

円筒構造物試験データを用いた熱過渡強度評価法の検討

高速原型炉クリープ疲労損傷評価法と高度化案の比較

1996年7月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi,
Hitashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)1996

円筒構造物試験データを用いた熱過渡強度評価法の検討

高速原型炉クリープ疲労損傷評価法と高度化案の比較

川崎 信史*、笠原 直人*

要 旨

高速炉の主要構造物としては原子炉容器、配管、熱交換器、ノズル等などが挙げられる。高温構造設計基準では、これらの構造物の構造健全性維持を目的として、1次応力、ひずみ、クリープ疲労損傷の制限を設けている。特に高速炉のような高温で繰返し荷重（熱過渡）を受ける低圧の構造物においては、クリープ疲労損傷が構造物の支配的な破損形態となり、設計成立範囲を限定する要因となっている。

本研究では、一般化弾性追従モデルを採用したクリープ疲労損傷評価高度化案を使用し、円筒構造物の強度評価を行った。さらに、熱過渡強度試験より得られた円筒構造物試験データと強度評価より得られた損傷値の比較を行い、もんじゅの方法と高度化案の評価精度について検討した。

その結果、以下の知見を得た。

1. 累積疲労損傷係数 D_f は、円筒構造物において高度化案の方がもんじゅの方法より低目の損傷値を示した。（ただし、弾性追従が大きい構造不連続部では高度化案が高目の損傷値となった。）
2. 累積クリープ損傷係数 D_c も、高度化案の方が低目の損傷値を示す。（構造不連続部を持つ円筒構造 STF-3 で約 0.7 倍、構造不連続部を持たない円筒構造 STF-10 で約 0.1 倍）
3. STF-3 のき裂未発生部には、もんじゅの方法では制限損傷値を超えている部位が存在するが、高度化案では制限値内の評価であり、高度化案ではより正確なクリープ疲労損傷評価ができる。

上記の結果から、高度化案はもんじゅの方法と比較して D_f , D_c 共により実験結果に近い損傷値を予測した。この損傷評価精度の向上により、設計成立範囲の拡大の見通しを得ることができた。

Study on thermal transient strength evaluation method using cylindrical structural test data

Proposal of an advanced creep-fatigue damage evaluation method
and comparison with a conventional one for the prototype fast reactor

Nobuchika Kawasaki* and Naoto Kasahara*

ABSTRACT

As main components of fast reactors, there are reactor vessels, pipes, heat exchangers, nozzles. In order to keep their structural integrity, the elevated temperature structural design guide evaluates primary stress, strain, and creep-fatigue damage of them. Especially in fast reactors which operate under low pressure and high temperature conditions, creep-fatigue damage is dominant, and limits a design range. For the purpose of extending a design range, author evaluated strength of cylindrical structures by an advanced proposed method based on the generalized elastic follow-up model. Furthermore we studied evaluation accuracy of a method of 'monjyu' and a proposed method, through comparison of thermal transient strength test data with damage calculated by two strength evaluation methods.

Results are summarized as follows.

1. An advanced proposed method predicted lower fatigue damage (D_f) than a method of 'monjyu'. (However, in structural discontinuities where an elastic follow up is large, a proposed method shows higher damage than a method of 'monjyu'.)
2. An advanced proposed method calculated lower creep damage (D_c) than a method of 'monjyu'. (About 0.7 times lower in a cylindrical structure with a structural discontinuity (STF-3). About 0.1 times lower in a cylindrical structure without a structural discontinuity (STF-10).)
3. On no-crack portions in STF-3, prediction of a method of 'monjyu' is out of a limit of crack initiation, nevertheless one of an advanced proposed method is within the range. Through above results, an advanced proposed method was evaluated to be more accurate in prediction of creep-fatigue damage.

We concluded from the above investigation that we calculated more rational and lower damage by proposed method, and it has the possibilities to get extension of a design range.

* OEC, Structure and Material Research Section

目 次

| | |
|-------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 構造物の熱過渡強度評価法 | 2 |
| 2.1 “もんじゅ”の方法 | 2 |
| 2.2 高度化した方法 | 2 |
| 3. 熱過渡強度試験解析 | 9 |
| 3.1 試験の内容 | 9 |
| 3.2 解析方法 | 16 |
| 3.3 解析結果 | 19 |
| 4. 熱過渡強度評価 | 29 |
| 4.1 熱過渡強度データベース | 29 |
| 4.2 強度評価結果 | 29 |
| 5. 考察 | 36 |
| 5.1 高度化手法の合理性について | 36 |
| 5.2 評価手法の改良提案 | 37 |
| 6. 結論 | 39 |
| 謝辞 | 40 |
| 参考文献 | 41 |

記号の定義

| 記号 | 定義 |
|-------------------|---|
| D | 累積クリープ疲労損傷係数の制限値 |
| Dc | 累積クリープ損傷係数 |
| DCN | 1次及び2次応力によるクリープ損傷係数 |
| DCP | ピーク応力によるクリープ損傷係数 |
| Df | 累積疲労損傷係数 |
| D* | 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 |
| D** | ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 |
| K | 弾性応力集中係数 [$K = S_f / S_n$] |
| K* | ピーク熱応力を除いた弾性応力集中係数 [$K^* = (S_p + S_f) / S_n$] |
| K ϵ | ひずみ集中係数 |
| K γ | ピーク熱ひずみに関するひずみ集中係数 |
| S | ひずみ K ϵn に対応する応力 |
| S* | ひずみ ϵn に対応する応力 |
| 3 $\bar{S}m$ | 応力緩和を考慮したシェイクダウン基準値 |
| Sg | クリープ損傷評価において定応力型で評価する応力の水準 |
| Si (σ_i) | 保持応力 |
| Sf | ピーク熱応力範囲 |
| Sn | 公称応力範囲 |
| Sp | ピーク応力範囲 |
| q | 弾性追従係数 |
| qn | 総体的弾性追従係数 |
| qL | 局所的弾性追従係数 |
| q ν | ポアソン比効果弾性追従係数 [$q_\nu = 2(1-\nu)$] |
| q ν^* | ポアソン比効果と厚さ方向非線形温度勾配を考慮した弾性追従係数 [$q_\nu^* = 5/3$] |
| τ | ひずみ周期 |
| ϵ_f | ピーク熱ひずみ範囲 |
| ϵ_n | 公称ひずみ範囲 |
| ϵ_i | 全ひずみ範囲 |
| $\dot{\epsilon}$ | ひずみ速度 |
| ν | ポアソン比 |

List of figures and tables

- Fig. 2.1 Restriction of creep-fatigue damage (Campbell)
- Fig. 2.2 Flow of structural analysis
- Fig. 2.3 Flow of BDS evaluation method
- Fig. 2.4 Flow of BDS-MD evaluation method
- Fig. 2.5 Flow of EQEF evaluation method
- Fig. 2.6 Flow of EQEF167 evaluation method
- Fig. 3.1 Geometry of STF-3
- Fig. 3.2 Sodium temperature time history- STF-3 (Hot shock)
- Fig. 3.3 Sodium temperature time history- STF-3 (Cold shock)
- Fig. 3.4 Geometry of STF-10
- Fig. 3.5 Sodium temperature time history- STF-10 (Hot shock)
- Fig. 3.6 Sodium temperature time history- STF-10 (Cold shock)
- Fig. 3.7 Finite element mesh and boundary condition of STF-3
- Fig. 3.8 Finite element mesh and boundary condition of STF-10
- Fig. 3.9 Evaluation line , section and node of STF-3
- Fig. 3.10 Temperature history at node 1,12,19 (STF-3)
- Fig. 3.11 Temperature history at node 3301,3312,3319(STF-3)
- Fig. 3.12 Times for evaluation of maximum strain range (STF-3)
- Fig. 3.13 Temperature contour at time 1 (STF-3)
- Fig. 3.14 Stress intensity contour at time 1 (STF-3)
- Fig. 3.15 Temperature contour at time 2 (STF-3)
- Fig. 3.16 Stress intensity contour at time 2 (STF-3)
- Fig. 3.17 Tresca stress range along an evaluated line (STF-3)
- Fig. 3.18 Temperature history (STF-10)
- Fig. 3.19 Evaluation point of STF-10
- Fig. 3.20 Temperature contour at time 1 (STF-10)
- Fig. 3.21 Stress intensity contour at time 1 (STF-10)
- Fig. 3.22 Temperature contour at time 2 (STF-10)
- Fig. 3.23 Stress intensity contour at time 2 (STF-10)
- Fig. 4.1 Stress range along an evaluation line
- Fig. 4.2 Strain concentration factor along an evaluation line
- Fig. 4.3 Strain range along an evaluation line
- Fig. 4.4 Initial stress along an evaluation line
- Fig. 4.5 Fatigue damage along an evaluation line
- Fig. 4.6 Creep damage along an evaluation line

Fig. 4.7 Creep-fatigue damage along an evaluation line

Fig. 4.8 Distribution of creep-fatigue damage (total data)

Fig. 4.9 Distribution of creep-fatigue damage

Fig. 4.10 Distribution of creep-fatigue damage

Table 2.1 List of Strength Evaluation Method

Table 3.1 Test conditions

Table 3.2 Input temperature history (STF-3)

Table 3.3 Input temperature history (STF-10)

Table 3.4 Heat transfer coefficient (STF-10)

Table 3.5 Equivalent stress range on an evaluation point (STF-10)

Table 4.1 Strength analysis results of BDS-MD

Table 4.2 Strength analysis results of EQEF167

1. はじめに

高速炉の構造設計では、クリープ疲労損傷の制限が設計の支配要因となっている場合が多く、信頼性および経済性に優れた構造設計を行うためには、評価精度の優れたクリープ疲労損傷評価法を確立することが必要である。もんじゅの設計に用いられた「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針(BDS)」¹⁾²⁾は、世界に先駆けてクリープ損傷評価に応力緩和を考慮することにより他国の基準に比べてより精度の良い予測が可能になっている。しかしながら、BDSの手法を用いて構造物熱過渡強度試験のクリープ疲労損傷値を予測すると、実際の破損発生時点と損傷値の間に大幅な隔たりが認められる場合があり、評価法の精度の向上が望まれていた。このような要求から、構造物のクリープ疲労損傷を支配するひずみ集中と保持中の応力緩和の検討に着手し、従来の評価手法では明確になっていなかった局所挙動と総体挙動の重畳効果を弾性追従で記述する一般化弾性追従モデルをベースにした高度化手法³⁾を提案した。高度化手法の有効性は、非弾性解析により検証しているものの実機への適用性を評価するためには構造物熱過渡強度試験データによる確認が必要である。

本報告書の目的は、BDSのクリープ疲労損傷評価法から設計で考慮される安全係数を取り除いた評価法(以下ではBDS-MDと略称する)と一般化弾性追従モデルを用いた高度化案(以下ではEQEFと略称する)を比較することにより、高度化案の予測精度を評価するとともに、構造物熱過渡強度試験データの評価を通して、評価法の持つ安全裕度を明確にすることにより今後の評価手法の改良に資することにある。

そこで、大洗工学センターでこれまでに実施した構造物熱過渡強度試験のうち、小型熱過渡試験装置(略称STST)で行われた同材溶接継手モデルと平滑溶接継手モデルを対象にBDS-MDとEQEFを用いたクリープ疲労損傷評価を行い、試験から得られたき裂データとクリープ疲労損傷値の比較により両評価手法の予測精度を評価した。

2. 構造物の熱過渡強度評価法

熱過渡強度評価は、入力となる構造物に与えられた試験条件（熱履歴）から、構造物の強度を損傷値という形で求めることである。強度評価の解析の流れを Fig.2.2 に示す。本章では応力範囲が既に求まっている段階、つまり強度評価のみについて述べ、そのほかの伝熱・応力解析については次章で述べる。

これまで動燃事業団において Table2.1 に示すような評価法を開発してきたが、本報告書では、“もんじゅ”の方法 (BDS) および高度化した方法 (EQEF) (Equivalent elastic follow-up)について簡単に説明を加え、その上で小型熱過渡試験装置 (STST) で試験された同材溶接継手モデルと平滑溶接継手モデルに対し、この2つの評価法を用いて評価を加える。

2.1 “もんじゅ”の方法

高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針 (BDS) で用いられているクリープ疲労損傷評価法について概略を示す。公称ひずみから損傷値を求める過程を Fig.2.3 のフロー図に示す。また、BDS から裕度を取り除いた BDS-MD の流れを Fig.2.4 に示す。

- 1) ひずみ集中係数 $K\varepsilon$ として、構造物の総体挙動に基づく係数 $KK'e$ 、局所挙動に基づく係数 $K^2(S^*/S)$ の最大値をとる。ここで、 $K'e$ は、弾性追従モデルに基づくひずみ拡大係数であり、 $K^2(S^*/S)$ は切欠のような局所的なひずみ集中を Neuber 則を使って保守的に評価する係数である。弾性追従係数 q は、原型炉の評価対象機器を安全側に包絡する一定の弾性追従パラメータ ($q=3$) を使用する。
- 2) ひずみ集中係数 $K\varepsilon$ とピーク熱ひずみに関する弾性応力集中係数 $K\gamma$ を用いて、公称ひずみ範囲よりひずみ範囲を求める。
- 3) 求めたひずみ範囲の許容繰返し数 N_f を設計疲労線図から読み取り、累積疲労損傷値 D_f を計算する。
- 4) 定応力型で評価する応力の水準 S_g によるクリープ損傷値 $D_{c1}(=0.3)$ を求める。
- 5) S_g を超える初期応力および各事象の緩和クリープ損傷 D^* を $q=3$ で計算。
- 6) S_g を超える初期ピーク応力および各事象の緩和クリープ損傷 D^{**} を $q=1$ で計算。
- 7) $D_f+D_c(D_{c1}+D^*+D^{**})$ を制限値 D で制限。(Fig.2.1)

2.2 高度化した方法

構造不連続部で生じるひずみ集中の要因は、構造不連続部の細部の形状変化に起因

する局所的要因と構造不連続部を構成する部材の板厚や剛性の違いに起因する総体的要因およびそれらの重畳効果からなると考えられている。もんじゅの手法は、局所的要因によるひずみ集中を Neuber 則により予測し、総体的要因によるひずみ拡大係数 K_e と弾性応力集中係数 K との積により求まるひずみ集中係数と比較し、いずれか大きい方を用いる方法を採用している。しかしながら、この方法は考え得るひずみ集中の一般的な最大値を与えるだけで、本来のひずみ集中メカニズムに立脚していないため過度に保守的になる傾向がある。高度化した手法は、局所的要因によるひずみ集中が弾性追従モデルで表すことが可能なことを示した上で、複数の弾性追従要因が重畳する場合の力学モデルを直接解くことにより求めたひずみ集中係数を採用している。また、もんじゅの手法では、構造毎に弾性追従係数を予測する手法が確立されていなかったため、多くの構造の弾性追従ひずみを保守的に包絡する $q = 3.0$ という一律の値が用いられたが、これまでの検討により構造不連続の無い円管を始め、多孔板、Y型構造、溶接継手などの弾性追従係数をそれらの形状パラメータから予測する手法が確立されつつあるため、高度化した手法では弾性追従係数を構造毎に定めている。さらに、クリープ損傷評価においては、中間保持位置効果を考慮し、高温保持開始時点の緩和初期応力の予測精度の向上を図っている。

- 1) 構造物の総体挙動、局所挙動を弾性追従係数を用いてあらわし、その累積の形でひずみ集中係数 $K\varepsilon$ を導出する。
- 2) ひずみ範囲とひずみ速度から許容繰返し数 N_f を求める。
- 3) 中間保持効果を考慮して時点 1、時点 2 それぞれの公称ひずみ範囲、ひずみ集中係数を求め、それぞれのひずみ範囲のうち大きい方をひずみ範囲とする。
- 4) 動的応力-ひずみ曲線より初期応力を求め、弾性追従係数 $q_n q_L$ を用いて緩和クリープ損傷 D_{cr} を求める。
- 5) $D_f + D_c(N \cdot D_{cr})$ を D で制限。

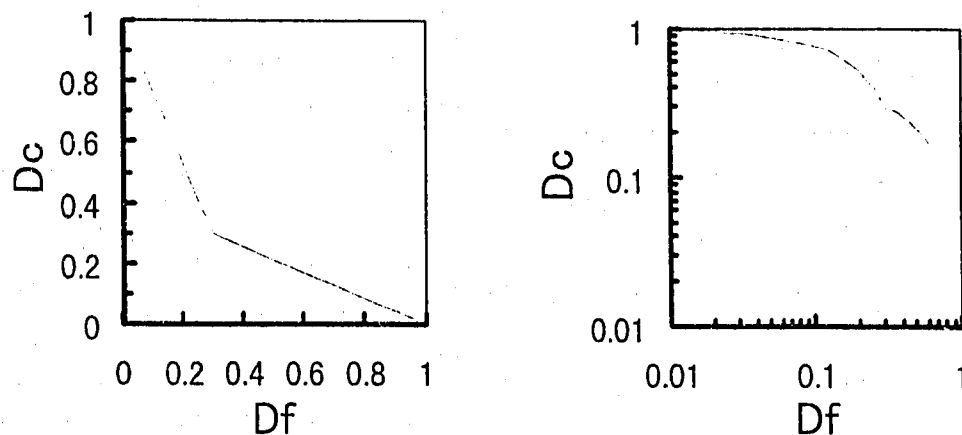


Fig. 2.1 Restriction of creep-fatigue damage (Campbell)

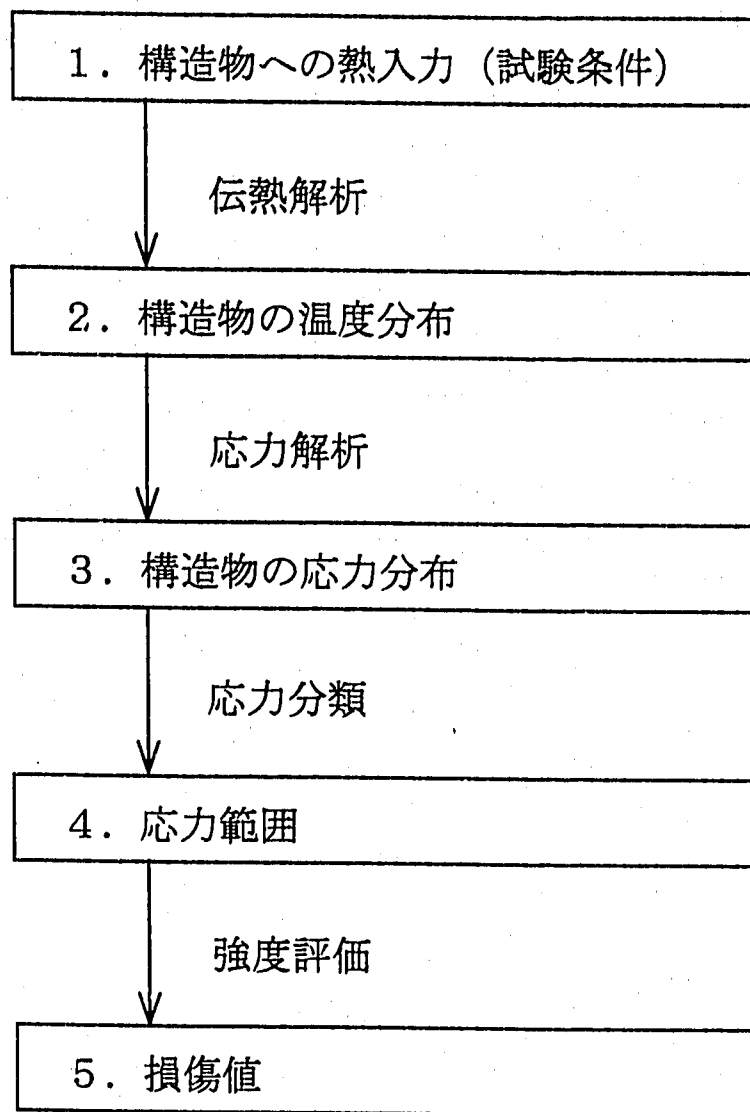


Fig. 2.2 Flow of structural analysis

Table 2.1 List of strength evaluation method

| 評価法名 | 概略 |
|---------|--|
| BDS | 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針で用いられている方法 |
| BDS-MD | 上記 BDSより安全裕度を削除したもの |
| EQEF | 一般化弾性追従モデルを用いて評価したもの |
| EQEF167 | 上記 EQEFの中で使用している総体的弾性追従係数を1.00 局所的弾性追従係数を1.67で固定した評価法 |

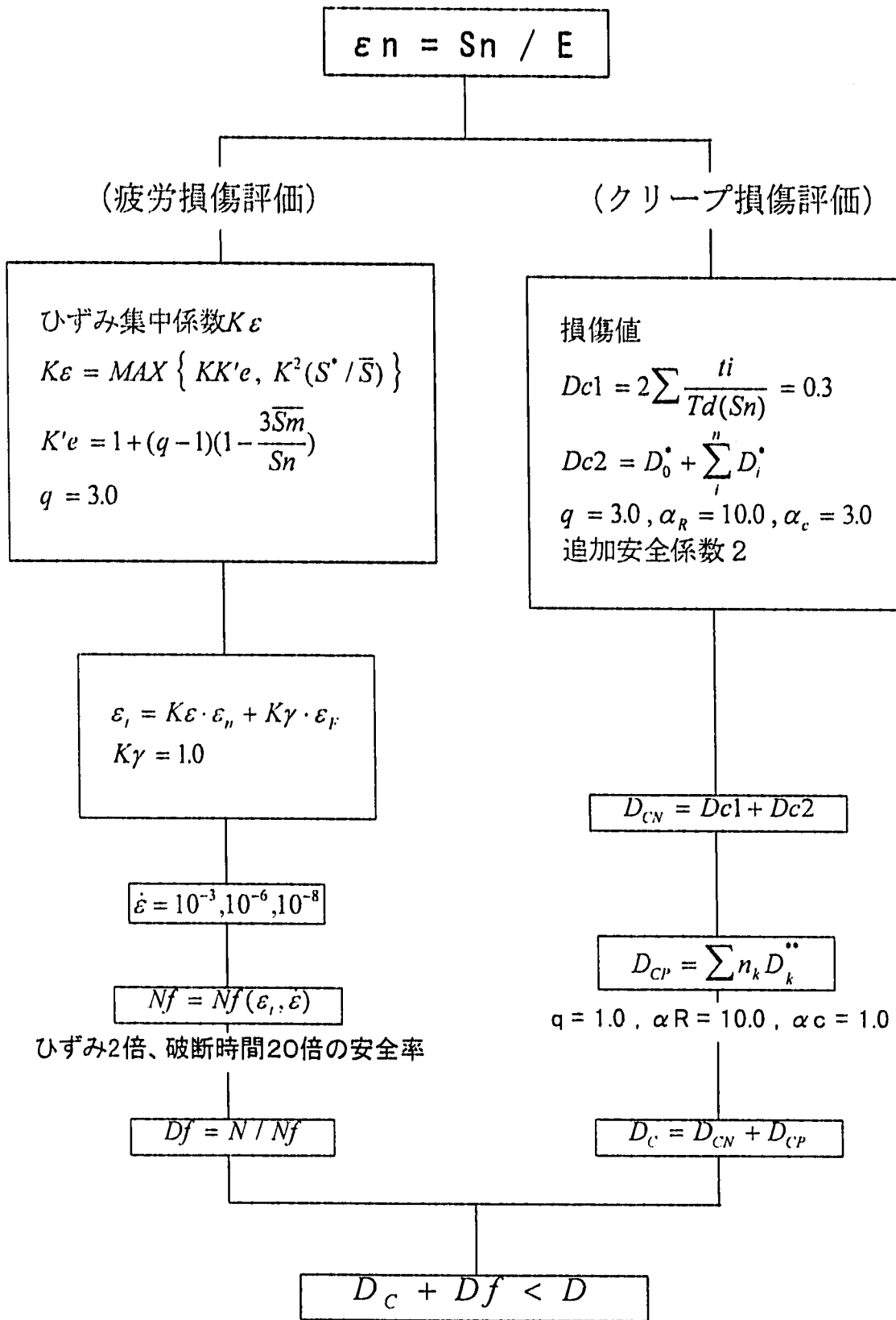


Fig. 2.3 Flow of BDS evaluation method

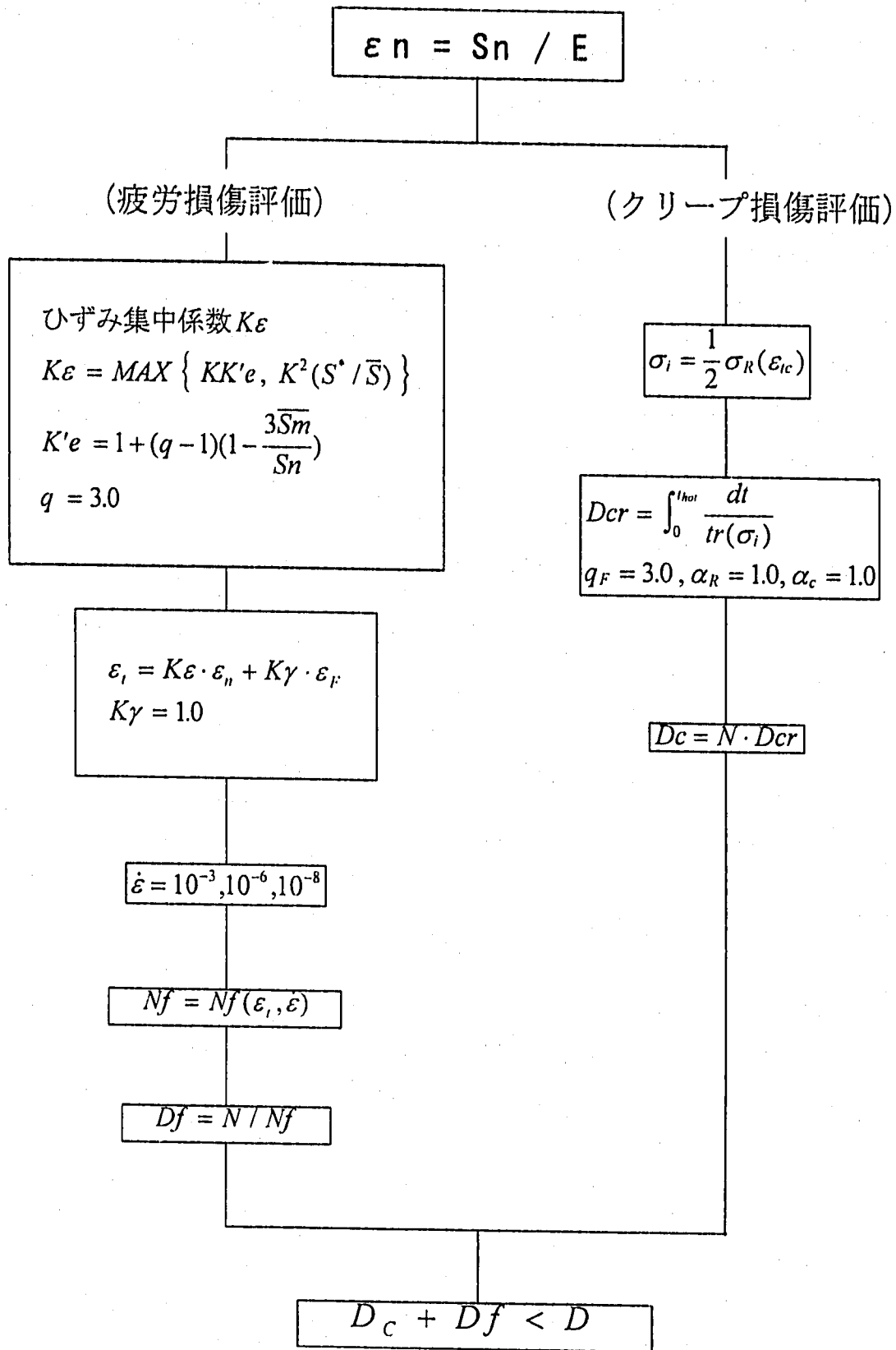


Fig. 2.4 Flow of BDS-MD evaluation method

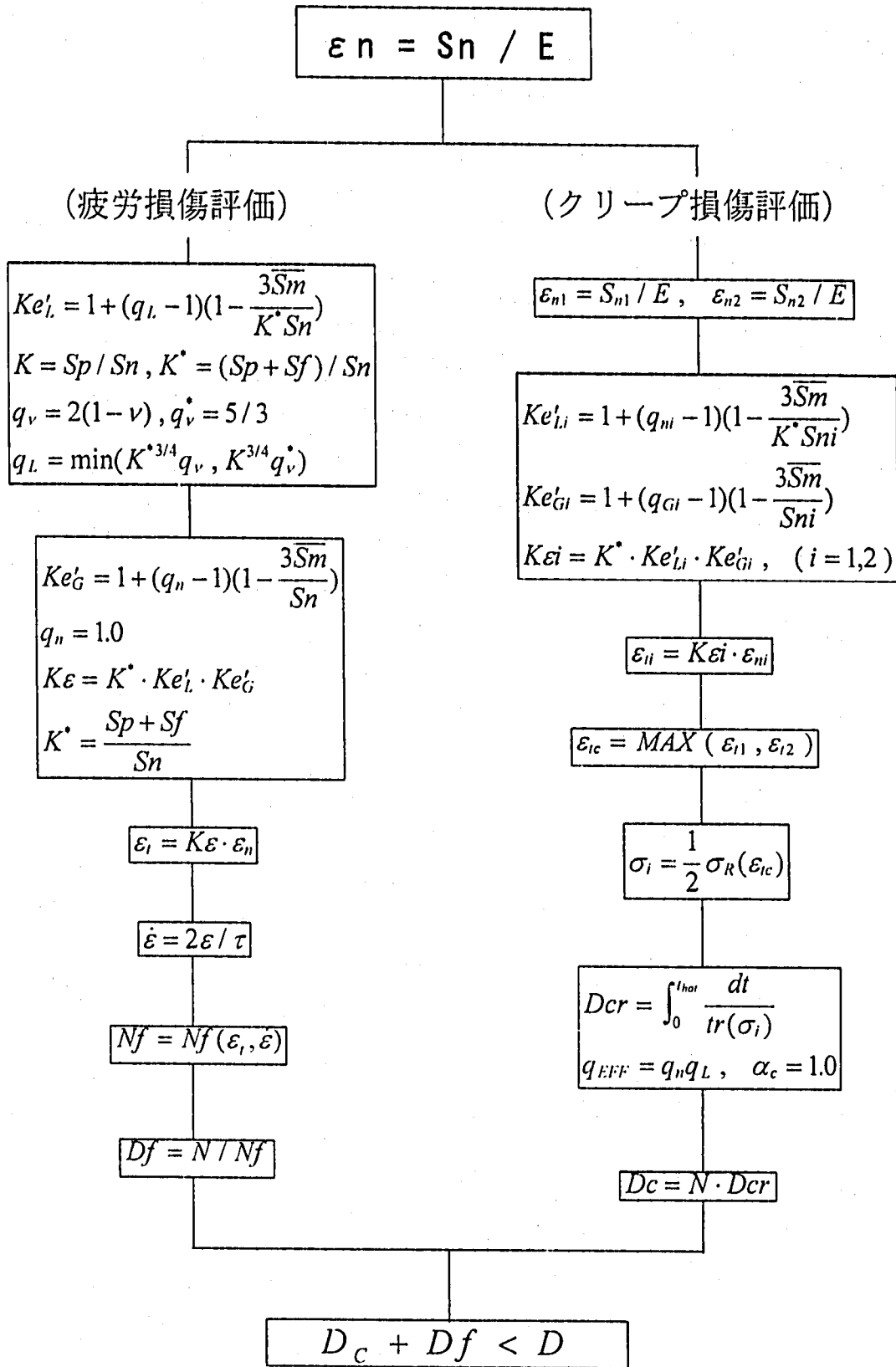


Fig. 2.5 Flow of EQEF evaluation method

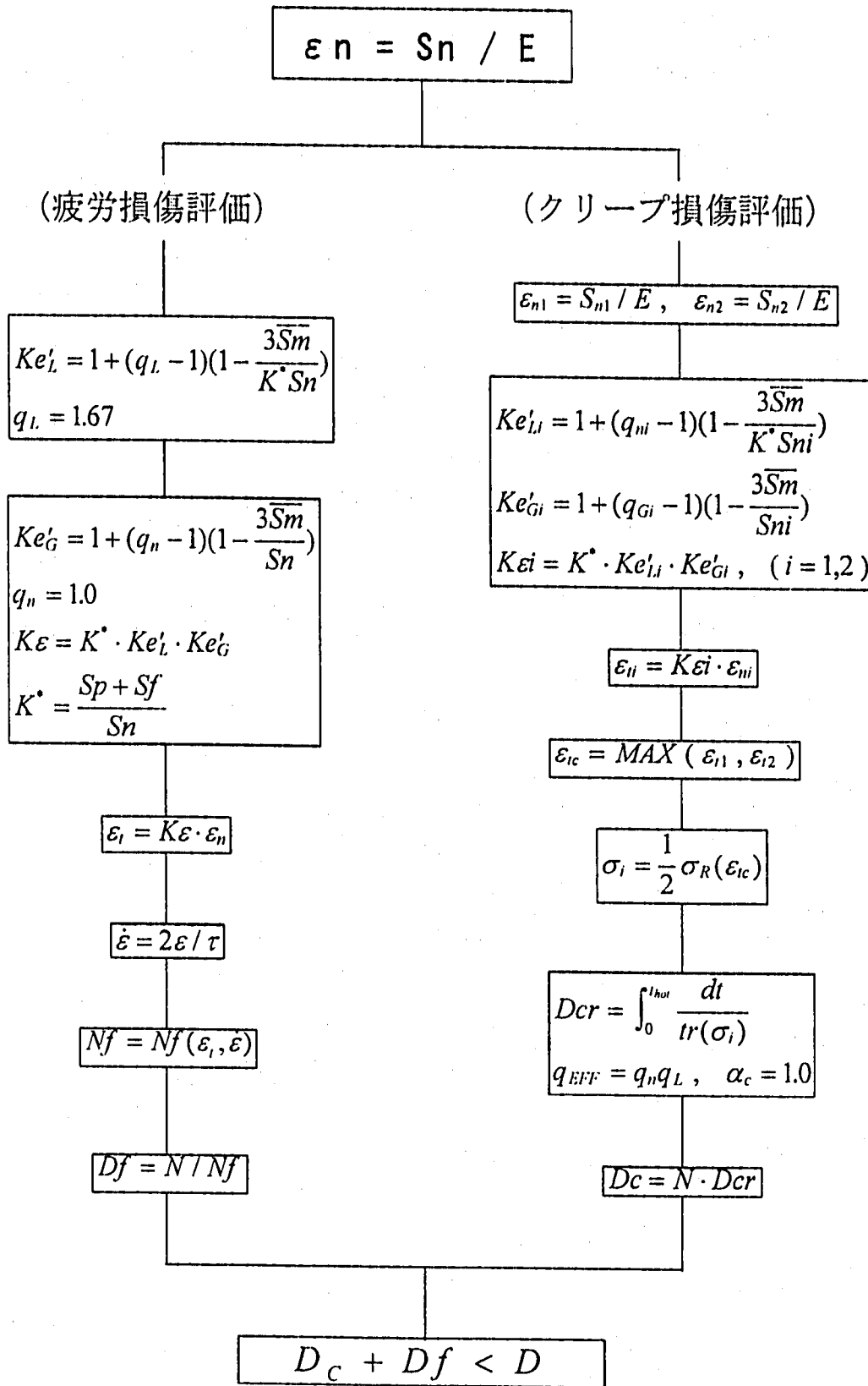


Fig. 2.6 Flow of EQEF167 evaluation method

3. 熱過渡強度試験解析

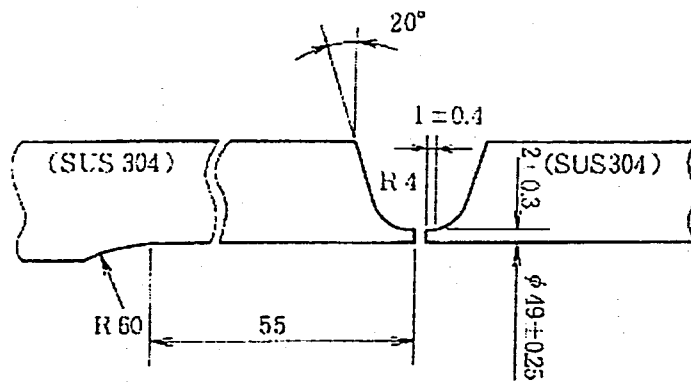
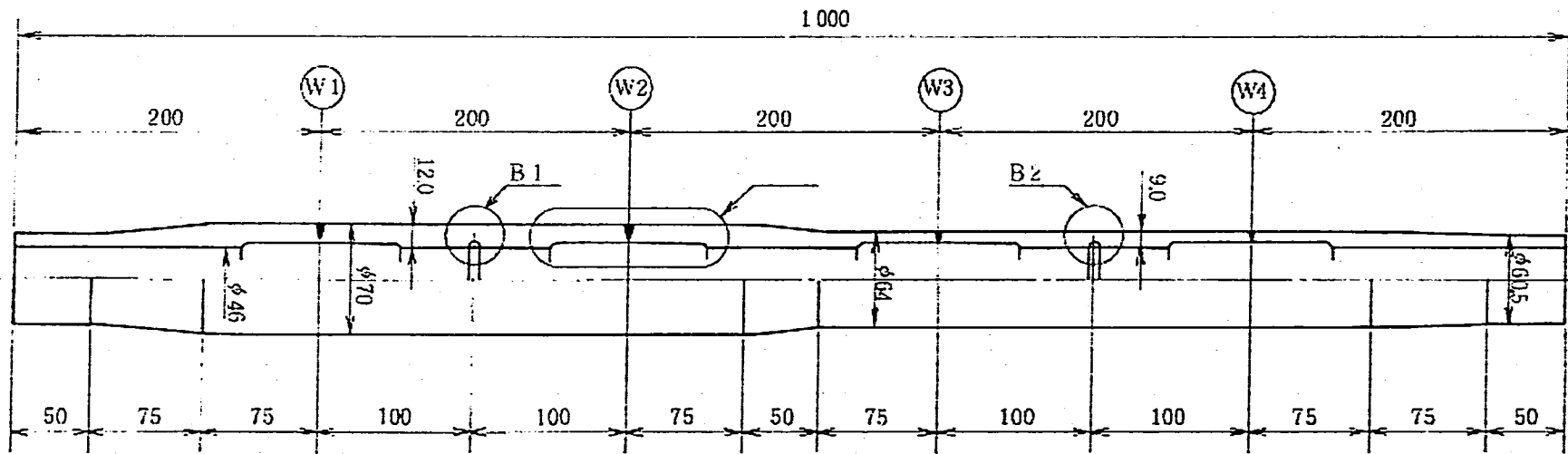
今回、評価法の合理性を検討するために用いた試験は、小型熱過渡試験装置（略称 S T S T）において行われた同材溶接継手モデル（STF-3）と平滑溶接継手モデル（STF-10）である。ここでは公称応力 S_n の算出までをその範囲として扱い、強度評価については次章で扱う。

3.1 試験の内容

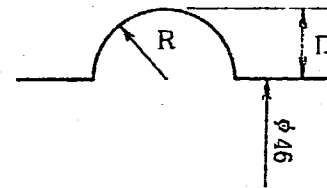
両試験の試験条件を Table 3.1 に、STF-3 の形状図を Fig.3.1 に、Hot Shock 時の変化履歴を Fig.3.2 に、Cold Shock 時の温度履歴を Fig.3.3 に示す。（解析には点 A で計測された温度を使用。）また、STF-10 の形状図を Fig.3.4 に、Hot Shock 時の温度履歴を Fig.3.5 に、Cold Shock 時の温度履歴を Fig.3.6 に示す。

Table 3.1 Test conditions

| | STF-3 | STF-10 |
|------------------|---------|--------|
| 材料 | SUS304 | SUS304 |
| 外径(mm) | 60.5~70 | 73 |
| 板厚t(mm) | 7.5~12 | 11.25 |
| 高温ナトリウム温度(°C) | 600 | 595 |
| 低温ナトリウム温度(°C) | 300 | 333 |
| 温度差(°C) | 300 | 262 |
| 高温ナトリウム保持時間(min) | 60 | 5 |
| 低温ナトリウム保持時間(min) | 4 | 5 |
| 高温ナトリウム流速(l/min) | 90 | 68 |
| 低温ナトリウム流速(l/min) | 100 | 68 |
| 熱過渡サイクル数 | 780 | 10100 |



Detail - A



Detail - B1, B2

| | R | D |
|-----|------|------|
| B 1 | 1.0 | 1.0 |
| B 2 | 1.18 | 0.55 |

(Unit : mm)

Fig. 3.1 Geometry of STF-3

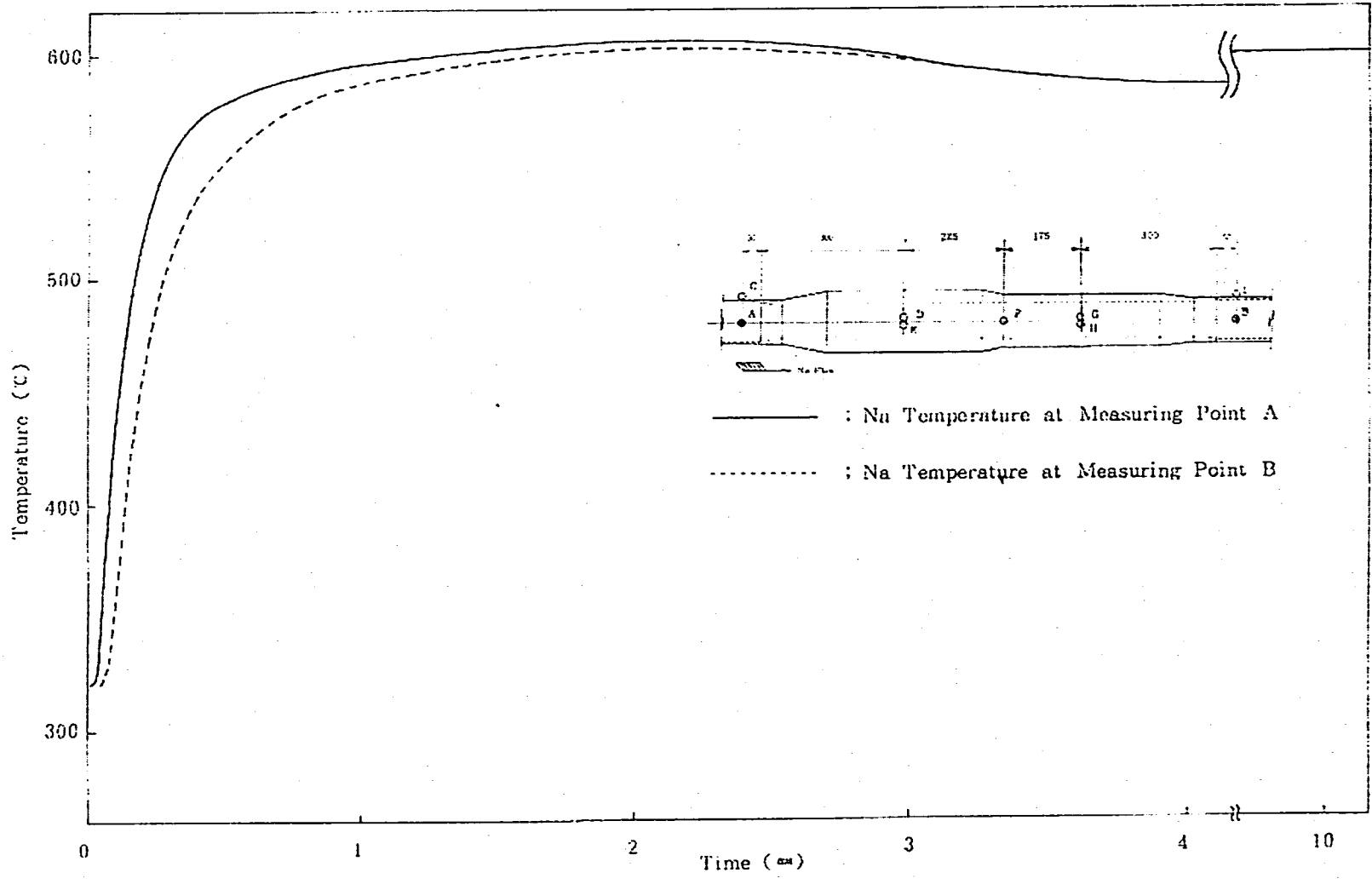


Fig.3.2 Sodium temperature time history-STF-3 (Hot shock)

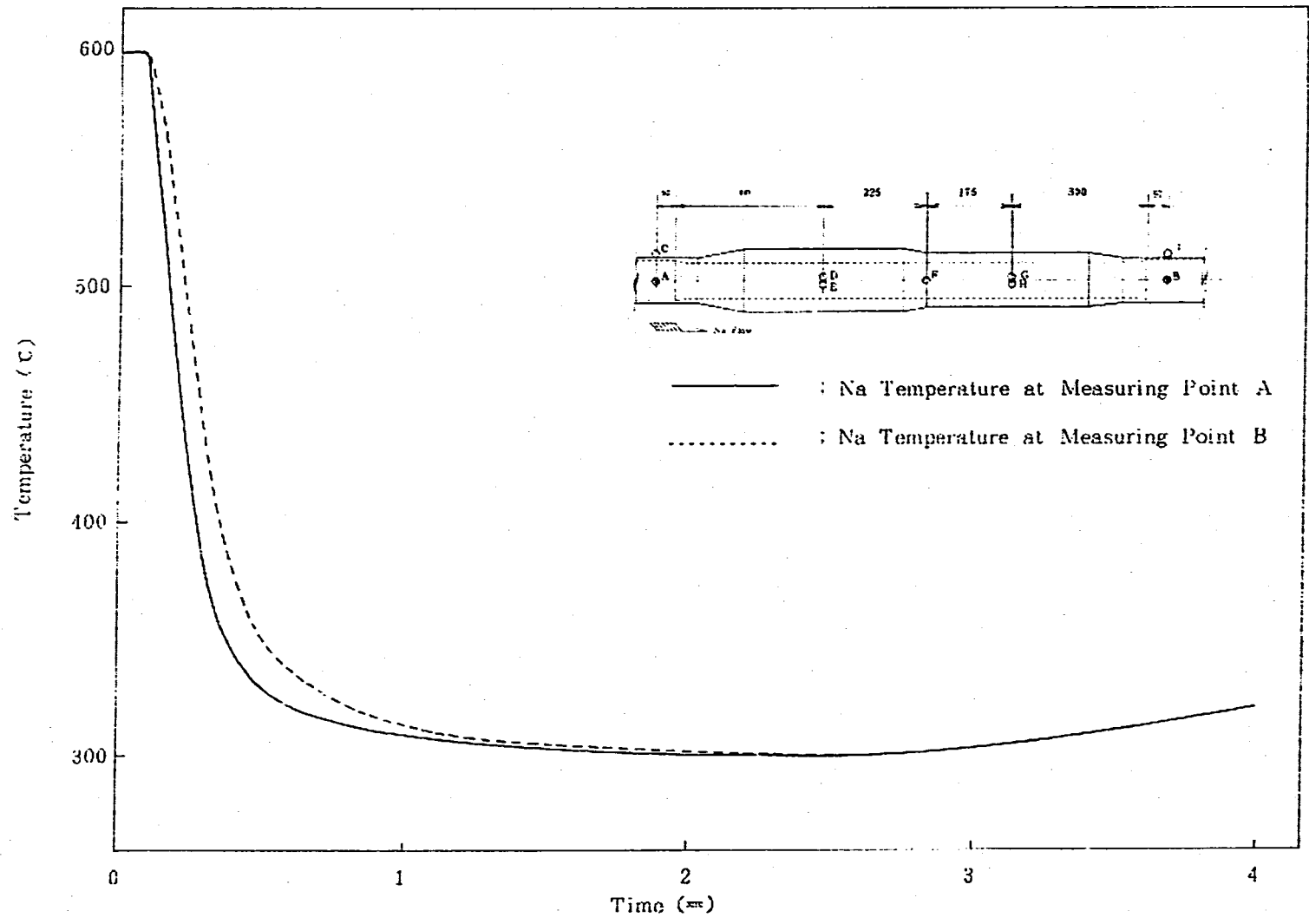
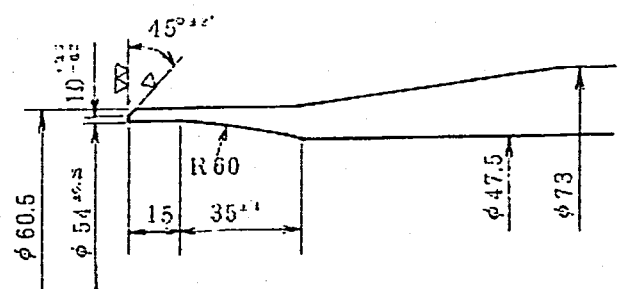
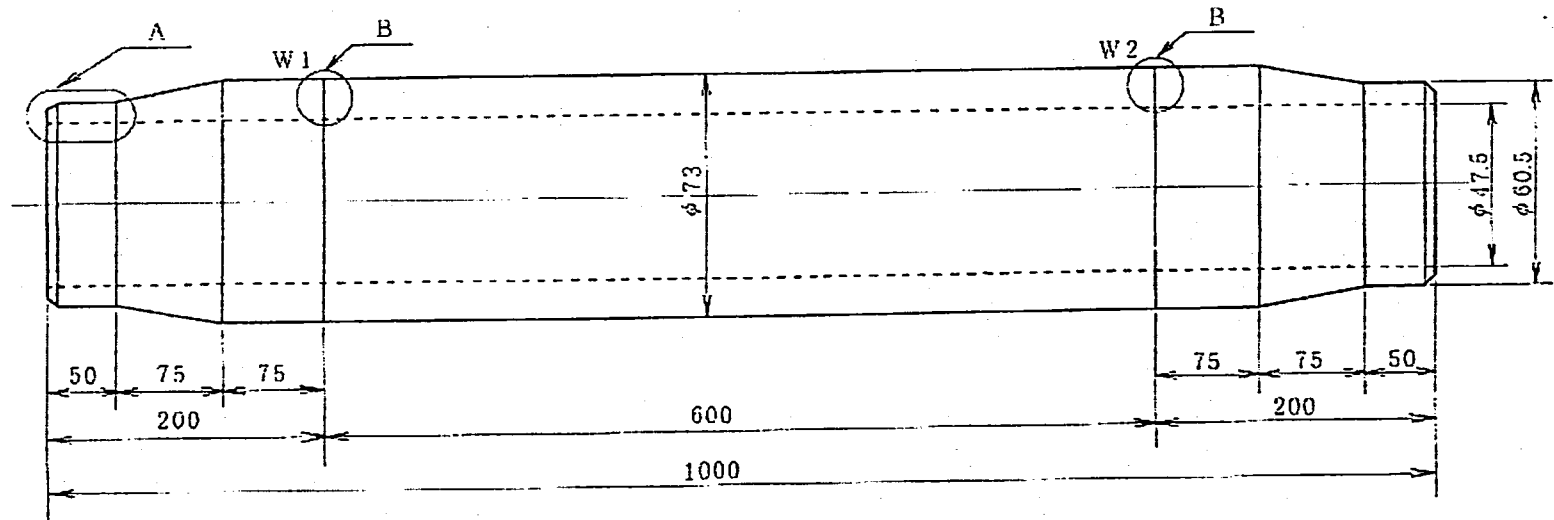
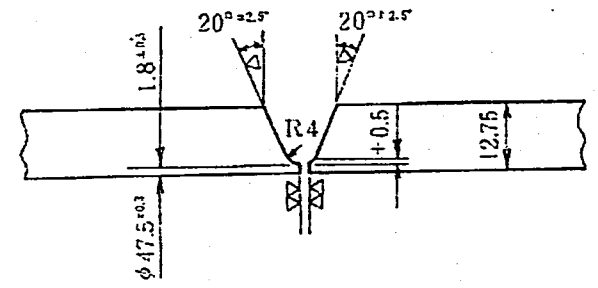


Fig.3.3 Sodium temperature time history-STF-3 (Cold shock)



Detail-A



Detail-B

(Unit : mm)

Fig.3.4 Geometry of STF-10

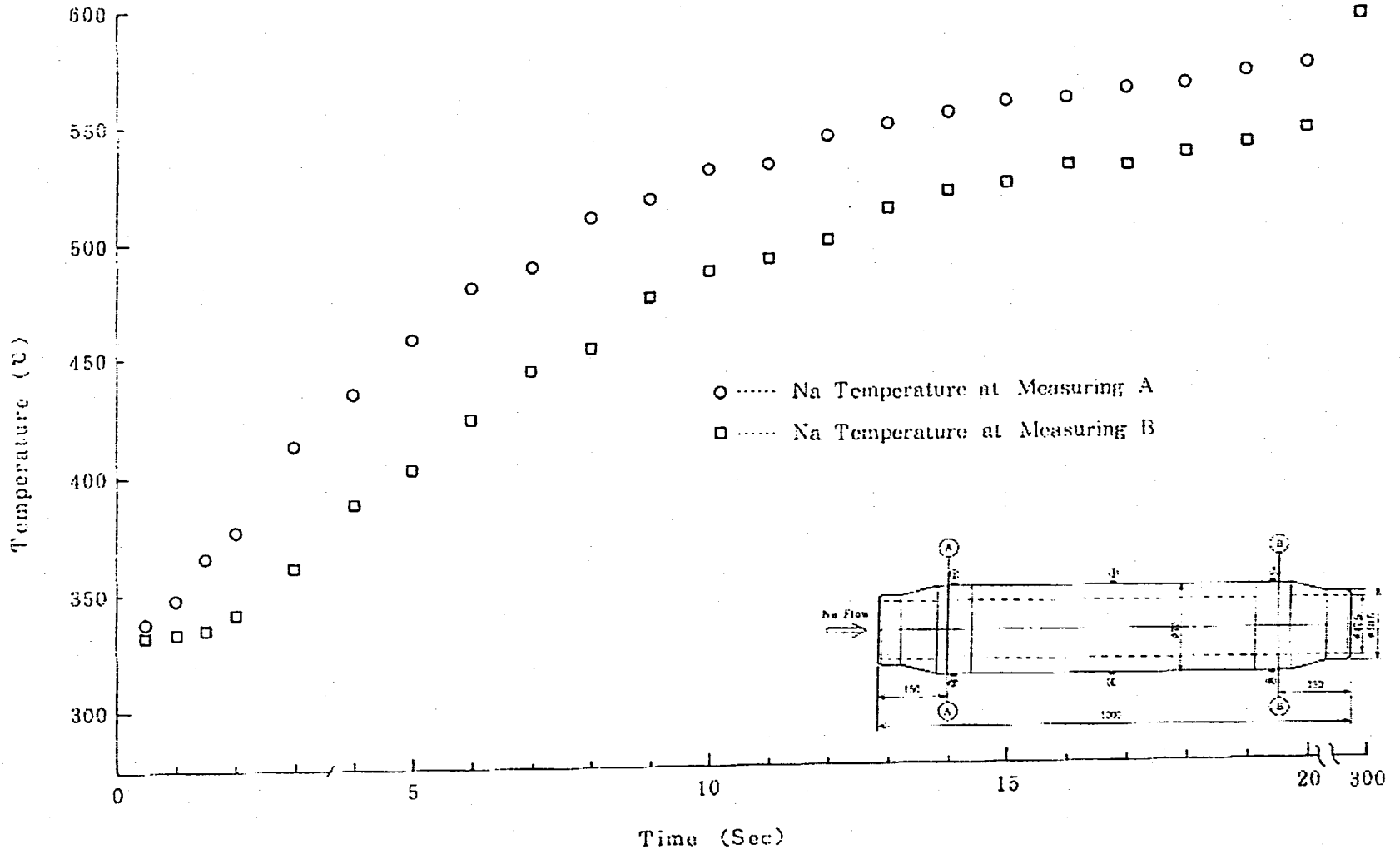


Fig.3.5 Sodium temperature time history-STF-10 (Hot shock)

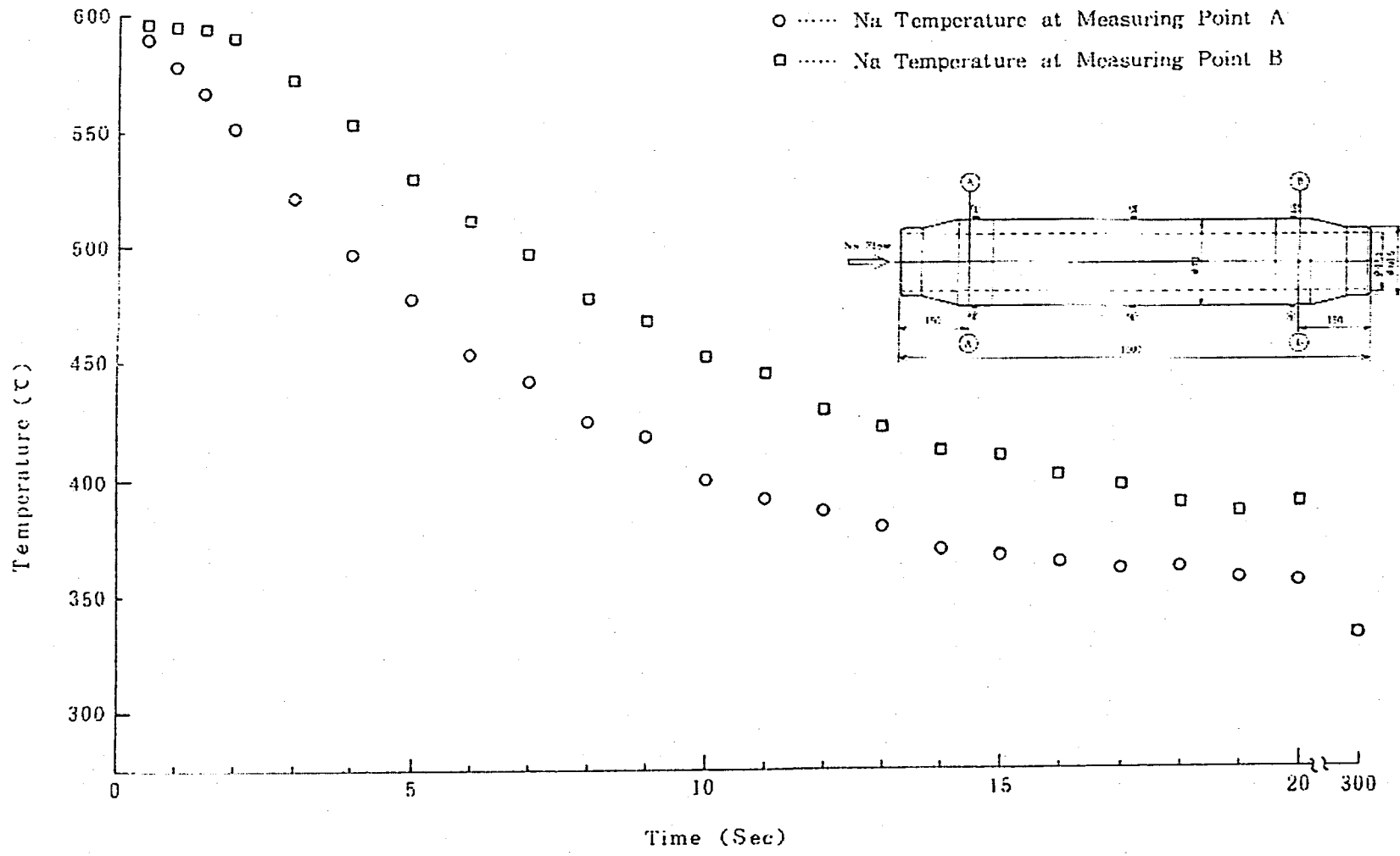


Fig.3.6 Sodium temperature time history-STF-10 (Cold shock)

3.2 解析方法

供試体の熱伝導解析および熱応力解析を汎用非線型構造解析プログラム FINAS for Windows NT version 12.0 を用いて行った。

外表面は断熱とし、ナトリウムと供試体との熱伝達は Seban-Shimazaki の式によって求めた。熱伝導解析で使用した要素は

| | |
|------------------|-------|
| 熱伝導 8 節点四辺形軸対象要素 | HQAX8 |
| 熱伝達 3 節点軸対象要素 | FCAX3 |

の 2 要素である。

使用した解析モデル、および境界条件を Fig.3.7 , Fig.3.8 に示す。Fig.3.7 では STF-3 肉厚部上流側溶接部を、Fig.3.8 では STF-10 の母材部をそれぞれモデル化した。

入力ナトリウム温度履歴を Table 3.2、Table3.3 に示す。STF-3 においては、Hotshock 時と Coldshock 時のナトリウム流速が異なるので、ユーザーサブプログラム XFILM を用いてナトリウムの流速と温度依存材料特性を与え Seban-Shimazaki の式より、熱伝達係数を求めた。STF-10 では、Hotshock 時と Coldshock 時のナトリウム流速が等しいので、Table 3.4 に示すような温度だけの関数として熱伝達係数を与えた。

応力解析は、弾性解析を次の要素を用いて行った。

| | |
|--------------|------|
| 8 節点四辺形軸対象要素 | QAX8 |
|--------------|------|

応力解析は STF-3 については、熱伝導解析の解析ステップのうち 23, 27, 30, 32, 34, 36, 38, 42, 89, 94, 100, 102, 103, 104, 106, 110 ステップについて行った。STF-10 については全ステップ行った。

Table 3.2 Input temperature history (STF-3)

| 時間 sec | STEP数 | 温度 °C |
|--------|-------|-------|
| 1.8 | 1 | 320 |
| 5 | 20 | 420 |
| 10 | 10 | 500 |
| 15 | 5 | 542 |
| 20 | 5 | 562 |
| 25 | 2 | 572 |
| 30 | 1 | 580 |
| 40 | 1 | 587 |
| 60 | 2 | 595 |
| 100 | 2 | 603 |
| 130 | 1 | 605 |
| 158 | 1 | 603 |
| 210 | 2 | 590 |
| 240 | 1 | 586 |
| 290 | 1 | 581 |
| 340 | 1 | 579 |
| 386 | 1 | 582 |
| 500 | 2 | 595 |
| 540 | 1 | 598 |
| 600 | 2 | 600 |
| 800 | 2 | 600 |
| 1200 | 1 | 600 |
| 3600 | 2 | 600 |
| 3606.3 | 1 | 600 |
| 3615 | 25 | 430 |
| 3620 | 10 | 370 |
| 3625 | 5 | 340 |
| 3630 | 2 | 330 |
| 3640 | 2 | 318 |
| 3660 | 4 | 310 |
| 3680 | 4 | 305 |
| 3725 | 5 | 300 |
| 3765 | 4 | 300 |
| 3805 | 2 | 310 |
| 3840 | 2 | 320 |

Table 3.3 Input temperature history (STF-10)

| 時間 sec | STEP数 | 温度 °C |
|--------|-------|-------|
| 0.5 | 1 | 338 |
| 1 | 1 | 348 |
| 1.5 | 1 | 365 |
| 2 | 1 | 376 |
| 3 | 1 | 414 |
| 4 | 1 | 437 |
| 5 | 1 | 460 |
| 6 | 1 | 486 |
| 7 | 1 | 490 |
| 8 | 1 | 513 |
| 9 | 1 | 520 |
| 10 | 1 | 530 |
| 11 | 1 | 531 |
| 12 | 1 | 545 |
| 13 | 1 | 550 |
| 14 | 1 | 555 |
| 15 | 1 | 560 |
| 16 | 1 | 562 |
| 17 | 1 | 565 |
| 18 | 1 | 567 |
| 19 | 1 | 574 |
| 20 | 1 | 575 |
| 50 | 1 | 577 |
| 100 | 1 | 581 |
| 200 | 1 | 588 |
| 300 | 1 | 595 |
| 300.5 | 1 | 590 |
| 301 | 1 | 580 |
| 301.5 | 1 | 568 |
| 302 | 1 | 552 |
| 303 | 1 | 523 |
| 304 | 1 | 498 |
| 305 | 1 | 476 |
| 306 | 1 | 455 |
| 307 | 1 | 440 |
| 308 | 1 | 425 |
| 309 | 1 | 418 |
| 310 | 1 | 400 |
| 311 | 1 | 392 |
| 312 | 1 | 385 |
| 313 | 1 | 380 |
| 314 | 1 | 370 |
| 315 | 1 | 365 |
| 316 | 1 | 363 |
| 317 | 1 | 362 |
| 318 | 1 | 361 |
| 319 | 1 | 357 |
| 320 | 1 | 355 |
| 350 | 1 | 353 |
| 400 | 1 | 349 |
| 500 | 1 | 341 |
| 600 | 1 | 333 |

Table 3.4 Heat transfer coefficient (STF-10)

| 温度 °C | 熱伝達率 h Kcal/mm ² sec |
|-------|---------------------------------|
| 300 | 3.21E-06 |
| 350 | 3.12E-06 |
| 400 | 3.02E-06 |
| 450 | 2.94E-06 |
| 500 | 2.85E-06 |
| 550 | 2.77E-06 |
| 600 | 2.69E-06 |

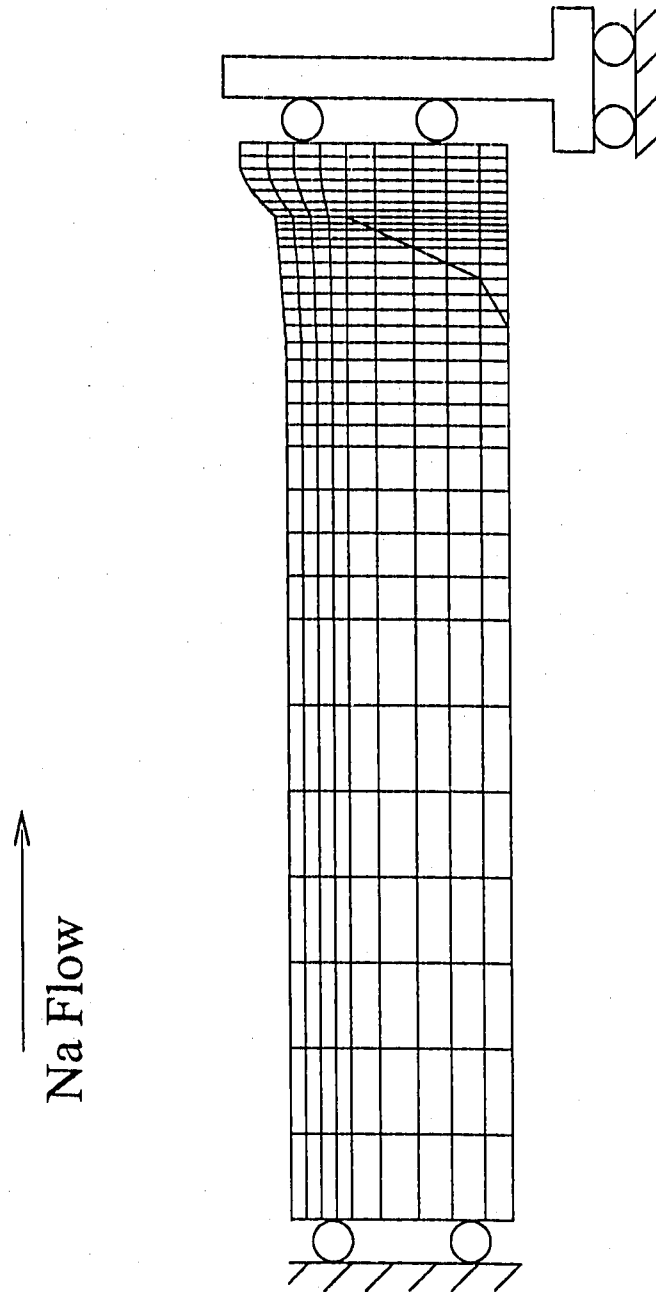


Fig. 3.7 Finite element mesh and boundary condition of STF-3

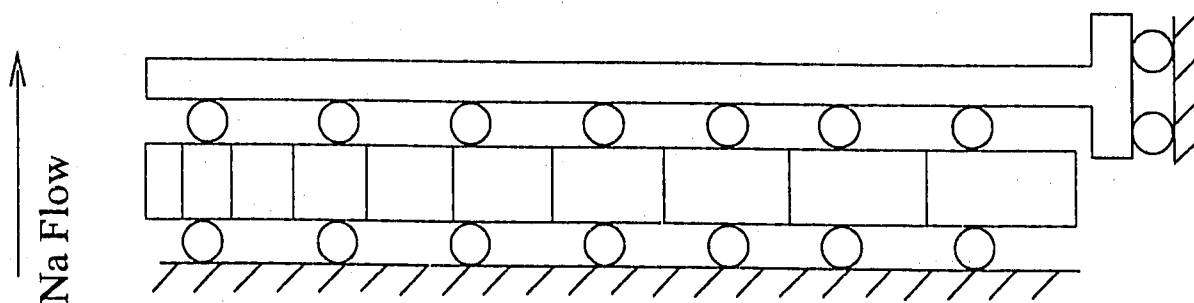


Fig. 3.8 Finite element mesh and boundary condition of STF-10

3.3 解析結果

3.3.1 STF-3

Table3.1 の条件に基づき、Fig.3.7 の有限要素モデルを用い伝熱解析した結果を Fig.3.10、Fig.3.11 に示す。図中の評価ラインおよび要素番号については Fig.3.9 に示す。

解析結果は、ノード 3301,3312,3319 を通る評価断面 No.1 からノード 1,12,19 を通る評価断面 No.66 までの全区間を、評価ラインにとり応力分類した。

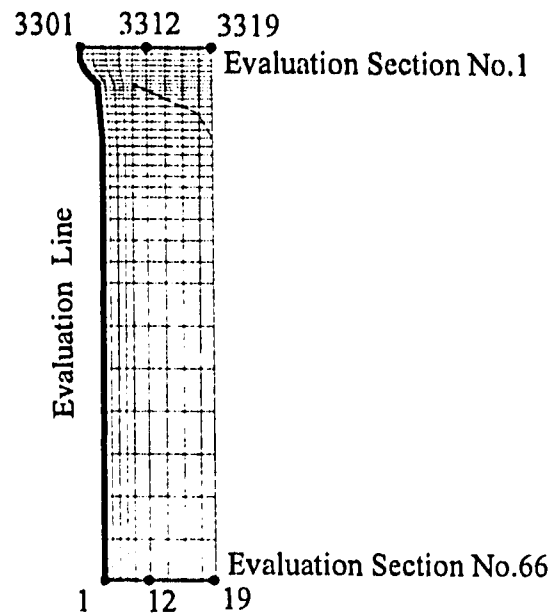


Fig. 3.9 Evaluation line , section and node of STF-3

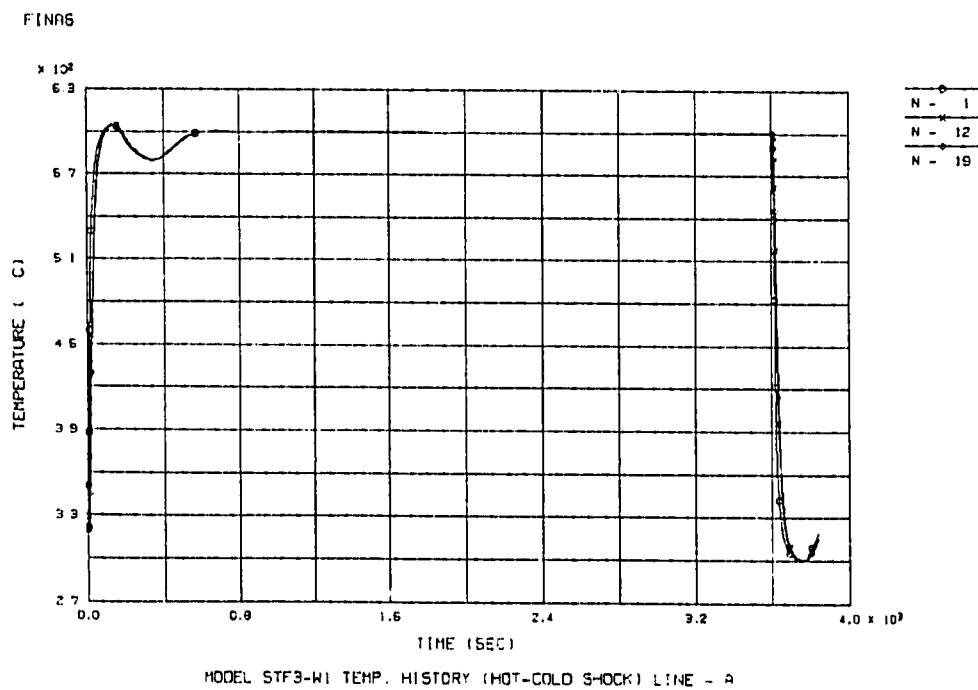


Fig. 3.10 Temperature history at node 1,12,19 (STF-3)

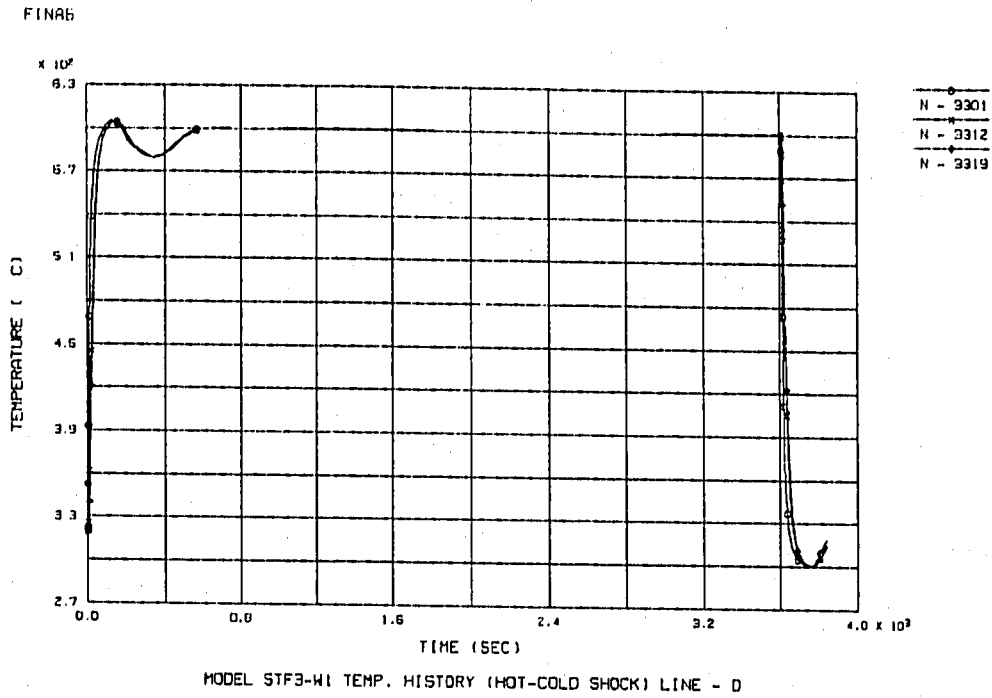


Fig. 3.11 Temperature history at node 3301,3312,3319(STF-3)

応力が最大となる極値2時点は、 Fig.3.12 に示す時点1（経過時間 15 秒後、ナトリウム温度 542℃）と時点2（経過時間 3621 秒後、ナトリウム温度 364℃）であった。応力の極値2時点の温度分布、応力分布を Fig3.13～16 に示す。

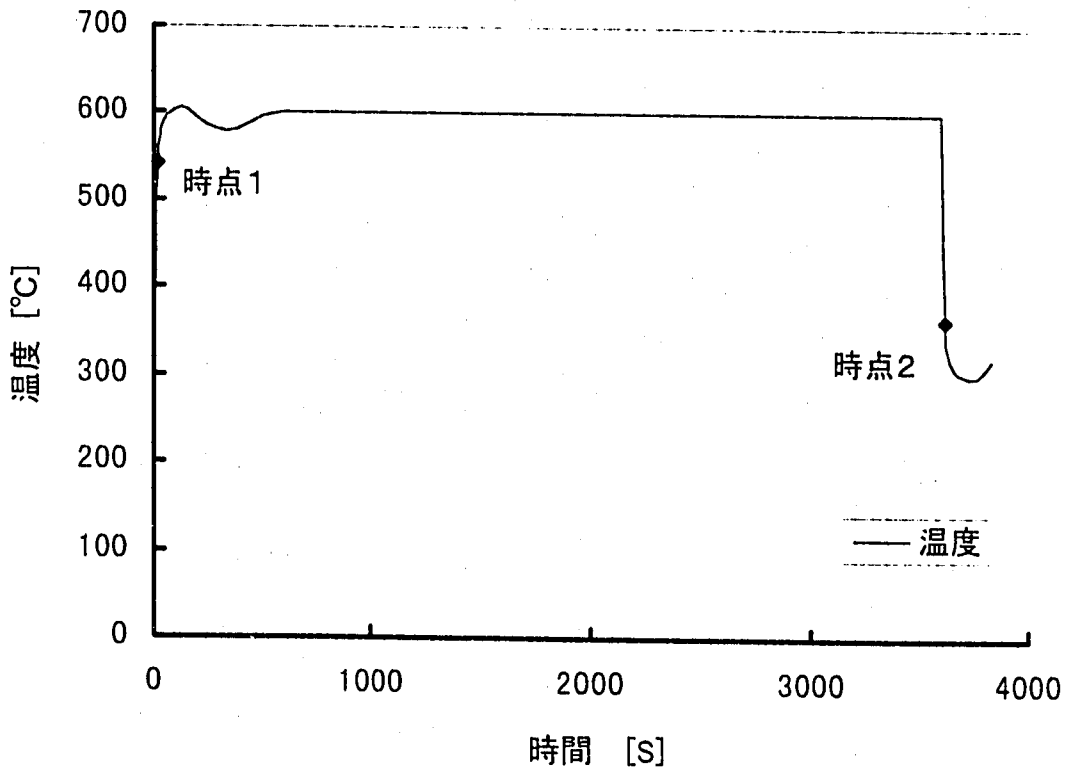


Fig. 3.12 Times for evaluation of maximum strain range (STF-3)

V1

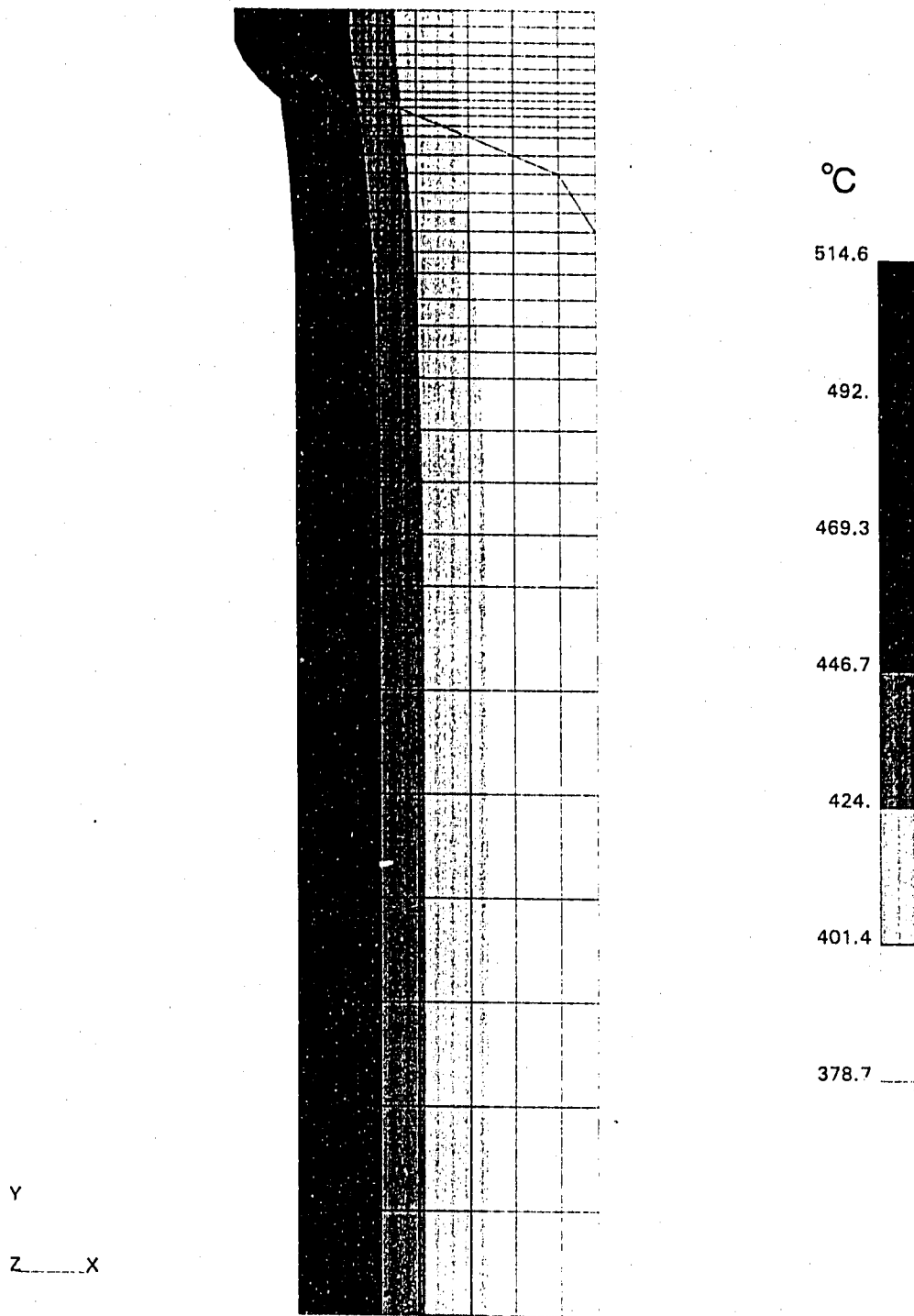


Fig. 3.13 Temperature contour at time 1 (STF-3)

V1

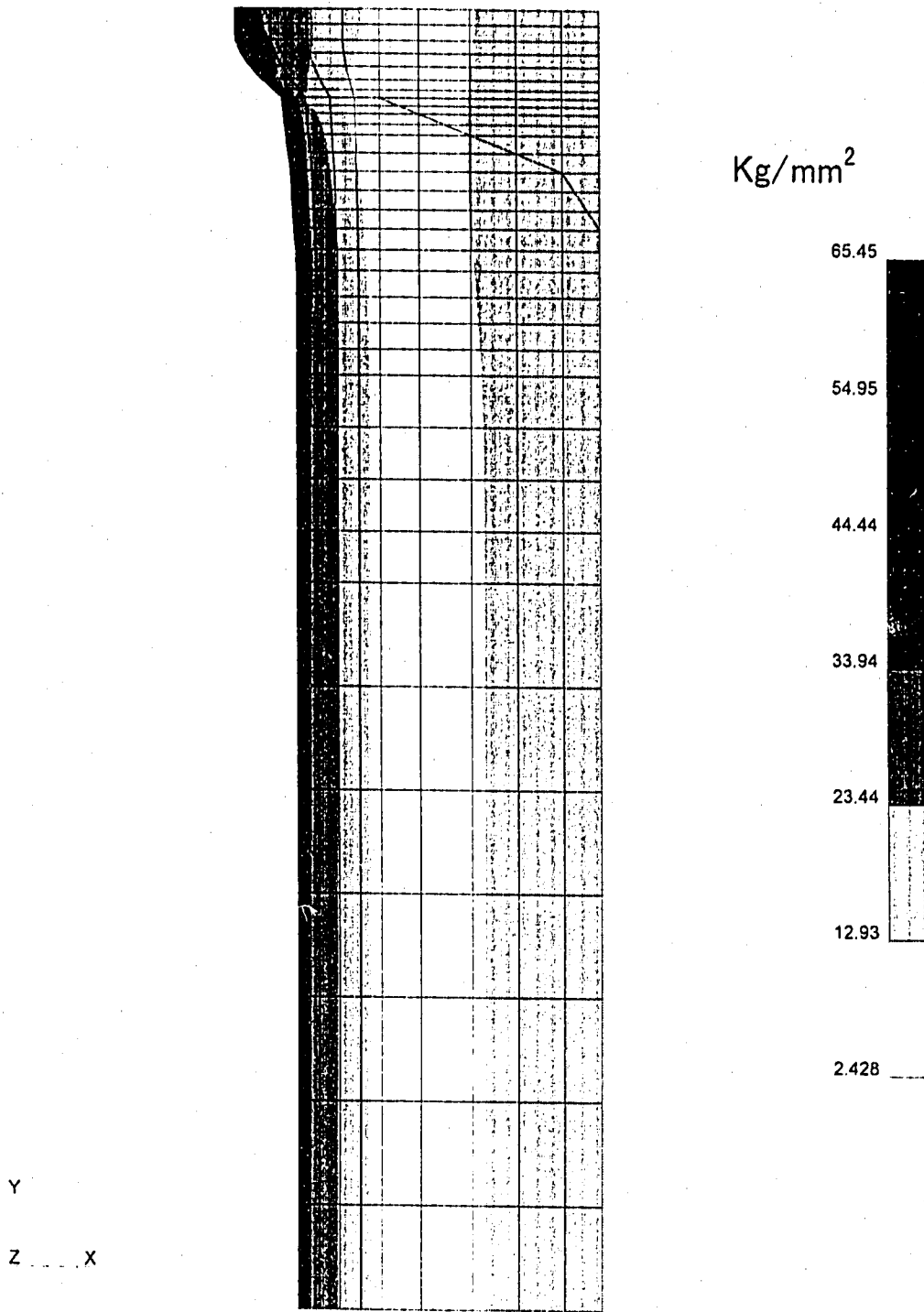


Fig. 3.14 Stress intensity contour at time 1 (STF-3)

V1

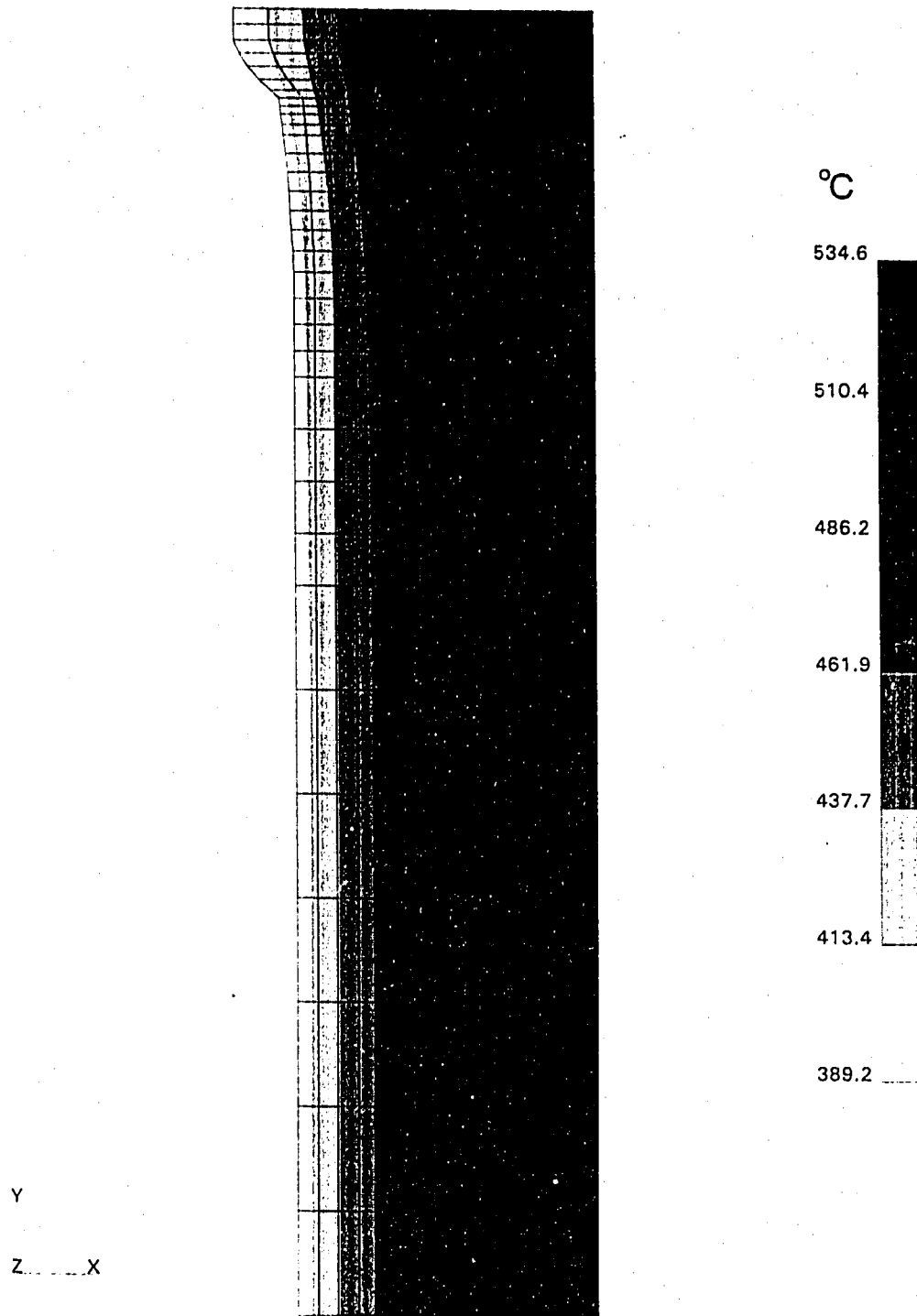


Fig. 3.15 Temperature contour at time 2 (STF-3)

V1

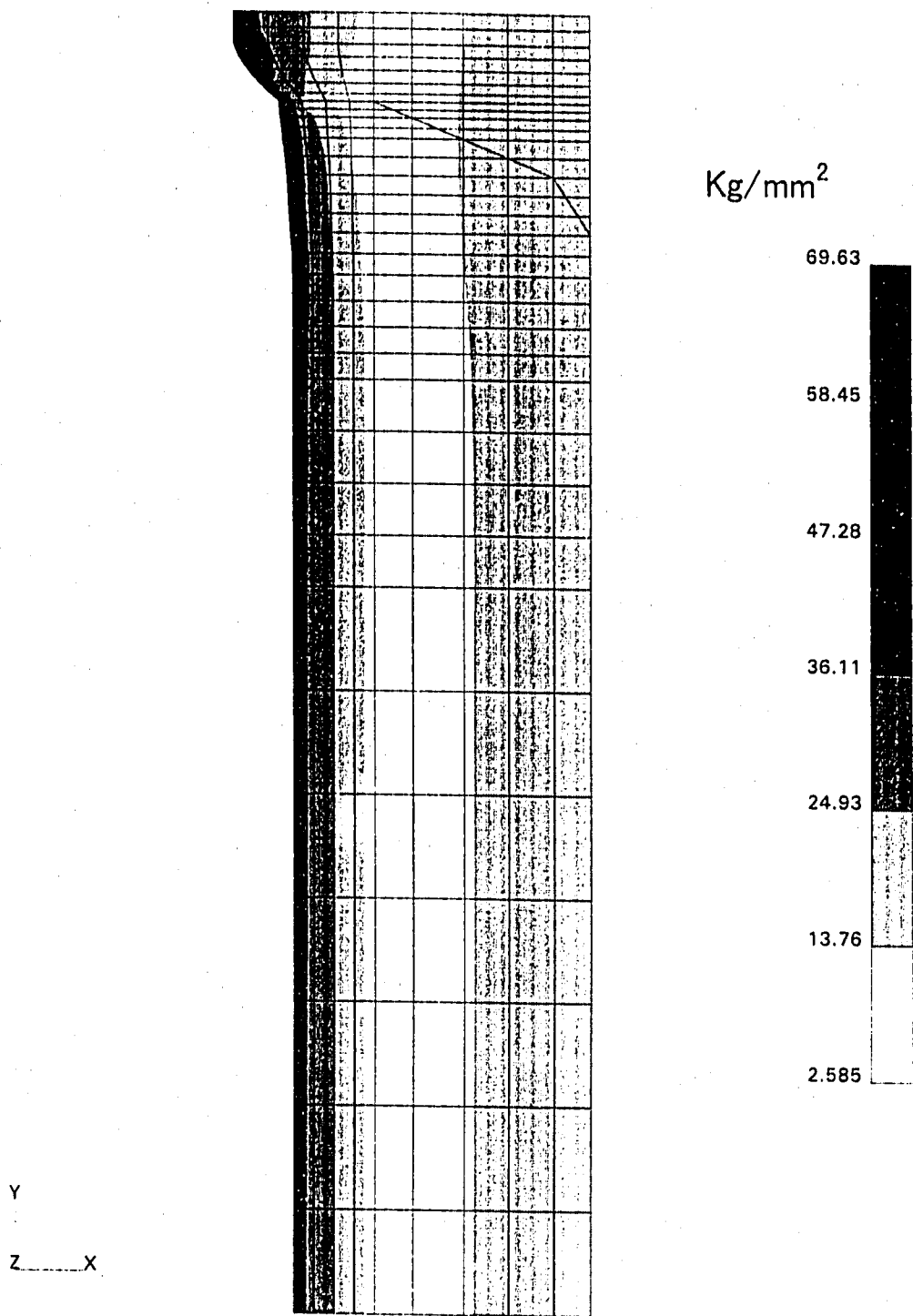


Fig. 3.16 Stress intensity contour at time 2 (STF-3)

また、Fig.3.9 に示した評価ラインに沿った全断面で、膜、曲げ、ピークの各応力に分類した。各応力強さ範囲を Fig.3.17 に示す。応力分類は、FINAS 後処理プログラム「RANGE」を使用した。

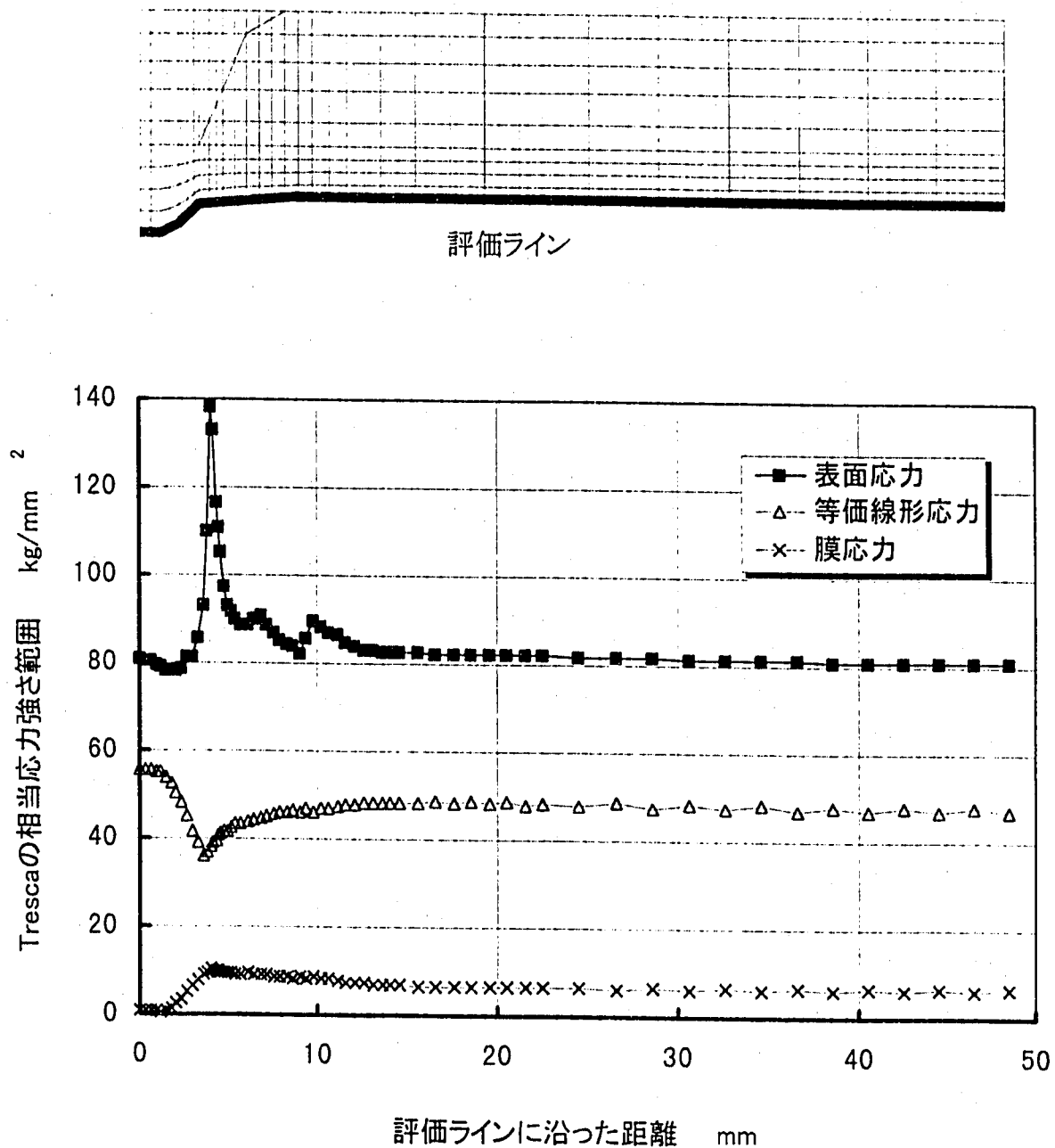


Fig. 3.17 Tresca stress range along an evaluated line (STF-3)

3.3.2 STF-10

Table3.1 の条件に基づき、Fig.3.8 の有限要素モデルを用い伝熱解析した結果を Fig.3.18 に、評価点を Fig.3.19 に示す。また、極値 2 時点の温度分布、応力分布を Fig3.20 ~23 に示す。極値 2 時点は、時点 1、経過時間 13 秒後、内面ナトリウム温度 509℃、外面ナトリウム温度 370℃、時点 2、経過時間 315 秒後、内面ナトリウム温度 403℃、

外面ナトリウム温度 543°Cであった。

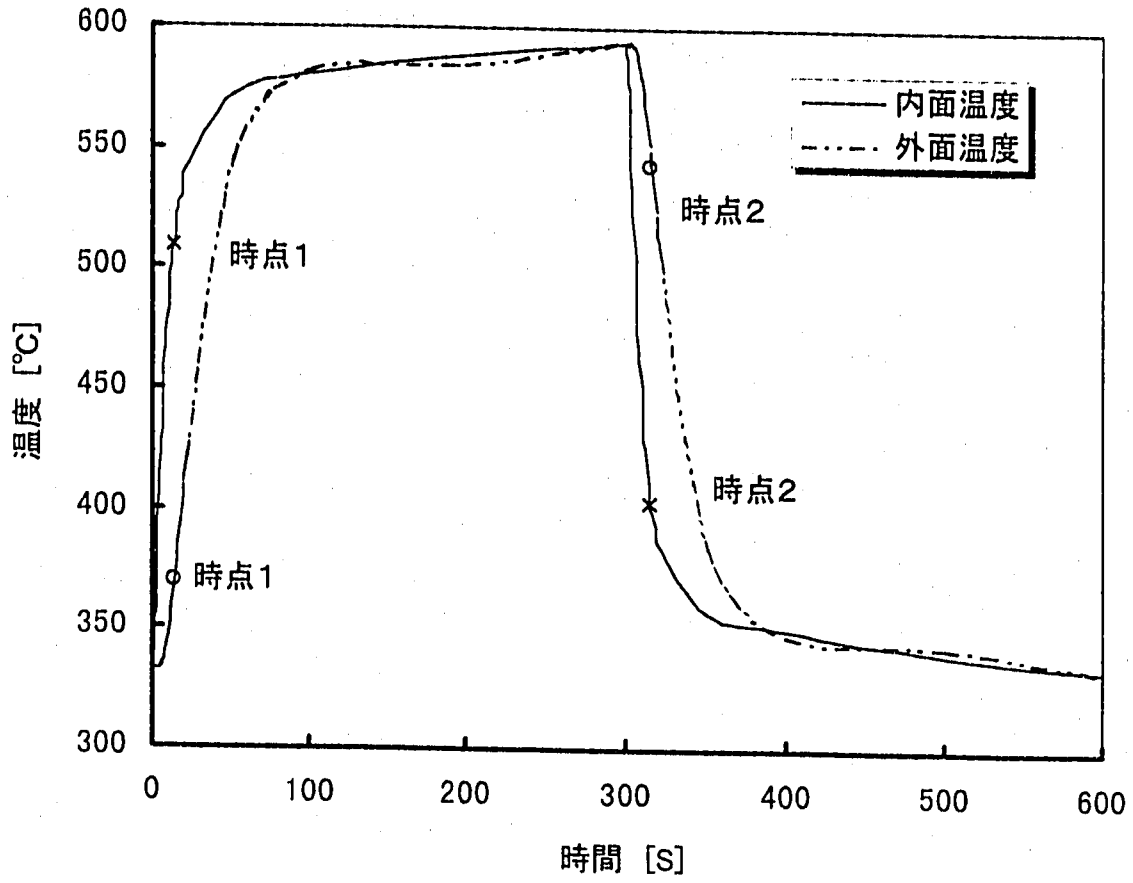


Fig. 3.18 Temperature history (STF-10)

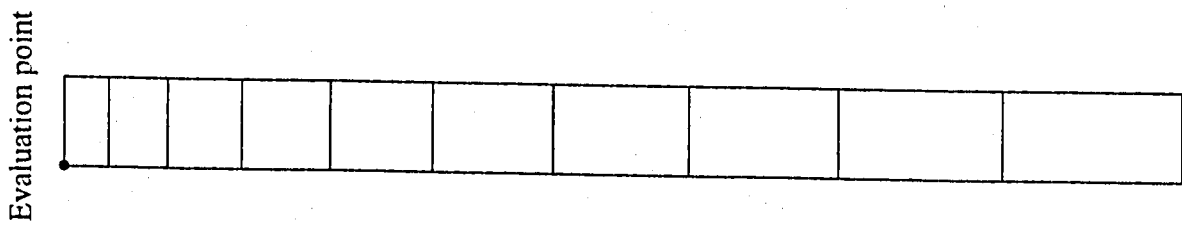


Fig. 3.19 Evaluation point of STF-10

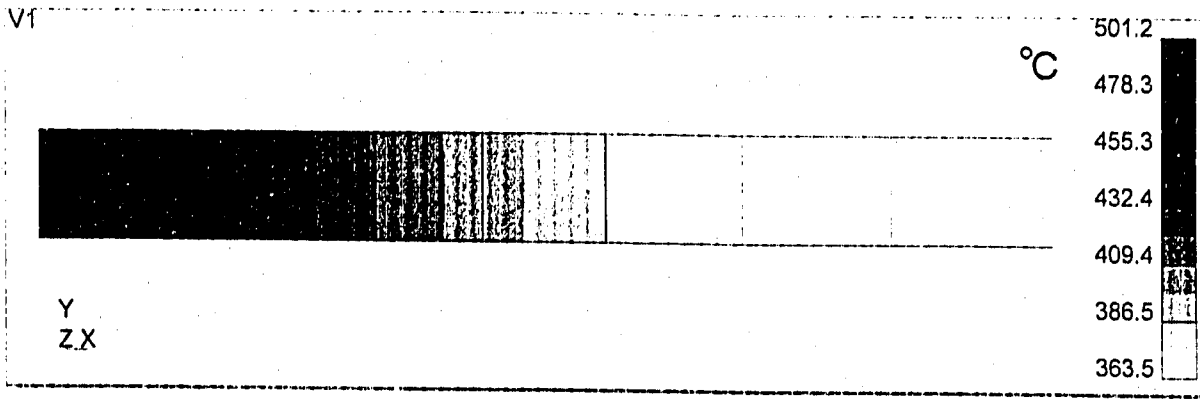


Fig. 3.20 Temperature contour at time 1 (STF-10)

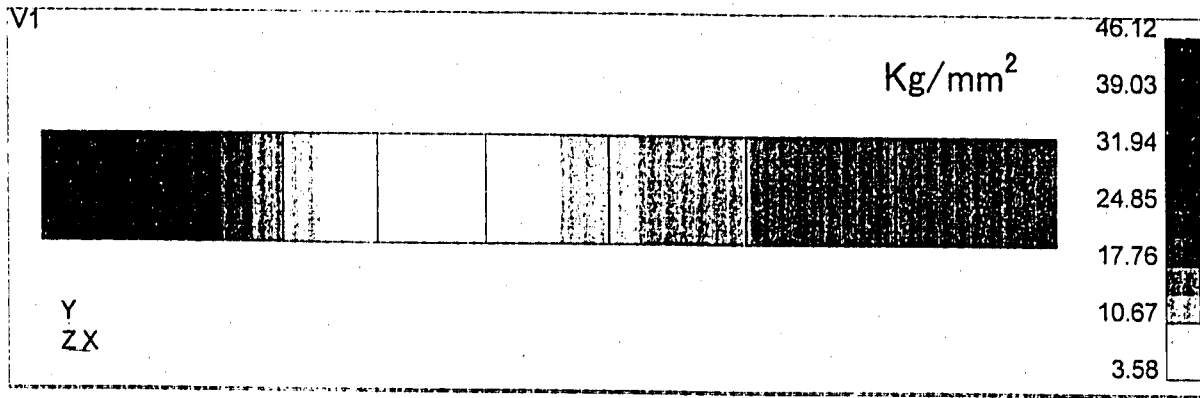


Fig. 3.21 Stress intensity contour at time 1 (STF-10)

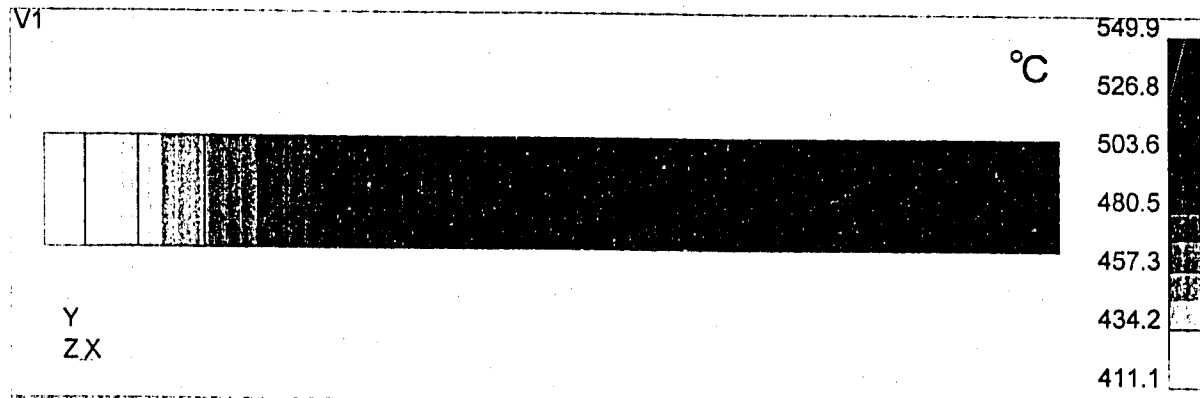


Fig. 3.22 Temperature contour at time 2 (STF-10)

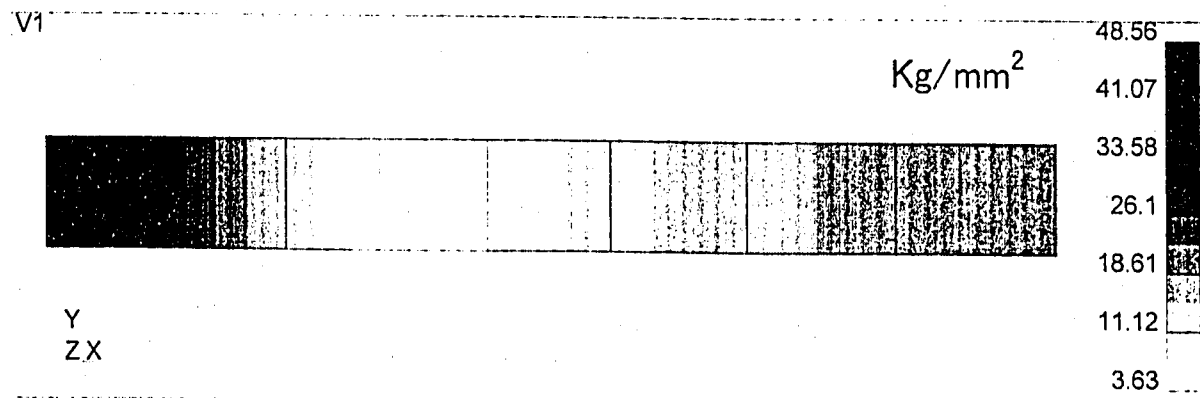


Fig. 3.23 Stress intensity contour at time 2 (STF-10)

また、評価点の各応力値（応力分類後の応力範囲）を Table3.5 に示す。

Table. 3.5 Equivalent stress range on an evaluation point (STF-10)

| 相当応力範囲 | | | | | |
|--------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| 表面応力 | | 等価線形応力 | | 膜応力 | |
| ミーゼス | トレスカ | ミーゼス | トレスカ | ミーゼス | トレスカ |
| Δ VMS | Δ TRES | Δ LVMS | Δ LTRES | Δ MVMS | Δ MTRES |
| 95.3 | 95.33 | 46.54 | 49.36 | 7.55 | 8.72 |
| 95.3 | 95.33 | 46.54 | 49.36 | 7.55 | 8.72 |

4. 熱過渡強度評価

各評価法による損傷値の算出には、構造物強度データベースシステム“STAR”の持つ機能を使用した。4)

4.1 熱過渡強度データベース

STARは強度評価法の開発および検証を支援するために、構材室で開発された熱過渡強度データベースシステムである。STARの特徴は、通常データ蓄積・検索機能に加えて強度評価法開発のための支援機能を有するところにある。STARに蓄積された構造解析結果は、複数の評価法により損傷計算を行うことができ、新しく開発した評価法を追加し、評価法間の相関を調べたり、試験結果（亀裂長さ）と解析結果（損傷値）を比較することができる。

4.2 強度評価結果

4.2.1 STF-3

STF-3の強度評価には、BDS-MDとEQEFを用いた。評価法の内容についてはFig.2.4、Fig.2.5に示した通りである。

FINASの弾性解析結果より得られたピーク応力範囲 S_p 、公称応力範囲 S_n をFig.4.1に示す。ただし、ここでいうピーク応力範囲は熱ピーク応力 S_f を除いたものである。

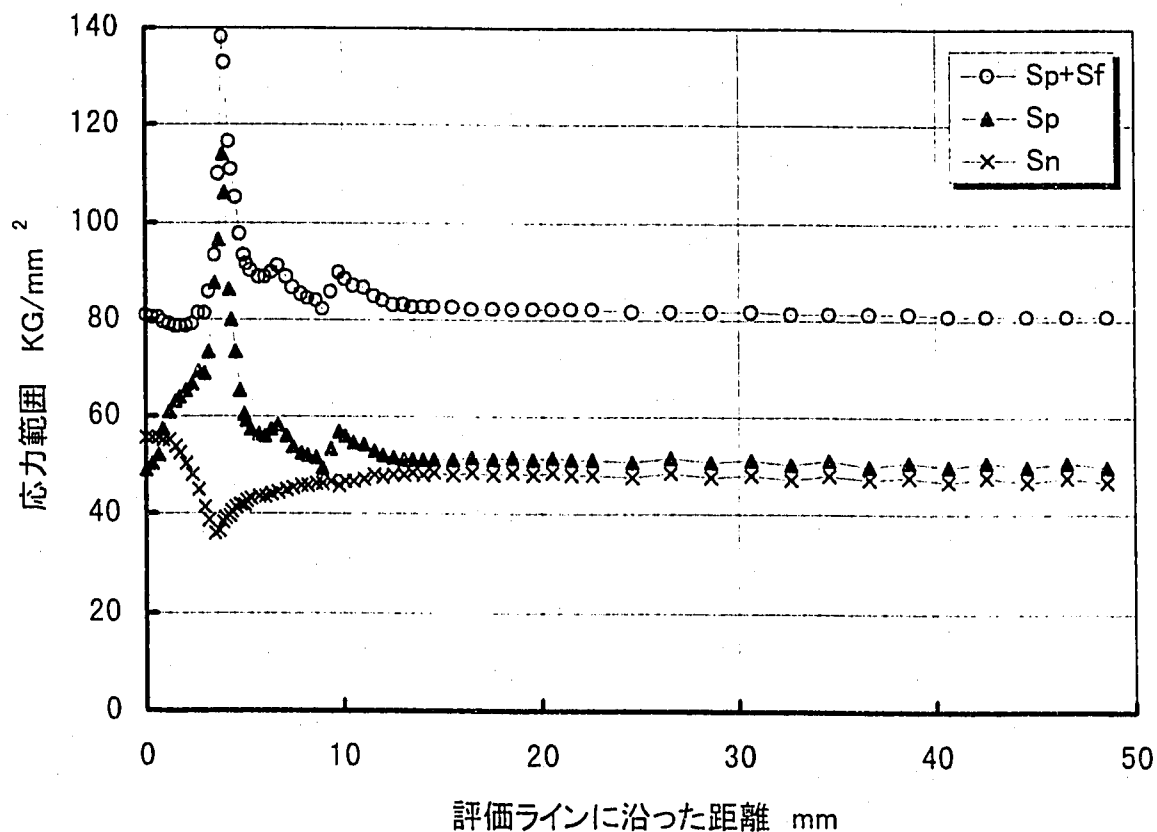


Fig.4.1 Stress range along an evaluation line

以下、各評価法ごとにひずみ集中係数 $K\varepsilon$ 、全ひずみ範囲 ε_t 、初期応力 S_i 、損傷値 D_c 、 D_f 、損傷和 (D_f, D_c) を示す。EQEF のひずみ集中係数は、BDS-MD のひずみ集中係数との比較のため STAR の中で用いられている応力集中係数： $K^* [= (S_p+S_f) / S_n]$ ではなく、BDS-MD で用いている応力集中係数： $K [= S_p/S_n]$ を使用している。

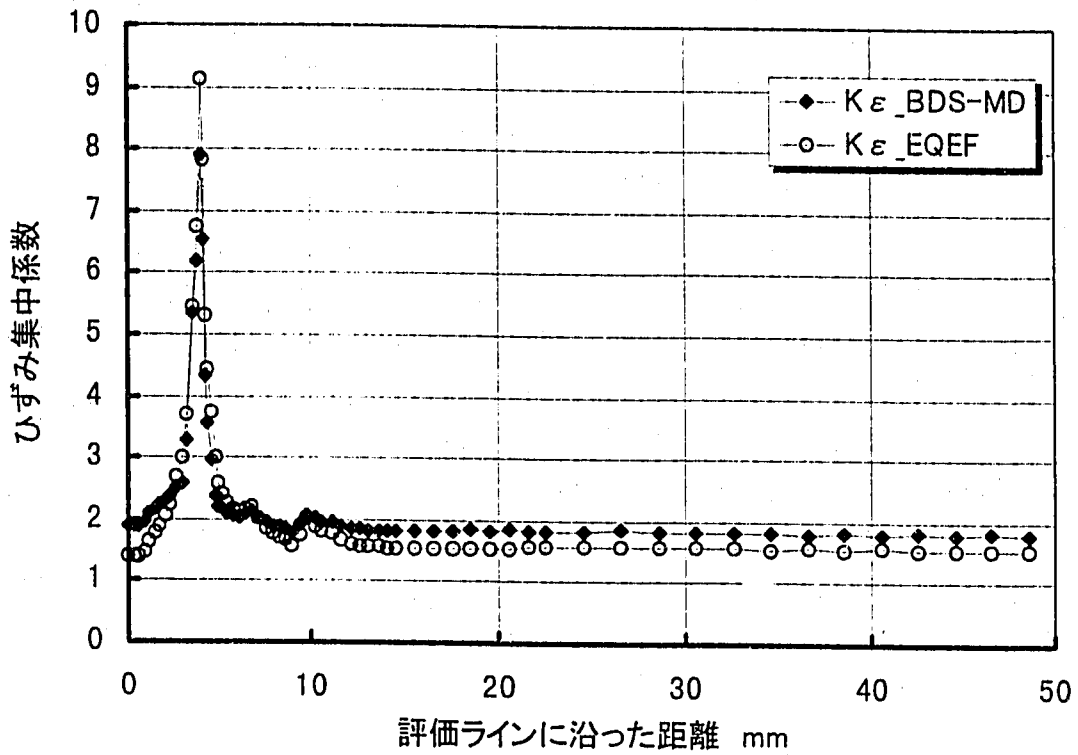


Fig.4.2 Strain concentration factor along an evaluation line

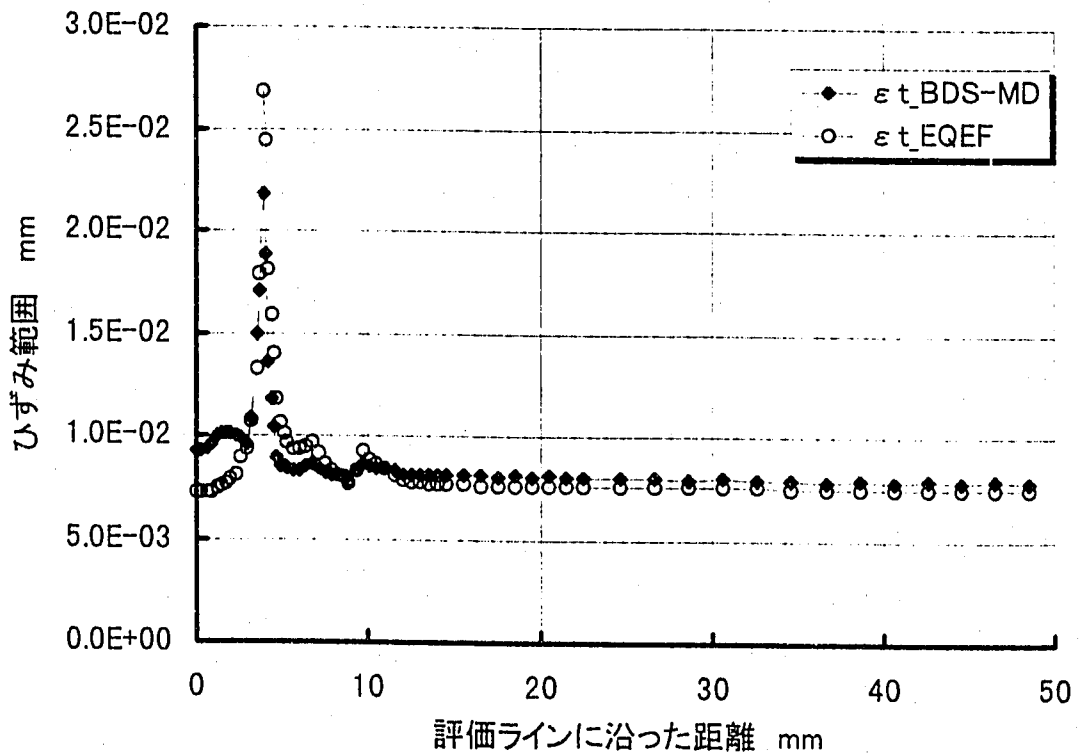


Fig.4.3 Strain range along an evaluation line

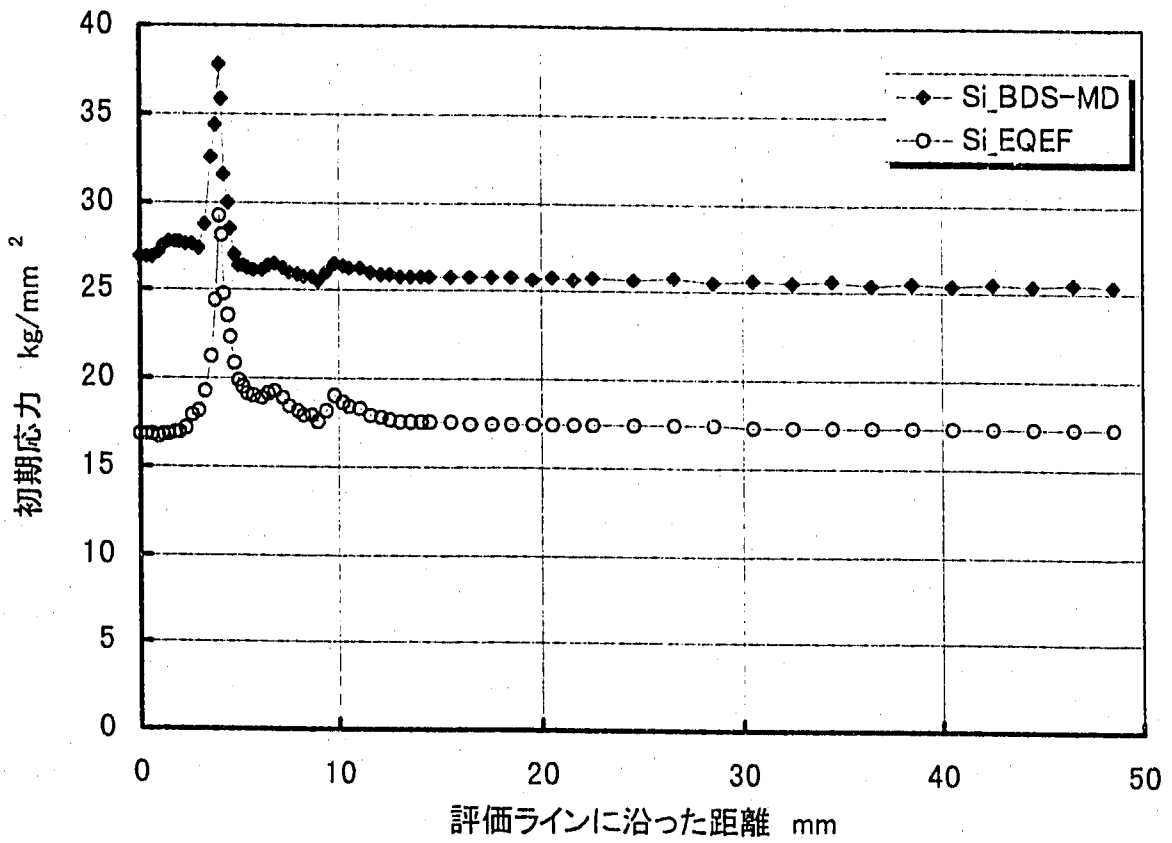


Fig.4.4 Initial stress along an evaluation line

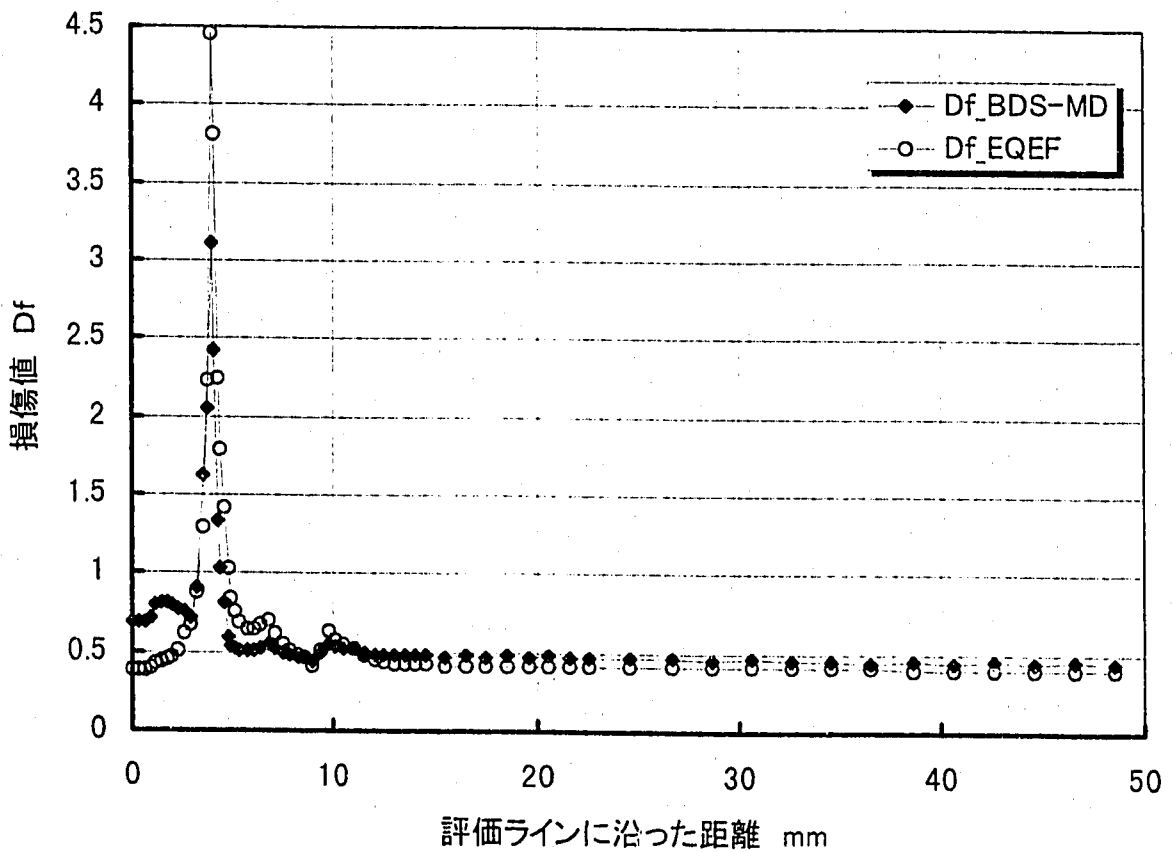


Fig.4.5 Fatigue damage along an evaluation line

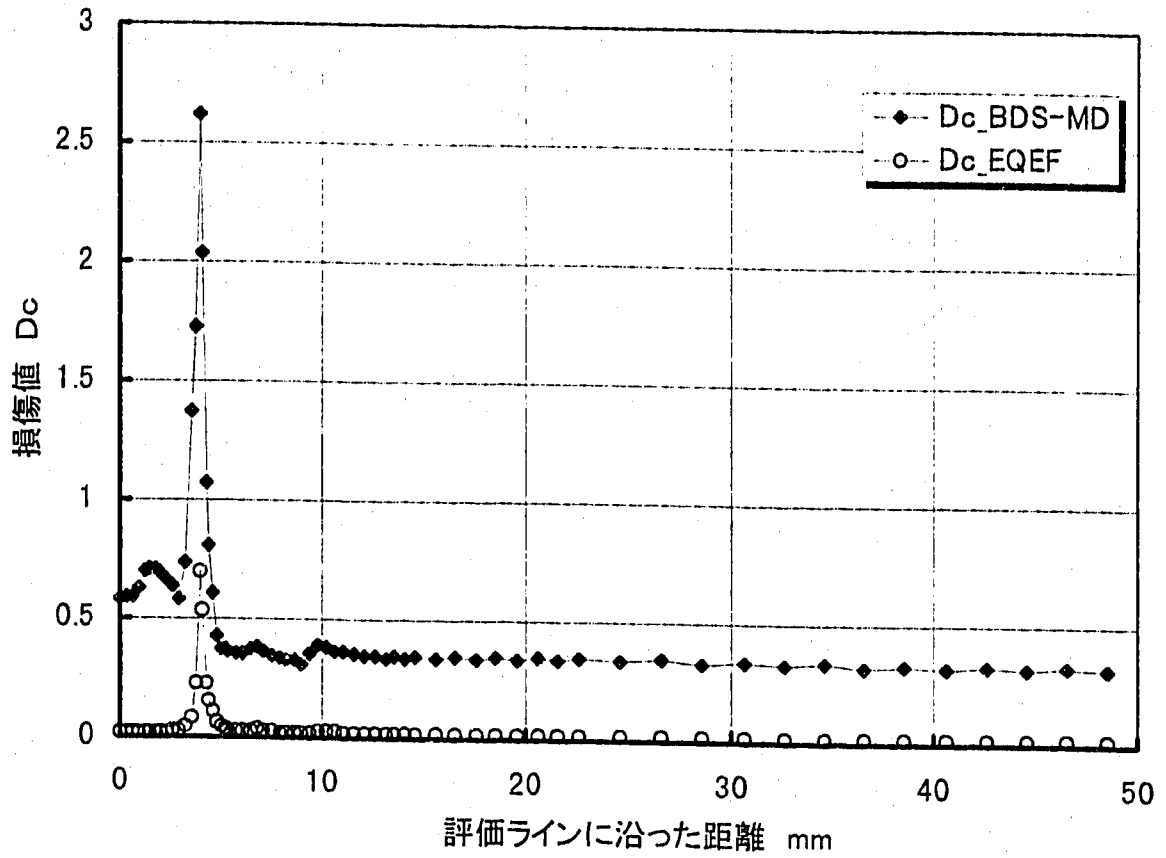


Fig.4.6 Creep damage along an evaluation line

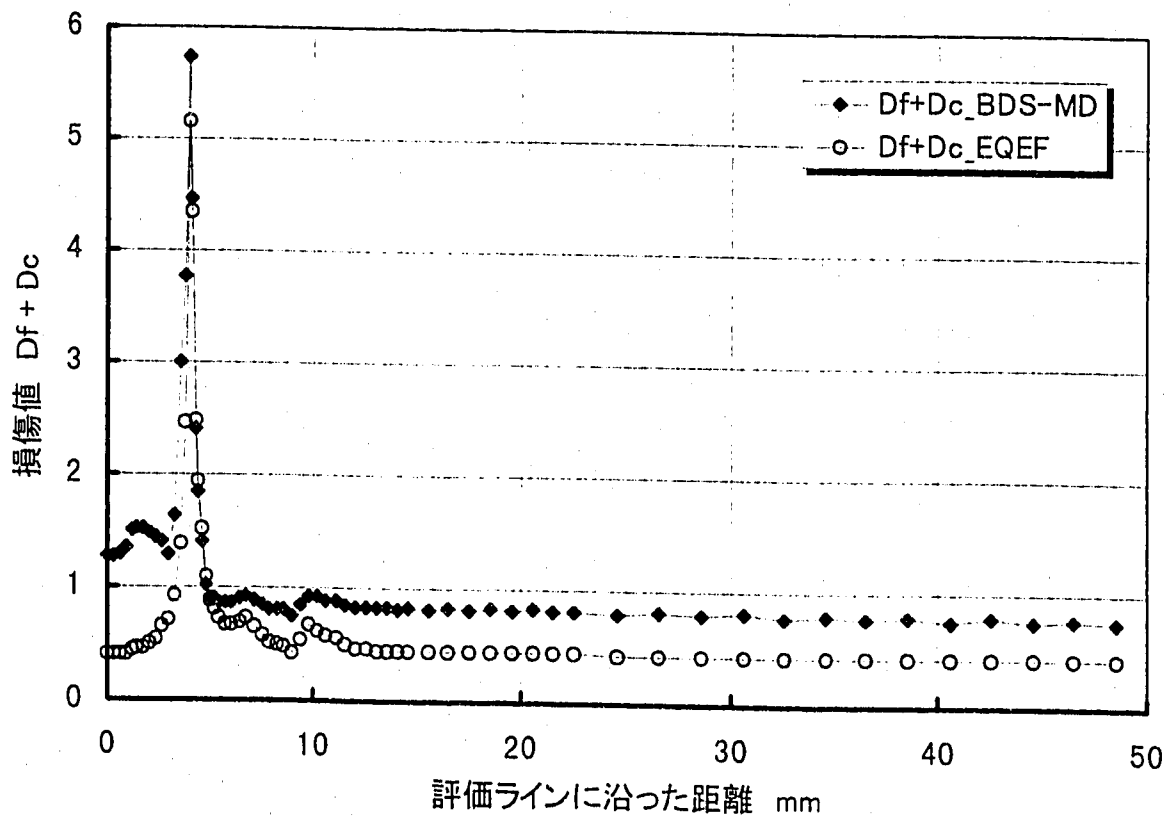


Fig.4.7 Creep-fatigue damage along an evaluation line

得られた損傷値を線形累積損傷則 (Liner damage summation rule) により制限値Dと比較すると Fig.4.8、Fig.4.9 の様になる。Fig.4.9 はき裂発生による応力解放の影響を考慮して、き裂発生点近傍のデータ (き裂発生点からき裂長さの範囲内にあるデータ) を削除したものである。き裂は、最大損傷値の点で発生し 1.05mm であった。STF-3 の構造不連続部は溶接部であるので母材よりも強度が落ちているが、母材と溶接部の区別はしていない。

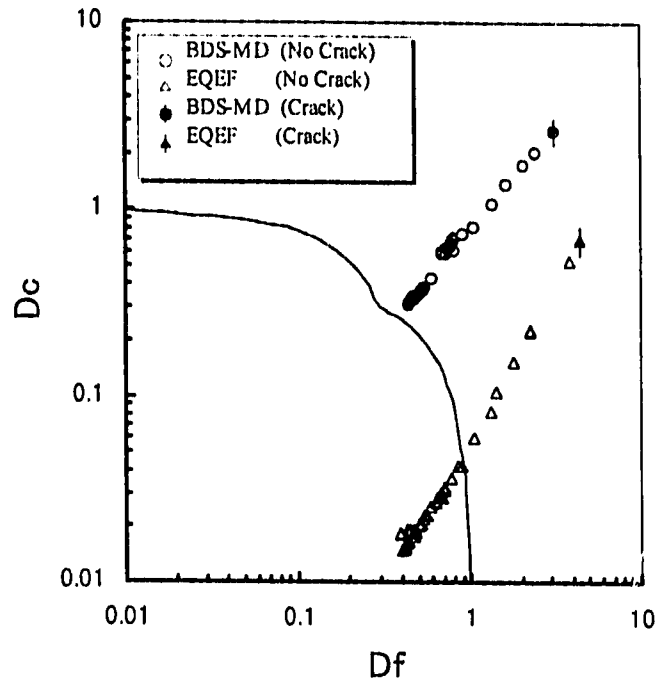


Fig.4.8 Distribution of creep-fatigue damage (total data)

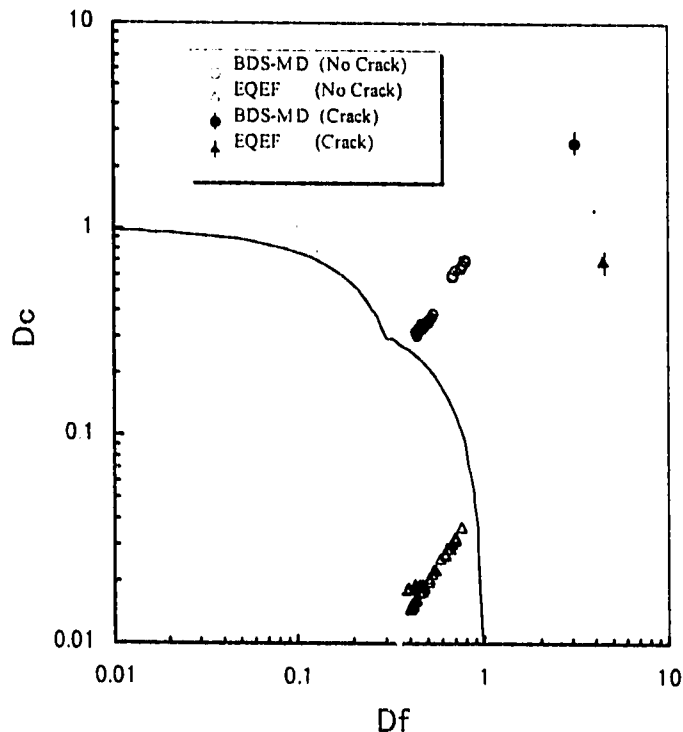


Fig.4.9 Distribution of creep-fatigue damage

4.2.2 STF-10

STF-10 については、形状不連続部がないため全内表面が同一の損傷になるため評価結果を表で示す (Table4.1, Table4.2)。STF-10 は形状不連続部のない円管なので q_L を 1.67 ($q_L = K^{3/4} \cdot q_v^* = 1^{3/4} \cdot 5/3 = 1.67$) として固定している評価法 EQEF167 を使用した。Fig.2.5、Fig.2.6 で示したように、 q_L の導出方法以外は EQEF と同じフローである。STF-3 および 10 の損傷値をまとめると Fig.4.10 の様になる。

Table4.1 Strength analysis results of BDS-MD

| | | |
|-----------|----------|----------|
| 相当応力範囲トレス | 表面応力 | 55.64 |
| | 等価線形応力 | 49.36 |
| 歪集中係数 | 応力集中係数 | 1.13 |
| | 弾性追従係数 | 3.00 |
| | Ke'係数 | 1.78 |
| | NEUBER 則 | 1.25 |
| | 歪集中係数 | 2.00 |
| 熱ピーク歪 | | 3.25E-03 |
| 全歪範囲 | | 9.73E-03 |
| 初期応力 | | 24.65 |
| 弾性追従係数 | | 3.00 |
| 損傷値 | D f | 9.6 |
| | D c | 5.1 |
| | D | 14.7 |

Table4.2 Strength analysis results of EQEF167

| | | |
|-----------|---------|----------|
| 相当応力範囲トスカ | 表面応力 | 55.64 |
| | 等価線形応力 | 49.36 |
| 総体的弾性追従係数 | | 1.00 |
| 局所的弾性追従係数 | | 1.67 |
| 歪集中係数 | 応力集中係数 | 1.13 |
| | Ke'L 係数 | 1.46 |
| | 歪集中係数 | 2.82 |
| 熱ピーク歪 | | 2.40E-03 |
| 全歪範囲 | | 9.11E-03 |
| 初期応力 | | 17.67 |
| 弾性追従係数 | | 1.67 |
| 損傷値 | D f | 8.4 |
| | D c | 0.47 |
| | D | 8.9 |

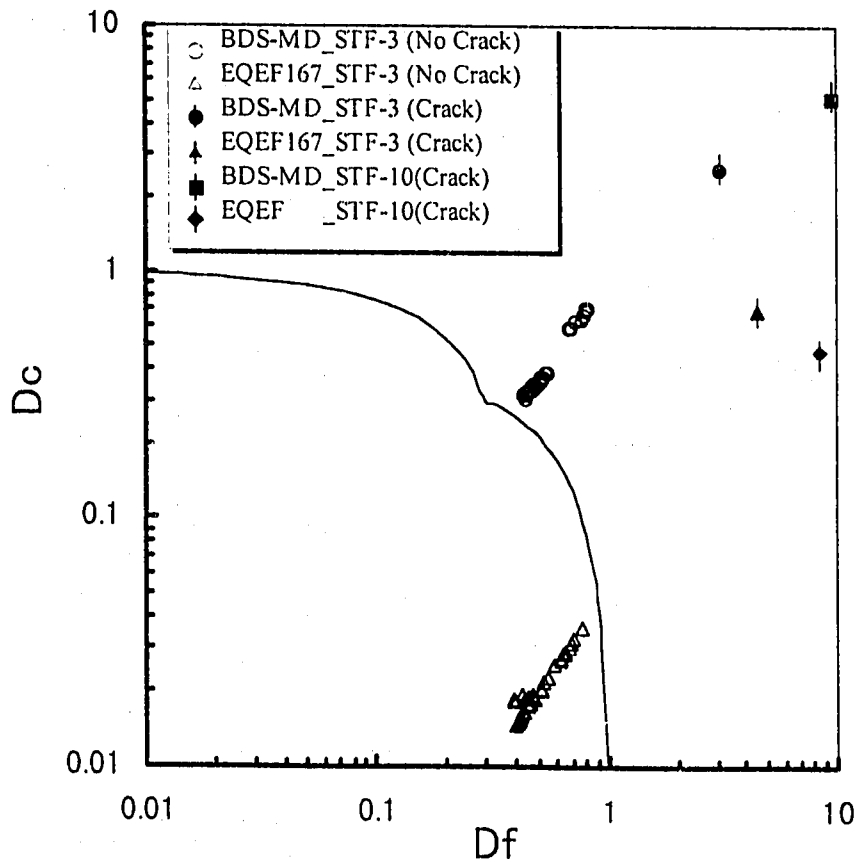


Fig.4.10 Distribution of creep-fatigue damage

5. 考察

5.1 高度化手法の評価精度について

1. ひずみ集中係数の比較

BDS-MD では、弾性追従係数 q を 3.0 として導出したひずみ集中係数とノイバー則に基づくひずみ集中係数の最大値を評価法におけるひずみ集中係数として使用している。その結果 STF-3 の局所的構造不連続部では、ノイバー則に基づく係数の方が弾性追従係数から導いた係数より高くなり、STF-10 では、構造不連続部がないため弾性追従係数に基づく係数の方が高くなっている。

一方、EQEF においては、STF-3 では総体的弾性追従係数 $q_n = 1.0$, 局所的弾性追従係数 $q_L = \min(K^{3/4} q_v, K^{3/4} q_v^*)$ を使用しており、局所的構造不連続部では $K^{3/4} q_v$ が、平滑部近傍では $K^{3/4} q_v^*$ がより低くなっている。STF-10 では $q_n = 1.0$, $q_L = 1.67$ を用いた一般化弾性追従モデルに基づき、ひずみ集中係数を導出している。 $(K^* = (Sp + Sf) / Sn, K = Sf / Sn, q_v = 2(1 - \nu), q_v^* = 5/3)$ である。 q_v は、ポアソン比効果によるひずみ集中を考慮した弾性追従係数であり、 q_v^* は、厚さ方向非線型温度勾配を考慮したひずみ集中係数 (q_v を包含) である。2)

Fig.4.2 に示すように STF-3 のひずみ集中係数においては、EQEF の方が BDS-MD より、平滑部で約 10%強低減している。ただし、構造不連続部では、約 15%上昇している。STF-10 では、Table 4.1、4.2 よりひずみ集中係数を試算すると、BDS-MD 2.00、EQEF 1.65 (比較のため熱ピークひずみ相当分を除外するため、 $K\varepsilon = K \cdot K_{cl} \cdot K_{CG}$ を用いる。) であり、EQEF の方が 17.5%低減している。

2. ひずみ範囲

BDS-MD が、熱ひずみ集中係数 $K\gamma$ を 1.0 として導出しているのに対し、EQEF では、ひずみ集中係数自体に、熱ピークひずみ分を考慮した係数を使用して、熱ピークひずみに対するひずみ集中を考慮している。そのため、平滑部における EQEF のひずみ範囲の低減割合は、ひずみ集中係数と比べて小さくなっている。

Fig.4.3 に示すように STF-3 の構造不連続部では、EQEF の方が BDS-MD より 30%程度高いひずみ範囲を示しているが、これは EQEF の局所的弾性追従係数 q_L が、この部位で 3 を超えることによっている。BDS-MD では、 $q = 3$ で一律評価しているため、EQEF の評価値の方が高くなっている。切り欠きのような弾性応力集中が大きい部位では、弾性追従係数が 3.0 より大きくなる場合もあり得る。この点に関しては、今後非弾性解析で確認しておく必要がある。

3. 初期応力 (Fig.4.4)

クリープ損傷評価に用いる初期応力は、EQEF の方が中間保持を考慮している分低く、BDS-MD の 70%程度の値となっている。

4. 1～4までの結果、疲労損傷 D_f は、構造不連続部で EQEF の方が高く (MAX_Df EQEF = 4.5, MAX_Df BDS-MD = 3.1) 平滑部では、若干低い
クリープ損傷 D_c は、中間保持の効果により、EQEF の方が大幅に低くなっている。(Fig.4.5、Fig.4.6、Fig.4.7)
5. 各評価法による損傷値とき裂の相関 (Fig.4.10) から、BDS-MD では D_c が高く、き裂の確認されていない点でも制限値 D を超えているが、EQEF では、制限値内に収まっており EQEF がより試験結果に近い値を示しているといえる。

5.2 評価手法の改良提案

1. EQEF における、総体的弾性追従係数 q_n の検討。妥当性のある q_n の検討、構造の違いによる q_n の違い。
2. EQEF において、局所的弾性追従係数 q_L が 3 を超えることの妥当性の検討。
3. 高温保持中の保持応力の定量的検討。(現在、中間保持により時点 1 と時点 2 の 2 サイクルのうち保持応力の高い方を使用し、実現象の残留応力を保守的に評価。)
4. 応力緩和における弾性追従係数 q_{EFF} の検討。(現在、 $q_{EFF} = q_G \cdot q_L$ で評価。)
5. 熱ピークひずみの考慮方法の検討。(BDS-MD で $K_\gamma \cdot \epsilon_f$, EQEF で $K_\epsilon = (S_p + S_f) / S_n \cdot K'_{eL} \cdot K'_{eG}$ 評価。)

6. 結論

熱過渡強度評価における非線形挙動を一般化弾性追従モデルを用いて評価した。総体的挙動、局所的挙動、高温保持中の応力緩和これらすべてを弾性追従モデルを用い正確に挙動の評価を行った結果として、円筒構造に対しては、 D_f 、 D_c 共に EQEF が BDS-MD よりも低い損傷値を示した。特に高温保持中の初期応力を正確に評価することによる D_c の低下は顕著なものであった。

EQEF は、BDS-MD と比較して D_f 、 D_c 共により合理的な損傷値を示し、そのため、設計成立範囲の拡大の見通しを得ることができた。今後、以下の方法で合理性を詳細に確認する予定である。

1. 総体的な弾性追従を伴う構造等、未整理のデータの拡充
2. 詳細な弾塑性解析との比較による、弾性追従係数に含まれる裕度の検討（一般化弾性追従モデルでの適切な弾性追従係数の検討、および、高温保持中の初期応力の確認）

謝 辞

本研究を実施するに当たり、構造材料技術開発室の山下担当役より研究内容に関する多くの指導、助言、議論をして頂きました。ここに深く謝意を表します。

また、構造解析、強度評価の実施に当たりましては、(株)常陽産業の石川氏、細貝氏に多大な御協力をして頂きました。厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) 永田 敬 他, '高速炉用高温構造設計基準に関する研究開発' 動燃技報 No.65, (1988) 39-71
- 2) Kunihiro IIDA et al., SIMPLIFIED ANALYSIS AND DESIGN FOR ELEVATED TEMPERATURE COMPONENTS OF MONJU, Nucl.Eng.Des.98, (1987) 305-317
- 3) Naoto Kasahara et al., Advanced creep-fatigue evaluation rule for fast breeder reactor components : generalization of elastic follow-up model, Nucl.Eng.Des.155, (1995) 499-518
- 4) Naoto Kasahara et al., Database System of Structural Strength Tests to Validate Design Methods of FBR Components, Int.Symp.SMIRT, (1991)