

「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の原因究明対策班作業関連資料

## 1次主冷却系温度計さやの解析・試験報告

1996年7月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。については複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の原因究明対策班作業関連資料

1次主冷却系温度計さやの解析・試験報告

原因究明対策班 原因解析・試験グループ \*

要 旨

本報告書は、1995年12月8日に発生した「もんじゅ」2次主冷却系ナトリウム漏えい事故の原因究明作業の一環として実施した、1次主冷却系温度計さやの健全性に関する試験・解析の中間結果をまとめたものである。

---

\* 横田 淑生 (動力炉開発推進本部 もんじゅプラント設備検討グループ)  
一宮 正和 (大洗工学センター システム開発推進部 プラント工学室)  
家田 芳明 (大洗工学センター 基盤技術開発部 熱流体技術開発室、現企画部)

## 1 次主冷却系温度計さやの解析・試験結果報告

もんじゅナトリウム漏洩事故の原因究明の今後の進め方について（平成8年1月24日）において、1次系の温度計さや部について念のために流力振動による破損のおそれのないことを確認する旨、記したところである。今回この方針に沿って実験及び解析により1次系の温度計さやの健全性を評価した。

### 1. 1次主冷却系温度計さやの説明

#### 1.1 温度計さや設置位置及び運転条件

1次主冷却系には、A、B、C各ループに13本ずつ、全体で39本の温度計さやが存在する。図1に1次主冷却系配管の鳥瞰図を示す。各ループ当たりの温度計本数、定格運転状態での流速及び運転温度は以下のとおりである。

- ・ホットレグ(32B) : 運転温度529℃  
6本(うち精密型1本) : 3.5 m/s
- ・クロスオーバーレグ(32B) : 運転温度397℃  
4本 : 3.4 m/s
- ・コールドレグ(24B) : 運転温度397℃  
3本(うち精密型1本) : 6.1 m/s

伝熱性能評価用の測温抵抗体を用いた精密型温度計がホットレグとコールドレグに1本ずつ設置されている。

1次系は主循環ポンプ出口側コールドレグ配管における流速が最も速い。固有振動数との関連において100%流量未満の低流量状態でも共振を回避するように設計する場合、流速が速い方が流力振動上、厳しくなるので、コールドレグに設置された温度計を代表として評価、検討を行った。

#### 1.2 温度計さやの形状

温度計さや形状図を図2に示す。付け根部には適切なR部を設け、配管との接合部は突き合わせ溶接としている。また、通常型は熱電対を用いるので一点で温度測定するのに対して精密型の場合は、測温抵抗体を用い、その長さが約30mmあるため、通常型温度計は細径部長さ32mmに対して精密型は細径部を62mmと長くしている。

### 2. 検討項目

細径部に関しては固有振動数が通常型で約8000Hz（計算値）、精密型で約2000Hz（計算値）、無次元流速（流速を温度計の直径及び固有振動数で割ったもの）が通常型で約0.06、精密型で約0.2である。「ASME Code Sec. III Appendix.N-1300」で揚力方向、抗力方向とも振動を回避できる条件とされている無次元流速1に比べてこれらは非常に小さな値となっており、細径部が単独で振動するモードを考える必要はない。上記のことから温度計さや全体が振動するモードに注目して以下の検討項目を実施した。

- ・打振試験（水中）
- ・流力振動試験
- ・2次元流体－構造連成解析

### 3. 温度計の打振試験

#### 3.1 試験の概要

実寸大の温度計を製作し、水中でその太径部の先端部をハンマで打撃した後、その振動挙動を計測し、温度計の固有振動数と減衰定数を確認する。

#### 3.2 試験の結果

通常型温度計の固有振動数の測定結果は414 Hz（約25℃）であり、コールドレグにおける運転温度の固有振動数に補正するため添付資料1に示す縦弾性係数の温度補正を実施すると380 Hzとなる。固有振動数は別途実施した通常型温度計振動解析結果（362 Hz：ナトリウム温度397℃）とほぼ一致している。固有振動数解析の方法を添付資料2に示す。通常型温度計振動解析結果のモード図を図3に示す。

一方、精密型温度計の固有振動数の測定結果は470 Hz（約25℃）であり、コールドレグにおける運転温度の固有振動数に補正するため縦弾性係数の温度補正を実施すると430 Hzとなる。固有振動数は別途実施した精密型温度計振動解析結果（429 Hz：ナトリウム温度397℃）とほぼ一致している。

なお、通常型、精密型とも試験結果は減衰定数が0.2%程度であった。

### 4. 流力振動試験

#### 4.1 試験の概要

1次主配管の温度計の健全性を検討するため、実寸大温度計の流力振動試験を行い、渦励起振動発生の有無を確認する。図4に試験装置の概略形状を示す。温度計は実機と同一形状であり、振動特性をさや付け根部周方向4カ所さやの軸方向に設けたひずみゲージにより測定した。保温材、ヒータ、内装板などは設置しないこととした。水の温度は約25℃である。

#### 4.2 試験条件の妥当性

##### (1) 配管径の考え方

温度計取付配管は実機コールドレグ配管を模擬して24B配管とすることが望ましいが、試験装置のポンプ最大能力（1900 m<sup>3</sup>/h）の制約から無次元流速で実機条件をカバーすることを重視して10B配管を使用した。その際、配管内速度分布を考慮するとさや付け根部応力に関して実機条件より流力振動試験の方が約5%厳しくなる。その算出根拠を添付資料3に示す。よって流力振動試験結果に基づいて評価するものとする。

##### (2) 超臨界領域の確認

1次系実機コールドレグ温度計でのレイノルズ数は定格運転100%流量条件において  $5.2 \times 10^5$  であり超臨界領域（機械工学便覧流体工学より）に相当する。超臨界領域は温度計表面の流れの状態が層流境界層から乱流境界層に遷移する領域である。超臨界域ではストロハル数が大きくなりカルマン渦振動数は増大するが、

渦発生 の規則性すなわち方向性及び発生周期等がばらつく傾向にあるため、平均的には温度計に作用する流体力は低下する。無次元流速では十分に実機条件を上回っているが、念のため超臨界領域までの試験を実施することとした。

### (3) 無次元流速の考え方

渦励起振動発生の有無を確認するためには実機と同等以上の無次元流速を確保するように試験条件を設定する必要がある。温度計さや全体が振動する場合の固有振動数は通常型約380 Hz (397℃相当)、精密型約430 Hz (397℃相当)であり、これに対応する無次元流速は通常型約0.6、精密型約0.5であって、「ASME Code Sec. III Appendix.N-1300」で揚力方向、抗力方向とも振動を回避できる条件とされている値1に比べて小さい。

流力振動試験条件(25℃、流速10.4 m/s)で評価した無次元流速は通常型で約0.9、精密型で約0.8であり、実機条件と比べて無次元流速が高目になるようにした。

## 4.3 試験の結果

### (1) 通常型温度計の発生応力

図5-1及び図5-2に通常型温度計の試験結果を示す。応力変動値による振幅を振動モードに基づき換算すると±0.007 mm(揚力方向)であり、発生応力は0.13 kgf/mm<sup>2</sup>(揚力方向)、0.08 kgf/mm<sup>2</sup>(抗力方向)と小さい。また、さや付け根のR=10 mmから算出した応力集中係数 $K_{\sigma}=1.3$ を考慮し、告示501号別図第2:SUS304のC線図の10<sup>11</sup>回に示されている最も低い値(約8.3 kgf/mm<sup>2</sup>)と比較しても十分小さい。更に流力振動試験の揚力方向の振動数は約65 Hz(超臨界領域にあることから振動数はある幅でばらついている)と流力振動試験状態でのさやの固有振動数414 Hzから大きく離れており自励的振動が生じているのではなく流体力による強制変位による振動と考えられる。

### (2) 精密型温度計の発生応力

図6-1及び図6-2に精密型温度計の試験結果を示す。全般的に通常型温度計の試験結果と同様の傾向を示す。温度計付け根部の発生応力は実機条件で0.1 kgf/mm<sup>2</sup>(揚力方向)、0.06 kgf/mm<sup>2</sup>(抗力方向)と通常型温度計よりも小さく強度評価上、有意とならないこと及び自励的な振動が発生しないことを精密型温度計でも確認した。

### (3) 通常型温度計のストロハル数の確認

図7に通常型温度計流力振動試験におけるレイノルズ数とカルマン渦振動数を決定するストロハル数との関係を示すが、水流動試験結果でレイノルズ数が $1 \times 10^5$ 程度からストロハル数が増大し(レイノルズ数が $1.3 \times 10^5$ ではストロハル数が最大値約0.26)、また、ストロハル数にばらつきが生じてきていることから超臨界領域に入っていることが確認された。

流力振動試験でのレイノルズ数は最大で約 $3 \times 10^5$ と実機コールドレグ条件の $5.2 \times 10^5$ に対して小さいが、いずれにしても超臨界領域に到達している。また、図7に示すように流力振動試験ではストロハル数は最大値0.26となり、それ以上レイノルズ数が増大するとストロハル数が低下傾向を示すため流力振動試験の模擬性に関しては問題ないと考えられる。

なお、流力振動試験では温度計付け根部にひずみゲージを貼り付けており、これによりさやの振動数が得られる。さやの揚力方向の振動数をカルマン渦の振動数と見なしてストロハル数を算出した。

なお、精密型においても太径部の直径は等しいため、ストロハル数とカルマン渦振動数との関係は通常型と等しいと言える。

## 5. 2次元流体—構造連成解析

### 5.1 解析の概要

1次径温度計さや全長分を太径部と仮定した添付資料4の付図4-1に示す2次元モデルにより解析を行った。

解析条件は実機コールドレグの100%出力時とし、ナトリウム温度は397℃、流速は約6.1 m/sを与えた。さやの固有振動数は約380 Hz (397℃相当)となるように振動応答解析のバネ定数を与えた。

### 5.2 解析の結果

1次系さやの解析結果を図8に示す。本図はさや変位置の時刻歴図である。

抗力方向の温度計さやの変位置は図8より±0.0006 mm、振動数は約160 Hzであり、揚力方向は±0.002 mm、振動数は約85 Hzでストロハル数0.39に対応する。なお、上記の振動数は図8に示す解析結果の変位置を周波数分析して算出したものである。

これは主にカルマン渦振動数に対応する振動成分であり、対応する揚力方向発生応力は図3に示す変形モード図に基づき算出すると±0.04 kgf/mm<sup>2</sup>である。

## 6. 考察

流力振動試験結果と2次元流体—構造連成解析結果を実機コールドレグの試験状態で比較すると以下に示す違いがある。

### (1) さやの変位置

通常型温度計流力振動試験では抗力方向±0.006 mm、揚力方向±0.007 mmに対して流体—構造連成解析では抗力方向±0.0006 mm、揚力方向±0.002 mmとなる。

### (2) 揚力方向のさやの振動数

揚力方向の振動数は流力振動試験の約65 Hzに対して解析結果では約85 Hzと振動数が大きくなっている。

前者は流力振動試験では乱流励起成分が含まれているため揚力方向のカルマン渦による振動が中心の2次元流体—構造連成解析結果よりも変位置が大きく出ている。

後者は解析のモデル化上、乱流強度が弱目となり解析によるストロハル数が大きくなるためと考えられる。

## 7. 結論

1次系温度計さやの振動は流体力による強制振動のみであり流力振動試験及び流体—構造連成解析結果とも1次系温度計さやの変位置は十分に小さく、揚力方向及び抗力方向いずれにおいても渦による振動は励起されないことが確認された。

以上

原子炉容器

1次主冷却系  
中間熱交換器

1次主冷却系  
循環ポンプ

コールドレグ

温度計 3本

流速 6.1m/s

流量計

1次主冷却系  
逆止弁

クロスオーバーレグ 温度計 4本

流速 3.4m/s

ホットレグ 温度計 6本

流速 3.5m/s

図1 1次主冷却系配管鳥瞰図



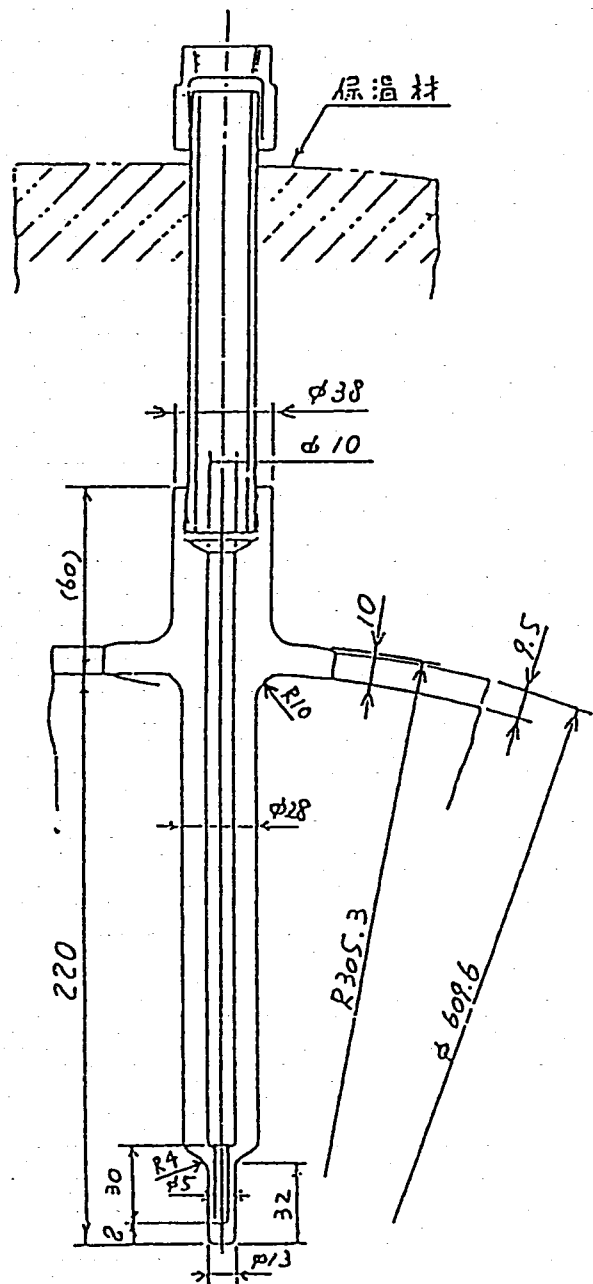


図 2 - a 1次冷却系24B配管用温度計ウエル構造図  
110-A,B,C-TE6A,B (コールドレグ通常型)

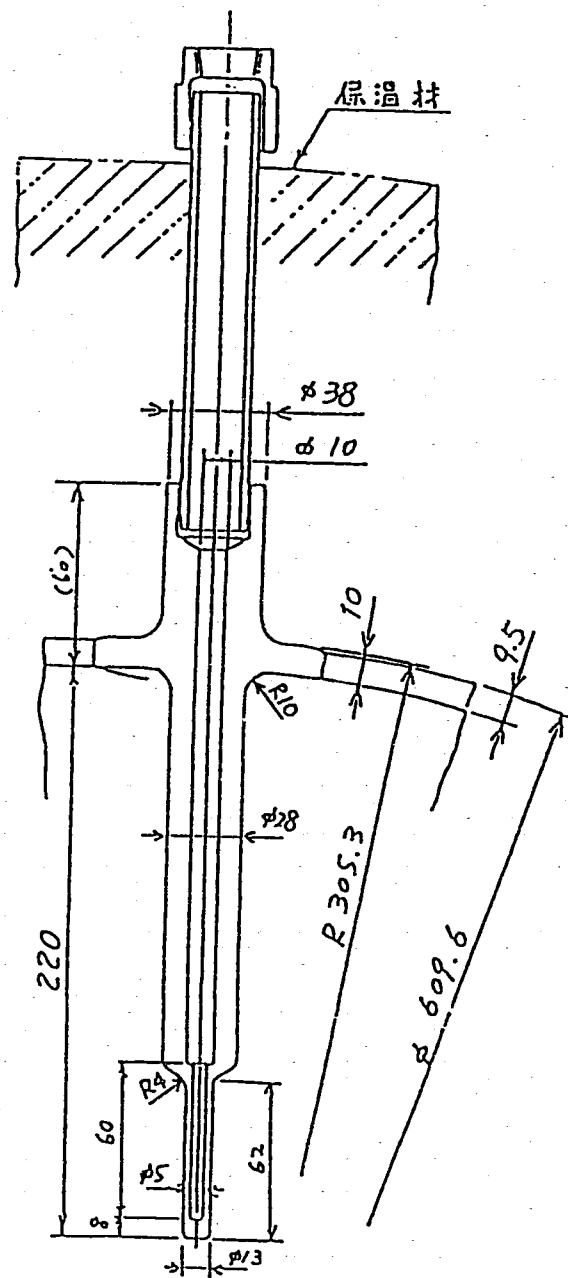
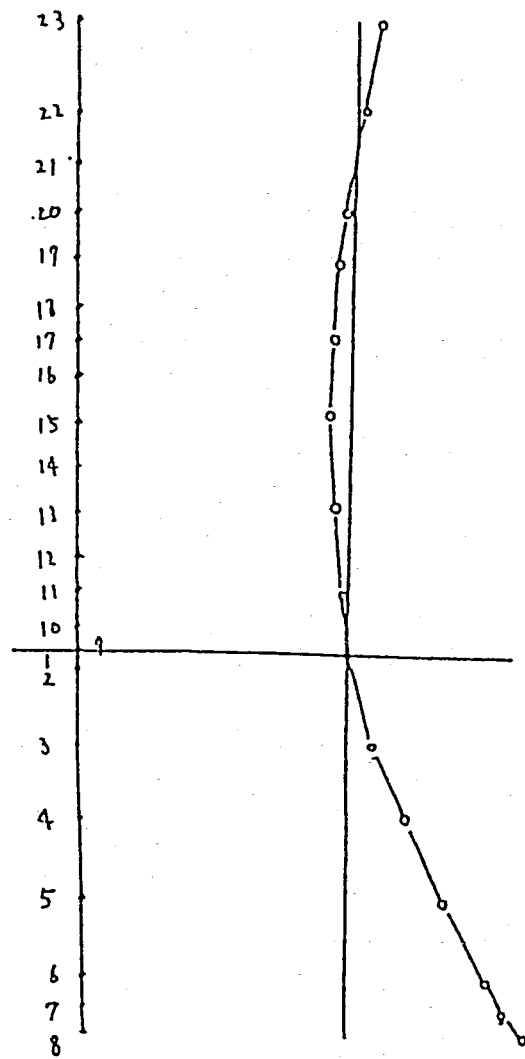
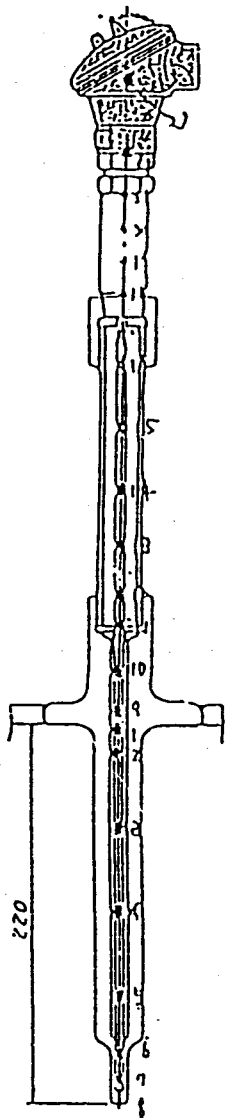


図 2 - b 1次冷却系24B配管用温度計ウエル構造図  
110-A,B,C-TE7 (コールドレグ精密型)



(通常型)

図 3 1次系温度計ウェル振動モード図

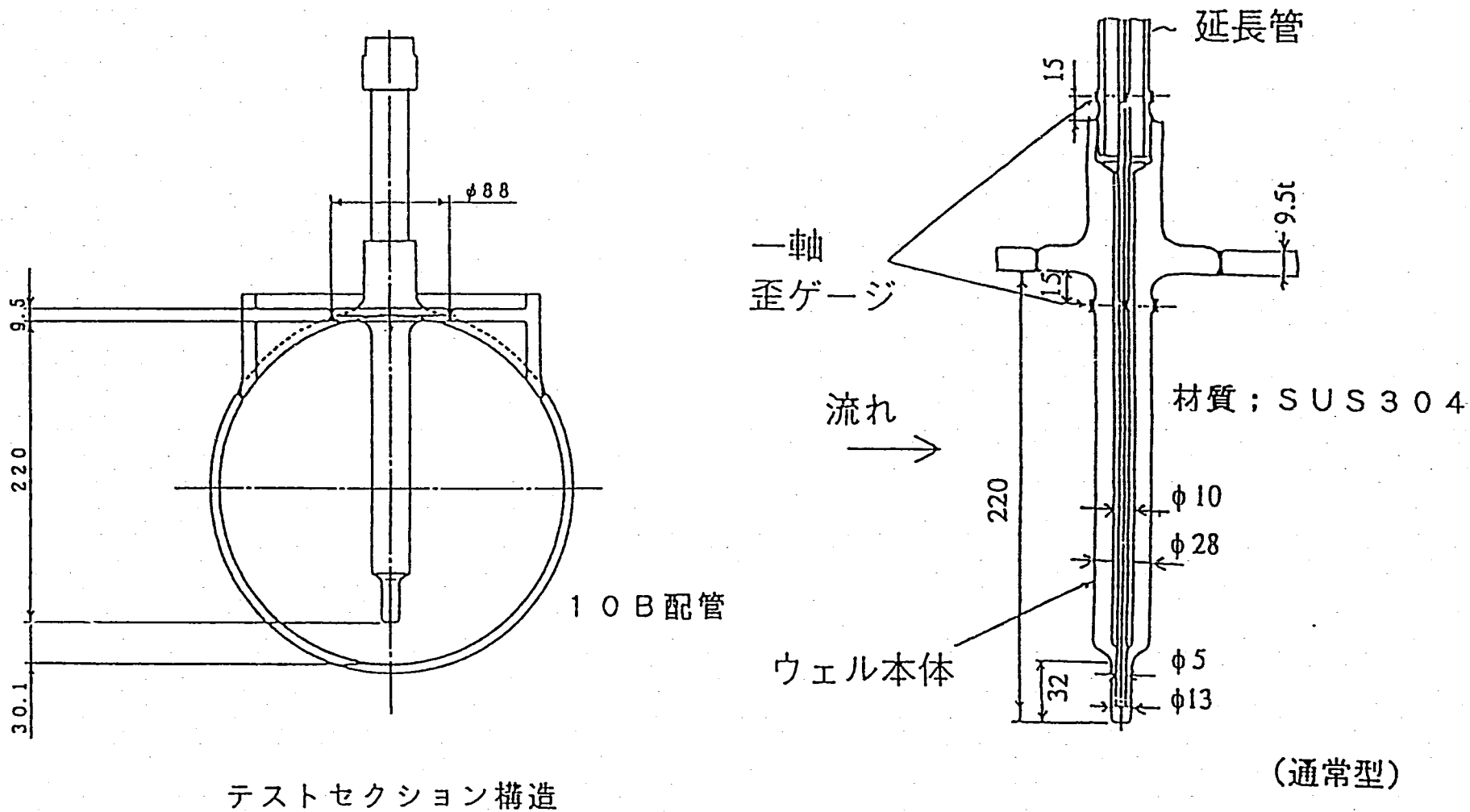


図4 試験体概要

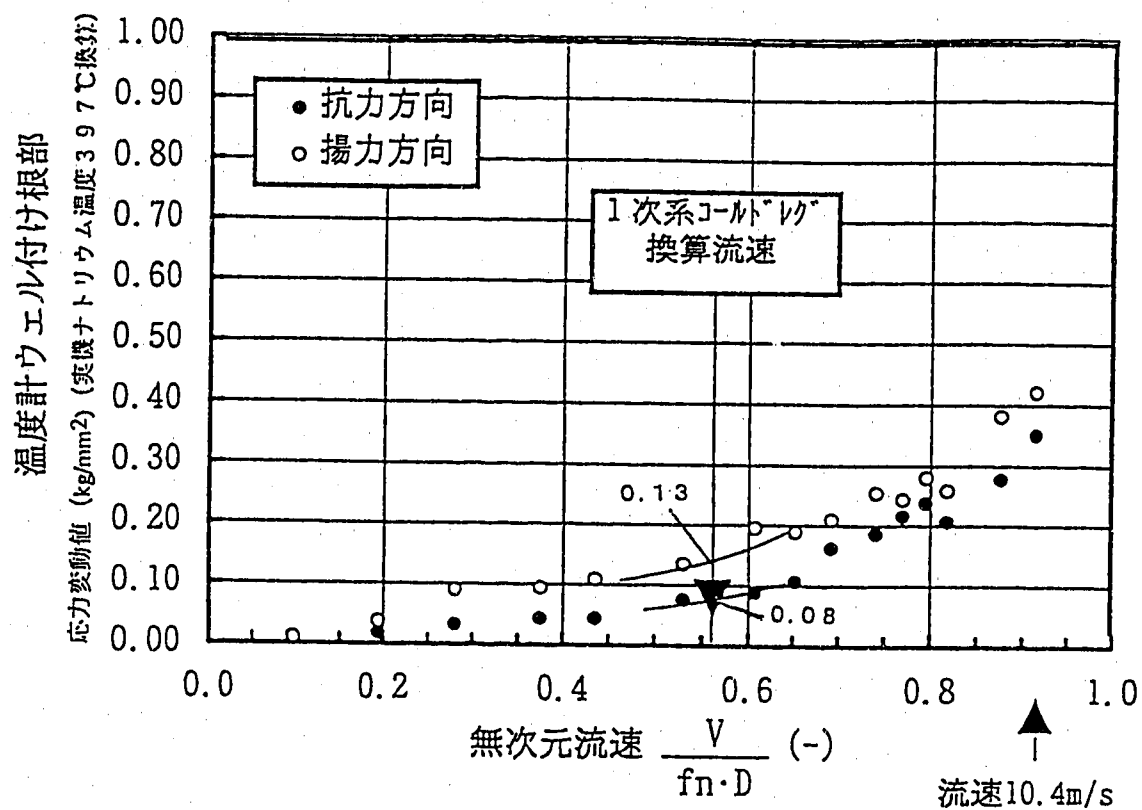


図5-1 水流动試験の無次元流速と1次系コールドレグ  
通常型温度計ウェル変動応力値  
(V:流速, fn:固有振動数, D:ウェル外径)

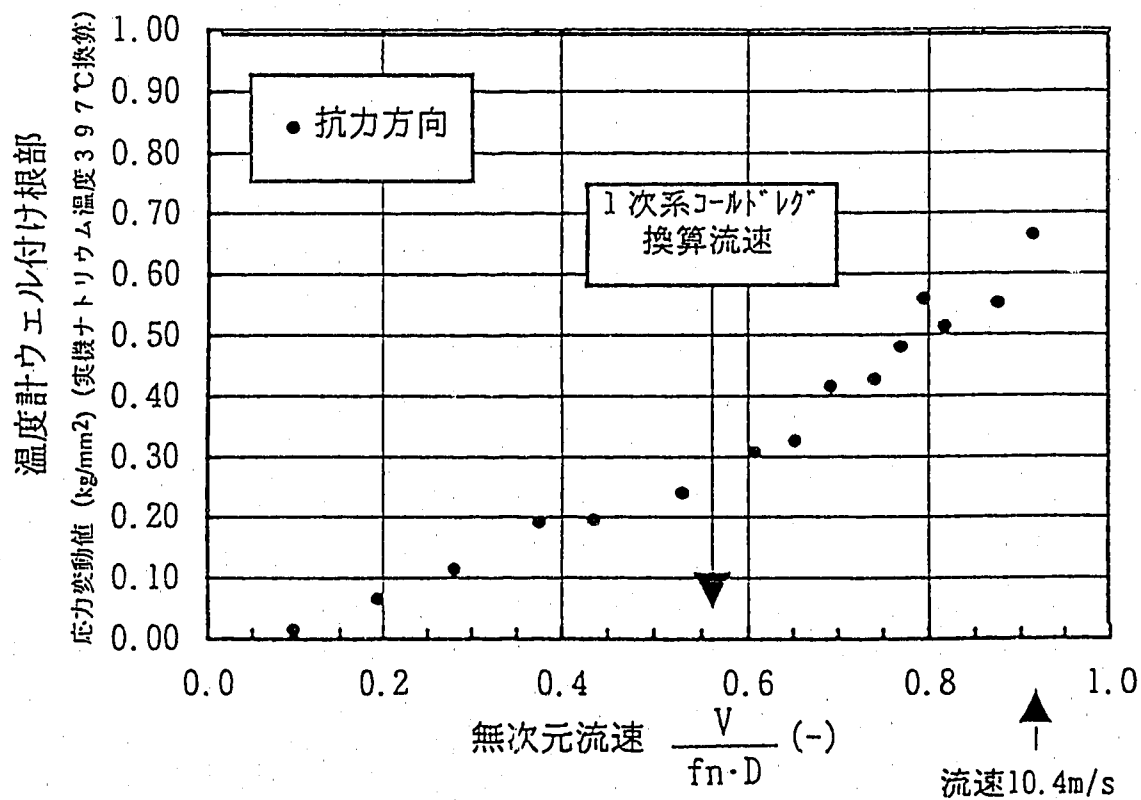


図5-2 水流动試験の無次元流速と1次系コールドレグ  
通常型温度計ウェル平均応力値  
(V:流速, fn:固有振動数, D:ウェル外径)

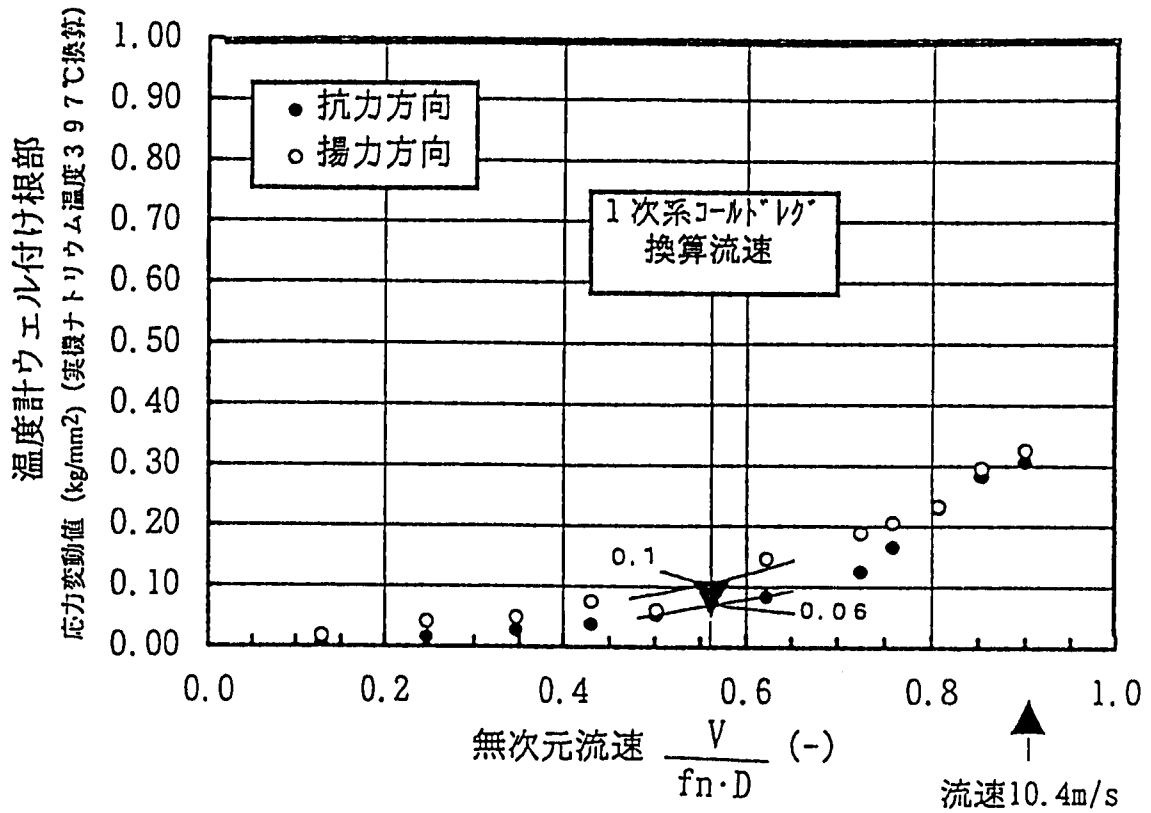


図6-1 水流動試験の無次元流速と1次系コールドレグ精密型温度計ウエル変動応力値  
(V:流速, fn:固有振動数, D:ウエル外径)

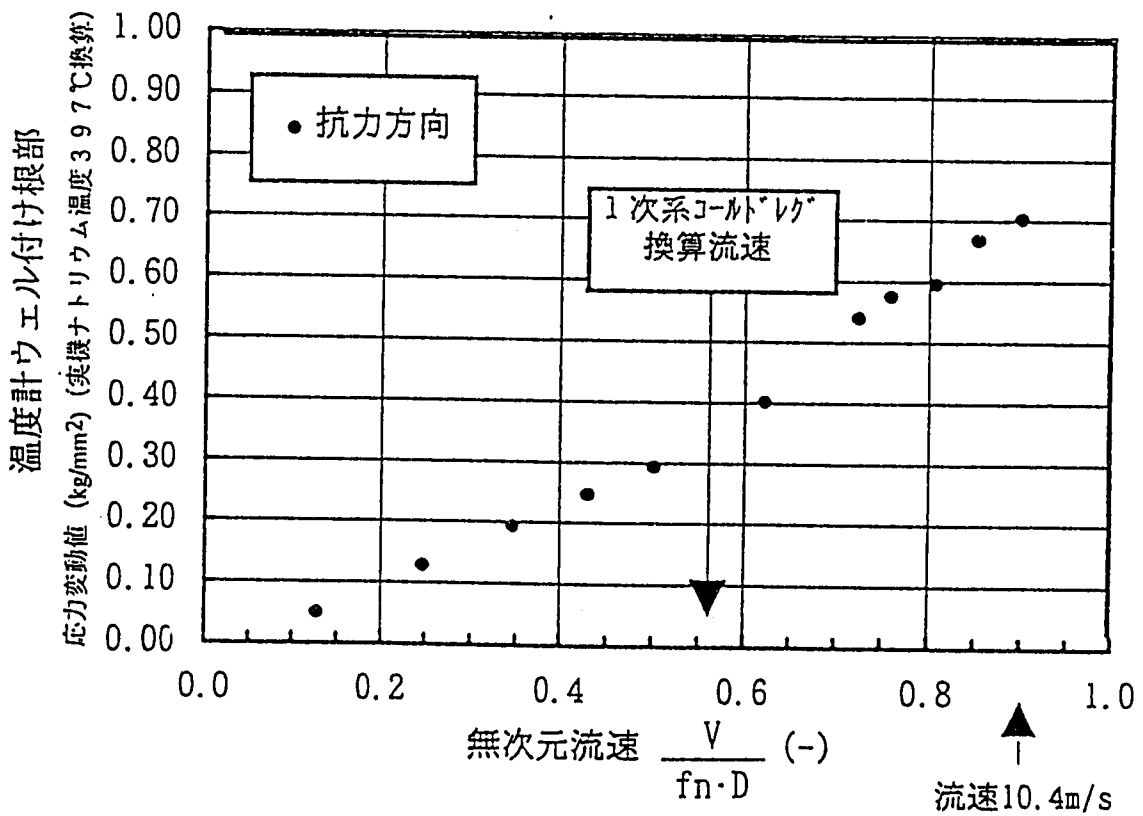
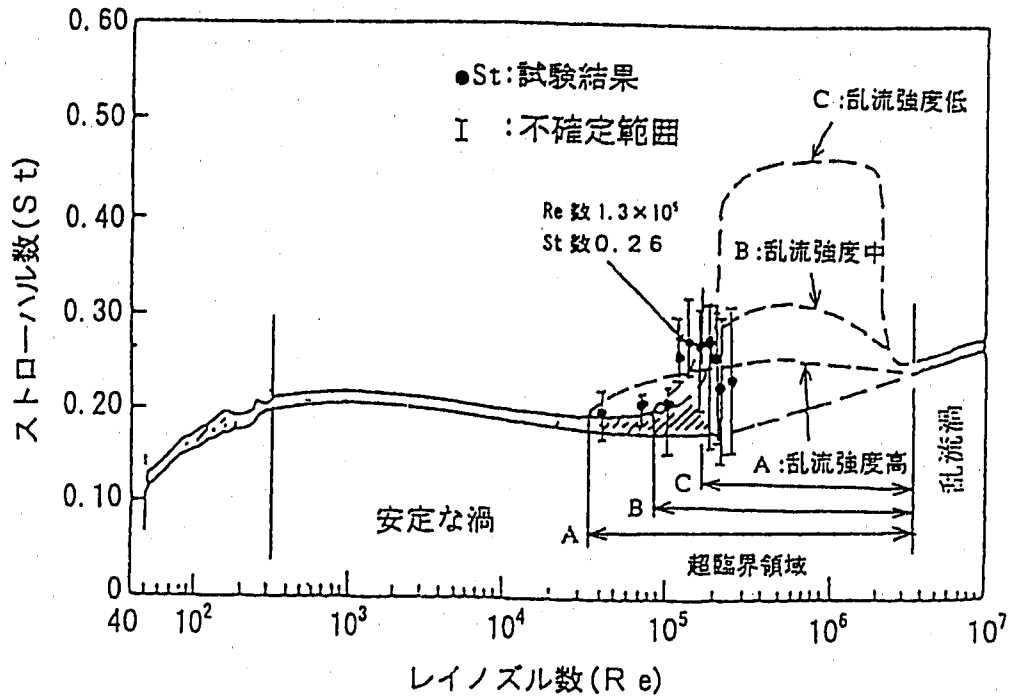


図6-2 水流動試験の無次元流速と1次系コールドレグ精密型温度計ウエル平均応力値  
(V:流速, fn:固有振動数, D:ウエル外径)



円柱からの渦放出のストローハル数と  
レイノズル数との関係 (Chen\* の図を基に作成)

\* : Flow-Induced Vibration of Circular Cylindrical Structure

図 7 レイノズル数とストローハル数の関係

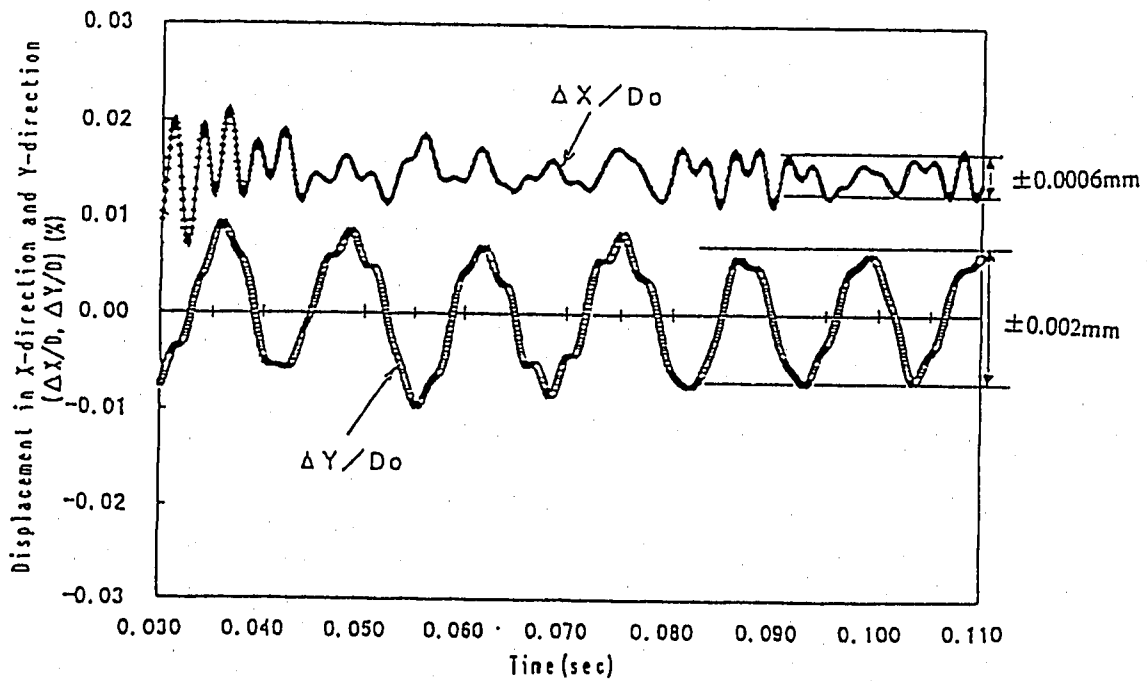


図 8 1次系温度計中心位置のX, Y方向変位の時間変化

## 添付資料 1

## 温度計ウェル固有振動数の温度補正の考え方

1次系温度計ウェルの流力振動評価では打振試験により計測されたウェルの固有振動数を実機運転温度（397℃）での固有振動数に換算している。

その際の換算の考え方を以下に示す。

端点剛支持の片持ちばりの固有振動数は機械工学便覧より次式で示される。

$$f_n = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I \cdot g}{\gamma \cdot A}}$$

(記号の説明)

$f_n$  : 温度計ウェル固有振動数

$\lambda$  : 1次モード振動係数 1.875

(機械工学便覧の片持ちばり1次モードの振動係数による)

$l$  : 温度計ウェル長さ

$E$  : ウェルの縦弾性係数

$I$  : ウェルの断面二次モーメント

$g$  : 重力加速度

$\gamma$  : ウェル材料の比重量

$A$  : ウェルの断面積

上記の式中、ウェルの縦弾性係数E以外は温度依存性が非常に小さく、温度計ウェルの固有振動数はウェルの縦弾性係数Eの1/2乗に比例すると仮定すると温度換算の考え方は以下のようになり、温度計ウェルが通常型、精密型のどちらの場合にも適用できる。なお、記号の添え字は温度を表す。

$$f_{n397} = f_{n25} \cdot \sqrt{\frac{E_{397}}{E_{25}}}$$

$$= 414 * \sqrt{17000 / 20000} \doteq 380 \text{ (通常型)}$$

$$= 470 * \sqrt{17000 / 20000} \doteq 430 \text{ (精密型)}$$

参考までに、オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）における25℃及び397℃の縦弾性係数（E）は、E25が約20000 kgf/mm<sup>2</sup>、E397が約17000 kgf/mm<sup>2</sup>である。

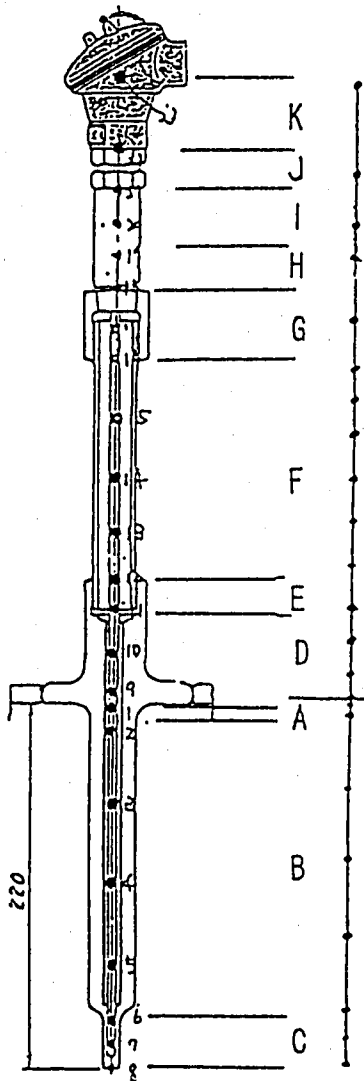
添付資料 2

温度計ウェル固有振動数解析の方法

1次系温度計ウェルの固有振動数解析の方法を以下に説明する。

解析コードは汎用構造解析プログラム「FINAS」であり、温度計ウェルをモデル化した多質点はり解析を行う。解析モデルは付図2-1に示すように温度計ウェルと配管外のコネクタまで含めた温度計本体をモデル化したものである。また、配管内部では排除マスを考慮した。

解析コード「FINAS」は一般的に使用されており、「常陽」MK-Ⅲ中間熱交換器の設工認申請用の耐震解析などにも用いられている。



1次系温度計の寸法、重量データ

部材	外径	内径	長さ	温度	備考
A	32	10	4	397	Naの付加重量を考慮
B	28	10	184	397	Na比重量:約860kgf/m <sup>3</sup>
C	13	5	32	397	
D	38	10	40	310	主配管局部剛性考慮
E	38	27.7	20	310	
F	27.2	21.4	110	137	一部, 310°C含む。
G	40	27.7	40	50	
H	27.2	16.2	45	50	
I	27.2	18	40	50	
J	27.2	20.5	35	50	
K	27.2	20.5	57	50	集中重量=334g

注記：上記データは通常型のものであり、精密型は部材Bの長さが通常型より30mm短く、部材Cの長さが通常型より30mm長い。

付図2-1 1次系温度計ウェル固有振動数解析モデル図



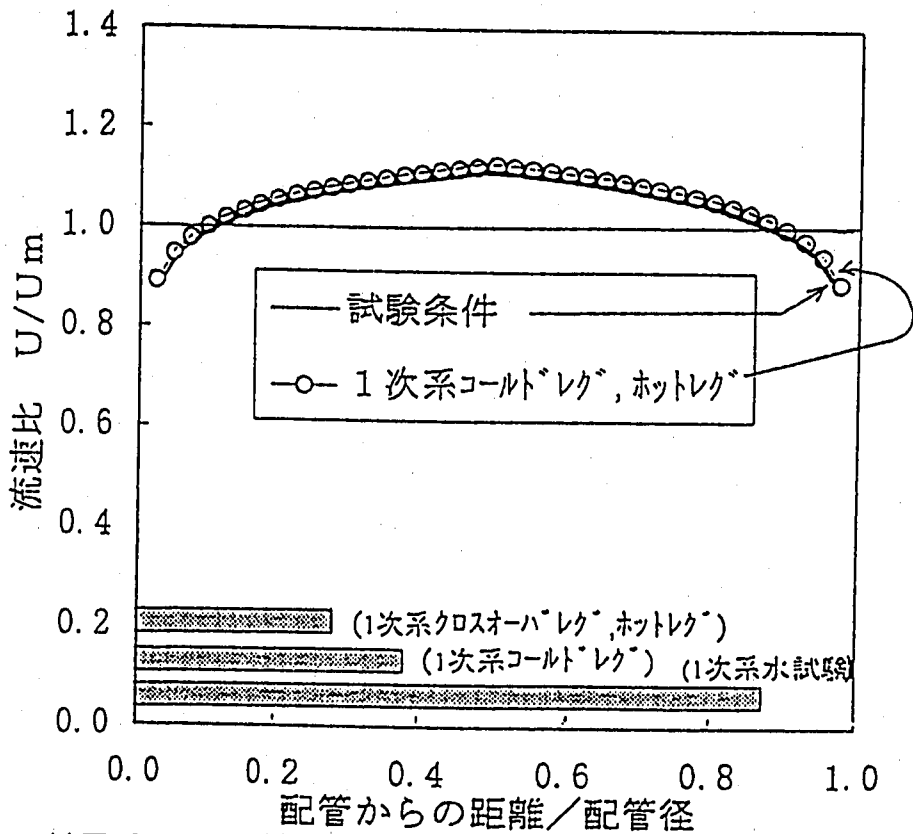
添付資料 3

10B配管使用時のさや付け根部の発生応力

管内の乱流領域での速度分布を付図3-1に示す。流力振動試験条件と実機1次系の配管直径で規格化した流速比分布はほぼ一致している。

流力振動試験では配管中央部の流速が最大となる領域の流体力がさやに加わるのに対して、1次系の実機条件では配管直径に対するさやの相対長さが短いため、流速が最大となる部分を流体力として受けていない。以上の速度分布を考慮してウェル付け根部に加わる応力を同じ流速で整理すると流力振動試験の方が1次系実機条件より約5%大きくなることがわかった。

よって、10B配管による流力振動試験で発生応力を評価すれば実機条件を包絡できる。



付図3-1 流速分布と温度計ウェル挿入長さ

## 添付資料 4

## 2次元流体－構造連成解析方法の説明

2次元流体－構造連成解析方法を説明する。解析にはメーカー開発のコード「FIV」を用いた。その解析手法のアルゴリズムと特徴を付図4-1に示す。微小時間増分に対して、以下の手順を行うものである。

第一に差分法による流動解析を実施し、ウエル周りの圧力及び壁面粘性力を算出する。

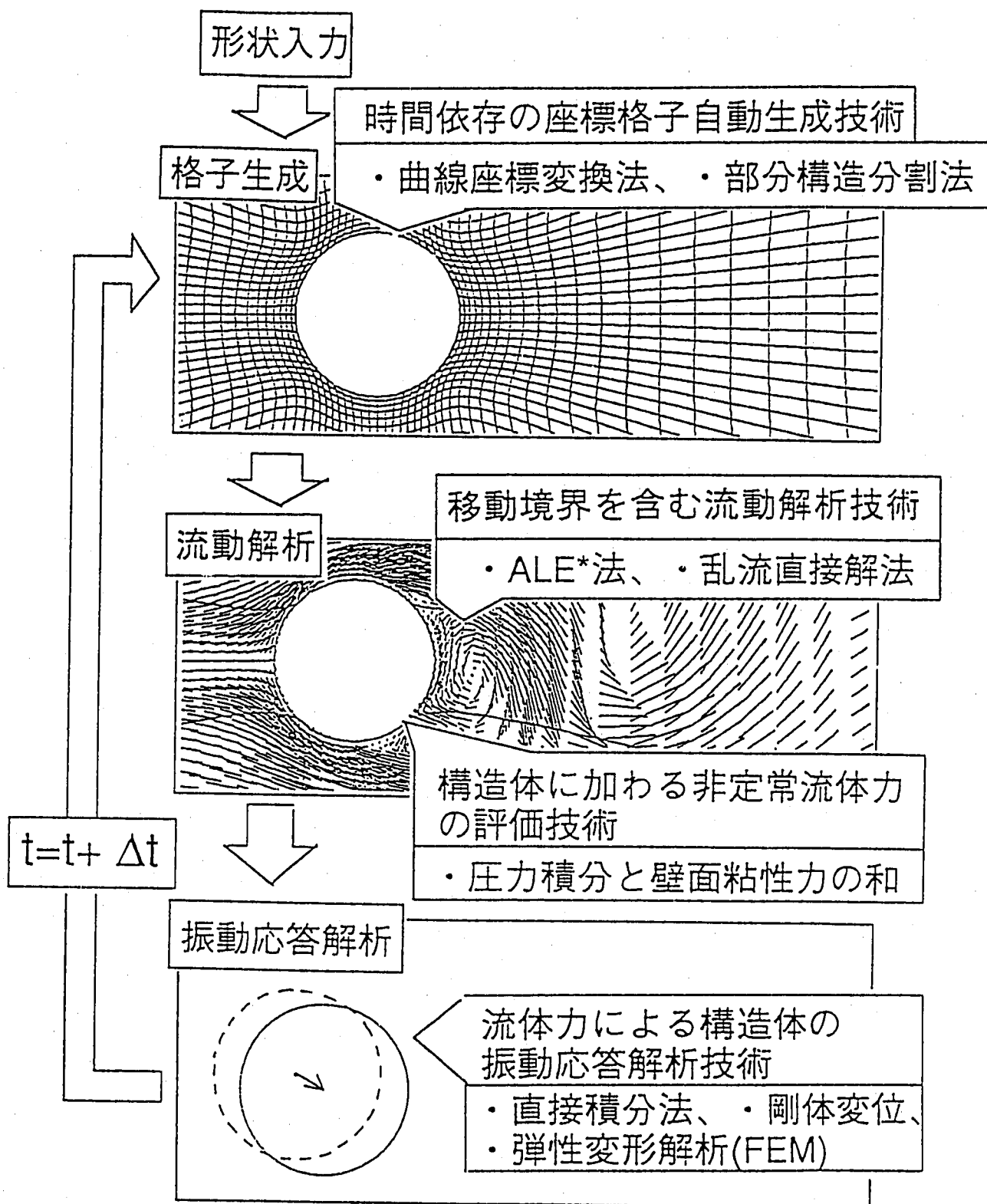
第二に流れに対して抗力方向と揚力方向の温度計ウエル太径部の振動をモデル化した振動応答解析条件に上記の流体力を入力する。

第三に振動応答解析の結果、算出されたウエル変位量を流動解析用の解析モデルに反映させて解析格子の再生成を行う。

なお、解析条件は実機コールドレグの100%出力時とし、温度は397℃、流速は約6.1m/sを与えた。ウエルの固有振動数は約380Hzとなるように振動応答解析のバネ定数を与えた。

また、2次系温度計ウエルの解析の場合と同様に、温度計ウエル軸方向に流体力の位相差がないと仮定すると2次元流体－構造連成解析により算出した変位量は温度計ウエル先端部の変位量を代表している。

本手法の詳細は付図4-1に記した機械学会論文に報告されており、現在では管群の流力振動解析へも適用されている。

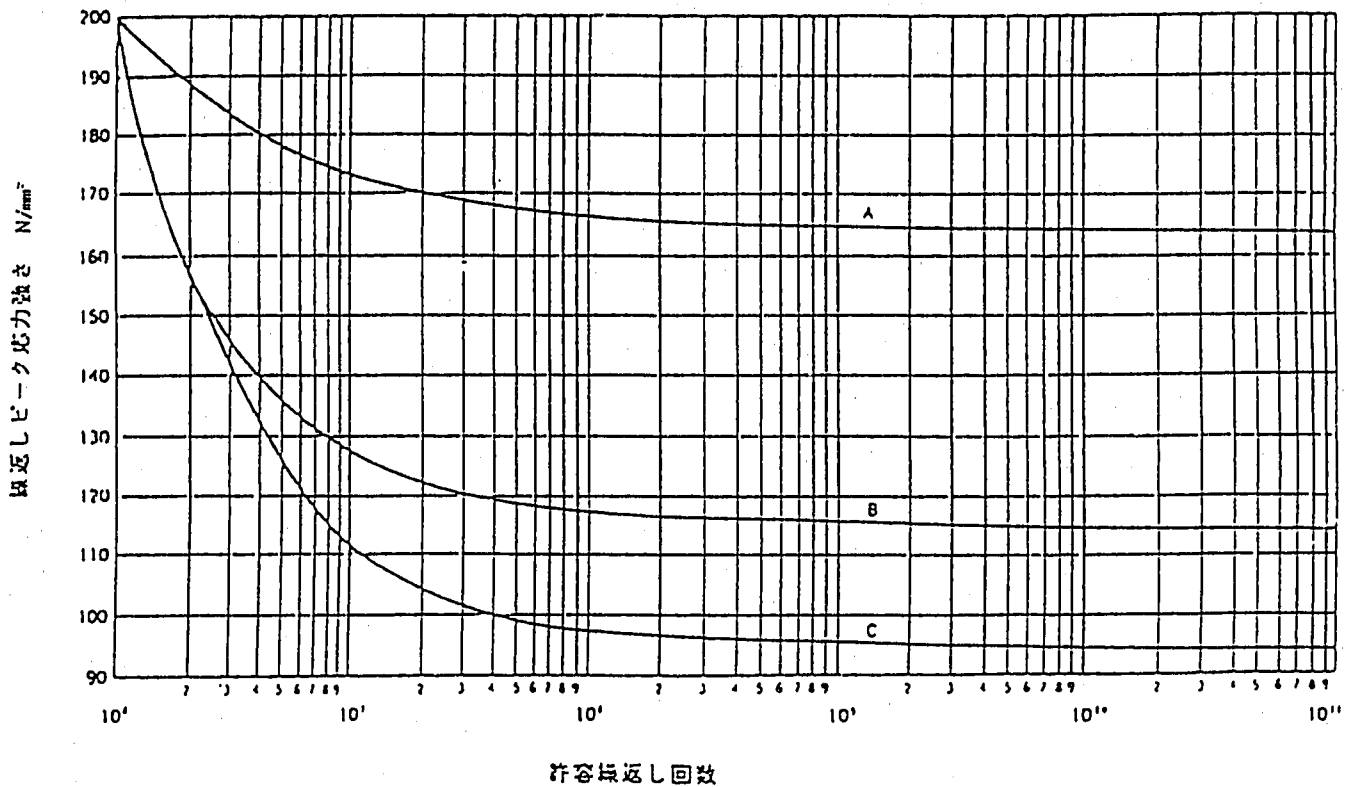


(\* Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method)

付図4-1 解析手法のアルゴリズムと特徴<sup>(1)</sup>

(1) 定岡、梅垣；「乱流場における流体・構造体連成振動解析手法の開発  
 (第1報；定式化と強制振動の解析)」、  
 日本機械学会論文集 (B編) 60巻570号 (1994-2)、409

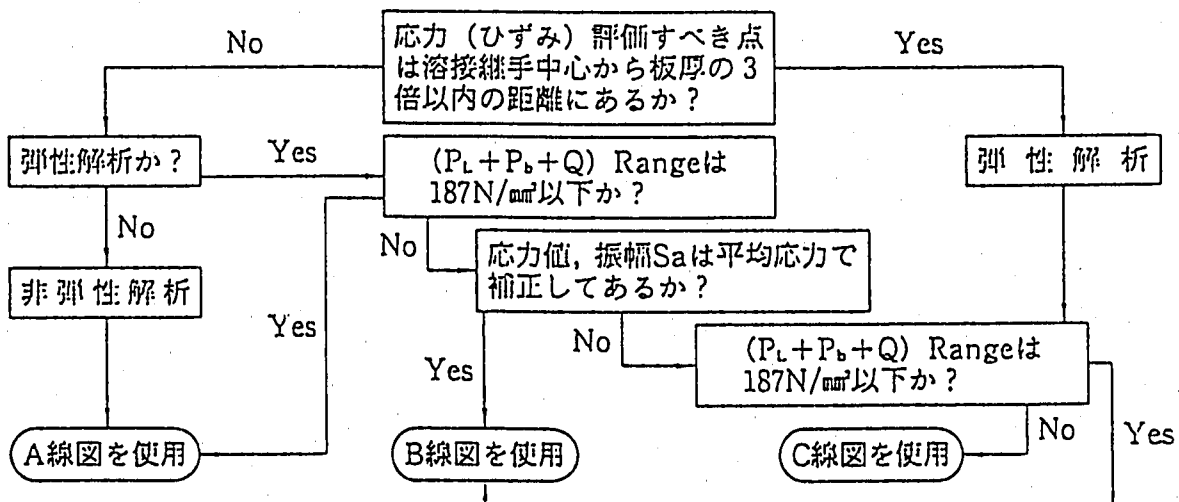
参考資料 告示501号別図第2



(備考)

- この図における繰返しピーク応力強さは、疲れ解析による繰返しピーク応力強さに  $\frac{1.95 \times 10^5}{\text{材料の使用温度における縦弾性係数}}$  を乗じて得た値とする。
- 曲線A, B及びCの使い分けは下記による。

別 図



軸方向及び径方向の温度勾配による熱曲げ応力は、Qから除く。

- 温度が430度を超える場合は、この図を使用できない。