ , 設計クリーブ破 断応力強さ $S_r$ 及び設計緩和強さ $S_R$ の外挿値	○ $3 \times 10^5$ hr を超える時間に対する $S_t$ , $S_R$ 及び $S_r$ の外挿に關する補助 表
3	MC	SUSF304大型鍛鋼品の規格引張 強さ $49 \text{ kg/mm}^2$ 級の材料強度基準 等	○ SUSF304の大型鍛鋼品に關する 引張強さ $49 \text{ kg/mm}^2$ 級の材料強度基 準等
4	MD	SUSF321大型鍛鋼品の材料強度 基準等	○ SUSF321の大型鍛鋼品に關する 材料強度基準等

## 2 補間方法

材料強度基準等を設計に適用する場合に、別表、別図の補間が必要となるが、その方法は下記によるものとする。

- 1) 別図において、座標軸に温度を使用している最大許容応力強さ  $S_0$ 、設計応力強さ  $S_m$ 、設計降伏点  $S_y$ 、設計引張強さ  $S_u$  は、温度に關しては線形補間して使用するものとする。
- 2) 別図において、温度をパラメータとしている設計応力強さ  $S_t$ 、設計クリーブ破断応力強さ  $S_R$ 、設計緩和強さ  $S_r$ 、許容ひずみ範囲  $\epsilon_t$  は、温度について線形に補間した後、別図の座標軸の表示に従って線形、片対数、両対数のいずれかにより補間するものとする。

別図の与えられていない縦弾性係数、ポアソン比、熱膨張係数については線形補間して使用する。

## 3 別表1(別図1)の策定方法は次のとおりである。

### (1) 別表 1.1 最大許容応力強さ $S_0$ 。

#### 1) SUS304, SUS316

告示の別表第6に定める許容引張応力  $S$  とした。

2) SUS321 伝熱管

i) 温度  $T \leq 425^\circ\text{C}$

告示の別表第6に定める許容引張応力  $S$  とした。

ii)  $425^\circ\text{C} < T \leq 650^\circ\text{C}$

次に掲げる値のうち最小のものを  $S_0$  と定めた。

- (イ) 室温での規格引張強さの0.25倍の値
- (ロ) 各温度での設計引張強さの0.25倍の値
- (ハ) 室温での規格降伏点の0.625倍の値
- (ニ) 各温度での設計降伏点の0.9倍の値
- (ホ)  $10^3$  時間に0.01%のクリープを生ずる応力の平均値

別表1.3の解説に示すSUS321のクリープひずみ式において最小クリープひずみ速度  $\dot{\epsilon}_m$  が  $0.01\%/10^3\text{hr}$  となる応力

- (ヘ)  $10^5$  時間でクリープ破断を生ずる応力の最小値の0.8倍の値

別表1.5の解説に示す設計クリープ破断式  $S_R(t, T)$  において温度  $T$ 、時間  $t = 10^5$  時間として定まる応力の0.8倍の値

- (ト)  $10^5$  時間でクリープ破断を生ずる応力の平均値の0.6倍の値

別表1.5の解説に示す平均クリープ破断式  $S_R(t, T)$  において温度  $T$ 、時間  $t = 10^5$  時間として定まる応力の0.6倍の値

ただし、 $450^\circ\text{C}$  での  $S_0$  は告示第6表に定める許容引張応力  $S$  と滑らかに連続するようにフェアリングを施した。

3.  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  (NT) 板,  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  (NT) 伝熱管

告示の別表第6に定める許容引張応力  $S$  とした。

(2) 別表1.2 設計応力強さ  $S_m$

1) SUS304, SUS316, SUS321

i) 温度  $T \leq 425^\circ\text{C}$

告示の別表第2に定める設計応力強さ  $S_m$  とした。

ii)  $425^\circ\text{C} < T \leq 650^\circ\text{C}$

次に掲げる値のうち最小のものを  $S_m$  と定めた。

- (イ) 室温での設計引張強さの $\frac{1}{2}$ 倍の値
- (ロ) 各温度での設計引張強さの $\frac{1}{2}$ 倍の値
- (ハ) 室温での設計降伏点の $\frac{1}{2}$ 倍の値
- (ニ) 各温度での設計降伏点の0.9倍の値

2)  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo(NT)板,  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo(NT)伝熱管

i) 温度  $T \leq 40^\circ\text{C}$

告示の別表第2に定める設計応力強さ  $S_m$  とした。

ii)  $40^\circ\text{C} < T \leq 550^\circ\text{C}$

次に掲げる値のうち最小のものを  $S_m$  と定めた。

- (イ) 室温での規格引張強さの $\frac{1}{2}$ 倍の値
- (ロ) 各温度での設計引張強さの $\frac{1}{2}$ 倍の値
- (ハ) 室温での規格降伏点の $\frac{1}{2}$ 倍の値
- (ニ) 各温度での設計降伏点の $\frac{1}{2}$ 倍の値

(3) 別表 1.3 設計応力強さ  $S_t$

各鋼種とも次に掲げる値のうち最小のもの  $S_t$  と定めた。

- (イ) 各温度, 各時間での設計クリープ破断応力強さ  $S_R$  (別表 1.5) の $\frac{1}{2}$ 倍の値
- (ロ) 各温度, 各時間での第3期クリープを開始する応力の最小値の0.8倍の値

別表 1.5 の解説に示されるクリープ破断式において温度  $T$ , 時間  $t$  とし, 次式より算定される応力  $S_3^{\min}(t, T)$  の0.8倍の値

$$S_3^{\min}(t, T) = S_R(t/a_3, T)$$

ここで,

$S_R(t/a_3, T)$  : 別表 1.5 解説に示されるクリープ破断式において温度  $T$ , 時間  $t/a_3$  として算出される応力

$a_3$  : 第3期クリープ開始時間とクリープ破断時間の比の平均値であり, 第3期クリープ開始時間  $t_3(\sigma, T)$  との相関により定式化を行なった。

- (ハ) 各温度, 各時間での1.0%の全ひずみを生ずる応力の最小値  $S_1^{\min}$  %。  $S_1^{\min}$  % は次の方式により定める  $S_t$  用等時応力-ひずみ線図より算定した。

(a) 弾塑性一ひずみ関係は以下に示される弾塑性応力一ひずみ関係式において降伏点を設計降伏点として定めた。

(1)  $\sigma \leq \sigma_p$  のとき

$$\epsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\epsilon_p = 0$$

(2)  $\sigma > \sigma_p$  のとき

$$\epsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\epsilon_p = \left( \frac{\sigma - \sigma_p}{K} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad \sigma_p = \sigma_y - K (0.002)^m$$

$E$ ,  $\sigma_y$ ,  $K$ ,  $m$  は温度の関数として下記により定めた。

(1) 縦弾性係数  $E$  は材料強度基準等に定める値と一致させる。

(2)  $\sigma_y$  を定めるに必要な平均降伏点/最小降伏点比  $\sigma_y$  は設計降伏点を策定するに当って用いた値と一致させた。

(3) 平均降伏点はステンレス協会調査<sup>(1)</sup> (SUS304, SUS316, SUS321 伝熱管の場合), 日本鉄鋼協会調査<sup>(2)</sup> (2¼Cr-1Mo(NT)の場合)の値と一致させた。

(4) 比例限  $\sigma_p$  を超える領域の塑性ひずみを表わすパラメータ:  $K$ ,  $m$  については文献(3)に示された値を国産材により確性した上で用いた。

出典(1) ステンレス協会・技術委員会 ステンレス鋼許容応力分科会, “ステンレス鋼の高温強度について”, ステンレス誌, 1979年12月。

(2) 日本鉄鋼協会・データシート部会 高温引張データ分科会。

(3) Blackburn, L. D., “Isochronous Stress-Strain Curves for Austenitic Stainless Steel”, The Generation of Isochronous Stress-Strain Curves (ed. Schaefer, A. O.), ASME Winter Annual Meeting, 1972.

(b) クリープひずみ関係は, 以下に示すクリープひずみ式を用いて定める。

$$\epsilon_e = C_1 \{ 1 - \exp(-r_1 t) \} + C_2 \{ 1 - \exp(-r_2 t) \} + \epsilon_{mt}$$

ここで,

$$r_1 = S_1 t_R^{\alpha_1}$$

$$r_2 = S_2 t_R^{\alpha_2}$$

$$C_1 = G_1 \dot{\epsilon}_m^{\beta_1} / r_1$$

$$C_2 = G_2 \dot{\epsilon}_m^{\beta_2} / r_2$$

$$\dot{\epsilon}_m = F t_R^{-\lambda}$$

$$\alpha_R t_R = f(\sigma, T)$$

$S_1, \alpha_1, S_2, \alpha_2, G_1, \beta_1, G_2, \beta_2, F, \lambda,$  は鋼種および温度によって定まる定数である。 $f$  は別表 1.5 に示すクリープ破断式より導出される関係式であり鋼種、温度及び応力の関数である。

(4) 別表 1.4 設計降伏点  $S_y$

1) SUS 304, SUS 316, SUS 321 伝熱管

i) 温度  $T \leq 425^\circ\text{C}$

告示の別表第 9 に定める設計降伏点  $S_y$  とした。

ii)  $425^\circ\text{C} < T \leq 650^\circ\text{C}$

次式より算定される値と定めた。

$$S_y(T) = \bar{S}_{YRT} \times r_y(T) / a_y$$

ここで,

$S_y(T)$ : 温度  $T$  における設計降伏点

$\bar{S}_{YRT}$ : 室温での平均降点

$r_y(T)$ : トレンド曲線

$r_y(T)$  は高温降伏点と室温降伏点の比を温度の関数として与えるもので、ステンレス協会の調査によっている。

$a_y$ : 平均降伏点 / 設計降伏点

2)  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  (NT) 板,  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  (NT) 伝熱管

i) 温度  $T \leq 425^\circ\text{C}$

告示の別表第 9 に定める設計降伏点  $S_y$  と定めた。

ii)  $425\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 550\text{ }^{\circ}\text{C}$

1)と同様な方式で定めた。

トレンド曲線は日本鉄鋼協会・データシート部会 高温引張データ分科会の調査によっている。

(5) 別表 1.5 設計クリーブ破断応力強さ  $S_R$

各鋼種とも、温度  $T$ 、時間  $t$  での設計クリーブ破断応力強さ  $S_R$  は下記のクリーブ破断式を用いて定めた。ただし、いずれの鋼種においても当該温度における設計引張強さ  $S_u$  を超えないものとした。

$$(T+273.15)(\log_{10}(a_R t_R)+C) = A_0 + A_1 \log \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2$$

<記号と単位>

$T$  : 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_R$  : クリーブ破断時間 (h)

$\sigma$  : クリーブ破断応力 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

1) クリーブ破断式は、溶接協会 P・FCI 小委員会の調査に基づき、国産材料データによる平均クリーブ破断応力強さ  $\bar{S}_R(t, T)$  を、次の方針により定式化した。

(a) ラルソン・ミラー法による温度・時間パラメータ法を用いた。

(b) 応力の対数項は、適切なあてはめ性が確保できる範囲でできるだけ低次(2次式)とした。

2) 時間係数  $a_R$  を用いて、設計クリーブ破断応力強さ  $S_R$  を次式により定めた。

$$S_R(t, T) = \bar{S}_R(a_R t, T)$$

時間係数  $a_R$  は、パラメータ法における95%信頼下限を十分にカバーする数値とした。

(6) 別表 1.6 設計引張強さ  $S_u$

1) SUS304, SUS316, SUS321 伝熱管

i) 温度  $T \leq 425\text{ }^{\circ}\text{C}$

告示の別表第10に定める設計引張強さ  $S_u$  とした。

ii)  $425\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 650\text{ }^{\circ}\text{C}$

ステンレス協会・技術委員会ステンレス鋼許容応力分科会の答申における95%

信頼下限値に基づき定めた。

ただし、当該温度での  $S_u$  値は当該温度より低温域での  $S_u$  値を超えないものとした。

2)  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT)板,  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT)伝熱管

i) 温度  $T \leq 425^\circ\text{C}$

告示の別表第10に定める設計引張強さ  $S_u$  とした。

ii)  $425^\circ\text{C} < T \leq 550^\circ\text{C}$

日本鉄鋼協会データシート部会高温引張データ分科会の調査による95%信頼下限値に基づき定めた。

ただし、注目する  $S_u$  値は当該温度より低温域での  $S_u$  値を超えないものとした。

また告示の規定する値との滑らかな接続を考慮した。

(7) 別表 1.7 設計緩和強さ  $S_r$

各鋼種とも、温度  $T$ 、時間  $t$  に対する  $S_r$  は次の方式により定めた。

1) 単軸応力・定ひずみ条件の下で、初期応力を  $1.5 S_m$  としてクリープひずみ式及びひずみ硬化則により算定した応力とした。

各鋼種のクリープひずみ式は別表 1.3 の解説に示している。

2)  $1.5 S_m$  は各鋼種の設計応力強さ  $S_m$  (別表 1.2) から定める。

(8) 別表 1.8 縦弾性係数  $E$

1) SUS304, SUS316, SUS321

i) 温度  $T \leq 425^\circ\text{C}$

告示の別表第11に定める値とした。

ii)  $425^\circ\text{C} < T \leq 650^\circ\text{C}$

ASME Code Case N-47-17 Table I-14.7で  $800^\circ\text{F} \sim 1350^\circ\text{F}$  ( $427^\circ\text{C} \sim 732^\circ\text{C}$ ) に対して与えられている値から、回帰演算により温度に関して1次の近似式を求めこれによって算定される値とした。

2)  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$

i) 温度  $\leq 375^\circ\text{C}$

告示の別表第11に定める値とした。

ii)  $375^{\circ}\text{C} < T \leq 550^{\circ}\text{C}$

ASME Code Case N-47-21 Table I-14.7 に与えられている値から回帰演算により温度に関して3次の近似式を求め、これによって算定される値とした。

(9) 別表 1.9 ポアソン比  $\nu$

各鋼種とも、下記に準拠して定めた。ただし  $\nu$  が 0.3 以下の場合には 0.3 とした。

- 非弾性構造解析法の実用化に関する研究(II), (社)日本機械学会,  
非弾性構造解析法実用化研究分科会(主査 山田嘉昭)1979年6月。

(10) 別表 1.10 熱膨張係数  $\alpha$

1) SUS304, SUS316, SUS321

a) 瞬時熱膨張係数  $\alpha_A$

ASME Sec III Table I-5.0 及び ASME Code Case N-47-17, Table I-14-8 において SUS316 に対して与えられている値から回帰演算により温度に関して4次の近似式を求め、これにより算定される値とした。

b) 平均膨張係数  $\alpha_B$

ASME Sec III Table I-5.0 及び ASME Code Case N-47-17 Table I-14.9 において SUS316 に対して与えられている値から回帰演算により温度に関して3次の近似式を求め、これにより算出される値とした。

2)  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$

a) 瞬時熱膨張係数  $\alpha_A$

i) 温度  $T \leq 425^{\circ}\text{C}$

告示の別表第12に定める値とした。

ii)  $425^{\circ}\text{C} < T \leq 550^{\circ}\text{C}$

ASME Sec III Table I-5.0 及び ASME Code Case N-47-17 Table I-14.8 に与えられている値から回帰演算により温度に関して3次の近似式を求め、これにより算定される値とした。

b) 平均熱膨張係数  $\alpha_B$

i) 温度  $T \leq 425^{\circ}\text{C}$

告示の別表第 1 2 に定める値とした。

ii)  $425\text{ }^\circ\text{C} < T \leq 550\text{ }^\circ\text{C}$

ASME SEC III Table I-50 及び ASME Code Case N-47-17 Table I-14.9 に与えられている値から回帰演算により温度に関して 2 次の近似式を求め、これにより算定される値とした。

(1) 別表 1.1 1 許容ひずみ範囲 (A)

各鋼種とも、各温度に対する許容ひずみ範囲 (A) は次の方式により定めた。

1) 以下に示される各鋼種に対する平均疲労破損式において温度  $T$ 、ひずみ速度  $\dot{\epsilon} = 10^{-3}\text{ mm/mm/sec}$  とし平均疲労破損曲線をした。

$$(\log_{10} (Nf))^{-1/2} = \sum_{k=0}^4 A_k (\log_{10} \Delta \epsilon_t)^k$$

ただし、

$Nf$  : 破損繰返し数

$\Delta \epsilon_t$  : 全ひずみ範囲 (mm/mm)

$T$  : 温度 ( $^\circ\text{C}$ )

$\dot{\epsilon}$  : 全ひずみ速度 (mm/mm/sec)

2) 得られた平均疲労破損曲線に対し

a) ひずみ範囲で  $1/2$

b) 繰返し数で  $1/20$

の係数を乗じた値のいずれか小さい方の値を許容ひずみ範囲 (A) と定める。

ただし、曲率の不連続部に対しては、滑らかな連続曲線となるように安全側にフェアリングを施した。

(2) 別表 1.1 2 許容ひずみ範囲 (B)

各鋼種とも、温度  $T$  に対する許容ひずみ範囲 (B) は次の方式により定めた。

1) (1) に示される各鋼種に対する平均疲労破損式において、温度  $T$ 、ひずみ速度  $\dot{\epsilon} = 10^{-6}\text{ mm/mm/sec}$  とし、平均疲労破損曲線を算定した。

2) 得られた平均疲労破損曲線から、許容ひずみ範囲(A)と同様な方式により許容ひずみ範囲(B)を定めた。

(13) 別表 1.1 3 許容ひずみ範囲(C)

各鋼種とも、温度 T に対する許容ひずみ範囲(C)は次の方式により定めた。

1) (11)に示される各鋼種に対する平均疲労破損式において温度 T, ひずみ速度  $\dot{\epsilon} = 10^{-6}$  mm/mm/sec, とし平均疲労破損曲線を算定した。

2) 得られた平均疲労破損曲線から許容ひずみ範囲(A)の場合と同様な方式により許容ひずみ範囲(C)を定めた。

(14) 別表 1.1 4 許容引張応力 S\*

1) SUS304, SUS316 及び SUS321 伝熱管

i) 温度  $T \leq 425^\circ\text{C}$

告示別表第 6 に定める値と同一とする。

ii) 温度  $T > 425^\circ\text{C}$

次に掲げる値のうちの最小のもの

- (イ) 室温での規格引張強さの 0.25 倍の値
- (ロ) 各温度での設計引張強さの 0.25 倍の値
- (ハ) 室温での規格降伏点の 0.625 倍の値
- (ニ) 各温度での設計降伏点の 0.9 倍の値

設計引張強さ : 高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準別表 1.6 の  $S_u$  値

設計降伏点 : 同上別表 1.4 の  $S_y$  値

ただし、告示別表第 6 に定める値を下まわらないものとする。

2)  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  (NT) 板, 伝熱管

i) 温度  $T \leq 375^\circ\text{C}$

告示別表第 6 に定める値と同一とする。

ii) 温度  $T > 375^\circ\text{C}$

次に掲げる値のうちの最小のもの

- (イ) 室温での規格引張強さの 0.25 倍の値
- (ロ) 各温度での設計引張強さの 0.25 倍の値
- (ハ) 室温での規格降伏点の 0.625 倍の値

(≡) 各温度での設計降伏点の0.625倍の値

設計引張強さ：告示別表第10の $S_u$ 値（告示別表第10にない部分については、  
高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準別表1.6の $S_u$ 値）

設計降伏点：告示別表第9の $S_y$ 値（告示別表第9にない部分については、  
高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準別表1.4の $S_y$ 値）

ただし、告示別表第6に定める値を下まわらないものとする。

(15) 別図1.1 最大許容応力強さ $S$ 。

別図1.1は別表1.1を図示したものである。

(16) 別図1.2 設計応力強さ $S_m$

別図1.2は別表1.2を図示したものである。

(17) 別図1.3 設計応力強さ $S_t$

別図1.3は別表1.3を図示したものである。

(18) 別図1.4 設計降伏点 $S_y$

別図1.4は別表1.4を図示したものである。

(19) 別図1.5 設計クリーブ破断応力強さ $S_R$

別図1.5は別表1.5を図示したものである。

(20) 別図1.6 設計引張強さ $S_u$

別図1.6は別表1.6を図示したものである。

(21) 別図1.7 設計緩和強さ $S_r$

別図1.7は別表1.6を図示したものである。

(22) 別図1.8 許容ひずみ範囲(A) $\epsilon_t$

別図1.8は別表1.11を図示したものである。

(23) 別図1.9 許容ひずみ範囲(B) $\epsilon_t$

別図1.9は別表1.12を図示したものである。

(24) 別図1.10 許容ひずみ範囲(C) $\epsilon_t$

別図1.10は別表1.13を図示したものである。

(25) 別図1.11 等時応力-ひずみ線図

等時応力-ひずみ線図は各鋼種の平均的材料挙動（弾塑性クリーブ挙動）を示すものとして、下記のようにして求めた。

- 1) 別表 1.3 解説に示される各鋼種の弾塑性応力ひずみ関係式を用いて、応力に対するひずみを算定した。このようにして得られた応力ひずみ関係は 0 hr と表示した。これは ASME Code Case N-47 Fig T-1800 における “Average hot tensile” に対応するものである。
  - 2) 各時間に対する等時応力ひずみ線図は、与えられた応力・時間について、別表 1.3 解説に示される各鋼種のクリープひずみ式を用いて、クリープひずみを算出し、1) で計算した。弾塑性ひずみに加算して対応するひずみを求めた。
- ④ 別図 1.1 2 許容引張応力  $S^*$
- 別図 1.1 2 は別表 1.1 4 を図示したものである。
- 4 設計許容値策定方法を表 3 に一覧表として示す。

表 3 設計許容値策定方法の一覧表

設計許容値	策 定 方 法		備 考	設計許容値	策 定 方 法		備 考
最大許容 応力強さ  S <sub>0</sub>	非 ク リ ー プ 領 域	(イ) 室温での規格引張強さの $\frac{1}{4}$ (ロ) 各温度での設計引張強さの $\frac{1}{4}$ (ハ) 室温での規格降伏点の $\frac{5}{8}$ (ニ) 各温度での設計降伏点の $\frac{5}{8}$ (ただしオーステナイト系材料及び高ニッケル合金 にあっては各温度での設計降伏点の0.9) 〔(イ)~(ニ)のうち最小の値をS <sub>0</sub> とする。〕	(イ)~(ロ)に関しては係数 5%を2%に改訂する動 きがある。 ASME SEC III'79 winter addenda	設計引張 強  さ  S <sub>u</sub>	ク非 ク リ ー プ 領 域	(1) SUS304, SUS316, SUS321 伝熱管 ステンレス協会の技術委員会ステンレス鋼許容応力 分科会の答申による95%信頼下限値に基づき定め る。ただし当該温度より低温域でのS <sub>u</sub> 値を超えない ものとする。	
	ク リ ー プ 領 域	(ホ) 10 <sup>3</sup> 時間に0.01%のクリープを生ずる応力の 平均値 (ヘ) 10 <sup>5</sup> 時間でクリープ破断を生ずる応力の最小 値の0.8 (ト) 10 <sup>5</sup> 時間でクリープ破断を生ずる応力の平均 値の0.6 〔(イ)~(ト)のうち最小の値をS <sub>0</sub> と定める。〕				(2) 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo (NT) 鉄鋼協会, データシート部会 高温引張データ分科 会の調査による95%信頼下限値に基づき定める。 ただし当該温度より低温域でのS <sub>u</sub> 値を超えないもの とする。	
設計応力 強  さ  S <sub>m</sub>	ク非 ク リ ー プ 領 域	(イ) 室温での規格引張強さの $\frac{1}{4}$ (ロ) 各温度での設計引張強さの $\frac{1}{4}$ (ハ) 室温での規格降伏点の $\frac{3}{8}$ (ニ) 各温度での設計降伏点の $\frac{3}{8}$ (ただしオーステナイト系材料及び高ニッケル合金 にあっては各温度での設計降伏点の0.9) 〔(イ)~(ニ)のうち最小の値をS <sub>m</sub> と定める。〕		設計緩和 強  さ  S <sub>r</sub>	ク リ ー プ 領 域	当該温度T 当該時間tに対するS <sub>r</sub> は次の方法によ り定める。 (1) 単軸応力, 定ひずみ条件下で初期応力を1.5S <sub>m</sub> としてクリープひずみ式及びひずみ硬化則により 算定した応力とする。 (2) 1.5S <sub>m</sub> は設計応力強さS <sub>m</sub> から定める。	クリープひずみ式にお ける時間係数 $\alpha_R$ はク リープ挙動のばらつき を安全側に推定する値 とする。
設計応力 強  さ  S <sub>t</sub>	ク リ ー プ 領 域	(イ) 当該温度当該時間における設計クリープ破 断応力強さの $\frac{2}{3}$ (ロ) 当該温度, 当該時間で第3次クリープを開 始する応力の最小値の0.8 (ハ) 当該温度, 当該時間で1%の全ひずみを生 ずる最小応力 〔(イ)~(ハ)のうち最小の値をS <sub>t</sub> と定める。〕		許容ひずみ 圍  (A)	ク リ ー プ 領 域	平均疲労破損式から, 当該温度T, ひずみ速度 $\dot{\epsilon} =$ $10^{-3}$ mm/mm/secとして算定される平均疲労破損 曲線に (1) ひずみ範囲で $\frac{1}{2}$ (2) 繰返し数で $\frac{1}{20}$ の係数を乗じ両者のいずれか小さい方の値と定める。	曲率の不連続な領域に 対しては, 滑らかに連続 した曲線となるよう に安全側にフェアリン グを施すものとする。
設 計 降 伏 点  S <sub>y</sub>	ク非 ク リ ー プ 領 域	国産材料データ調査より得られたトレンド曲線 に基づき平均降伏点を算定し, これを係数 $\alpha_y$ で除した値と定める。	係数 $\alpha_y$ の値は告示及 びCCN-47との適合 性を考慮して定める。	許容ひずみ 圍  (B)	ク リ ー プ 領 域	平均疲労破損式から, 当該温度T, ひずみ速度 $\dot{\epsilon} =$ $10^{-3}$ mm/mm/secとして算定される平均疲労破損曲 線に (1) ひずみ範囲で $\frac{1}{2}$ (2) 繰返し数で $\frac{1}{20}$ の係数を乗じ両者のいずれか小さい方の値と定める。	曲率の不連続な領域に 対しては滑らかに連続 した曲線となるよう に安全側にフェアリン グを施すものとする。
設計クリープ 破断強さ  S <sub>R</sub>	ク リ ー プ 領 域	クリープ破断式において, 当該温度T, 当該時間 t, 時間係数 $\alpha_R$ として算定される応力と定める。 ただし当該温度での設計引張強さS <sub>u</sub> を超えない ものとする。	係数 $\alpha_R$ は95%信頼 下限を十分にカバー する値とする。	許容ひずみ 圍  (C)	ク リ ー プ 領 域	平均疲労破損式から, 当該温度T, ひずみ速度 $\dot{\epsilon} =$ $10^{-3}$ mm/mm/secとして算定される平均疲労破損曲 線に (1) ひずみ範囲で $\frac{1}{2}$ (2) 繰返し数で $\frac{1}{20}$ の係数を乗じ両者のいずれか小さい方の値と定める。	曲率の不連続な領域に 対しては滑らかに連続 した曲線となるよう に安全側にフェアリン グを施すものとする。

## 付録MA 環境効果

### MA. 1 ナトリウム環境効果

#### MA. 1.1 液体ナトリウム接液面のくされ代

- (1) 液体ナトリウムに接液する部材にあつては、接液面に次の計算式により定めるくされ代  $a$  (mm) をとるものとする。

$$a = NR_D + \sum_i \frac{n_i}{8760} R_i \quad (\text{MA. 1})$$

$N$  : 総使用期間 (yr)

$R_D$  : 最高使用酸素濃度  $C_{OD}$  及び最高使用温度に対して定める腐食速度 (mm/yr)

$n_i$  : 温度  $T_i$  において  $C_{OD}$  を超える酸素濃度  $C_{O_i}$  である状態の持続時間 (hr)

$R_i$  : 酸素濃度  $C_{O_i}$  及び温度  $T_i$  に対して定める腐食速度 (mm/yr)

$R_D$  及び  $R_i$  は次の計算式により定めるものとする。

$$\log_{10} R = 0.85 + 1.5 \log_{10} C_O - 3.9 \times 10^3 / (T + 273) \quad (\text{MA. 2})$$

$R$  : 腐食速度 (mm/yr)

$C_O$  : 酸素濃度 (ppm)

$T$  : 温度 (°C)

ただし、(MA. 2) 式の適用範囲及び適用材料は次のとおりである。

$C_O$  : 5 ~ 25 ppm

$T$  : 400 ~ 650 °C

適用材料: SUS304, SUS316, SUS321 及び 2¼Cr-1Mo 鋼

- (2) (MA. 2) 式の適用範囲の下限を下回る環境条件に対しては、下限値によりくされ代を算定するものとする。
- (3) ベローズ等の極薄肉の特殊部材にあつては、MA. 1 によらず、別途くされ代を定めるものとする。

#### MA. 1.2 強度補正係数

- (1) 液体ナトリウムに接液する 2¼Cr-1Mo 鋼部材にあつては、接液部分の材料強度基準として、別表 1 (別図 1) に定める材料強度基準  $S_o$ ,  $S_m$ ,  $S_t$ ,  $S_y$ ,  $S_R$ ,  $S_u$  及び  $S_r$

の値に次の計算式により定める強度補正係数  $f_{DC}$  を乗じた値を用いるものとする。

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{DC} = 1 - \sum_i 4.8 \times 10^4 K_i \sqrt{t_i} / h_{eq} \end{array} \right. \quad (\text{MA. 3})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \log_{10} K_i = 0.15 - 6.10 \times 10^3 / (T_i + 2.73) \end{array} \right. \quad (\text{MA. 4})$$

ここに、

$T_i$  : 状態  $i$  における最高金属温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_i$  : 状態  $i$  の累積持続時間 (hr)。 $\sum_i t_i$  は総使用時間を下回ってはならない。

$h_{eq}$  : 等価厚さ (mm)

ただし、(MA. 4) 式は焼ならし焼もどし (NT) 材又はこれと同等以上の脱炭抑止特性を有する  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼に適用するものとする。特価厚さ  $h_{eq}$  は次の 1) 及び 2) に準拠して定めるものとする。

1) 厚さ  $t$  (mm) の平板が片面又は両面において液体ナトリウムに接液している場合は、それぞれ

$$h_{eq} = t \quad \text{又は} \quad h_{eq} = t/2 \quad (\text{MA. 5})$$

とする。

2) 外半径が  $r_o$  (mm)、内半径が  $r_i$  (mm) の管が外表面又は内表面において液体ナトリウムに接液している場合は、それぞれ

$$h_{eq} = \frac{r_o^2 - r_i^2}{2 r_o} \quad \text{又は} \quad h_{eq} = \frac{r_o^2 - r_i^2}{2 r_i} \quad (\text{MA. 6})$$

とする。

(2) 次の 1) 又は 2) を満足する場合は  $f_{DC} = 1.0$  とすることができる。

1)  $h_{eq} \geq 10$  (mm) の場合

2) (MA. 3) 式により算定した  $f_{DC}$  が 0.99 を上回る場合

### 【解 説】

1 付録 MA. 1 は、原型炉におけるナトリウム環境効果の評価法を示したものである。

2 評価法の概要は、以下に示すとおりである。

イ) ナトリウム環境効果は表面効果としてのくされ代と体積効果としての強度補正係数により評価する。

ロ)  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼については、脱炭挙動に対応する強度補正係数を適用するものとする。

ハ) オーステナイト系ステンレス鋼については研究開発成果に基づき強度補正係数は適用しないものとする。

3 液体ナトリウムによるくされ代の適用と取扱いは以下のとおりである。

イ) SUS304, 316, 321および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼共通に適用する。

ロ) 設計評価上, (MA.1)および(MA.2)式で求められるくされ代は荷重を分担しないものとして扱う。

ハ) くされ代は基本的には一般腐食および表面変質層を包含するものとし, 局部腐食は原型炉の使用条件下では生じないものとして扱う。

ニ) ナトリウム接液部のくされ代は設計条件に関する1次応力の制限において, くされ代として算出し, 壁厚に対して無視出来ることを確認する。

4 液体ナトリウムによるくされ代評価法の考え方は, 以下のとおりである。

(1) 一般腐食によるくされ代

ナトリウム接液部における構造材料の腐食形態は少なくとも原型炉で使用が予定されている鋼種(SUS304, 316, 321および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼)については表面全体で均一な腐食を呈することが知られている。

この腐食速度に影響を与える因子としては, ナトリウム浸漬時間, ナトリウム流速, ナトリウム温度, ナトリウム中酸素濃度, ダウンストリーム効果, 鋼種等が挙げられるが, 本方針では, これら諸因子のうちナトリウム温度, ナトリウム中酸素濃度をパラメータとした(MA.2)式を腐食速度評価式としている。これは次の理由による。

イ) 腐食速度に及ぼす個々の影響については, 従来, 個別に定式化の試みはあるが, 全ての因子を包含した腐食速度の定式化は現時点でははかられていない。

ロ) 原型炉の使用条件では板厚に比べ, ナトリウム接液部のくされ代は一般に僅かであり, 安全側に想定しても設計上支障をきたす場合はほとんどない。

ハ) (MA.2)式は「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針で用いている腐食速度を数値化したものであり基準としての整合性が良い。

なお, (MA.2)式を用いた, 設計腐食速度式と実験データとの比較例を図MA.1.1に示す。

(2) 局部腐食によるくされ代

局部腐食としては, 粒界腐食, 孔食, 隙間腐食等が挙げられるが, 最近の多くの経験

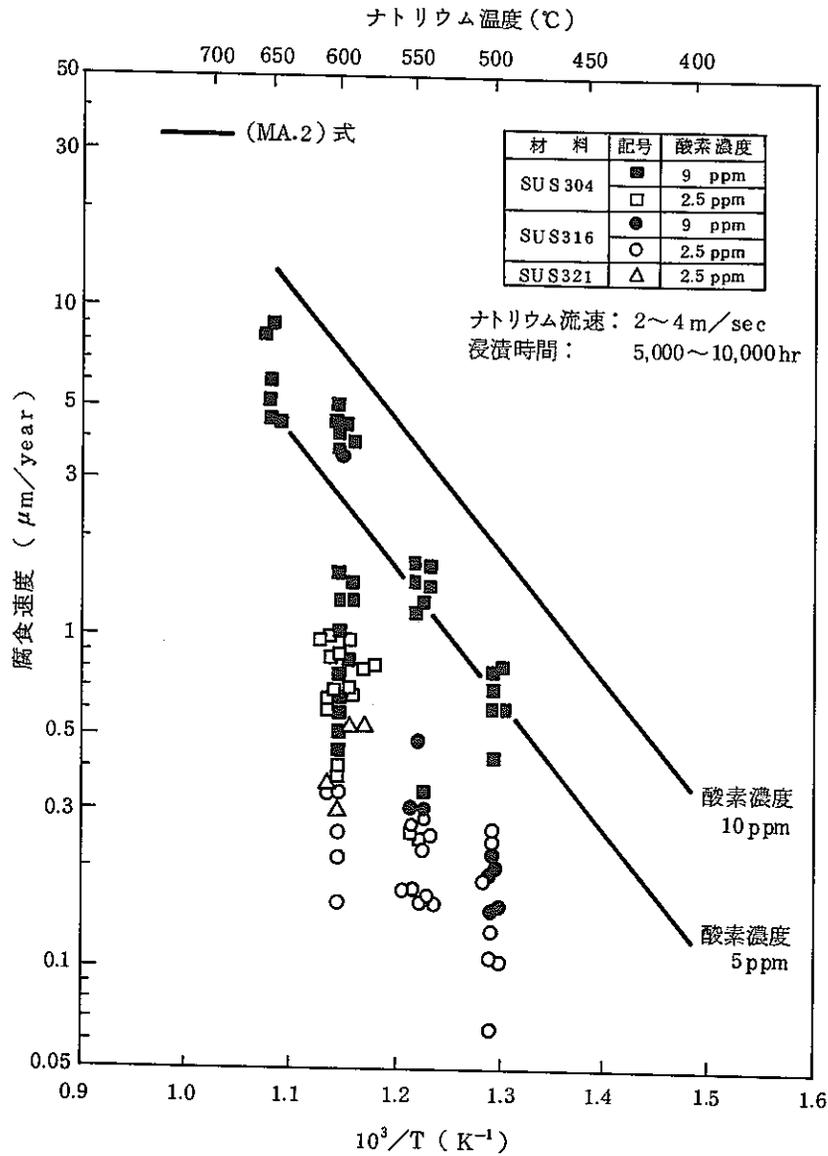


図 MA 1.1 設計腐食速度式と実験データとの比較

からこの種の現象は認められておらず、高速炉の通常運転条件下で局部腐食は生ずることがないと考えられている。従って、局部腐食によるくされ代は考慮する必要はないものとした。

### (3) 表面変質層の影響

特に、高温部のナトリウム中に浸漬したオーステナイト系ステンレス鋼ではNi, Crの選択的溶出により表層近傍にFeが富化したフェライト層が形成される。表面変質層は肉厚の減少を来すものではないが、構造設計上、その表面変質層の部分は載荷能力に乏しいとして腐食と同等に取扱えば安全側である。

表面変質層の生成は金属元素の拡散によって生じ、550℃以下の原型炉の温度では、その使用期間24～30年を想定しても、その変質層厚さは数十μmに抑まると予測される。従って(MA.2)式でくされ代を評価すれば表面変質層を含めてナトリウム環境による表面効果を評価出来ると考えられる。

(4) (2)に示す(MA.2)式の適用範囲の下限を下回る環境条件に対しては、適用範囲の下限値を適用しておけば、大きい腐食速度を与えるので、安全側の評価となる様、下限値を使用することとした。

(5) (3)に示す極薄肉部材のくされ代については、別途くされ代を定めるものとした。

#### 5 オーステナイト系ステンレス鋼のナトリウム中強度の補正係数について

原型炉の場合、炉心を除く一般の構造材料は550℃以下である。この付近の温度域では通常のナトリウム環境下では脱炭を生じないことが確認されている。

また、2次冷却系ではフェライト鋼の炭素活性度はオーステナイト系ステンレス鋼に比べて高いためにステンレス鋼には浸炭を生じることがあっても脱炭は生じ得ない。

##### イ) 引張およびクリープ特性の補正係数

ステンレス鋼にナトリウムを介して浸炭が生じた場合、一般的には延性は低下するが、引張強さ、降伏強さともに上昇する傾向がある。また、ナトリウム中と大気中のクリープ破断試験結果の比較によれば、クリープ破断強さについても、大気中と同程度の値を示すことが示されている。

この様に、引張特性およびクリープ特性に関しては現在のところ明らかな強度低下を示すデータは認められていない。従って、強度低下係数を導入せずに設計を進めるのが良いとしている。

##### ロ) 疲労強度の補正係数

ナトリウム中での低サイクル疲労強度は、大気中の疲労特性と比較して寿命増加するという報告が多い。ナトリウム中の疲労寿命はとくに低ひずみ範囲側で大気中に比較して更に長寿命側へ移行する様相を示し、ナトリウム雰囲気は大気中に比較して良い環境であることを示している。従って疲労特性に関しても、現状では強度低下係数を導入する必要はないとしている。

以上述べた如く、一般的にオーステナイト系ステンレス鋼はすぐれたナトリウムとの共存性を有しており、比較的良く制御されたナトリウム環境下ではステンレス鋼につい

ては、特に強度補正係数は導入せずに設計を行うものとしている。

## 6 2¼Cr-1Mo鋼の強度補正係数について

(1) 強度補正係数を導入する理由は、以下のとおりである。

イ) ナトリウムに浸漬した2¼Cr-1Mo鋼について引張試験またはクリープ試験を実施すると強度の低下傾向が見られる。

ロ) Goldmann は、この様な傾向は炭素含有量の変化に対応し、それに比例して減少するとして強度補正係数を提案している。

(2) 2¼Cr-1Mo鋼のナトリウム中強度補正係数の考え方は次のとおりである。

本方針における(MA. 4)式はKrankota が提示した設計用脱炭速度定数推奨値を数式表示したもので、これは2¼Cr-1Mo鋼の脱炭が炭素の拡散律速であるとして、単位面積あたりの炭素の溶出重量は浸漬時間の平方根に比例するというものである。Krankota らはこの考え方に立って、脱炭速度定数に関する最適線と設計指標線を示した。脱炭の評価は、この脱炭速度定数を通じて行うことが現状では広く支持されている。

本方針における(MA. 4)式はこのKrankota が設定した設計指標線に対応する。

(MA. 3)式はGoldmann が提唱した定常クリープ速度に対する応力に対して与えた強度補正係数を初期炭素含有量0.1% Cとして規格化したものである。即ち、本方針における2¼Cr-1Mo鋼の強度補正係数はナトリウム接液部における短時間および長時間強度が脱炭による材料の平均炭素含有量の減少と対応するとする脱炭評価式をベースとしている。

設計評価式として平均炭素含有量に基づく、この様な補正係数を採用したのは下記の理由による。

イ) 本補正係数は、脱炭に伴う強度データを安全側に包含する。

ロ) 原型炉条件では脱炭量は一般に僅かであり、安全側に設定しても実用上支障が生じない。

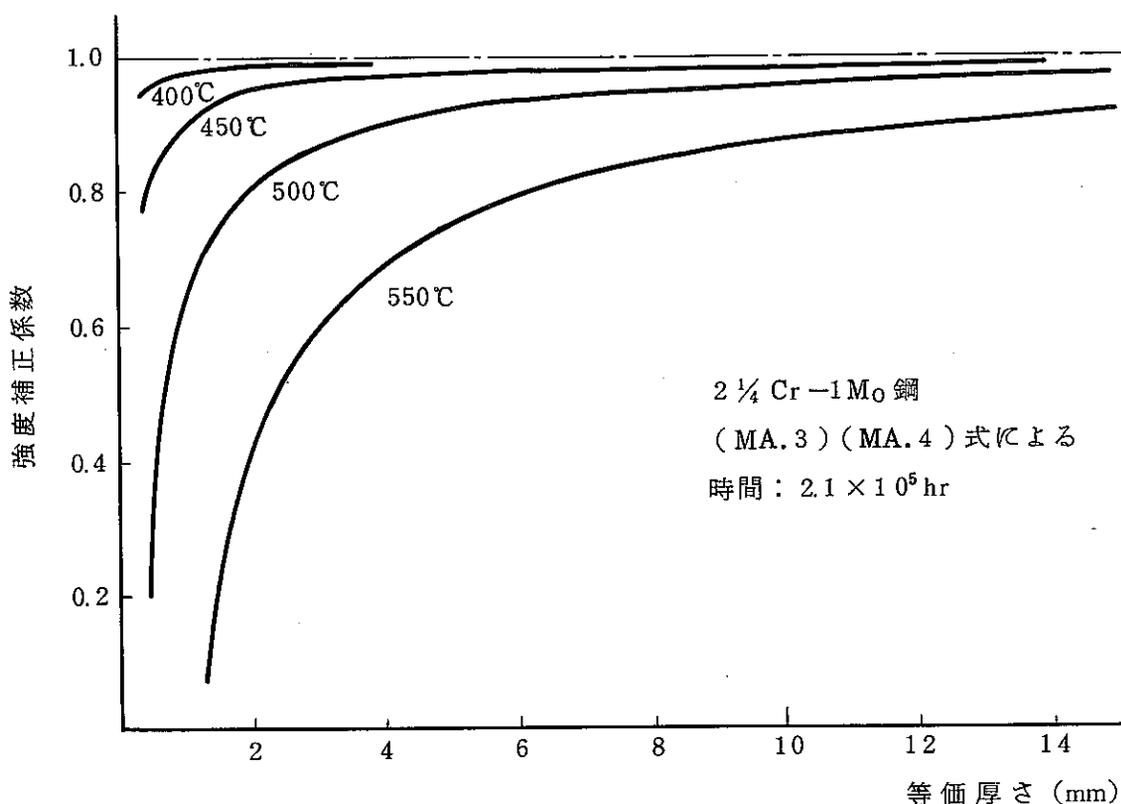
(3) (MA. 3)式および(MA. 4)式を用いて、強度補正係数を温度、等価厚さをパラメータとして表わしたものを図MA. 1.2に示す。

(4) 本方針では設計の簡素化をはかるために下記の場合は強度補正係数 $f_{DC} = 1$ としてよいと規定している。

イ)  $h_{eq} \geq 10$  mm の場合、又は

ロ) (MA. 3) 式による  $f_{DC}$  が 0.99 を上回る場合

これは  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼の使用が予定されている原型炉の蒸発器の設計温度を  $470^\circ\text{C}$  とすると等価厚さ ( $h_{eq}$ ) が  $10\text{mm}$  を上回る場合,  $f_{DC} > 0.98$  となり, 上記イ), ロ) はほぼ等価な規定となっていることによるものである。



図MA. 1.2  $2.1 \times 10^5$  hr に対する強度補正係数

## MA. 2 中性子照射効果

材料が SUS 304 であって, 最高使用温度が  $575^\circ\text{C}$  以下であり, 累積中性子照射量が  $1 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) を超えない場合は, 本方針のひずみの制限及び別表 1 (別図 1) の材料強度基準等を特に補正することなく適用することができる。ただし, 告示の適用温度範囲を超える金属温度で使用し, 「クリープ効果が顕著でない場合」に該当しないものにあつては, クリープ強度に及ぼす熱中性子照射の効果を MA. 2.2 により評価するものとする。

告示の適用温度範囲内の金属温度で使用するか、又は「クリープ効果が顕著でない場合」に該当するものにあつては、累積中性子照射量が別表MA.1に定める値を超えない場合は、本方針のひずみの制限値及び別表（別図1）の材料強度基準等を特に補正することなく適用することができる。

上記のいずれにも該当しない場合は、運転状態を考慮して中性子照射効果を適切に評価するものとする。

表MA.1 累積中性子照射量限界値

$n/cm^2$  ( $E > 0.1$  MeV)

DS M 5901

温度(°C)	SUS 304 <sup>1)</sup>	SUS 304 溶接部
350	$4 \times 10^{21}$	$1.5 \times 10^{21}$
400	$5 \times 10^{21}$	$2 \times 10^{21}$
450	$5 \times 10^{21}$	$2 \times 10^{21}$
500	$6 \times 10^{21}$	$2 \times 10^{21}$
550	$4 \times 10^{21}$	$1.2 \times 10^{21}$
600	$1 \times 10^{21}$	—

注1) 溶接部を除く。

MA. 2.2 クリープ強度に及ぼす熱中性子照射効果の評価

告示の適用温度範囲を超える金属温度で使用し、「クリープ効果が顕著でない場合」に該当しないものにあつては、次の(1)から(4)によりクリープ強度に係る設計係数を定めるものとする。

- (1) 別表1(別図1)の $S_0$ に対しては、参照する温度 $T$ が $500^{\circ}\text{C}$ を超える場合は、次式により定める $\Delta T$ を加えて補正した温度を適用する。

$$\Delta T = (T + 273) \cdot \log f_t / 23$$

- (2) 別表1(別図1)の $S_t$ 及び $S_R$ に対しては、参照する時間を $f_t$ 倍して補正した時間を適用する。

- (3) 付録Eの $D^*$ に対しては、図E.1において、 $t^*$ を $f_t$ 倍および読みとり値を $g_t$ 倍に補正して適用する。

- (4) 付録Fの $D^{**}$ に対しては、図F.1において、 $t^*$ を $f_t$ 倍および読みとり値を $g_t$ 倍に補正して適用する。

ここに、 $f_t$ 及び $g_t$ は、それぞれ次の計算式により定めることができる。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \phi_{th} \leq \phi_{th1} & : f_t = g_t = 1 \\ \phi_{th1} < \phi_{th} \leq \phi_{th2} & : f_t = f_{to}^n \\ & f_t = g_{to}^n \\ \phi_{th2} < \phi_{th} & : f_t = f_{to} \\ & f_t = g_{to} \end{array} \right.$$

$$n = \frac{\log(\phi_{th} / \phi_{th1})}{\log(\phi_{th2} / \phi_{th1})}$$

$\phi_{th}$  : 累積熱中性子照射量 ( $n / \text{cm}^2$ )

$f_{to}, g_{to}, \phi_{th1}, \phi_{th2}$  : 次表に定めるところによる。

$f_{to}$	3
$g_{to}$	1.5
$\phi_{th1} (n / \text{cm}^2)$	$1 \times 10^{15}$
$\phi_{th2} (n / \text{cm}^2)$	$1 \times 10^{18}$

## 【解説】

- 1 MA.2は、本方針における中性子照射効果に関する評価の取扱いを示したものである。
- 2 材料特性に及ぼす中性子照射効果は、一般的には下記の傾向を示す。
  - a) 降伏応力：照射量に伴い増大する。
  - b) 引張強さ：大差ないか又は若干増大する。
  - c) 引張試験における破断延性，一様伸び，絞り：照射量に伴いかなり減少する。
  - d) クリーブ破断強度：照射量に伴い減少する。
  - e) クリーブひずみ速度：一般に変化は小さいが増加する。
  - f) 疲労強度：大差を生じない。

このような材料特性に及ぼす中性子照射効果のメカニズムは、必ずしも明確にされていないが、主として下記の2つによると考えられている。

- a) 原子のはじき出し
- b) 核変換による組成の変化

この内前者は、原子のはじき出しにより金属中に点欠陥、線欠陥あるいは面欠陥などの格子欠陥が生成されることによる損傷であり、高速炉環境においては a) が支配的になると考えられる。b) は、主に、熱中性子照射により生ずるものである。

- 3 MA.2では、中性子照射効果に関する評価の取扱いとして「材料がSUS304であって、最高使用温度が575℃以下であり、累積中性子照射量が $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) を超えない場合は、本方針のひずみの制限及び別表1（別図1）の材料強度基準等を特に補正することなく適用することができる。」ことを示している。この取扱いは、次の方針に基づくものである。

- (1) 強度補正を必要としない中性子照射量の制限値は、材料の延性を確保することを目的として、照射後引張試験における10%破断伸びに対応する照射量に基づき策定した。ここで10%破断伸びを策定方針としたのは、下記理由による。
  - a) 中性子照射効果に最も敏感な機械的性質は引張試験における破断伸びである。
  - b) 本方針では、対象材料が延性材料であることを前提として、1次応力の制限、ひずみの制限等を規定している。

ここに、延性による材料分類の概念は次の通りである。<sup>1)</sup>

(1) 標準試験片（標点間距離約 50 mm）による引張破断伸び  $\epsilon_f$  が 10 % 以上の材料を、延性（ductile）材料とする。

(a)  $\epsilon_f$  が 1 % から 10 % の材料を、亜延性（limited ductility）材料とする。

(b)  $\epsilon_f$  が 1 % 以下の材料を、脆性（brittle）材料とする。

ASME Code Section III 及び Code Case N-47 でも、上記の分類概念により、対象材料が延性材料であることを前提として、各種許容限界を定めている。<sup>2)</sup>

本方針における許容ひずみの概念は、運転状態 I, II, III 及び試験状態に対する、膜ひずみで 1 %, 等価線形ひずみで 2 % という累積非弾性ひずみの制限に見られる。このような許容ひずみ水準と、破断伸び 10 % 以上によって規定される延性材料の前提は適切に対応していると考えられる。

(2) 10 % 破断伸びを基準に中性子照射量の限界値を策定するにあたっては下記の手法を採用した。

限界値を定める基準になる破断伸びの最小値に関しては、実データの最小値を用いるものとしているが、ここで、破断伸びの累積中性子照射量依存性について回帰分析を行い、95 % 信頼限界（下限）を最小値の目安とした。

なお、限界値を定める際に用いた試験データの多くは寸法効果を考慮すると破断伸びの出にくい試験片によっているため、安全側の評価要因がはいつていると考えられる。この回帰分析により得られた限界値を表 MA. 2.1 に示す。但し同表に示す溶接部に関する限界値は母材の限界値の  $\frac{1}{2}$  を目安として定めたものである。

(3) 表 MA. 2.1 に対して、温度、母材・溶接部の区別毎に中性子照射量の制限値を設けることは、設計を煩雑にするので、中性子照射量が小さい高速原型炉第 1 種機器においては、最高使用温度が 575 °C 以下であり累積中性子照射量が  $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) を超えない場合はこのしきい値が、10 % 破断伸び基準の限界値に対して、十分な安全裕度を有するため、本方針のひずみの制限及び別表 1（別図 1）の材料強度基準等を補正することなく適用できるとした。

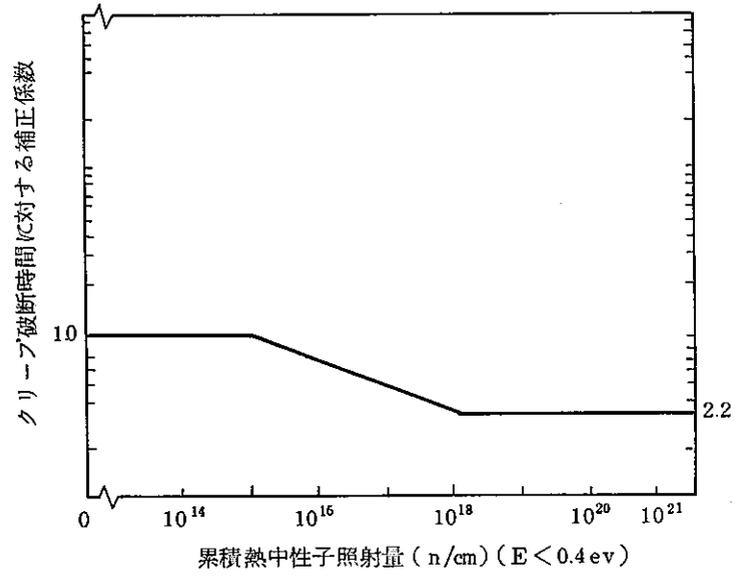
4 本方針では、上述した中性子照射効果に関する評価の取扱いを策定するに当たっての方針を勘案して、累積中性子照射量が  $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) を超える場合は次のように取扱うものとする。

告示の適用温度範囲内の金属温度で使用するか、又は「クリープ効果が顕著でない場合」に該当するものにあつては、累積中性子照射量が別表MA. 1 に定める値を超えない場合は、本方針のひずみの制限値及び別表1（別図1）の材料強度基準等を特に補正することなく適用することができる。

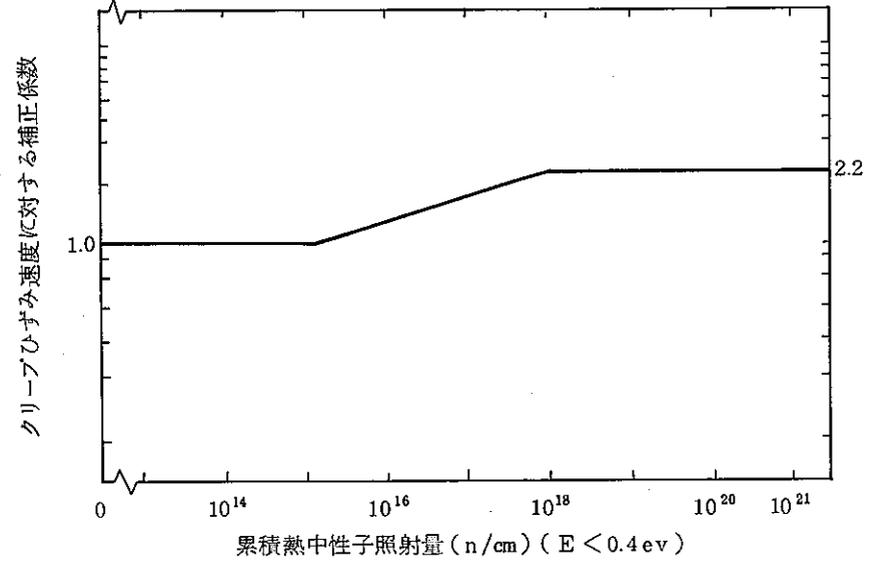
5. クリープ破断時間に及ぼす熱中性子照射効果について、適用規格MA. 2. 2 のうち、クリープ破断時間については累積中性子照射量（ $E < 0.4 \text{ eV}$ ）が  $10^{15} \text{ n/cm}^2$  を超える場合は、図MAA. 1 に示す補正係数を適用するものとしている。
6. クリープひずみ速度に及ぼす熱中性子照射効果について、適用規格MA. 2. 2 のうち、クリープひずみ速度については累積中性子照射量（ $E < 0.4 \text{ eV}$ ）が  $10^{15} \text{ n/cm}^2$  を超える場合は、図MAA. 2 に示す補正係数を適用するものとしている。
7. 材料強度基準における熱中性子照射効果の取扱いは〔解説5〕及び〔解説6〕に示したように、クリープ強度及びクリープひずみ速度に対する影響を設計上考慮し、「高温構造設計方針」の各種制限における材料強度基準の取扱いを表MAA. 1 に示すとおりとした。これらの取扱いを条文化したのがMA. 2. 2 である。

#### 参考文献

- 1) Papirno, R., "Ductility in Structural Design," Ductility, American Society for Metals, p 343 (1968).
- 2) Blackburn, L. and Knecht, R., "Irradiation Effects and Design of LMFBR Permanent Reactor Structures," Atomkernenergie (ATKE) Bd. (1977).



図MAA.1 熱中性子照射量によるクリープ破断時間の整理



図MAA.2 累積熱中性子照射量によるクリープ速度の整理

表MAA. 1 材料強度基準における熱中性子照射効果の取扱い

$t^*$  : 高温使用時間

規定	材料強度	クリープ強度	クリープ速度	策定方法及び基本的考え方	
一次応力の制限	最大許容応力強さ ( $S_0$ )	○	○	○ $S_0$ 値の決定因子は、高温域では $S_R$ であるので、 $t^*$ を3倍して求めた応力値となるように、別表1.1の温度を読み換える。	
	設計応力強さ ( $S_t$ )	$\frac{2}{3} S_R$	○	—	○ $\frac{2}{3} S_R$ , $0.8 S_3$ はクリープ破断時間を $\frac{1}{3}$ , $S_1 \%$ はクリープ速度を補正して、その中の最小値として $S_t$ を決定する。 ○ $S_t$ 値の決定因子は、 $\frac{1}{3} S_R$ 及び $S_1 \%$ であるが、いずれの場合も別表1.3の時間を3倍して、 $S_t$ 値を読み換えることができる。
		$0.8 S_3$	○	—	
$S_1 \%$	—	○			
ひずみの制限	累積非弾性ひずみの制限 ( $\epsilon_{EC}$ )	—	△	○ 弾性核応力を1.25倍及びO'Donnell & Poroski 法に含まれる保守性によりクリープ速度増加の影響は現行のまま包絡される。	
	シェイクダウン基準 ( $S_r$ )	—	△	○ 基準値は荷重の繰返しに対して適用される。緩和応力強さ $S_{RH}$ は、保守的に全高温使用時間を用いて計算される。したがって熱中性子照射効果はこの $S_{RH}$ 算出の保守性によりカバーできると考えられる。	
クリープ疲労損傷の制限	応力一定クリープ損傷 ( $D_{C1}$ )	○	—	○ $t^*$ を3倍にして評価	
	1次及び2次応力緩和クリープ損傷 ( $D^*$ )	○	○	○ $t^*$ を3倍、クリープ速度を2倍にして詳細評価したクリープ損傷値を包絡する簡易式で評価	
	ピーク応力緩和クリープ損傷 ( $D^{**}$ )	○	○	○ 上記と同じ	

注) ○ 中性子照射効果を考慮する。

△ 中性子照射効果を考慮するが、効果が小さく評価法の保守性に包絡される。

## 【解説】付録MB

### 1. 設計応力強さ $S_t$ の外挿値

設計応力強さ  $S_t$  の外挿値は、別表 1.3（別図 1.3）に規定する時間を越えた時間での  $S_t$  値を必要とする場合に使用すべき値を示すものである。このような  $S_t$  値が必要となるのは下記の場合である。

1) 本方針 3.2.3(3)において使用分数を算定する場合

### 2. 設計クリーブ破断応力強さ $S_R$ の外挿値

設計クリーブ破断応力強さ  $S_R$  の外挿値は、別表 1.5（別図 1.5）に規定する時間を越えた時間での  $S_R$  値を必要とする場合に使用すべき値を示したものである。

このような  $S_R$  値が必要となるのは下記の場合である。

1) 本方針 3.2.3(5)において使用分数を算定する場合

2) 本方針 3.4.2(3)1)において使用分数を算定する場合

3) 本方針 3.5.2(3), または 3.5.3(1), または 3.5.3(2)において累積クリーブ損傷係数を算定する場合

なお、付録MBは別表 1.1～1.3（別図 1.1～1.11）に規定する時間を越える高温使用時間を認めたものではない。

### 3. 設計緩和強さ $S_r$ の外挿値

設計緩和強さ  $S_r$  の外挿値は、別表 1.7（別図 1.7）に規定する時間を越えた時間での  $S_r$  値を必要とする場合に使用すべき値を示したものである。

このような  $S_r$  値が必要となるのは下記の場合である。

(1) 3.4.2(2)1), 3.4.2(2)3), 3.5.3(1)2)及び付録Eにおいて  $S_{rH}$  を算出する場合

## 【解説】付録MC

1. 付録MCは規格引張強さ  $49 \text{ kg/mm}^2$  級の SUSF304 に対する材料強度基準等を規定しているものである。

2. 規格引張強さ  $49 \text{ kg/mm}^2$  級の SUSF304 の材料強度基準等が  $53 \text{ kg/mm}^2$  級と異なるのは高温における引張強さに関する部分のみであり、高温引張強さに係わる材料強度基準等が規定されている。

**【解説】付録MD**

1. 付録MDは、SUSF321に対する材料強度基準等は、SUS304の基準等を適用できることを示したものである。
2. 本規定はSUSF321のデータに基づいて、SUS304の基準が適用できることを確認した上で策定された。

付 録

高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針

〔 解 説 〕

## 目 次

1. ま え が き .....	401
2. 構造の規格とは .....	401
3. 応 力 分 類 .....	401
4. 1 次 応 力 の 制 限 .....	403
5. ひ ず み の 制 限 .....	405
5.1 2 次 応 力 の 再 分 類 .....	406
5.2 シェイクダウン基準 .....	407
5.3 累積非弾性ひずみの制限 .....	409
5.4 運転状態Ⅳにおけるひずみの制限 .....	410
5.5 負荷状態の分類 .....	410
6. クリープ疲労損傷の制限 .....	413
6.1 基本的考え方 .....	413
6.2 弾性解析による簡易評価法（一般規定） .....	414
6.3 弾性解析による簡易評価法（長期1次応力が低い場合クリープ効果が顕著でない場合） .....	415

# 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針

## 〔 解 説 〕

### 1. まえがき

本解説は、原子炉安全技術顧問会・技術部会・FBR技術基準検討会・第2グループの審議（昭和58年9月～昭和59年9月）において、高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針（以下本方針という。）の説明に使用した資料をもとにして審議結果を反映させて作成されたものである。

### 2. 構造の規格とは

構造の規格とは、設計された原子力プラントの構造物が設計寿命中破損することなしに健全に使用されうることを確認するための尺度であり、寿命中予想される負荷に対して構造物が各種の破損に至ることのないよう規格が定められている。

軽水炉用の構造の規格として「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」（通商産業省告示501号，以下告示501号又は告示という。）があり、原子力プラントの構造はこれに則したものでなければならない。告示の規格の構成を第1種容器について図1に示す。

それに対して、高速原型炉もんじゅの使用条件を考慮すると、告示で防止している破損様式に加えて、材料のクリープ挙動に基づく破損をも防止する必要がある、それを考慮した規定が必要となる。図2には、代表的構造物として軽水炉の原子炉圧力容器ともんじゅの原子炉容器の主要寸法・使用条件を比較し、告示の構造の規格をもんじゅに適用するにあたり、構造の規格として補うべく部分が明示されている。告示の構造の規格により防止すべき破損様式に加えて、もんじゅの構造の規格により防止すべき破損様式は以下のとおりである。

- (1) クリープ破断
- (2) 過大なクリープ変形
- (3) クリープ疲労破損
- (4) クリープ座屈

### 3. 応力分類

原子力プラントの寿命中に想定される荷重に対応して生じる可能性のある構造物の破損を

適切に防止するためには、荷重又は応力の性質に十分留意する必要がある。

構造物に生じる応力は、荷重発生要因、荷重の持続性、構造物の形状、断面内の応力分布等により図3に示すように1次応力、2次応力、ピーク応力及び長期、短期及び膜応力、曲げ応力に分類され、それぞれの分類に応じた応力に対応する破損の防止を適切にはかる必要がある。応力分類とそれに対応する破損様式を図4に示す。分類された応力の性質と予想される破損様式との関係は以下に示す基本的考え方に基づいている。

- (1) 1次応力は内圧・自重等により生じる荷重制御型応力であり、変形が進行しても応力は低下せず、最終的には不安定破断に至る可能性のある応力である。したがって、この1次応力は延性破断、クリープ破断防止の観点より制限される。
- (2) 2次応力は、熱膨張反力、熱応力、変形拘束等により生じる変形制御型応力であり、非弾性ひずみが生じることにより応力が低減するので急速な不安定破断に至る可能性は少ない。したがって、2次応力は過大な塑性(クリープ)変形を防止する観点から制限される。
- (3) ピーク応力は、局部構造不連続部の表面層に生じる応力や熱過渡により表面層近傍に生じる応力であり、表面層のある限られた領域に限定して生じる局部応力である。したがって、ピーク応力は、構造物の総体的変形には寄与しないが、くり返し負荷により疲労破損を構造物にもたらす可能性があるため、ピーク応力は疲労・クリープ疲労破断防止の観点より制限される。
- (4) 1次及び2次応力は、荷重の持続性により長期荷重と短期荷重に分類される。特に材料のクリープ変形挙動を考慮する必要があるクリープ温度域では、荷重の持続性により部材が受ける損傷の度合に差がある。したがって、1次応力のうち長期荷重に分類される場合には、告示の1次応力の制限に加えて使用分数和の制限がなされ、2次応力のうち長期荷重に分類された応力は弾性追従の効果を考慮する必要がある。
- (5) 1次応力及び2次応力は、断面内の応力分布の状況により、膜応力・曲げ応力に分類され、それぞれの特性に応じて制限される。

以上の応力分類の考え方にに基づき、本方針の規格は以下に示す各種制限により構成されている。

- (1) 1次応力の制限
- (2) ひずみの制限
- (3) クリープ疲労損傷の制限
- (4) 座屈の制限

#### 4. 1次応力の制限

1次応力に対する制限は、次の2種類の観点より、延性破断、クリーブ破断を防止することを目的とするが、付随的に過大な塑性、クリーブ変形をも防止する。

- (1) 応力強さに対する制限
- (2) 使用分数和に対する制限

応力強さに対する制限は、図5に示すように基本的には（長期+短期）膜応力強さは短時間強度（ $S_y$ ：降伏応力， $S_u$ ：引張強さ）に基づき策定された設計応力強さ（ $S_m$ ）以下に、長期膜応力強さはクリーブ破断応力強さやクリーブ変形挙動に基づき策定された設計応力強さ（ $S_t$ ）以下に制限されている。従って、（長期+短期）の1次応力の制限は、告示の規定と同様に延性破断及び過大な塑性変形を防止するが、長期の1次応力の制限はクリーブ破断及び過大なクリーブ変形を防止することになる。なお、想定される事象の発生頻度とその大きさにより運転状態が区分されており、厳しい事象程発生頻度が低いことを考慮して定められた引張強さに掛ける設計係数を運転状態別に比較すると表1に示すとおりとなり、設計許容値が事象の発生頻度に応じて適切に定められている。

ただし、高温での使用実績に乏しい現状では、長期1次応力の制限値（ $S_t$ ）に対する運転状態別の割増しはしないこととした。

一方、使用分数和に対する制限は、使用分数和の概念が図6に示されているように、応力強さに対する制限とは別個に、許容時間に対する使用時間の比の和が1.0以下とすることにより、各運転状態を通して寿命中にクリーブ破断や過大なクリーブ変形が生じないことを確認するものである。

1次応力の制限の基本的考え方は以上示すとおりであるが、さらに曲げ応力が負荷された場合の部材の耐荷能力の増加を考慮して、制限値の割増を考慮している。割増係数 $K_s$ 、 $K_t$ の概念を図7に示す。なお、1次応力の制限に使用される設計許容値の策定方法を表2にまとめ示す。

表1 許容値の体系

短期 荷重	状態	設計条件	運転状態 I及びII	運転状態 III	試験状態	運転状態 IV
	設計係数					
	引張り強さ に対する係数	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1.2}{3}$	-	$\frac{2}{3}$
長期 荷重	使用分数和制限 基準となる許容値		$S_t$			
			$\frac{2}{3} S_R$			

表2 材料強度基準値の策定方法

設計許容値	策定方法	
<p>最大許容 応力強さ</p> <p><math>S_o</math></p>	<p>非 ク リ ー プ 領 域</p>	<p>(イ) 室温での規格引張強さの1/4 (ロ) 各温度での設計引張強さの1/4 (ハ) 室温での規格降伏点の5/8 (ニ) 各温度での設計降伏点の5/8 (ただしオーステナイト系材料及び高ニッケル合金 にあつては各温度での設計降伏点の0.9) 〔(イ)~(ニ)のうち最小の値を<math>S_o</math>とする。〕</p>
	<p>ク リ ー プ 領 域</p>	<p>(ホ) <math>10^3</math>時間に0.01%のクリープを生じる応力の平均値 (ヘ) <math>10^5</math>時間でクリープ破断を生じる応力の最小値の0.8 (ト) <math>10^5</math>時間でクリープ破断を生じる応力の平均値の0.6 〔(イ)~(ト)のうち最小の値を<math>S_o</math>と定める。〕</p>
<p>設計応力 強さ</p> <p><math>S_m</math></p>	<p>ク非 ク リ ー プ 領 域</p>	<p>(イ) 室温での規格引張強さの1/3 (ロ) 各温度での設計引張強さの1/3 (ハ) 室温での規格降伏点の2/3 (ニ) 各温度での設計降伏点の2/3 (ただしオーステナイト系材料及び高ニッケル系合 金にあつては各温度での設計降伏点の0.9) 〔(イ)~(ニ)のうち最小の値を<math>S_m</math>と定める。〕</p>
<p>設計応力 強さ</p> <p><math>S_t</math></p>	<p>ク リ ー プ 領 域</p>	<p>(イ) 当該温度当該時間における設計クリープ破断応力強 さの2/3 (ロ) 当該温度, 当該時間で第3期クリープを開始する応 力の最小値の0.8 (ハ) 当該温度, 当該時間で1%の全ひずみを生じる最小 応力 〔(イ)~(ハ)のうち最小の値を<math>S_t</math>と定める。〕</p>

## 5. ひずみの制限

ひずみの制限に対応する告示の規定は、(1次+2次)応力の制限であり、非クリープ温度領域における(1次+2次)応力の制限とクリープ温度領域におけるひずみの制限の規定を比較したものを表3に示す。この表から理解されるように、非クリープ温度領域における(1次+2次)応力の制限は、シェイクダウン基準と熱ラチェットの防止から構成され、基本的には応力値に対する制限により、過大な塑性変形を防止するとともに、後の疲労損傷評価法を妥当ならしめるための基礎を整える役割を果たすものである。それに対して、クリープ温度領域では必ずしも応力値に対する制限のみでは過大な非弾性ひずみを抑制することは難しく、したがって、制限すべき対象を(1次+2次)応力のみではなく直接的に過大な非弾性ひずみを防止する規定(累積非弾性ひずみの制限)としている。

表3 告示の規定との比較

非クリープ温度領域	ク リ ー プ 温 度 領 域
<p><b>(1次+2次)応力の制限</b> →過大な塑性変形の防止</p> <hr/> <p>○ <b>シェイクダウン基準</b></p> <p style="text-align: center;"><math>S_n \leq 3 S_m</math></p> <p>満足しない場合は 簡易弾塑性解析 ただし <math>S_n' \leq 3 S_m</math></p> <p>○ <b>進行性変形の防止</b> (熱ラチェットの防止)</p>	<p><b>ひずみの制限</b></p> <p>→ { 過大な塑性変形の防止 過大なクリープ変形の防止</p> <p>○ <b>2次応力の再分類</b> ← 具体的方法</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 顕著な弾性追従……………荷重制御型応力として扱う</li> <li>○ 若干の弾性追従……………<math>Q_{EF}</math></li> <li>○ 弾性追従を伴わない……………<math>Q</math></li> </ul> <p>○ <b>(修正)シェイクダウン基準</b></p> <p>構造物が総体的に弾性挙動するようにする</p> <p style="text-align: center;"><math>S_n \leq 3 \bar{S}_m</math></p> <p>満足しない場合は 簡易非弾性解析 ただし { <math>S_n' \leq 3 \bar{S}_m</math> <math>S_n^* \leq 3 S_{mH}</math> <math>S_n \leq \beta_s \cdot (3 \bar{S}_m)</math></p> <p>○ <b>累積非弾性ひずみの制限</b></p> <p>(クリープラチェットひずみ) + (弾性追従ひずみ) 膜<math>\leq 1\%</math>, 膜+曲げ<math>\leq 2\%</math></p> <p><b>クリープ効果が顕著でない場合</b> 非クリープ温度領域での取扱いと類似の扱いをする。</p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; width: fit-content; margin-left: auto; margin-right: auto;">       長期1次応力が低い場合     </div> <p style="text-align: right;">具体的算出方法</p>

しかしながら、弾性解析に基づくひずみの評価は容易ではなく、特にクリープ温度領域では、構造物の形状によっては2次応力が荷重制御型応力に類似した挙動を示す（弾性追従という。）ことにより弾性解析に基づくひずみよりも大きなひずみが生じる場合があり、さらにひずみの評価が難しくなる。

本方針では、弾性追従を適切に評価することにより2次応力を1次応力等に再分類する具体的方法を与えるとともに、もんじゅの使用条件を考慮して、「長期1次応力が低い場合」「クリープ効果が顕著でない場合」を設け、その場合に限り簡易な累積非弾性ひずみの評価法を与えることにより、ひずみの制限への適合を示すことができるようにしている。

### 5.1 2次応力の再分類

変形制御型応力（2次応力）であっても、その挙動が荷重制御型応力（1次応力）に類似した挙動を示すことがあり、その現象を弾性追従といい、その弾性追従の程度により2次応力を再分類して設計評価する必要がある。まず、このような追加的に生じる非弾性ひずみの発生メカニズムを簡便な弾性追従のモデルを用いて説明する。

弾性追従の概念を図8に示す。弾性追従とは、構造系の中の比較的弱い箇所に非弾性ひずみが集中してくる現象であり、その箇所とそれ以外の部分との発生応力の差や剛性の差により弾性追従の程度に差が生じる。弾性追従モデルとして変断面棒を考えると、初期状態では、与えられた変位 $\delta$ を部材の断面積と長さに応じて部材Aと部材Bで吸収している。この状態を維持したまま、クリープ変形が生じるような温度にまで温度を上昇させると、高応力が生じている部材Bのみクリープ変形が生じ、これにより応力が緩和する。変形制御型の荷重が負荷されている場合に応力の緩和は部材の弾性変形量の一部が非弾性変形量と置き換わることにより生じるものであり、この変断面棒の場合には、部材Bの応力緩和に伴い弾性変形の減少分を非弾性変形（クリープ変形）で補うばかりではなく、部材Aの弾性変形の減少分をも部材Bの非弾性変形で補う必要があるので、部材Bの非弾性ひずみ量は弾性計算により想定する最大の非弾性変形量（ $\delta_B$ ）よりも $\delta_{BF}$ 分だけ弾性追従により多目に生じる。この状態を部材A及びBの荷重と変位の関係で表わすと、図8の下図に示すとおりとなり、負荷されている荷重の挙動は、変形制御型と荷重制御型荷重の中間的様相を示す。

弾性追従を伴う2次応力の挙動を詳細に調べると図9のようになり、①→②での応力緩和速度は、評価対象部位での応力増分（ $\Delta\sigma$ ）とひずみ増分（ $\Delta\epsilon$ ）とすると、応力-ひずみ関係が

$$\left(\frac{1}{k} \cdot \frac{S}{\ell}\right) \Delta \sigma + \Delta \varepsilon = 0$$

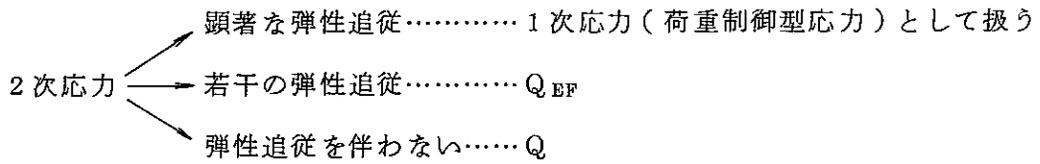
となるので、

$$\frac{\Delta \sigma}{\Delta t} = - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{k} \cdot \frac{SE}{\ell}\right)} E \cdot \dot{\varepsilon}_c$$

となり、単純な応力緩和 ( $\Delta \varepsilon = 0$ ) の場合と比較すると応力緩和速度は低下する。なお、単純な応力緩和の場合の応力緩和速度は以下のとおりとなる。

$$\left(\frac{\Delta \sigma}{\Delta t}\right)_{\Delta \varepsilon = 0} = -E \dot{\varepsilon}_c$$

以上まとめると、弾性追従に伴う 2 次応力の挙動として留意すべき点は、非弾性ひずみの増加と応力緩和速度の低下であり、それらの構造強度に及ぼす影響を図 10 にまとめて示す。これらの点を考慮して、本方針では、ひずみの制限及びクリープ疲労損傷の制限において 2 次応力を次のように再分類するものとした。



## 5.2 シェイクダウン基準

シェイクダウン基準とは、構造部材が繰返し荷重下で総体として弾性挙動するか否かの判定基準であり、具体的には (1 次 + 2 次) 応力強さ範囲を許容値以下に抑制するものである。本方針における該当する規定は以下のとおりである。

$\left[ \begin{array}{l} S_n^* \leq 3 S_{mH} \\ S_n \leq 3 \bar{S}_m \dots\dots \text{又は} \dots \rightarrow \left[ \begin{array}{l} S'_n \leq 3 \bar{S}_m \\ S_n \leq \beta_s (3 \bar{S}_m) \end{array} \right. \end{array} \right.$
--

シェイクダウン基準の基本的考え方を図 11 と図 12 に示す。図には、設計の保守性・解析の簡便さを考慮して、材料の変形挙動を弾完全塑性体として、片端固定の丸棒に一定変位  $\delta_2$ 、変位範囲  $\delta_R$  を加えた場合の部材の応力-ひずみ挙動が示されている。弾性追従を伴う場合においても、弾性追従を伴わない場合においても変位範囲  $\delta_R$  に相当するひずみ範囲  $\varepsilon_R$  が以下の場合においてシェイクダウン基準を満足することができ、それを超える場合

には塑性サイクルを描くことが理解される。

(1) 非クリープ温度域

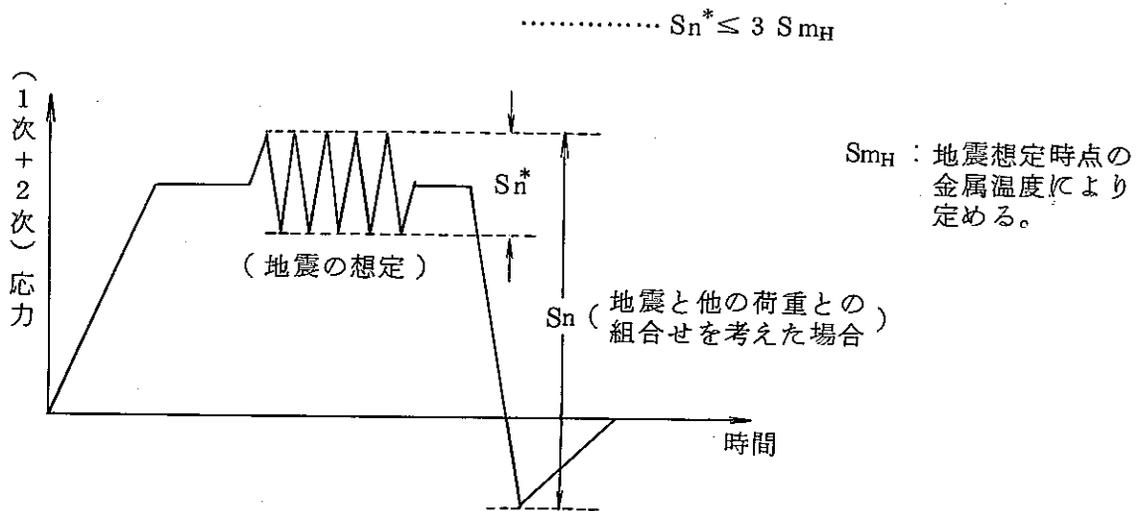
$$\epsilon_R \leq 3 S_m / E$$

(2) クリープ温度域

$$\epsilon_R \leq 3 \bar{S}_m / E$$

なお、(1次+2次)応力の変動範囲( $S_n$ )がシェイクダウン基準を満足しない場合は、次に示す(ロ、ハ)の代替規定が用意されている。

(イ) 地震荷重単独による(1次+2次)応力の変動範囲( $S_n^*$ )は、シェイクダウン基準内に制限する



(ロ) 熱曲げ応力( $Q_{Tb}^* + Q_{Tb}$ ; 若干の弾性追従を伴うにすぎないか、又は弾性追従を伴わない)を除く(1次+2次)応力の変動範囲( $S'_n$ )は、シェイクダウン基準内に制限する。

$$\dots S'_n \leq 3 \bar{S}_m$$

( (1次+2次)応力のうち、大きなひずみ集中を生じる可能性がある部分の変動範囲( $S'_n$ )は、シェイクダウン基準内に制限する。 )

(ハ) (1次+2次)応力の変動範囲( $S_n$ )の上限値を、配管エルボを試験体に用いた繰返し負荷試験で、平均ひずみの増大が生じた水準以下に制限する。(図13参照)

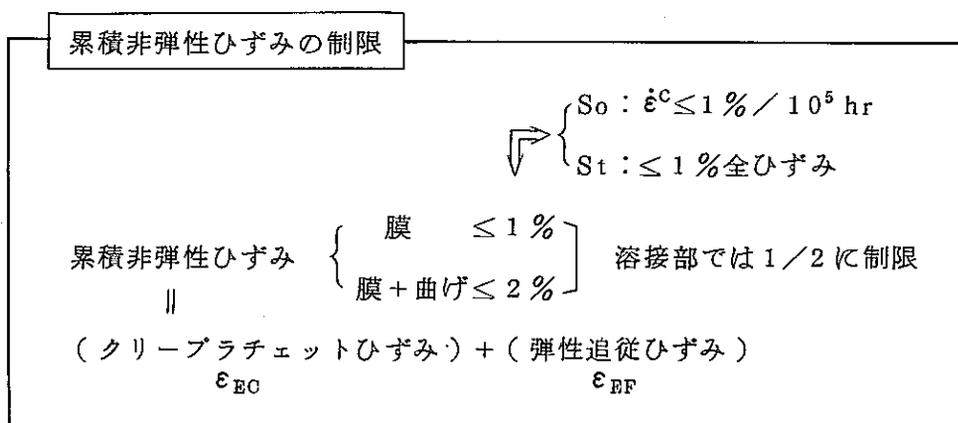
$$\dots S_n \leq \beta_s (3 \bar{S}_m)$$

$$\beta_s = 2.5$$

### 5.3 累積非弾性ひずみの制限

表3に示すとおり、本方針における累積非弾性ひずみの制限に該当する告示の規定は進行性変形の防止（熱ラチェットの防止）であり、定常的1次応力に過渡的2次応力が繰返し負荷された場合に、繰返しに伴い変形が進行することを防止することを目的としている。具体的には、定常的1次応力と過渡的2次応力の負荷状態を図14に示されているBree線図上でE, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, P領域に制限することにより、進行性変形が防止される。進行性変形が生じない領域（例えばS<sub>1</sub>領域）における断面内応力分布及びそのメカニズムを図15に示す。また、熱ラチェット発生メカニズム（例えばR<sub>1</sub>領域）を図16に示す。図から理解されるように2次応力の負荷時及び除荷時において断面内に弾性的に挙動する領域（弾性コアという。）が存在すれば進行性変形が生じないといえる。Bree線図上の領域区分に応じて、応力分布及び応力ひずみ関係をまとめて図17に示す。

以上示したように非クリーブ温度域では負荷状態をBree線図上でE, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, P領域に制限することにより、進行性変形を防止できるが、クリーブ温度域では一定程度非弾性ひずみが生じることは避けられない。したがって本方針では、一定程度の非弾性ひずみは許容するものとし、累積非弾性ひずみそのものを制限対象とした。本方針の規定を以下に示す。



ここに示す累積非弾性ひずみは、構造物の通常の使用状況を考慮するとクリーブラチェットひずみと弾性追従ひずみに限定することができ、クリーブラチェットひずみは簡易計算法（O'Donnell & Porowskiモデル）により求めることができる。クリーブラチェットひずみの発生メカニズムは、図18に示されるように、基本的にはBreeのモデルの考え方と同じであるが、弾性コアに生じる応力が緩和することなく断面全体に一様に作用している

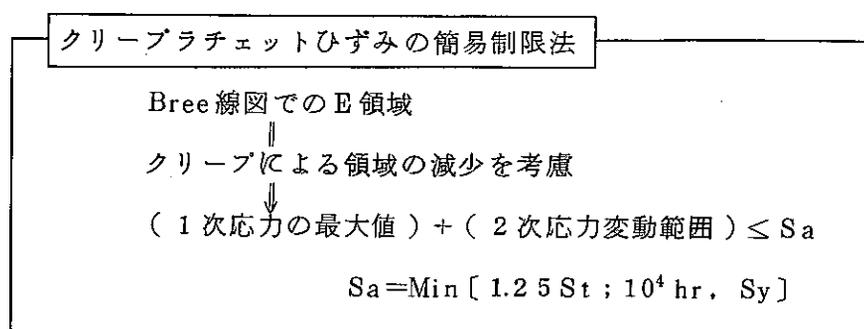
ものとしてクリープひずみが設計上保守的に評価されるよう規定されている。

さらに、本方針では、運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及び試験状態における短期荷重の重畳によるクリープラケットひずみの増加をも評価できるように、O'Donnell & Porowski 法を修正して用いるものとしている。その考え方を図 19 に示す。

クリープラケットひずみの簡易計算法の妥当性は表 4 に示す実験により実験的に検証されて、その結果を図 20 に示す。いずれの試験条件においても簡易計算法により求められるクリープラケットひずみは、実験値よりも大きく、簡易計算法による評価は設計上保守的といえる。

弾性追従ひずみは、一般的には適切に評価することとしており、具体的計算方法は与えられていないが、後で述べられる長期 1 次応力が低い場合に限り、付録 B により評価することができる。

以上がクリープラケットひずみと弾性追従ひずみの和を制限することにより、進行性変形の防止をはかるものであるが、クリープラケットひずみの簡易制限法として以下に示す方法も用意されている。



#### 5.4 運転状態Ⅳにおけるひずみの制限

運転状態Ⅳにおけるひずみの制限の基本的考え方を図 21 に示す。

#### 5.5 負荷状態の分類

##### (1) 長期 1 次応力が低い場合

ひずみの制限では、2 次応力負荷下でのひずみの挙動に基づき 2 次応力の再分類及び弾性追従ひずみの算出を行う必要があるが、一般的には 2 次応力負荷下でのひずみの挙動に、同時に存在する 1 次応力が影響を及ぼすと考えられ、一般的には、1 次応力の影

表4 クリープラケット試験条件

試験番号	№26,27	№28	№29	№30
試験条件				
軸応力	$8 \text{ kg/mm}^2$	$8 \text{ kg/mm}^2$	$6 \text{ kg/mm}^2$	$8 \text{ kg/mm}^2$
Tmax	600℃			
Tmaxにおける $\sigma_{0.2\%}$ (実験値)	$11.97 \text{ kg/mm}^2$			
Tmin	300℃	400℃	300℃	500℃
Tc	515.88℃	544.08℃	515.95℃	570.51℃
$\Delta T_1$	143.18℃	93.52℃	140.57℃	51.35℃
Tcにおける $\sigma_{0.2\%}$ (実験値)	$12.97 \text{ kg/mm}^2$	$12.65 \text{ kg/mm}^2$	$12.97 \text{ kg/mm}^2$	$12.33 \text{ kg/mm}^2$
プレ・クリープ時間	168 hr	524 hr	312 hr	504 hr
1サイクル当りの保持時間	165 hr			

(注) Tmax : 最高温度 Tmin : 最低温度 Tc : 最大熱応力発生時の壁厚平均金属温度 ( $\sigma_{0.2\%}$ は、当温度に対応)

$T_1$  : 最大熱応力発生時の等価線形温度勾配 実験値 : 供試材の材料試験結果に基づく内外挿値 プレクリープ : 熱過渡負荷以前のクリープ時間

th : 1サイクル当りの保持時間

響を考慮した方策が必要である。

一方、もんじゅの主要機器では、内圧が低いいためその影響は無視できる場合が多く、2次応力単独負荷下での挙動の評価に基づき、2次応力の再分類及び弾性追従ひずみ算出の具体的かつ簡易な方法を策定することが可能と考えられる。

この状況を鑑み、1次応力の2次応力の挙動に及ぼす影響が十分小さい、1次応力のレベルを次に示す判断基準により確認し、2次応力の再分類基準、弾性追従ひずみ算出法、応力緩和型クリープ損傷評価が、2次応力単独下での挙動評価にもとづき用意されている。

(判断基準)

長期1次応力が低い場合  $\langle P_L + P_b \rangle \leq S_{LP}$

$$S_{LP} = \text{Min} [ S_{rH}, S_g/g ]$$

$S_{rH}$  : 初期応力を1.5  $S_m$ として寿命中に緩和する応力水準

→  $\langle P_L + P_b \rangle \leq S_{rH}$  の1次応力により生じるクリープひずみは無視できる。

$S_g$  : クリープ損傷を定応力型で評価する応力水準

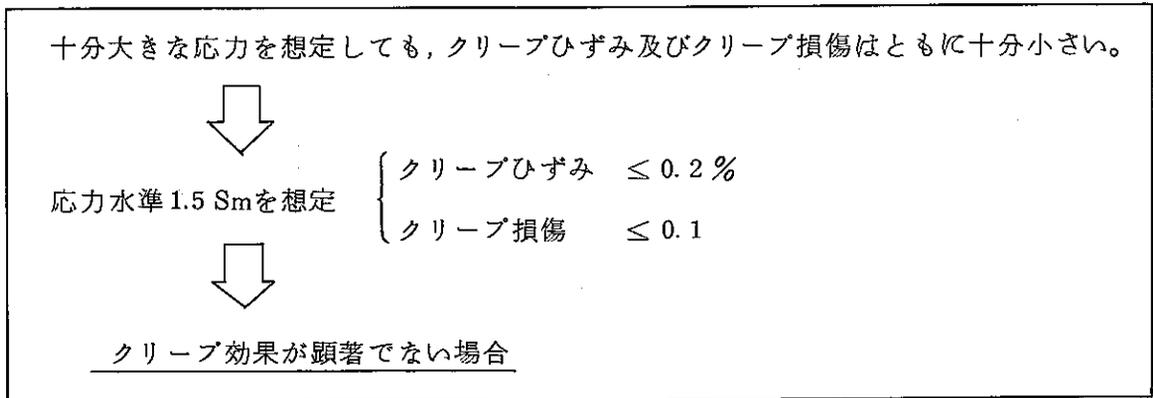
→  $\langle P_L + P_b \rangle \leq S_g/g$  ( $g=3$ )であれば、応力水準  $S_g$  までの緩和に及ぼす1次応力の影響は無視できる。

(2) クリープ効果が顕著でない場合

原子炉容器下部のように通常は約400℃(告示の適用温度範囲)で使用されるが、一時的に高温になる場合にはクリープ変形を考慮した規定を適用する必要性は乏しく、告示の構造の規格に類似した取扱いを行っても良いはずである。

本方針では、十分大きな応力を想定しても、クリープひずみ及びクリープ損傷はともに十分低い場合をクリープ効果が顕著でない場合と分類し、ひずみの制限の評価方法として、クリーブラチェット評価にかえて、熱ラチェットの制限を適用するものとした。クリープ効果が顕著でない場合の判定基準を以下に示す。

(判定基準)



## 6. クリープ疲労損傷の制限

### 6.1 基本的考え方

高温でくり返し荷重を受ける材料の強度は、負荷速度、負荷波形などの時間的因子を含む諸量の影響を受ける。このような高温での時間的因子を含む材料の繰返し強度は総称してクリープ疲労強度という。

一般に、告示の温度領域におけるくり返し負荷下では保持時間によって材料の破損くり返し数は変化せず、ひずみ範囲のみの関数といえることができるが、クリープ温度領域では、保持時間により材料の破損くり返し数に影響を与える。(図24参照)図25にはクリープ温度領域(593℃)における保持時間の影響を調べた実験データが示されており、保持時間が長くなるに従って破損くり返し数が低下している。したがって、設計評価上クリープ疲労破損を防止するためには、保持時間の効果を適切に考慮した評価法が必要である。

(図26)

本方針では、クリープ疲労破損を防止するために、図27に示すように、クリープ損傷(D<sub>c</sub>)と疲労損傷(D<sub>f</sub>)の和を、クリープ損傷と疲労損傷の相互作用を考慮した制限値(D)以下に制限するものとした。設計裕度はクリープ損傷と疲労損傷を評価する方法の中で考慮する。なお、制限値Dは、材料のクリープ疲労試験のデータの平均傾向として定められたものであり、付録Cの解説で詳細に述べる。図28は、クリープ疲労試験により得られた結果を評価法に従って再評価したものであり、本方針における規定によりクリープ疲労破損が適切な裕度をもって防止されているといえる。

## 6.2 弾性解析による簡易評価法（一般規定）

### (1) 疲労損傷評価法

疲労損傷の評価法は、図 2 7 に示したように許容くり返し数に対する想定されるくり返し数の比の和として算出されるので、許容くり返し数算定に用いられるひずみ範囲を適切に定める必要がある。評価の対象とするひずみ範囲は、構造物における局部構造不連続部等に生じる場合も包含しているので、一般的には、弾性ひずみのみではなく塑性ひずみ、クリープひずみ等の集中をも考慮したものでなければならず、評価はかなり難しい。

本方針は、基本的には実験と解析にもとづく Neuber 則を適用し、弾性解析により算定されたひずみと弾性応力集中係数とを組み合わせ、ひずみ範囲を簡便に算出することができる計算式を与えている。この基本的考え方を図 2 9 及び図 3 0 に示す。

### (2) クリープ損傷評価法

クリープ損傷は、図 3 1 に示されているようにクリープ破断時間に対する負荷されている応力の持続時間の比の和として算出されるので、負荷されている応力及びその経時変化を適切に評価する必要がある。構造物に生じる応力は、1 次応力、2 次応力、ピーク応力の和であり、一般的には保持時間中の全応力の経時変化を設計上一律に定めることは困難である。

したがって、本方針では図 3 1 に示すように、応力分類に対応した応力挙動の特徴に応じて、(1 次+2 次) 応力によるクリープ損傷とピーク応力によるクリープ損傷との和として、クリープ損傷を評価するものとした。

(1 次+2 次) 応力によるクリープ損傷は、弾性追従に伴う 2 次応力の挙動及び残留応力の存在等に留意した簡易評価法により算定される。簡易評価法は、ASME Code Case N-47 の規定と同様であり、(1 次+2 次) 応力の水準に応じて、保守的な評価が得られるような適切な評価応力水準  $S_k$  を選定し、その応力があるひずみサイクルの間中一定に保持されるとしてクリープ損傷を評価する。応力水準  $S_k$  の定め方を以下に示す。

評価応力水準  $S_k$  の定め方

(1) (1 次+2 次) 応力が降伏応力を超えない場合は、2 次応力といえども 1 次応力として評価する。

$$\boxed{\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle \leq S_y} \text{ のとき}$$

$$\boxed{S_R = \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle}$$

(ロ) (1次+2次)応力が降伏応力を超える場合は、適切な水準の応力が維持されるとして評価する。

a) 長期荷重による(1次+2次)応力は1次応力として評価する。

$$\dots\dots\dots \boxed{\langle P_L + P_b + Q \rangle}$$

b) 過渡的荷重による残留応力は、応力範囲の1/2を評価水準とする。ただし、長期荷重による1次一般膜応力は加算する。...

$$\boxed{P_m + 0.5 \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle_R}$$

c) なお、平均的な降伏応力(1.25 Sy)を上まわる水準で評価することを要しない。

$$\dots\dots\dots \boxed{1.25 S_y}$$

$$\boxed{\langle P_L + P_L + P_b + P_b + Q + Q \rangle > S_y} \text{ のとき}$$

$$\boxed{S_k = \text{Min} [ 1.25 S_y, \text{Max} [ \langle P_L + P_b + Q \rangle, \langle P_m \rangle + 0.5 \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle_R ] ]}$$

ただし、 $S_k$ が応力水準 $S_g$ を下回る場合は $S_k = S_g$ とする。

ピーク応力によるクリープ損傷は、定ひずみくり返し下での応力の挙動で模擬することができるので、局所でのひずみ範囲に対するクリープ損傷値を設計定数として与えるものとした。詳細については、付録Fの解説で述べられている。

### 6.3 弾性解析による簡易評価法(長期1次応力が低い場合クリープ効果が顕著でない場合)

もんじゅの使用条件(高温, 低圧, 熱応力等)を考慮すれば、一般規定と比較しより合理的なクリープ疲労損傷評価法の策定が可能となる。ここでは、もんじゅの使用条件を考慮した負荷状態として、長期1次応力が低い場合、クリープ効果が顕著でない場合とに区分し、その負荷状態に応じた具体的評価法について解説する。(図3.2参照)

#### (1) 長期1次応力が低い場合

長期1次応力が低い場合の判定基準は、定常的に負荷されている1次応力による影響が十分小さいことを確認するものであり、その場合には2次応力単独の挙動にもとづいて、ひずみ範囲の算定法の合理化及び応力緩和に伴うクリープ損傷の評価に関する具体的方法の策定が可能となる。その判定基準を図3.3に示す。

ひずみ範囲の評価式は図34に示されているように、弾性追従によるひずみの拡大( $K\varepsilon$ )及び1次応力によるクリープひずみの削除等合理的算定式が与えられている。また、クリープ損傷評価法については、弾性追従に伴う2次応力の挙動にもとづいて、応力緩和に伴うクリープ損傷としてクリープ損傷が評価される。この基本的考え方を図35に示す。図36には、もんじゅの典型的な負荷条件に対して、一般規定、長期1次応力が低い場合、非弾性解析にもとづくクリープ損傷値を比較したものであり、長期1次応力が低い場合のクリープ損傷評価法が一般規定より合理的でかつ非弾性解析法によるクリープ損傷値を包絡していることより、長期1次応力が低い場合の評価法は妥当なものといえる。

(2) クリープ効果が顕著でない場合

クリープ効果が顕著でない場合の判定基準の考え方は、十分大きな応力を想定したとしてもクリープひずみ及びクリープ損傷はともに十分小さい場合には、告示に準じた評価が可能となる、ということで、その判定法を図37に示す。

この場合のクリープ疲労損傷の制限に関する規定は、長期1次応力が低い場合と同じとする。

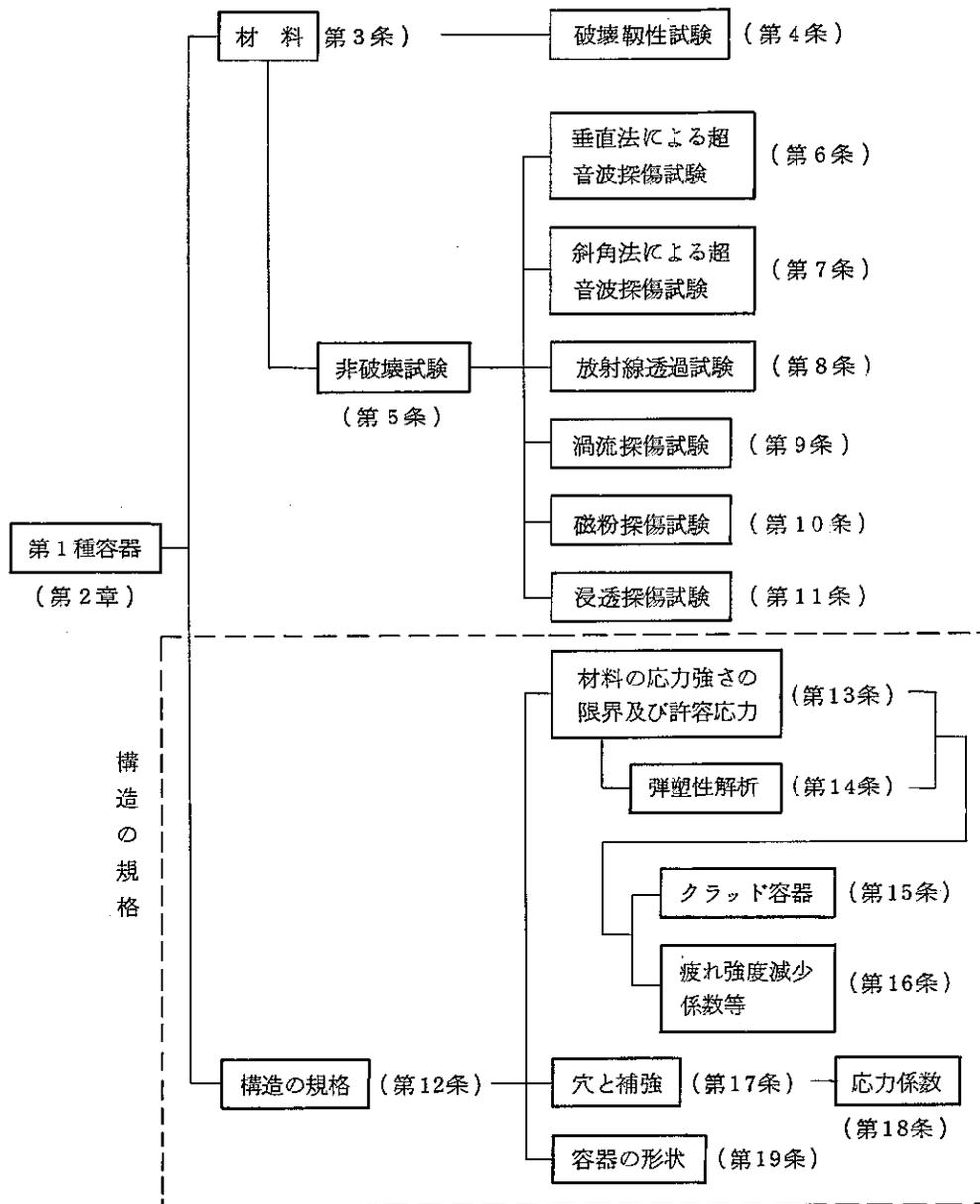
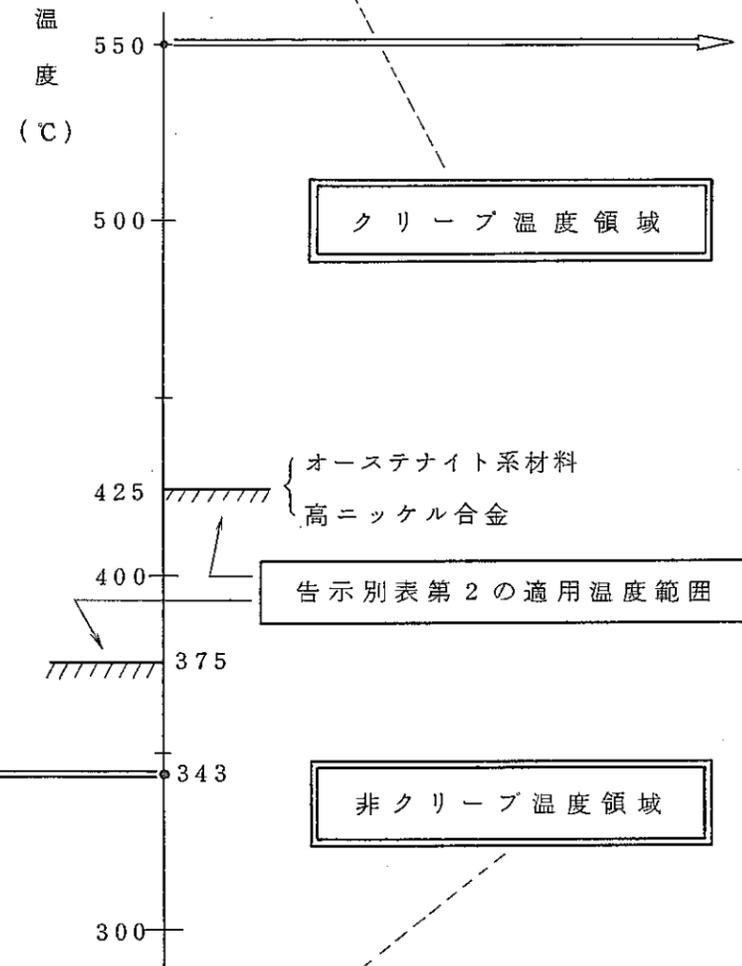


図1. 告示501号の規定の構成

告示に追加して、高温で防止すべき破損様式

- e) クリープ破断
- f) 過大なクリープ変形
- g) クリープ疲労破損
- h) クリープ座屈



告示で防止する破損様式

- a) 延性破断
- b) 過大な塑性変形
- c) 疲労破損
- d) 弾塑性座屈

PWR原子炉圧力容器		
最高使用温度	343℃	
最高使用圧力	175 kg/cm <sup>2</sup> G	
主要寸法	内径	4.0 m
	全高	12.1 m
	胴部肉厚	200 mm
使用材料	母材：低合金鋼 肉盛：オーステナイト系ステンレス鋼	
冷却材	水	

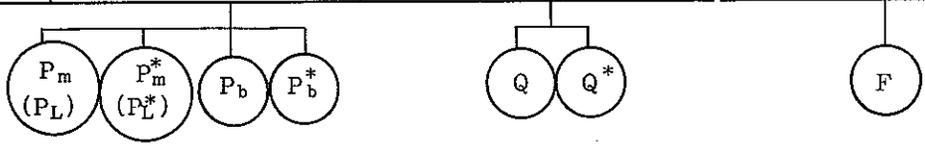
もんじゅ原子炉容器		
	上部	下部
最高使用温度	550℃	420℃
最高使用圧力	2kg/cm <sup>2</sup> G	10kg/cm <sup>2</sup> G
主要寸法	内径	7.1 m
	全高	17.8 m
	胴部肉厚	50 mm
使用材料	オーステナイト系ステンレス鋼	
冷却材	液体金属ナトリウム	

もんじゅの特徴

- 高温
- 低圧
- ナトリウムの使用
- 熱応力

図2 構造の規格により防止すべき破損様式

種類	1次応力	2次応力	ピーク応力
記号	P	Q	F
荷重の区分	荷重制御型応力	変形制御型応力	応力集中及び局部熱応力
代表例	(一定内圧) 	熱膨張 応力 	(一様引張荷重) 



負荷の継続時間による分類

{ 長期荷重  
 短期荷重 (肩付\*)

分類例	荷重制御型荷重	変形制御型荷重
長期荷重	自重・通常運転時の内圧	熱膨張反力
短期荷重	地震荷重	熱過渡

断面内応力分布による分類

(m : membrane b : bending)

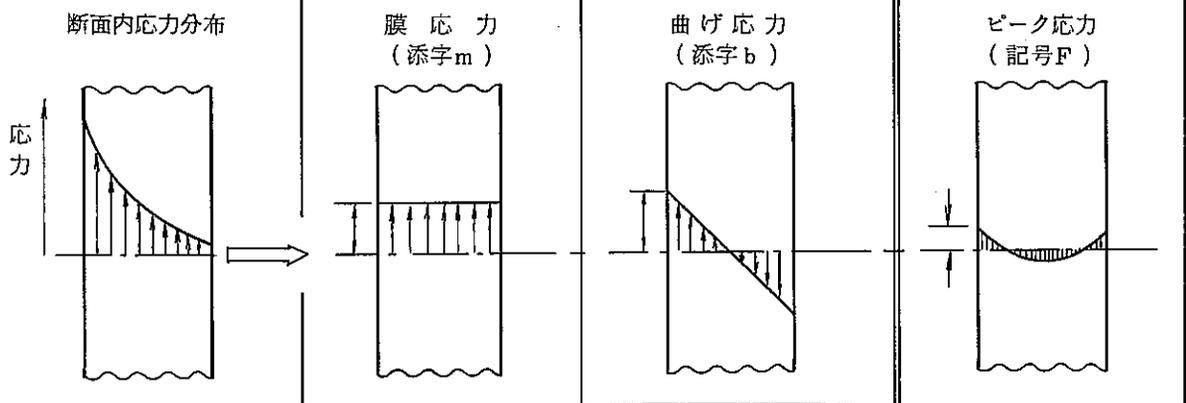
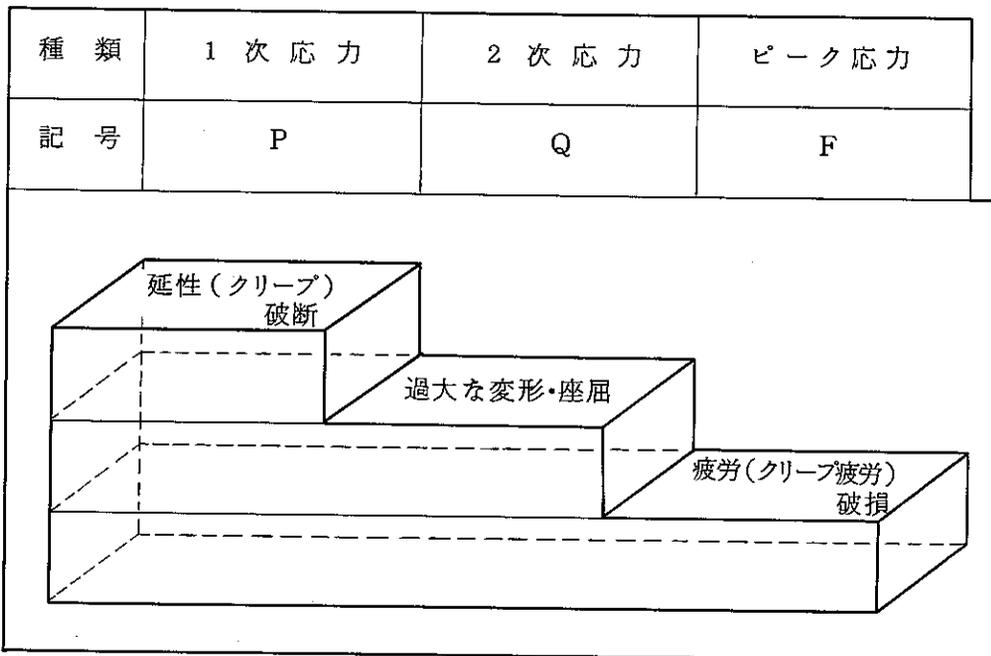


図3. 応力分類の考え方



応力の特徴に応じて適切な水準に制限

図4. 応力分類と破損様式との対応

	運転状態 I 及び II
長期 + 短期	$\langle P_m + P_m^* \rangle \leq S_m$
長期	$\langle P_m \rangle \leq S_t$

$\langle \rangle$  : 応力強さを表わす記号

$S_m$

- ① 引張り強さの 1/3
- ② 降伏点の 2/3 (注)

但し、室温での規格引張強さの 1/3 及び規格降伏点の 2/3 を超えないこと

延性破断の防止

過大な塑性変形の防止

$S_t$

- ① 当該時間で 1% 全ひずみ ( $\epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^c$ ) を生じる最小応力
- ② 当該時間で第 3 期クリープを開始する最小応力の 0.8
- ③ 当該時間でクリープ破断を生じる最小応力の 2/3

過大なクリープ変形の防止

クリープ破断の防止

注) オーステナイト系材料及び高ニッケル合金では 0.9

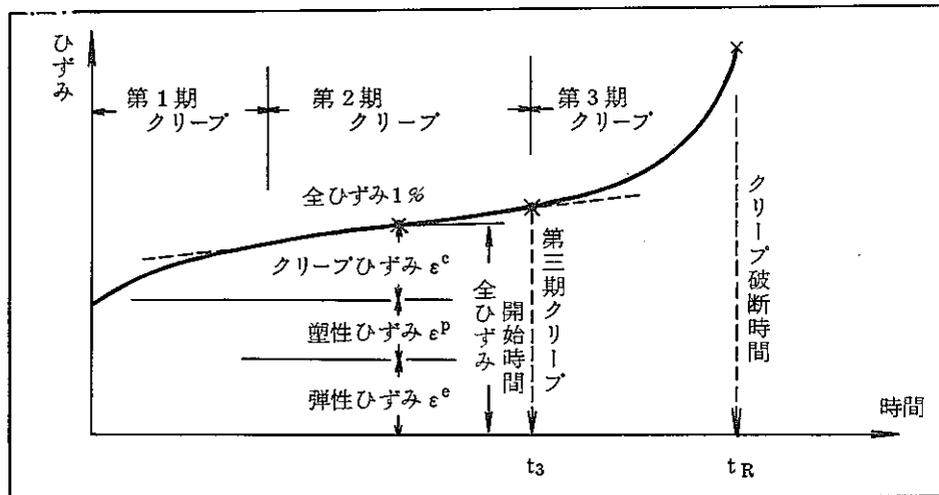


図 5. 1次応力制限に対する基本的考え方

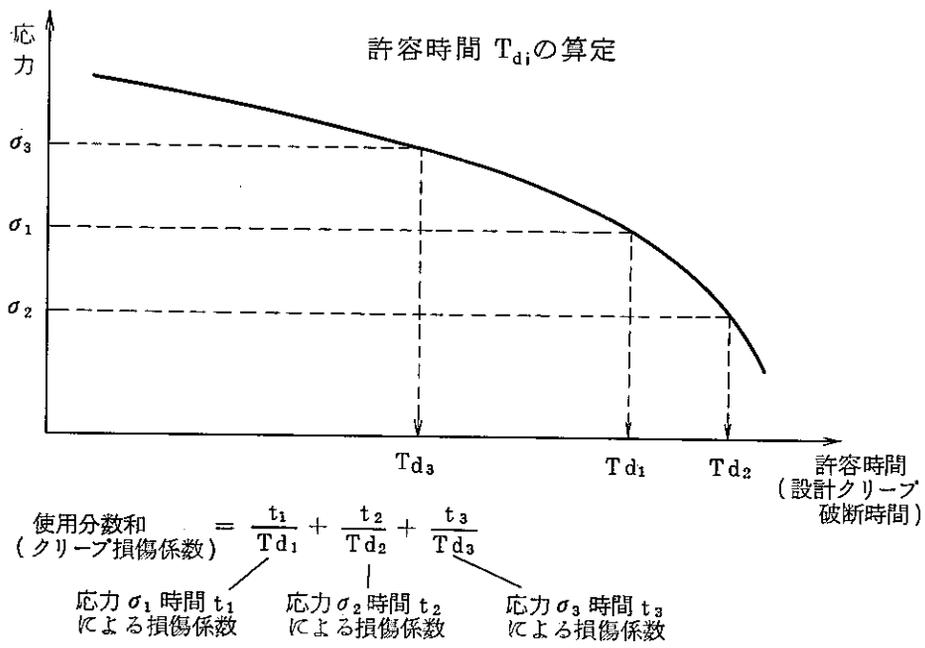
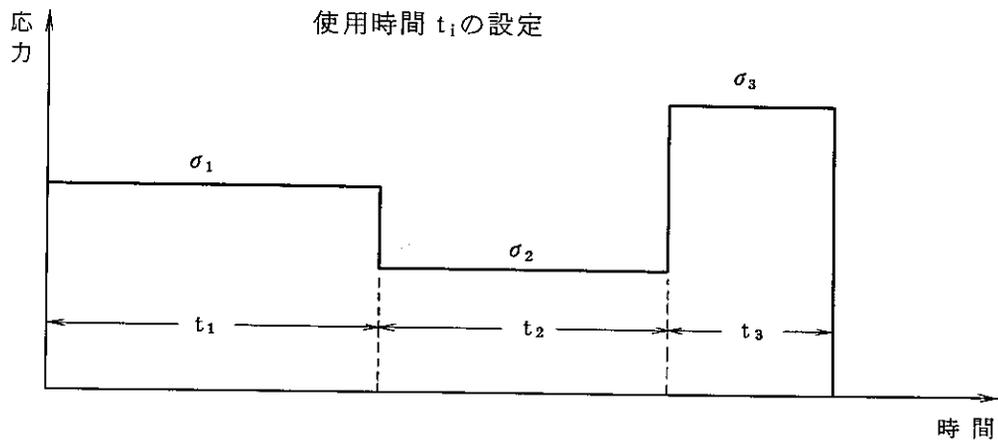
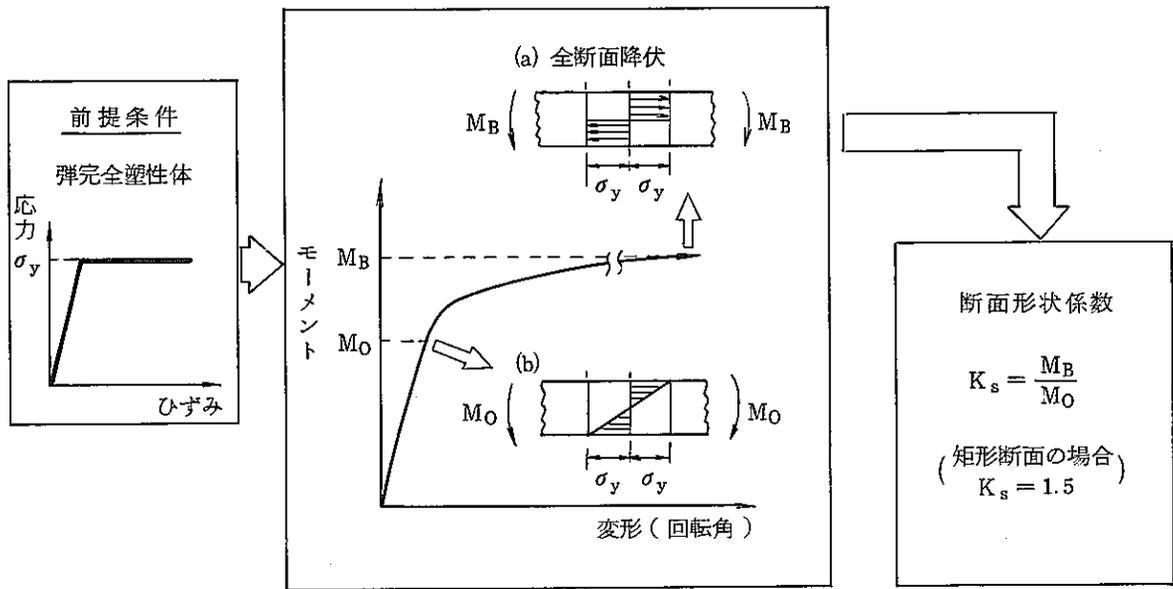


図 6. 使用分数和の概念

K<sub>s</sub> の概念



K<sub>t</sub> の概念

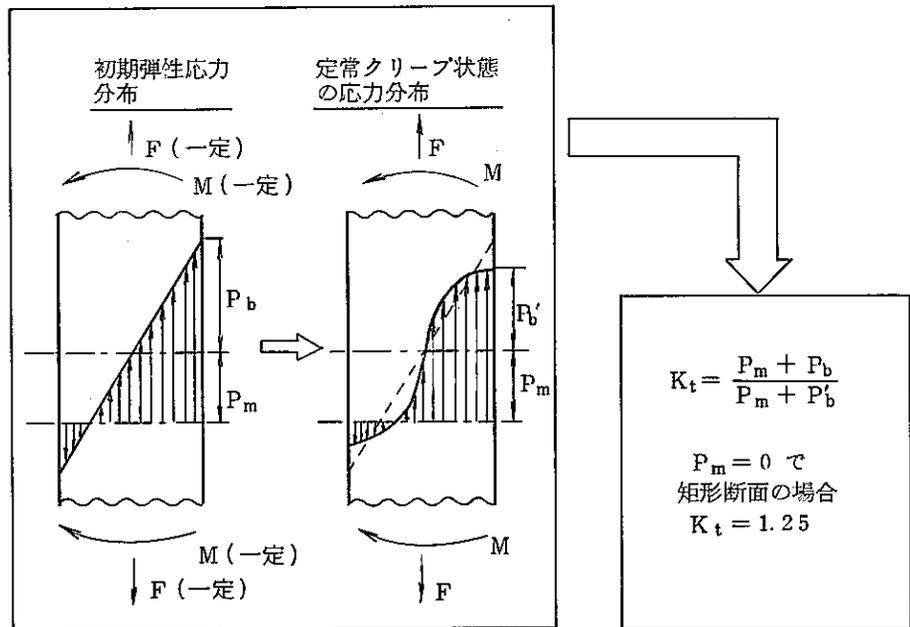


図7. (膜+曲げ) 応力に対する係数  $K_s$ ,  $K_t$  の考え方

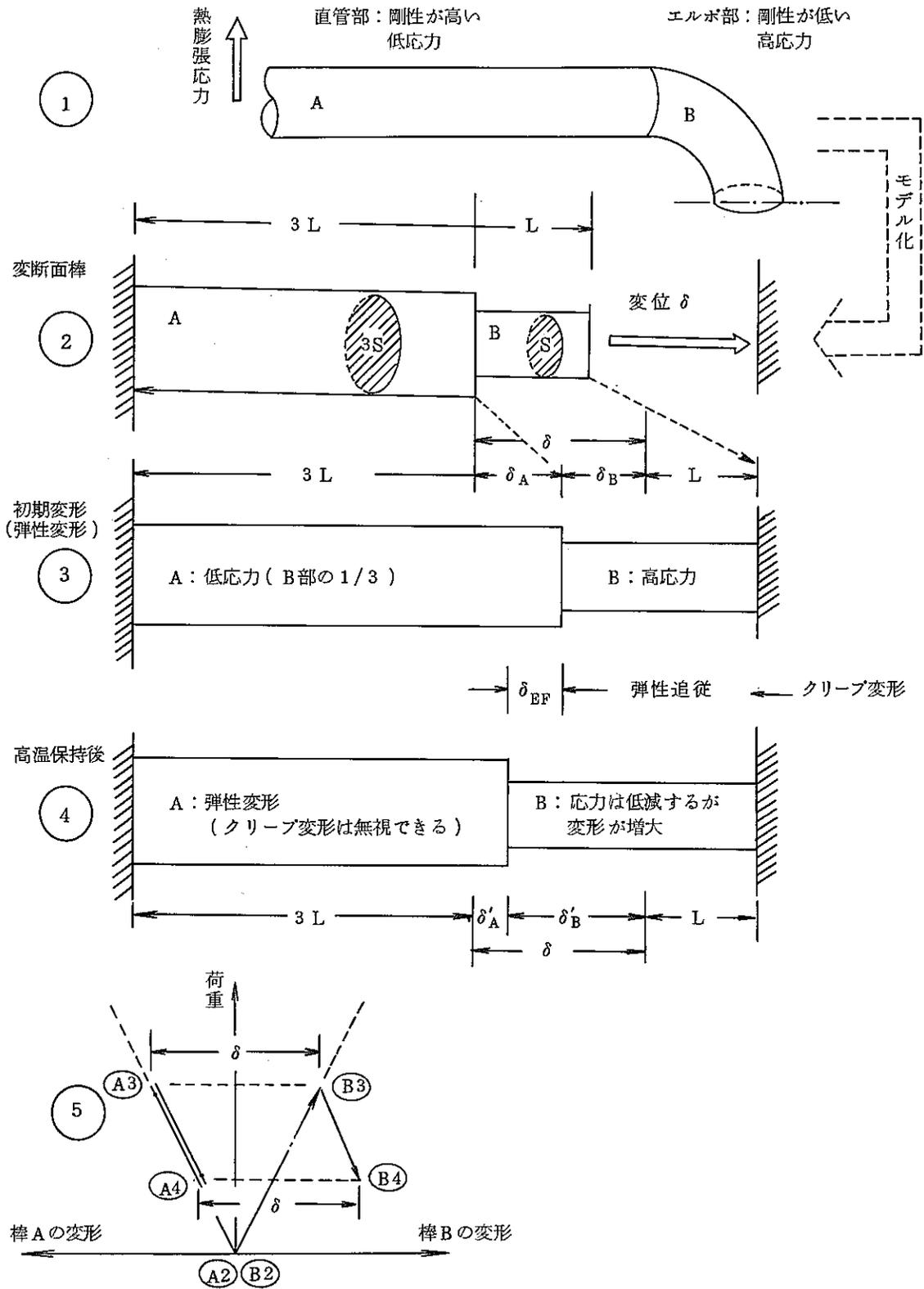
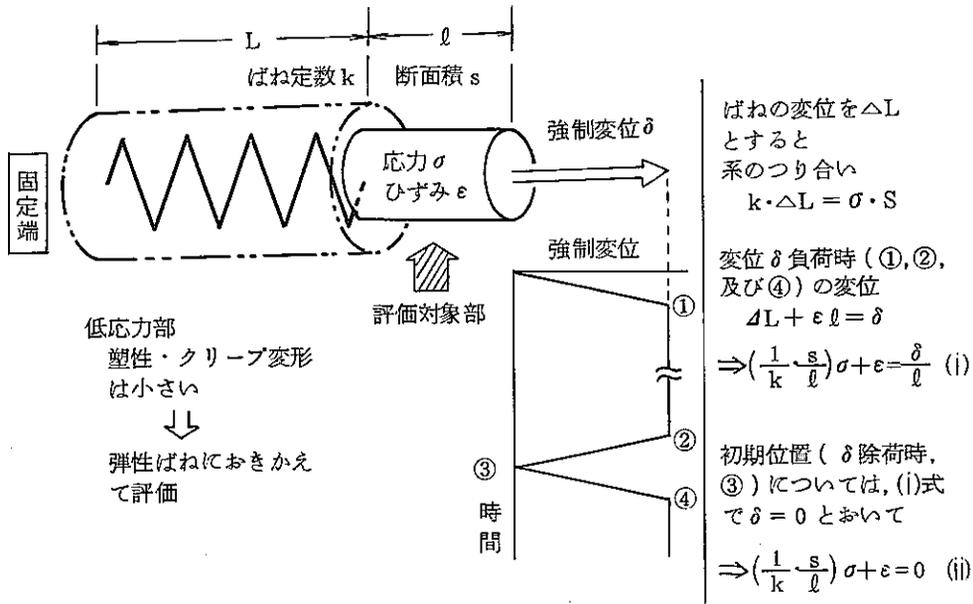
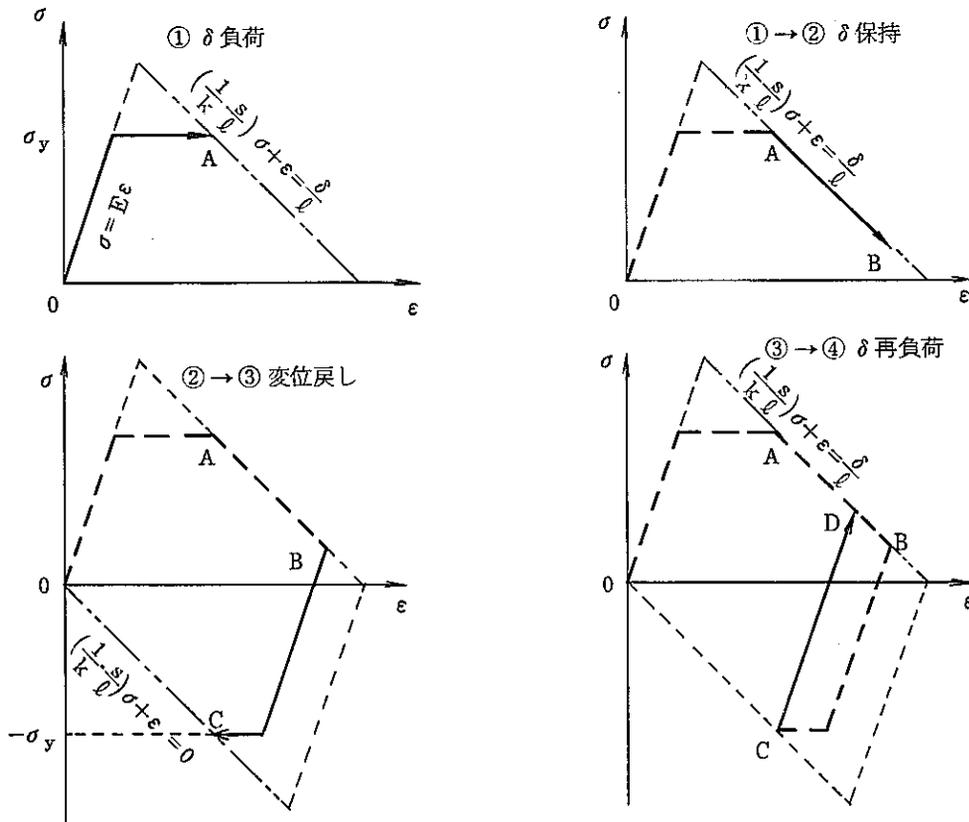


図 8. 弾性追従の概念



(a) 弾性追従モデル



(b) 評価対象部の応力とひずみ挙動

図9. 弾性追従を伴う2次応力の挙動について

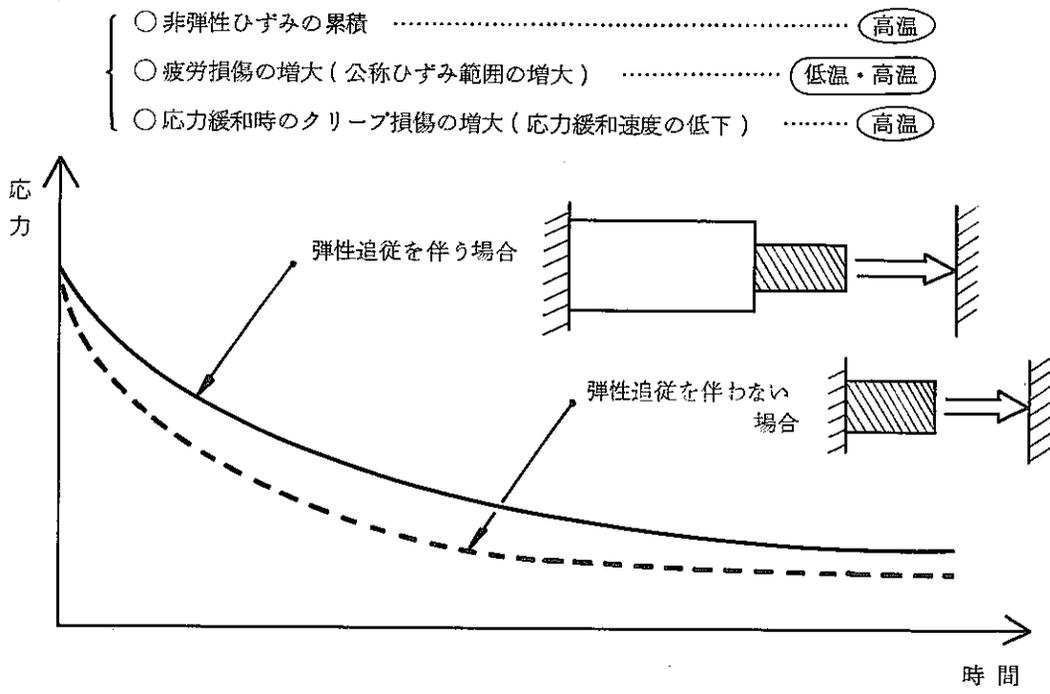


図 10. 弾性追従の構造強度に及ぼす影響

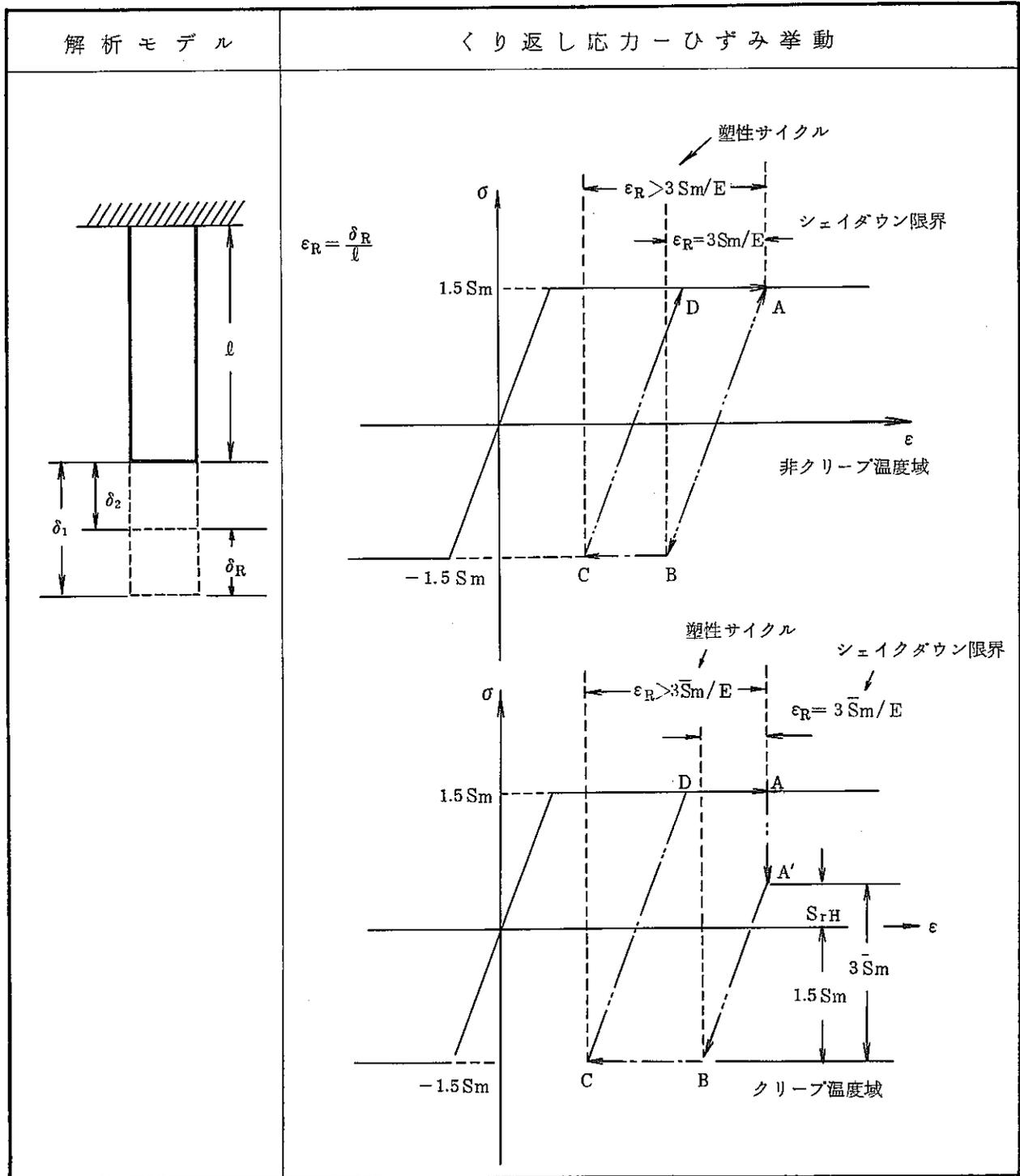
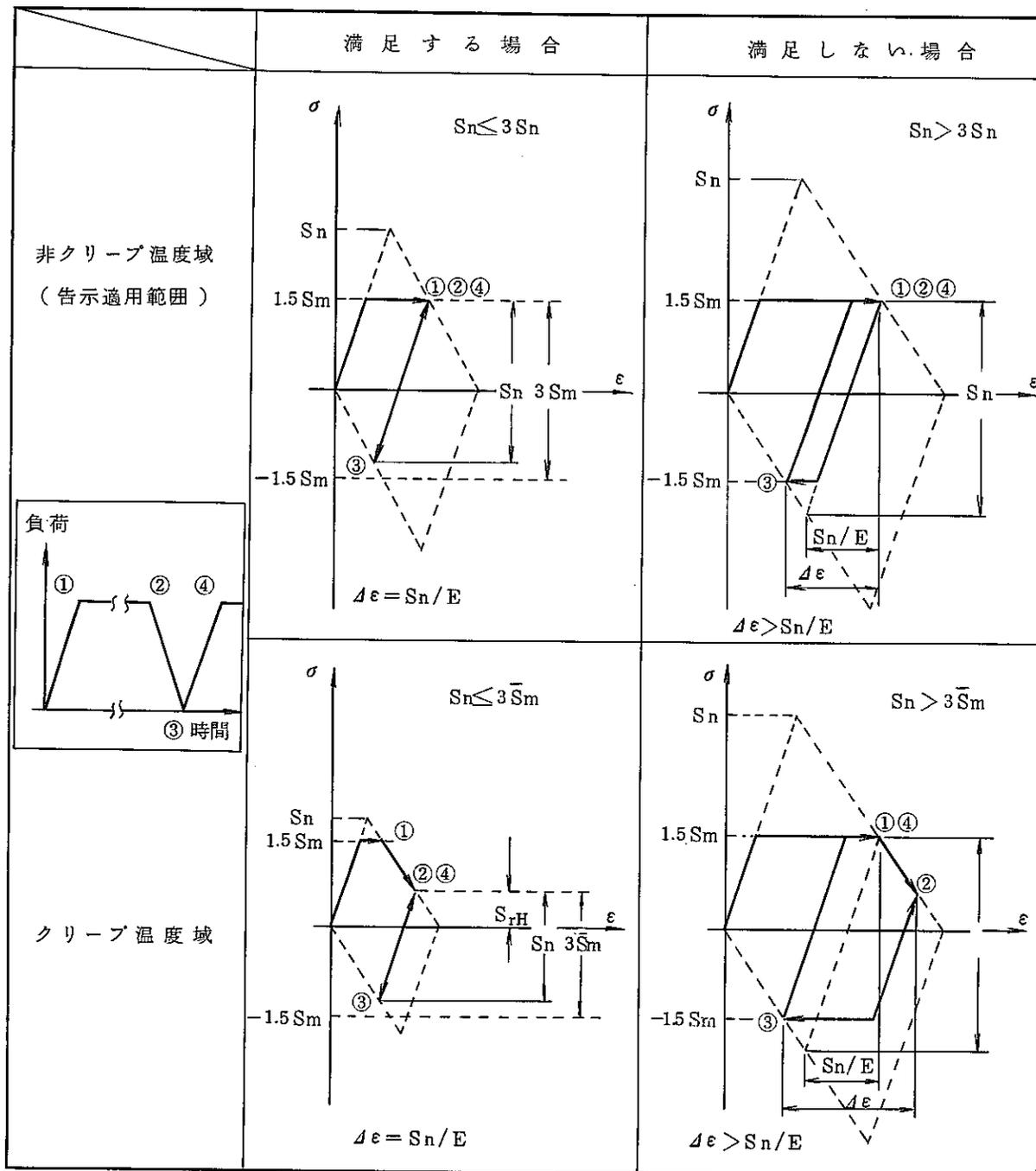


図 11. シエイクダウン基準 (1)  
 (弾性追従を伴わない 2 次応力の場合)



$S_n$  : (1次+2次)応力の変動範囲

$S_{rH}$  : 初期応力を  $1.5 S_m$  として寿命中に緩和する応力水準

図 12. シェイクダウン基準 (2)  
(弾性追従を伴う 2 次応力の場合)

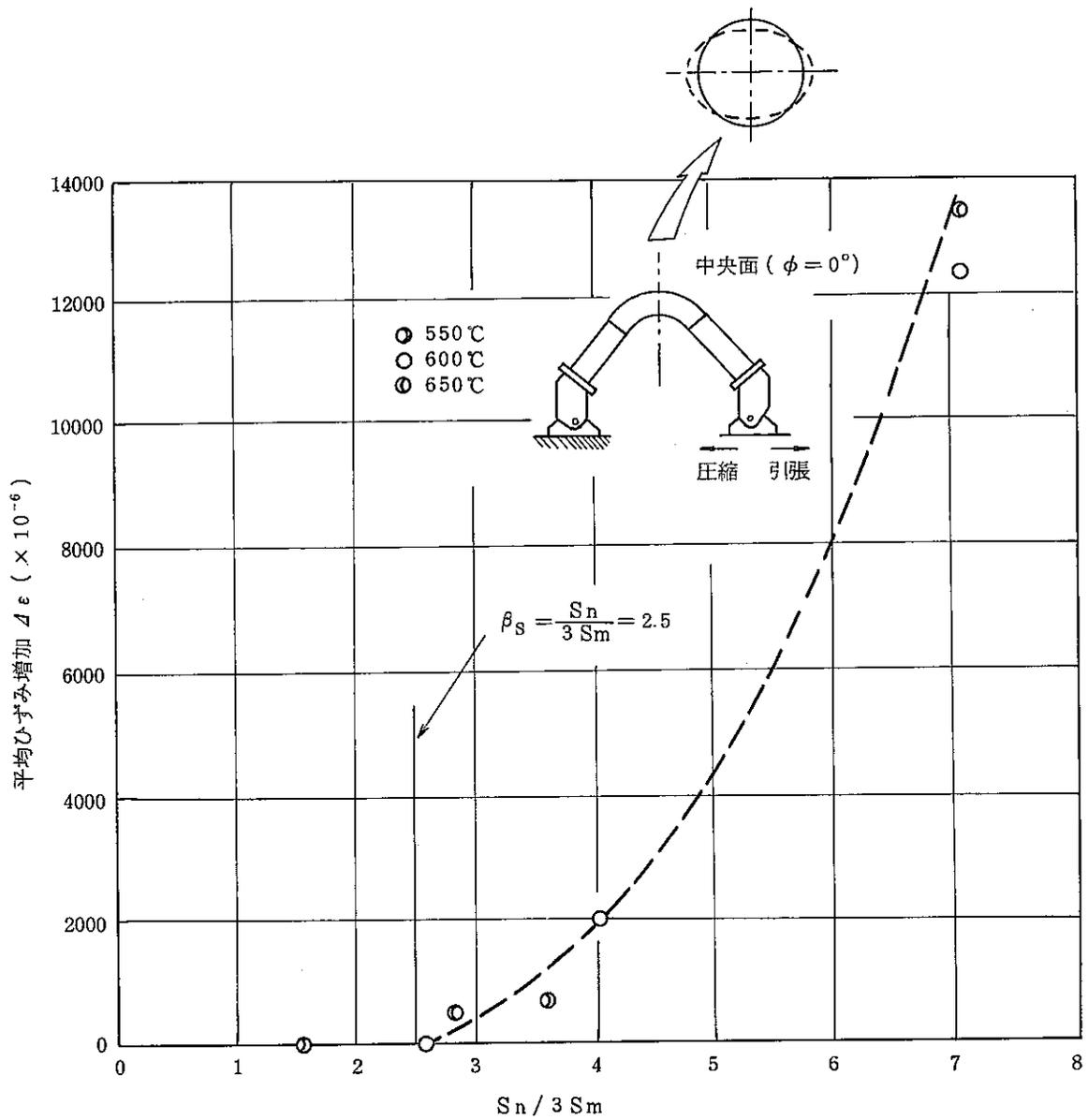


図 13.  $S_n / 3\bar{S}_m$  に対する平均ひずみ増加の関係  
( $S_n \leq \beta_s (3\bar{S}_m)$  に関する実験データ)

材 料 : 弾完全塑性体  
 負 荷 : 定常1次膜応力 + 繰返し2次曲げ応力

⇒ Bree線図(熱ラチェット線図)

構造の規格での制限

進行性変形が生じ  
ないこと



右図(Bree線図)の  
E, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, P領域

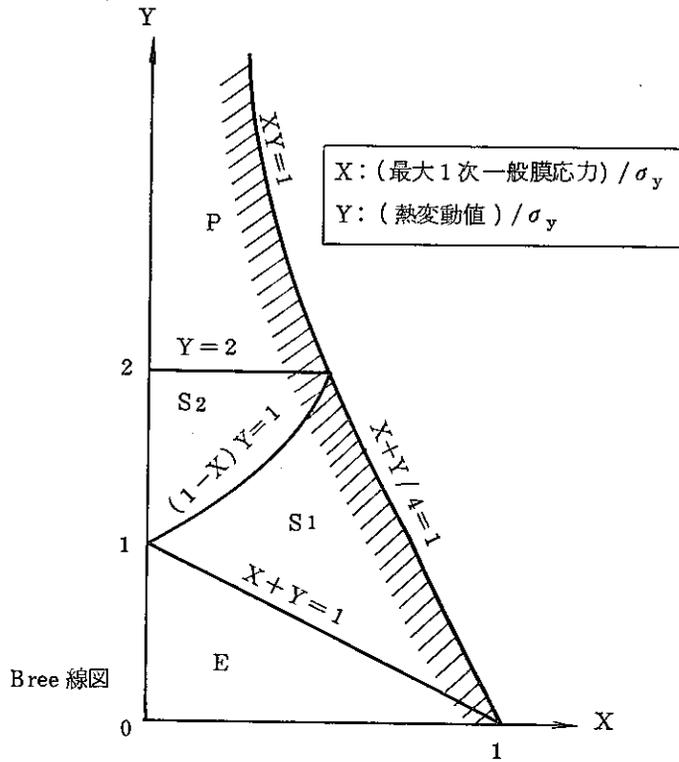


図 14. Bree のモデルによる評価方法  
(非クリープ温度域)

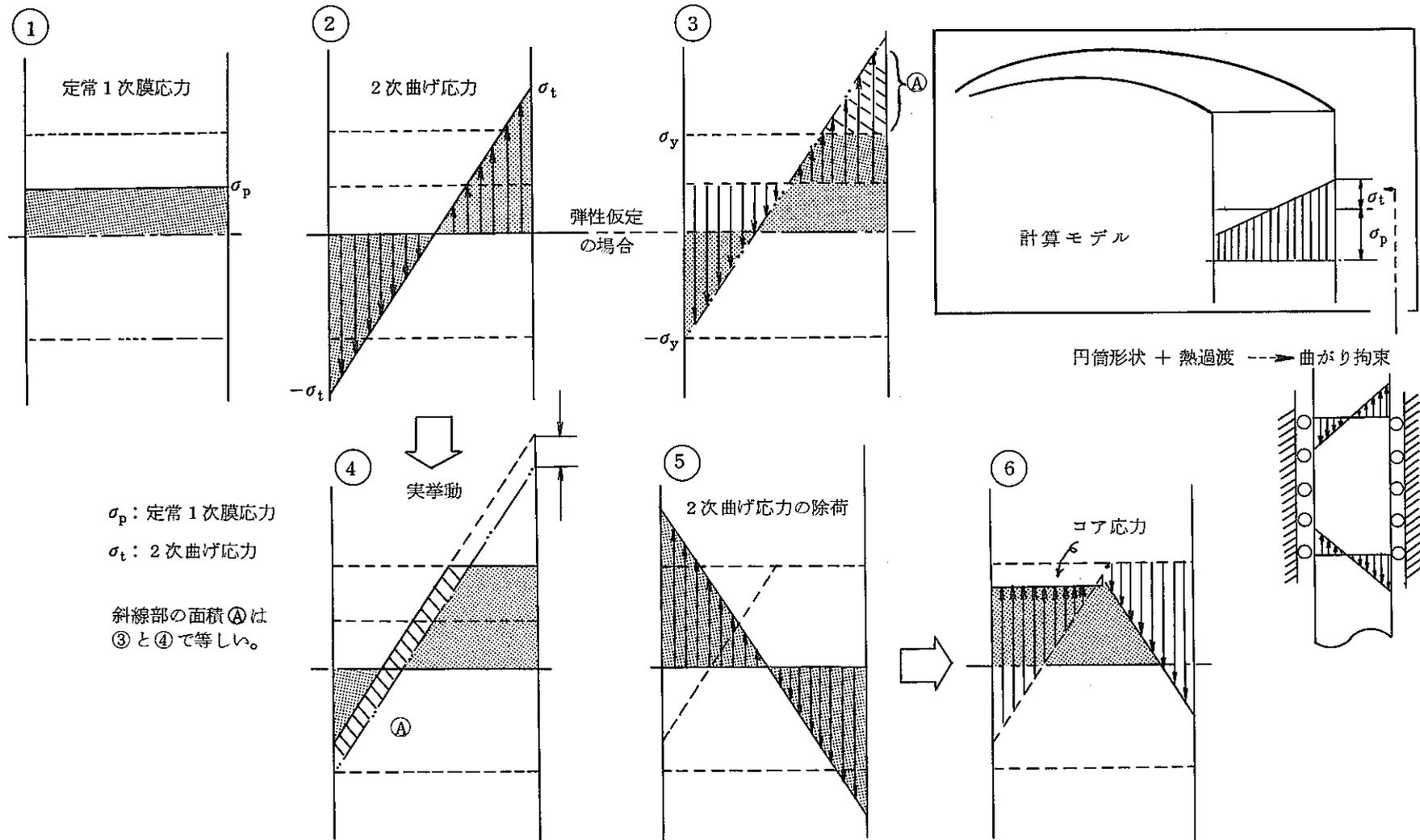


図 15. Bree のモデルによる断面内の応力分布の推移 ( $S_t$  領域)

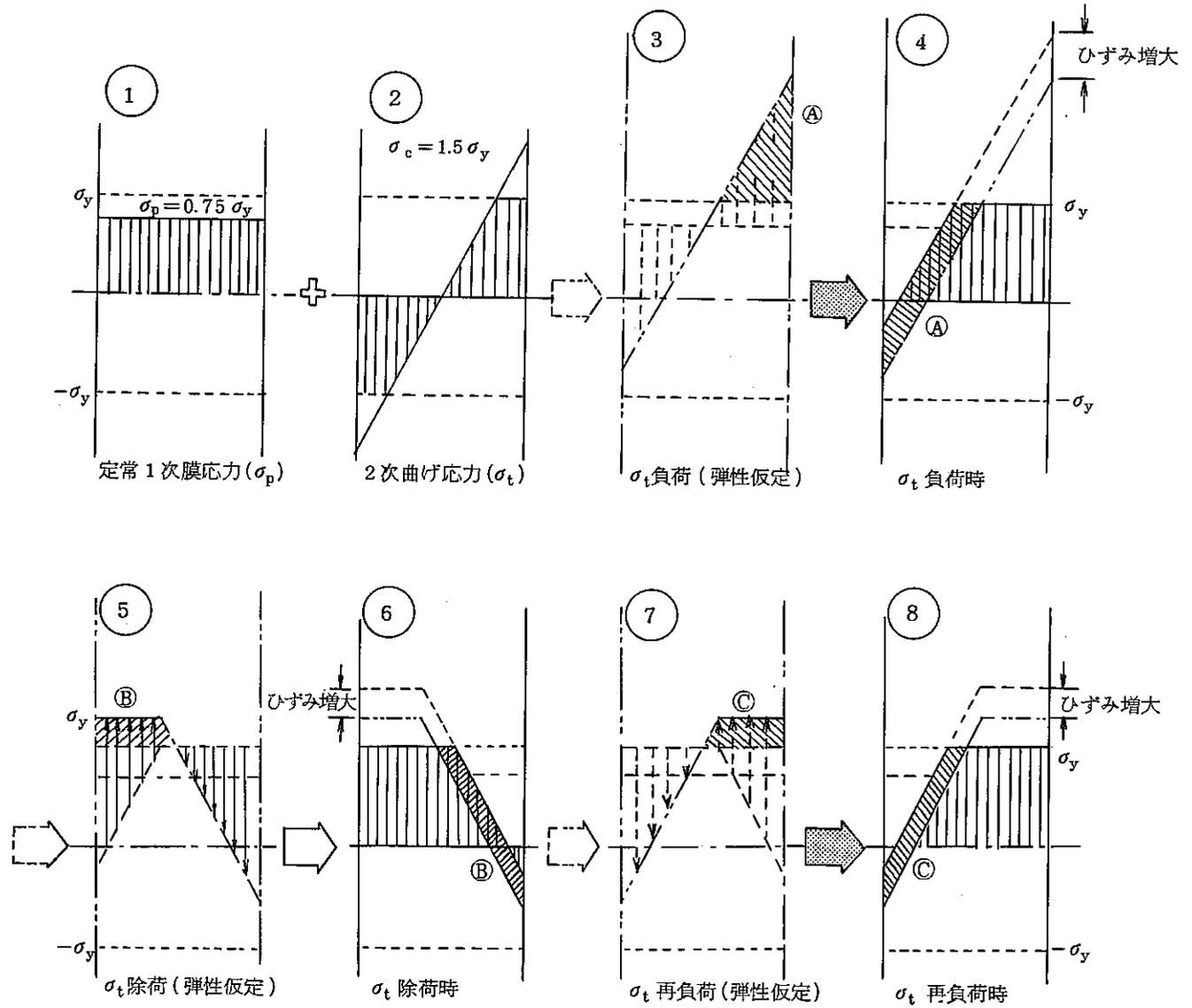
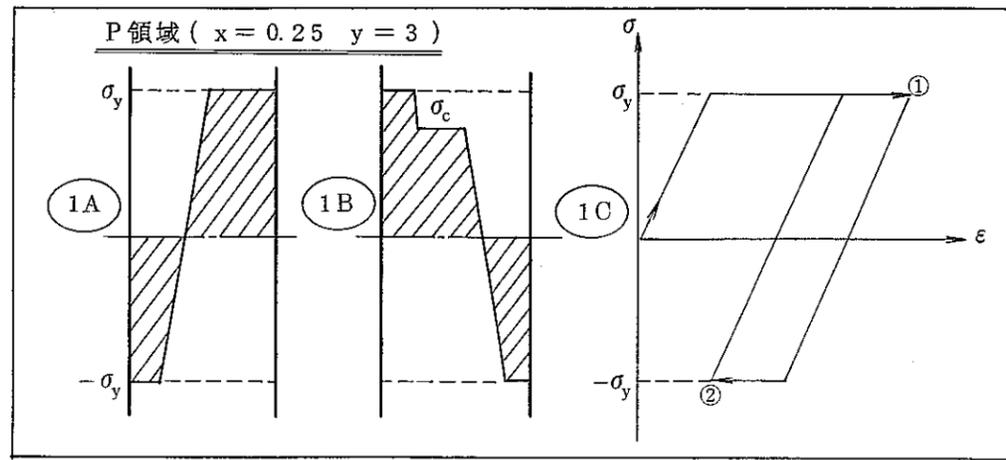


図16. 熱ラチェット発生メカニズム ( $R_1$  領域の例)



(nA) 熱応力負荷時  
 (nB) 熱応力除荷時  
 (残留応力)

$$\sigma_c = 2y \leftrightarrow \sigma_c = 1 + y - 2\sqrt{(1-x)y}$$

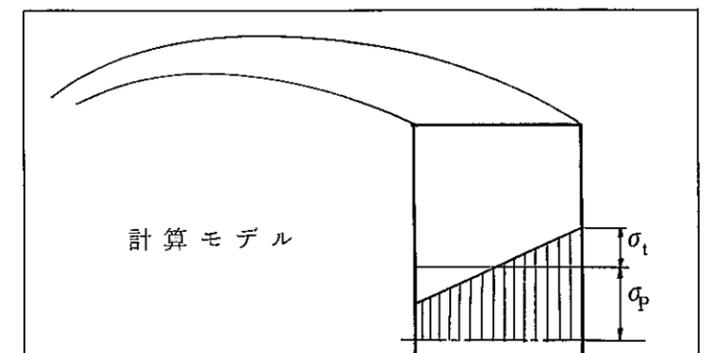
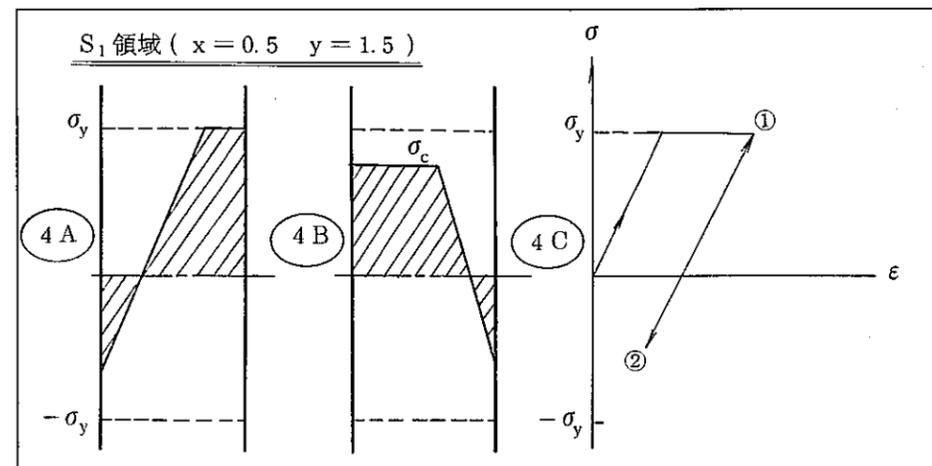
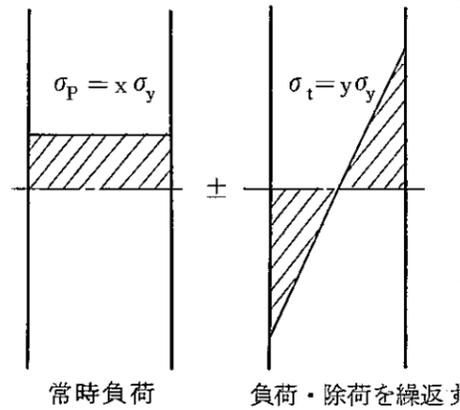
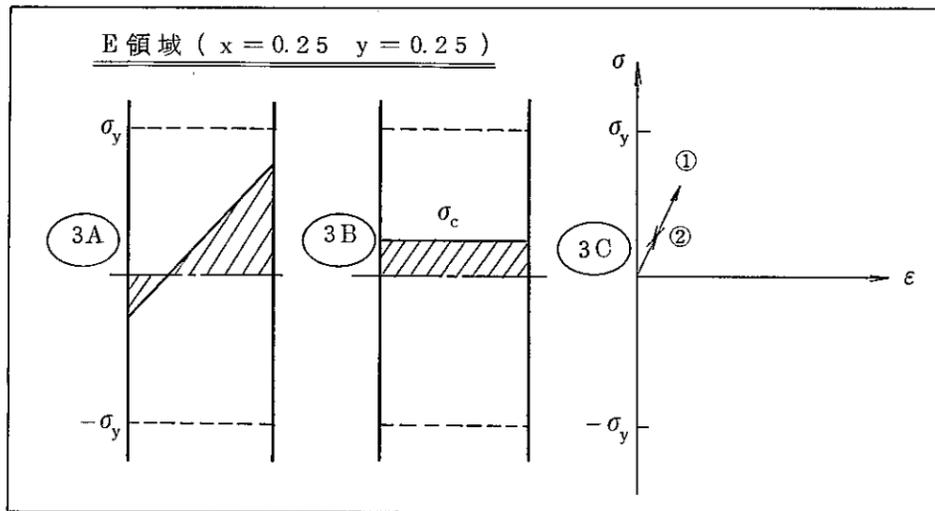
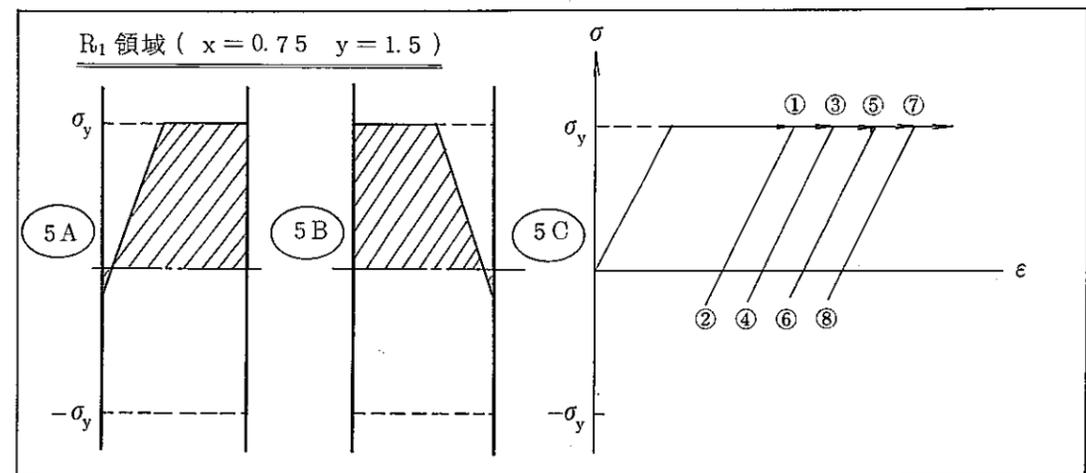
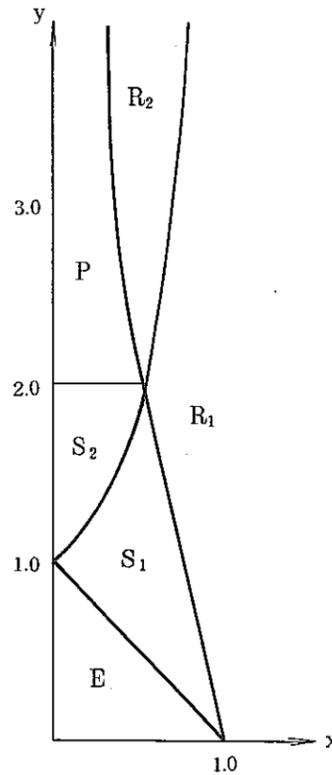
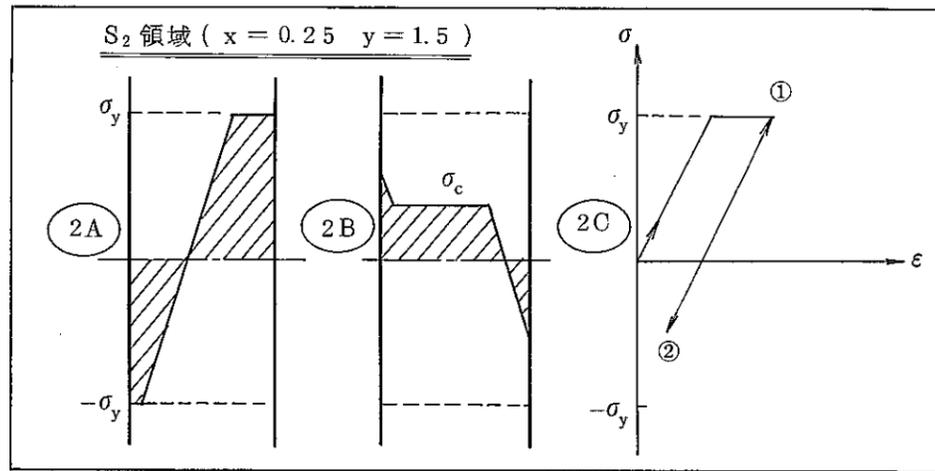
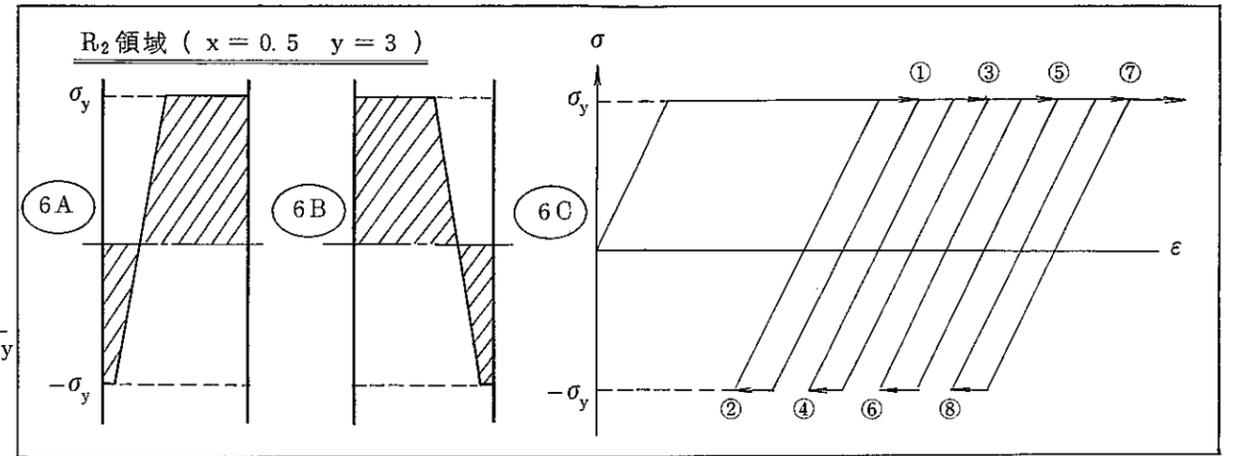


図 17 1次応力と2次応力の組合せによる応力ひずみ挙動 (Breeモデル: クリープ効果が無視できる場合)

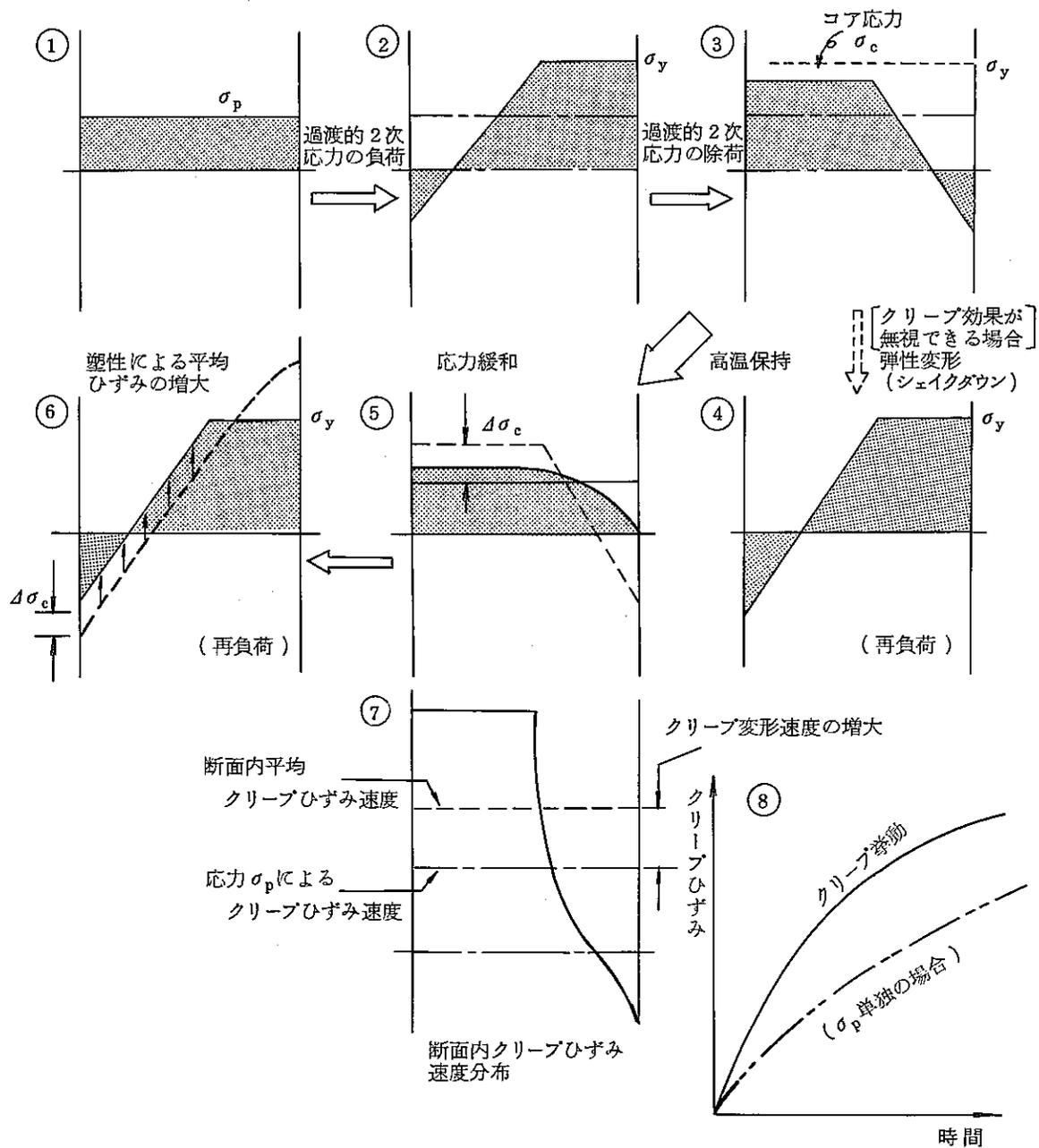


図 18. クリープラチエット発生メカニズム ( $S_1$  領域の例)

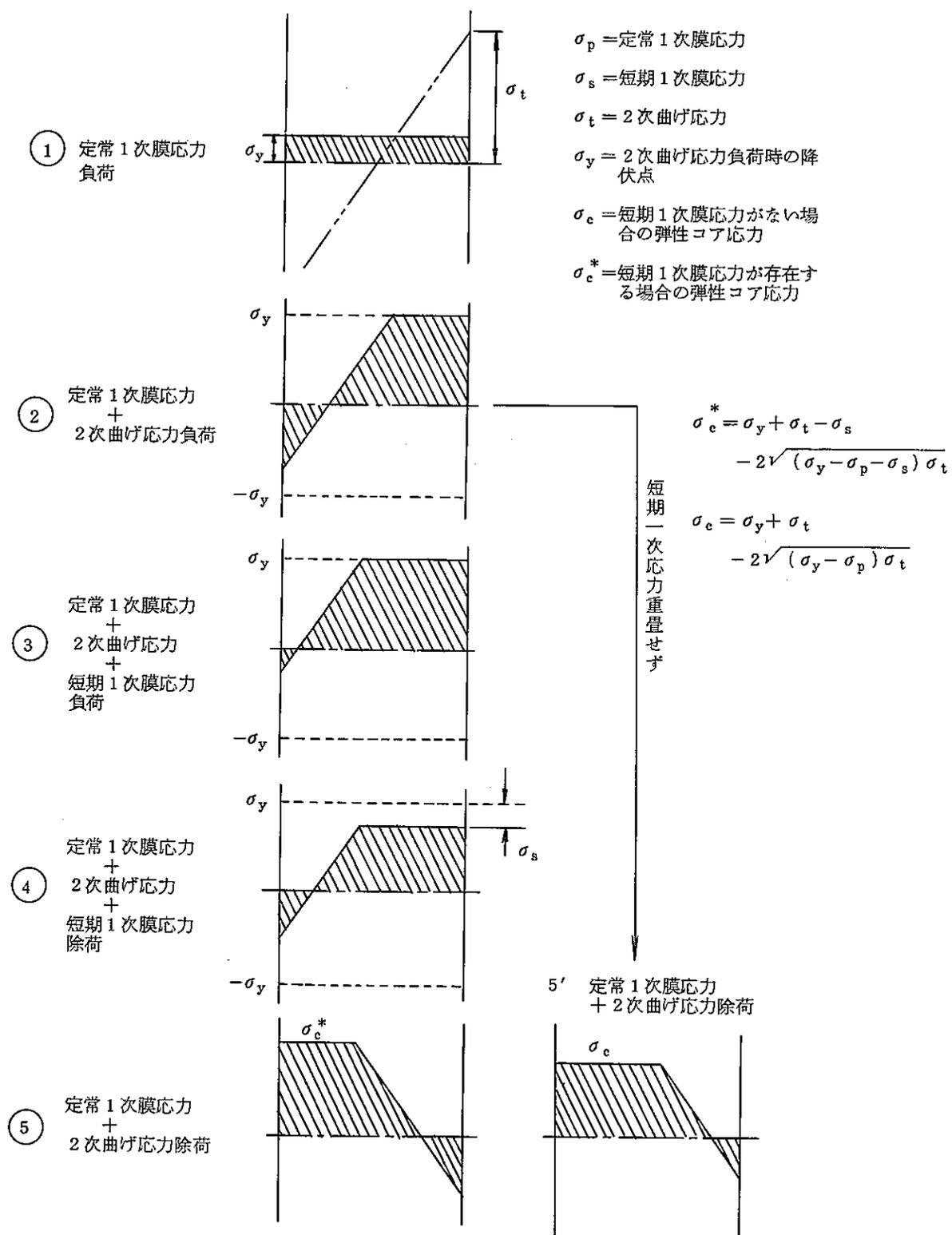


図 19. 短期 1 次応力の重量  $((\sigma_y - \sigma_p)\sigma_t \leq \sigma_y^2$  の場合) による弾性コア応力の評価

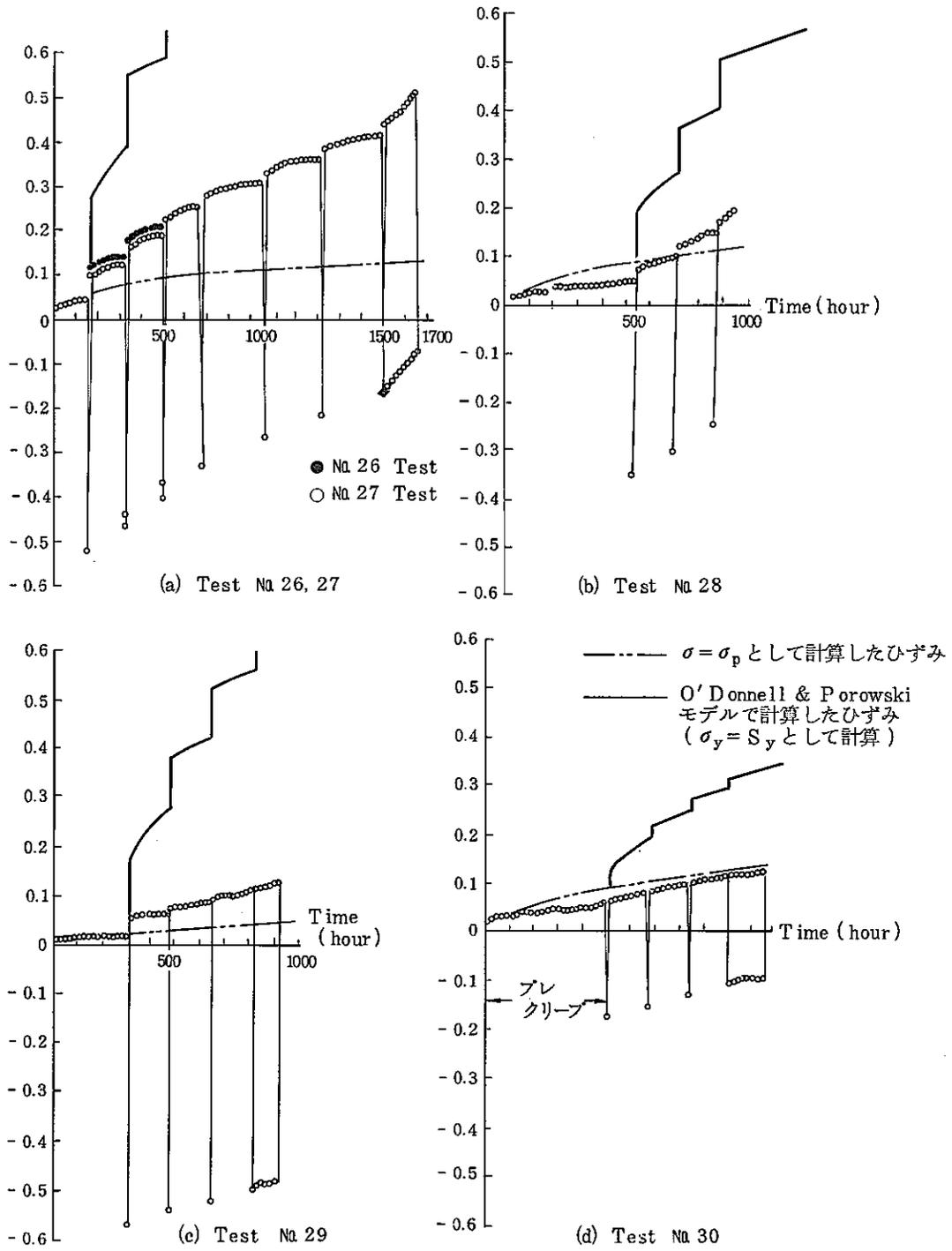


図 20. クリープラチエットひずみの実験値と簡易計算値との比較

運転状態Ⅳにおける荷重の特徴

$S_2$ 地震 ……繰返し性を有する……繰返し効果による損傷を生じる可能性  
 ||  
 運転状態Ⅳ ……発生頻度が極めて低い  
 ⇒ 適切な安全余裕で、繰返し効果による損傷を制限できないか？



メカニカルラチェット現象の把握

メカニカルラチェット試験（図2.2参照）  
 ↓  
 （定常的1次応力+機械的繰返し2次応力）  
 実験データをBree線図上にプロット  
 ↓  
 （繰返し2次応力は、繰返し応力・ひずみ関係式で応力に変換）  
 E,  $S_1$ ,  $S_2$ , P領域内であれば  
 十分大きな繰返し数を考えても } （図2.3参照）  
 十分小さな累積ひずみになる



制限方法

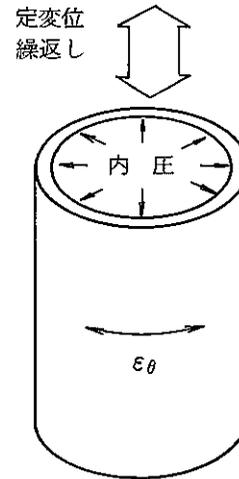
1次応力パラメータ  $X_s = (\text{定常1次応力}) / 1.5 S_m$   
 2次応力パラメータ  $Y_s = (\text{地震による1次+2次応力範囲}) / 1.5 S_m$  } Bree線図上での領域 E,  $S_1$ ,  $S_2$ , P  
 但し、(地震による1次+2次応力範囲)  $\leq \beta s \cdot 3 S_m$

図2.1 運転状態Ⅳでのひずみの制限

試 験 条 件		
材 料	SUS316TB材	
形 状	薄肉円筒試験体	
温 度	室 温	
荷重 条件	$\sigma_\theta$	0, 4.4, 8.8, 17.6 (kg/mm <sup>2</sup> )
	$\epsilon_Z^a$	0.4%

$\sigma_\theta$  : 定常内圧による周方向応力

$\epsilon_Z^a$  : 繰り返し軸ひずみ振幅

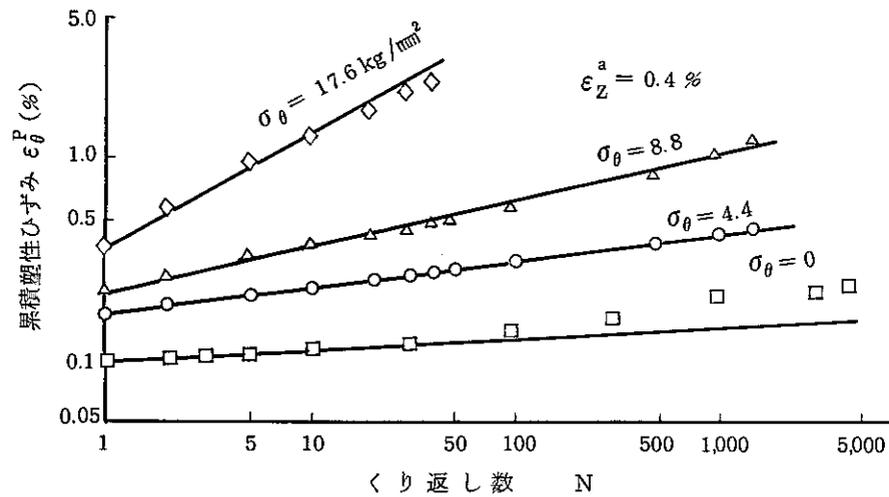


試 験 条 件		
材 料	SUS316TB材	
形 状	薄肉円筒試験体	
温 度	550°	
荷重 条件	$\sigma_\theta$	0, 2.66, 5.32, 7.98 (kg/mm <sup>2</sup> )
	$\epsilon_Z^a$	0.6%

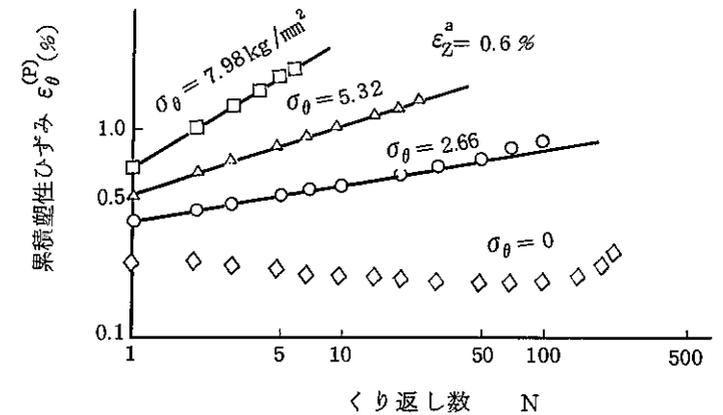
$\sigma_\theta$  : 定常内圧による周方向応力

$\epsilon_Z^a$  : 繰り返し軸ひずみ振幅

—441—



円周塑性ひずみ  $\epsilon_\theta^P$  の成長挙動 (室温)



円周塑性ひずみ  $\epsilon_\theta^P$  の成長挙動 (550°C)

図 22 メカニカルラチェット実験例

記号	材 料	負 荷 形 式	
		定 常	くりかえし
△	SUS304	ねじり	軸方向
○	SUS316	内 圧	軸方向
◇	SUS316L	軸方向	ねじり
◇	SUS304L	"	"

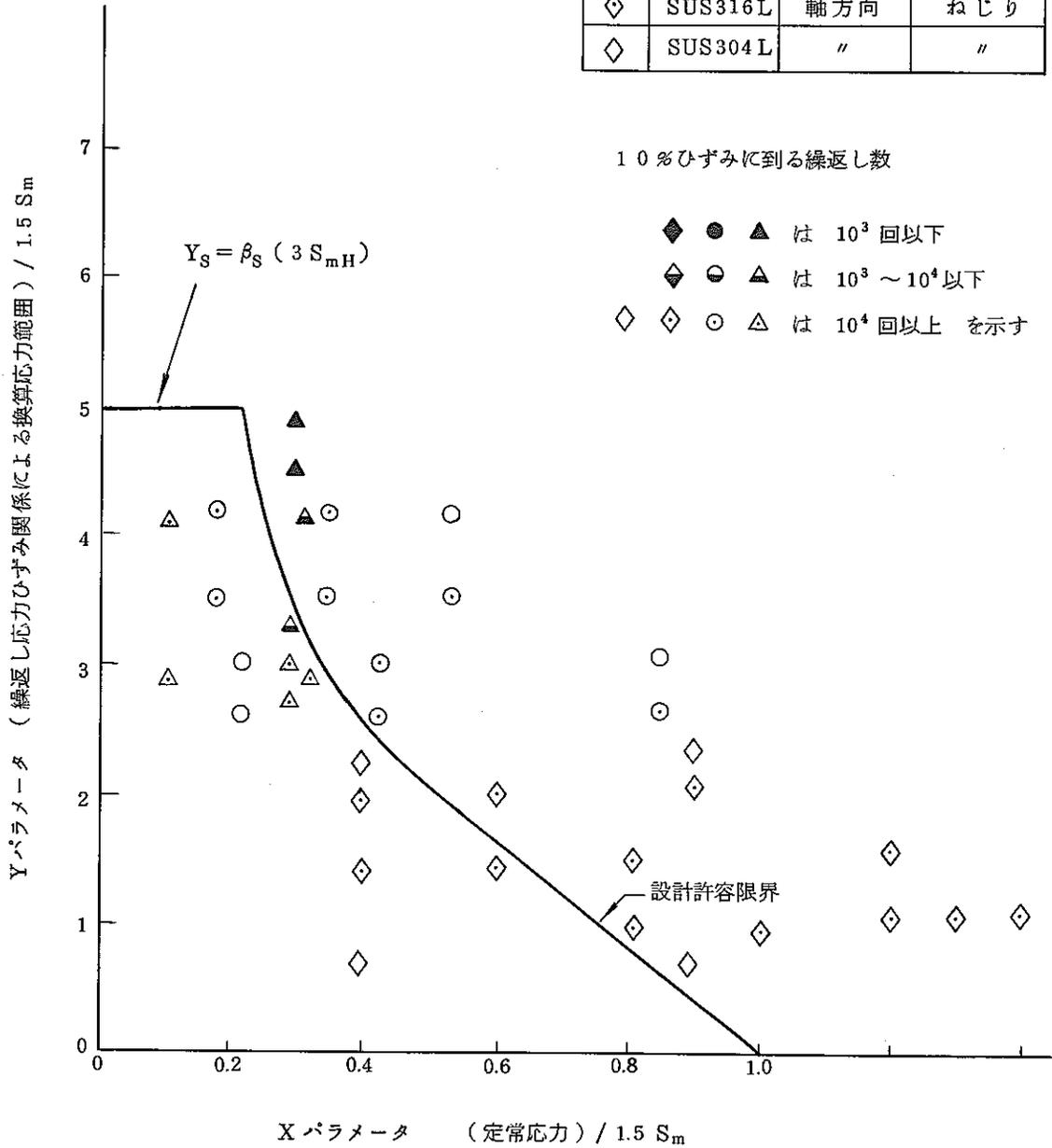


図 2.3. メカニカルラチェット試験結果のBree線図上へのプロット

告示の温度領域における  
繰返し



保持時間によって破損繰  
返し数は変らない。

クリープ温度領域におけ  
る繰返し



保持時間によって破損繰  
返し数は低下する。

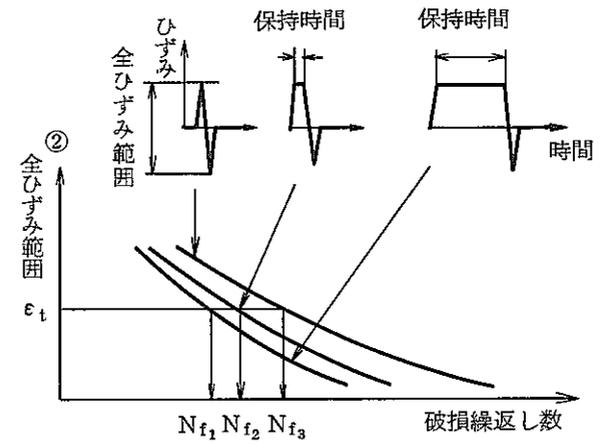
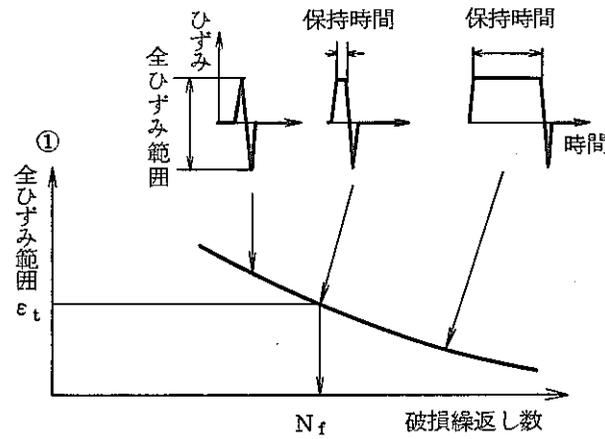


図 24. 告示の温度領域及びクリープ温度領域における  
破損くり返し数の比較

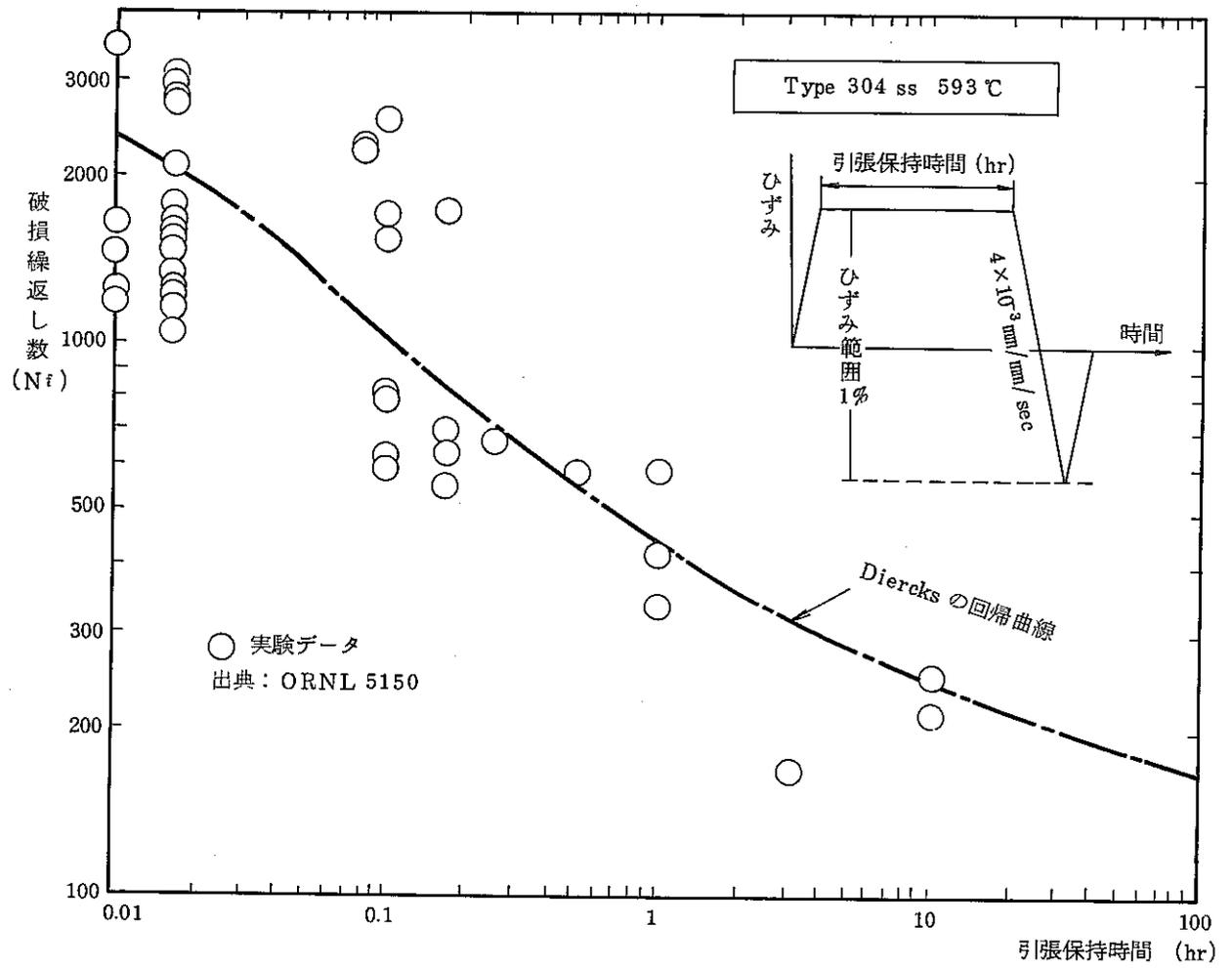
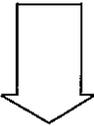


図 25. 高温保持に伴う破損くり返し数の低下

クリープ疲労損傷の制限の考え方

クリープ温度領域で保持を伴う繰返し荷重を負荷すると、保持時間によって寿命が異なる。従って、保持時間効果を適切に考慮した損傷の制限が必要となる。



クリープ温度領域における保持を含む繰返し荷重

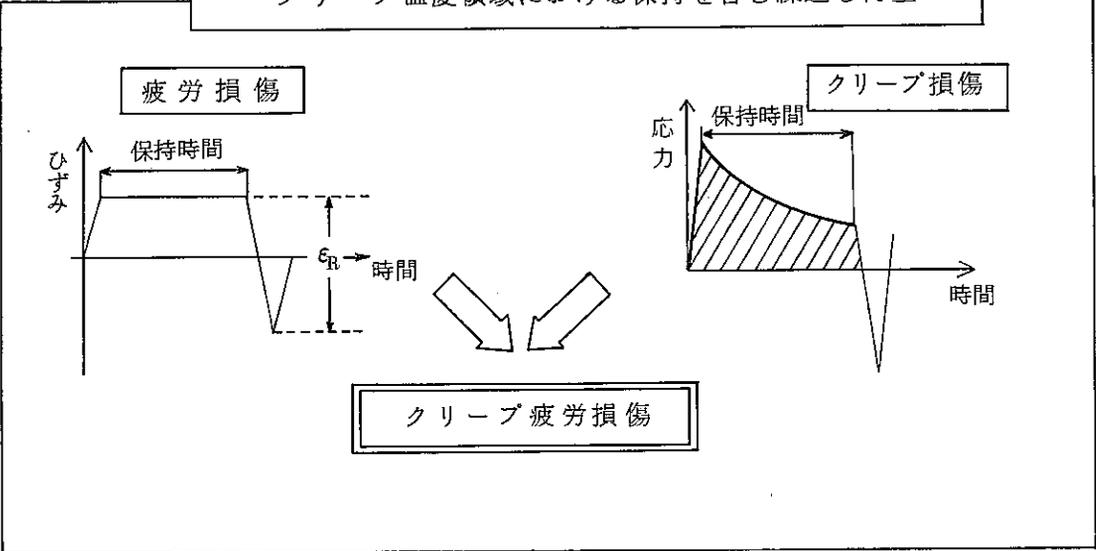


図 2 6 クリープ疲労損傷の制限の考え方

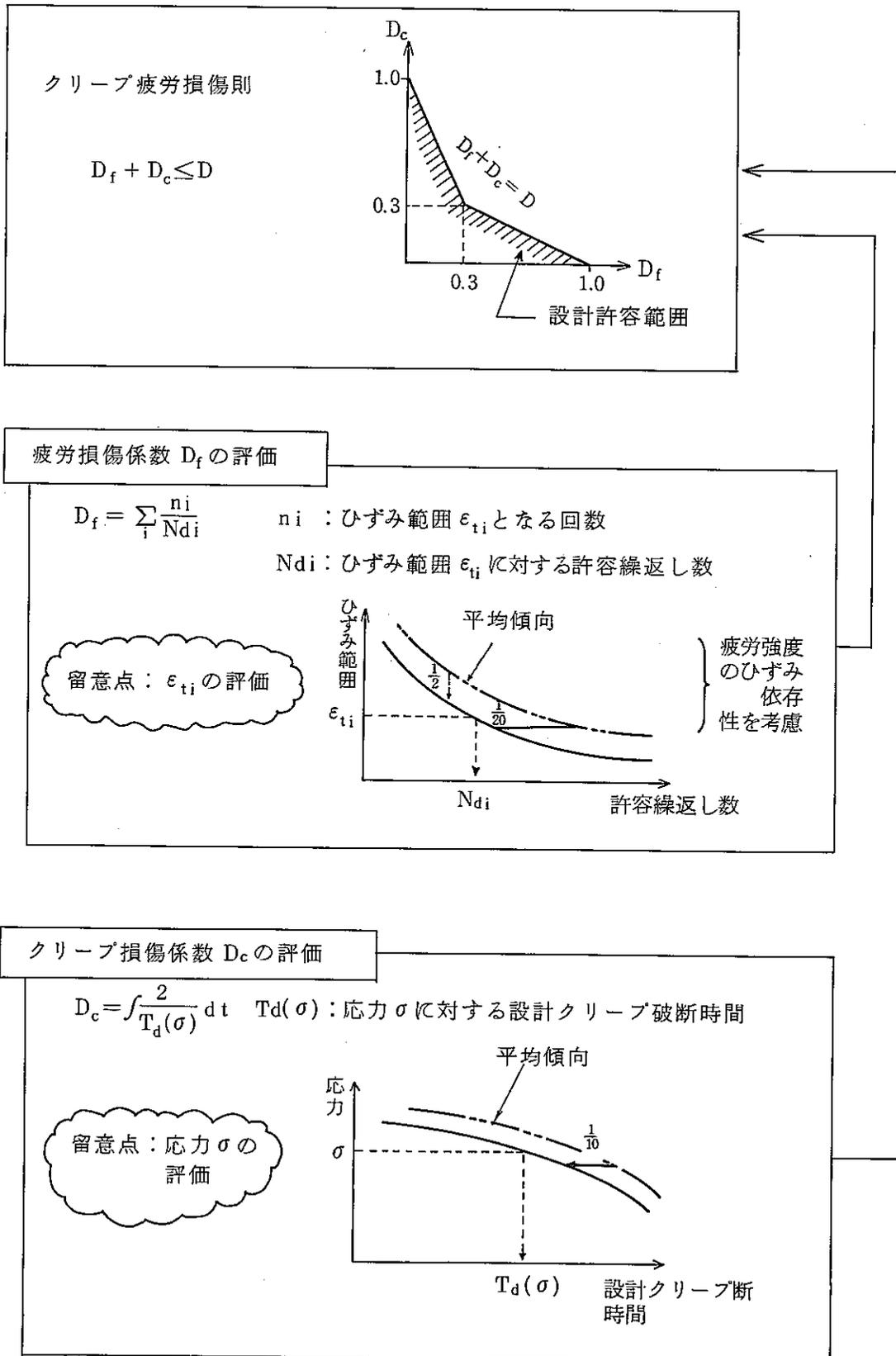


図 27 クリープ疲労損傷則と評価上の留意点

データの出典：S.S.Manson, Thermal Stresses and Low Cycle Fatigue, PP.193-273,  
Mc Grow-Hill, 1966等

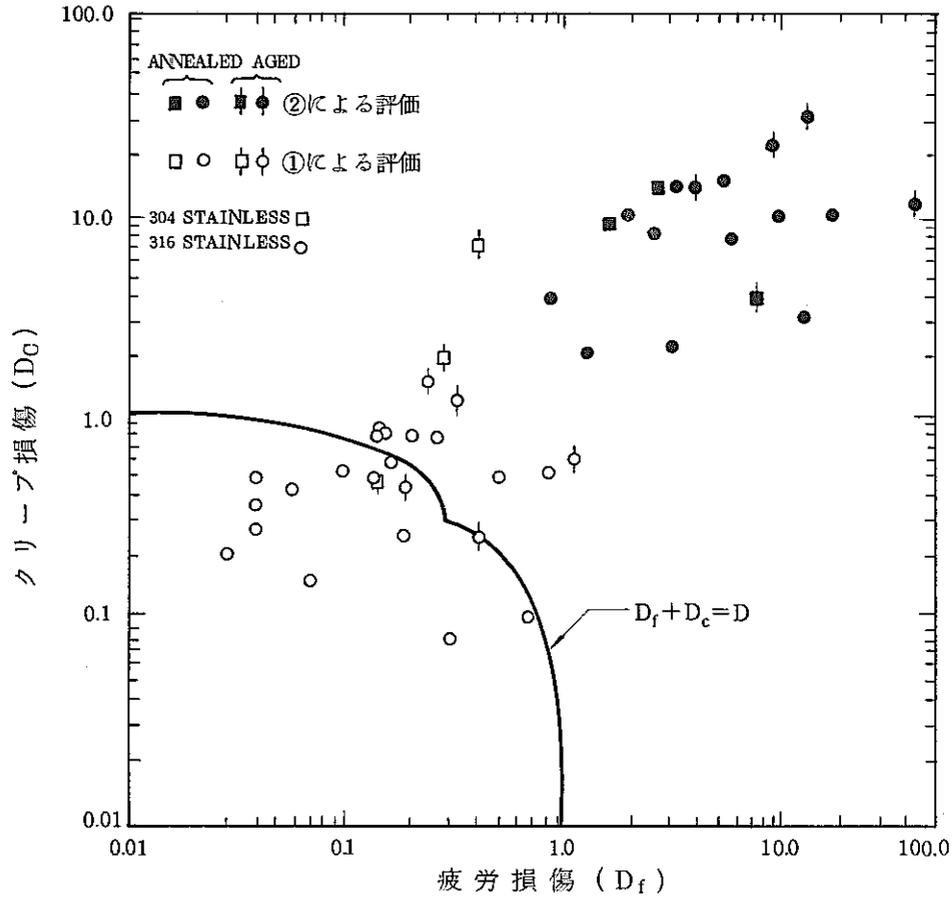
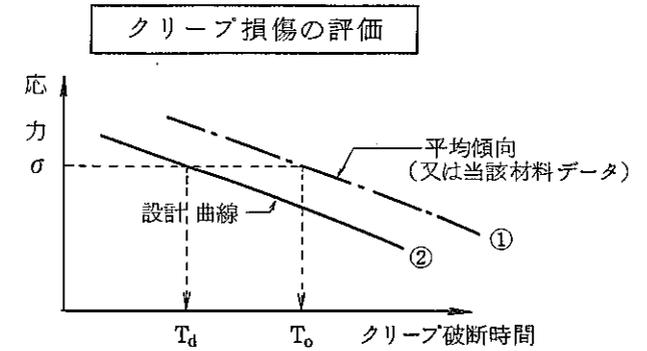
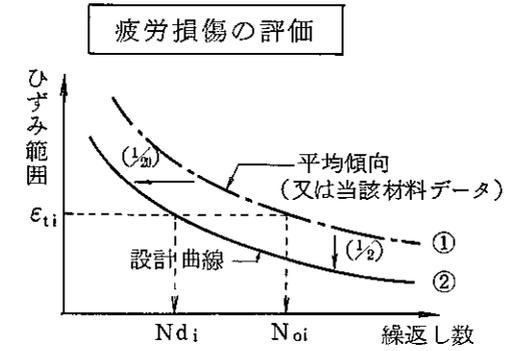


図 28 クリープ疲労損傷の制限の妥当性

(備考)



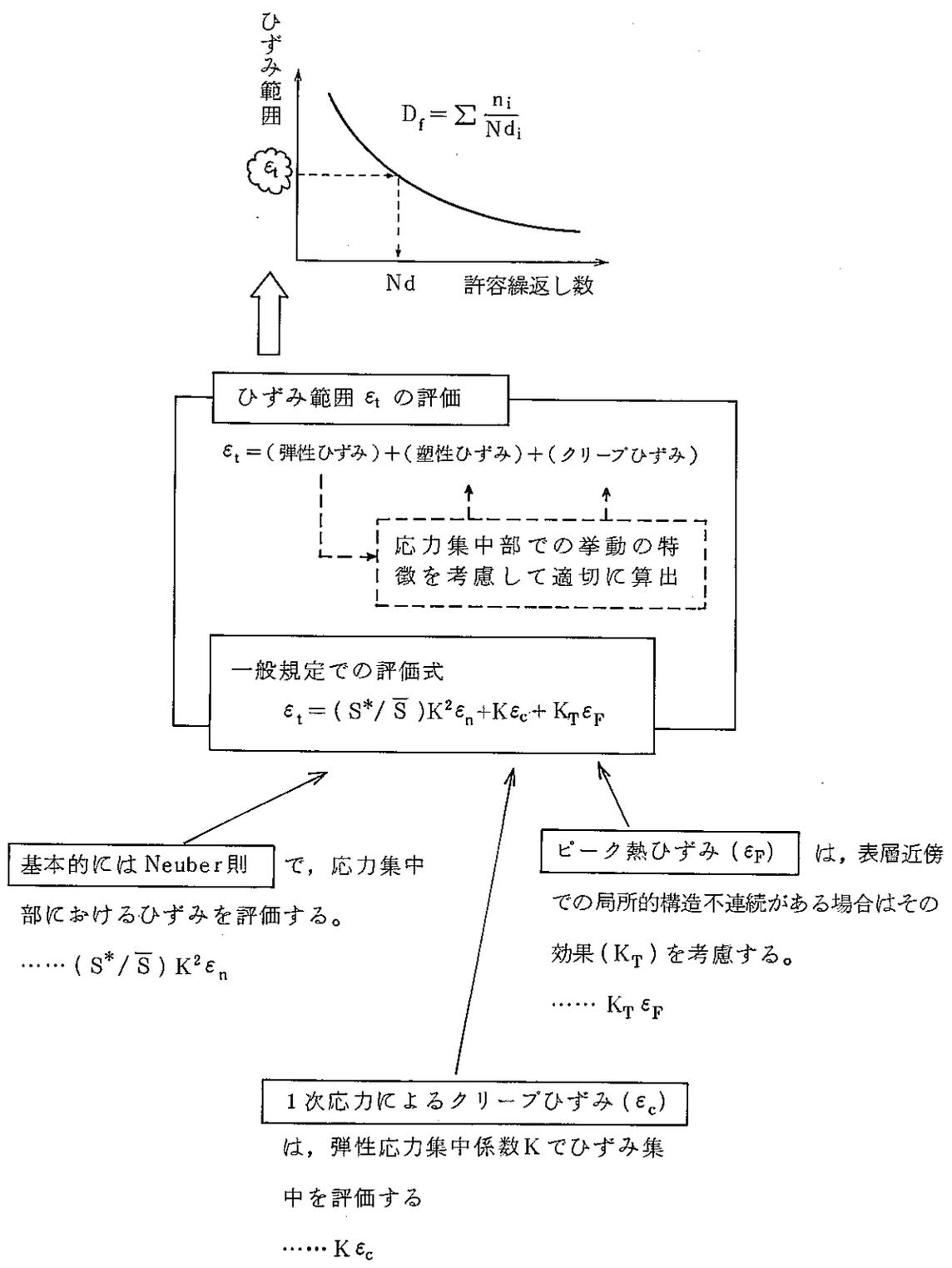


図 2.9. 疲労損傷評価法の基本的考え方

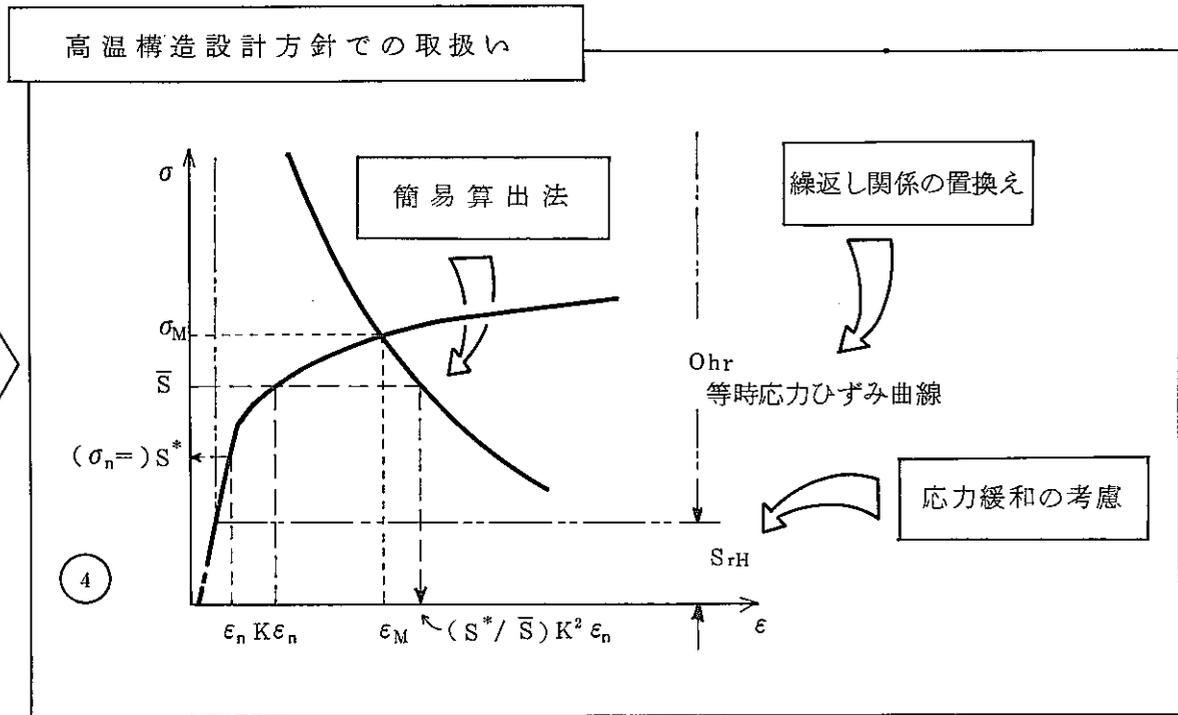
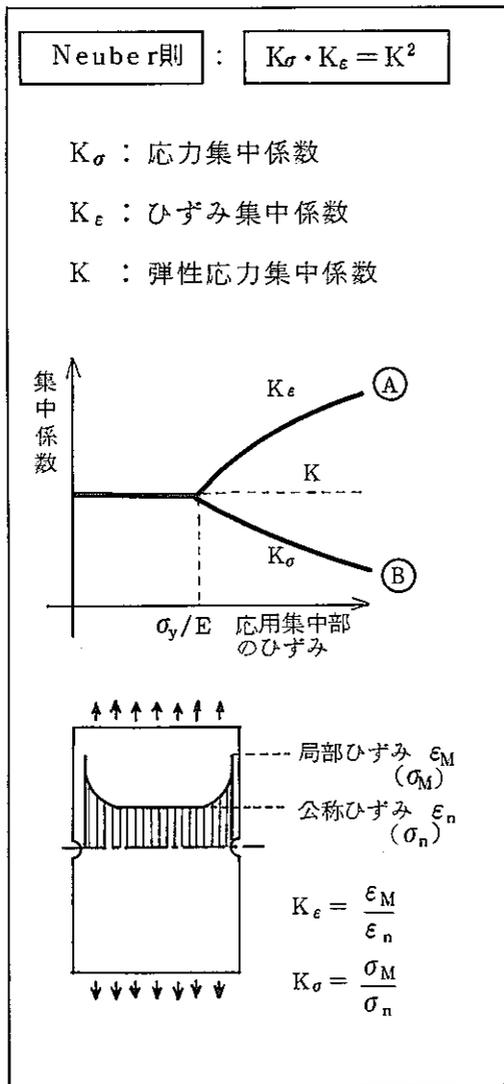
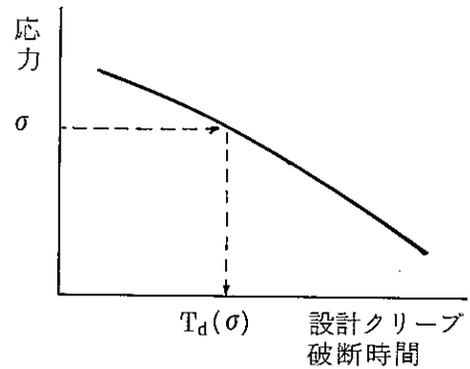


図 30 ひずみ範囲算出における Neuber 則の取扱い

クリープ損傷  $D_C = \int \frac{2}{T_d(\sigma)} dt$

応力挙動の特徴を考慮して  
2つに区分



$$D_C = \underbrace{\int \frac{2}{T_d(\sigma_{I+II})} dt}_{D_{CN}} + \underbrace{\int \frac{2}{T_d(\sigma)} dt - \int \frac{2}{T_d(\sigma_{I+II})} dt}_{D_{CP}}$$

(1次+2次)応力による応力  
[ $\sigma_{I+II}$ ]の履歴に基づくクリー  
プ損傷分



弾性追従を伴う2次応力による  
応力挙動に注意する必要がある



簡易評価法を与える

ピーク応力による応力の履歴に基  
づくクリープ損傷分  
( $D_{CN}$ 分は除外可能)



定ひずみ繰返し下での応力挙動で  
模擬することができる

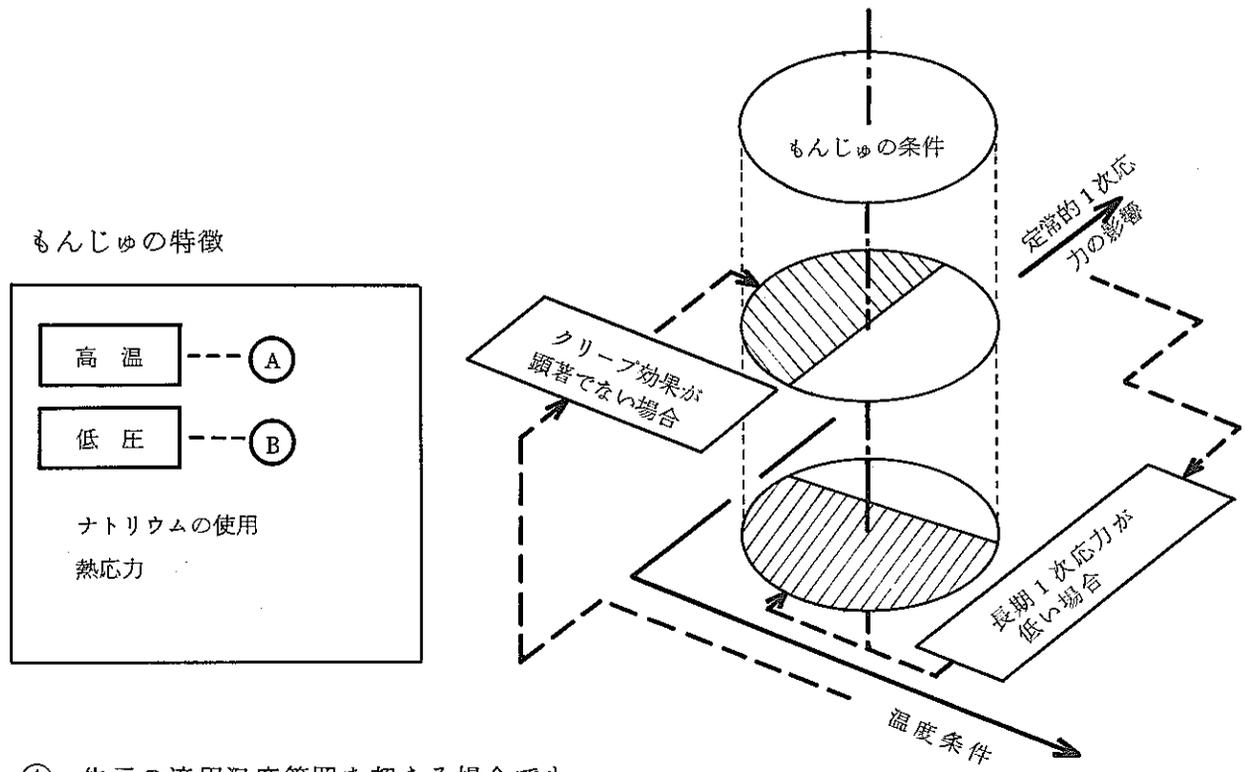


局所でのひずみ範囲  $\epsilon_t$  に対するク  
リープ損傷値を設計定数として与  
える

$D^{**}$  : ひずみ範囲  $\epsilon_t$ , 温度  $T$ ,  
等の関数

$$D_{CP} = \sum D^{**}$$

図 3 1 弾性解析によるクリープ損傷評価の基本構成



① 告示の適用温度範囲を超える場合でも

(イ) 告示の適用温度範囲に近い温度で使用される場合

(ロ) 通常は告示の適用温度範囲内にあるが、短時間に限って告示の適用温度範囲を超える場合

⇒ 告示の規定に類似した簡易評価法

………… クリープ効果が顕著でない場合

② 定常的な1次応力の水準が低い場合には、2次応力単独の挙動の分析に基づく評価法が策定可能

………… 長期1次応力が低い場合

図 3 2 もんじゅの特徴を考慮した負荷状態区分

判定法

定常的な1次応力による影響は十分小さいこと

$$\langle P_L + P_b \rangle \leq S_{LP}, \quad S_{LP} = \text{Min} [ S_{rH}, S_g / g ]$$

$S_{rH}$  : 初期応力を  $1.5 S_m$  として寿命中に緩和する応力水準

⇒  $\langle P_L + P_b \rangle \leq S_{rH}$  の1次応力により生じるクリープひずみは、無視できる。

$S_g$  : クリープ損傷を定応力型で評価する応力水準

⇒  $\langle P_L + P_b \rangle \leq S_g / g$  ( $g = 3$ ) であれば、応力水準  $S_g$  までの2次応力の緩和挙動に及ぼす1次応力の影響は無視できる。

図 3 3 長期1次応力が低い場合の判定法

ひずみ範囲の評価

$$\epsilon_t = (S^* / \bar{S}) K^2 \epsilon_n + K \epsilon_c + K_T \epsilon_F \quad \text{一般規定}$$

1次応力によるクリープひずみは無視可能



$$\epsilon_t = K_\epsilon \epsilon_n + K_T \epsilon_F \quad \text{長期1次応力が低い場合}$$

$$K_\epsilon = \text{Max} [ K K'_\epsilon, (S^* / \bar{S}) K^2 ]$$

$$K'_\epsilon = \frac{\text{非弾性挙動を考慮した(1次+2次)応力によるひずみ}}{\text{弾性計算による(1次+2次)応力によるひずみ}}$$

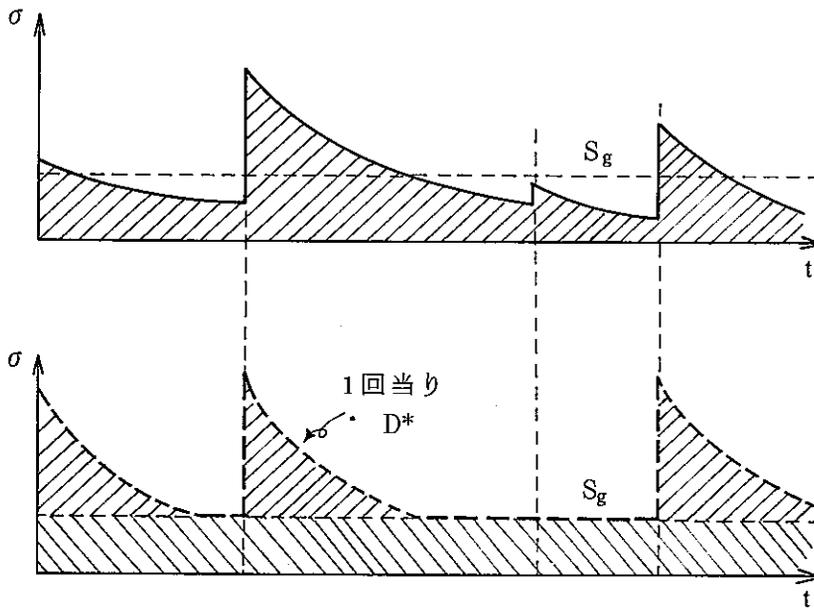
図 3 4 ひずみ範囲 ( $\epsilon_t$ ) の評価

( 1次 + 2次 ) 応力によるクリープ損傷の評価

$$D_{CN} = D_{C1} + D_{C2}$$

$D_{C1}$  : 一定応力 ( $S_g$ ) でのクリープ損傷 (  $D_{C1} \doteq 0.3$  )

$D_{C2}$  : ( 1次 + 2次 ) 応力による応力が応力水準  $S_g$  に緩和する過程でのクリープ損傷



非弾性解析  
( 実際の応力挙動 )

長期1次応力が  
低い場合

$$\Rightarrow D_{C2} = D_0^* + \sum_i^{n^*} D_i^*$$

$$\Rightarrow D_{C1} = \int \frac{2}{T_d(S_g)} dt$$

図 35. ( 1次 + 2次 ) 応力によるクリープ損傷の評価

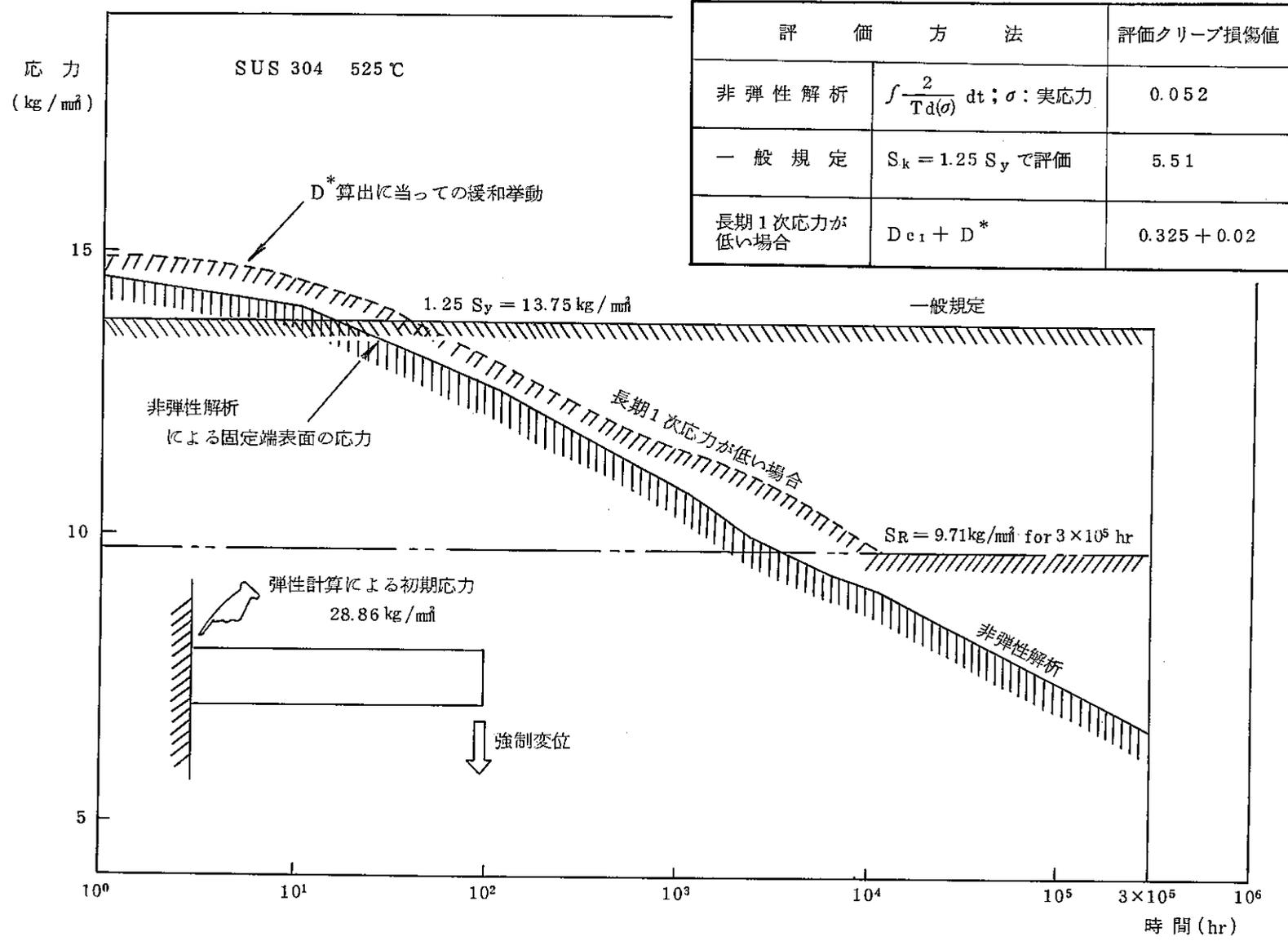


図 36. 評価方法による評価クリープ損傷値の比較

判定法

十分大きな応力を想定しても、クリープひずみ及びクリープ損傷はともに十分小さいこと。



応力水準  $1.5 S_m$

{  
クリープひずみ  $\leq 0.2\%$   
クリープ損傷  $\leq 0.1$

図 3 7 クリープ効果が顕著でない場合の判定法

## 記 号 の 説 明

( 1 次 応 力 の 制 限 )

記号	定 義	記号	定 義
$P_m$	長期荷重による1次一般膜応力	$t_j$	1次応力強さ $\langle P_L + P_b \rangle_j$ が負荷されている状態の持続時間
$S_o$	最大許容応力強さ(別表1.1) (告示の適用温度にあつては許容引張応力(告示別表第6)を用いる)	$t_{bj}$	応力強さ $(\langle P_L + P_b \rangle_j / K_t)$ に対して、設計応力強さ $(S_t)$ を用いて定められる許容持続時間
$P_L$	長期荷重による1次局部膜応力		
$P_b$	長期荷重による1次曲げ応力		
$P_m^*$	短期荷重による1次一般膜応力	$B$	運転状態Ⅰ、Ⅱ及びⅢにわたる使用分数和の制限値 $B = 1.0$
$S_m$	材料の短時間特性に基づく設計応力強さ(別表1.2)	$S_{mW}$	オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあつては、 $S_{mW} = \text{Min}[2.4 S_m, 2 S_u / 3]$ フェライト系鋼にあつては、 $S_{mW} = 2 S_u / 3$
$S_t$	材料のクリープ特性等に基づく設計応力強さ(別表1.3)	$S_u$	設計引張強さ(別表1.6)
$P_L^*$	短期荷重による1次局部膜応力	$S_R$	設計クリープ破断応力強さ(別表1.5)
$P_b^*$	短期荷重による1次曲げ応力	$t_{Ri}$	応力強さ $1.5 \langle P_m \rangle_i$ に対して、設計クリープ破断応力強さ $(S_R)$ を用いて定められる許容持続時間
$K_s$	断面形状係数(別表2.2)		
$K_t$	弾性計算による断面内最大応力とクリープ変形による応力再配分後の断面内最大応力との比		
$t_i$	1次一般膜応力強さ $\langle P_m \rangle_i$ が負荷されている状態の持続時間	$t_{Rbj}$	応力強さ $1.5 (\langle P_L + P_b \rangle_j / K_t)$ に対して、設計クリープ破断応力強さ $(S_R)$ を用いて定められる許容持続時間
$t_{mi}$	応力強さ $\langle P_m \rangle_i$ に対して、設計応力強さ $(S_t)$ を用いて定められる許容持続時間		
	$B_R$		運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及びⅣにわたる使用分数和の制限値 $B_R = 1.0$

(ひずみの制限)

記号	定 義	記号	定 義
$t_i$	金属温度 $T_i$ の持続時間	$\epsilon_{EC}$	促進クリープひずみ
$t_{di}$	応力強さ $1.5 S_m$ に対して, 設計クリープ破断応力強さ ( $S_R$ ) を用いて定められる許容持続時間	$\epsilon_{EF}$	弾性追従ひずみ
		$\epsilon_{mEF}$	長期 2 次膜応力により生じる弾性追従ひずみ (膜ひずみ)
		$\epsilon_{bEF}$	長期 2 次曲げ応力により生じる弾性追従ひずみ (等価線形ひずみ)
$\epsilon_i$	温度 $T_i$ , 時間 $t_i$ において, 応力が $1.5 S_m$ の水準にあるとして計算されるクリープひずみ。	$S_n^*$	短期荷重のみによる (1 次 + 2 次) 応力強さ範囲
$S_{LP}$	長期 1 次応力が低い場合の判定に使用される判定値 $S_{LP} = \text{Min} [ S_{rH}, S_g / g ]$	$S_n$	(1 次 + 2 次) 応力強さ範囲
$S_{rH}$	初期応力を $1.5 S_m$ として寿命中に緩和する応力の水準	$S'_n$	熱曲げ応力を除く (1 次 + 2 次) 応力強さ範囲
$S_g$	クリープ損傷評価において定応力型で評価する応力の水準	$S_{mH}$	負荷サイクル中の最高金属温度に対する設計応力強さ ( $S_m$ )
$g$	倍率 $g$ は 3 としている	$\beta_s$	進行性ひずみの防止に係わる設計係数 ( $\beta_s = 2.5$ )
$Q$	長期 2 次応力	$3S_m$	シェイクダウン基準値
$Q^*$	短期 2 次応力	$3\bar{S}_m$	応力緩和を考慮したシェイクダウン基準値
$S_a$	$\text{Min} [ 1.25 S_t ; 10^4 \text{ hr}, S_y ]$	$Q_{Tb}$	長期熱曲げ応力
		$Q_{Tb}^*$	短期熱曲げ応力

(クリープ疲労損傷の制限)

記号	定 義	記号	定 義
$\epsilon_n^k$	時点 $k$ における公称ひずみ範囲	$\sigma_{SC}$	変形制御型応力
$\epsilon_p^k$	時点 $k$ における相当ひずみ	$E$	縦弾性係数 (別表 1.8)
$\epsilon_p$ ( $\epsilon_p, \sigma^k$ )	相当塑性ひずみ $\epsilon_p$ , 応力 $\sigma^k$ に対して全ひずみ理論により算定する塑性ひずみテンソル	$E$	弾性係数テンソル
$\epsilon_o(<\sigma^k>)$	応力強さ $<\sigma^k>$ に対する (弾性 + 塑性) ひずみ	( $\epsilon$ ) <sub>eq</sub>	ミーゼス型相当ひずみ
$\sigma^k_{LC}$	荷重制御型応力	$\nu$	ポアソン比 (別表 1.9)
		$\epsilon_C$	長期荷重制御型応力により生じる相当クリープひずみ

記号	定 義	記号	定 義
$\epsilon_F$	ピーク熱ひずみ範囲	$D_k^*$	ひずみ範囲 $\epsilon_{tk}$ に対するピーク応力に関する緩和クリーブ損傷係数
$K$	弾性応力集中係数	$t_i$	金属温度 $T_i$ の持続時間
$K_T$	ピーク熱ひずみに関する弾性応力集中係数	$t_{di}$	応力強さ $S_g$ に対して、設計クリーブ破断応力強さ ( $S_R$ ) を用いて定められる許容持続時間
$\epsilon_n$	公称ひずみ範囲		
$K_\epsilon$	ひずみ集中係数		
$S^*$	ひずみ $\epsilon_n$ に対応する応力		
$\bar{S}$	ひずみ $K\epsilon_n$ に対応する応力		
$n_i$	相当ひずみ範囲が $\epsilon_{ti}$ であるひずみサイクルの繰返し回数	$n^*$	保持過程での初期応力が応力水準 $S_g$ を超える可能性がある (1次+2次) 応力強さの回数
$N_{di}$	相当ひずみ範囲 $\epsilon_{ti}$ に対する許容繰返し回数	$D^*$	1次及び2次応力に関する緩和クリーブ損傷係数
$D_{CN}$	1次及び2次応力によるクリーブ損傷係数	$D_C$	累積クリーブ損傷係数
$D_{CP}$	ピーク応力によるクリーブ損傷係数	$D_f$	累積疲労損傷係数
$S_{y1k}$	ひずみサイクル $k$ の最高及び最低壁厚平均金属温度に対する設計降伏応力	$D$	累製クリーブ疲労損傷係数の制限値
$n_k$	ひずみ範囲が $\epsilon_{tk}$ であるひずみサイクル $k$ の繰返し回数		