

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。

2001. 7. 31

[技術情報室]

分置

# 高速原型炉第1種機器の自動強度評価システム

## 開発報告書

REVISION C-1

1982年3月

三井造船株式会社

この資料は動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松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

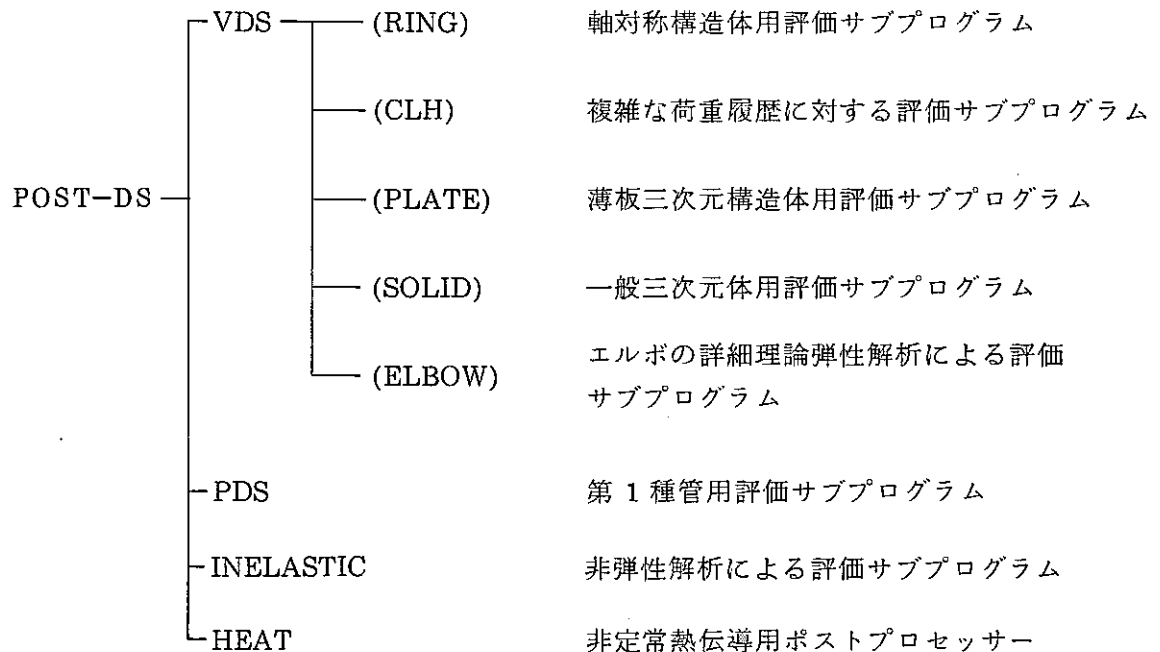
© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

## 高速原型炉第1種機器の自動評価システム

正田美穂\*<sup>1</sup> 鞘脇正明\*<sup>2</sup> 小野 令\*<sup>3</sup>  
飯田正幸\*<sup>3</sup> 尾角敏宣\*<sup>2</sup> 小松英幸\*<sup>1</sup>

### 要 旨

高速原型炉高温第1種機器の構造設計方針（昭和56年11月）に従って有限要素法（FEM）解析プログラムによる応力解析及び熱解析の結果を用いて第1種機器の強度を自動的に評価するシステムを前年度に引続き開発を実施した。この自動評価システムをPOST-DS（Design Standard）と呼び8つのサブプログラム機能を統合したものである。以下にその構成を記す。



\*\* 本報告書は、三井造船(株)が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究開発の成果である。

\*1 三井造船(株) システムエンジニアリング事業部

\*2 三井造船(株) 玉野研究所応力研究室

\*3 三井造船(株) 電算室電算機部

# 要 旨

## 目 次

	頁
1. 緒 言 .....	1
2. 評価手順の詳細説明 .....	2
2.1 高温設計方針の評価手順 .....	3
・ 第1種容器の評価 (VDS) .....	3
・ 第1種管の評価 (PDS) .....	56
2.2 応力分類法 .....	102
2.3 複雑な荷重履歴に対するクリープ疲労評価法 .....	112
2.4 非弾性解析に基づく場合の評価法 .....	131
2.5 エルボの詳細理論弾性解析による評価法 .....	152
2.6 温度分布の分類法 .....	162
2.7 そ の 他 .....	164
・ 梁要素の部材座標系 .....	164
・ TEE 管の評価式 .....	166
3. プログラムの詳細 .....	168
3.1 プログラム構造図 .....	168
3.2 サブルーチン対応表 .....	181
4. 結 言 .....	202
5. 参 考 文 献 .....	203

# 1 章 緒 言

日本に於ける高速原型炉第 1 種機器用の高温設計基準は，動力炉・核燃料開発事業団を中心にして昭和 53 年 11 月に暫定案<sup>(1)(2)</sup>が制定され昭和 55 年 9 月に内容が改訂され，同時に名称も構造設計指針(案)<sup>(3)</sup>となり，昭和 56 年 11 月に構造設計方針(以下「方針」<sup>(5)</sup>と略記する)として決定された。

本強度評価システムは有限要素法 (FEM) による応力解析結果を用い，この「方針」に従って高速炉第 1 種機器の強度を自動的に評価するプログラムである。プログラムの開発は昭和 54 年度にスタートし，暫定案をベースに軸対称体構造に適用可能な POST-VDS<sup>(9)</sup>プログラムと，第 1 種管用評価の POST-PDS<sup>(10)</sup>プログラムを開発した。引続き昭和 55 年度では解析プログラム FINAS, MARC, 配管解析用プログラム NUPIPE を使った 8 種類のプログラムを作成した。さらに本年度(昭和 56 年)は非弾性解析に基づく評価，非定常熱伝導解析用ポストプロセッサ等を統合，ユーザの使い易さを目的とした入出力部の改良，エラー処理の完備などを行った。

本システム POST-DS のマニュアルとして，本開発報告書以外に利用者手引き書を作成し，ユーザの便宜を計った。

又，POST-DS は動力炉・核燃料開発事業団および三井造船株式会社の定期的な打合せを通じて審議検討されて開発されたものである。

## 2 章 評価手順の詳細説明

本章では自動強度評価システムの内、構造設計方針に基づいた第 1 種機器の詳細評価手順と、特に重要と思われる事項について詳細に説明する。

また、自動強度評価システムの利用者手引き書で述べなかった事項も詳細に説明する。

### 2.1 高温設計方針の評価手順

a) 第 1 種容器の評価手順

b) 第 1 種管の評価手順

### 2.2 応力分類法

### 2.3 複雑な荷重履歴に対するクリープ疲労評価法

### 2.4 非弾性解析に基づく場合の評価法

### 2.5 エルボの詳細理論弾性解析による評価法

### 2.6 温度分布の分類法

### 2.7 その他

## 2.1 高温設計方針の評価手順

本自動強度評価システムで用いている方針の詳細評価手順について説明する。応力の強さの算定方法が異なる以外は第1種容器の場合も，第1種管の場合も評価手順は同じになるが，ここでは評価プログラムと対応させるため容器用 (POST-VDS) と配管用 (POST-PDS) の評価手順を別々に示す。

### a) 第1種容器の評価手順 (POST-VDS)

第1種容器の構造設計方針及び通産省告示による評価フローを Fig. 2.1.1, 2.1.2 に示す。このフローに従って下記の1次応力の制限，ひずみの制限ならびにクリープ疲労損傷の制限に対する評価手順について述べる。

#### (1) 1次応力の制限

#### (2) ひずみの制限

- 1)  $S_n^*$ ,  $S_n$ ,  $S_n^{\circ}$  の制限
- 2) 告示によるラチェットの評価フロー
- 3)  $\langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*)/Kt \rangle_{\max} + \langle Q + Q^* \rangle_R$  の制限
- 4)  $\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF}$ ,  $\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF} + \epsilon_{bEF}$  の制限
- 5) 運転状態Ⅳに関する制限

#### (3) クリープ疲労損傷

- 1) 告示の評価手順に従ったひずみ範囲  $\epsilon_t$  の算定
- 2) 長期1次応力が低い場合の疲労損傷評価法に基づくひずみ範囲  $\epsilon_t$  の算定
- 3) 一般規定に基づくひずみ範囲  $\epsilon_t$  の算定
- 4) 長期1次応力が低い場合およびクリープ効果が顕著でない場合の累積クリープ損傷係数  $D_c$  の算定
- 5) 長期1次応力が高い場合の累積クリープ損傷係数の算定

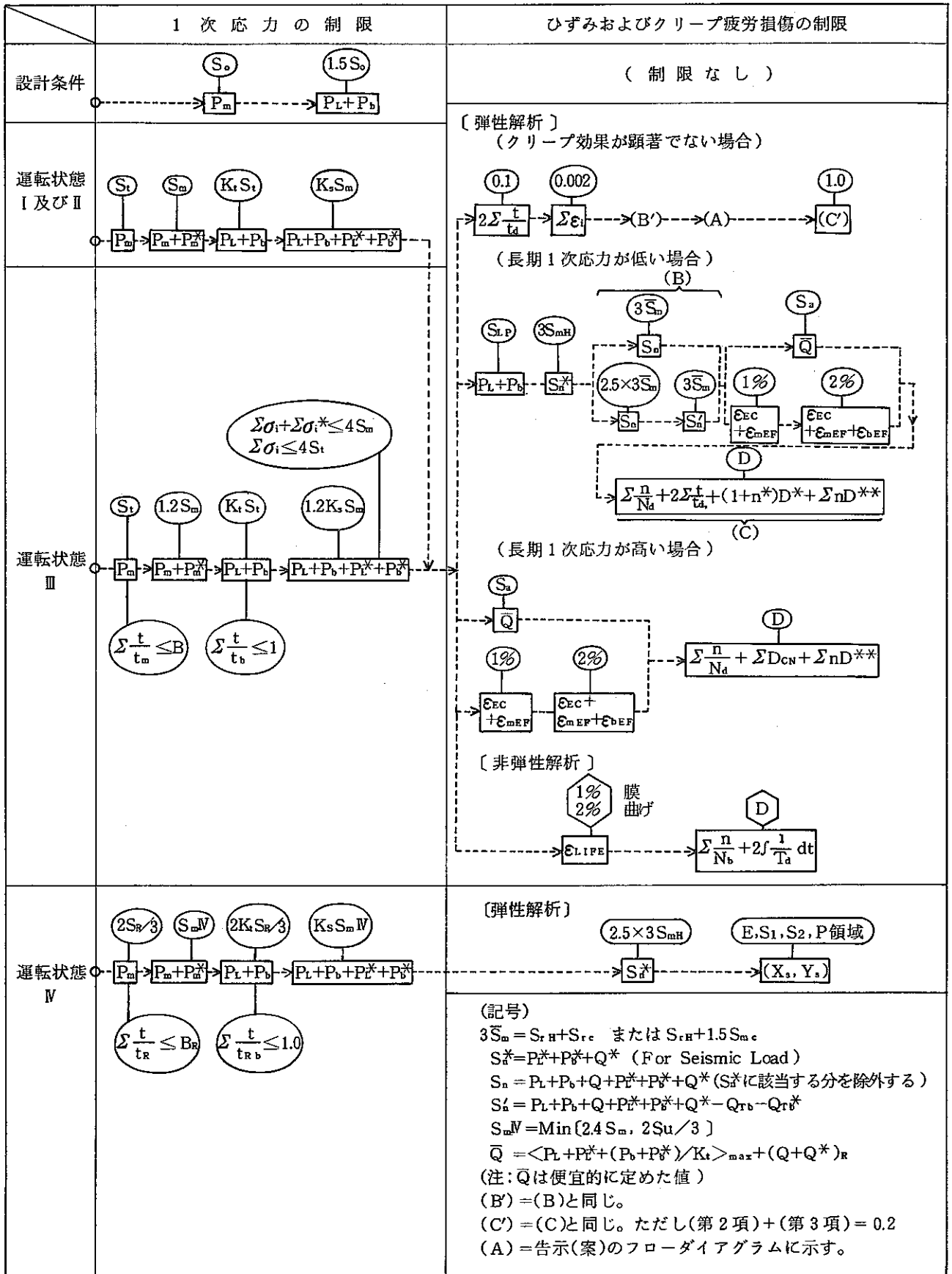


Fig. 2. 1. 1 第 1 種容器の構造設計方針フローダイアグラム



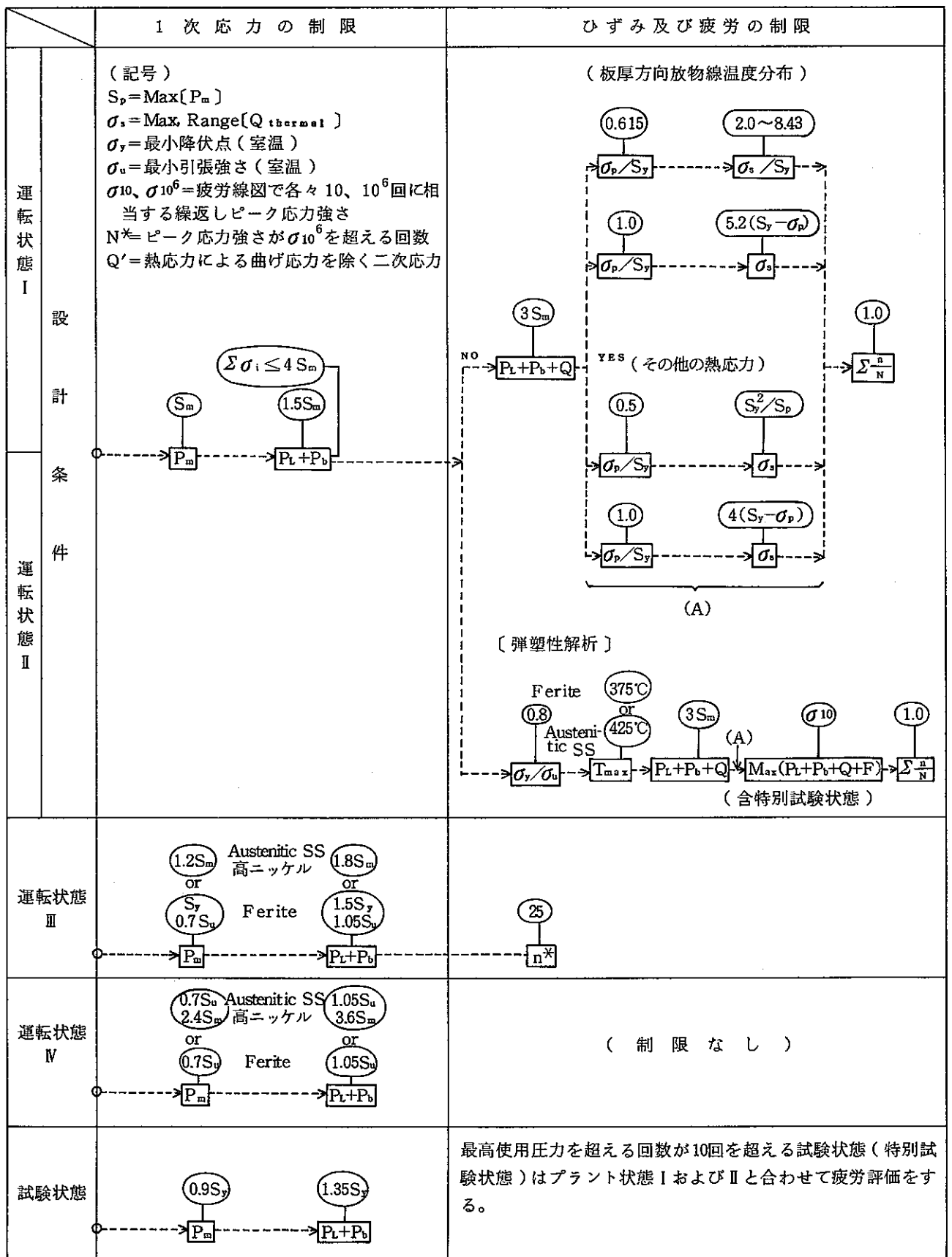
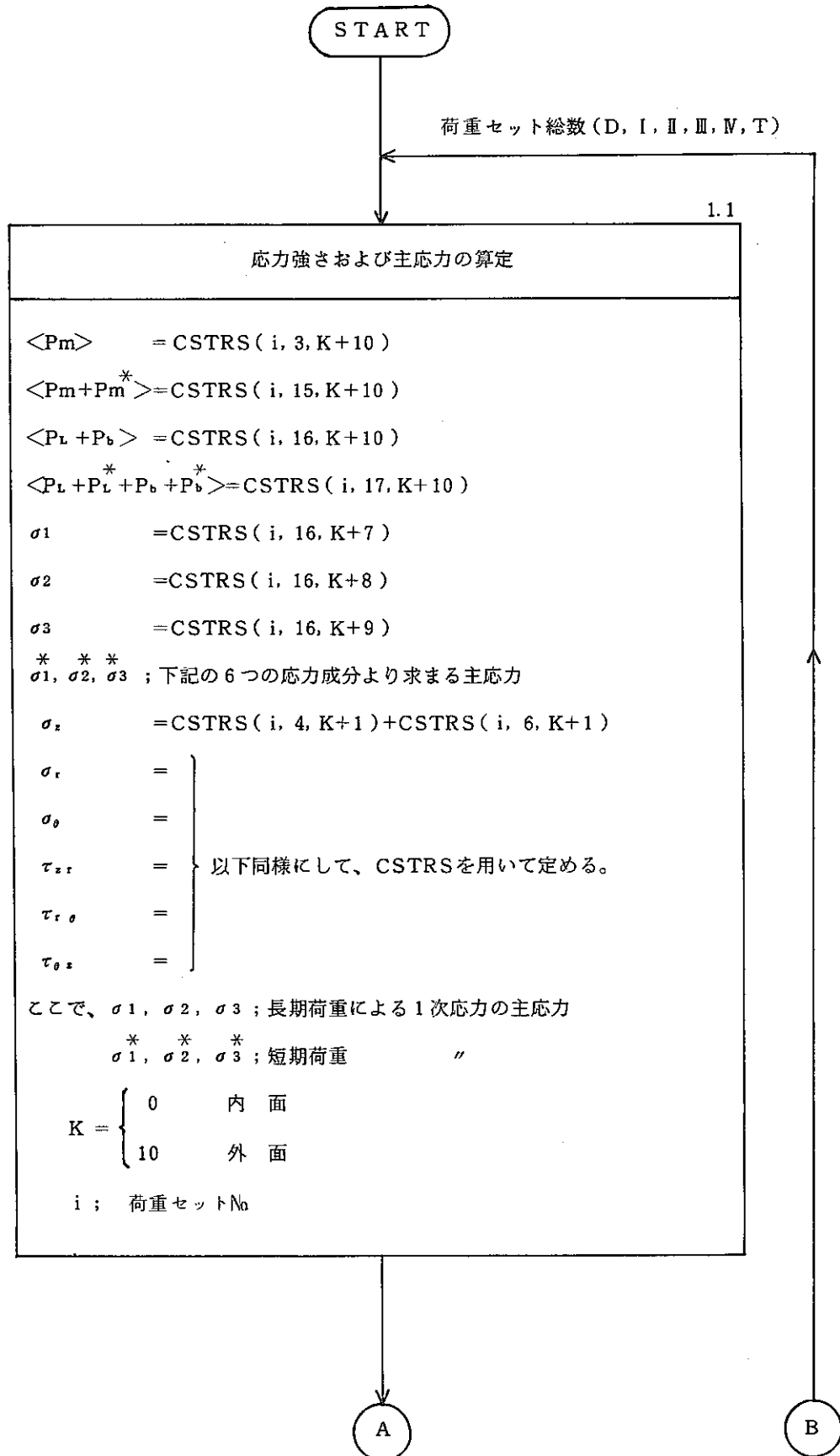
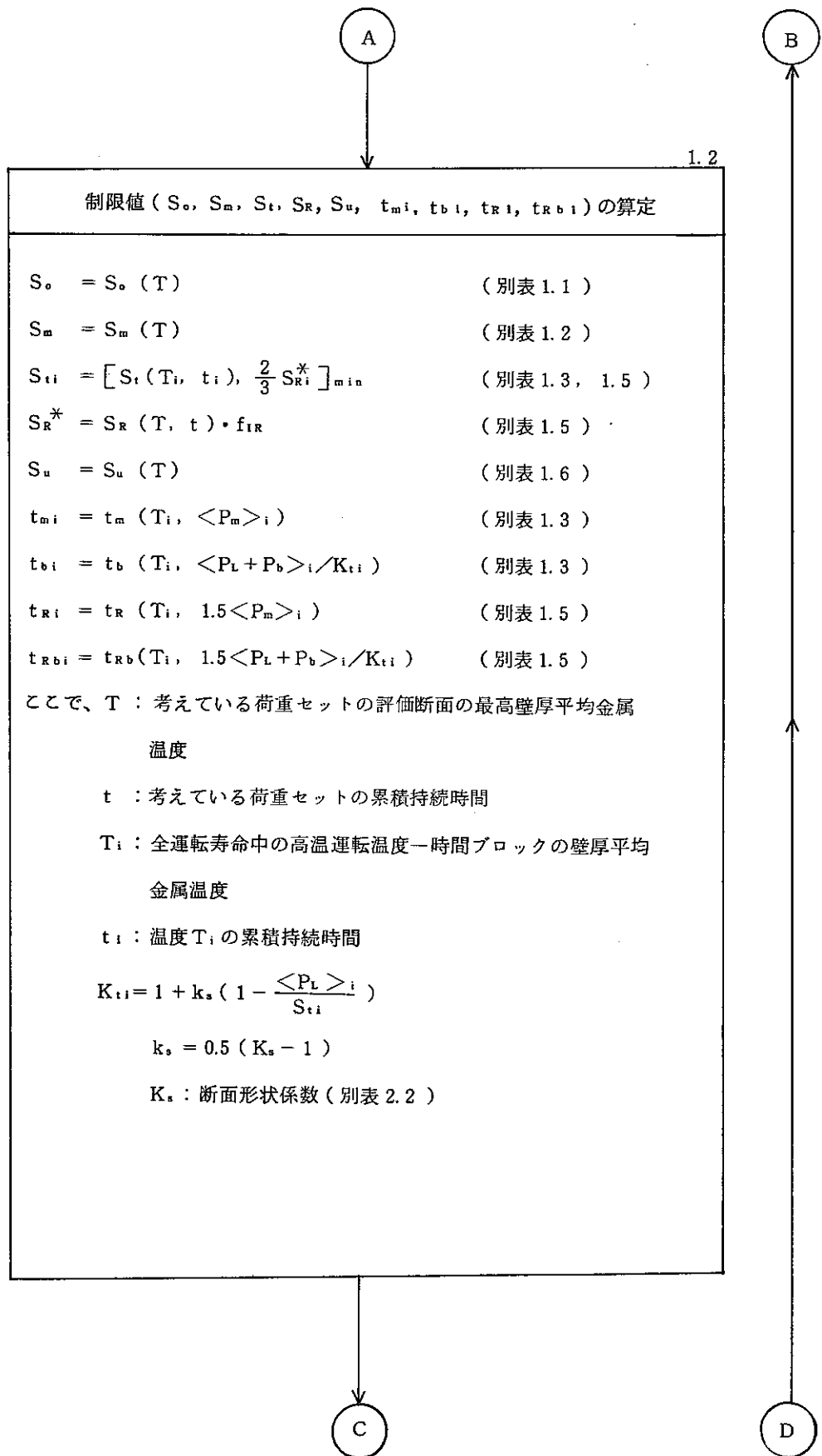
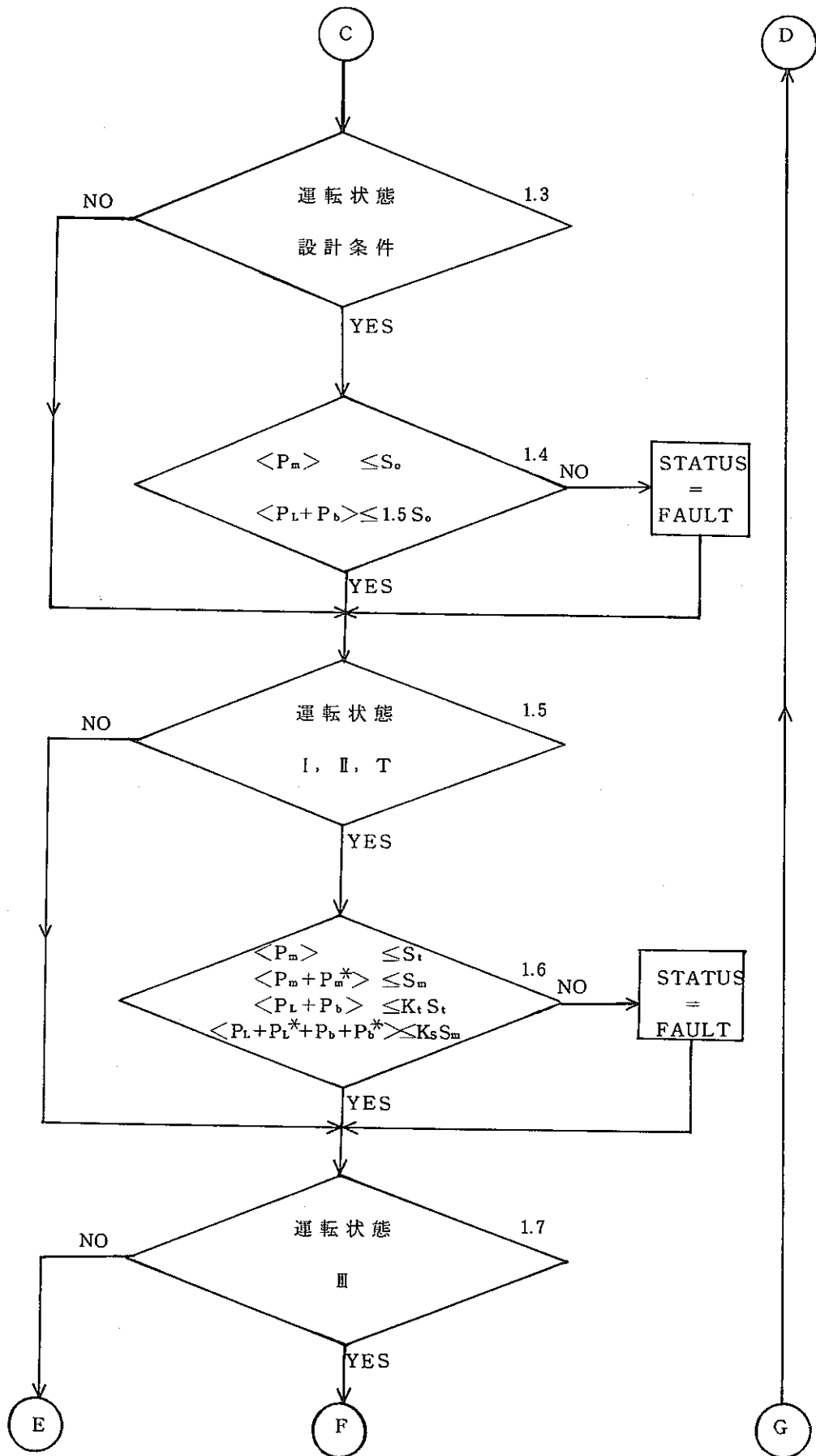


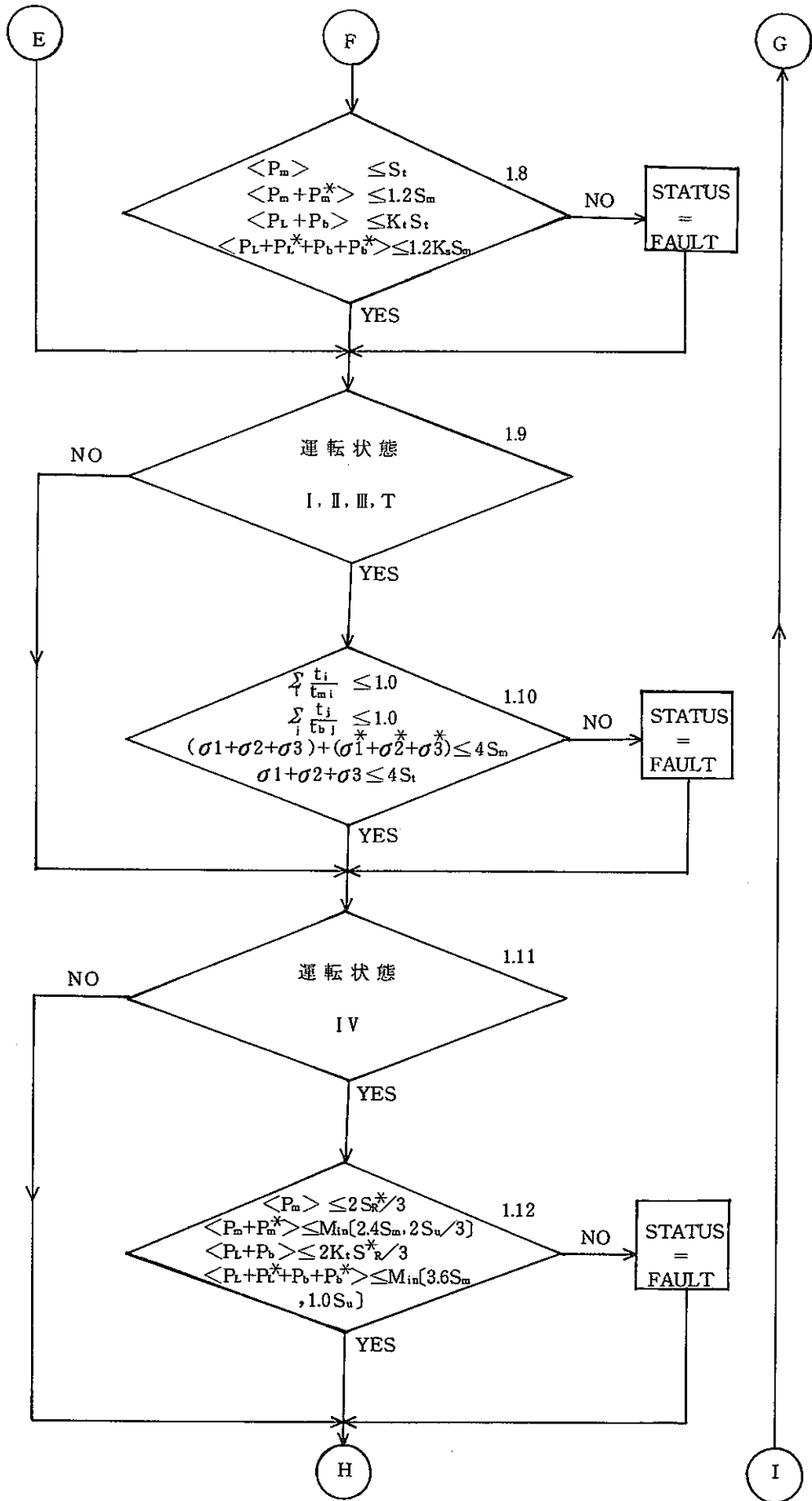
Fig. 2. 1. 2 通産省告示第 1 種容器の設計基準フローダイアグラム

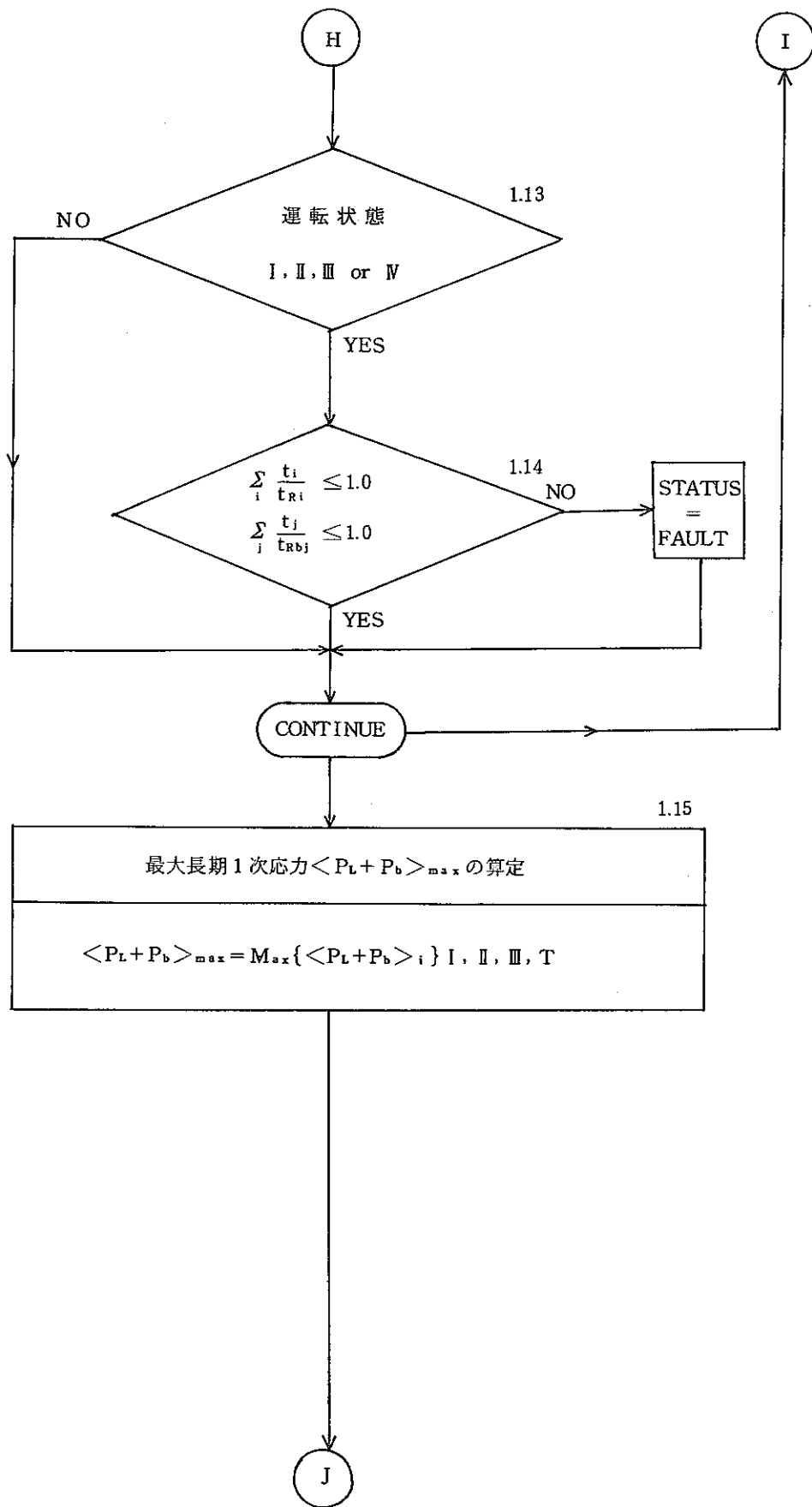
(1) 1次応力の制限











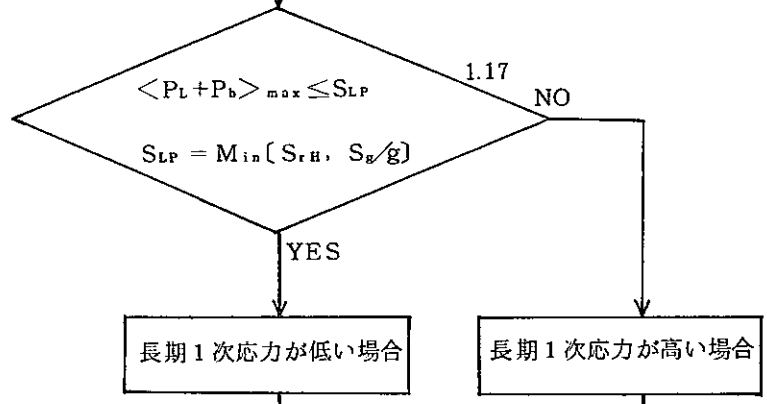
J

1.16

許容値  $S_{rH}$  の算定

$S_{rH}$  : 次の 1) ~ 5) により定める。

- 1) 運転状態 I, II, III 及び試験状態における高温使用時間を評価断面の最高金属温度履歴に基づき, 温度  $T_i$  の累積持続時間  $t_i$  (hr) ( $i = 1 \sim k$ ) に分割する。ここに  $T_i > T_{i+1}$  とする。
- 2) 温度  $T_i$ , 時間  $t_i$  に対して別表 1.7 に定める値を  $(S_r)_i$  (kg/mm<sup>2</sup>) とする。
- 3) 温度  $T_i$  ( $i \geq 2$ ), 応力  $(S_r)_{i-1}$  に対して別表 1.7 により定める時間を  $t'_{i-1}$  (hr) とする。
- 4) 温度  $T_i$  ( $i \geq 2$ ), 時間  $(t'_{i-1} + t_i)$  に対して別表 1.7 に定める値を  $(S_r)_i$  とする。
- 5)  $S_{rH} = (S_r)_k$  とする。



1.18

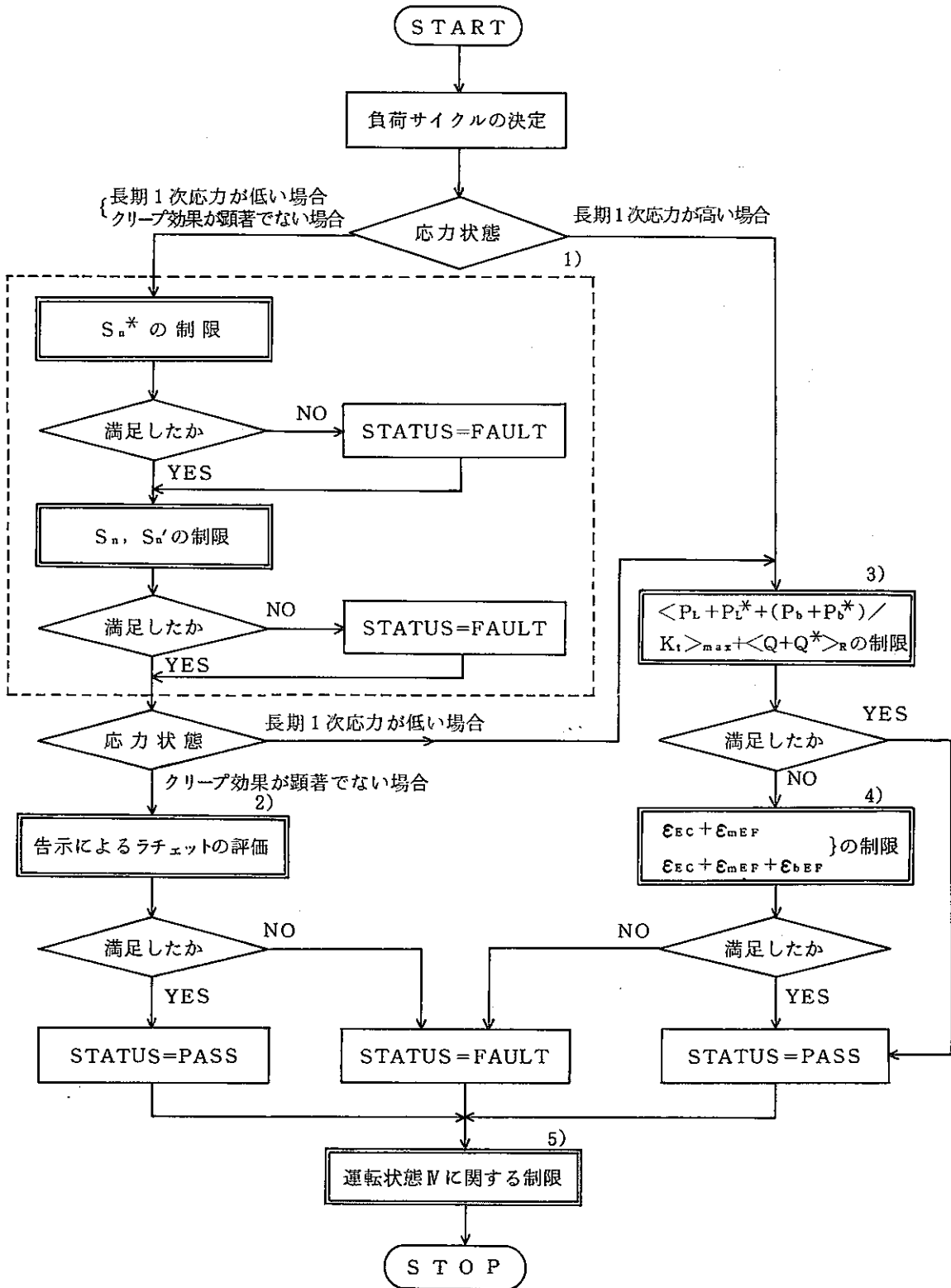
クリープ効果が顕著かどうかのチェックを行なう。

- 1)  $2 \sum t_i / t_{di} \leq 0.1$
- 2)  $\sum \epsilon_i \leq 0.002$

STOP

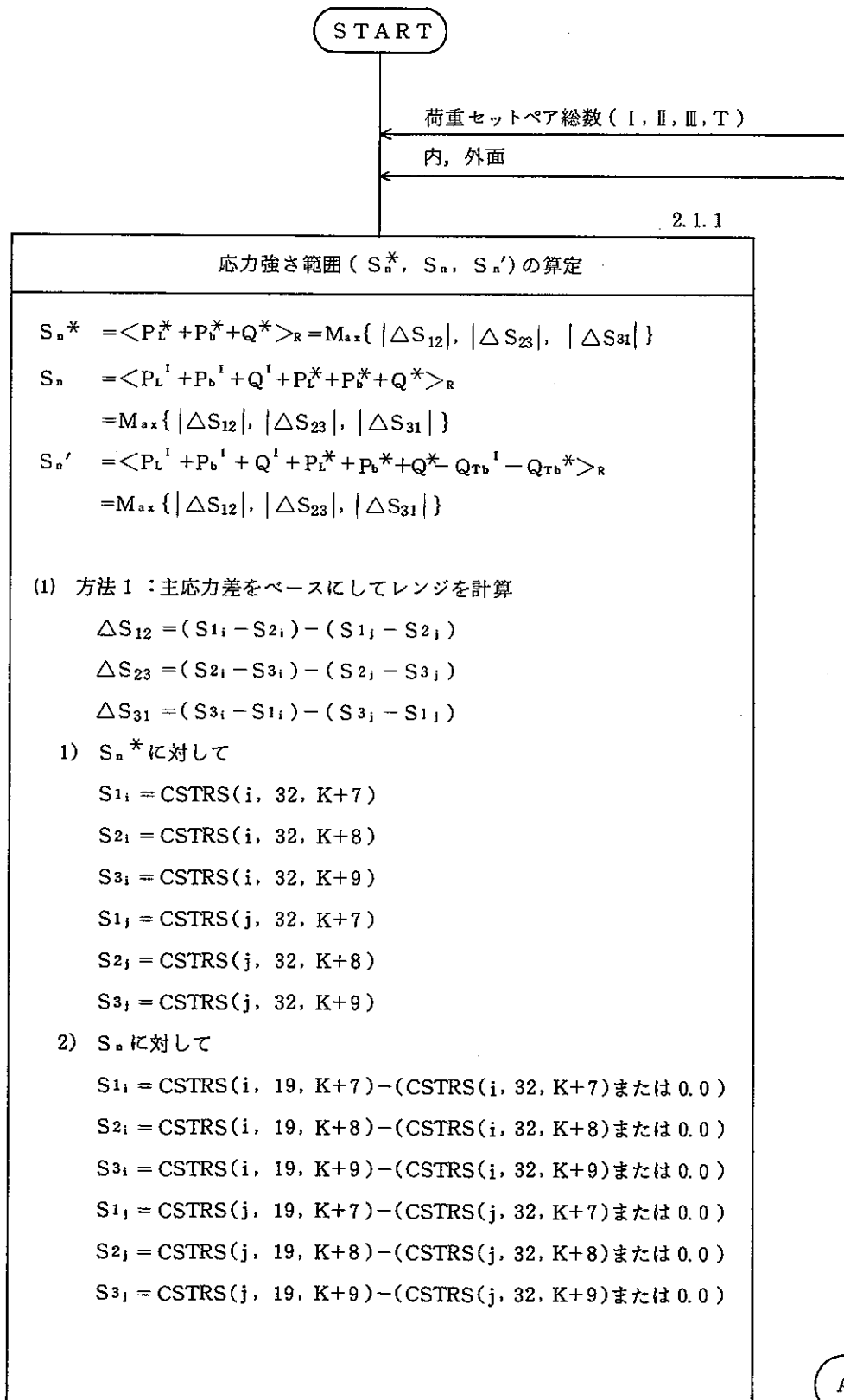
(2) ひずみの制限

ひずみの制限に対する評価フローを下图に示す。图中1)～5)の各制限に対する詳細フローを次ページ以降に示す。





1)  $S_n^*$ ,  $S_n$ ,  $S_n'$  の制限



続く

続き

A

3)  $S'_n$  に対して

$$S_{1i} = \text{CSTRS}(i, 30, K+7)$$

$$S_{2i} = \text{CSTRS}(i, 30, K+8)$$

$$S_{3i} = \text{CSTRS}(i, 30, K+9)$$

$$S_{1j} = \text{CSTRS}(j, 30, K+7)$$

$$S_{2j} = \text{CSTRS}(j, 30, K+8)$$

$$S_{3j} = \text{CSTRS}(j, 30, K+9)$$

(2) 方法2: 応力成分をベースにレンジをとってから主応力を計算

$$\Delta S_{12} = \Delta S_1 - \Delta S_2$$

$$\Delta S_{23} = \Delta S_2 - \Delta S_3$$

$$\Delta S_{31} = \Delta S_3 - \Delta S_1$$

ここで、 $\Delta S_1$ ,  $\Delta S_2$ ,  $\Delta S_3$ : 下記の6つの応力成分レンジにより  
求まる主応力レンジ

$$\Delta \sigma_z = \sigma_{zi} - \sigma_{zj}$$

$$\Delta \sigma_r = \sigma_{ri} - \sigma_{rj}$$

$$\Delta \sigma_\theta = \sigma_{\theta i} - \sigma_{\theta j}$$

$$\Delta \tau_{zr} = \tau_{zri} - \tau_{zrj}$$

$$\Delta \tau_{r\theta} = \tau_{r\theta i} - \tau_{r\theta j}$$

$$\Delta \tau_{\theta z} = \tau_{\theta zi} - \tau_{\theta zj}$$

1)  $S_n^*$  に対して

$$\sigma_{zi} = \text{CSTRS}(i, 32, K+1)$$

$$\sigma_{ri} = \text{CSTRS}(i, 32, K+2)$$

$$\sigma_{\theta i} = \text{CSTRS}(i, 32, K+3)$$

$$\sigma_{zri} = \text{CSTRS}(i, 32, K+4)$$

$$\sigma_{r\theta i} = \text{CSTRS}(i, 32, K+5)$$

$$\sigma_{\theta zi} = \text{CSTRS}(i, 32, K+6)$$

続く

B

続き

$$\sigma_{zj} = \text{CSTRS}(j, 32, K+1)$$

$$\sigma_{rj} = \text{CSTRS}(j, 32, K+2)$$

$$\sigma_{\theta j} = \text{CSTRS}(j, 32, K+3)$$

$$\tau_{zrj} = \text{CSTRS}(j, 32, K+4)$$

$$\tau_{r\theta j} = \text{CSTRS}(j, 32, K+5)$$

$$\tau_{\theta zj} = \text{CSTRS}(j, 32, K+6)$$

2)  $S_n$  に対して

$$\sigma_{zi} = \text{CSTRS}(i, 19, K+1) - (\text{CSTRS}(i, 32, K+1) \text{ または } 0.0)$$

$$\sigma_{ri} = \text{CSTRS}(i, 19, K+2) - (\text{CSTRS}(i, 32, K+2) \text{ または } 0.0)$$

$$\sigma_{\theta i} = \text{CSTRS}(i, 19, K+3) - (\text{CSTRS}(i, 32, K+3) \text{ または } 0.0)$$

$$\tau_{zri} = \text{CSTRS}(i, 19, K+4) - (\text{CSTRS}(i, 32, K+4) \text{ または } 0.0)$$

$$\tau_{r\theta i} = \text{CSTRS}(i, 19, K+5) - (\text{CSTRS}(i, 32, K+5) \text{ または } 0.0)$$

$$\tau_{\theta z i} = \text{CSTRS}(i, 19, K+6) - (\text{CSTRS}(i, 32, K+6) \text{ または } 0.0)$$

$$\sigma_{zj} = \text{CSTRS}(j, 19, K+1) - (\text{CSTRS}(j, 32, K+1) \text{ または } 0.0)$$

$$\sigma_{rj} = \text{CSTRS}(j, 19, K+2) - (\text{CSTRS}(j, 32, K+2) \text{ または } 0.0)$$

$$\sigma_{\theta j} = \text{CSTRS}(j, 19, K+3) - (\text{CSTRS}(j, 32, K+3) \text{ または } 0.0)$$

$$\tau_{zrj} = \text{CSTRS}(j, 19, K+4) - (\text{CSTRS}(j, 32, K+4) \text{ または } 0.0)$$

$$\tau_{r\theta j} = \text{CSTRS}(j, 19, K+5) - (\text{CSTRS}(j, 32, K+5) \text{ または } 0.0)$$

$$\tau_{\theta z j} = \text{CSTRS}(j, 19, K+6) - (\text{CSTRS}(j, 32, K+6) \text{ または } 0.0)$$

3)  $S_n'$  に対して

$$\sigma_{zi} = \text{CSTRS}(i, 30, K+1)$$

$$\sigma_{ri} = \text{CSTRS}(i, 30, K+2)$$

$$\sigma_{\theta i} = \text{CSTRS}(i, 30, K+3)$$

$$\tau_{zri} = \text{CSTRS}(i, 30, K+4)$$

$$\tau_{r\theta i} = \text{CSTRS}(i, 30, K+5)$$

$$\tau_{\theta z i} = \text{CSTRS}(i, 30, K+6)$$

$$\sigma_{zj} = \text{CSTRS}(j, 30, K+1)$$

$$\sigma_{rj} = \text{CSTRS}(j, 30, K+2)$$

$$\sigma_{\theta j} = \text{CSTRS}(j, 30, K+3)$$

$$\tau_{zrj} = \text{CSTRS}(j, 30, K+4)$$

$$\tau_{r\theta j} = \text{CSTRS}(j, 30, K+5)$$

$$\tau_{\theta z j} = \text{CSTRS}(j, 30, K+6)$$

$$K = \begin{cases} 0 & \text{内面} \\ 10 & \text{外面} \end{cases}$$

$i, j$  : 考えている荷重セットペアの荷重セットNo



C

D

2.1.2

許容応力値 ( $3S_{mH}$ ,  $3\bar{S}_m$ ,  $3S_m$ ,  $S_{rH}$ ,  $S_{mc}$ ,  $S_{rc}$ )の算定

$S_{mH} = S_m(T)$   
 T : 考えている負荷サイクル中の評価点の最高金属温度

$3\bar{S}_m = \begin{cases} S_{rH} + 1.5S_{mc} & (T_c \text{ が告示の適用温度範囲内にある場合}) \\ S_{rH} + S_{rc} & (T_c \text{ が告示の適用温度範囲を超える場合}) \end{cases}$

$3S_m = 1.5S_{mH} + 1.5S_{mc}$

$S_{mc} = S_m(T_c)$

$S_{rc} = S_r(T_s, t_s)$

$S_{rH}$  : ステップ1.16で定める値

ここで、 $T_c$  : 考えている負荷サイクルにおいて、 $S_m$ を定める応力状態の低温側の(評価点の)金属温度

$T_s$  :  $S_r$ を定める2つの応力状態のうち、いずれか定常状態の(評価点の)金属温度との差が大きい方の(評価点の)金属温度

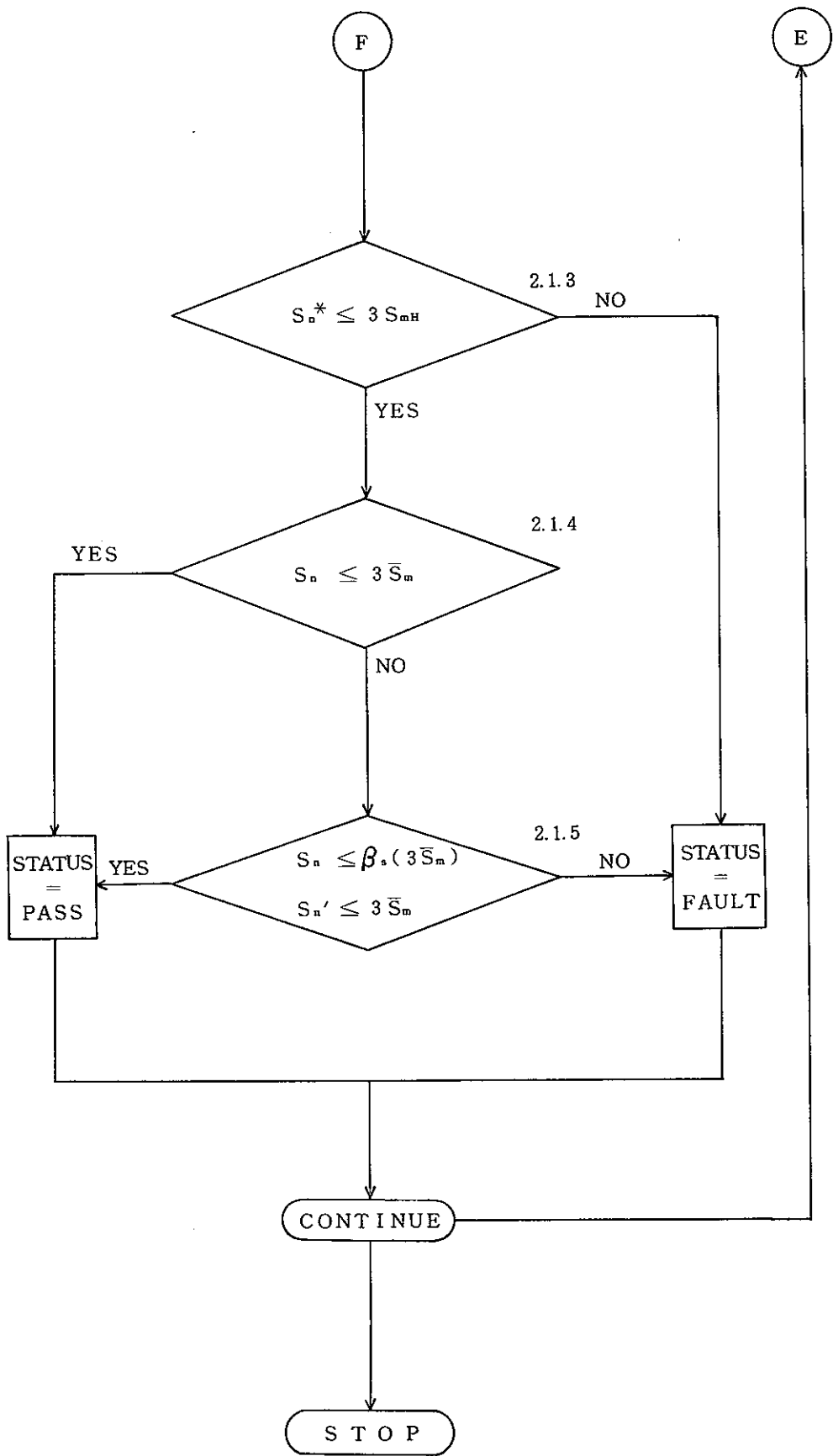
$t_s = \text{Min}\{t_{s1}, t_{s2}\}$

$t_{s1}$  : 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(ユーザが指定する)

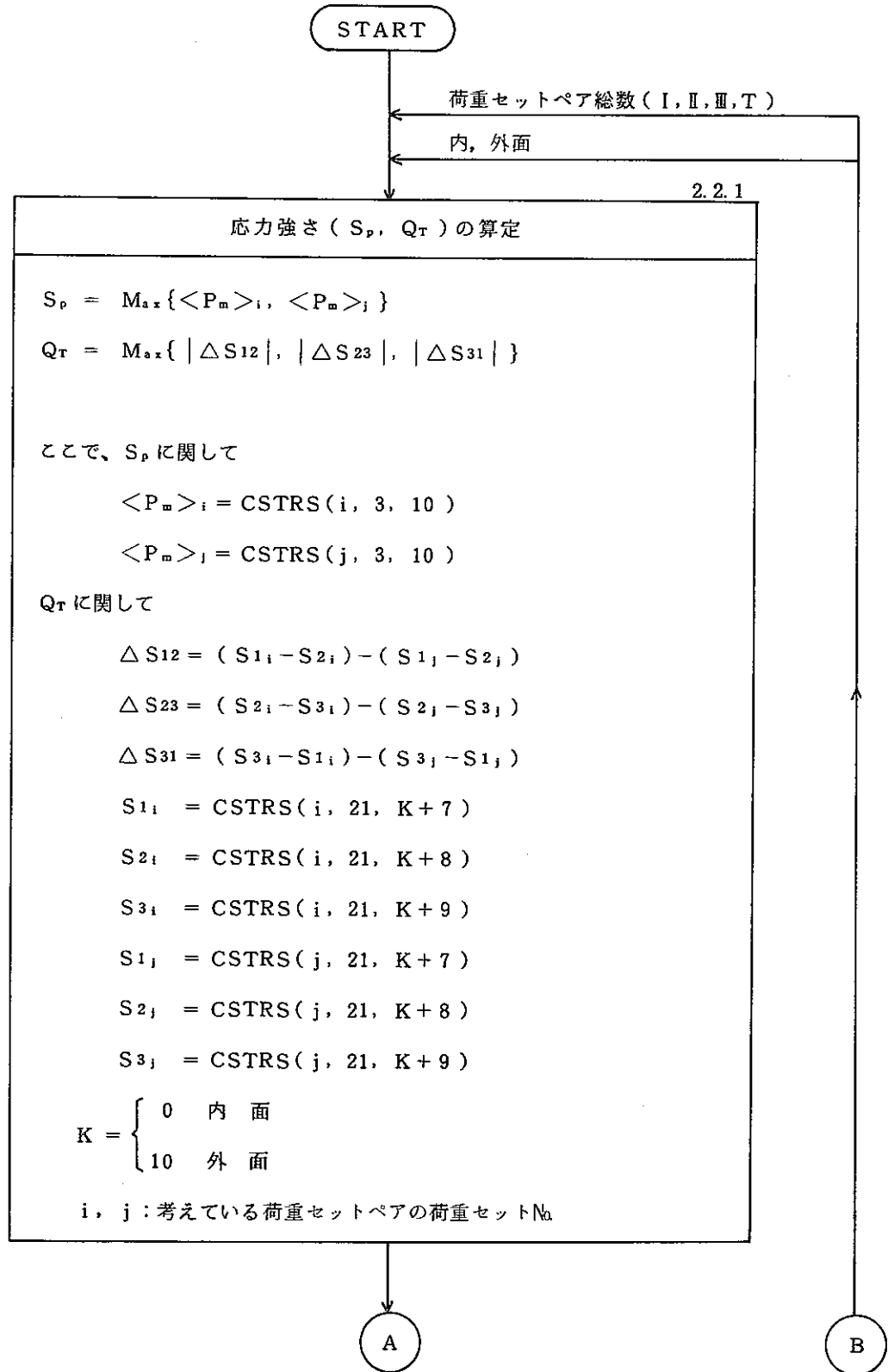
$t_{s2}$  : 考えている負荷サイクル内において温度が $T_s$ になってから告示の適用温度範囲内の温度に到達するまでの時間(ユーザが指定する)

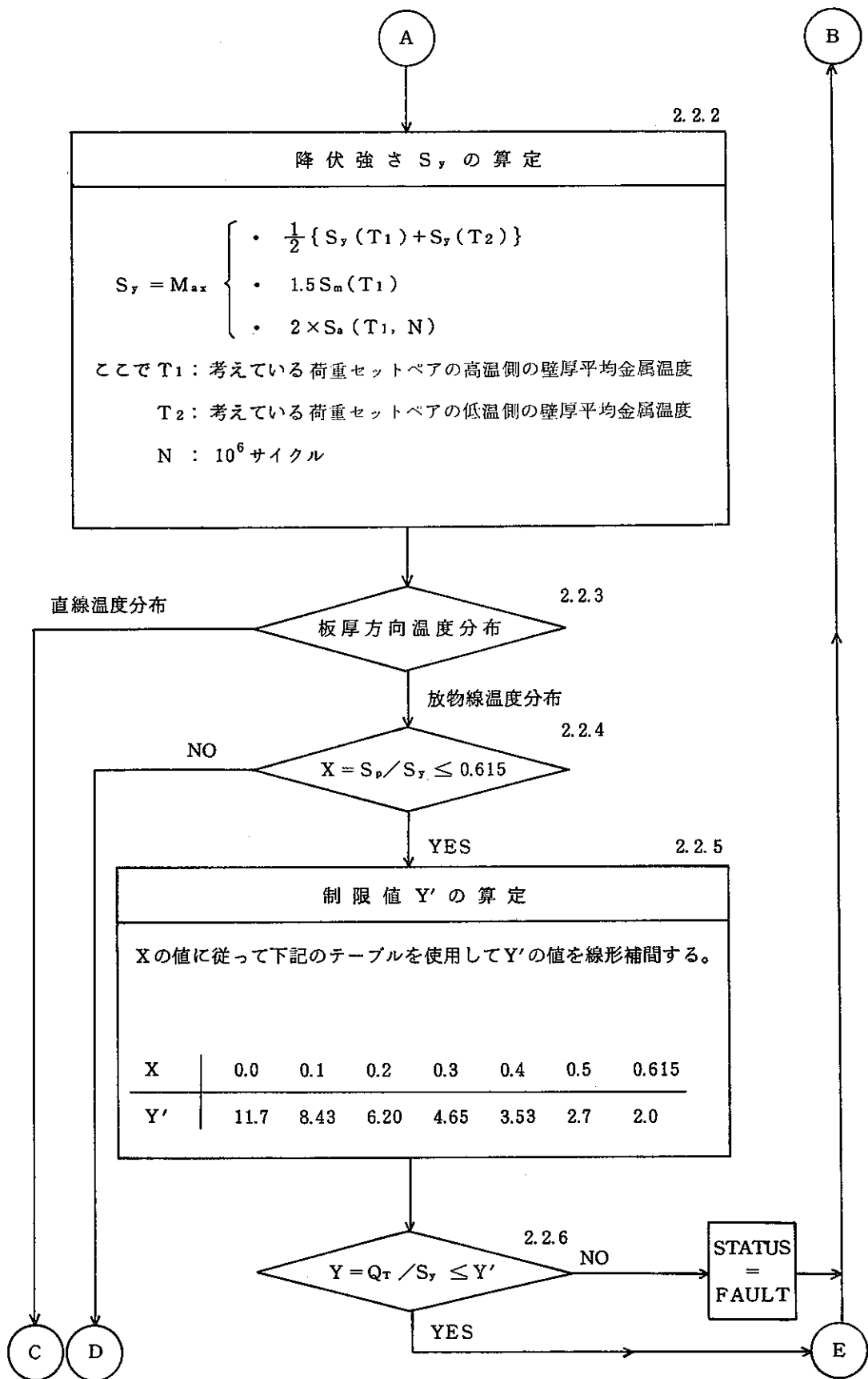
F

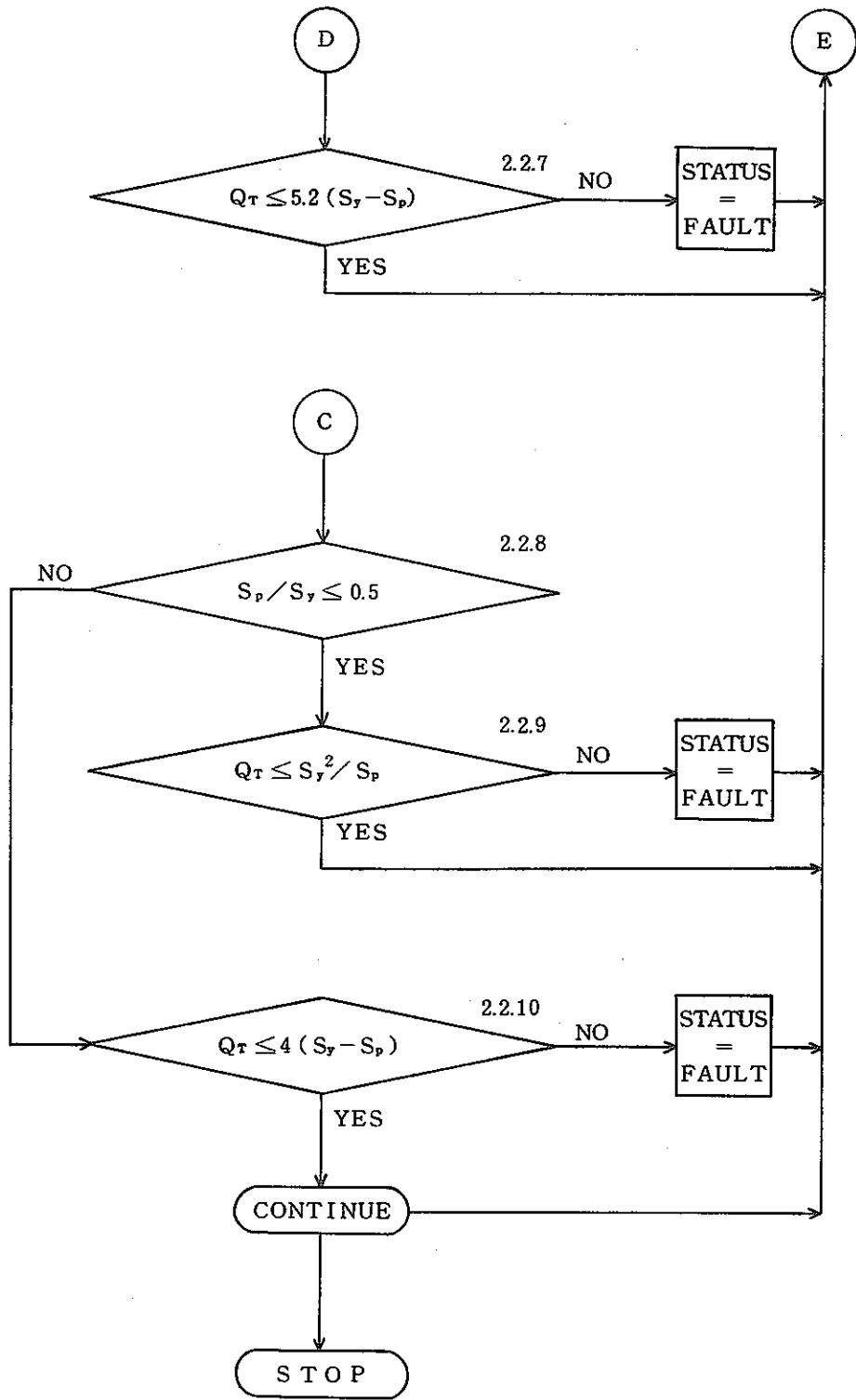
E



2) 告示によるラチェットの評価フロー

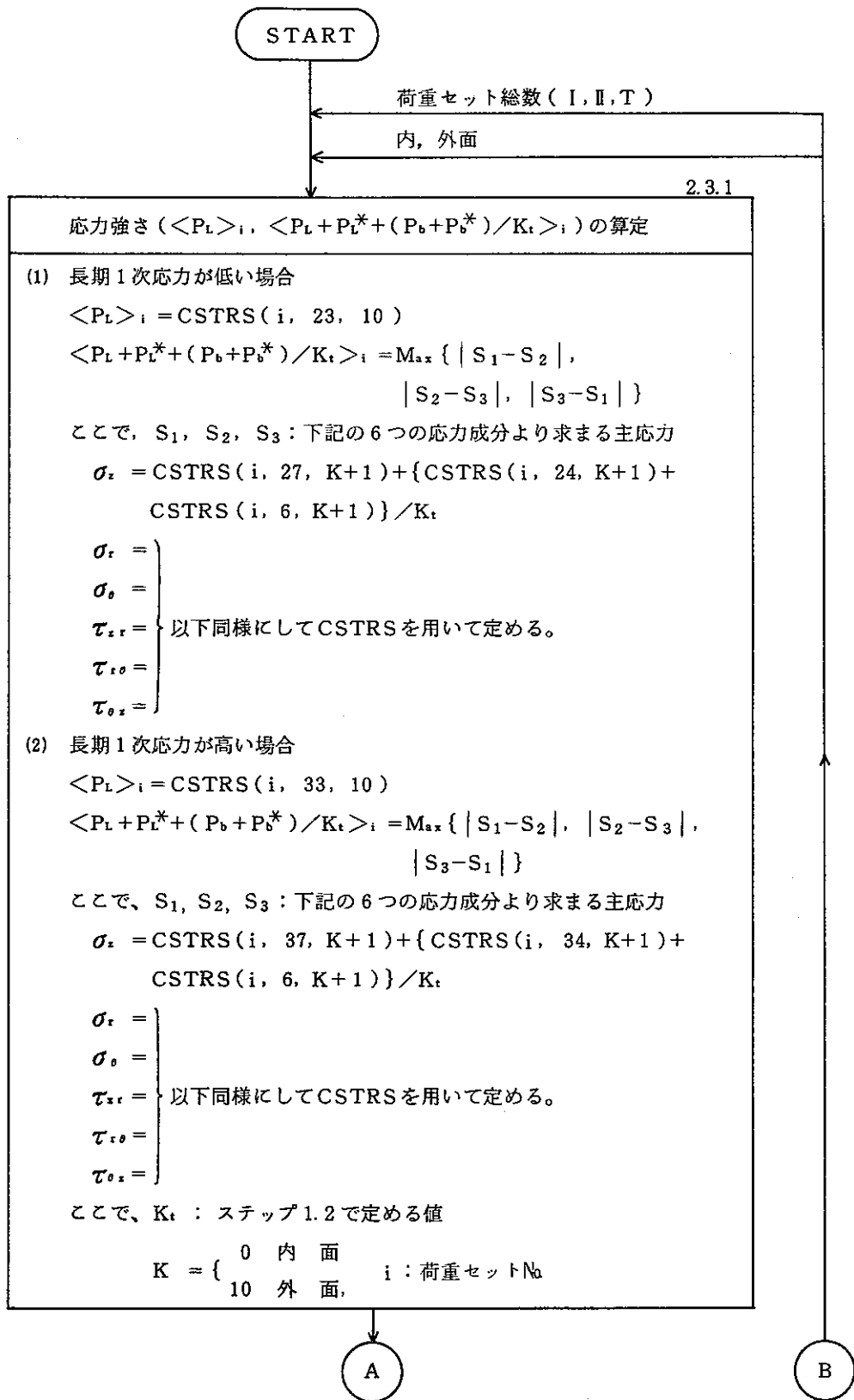


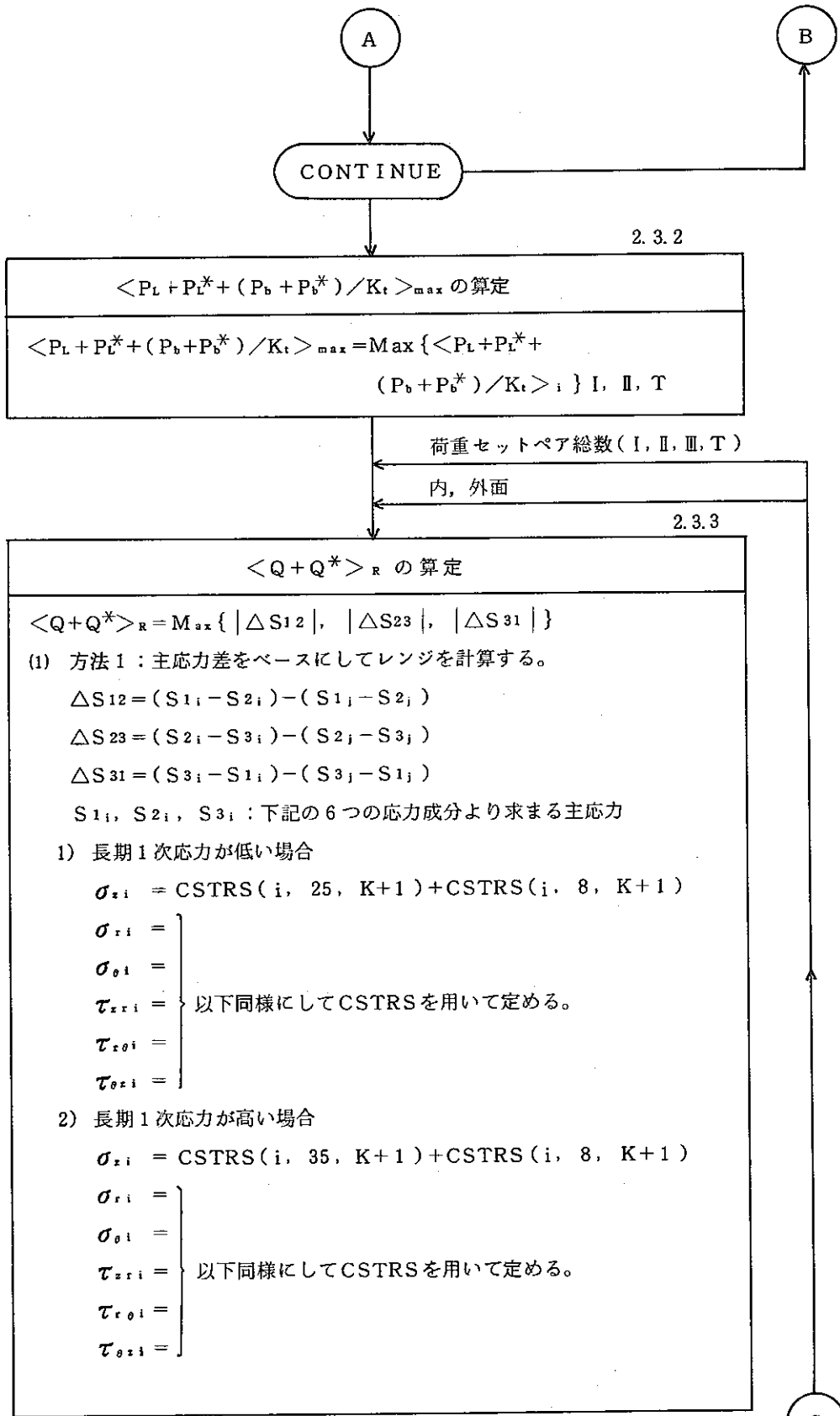






3)  $\langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / K_t \rangle_{\max} + \langle Q + Q^* \rangle_R$  の制限





続く

$S_{1j}, S_{2j}, S_{3j}$  : 下記の6つの応力成分より求まる主応力

1) 長期1次応力が低い場合

$$\sigma_{zj} = \text{CSTRS}(j, 25, K+1) + \text{CSTRS}(j, 8, K+1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rj} &= \\ \sigma_{\theta j} &= \\ \tau_{zrj} &= \\ \tau_{\theta zj} &= \\ \tau_{\theta rj} &= \end{aligned} \right\} \text{以下同様にしてCSTRSを用いて定める。}$$

2) 長期1次応力が高い場合

$$\sigma_{zj} = \text{CSTRS}(j, 35, K+1) + \text{CSTRS}(j, 8, K+1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rj} &= \\ \sigma_{\theta j} &= \\ \tau_{zrj} &= \\ \tau_{r\theta j} &= \\ \tau_{\theta zj} &= \end{aligned} \right\} \text{以下同様にしてCSTRSを用いて定める。}$$

(2) 方法2: 応力成分をベースにレンジをとってから主応力を計算する。

$$\Delta S_{12} = \Delta S_1 - \Delta S_2$$

$$\Delta S_{23} = \Delta S_2 - \Delta S_3$$

$$\Delta S_{31} = \Delta S_3 - \Delta S_1$$

$\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3$ : 下記の6つの応力成分レンジより求まる主応力レンジ

$$\Delta \sigma_z = \sigma_{zi} - \sigma_{zj}$$

$$\Delta \sigma_r = \sigma_{ri} - \sigma_{rj}$$

$$\Delta \sigma_\theta = \sigma_{\theta i} - \sigma_{\theta j}$$

$$\Delta \tau_{zr} = \tau_{zri} - \tau_{zrj}$$

$$\Delta \tau_{r\theta} = \tau_{r\theta i} - \tau_{r\theta j}$$

$$\Delta \tau_{\theta z} = \tau_{\theta zi} - \tau_{\theta zj}$$

ここで、各応力成分は、方法1と同じ

$$K = \begin{cases} 0 & \text{内面} \\ 10 & \text{外面} \end{cases}$$

$i, j$ : 考えている荷重セットペアの荷重セットNo



D

E

2.3.4

制限値  $S_a$  の算定

$$S_a = \begin{cases} S_2 & (T_1 \leq T_0) \\ \text{Min}\{S_1, S_2\} & (T_1 > T_0) \end{cases}$$

ここで  $T_1$  : 考えている荷重セットペアの低温側の壁厚平均金属温度

$T_0$  : 次式により求まる温度

$$S_m(T_0) = S_t(T_0, t), \quad t = 10^5 \text{ Hr}$$

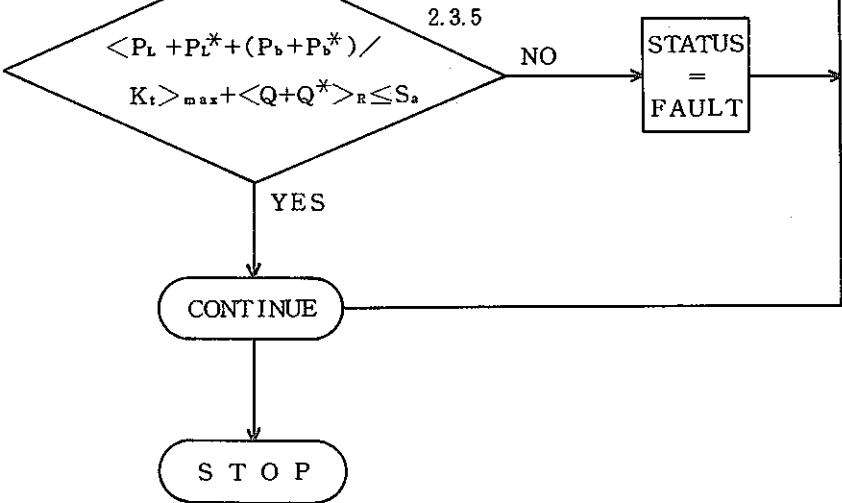
$$S_1 = S_t(T, t) \times 1.25$$

$T$  : 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 (考えている評価断面の)

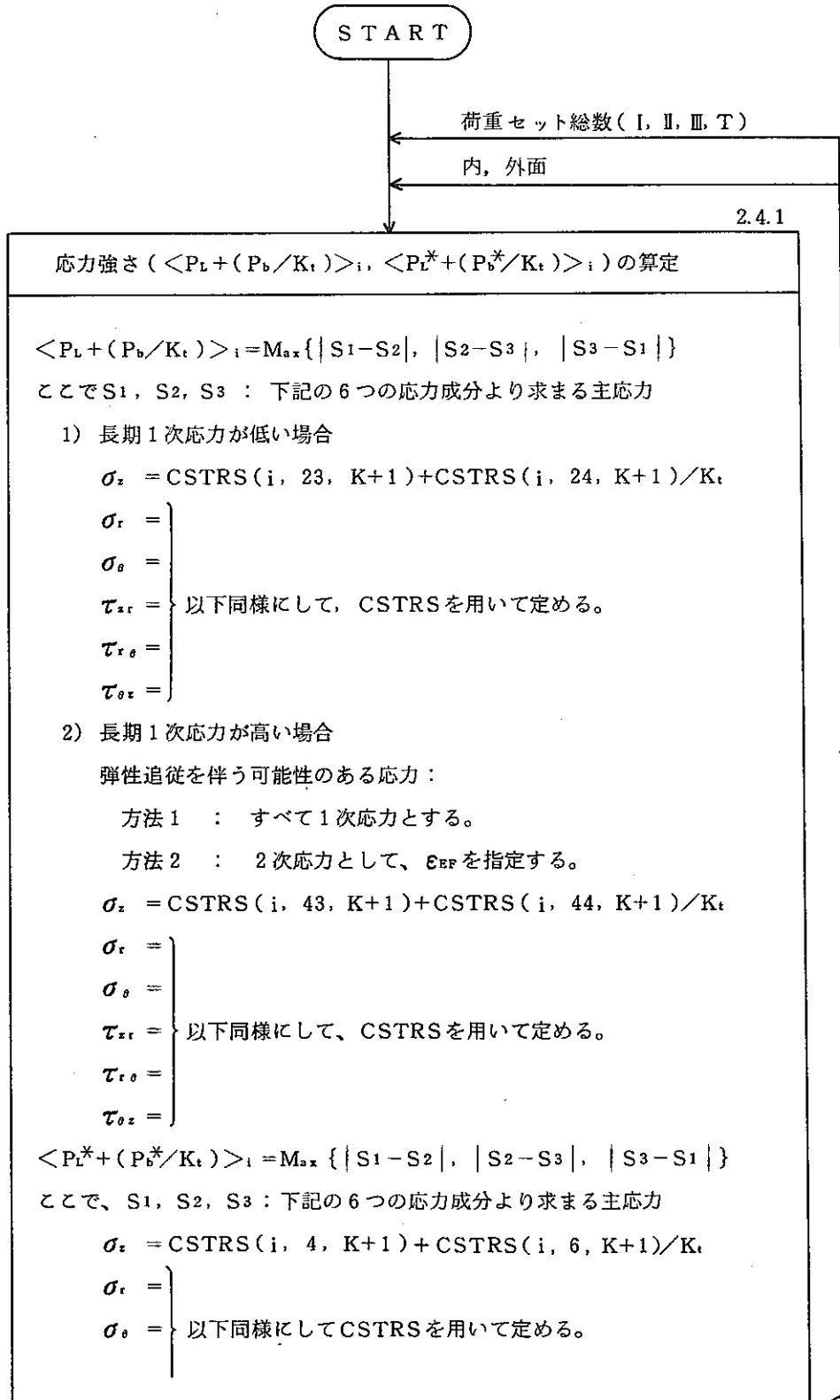
$$t = 10^4 \text{ Hr}$$

$$S_2 = \frac{1}{2} \{ S_y(T_1) + S_y(T_2) \}$$

$T_2$  : 考えている荷重セットペアの高温側の壁厚平均金属温度

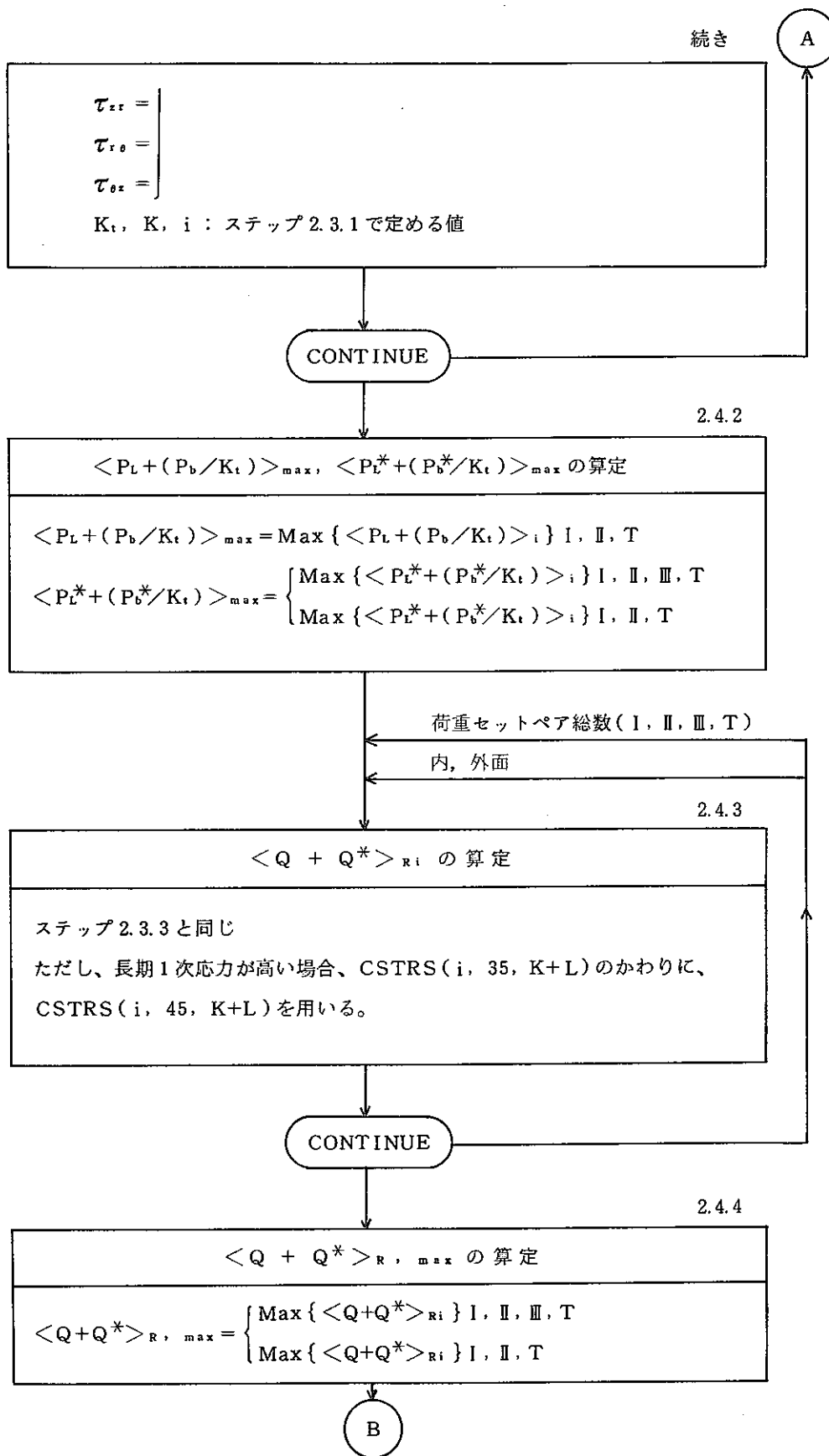


4)  $\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF}$ ,  $\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF} + \epsilon_{bEF}$  の制限



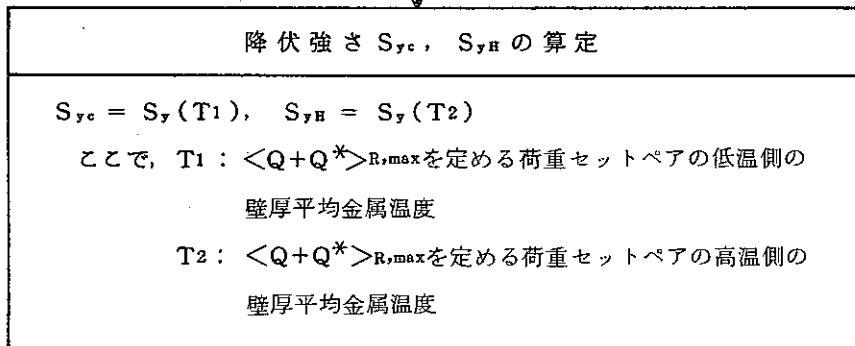
続く

A

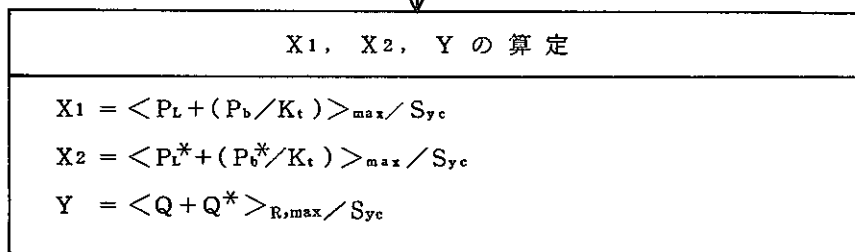


B

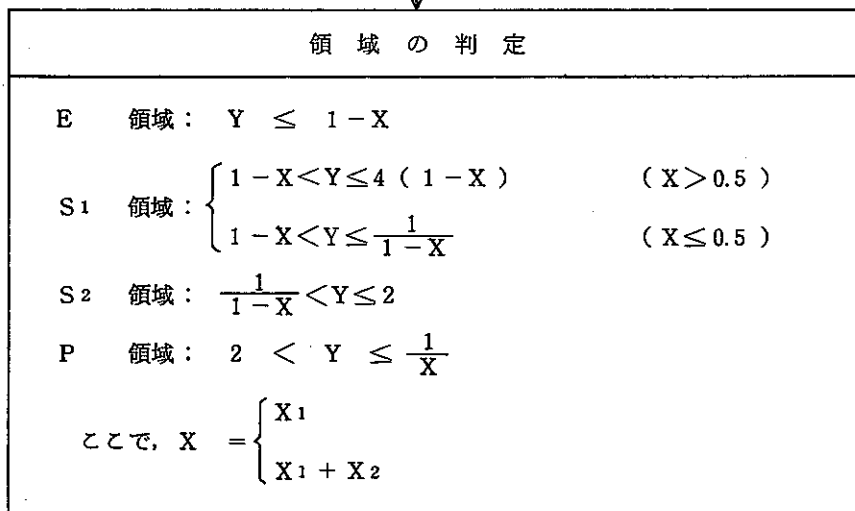
2.4.5



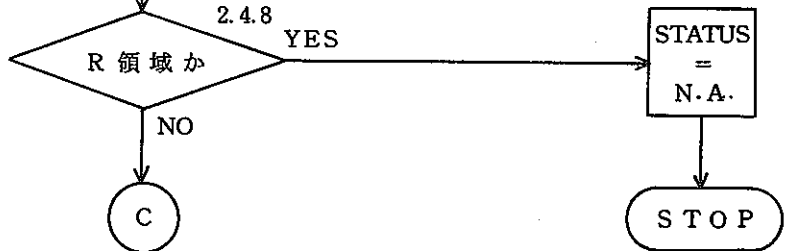
2.4.6

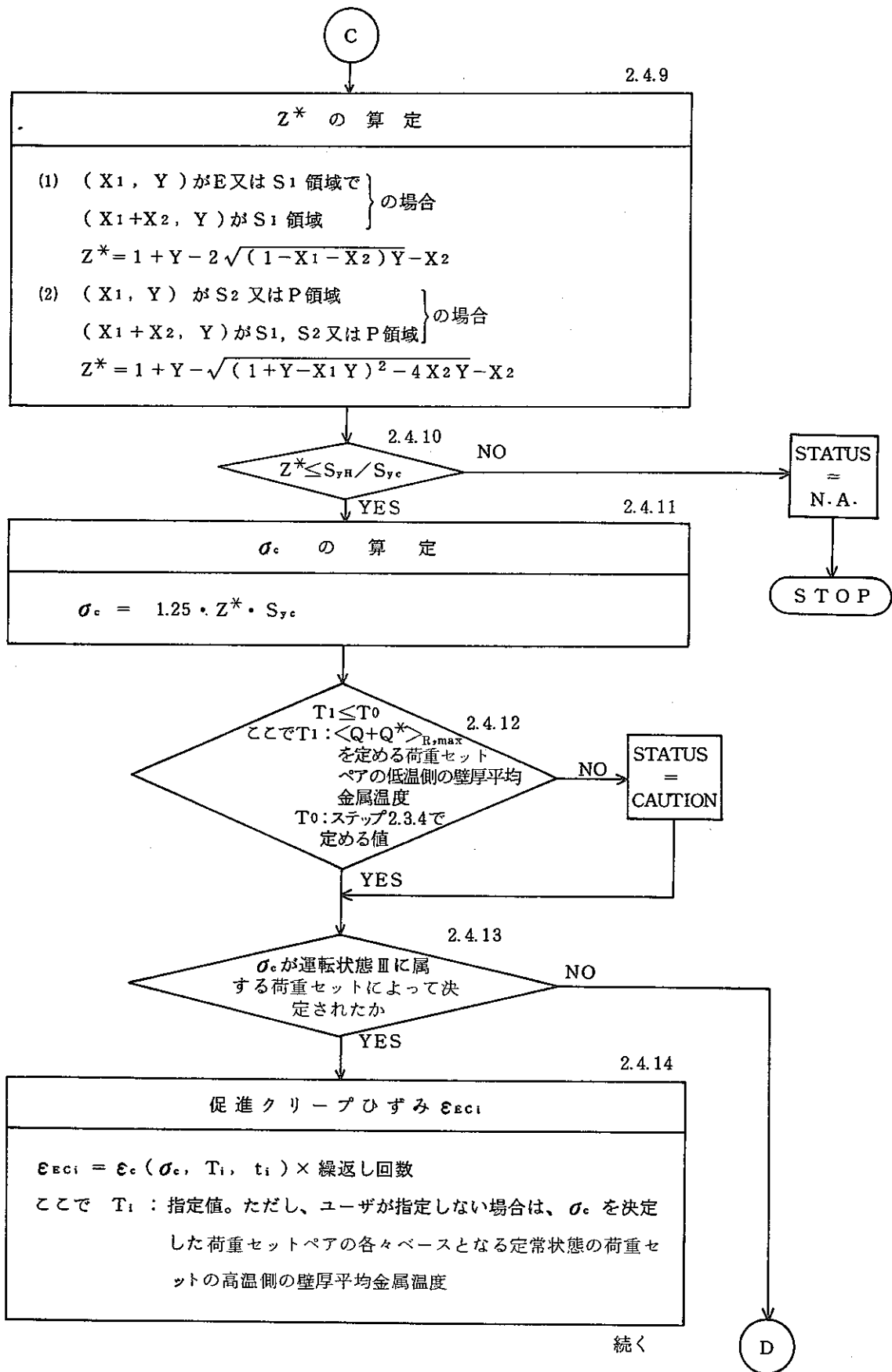


2.4.7

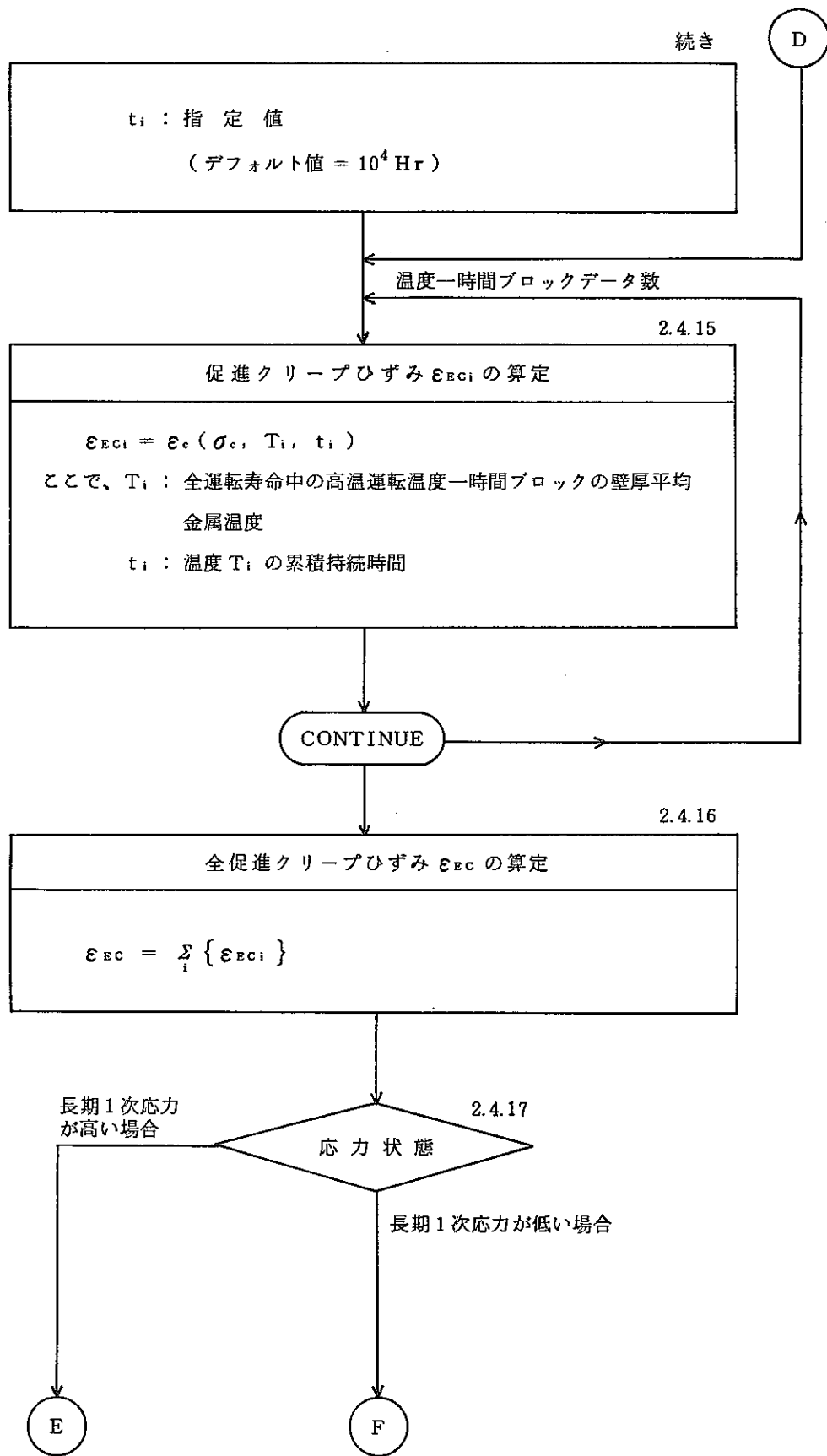


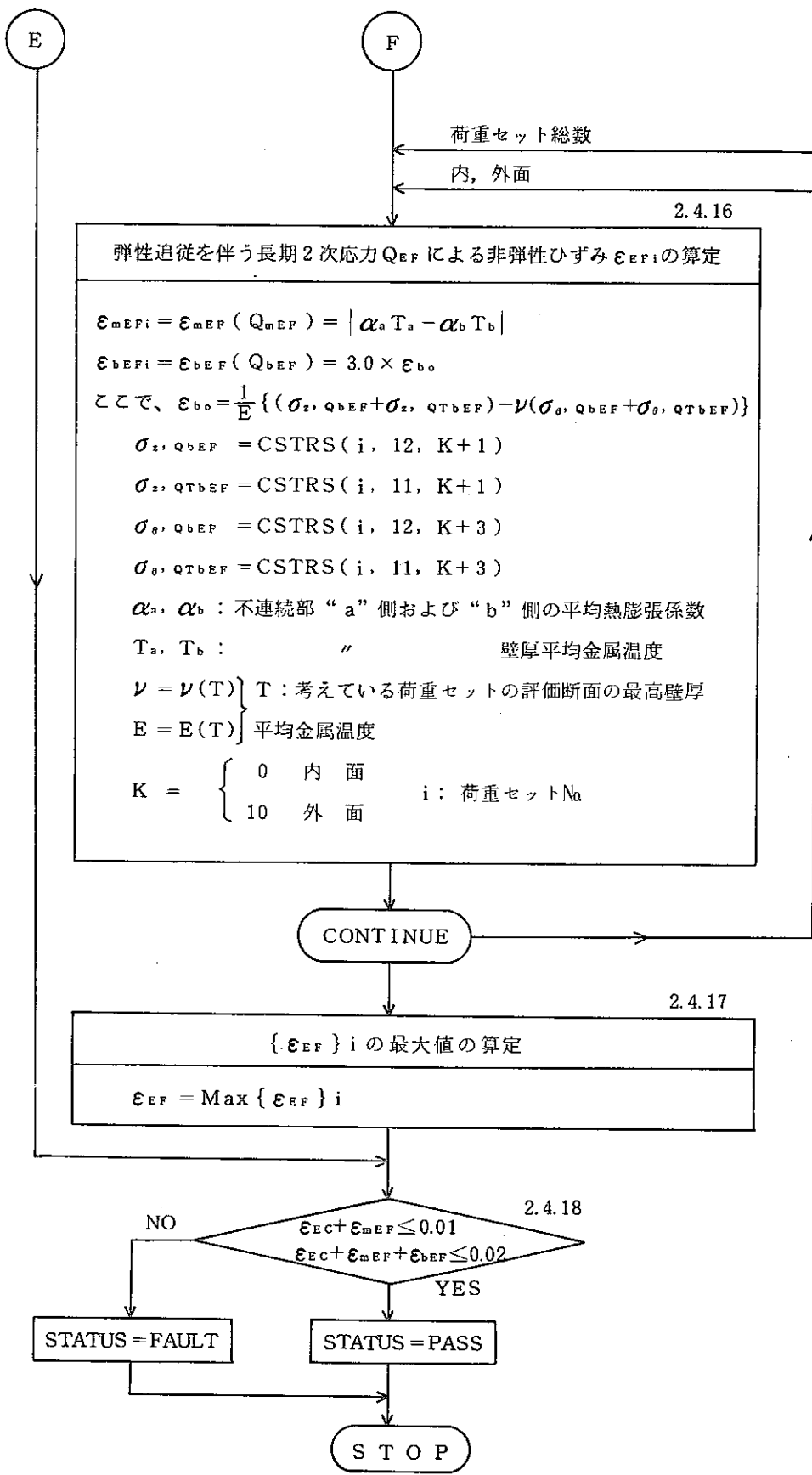
2.4.8



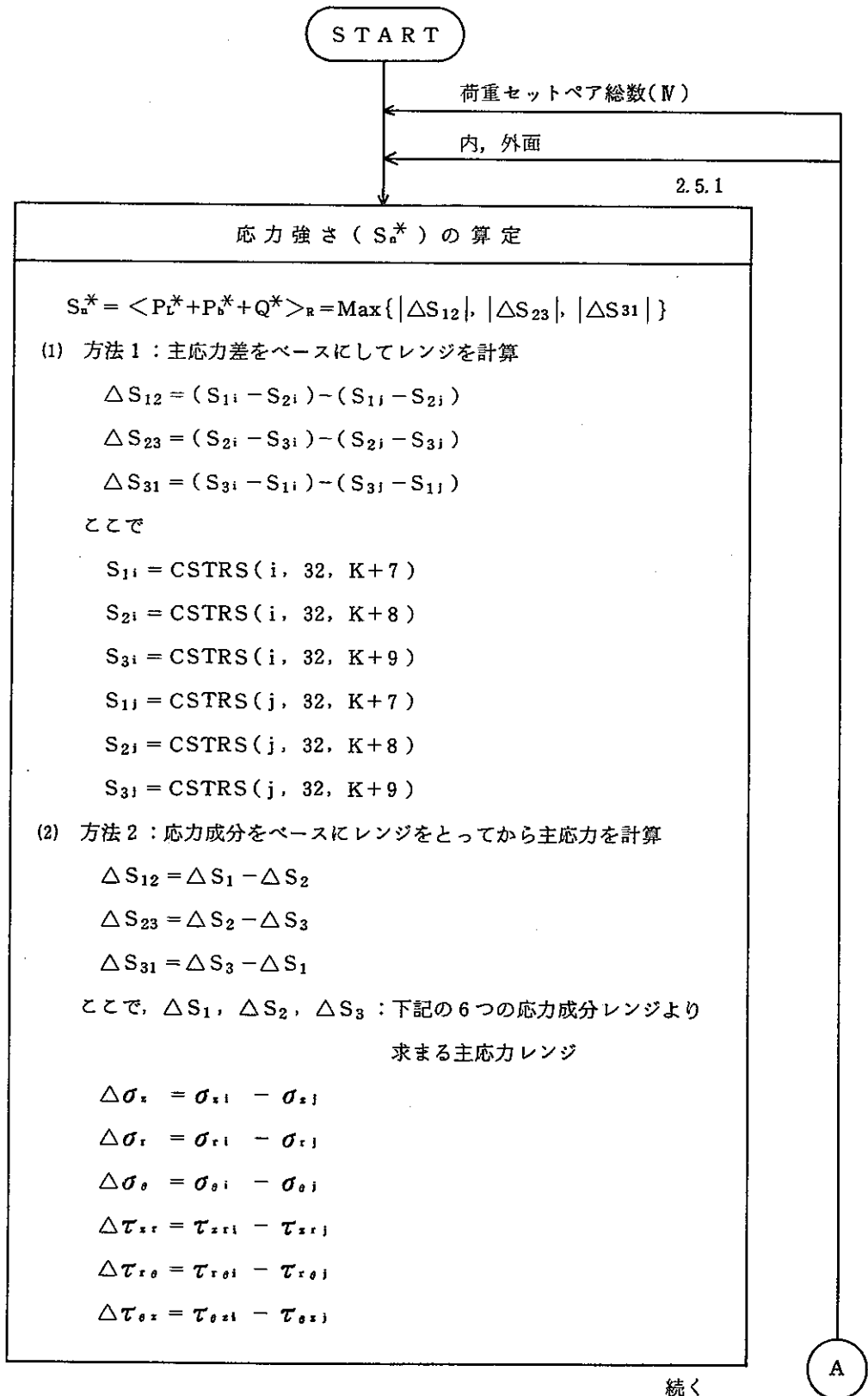




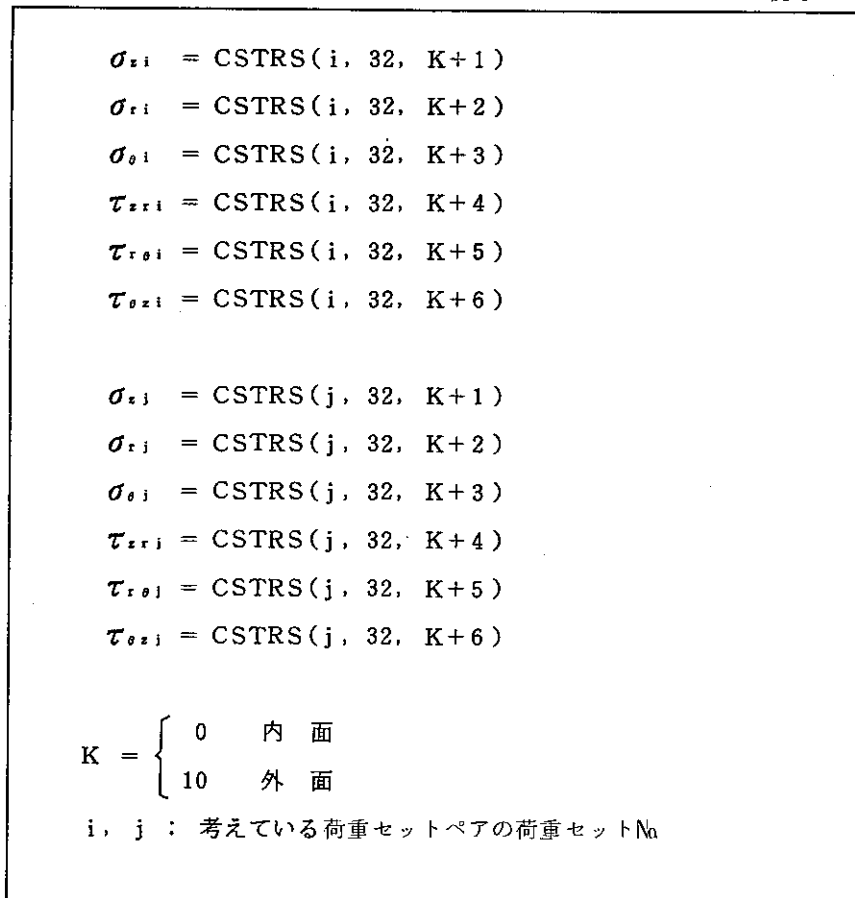




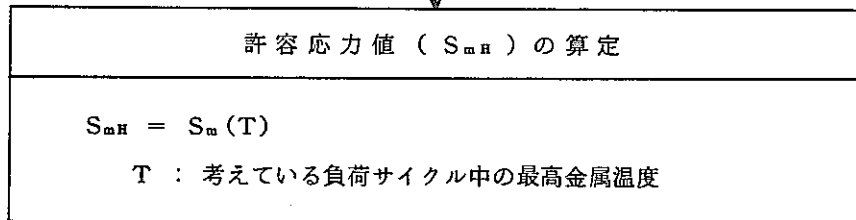
5) 運転状態Ⅳに関する制限



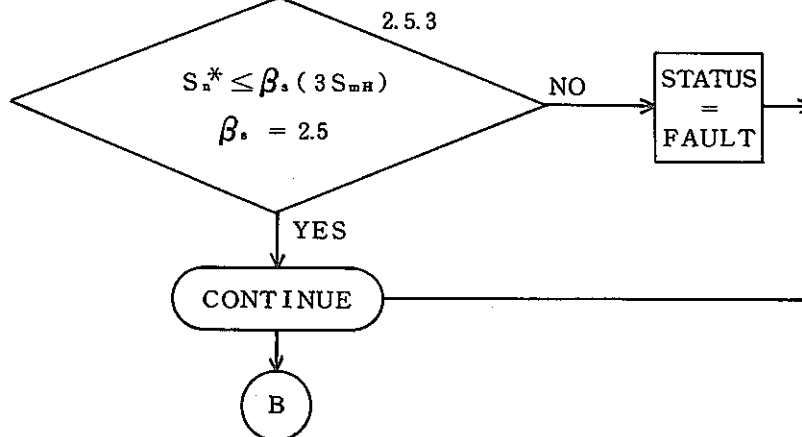
続き

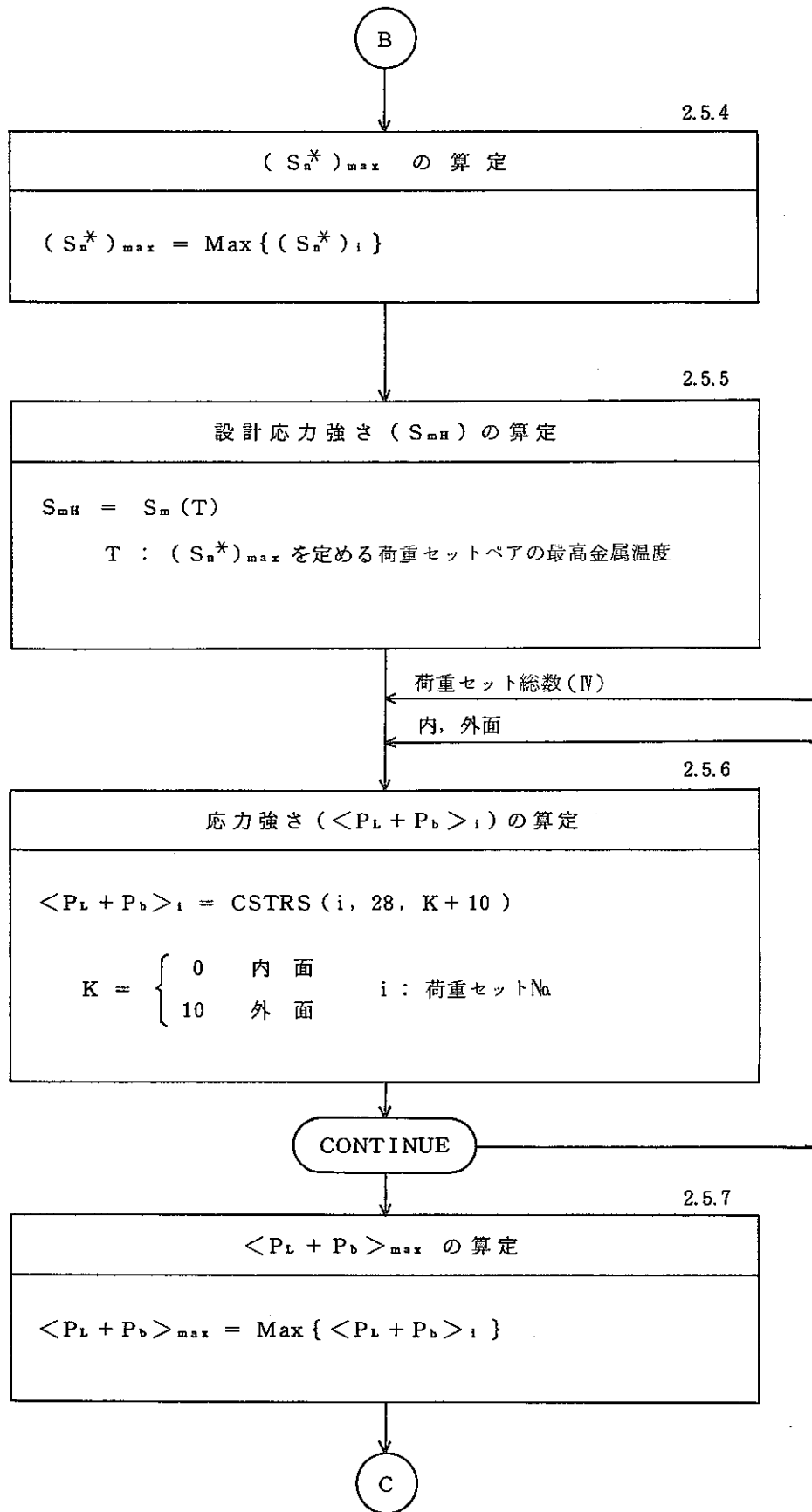


2.5.2



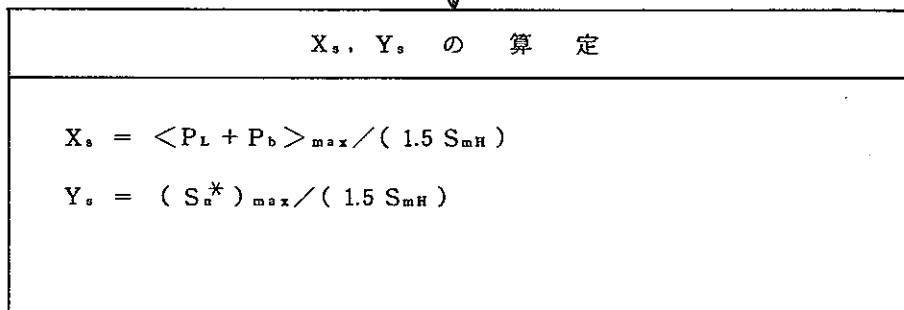
2.5.3



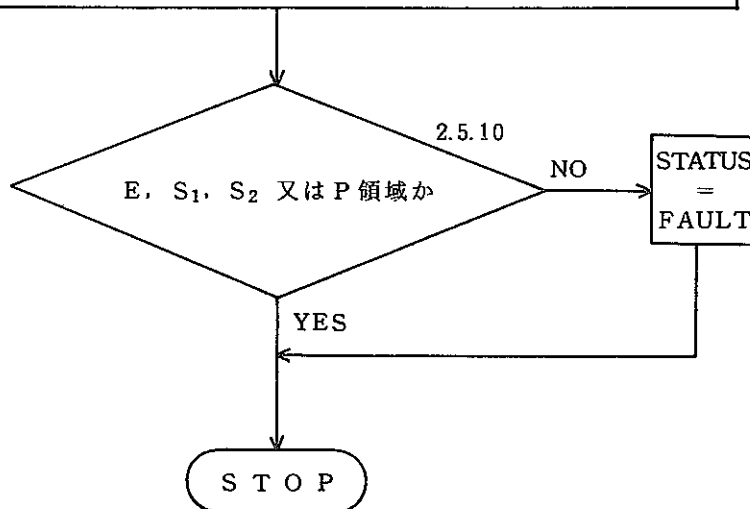
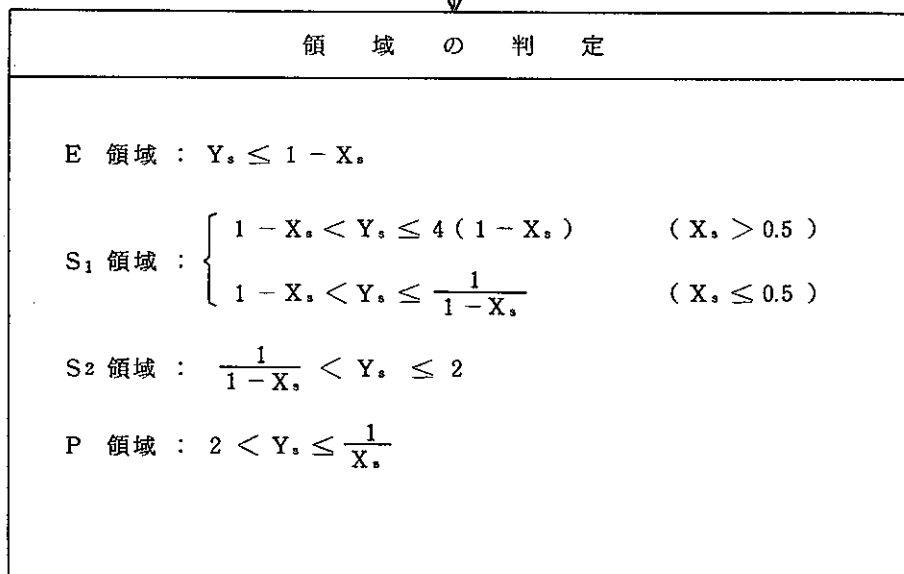


C

2.5.8

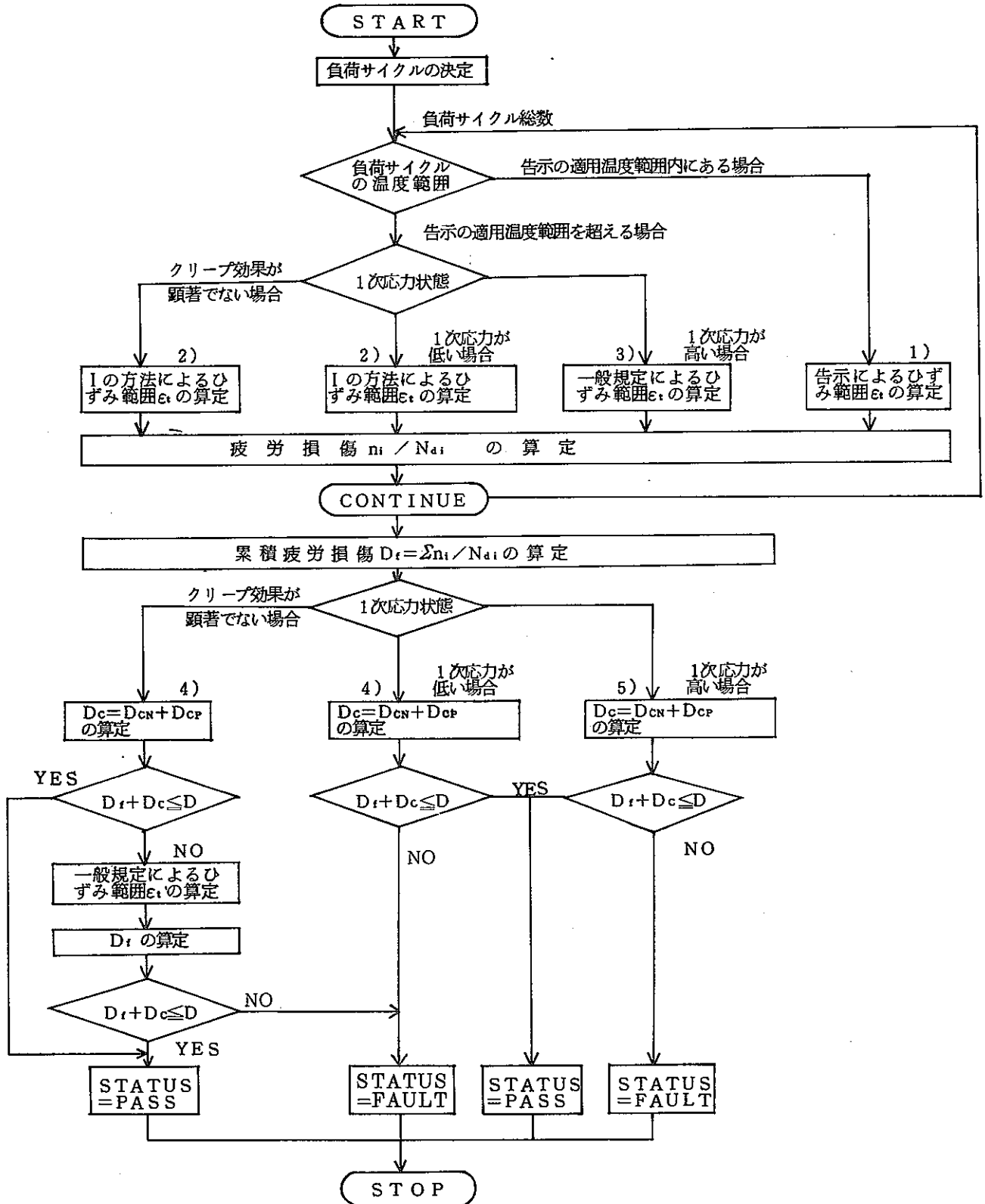


2.5.9

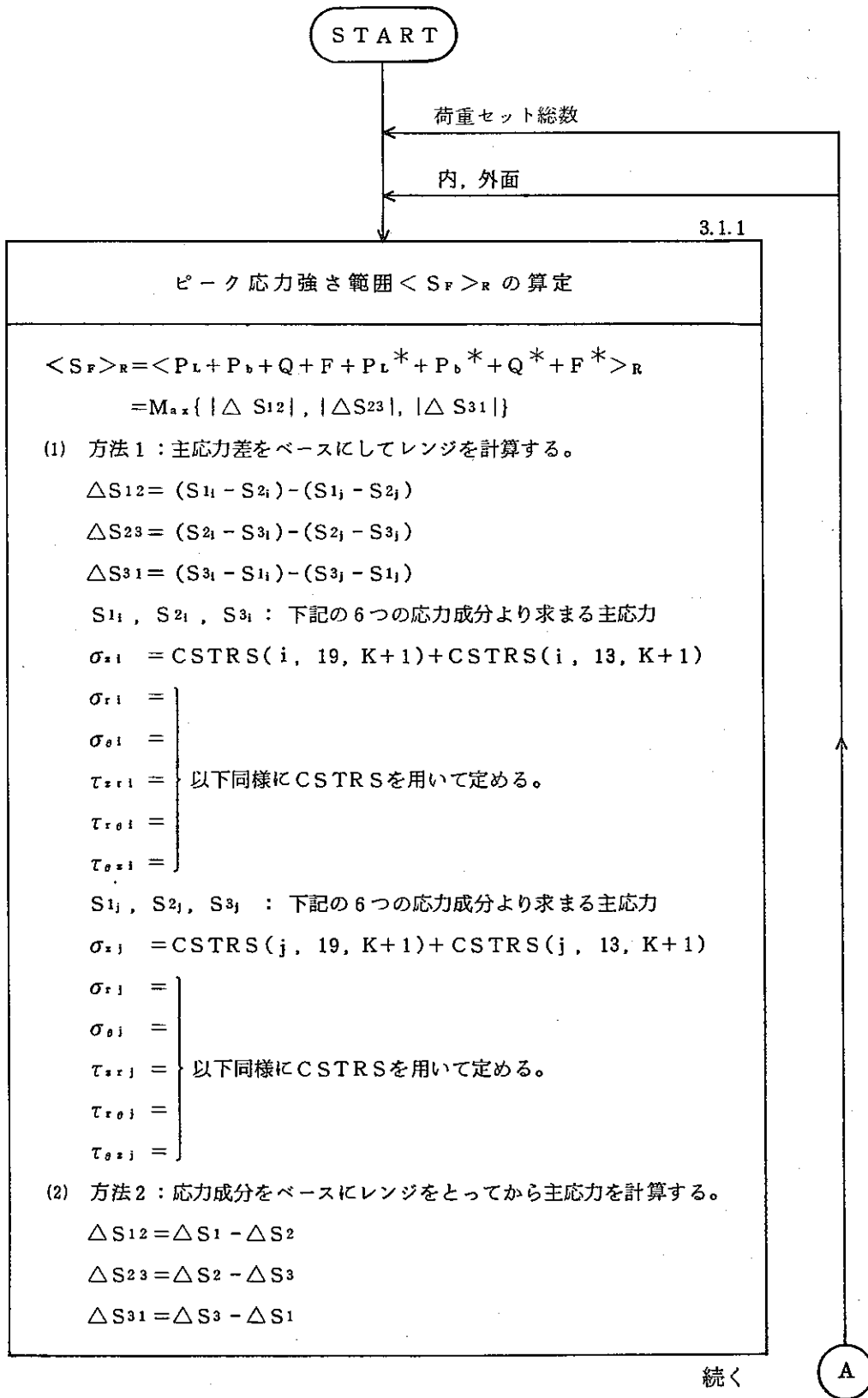


(3) クリープ疲労損傷の制限

クリープ疲労損傷の制限に対する評価フローを下図に示す。図中 1) ~ 5) の評価手順に対する評価フローを次ページ以降に示す。



1) 告示の評価手順に従ったひずみ範囲  $\epsilon_t$  の算定





続き

A

$\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3$  : 下記の6つの応力成分レンジより求まる主応力レンジ

$$\Delta \sigma_z = \sigma_{zi} - \sigma_{zj}$$

$$\Delta \sigma_r = \sigma_{ri} - \sigma_{rj}$$

$$\Delta \sigma_\theta = \sigma_{\theta i} - \sigma_{\theta j}$$

$$\Delta \tau_{rz} = \tau_{rz i} - \tau_{rz j}$$

$$\Delta \tau_{r\theta} = \tau_{r\theta i} - \tau_{r\theta j}$$

$$\Delta \tau_{\theta z} = \tau_{\theta z i} - \tau_{\theta z j}$$

ここで、各応力成分は、方法1と同じ。

$$K = \begin{cases} 0 & \text{内面} \\ 10 & \text{外面} \end{cases}$$

$i, j$  : 考えている荷重セットペアの荷重セットNo

3.1.2

ひずみ範囲  $\epsilon_{ti}$  の算定

$$\epsilon_{ti} = \langle S_F \rangle_R \times \frac{1}{E_i}$$

ここで、 $E_i = E(T)$

T : 考えている荷重サイクル中の最高金属温度

E : 縦弾性係数

CONTINUE

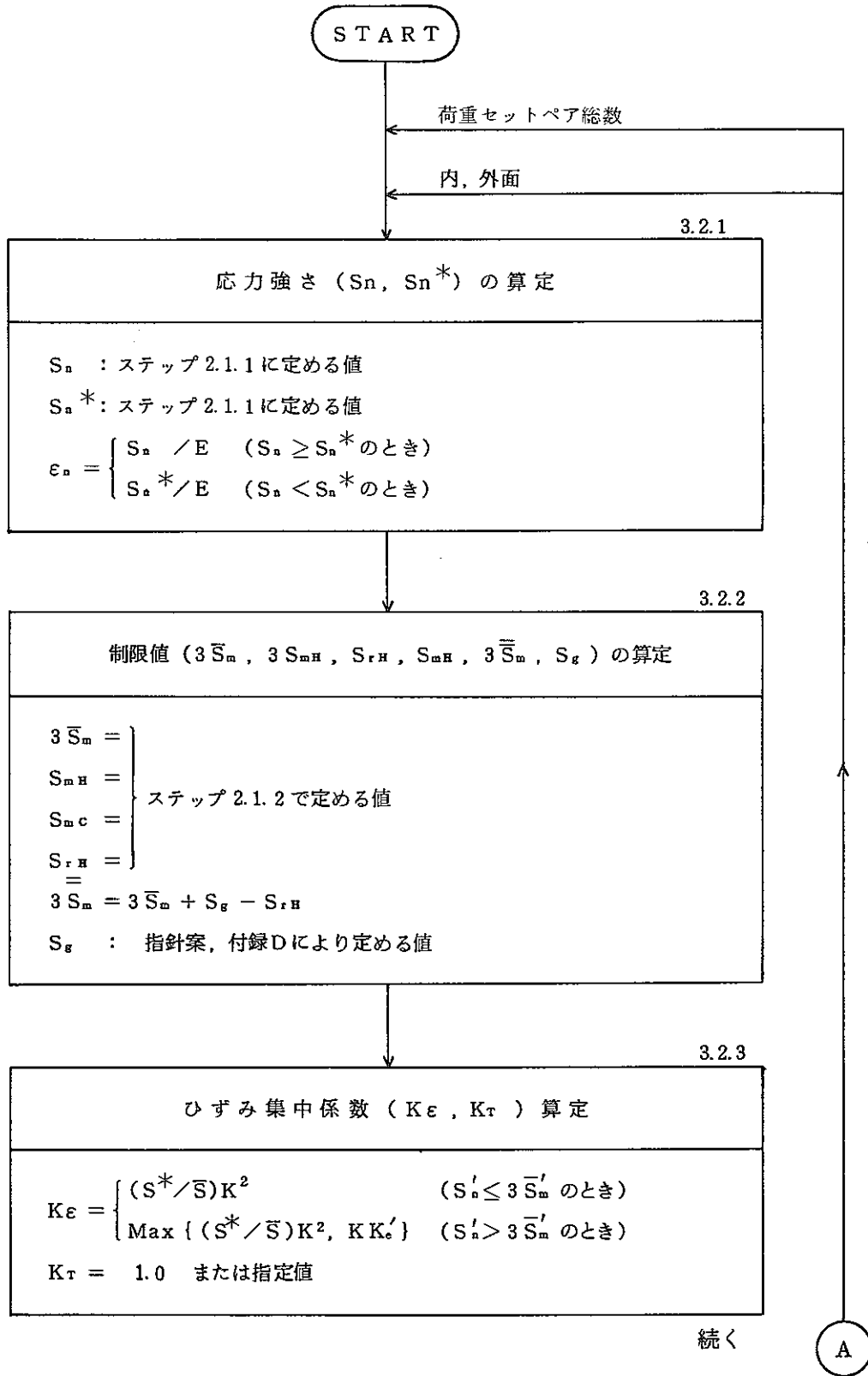
3.1.3

最大ひずみ範囲  $\epsilon_t$  の算定

$$\epsilon_t = \text{Max} \{ \epsilon_{ti} \}$$

STOP

2) 長期1次応力が低い場合の疲労損傷評価法に基づくひずみ範囲  $\epsilon_t$  の算定



続き

ここで、 $K' = 1 + (q-1) \{ 1 - (3\bar{S}_m / S_n') \}$ ,  $q = 3.0$

$$S_n^* = \begin{cases} E \epsilon_n & (\epsilon_n \leq S_{rH}' / E \text{ のとき}) \\ S (\epsilon_n - S_{rH}' / E) + S_{rH}' & (\epsilon_n > S_{rH}' / E \text{ のとき}) \end{cases}$$

$$S_n' = \begin{cases} KE \epsilon_n & (K \epsilon_n \leq S_{rH}' / E \text{ のとき}) \\ S (K \epsilon_n - S_{rH}' / E) + S_{rH}' & (K \epsilon_n > S_{rH}' / E \text{ のとき}) \end{cases}$$

$$S_n' = \begin{cases} S_n & (S_n \geq S_n^* \text{ のとき}) \\ S_n^* & (S_n < S_n^* \text{ のとき}) \end{cases}$$

$$3\bar{S}_n' = \begin{cases} 3\bar{S}_n & (S_n \geq S_n^* \text{ のとき}) \\ 3S_{mH} & (S_n < S_n^* \text{ のとき}) \end{cases}$$

$$S_{rH}' = \begin{cases} S_{rH} & (S_n \geq S_n^* \text{ のとき}) \\ 1.5 S_{mH} & (S_n < S_n^* \text{ のとき}) \end{cases}$$

$E = E(T)$ ,  $T$ : 考えているひずみサイクル中の最高金属温度

$K =$  相当弾性応力集中係数, ユーザが指定しない場合は次式により計算する。

$$K = \max \{ K_i \} \geq 1.0$$

(1) 方法1: 2次応力に熱応力は含めない。

$$K_i = \frac{\langle P_L + P_b + Q + F \rangle_i}{\langle P_L + P_b + Q \rangle_i} = \frac{CSTRS(i, 20, \kappa + 10)}{CSTRS(i, 22, \kappa + 10)}$$

(2) 方法2: 2次応力に熱応力を含める。

$$K_i = \frac{\langle P_L + P_b + Q + F \rangle_i}{\langle P_L + P_b + Q \rangle_i} = \frac{CSTRS(i, 20, \kappa + 10) + CSTRS(i, 21, \kappa + 10)}{CSTRS(i, 19, \kappa + 10)}$$

$$\left( \kappa = \begin{cases} 0 & \text{内面} \\ 10 & \text{外面} \end{cases}, i: \text{荷重セットNo} \right)$$

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 $O_{H_r}$ の等時応力-ひずみ曲線により定める応力

A

B

C

相当熱ひずみ範囲 $\epsilon_F$ の算定

$$\epsilon_F = \langle S_F \rangle_R \times \frac{1}{E} \times \frac{1-\nu}{1-\bar{\nu}}$$

ここで

$$\langle S_F \rangle_R = \text{Max} \{ |\Delta S_{12}|, |\Delta S_{23}|, |\Delta S_{31}| \}$$

$$\Delta S_{12} = (S_{11} - S_{21}) - (S_{1j} - S_{2j})$$

$$\Delta S_{23} = (S_{21} - S_{31}) - (S_{2j} - S_{3j})$$

$$\Delta S_{31} = (S_{31} - S_{11}) - (S_{3j} - S_{1j})$$

$$S_{1i} = \text{CSTRS}(i, 14, K+7)$$

$$S_{2i} = \text{CSTRS}(i, 14, K+8)$$

$$S_{3i} = \text{CSTRS}(i, 14, K+9)$$

$$S_{1j} = \text{CSTRS}(j, 14, K+7)$$

$$S_{2j} = \text{CSTRS}(j, 14, K+8)$$

$$S_{3j} = \text{CSTRS}(j, 14, K+9)$$

$$E = E(T)$$

$$E' = \frac{1}{2} \{ E(T1) + E(T2) \}$$

$$\nu = \frac{1}{2} \{ \nu(T1) + \nu(T2) \}$$

$$\bar{\nu} = 0.5 - (0.5 - \nu)(3 \bar{S}_m / (E' \epsilon_{ts}))$$

(ただし,  $\bar{\nu} \geq \nu$ )

$$\epsilon_{ts} = \epsilon_t(N, T)$$

T1: 時点1の金属温度

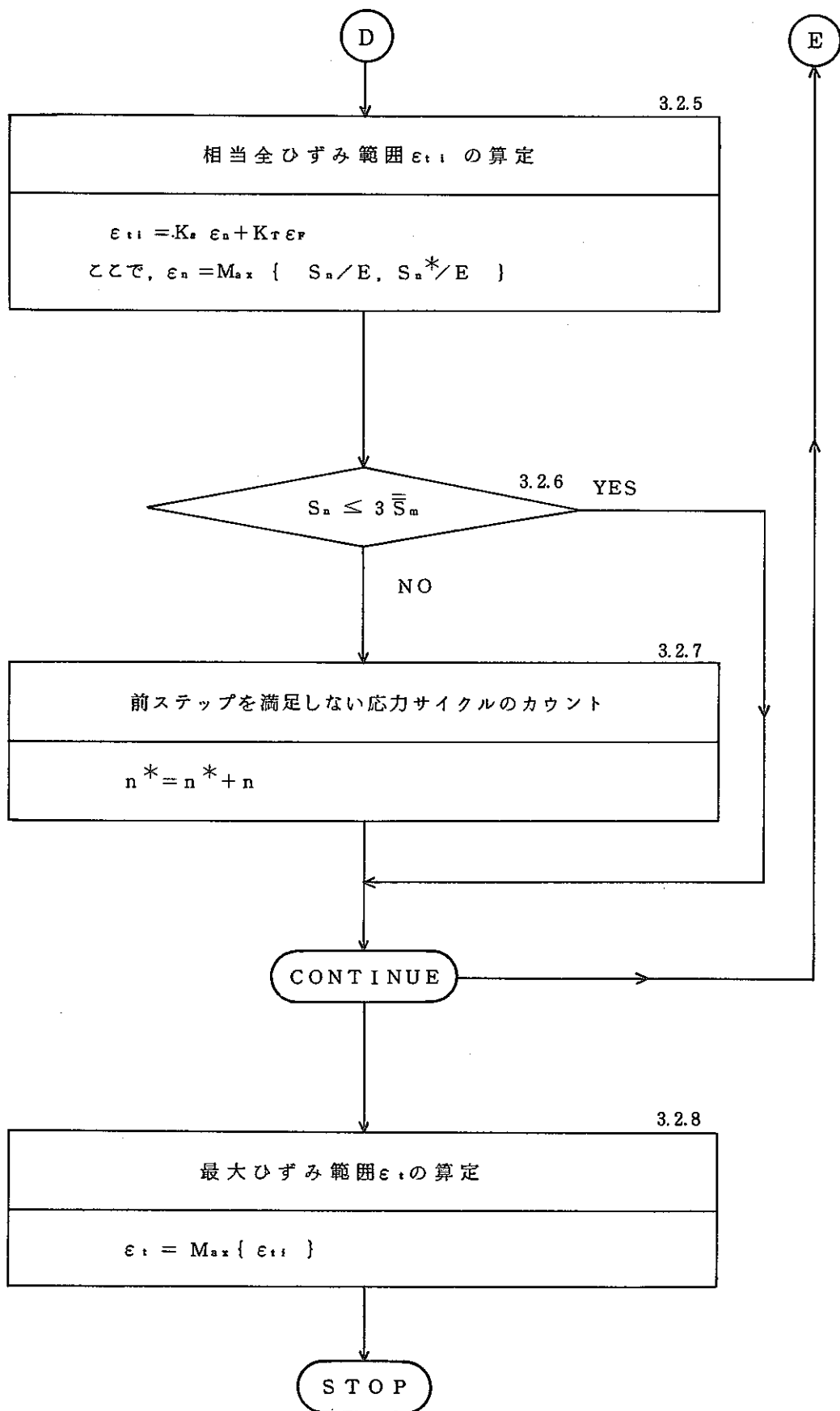
T2: 時点2の金属温度

T: 考えているひずみサイクル中の最高金属温度

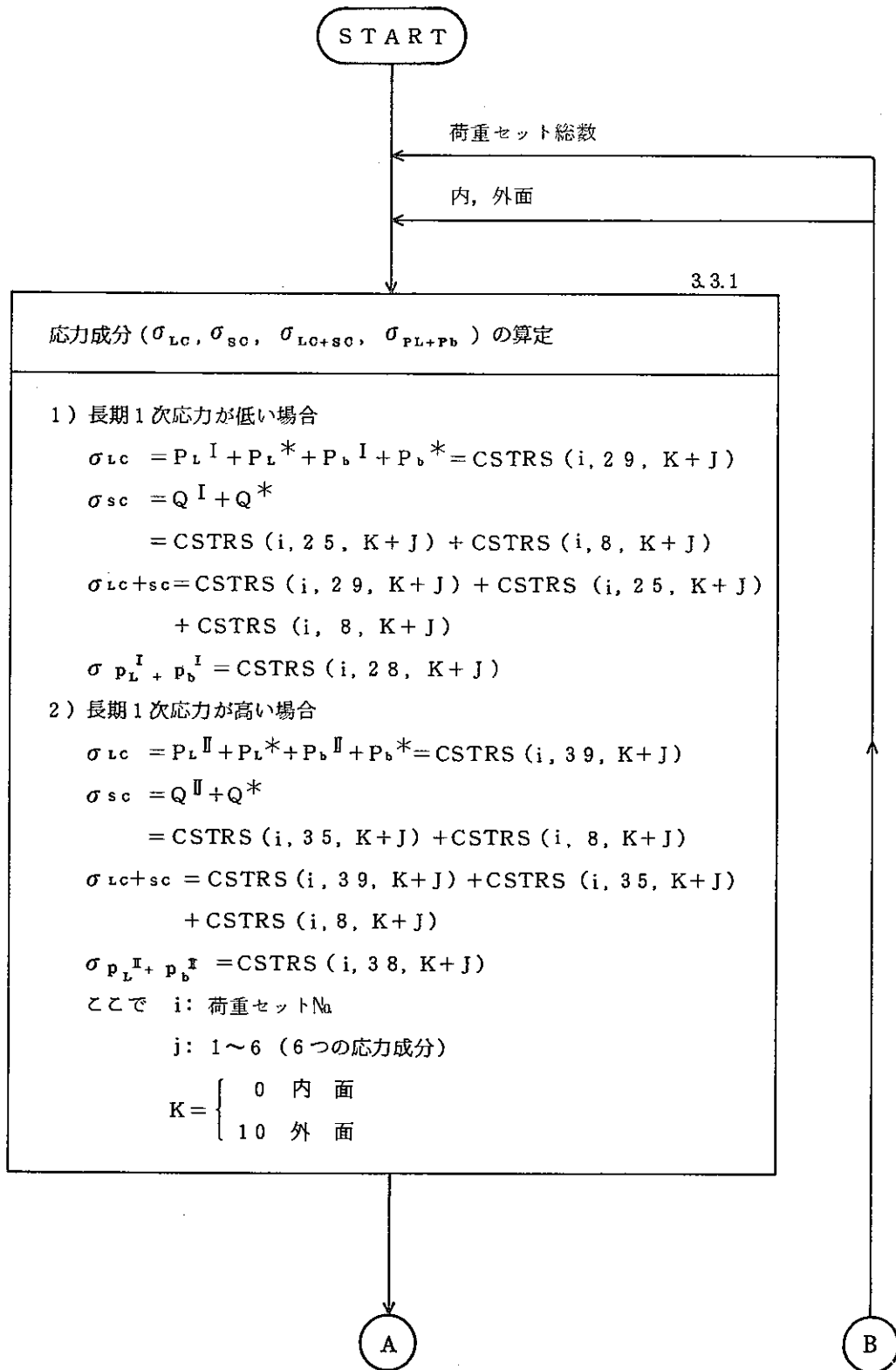
N: 考えているひずみサイクル中の繰返し回数

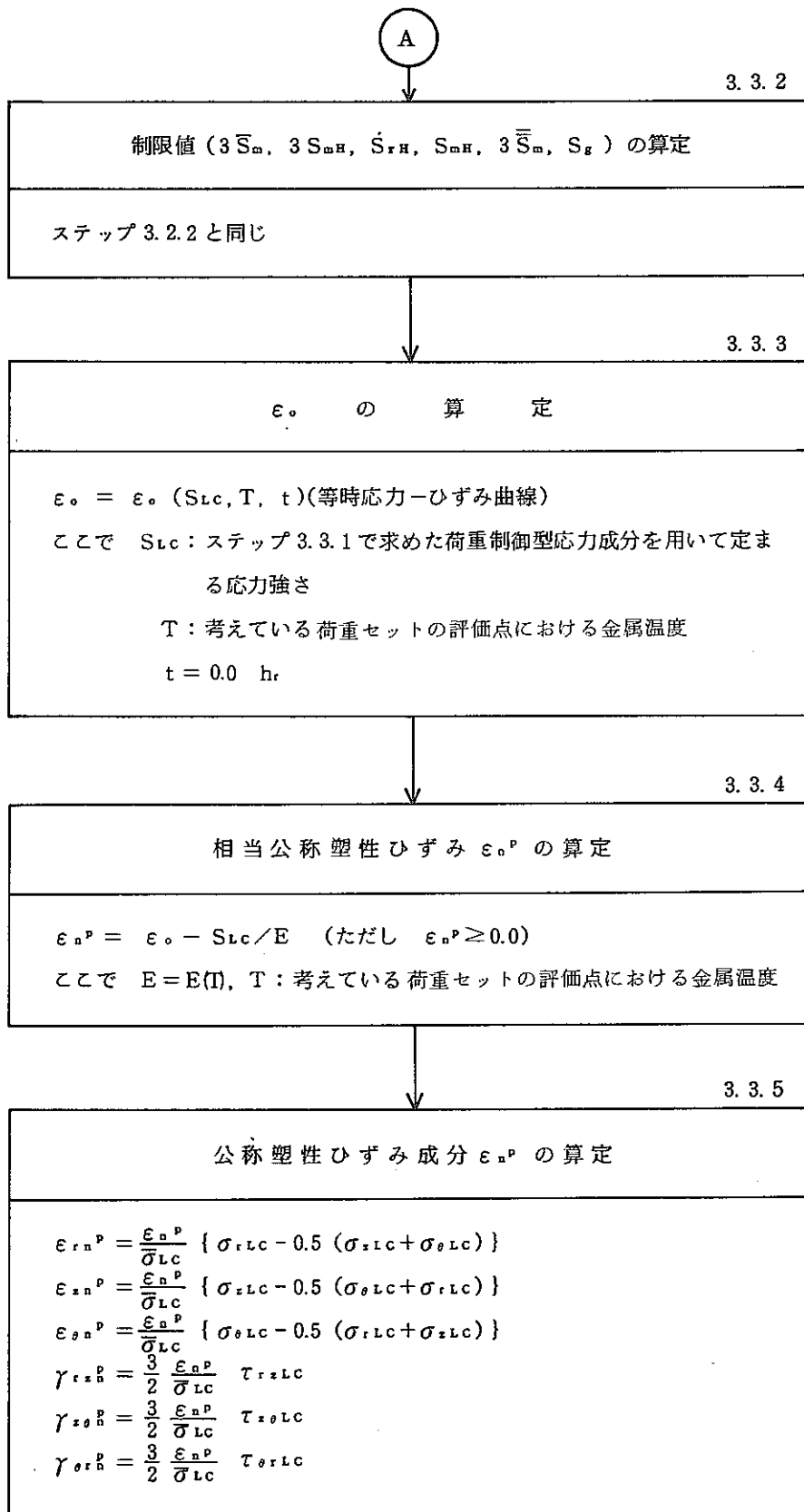
$$K = \begin{cases} 0 & \text{内面} \\ 10 & \text{外面} \end{cases}$$

i, j: 考えている荷重セットペアの荷重セットNo



3) 一般規定に基づくひずみ範囲  $\epsilon_t$  の算定





続く

続き

$$\text{ここで } \bar{\sigma}_{LC} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \}^{1/2}$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rLC} &= \\ \sigma_{zLC} &= \\ \sigma_{\theta LC} &= \\ \tau_{rzLC} &= \\ \tau_{z\theta LC} &= \\ \tau_{\theta rLC} &= \end{aligned} \right\} \text{ステップ 3.3.1 で求めた荷重制御型応力成分}$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  : 上記の 6 応力成分を用いて定まる主応力  
 $\epsilon_n^p$  : ステップ 3.3.4 で定めた相当公称塑性ひずみ



3.3.6

公称弾性ひずみ成分  $\epsilon_n^e$  の算定

$$\epsilon_{rn}^e = \frac{1}{E} \{ \sigma_{rLC+SC} - \nu(\sigma_{zLC+SC} + \sigma_{\theta LC+SC}) \}$$

$$\epsilon_{zn}^e = \frac{1}{E} \{ \sigma_{zLC+SC} - \nu(\sigma_{rLC+SC} + \sigma_{\theta LC+SC}) \}$$

$$\epsilon_{\theta n}^e = \frac{1}{E} \{ \sigma_{\theta LC+SC} - \nu(\sigma_{rLC+SC} + \sigma_{zLC+SC}) \}$$

$$\gamma_{rzn}^e = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{rzLC+SC}$$

$$\gamma_{z\theta n}^e = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{z\theta LC+SC}$$

$$\gamma_{\theta rn}^e = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{\theta rLC+SC}$$

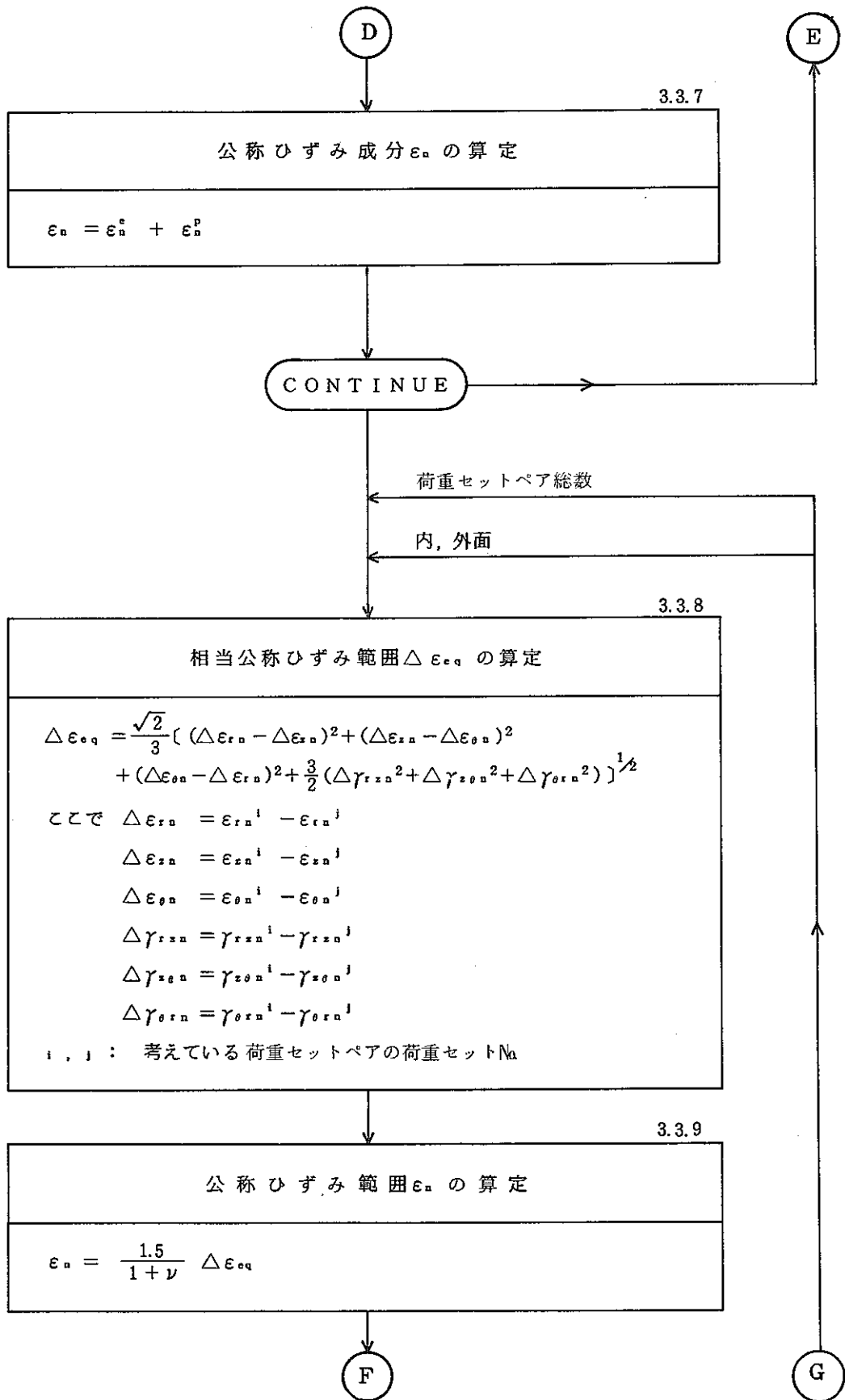
ここで  $\left. \begin{aligned} \sigma_{rLC+SC} &= \\ \sigma_{zLC+SC} &= \\ \sigma_{\theta LC+SC} &= \\ \tau_{rzLC+SC} &= \\ \tau_{z\theta LC+SC} &= \\ \tau_{\theta rLC+SC} &= \end{aligned} \right\} \text{ステップ 3.3.1 で求めた LC+SC に対応する}$ 

応力成分

$E = E(T)$  } T : 考えている荷重セットの評価点における  
 $\nu = \nu(T)$  } 金属温度







F

3.3.10

相当クリープひずみ範囲 $\epsilon_c$ の算定

$$\epsilon_c = \epsilon_c (S_{Lc}, T, t_1) - \epsilon_c (S_{Lc}, T, t_0)$$

ここで  $S_{Lc}$  : 考えている荷重セットペアを構成する荷重セットのうち  $\epsilon_c$  の大きい値を与える荷重セットに対する長期荷重制御型応力強さ。

$T$  :  $S_{Lc}$  を決める荷重セットの (評価点) における最高金属温度

$t_1$  :  $S_{Lc}$  を決める荷重セットの 1 サイクル当りの経過時間  
 $t_0 = 0.0 \text{ Hr.}$

3.3.11

公称ピーク熱ひずみ $\epsilon_F$ の算定

$$\epsilon_F = \langle S_F \rangle_R \times \frac{1}{E} \times \frac{1-\nu}{1-\bar{\nu}}$$

ここで

$$\langle S_F \rangle_R = M_{\sigma} \times \{ |\Delta S_{12}|, |\Delta S_{23}|, |\Delta S_{31}| \}$$

$$\Delta S_{12} = (S_{1i} - S_{2i}) - (S_{1j} - S_{2j})$$

$$\Delta S_{23} = (S_{2i} - S_{3i}) - (S_{2j} - S_{3j})$$

$$\Delta S_{31} = (S_{3i} - S_{1i}) - (S_{3j} - S_{1j})$$

$$S_{1i} = \text{CSTRS}(i, 14, K+7)$$

$$S_{2i} = \text{CSTRS}(i, 14, K+8)$$

$$S_{3i} = \text{CSTRS}(i, 14, K+9)$$

$$S_{1j} = \text{CSTRS}(j, 14, K+7)$$

$$S_{2j} = \text{CSTRS}(j, 14, K+8)$$

$$S_{3j} = \text{CSTRS}(j, 14, K+9)$$

$$E = E(T)$$

$$E' = \frac{1}{2} \{ E(T_1) + E(T_2) \}$$

$$\nu = \frac{1}{2} \{ \nu(T_1) + \nu(T_2) \}$$

$$\bar{\nu} = 0.5 - (0.5 - \nu) (3\bar{S}_m / (E' \epsilon_{t,a}))$$

(ただし  $\bar{\nu} \geq \nu$ )

$$\epsilon_{t,a} = \epsilon_t(N, T)$$

$T_1$  : 時点1の金属温度

$T_2$  : 時点2の金属温度

$T$  : 考えているひずみサイクル中の最高金属温度

$N$  : 考えているひずみサイクル中の繰返し回数

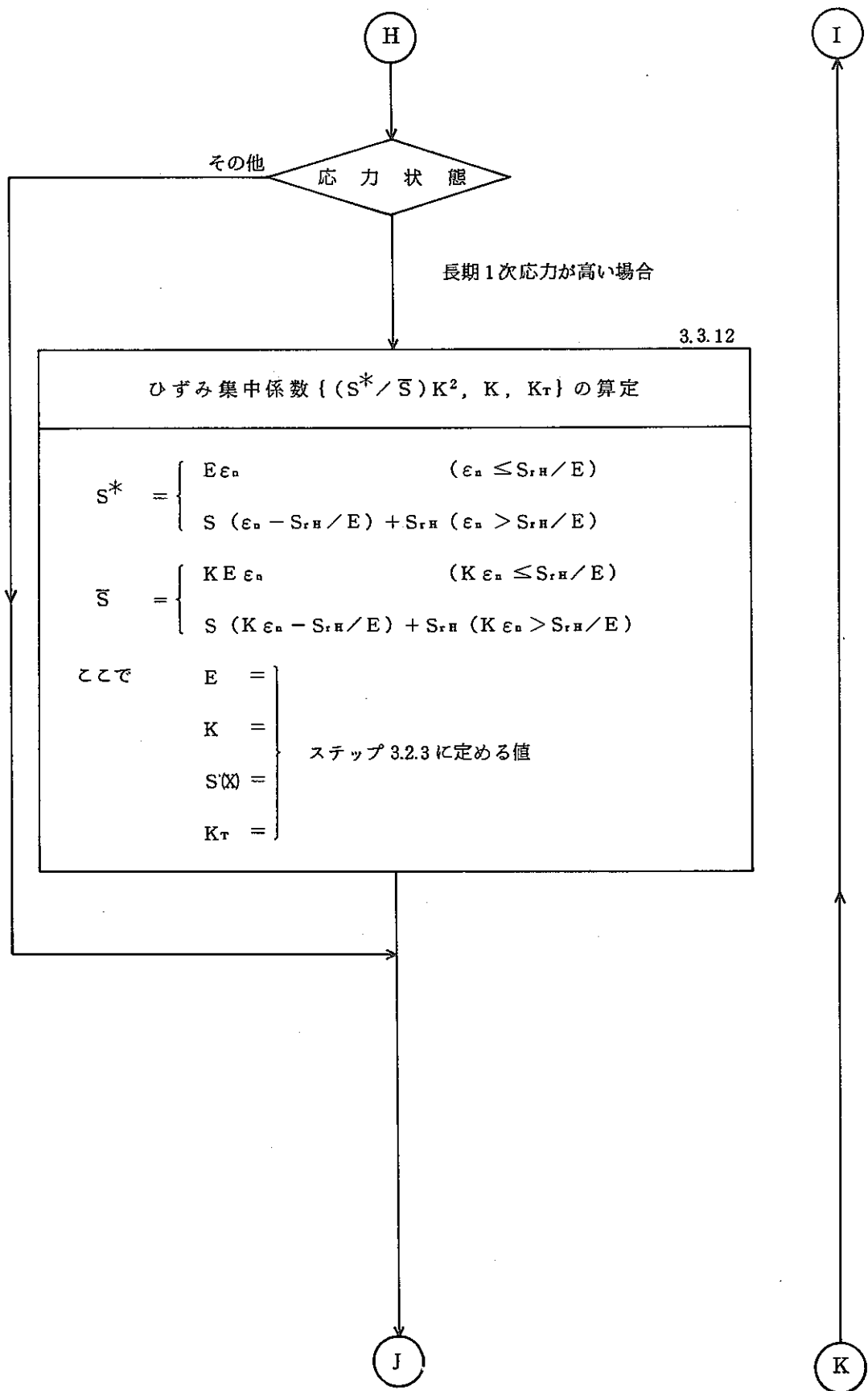
$$K = \begin{cases} 0 & \text{内面} \\ 10 & \text{外面} \end{cases}$$

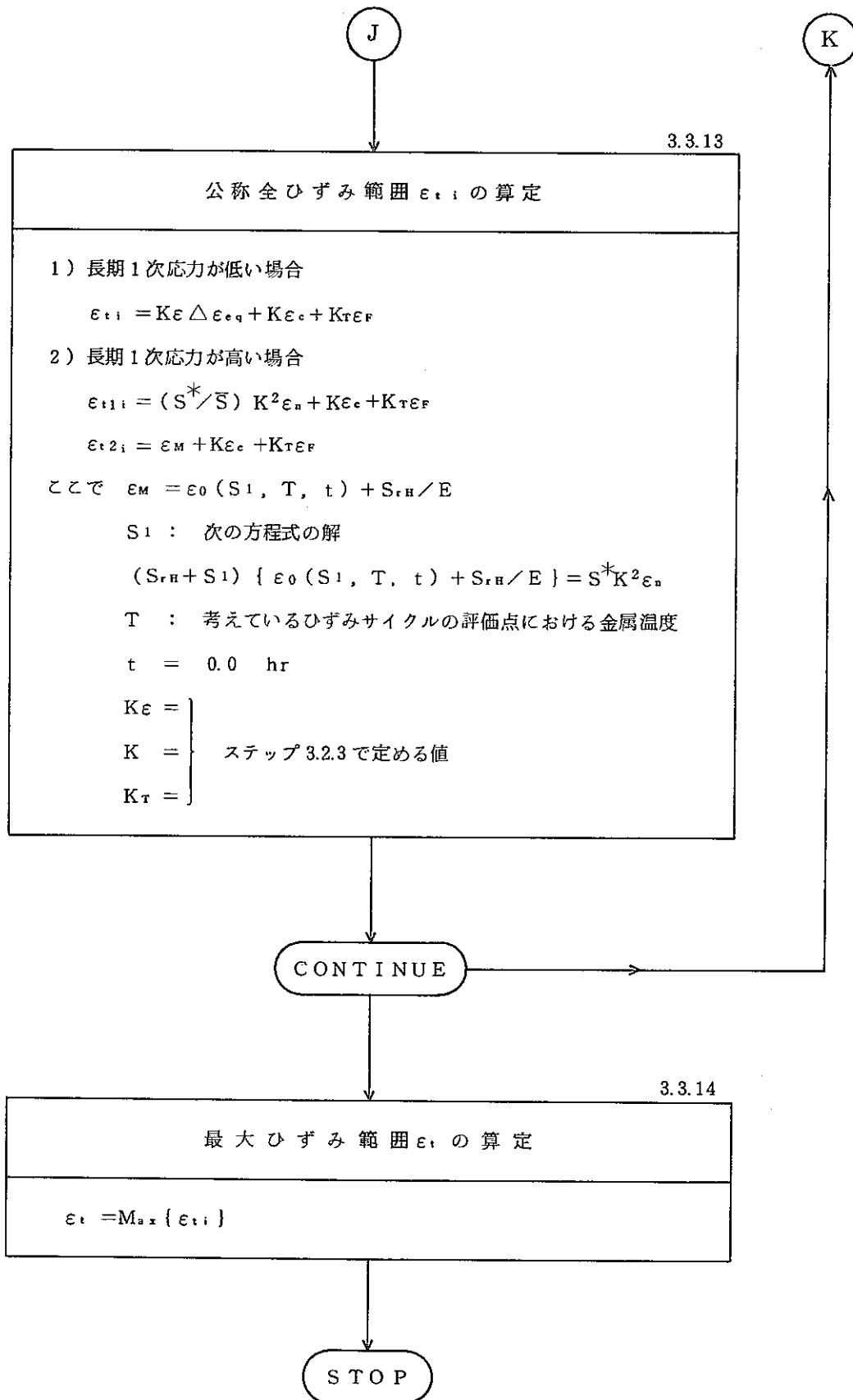
$i, j$  : 考えている荷重セットペアの荷重セットNo

H

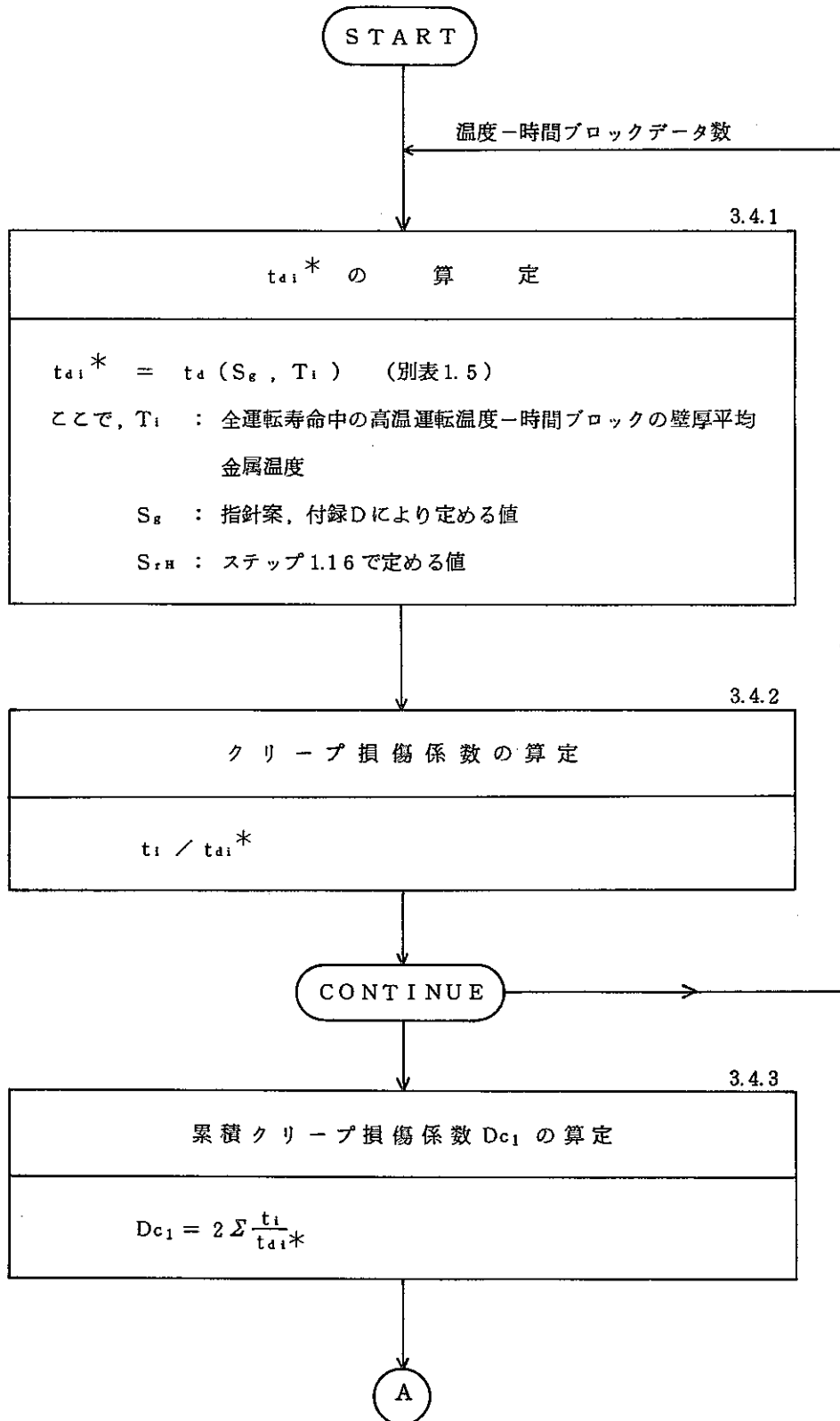
G

I





4) 長期1次応力が低い場合およびクリープ効果が顕著でない場合の累積クリープ損傷係数  $D_c$  の算定



A

3.4.4

$n^*$  の 算 定

$n^*$  : ステップ 3.27 で定める値  
( 次の条件を満足しない応力サイクルの回数 )  
 $S_n \leq 3 \bar{S}_m, 3 \bar{S}_m = 3 \bar{S}_m + S_g - S_{ra}$

3.4.5

累積クリープ損傷係数  $D_{c2}$  の算定

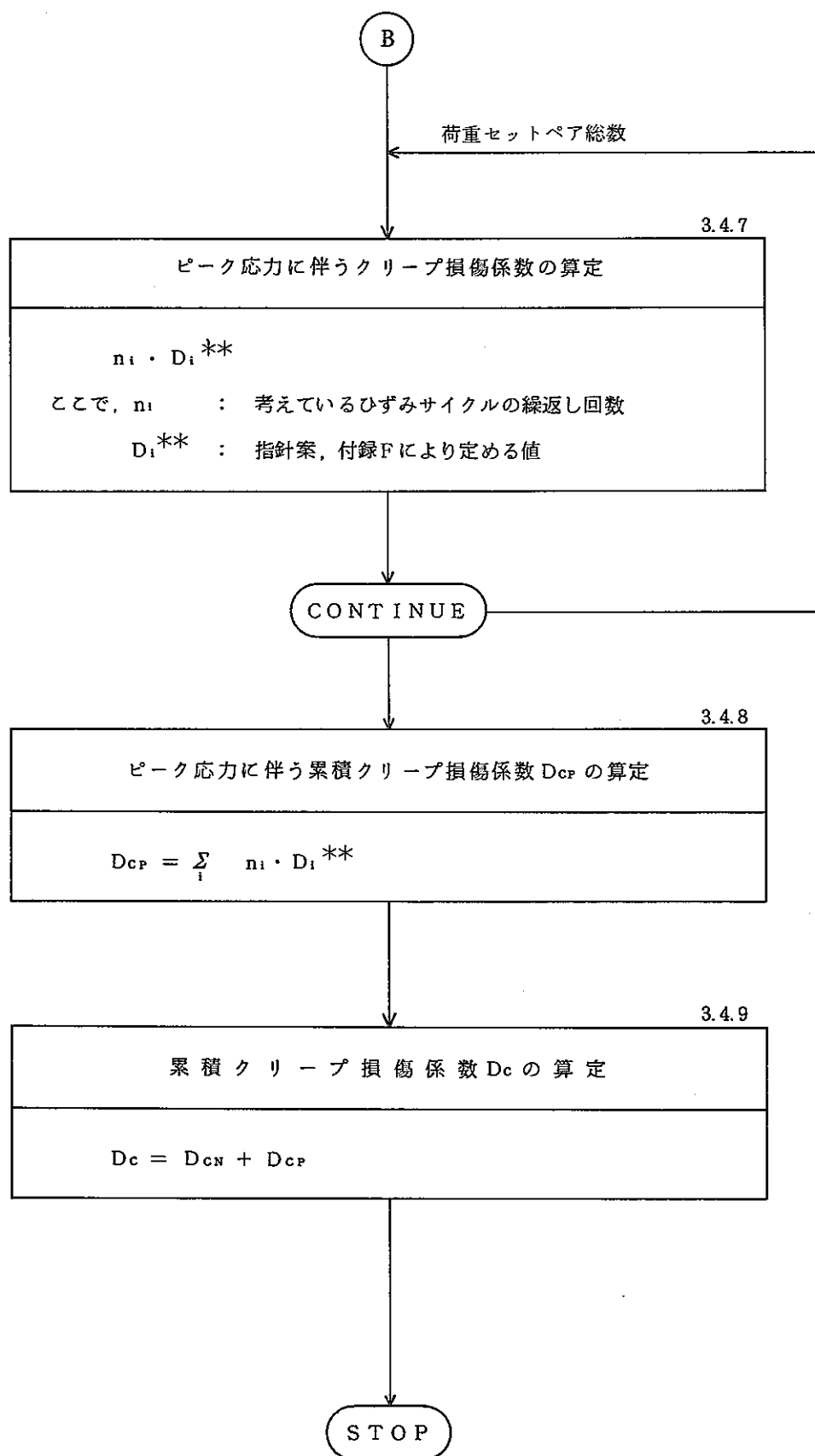
$D_{c2} = (1 + n^*) D^*$   
ここで、 $n^*$  : 前ステップで定める値  
 $D^*$  : 指針案、付録 E により定める値

3.4.6

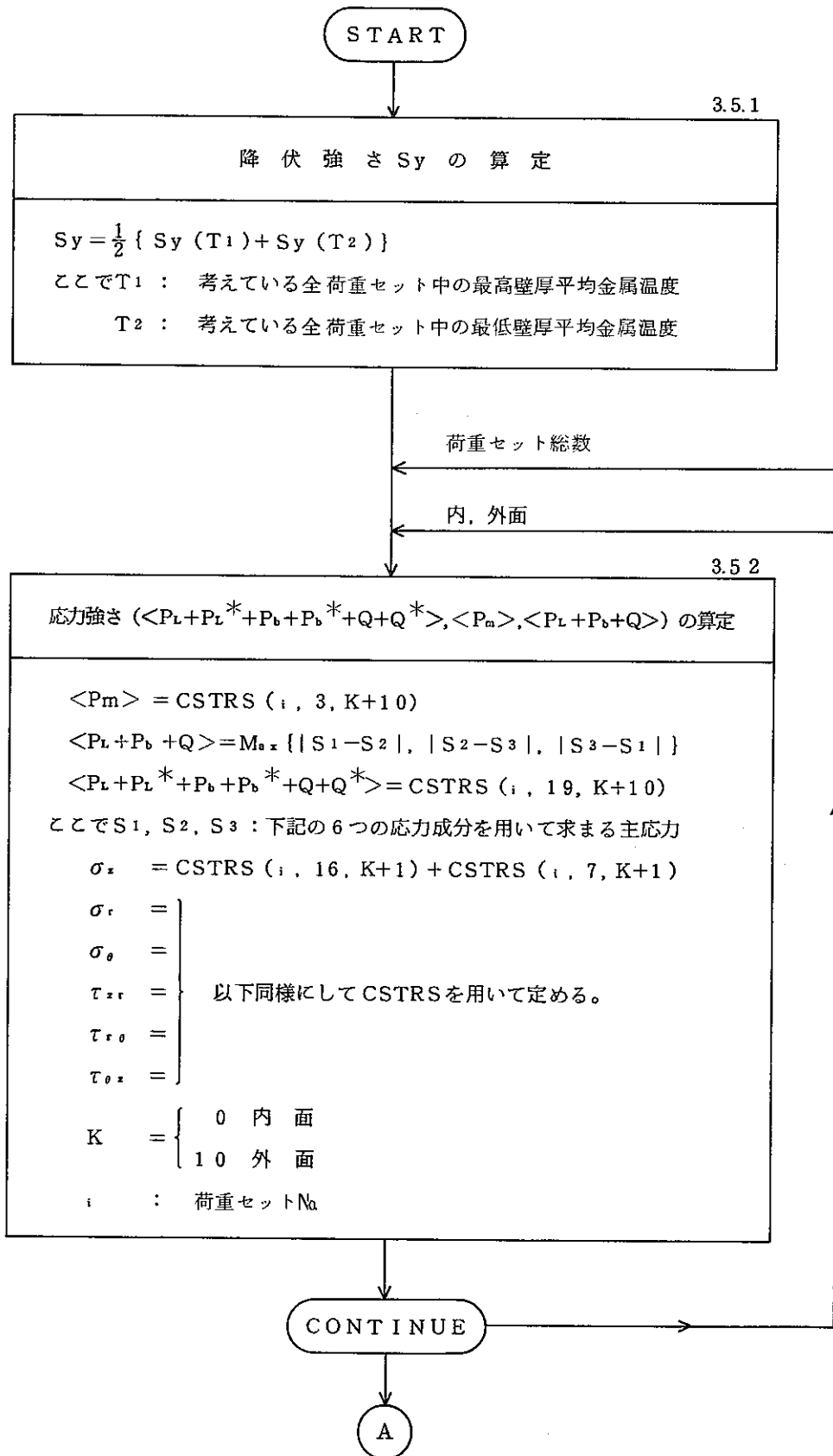
累積クリープ損傷係数  $D_{cN}$  の算定

- 1) 長期 1 次応力が低い場合  
 $D_{cN} = D_{c1} + D_{c2}$  (ただし  $D_{cN} \geq 0.1$ )
- 2) クリープ効果が顕著でない場合  
 $D_{cN} = 0.2$

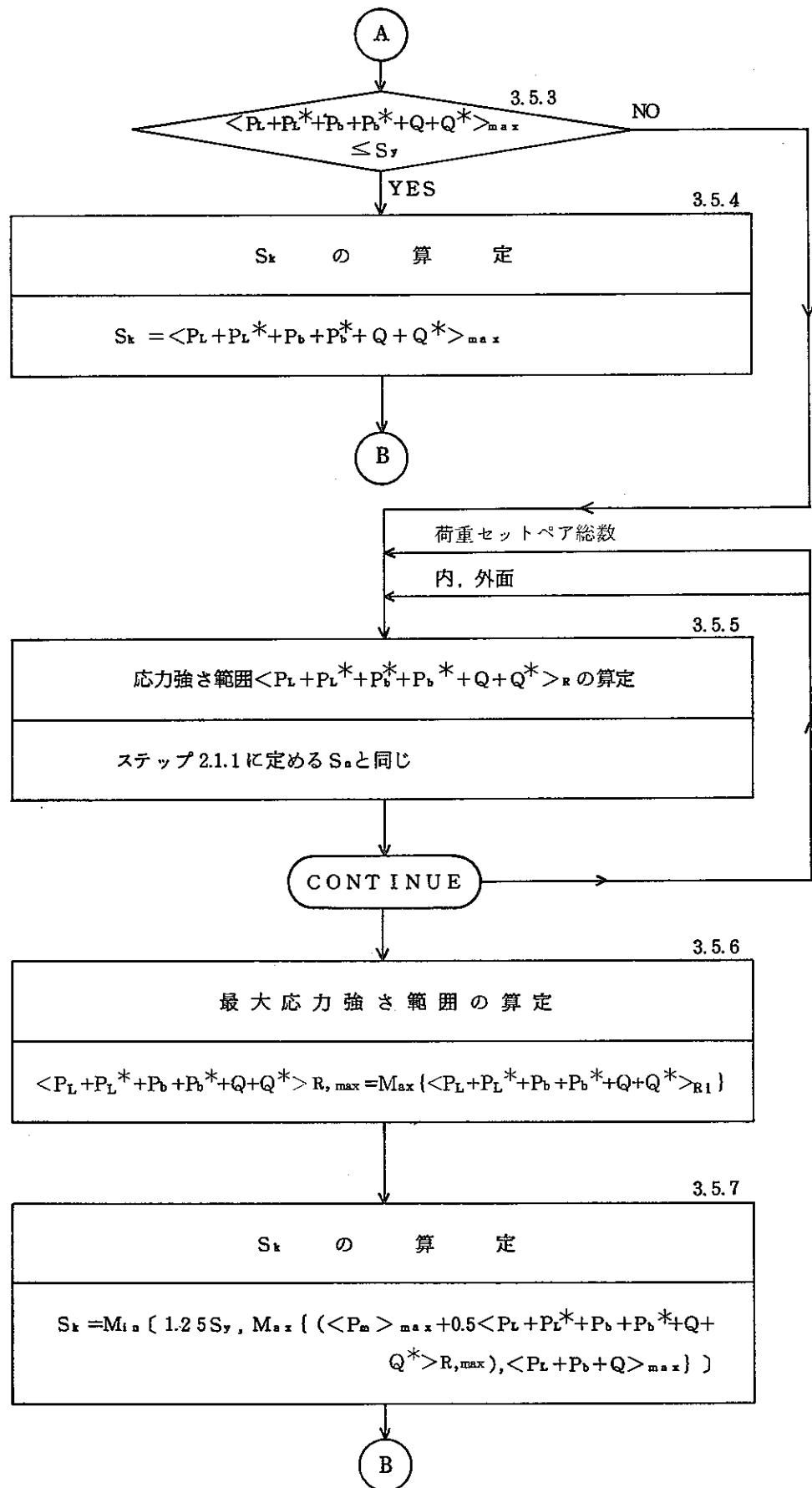
B



5) 長期1次応力が高い場合の累積クリープ損傷係数Dcの算定







B

3.5.8

$t_{di}^*$  の算定

$$t_{di}^* = t_d (S_k / K', T_i) \quad (\text{別表 1.5})$$

ここで  $S_k$  : 前ステップで定めた値 (ただし  $S_k \geq S_g$ )

$S_g$  : 方針, 付録 D により定める値

$T_i$  : 全運転寿命中の高温運転温度-時間ブロックの壁厚平均金属温度

3.5.9

クリープ損傷係数  $D_{CN}$  の算定

$$D_{CN} = 2 \sum_i \frac{t_i}{t_{di}^*} \quad (\text{ただし } D_{CN} \geq 0.1)$$

ここで  $t_{di}$  : 前ステップで定めた値

$t_i$  : 温度  $T_i$  における累積使用時間

ロードセットペア総数

3.5.10

ピーク応力に伴うクリープ損傷係数の算定

$n_i D_i^{**}$

ここで  $n_i$  : 考えているひずみサイクルの繰返し回数

$D_i^{**}$  : 方針, 付録 F により定める値

CONTINUE

C

C

3.5.11

ピーク応力に伴う累積クリープ損傷係数  $D_{CP}$  の算定

$$D_{CP} = \sum_i n_i \cdot D_i^{**}$$

3.5.12

累積クリープ損傷係数  $D_C$  の算定

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

STOP

b) 第 1 種管の評価 (POST-PDS)

第 1 種管の構造設計方針及び通産省告示による評価手順を Fig.2. 1. 3, 2. 1. 4 に示す。この評価手順に従って下記の 1 次応力の制限, ひずみの制限 ならびにクリープ疲労損傷の制限に対する詳細手順について述べる。

(1) 1 次応力の制限

- 1) 設計条件に関する制限
- 2) 運転状態 I, II, III, 及び IV に関する制限

(2) ひずみの制限

- 1) 長期 1 次応力状態の判定
- 2) ひずみの制限 1.
- 3) ひずみの制限 3.
- 4) ひずみの制限 4.
- 5) クリープ効果が顕著でないことの確認
- 6) ひずみの制限 2.
- 7) ひずみの制限 5.

(3) クリープ疲労損傷の制限

- 1) 疲労損傷係数の計算
- 2) 告示による疲労損傷の算定
- 3) クリープ損傷係数の計算

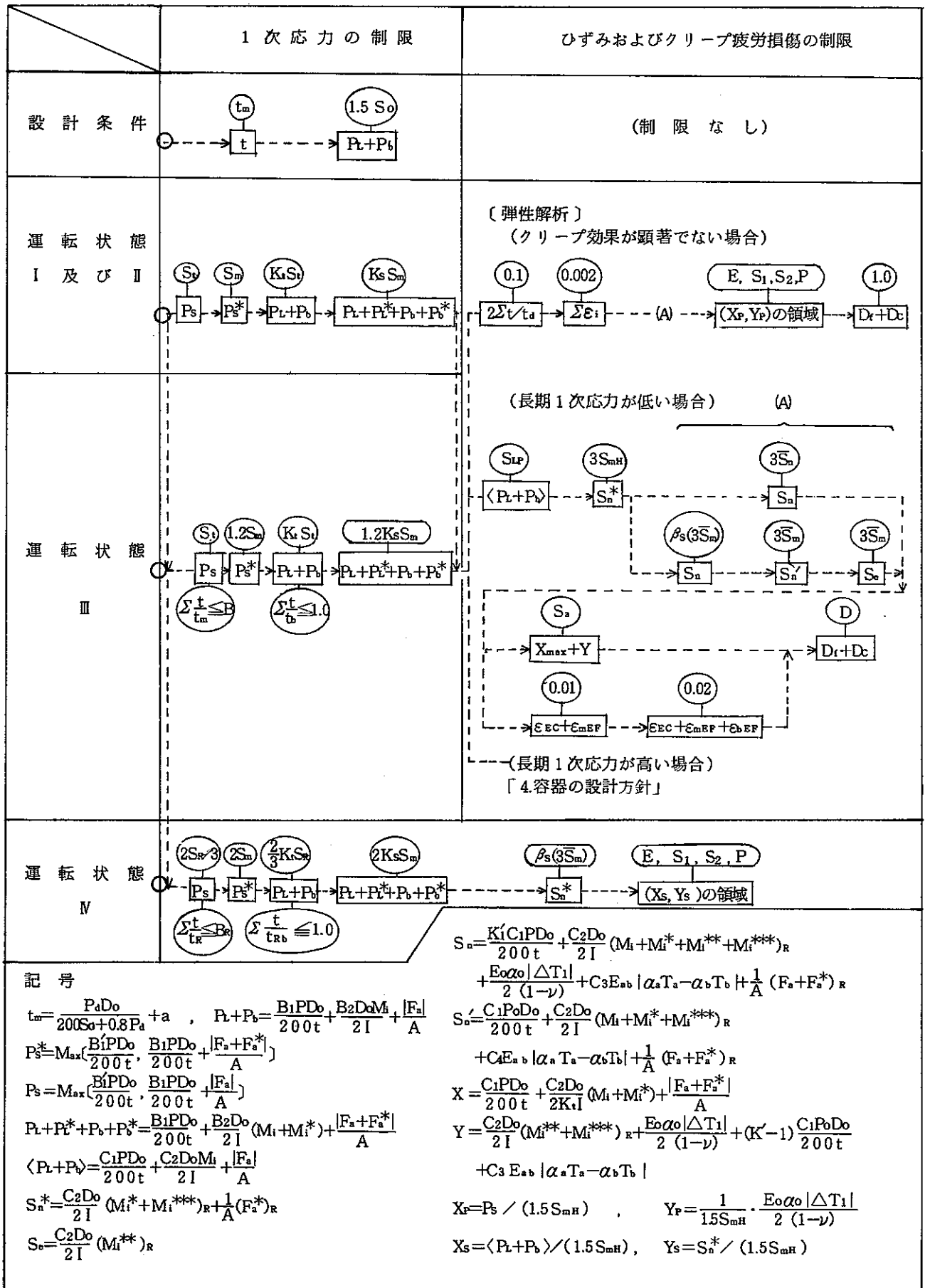


Fig. 2. 1.3 第1種管の構造設計方針フローダイアグラム

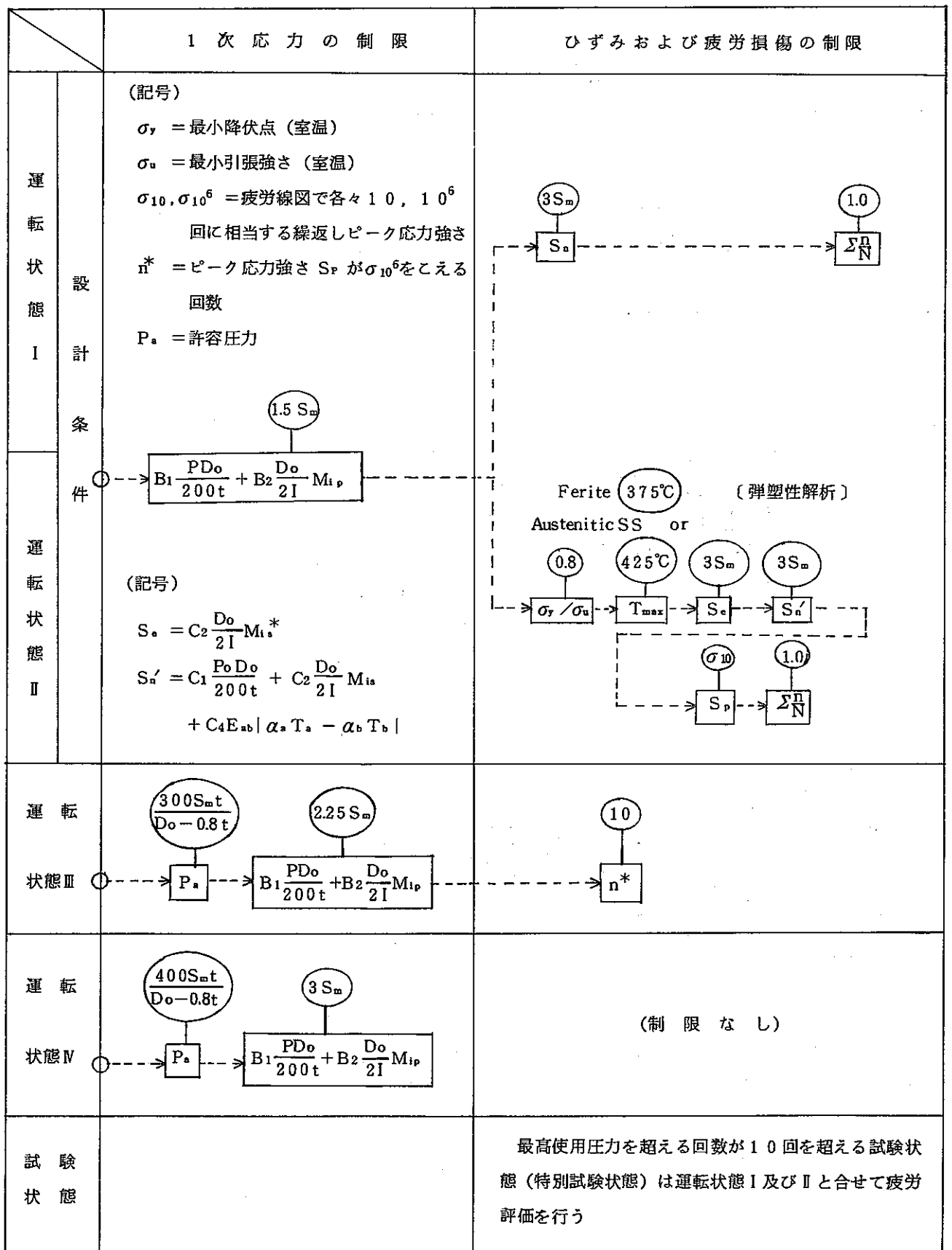
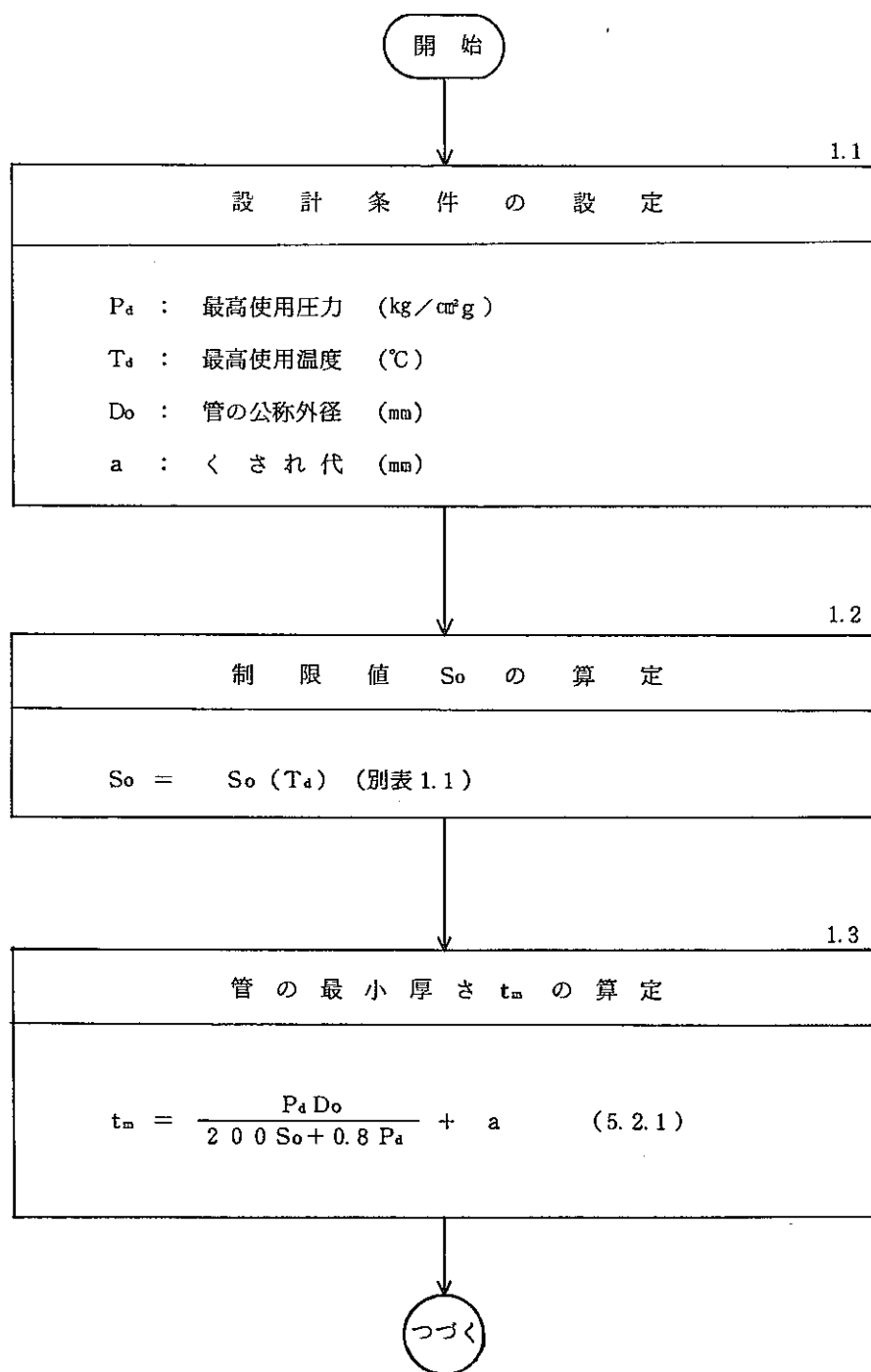


Fig. 2. 1. 4 通産省告示第 1 種管の設計基準フローダイアグラム

(1) 1次応力の制限

本節では1次応力の制限に対する詳細評価手順について述べる。本節で使用する式の番号は、方針に対応している。また、チャートの右肩の番号は、ステップ番号である。

1) 設計条件に関する制限 (5.2.2)



つづき

1.4

応力強さ  $P_L + P_b$  の算定

$$P_L + P_b = \frac{B_1 P_d D_o}{200 t} + \frac{B_2 D_o M_i}{2 I} + \frac{|F_d|}{A} \quad (5.2.2)$$

$B_1, B_2$  : 告示第48条に定める応力係数

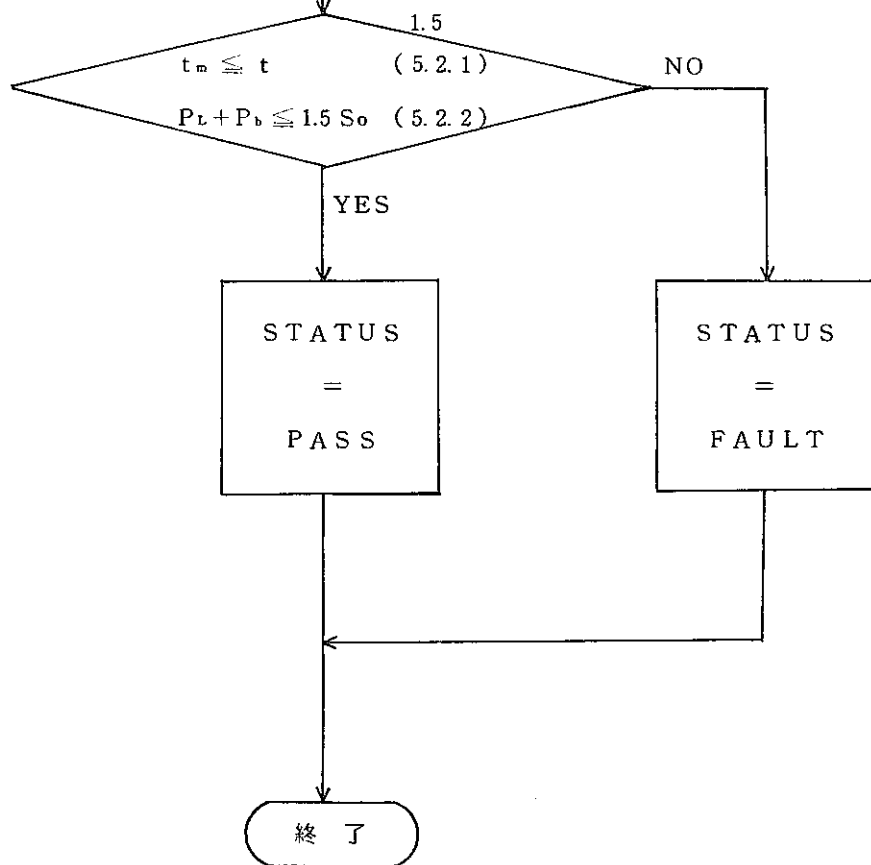
$t$  : 管の公称厚さ (mm)

$I$  : 公称寸法による管の断面2次モーメント ( $\text{mm}^4$ )

$M_i$  : 自重によるモーメント ( $\text{kg} \cdot \text{mm}$ )

$F_d$  : 自重による軸力 (kg)

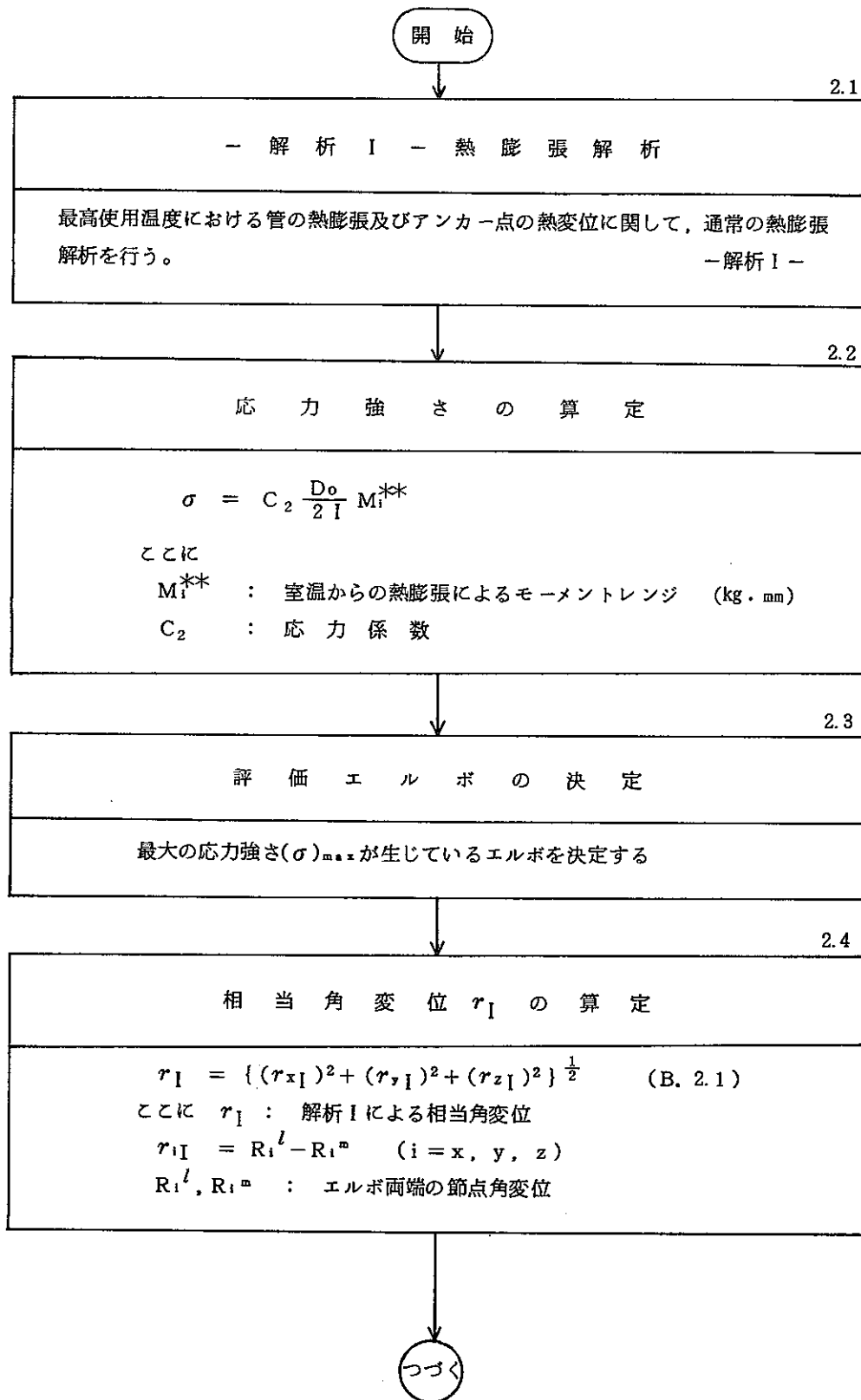
$A$  : 管の断面積 ( $\text{mm}^2$ )

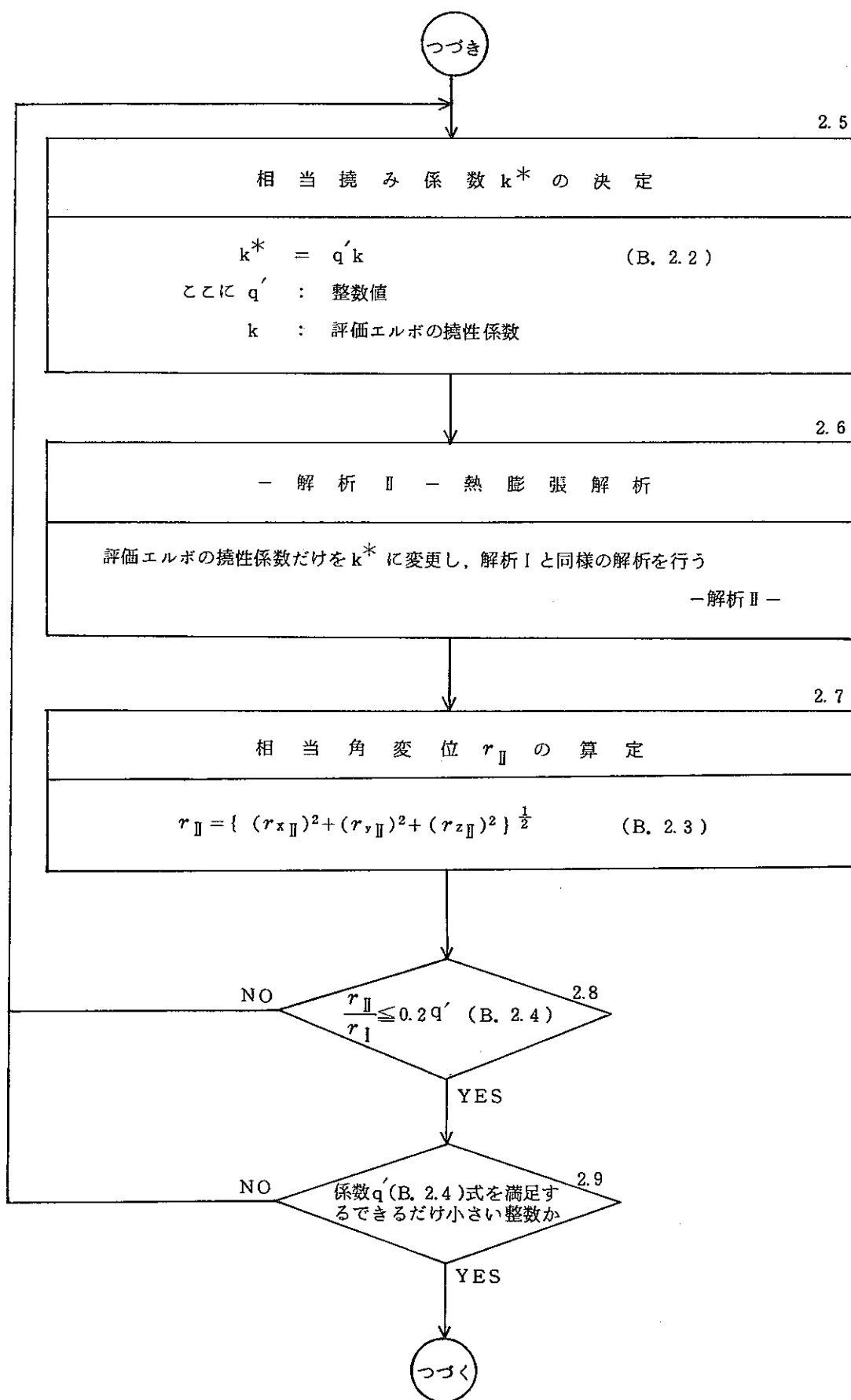




2) 運転状態 I, II, III 及び IV に関する制限 (5.2.3)

a) 弾性追従の判定 (5.2.3(1), 付録 B)





つづき

2.10

弾性追従ひずみの算定

$$\epsilon_{EF} = f G(\lambda) \frac{r \Pi}{\alpha_B} \quad (\text{B. 2.5})$$

ここに

f : ひずみ集中補正係数  $f = 1.5$

$\lambda = t R / r^2$

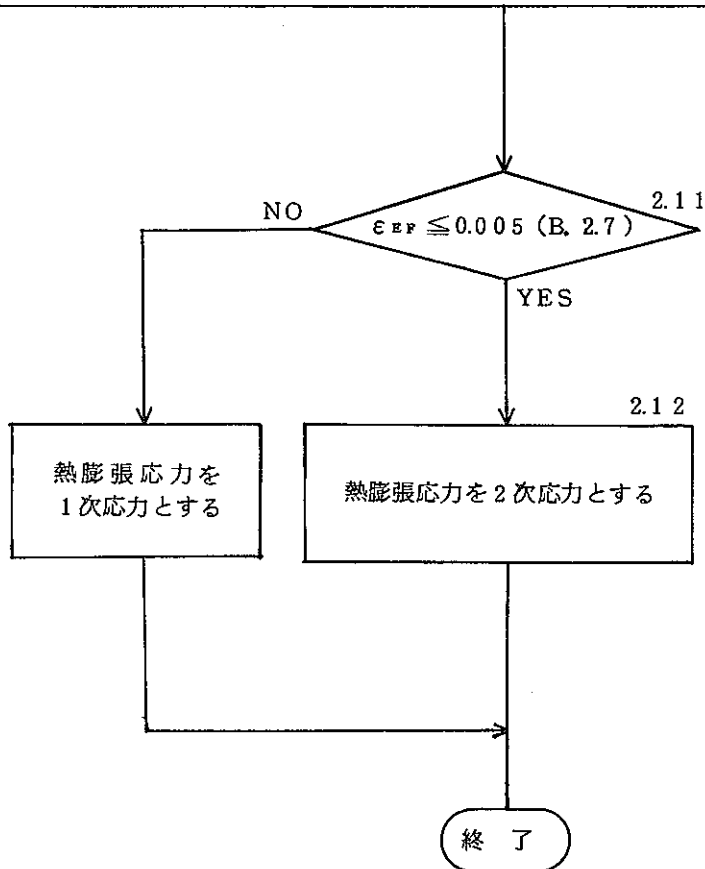
t : 厚さ (mm)

R : 曲り管又はエルボの曲げ半径 (mm)

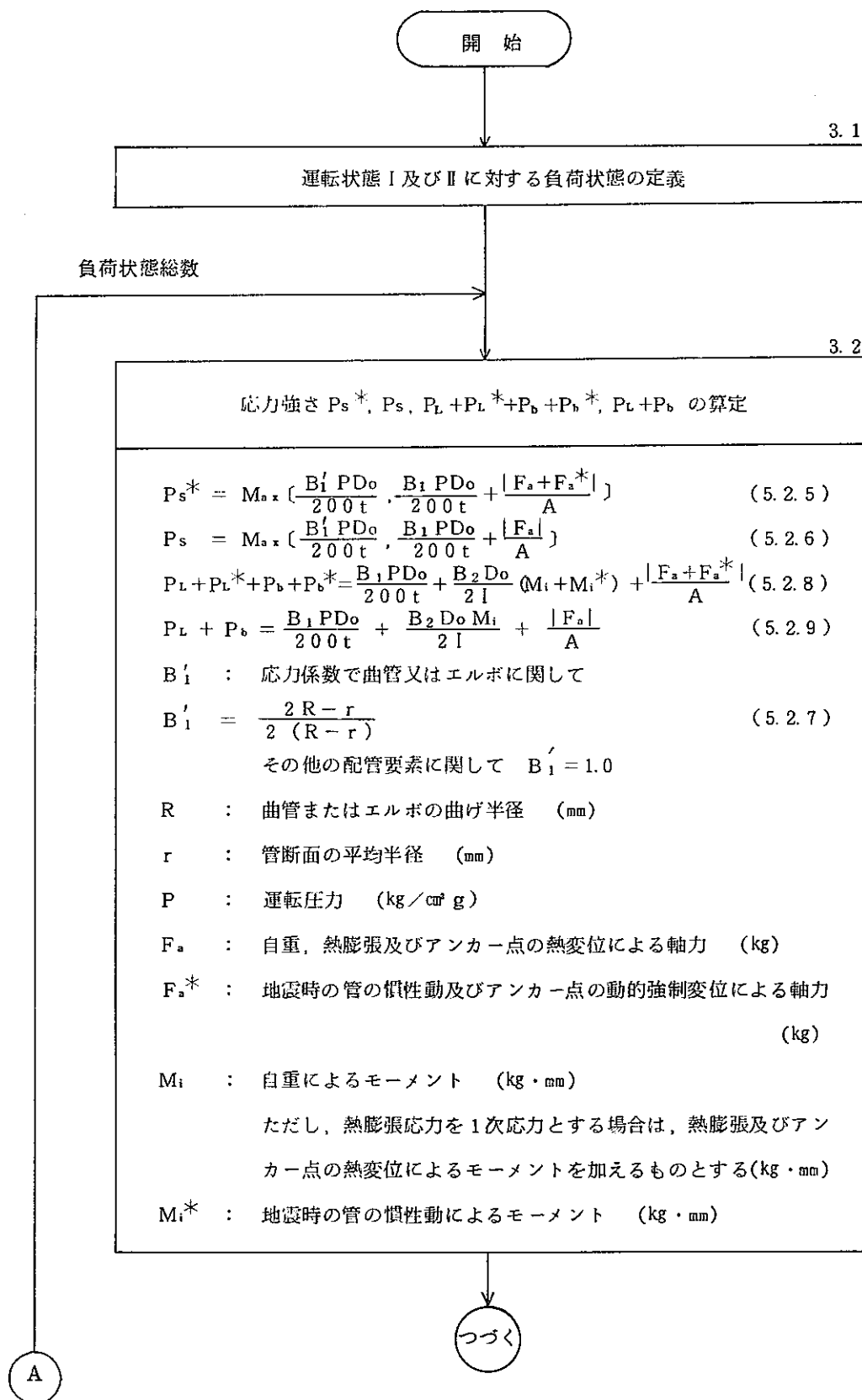
r : 管断面の平均半径 (mm)

$$G(\lambda) = \frac{r}{R} \left\{ 1.044 \lambda^{\frac{1}{3}} + 0.582 \left( \frac{r}{R} \right) \lambda^{\frac{2}{3}} \right\} \quad (\text{B. 2.6})$$

$\alpha_B$  : 曲り管又はエルボの曲り角 (radian)



b) 運転状態 I 及び II に関する制限 ( 5. 2. 3 (2) )



A

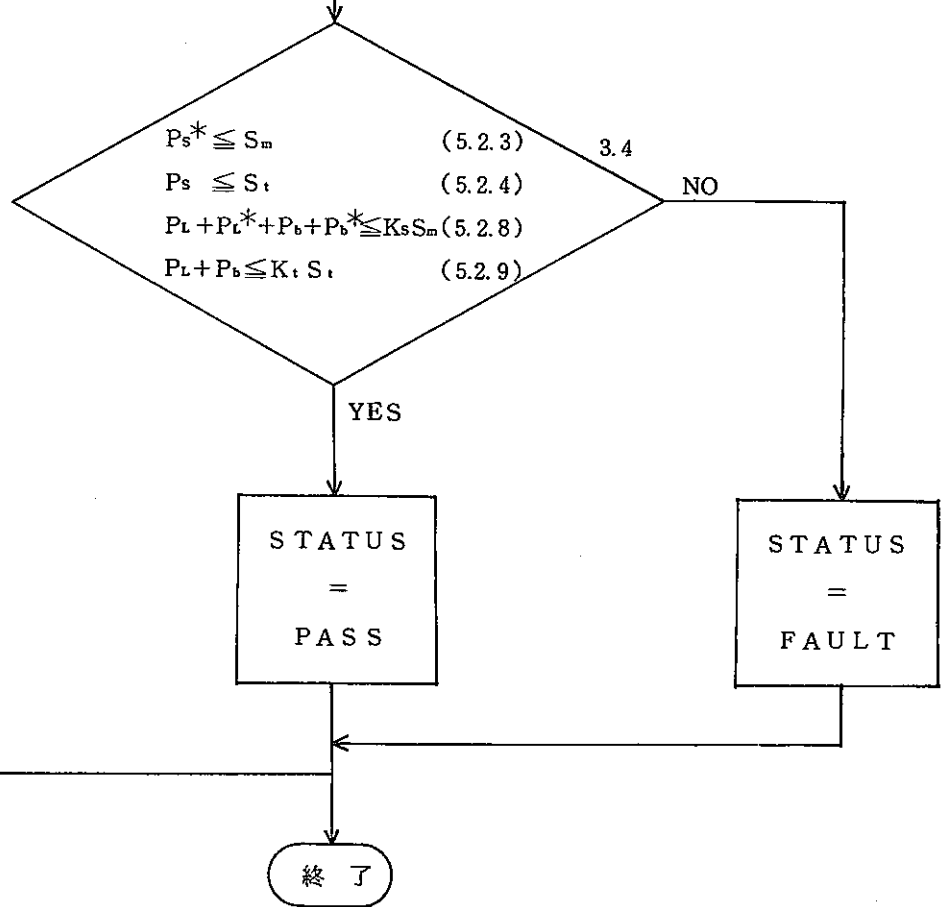
つづき

3.3

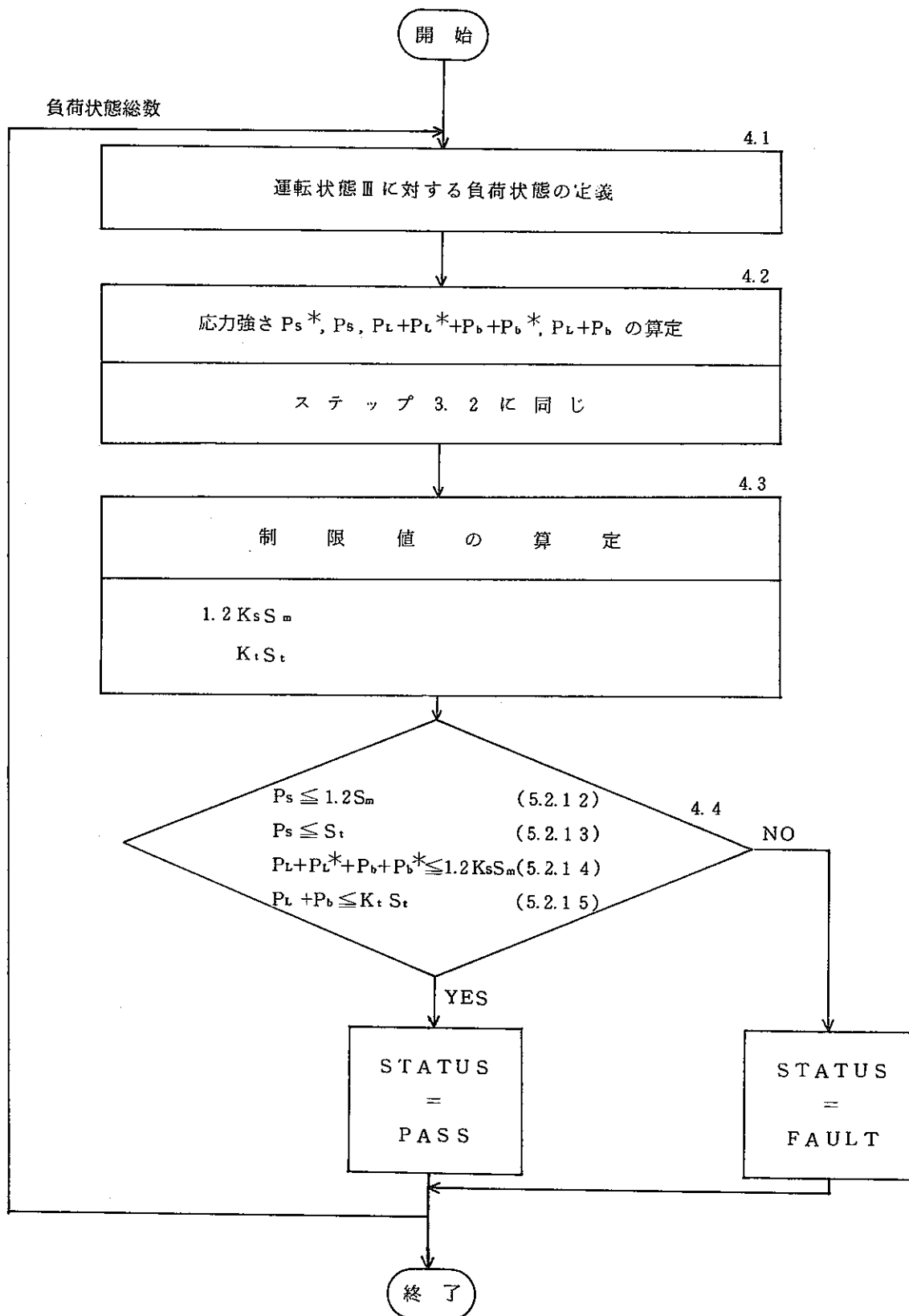
制 限 値 の 算 定

---

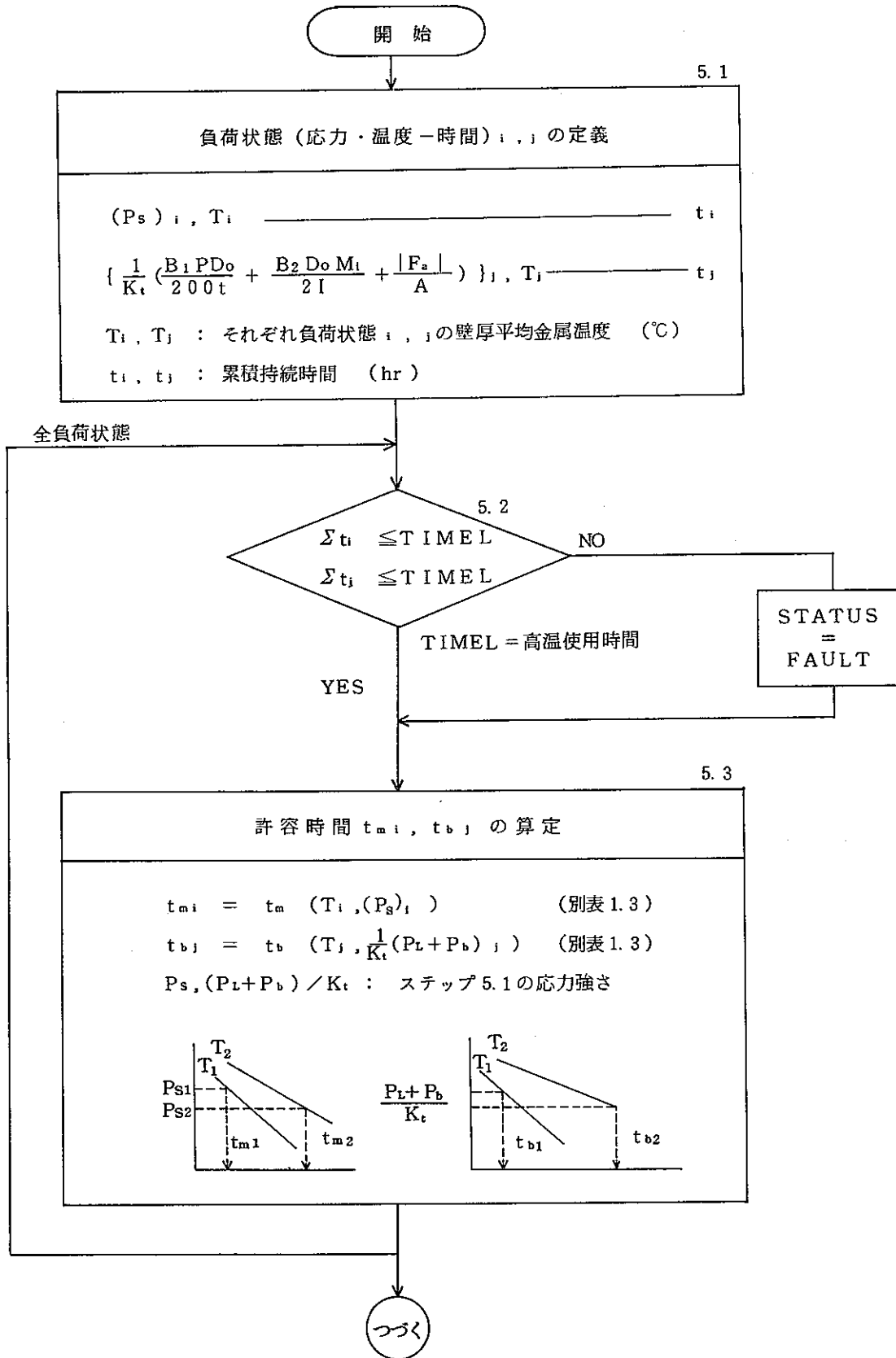
$S_m = S_m (T)$   
 $S_t = S_t (T, t_h)$   
 $K_t = 1 + k_s (1 - P_s / S_t) \quad (5.2.10)$   
 $k_s = \alpha_c (K_s - 1) \quad (5.2.11)$   
 $T$  : 考えている負荷状態における最高壁厚平均金属温度 (°C)  
 $t_h$  : 累積持続時間 (hr)  
 $\alpha_c$  : クリープ係数  $\alpha_c = 0.5$   
 $K_s$  : 断面形状係数  $K_s = 1.27 (t / D_o \leq 0.05)$

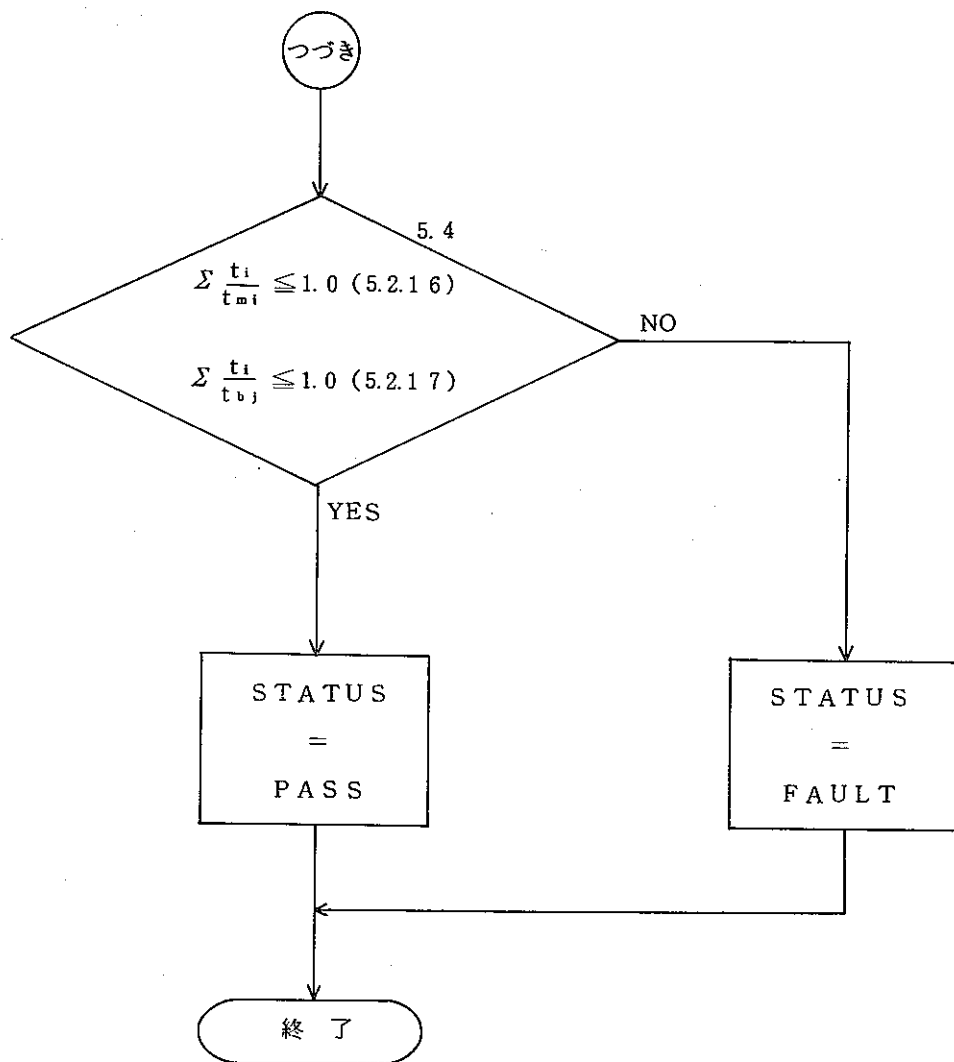


c) 運転状態Ⅲに関する制限 (5.2.3(3))



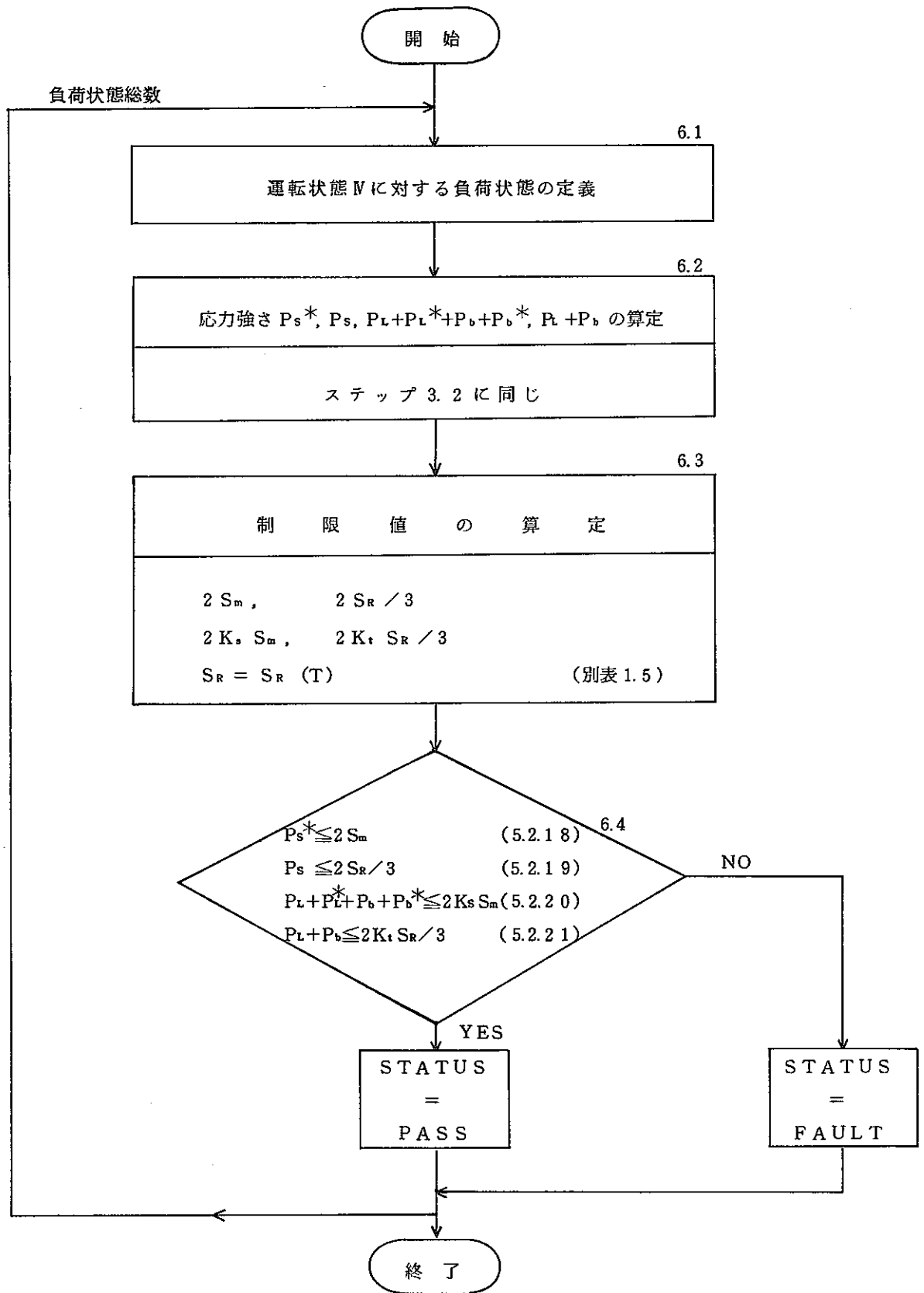
d) 運転状態 I, II 及び III にわたる制限 (5.2.3(4))



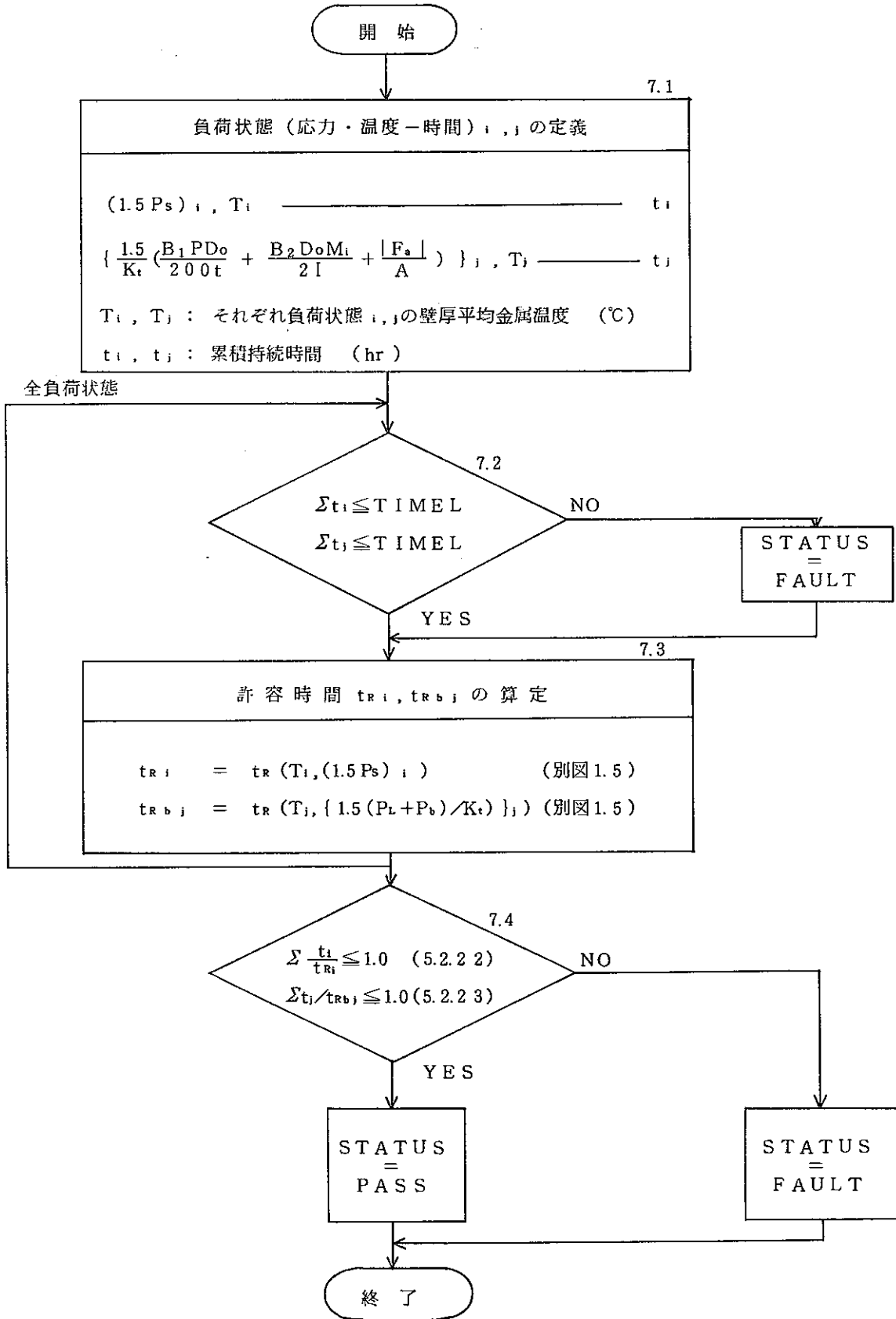




e) 運転状態 IV に関する制限 (5.2.3(5))

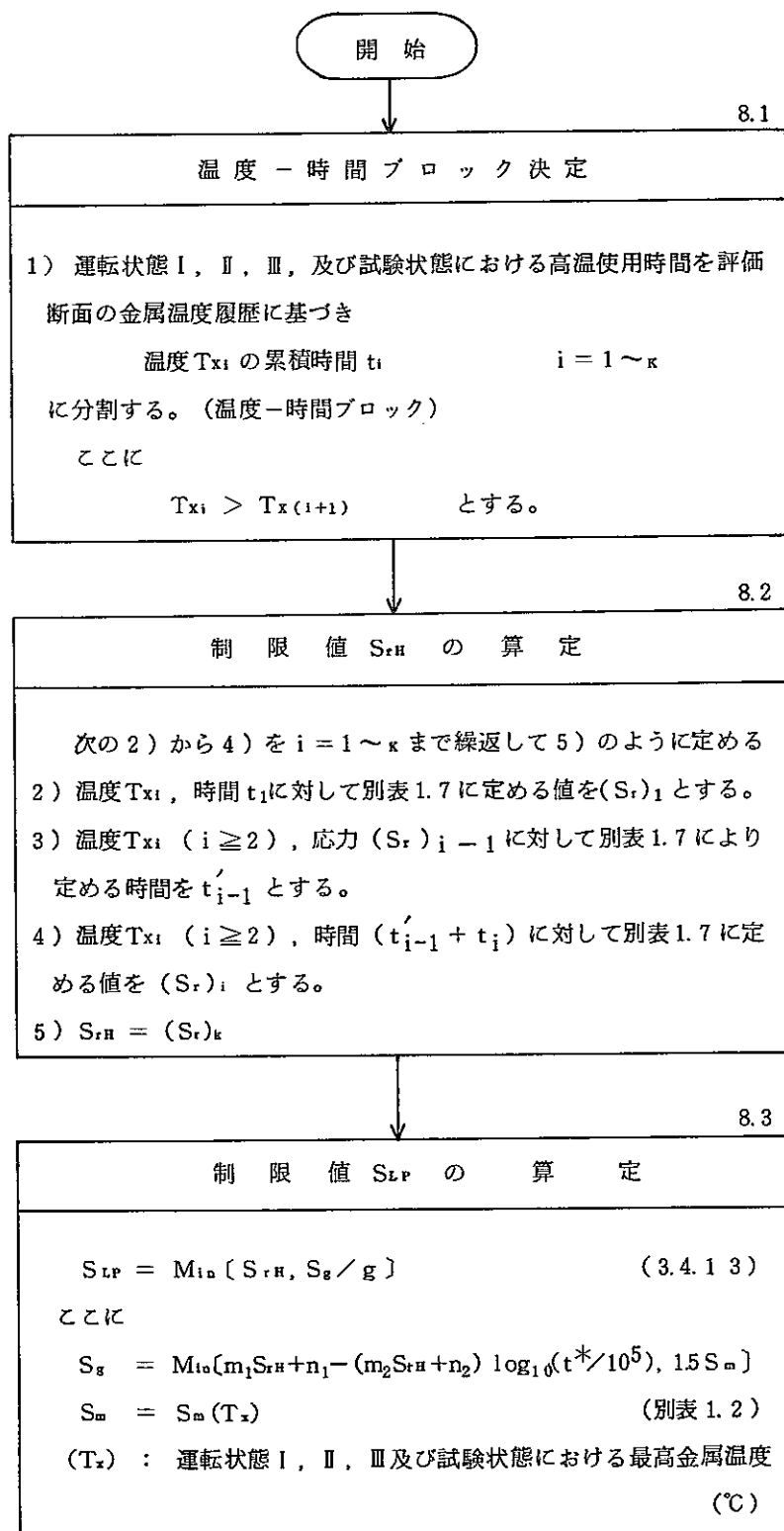


f) 運転状態 I, II, III 及び IV にわたる制限 (5.2.3(6))



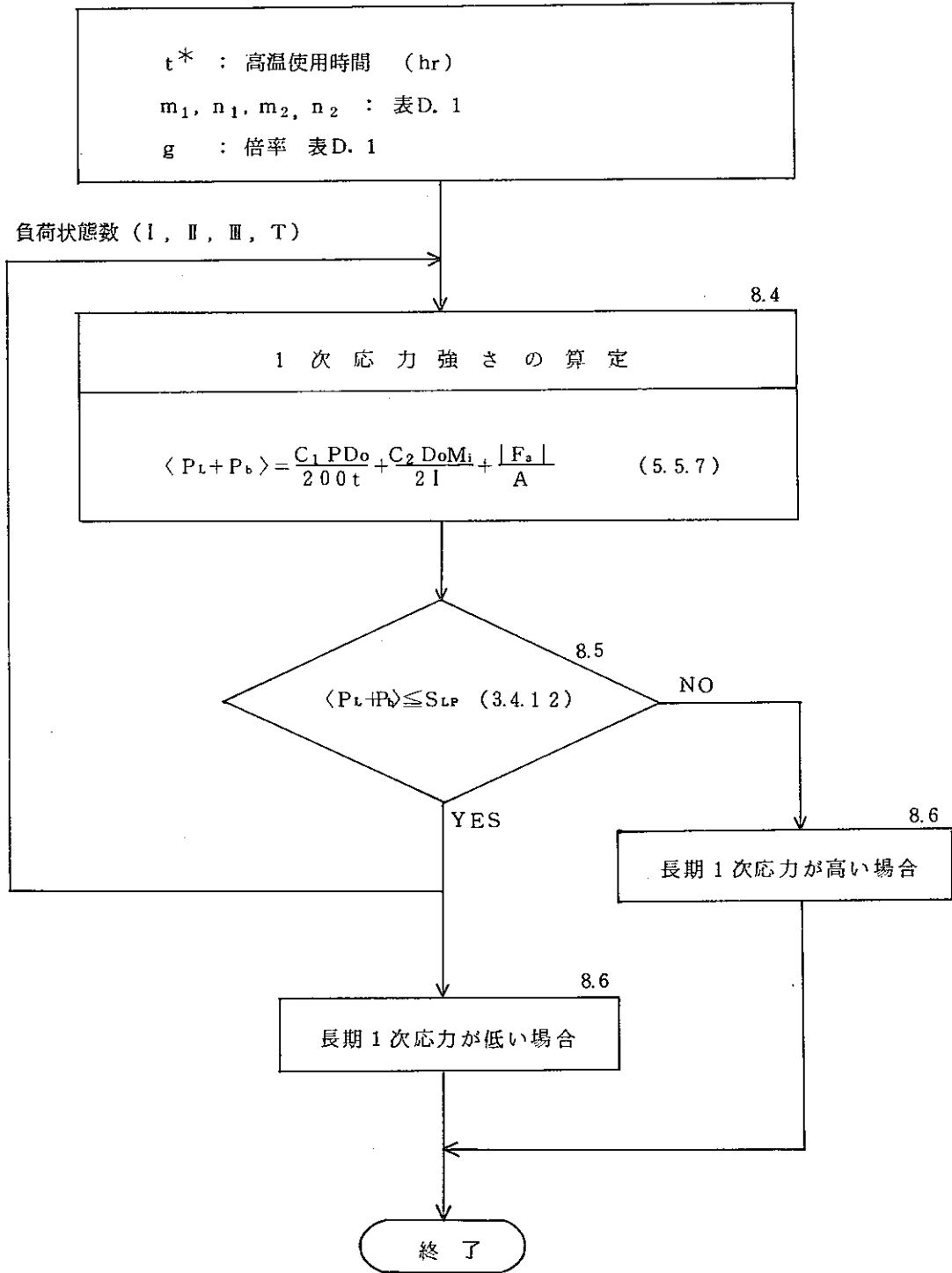
(2) ひずみの制限 (5.5)

1) 長期1次応力状態の判定 (3.4.2(2))

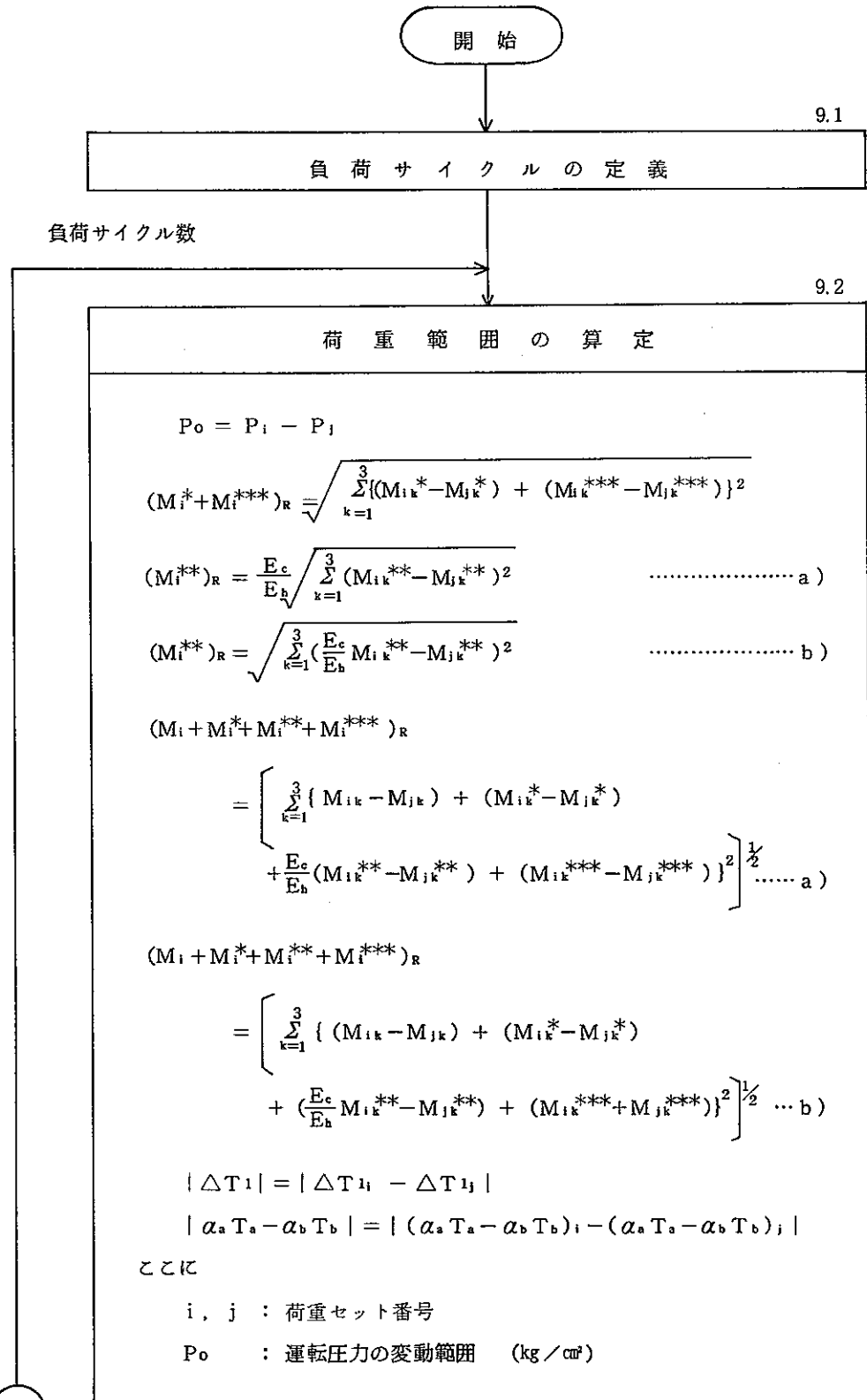


つづく

つづき



2) ひずみの制限 1 (Strain Limit 1) (3.4.2(2)3 b))



A

つづく

- $M_k^{**}$  : 熱膨張及びアンカー点の熱変位によるモーメント (kg・mm)  
ただし、熱膨張応力を1次応力とする場合は  $M_i^{**} = 0$  とする。
- $M_k^{***}$  : 地震時のアンカー点の動的強制変位によるモーメント  
(kg・mm)
- $\Delta T_1$  : 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 (°C)
- $\alpha_a, \alpha_b, T_a, T_b$  : 告示第46条に定める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
- $E_c(E_b)$  : 負荷サイクル中の最低(最高)壁厚平均金属温度における縦弾性係数、ここでは、 $M_k^{**}$  の縦弾性係数補正として、a)式とb)式のいずれかを適用する。b)式では、荷重セットiの温度はjよりも高いことを仮定した場合である。

9.3

## 応力強さ範囲の算定

$$S_n = \frac{C_2 D_o}{2I} (M_i^{**} + M_i^{***})_R + \frac{1}{A} (F_a^*)_R \quad (5.5.8)$$

$$S_n = \frac{K_1' C_1 P_o D_o}{200t} + \frac{C_2 D_o}{2I} (M_i + M_i^{**} + M_i^{***})_R + \frac{E_o \alpha_o |\Delta T_1|}{2(1-\nu)} + C_3 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| + \frac{1}{A} (F_a + F_a^*)_R \quad (5.5.9)$$

$$S_n' = \frac{C_1 P_o D_o}{200t} + \frac{C_2 D_o}{2I} (M_i + M_i^{**} + M_i^{***})_R + C_4 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| + \frac{1}{A} (F_a + F_a^*)_R \quad (5.5.10)$$

$$S_e = \frac{C_2 D_o}{2I} (M_i^{**})_R \quad (5.5.12)$$

ここに  $E_o = E(200^\circ\text{C})$  (縦弾性係数) $\alpha_o = \alpha(200^\circ\text{C})$  (瞬時熱膨張係数) $E_{ab}$  : ステップ9.2の熱応力を表すパラメータ

つづく

つづき

制限値  $3\bar{S}_m, 3S_{mH}$  の算定

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金属温度 (最高金属温度) を  $T_i, T_j$  とする。

- $T_i$  又は  $T_j$  のいずれかが告示の適用温度範囲内にある場合は

$$T_c = \text{Min} (T_i, T_j)$$

$$S_{mc} = S_m (T_c) \quad (\text{告示別表第2})$$

$$3\bar{S}_m = S_{rH} + 1.5 S_{mc} \quad (3.4.2.1)$$

- $T_i$  と  $T_j$  が告示の適用温度範囲を超える場合は

$$3\bar{S}_m = S_{rH} + S_{rc} \quad (3.4.2.2)$$

$$S_{rc} = S_r (T_s, t_s) \quad (\text{別表1.7})$$

$$T_s = \text{Max} (|T_i - T_{ss}|, |T_j - T_{ss}|)$$

$t_s$  :  $T_s$  になってから定常状態の温度  $T_{ss}$  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)

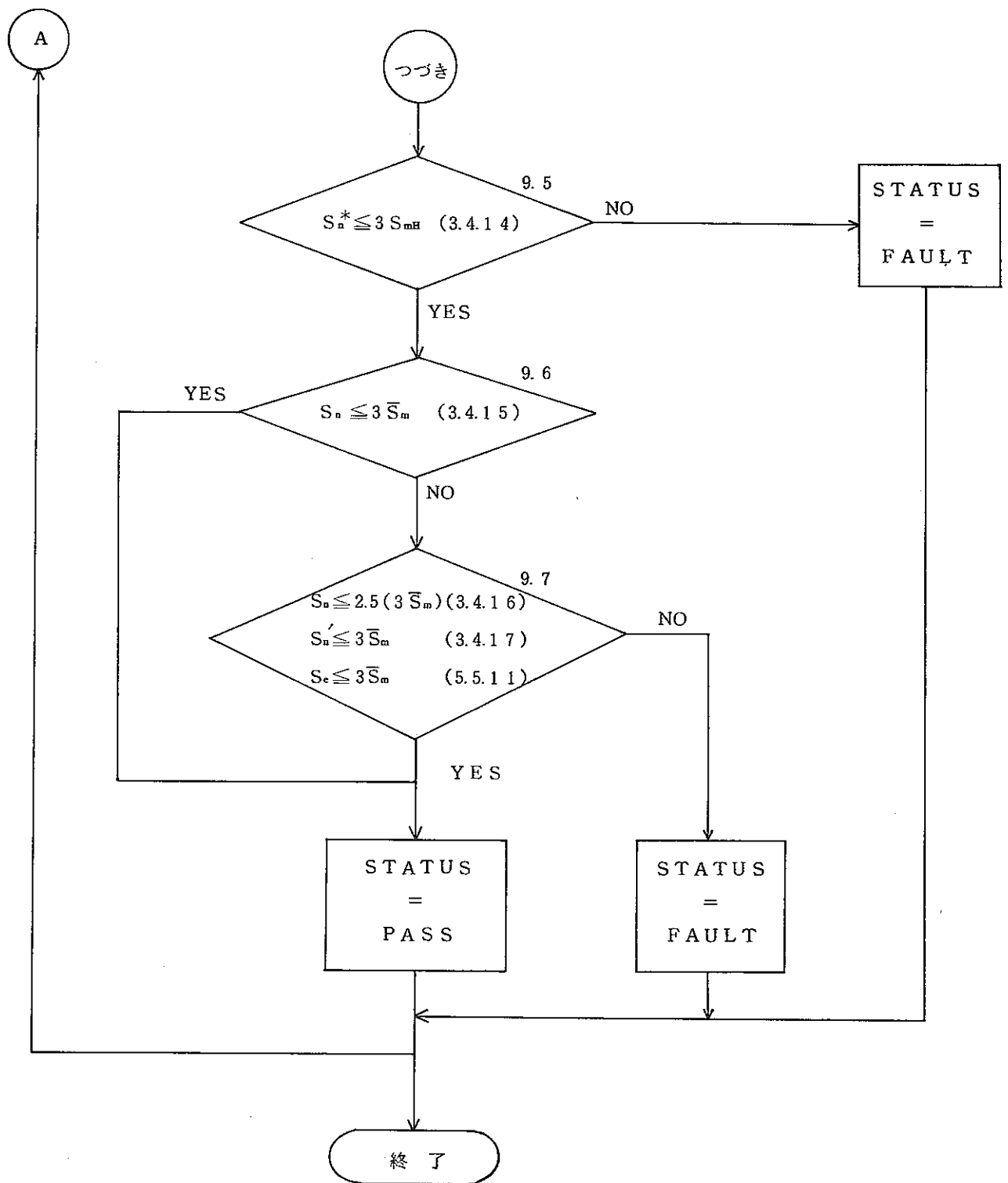
- $T_i$  と  $T_j$  のいずれも告示の適用温度範囲内にある場合

$$3\bar{S}_m = 0.5 (3S_m(T_i) + 3S_m(T_j))$$

- $3S_{mH} = 3S_m(T)$  (別表1.2)

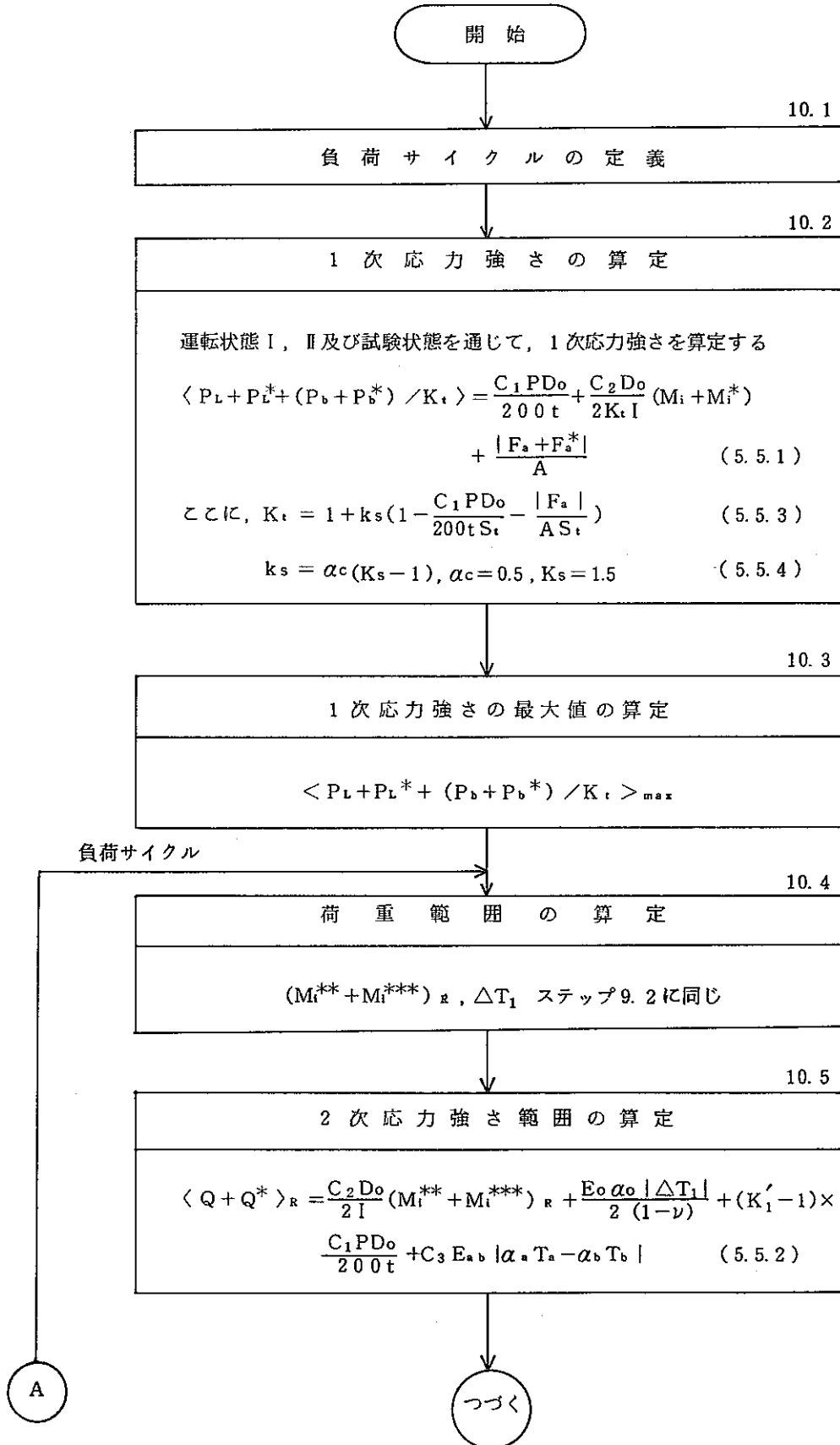
ここに,  $T$  : 負荷サイクル中の最高金属温度 (°C)

つづく





3) ひずみの制限 3 (Strain Limit 3) (3.4.2(1)2) a))



つづき

10.6

$S'_y$  の 算 定

$$S'_y = 0.5 (S_{y1} + S_{y2})$$

$$S_{y1} = S_y (T_1) \quad (\text{別表 1.4})$$

$$S_{y2} = S_y (T_2) \quad (\text{別表 1.4})$$

ここに,  $T_1, T_2$  : 考えている負荷サイクル中の壁厚平均金属温度の最高値と最低値 (°C)

10.7

制 限 値  $S_a$  の 算 定

評価の対象とする  $\langle Q + Q^* \rangle_R$  を定める応力状態のうち

- 少なくともひとつの状態における壁厚平均金属温度が  $T_0$  より低い場合
 
$$S_a = S'_y \quad (\text{ステップ 10.6})$$
- いずれも  $T_0$  より高い場合
 
$$S_a = \text{Min} (S'_y, 1.25 S_t)$$

$$S_t = S_t (T, t_b) \quad (\text{別表 1.3})$$

$T$  : 負荷サイクル中の最高壁厚平均金属温度 (°C)

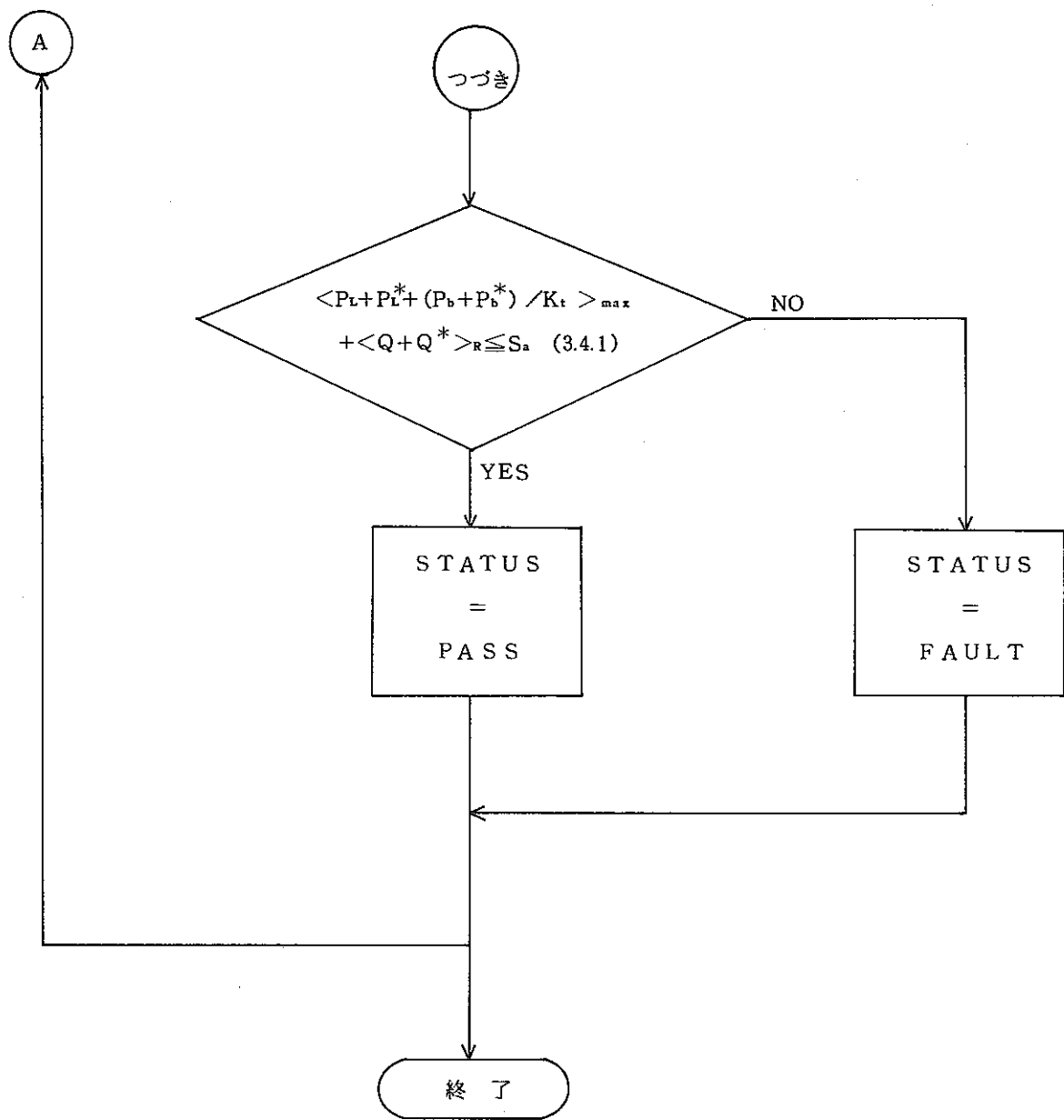
$$t_b = 10^4 \text{ (hr)}$$

なお  $T_0$  は次式により定める温度

$$S_m (T_0) = S_t (T_0, t) \quad t = 10^5 \text{ (hr)}$$

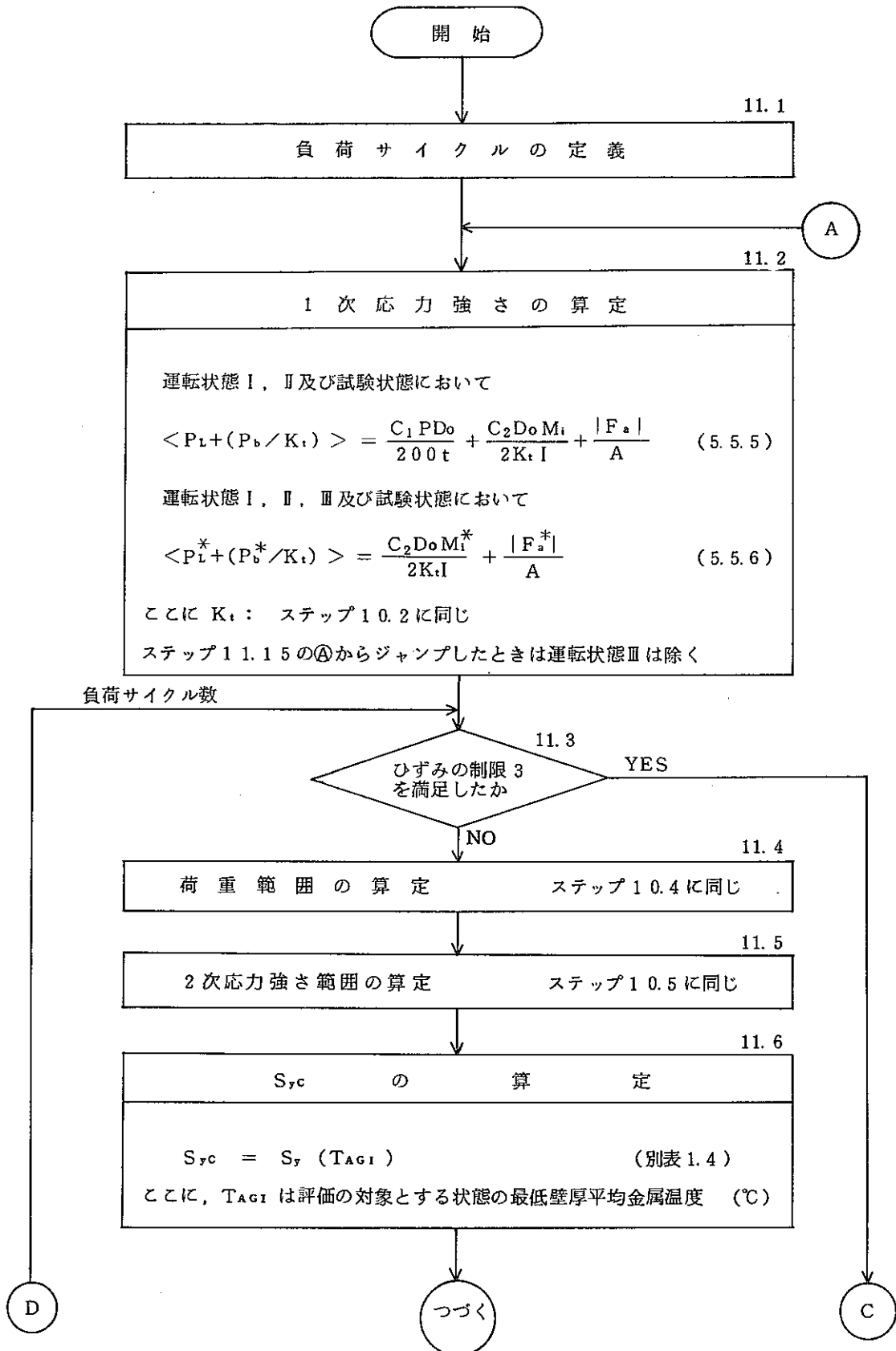
(別表 1.2, 1.3)

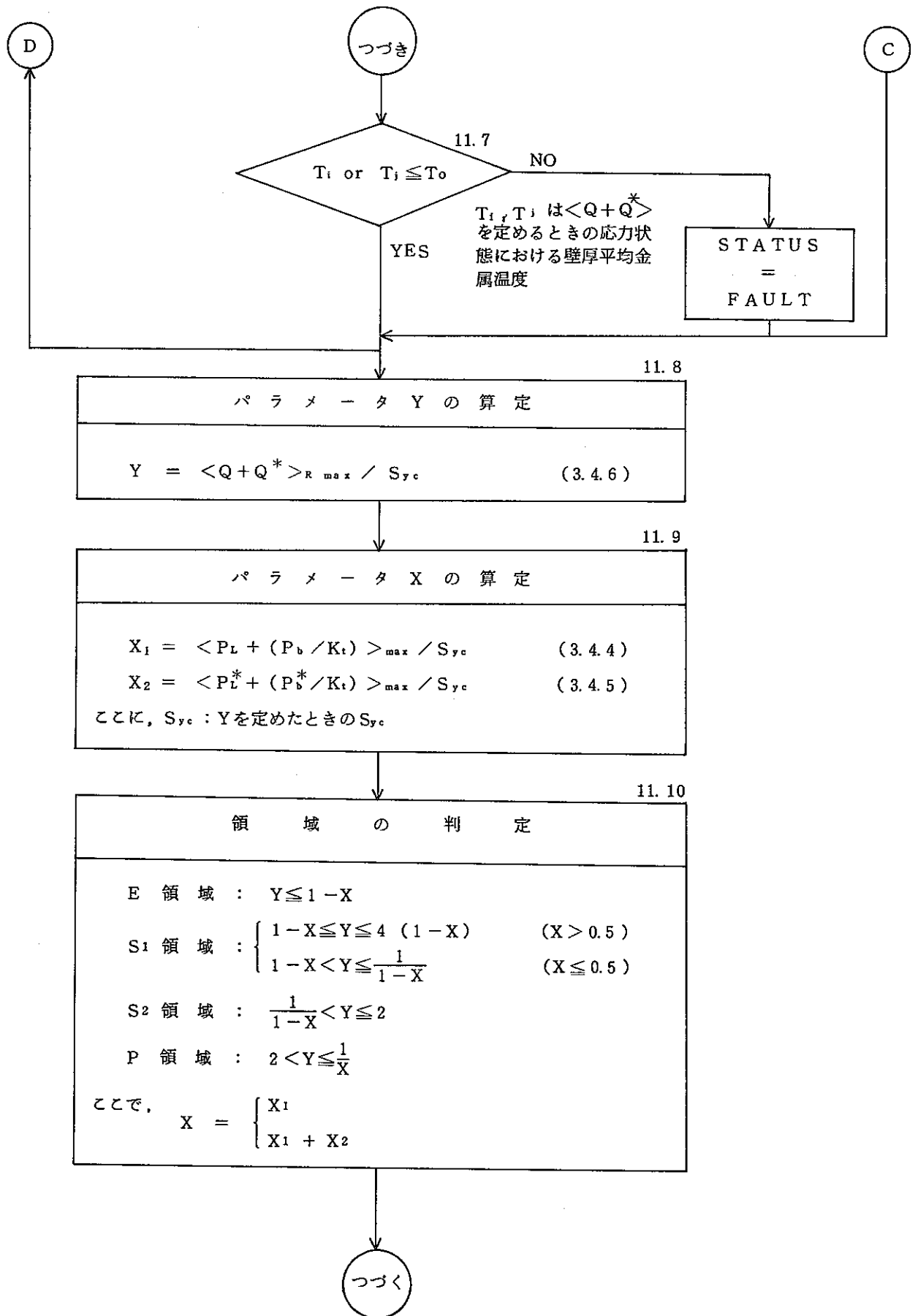
つづく

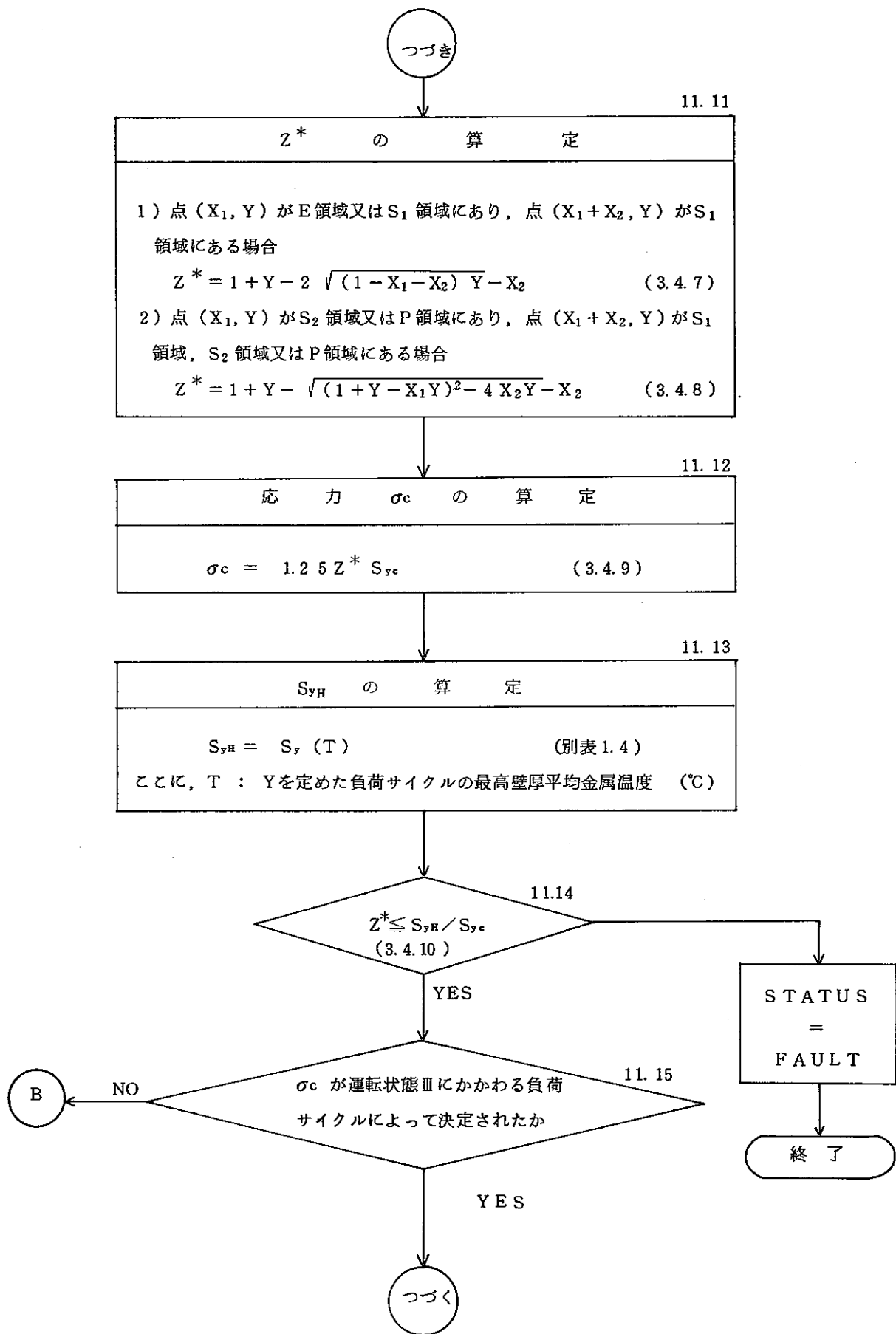


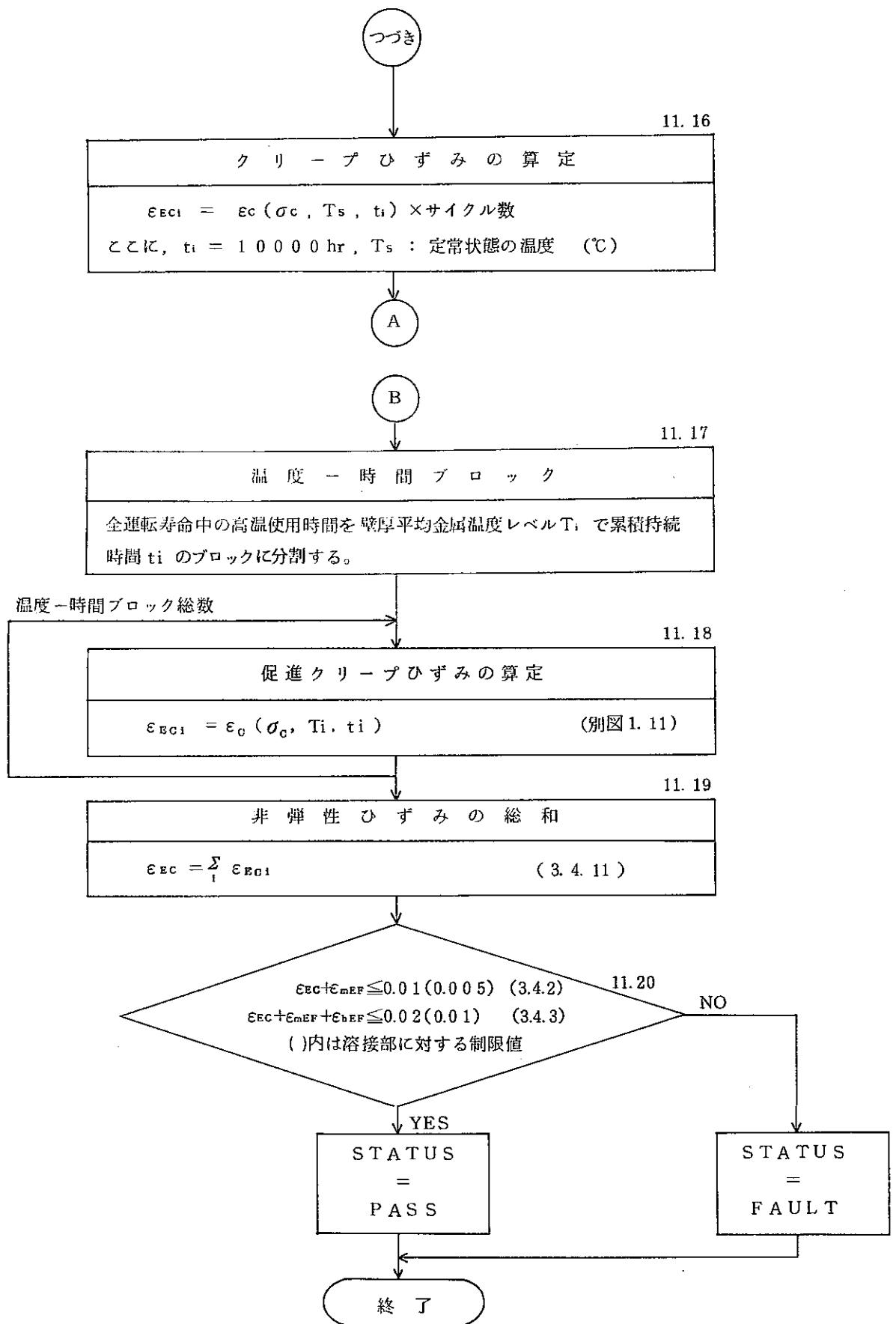
4) ひずみの制限 4 (Strain Limit 4)

(3.4.2(1)2) b))

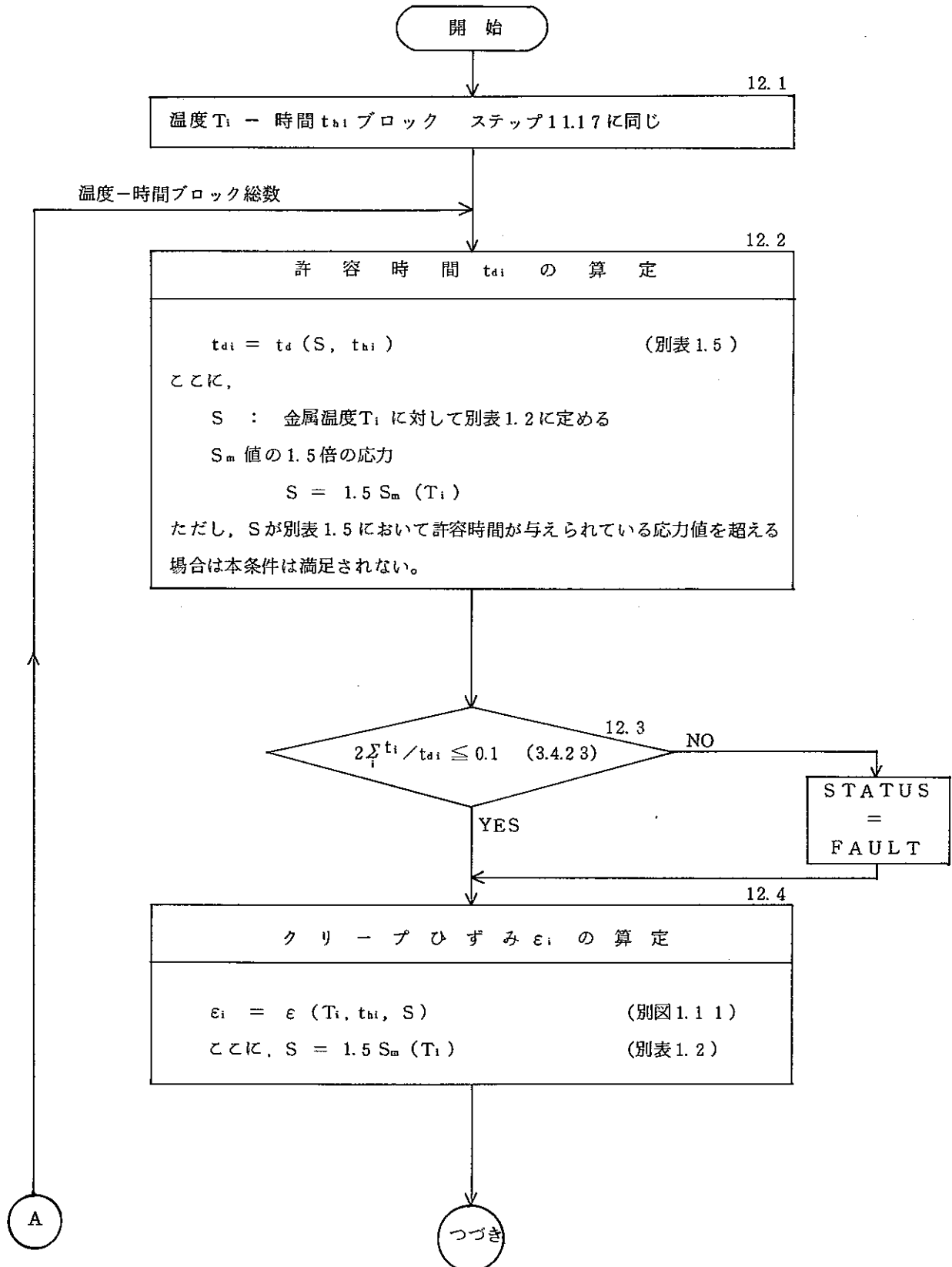




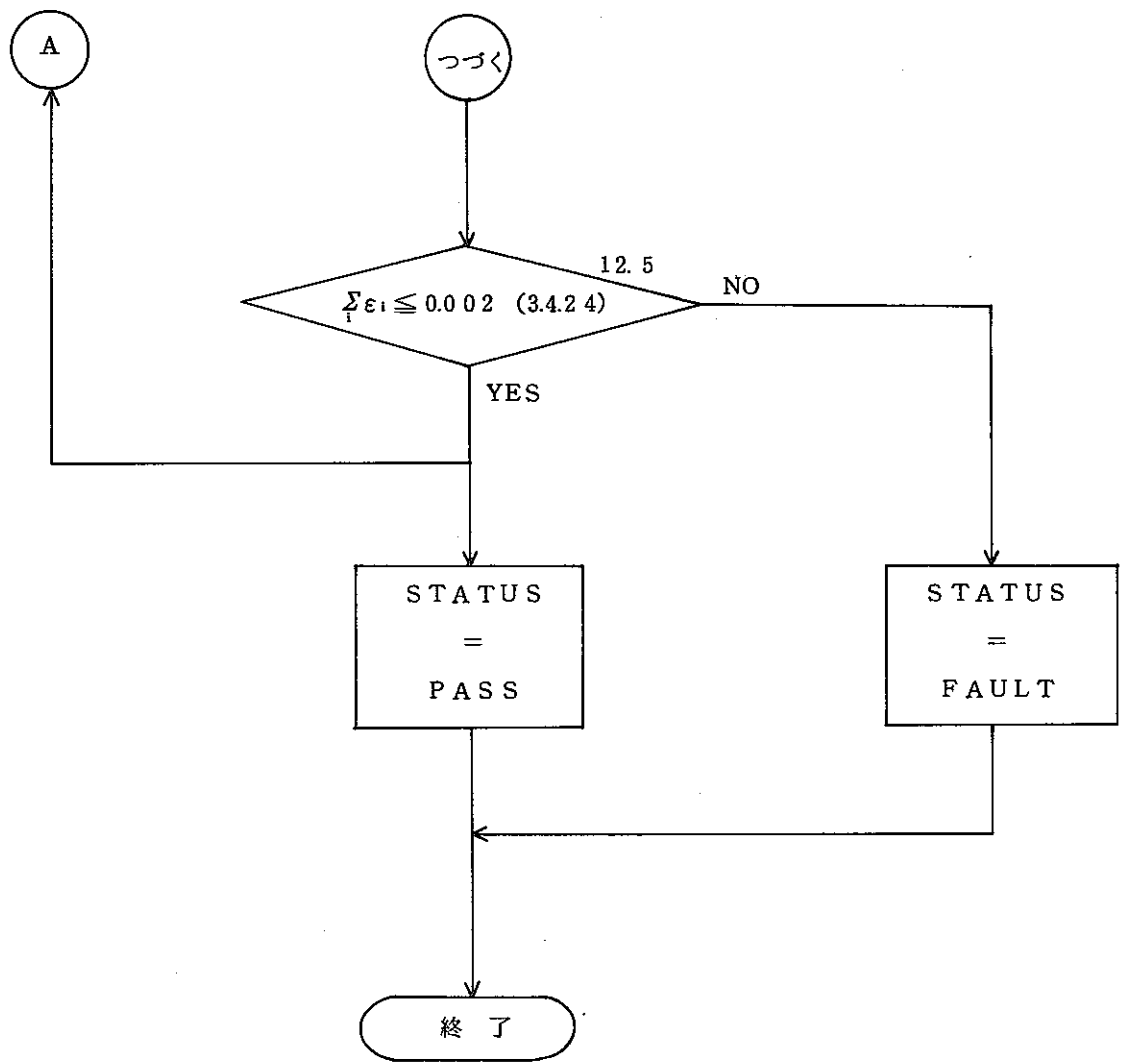




5) クリープ効果が顕著でないことの確認 (3.4.2(3)1))

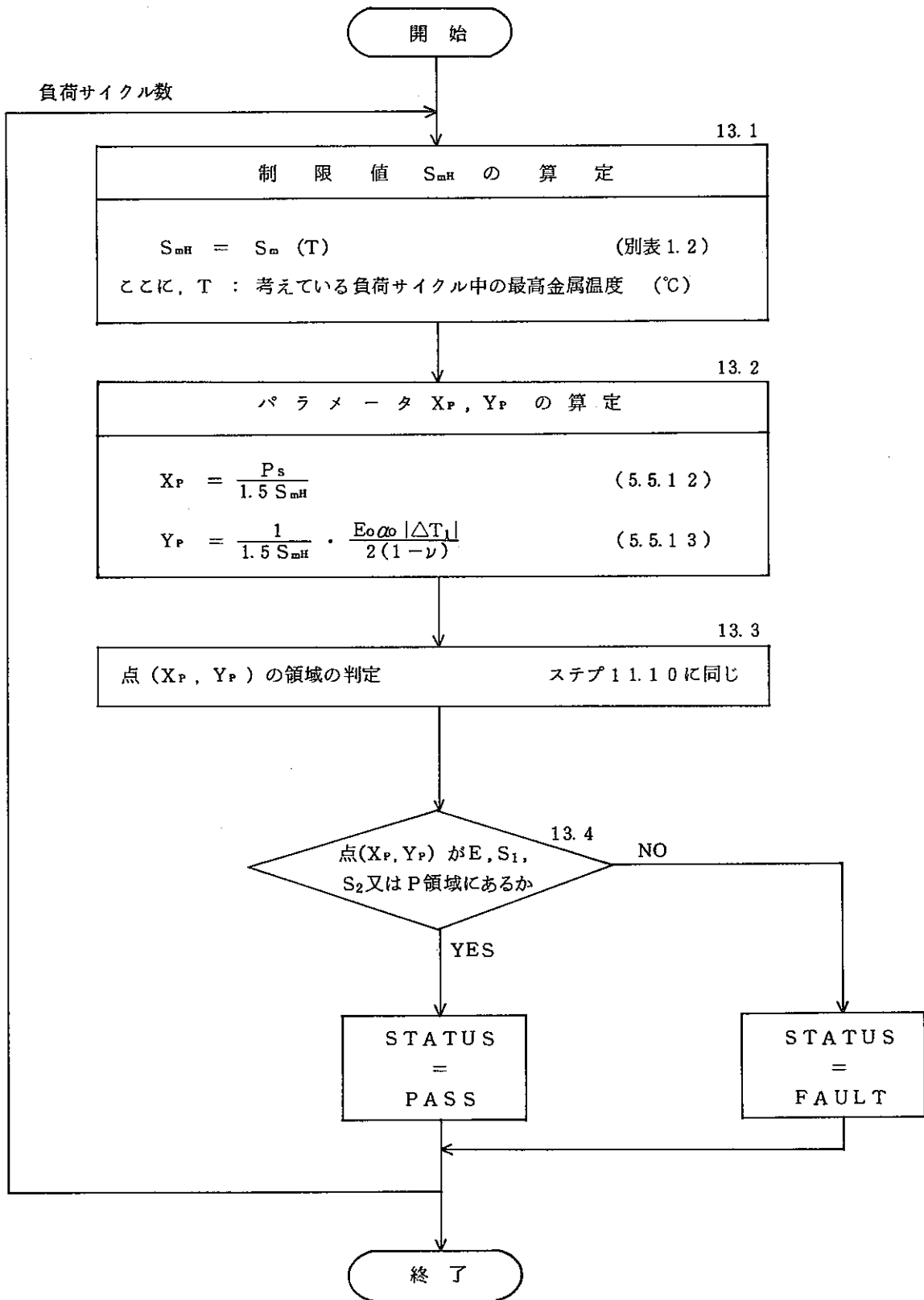






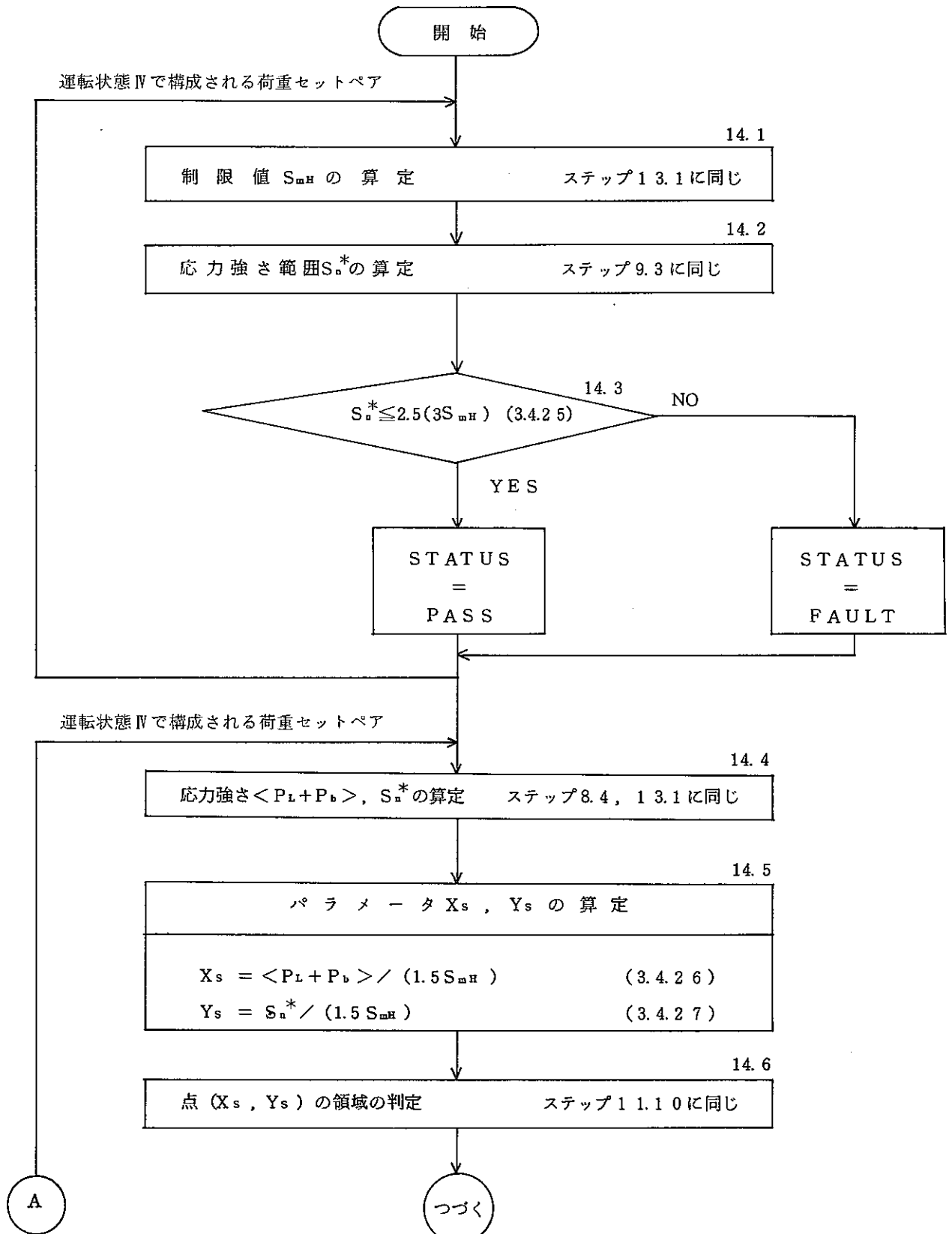
6) ひずみの制限 2 (Strain Limit 2) (5.5.3(3))

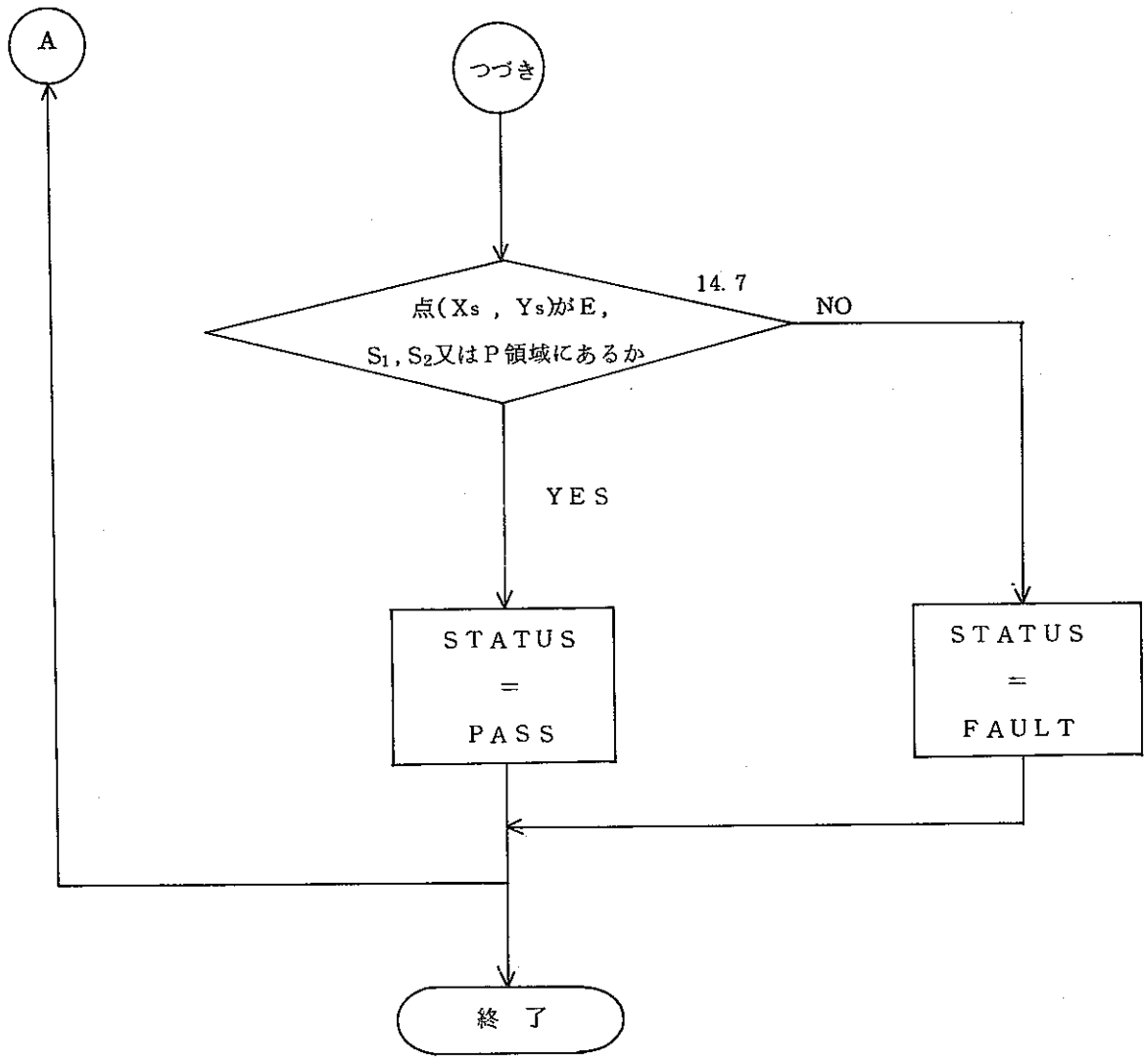
(熱応力ラチェットの制限)



7) ひずみの制限 5 (Strain Limit 5) (3.4.3)

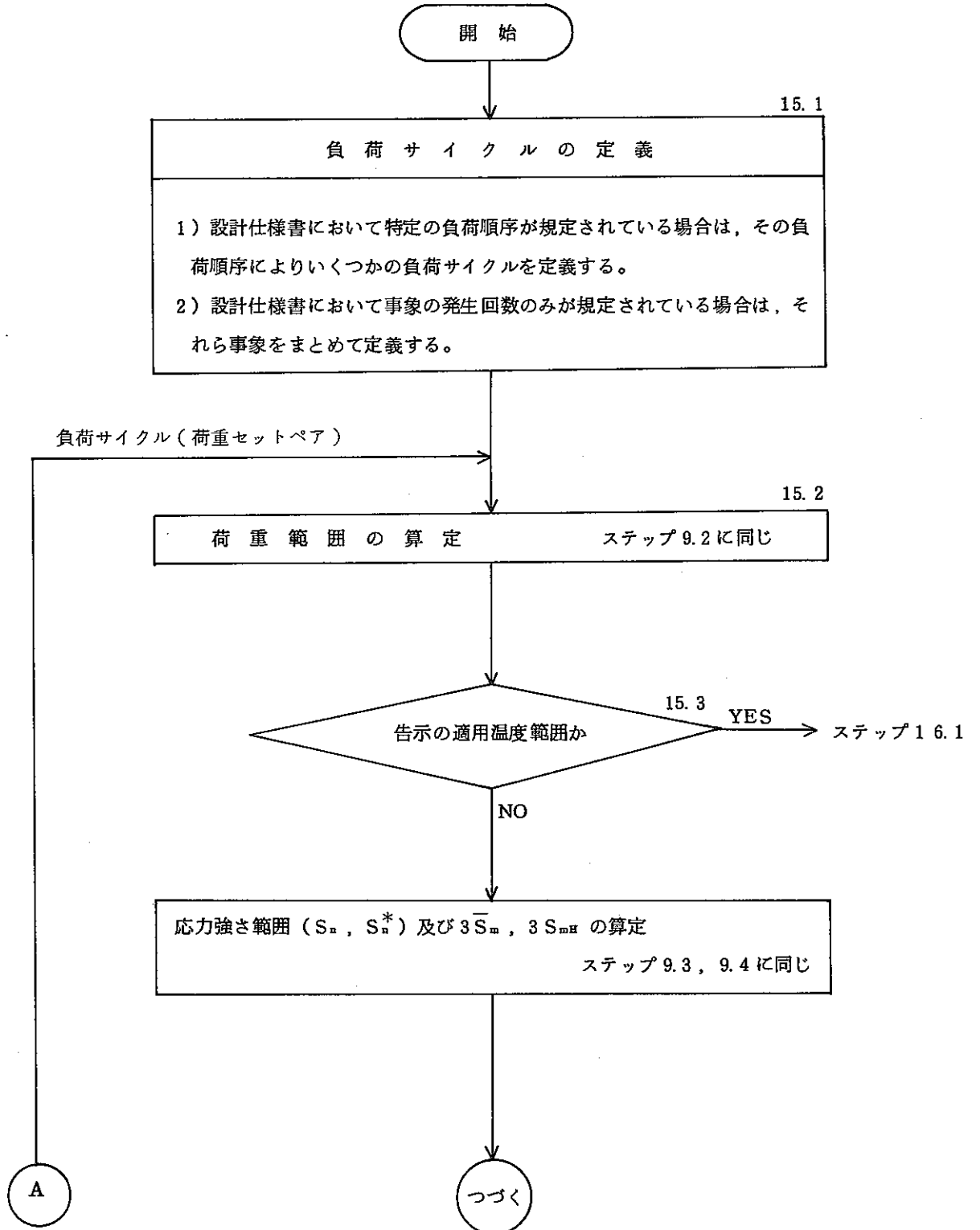
(運転状態 IV に関する制限)





(3) クリープ疲労損傷の制限 (5.6)

1) 疲労損傷係数の計算





15. 5

縦弾性係数 E の算定

$$E = E(T_1) \quad (\text{別表 1. 8})$$

ここに、 $T_1$  : 考えている負荷サイクル中の最高金属温度 (°C)



15. 6

ひずみ範囲  $\epsilon_n$  の算定

$$\epsilon_n = \frac{S_n}{E} \text{ 又は } \epsilon_n = \frac{S_n^*}{E} \quad (3. 5. 2 4)$$



15. 7

応力集中係数 K ,  $K_T$  の算定

付録H

(1) 応力集中係数 K は解析対象個所における局部的不連続に対して適切に定めるものとする。

K の値は告示 4 8 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  $K_1$  に管断面の扁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  $K_t$  は解析対象個所における局部的構造不連続に対して適切に定めるものとする。

$K_T$  の値は告示第 4 8 条に定める応力係数  $K_3$  を超えることを要しない。



つづき

15.8

### S\* の算定

○  $\epsilon_n$  を  $S_n$  によって定める場合

$$S^* = E \epsilon_n \quad (\epsilon_n \leq S_{rH} / E \text{ のとき}) \quad (3.5.12)$$

$$S^* = S \left( \epsilon_n - \frac{S_{rH}}{E} \right) + S_{rH} \quad (\epsilon_n > S_{rH} / E \text{ のとき}) \quad (3.5.13)$$

○  $\epsilon_n$  を  $S_n^+$  によって定める場合

$$S^* = E \epsilon_n \quad (\epsilon_n \leq 1.5 S_{mH} / E)$$

$$S^* = S \left( \epsilon_n - \frac{1.5 S_{mH}}{E} \right) + 1.5 S_{mH} \quad (\epsilon_n > 1.5 S_{mH} / E)$$

ここに、 $S(x)$  : 考えているひずみサイクル中の最高金属温度  $T_x$  において、ひずみ  $x$  に対して別図 1.11 の 0 hr 等時応力-ひずみ曲線により定める応力

$E$  : 時点1及び時点2の金属温度に対して別表 1.8 に定める値の平均値

15.9

### $\bar{S}$ の算定

○  $\epsilon_n$  を  $S_n$  によって定める場合

$$\bar{S} = K E \epsilon_n \quad (\epsilon_n \leq S_{rH} / E \text{ のとき}) \quad (3.5.14)$$

$$\bar{S} = S \left( K \epsilon_n - \frac{S_{rH}}{E} \right) + S_{rH} \quad (\epsilon_n > S_{rH} / E \text{ のとき}) \quad (3.5.15)$$

○  $\epsilon_n$  を  $S_n^+$  によって定める場合

$$\bar{S} = K E \epsilon_n \quad (\epsilon_n \leq 1.5 S_{mH} / E)$$

$$\bar{S} = S \left( K \epsilon_n - \frac{1.5 S_{mH}}{E} \right) + 1.5 S_{mH} \quad (\epsilon_n > 1.5 S_{mH} / E)$$

つづく

つづき

15. 10

ひずみ集中係数  $K_e$  の算定

○  $\epsilon_n$  を  $S_n$  によって定める場合

$$K_e = (S^*/\bar{S}) K^2 \quad (S_n \leq 3\bar{S}_m \text{ のとき}) \quad (3.5.26)$$

$$K_e = \text{Max}[(S^*/\bar{S}) K^2, KK_e'] \quad (S_n > 3\bar{S}_m \text{ のとき}) \quad (3.5.27)$$

ここに,  $K_e' = 1 + (q-1)\{1 - (3\bar{S}_m/S_n)\}$ ,  $q = 3.0$

(3.5.28)

○  $\epsilon_n$  を  $S_n^*$  によって定める場合

$$K_e = (S^*/\bar{S}) K^2 \quad (S_n^* \leq 3S_{mH})$$

$$K_e = \text{Max}[(S^*/\bar{S}) K^2, KK_e'] \quad (S_n^* > 3S_{mH})$$

ここに,  $K_e' = 1 + (q-1)\{1 - (3S_{mH}/S_n^*)\}$ ,  $q = 3.0$

15. 11

ひずみ範囲  $\epsilon_F$  の算定

$$\epsilon_F = \frac{E_0 \alpha_0 |\Delta T_2|}{E(1-\bar{\nu})} \quad (5.6.1)$$

ただし,  $\bar{\nu} = 0.5 - (0.5 - \nu) \left(\frac{3\bar{S}_m}{E\epsilon_{ts}}\right)$  ( $\bar{\nu} \geq \nu$ ) (3.5.11)

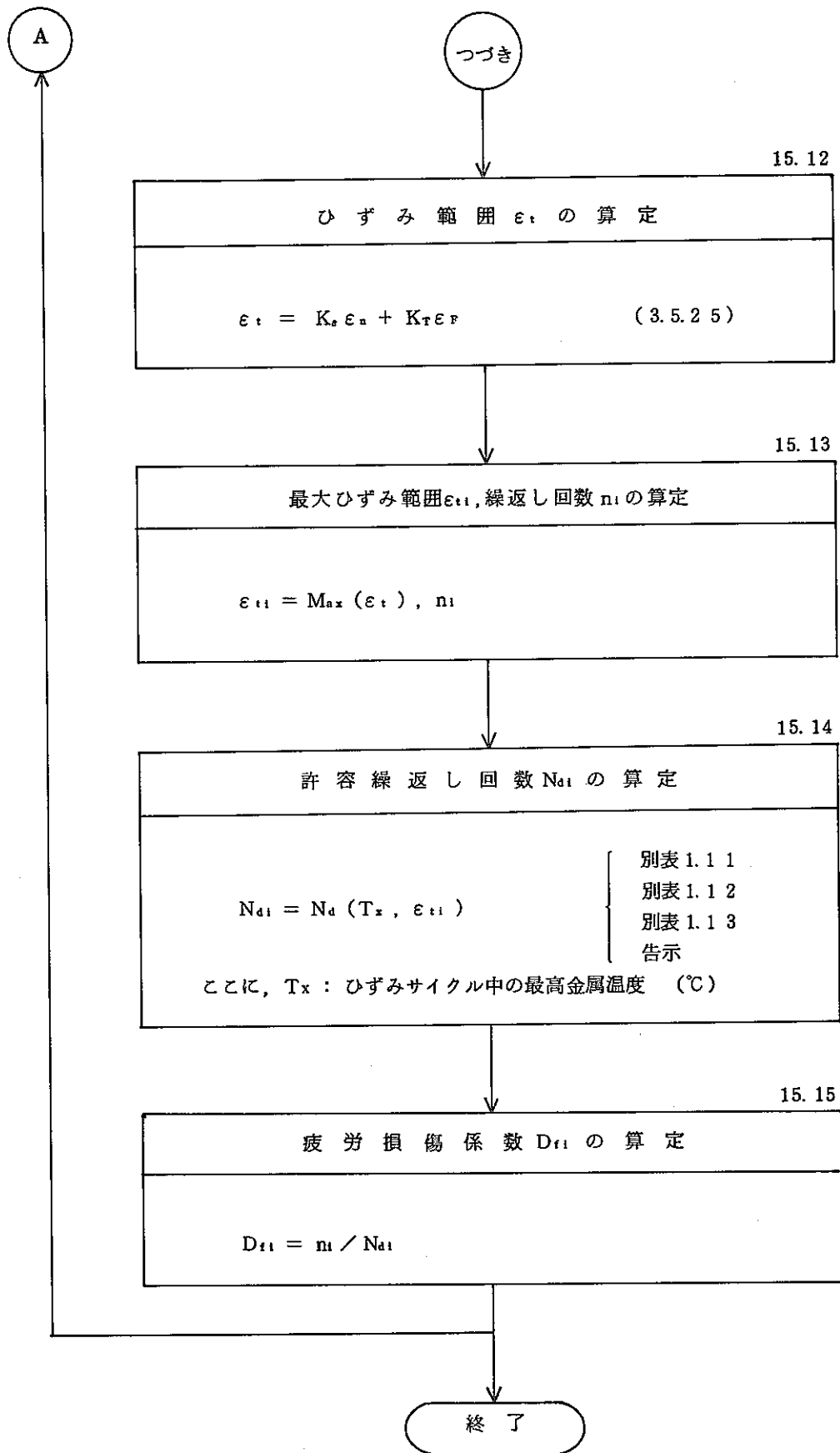
ここに,  $\epsilon_{ts}$ : 考えているひずみサイクルの繰返し回数  $n_i$  に対して当該ひずみサイクル中の最高金属温度  $T_i$  において  $N_{di}$  の算定に用いる別表に定める許容ひずみ範囲

$\nu$ : 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。告示の適用温度に対しては  $\nu = 0.3$

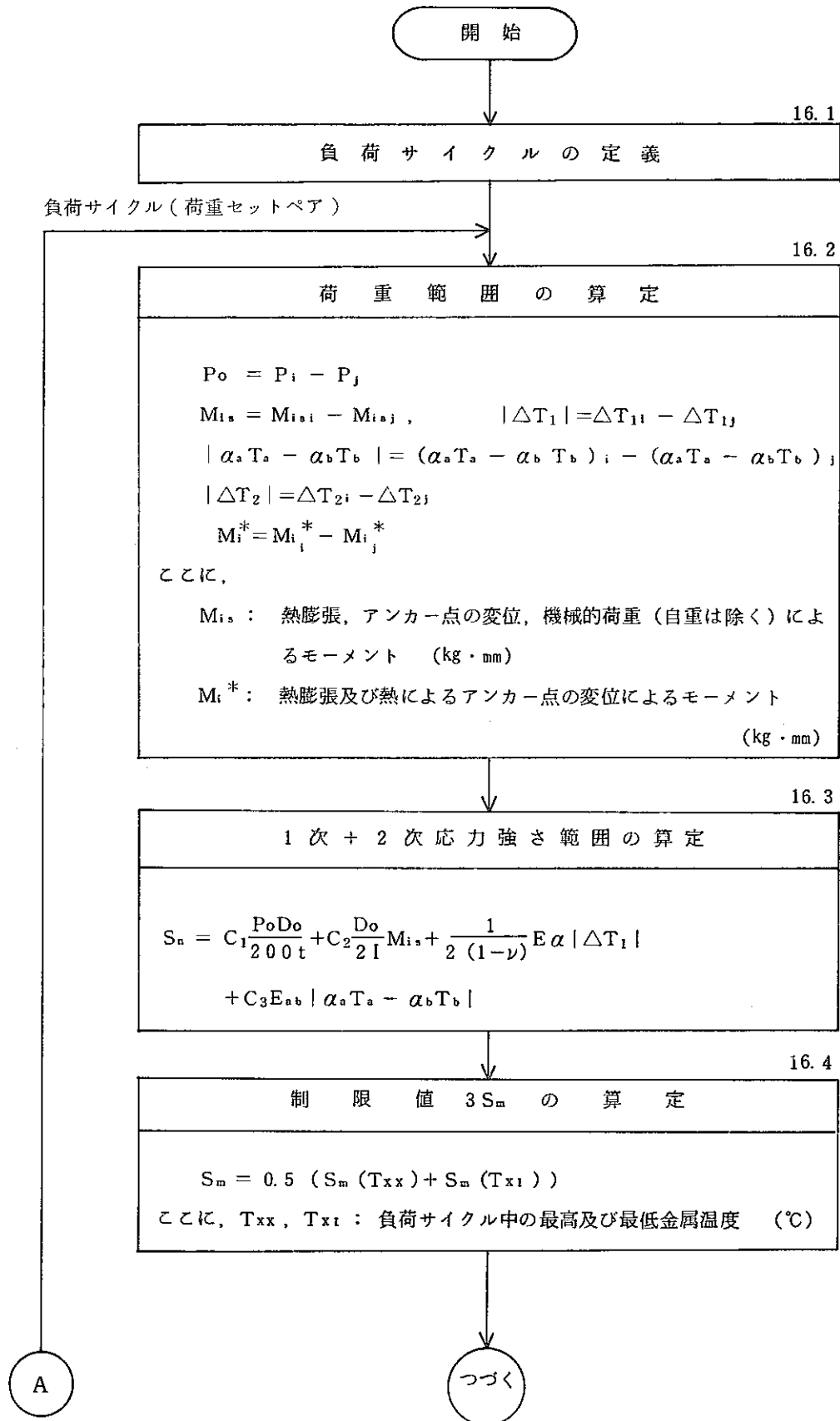
$\Delta T_2$ : 壁厚方向温度分布とモーメント等価温度分布の間の最大温度差の変動範囲 (°C)

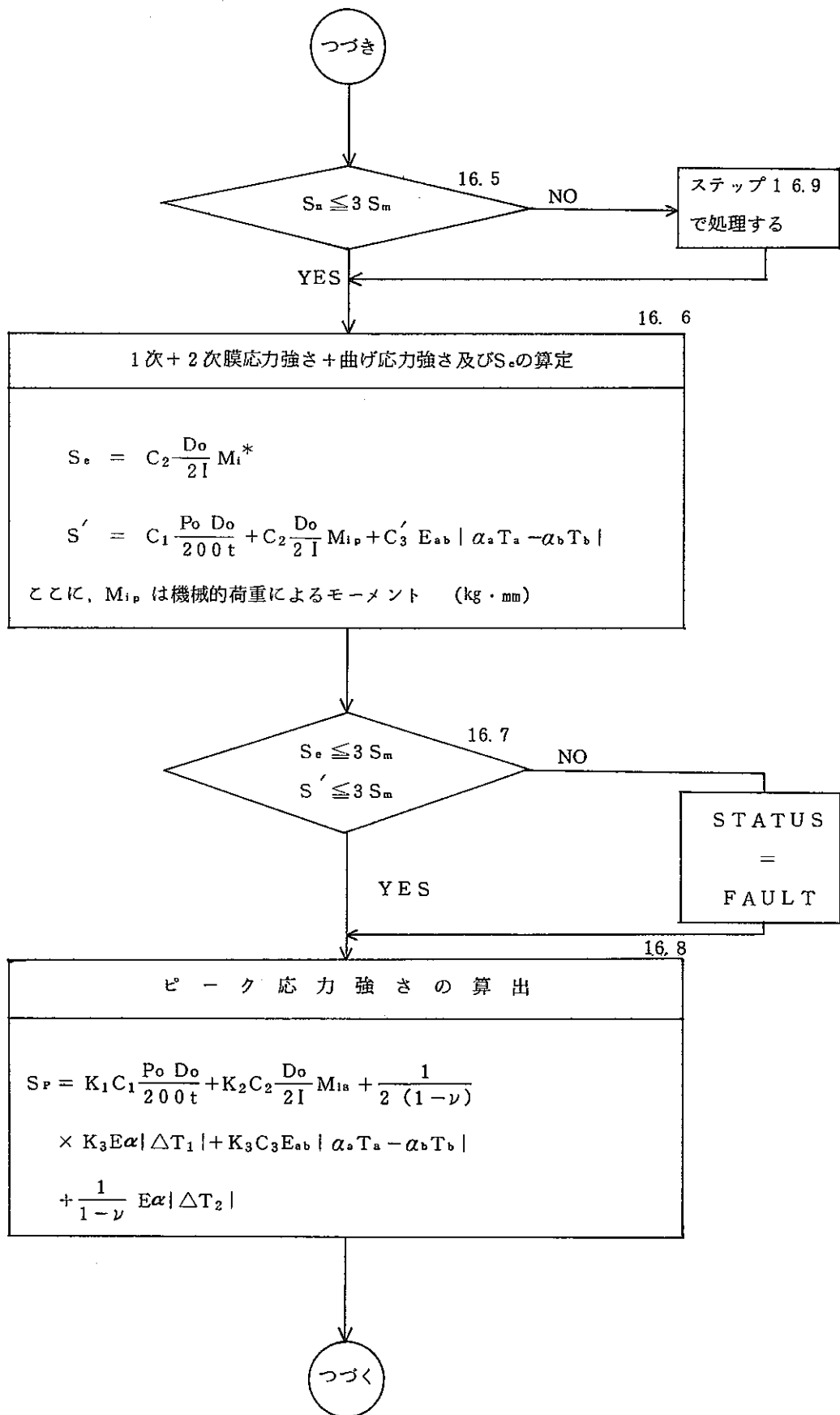
つづく





2) 告示による疲労損傷係数の算定





A

つづき

16.9

S<sub>ℓ</sub> の 算 出

- S<sub>n</sub> ≤ 3 S<sub>m</sub> のとき  

$$S_{\ell} = \frac{1}{2} S_P$$
- 3 S<sub>m</sub> < S<sub>n</sub> < 3m S<sub>m</sub> のとき  

$$S_{\ell} = \text{Max} \left[ \frac{K_c S_P}{2}, \frac{1}{2} \left\{ S_P + A_0 S_n \left( \frac{S_P}{3 S_m} - 1 \right) \right\} \right]$$
- 3m S<sub>m</sub> ≤ S<sub>n</sub> のとき  

$$S_{\ell} = \frac{S_P}{2n}$$

ここに, A<sub>0</sub>, m, n : 材料パラメータ

$$K_c = 1 + \frac{1-n}{n(m-1)} \left( \frac{S_n}{3 S_m} - 1 \right)$$

16.10

許 容 繰 返 し 回 数 の 算 定

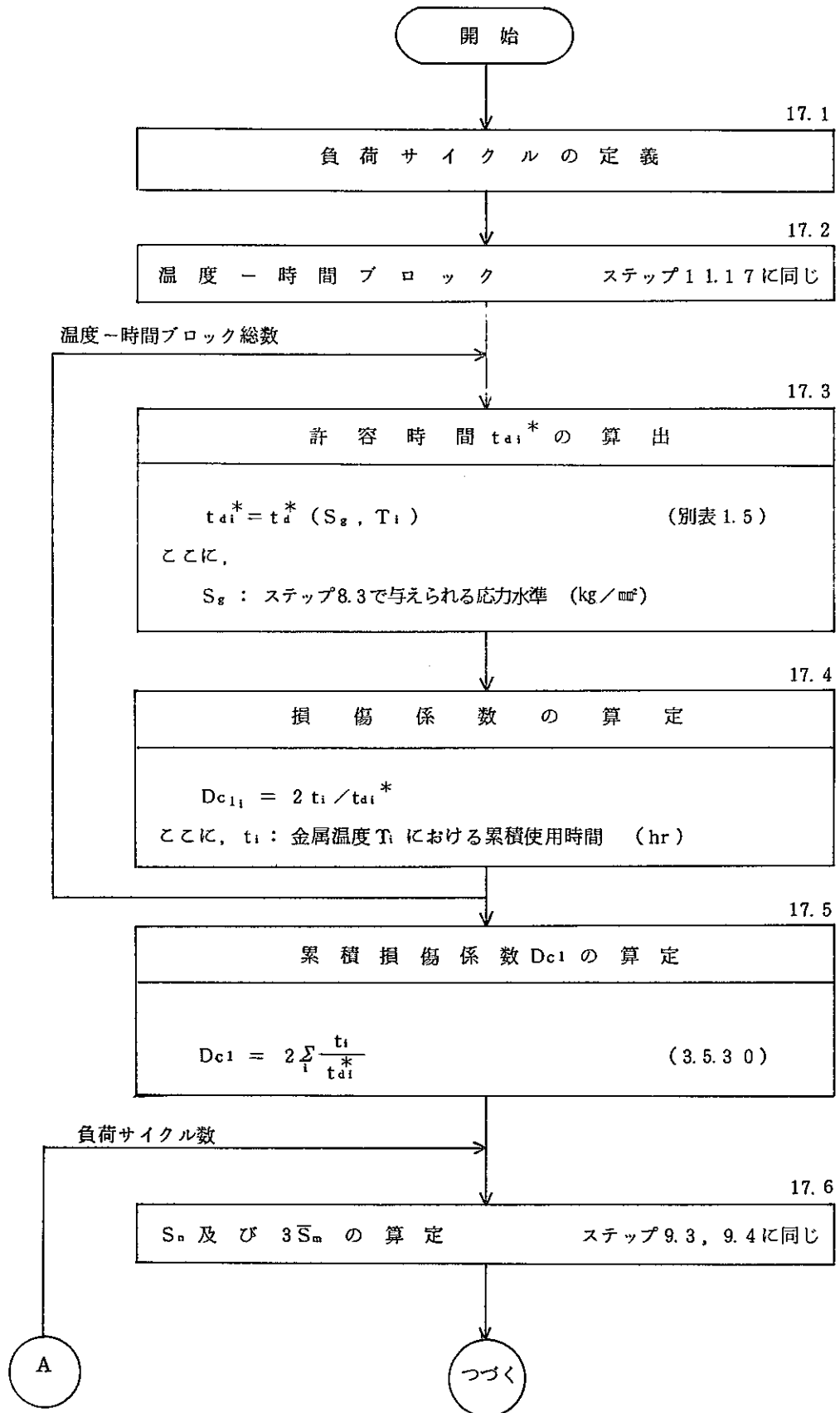
$$N_{d1} = N_d ( S_{\ell} ) \quad \text{(告示別図第1, 第2)}$$

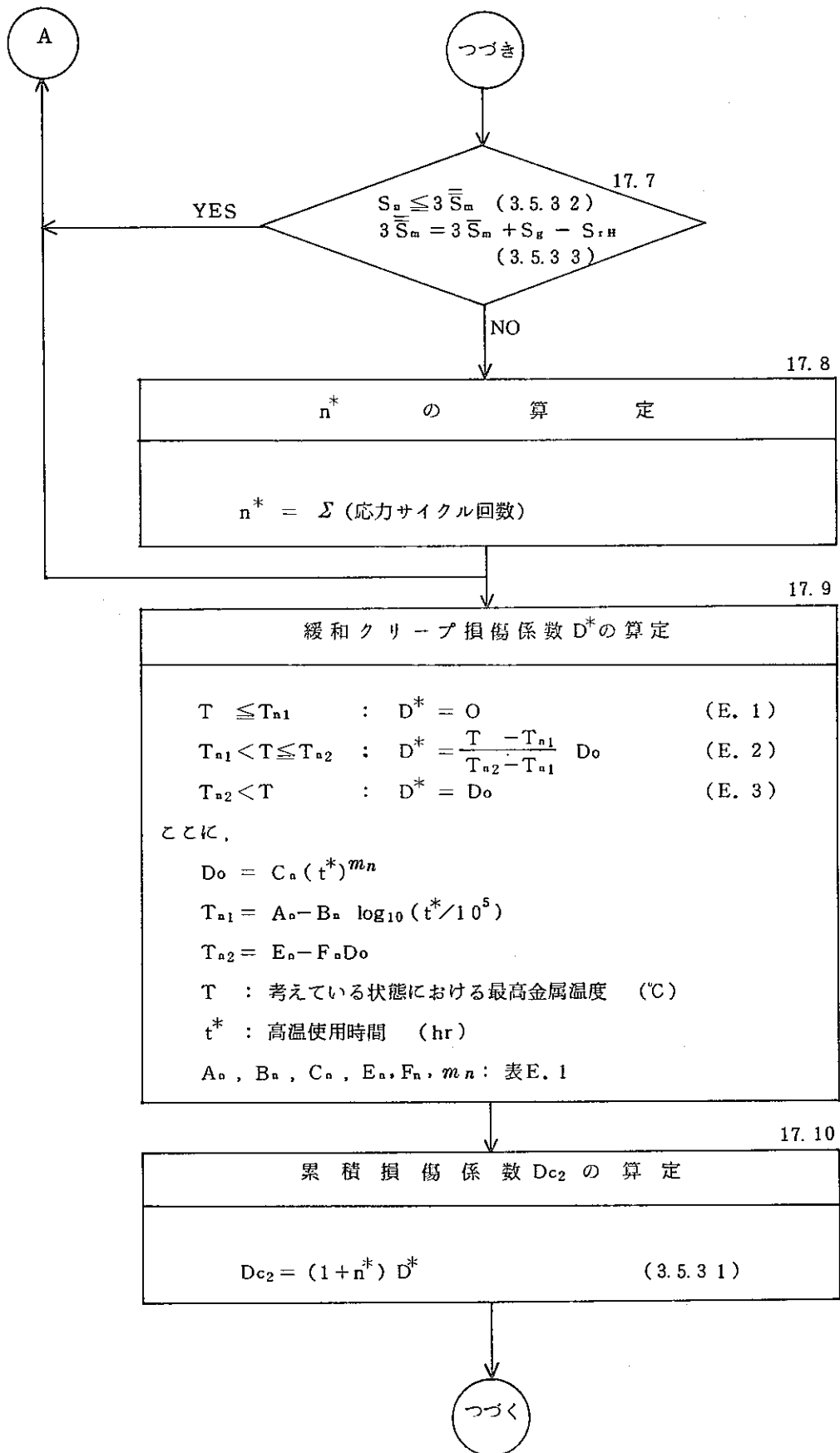
16.11

損 傷 係 数  $n_i / N_{d1}$  の 算 定

終 了

3) クリープ損傷係数の計算





つづき

負荷サイクル数

17. 11

緩和クリープ損傷係数  $D^{**}$  の算定

(1) 係数Kにかかわる局部応力集中及びピーク熱応力のいずれも無視する場合

$$D^{**} = 0$$

(2)  $\epsilon_t \leq 3 \bar{S}_m / E$  のとき (F. 1)

$$D^{**} = 0$$

(3) (1), (2)以外の場合

$$D^{**} = D_F \{ (E \epsilon_t - 3 \bar{S}_m) / 3 S_m \}^{n_P} \quad (F. 2)$$

$$n_P = \{ -A_P / (T + 273.15) + B_P \}^{-1} \quad (F. 3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T \leq T_{P1} \quad : \quad D_F = 0 \quad (F. 4) \\ T_{P1} < T \leq T_{P2} \quad : \quad D_F = \frac{T - T_{P1}}{T_{P2} - T_{P1}} D_{F0} \quad (F. 5) \\ T_{P2} < T \quad : \quad D_F = D_{F0} \quad (F. 6) \end{array} \right.$$

$$D_{F0} = C_P (t^* + E_P)^{m_P} \quad (F. 7)$$

$$T_{P1} = -F_P \log_{10} (H_P t^*) + G_P \quad (F. 8)$$

$$T_{P2} = -F_P \log_{10} (2.0 t^* / 3) + G_P \quad (F. 9)$$

ここに,

$t^*$  : 高温使用時間 (hr)

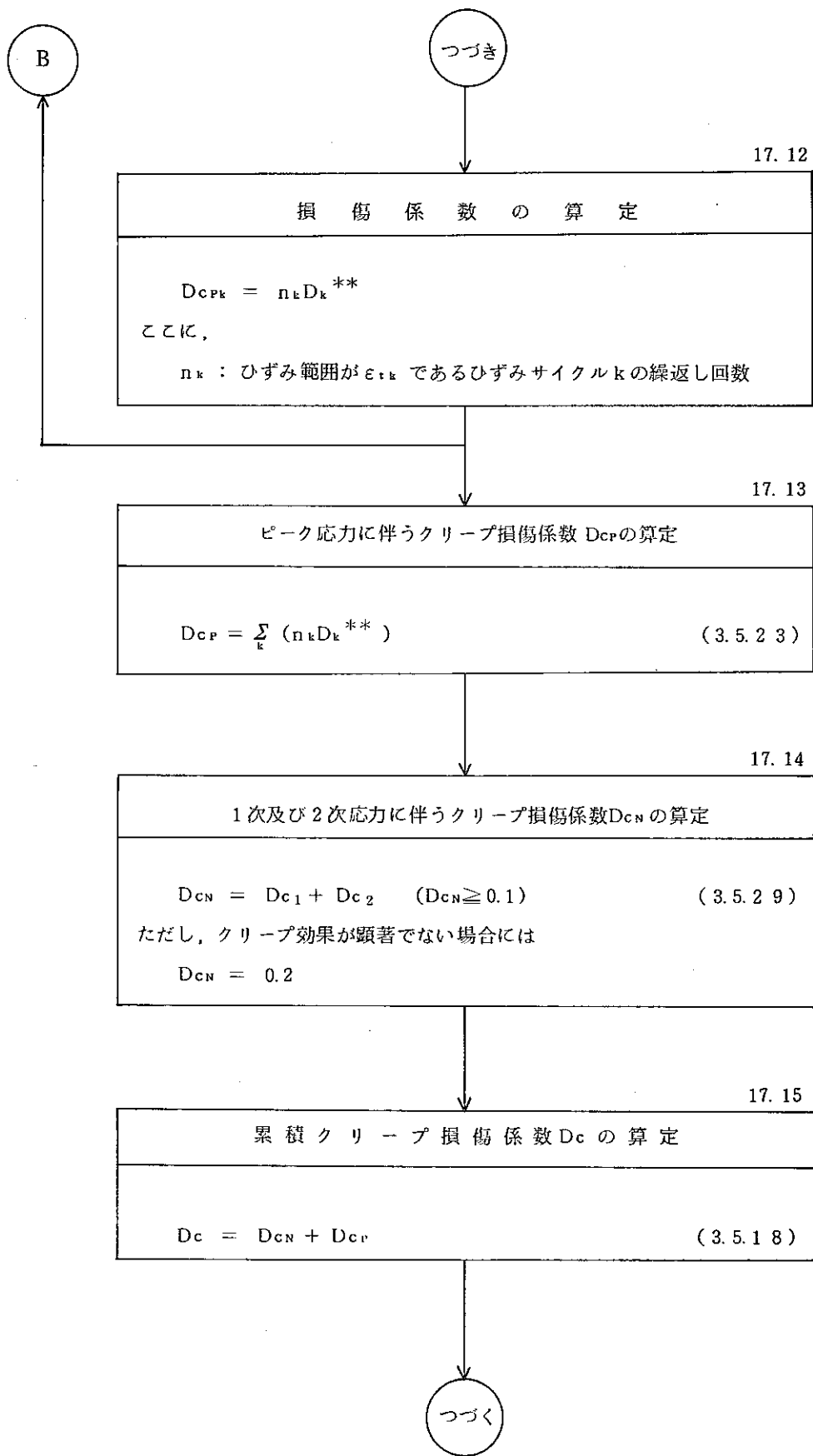
$T$  : 考えている評価点の金属温度履歴に基づき定める温度 (°C)

$S_m = S_m (T)$  (別表 1. 2)

$A_P, B_P, C_P, E_P, F_P, G_P, H_P, m_P$  : 表 F. 1

B

つづく





つづき

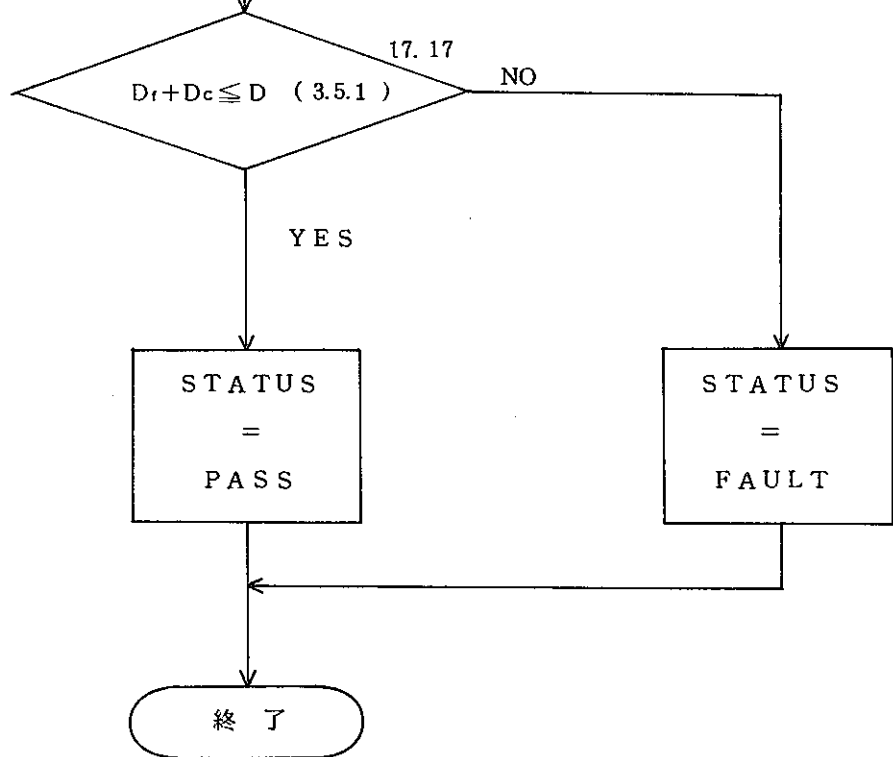
17. 16

累積クリープ疲労損傷係数の制限値 D の算定

$$D = 1.0 - \frac{4}{3} D_c \quad (0 \leq D_c \leq 0.3)$$
$$D = \frac{3}{7} + \frac{4}{7} D_c \quad (0.3 \leq D_c \leq 1.0)$$

ただし、クリープ効果が顕著でない場合には  
 $D = 1.0$

図 C. 1



## 2.2 応力分類法

方針に従って第1種機器の強度評価を行う場合、生じている応力をその発生原因、発生位置によって、1次一般膜応力( $P_m$ )、1次局部膜応力( $P_L$ )、1次曲げ応力( $P_b$ )、2次応力( $Q$ )、ピーク応力( $F$ )の応力カテゴリーに分類し、最大主応力差に相当する応力強さ(Stress Intensity)を求めなければならない。

本節ではまず2.2.1項で有限要素法による応力解析結果を用いる場合の応力分類手順について説明し、2.2.2項以降で、本評価システムで用いている各評価手順の詳細について説明する。

### 2.2.1 応力分類手順

有限要素法による応力解析結果を用いる場合の応力分類の手順は次のようになる。

- (1) 応力評価断面(以後SCL(Stress Classification Line)と略す)を決定する。
- (2) 応力解析結果が全体座標系で求められている場合には、これらを局所(SCL)座標系へ変換する。
- (3) SCL上の各応力成分の離散化値を求める。
- (4) 等価線形応力を求める。
- (5) 応力カテゴリーに分類する。

上の手順について次頁以降で説明する。

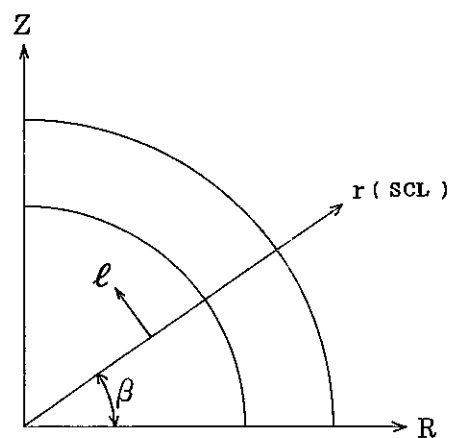
## 2.2.2 応力成分の座標変換

### (1) 軸対称体の場合

次式により全体座標系での応力成分を SCL 座標系

( $\sigma_r = \text{SCL 方向}$ ,  $\sigma_l$  : 子午線方向,

$\sigma_t = \text{周方向}$ ,  $\tau_{rl} = \text{剪断応力}$ )へ変換する。



$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_l \\ \sigma_t \\ \tau_{rl} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & 0 & 2 \sin \beta \cos \beta \\ \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & 0 & -2 \sin \beta \cos \beta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta \cos \beta & \sin \beta \cos \beta & 0 & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_R \\ \sigma_Z \\ \sigma_t \\ \tau_{RZ} \end{Bmatrix}$$

### (2) 一般三次元体の場合

次式を用いて全体座標系での応力成分を SCL 座標系へ変換する。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2l_1m_1 & 2m_1n_1 & 2n_1l_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2l_2m_2 & 2m_2n_2 & 2n_2l_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2l_3m_3 & 2m_3n_3 & 2n_3l_3 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & n_1n_2 & l_1m_2+l_2m_1 & m_1n_2+m_2n_1 & n_1l_2+n_2l_1 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & l_2m_3+l_3m_2 & m_2n_3+m_3n_2 & n_2l_3+n_3l_2 \\ l_3l_1 & m_3m_1 & n_3n_1 & l_3m_1+l_1m_3 & m_3n_1+m_1n_3 & n_3l_1+n_1l_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.2.1)$$

ここで  $l_1, m_1, n_1$  : x 軸の X, Y, Z 軸に対する方向余弦

$l_2, m_2, n_2$  : y 軸の X, Y, Z 軸に対する方向余弦

$l_3, m_3, n_3$  : z 軸の X, Y, Z 軸に対する方向余弦

SCL座標系の定義方法についてはFig. 2.2.1 参照のこと。

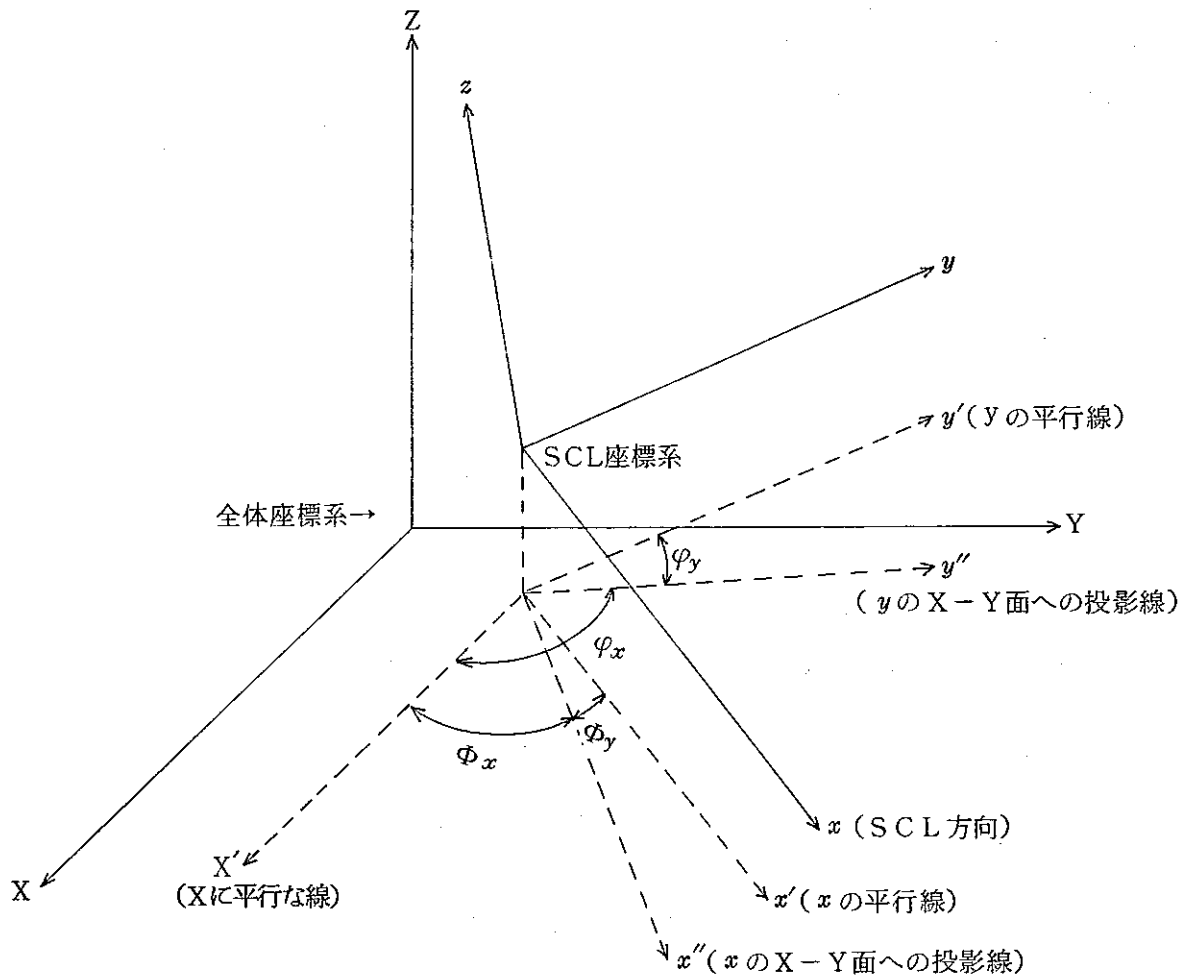


Fig. 2. 2. 1 SCL 座標系の定義

### 2.2.3 評価断面の応力値の算定

#### (1) 方法 1

本方法は軸対称体要素（1次要素又は2次要素でも図心点で応力値を求めている場合）、一般三次元体要素に適用している方法であり、応力値の計算点はSCLを構成している要素の図心位置と内外表面とする。

内外表面の応力値は各々表面に近い3個の要素図心位置における値を用いて2次式で外挿して求める。

従って、SCLは各要素の図心上になければならない。

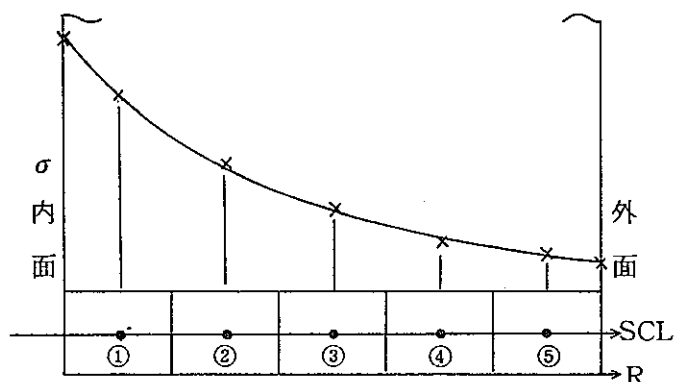


Fig. 2. 2. 2 応力値の計算点（ケース 1）

#### (2) 方法 2

本方法は軸対称体要素（8節点2次要素で、ガウスの9積分点で応力値を求めている場合）に適用している方法で、応力値の計算点はSCLと要素の辺の交点とする。

交点での応力成分の値は各要素を構成する8節点における値と、セレンディピティの2次の形状関数を用いて求める。したがって、SCLの方向は任意に定義できる。

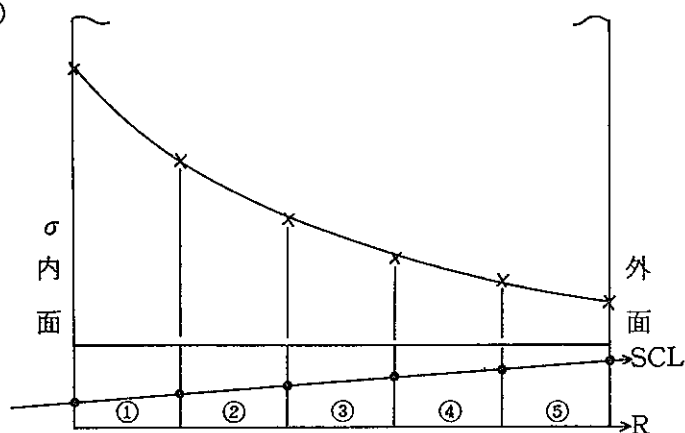


Fig. 2. 2. 3 応力値の計算点（ケース 2）

#### 2.2.4 等価線形応力の算定法

前項で求めた離散化点での値を用いて、モーメント等価線形応力分布を算定する。線形化は軸方向応力と周方向応力についてのみ行う。

半径方向応力および剪断応力については線形化は行わず、内外表面応力値を線形化された応力値とみなす。

線形化は次式を用いて行う。

$$S_{\text{LINEAR}} = S_{\text{MID}} + \Delta S \frac{\eta}{h/2} \quad (2.2.2)$$

$$\text{ここで } S_{\text{MID}} = S_{\text{MEAN}} - \frac{h}{6r_m} \Delta S$$

$$\Delta S = \frac{6/h^2}{(1-h^2/12r_m^2)} \left[ M - N \frac{h^2}{12r_m} \right]$$

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} S(\eta) \eta \left( 1 + \frac{\eta}{r_m} \right) d\eta \doteq \sum_{i=1}^n \left\{ S_i \left( 1 + \frac{r_i - r_m}{r_m} \right) (r_i - r_m) W_i \right\}$$

$$N = \int_{-h/2}^{h/2} S(\eta) \left( 1 + \frac{\eta}{r_m} \right) d\eta \doteq \sum_{i=1}^n \left\{ S_i \left( 1 + \frac{r_i - r_m}{r_m} \right) W_i \right\}$$

$$\eta = r - r_m$$

$r_m$  = 平均曲率半径

$h$  = 板厚 (= SCL 長さ)

$$S_{\text{MEAN}} = N/h$$

## 2.2.5 応力分類

本プログラムシステムでは、方針に基づいて評価する場合に必要な応力分類結果を3次元のテーブル(CSTRS(I, J, K))にまとめ、これを評価断面毎にワークファイルから読み込んでワークテーブルとして用いている。

CSTRS テーブルの内容を以下に示す。

CSTRS(I, J, K) : 応力分類テーブル

I =	ロードセットNo	
J = 1	$S_P$	$= \sigma_m(P)$
= 2	$Q_{mEF}$	$= \sigma_m(T)$
= 3	$P_L$	$= \sigma_m(All - T)$
= 4	$P_L^*$	$= \sigma_m^*(All - T)$
= 5	$P_b$	$= \sigma_b(P) \text{ or } 0.0$
= 6	$P_b^*$	$= \sigma_b^*(P) \text{ or } 0.0$
= 7	$Q$	$= \sigma_m(T) + \sigma_b(All) - \{\sigma_b(P) \text{ or } 0.0\}$
= 8	$Q^*$	$= \sigma_m^*(T) + \sigma_b^*(All) - \{\sigma_b^*(P) \text{ or } 0.0\}$
= 9	$Q_{Tb}$	$= \sigma_b(T)$
= 10	$Q_{Tb}^*$	$= \sigma_b^*(T)$
= 11	$Q_{TbEF}$	$= \sigma_b(T) \pm \frac{E\alpha\Delta T_1}{2(1-\nu)}$
= 12	$Q_{bEF}$	$= \sigma_b(All) - \{\sigma_b(P) \text{ or } 0.0\}$
= 13	$F + F^*$	$= \sigma_F(All)$
= 14	$F_T + F_T^*$	$= \sigma_F(T)$
= 15	$P_L + P_L^*$	$= (3) + (4)$
= 16	$P_L + P_b$	$= (3) + (5)$
= 17	$P_L + P_L^* + P_b + P_b^*$	$= (3) + (4) + (5) + (6)$
= 18	$P_L^* + P_b^* + Q^*$	$= (4) + (6) + (8)$

$$\begin{aligned}
&= 19 \quad P_L + P_b + Q + P_L^* + P_b^* + Q^* = (3) + (4) + (5) + (6) + (7) + (8) \\
&= 20 \quad P_L + P_b + Q + F + P_L^* + P_b^* + Q^* + F^* = \text{Surface Stress}(A11-T) \\
&= 21 \quad Q^T + Q^{T*} = \sigma_m(T) + \sigma_b(T) + \sigma_m^*(T) + \sigma_b^*(T) \\
&= 22 \quad P_L + P_b + Q + P_L^* + P_b^* + Q^*(A11-T) \\
&\quad = \sigma_m(A11-T) + \sigma_b(A11-T) + \sigma_m^*(A11-T) + \sigma_b^*(A11-T) \\
&= 23 \quad P_L^I = P_L + \{ Q_{mEF} \text{ or } 0.0 \} = (3) + \{ (2) \text{ or } 0.0 \} \\
&= 24 \quad P_b^I = P_b + \{ (Q_{bEF} + Q_{TbEF}) \text{ or } 0.0 \} \\
&\quad = (5) + \{ ((12) + (11)) \text{ or } 0.0 \} \\
&= 25 \quad Q^I = Q - \{ Q_{mEF} \text{ or } 0.0 \} - \{ (Q_{bEF} + Q_{TbEF}) \text{ or } 0.0 \} \\
&= 26 \quad Q_{Tb}^I = Q_{Tb} - \{ Q_{TbEF} \text{ or } 0.0 \} = (9) - \{ (11) \text{ or } 0.0 \} \\
&= 27 \quad P_L^I + P_L^* = (23) + (4) \\
&= 28 \quad P_L^I + P_b^I = (23) + (24) \\
&= 29 \quad P_L^I + P_L^* + P_b^I + P_b^* = (23) + (4) + (24) + (6) \\
&= 30 \quad P_L^I + P_b^I + Q^I + P_L^* + P_b^* + Q^* - Q_{Tb}^I - Q_{Tb}^* \\
&\quad = (23) + (24) + (25) + (4) + (6) + (8) - (26) - (10) \\
&= 31 \quad Q_{Tb}^I + Q_{Tb}^* = (26) + (10) \\
&= 32 \quad P_L^* + P_b^* + Q^* = \sigma_m^*(A11-T) + \sigma_b^*(A11-T) \\
&= 33 \quad P_L^{II} = P_L + \{ Q_{mEF} \text{ or } 0.0 \} = (3) + \{ (2) \text{ or } 0.0 \} \\
&= 34 \quad P_b^{II} = P_b + \{ (Q_{bEF} + Q_{TbEF}) \text{ or } 0.0 \} = (5) + \{ ((12) + (11)) \text{ or } 0.0 \} \\
&= 35 \quad Q^{II} = Q - \{ \{ Q_{mEF} \text{ or } 0.0 \} - \{ (Q_{bEF} + Q_{TbEF}) \text{ or } 0.0 \} \} \\
&\quad \quad * (1 - \text{FACTR}) \\
&= 36 \quad Q_{Tb}^{II} = Q_{Tb} - \{ Q_{TbEF} \text{ or } 0.0 \} = (9) - \{ (11) \text{ or } 0.0 \} \\
&= 37 \quad P_L^{II} + P_L^* = (33) + (4) \\
&= 38 \quad P_L^{II} + P_b^{II} = (33) + (34) \\
&= 39 \quad P_L^{II} + P_L^* + P_b^{II} + P_b^* = (33) + (4) + (34) + (6)
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
= 40 & P_L^{\text{II}} + P_b^{\text{II}} + Q^{\text{II}} + P_L^* + P_b^* + Q^* - Q_{Tb}^{\text{II}} - Q_{Tb}^* \\
& = (33) + (34) + (35) + (4) + (6) + (8) - (36) - (10) \\
= 41 & Q_{Tb}^{\text{II}} + Q_{Tb}^* = (36) + (10) \\
= 42 & \text{夕} \approx - \\
= 43 & P_L^{\text{II}'} = P_L + Q_{\text{MEF}} = (3) + (2) \\
= 44 & P_b^{\text{II}'} = P_b + Q_{b\text{EF}} + Q_{Tb\text{EF}} = (5) + (12) + (11) \\
= 45 & Q^{\text{II}'} = Q - Q_{\text{MEF}} - Q_{b\text{EF}} - Q_{Tb\text{EF}} = (7) - (2) - (11) - (12)
\end{aligned}$$

K = 1	内 面	応力成分	$\sigma_z$
= 2	"	"	$\sigma_r$
= 3	"	"	$\sigma_\theta$
= 4	"	"	$\tau_{zr}$
= 5	"	"	$\tau_{r\theta}$
= 6	"	"	$\tau_{\theta z}$
= 7	"	主 応 力	$\sigma_1$
= 8	"	"	$\sigma_2$
= 9	"	"	$\sigma_3$
= 10	"	応力強さ	S
= 11	外 面	応力成分	$\sigma_z$
= 12	"	"	$\sigma_r$
= 13	"	"	$\sigma_\theta$
= 14	"	"	$\tau_{zr}$
= 15	"	"	$\tau_{r\theta}$
= 16	"	"	$\tau_{\theta z}$
= 17	"	主 応 力	$\sigma_1$
= 18	"	"	$\sigma_2$
= 19	"	"	$\sigma_3$
= 20	"	応力強さ	S

注) 記号の説明

下記以外の記号は方針のそれに同じ

$S_p$  : 圧力荷重だけによる膜応力成分

$\sigma_m$  : 膜応力成分 (下図参照)

$\sigma_b$  : 曲げ応力成分 (下図参照)

$\sigma_F$  : ピーク応力成分 (下図参照)

P : 圧力荷重

T : 熱荷重

A11 : 全荷重の重ね合わせ

右肩の添字 I : 長期 1 次応力が低い場合を意味する

右肩の添字 II : 長期 1 次応力が高い場合を意味する

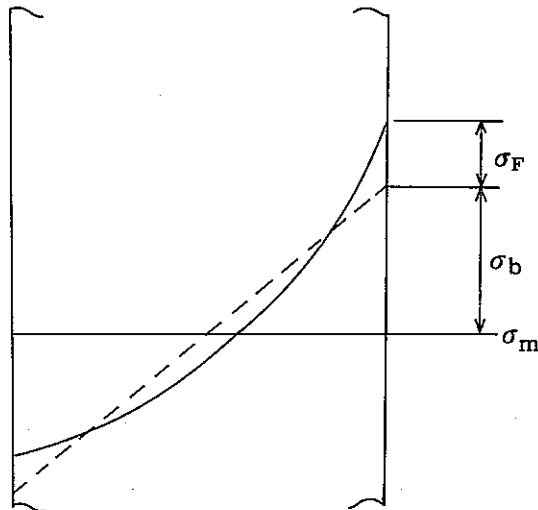


Fig. 2. 2. 4 応力の分類

## 2.2.6 薄板要素を用いる場合の応力分類

薄板要素を用いた解析では(1次+2次)応力までで、ピーク応力は求められないので、次のようにして算定する。

- (1) 長期+短期ピーク応力  $F + F^*$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= (K-1) \times \sigma_{x, PL+Pb+Q} \\ \sigma_y &= (K-1) \times \sigma_{y, PL+Pb+Q} \end{aligned} \right\} \quad (4.3.4)$$

- (2) 長期+短期ピーク熱応力  $F_T + F_T^*$

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{E\alpha\Delta T_2}{1-\nu} \quad (4.3.5)$$

- (3) 長期熱曲げ応力  $Q_{Tb}$ , 短期熱曲げ応力  $Q_{Tb}^*$

解析結果に板厚方向線形温度勾配  $\Delta T_1$  による応力成分が含まれていない場合には次式により算定する。

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{E\alpha\Delta T_1}{2(1-\nu)} \quad (4.3.6)$$

ここに  $K$  : 相当弾性応力集中係数

$E$  : 縦弾性係数 ( $Kg/mm^2$ )

$\alpha$  : 瞬時熱膨張係数 ( $mm/mm/^\circ C$ )

$\nu$  : ポアソン比

$\Delta T_1$  : モーメント等価線形温度分布を仮定した場合における壁厚内外面の温度差 ( $^\circ C$ )

$\Delta T_2$  : 壁厚方向温度分布とモーメント等価線形温度分布の間の温度差 ( $^\circ C$ )

## 2.3 複雑な荷重履歴に対するクリープ疲労評価法

高速炉の機器類は運転寿命中に種々の荷重の組合せを受けたり、ランダムな荷重を受ける。しかも実際の機器類は多軸応力状態であり、この多軸応力状態で複雑な荷重履歴を受ける場合のクリープ疲労が重要な問題になってくる。

本評価システムは、ほとんど別個に研究されてきているランダム荷重の計数法の問題と、多軸クリープ疲労評価法の問題を組合せて、新しい評価法の提案を試みた。

まず、2.3.1項でランダム荷重の計数法について2.3.2項で多軸クリープ疲労評価法について説明する。

### 2.3.1 ランダム荷重の計数法

現在方針で採用されているひずみ範囲の計数法は荷重履歴が複雑な場合には必ずしも実際の応力-ひずみ挙動に対応した評価法になっていない。

そこで現在、ランダム波形に対する計数法の主流とみられる<sup>(12)</sup>レインフロー法<sup>(13)(14)</sup>（以下RF法と記す）とこのレインフロー法を簡略化したヒステリシスループ法<sup>(13)</sup>（以下HL法と記す）をとり入れた評価法を考える。

また多軸応力状態の場合のひずみ履歴は1) 最大剪断ひずみ説 (Tresca), 2) 8面体剪断ひずみ説 (Mises) 及び3) これらを一般化したBrownとMillerの方法 (Konter, Janssen, Husslage) の3ケースのうちのいずれかで求めて、このひずみ履歴に対してRF法又はHL法を適用することとする。

#### (1) RF法による計数方法<sup>(13)(14)</sup>

##### a) アルゴリズム

Fig. 2.3.1 に示すように時間軸を縦にとり、分解すべきひずみの時間的変化を多重になった屋根構造1-2……9にみたてる。その各屋根のつけ根の位置から山、谷の番号の順に雨滴を流すことを想像する。雨滴は次の3つの条件を満たして流れ落ち、停止するものとする。

そして雨滴が停止するまでに流れた横座標を測って、これに相当する大きさのひずみ幅を分解して疲労に有効なひずみ振幅とする。

条件1) 雨滴は屋根のつけ根から番号の順に流れ始め、停止条件が満たされるまで下の屋根に流れ落ち続ける。

条件2) (停止条件) 軒先から落下中の雨滴は次の2条件の一方を満足したとき落下を停止する。

i) 右向き流れの場合: 右向きに流れる雨滴の出発点より左側に他の屋根の軒先が表われたとき。

ii) 左向き流れの場合：左向きに流れる雨滴の出発点より右側に他の屋根の軒先が表われたとき。  
条件 3) 屋根の一部をすでに雨滴が流れていたら、その流れは停止する。

b) 基本フロー

Fig. 2.3.2 にRF法による計数の基本フローを示す。

(2) HL法による計数方法<sup>(15)</sup>

a) アルゴリズム

RF法を簡略化してアルゴリズムを非常に単純にしたもので、相継ぐ2個のレンジ $r_{ij}$ ,  $r_{jk}$ の大きさを比較し、 $r_{ij} \leq r_{jk}$  の場合にのみ $r_{ij}$ を計数する。

b) 基本フロー

Fig. 2.3.3 にHL法による計数の基本フローを示す。

(3) RF法とHL法の比較検討

7種類の波形についてRF法とHL法で計数した例をFig. 2.3.4に示す。

特に例題の7の場合（大きな波に小さな波が重畳している場合）にはHL法は非安全側の評価をすることになる。

## 2.3 2 多軸応力状態におけるクリープ疲労評価法

これまでに多軸疲労試験に関する文献サーベイは大路<sup>(16)</sup>、Krempf<sup>(17)</sup>等によって、多軸クリープ試験に関してはBoresiとSidebottom<sup>(18)</sup>、Henderson<sup>(19)</sup>等によって文献調査され、まとめられているが、多軸応力場におけるクリープと疲労の相乗効果という観点からの論文はわずかに参考文献〔20〕にみあたるだけである。

従ってここでも多軸疲労強度評価法を中心に文献サーベイを行い、有益と思われる以下の一連の研究成果を本プログラムシステムに取入れることにする。

ここで問題になるのは単軸応力場での試験データと多軸応力場での試験データをどのように関連づけるかということであり、この点に関するこれまでの研究成果を以下に紹介する。

### (1) 相当ひずみ範囲の計算方法

#### a) Mises の式を用いる方法

Mises の 8 面体剪断ひずみ説に基づく相当ひずみ式は次式で表わされる。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\nu)} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3.1)$$

ここで、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  : 主ひずみ

$\nu$  : ポアソン比。非弾性ひずみの比率により 0.3 (弾性) ~ 0.5 (非弾性ひずみが支配的な場合) の値をとる。

#### b) Tresca の式を用いる方法

Tresca の最大剪断ひずみ説に基づく相当ひずみ式は次式で表わされる。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{3} (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (2.3.2)$$

ここで、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  : 主ひずみ ( $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3$ )

c) BrownとMillerの式を用いる方法

これまでの多軸応力場における疲労試験結果から高サイクル疲労では延性材料に対してはMisesあるいはTrescaの理論が脆性材料に対してはRankineの最大主応力説がよく適用できることがわかっている。しかし塑性ひずみが支配的な低サイクル疲労においては、必ずしもこれらの理論は適用できないことがわかってきた。そこでBrownとMillerは従来のTresca, Mises等の古典的な破損理論にかわる新しい理論を疲労クラックの発生と成長の機構の物理的な解釈にもとずいて提案した。<sup>(21)</sup>

彼らの提案はクラックの成長の支配因子は最大剪断ひずみと最大剪断ひずみ面に垂直な引張ひずみであるとするもので、これはFig. 2.3.5に示すMohrのひずみ円の最大ひずみ円上の剪断ひずみの最大値点で表わされる。従って、疲労の等寿命線は  $\frac{\gamma_{\max}}{2} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{2}$  と  $\epsilon_n = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2}$  を両軸とするグラフ上で次式で表わされる。

$$\frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{2} = f\left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2}\right) \quad (2.3.3)$$

ここで  $\epsilon_1 \geq \epsilon_2 \geq \epsilon_3$

Fig. 2.3.6は最大剪断ひずみ面とクラックの成長方向を示している。

同図に示すように、クラックの成長をStage IとStage IIに分け、クラック試験片の表面に沿って伝播する場合 (Case A:  $\lambda = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ ) と表面から中へ伝播する場合 (Case B:  $\lambda = \sigma_2 / \sigma_1 > 0$ ) の2つの様式に分けて考える必要があることを指摘している。

Fig. 2.3.7, 2.3.8は各々LiddleとMiller及びParsonsの実験データをプロットしたものである。これらの図から等寿命線は  $\frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{2}$  と  $\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2}$  の関数として表わされることがわかるが、具体的な式の表示は行われていない。

続いて、ParsonsとPascoeは<sup>(22)</sup> Fig. 2.3.9に示すような十字形試験片で、QT 35 (1 Cr-0.5Mn鋼) とAISI 304鋼を用いて種々のひずみ比 ( $\xi = \Delta \epsilon_2 / \Delta \epsilon_1 = -1 \sim +1$ ) について実験を行い、Fig. 2.3.10に示すような等寿命線を得た。

この図から高サイクル疲労では従来のMisesの理論がほぼ適用できるが、塑性ひずみが支配的な低サイクル疲労では従来の古典理論は適用できないことがわかる。特に  $-\frac{1}{2} < \xi < 1$



の範囲では従来の古典理論は非安全側の評価を行うことになる。

Konter, Janssen 及び Husslage<sup>(23)</sup> は Brown と Miller, Parsons と Pascoe の研究成果を踏まえて、20℃と550℃のAISI 304 鋼と550℃での2¼ Cr-1Mo 鋼を用いて、円筒試験片の引張・圧縮とねじり荷重の組合せ実験を行い、次のような新しい式を提案した。

$$\Delta \varepsilon_{eq}^2 = (16-9\beta) \Delta \varepsilon_{P,n}^2 + \beta \Delta \varepsilon_{P,s}^2 \quad (2.3.4)$$

$$\text{ここで } \Delta \varepsilon_{P,n} = \frac{\Delta \varepsilon_{P1} + \Delta \varepsilon_{P3}}{2} \quad (2.3.5)$$

$$\Delta \varepsilon_{P,s} = \frac{\Delta \varepsilon_{P1} - \Delta \varepsilon_{P3}}{2} \quad (2.3.6)$$

$$(\Delta \varepsilon_{P1} > \Delta \varepsilon_{P2} > \Delta \varepsilon_{P3})$$

ただし、 $\beta$  は Case A ( $-1 \leq \xi \leq -0.5$ ) と Case B ( $-0.5 \leq \xi \leq 1$ ) ( $\xi = \Delta \varepsilon_{P2} / \Delta \varepsilon_{P1}$ ) に対してそれぞれ次のようにして実験データから求める。Case A に対してはねじり試験データ ( $\xi = -1$ ) を用いて  $\beta_A$  を次のようにして計算する。

$$\beta_A = \left( \frac{2\Delta \varepsilon_{P,ax}}{\Delta \gamma_P} \right)^2 \quad (2.3.7)$$

ここで  $\Delta \gamma_P$  は単軸試験における塑性ひずみ範囲  $\Delta \varepsilon_{P,ax}$  に対応した繰返し回数と同じ値を与える工学剪断ひずみ範囲の塑性ひずみ成分である。

Case B については、現在のところ実験データがないので、次のようにして Case A の値から Case B の値を推定する。

つまり、等寿命線は主ひずみ面 ( $\Delta \varepsilon_{P1}$  と  $\Delta \varepsilon_{P2}$ ) でなめらかであると仮定して、両者の Case について式 (2.3.4) を  $\Delta \varepsilon_{P1}$  と  $\Delta \varepsilon_{P2}$  で表わし、 $\xi = -0.5$  で  $d(\Delta \varepsilon_{P2})/d(\Delta \varepsilon_{P1})$  が両 Case で等しいとおくと、 $\beta_B$  は次式で表わされる。

$$\beta_B = \frac{8}{3} - \beta_A \quad (2.3.8)$$

従来の古典理論を  $\Delta \varepsilon_{P,n}$  と  $\Delta \varepsilon_{P,s}$  で表わすと各々次のようになる。

(i) Mises の式

$$\Delta \varepsilon_{eq}^2 = 4 \Delta \varepsilon_{P,n}^2 + \frac{4}{3} \Delta \varepsilon_{P,s}^2 \quad (2.3.9)$$

(iii) Tresca の式

$$\Delta \varepsilon_{\text{eq}}^2 = \frac{16}{9} \Delta \varepsilon_{\text{P},s}^2 \quad (2.3.10)$$

従って、Mises と Tresca の式は各々  $\beta = \frac{4}{3}$ ,  $\beta = \frac{16}{9}$  のときの特別な場合であるといえる。

Fig. 2.3.11 は Fig. 2.3.10 に示す実験データを用いて求めたものである。両者の図を比較すると、上で求めた相当ひずみ式による等寿命線は  $\xi$  のほとんどの範囲で実験値とよく一致していることがわかる。

また Fig. 2.3.12 に AISI 304 鋼に対する実験データと等寿命線を示す。

中空円筒試験片の引張・圧縮とねじりの組合せ実験で行えるひずみ範囲  $-1 \leq \xi \leq -0.5$  で比較的良好に実験データと一致している。また等寿命線の形は Fig. 2.3.11 とほとんど同じパターンである。

Fig. 2.3.13 は上の式で求めた相当ひずみ範囲と破損までの繰返し回数の関係をプロットしたものであるが、これから、図中に示した相当ひずみの計算式で、多軸応力状態をよく表わせることがわかる。

d) Multiaxiality Factor を用いる方法

MansonとHalford<sup>(3)</sup> は最初にDavisとConnellyによって提案されたTriaxiality Factor (TF)を用いて、多軸応力場の疲労損傷を取扱えるMultiaxiality Factor(MF)の概念を提案した。本方法では、8面体剪断ひずみ説に基づいて計算された相当ひずみ範囲にこのMFを乗ずることによって多軸応力場の効果を考慮する。MFは次式で表わせる。

$$MF = \frac{1}{2 - TF} \quad (TF \leq 1) \quad (2.3.11)$$

$$MF = TF \quad (TF > 1) \quad (2.3.12)$$

$$\text{ここで } TF = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\bar{\sigma}} \quad (2.3.13)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (2.3.14)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  : 主応力

Fig. 2.3.14 に上記の方法をBlassとZamrik<sup>(24)</sup>の多軸疲労試験データに適用した例を示す。

これから、この場合には本方法で多軸応力状態をよく表わせることがわかる。

なお、Fig. 2.3.15はBrownとMillerの方法を同じBlassとZamrikのデータに適用してみたものである。

どちらの方法もほぼ同程度のばらつきで多軸疲労試験データを整理できることがわかる。

## (2) 相当ひずみの符号の判定法

ひずみサイクル中の任意の2点間の相当ひずみ範囲を求めるためには相当ひずみの符号は考えなくてもよい。

ところが、多軸応力場で、この相当ひずみ範囲を求める2点を決定するために、レインフロー法又はヒステリシスループ法を適用する場合には、相当ひずみの時刻歴が必要になり、これを求めるためには、各時刻において、相当ひずみに符号をつけて考えなければならない。

そこで本プログラムシステムでは、次のようにして符号を判定するようにした。

### a) Misesの式又はBrownとMillerの式を用いる場合

LobitzとNickellが参考文献〔27〕で提案している方法、つまり相当ひずみの符号として、絶対値が最大の主偏差応力の符号にあわせる。

### b) Trescaの式を用いる場合

下記の3ケースについて相当ひずみ履歴を求め、指定された計数法を適用して求める損傷値のうち最大の値を採用する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{i) } \epsilon_{\text{eq1}} = \frac{2}{3} (\epsilon_z - \epsilon_r) \\ \text{ii) } \epsilon_{\text{eq2}} = \frac{2}{3} (\epsilon_r - \epsilon_t) \\ \text{iii) } \epsilon_{\text{eq3}} = \frac{2}{3} (\epsilon_t - \epsilon_z) \end{array} \right\} \quad (2.3.15)$$

ここで  $\epsilon_z, \epsilon_r, \epsilon_t$  は各々指定された評価断面における局所座標系での、軸方向、半径方向および周方向ひずみ。

### (3) クリープ疲労評価法

#### a) 弾性解析に基づく場合

方針の評価方法をベースにして、これに下記の機能を追加し、弾性解析に基づく場合の、複雑な荷重履歴に対する評価プログラム POST-VDS (CLH) として本評価システムに組み込んでいる。

##### i) ひずみ範囲の計数法

レインフロー法又はヒステリシスループ法を適用する。

##### ii) 相当ひずみの計算式

Mises の式、Tresca の式及び Brown と Miller の式のいずれかを適用する。

Multiaxiality Factor を用いる方法は POST-VDS (CLH) の現 Version では考慮していない。

#### b) 非弾性解析に基づく場合

方針で採用している線形損傷和則 (Linear Damage Summation Rule (LDS 法)) 以外に、ひずみ範囲分割法 (Strain Range Partitioning Method (SRP 法)) も適用できるようにし、非弾性解析に基づく場合の評価プログラム (POST-VDS (INELASTIC)) として本評価システムに組み込んでいる。

LDS 法、SRP 法以外に Damage-rate Approach 等があるが、この手法に関しては現在のところ材料データが乏しいので、本評価システムでは考慮していない。

SRP 法では多軸応力場の取扱いについて、若干手法の異なる次の 2 人の手法を採用している。

##### i) Manson 等の方法<sup>(26)</sup>

##### ii) Lobitz 等の方法<sup>(27)</sup>

ただし、i) の方法では、相当ひずみの符号の取り方に関して、初期の Manson の方法を修正して ii) の Lobitz の方法を採用している。

非弾性解析に基づく場合の評価方法の詳細については 2.4 節を参照のこと。

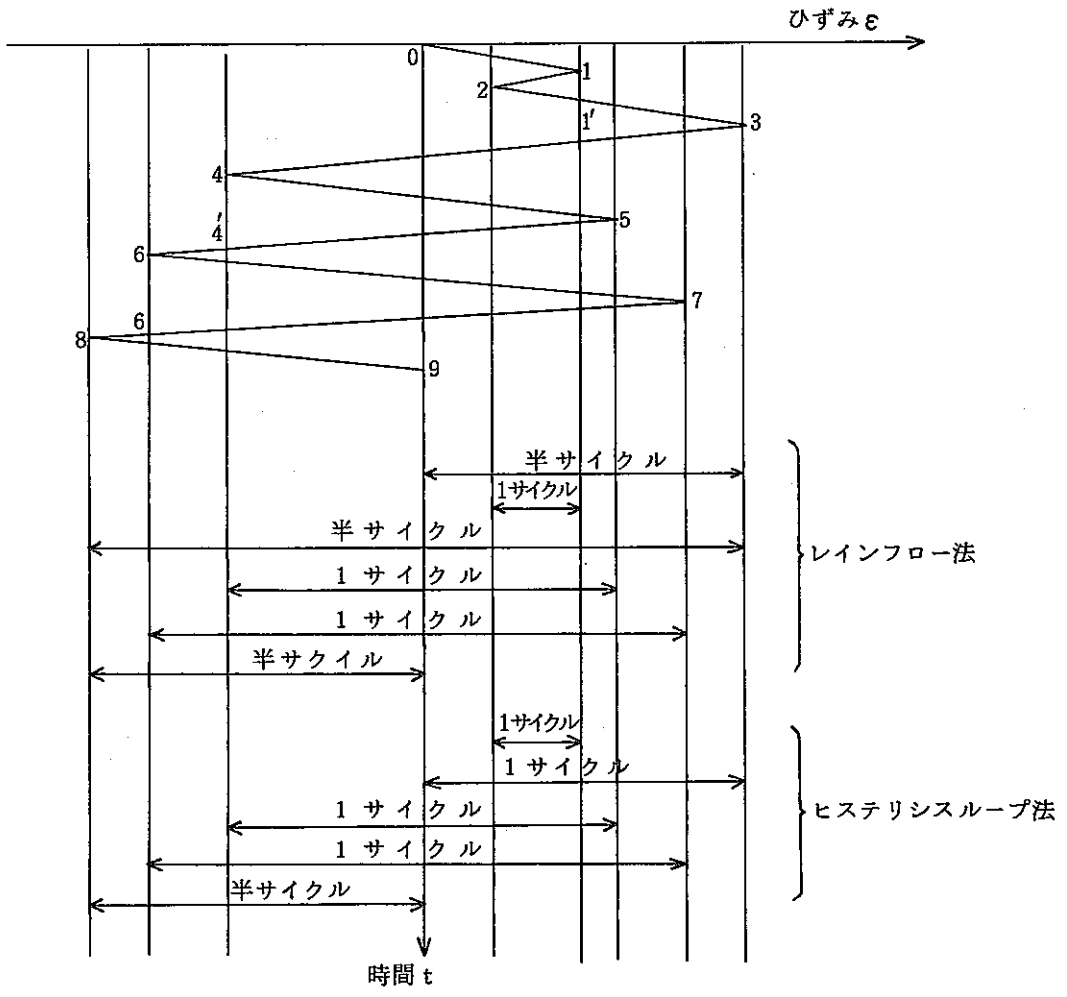
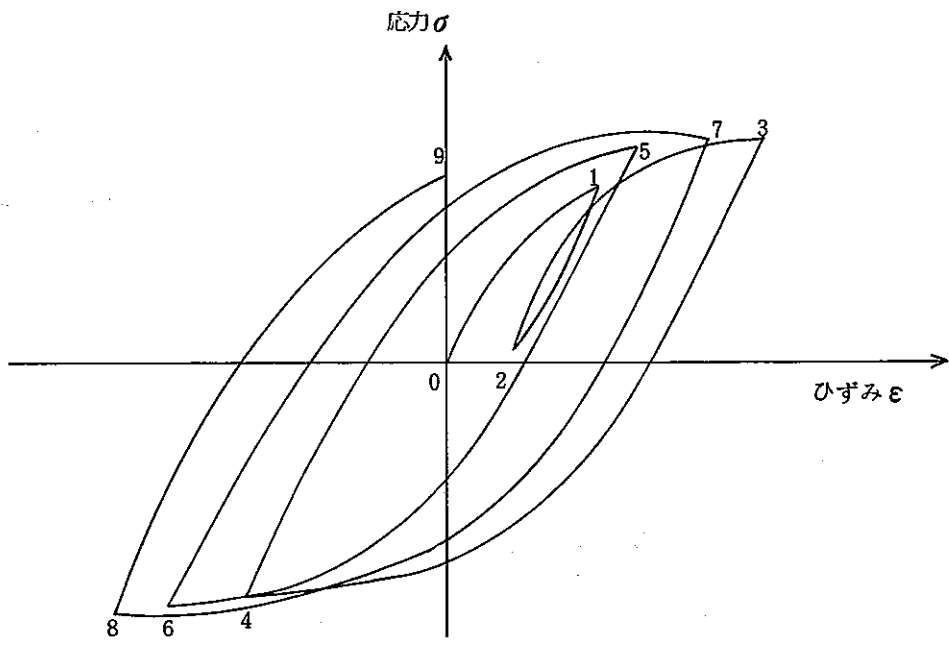


Fig Fig. 2. 3. 1 応力 - ひずみサイクルとひずみ振幅の分解

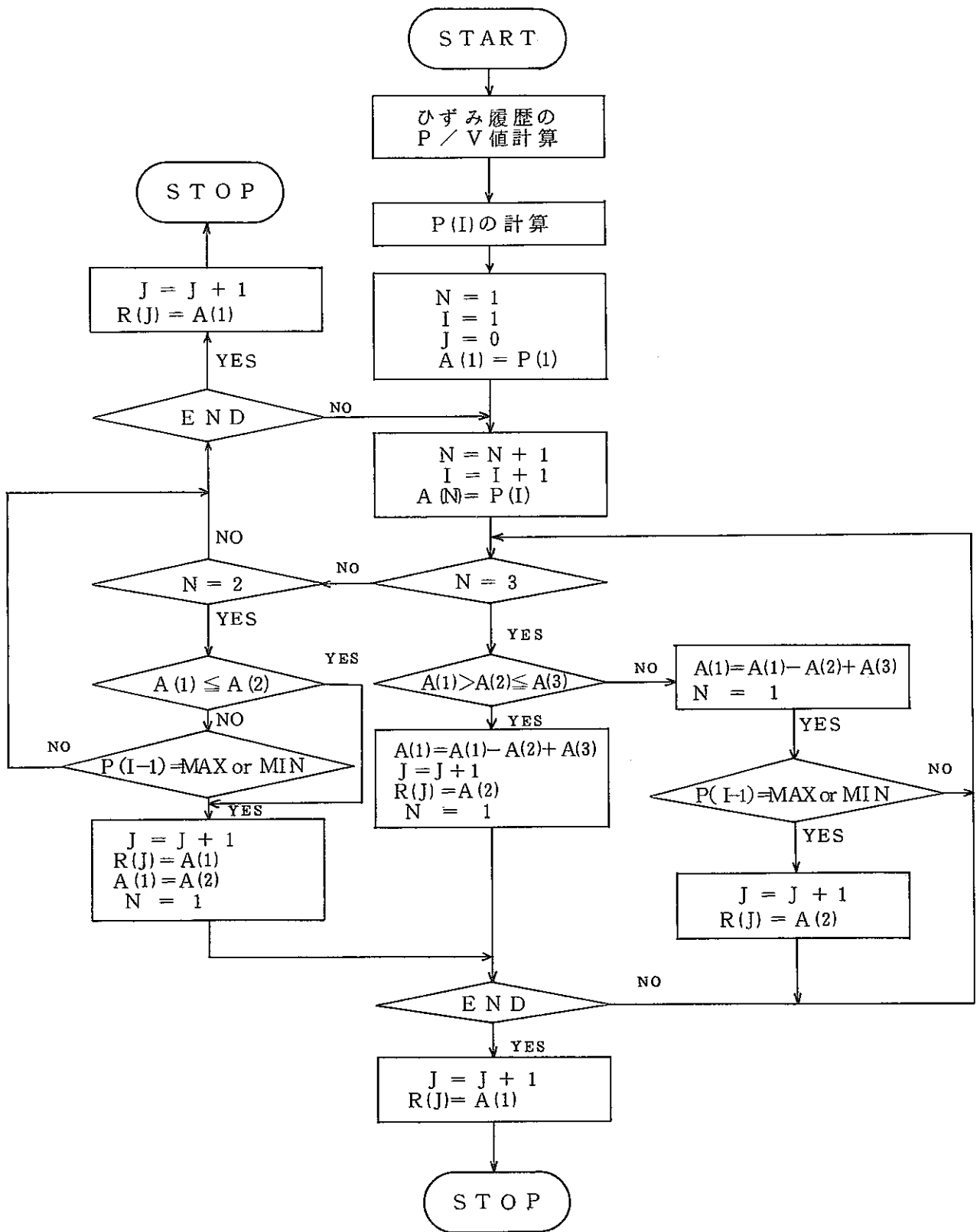


Fig. 2.3.2 RF法による計数の基本フロー

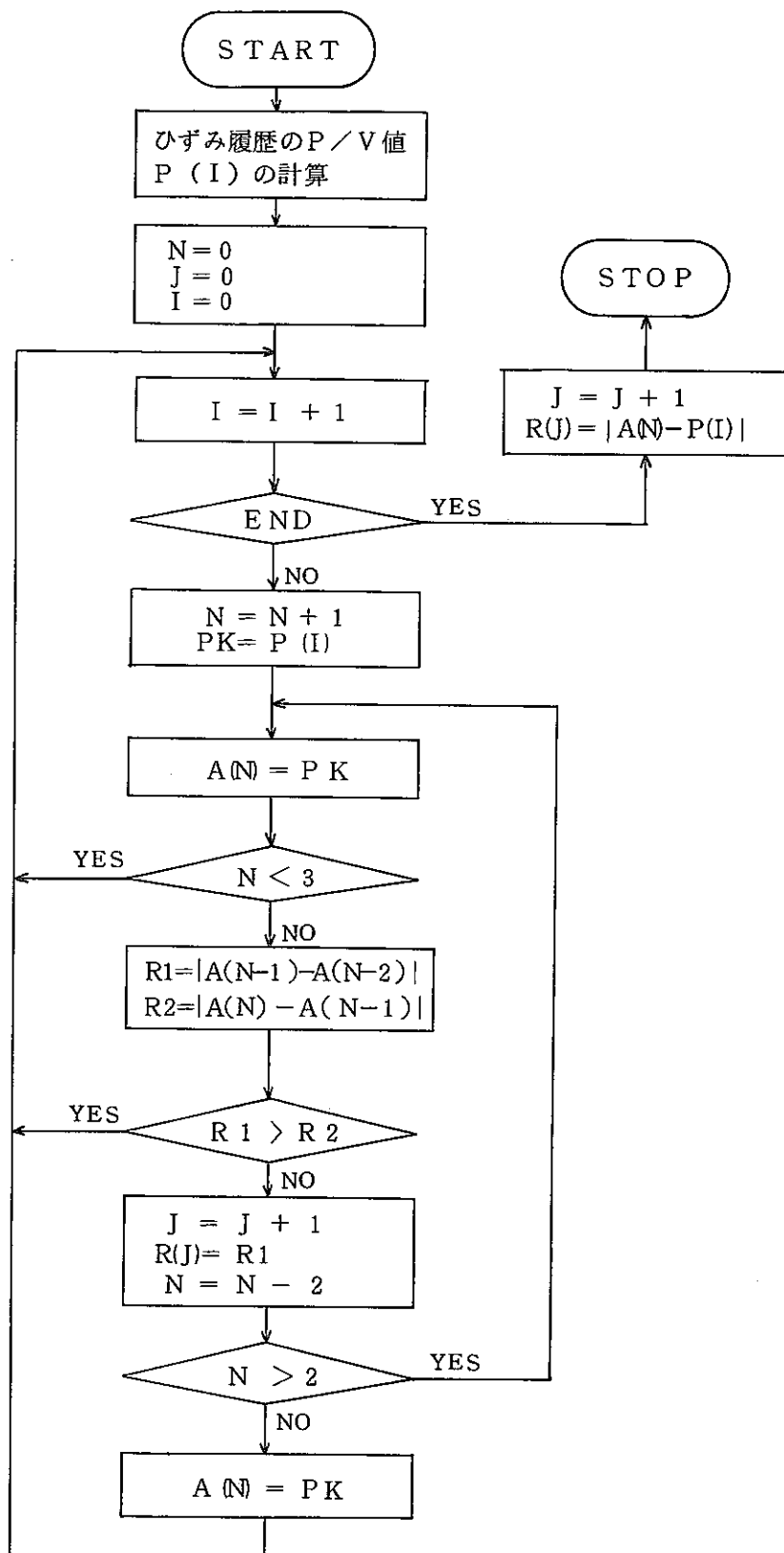
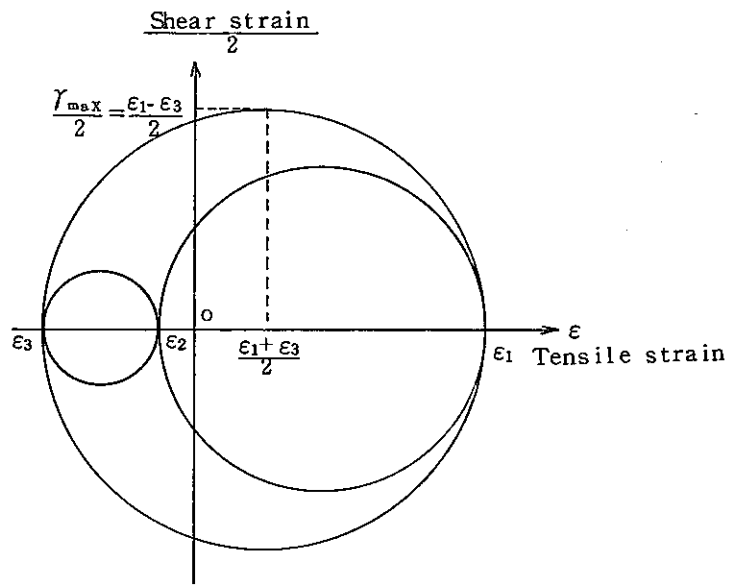


Fig. 2. 3. 3 HL法による計数の基本フロー



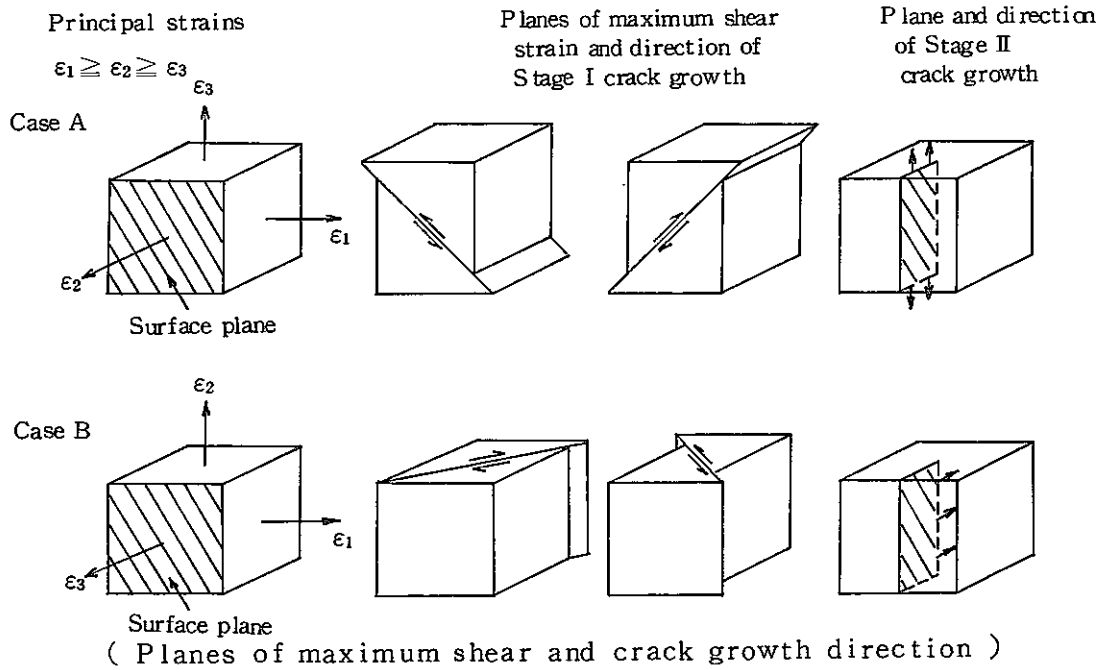
例題	1	2	3	4	5	6	7
波形							
RF法							
HL法							
備考	HL法ではR4-9を半サイクルとして計数しない。	HL法ではR4-7を半サイクルとして計数しない。	HL法ではR1-2を1サイクルとして計数する。	HL法ではR1-2を1サイクルとして計数する。	HL法ではR1-2を1サイクルとして計数する。	HL法ではR1-2, R3-4, R5-6を各々1サイクルとして計数する。	HL法ではR6-11を半サイクルとして計数しない。

Fig. 2.3.4 RF法とHL法による波形計数結果の比較



( Mohr's circle of strain )

Fig. 2. 3. 5 Mohr のひずみ円



( Planes of maximum shear and crack growth direction )

( 21 )

Fig. 2. 3. 6 最大剪断面とクラックの成長方向

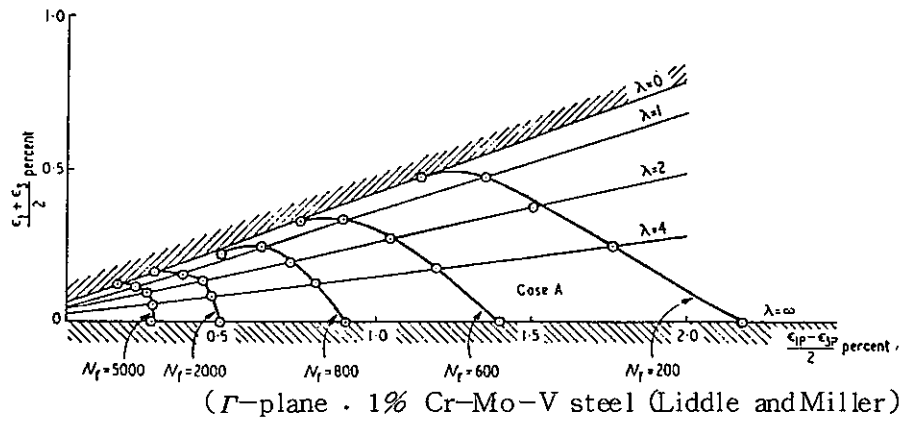


Fig. 2. 3. 7 Liddle と Miller の実験結果 [21]

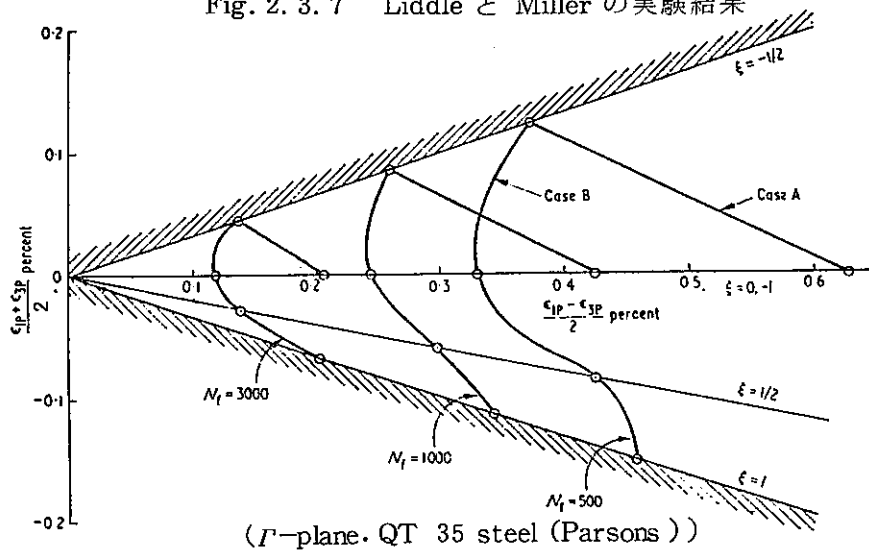
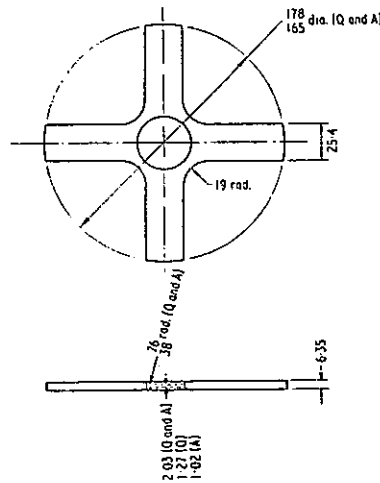


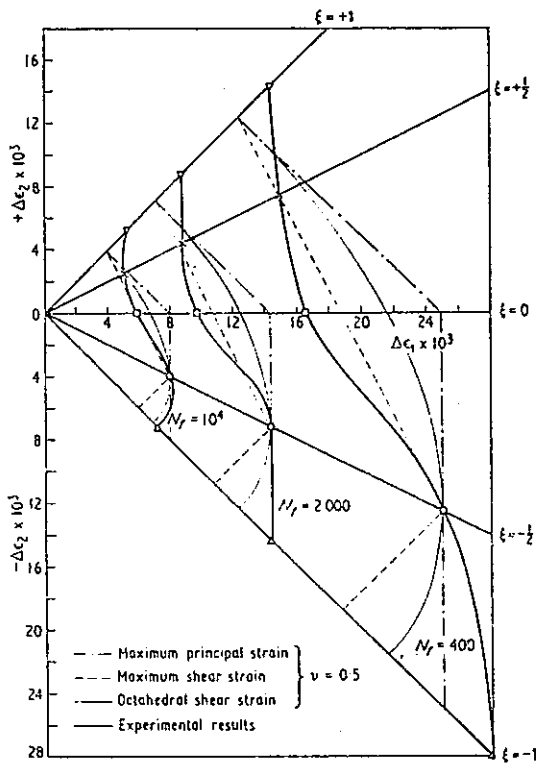
Fig. 2. 3. 8 Parsons の実験結果 [21]



All dimensions in mm. Where two or more alternative dimensions are specified these refer to the three different specimen configurations used, Q indicates QT35 specimen and A A I S I 304 specimen.

( Biaxial fatigue specimen ) [22]

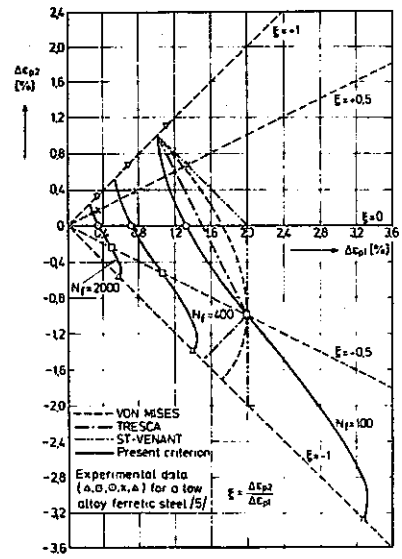
Fig. 2. 3. 9 Parsons と Pascoe の試験片



(Loci of constant endurance on the plane of surface (total) strains - comparison of experimental results with three common theories

[ 22 ]

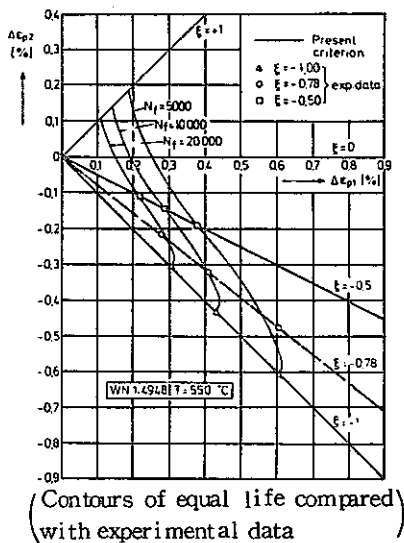
Fig. 2.3.10 Parsons と Pascoe の実験結果 (QT 35)



(Experimental verification of failure models on plane of surface (plastic) strains

[ 23 ]

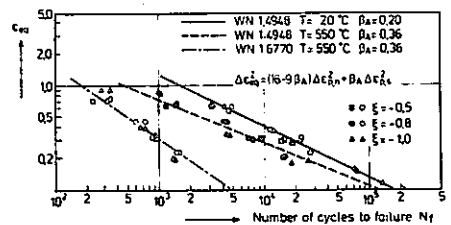
Fig. 2.3.11 相当ひずみ式と実験結果の比較 (QT 35)



(Contours of equal life compared with experimental data

[ 23 ]

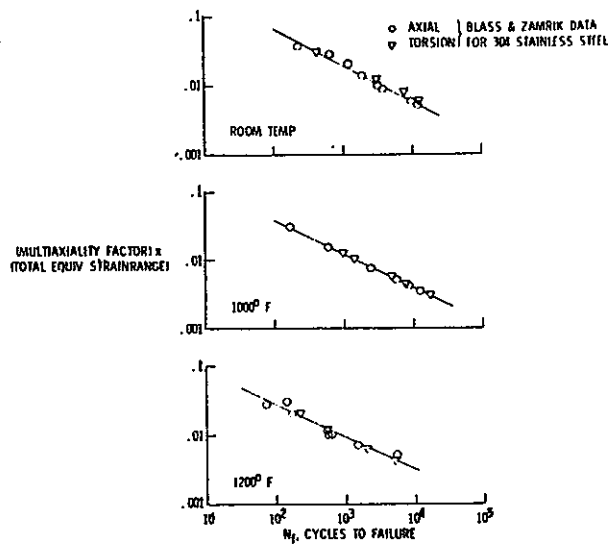
Fig. 2.3.12 相当ひずみ式と実験結果の比較 (ANSI 304 鋼)



(Equivalent strain versus number of cycles to failure

[ 23 ]

Fig. 2.3.13 相当ひずみ範囲と破損までの繰返し回数の関係



Application of the multiaxiality factor to Blass and Zamrik's equivalent total strain range low-cycle fatigue data for type 304 stainless steel.

- (a) Room temperature
- (b) 1000 F
- (c) 1200 F

Fig. 2. 3. 14 Blass と Zamrik の実験データの <sup>[31]</sup> Multiaxiality Factor による整理

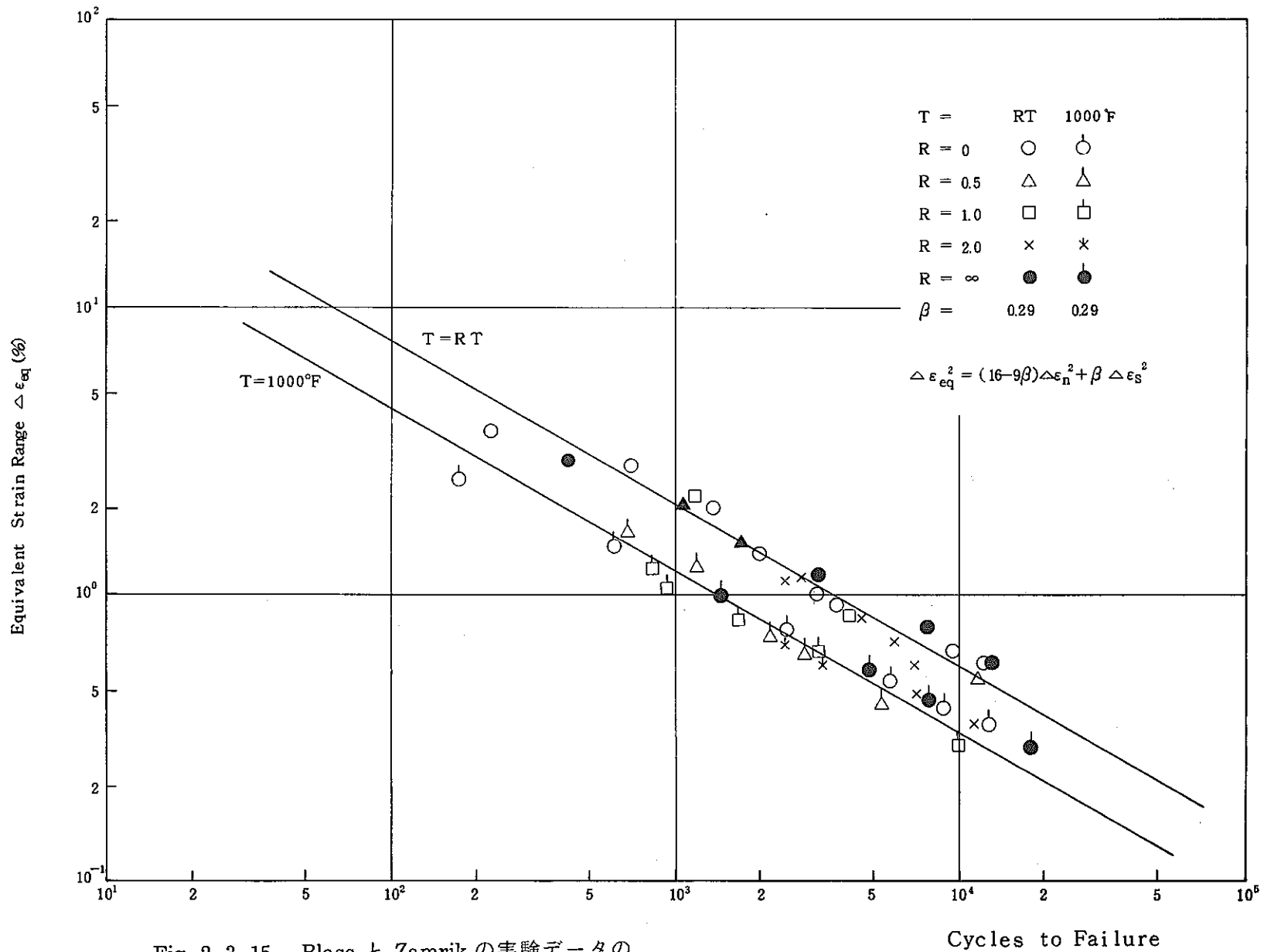


Fig. 2. 3. 15 Blass と Zamrik の実験データの  
相当ひずみ式による整理

## 2.4 非弾性解析に基づく場合の評価手順

2.4.1 項に、非弾性解析によるクリープ疲労損傷の評価に関する3手法について、その評価手順を示す。

2.4.2 項に、ひずみの制限ならびにクリープ疲労損傷に対して、上記3手法を採用した非弾性解析用評価プログラムの詳細評価手順を示す。

### 2.4.1 非弾性解析によるクリープ疲労損傷評価法

下記のクリープ疲労損傷評価法について述べる。

- (1) L D S法によるクリープ疲労損傷評価法
- (2) S R P (I)法によるクリープ疲労損傷評価法  
( Manson - Halford の方法 )
- (3) S R P (II)法によるクリープ疲労損傷評価法  
( Lobitz - Nickell の方法 )

(1) LDS法によるクリープ疲労損傷評価法

step1: 相当ひずみ範囲を求める

〔Method 1〕 ひずみ成分差法

step a : サイクル中の時点  $i$  を選ぶ。

step b : サイクル中の各時点  $k$  における各ひずみ成分から、時点  $i$  における対応ひずみ成分を差し引くことにより、各ひずみ成分差を計算する。

$$\Delta \epsilon_x = \epsilon_{x, k} - \epsilon_{x, i}$$

$$\Delta \epsilon_y = \epsilon_{y, k} - \epsilon_{y, i}$$

$$\Delta \epsilon_z = \epsilon_{z, k} - \epsilon_{z, i}$$

$$\Delta \gamma_{xy} = \gamma_{xy, k} - \gamma_{xy, i}$$

$$\Delta \gamma_{yz} = \gamma_{yz, k} - \gamma_{yz, i}$$

$$\Delta \gamma_{zx} = \gamma_{zx, k} - \gamma_{zx, i}$$

step c : 各時点間の相当ひずみ範囲を計算する。

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{eq, ki} = & \frac{\sqrt{2}}{3} \left[ (\Delta \epsilon_x - \Delta \epsilon_y)^2 + (\Delta \epsilon_y - \Delta \epsilon_z)^2 \right. \\ & \left. + (\Delta \epsilon_z - \Delta \epsilon_x)^2 + \frac{3}{2} (\Delta \gamma_{xy}^2 + \Delta \gamma_{yz}^2 + \Delta \gamma_{zx}^2) \right]^{1/2} \end{aligned}$$

step d : 全ての各時点間の相当ひずみ範囲  $\Delta \epsilon_{eq, ki}$  の最大値を考えているサイクルの相当ひずみ範囲  $\Delta \epsilon_{eq}$  とする。



〔Method 2〕 ひずみ増分法

step a : サイクル中の時点kとk-1の間の各ひずみ成分の増分を求める。

$$\Delta \varepsilon_x = \varepsilon_{x,k} - \varepsilon_{x,k-1}$$

$$\Delta \varepsilon_y = \varepsilon_{y,k} - \varepsilon_{y,k-1}$$

$$\Delta \varepsilon_z = \varepsilon_{z,k} - \varepsilon_{z,k-1}$$

$$\Delta \gamma_{xy} = \gamma_{xy,k} - \gamma_{xy,k-1}$$

$$\Delta \gamma_{yz} = \gamma_{yz,k} - \gamma_{yz,k-1}$$

$$\Delta \gamma_{zx} = \gamma_{zx,k} - \gamma_{zx,k-1}$$

step b : 時点kにおける相当ひずみ増分を求める。

$$\Delta \varepsilon_{eq,k} = \frac{\sqrt{2}}{3} [ (\Delta \varepsilon_x - \Delta \varepsilon_y)^2 + (\Delta \varepsilon_y - \Delta \varepsilon_z)^2 + (\Delta \varepsilon_z - \Delta \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2} (\Delta \gamma_{xy}^2 + \Delta \gamma_{yz}^2 + \Delta \gamma_{zx}^2) ]^{1/2}$$

step c : 相当ひずみ増分の符号として、その増分の終端における絶対値が最大の主偏差応力の符号を用いる。

step d : サイクル中の相当ひずみ増分の正負各符号について各々の和を求め、その絶対値の大きい方の値を、そのサイクルの相当ひずみ範囲とする。

$$\Delta \varepsilon_{eq} = \text{Max} \{ |\Delta \varepsilon_{eq,+}|, |\Delta \varepsilon_{eq,-}| \}$$

step 2 : サイクル中の最高金属温度における材料の設計疲労曲線(別表 1.11~13)に対して、step 1 で求めた相当ひずみ範囲に多軸応力状態の影響係数MF をかけた値を用いて許容繰返し回数Ndを求める。

step 3 : n 番目のサイクルに対する疲労損傷係数  $D_f^n$  は

$$D_f^n = \frac{1}{Nd}$$

で得られる。したがって、累積疲労損傷係数  $D_f$  は

$$D_f = \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{Nd} \right)_n$$

で得られる。

step 4 : 各時刻における相当応力を求める。

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$$

step 5 : step 4 で求めた相当応力およびその時刻における金属温度に対して応力-クリープ破断時間曲線から許容時間  $T_d$  を求める。

step 6 : 累積クリープ損傷係数  $D_c$  は

$$D_c = 2 \int_0^t \left( \frac{1}{T_d} \right) dt$$

で得られる。

step 7 : 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。

$$D_f + D_c \leq D$$

(2) SRP(I)法によるクリープ疲労損傷評価法<sup>(26)</sup>

step 1 : 非弾性解析により, 3主方向の主応力, 非弾性主ひずみを求める。

step 2 : 3主ひずみ $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ をクリープひずみ $(\varepsilon_1^c, \varepsilon_2^c, \varepsilon_3^c)$ と塑性ひずみ $(\varepsilon_1^p, \varepsilon_2^p, \varepsilon_3^p)$ に分類する。

step 3 : 各々塑性およびクリープの相当ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{eq}$ を求める。

$$\Delta\varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{[\Delta(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)]^2 + [\Delta(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)]^2 + [\Delta(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)]^2}$$

step 4 : 相当ひずみ増分の符号として, その増分の終端における絶対値が最大の主偏差応力の符号を用いる。

step 5 : 以下の手順に従って, 各ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{pp}$ ,  $\Delta\varepsilon_{cc}$ ,  $\Delta\varepsilon_{pc}$ ,  $\Delta\varepsilon_{cp}$ およびラチェットひずみ $\delta_p$ ,  $\delta_c$ を求める。

$$A_i^p = \Sigma (\Delta\varepsilon_{eq, +}^p)$$

$$A_i^c = \Sigma (\Delta\varepsilon_{eq, +}^c)$$

$$A_j^p = \Sigma |\Delta\varepsilon_{eq, -}^p|$$

$$A_j^c = \Sigma |\Delta\varepsilon_{eq, -}^c|$$

$$A_L^p = \text{Max} (A_i^p, A_j^p)$$

$$A_S^p = \text{Min} (A_i^p, A_j^p)$$

$$A_L^c = \text{Max} (A_i^c, A_j^c)$$

$$A_S^c = \text{Min} (A_i^c, A_j^c)$$

$$B_i = A_i^P + A_i^C$$

$$B_j = A_j^P + A_j^C$$

$$B_S = \text{Min}(B_i, B_j) = \Delta \epsilon_{in}$$

故に

$$\Delta \epsilon_{PP} = A_S^P$$

$$\Delta \epsilon_{CC} = A_S^C$$

$$\Delta \epsilon_{PC} = B_S - A_S^P - A_S^C \quad \text{if } A_L^P = A_i^P \text{ and } A_S^C = A_i^C$$

$$\Delta \epsilon_{CP} = B_S - A_S^P - A_S^C \quad \text{if } A_S^P = A_i^P \text{ and } A_L^C = A_i^C$$

$$\delta_P = A_L^P - A_S^P - B_S + A_S^P + A_S^C = A_L^P + A_S^C - B_S$$

$$\delta_C = A_L^C - A_S^C - B_S + A_S^P + A_S^C = A_L^C + A_S^P - B_S$$

step 6 : pp, cc, pc, cp の各タイプに関するひずみ範囲-寿命関係から, 非弾性ひずみ範囲

$\Delta \epsilon_{in}$  に対する寿命  $N_{PP}$ ,  $N_{CC}$ ,  $N_{PC}$ ,  $N_{CP}$  を求める。

step 7 : (2.4.1) 式に示すクリープ疲労相互作用下における損傷則から予想される寿命  $N_f$

を求める。

$$\frac{F_{PP}}{N_{PP}} + \frac{F_{CC}}{N_{CC}} + \frac{F_{PC}}{N_{PC}} + \frac{F_{CP}}{N_{CP}} + \frac{\delta_P}{D_P} + \frac{\delta_C}{D_C} = \frac{1}{N_f} \quad (2.4.1)$$

ここで

$$F_{PP} = \Delta \epsilon_{PP} / \Delta \epsilon_{in}$$

$$F_{CC} = \Delta \epsilon_{CC} / \Delta \epsilon_{in}$$

$$F_{PC} = \Delta \epsilon_{PC} / \Delta \epsilon_{in}$$

$$F_{CP} = \Delta \epsilon_{CP} / \Delta \epsilon_{in}$$

$$\Delta \epsilon_{in} = B_S = \Delta \epsilon_{PP} + \Delta \epsilon_{CC} + \Delta \epsilon_{CP} \text{ (or } \Delta \epsilon_{PC} \text{)}$$

$$D_P = -\ln[1 - (RA)_P]$$

$(RA)_P$  : 引張試験における断面収縮率

$$D_C = -\ln[1 - (RA)_C]$$

$(RA)_C$  : クリーププラブチヤ試験における断面収縮率

step 8 : 多軸応力状態の影響を考慮するために, ( 2.4.2 ) 式に示す影響係数MFを用いて

( 2.4.1 ) 式を修正する。

$$MF = \begin{cases} TF & ( TF \geq 1 ) \\ \frac{1}{2-TF} & ( TF < 1 ) \end{cases} \quad ( 2.4.2 )$$

$$\text{ここで } TF = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}$$

$$\frac{F_{PP}}{N'_{PP}} + \frac{F_{CC}}{N'_{CC}} + \frac{F_{PC}}{N'_{PC}} + \frac{F_{CP}}{N'_{CP}} + \frac{\delta_P}{D'_P} + \frac{\delta_C}{D'_C} = \frac{1}{N_f}$$

ここで

$$N'_{PP} = N_{PP} / (MF)^{1/m_{PP}}$$

$$N'_{CC} = N_{CC} / (MF)^{1/m_{CC}}$$

$$N'_{PC} = N_{PC} / (MF)^{1/m_{PC}}$$

$$N'_{CP} = N_{CP} / (MF)^{1/m_{CP}}$$

$$D'_P = D_P / MF$$

$$D'_C = D_C / MF$$

$m_{PP}, m_{CC}, m_{PC}, m_{CP}$ : 各タイプの  $\Delta \varepsilon = AN_f^{-m}$  における指数

(3) SRP(Ⅱ)法によるクリープ疲労損傷評価法<sup>(27)</sup>

step 1 : 相当塑性ひずみ増分の符号として、その増分の終端における絶対値が最大の主偏差応力の符号を用いる。(これは、最大の塑性主ひずみの増分の符号と一致する)

step 2 : サイクル中の相当塑性ひずみ増分の正負各符号について、各々の和を求め、その絶対値の小さい方の値をそのサイクルの塑性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{pp}$ とする。

step 3 : step 1 および 2 と同様にして相当クリープひずみ増分から、考えているサイクル中のクリープひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{cc}$ を求める。

step 4 : 混合ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{cp}$ または $\Delta \epsilon_{pc}$ は、塑性残余ひずみとクリープ残余ひずみの絶対値の小さい方の値とする。ただし、2つの残余ひずみの符号が等しい場合には、混合ひずみ範囲はないものとする。

また、クリープ残余ひずみが正のとき  $\Delta \epsilon_{cp}$

塑性残余ひずみが正のとき  $\Delta \epsilon_{pc}$  とする。

step 5 : n 番目のサイクルに対する損傷係数 $D_f^n$ は

$$D_f^n = \frac{1}{N_{pp}} + \frac{1}{N_{cc}} + \frac{1}{N_{cp/pc}}$$

で得られる。ここで、 $N_{pp}$ 、 $N_{cc}$ 、 $N_{cp/pc}$ は、サイクル中の最高温度における材料のひずみ範囲-寿命関係に対して、各々 $\Delta \epsilon_{pp}$ 、 $\Delta \epsilon_{cc}$ 、 $\Delta \epsilon_{cp/pc}$ を用いて求められる寿命サイクル数。

step 6 : 延性消耗による損傷係数 $D_\epsilon$ は次式により求める。

$$D_\epsilon = MF \left[ \left( \frac{\epsilon_{\epsilon q}^c}{\epsilon_f^c} \right)^2 + \left( \frac{\epsilon_{\epsilon q}^p}{\epsilon_f^p} \right)^2 \right]^{1/2}$$

ここで

$\varepsilon_{\varepsilon q}^c, \varepsilon_{\varepsilon q}^p$  : 考えている時間における全相当クリープひずみおよび全相当塑性ひずみ

$$\varepsilon_f^p = \ell_n\left(\frac{1}{1-RA}\right) \quad (RA : \text{断面収縮率})$$

$\varepsilon_f^c$  : 考えている時間における応力，継続時間，温度に対して等時応力-ひずみ線図から求まるクリープひずみに，その応力値に対するクリープラプチャー時間を掛け，さらに継続時間で割った値。

MF : 多軸応力状態の影響係数

step 7 : 全損傷係数Dは

$$D = D_\varepsilon + \sum_{n=1}^N D_f^n$$

で得られる。

ただし， $D_\varepsilon$  は，第N番目のサイクルの終端において算定する。

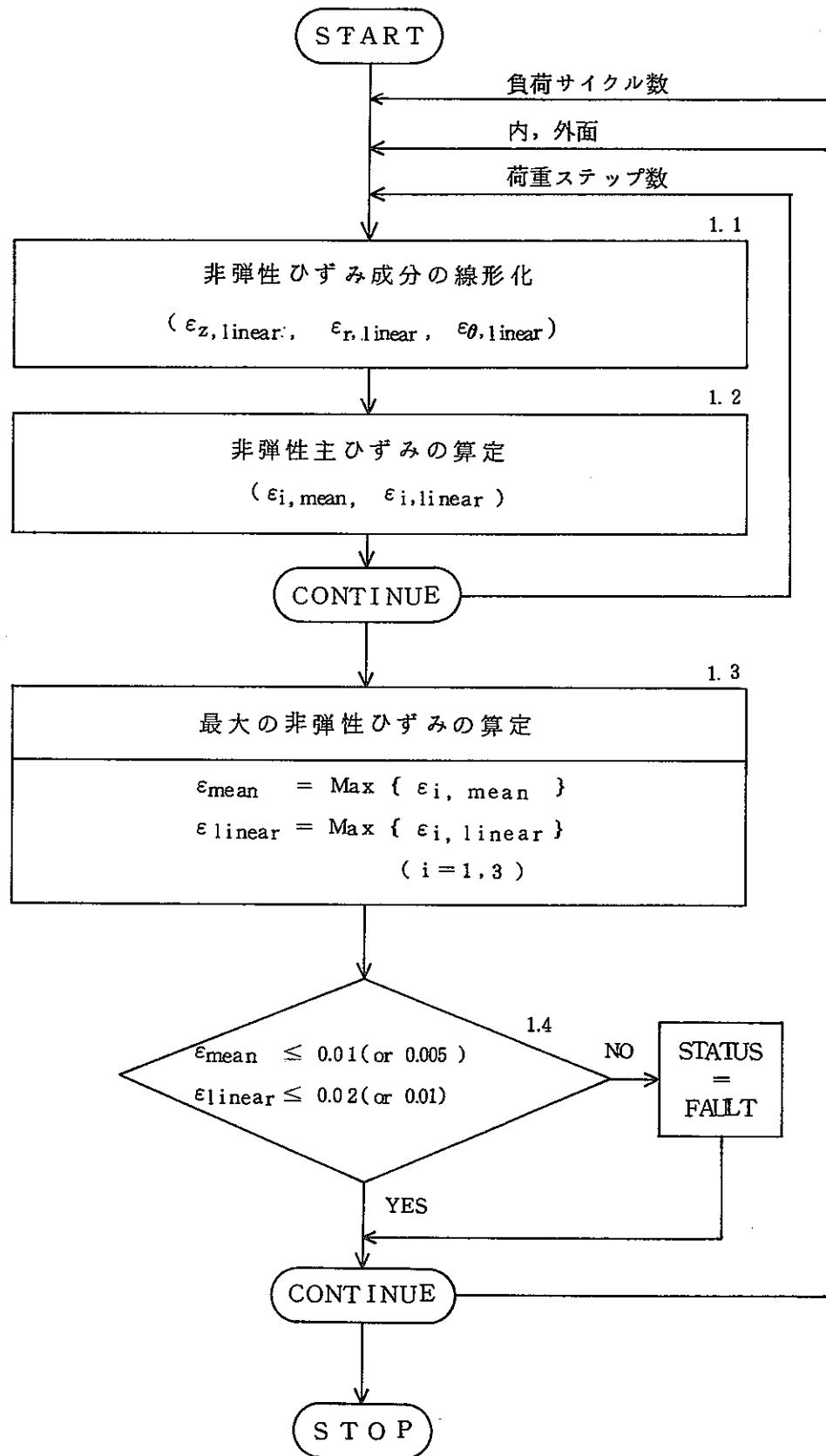
#### 2.4.2 非弾性解析用評価プログラム， POST-INELASTICの詳細評価手順

下記のひずみの制限ならびにクリープ疲労損傷の制限に対する詳細評価手順について述べる。

- (1) ひずみの制限に対する詳細評価手順
- (2) クリープ疲労損傷の制限に対する詳細評価手順
  - 1) L D S法によるクリープ疲労損傷の制限
  - 2) S R P (I)法によるクリープ疲労損傷の制限
  - 3) S R P (II)法によるクリープ疲労損傷の制限

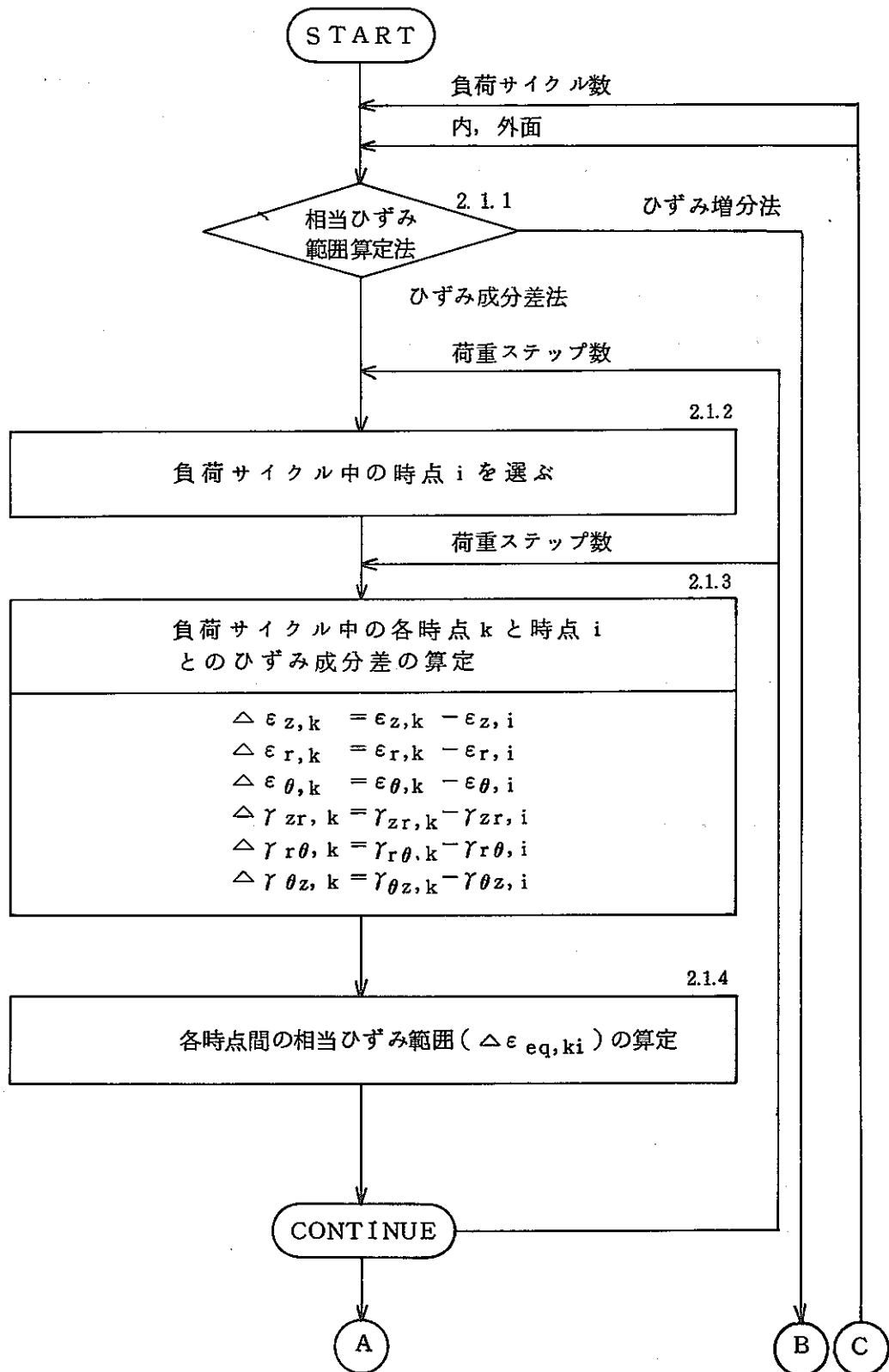


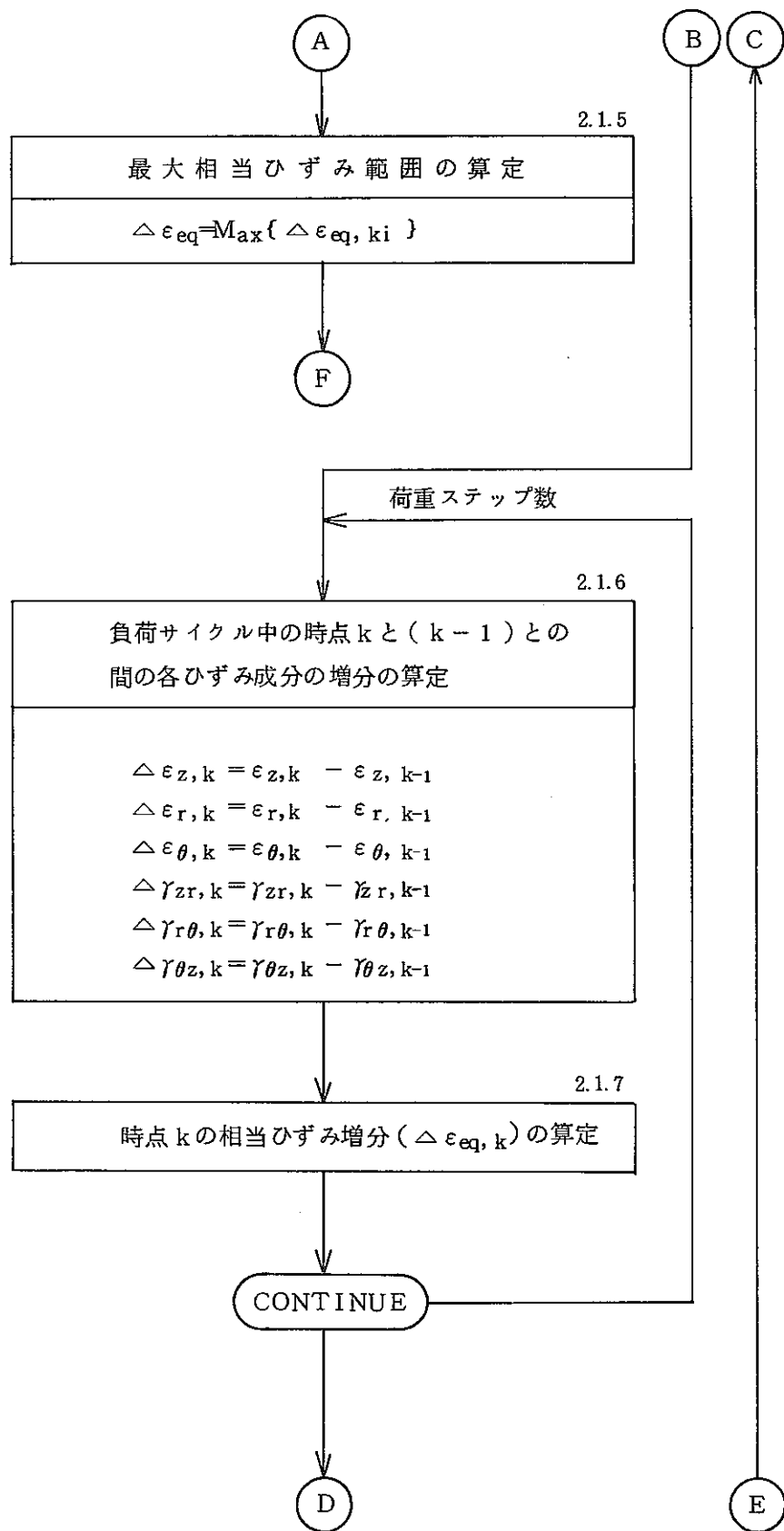
(1) ひずみの制限に対する詳細評価手順

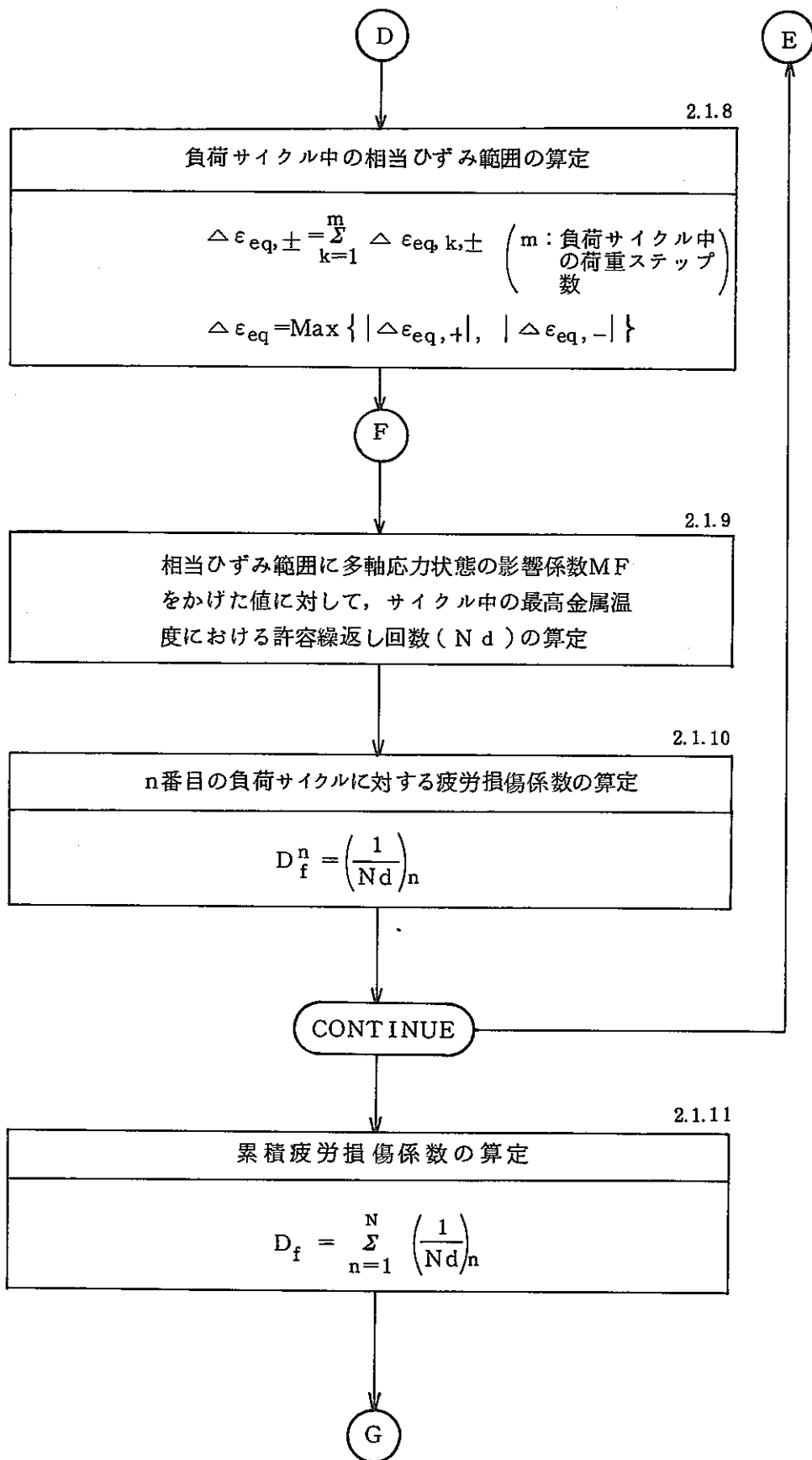


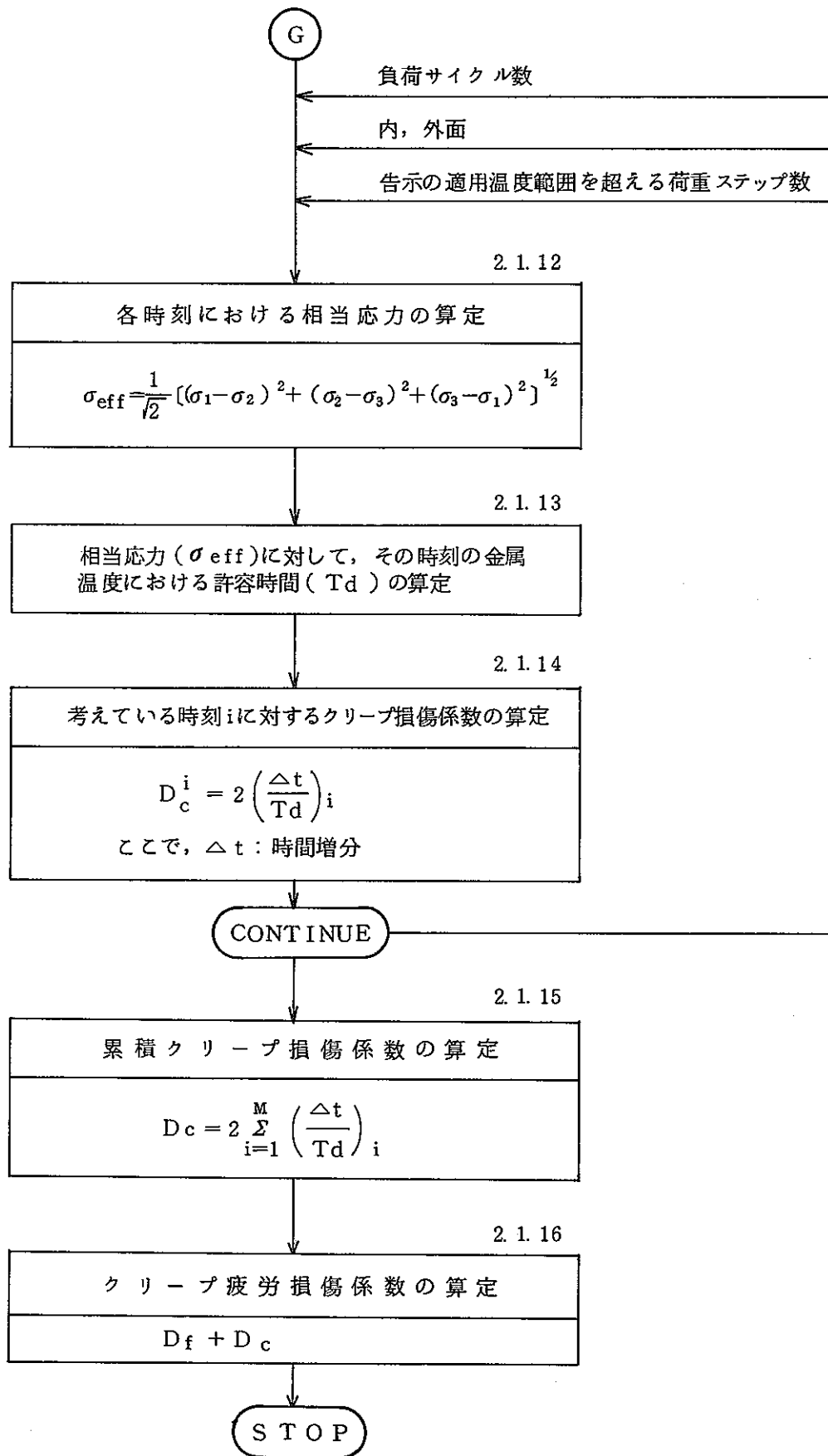
(2) クリープ疲労損傷の制限に対する詳細評価手順

1) LDS法によるクリープ疲労損傷の制限

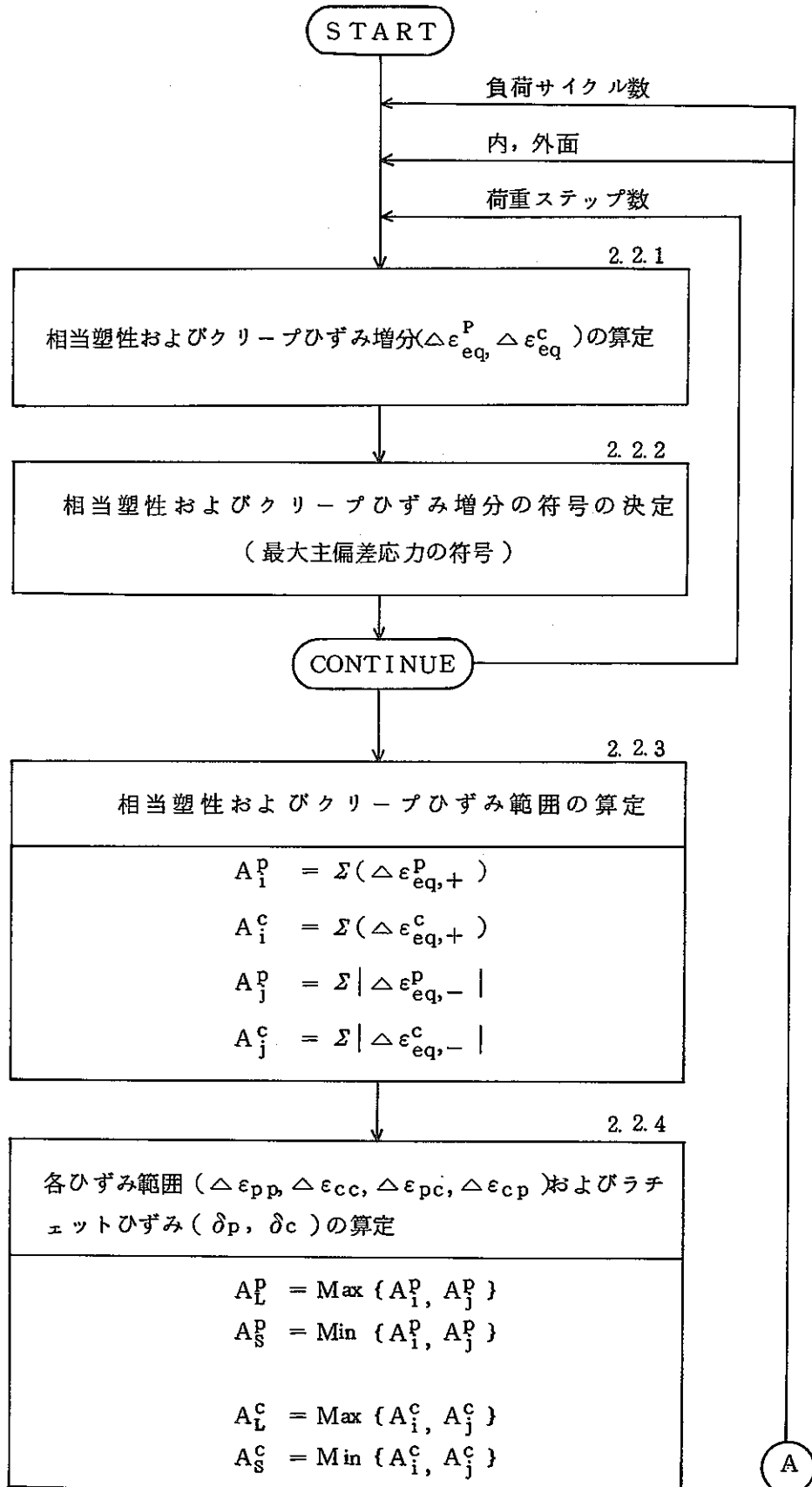








2) SRP (I) 法によるクリープ疲労損傷の制限



続く

続き

$$B_i = A_i^p + A_i^c$$

$$B_j = A_j^p + A_j^c$$

$$B_s = \text{Min} \{ B_i, B_j \}$$

故に

$$\Delta \varepsilon_{in} = B_s$$

$$\Delta \varepsilon_{pp} = A_s^p$$

$$\Delta \varepsilon_{cc} = A_s^c$$

$$\Delta \varepsilon_{pc} = B_s - A_s^p - A_s^c, \text{ if } A_L^p = A_i^p \text{ and } A_s^c = A_i^c$$

$$\Delta \varepsilon_{cp} = B_s - A_s^p - A_s^c, \text{ if } A_s^p = A_i^p \text{ and } A_L^c = A_i^c$$

$$\delta_p = A_L^p - A_s^p - B_s + A_s^p + A_s^c = A_L^p + A_s^c - B_s$$

$$\delta_c = A_L^c - A_s^c - B_s + A_s^p + A_s^c = A_L^c + A_s^p - B_s$$

2.2.5

pp, cc, pc, cpの各タイプに関して、非弾性ひずみ範囲 ( $\Delta \varepsilon_{in}$ ) に対する寿命 ( $N_{pp}, N_{cc}, N_{pc}, N_{cp}$ ) の算定

2.2.6

多軸応力状態か

NO

YES

2.2.7

影響係数の算定

$$MF = \begin{cases} TF & (TF \geq 1) \\ \frac{1}{2-TF} & (TF < 1) \end{cases}$$

$$\text{ここで, } TF = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}$$

B

C

A

B

C

2.2.8

n 番目の負荷サイクルに対するクリープ疲労損傷係数

$$D_f^n = \frac{1}{N_f}$$

$$= \frac{F_{pp}}{N_{pp}'} + \frac{F_{cc}}{N_{cc}'} + \frac{F_{pc}}{N_{pc}'} + \frac{F_{cp}}{N_{cp}'} + \frac{\delta_p}{D_p'} + \frac{\delta_c}{D_c'}$$

ここで、

$$F_{pp} = \Delta \epsilon_{pp} / \Delta \epsilon_{in}$$

$$F_{cc} = \Delta \epsilon_{cc} / \Delta \epsilon_{in}$$

$$F_{pc} = \Delta \epsilon_{pc} / \Delta \epsilon_{in}$$

$$F_{cp} = \Delta \epsilon_{cp} / \Delta \epsilon_{in}$$

$$D_p = -\ell_n [1 - (RA)_p]$$

(RA)<sub>p</sub>: 引張試験における断面収縮率

$$D_c = -\ell_n [1 - (RA)_c]$$

(RA)<sub>c</sub>: クリープラプチャ試験における断面収縮率

$$N_{pp}' = N_{pp} / (MF)^{1/m_{pp}}$$

$$N_{cc}' = N_{cc} / (MF)^{1/m_{cc}}$$

$$N_{pc}' = N_{pc} / (MF)^{1/m_{pc}}$$

$$N_{cp}' = N_{cp} / (MF)^{1/m_{cp}}$$

$$D_p' = D_p / MF$$

$$D_c' = D_c / MF$$

m<sub>pp</sub>, m<sub>cc</sub>, m<sub>pc</sub>, m<sub>cp</sub>: 各タイプの  $\Delta \epsilon = AN_f^{-m}$  における指数

CONTINUE

2.2.9

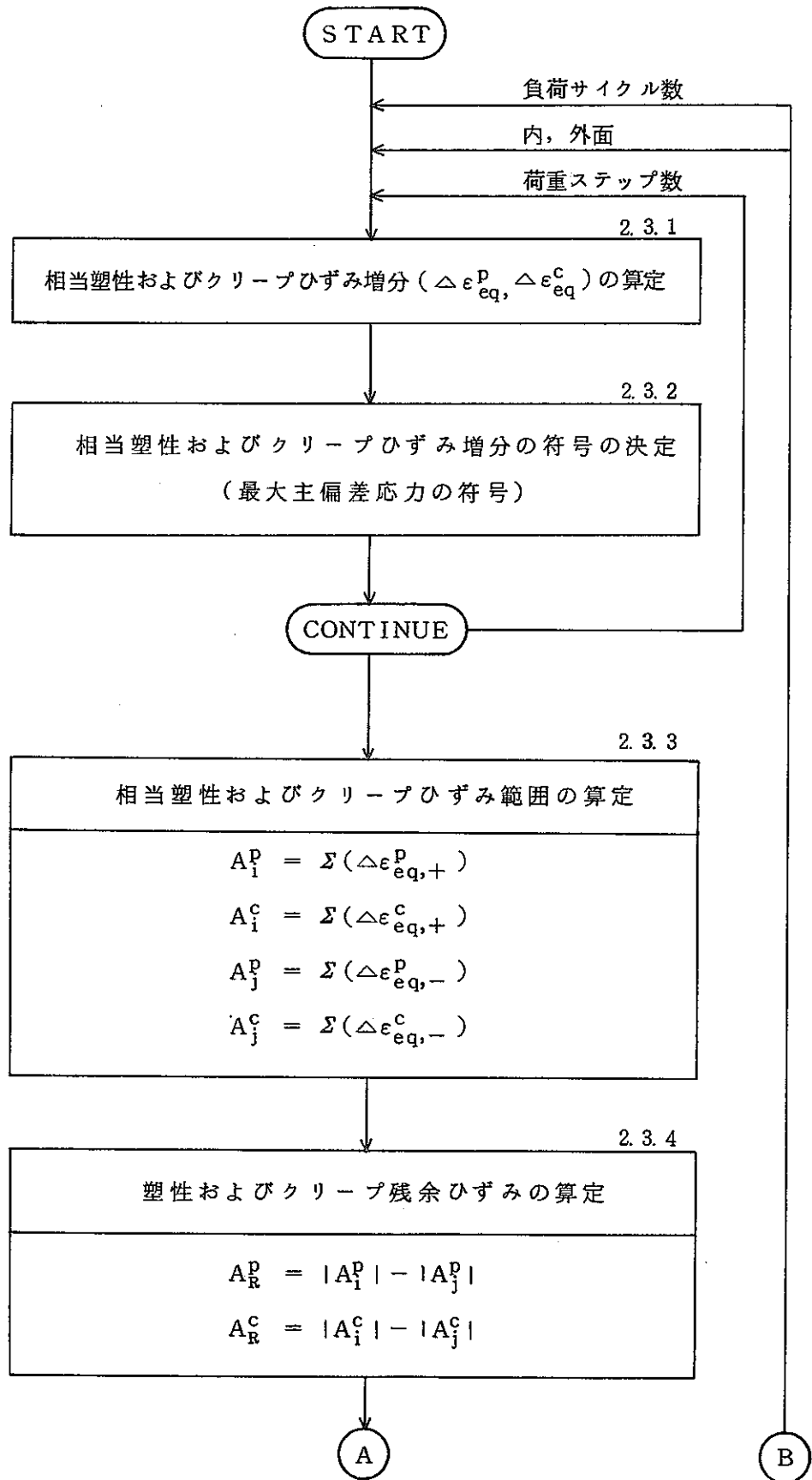
累積クリープ疲労損傷係数の算定

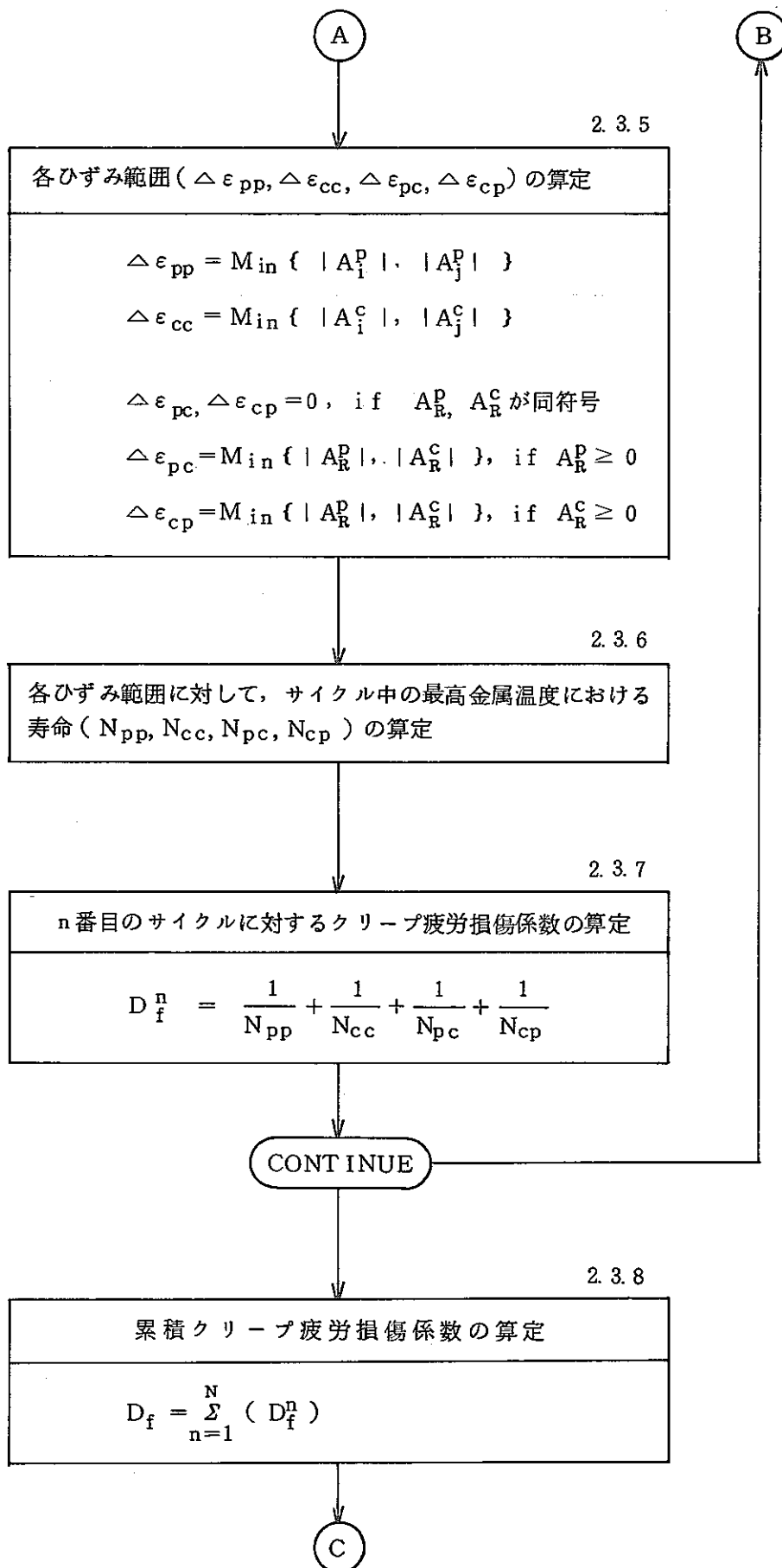
$$\sum_{n=1}^n (D_f^n)$$

STOP



3) SRP(Ⅱ)法によるクリープ疲労損傷の制限





(C)

2.3.9

延性消耗による損傷係数の算定

$$D_{\epsilon} = MF \left[ \left( \frac{\epsilon_{eq}^c}{\epsilon_f^c} \right)^2 + \left( \frac{\epsilon_{eq}^p}{\epsilon_f^p} \right)^2 \right]^{1/2}$$

ここで

$\epsilon_{eq}^p, \epsilon_{eq}^c$  : 考えている時間における全相当  
塑性およびクリープひずみ

$$\epsilon_f^p = \ln \left( \frac{1}{1-RA} \right)$$

( RA : 引張試験における断面収縮率 )

$\epsilon_f^c$  : 考えている時間における, 応力, 継続  
時間, 金属温度に対して等時応力-ひず  
み曲線から求まるクリープひずみに,  
その応力値に対するクリープラプチャ  
-時間を掛け, さらに継続時間で割っ  
た値。

MF : 多軸応力状態の影響係数, ステップ 2.  
2.7 参照

2.3.10

累積クリープ疲労損傷係数の算定

$$D_{\epsilon} + D_f$$

STOP

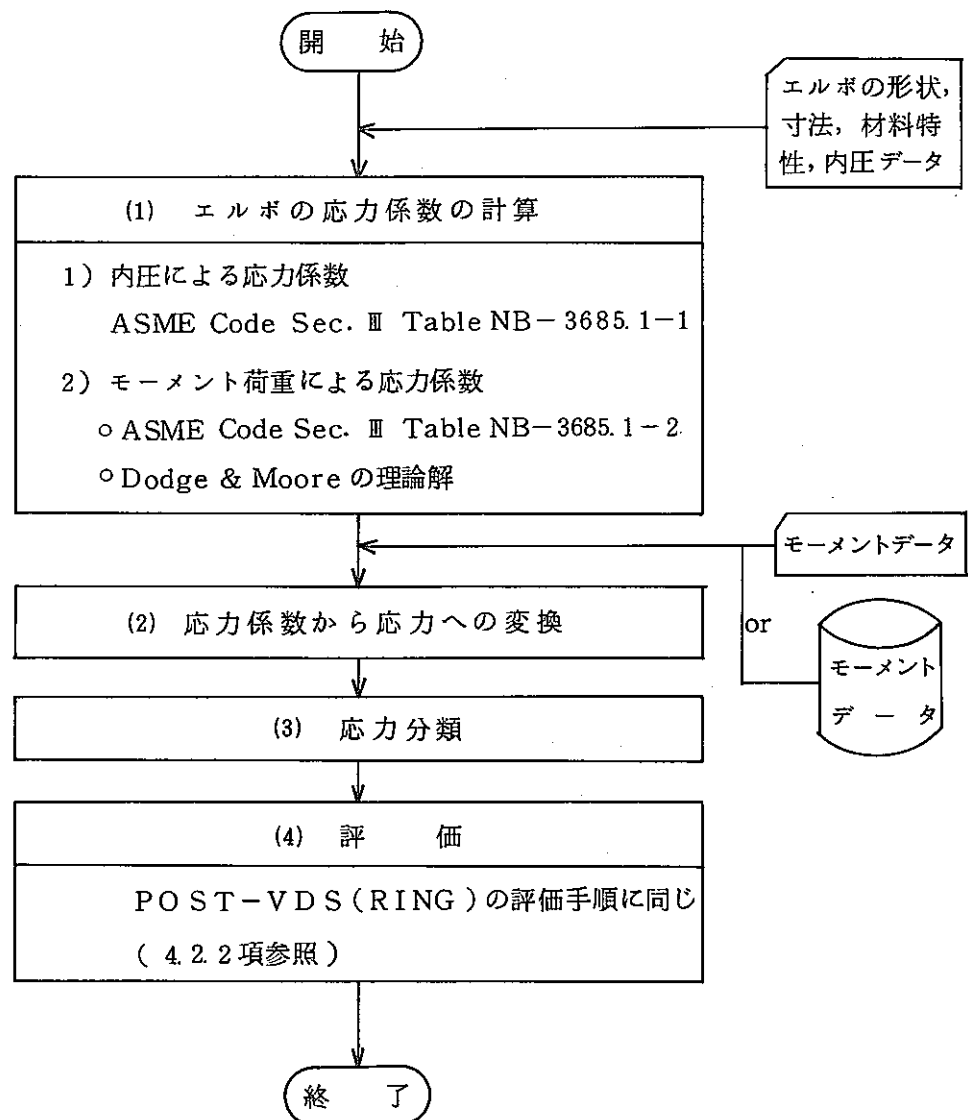
## 2.5 エルボの詳細理論弾性解析による評価法

方針では管の設計について、応力係数による弾性解析を用いる場合と容器の設計方針による場合が定められており、いずれの方法を用いてもよいことになっている。

本節では、エルボの理論弾性解析により得られた詳細応力係数（以下応力係数と略記する）を用いて容器の設計方針に従った評価を行う場合についてPOST-VDS ( ELBOW ) の評価手順と対応させながら説明する。

### 2.5.1 評価手順

以下にPOST-VDS ( ELBOW ) の評価手順の概略を示す。



次に、各ステップの内容について説明する。

## 2.5.2 エルボの応力係数の計算

### 1) 内圧による応力係数

内圧による応力係数は、ASME Sec. III Div.1 Subsec. NB Table NB-3685.1-1による。

TABLE NB-3685.1-1

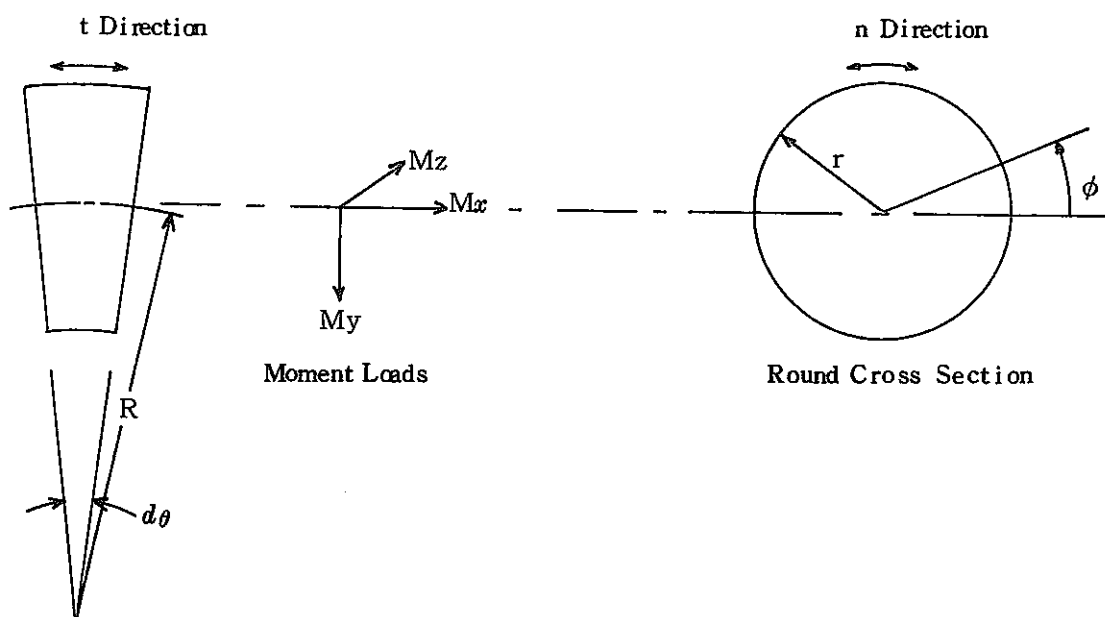
CURVED PIPE OR WELDING-END ELBOWS, INTERNAL PRESSURE

Location	Surface	Stress Direction	Stress Index <sup>1</sup>	
$\phi$ ↓	Inside	$\sigma_n$ ↓	For Round Cross Section $\left[ \frac{D_o - 0.8(t_m - a)}{2(t_m - a)} \right] \left[ \frac{.5(2R + r \sin \phi)}{R + r \sin \phi} \right] = i_1$	
	Mid			
	Outside			
	Inside	$\sigma_t$ ↓		$\frac{D_i}{4(t_m - a)} = i_2$
	Mid			
	Outside			

**NOTE:**

(i) The radial stress  $\sigma_r$  on the inside surface is equal to  $-P$ , at midsurface to  $-P/2$ , and outside surface to 0.

この応力係数は円環殻の膜理論から導びかれたものである。なお、エルボの座標系については下図を参照のこと。



2) モーメント荷重による応力係数

本プログラムではモーメント荷重による応力係数について次のいずれかを選択できるようになっている。

i) ASME Sec. III Div. 1 Subsec. NB Table NB-3685.1-2

ii) Dodge & Moore の理論解

これらの応力係数算定の根拠となっている理論は、Von Karmanがエルボの扁平量を断面内の角座標に関するフーリエ級数形におき、最小エネルギーの定理を適用した近似解法を基礎として拡張されたもので、i) はRodabaugh & George の第3近似解、ii) はRodabaugh & George の理論とGrossの理論を組み合わせた高次近似解である。

以下にi), ii) の応力係数算定式を示す。

i) ASME Sec. III Div. 1 Subsec. NB Table NB-3685.1-2

TABLE NB-3685.1-2  
CURVED PIPE OR WELDING-END ELBOWS, MOMENT LOADING ( $\lambda \geq 0.2$ )

Location	Surface	Stress Direction	Stress Index <sup>1</sup>
All	All	Torsional Moment, $M_x$ $\tau_{nt}$ (Note 2)	1.0
		In-Plane or Out of Plane Moments, $M_y$ or $M_z$	
$\phi$ ↓	Outside	$\sigma_n$ ↓	$\nu \sigma_{tm} + \sigma_{nb}$
	Mid inside		$\nu \sigma_{tm}$ $\nu \sigma_{tm} - \sigma_{nb}$
	Outside	$\sigma_t$ ↓	$\sigma_{tm} + \nu \sigma_{nb}$
	Mid		$\sigma_{tm}$
	Inside		$\sigma_{tm} - \nu \sigma_{nb}$

where  $\nu$  = Poisson's ratio

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{tm} &= \sin \phi + \{(1.5 x_2 - 18.75) \sin 3 \phi + 11.25 \sin 5 \phi\} / x_4 \\ \sigma_{nb} &= \lambda (9 x_2 \cos 2 \phi + 225 \cos 4 \phi) / x_4 \end{aligned} \right\} \text{In Plane, } M_z$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{tm} &= \cos \phi + \{(15 x_2 - 18.75) \cos 3 \phi + 11.25 \cos 5 \phi\} / x_4 \\ \sigma_{nb} &= -\lambda (9 x_2 \sin 2 \phi + 225 \sin 4 \phi) / x_4 \end{aligned} \right\} \text{Out of Plane, } M_y$$

$$\begin{aligned} x_1 &= 5 + 6 \lambda^2 + 24 \Psi \\ x_2 &= 17 + 600 \lambda^2 + 480 \Psi \\ x_3 &= x_1 x_2 - 6.25 \\ x_4 &= (1 - \nu^2) (x_3 - 4.5 x_2) \\ \lambda &= t_m R / (r^2 \sqrt{1 - \nu^2}) \text{ (Equations are valid for } \lambda \geq 0.2 \text{ only)} \\ \Psi &= PR^2 / E r t_m \end{aligned}$$

NOTES:

(1) The radial stress,  $\sigma_r$ , is zero for all surfaces.

(2)  $\tau_{nt}$  is a shear stress in the n-t plane and must be appropriately combined with the principal stresses  $\sigma_n$  and  $\sigma_t$  to obtain principal stresses due to combinations of  $M_x$  with  $M_y$  or  $M_z$ .

ii) Dodge & Moore の理論解

以下に解析結果を示す。詳細については参考文献 [32] [33] を参照のこと。

○面内曲げモーメントに対して

$$i_{zz} = F \left[ D \sin \phi + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N A_n \sin(2n+1)\phi \pm \frac{\nu \lambda}{2} \sum_{n=1}^N B_n \cos 2n\phi \right]$$

$$i_{\theta z} = F \left[ -\frac{1}{\gamma} \left\{ D \cos \phi + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{(2n+1)} \cos(2n+1)\phi \right\} \cos \phi \pm \frac{\lambda}{2} \sum_{n=1}^N B_n \cos 2n\phi \right]$$

○面外曲げモーメントに対して

$$i_{zy} = F \left[ D \cos \phi + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N A_n \cos(2n+1)\phi \pm \frac{\nu \lambda}{2} \sum_{n=1}^N -B_n \sin 2n\phi \right]$$

$$i_{\theta y} = F \left[ \frac{1}{\gamma} \left\{ D \sin \phi + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{(2n+1)} \sin(2n+1)\phi \right\} \sin \phi \pm \frac{\lambda}{2} \sum_{n=1}^N B_n \sin 2n\phi \right]$$

ここに

$i$  = 応力係数

$$F = \frac{k_p}{1-\nu^2}, \quad k_p = \frac{1}{1 + \frac{3}{2} d_1}, \quad D = 1 + \frac{3}{2} d_1$$

$$A_n = (1 - 2n) d_n + (2n + 3) d_{n+1}$$

$$B_n = (2n - 8n^3) d_n$$

$$\lambda = tR / (r^2 \sqrt{1-\nu^2}), \quad \gamma = R/r, \quad \Psi = PR^2 / Ert$$

添字  $\theta$  : 管断面周方向,  $z$  : 管断面に直角な方向

計算式中の+, -の符号はそれぞれ管外内面に対応する。

応力係数  $i$  については, 例えば  $i_{\theta z}$  は面内曲げモーメント  $M_z$  に対する周方向応力係数を意味する。

$d_n$  : 次式において級数を  $N$  項で打ち切り  $d_{N+1} = 0$  とした  $N$  元連立一次方程式の解である。

$$\begin{cases} 3 + (5 + 6\lambda^2 + 24\Psi) d_1 - \frac{5}{2} d_2 = 0 \\ -\frac{5}{2} d_1 + (17 + 600\lambda^2 + 480\Psi) d_2 - \frac{21}{2} d_3 = 0 \\ \vdots \\ -\frac{1}{2} (2n-3)(2n+1) d_{n-1} + [(4n^2+1) + (8n^3-2n)^2 \frac{\lambda^2}{6} + 8n^2(4n^2-1)\Psi] d_n \\ - \frac{1}{2} (2n-1)(2n+3) d_{n+1} = 0 \end{cases}$$

なお, 本プログラムでは  $N = 20$  まで考慮している。

○ねじりモーメントに対して

$$i = 1.0$$

### 2.5.3 応力係数から応力への変換

下記により応力係数から応力へ変換する。

荷 重	応力係数に下記の値を乗ずる
内 圧	P
$M_x$	$M_x / 2Z$
$M_y$	$M_y / Z$
$M_z$	$M_z / Z$

ここに P : 内圧  
Z : 管の断面係数  
 $M_x$  : ねじりモーメント  
 $M_y$  : 面外曲げモーメント  
 $M_z$  : 面内曲げモーメント

### 2.5.4 応力分類

容器の場合の応力分類法に従うものとするが、面内、面外及びねじりモーメントによる応力は、ASME Sec III Div. 1 Subsec. NB NB - 3685.4 の規定に従い以下のように分類する。

- (1) 荷重制御型の面内、面外及びねじりモーメントによる軸力、周方向及びせん断応力の膜応力成分は1次応力 ( $P_L$ ) として分類する。
- (2) 荷重制御型の面内、面外曲げモーメントによる曲げ応力成分のうち、75%を1次応力 ( $P_b$ )、25%を2次応力 ( $Q$ ) として分類する。
- (3) 変位制御型の面内、面外及びねじりモーメントによる応力はすべて2次応力 ( $Q$ ) として分類する。

なお、エルボの理論弾性解析によって得られる応力は1次+2次応力までで、ピーク応力については弾性応力集中係数を与えることによって考慮する。



以下にPOST-VDS (ELBOW) における具体的な応力分類を示す。

1) 長期荷重による1次一般膜応力  $P_m$

$$\sigma_{\theta} = \left[ \frac{D_o - 0.8(t_m - a)}{2(t_m - a)} \right] \left[ \frac{R - 0.5r}{R - r} \right] P$$

$$\sigma_r = -0.5P$$

$$\sigma_z = \frac{Di}{4(t_m - a)} P + \frac{Fd}{A}$$

ここに

$D_o$  : 管外径 (mm),  $Di$  : 管内径 (mm),  $t_m$  : 管板厚 (mm)

$a$  : くされ代 (mm),  $r$  : 管の平均半径 (mm)

$R$  : 管の曲げ半径 (mm),  $P$  : (圧力  $kg/mm^2$ )

$Fd$  : 自重による軸力 (kg),  $A$  : 管の断面積 ( $mm^2$ )

添字

$\theta$  : 管断面周方向,  $r$  : 半径方向,  $z$  : 管断面に直角な方向

2) 長期荷重による1次局部膜応力  $P_L$

$$\sigma_{\theta} = i_{\theta y}^m \frac{My}{Z} + i_{\theta z}^m \frac{Mz}{Z} + \sigma_{\theta}(P_m) \left\langle + i_{\theta y}^m \frac{My^{**}}{Z} + i_{\theta z}^m \frac{Mz^{**}}{Z} \right\rangle$$

$$\sigma_r = -0.5P$$

$$\sigma_z = i_{zy}^m \frac{My}{Z} + i_{zz}^m \frac{Mz}{Z} + \sigma_z(P_m) + \frac{Fa}{A} \left\langle + i_{zy}^m \frac{My^{**}}{Z} + i_{zz}^m \frac{Mz^{**}}{Z} \right\rangle$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{Mx}{2Z} \left\langle + \frac{Mx^{**}}{2Z} \right\rangle$$

ここに

$i$  : 応力係数,  $Z$  : 管の断面係数 ( $mm^3$ )

$M$  : 自重によるモーメント ( $kg \cdot mm$ )

$M^{**}$  : 熱膨張及びアンカー点の熱変位によるモーメント ( $kg \cdot mm$ )

$Fa$  : 熱膨張及びアンカー点の熱変位による軸力 (kg)

$\sigma(P_m)$  : 長期荷重による1次一般膜応力を意味する。

添字

$m$  : 板厚中央面

応力係数については、例えば  $i_{\theta y}$  はモーメント  $My$  に対する周方向応力係数を意味する。

$\langle \rangle$  内の項は、熱膨張応力を1次応力とする場合に適用する。

3) 短期荷重による1次局部膜応力  $P_1^*$

$$\sigma_{\theta} = i_{\theta y}^m \frac{M_y^*}{Z} + i_{\theta z}^m \frac{M_z^*}{Z}$$

$$\sigma_z = i_{zy}^m \frac{M_y^*}{Z} + i_{zz}^m \frac{M_z^*}{Z} + \frac{F a^*}{A}$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{M_x^*}{2Z}$$

ここに

$M^*$  : 地震時の管の慣性動によるモーメント ( $kg \cdot mm$ )

$F a^*$  : 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 ( $kg$ )

4) 長期荷重による1次曲げ応力  $P_b$

ASME Sec. III Div. 1 Subsec. NB NB-3685.4の規定に従い、荷重制御型面内、面外モーメントによる曲げ応力成分のうち、75%を1次応力( $P_b$ )、25%を2次応力( $Q$ )に分類する。

$$\sigma_{\theta} = 0.75 \times \left\{ (i_{\theta y}^s - i_{\theta y}^m) \frac{M_y}{Z} + (i_{\theta z}^s - i_{\theta z}^m) \frac{M_z}{Z} \right\}$$

$$\left\langle + 0.75 \times \left\{ (i_{\theta y}^s - i_{\theta y}^m) \frac{M_y^{**}}{Z} + (i_{\theta z}^s - i_{\theta z}^m) \frac{M_z^{**}}{Z} \right\} \right\rangle$$

$$\sigma_z = 0.75 \times \left\{ (i_{zy}^s - i_{zy}^m) \frac{M_y}{Z} + (i_{zz}^s - i_{zz}^m) \frac{M_z}{Z} \right\}$$

$$\left\langle + 0.75 \times \left\{ (i_{zy}^s - i_{zy}^m) \frac{M_y^{**}}{Z} + (i_{zz}^s - i_{zz}^m) \frac{M_z^{**}}{Z} \right\} \right\rangle$$

ここに

添字  $s$  : 管表面

$\langle \rangle$  内の項は熱膨張応力を1次応力とする場合に適用する。

5) 短期荷重による1次曲げ応力  $P_b^*$

4)と同様な応力分類を行う。

$$\sigma_{\theta} = 0.75 \times \left\{ (i_{\theta y}^s - i_{\theta y}^m) \frac{M_y^*}{Z} + (i_{\theta z}^s - i_{\theta z}^m) \frac{M_z^*}{Z} \right\}$$

$$\sigma_z = 0.75 \times \left\{ (i_{zy}^s - i_{zy}^m) \frac{M_y^*}{Z} + (i_{zz}^s - i_{zz}^m) \frac{M_z^*}{Z} \right\}$$

6) 長期2次応力 Q

$$\sigma_o = \left\langle i_{\theta y} \frac{M_y^{**}}{Z} + i_{\theta z} \frac{M_z^{**}}{Z} \right\rangle + \frac{1}{3} \sigma_o (Pb) - Eab (\alpha_a T_a - \alpha_b T_b) + \frac{E\alpha \Delta T_1}{2(1-\nu)} \quad (\text{定常})$$

$$\sigma_z = \left\langle i_{zy} \frac{M_y^{**}}{Z} + i_{zz} \frac{M_z^{**}}{Z} \right\rangle + \frac{1}{3} \sigma_z (Pb) + \frac{E\alpha \Delta T_1}{2(1-\nu)} \quad (\text{定常})$$

$$\tau_{zo} = \left\langle \frac{M_x^{**}}{2Z} \right\rangle$$

ここに

E : 縦弾性係数 (kg/mm<sup>2</sup>),    α : 瞬時熱膨張係数 (mm/mm/°C)

T : 温度 (°C),                    ν : ポアソン比

ΔT<sub>1</sub> : 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(°C)

Eab : (E<sub>a</sub> + E<sub>b</sub>) / 2 (kg/mm<sup>2</sup>)

添字

a : 評価部側

b : 評価部に隣接した不連続部側

7) 短期2次応力 Q\*

$$\sigma_o = i_{\theta y} \frac{M_y^{***}}{Z} + i_{\theta z} \frac{M_z^{***}}{Z} + \frac{1}{3} \sigma_o (Pb^*) + \frac{E\alpha \Delta T_1}{2(1-\nu)} \quad (\text{非定常})$$

$$\sigma_z = i_{zy} \frac{M_y^{***}}{Z} + i_{zz} \frac{M_z^{***}}{Z} + \frac{1}{3} \sigma_z (Pb^*) + \frac{E\alpha \Delta T_1}{2(1-\nu)} \quad (\text{非定常})$$

$$\tau_{zo} = \frac{M_x^{***}}{2Z}$$

ここに

M<sup>\*\*\*</sup> : 地震時のアンカー点の動的強制変位によるモーメント (kg・mm)

8) 長期熱曲げ応力 Q<sub>τb</sub>

$$\sigma_o = \sigma_z = \frac{E\alpha \Delta T_1}{2(1-\nu)} \quad (\text{定常})$$

9) 短期熱曲げ応力  $Q_{\tau b^*}$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_z = \frac{E\alpha \Delta T_1}{2(1-\nu)} \quad (\text{非定常})$$

10) 長期+短期ピーク応力  $F + F^*$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{\theta} \\ \sigma_z \end{array} \right\} = (K-1) (P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* - Q_{\tau b} - Q_{\tau b^*}) + \frac{E\alpha \Delta T_2}{1-\nu}$$

ここに

K: 相当弾性応力集中係数

$\Delta T_2$ : 壁厚方向温度分布とモーメント等価線形温度分布の間の温度差(°C)

ただし, Qには不連続応力  $E\alpha b(\alpha a T_a - \alpha b T_b)$  を含めないものとする。

11) 長期+短期ピーク熱応力  $F_{\tau} + F_{\tau}^*$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_z = \frac{E\alpha \Delta T_2}{1-\nu}$$

これらの応力分類結果は, 2.2.5 項に示される三次元の応力テーブル(CSTRS(I, J, K))にまとめられる。

### 2.5.5 評価

評価手順は、POST-VDS (RING) の場合と同じである。

ただし、本プログラムでは、地震解析としてモーダル応答解析法が採用されることを想定して、地震時の管の慣性動によるモーメント  $M_i^*$ 、軸力  $F_x^*$  を以下のように取扱っている。すなわち、モーダル応答解析法で得られた結果は無符号であるので、1次応力の制限の評価に関して  $\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle$  を計算する場合、ELBOW LOAD SETカードでLDSET(I, 11)=1が与えられたロードセットに対しては、各モーメント成分及び軸力に対して+、-の符号を考え、Table 2.5.1の符号組合せの中から  $P_L + P_L^* + P_b + P_b^*$  の応力強さの最大値を探し出して出力するようにしている。

Table 2.5.1 符号組合せ

$M_y^*$	+	+	+	+	-	-	-	-
$M_z^*$	+	+	-	-	+	+	-	-
$F_x^*$	+	-	+	-	+	-	+	-

注)  $M_x^*$ の符号は、自重によるモーメント  $M_x$ の符号に合わせる。

なお、ひずみの制限、クリープ疲労損傷の制限の評価に関しては、 $M_i^*$ 、 $F_x^*$ の符号はユーザーの指定に従うものとする。

## 2.6 温度分布の分類方法

指針案に従って第1種機器の評価を行なう場合、強度評価に必要な、壁厚平均温度  $T_{avg}$ 、モーメント等価線形温度分布における内外面温度差  $\Delta T_1$  および壁厚方向温度分布とモーメント等価線形温度分布との内外面における温度差  $\Delta T_2$  を求める必要がある。

いま、SCL上の温度分布を  $T(x)$  とすると

$$T_{avg} = \frac{1}{t} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} T(x) dx \quad (2.6.1)$$

$$\Delta T_1 = \frac{12}{t^2} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} T(x) x dx \quad (2.6.2)$$

となる。これらの温度分布の分類の模式図を Fig. 2.6.1 に示す。

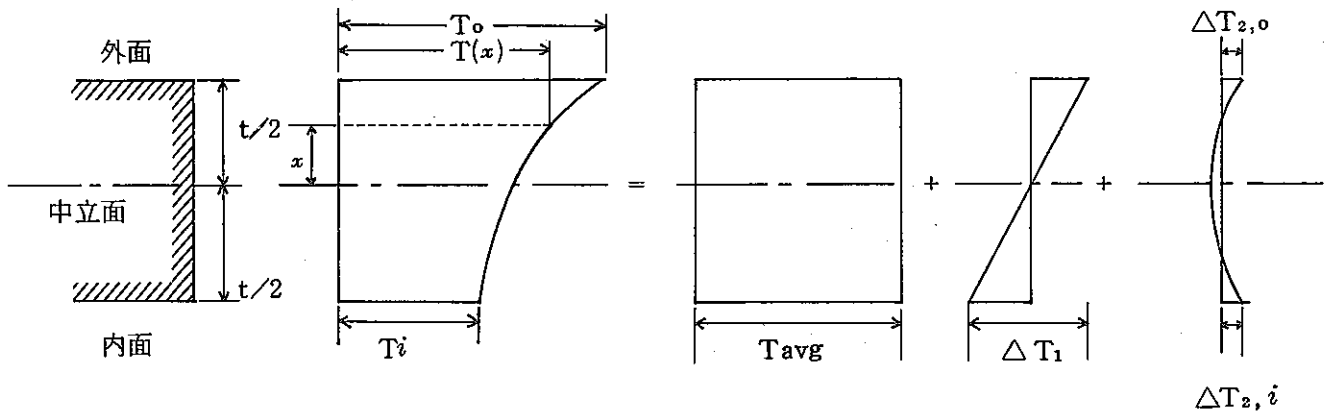


Fig. 2.6.1 温度分布の分類の模式図

なお、温度分布により、 $\Delta T_1$ 、 $\Delta T_2$  には正負の符号が存在する。本プログラム (POST-HEAT) では、以下のように符号を定める。

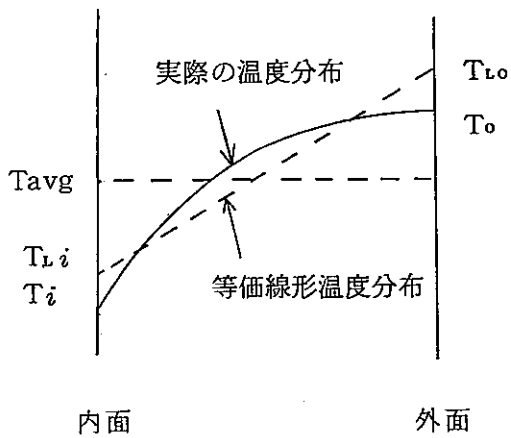


Fig. 2.6.2 評価断面の温度分布

$T_i$  : 内表面温度  
 $T_o$  : 外表面温度  
 $T_{Li}$  : 等価線形内面温度  
 $T_{Lo}$  : 等価線形外面温度  
 $T_{avg}$  : 壁厚平均温度

とすると

$$\Delta T_1 = T_{Lo} - T_{Li}$$

$$(\Delta T_2) \text{ 内面} = T_i - T_{Li}$$

$$(\Delta T_2) \text{ 外面} = T_o - T_{Lo}$$

$$(\Delta T_1/2 + \Delta T_2) \text{ 内面} = T_i - T_{avg}$$

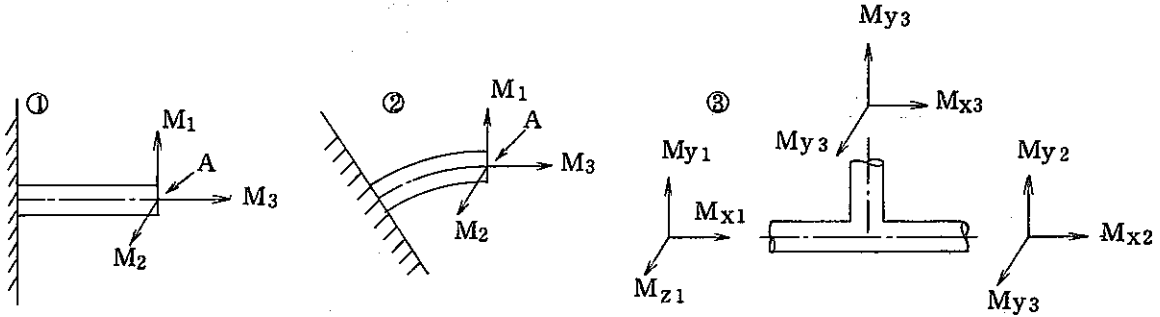
$$(\Delta T_1/2 + \Delta T_2) \text{ 外面} = T_o - T_{avg}$$

として求めている。なお、(2.6.1)、(2.6.2)式で用いる積分は、SCL上の温度分布を区分的に放物線分布と仮定して定積分計算を行っている。

## 2.7 その他

### 2.7.1 梁要素の部材座標系

方針に示されるモーメントは次式に示す合モーメントで定義する。



$$M_t = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2}$$

$$M_t = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2}$$

$M_{i1}$  と  $M_{i2}$  が同符号 :  $M_{ir} = 0$

$M_t$  : 点 A におけるモーメント

$M_{i1}$  と  $M_{i2}$  が異符号 :  $M_{ir} = \min(M_{i1}, M_{i2})$

$$M_b = \sqrt{M_{x3}^2 + M_{y3}^2 + M_{z3}^2}$$

$$M_r = \sqrt{M_{xr}^2 + M_{yr}^2 + M_{zr}^2}$$

ここに  $i = x, y, z$

合モーメントであるので全体座標系でも部材座標系でもその値は等しいが、エルボの詳細解析に利用されることを考慮して、ストアされるモーメントは上図のような部材座標系とする。

NUPIPE プログラムの部材座標系は次のとおりである。

#### ① 直 梁

x 軸は部材の始端から終端に向かう方向が正である。

y, z 軸は以下の 2 つの場合に分けられる。

##### i) x 軸が Y 軸と平行でないとき

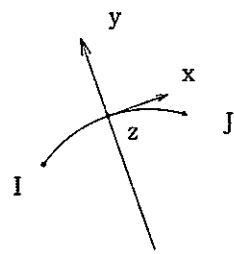
部材座標系 y 軸は、部材座標系 x 軸と全体座標系 Y 軸を含む面内において y 軸を基準座標系 Y 軸に投影したとき、y 軸と Y 軸の正の方向が同じになるように y 軸を定める。部材座標系 z 軸は右手系で定める。

##### ii) x 軸が Y 軸に平行なとき

y 軸は X 軸と同じ方向になる。



② 曲り梁



y 軸は半径方向にとる。

I : 部材の始端

J : 部材の終端

なお、地震荷重ケースを含めて T E E 管のモーメントの計算は、N U P I P E - I I で使用される方法による。

$$(M_{ir})_A = |M_{i1}| + |M_{i2}| - |M_{i3}|$$

$$(M_{ir})_B = \text{Min}(|M_{i1}|, |M_{i2}|)$$

$$M_{ir} = \text{Min}((M_{ir})_A, (M_{ir})_B)$$

## 2.7.2 TEE 管の評価式

POST-PDS では TEE 管に対する評価式として次式を用いている。

$$P_L + P_b = \frac{B_1 P D_0}{200 t} + \frac{B_{2b} M_{ib}}{Z_b} + \frac{B_{2r} M_{ir}}{Z_r} + \text{Max} \left( \frac{|F_{ab}|}{A_b}, \frac{|F_{ar}|}{A_r} \right)$$

$$P_S^* = \frac{B_1 P D_0}{200 t} + \text{Max} \left( \frac{|F_{ab} + F_{ab}|}{A_b}, \frac{|F_{ar} + F_{ar}|}{A_r} \right)$$

$$P_S = \frac{B_1 P D_0}{200 t} + \text{Max} \left( \frac{|F_{ab}|}{A_b}, \frac{|F_{ar}|}{A_r} \right)$$

$$P_L + P_L^* + P_b + P_b^* = \frac{B_1 P D_0}{200 t} + \frac{B_{2b}}{Z_b} (M_{ib} + M_{ib}^*) + \frac{B_{2r}}{Z_r} (M_{ir} + M_{ir}^*) \\ + \text{Max} \left( \frac{|F_{ab} + F_{ab}^*|}{A_b}, \frac{|F_{ar} + F_{ar}^*|}{A_r} \right)$$

$$\langle P_L + P_b \rangle = \frac{C_1 P D_0}{200 t} + \frac{C_{2b} M_{ib}}{Z_b} + \frac{C_{2r} M_{ir}}{Z_r} + \text{Max} \left( \frac{|F_{ab}|}{A_b}, \frac{|F_{ar}|}{A_r} \right)$$

$$S_n = \frac{K_1' C_1 P_0 D_0}{200 t} + \frac{C_{2b}}{Z_b} (M_{ib} + M_{ib}^* + M_{ib}^{**} + M_{ib}^{***})_R + \frac{C_{2r}}{Z_r} (M_{ir} + M_{ir}^* + M_{ir}^{**} + M_{ir}^{***})_R \\ + \frac{E_0 \alpha_0 |\Delta T_1|}{2(1-\nu)} + C_3 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| + \text{Max} \left[ \frac{1}{A_b} (F_{ab} + F_{ab}^*)_R, \right. \\ \left. \frac{1}{A_r} (F_{ar} + F_{ar}^*)_R \right]$$

$$S_n^* = \frac{C_{2b}}{Z_b} (M_{ib}^* + M_{ib}^{***})_R + \frac{C_{2r}}{Z_r} (M_{ir}^* + M_{ir}^{***})_R + \text{Max} \left[ \frac{1}{A_b} (F_{ab}^*)_R, \frac{1}{A_r} (F_{ar}^*)_R \right]$$

$$S_n' = \frac{C_1 P_0 D_0}{200 t} + \frac{C_{2b}}{Z_b} (M_{ib} + M_{ib}^* + M_{ib}^{***})_R + \frac{C_{2r}}{Z_r} (M_{ir} + M_{ir}^* + M_{ir}^{***})_R \\ + C_4 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| + \text{Max} \left[ \frac{1}{A_b} (F_{ab} + F_{ab}^*)_R, \frac{1}{A_r} (F_{ar} + F_{ar}^*)_R \right]$$

$$S_e = \frac{C_{2b}}{Z_b} (M_{ib}^{**})_R + \frac{C_{2r}}{Z_r} (M_{ir}^{**})_R$$

$$X = \frac{C_1 P D_0}{200 t} + \frac{C_{2b}}{K t Z_b} (M_{ib} + M_{ib}^*) + \text{Max} \left( \frac{|F_{ab} + F_{ab}^*|}{A_b}, \frac{|F_{ar} + F_{ar}^*|}{A_r} \right)$$

$$Y = \frac{C_{2b}}{Z_b} (M_{ib}^{**} + M_{ib}^{***})_R + \frac{C_{2r}}{Z_r} (M_{ir}^{**} + M_{ir}^{***})_R + \frac{E_0 \alpha_0 |\Delta T_1|}{2(1-\nu)} + (K_1' - 1) \frac{C_1 P_0 D_0}{200 t}$$

$$+ C_3 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b|$$

$$P_L + (P_b / K t) = \frac{C_1 P D_0}{200 t} + \frac{C_{2b} M_{ib}}{K t Z_b} + \frac{C_{2r} M_{ir}}{K t Z_r} + \text{Max} \left( \frac{|F_{ab}|}{A_b}, \frac{|F_{ar}|}{A_r} \right)$$

$$P_L^* + (P_b^*/Kt) = \frac{C_{2b}M_{ib}^*}{KtZ_b} + \frac{C_{2r}M_{ir}^*}{KtZ_r} + \text{Max} \left( \frac{|F_{ab}|^*}{A_b}, \frac{|F_{ar}|^*}{A_r} \right)$$

ここに

添字 b : Branch 側, r : Run 側

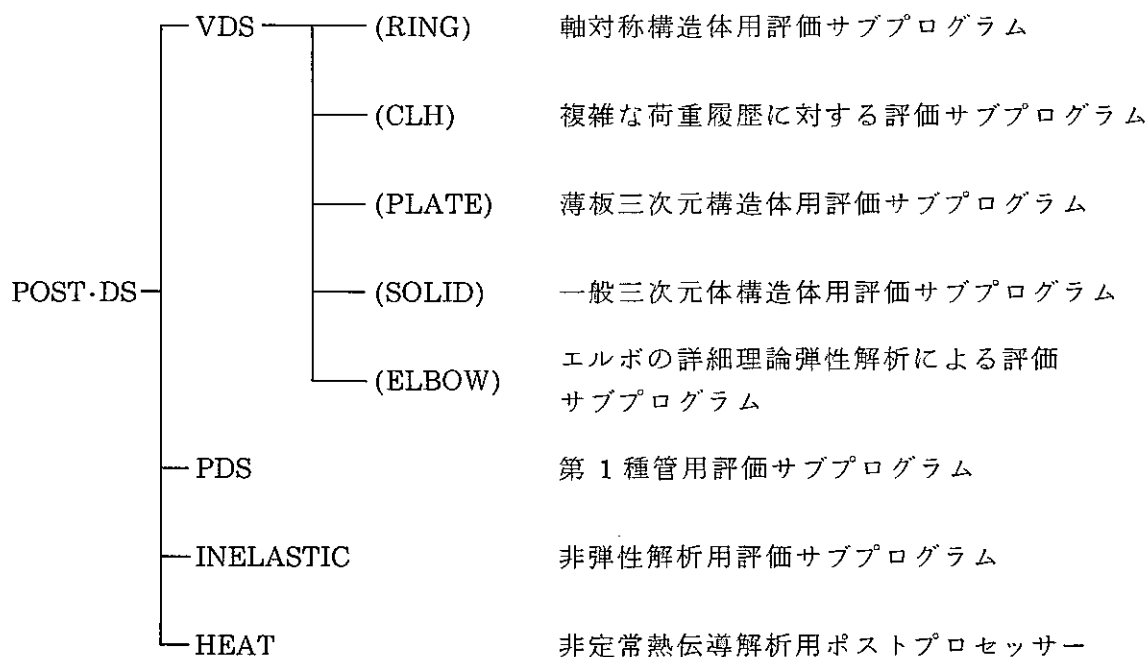
### 3 章 プログラムの詳細

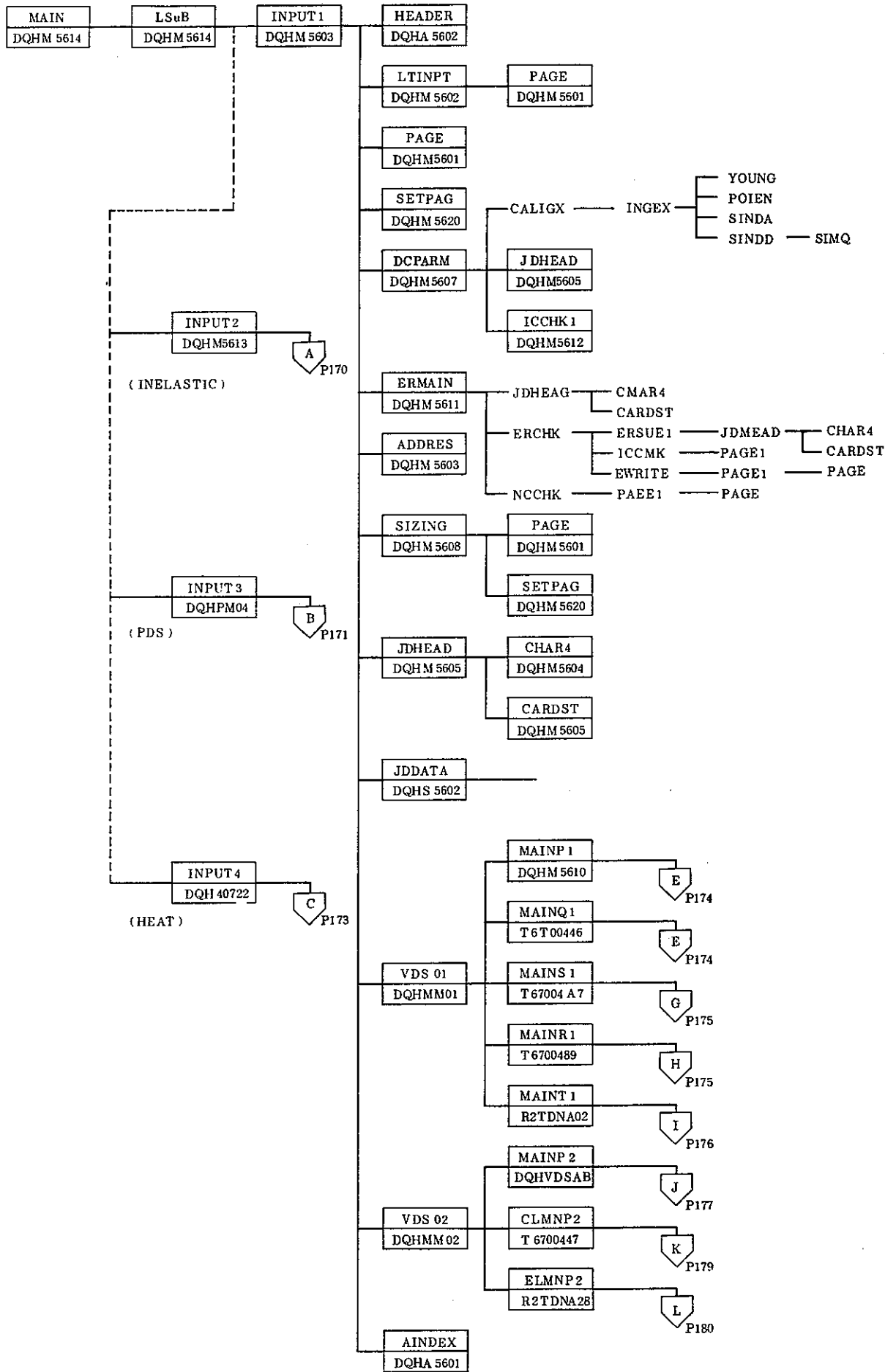
本自動強度評価システムは，昭和 55 年度に開発を行った 8 個のサブプログラム群を，今年度一つに統合し，POST-DS と呼ぶ評価システムに作り上げた。

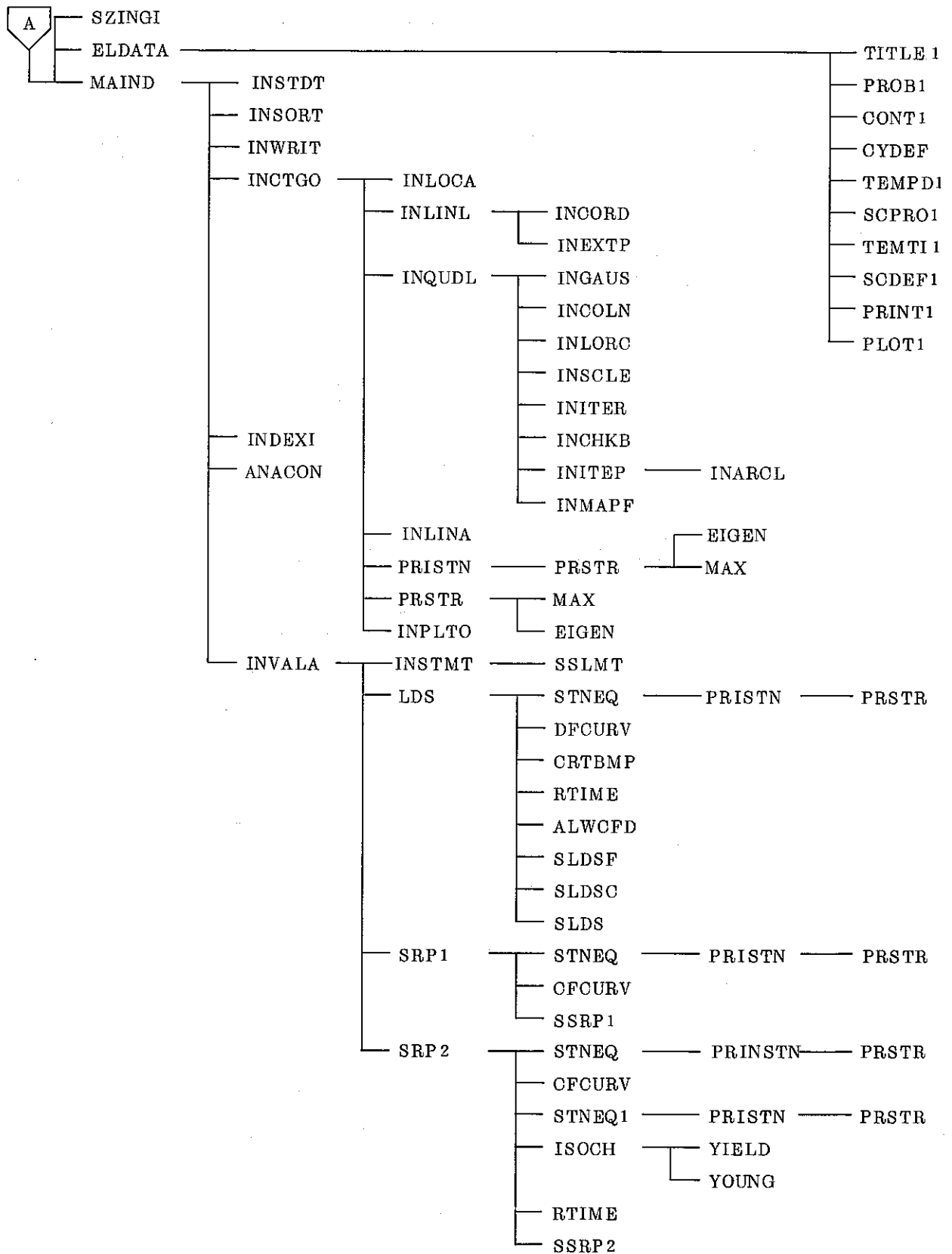
本章では，プログラムの詳細フローとサブチーン対応表を記し，今後の開発及び維持の資料とする。

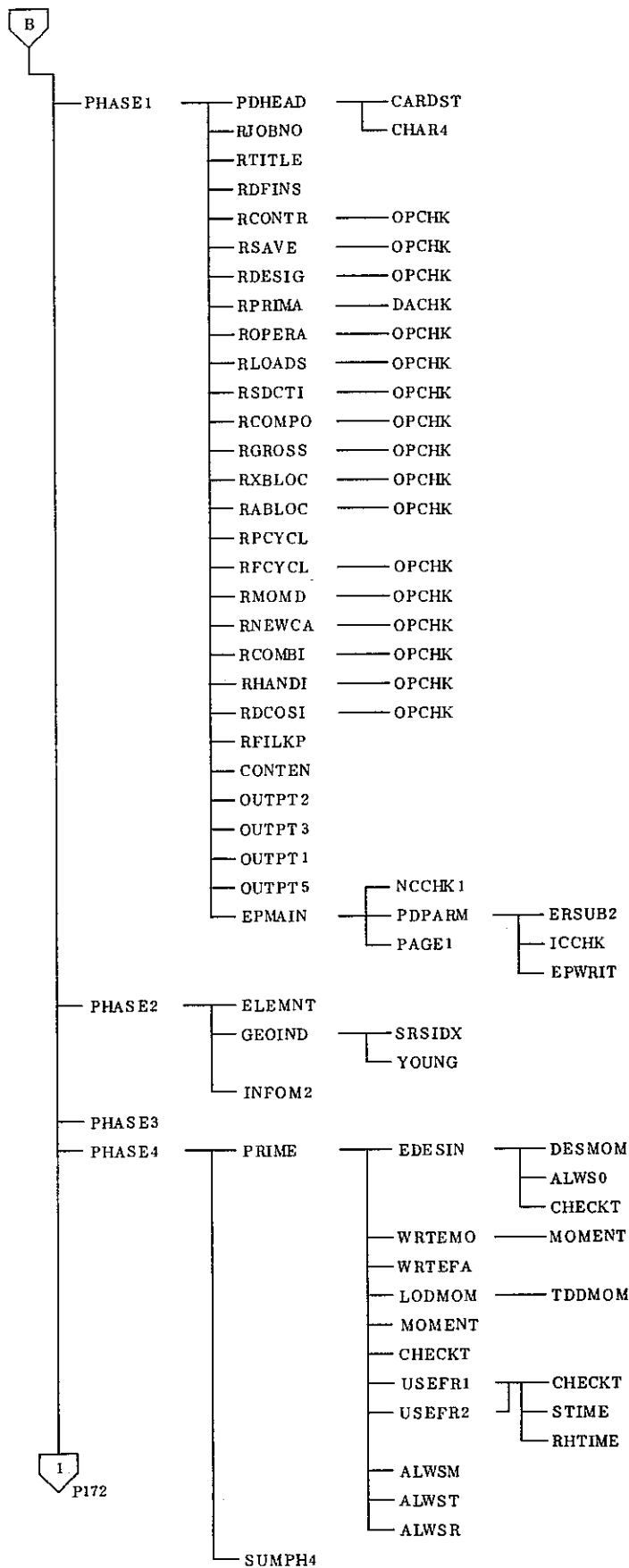
#### 3.1 プログラム構造図

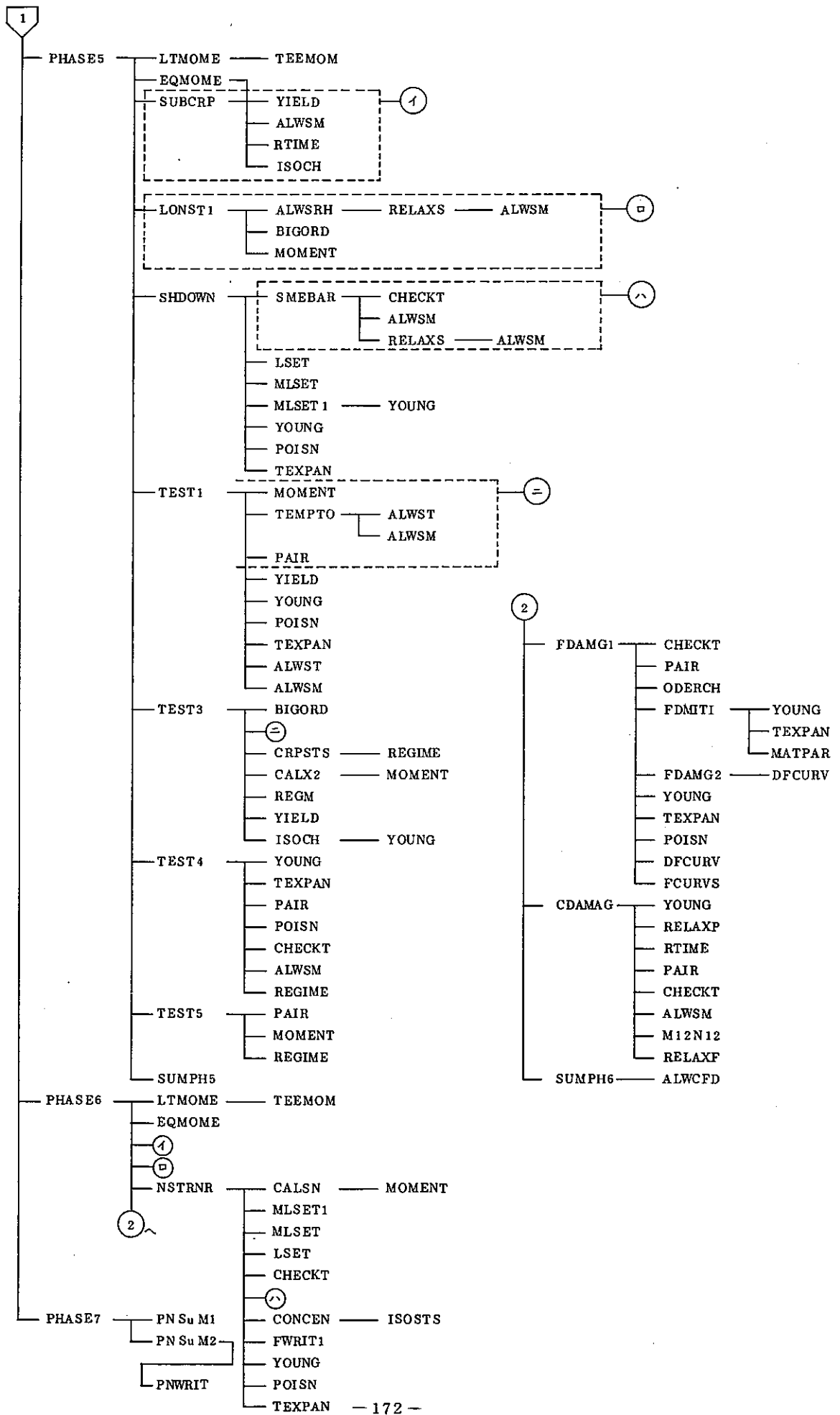
上記に述べたサブプログラム群の統合により以下に示すプログラム構造になった。詳細フロー図は次頁以降に示す。



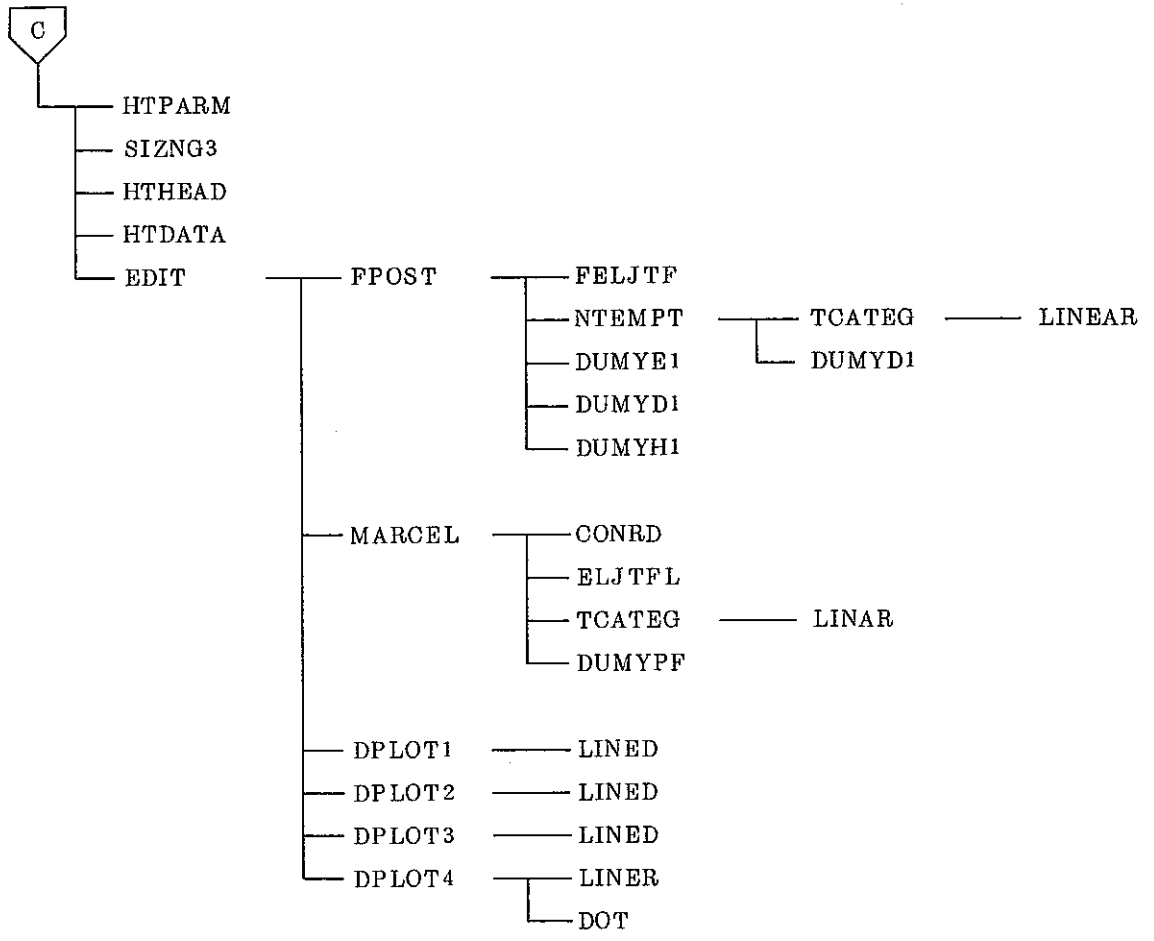


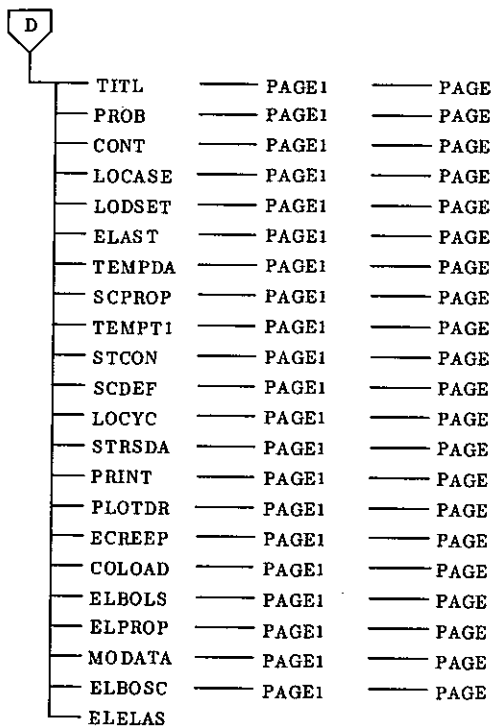
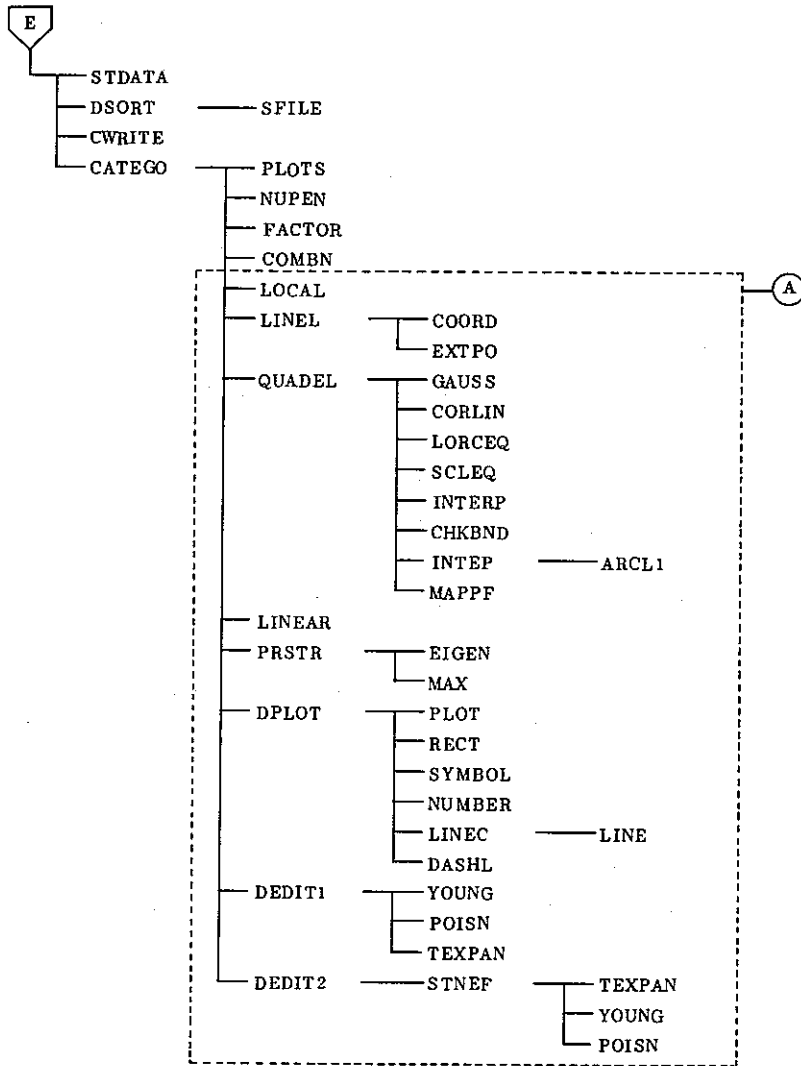


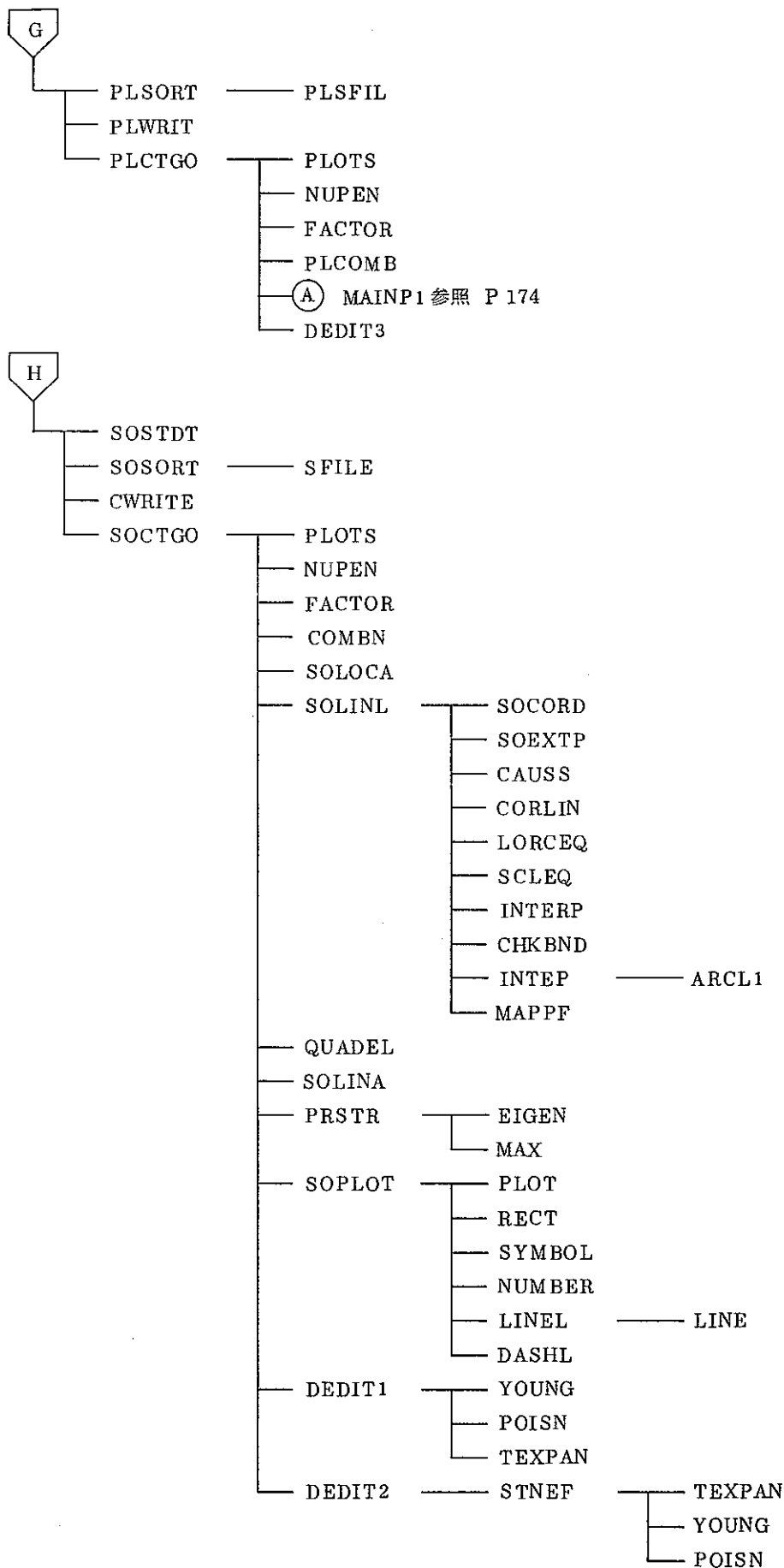


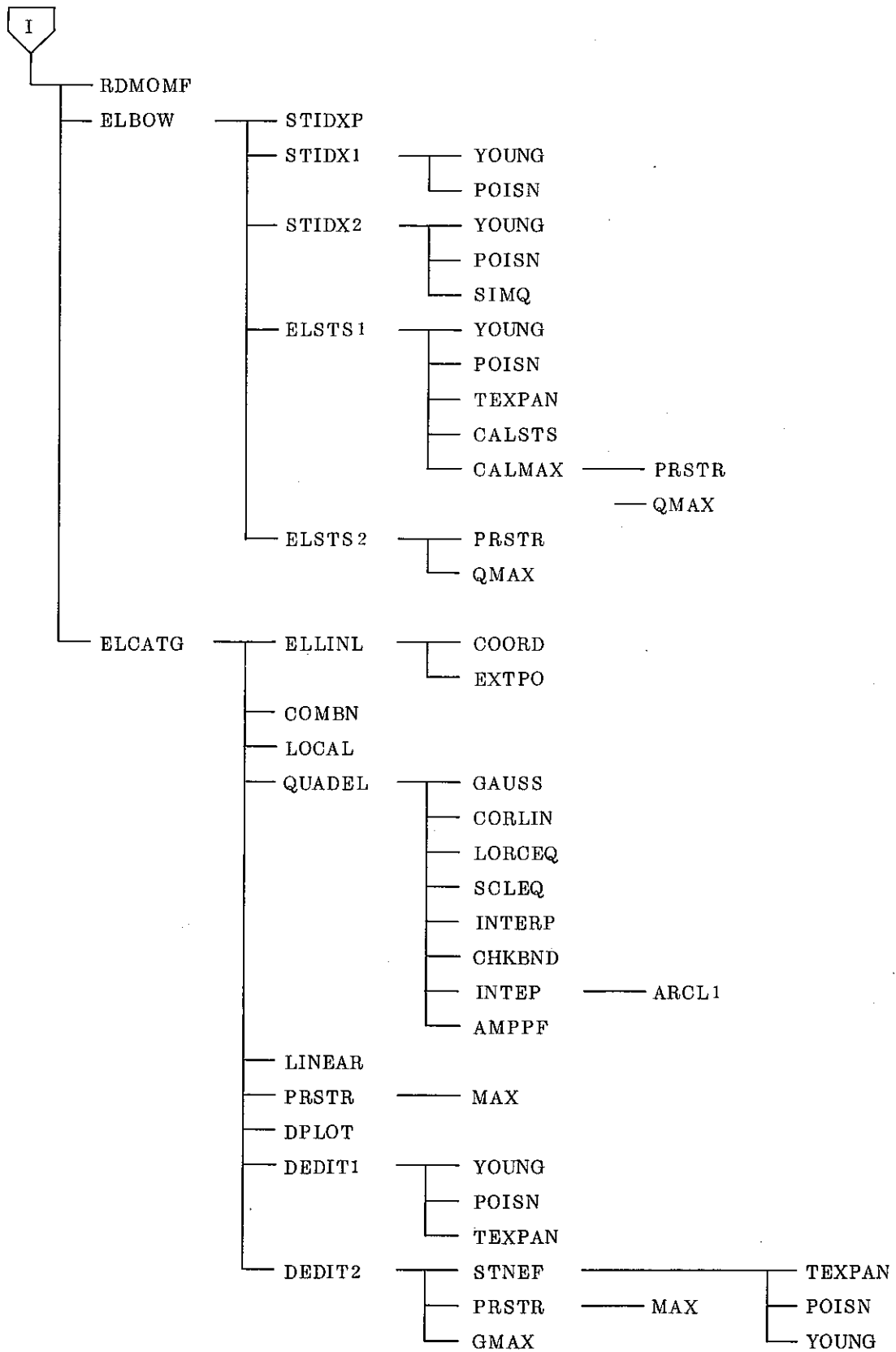


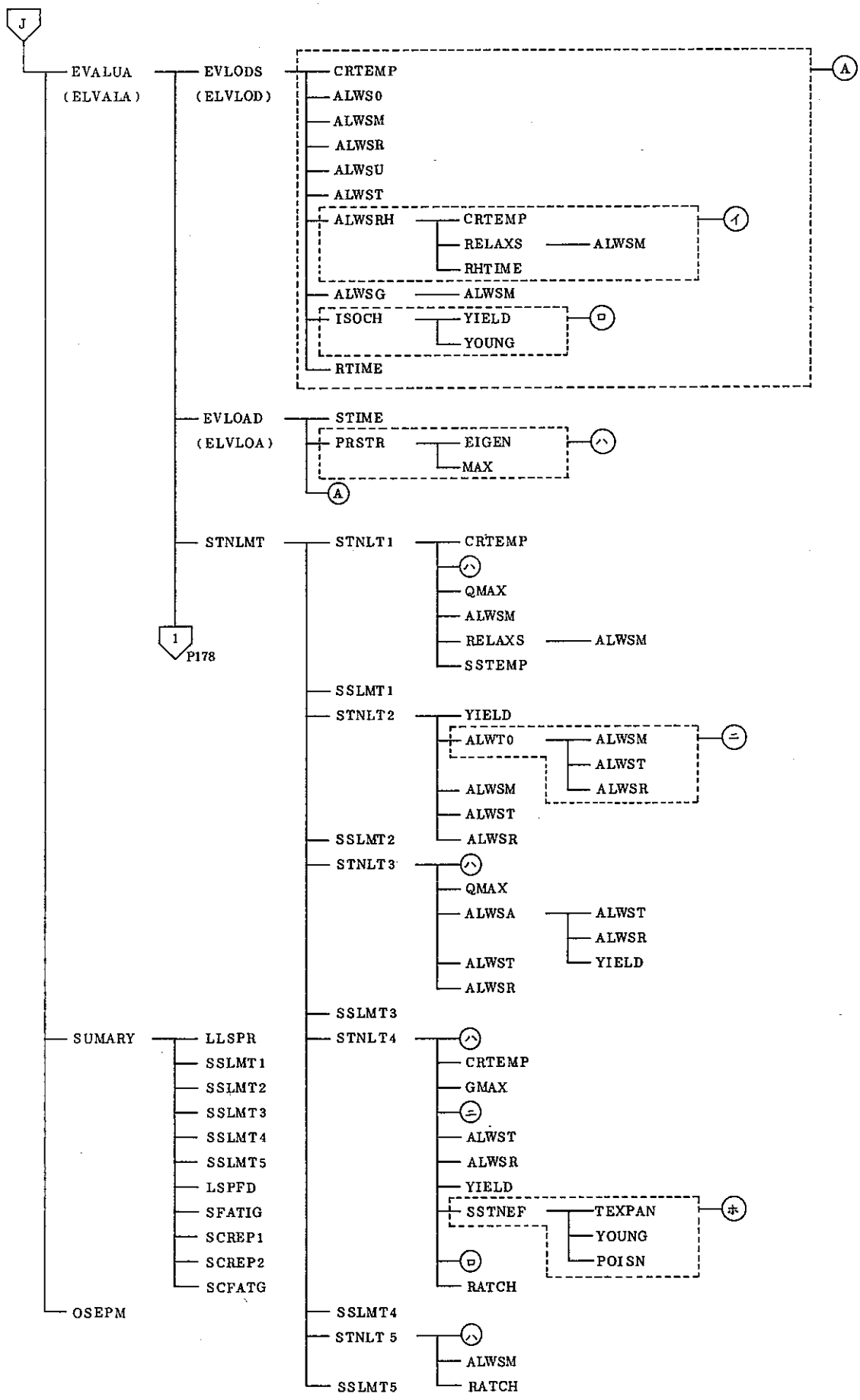




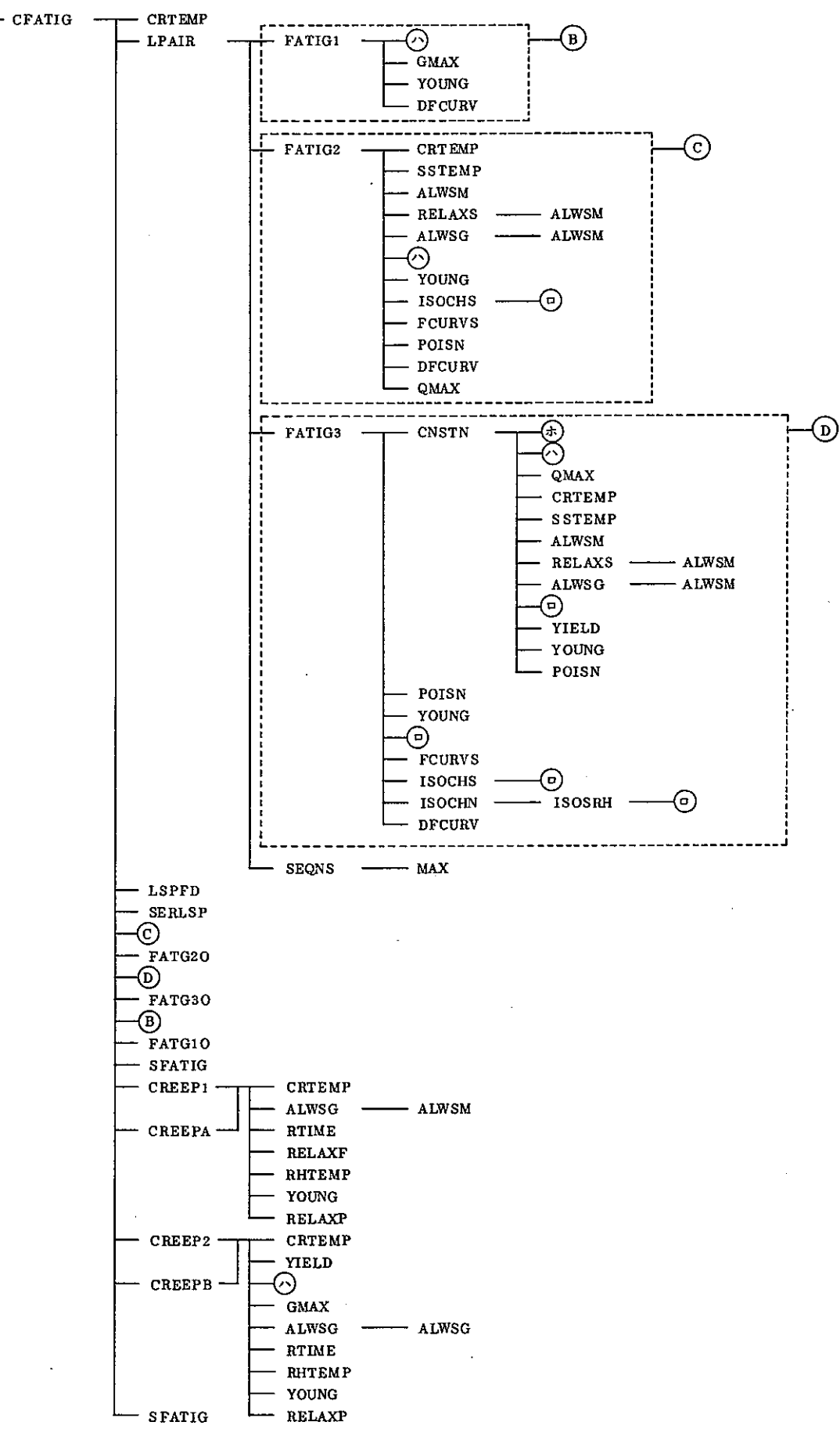


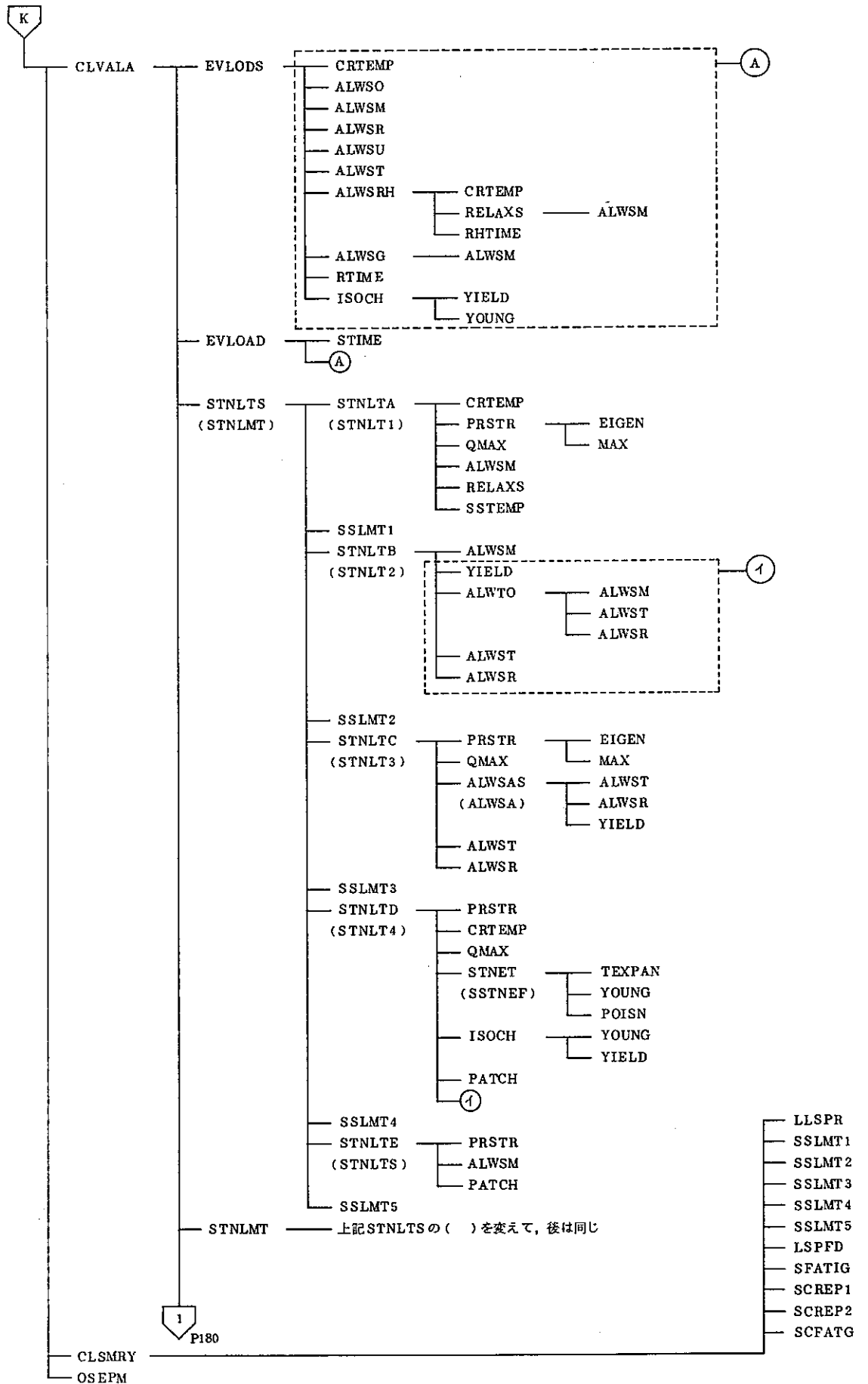


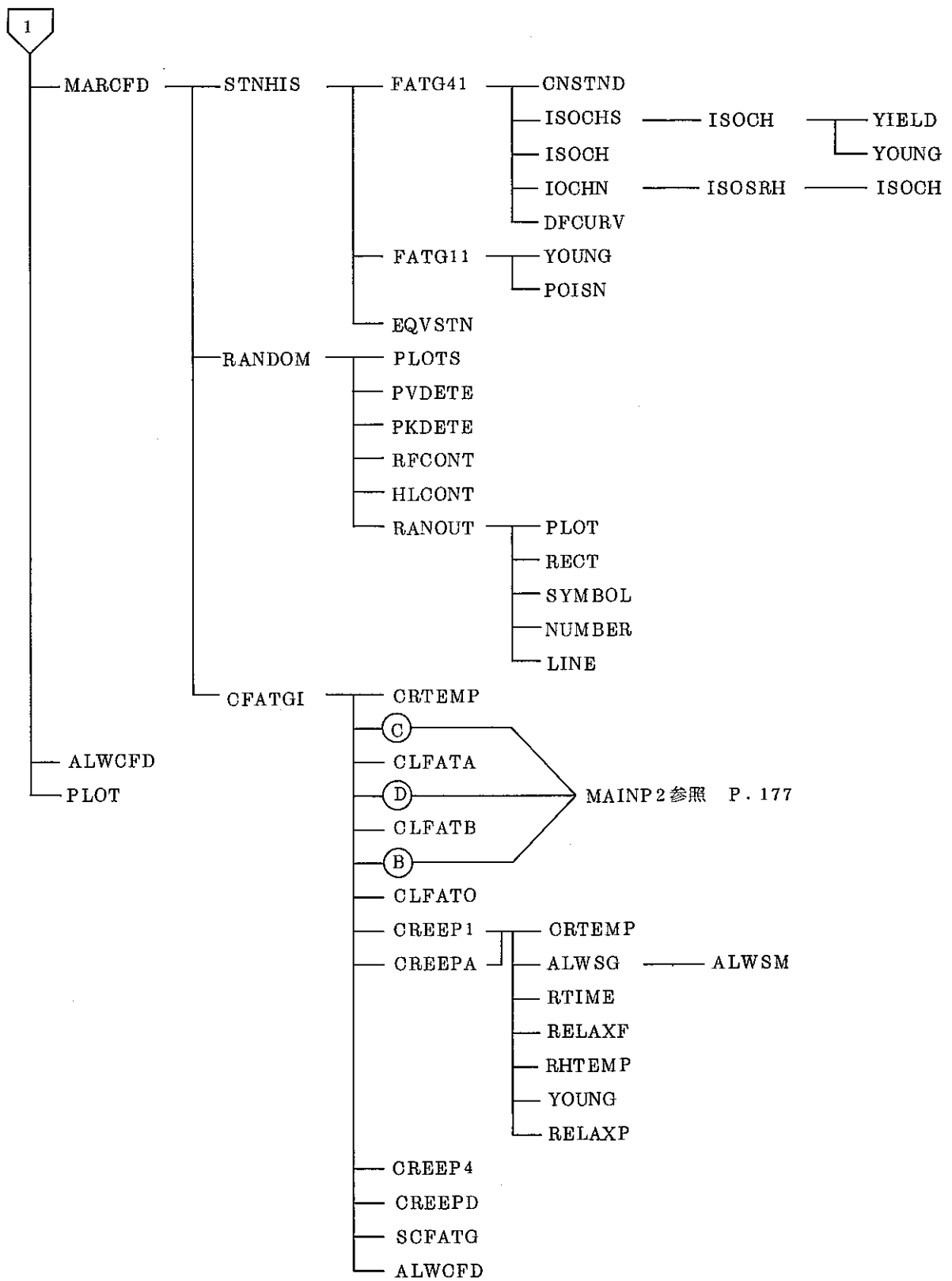




1







L  
 MAINP2の( )に変えて、後は同じ  
 P 177



### 3.2 サブルーチン対応表

自動強度評価システムで用いてくるサブルーチンの一覧を次頁以降に示す。本節では、サブルーチンの概要説明と 8 個のサブプログラム群で使われている状況と各コード番号<sup>注</sup>を示し今後のプログラム管理に役立たせる。

注) コード番号は開発担当会社の‘PANVALET’システムでの番号である。

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (1)  
56年度開発プログラム

サブルーチン名	パンバレー名	機 能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
MAIN	DQHM5614	POST-DS(MAIN プログラム)	○	○	○	○	○	○	○	○
LSUB	"	VDS(RING-ELBOW), INEL, PDS, HEATのふり分け。	○	○	○	○	○	○	○	○
INPUT1	DQHM5603	VDS(RING-ELBOW)全体の処理コントロール。	○	○	○	○	○			
ADDRE	"	アドレスの決定。	○	○	○	○	○			
INPUT2	DQHM5613	VDS(INELASTIC)の処理コントロール。						○		
INPUT3	" PM04	POST-PDSの処理コントロール。							○	
INPUT4	" 40722	POST-HEATの処理コントロール。								○
AINDEX	" A5601	目次作成。	○	○	○	○	○			
HEADER	" A5602	表紙作成。	○	○	○	○	○	○	○	○
LTINPUT	" M5602	インプットデータカードのAタイプの読み込み, 及びその内容をAタイプでリストアウト。	○	○	○	○	○	○	○	○
PAGE	DQHM5601	改ページ及びページ数のプリント。	○	○	○	○	○	○	○	○
SETPAG	" M5620	AINDEXルーチン(目次作成)のためのページ設定。	○	○	○	○	○			
DCPARM	" M5607	パラメータ決定。	○	○	○	○	○			
ERMAIN	DQHM5611	エラー判定のコントロール。	○	○	○	○	○	○		
NCCHK	"	必須データが有るか無いかの判定。	○	○	○	○	○	○		
ERCHK	"	データのフォーマットチェックコントロール(ICCHKルーチンを呼んでる。)	○	○	○	○	○	○		
ERSUBI	"	データカードの枚数のカウント。	○	○	○	○	○	○		
EWRITE	"	データカード枚数のエラーチェック及びエラーメッセージ。	○	○	○	○	○	○		
SIZING	"	サイズとオプションの表示。	○	○	○	○	○			
JDHEAD	DQHM5605	ヘッダー判定。	○	○	○	○	○	○		
CARDST	"	変数KIND(ヘッダ種別番号)の設定。	○	○	○	○	○	○		

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (2)

サブルーチン名	パンバレー名	機 能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
JDDATA	DQHS5602	各インプットデータカードの入力ルーチンのコントロール。	○	○	○	○	○			
ICCHK1	" M5616	インプットデータのフォーマットの判定。	○	○	○	○	○	○	○	○
CHAR4	" M5604	ヘッダー判定のために、ヘッダーを4文字に区切る。	○	○	○	○	○	○	○	○
ICCHK	" M5612	ICCHK1 ルーチンにエラーメッセージの機能を加えたもの。	○	○	○	○	○	○	○	○
PAGE1	" S5607	リスト出力のラインカウント, 及びPAGEルーチンの呼び出し。	○	○	○	○	○	○	○	○
CONT	" S5601	「CONTROL CARD」の入力, 文章説明, 及びエラーデータのチェックとメッセージ。	○	○	○	○	○			
TITLE	" S5603	「TITLE CARD」の入力。	○	○	○	○	○			
PROB	" S5604	「PROBLEM CARD」の入力。	○	○	○	○	○			
TEMPTI	" S5605	「TEMPERATURE-TIME BLOCK CARD」の入力, 文章説明, 及びエラーデータのチェックとメッセージ。	○	○	○	○	○			
SCDEF	" S5606	「SCL DEFINITION CARD」の	○	○	○	○	○			
ELBOLS	" S5608	「ELBOW LOAD SET」の					○			
ELPROP	" S5609	「ELBOW PROPERTY」の					○			
MODATA	" S5610	「MOMENT DATA」の					○			
ELBOSC	" S5611	「ELBOW SCL DEFINITION」の					○			
PRINT	" S5612	「PRINT OUT」の	○	○	○	○	○			
PROTDR	" S5613	「PLOT」の	○	○		○				
TEMPDA	" M5609	「TEMPERATURE DATA」の	○	○	○	○	○			
LOCASE	" K5601	「LOAD CASE DEFINITION CARD」の	○	○	○	○	○			
LODSET	" K5602	「LOAD SET CARD」の	○	○	○	○				
SCPROP	" K5603	「SCL PROPERTY」の	○	○	○	○				

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (3)

サブルーチン名	パンバレー名	機 能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
ELAST	DQHK5604	「ELASTIC FOLLOW UP」の入力, 文章説明, 及びエラーデータのチェックとメッセージ。	○	○		○				
STCON	" K5605	「STRESS CONCENTRATION CARD」の "	○	○	○	○	○			
LOCYC	" K5606	「LOADING CYCLE CARD」の "	○	○	○	○	○			
STRSDA	" K5607	「STRESS DATA」の "	○	○	○	○				
ECREEP	" K5608	「ENHANCED CREEP」の "	○	○	○	○	○			
COLOAD	" K5609	「COMPLEX LOADING HISTORY」の "		○						
ELELAS	"	「ELBOW ELASTIC FOLLOW UP」の "					○			
SZING1	DQHM5615	サイズとオプションの表示。						○		
TITLE1	" S5614	「TITLE CARD」の入力。						○		
CONT1	" S5616	「CONTROL CARD」の入力, 文章説明, 及びエラーデータのチェックとメッセージ。						○		
CYDEF	" S5617	「CYCLE DEFINITION」の "						○		
TEMPD1	" S5618	「TEMPERATURE DATA」の "						○		
SCPRO1	" S5620	「SCL PROPERTY」の "						○		
TEMTI1	" S5621	「TEMPERATURE-TIME BLOCK」の "						○		
SCDEF1	" S5622	「SCL DEFINITION」の "						○		
PRINT1	" S5623	「PRINT OUT」の "						○		
PLOT1	" S5624	「PLOT」の "						○		
ELDATA	" S5626	各インプットデータカードの読込みルーチンのコントロール。						○		
EPMAIN	DQHPM01	データのフォーマットエラー以外のエラー判定, 及びパラメータ決定のコントロール。							○	
PDPARM	"	パラメーター決定。							○	
NCCHK1	"	必須データが有るか無いかの判定。							○	

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (4)

サブルーチン名	パンバレー名	機 能	○印：使用する								
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT	
ERSUB2	DQHPM01	データカードの枚数のカウント。								○	
EPWRIT	"	データカード枚数のエラーチェック, 及びエラーメッセージ。								○	
RDFINS	DQHPM02	FINASによるPOSTFILEの読込み。								○	
PDHEAD	" S5625	ヘッダー判定。								○	
OPCHK	" PS01	データーのオプションチェック。								○	
RTITLE	" PS02	「TITLE」の入力。								○	
RJOBNO	" PS03	「PROBLEM」の入力。								○	
RCONTR	" PS04	「CONTROL」の入力, 文章説明, 及びエラーデータのチェックとメッセージ。								○	
ROPERA	" PS05	「OPERATION」の "								○	
RDESIG	" PS06	「DESIGN LOAD」の "								○	
RPRIMA	DQHPS07	「PRIMARY LOAD」の "								○	
DACHK	"	「PRIMARY LOAD」のデータチェック。								○	
RCOMBI	DQHPS08	「LOAD COMBINATION」の "								○	
RNEWCA	" PS09	「LOAD CASE DEFINITION」の "								○	
RMOMD	" PS10	「MOMENT DATA」の入力, 文章説明, 及びエラーデータのチェックとメッセージ。								○	
RFCYCL	" PI01	「LOADING CYCLE」の "								○	
RSAVE	" PI02	「LOAD CASE SAVE」の "								○	
RXBLOC	" PI03	「TEMP-TIME XBLOCK」の "								○	
RABLOC	" PI04	「TEMP-TIME ABLOCK」の "								○	
RLOADS	" PI05	「LOAD SET」の "								○	
RCOMPO	" PK01	「PIPING COMPONENT」の "								○	

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (5)

サブルーチン名	パンバレー名	機能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
RSECTI	DQHPK02	「PIPE PROPERTY」の入力, 文章説明, 及びエラーデータのチェックとメッセージ。							○	
RHANDI	" PK03	「STRESS CONCENTION FACTOR」の "							○	
RDCOSI	" PK04	「DIRECTION COSINE」の "							○	
RGROSS	" PK05	「GROSS DISCONTINUITY」の "							○	
HTPARM	DQHM5621	パラメータ決定。								○
ERSUB3	"	データカードの枚数のカウント								○
HTMSG1	"	データカードの枚数のエラーチェック, 及びエラーメッセージ。								○
NCCHK3	"	必須データ有, 無の判定。								○
SIENG3	DQHM5622	サイズとオプションの表示。								○
HTHEAD	" S5638	ヘッダー判定。								○
HTDATA	" S5639	各インプットデータカードの読み込みルーチンのコントロール。								○
HTPROB	" S5628	「PROBLEM」の入力。								○
HTTITL	" S5629	「TITLE」の入力。								○
HTSDEF	" S5630	「SCL DEFINITION」の入力, 文章説明, 及びエラーデータのチェックとメッセー								○
		ジ。								
HTPLOS	" S5631	「PLOT SCL」の "								○
HTNDEF	" S5632	「NODE DEFITION」の "								○
HTPLON	" S5633	「PLOT NODE」の "								○
HTPLOD	" S5634	「PLOT DISTRIBUTION」の "								○
HTPUNO	" S5635	「PUNCH OUT」の "								○
HTCARI	" S5636	「CARD INPUT」の "								○

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (6)

サブルーチン名	パンバレー名	機 能	○印：使用する								
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT	
HTCONT	DQHS5637	「CONTROL」の入力, 文章説明, 及びエラーデータのチェックとメッセージ。									○
PHASE1	" PM03	各インプットデータカードの読み込みルーチンのコントロール。	○								
OSEPM	DQHS5619	評価の結論をプリントアウトする。	○	○	○	○	○				
OSEPM2	"	"	○	○	○	○	○				
FORM	"	"	○	○	○	○	○				
PROB1	DQHS5615	「PROBLEM CARD」の入力。							○		
CRDSTU	" S5625	CARDSTと同じ機能								○	
HCRDST	" S5638	"									○
VDSO1	" MM01	評価処理前半のコントロール。	○	○	○	○	○				
VDSO2	" MM02	" 後半 "	○	○	○	○	○				
MAINP1	DQHM5610	実質的なメインプログラム (評価部前半)	○								
MAINQ1	T6700446	" ( " )		○							
MAINR1	T67004B9	" ( " )				○					
MAINS1	T67004A7	" ( " )			○						
MAINT1	R2TDNA02	" ( " )						○			
MAINP	T6700461	実質的なメインプログラム							○		
MAINP2	DQHVDSAB	実質的なメインプログラム (評価部後半)	○		○	○			○		
CLMNP2	T6700447	" ( " )		○							
ELMNP2	R2TDNA28	" ( " )						○			
ALWSA	T5413702	制限値 Sa の算定。	○	○	○	○	○				
ALWSRH	" 06	" SrH "	○	○	○	○	○				

POST-DS (サブルーチン名, パンパレー名対応表) (7)

サブルーチン名	パンパレー名	機能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
ARCL1	T541309	二次元の曲線の長さを算定する。	○	○	○	○	○			
CATEGO	DQHVDS10	応力分数を行ないCSTRSテーブルを作成する。	○	○						
SOCTGO	T67004B3	"				○				
PLCTGO	" 4A5	"			○					
ELCATG	DQHM5632	"					○			
INCTGO	T6700466	"						○		
CFATIG	T5413711	クリープ疲労損傷評価を行う。	○		○	○	○			
CFATG1	T6700434	"		○						
CHKBND	T5413712	SCLと辺I-Jの交点がI-J内にあるかどうかの判定。	○	○	○	○	○			
CNSTN	" 13	公称ひずみ $\epsilon_n$ の算定。	○	○	○	○	○			
COMBN	" 14	ロードケースを重ね合わせて応力テーブル(STS)を作成する。	○	○		○	○			
PLCOMB	T67004A3	"			○					
COORD	T5413715	SCL上の節点座標値と, 要素図心位置の座標値を計算	○	○	○		○			
SOCORD	T67004B1	"				○				
INCORD	" 969	"						○		
CORLIN	T5413716	辺I-Jが直線かどうかの判定を行う。	○	○	○	○	○			
ICOLN	T6700473	"						○		
CREEPA	T5413717	CREEP1と同じ, ただしプリントアウトなし。	○	○	○	○	○			
CREEPB	" 18	CREEP2	○		○	○	○			
CREEP1	" 19	長期1次応力が低い場合のクリープ損傷評価を行う。	○	○	○	○	○			
CREEP2	" 20	" 高い	○		○	○	○			



POST-DS (サブルーチン名, パンパレー名対応表) (8)

サブルーチン名	パンパレー名	機 能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
CWRITE	T5413721	データテーブルのチェックライトを行う。	○	○		○	○			
PLWRIT	T67004A9	"			○					
INWRIT	" 465	"						○		
DEDITI	T5413722	応力分類テーブル (CSTRS) の作成 (I)	○	○	○	○	○			
DEDIT2	" 23	" (II)	○	○		○	○			
DEDIT3	T67004A4	" (III)			○					
DPLOT	T5413725	X-Yプロッターにより, 評価点の応力分布図を出力する。	○	○	○		○			
SOPLOT	T67004BB	"				○				
INPLOT	" 494	"						○		
DSORT	DQHVDS27	応力ファイルを読み込み応力テーブル (STRS) を作成する。	○	○		○	○			
SLSORT	T67004A2	"			○					
INSERT	" 482	"						○		
EVALUA	T5413728	方針に従って強度評価を行う。	○		○	○				
CLVALA	T6700448	"		○						
ELVALA	R2TDNA29	"					○			
INVALA	T6700416	"						○		
EVLOAD	T5413729	一次応力の評価を行う。	○	○	○	○				
ELVLOA	R2TDNA26	"					○			
EVLODS	T5413730	EVLOADと同じ, ただしプリントアウトしない。	○	○	○	○				
ELVL0D	R2TDNA27	"					○			
EXTPO	T5413731	SCLの内外表面の応力値を外挿して求める。	○	○	○		○			

POST-DS (サブルーチン名, パンパレー名対応表) (9)

サブルーチン名	パンパレー名	機能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
SOEXTP	T67004B0	SCLの内外表面の応力値を外挿して求める。				○				
INEXTP	T6700470	"						○		
FATIG1	T5413732	告示の評価手順に従ってひずみ範囲 $\epsilon_t$ を算定する。	○		○	○	○			
CLFAT1	T6700435	"		○						
FAFIGIO	T5413733	FATIG1 の評価結果の詳細リストを出力する。	○		○	○	○			
CLFATO	T6700436	"		○						
FATIG2	T5413734	疲労損傷評価 (Method 2)	○		○	○	○			
CLFAT2	T6700437	"		○						
FATIG2O	T5413735	FATIG2 の評価結果の詳細リストを出力する。	○		○	○	○			
CLFATA	T6700438	"		○						
FATIG3	T5413736	疲労損傷評価 (Method 3)	○		○	○	○			
CLFAT3	T6700439	"		○						
FAIIG3O	T5413737	FATIG3 の評価結果の詳細リストを出力する。	○		○	○	○			
CLFATB	T6700440	"		○						
FATG41	T6700441	疲労損傷評価 (Method 4)		○						
GAUSS	T5413741	ガウス積分点での応力値から節点での値を外挿して求める。	○	○	○	○	○			
INGAUS	T6700472	"						○		
INTEP	T5413743	SCLとI-Jの交点の $\xi, \eta$ 座標値を求める。	○	○	○	○	○			
INITEP	T6700478	"						○		
INTERP	T5413744	SCLと辺I-Jの交点の座標値を求める。	○	○	○	○	○			
INITER	T6700476	"						○		

POST-DS (サブルーチン名, パンパレー名対応表) (10)

サブルーチン名	パンパレー名	機能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
ISOCHN	T5413746	等時応力-ひずみ曲線 ( $S_{rH}$ 含む) で応力値を求める。	○	○	○	○	○			
ISOCHS	" 47	等時応力-ひずみ曲線で応力値を求める。	○	○	○	○	○			
ISOSRH	" 48	等時応力-ひずみ曲線 ( $S_{rH}$ 含む) でひずみを求める。	○	○	○	○	○			
LINEAR	" 49	評価点の応力分布の線形化を行う。	○	○	○		○			
SOLINA	T67004B6	"				○				
INLINA	" 481	"						○		
LINEL	T5413750	SCLを構成する要素の図心位置の応力値を求める。	○	○	○					
LLSPR	T5413751	ひずみの制限の評価用のロードセッドペアテーブルをプリントアウトする。	○	○	○	○	○			
LOCAL	" 52	応力成分を全体系から SCL系へ変換する。	○	○	○		○			
SOLOCA	T67004B2	"				○				
SOLINL	" 4B7	SCLを構成する要素の図心位置の応力値を求める。				○				
INLINL	" 468	"						○		
INLOCA	T6700467	応力成分を全体系から SCL系へ変換する。						○		
LORCEQ	T5413753	辺 I-J を 1 次式又は 2 次式で表わす。	○	○	○	○	○			
INLORC	T6700474	"						○		
LPAIR	T5413754	荷重セットペアを定義する。	○	○	○	○	○			
LSPFD	" 55	疲労損傷用 荷重セットペアテーブルをプリントアウトする。	○	○	○	○	○			
MAPPF	" 58	8 節点での応力値から任意の交点 P の応力値を内挿する。	○	○	○	○	○			
INMAPF	T6700480	"						○		
MAX	T5413759	配列(A)の最大値とその引数を求める。	○	○	○	○	○	○		
PRSTR	" 62	6 個の応力成分から 3 個の主応力分を求める。	○	○	○	○	○	○		

POST-DS (サブルーチン名, パンパレー名対応表) (1)

サブルーチン名	パンパレー名	機能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
QMAX	T5413763	配列(A)の最大レンジを求める。	○	○	○	○	○			
QUADEL	DQHVDS67	SCLと辺との交点での応力値を求める。	○	○	○	○	○			
INQUDL	T6700471	"						○		
RAKCH	T5413765	E, S, P, R領域の判定。	○	○	○	○	○			
RELAXF	T6700410	累積クリープ損傷 $D_{c2}$ の算定における $D^*$ を決定する。	○	○	○	○	○		○	
RELAXS	T5413767	設計緩和強さ $S_r$ を算定する。	○	○	○	○	○		○	
RHTIME	" 68	別表 1.7 ( $S_r$ ) に温度と応力を適用して時間を求める。	○	○	○	○	○		○	
RTIME	" 69	別表 1.5 ( $S_R$ ) に応力を適用して時間を求める。	○	○	○	○	○	○	○	
SCFATG	" 70	クリープ疲労損傷評価結果の要約をプリントアウトする。	○	○	○	○	○			
SCLEQ	" 71	評価点の SCL を 1 次式で表わす。	○	○	○	○	○			
INSCLE	T6700475	"						○		
SCREP1	T5413772	クリープ損傷評価結果の要約をプリントアウトする。(低い場合)	○	○	○	○	○			
SCREP2	" 73	" (高い場合)	○	○	○	○	○			
SEQNS	" 74	ひずみ範囲の大きい順に荷重セットペアを並べ換える。	○	○	○	○	○			
SERLSP	" 75	各負荷サイクル内でひずみ範囲が最大になる荷重セットペアを求める。	○	○	○	○	○			
SFATIG	" 76	疲労損傷評価結果の要約をテーブル形式で出力する。	○		○	○	○			
CLSFTG	T6700456	"		○						
SFILE	DQHVDS77	ポストテープの読み込み。	○	○			○			
SOSFIL	T67004BA	"				○				
PLSFIL	" 4AA	"			○					
SSLMT1	T5413779	ひずみの制限 1 の評価結果の要約をテーブル形式で出力する。	○	○	○	○	○			

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (12)

サブルーチン名	パンバレー名	機能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
SSLMT2	T5413780	ひずみの制限2の評価結果の要約をテーブル形式で出力する。	○	○	○	○	○			
SSLMT3	" 81	ひずみの制限3の "	○	○	○	○	○			
SSLMT4	" 82	ひずみの制限4の "	○	○	○	○	○			
SSTEMP	" 83	Snを定める2つの応力状態のうち、いずれか定常状態の金属温度との差が大きい方の	○	○	○	○	○			
	84	金属温度を求める。								
SSTNEF	" 84	弾性追従ひずみ $\epsilon_{EF}$ を算定する。	○	○	○	○	○			
SOSORT	DQHM5630	応力ファイルを読み込み、応力テーブル(STRS)を作成する。				○				
ELLINL	" 33	SCLを構成する要素の図心位置の応力値を求める。					○			
STDATA	DQHVDS85	MARCの構造データファイルを読み込む。	○	○	○		○			
SOSTDT	T67004BC	"				○				
INSTDT	" 464	"						○		
STIME	T5413786	別表1.3( $S_t$ )に応力を適用して時間を求める。	○	○	○	○	○		○	
STNEF	" 87	SSTNEFと同じ。ただし詳細リストを出力しない。	○	○	○	○	○			
STMLMT	" 88	ひずみの制限に対する評価を行う。	○	○	○	○	○			
STNLTA	" 89	STNLTAと同じ。ただし詳細リストを出力しない。	○	○	○	○	○			
STNLTB	" 90	STNLTBと同じ。	○	○	○	○	○			
STNLTC	" 91	STNLTCと同じ。	○	○	○	○	○			
STNLTD	" 92	STNLTDと同じ。	○	○	○	○	○			
STNLTS	" 93	STNLMTと同じ。	○	○	○	○	○			
STNLTA	" 94	$S_n$ , $S_n$ , $S_n'$ , $S_n''$ の制限。	○	○	○	○	○			
STNLTB	" 95	告示によるラチェットの評価。	○	○	○	○	○			

POST-DS (サブルーチン名, パンパレー名対応表) (13)

サブルーチン名	パンパレー名	機 能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
STNLT3	T5413796	$\langle P_L + P_L + (P_b + P_b^*) / K_t \rangle_{\max} + \langle Q + Q^* \rangle_R$ の制限	○	○	○	○	○			
STNLT4	" 97	$\epsilon_{EC}, \epsilon_{EC} + \epsilon_{EF} (Q_{EF})$ の制限。	○	○	○	○	○			
SUMARY	" 98	評価結果の要約をテーブル形式で出力する。	○		○	○	○			
CLSMRY	T6700455	"		○						
ALWSG	" 420	応力水準 $S_g$ を求める。	○	○	○	○	○			
STNLTE	" 422	STNLT5 と同じ, ただし詳細リストを出力しない。	○	○	○	○	○			
STNLT5	" 423	運転状態IVに対するひずみの制限の評価を行う。	○	○	○	○	○			
INSTMT	" 412	ひずみの制限に対する評価を行う。						○		
RELXP	" 425	累積クリープ損傷 $D_{cp}$ の算定における $D^{**}$ を決定する。	○	○	○	○	○		○	
SSLMT5	" 426	ひずみの制限5の評価結果の要約をテーブル形式で出力する。	○	○	○	○	○			
RHTEMP	" 427	別表1.7 ( $S_r$ ) に時間と応力を適用して温度を求める。	○	○	○	○	○			
ALWT0	T82517A1	制限温度 $T_0$ を求める。	○	○	○	○	○			
CREEPD	T6700452	CREEPB と同じ。		○						
CREEP4	" 451	CREEP2 "		○						
MARCFD	" 430	複雑な荷重履歴をうける場合のクリープ疲労評価を行う。		○						
INDRCL	" 479	二次元の曲線の長さを算定する。						○		
INCHKB	" 477	SCL と辺 1-J の交点があるかどうかの判定。						○		
STNHIS	" 431	ひずみ履歴を求める。		○						
RANDOM	" 433	ランダム波形の計数を行う。		○						
PVDETE	" 404	ひずみ履歴の $P/V$ 値を検出し, $P/V$ 値でないものは除外する。		○						
RFCONT	" 402	レインフロー法によるひずみ履歴の計数。		○						

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (14)

サブルーチン名	パンバレー名	機 能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
HLCONT	T6700403	ヒステリシスループ法によるひずみ範囲の計数。		○						
PKDETE	" 405	その点以降のひずみ履歴で最大値または最小値かどうかの判定。		○						
EQVSTN	" 432	相当ひずみの計算。		○						
CNSTND	" 442	CNSTNと同じ。		○						
RANOUT	" 443	ひずみ履歴をX-Yプロッターにより出力する。		○						
FATG11	" 444	応力成分から弾性ひずみ成分を求める。		○						
STIDXP	R2TDNA04	ASME Sec. III Table NB-3685. 1-1に基づき評価点の応力係数を計算する。					○			
PLWSRH	PDS00050	制限値 $S_{RH}$ の算定。							○	
ALWS0	T5413701	最大許容応力強さ $S_0$ (別表1.1)を求める。	○	○	○	○	○		○	
ALWSAS	" 03	ALWSAと同じ。ただし詳細リストを出力しない。	○	○	○	○	○			
ALWSM	" 04	設計応力強さ $S_m$ (別表1.2)を求める。	○	○	○	○	○		○	
ALWSR	" 05	設計クリーブ破断応力強さ $S_R$ (別表1.5)を求める。	○	○	○	○	○		○	
ALWST	" 07	設計応力強さ $S_t$ (別表1.3)を求める。	○	○	○	○	○		○	
ALWSU	" 08	" $S_u$ (別表1.6)を求める。	○	○	○	○	○		○	
CRTEMP	T82517B1	各材料へのクリーブ温度を求める。	○	○	○	○	○	○		
ALWCFD	T6700411	クリーブ疲労損傷の制限値Dを求める。	○	○	○	○	○			
CHECKT	PDS00053	各材料のクリーブ温度を求める。		○					○	
PRISTN	T6700450	6個のひずみ成分から3個の主ひずみを求める。		○					○	
DFCURV	T5413724	設計疲労曲線にひずみ範囲を適用して許容繰返し回数 $N_d$ を求める。	○	○	○	○	○	○	○	
FCURVS	" 40	設計疲労曲線に繰返し回数を適用して、ひずみ範囲 $\epsilon_f$ を求める。	○	○	○	○	○		○	
ISOCH	" 45	等時応力-ひずみ曲線に温度、時間、応力を適用してひずみを求める。	○	○	○	○	○	○	○	

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (15)

サブルーチン名	パンバレー名	機 能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
POISN	T5413761	ポアソン比 $\nu$ を算定する。	○	○	○	○	○		○	
TEXPAN	" 99	熱膨張係数 $\alpha$ を算定する。	○	○	○	○	○		○	
YIELD	" C0	降伏強さ $S_y$ を算定する。	○	○	○	○	○	○	○	
YOUNG	" C1	ヤング率 $E$ を算定する。	○	○	○	○	○	○	○	
CALIDX	R2TDNA21	曲げ荷重に対するエルボの応力係数分布を計算するためのデータを読み込む。					○			
INDEX	" 22	エルボ要素の形状パラメータ等を計算する。					○			
SINDA	" 23	ASME Sec. III Table NB-3685. 1-2に基づき応力係数分布を計算して出力する。					○			
SINDD	" 24	Dodge & Moore の理論解により応力係数分布を計算して出力する。					○			
SIMQ	" 19	連立一次方程式を解く。					○			
RDMOMF	" 18	力, 及びモーメントファイルを読み込み評価に必要な節点の部材力を決定する。					○			
ELBOW	" 06	エルボ評価点の応力係数を計算するためのメインプログラム。					○			
STIDX1	" 05	ASME Sec III Table NB-3685. 1-2に基づき評価点の応力係数を計算する。					○			
STIDX2	" 17	Dodge & Moore の理論解により評価点の応力係数を計算する。					○			
ELSTS1	" 11	応力分類テーブル (CSTRS) の作成(I)					○			
ELSTS2	" 12	" " (III)					○			
SALSTS	" 10	エルボの断面係数, 応力係数及びモーメント値から応力を計算する。					○			
CALMAX	" 25	$M_i^*$ , $F_x^*$ の各成分の符号組合せを種々変化させ最大応力強さを計算する。					○			
ALWCDF	T6700411	累積クリープ疲労損傷係数の制限値 $D$ の算定。						○		
LDS	" 414	LDS法により, クリープ疲労損傷の制限に対する評価を行う。						○		
CFCURV	" 417	ひずみ範囲-寿命関供式にひずみ範囲を適用して, 寿命を求める。						○		
SRP1	" 418	SRP(I)法により, クリープ疲労損傷の制限に対する評価を行う。						○		



POST-DS (サブルーチン名, パンパレー名対応表) (16)

サブルーチン名	パンパレー名	機 能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
SRP2	T6700419	SRP(Ⅲ)法により, クリープ疲労損傷の制限に対する評価を行う。						○		
STNEQ	" 483	相当ひずみ範囲を算定する。						○		
STNEQ1	" 484	相当ひずみを算定する。						○		
SSLMT	" 486	ひずみの制限の評価結果の要約をテーブル形式で出力する。						○		
SLDSF	" 487	LDS法による疲労損傷の制限の評価結果の要約をテーブル形式で出力する。						○		
SLDC	" 488	LDS法によるクリープ損傷の制限の評価結果の要約をテーブル形式で出力する。						○		
SLDS	" 489	LDS法によるクリープ疲労損傷の制限の評価結果の要約をテーブル形式で出力する。						○		
SSRP1	" 490	SRP(I)法によるクリープ疲労損傷の制限の評価結果の要約をテーブル形式で出力する。						○		
SSRP2	" 491	SRP(Ⅲ)法による "						○		
INDEXI	" 492	評価結果の索引を出力する。						○		
ANACON	" 493	解析条件を出力する。						○		
DPLOT	" 494	X-Yプロッターにより評価点のひずみ分布図を出力する。						○		
HTLINR	T8240704	温度分類に必要な線形化作業を行う。								○
CONTEN	PDS00028	索引を出力する。							○	
OUTPT1	" 24	荷重セットのサマリーを出力する。							○	
OUTPT2	" 25	荷重ケースのサマリーを出力する。							○	
OUTPT3	" 26	設計条件及び一次荷重データのサマリーを出力する。							○	
OUTPT5	" 27	温度一時間ブロックデータを出力する。							○	
PHASE2	" 29	コンポーネントの特性データを計算する。							○	
ELEMNT	" 30	データセット (IFIL3) の評価要素データの位置を調べる。							○	
GEOIND	" 31	コンポーネント形状パラメータを計算し, 応力係数等を決定する。							○	

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (17)

サブルーチン名	パンバレー名	機 能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
INFOM2	PDS00033	コンポーネントに関するサマーを出力する。							○	
SRSIDX	" 32	応力係数を計算する。							○	
PHASE3	" 34	評価要素に対し, 各荷重ケースの軸力とモーメントを決定する。							○	
PHASE4	" 35	1次応力の制限を評価するメインプログラム。							○	
PRIME	" 36	1次応力の制限の評価を行う。							○	
SUMPH4	" 44	1次応力の制限のサマリーを出力し, また評価結果をデータセット (IAIL4) に書き込む。							○	
EDESIN	PDS00040	設計条件に関する制限を評価する。							○	
WRTEMO	" 43	1次応力負荷状態のモーメントを出力する。							○	
LCDMOM	" 39	モーメント $M_i + M_i^*$ を計算する。							○	
USEFR1	" 38	$(P_s)_i$ に対する使用分数を計算し総和する。							○	
USEFR2	" 37	$\{(P_L + P_b)/K_t\}_j$ に対する使用分数を計算し総和する。							○	
DESMOM	" 41	設計条件の荷重ケース番号とモーメントを求める。							○	
PHASE5	" 45	ひずみの制限を評価するメインプログラム。							○	
SHDOWN	" 46	$S_n^* \leq 3 S_{mH}$ および $S_n \leq 3 \bar{S}_m$ または $S_n \leq 2.5 (3 \bar{S}_m)$ , $S'_n \leq 3 \bar{S}_m$ かつ $S_e \leq 3 \bar{S}_m$ の制限を評価する。							○	
TEST1	PDS00060	$(X)_{Max} + Y \leq S_a$ の制限を評価する。							○	
TEST3	" 58	$\epsilon_{EC} \leq \epsilon_{LM}$ , $\epsilon_{EF} + \epsilon_{EF} \leq \epsilon_{LM}$ の制限を評価する。							○	
TEST4	" 59	点 $(X_p, Y_p)$ の領域を評価する。							○	
SUMPH5	" 65	ひずみの制限のサマリーを出力し, また評価結果をデータセット (IFIL4) に書き込む。							○	
BIGORD	" 51	値を大きい順に並び換える。							○	

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (8)

サブルーチン名	パンバレー名	機 能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
TEMPT0	PDS00057	温度 $T_0$ を求める。							○	
CRPSTS	" 62	相当クリープ応力を計算する。							○	
CALX2	" 63	指針案の ( 3, 4, 5 ) 式, $X_2$ の分子の計算及びその最大値を求める。							○	
REGM	" 89	領域識別番号 IP を領域名に置き換える。							○	
REGIME	" 64	( $X_1$ , Y ) または ( $X_1 + X_2$ , Y ) の領域を決定する。							○	
WRTEFA	" 86	1 次応力負荷状態の軸力を出力する。							○	
M12N12	" 87	表 D. 1 の係数 $m_1$ , $n_1$ , $m_2$ , $n_2$ を定める。							○	
TEST5	" 88	運転状態 IV に関する制限を評価する。							○	
PHASE6	" 69	クリープ疲労損傷の制限に関するメインプログラム							○	
NSTRNR	" 70	公称ひずみ $\epsilon_n$ 及びひずみ集中係数 $K_c$ を計算する。							○	
FDAMG1	" 71	疲労損傷係数を算定する。							○	
CDAMAG	" 77	クリープ損傷係数を算定する。							○	
SUMPH6	" 81	クリープ疲労損傷の制限に対する評価の要約を出力する。							○	
CALSN	" 72	応力強さ $S_n$ , $S_n^*$ と MITI CODE 用ピーク応力強さを計算する。							○	
CONCEN	" 80	ひずみ集中係数 $K_c$ を計算する。							○	
FWRIT1	" 78	見出しの E. 1 GENERAL を出力する。							○	
ODERCH	" 73	全ひずみレンジをその大きさの順に並べかえ, 対応テーブル IORD を作成する。							○	
FDMIT1	" 74	告示の適用温度範囲内の応力サイクルの疲労損傷係数を計算する。							○	
FDMIT2	" 76	負荷順序が定義された場合の累積疲労損傷係数を計算する。							○	
MATPAR	" 75	MITI 告示 47 条の簡便弾塑性解析を適用するときの材料定数 $m$ , $n$ , $A_0$ を定める。							○	
ISOSTS	" 79	等時応力-ひずみ曲線に対し温度とひずみ値を適用して応力値を定める。							○	

POST-DS (サブルーチン名, パンバレー名対応表) (19)

サブルーチン名	パンバレー名	機能	○印：使用する								
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT	
PHASE7	PDS00082	結論を出力するメインプログラム。								○	
PNSUM1	" 83	結論の前半を出力する。								○	
PNSUM2	" 84	結論の後半で, 評価結果を出力する。								○	
PNWRIT	" 85	評価結果を出力する。								○	
EQMOME	" 68	評価要素の地震荷重に対応するモーメント ( $M_i + M_i^*$ , $M_i^{**} + M_i^{**}$ ) を算定する。								○	
LSET	" 54	圧力, 温度または不連続応力のレンジを求める。								○	
LONST1	" 49	長期1次応力状態の判定を行う。								○	
LTMOME	" 66	評価要素の各ロードセットに対するモーメントを定める。								○	
MLSET	" 55	モーメントのレンジを計算する。								○	
MLSET1	" 56	熱膨張によるモーメントを含むモーメントレンジを計算する。								○	
MOMENT	" 52	合モーメントを求める。								○	
PAIR	" 61	荷重セットペアを定義する。								○	
PAGEW	DQHPEGEW	目次のページをセットする。								○	
SM3BAR	PDS00047	制限値 $3\bar{S}_m$ と $S_{mH}$ を求める。								○	
SUBCRP	" 48	クリープ効果が顕著かどうかの判定を行う。								○	
COVER	" 02	プログラム名を出力する。								○	
TEEMOM	" 42	TEE管の主管モーメントを計算する。								○	
EDIT	T8240723	POST TAPEの読み込みを行い, 温度分類, 図形出力等の編集を行う。									○
FPOST	" 15	FINASのPOST TAPEの読み込みを行い, 温度分類の編集等を行う。									○
FELJTF	" 12	FINASのPOST TAPEに書かれた要素, 節点データを読み込み, SCL座標(内面を基準とする)を計算する。									○

POST-DS (サブルーチン名, パンパレー名対応表) (20)

サブルーチン名	パンパレー名	機 能	○印：使用する							
			RING	CLH	PLATE	SOLID	ELBOW	INEL	PDS	HEAT
NTEMPT	T8240714	節点温度データを編集し, 温度分類, 図形出力等のデータを作成する。								○
TCATEG	" 20	SCL上の温度分布より $T_{avg}$ , $\Delta T_1$ , $\Delta T_2$ 等の温度分類を行う。								○
DUMYD1	" 13	不必要な節点温度データ, 節点温度増分データ, 節点変位データ, 節点変位増分データ, 節点反力データの空読みを行う。								○
DUMYE1	T8240711	不必要な要素応力, ひずみデータ, 要素応力, ひずみ増分データの空読みを行う。								○
DUMYH1	" 10	不必要な熱フロー, 熱流束データ, 熱フロー, 熱流束増分データの空読みを行う。								○
MARCFL	" 02	MARCのPOST TAPEの読み込みを行い, 温度分類の編集等を行う。								○
CONRD	" 03	MARC(J1 version)のPOST TAPEに書かれた要素節点データを読み込み, SCL 座標(内面を基準とする)を計算する。								○
ELJTFL	T8240701	MARC(H4, 又はJ1 version)の要素, 節点データファイル又はカードデッキを読み 込み, SCL座標(内面を基準とする)を計算する。								○
DUMYPF	T8240719	MARCのPOST TAPEのうち, 不必要なステップに対するデータを空読みさせる。								○
DPLOT1	" 05	$T_{avg}$ , 又は $\Delta T_1$ の時刻履歴をプロットする。								○
DPLOT2	" 24	$\Delta T_2$ , 又は $\Delta T_1/2 + \Delta T_2$ の時刻履歴をプロットする。								○
DPLOT3	" 06	節点温度の時刻履歴をプロットする。								○
DPLOT4	" 08	SCL上の温度分布をプロットする。								○
LINED	" 25	(X, Y)データを折線でプロットし, データのある間隔ごとに, そのデータの番号を 描くプロッター用サブルーチン。								○
DOT	T8240709	2点間をドットで結ぶ, プロッター用サブルーチン。								○
NUMBX	DQHNUMBX	直線を描きその上に文字を表示する。	○	○				○	○	○
PAGEW	DQHVPAGW	ページ番号の設定を行う。							○	

## 4 章 結 言

高速原型炉第 1 種機器の自動強度評価システムを，昭和 55 年度に引続き開発を行ない，利用者手引き書と併せて報告した。本年度の開発目標としたシステムの使い易さとしては，各種チェック機能を追加することにより，利用者の入力方法の誤りを迅速に発見し，円滑な解析・評価計算を行なえるようになった。ただし，自動強度評価システムには適用範囲対象構造等に関しては，多少の制限があるが，高速原型炉第 1 種機器設計のための強力な道具として，また高温設計方針そのものの検討のためにも貢献できると考える。

また，自動強度評価システムは，設計方針の評価方法に基づいているが，使いこなすには，方針の評価方法に精通していることはもちろんのこと，高温構造設計に関連した高度な知識が要求され，出力結果だけを鵜呑みにしないで，評価結果に対する慎重なる判断が必要である。

本自動強度評価システムは，方針の改訂に応じて修正されていくべきもので，今後研究／開発の成果を取り入れ，使用者の意見等を十分に反映されるべきものと考えます。

最後に，自動強度評価システムの開発にあたり，動力炉核燃料開発事業団の，加納巖氏，武藤猛氏から受けたご援助ならびに有益なご検討に対して，心より謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 動力炉・核燃料開発事業団：高速原型炉第一種容器の高温設計基準（暫定案），昭和53年11月。
- (2) 動力炉・核燃料開発事業団：高速原型炉第一種管の高温設計基準（暫定案），昭和54年2月（改訂1）。
- (3) 動力炉 核燃料開発事業団：高速原型炉高温第一種機器の構造設計指針（案），昭和55年9月。
- (4) 通商産業省：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（通産省告示第501号），昭和55年10月。
- (5) 動力炉・核燃料開発事業団：高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針，昭和56年11月
- (6) ASME：ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sect. III, 1980 Edition.
- (7) MARC ANALYSIS RESEARCH CORPORATION：MARC General Purpose Finite Element Program—User Manual, 1979.
- (8) NUCLEAR SERVICE CORPORATION：NUPIPE II User's Manual, 1977.
- (9) 三井造船(株)：高速原型炉第一種容器設計基準による自動評価システム（POST-VDS）報告書（PNC SJ-299 79-13），1979年12月。
- (10) 三井造船(株)：高速原型炉第一種管設計基準による自動評価システム（POST-VDS）報告書（PNC SJ-299 79-14），1979年12月。
- (11) 三井造船(株)：高速原型炉第1種機器の自動評価システム報告書（PNC ZJ 299 81-06），1981年5月
- (12) 岡村弘之：強度の統計的取扱い，培風館，P112-114，P127-129，昭和53年3月。
- (13) 遠藤達雄：Rainflow法で疲労寿命を現場測定，日経メカニカル，P70-76，1979年10月。
- (14) 遠藤達雄，安在弘幸，西谷弘信他：Rainflow法による機械・構造物の疲労寿命測定技術，フジテクノシステム講習会テキスト，1980年5月。
- (15) 薄一平，岡村弘之：定常ランダム荷重下の疲労き裂進展，機講論，1977年11月。
- (16) 大路清嗣：多軸応力下の低繰返し数疲労，材料，第16巻，第163号，昭和42年4月。

- (17) E. Krempl : The Influence of State of Stress on Low-Cycle Fatigue of Structural Materials , A Literature Survey and Interpretive Report , Proc. ASTM , STP549 , 1974.
- (18) A. P. Boresi, O.M. Sidebottom : Creep of Metals under Multiaxial State of Stress , Nuclear Engineering and Design 18 , 1974.
- (19) J. Henderson : An Investigation of Multiaxial Creep Characteristics of Metals , MPC-7 , Characterization of Materials for Service at Elevated Temperatures , ASME/CSME Montreal Pressure Vessel and Piping Conference , 1978.
- (20) M. Sakane , M. Ohnami : Effect of Multiaxiality of Stress on Metallic Creep-Fatigue Interaction at Elevated Temperatures , Third International Conference on Pressure Vessel Technology , 1977 .
- (21) M. W. Brown , K. J. Miller : A Theory for Fatigue Failure under Multiaxial Stress-Strain Conditions , Proc. Inst. Mech. Eng. , 187 , P 745-755 , 1973 .
- (22) M. W. Parsons , K. J. Pascoe : Low-Cycle Fatigue under Biaxial Stress , Proc. Inst. Mech. Eng. , 188 , P657-671 , 1974 .
- (23) A. W. A. Konter , G. T. M. Janssen , W. Husslage : Effect of Biaxial Loading and Geometry on Prediction of Low-Cycle Fatigue Life ; 5th SMIRT Conference L13/1 , 1979 .
- (24) J. J. Blass , S. Y. Zamrik : Multiaxial Low-Cycle Fatigue of Type 304 Stainless Steel , MPC-3 , ASME-MPC Symposium on CREEP-FATIGUE INTERACTION , 1976 .
- (25) K. Kanazawa , K. J. Miller , M. W. Brown : Low-Cycle Fatigue under Out-of-Phase Loading Conditions , Trans. ASME , Journal of Engineering Materials and Technology , July 1977 .
- (26) S. S. Manson , G. R. Halford : Treatment of Multiaxial Creep-Fatigue by Strainrange Partitioning , MPC-3 , ASME-MPC Symposium on CREEP-FATIGUE INTERACTION , 1976 .



- (27) D. W. Lobitz, R. E. Nickell : Creep-Fatigue Damage under Multi-axial Conditions, L4/3, 4th SMIRT Conference, 1978.
- (28) P. S. Maiya : Creep-Fatigue Life Prediction for Different Heats of Type 304 Stainless Steel at 593 °C by Linear Damage Rule, Strainrange Partitioning Method and Damage-rate Approach, ASME Code Committee Submittance, 1977.
- (29) F. S. Kelly : A General Fatigue Evaluation Method (Elastic Stress or Plastic Strain with Constant or Varying Principal Direction), ASME, 79-PVP-77, 1979.
- (30) S. S. Manson : The Challenge to Unify Treatment of High Temperature Fatigue—A Partisan Proposal Based on Strainrange Partitioning, Proc. ASTM, STP520, 1972.
- (31) S. S. Manson, G. R. Halford : Discussion on "Multi-axial Low-Cycle Fatigue of Type 304 Stainless Steel" by J. J. Blass, S. Y. Zamrik, Journal of Engineering Materials and Technology, Trans. of the ASME, P283-286, July 1977.
- (32) W. G. Dodge, S. E. Moore : Stress Indices and Flexibility Factors for Moment Loadings on Elbows and Curved Pipe, ORNL-TM-3658, March 1972, also in Welding Research Council Bulletin 179, December 1972.
- (33) W. G. Dodge, S. E. Moore : ELBOW : A Fortran Program for the Calculation of Stresses, Stress Indices and Flexibility Factors for Elbows and Curved Pipe, ORNL-TM-4098, April 1973.
- (34) G. H. Golden, J. V. Tokar : Thermophysical Properties of Sodium, ANL-7323, August 1967.
- (35) 日本機械学会 : 伝熱工学資料 (改訂第3版), 昭和50年2月.