

高サイクル熱疲労特性に関する試験研究

— 第2報 温度計測試験結果 —

(研究報告)

2004年2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

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

高サイクル熱疲労特性に関する試験研究

— 第2報 温度計測試験結果 —

(研究報告)

小林澄男*, 長谷部慎一*, 田中 宏**, 茨城幸一**, 深作 博***

要 旨

原子力プラントにおいて高温と低温の流体が合流する領域では、流体の不完全な混合に伴って温度変動が発生するため、接液する構造物の高サイクル熱疲労（サーマルストライピング現象）による破損を防止する必要がある。そこで、サーマルストライピング現象による温度変動が構造物のき裂発生と進展挙動に及ぼす影響を解明するため、構造物熱過渡強度試験施設(TTS)を改造して、高サイクル熱疲労試験装置(SPECTRA)を開発した。SPECTRAは、電磁ポンプにより600℃と250℃のナトリウムの混合割合を制御して内径66.9mm、肉厚11.1mm、全長1600mmの配管形状試験体内のナトリウム温度を正弦波状に変動することができる。この装置を用いてステンレス鋼における温度計測試験を実施し、以下の事項を確認した。

- (1) 平均温度425℃、温度変動振幅200℃において、周期2秒～40秒の範囲でナトリウム温度を正弦波状に変化させて、長期間、安定して試験を継続することができる。
- (2) 温度変動振幅は、試験体軸方向に対して線形的に減衰する。
- (3) 試験体板厚内の温度変動振幅の伝達特性は、既存の関係式と良く一致している。
- (4) 短周期と長周期を重畳させた温度変動についても制御が可能である。

今後は、本温度計測試験結果に基づいて、ステンレス鋼の試験体に対して正弦波温度変動試験を進める計画である。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 新技術開発試験グループ

**常陽産業株式会社

***東興機械工業株式会社

Experimental Study on Properties of High Cycle Thermal Fatigue (2)

— Results of the Temperature Measurement Test —

S.Kobayashi*, S.Hasebe*, H.Tanaka**, K.Ibaraki**, H.Fukasaku***

Abstract

At a nuclear power plant, where fluids of high and low temperature flow into each other, it is necessary to prevent structural failure damage caused by the high cycle thermal fatigue (thermal striping phenomenon). The Sodium Temperature Controlled Thermal Fatigue Test Equipment (SPECTRA) was developed by modifying the Thermal Transient Test Facility for Structure (TTS) in order to clarify the effect of temperature fluctuation induced by the thermal striping phenomenon on the crack initiation and its propagation behavior. As two electromagnet pumps mix sodium flows both temperature of 600°C and 250°C, SPECTRA is able to provide the sinusoidal fluctuation of sodium temperature in the specimen which is made as 66.9mm in inner diameter, 11.1mm in thickness and 1600mm in length. The temperature measurement test by stainless steel was carried out using SPECTRA, and the following results were confirmed:

- (1) Temperature fluctuation periods of 2-20 seconds of sodium can be induced stably for a long term under the conditions of the mean temperature of 425°C and the difference of 200°C.
- (2) The sinusoidal temperature fluctuation range is reduced linearly with the axial direction of specimen.
- (3) Transmission characteristics of the fluctuation amplitude in the specimen's wall are corresponded to known equations for thermal transmission.
- (4) It can control the temperature fluctuation as superimpose both short and long periods.

After this, sinusoidal temperature fluctuation tests for the stainless steel specimen are going to be carried out based on obtained results.

* New Technology Development Group, Advanced Technology Division, OEC

** Joyo Industry Co. Ltd.

***Tohko Machine Industry Co.

目 次

1. はじめに	-----	1
2. 計測装置の概要	-----	2
3. 試験条件	-----	3
4. 温度計測試験の概要	-----	4
4.1 温度計測試験の実施期間	-----	4
4.2 試験手順	-----	4
4.3 温度の計測方法	-----	5
5. 計測結果	-----	7
5.1 ナトリウム流量	-----	7
5.2 試験体の温度	-----	7
5.2.1 ナトリウム温度の変動状況	-----	8
5.2.2 試験体板厚内の温度	-----	8
5.3 試験装置各部の温度変化	-----	9
5.4 試験条件の安定性	-----	10
5.5 異周波数重畳による温度変動	-----	11
5.6 外表面のひずみ計測結果	-----	11
6. 考 察	-----	12
6.1 ナトリウム温度変動のスペクトル	-----	12
6.2 温度変動振幅の径方向伝達	-----	12
6.3 ナトリウム温度変動の軸方向分布	-----	15
7. おわりに	-----	16
8. 謝 辞	-----	17
9. 参考文献	-----	18

表 目 次

表2.1	熱電対取付け位置一覧表	19
表4.1	温度計試験の経過	20

目 次

図2.1	高サイクル熱疲労試験の温度計測系統図	21
図2.2	構造物熱過渡強度試験施設系統図(温度計測位置図)	22
図2.3	温度計測試験体Ⅰのミキシング構造	23
図2.4	温度計測試験体Ⅰの形状図	24
図2.5	温度計測試験体Ⅰの熱電対施工状況	25
図2.6	温度計測試験体Ⅰの素線式熱電対施工図	26
図2.7	温度計測試験体Ⅱのミキシング構造	27
図2.8	温度計測試験体Ⅱの熱電対施工位置図	28
図5.1	温度計測試験Ⅰにおける試験中のナトリウム流量変化	29
図5.2	温度計測試験Ⅱにおける試験中のナトリウム流量変化	30
図5.3	試験体上流部(TS1)でのナトリウム温度の変動状況	31
図5.4	試験体上流部(TS8)でのナトリウム温度の変動状況	32
図5.5	ナトリウム温度の周方向分布	33
図5.6	各軸方向位置でのナトリウム温度の履歴	34
図5.7	温度変動振幅の軸方向分布	35
図5.8	上流部(TS1)における径方向各位置の温度変動状況	36
図5.9	下流部(TS8)における径方向各位置の温度変動状況	37
図5.10	上流部(TS1)における最高/最低温度の径方向分布	38
図5.11	下流部(TS8)における最高/最低温度の径方向分布	39
図5.12	温度変動振幅の径方向分布	40
図5.13	試験体上下流部の温度計測結果(周期2秒)	41
図5.14	試験体上下流部の温度計測結果(周期10秒)	42
図5.15	試験体上下流部の温度計測結果(周期40秒)	43
図5.16	TTSループ内各部の温度変動状況	44
図5.17	ナトリウム流量の安定状況	45
図5.18	試験体内ナトリウム温度の安定状況	45
図5.19	ヘッドタンク液位の自動調整状況	45
図5.20	異周波数温度変動の重畳制御例	46
図5.21	外面軸方向ひずみの計測結果	47
図5.22	外面周方向ひずみの計測結果	48
図6.1	上流部(TS1)でのナトリウム温度変動のスペクトル	49
図6.2	下流部(TS8)でのナトリウム温度変動のスペクトル	50

図6.3	ナトリウム温度変動ひずみ率の周方向分布	51
図6.4	ナトリウム温度変動ひずみ率の周波数依存	51
図6.5	板厚内の温度変動振幅の分布	52
図6.6	温度変動の周期と振幅の関係	52
図6.7	対数温度変動振幅比の分布	53
図6.8	位相遅れの分布	54
図6.9	ナトリウム中の対数温度変動振幅比の分布	55
図6.10	径方向温度の推測結果Ⅰ	56
図6.11	径方向温度の推測結果Ⅱ	56
図6.12	軸方向温度振幅勾配の周波数依存	57

1. はじめに

構造物熱過渡強度試験施設(TTS: Thermal Transient test facility for Structure)に設置された高サイクル熱疲労試験装置(SPECTRA: Sodium temperature Controlled Thermal Fatigue test equipment)を用いて温度計測試験を行った。高サイクル熱疲労試験は、ナトリウム配管合流部等に生じるサーマルストライピング現象が構造物に与える影響を解明するための基礎的データを収集することを目的に実施するものである。このため、試験データを評価する上では、試験体内の温度を詳細に把握する必要がある。しかし、試験体に熱電対を施工して試験を実施した場合、熱電対の施工部からき裂が発生する恐れがある。そこで、強度試験の前に熱電対を試験体内外に多数施工した専用の試験体を製作して試験体温度を詳細に計測する温度計測試験を実施し、そのデータを強度試験における結果の評価に使用することとした。

SPECTRAでは、2001年9月から2002年12月までの間にミキシング部の構造を改良して調整試験と温度計測試験を合計5回実施し、温度振幅200℃、温度変動周期2秒～40秒の正弦波状温度変動データを取得した。また、温度計測試験では、試験体温度に加えてナトリウムループ全体の温度も詳細に計測した。ここでは、計測された温度変動挙動及びその結果と既存の計算式による予測との比較検討について報告する。

なお、今後、温度計測試験で得られたデータに基づいて強度試験体による高サイクル熱疲労試験を実施する。

2. 計測装置の概要

温度の計測は、試験部に取り付けた熱電対に加え、試験装置の制御・監視用熱電対の信号についても補償導線の途中端子で分岐して行った。温度の信号はシグナルコンディショナを介してデータ収録装置で収録した。温度以外のナトリウム液位、ナトリウム流量等についても、制御・監視装置のアナログ信号を分岐して温度と同時に収録した。図 2.1 に計測装置の系統図を示す。本温度計測試験に使用した主要な機器は以下の通りである。

- ・試験装置

 - SPECTRA (TTS 内に設置) ⁽¹⁾ : 図 2.2 参照

 - 試験体の設置方法：水平横置き

 - 試験体寸法：外径 89.1mm, 内径 66.9mm, 肉厚 11.1mm, 全長 1600mm

- ・温度計測試験体 I

 - ミキシング構造：図 2.3 参照

 - 熱電対施工状況：図 2.4, 図 2.5 及び図 2.6 参照

 - 試験体材質：316 FR ステンレス鋼

 - 熱電対施工深さ実測値：表 2.1 参照

- ・温度計測試験体 II

 - ミキシング構造：図 2.7 参照

 - 熱電対施工状況：図 2.8 参照

 - 試験体材質：SUS304TP ステンレス鋼

- ・試験体内温度計測用熱電対仕様

 - 種類：JIS K クラス 1(0.4 級) 接地型

 - シース：外径 1mm, 先端部厚さ 0.2mm, 材質 SUS316

- ・試験部外面温度計測用熱電対仕様

 - 種類：JIS K クラス 1(0.4 級) 素線型

 - 素線外径：0.32mm

 - 被覆材：セラミック系長繊維 2 重被覆

- ・シグナルコンディショナ

 - エムティティ社製 MS2301 型

 - K 用 0-800℃ → 0-10V

- ・データ収録装置

 - 横河電機社製 WE7000 型

 - チャンネル数：10 チャンネル×10 ユニット

 - AD 変換器分解能：16 ビット

 - サンプリング間隔：≤10 μ 秒/チャンネル

3. 試験条件

温度計測試験における主要な試験条件は以下のとおりである。なお、詳細については既報の文献(1)に記載されている。

- (1) 試験体上流部目標温度変動振幅：200℃
- (2) 温度変動波形：正弦波状波形，(2周波数重畳波形)
- (3) 試験体平均温度：425℃
- (4) 温度変動周期：2秒，5秒，10秒，20秒，40秒
ただし，3秒，4秒についても試験体内のデータを収録した。
- (5) 入口ナトリウム温度：高温側 600℃，低温側 250℃
ただし，周期2秒は 610℃/240℃での試験も実施。
- (6) 平均ナトリウム流量：高温側 150L/分，低温側 150L/分
合計 300L/分
- (7) 観察セル内温度：425℃

4. 温度計測試験の概要

温度計測試験は、試験装置の製作に伴う検収試験とその後の調整試験に伴って合計5回実施した。ここでは、強度試験の参照データを取得した2回の試験を中心に、これらの試験の概略を示す。

4.1 温度計測試験の実施期間

温度計測試験は、2001年9月の試験装置改造竣工時に加えて、2001年12月、2002年3月、2002年7月及び2002年12月に実施した。その間に温度計測用熱電対の施工方法やミキシング構造の改良を行い、試験装置の最適化を図った。そして、2002年7月に試験体板厚内の温度を詳細に計測し、半径方向の温度挙動を把握した(以下「温度計測試験Ⅰ」という)。その後、2002年9月に行った強度試験において、ミキシング部での低温ナトリウムの高温側への逆流の影響が大きいことが分かったので、ミキシング構造を改良して2002年12月に再度温度計測試験を行い、ナトリウム温度変動の再現性があることを確認した(以下「温度計測試験Ⅱ」という)。この改良により、そこでの流動抵抗が緩和されて、特に高周波数領域の温度制御が容易になった。この間の経過を表4.1に示す。表に示すように2002年12月の試験では、試験体材質をそれまで使用してきた316FRからSUS304TPに変更した。しかし、両者の熱伝導率、比熱及び密度の違いは数%以内であり⁽²⁾、試験体材質を変更したことによる伝熱特性に与える影響は無視することができる。

4.2 試験手順

温度計測試験の概略要領を以下に記載する。

試験に先立って、ナトリウム加熱器や冷却器を調節して高温側ナトリウム温度を600℃、低温側ナトリウム温度を250℃に調整した。また、試験体前後の流量調節弁を調節して、高温側と低温側のナトリウム配管系統の流動抵抗の整合を取った。さらに、ナトリウム駆動用電磁ポンプの制御装置の定数テーブルを調整した。なお、これらの設定値は、試験装置製作時にメーカーから取得した最適値を参考にして決定した。

温度計測試験においては、温度変動周期ごとに電磁ポンプ用インバータ制御装置の印加電圧波形及び流量変動幅を調節し、温度及びナトリウム流量の変化状況等を確認しながら試験を繰り返して最適化を図った。データの収録は、温度変動条件を調整しながら、温度変動周期ごとに最適と思われる温度変動が得られたときに数サイクル分に亘って行った。

温度計測試験を通した概略手順は以下の通りである。

- (1) 試験装置の昇温、ナトリウムの充填・循環、再昇温等により規定の温度でナトリウムを循環させる。
- (2) 試運転で取得したデータをもとにナトリウム流量調節弁の開度を調節する。

- (3) ナトリウムを一定割合で混合させながら、高温ナトリウム加熱器の出力と空冷ナトリウム冷却器の送風機ダンパの開度を調節し、試験体入り口におけるナトリウム温度が、高温側 600℃、低温側 250℃となるようにしてナトリウムループ全体を安定させる。
- (4) 試験する温度変動周期とナトリウム流量の変動振幅を制御装置に設定する。
- (5) ナトリウム温度が正弦波状に変動し、なお且つ高温ナトリウムと低温ナトリウムの和が常に等しくなるように電磁ポンプ用制御装置の出力電圧波形を設定する。
- (6) 高温と低温のナトリウム流量を変動させる温度変動運転を行い、温度変動及びナトリウムの流動状況等のデータを収録する。
- (7) 数サイクルの運転後、温度変動運転を停止して一定流量での混合運転に戻す。
- (8) 収録されたデータにより目標の試験条件に合致しているかどうかを確認する。
- (9) 目標温度条件に合致していた場合は、同一条件で再度温度変動運転を行って、その温度変動周期におけるリファレンスデータを収録する。目標に合致していない場合は、ナトリウム変動振幅、電磁ポンプ用制御装置の出力電圧波形を再調整して(5)からの手順を繰り返す。
- (10) 温度変動周期を変更し、上記(5)～(9)により各温度変動周期における最適な条件によるデータを収録するとともに、そのときの試験装置の状態を記録する。

なお、試験中は常に各電磁ポンプ出口のナトリウム流量を監視し、流量がゼロ以下に下がらないように注意した。これは、低温配管への高温ナトリウムの流入、またはその逆の場合、入り口配管に大きな熱応力を発生する恐れがあるためであり、実際の調整運転中、短周期条件では逆流が発生し易い傾向があった。

4.3 温度の計測方法

温度の計測は、図 2.4 及び図 2.8 に示すような試験体に多数の熱電対を取付けた温度計測試験体を製作し、試験体の上流側から 200mm ごとに TS1 から TS8 までを決め、その近傍の断面に集中して熱電対を取り付けて行った。TS1 の位置はミキシング構造出口の多孔板から 450mm の位置である。ただし、実際は、温度計測試験 I では上記の図 2.4 及び図 2.5 に示すように TS1 と TS8 の詳細計測に加えて TS2 及び TS5 におけるナトリウム中温度の計測を行い、温度計測試験 II では図 2.8 に示すように TS1 と TS8 のナトリウム中の温度のみを計測した。試験終了後、温度計測試験体 I をワイヤーカット(放電加工)によって切断して計測した熱電対用細孔先端の径方向位置は表 2.1 の通りであった。板厚内及びナトリウム中の温度を計測したシース熱電対は、外径 1.0mm の接地式熱電対であり、応答性を改善するため先端部の肉厚を 0.2mm に仕上げたものである。外表面の温度は、シース熱電対を外表面に接触させたものと、素線式熱電対を試験体外表面に溶接したものによって計測した。素線式熱電対は、細い素線を使用して取付け方法を正しく行えば原理的に計測の時定数が極めて小さく、雰囲気の影響も無視できる利点を持っている。

温度の計測及びデータ収録は、図 2.1 のブロック図に示す機器構成で行った。主要部の

機能は以下の通りである。シグナルコンディショナは、熱電対の微弱な熱起電力を増幅して計測点の温度に対応した電圧に変換するものであり、0～800℃の熱電対の起電力を0～10Vに変換する。データ収録装置は、シグナルコンディショナの出力信号をサンプリングしながらデジタル信号に変換し、順次ハードディスクに収録するものである。

一般に、正弦波状に変化する電圧の最大値を計測する場合において、計測値が真の最大値に対して1%以内となるように計測するためには1周期に対して約20サンプルの計測を行う必要がある。また、半分の約10サンプルでは最大で5%の計測値のずれが生じる場合がある。これらのことを勘案して、本試験における温度データのサンプリング間隔は0.05秒とした。このサンプリング間隔であれば、本温度計測試験における最小周期2秒の温度変動を確実に捕らえることができる。また、これは、波形のひずみを評価する上で必要となる高調波成分に対しても十分なサンプリング間隔である。

一方、温度データ収録装置に搭載されているA/D変換器のサンプリング間隔は10 μ 秒/サンプルであり、10チャンネルで1ユニットとなっている。各ユニットに対しては同時にサンプリング開始信号が出ているので、チャンネル間の時間差は最大で100 μ 秒である。このサンプリング時間差はデータ収録間隔の0.2%であり、本温度計測試験においては全チャンネル同時にデータを収録しているものと見なすことができる。

5. 計測結果

第4章で述べたように、温度計測試験は試験装置各部を改良しながら繰返して実施した。ここでは、2002年7月にナトリウム温度と板厚内温度を計測した温度計測試験Ⅰ、その後ミキシング構造改良した後の2002年12月にナトリウム温度を計測した温度計測試験Ⅱの結果について報告する。温度計測試験Ⅰは、試験体に多数の熱電対を施工し、試験体板厚内の温度変動を詳細に把握することを目的に実施した試験である。温度計測試験Ⅱは、ミキシング構造改良後の試験条件を温度計測試験Ⅰと同等に調整することを目的に実施した試験である。

5.1 ナトリウム流量

温度計測試験Ⅰにおける各温度変動周期での3サイクル分のナトリウム流量の変動状況を図5.1に示す。各グラフの横軸(X軸)の原点は、高温と低温のナトリウム流量の差の最大値と最小値の中央値を増加しながら横切る時点とした。本報告書の横軸が時間のグラフは、全て同様に原点を定めた。図5.1において、高温Naと低温Naの流量は各系統の流量であるが、試験体内は高温Naと低温Naの密度を考慮して求めた試験体内部を流れるナトリウム流量である。

温度計測試験Ⅰに使用したミキシング部の構造(図2.3参照)では低温ナトリウムの流動抵抗が大きく、試験体内の温度を正弦波状に変化させるために、短周期ではナトリウムポンプの制御信号を台形状にしていた。その結果、短周期の試験で試験体内ナトリウム流量が変動し、周期2秒では目標の300L/分に対して最大で385L/分となった。また、平均流量に対する変動幅は周期2秒～周期10秒で約12%であった。

ミキシング構造を改良した後の温度計測試験Ⅱにおける各温度変動周期での3サイクル分のナトリウム流量の変動状況を図5.2に示す。試験体内のナトリウム流量は図5.1と同様にして求めた。試験体内流量は、温度計測試験Ⅰに比べてかなり改善されたものの、周期2秒では333L/分となった。平均流量に対する変動幅は最大で約8%である。なお、全ての周期において高温のナトリウム流量が増加しているときに試験体内ナトリウム流量が増加する傾向が認められるが、これにはナトリウム物性値の温度依存性の影響も含まれている。

5.2 試験体の温度

温度計測試験Ⅰにおいて、試験体板厚内及びナトリウムループ各部の温度を詳細に計測した。また、温度計測試験Ⅱでは、改良されたミキシング構造を使用して、ナトリウムの温度変動が温度計測試験Ⅰと同様になるように調整したときのナトリウムの温度と流量の計測を行った。ここでは、ナトリウム温度及び試験体板厚内の温度変動状況を示す。

5.2.1 ナトリウム温度の変動状況

ナトリウムの温度変動状況は、ミキシング構造を改良した後の状態が重要であることから、温度変動試験Ⅱによって得られた各温度変動周期における試験体内面から 3mm ナトリウム側の温度変動状況を図 5.3 及び図 5.4 に示す。図 5.3 は試験体上流部の TS1 におけるナトリウムの温度変動状況、図 5.4 は試験体下流部の TS8 におけるナトリウムの温度変動状況である。凡例の記号は図 2.8 に示す熱電対の記号と対応しており、記号末尾の A~D が角度 90 度間隔で 0 度~270 度に対応している。TS1 における温度変動は、周期 2 秒と周期 5 秒では若干の乱れが確認できるものの、ほぼ正弦波状の温度変動を示している。TS8 における温度変動は、TS1 に比べて振幅が小さくなるとともに、温度変動の乱れが大きくなっている。この傾向は短周期ほど著しいが、全体としては、ほぼ正弦波状の温度変動波形となっている。

図 5.5 は、ナトリウム温度の最大値及び最小値(4~5 サイクルの平均)の周方向分布を温度変動周期毎に示したものである。また、図 5.5(f) は、図 5.5 (a)~(e) における周方向の温度偏差と周期の関係である。TS1 では周方向温度分布はわずかであるが、TS8 では特に 5 秒以下の短周期で横置きされた試験体の上下に温度差が付く傾向が認められる。しかし、周期 10 秒以上では、温度差は数℃以内に抑えられている。

図 5.6 は温度計測試験Ⅰにおけるナトリウム中温度の試験体軸方向各位置での計測結果である。計測位置は、図 2.4 の通りであり、熱電対はすべて試験体の 0 度位置(上部)に施工されている。温度変動振幅は減衰しながら軸方向に伝達しており、周期 2 秒では 1400mm の間に位相がほぼ反転している。また、上流の温度変動の揺らぎがその下流でも保持されている。

図 5.7 は図 5.6 における各計測位置での最高温度と最低温度の 4~5 サイクル分の平均及び温度振幅の平均の軸方向分布である。何れも軸方向に対してほぼ直線的に変化している。また、温度振幅の軸方向勾配は温度変動周期が短いほど大きくなる傾向が認められる。

5.2.2 試験体板厚内の温度

温度計測試験Ⅰにおけるナトリウム中から試験体外表面までの試験体径方向各位置での温度挙動は図 5.8 及び図 5.9 に示すとおりである。これらの図において、-3mm, 1.5mm, 2.8mm のデータは、周方向に 90 度間隔で計測した結果 4 点分の平均である。温度変動は、外面に向かうにしたがって減衰し、位相が遅れる。

各径方向位置での温度変動の最高温度と最低温度を求めた結果を図 5.10 及び図 5.11 に示す。これらの図において最高温度及び最低温度は 4~5 サイクル分の平均であり、各計測点の径方向位置は実測値である。シグナルコンディショナのゼロ調整不良と思われるデータの上下変動が認められるが、試験体の内面から外面に向かうにしたがって最

高温度と最低温度は対称的な傾向で中間温度に近づいている。温度変動振幅は、図 5.12 に示すように内面近傍で急激に減衰している。変動幅の減衰は、短周期ほど著しい傾向がある。

5.3 試験装置各部の温度変化

試験中の試験装置各部の温度変動状況は、強度試験体を用いた試験を継続的に行えるかどうかを判断する上で重要である。特に、試験体近傍の配管には比較的大きな温度変動が加わる可能性があることから、温度計測試験において、試験体の温度と同時にこれらの配管の外表面温度を計測した。ここでは、強度試験と同様の条件となる温度計測試験Ⅱの結果に基づいて報告する。

図 5.13～図 5.15 は温度変動周期 2 秒、10 秒、40 秒における試験体の上流及び下流の配管表面等の温度履歴である。各グラフの内容は以下の通りである。

(a) ティー配管下部外面温度

高温配管と低温配管の接続ティー配管の側面及び底面の温度であり、ほぼ一定の温度に保持されている。この位置の配管内には高温ナトリウムが流れるが、温度の変動が認められないので、低温ナトリウムの逆流等はないと考えることができる。

(b) フルドヘッド部外面温度

上記ティー配管上部の外面温度である。高温ナトリウムが流れる場所であるが、上部から導入されている低温ナトリウム配管からの伝熱の影響を受けて低温溜まりが生じている。そこでの温度はナトリウムの流動に合わせて変動しており、長周期ほど変動が大きくなっている。また、周方向にも若干の分布を持っており、高温ナトリウムが当たる位置の温度が高くなっている。

(c) Y ピース上流側溶接部外面温度

ティー配管と Y ピースとの溶接線の Y ピース側の外面温度である。低温配管によって冷やされたナトリウム及びフルドヘッド部の低温ナトリウム溜まりの影響により上面側の温度が少し低くなる傾向があるものの、大きな温度変動は認められない。

(d) 噴流ノズル部外面温度

低温ナトリウムの噴流孔に相当する位置の外面温度である。噴流部には、2 枚の熱遮蔽管とその外側のナトリウム層及び外側配管があり、これらによって噴流に伴う大きな温度変動を緩和している。その結果、周期 2 秒では噴流の影響があまり認められないが、長周期になるに従って変動が大きくなっている。また、熱遮蔽管と外側配管との間の停留ナトリウムの成層化及び高温と低温のナトリウムの密度差に伴う流動の偏り等の影響で上面の温度が高くなる傾向がある。また、底面側の温度変動の方が大きくなっている。この温度変動は周期 40 秒の場合 200℃を超えるが、この部分の外側配管の肉厚は薄くしており、試験体よりも先に破損することがないように考慮されている。

(e) 試験体入口配管外面温度

ミキシング部多孔板と試験体との接続配管の外面温度である。各周方向位置での温度変動はほぼ一様に変化しており、ミキシング構造と多孔板により高温と低温のナトリウムが完全に混合されていることが分かる。

(f) 下流側配管温度

試験体から下流側の主要位置での温度計測結果である。短周期ではスタティックミキサの入口部で既に温度変動は減衰しているが、長周期ではバッファタンク(BFT)入口まで比較的大きな温度変動が認められる。しかし、その場合でもバッファタンクの下流側では温度変動はきわめて小さくなっており、バッファタンクの温度変動緩和効果が認められる。周期 20 秒以下の短周期の温度変動において温度変動が認められるのはバッファタンク入口までである。周期 40 秒におけるナトリウム温度の脈動はバッファタンクを出た後も少し残るが、さらにミキシングタンクに入って温度変動は吸収されるので、それ以後の配管等に温度変動の影響を与えることはない。

ナトリウム温度の変動は変動周期が長いほど下流まで残る。そこで温度計測試験で最も長周期の周期 40 秒における試験時のバッファタンク(BFT)入口からヘッドタンク(HET, CET)までの温度変動状況を図 5.16 に示す。温度変動は、高温ループ側及び低温ループ側ともにミキシングタンク(HMT, CMT)以降には認められない。高温側ミキシングタンク内の温度が揺らいでいる理由は、600℃のナトリウムを約 100L/分の流量でバイパスラインを通して直接HMT内に流しているためである。何れにしてもそれぞれのミキシングタンク内で完全に温度変動は取り除かれ、低温ループはクーラー(C1)、高温ループは高温加熱器(H1)に入る。低温ループのナトリウムはさらに低温加熱器(H2)を通り、高温及び低温のナトリウムは規定の温度に調節されてそれぞれのヘッドタンクに入る。ヘッドタンクでは、温度は完全に均一化されている。

5. 4 試験条件の安定性

試験体にき裂を発生させる強度試験は、長期間に亘って安定的に試験を継続する必要がある。ここで問題となるのは、試験体入口で混合する前の高温と低温のナトリウムの温度、電磁ポンプの吐出性能、ヘッドタンク液位である。

試験体入口におけるナトリウム温度は、加熱器と冷却器を自動制御又は手動制御することによって、目標温度の上下 2℃以内に保持できることが温度計測試験中に確認された。電磁ポンプの吐出性能の安定性は、最も激しい変動を求められる周期 2 秒の条件で温度計測試験Ⅱにおいて確認した。周期 2 秒での連続運転を約 5 時間に亘って実施したが、図 5.17 及び図 5.18 に示すように、ナトリウムの流量及び温度変動に変化は認められず、安定した運転が可能であることを確認した。高温及び低温用ヘッドタンク液位は、低温系ループへのナトリウムの戻り流量に依存して変動する。このため、高温用ヘッドタンク(HET)液位と低温用ヘッドタンク(CET)液位との差が大きくなった場合に戻り配管に設置されて

いる流量調節弁(FCV-107)の開度を自動調節する機能を設けている。図 5.19 は高温と低温のナトリウムを合流し続けた時のヘッドタンク液位の 1 日の変動状況である。図中に記されている「戻り弁 閉」と記された区間は、液位調節のために戻り弁を 1%閉じたことを示している。戻り弁の開閉にかかわらず、単純に合流を継続している間も液位は変動している。液位が平衡している状況下では、わずかな状況の変化が液位変動に現れるようである。しかし、戻り配管の流量調節弁の開度を制御することで、液位を試験条件に悪影響を与えない範囲に維持することは可能である。

5.5 異周波数重畳による温度変動

図 5.20 は、温度変動周期 40 秒と 4 秒との二つの周波数を重畳させて、ピーク間温度振幅を 200℃に調節した例である。図 5.20(a)に示すように電磁ポンプの制御信号を調節することにより、(b)に示すナトリウム流量の制御が可能である。また、このときの合計ナトリウム流量はほぼ一定に制御することが可能である。図 5.20(c), (d)は TS1 と TS8 におけるナトリウムの温度変動状況である。また、図 5.20(e)は、温度変動のスペクトルであり、0.025Hz 及び 0.25Hz の位置にピークがあり、他には有意なピークは認められない。TS1 のピーク(片側振幅)は、0.025Hz が 72.2℃、0.25Hz が 24.7℃である。なお、装置の性能上、重畳する周波数の組み合わせは、規則性を守るとすれば基本波の 2 倍、4 倍、5 倍及び 10 倍に限られる。

5.6 外表面のひずみ計測結果

温度計測試験Ⅱにおいて、TS1 から下流へ 150mm の位置の試験体外面にカプセル型ひずみゲージを取り付けて試験途中のひずみを計測した。動ひずみ計の出力信号は温度計測用のデータ収録装置で温度と同時に収録した。収録された値に対してゲージの温度特性値による補正を加えてひずみを求めた。その結果を図 5.21 及び図 5.22 に示す。図 5.21 は軸方向ひずみ、図 5.22 は周方向ひずみの計測結果であり、参考として同一のグラフ内に TS1 のナトリウム中温度と表面温度を示している。計測結果に基づくひずみ範囲と文献(3)に基づいて温度計測試験Ⅰにおける試験体内面の温度計測結果から外表面のひずみ範囲を計算した結果を図 5.21 及び図 5.22 のグラフ(f)に示す。短周期では外面近傍、長周期では板厚全体にわたって板厚保方向の温度差が小さくなるので、外表面のひずみ範囲は、温度変動周期が短い場合と長い場合に小さくなり、肉厚に対して特定の周期で最大ひずみ振幅を示すことが予想できる。計測結果は計算結果よりも少し大きいひずみ範囲となったが、計測結果の周期依存の傾向はほぼ一致している。

6. 考察

本温度計測試験によって得られた温度の周期変動熱伝達の特徴と既存の関係式⁽³⁾⁽⁵⁾との比較を行い、計測結果の妥当性を確認する。

6.1 ナトリウム温度変動のスペクトル

試験装置の調整においては可能な限りナトリウムの温度変動が正弦波となるように電磁ポンプの制御信号を調節したが、計測された温度変動にはナトリウムの流動に伴う乱れを含んでいる。そこで、温度計測結果の周波数成分を確認するため、試験体内面から3mmナトリウム側でのナトリウム温度の計測結果についてスペクトル分析を行った。その結果を図6.1及び図6.2に示す。図6.1は試験体上流部のTS1におけるものであり、図6.2は試験体下流部のTS8におけるナトリウム温度変動のスペクトルである。全体に第2、第3調波が少し認められ、その振幅は最大で5~6℃である。また、短周期ほど高調波が大きい傾向があり、長周期ほど高次までの周波数成分が認められる。

基本波に対する高調波の程度を比較するため、電気工学で使用されている交流波形のひずみ率の適用を試みた。交流波形のひずみ率は、基本波の実効値に対する高調波の実効値の総和で表される⁽⁴⁾。

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} A_n^2}{2}}}{A_1 / \sqrt{2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} A_n^2}{A_1^2}} \quad (6.1)$$

ここで、 δ はひずみ率、 A は振幅である。図6.3はひずみ率の分布である。この図においては、高調波成分として基本波以外のスペクトルを全て使用した。何れの周期においてもTS1よりもTS8でひずみ率が高い傾向を示している。また、TS1では、各周方向角度でほとんど一定のひずみ率であるが、TS8では0度と180度で少し大きくなる傾向が認められる。図6.4は、温度変動の周波数(平方根)とひずみ率の関係である。ひずみ率は周波数の平方根と直線的な相関があるように見える。ひずみ率にこのような規則性が現れるということは人為的以外の要因作用が存在することを示している。

6.2 温度変動振幅の径方向伝達

半無限固体に対して、その表面で $T = A \sin(\omega t + \phi)$ の温度変動があるとき、固体内へ伝わる温度応答は以下の式で表すことができる⁽⁵⁾。

$$T(x,t) = \frac{Ah^*}{\sqrt{(h^*+k)^2+k^2}} \exp(-kx) \cdot \sin(\omega t + \phi - \varepsilon - kx) \quad (6.2)$$

$$\text{ただし, } h^* = h/\lambda, \quad \varepsilon = \tan^{-1} \left[\frac{k}{(h^*+k)} \right], \quad k = \sqrt{\omega/2a}$$

ここで、 A は温度変動振幅、 ω は温度変動の角速度、 t は時間、 ϕ は初期位相、 h は固体表面での熱伝達率、 a は固体の温度伝導度、 λ は固体の熱伝導率、 x は固体表面からの距離である。

温度計測試験 I における試験体板厚内の温度変動振幅の分布を図 6.5 に示す。温度変動振幅は、内面近傍で大きく変化しており、外面側及びナトリウム中では変化が少なくなる傾向がある。また、変動周期による依存性も認められる。図 6.6 は温度変動の周期と振幅の関係を示したものであり、この図においても温度変動振幅の径方向距離及び温度変動周期に対して依存性を確認することができる。

図 6.5 及び図 6.6 における内面の温度変動振幅を基準として規格化した結果を図 6.7 に示す。図 6.7 (a) は径方向位置と温度変動比の対数との関係であり、板厚内の変化はほぼゼロを通る直線で表すことができる。また、図 6.7 (b) は温度変動周波数の平方根と規格化した温度変動の対数との関係である。これもゼロを通る直線で表すことができるとすれば、これらのグラフは次の式で表される。

$$\ln \left(\frac{\Delta T_{xs}}{\Delta T_{os}} \right) = -x \sqrt{c_s \cdot f} \quad (6.3)$$

ここで、 ΔT_{xs} は任意の板厚内位置と任意の周波数における温度振幅、 ΔT_{os} は各周波数における内表面の温度振幅、 c_s は定数である。(6.2) 式を変形すると温度振幅を周波数と板厚内位置の関数として求める次の式が得られる。

$$\Delta T_{xs} = \Delta T_{os} \cdot \exp(-x \sqrt{c_s \cdot f}) \quad (6.4)$$

(6.3) 式は、 $\sqrt{c_s \cdot f} = \sqrt{\omega/2a} = k$ とすれば、(6.2) 式に示す構造物中の温度変動振幅の伝達式と一致している。

径方向への温度変動振幅の伝播の時間的な遅れを図 6.8(a) に示す。図 6.8(b) は、温度変動の時間遅れを位相差で示したものである。さらに、図 6.8(c) は温度変動周波数の平方根と遅れ位相差との関係を示したものである。ここでは、相関が直線状になるように横軸を周波数の平方根とした。図 6.8(b), (c) から、温度変動の位相遅れは周波数の平方根と板厚方向距離に比例しているように見える。特に、図 6.8(b) のグラフでは板厚内での位相遅れがほぼ直線的となっており、その勾配と温度変動周波数の関係は図 6.8(d) のとおりである。このグラフにおいて横軸は周波数の平方根であり、近似曲線はゼロを通る直線で表すことができる。これは、位相遅れが内面からの距離と温度変動周波数の平方根と

の積に比例することを示しており、(6.2)式の固体内の位相遅れ成分 kx に相当していると考えることができる。

図 6.9 は、ナトリウム中の温度について、内面温度を基準とした温度変動振幅の比の対数の分布を示したものであり、図 6.9(a)は径方向距離の平方根、図 6.9(b)は周波数の平方根が横軸となっている。グラフはほぼゼロを通る直線となっているので、以下の式で表すことができる。

$$\ln\left(\frac{\Delta T_{xn}}{\Delta T_{on}}\right) = c_n \sqrt{fx} \quad (6.5)$$

ここで、 ΔT_{xn} はナトリウム中の温度振幅、 ΔT_{on} は配管内表面の温度振幅、 c_n は定数であり、 x は配管内表面からの距離である。(6.5)式より、配管内表面の温度振幅が既知であれば、ナトリウム中の温度振幅は次の式で求めることができる。

$$\Delta T_{xn} = \Delta T_{on} \cdot \exp(c_n \sqrt{fx}) \quad (6.6)$$

(6.2)式においては、流体から構造物表面への温度応答を距離の関数として示していないので対比はできないが、 c_n の値を定量化できれば(6.6)式により流体と構造物との境界層領域の温度変動振幅を構造物の温度変動振幅から求めることができる。ちなみに図 6.9 に示すグラフの勾配の分布から求めた c_n の値は約 0.51 である。

以上の関係式を用いて、試験体内面の温度変動振幅が与えられたときの板厚内温度振幅を推測することができる。その妥当性を確認するため、温度変動周期 2 秒、10 秒、40 秒の温度計測試験のデータと上記の式を使って推測した結果(推測 I)との比較を図 6.10 に示す。これらの計算は、SUS304 鋼の 425℃における温度変動率を 4.54(mm^2/s)として行った。また、横軸が負の領域はナトリウム中を示している。図 6.10(a)(b)において、周期 2 秒と周期 10 秒の推測結果は計測結果と比較的良く一致しているものの、周期 40 秒では外面側の推測結果が計測結果と離れている。図には示されていないが、長周期の外面温度の推測結果が実際の計測結果と一致しない傾向は周期 20 秒でも観察された。これは、(6.2)式が半無限固体内の温度応答を想定しており、板厚が温度変動波長に対して無視できない場合には適用できないことを示している。図 6.8(b)に示すように、内面を基準としたときの周期 10 秒における外面の位相遅れは 3.43(rad)であり、この周期では(6.4)式による推測が可能であることから、本試験における(6.2)式の適用可能範囲は $kL \geq \pi$ をひとつの目安として推奨することができる。ただし、 L は試験体の板厚である。図 6.10 において、ナトリウム中の温度変動振幅は(6.6)式を用いて推測した。多少の誤差はあるものの、ナトリウム中の温度変動振幅についても概ね一致している。

有限な板内部の温度伝導関数は以下のように表すことができる⁽³⁾。

$$D = \left(\frac{\Delta T_{xs}}{\Delta T_{os}}\right) = \frac{\cosh(FX)\cos(FX) + j\sinh(FX)\sin(FX)}{\cosh(F)\cos(F) + j\sinh(F)\sin(F)} \quad (6.7)$$

$$\text{ただし, } F = \sqrt{\pi f^*}, \quad X = (1 - x^*/L), \quad j = \sqrt{-1}$$

ここで、 $f^* = fL^2/a$ は無次元周波数、 $x^* = x/L$ は構造物中の無次元深さ、 L は構造物の板厚である。(6.7)式に基づいて試験体内面の温度変動振幅から板厚内の温度変動振幅を推測した結果は図 6.11 の通りであり、短周期から長周期まで良く一致している。

6.3 ナトリウム温度変動の軸方向分布

温度変動振幅の軸方向勾配と周波数との関係は図 6.12(a)に示す通りである。この図には2回の温度計測試験の結果を示しており、累乗近似式の累乗数はどちらも同程度の数値となっている。また、全体に温度計測試験Ⅱの勾配の方が大きい傾向を示している。温度計測試験Ⅱにおいてはナトリウム流量と TS1 における温度振幅が温度計測試験Ⅰと合致するように各部を調節したので、両試験における挙動は同一となるはずである。ミキシング構造の変更、試験体材質、試験実施時期、温度変動波形やナトリウム流量の微妙な違い等が影響した可能性があるが、その原因は特定できていない。図 6.12(b)に2回の試験の結果を合成した周波数の平方根と勾配との相関を示す。図 6.12(b)に示すように、ナトリウム温度変動の減衰には周波数依存性が認められる。温度変動振幅の軸方向勾配が周波数の平方根に比例することから、ナトリウム温度の変動振幅は図に示す近似曲線を用いて以下のように表すことができる。

$$\Delta T_{nz} = \Delta T_{no} - (69.14\sqrt{f} + 22.02)z \quad (6.7)$$

ここで、 ΔT_{nz} は ΔT_{no} から下流へ $z(m)$ の位置におけるナトリウムの温度変動振幅である。

7. おわりに

構造物熱過渡強度試験施設内に設置された SPECTRA を用いて温度計測試験を行った結果、以下の通り高サイクル熱疲労試験が可能であることを確認し、強度試験体を用いた試験及び解析を行う上で有用なデータを得ることができた。

- (1) ナトリウムの温度変動振幅 200℃、温度変動周期 2 秒～40 秒の目標とする試験条件において、試験体入口部でのナトリウム温度を正弦波状に変化させることができた(最大ひずみ率が 7.7%/周期 2 秒)。
- (2) 試験中の試験体内ナトリウム流量の変動範囲を目標の 300L/分に対して最大 11%に抑えることができた。
- (3) 試験体近傍の温度変動状況及びナトリウムループ全体の状態に異常な変動はなく、試験体に繰返し温度変動を与えながら長期間の安定運転を行うことが可能である。
- (4) 試験体板厚内の温度振幅の分布は、既知の関係式で表すことができる。
- (5) 試験体軸方向のナトリウム温度振幅の減衰はほぼ直線的であり、その勾配は周波数の平方根に比例する。
- (6) 試験体内のナトリウム温度と試験体内面との境界層の温度振幅の変化は、内面からの距離と温度変動周波数の平方根の指数関数として表すことができる。
- (7) 高温と低温のナトリウムの混合割合を調節することによって、正弦波以外の波形でナトリウム温度を変動させることが可能であり、二つの周波数を重畳させることも可能である。
- (8) 外面にカプセルゲージを取り付けて計測したひずみ変動範囲と変動周期との関係は、温度変動から求めた結果と同様の傾向を示している。

今後、本温度計測試験によって得られたデータに基づいて、一連の高サイクル熱疲労試験を実施する予定である。

8. 謝 辞

本温度計測試験は、構造信頼性グループが進めている高サイクル熱疲労評価法の開発のために実施したものであり、同グループの笠原グループリーダー、川崎副主任研究員及び安藤研究員には試験条件等についてご助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

9. 参考文献

- (1) 長谷部 慎一 他：“高サイクル熱疲労特性に関する試験研究——高サイクル熱疲労試験装置の概要と試験計画——”，JNC TN9400 2003-004, (2003)
- (2) 木村 英隆 他：“FBR 構造材料の物性値測定 —— (その1)各種圧延鋼鉄の物性値測定——”，PNC TN9410 90-094, (1990)
- (3) 笠原 直人 他：“流体温度ゆらぎに対する応力拡大係数の周波数応答関数”
JNC TN9400 2002-047, P8, (2002)
- (4) “電気工学ハンドブック 第6版”，電気学会, P134, (2001)
- (5) “伝熱工学資料 改訂第4版”，日本機械学会, P14, (1986)

表2.1 熱電対取付け位置一覧表

熱電対記号	軸方向位置	周方向位置	径方向計測位置 (公称値)	熱電対位置実測値 (内面基準：mm)
TS1-1A	断面1	0°	ナトリウム中内面から3mm	-2.86
TS1-23B	断面1	90°	ナトリウム中内面から3mm	-2.63
TS1-22C	断面1	180°	ナトリウム中内面から3mm	-2.82
TS1-21D	断面1	270°	ナトリウム中内面から3mm	-2.65
TS1-2C	断面1	180°	ナトリウム中内面から1mm	-0.79
TS1-3A	断面1	0°	試験体内表面	0.00
TS1-4A	断面1	0°	構造物中内面から1.5mm	1.70
TS1-7B	断面1	90°	構造物中内面から1.5mm	1.55
TS1-6C	断面1	180°	構造物中内面から1.5mm	1.71
TS1-5D	断面1	270°	構造物中内面から1.5mm	1.60
TS1-31A	断面1	0°	構造物中内面から2.8mm	2.86
TS1-33B	断面1	90°	構造物中内面から2.8mm	3.05
TS1-8C	断面1	180°	構造物中内面から2.8mm	3.03
TS1-32D	断面1	270°	構造物中内面から2.8mm	2.80
TS1-9A	断面1	0°	構造物中内面から5.5mm	5.45
TS1-10C	断面1	180°	構造物中内面から8.3mm	8.52
TS1-11A	断面1	0°	試験体外表面	
TS2-1A	断面2	0°	ナトリウム中内面から3mm	-2.59
TS5-1A	断面5	0°	ナトリウム中内面から3mm	-2.78
TS8-1A	断面8	0°	ナトリウム中内面から3mm	-2.78
TS8-23B	断面8	90°	ナトリウム中内面から3mm	-3.04
TS8-22C	断面8	180°	ナトリウム中内面から3mm	-2.98
TS8-21D	断面8	270°	ナトリウム中内面から3mm	-2.92
TS8-2C	断面8	180°	ナトリウム中内面から1mm	-1.00
TS8-3A	断面8	0°	試験体内表面	0.00
TS8-4A	断面8	0°	構造物中内面から1.5mm	1.53
TS8-7B	断面8	90°	構造物中内面から1.5mm	1.70
TS8-6C	断面8	180°	構造物中内面から1.5mm	1.36
TS8-5D	断面8	270°	構造物中内面から1.5mm	1.24
TS8-31A	断面8	0°	構造物中内面から2.8mm	2.81
TS8-33B	断面8	90°	構造物中内面から2.8mm	2.98
TS8-8C	断面8	180°	構造物中内面から2.8mm	2.70
TS8-32D	断面8	270°	構造物中内面から2.8mm	2.58
TS8-9A	断面8	0°	構造物中内面から5.5mm	5.54
TS8-10C	断面8	180°	構造物中内面から8.3mm	8.17
TS8-11A	断面8	0°	試験体外表面	

表4.1 温度計測試験の経過

試験実施時期	試験の目的	温度変動振幅	試験体材質	温度計測
2001年9月	SPECTRA製作の検収試験	250℃	316FR ステンレス鋼	試験体板厚内温度 ナトリウム中温度
2001年12月	SPECTRA製作の検収再試験 (熱電対の施工方法, 計測位置精度を改良)	200℃	316FR ステンレス鋼	試験体板厚内温度 ナトリウム中温度
2002年3月	詳細な温度データの取得 試験装置の安定運転確認	200℃	316FR ステンレス鋼	試験体板厚内温度 ナトリウム中温度 主要外表面温度 (試験体前後を含む)
2002年7月	詳細な温度データの再取得 夏季における試験装置の安定運転確認	200℃	316FR ステンレス鋼	試験体板厚内温度 ナトリウム中温度 主要外表面温度 (試験体前後を含む)
2002年9月	316FRステンレス鋼による強度試験 (SPECTRAの性能確認)	250℃	316FR ステンレス鋼	主要外表面温度 (試験体前後を含む)
2002年12月	ミキシング構造改良に伴う再現性確認試験	200℃	SUS 304TP ステンレス鋼	ナトリウム中温度 主要外表面温度 (試験体前後を含む)

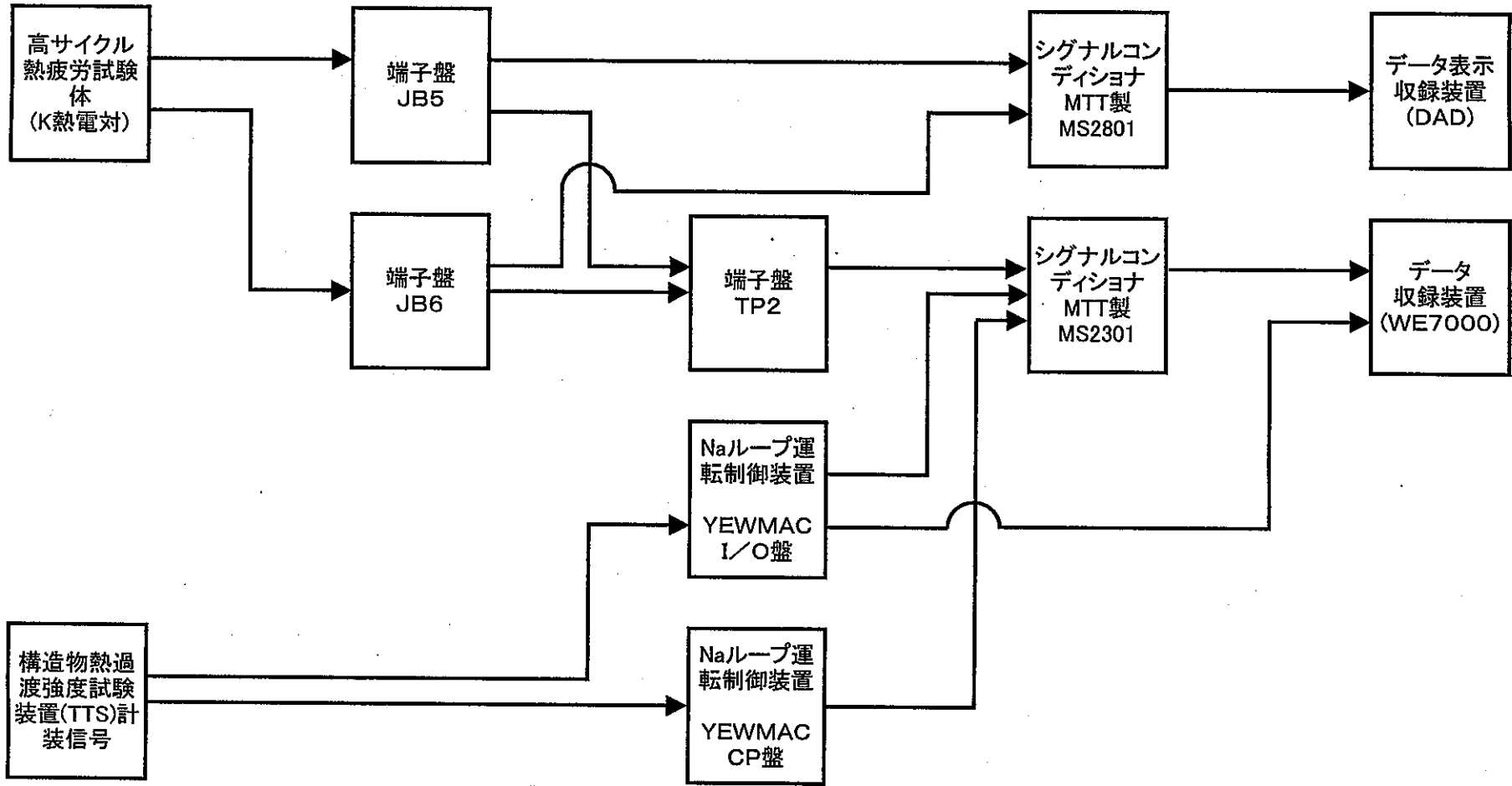


図2.1 高サイクル熱疲労試験の温度計測系統図

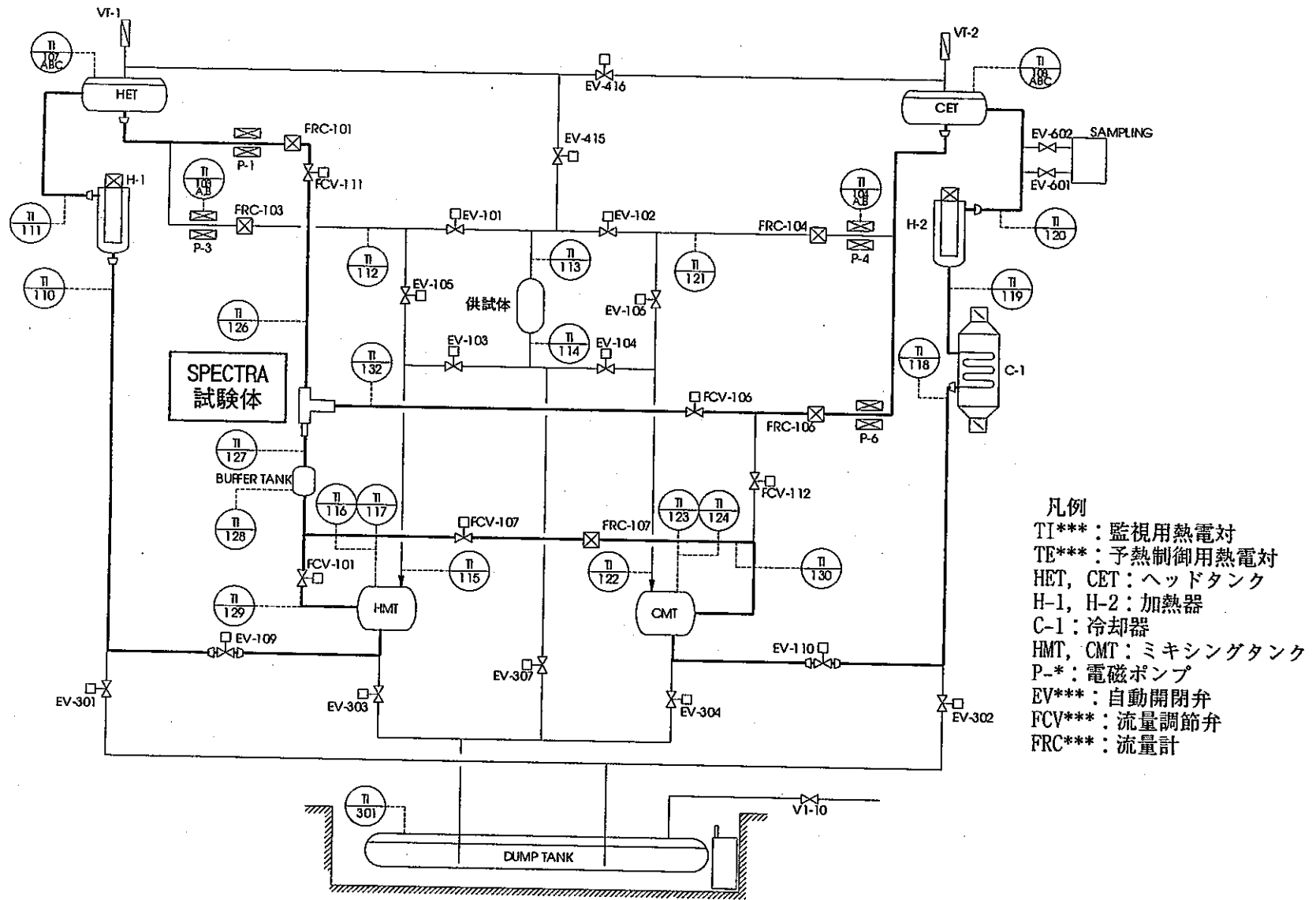


図2.2 構造物熱過渡試験施設(TTS)系統図(温度計測位置図)

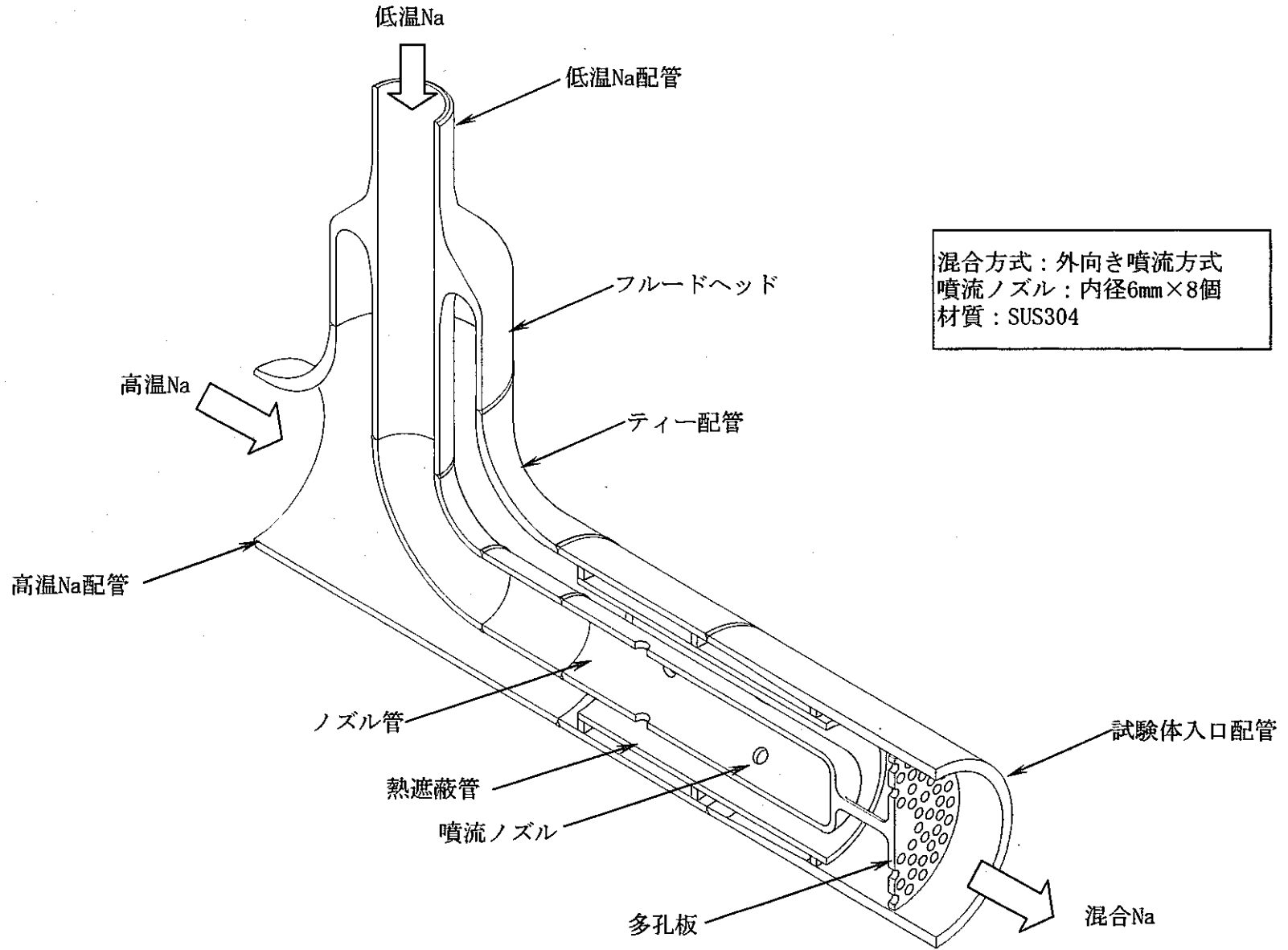
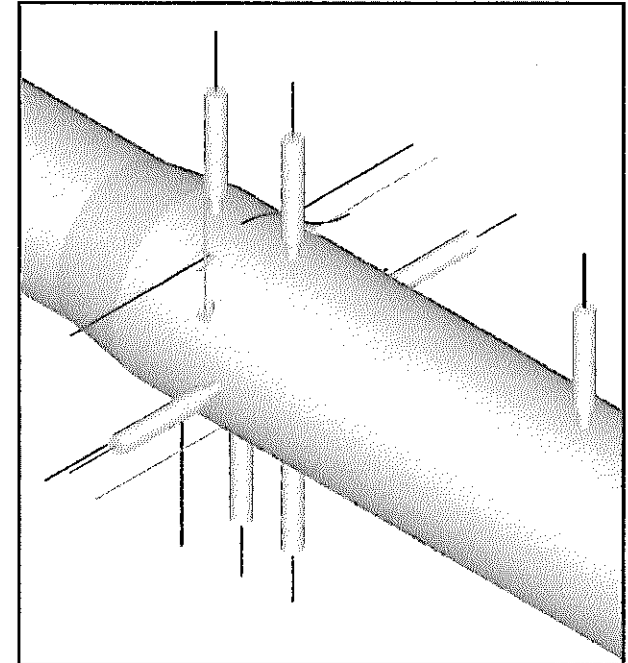
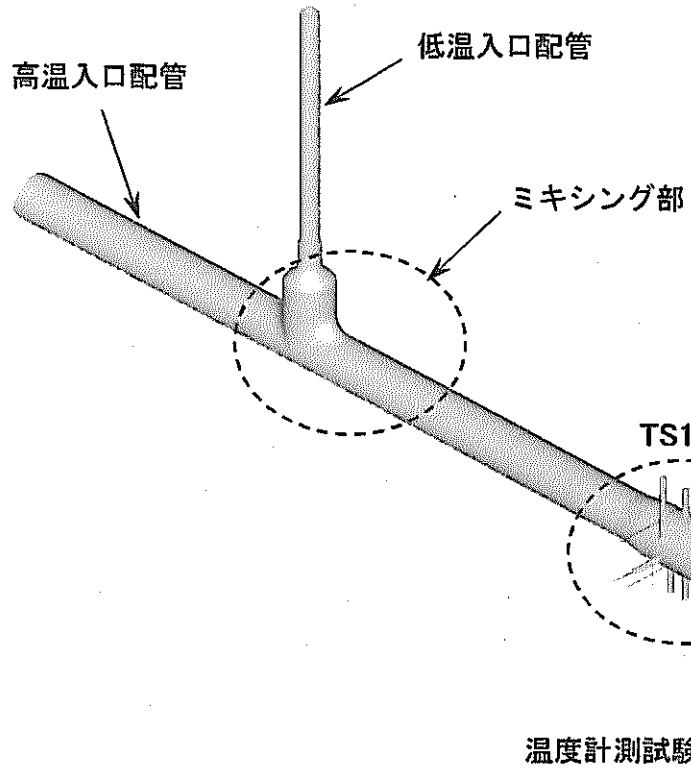


図2.3 温度計測試験体1のミキシング構造



TS1 熱電対施工部拡大図

TS1, TS2, TS5, TS8 : 熱電対施工位置

図2.4 温度計試験体 I の形状図

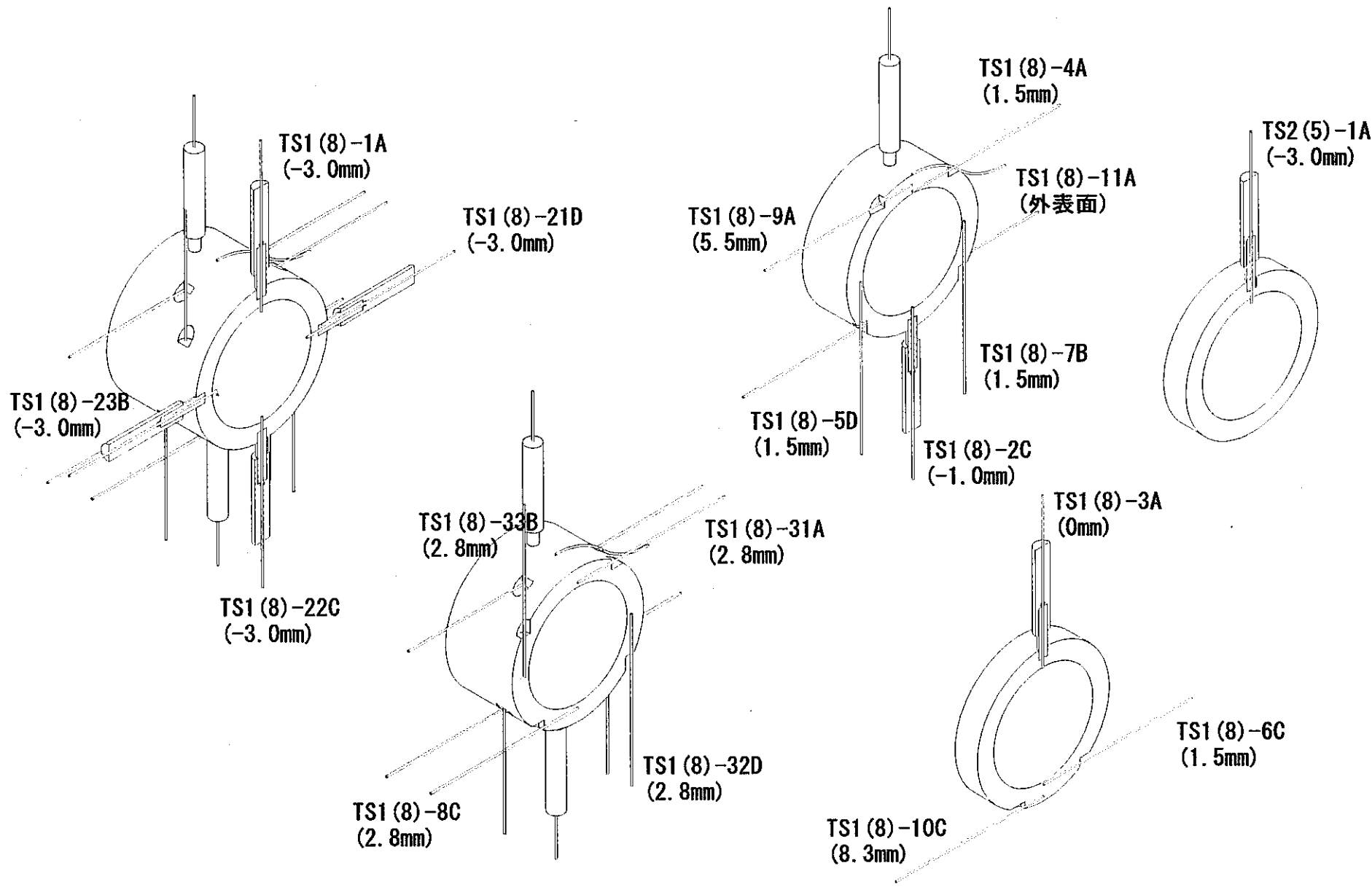


図2.5 温度計試験体 I の熱電対施工状況

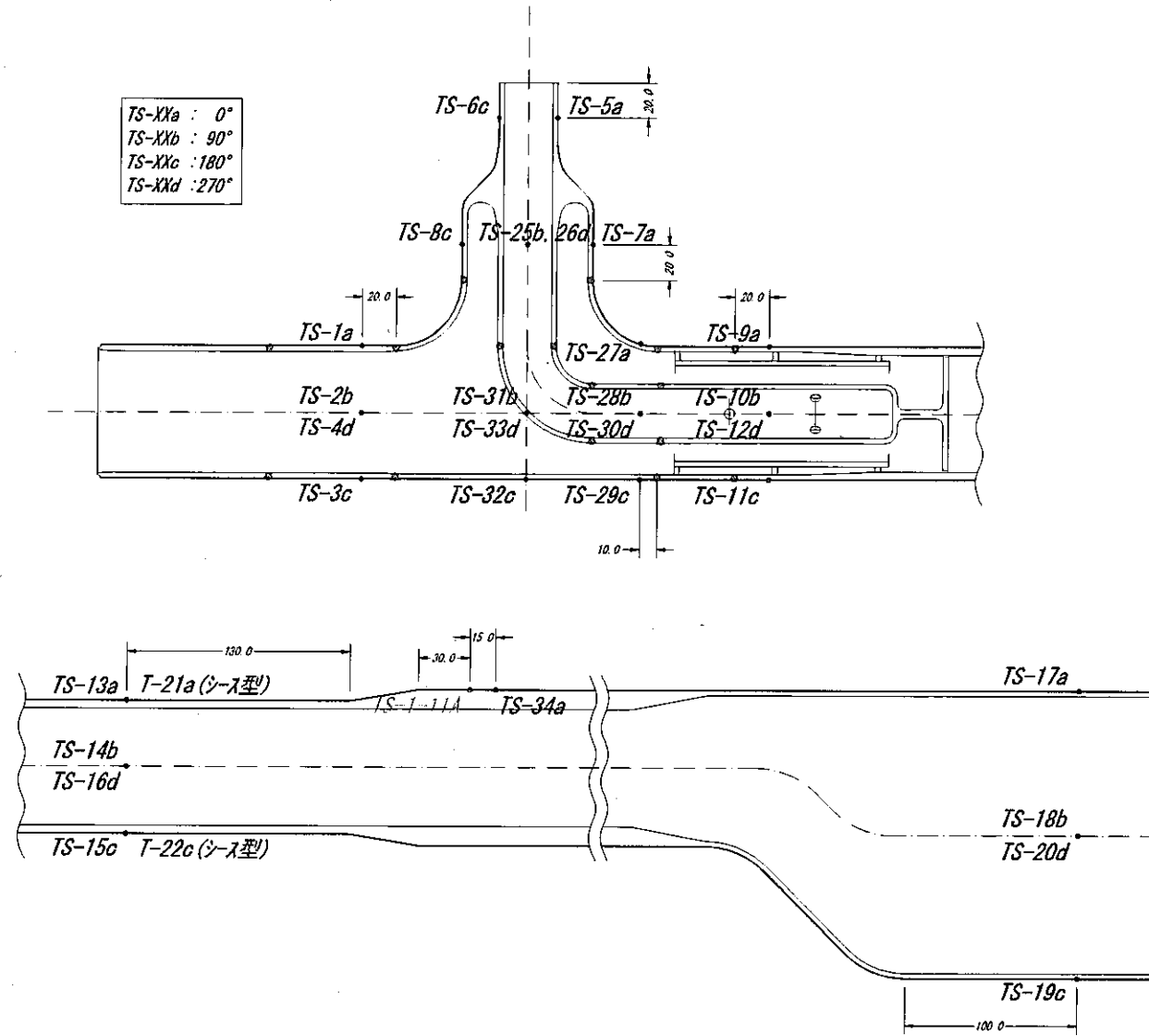


図2.6 温度計試験体 I 素線式熱電対施工図

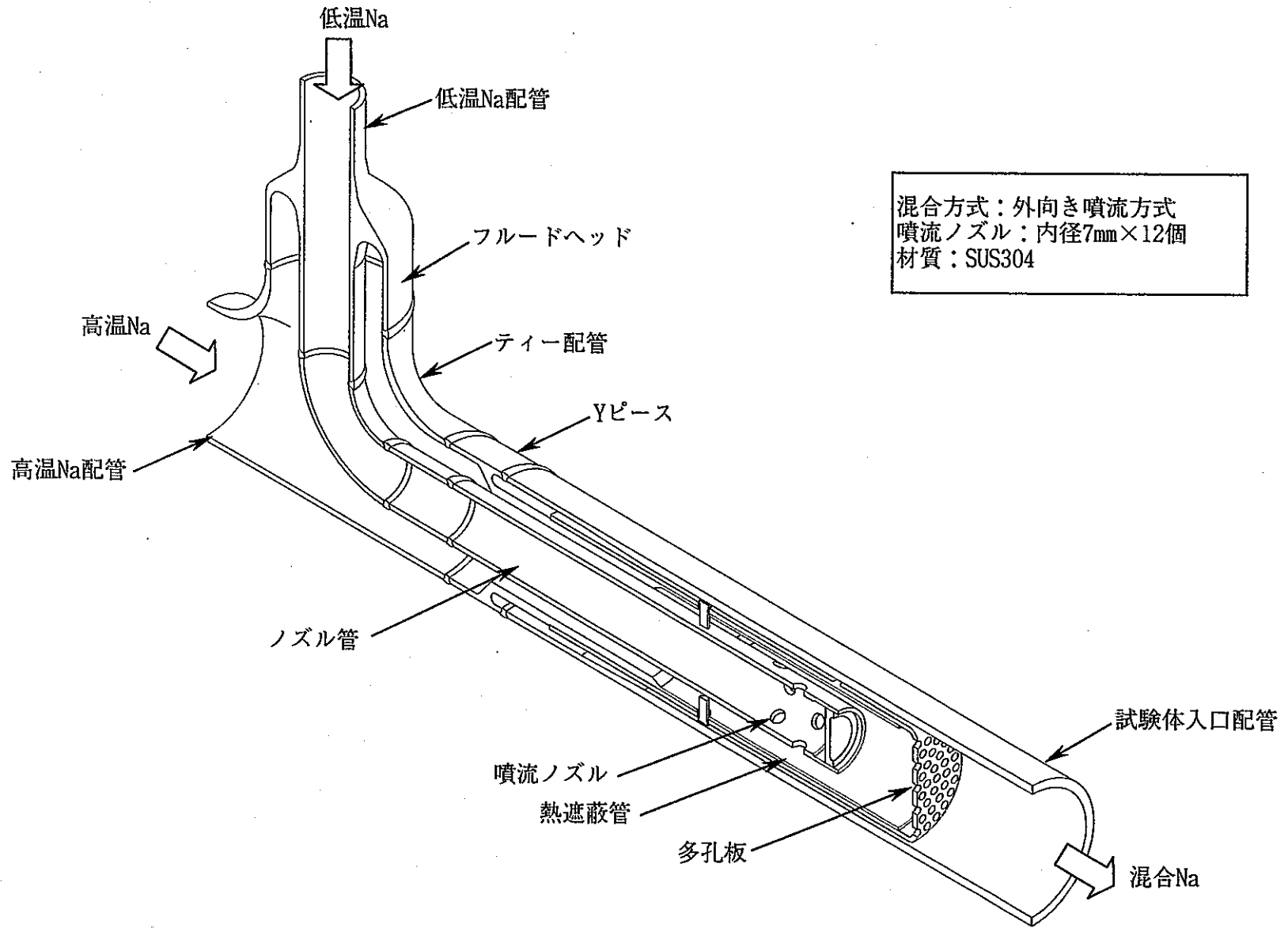
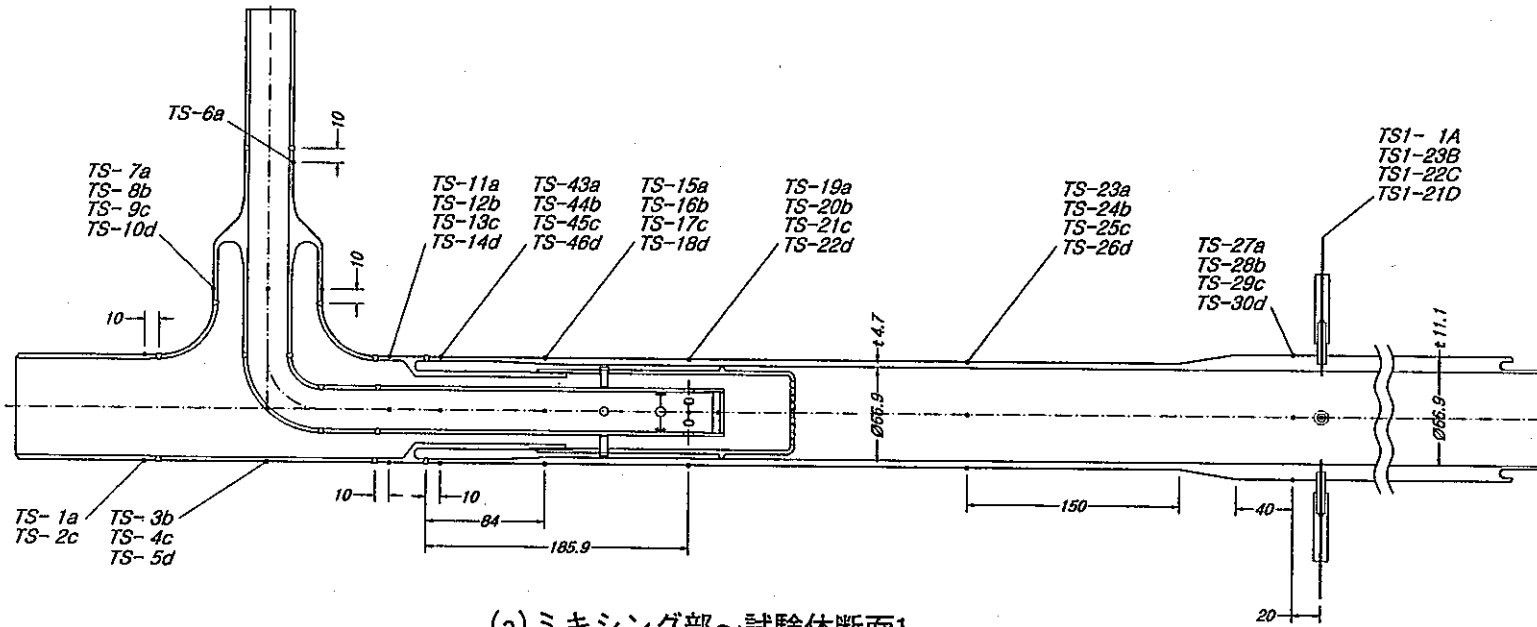
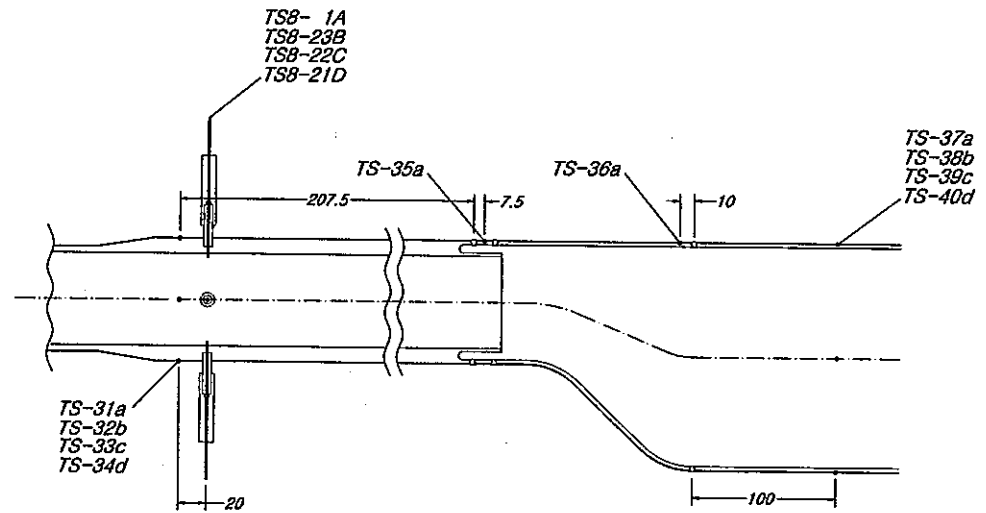


図2.7 温度計試験体IIのミキシング構造



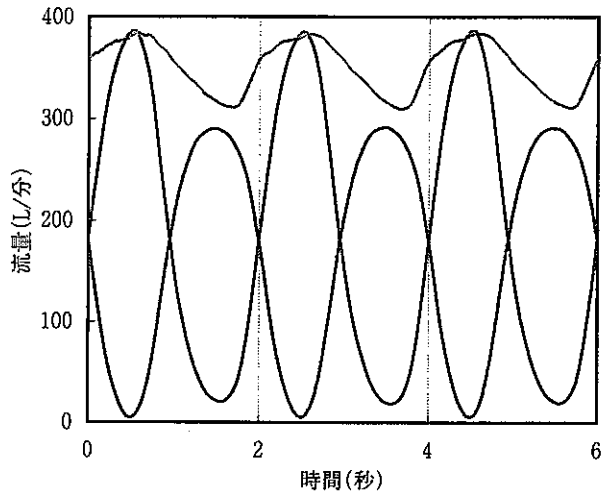
(a) ミキシング部～試験体断面1



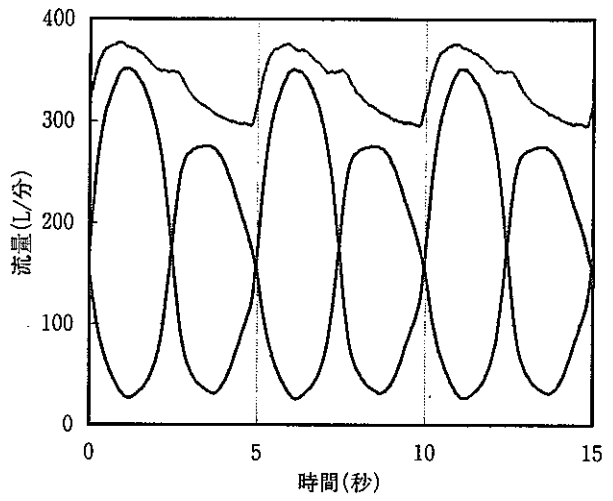
(b) 試験体断面8～スタティックミキサ

図2.8 温度計測試験体IIの
熱電対施工位置図

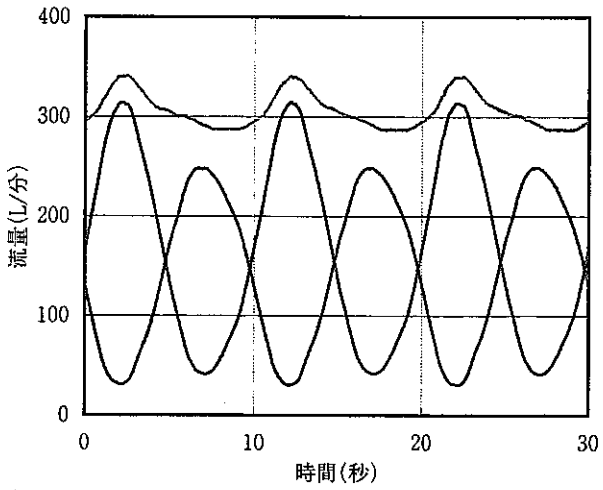
(a) 周期2秒



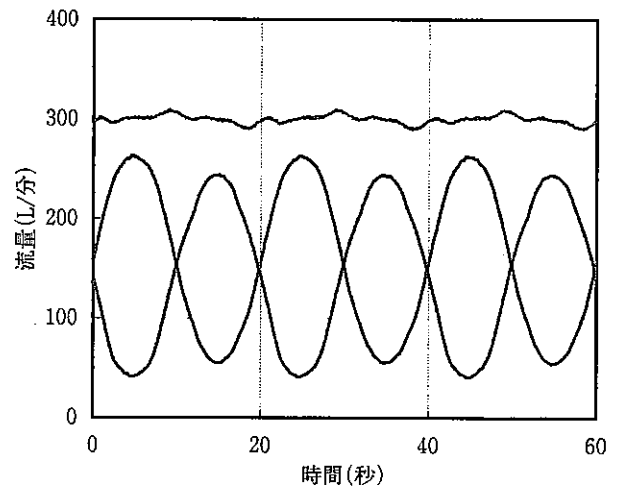
(b) 周期5秒



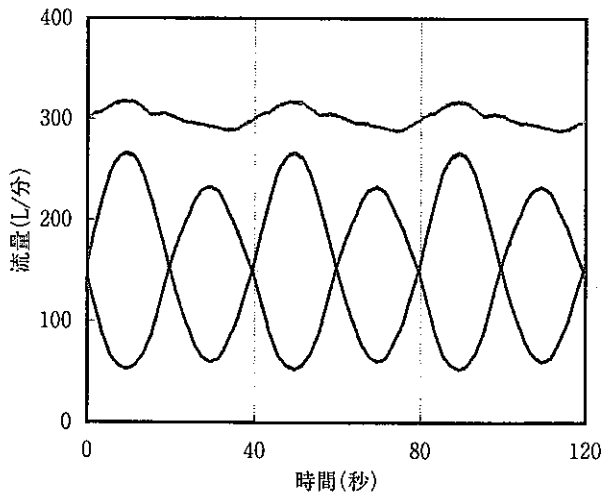
(c) 周期10秒



(d) 周期20秒



(e) 周期40秒



凡例

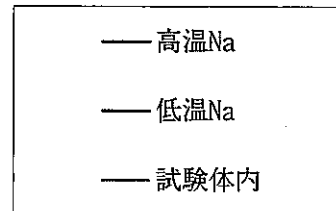
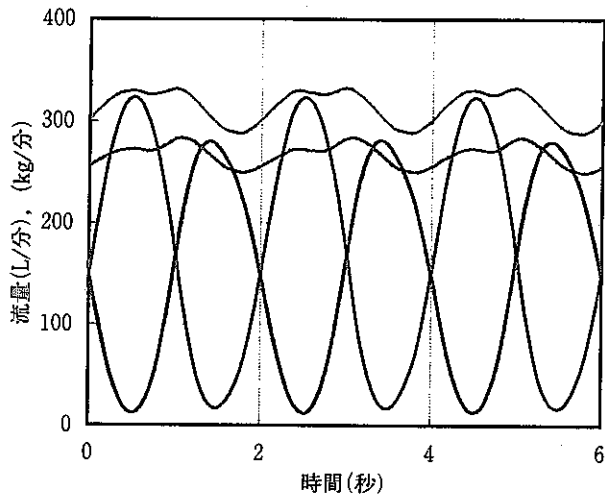
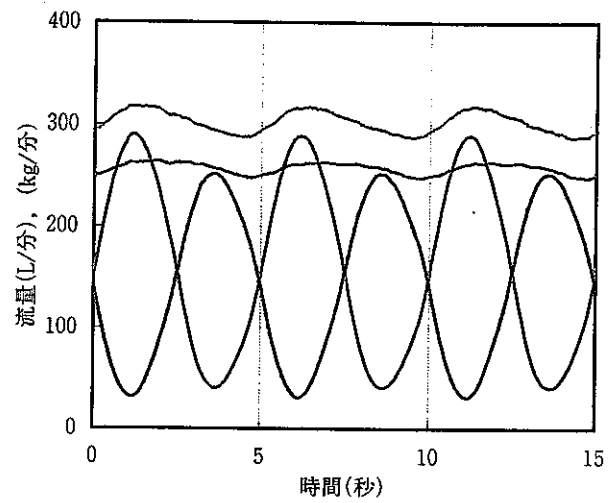


図5.1 温度計測試験Iにおける試験中のナトリウム流量変化

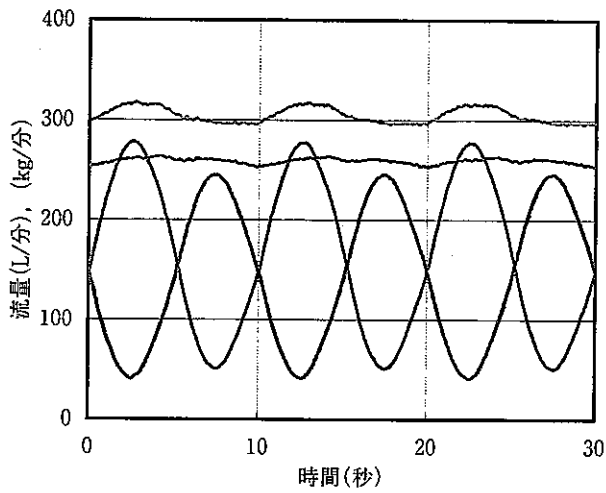
(a) 周期2秒



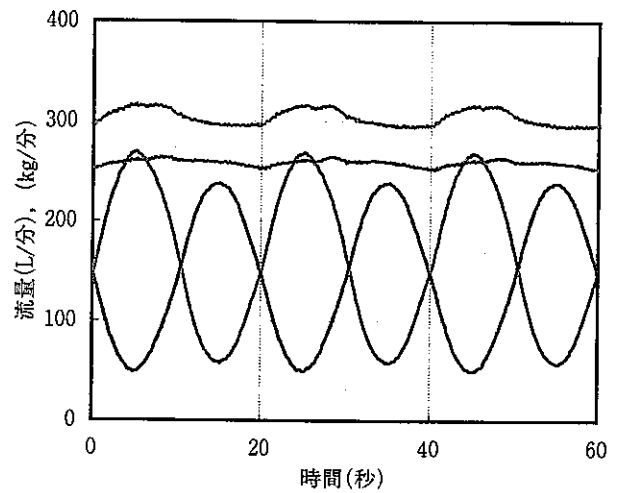
(b) 周期5秒



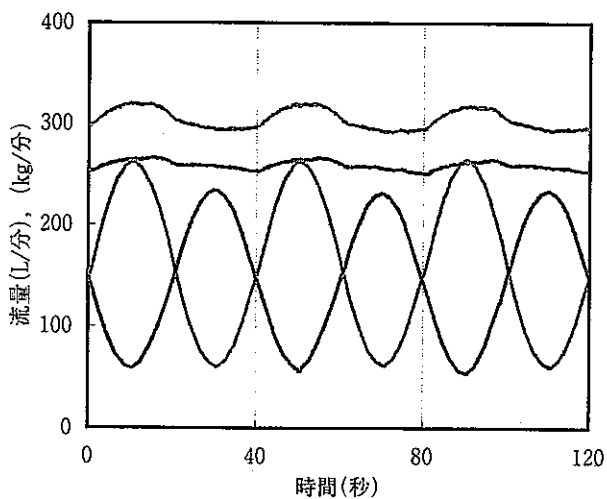
(c) 周期10秒



(d) 周期20秒



(e) 周期40秒



凡例

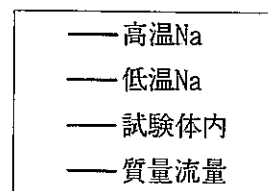
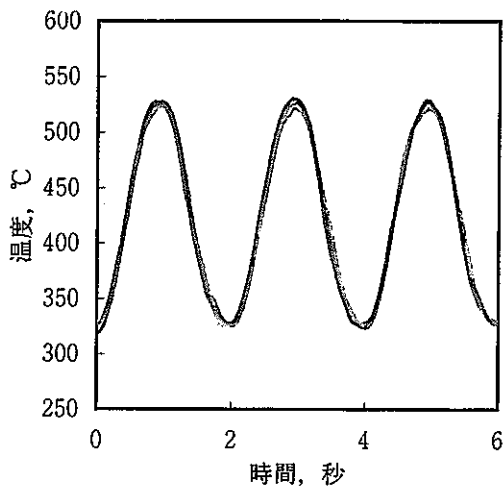
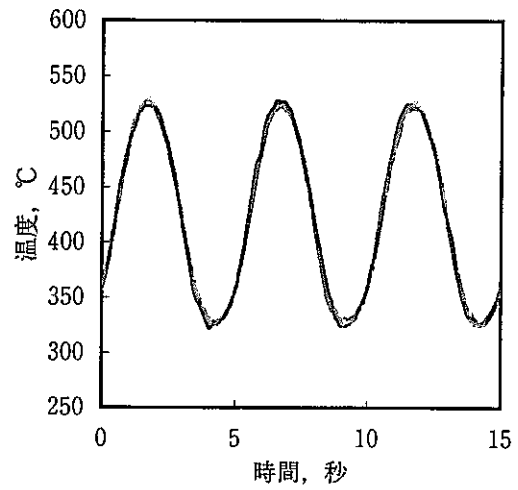


図5.2 温度計測試験IIにおける試験中のナトリウム流量変化

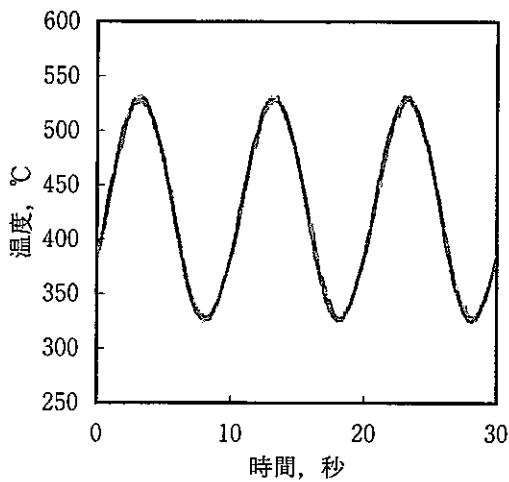
(a) 周期2秒



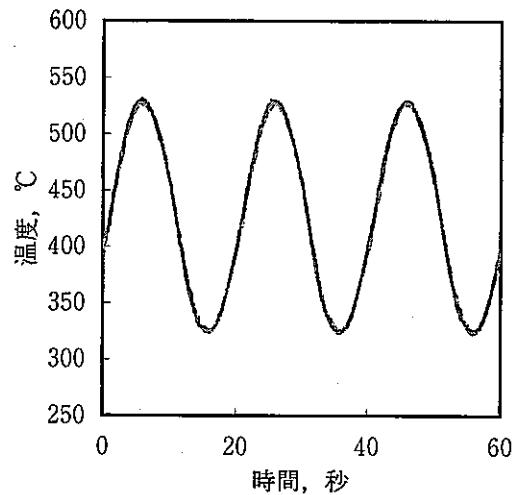
(b) 周期5秒



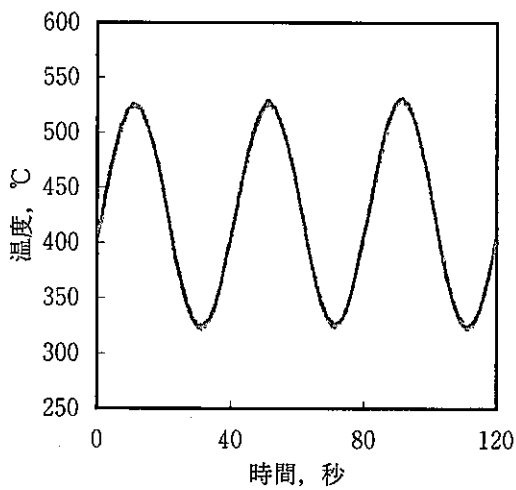
(c) 周期10秒



(d) 周期20秒



(e) 周期40秒



凡例

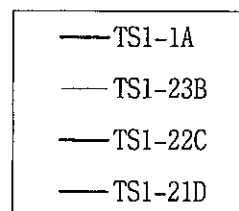


図5.3 試験体上流部(TS1)でのナトリウム温度の変動状

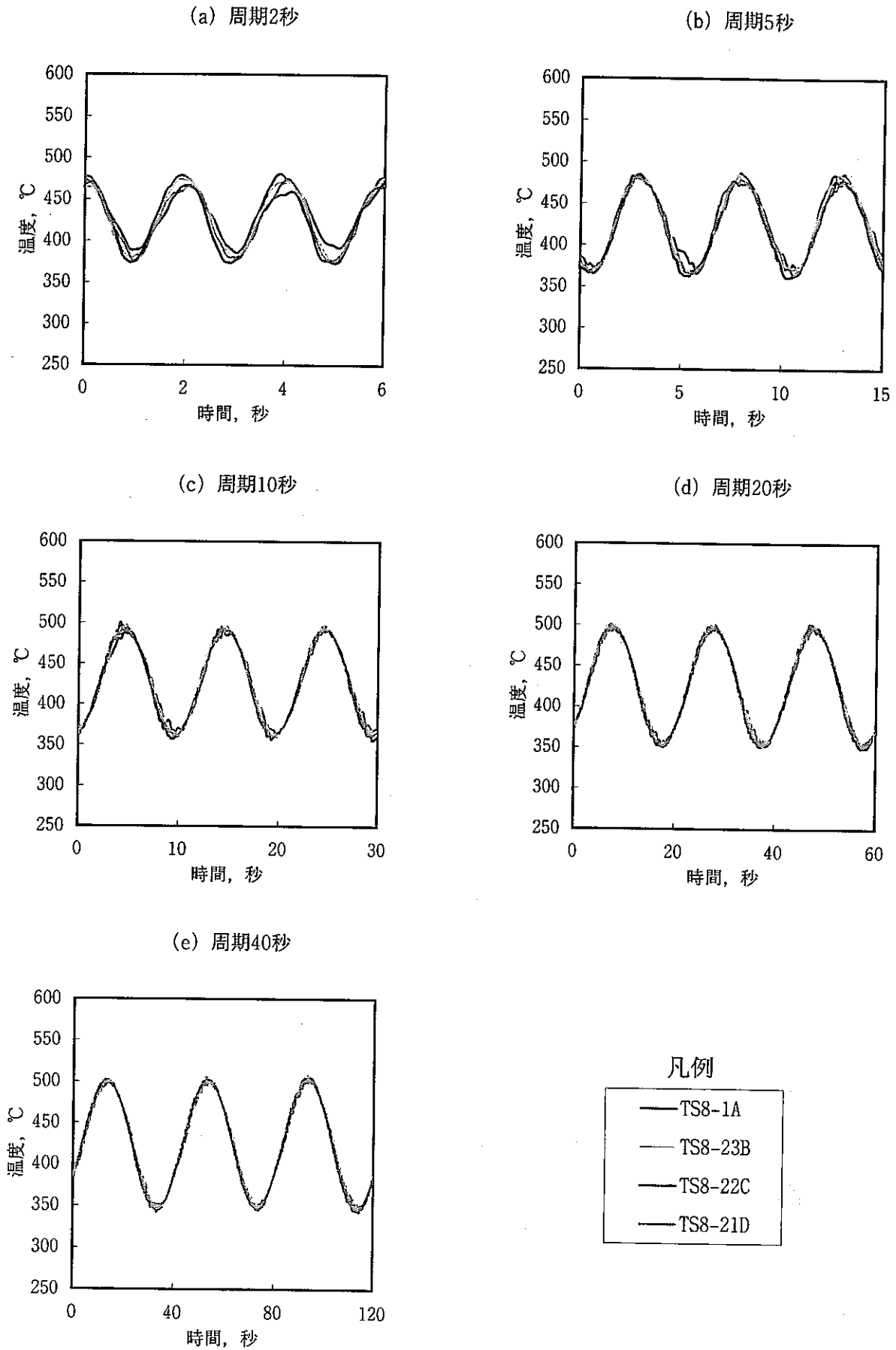
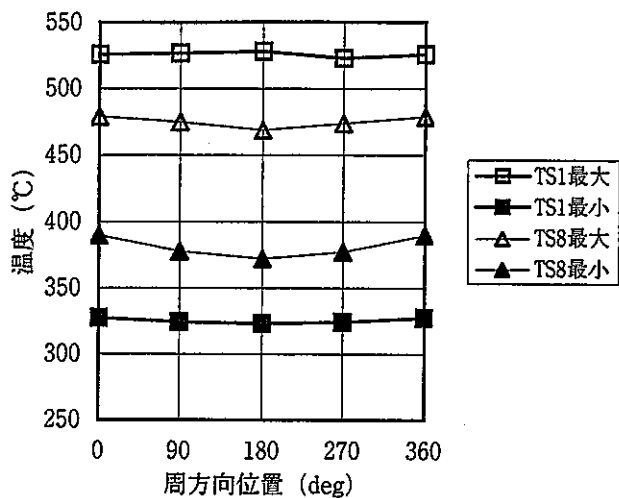
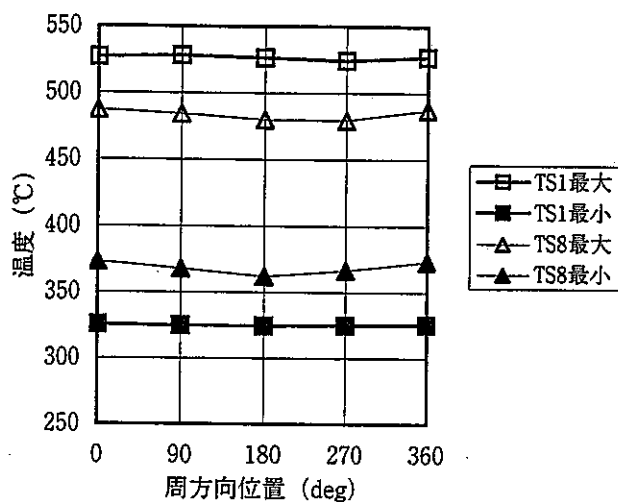


図5.4 試験体下流部(TS8)でのナトリウム温度の変動状

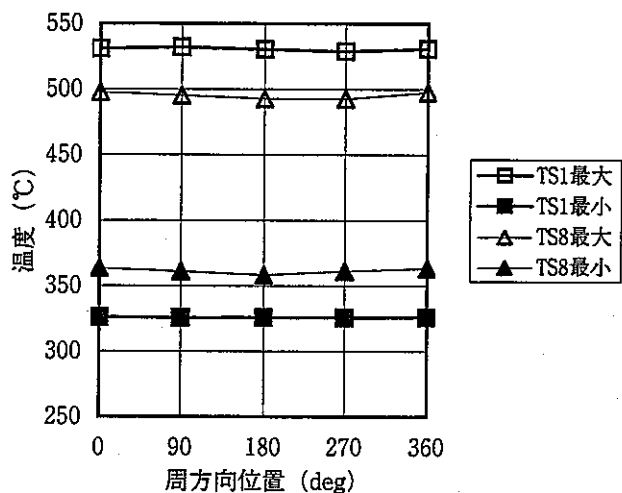
(a) 周期2秒



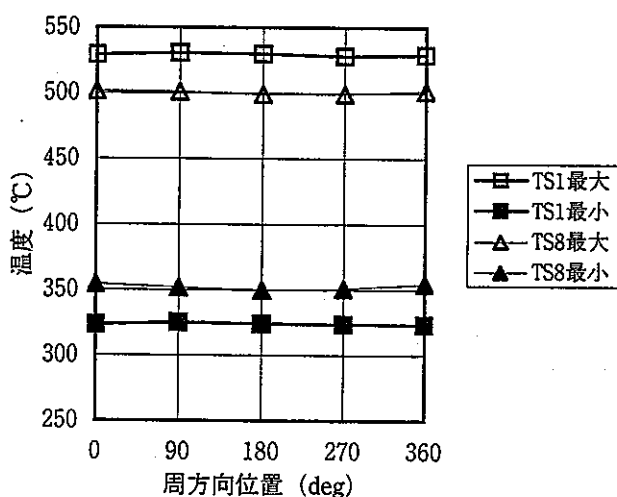
(b) 周期5秒



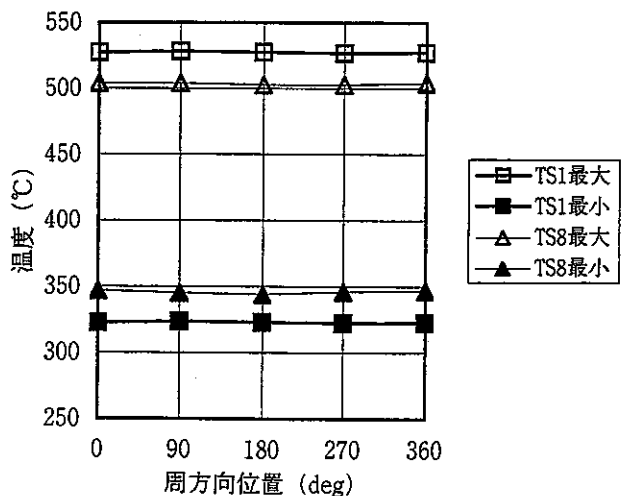
(c) 周期10秒



(d) 周期20秒



(e) 周期40秒



(f) 周方向偏差の周期依存

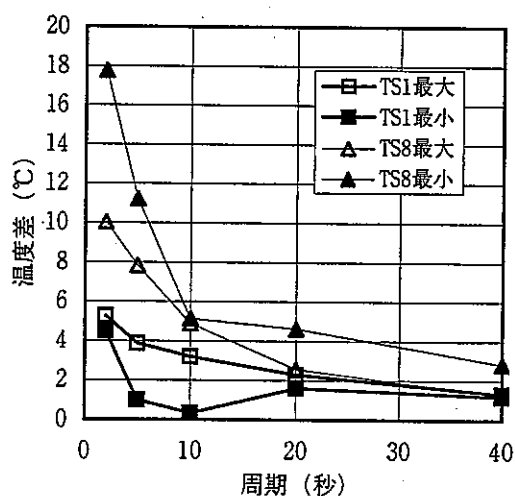
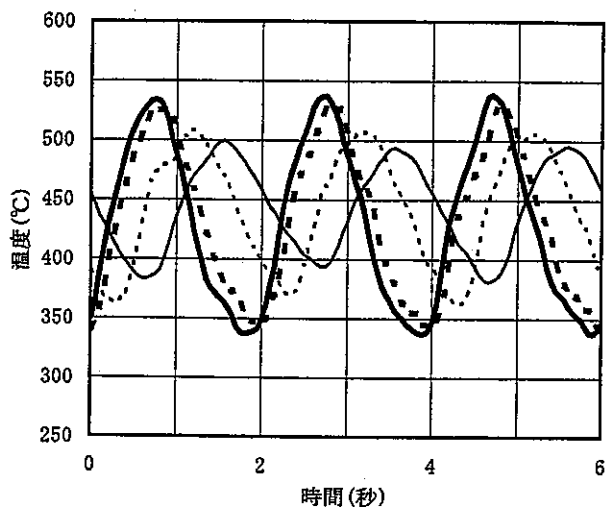
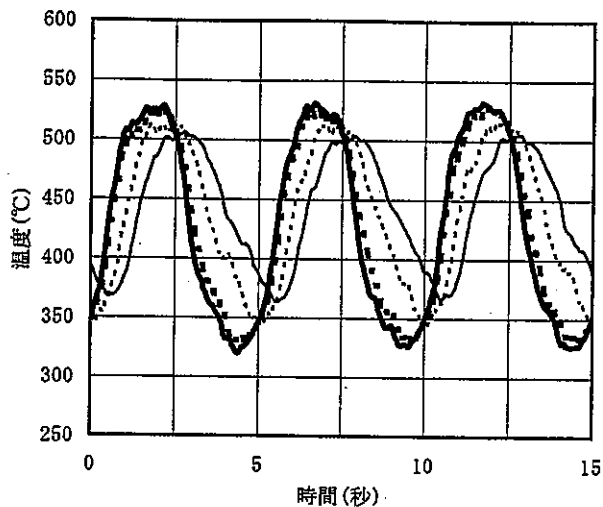


図5.5 ナトリウム温度の周方向分布

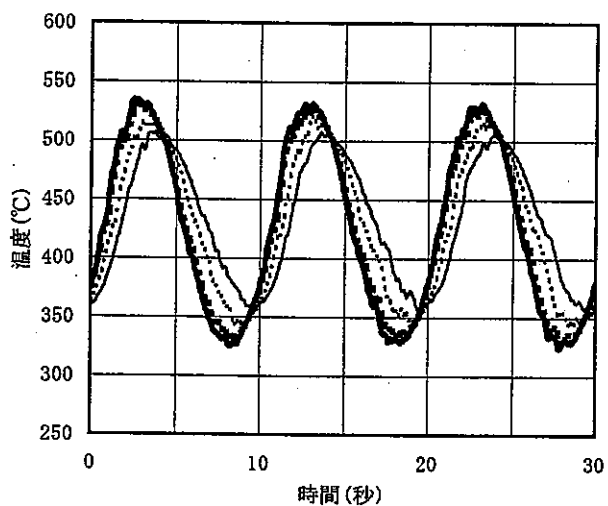
(a) 周期2秒



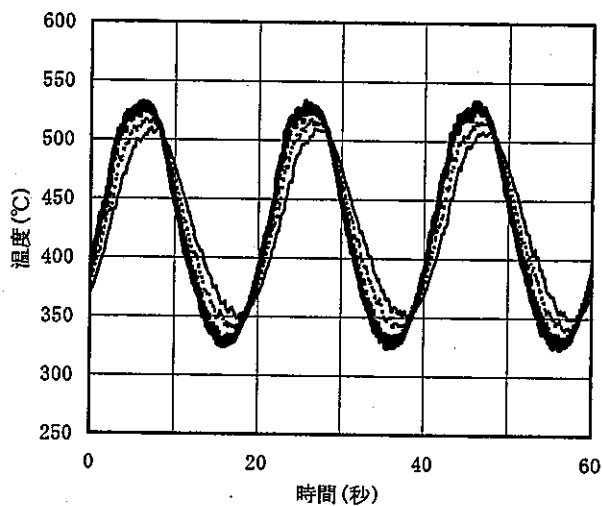
(b) 周期5秒



(c) 周期10秒



(d) 周期20秒



(e) 周期40秒

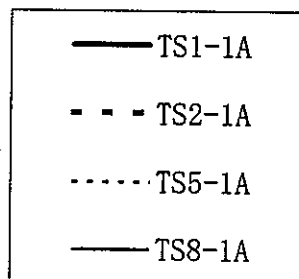
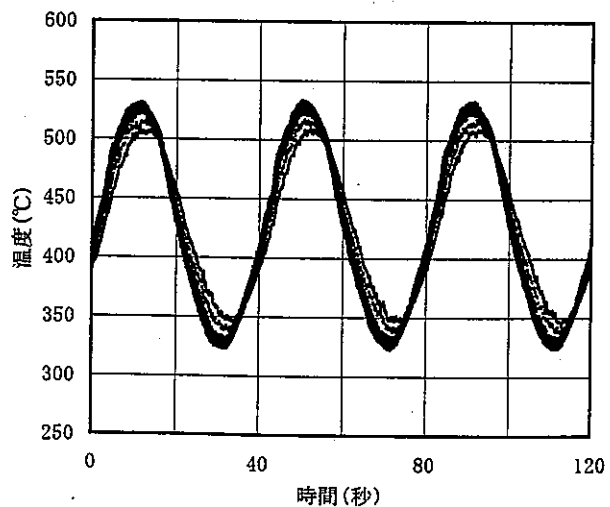
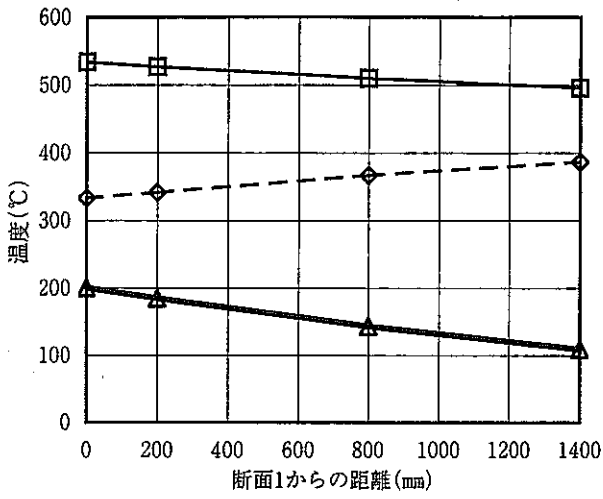
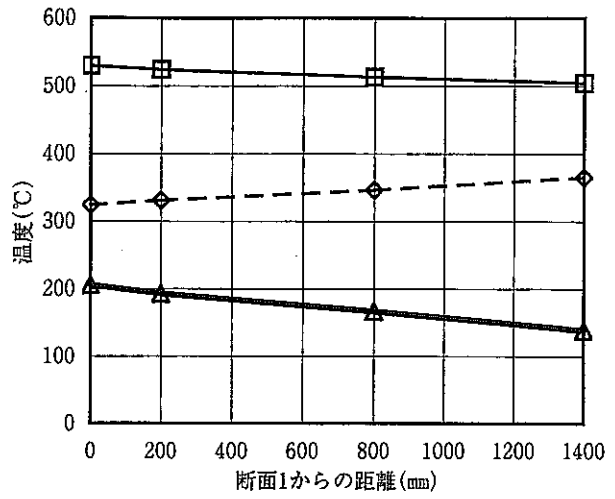


図5.6 各軸方向位置でのナトリウム温度の履歴

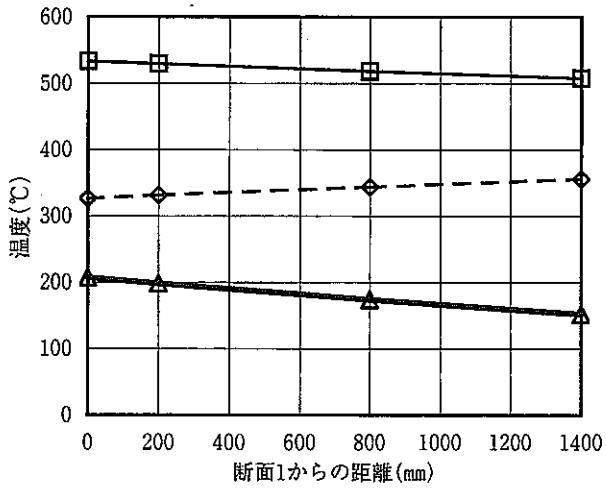
(a) 周期2秒



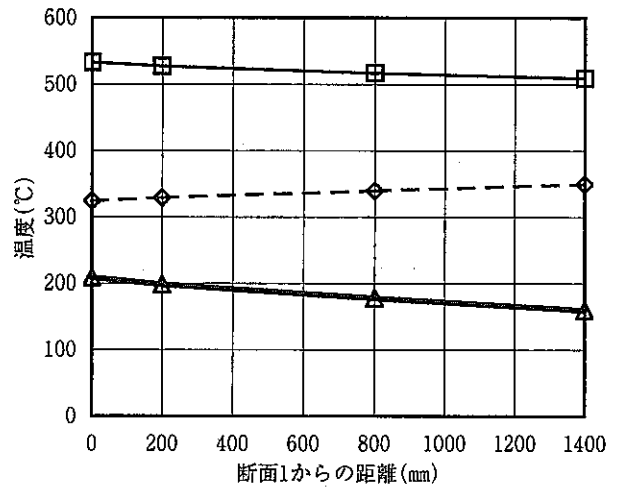
(b) 周期5秒



(c) 周期10秒



(d) 周期20秒



(e) 周期40秒

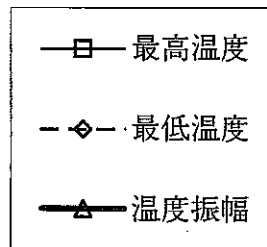
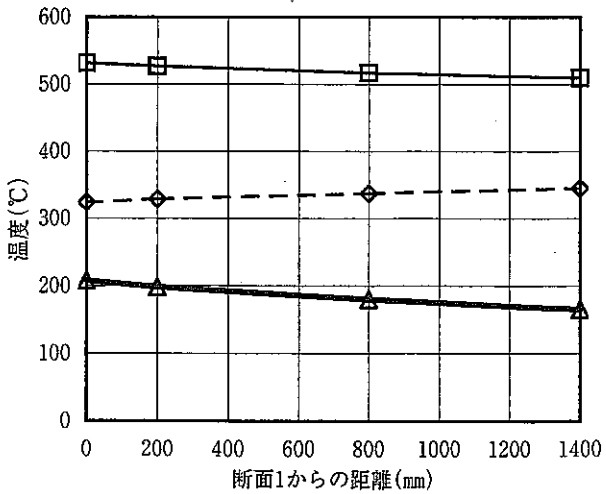
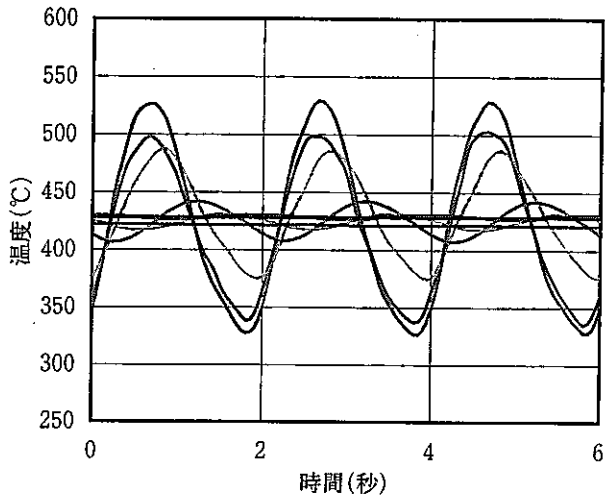
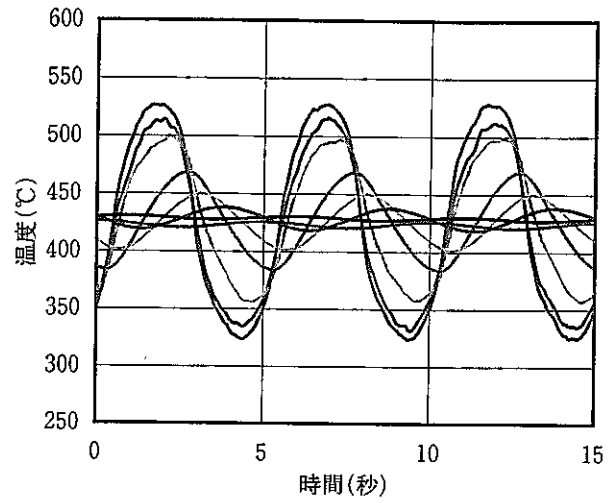


図5.7 温度変動振幅の軸方向分布

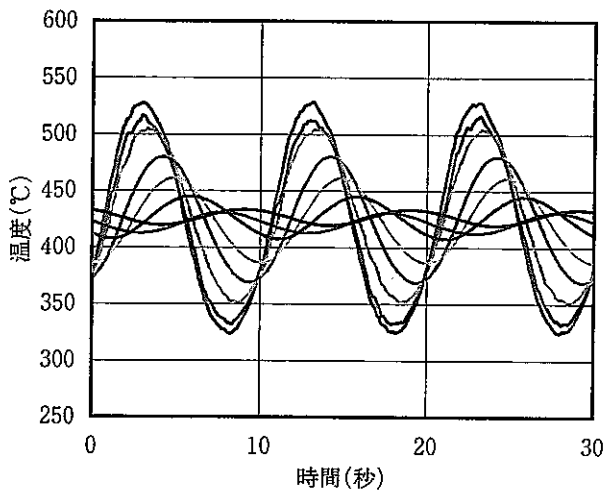
(a) 周期2秒



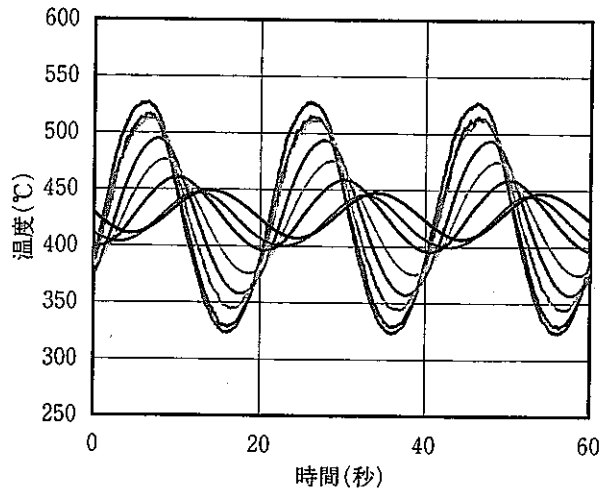
(b) 周期5秒



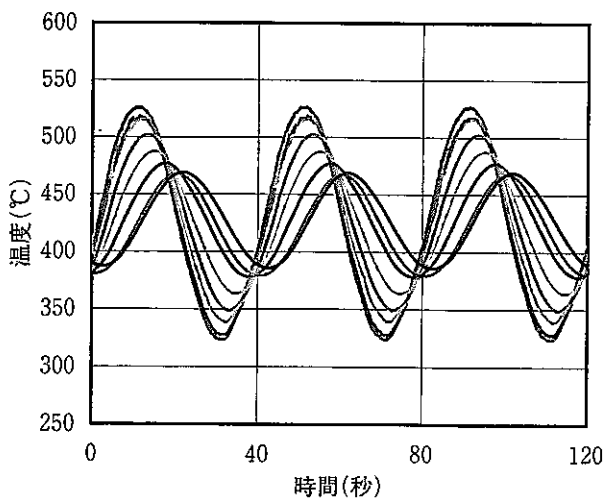
(c) 周期10秒



(d) 周期20秒



(e) 周期40秒



内面からの距離

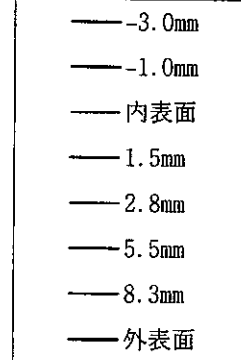
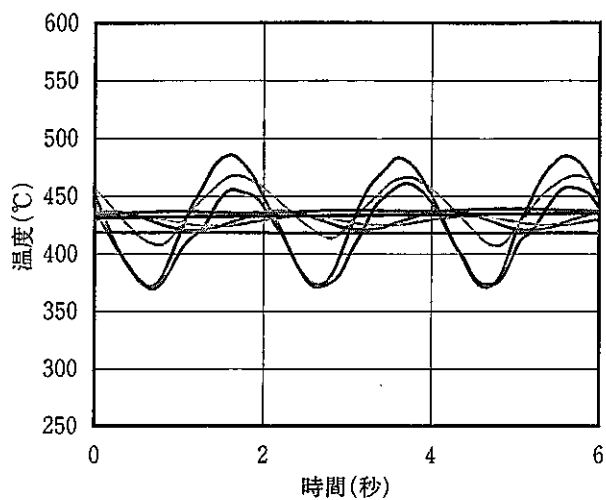
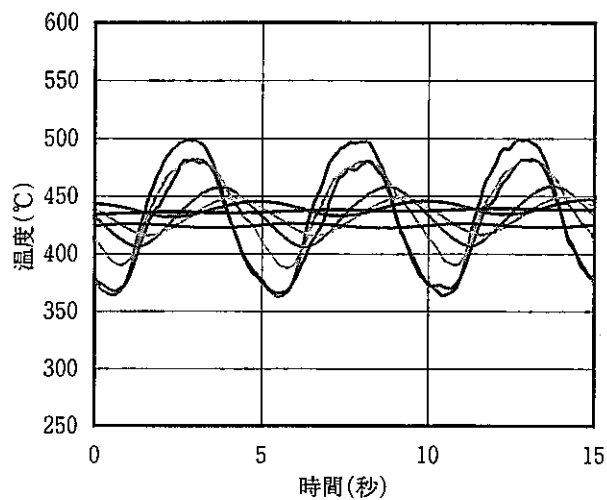


図5.8 上流部(TS1)における径方向各位置の温度変動状況

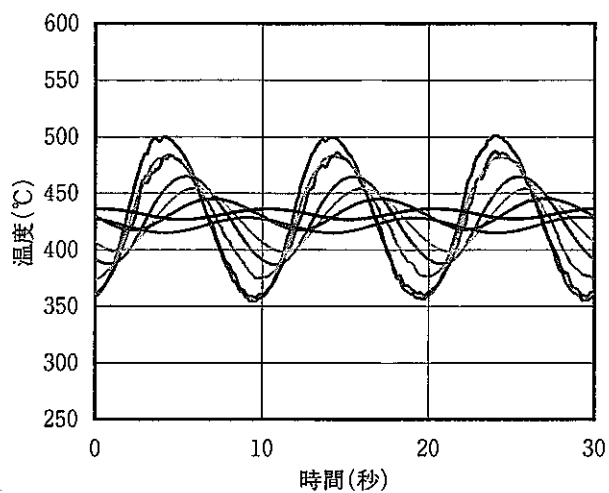
(a) 周期2秒



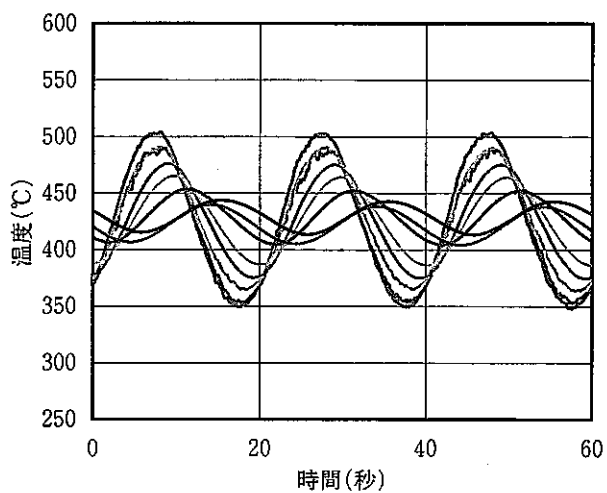
(b) 周期5秒



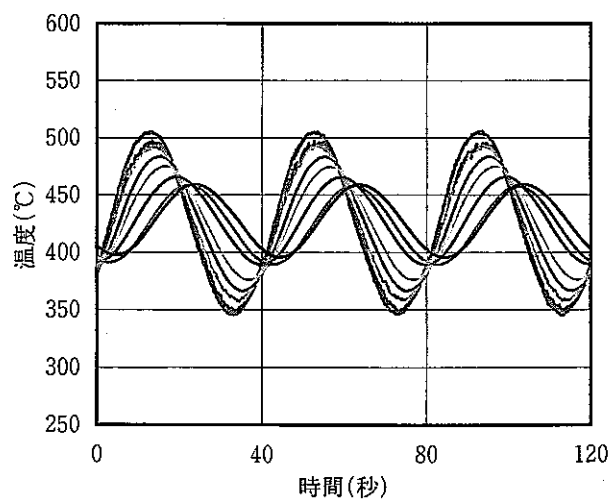
(c) 周期10秒



(d) 周期20秒



(e) 周期40秒



内面からの距離

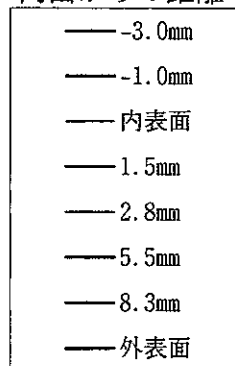
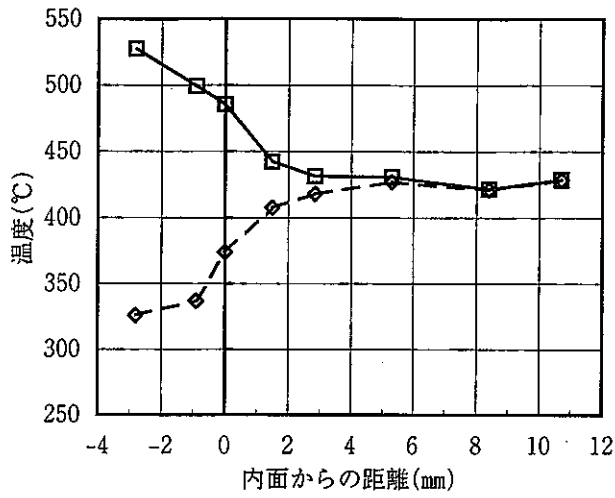
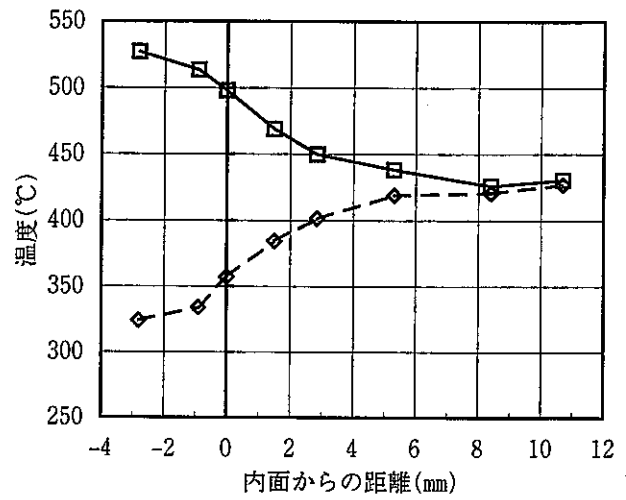


図5.9 下流部(TS8)における径方向各位置の温度変動状況

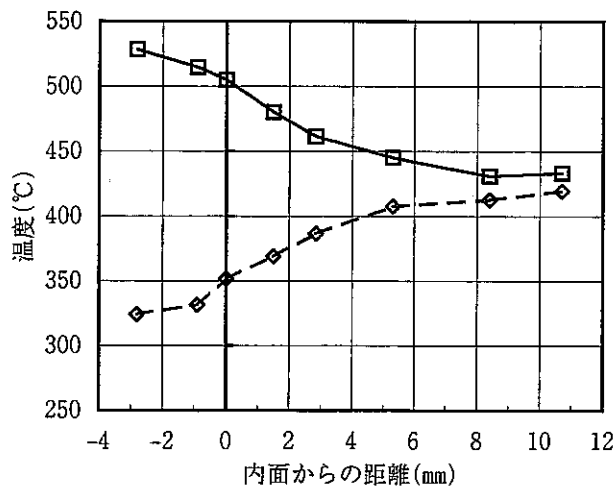
(a) 周期2秒



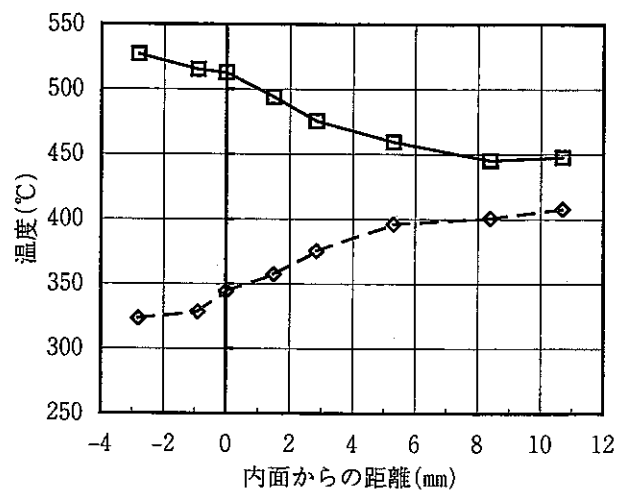
(b) 周期5秒



(c) 周期10秒



(d) 周期20秒



(e) 周期40秒

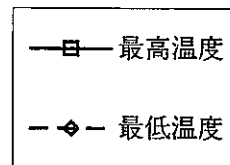
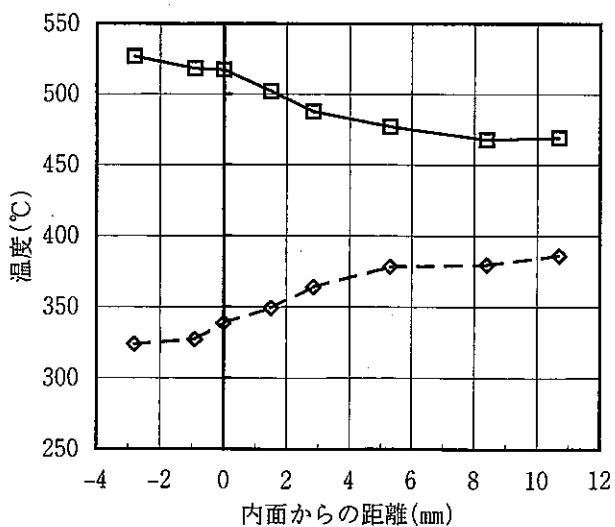
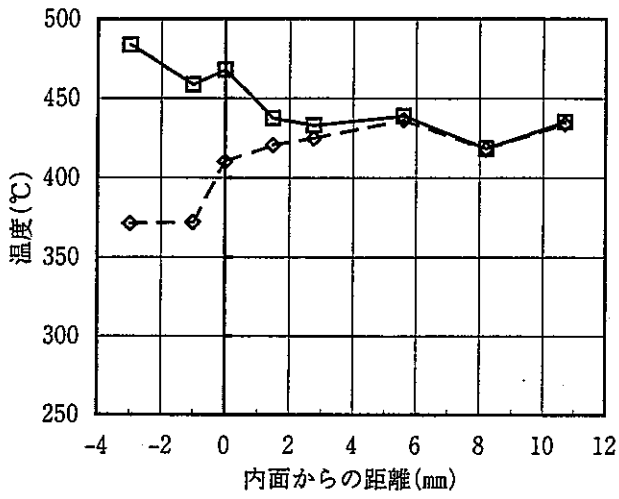
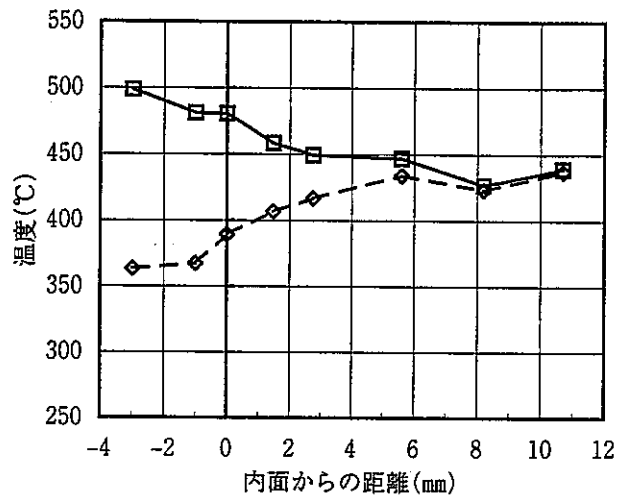


図5.10 上流部(TS1)における最高/最低温度の径方向分布

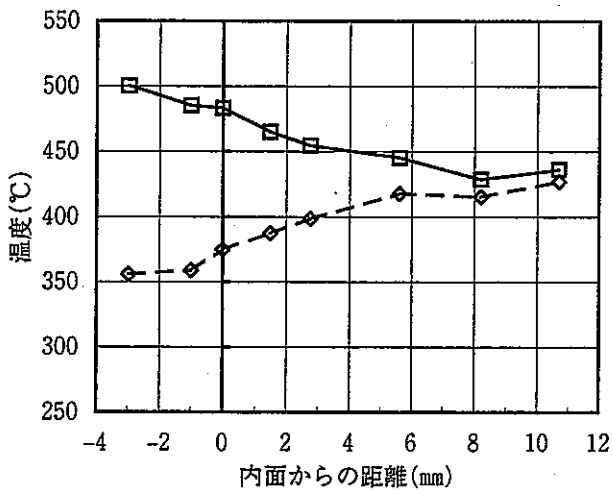
(a) 周期2秒



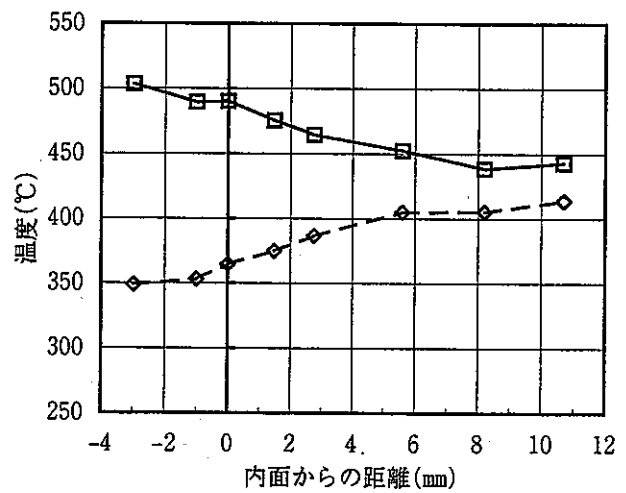
(b) 周期5秒



(c) 周期10秒



(d) 周期20秒



(e) 周期40秒

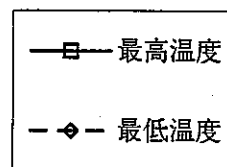
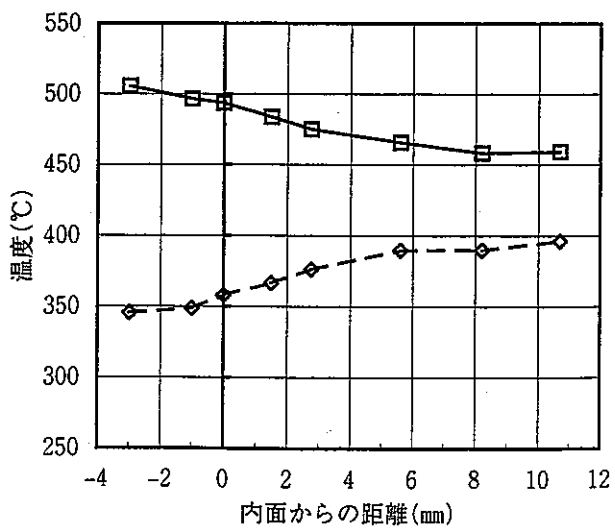
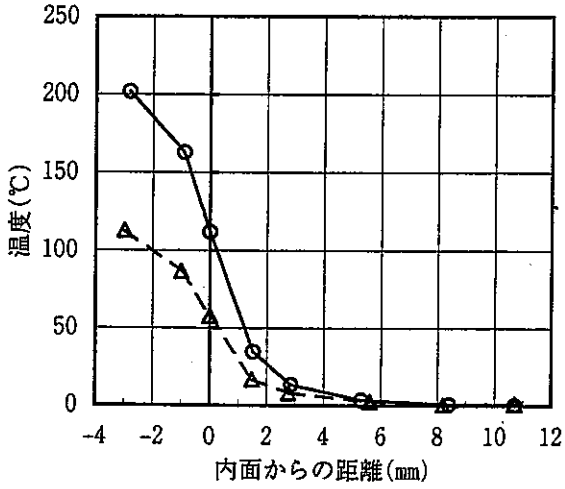
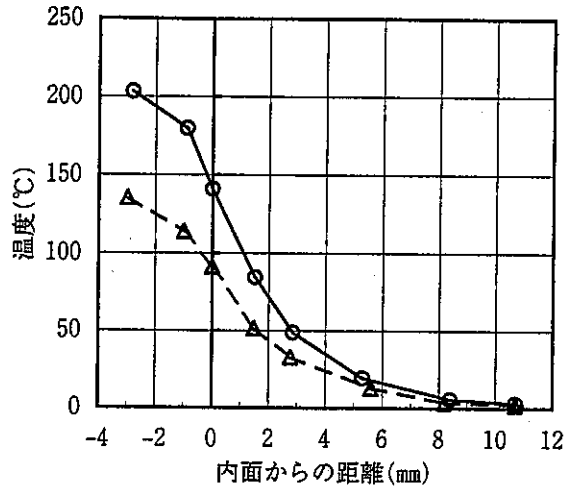


図5.11 下流部(TS8)における最高/最低温度の径方向分布

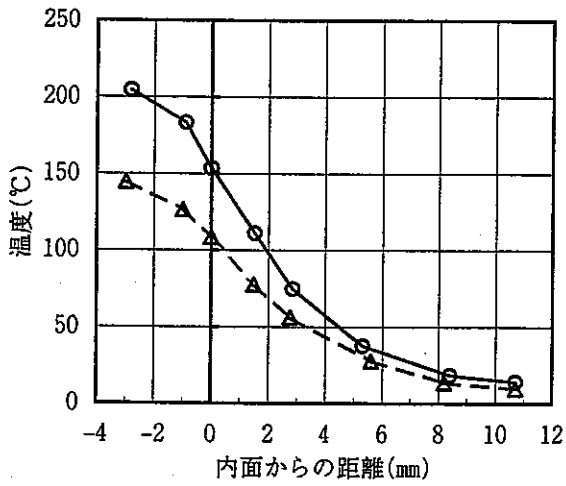
(a) 周期2秒



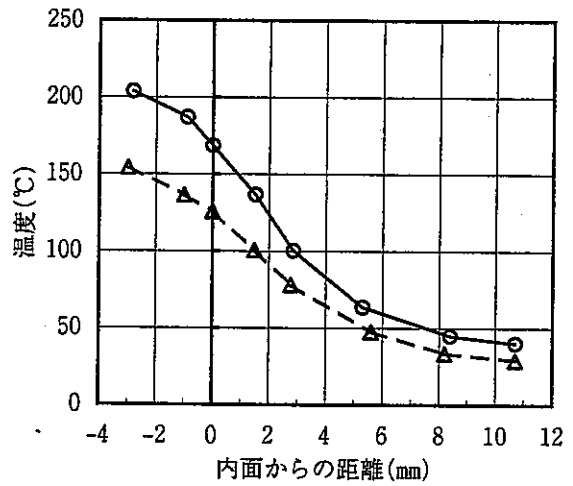
(b) 周期5秒



(c) 周期10秒



(d) 周期20秒



(e) 周期40秒

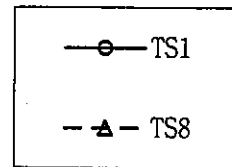
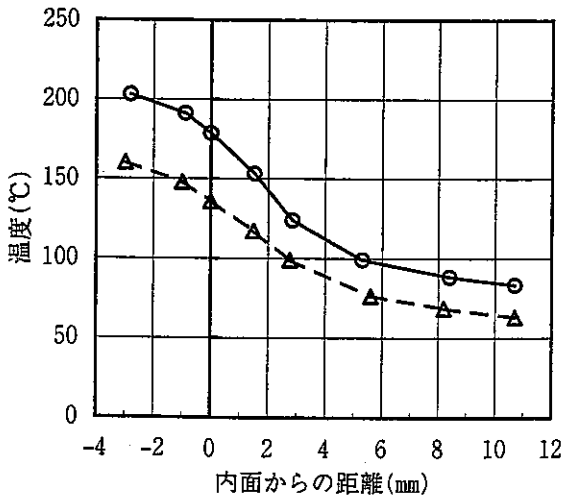
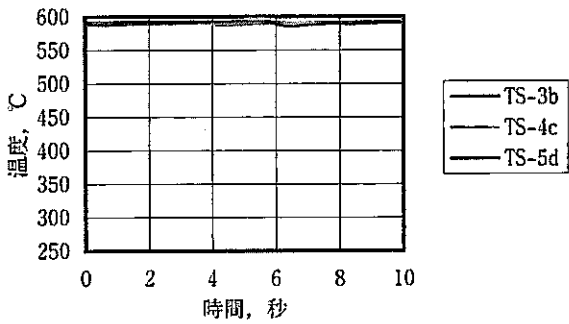
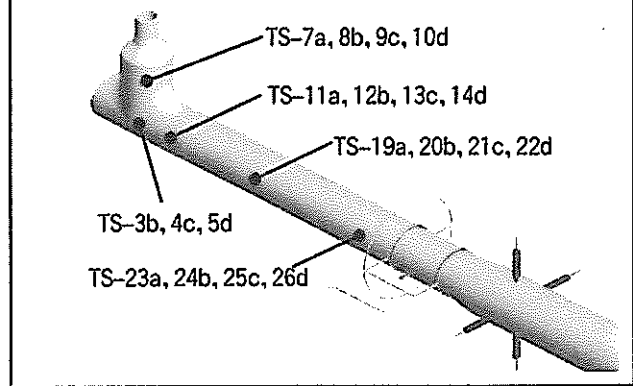


図5.12 温度変動振幅の径方向分布

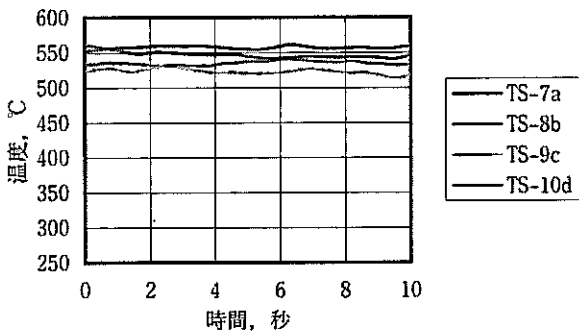
(a) ティー部外面温度



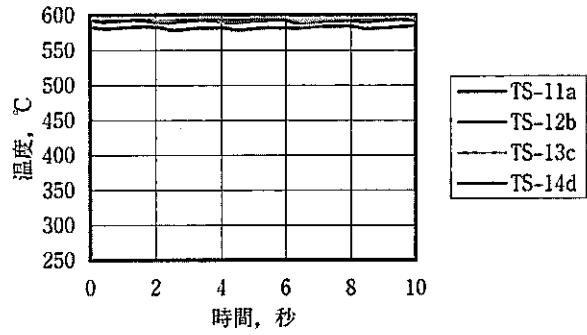
試験体上流側の温度計測位置



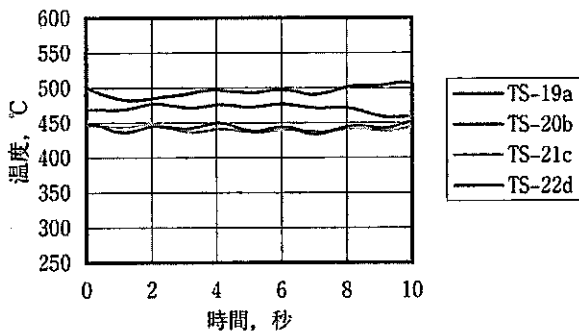
(b) フルドヘッド部外面温度



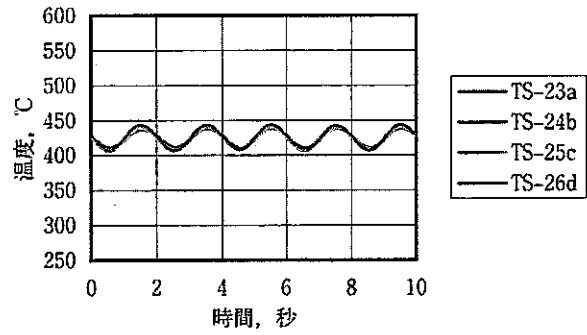
(c) ティー溶接部外面温度



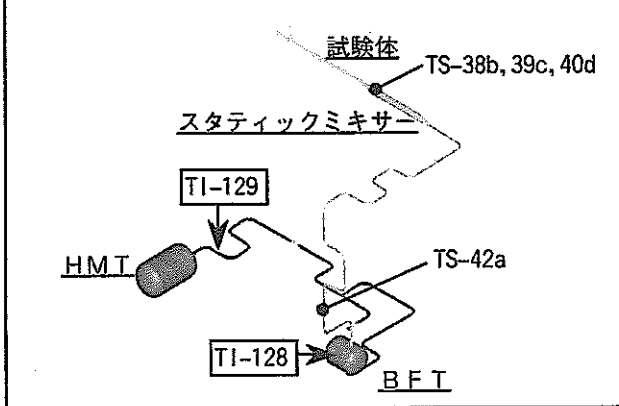
(d) 噴流部外面温度



(e) 試験体入口部外面温度



試験体下流側温度計測位置



(f) 下流側温度

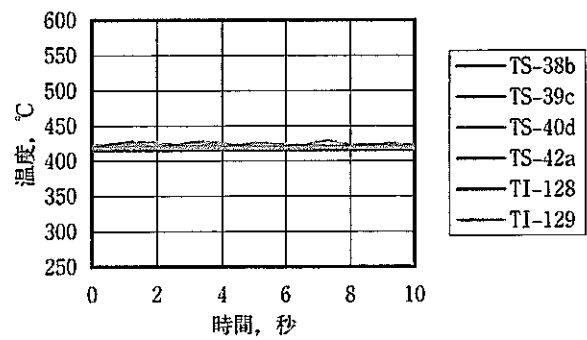
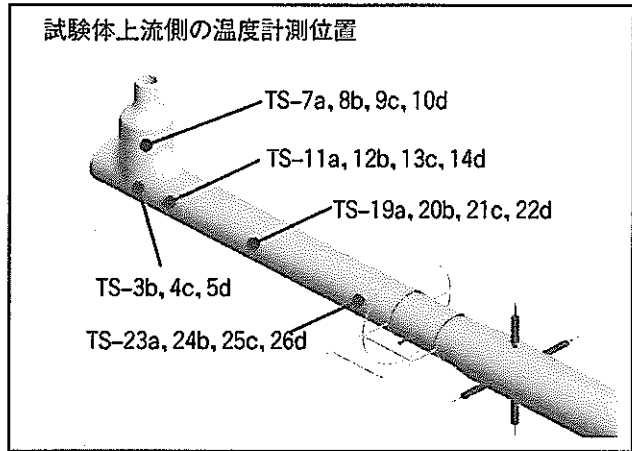
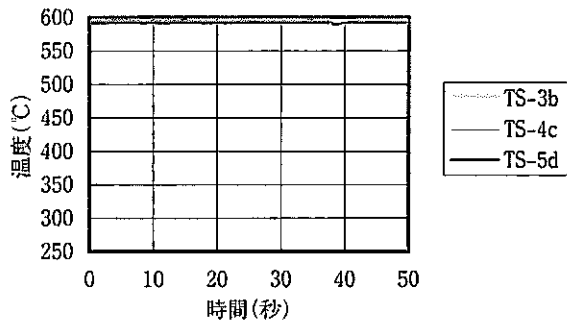


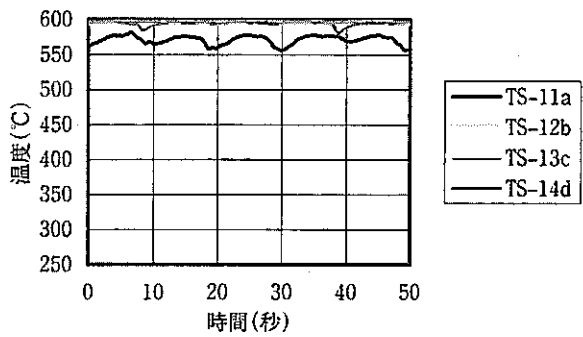
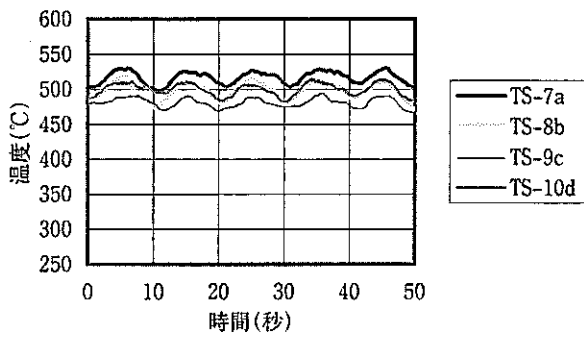
図5.13 試験体上下流部の温度計測結果(周期2秒)

(a) ティー配管下部外面温度

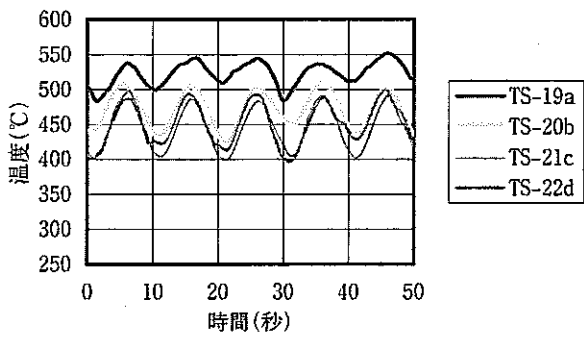


(c) Yピース上流側溶接部外面温度

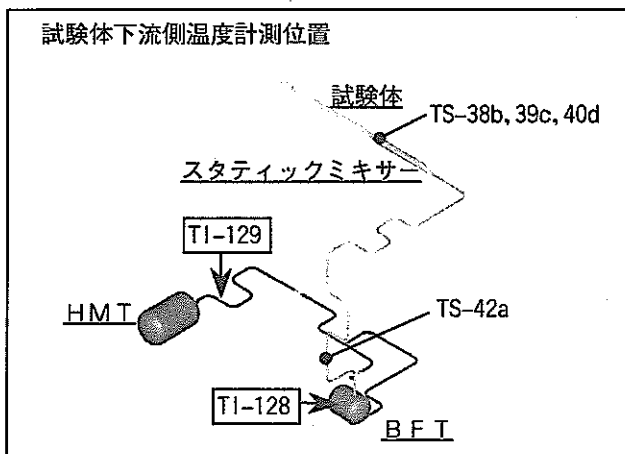
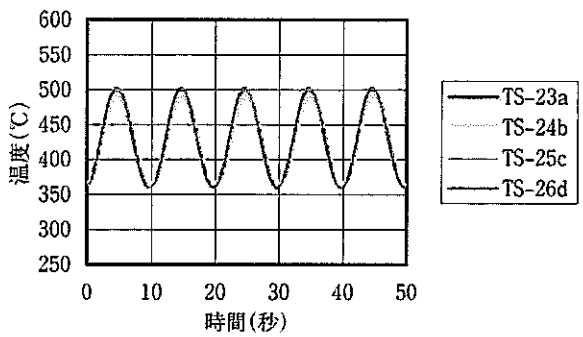
(b) フルドヘッド部外面温度



(d) 噴流ノズル部外面温度



(e) 試験体入口配管外面温度



(f) 試験体下流側温度

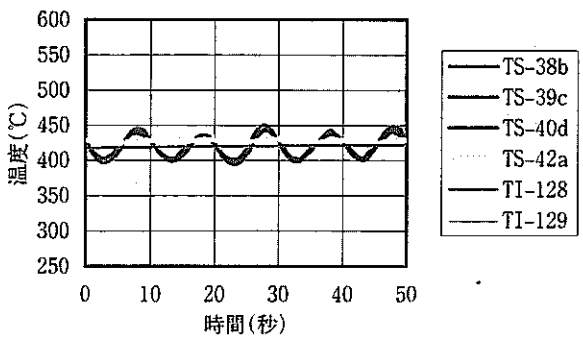
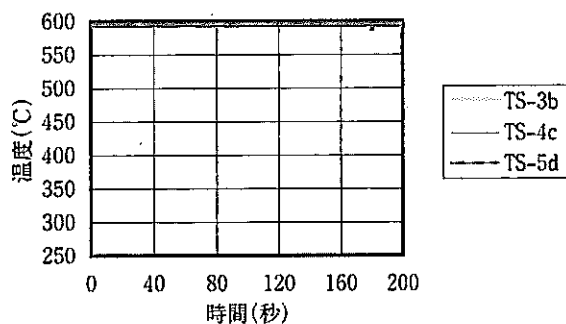
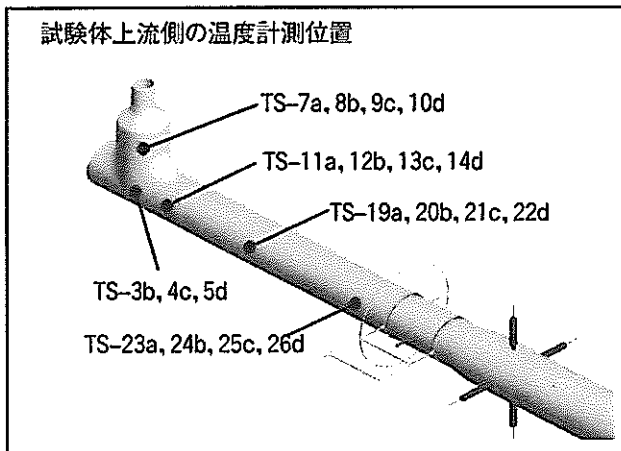


図5.14 試験体上下流部の温度計測結果(周期10秒)

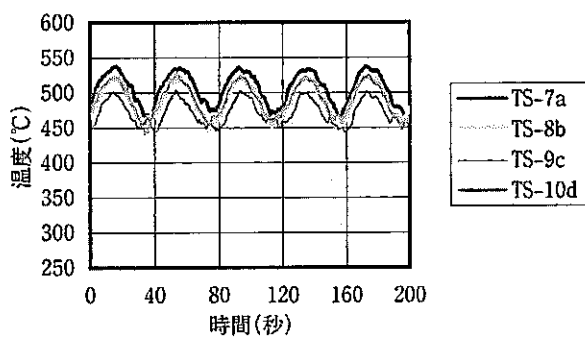
(a) ティー配管下部外面温度



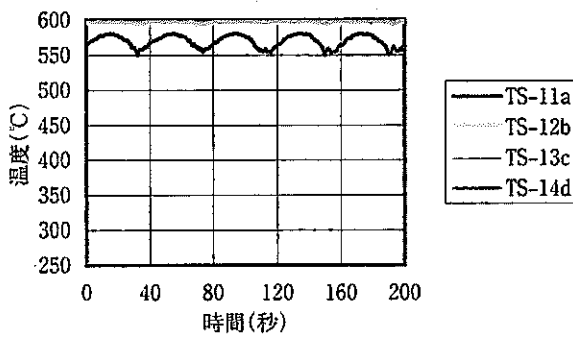
試験体上流側の温度計測位置



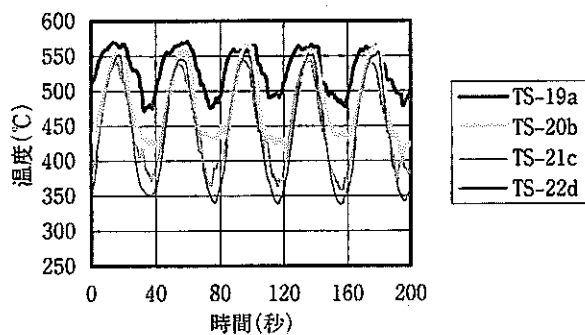
(b) フルドヘッド部外面温度



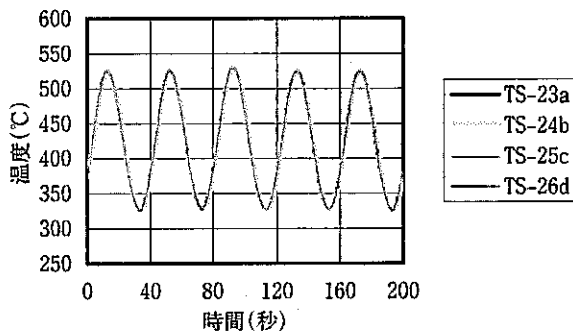
(c) Yピース上流側溶接部外面温度



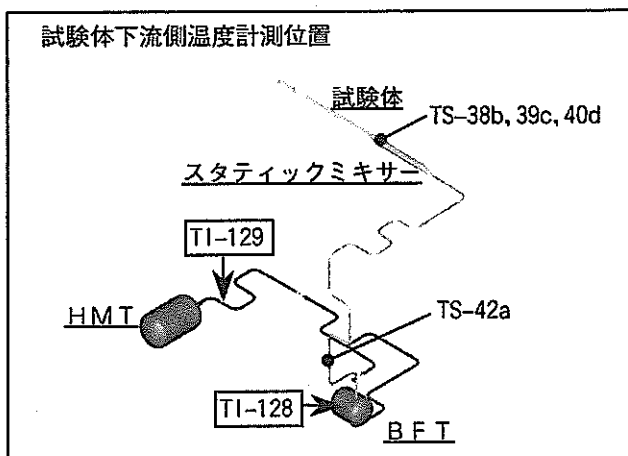
(d) 噴流ノズル部外面温度



(e) 試験体入口配管外面温度



試験体下流側温度計測位置



(f) 試験体下流側温度

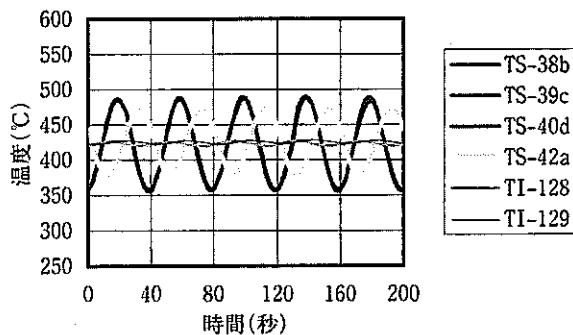
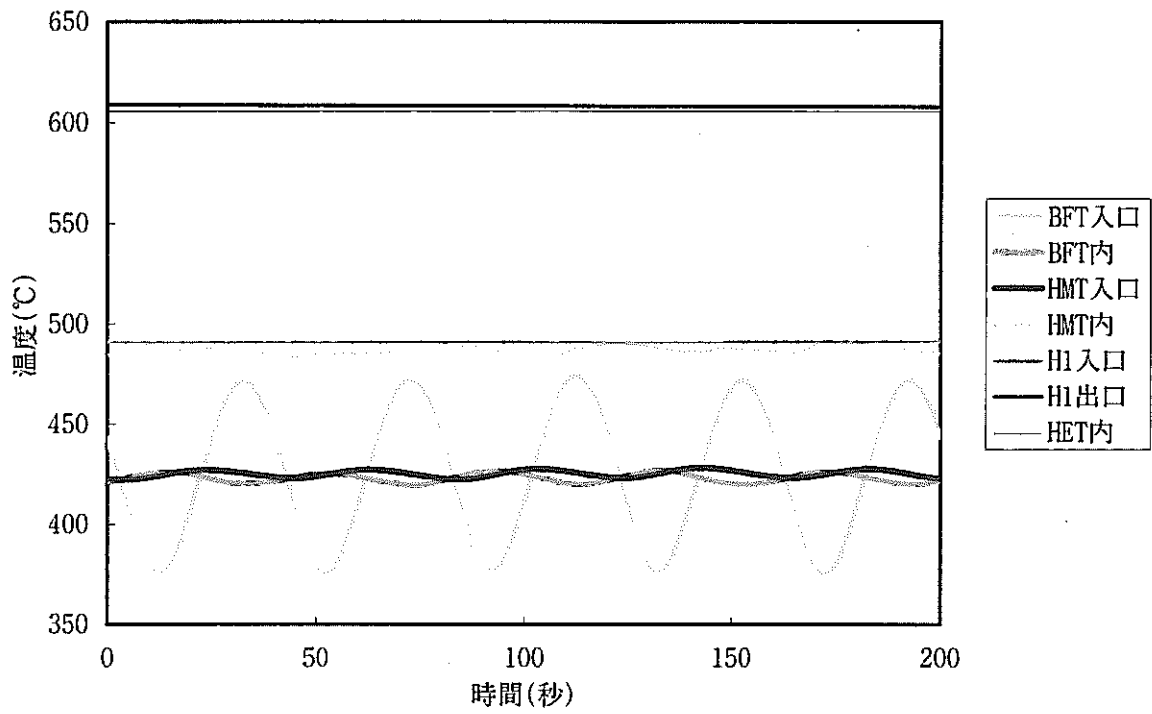


図5.15 試験体上下流部の温度計測結果(周期40秒)

(a) 高温側ループの温度変動状況



(b) 低温側ループの温度変動状況

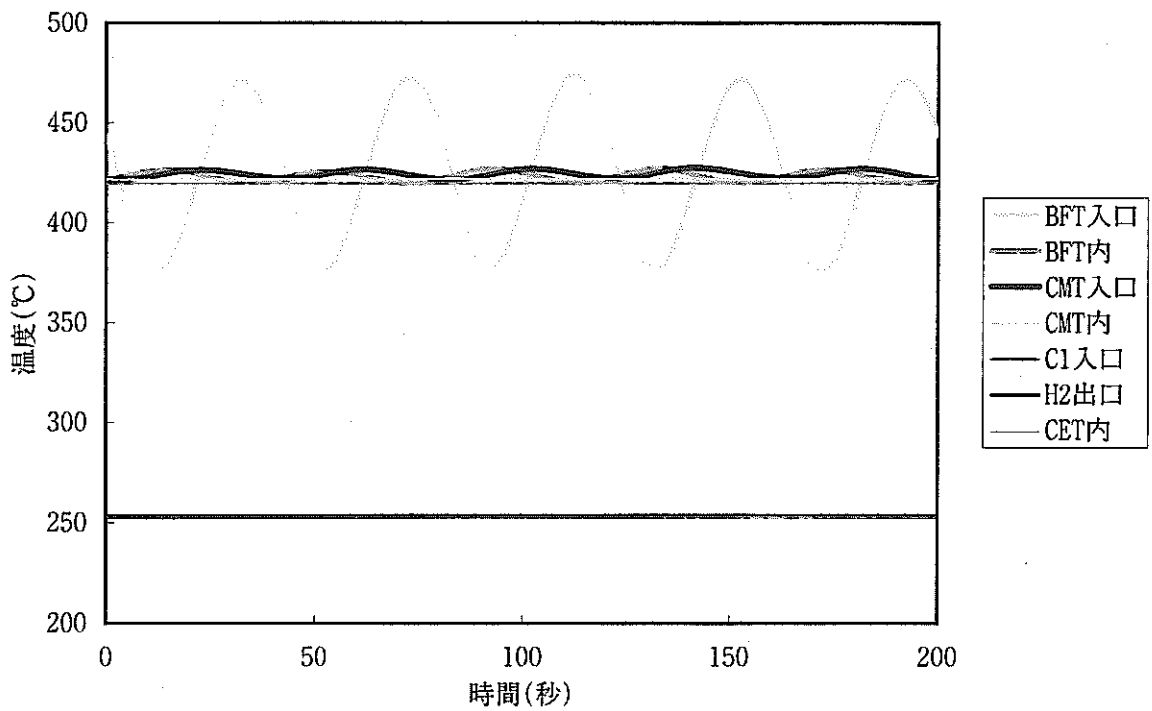


図5.16 TTSループ内各部の温度変動状況

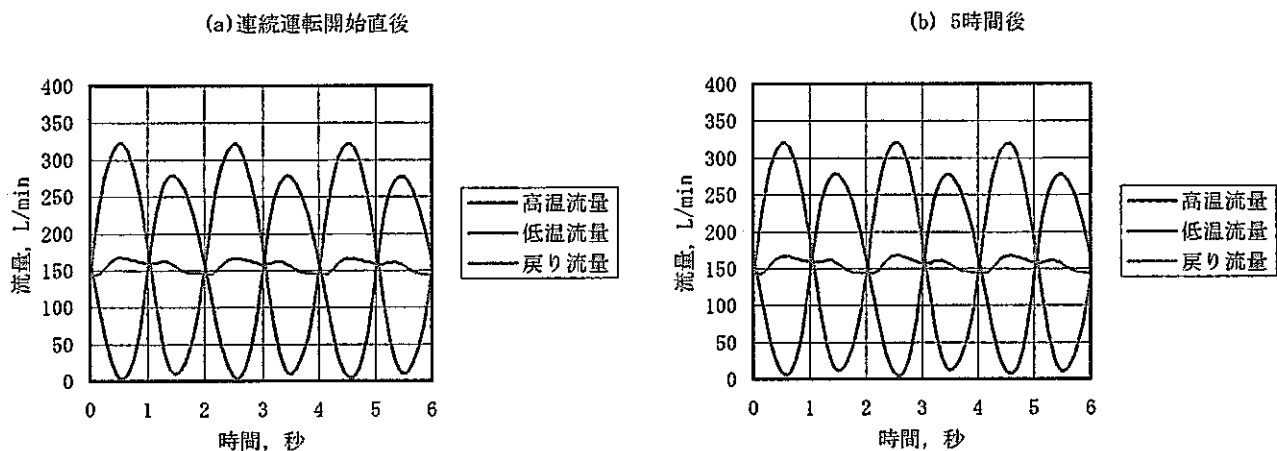


図5.17 ナトリウム流量の安定状況

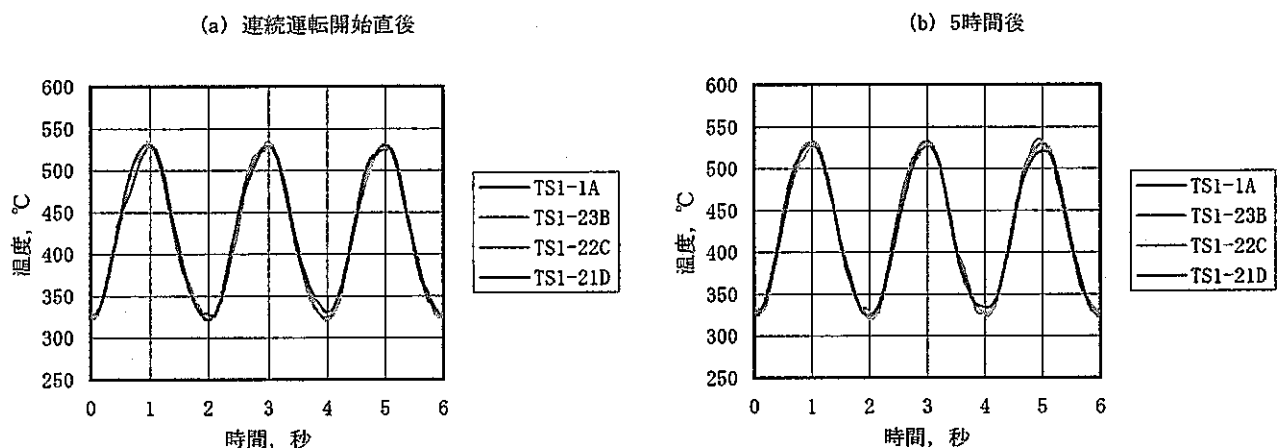


図5.18 試験体内ナトリウム温度の安定状況

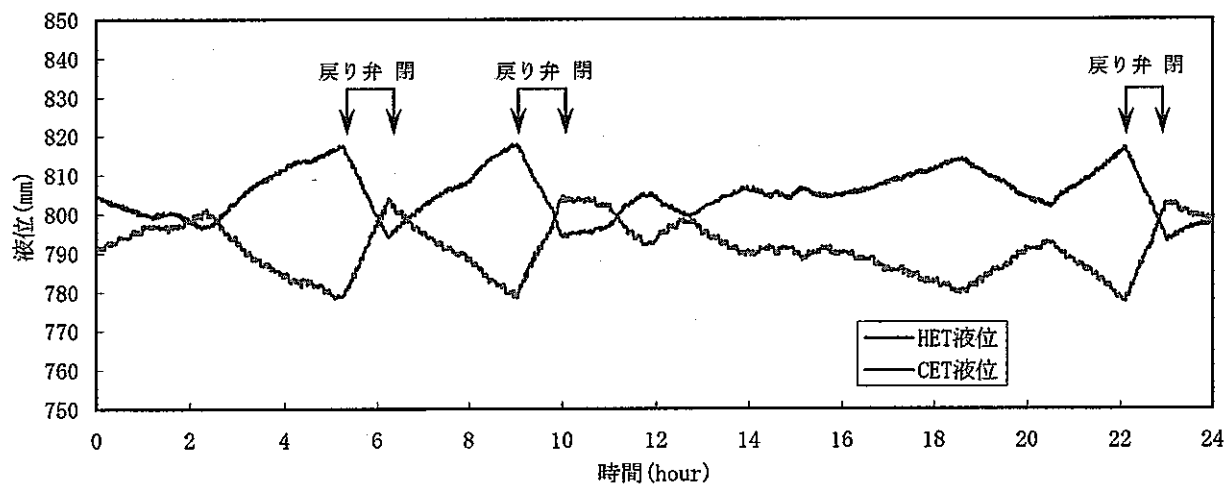
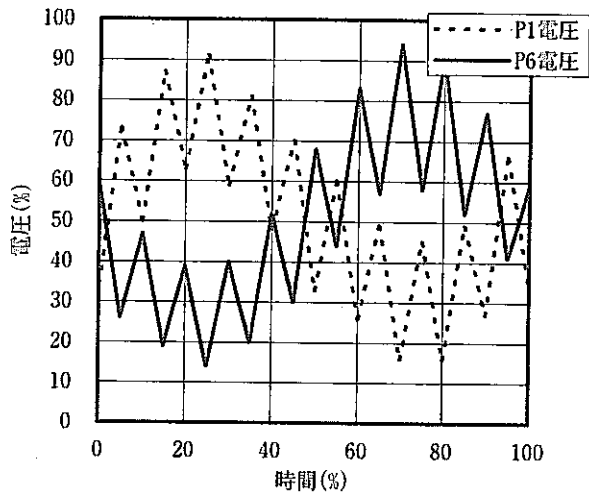
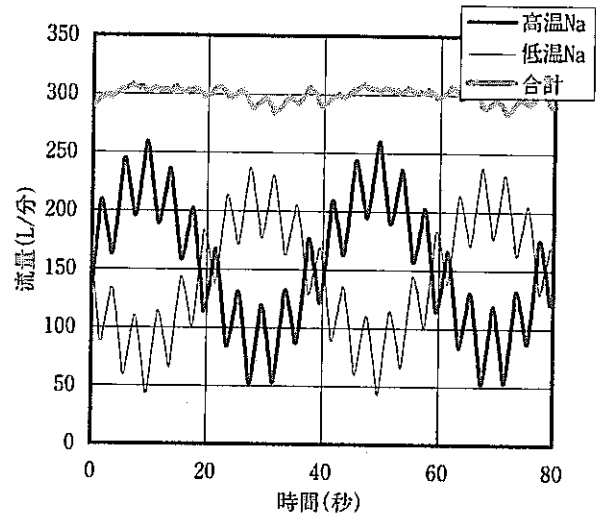


図5.19 ヘッドタンク液位の自動調整状況

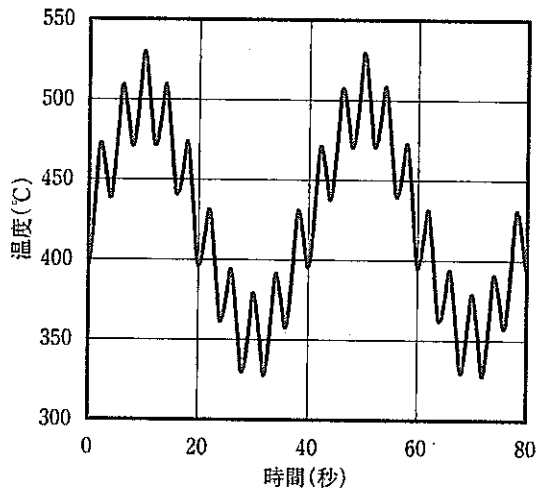
(a) 電磁ポンプ制御信号



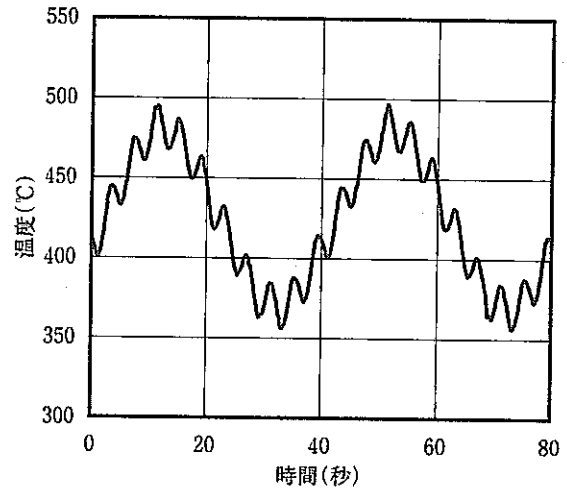
(b) ナトリウム流量の履歴



(c) TS1におけるナトリウム温度の履歴



(d) TS8におけるナトリウム温度の履歴



(e) 温度変動のスペクトル

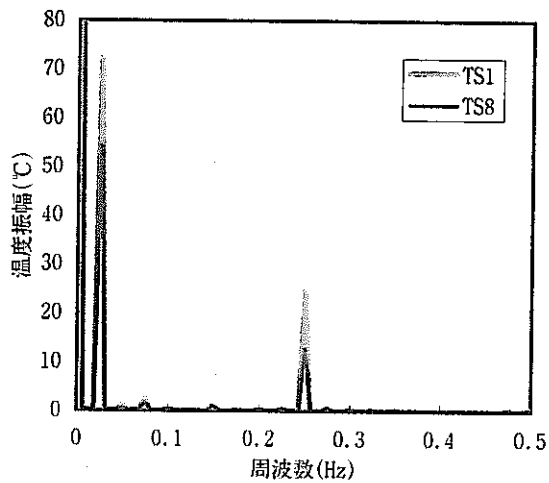


図5.20 異周波数温度変動の重畳制御例

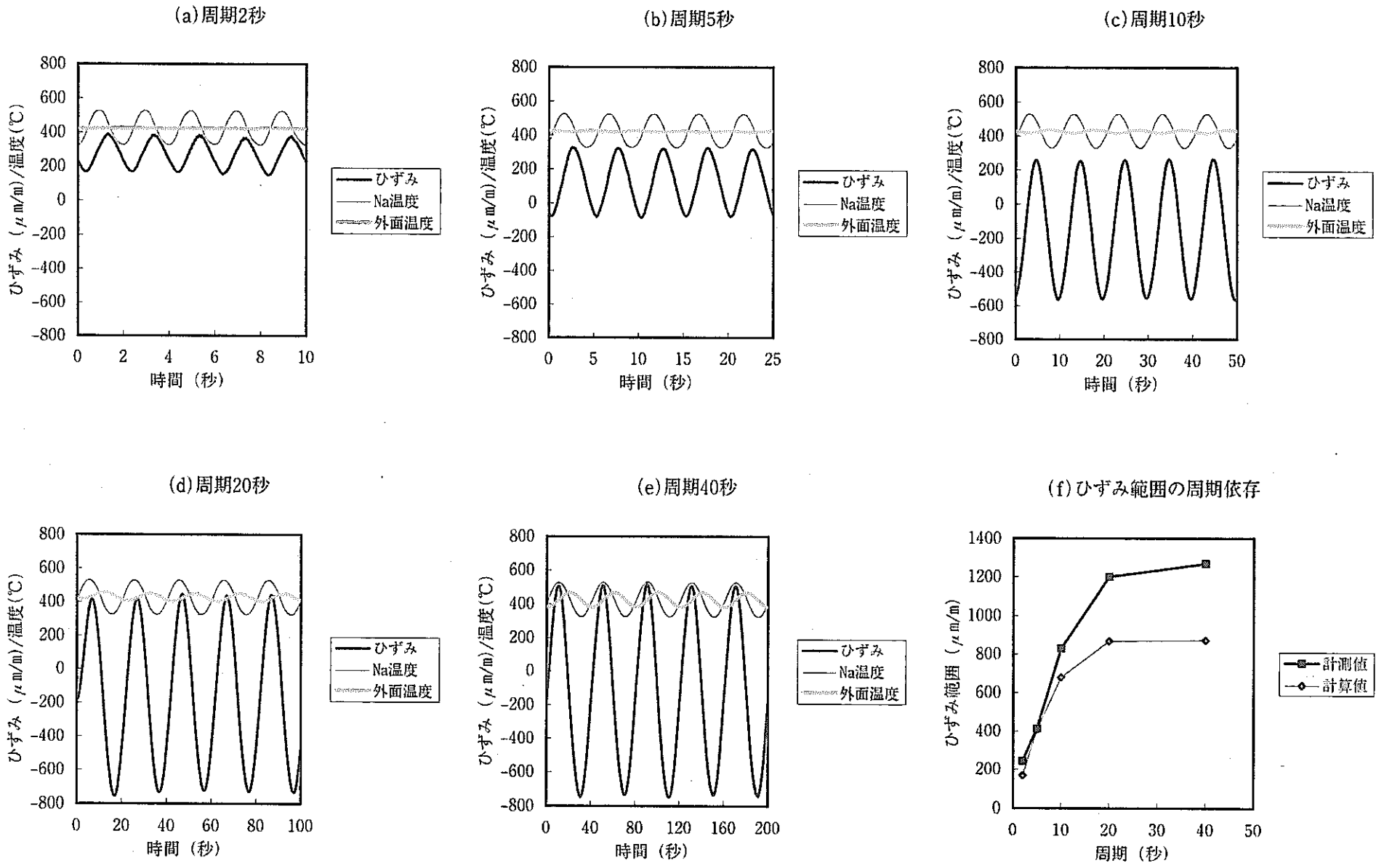


図5.21 外面軸方向ひずみの計測結果

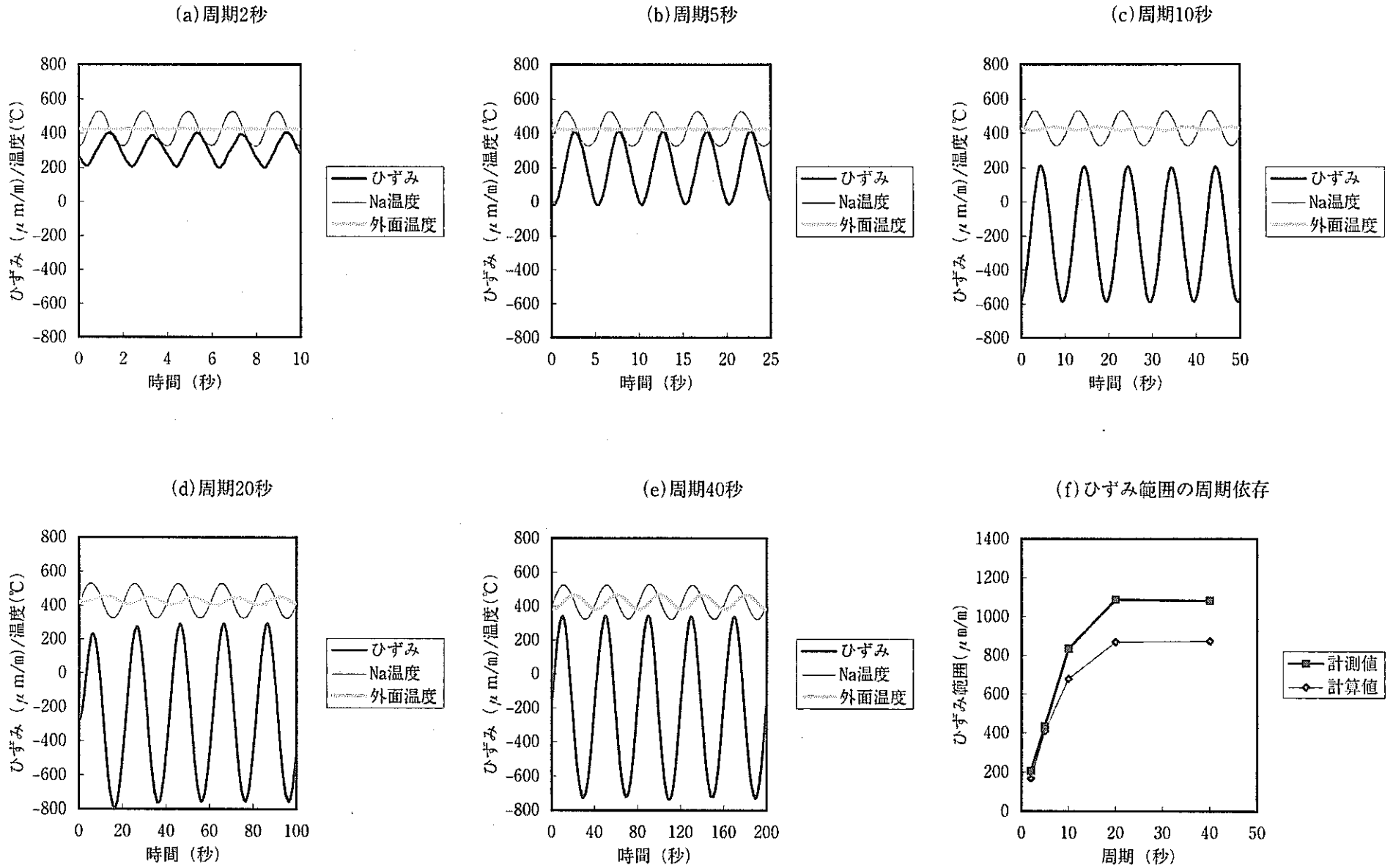


図5.22 外面周方向ひずみの計測結果

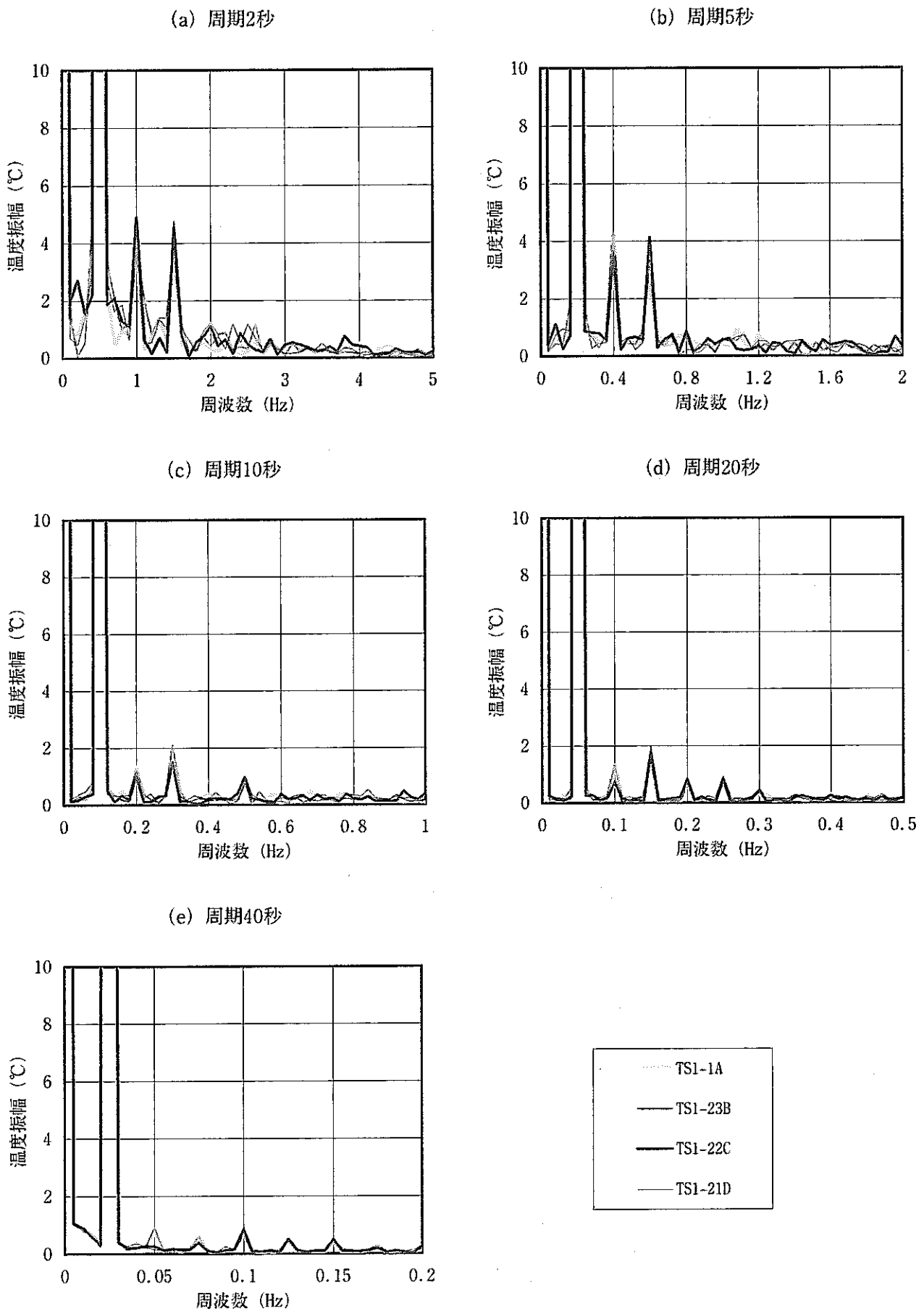


図6.1 上流部(TS1)でのナトリウム温度変動のスペクトル

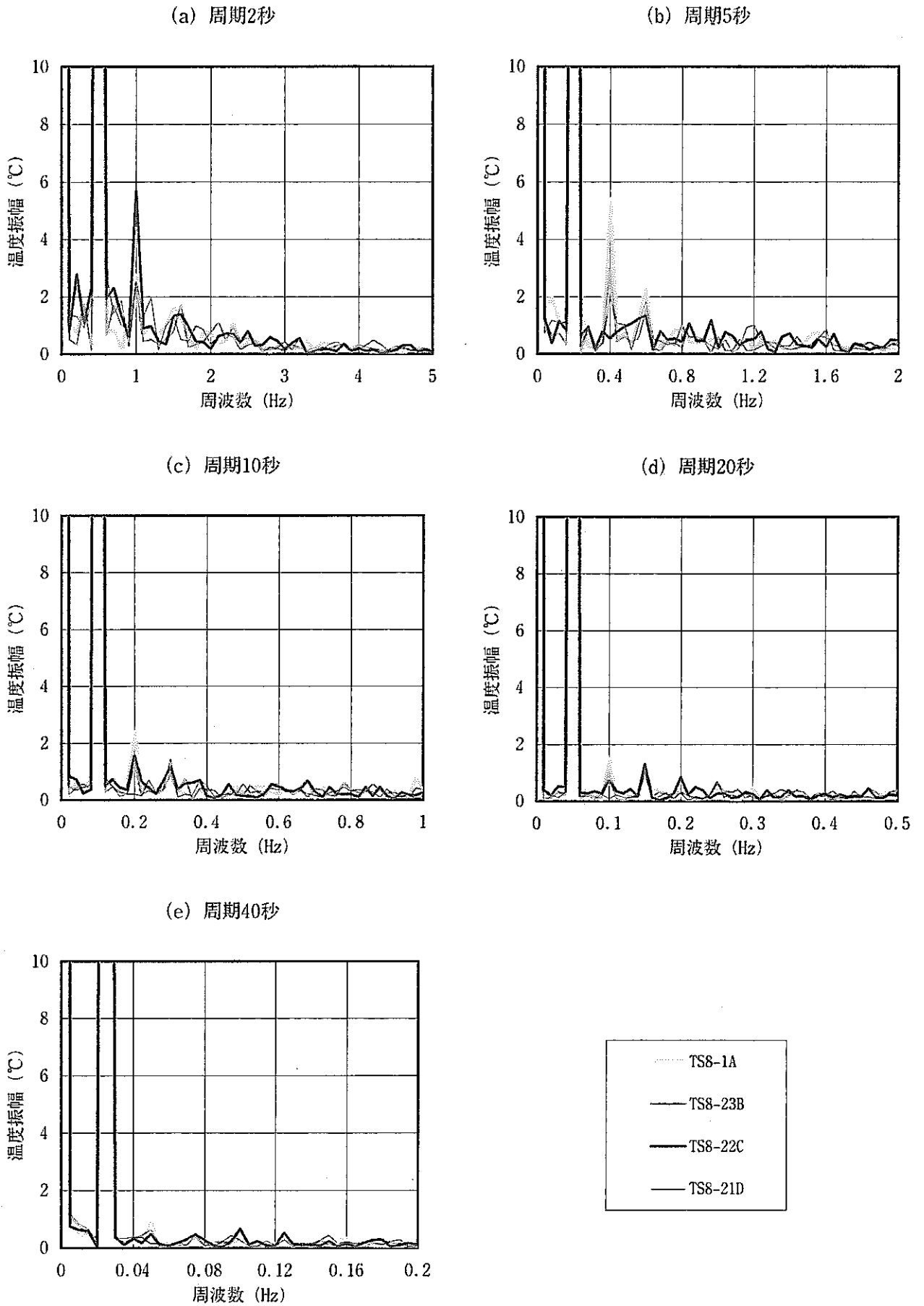


図6.2 下流部(TS8)でのナトリウム温度変動のスペクトル

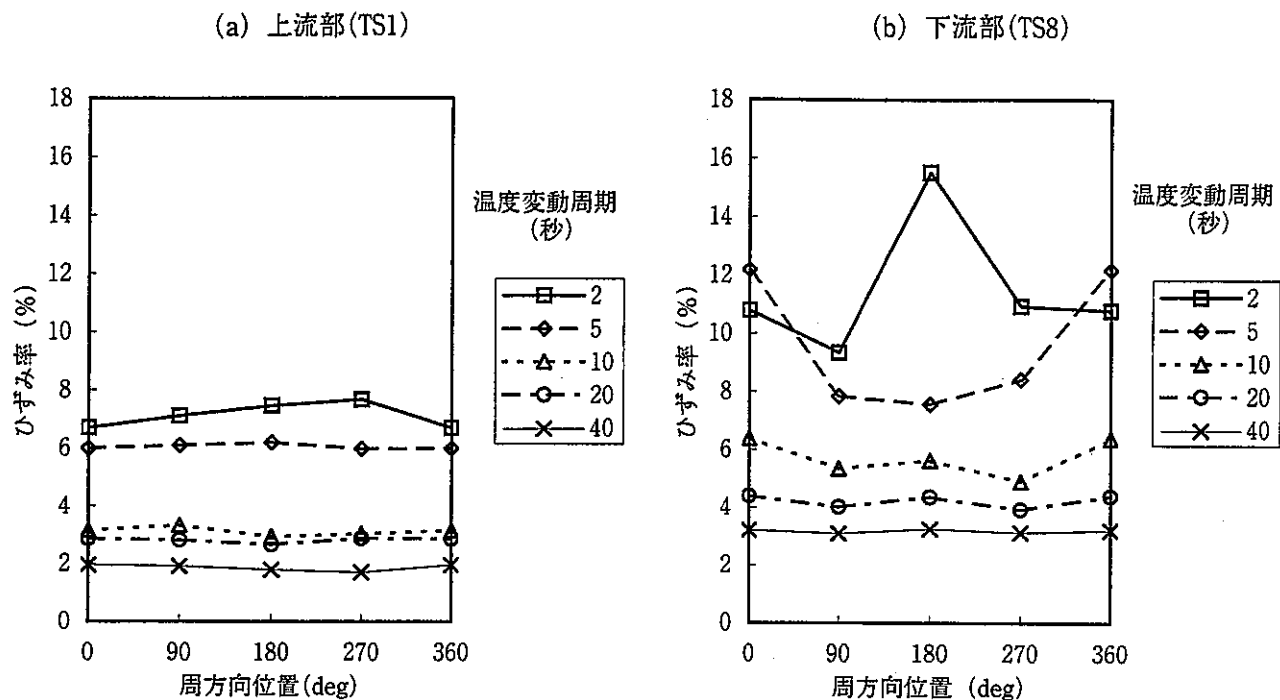
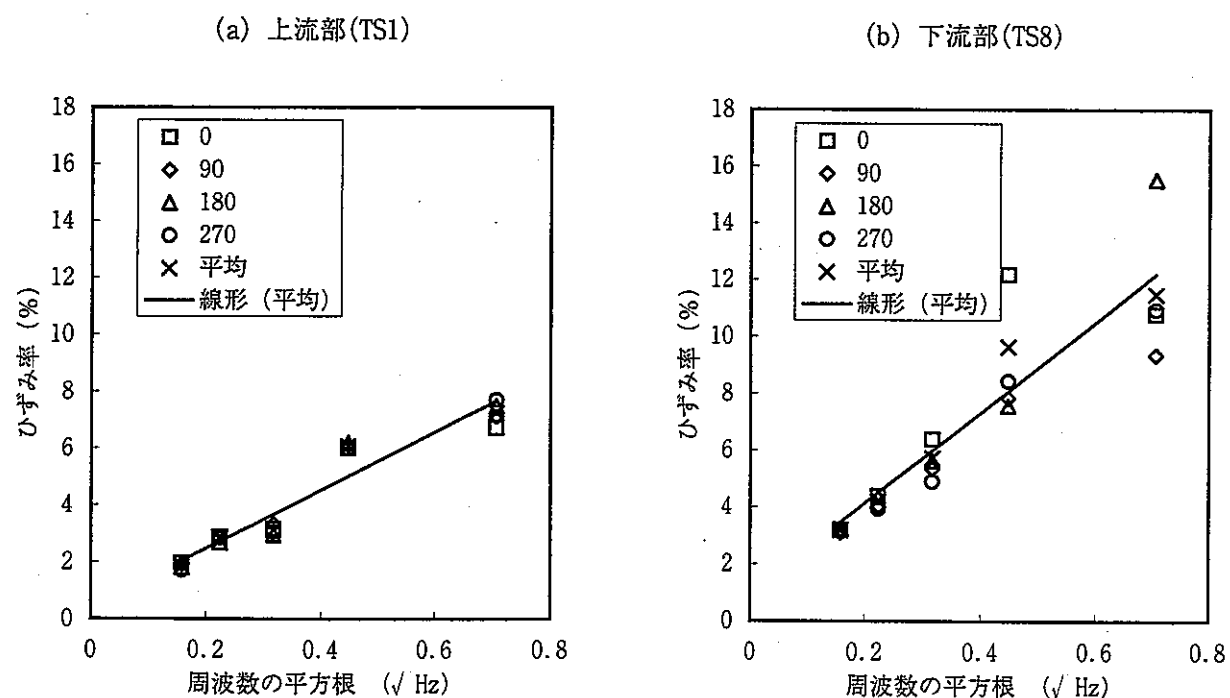


図6.3 ナトリウム温度変動ひずみ率の周方向分布



凡例: 周方向位置 (deg)

図6.4 ナトリウム温度変動ひずみ率の周波数依存

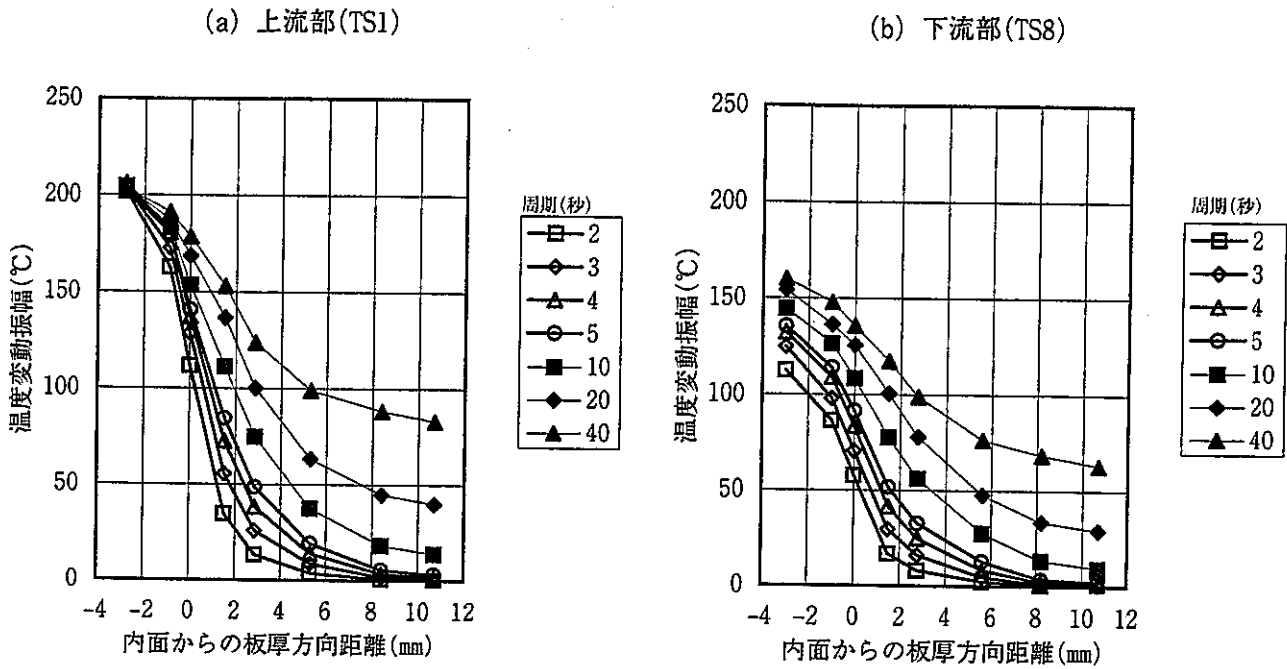


図6.5 板厚内の温度変動振幅の分布

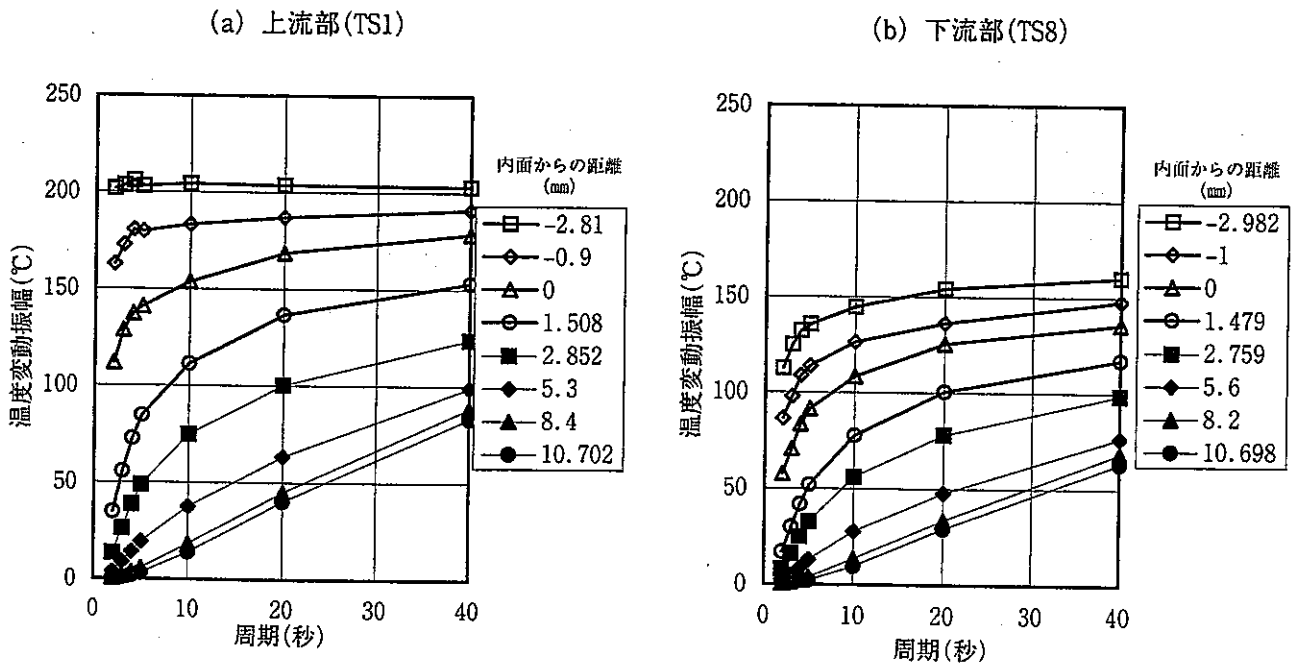
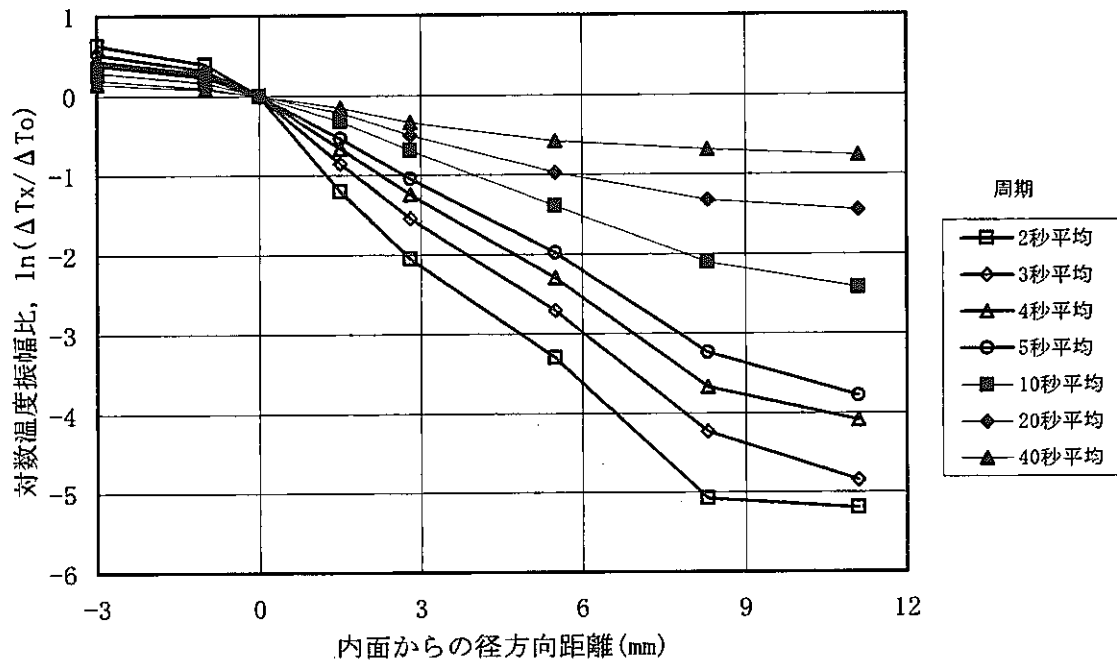


図6.6 温度変動の周期と振幅の関係

(a) 径方向分布



(b) 周波数依存性

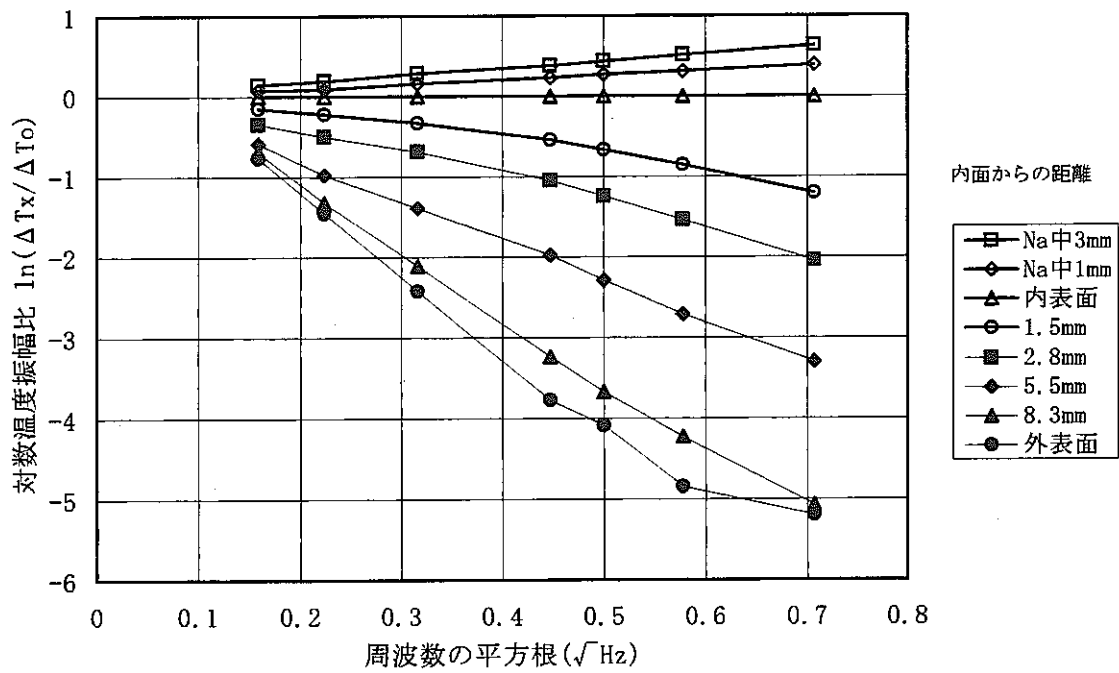
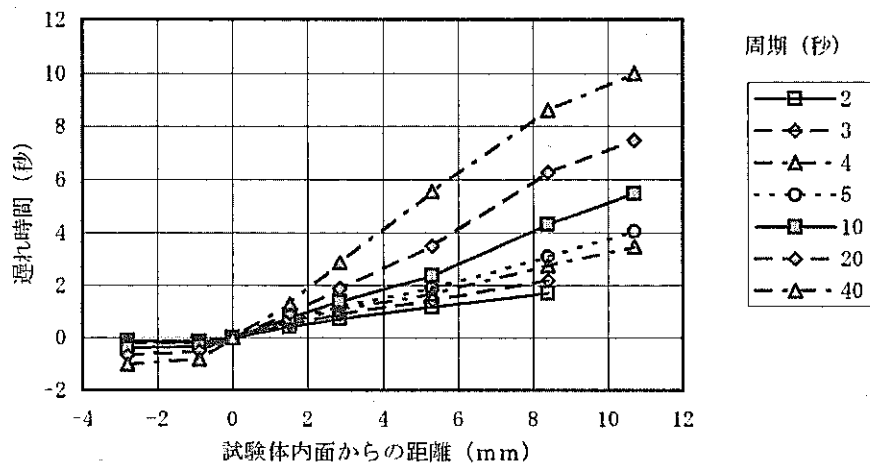
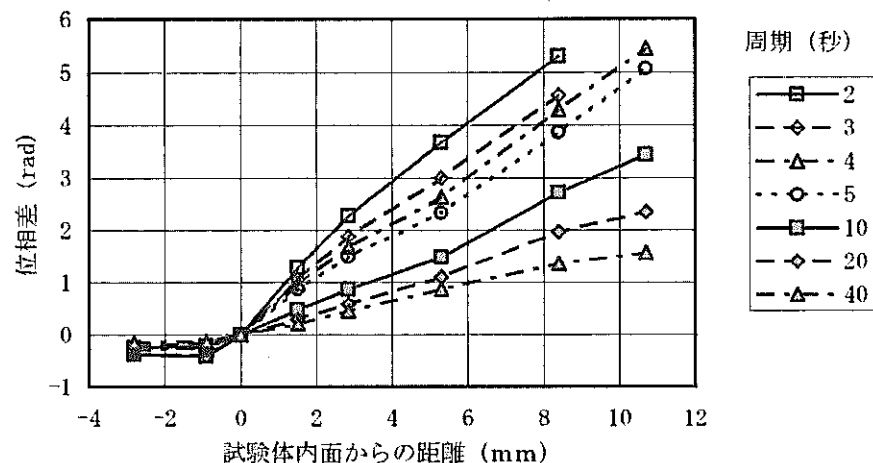


図6.7 対数温度変動振幅比の分布

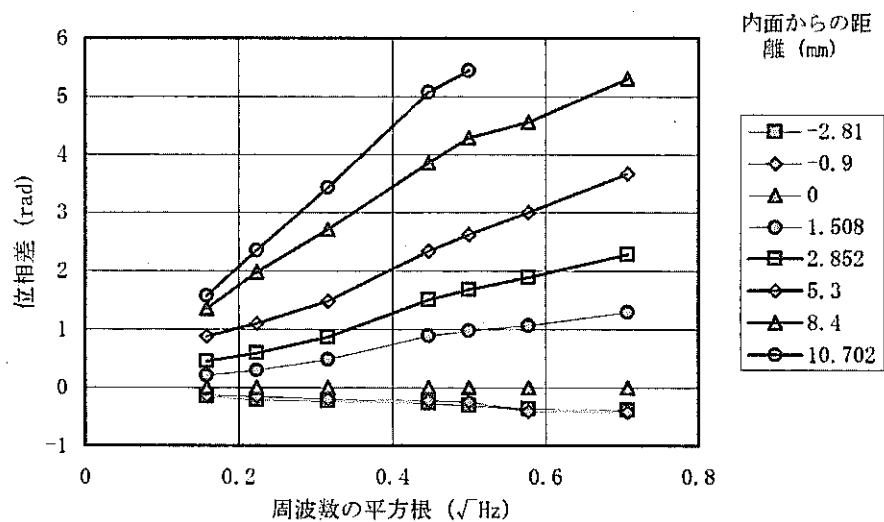
(a) 温度変動の径方向伝播の時間遅れ
内表面基準



(b) 温度変動の径方向伝播の位相遅れ
内表面基準



(c) 周波数と位相遅れの関係



(d) 位相遅れの勾配

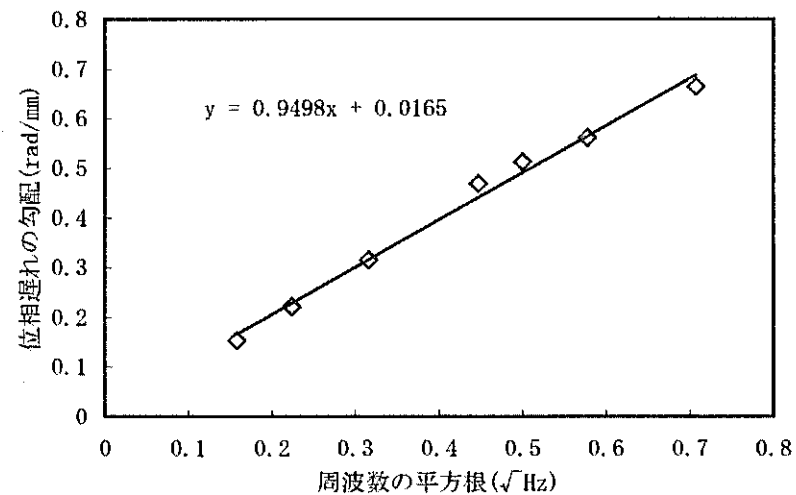
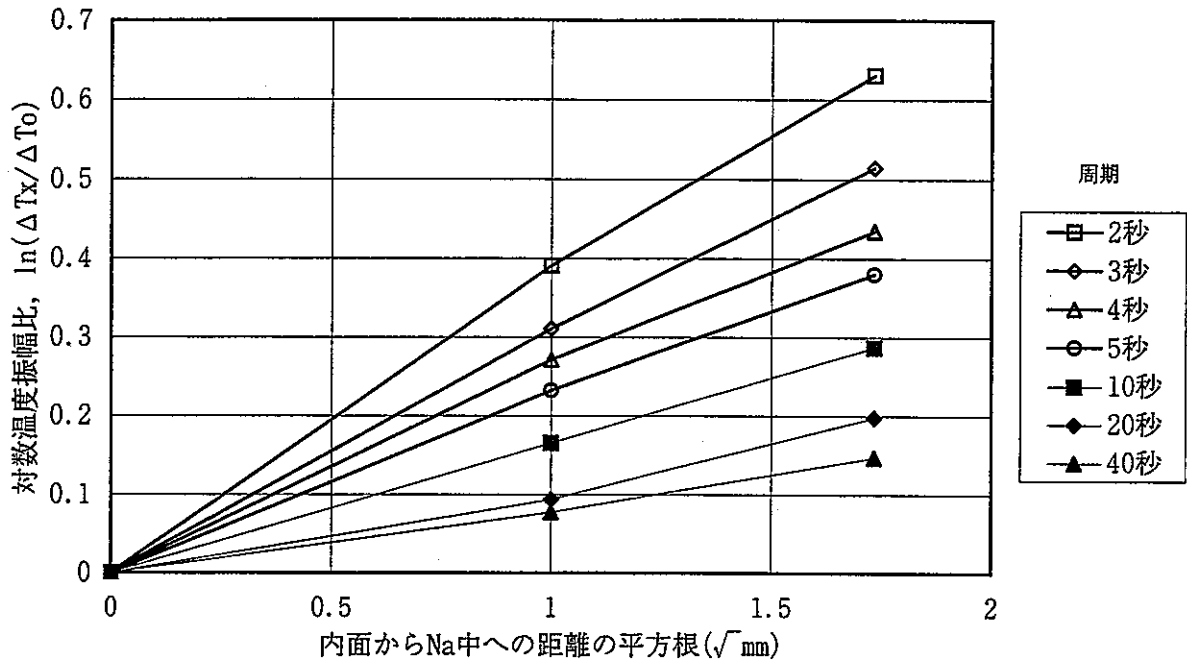


図6.8 位相遅れの分布

(a) 径方向分布



(b) 周波数依存性

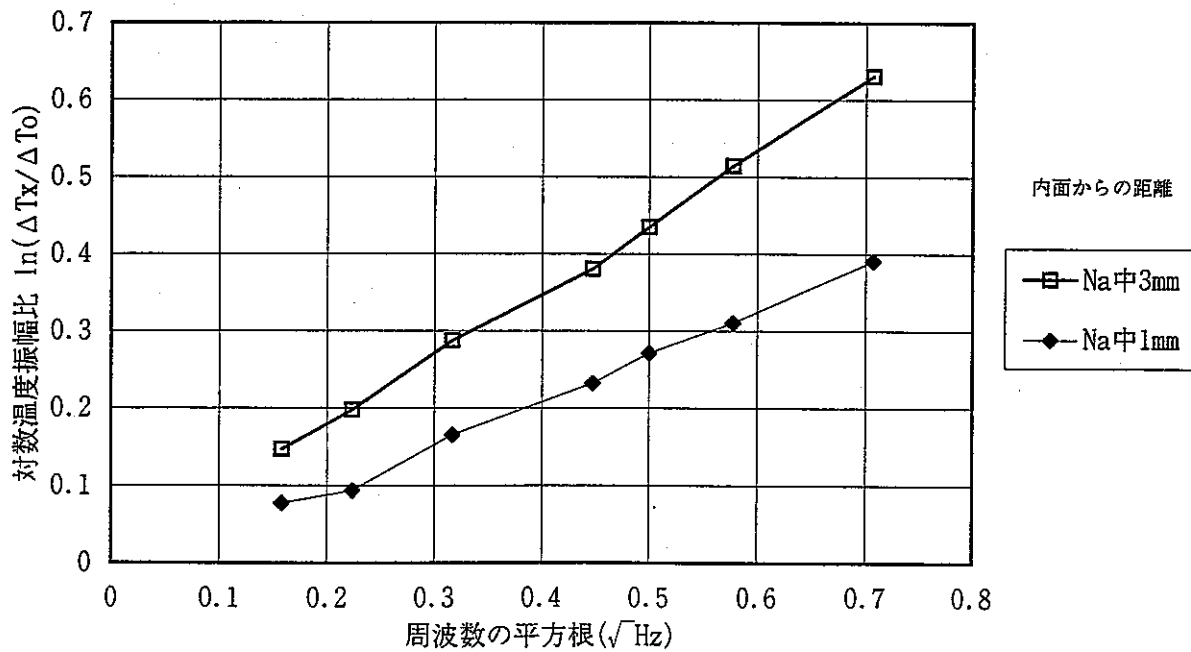


図6.9 ナトリウム中の対数温度変動振幅比の分布

(a) 上流部(TS1)

(b) 下流部(TS8)

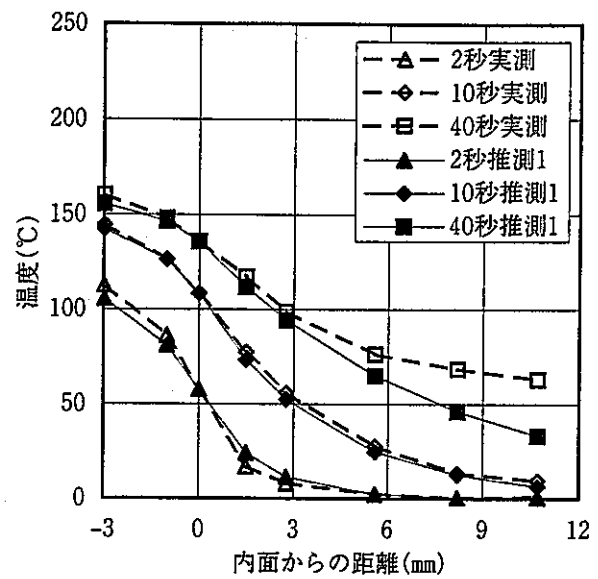
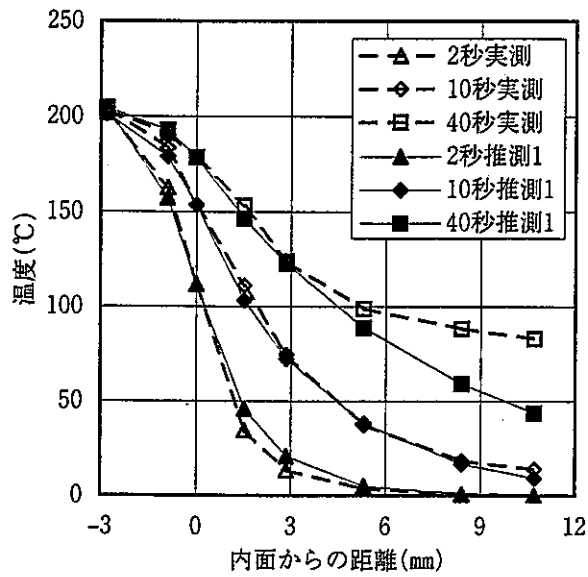


図6.10 径方向温度の推測結果 I

(a) 上流部(TS1)

(b) 下流部(TS8)

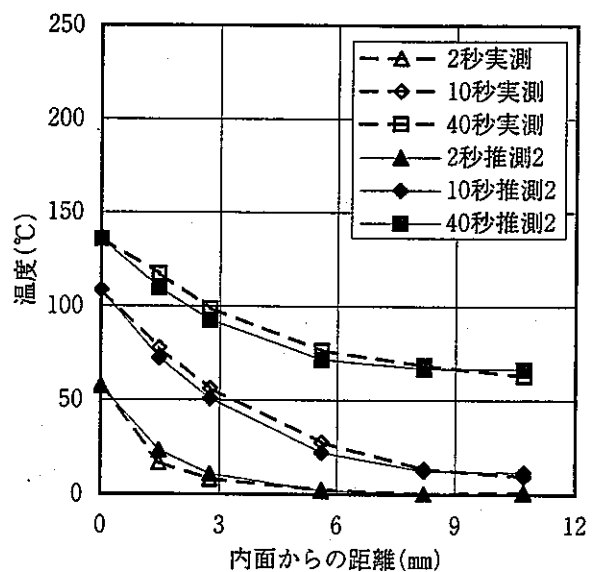
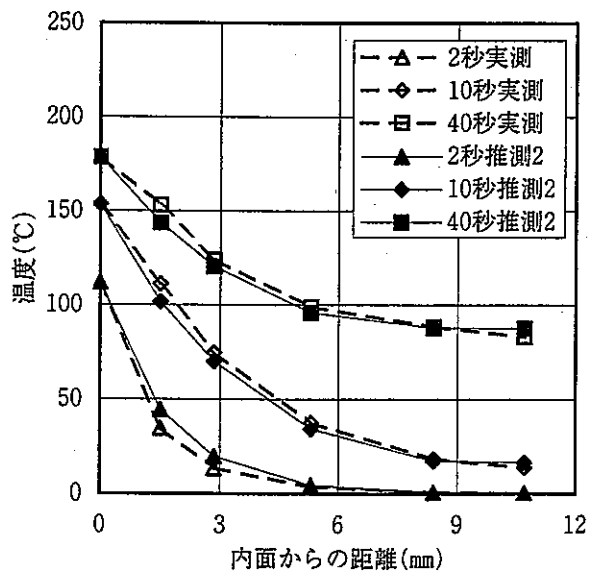
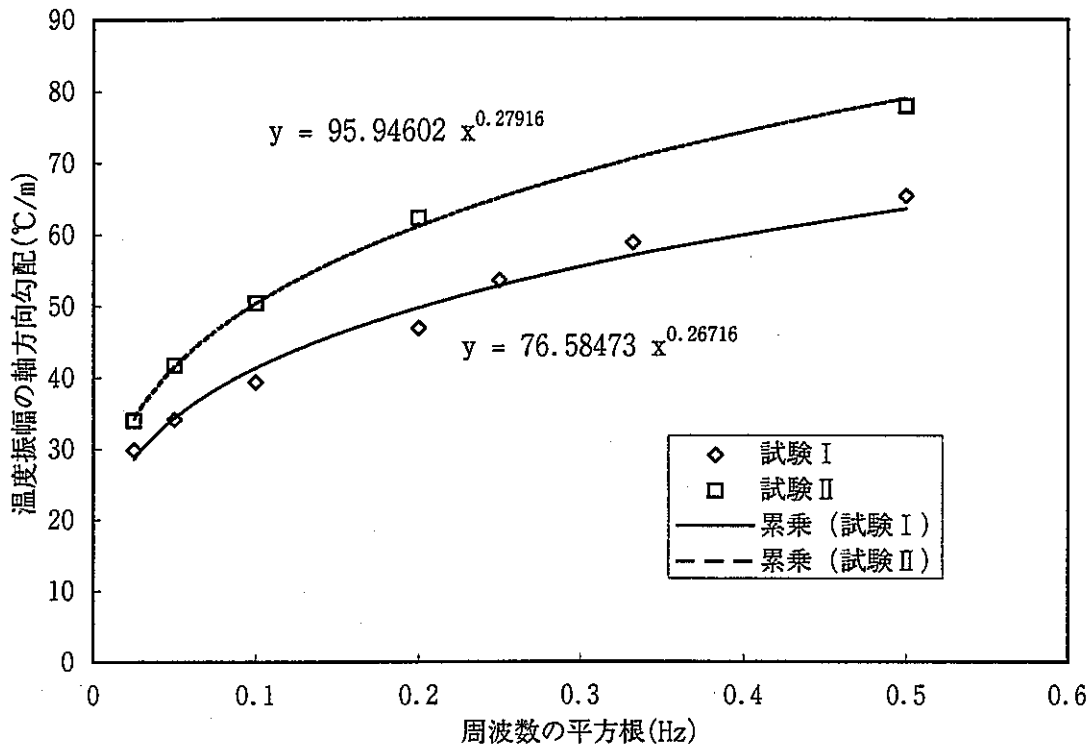


図6.11 径方向温度の推測結果 II

(a) 周波数と温度振幅勾配



(b) 周波数の平方根と温度振幅勾配

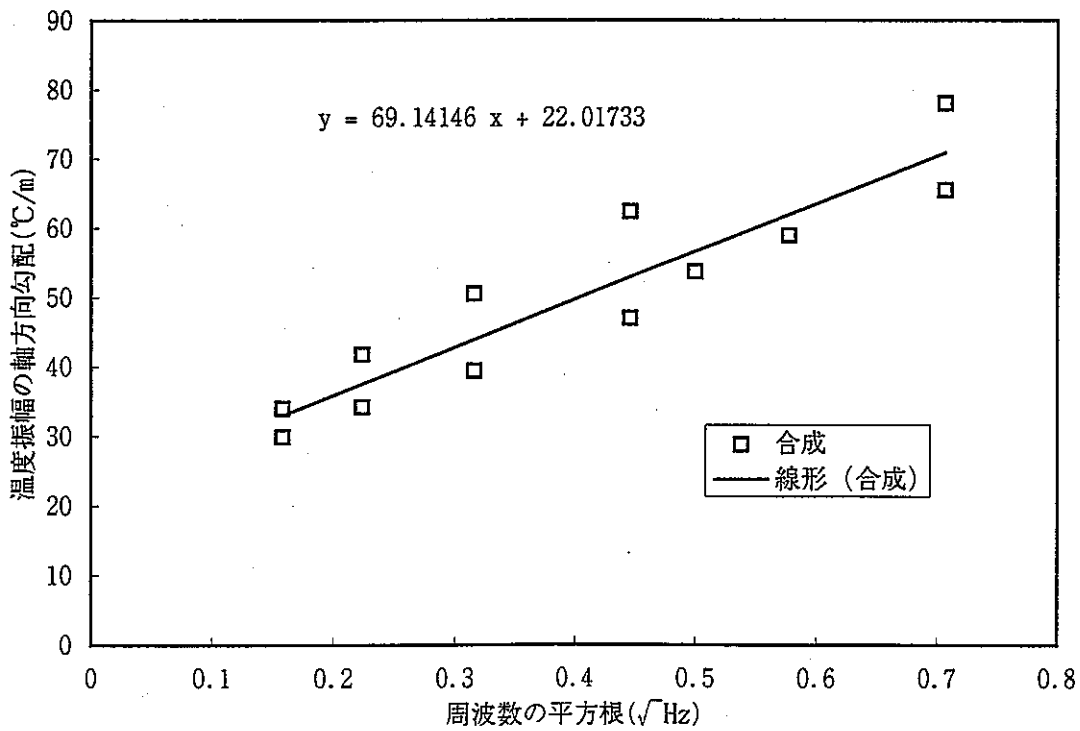


図6.12 軸方向温度振幅勾配の周波数依存