



# サーマルストライピングによる熱疲労現象の 影響因子と熱流動・構造の統合評価

(研究報告)

1999年1月

日本原子力研究所蔵書



3300293460

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

31-09

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  
してください。

〒319-1194 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

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 319-1194,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1999

## サーマルストライピングによる熱疲労現象の影響因子と 熱流動・構造の統合評価 (研究報告)

笠原 直人<sup>1)</sup>、村松 壽晴<sup>2)</sup>

### 要 旨

原子力プラントの温度が異なる冷却材が合流する領域では、流体混合による不規則な温度ゆらぎが生じるため、熱応力による構造材の疲労破損に注意する必要がある。この現象はサーマルストライピングと称され、熱流体と構造が複雑に関連し合う現象であることから、従来はモックアップ実験による評価が必要不可欠であった。

著者らはこれを解析的評価手法に置き換えるため、数値解析コードシステムを整備すると共に、フランス高速原型炉「フェニックス」の2次主冷却系配管で発生した流体温度ゆらぎによる熱疲労き裂発生事象を対象として熱流動・構造の詳細な解析を実施し、流体温度ゆらぎによる熱疲労現象のメカニズム、および現象の各過程における構造健全性に対する影響因子を明らかにした。

さらに、これらの成果に基づき、影響因子を適切に取り込んだ解析的評価手法を提案するとともに、将来の設計手法確立に向けた課題を示した。

- 
- 1) 大洗工学センター システム技術開発部 構造材料技術開発グループ
  - 2) 大洗工学センター システム技術開発部 熱流動技術開発グループ

Main factors of thermal fatigue failure induced by thermal striping  
and total simulation of thermal hydraulic and structural behaviors  
(Research report)

Naoto Kasahara<sup>1)</sup> Toshiharu Muramatsu<sup>2)</sup>

Abstract

At incomplete mixing area of high temperature and low temperature fluids near the surface of structures, temperature fluctuation of fluid gives thermal fatigue damage to wall structures. This phenomenon is called thermal striping, which becomes sometimes a critical problem in LMFR plants. Since thermal striping phenomenon is characterized by the complex thermohydraulic and thermomechanical coupled problem, conventional evaluation procedures require mock-up experiments.

In order to replace them by simulation-base methods, the authors have developed numerical simulation codes and applied them to analyze a tee junction of the PHENIX secondary circuit due to thermal striping phenomenon, in the framework of the IAEA coordinated research program (CRP). Through this analysis, thermohydraulic and thermomechanical mechanism of thermal striping phenomenon was clarified, and main factors on structural integrity was extracted in each stage of thermal striping phenomenon.

Furthermore, simulation base evaluation methods were proposed taking above factors of structural integrity into account.

Finally, R&D problems were investigated for future development of design evaluation methods.

---

1) Structure and Material Research Group, System Engineering Division, OEC, JNC  
2) Thermal Hydraulic Research Group, System Engineering Division, OEC, JNC

## 目 次

第1章 緒 言 .....	1
第2章 現象の分析と支配因子の抽出 .....	2
2. 1 流体温度ゆらぎと構造の温度応答 .....	2
2. 2 熱応力と熱疲労 .....	3
2. 3 支配因子 .....	5
第3章 流体 - 構造熱的連成解析に必要となるモデル化項目 .....	8
3. 1 数値解析モデル .....	8
3. 2 境界条件 .....	8
3. 3 必要十分な統計母集団の取得 .....	9
第4章 構造熱応力・破壊力学解析に必要となるモデル化項目 .....	10
4. 1 熱応力解析モデル .....	10
4. 2 破壊力学解析モデル .....	10
第5章 設計手法の確立に向けた課題 .....	11
5. 1 流体温度ゆらぎ挙動の減衰効果に対する周波数依存性 .....	11
5. 2 流体温度ゆらぎ挙動の幾何形状依存性 .....	11
5. 3 流体温度ゆらぎ統計量の実機外挿性 .....	11
5. 4 温度ゆらぎ振幅の減衰効果を考慮した応力変動成分の評価 .....	12
5. 5 構造の周波数応答特性を考慮した流体／構造の一貫した解析 .....	13
5. 6 強度評価クライテリア .....	13
5. 7 き裂進展評価 .....	13
第6章 結 言 .....	15
謝辞 .....	17
参考文献 .....	18

表リスト  
List of Tables

Table 1 Sensitivities of structural integrity to various factors

図リスト  
List of Figures

- Fig.1 Attenuation mechanisms of temperature fluctuation amplitude
- Fig.2 Comparison of measured temperature among in Sodium, at the metal surface, and in the metal
- Fig.3 Distribution of time-averaged amplitude of temperature fluctuation from sodium to inside of metal
- Fig.4 Contribution of different factors to attenuation of temperature fluctuation
- Fig.5 Plate model due to sinusoidal temperature fluctuation
- Fig.6 Temperature profile in a semi-infinite solid due to sinusoidal temperature fluctuation
- Fig.7 Geometrical characteristics of the Phenix secondary piping system
- Fig.8 Stress response of plate to sinusoidal temperature fluctuation
- Fig.9 Boundary conditions for fracture mechanics analysis
- Fig.10 Stress Intensity Factor for crack depth
- Fig.11 Mechanism of thermal striping phenomenon and sensitive factors
- Fig.12 Non-dimensional thermal mechanical responses to sinusoidal temperature fluctuation

## 第1章 緒 言

原子力プラントの温度が異なる冷却材が合流する領域の近傍では、流体混合による不規則な温度ゆらぎが生じるため、熱応力による構造材の疲労破損に注意する必要がある。この現象はサーマルストライピングと称され、熱流体と構造が複雑に関連し合う現象であることから、従来はモックアップ実験による評価が必要不可欠であった。

これを解析的手法に置き換えるため、著者らは熱流動解析<sup>(1)(2)</sup>および構造解析<sup>(3)(4)</sup>の数値解析コードシステムを整備すると共に、フランス高速原型炉「フェニックス」の2次主冷却系配管で発生した流体温度ゆらぎによる熱疲労き裂発生事象を対象として、このコードシステムを用いた熱流動・構造・破壊の詳細な解析を実施し、実データとの比較を行った<sup>(5)-(9)</sup>。

本報では、実機プラントを対象とした解析結果を分析することにより、流体温度ゆらぎによる熱疲労現象のメカニズムを解明し、また各メカニズムにおける構造健全性に対する影響因子を抽出する。さらに、これらを適切に取り込んだ解析的評価手法を提案すると共に、将来の設計手法確立に向けた課題を抽出する。

## 第2章 現象の分析と支配因子の抽出

### 2.1 流体温度ゆらぎと構造の温度応答

温度の異なる冷却材が混合することによって発生した不規則温度ゆらぎは、構造物に到達するまでに、数々の減衰作用を受ける。Fig. 1 はその減衰作用を模式的に示したもので、(1) 主流域での乱流混合による減衰作用、(2) 分子拡散効果が支配的な境界層を通過することによる減衰作用、(3) 流体から構造物に熱が非定常的に伝達される過程での減衰作用、および(4) 構造物内部での熱伝導による減衰作用の 4 種類に分類される<sup>(10)</sup>。Fig. 2 は、これら減衰作用を定量化するために行ったナトリウム基礎実験 であり 4 mm 隔てて平行に置かれた噴流ノズル (5 mm × 9 mm) の下流側 35 mm 位置に温接点設置個所の異なる熱電対群を埋め込んだ試験片 (304SS 鋼) を設置し、噴流 ( $V = 2.0$  m/s) ナトリウム温度をそれぞれ 320 °C および 280 °C に設定して温度ゆらぎの時系列減衰挙動を測定) に対する数値解析結果 (噴流ノズルの横方向中央位置の軸方向ライン) であり、試験片表面から 10 mm 位置での乱流域中における温度ゆらぎ挙動が、試験片内部に向かうにしたがって大きく減衰してゆく様子を見ることができる<sup>(11)</sup>。Fig. 3 は同軸方向ライン上における温度ゆらぎ振幅の減衰特性を実験結果と共に示したもので、乱流域中における比較的大きな温度ゆらぎ振幅が、境界層および試験片表面を通過して試験片内部に到達するまで過程で顕著な減衰作用を受けていることが分かる。

温度ゆらぎ振幅に対する上記 4 種類の減衰作用の分担割合を、実験結果と比較 (噴流流速  $V = 1.0$  m/s, 1.5 m/s および 2.0 m/s の 3 条件) して Fig. 4 に示す。結果より、噴流流速を増加させるにしたがって、主流域中での乱流拡散効果による減衰割合は減少するものの、流体から構造物に熱が非定常的に伝達される過程での減衰割合が上昇することが分かる。噴流流速の増加に伴う主流域中での乱流拡散効果による減衰割合の減少は、噴流流速の増加によって流体通過時間 (35 mm; 噴流ノズル - 試験片間距離) が短縮され、この間での冷却材混合に費やされる時間が減少したためであると解釈できる。一方、噴流流速の増加に伴う流体から構造物に熱が非定常的に伝達される過程での減衰割合の上昇は、流体および試験片間における非線形性の卓越によるものと考えることができる。すなわち、噴流流速の増加はレイノルズ数  $Re$  の上昇をもたらして、流体中において温度変動に対する有意なスペクトル密度を持つ周波数範囲を広げる。一方、試験片 (304SS 鋼) の温度変動に対する周波数応答スペクトルは噴流流速の変化に無関係であることから、両者間での非線形な応答性は噴流流速の増加に伴って拡大する。この周



波数応答に関する特性差の拡大は、両者間での温度ゆらぎ伝達特性を阻害する効果を有することから、ここでの減衰割合は増加することとなる。なお、分子拡散効果が支配的な境界層を通過することによる減衰作用および構造物内部での熱伝導による減衰作用は、噴流流速の増加に対して大きな依存性を持たないことが同図より分かる。

以上より、流体 - 構造物間での非定常温度ゆらぎ挙動の高精度評価においては、温度ゆらぎ挙動についての減衰効果を厳密に分離・評価することが必要であるとともに、熱流動条件の変化によって変化する主流域での乱流拡散効果による減衰作用および流体から構造物に熱が非定常的に伝達される過程での減衰作用を適切に評価することが必要であると結論づけられる。

## 2.2 熱応力と熱疲労

温度ゆらぎを有する流体に構造物が接する場合、構造物中に温度ゆらぎが伝播し、これが繰り返して熱応力の要因となる。熱応力発生のメカニズムを、Fig.5に示す1次元平板モデルを用いて考察する。簡単化のため、単一周波数の正弦波状流体温度ゆらぎと一定の熱伝達係数を仮定し、平板の温度分布を半無限固体の熱伝達面から板厚に相当する距離までの温度分布で近似する。板熱伝達面から板厚方向の距離を $x$ とすると、平板の熱伝導方程式と境界条件は以下のようになる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h(T|_{x=0} - T_f), \quad T_f = \frac{1}{2} \Delta T_f \sin(\omega t) \quad (2)$$

ただし、 $T_f$ : 流体温度,  $\Delta T_f$ : 流体温度振幅,  $x$ : 板厚方向距離,  $L$ : 板厚,  $t$ : 時間,  $\omega$ : 角周波数,  $h$ : 熱伝達係数,  $\lambda$ : 熱伝導率,  $c$ : 比熱,  $\rho$ : 比重

式(2)で記述される、正弦波状の流体温度ゆらぎ過渡条件に対する式(1)の解は、例えば単位ステップ応答解をDuhamel積分することによって簡単に求まる<sup>(12)</sup>。

$$T_s = T(x, t) = \frac{1}{2} \Delta T_s e^{-kx} \sin(\omega t - kx - \varepsilon),$$

$$\Delta T_s = \frac{\Delta T_f j}{\sqrt{(j+k)^2 + k^2}}, \quad k = \sqrt{\frac{\omega}{2a}}, \quad a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad j = \frac{h}{\lambda}, \quad \varepsilon = \tan^{-1}[k/(j+k)] \quad (3)$$

ただし、 $T_s$ :構造温度、 $\Delta T_s$ :構造温度振幅、 $a$ :温度拡散係数

式(3)の解を周波数をパラメータとして他の変数を固定しプロットするとFig.6のような傾向になり、周波数が高くなると構造の温度追従が悪くなり応答振幅が小さくなる事が分かる。なお、構造温度振幅が熱伝達係数の関数であることに注意が必要である。

次に式(3)で与えられる温度分布の下での平板の応力応答を求める。ここで、半無限固体に対する熱伝導解を平板に与えた場合の結果は、流体温度ゆらぎに対する平板の応力応答の良い近似解になっていることが確かめられている<sup>(13)</sup>。板厚内温度勾配による熱応力は、板厚各部の温度 $T_s(x, t)$ と板厚平均温度との差に比例することから、熱弾性理論により板厚方向応力分布 $\sigma(x, t)$ を以下のように求めることが出来る。

$$\begin{aligned} \sigma(x, t) &= \frac{E\alpha}{1-\nu} \left\{ T_s(x, t) - \frac{1}{L} \int_0^L T_s(x, t) dx \right\} \\ &= \frac{E\alpha\Delta T_s}{2(1-\nu)} \left\{ e^{-kx} \sin(\omega t - kx - \varepsilon) - \frac{1}{L} \int_0^L e^{-kx} \sin(\omega t - kx - \varepsilon) dx \right\} \quad (4) \\ &= \frac{E\alpha\Delta T_s}{2(1-\nu)} \left[ e^{-kx} \sin(\omega t - kx - \varepsilon) + \frac{1}{\sqrt{2}kL} \left\{ e^{-kL} \sin\left(\omega t - kL - \varepsilon - \frac{\pi}{4}\right) - \sin\left(\omega t - \varepsilon - \frac{\pi}{4}\right) \right\} \right] \end{aligned}$$

ただし、 $\sigma$ :応力、 $E$ :ヤング率、 $\alpha$ :線膨張係数、 $\nu$ :ポアソン比

式(4)から、周波数が低く構造材の熱伝導により板厚の平均温度が板厚各部の温度に追従する場合には、表面温度と板厚方向平均温度の差によって生じる応力振幅が小さくなる事が分かる。実例として、「フェニックス」の2次主冷却系配管(Fig.7)<sup>(9)</sup>を例にとり、熱応力の周波数応答特性を評価する。流体温度振幅は、高温と低温の流体温度差 $\Delta T_f=90\text{K}$ とする。熱伝達係数 $h$ は管内流速と管内乱流熱伝達に関するSeban-Shimazakiの式から求めた $14500\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ を用いる。これら

の値を材料である304SS鋼の物性値と共に、式(4)に代入すると、構造の周波数応答線図がFig.8のように求まり、高周波側と低周波側の両側で応力振幅が小さくなり、両者の中間の $f=0.085\text{Hz}$ で振幅が最大となることが分かる。

熱応力の要因として、これまで主に板厚方向温度分布を考慮してきたが、流体平均温度が定常的な空間分布を有している場合、または周波数が非常に低く、板厚平均温度が流体温度に追従して3次元的な温度分布が生じるような場合には、それによる応力を評価する必要がある。例としてはホットスポット等による応力が考えられる。これらの空間温度分布による応力は一般的に平均応力成分として作用すると考えられるが、この分布に有意な変動が有る場合にはゆらぎ応力成分として扱う必要がある。尚、平均応力成分は熱応力の他に、圧力・配管力・溶接残留応力等の機械荷重も要因となるため、これらが存在する場合には機械荷重による効果を重畳させて評価する必要がある。

応力変動の繰り返し数が材料の許容繰り返し数を上回る場合には、熱疲労によるき裂の発生と進展を考慮する必要がある。特に繰り返し数が $10^6$ 回を上回る場合の破損モードは高サイクル疲労となる。高サイクル疲労によるき裂の発生には、溶接部、表面粗さ、経年化等の強度低減要因と、平均応力要因が影響する。

次に、き裂進展挙動に関しては、き裂先端の応力拡大係数範囲 $\Delta K$ と材料のき裂進展特性によって支配される。ここで応力拡大係数範囲 $\Delta K$ はき裂の開閉挙動と関係し、平均応力および周辺の拘束条件の影響<sup>(14)</sup>を比較的広範囲で受ける。例えばFig.9は軸方向変位が自由な場合と、拘束された場合の304SS鋼製の配管である。両者の内面に熱伝達係数 $14500\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ を介して、周波数 $1\text{Hz}$ および $0.1\text{Hz}$ で振幅 $90\text{K}$ の温度ゆらぎを与えた場合の最大応力拡大係数を、経路積分による $\hat{J}$ 積分を平面応力条件下で等価な応力拡大係数に変換することにより計算した。Fig.10に示した計算結果から、応力拡大係数は拘束条件の影響を受け、温度ゆらぎの周波数が低いほどまたき裂が深いほど、その影響が大きいことが分かる。

### 2.3 支配因子

これまでの分析から、流体温度ゆらぎによる熱疲労現象はFig.11のような素過程に分解出来ると考えられる。高温と低温の流体が混合すると(1)主流中に温度ゆらぎが生じ、(2)境界層内での流体温度ゆらぎを経て、(3)構造表面での温度ゆらぎとなる。この後熱伝導によって(4)構造内の温度ゆらぎとなる。これが多数回繰り返されると(5)構造表面での高サイクル疲労き裂が生じ、さらに温

度ゆらぎによる熱荷重印加が繰り返されると(6)高サイクル疲労き裂進展を生じさせる。これらを最終的な構造健全性への影響度の観点から眺めると、(1)～(4)の過程では温度ゆらぎ振幅の減衰要因を考慮することが重要となる。これらの各段階における減衰機構は、前記のように(1)が①主流域での乱流混合、(2)が②境界層内部の分子拡散、(3)が③非定常熱伝達、および(4)が④熱伝導による構造内部の温度差の緩和によるものである。(5)の段階では⑤溶接部、⑥表面粗さ、⑦経年化等の強度低減要因を、また(5)と(6)の両者に対して⑧空間温度分布、⑨内圧、⑩配管反力、⑪溶接残留応力等による平均応力要因を考慮することが重要である。

次にこれらの要因の健全性評価結果への影響感度を、「フェニックス」の2次主冷却系配管(Fig.7)におけるき裂発生事象の詳細解析結果<sup>(9)</sup>を例にとり検討する。まず、(1)～(4)の温度ゆらぎ振幅の減衰要因について分析する。温度ゆらぎ振幅の減衰を全て無視した場合の応力は、高温と低温の流体温度差 $\Delta T_f = 90\text{K}$ を式(4)の温度差の項に代入することにより353MPaとなる。

これに対し、主流から境界層までの熱流動挙動をモデル化し、①主流域での乱流混合、および②境界層内部の分子拡散による各減衰効果を考慮した DINUS-3 コードを用いた解析による構造表面近傍の流体温度ゆらぎ振幅 $\Delta T_f = 35\text{K}$ <sup>(9)</sup>を式(2)与えると、応力振幅として 137MPa が得られる。さらに、③非定常熱伝達、および④構造内部の熱伝導による減衰効果に関しては、Fig.8 を用いて考察する。前節で述べたように、温度ゆらぎ振幅 $\Delta T_f$ が 90K で一定であっても応力応答振幅は周波数により異なり、0.085Hz で最大値 243 MPa を取る。①～④のすべての減衰効果を考慮した場合の発生応力を評価するためには、熱流動解析コードと構造解析コードの連成解析が必要となる。この観点から DINUS-3 コードと BEMSET コードの熱的連成解析から得られた構造物中の温度分布を、FINAS コードによる応力解析モデルに直接入力することにより評価し、時刻歴解析の最大応力振幅として 113MPa を得た<sup>(9)</sup>。

次に(5)構造表面での高サイクル疲労き裂発生に対する強度低減要因に関しては、⑤溶接部の集中係数は 2.3 であった<sup>(9)</sup>。また、⑥表面仕上げの影響と⑦経年化の影響はひずみ集中係数に換算すると 1.2 程度となる<sup>(12)</sup>。

平均応力については溶接継手と垂直方向の成分に着目すると、⑧配管モーメントと内圧による応力が 6.65 MPa、⑨ホットスポットによる応力が 75 MPa の圧縮応力、また⑩溶接残留応力が材料の降伏応力である 124MPa である<sup>(9)</sup>。高温のステンレス鋼に対する平均応力の効果は必ずしも明らかではないが、ここでは修正 Goodman 線図を用いた。

以上を整理すると、「フェニックス」2次主冷却系の構造健全性に対する各因子の影響度は

Table 1のようになる。この影響度の分析から、健全性評価結果への影響が最も大きい因子は温度ゆらぎ振幅の減衰効果であり、次が溶接部の形状不連続による強度低減効果であることが分かった。

尚、Fig.11 に示した流体温度ゆらぎに起因した熱疲労現象の素過程は、基礎的な現象により区分した一般的なものである。また、Table 1 の各因子は①を除き局所的な効果であることから、因子の種類と影響度の定性的傾向については、評価対象形状が異なっても不変であると考えられる。よって、高サイクル熱疲労に対する一般的解析評価手法を構築するためには、Fig.11 の素過程に着目し、Table 1の因子による影響度を評価対象に合わせて定量化する手法を開発する必要がある。

## 第3章 流体 - 構造熱的連成解析に必要となるモデル化項目

### 3.1 数値解析モデル

解析では前章で抽出した4種類の温度ゆらぎ振幅減衰効果を定量的に評価する必要がある。そのためには、評価対象が流体 - 構造熱的連成挙動であるため、熱流動評価精度と構造熱伝導評価精度とを適切に整合させることが基本的に必要となる。特に、熱流動解析と構造熱伝導解析の連成には評価結果に影響を及ぼす熱伝達係数等の工学的係数を用いることなく、また両者間での交換物理量である構造物表面温度あるいは熱流束の精度を劣化させないモデル化が重要となる。

熱流動数値解析モデルでは、当該連成現象が乱流挙動を特徴づける特質、すなわち、(1) 非定常性、(2) 3次元性、(3) 非線形性、(4) 間欠性などを有していることから、多くの乱流解析で必要とされる高精度モデルの使用が必須となる。具体的には、

- /1/ 時間平均操作を施さない基礎式としての Navier-Stokes 方程式
- /2/ 乱流エネルギースペクトルのカスケード過程を模擬可能な数値計算法
- /3/ 数値解を劣化させない高次精度の空間および時間に対する離散化手法

の使用が要求される。一方、流体 - 構造物間での交換物理量の評価モデルでは、両者の異なる時間スケールを時々刻々の確に捉えるとともに、非定常過程を厳密に捉え得るものがある必要がある。

### 3.2 境界条件

入口境界条件については、配管エルボなどにより誘起される 2 次流れによる低周波成分や評価対象場によって変化する乱流強度などの外乱要素を、解析モデル中で適切に考慮する必要がある。外乱要素の考慮にあたっては、基礎実験などが既に行われている場合には測定データの内外挿によってこれを行う必要がある。一方、測定データなどが存在しない場合にあつては、外乱要素を発生させる幾何形状などを解析モデルに取り込んで陰的に評価を行うか、あるいは別の解析により外乱要素の解析を行ってこれを入口境界条件として与える必要がある。後者の方法論については、文献<sup>(10)</sup>を参照されたい。

固体壁境界条件については、境界層などでの温度ゆらぎ挙動の減衰を厳密に取り扱う観点より、壁関数などの工学モデルからの脱却が必要である。すなわち、境界層厚さやここでの状態量

が時間・空間的に不規則に変化し、この不規則変化が評価対象である温度ゆらぎ挙動を直接的に支配する当該評価問題では、固体壁からの距離によって一意に与えられる剪断応力のみでは、厳密な評価結果は望めない。この場合、固体壁上に粘着条件を課した上で、境界層内の熱流動挙動を含めて局所瞬時場を評価する直接シミュレーション手法などの使用が必要となる。

### 3.3 必要十分な統計母集団の取得

統計処理に必要な十分な母集団を得るために必要となるシミュレーション時間については、低周波成分の存在寄与が大きい場合に十分な注意が必要である。不規則振動論での統計処理概念に従えば、存在する低周波成分周期の 10 倍以上の標本区間の取得が必要となる。

## 第4章 構造熱応力・破壊力学解析に必要となるモデル化項目

### 4.1 熱応力解析モデル

流体温度ゆらぎによる繰り返し熱応力は、通常は板厚方向温度勾配が主要因となるため、板厚方向の1次元モデルで解析可能である。ただし板厚内温度勾配は熱伝達係数および温度ゆらぎ周波数に依存して変化するため、流体 - 構造熱的連成効果を考慮した時刻歴解析によって得られた温度勾配を評価に使用する必要がある。こうした詳細な温度連成解析結果が使用できない場合には、温度ゆらぎ振幅を大きめに想定した保守的な評価を行う必要がある。

流体平均温度が定常的に空間分布を有している場合、または流体温度ゆらぎ周波数が非常に低く板厚平均温度が流体温度に追従して空間分布するような場合には3次元温度分布が応力へ影響を与えるため、シェルモデルやソリッドモデルを用いた多次元解析が必要となる。また、本解析のための熱的境界条件を設定するには、流体平均温度の空間分布が重要となるため、定常流動解析結果あるいは非定常熱流動解析結果の時間平均操作より得られた平均温度分布に対する多次元情報が必要となる。

### 4.2 破壊力学解析モデル

高サイクル疲労き裂進展は、通常は小規模降伏が成立する条件であるため線形破壊力学パラメータである応力拡大係数  $K$  の変動範囲  $\Delta K$  を用いて評価される。ここで応力拡大係数  $\Delta K$  は、周囲の応力分布と拘束条件の影響を受けるため、影響範囲に留意した解析モデルの設定が必要となる。流体温度ゆらぎの周波数が高く、板厚平均温度がこれに追従せずに一定とみなされる場合であれば応力拡大係数に影響する応力分布は板厚方向温度勾配によって決まるため、板厚方向の1次元モデルで解析が可能である。これに対し、板厚平均温度の変動が無視出来ない場合には板厚と直交する方向の拘束条件の影響を受けるため、端部までの距離を十分にとった解析モデルを用いるか、実機を模擬した拘束条件を使用する必要がある。さらに応力拡大係数の計算に際して、影響関数法<sup>(16)</sup>を用いる場合には、周辺のコンプライアンスの変化を考慮した適切な影響関数を使用する必要がある。尚、き裂に対する応力分布と拘束条件の影響に関しては、温度ゆらぎ周波数が低く、またき裂が深いほど、大きくなることから、留意が必要である。



## 第5章 設計手法の確立に向けた課題

### 5.1 流体温度ゆらぎ挙動の減衰効果に対する周波数依存性

流体 - 構造熱的連成解析結果の妥当性を広い条件範囲に亘って確認する観点より、第 II 章で述べた 4 種類の温度ゆらぎ振幅減衰作用についての周波数特性を明らかにする必要がある。すなわち第 II 章で述べた通り、4 種類の減衰作用の分担割合は、レイノルズ数  $Re$  の増減 (12,755 - 25,510) によって変化した。このレイノルズ数  $Re$  の増加は、流体中における有意なスペクトル密度を持つ周波数範囲を広げ、流体 - 構造物間での周波数応答特性を大きく変化させる。なお、実機条件におけるレイノルズ数  $Re$  は  $10^6$  のオーダーに及び、有意なスペクトル密度が存在する周波数範囲も顕著な広がりを持つものと考えられる。本報に示した数値解析システムをサーマルストライピングに対する設計手法として用いてゆくためには、更に広範囲のレイノルズ数  $Re$  範囲について定量的に検証しておくことが必要となる。

### 5.2 流体温度ゆらぎ挙動の幾何形状依存性

サーマルストライピング現象は、基本的に温度の異なる冷却材の混合現象であり、乱流挙動に支配されたものであることから、対象とする幾何形状に大きく依存する。本報に示した数値解析システムの適用性は、簡略化された基本体系についてのみ確認できているものの、実機で想定される各種の構造物を内包した形状下での適用性は定量的に確認できていない。ただし、実機条件で想定される形状全てについて、網羅的に検証を行うことは工学的に適切ではないことから、形状に依存しない普遍的特性に遡って厳密な検証を行い、数値解析システムの総合的な検証実績を実施する必要がある。

### 5.3 流体温度ゆらぎ統計量の実機外挿性

サーマルストライピング現象に対する設計評価は、 $10^6$  回以上に亘る熱サイクルの影響評価問題であることから、数値シミュレーションによる高々数十秒間の評価結果の統計的特性がプラント寿命期間中におけるそれを代表しているか否かを確認する必要がある。このためには、高速計算機によりシミュレーション時間を延長して必要十分な母集団を取得する方法が確実であるが、評価対象の熱流動条件や幾何形状に依存して統計的特性が変化する可能性を考えると、一概に適切な方法とは言い難い。したがって、構造物に対する高サイクル疲労データとの対比に基づいて、

流体温度ゆらぎ統計量に対する母集団の必要十分条件を蓄積する方策が最適であると考えられる。

#### 5.4 温度ゆらぎ振幅の減衰効果を考慮した応力変動成分の評価

温度ゆらぎ振幅の減衰効果は Table 1 に示したように複数考えられ、これらを考慮することにより合理的な設計評価が可能となる。すべての要因を考慮した数値解析は技術的には可能になりつつあるが、設計時のパラメータ解析にはより簡易なスクリーニングルールに基づく評価を併用した手法が必要となる<sup>(17)</sup>。①主流域での乱流混合効果、および②境界層内部の分子拡散効果を考慮するために必要な課題は上記の1～3で述べた通りである。これに対し、③非定常熱伝達、および④構造内部の熱伝導による減衰効果は式(4)から推定できる可能性がある。具体的には、式(4)はビオ数  $Bi$ 、無次元周波数  $f^*$ 、無次元応力  $\sigma^*$ 、フーリエ数  $t^*$  により無次元表示出来<sup>(18)</sup>、一般化した周波数応答線図として使用することが可能である。

$$\dot{\sigma} = \frac{1}{2} H(Bi, f^*) N(f^*, t^*), \quad H(Bi, f^*) = \frac{Bi}{\sqrt{(Bi + \sqrt{f^*})^2 + f^*}}, \quad N(f^*, t^*) = \sin(2f^* t^*) + \frac{1}{\sqrt{2f^*}} \left\{ e^{-\sqrt{f^*} t^*} \sin\left(2f^* t^* - \sqrt{f^*} t^* - \frac{\pi}{4}\right) - \sin\left(2f^* t^* - \frac{\pi}{4}\right) \right\} \quad (5)$$

$$Bi = \frac{hL}{\lambda}, \quad f^* = \frac{L^2 f}{a}, \quad \sigma^* = \sigma|_{t=0} / \frac{E\alpha\Delta T_f}{1-\nu}, \quad t^* = \frac{at}{L^2} \quad (6)$$

ただし、 $Bi$ :ビオ数、\*印は各記号の無次元数を表す。

式(5)において、 $H$  は熱伝達による減衰効果を表し  $Bi$  が小さく  $f^*$  が大きいほど応力振幅は減衰する。また、 $N$  は熱伝導による板厚内温度勾配の緩和の効果を表し  $f^*$  が小さいほど応力振幅が減少する。このように温度ゆらぎ減衰効果の物理的な意味を、材料や板厚に依存しない無次元パラメータで表示することができる。

$Bi$  と  $f^*$  をパラメータとして無次元応力振幅  $\Delta\sigma^*$  をプロットすると、 $Bi$  が大きいほど応力振幅が大きく、さらに特定の周波数において最大振幅が生じる(Fig.12)ものとなり、これを設計線図として使用出来る。本線図の最も簡単な利用法は、あらゆる周波数の温度ゆらぎに対する応力応答の上限を知ることである。ここで、熱伝達係数が  $Bi$  に影響を与えるため、その設定法が今後の課題である。

### 5.5 構造の周波数応答特性を考慮した流体／構造の一貫した解析

熱流動解析では対象とする周波数によって、モデル化の範囲、時空間のメッシュ幅、シミュレーション時間が大きく異なってくる。したがって、構造健全性に影響を及ぼす周波数帯域を予め把握した後に熱流動解析を行うアプローチが有効と考えられる。有感周波数帯域を把握するには正弦波に対する構造の応答解析を行えば可能であるが、平板で近似できる問題であれば、Fig.12の周波数応答線図を利用することが出来る。例えば、Fig.7のPhenixの配管の場合、最大応力を発生させる周波数は0.085Hzであった。従って、熱流動解析のシミュレーション時間は周期の10倍である120秒程度は必要であり、またこの周波数の要因となる流れの機構が存在する場合はそれをモデルに含めるか、または境界条件で考慮する必要がある。

### 5.6 強度評価クライテリア

高サイクル疲労設計では強度評価クライテリアとして広く疲労限が用いられているが、原子力プラントの冷却材バウンダリに利用されるオーステナイト系ステンレス鋼では明確な疲労限が現れない。このため疲労限設計を行おうとすれば、安全裕度を見込んだ低めの疲労限を設定することになり、より合理的な設計評価を行うには低サイクル疲労で使用されている疲労損傷係数がクライテリアとして適当と考えられる。疲労損傷係数の計算には応力またはひずみの振幅と繰り返し数の情報が必要となる。これらの情報は時刻歴解析とレインフロー法等の波形分解法を使用すれば技術的には得ることが可能であるが、温度ゆらぎ振幅減衰効果を考慮した流体－構造連成モデルによる長時間の時刻歴解析はコストと計算時間が膨大なものとなり、設計用にはより効率の高い解析法の使用が望まれる。また疲労損傷を評価する場合、溶接部等の強度低減係数についても設計時に予測することは難しいため、施工法を限定した上での上限値等を取り決める必要が生じる。

### 5.7 き裂進展評価

応力拡大係数は熱応力に対してもき裂付きの有限要素モデルにより解析可能であるが、設計用には簡易な影響関数法の適用が望まれる。影響関数法の適用範囲は通常既知の荷重を受ける試験片等の応力拡大係数が外力の関数として与えられる場合に限られ、不静定構造で一般の構造では、き裂の進展により当該部材の剛性が低下するため荷重の再配分が生じ、外力が一定であってもこの部分に加わる内力は変化する。周波数の低い温度ゆらぎに対してはこの影響が

顕著であるため、き裂進展に伴う周辺部材のコンプライアンス $\lambda$ の変化を考慮<sup>(1)</sup>する等の方法が必要である。

## 第6章 結 言

フランス高速原型炉フェニックスの配管キミシング部を例として流体温度ゆらぎによる熱疲労現象の分析を行い、そのメカニズムを解明すると共に、構造健全性に対する影響因子を以下のように抽出した。

- (1) 主流中の温度ゆらぎに関する影響因子
  - ①主流域での乱流混合による温度振幅の減衰
- (2) 境界層内での流体温度ゆらぎに関する影響因子
  - ②境界層内部の分子拡散
- (3) 構造表面での温度ゆらぎに関する影響因子
  - ③非定常熱伝達
- (4) 構造内の温度ゆらぎに関する影響因子
  - ④構造内部の熱伝導による板厚内温度勾配の緩和
- (5) 構造表面での高サイクル疲労き裂発生に関する影響因子
  - ⑤溶接部、⑥表面粗さ、⑦経年化等の強度低減要因
- (6) 高サイクル疲労き裂発生と進展に関する影響因子
  - ⑧空間温度分布、⑨内圧、⑩配管反力、⑪溶接残留応力等による平均応力

また、上記因子を考慮した熱流動/構造/破壊の解析に必要なモデル化項目を以下のように整理した。

- (a) 温度ゆらぎ振幅に関する主要な減衰要因は上記①と②であり、これらを適切に評価するための熱流動数値解析モデルとして、乱流解析用の高精度モデル
- (b) 構造健全性への影響が大きい温度ゆらぎ低周波成分に関して、配管エルボなどにより誘起される 2次流れが要因となることから、これを考慮した熱流動数値解析モデルの入口境界条件
- (c) 上記③を正確に評価するための、熱流動解析モデルと構造熱伝導解析モデルの接続に熱伝達係数等の工学的係数を排除した、両者間での交換物理量である構造物表面温度あるいは熱流束の精度を劣化させないモデル化
- (f) 構造健全性に対する有感周波数帯の把握と、有感周波数帯域を評価するために十分な範囲をモデル化した流体・構造の熱的連成解析

- (d) 上記(5)を生じさせる応力の変動成分は熱伝達係数と周波数の影響を受ける瞬時の板厚内温度勾配とその変化に依存することから、流体 - 構造熱的連成を考慮した時刻歴解析によって得られた応力履歴に基づく疲労強度評価
- (e) 上記(6)のき裂進展評価に用いられる応力拡大係数範囲 $\Delta K_I$ は、き裂周辺の応力分布と拘束条件の影響を受けるため、これらの影響範囲を含む破壊力学解析モデルと拘束条件

## 謝 辞

Phenixプラントに関するベンチマーク解析は、IAEA coordinated research program on “Harmonization and validation of Fast Reactor thermomechanical and thermohydraulic codes and relations using experimental data” の一環として実施されたものです。フランスNOVATOME社のM.Sperandio氏およびO.Gelineau氏からは、Phenix解析に必要な詳細なデータを提示いただきましたことに、深く感謝いたします。また国際共同研究の機会を与えていただきましたIAEAのA.Rinejski氏、および本共同研究の中で現象分析のヒントとなる多くの有益な議論に応じていただきました英仏露印韓の各国からの参加者に謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 村松 壽晴, ニノ方 壽, 'サーマルストライピング現象に対する解析的評価手法の開発', 日本原子力学会誌, 36[12], pp1152-1163 (1994).
- (2) 村松壽晴, '国際原子力機関主催「実炉データを用いた熱構造力学・熱流動解析コードの検証」研究プログラム(1) - 仏国高速炉フェニックスでの高サイクル熱疲労事象に係わる熱流動ベンチマーク解析, PNC TN9410 97-058, (1997)
- (3) Iwata, K. and Tsukimori, K, 'FINAS Version 12.0 User's Manual', PNC TN9520 95-013, (1995)
- (4) Watashi, K. and Yoshida, H., 'CANIS computer code for inelastic fracture mechanics', ASME PVP, vol.167, pp.15-23, (1989)
- (5) 村松 壽晴, '高速炉配管系におけるサーマルストライピングの評価(Ⅰ)', 原子力学会, 「1998春の年会」要旨集, H49.
- (6) 笠原 直人, '高速炉配管系におけるサーマルストライピングの評価(Ⅱ)', 原子力学会「1998春の年会」要旨集, H50.
- (7) 村松 壽晴, '高速炉配管系におけるサーマルストライピングの評価(Ⅲ)', 原子力学会「1998秋の大会」要旨集, G1.
- (8) 笠原 直人, '高速炉配管系におけるサーマルストライピングの評価(Ⅳ)', 原子力学会「1998秋の大会」要旨集, G2.
- (9) 村松 壽晴, 笠原 直人, '熱流動 / 構造 / 破壊の統合解析手法と高速炉配管合流部における熱疲労評価', 原子力誌, 投稿中
- (10) 村松 壽晴, 'サーマルストライピング現象の数値解析に関する研究', 東京工業大学 学位論文 (1994)
- (11) 村松 壽晴, '流体-構造熱的連成挙動の数値解析', 日本機械学会, 第 10 回計算力学講演会, pp. 195 (1997)
- (12) Holman, J.P, 'Heat Transfer', 7<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, (1990)
- (13) Kasahara, N., et al., 'Structural Response Diagram Approach for evaluation of thermal striping phenomenon', SMiRT15, to be published



- (14) 飯井俊行、日本機械学会、論文集 A, 64 巻 621 号, pp62-67,(1998)
- (15) Nuclear Electric,'R5 An Assessment Procedure for The High Temperature Response of Structures',(1996)
- (16) 例えば Wu, Xue-ren,et al., 'Weight functions and stress intensity factor solutions', Pergamon,(1992)
- (17) Lejeail, Y., et al., 'A contribution to improvement of design rules on thermal striping', SMiRT14, Lyon,(1997)
- (18) 笠原 直人, '構造物の応答特性に着目した熱過渡強度評価法( I )',原子力学会「1999 春の年会」要旨集, H48

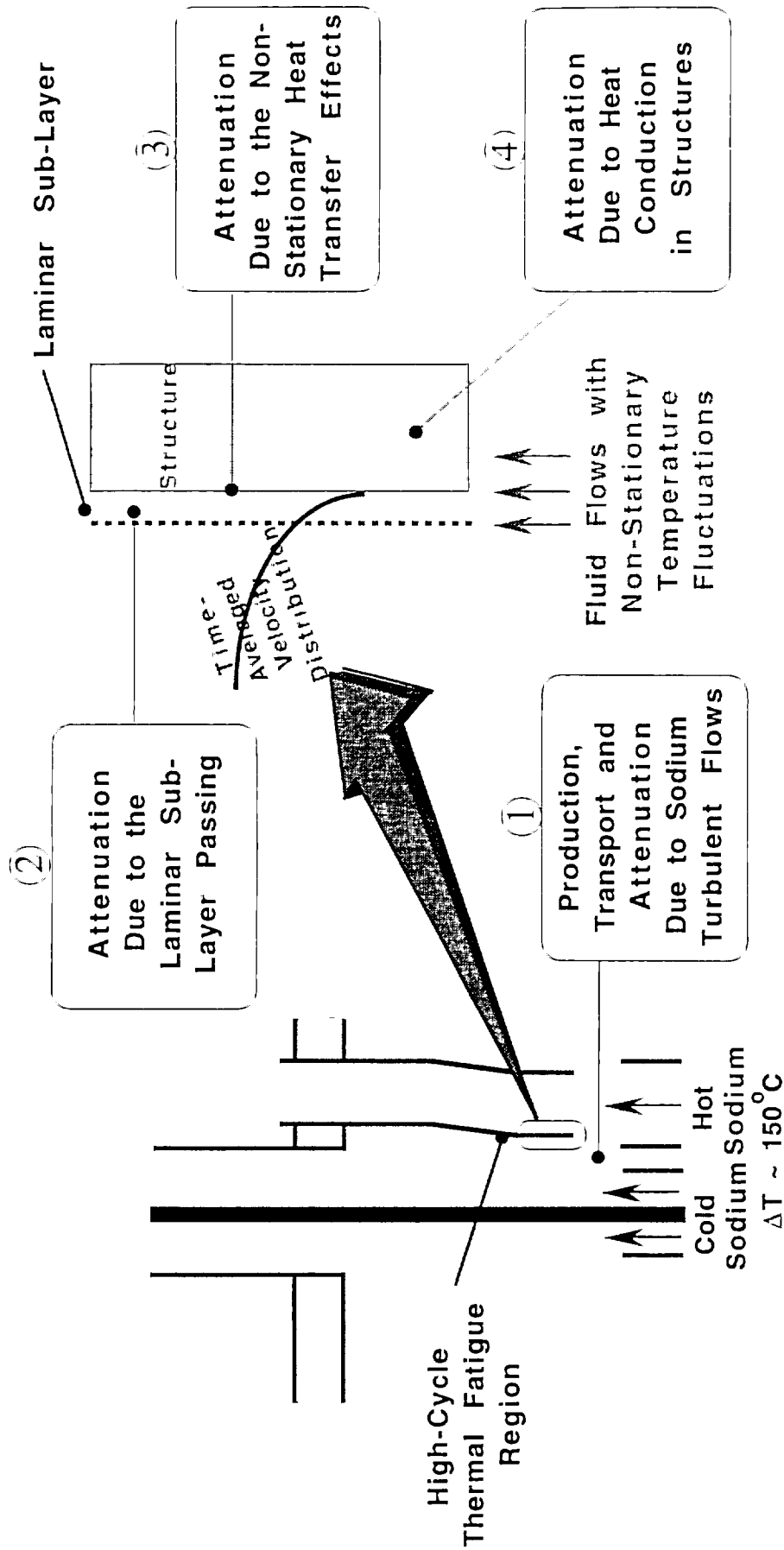


Fig.1 Attenuation mechanisms of temperature fluctuation amplitude

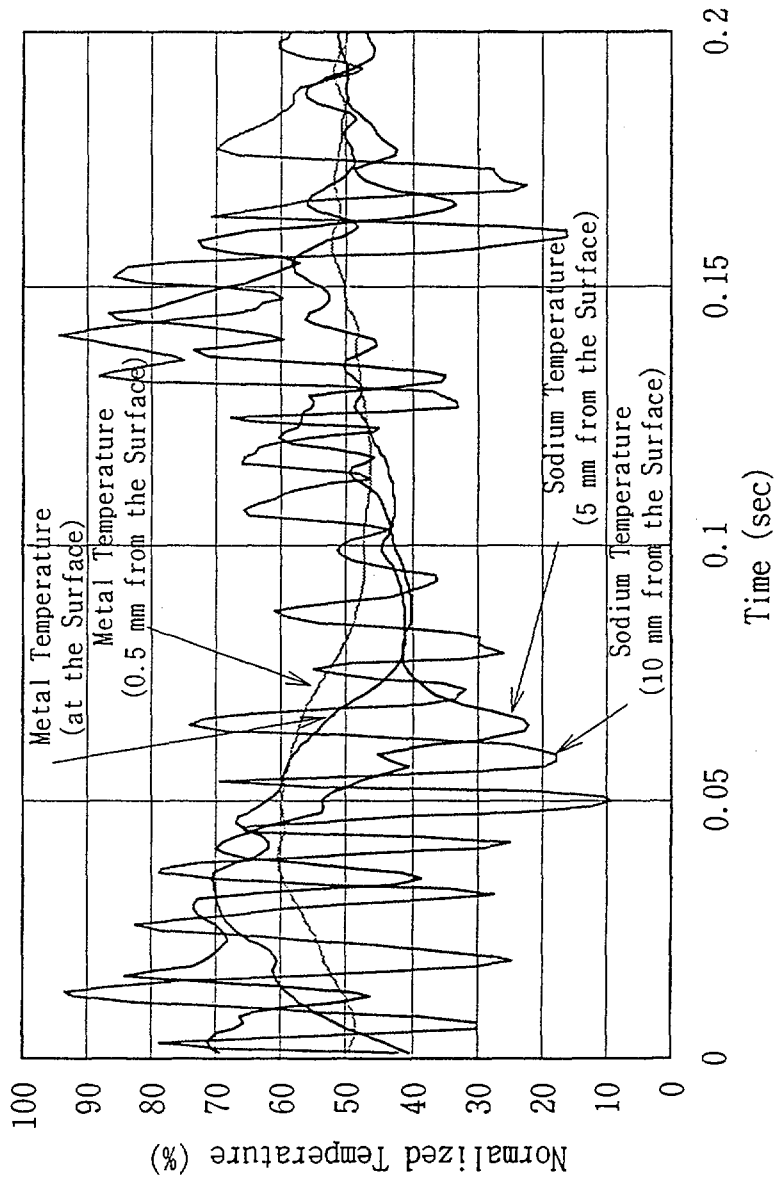


Fig.2 Comparison of measured temperature among in Sodium, at the metal surface, and in the metal

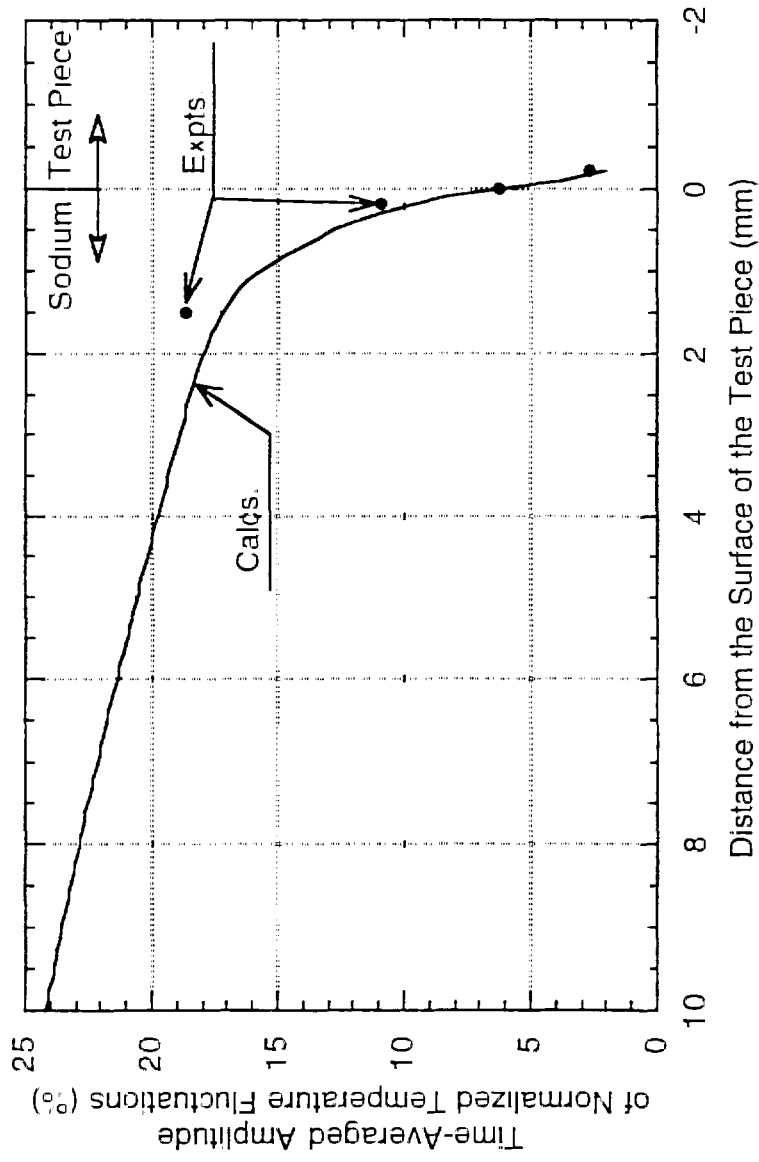


Fig.3 Distribution of time-averaged amplitude of temperature fluctuation from sodium to inside of metal

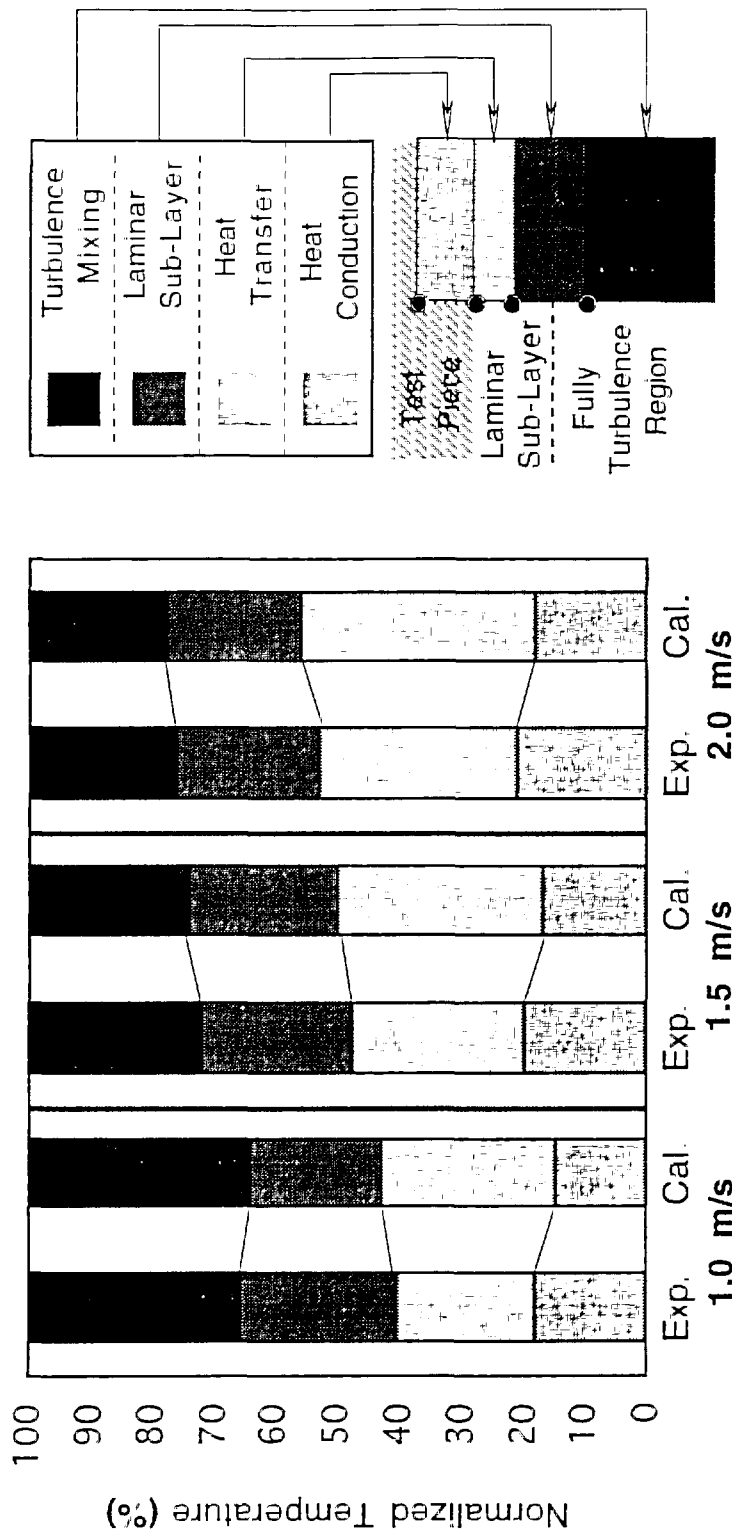
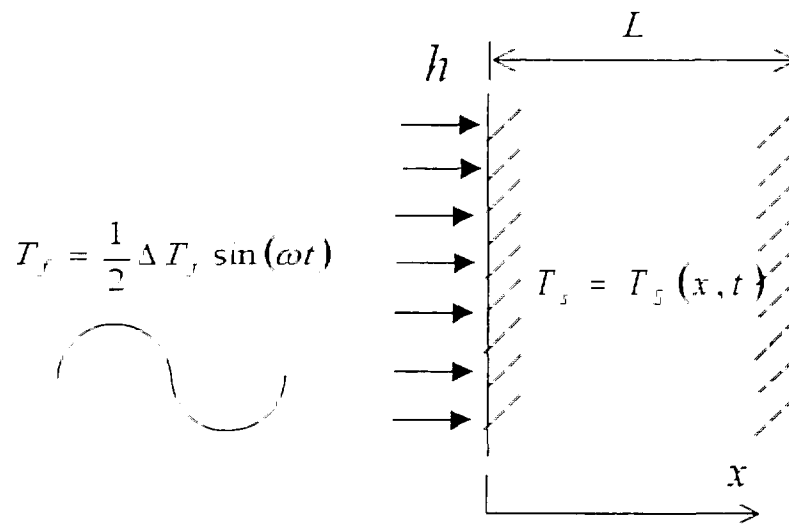


Fig.4 Contribution of different factors to attenuation of temperature fluctuation



**Fig.5 Plate model due to sinusoidal temperature fluctuation**

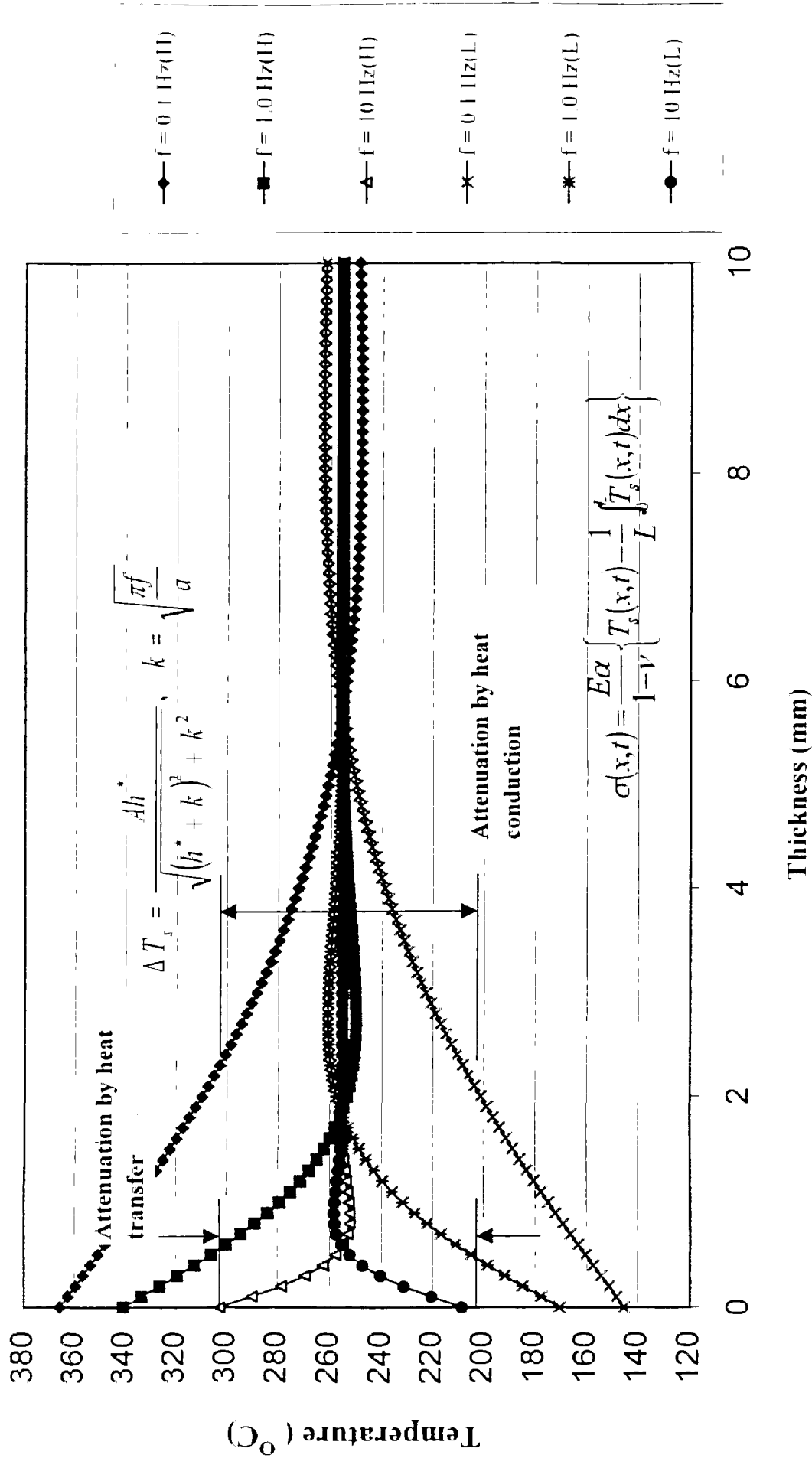


Fig.6 Temperature profile in a semi-infinite solid due to sinusoidal temperature fluctuation

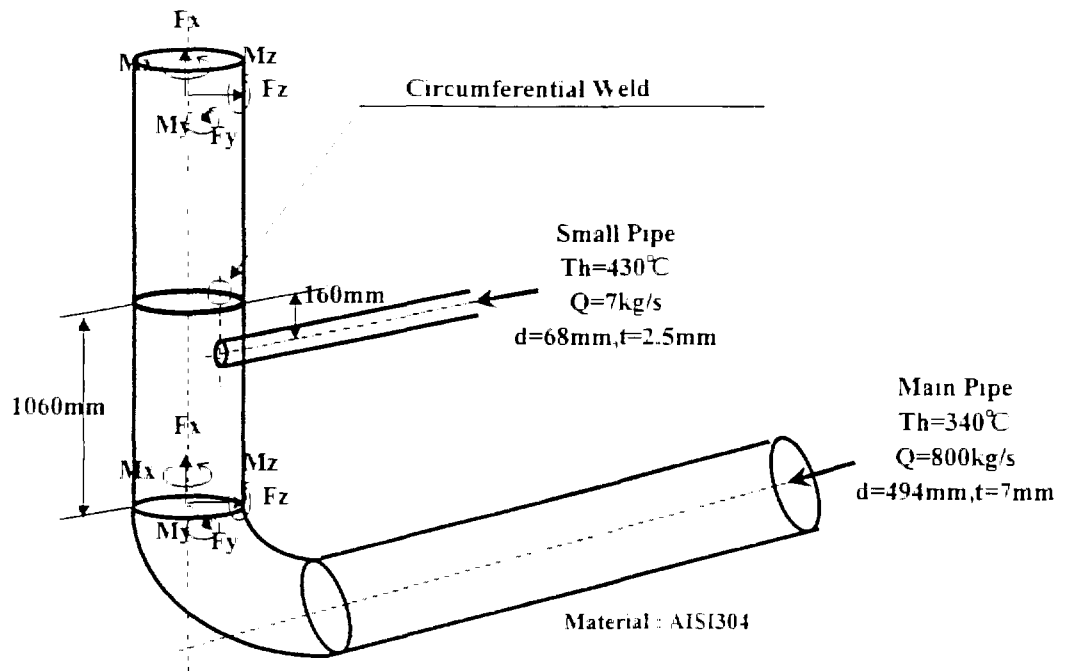
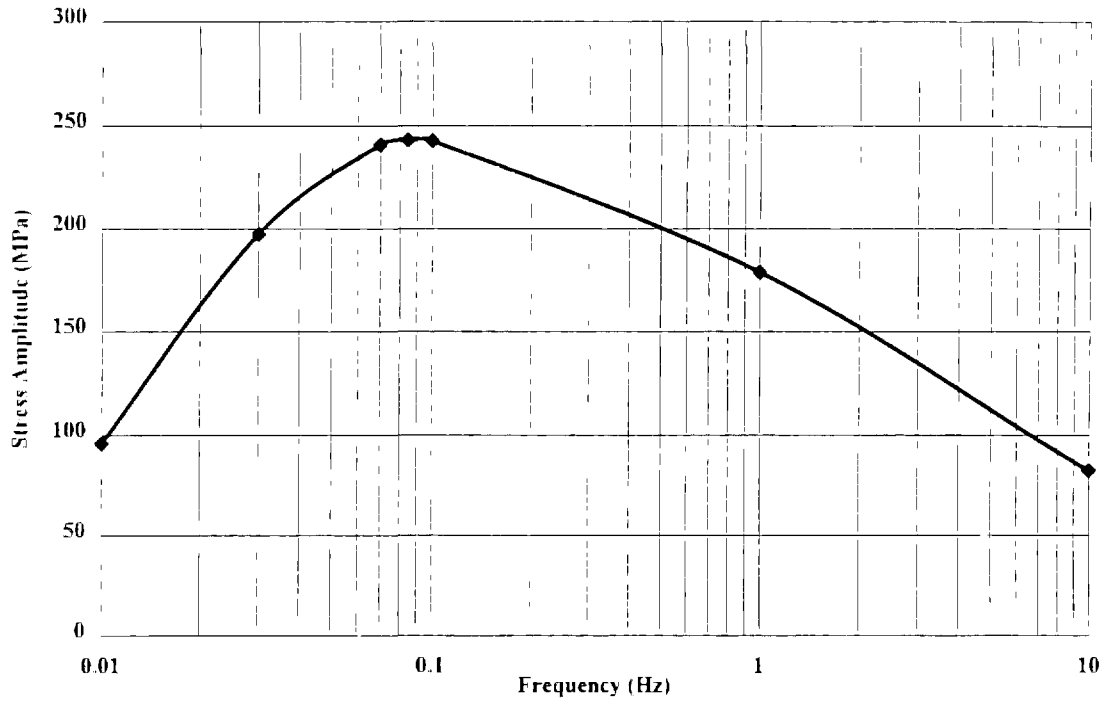


Fig.7 Geometrical Characteristics of the Phenix Secondary Piping System





**Fig.8 Stress response of plate to sinusoidal temperature fluctuation**

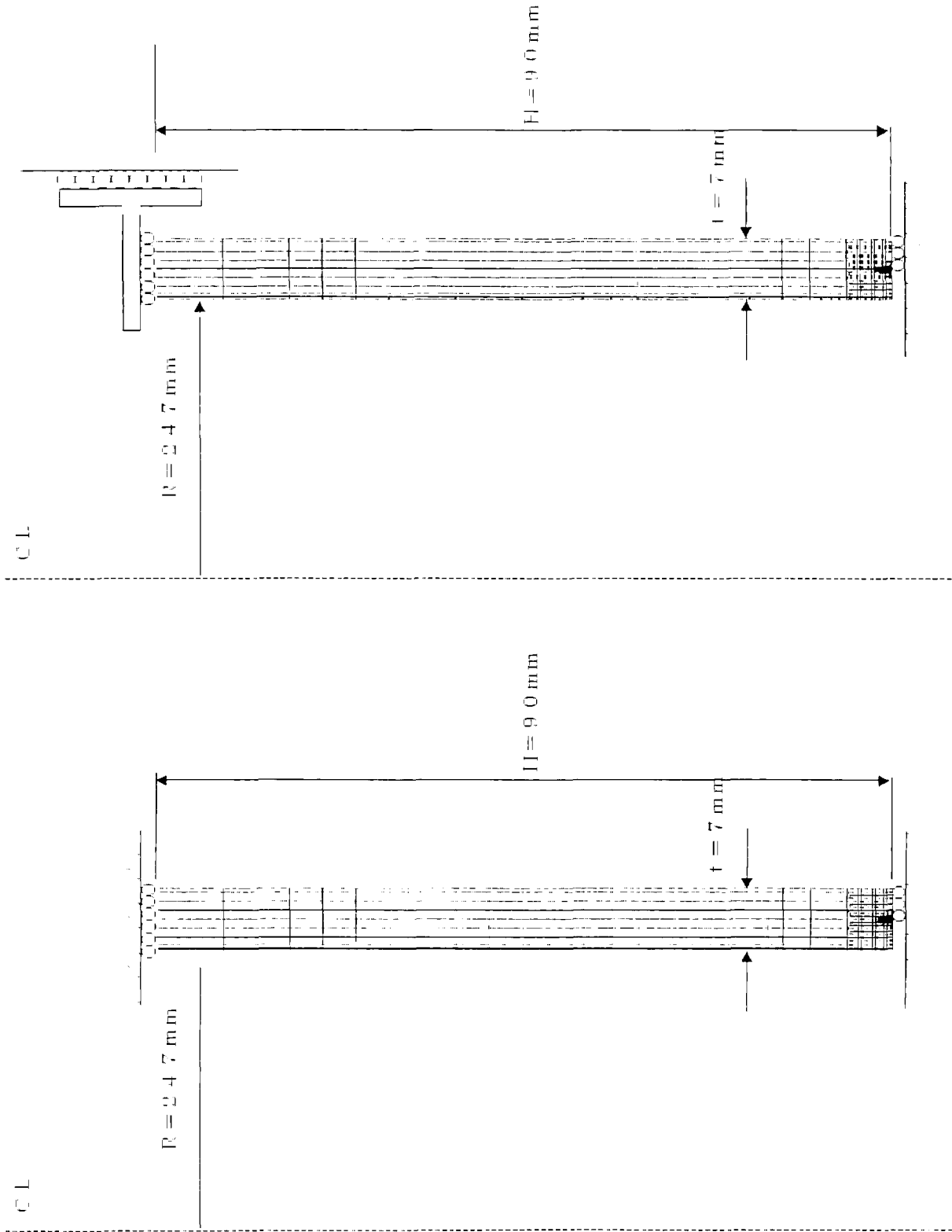


Fig.9 Boundary conditions for stress analysis

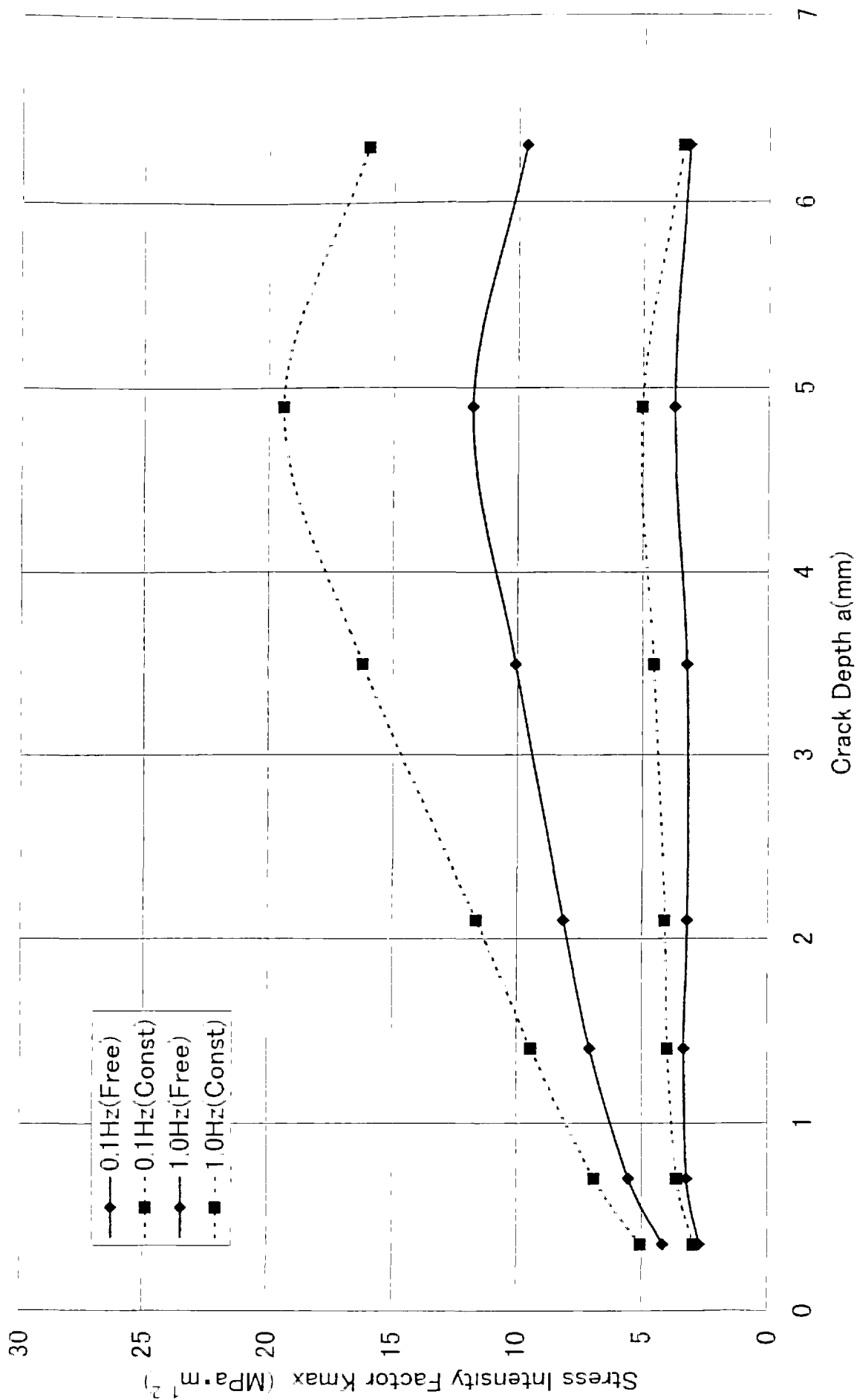


Fig 10 Stress Intensity Factor of Different Crack Depth

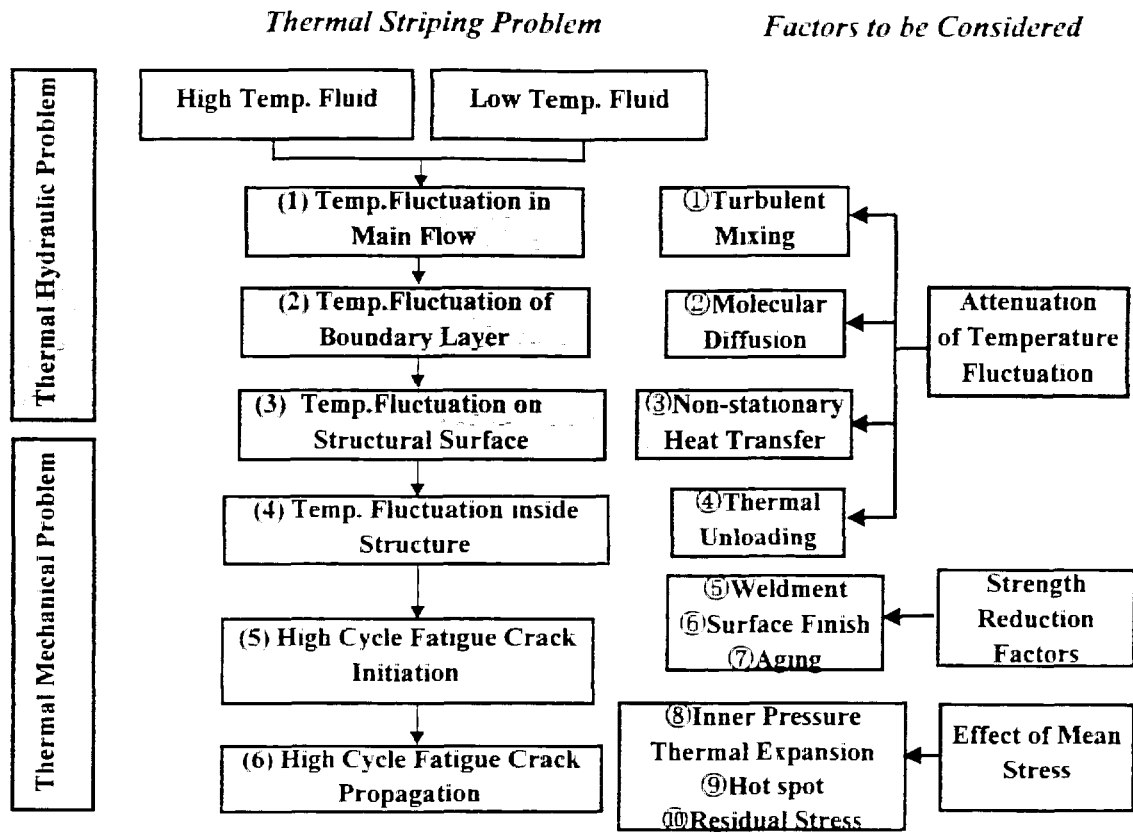


Fig. 11 Mechanism of Thermal Stripping Phenomenon and Sensitive Factors

Table 1 Sensitivities of structural integrity to various factors

温度ゆらぎの減衰効果	$\Delta \sigma$ (MPa)	影響度
温度ゆらぎ振幅の減衰効果を考慮せず	353	0*
①乱流混合+②分子拡散	137	-61%*
③非定常熱伝達+④温度除荷	243	-31%*
①②③④のすべての減衰効果を考慮	113	-68%*
強度低減と平均応力	$\Delta \sigma$ (MPa)	影響度
⑤溶接部の不連続効果を考慮	256	40%*
⑥表面仕上げの影響	136	7%*
⑦経年化の影響	136	7%*
⑧配管モーメントと内圧	—	1.5%**
⑨ホットスポット	—	-11%**
⑩溶接残留応力	—	25%**

\*温度ゆらぎの減衰効果を考慮しない場合(353MPa)に対する割合

\*\*疲労限の低減割合

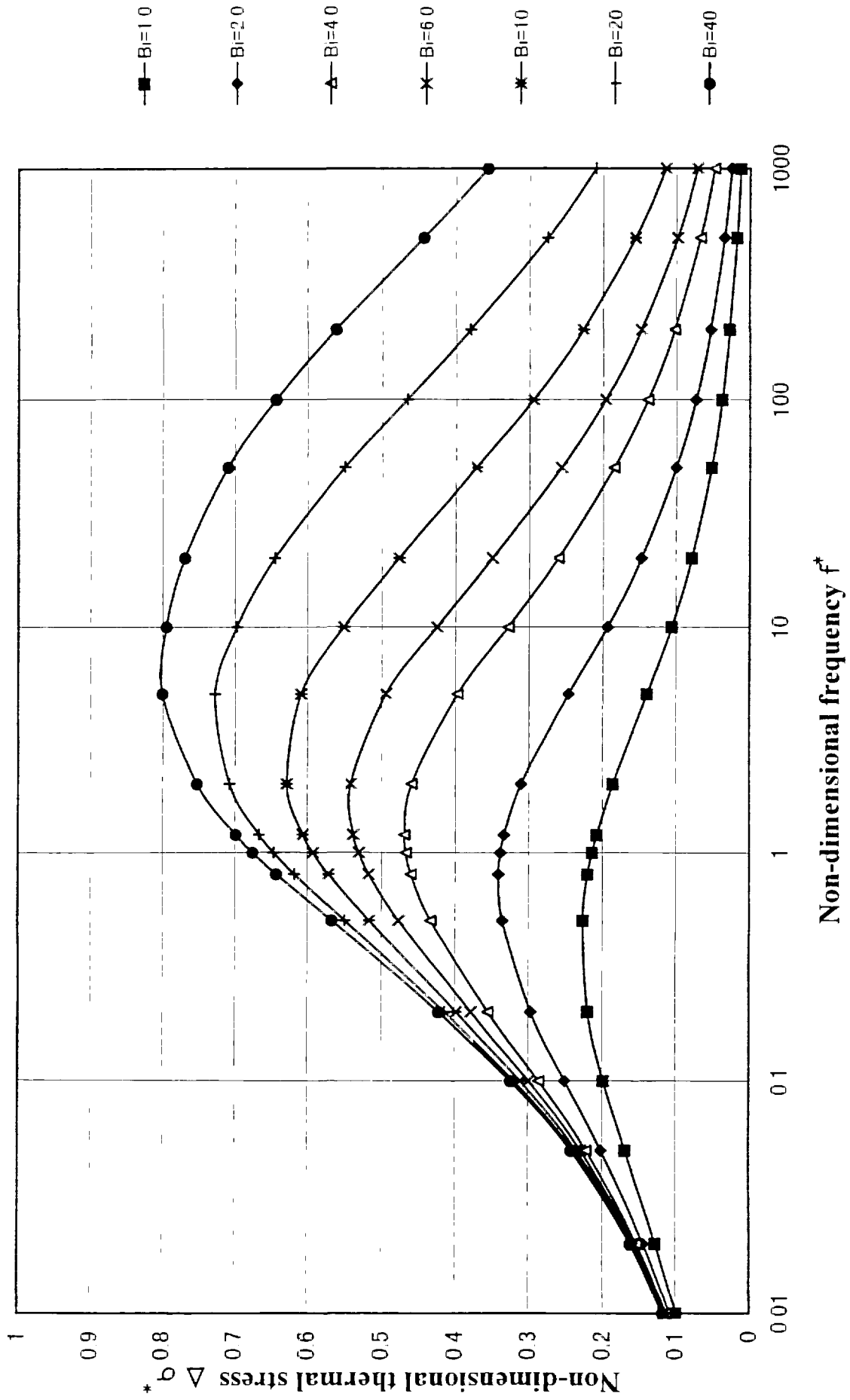


Fig. 12 Non-dimensional Thermal mechanical responses to sinusoidal temperature fluctuation