

# サーマルストライピング現象の熱流動 に関する実験研究

— 平行三噴流体系を用いたナトリウムおよび水の  
温度変動特性の比較 —

(研究報告書)

2003年6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製・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)  
2003

サーマルストライピング現象の熱流動に関する実験研究  
—平行三噴流体系を用いたナトリウムおよび水の温度変動特性の比較—  
(研究報告書)

木村暢之<sup>1)</sup>、三宅康洋<sup>2)</sup>、宮越博幸<sup>1)</sup>  
長澤一嘉<sup>3)</sup>、五十嵐実<sup>1)</sup>、上出英樹<sup>1)</sup>

要旨

高速炉において、温度の異なる流体が混合し、その際に発生する温度変動が構造材へ伝わることにより、構造材に高サイクル熱疲労をもたらす現象（サーマルストライピング現象）の評価手法を確立することは重要である。サーマルストライピング現象の評価において、流体中での温度変動特性、流体から構造材への温度変動の伝達特性、構造材中の温度変動の伝播特性を取り込んだ上で、構造健全性を評価することで、安全性担保と合理的な設計が可能となる。

高速炉の冷却材として検討されているナトリウムに比べ、一般産業で多く使用される水では、熱伝導率が約 1/100 であることから、温度変動特性が異なると考えられる。そこで、本研究では、3 本鉛直壁噴流体系のナトリウム試験と水試験をほぼ同一の寸法形状で実施し、ナトリウムと水の物性の違いによる噴流間混合現象への影響を評価した。試験パラメータとしては、水試験をリファレンスとし、ナトリウム試験において、流速を同じにしたケースと  $Re$  数を同じにしたケースの 2 ケース行った。また、噴流の混合形態の異なる条件として 3 本の噴流の吐出速度が等速条件、非等速条件、ならびに 1 本の噴流の流速をゼロとした 2 噴流条件の 3 パターン実施した。

その結果、各噴流条件ともナトリウムの方が水に比べて、噴流間の流体混合が発生する領域が下流側になることが明らかとなった。また、温度変動のパワースペクトル密度（PSD）は、流速一致条件でナトリウムと水の結果が一致した。壁面近傍では、水に比べて、ナトリウムの温度変動の PSD は低周波数成分側が小さくなることがわかった。

構造材の疲労損傷を評価する上で重要な変動の振幅とその頻度を分析する上で、流体温度変動の波形分析（レインフロー法）を行った結果、全体的な傾向はナトリウムと水で一致した。

これらのことから、温度変動の空間分布、周波数および振幅に関して、同一寸法形状、流速一致条件での水試験により得られた結果を使用して実機を評価できる見通しが得られた。

---

本報告書には、(株) エヌデーデーおよび (株) NESI が核燃料サイクル開発機構（機構担当部課室：要素技術開発部新技術開発試験グループ）との契約により実施した業務成果に関するものを含み、核燃料サイクル開発機構が取りまとめたものである。

<sup>1)</sup> サイクル機構、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

<sup>2)</sup> 株式会社エヌデーデー

<sup>3)</sup> 株式会社 NESI

**Experimental Study on Thermalhydraulics in Thermal Striping Phenomena**  
**- Comparison of Temperature Fluctuations between Sodium and Water -**  
(Research Report)

Nobuyuki KIMURA<sup>1)</sup>, Yasuhiro MIYAKE<sup>2)</sup>, Hiroyuki MIYAKOSHI<sup>1)</sup>  
Kazuyoshi NAGASAWA<sup>3)</sup>, Minoru IGARASHI<sup>1)</sup> and Hideki KAMIDE<sup>1)</sup>

**ABSTRACT**

A quantitative evaluation on thermal striping, in which temperature fluctuation due to convective mixing causes high cycle thermal fatigue in structural components, is of importance for structural integrity and reactor safety.

Thermal conductivity of sodium is approximately 100 times larger than that of water. Thus, temperature fluctuation characteristics will be different between sodium, which is used as a coolant of a fast reactor, and water, which is used in general industries. In this study, a comparison of convective mixing among jets was performed in parallel triple wall jets with the same geometries between sodium and water. The discharged velocity in the sodium experiment was experimental parameter and set at the same velocity and the same Reynolds number in comparison with the water experiment. And also, the velocity ratio among the triple jets was varied to change flow pattern.

It was seen that the water jets were mixed in slightly closer region to the nozzle than in sodium jets. As for the power spectrum densities (PSD) of temperature fluctuation, the PSD of sodium was similar to the PSD of water under the same discharged velocity condition. At the neighborhood of the wall, the lower frequency component in the PSD of sodium decreased in comparison with the PSD of water.

It was shown that the amplitude and frequency characteristics obtained by rain-flow method, which was important to evaluate structural damage by the thermal fatigue, were identical between sodium and water overall.

These experimental results show that water experiment could simulate the frequency and the amplitude in temperature fluctuation characteristics in the sodium cooled reactor.

---

1) Japan Nuclear Cycle development Institute, O-arai Engineering Center, Advanced Technology Division, New Technology Development Group

2) NDD

3) NESI Incorporation

## 目次

1. 序論 .....	1
2. 実験 .....	2
2.1 水試験装置 (WAJECO) .....	2
2.1.1 試験装置 .....	2
2.1.2 温度計測 .....	2
2.2 ナトリウム試験装置 (PLAJEST) .....	3
2.2.1 試験装置 .....	3
2.2.2 温度計測 .....	3
2.3 実験条件 .....	4
3. 実験結果 .....	6
3.1 時間平均温度場における水とナトリウムの比較 .....	6
3.1.1 時間平均温度、温度変動強度コンターの比較 .....	6
3.1.2 時間平均温度、変動強度分布の比較 .....	7
3.1.3 温度変動強度の奥行き方向分布の比較 .....	8
3.2 温度変動特性における水とナトリウムの比較 .....	10
3.2.1 パワースペクトル密度の比較 .....	10
3.2.2 ストローハル数によるパワースペクトル密度の比較 .....	10
4. 考察 .....	12
4.1 低温噴流の揺れ幅に伴う流体混合位置の検討 .....	12
4.2 レインフロー法による温度変動特性の比較 .....	12
5. 結論 .....	15
謝辞 .....	17
参考文献 .....	18

## 記号リスト

D	: 水力等価直径 (= $0.02\text{m}$ )
N	: 時系列データ数
Re	: Reynolds 数
r	: 噴流吐出速度比 (= $V_c/V_h$ )
St	: Strouhal 数
T	: 瞬時の温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{\text{avg}}$	: 時間平均温度
$T_{\text{avg}}^*$	: 時間平均無次元温度
$T_c$	: 低温噴流温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_h$	: 高温噴流温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{\text{RMS}}$	: 温度変動強度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{\text{RMS}}^*$	: 規格化温度変動強度
t	: 任意時刻 (s)
$V_c$	: 低温噴流吐出速度 (m/s)
$V_h$	: 高温噴流吐出速度 (m/s)
$V_{\text{space}}$	: 噴流の空間平均吐出速度 (m/s)
x	: 水平方向位置 (m)
y	: 奥行き方向位置 (m)
z	: 鉛直方向位置 (m)
$\Delta T$	: 噴流吐出温度差 ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\nu$	: 動粘性係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

## 表リスト

Table 2.1 Experimental Conditions.

## 図リスト

- Fig.2.1.1 Experimental Loop. (WAJECO)  
 Fig.2.1.2 Schematic of Test Section. (WAJECO)  
 Fig.2.1.3 Discharged Nozzles of Triple Jets.(WAJECO)  
 Fig.2.1.4 Thermocouples Tree. (WAJECO)  
 Fig.2.2.1 Experimental Loop. (PLAJEST)  
 Fig.2.2.2 Test Plenum. (PLAJEST)  
 Fig.2.2.3 Discharged Nozzles of Triple Jets.(PLAJEST)  
 Fig.2.2.4 Movable Thermocouples Tree. (PLAJEST)  
 Fig.3.1.1 Comparisons of Time-Averaged Temperature Field between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.  
 Fig.3.1.2 Comparisons of Time-Averaged Temperature Field between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.  
 Fig.3.1.3 Comparisons of Time-Averaged Temperature Field between Sodium and Water under Double-Jet Condition.  
 Fig.3.1.4 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.  
 Fig.3.1.5 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.  
 Fig.3.1.6 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.  
 Fig.3.1.7 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.  
 Fig.3.1.8 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.  
 Fig.3.1.9 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth

- Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.
- Fig.3.1.10 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.
- Fig.3.1.11 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.
- Fig.3.1.12 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.
- Fig.3.1.13 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.
- Fig.3.1.14 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.
- Fig.3.1.15 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.
- Fig.3.1.16 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.
- Fig.3.1.17 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.
- Fig.3.1.18 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.
- Fig.3.1.19 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.
- Fig.3.1.20 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.
- Fig.3.1.21 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.
- Fig.3.1.22 Comparisons of Depth Distributions of Maximum Temperature Fluctuation Intensity at Each Cross-Section normal to Wall between

- Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.
- Fig.3.1.23 Comparisons Depth Distributions of Maximum Temperature Fluctuation Intensity at Each Cross-Section normal to Wall between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.
- Fig.3.1.24 Comparisons Depth Distributions of Maximum Temperature Fluctuation Intensity at Each Cross-Section normal to Wall between Sodium and Water under Double-Jet Condition.
- Fig.3.2.1 Comparisons of Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Frequency between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.
- Fig.3.2.2 Comparisons of Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Frequency between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.
- Fig.3.2.3 Comparisons of Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Frequency between Sodium and Water under Double-Jet Isovelocity Condition.
- Fig.3.2.4 Comparisons of Normalized Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Strouhal Number between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.
- Fig.3.2.5 Comparisons of Normalized Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Strouhal Number between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.
- Fig.3.2.6 Comparisons of Normalized Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Strouhal Number between Sodium and Water under Double-Jet Condition.
- Fig.4.1.1 Comparisons of Cold-Jet Fluctuating Characteristics between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.
- Fig.4.2.1 Comparisons of Wave Characteristics of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.
- Fig.4.2.2 Comparisons of Wave Characteristics of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.
- Fig.4.2.3 Comparisons of Wave Characteristics of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

- Fig.4.2.4 Comparisons of 2D-Histograms of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.
- Fig.4.2.5 Comparisons of 2D-Histograms of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition
- Fig.4.2.6 Comparisons of 2D-Histograms of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Double-Jet Condition.
- Fig.4.2.7 Comparisons of Histograms of Time-Period and Amplitude of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.
- Fig.4.2.8 Comparisons of Histograms of Time-Period and Amplitude of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.
- Fig.4.2.9 Comparisons of Histograms of Time-Period and Amplitude of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

## 1. 序論

原子炉や一般プラント等において、温度の異なる流体が混合する箇所では、流体温度差に起因する温度変動が発生し、構造材に繰り返し熱荷重が印加され、高サイクル疲労による損傷が生じる場合がある（サーマルストライピング現象、以下、本現象）<sup>[1]-[6]</sup>。液体金属冷却高速炉では、冷却材の熱伝導率が水に比べて約 100 倍大きいことから、流体中で発生した温度変動が構造材表面まで到達しやすいという特徴を有している。

流体中で発生する温度変動挙動は、流体の種類、流体の混合体系、フローパターン、混合前の流速等に影響される。構造材に温度変動が到達する過程において、流体中に生じた温度変動は、構造材近傍の境界層内で、温度変動の周波数や振幅が変化すると考えられる。また、流体から構造材への温度変動の伝達過程では、流体ならびに構造材の物性の影響を受け、流体中の温度変動の周期や振幅によって、構造材内部で発生する熱応力の値は変化する<sup>[7]</sup>。

核燃料サイクル開発機構では、本現象に対して、流体から構造材まで一貫して評価可能な非定常熱的応答挙動の解析評価システムの構築を行っている<sup>[8]-[10]</sup>。また、本現象への実験的なアプローチとして、実機の配管合流部を模擬した水試験を実施しており、配管の流速比をパラメータとしたフローパターンの違い、およびフローパターン毎の温度変動の発生メカニズムについて明らかにしている<sup>[11]-[13]</sup>。さらに、水を作動流体とした平行スリットからの 3 本鉛直噴流試験装置（WAJECO）を用い、噴流間の流体混合挙動を明らかにした<sup>[14]-[20]</sup>。また、WAJECO と同形状を有するナトリウム試験装置（PLAJEST）を用い、流体ならびに構造材の温度を詳細に計測している。その結果、流体から構造材への温度変動の熱伝達挙動を定量化した<sup>[21][22]</sup>。

流体中の混合特性を把握するためには、取扱の容易さや、流速計測手法の適用性などから、水を作動流体とした熱流動試験が多く実施されている。しかしながら、実機で使用されるナトリウムと水では、熱的な物性が大きく異なるため、水試験により得られた結果をそのまま実機評価に用いることはできず、作動流体の違いを定量的に把握する必要がある。

そこで、本報では、同形状を持つ 3 本鉛直壁噴流試験体系のナトリウム試験と水試験を実施し、ナトリウムと水の物性の違いによる噴流間混合現象への影響を評価することを目的とした。

## 2. 実験

中心に低温の噴流を、その左右に高温の噴流を配した平行三噴流間の噴流間混合過程について、噴流吐出ノズルをほぼ同一形状とした水およびナトリウム試験装置を製作し、詳細な温度計測をおこなった。

以下に水試験、および、ナトリウム試験装置の詳細を示す。

### 2.1 水試験装置 (WAJECO)

#### 2.1.1 試験装置

Fig.2.1.1 に実験装置系統図を示す。実験ループは、貯水タンク、高温水用循環ポンプ、低温水用循環ポンプ、および、ループ中の不純物除去のためのフィルター、加熱器（温水ボイラー）、空気冷却器、試験部矩形容器、試験部の液面制御用戻りポンプ、電磁流量計、弁より構成されている。2本の高温噴流の流量は2流路の差圧を測定し、調整する。

Fig.2.1.2 に試験部の詳細を示す。試験部は、矩形容器（2438mm（幅）×500mm（奥行き）×2438mm（高さ））内に設置されている。3本の噴流は、4つの同一形状ブロックの間隙より吐出する。中心の噴流が低温、外側の2本の噴流が高温である。ブロックを前後から挟む2枚の仕切板は、噴流を準2次元的な挙動に近づけるために設置した。2枚の仕切板の間隔は169mmである。噴流吐出口のスリット幅は20mm、3本の噴流吐出口の間隔は、噴流の中心-中心間で70mmである。座標系は、仕切板に平行な水平方向を  $x$ 、板の法線方向を  $y$ 、鉛直方向を  $z$  とした。また、原点は、仕切板表面( $y$ )、低温噴流の中央( $x$ )、ノズル出口高さ( $z$ )とし、板に平行な右方向に  $x$  を正、板から離れる法線方向に  $y$  を正、上方に  $z$  を正とした。

Fig. 2.1.3 に噴流吐出ノズルの概略を示す。高温、低温の配管から供給された流体は、ノズル部のバッファに流入し、四分円で縮流する。その後、各高温、低温の流体は多孔板を通過し、再度、四分円ノズルで縮流されて容器中に吐出する。吐出ノズルの形状はスリット状で20mm×169mmである。ノズルから吐出した流体は、仕切板で挟まれた領域を鉛直上方に流れる。

#### 2.1.2 温度計測

温度測定は、奥行き方向、ならびに鉛直方向に移動可能な駆動装置に複数本の熱電対が取り付けられた熱電対ツリーにより行った。Fig.2.1.4 に熱電対ツリー

の構造を示す。熱電対ツリーには、剥離防止のためのナイフエッジ断面形状の水平バーに 5mm 間隔で 39 本の熱電対が取り付けられている。熱電対は非接地 K 型熱電対（クロメルアルメル、シース径 0.25mm $\phi$ ）を 1mm $\phi$  ステンレスチューブに内挿し、先端の 5mm のみが流れ中に出るように設置した。水平バーに取り付けられた熱電対は、絶対校正を行った熱電対と一様温度の流体中に浸けることで相対校正を行い、測定誤差は 0.1 $^{\circ}$ C であった。熱電対の起電力信号を A/D 変換器にて収録し、その後校正曲線により温度データとした。流体混合場の温度は、奥行き方向に関しては、熱電対測定位置を壁からの距離( $y$ )が 0.5、1、2、4、6、10、15、20、40、85mm となるように移動させ、鉛直方向に関しては噴流吐出口から高さ( $z$ )500mm までを 10mm ピッチで上昇させて計測した。サンプリング周波数は 100Hz で、各熱電対に対し、計測位置毎に 4200 点（約 42s）の時系列データを取得した。

## 2.2 ナトリウム試験装置 (PLAJEST)

### 2.2.1 試験装置

Fig. 2.2.1 に実験ループの概略を示す。実験ループは、空気冷却器、電気ヒータによる加熱器(最大出力 300kW)、電磁ポンプ(最大ナトリウム流量 1600l/min)、流量調節弁、電磁流量計、および試験容器より形成される。ナトリウムは高温ライン 2 系統、低温ライン 1 系統の計 3 系統を通して試験容器に流入する。

Fig. 2.2.2 に試験容器の概略を示す。試験容器は外径 1400mm、高さ 2900mm の円筒容器である。試験容器は、流入したナトリウムを噴流として吐出させるための噴流吐出ノズル、流体中の温度を計測するために複数の熱電対が取り付けられた上下可動式熱電対ツリー、構造材中の温度を計測するために熱電対を埋め込んだ熱応答供試板（仕切板の片側に相当）より構成される。

Fig. 2.2.3 に噴流吐出ノズルの概略を示す。ノズル形状は、20mm $\times$ 180mm と奥行き方向の長さが若干、長くなっていることを除き、噴流吐出ノズルの形状は流入部を含め、水試験とほぼ同じである。座標系は、水試験と同様に、仕切板に平行な水平方向を  $x$ 、板の法線方向を  $y$ 、鉛直方向を  $z$  とした。

### 2.2.2 温度計測

温度計測は、Fig. 2.2.4 に示す熱電対ツリーにより行った。熱電対は熱応答供試板表面から板の法線方向（奥行き方向）に  $y=0.5$ mm、10mm、40mm、90mm の位置に各 25 本ずつ取り付けられている。各奥行き断面の熱電対は、噴流間の

流体混合が活発に起こる領域付近は水平方向に 5mm 間隔、それ以外は 10mm 間隔で設置した。熱電対は、K 型非接地タイプで、シース外径 0.3mm および 0.5mm である。熱電対は流線型のステイより長さ 55mm、外径 1mm の SUS 製保護管の中を通り、先端の 5mm のみ流体中に置かれている。熱電対のシースはステイ、支持管を通り、試験容器外へ取り出される。熱電対ツリーは、上下に移動することができ、任意の高さ位置で流体中の温度を計測することができる。

温度計測は、熱電対からの起電力信号を零接点補償器に通し、直流アンプにより増幅し、電源ノイズ等を消去するための 40Hz のローパスフィルタを通した後に、16bit の AD 変換ロガーにより収録を行った。その他の物理量（流量、Na 液位、カバーガス圧力）は各変換器よりロガーへ接続して収録した。主循環系電磁流量計、および 3 本の噴流に対応する配管に接続された電磁流量計は、試験容器からの落下法により絶対校正を行った。熱電対は、ノズル出口の 3 本を単体で絶対校正を行い、熱電対ツリーおよび熱応答供試板の大部分の熱電対は、250℃、300℃、350℃、400℃において、ノズル出口の 3 本の熱電対の起電力計測結果の平均を基に相対校正を行った。

実験は、所定の流量・温度に設定した後、半日程度定常状態を保持し、熱電対ツリーおよび熱応答供試板の時間平均温度に変化のないことを確認した後にデータ収録を開始した。

計測は、熱電対ツリーを最下端（噴流吐出口より 5mm）に下げた状態から行い、その後、噴流吐出口高さから 10mm、20mm、．．．、500mm（最上部位置）と 10mm ピッチで熱電対ツリーを上昇させ、各位置で熱電対ツリー、熱応答供試板、噴流吐出口温度、およびプロセス量を取得した。各位置でのデータは、10ms (=100Hz サンプリング) 間隔で 20000 点 (=200s) 収録した。

### 2.3 実験条件

Table 2.1 に水およびナトリウム試験の実験条件を示す。ここで示した無次元数 ( $Re$  数) は以下の定義に基づく。

$$Re = \frac{V_{space} D}{\nu} \quad (2.1)$$

ここで、 $D$  はノズルのスリット幅 (20mm) とした。また、噴流吐出温度差  $\Delta T$ 、3 本の噴流の平均吐出速度  $V_{space}$ 、平均吐出温度  $T_{space}$  を以下の式で定義した。 $T_h$ 、 $T_c$  は高温、低温噴流の吐出温度、 $V_h$ 、 $V_c$  は高温、低温噴流の吐出速度である。

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (2.2)$$

$$V_{space} = \frac{V_c + 2 \times V_h}{3} \quad (2.3)$$

$$T_{space} = \frac{T_c + 2 \times T_h}{3} \quad (2.4)$$

試験条件は3本の噴流の吐出速度を同じ、すなわち、低温噴流と高温噴流の吐出流速比  $r (=V_c/V_h)$  を 1.0 とした等速条件、中心の低温噴流の吐出速度を両側の高温噴流より小さく設定した非等速条件 ( $r=0.67$ )、中心噴流（低温噴流）と高温噴流の片側のみを用い、2つの噴流の吐出速度を等しくした二噴流等速条件を設定した。3本の噴流の吐出速度を等しくしたケースでは、3本の噴流が噴流吐出速度に比例した周期で振動しながら混合する。中心の低温噴流の吐出速度を両側の2本の高温噴流吐出速度より小さくしたケースでは、噴流の振動は発生しない<sup>[14][16]</sup>。また、2噴流のケースは3噴流のケースとは混合過程が異なると考えられる。そこで、水試験において、上記条件の試験を1ケースずつ設定し、ここで設定した水試験の条件に対して、流速一致およびレイノルズ数一致条件でナトリウム試験を実施した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 時間平均温度場における水とナトリウムの比較

##### 3.1.1 時間平均温度、温度変動強度コンターの比較

Fig.3.1.1～Fig.3.1.3 に各奥行き断面における時間平均温度コンターと温度変動強度コンターの水とナトリウムの比較を示す。時間平均化は全収録データ（水：4000 点、ナトリウム：20000 点）に対して行った。奥行き方向断面は壁面からの距離を示している。なお、図中に"T/Cs were Lost"で示した位置の熱電対は断線しているためデータが欠けている。

時間平均温度と温度変動強度は以下の式で無次元化した。

$$T_{avg}^* = \frac{T_{avg} - T_c}{\Delta T} \quad (3.1)$$

$$T_{RMS}^* = \frac{T_{RMS}}{\Delta T} \quad (3.2)$$

ここで、

$$T_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - T_{avg})^2}{N}} \quad (3.3)$$

である。

三噴流等速条件での時間平均温度コンターを見ると、水とナトリウムでほぼ同様の温度場となっており、左右の高温噴流が中心の低温噴流側に傾いて流れていた。壁面に近づくに従って高温噴流の領域が下流側に延びることがわかる。温度変動強度についても、水試験とナトリウム試験で同様の傾向にあり、低温噴流と高温噴流がぶつかる領域で急激に大きくなっていることが分かる。壁面に近づくにつれて、水、ナトリウムともに変動強度が大きくなる領域は小さくなっている。

三噴流非等速条件の場合は、時間平均温度場に関しては、水試験、ナトリウム試験ともに低温噴流が片側の高温噴流に傾いて流れているが、水試験における低温噴流の傾きはナトリウムよりも小さくなっている。温度変動強度に関しては、ナトリウム試験では低温噴流が傾いている側に変動強度が高くなる領域が観察されているが、水試験では低温噴流が傾いている反対側にも比較的、変動強度が高くなる領域が見られる。奥行き方向に関しては、水、ナトリウムともに壁面に近づくにつれて変動強度の大きい領域が小さくなることが分かる。

二噴流等速条件の場合は、水試験とナトリウム試験の時間平均温度場はほぼ同じであり、低温噴流と高温噴流が互いに近づいて流れていることが分かる。温度変動強度に関しては、水試験とナトリウム試験で同様の傾向を示しており、

壁に近づくにつれて変動強度が小さくなること分かる。

### 3.1.2 時間平均温度、変動強度分布の比較

Fig.3.1.4～Fig.3.1.9 に三噴流等速条件での水平、鉛直、奥行き方向の時間平均温度分布および温度変動強度分布の水とナトリウムの比較を示す。

水平方向の温度分布を見ると、水とナトリウムでほぼ同じ分布を示しているが、奥行き方向に見た流路中央位置 ( $y/D=4.5$ ) では、鉛直方向位置  $z/D=5.0\sim 7.5$  にかけて、水の方がナトリウムに比べて温度分布の平坦化が進んでいることが分かる。温度変動強度は水の方がナトリウムよりも上流側で大きくなり、下流側で小さくなる傾向にある。これは、水の方が高温、低温流体の混合がナトリウムに比べて上流側で始まり、温度の均一化がより上流側で収束していると考えられる。この傾向は壁面近傍よりも流路中央位置のほうが顕著に現れている。

鉛直方向分布に関しては、時間平均温度は水とナトリウムでほぼ同様の分布となっているが、温度変動強度に関しては、 $y/D=4.5$  で特に顕著であるが、水の方がナトリウムに比べてピーク値が上流側で現れている。

奥行き方向の温度分布は、水、ナトリウムの間で大きな違いは見られない。温度変動強度に関しては、ナトリウムでは各計測点で、壁面に近づくにつれて変動強度が小さくなっているが、水では計測点 (Fig. 3.1.9(6), (9), (11), (12)参照) によって壁面に向かって変動強度が大きくなっている箇所がある。また、水では壁面近傍で一旦、変動強度が大きくなり、さらに壁に近づくと小さくなる分布 (Fig. 3.1.9(6), (9)参照) が見られるが、この傾向は  $y/D=0.05\sim 0.3$  の範囲で多く現れているため、この位置に計測点を持たないナトリウムとは厳密には比較することができない。

Fig.3.1.10～Fig.3.1.15 に三噴流非等速条件での水平、鉛直、奥行き方向の時間平均温度分布および温度変動強度分布の水とナトリウムの比較を示す。

水平方向の温度分布を見ると、温度分布の非対称性が水に比べナトリウムの方が顕著に現れている。また、等速条件の時と同様に、水の方が温度分布の均一化が上流側で進んでいる。温度変動強度に関しては、ナトリウムでは低温噴流が傾いている側 ( $x/D < 0$  側) の温度変動強度が傾いていない側に比べて大きくなっており、非対称性が顕著に現れている。しかし、水では温度分布に非対称性はあるが、低温噴流が傾いていない側 (図中右側) の温度勾配が大きい。そのため、水では低温噴流の右側での温度変動強度がナトリウムに比べて大きくなっている。

鉛直方向に関しては、温度分布は低温噴流が傾いている側は、水とナトリウムでほぼ同様の分布を示しているが、低温噴流位置 (Fig. 3.1.12(5)) の壁面近傍 (iii) での出口付近 ( $z/D < 5$ ) では、ナトリウムの方が高温になっている。これ

は、ナトリウム試験に用いられている噴流吐出ノズル内でのノズル壁などのステンレス構造物の熱伝導により、噴流間の吐出温度差が緩和されており、特に、壁面近傍ではステンレス構造物の影響を受けていると考えられる。温度変動強度の鉛直方向分布は、水の方が変動強度のピーク値が上流側に現れていることが確認できる。

奥行き方向に関しては、温度は水、ナトリウムともに  $z/D=7.5$  より上流側では壁面に近づくにつれて温度が高くなる傾向にあり、下流側では平坦な分布を示した。温度変動強度に関しては、 $z/D=7.5$  の下流側では水とナトリウムでよく一致しているが、上流側 (Fig.3.1.15(a)の(5)、(6)) では、水の方が大きくなる傾向にある。また、水は等速条件の時と同様に、壁近くで一旦、変動強度が大きくなっていることが分かる。

Fig.3.1.16～Fig.3.1.21 に二噴流等速条件での水平、鉛直、奥行き方向の時間平均温度分布および温度変動強度分布の水とナトリウムの比較を示す。

水平方向の温度分布は、水と流速一致条件のナトリウムで一致しているが、流路中央位置 ( $y/D=4.5$ ) では水の方が若干、温度の均一化が上流側 ( $z/D=7.5\sim 10.0$ ) で発生している。温度変動強度については、上流側では水とナトリウムの分布が一致しているが、下流側、特に流路中央位置においては、変動強度のピーク値が水の方が小さくなっている。

鉛直方向の温度分布において、流路中央位置では水とナトリウムでほぼ一致しているが、壁近傍では水の方がナトリウムよりも上流側で温度が上昇している。また、温度変動強度は、水の方がナトリウムよりも上流側で大きくなる。

奥行き方向の温度分布は、水とナトリウムで同様の傾向にある。変動強度に関しては、二噴流のほぼ中間となる水平方向位置 ( $x/D=-2.25$ ) では、上流側 ( $z/D=5.0\sim 10.0$ ) での壁面近傍において、水の方がナトリウムに比べ、変動強度が大きい。低温噴流に近い水平方向位置 ( $x/D=-0.75$ 、 $x/D=0.0$ ) では、水の方がナトリウムよりも温度変動強度が大きい。分布形状は概して同様である。ただし、ナトリウムの計測点が少ないため、壁面近傍での詳細な傾向は明確ではない。

### 3.1.3 温度変動強度の奥行き方向分布の比較

Fig.3.1.22～Fig.3.1.24 に奥行き方向に垂直な断面で温度変動強度が最大となる位置における時間平均温度、変動強度の奥行き方向分布を示す。

三噴流等速条件 (Fig. 3.1.22) では、奥行き方向に垂直な断面での温度変動強度が最大となる位置はほぼ同じ水平、鉛直位置であった。最大温度変動強度の奥行き方向分布を見ると、ナトリウムでは壁に近づくにつれて変動強度が小さくなる傾向があり、レイノルズ数一致条件の方が流速一致条件よりもこの傾向

が顕著に現れている。これに対して、水での変動強度は、流路中央位置 ( $y/D=4.25$ ) と壁近傍位置 ( $y/D=0.025$ ) を比較すると、若干、壁近傍の方が小さくなっているが、ナトリウムに比べて流路中央位置からの温度変動強度の低下が小さい。また、水では壁面近くの位置 ( $y/D=0.2, 0.3$ ) で変動強度が大きくなり、壁に向かって再び小さくなっていることが分かる。

三噴流非等速条件 (Fig. 3.1.23) では温度変動強度が最大となる位置が、ナトリウムでは低温噴流が傾き、高温噴流とぶつかる片側の領域に現れている。しかし、水では低温噴流の傾きとは反対側の領域にも現れており、変動強度の最大値が現れる位置にばらつきが生じている。これらの計測位置における温度変動強度の奥行き方向分布を見ると、等速条件の場合と同様に、水、ナトリウムともに壁面に近づくにつれて徐々に変動強度が小さくなっているが、水では壁面近傍の  $y/D=0.2, 0.3$  の位置で変動強度が一旦、大きくなっている。

二噴流等速条件 (Fig. 3.1.24) では温度変動強度が最大となる位置が、ナトリウムに関しては各奥行き方向に垂直な断面でほぼ同じ領域に現れているが、水ではばらついて現れている。各奥行き断面での最大温度変動強度の奥行き方向分布を見ると、ナトリウムでは壁面に近づくにつれて変動強度が小さくなる傾向にある。また、レイノルズ数一致条件の方が流速一致条件よりも変動強度は大きく減衰する。これに対して、水での変動強度は、三噴流等速条件時と同様に、流路中央位置 ( $y/D=4.25$ ) から壁近傍位置 ( $y/D=0.025$ ) への変動強度の減衰はほとんどなく、壁面近くの位置 ( $y/D=0.2, 0.3$ ) で変動強度が大きくなり、壁に向かって再び小さくなる現象が観察される。

各噴流吐出条件において、壁面近傍では、水での温度変動は、ナトリウムの場合と同程度、あるいは大きくなっていることから、水での流体中の温度変動から構造材の疲労損傷評価を行うことができると考えられる。

## 3.2 温度変動特性における水とナトリウムの比較

### 3.2.1 パワースペクトル密度の比較

Fig.3.2.1～Fig.3.2.3 に温度変動強度が最大値となる位置における温度変動のパワースペクトル密度（以下、PSD）を示す。PSD は、全収録データ（水試験に関しては 4200 点、ナトリウム試験に関しては 20000 点）から 512 点（5.125 秒）ずつ 10 点おき（0.1 秒毎）に取り出し、FFT を施した後に平均化処理を行った。また、得られた PSD は噴流吐出温度差 $\Delta T$  で規格化した。

三噴流等速条件の温度変動の PSD を見ると、流路中央位置においては、水と流速一致条件のナトリウムで卓越周波数がほぼ同じ位置で現れているが、 $y/D=0.5$ 、 $0.025$  の位置では、水の卓越周波数成分が消滅し、低周波数成分のパワーがナトリウムよりも大きくなっていることが分かる。

三噴流非等速条件の温度変動の PSD では、流路中央位置では水、ナトリウムともに卓越周波数は現れていないが、壁面近傍ではナトリウムに卓越周波数が見られる。また、壁面近傍では等速条件の場合と同様に水の低周波数成分のパワーがナトリウムよりも大きくなっている。

二噴流等速条件の温度変動の PSD を見ると、流路中央位置では水と流速一致条件のナトリウムで卓越周波数がほぼ同じ周波数に現れているが、 $y/D=2.0$  の位置から  $y/D=0.025$  の位置では、水の卓越周波数成分は消滅している。また、 $y/D=0.5$ 、 $0.025$  の位置では水の低周波数成分のパワーがナトリウムよりも大きくなっている。

### 3.2.2 ストローハル数によるパワースペクトル密度の比較

Fig.3.2.4～Fig.3.2.6 に温度変動強度が最大値となる位置における温度変動のパワースペクトル密度に対するストローハル数の影響を示す。ストローハル数は、以下の式により定義される。

$$St = \frac{fD}{V_{space}} \quad (3.4)$$

また、PSD のパワーは以下の式で規格化した。

$$Power(-) = \frac{Power(s) \times V_{space} (m/s)}{D(m)} \quad (3.5)$$

三噴流等速条件では、PSD をストローハル数で整理することにより、水とナトリウムの卓越周波数および高周波数域における PSD のプロファイルがよく一致することが分かる。三噴流非等速条件においても、流路中央位置に関しては、高周波数域の PSD のプロファイルが水とナトリウムでよく一致している。また、壁面近傍では、高周波数域で PSD のパワーが水の方がナトリウムよりも若干、

小さくなっているが、ストローハル数が大きくなるにつれ、近づく傾向にある。二噴流等速条件では、流路中央位置での卓越周波数および高周波数域での PSD のプロファイルが水とナトリウムでよく一致している。

これらの結果から、ストローハル数と流速と代表長さで規格化した PSD を用いることにより、水とナトリウムの温度変動特性がほぼ同じ PSD で示されることがわかった。

## 4. 考察

### 4.1 低温噴流の揺れ幅に伴う流体混合位置の検討

前章にて、三噴流等速条件の流路中央位置において、水の方が流体混合の始まる位置がナトリウムよりも上流側にあることが分かった。この現象の原因を明らかにするために、低温噴流の空間的な揺れ幅に関して考察を行った。

Fig.4.1.1(a)に流体混合が活発に行われる鉛直方向位置における瞬時の水平方向温度分布を示す。三本の噴流吐出速度が同じ場合、低温噴流は左右に振動することが可視化試験で明らかとなっており、水平方向温度分布を見ても温度が最も低くなる位置が各時刻で異なっていることが確認できる。瞬時の水平方向温度分布から、温度が最も低くなる位置を瞬時の低温噴流の中心位置とする。Fig.4.1.1(b)に低温噴流の水平方向位置に関する変動挙動を示す。低温噴流位置が中心位置 ( $x/D=0.0$ ) を境にして周期的に変動していることが分かる。Fig.4.1.1(c)に低温噴流位置変動強度の鉛直方向分布の水とナトリウムの比較を示す。低温噴流位置の変動強度は、水の方がナトリウムよりも上流側で大きくなっており、水の方が低温噴流の傾きが大きくなっていることが推定できる。そのため、水の方がナトリウムに比べて、低温噴流と高温噴流が上流側で接触し、温度変動強度の大きい位置が上流側になっていると考えられる。この結果から、水の方がナトリウムよりも上流側で流体混合が始まる原因は、水の方がナトリウムに比べて、噴流の空間的振動幅が大きくなっていることによると考えられる。

### 4.2 レインフロー法による温度変動特性の比較

構造材の高サイクル疲労損傷を評価する上で、構造材中の応力の振幅とその頻度を求める必要がある。流体中の温度変動は、流体から構造材への熱伝達を経て、構造材中へ伝わるが、構造材中で応力に変換される割合は温度変動の周波数に依存する<sup>[7]</sup>。3.2 節にて、流体中の温度変動の周波数特性は、ナトリウムと水の間で大きな違いはないことを示した。そこで、残る特性として、流体中の温度変動に対して波形解析を行い、温度変動の水とナトリウムで温度変動の振幅の違いを比較した。今回、波形解析にはレインフロー法を用いた。レインフロー法はランダム波を多層の屋根と見なして、すべての波を有効区間の半波として取り出し、ペアを作る波と作らない波をそれぞれ完全に計数する手法であるため、疲労強度設計等に広く利用されている<sup>[23]</sup>。データを評価した点は奥行き方向(y)に垂直な断面で温度変動強度が最大となる位置とした。また、レインフロー法で求めた半波の時間幅を2倍して周期として整理した。

Fig.4.2.1～Fig.4.2.3 に奥行き方向に垂直な断面における温度変動の周期 ( $\Delta t$ ) と振幅 ( $\Delta T^*$ ) の散布図を示す。三噴流および二噴流の各条件ともに周期が大きくなるにつれて、振幅が大きくなるのが分かる。また、三噴流等速条件および二噴流等速条件に関しては、流路中央位置では、水、ナトリウムともに周期が 0.01 秒、振幅が 0.1 の付近と周期が 1.0 秒、振幅が 0.8 の付近の 2 カ所にプロットが集中している。水では、流路中央位置 ( $y/D=4.5$ ) と壁面近傍 ( $y/D=0.025$ ) での温度変動の周期と振幅の関係に大きな違いは見られない。一方、ナトリウムでは、壁面に近づくにつれて、温度変動の振幅が低下していることがわかる。ナトリウムの場合において、レイノルズ数一致のケースの方が流速一致のケースに比べて、壁面近傍での温度変動振幅の低下が大きくなっている。

Fig.4.2.4～Fig.4.2.6 に温度変動の周期と振幅の 2 次元ヒストグラムを示す。ヒストグラムは周期の範囲を 0.0～4.2 秒、分割幅を 0.2 秒とし、振幅の範囲を 0.0～1.0、分割幅を 0.05 とした。

三噴流等速条件では、流路中央位置 ( $y/D=4.5$ ) においては、周期 0.2～0.6 秒、振幅 0.65～0.85 の領域、および、周期 0.0～0.2 秒、振幅 0.0～0.2 の領域で頻度が高くなっている。前者は PSD の結果から得られた卓越周波数成分を内包する範囲であり、中心噴流が左右に揺れることによる温度変動の波をカウントしたものであると考えられる。後者は卓越周波数成分に重畳した小さな波をカウントしたもので、その他の頻度がそれほど高くない領域は過渡的な振動であるといえる。卓越周波数成分に相当する  $\Delta t=0.2\sim 0.6s$  の領域を見ると、水は振幅 0.65～0.7、ナトリウムは振幅 0.8～0.85 の領域で頻度が高くなっており、水の方が若干、振幅が小さくなっているが、全体的な分布はほぼ同様の傾向を示している。また、振幅の大きい波 ( $\Delta T=0.8$ ) は比較的広範囲の周期で発生している。構造材は、ある周期の温度変動に対して応力のピーク値を有することから、広範囲の周期を有する温度変動には、構造材に感度のある周期が含まれている可能性がある。このような特性は、水とナトリウムで共通となっている。

壁面近傍の位置 ( $y/D=0.025$ ) に関しては、水の方がナトリウムよりも頻度分布にばらつきがあり、卓越周波数成分の領域に関しては、水はナトリウムほど頻度が高くなる領域が顕著に現れていない。また、ナトリウムに関しては、卓越周波数成分に起因する頻度の高い領域が、流路中央位置と比べて振幅が小さくなる方向にシフトしていることが分かる。

三噴流非等速条件に関しては、流路中央位置および壁近傍位置で、水とナトリウムの頻度分布はほぼ同様の傾向を示している。周期 0.0～0.2 秒、振幅 0.0～0.2 の領域で頻度が高くなっている。非等速条件時には中心から吐出する低温噴流が振動せずに、片側の高温噴流に沿って流れるため、等速条件で見られたような卓越周波数成分を示す高頻度の領域は現れていない。

二噴流等速条件では、流路中央位置においては、水とナトリウムで全体的な頻度分布は同様の傾向にある。PSD で得られた卓越周波数成分近傍については、水は振幅 0.6~0.65 の領域に、ナトリウムは流速一致条件で振幅 0.7~0.75、レイノルズ数一致条件で振幅 0.6~0.65 の領域で頻度が高くなっており、レイノルズ数一致条件のナトリウムと水で高頻度領域の範囲が一致している。

Fig.4.2.7~Fig.4.2.9 にレインフロー法で求めた周期 ( $\Delta t$ ) および振幅 ( $\Delta T^*$ ) のヒストグラムを示す。ヒストグラムの範囲は周期 0.0~2.0 秒の範囲で、分割幅は 0.2 秒とし、振幅は 0.0~1.0 の範囲で分割幅は 0.1 とした。

三噴流等速条件では、奥行き方向に垂直な各断面において、周期 0.0~0.2 秒の範囲ではナトリウムより水の方が頻度は高くなっているが、周期 0.4~2.0 秒の範囲では、水とナトリウムで大きな差は生じていない。短周期（高周波数）の温度変動成分は、構造材内部まで伝わりにくいため、構造材の損傷に達する熱応力の発生には至らない。よって、水とナトリウムの中の短周期での違いの影響は少ないと考えられる。振幅に関しては、水、ナトリウムともに振幅 0.0~0.1 の範囲の頻度が高くなっている。これを 1 次ピークとすると、流路中央位置では、水は振幅 0.6~0.7 の範囲で、ナトリウムは振幅 0.8~0.9 の範囲で 2 次ピークが存在する。この 2 次ピークは壁面に近づくと、ナトリウムでは振幅が小さくなる方向にシフトするが、水では頻度分布が平坦化していく傾向にある。

三噴流非等速条件では、周期の分布は等速条件の時と同様に周期 0.0~0.2 秒の範囲では、ナトリウムより水の方が頻度は大きくなっているが、周期 0.4~2.0 秒の範囲では、水とナトリウムではほぼ同様の傾向を示す。振幅に関しては、水、ナトリウムともに等速条件で見られた 2 次ピークは小さくなる。また、奥行き方向位置  $y/D=0.5$  において、水での振幅はナトリウムに比べて大きくなっている。流路中央 ( $y/D=4.5$ ) と壁面近傍 ( $y/D=0.025$ ) 位置では、三噴流等速条件に比べ、水とナトリウムでの頻度分布の違いは小さい。

二噴流等速条件では、全体的な頻度分布は三噴流非等速条件に近い分布形状となっている。周期に関しては、周期 0.0~0.2 秒の範囲で、水とナトリウムの頻度の差が三噴流条件の時よりも小さくなっている。2 次ピークに関しては、水は流路中央位置では振幅 0.5~0.6 に、ナトリウムは振幅 0.7~0.8 に確認でき、壁面に近づくとつれて、振幅が小さくなり、分布が平坦化に向かう傾向にある。三噴流非等速条件と同様に、水とナトリウムでの頻度分布の傾向は、三噴流等速条件に比べ、良く一致している。

## 5. 結論

サーマルストライピング現象解明に向けた研究の一環として、平行三噴流試験体系における水とナトリウムの温度変動挙動の特性を比較した。試験条件は、三噴流等速条件、三噴流非等速条件、二噴流等速条件とし、水とナトリウムを比較するための試験パラメータは、噴流吐出速度を同じにした流速一致条件とレイノルズ数を近づけたレイノルズ数一致条件を設定した。以下にその結果を示す。

### (1)時間平均温度、変動強度の比較

時間平均温度に関しては、各条件ともに、水の方がナトリウムよりも若干、温度の均一化が上流側で始まっているが、全体的な分布はよく一致した。温度変動強度については、水の方がナトリウムよりも上流側で変動強度が大きくなり、水の方が流体の混合が上流側で開始することがわかった。この原因としては、水の方がナトリウムの場合に比べ、噴流が大きく振動しているためであることが明らかになった。

### (2)温度変動のパワースペクトル密度による比較

温度変動のパワースペクトル密度（以下、PSD）は、流路中央位置について、等速条件では、水とナトリウムの卓越周波数がほぼ同じ位置で現れ、壁面に近づくと水では卓越周波数成分が消滅し、低周波数成分のパワーがナトリウムの場合よりも大きくなることが分かった。非等速条件では、流路中央位置では水、ナトリウムともに卓越周波数は現れていないが、壁面近傍では等速条件の時と同様に水での低周波数成分のパワーがナトリウムよりも大きくなることが分かった。

また、ストローハル数と規格化した PSD を用いることによって、水とナトリウムの温度変動特性がほぼ同じ PSD で表せることがわかった。

### (3)レインフロー法による温度変動特性の比較

レインフロー法を用いて温度変動の周期と振幅の頻度分布を見ると、三噴流等速条件については、噴流が左右に揺れることにより発生する周期と振幅の領域と、この卓越周波数成分に重畳した小さな波をカウントした領域で頻度が高くなった。流路中央位置において、卓越周波数成分を示す頻度の高い領域が、水ではナトリウムに比べて、若干振幅が小さくなる方向にシフトする傾向となったが、全体的な分布は水とナトリウムでほぼ一致した。三噴流非等速条件に関しては、水、ナトリウムともに中心から吐出する低温噴流が振動せずに、片

側の高温噴流に傾いて流れるため、等速条件時に見られた卓越周波数成分に相当する高頻度の領域は現れていない。水とナトリウムの頻度分布は、等速条件の場合に比べ、よい一致を示した。二噴流条件での水とナトリウムの頻度分布は、三噴流非等速条件と同様の傾向を示し、水とナトリウムでは大きな違いは見られなかった。

上記の結果から、流路中央位置に関しては、卓越した周波数成分を示す三噴流等速条件と二噴流条件、ならびに卓越周波数成分をもたない三噴流非等速条件において、時間平均温度、および、温度変動の周波数特性が水とナトリウムではほぼ同様の傾向を示すことを明らかにした。また、壁面近傍において、時間平均温度に関しては、水とナトリウムで同様の傾向を示したが、温度変動特性に関しては、水において卓越周波数成分が消滅した。水試験の結果は壁近傍の温度変動強度をナトリウムと同程度、あるいは大きく評価していることから、流体中の温度変動から構造材の疲労損傷評価を行うことが可能であると考えられる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、電力中央研究所我孫子研究所の守屋祥一主席研究員、大洗工学センター要素技術開発部流体計算工学グループの村松壽晴主任研究員に多大なご助言・ご指導を賜りました。ここに感謝いたします。本実験を行うにあたり、常陽産業（株）の方々に多大な努力をいただきました。ここに感謝いたします。

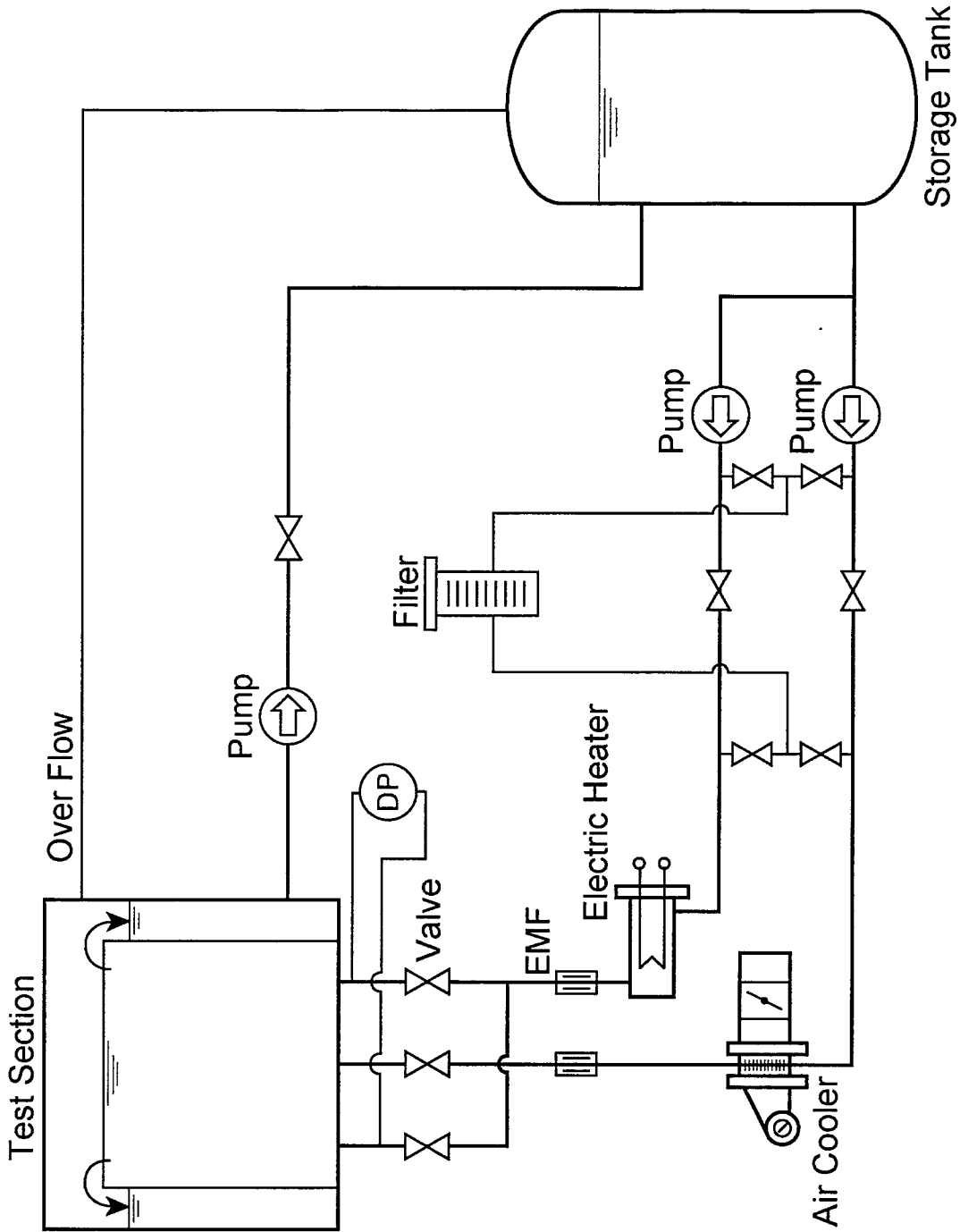
## 参考文献

- [1]Wood, Proposal for Design against Thermal Striping, Nuclear Energy, Vol. 19, No. 6, 433-437, 1980.
- [2]Brunings, LMFBR Thermal-Striping Evaluation, Interim Report, EPRI-NP-2672, Research Project 1704-11, prepared by Rockwell International Energy Systems Group, 8900 De Soto Avenue, Canoga Park, CA, USA, 91304, October 1982., Prepared for EPRI. EPRI Project Manager: J. Matte III.
- [3]C. Betts, C. Boorman, et al., Thermal Striping in Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactors, 2<sup>nd</sup> International Topical Mtg. on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH-2, Santa Barbara, CA, USA, Vol. 2, 1292-1301, 1983.
- [4]S. Moriya, S. Ushijima, et al., Prediction of Thermal Striping in Reactors, International Conference Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Oct. 28 ~ Nov. 1, Kyoto, Japan, Vol. 1, 10.6.1-10.6.10, 1991.
- [5]D. Tenchine and H. Y. Nam, Thermal Hydraulics of Co-axial Sodium Jets, AM. Inst. Chem. Engrs. Symp. Ser., Vol. 83, No. 257, 151-156, 1987.
- [6]D. Tenchine and J. P. Moro, Experimental and Numerical Study of Coaxial Jets, NURETH-8, Kyoto, Japan, Vol. 3, pp.1381~1387, 1997.
- [7]笠原 直人、流体温度ゆらぎに対する接液構造物の周波数応答関数、機械学会、計算力学講演会、301、2000。
- [8]村松壽晴、笠原直人他、サーマルストライピングに関する研究の現状と今後の研究開発、JNC TN9400 2000-010、2000。
- [9]村松壽晴、冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発(XI) 一流体一構造非定常熱的応答特性に係わる評価手法の検証一、PNC TN9410 97-039、1997。
- [10]T. Muramatsu, Numerical Analysis of Nonstationary Thermal Response Characteristics for a Fluid-Structure Interaction System, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 121, pp.276-282, 1999.
- [11]五十嵐実、田中正暁、林謙二、飛田昭、上出英樹、配管合流部の混合現象に関する研究 一可視化試験結果と予測解析一、JNC TN9400 2001-024、2000。
- [12]M. Igarashi, M. Tanaka, S. Kawashima and H. Kamide, Experimental study on fluid mixing for evaluation of thermal striping in T-pipe junction, ICONE-10, ICONE10-22255, 2002.
- [13]五十嵐実、川島滋代、中根茂、田中正暁、木村暢之、上出英樹、配管合流部の混合現象に関する研究 一DNS による実験研究と現象の解明一、JNC TN9400 2003-005、2003。
- [14]木村暢之、A. Tokuhiko、宮越博幸、平行三噴流のサーマルストライピング現象に関する実験研究 一噴流の吐出速度差と吐出温度差が対流混合に及ぼす影響一、PNC TN9410 96-296、1996。
- [15]A. Tokuhiko and N. Kimura, An experimental investigation on thermal striping. Mixing phenomena of a vertical non-buoyant jet with two adjacent buoyant jets as measured by ultrasound Doppler velocimetry, Nucl. Eng. Design, 188, pp.49-73, 1999.

- [16]木村暢之、A. Tokuhira、上出英樹、サーマルストライピング現象における流体内混合に関する実験研究－平行三噴流間の混合過程と吐出速度の影響－、JNC TN9400 2000-027、2000.
- [17]木村暢之、長澤一嘉、五十嵐実、上出英樹、サーマルストライピング現象における流体内混合に関する実験研究－壁面近傍での混合現象の変化－、JNC TN9400 2001-030、2000.
- [18]木村暢之、三宅康洋、西村元彦、上出英樹、サーマルストライピング現象における流体内混合に関する研究－平行三噴流間混合過程の数値解析と手法間の比較－、JNC TN9400 2000-099、2000.
- [19]木村暢之、五十嵐実、上出英樹、サーマルストライピング現象における流体内混合に関する研究－DNS を用いた噴流間の流体混合現象の解明－、JNC TN9400 2000-108、2000.
- [20]木村暢之、三宅康洋、長澤一嘉、五十嵐実、上出英樹、菱田公一、サーマルストライピング現象における流体内混合に関する研究－噴流間混合の乱流特性に対する DNS の模擬性評価－、JNC TN9400 2001-132、2002.
- [21]木村暢之、宮越博幸、三宅康洋、五十嵐実、上出英樹、サーマルストライピングに関する実験研究－平行三噴流ナトリウム試験－、JNC TN9400 2001-063、2001.
- [22]木村暢之、三宅康洋、宮越博幸、長澤一嘉、五十嵐実、上出英樹、サーマルストライピングに関する実験研究－流体－構造間における温度変動の伝達挙動の評価－、JNC TN9400 2002-059、2002.
- [23]薄一平、岡村弘之、定常ランダム加重下の疲労き裂進展（第1報、試験システムおよび S45C の実験結果）日本機械学会論文集（第1部）44巻386号（昭53-10）

**Table 2.1 Experimental Conditions.**

Working Fluid	Condition	Case Name	Run Name	Left Jet (Hot)			Center Jet (Cold)			Right Jet (Hot)			Average			
				$V_{h,L}$ (m/s)	$Re_{h,L}$ ( $\times 10^4$ )	$T_{h,L}$ ( $^{\circ}C$ )	$V_c$ (m/s)	$Re_c$ ( $\times 10^4$ )	$T_c$ ( $^{\circ}C$ )	$V_{h,R}$ (m/s)	$Re_{h,R}$ ( $\times 10^4$ )	$T_{h,R}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{space}$ ( $^{\circ}C$ )	$\Delta T$ ( $^{\circ}C$ )	$V_{space}$ (m/s)	$Re$ ( $\times 10^4$ )
Water	Triple-Jet Isovelocity	WE3	WJ3-A01	0.49	1.47	39.29	0.52	1.25	28.5	0.49	1.47	39.36	35.60	10.82	0.50	1.40
Sodium		SE3-V	SJ3-A05	0.51	2.83	347.7	0.51	2.60	304.5	0.50	2.81	347.3	333.2	43.01	0.51	2.75
		SE3-R	SJ3-A02	0.30	1.68	350.1	0.30	1.55	310.0	0.30	1.66	349.7	336.6	39.91	0.30	1.63
Water	Triple-Jet Non-Isovelocity	WN3	WJ3-A02	0.49	1.47	39.31	0.34	0.79	26.24	0.49	1.47	39.36	35.94	13.09	0.44	1.24
Sodium		SN3-V	SJ3-A11	0.51	2.87	349.8	0.32	1.68	311.0	0.51	2.87	349.8	340.5	38.74	0.45	2.47
		SN3-R	SJ3-A10	0.30	1.70	352.4	0.20	1.04	311.0	0.31	1.72	352.2	342.1	41.26	0.27	1.49
Water	Double-Jet Isovelocity	WE2	WJ3-A03	0.49	1.47	39.39	0.52	1.16	25.09	—	—	—	32.06	14.30	0.52	1.34
Sodium		SE2-V	SJ3-A18	0.50	2.79	350.0	0.51	2.65	309.9	—	—	—	329.7	40.09	0.51	2.72
		SE2-R	SJ3-A16	0.30	1.70	351.5	0.29	1.53	310.3	—	—	—	331.2	41.22	0.30	1.62



**Fig. 2.1.1 Experimental Loop. (WAJECCO)**

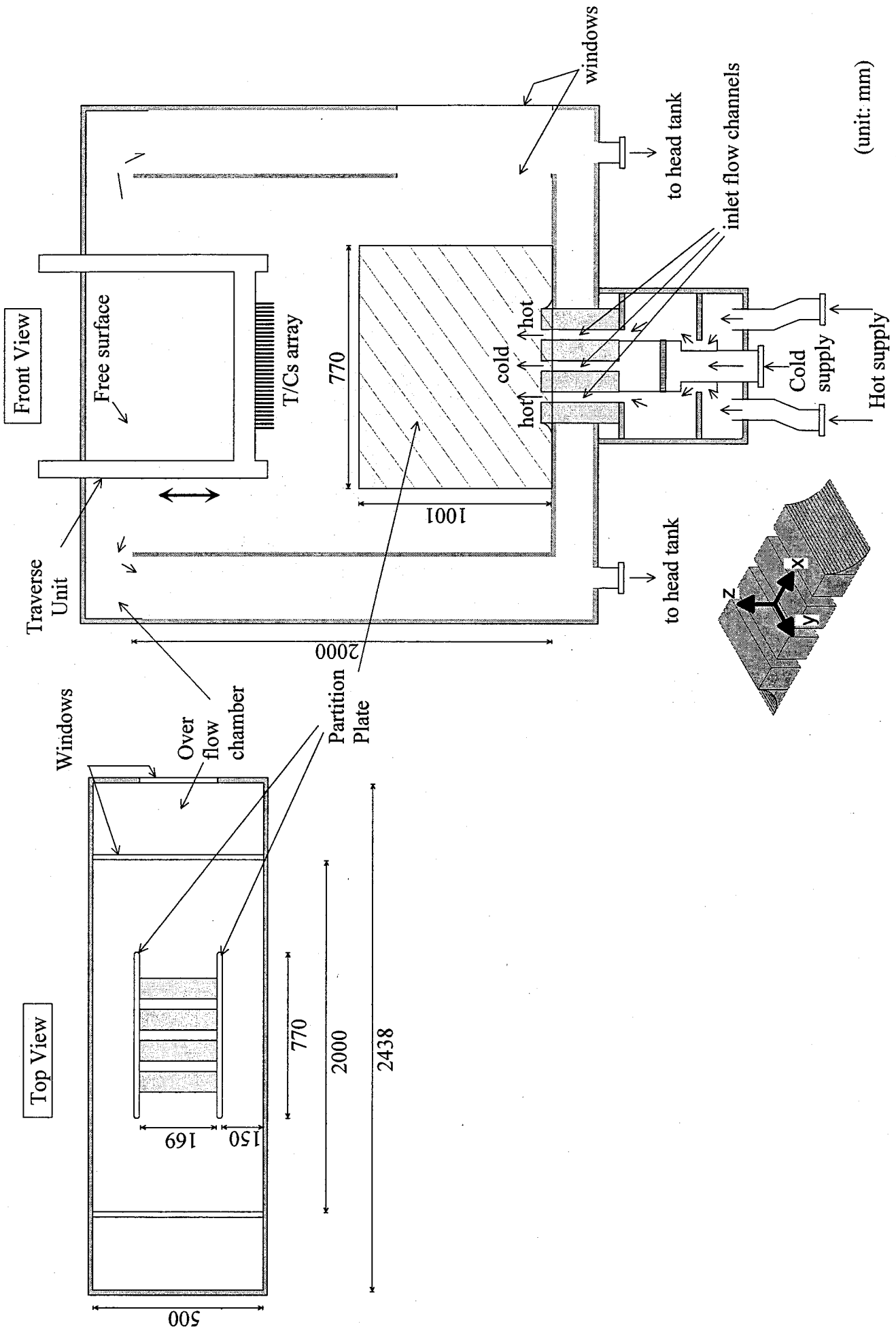
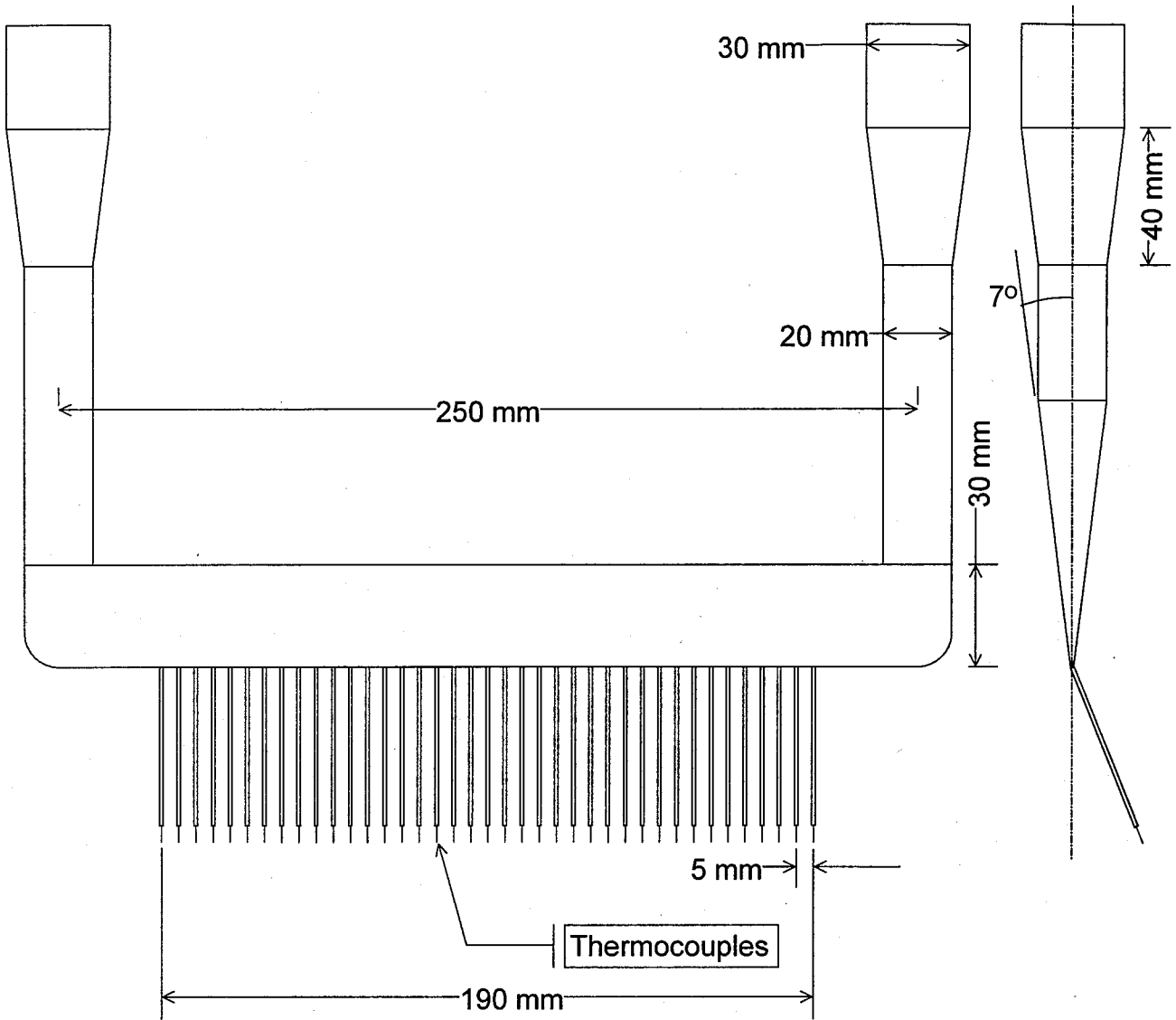
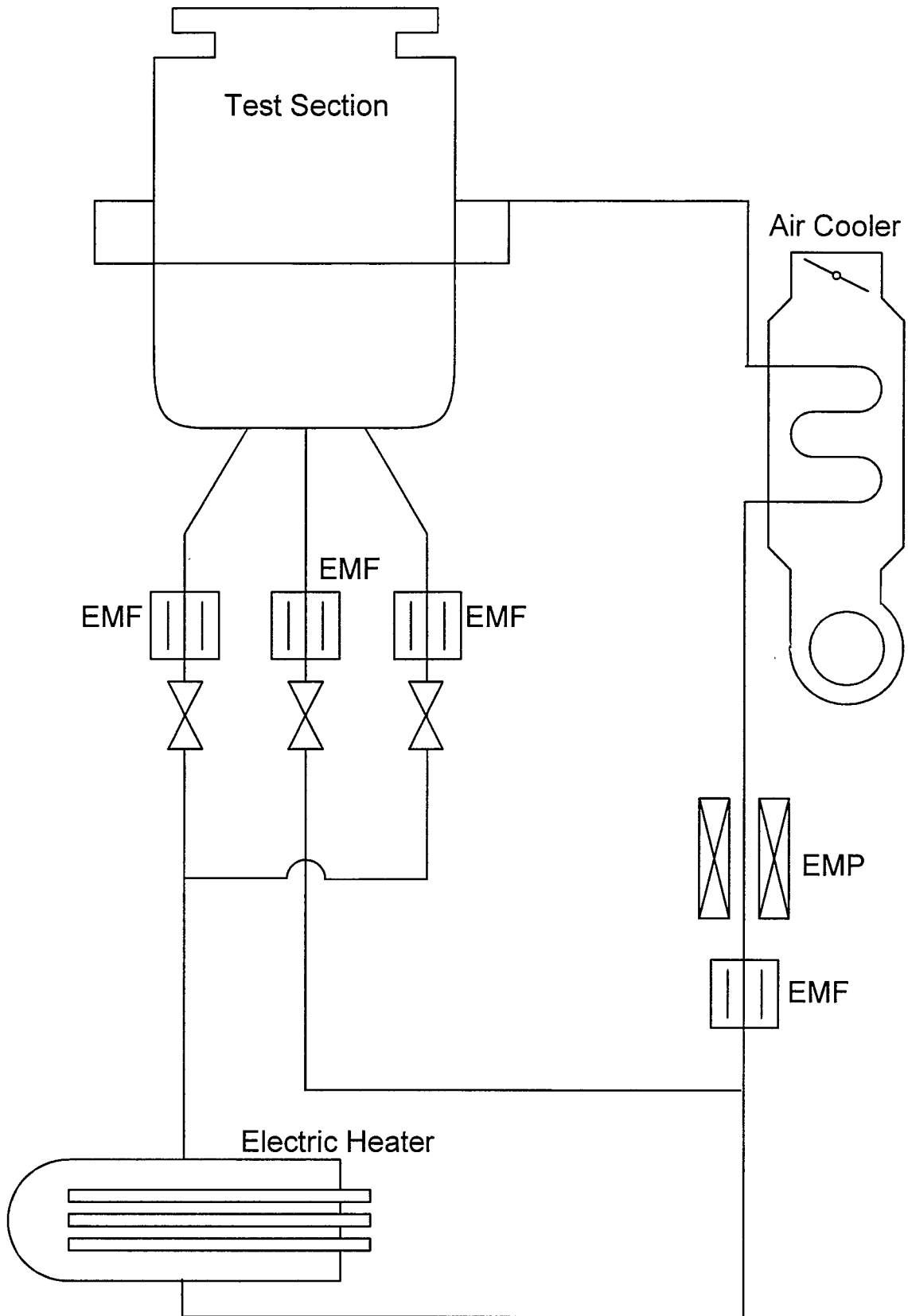


Fig.2.1.2 Schematic of Test Section. (WAJECCO)





**Fig.2.1.4 Thermocouples Tree. (WAJECO)**



**Fig. 2.2.1 Experimental Loop. (PLAJEST)**

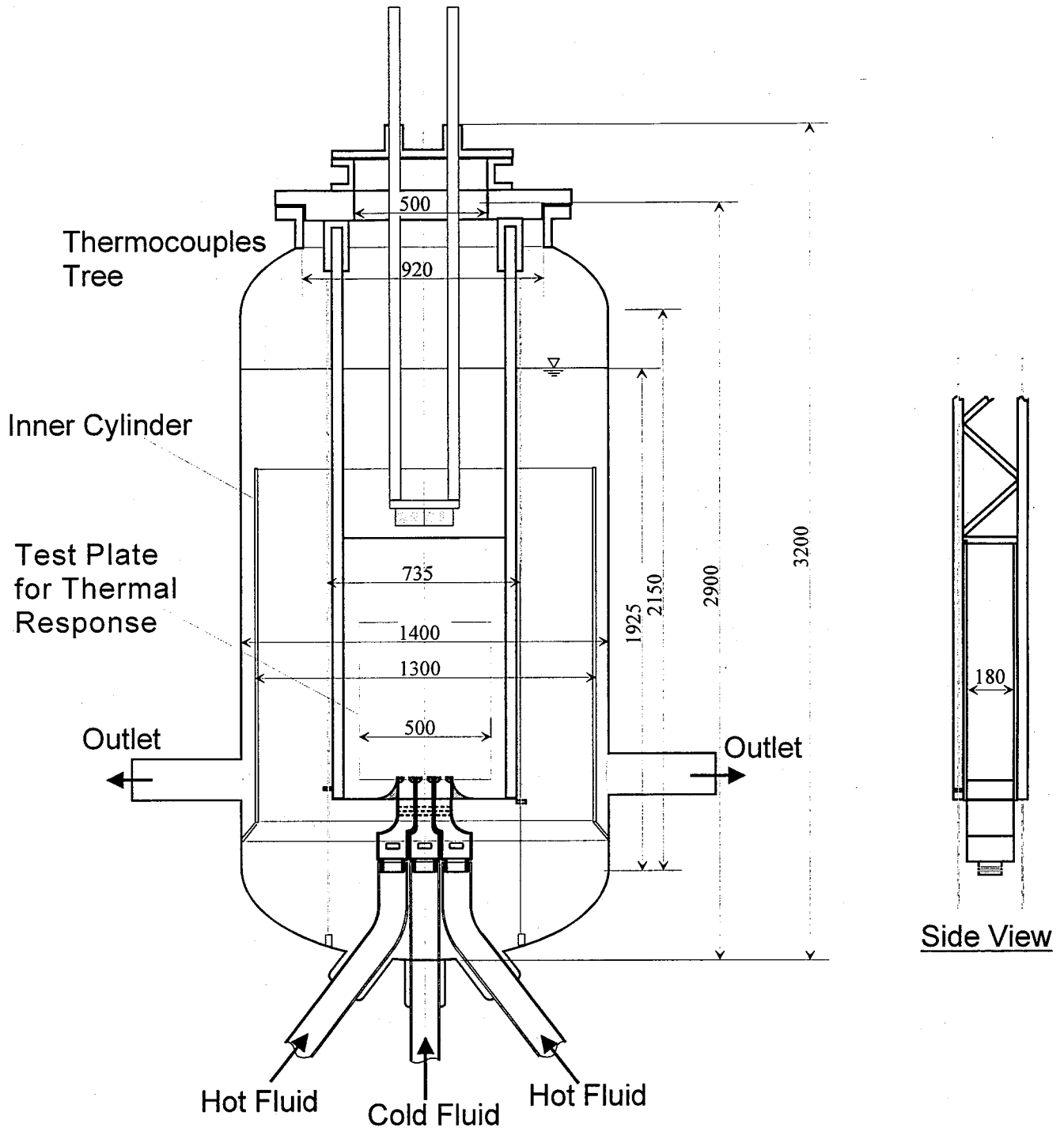


Fig. 2.2.2 Test Plenum. (PLAJEST)

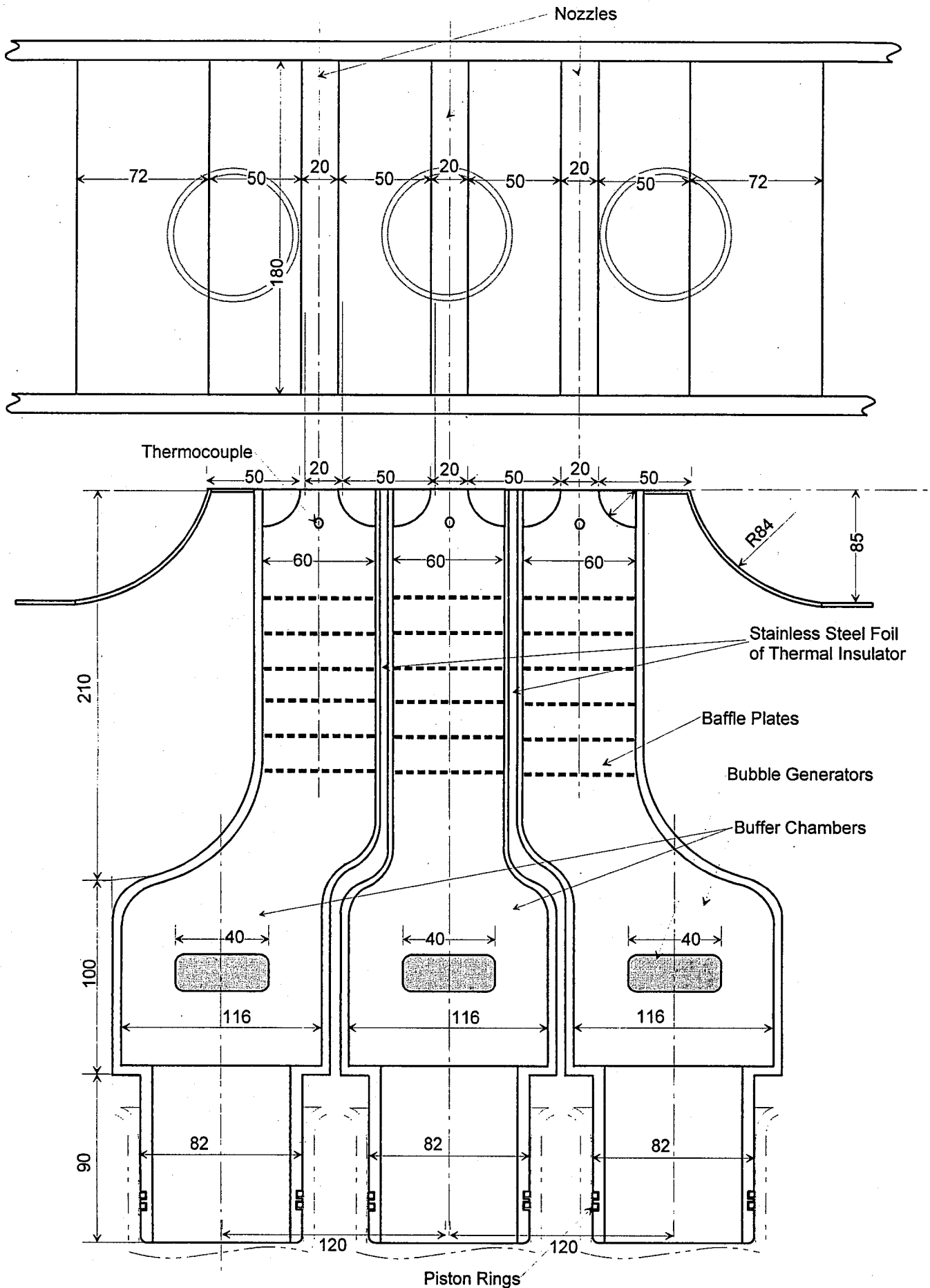


Fig. 2.2.3 Discharged Nozzles of Triple Jets.(PLAJEST)

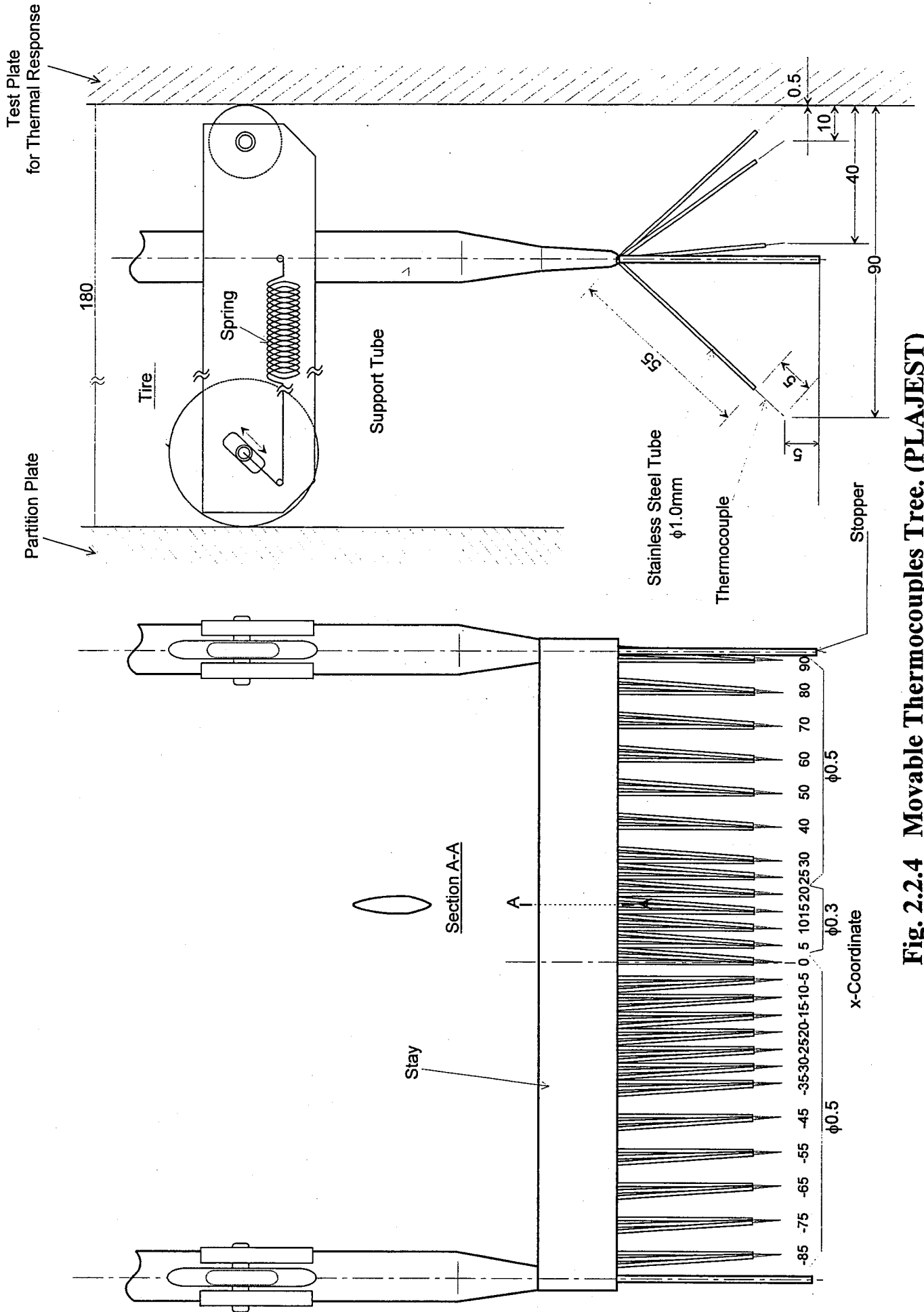
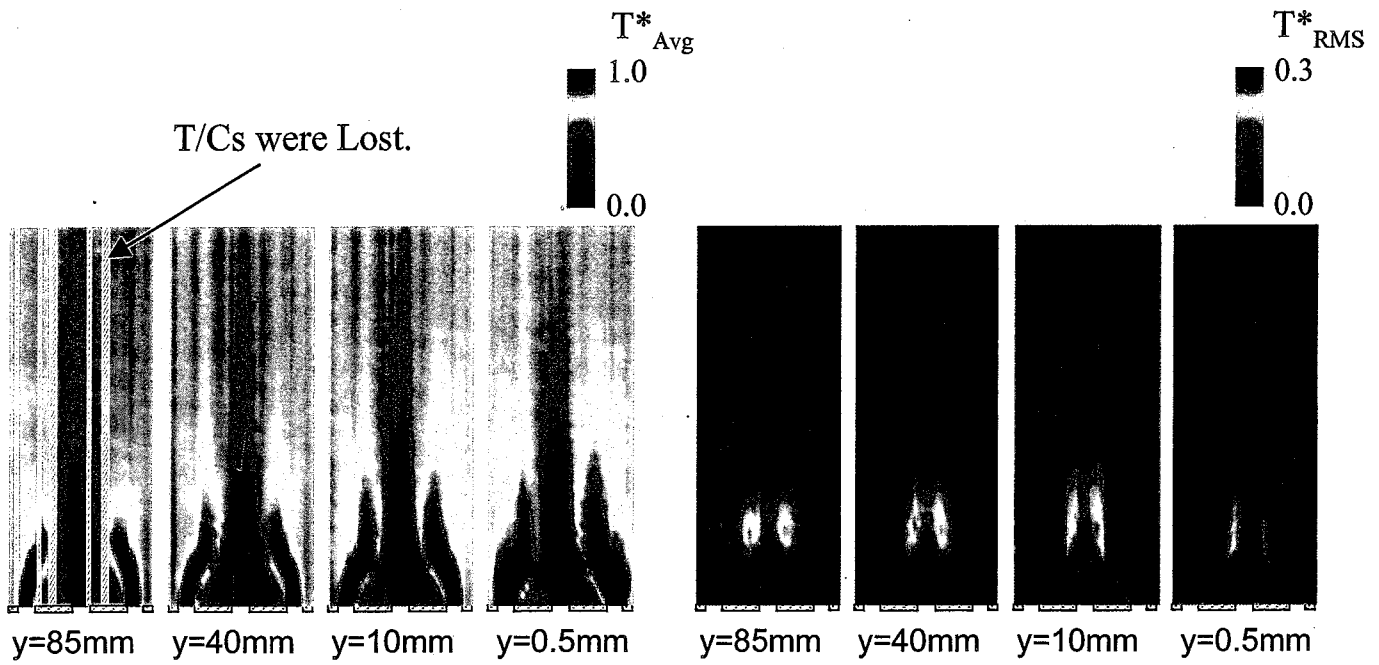
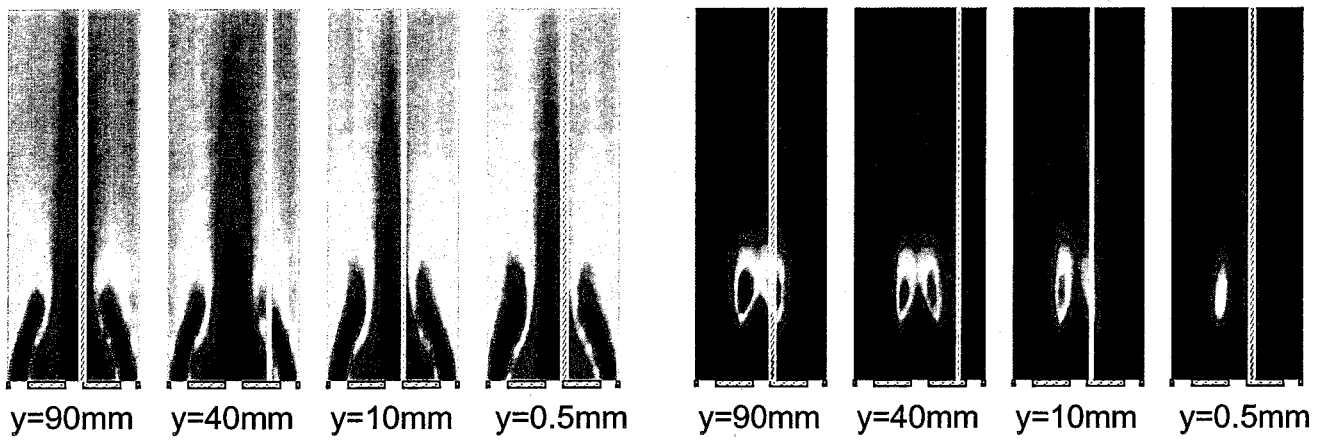


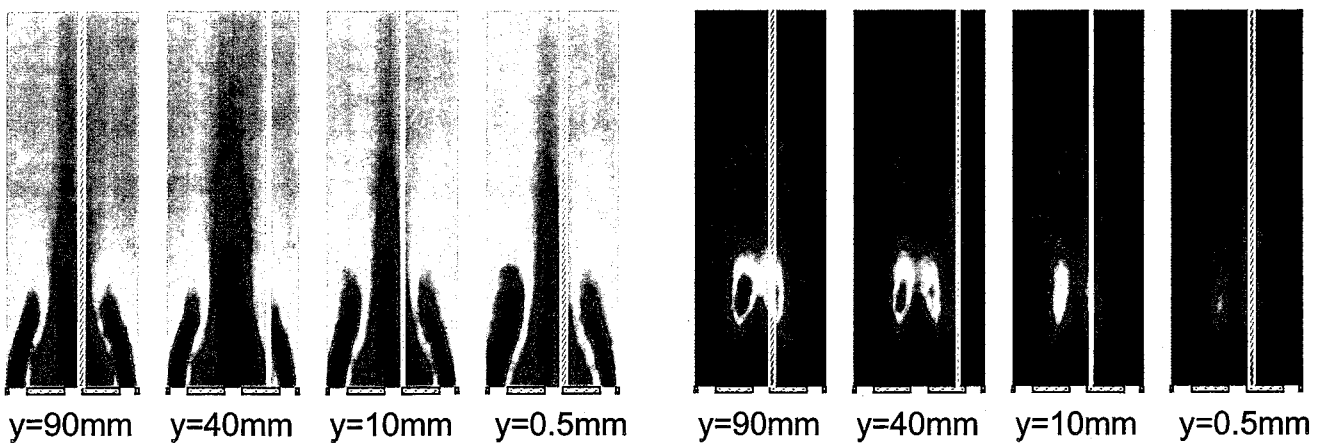
Fig. 2.2.4 Movable Thermocouples Tree. (PLAJEST)



(a) WE3 ( $V_h=V_c=0.5$ (m/s),  $\Delta T=12$  ( $^{\circ}$ C),  $Re=14000$ )

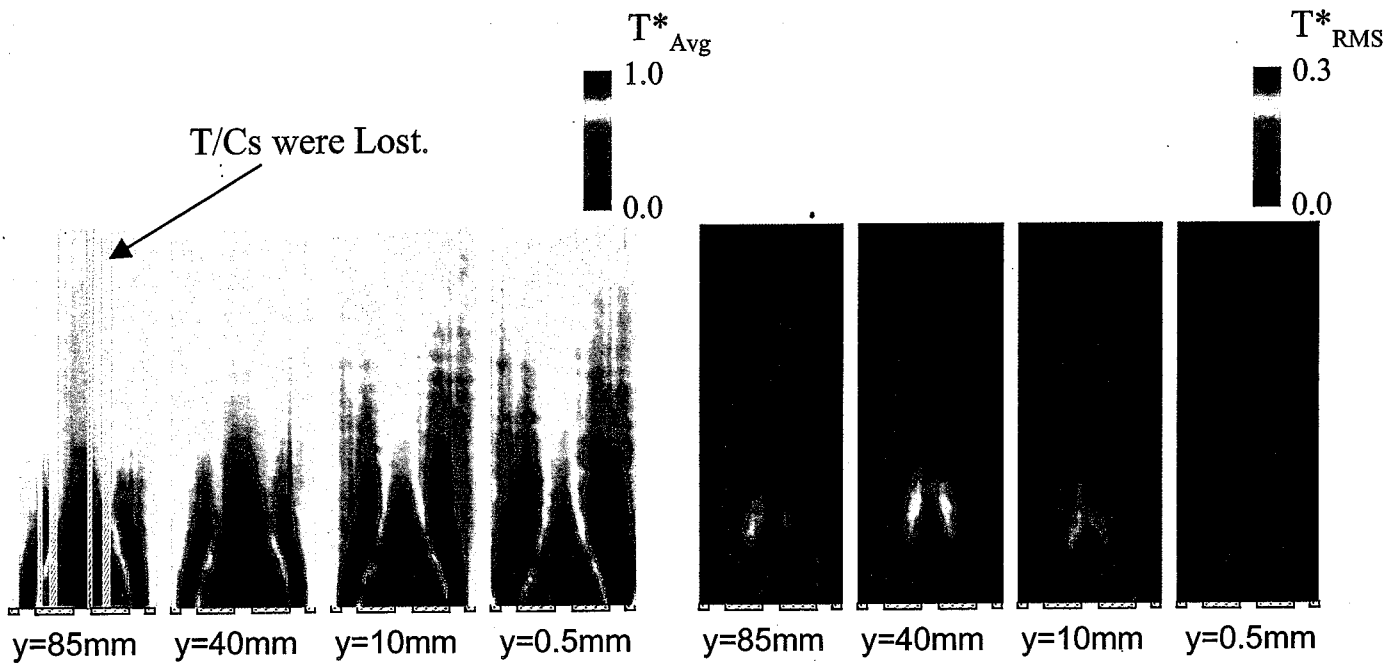


(b) SE3-V ( $V_h=V_c=0.5$ (m/s),  $\Delta T=43$  ( $^{\circ}$ C),  $Re=27500$ )

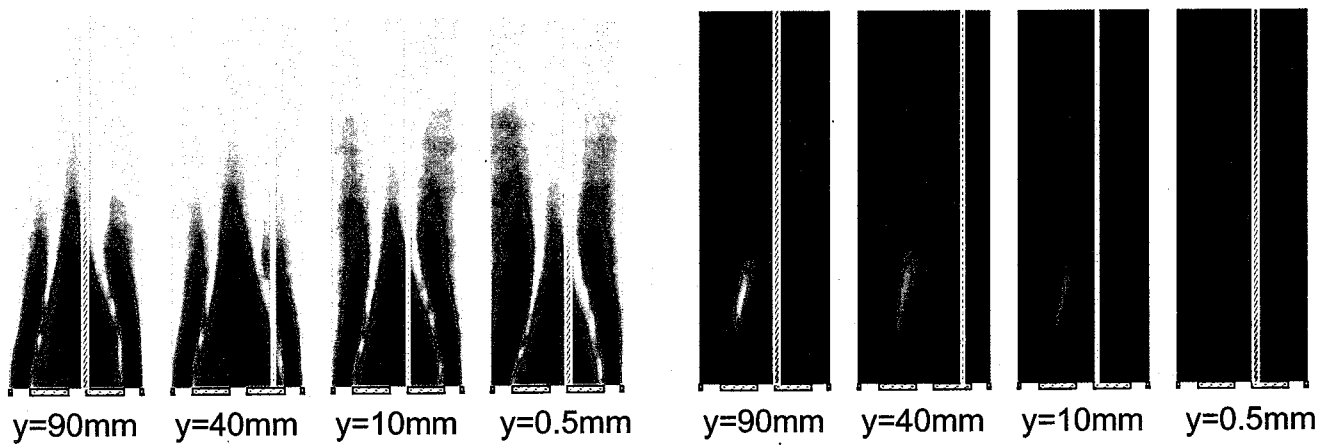


(c) SE3-R ( $V_h=V_c=0.3$ ,  $\Delta T=39$  ( $^{\circ}$ C),  $Re=16000$ )

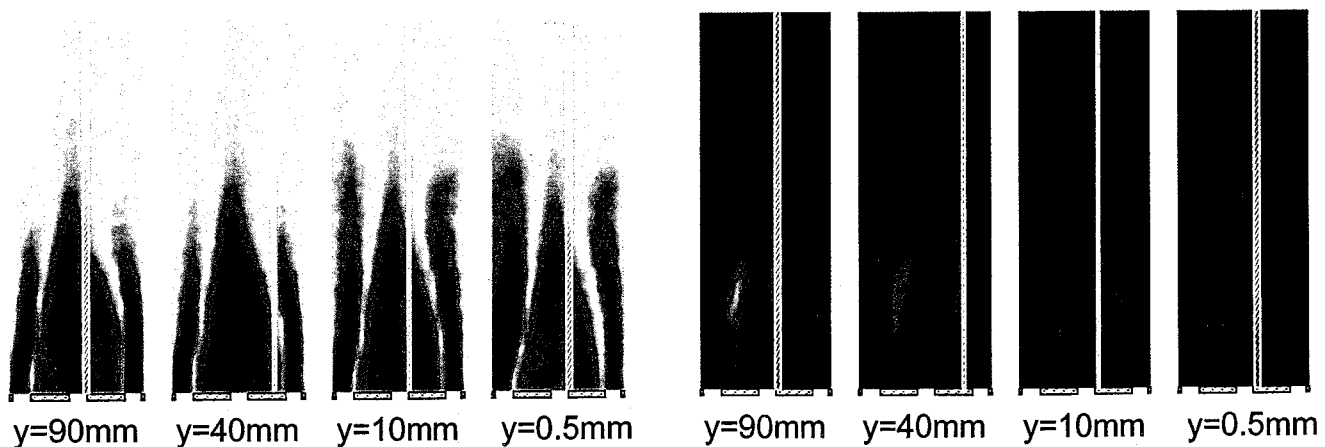
Fig.3.1.1 Comparisons of Time-Averaged Temperature Fields between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.



(a) WN3 ( $V_h=0.49$ ,  $V_c=0.34$ ,  $\Delta T=13$  ( $^{\circ}C$ ),  $Re=12500$ )

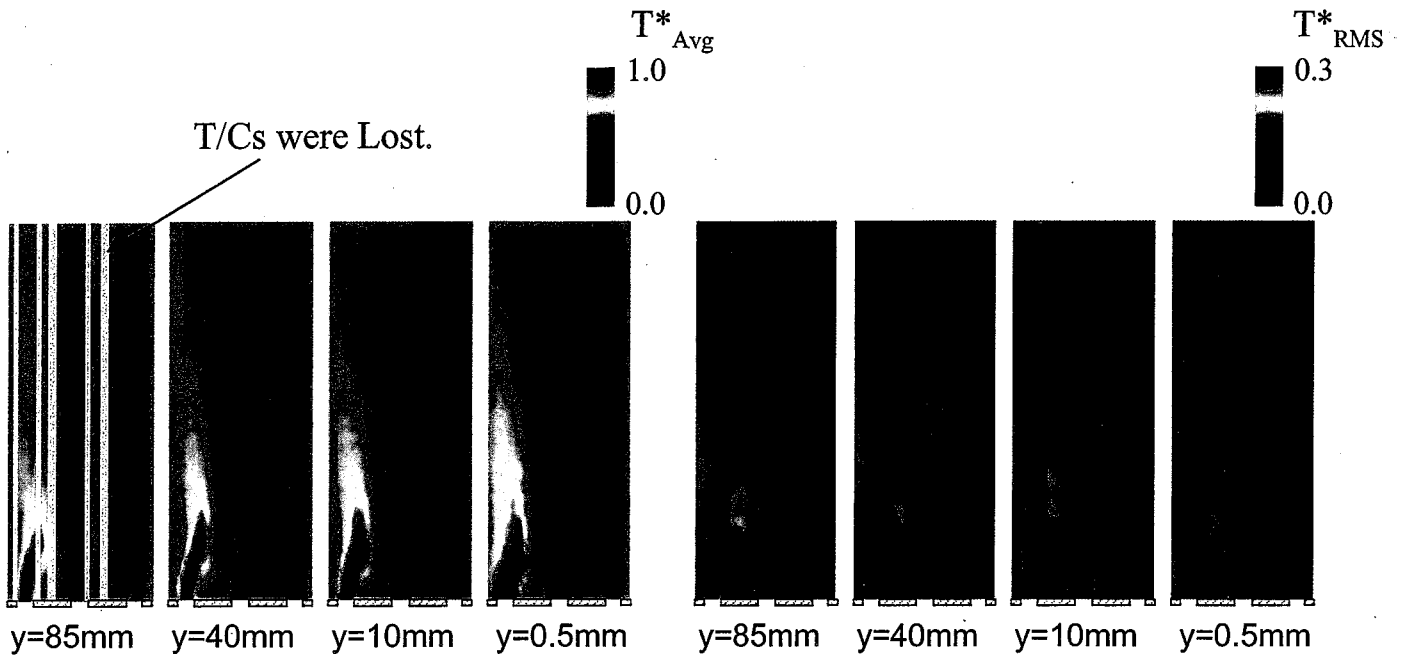


(b) SN3-V ( $V_h=0.5$ ,  $V_c=0.34$ ,  $\Delta T=39$  ( $^{\circ}C$ ),  $Re=25000$ )

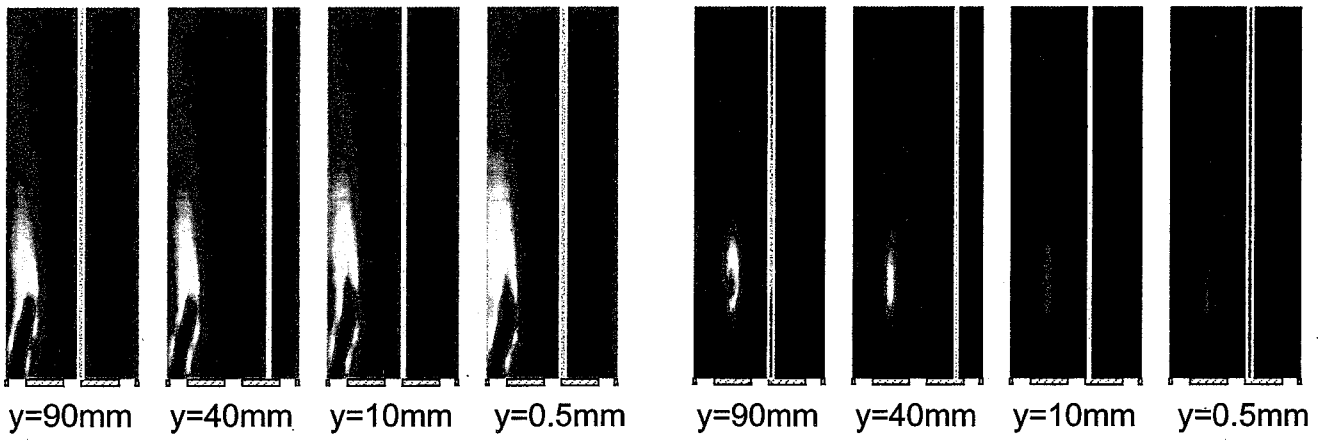


(c) SN3-R ( $V_h=0.3$ ,  $V_c=0.2$ ,  $\Delta T=41$  ( $^{\circ}C$ ),  $Re=15000$ )

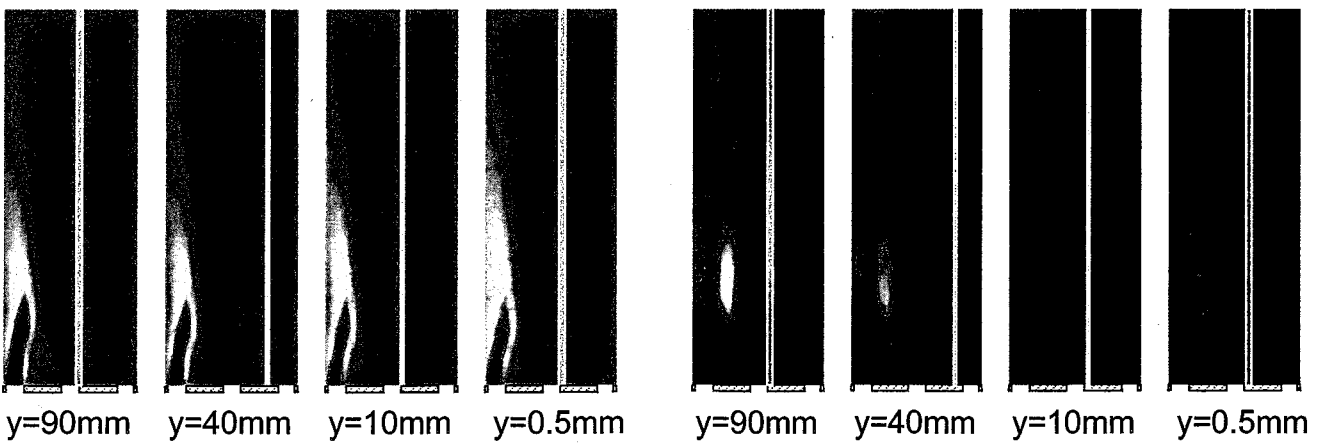
Fig.3.1.2 Comparisons of Time-Averaged Temperature Fields between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.



(a) WE2 ( $V_h=0.52$ ,  $V_c=0.49$ ,  $\Delta T=14$  ( $^{\circ}C$ ),  $Re=13500$ )



(b) SE2-V ( $V_h=0.5$ ,  $V_c=0.5$ ,  $\Delta T=40$  ( $^{\circ}C$ ),  $Re=27000$ )



(c) SE2-R ( $V_h=0.3$ ,  $V_c=0.3$ ,  $\Delta T=41$  ( $^{\circ}C$ ),  $Re=16000$ )

Fig.3.1.3 Comparisons of Time-Averaged Temperature Fields between Sodium and Water under Doble-Jet Condition.

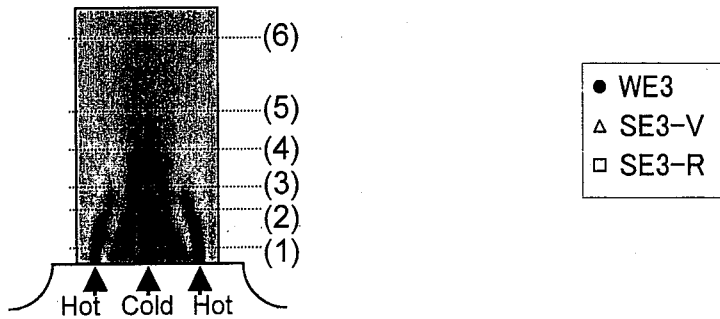
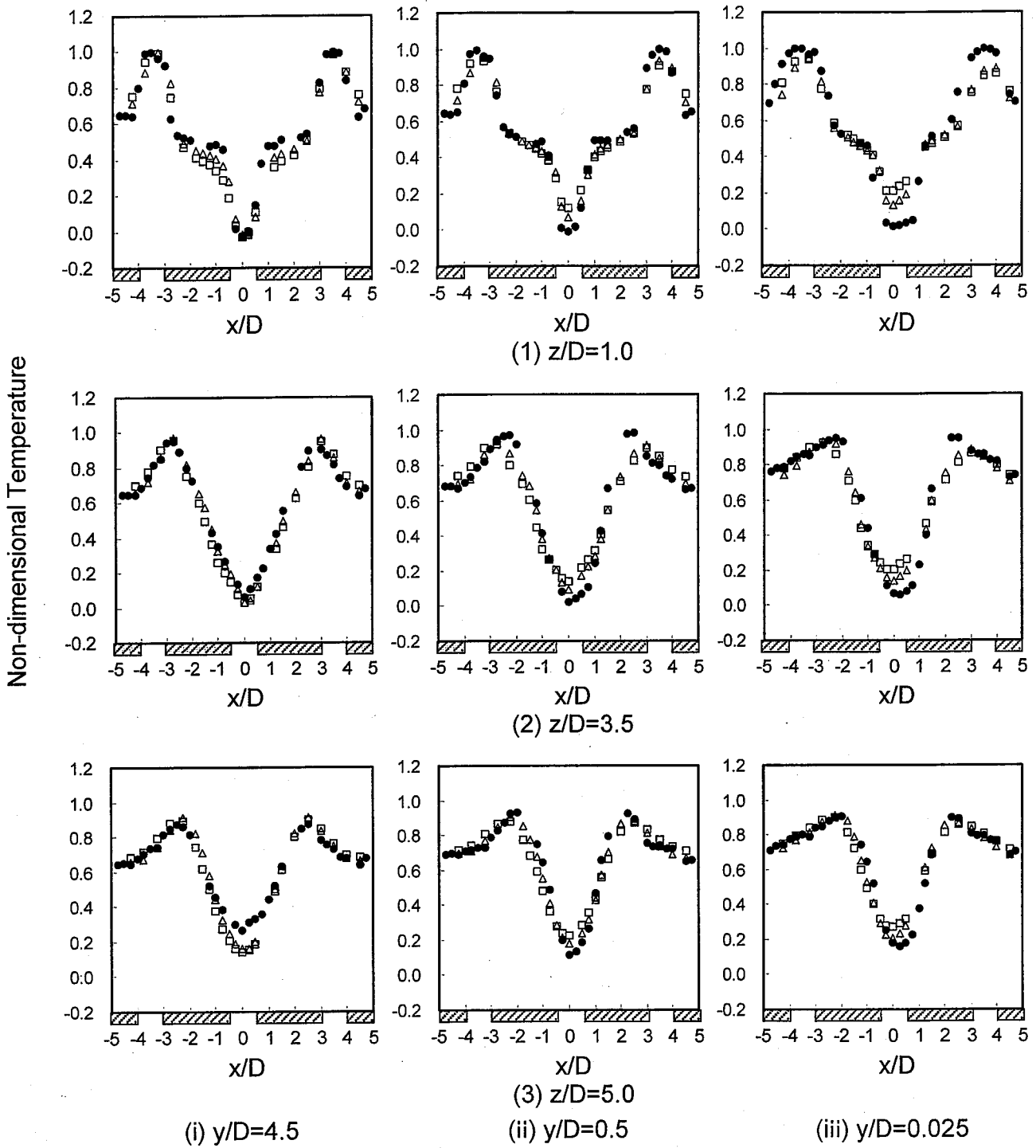


Fig.3.1.4(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

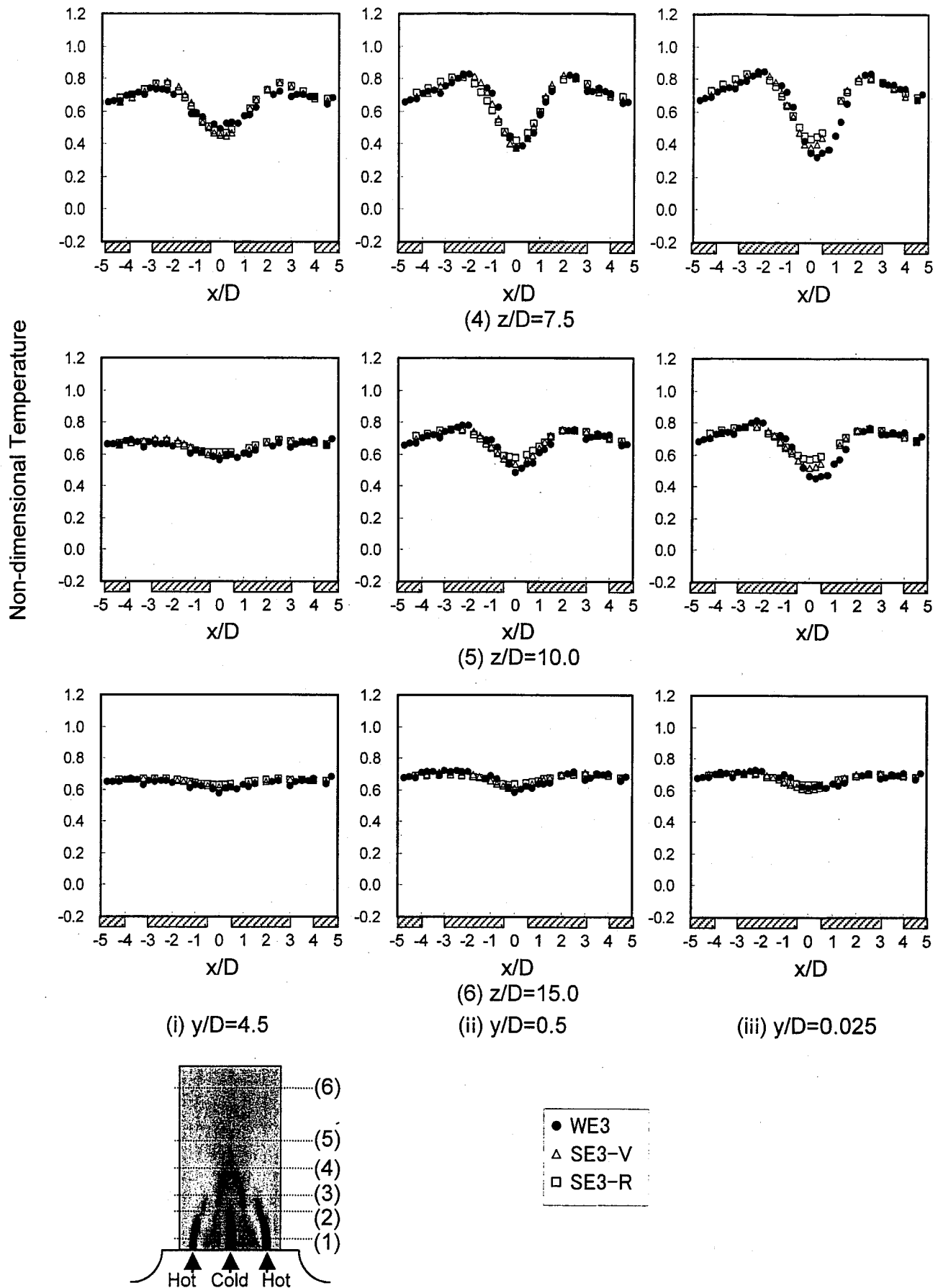


Fig.3.1.4(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

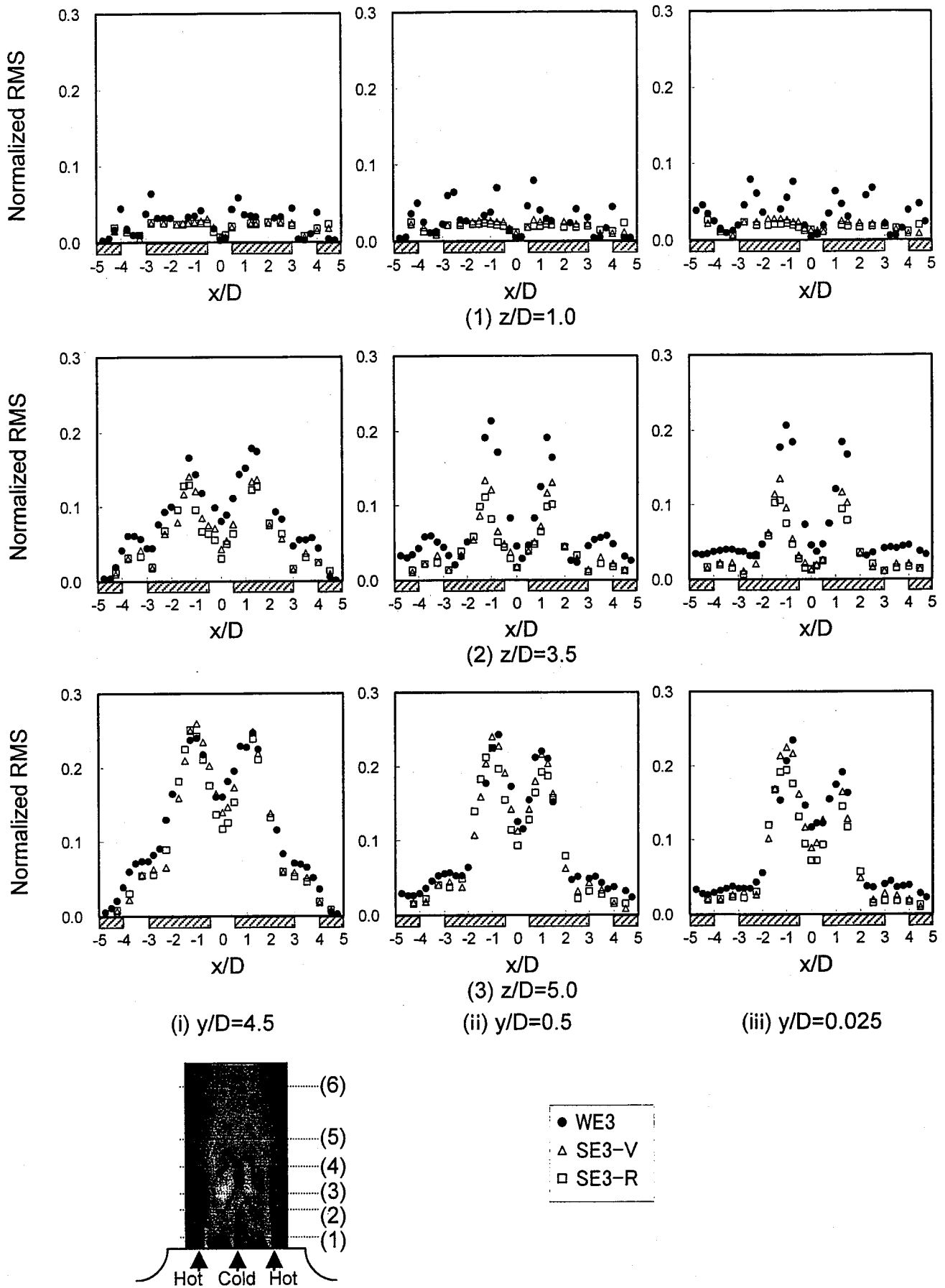


Fig.3.1.5(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

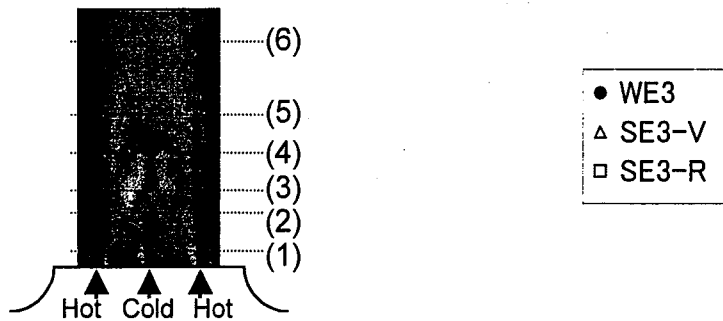
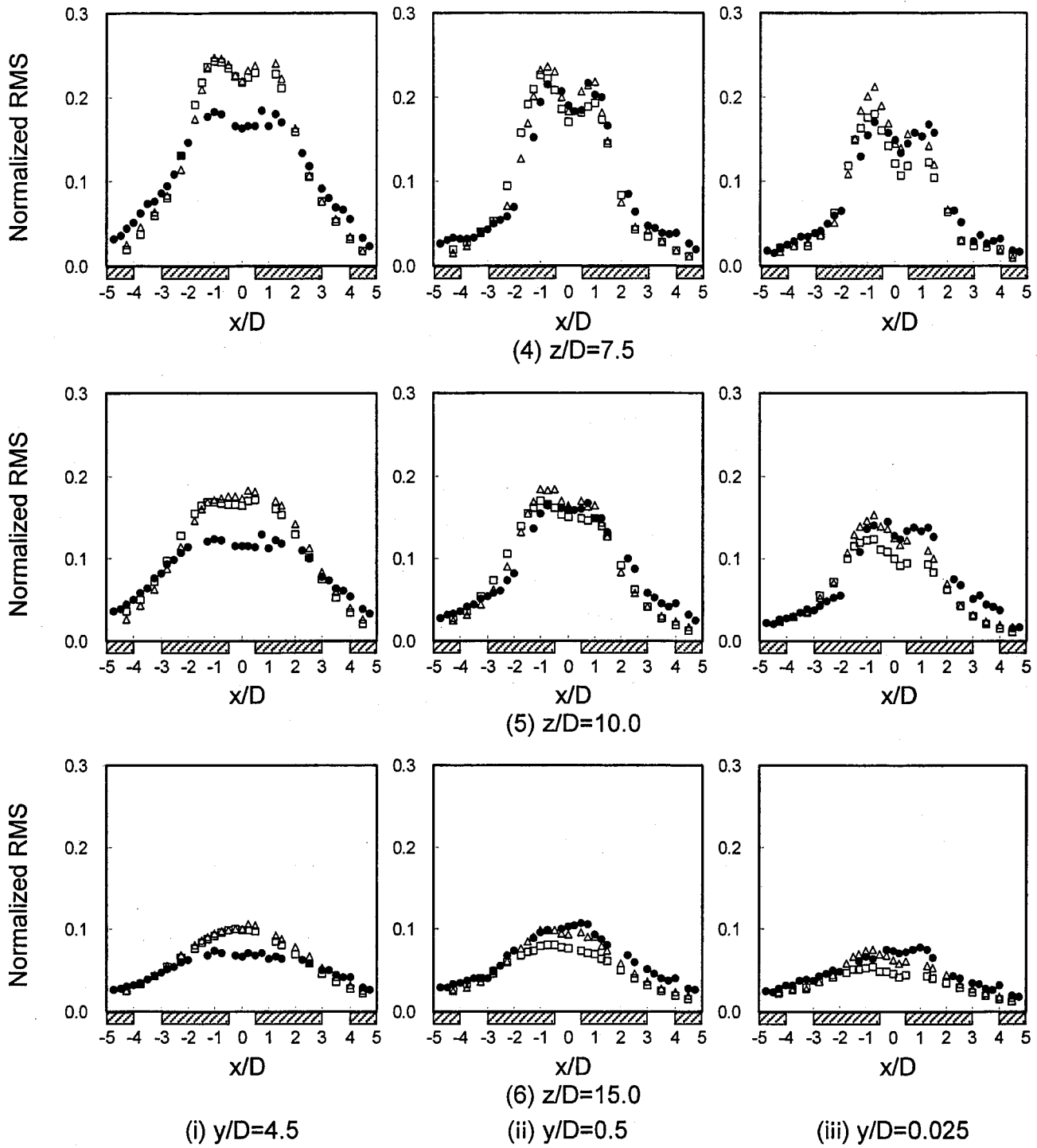


Fig.3.1.5(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

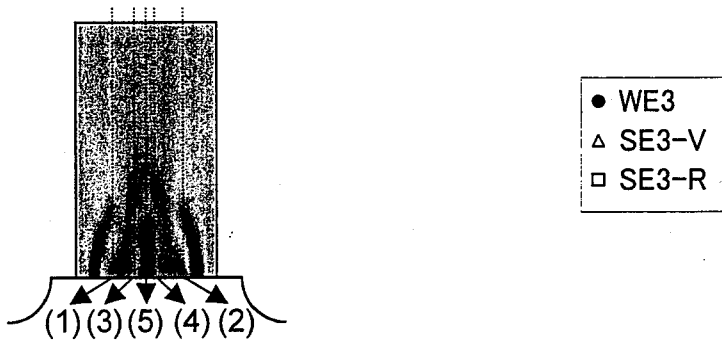
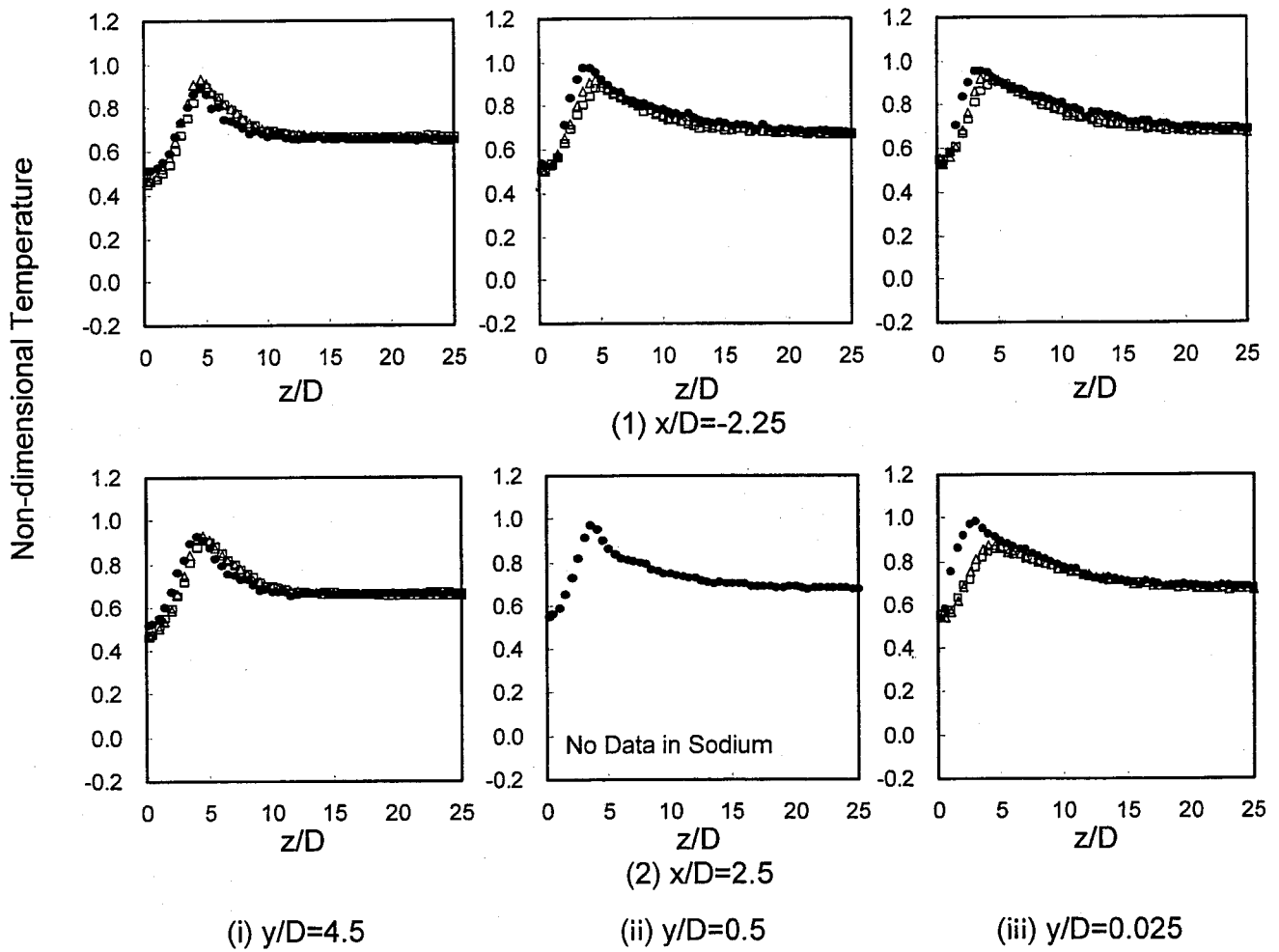
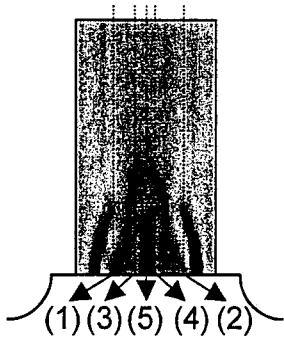
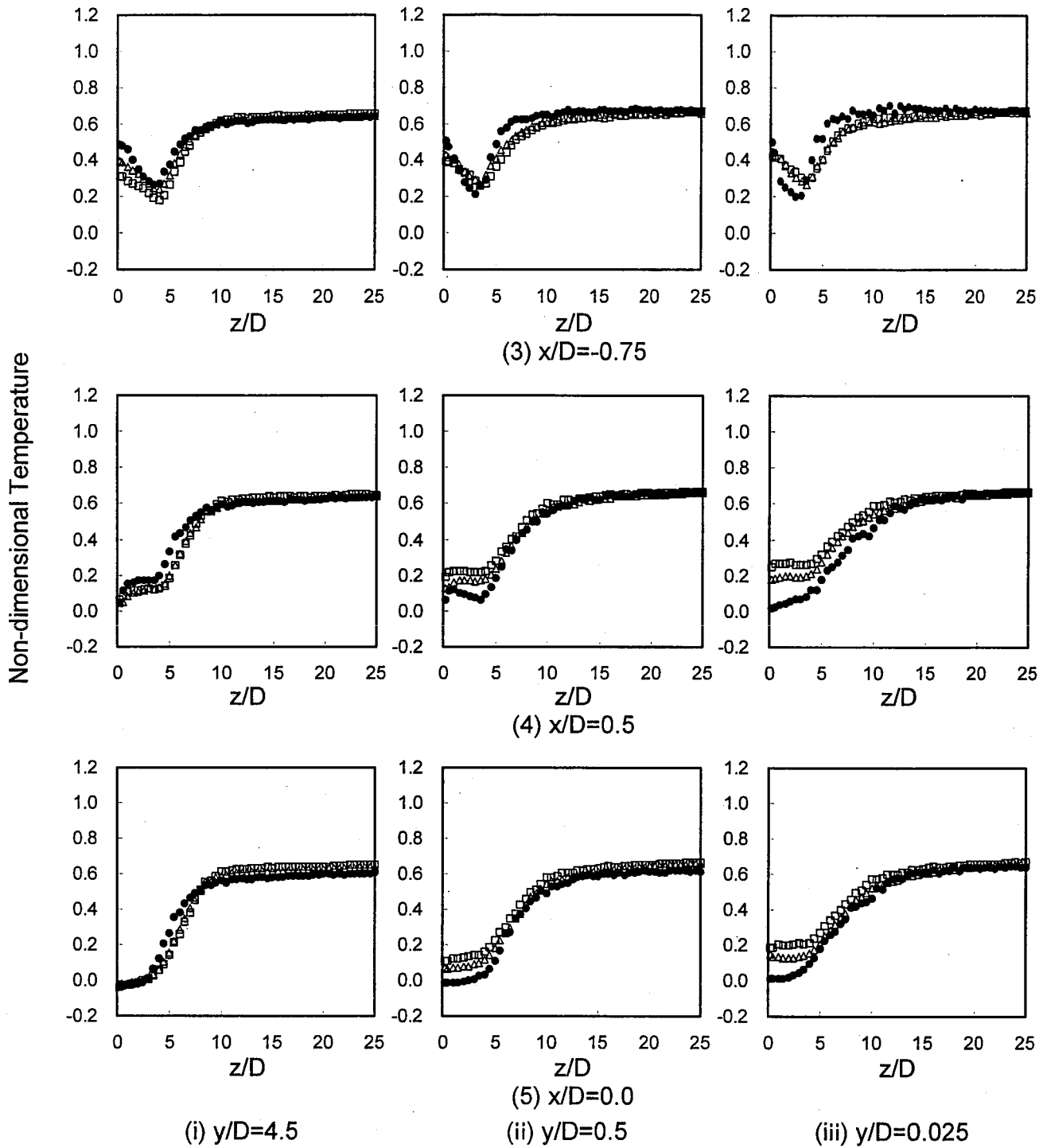


Fig.3.1.6(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.



● WE3  
 ▲ SE3-V  
 □ SE3-R

Fig.3.1.6(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

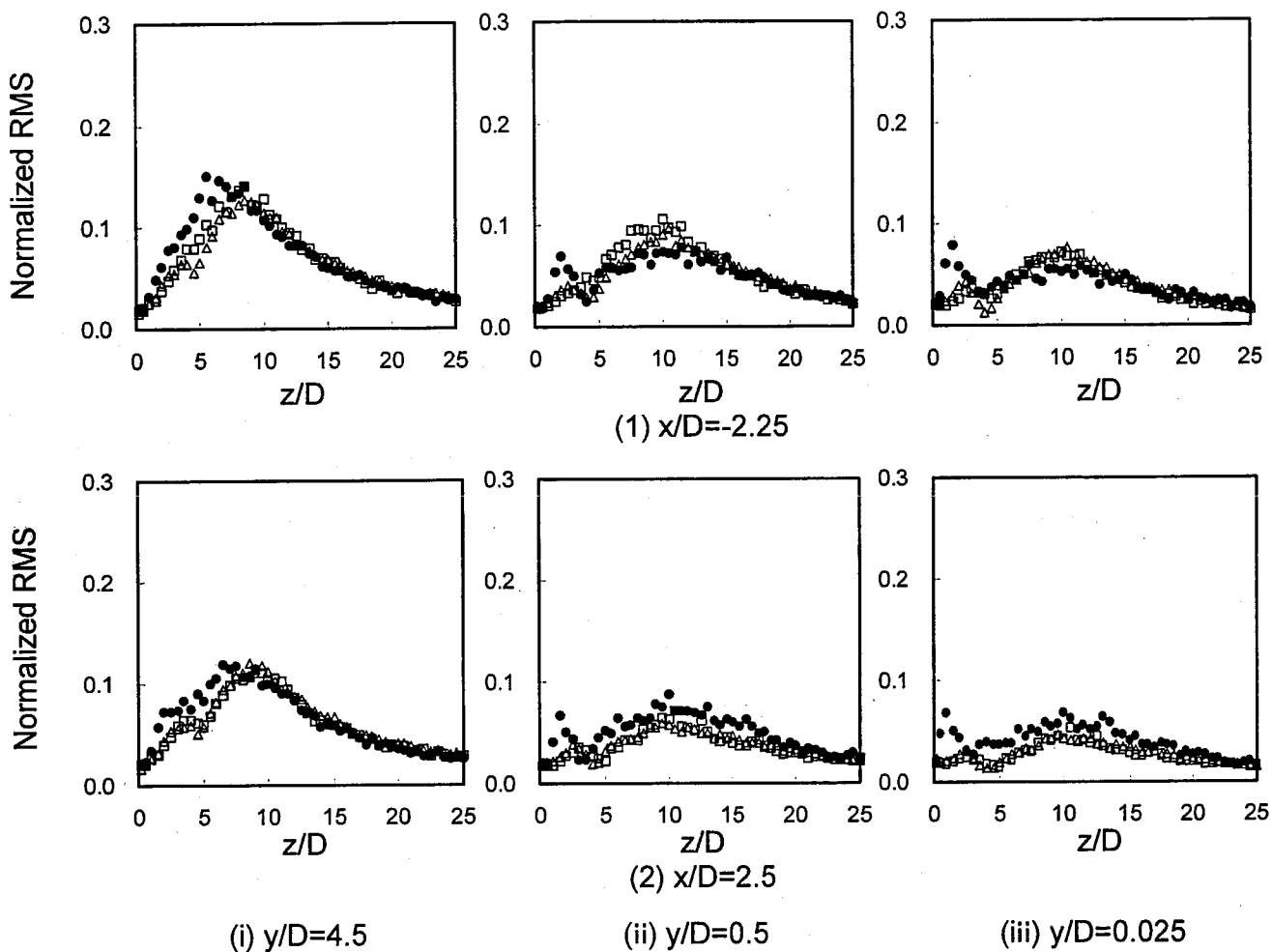


Fig.3.1.7(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

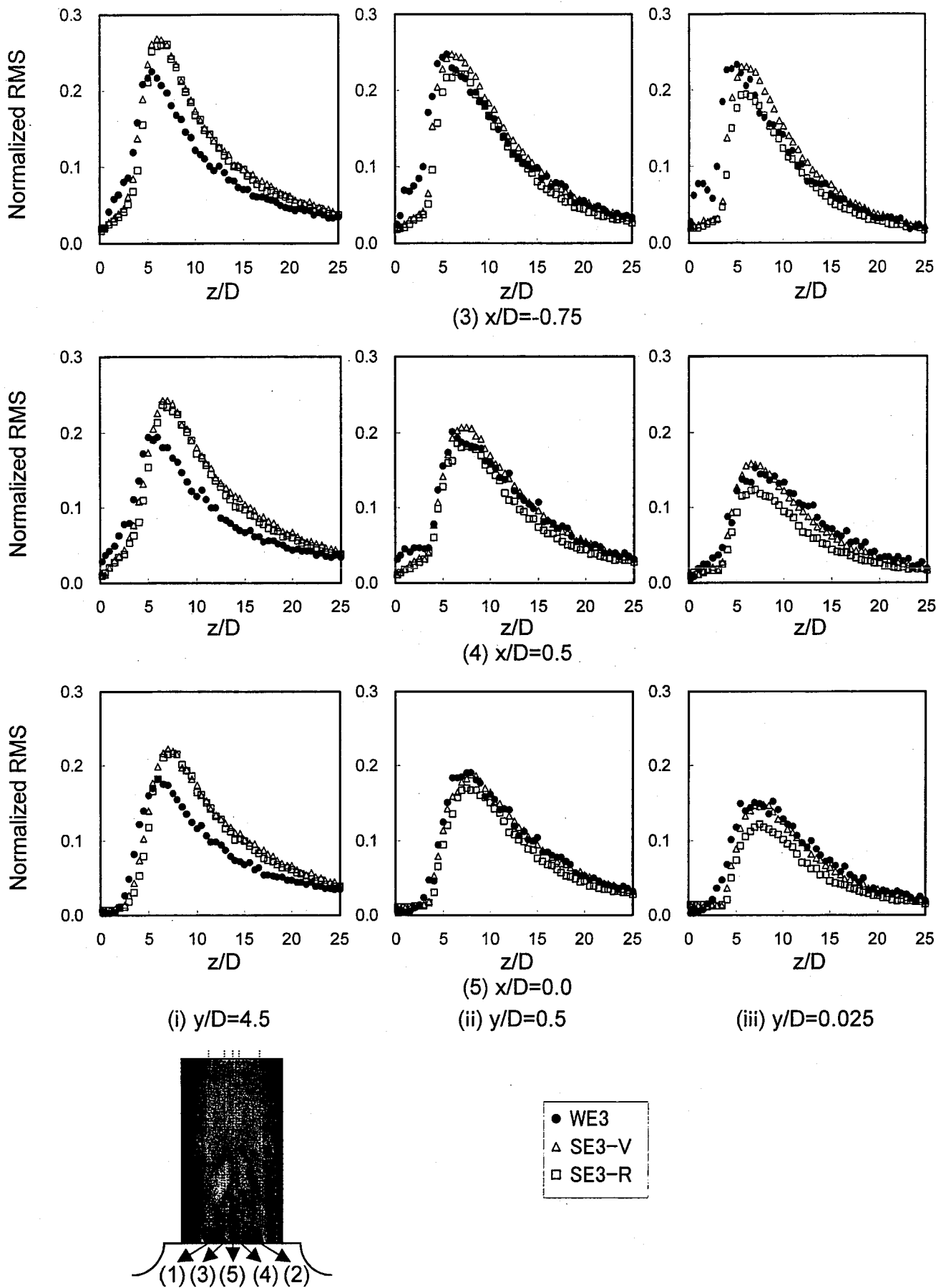


Fig.3.1.7(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

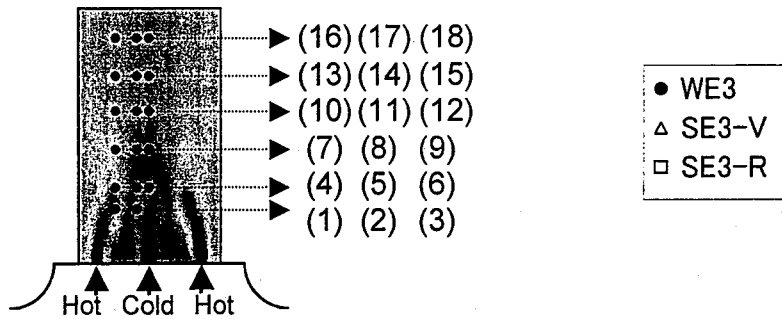
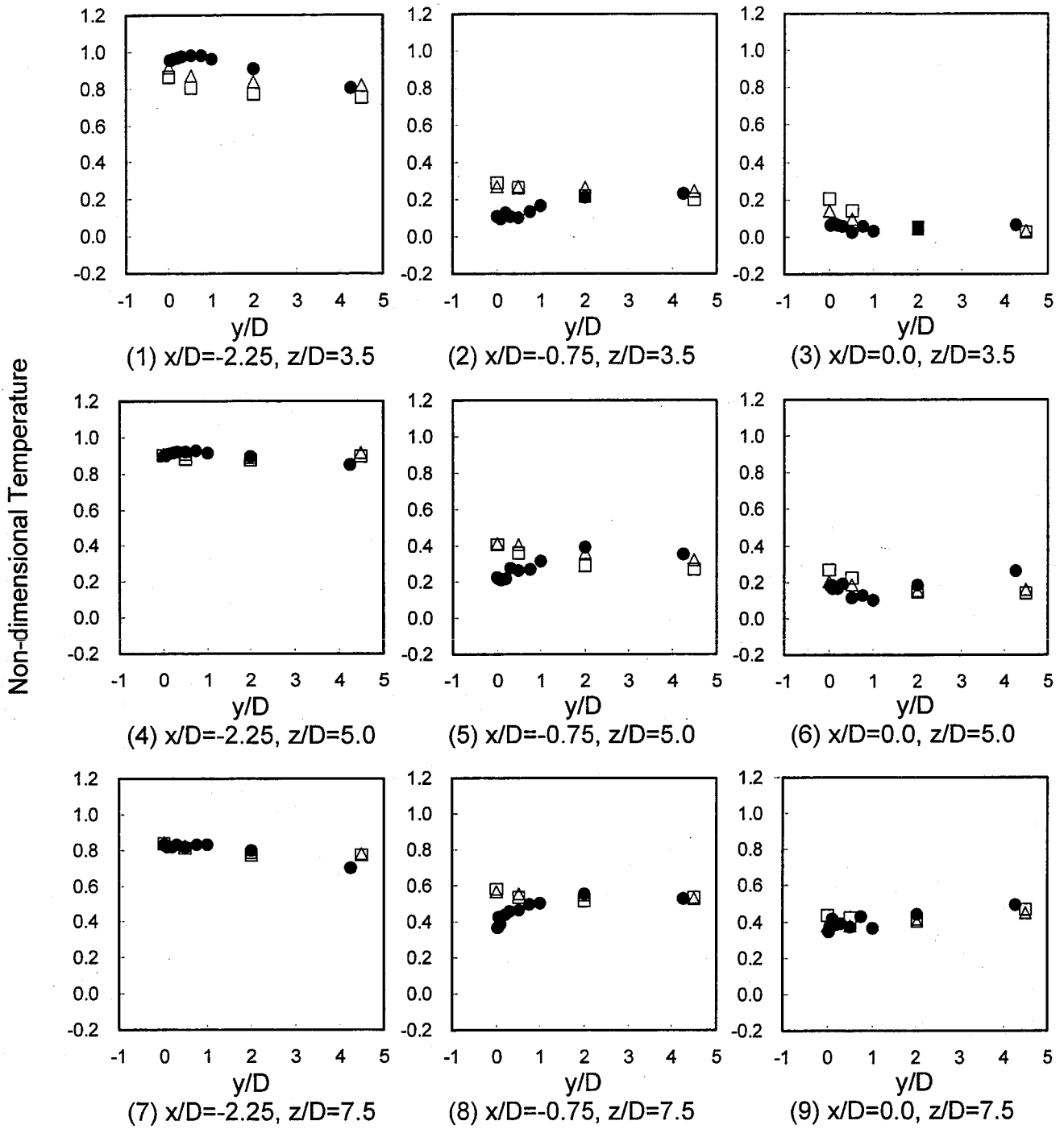


Fig.3.1.8(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

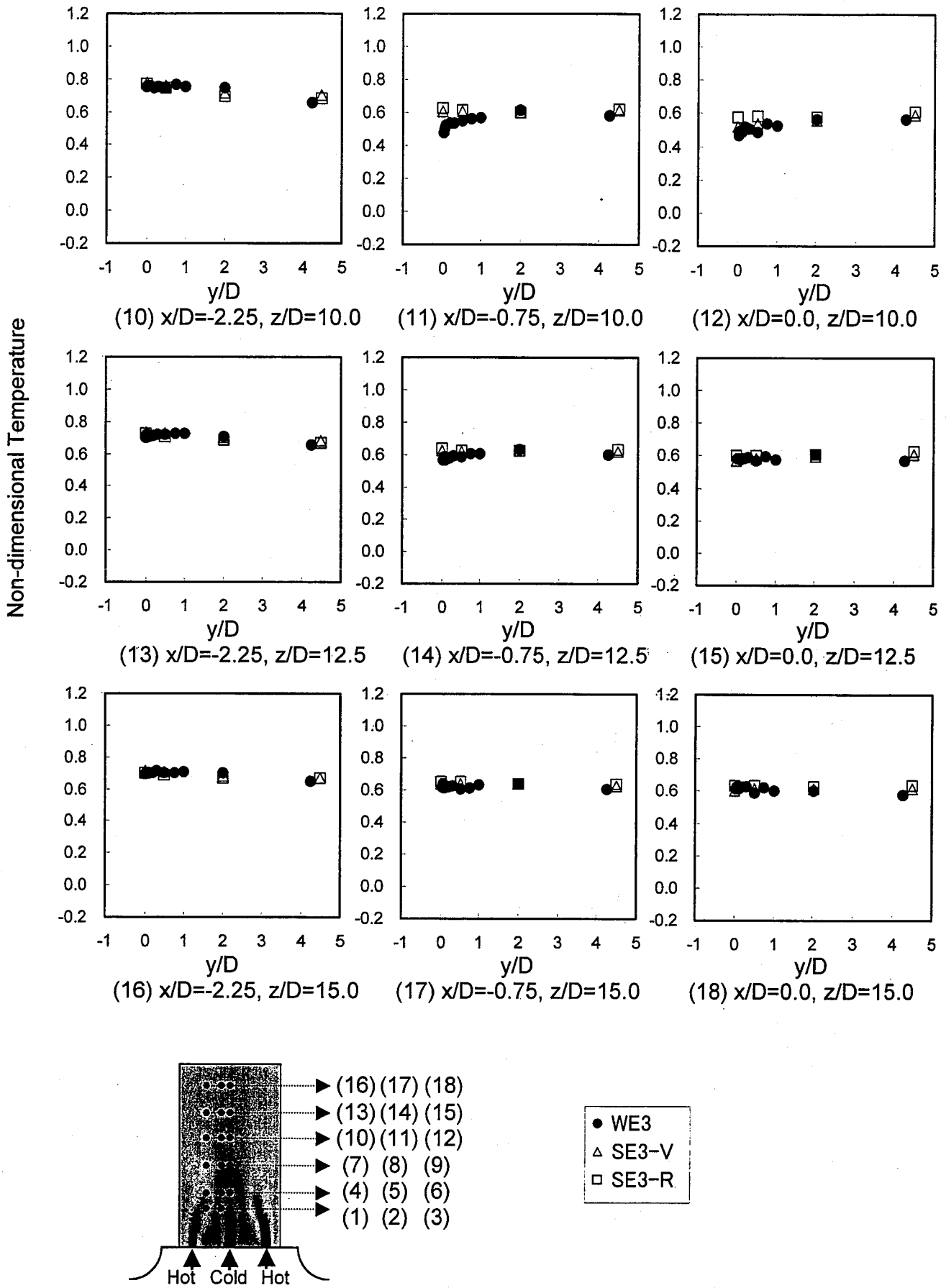


Fig.3.1.8(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

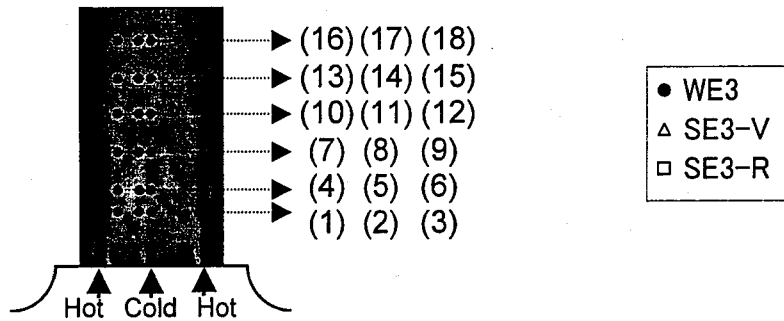
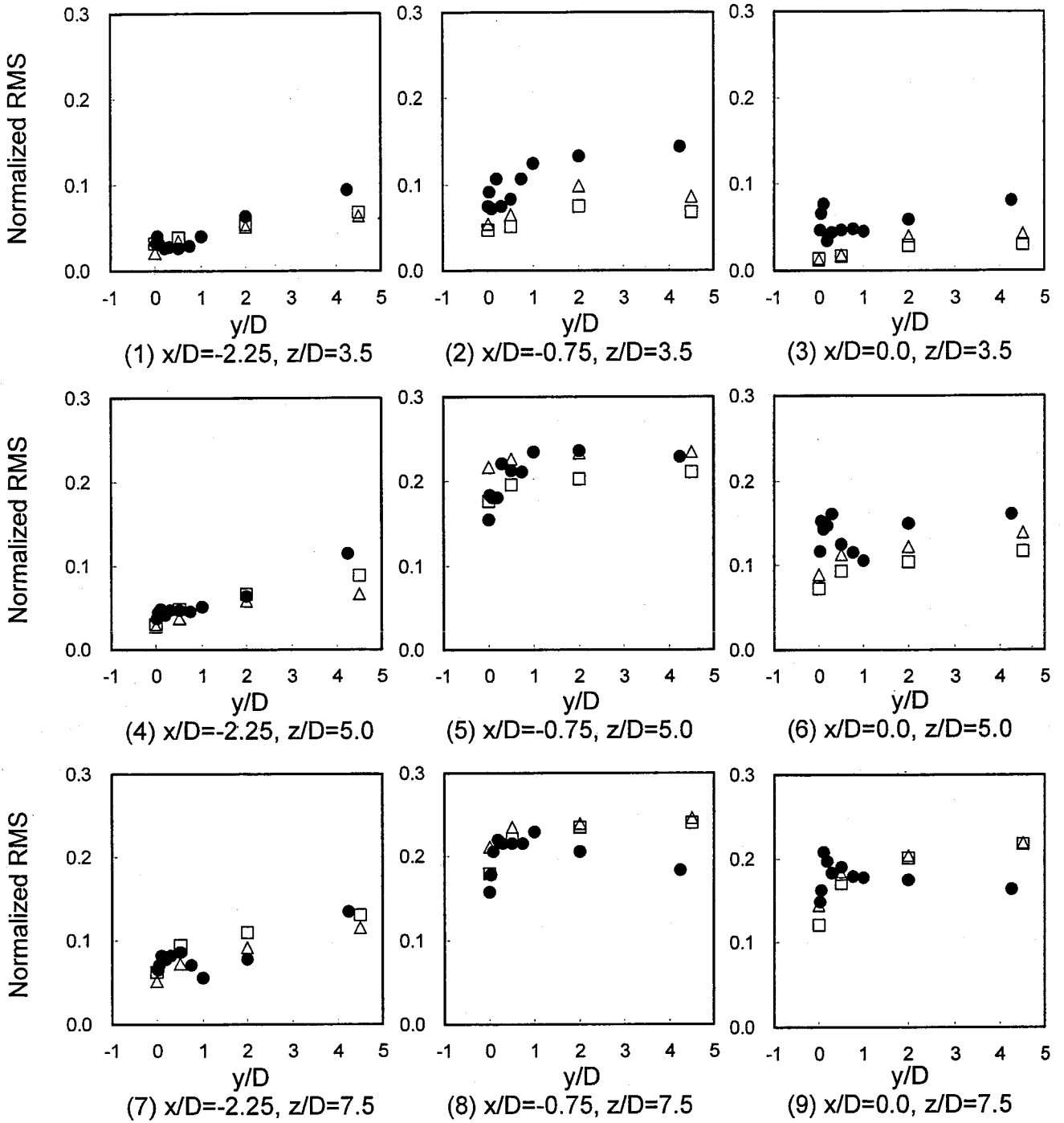


Fig.3.1.9(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

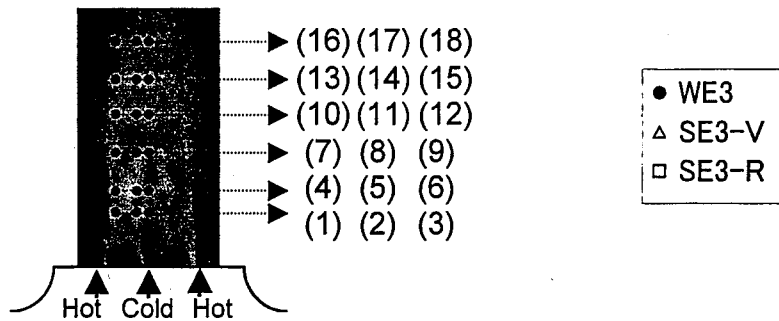
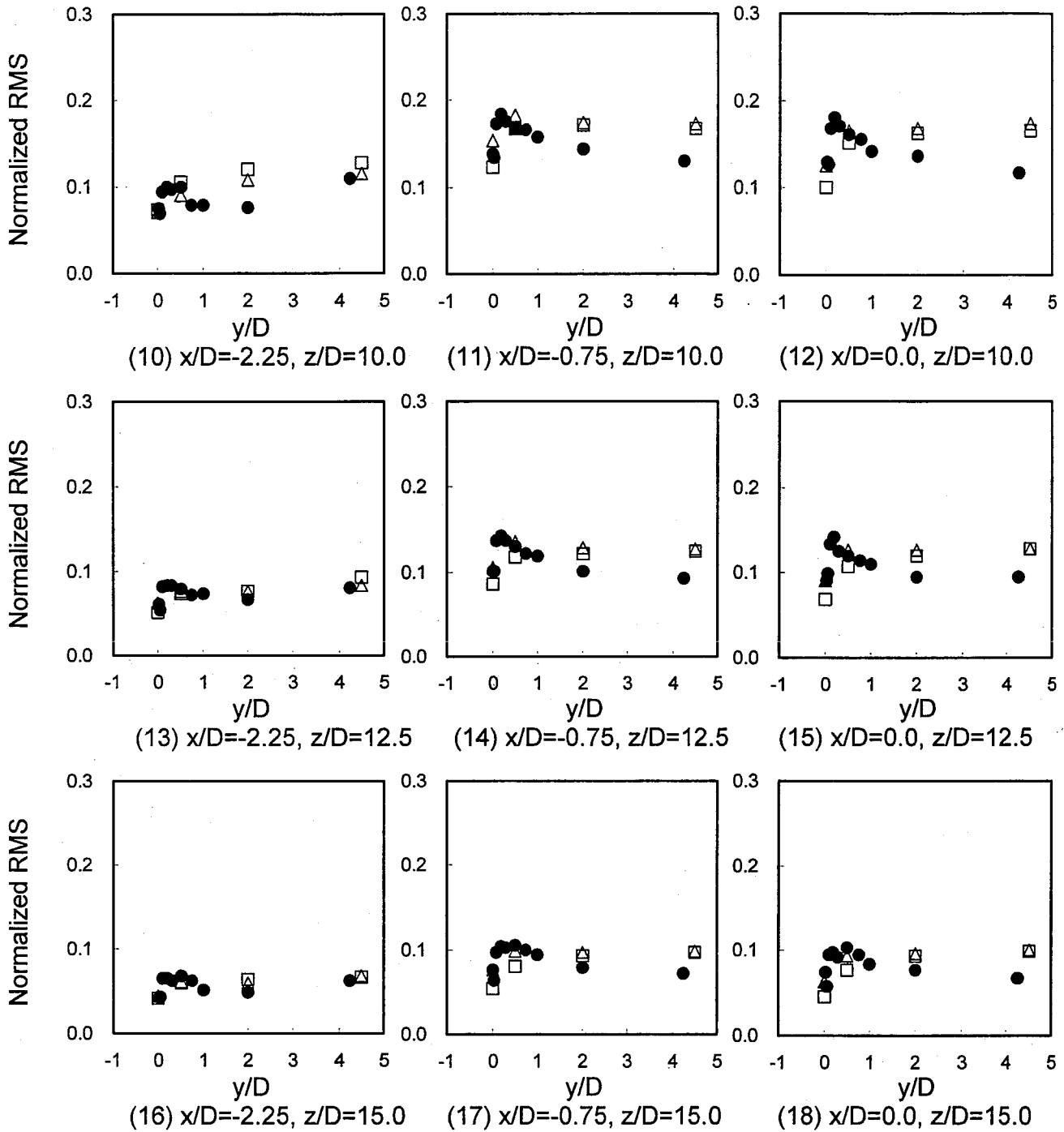


Fig.3.1.9(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

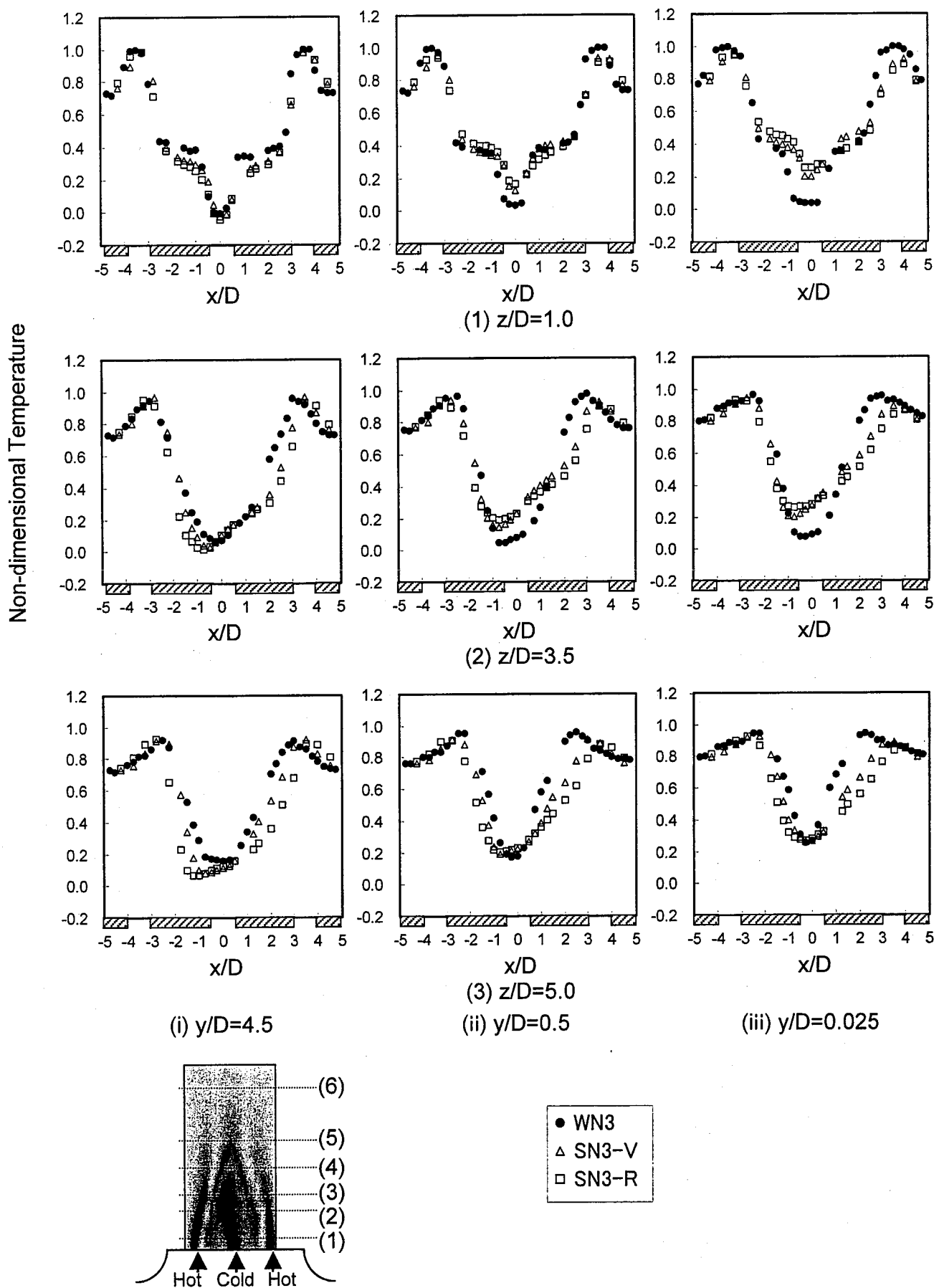


Fig.3.1.10(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

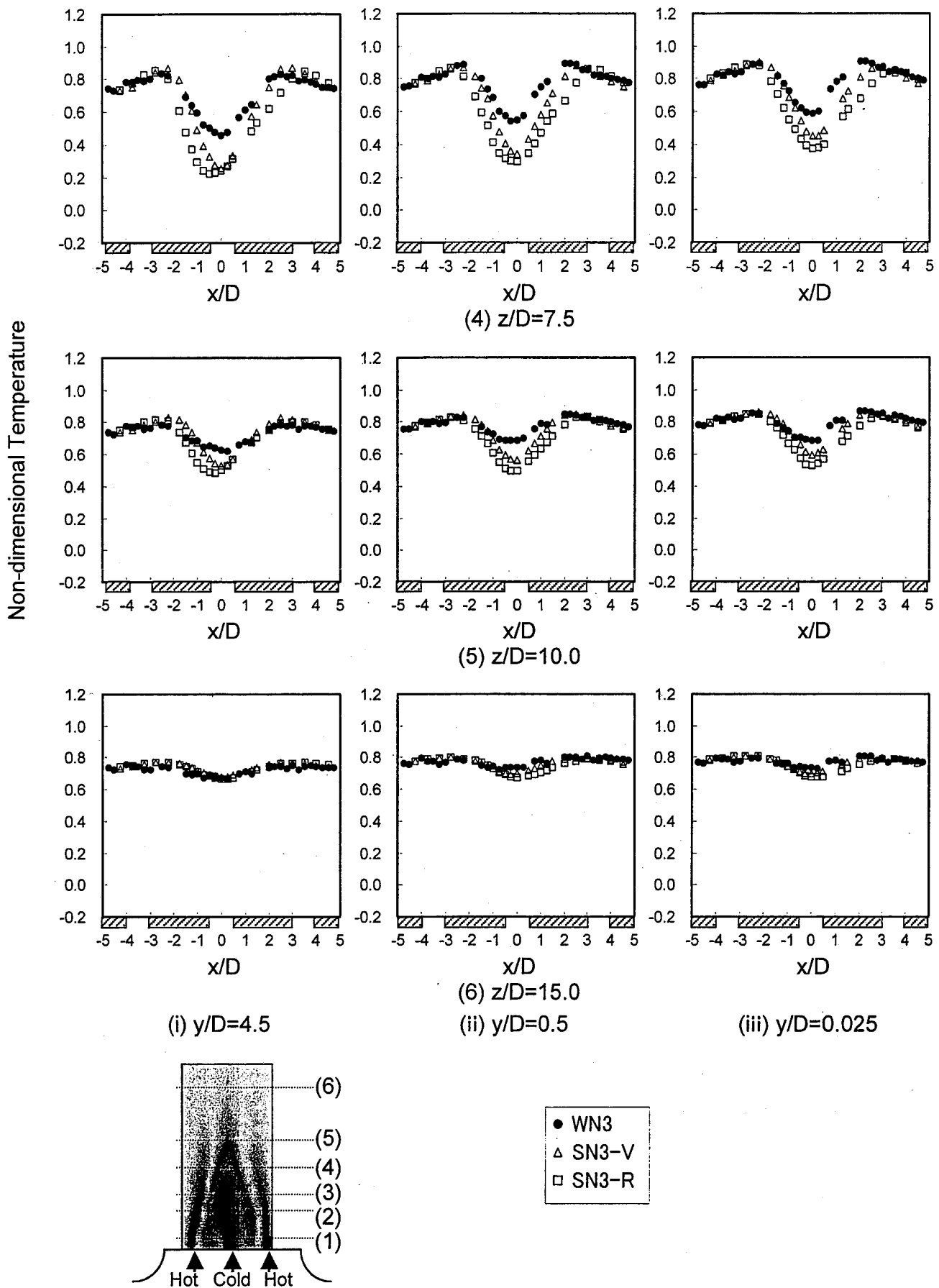


Fig.3.1.10(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

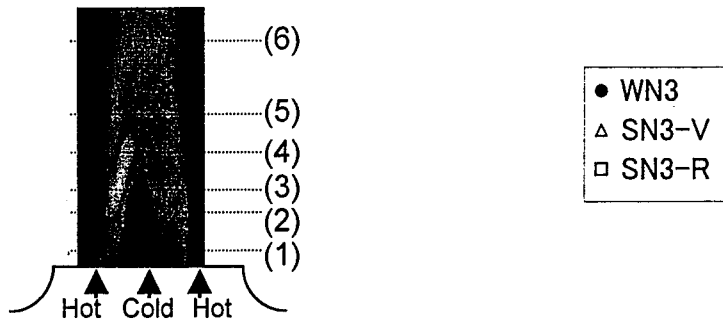
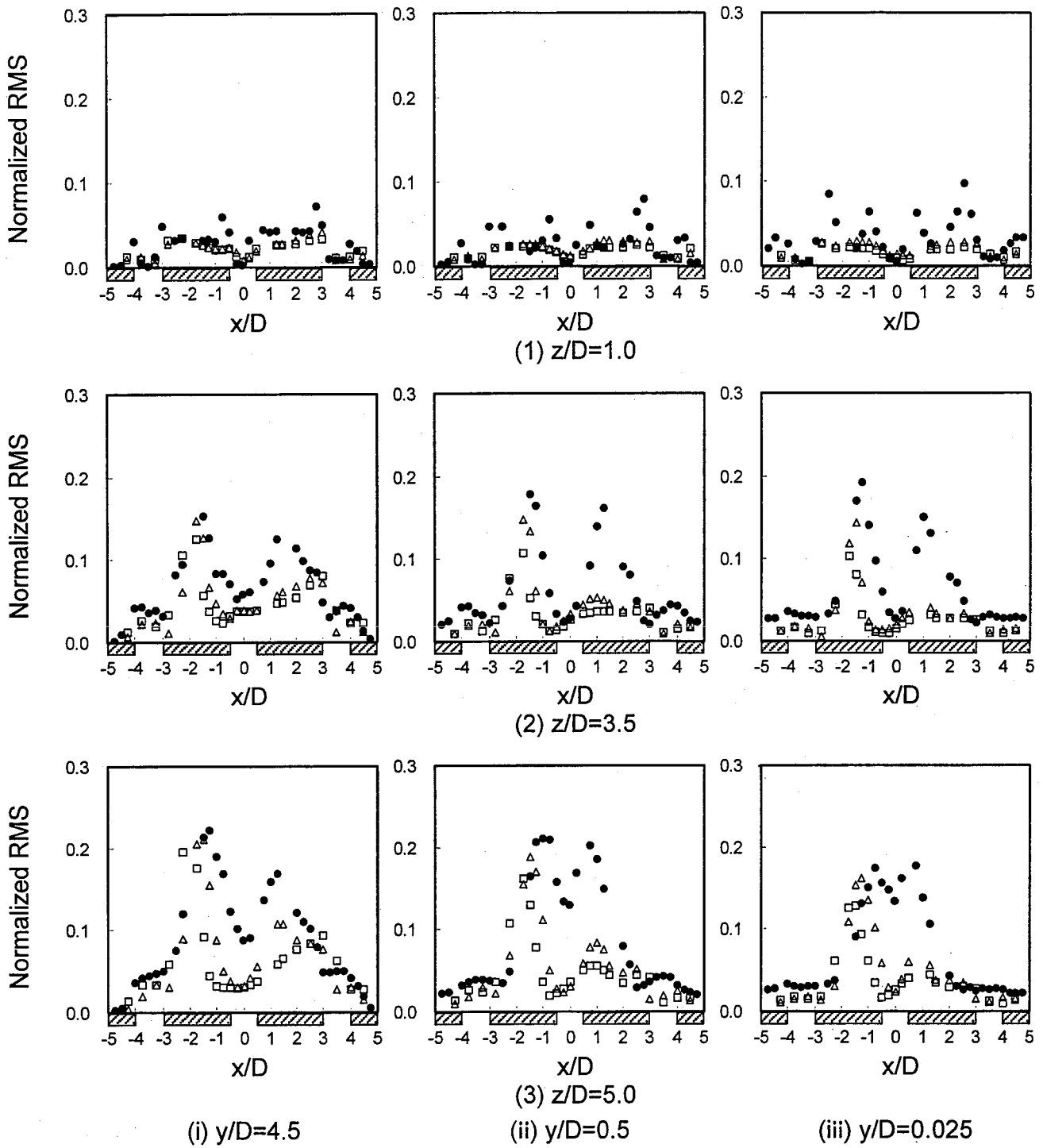
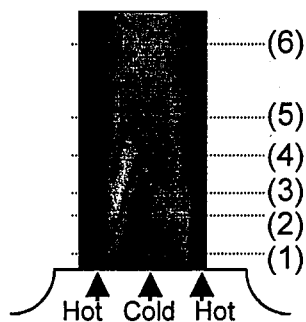
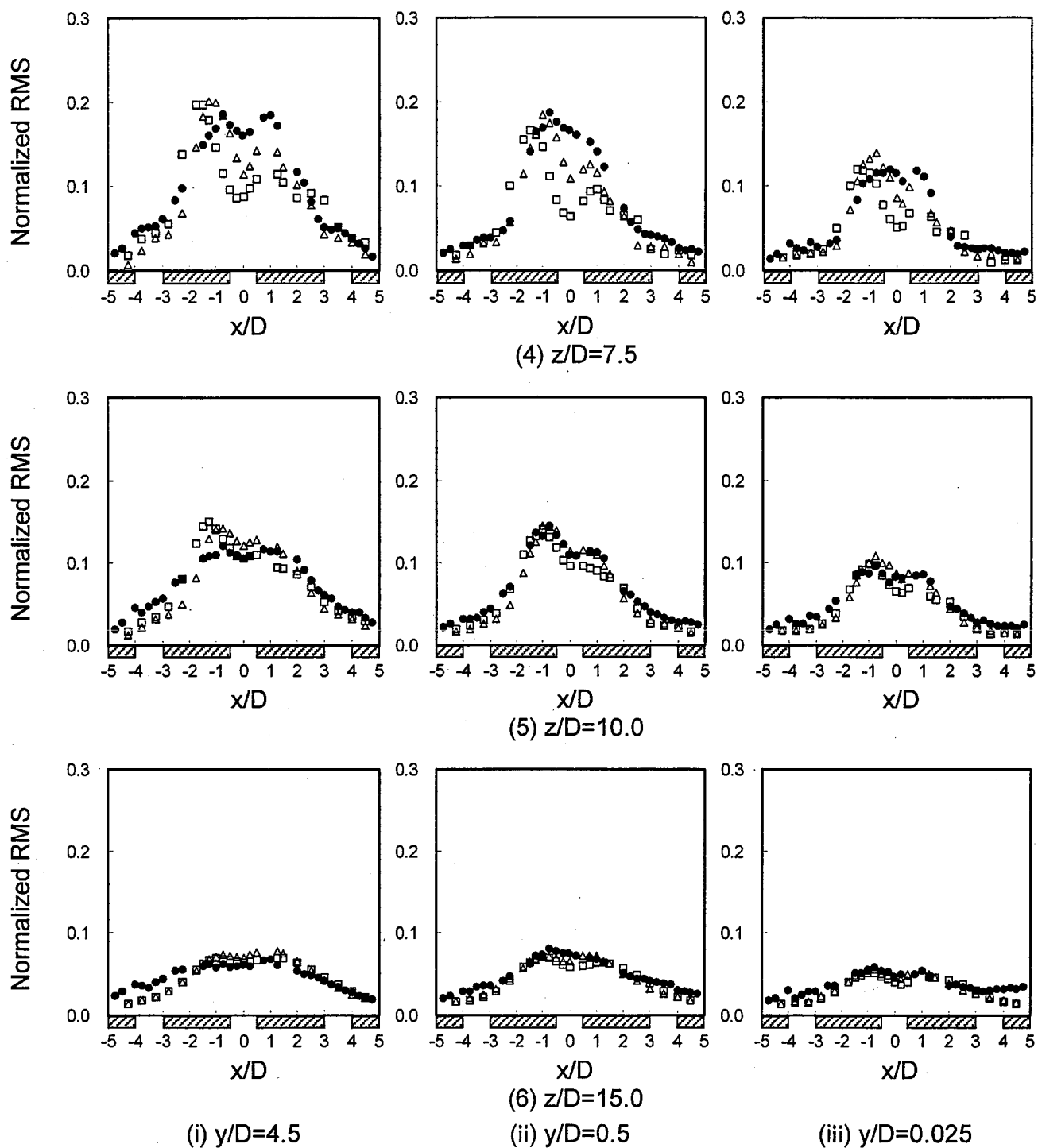


Fig.3.1.11(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.



● WN3  
 △ SN3-V  
 □ SN3-R

Fig.3.1.11(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

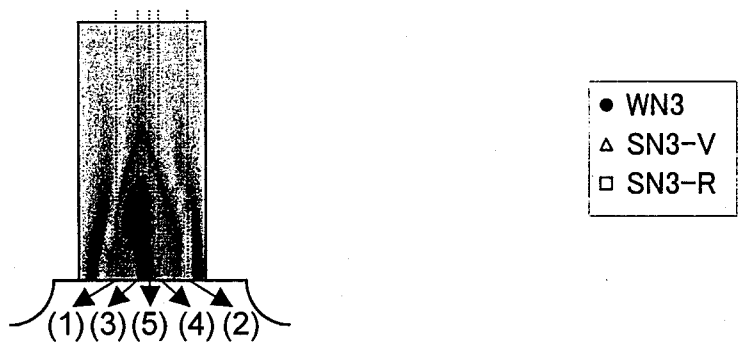
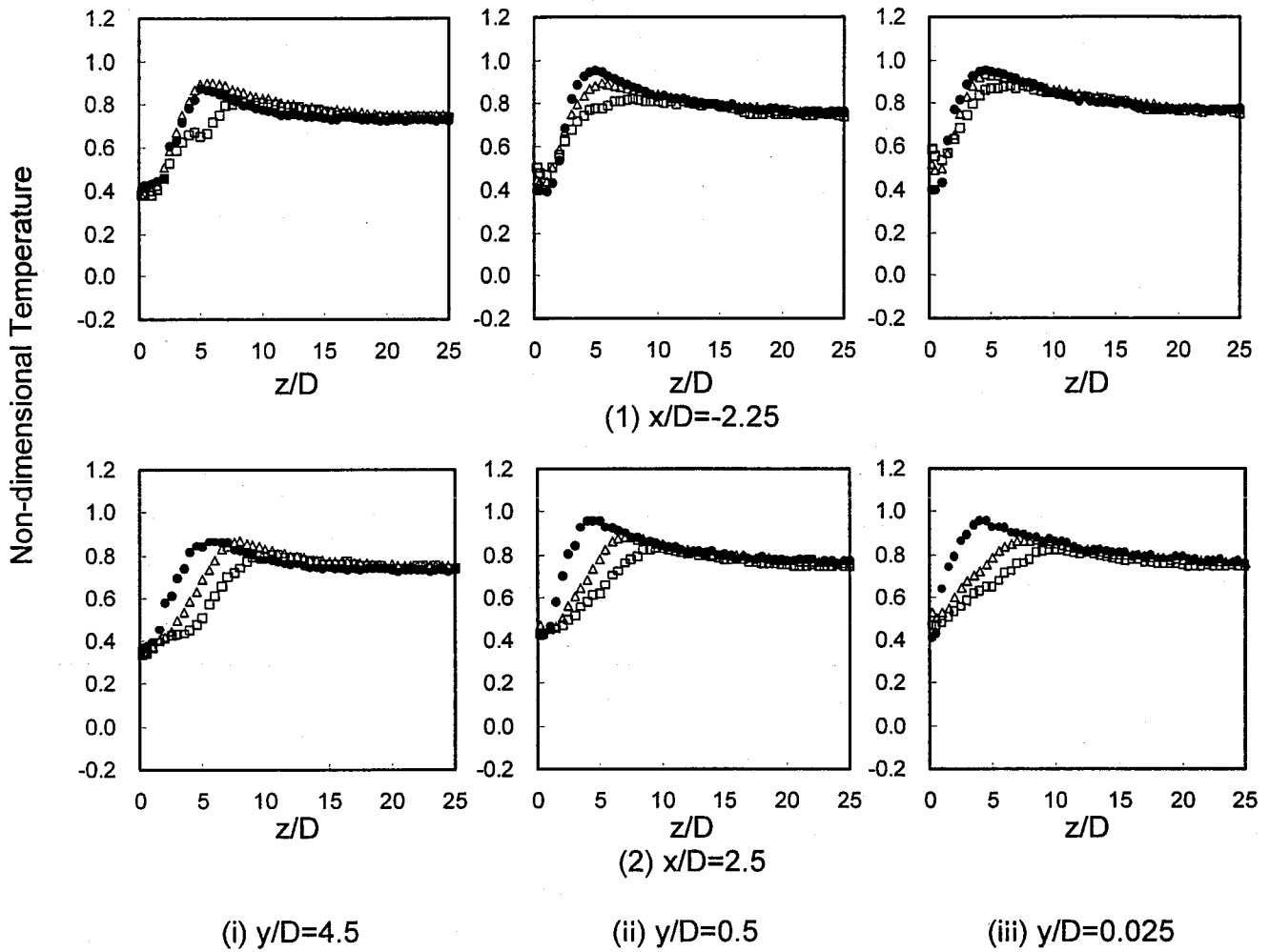


Fig.3.1.12(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

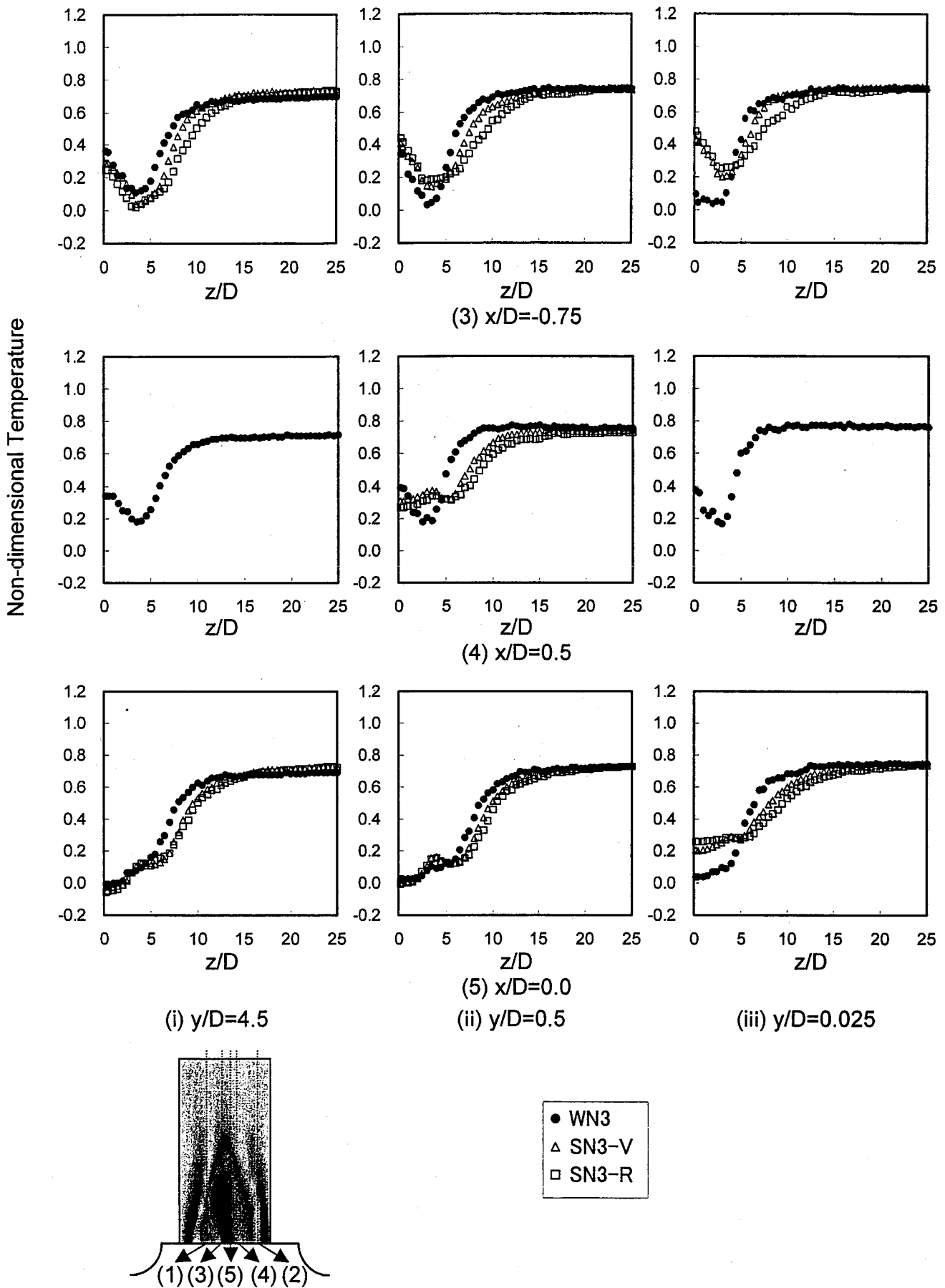


Fig.3.1.12(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

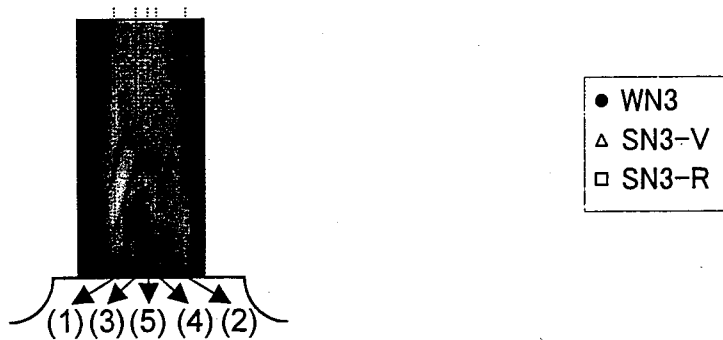
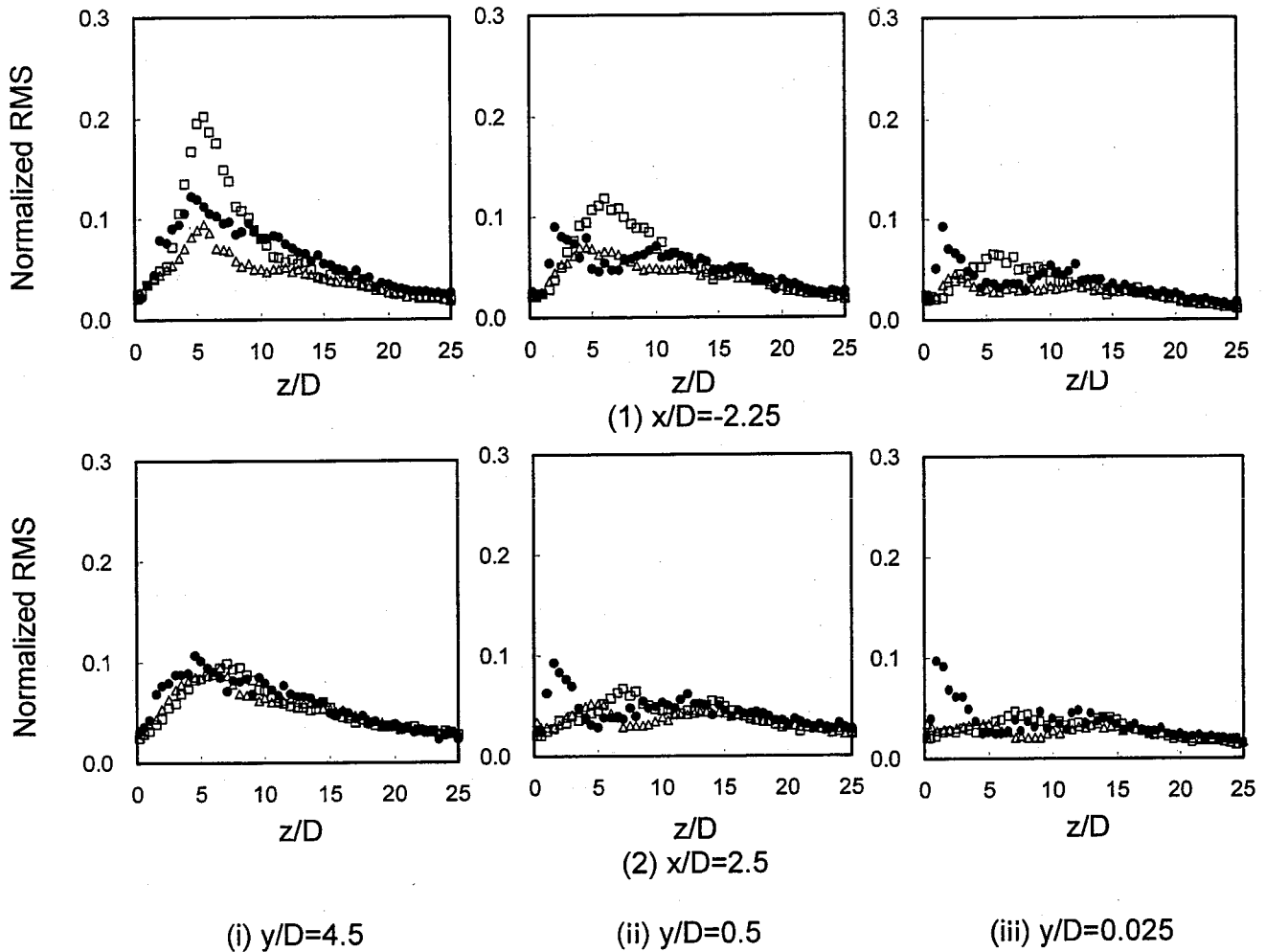


Fig.3.1.13(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

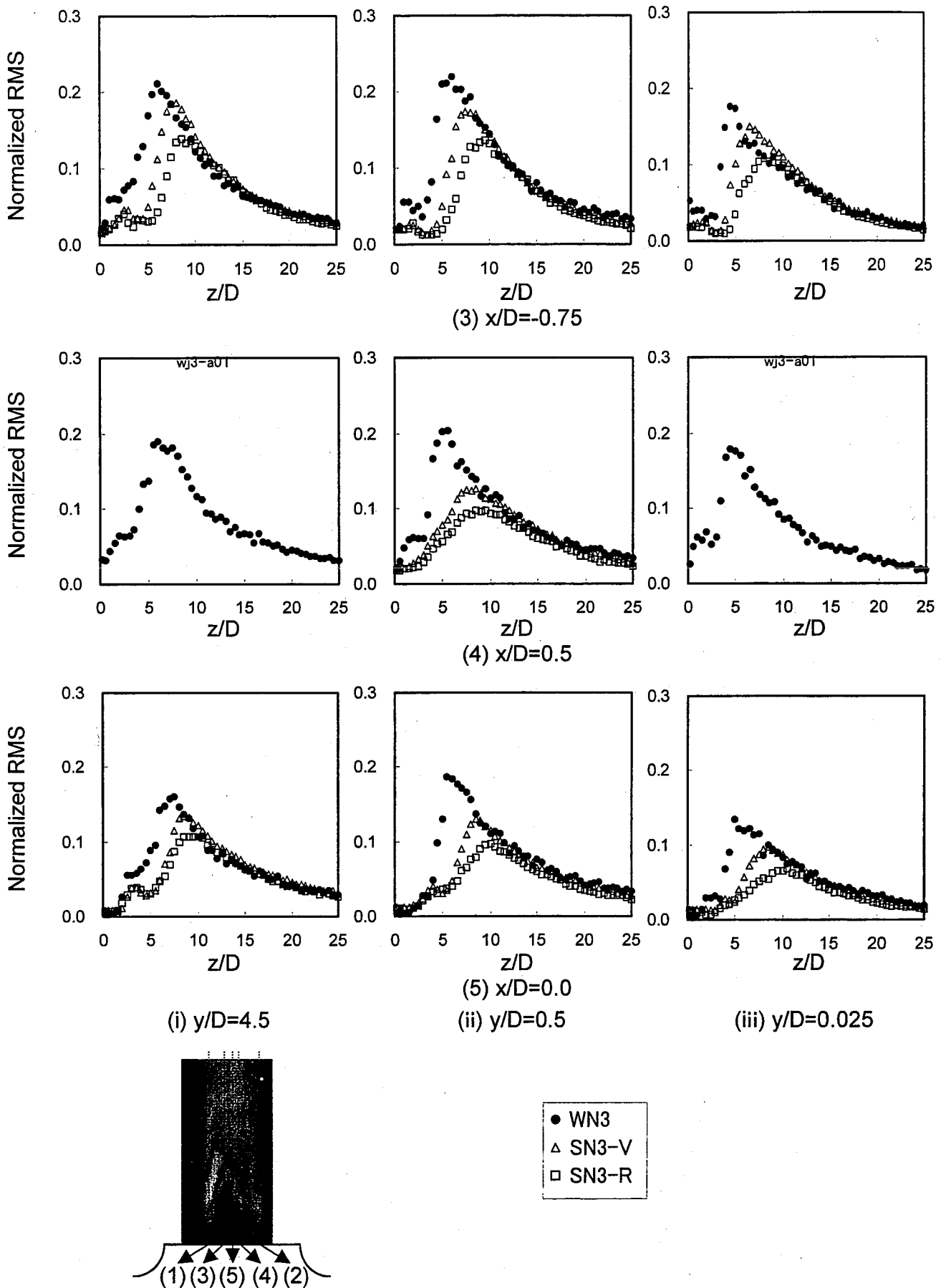


Fig.3.1.13(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

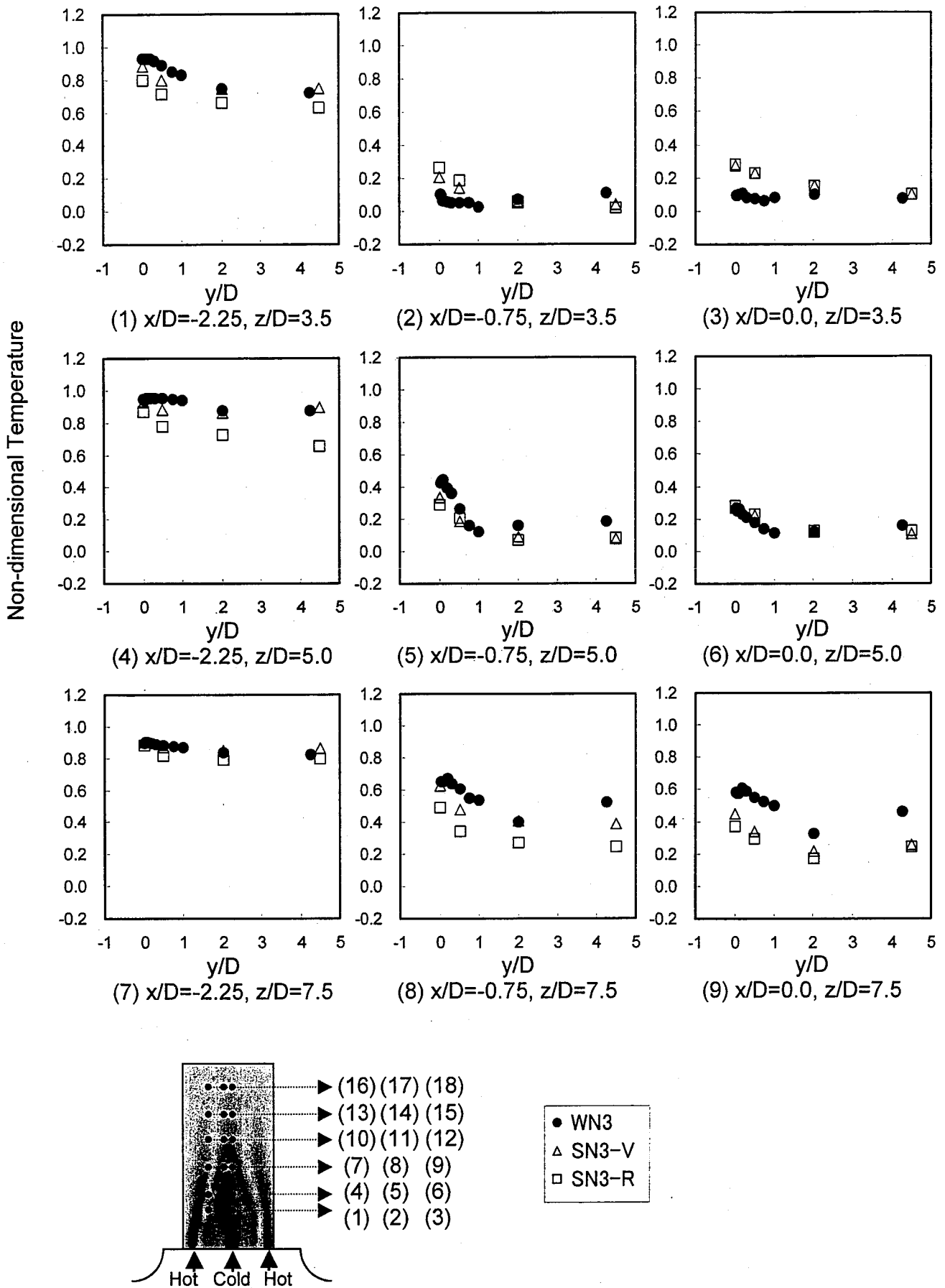


Fig.3.1.14(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

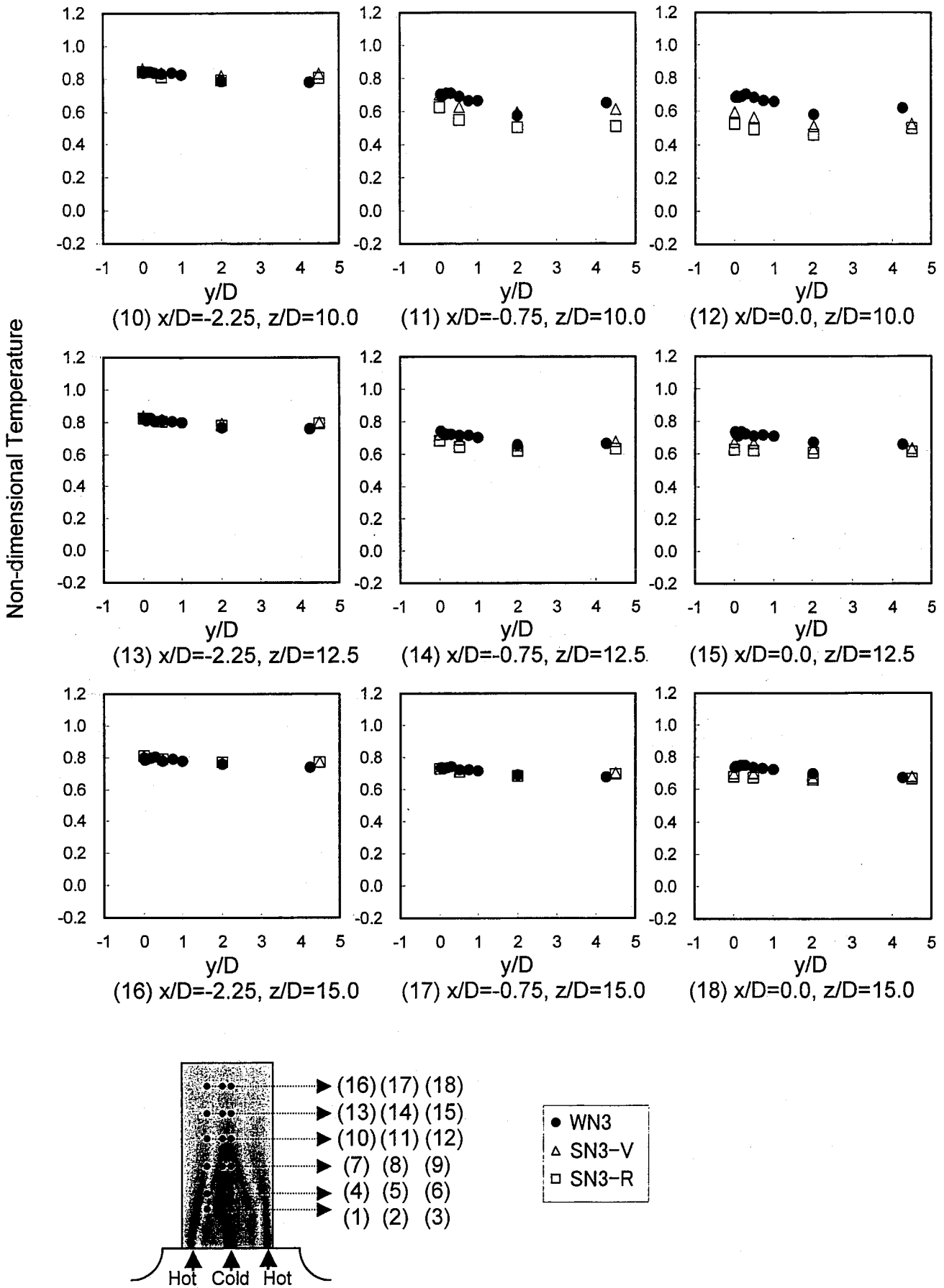


Fig.3.1.14(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

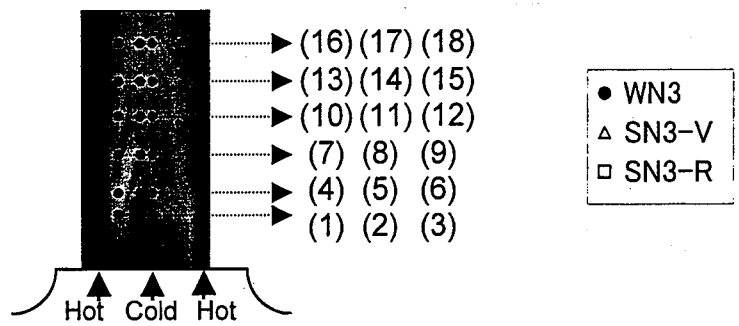
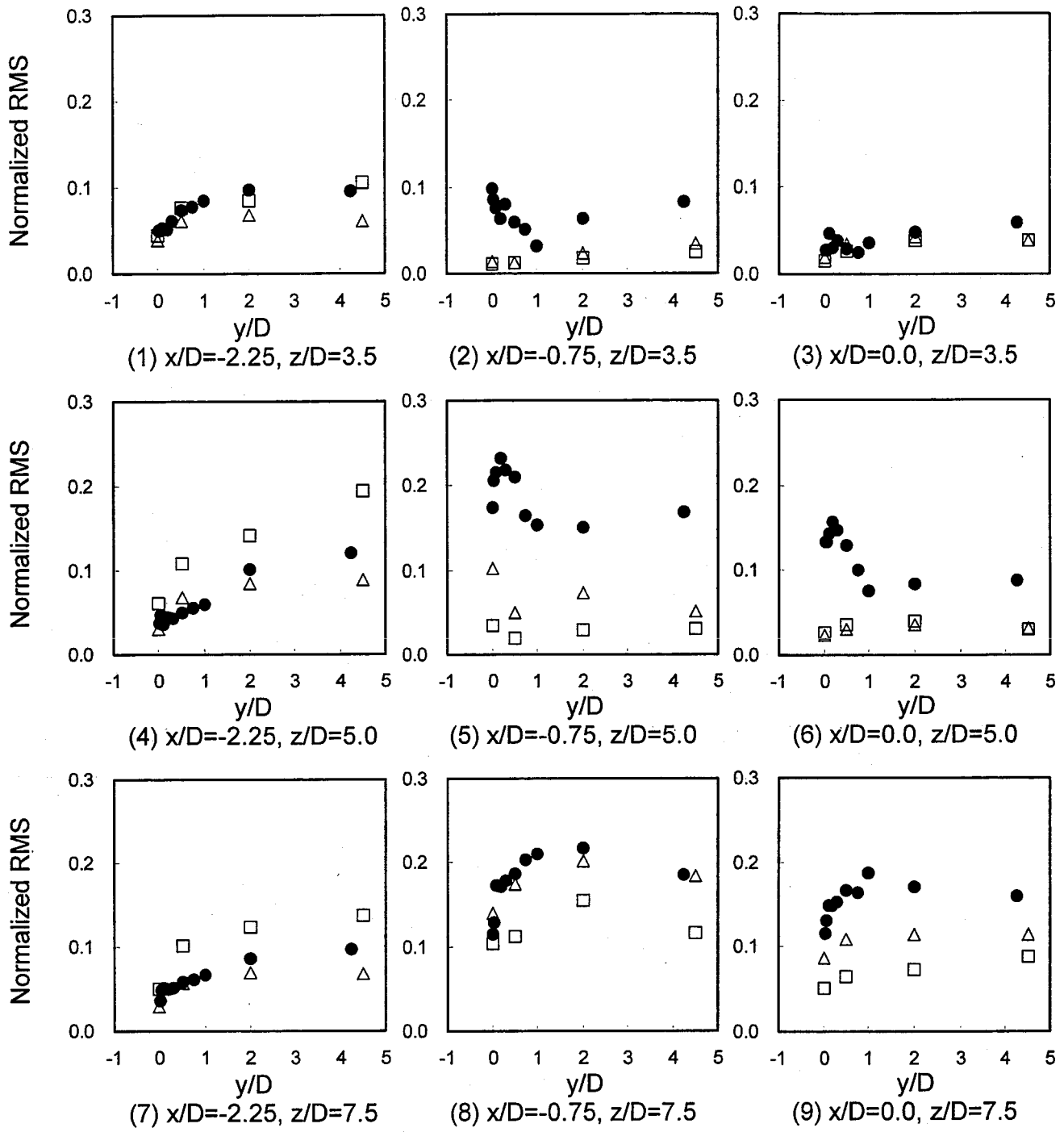


Fig.3.1.15(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

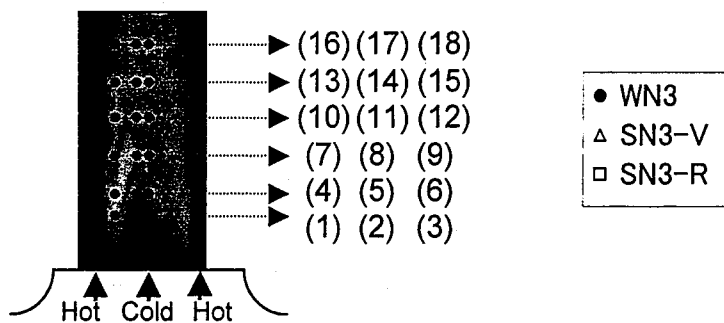
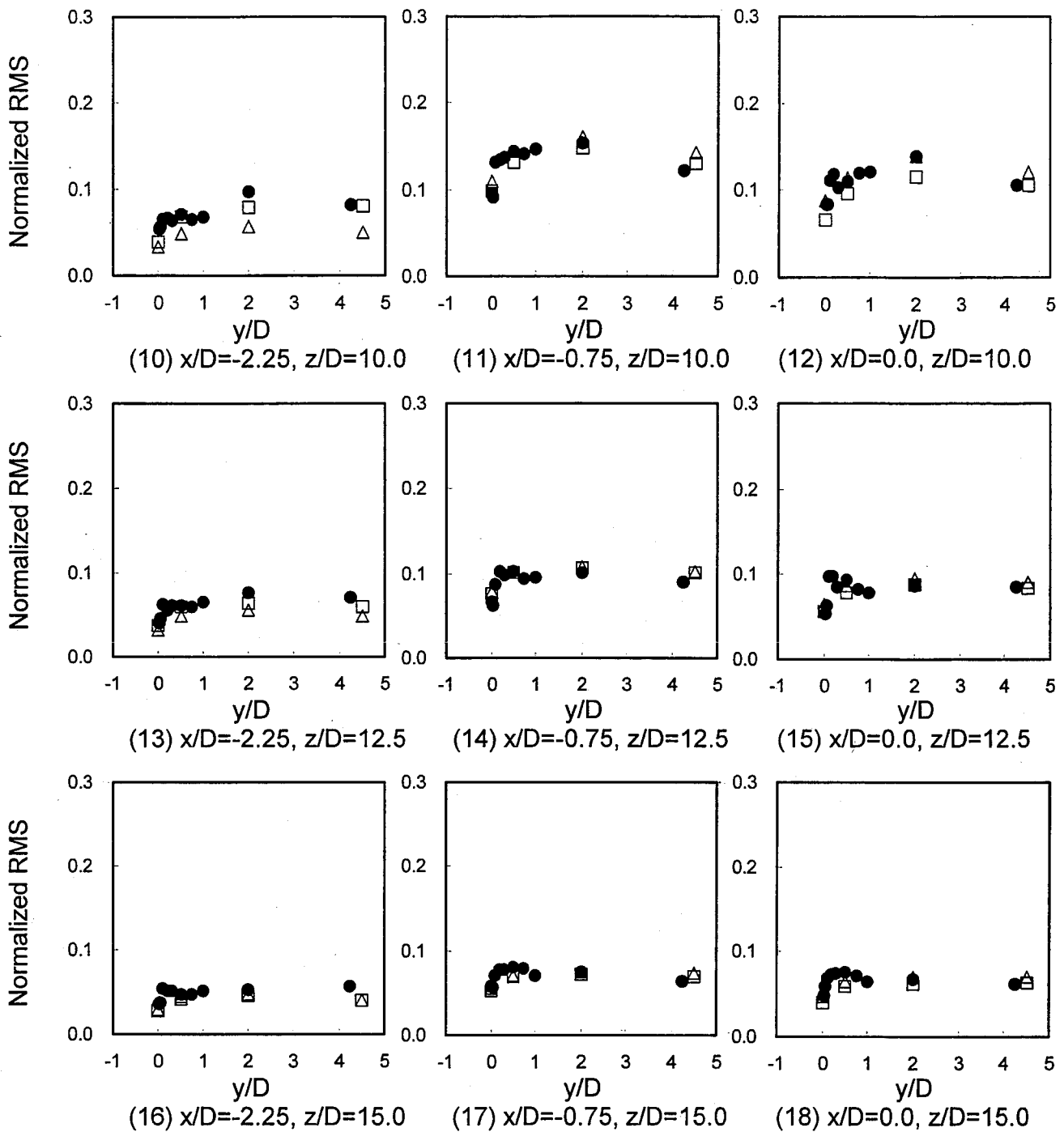


Fig.3.1.15(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

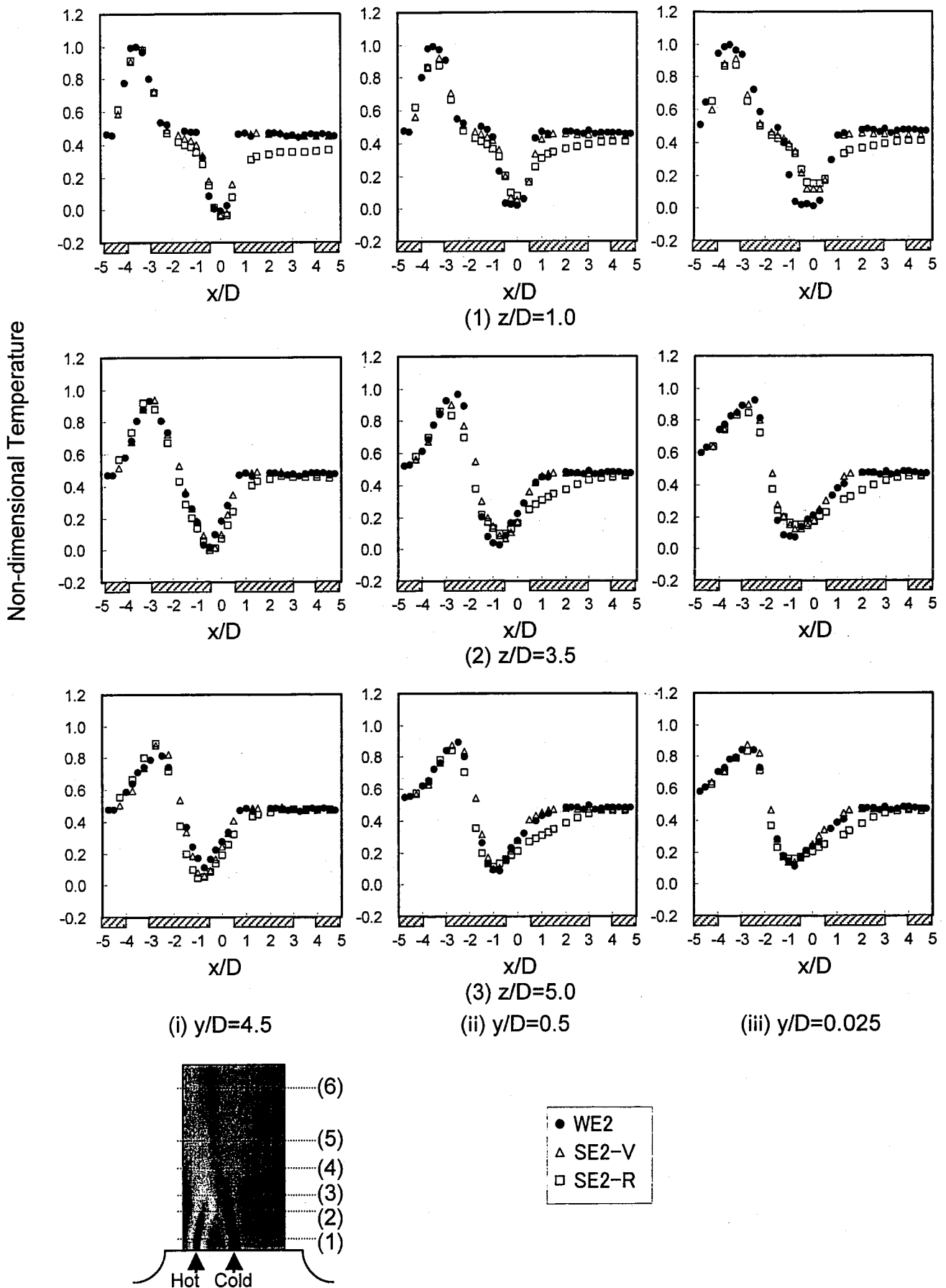


Fig.3.1.16(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

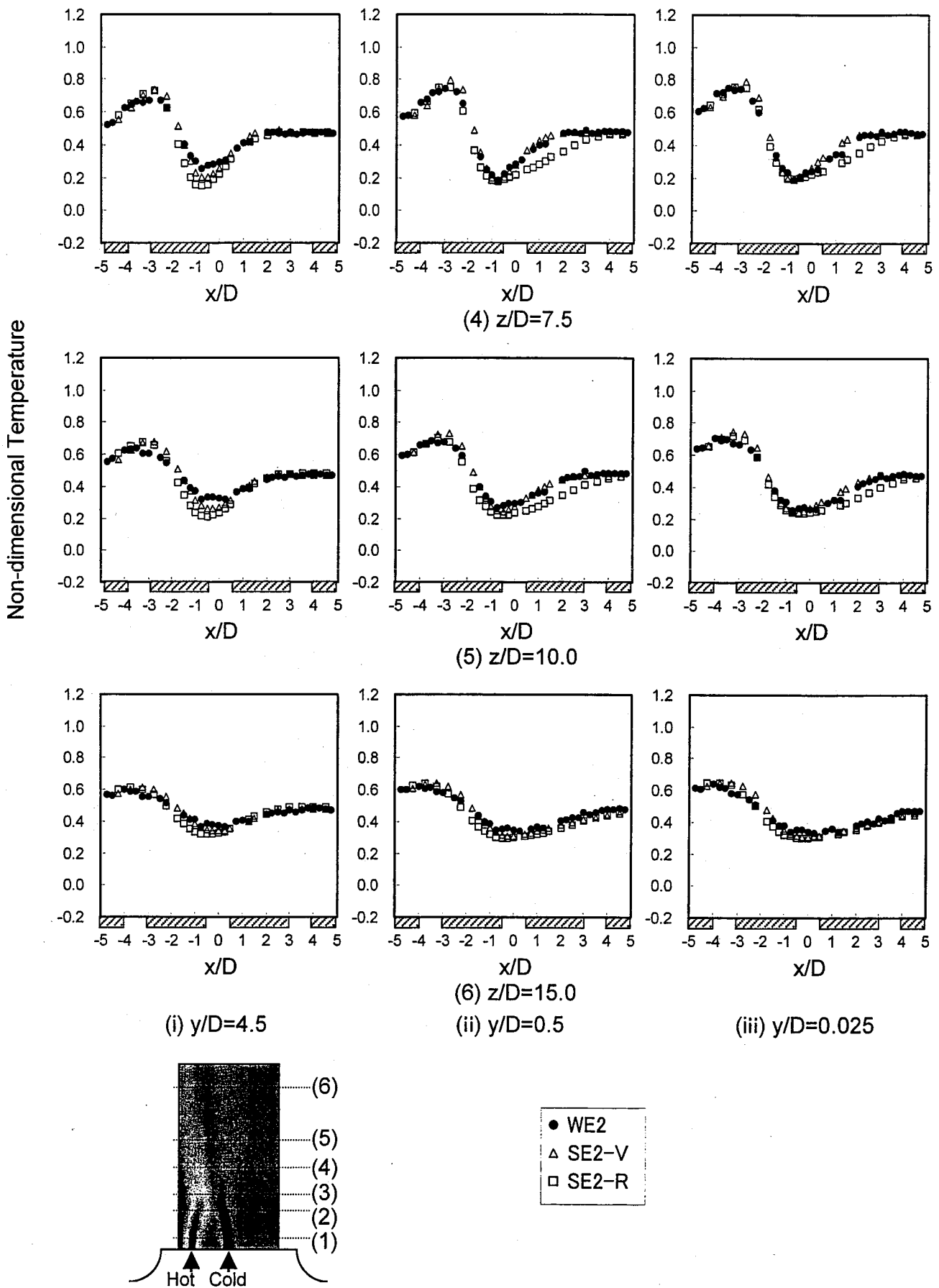


Fig.3.1.16(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

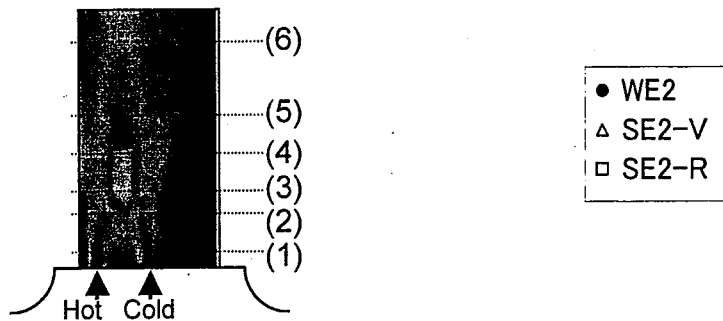
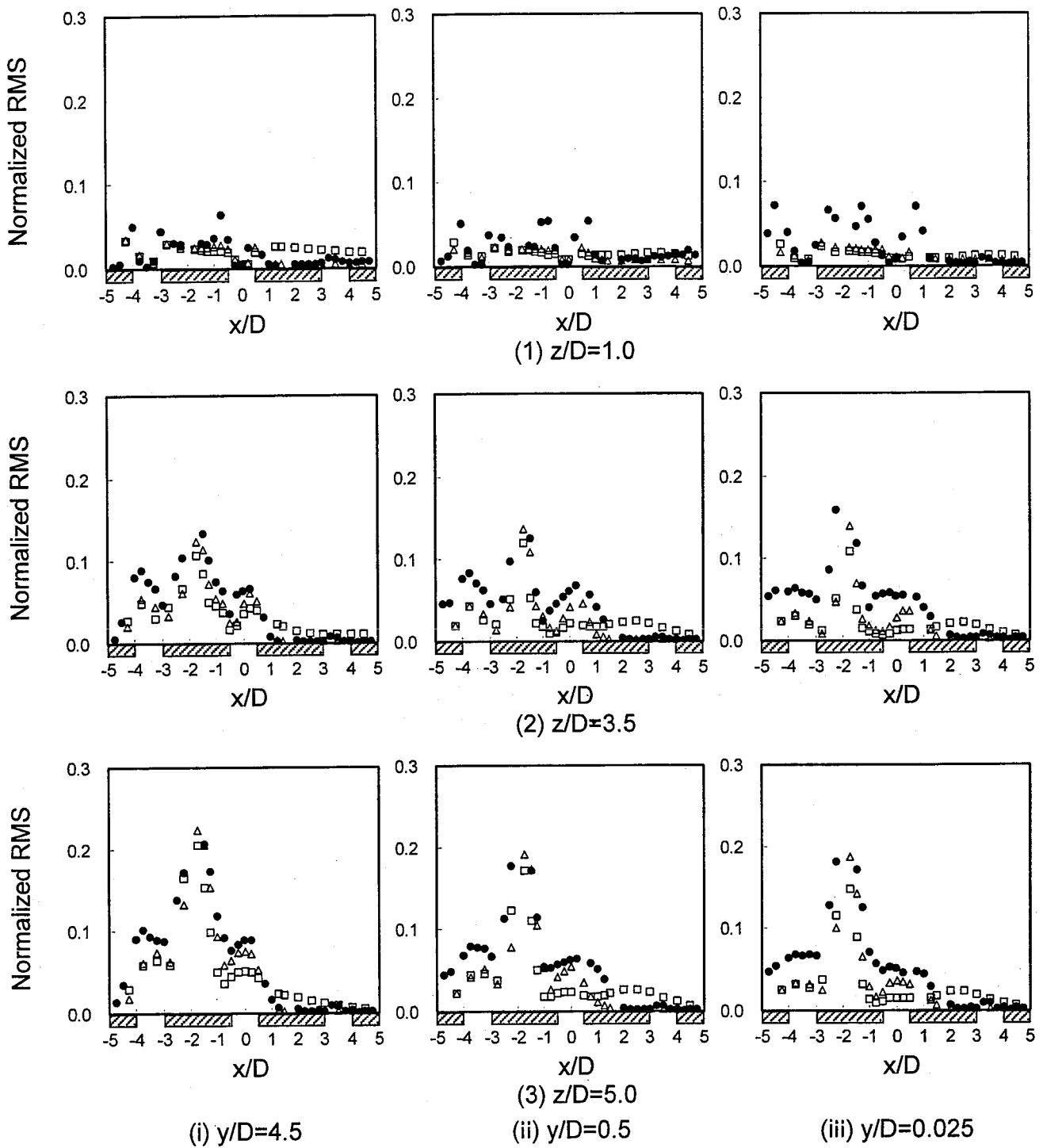


Fig.3.1.17(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

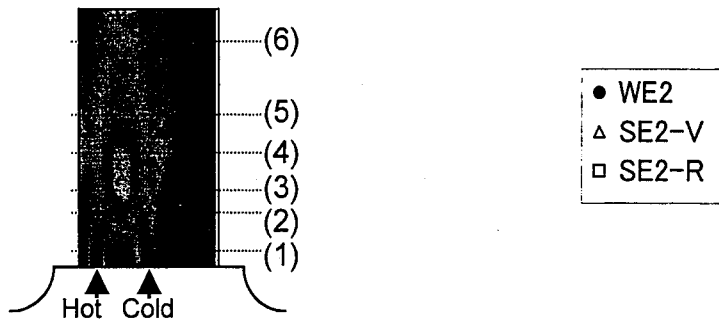
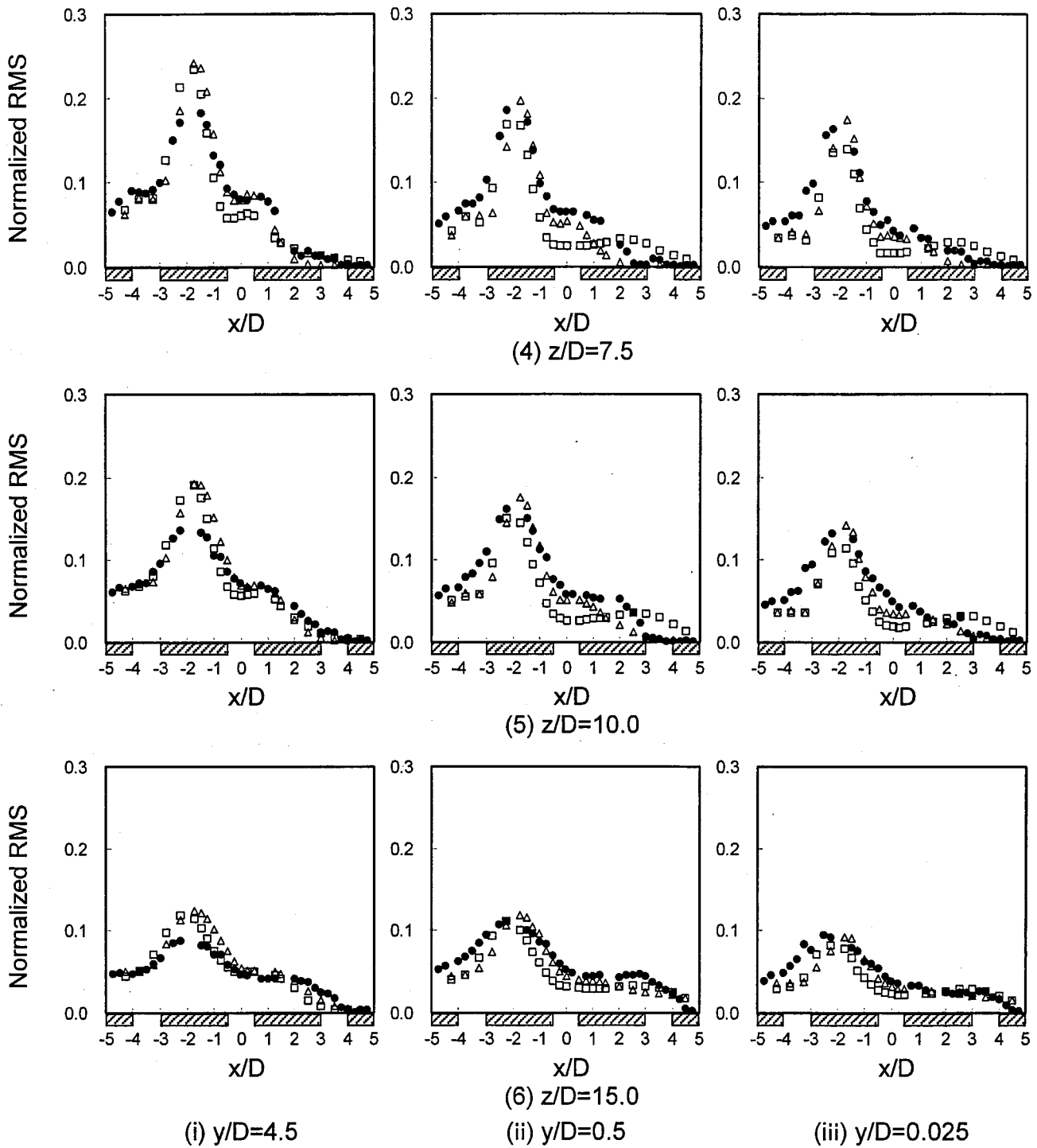


Fig.3.1.17(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

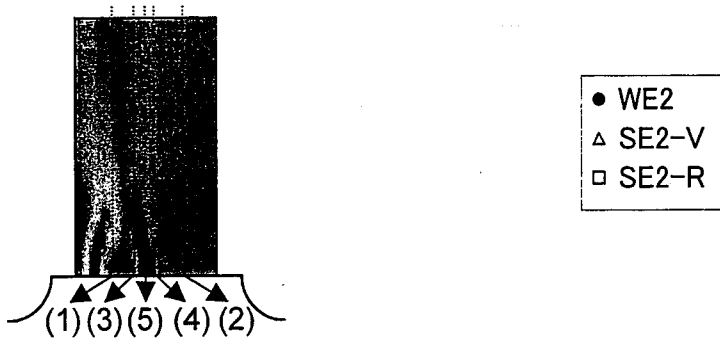
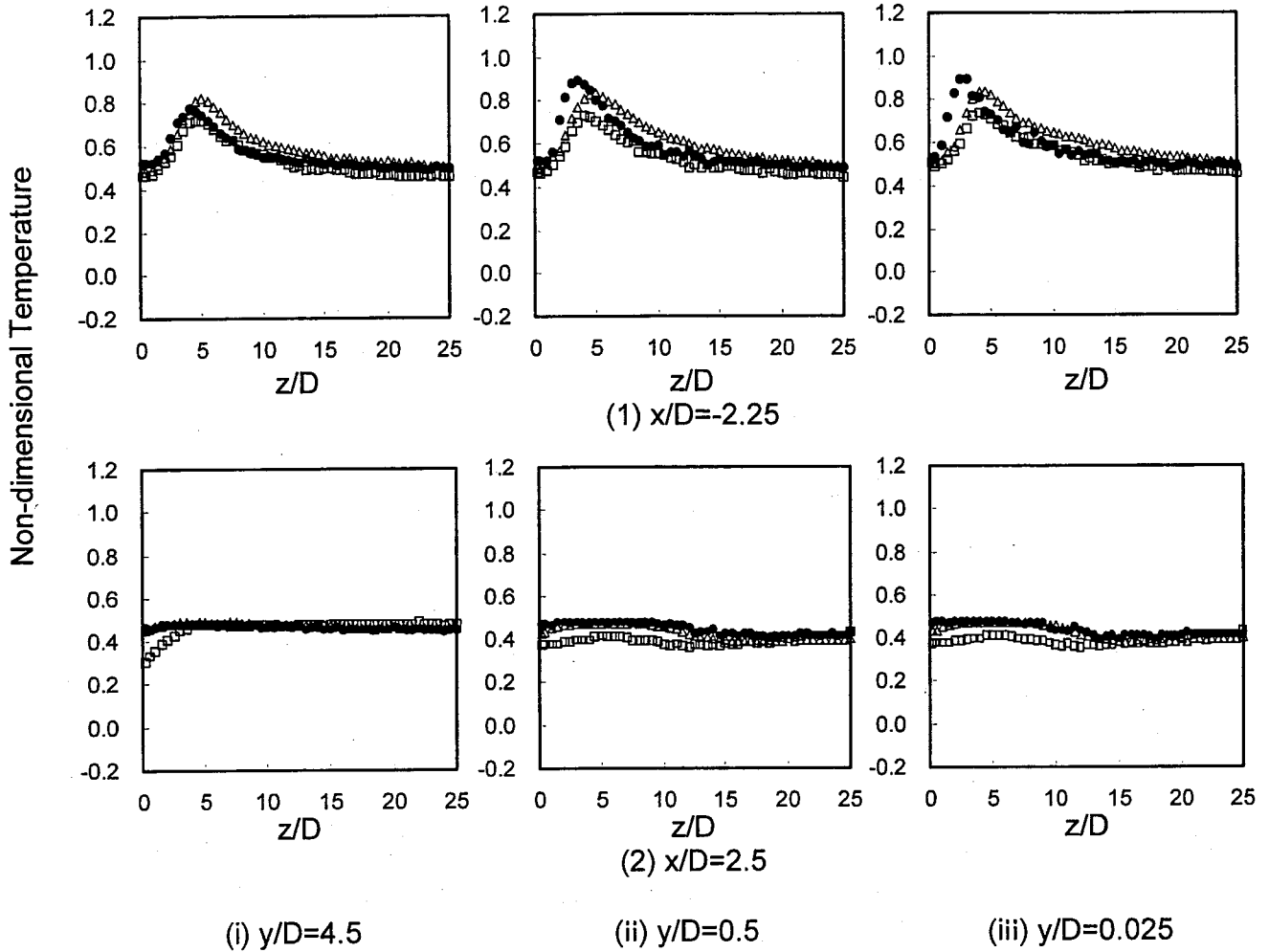


Fig.3.1.18(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

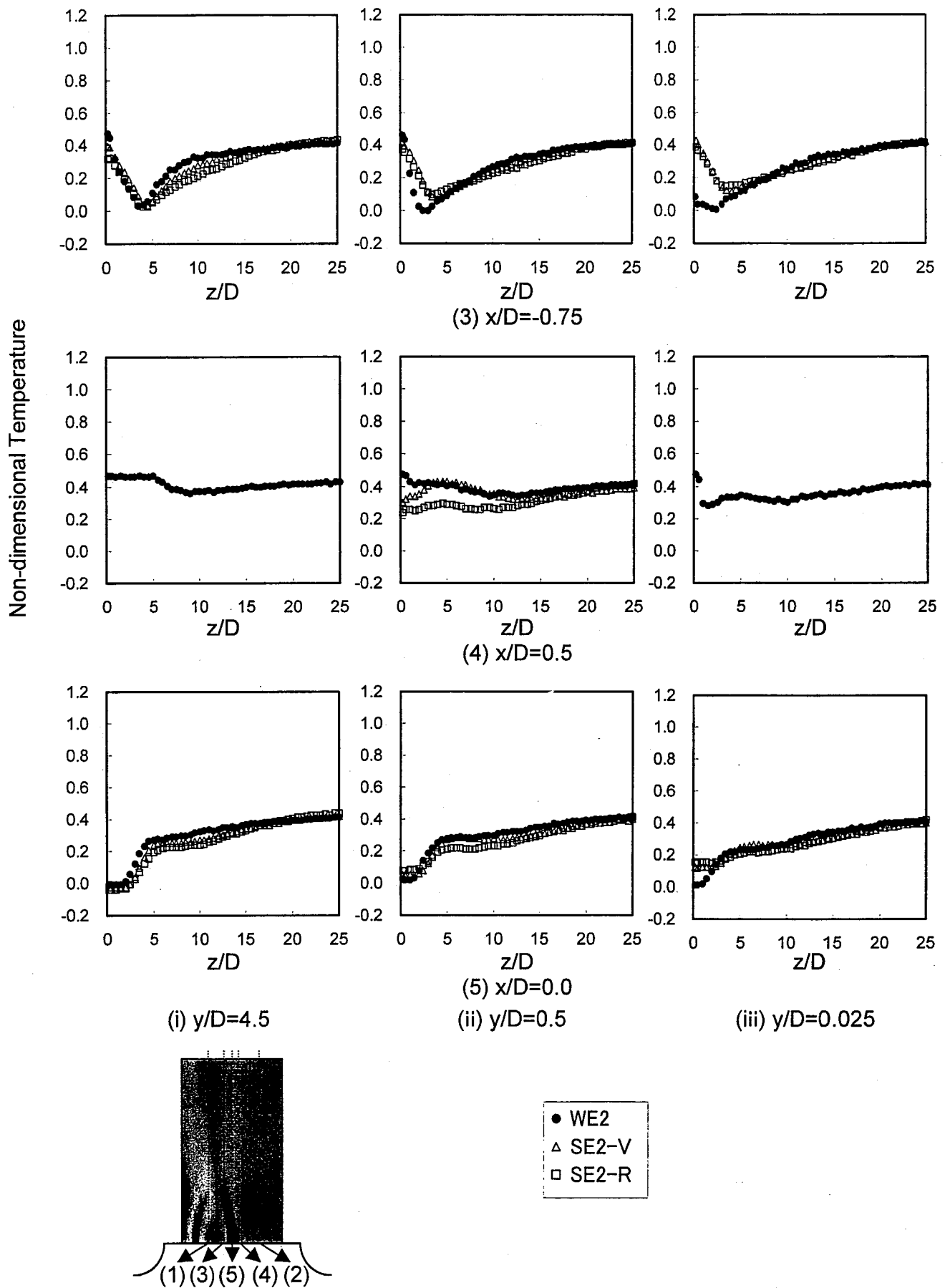


Fig.3.1.18(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

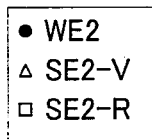
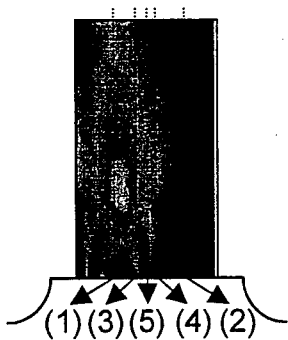
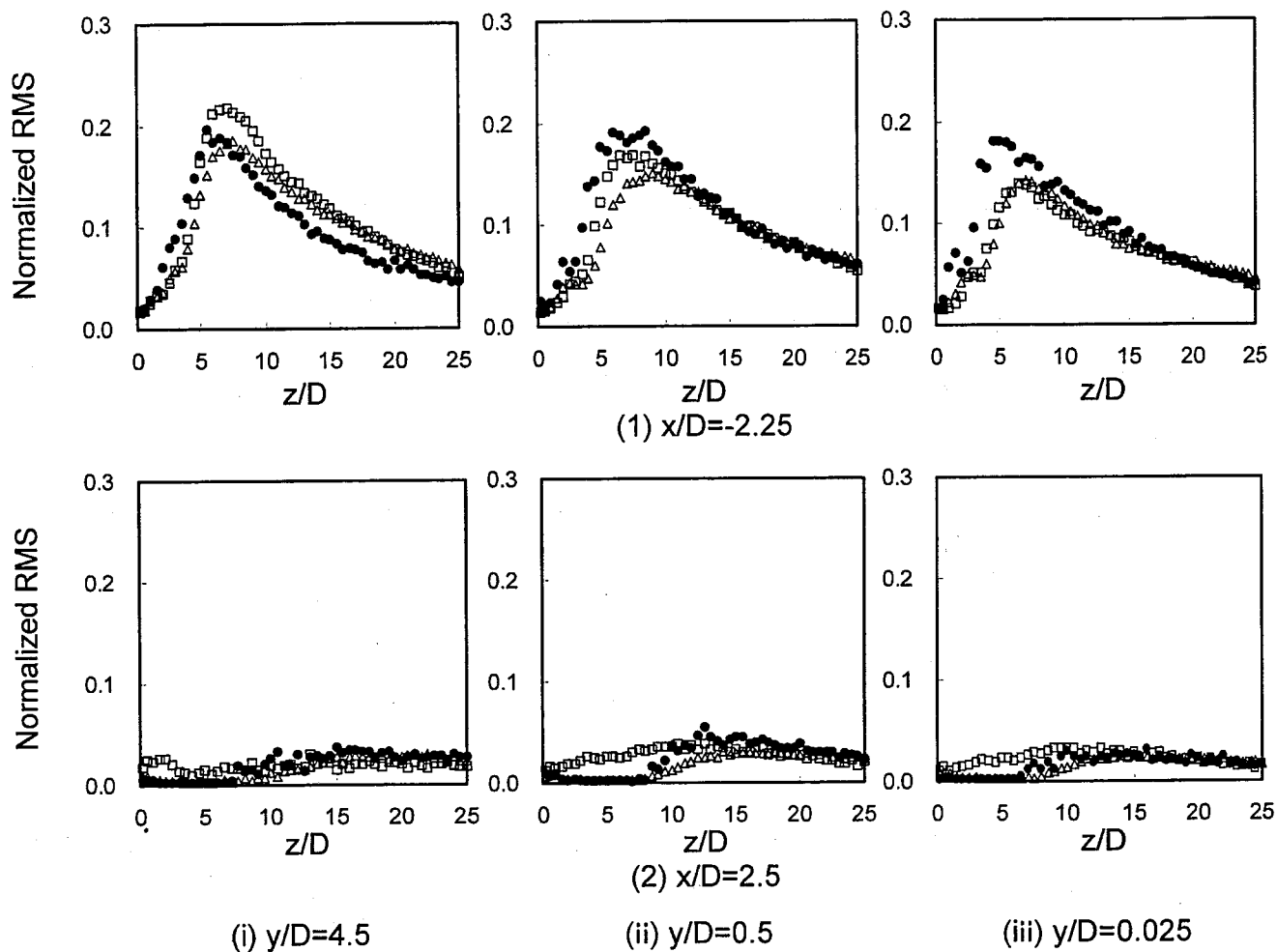


Fig.3.1.19(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

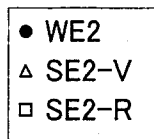
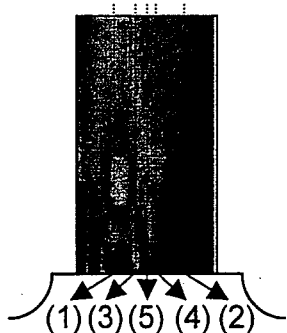
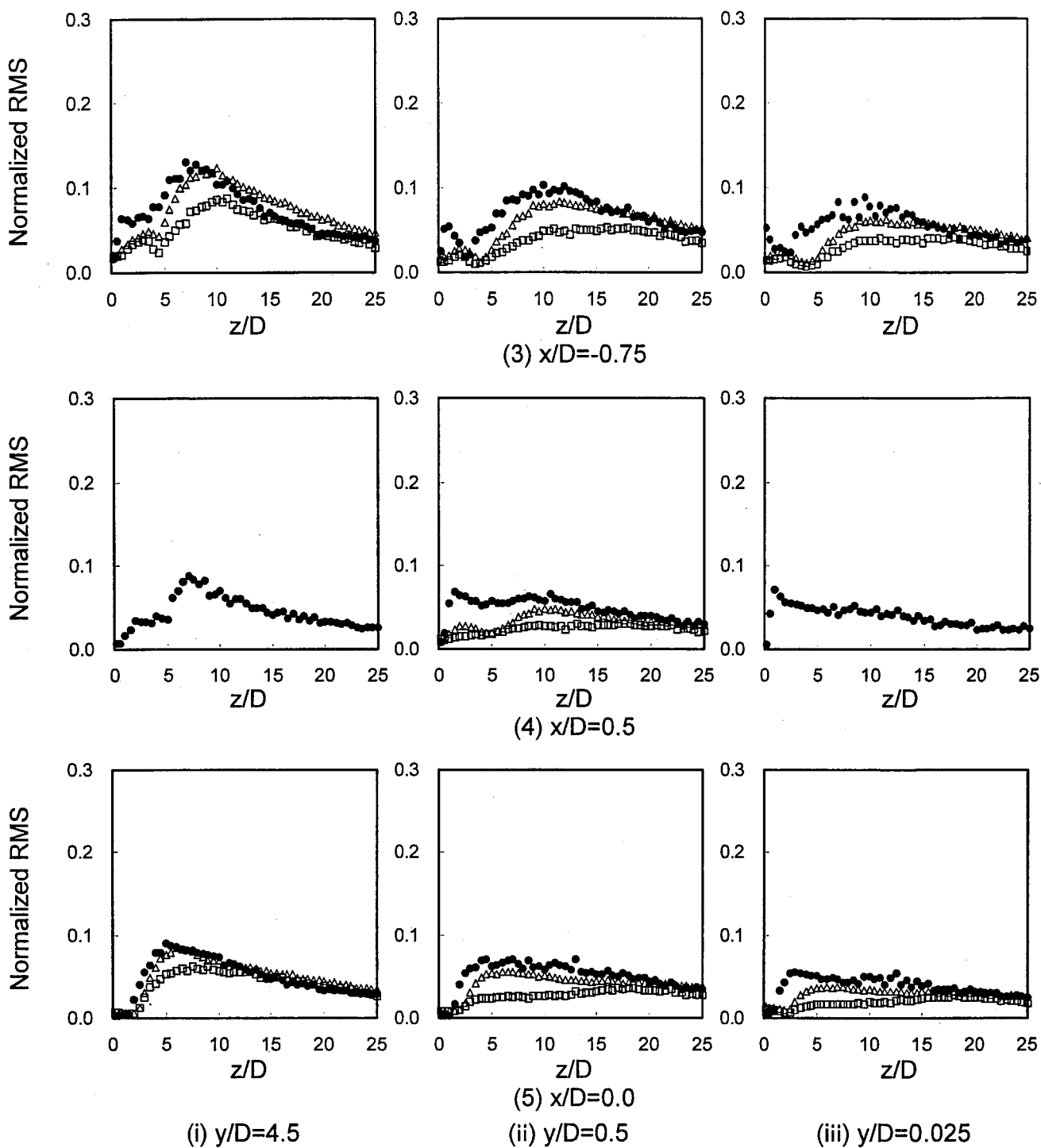


Fig.3.1.19(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

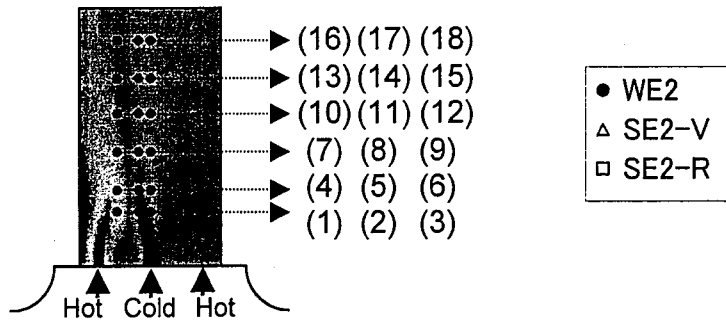
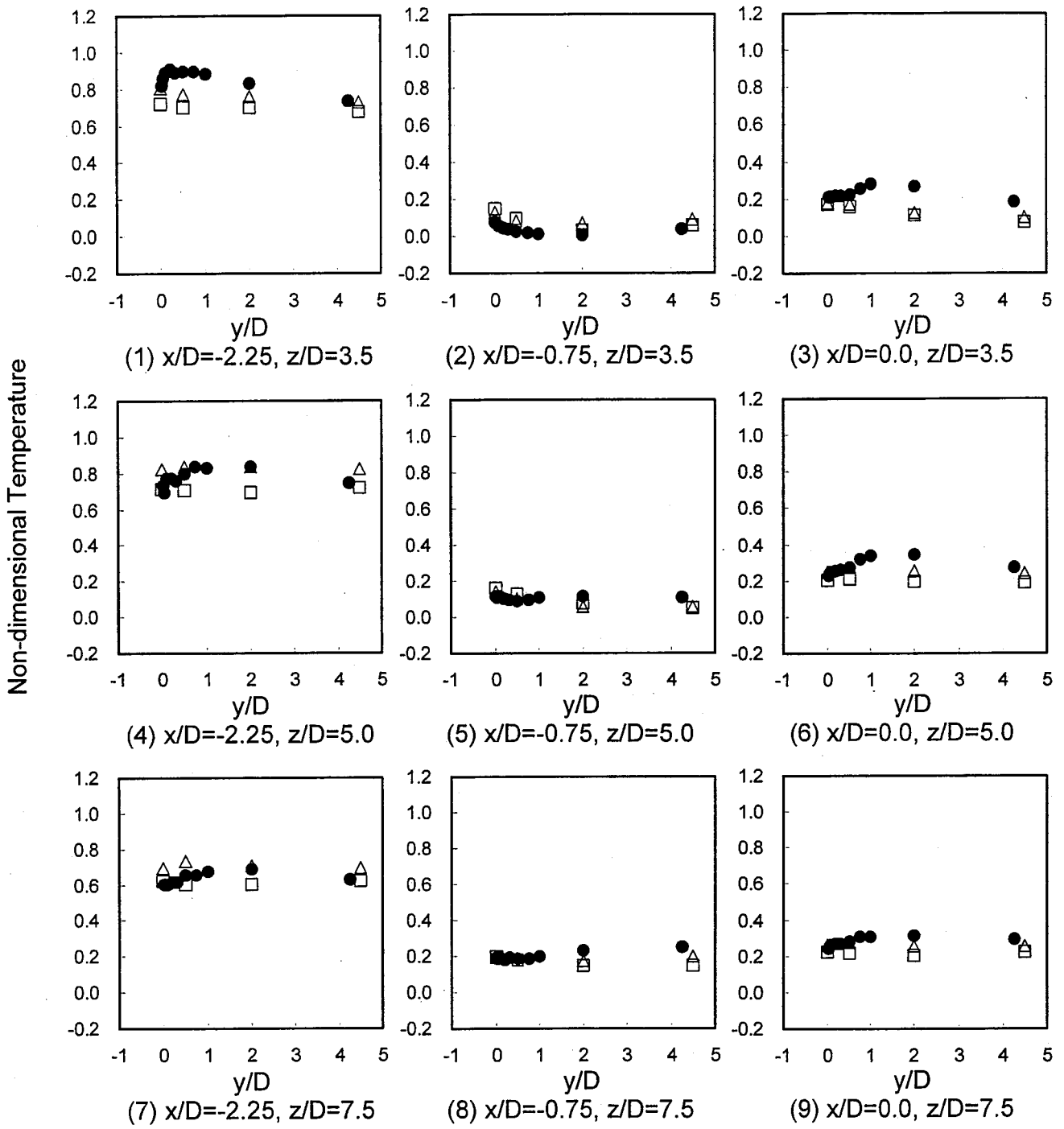


Fig.3.1.20(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

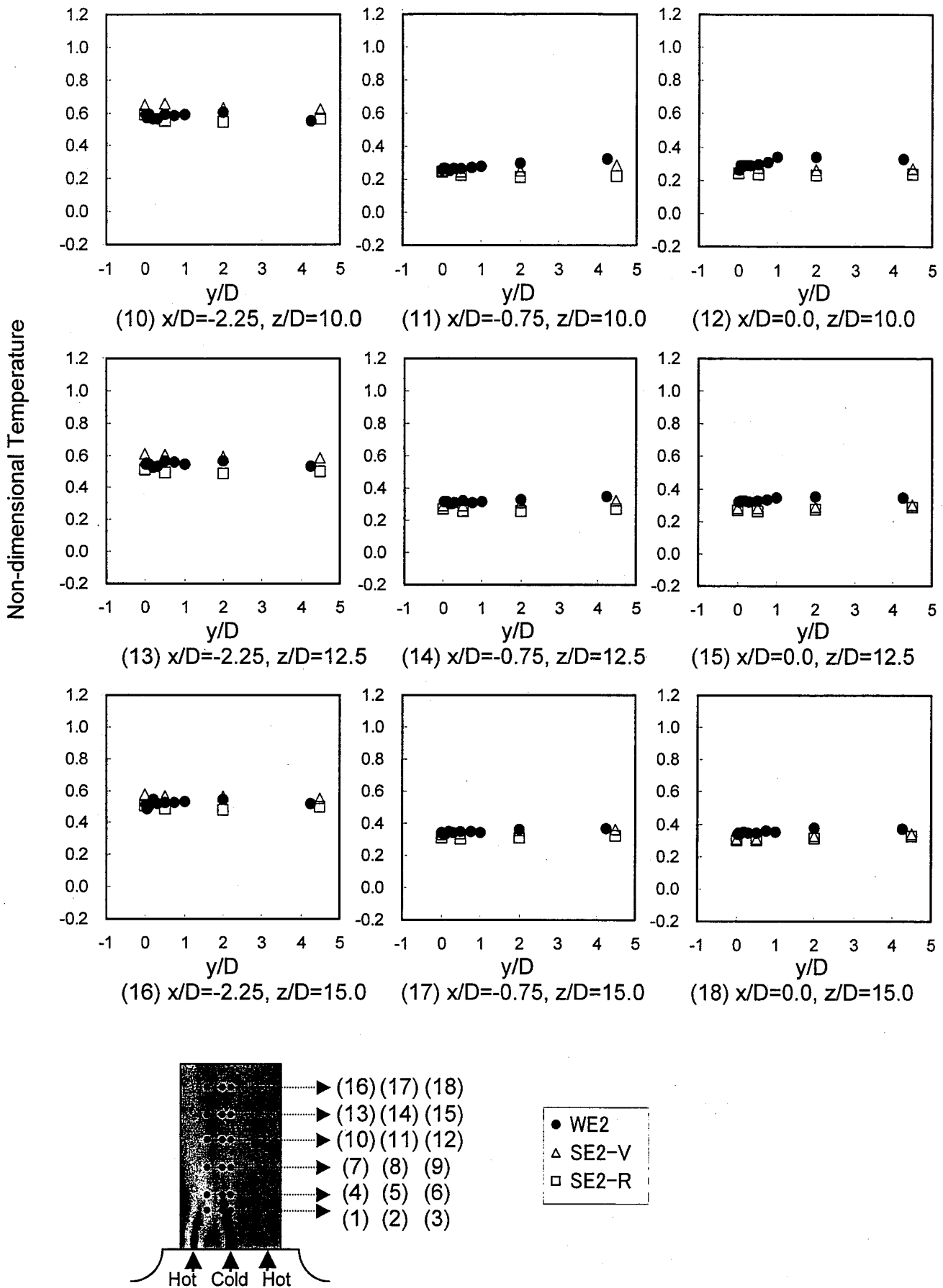


Fig.3.1.20(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

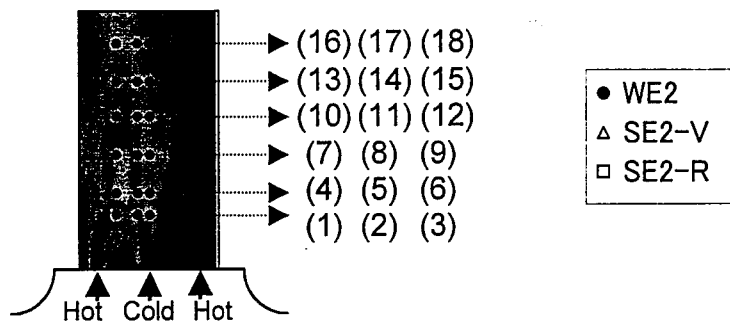
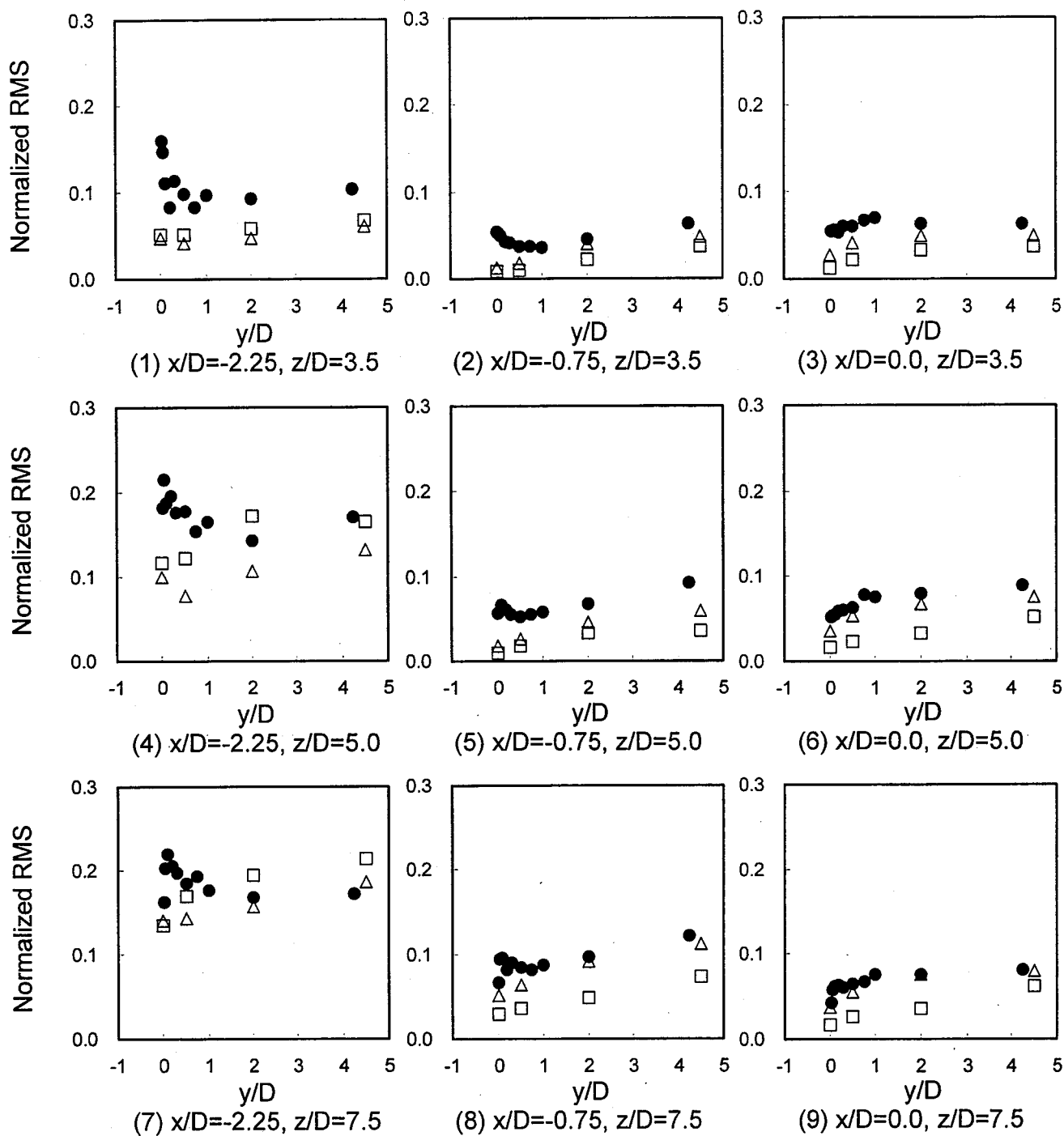


Fig.3.1.21(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

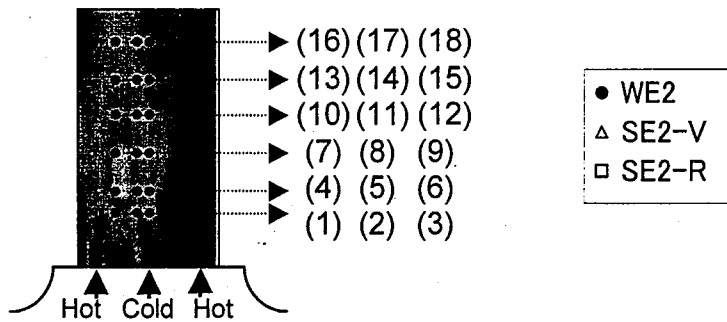
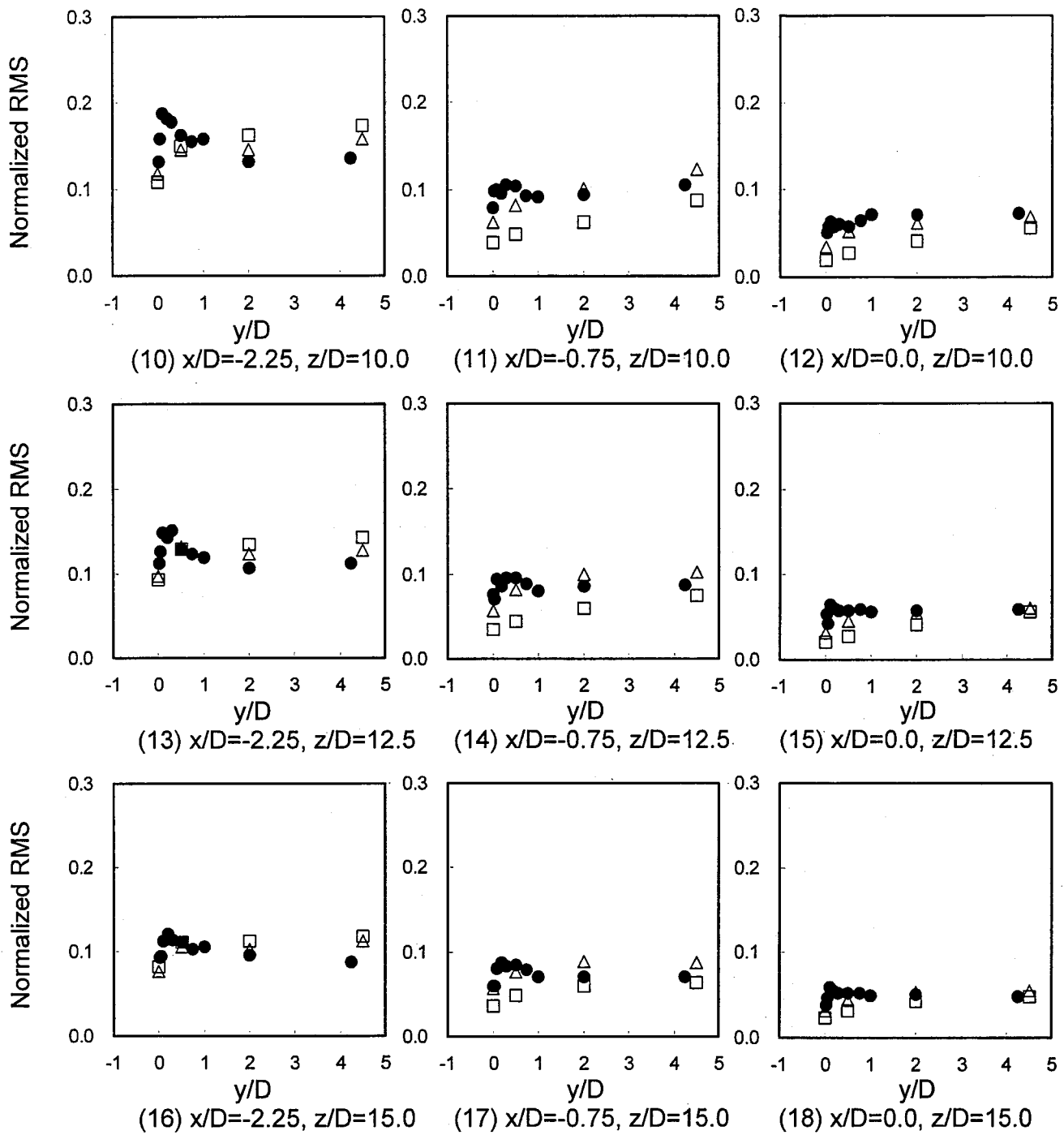
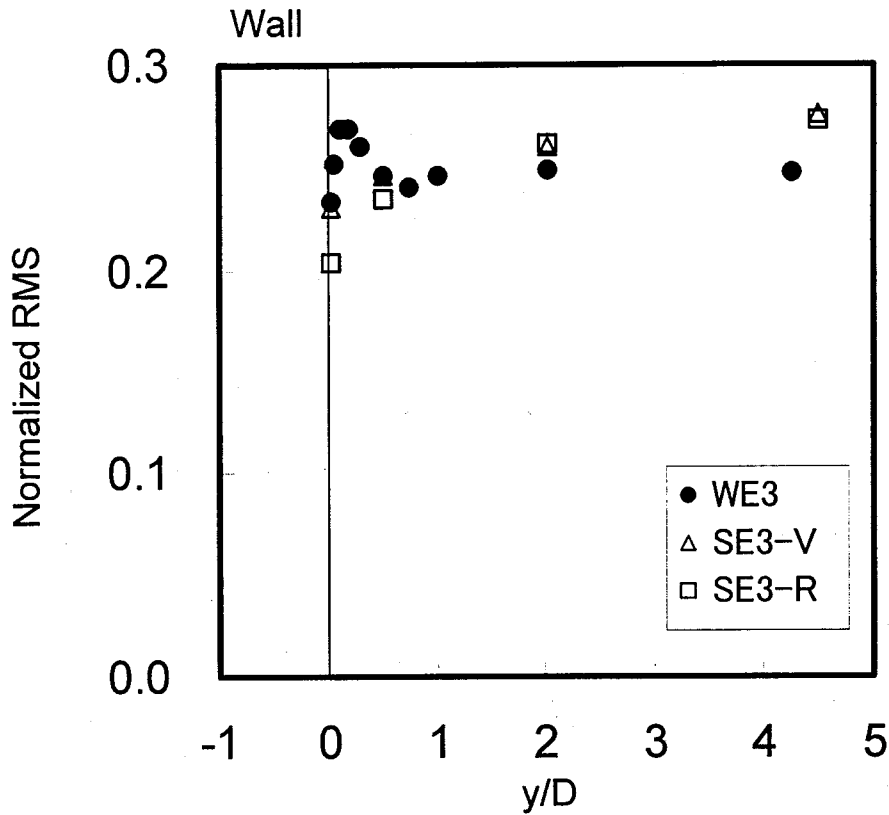


Fig.3.1.21(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water under Double-Jet Condition.



Measured Position : Maximum Temperature Fluctuation Intensity

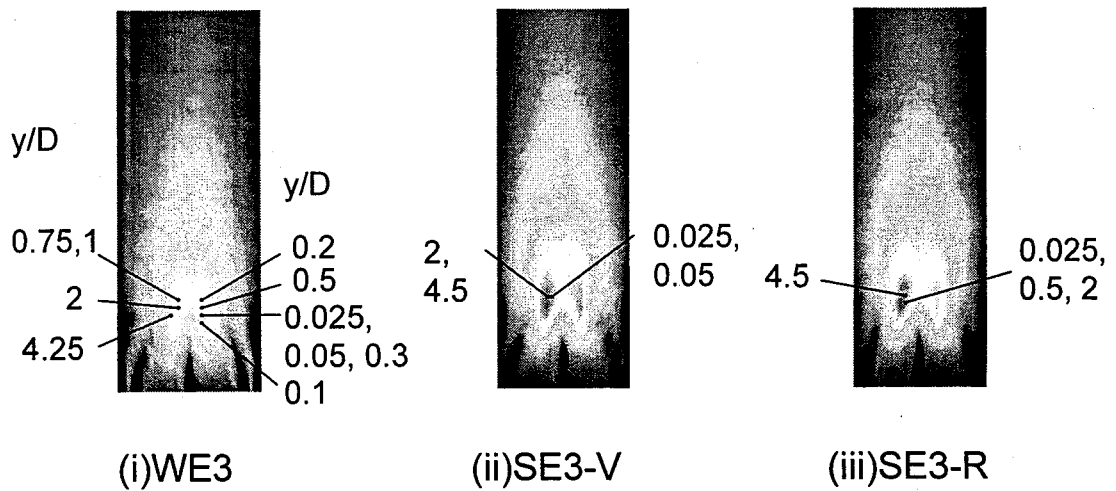
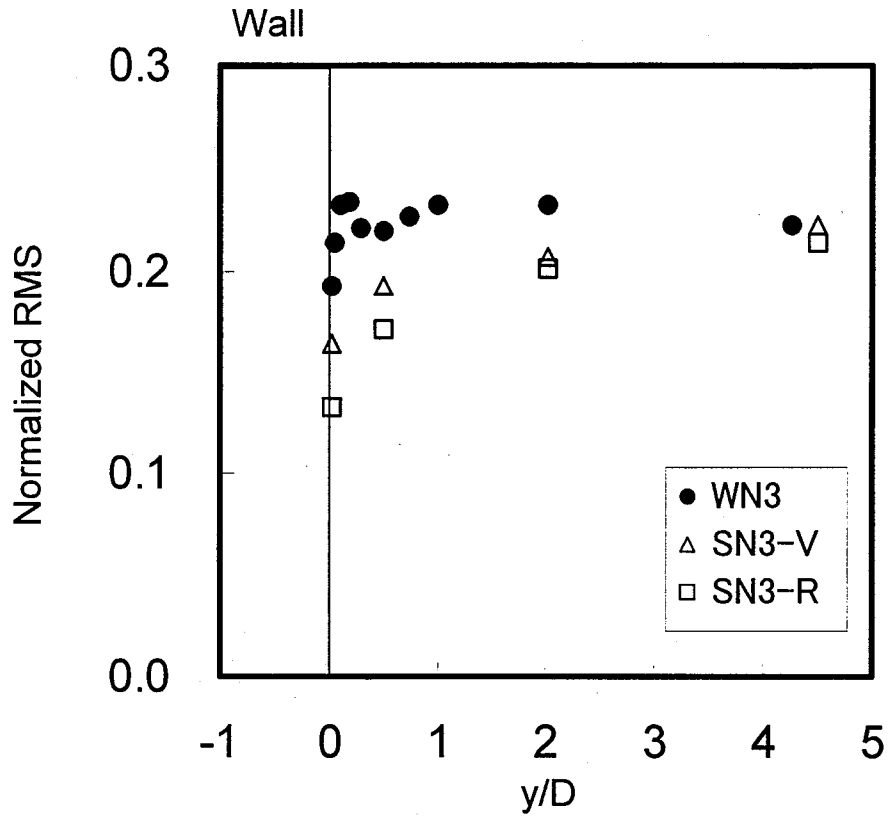


Fig.3.1.22 Comparisons of Depth Distributions of Maximum Temperature Fluctuation Intensity at Each Cross-Section normal to Wall between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.



Measured Position : Maximum Temperature Fluctuation Intensity

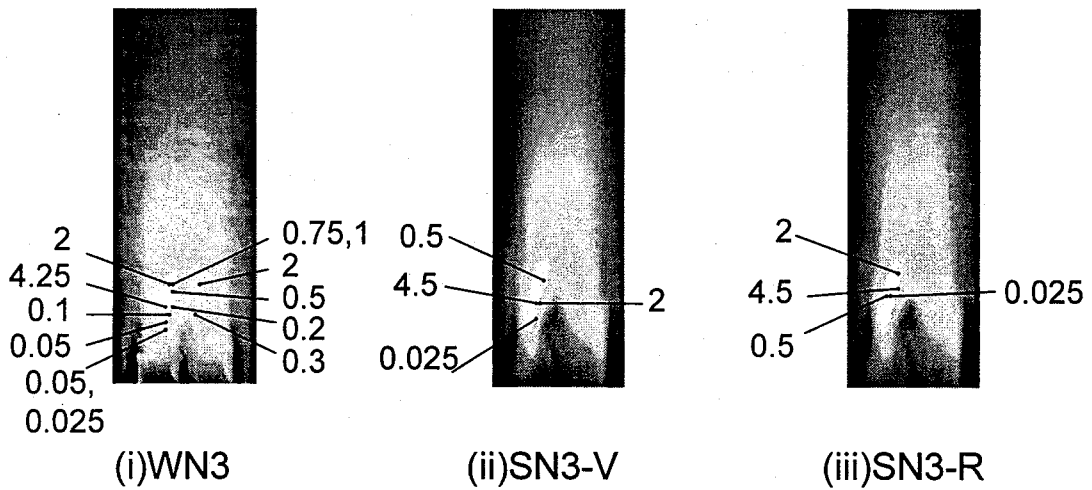
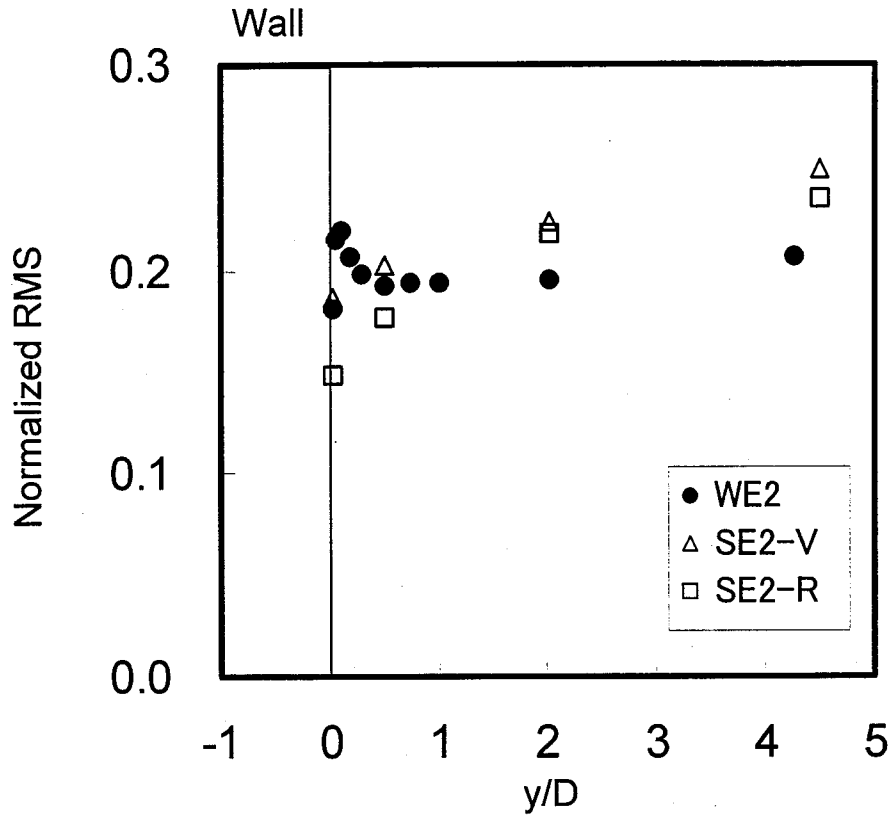


Fig.3.1.23 Comparisons of Depth Distributions of Maximum Temperature Fluctuation Intensity at Each Cross-Section normal to Wall between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.



Measured Position : Maximum Temperature Fluctuation Intensity

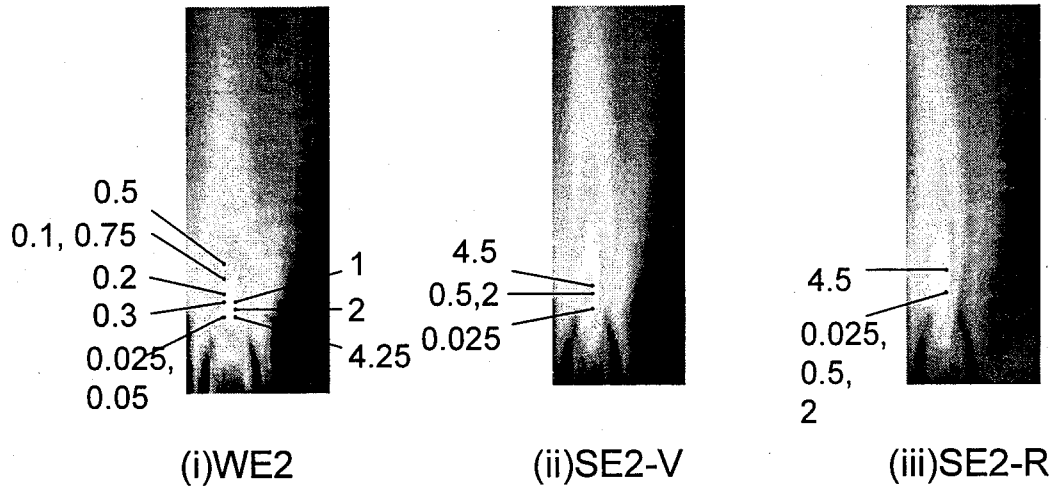


Fig.3.1.24 Comparisons of Depth Distributions of Maximum Temperature Fluctuation Intensity at Each Cross-Section normal to Wall between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

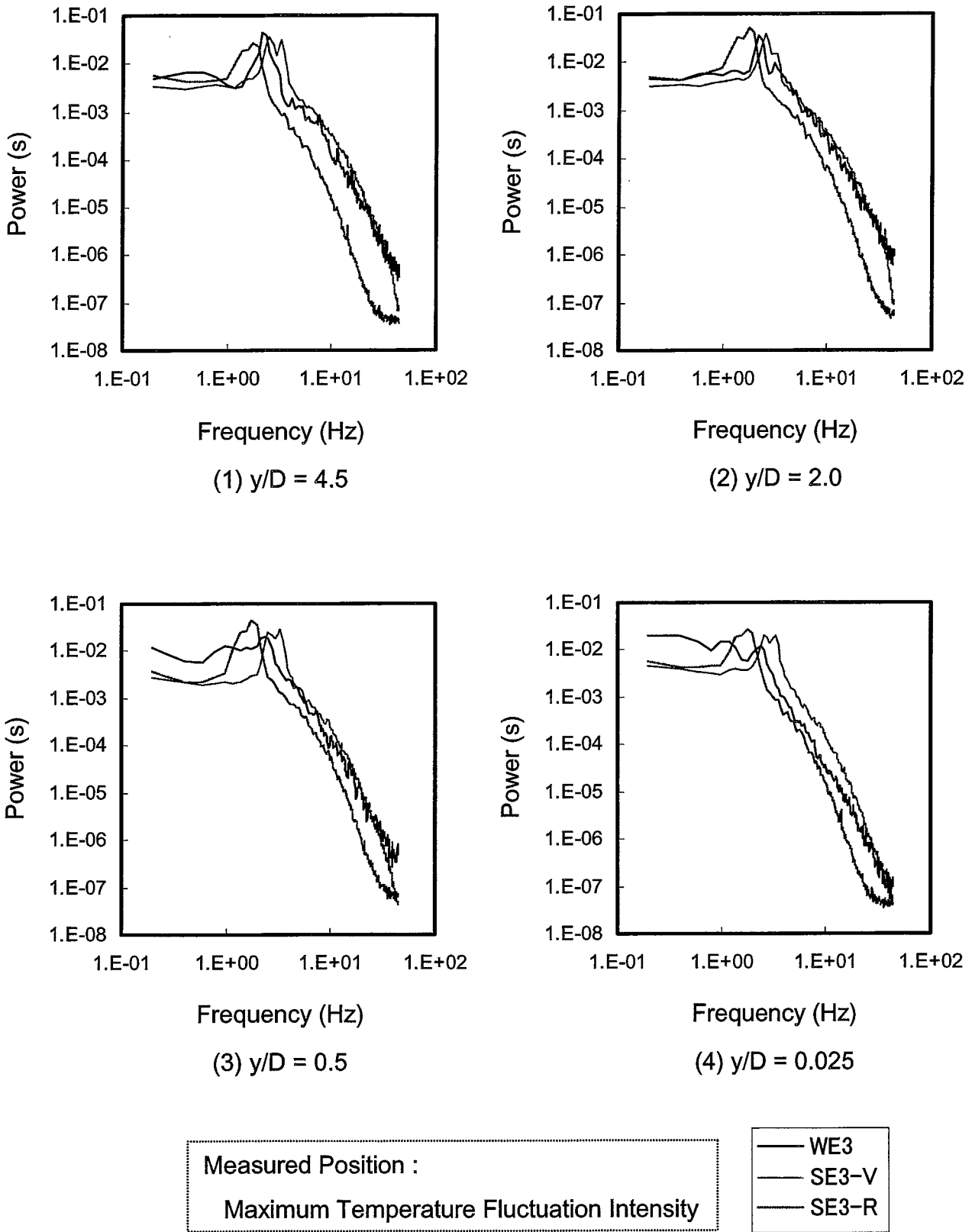


Fig.3.2.1 Comparisons of Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Frequency between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

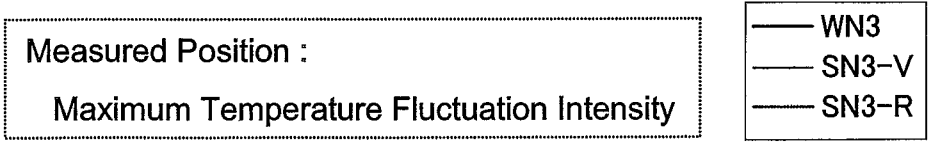
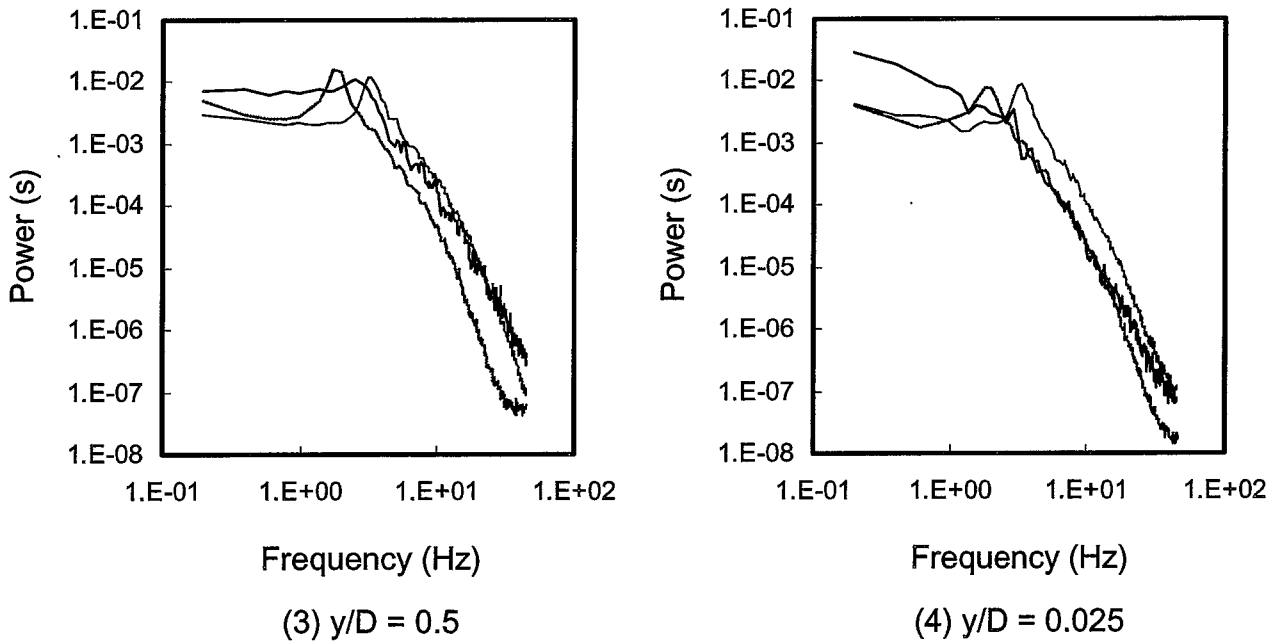
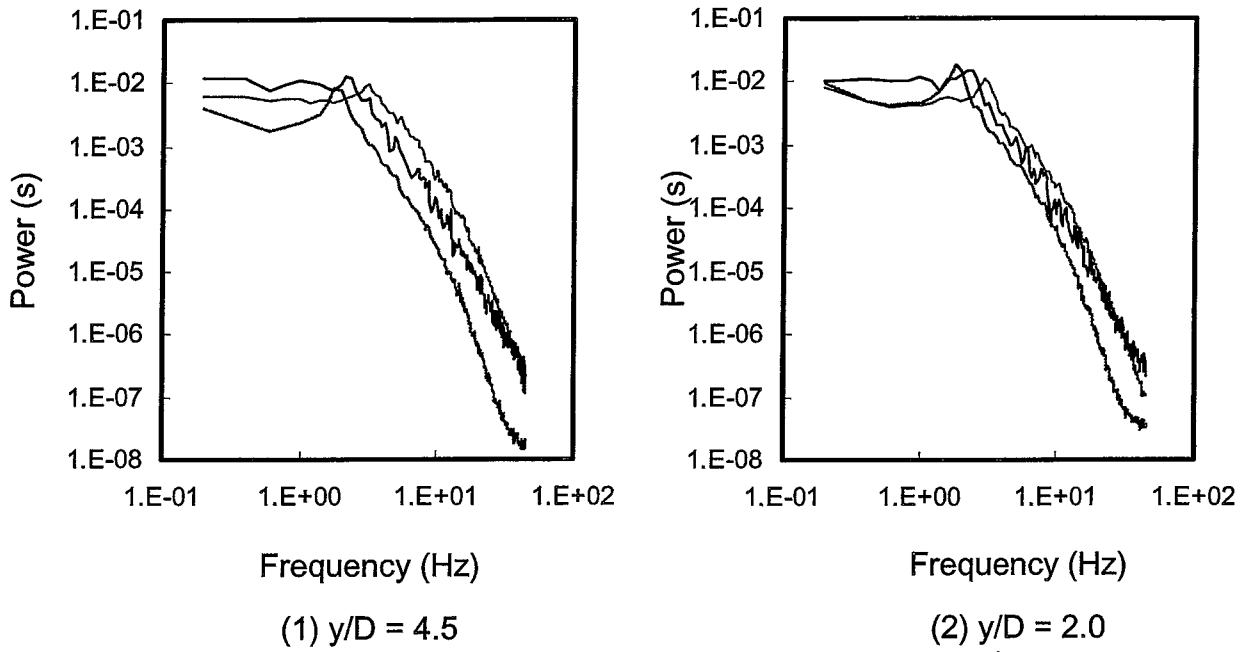


Fig.3.2.2 Comparisons of Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Frequency between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

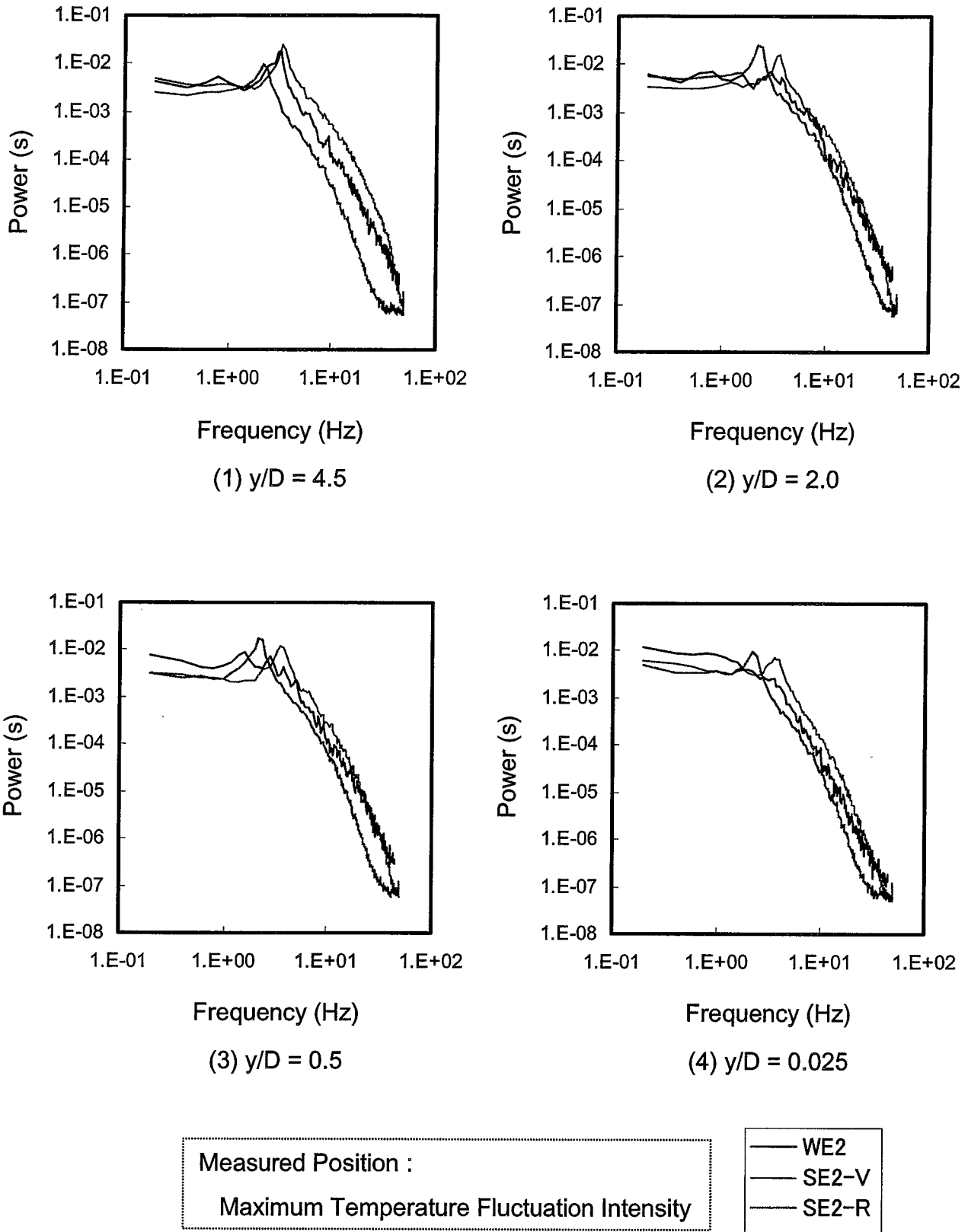


Fig.3.2.3 Comparisons of Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Frequency between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

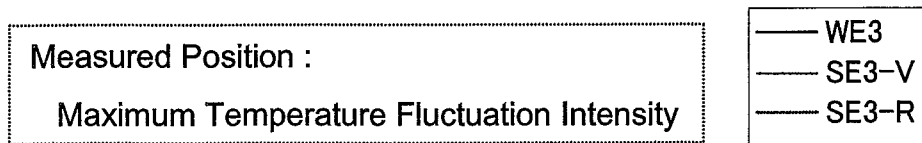
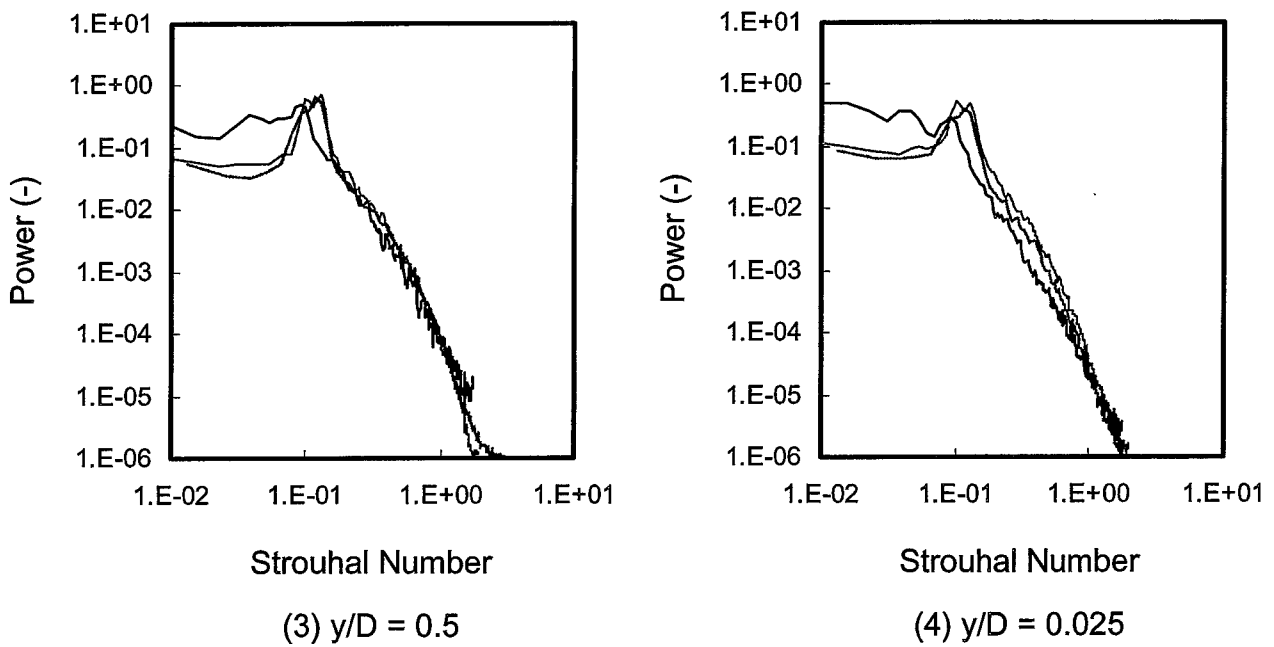
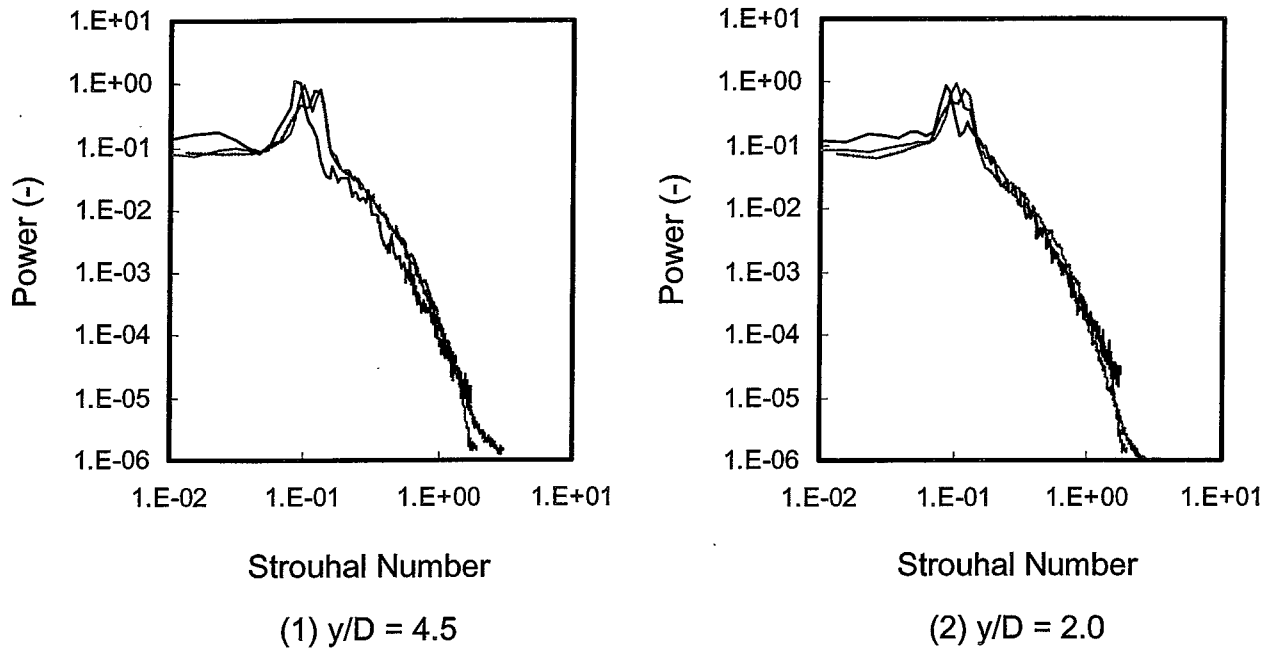


Fig.3.2.4 Comparisons of Normalized Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Strouhal Number between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

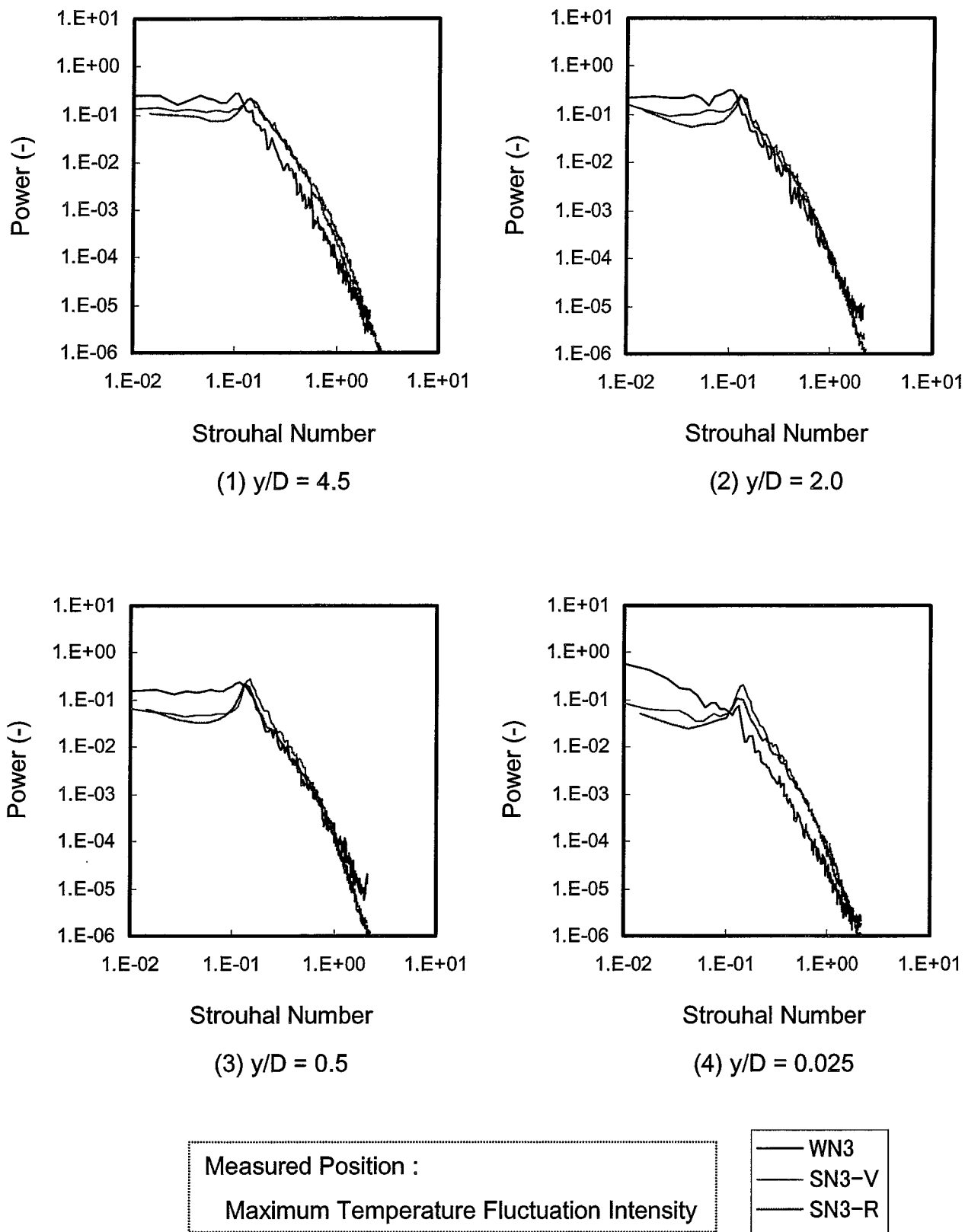


Fig.3.2.5 Comparisons of Normalized Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Strouhal Number between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

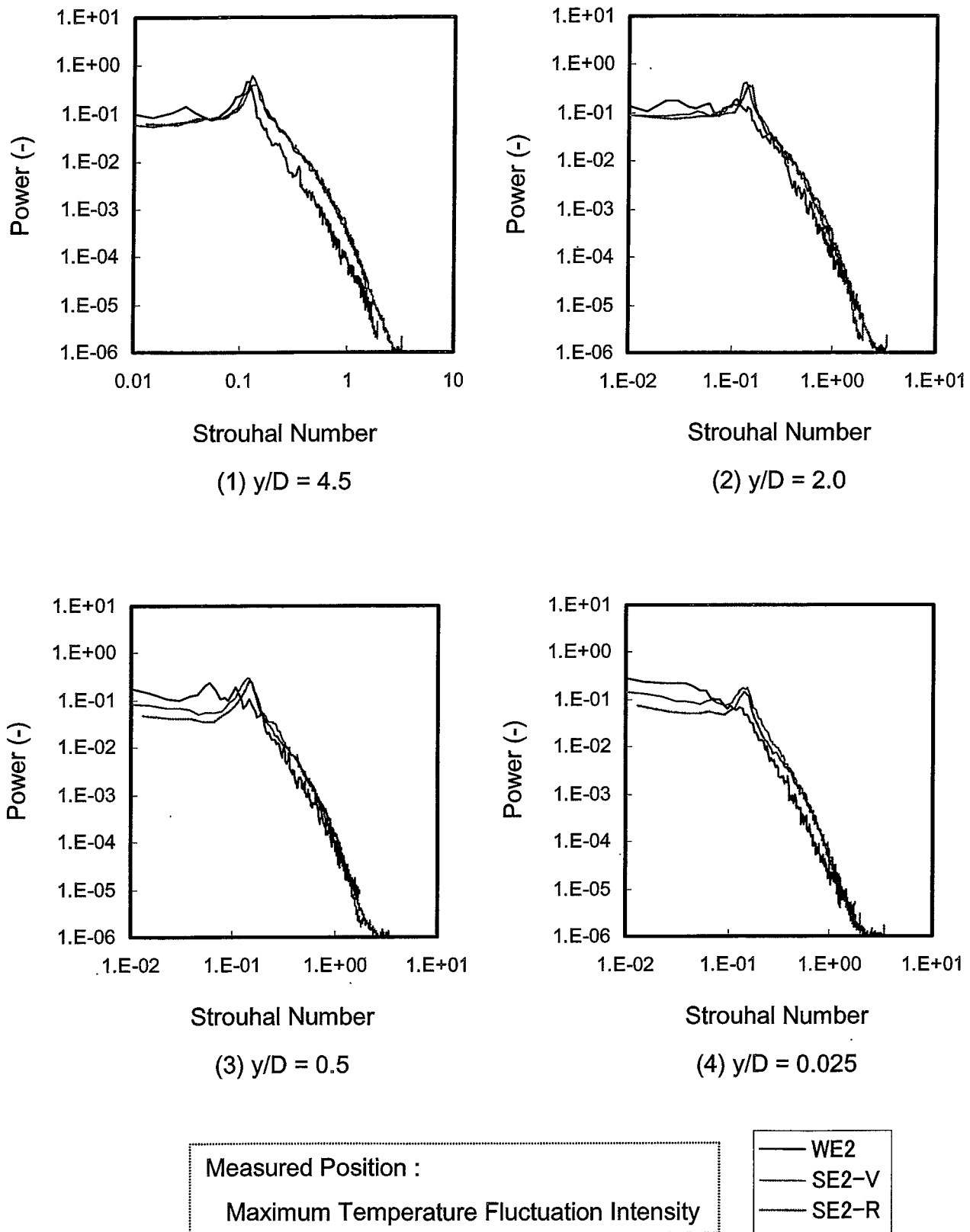
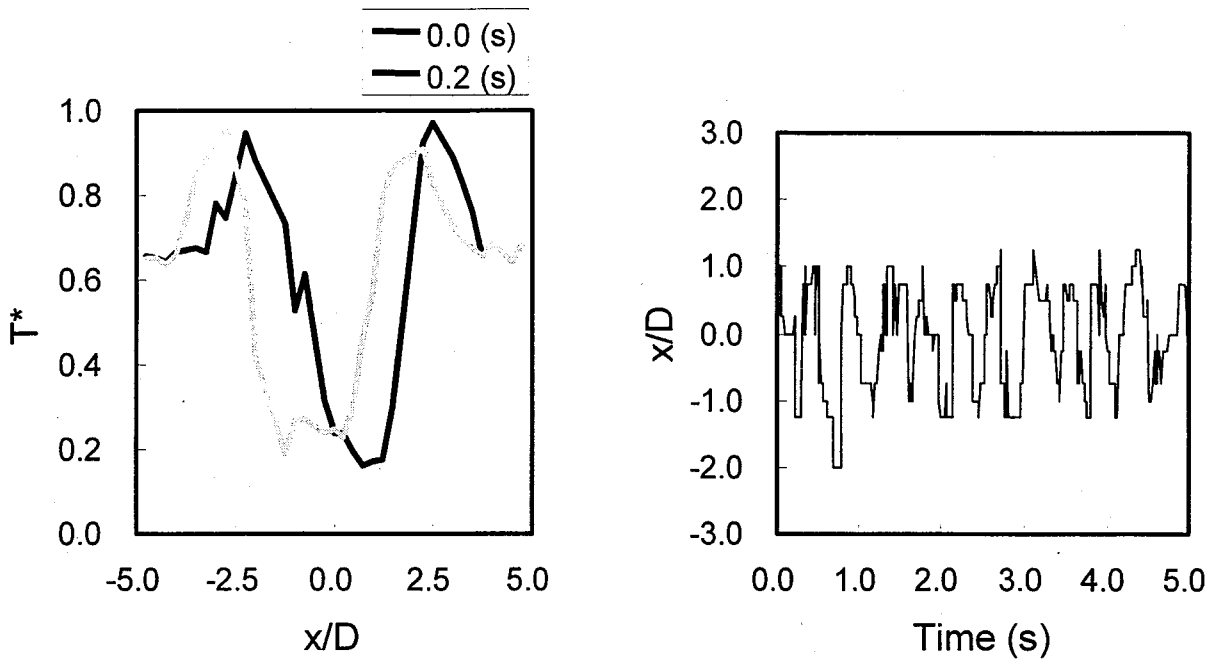
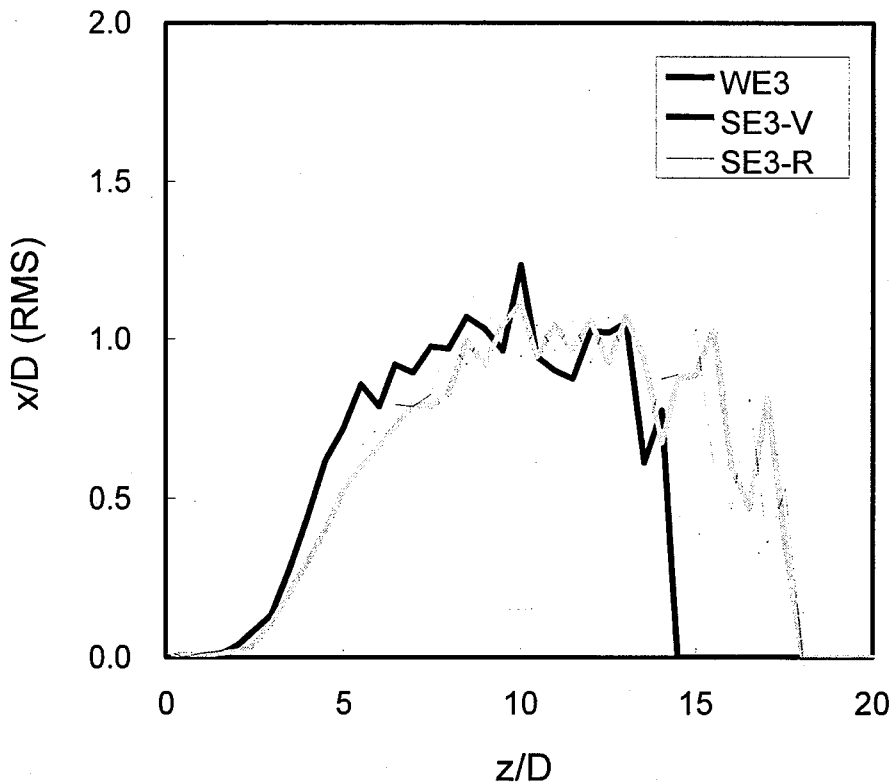


Fig.3.2.6 Comparisons of Normalized Power Spectrum Densities of Temperature Fluctuation versus Strouhal Number between Sodium and Water under Double-Jet Condition.



(a) Temperature Distribution in Horizontal Direction.

(b) Fluctuation of Cold-Jet Position.



(c) Fluctuation Intensity Distributions of Cold-Jet Position in Vertical Direction.

Fig.4.1.1 Comparisons of Cold-Jet Fluctuating Characteristics between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

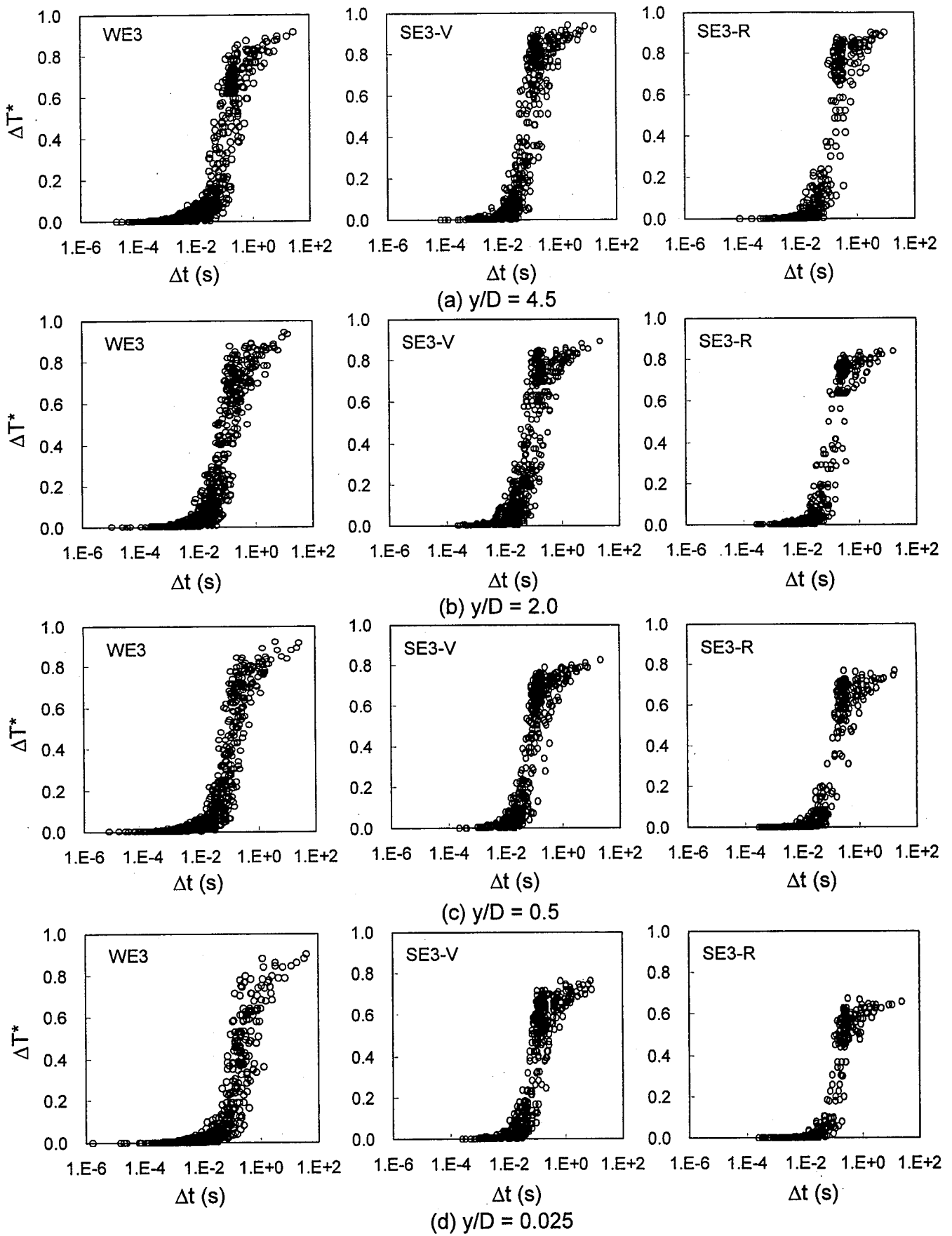


Fig.4.2.1 Comparisons of Wave Characteristics of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

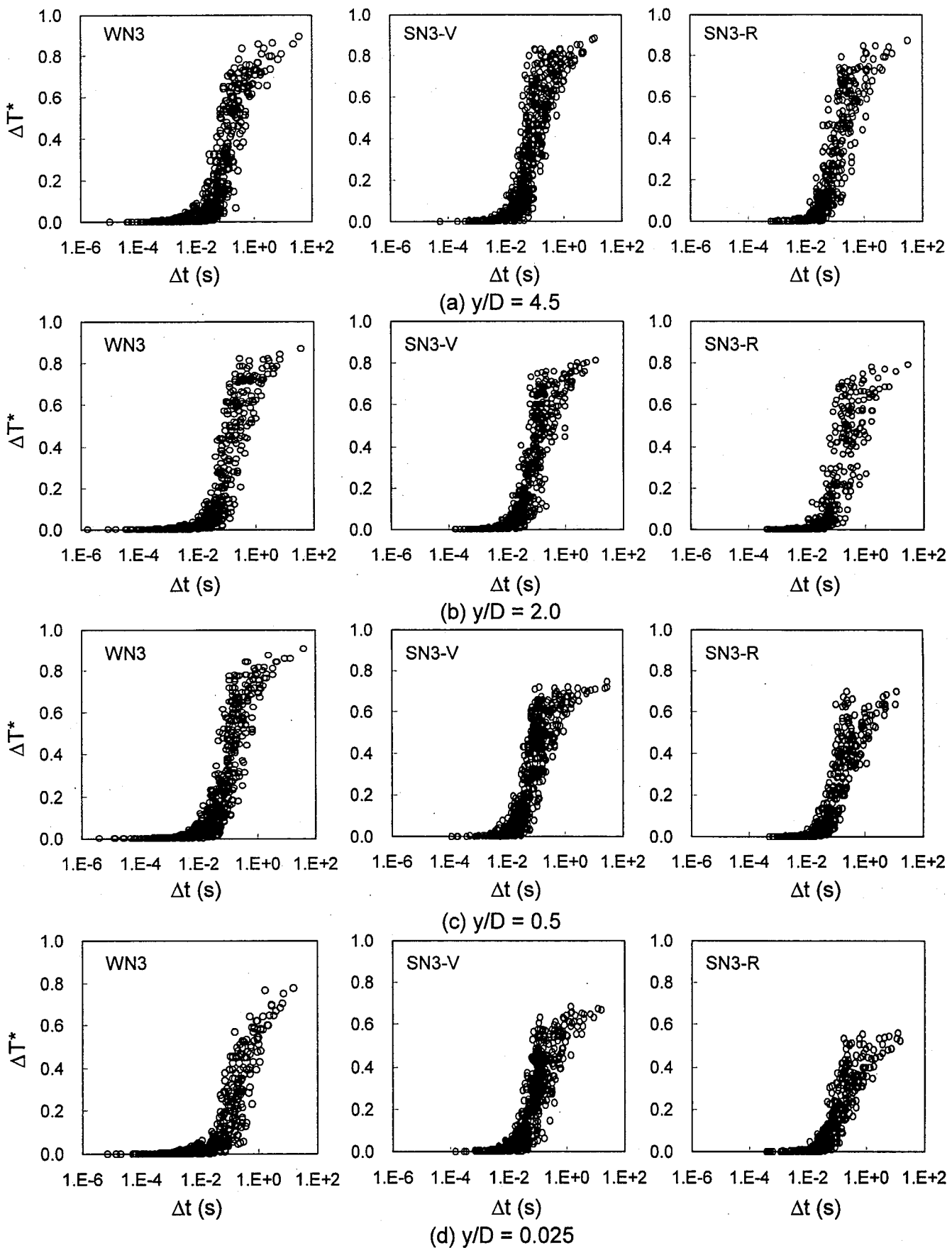


Fig.4.2.2 Comparisons of Wave Characteristics of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

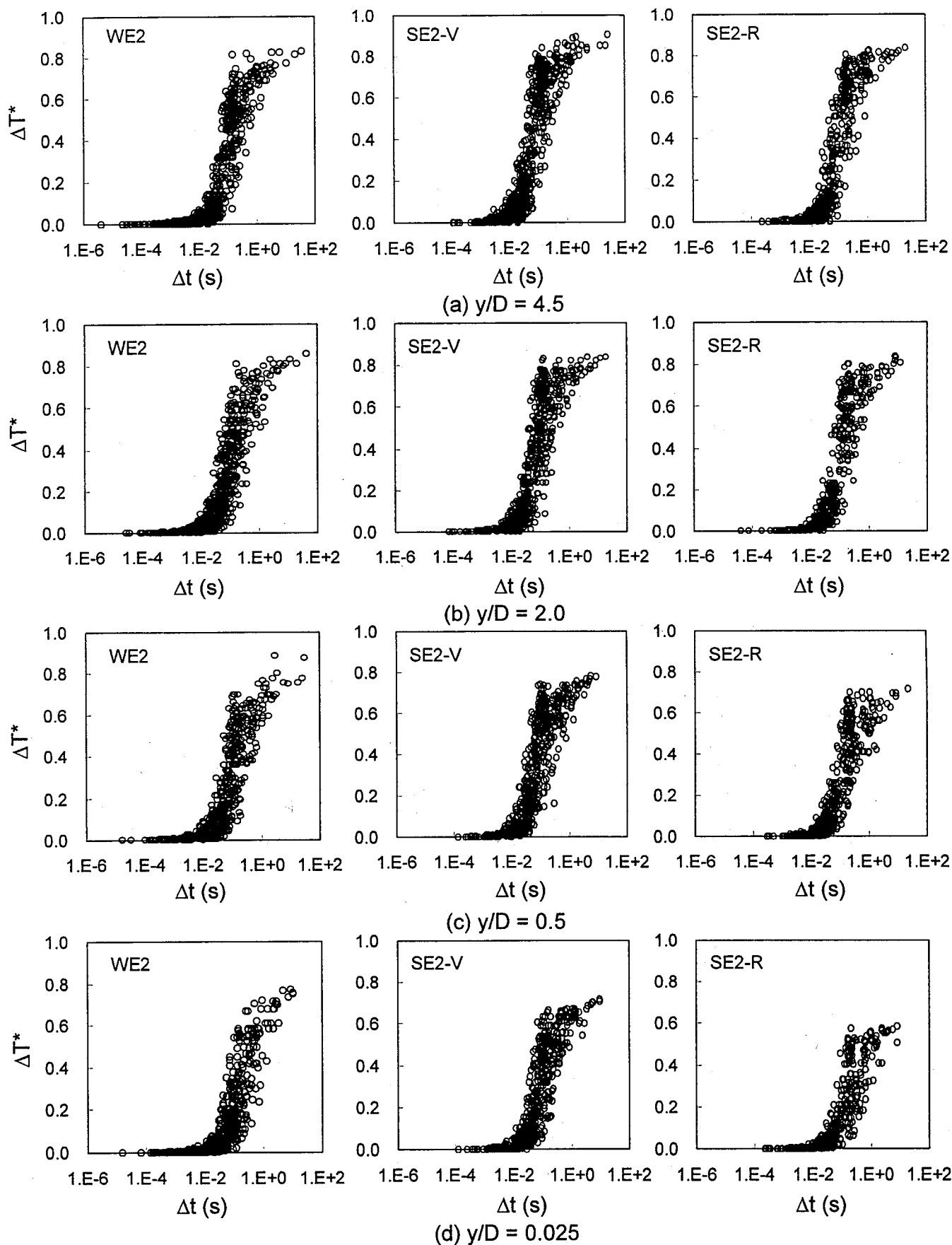
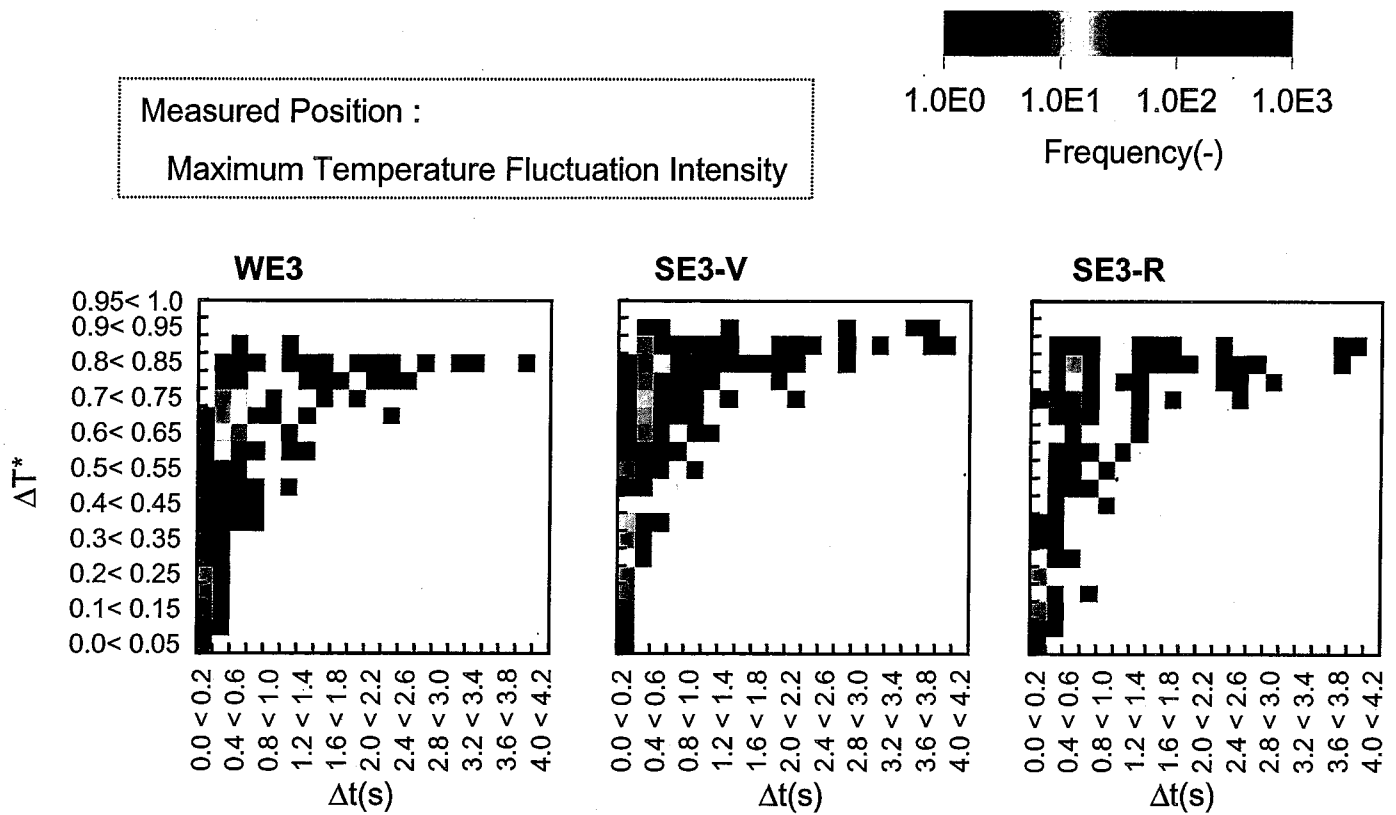
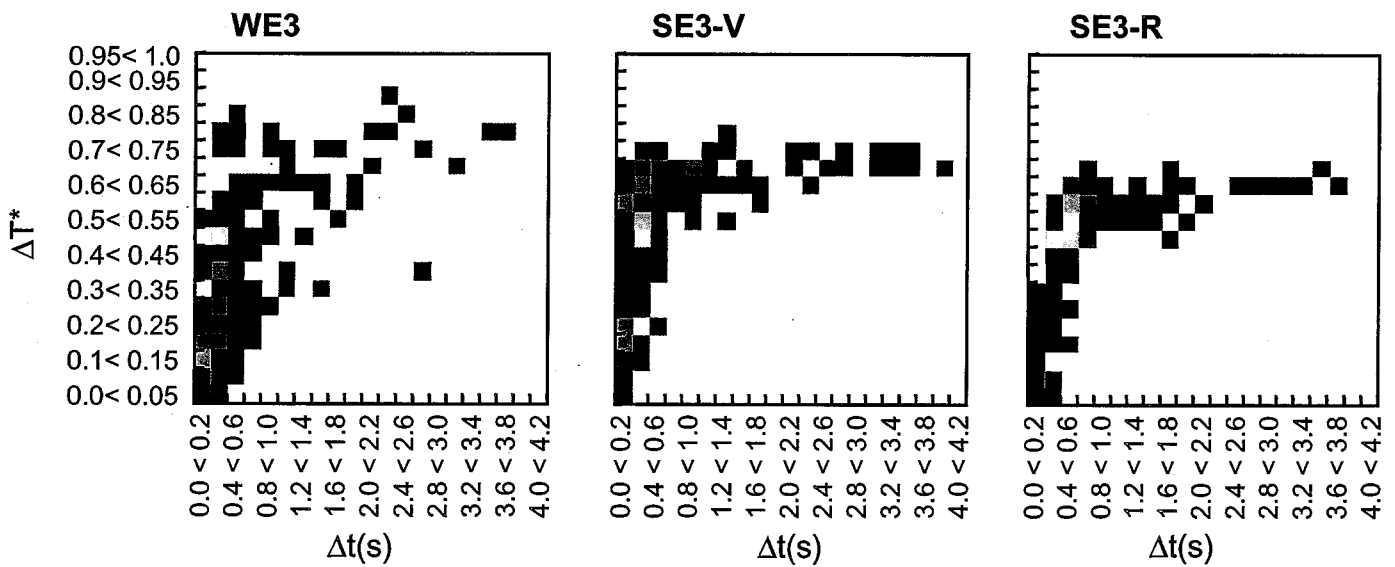


Fig.4.2.3 Comparisons of Wave Characteristics of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Double-Jet Condition.



(a)  $y/D=4.5$



(b)  $y/D=0.025$

Fig.4.2.4 Comparisons of 2D-Histograms of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.

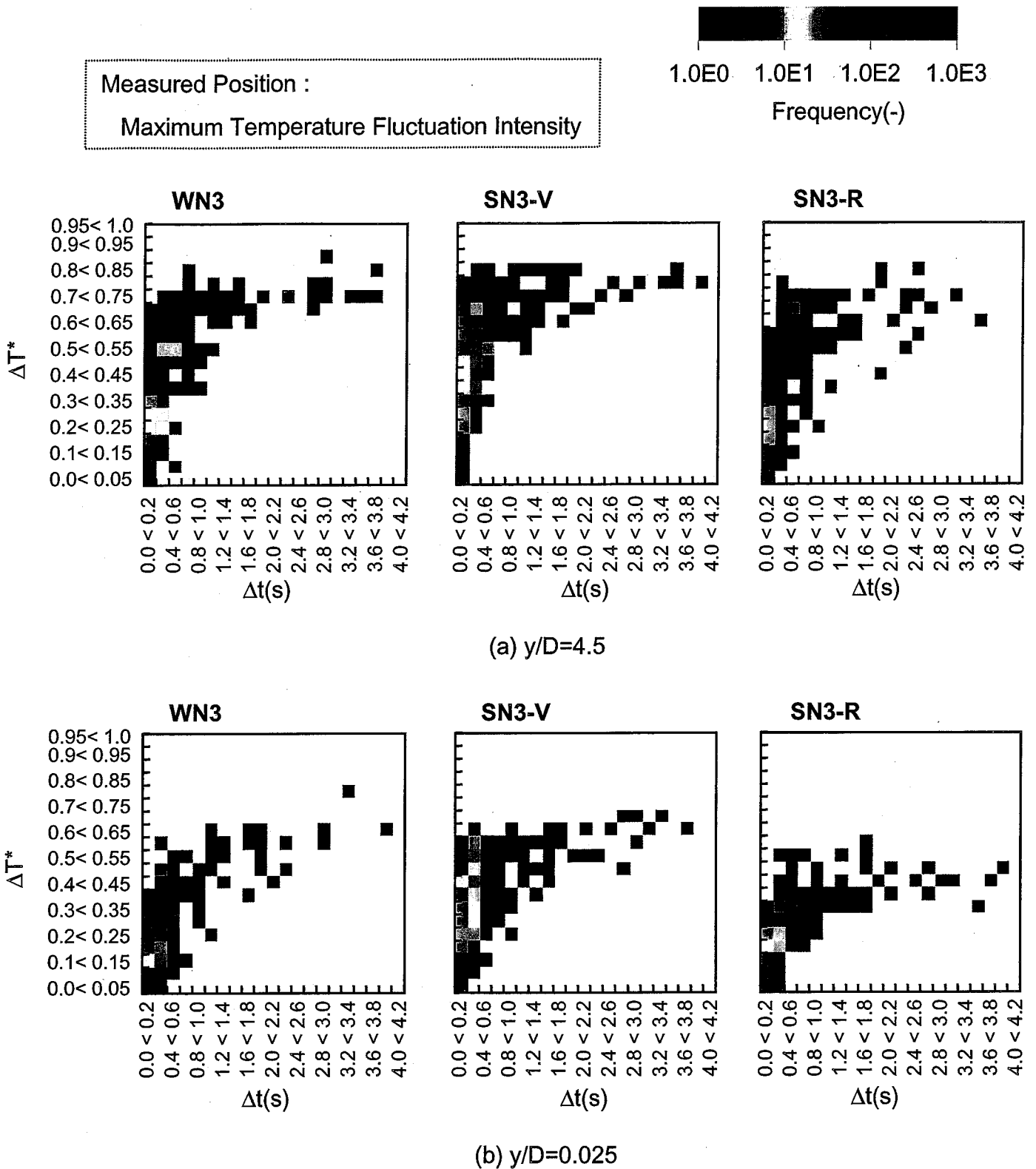


Fig.4.2.5 Comparisons of 2D-Histograms of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition

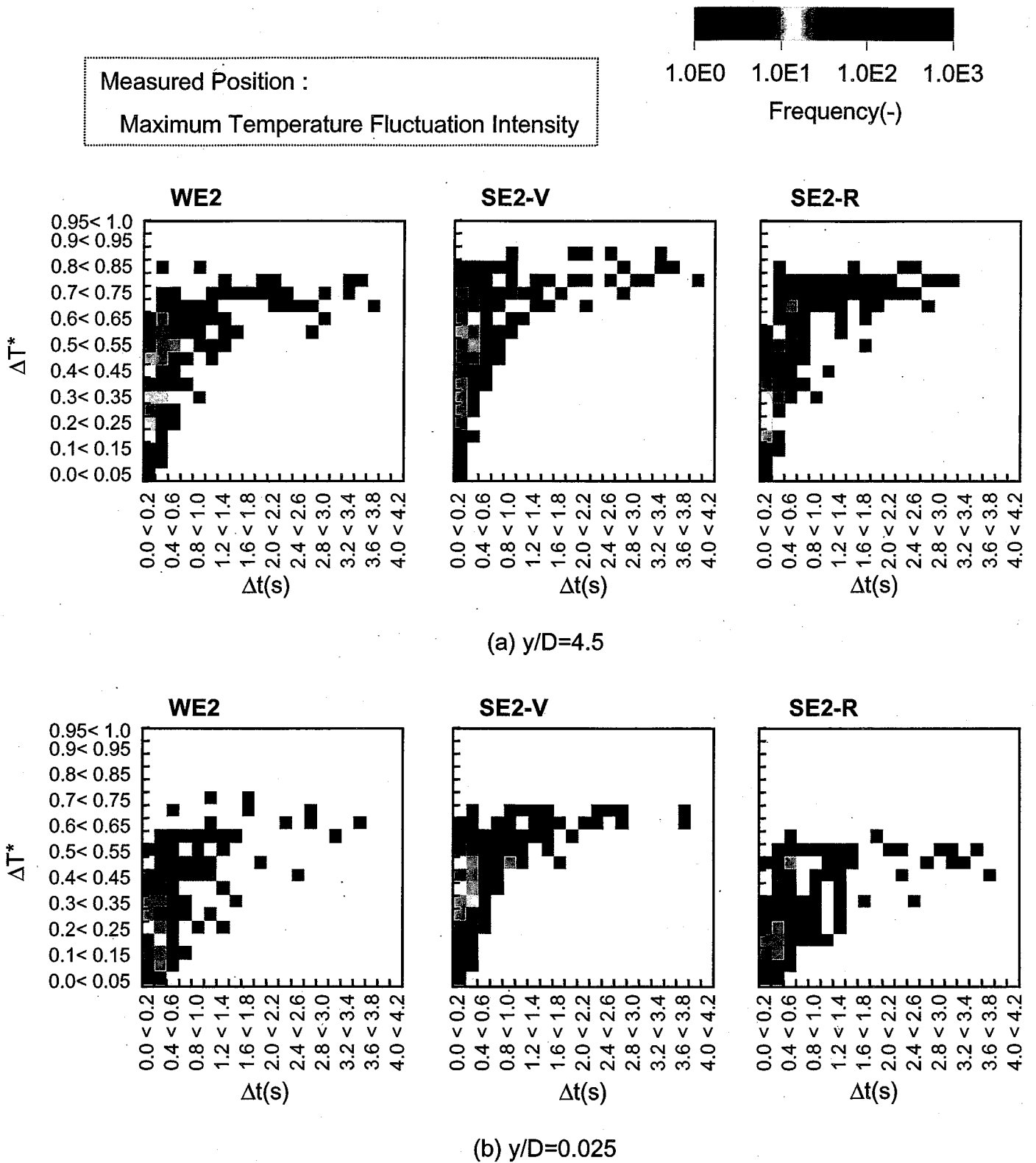
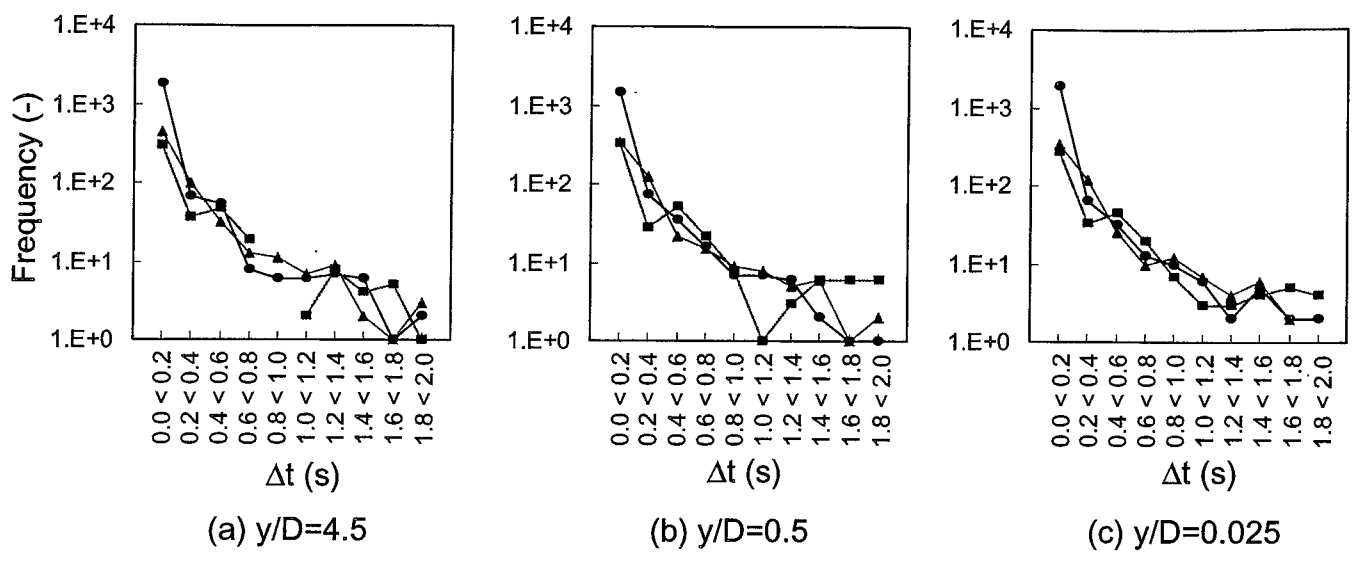


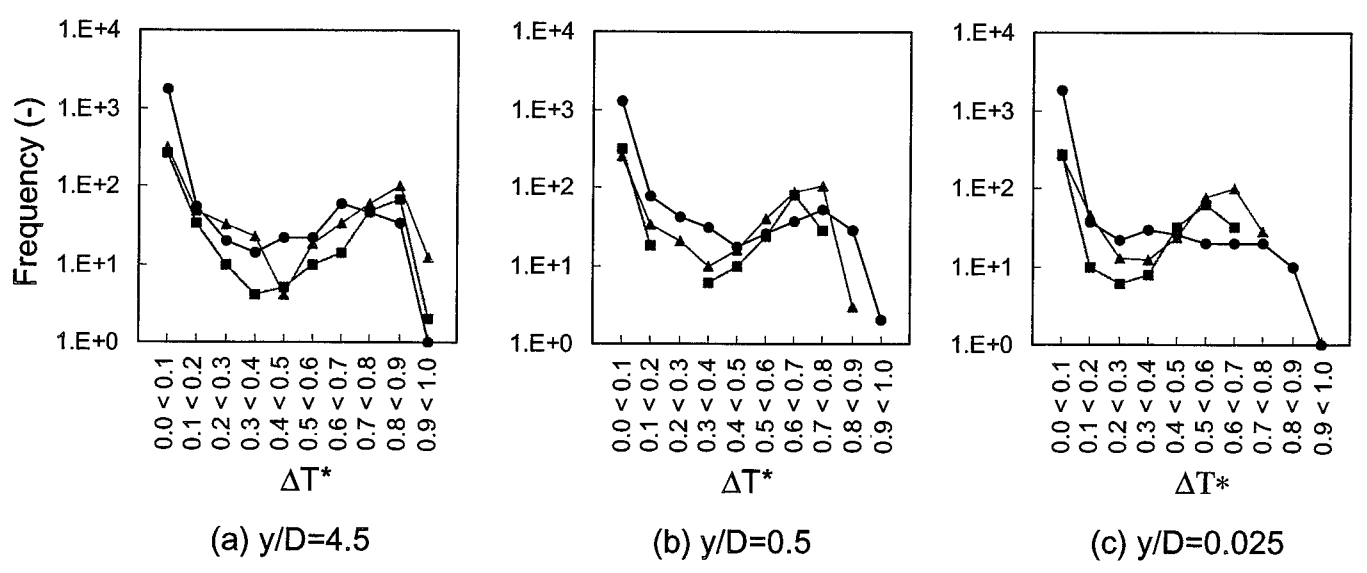
Fig.4.2.6 Comparisons of 2D-Histograms of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Double-Jet Condition.

Measured Position :  
 Maximum Temperature Fluctuation Intensity

● WE3  
 ▲ SE3-V  
 ■ SE3-R

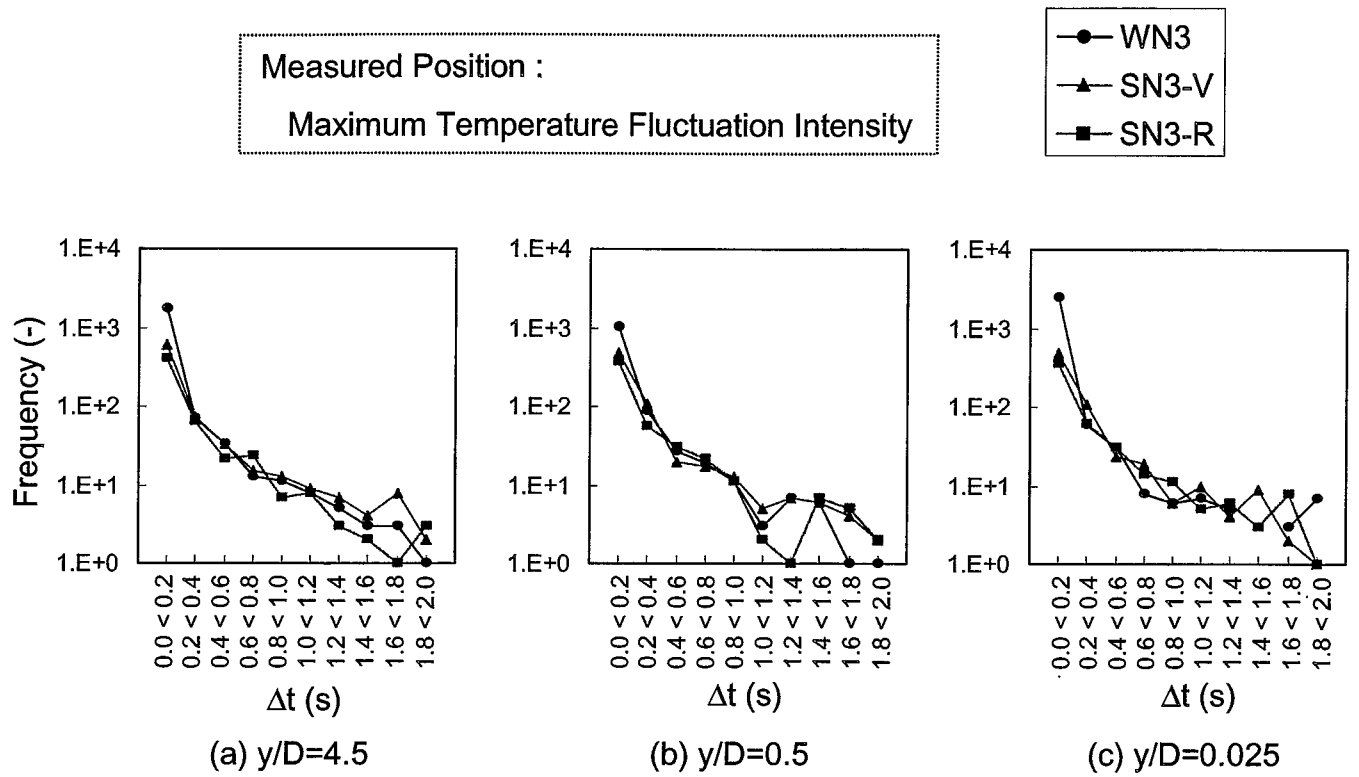


(i) Histograms of Time-Period of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow Method.

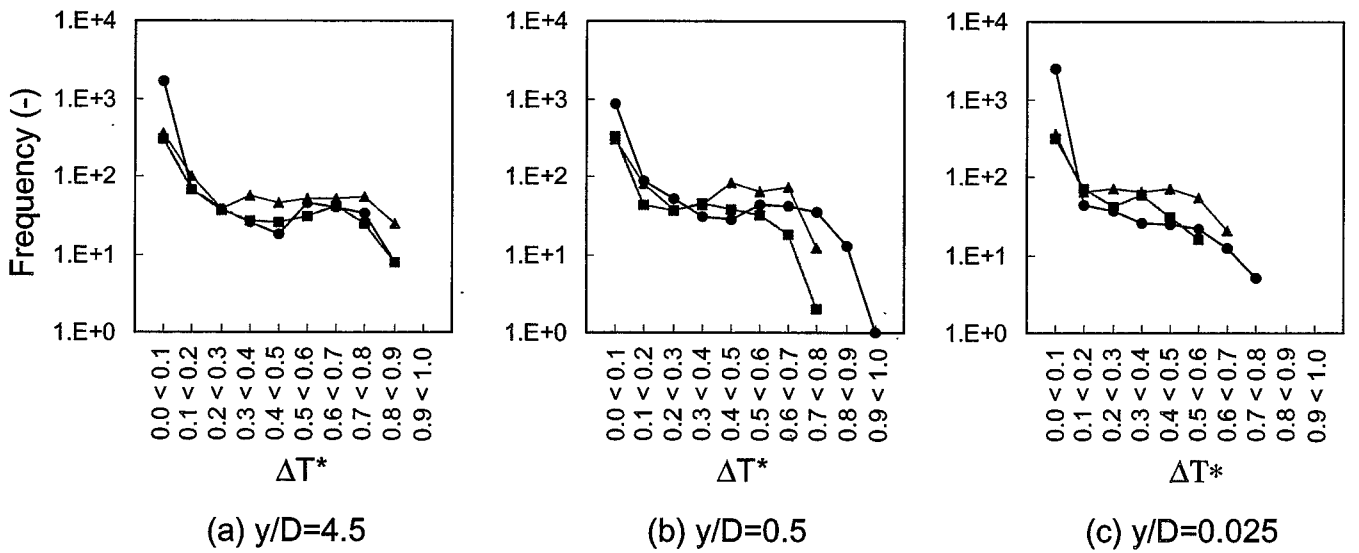


(ii) Histograms of Amplitude of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow Method.

Fig.4.2.7 Comparisons of Histograms of Time-Period and Amplitude of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Isovelocity Condition.



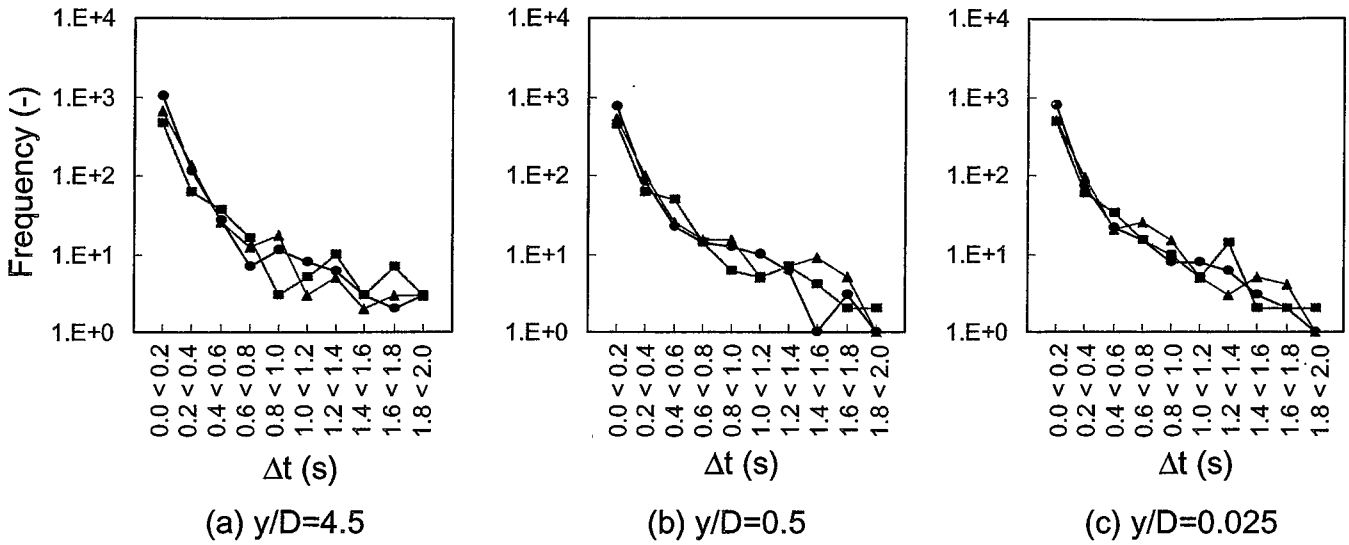
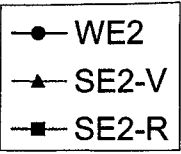
(i) Histograms of Time-Period of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow Method.



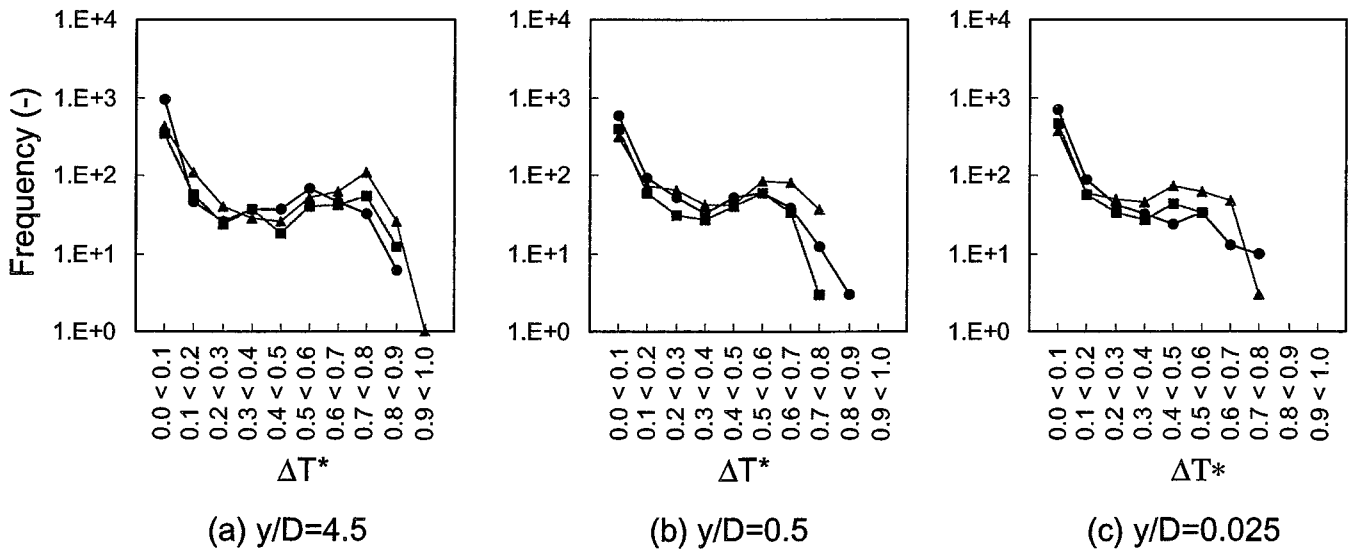
(ii) Histograms of Amplitude of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow Method.

Fig.4.2.8 Comparisons of Histograms of Time-Period and Amplitude of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Triple-Jet Non-Isovelocity Condition.

Measured Position :  
 Maximum Temperature Fluctuation Intensity



(i) Histograms of Time-Period of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow Method.



(ii) Histograms of Amplitude of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow Method.

Fig.4.2.9 Comparisons of Histograms of Time-Period and Amplitude of Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow between Sodium and Water under Double-Jet Condition.