

# 熱過渡応力スクリーニング法の開発

— Green関数法の応用 —

( 研究報告 )

2004年1月

核燃料サイクル開発機構

大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：[jserv@jnc.go.jp](mailto:jserv@jnc.go.jp)

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)

2004

## 熱過渡応力スクリーニング法の開発

### —Green 関数法の応用—

(研 究 報 告)

古橋 一郎<sup>1)</sup>、柴本 宏<sup>2)</sup>、笠原直人<sup>2)</sup>

### 要 旨

FBR 構造設計における熱過渡応力スクリーニング法の開発を目的に以下の研究を実施した。

- ・ 热伝達係数一定条件下の線形熱応力問題に適用されてきた Green 関数(以下 G 関数と略記)を、熱伝達係数が変化する非線形熱応力問題に適用するための近似非線形評価式を提案した。
- ・ IHX のスカート構造および管板構造の過渡熱応力詳細解析を実施した。
- ・ 従来の上限線形解析(上限熱伝達係数を使用した線形熱応力解析)を実施し上限 G 関数を求めた。
- ・ 平均的な熱伝達係数を使用した中間線形解析および下限熱伝達係数を使用した下限線形解析を実施し、中間 G 関数および下限 G 関数を求めた。
- ・ 上限 G 関数を用いて従来手法による簡易評価を行った。
- ・ 上限 G 関数、中間 G 関数および下限 G 関数を用いて提案手法による評価を行った。

これらにより以下のような結果が得られた。

- ・ スカート構造のように單一流体の熱過渡により熱応力が生じるケースでは従来手法による評価が安全側であり有効であることが確認された。ただし過大評価となる場合が多いことが確認された。
- ・ 管板構造のように複雑な構造形状で複数流体の熱過渡により応力が生じるケースでも従来手法は概ね安全側であり有効であることが確認された。
- ・ ただし複雑な構造形状で複数流体系の場合は、熱伝達係数を大きくすると長時間側の熱応力が小さくなり、従来手法が安全側とならない部位があり得ることが確認された。
- ・ 提案手法は詳細解析をよく近似できることが確認された。

これらの結果を踏まえ、従来手法と提案手法を調和させた「熱過渡応力スクリーニング法」の試案を作成した。

---

1) (株) CRC ソリューションズ

2) 大洗工学センター 要素技術開発部 構造信頼性研究グループ

Development of thermal stress screening method  
—Application of Green function method—

(Research Document)

Ichiro FURUHASHI<sup>1)</sup>, Hiroshi SHIBAMOTO<sup>2)</sup> and Naoto KASAHARA<sup>2)</sup>

ABSTRACT

This work was achieved for the development of the screening method of thermal transient stresses in FBR components.

We proposed an approximation method for evaluations of thermal stress under variable heat transfer coefficients (non-linear problems) using the Green functions of thermal stresses with constant heat transfer coefficients (linear problems). Detailed thermal stress analyses provided Green functions for a skirt structure and a tube-sheet of Intermediate Heat Exchanger. The upper bound Green functions were obtained by the analyses using those upper bound heat transfer coefficients. The medium and the lower bound Green functions were got by the analyses of those under medium and the lower bound heat transfer coefficients. Conventional evaluations utilized the upper bound Green functions. On the other hand, we proposed a new evaluation method by using the upper bound, medium and the lower bound Green functions. The comparison of above results gave the results as follows. The conventional evaluations were conservative and appropriate for the cases under one fluid thermal transient structure such as the skirt.

The conventional evaluations were generally conservative for the complicated structures under two or more fluids thermal transients such as the tube-sheet. But the danger locations could exists for the complicated structures under two or more fluids transients, namely the conventional evaluations were non-conservative. The proposed evaluations gave good estimations for these complicated structures. Though above results, we have made the basic documents of the screening method of thermal transient stresses using the conventional method and the new method.

---

1) CRC Solutions Co, Ltd.

2) Structural Research Group, Advanced Technology Division, OEC, JNC

## 目 次

## 要旨

1. はじめに .....	1
2. 線形熱伝導および線形熱応力 .....	2
2. 1 線形熱伝導および線形熱伝達における温度の Green 関数 .....	2
2. 2 線形弾性体および線形境界条件における熱応力の Green 関数 .....	3
2. 3 热伝達係数が時間変化する非線形熱応力の近似計算法 .....	4
3. 適用性検討解析 .....	7
3. 1 IHX のモデル化 .....	7
3. 1. 1 スカート構造の熱過渡モデル .....	7
3. 1. 2 管板構造の熱過渡モデル .....	7
3. 1. 3 FEM 数値解析モデル .....	9
3. 2 IHX スカート構造の熱過渡応力解析 .....	1 5
3. 2. 1 IHX スカート構造の Green 関数 .....	1 5
3. 2. 2 IHX スカート構造の手動トリップ事象解析 .....	1 9
3. 2. 3 IHX スカート構造の一次ポンプ軸固着事象解析 .....	2 0
3. 3 IHX 管板構造の熱過渡応力解析 .....	4 9
3. 3. 1 IHX 管板構造の Green 関数 .....	4 9
3. 3. 2 IHX 管板構造の手動トリップ事象解析 .....	5 5
3. 3. 3 IHX 管板構造の一次ポンプ軸固着事象解析 .....	5 6
4. 系統熱過渡荷重のスクリーニング法の試案 .....	1 0 1
4. 1 スクリーニングの基本方針 .....	1 0 2
4. 2 スクリーニング法 .....	1 0 3
4. 2. 1 上限線形解析 .....	1 0 4
4. 2. 2 中間線形解析および下限線形解析 .....	1 0 6
4. 2. 3 設計パラメータ感度評価 .....	1 0 8
5. まとめ .....	1 1 0
参考文献 .....	1 1 1

## 表リスト

- Table.3.1-1 手動トリップ事象による熱伝達係数の変化  
Table.3.1-2 一次ポンプ軸固定着事象による熱伝達係数の変化  
Table.3.2-1 スカート構造の評価断面の熱応力特性  
Table.3.3-1 管板構造の評価断面の熱応力特性 (一次系温度変化 100°C)  
Table.3.3-2 管板構造の評価断面の熱応力特性 (二次系温度変化 100°C)

## 図リスト

- Fig.3.1-1 IHX の全体構造  
Fig.3.1-2 IHX スカート構造の熱過渡モデル  
Fig.3.1-3 IHX 管板構造の熱過渡モデル  
Fig.3.1-4 手動トリップ事象によるナトリウム温度の時間変化  
Fig.3.1-5 手動トリップ事象による熱伝達係数の時間変化  
Fig.3.1-6 一次ポンプ軸固定着事象によるナトリウム温度の時間変化  
Fig.3.1-7 一次ポンプ軸固定着事象による熱伝達係数の時間変化  
Fig.3.2-1(1)、(2)  $h_{max}$  による温度コンター  
Fig.3.2-2(1)、(2)  $h_{max}$  による等価応力コンター  
Fig.3.2-3 IHX スカート構造の評価断面  
Fig.3.2-4(1)～(7) IHX スカート構造評価断面 L1～L7 の Green 関数  
Fig.3.2-5(1)～(7) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面  
L1～L7 の応力  
Fig.3.2-6(1)～(7) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面  
L1～L7 の応力成分  
Fig.3.2-7(1)～(7) 一次ポンプ軸固定着による IHX スカート構造評価断面  
L1～L7 の応力  
Fig.3.3-1(1)、(2)  $h_{max}$  による温度コンター ( $F_1=100$ )  
Fig.3.3-2(1)、(2)  $h_{max}$  による温度コンター ( $F_2=100$ )  
Fig.3.3-3(1)、(2)  $h_{max}$  による等価応力コンター ( $F_1=100$ )  
Fig.3.3-4(1)、(2)  $h_{max}$  による等価応力コンター ( $F_2=100$ )  
Fig.3.3-5 IHX 管板構造の評価断面  
Fig.3.3-6(1)～(8) IHX 管板構造評価断面 L1～L7、L9  
の Green 関数 ( $F_1=100$ )

- Fig.3.3-7(1)～(8) IHX 管板構造評価断面 L1～L6、L8、L10  
の Green 関数 (F2=100)
- Fig.3.3-8(1)～(10) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面  
L1～L10 の応力
- Fig.3.3-9(1)～(4) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面  
L1～L4 の応力成分
- Fig.3.3-10(1)～(10) 一次ポンプ軸固定による IHX 管板構造評価断面  
L1～L10 の応力
- Fig.3.3-11(1)～(4) 一次ポンプ軸固定による IHX 管板構造評価断面  
L1～L4 の応力成分

## 1. はじめに

実用化戦略調査研究において有望とされているナトリウム冷却実用化炉の設計研究では、信頼性と経済性の向上のため、「もんじゅ」、実証炉からさらに進んだプラント設計として、コンパクトで簡素な原子炉構造、短縮した主配管、循環ポンプと中間熱交換器を合体した機器の採用、及びループ数の削減が検討されている。そのために、出力に対する冷却材の熱容量が減少し、流速が上昇することから、系統熱過渡荷重が厳しくなる傾向にある。これを解決するため、高熱応力部のスクリーニング法と、選定部位に対する熱流動・構造一貫評価法を組み合わせた合理的な熱応力評価体系を開発している[1]。

本報告はFBR構造の熱過渡応力スクリーニング法の開発に関するものである。構成方程式および境界条件がともに線形方程式となる線形系の特徴は「重ね合わせの原理」が成立し、系の特性を表す伝達関数などを定義できることである。例えば流体との線形熱伝達にある構造で、流体温度変化を入力とし構造温度変化を出力とした場合に、出力=伝達関数×入力となるような伝達関数を定義できる。構造の熱応力を出力とした場合も同様の伝達関数を定義できる。複数入力の線形重ね合わせは出力の線形重ね合わせとなって現れる。特に単位ステップ関数  $F=1(t>0)$  を入力した時の出力  $G(x,y,z,t)$  は応答関数あるいはGreen関数などと呼ばれ、熱過渡問題への応用価値が大きい。いったん Green 関数を求めておけば、任意の入力  $F(t)$  に対する出力が時間方向の積分重ね合わせにより簡単かつ厳密に計算できる。これにより例えば運転条件を変更して入力  $F(t)$  を変化させた時の熱応力を簡単に計算評価できる。すなわち Green 関数をデータベースとして、予測問題に適用できる利点がある。

実際にFBR構造設計で想定される熱過渡事象は、まれに生じる可能性のある事故など定格運転状態から大きく逸脱した事象を多く含むものである。高度な安全性が要求される原子力プラントであるから、過酷な事象をも想定して、安全性を十分に確保できるような設計思想となっている。従って冷却材の温度と同時に流量が急変するような事象をも想定して設計する必要がある。流量が変化すれば熱伝達係数が変化し、境界条件は非線形となる。従来このような非線形熱応力事象の評価では、最大流量時の上限熱伝達係数が維持されたとした線形近似モデルにより解析評価した場合が多い。このような従来手法では過度に安全側の設計となる場合が多い。本報告ではこのような非線形問題の評価に関して、数点の Green 関数をデータベースとして使用し、重ね合わせ法を応用した近似計算手法を提案した。

## 2. 線形熱伝導および線形熱応力

### 2. 1 線形熱伝導および線形熱伝達における温度の Green 関数

密度  $\rho$ 、比熱  $c$  および熱伝導率  $\lambda$  の熱伝導材料特性が定数で与えられた構造内の非定常温度  $T$  は以下の線形熱伝導方程式に支配される。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T \quad (\text{in solid}) \quad (2.1)$$

ここで構造内の任意位置を  $P(x,y,z)$  とし、任意位置  $P$  および任意時間  $t$  の温度を  $T=T(P,t)=T(x,y,z,t)$  とする。複数の部分表面で複数の流体と熱伝達にある場合とする。表面  $S_k$  上で流体  $k$  と熱伝達にあり、流体  $k$  の温度が  $F_k(t)$ 、熱伝達係数が定数  $h_k$  で与えられた場合とする ( $k=1, N$ )。その他の表面は断熱されているとする。境界条件は次のように線形方程式で与えられる。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \eta} = h_k \{F_k(t) - T\} \quad (\text{on surface } S_k) \quad (k=1, N) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \eta} = 0 \quad (\text{on surface } S \text{ except } S_k) \quad (2.3)$$

ここに  $\eta$  は外向き法線方向とする。初期温度条件  $T(P,0)$  を与えて支配方程式 (2.1) および境界条件式 (2.2)、(2.3) を連立させて解けば、任意位置および任意時間の構造温度  $T(P,t)$  が求まる。支配方程式および境界条件式がすべて線形方程式となるこのような系を線形系と言う。線形系では「重ね合わせの原理」が成立し、Green 関数が存在する。初期温度  $T(P,0)$  と流体温度  $F_k(t)$  を系の入力と見なし、構造温度  $T(P,t)$  を系の出力と見なした場合、入力の線形重ね合わせは出力の線形重ね合わせとなる。系の入力と出力の特性を表す関数（伝達関数、応答関数あるいは Green 関数など）を定義することができる。

以後初期状態は定常温度分布にある場合のみを取り扱う。 $F_k(0)$  が間接的に初期温度分布を表し、 $F_k(t)$  ( $t > 0$ ) が流体温度の時間変化を表すものとする。すなわち  $t = -\infty$  から  $t = 0$  まで流体温度  $F_k(0)$  が維持されて定常温度分布にあるとする。全流体の初期温度  $F_k(0) = T_0$  の時、初期温度分布は一様基準温度  $T_0$  を表すことになる。

#### (1) 構造温度の Green 関数

初期状態は全体が一様基準温度  $0$  とする。流体  $k$  温度のみ単位ステップ変化して [ $F_k=1(t>0)$ ]、他の流体は基準温度  $0$  を維持した場合を考える。構造温度が  $H_k(P, h_k, t)$  と求められたとする。これは流体  $k$  温度のステップ変化に対する構造温度の応答関数であり、温度の Green 関数と呼ばれる。 $H_k(P, h_k, \infty)$  は流体  $k$  温

度のみ 1 で他の流体は基準温度 0 を維持した場合の定常温度分布を表す。

### (2) 単一流体の温度時間変化

流体  $k$  温度が  $F_k(t)$  と時間変化し、他の流体は基準温度  $T_0$  を維持した場合の構造温度は次式の積分で与えられる。

$$T_k(P, t) = T_0 + \{F_k(0) - T_0\}H_k(P, h_k, \infty) + \int_0^t F_k'(\tau)H_k(P, h_k, t - \tau)d\tau \quad (2.4)$$

### (3) 複数流体の温度時間変化

各流体温度がそれぞれ同時に時間変化した場合の構造温度  $T(P, t)$  は、各流体の温度変化による構造の温度変化を(2.4)式で計算し、それらを全流体について加算すればよい。

$$T(P, t) = T_0 + \sum_{k=1}^N \{T_k(P, t) - T_0\} \quad (2.5)$$

## 2. 2 線形弾性体および線形境界条件における熱応力の Green 関数

ヤング率  $E$ 、ポアソン比  $\nu$  および線膨張係数  $\alpha$  の力学材料特性が定数で与えられた線形弾性体の応力と弾性ひずみ（全ひずみ－熱ひずみ）は線形方程式（Hooke の法則）に支配される。この支配方程式は応力と変位と温度に関する線形方程式に変換できる。複数の境界表面で、変位拘束型あるいは荷重制御型の力学境界条件にあり、変位拘束型境界は変位の線形方程式で与えられ、荷重制御型境界は応力に関する線形方程式で与えられる場合とする。線形系となるので「重ね合わせの原理」が成立し、温度の Green 関数と同様に応力の Green 関数が存在する。

[補足 1] 構造の材質は何種類であってもよい。部分領域  $V_j$  每に ( $\rho_j, c_j, \lambda_j, E_j, \nu_j, \alpha_j$ ) が定数であればよい。材質の境界面を通過する熱流 ( $\lambda_j \partial T / \partial n$ ) と変位の連続条件が追加されるが、構造全体の線形性は保たれる。

[補足 2] 部分表面  $S_k$  の熱伝達係数  $h_k$  は单一定数として記述したが、 $h_k$  は複数の定数のセットでもよい。 $S_k$  のさらに分割された部分表面ごとに定数であれば、構造全体の線形性は保たれる。

[補足 3] 以後の記述では荷重制御型の境界条件により生じる応力は除外する。すなわち荷重制御型の境界荷重を 0 とした場合（自由表面で置き換えた場合）を記述する。これにより構造全体で応力が 0 となるような一様基準温度  $T_0$  が自然に設定できるような構造を対象として記述する。必要に応じて、全体が一定基準温度  $T_0$  で（荷重制御型）荷重のみを負荷した場合の（荷重制御型）応力を重ね合わせるなどして、適切に考慮するものとする。

### (1) 構造熱応力の Green 関数

初期状態は全体が一様基準温度  $T_0$  で熱応力 0 とする。流体  $k$  温度のみ単位ステップ変化して [ $F_k = T_0 + 1 (t > 0)$ ]、他の流体は基準温度  $T_0$  を維持した場合を考える。構造の応力が  $G_k(P, h_k, t)$  と求められたとする。これは流体  $k$  温度のステップ変化に対する構造熱応力の応答関数であり、熱応力の Green 関数と呼ばれる。 $G_k(P, h_k, \infty)$  は流体  $k$  のみ  $T_0 + 1$  で他の流体は  $T_0$  を維持した場合の定常熱応力を表わす。すべての位置で  $G_k(P, h_k, \infty) = 0$  となる場合は、流体  $k$  の温度変化に対して定常熱応力が生じない構造および境界条件である。 $G_k(P, h_k, \infty) \neq 0$  となる位置がある場合は、流体  $k$  の温度変化に対して定常熱応力が生じる構造および境界条件である。

### (2) 单一流体の温度変化

流体  $k$  温度が  $F_k(t)$  と時間変化し、他の流体は基準温度  $T_0$  を維持した場合の構造熱応力は次式の積分で与えられる。

$$S_k(P, t) = \{F_k(0) - T_0\}G_k(P, h_k, \infty) + \int_0^t F_k'(\tau)G_k(P, h_k, t - \tau)d\tau \quad (2.6)$$

### (3) 複数流体の温度変化

各流体温度がそれぞれ同時に時間変化した場合の熱応力  $S(P, t)$  は、各流体の温度変化による熱応力を(2.6)式で計算し、それらを全流体について加算すればよい。

$$S(P, t) = \sum_{k=1}^N S_k(P, t) \quad (2.7)$$

## 2. 3 热伝達係数が時間変化する非線形熱応力の近似計算法

熱伝達係数が  $h_j(t)$  と時間変化する場合、境界条件式(2.2)が非線形方程式となり、「重ね合わせの原理」が成立せず、Green 関数が存在しない。このような非線形問題に対して Green 関数法を近似的に応用することを考える。

### (1) 单一流体の熱伝達係数と温度の時間変化

流体  $k$  の熱伝達係数が  $h_k(t)$ 、温度が  $F_k(t)$  と時間変化する場合を考える。他の流体  $j$  は一定の熱伝達係数  $h_j$  および温度  $T_0$  を維持するものとする ( $j \neq k$ )。初期状態は時間  $t=0$  まで  $h_k(0)$  および  $F_k(0)$  が維持された定常熱応力状態とする。この時の構造熱応力を  $S_k^{NL}(P, t)$  とする。

初期定常熱応力は(2.6)式の右辺第一項の  $h_k$  を  $h_k(0)$  に置き換えたものとなる。(2.6)式の右辺第二項の積分の中は、微小時間区間  $[\tau, \tau + d\tau]$  の流体温度変化

$F_k'(\tau) d\tau$  により時間  $t$  (すなわち  $t - \tau$  時間後) に生じる熱応力を表わしている。これを時間区間  $[\tau, t]$  の平均熱伝達係数に対する Green 関数で近似すると、 $S_k^{NL}(P, t)$  の近似式として次式が得られる。

$$S_k^{NL}(P, t) = \{F_k(0) - T_0\}G_k\{P, h_k(0), \infty\} + \int_0^t F_k'(\tau)G_k\{P, \overline{h_k(\tau, t)}, t - \tau\}d\tau \quad (2.8)$$

ここで上線付き  $h_k(\tau, t)$  は時間区間の平均熱伝達係数を表すものとする。ある時間  $t_E$  に熱伝達係数が  $h_k(t_E)$  に達し、流体温度が基準温度  $T_0$  に達し、以後この状態を維持する場合を考える。時間が十分に経過 ( $t = \infty$ ) すると一様基準温度  $T_0$  となり定常熱応力は 0 となるが、近似式(2.8)は次式に漸近する。

$$S_k^{NL}(P, t) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} \{F_k(0) - T_0\}G_k\{P, h_k(0), \infty\} + \{T_0 - F_k(0)\}G_k\{P, h_k(t_E), \infty\} \quad (2.9)$$

定常熱応力が熱伝達係数に依存しない構造では(2.9)式は 0 となり、近似式(2.8)は  $t \rightarrow \infty$  で正解に漸近する。定常熱応力が熱伝達係数に依存する構造では(2.9)式  $\neq 0$  となり、近似式(2.8)は  $t \rightarrow \infty$  で一定の誤差を与える。これは初期定常熱応力が熱伝達係数の変化に追従して変化することを無視したことによる。定常熱応力が熱伝達係数変化に追従して変化する時定数を  $\tau_p$  として、 $S_k^{NL}(P, t)$  を次式により近似することが考えられる。

$$\begin{aligned} S_k^{NL}(P, t) &= \{F_k(0) - T_0\}[G_k\{P, h_k(0), \infty\} \exp(-t/\tau_p)] \\ &+ G_k\{P, \overline{h_k(0, t)}, \infty\} [1 - \exp(-t/\tau_p)] + \int_0^t F_k'(\tau)G_k\{P, \overline{h_k(\tau, t)}, t - \tau\}d\tau \end{aligned} \quad (2.10)$$

## (2) 複数流体の熱伝達係数と温度の時間変化

各流体の熱伝達係数および温度がそれぞれ同時に時間変化する場合の構造熱応力  $S^{NL}(P, t)$  は、各流体の熱伝達係数および温度の変化による熱応力を(2.8)または(2.10)式で近似計算し、それらを全流体について加算することが考えられる。

$$S^{NL}(P, t) = \sum_{k=1}^N S_k^{NL}(P, t) \quad (2.11)$$

## (3) 工学的な近似計算手法

近似式(2.8)あるいは(2.10)では任意の熱伝達係数に対する Green 関数が使用される。これを効率よく近似計算するには熱伝達係数の変動範囲内の何点かの値に対して、Green 関数を予め求めておき、それらを  $h$  に関して線形補間して計算するのが簡便である。例えば  $h_k(t)$  の最大値  $h_{k,max}$ 、中間値  $h_{k,med}$  および最小値  $h_{k,min}$  に対して Green 関数を求めておき、それらを線形補間するなどが考えられる。近似式(2.8)あるいは(2.10)の右辺の積分は、時間を有限区間に分割し

て積算するのが簡便である。例えば時系列データ( $t_j, F_{k,j}, h_{k,j}$ )( $j=1, n$ )で流体の温度と熱伝達係数が与えられている場合、積分を次式で近似計算するのが簡便である。

$$\int_0^t F_k'(\tau) G_k \{P, \overline{h_k(\tau, t)}, t - \tau\} d\tau = \sum_{j=1}^{m-1} (F_{k,j+1} - F_{k,j}) G_k \{P, \overline{h_k(t_j, t_m)}, t - \frac{t_j + t_{j+1}}{2}\} \\ (\text{for } t_m \leqq t) \quad (2.12)$$

ここで時間区間幅( $t_{j+1} - t_j$ )の最大値はある限界値を超えると誤差が大きくなる。限界値は構造の熱応力特性に依存する。具体的には Green 関数の時間変化曲線のスペクトル分析あるいは時定数分析から限界値を定めることができる。時系列データの最大時間区間幅が限界値を超える場合は(2.12)式の積分計算の時に分割して計算するのがよい。

### 3. 適用性検討解析

前章で示した Green 関数法を熱応力スクリーニング法として適用できるかどうかを検証するために FBR の中間熱交換器 (IHX) のスカート構造および管板構造を対象に、手動トリップ事象および一次ポンプ軸固定事象に対する過渡熱応力解析を行った。

#### 3. 1 IHX のモデル化

IHX の全体構造を Fig.3.1-1 に示す。一次系 Na が上部一次系入口ノズルから上部一次系プレナムに流入し、上部管板、伝熱管内側、下部管板、一次系ポンプ吸入部一吐出部を経由して一次系出口ノズルに至る。二次系 Na が下部二次系入口ノズルから流入し、伝熱管外側管束部をジグザグに上方に流れ、上部二次系プレナムを経由して二次系出口ノズルに至る。内側容器胴内に一次系ポンプが挿入されて一体構造となる。外側胴とスカートが Y 型接続され、スカート下部が基礎に固定される。熱過渡要因は 2 種類ある。熱過渡要因 1 は一次系 Na の流量  $Q_1(t)$  および温度  $F_1(t)$  の時間変化である。熱過渡要因 2 は二次系 Na の流量  $Q_2(t)$  および温度  $F_2(t)$  の時間変化である。

##### 3. 1. 1 スカート構造の熱過渡モデル

スカート構造の熱過渡モデルを Fig.3.1-2 に示す。管板部から十分離れた外側胴の二次系出口プレナムでスカート支持され一次系 Na の温度変化による熱応力はほとんど生じないと考えられる。外側胴とスカートのみを部分構造モデル化した。熱過渡要因は二次系 Na の出口側プレナムでの流量  $Q_2(t)$  および温度  $F_2(t)$  の時間変化である。容器胴内面と二次系 Na が熱伝達係数  $h_{2b}(t)$  で熱伝達にある。スカート下部の外面は一定雰囲気温度  $T_0=50^\circ\text{C}$  と一定熱伝達係数  $h_0$  で熱伝達にある。他の表面は断熱されている。熱応力 0 の基準温度は  $T_0=50^\circ\text{C}$  となる。以後スカート構造を記述する時は、熱過渡要因が一種類であるので、二次系を表す添え字 2 および 2a は省略する。

##### 3. 1. 2 管板構造の熱過渡モデル

管板構造の熱過渡モデルを Fig.3.1-3 に示す。熱過渡要因 1 は一次系 Na の流量  $Q_1(t)$  および温度  $F_1(t)$  の時間変化である。一次系上部プレナムの内側胴外面、管板上面、管板支持スカート上面および外側胴内面で熱伝達係数  $h_{1a}(t)$  とした。

伝熱管内面で熱伝達係数  $h_{1b}(t)$ とした。以下の数式では2種類の熱伝達係数を総称して  $h_1(t)$ と記述する。

管板構造の熱過渡要因2は二次系Naの流量  $Q_2(t)$ および温度  $F_2(t)$ の時間変化である。管束部伝熱領域の内側胴外面、管板下面で熱伝達係数を  $h_{2a}(t)$ とした。二次系出口プレナムの管板支持スカート下面および外側胴内面で熱伝達係数  $h_{2b}(t)$ とした。以下の数式では2種類の熱伝達係数を総称して  $h_2(t)$ と記述する。

管板構造の他の表面は断熱境界であり、一定雰囲気温度との熱伝達がないので、熱応力0の基準温度  $T_0$ は任意の温度でよい。全体が一様温度  $T_0$ の時、熱応力0となる。

- 手動トリップ事象によるNa温度の時間変化を Fig.3.1-4 に示す。
- 手動トリップ事象による熱伝達係数の時間変化を Fig.3.1-5 および Table.3.1-1 に示す。一次系は2直線近似し、二次系は3直線近似した。

Table.3.1-1 手動トリップ事象による熱伝達係数の変化

		一次系(W/m <sup>2</sup> K)		二次系(W/m <sup>2</sup> K)	
	t(sec)	$h_{1a}(t)$	$h_{1b}(t)$	$h_{2a}(t)$	$h_{2b}(t)$
初期上限値( $h_{1,max}, h_{2,max}$ )	0.0	2000	20000	50000	3400
中間値 ( $h_{1,med}, h_{2,med}$ )	25.0	800	8000	36000	2350
最終下限値( $h_{1,min}, h_{2,min}$ )	49.01	800	8000	30000	1350

- 一次ポンプ軸固着事象によるNa温度の時間変化を Fig.3.1-6 に示す。
- 一次ポンプ軸固着事象による熱伝達係数の時間変化を Fig.3.1-7 および Table.3.1-2 に示す。一次系は3直線近似し、二次系は4直線近似した。

Table.3.1-2 一次ポンプ軸固着事象による熱伝達係数の変化

		一次系(W/m <sup>2</sup> K)		二次系(W/m <sup>2</sup> K)	
	t(sec)	$h_{1a}(t)$	$h_{1b}(t)$	$h_{2a}(t)$	$h_{2b}(t)$
初期上限値( $h_{1,max}, h_{2,max}$ )	0.0	2000	20000	50000	3400
中間値1 ( $h_{1,med}, h_{2,med}$ )	2.0	800	8000	50000	3400
中間値2 ( $h_{1,min}, h_{2,med}$ )	12.0	400	4000	36000	2350
最終下限値( $h_{1,min}, h_{2,min}$ )	22.0	400	4000	30000	1350

### 3. 1. 3 FEM 数値解析モデル

- ・ 材料特性は一次系 Na および二次系 Na の温度変動範囲の平均値に近い 450°Cでの 12Cr 鋼の以下の値を共通に使用した。  
密度  $\rho = 7780 \text{ kg/m}^3$ 、比熱  $c = 0.657 \text{ J/gK}$ 、熱伝導率  $\lambda = 29.0 \text{ W/mK}$   
ヤング率  $E = 185000 \text{ MPa}$ 、ポアソン比  $\nu = 0.298$ 、  
熱膨張係数  $\alpha = 13.0 \times 10^{-6}/\text{°C}$
- ・ 以下の解析において解析コードは FINAS - v16.0 を使用した。熱伝導解析では HQAX4(熱伝導 4 節点軸対称要素)および FLAX2 (熱伝達 2 節点軸対称要素) を使用した。熱応力解析では QAX4(4 節点軸対称要素)を使用した。
- ・ 热伝導解析における管板の穴あき領域は、2重節点で定義された 4 本の幅 0 の環状スリットにより、伝熱管内面からの面内方向の熱伝達を模擬した。等価材料特性 ( $\rho c^*$ 、 $\lambda r^*$ 、 $\lambda z^*$ ) および等価熱伝達係数  $h^*$ を使用し、管板の面内方向および上下方向の温度拡散が実際と一致するように設定した。すなわち面内方向および上下方向のビオ数およびフーリエ数がすべて一致するような異方性材質で近似した。伝熱管一本あたりを取り出した正 6 角形断面の詳細解析と比較し、平均温度および上下の温度分布の時間推移が良好に模擬できることを確認した。近似モデルの詳細記述は今回の解析目的から外れるので省略する。
- ・ 热応力解析における管板の穴あき領域は実績のある ASME-A8000 の手法による等価材料特性 ( $E^*$ 、 $\nu^*$ ) を使用した。その際に伝熱解析における環状スリットは同一節点で置き換え連続構造とした。
- ・ 穴あき領域の平均応力は実際を良く模擬するものと思われる。ただし今回の解析目的から外れるので、穴あき領域は応力評価対象部位から除外した。

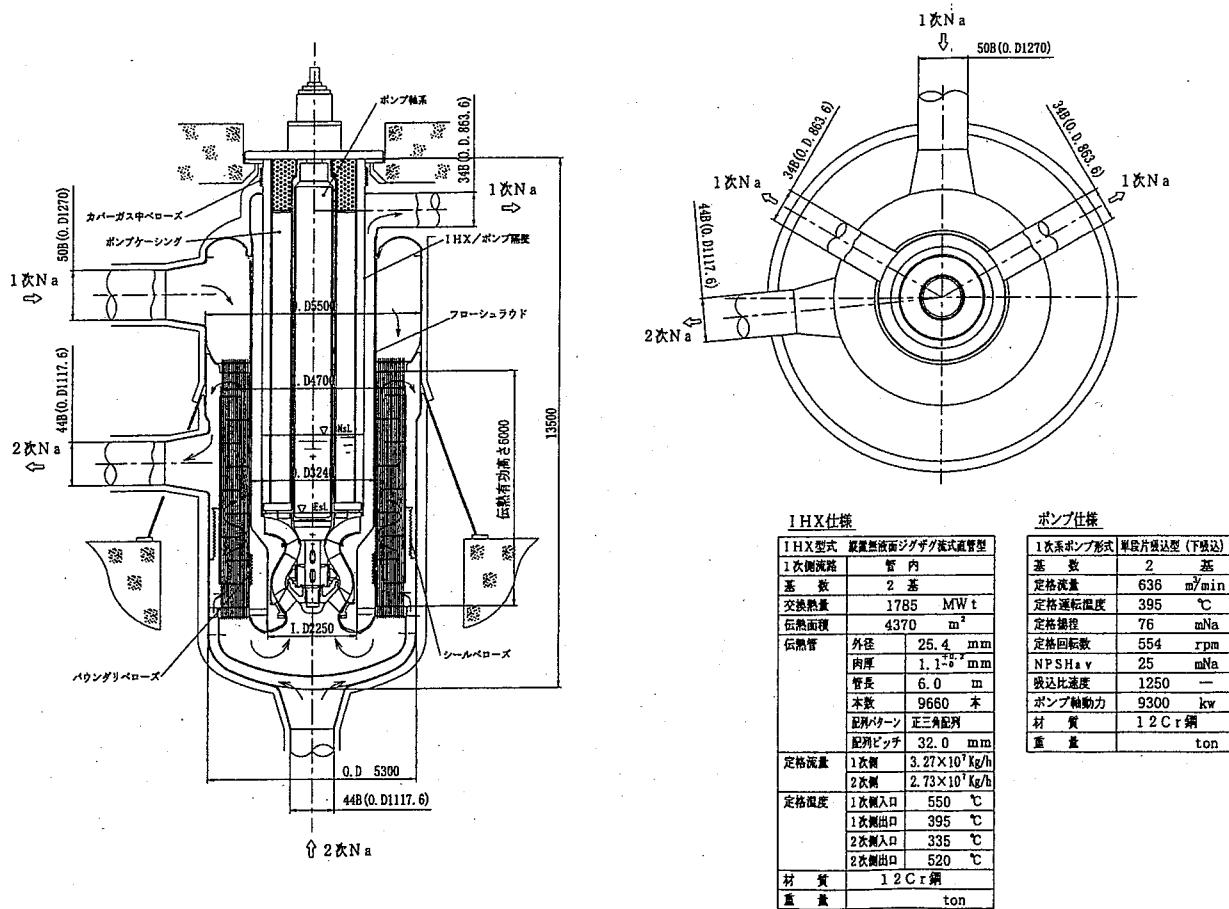


Fig.3.1-1 IHX の全体構造

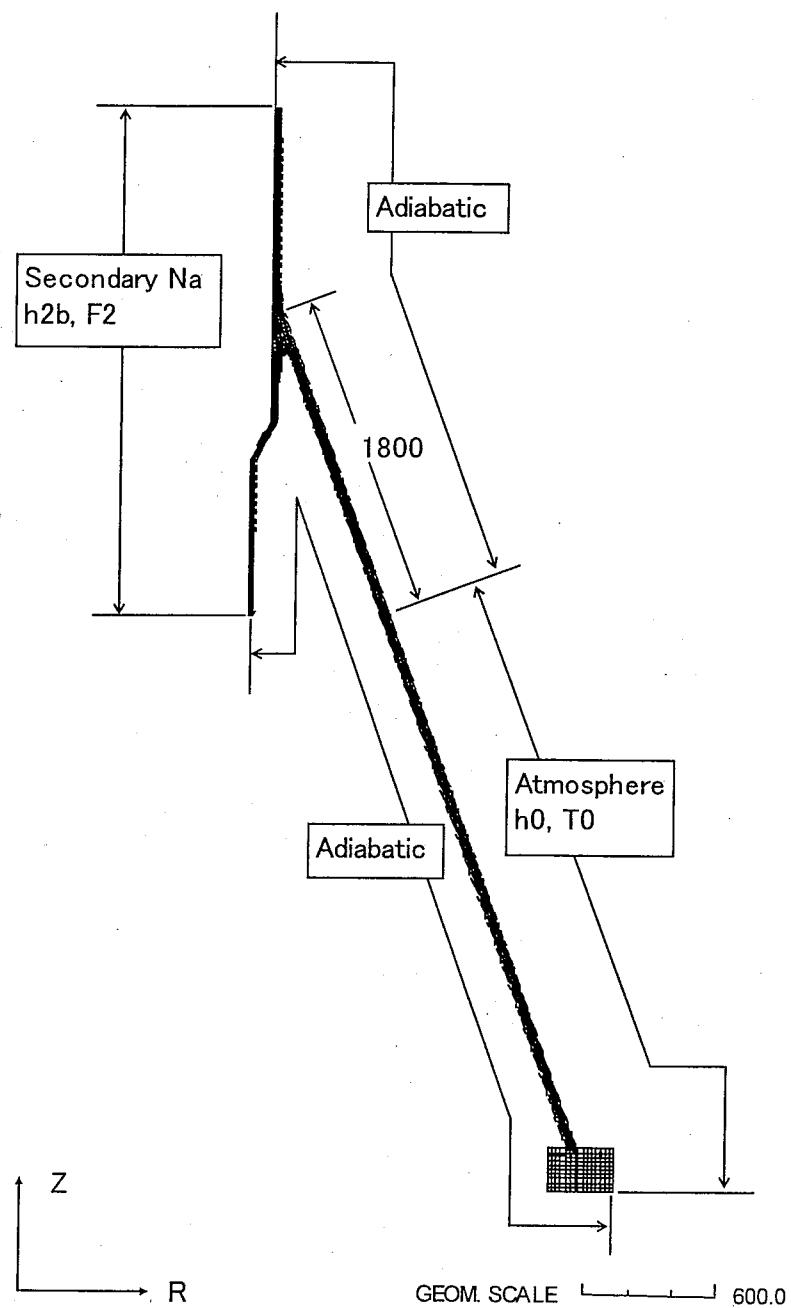


Fig.3.1-2 IHX スカート構造の熱過渡モデル

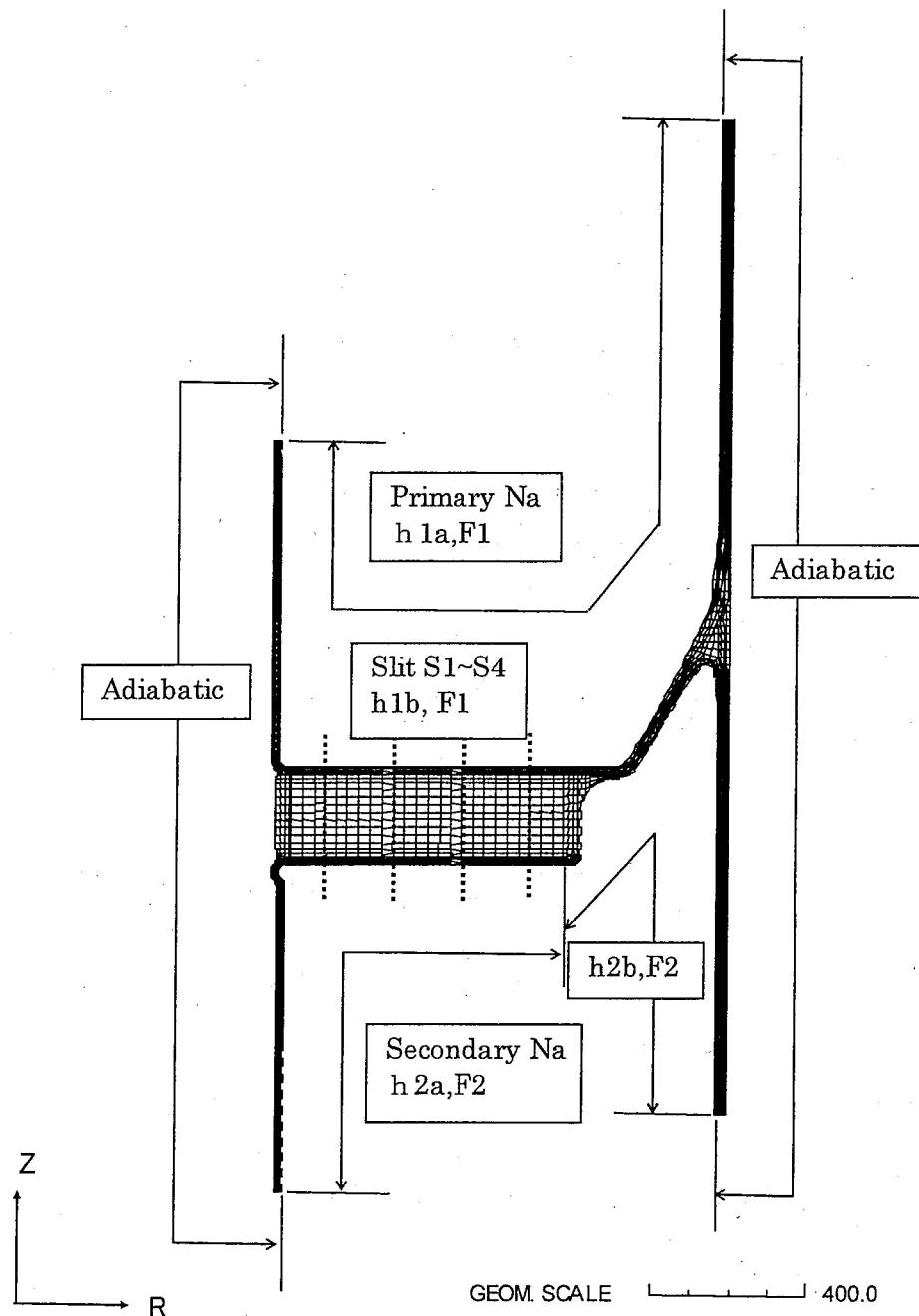


Fig.3.1-3 IHX 管板構造の熱過渡モデル

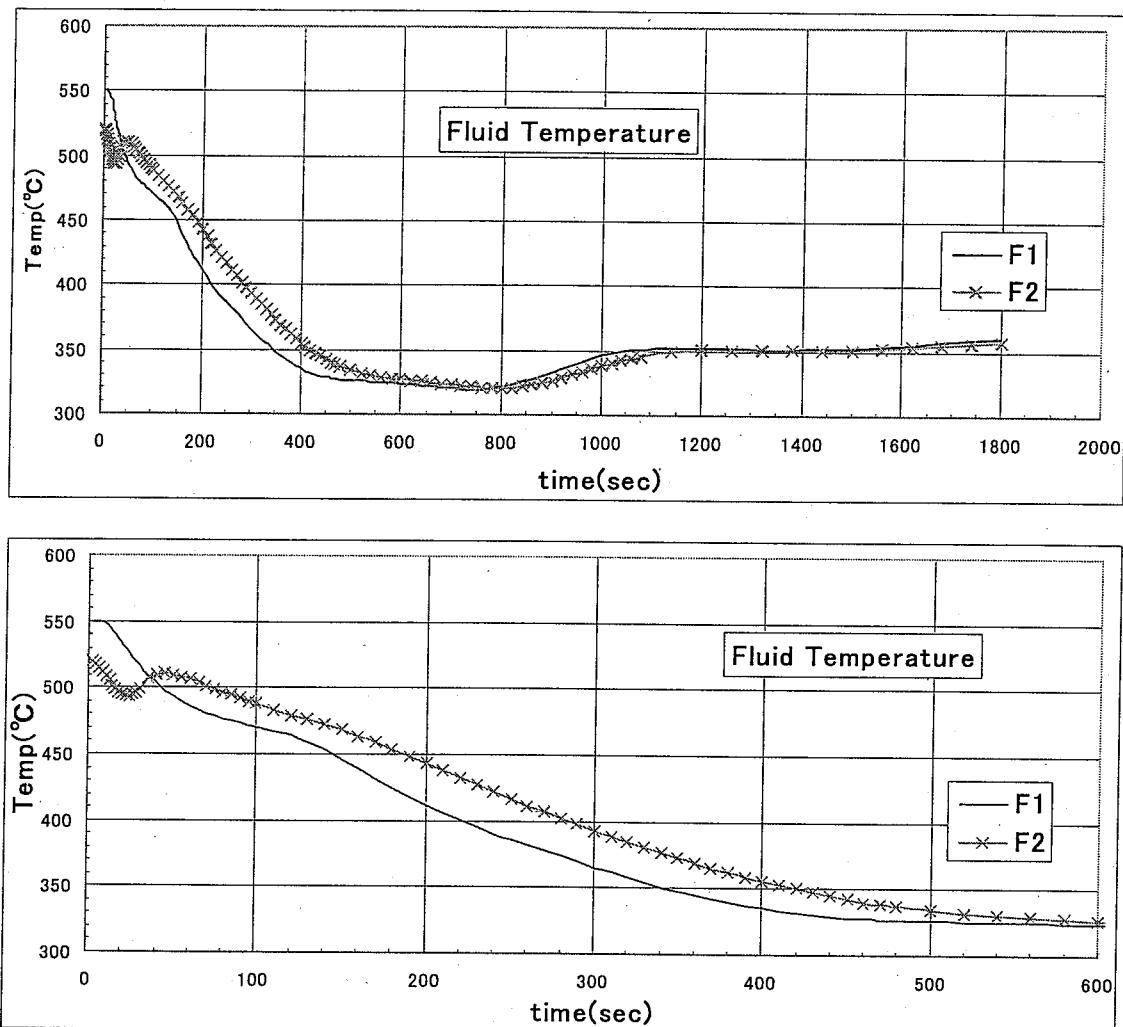


Fig.3.1-4 手動トリップ事象によるナトリウム温度の時間変化

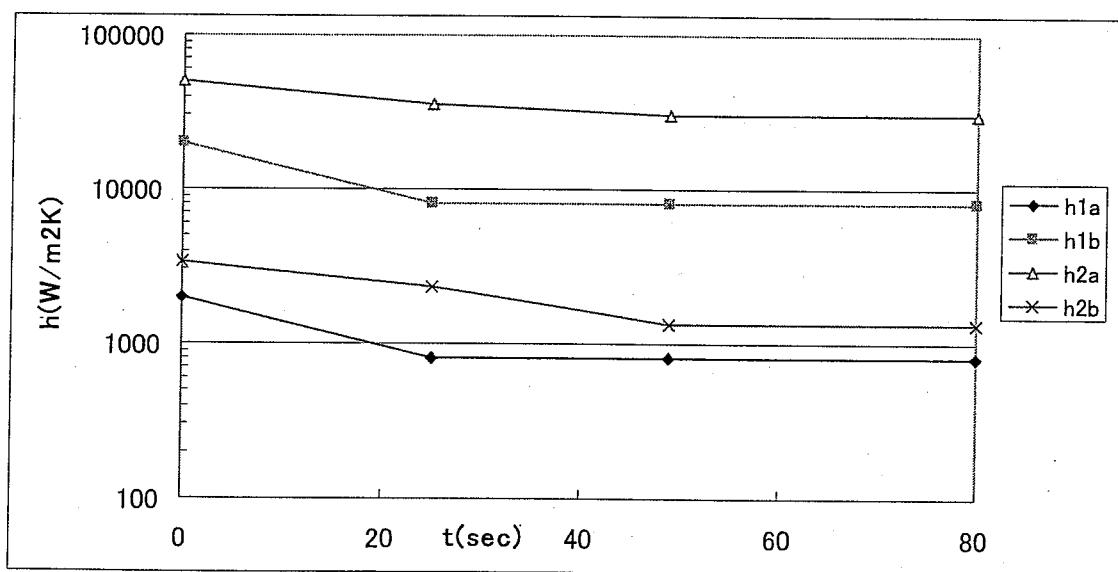


Fig.3.1-5 手動トリップ事象による熱伝達係数の時間変化

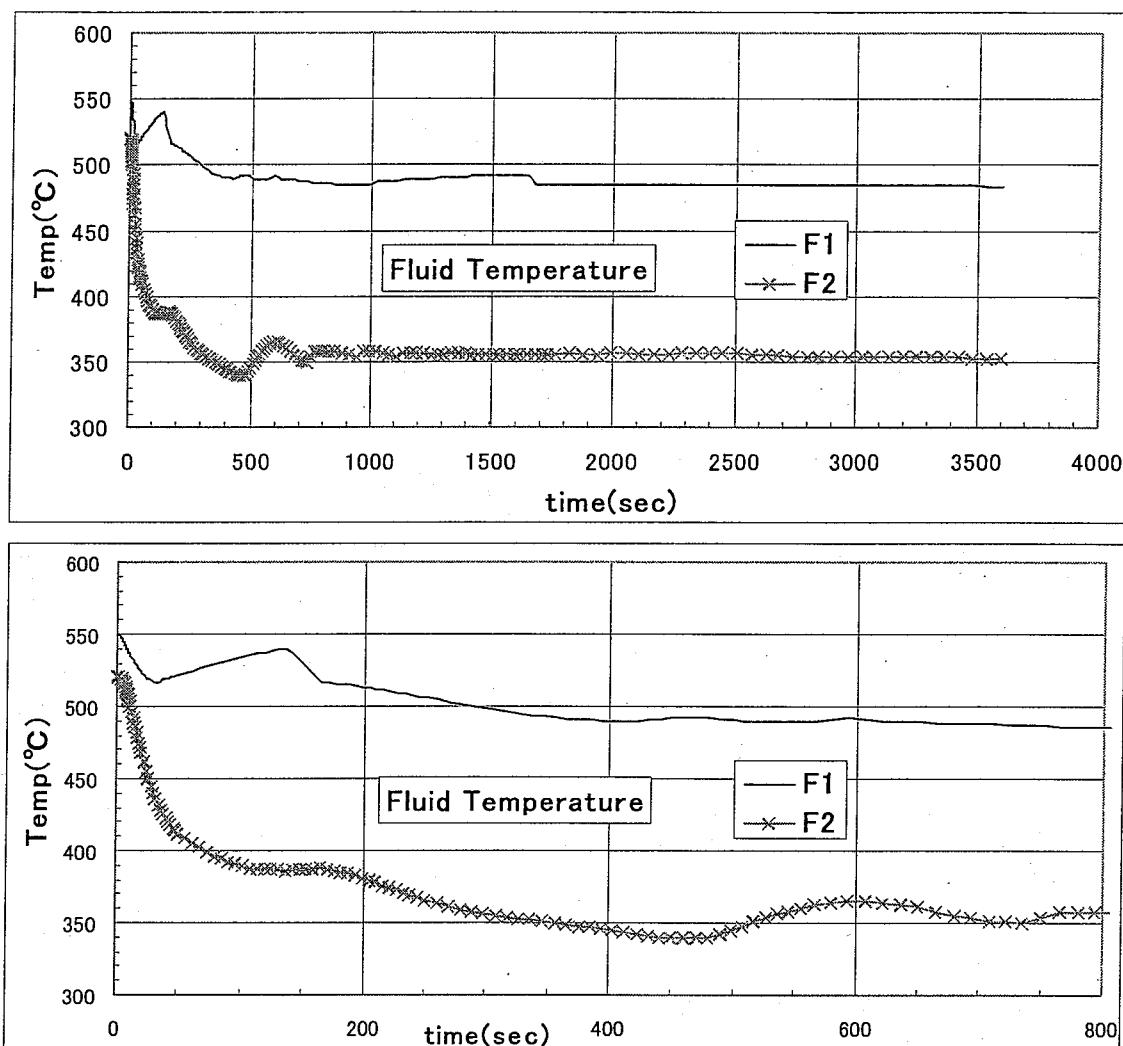


Fig.3.1-6 一次ポンプ軸固着事象によるナトリウム温度の時間変化

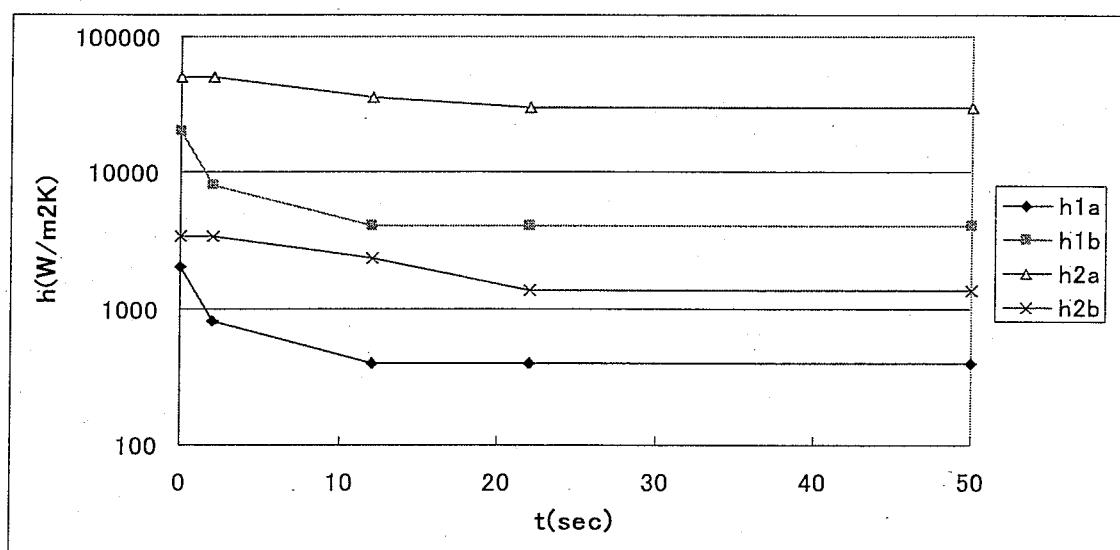


Fig.3.1-7 一次ポンプ軸固着事象による熱伝達係数の時間変化

### 3. 2 IHX スカート構造の熱過渡応力解析

#### 3. 2. 1 IHX スカート構造の Green 関数

熱伝達係数の上限値  $h_{\max}$ 、中間値  $h_{\text{med}}$  および下限値  $h_{\min}$  のそれぞれに対して以下の線形熱伝導解析および線形熱応力解析を行い、Na 温度変化に対する過渡熱応力の Green 関数を求めた。

##### (1) 線形熱伝導解析

- 初期一様温度 0°Cとした。雰囲気温度 0°C、熱伝達係数  $h_0=45 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Na の初期温度 0°C [ $F(0)=0$ ]、 $t=0$  でステップ変化 100°C [ $F(t)=100(t>0)$ ]
- 最終時点は  $t=\infty$  の定常温度解析とした。
- 構造温度は雰囲気温度を 0、Na 温度を 100 とした時の相対温度%を表すことになる。
- 熱伝達係数  $h_{\max}$  の解析による温度コンターを Fig.3.2-1 に示す。

##### (2) 線形熱応力解析

線形熱伝導解析による構造温度を用いて線形熱応力解析を行った。

- 熱伝達係数  $h_{\max}$  の解析による Mises の等価応力コンターを Fig.3.2-2 に示す。
- 熱応力解析結果および過去の同様構造の解析経験から選定された評価断面を Fig.3.2-3 に示す。評価断面 L1 から L5 は熱応力に特に留意すべき応力集中部位である。評価断面 L6 および L7 は応力集中のない容器胴部であり、基準熱応力を確認するために追加したものである。
- 以後、任意位置 P として点位置だけでなく任意断面（評価断面 L1～L7）も可能とする。

##### (3) 熱応力 Green 関数

線形熱応力解析結果は Na 温度のステップ変化 100°C に対する熱応力の Green 関数である。選定された評価断面 L1～L7 の各々について、Green 関数テンソルの各成分 ( $N$  ; 断面板厚方向成分,  $L$  ; 断面に垂直な長手方向成分,  $T$  ; 円周方向成分,  $NL$  ; せん断成分) の内面値( $i$ )、外面値( $o$ )、断面平均値( $m$  ; 膜応力)および断面一次モーメント( $b$  ; 曲げ応力)の時系列をファイル化した。

- 以後、上限  $h_{\max}$  に対する Green 関数を  $G(P,h_{\max},t)$ 、中間  $h_{\text{med}}$  に対する Green 関数を  $G(P,h_{\text{med}},t)$ 、下限  $h_{\min}$  に対する Green 関数を  $G(P,h_{\min},t)$  と記すことにする。以後テンソル成分記号( $N,L,T,NL$ )および記号( $i,o,m,b$ )は特に必要な場合を除いて省略する。
- $G(P,h_{\max},t)$  および  $G(P,h_{\min},t)$  の主要な成分( $L,T$ )を Fig.3.2-4 に示す。

#### (4) スカート構造の熱応力特性

各断面の熱応力特性（極値、定常値、時定数、要因）について分析した結果を Table.3.1-3 に示した。

- ・ 断面 L1 (Y型接続部下方の容器胴テーパ始端)

2つの極値および定常値が現れる。最初の極値 1 は熱伝達係数に大きく依存し、要因 1 (板厚方向温度勾配) による (曲げ+ピーク) 型の熱応力である。2番目の極値 2 は熱伝達係数にほとんど依存せず、要因 2 (Y 接続部とテーパ部との板厚平均温度の差、もしくは軸方向温度勾配) による (半径方向せん断+軸方向曲げ) 型の熱応力である。極値 1 と極値 2 は曲げ方向が反対であり、 $h_{max}$  の時ほぼ同じ大きさである。定常値は熱伝達係数にほとんど依存せず極値 2 と成分構成はほぼ同一で大きさが約 1/8 である。これは要因 3 (Y型接続部が一様温度に達した後のスカート部の定常温度分布、軸方向温度勾配) により生じる (半径方向せん断+曲げ) 型の熱応力である。

- ・ 断面 L2 (Y型接続部容器胴側 R 始端)

2つの極値および定常値が現れる。要因 1 による極値 1 は熱伝達係数に大きく依存する。極値 2 は熱伝達係数にほとんど依存せず、要因 2 (Y 接続部の容器胴側とスカート側との板厚平均温度の差) による (半径方向せん断+軸方向曲げ) 型の熱応力である。極値 1 と極値 2 は曲げ方向が反対であり、極値 1 は極値 2 より小さく  $h_{max}$  の時ほぼ 0.8 倍である。定常値は熱伝達係数にほとんど依存せず極値 2 と成分構成はほぼ同一で大きさが約 1/9 である。これは要因 3 により生じる (半径方向せん断+曲げ) 型の熱応力である。

- ・ 断面 L3 (Y型接続部スカート側 R 始端)

1つの極値および定常値が現れる。断面 L1 および L2 のような短時間領域での極値 1 は現れない。要因 2 による極値 2 は熱伝達係数にほとんど依存しない。定常値は熱伝達係数にほとんど依存せず極値 2 と同一方向の曲げ (せん断は 0) であり、大きさが約 1/5 である。これは要因 3 により生じる純曲げ型の熱応力である。

[補足] 定常値でせん断が 0 となったのは、Y 型接続領域の形状およびスカートの軸方向温度勾配区間と R 始端部の相対的な位置関係が偶然にそのようになっていたということである。一般に温度勾配の影響は (半径方向せん断+軸方向曲げ) が減衰周期関数として軸方向に伝播する。

- ・ 断面 L4 (Y型接続部テーパ始端)

2つの極値および定常値が現れる。要因 1 による極値 1 は熱伝達係数に大きく依存する。要因 2 による極値 2 は熱伝達係数にほとんど依存しない。極値 1 と極値 2 は曲げ方向が同一であり、極値 1 は極値 2 より大きく  $h_{max}$  の時ほぼ 3 倍である。定常値は熱伝達係数にほとんど依存せず極値 2 と同一方向の曲げ (せん断は 0)

ん断は0)であり、大きさが約1/5である。これは要因3により生じる純曲げ型の熱応力である。

- ・ 断面L5 (Y型接続部上方の容器胴テーパ始端)

2つの極値および定常値が現れる。要因1による極値1は熱伝達係数に大きく依存する。極値2は熱伝達係数にほとんど依存せず、要因2(Y接続部とテーパ部との板厚平均温度の差、もしくは軸方向温度勾配)による(半径方向せん断+軸方向曲げ)型の熱応力である。極値1は極値2と曲げ方向が同一であり、極値2より大きく $h_{max}$ の時ほぼ3倍である。要因3による定常値は熱伝達係数にほとんど依存せず極値2と成分構成はほぼ同一で大きさが約1/5である。

- ・ 断面L6およびL7 (Y型接続部の影響を受けない容器胴)

短時間側の要因1による極値1のみ現れる。極値1は熱伝達係数に強く依存する。基本的には理論解[2]、Mcneill-Brock線図[3]あるいはHeisler線図[4]などによる評価と計算誤差の範囲内で一致するものである。解析モデルの妥当性を確認検証するのに有効である。

Table.3.2-1 スカート構造の評価断面の熱応力特性

断面	極値 1 極値 2 定常	h <sub>max</sub> 3400		h <sub>med</sub> 2350		h <sub>min</sub> 1350		熱応力要因 (脚注)
		$\tau$ (sec)	S <sub>Mises</sub> (MPa)	$\tau$ (sec)	S <sub>Mises</sub> (MPa)	$\tau$ (sec)	S <sub>Mises</sub> (MPa)	
L1	E.1	16	148.1	20	125.1	29	92.6	$T_h - T_m$
	E.2	420	146.4	480	147.0	600	147.5	$T_{m,A} - T_{m,B}$
	S.S	2E5	17.8	2E5	17.8	2E5	18.0	$\Delta T_L / L$
L2	E.1	16	140.8	28	120.0	42	92.7	$T_h - T_m$
	E.2	360	170.3	420	166.5	540	159.3	$T_{m,A} - T_{m,B}$
	S.S	2E5	*18.2	2E5	*18.3	2E5	*18.4	$\Delta T_L / L$
L3	E.1	熱伝達のない断面、短時間の極値が現れない						
	E.2	600	179.9	720	177.1	1140	172.0	$T_{m,A} - T_{m,B}$
	S.S	2E5	38.5	2E5	38.5	2E5	38.5	$\Delta T_L / L$
L4	E.1	18	150.5	24	128.0	38	96.4	$T_h - T_m$
	E.2	1800	*49.6	2040	*48.9	2400	*47.3	$T_{m,A} - T_{m,B}$
	S.S	2E5	*10.3	2E5	*10.3	2E5	*10.2	$\Delta T_L / L$
L5	E.1	21	163.2	27	140.1	40	106.1	$T_h - T_m$
	E.2	1920	47.1	2160	46.5	2700	45.3	$T_{m,A} - T_{m,B}$
	S.S	2E5	9.9	2E5	9.9	2E5	9.9	$\Delta T_L / L$
L6	E.1	12	132.2	15	109.8	19	79.1	$T_h - T_m$
L7	E.1	14	142.6	18	119.9	25	87.9	$T_h - T_m$

[注 1] \*は外表面側の応力。

[注 2]  $T_h - T_m$  は当該断面の熱伝達面温度と板厚平均温度の差。

[注 3]  $T_{m,A} - T_{m,B}$  は隣接断面との板厚平均温度の差あるいは軸方向温度勾配。

[注 4]  $\Delta T_L / L$  はスカートの軸方向温度勾配。

### 3. 2. 2 IHX スカート構造の手動トリップ事象解析

#### (1) 詳細熱応力解析

熱伝達係数の時間変化を忠実に考慮した手動トリップ事象の非線形熱伝導解析および線形熱応力解析を行った。これを参照解として、以下の簡易評価と比較した。

- 初期定常温度分布、雰囲気温度  $T_0=50^{\circ}\text{C}$ 、Na 温度  $F(0)=520^{\circ}\text{C}$
- 評価断面 L1～L7 の熱応力の Mises 等価応力を Fig.3.2-5 に示す。
- 評価断面 L1～L7 の熱応力の主要な成分(L,T)を Fig.3.2-6 に示す。

#### (2) 簡易評価 1

熱伝達係数  $h_{\max}$  が維持された場合の熱応力を、 $G(P, h_{\max}, t)$  を用いて、次式により計算した。

$$S(P, t) = \{F(0) - T_0\}G(P, h_{\max}, \infty) + \int_0^t F'(\tau)G(P, h_{\max}, t - \tau)d\tau \quad (3.1)$$

ここで右辺の積分は Na 温度の時系列データ  $(t_j, F_j)$  ( $j=1, n$ ) を用いて、次式により計算した。

$$\int_0^t F'(\tau)G(P, h_{\max}, t - \tau)d\tau = \sum_{j=1}^{m-1} (F_{j+1} - F_j)G\left\{P, h_{\max}, t - \frac{t_j + t_{j+1}}{2}\right\} \quad (\text{for } t_m \leq t) \quad (3.2)$$

時間区間幅  $(t_{j+1} - t_j)$  は最大値 10sec を超えないようにした。元のデータの区間幅が 10sec を超える場合は分割して 10sec 以下となるようにした。

- 評価断面 L1～L7 の Mises 等価応力を Fig.3.2-5 に示す。熱過渡初期は参照解と良く一致するが、時間が進むにつれて過大評価となる。
- 同様に  $h_{\text{med}}$  が維持された場合の熱応力を、 $G(P, h_{\text{med}}, t)$  を用いて計算した。評価断面 L1～L7 の Mises 等価応力を Fig.3.2-5 に示す。熱過渡初期は若干の過小評価であるが、時間が進むにつれて過大評価となる。
- 同様に  $h_{\min}$  が維持された場合の熱応力を、 $G(P, h_{\min}, t)$  を用いて計算した。評価断面 L1～L7 の Mises 等価応力を Fig.3.2-5 に示す。熱過渡初期は過小評価となるが、時間が進むにつれて参照解に近づく。

#### (3) 簡易評価 2

熱伝達係数が  $h(t)$  と時間変化する場合の熱応力を次式で近似計算した。

$$S^{NL}(P,t) = \{F(0) - T_0\}G\{P, h(0), \infty\} + \int_0^t F'(\tau)G\{P, \overline{h(\tau,t)}, t-\tau\}d\tau \quad (3.3)$$

ここで上線付き  $h(\tau, t)$  は時間区間  $[\tau, t]$  の平均熱伝達係数である。任意  $h$  に対する Green 関数  $G(P, h, t)$  は  $G(P, h_{max}, t)$ 、 $G(P, h_{med}, t)$  および  $G(P, h_{min}, t)$  を  $h$  に関して線形補間して計算した。

- ・ 評価断面 L1～L7 の Mises 等価応力を Fig.3.2-5 に示す。
- ・ 評価断面 L1～L7 の主要な成分を Fig.3.2-6 に示す。
- ・ 全時間領域において参照解を良く近似することが確認できる。

### 3. 2. 3 IHX スカート構造の一次ポンプ軸固着事象解析

#### (1) 詳細熱応力解析

熱伝達係数の時間変化を忠実に考慮した一次ポンプ軸固着事象の非線形熱伝導解析および線形熱応力解析を行った。これを参照解として、以下の簡易評価と比較した。

- ・ 初期定常温度分布、雰囲気温度  $T_0=50^\circ\text{C}$ 、Na 温度  $F(0)=520^\circ\text{C}$
- ・ 評価断面 L1～L7 の熱応力の Mises 等価応力を Fig.3.2-7 に示す。
- ・ 手動トリップ事象と熱応力の大きさはほとんど同じとなる。約 40 秒間の温度変化を一定以下に抑えれば短時間の熱応力は無視できる構造である。長時間側の時定数  $\tau_2$  および  $\tau_3$  が大きいので、極値 2 および定常熱応力に支配される構造であり、最大熱応力は二次系 Na 温度の全変動幅にほとんど比例する構造である。

#### (2) 簡易評価 1

熱伝達係数  $h_{max}$  が維持された場合の熱応力を、 $G(P, h_{max}, t)$  を用いて(3.1)式により計算した。

- ・ 評価断面 L1～L7 の Mises 等価応力を Fig.3.2-7 に示す。熱過渡初期は参照解と良く一致するが、時間が進むにつれて過大評価となる。
- ・ 同様に  $h_{med}$  が維持された場合の熱応力を、 $G(P, h_{med}, t)$  を用いて計算した。評価断面 L1～L7 の Mises 等価応力を Fig.3.2-7 に示す。熱過渡初期は若干の過小評価であるが、時間が進むにつれて過大評価となる。
- ・ 同様に  $h_{min}$  が維持された場合の熱応力を、 $G(P, h_{min}, t)$  を用いて計算した。評価断面 L1～L7 の Mises 等価応力を Fig.3.2-7 に示す。熱過渡初期は過小評価となるが、時間が進むにつれて参照解に近づく。

### (3) 簡易評価 2

熱伝達係数が  $h(t)$  と時間変化する場合の熱応力を(3.3)式で近似計算した。

- ・ 評価断面 L1～L7 の Mises 等価応力を Fig.3.2-7 に示す。
- ・ 全時間領域において参照解を良く近似することが確認できる。

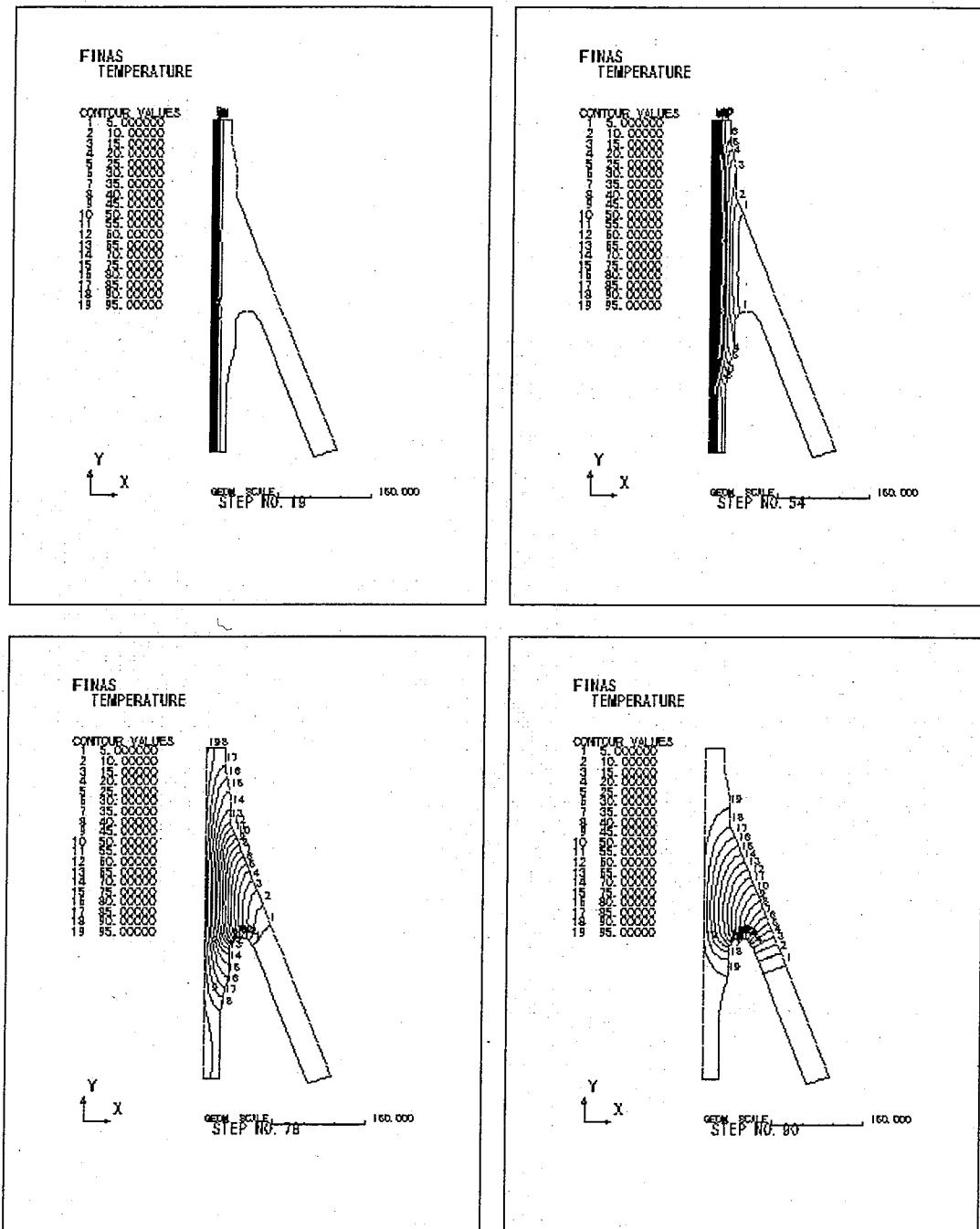


Fig.3.2-1(1)  $h_{max}$  による温度コンター( $t=10,60,240,600\text{sec}$ )

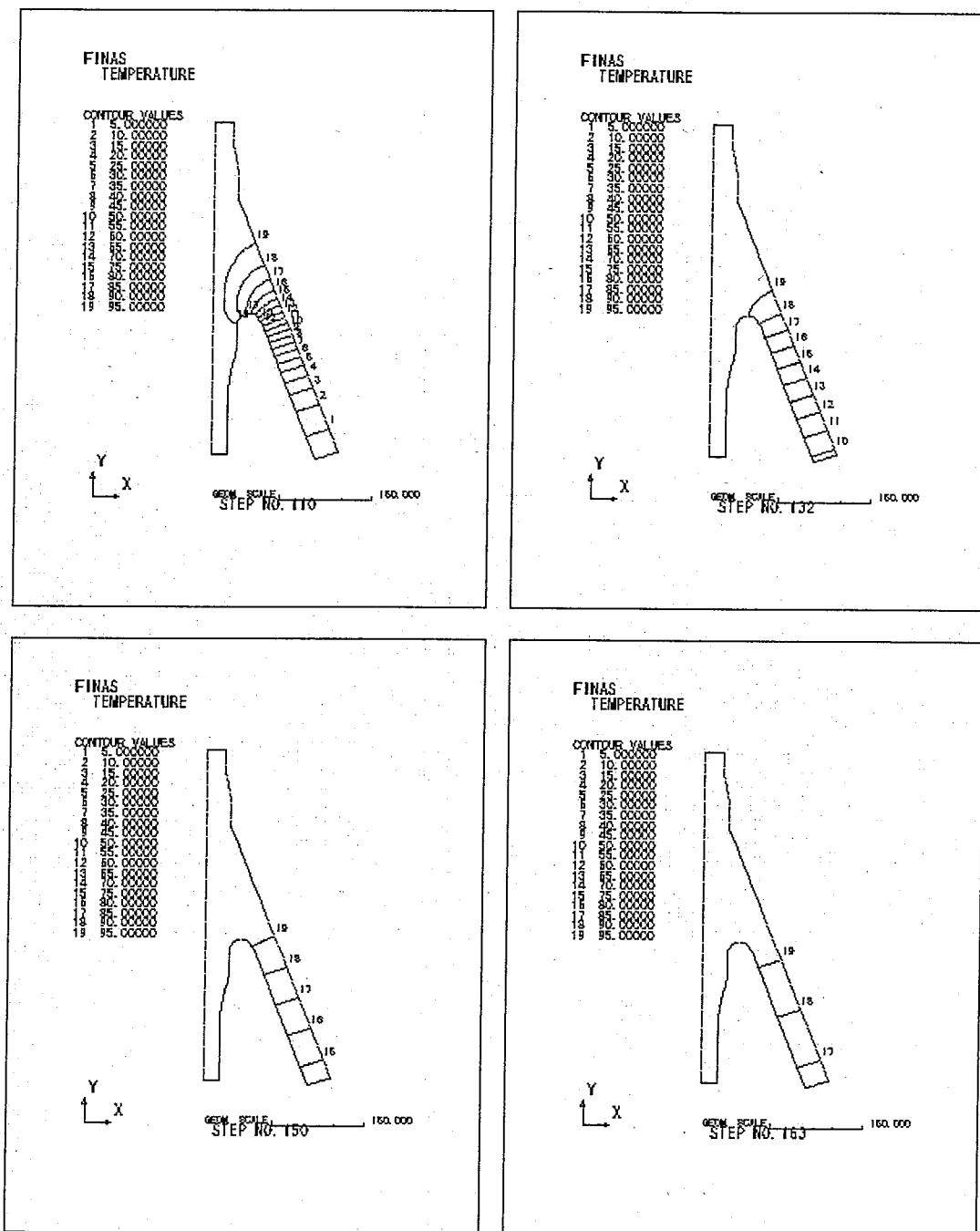


Fig.3.2-1(2)  $h_{max}$  による温度コンター( $t=2400, 21600, 86400, \infty$  sec)

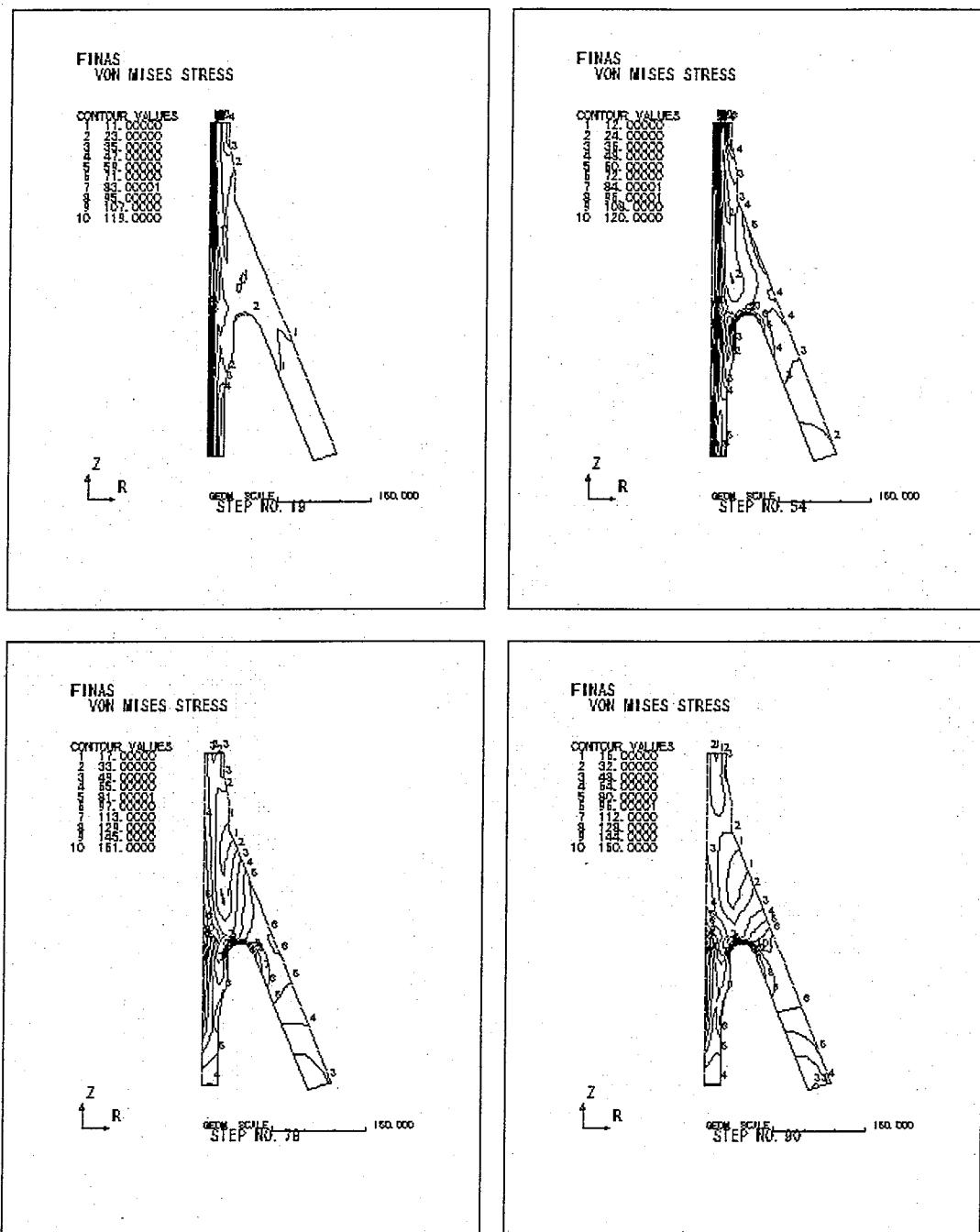


Fig.3.2-2(1) hmax による等価応力コンター( $t=10,60,240,600\text{sec}$ )

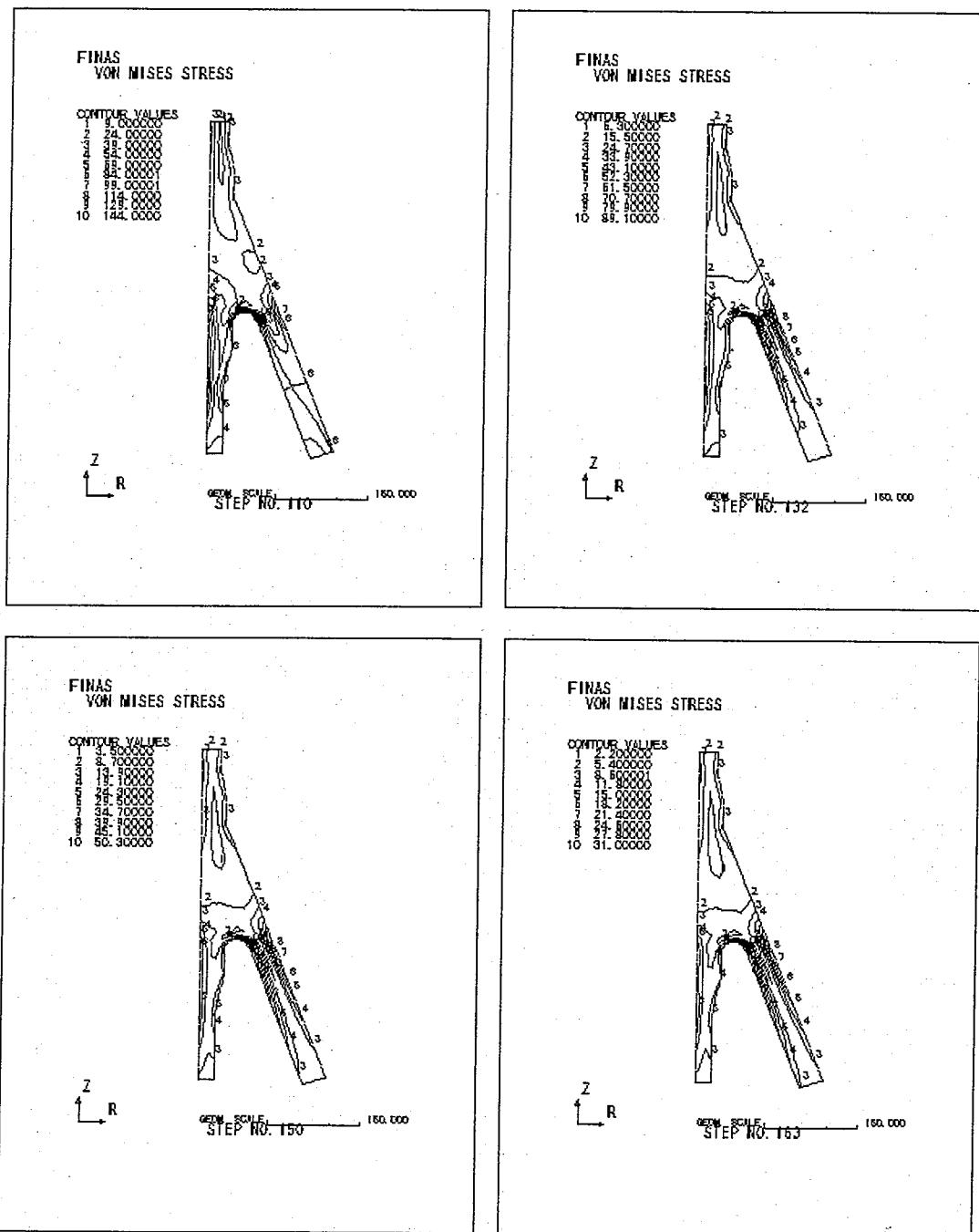


Fig.3.2-2(2) hmax による等価応力コンター( $t=2400, 21600, 86400, \infty$  sec)

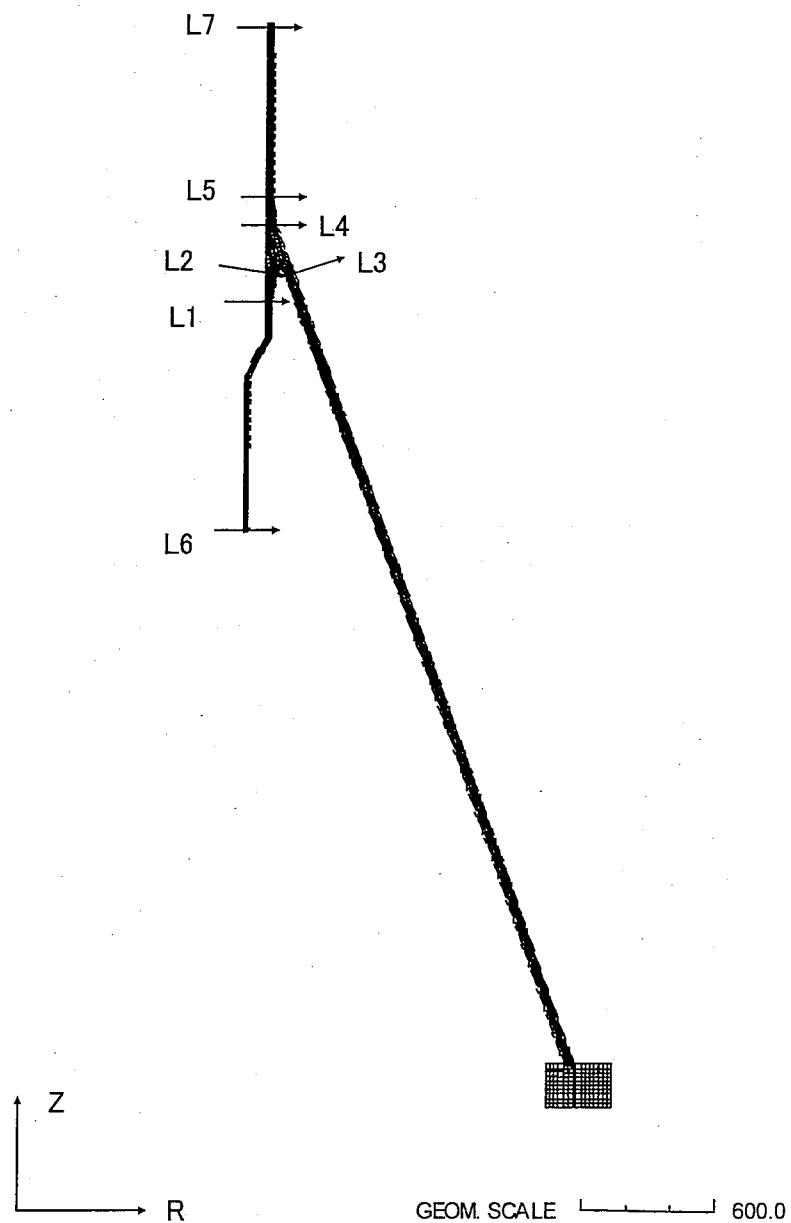
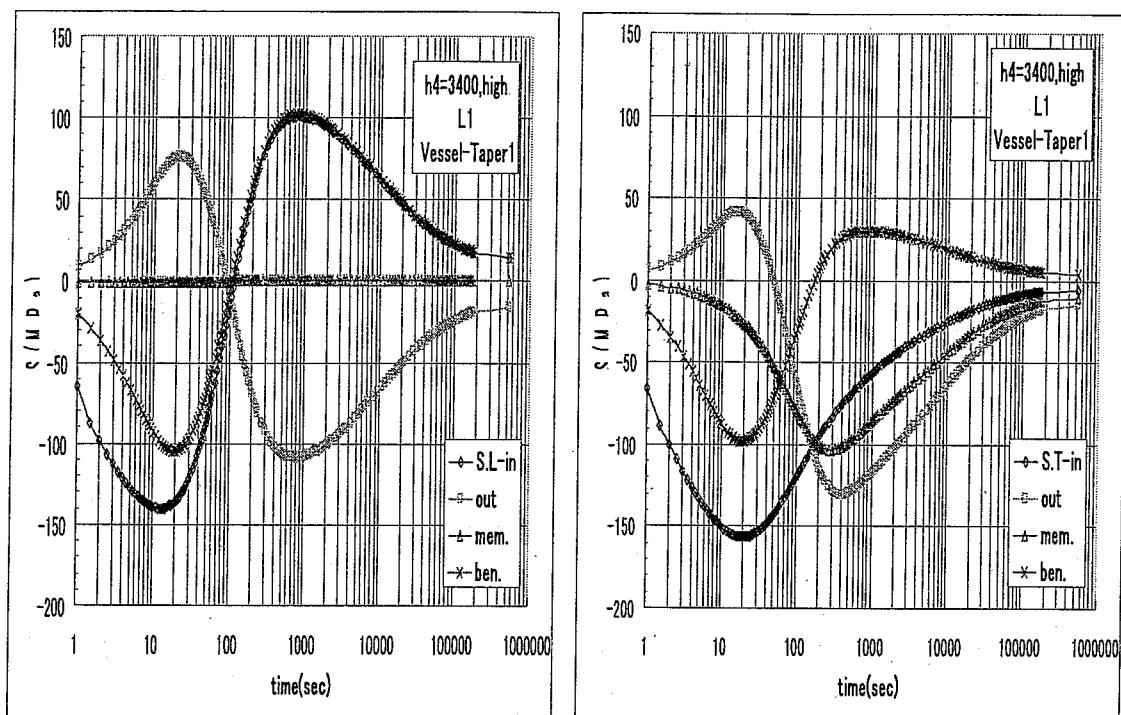


Fig.3.2-3 IHX スカート構造の評価断面



$h_{\max} \uparrow$

$h_{\min} \downarrow$

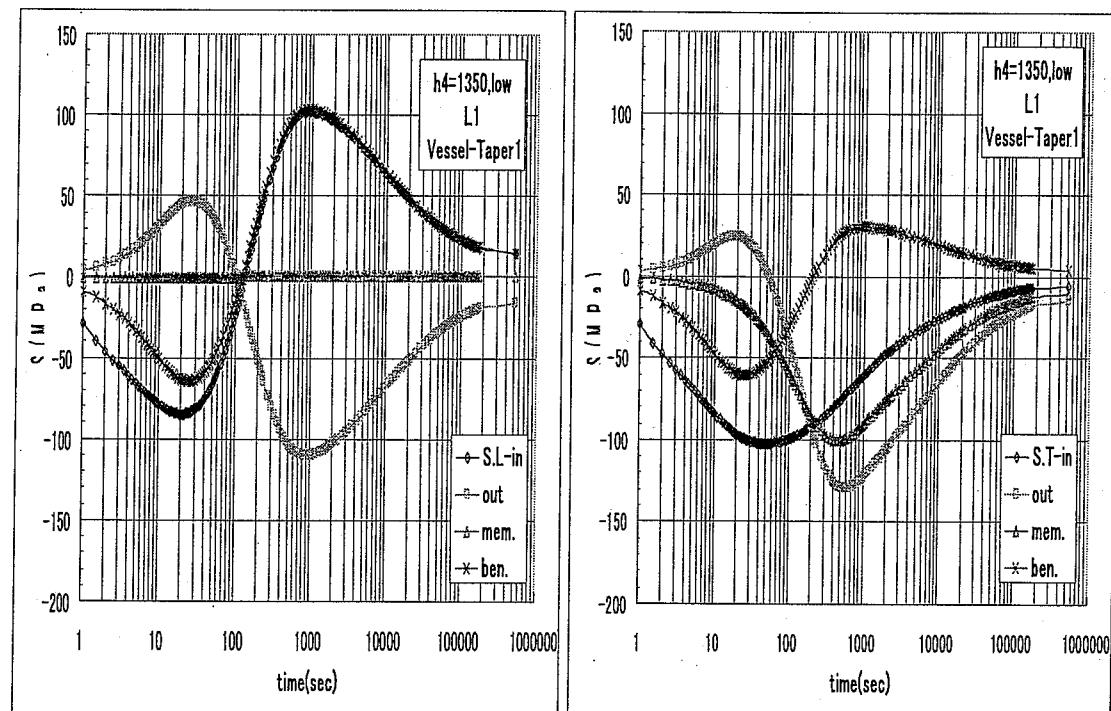


Fig.3.2-4(1) IHX スカート構造評価断面 L1 の Green 関数

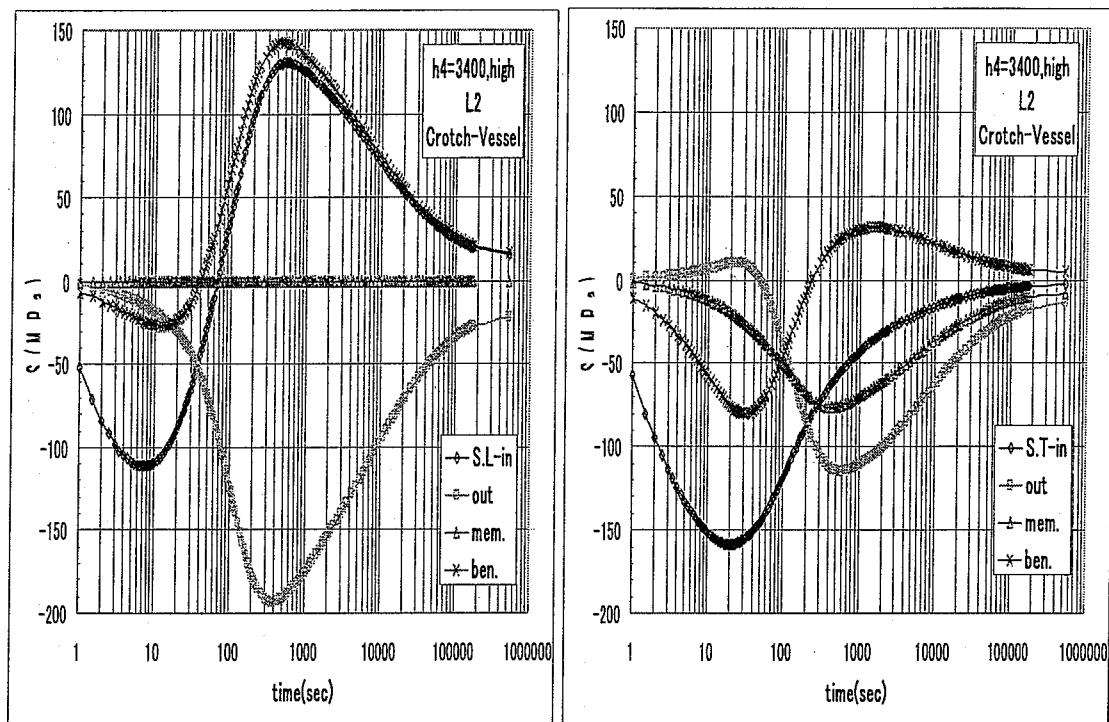
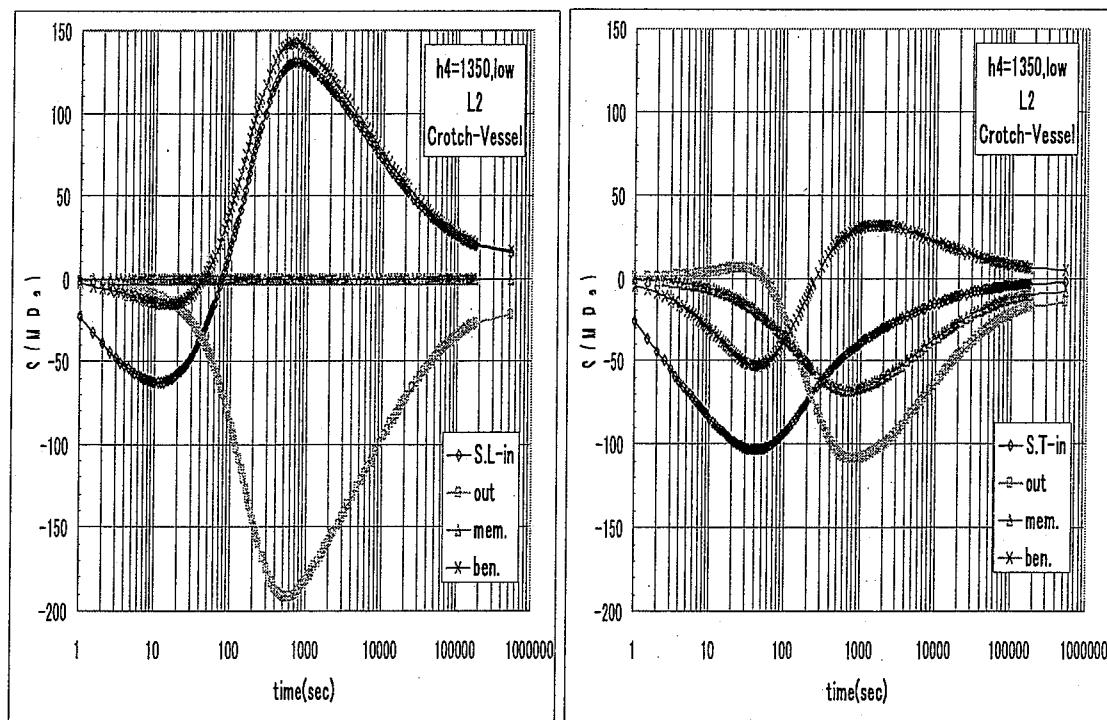
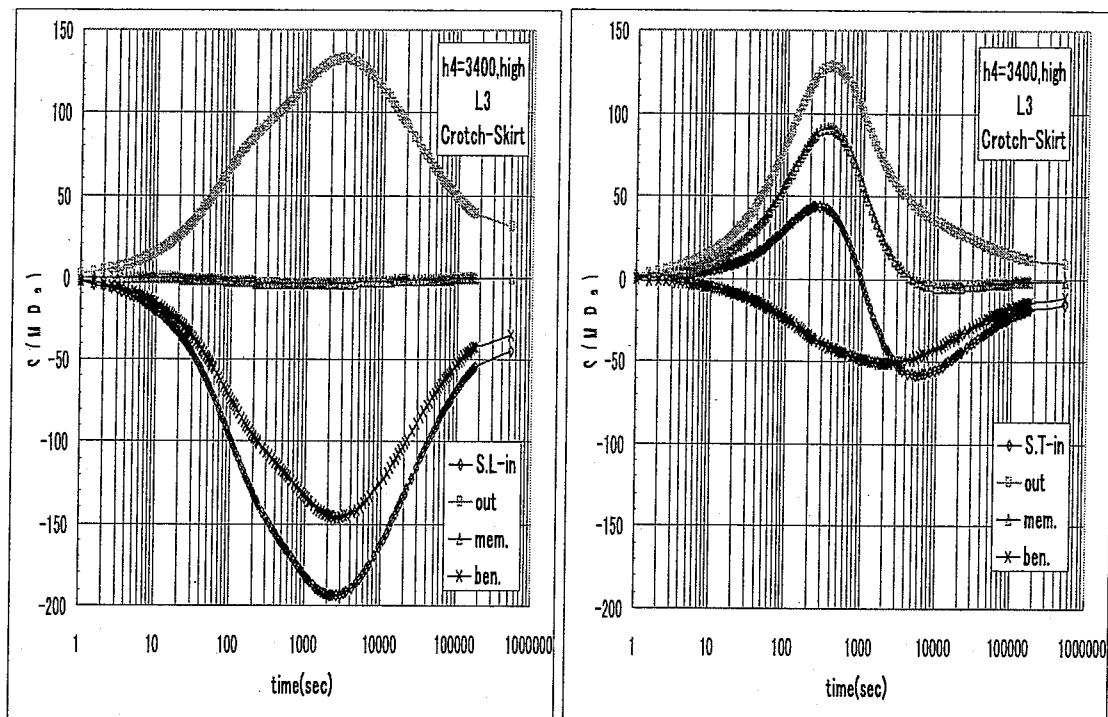
 $h_{\max} \uparrow$  $h_{\min} \downarrow$ 

Fig.3.2-4(2) IHX スカート構造評価断面 L2 の Green 関数



h.max ↑

h.min ↓

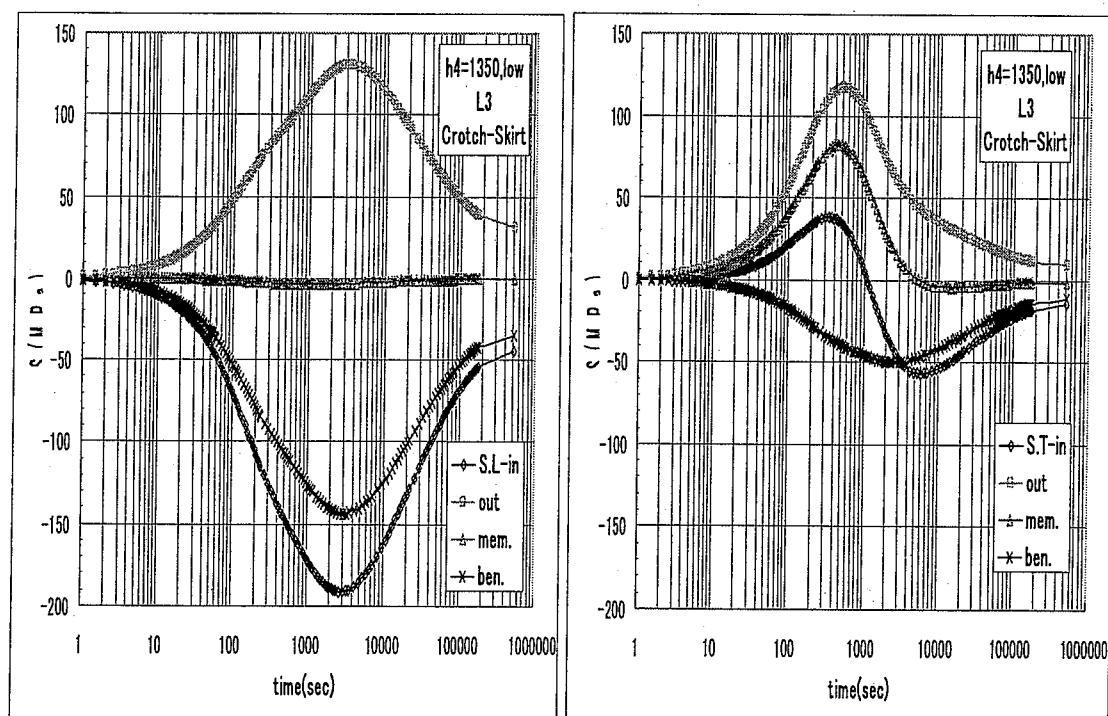
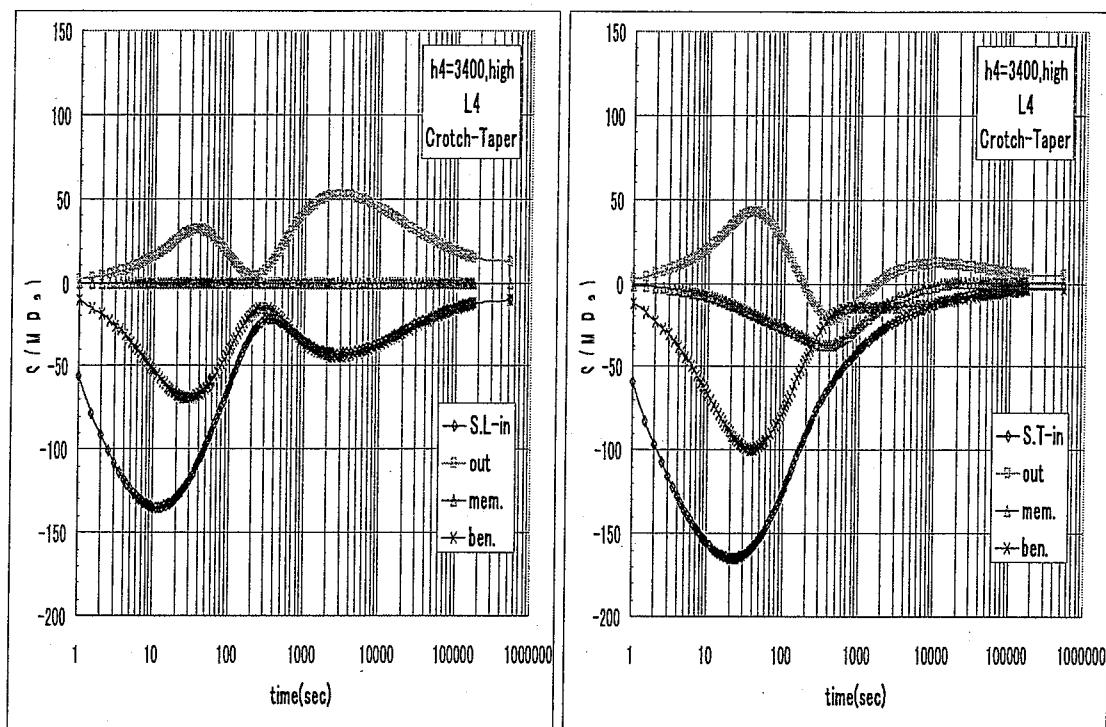


Fig.3.2-4(3) IHX スカート構造評価断面 L3 の Green 関数



h.max ↑

h.min ↓

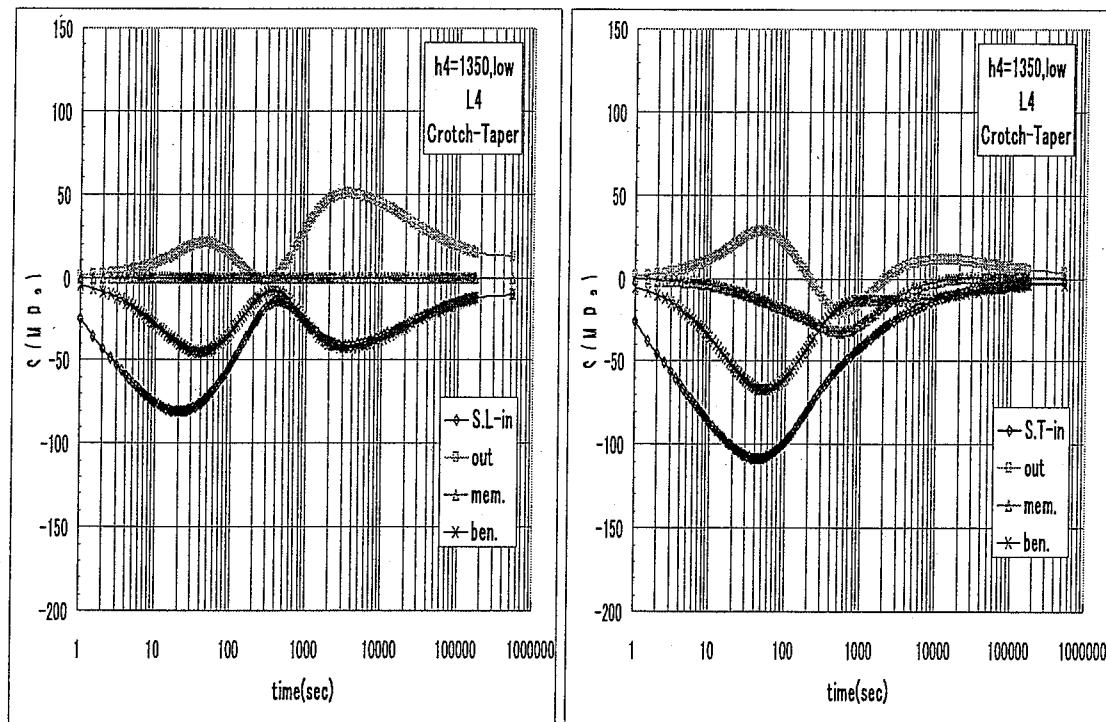
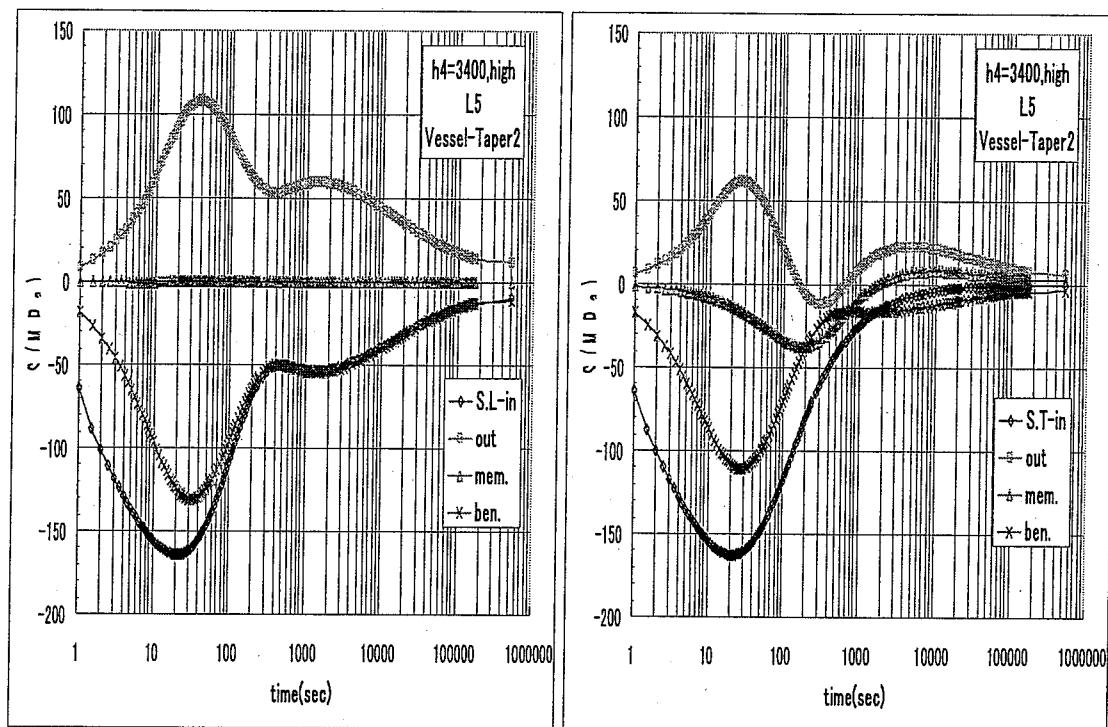


Fig.3.2-4(4) IHX スカート構造評価断面 L4 の Green 関数



$h_{\max} \uparrow$

$h_{\min} \downarrow$

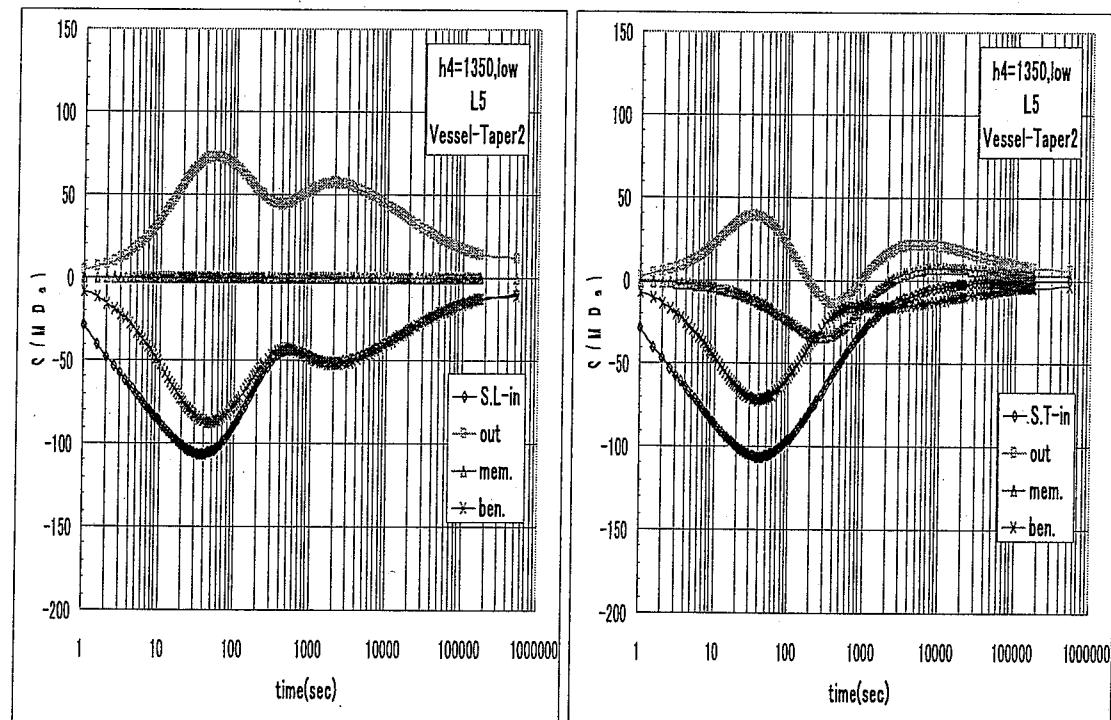
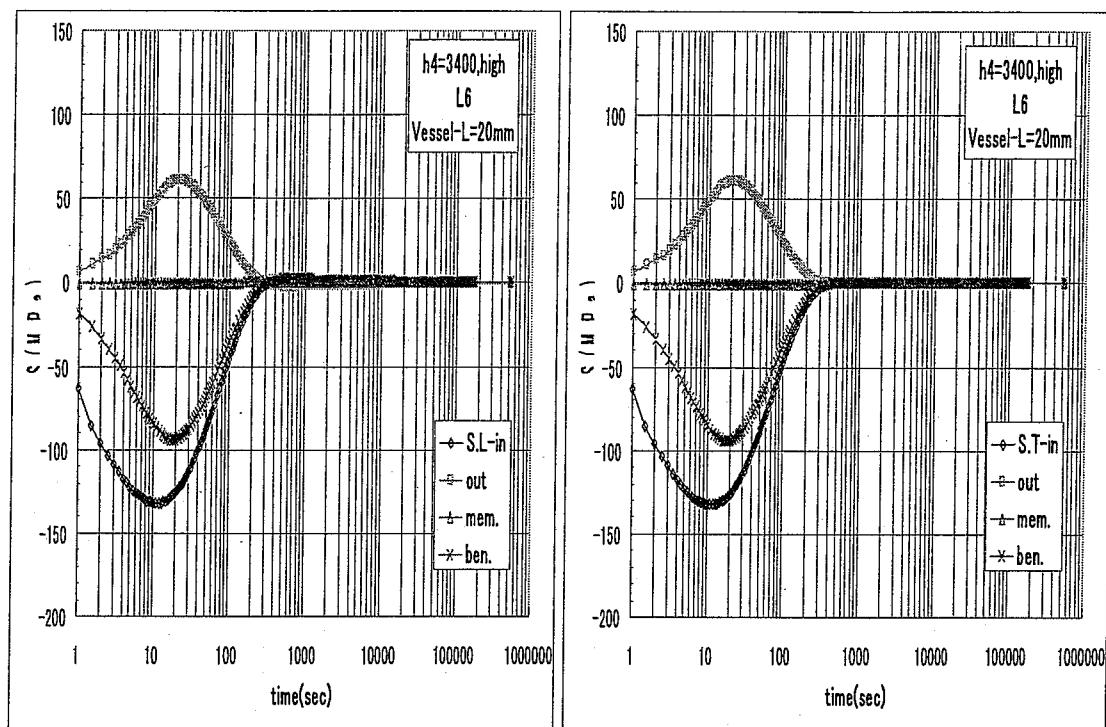


Fig.3.2-4(5) IHX スカート構造評価断面 L5 の Green 関数



$h_{\max} \uparrow$

$h_{\min} \downarrow$

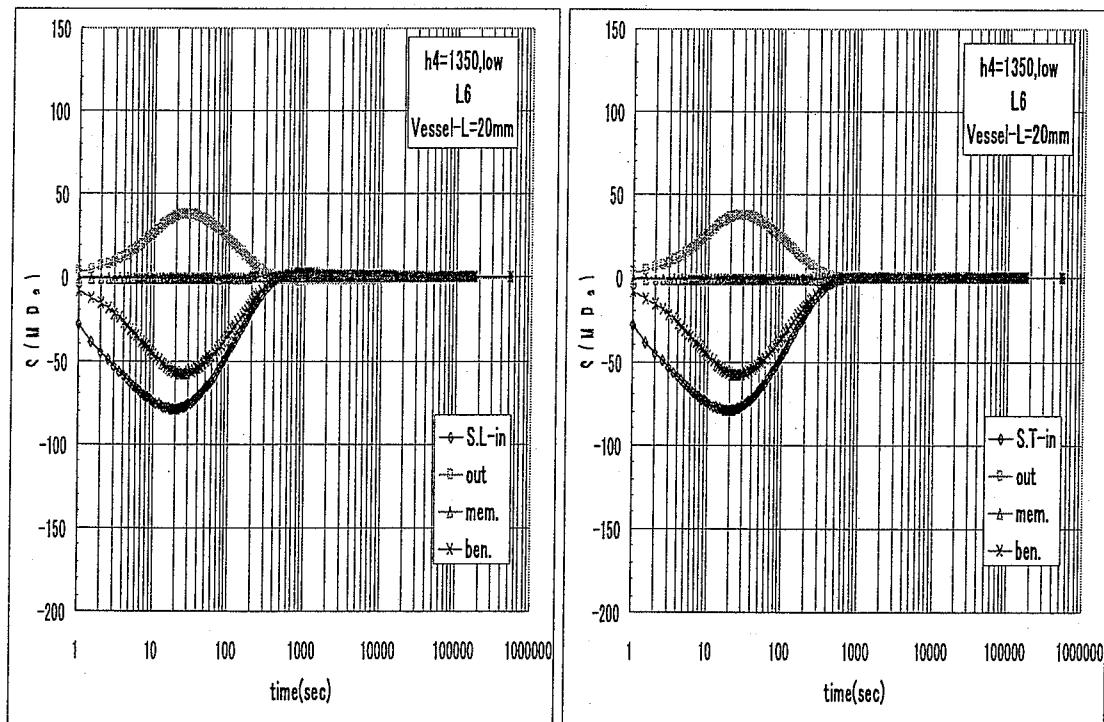
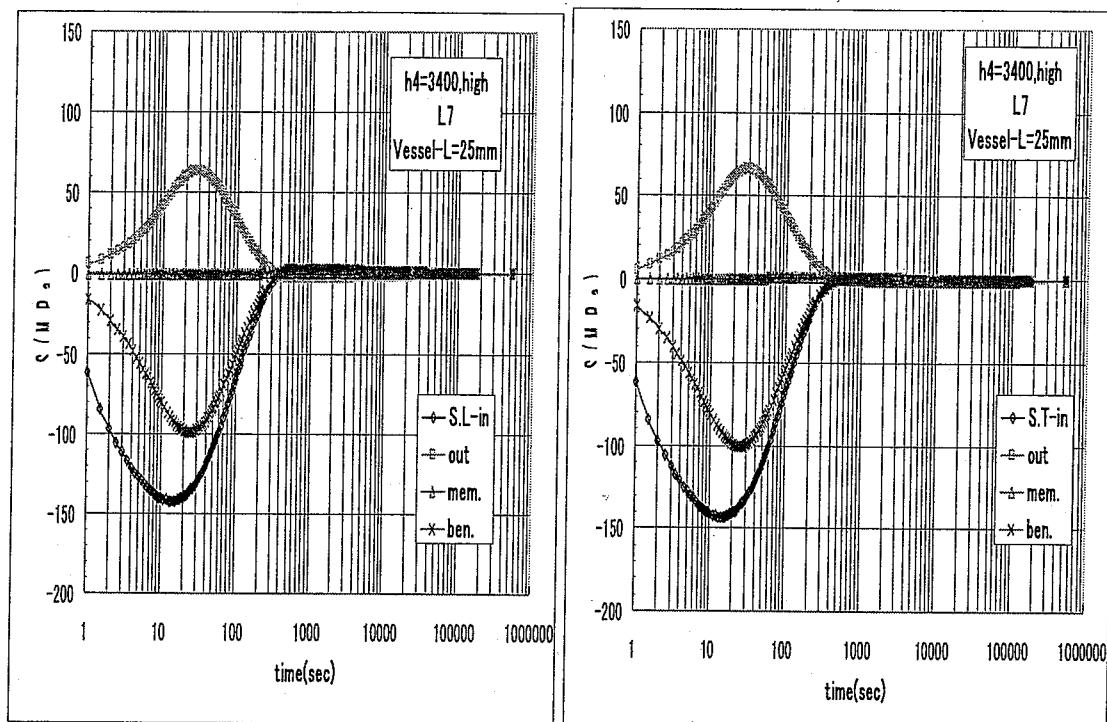


Fig.3.2-4(6) IHX スカート構造評価断面 L6 の Green 関数



$h_{\max} \uparrow$

$h_{\min} \downarrow$

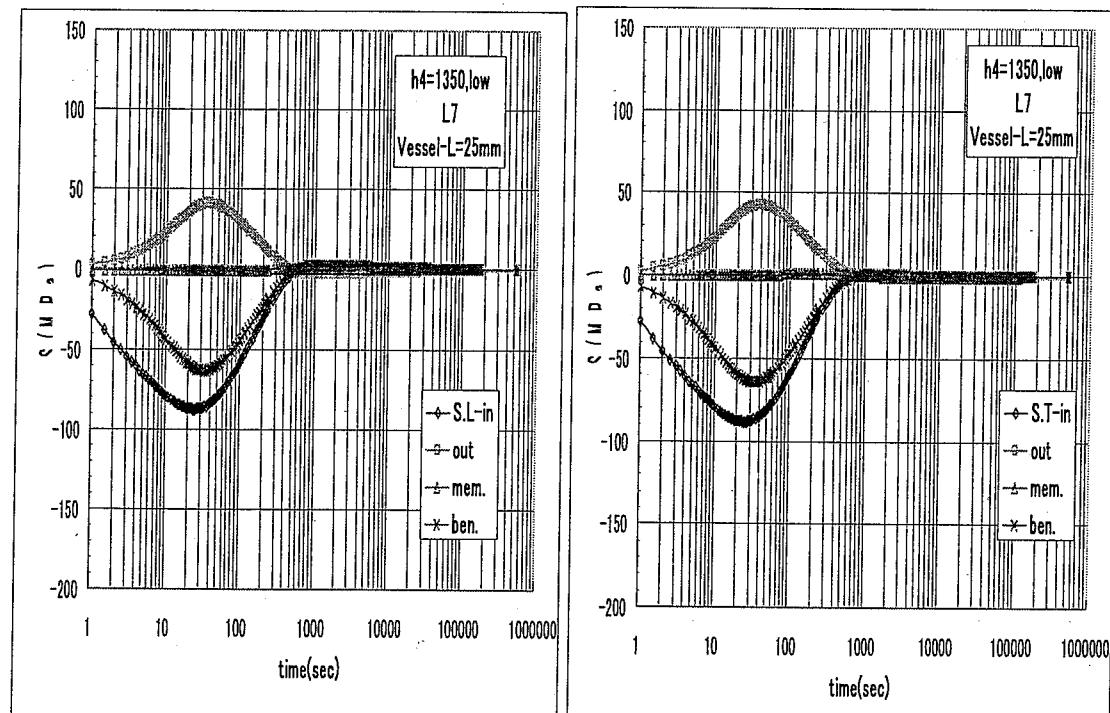


Fig.3.2-4(7) IHX スカート構造評価断面 L7 の Green 関数

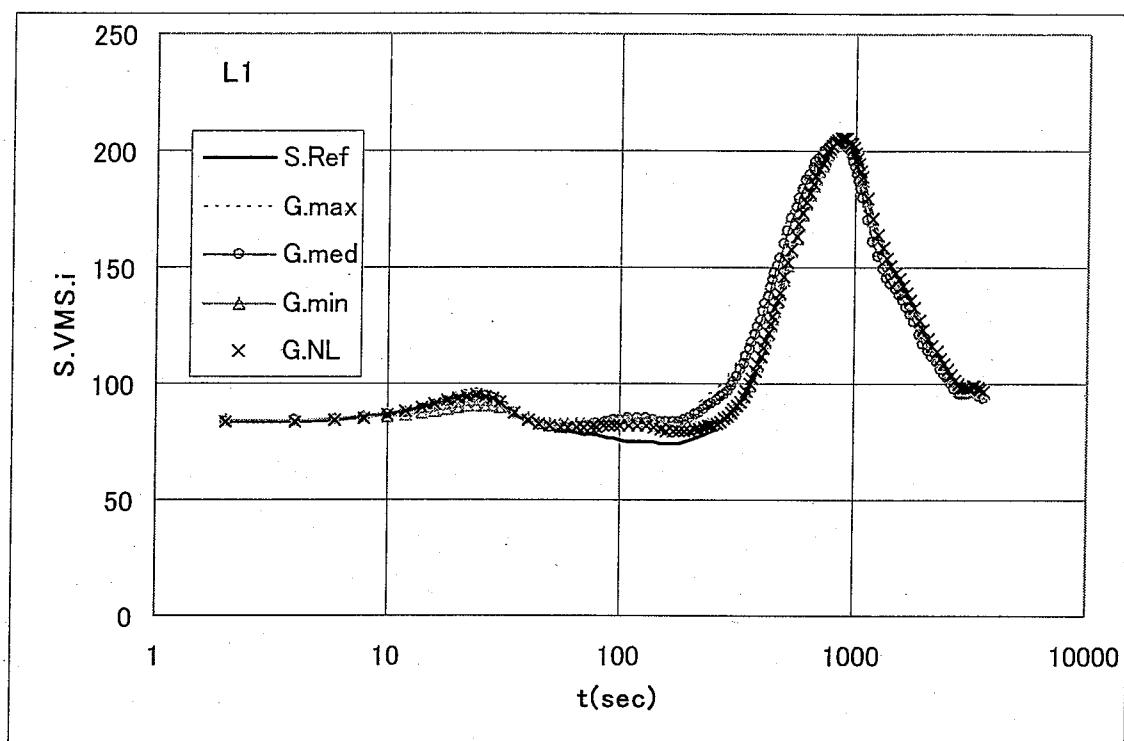


Fig.3.2-5(1) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L1 の応力

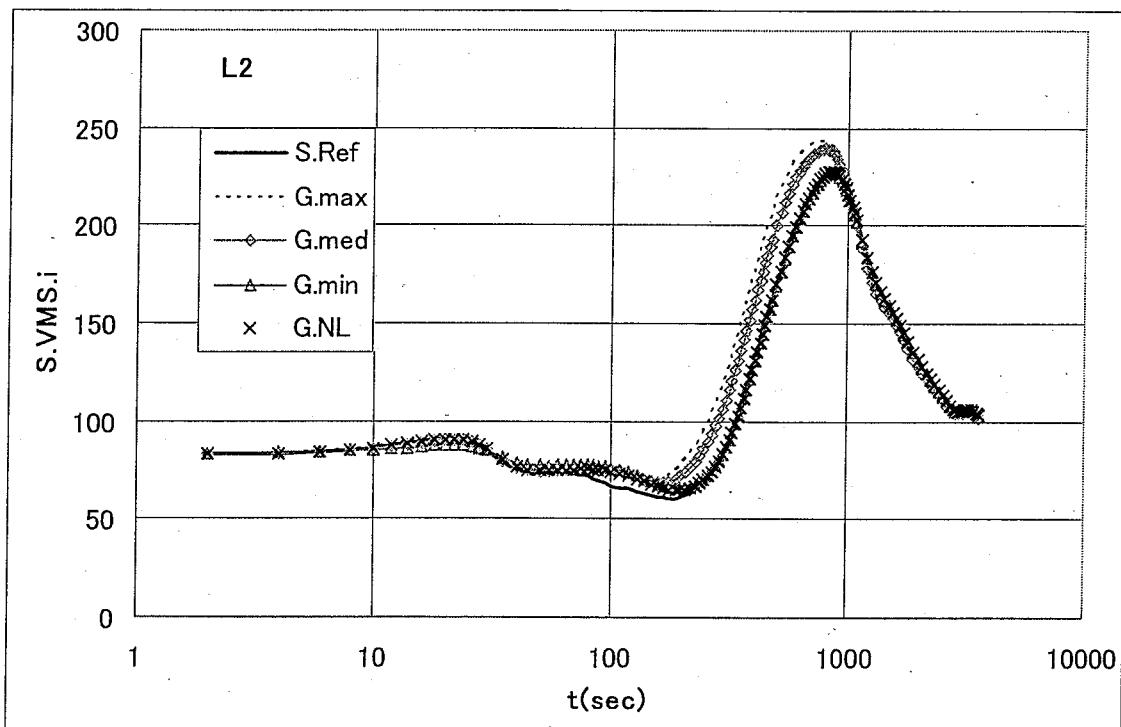


Fig.3.2-5(2) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L2 の応力

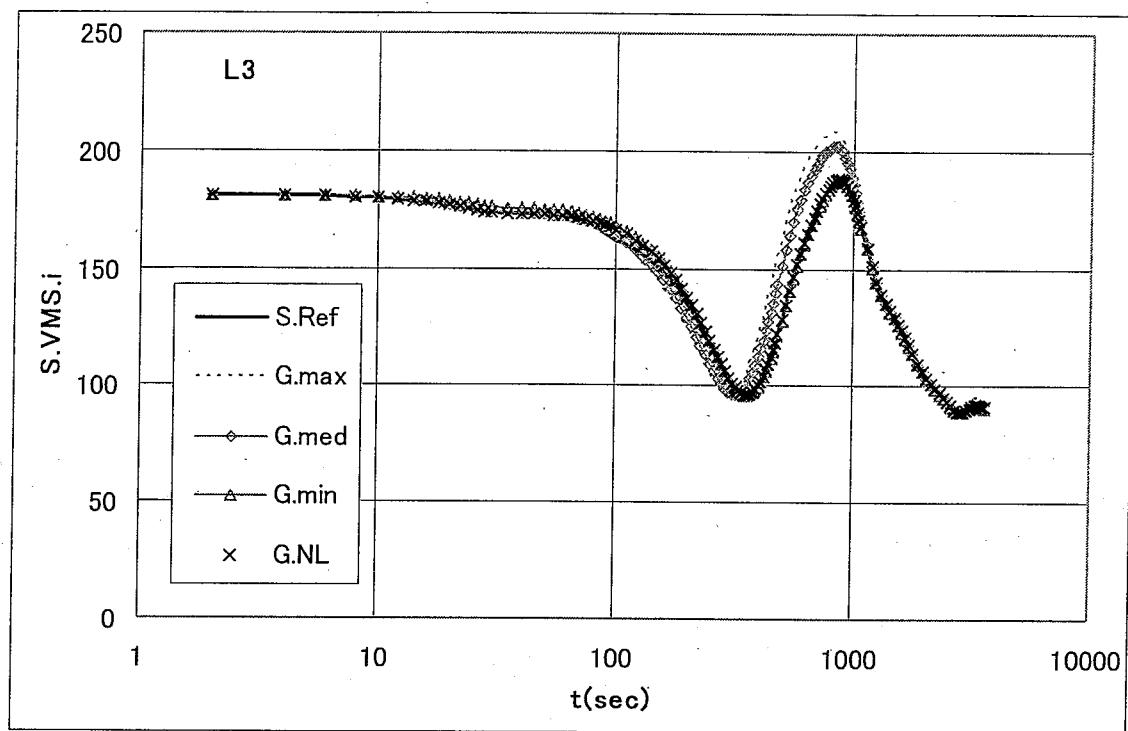


Fig.3.2-5(3) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L3 の応力

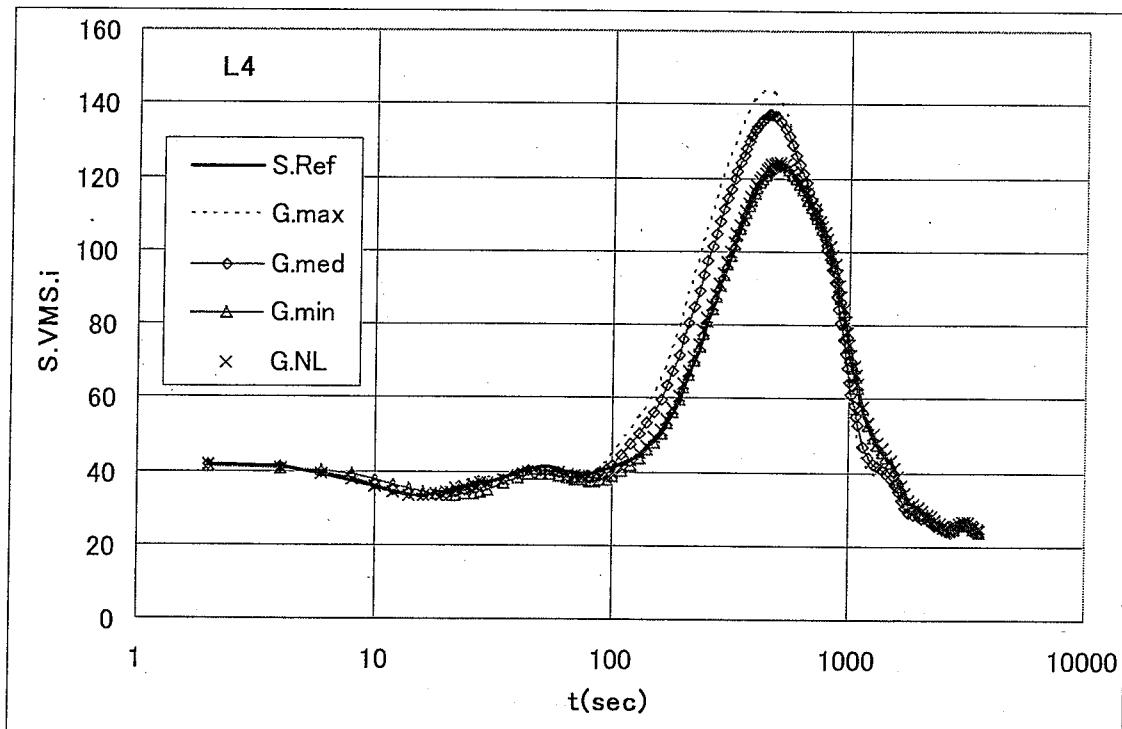


Fig.3.2-5(4) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L4 の応力

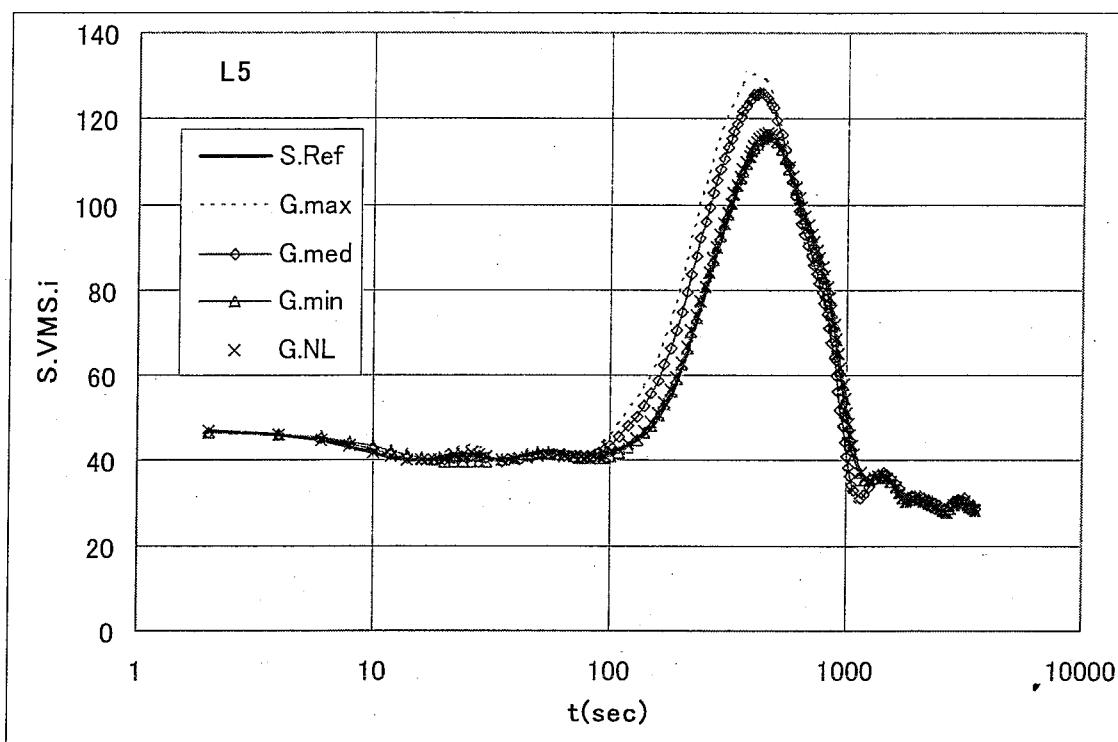


Fig.3.2-5(5) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L5 の応力

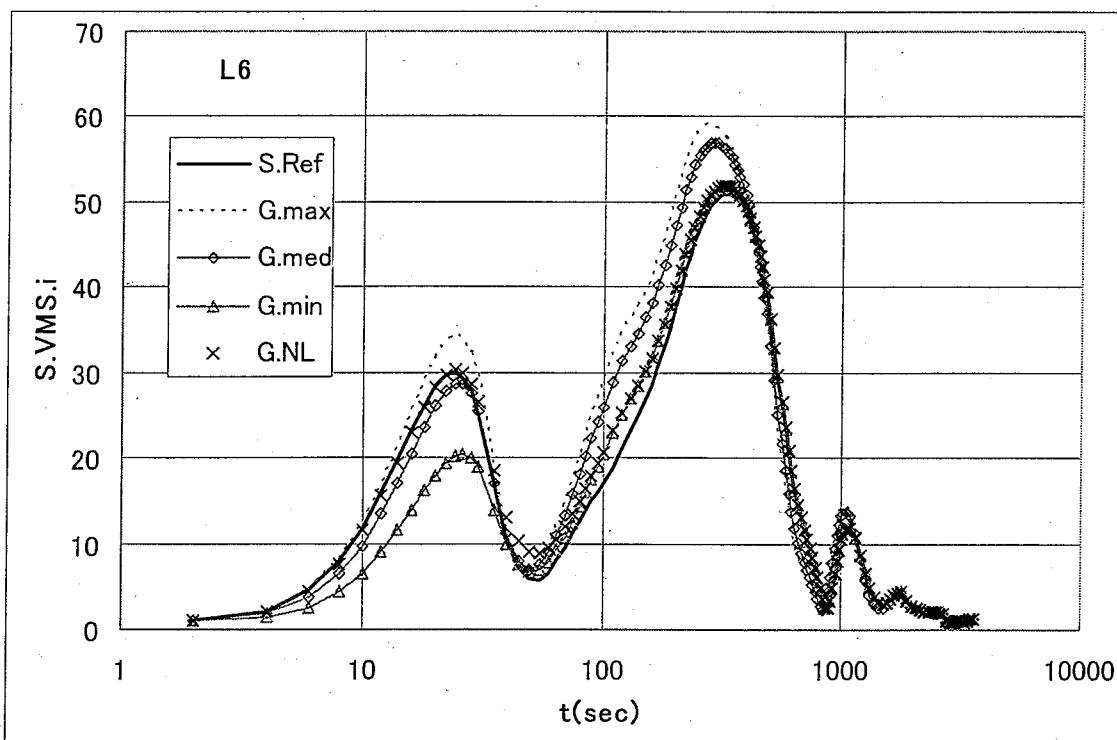


Fig.3.2-5(6) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L6 の応力

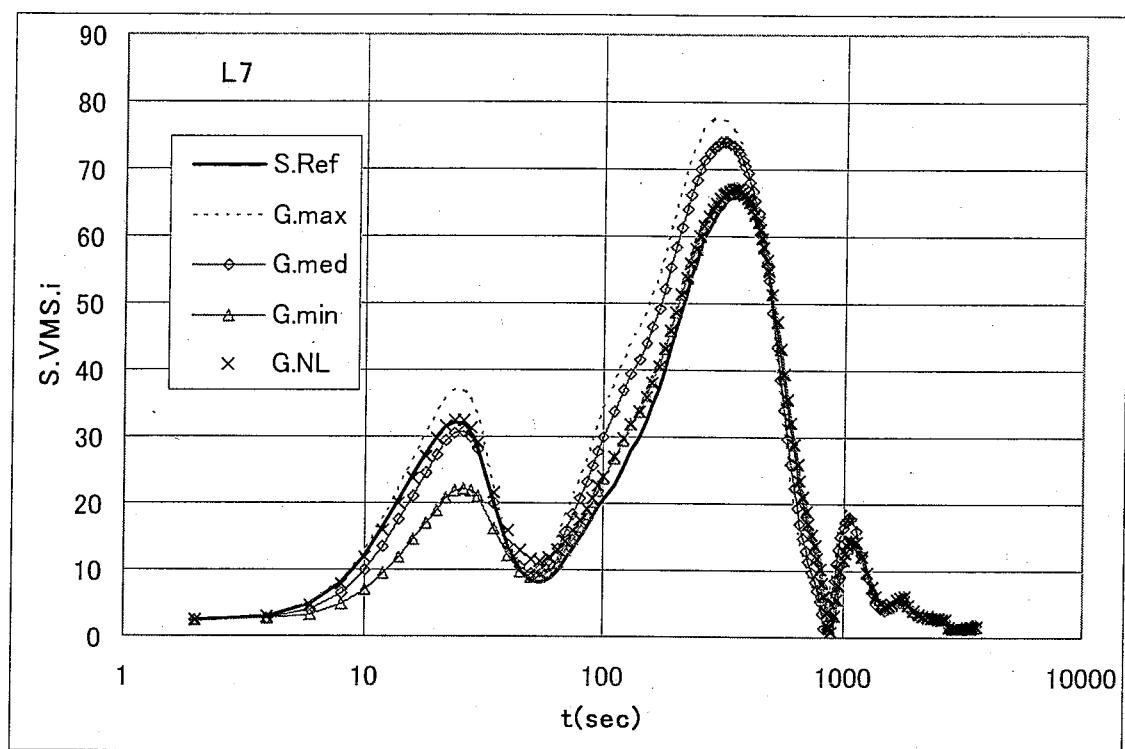


Fig.3.2-5(7) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L7 の応力

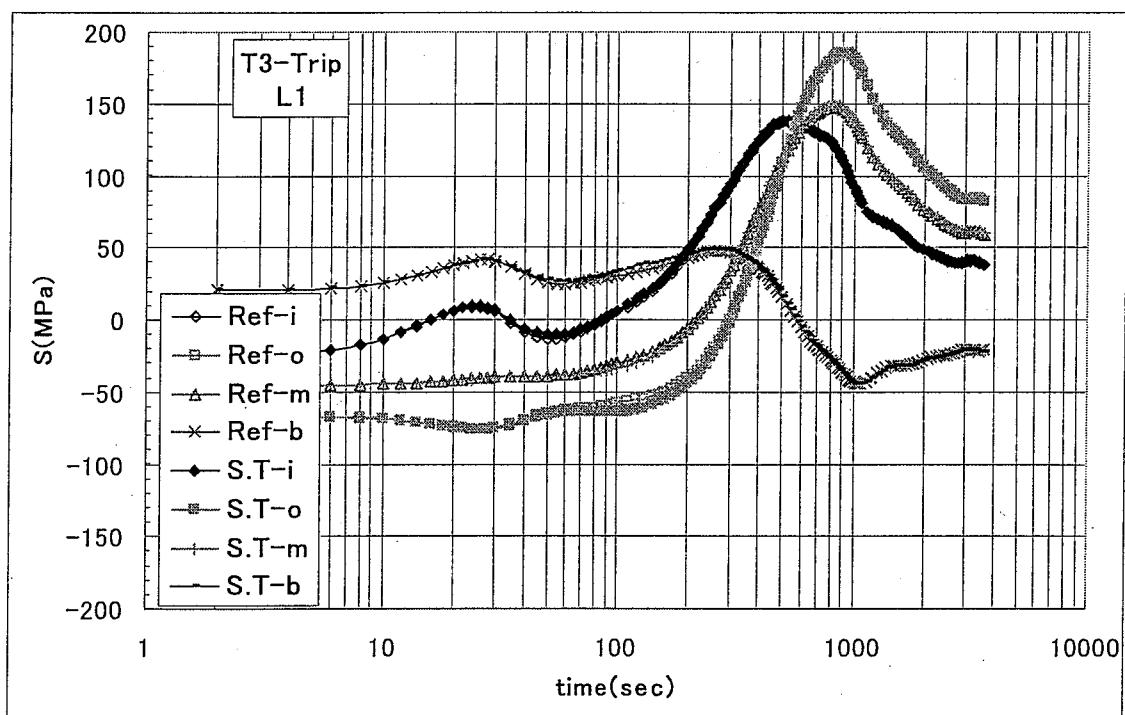
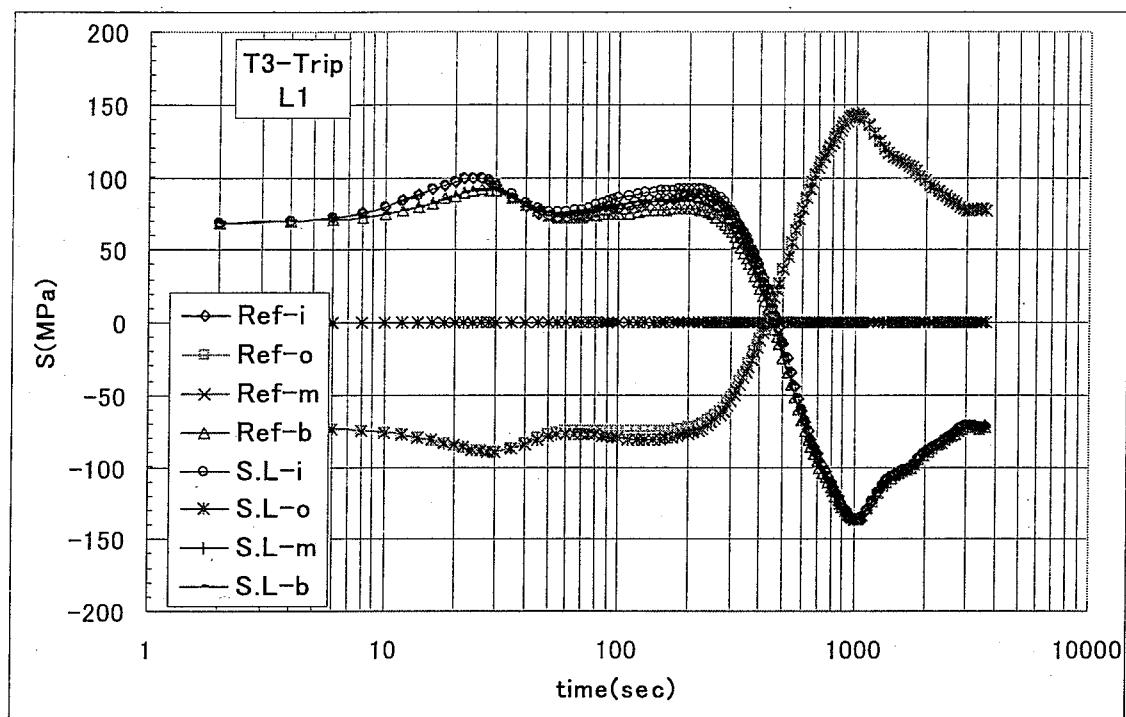


Fig.3.2-6(1) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L1 の応力成分

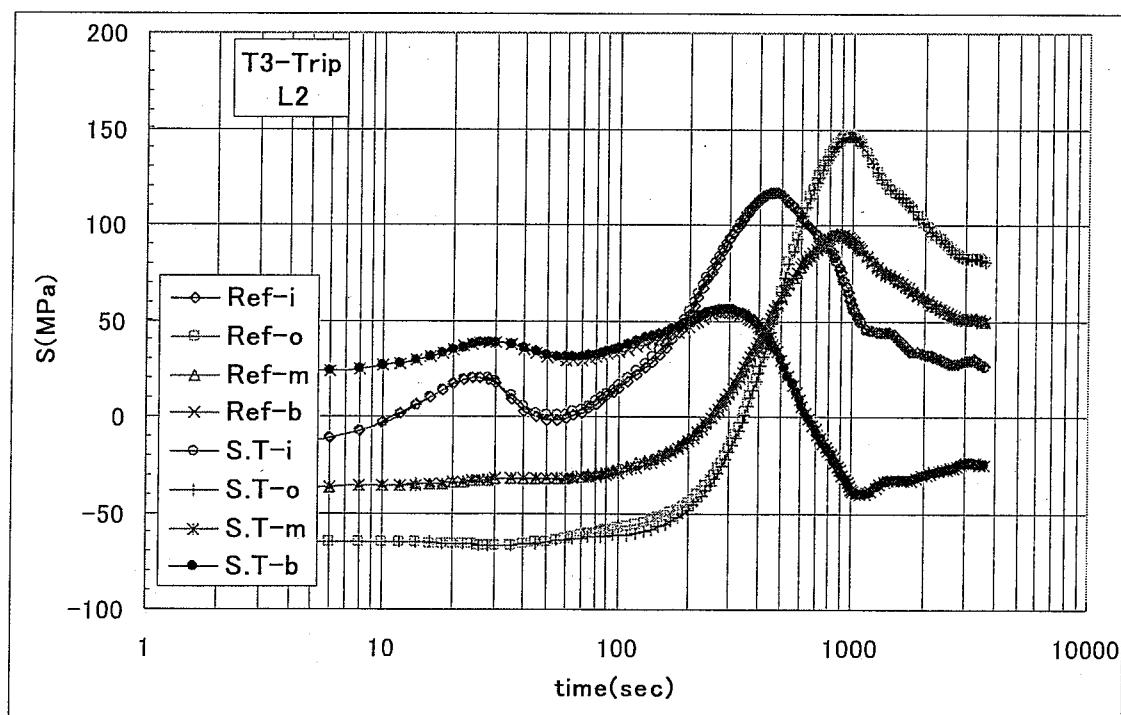
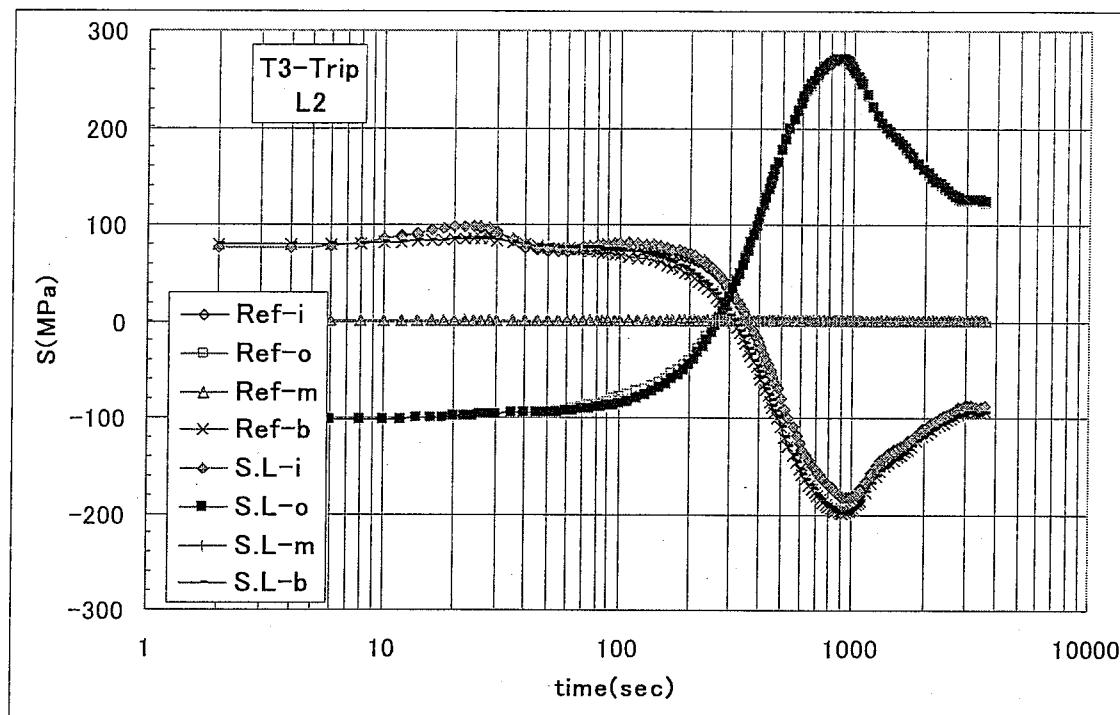


Fig.3.2-6(2) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L2 の応力成分

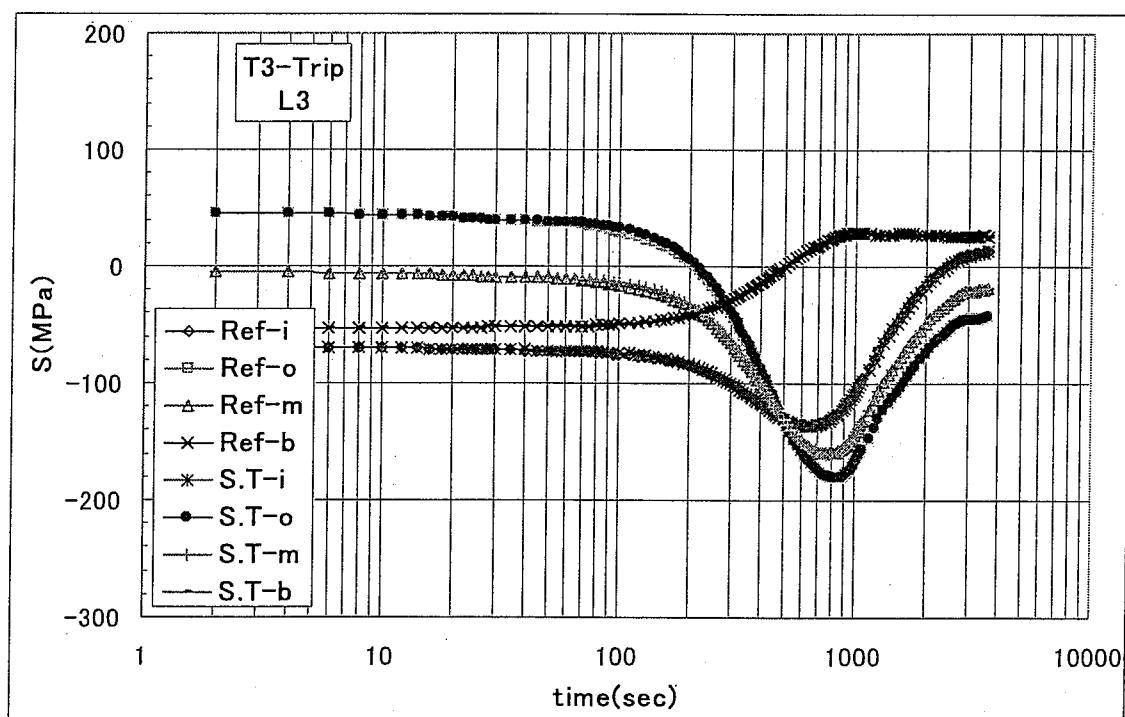
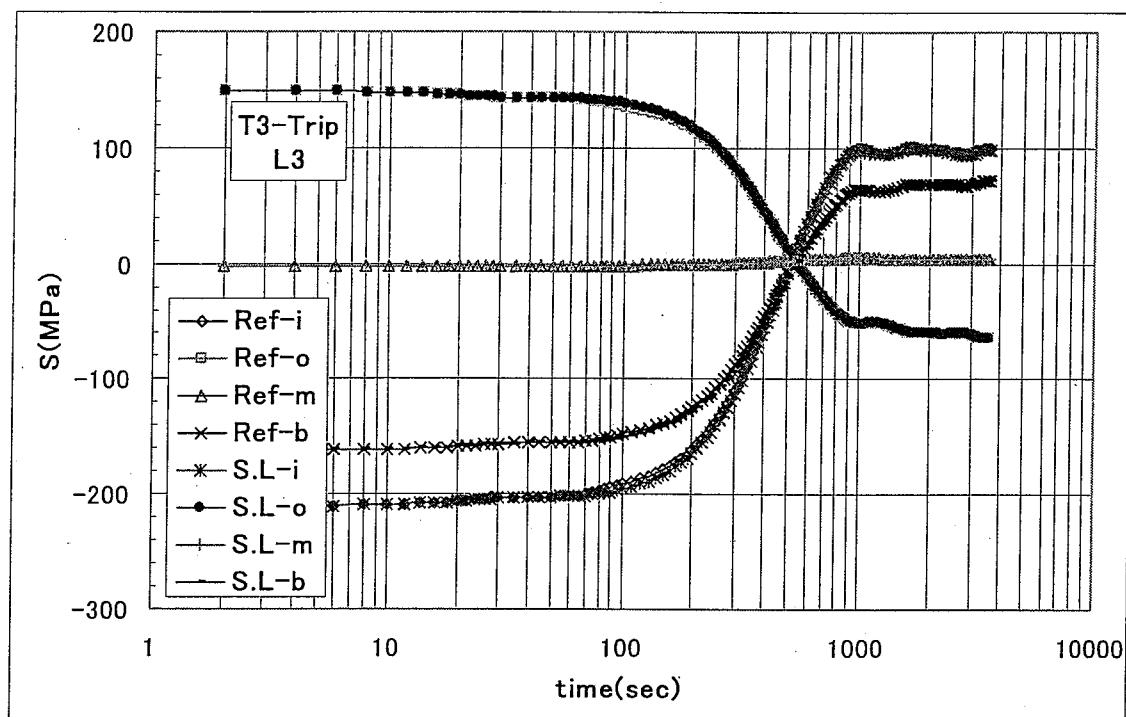


Fig.3.2-6(3) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L3 の応力成分

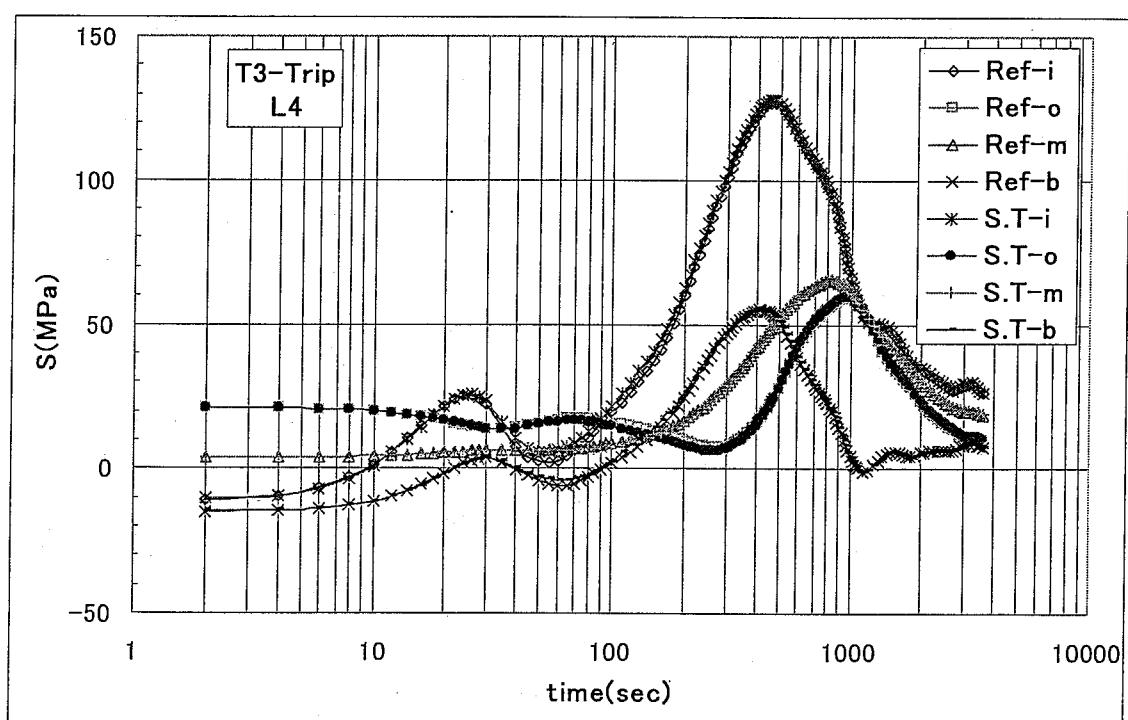
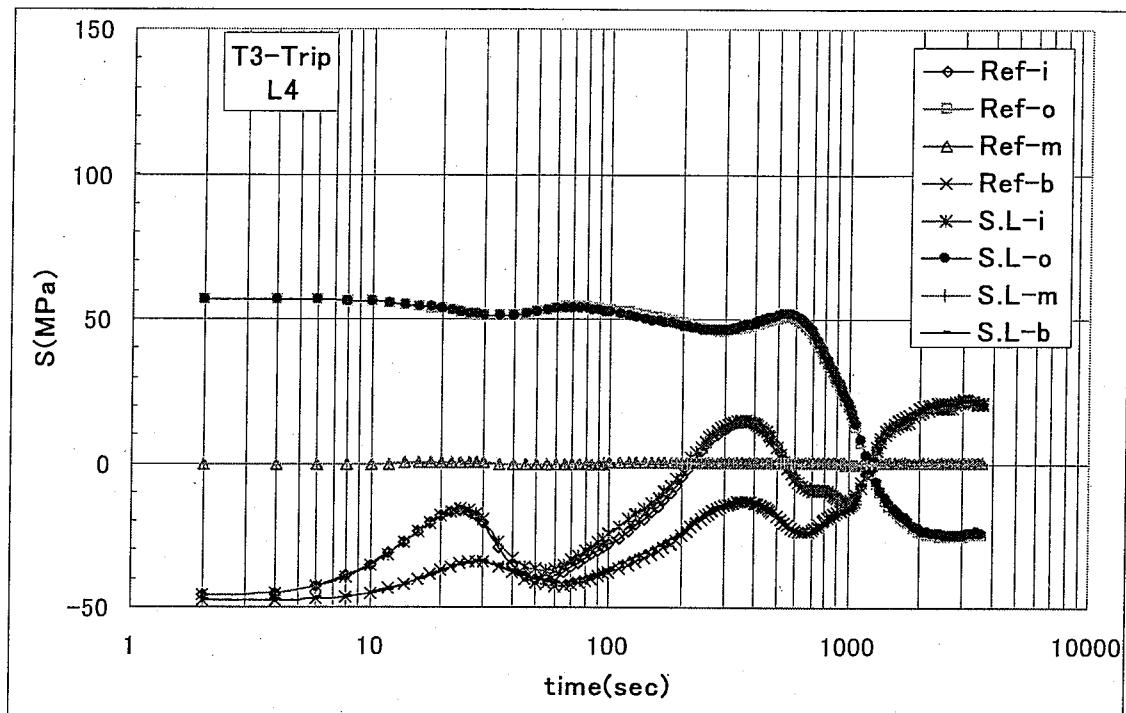


Fig.3.2-6(4) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L4 の応力成分

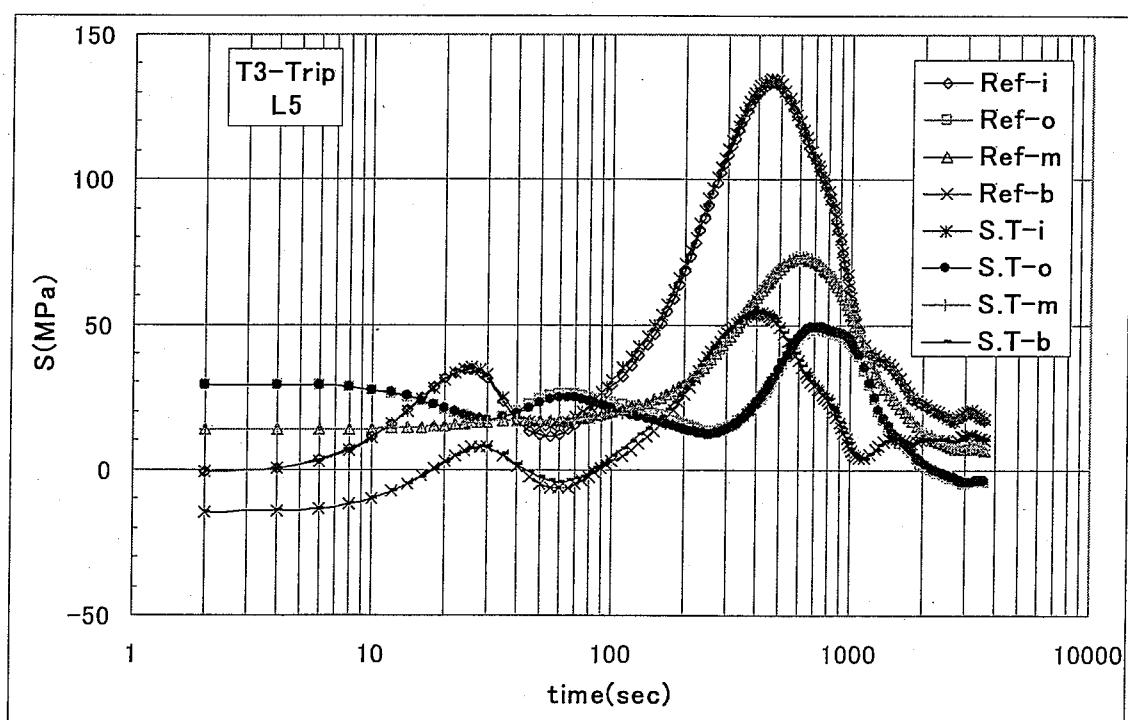
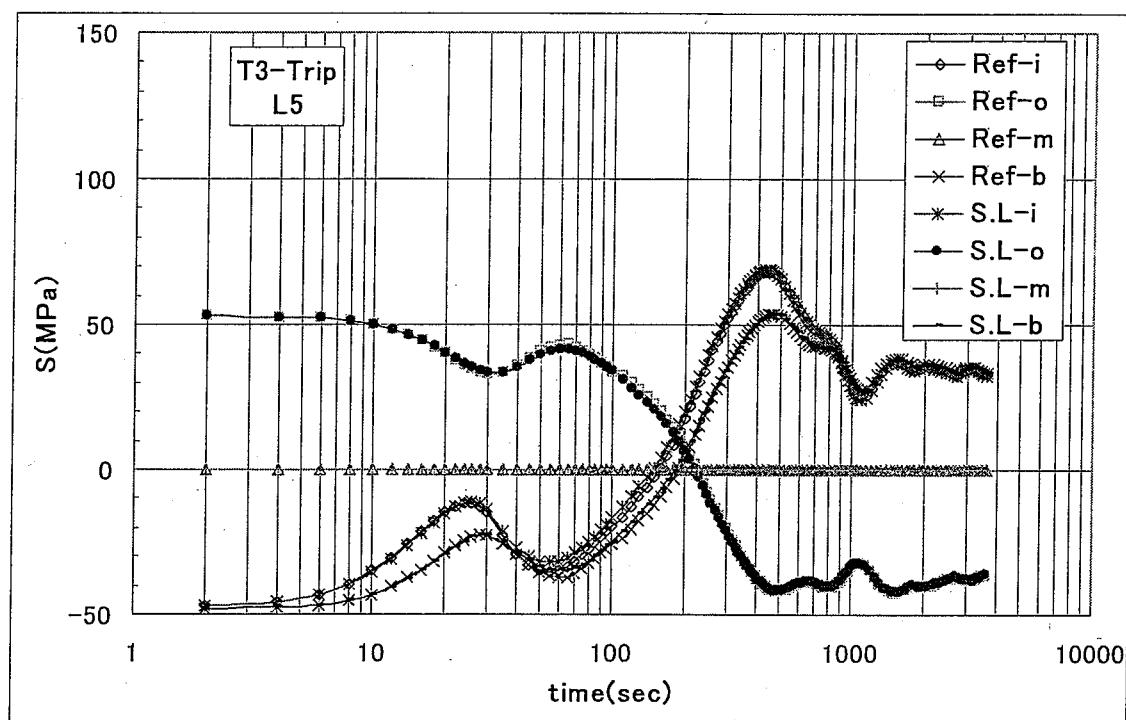


Fig.3.2-6(5) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L5 の応力成分

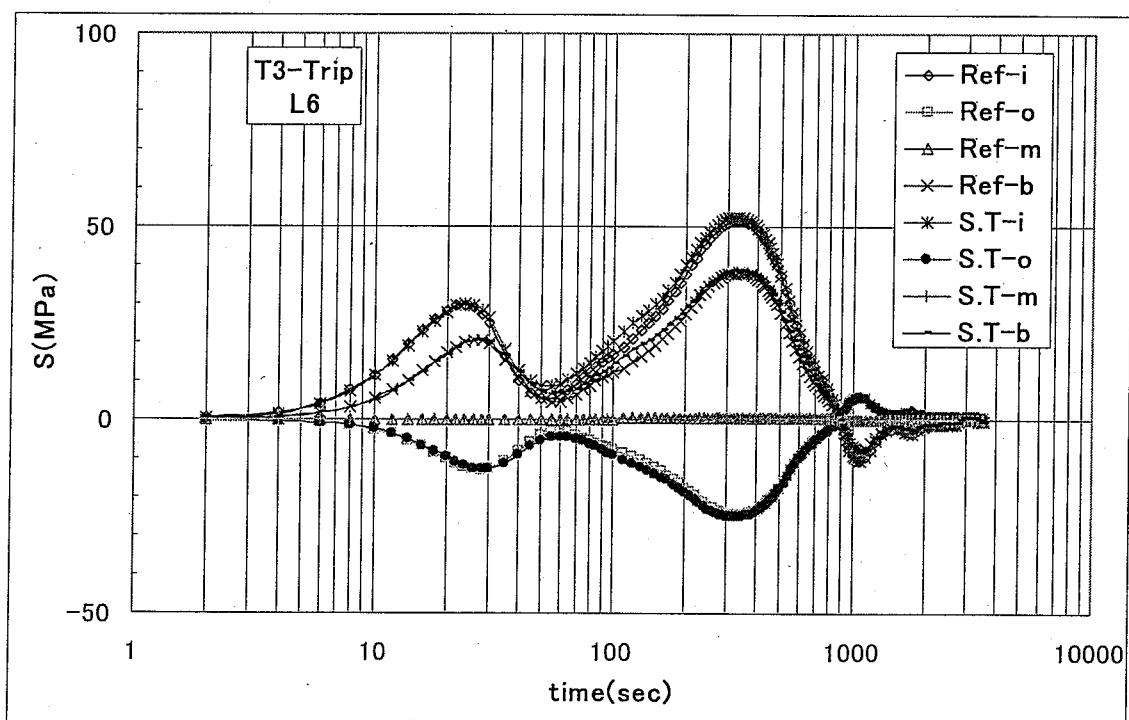
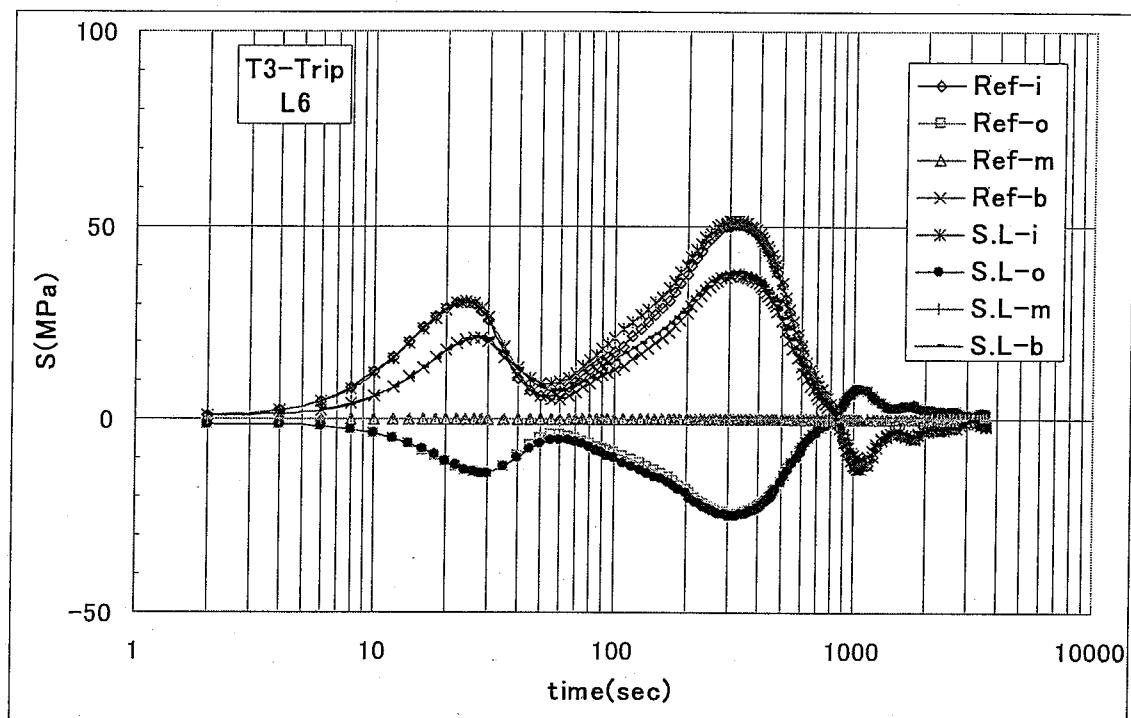


Fig.3.2-6(6) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L6 の応力成分

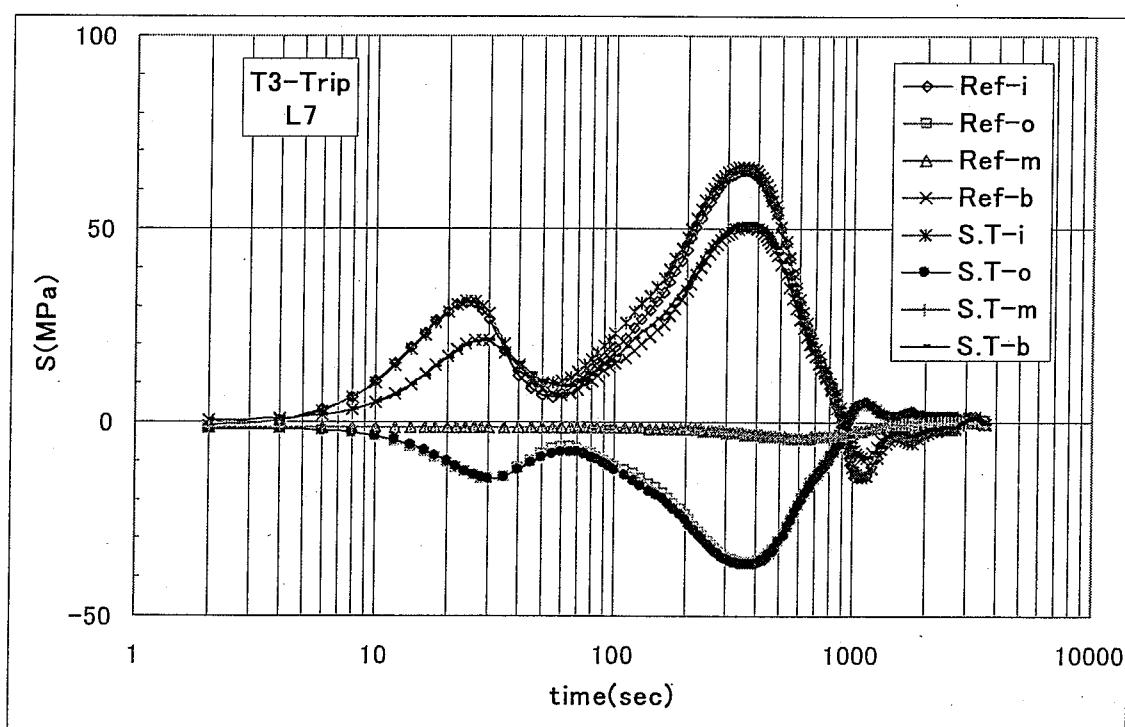
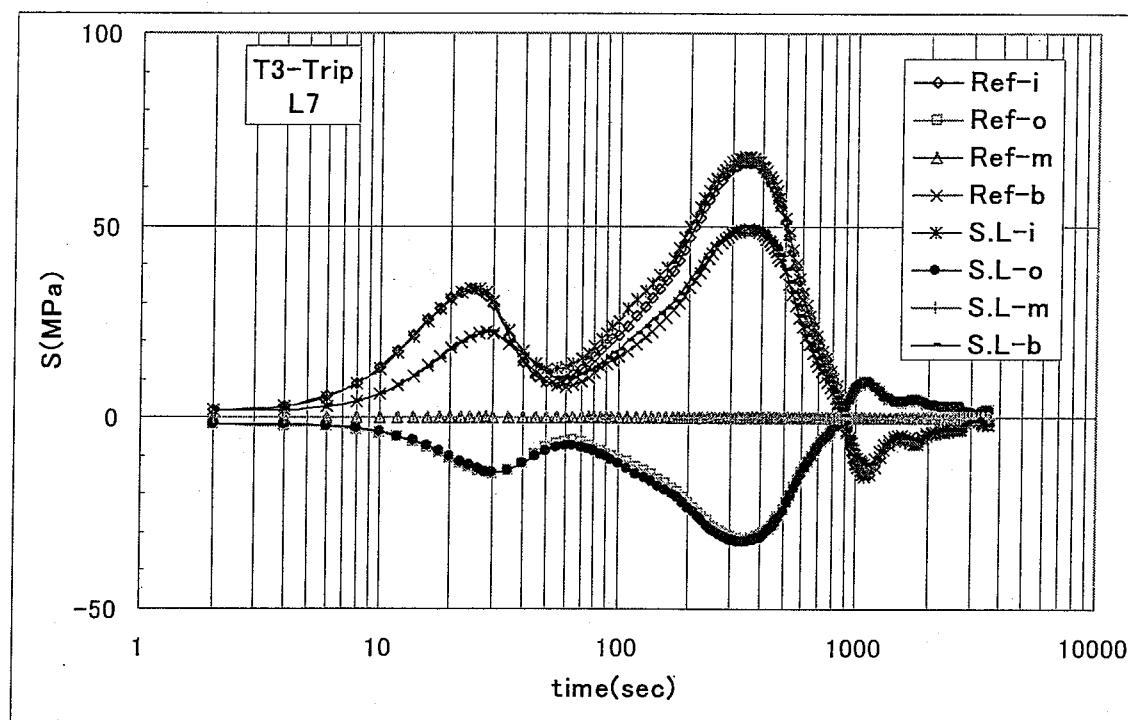


Fig.3.2-6(7) 手動トリップによる IHX スカート構造評価断面 L7 の応力成分

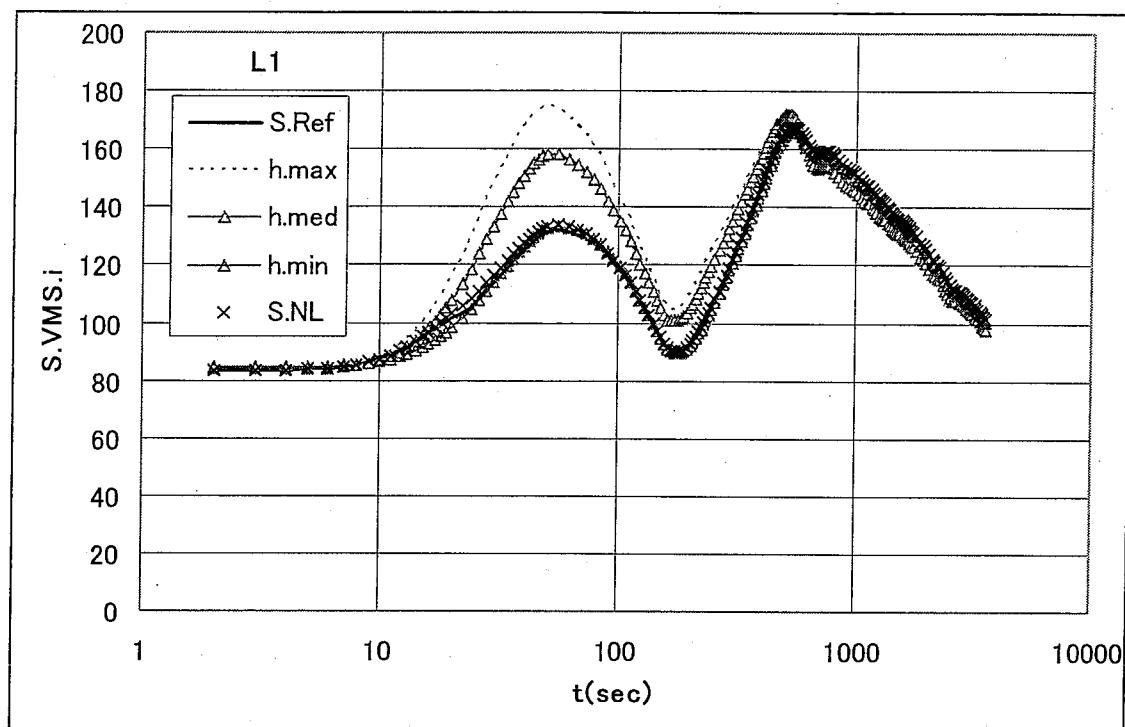


Fig.3.2-7(1) 一次ポンプ軸固着による IHX スカート構造評価断面 L1 の応力

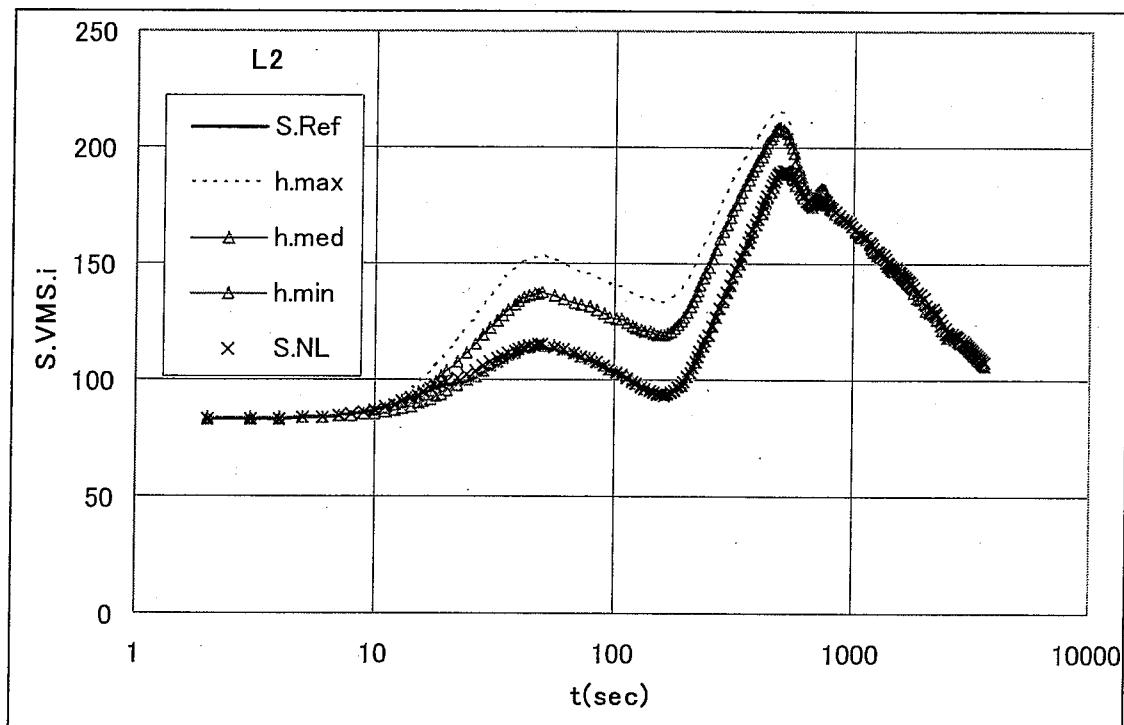


Fig.3.2-7(2) 一次ポンプ軸固着による IHX スカート構造評価断面 L2 の応力

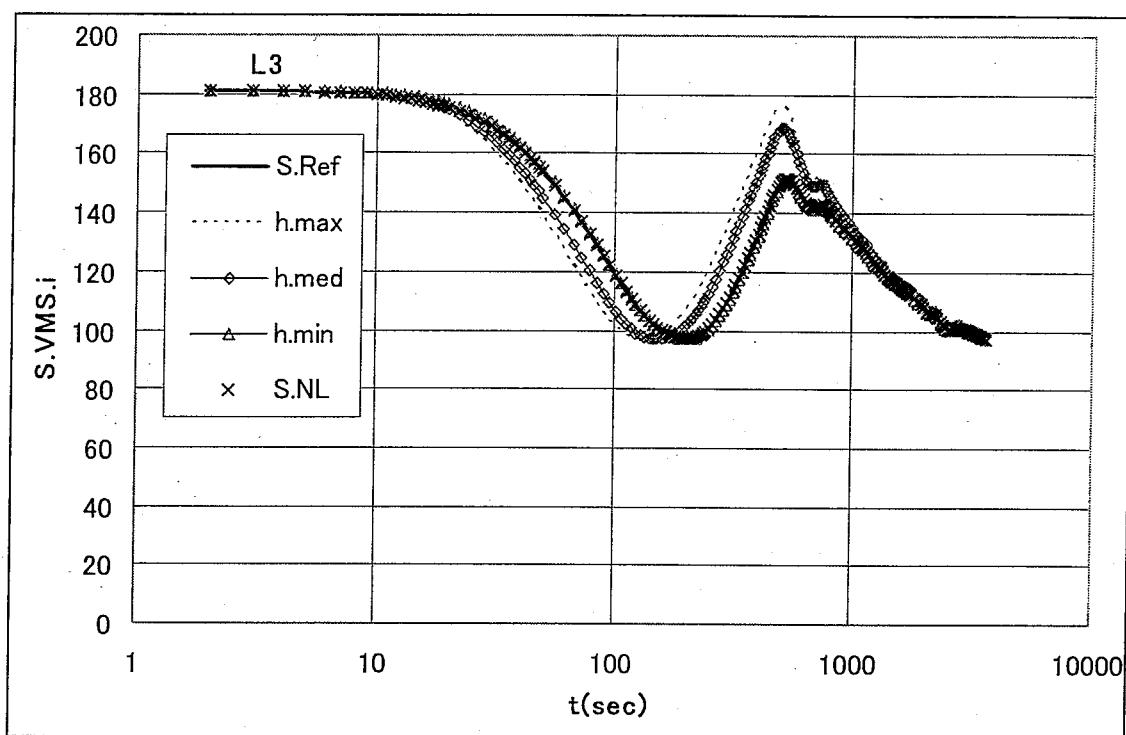


Fig.3.2-7(3) 一次ポンプ軸固着による IHX スカート構造評価断面 L3 の応力

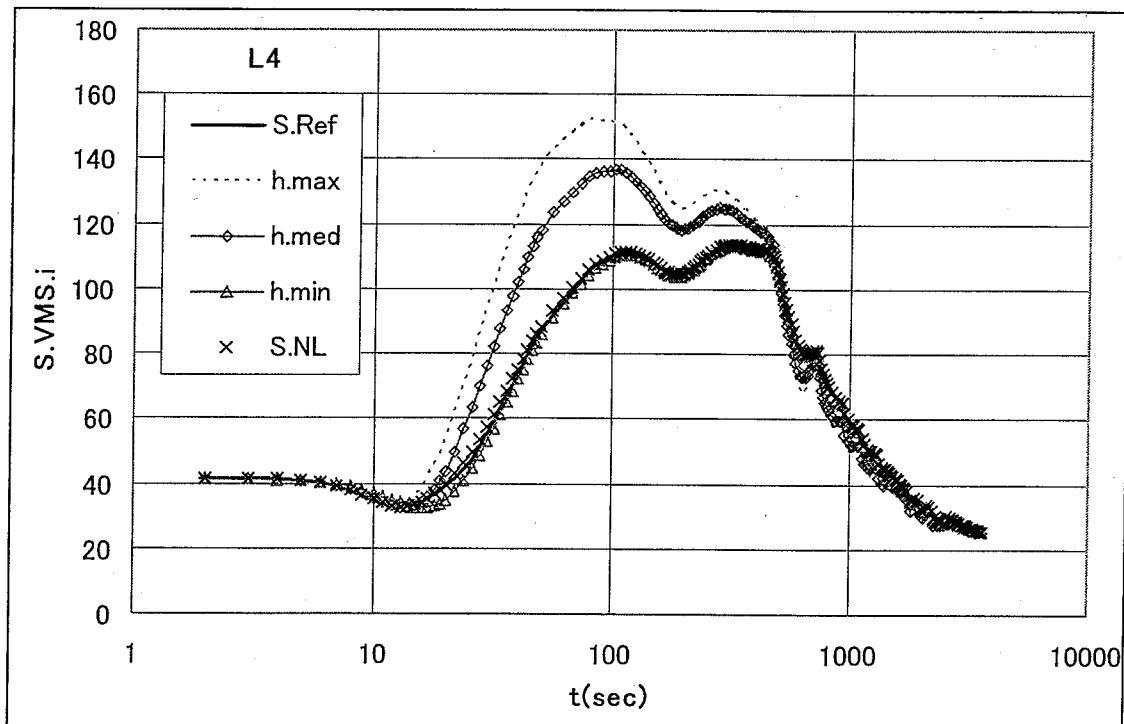


Fig.3.2-7(4) 一次ポンプ軸固着による IHX スカート構造評価断面 L4 の応力

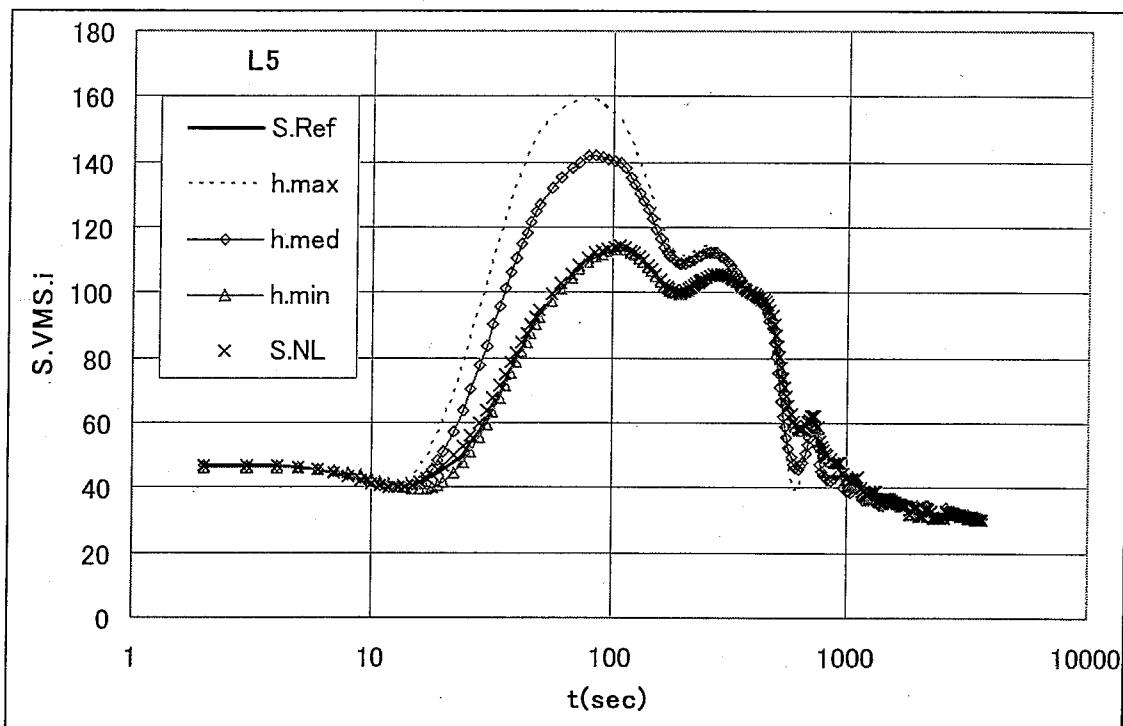


Fig.3.2-7(5) 一次ポンプ軸固定による IHX スカート構造評価断面 L5 の応力

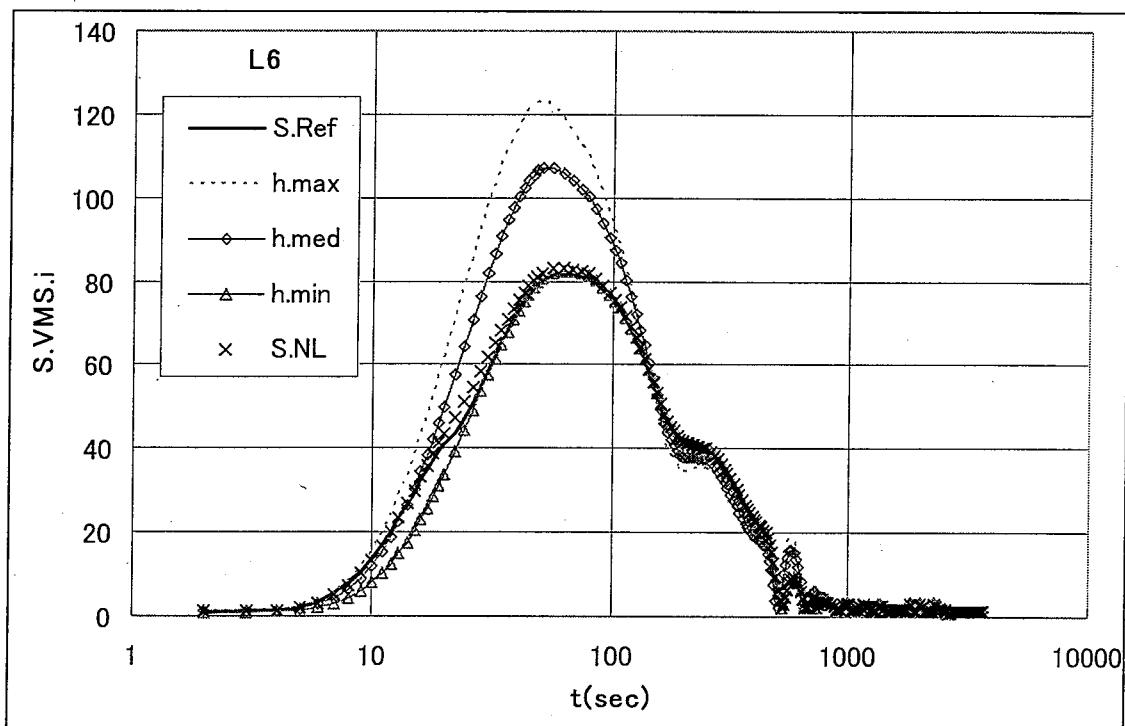


Fig.3.2-7(6) 一次ポンプ軸固定による IHX スカート構造評価断面 L6 の応力

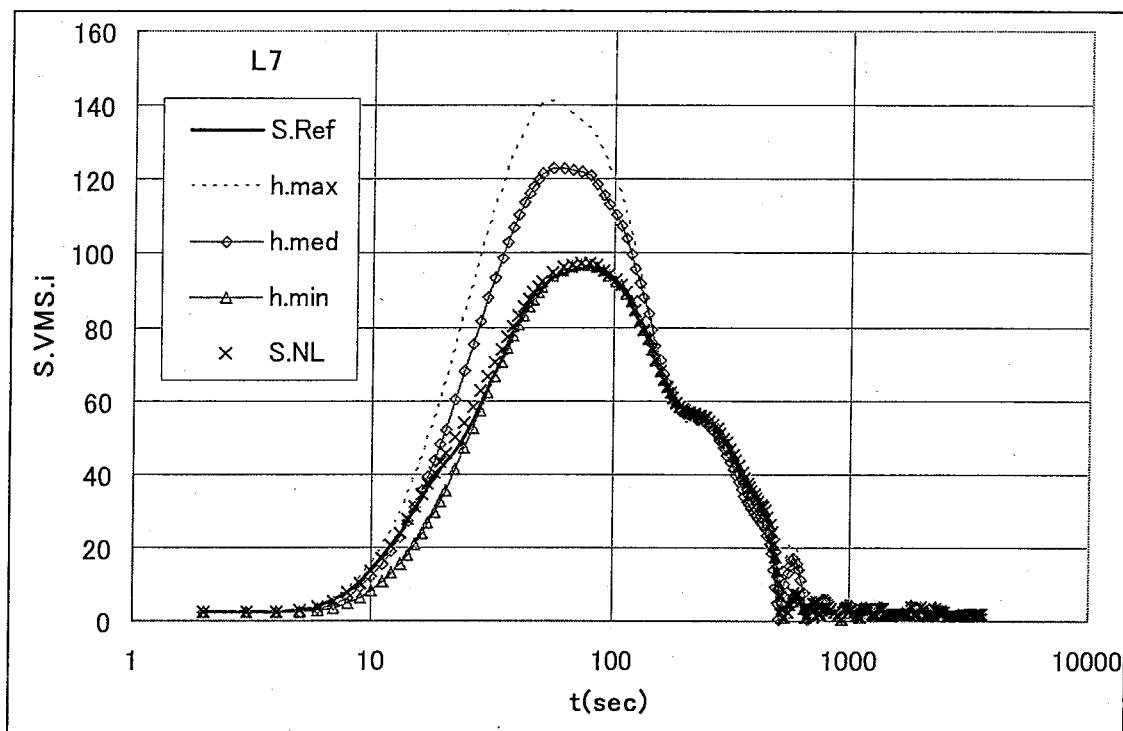


Fig.3.2-7(7) 一次ポンプ軸固着による IHX スカート構造評価断面 L7 の応力

### 3. 3 IHX 管板構造の熱過渡応力解析

#### 3. 3. 1 IHX 管板構造の Green 関数

手動トリップ事象の3時点 [初期上限値( $h_{1,max}, h_{2,max}$ )、中間値( $h_{1,med}, h_{2,med}$ )、最終下限値( $h_{1,med}, h_{2,min}$ )] および一次ポンプ軸固定事象の3時点 [初期上限値は手動トリップと共に省略、中間値1 ( $h_{1,med}, h_{2,max}$ )、中間値2 ( $h_{1,min}, h_{2,med}$ )、最終下限値( $h_{1,min}, h_{2,min}$ )] の熱伝達係数を使用して、以下の線形熱伝導解析および線形熱応力解析を行い、Na 温度変化に対する過渡熱応力の Green 関数を求めた。

##### (1) 線形熱伝導解析

- ・ 初期一様温度 0°Cとした。[ $F_1(0)=0, F_2(0)=0$ ]
- ・ 一次系 Na のみステップ変化 100°C [ $F_1(t)=100, F_2(t)=0(t>0)$ ] の解析
- ・ 二次系 Na のみステップ変化 100°C [ $F_1(t)=0, F_2(t)=100(t>0)$ ] の解析
- ・ 最終時点は  $t=\infty$  の定常温度解析とした。
- ・ 初期上限値( $h_{1,max}, h_{2,max}$ )の解析による温度センターを Fig.3.3-1(一次系 Na ステップ変化)および Fig.3.3-2(二次系 Na ステップ変化)に示す。

##### (2) 線形熱応力解析

線形熱伝導解析による構造温度を用いて線形熱応力解析を行った。

- ・ 上限値( $h_{1,max}, h_{2,max}$ )の解析による Mises の等価応力センターを Fig.3.3-3(一次系 Na ステップ変化)および Fig.3.3-4(二次系 Na ステップ変化)に示す。
- ・ 热応力解析結果および過去の同様構造の解析経験から選定された評価断面を Fig.3.3-5 に示す。評価断面 L1 から L6 は熱応力に特に留意すべき応力集中部位である。評価断面 L7 から L10 は応力集中のない容器胴部であり、基準熱応力を確認するために追加したものである。

##### (3) 热応力 Green 関数

線形熱応力解析結果は Na 温度のステップ変化 100°Cに対する熱応力の Green 関数である。選定された評価断面 L1~L10 の各々について、Green 関数テンソルの各成分 (N ; 断面板厚方向成分,L ; 断面に垂直な長手方向成分,T ; 円周方向成分,NL ; せん断成分) の内面値(i)、外面値(o)、断面平均値(m ; 膜応力)および断面一次モーメント(b ; 曲げ応力)の時系列をファイル化した。

- ・ 以後、一次系 Na 温度ステップ変化に対する Green 関数を  $G_1(P, h_1, h_2, t)$  と

記述し、二次系 Na 温度ステップ変化に対する Green 関数を  $G_2(P,h_1,h_2,t)$  と記述することにする。

- 以後テンソル成分記号( $N,L,T,NL$ )および記号( $i,o,m,b$ )は特に必要な場合を除いて省略する。
- $G_1(P,h_{1,max},h_{2,max},t)$ の主要な成分( $L,T$ )を Fig.3.3-6 に示す。
- $G_2(P,h_{1,max},h_{2,max},t)$ の主要な成分( $L,T$ )を Fig.3.3-7 に示す。

#### (4) 管板構造の熱応力特性

各断面の熱応力特性（極値、定常値、時定数、熱伝達係数依存性）について分析した結果を Table.3.3-1 に示した。以下に各断面の特徴を記す。ここでは一次系 Na 温度を  $F_1$ 、その変化を  $\Delta F_1$  と略記し、二次系 Na 温度を  $F_2$ 、その変化を  $\Delta F_2$  と略記する。

- $\Delta F_1$  に対する温度応答を時定数の小さい順に並べると以下のようになる。初期表面ピーク温度 [一次系内側胴外面( $h_{1a}$ )、管板上面( $h_{1a}$ )、支持スカート上面( $h_{1a}$ )、一次系外側胴内面( $h_{1a}$ )]、管板穴あき領域平均温度(伝熱管  $h_{1b}$ )<一次系内側胴曲げ上限、管板穴あき領域平均温度上限（定常）<一次系内側胴一様上限（定常）、支持スカート曲げ上限（定常）、一次系外側胴曲げ上限<管板内側リム温度上限（定常）<管板外側リム半径方向温度勾配上限（定常）<支持スカートと外側胴の Y 接続部軸方向温度勾配上限（定常）。管板では伝熱管( $h_{1b}$ )による平均温度上昇と下面( $F_2=0,h_{2a}$ )のピーク温度が定常値として残る。下面ピーク温度により曲げ成分が伴う。内側リムおよび外側リムを除いて管板は早期に定常温度（膜+曲げ+下面ピーク）に達する。一次系伝熱管による管板平均温度上昇が下面の二次系によるピーク温度の浸透厚さを減少させ、管板の曲げ（厚さ方向温度モーメント）を減少させる効果がある。

- $\Delta F_2$  に対する温度応答を時定数の小さい順に並べると以下のようになる。初期表面ピーク温度 [二次系内側胴外面( $h_{2a}$ )、管板下面( $h_{2a}$ )、支持スカート下面( $h_{2a}$ )、二次系外側胴内面( $h_{2b}$ )] < 二次系内側胴曲げ上限、管板下面ピーク上限（定常）< 二次系内側胴一様上限（定常）< 支持スカート曲げ上限（定常）、二次系外側胴曲げ上限<管板外側リム半径方向温度勾配上限（定常）< 支持スカートと外側胴の Y 接続部軸方向温度勾配上限（定常）。管板は外側リムを除いて早期に定常温度（膜+曲げ+下面ピーク）に達する。一次系( $h_{1a},h_{1b}$ )に比べて熱伝達係数  $h_{2a}$  が大きいので  $\Delta F_1$  に対するよりも更に早く定常に達する。

##### ・ 断面 L1 (内側胴と管板上面の接続 R 部)

$\Delta F_1$  により、短時間  $\tau_1$  で極値 1 が生じる。要因 1 は一次系内側胴の（曲げ+ピーク）であり  $h_1$  に大きく依存する。要因 2 は一次系内側胴と管板との平均温度差および管板の曲げである。二つの要因が同符号の曲げで重畠する。一次

系内側胴が一様定常に達して要因 1 が消え、リム部も含めた管板温度と支持スカートが定常に達した時点  $\tau_2$  で極値 2 となる。全体が定常温度に達して定常応力に収束する。

$\Delta F_2$  により、短時間で小さな極値 1（要因 1～二次側内側胴の曲げが内側リムを介して伝達される）が生じる。 $\Delta F_1$  による極値 1 と同符号である。早期に二次系内側胴が上限に達し、要因 2（管板下面のピーク温度に伴う管板の膜+曲げ）に移行し符号反転する。単調増加し、支持スカートおよび Y 接続部が定常温度に達して定常応力となる。 $\Delta F_2$  による定常応力は  $\Delta F_1$  による定常応力と逆符号で大きさが等しい。

50 秒の温度変化により短時間の熱応力が生じる。500 秒以上の長時間の温度変化による極値 2 および定常熱応力が支配的となる。定常値は逆符号で大きさが等しいので、 $F_1$  と  $F_2$  の差に比例した定常熱応力となる。極値 2 および定常熱応力の熱伝達係数依存性に注目したい。極値 2 および定常熱応力は管板の（膜+曲げ）が支配要因であるが、一次系の熱伝達係数の増加により減少することに注目したい。すなわち伝熱管の熱伝達係数増加が管板下面のピーク温度の浸透厚さを減少させ、管板の曲げ（厚さ方向温度モーメント）を減少させ、要因 2 による長時間側の熱応力を低下させる。平均温度の差も減少し、同様の効果があるが、平均温度は双方とも  $F_1$  に支配されて差が小さいので、その効果は相対的に小さい。

- 断面 L2（内側胴と管板下面の接続 R 部）

断面 L1 における  $\Delta F_1$  の効果と  $\Delta F_2$  の効果を入れ替えたようになる。 $\Delta F_2$  により短時間の極値 1（要因 1～二次系内側胴の曲げ+ピーク）が現れるが同符号で大きさもほとんど同じの極値 2（要因 2～二次系内側胴と管板との平均温度差および管板の曲げ）に移行する。極値 1 が僅かに二次系  $h_{2a}$  に依存する。 $\Delta F_1$  と  $\Delta F_2$  とで符号反対の長時間側の極値 2 が現れ、定常値に収束する。極値 2 および定常値は熱伝達係数にほとんど依存せずほぼ一定となる。これは極値 2 と定常値の要因 2 のうち、( $F_1$  と  $F_2$  の差でほとんど決まってしまう) 平均温度の差が大きな比重を占め、管板曲げの効果が相対的に小さくなるからである。応力値は全評価断面中最大となるので、熱応力に最も注意すべき部位である。15 秒の温度変化により短時間の熱応力が生じる。600 秒以上の温度変化による極値 2 および定常熱応力が支配的となる。温度変化が緩やかであっても、最終的に  $F_1$  と  $F_2$  の差が大きくなる事象に留意すべきである。

- 断面 L3（管板支持スカート管板側 R 始端）

長時間側の極値が定常値に収束する。 $\Delta F_1$  と  $\Delta F_2$  の効果は符号反対でほとんど相似形である。短時間では要因 1（管板の膜+曲げ）が現れ、要因 2（支持スカートの曲げ+ピーク）が少し遅れて重畠し、定常値（要因 3～管板と支持

スカートとの平均温度の差および曲げの差) に収束する。管板および支持スカートとも温度応答は早いのだが、両者の応答差により熱応力が生じるので見かけ上の時定数派少し大きくなる。熱伝達係数依存性は小さい。F1 と F2 の差に比例した定常熱応力となる。応力値が二番目に大きく、断面 L2 と同様の留意が必要である。

- ・ 断面 L4 (管板支持スカートの容器胴側 Y 接続 R 始端)

$\Delta F_1$  の効果は、初期は要因 1 (支持スカート側の曲げ+ピーク) であるが、時間と共に要因 2 (Y 接続部の支持スカート側と外部胴側との平均温度の差) に移行し、最大値となる定常値に収束する。要因 1 と要因 2 が同符号で連続するので極値が現れない。 $\Delta F_2$  の効果は短時間で  $\Delta F_1$  と同符号の極値 1 (要因 1) となるが、すぐに符号反転し極値 2 (要因 2) となり定常値に収束する。断面 L1 と同様、30 秒の温度変化を制限することで短時間の熱応力を抑えることができる。全温度変化による定常熱応力が支配的となるが、定常値は大きさが等しく符号が反対となるので、F1 と F2 の差に比例した定常熱応力となる。熱伝達係数依存性に関して、断面 L1 と同様な構造となっていることに注目したい。すなわち一次系の熱伝達係数の増加が要因 2 による長時間側の熱応力を低下させる現象が顕著に現れる位置である。

- ・ 断面 L5 (Y 接続容器胴側の R 始端)

基本的に L1 および L4 と同様の傾向である。応力値が小さい。

- ・ 断面 L6 (Y 接続上方容器胴のテーパ始端)

基本的に L1 および L4 と同様の傾向である。応力値が小さい。

- ・ 断面 L7、L9 (管板から十分離れ、一次系に接する内側胴および外側胴)

一般容器胴の熱応力である。F2 の効果は無視してよい。

- ・ 断面 L8、L10 (管板から十分離れ、二次系に接する内側胴および外側胴)

一般容器胴の熱応力である。F1 の効果は無視してよい。

Table.3.3-1(1) 管板構造の評価断面の熱応力特性(一次系温度変化 100°C)

断面	極 値	h <sub>1max</sub> h <sub>2max</sub>		h <sub>1med</sub> h <sub>2med</sub>		h <sub>1med</sub> h <sub>2min</sub>		h <sub>1min</sub> h <sub>2med</sub>		h <sub>1min</sub> h <sub>2min</sub>	
		$\tau$ sec	S <sub>Mises</sub> MPa	$\tau$ sec	S <sub>Mises</sub> MPa)	$\tau$ sec	S <sub>Mises</sub> MPa	$\tau$ sec	S <sub>Mises</sub> MPa	$\tau$ sec	S <sub>Mises</sub> MPa
L1 out	E.1	40	177.7	50	120.7	50	120.0	50	87.6	50	87.4
	E.2			660	124.2	570	109.8	1560	136.3	1500	123.2
	S.S	1800	111.8		119.8		104.1		134.9		121.3
L2 out											
	E.2	600	303.9	540	302.9	510	301.5	450	304.2	420	304.7
	S.S	1800	301.4		298.1		295.7		293.5		292.7
L3 in	E.1										
	E.2	270	293.3	420	282.8	420	270.8	660	285.7	660	276.5
	S.S	1800	273.9		265.3		251.0		272.1		261.0
L4 out	E.1										
	E.2										
	S.S	1800	123.8		129.6		121.9		139.7		133.5
L5 in	E.1	30	125.2	55	72.1	55	72.0				
	E.2							140	43.1	110	42.9
	S.S	1800	53.5		50.0		48.0		47.3		45.8
L6 in	E.1										
	E.2										
	S.S	1800	130.7		117.9		121.3		103.9		106.4
L7 out E.1	11	88.1	17	46.6	17	46.6	22	26.4	22	26.4	
L8 out E.1											
L9 in E.1	20	111.0	32	62.7	32	62.7	45	36.9	45	36.9	
L10 in E.1											

Table.3.3-1(2) 管板構造の評価断面の熱応力特性(二次系温度変化 100°C)

断面	極 値	h <sub>1max</sub> h <sub>2max</sub>		h <sub>1med</sub> h <sub>2med</sub>		h <sub>1med</sub> h <sub>2min</sub>		h <sub>1min</sub> h <sub>2med</sub>		h <sub>1min</sub> h <sub>2min</sub>	
		$\tau$ sec	S <sub>Mises</sub> MPa	$\tau$ sec	S <sub>Mises</sub> MPa)	$\tau$ sec	S <sub>Mises</sub> MPa	$\tau$ sec	S <sub>Mises</sub> MPa	$\tau$ sec	S <sub>Mises</sub> MPa
L1 out	E.1	2.5	11.0	5.0	14.7	10	22.4	5.0	15.0	11	23.1
	E.2										
	S.S	1800	111.7		119.8		104.1		134.9		121.3
L2 out	E1	13	326.8	15	311.1	15	306.7	14	314.6	14	305.1
	E.2										
	S.S	1800	301.4		298.0		295.7		293.5		292.7
L3 in	E.1										
	E.2										
	S.S	1800	273.9		265.3		251.0		272.1		261.0
L4 out	E.1	19	145.4	28	124.5			28	124.5		
	E.2			900	130.1			1320	140.1		
	S.S	1800	123.8		129.6		121.7		139.7		133.5
L5 in	E.1										
	E.2			600	51.5	840	49.0	570	51.0	720	48.8
	S.S	1800	53.5		50.0		48.0		47.3		45.8
L6 in	E.1	18	143.2	26	121.3	40	90.7	26	121.2	40	90.7
	E.2	570	132.9	660	121.2	1080	122.2	540	111.5	900	109.8
	S.S	1800	130.7		117.9		121.3		103.9		106.4
L7 out	E.1										
L8 out	E.1	1.5	269.9	1.5	256.7	1.5	247.5	1.5	256.7	1.5	247.5
L9 in	E.1										
L10 in	E.1	15	143.4	19	120.6	26	88.6	19	120.6	26	88.6

### 3. 3. 2 IHX 管板構造の手動トリップ事象解析

#### (1) 詳細熱応力解析

熱伝達係数の時間変化を忠実に考慮した手動トリップ事象の非線形熱伝導解析および線形熱応力解析を行った。これを参照解として Green 関数を用いた以下の簡易評価と比較した。

- 初期定常温度分布、一次系 Na 温度  $F_1(0)=550^{\circ}\text{C}$ 、二次系 Na 温度  $F_2(0)=520^{\circ}\text{C}$
- 評価断面 L1～L10 の熱応力の Mises 等価応力を Fig.3.3-8 に示す。
- 特に応力が大きい評価断面 L1～L4 の主要な成分(L,T)を Fig.3.3-9 に示す。
- G 関数による熱応力特性評価で、最も厳しい箇所と予想された断面 L2 の応力が予想外に小さい結果が注目に値する。これは手動トリップ事象では一次系 Na 温度と二次系 Na 温度がほぼ平行し、両者の差がそれほど大きくならないことが原因である。
- 管板構造の長時間側熱応力は、全ての評価断面で一次系 Na 温度と二次系 Na 温度の効果が逆符号の同じ大きさで作用するので、このような両者の差が大きくならずに平行するような事象が管板にとって好ましい。

#### (2) 簡易評価 1

上限値( $h_{1,\max}, h_{2,\max}$ )が維持された場合の熱応力を  $G_1(P, h_{1,\max}, h_{2,\max}, t)$  および  $G_2(P, h_{1,\max}, h_{2,\max}, t)$  を用いて次式により計算した。

$$S(P, t) = S_1(P, t) + S_2(P, t) \quad (3.4)$$

$$S_k(P, t) = \{F_k(0) - T_0\}G_k(P, h_{1,\max}, h_{2,\max}, \infty) + \int_0^t F_k'(\tau)G_k(P, h_{1,\max}, h_{2,\max}, t - \tau)d\tau \quad (k=1,2) \quad (3.5)$$

ここで右辺の積分は Na 温度の時系列データ( $t_j, F_{k,j}$ )( $j=1, n$ )を用いて、次式により計算した。

$$\int_0^t F_k'(\tau)G_k\{P, h_{1,\max}, h_{2,\max}, t - \tau\}d\tau = \sum_{j=1}^{m-1} (F_{k,j+1} - F_{k,j})G_k\{P, h_{1,\max}, h_{2,\max}, t - \frac{t_j + t_{j+1}}{2}\} \quad (\text{for } t_m \leq t) \quad (3.6)$$

時間区間幅( $t_{j+1} - t_j$ )は最大値 10sec を超えないようにした。元のデータの区間幅

が 10sec を超える場合は分割して 10sec 以下となるようにした。

- ・ 評価断面 L1～L10 の Mises 等価応力を Fig.3.3-8 に示す。概ね過大評価となる。ただし評価断面 L2 では特に長時間側で過小評価となる。熱伝達係数を最大値に設定することが必ずしも安全側とならない例である。
- ・ 同様に中間値 ( $h_{1,med}, h_{2,med}$ ) が維持された場合の熱応力を  $G_1(P, h_{1,med}, h_{2,med}, t)$  および  $G_2(P, h_{1,med}, h_{2,med}, t)$  を用いて計算した。評価断面 L1～L10 の Mises 等価応力を Fig.3.3-8 に示す。
- ・ 同様に下限値 ( $h_{1,min}, h_{2,min}$ ) が維持された場合の熱応力を  $G_1(P, h_{1,med}, h_{2,min}, t)$  および  $G_2(P, h_{1,med}, h_{2,min}, t)$  を用いて計算した。評価断面 L1～L10 の Mises 等価応力を Fig.3.3-8 に示す。

### (5) 簡易評価 2

熱伝達係数が時間変化する場合の熱応力を次式で近似計算した。

$$S^{NL}(P, t) = S_1^{NL}(P, t) + S_2^{NL}(P, t) \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} S_k^{NL}(P, t) &= \{F_k(0) - T_0\} [G_k\{P, \overline{h_1(0,t)}, \overline{h_2(0,t)}, \infty\} \exp(-t/\tau_p)] \\ &+ G_k\{P, \overline{h_1(0,t)}, \overline{h_2(0,t)}, \infty\} \{1 - \exp(-t/\tau_p)\} + \int_0^t F'_k(\tau) G_k\{P, \overline{h_1(\tau,t)}, \overline{h_2(\tau,t)}, t-\tau\} d\tau \end{aligned} \quad (k=1,2) \quad (3.8)$$

ここで上線付き  $h_k(\tau, t)$  は時間区間  $[\tau, t]$  の平均熱伝達係数である。任意  $h_1, h_2$  に対する Green 関数  $G_k(P, h_1, h_2, t)$  は  $G_k(P, h_{1,max}, h_{2,max}, t)$ 、 $G_k(P, h_{1,med}, h_{2,med}, t)$  および  $G_k(P, h_{1,med}, h_{2,min}, t)$  を  $h_1, h_2$  に関して線形補間して計算した。

- ・ 初期定常熱応力変化の時定数  $\tau_p$  は時定数分析結果を参考にして以下の値を使用した。断面 L1, L5 で 200sec、L2～L4 で 30sec、L6 で 400sec、L7～L10 は  $\infty$ 。全断面で  $\infty$  としてこれを無視しても大きな差はない。
- ・ 評価断面 L1～L10 の Mises 等価応力を Fig.3.3-8 に示す。参照解を良く近似している。
- ・ 特に応力が大きい評価断面 L1～L4 の主要な成分を Fig.3.3-9 に示す。

### 3. 3. 3 IHX 管板構造の一次ポンプ軸固着事象解析

#### (1) 詳細熱応力解析

熱伝達係数の時間変化を忠実に考慮した一次ポンプ軸固着事象の非線形熱伝導解析および線形熱応力解析を行った。これを参照解として Green 関数を用いた以下の簡易評価と比較した。

- ・ 初期定常温度分布、一次系 Na 温度  $F_1(0)=550^{\circ}\text{C}$ 、二次系 Na 温度  $F_2(0)=520^{\circ}\text{C}$
- ・ 評価断面 L1～L10 の熱応力の Mises 等価応力を Fig.3.3-10 に示す。
- ・ 特に応力が大きい評価断面 L1～L4 の主要な成分(L,T)を Fig.3.3-11 に示す。
- ・ 手動トリップ事象に比べて予想以上に大きな熱応力となった。これは一次系 Na 温度があまり低下せず、二次系 Na 温度だけ大きく低下し、両者の差が大きくなる状態が長時間維持されるからである。このような事象が管板構造に最も厳しい条件となる。

## (2) 簡易評価 1

上限値( $h_{1,\max}, h_{2,\max}$ )が維持された場合の熱応力を  $G_1(P, h_{1,\max}, h_{2,\max}, t)$  および  $G_2(P, h_{1,\max}, h_{2,\max}, t)$  を用いて(3.4),(3.5),(3.6)式により計算した。

- ・ 評価断面 L1～L10 の Mises 等価応力を Fig.3.3-10 に示す。概ね過大評価となる。ただし評価断面 L1 および L4 では特に長時間側で過小評価となり、最大応力を過小評価する。熱伝達係数を最大値に設定することが必ずしも安全側の結果を与えるとは限らない例である。手動トリップ事象では断面 L2 を過小評価したが本ケースでは断面 L1 および L4 を過小評価し、熱過渡条件により異なった。一次ポンプ軸固定事象では一次系 Na と二次系 Na 温度の逆転があり、それが影響していると考えられる。
- ・ 同様に中間値( $h_{1,\min}, h_{2,\text{med}}$ )が維持された場合の熱応力を  $G_1(P, h_{1,\min}, h_{2,\text{med}}, t)$  および  $G_2(P, h_{1,\min}, h_{2,\text{med}}, t)$  を用いて計算した。評価断面 L1～L10 の Mises 等価応力を Fig.3.3-10 に示す。
- ・ 同様に下限値( $h_{1,\min}, h_{2,\min}$ )が維持された場合の熱応力を  $G_1(P, h_{1,\min}, h_{2,\min}, t)$  および  $G_2(P, h_{1,\min}, h_{2,\min}, t)$  を用いて計算した。評価断面 L1～L10 の Mises 等価応力を Fig.3.3-10 に示す。

## (6) 簡易評価 2

熱伝達係数が時間変化する場合の熱応力を(3.7),(3.8)式で近似計算した。

- ・ 評価断面 L1～L10 の Mises 等価応力を Fig.3.3-10 に示す。参照解を良く近似している。
- ・ 特に応力が大きい評価断面 L1～L4 の主要な成分を Fig.3.3-11 に示す。

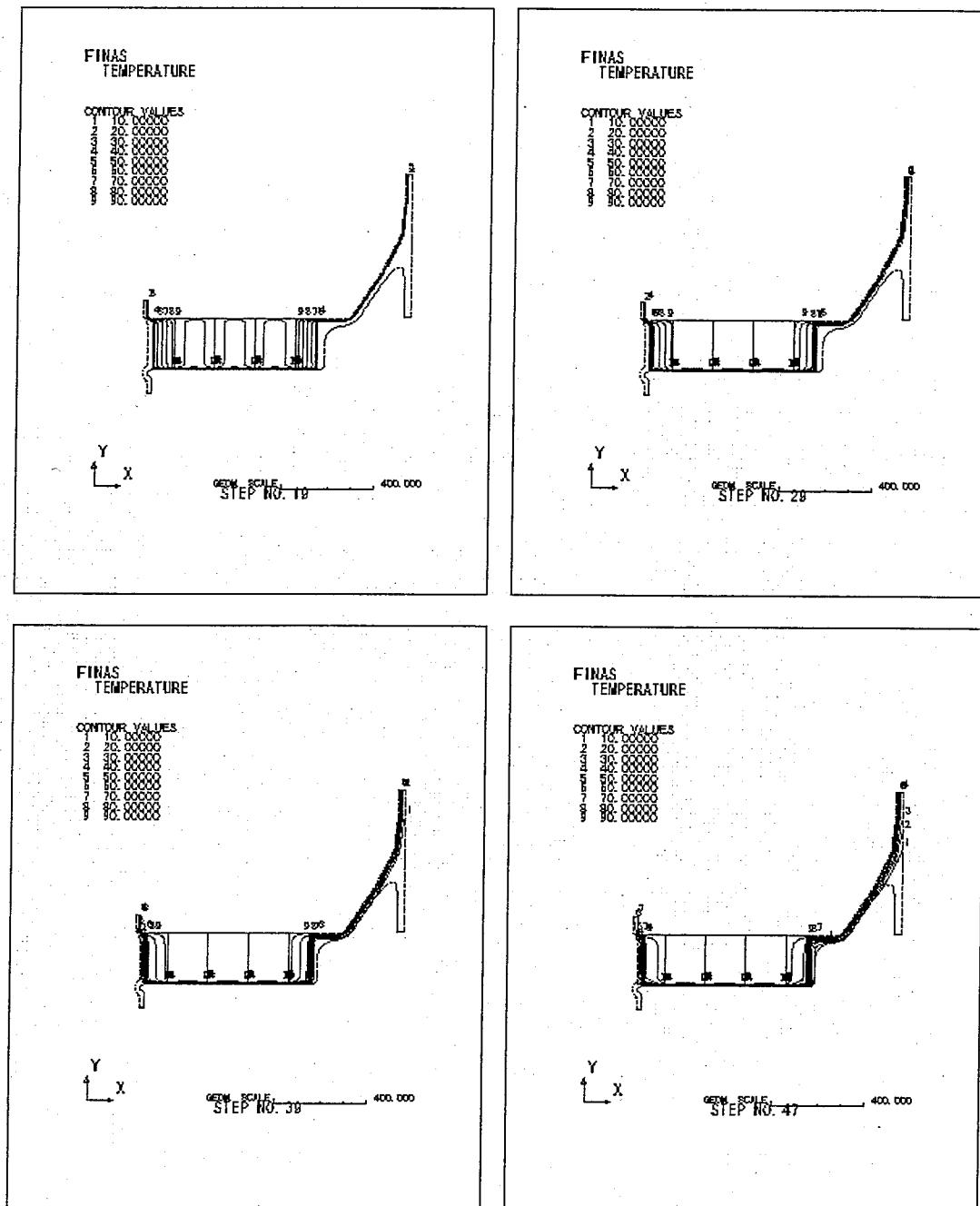


Fig.3.3-1(1)  $h_{max}$  による温度コンター( $F_1=100, t=10, 20, 40, 80\text{sec}$ )

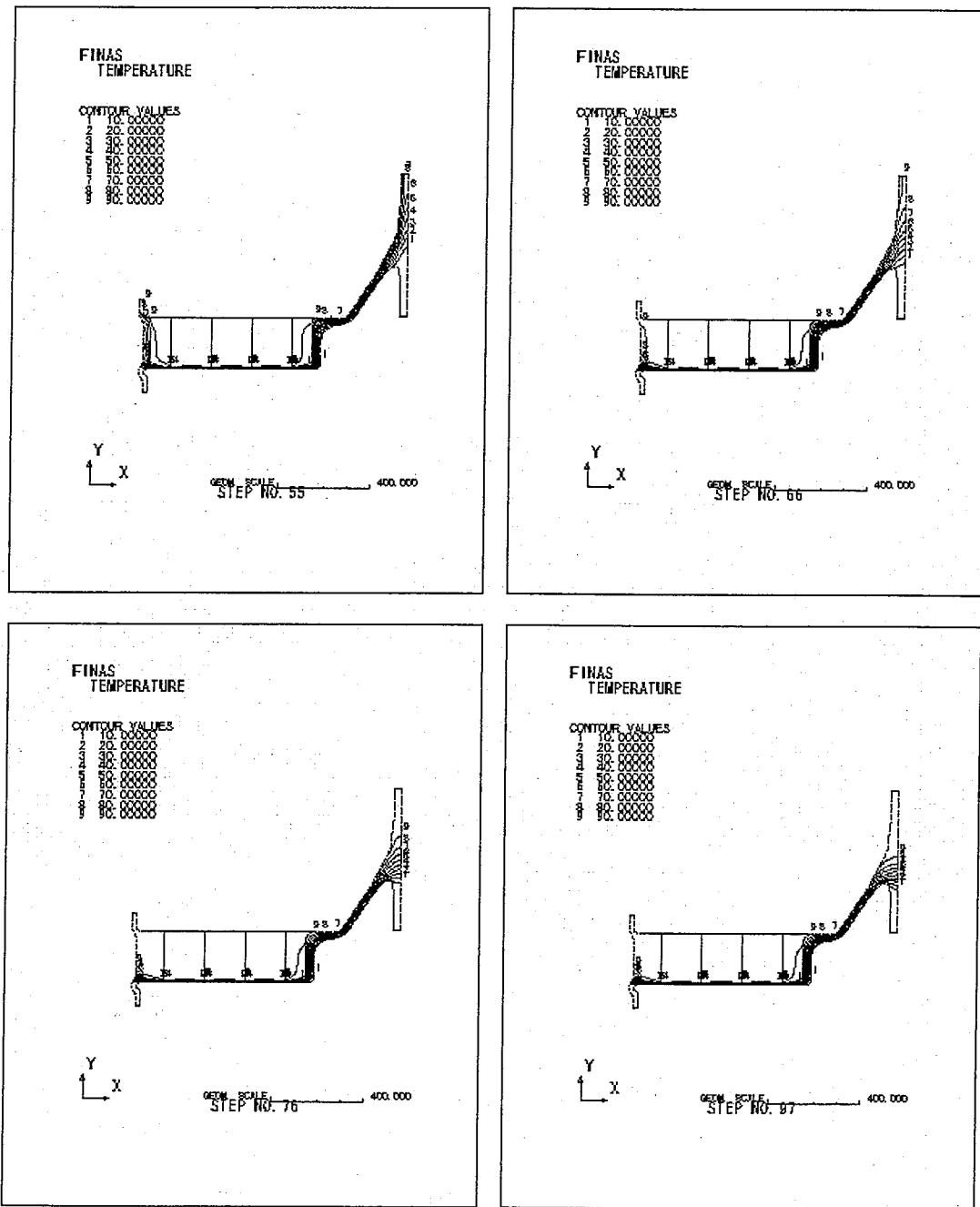


Fig.3.3-1(2)  $h_{max}$  による温度コンター( $F_1=100, t=150,300,600,\infty$ sec)

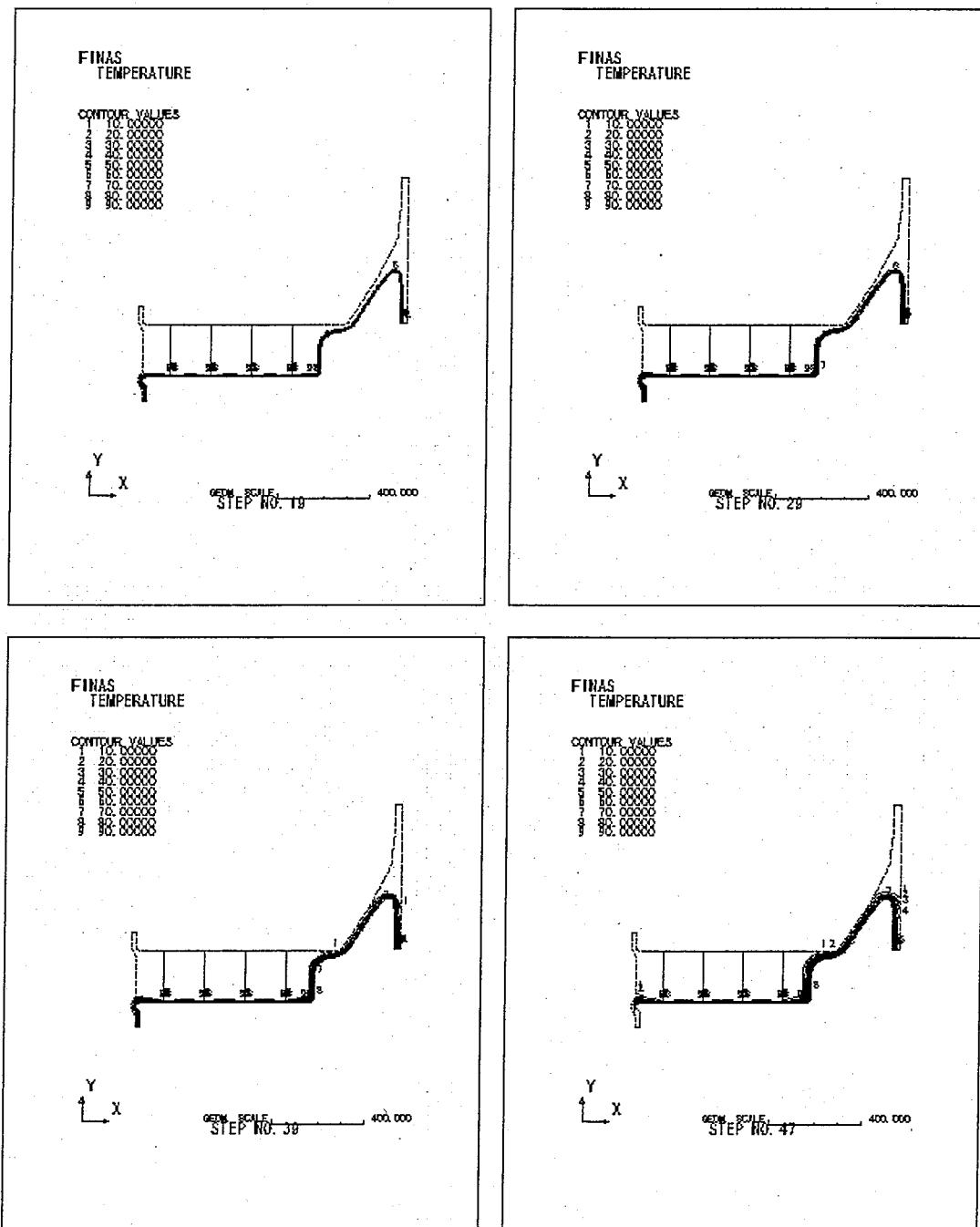


Fig.3.3-2(1)  $h_{max}$  による温度コンター( $F_2=100, t=10, 20, 40, 80\text{sec}$ )

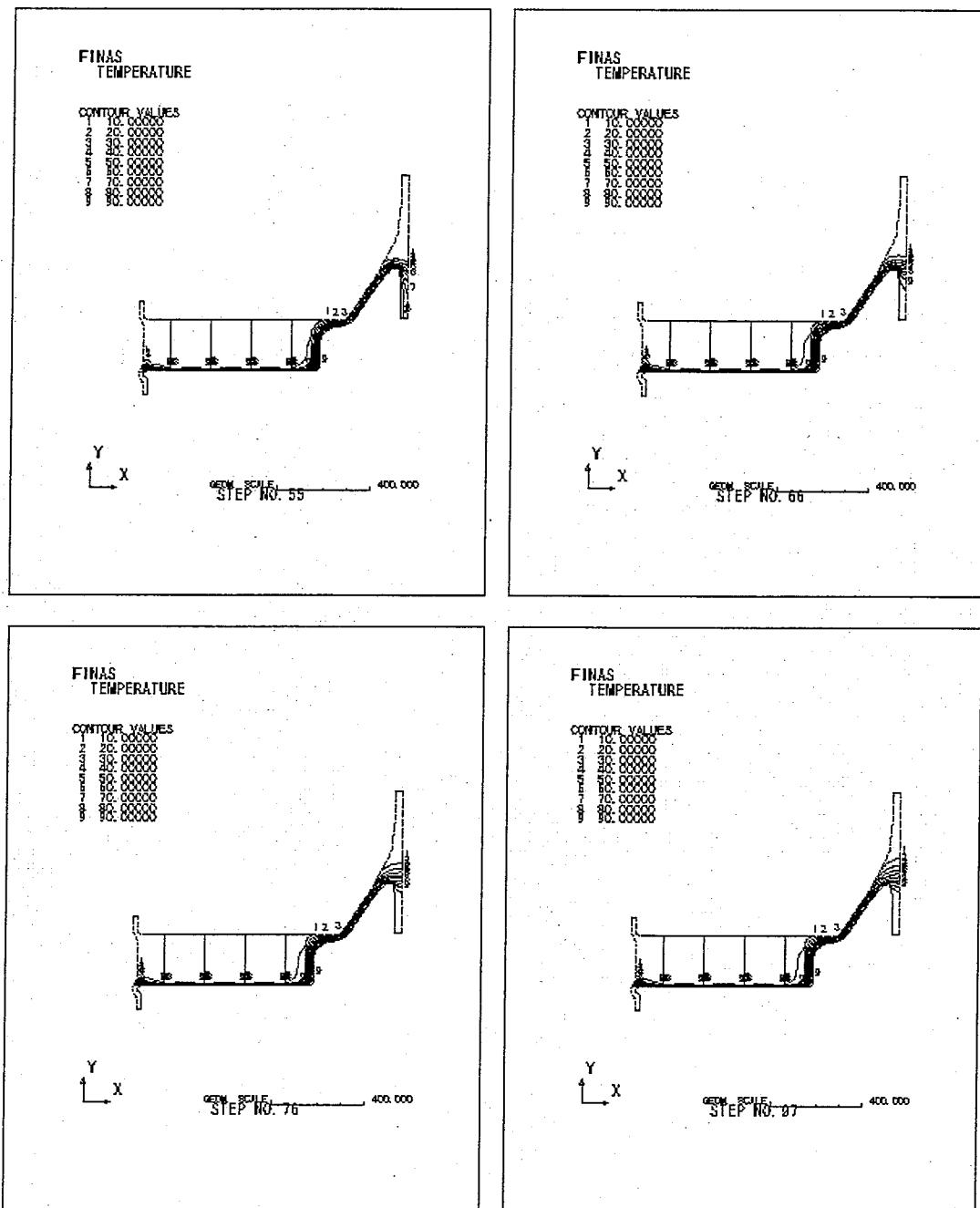


Fig.3.3-2(2)  $h_{max}$  による温度コンター( $F_2=100, t=150, 300, 600, \infty$  sec)

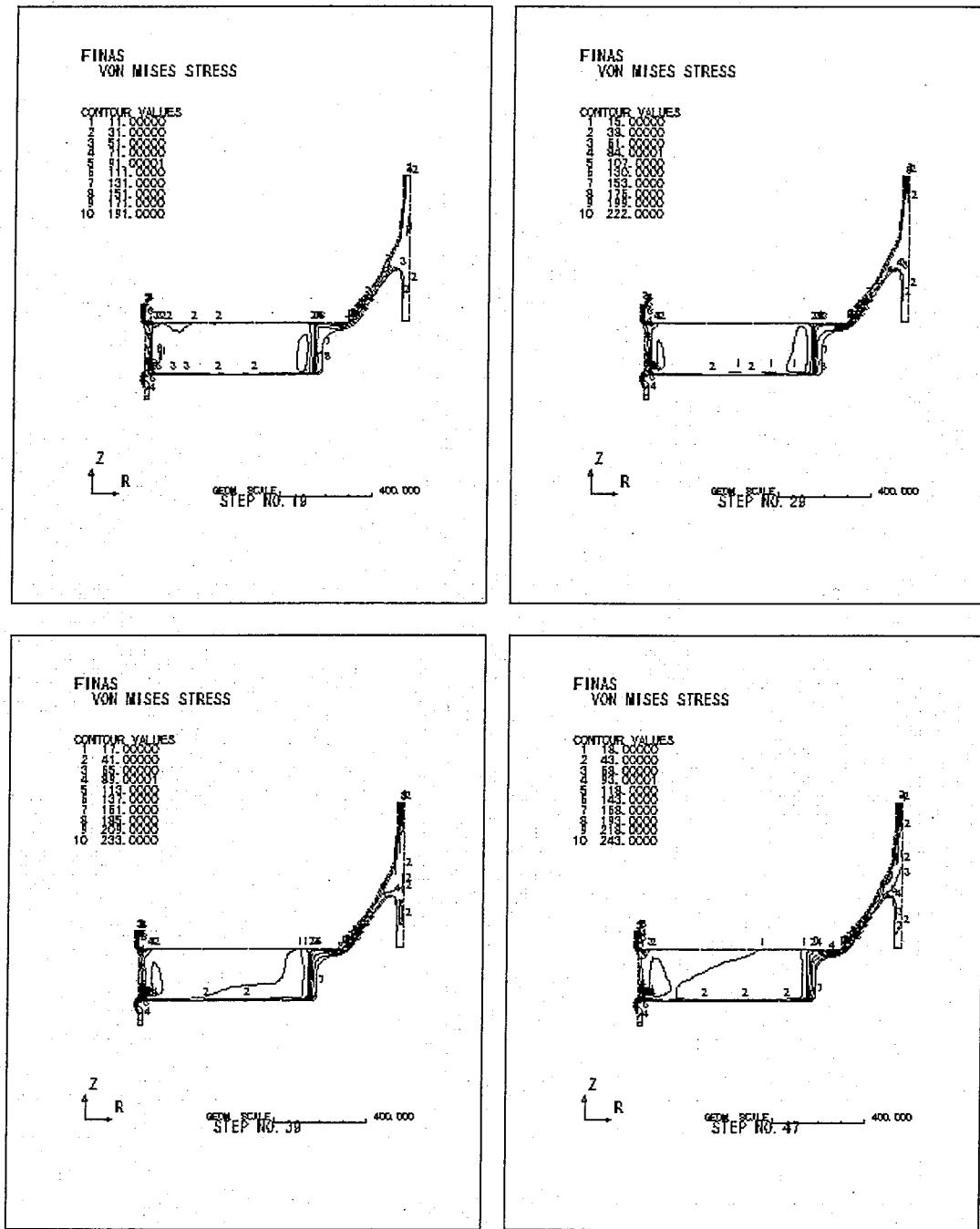


Fig.3.3-3(1) hmax による等価応力コンター(F1=100,t=10,20,40,80sec)

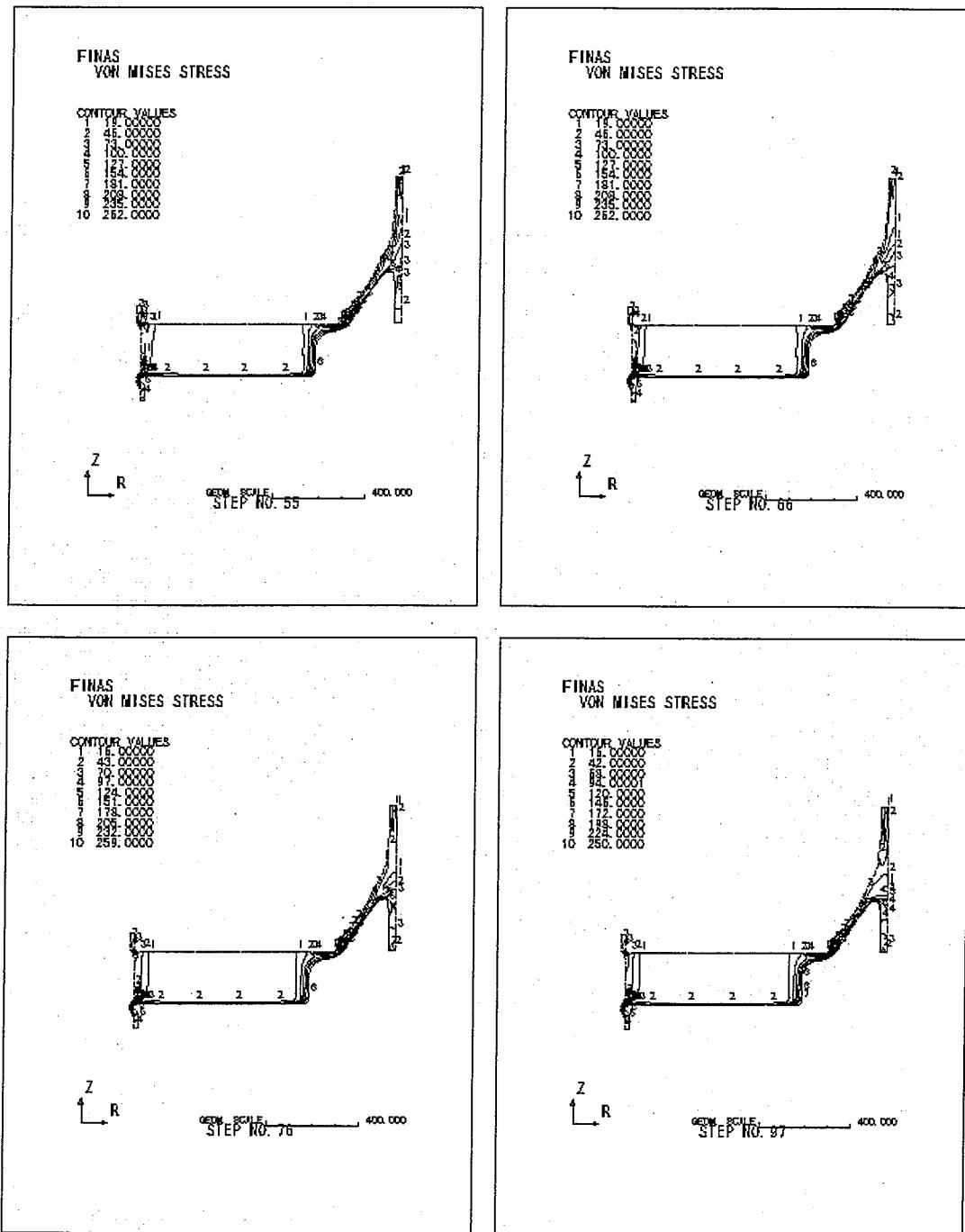


Fig.3.3-3(2)  $h_{max}$  による等価応力コンター( $F_1=100, t=150, 300, 600, \infty \text{sec}$ )

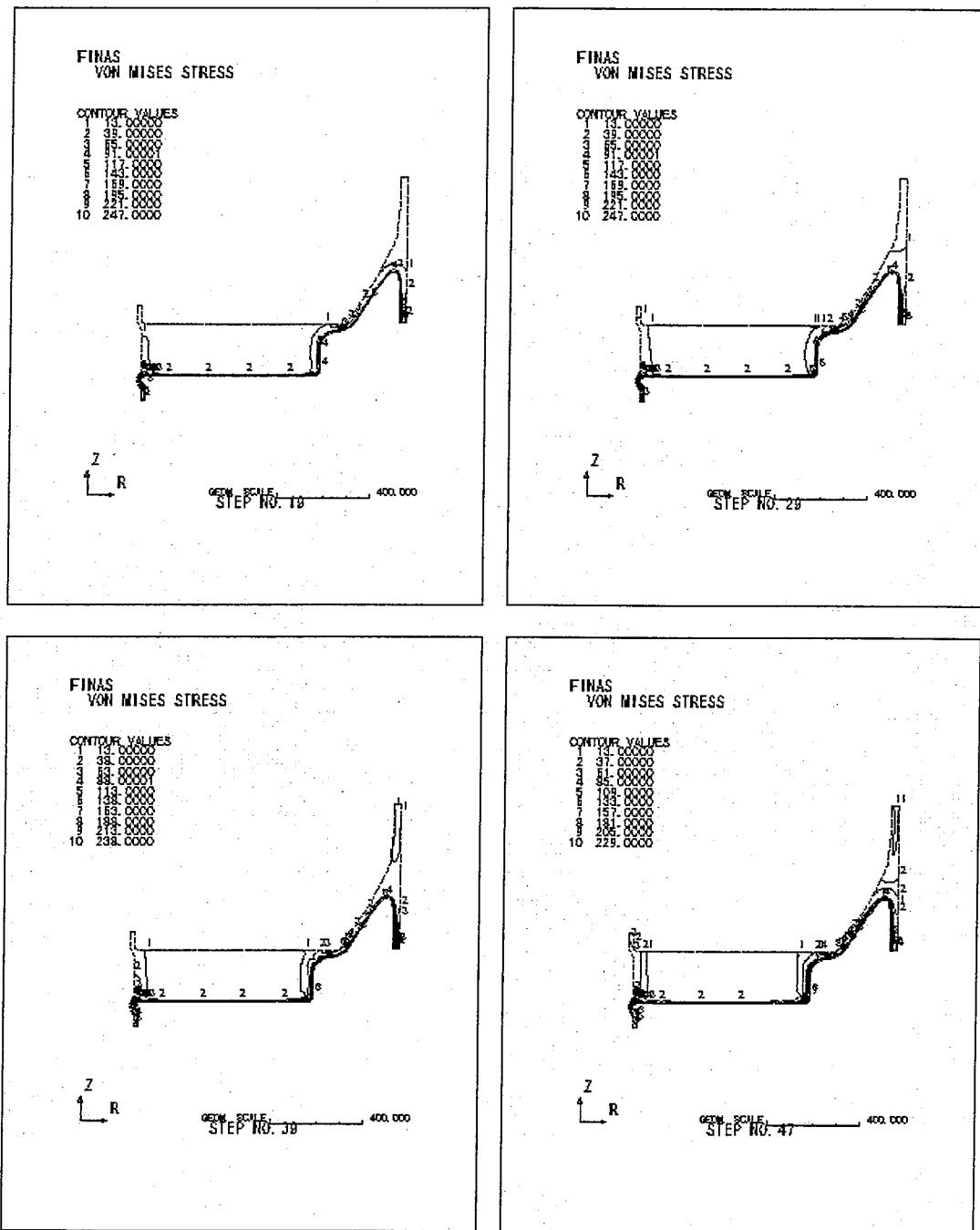


Fig.3.3-4(1) hmax による等価応力コンター(F2=100,t=10,20,40,80sec)

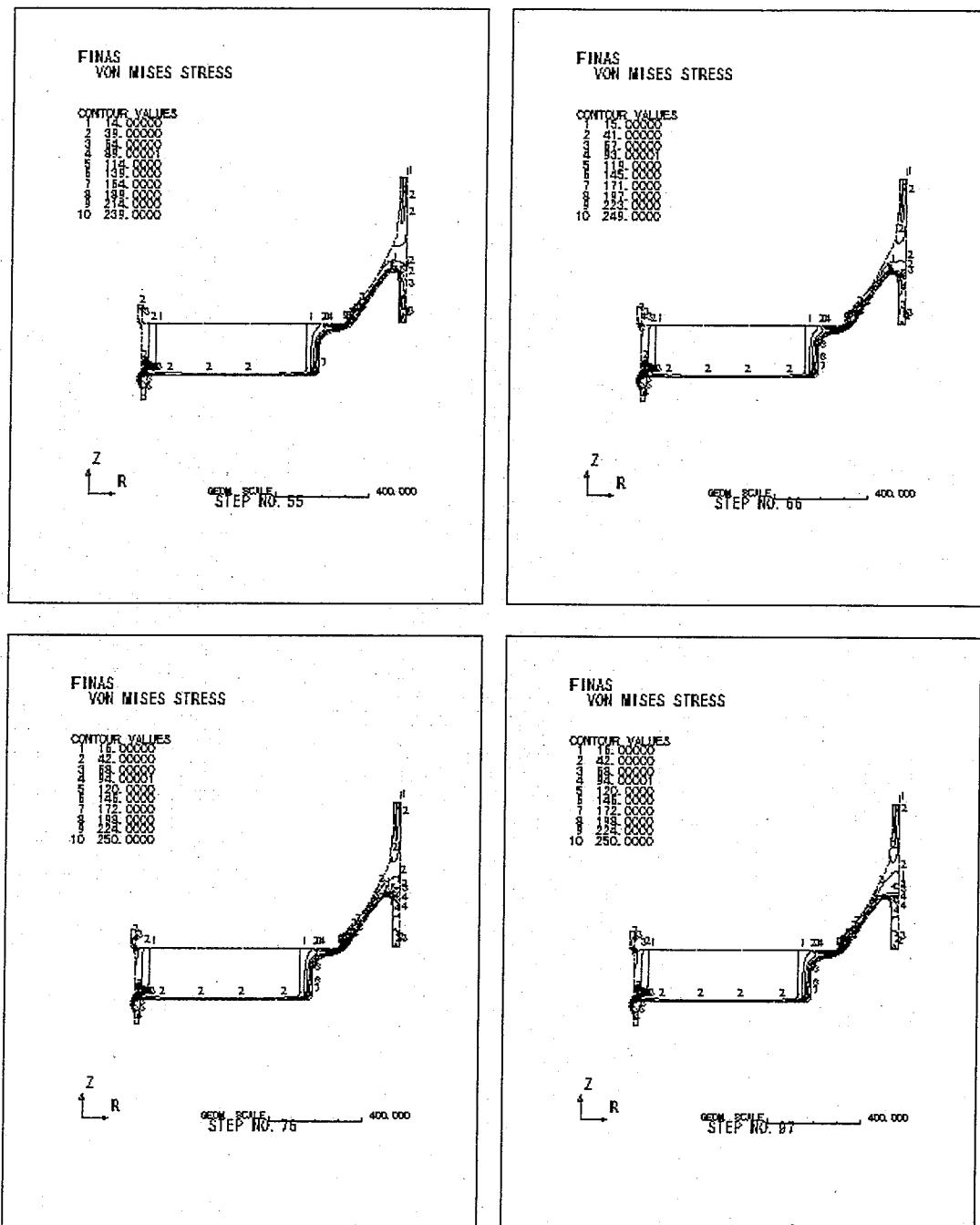


Fig.3.3-4(2) hmax による等価応力コンター( $F_2=100, t=150, 300, 600, \infty$  sec)

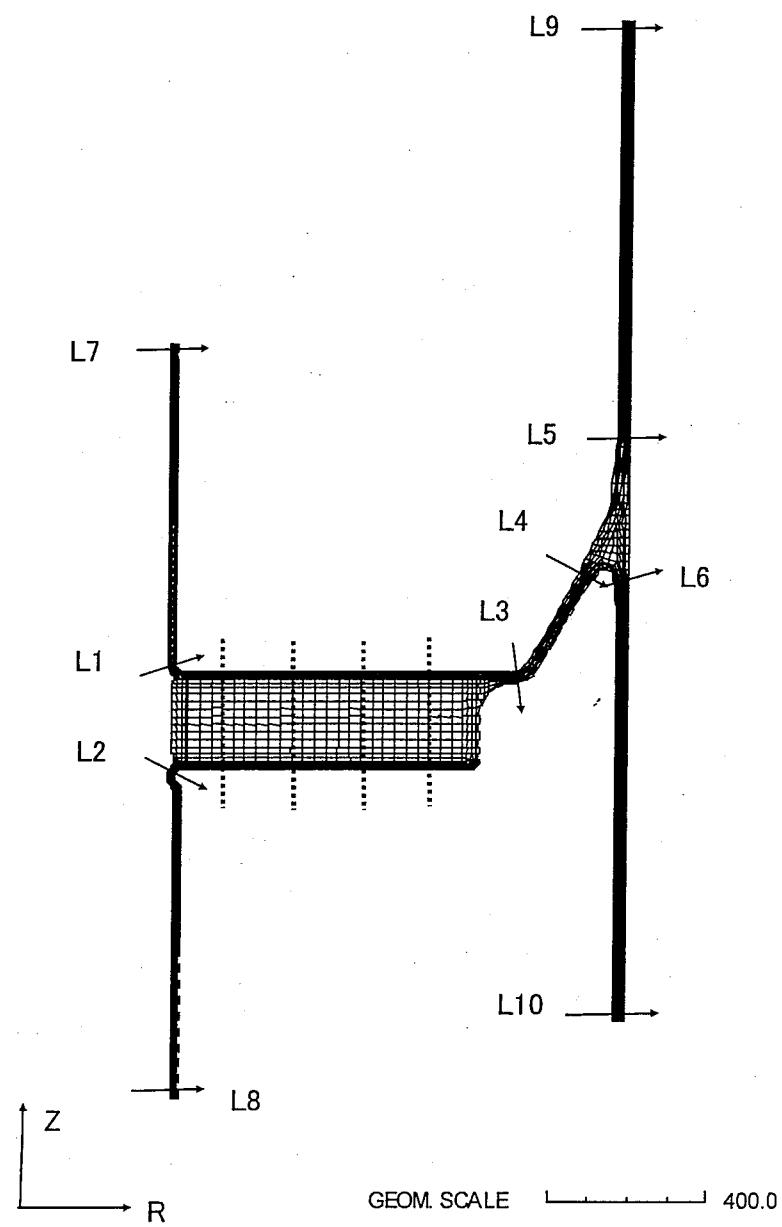


Fig.3.3-5 IHX 管板構造の評価断面

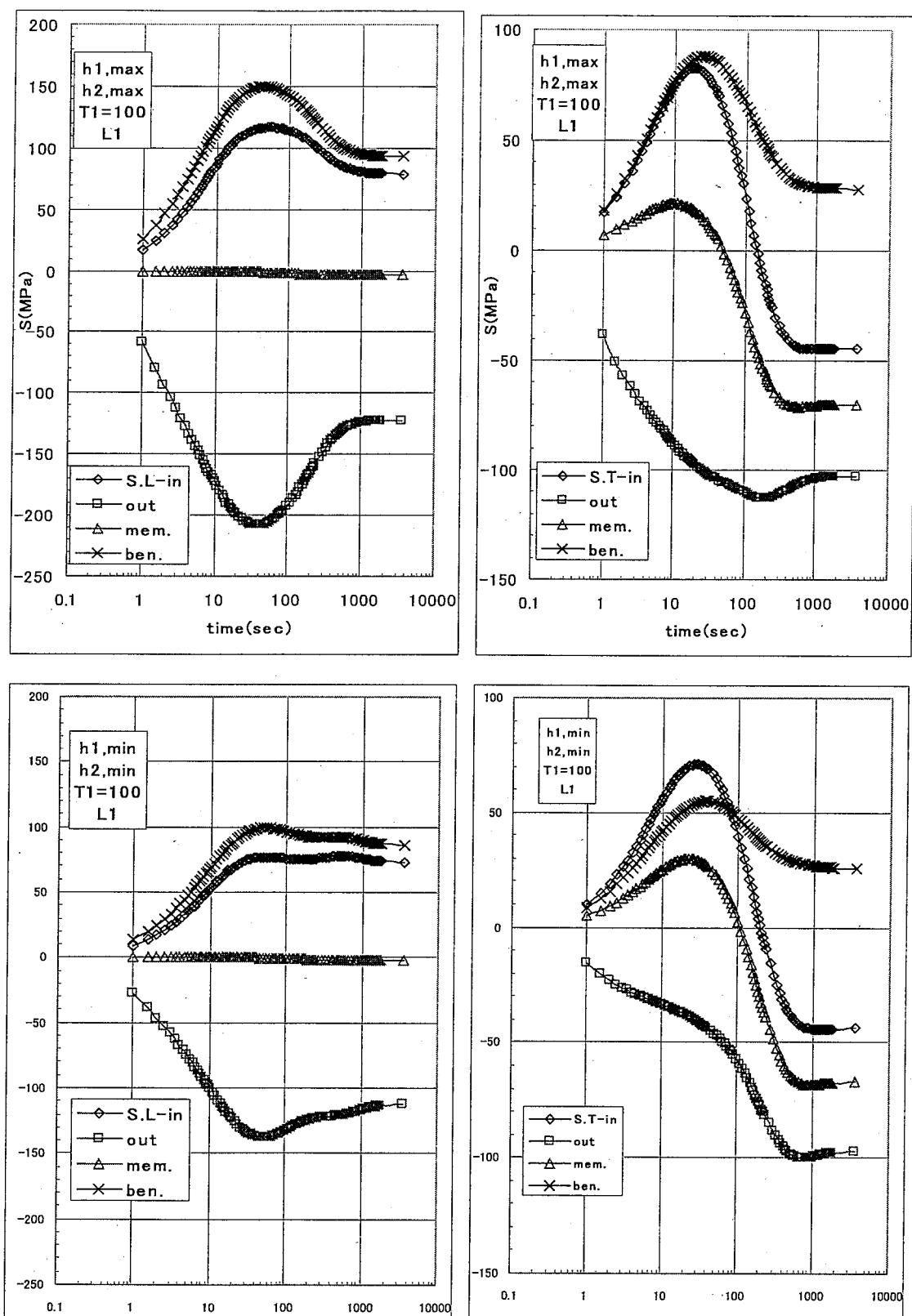


Fig.3.3-6(1) IHX 管板構造評価断面 L1 の Green 関数 ( $F_1=100$ )

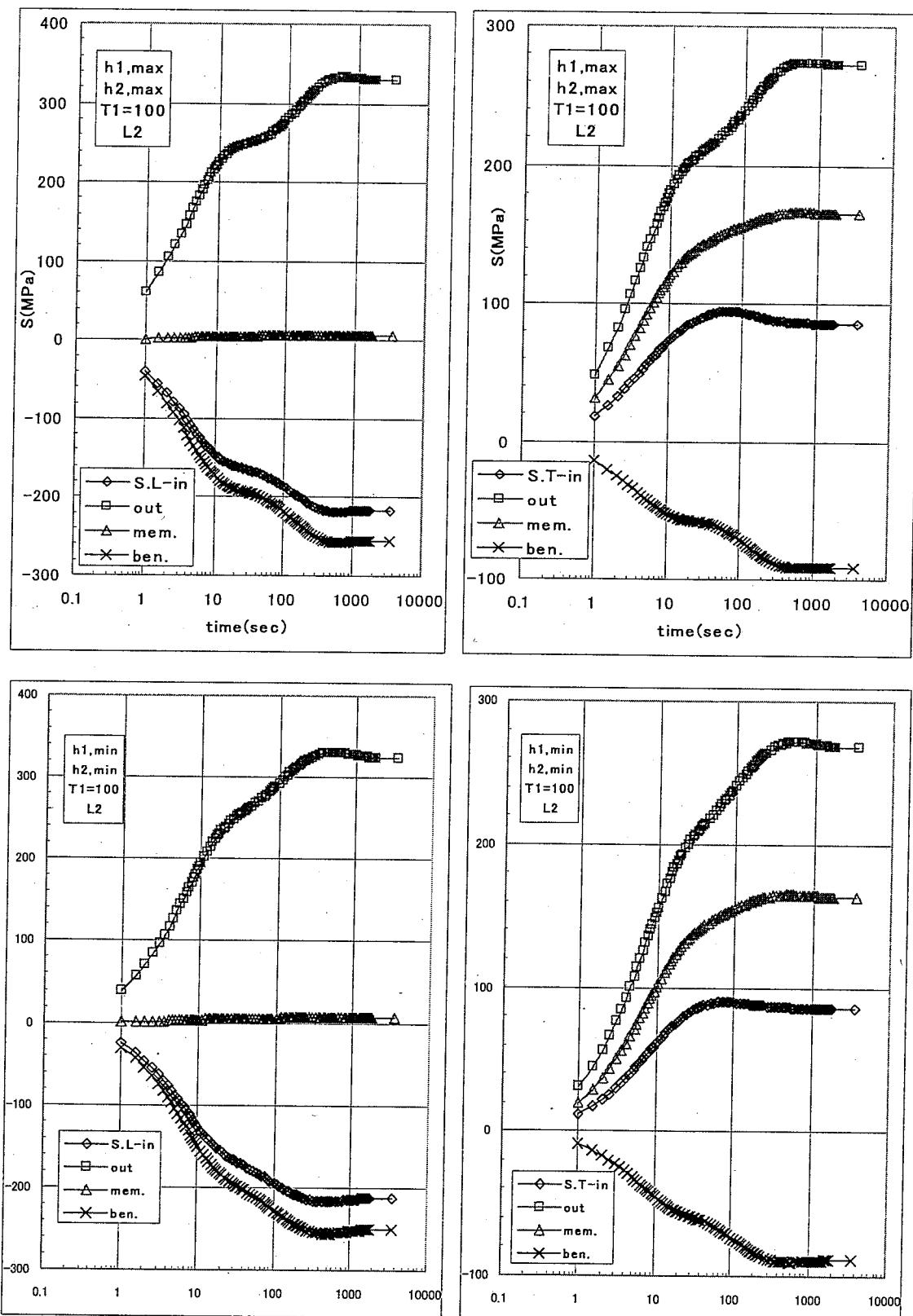


Fig.3.3-6(2) IHX 管板構造評価断面 L2 の Green 関数 (F1=100)

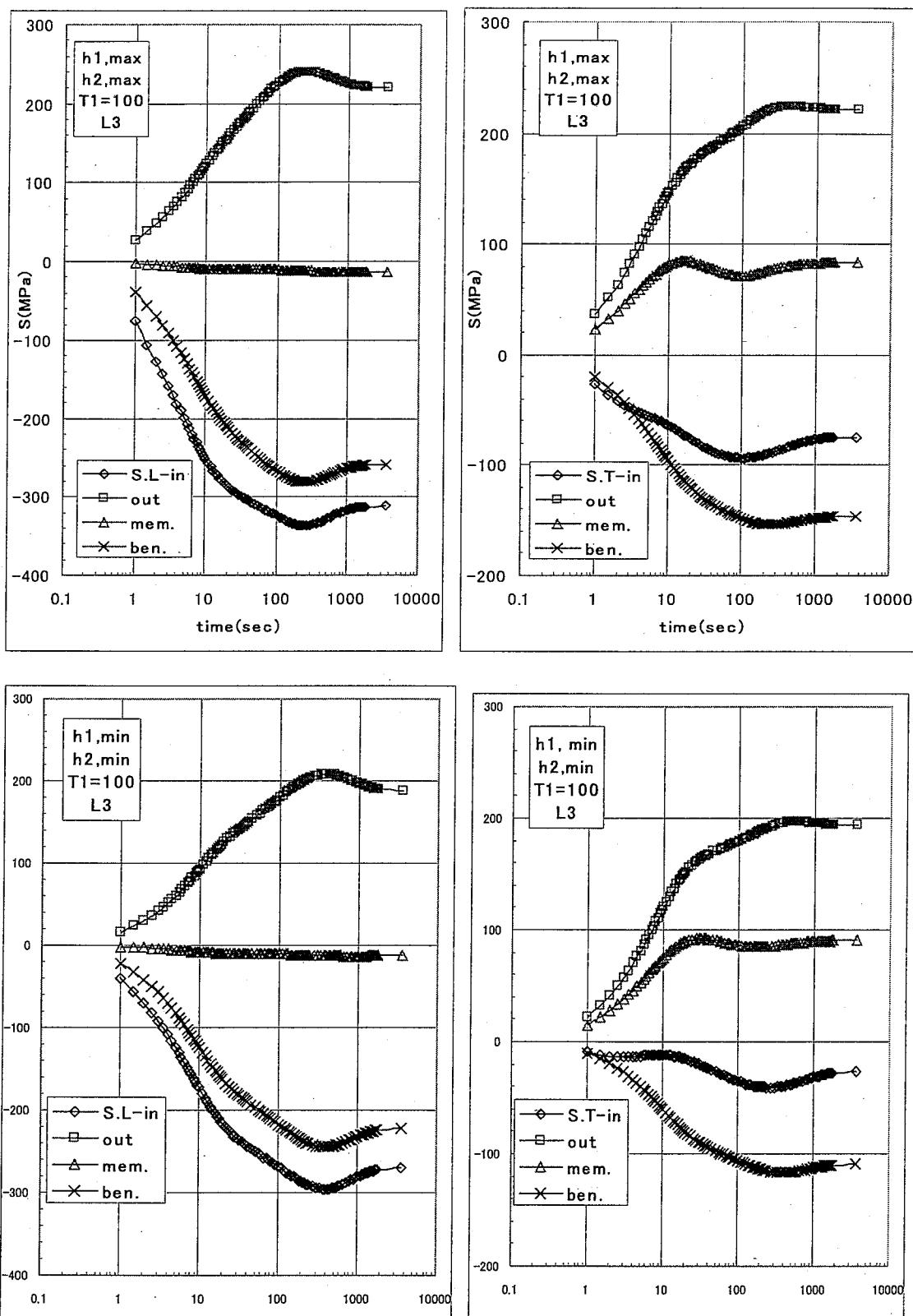


Fig.3.3-6(3) IHX 管板構造評価断面 L3 の Green 関数 ( $F1=100$ )

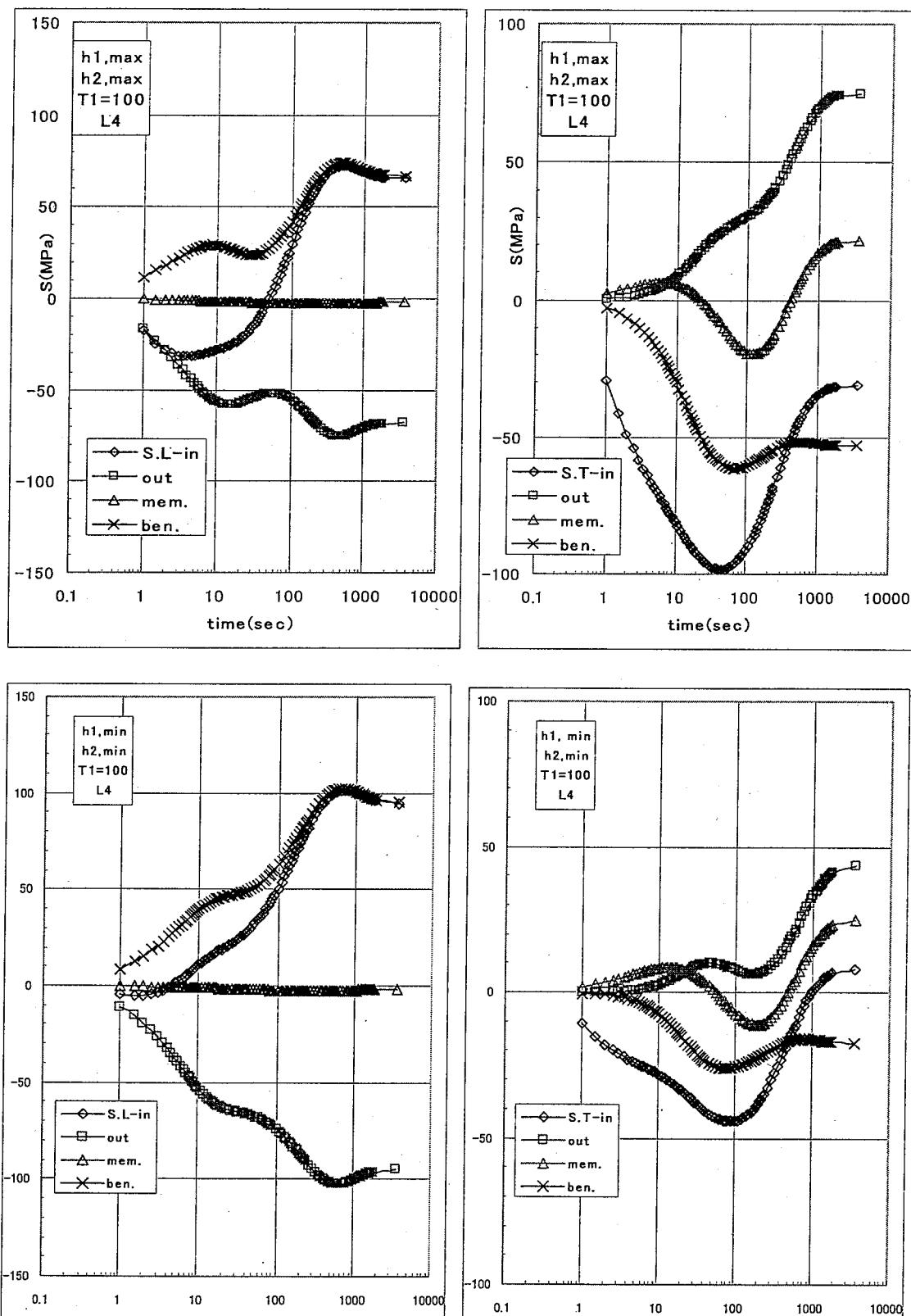


Fig.3.3-6(4) IHX 管板構造評価断面 L4 の Green 関数 ( $F_1=100$ )

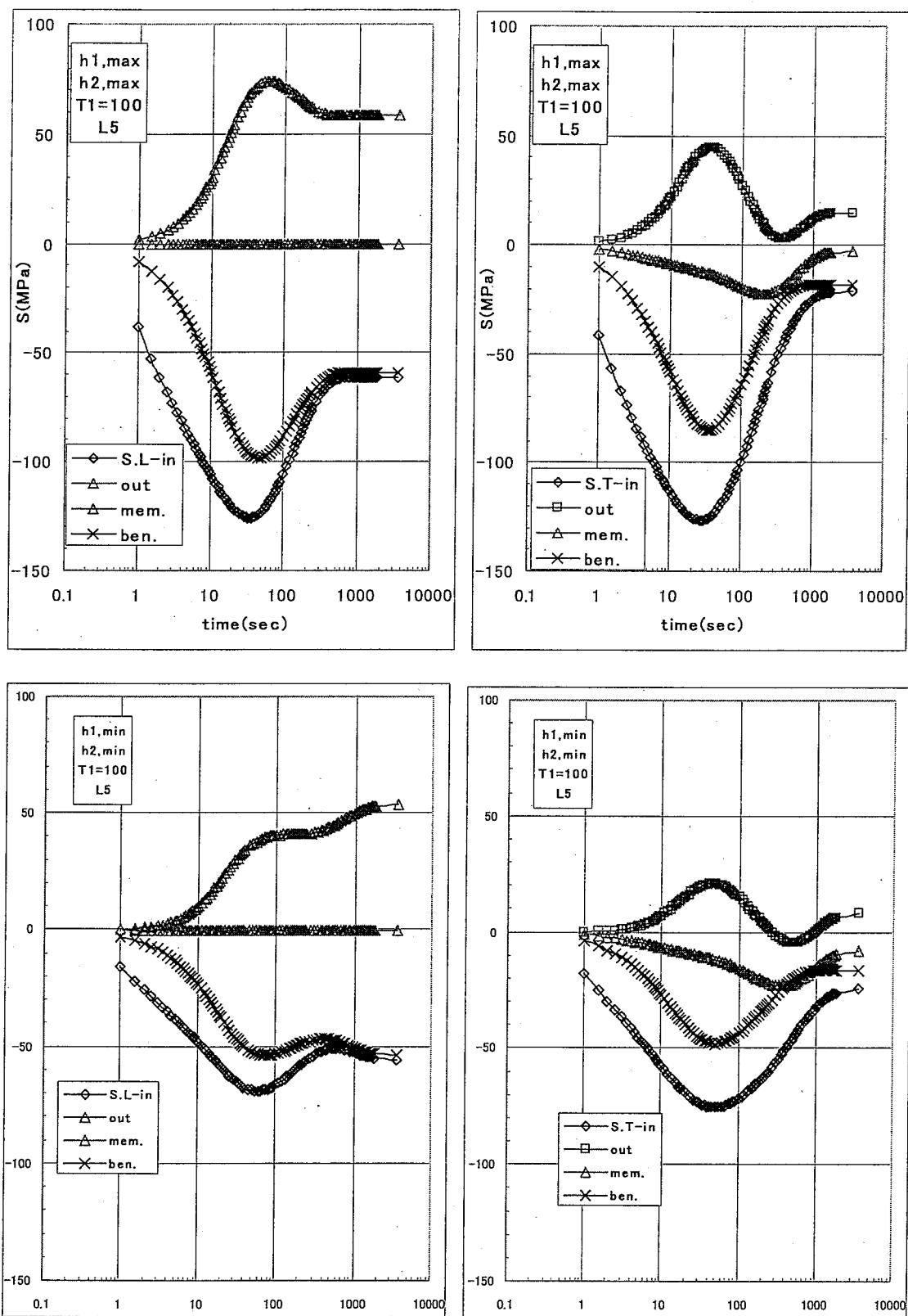


Fig.3.3-6(5) IHX 管板構造評価断面 L5 の Green 関数 (F1=100)

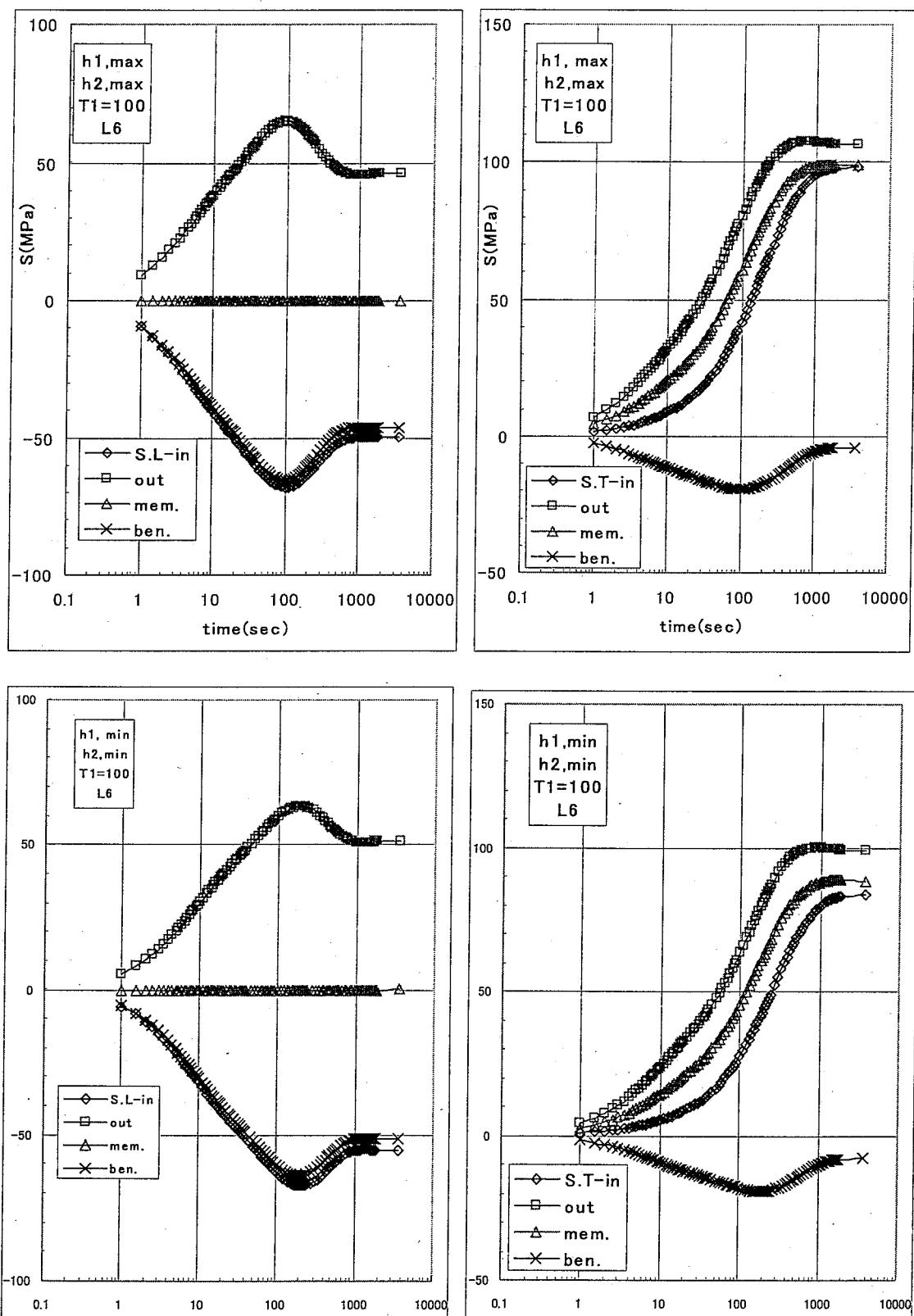
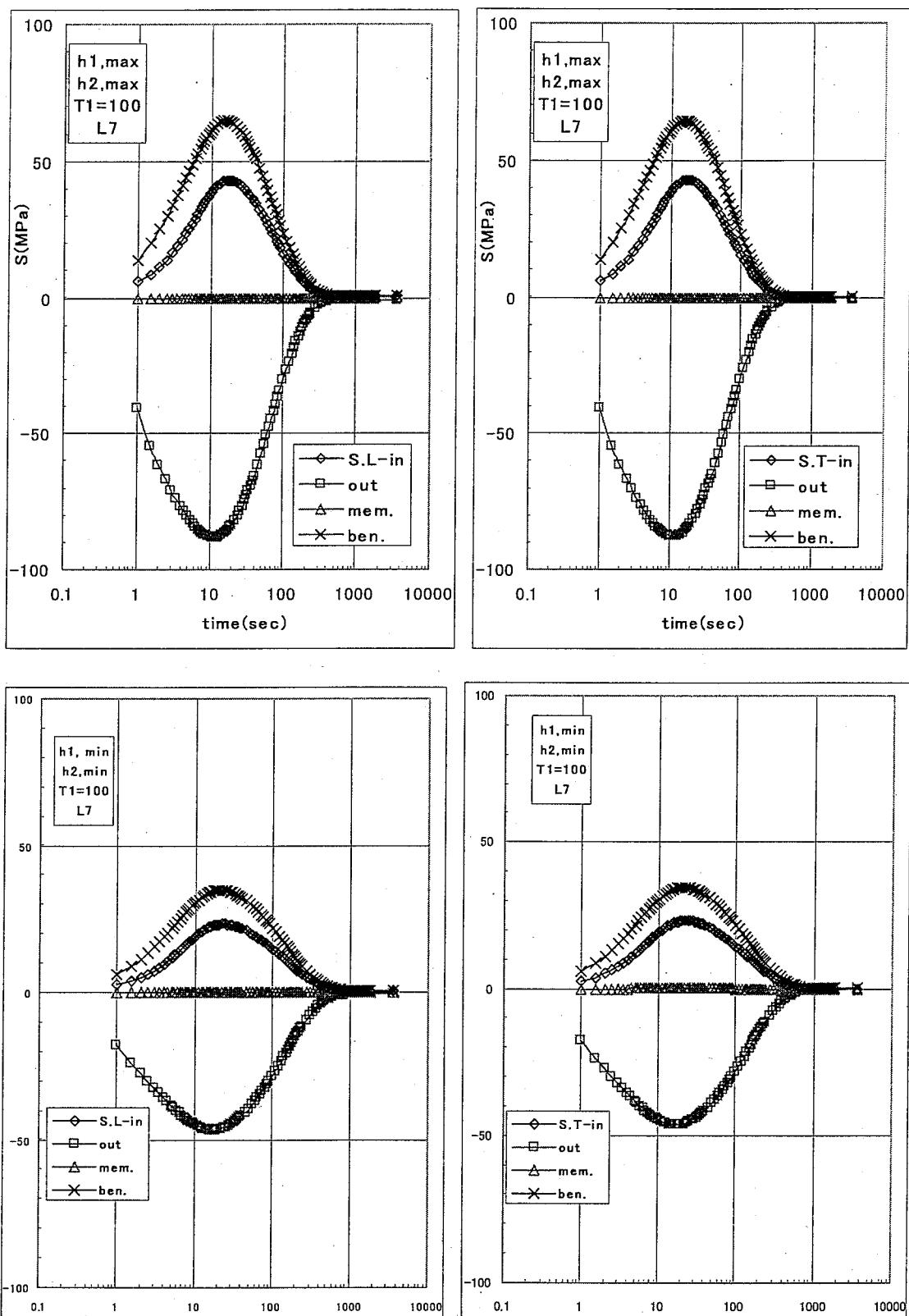


Fig.3.3-6(6) IHX 管板構造評価断面 L6 の Green 関数 (F1=100)

Fig.3.3-6(7) IHX 管板構造評価断面 L7 の Green 関数 ( $F_1=100$ )

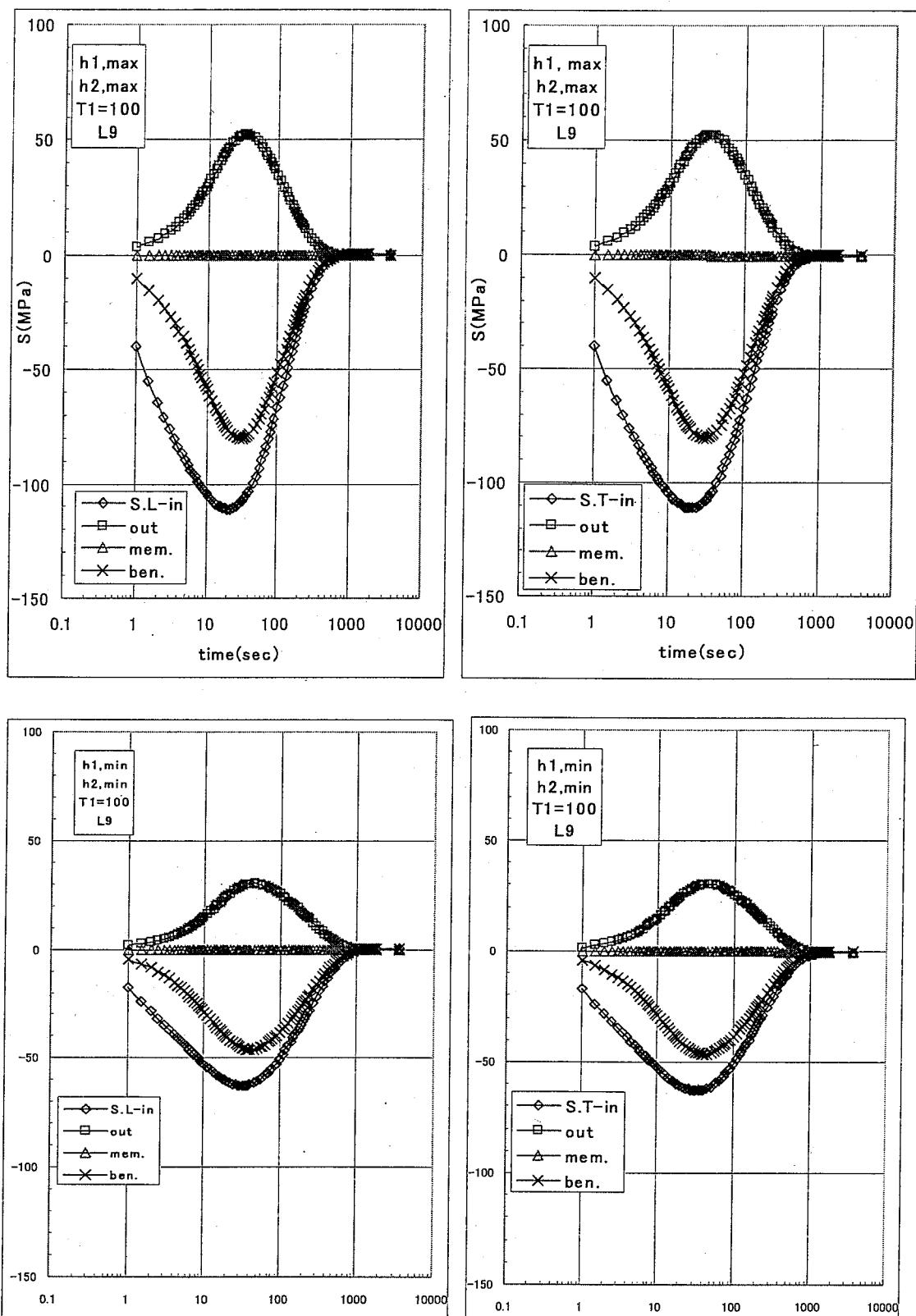


Fig.3.3-6(8) IHX 管板構造評価断面 L9 の Green 関数 ( $F_1=100$ )

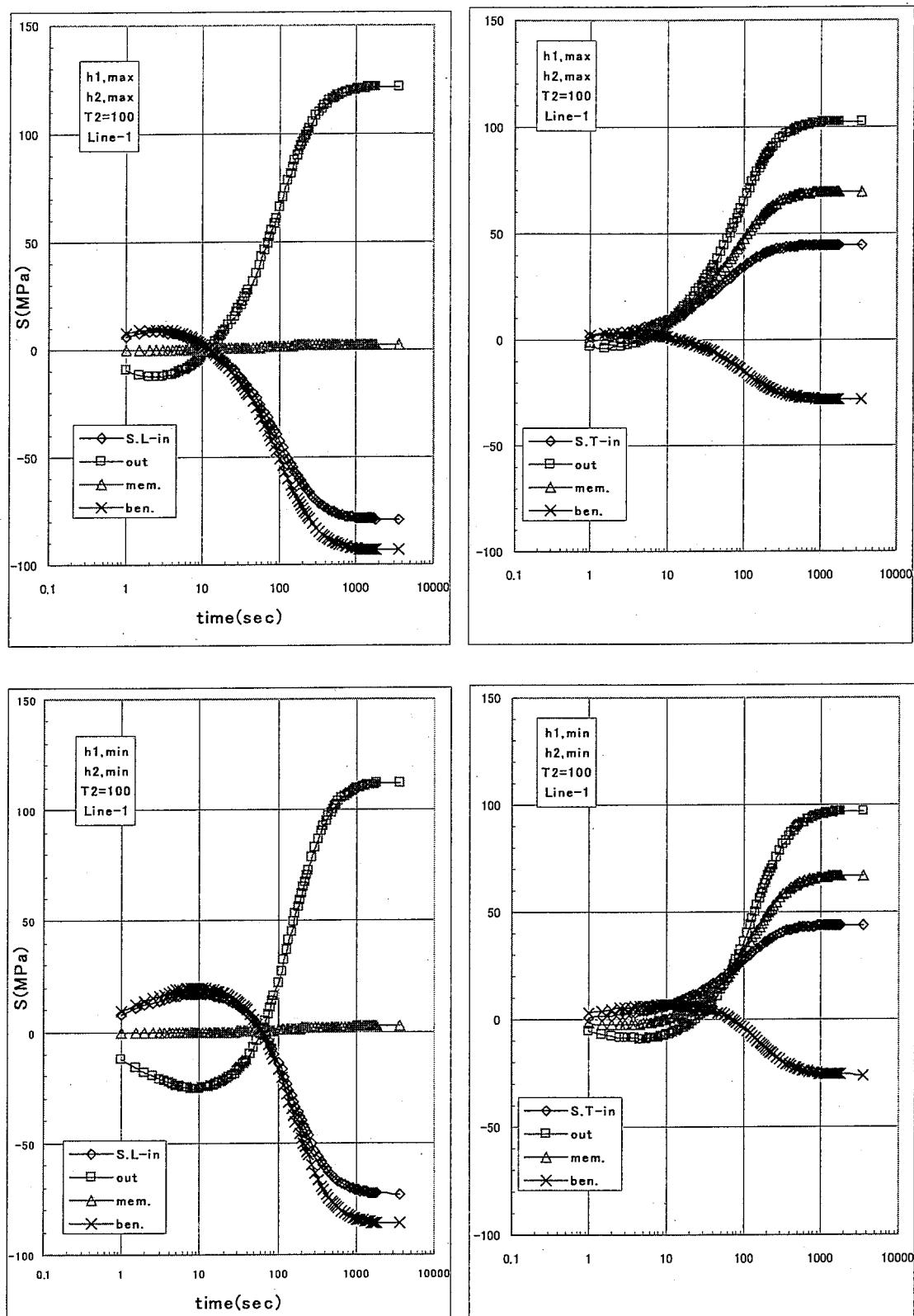


Fig.3.3-7(1) IHX 管板構造評価断面 L1 の Green 関数 (F2=100)

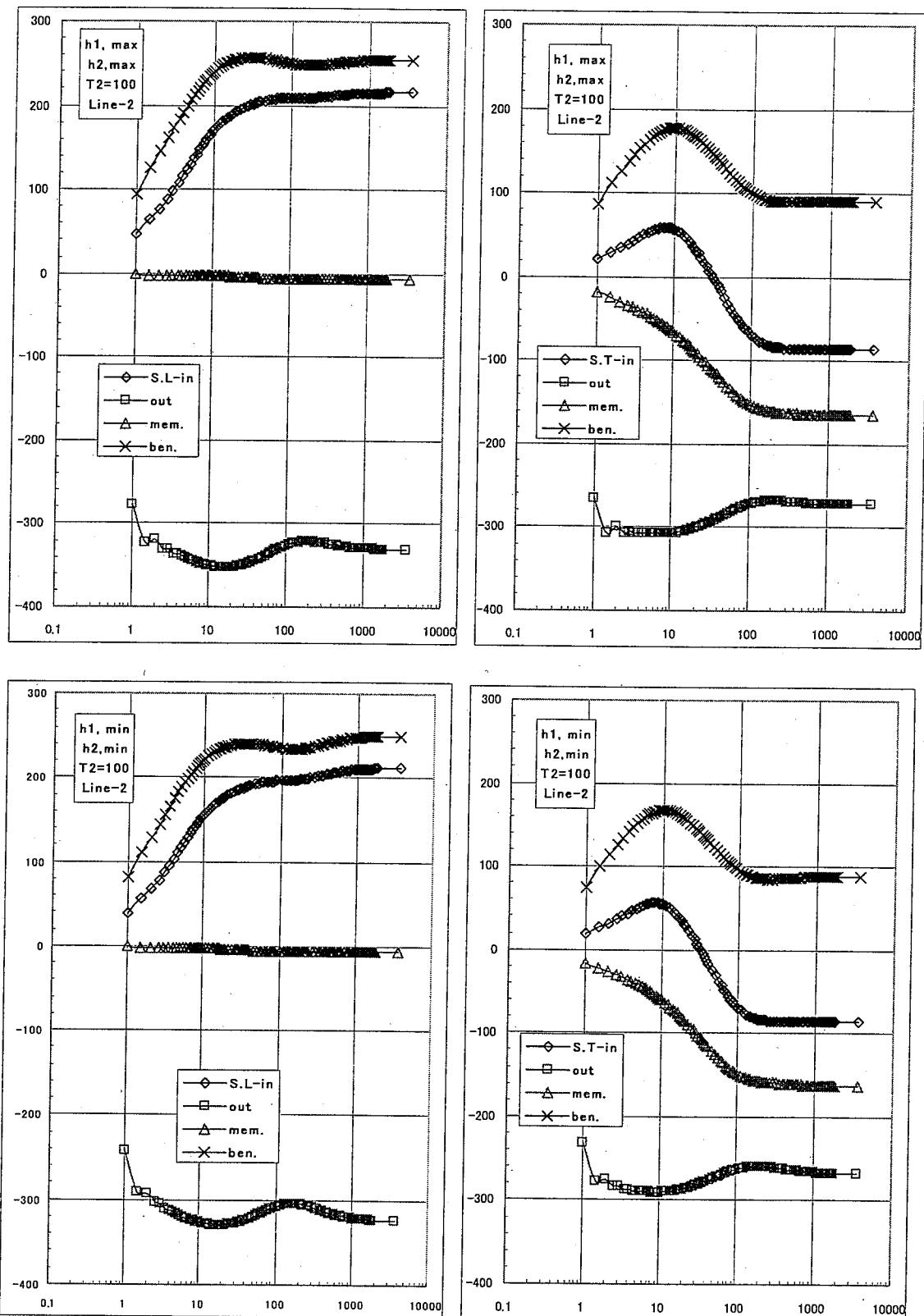


Fig.3.3-7(2) IHX 管板構造評価断面 L2 の Green 関数 ( $F_2=100$ )

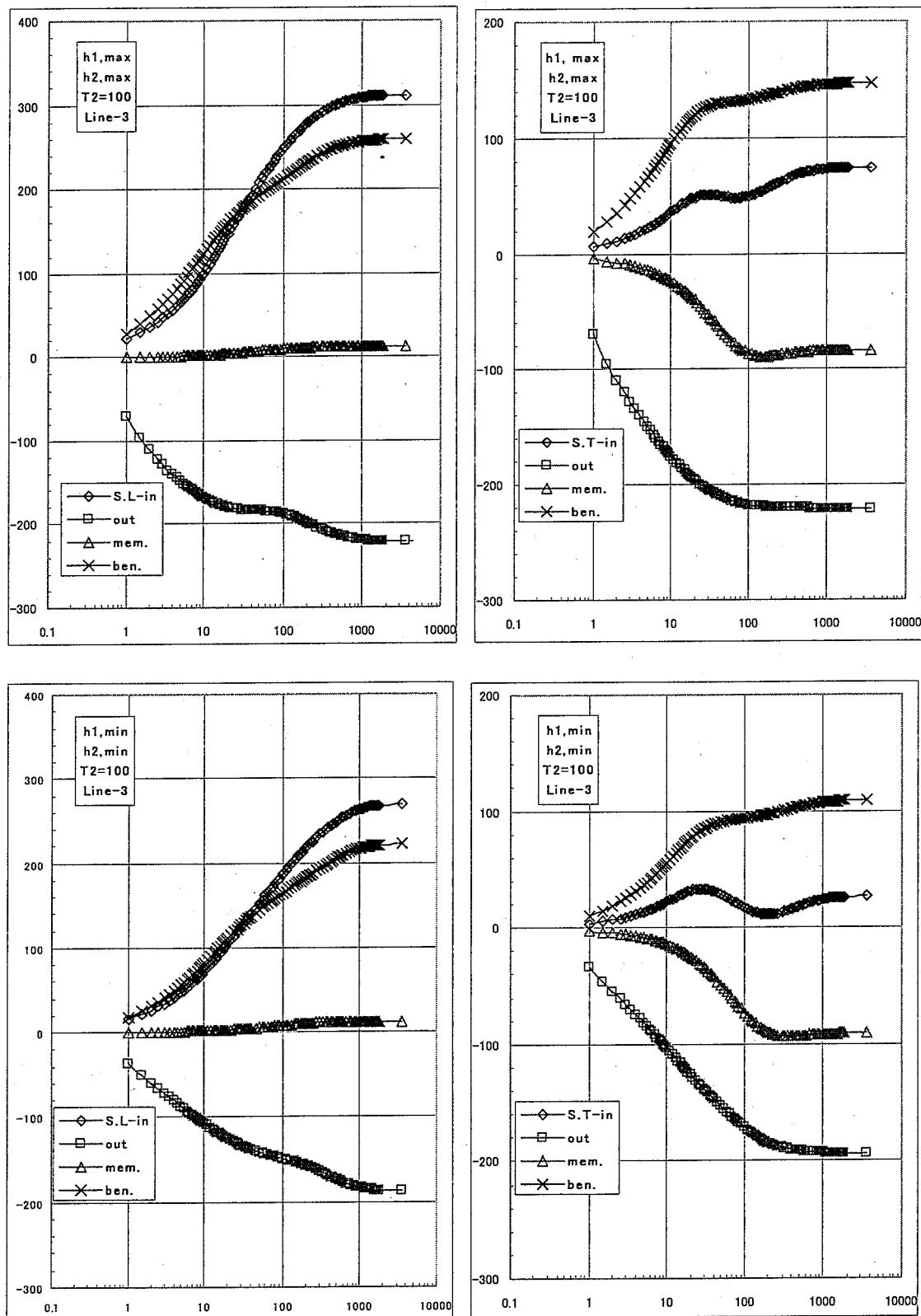


Fig.3.3-7(3) IHX 管板構造評価断面 L3 の Green 関数 ( $F_2=100$ )

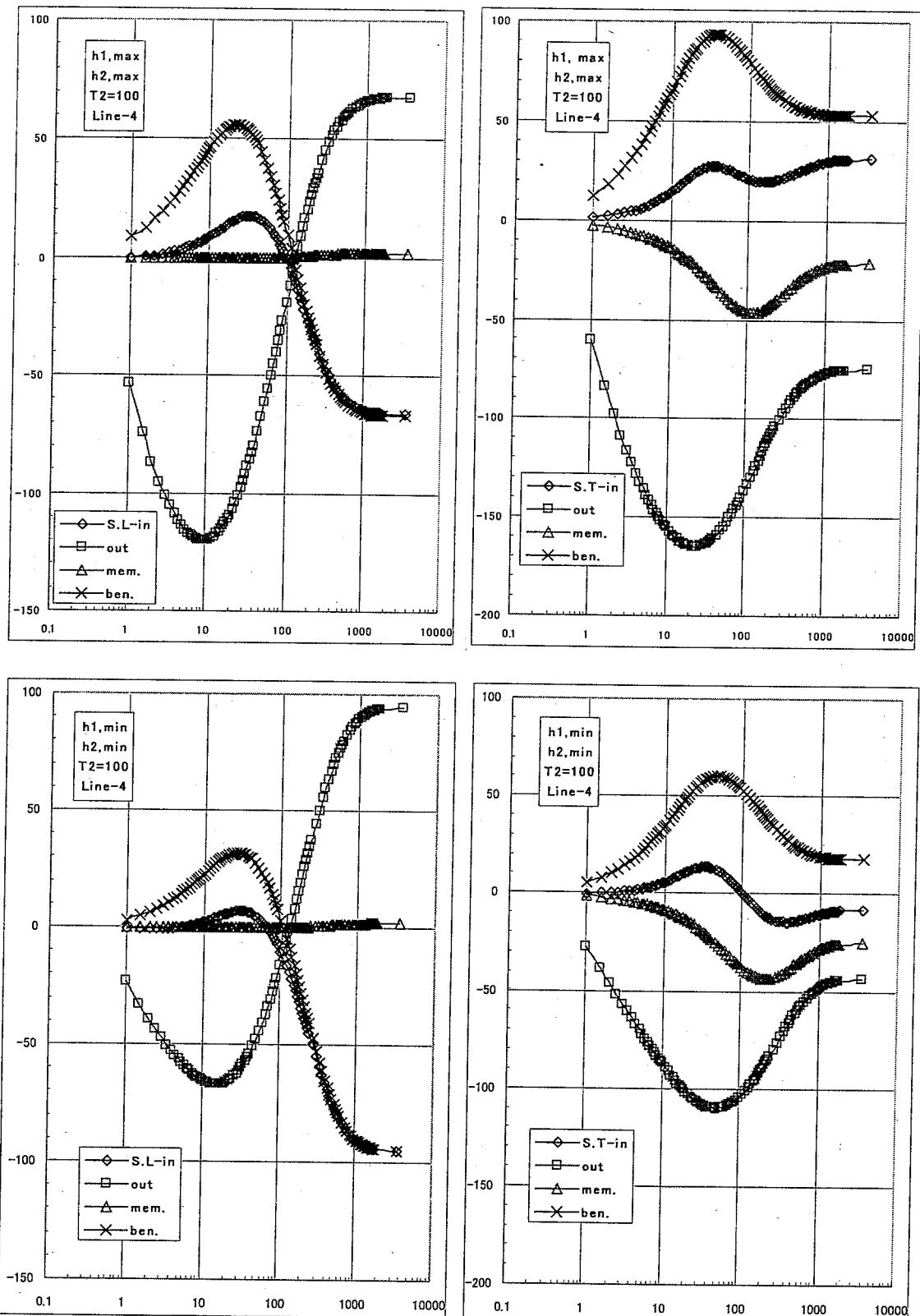


Fig.3.3-7(4) IHX 管板構造評価断面 L4 の Green 関数 ( $F_2 = 100$ )

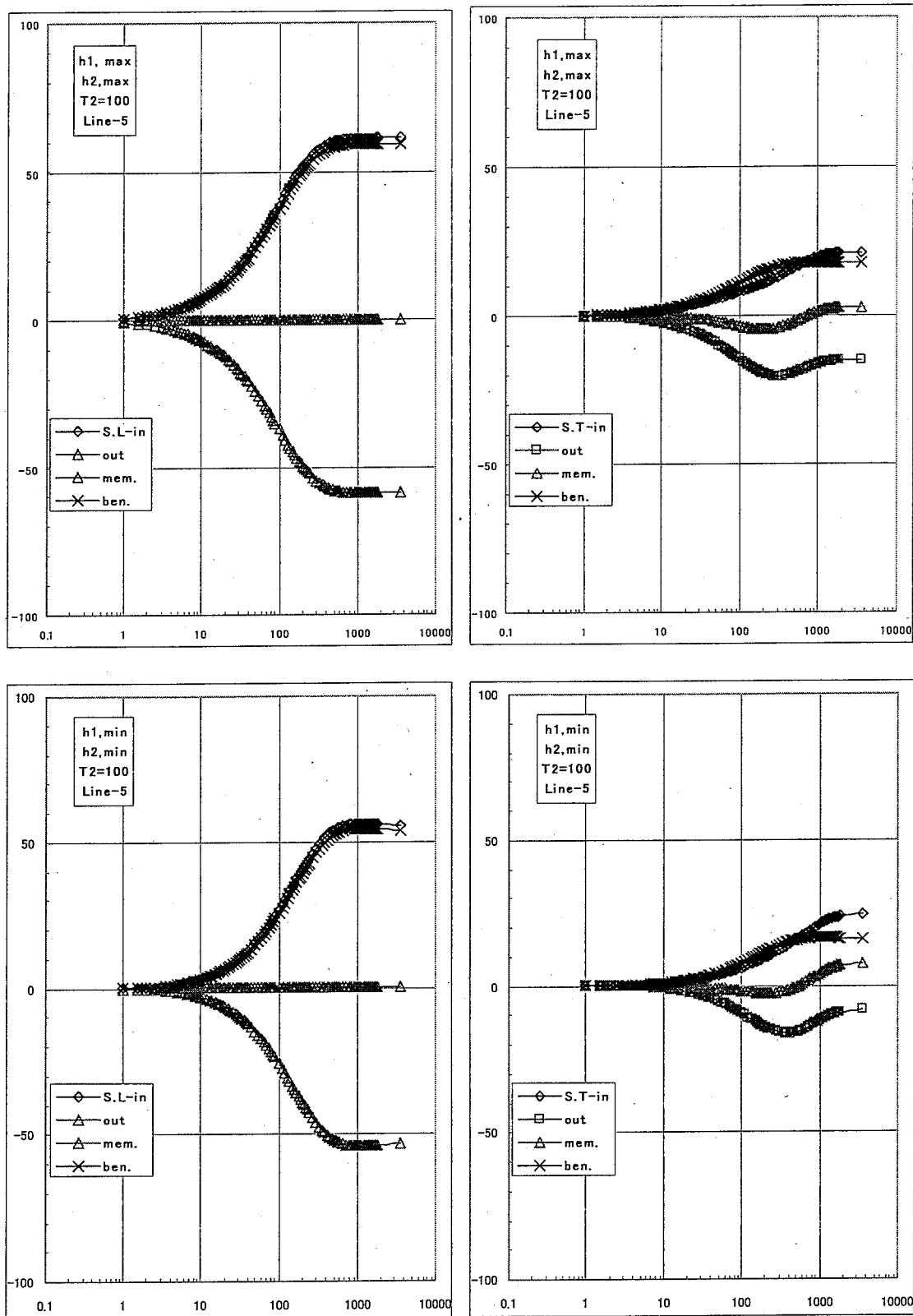


Fig.3.3-7(5) IHX 管板構造評価断面 L5 の Green 関数 ( $F_2=100$ )

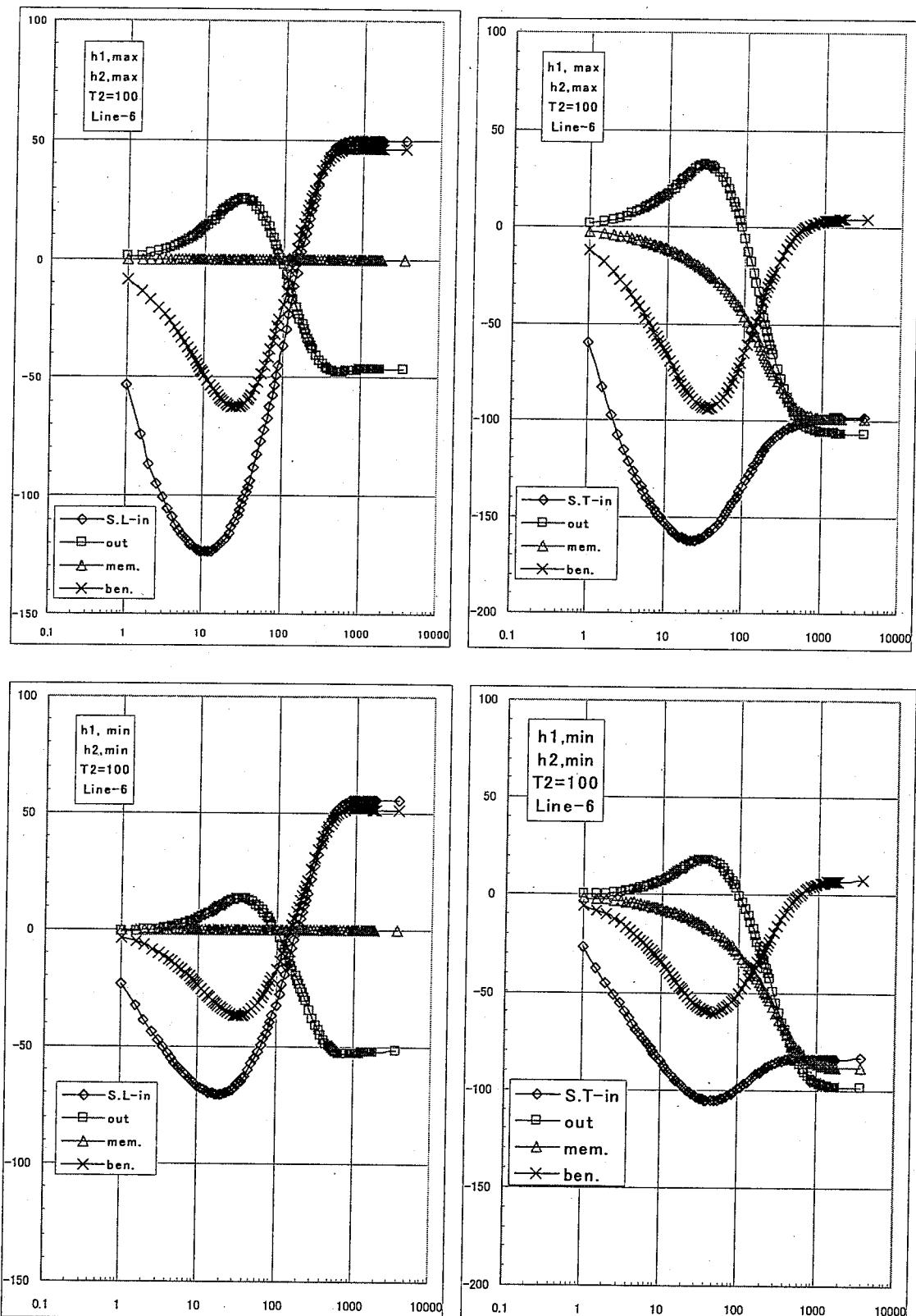


Fig.3.3-7(6) IHX 管板構造評価断面 L6 の Green 関数 ( $F_2=100$ )

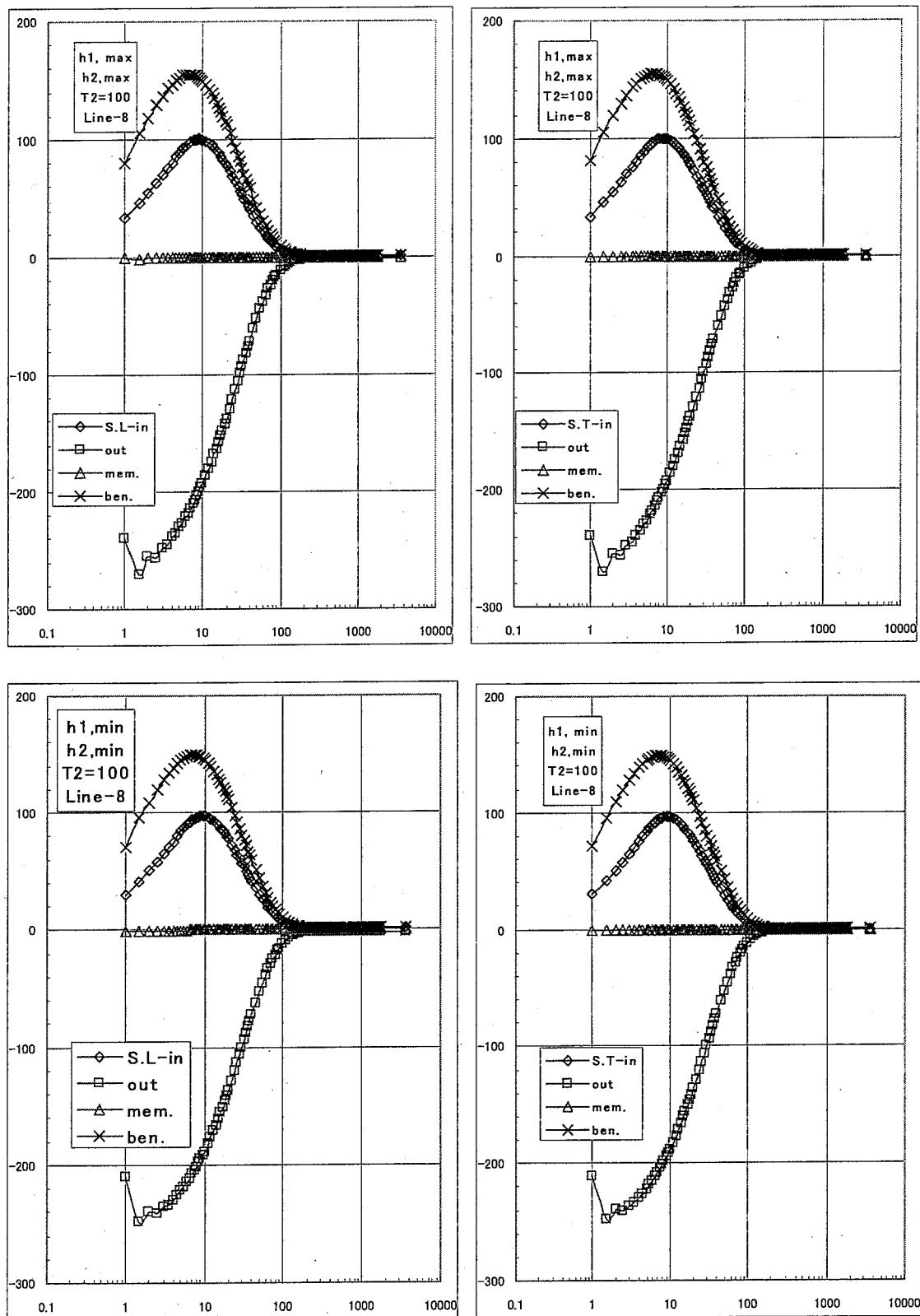


Fig.3.3-7(7) IHX 管板構造評価断面 L8 の Green 関数 (F2=100)

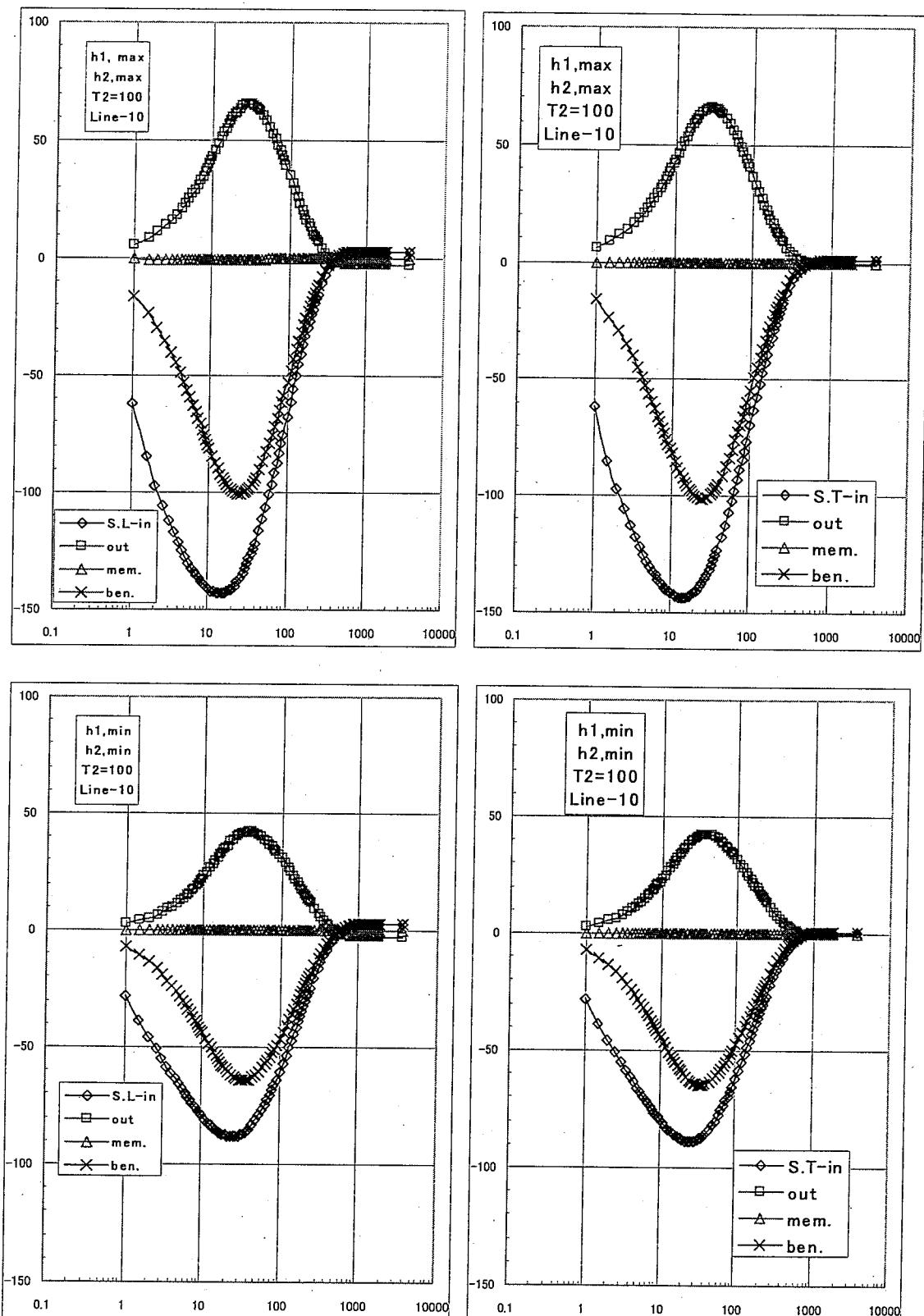


Fig.3.3-7(8) IHX 管板構造評価断面 L10 の Green 関数 ( $F_2=100$ )

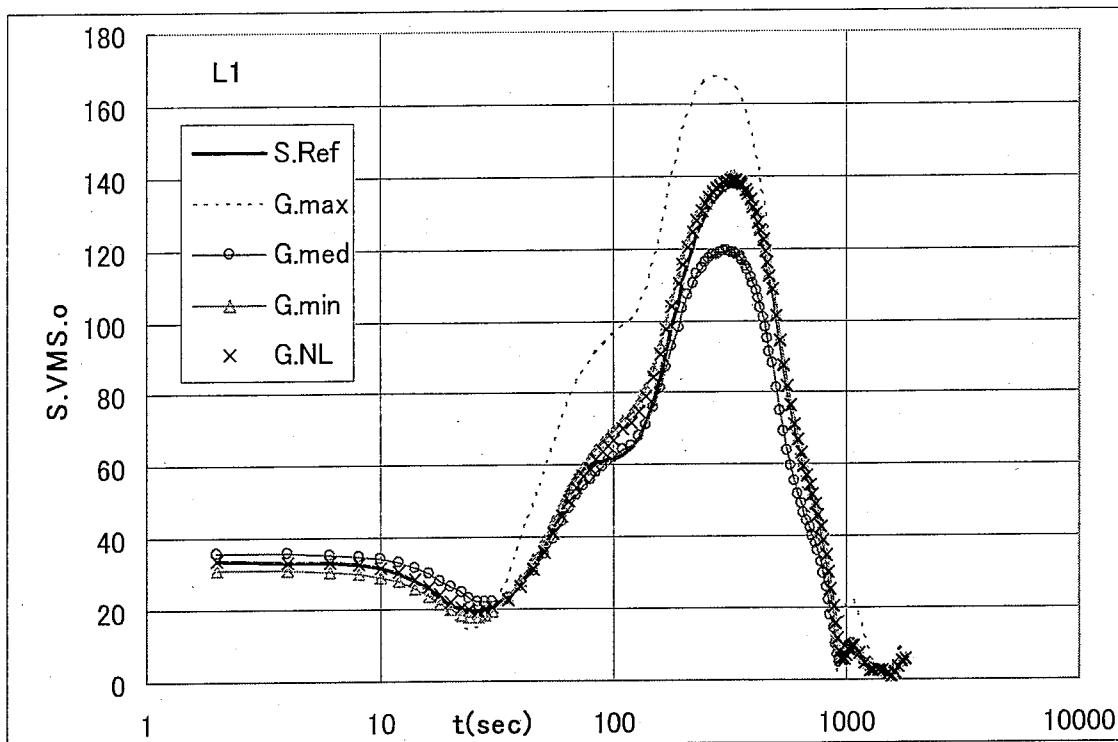


Fig.3.3-8(1) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L1 の応力

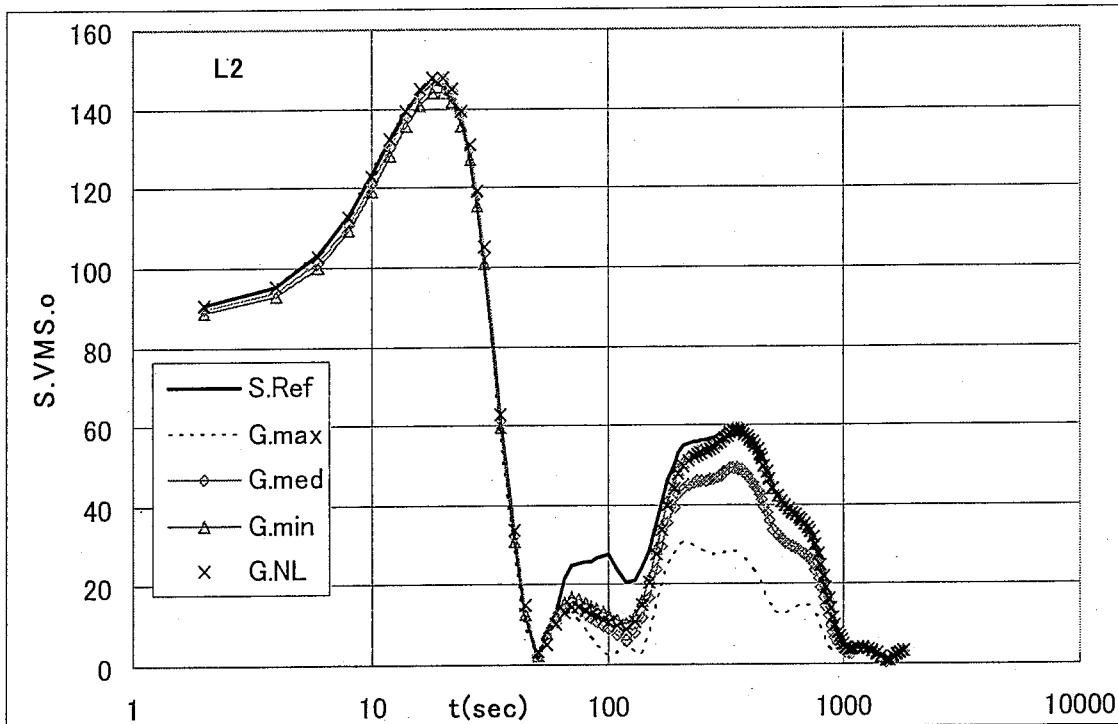


Fig.3.3-8(2) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L2 の応力

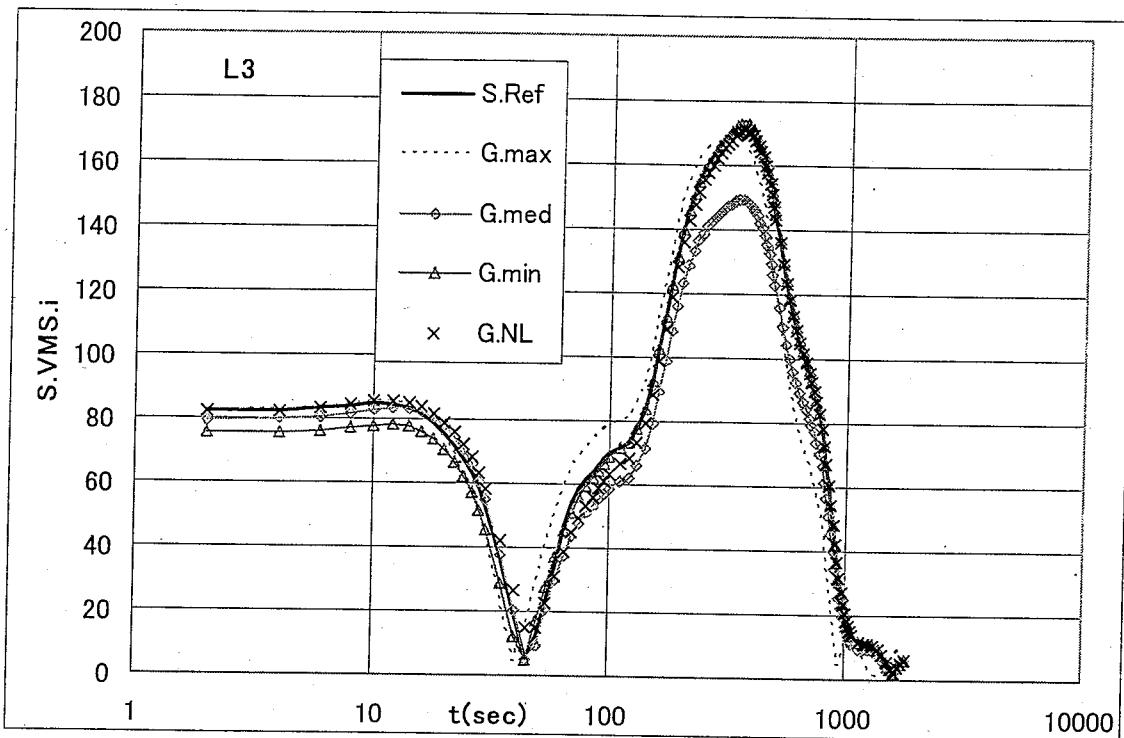


Fig.3.3-8(3) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L3 の応力

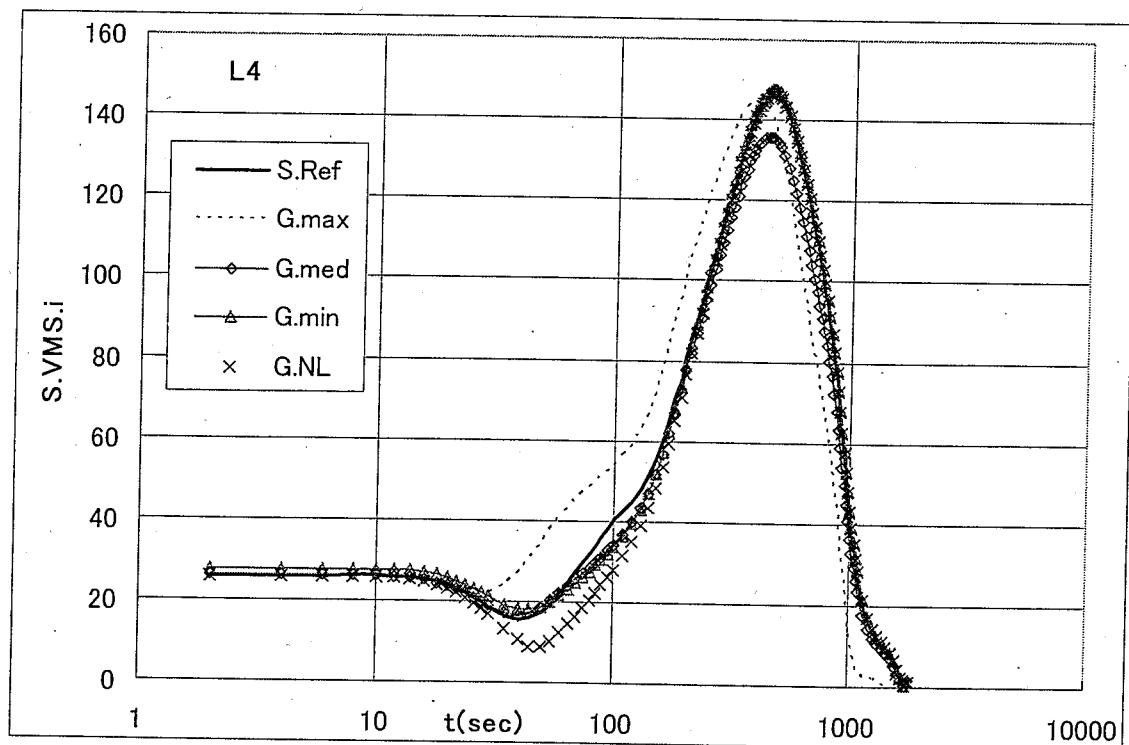


Fig.3.3-8(4) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L4 の応力

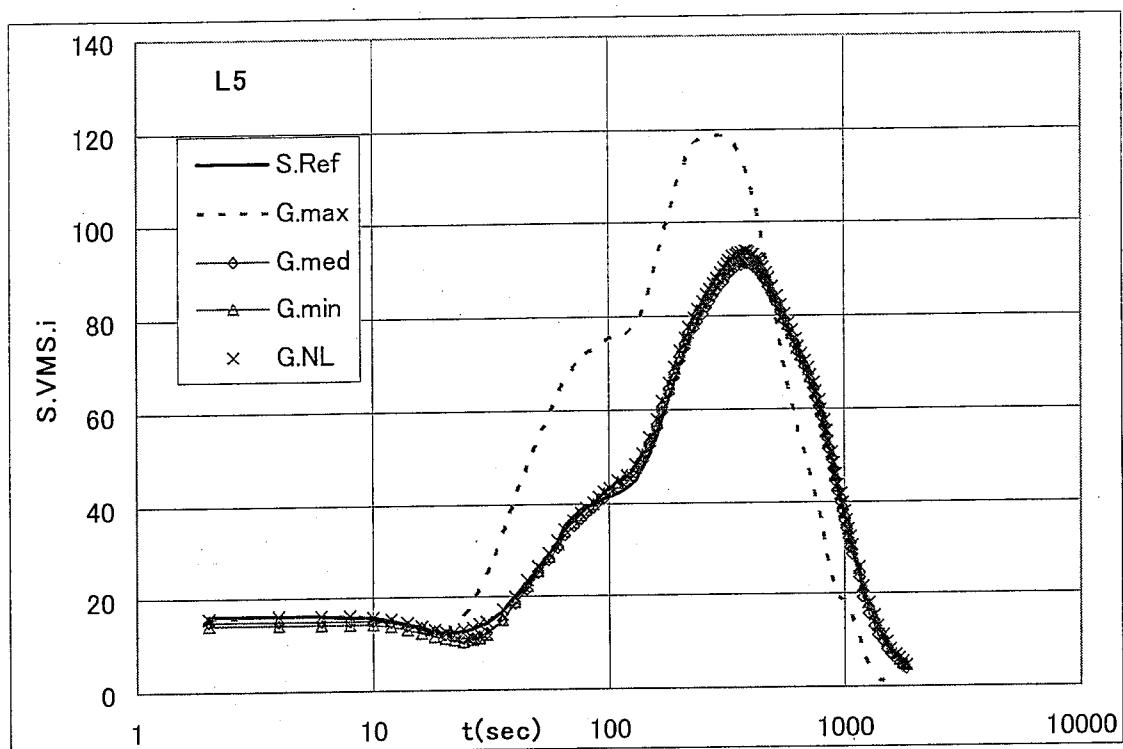


Fig.3.3-8(5) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L5 の応力

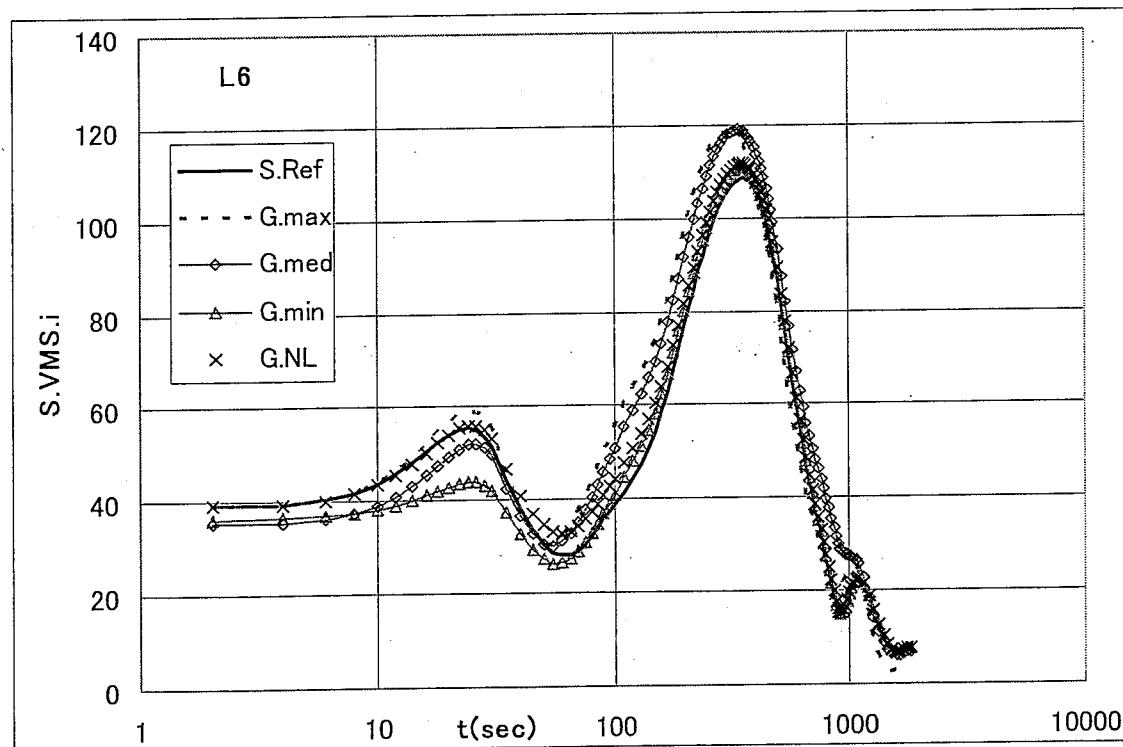


Fig.3.3-8(6) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L6 の応力

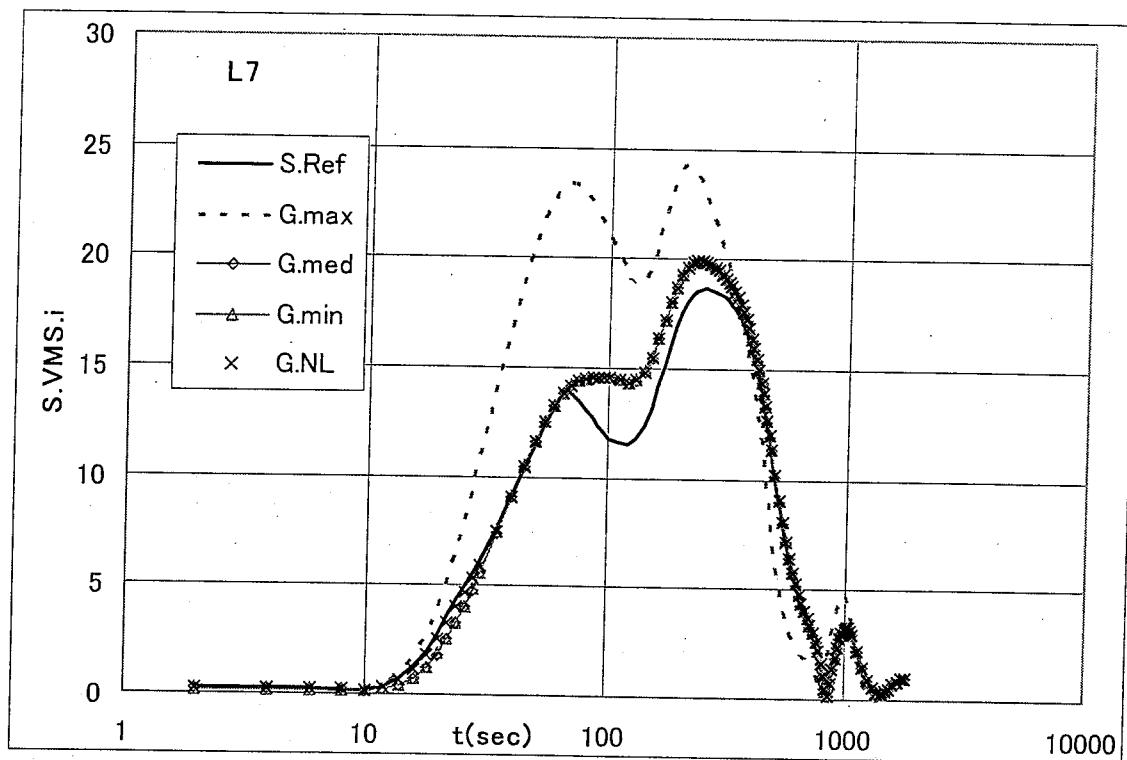


Fig.3.3-8(7) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L7 の応力

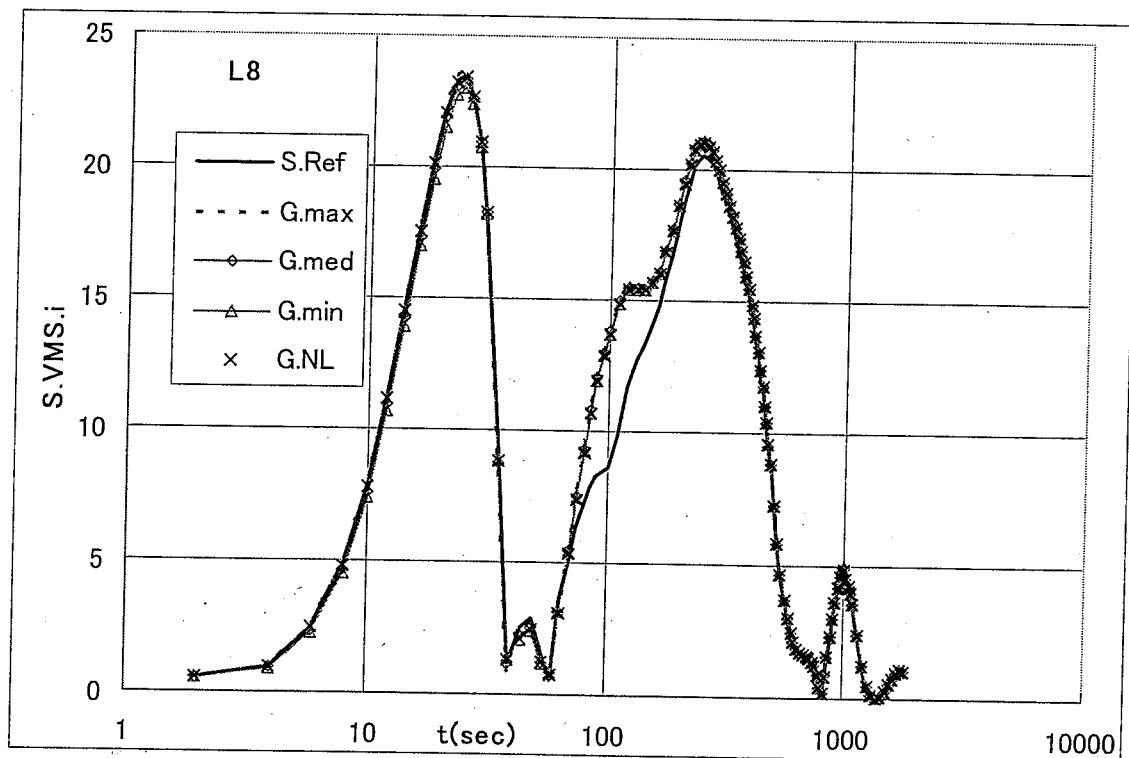


Fig.3.3-8(8) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L8 の応力

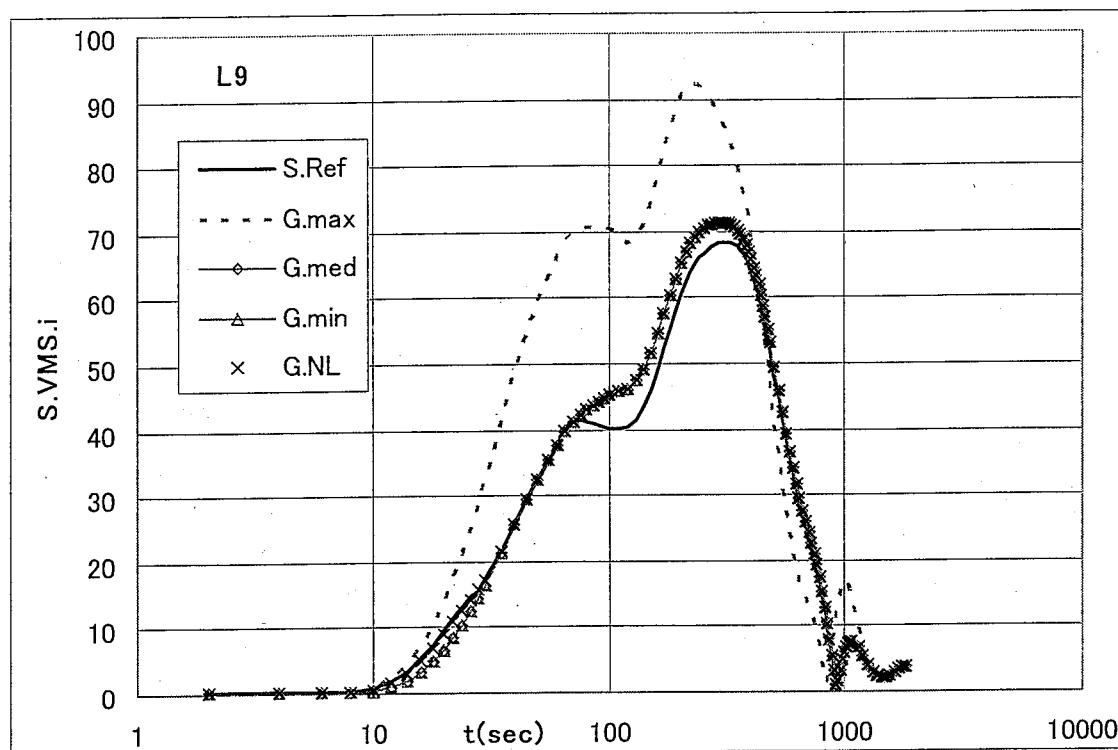


Fig.3.3-8(9) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L9 の応力

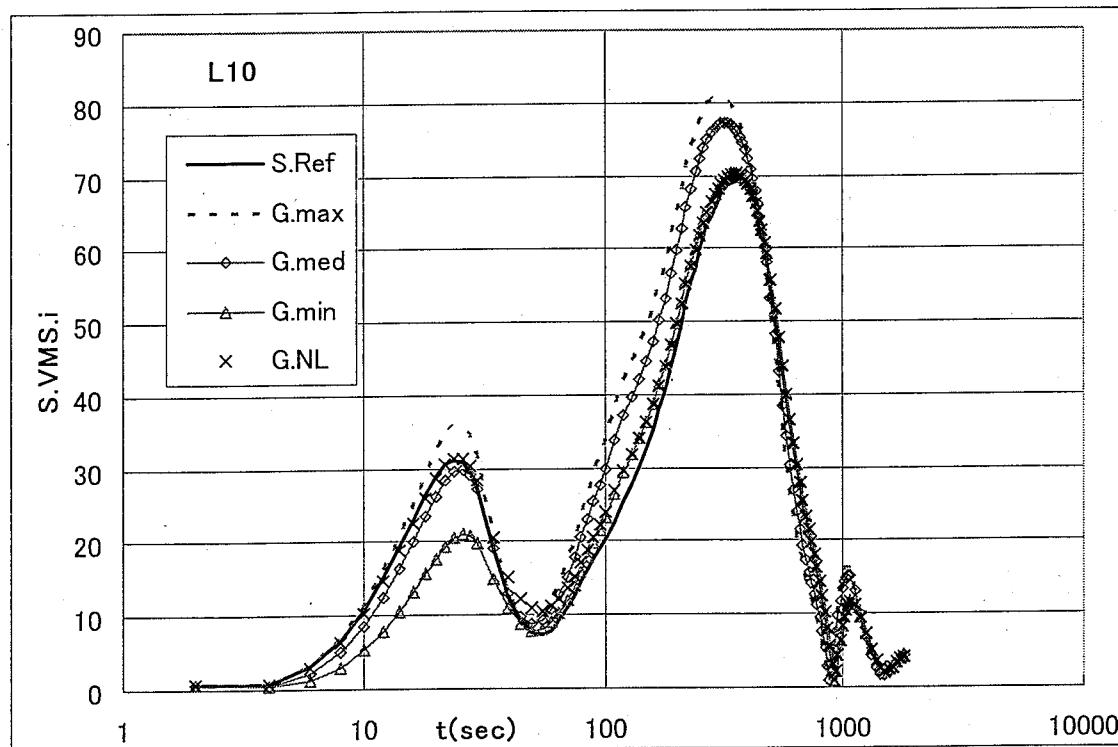


Fig.3.3-8(10) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L10 の応力

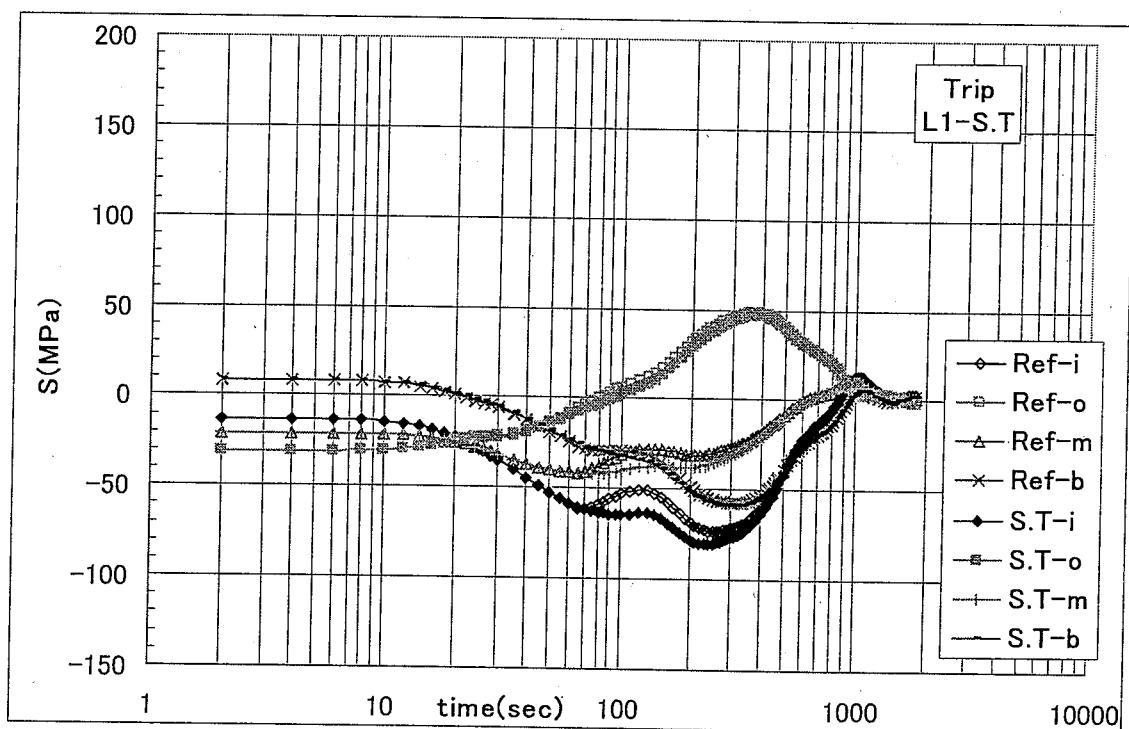
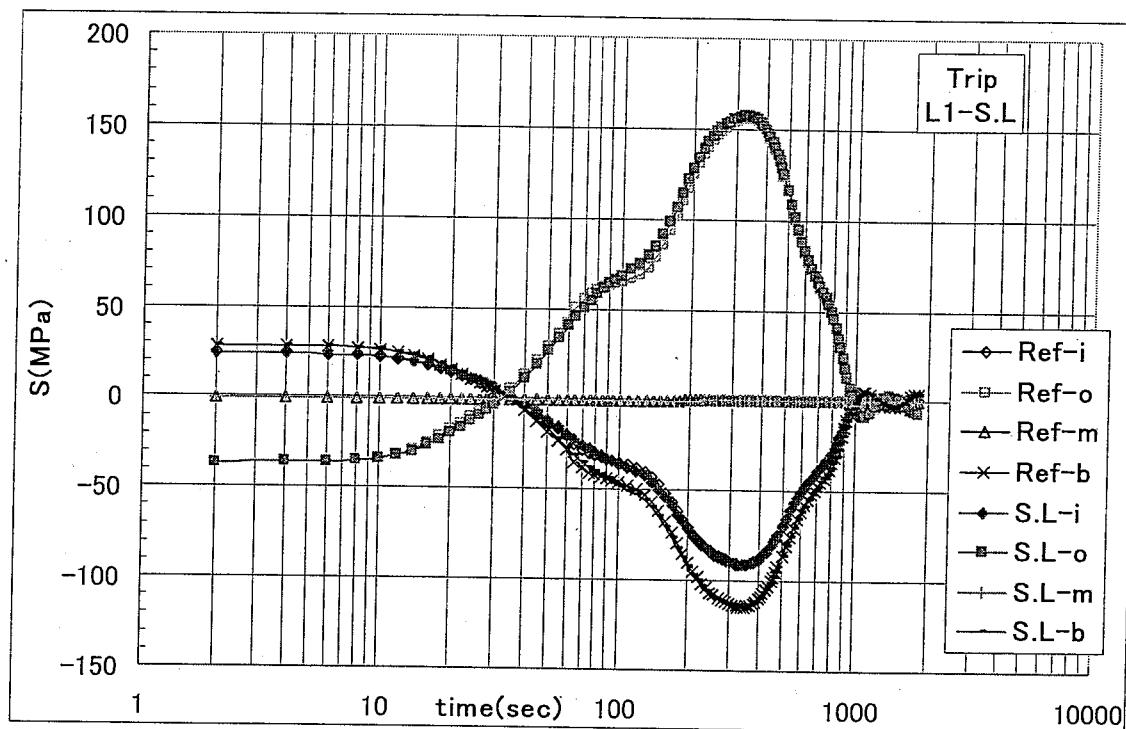


Fig.3.3-9(1) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L1 の応力成分

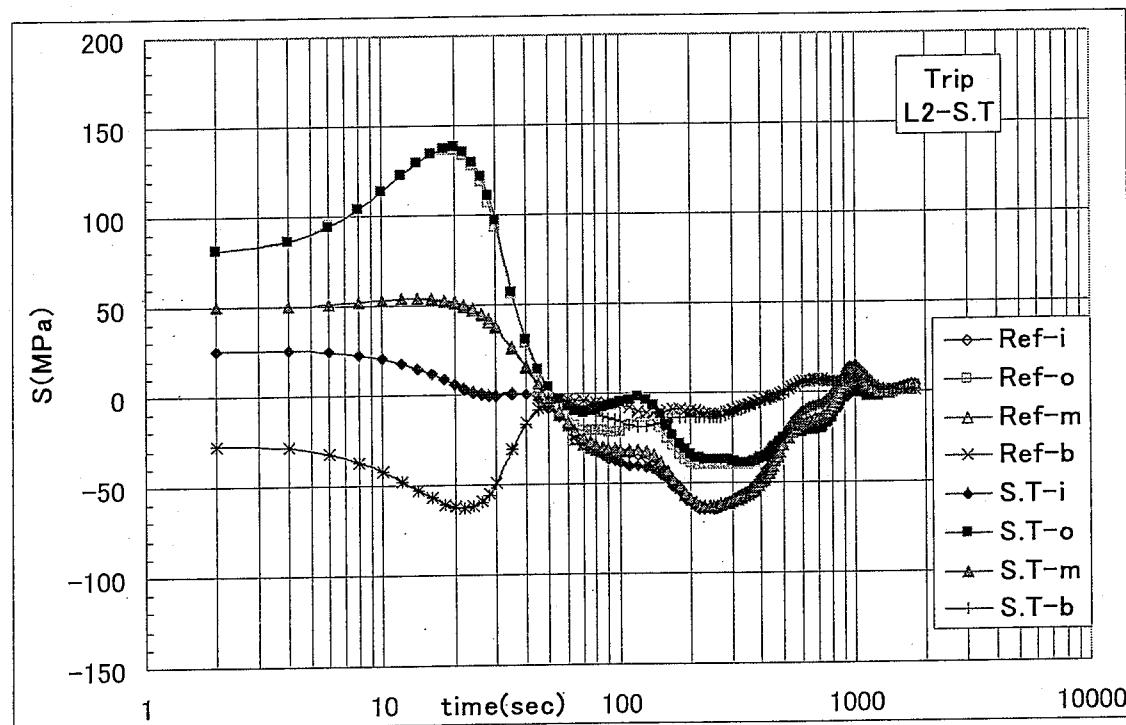
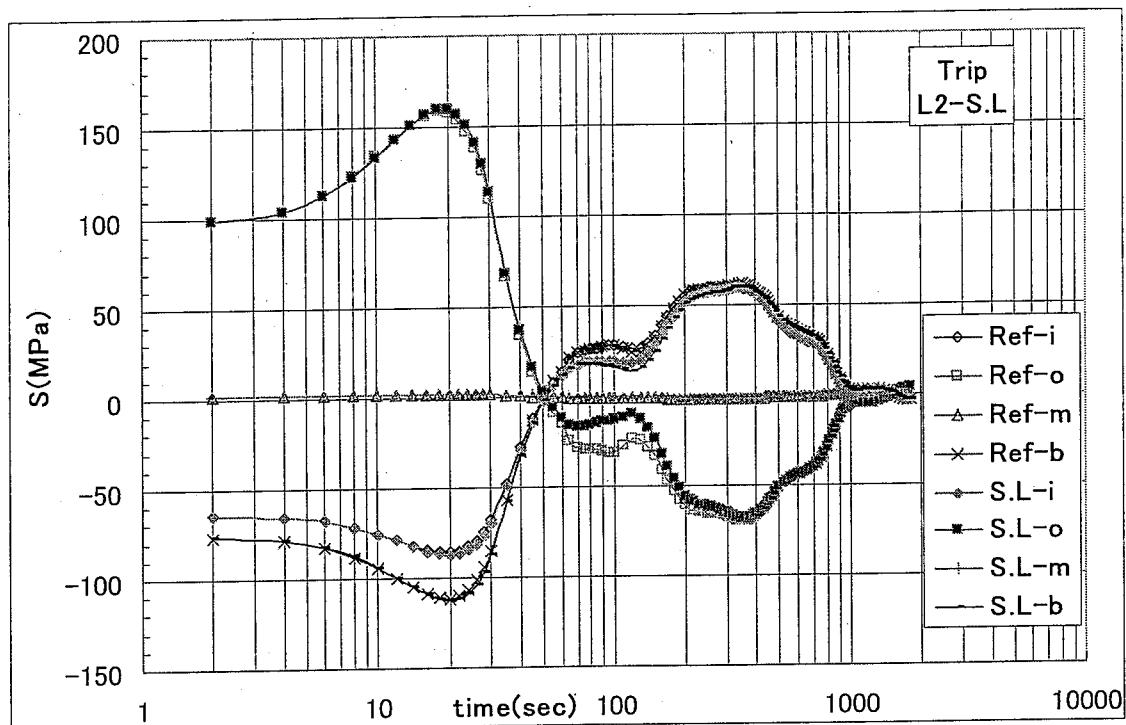


Fig.3.3-9(2) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L2 の応力成分

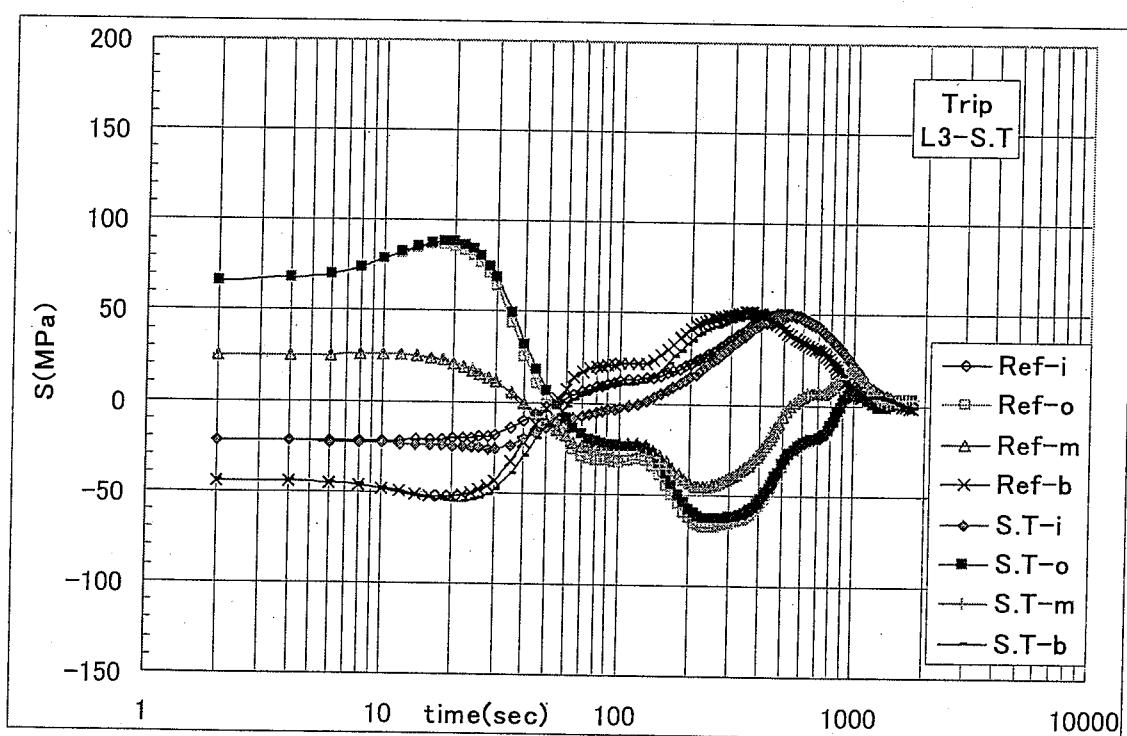
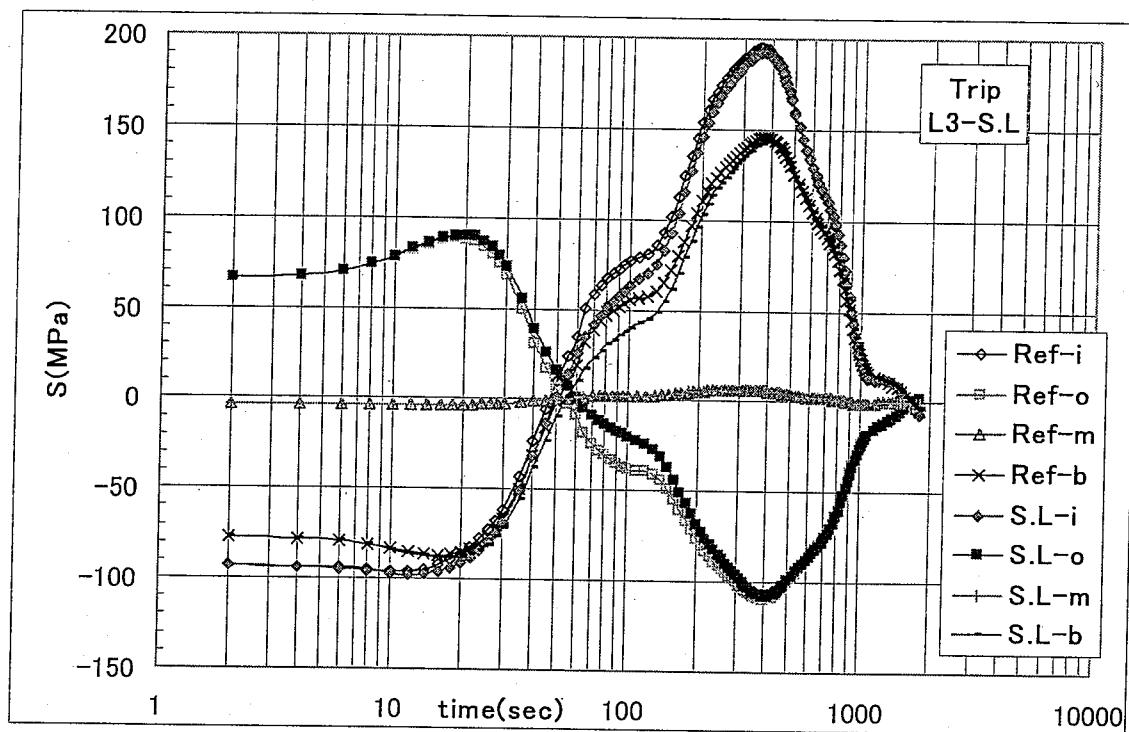


Fig.3.3-9(3) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L3 の応力成分

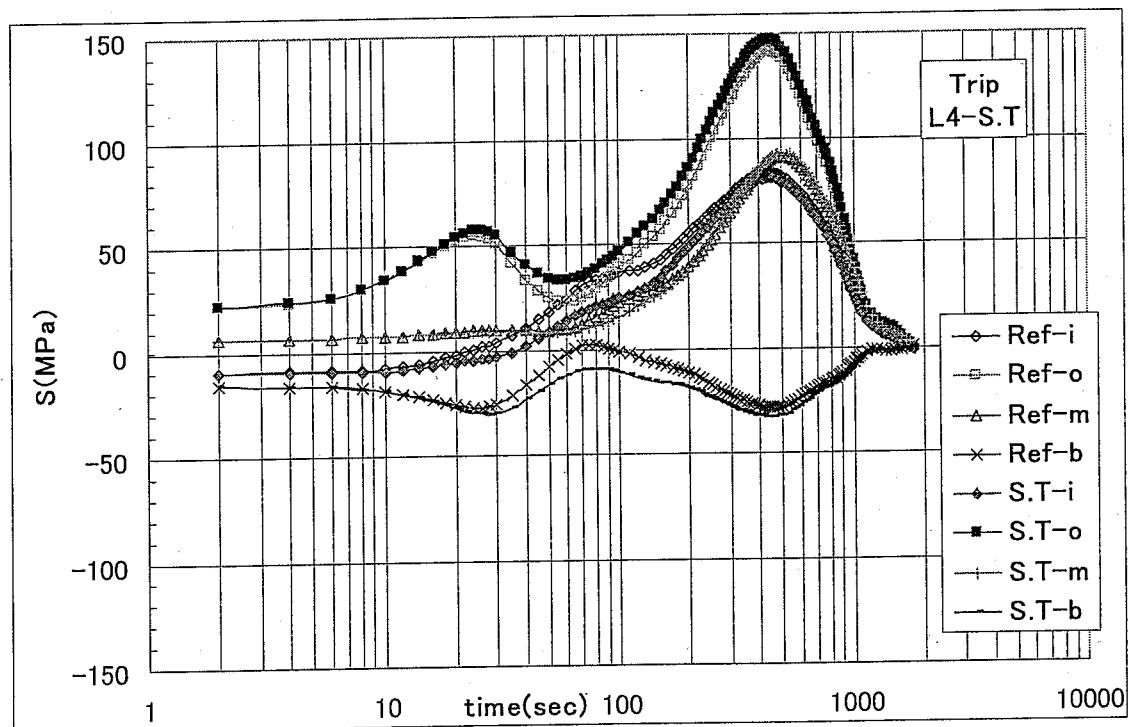
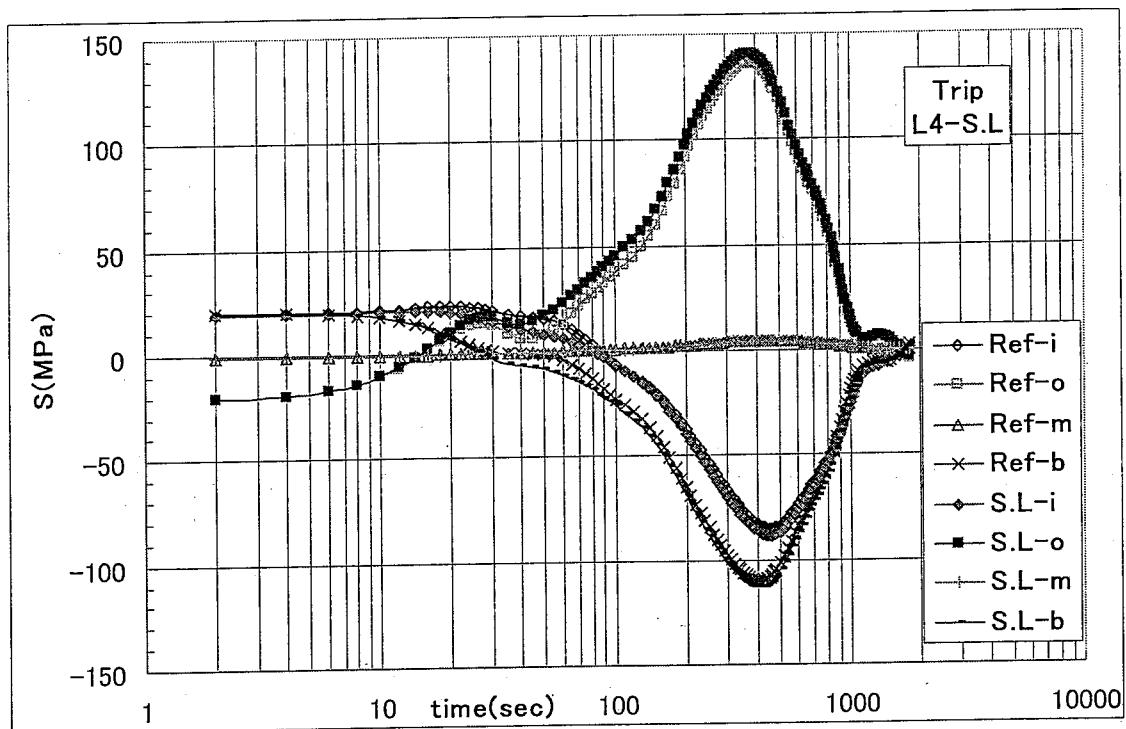


Fig.3.3-9(4) 手動トリップによる IHX 管板構造評価断面 L4 の応力成分

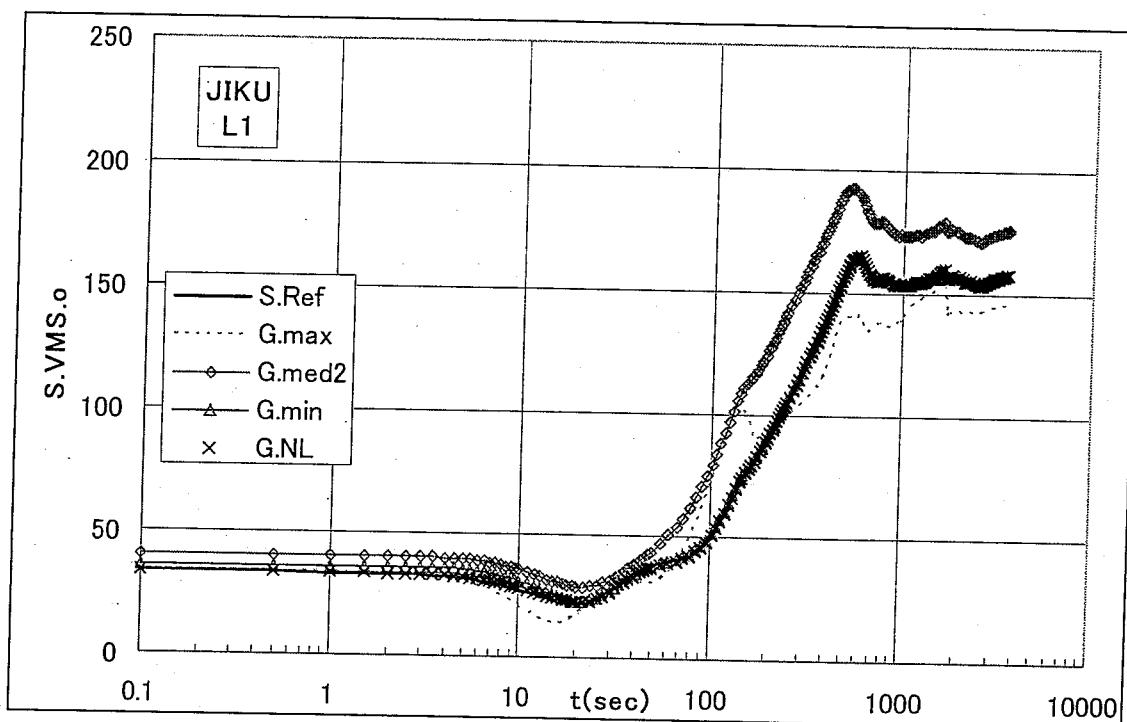


Fig.3.3-10(1) 一次ポンプ軸固定による IHX 管板構造評価断面 L1 の応力

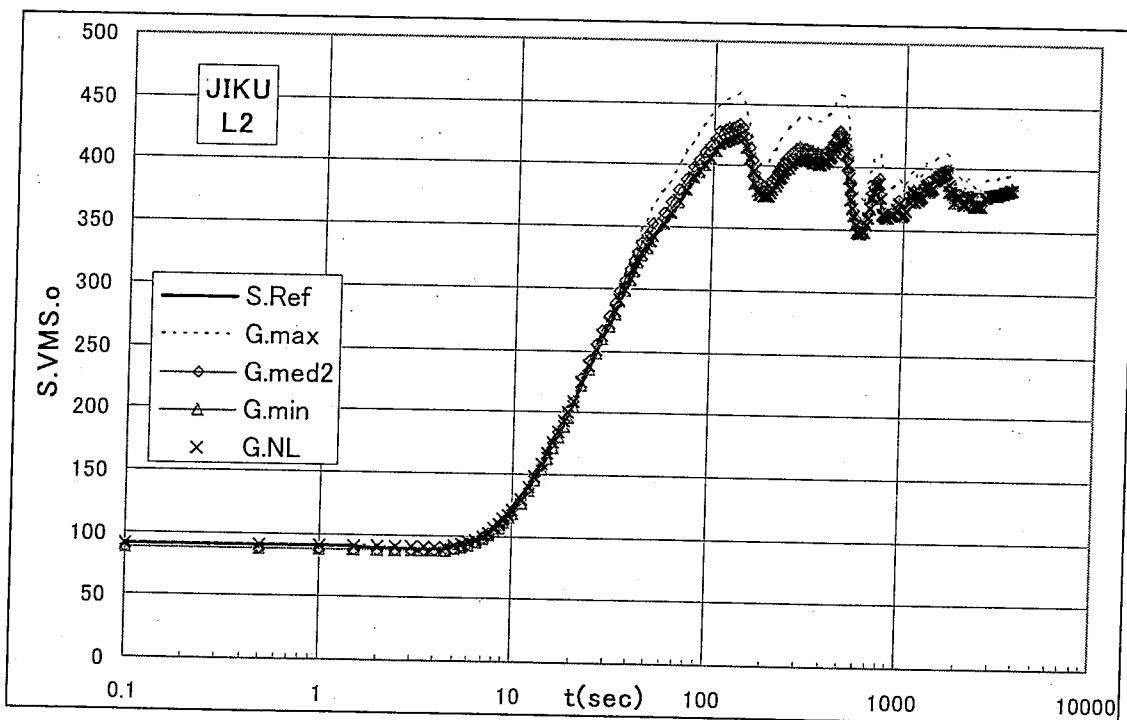


Fig.3.3-10(2) 一次ポンプ軸固定による IHX 管板構造評価断面 L2 の応力

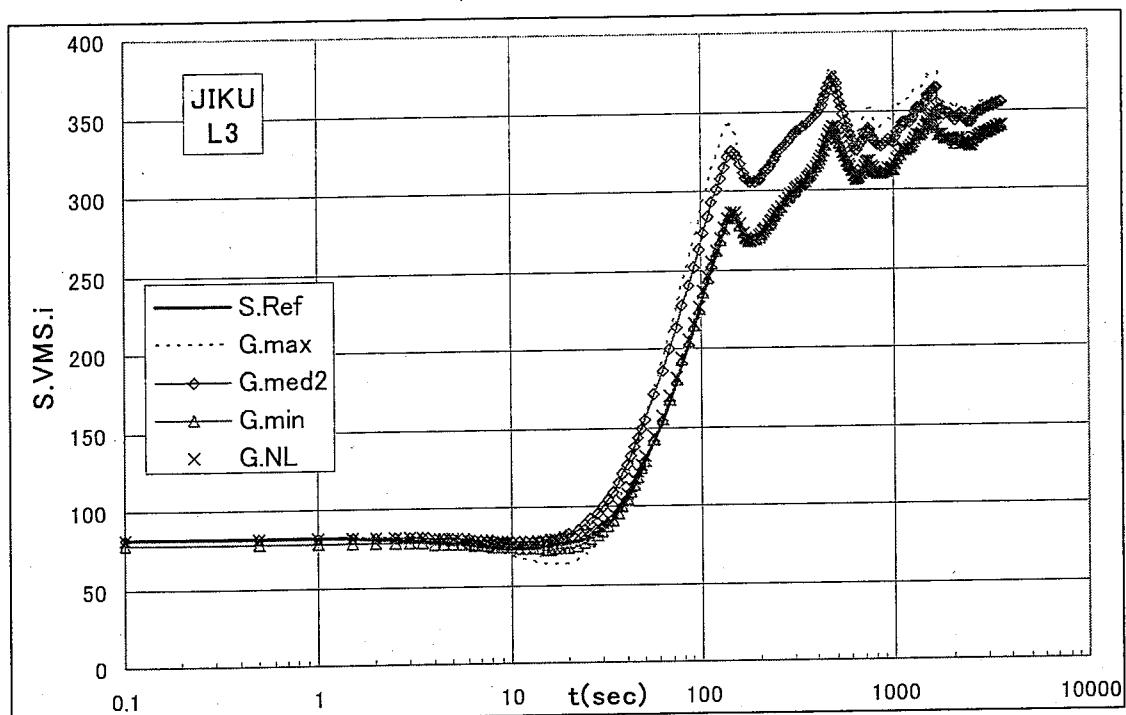


Fig.3.3-10(3) 一次ポンプ軸固着による IHX 管板構造評価断面 L3 の応力

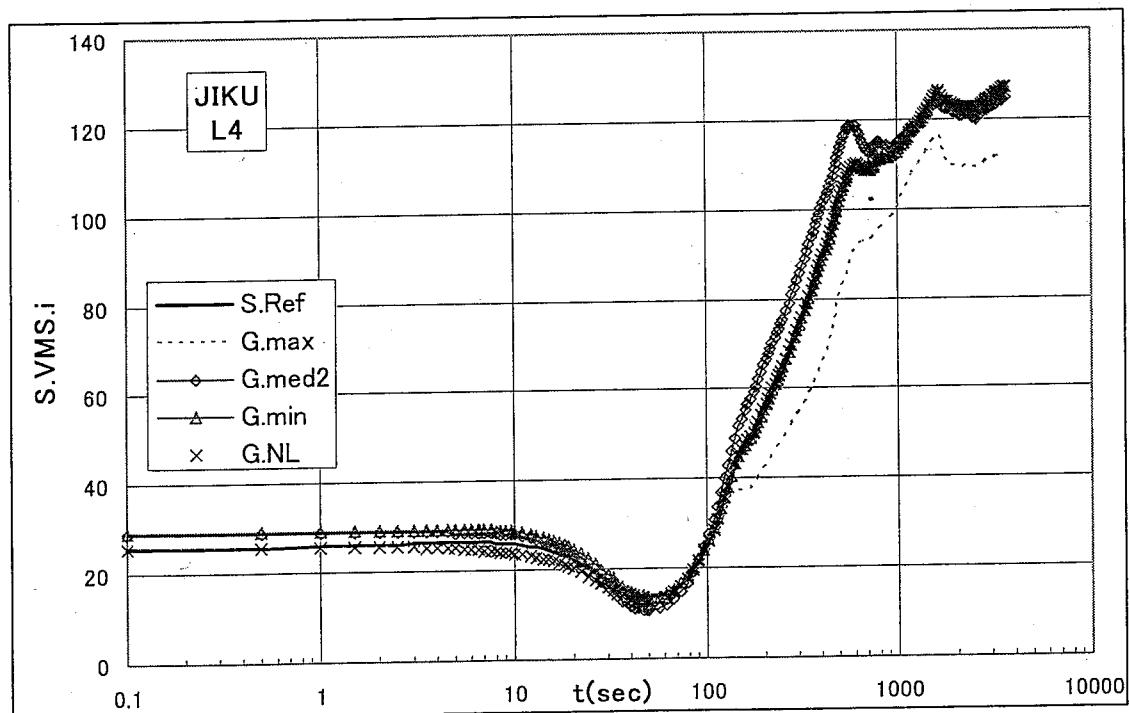


Fig.3.3-10(4) 一次ポンプ軸固着による IHX 管板構造評価断面 L4 の応力

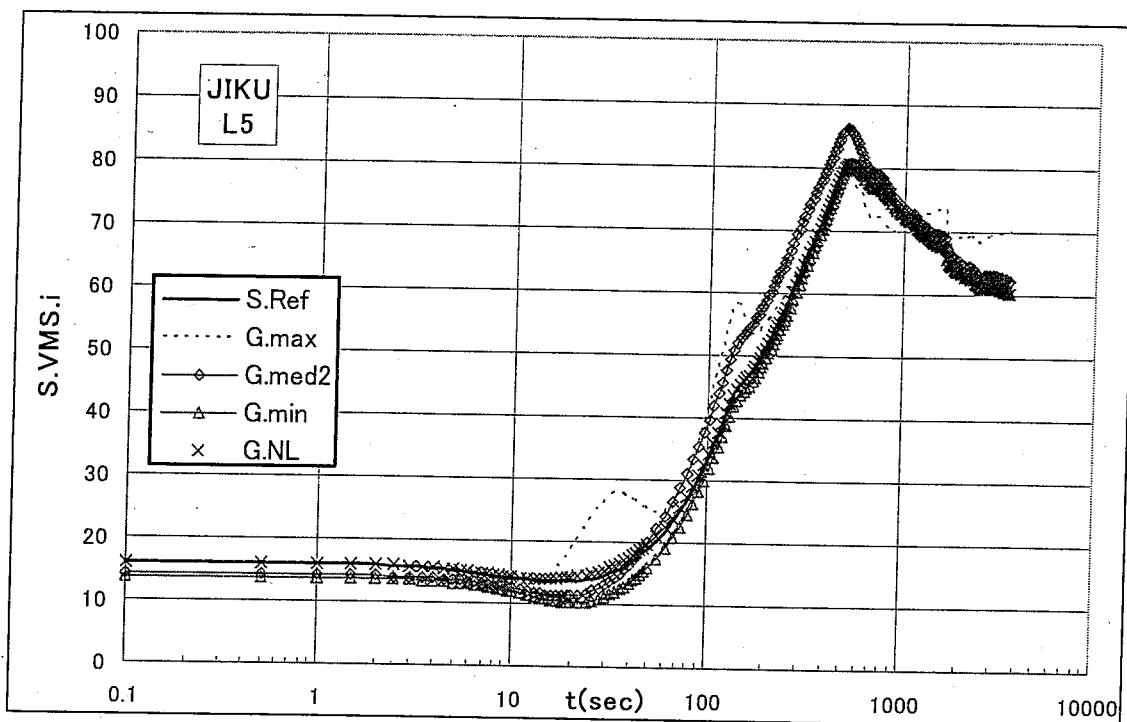


Fig.3.3-10(5) 一次ポンプ軸固定による IHX 管板構造評価断面 L5 の応力

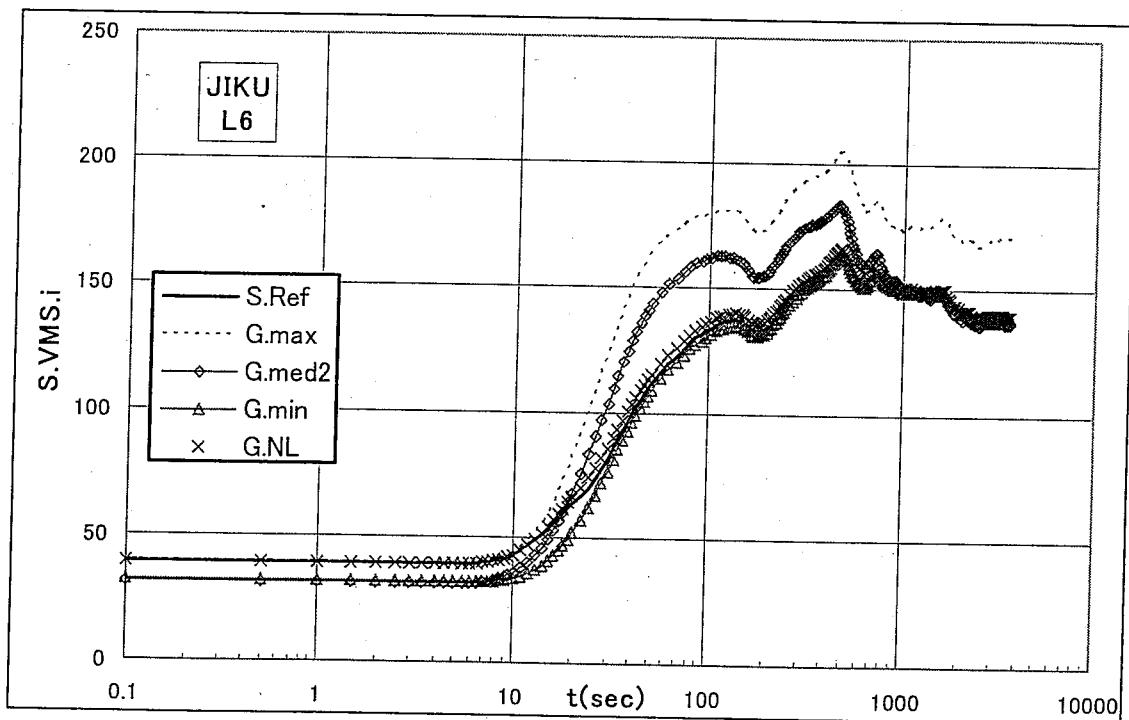


Fig.3.3-10(6) 一次ポンプ軸固定による IHX 管板構造評価断面 L6 の応力

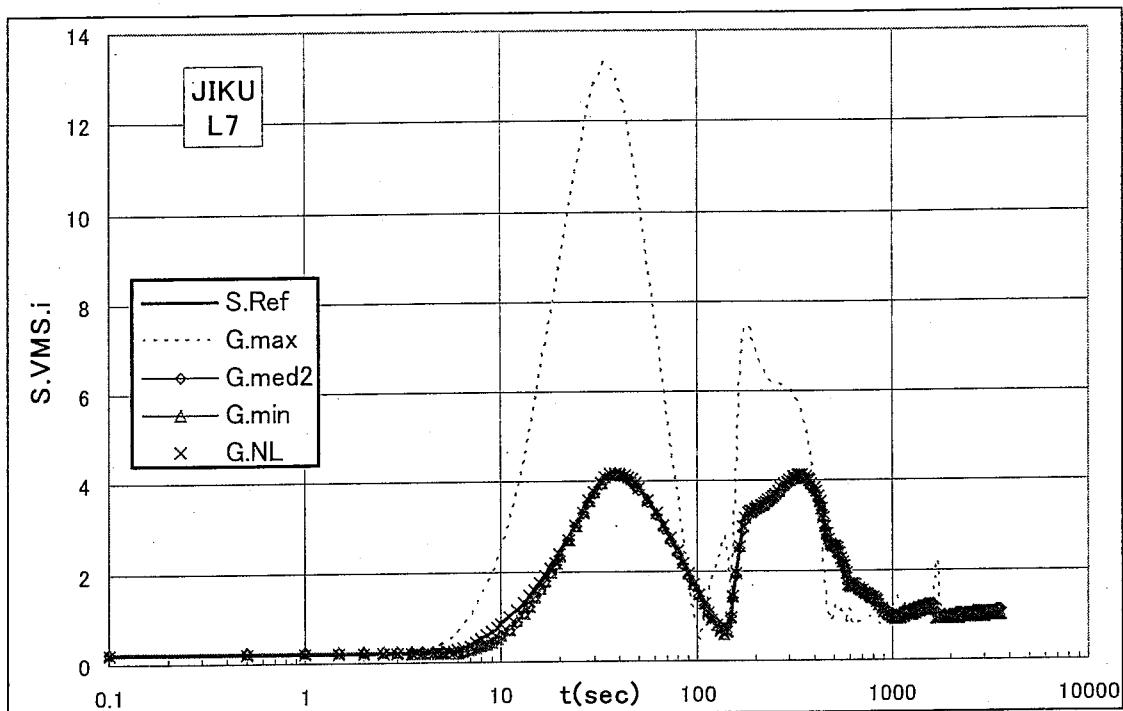


Fig.3.3-10(7) 一次ポンプ軸固定による IHX 管板構造評価断面 L7 の応力

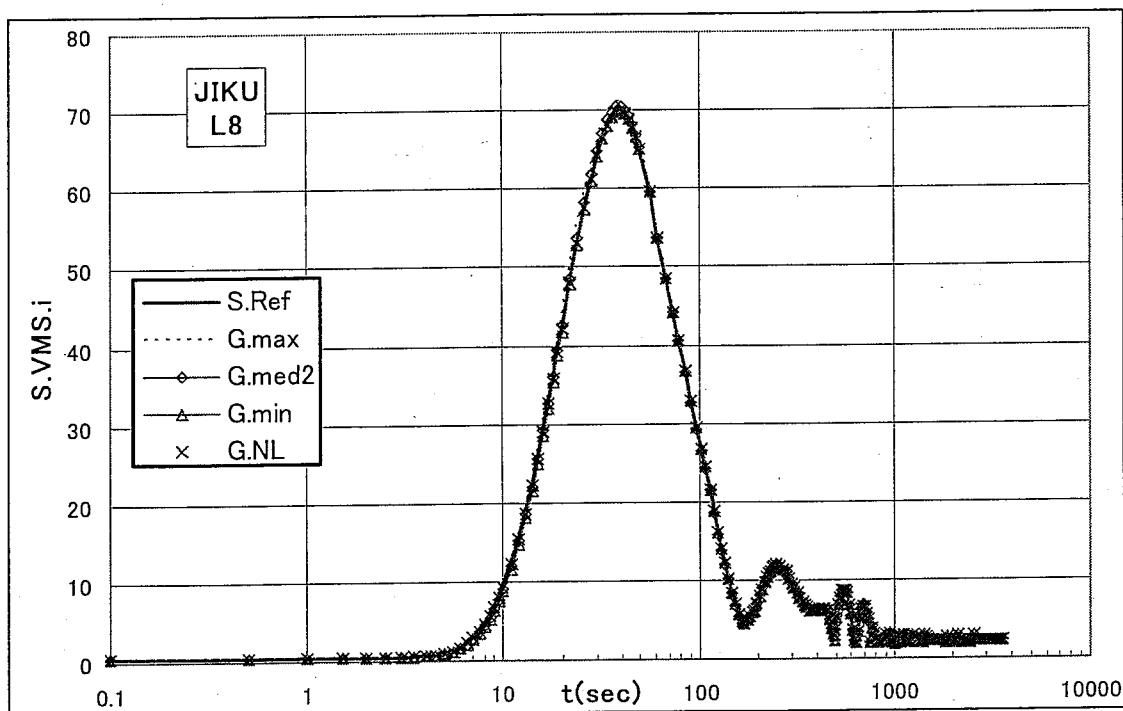


Fig.3.3-10(8) 一次ポンプ軸固定による IHX 管板構造評価断面 L8 の応力

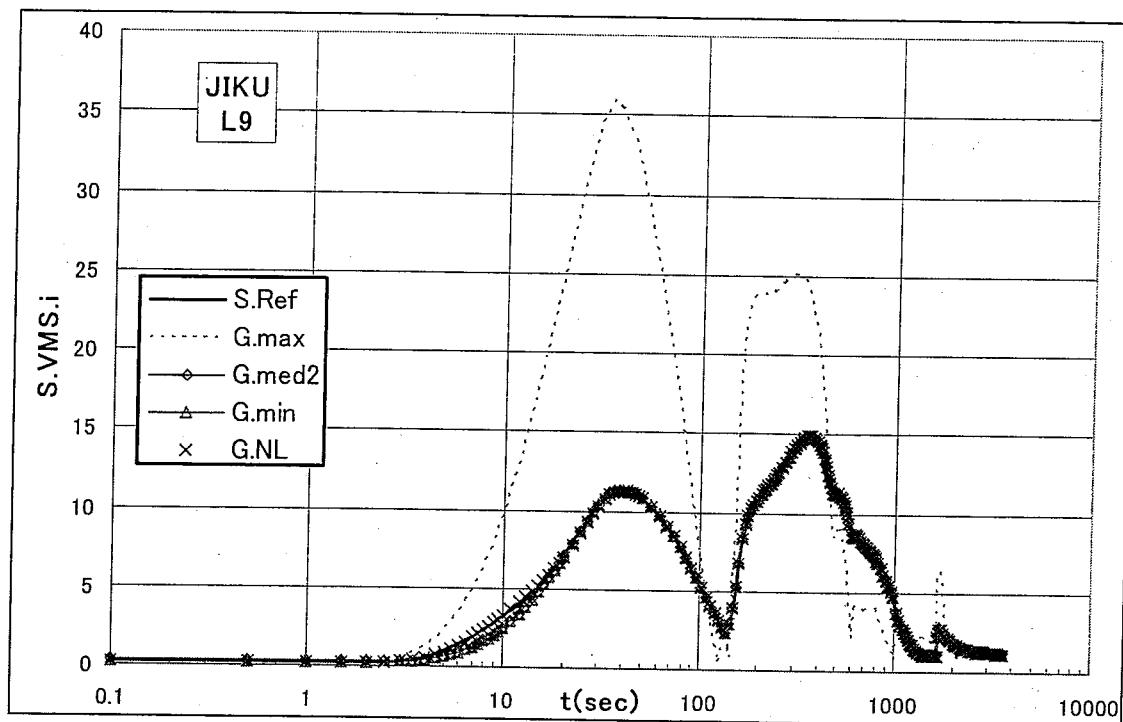


Fig.3.3-10(9) 一次ポンプ軸固定による IHX 管板構造評価断面 L9 の応力

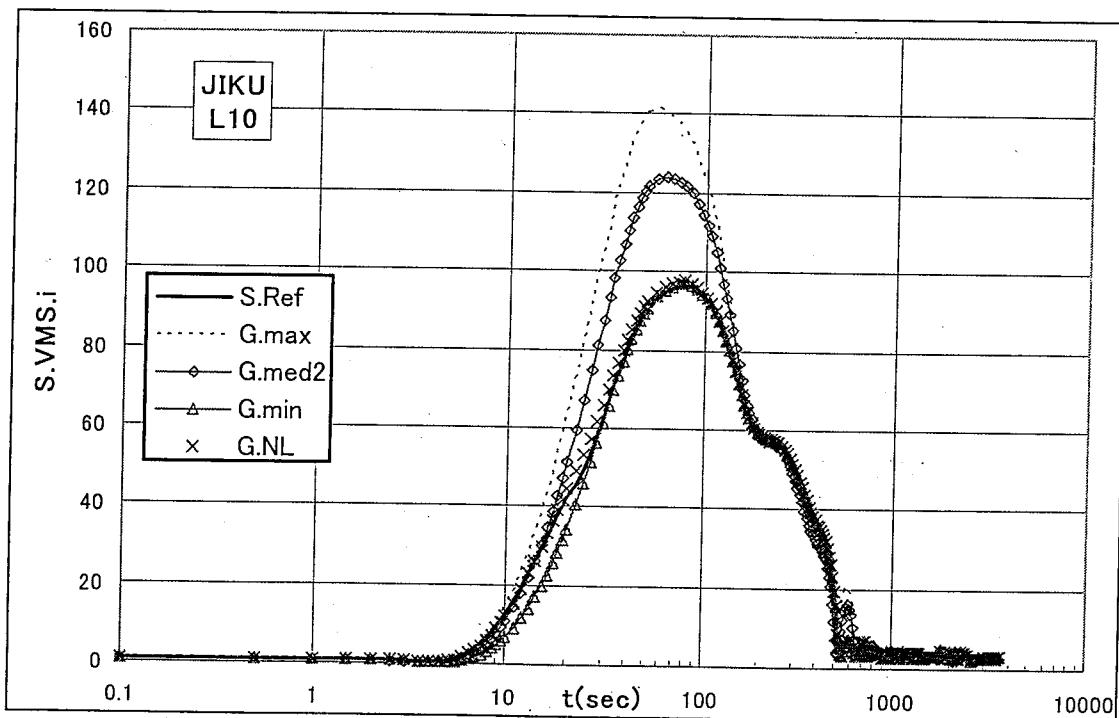


Fig.3.3-10(10) 一次ポンプ軸固定による IHX 管板構造評価断面 L10 の応力

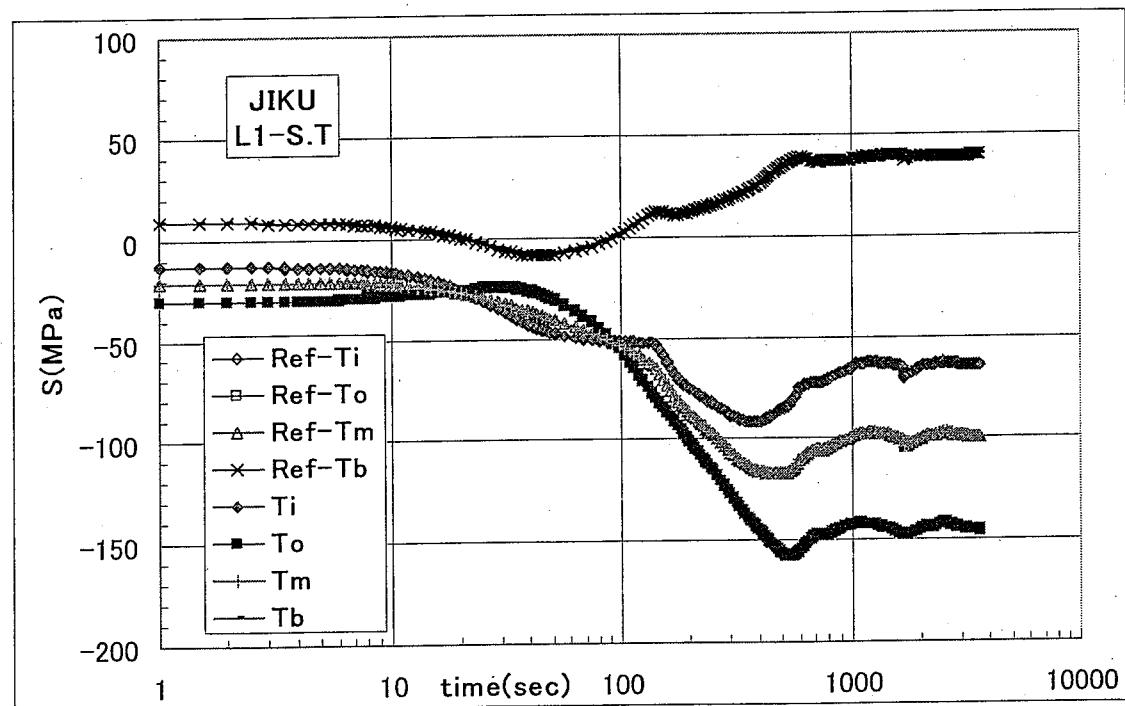
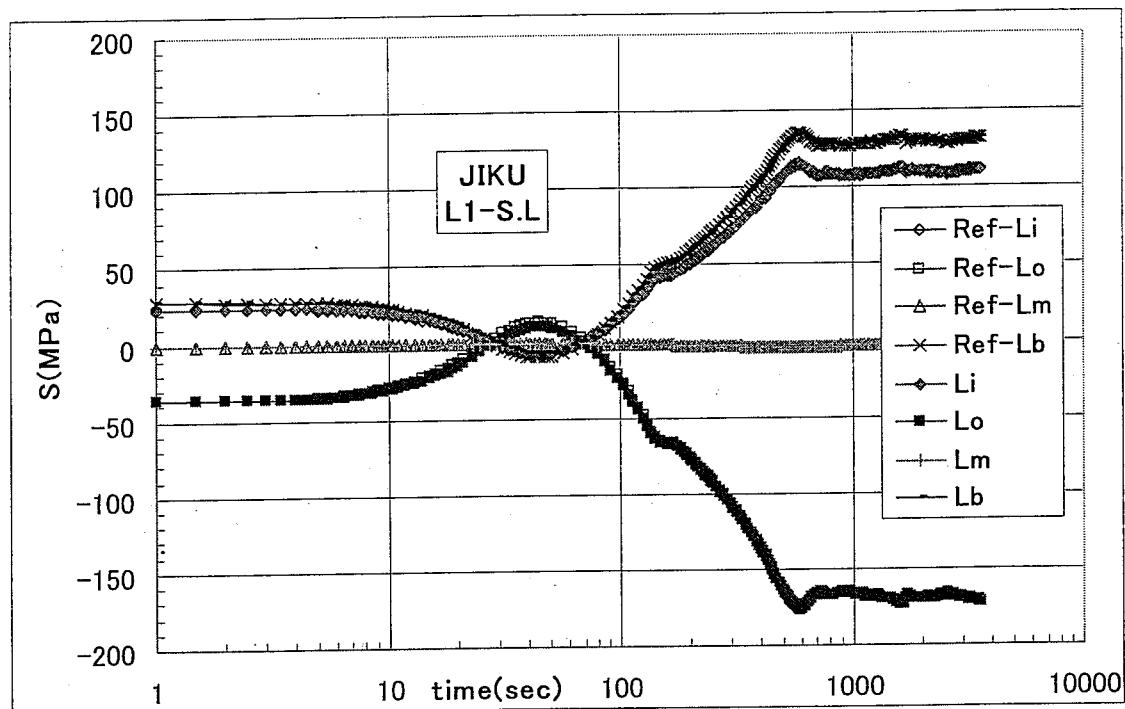


Fig.3.3-11(1) 一次ポンプ軸固着による IHX 管板構造評価断面 L1 の応力成分

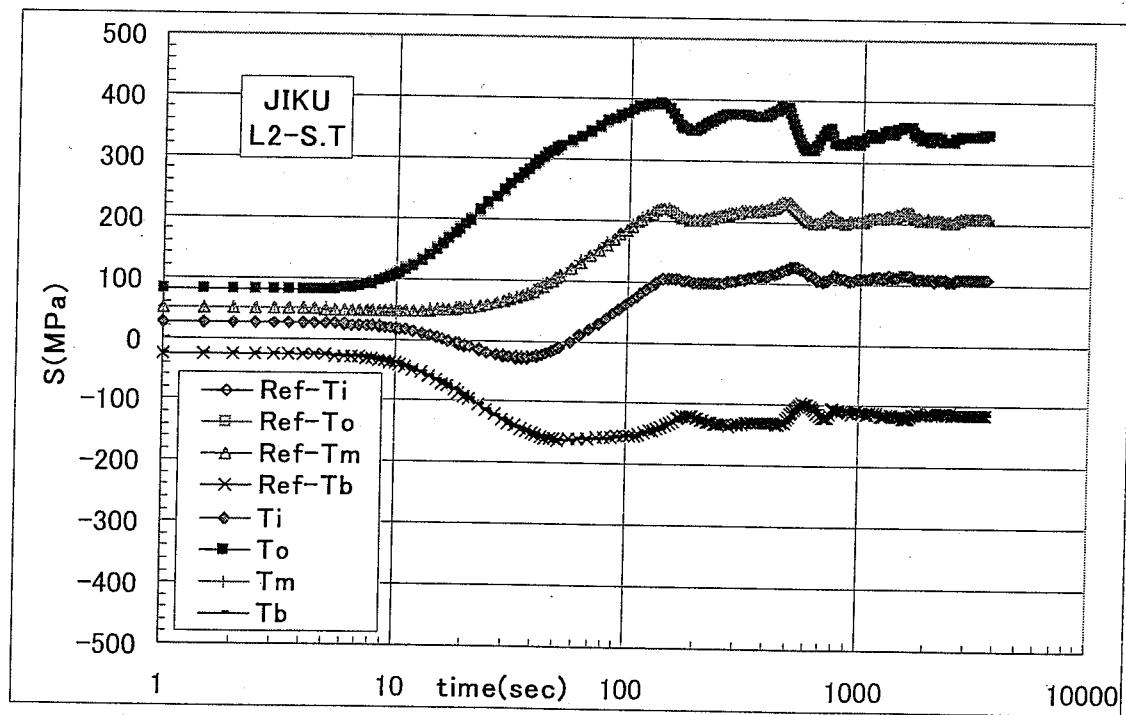
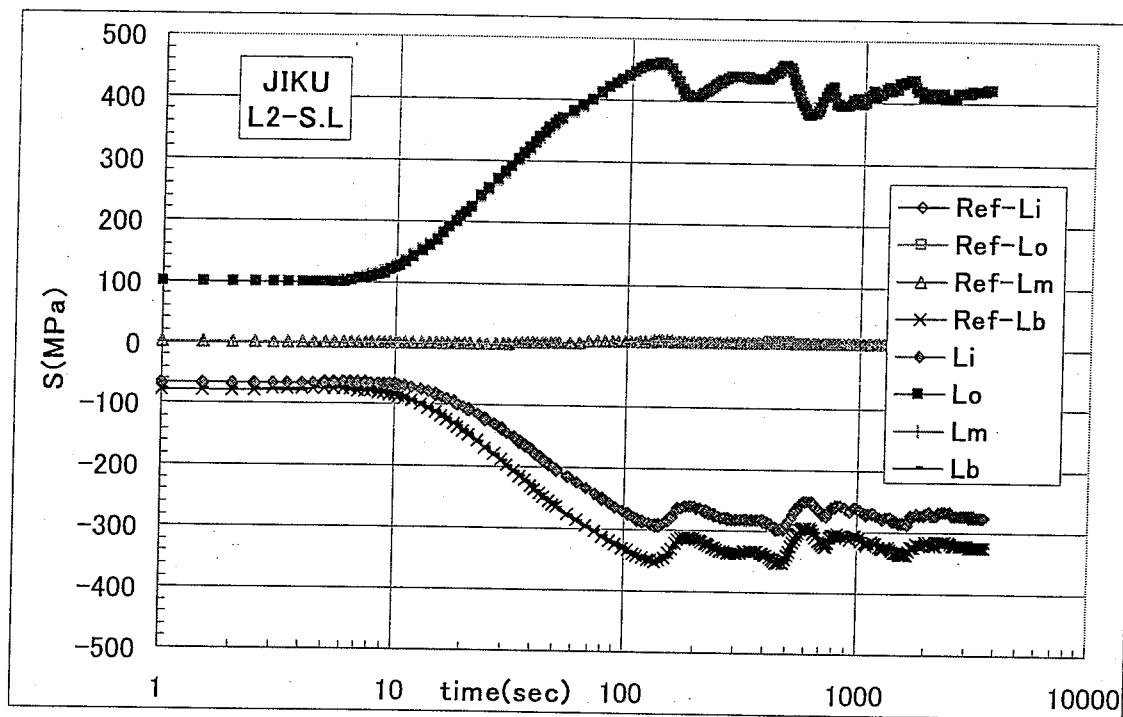


Fig.3.3-11(2) 一次ポンプ軸固着による IHX 管板構造評価断面 L2 の応力成分

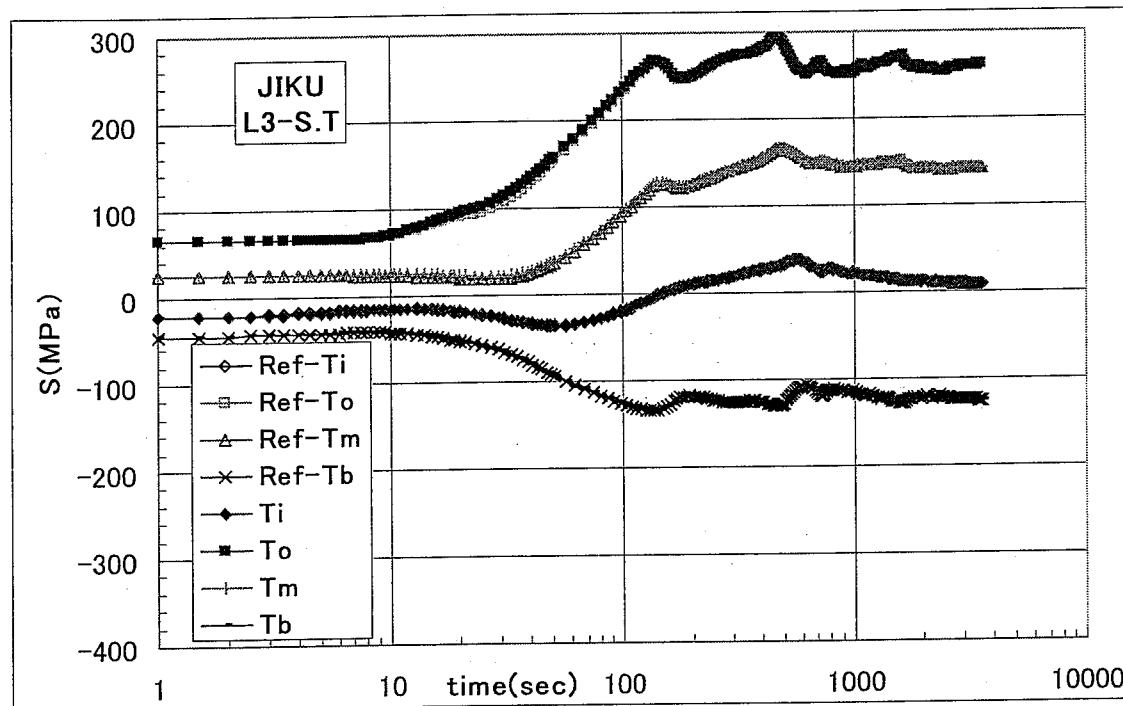
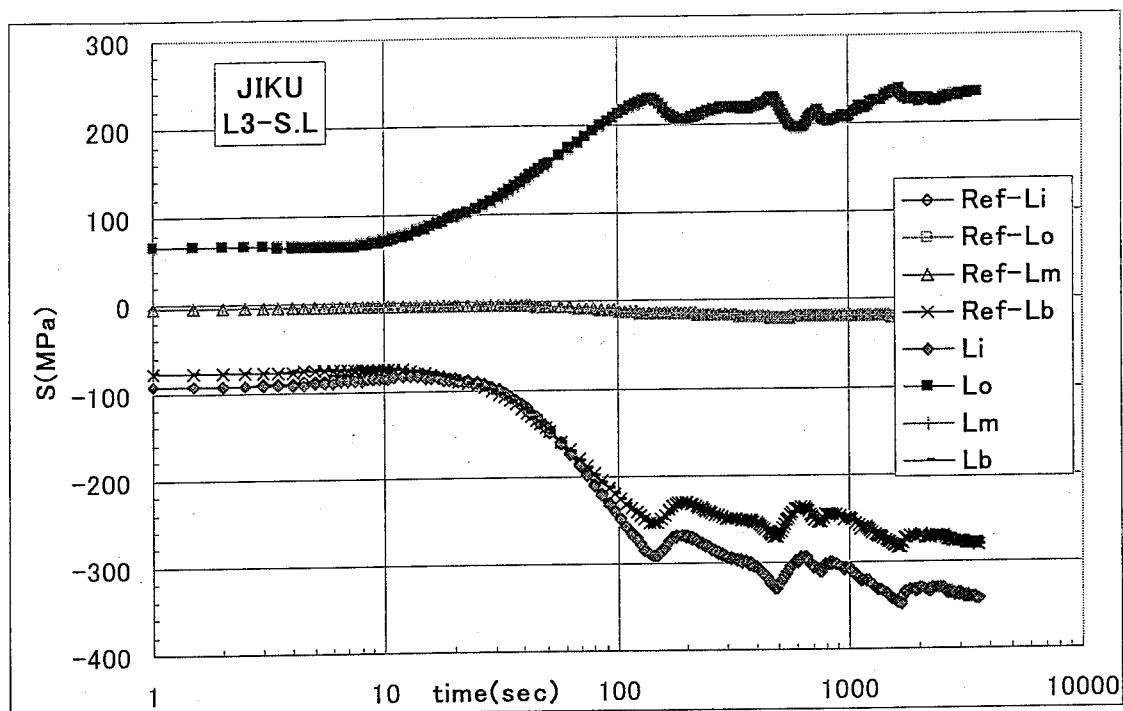


Fig.3.3-11(3) 一次ポンプ軸固定による IHX 管板構造評価断面 L3 の応力成分

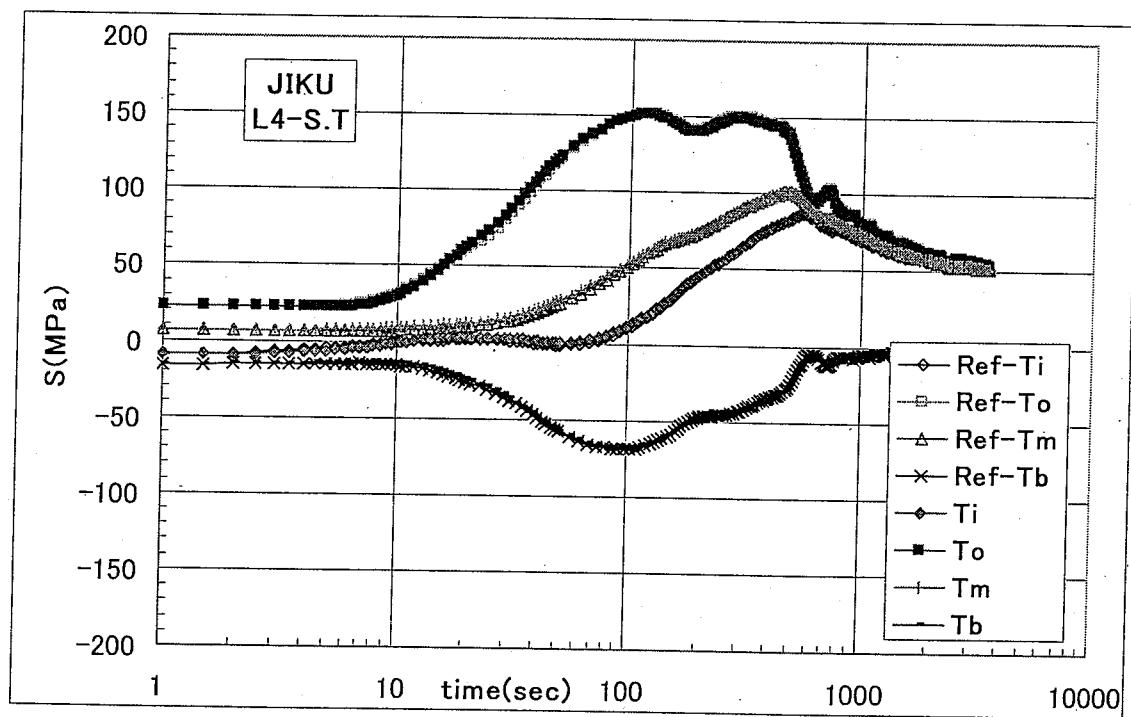
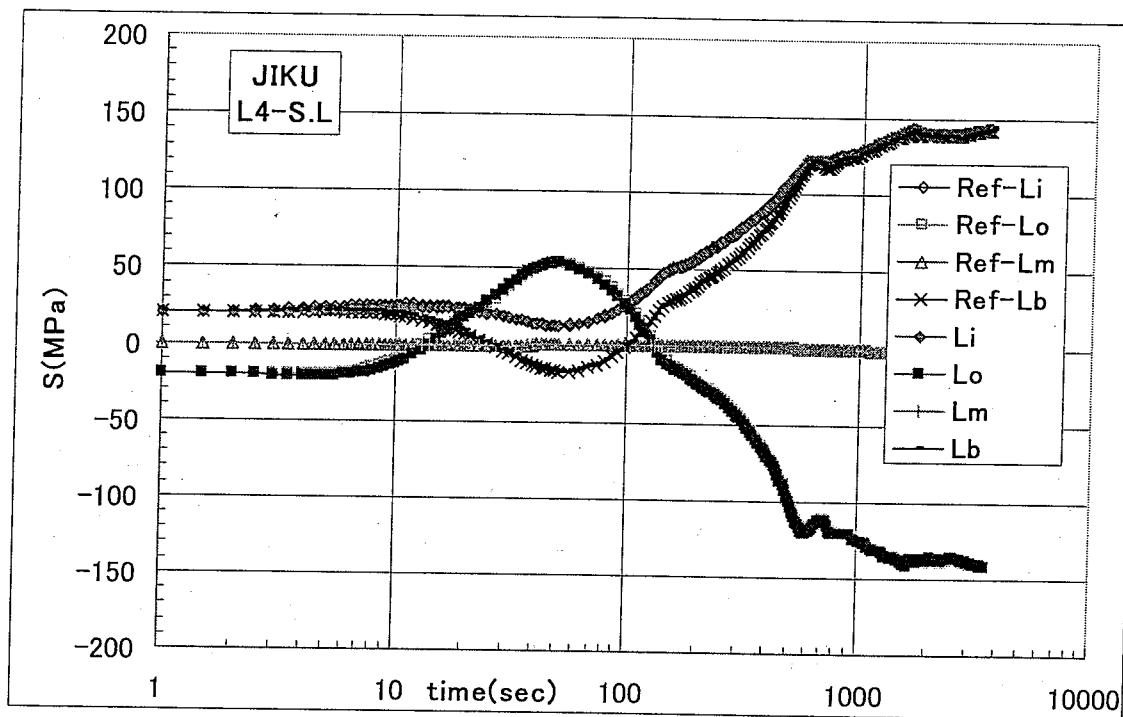


Fig.8.3-11(4) 一次ポンプ軸固着による IHX 管板構造評価断面 L4 の応力成分

#### 4. 系統熱過渡荷重のスクリーニング法の試案

前章の解析により、Green 関数法を応用した簡易熱応力評価が有力であることが検証された。FBR 構造の設計における熱過渡応力評価手法として指針化することを想定して以下のような試案を作成した。

以下の記号および単位を使用する。

$t$  ; 時間 (sec)

$T$  ; 温度 (°C)

$T_0$  ; 基準温度 (°C)、初期温度あるいは定常熱応力 0 となる基準温度

$S$  ; 構造の熱応力 (MPa) =  $(10^6 \text{N}/\text{m}^2)$  =  $(\text{N}/\text{mm}^2)$

$\rho$  ; 構造の比重量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c$  ; 構造の比熱 ( $\text{J}/\text{gK}$ ) =  $(\text{J}/\text{g°C})$

$\lambda$  ; 構造の熱伝導率 ( $\text{W}/\text{mK}$ ) =  $(\text{J}/\text{m sec°C})$

$E$  ; 構造の弾性係数 (MPa)

$\nu$  ; 構造のポアソン比

$\alpha$  ; 構造の熱膨張係数 ( $/^\circ\text{C}$ )

$Q(t)$  ; 流体の流量 ( $\text{kg}/\text{h}$ 、 $\text{kg}/\text{sec}$ 、 $\text{m}^3/\text{h}$ 、 $\text{m}^3/\text{sec}$ など)

$h(t)$  ; 流体と構造表面との熱伝達係数 ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ) =  $(\text{J}/\text{m}^2 \text{sec°C})$

$F(t)$  ; 流体の温度 (°C)

$P$  ; 対象構造の任意位置を表す位置ベクトル  $P=(x,y,z)$ 、あるいは対象構造の任意の断面

$G(P,h,t)$  ; 材料特性  $\rho$ 、 $c$ 、 $\lambda$  および熱伝達係数  $h$  を定数とした線形熱伝導モデル、および材料特性  $E$ 、 $\nu$ 、 $\alpha$  を定数とした線形熱応力モデルにおいて、熱応力 0 の一様一定温度  $T_0$  状態から流体温度が単位ステップ変化 ( $T_0+1$ ) した時に、任意位置  $P$  に生じる非定常熱応力 (MPa/ $^\circ\text{C}$ ) ; 热応力の Green 関数と呼ばれる。ここでは G 関数と略記することにする。

#### 4. 1 スクリーニングの基本方針

##### 〔基本方針 1〕スクリーニングの対象

スクリーニングの対象構造は液体金属冷却高速炉の一次冷却系および二次冷却系を構成する機器、構造および配管とする。熱過渡事象は設計で想定された系統熱過渡荷重とする。プラント動特性解析あるいは過去の同型炉の運転データなどから適切に予測設定された系統熱過渡荷重は、一次系および二次系の冷却材の流量と温度の時系列データとして与えられているものとする。

##### 〔基本方針 2〕スクリーニングの目的

スクリーニングの主目的は多くの荷重条件と熱過渡条件の組み合せの中から、詳細評価が必要な厳しい条件を摘出することである。対象構造の熱応力をより厳密に評価することが主目的ではない。熱応力の上限予測値が許容応力以下であれば、目的は達成されたとする。

##### 〔基本方針 3〕スクリーニングの方法

解析によるスクリーニングを前提とする。ただし解析手法については制限を設けない。材料特性および熱過渡条件を単純化した線形モデルによる線形解析を推奨する。安全側の線形解析により計算された熱応力の上限予測値が許容応力以下であるならば、厳密なモデルによる詳細解析を要求しない。

〔補足 1〕理論解あるいは線図を用いた解析、有限要素法による数値解析（以下 FEM 解析と記す）、その他の解析手法が考えられる。妥当性が明らかであれば、どのような解析手法を用いてもよい。構造形状および熱過渡条件が単純で公式あるいは線図が適用できる場合もある。例えば Carlslaw&Jeager の熱伝導の古典的名著[2]、Mcneill&Brock 線図[3]および Heisler 線図[4]などがよく知られている。一般には FEM 解析を推奨する。FEM 解析の利点は、解析対象範囲が広く汎用性があることである。また応力テンソル各成分が数値解として計算される利点が大きい。理論解あるいは線図が適用できる場合であっても、FEM 解析を採用することにより解析効率が格段に向上する場合が多い。

〔補足 2〕線形モデルの特徴は「重ねあわせの原理」が成立し、「Green 関数法」が適用できることである。基本解（Green 関数）を用いて、任意の入力（流体温度時間変化）に対する出力（非定常熱応力）が簡単な重ね合わせにより正確に計算できる。この特徴は簡易計算あるいは感度解析において大きな利用価値がある。

#### 4. 2 スクリーニング法

材料特性および境界条件（熱伝達係数）を一定として単純化した線形モデルの線形解析によるスクリーニングを推奨する。材料特性は想定される温度変動範囲内の平均的な値を使用することを推奨する。上下限温度での値の平均値、あるいは平均温度付近での値を使用することを推奨する。

[補足 1] 材料特性を定数として設定するための上限温度、下限温度および平均温度は工学的判断により設定してよい。例えば一部表面で高温流体（温度変動範囲 550°C～300°C）と熱伝達にあり、他の表面で基準温度  $T_0=50^\circ\text{C}$  の低温雰囲気と一定熱伝達係数で熱伝達にある構造を考える。全体が一様温度  $T_0$  の時に熱応力 0 となるような力学境界条件とする。このような場合であっても、低温雰囲気側では大きな熱応力が発生せず、熱応力に留意すべき評価位置が高温流体の温度変動範囲内となるような構造では、上限温度 550°C、下限温度 300°C、平均温度 425°C と設定してよい。上限温度における値と下限温度における値の平均値を使用するか、あるいは平均温度における値を使用する。材料特性データが 300、350、400、450°C … と 50°C 刻みの表で与えられているような場合、補間して 425°C の値を算出して使用してよい。450°C の値を用いた方が安全側の解析になると判断される場合は、補間せずに 450°C の値を使用してもよい。

[補足 2] 本節では單一流体の流量および温度が時間変化し、熱応力要因となる場合を記述している。重ね合わせの原理に基づき、複数流体が構造に接し、これらの流量および温度がそれぞれ時間変化する場合に適用してもよい。複数流体の場合は、それぞれの流体が単独で流量および温度が時間変化する場合の熱応力を計算評価する。その際に当該流体以外の流体は熱応力 0 の基準温度  $T_0$  を維持した状態（固定境界条件）とする。すべての流体について、単独に時間変化した場合の熱応力を計算し、それらを加算すればよい。但し前章での管板構造の解析例に見られたように、特殊な構造形状の複数流体系の場合、熱伝達係数が大きくなると、長時間側の熱応力を低下させるような部位があり得る。上限熱伝達係数を使用した上限線形解析が安全側の評価とはならない場合もあり得る。平均的な熱伝達係数を用いた中間線形解析および下限熱伝達係数を用いた下限線形解析を行い、熱伝達係数依存性を確認することを推奨する。熱伝達係数依存度が負となる場合は、得られた 3 種類の G 関数を補間することで熱伝達係数の変化を考慮した近似非線形評価を行うことを推奨する。

[補足 3] 本節で取り扱う応力  $S$  あるいは  $G$  関数は、特に断らない限り応力テンソルの各成分を示すものとする。ただし許容応力と比較する場合は Mises の等価応力あるいは Tresca の等価応力を用いるものとする。

[補足 4] 本節では構造の任意位置  $P$  あるいは評価位置 A 点などと点座標で位

置を記述する。実際の適用では評価断面Lなどと断面で位置を記述してもよい。その場合は、応力テンソル各成分について、内外表面値と断面合計応力(stress resultant)を計算することを推奨する。例えば内面応力、外面応力、膜応力(平均値、断面0次モーメント)および曲げ応力(断面1次モーメント)を計算することを推奨する。断面合計応力により、断面に作用する荷重のタイプ(引張、曲げ、ピーク)、大きさおよび方向が簡単に把握でき、温度分布との対応あるいは熱応力の発生メカニズムを分析しやすくなる。

#### 4. 2. 1 上限線形解析

材料特性を一定とし、流体の最大流量から想定される最大熱伝達係数  $h_{max}$  を使用し、熱応力0の一様基準温度  $T_0$  状態から流体温度が単位ステップ変化した場合 [ $F(0)=T_0 \rightarrow F(t)=T_0+1(t>0)$ ] の線形熱伝導解析および線形熱応力解析を行うことを推奨する。得られた熱応力を上限 G 関数と呼び  $G(P, h_{max}, t)$  と記すことにする。

##### [S 1-1] 評価点あるいは評価断面の選定

上限 G 関数の値の大きい位置から、対象構造で熱応力に留意すべき評価点あるいは評価断面を選定する。過去の知見あるいは当該構造特有の設計上の事由から熱応力に留意すべき位置も加えるべきである。

##### [S 1-2] 上限熱応力特性評価

上限G関数は单一あるいは複数の極値および定常値を有する。これらの極値と定常値およびその時定数は、対象構造の熱応力のメカニズムあるいは特性を直接反映したものであり、熱応力の簡易評価あるいはパラメータ感度評価などに利用できる。

- ・選定されたすべての評価点あるいは評価断面に対して極値と定常値およびその時定数を取得することを推奨する。これらは後述する感度解析に使用される。

[補足] 時間の対数  $\log(t)$  を横軸とし、上限G関数テンソルの主要な成分を縦軸として図表示することを推奨する。上限G関数が单一時定数の曲線から構成されるのか、時定数の異なる複数の曲線から構成されるのか、目視により判断しやすくなる。熱拡散により温度分布が生じ、熱膨張変形と力学拘束条件のバランスで熱応力が生じる。すなわち非定常熱応力は拡散現象の直接的な反映である。拡散現象の時定数分析には  $\log(t)$  表示が優れている。

- 評価位置近傍に熱伝達面がある場合は、一般に短時間で最初の極値  $G(P, h_{\max}, \tau_1)$  が現れる。熱伝達面からの温度変化が板厚方向に進行し、板厚方向温度分布が形成され、これが要因となり（曲げ+ピーク）成分主体の熱応力が生じる。極値 1 とその時定数  $\tau_1$  と称することにする。
- 評価位置近傍に熱伝達面および構造不連続部がある場合は、第 2 番目の極値  $G(P, h_{\max}, \tau_2)$  が現れる。対象不連続部に特有な温度分布（板厚平均温度の差あるいは長手方向温度分布など）が進行し、これが要因となり（膜+曲げ）成分主体の熱応力が生じる。極値 2 その時定数  $\tau_2$  と称することにする。
- 構造不連続部から十分離れた熱伝達面近傍では極値 1 のみ現れる場合が多い。逆に熱伝達面から十分に離れた位置では極値 2 のみ現れる場合がある。最終の極値は以下の定常値に収束する。
- 定常値  $G(P, h_{\max}, \infty) \neq 0$  の場合、流体温度単位変化による位置 P の定常熱応力を表す。全ての位置で  $G(P, h_{\max}, \infty) = 0$  の場合、対象構造は定常熱応力が生じない構造および境界条件である。定常値にはほぼ収束する時間を定常時定数  $\tau_3$  と称することにする。定常値  $\neq 0$  の場合は定常値のおよそ 0.95 倍～1.05 倍の範囲内に達する時間とする。定常値 = 0 の場合は最終極値のおよそ 0.05 倍以下に達する時間とする。

#### [ S 1 - 3 ] 第一近似上限熱応力

- 最大熱伝達係数を維持して、流体温度の最大変動幅を瞬時にステップ変化として与えた場合の熱応力を次式により近似評価する。これを第一近似上限熱応力  $S_{UL1}(P, t)$  と称することにする。

$$S_{UL1}(P, t) = (F_{\max} - F_{\min})G(P, h_{\max}, t) \quad (4.2.1)$$

- 第一近似上限熱応力の最大値が許容応力以下であれば以降の解析を要求しない。

#### [ S 1 - 4 ] 第二近似上限熱応力

- 最大熱伝達係数を維持して、流体温度時間変化  $F(t)$  を与えた場合の熱応力を以下の式により近似評価する。これを第二近似上限熱応力  $S_{UL2}(P, t)$  と称することにする。ここで初期状態は定常温度分布であるとし  $F(0)$  が初期状態を間接的に表すものとする。 $F(0)=T_0$  ならば一様基準温度状態であり、 $F(0) \neq T_0$  ならば流体温度  $T_0$  の定常温度分布状態である。

$$S_{UL2}(P, t) = \{F(0) - T_0\}G(P, h_{max}, \infty) + \int_0^t F'(\tau)G(P, h_{max}, t - \tau)d\tau \quad (4.2.2)$$

・ここで数値積分は流体温度の時系列データ [ $t_j, F(t_j)$ ] ( $j=1, n$ ) を用いて次式で計算する。時系列データの区間幅 ( $t_{j+1} - t_j$ ) は時定数  $\tau_1$  を超えないものとする。超える場合は  $\tau_1$  以下となるように分割して計算する。

$$\int_0^t F'(\tau)G(P, h_{max}, t - \tau)d\tau = \sum_{j=1}^{k-1} \{F(t_{j+1}) - F(t_j)\}G(P, h_{max}, t - \frac{t_j + t_{j+1}}{2}) \quad (t_k \leq t) \quad (4.2.3)$$

・第二近似上限熱応力の最大値が許容応力以下である場合は以降の解析を要求しない。

#### 4. 2. 2 中間線形解析および下限線形解析

最大熱伝達係数  $h_{max}$  を使用した上限線形解析による熱応力の近似評価値が許容応力を超える場合、熱伝達係数の平均的な値  $h_{med}$  を用いた中間線形解析および熱伝達係数の下限値  $h_{min}$  を用いた下限線形解析を実施することを推奨する。熱応力 0 の基準温度状態から流体温度が単位ステップ変化した場合の線形熱伝導解析および線形熱応力解析を行う。中間値  $h_{med}$  を用いて得られた熱応力を中間 G 関数と呼び  $G(P, h_{med}, t)$  と記すことにする。下限値  $h_{min}$  を用いて得られた熱応力を下限 G 関数と呼び  $G(P, h_{min}, t)$  と記することにする。

[補足] 一般に熱伝達係数の流量 ( $\propto$  レイノルズ数  $\propto$  プラントル数) 依存性は評価式あるいは層流／乱流で大きく異なる。熱伝達係数の中間値および下限値を厳密に設定することは難しく負担が大きいので、工学的な判断による設定を認めるものとする。例えば「定格 100 % 流量で評価した熱伝達係数を上限値とし、40 % 流量で評価した熱伝達係数を中間値とし、10 % 流量で評価した熱伝達係数を下限値とし、10 % 以下の流量では下限値を使用する。」といった工学的な判断による設定を認める。

##### [S 2-1] 热応力特性評価

中間 G 関数および下限 G 関数に対して、上限 G 関数に対する [S 1-2] と同様の熱応力特性評価を実施することを推奨する。すなわち選定されたすべての評価点あるいは評価断面に対して極値と定常値およびその時定数を取得することを推奨する。これらのデータは対象構造の熱応力のメカニズムあるいは特

性を直接反映したものであり、熱応力の簡易評価あるいはパラメータ感度評価などに利用できる。

### [S 2-2] 近似非線形熱応力

- ・上限、中間および下限の G 関数を使用して、熱伝達係数時間依存の非線形性を近似的に以下の式により評価する。これを近似非線形熱応力  $S_{NL}(P,t)$  と称することにする。
- ・初期状態は流体温度  $F(0)$  の定常熱応力状態にあるものとして、次式で計算する。

$$S_{NL}(P,t) = \{F(0) - T_0\} [G\{P, h(0), \infty\} \exp(-\frac{t}{\tau_p}) + G\{P, \overline{h(0,t)}, \infty\} \{1 - e(-\frac{t}{\tau_p})\}] \\ + \int_0^t F'(\tau) G\{P, \overline{h(\tau,t)}, t-\tau\} d\tau \quad (4.2.4)$$

- ・ここで上線付き  $h(\tau, t)$  は時間区間  $(\tau, t)$  での熱伝達係数の平均値とする。
- ・任意の  $h$  に対する G 関数  $G(P,h,t)$  は上限、中間および下限 G 関数を  $h$  に関して線形補間して次式で算出するものとする。

$$h_{max} \geq h \geq h_{med} \quad G(P,h,t) = \{(h-h_{med})G(P, h_{max}, t) + (h_{max}-h)G(P, h_{med}, t)\} / (h_{max}-h_{med}) \quad (4.2.5)$$

$$h_{med} \geq h \geq h_{min} \quad G(P,h,t) = \{(h-h_{min})G(P, h_{med}, t) + (h_{med}-h)G(P, h_{min}, t)\} / (h_{med}-h_{min}) \quad (4.2.6)$$

・(4.2.4)式の右辺第一項は初期定常熱応力が熱伝達係数変化に追従して変化することを近似考慮したものである。 $\tau_p$  は評価位置  $P$  の  $[\tau_1, \tau_3]$  の範囲で設定された初期定常応力変化の時定数とする。設定困難な場合は  $\tau_p = \infty$  として定常熱応力項の変化を無視してよい。

・(4.2.4)式の右辺第二項の数値積分は流体温度の時系列データ  $[t_j, F(t_j)] (j=1, n)$  を用いて次式で計算する。時系列データの区間幅  $(t_{j+1} - t_j)$  は時定数  $\tau_1$  を超えないこと。超える場合は  $\tau_1$  以下となるように分割して計算する。

$$\int_0^t F(\tau) G\{P, \overline{h(\tau,t)}, t-\tau\} d\tau = \sum_{j=1}^{k-1} \{F(t_{j+1}) - F(t_j)\} G\{P, \overline{h(\frac{t_j+t_{j+1}}{2}, t)}, t - \frac{t_j+t_{j+1}}{2}\} \quad (t_k \leq t) \quad (4.2.7)$$

- ・近似非線形熱応力  $S_{NL}(P,t)$  の最大値の 1.1 倍が許容応力以下の場合、詳細解析によるスクリーニングあるいは設計変更を要求しない。

#### 4. 2. 3 設計パラメータ感度評価

線形解析ベースの近似非線形熱応力が基準を満足しない場合、詳細解析を始める前に、設計パラメータ感度評価を行うことを推奨する。基準を満たすためにどのような設計パラメータ変更が有効であるかを検討評価し、設計変更要求を行うのがよい。

##### [S 4-1] 感度評価テーブル

上限、中間および下限G関数の特性評価結果を、熱伝達係数をパラメータとして、以下のような感度評価テーブルあるいは感度評価図を作成する。

熱伝達係数	$h_{\max}$	$h_{\text{med}}$	$h_{\min}$
極値 1 応力 $G(\tau 1)$			
時定数 1 $\tau 1$			
極値 2 応力 $G(\tau 2)$			
時定数 2 $\tau 2$			
定常熱応力 $G(\infty)$			
時定数 3 $\tau 3$			

##### [S 4-2] 感度評価 1 (短期熱応力)

- ・極値 1 とその時定数の熱伝達係数感度。一般に極値 1 は熱伝達係数に強く依存する。時定数  $\tau_1$  は  $h$  の減少により緩やかに増加する。  
板厚方向（曲げ+ピーク）温度分布型、片面熱伝達型（容器胴）、両面熱伝達型（伝熱管、管板）など。[解説、事例集参照]
- ・短期熱応力  $S_1$  は直前の時間区間 [ $t - \tau_1, t$ ] の流体温度変化  $\Delta F_1$  に極値 1 を乗ずることで概ね安全側に評価できる。 $S_1 = G(\tau_1) \Delta F_1$

##### [S 4-3] 感度評価 2 (中期熱応力)

- ・極値 2 とその時定数の熱伝達係数感度。極値 2 とその時定数の熱伝達係数感

度はその発生メカニズムに大きく依存する。定常熱応力に収束する過程での極値となる場合が多い。

並列接続型の不連続（Y構造、セーフエンド構造）、直列接続型の不連続（テープ構造）、分岐接続型（管板と胴、Y構造）、長手方向温度勾配型（スカート構造、液面近傍構造）、板厚平均温度の差+板厚方向温度勾配の差（管板と胴の接続構造）など。〔解説、事例集参照〕

- 中期熱応力  $S_2$  は過去の時間区間 [ $t - (\tau_1 + \tau_2)$ ,  $t - \tau_1$ ] の流体温度変化  $\Delta F_2$  に極値 2 を乗ずることで概ね安全側に評価できる。 $S_2 = G(\tau_2) \Delta F_2$

#### [S 4-4] 感度評価 3 (定常熱応力)

- 定常熱応力が生じる構造では定常値と時定数の熱伝達係数感度。
- 一般に大型構造で広い領域に亘る長手方向温度分布により最終極値が生じ、それが定常熱応力に収束するような構造では、最終極値および定常値は熱伝達係数にほとんど依存せず一定となる場合が多い。最終極値および定常値は、長手方向温度分布領域を支配する形状パラメータにのみ強く依存する場合が多い。長手方向温度勾配型（スカート構造、液面近傍構造）、板厚平均温度の差+板厚方向温度勾配の差（管板と胴の接続構造）など。〔解説、事例集参照〕
- 定常熱応力  $S_3$  は過去の時点 ( $t - \tau_3$ ) の流体温度  $F_3$  と基準温度  $T_0$  との差に定常値を乗ずることで概略値を評価できる。 $S_3 = G(\tau_3) (F_3 - T_0)$
- $S_1 + S_2 + S_3$  で概ね安全側の熱応力評価ができる。〔解説、事例集参照〕

#### [S 4-5] パラメータ解析

〔解説、事例集参照〕どのようなパラメータ変更が熱応力低減に有効であるか、感度解析により予測計算し、設計変更要求としてレポート提出する。

〔補足〕特に複雑な構造形状で複数流体系の場合は長時間側の極値 2 および定常熱応力の熱伝達係数依存性を確認すべきである。熱伝達係数を大きく設定することが長時間側の熱応力を過小評価することになる特殊な部位があり得るからである。〔解説、事例集参照〕

## 5. まとめ

FBR 構造設計における熱過渡応力スクリーニング法を開発するために以下を行った。

- ・線形熱応力における Green 関数（以下 G 関数と略記）を、熱伝達係数が変化する非線形熱応力問題に適用するための近似非線形評価式を提案した。
- ・IHX のスカート構造および管板構造の過渡熱応力詳細解析を実施した。
- ・従来の上限線形解析（上限熱伝達係数を使用した線形熱応力解析）を実施し上限 G 関数を求めた。
- ・上限 G 関数を用いて従来手法による簡易評価を行った。
- ・スカート構造のように單一流体の熱過渡により応力が生じるケースでは従来手法による評価が安全側であり有効であることを確認した。ただし過大評価となる場合が多いことを確認した。
- ・管板構造のように複雑な構造形状で複数流体の熱過渡により応力が生じる構造に対しても従来手法は概ね安全側であり有効であることが確認された。
- ・ただし複雑な構造形状の複数流体系では、熱伝達係数を大きくすると長時間側の熱応力が小さくなる特殊な部位があり得ること、すなわち熱伝達係数を大きく設定することが安全側とならない場合があり得ることが確認された。
- ・中間熱伝達係数を使用した中間線形解析および下限熱伝達係数を使用した下限線形解析を実施し、中間 G 関数および下限 G 関数を求めた。
- ・上限 G 関数、中間 G 関数および下限 G 関数を用いて、近似非線形評価式を用いた提案手法による評価を行った。
- ・提案手法は詳細解析をよく近似できることを確認した。
- ・従来手法と提案手法を調和させた「熱過渡応力スクリーニング法」の指針案を提案した。

今後、提案手法の更なる検証および改良を行う予定である。また提案手法を以下の分野へ応用することも大いに期待できる。

- ・高温プラント機器のオンライン損傷モニタリングへの応用
- ・プラントシミュレーションコードの熱応力計算エンジンとしての応用

## 参考文献

- [1]田中他、熱過渡応力解析へのGreen関数法の適用範囲の拡張(1),JNC TN9400  
2001 - 121,2002年2月
- [2] Conduction of heat in solids, second edition, H.S.Carlslaw and J.C.Jeager,  
Oxford, 1959.
- [3] Engineering data file, Charts for transient temperatures in pipes,  
D.R.McNeill and J.E.Brock, Heating/Piping/Air Conditioning, Nov.1971.
- [4] Transient Thermal Stresses in Slabs and Circular Pressure Vessels,  
M.P.Heisler, Journal of Applied Mechanics, June.1953.