

分置

サーマルストライピング現象の  
熱流動に関する研究

— 壁面噴流Na／水試験および準DNSを用いた

Naと水の混合特性比較評価 —

(研究報告書)

2004年5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

サーマルストライピング現象の熱流動に関する研究  
—壁面噴流 Na/水試験および準 DNS を用いた Na と水の混合特性比較評価—  
(研究報告書)

木村暢之<sup>1)</sup>、長澤一嘉<sup>2)</sup>、三宅康洋<sup>3)</sup>、宮越博幸<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。温度変動の発生から応力に至る過程の中で、ここでは流体中での温度変動の伝播と減衰について流体の物性の影響に着目して研究を行った。ナトリウム冷却高速炉に用いられるナトリウムは水と比べ、熱伝導率が約 100 倍大きい。一方で、流体中の温度変動特性を水試験で予測できれば合理的な実験が可能となる。

本研究では、壁面に沿う平行 3 噴流体系にて Na 試験と水試験をほぼ同一の寸法形状で実施するとともに、準 DNS コード DINUS-3 による数値解析を行った。これらにより、水と Na の物性の違いによる噴流間混合特性を評価した。Na 試験では熱電対による温度場計測、水試験では熱電対による温度場計測とともに、PIV による流速計測を実施した。

その結果、試験と準 DNS により得られた温度変動特性は Na と水とで、良好に一致した。温度変動の周波数特性は、流速を一致させたケースで、水と Na で同じ卓越周波数成分を有することがわかった。解析で得られた速度場は、構造材近傍を含めて、水と Na の違いは見られなかったが、温度場においては、構造材近傍において、Na の方が水より温度変動強度が小さくなることが明らかとなった。

これらのことから、温度変動の周波数特性に関しては水試験により Na 中での特性が評価可能であることがわかった。また、構造材近傍での温度変動特性は、水試験が Na 試験に比べ保守的な結果を与えることが明らかとなった。

---

本報告書には、(株) NESI および (株) エヌデー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 NESI

<sup>3)</sup> 株式会社エヌデー

**Study on Thermalhydraulics in Thermal Striping Phenomena**  
**- Evaluation on Convective Mixing in Sodium and Water based on Sodium/Water**  
**Experiments and Quasi-DNS -**  
(Research Report)

Nobuyuki KIMURA<sup>1)</sup>, Kazuyoshi NAGASAWA<sup>2)</sup>, Yasuhiro MIYAKE<sup>3)</sup>  
Hiroyuki MIYAKOSHI<sup>1)</sup>, 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.

In this study, a comparison of convective mixing phenomena in sodium and water was evaluated by using triple parallel jets sodium/water experiments and a quasi-DNS code. The triple jets were set to the same discharged velocities. Temperature was measured by using thermocouples in sodium experiment, and temperature and velocity were measured by using thermocouples and the PIV method in water experiment respectively.

Calculated results, which were obtained as the time-averaged and the instantaneous data, were in good agreements with the experimental results in sodium and water experiments. The prominent frequency component in temperature fluctuation in sodium experiment was equal to that in water experiment. The flow field in sodium was similar to that in water. The temperature fluctuation intensity in sodium was smaller than that in water at the neighborhood of the structure.

These results show the water experiment could simulate the sodium experiment as for the frequency characteristics of temperature fluctuation. And it seems that the temperature fluctuation intensity in water was more conservative than that in sodium.

---

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

2) NESI Incorporation

3) NDD

## 目次

1. 序論 .....	1
2. 実験 .....	3
2.1 水試験装置 (WAJECO) .....	3
2.1.1 試験装置 .....	3
2.1.2 温度計測 .....	4
2.1.3 流速計測 .....	4
2.2 ナトリウム試験装置 (PLAJEST) .....	6
2.2.1 試験装置 .....	6
2.2.2 温度計測 .....	6
2.3 実験条件 .....	7
3. 数値解析 .....	9
3.1 解析コードの概要 .....	9
3.2 解析ケース .....	9
3.3 解析体系 .....	9
3.4 境界条件 .....	10
3.5 解析手順 .....	10
4. 水試験における解析の模擬性 .....	12
4.1 時間平均温度場および速度場における DNS の模擬性 .....	12
4.2 温度変動挙動における DNS の模擬性 .....	14
4.3 乱流 2 次モーメントにおける DNS の模擬性 .....	15
5. 準 DNS による水とナトリウムの噴流間混合特性の比較 .....	17
5.1 時間平均温度場および速度場における水とナトリウムの比較 .....	17
5.2 温度変動挙動における DNS の模擬性 .....	19
5.3 レインフローによる Peak-To-Peak 値の水とナトリウムの比較 .....	20
5.4 乱流 2 次モーメントにおける水とナトリウムの比較 .....	20
5.5 乱流熱流束における水とナトリウムの比較 .....	21
5.6 流体混合過程に関する水とナトリウムの比較 .....	22
6. 結論 .....	24
謝辞 .....	26
参考文献 .....	27

記号リスト

- D : 水力等価直径 (=0.02m)  
N : 時系列データ数  
Re : Reynolds 数  
T : 瞬時の温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $\Delta T$  : 噴流吐出温度差 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{\text{avg}}$  : 時間平均温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T^*_{\text{avg}}$  : 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  
 $V_c$  : 低温噴流吐出速度 (m/s)  
 $V_h$  : 高温噴流吐出速度 (m/s)  
 $V_{\text{spece}}$  : 噴流の空間平均吐出速度 (m/s)  
 $u_{\text{avg}}$  : 時間平均流速の水平方向成分 (m/s)  
 $w_{\text{avg}}$  : 時間平均流速の鉛直方向成分 (m/s)  
 $u^*_{\text{avg}}$  : 無次元化水平方向流速成分  
 $w^*_{\text{avg}}$  : 無次元化鉛直方向流速成分  
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)

## 表リスト

Table 2.3	Experimental Conditions. ....	29
Table 3.1	Numerical Methods used in Experimental Analysis. ....	29
Table 3.2	Calculation Conditions. ....	29
Table 3.3	Number of calculated Meshes in Analysis (Region1). ....	29
Table 3.4	Number of calculated Meshes in Analysis (Region2). ....	29

## 図リスト

Fig.2.1.1	Schematic of Experimental Loop (WAJECO). ....	30
Fig.2.1.2	Schematic of Test Section (WAJECO). ....	31
Fig.2.1.3	Discharged Nozzles of Triple Jets (WAJECO). ....	32
Fig.2.1.4	Thermocouples Tree (WAJECO). ....	33
Fig.2.1.5	Principle of PIV. ....	34
Fig.2.1.6	Image Capturing System for PIV. ....	35
Fig.2.1.7	Timing Charts of Signals in PIV System. ....	36
Fig.2.1.8	Measured Positions for PIV in x-z plane. ....	37
Fig.2.2.1	Experimental Loop (PLAJEST). ....	38
Fig.2.2.2	Test Plenum (PLAJEST). ....	39
Fig.2.2.3	Discharged Nozzles of Triple Jet (PLAJEST). ....	40
Fig.2.2.4	Movable Thermocouples Tree (PLAJEST). ....	41
Fig.3.1	Mesh Arrangement of DNS. ....	42
Fig.3.2	Boundary Conditions. ....	43
Fig.4.1.1	Comparisons of Contours of Time-Averaged Temperature. between Experimental and Numerical Results. ....	44
Fig.4.1.2	Comparisons of Vectors of Time-Averaged Velocity between Experimental and Numerical Results. ....	44
Fig.4.1.3	Comparisons of Contours of Temperature Fluctuation Intensity between Experimental and Numerical Results. ....	45
Fig.4.1.4	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Directions between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ ) ....	46
Fig.4.1.5	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Directions between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ ) ....	47

Fig.4.1.6	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Directions between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ ) .....	48
Fig.4.1.7	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Directions between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ ) .....	49
Fig.4.1.8	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.5$ ) .....	50
Fig.4.1.9	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ ) .....	51
Fig.4.1.10	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ ) .....	52
Fig.4.1.11	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ ) .....	53
Fig.4.1.12	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ ) .....	54
Fig.4.1.13	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ ) .....	55
Fig.4.1.14	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ ) .....	56
Fig.4.1.15	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ ) .....	57
Fig.4.1.16	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ ) .....	58
Fig.4.1.17	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ ) .....	59



Fig.4.1.18	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ ) .....	60
Fig.4.1.19	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ ) .....	61
Fig.4.1.20	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction between Experimental and Numerical Results. ....	62
Fig.4.1.21	Comparisons of Temperature Fluctuations Intensity Distributions in Vertical Direction between Experimental and Numerical Results. ....	65
Fig.4.1.22	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Experimental and Numerical Results. ....	68
Fig.4.1.23	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Experimental and Numerical Results. ....	71
Fig.4.1.24	Comparisons of Depth Distributions of Maximum Temperature Fluctuations Intensity at Each Cross-Section normal to Wall between Experimental and Numerical Results. ---	74
Fig.4.2.1	Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation versus Frequency between Experimental and Numerical Results. ....	75
Fig.4.2.2	Comparisons of Power Spectrum Density of Horizontal Velocity versus Frequency between Experimental and Numerical Results. ....	76
Fig.4.3.1	Comparisons of Contours of Normal Components of Second Moments in Turbulence between Experimental and Numerical Results. ....	77
Fig.4.3.2	Comparisons of Contours of Shear Components of Second Moments in Turbulence between Experimental and Numerical Results. ....	78
Fig.4.3.3	Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ ) .....	79

Fig.4.3.4	Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )	-----	80
Fig.4.3.5	Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ )	-----	81
Fig.4.3.6	Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ )	-----	82
Fig.4.3.7	Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ )	-----	83
Fig.4.3.8	Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )	-----	84
Fig.4.3.9	Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ )	-----	85
Fig.4.3.10	Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ )	-----	86
Fig.4.3.11	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ )	-----	87
Fig.4.3.12	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )	-----	88
Fig.4.3.13	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ )	-----	89
Fig.4.3.14	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ )	-----	90

Fig.5.1.1	Comparisons of Contours of Time-Averaged Temperature between Sodium and Water Condition. ....	91
Fig.5.1.2	Comparisons of Vectors of Time-Averaged Velocity between Sodium and Water Condition. ....	91
Fig.5.1.3	Comparisons of Contours of Temperature Fluctuations Intensity between Sodium and Water Condition. ....	91
Fig.5.1.4	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=4.5) ....	92
Fig.5.1.5	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=0.5) ....	93
Fig.5.1.6	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=0.2) ....	94
Fig.5.1.7	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=0.05) ....	95
Fig.5.1.8	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=4.5) ....	96
Fig.5.1.9	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=0.5) ....	97
Fig.5.1.10	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=0.2) ....	98
Fig.5.1.11	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=0.05) ....	99
Fig.5.1.12	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=4.5) ....	100
Fig.5.1.13	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=0.5) ....	101

Fig.5.1.14	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ ) .....	102
Fig.5.1.15	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ ) .....	103
Fig.5.1.16	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ ) .....	104
Fig.5.1.17	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ ) .....	105
Fig.5.1.18	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ ) .....	106
Fig.5.1.19	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ ) .....	107
Fig.5.1.20	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction in between Sodium and Water Condition. ....	108
Fig.5.1.21	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition. ....	111
Fig.5.1.22	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition. ....	114
Fig.5.1.23	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition. ....	117
Fig.5.1.24	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=-0.75$ ) .....	120
Fig.5.1.25	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ ) .....	122

Fig.5.1.26	Comparisons of Time-Averaged Temperature Distribution in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ ) -----	124
Fig.5.1.27	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=-0.75$ ) -----	126
Fig.5.1.28	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ ) -----	128
Fig.5.1.29	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ ) -----	130
Fig.5.1.30	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=-0.75$ ) -----	132
Fig.5.1.31	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ ) -----	134
Fig.5.1.32	Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ ) -----	136
Fig.5.1.33	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=-0.75$ ) -----	138
Fig.5.1.34	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ ) -----	140
Fig.5.1.35	Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ ) -----	142
Fig.5.1.36	Comparisons of Depth Distributions of Maximum Temperature Fluctuations Intensity Each Cross-Section normal to Wall between Sodium and Water Condition. -----	144
Fig.5.2.1	Comparisons of Temperature Trend between Sodium and Water Condition. -----	145
Fig.5.2.2	Comparisons of Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. -----	147

Fig.5.2.3	Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation between Sodium and Water Condition. ....	148
Fig.5.2.4	Comparisons of Power Spectrum Density of Horizontal Velocity between Sodium and Water Condition. ....	149
Fig.5.3.1	Comparisons of Histograms of Time-Period and Amplitude in Temperature Fluctuation Calculated Rain Flow between Method Sodium and Water Condition. ....	150
Fig.5.4.1	Comparisons of Normal Components of Second Moments in Turbulence Field between Sodium and Water Condition. ....	151
Fig.5.4.2	Comparisons of Shear Components of Second Moments in Turbulence Field between Sodium and Water Condition. ....	152
Fig.5.4.3	Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ ) ....	153
Fig.5.4.4	Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ ) ....	154
Fig.5.4.5	Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ ) ....	155
Fig.5.4.6	Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ ) ....	156
Fig.5.4.7	Comparisons of Depth Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ ) ....	157
Fig.5.4.8	Comparisons of Depth Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ ) ....	158
Fig.5.4.9	Comparisons of Depth Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ ) ....	159
Fig.5.4.10	Comparisons of Depth Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ ) ....	160

Fig.5.4.11	Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )	----- 161
Fig.5.4.12	Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )	----- 162
Fig.5.4.13	Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )	----- 163
Fig.5.4.14	Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )	----- 164
Fig.5.4.15	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Depth Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )	----- 165
Fig.5.4.16	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Depth Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )	----- 166
Fig.5.4.17	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Depth Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )	----- 167
Fig.5.4.18	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Depth Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )	----- 168
Fig.5.4.19	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Depth and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )	----- 169
Fig.5.4.20	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Depth and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )	----- 170
Fig.5.4.21	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Depth and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )	----- 171
Fig.5.4.22	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Depth and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )	----- 172

Fig.5.4.23	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )	----- 173
Fig.5.4.24	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )	----- 174
Fig.5.4.25	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )	----- 175
Fig.5.4.26	Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )	----- 176
Fig.5.5.1	Comparisons of Turbulent Heat Fluxes Field between Sodium and Water Condition.	----- 177
Fig.5.5.2	Comparisons of Horizontal Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.25$ )	----- 178
Fig.5.5.3	Comparisons of Horizontal Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )	----- 179
Fig.5.5.4	Comparisons of Horizontal Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )	----- 180
Fig.5.5.5	Comparisons of Horizontal Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.25$ )	----- 181
Fig.5.5.6	Comparisons of Depth Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.25$ )	----- 182
Fig.5.5.7	Comparisons of Depth Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )	----- 183
Fig.5.5.8	Comparisons of Depth Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )	----- 184



Fig.5.5.9	Comparisons of Depth Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=0.25) .....	185
Fig.5.5.10	Comparisons of Vertical Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=4.25) .....	186
Fig.5.5.11	Comparisons of Vertical Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=0.5) .....	187
Fig.5.5.12	Comparisons of Vertical Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=0.2) .....	188
Fig.5.5.13	Comparisons of Vertical Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. (y/D=0.25) .....	189
Fig.5.6.1	Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Fluctuation Point in Sodium Calculation (x/D=4.5) .....	190
Fig.5.6.2	Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Fluctuation Point in Water Calculation. (x/D=4.5) .....	191
Fig.5.6.3	Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Fluctuation Point in Sodium Calculation. (x/D=0.5) .....	192
Fig.5.6.4	Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Fluctuation Point in Water Calculation (x/D=0.5) .....	193
Fig.5.6.5	Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Fluctuation Point in Sodium Calculation (x/D=0.2) .....	194
Fig.5.6.6	Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Fluctuation Point in Water Calculation (x/D=0.2) .....	195
Fig.5.6.7	Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Fluctuation Point in Sodium Calculation (x/D=0.05) .....	196

Fig.5.6.8	Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Fluctuation Point in Water Calculation ( $x/D=0.05$ ) .....	197
Fig.5.6.9	Comparisons of PSD Ratio Temperature to Horizontal Velocity between Sodium and Water Condition. ....	198

## 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）[1]-[6]。ナトリウム冷却高速炉では、冷却材の熱伝導率が水に比べて約 100 倍大きいことから、流体中の温度変動特性、特に構造材近傍においてナトリウムと水では挙動が大きく異なると考えられる。

流体中で発生する温度変動挙動は、流体の種類、混合する体系、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としては、構造材近傍の境界層において温度変動の特性が変化することが考えられる。また、流体から構造材への温度変動の伝達過程、および構造材中の温度変動の伝導過程では、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、構造材の厚みなどによって、構造材内部で発生する熱応力の値は変化する[7]。

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[8]-[10]。また、本現象への実験的なアプローチとして、T字配管合流部を対象に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[11]-[14]。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[15]-[23]。この体系は炉心の出口で低温のナトリウムが吐出する制御棒集合体を高温のナトリウムが吐出する燃料集合体が囲んでいる形状を2次元的に取り出したものである。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[24][25]。

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。加えて、水を内包する配管については、日本機械学会による高サイクル熱疲労に関する指針[26]が作成されている。しかしながら、高速炉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ナトリウム冷却炉の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。

前報[27]では、同一形状を持つ3本鉛直壁面噴流試験体系のナトリウム試験と水試験により、実験的に作動流体の影響を把握した。本報では、前報で示した

試験結果とともに、DINUS-3<sup>[10]</sup>による準直接シミュレーションをナトリウム並びに水試験について実施し、水試験のデータにより流速場とその変動に対する解析結果の妥当性を検証した上で、速度場／温度場の両面から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

ナトリウムと水の混合過程の比較を行うに当たり、形状のほぼ同一の水 (WAJECO) およびナトリウム (PLAJEST) 試験装置により、詳細な計測を実施した。水試験については熱電対を使用した温度計測と粒子画像流速測定法 (PIV) による速度計測を実施し、ナトリウム試験については、熱電対による温度計測を実施した。

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。試験装置は、作動流体 (水) をループへ供給するための貯水タンク、流体中の不純物を除去するためのフィルタ、流量調整用循環ポンプ、低温水供給用空気冷却器、高温水供給用加熱器 (電気ボイラ)、試験部矩形容器、試験部のオーバーフロー液位制御用戻りポンプから構成されている。貯水タンクから供給された水は、低温系統と高温系統に分岐され、それぞれに設置された循環ポンプによって加圧される。加圧された低温系統および高温系統の水は、空気冷却器および加熱器によって温度調節される。高温系統はこれより下流でさらに 2 系統に分岐され、低温系の 1 系統とともに試験部に流入する。低温系統および高温系統には電磁流量計、流量調節弁が設置されており、試験部流入流量の設定ならびに計測を可能にしている。高温系の 2 系統は配管中に動圧を計測するピトー管を挿入し、その差圧により流量が等しくなるよう調節を行った。試験部に流入した水を戻りポンプを用いて貯水タンクに導くことにより、一巡の循環流路が形成される。

Fig.2.1.2 に試験部の詳細を示す。試験部は、幅 2438mm、奥行き 500mm、高さ 2438mm の矩形試験容器と、作動流体を噴流として吐出させるための噴流吐出ノズルから構成されている。低温および高温系統からの水は、噴流吐出ノズルにより 3 本の矩形噴流となり、試験容器内に吐出される。座標系は、水平方向に  $x$ 、奥行き方向に  $y$ 、鉛直方向を  $z$  とした。3 本の噴流は、中心が低温、左右が高温となっている。噴流吐出ノズルを前後に挟む 2 枚の仕切板は、噴流を壁に沿った流れ (壁噴流) とし、壁面近傍の流れと温度変動の伝達に着目できるようにした。3 本の噴流は、噴流間の流体混合を生じながら仕切板に沿って上昇した後、試験容器の左右にある高さ 2000(mm) の堰をオーバーフローし、容器下方の出口配管より流出する。

Fig.2.1.3 に噴流吐出ノズルの概要を示す。低温および高温系からノズルに流入した水は、バッフル板で整流された後、四分円で絞られた噴流吐出ノズルより試験容器に流入する。四分円で縮流させることにより、噴流吐出口では一様流速分布の噴流とし吐出させた。噴流吐出口の形状は、幅 20mm、奥行き 170mm で、3本の噴流吐出口は 70mm 間隔で配置されている。ノズル出口面から 110mm 上流側には、噴流の温度を計測するための熱電対、210mm 上流側には噴流間の流量バランスを確認するためのピトー管を設置している。

### 2.1.2 温度計測

温度測定は、奥行き方向、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を用いて行った。Fig.2.1.4 に熱電対のツリーを示す。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。熱電対はシース外径 0.25mm の K型非接地タイプである。熱電対は水平バーに取り付けられた外径 1mm、長さ 50mm の SUS 製保護管の中を通り、先端の 5mm が流体中に置かれている。これらの熱電対は、実験開始前に恒温槽を用いて絶対校正した基準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℃であった。熱電対の起電力信号を、零接点補償器に通し、増幅、AD 変換、収録し、その後相対校正で求めた校正曲線により温度データとした。

温度計測は、熱電対ツリーを噴流吐出口より 5mm 下流まで下げた状態から開始し、以後 10mm、20mm と 10mm 間隔で 500mm 下流までの 51 ラインを対象とし、奥行き方向に関しては、熱電対測定位置を壁面からの距離が、0.5、1、2、4、6、10、15、20、40、85mm となるように移動し計測を行った。各計測位置において、10ms 間隔で 4096 点 (約 41 秒) の時系列データを取得した。

### 2.1.3 流速計測

本試験での流速計測は、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry ; PIV) を用いた。PIV は、微小粒子が混入した流れ場をレーザー等で可視化し、一定時間間隔で収録した可視化画像を画像処理したことによって流速を得る手法である。PIV は非接触の計測手法であり、2次元平面での瞬時の流速を時々刻々求めることができることから、多くの計測点のデータを取得する場合、非常に有効な手法である。構造物近傍や複雑体系における流れ場に関しても画像処理によって、高精度の流速計測が行えることが明らかになってきている。

Fig.2.1.5 に本計測に使用した輝度相関法による PIV の原理を示す。流体に混

入した微小粒子にレーザー等でシート状のパルス光を照射し、CCDカメラで微小時間間隔の2枚の画像を撮影する。(Fig.2.1.5中の原画像の[1]と[2])。2枚目の画像から1枚目の参照領域Aと同じパターン領域を探索する。探索方法として、空間における相互相関処理を使用している。すなわち、相互相関処理によって得られた相関係数の最大値を示す位置(図中の[2])に流体が移動しているとして、その移動量と2枚の画像の撮影時間間隔から局所流速を算出する。1枚目の参照領域の位置をずらして同様の計算を行うことによって、詳細な速度場を求めることができる。

Fig.2.1.6に本試験で使用したPIVシステムの構成を示す。本システムは、流体を可視化するダブルパルスNd-YAGレーザー、画像を撮影するプログレッシブCCDスキャンカメラ(画素数:640×480ピクセル、フレームレート60Hz)、撮影された画像を収録・保存するPC(DOS/V、PCIスロットに画像収録ボードを挿入)および収録時間の時間間隔を制御するタイミングコントローラから構成される。

Fig.2.1.7に本システムの画像収録における時間間隔を制御する信号の流れを示す。CCDカメラは、1/60秒毎に画像の撮影を行う直前に、垂直同期信号(V-SYNC)を発生する。この垂直同期信号を受けて、タイミングコントローラにより一定の遅れ時間の2つのTTLレベルのパルスが発生する。この2つのパルスをトリガとしてダブルパルスNd-YAGレーザーに入力することにより、レーザーシートが射出される。タイミングコントローラは、発生する2つのパルスを、撮影画像フレームの切り替わる時刻の前と後で発生させるように調節する。CCDカメラのシャッターは解放しているので、レーザーが発行した瞬間での流体の様子のみが画像に収録される。これにより、CCDカメラのフレームレートより短い時間間隔での2枚の画像が収録できる。

可視化画像の撮影を、試験体の正面方向(x-z平面)から行うことで、x、z方向流速を計測した。画像は、1回に200枚(100組)撮影し、同じ位置で3回繰り返して収録した。画像データは、2枚で1つの流速場を算出するため、流速の収録時間間隔は1/30秒となる。

Fig.2.1.8に画像収録位置を示す。奥行き方向断面毎に水平方向5箇所、鉛直方向10箇所で画像収録を行い、奥行き断面を5箇所(y=1mm、4mm、10mm、40mm、85mm)移動して、水平方向・鉛直方向で同様に画像収録を行った。1組の画像における収録時間間隔は、1msとした。各画像の撮影領域は、Fig.2.2.4(3)に示すように、CCDカメラの画素数(横640×縦480ピクセル)に対して、水平方向(横)約40mm、鉛直方向(縦)約30mmである。CCDカメラと撮影位置との距離を一定に保つために、撮影する奥行き方向位置に対応して、CCDカメラの位置を調整した。

本評価で使用した輝度相互相関 PIV は、サブピクセル法の導入により、1 ピクセル以下の画像解析精度を有するとともに、周辺との移動量との比較により上位 3 つの相関係数との入れ替えを行う手法である。サブピクセル法を導入した場合の相関処理による誤差は、0.2 ピクセル程度となる。流速の測定精度としては、時間間隔 1ms の場合、誤差は 0.013m/s である。輝度相互相関は参照領域内の空間平均輝度からの変動成分により計算しているため、相互相関導出時に背景輝度の影響が除去される。本処理において、参照領域サイズは 640×480 ピクセル画像に対して 22×22 ピクセルとした。この参照領域サイズが流速計測の空間分解能に相当するため、本計測の空間分解能は 1.3mm×1.3mm となる。また、1 つの画像中に参照領域は水平方向 60 点、鉛直方向 42 点設定しているので、画像中に 60×42=2520 ベクトルが求められた。

## 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。電磁ポンプにより吐出されたナトリウムは、低温ラインと高温ラインに分岐し、高温ラインのみ電気ヒータにより加熱される。高温ラインはさらに 2 系統に分岐し、低温ライン 1 系統とともに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 の円筒容器であり、試験容器に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。ノズルの形状は、20mm×180mm と奥行き方向の長さが 10mm 長くなっていることを除き、水試験のノズルと比較してほぼ同じ形状となっている。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=0.5mm、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型非接地型タイプで、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により長さ 55mm、外径 1mm の SUS 製保護管の中を通り、先端 5mm がナトリウム中におかれる。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 変換ロガーを通して収録を行った。その他の物理量（流量、Na 液位、カバーガス圧力）は各変換器に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°C、300°C、350°C、400°C 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が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 2.3 に水およびナトリウムの実験条件を示す。本体系における噴流吐出時のレイノルズ数は以下の定義に基づく。

$$Re_h = \frac{V_h D}{\nu} \quad (2.1)$$

$$Re_c = \frac{V_c D}{\nu}$$

ここで、代表長さ  $D$  は噴流出口の代表長さ（スリット幅）(=20mm) である。また、噴流吐出温度差  $\Delta T$ 、3 本の平均吐出温度  $T_{space}$ 、3 本の平均吐出速度  $V_{space}$  を以下の式で定義した。

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

$$T_{space} = \frac{T_c + 2 \times T_h}{3} \quad (2.3)$$

$$V_{space} = \frac{V_c + 2 \times V_h}{3} \quad (2.4)$$

### 3. 数値解析

サーマルストライピング現象を評価するためには、評価対象領域での温度変動挙動を、変動振幅、サイクル数、周波数特性など定量的に把握する必要がある。

温度および速度変動挙動を解析的に求める際、時間平均輸送モデルを使用すると、乱流量は時間平均されたものとなる。流動不安定に起因する低周波数の温度変動成分については過渡変化としてとらえられるものの、変動の振幅を含む時系列や乱流に起因する時系列や変動周波数を求めることはできない。

そこで、温度および速度変動の周期や振幅を定量的に把握するために、乱流モデルを使用しない準直接シミュレーション(DNS)を用いて多次元熱流動解析を実施した。本解析は、サイクル機構で開発された準直接シミュレーションコード、DINUS-3 を用いて実施した。

#### 3.1 解析コードの概要

DINUS-3 コードは、対流項に 3 次精度を持つ風上差分法を用いた準直接シミュレーションコードである。DINUS-3 コードの数値手法を Table 3.1 に示す。

#### 3.2 解析ケース

Table 3.2 に水およびナトリウム試験の解析条件を示す。実験としては、2.3 節に示したものに対応する。水試験の解析では温度差が異なっているが 10°C 程度であれば既往研究<sup>[22]</sup>にて噴流吐出温度差で規格化することにより温度差によらず評価できることが明らかになっている。

本実験解析は、壁間の中央位置までモデル化すると計算負荷が高く、困難であるため、2 領域に分けて解析を実施した。領域 1 は、構造材近傍での温度および速度変動に対する構造材の影響を評価するために壁面から 14mm ( $y/D=0.7$ ) までをモデル化した。領域 2 は、自由噴流における混合挙動（壁面の中央位置 90mm [ $y/D=4.5$ ] の近傍）を評価することとした。

#### 3.3 解析体系

Table 3.3~Table 3.4、Fig.3.1 に解析メッシュの概要およびメッシュ図を示す。領域 1 の解析範囲は、水平方向 410mm、鉛直方向 401mm とし、奥行き方向を仕切板表面より 14mm とした。水平方向および鉛直方向の解析領域は、試験体下部のノズルを構成する 4 つの矩形ブロックおよびブロックの傾斜部を内包するように設定した。メッシュサイズに関しては、中心噴流の左右 $\pm 80$ mm を 1mm、さらにその外側は 2mm、3mm、4mm と段階的に変更をした。鉛直方向は、ノズルより下部 (85mm) を 3mm と 2mm、ノズル上端から 50mm までを 2mm、50mm~150mm までを 1mm、150mm~250mm までを 2mm、それ以上を 3mm とした。奥行き方向は、熱応答供試板より 2mm までを 0.5mm、2mm

～4mm までを 1mm、4mm～14mm までを 2mm とした。

領域 2 の解析範囲は、水平方向および鉛直方向においては、領域 1 の範囲と同様とし、奥行き方向に関しては、1mm 間隔で 5mm とした。

本解析モデルの固体領域ノズル部を含む解析メッシュ数は、領域 1 が  $230 \times 11 \times 226$  (x×y×z) であり、領域 2 が  $230 \times 5 \times 226$  (x×y×z) とした。代表的なメッシュ幅は  $1\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 1\text{mm}$  角であった。

### 3.4 境界条件

Fig.3.2 に流入、流出部および壁の境界条件を示す。流出境界は、境界面の速度成分の連続と質量保存則が成立する条件とした。

今回の解析体系は解析領域の上部および側面のほぼ全域が流出境界となるため、出口境界での発散が生じやすい。そこで、流出部のメッシュは、ストレーナの役割をもたせるように出口境界面の法線方向に沿って 1 メッシュ分の透過率 (Permeability) をゼロとした面を全域に設定し、流速ベクトルが出口境界に対して垂直になるように設定した。また、出口境界の設定は 1 セルに対して 1 面のみ可能なため、解析体系上端部の左右の角には出口境界を指定しないセルを設定した。

流入の境界条件は、流速分布は平坦として速度変動をゼロとした。温度は一定である。壁境界に関しては、ノズルを形成する 4 つの矩形ブロックの上端を nonslip 境界、階段状にモデル化した傾斜部を freeslip 境界に設定した。壁面に関して、領域 1 は、壁表面の摩擦による速度境界層の影響を考慮するために壁境界を nonslip 境界、コード制約により、熱的境界を断熱境界に設定した。これにより、壁面近傍の境界層 (流速のみ) による温度変動特性の変化のみを評価することができる。領域 2 は、両方の壁境界を freeslip 境界とし、熱的境界を断熱境界に設定した。

### 3.5 解析手順

本解析を実行するにあたっては、数値発散を防ぐために以下に示す手順で計算を行った。

- ① 等速条件の流れ場を 1 次風上差分にて解く。
 

計算時間ステップ幅	: 0.2 (s)
シミュレーション時間	: 850.0 (s)
- ② 熱輸送を考慮した流れ場を 1 次風上差分にて解く。
 

計算時間ステップ幅	: 0.2 (s)
シミュレーション時間	: 2650.0 (s)
- ③ 高次差分に切り換えて流れ場を解く。(ここまでは定常計算オプション)
 

計算時間ステップ幅	: 0.0002 (s)
シミュレーション時間	: 5.0 (s)
- ④ 高次差分による過渡計算の実行 (各タイムステップで収束判定を行う)

計算時間ステップ幅 : 0.0002(s)

シミュレーション時間 : 5.00 (s)

- ⑤ 初期時間を 0.0(s)に設定し、高次差分による過渡計算を継続時間間隔 0.01(s)で 1024 点の時系列データを収録する。

計算時間ステップ幅 : 0.0002(s)

シミュレーション時間 : 10.24 (s)

本解析の領域 1 は、富士通製のベクトル計算機 vpp300 にて、領域 2 は、富士通製のベクトル計算機 vpp300VA で実施した。シミュレーション時間 1 秒を行うのに要する時間は、領域 1 のナトリウム試験解析 (PLAJEST) で約 8 日、水試験解析 (WAJECO) で約 20 日、領域 2 のナトリウム試験解析 (PLAJEST) で約 5 時間、水試験解析 (WAJECO) で 10 時間であった。

#### 4. 水試験における解析の模擬性

3本鉛直壁面噴流体系の水試験およびナトリウム試験について、準DNSコードDINUS-3を用いた3次元熱流動解析を実施した。これまでにナトリウム試験に関しては、壁近傍での温度変動特性を評価した<sup>[22]</sup>。水試験においては、壁から離れた流路中央での流体混合現象および乱流特性についてDNSの模擬性の評価を行った<sup>[20][21]</sup>。

本章では、既報<sup>[23]</sup>で示した水試験に対し、流体混合に対する壁の影響について速度場も含めて解析結果との比較を行いDNSの模擬性を評価した。以下に、その結果を示す。

##### 4.1 時間平均温度場および速度場におけるDNSの模擬性

Fig.4.1.1～Fig.4.1.3に実験および準DNSの解析によって得られた奥行き方向位置での時間平均温度コンター、時間平均流速ベクトルおよび温度変動強度コンターを示す。

実験の温度計測は、40.96秒間、速度計測は6秒間を3回、準DNSの解析は、10.24秒間の平均である。原点は、低温噴流の中心（水平方向： $x$ ）、壁表面（奥行き方向： $y$ ）、噴流吐出高さ（鉛直方向： $z$ ）とした。座標軸の方向は、水平方向（ $x$ ）は右方向、奥行き方向（ $y$ ）は、壁面から離れる方向、鉛直方向（ $z$ ）は流れ方向をそれぞれ正とした。各位置は、噴流吐出口のスリット幅（ $D=20\text{mm}$ ）で規格化した。

また、熱電対による計測結果と比較するために解析結果に対して非接地 $\phi 0.25\text{mm}$ の熱電対の時定数（ $5.7\text{ms}$ ）<sup>[29]</sup>に相当する一次遅れを加えて評価した。

なお、実験結果の $x/D=-1.75,-1.5,-0.5,1.75,2.0,2.75,4.25$ （図中に“T/Cs were Lost”に示した位置）の温度については、熱電対の断線によりデータの欠落が生じたため、当該位置近傍の健全熱電対による温度データに基づき補完した。

時間平均温度は、以下に示す式で無次元化を行った。

$$T_{avg}^* = \frac{(T_{avg} - T_c)}{\Delta T} \quad (4.1)$$

温度変動強度は、温度変動の二乗平均（標準偏差）として次の式で表される。

$$T_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T - T_{avg})^2}{N}} \quad (4.2)$$

上式により求められた温度変動強度は、以下の式に示すように噴流吐出温度差で無次元化した。

$$T_{RMS}^* = \frac{T_{RMS}}{\Delta T} \quad (4.3)$$

時間平均温度コンターおよび時間平均流速ベクトルをみると、DNS および実験ともに、低温噴流はほぼ鉛直方向に流れ、左右の高温噴流は、中心の低温噴流に向かって流れていることがわかる。実験では、壁面に近づくにつれて吐出温度を維持している噴流核が下流側にのびていることがわかる。また、流速は、壁面近傍で小さくなっている。DNS においては、噴流核の形状並びに壁面の摩擦の影響による壁近傍位置 ( $y/D=0.05$ ) での噴流速度の減衰が概ね実験結果と一致している。

温度変動強度に関して、DNS は、実験と比べて、温度変動強度の絶対値は大きく、温度変動の大きい領域が僅かに広がっているが、分布形状は実験結果と一致していることがわかる。

Fig.4.1.4～Fig.4.1.11 に実験および準 DNS の解析によって得られた各奥行き断面での時間平均温度および温度変動強度の水平方向分布の比較を示す。

時間平均温度に関して、DNS は、各奥行き断面における鉛直方向全ての位置において概ね全体の分布は実験結果と一致していることがわかる。

温度変動強度に関して、DNS は、実験よりも温度変動強度の値が大きく、温度変動強度を過大評価しているが、DNS および実験ともに分布の傾向はほぼ一致していることがわかる。

Fig.4.1.12～Fig.4.1.19 に実験および準 DNS の解析によって得られた各奥行き断面での水平方向流速成分 ( $u$  方向) および鉛直方向流速成分 ( $w$  方向) の水平方向分布の比較を示す。水平方向流速成分 ( $u$ )、鉛直方向流速成分 ( $w$ ) の時間平均値は、それぞれ以下に示す式を用いた。無次元化は噴流平均吐出速度  $V_{space}$  で行った。

$$u_{avg}^* = \frac{u_{avg}}{V_{space}} \quad (4.4)$$

$$w_{avg}^* = \frac{w_{avg}}{V_{space}} \quad (4.5)$$

水平方向流速成分に関して、DNS と実験を比べると、奥行き断面  $y/D=0.5$ 、 $0.2$ 、 $0.05$  での鉛直方向位置  $z/D=3.5$ 、 $5.0$  で僅かに差異が生じていることがわかる。これは、実験での低温噴流が僅かにプラス側の高温噴流側に傾いていると推測されるが、分布の傾向はほぼ一致していることがわかる。

鉛直方向流速成分に関して、DNS および実験ともに分布の傾向は一致していることがわかる。実験は、水平方向流速成分と同じ位置で、低温噴流が右側の高温噴流側に僅かに傾いていることがわかる。

Fig.4.1.20～Fig.4.1.21 に実験および準 DNS の解析によって得られた各奥行き断面での時間平均温度および温度変動強度の鉛直方向分布の比較を示す。

時間平均温度に関して、DNS は、各奥行き断面での水平方向全ての位置ともにほぼ実験結果と一致していることがわかる。

温度変動強度に関して、DNS は、実験と比べて、温度変動強度の値が大きくなっているが、分布の形状はほぼ一致していることがわかる。

Fig.4.1.22～Fig.4.1.23 に実験および準 DNS の解析によって得られた各奥行き断面での水平方向流速成分 (u 成分) および鉛直方向流速成分 (w 成分) の鉛直方向分布の比較を示す。

水平方向流速成分に関して、DNS および実験ともに、ほぼ同様な分布形状を示していることがわかる。しかし、奥行き方向位置  $y/D=0.5$ 、 $0.2$ 、 $0.05$  では、DNS は実験と比べ、ピークの発生位置が下流側に存在していることがわかる。

鉛直方向流速成分に関して DNS は、実験とほぼ同様な分布となっていることがわかる。また、DNS では、水平方向流速成分と同様にピーク値の発生位置が下流側であることがわかる。

Fig.4.1.24 に実験および準 DNS の解析によって得られた各奥行き断面における温度変動強度の最大値を奥行き方向に並べた分布の比較を示す。プロット位置は、横軸が  $y/D=-0.1\sim 0.6$  と  $-1.0\sim 5.0$  の 2 領域を示した。

DNS および実験をみると、奥行き方向位置  $y/D=0.5$  から壁面に近づくに従い徐々に大きくなり、最大値を示した後に、さらに壁面に近づくにつれて小さくなることがわかる。DNS の最大値は異なるものの、実験の傾向を再現していることがわかる。また、壁面近傍位置  $y/D=0.05$  と壁間の中央位置  $y/D=4.25$  の温度変動強度を比べると、実験は、 $y/D=4.25$  の位置より  $y/D=0.05$  の位置の方が僅かに温度変動強度は小さく、DNS は、 $y/D=4.25$  の位置より  $y/D=0.05$  の位置の方が温度変動強度は大きくなっていることがわかる。

## 4.2 温度変動挙動における DNS の模擬性

Fig.4.2.1 に実験および準 DNS の解析によって得られた各奥行き断面の温度変動強度が最大値となる位置における温度変動パワースペクトル密度 (以下、PSD) の比較を示す。PSD は、高速フーリエ変換 (FFT) を用いて求めた。スペクトルの平滑化の手法として、窓の大きさ 512 データ (時間間隔 5.12 秒) のガウス窓を設定し、この窓関数を全データに乗じて、温度変動のパワーを算出した。その際、得られたパワーに窓関数による低下した割合の補正を行った。各グラフの横軸は周波数成分、縦軸は噴流吐出温度差で規格化した無次元パワー (s) である。

DNS および実験をみると、壁面に近づくにつれて低周波数成分のパワーが大きくなっていることがわかる。実験は、壁面に近づくにつれて卓越周波数成分が減衰しているのに対し、DNS では、壁面から距離によらずほぼ同じ位置で卓越周波数成分が存在していることがわかる。また、高周波数成分のパワーが実験より DNS の方が僅かに大きくなっていることがわかる。



Fig.4.2.2 に実験および準 DNS の解析によって得られた各奥行き断面の温度変動強度が最大値となる位置における水平方向流速変動パワースペクトル密度（以下、PSD）の比較を示す。PSD は、窓の大きさを 128 データとして高速フーリエ変換処理を行い、窓を 1 データ毎にずらして全データに渡って処理した結果を平均化することより求めた。フーリエ変換処理は、瞬時の無次元流速に対して行ったため、得られた PSD の次元は(s)となる。

DNS および実験を奥行き断面で比べると、ほぼ同様な周波数で卓越周波数成分が存在していることがわかる。また、壁面近傍位置  $y/D=0.05$  では、DNS および実験の卓越周波数成分が消滅していることが確認できる。

#### 4.3 乱流 2 次モーメントにおける DNS の模擬性

Fig.4.3.1～Fig.4.3.2 に実験および準 DNS の解析によって得られた  $x-z$  平面における乱流 2 次モーメントコンターを示す。Fig.4.3.1 は垂直応力 ( $\overline{u'u'}$ 、 $\overline{w'w'}$ )、Fig.4.3.2 は剪断応力 ( $\overline{w'u'}$ ) である。

垂直応力  $\overline{u'u'}$ 、 $\overline{w'w'}$  および剪断応力  $\overline{w'u'}$  に関して、DNS と実験の絶対値を比べると、DNS の方が全体的に大きくなっていることがわかる。

水平方向の垂直応力  $\overline{u'u'}$  に関して、DNS と実験をみると、実験は、 $y/D=0.5$  の位置から壁面に近づくにつれて垂直応力は徐々に低下する傾向を示し、DNS では、 $y/D=0.2$  の位置で値が大きくなっていることがわかる。また、壁間の中央位置  $y/D=4.25$  では、DNS および実験ともに垂直応力の値は大きくなっていることがわかる。鉛直方向の垂直成分  $\overline{w'w'}$  に関して、DNS と実験を比べると、全体的な分布形状はほぼ一致していることがわかる。噴流の振動に起因する剪断応力  $\overline{w'u'}$  に関して、実験は、壁面に近づくにつれて絶対値が減少しているのに対し、DNS では、 $y/D=0.2$  の位置で大きくなっていることがわかる。奥行き方向位置  $y/D=4.25$  では、実験と比べて、DNS の絶対値が小さくなっていることがわかる。

Fig.4.3.3～Fig.4.3.10 に実験および準 DNS の解析によって得られた各奥行き断面での垂直応力 ( $\overline{u'u'}$ 、 $\overline{w'w'}$ ) の水平方向分布の比較を示す。横軸は水平方向位置、縦軸は噴流吐出流速で規格化した乱流 2 次モーメントである。

DNS において、水平方向成分および鉛直方向成分は、奥行き方向位置  $y/D=0.5$ 、 $0.2$ 、 $0.05$  の低温噴流と高温噴流がぶつかる鉛直方向位置  $z/D=3.5$ 、 $5.0$  で、DNS での垂直応力の値は、実験と比べ大きくなっていることがわかる。壁間の中央位置  $y/D=4.25$  では、DNS の方が実験と比べ垂直応力の値が小さくなっているが、全体的な分布傾向はほぼ実験と一致していることがわかる。

Fig.4.3.11～Fig.4.3.14 に実験および準 DNS の解析によって得られた各奥行き断面での剪断応力 ( $\overline{w'u'}$ ) の水平方向分布の比較を示す。横軸と縦軸は前図と同じである。

DNS および実験ともに垂直応力と同様に低温噴流と高温噴流がぶつかる位置

( $z/D=3.5, 5.0$ ) で剪断応力は、大きな値を示していることがわかる。また、壁間の中央位置  $y/D=4.25$  では、実験の方が DNS より剪断応力の値は大きくなっていることがわかる。

## 5. 準 DNS による水とナトリウムの噴流間混合特性の比較

水およびナトリウム試験による DNS の模擬性について、既報<sup>[20]・[22]</sup>および 4 章で示した。本章では、準 DNS による解析結果を基に、水とナトリウムの物性の違いによる噴流間混合特性の評価を行った。以下に、その結果を示す。

### 5.1 時間平均温度場および速度場における水とナトリウムの比較

Fig.5.1.1～Fig.5.1.3 に水およびナトリウムの解析によって得られた各奥行き方向位置での時間平均温度コンター、温度変動強度コンターおよび時間平均ベクトルの比較を示す。時間平均化は全計算データ 1024 (10.24 秒間) の平均である。各位置の原点および規格化は前図の Fig.4.1.1～Fig.4.1.3 と同じである。また、解析結果間の比較なので、T/C の遅れ時間は考慮していない。

時間平均温度および温度変動強度は、式(4.1)に示すように無次元化した。また、温度変動強度は、式(4.2)で温度変動の二乗平均(標準偏差)とし、式(4.2)で求められた温度変動強度は式(4.3)で無次元化を行った。

時間平均温度コンターおよび時間平均流速ベクトルみると、水とナトリウムは、ほぼ同様な温度場となっており、左右の高温噴流は中心の低温噴流側に傾いて流れていることがわかる。壁面に近づくにつれて高温噴流の領域が下流側に延びており、高温噴流が低温噴流に向かって流れる偏りが大きくなっていることがわかる。また、壁面の摩擦の影響により壁近傍での噴流速度が低下していることが確認できる。

温度変動強度については、水およびナトリウムともに、ほぼ同様な分布形状を示しており、低温噴流と高温噴流がぶつかる領域で温度変動強度が大きくなっていることが確認できる。しかし、ナトリウムの方が水よりも温度変動の大きい領域の広がり小さく、温度変動強度の絶対値が小さくなっていることがわかる。

Fig.5.1.4～Fig.5.1.11 に水およびナトリウムの解析によって得られた各奥行き断面における時間平均温度および温度変動強度の水平方向分布の比較を示す。

時間平均温度に関して、水とナトリウムを比べると、ほぼ同様な温度分布を示しているが、各奥行き方向における全ての鉛直方向位置  $z/D=1.0$  おいて、ナトリウムは、温度均一化が始まっていることが確認できる。また、壁間の中央位置  $y/D=4.5$  では、水およびナトリウムともに、温度分布の平坦化が壁面近傍位置  $y/D=0.05$  より進んでいることがわかる。

温度変動強度に関しては、水とナトリウムでほぼ同様な分布傾向を示しているが、ナトリウムは、水よりも温度変動強度の値が小さくなっていることが確認できる。

Fig.5.1.12～Fig.5.1.19 に水およびナトリウムの解析によって得られた各奥行き断面における時間平均水平方向流速成分(x方向)および時間平均鉛直方向流速成分(z方向)の水平方向分布の比較を示す。水平方向流速成分(u)、鉛直方

向流速成分 ( $w$ ) の時間平均値は、それぞれ式 (4.4) (4.5) に示す式で平均化を行った。無次元化は噴流平均吐出速度  $V_{space}$  を用いた。

水平方向流速成分および鉛直方向流速成分に関して水およびナトリウムともに、各奥行き方向における全ての鉛直方向位置において同様な流速分布を示していることがわかる。

Fig.5.1.20～Fig.5.1.21 に水およびナトリウムの解析によって得られた各奥行き断面における時間平均温度および温度変動強度の鉛直方向分布の比較を示す。

時間平均温度に関して、水とナトリウムを比べると、水平方向位置  $x/D=\pm 2.25, \pm 1.2$  の上流側で僅かに差異が生じている。これは、前で述べたように、ナトリウムでは温度の均一化が  $z/D < 1.0$  ですでに始まっていることを示している。温度変動強度において、ナトリウムは、各奥行き方向における全ての鉛直方向位置で温度変動強度の値が水より小さくなっているが、分布の傾向はほぼ水と一致していることがわかる。

Fig.5.1.22～Fig.5.1.23 に水およびナトリウムの解析によって得られた各奥行き断面における水平方向流速成分 ( $u$ ) および鉛直方向流速成分 ( $w$ ) の鉛直方向流速分布の比較を示す。

水平方向流速成分および鉛直方向流速成分に関して水とナトリウムの流速分布はほぼ一致していることがわかる。

Fig.5.1.24～Fig.5.1.29 に水およびナトリウムの解析によって得られた時間平均温度および温度変動強度の奥行き方向分布の比較を示す。プロットした位置は  $x-z$  平面の中で混合に特徴のある位置として、 $x/D=-0.75, 0.5, 2.25$  で  $z/D=1, 3.5, 5, 10$  の各点とした。横軸が  $y/D=0.0\sim 0.8$  と  $0.0\sim 5.0$  の 2 領域の分布を示した。奥行き方向位置は、 $y/D=0.0$  が壁面であり、 $y/D=0.7$  が壁面から 14mm の位置で、 $y/D=4.5$  が流路の中央位置 90mm である。

時間平均温度に関しては、水およびナトリウムともにほぼ同一の分布であり、フラットな分布を示している。ただし、鉛直方向位置  $z/D=1.0$  では、水とナトリウムで混合する位置がずれているため僅かに差異が生じていることがわかる。

温度変動強度に関しては、水とナトリウムを比べると、ナトリウムの方が水より温度変動強度が小さくなっていることが確認できる。ナトリウムの壁面近傍では、ほぼフラットな分布を示し、温度変動強度が減衰していないことがわかる。一方、水の壁面近傍は、鉛直方向位置  $z/D=1.0$  を除いた全ての位置において温度変動強度が減衰していることがわかる。

Fig.5.1.30～Fig.5.1.35 に水およびナトリウムの解析によって得られた時間平均水平方向流速成分 ( $u$  方向) および時間平均鉛直方向流速成分 ( $w$  方向) の奥行き方向分布の比較を示す。プロット位置は前図と同じである。

水平方向流速成分および鉛直方向流速成分に関しては、水とナトリウムは、ほぼ同様な分布形状を示していることがわかり、壁面近傍では、特に鉛直方向流速成分について壁面の摩擦の影響で流速が減衰していることが確認できる。

Fig.5.1.36 に水およびナトリウムの解析によって得られた各奥行き断面での温度変動強度が最大となる位置における温度変動強度を奥行き方向に並べた分布を示す。図は、奥行き方向位置を示す横軸が  $y/D=-0.2\sim 0.8$  と  $-1.0\sim 5.0$  の 2 領域を示した。

ナトリウムは、壁面に近づくにつれて、奥行き方向位置  $y/D=0.2$  付近まで僅かに変動強度が大きくなる傾向を示し、その後、壁面近傍まではほぼフラットな分布を示していることがわかる。これに対し、水は、奥行き方向位置  $y/D=0.7$  から壁面に近づくにつれて温度変動強度は一旦大きくなり、その後、壁面に近づくと減衰する傾向を示していることがわかる。また、壁間の中央位置  $y/D=4.5$  と壁面近傍位置  $y/D=0.025$  を比べると、ナトリウムは、 $y/D=4.5$  と  $y/D=0.05$  でほぼ同様な値を示しているのに対し、水では、 $y/D=4.5$  より  $y/D=0.05$  の方が僅かに大きくなっていることがわかる。

## 5.2 温度変動挙動における水とナトリウムの比較

Fig.5.2.1 に水およびナトリウムの解析によって得られた各奥行き断面での温度変動強度が最大となる位置における温度の時間変化を示す。プロット位置は、横軸が  $0\sim 10\text{sec}$  と  $0\sim 3\text{sec}$  の 2 領域である。

水とナトリウムの時間変化を比べると、ナトリウムは、水より振幅が減少しており、比較的周期的な変動が見られることがわかる。これに対し、水は、より複雑な波が見られランダム変動が重畳していることがわかる。

Fig.5.2.2 に水およびナトリウム解析によって得られた各奥行き断面での瞬時の水平方向分布を示す。

水平方向分布みると水およびナトリウムともに、噴流の振動により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わかる。ナトリウムは、水と比べると、温度が最も低くなる位置が明瞭に確認でき、低温噴流と高温噴流が混合する位置 ( $x/D=\pm 1.5$  付近) がゆるやかな温度勾配を示すことがわかる。一方、水は、低温噴流と高温噴流が混合する位置で、低温と高温の水が交互に入り混り、複雑な分布をしていることが確認できる。

Fig.5.2.3～Fig.5.2.4 に水およびナトリウム解析によって得られた各奥行き断面での温度変動強度が最大値となる位置における温度変動および水平方向流速変動のパワースペクトル密度の比較を示す。手法については、4.2 節と同様な手法とした。

温度変動のパワースペクトル密度に関して、水とナトリウムでは、ほぼ同様な位置で卓越周波数成分が存在し、ナトリウムの方が僅かであるが高周波数成分が水より小さくなっていることがわかる。また、 $y/D=4.25, 0.5$  の位置での低周波数成分は、水とナトリウムともに同様な分布を示しているのに対し、 $y/D=0.3, 0.2, 0.1, 0.05$  の位置では、ナトリウムの低周波数成分が水より小さくなっていることがわかる。

水平方向流速成分に関して、水とナトリウムを比べると、ほぼ同様な位置で卓越周波数成分が存在し、壁面に近づくにつれて卓越周波数成分が減衰する傾向を示し、壁面近傍位置  $y/D=0.05$  では、卓越周波数成分が消滅するなど、プロファイルが良く一致していることがわかる。

### 5.3 レインフローによる Peak-To-Peak 値の水とナトリウムの比較

構造材の熱疲労を評価する上で、波形解析により温度変動の振幅と頻度を求める必要がある。そこで、解析で得られた流体中の温度変動に対して、水とナトリウムで波形解析を行い、その相違を比較した。今回の波形解析にはレインフローを用いた。レインフロー法はランダム波を多層の屋根と見なして、全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>[28]</sup>。計測点は各奥行き断面で温度変動強度が最大値となる位置とした。

Fig.5.3.1 にレインフロー法より求めた各奥行き断面における温度変動の周期 ( $\Delta t$ ) および振幅 ( $\Delta T^*$ ) のヒストグラムの比較を示す。ヒストグラムをとる横軸の範囲は周期 0.0~1.0 秒の範囲で、分割幅は 0.1 秒とし、振幅は 0.0~1.0 の範囲で分割幅は 0.1 とした。縦軸は各区分データにおける波の数を計算時間 (10.24sec) で割った値である。

周期に関して水とナトリウムを比べると、周期 0.0~0.1 秒の範囲で水の方がナトリウムより頻度が大きくなっている。水の場合、小さな波が多く、ランダムな重畳した波が含まれていることを示している。その他の範囲に関しては、水とナトリウムともに同様な頻度であることがわかる。また、周期 0.0~0.1 秒の範囲を各奥行き方向位置でみると、ナトリウムは、 $y/D=0.5$  の位置で頻度が大きく、水は  $y/D=0.2$  で頻度が大きくなっていることがわかる。

振幅に関して水とナトリウムは、ともに振幅 0.0~0.1 の範囲で頻度が大きく、特に水において、小さな温度変動が多く含まれていることがわかる。また、振幅 0.0~0.1 の範囲を各奥行き方向位置で比べると、ナトリウムは、 $y/D=4.5, 0.5, 0.2$  までは、ほぼ同様な頻度を示しているが、壁面近傍の  $y/D=0.05$  では頻度が小さくなっていることがわかる。水は、壁面に近づくにつれて僅かに頻度が大きくなる傾向を示している。一方、振幅 0.6 以上の大きな波についてみると、水では 0.8 以上の波に比較的頻度があるのに対して、ナトリウムでは、0.6~0.9 に頻度が見られ、0.9 以上の大きな波が少ないことがわかる。

### 5.4 乱流 2 次モーメントにおける水とナトリウムの比較

Fig.5.4.1 および Fig.5.4.2 に水およびナトリウムの解析によって得られた  $x-z$  平面における奥行き方向位置での乱流 2 次モーメントコンターを示す。Fig.5.4.1 は垂直応力 ( $\overline{u'u'}$ 、 $\overline{v'v'}$ 、 $\overline{w'w'}$ )、Fig.5.4.2 は剪断応力 ( $\overline{u'v'}$ 、 $\overline{v'w'}$ 、 $\overline{w'u'}$ ) である。

垂直応力に関しては、水平方向成分の垂直応力  $\overline{u'u'}$  の水とナトリウムは、

$y/D=0.2$  付近で大きくなっており、その位置より壁面に近づくと垂直応力は低下している。また、壁間の中央位置  $y/D=4.5$  では水平方向の垂直応力は極大値を示していることがわかる。垂直応力  $\overline{w'w'}$  の水とナトリウムは、ほぼ同様な分布形状を示していることがわかる。奥行き方向の垂直成分  $\overline{v'v'}$  は、水およびナトリウムともに、 $y/D=0.5$  の位置で極大を示し壁面に近づくと徐々に絶対値が小さくなる傾向であることがわかる。

剪断応力に関して、奥行き方向に起因する成分  $\overline{u'v'}$ 、 $\overline{v'w'}$  は、水およびナトリウムともに、ほぼ同様な分布形状を示し、 $y/D=0.5$  から壁面近傍にかけて徐々に絶対値が減少していることがわかる。一方、噴流振動に起因する成分  $\overline{w'u'}$  の水およびナトリウムは、ほぼ同様な分布形状を示しており、 $y/D=0.2$  の位置で極大を示し、壁面に近づくと徐々に絶対値が低下していることがわかる。

Fig.5.4.3～Fig.5.4.14 に水とナトリウムの解析によって得られた奥行き断面での垂直応力の水平方向分布の比較を示す。横軸は水平方向位置、縦軸は噴流吐出流速で規格化した乱流2次モーメントである。

水平方向および鉛直方向成分の垂直応力を水とナトリウムで比較すると、各奥行き方向位置での鉛直方向全ての位置においてほぼ同様な分布を示し、壁間の中央位置  $y/D=4.5$  では、水およびナトリウムともに値が大きくなっていることがわかる。奥行き方向成分の垂直応力は、水およびナトリウムともに分布形状が一致していることがわかる。

Fig.5.4.15～Fig.5.4.26 に水およびナトリウムの解析によって得られた各奥行き断面による剪断応力の水平方向分布の比較を示す。横軸と縦軸は前図と同じである。

各成分の剪断応力に関して、水とナトリウムは、ほぼ同様な分布を示しており、低温噴流と高温噴流がぶつかる位置  $z/D=3.5$ 、 $5.0$  で剪断応力の値が大きくなっていることがわかる。また、壁面近傍位置  $z/D=0.05$  では、壁に平行な  $\overline{w'u'}$  成分において水およびナトリウムともに、壁面の摩擦の影響で剪断応力が減衰していることが確認できる。

## 5.5 乱流熱流束における水とナトリウムの比較

Fig.5.5.1 に水およびナトリウムの解析によって得られた  $x-z$  平面における奥行き方向位置での乱流熱流束コンターを示す。各乱流熱流束値は、噴流吐出流速と噴流吐出温度差で規格化した。

各成分の乱流熱流束に関して、水とナトリウムは、絶対値が異なるものの分布形状はほぼ一致していることがわかり、低温噴流と高温噴流のぶつかる領域付近で絶対値が大きくなっている。また、水とナトリウムともに、壁面近傍位置  $y/D=0.05$  で絶対値が減衰し、壁間の中央位置  $y/D=4.5$  では、絶対値が大きくなっていることがわかる。乱流熱流束の水平方向と鉛直方向成分の水とナトリウムでは、 $y/D=0.7$  の位置から壁面に近づくと、絶対値は一旦大きくなり、その

後壁面に近づくと小さくなる傾向を示す。奥行き方向成分は、壁面に近づくとつれて絶対値が小さくなる傾向を示している。

Fig.5.5.3～Fig.5.5.14 水およびナトリウム解析によって得られた各奥行き断面による乱流熱流束の水平方向分布の比較を示す。横軸は水平方向位置、縦軸は規格化した乱流熱流束である。

水とナトリウムを比べると、水平方向成分の乱流熱流束は、低温噴流と高温噴流がぶつかる領域付近 ( $z/D=3.5, 5.0, 7.5$ ) で、ナトリウムの方が僅かに絶対値が小さくなっているが、分布形状は一致している。乱流 2 次モーメントは水とナトリウムの場合で違いが小さいことから、ナトリウムの高熱拡散率の影響で乱流熱流束が水より小さくなっていると考えられる。奥行き方向および鉛直方向の乱流熱流束をみると、水およびナトリウムともにほぼ同様な分布を示し、壁面近傍位置  $y/D=0.05$  では、既報<sup>[21]</sup>で示したように、壁面の摩擦の影響で流体の混合が抑制され、乱流熱流束の絶対値が小さくなっていることがわかる。

## 5.6 流体混合過程に関する水とナトリウムの比較

Fig.5.6.1 および Fig.5.6.2 に壁面から最も離れた位置において、最大温度変動強度を示す位置を含む、ナトリウムと水の瞬時の速度場/温度場をそれぞれ示す。ベクトル図は、ベクトルが瞬時の流速、色が温度を示しており、左から右へ  $0.1s$  毎の瞬時ベクトルとなっている。白丸の箇所が最大温度変動強度を示す位置である。下の線図は、白丸の位置の温度/速度の時間変化を示す。速度は、水平(X)/奥行き(Y)/鉛直(Z)方向に分けて示している。各線図のカラーの縦線は、5枚のベクトル図に相当する時刻を示している。前述の通り、温度変動強度が最大になる位置は、低温噴流(ベクトル図の左側)と高温噴流(ベクトル図の右側)が接する箇所である。この位置では、ナトリウム/水とも高温流体と低温流体が入れ替わることによって、温度変動が発生していることがわかる。ナトリウムの場合、高温流体/低温流体の内部の温度分布は、比較的一様となっており、熱伝導率が大きい影響を受けていることがわかる。一方、水の場合、高温流体/低温流体内部にさらに細かい構造をもった温度分布が形成されていることがわかる。また、ナトリウムに比べ、水の場合は、高温流体と低温流体の境界の温度変化が急峻である。5.4 節に示した流速の 2 次モーメントにおいて、ナトリウムと水の空間分布はほぼ一致したことから、速度場はほぼ相似であると考えられる。温度変動については、噴流の振動に起因する卓越周波数成分はほぼ同じである。しかしながら、Fig.5.6.1 および Fig.5.6.2 の温度変動の時系列をみると、ナトリウムの場合卓越周波数成分が変動の主たる要因であるが、水の場合は、卓越周波数成分以外にも小さな変動が重畳していることがわかる。また、ナトリウムにおける温度変動は、水のものより振幅が小さくなっている。さらに、ナトリウムの温度変動波形は、比較的正弦波に近い形状となっているが、水の場合は、矩形波に近い形状となっている。これらの要因によって、ナトリウムに比べ、水の温度変動強度が大きくなっていると考えられる。純粋な正弦波であれば、変動強度(変動の RMS 値)は、実振幅の 0.35 倍となるのに



対し、矩形波の場合、変動強度は実振幅の 0.5 倍となる。ナトリウムと水では、温度変動波形の違いが、温度変動強度の違いの要因の一つであると考えられる。

Fig.5.6.3～Fig.5.6.8 に、Fig.5.6.1、Fig.5.6.2 で示した奥行き断面から壁面に近づいた断面での、ナトリウムと水の瞬時の速度場/温度場をそれぞれ示す。壁面からの距離は、 $y/D=0.5$ 、 $0.2$ 、 $0.05$  である。これによると、壁面からの距離によって、ナトリウムの場合は、温度変動の波形には大きな違いは見られないが、水の場合は、波形が徐々に矩形波に近づいていることがわかる。水では、壁面から離れた位置では、小さな温度の異なる流体塊による温度変動が見られたが、壁面に近い位置では、そのような流体塊はみられず、低温流体/高温流体の入れ替わることにより発生する温度変動が主体となっている。壁面より離れた位置では、小さな流体塊による温度変動が噴流振動による温度変動成分に重畳していることにより、逆に温度変動強度が低下している可能性がある。

Fig.5.6.9 に壁面から離れた位置、および壁面に近い位置での水平方向流速成分の PSD に対する温度変動の PSD の比を示す。PSD の比は、周波数成分毎に求めたものである。これによると、低周波数成分では、水とナトリウムでは PSD の比に大きな違いは見られないが、高周波数成分では、水は温度変動の PSD の方が速度変動の PSD に対して大きくなるのに対し、ナトリウムでは、温度変動の PSD が速度変動の PSD に対して小さくなっていることがわかる。速度/温度変動の強度は、流体内部での運動量/温度の拡散の逆数に対応していると考えられることから、Fig.5.6.9 は水とナトリウムのプラントル数の影響を示していると考えられる。

## 6. 結論

サーマルストライピング現象評価の一環として、これまで 3 本鉛直壁面噴流体系の水試験とナトリウム試験を対象として、準直接シミュレーション（準 DNS）コード DINUS-3 を用いた 3 次元熱流動解析を行った。水試験に関して、実験と解析結果との流速場を含めた比較を行い DNS の模擬性を評価し、解析の有効性を確認した。この準 DNS による解析結果をもとに、水とナトリウムの物性の違いによる噴流間混合特性の評価を行った。以下にその結果を示す。

### ○ 水試験における解析の模擬性

- ・ 時間平均温度および時間平均流速において、準 DNS により実験を模擬できることが明らかになった。また、温度変動強度については、準 DNS の解析は実験結果よりも温度変動強度は大きく過大評価しているが、空間分布の傾向はほぼ実験結果と一致していることがわかった。
- ・ 温度変動のパワースペクトル密度について、実験結果は壁面に近づくにつれて卓越周波数成分が小さくなるのに対し、準 DNS では、壁面からの距離によらず、同程度のパワーを有する卓越周波数成分が存在していた。また、水平方向流速変動のパワースペクトル密度については、準 DNS による解析結果は、実験とほぼ同じ位置で卓越周波数成分が存在するとともに、構造材近傍では、実験と同様に卓越周波数成分が減衰した。
- ・ 乱流 2 次モーメントに関して、準 DNS により得られた水平方向と鉛直方向の垂直応力および剪断応力は、実験結果と絶対値は異なっているが低温噴流と高温噴流が混合する位置で大きくなっており、分布の傾向は実験結果とほぼ一致した。

以上の実験との比較により、DINUS-3 を用いた準 DNS が平行 3 噴流における温度変動現象の物理を良く模擬できていると言える。

### ○ 準 DNS による水とナトリウムの噴流間混合特性の比較

- ・ 時間平均温度および時間平均流速に関しては、構造材近傍を含めて、水とナトリウムの違いは見られなかったが、温度変動強度においては、構造材近傍を含め、全体的にナトリウムの方が、水より温度変動強度が小さくなることがわかった。
- ・ 温度変動のパワースペクトル密度に関して、水とナトリウムでは、ほぼ同じ卓越周波数成分を有していた。また、ナトリウム試験解析における温度変動の高周波数成分のパワーが水より僅かに小さくなることがわかった。水平方向流速変動のパワースペクトル密度については、水およびナトリウムともに、

ほぼ同じ位置で卓越周波数成分が存在し、壁面に近づくにつれて消滅することがわかった。

- 乱流 2 次モーメントに関して、水平方向と鉛直方向の垂直応力並びに剪断力は、水とナトリウムでその空間分布が全ての奥行き方向位置 (y) において、ほぼ一致していることがわかった。
- 水平方向と鉛直方向の乱流熱流束においては、ナトリウム試験解析の方が、水に比べて、低温噴流と高温噴流がぶつかる位置で僅かに絶対値が小さくなっているが、分布形状は一致した。乱流 2 次モーメント (運動量拡散) は水とナトリウムの場合で違いが小さいことから、ナトリウムの高熱拡散率の影響により、乱流熱流束の絶対値が水に比べて小さくなっていると考えられる。
- 温度変動に関しては、ナトリウムの温度変動波形は、正弦波に近い形状となっている。水の場合、高温の領域と低温の領域の境界で温度勾配が大きく、領域の移動に伴う温度変動波形は、特に壁面近傍で矩形波に近い形状になっている。水とナトリウムの温度変動波形の違いが、温度変動強度の違いの要因の一つであることが明らかになった。
- 水平方向流速成分の PSD に対する温度変動の PSD の比において、低周波数成分の水とナトリウムでは PSD の比に大きな違いは見られないが、高周波数成分では、水では温度変動の PSD が速度変動の PSD に対して大きくなるのに対し、ナトリウムでは、熱伝導の影響により温度変動の PSD が速度変動の PSD に対し小さくなることがわかった。

これらの結果から、時間平均温度、速度に加え、温度変動の周波数特性に関して水試験結果によりナトリウム中での特性を評価可能であることがわかった。また、構造材近傍での温度変動特性は、水試験結果がナトリウム試験結果に比べ保守的となることが明らかになった。流体の温度変動が構造物に伝わる過程で一番大きな減衰は流体から壁への伝達過程にあることから、ナトリウム試験の重要性はやはり高い。例えば、流動側の変動特性 (振幅、周波数特性) は水試験で押さえ、流体から構造への伝達時の減衰については要素をうまく取り出したナトリウム試験によりその特性を抽出・一般化する方向が考えられる。このような形で実機評価に適用することにより、試験のコストを抑えて合理的な評価が可能になると考えられる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、本社 FBR サイクル開発推進部企画・調整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）の方々に多大なる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]五十嵐実、田中正暁、木村暢之、中根茂、川島滋代、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 一流体混合現象と構造材への温度変動伝達挙動の解明、JNC TN9400 2003-092、2003。
- [15]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.
- [16]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.
- [17]木村暢之、A. Tokuhiko、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 ー平行三噴流間の混合過程と吐出速度の影響一、JNC TN9400 2000-027、2000.
- [18]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 ー壁面近傍での混合現象の変化一、JNC TN9400 2001-030、2000.
- [19]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 ー平行三噴流間混合過程の数値解析と手法間の比較一、JNC TN9400 2000-099、2000.
- [20]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 ーDNS を用いた噴流間の流体混合現象の解明一、JNC TN9400 2000-108、2000.
- [21]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ー噴流間混合の乱流特性に対する DNS の模擬性評価一、JNC TN9400 2001-132、2002.
- [22]木村暢之、長澤一嘉、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現象の熱流動に関する研究 ーDNS を用いた平行三噴流ナトリウム試験解析一、JNC TN9400 2003-003、2002.
- [23]宮越博幸、長澤一嘉、木村暢之、三宅康洋、上出英樹、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 ー平行三噴流間混合の温度場と速度場一、JNC TN9410 2003-003、2003.
- [24]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ー平行三噴流ナトリウム試験一、JNC TN9400 2001-063、2001.
- [25]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ー流体ー構造間における温度変動の伝達挙動の評価一、JNC TN9400 2002-059、2002.
- [26]日本機械学会基準、配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針、JSME S 017-2003、2003.
- [27]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現象の熱流動に関する実験研究 ー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一、JNC TN9400 2003-077、2003.
- [28]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)
- [29]株式会社 岡崎製作所、接触式温度センサの基礎、TD1033、2002.

Table 2.3 Experimental Conditions.

Case	Left Jet			Center Jet			Right Jet		
	Velo. (m/s)	Re ( $\times 10^4$ )	Temp. ( $^{\circ}C$ )	Velo. (m/s)	Re ( $\times 10^4$ )	Temp. ( $^{\circ}C$ )	Velo. (m/s)	Re ( $\times 10^4$ )	Temp. ( $^{\circ}C$ )
Water (WAJECO)	0.5	1.5	39	0.5	1.3	29	0.5	1.5	39
Sodium (PLAJEST)	0.5	2.8	348	0.5	2.6	305	0.5	2.8	348

Table 3.1 Numerical Methods used in Experimental Analysis.

Analytical Code	DINUS-3
Turbulence Model	None(DNS)
Coordinate	Cartesian
Descretization	FDM
Time Integration	2nd-order Eler
Convection Term	3nd-order Upwind
Diffusion Term	2nd-order Central
Solution algorithm	Leap-Frog
Matrix Solver	ICCG

Table 3.2 Calculation Conditions.

Case		Left Jet			Center Jet			Right Jet		
		Velo. (m/s)	Re ( $\times 10^4$ )	Temp. ( $^{\circ}C$ )	Velo. (m/s)	Re ( $\times 10^4$ )	Temp. ( $^{\circ}C$ )	Velo. (m/s)	Re ( $\times 10^4$ )	Temp. ( $^{\circ}C$ )
Region1 (Wall Model)	Water	0.5	1.6	45	0.5	1.5	41	0.5	1.6	45
	Sodium	0.5	2.8	350	0.5	2.6	310	0.5	2.8	350
Region2 (Free Model)	Water	0.5	1.6	45	0.5	1.5	41	0.5	1.6	45
	Sodium	0.5	2.8	350	0.5	2.6	310	0.5	2.8	350

Table 3.3 Number of calculared Meshes in Analysis (Region1).

	DNS
x-mesh Number (Typical Mesh)	230 (1.0mm)
y-mesh Number (Typical mesh)	11 (0.5mm)
z-mesh Number (Typical mesh)	226 (1.0mm)

Table 3.4 Number of calculared Meshes in Analysis (Region2).

	DNS
x-mesh Number (Typical Mesh)	230 (1.0mm)
y-mesh Number (Typical mesh)	5 (0.5mm)
z-mesh Number (Typical mesh)	226 (1.0mm)

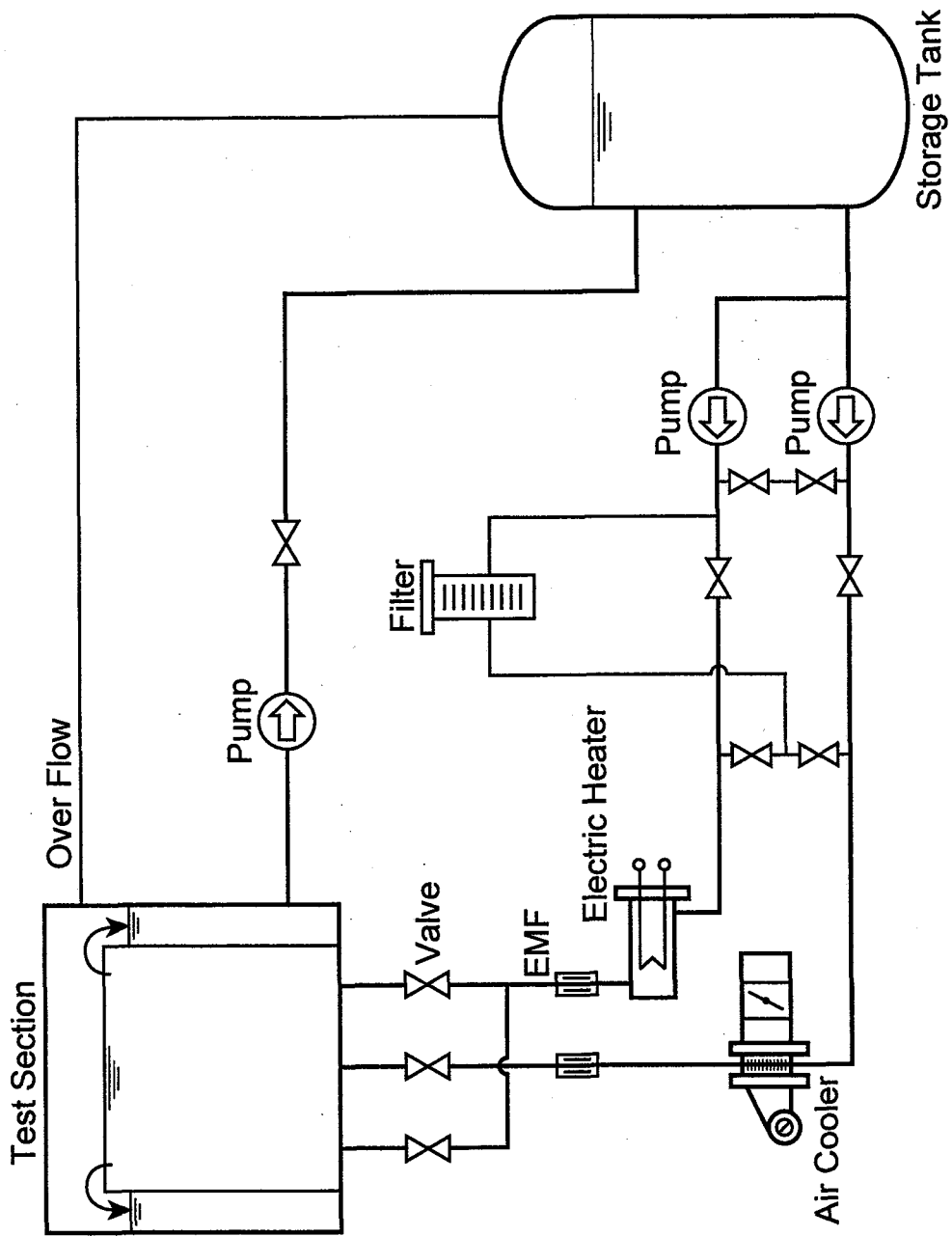


Fig. 2.1.1 Schematic of Experimental Loop (WAJECCO).



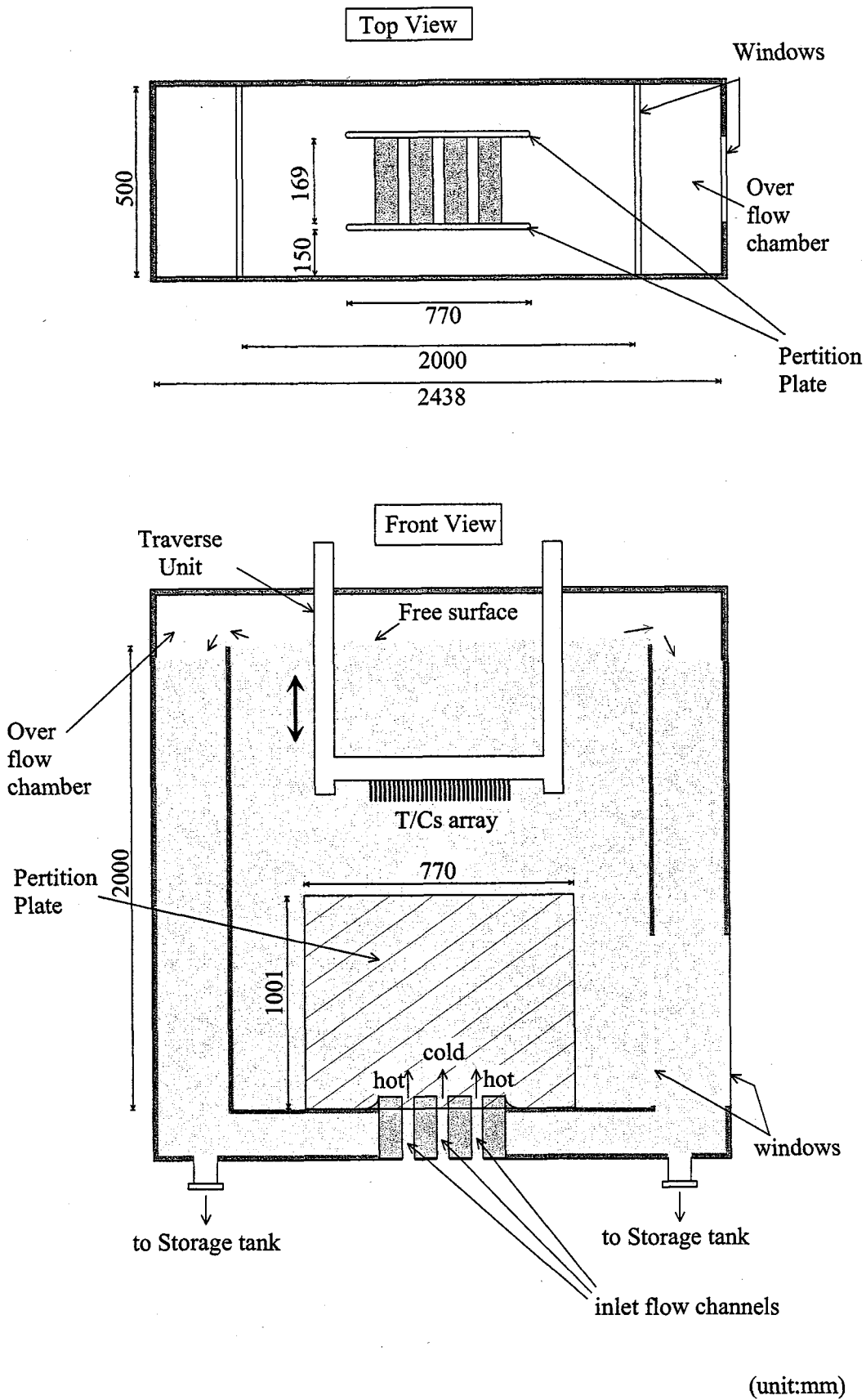


Fig.2.1.2 Schematic of Test Section (WAJECO).

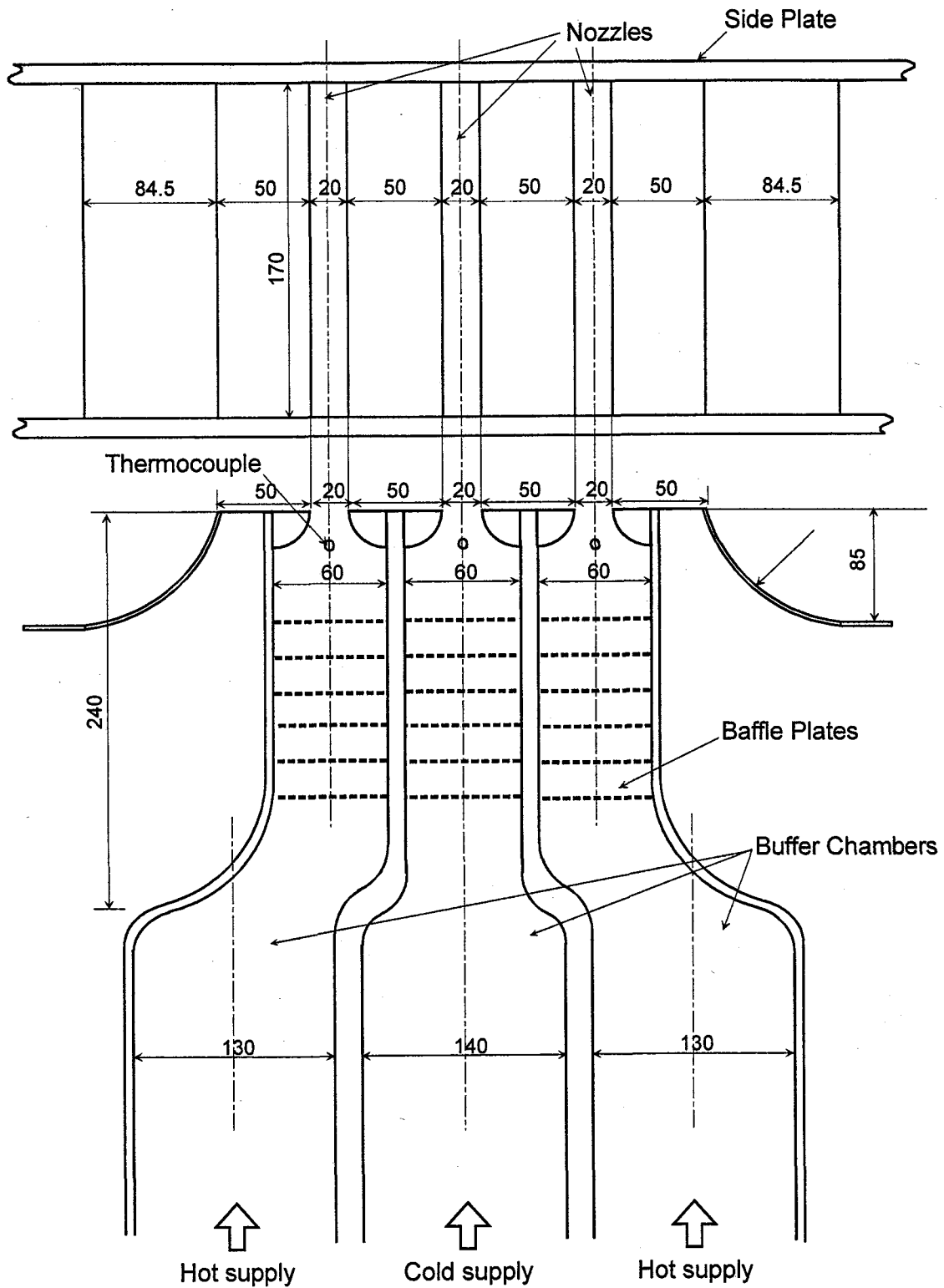


Fig. 2.1.3 Discharged Nozzles of Triple Jets (WAJECO).

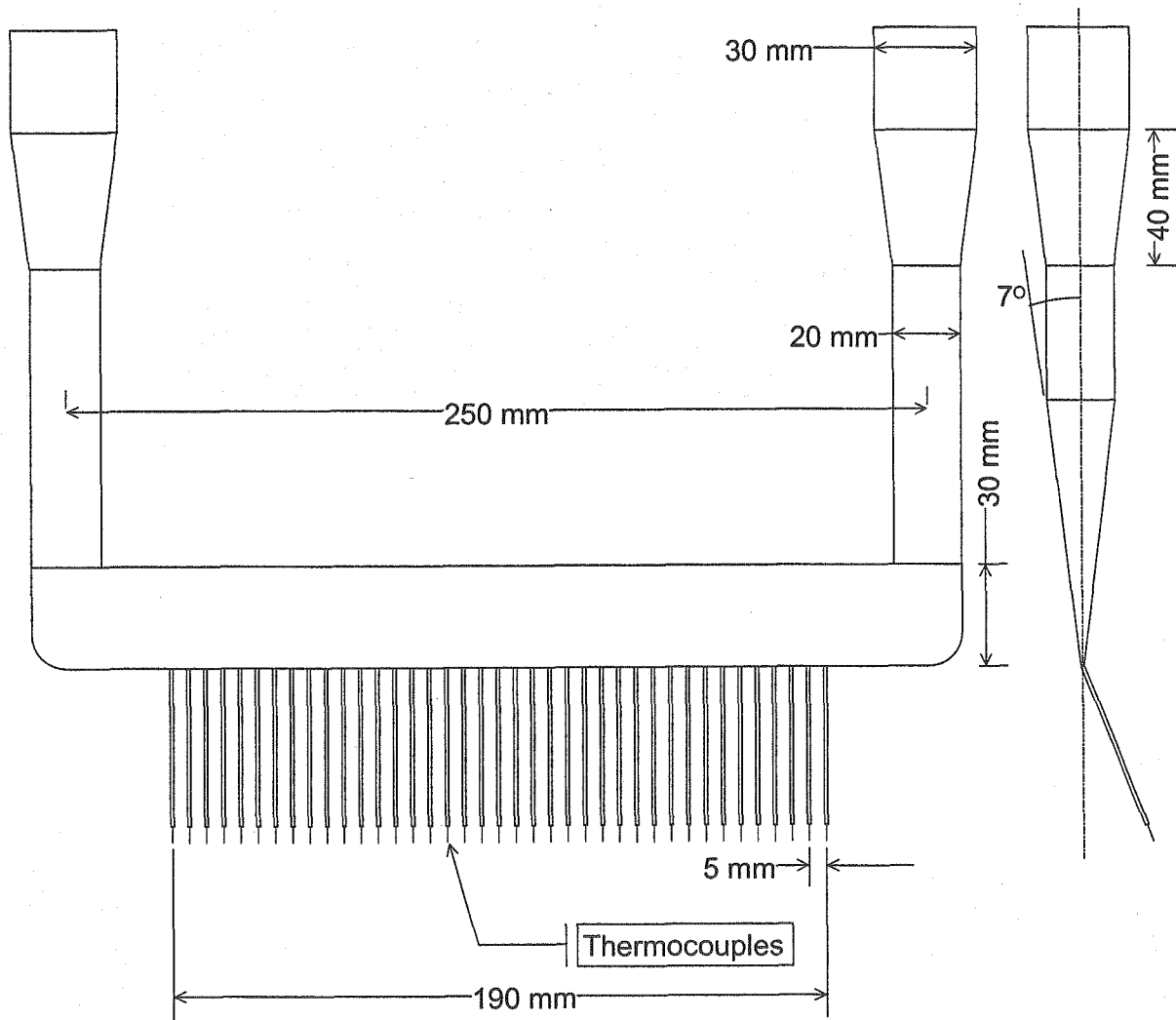


Fig.2.1.4 Thermocouples Tree (WAJECO).

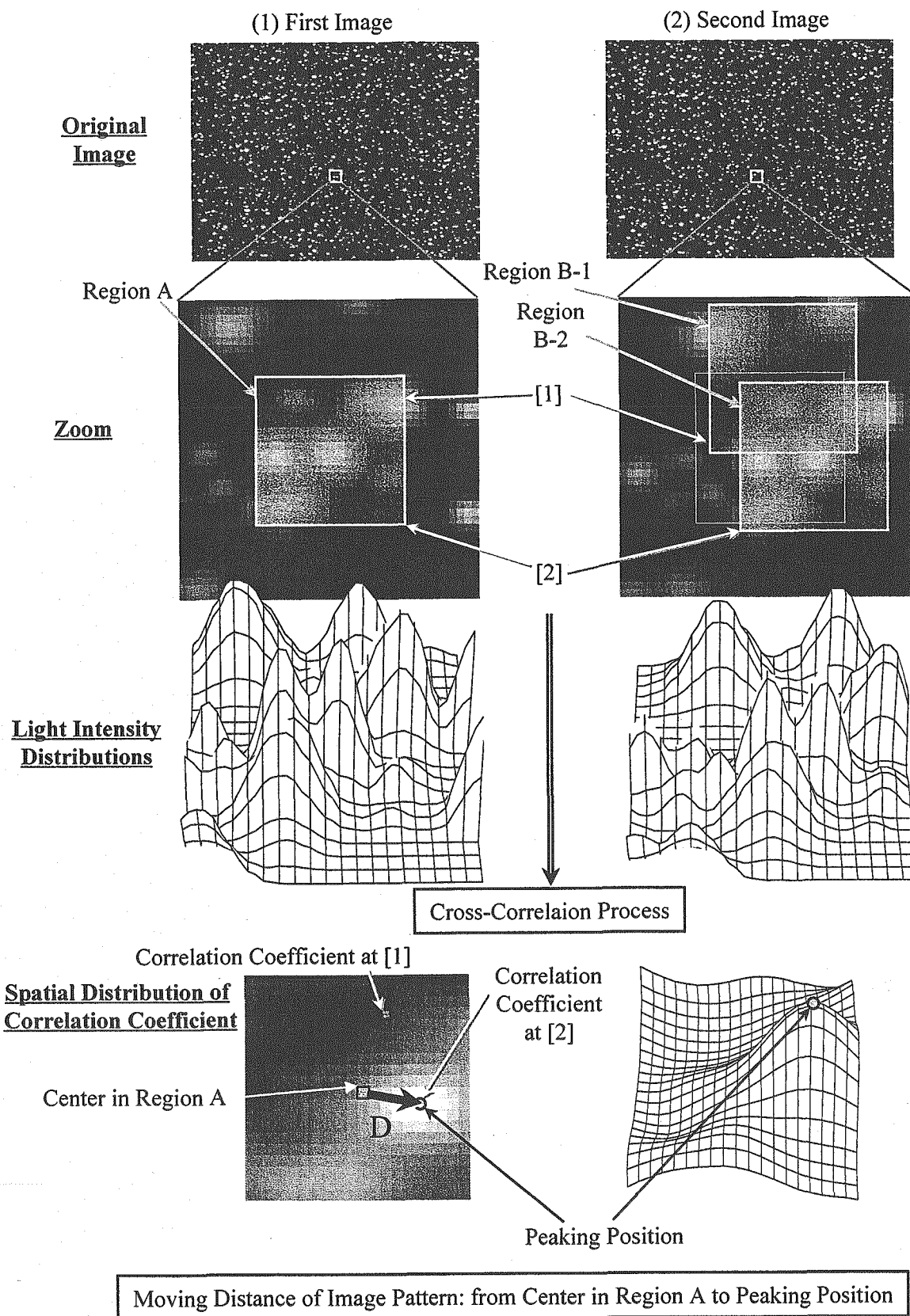


Fig. 2.1.5 Principle of PIV.

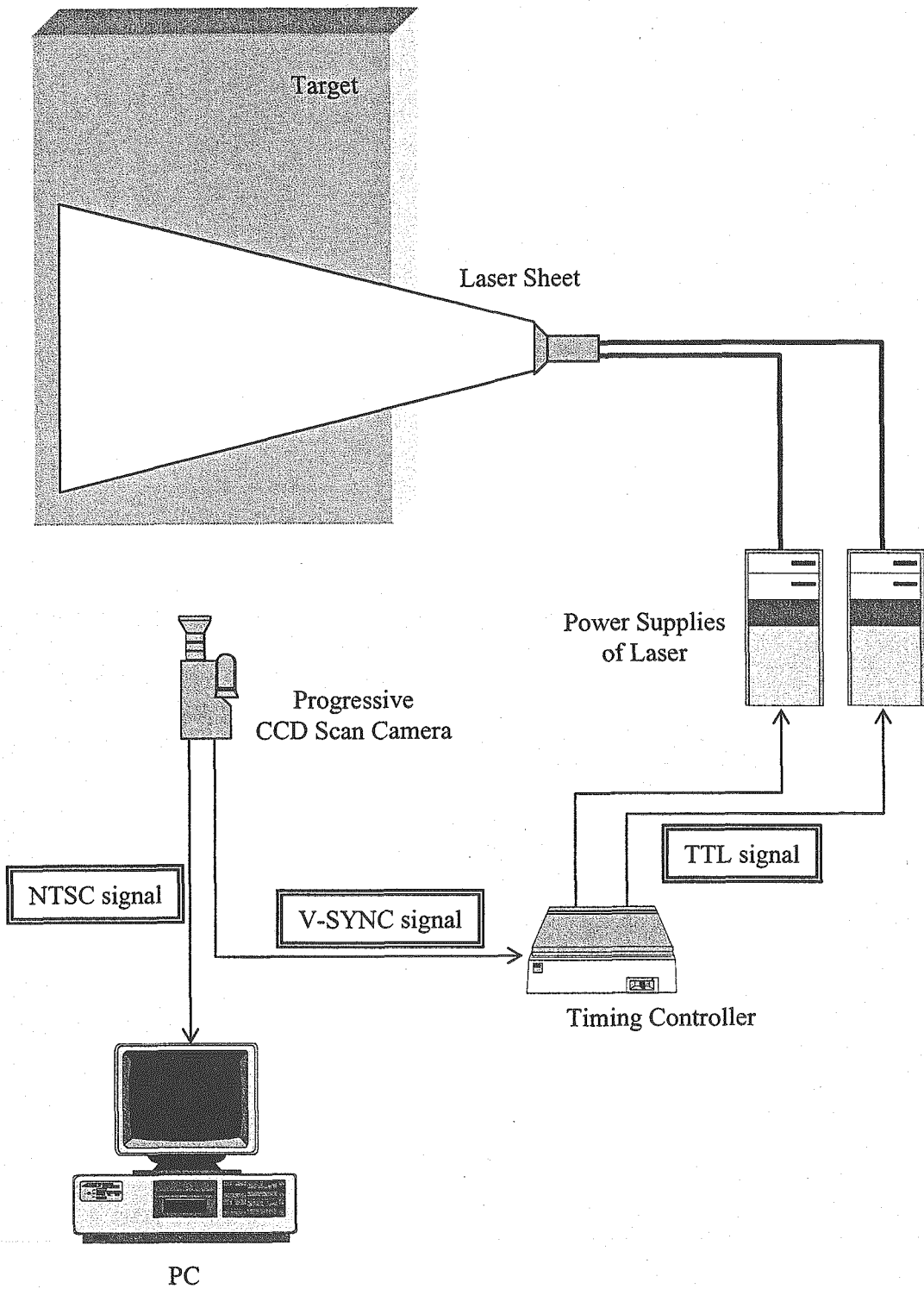


Fig. 2.1.6 Image Capturing System for PIV.

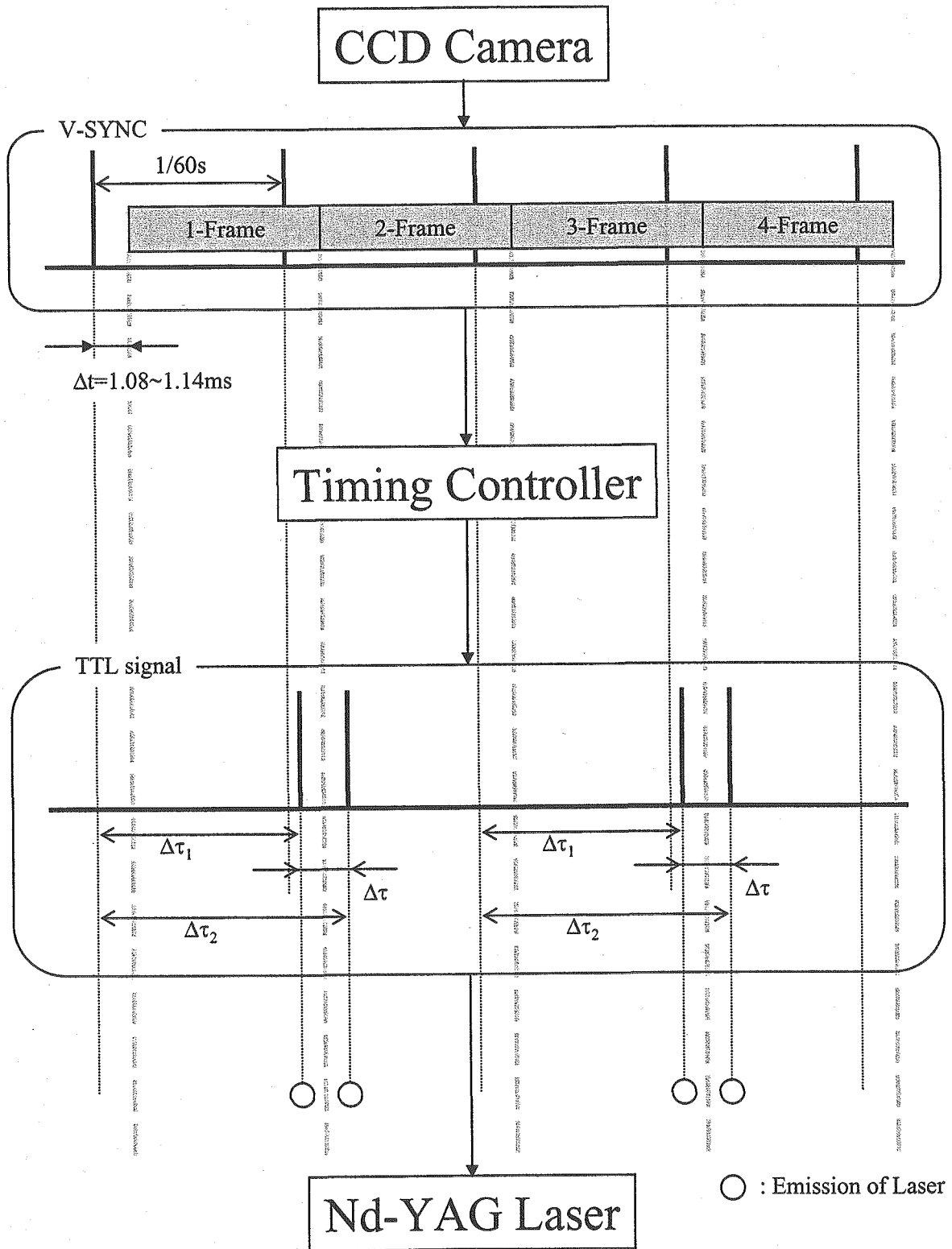
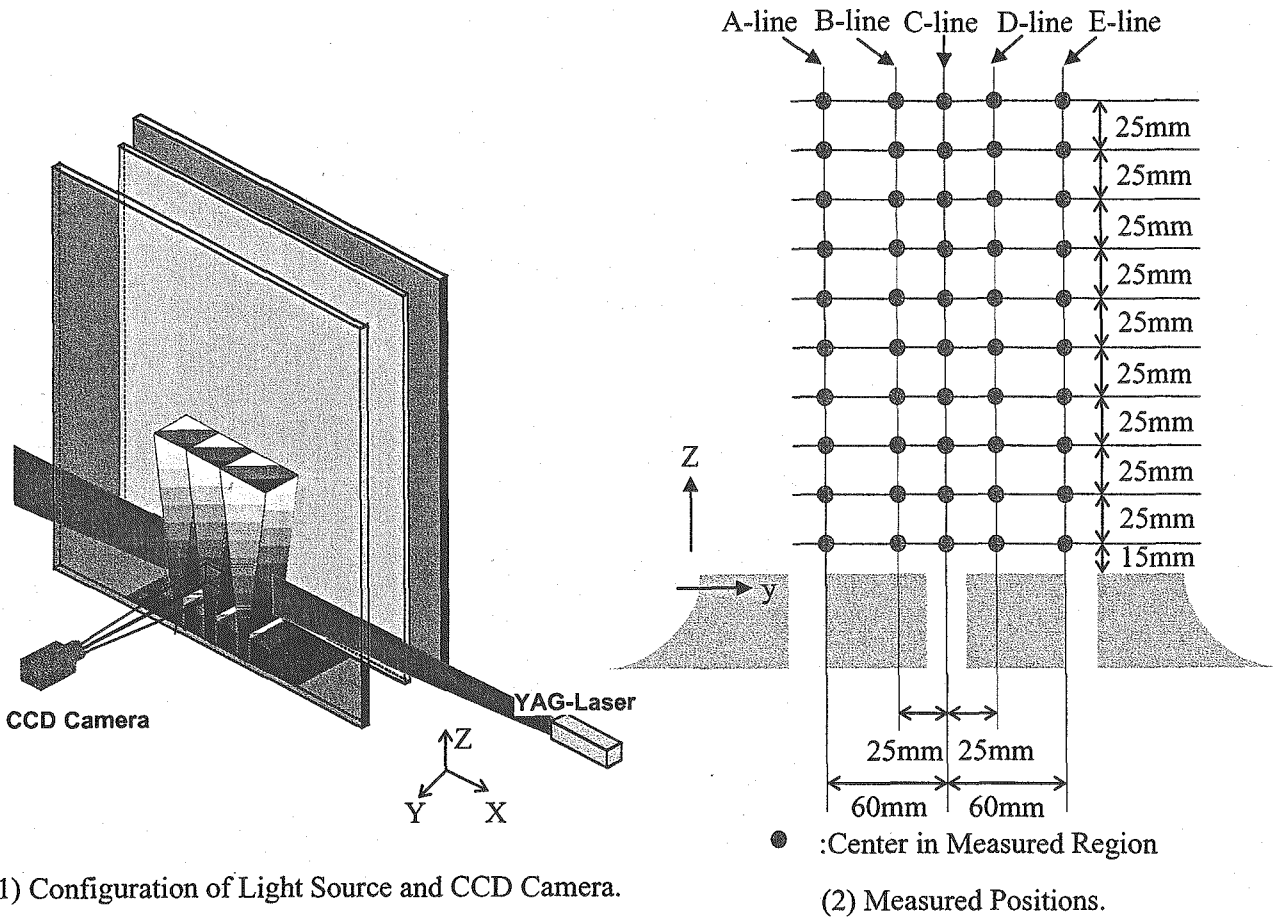
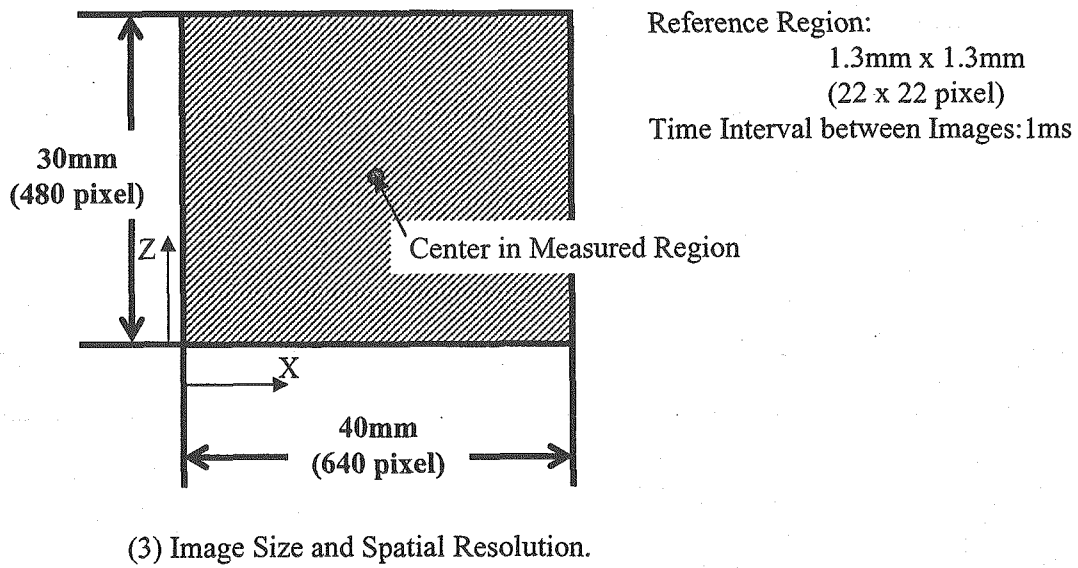


Fig. 2.1.7 Timing Charts of Signals in PIV System.



(1) Configuration of Light Source and CCD Camera.

(2) Measured Positions.



(3) Image Size and Spatial Resolution.

Fig. 2.1.8 Measured Positions for PIV in x-z plane.

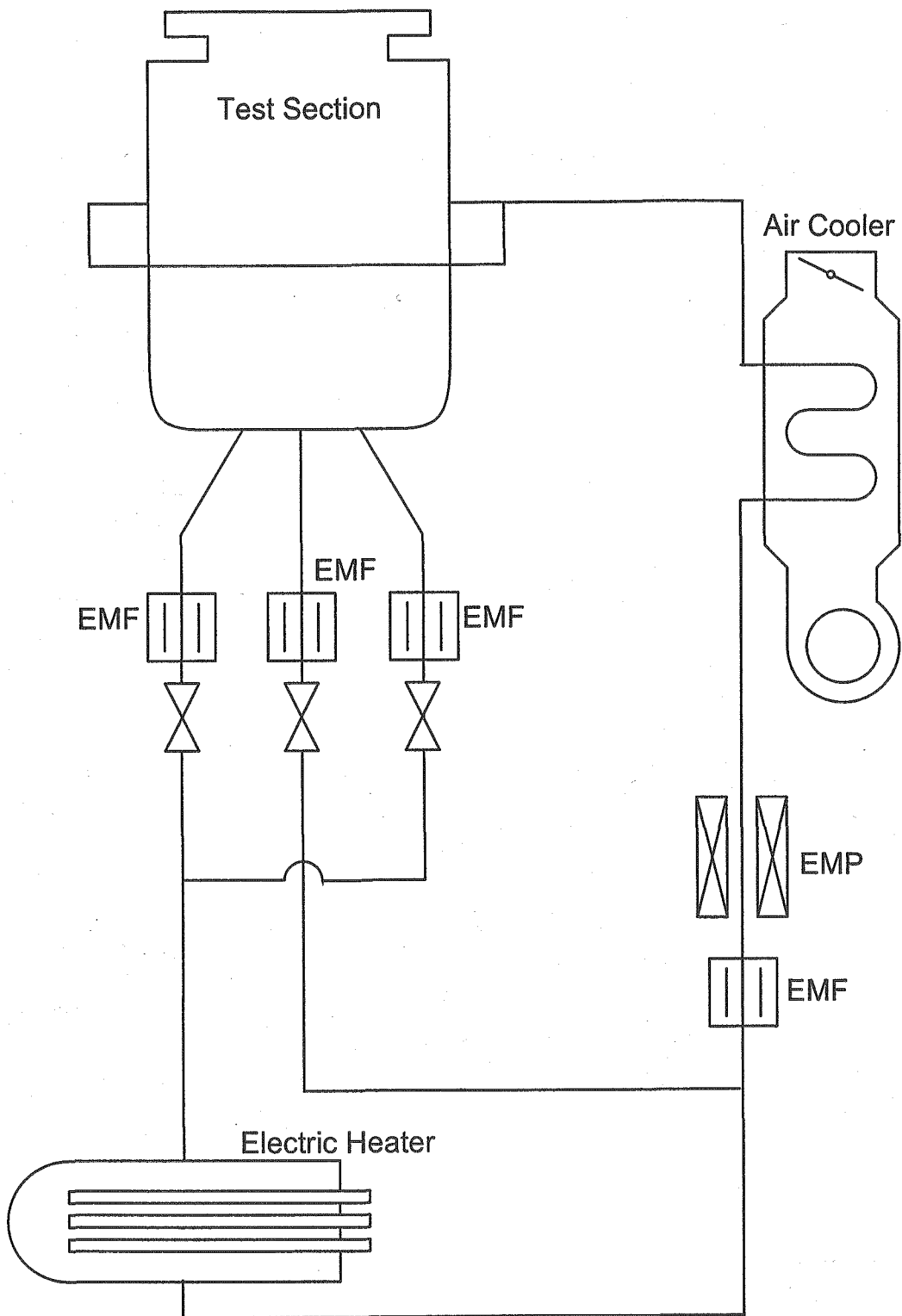


Fig. 2.2.1 Experimental Loop (PLAJEST).



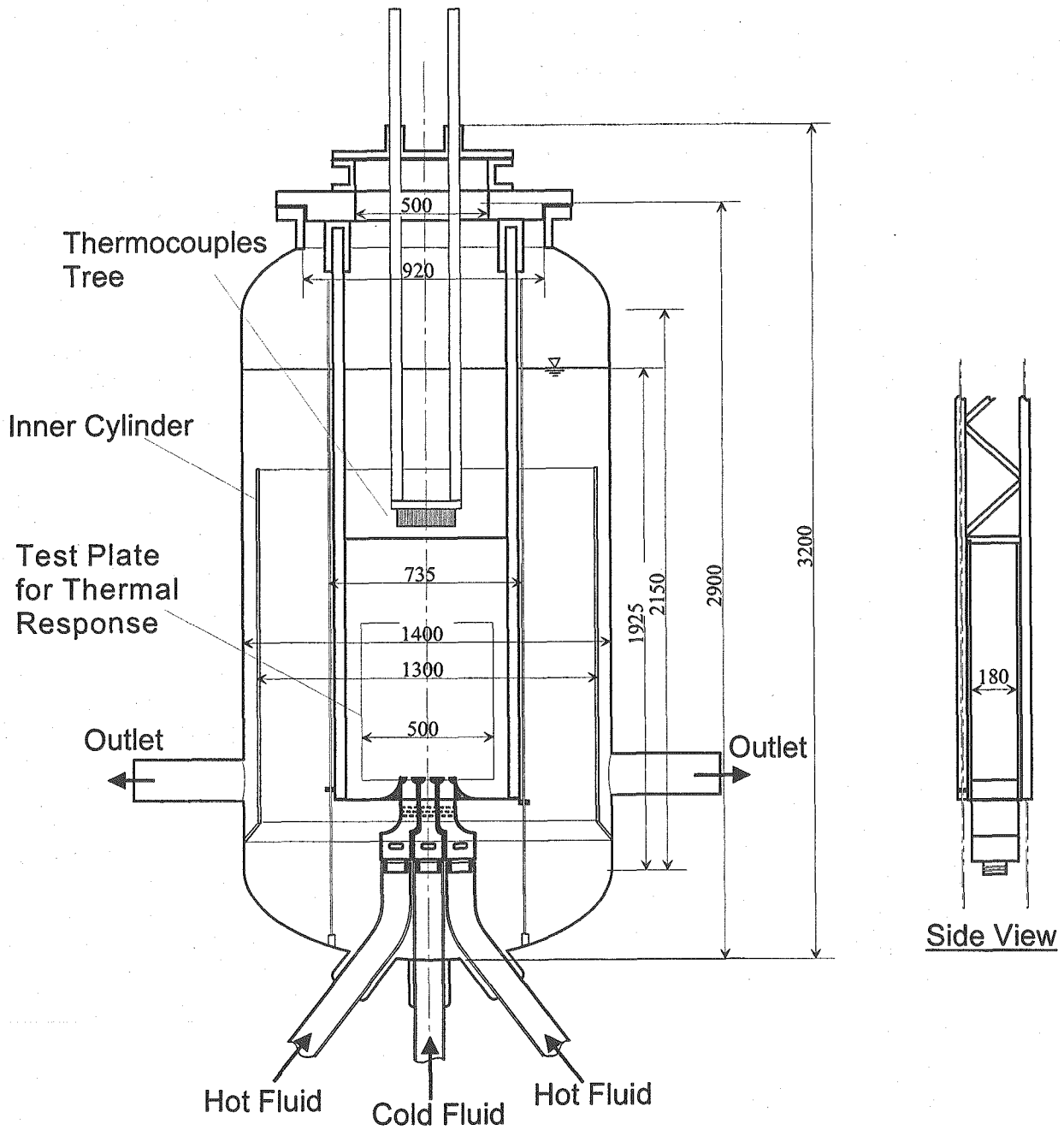


Fig. 2.2.2 Test Plenum(PLAJEST).

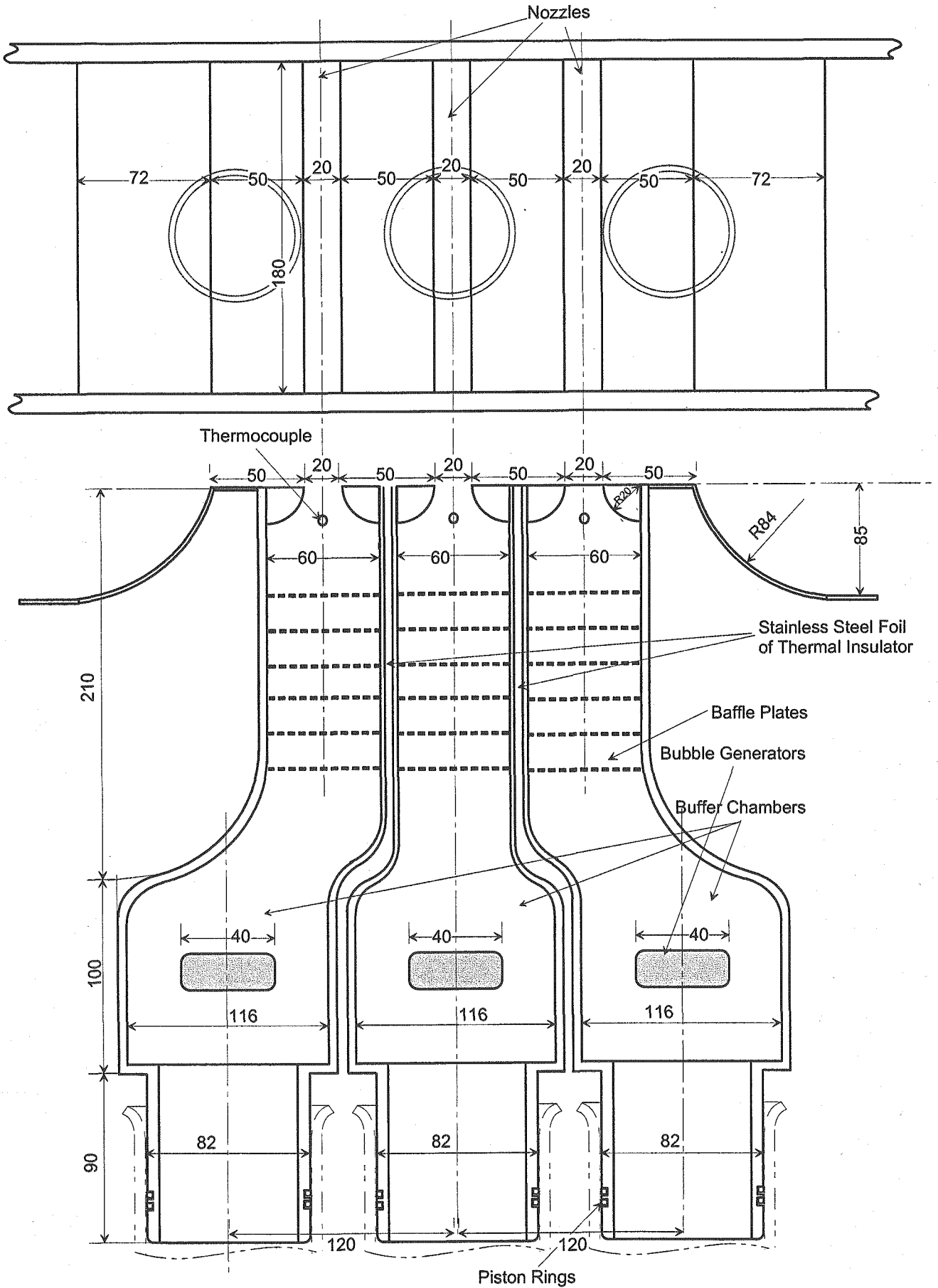


Fig. 2.2.3 Discharged Nozzles of Triple Jets (PLAJEST).

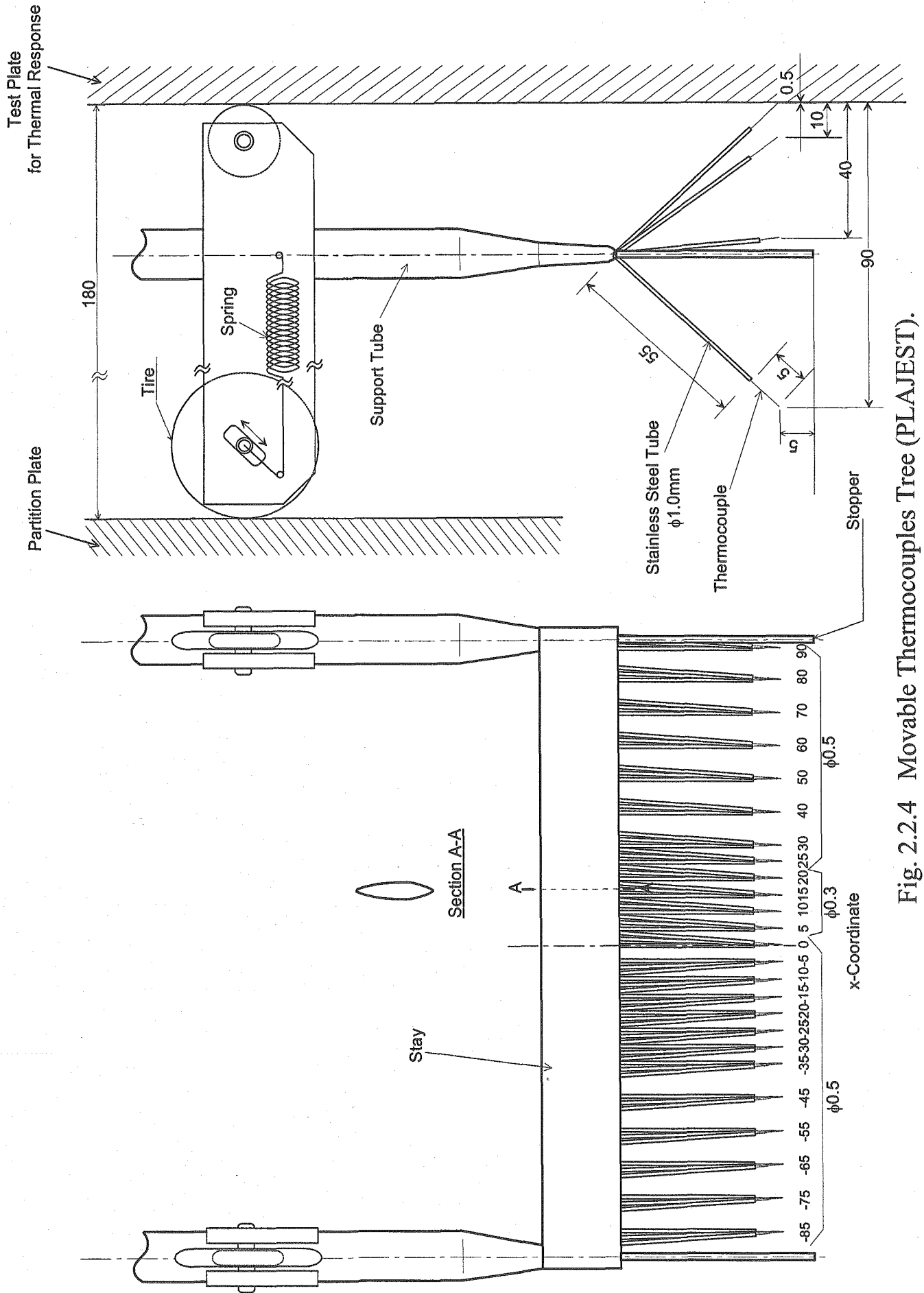


Fig. 2.2.4 Movable Thermocouples Tree (PLAJEST).

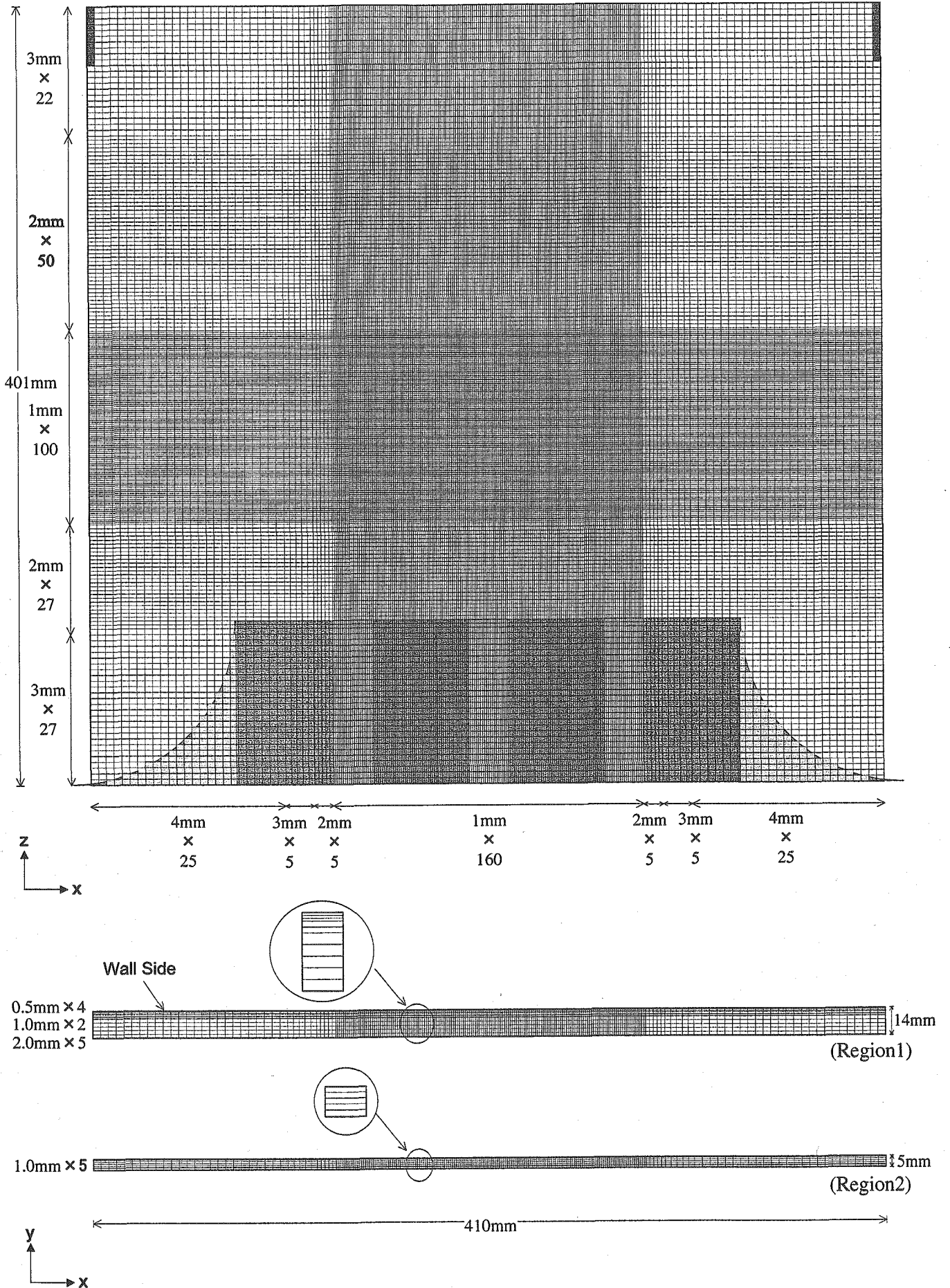


Fig. 3.1 Mesh Arrangement of DNS.

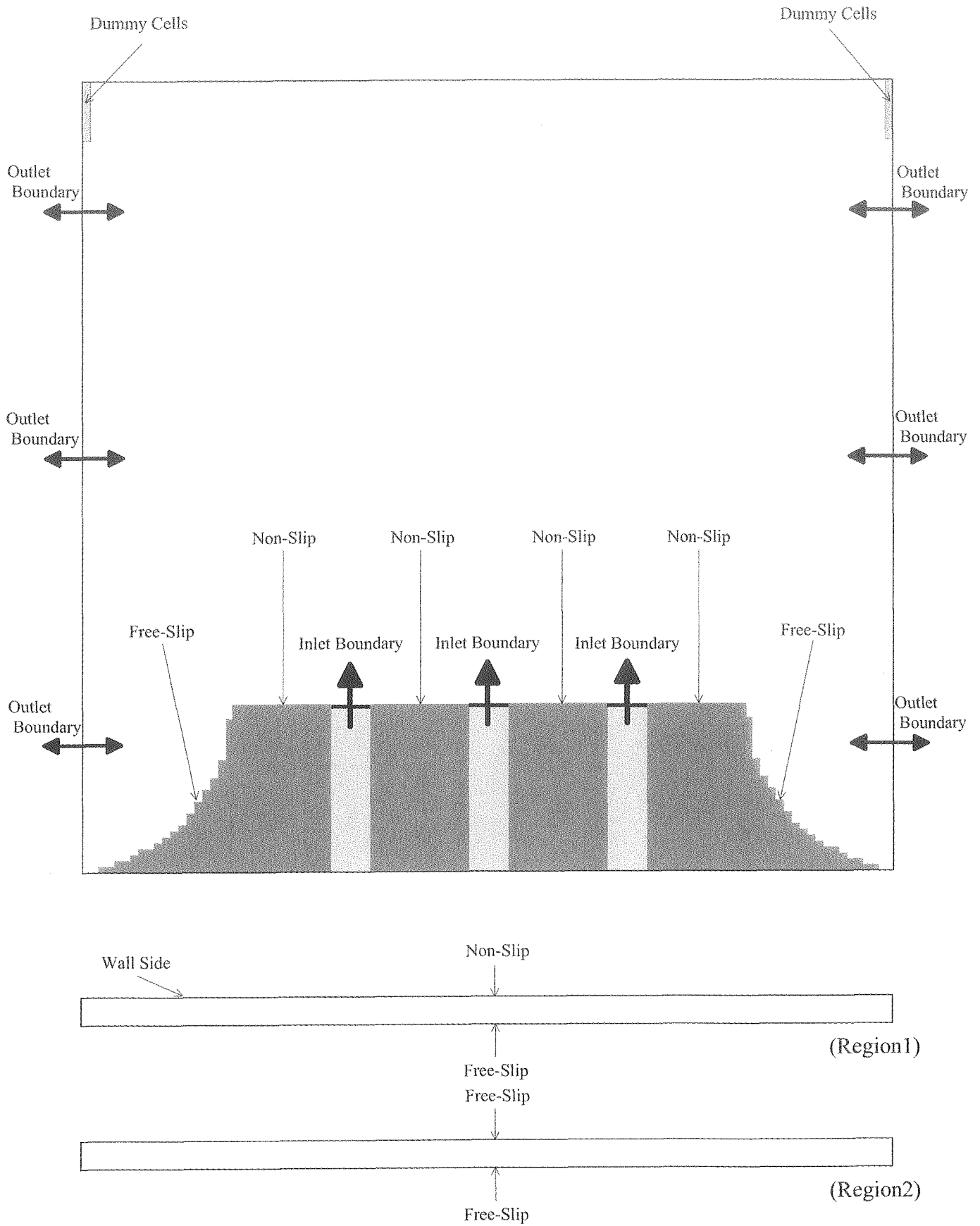


Fig. 3.2 Boundary Conditions.

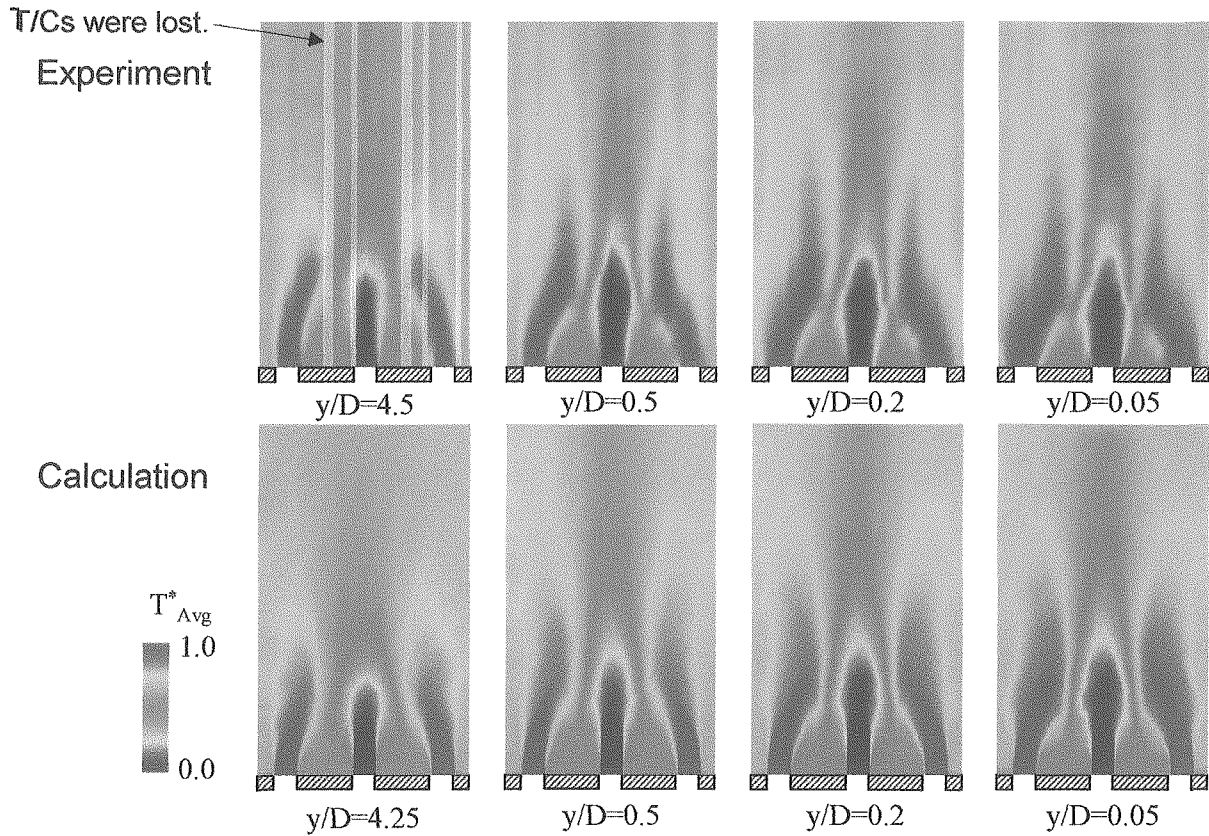


Fig.4.1.1 Comparisons of Contours of Time-Averaged Temperature between Experimental and Numerical Results.

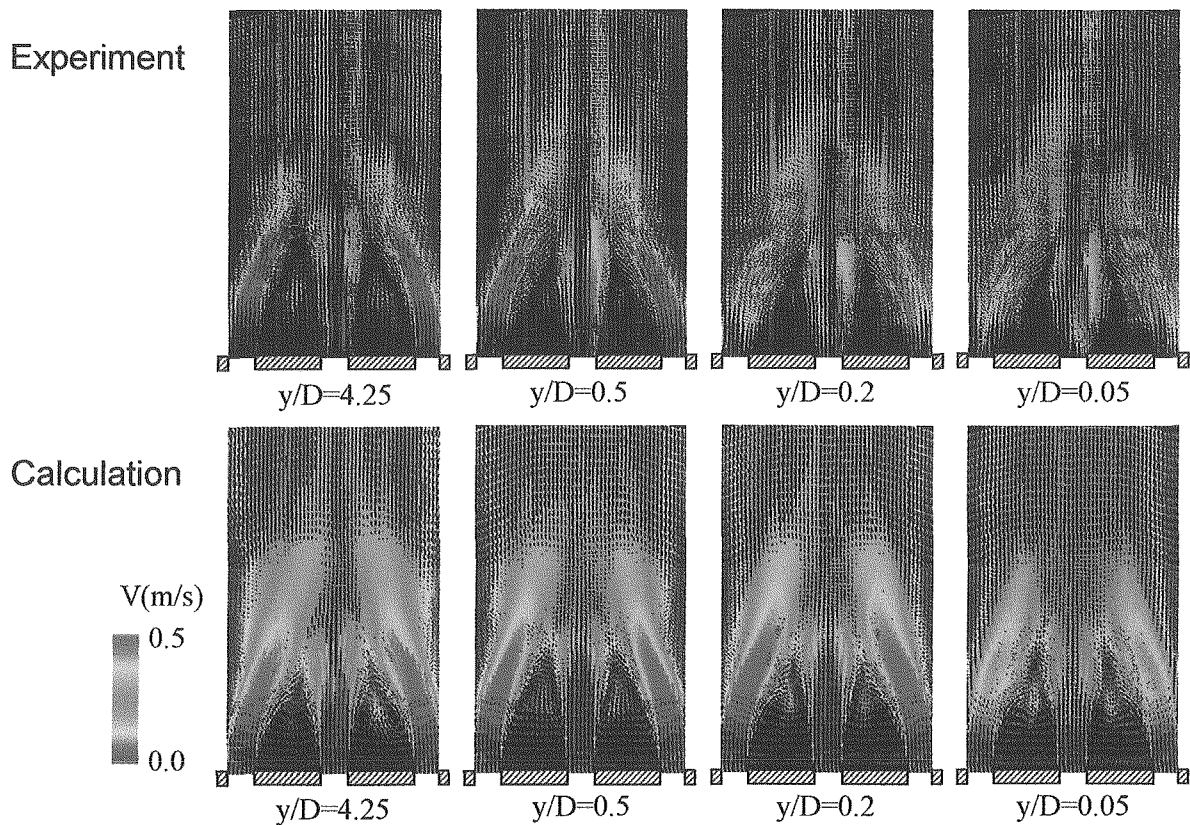


Fig.4.1.2 Comparisons of Vectors of Time-Averaged Velocity between Experimental and Numerical Results.

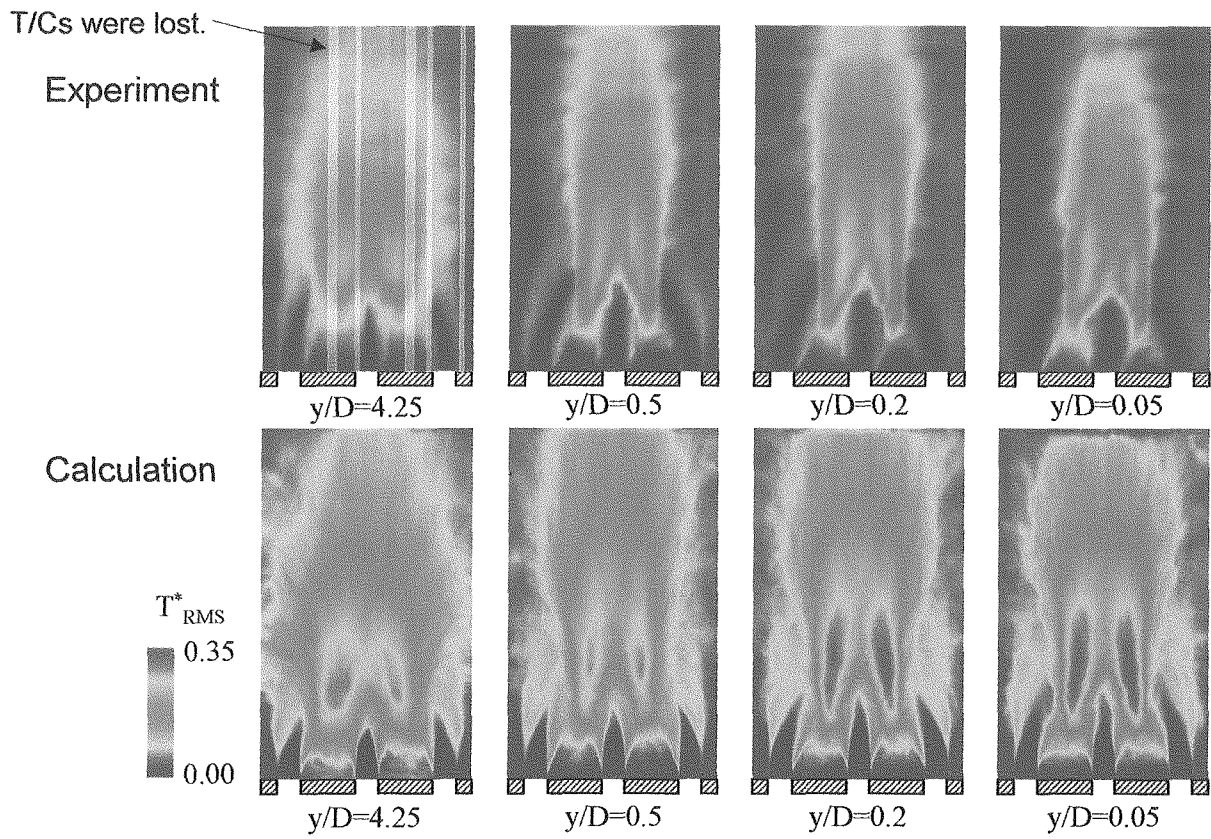


Fig.4.1.3 Comparisons of Contours of Temperature Fluctuation Intensity between Experimental and Numerical Results.

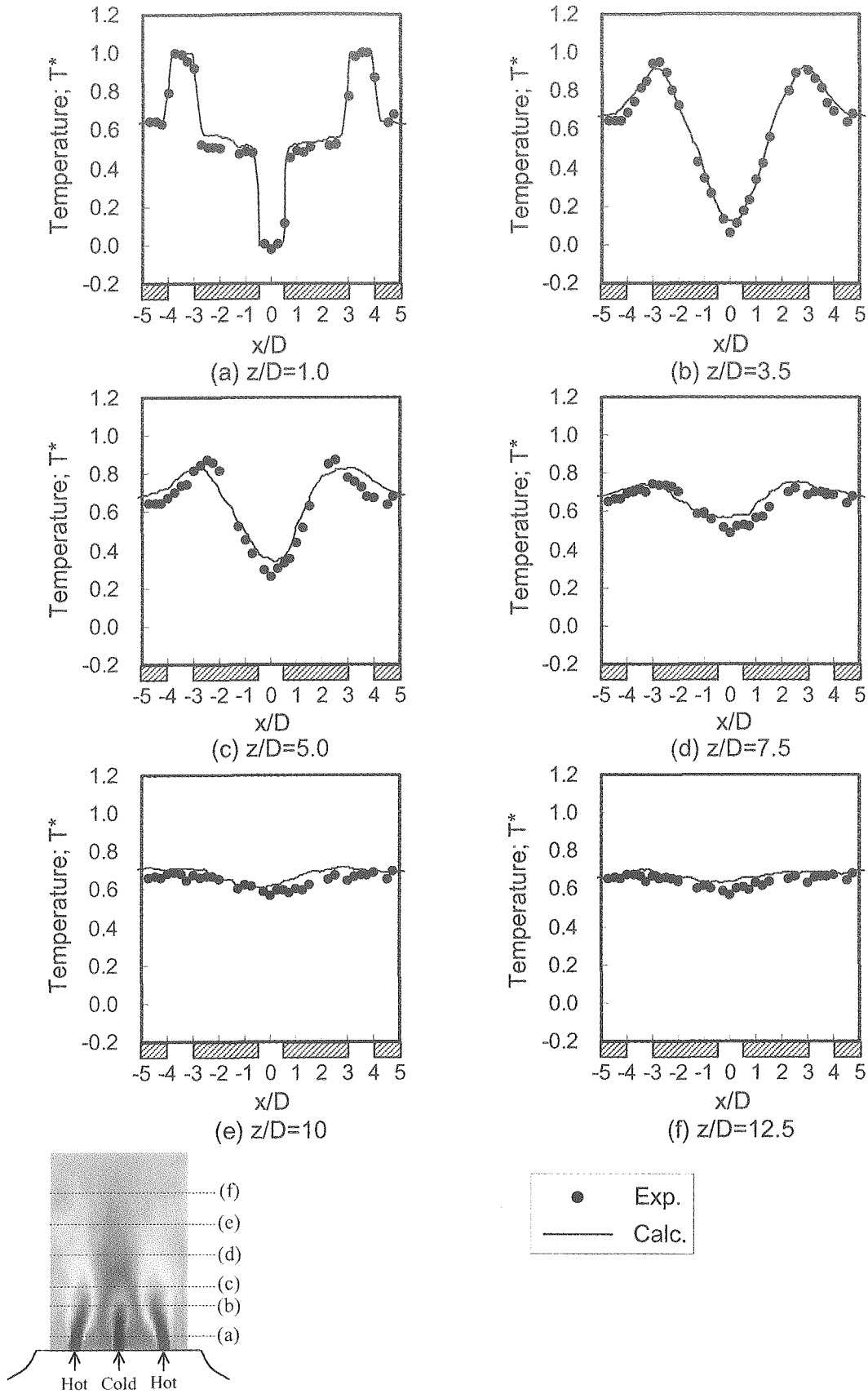


Fig.4.1.4 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ )



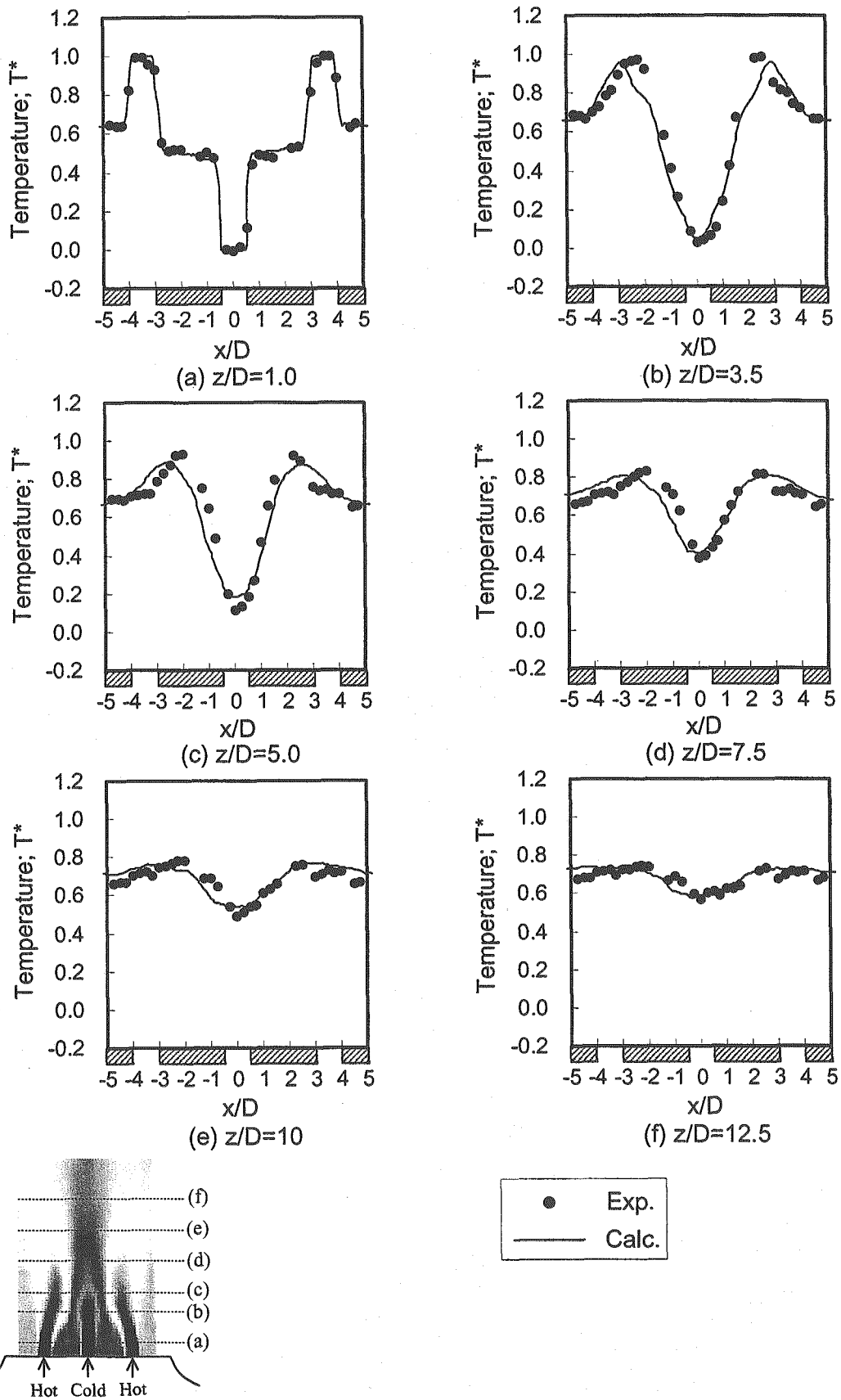


Fig.4.1.5 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )

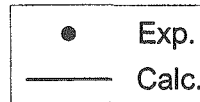
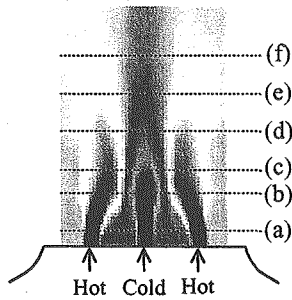
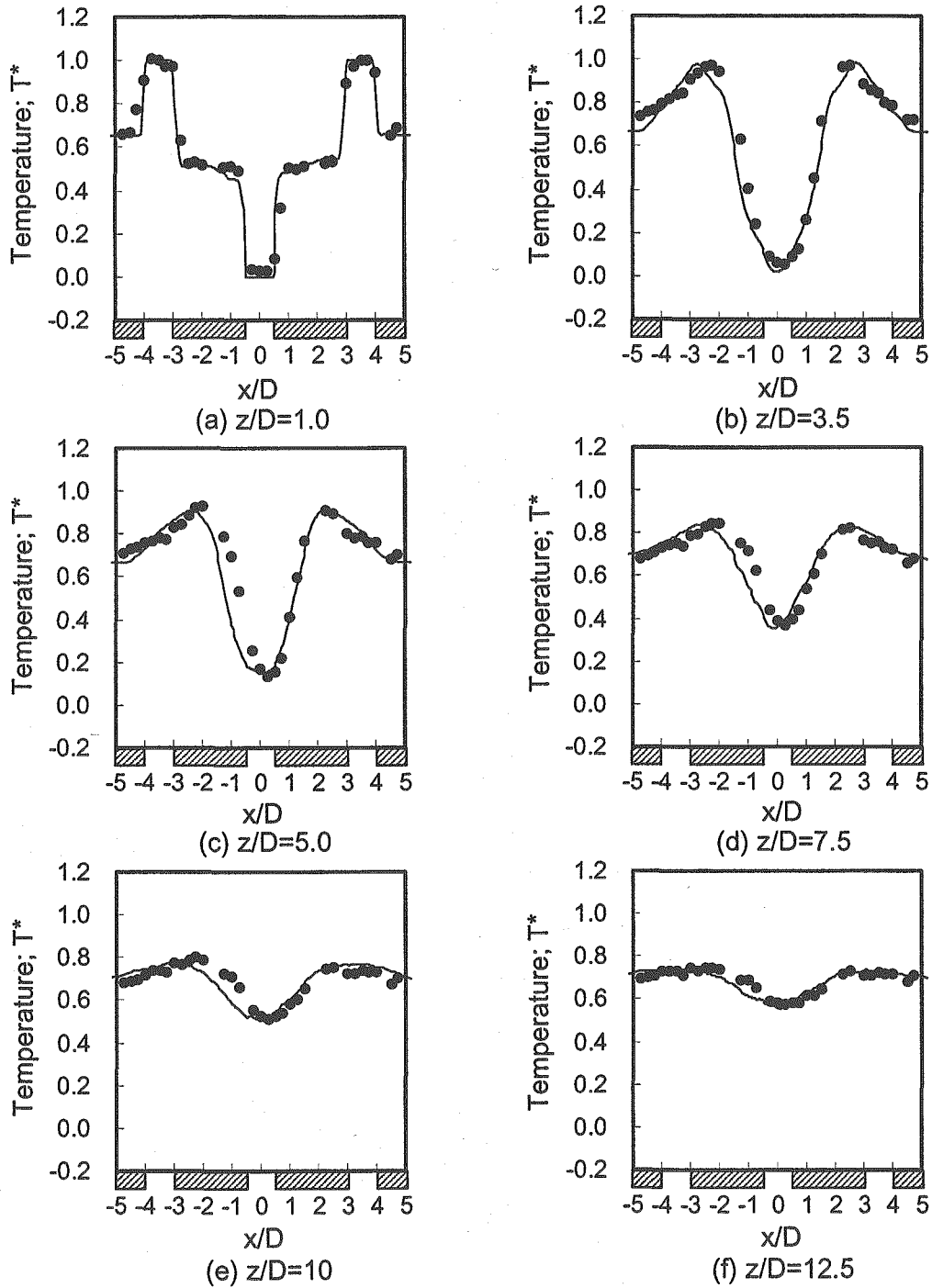
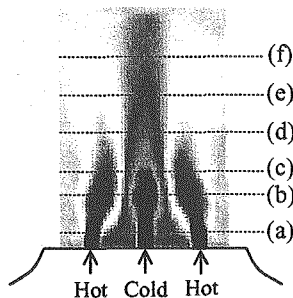
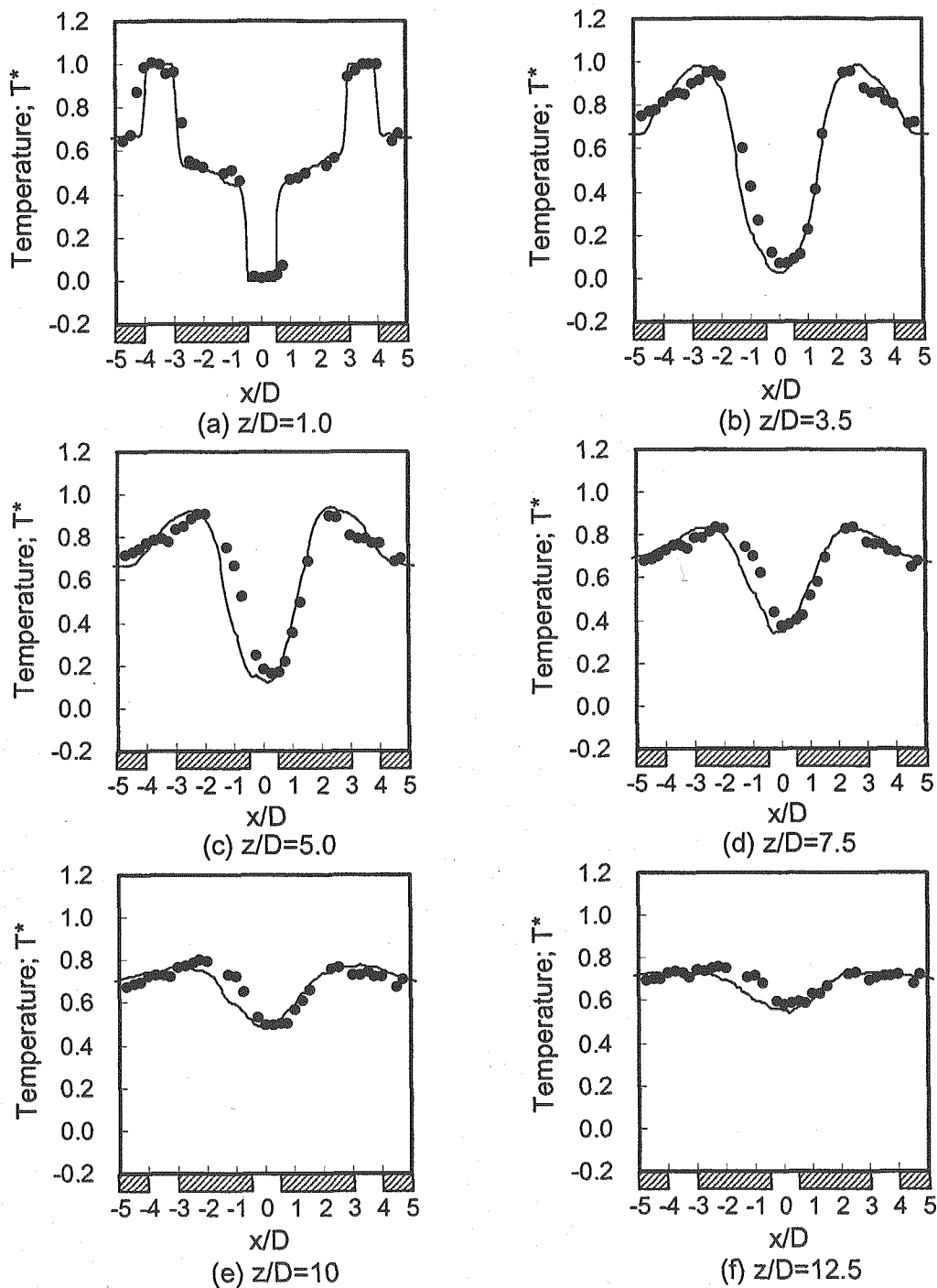


Fig.4.1.6 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ )



●	Exp.
—	Calc.

Fig.4.1.7 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ )

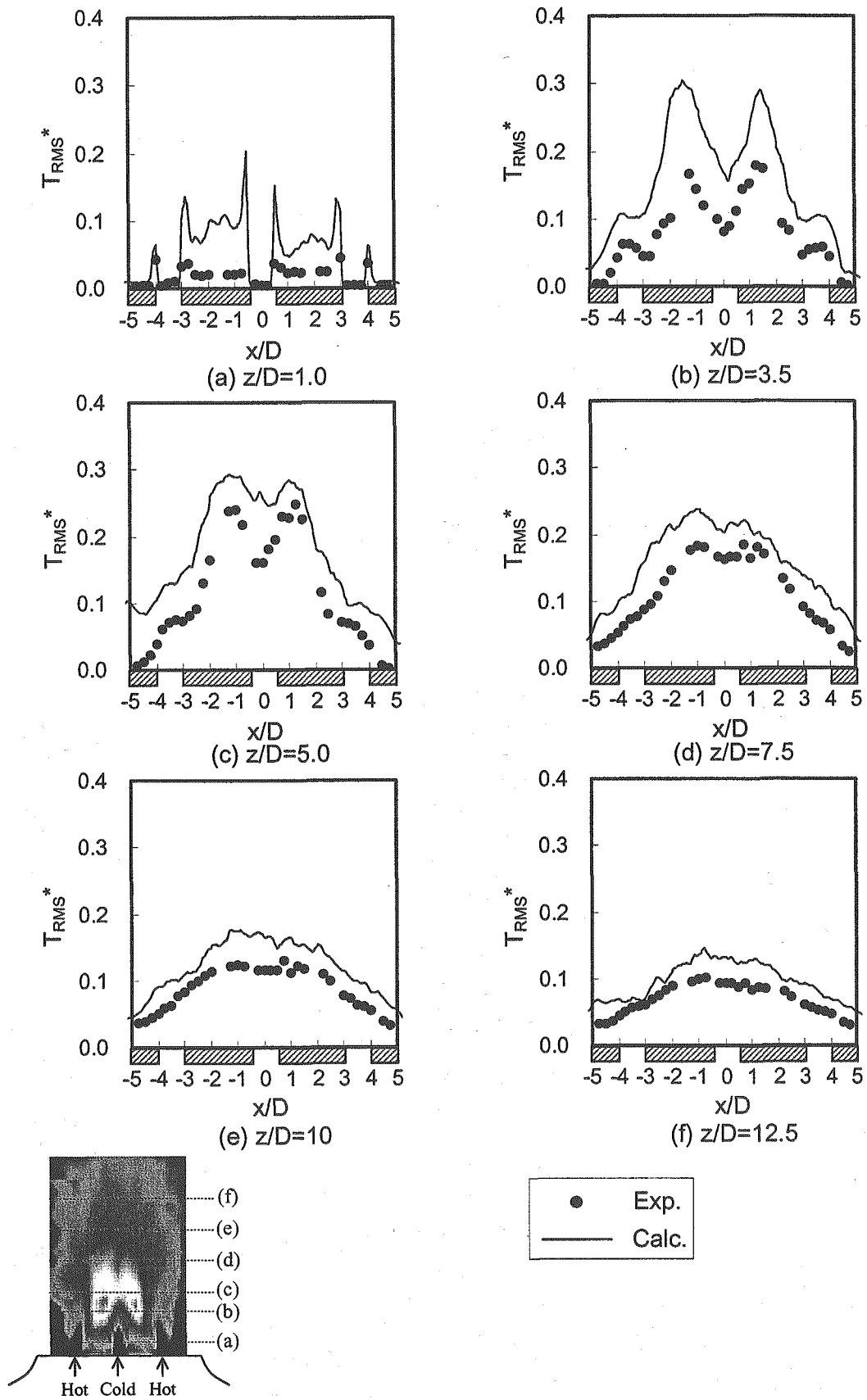


Fig.4.1.8 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ )

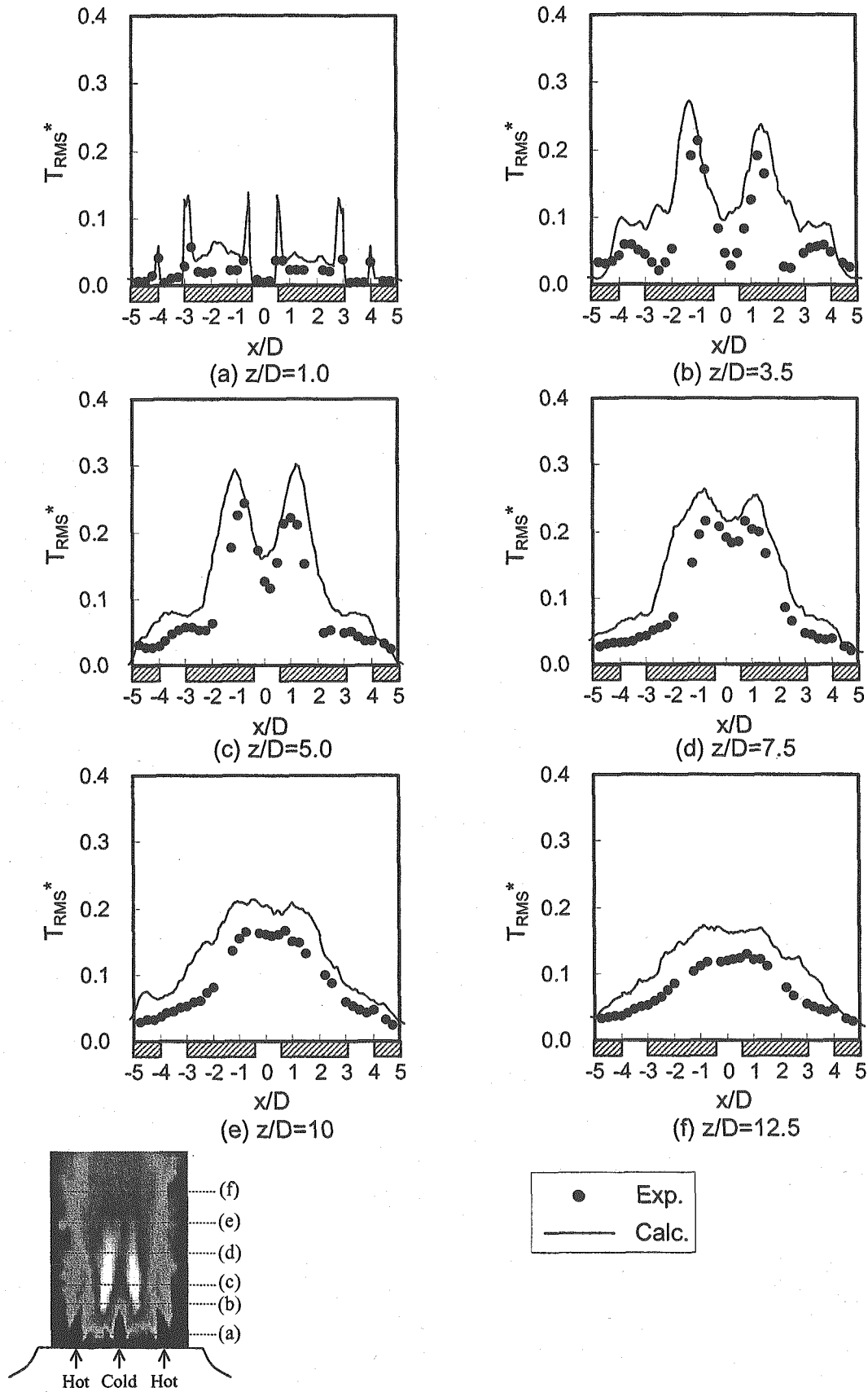


Fig.4.1.9 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )

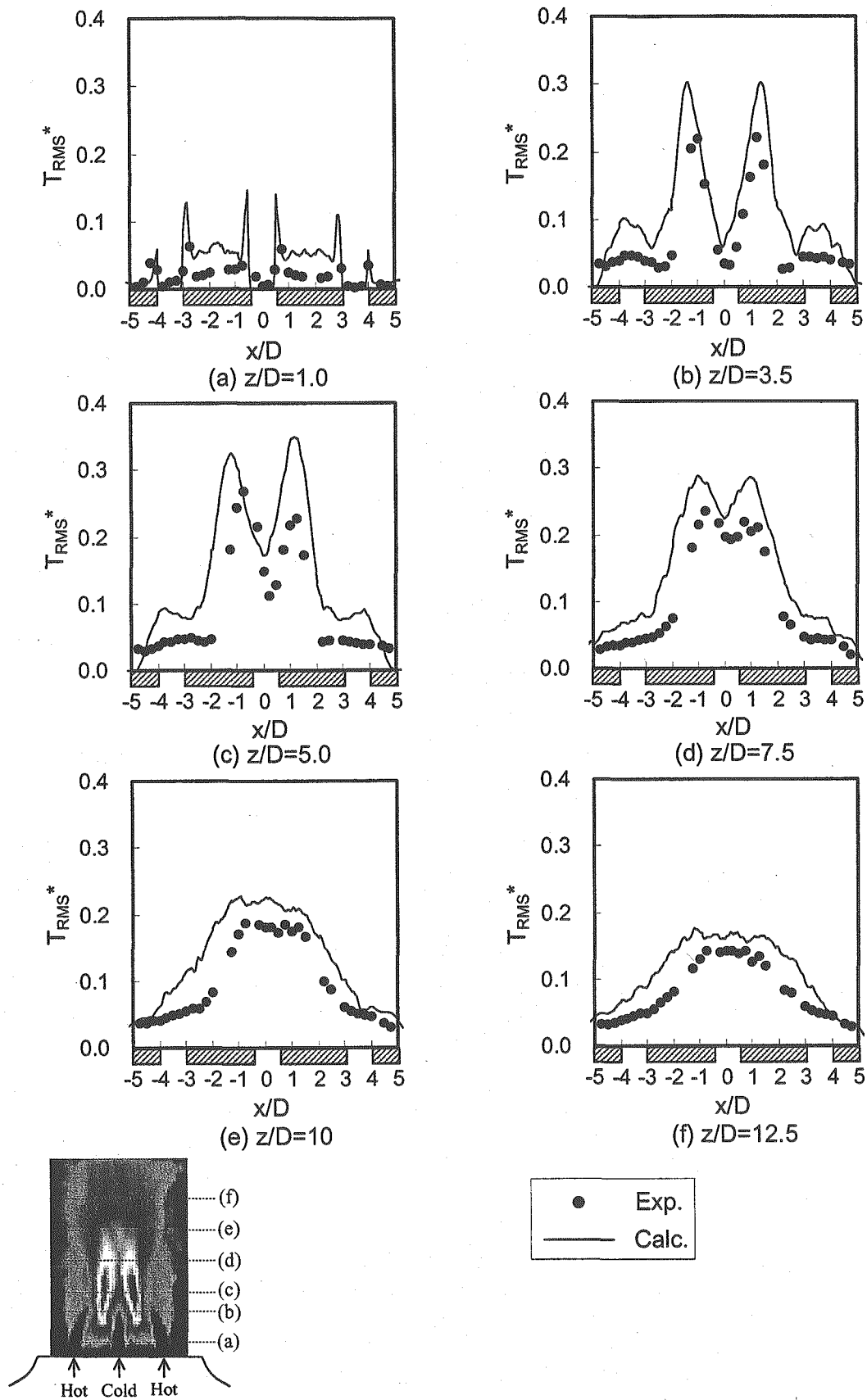


Fig.4.1.10 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ )

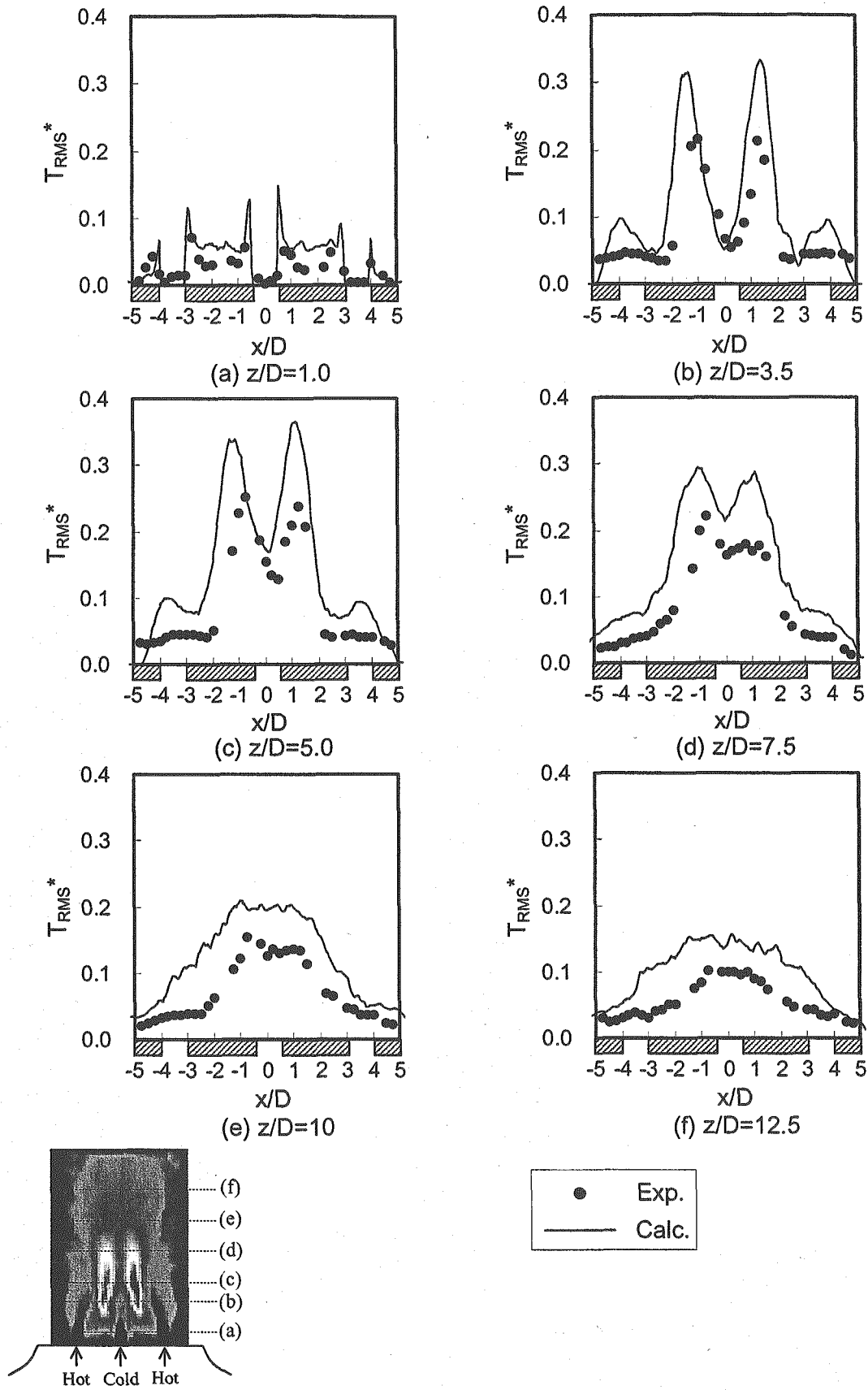


Fig.4.1.11 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ )

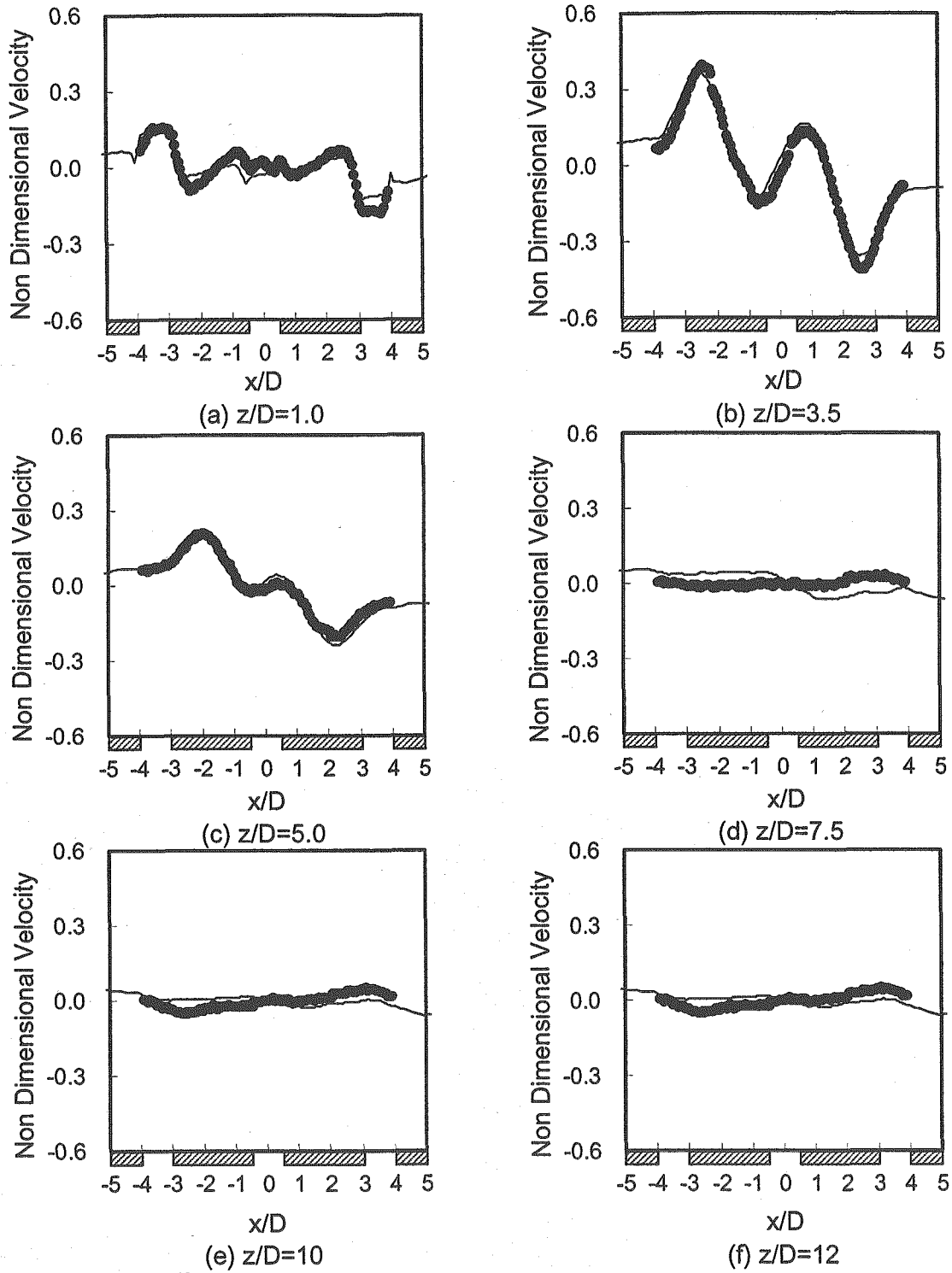


Fig.4.1.12 Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ )



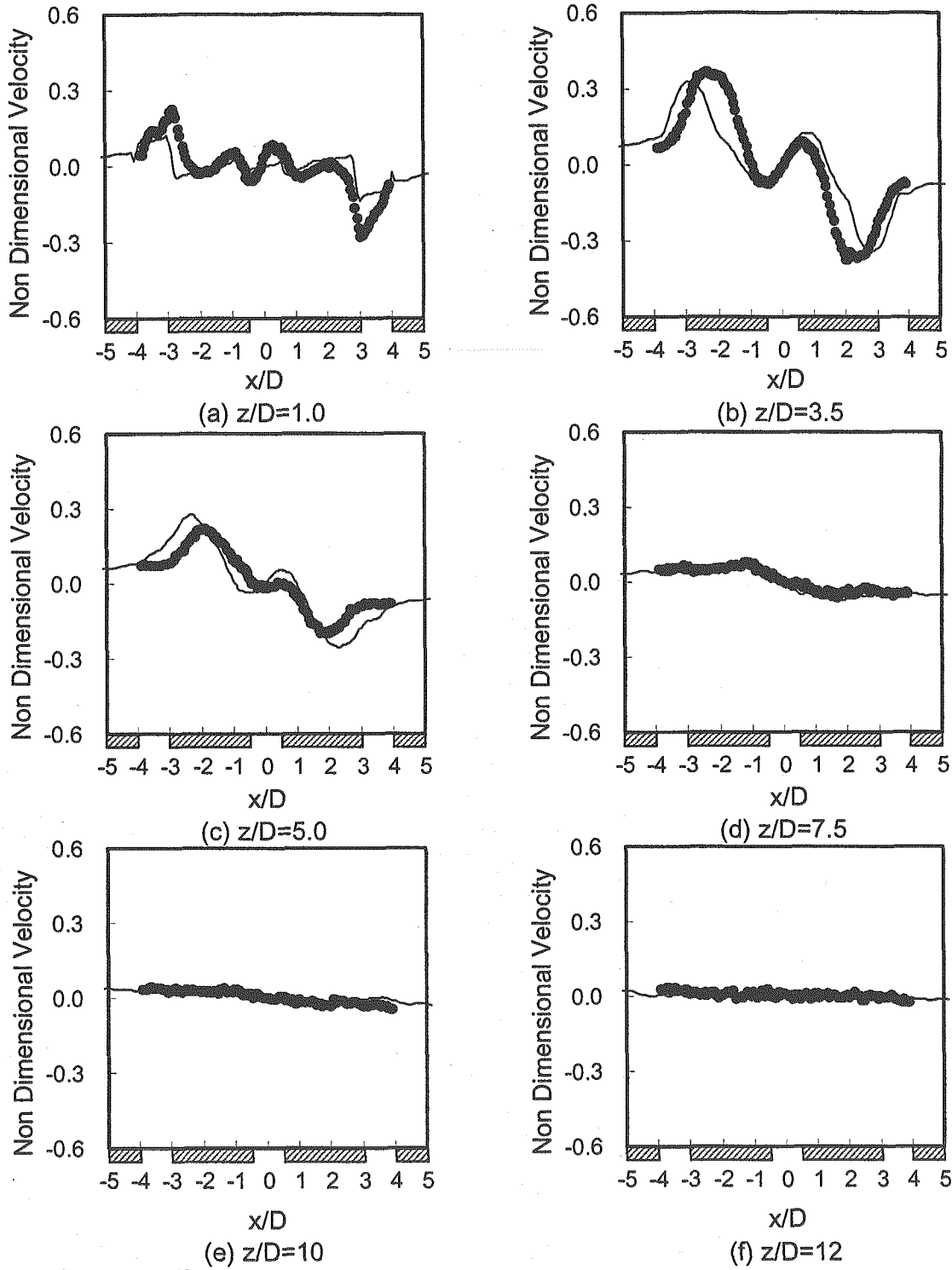
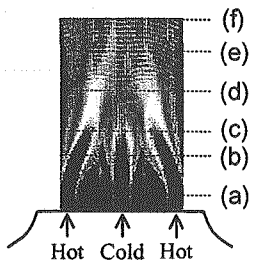
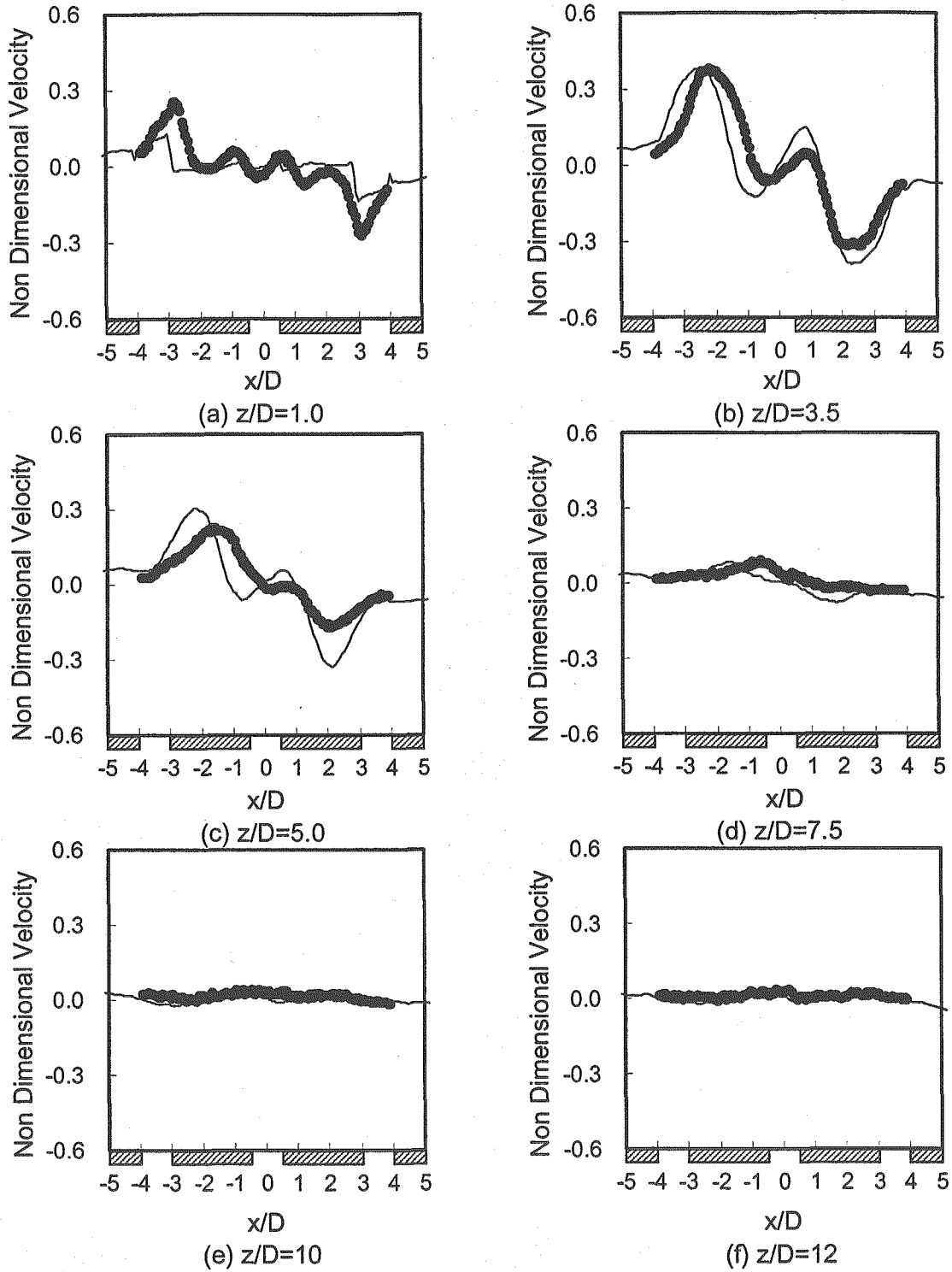
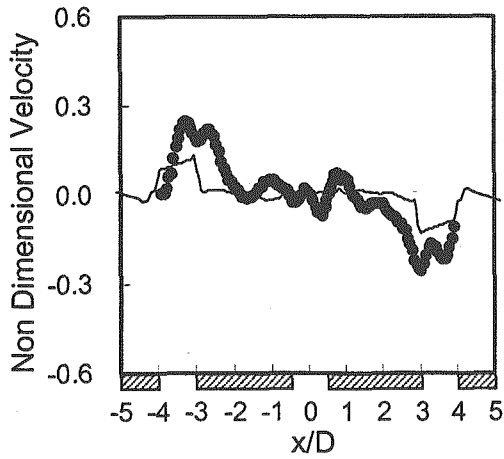


Fig.4.1.13 Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )

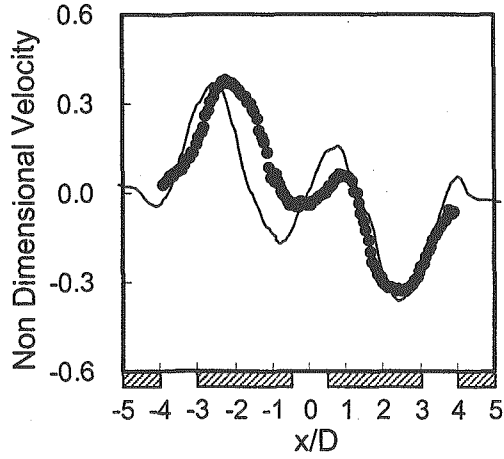


— Exp.  
— Calc.

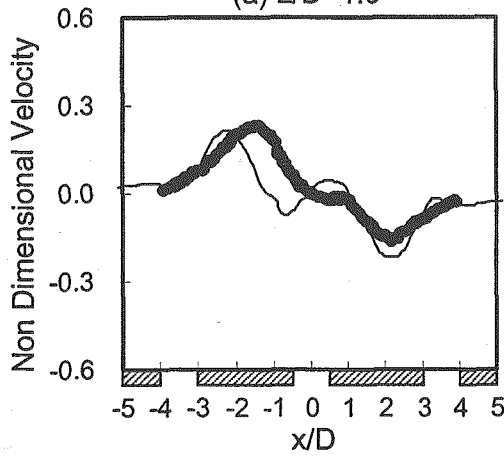
Fig.4.1.14 Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ )



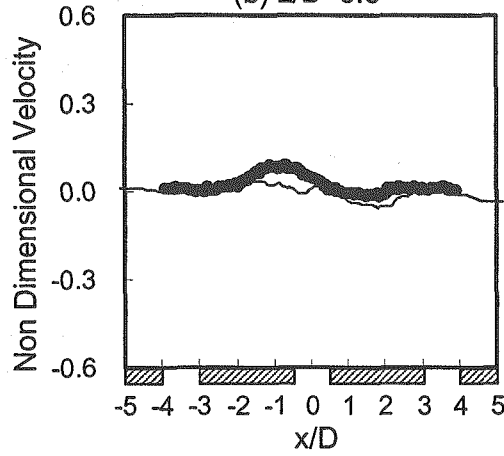
(a)  $z/D=1.0$



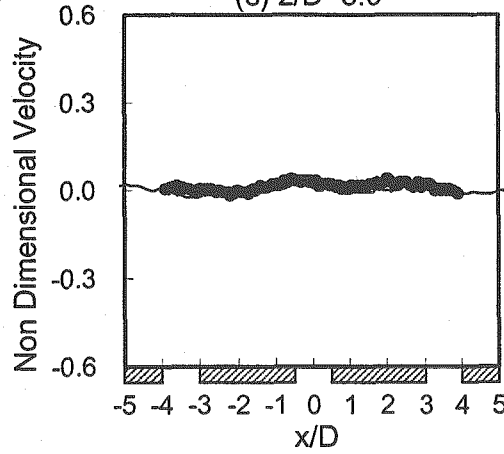
(b)  $z/D=3.5$



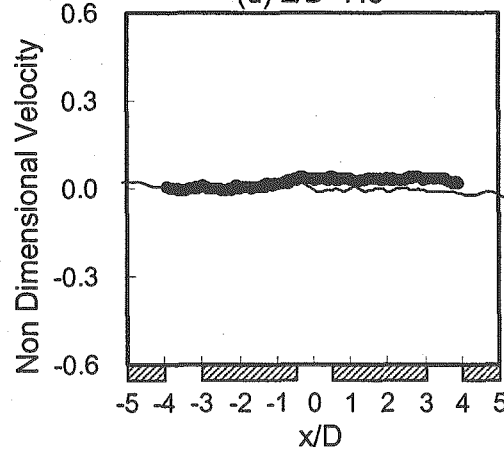
(c)  $z/D=5.0$



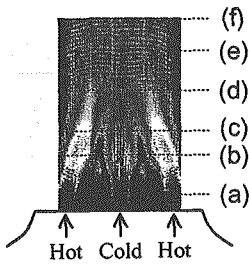
(d)  $z/D=7.5$



(e)  $z/D=10$



(f)  $z/D=12$



• Exp.  
— Calc.

Fig.4.1.15 Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ )

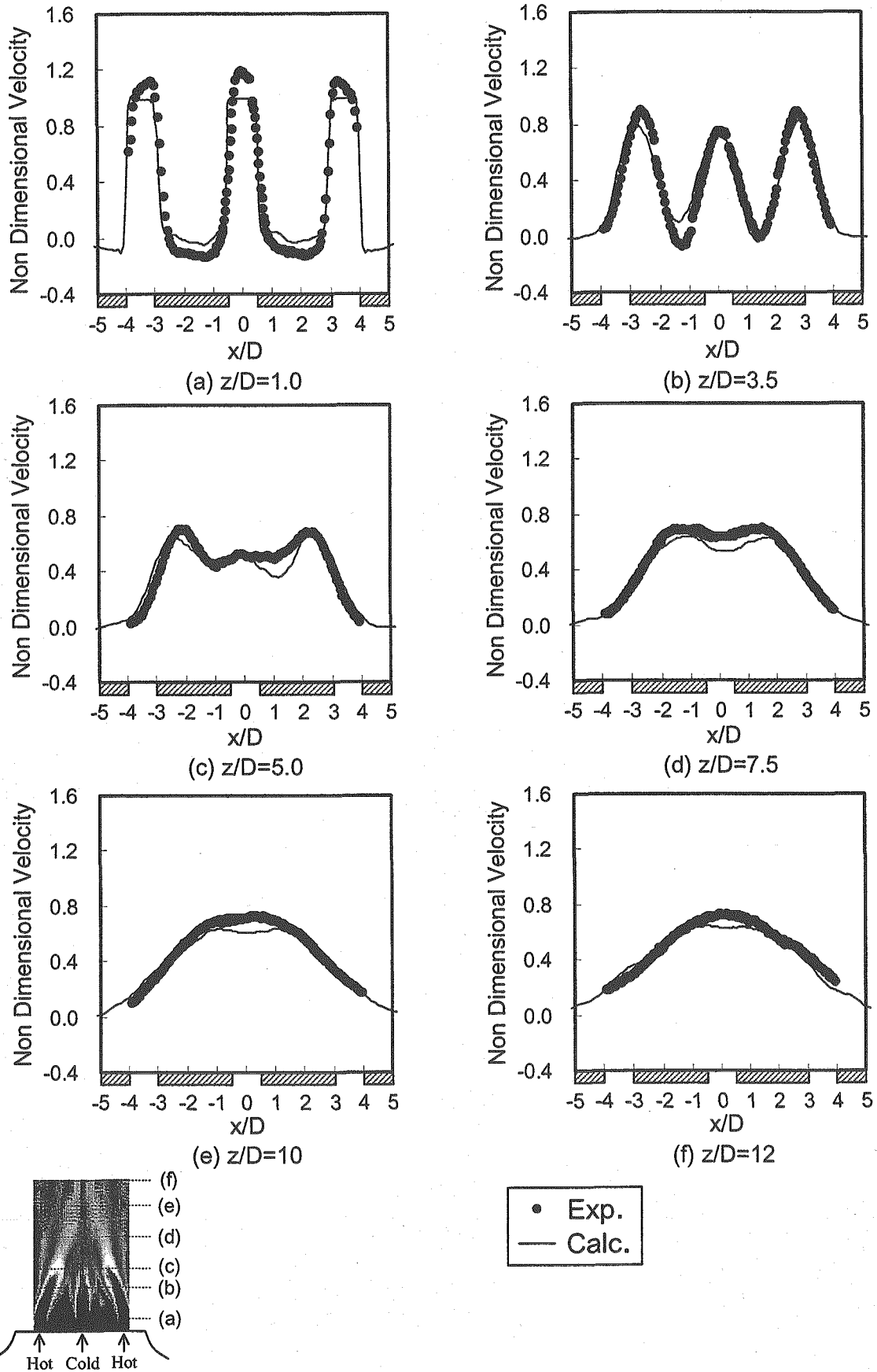
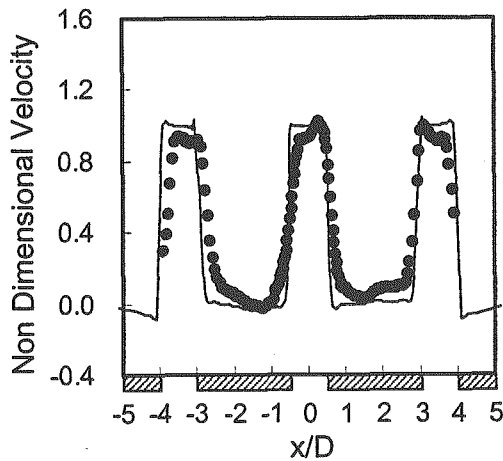
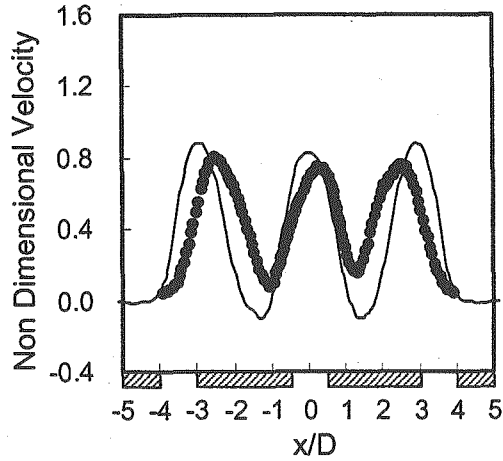


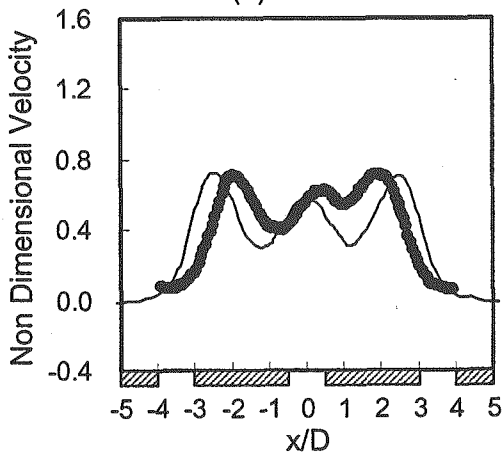
Fig.4.1.16 Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ )



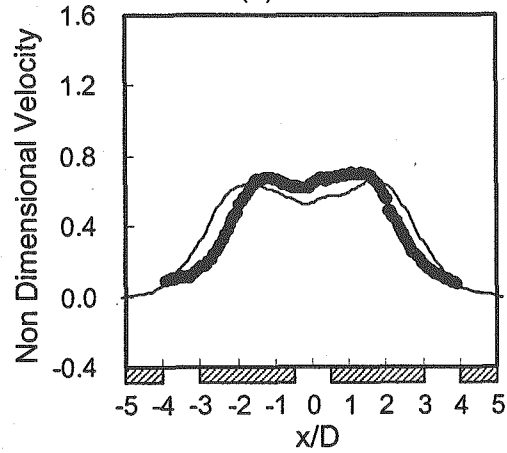
(a)  $z/D=1.0$



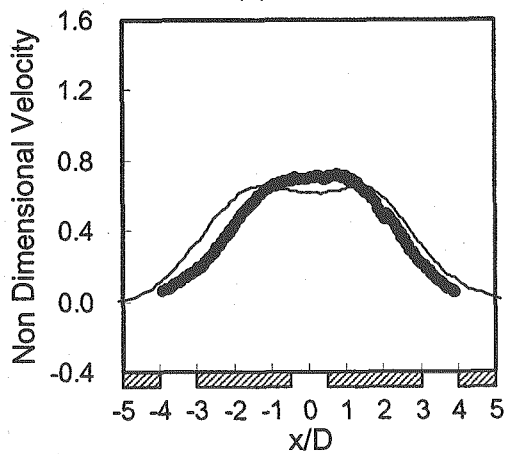
(b)  $z/D=3.5$



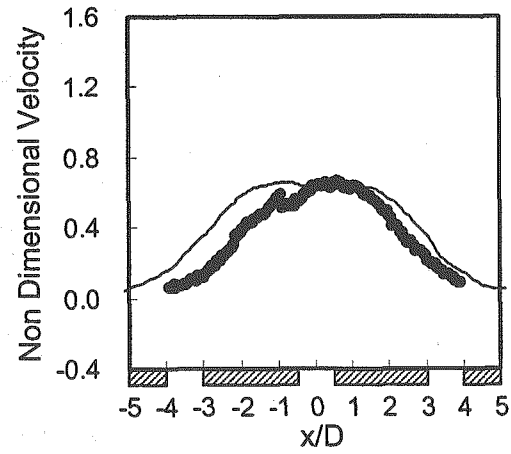
(c)  $z/D=5.0$



(d)  $z/D=7.5$



(e)  $z/D=10$



(f)  $z/D=12$

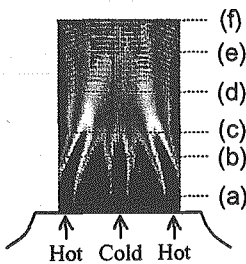


Fig.4.1.17 Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )

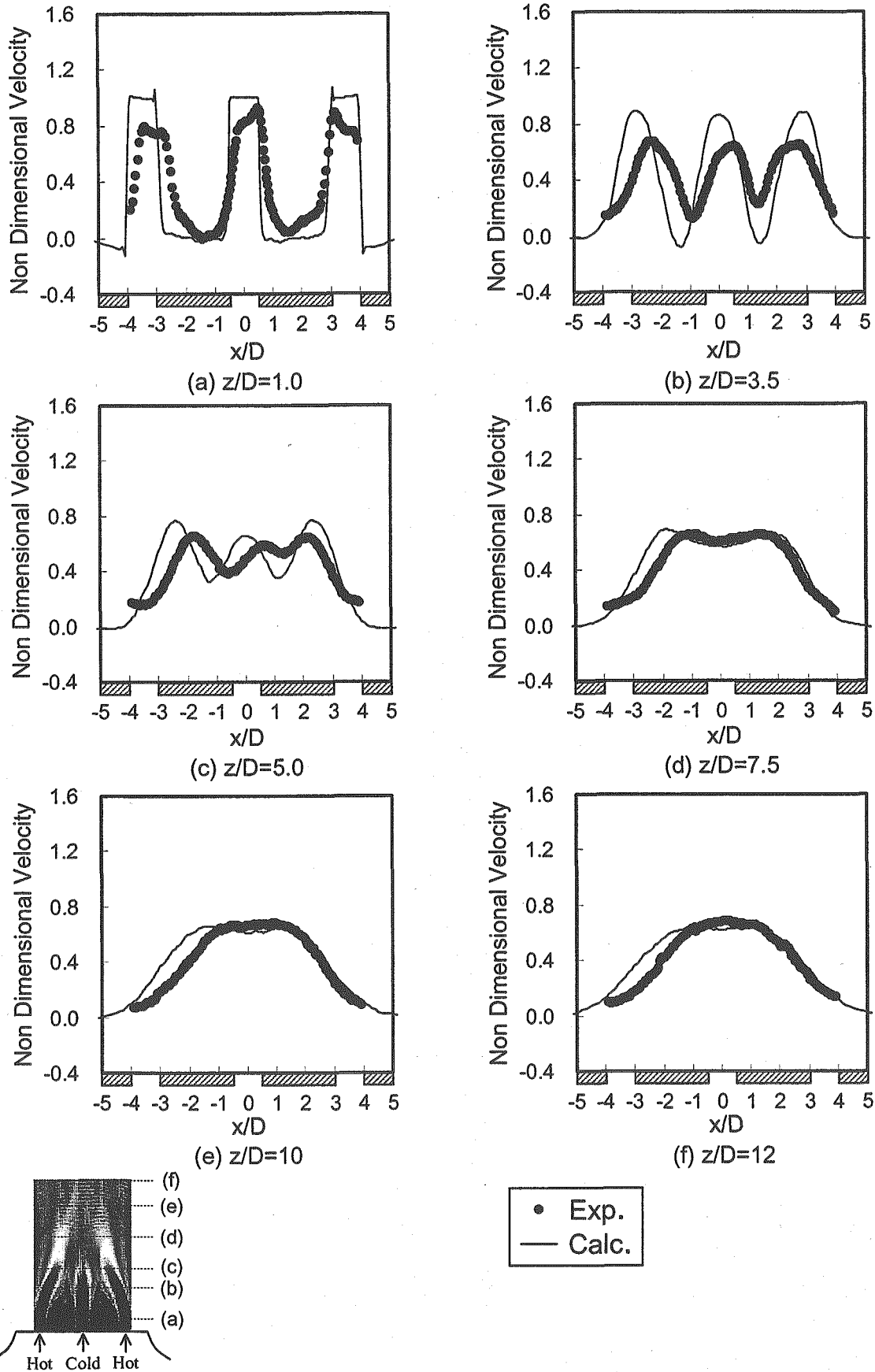


Fig.4.1.18 Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ )

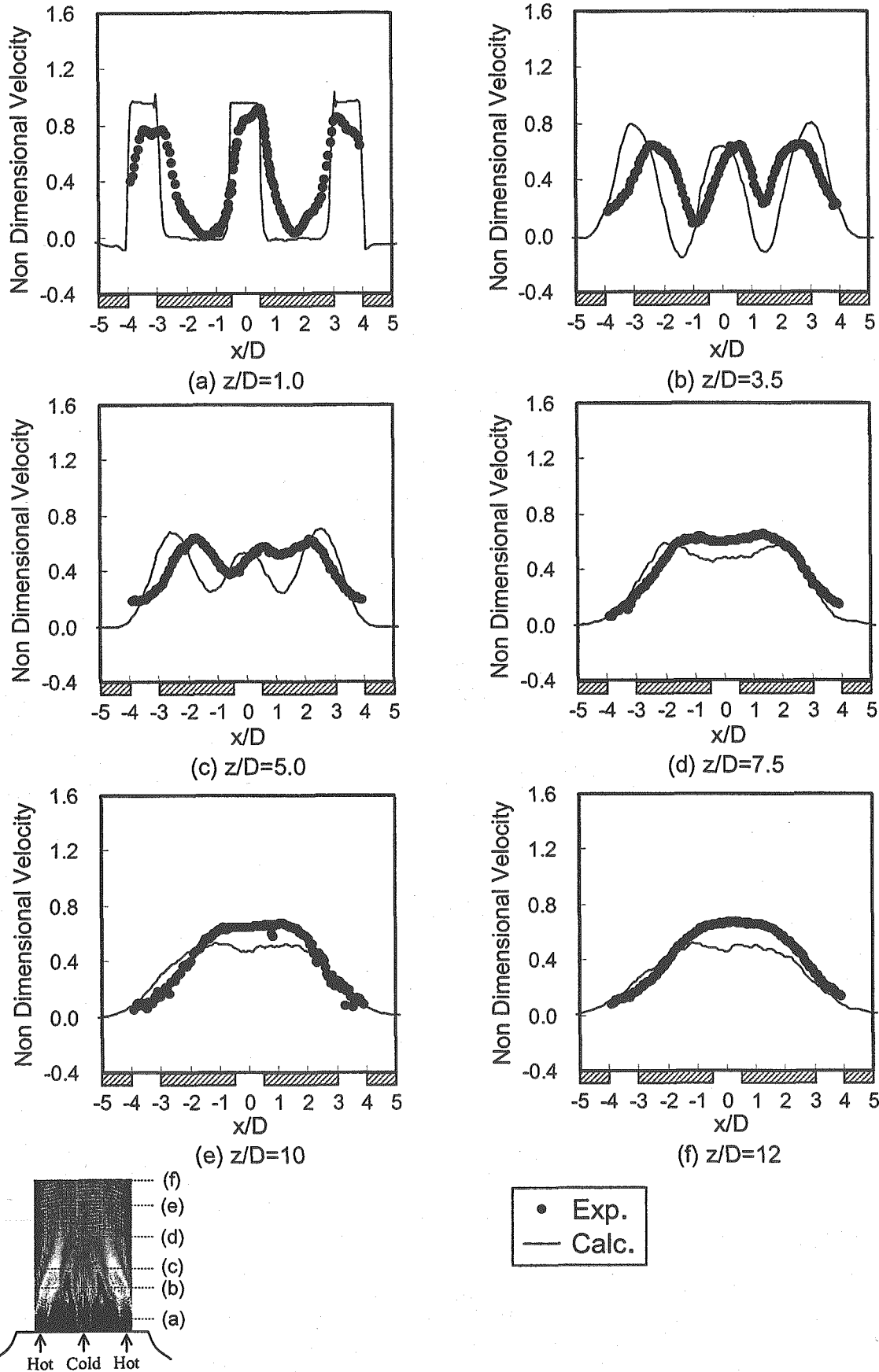


Fig.4.1.19 Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ )

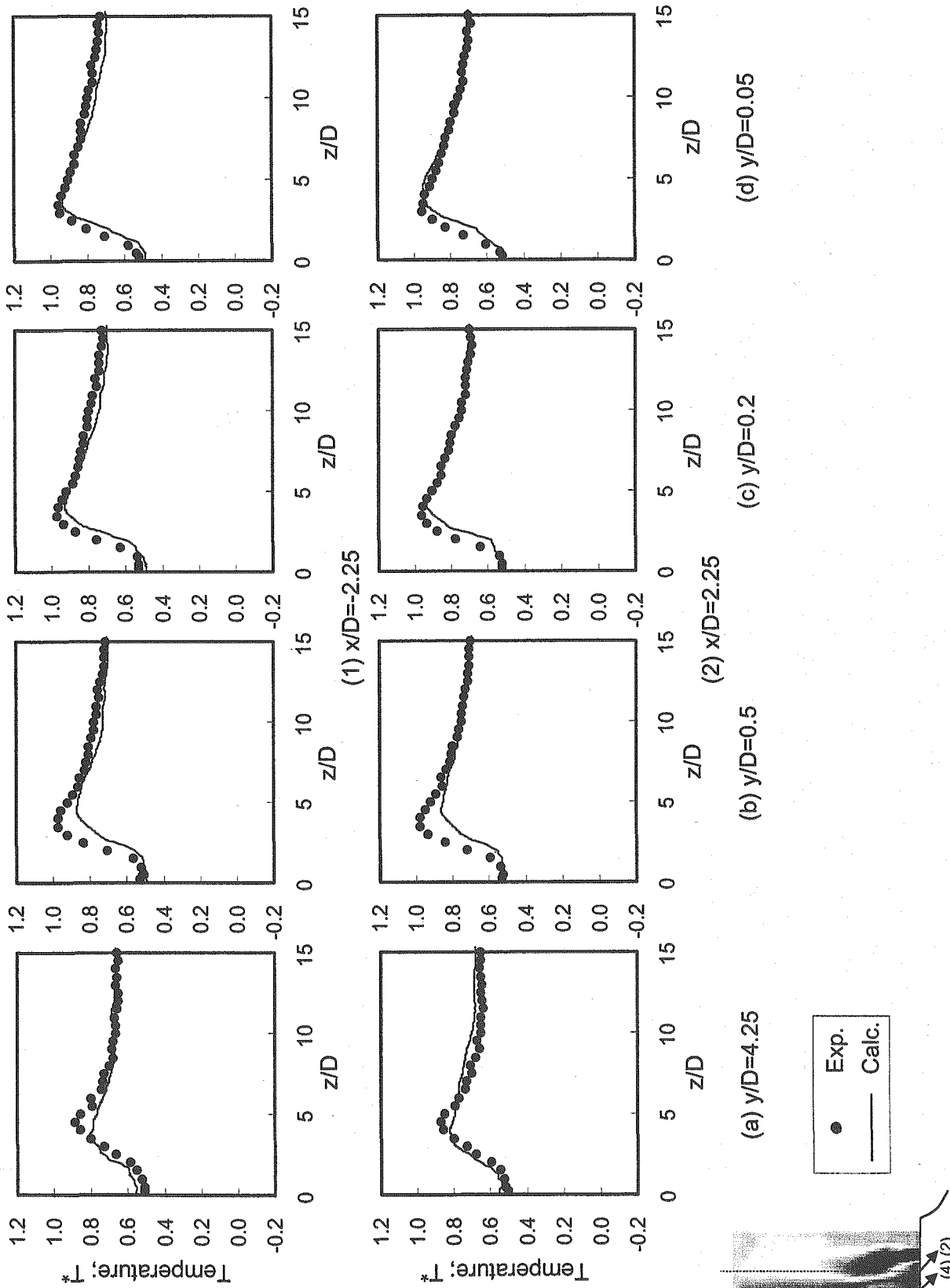


Fig.4.1.20(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Directions between Experimental and Numerical Results.



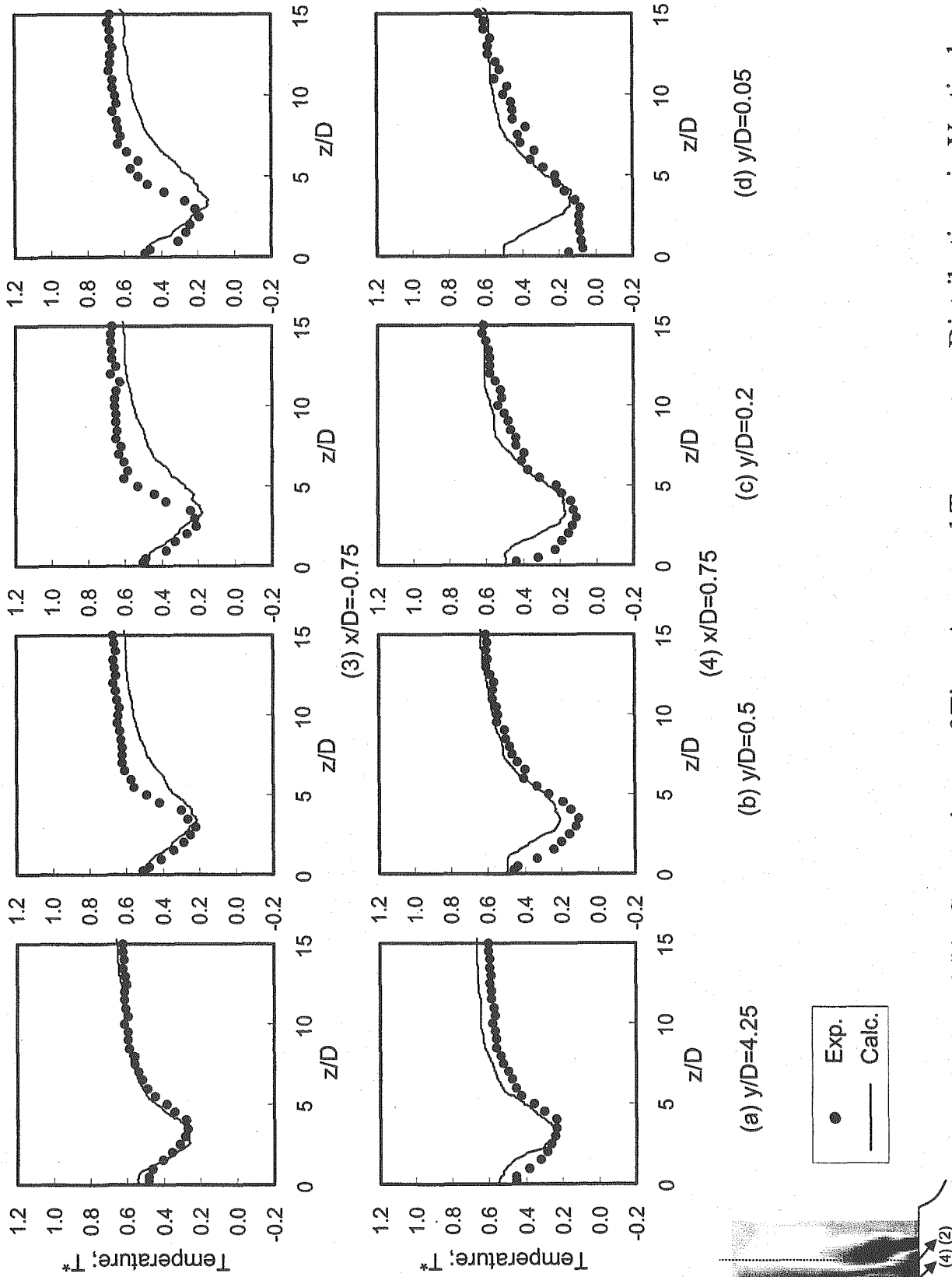


Fig.4.1.20(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Directions between Experimental and Numerical Results.

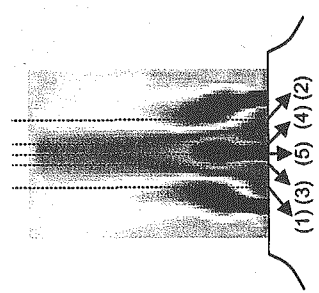
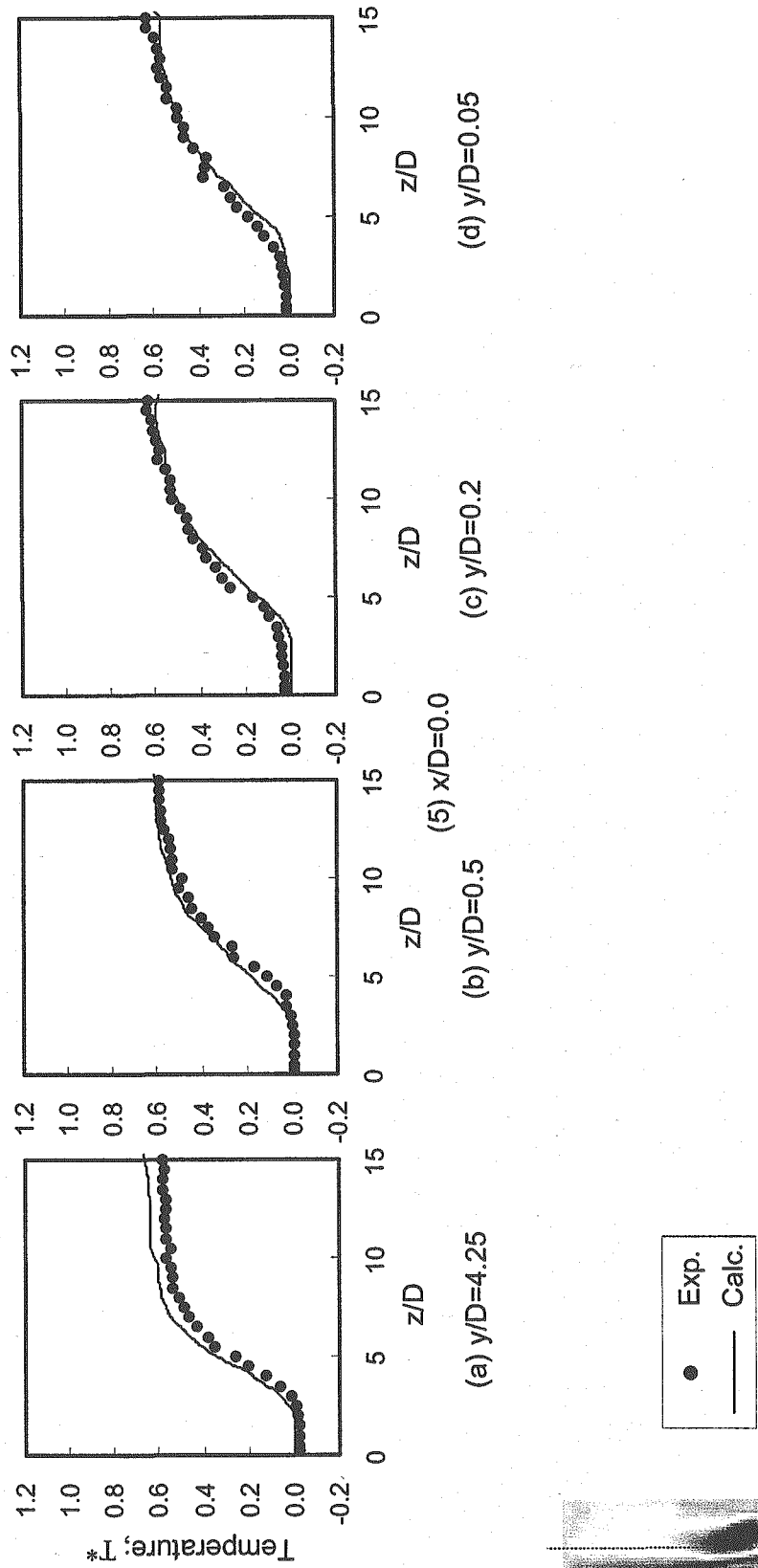


Fig.4.1.20(c) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Directions between Experimental and Numerical Results.

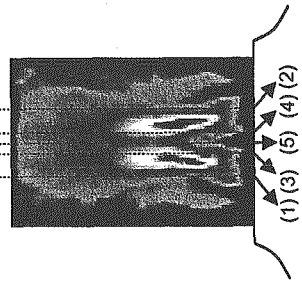
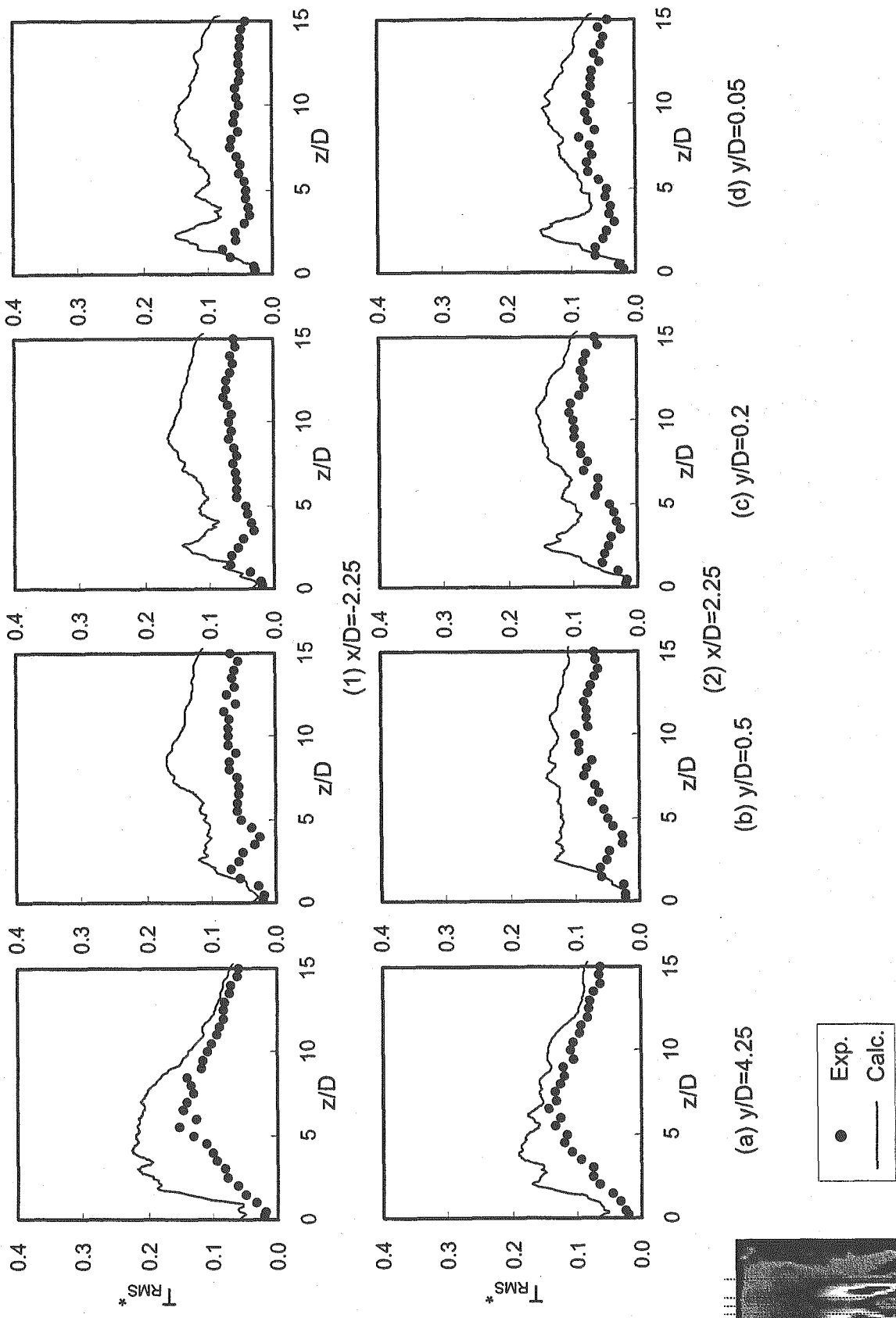


Fig.4.1.21(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Directions between Experimental and Numerical Results.

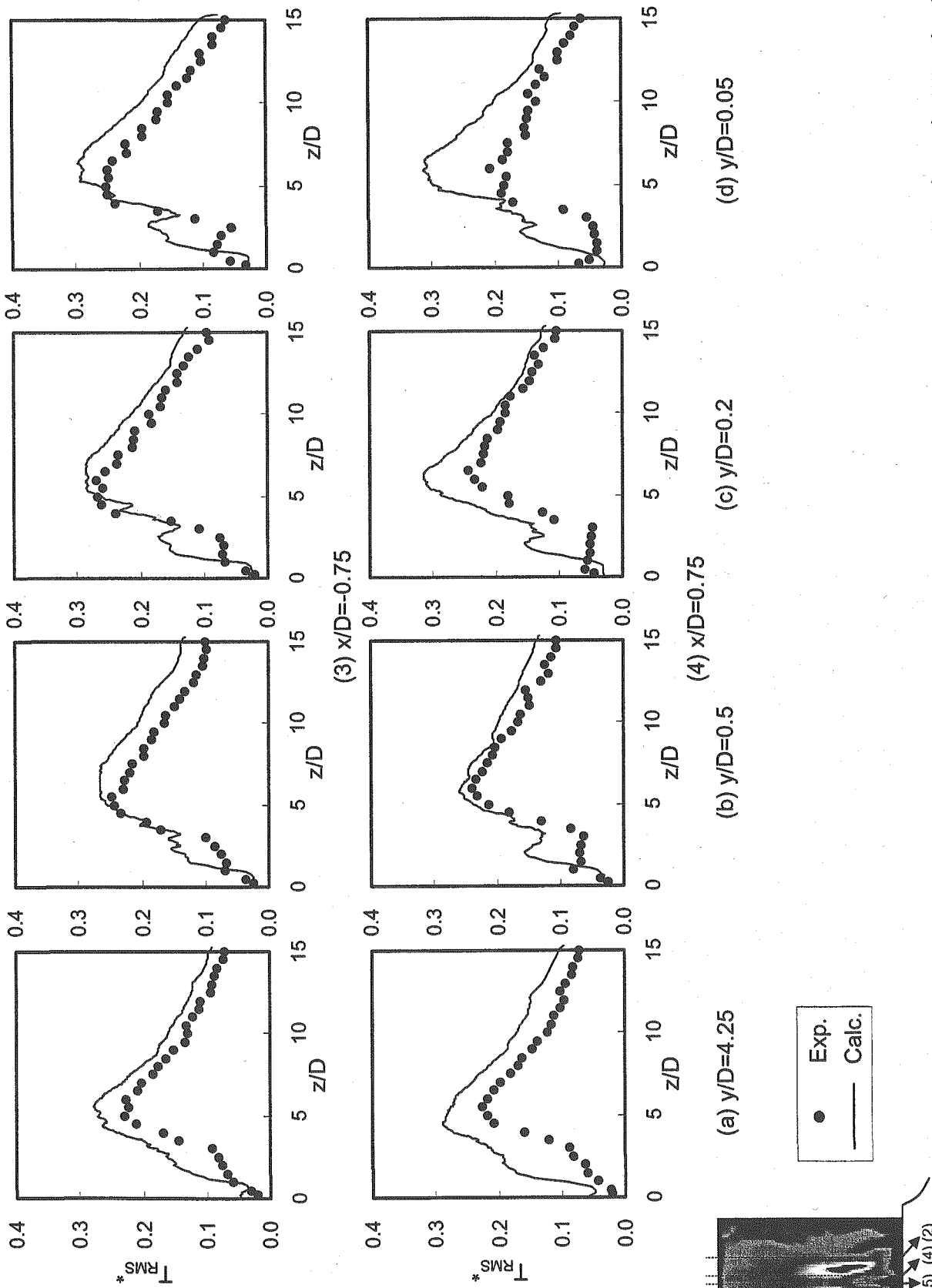


Fig.4.1.21(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Directions between Experimental and Numerical Results.

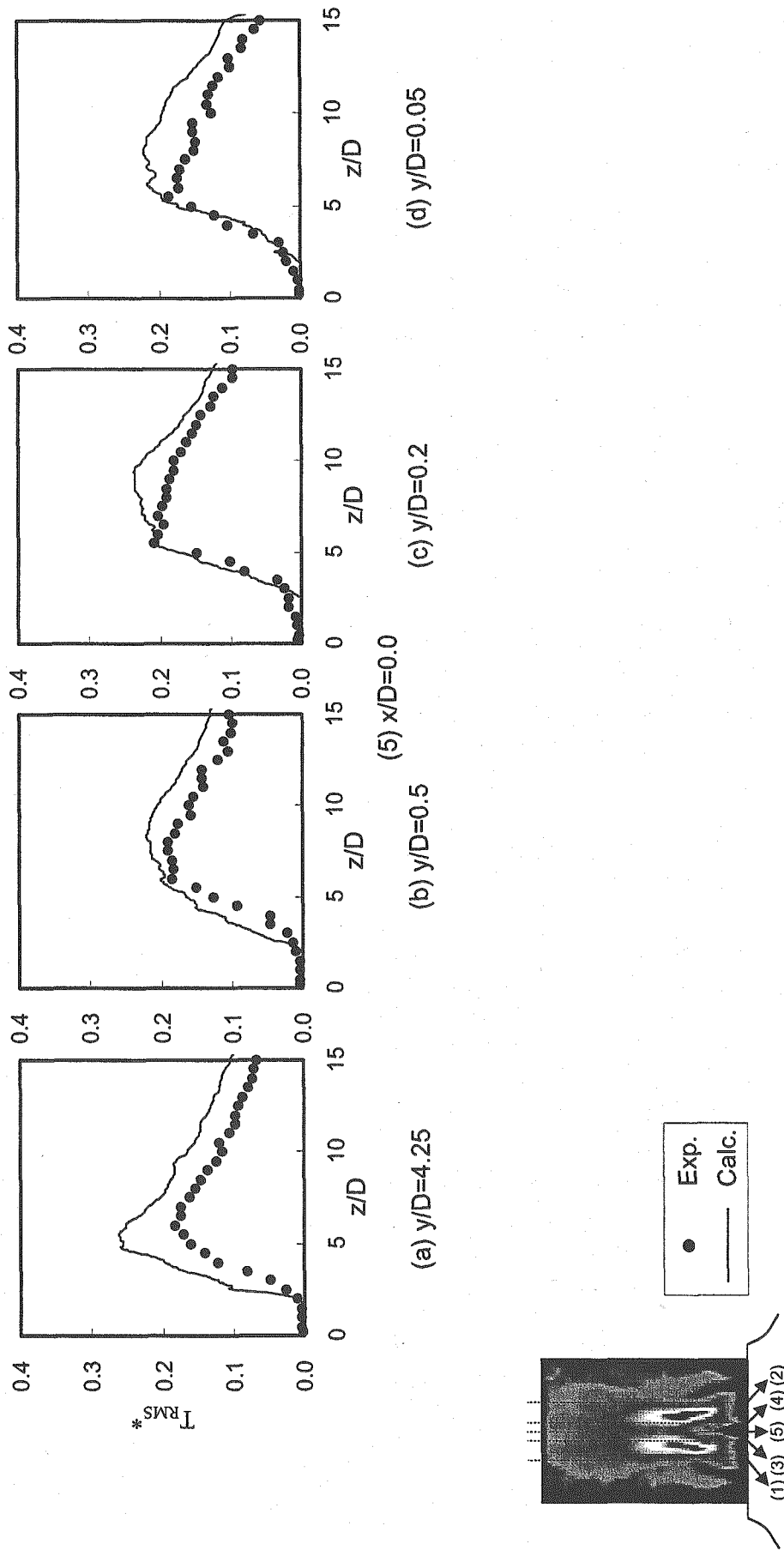


Fig.4.1.21(c) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Directions between Experimental and Numerical Results.

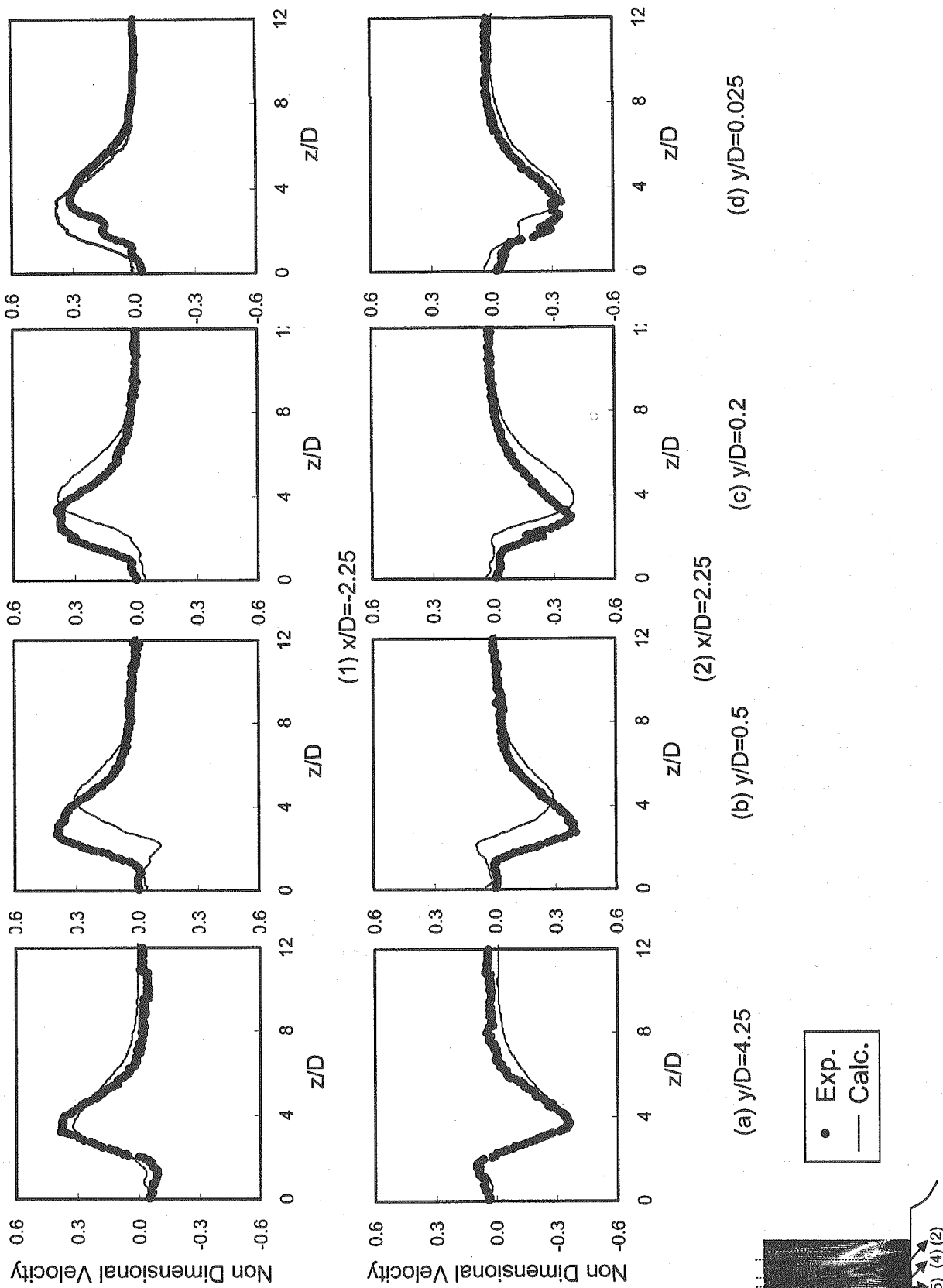


Fig.4.1.22(a) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Experimental and Numerical Results.

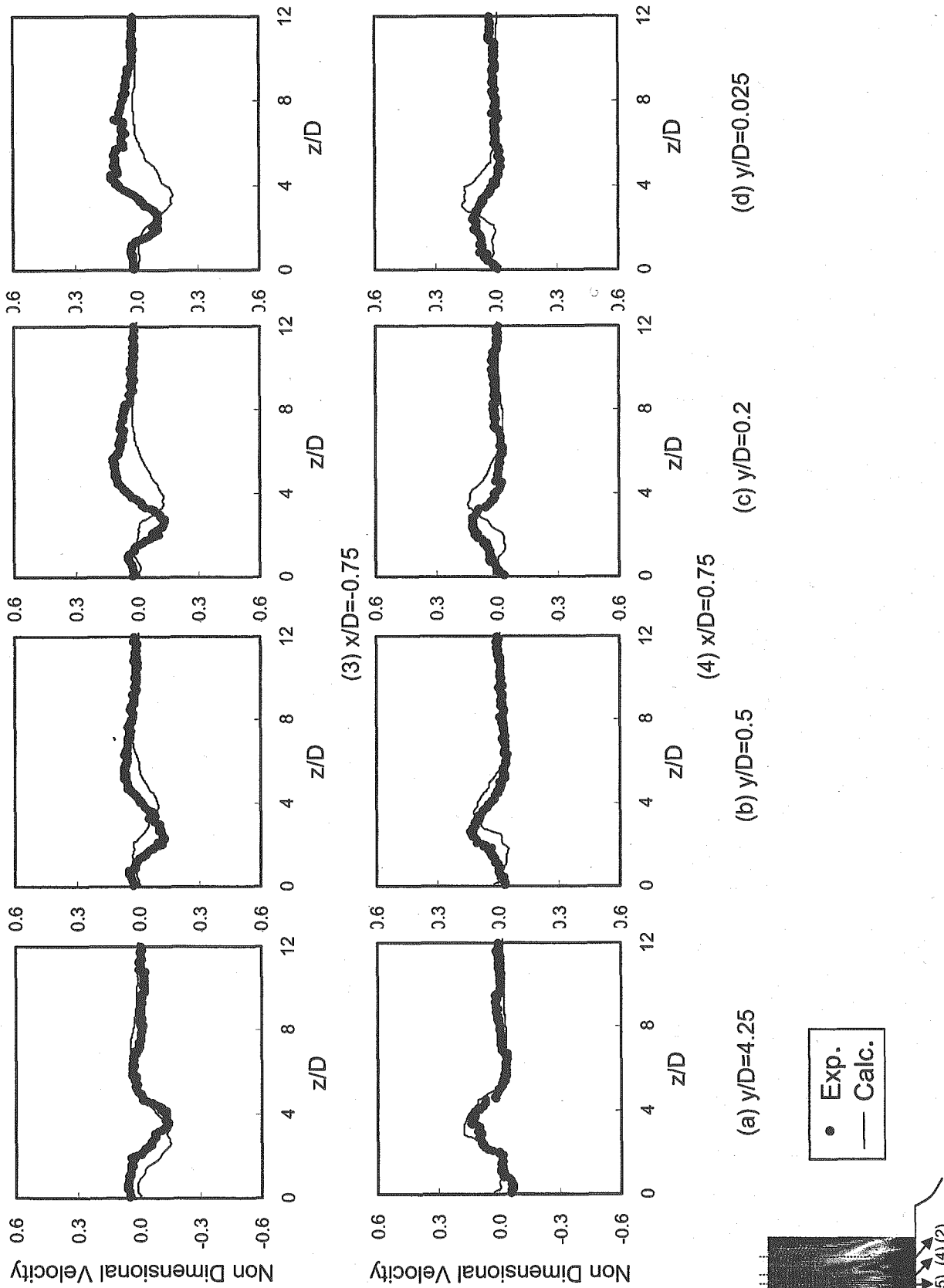


Fig.4.1.22(b) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Experimental and Numerical Results.

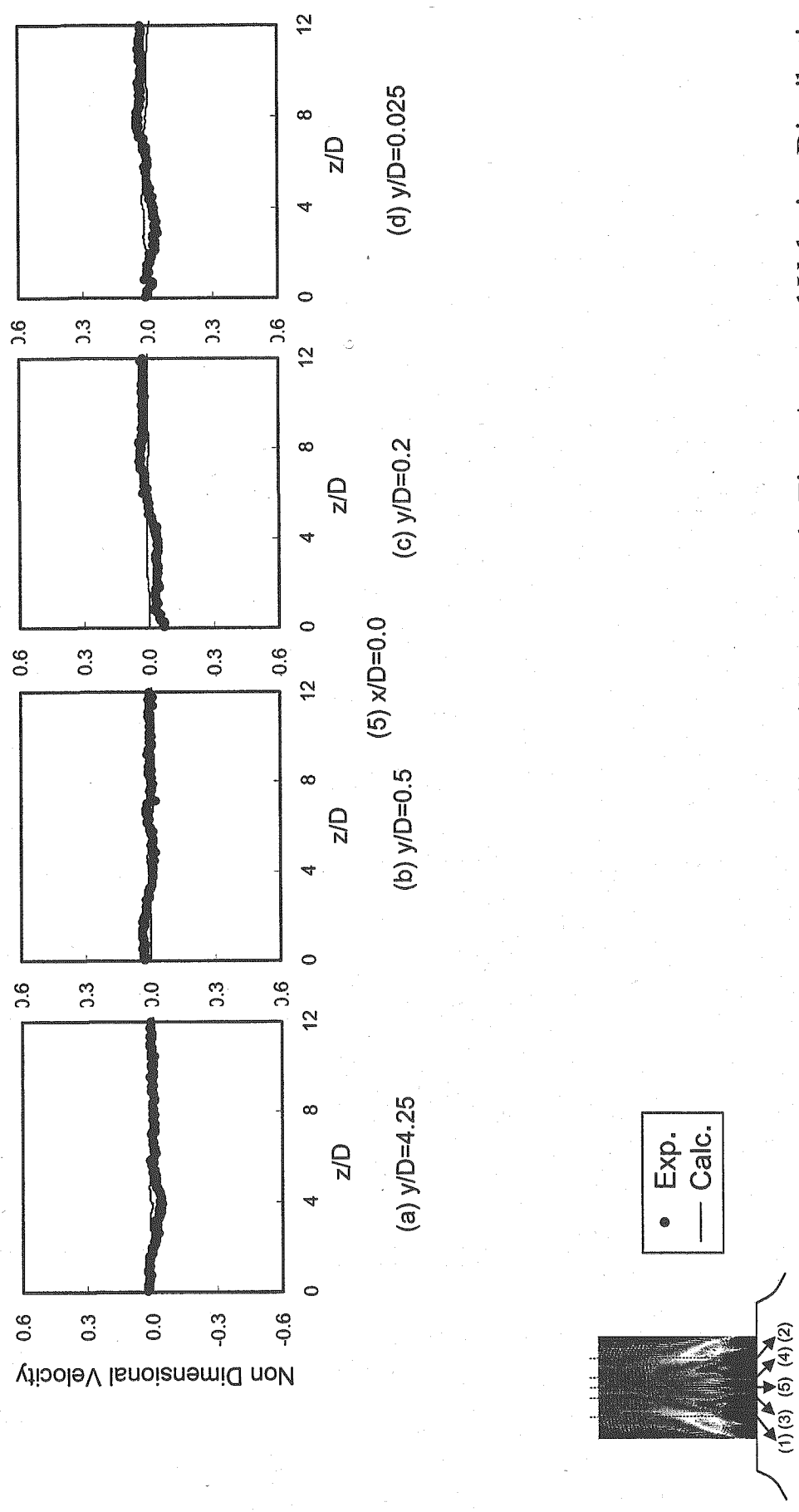


Fig.4.1.22(c) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Experimental and Numerical Results.



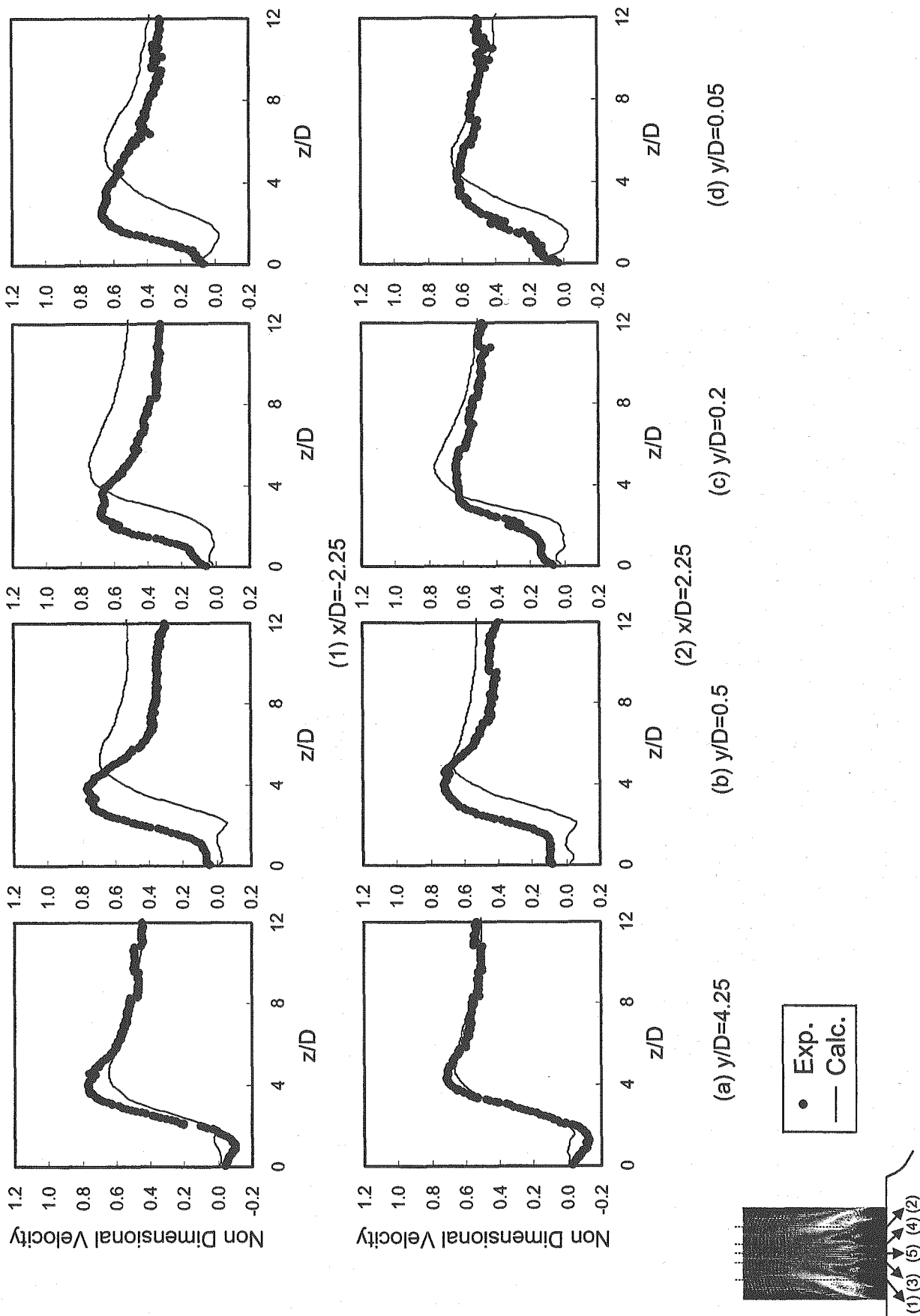


Fig.4.1.23(a) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Experimental and Numerical Results.

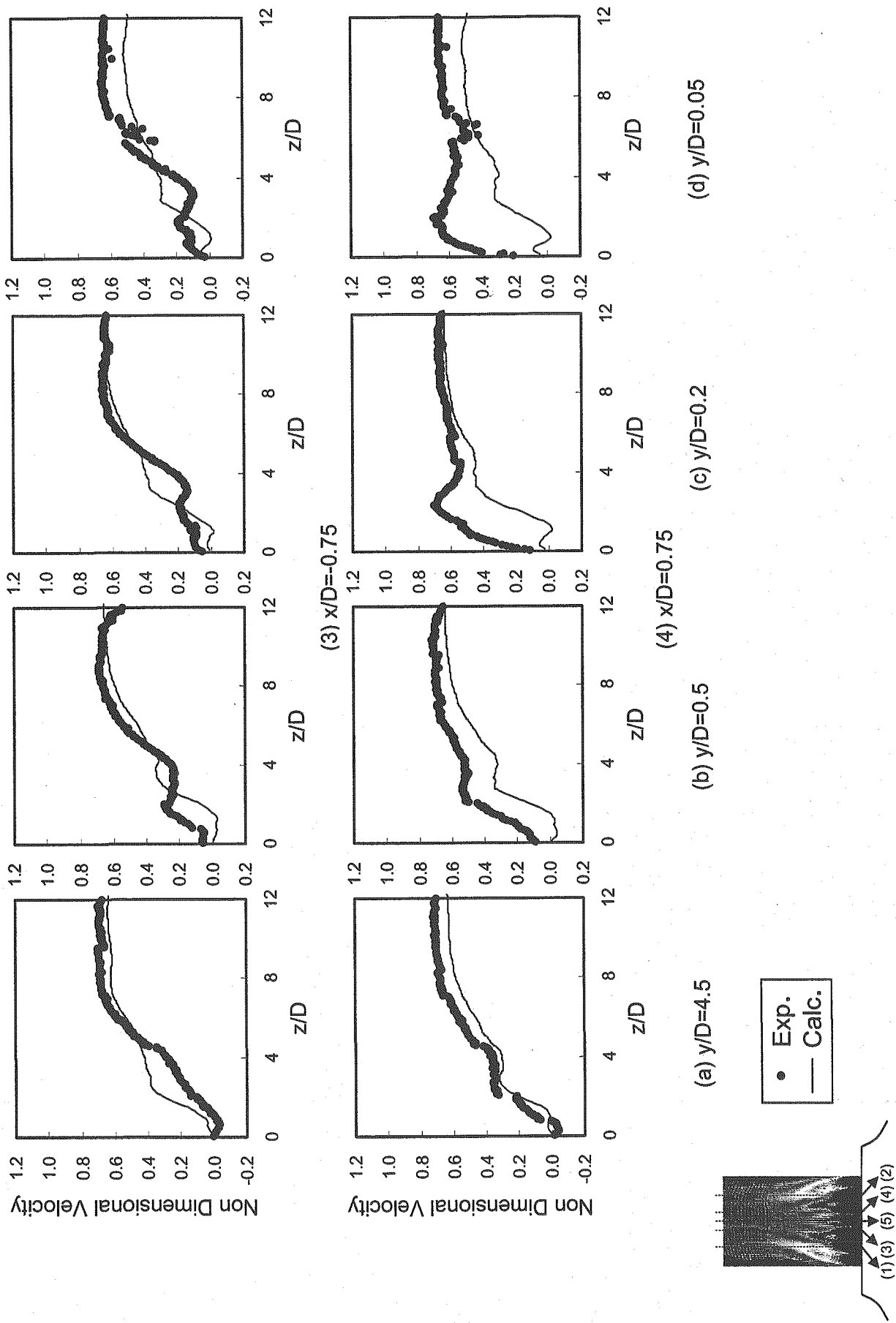


Fig.4.1.23(b) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Experimental and Numerical Results.

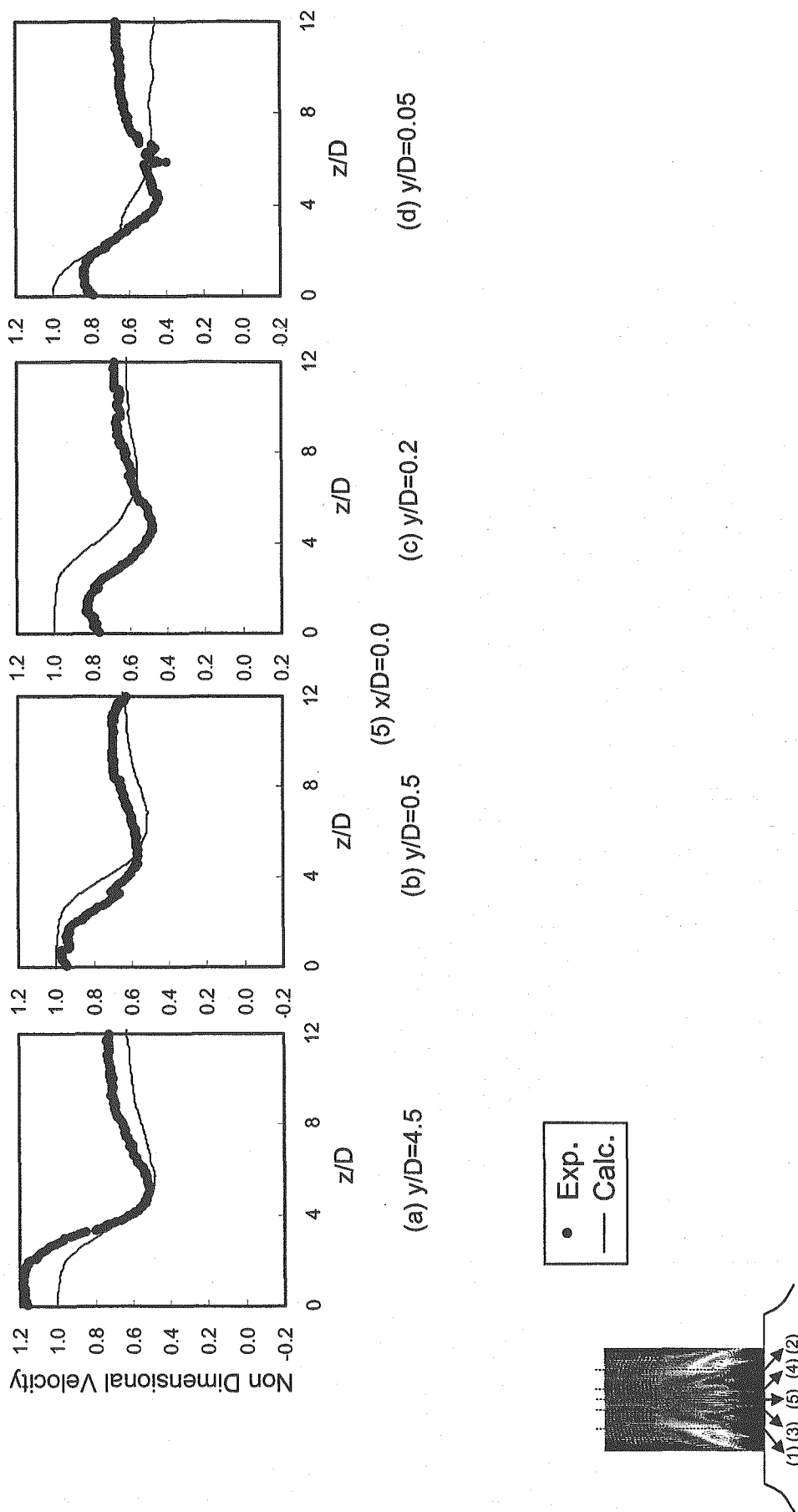
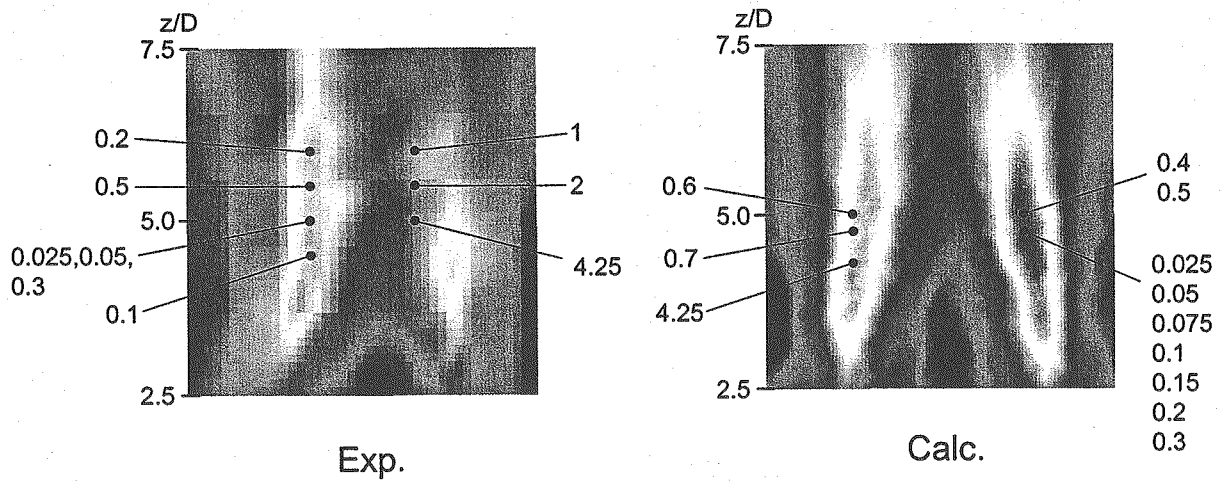
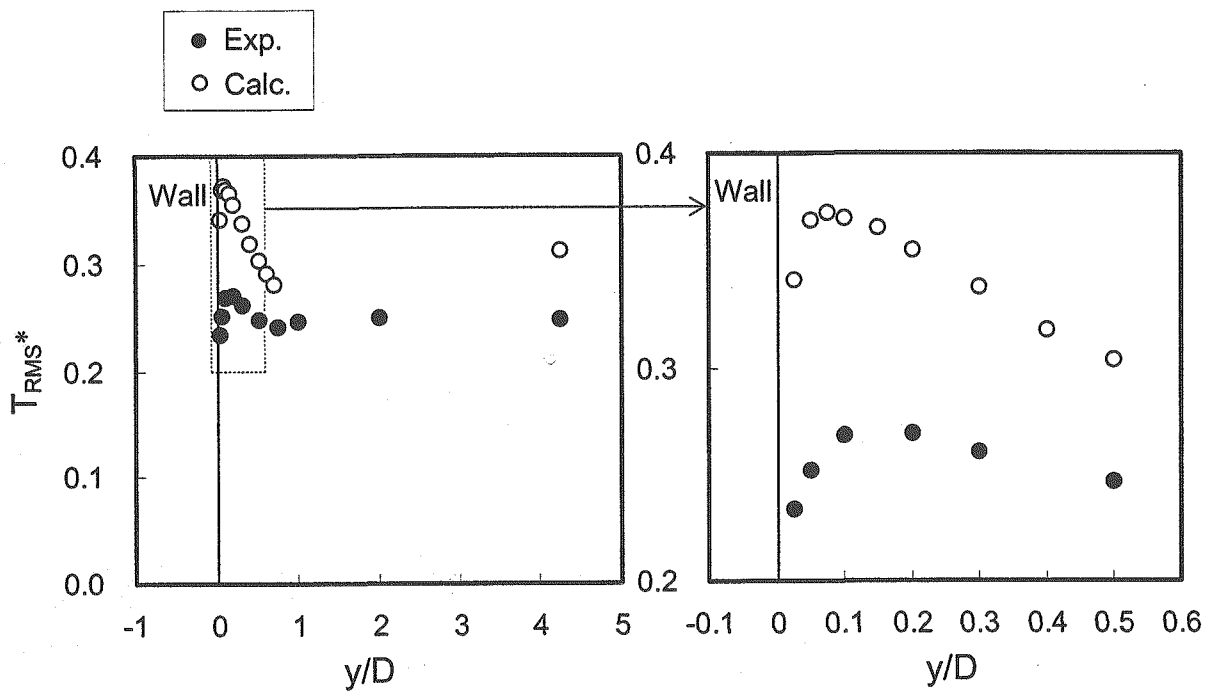


Fig.4.1.23(c) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Experimental and Numerical Results.



Measured at each  $y/D$  cross section where the maximum Temperature Fluctuations Intensity was found

Fig.4.1.24 Comparisons of Depth Distributions of Maximum Temperature Fluctuations Intensity at Each Cross-Section normal to Wall between Experimental and Numerical Results.

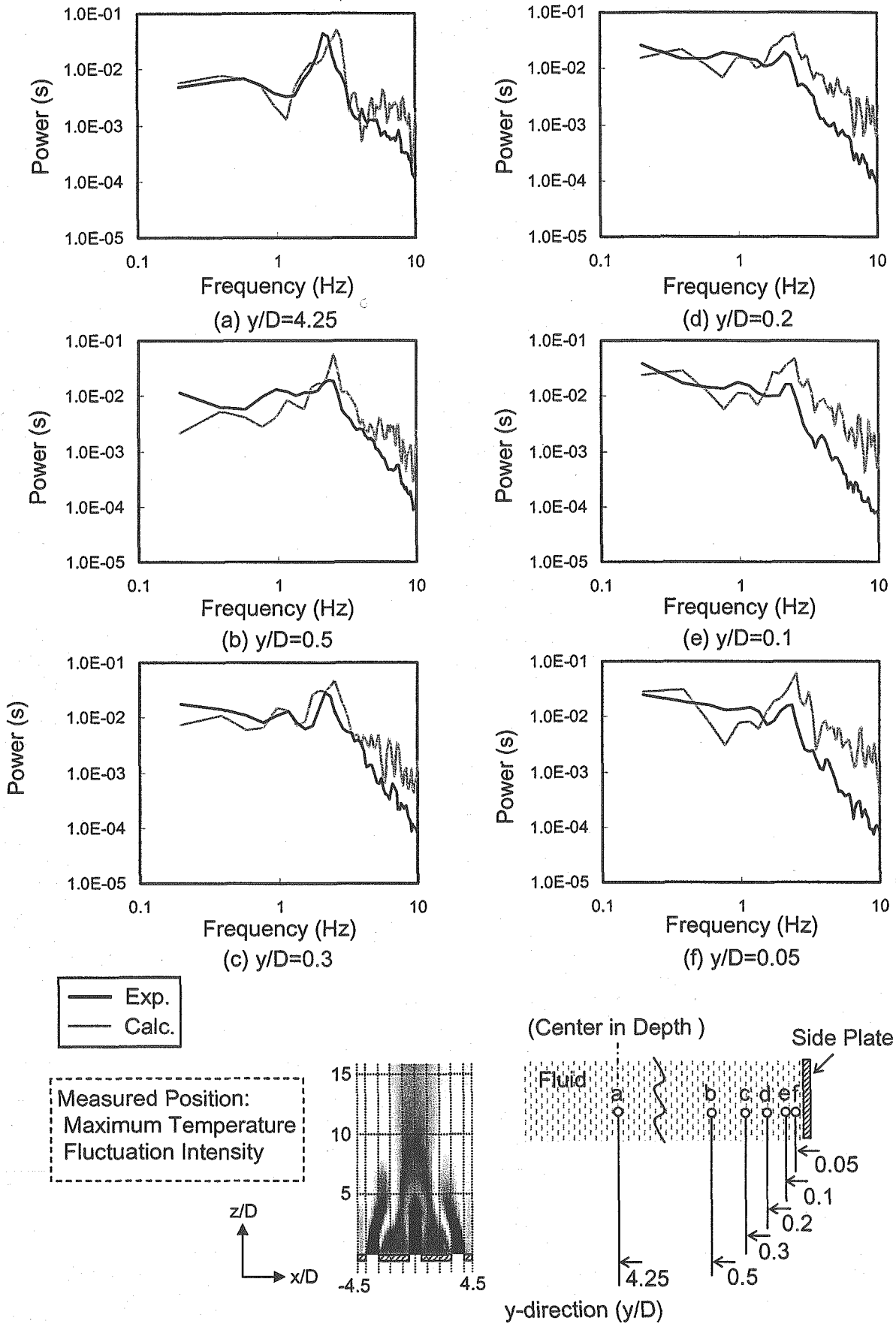
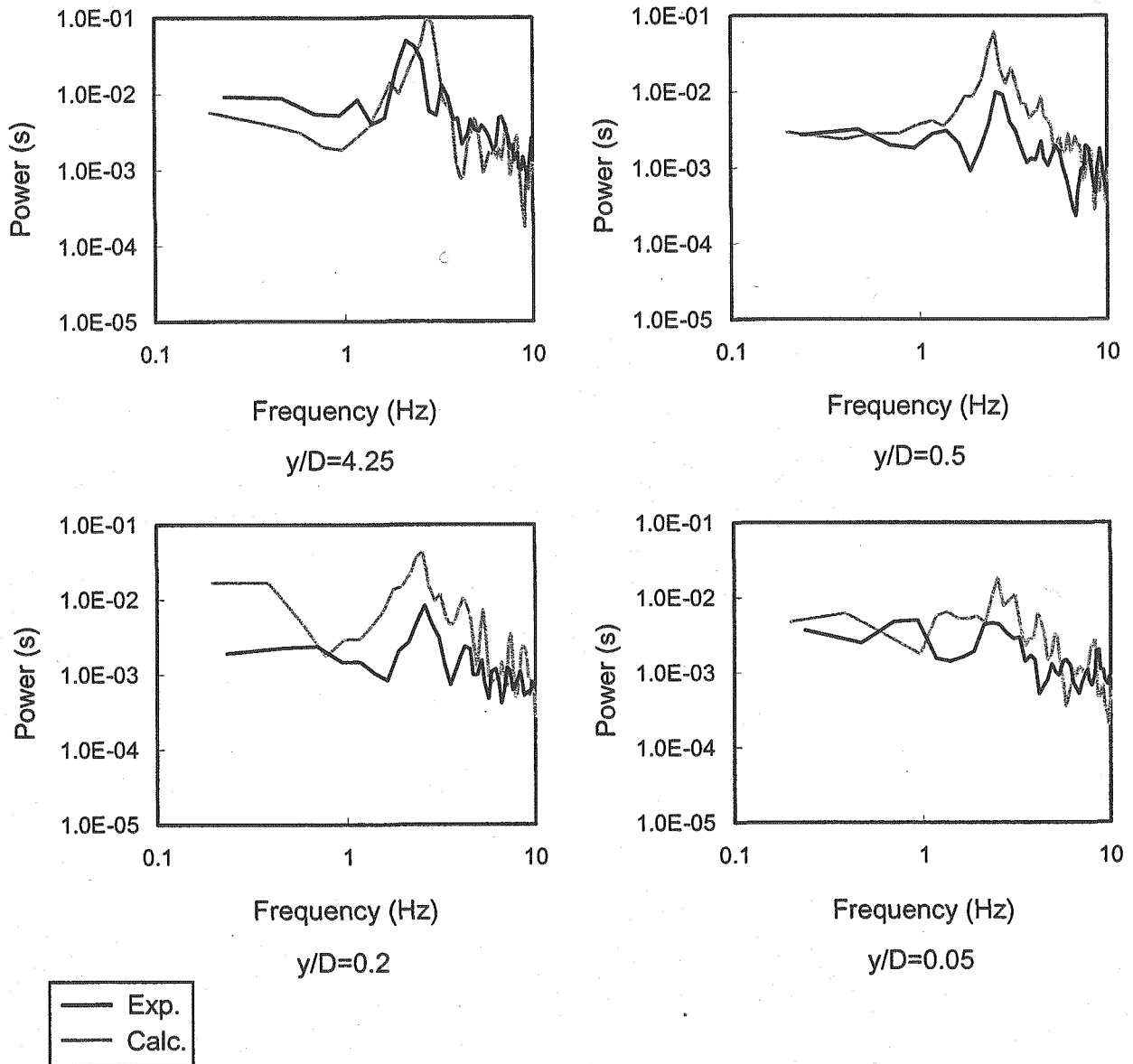


Fig.4.2.1 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation versus Frequency between Experimental and Numerical Results.



Measured Position:  
Maximum Temperature  
Fluctuation Intensity

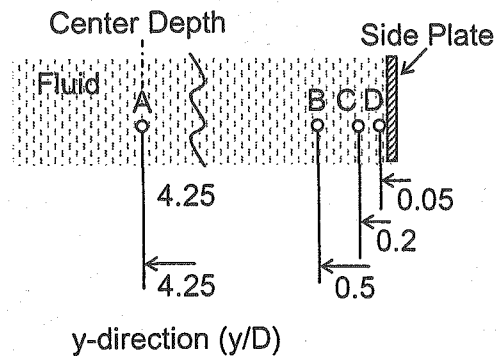
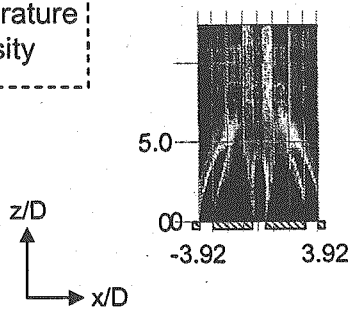


Fig.4.2.2 Comparisons of Power Spectrum Density of Horizontal Velocity versus Frequency between Experimental and Numerical Results.

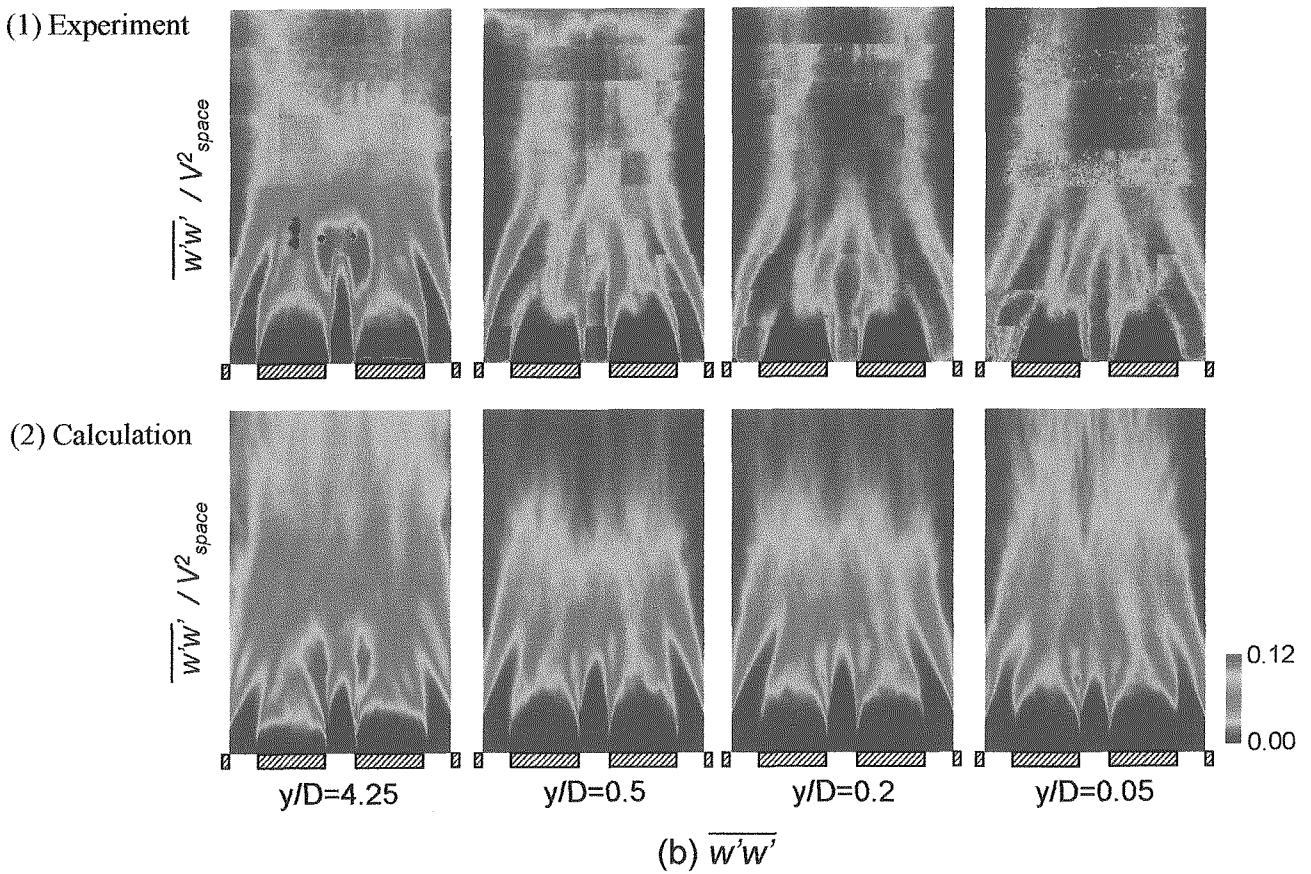
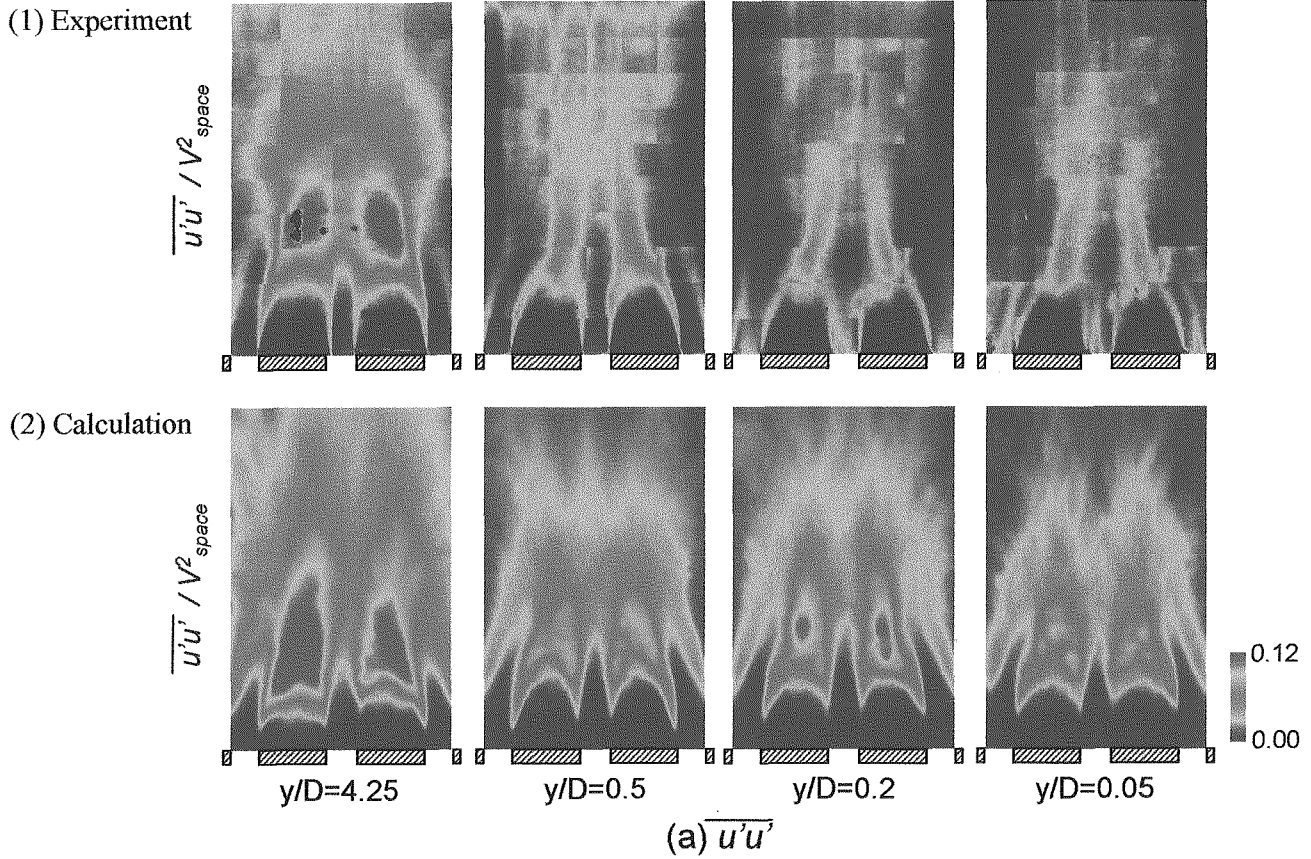


Fig.4.3.1 Comparisons of Contours of Normal Components of Second Moments in Turbulence between Experimental and Numerical Results.

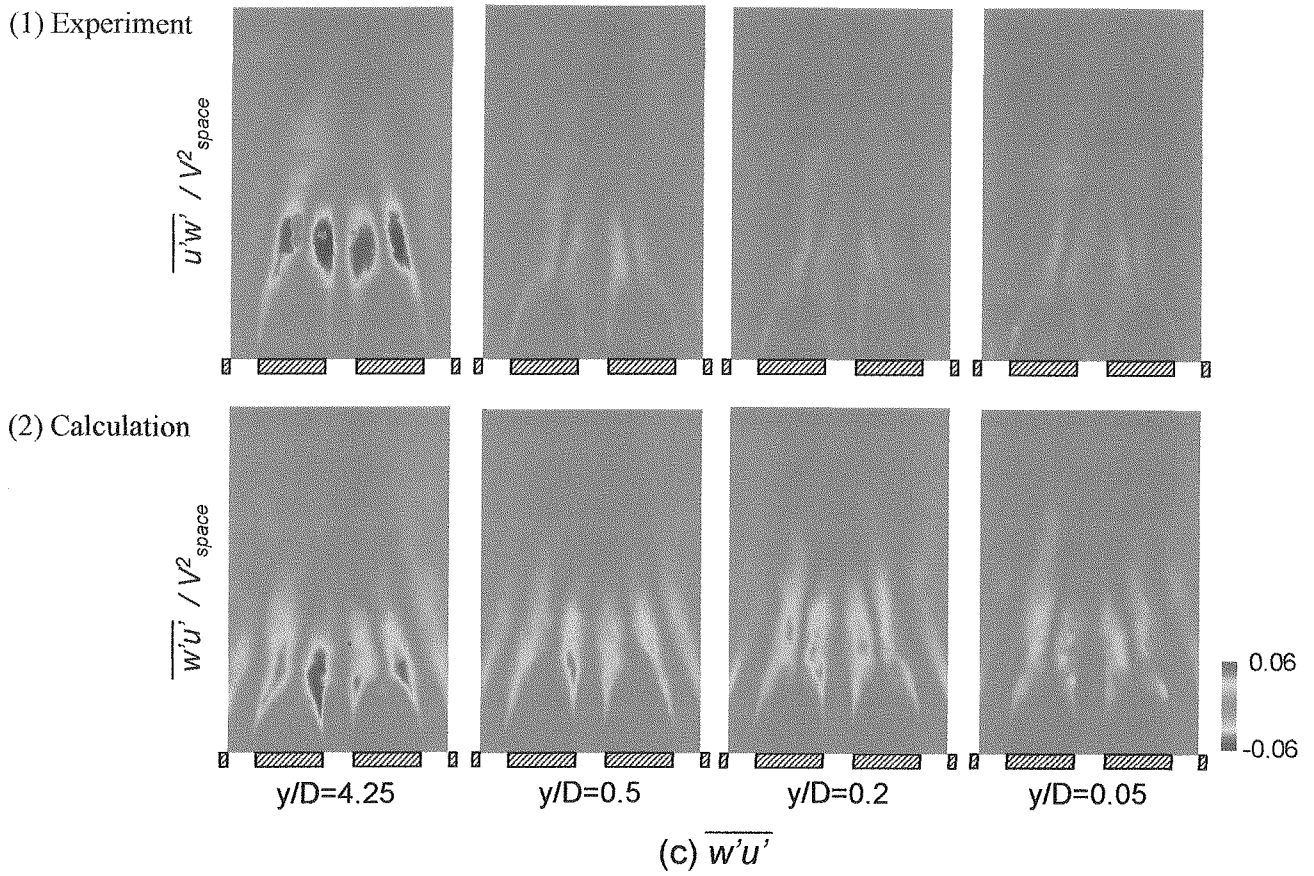


Fig.4.3.2 Comparisons of Contours of Shear Components of Second Moments in Turbulence between Experimental and Numerical Results.



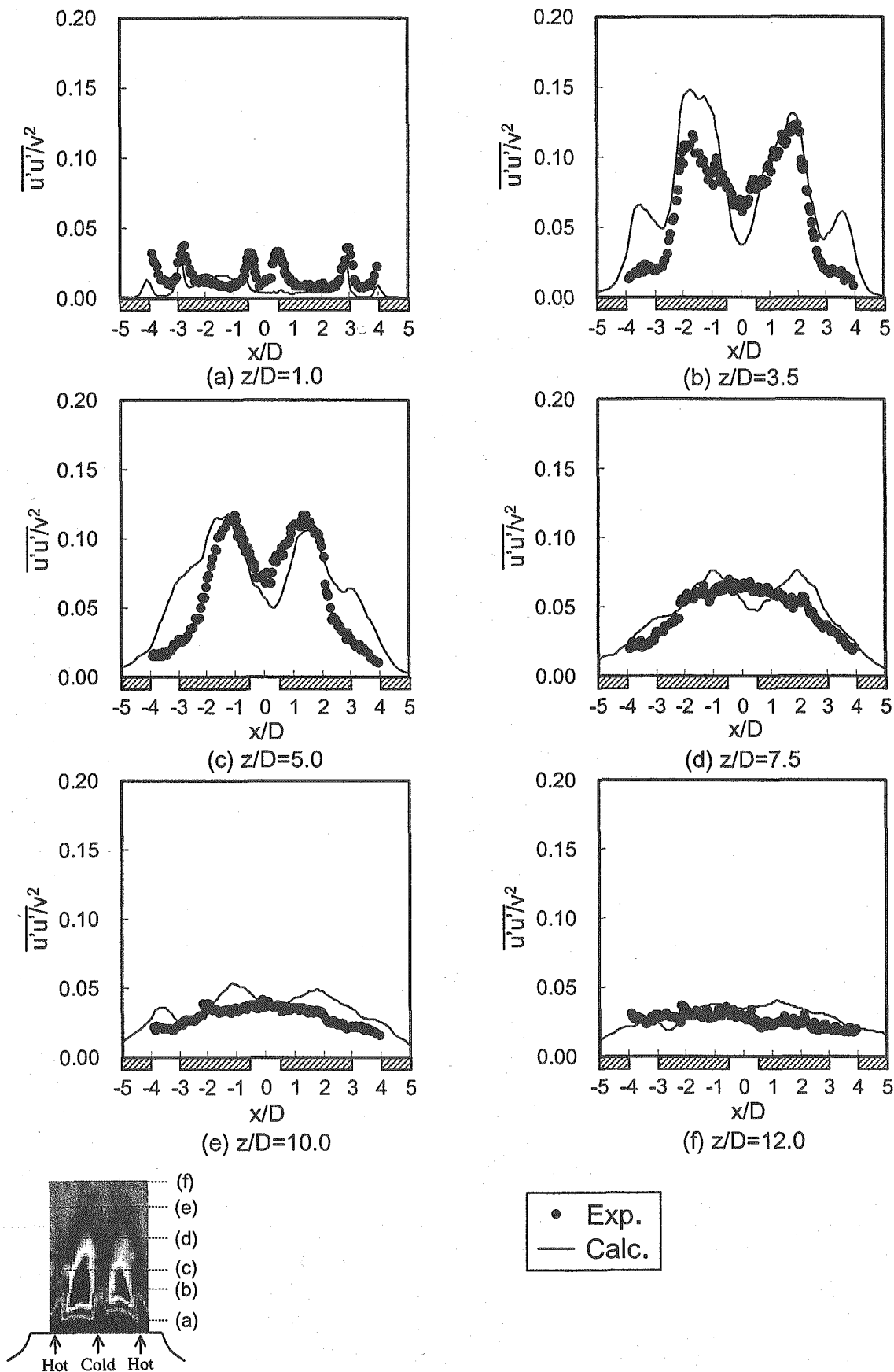


Fig.4.3.3 Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ )

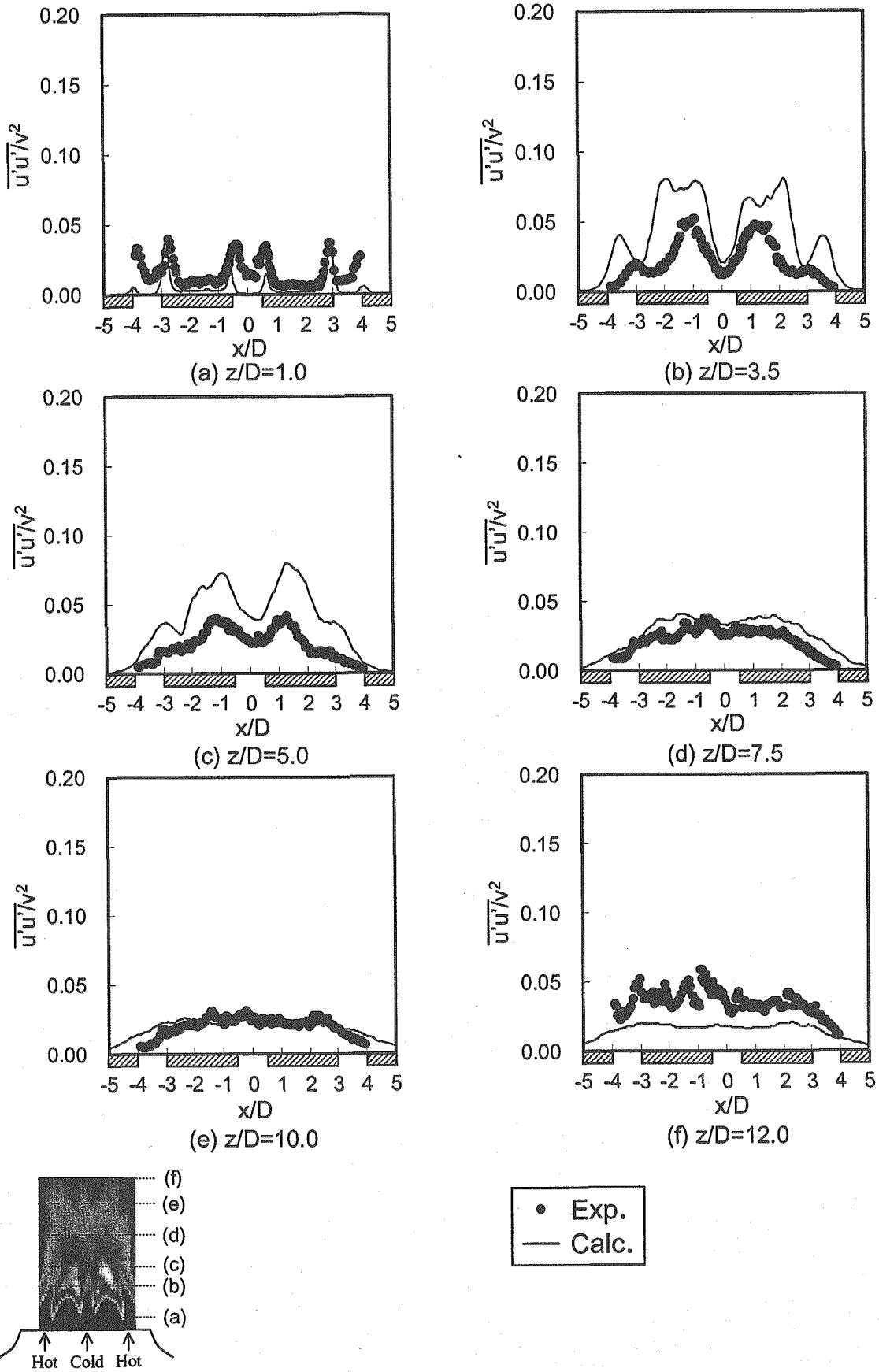
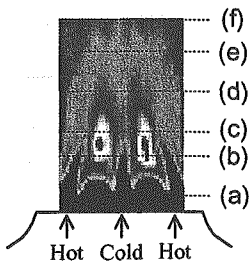
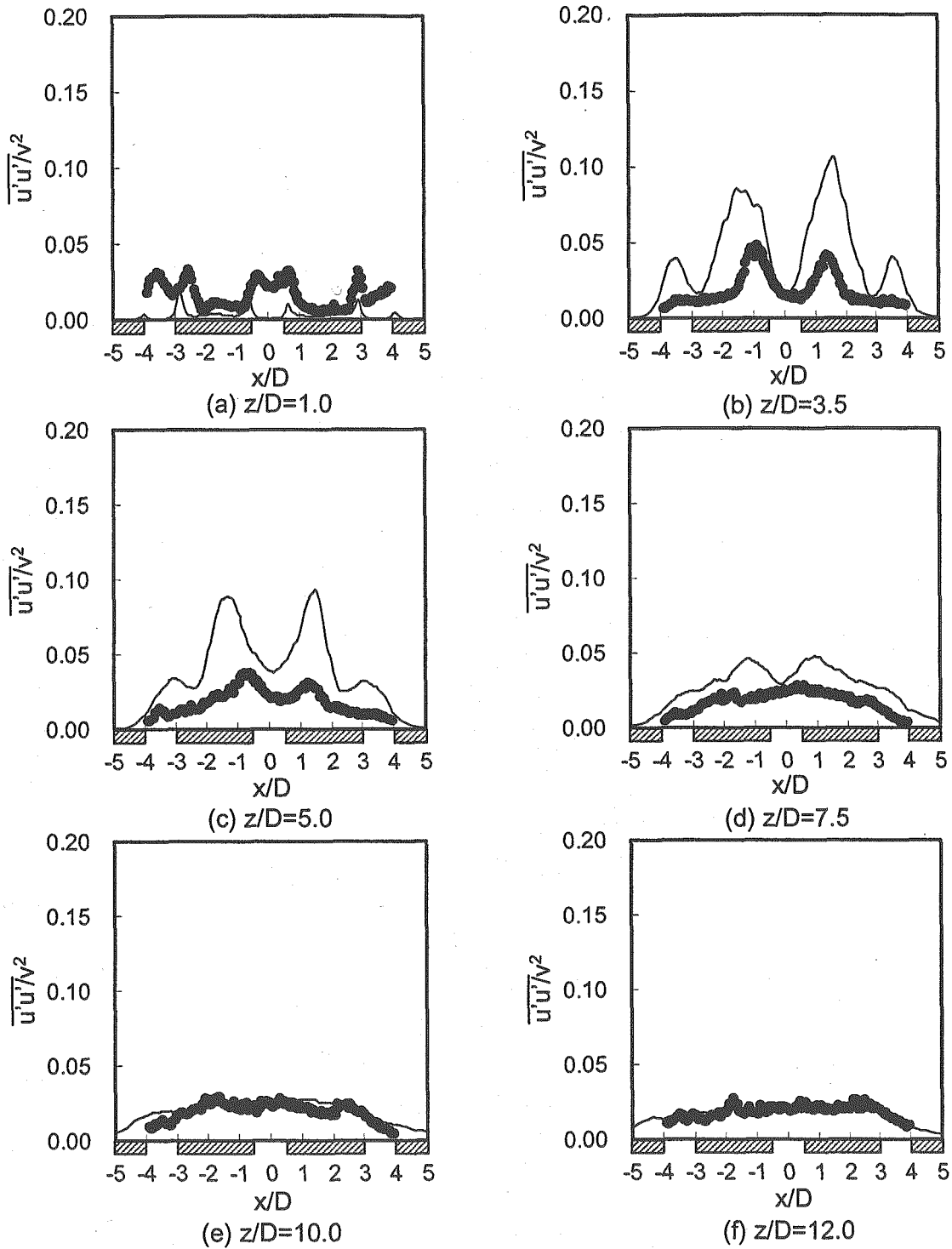


Fig.4.3.4 Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )



• Exp.  
— Calc.

Fig.4.3.5 Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ )

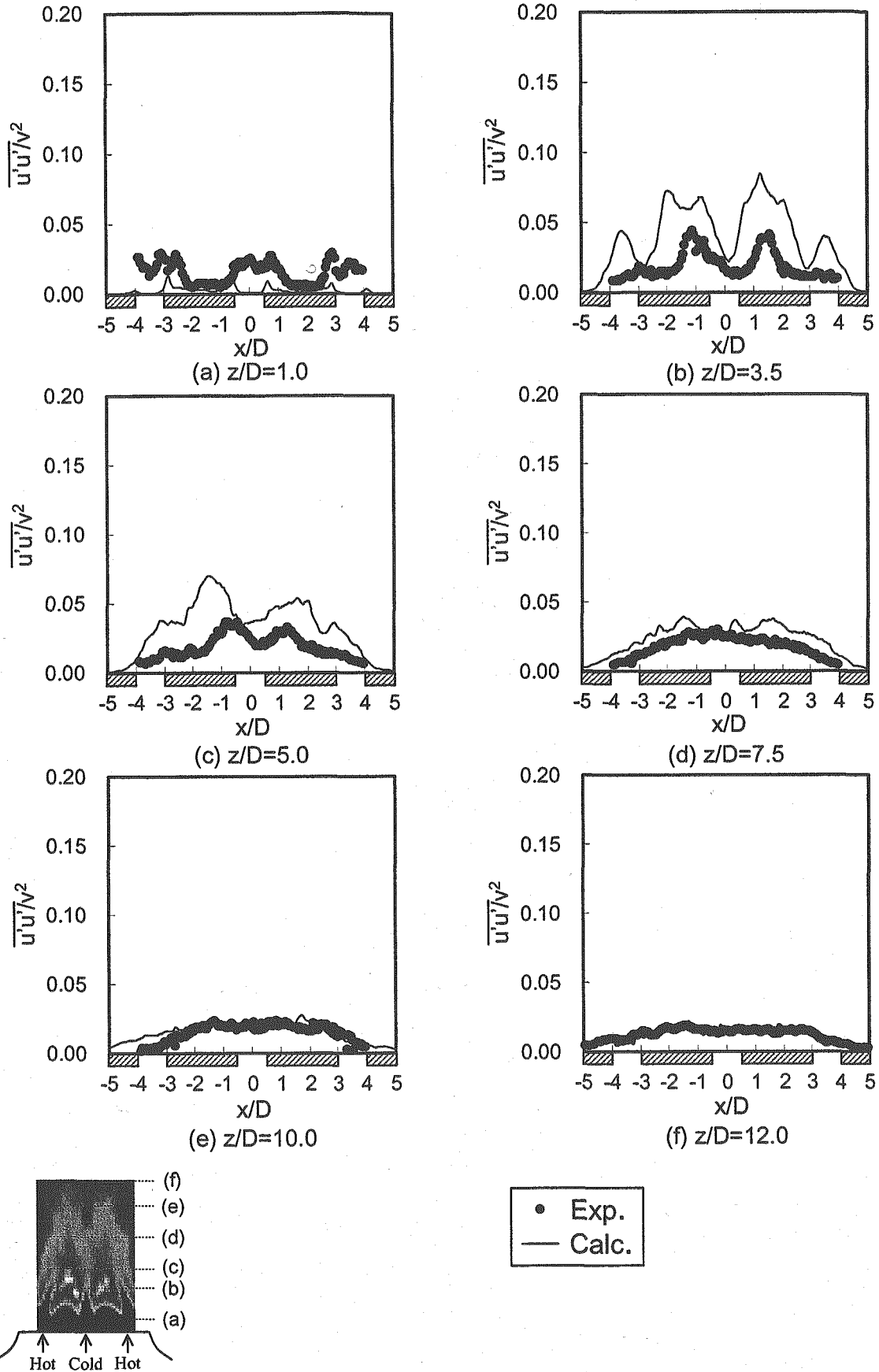


Fig.4.3.6 Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ )

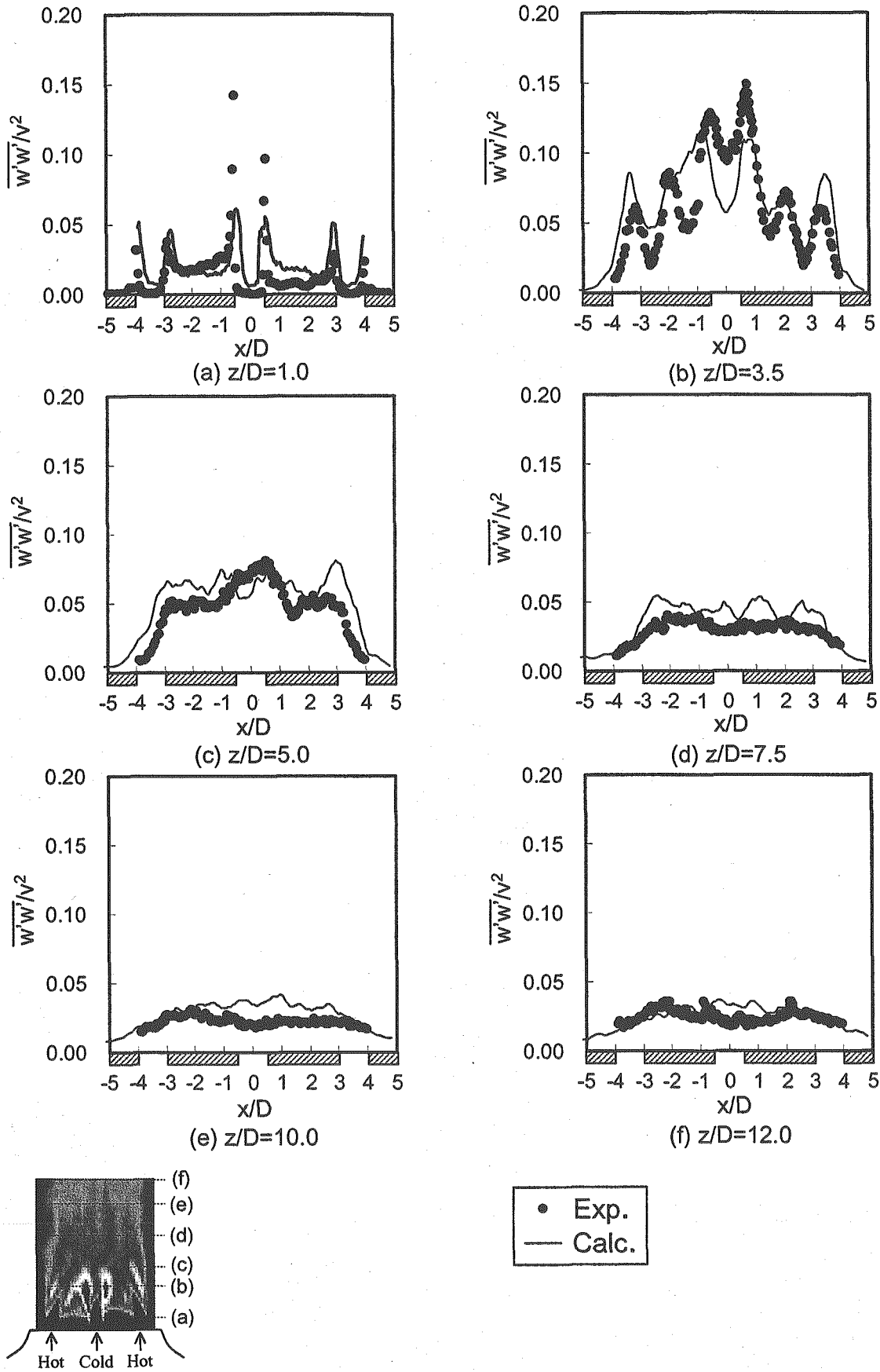


Fig.4.3.7 Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ )

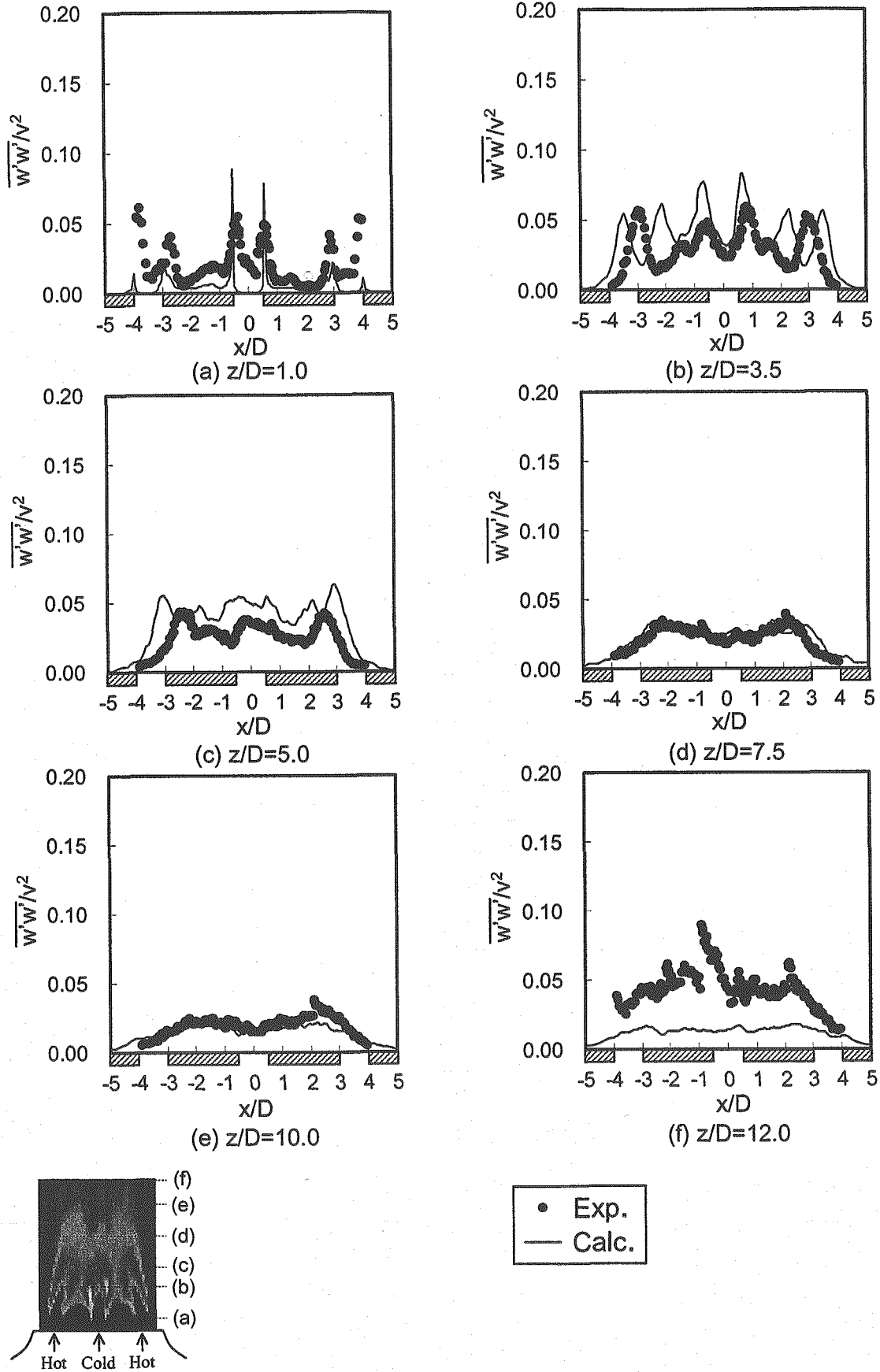


Fig.4.3.8 Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )

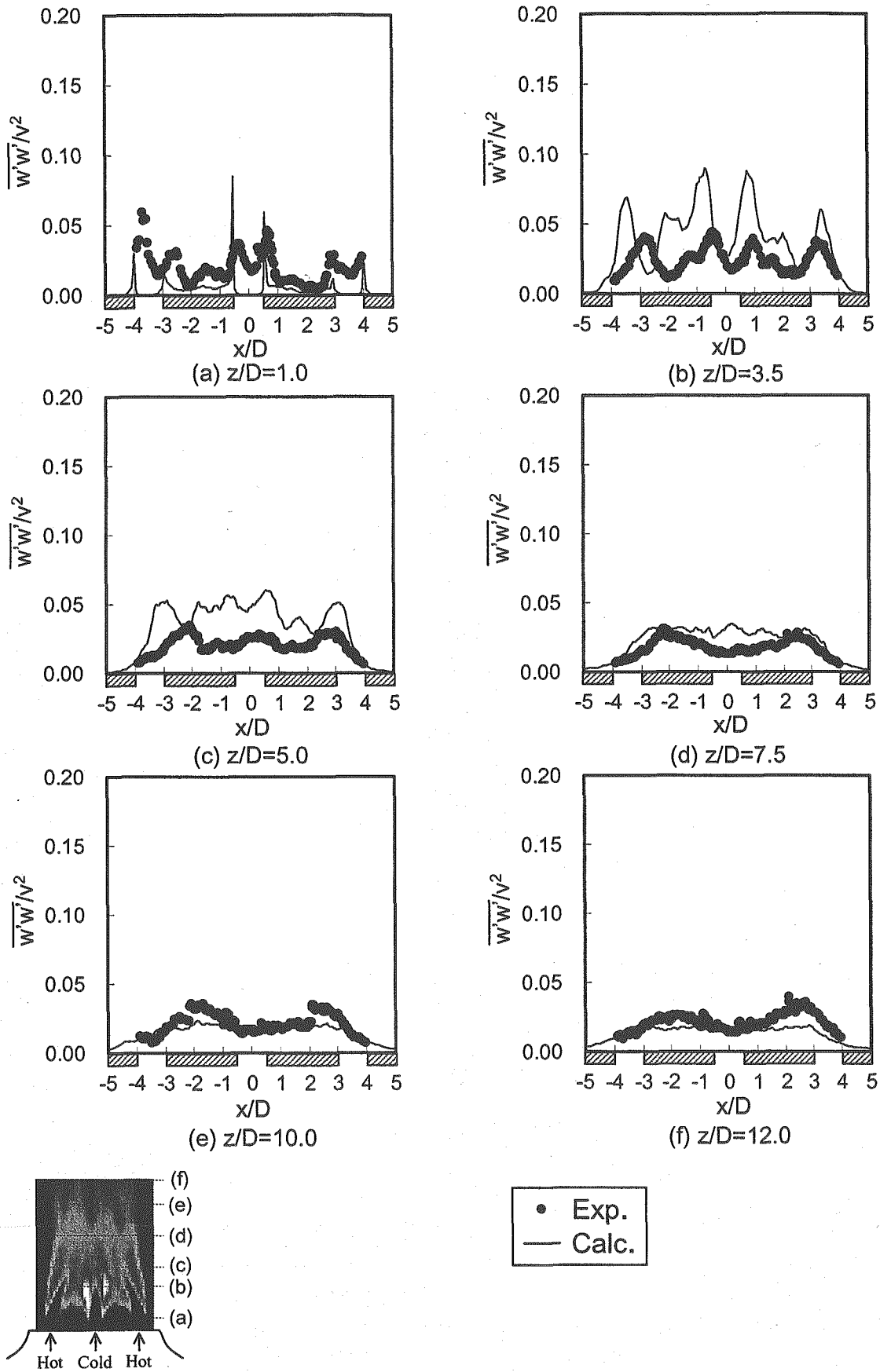


Fig.4.3.9 Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ )

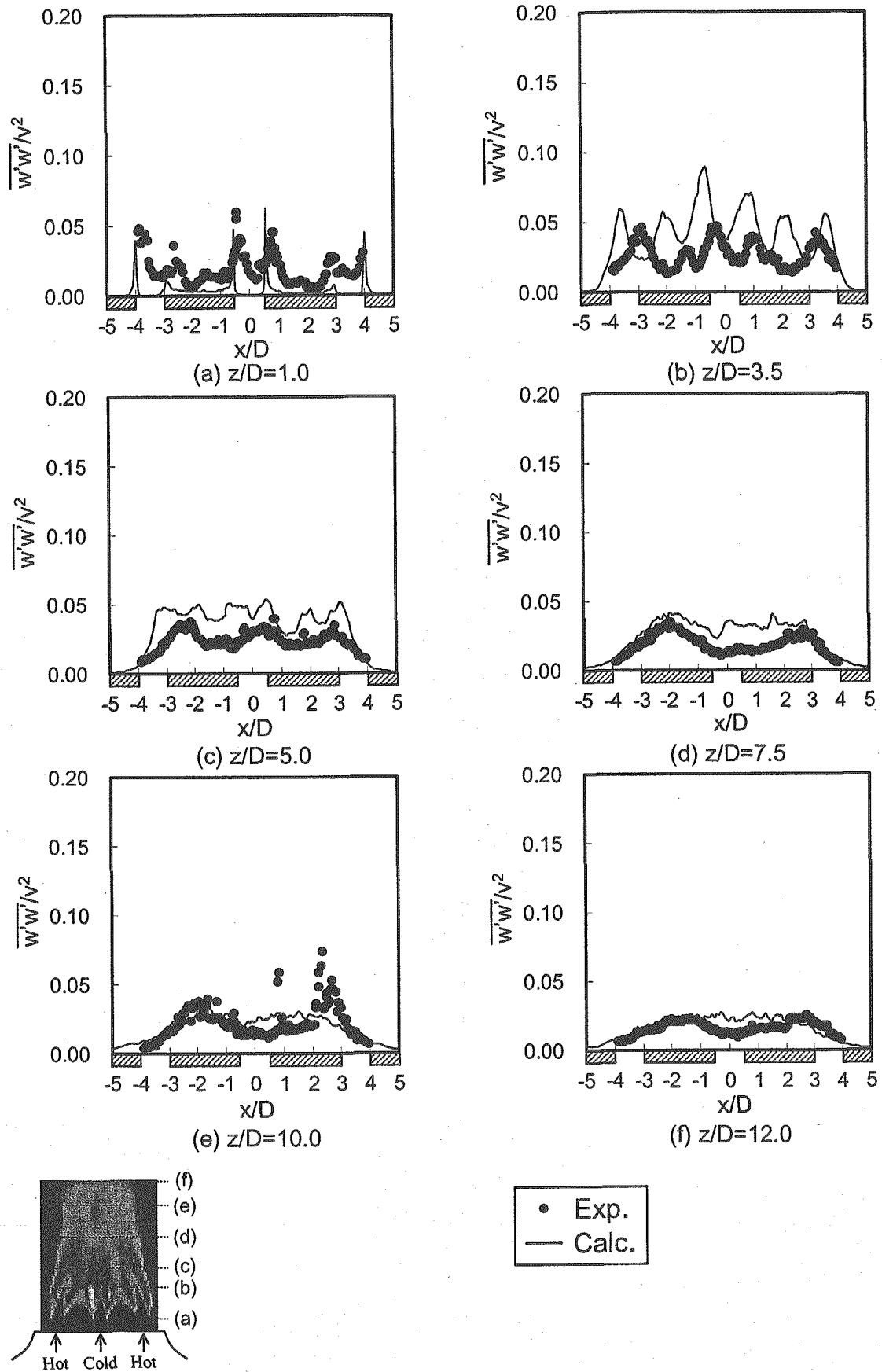


Fig.4.3.10 Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ )



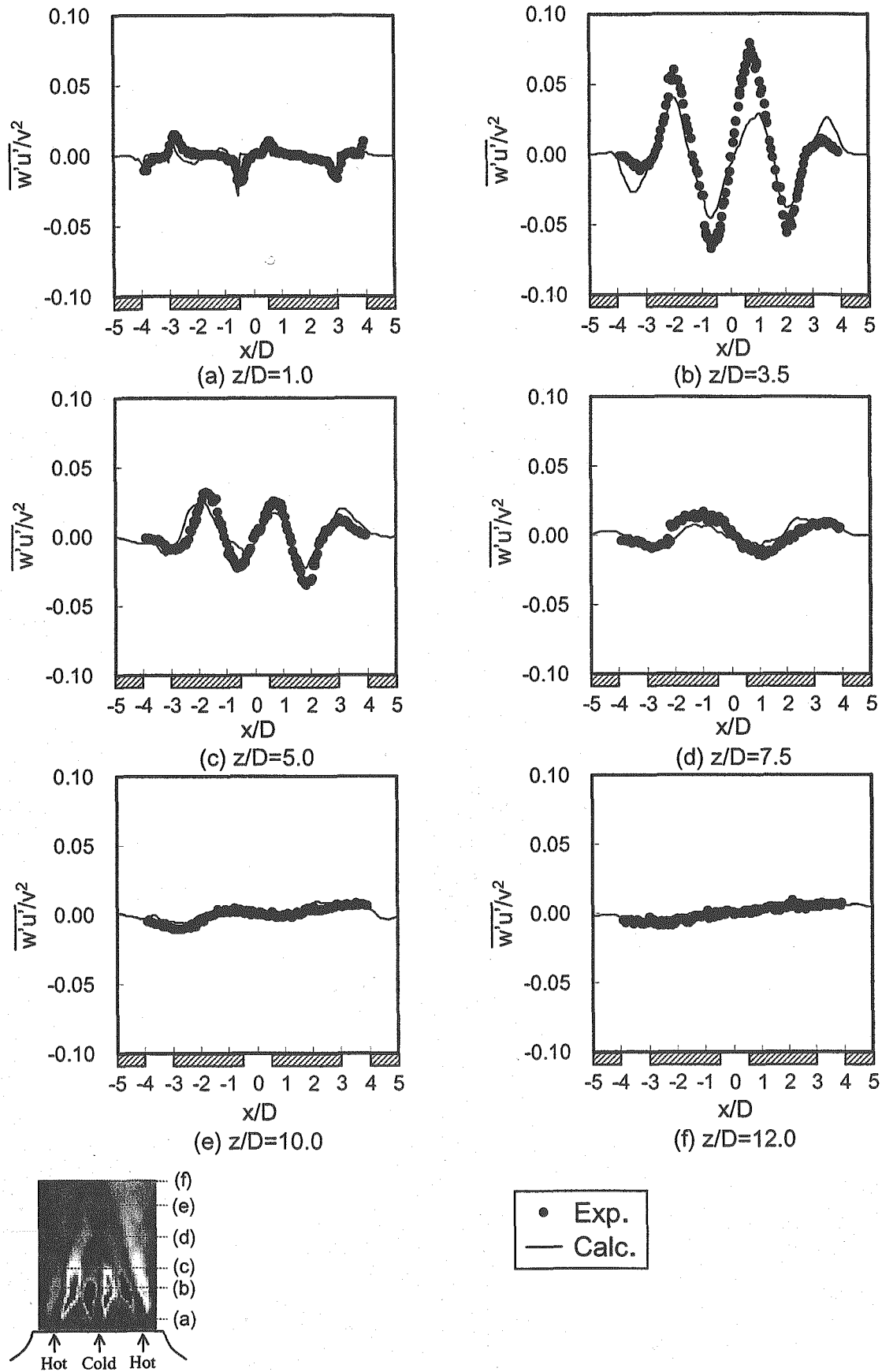
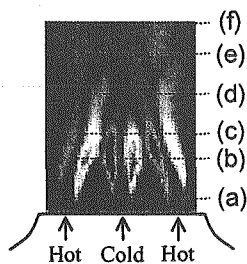
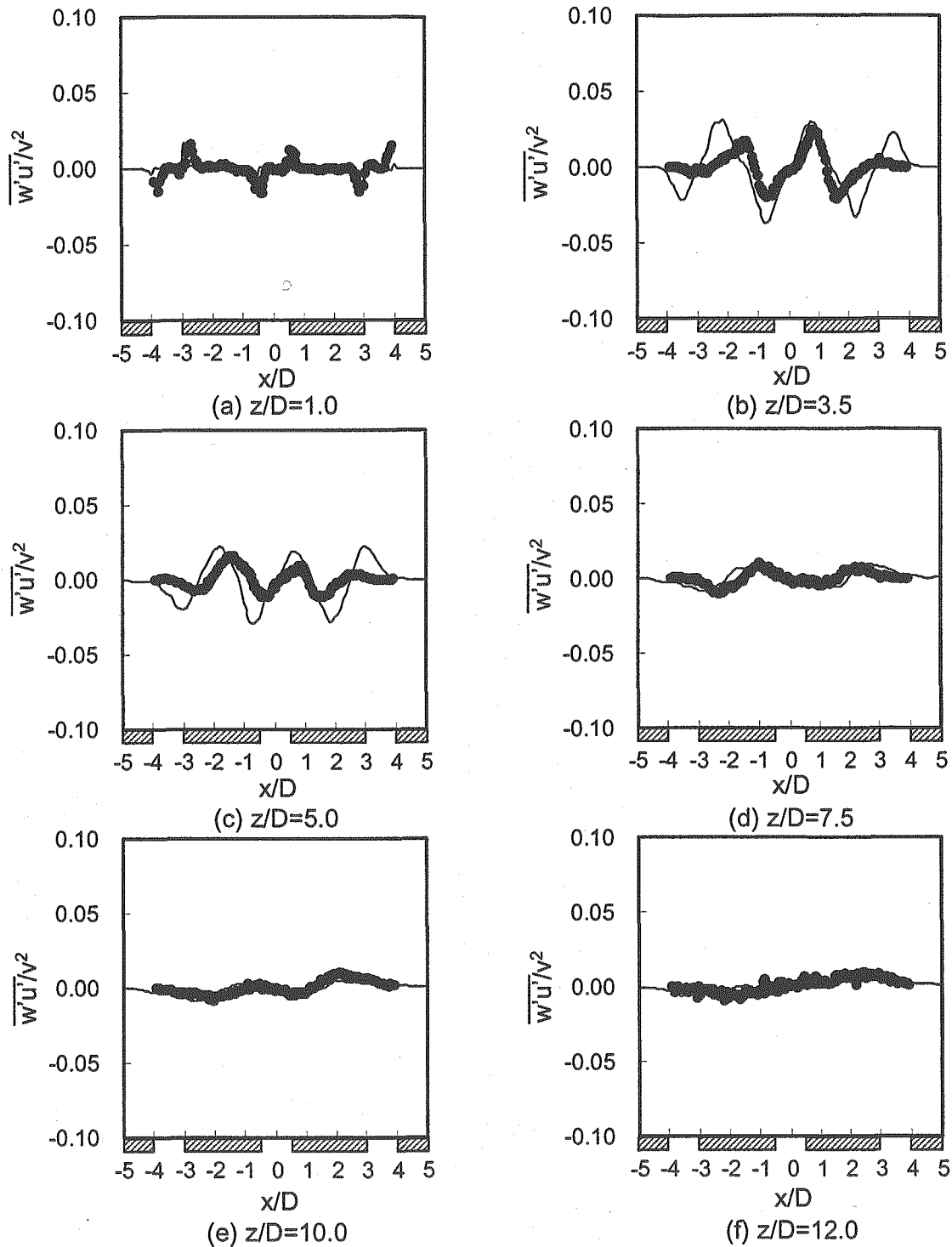


Fig.4.3.11 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=4.25$ )



• Exp.  
— Calc.

Fig.4.3.12 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )

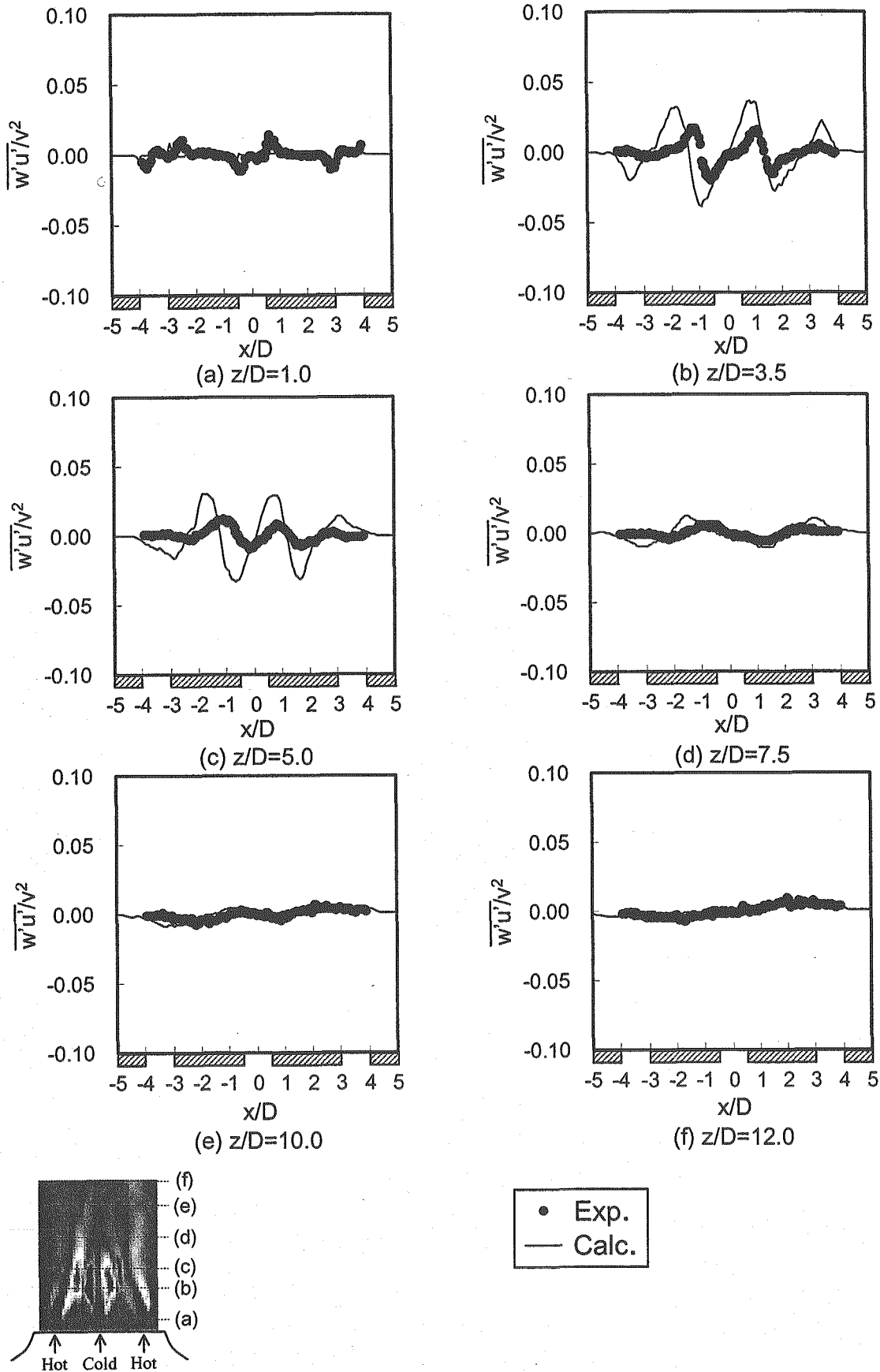


Fig.4.3.13 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.2$ )

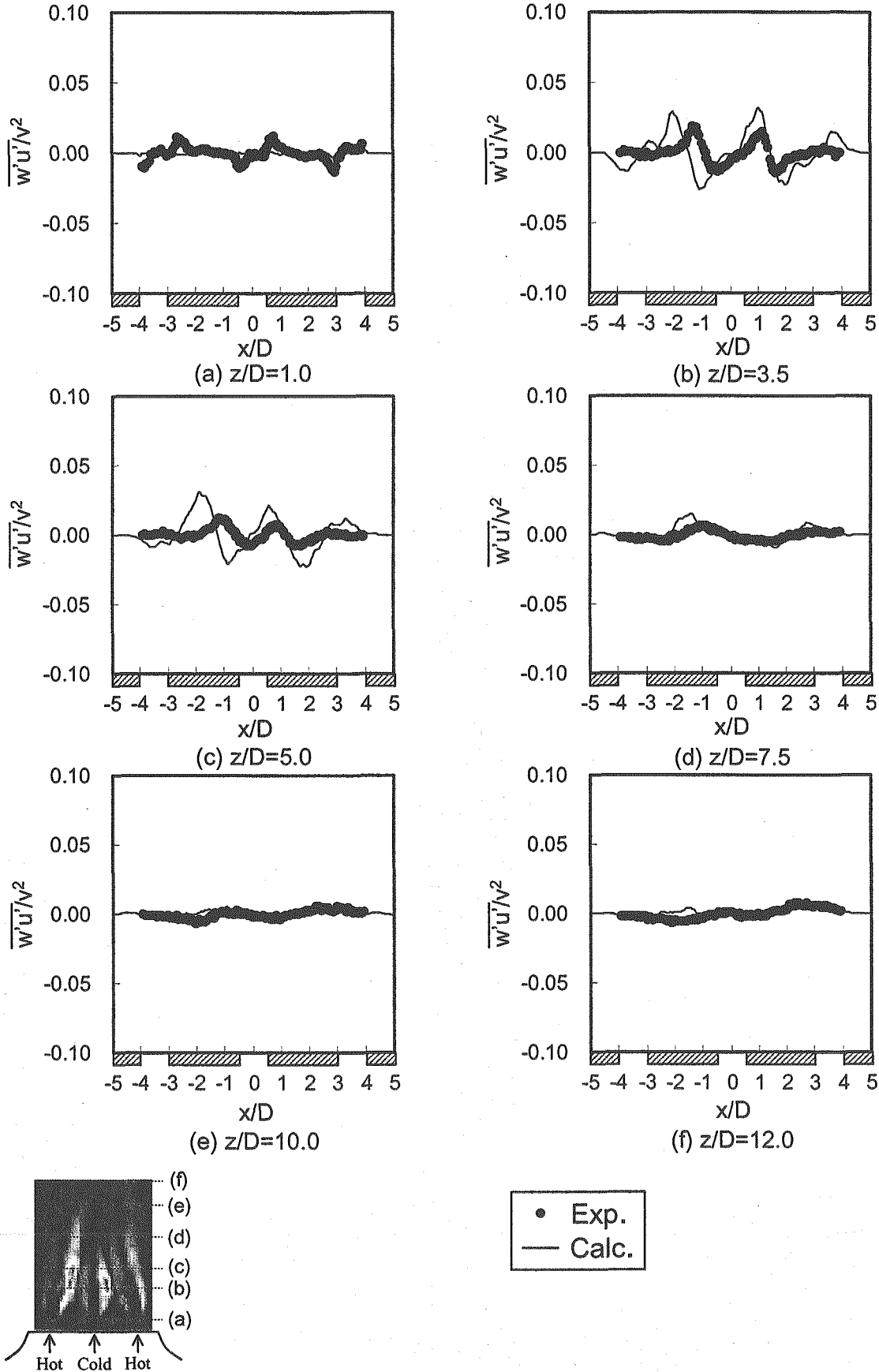


Fig.4.3.14 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.05$ )

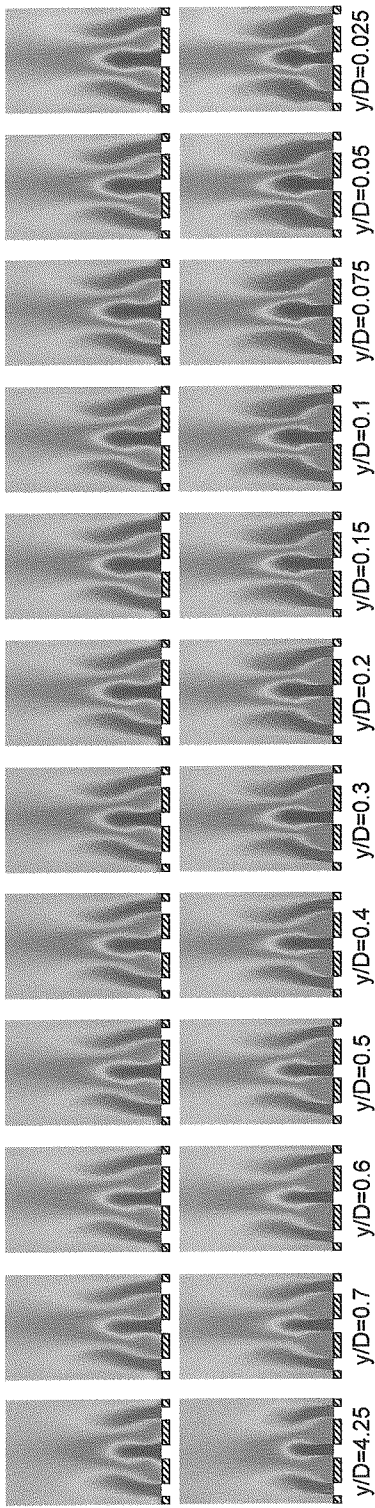


Fig.5.1.1.1 Comparisons of Contours of Time-Averaged Temperature between Sodium and Water Condition.

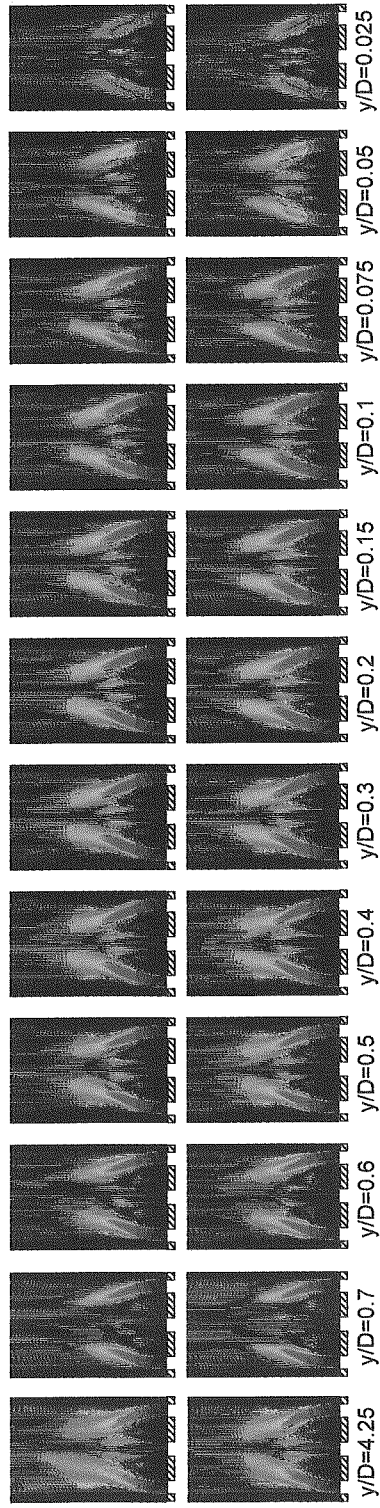


Fig.5.1.1.2 Comparisons of Vectors of Time-Averaged Velocity between Sodium and Water Condition.

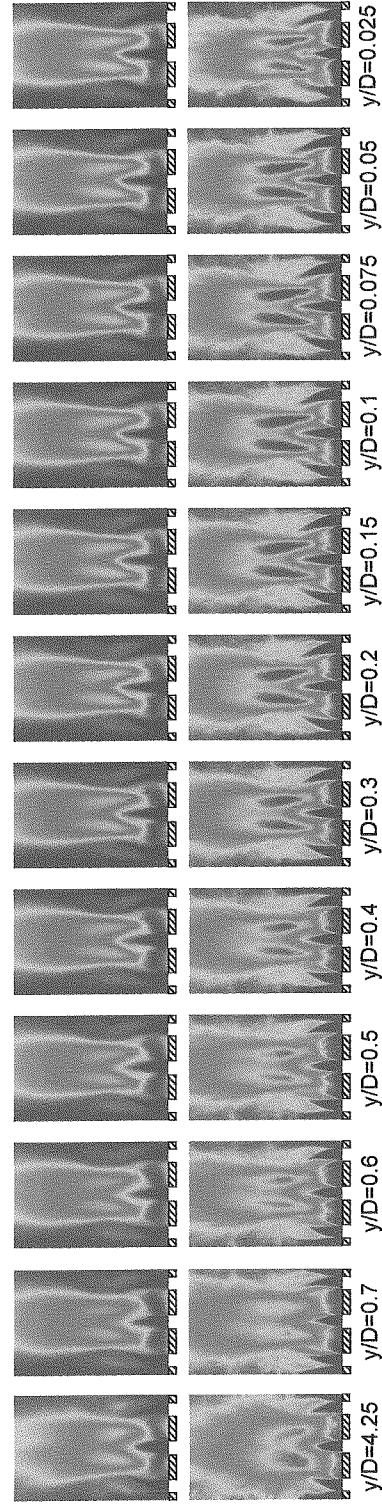


Fig.5.1.1.3 Comparisons of Contours Temperature Fluctuations Intensity between Sodium and Water Condition.

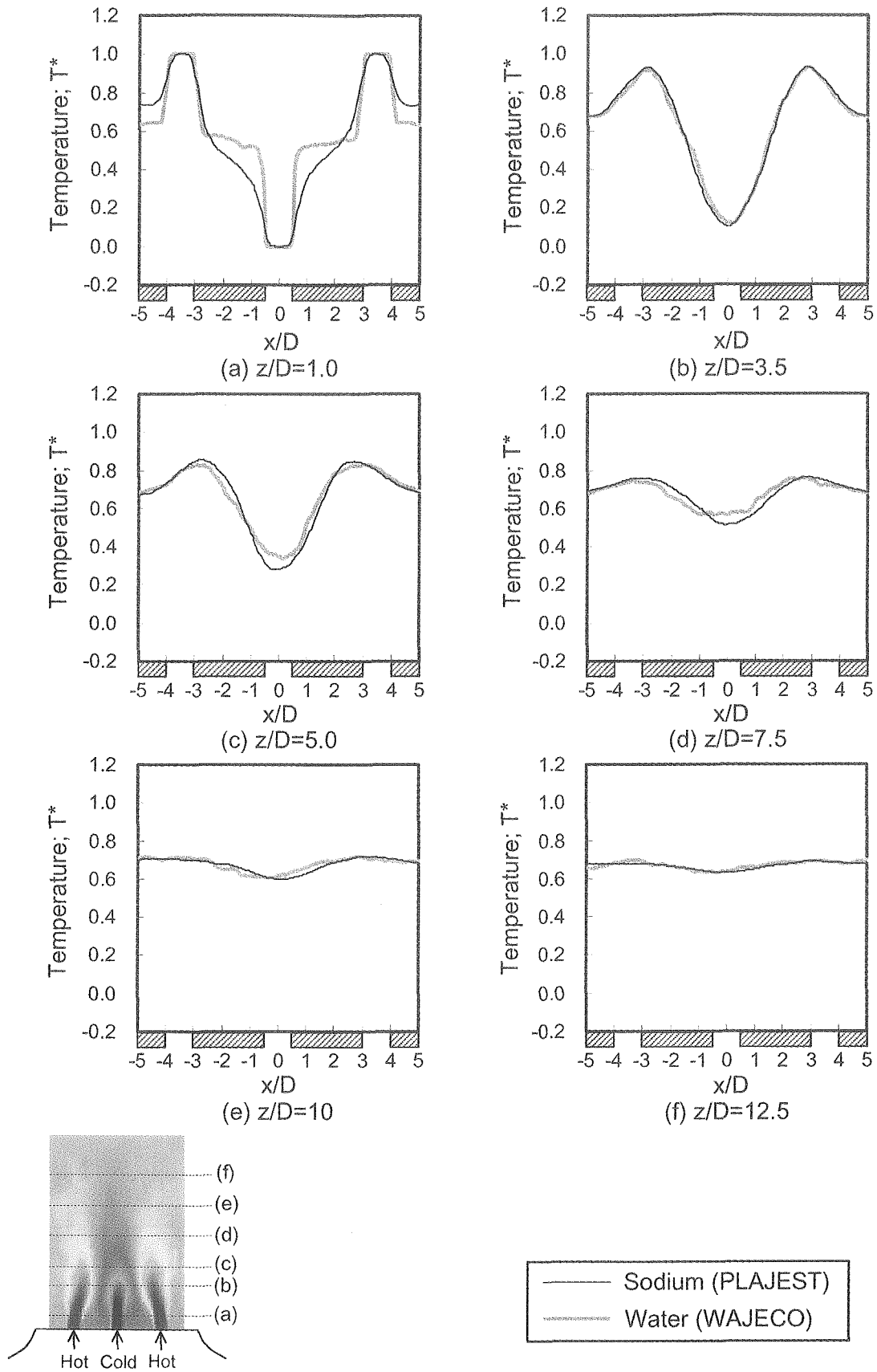


Fig.5.1.4 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )

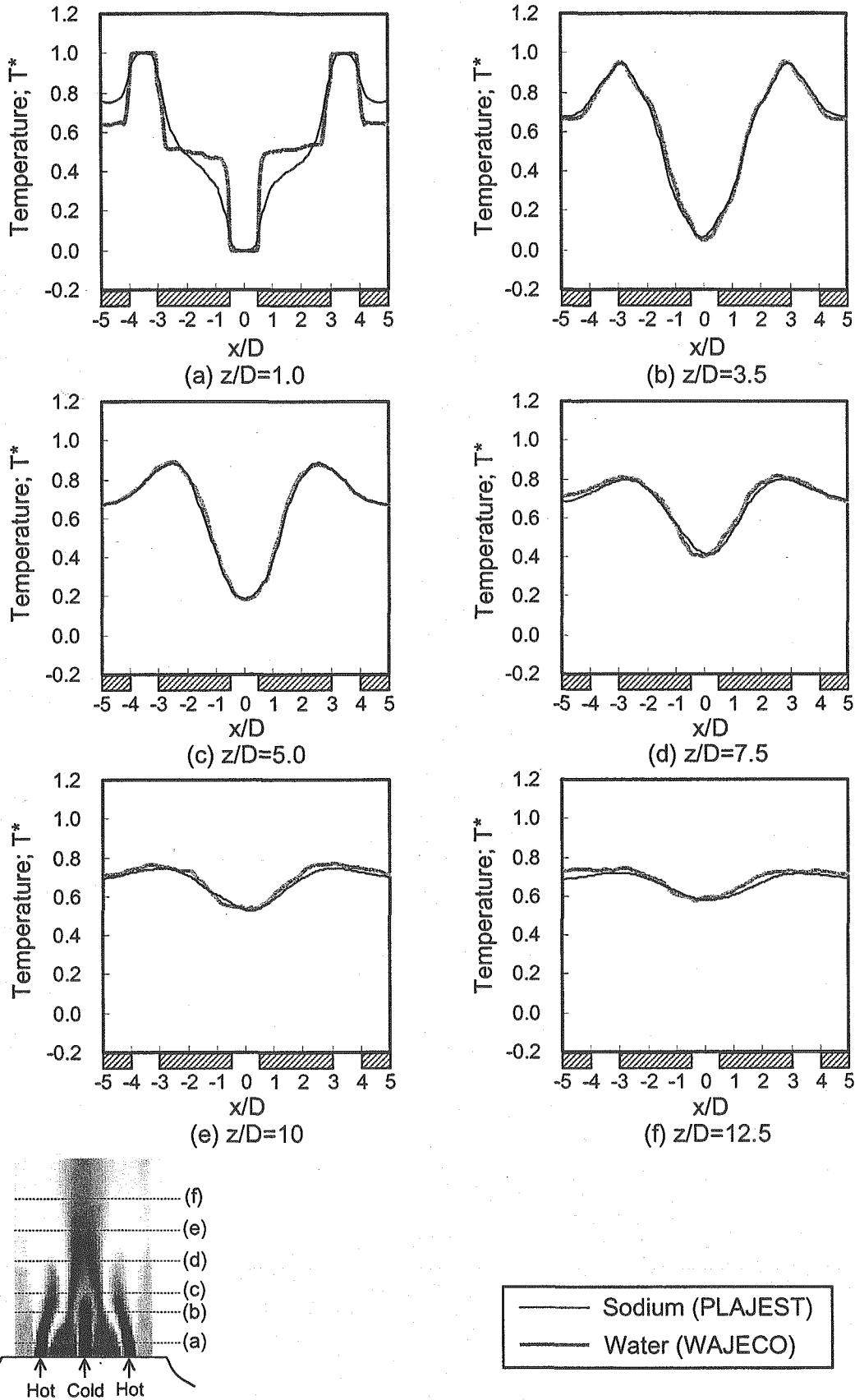


Fig.5.1.5 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )

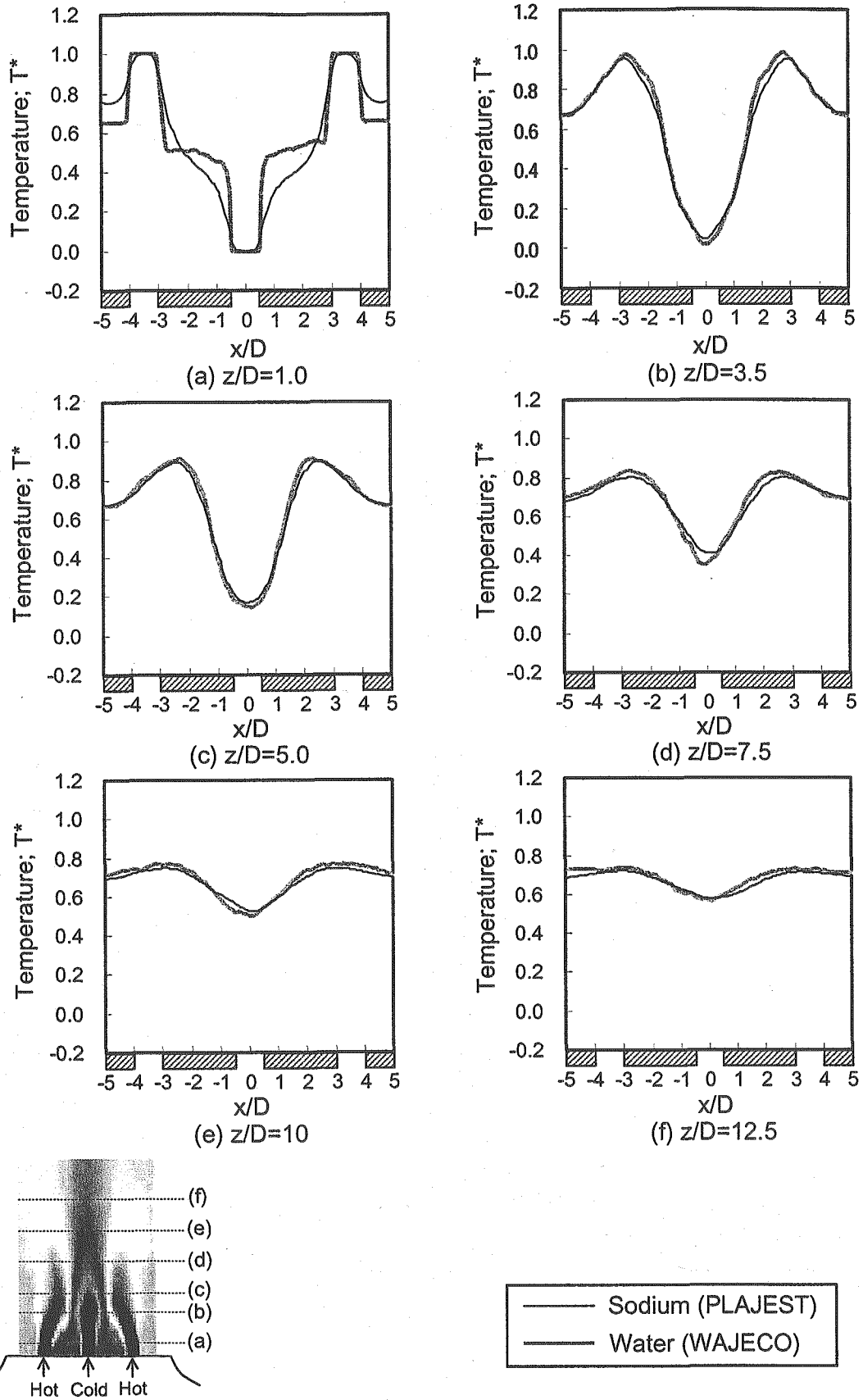


Fig.5.1.6 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )



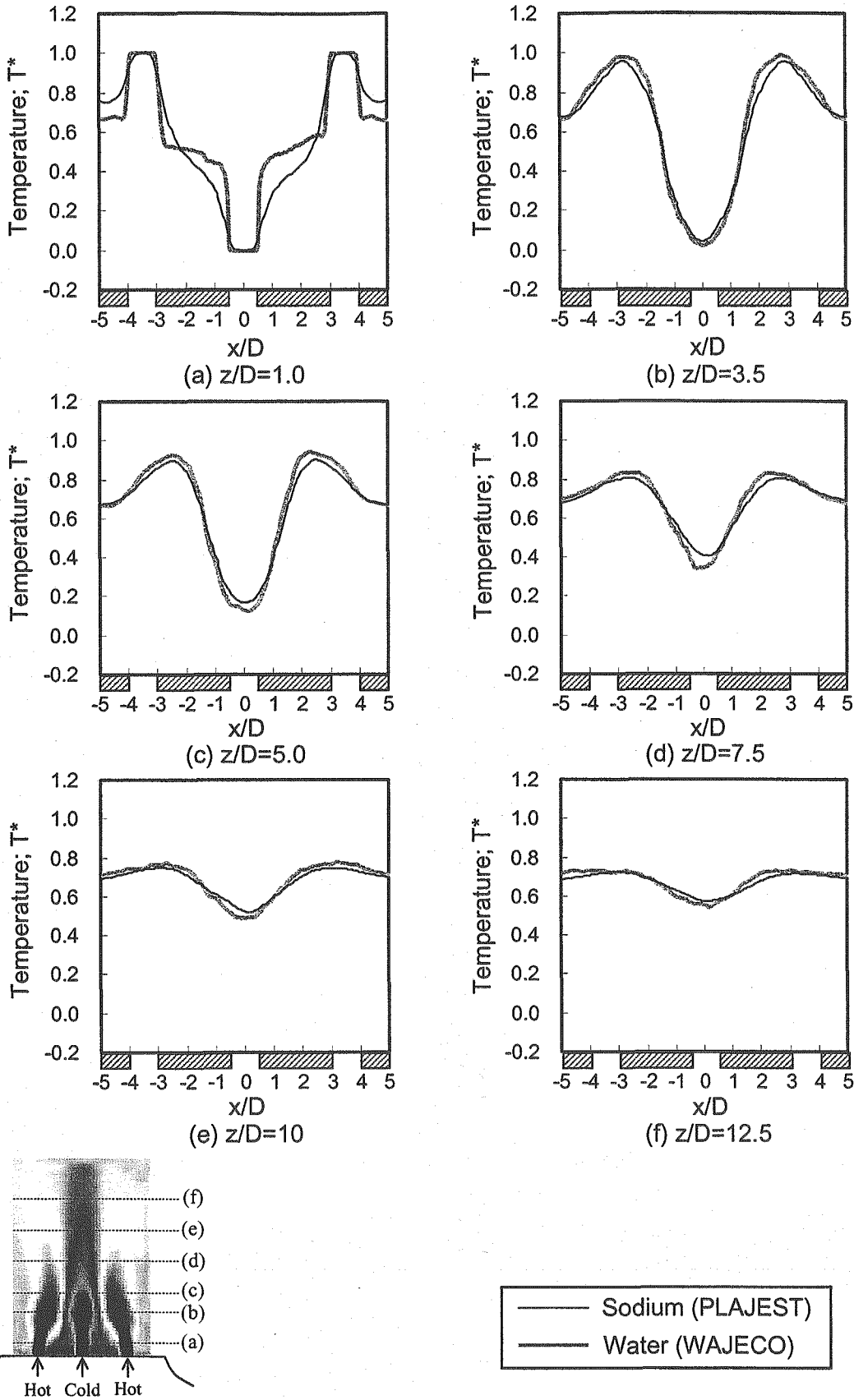


Fig.5.1.7 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )

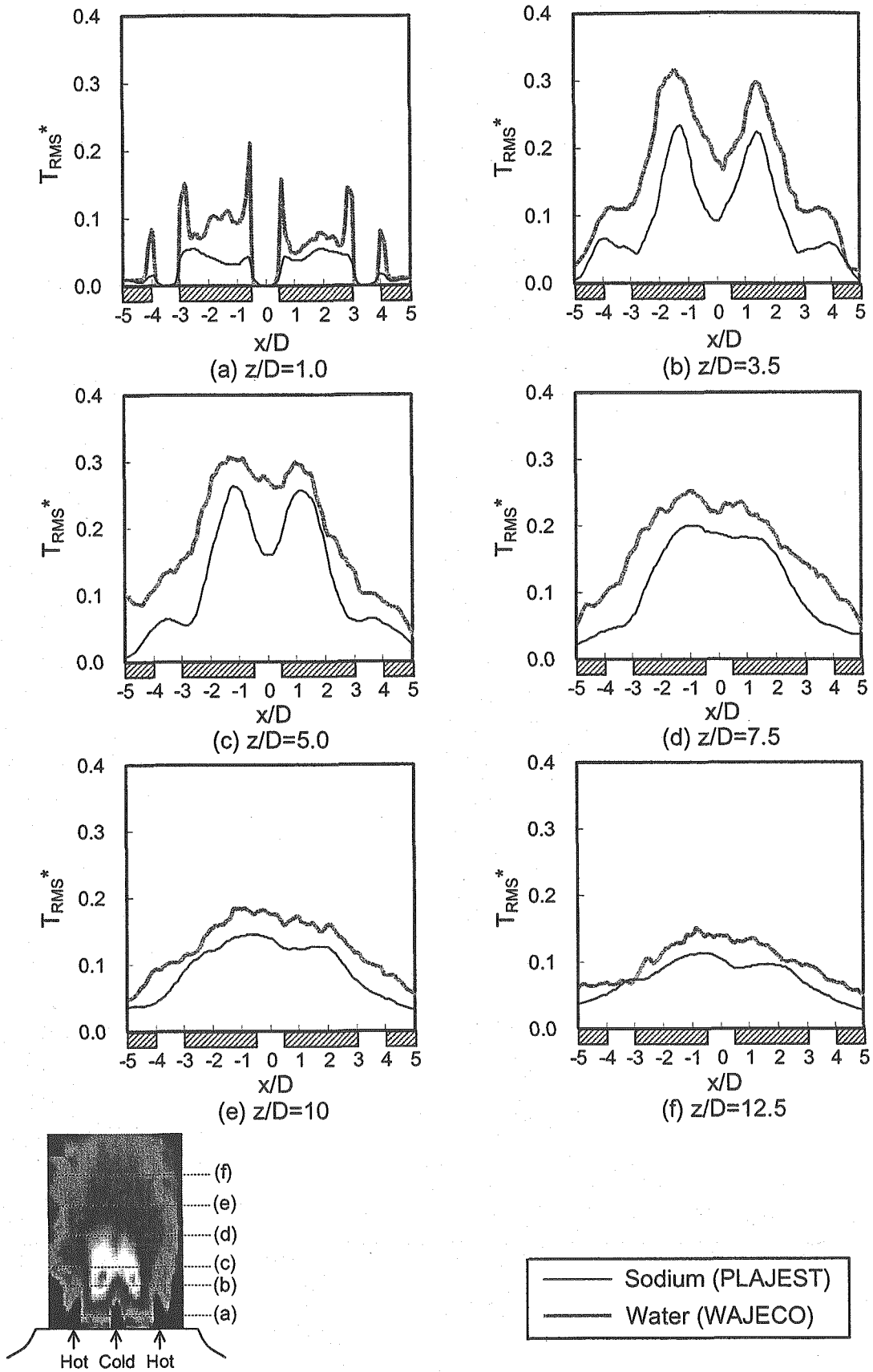


Fig.5.1.8 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )

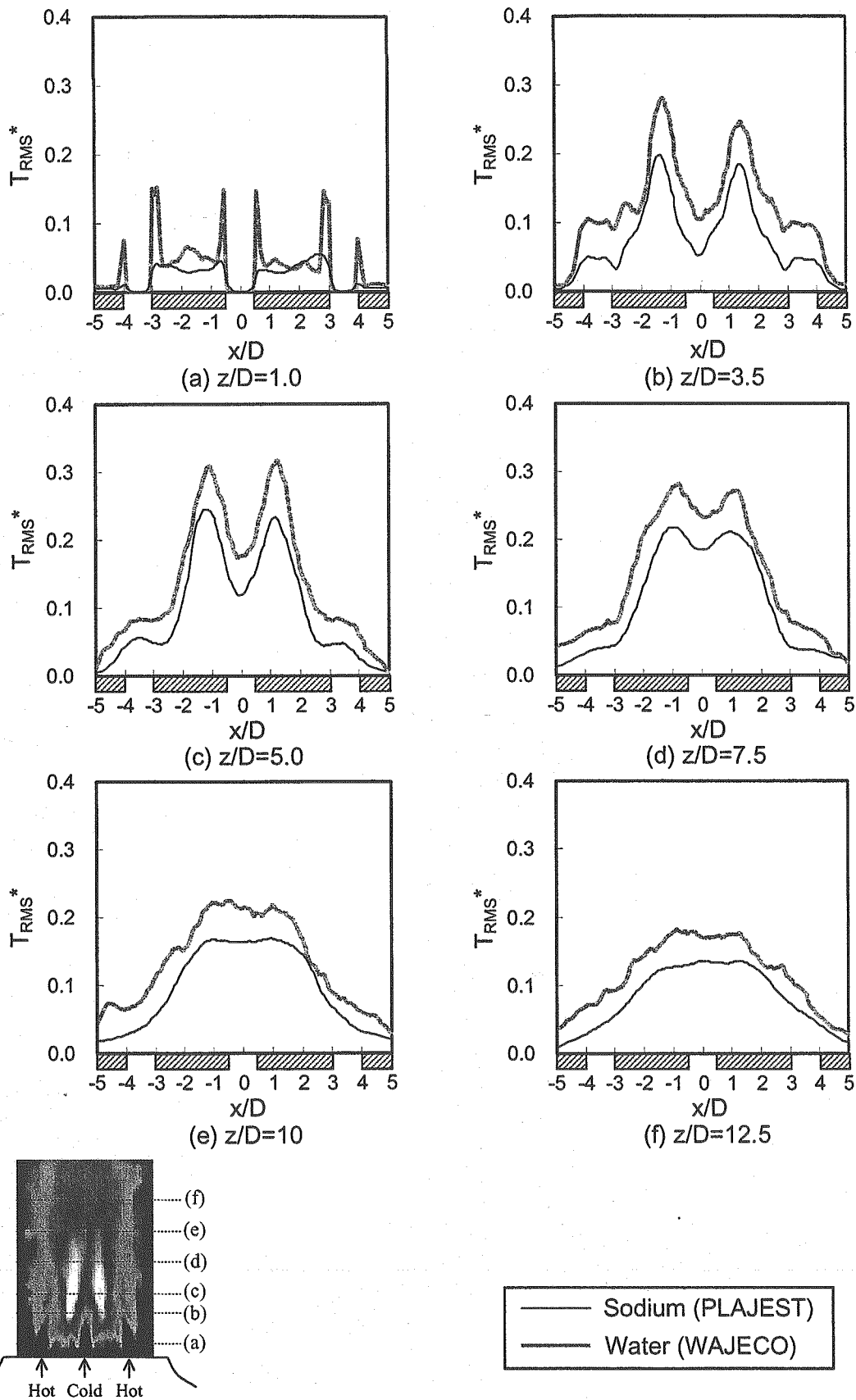


Fig.5.1.9 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )

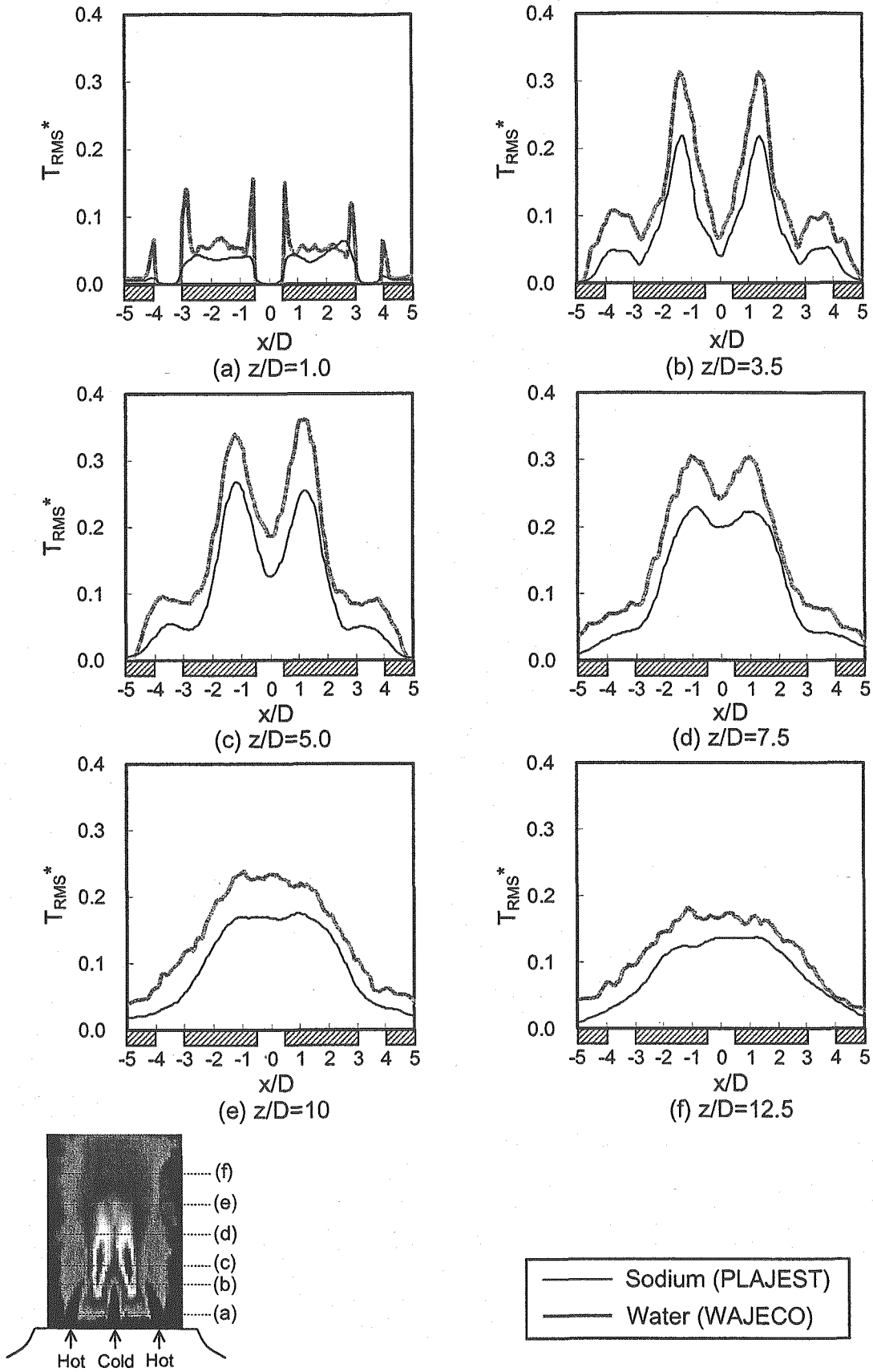


Fig.5.1.10 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )

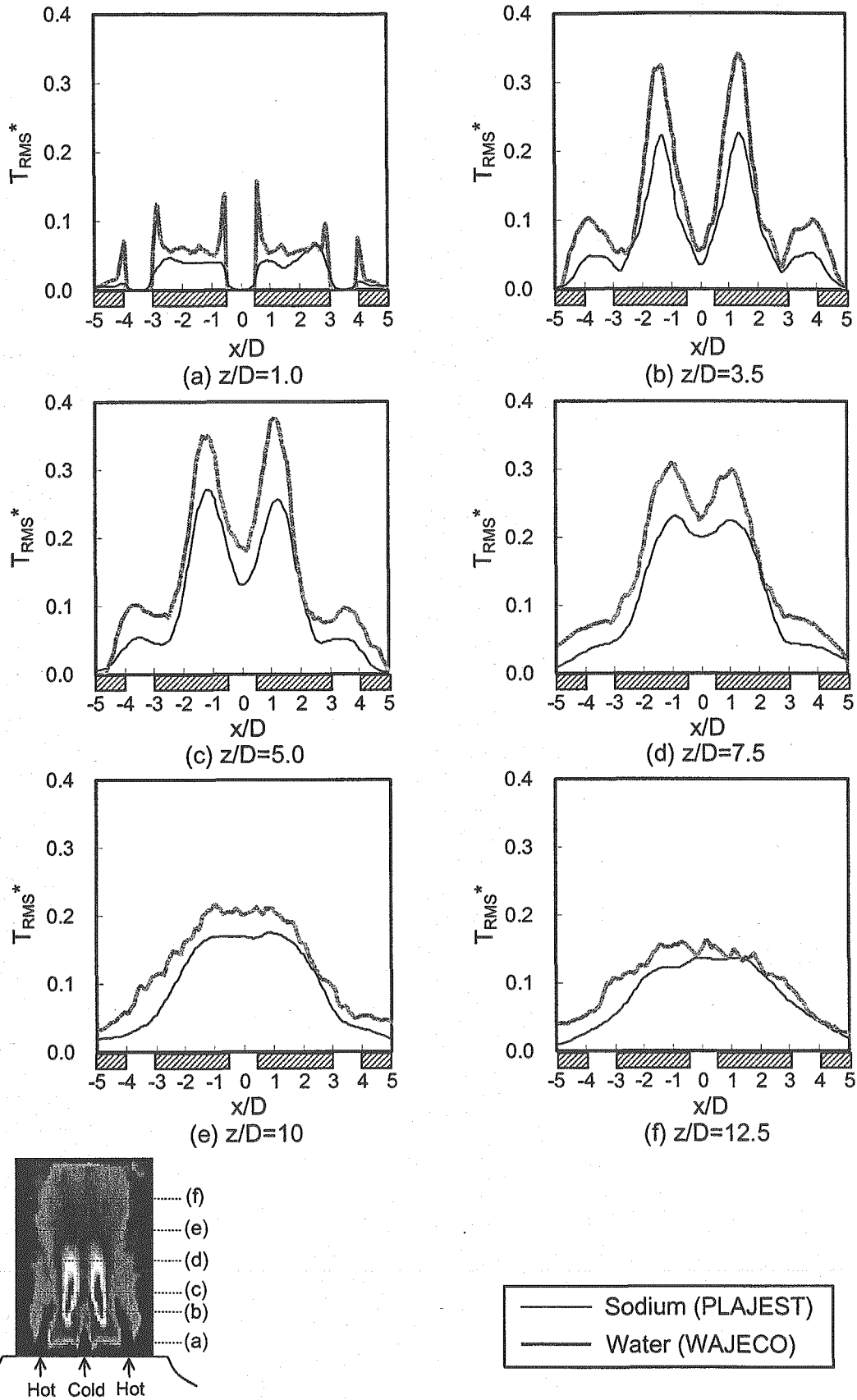
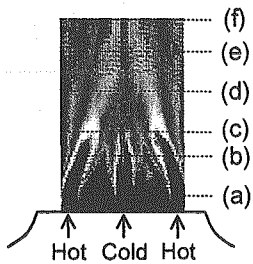
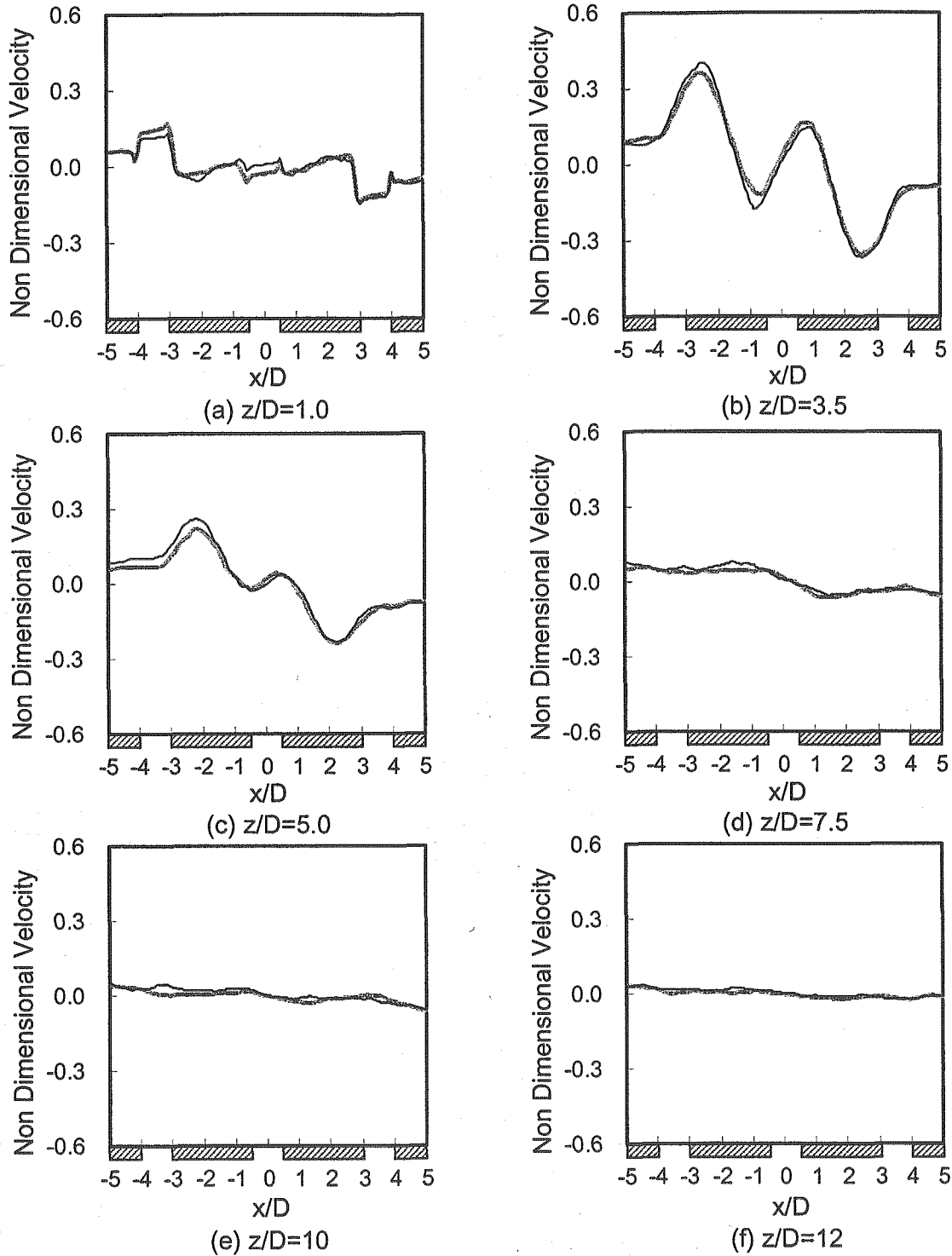
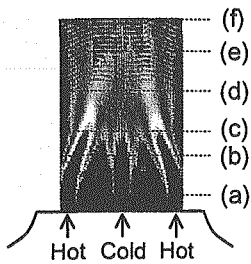
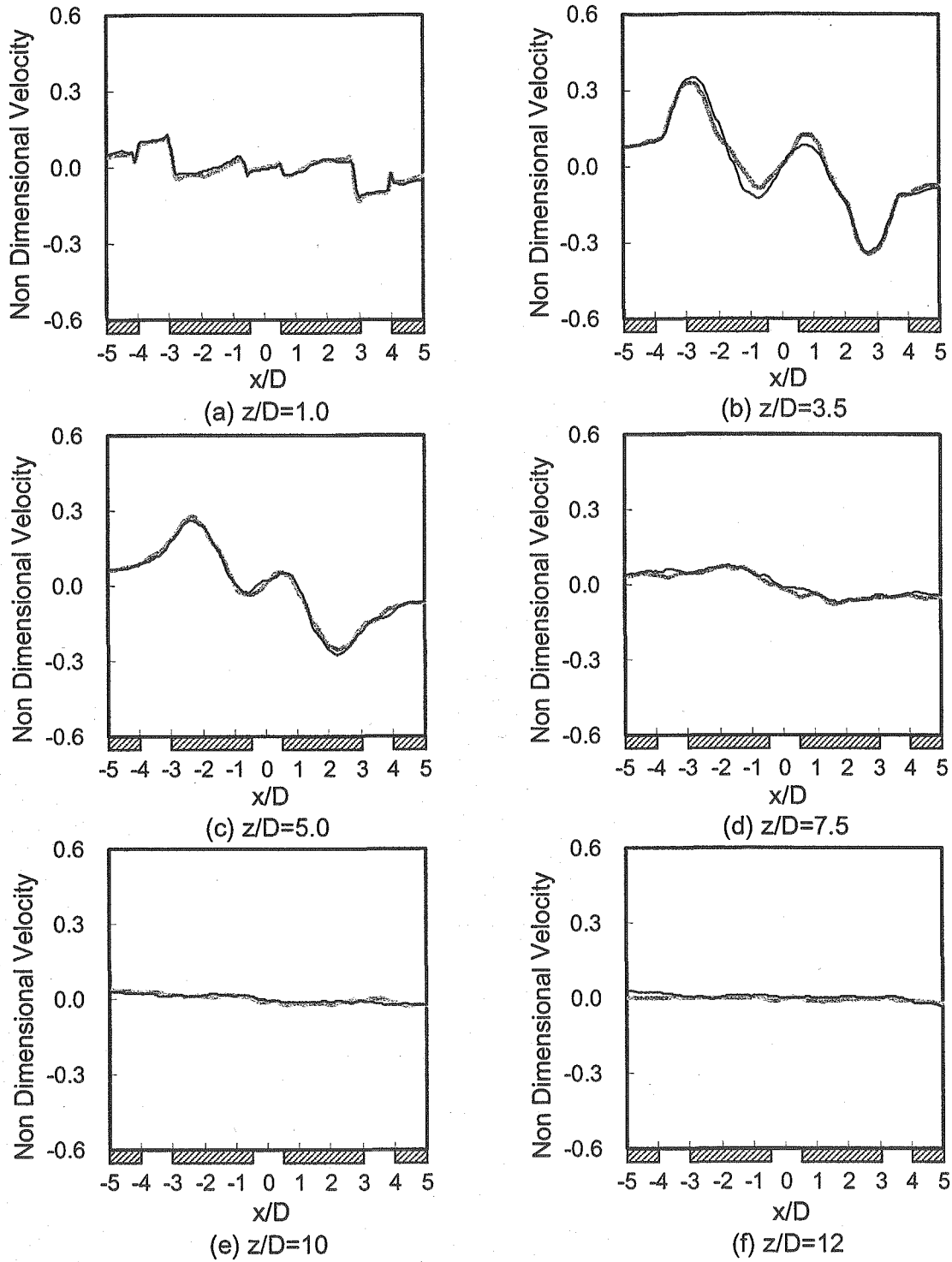


Fig.5.1.11 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )



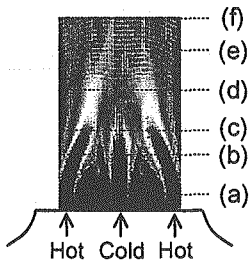
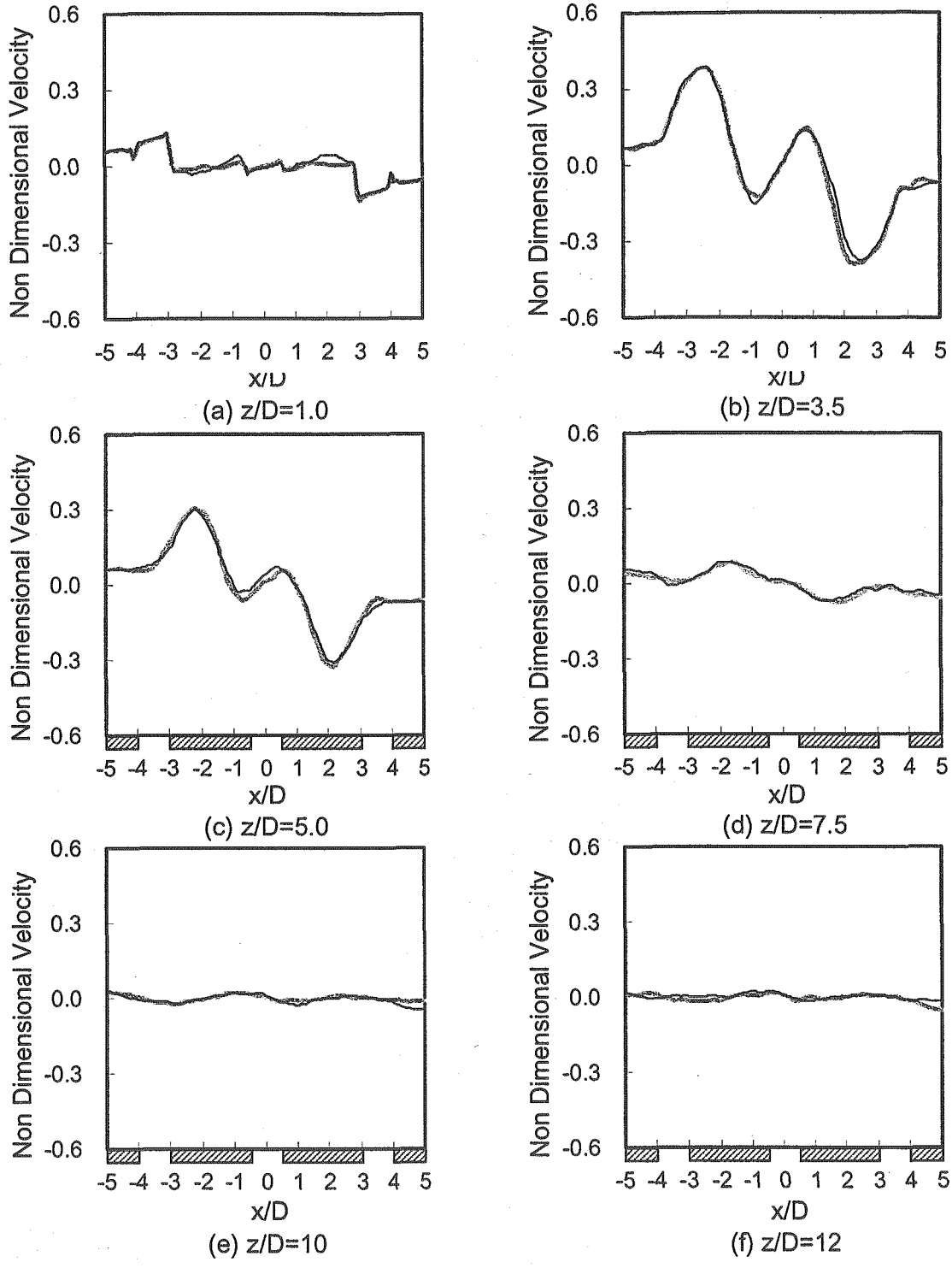
— Sodium (PLAJEST)  
 — Water (WAJECO)

Fig.5.1.12 Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )



—	Sodium (PLAJEST)
—	Water (WAJECO)

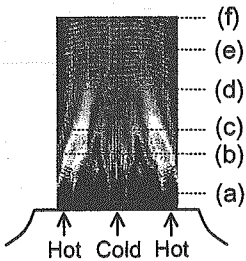
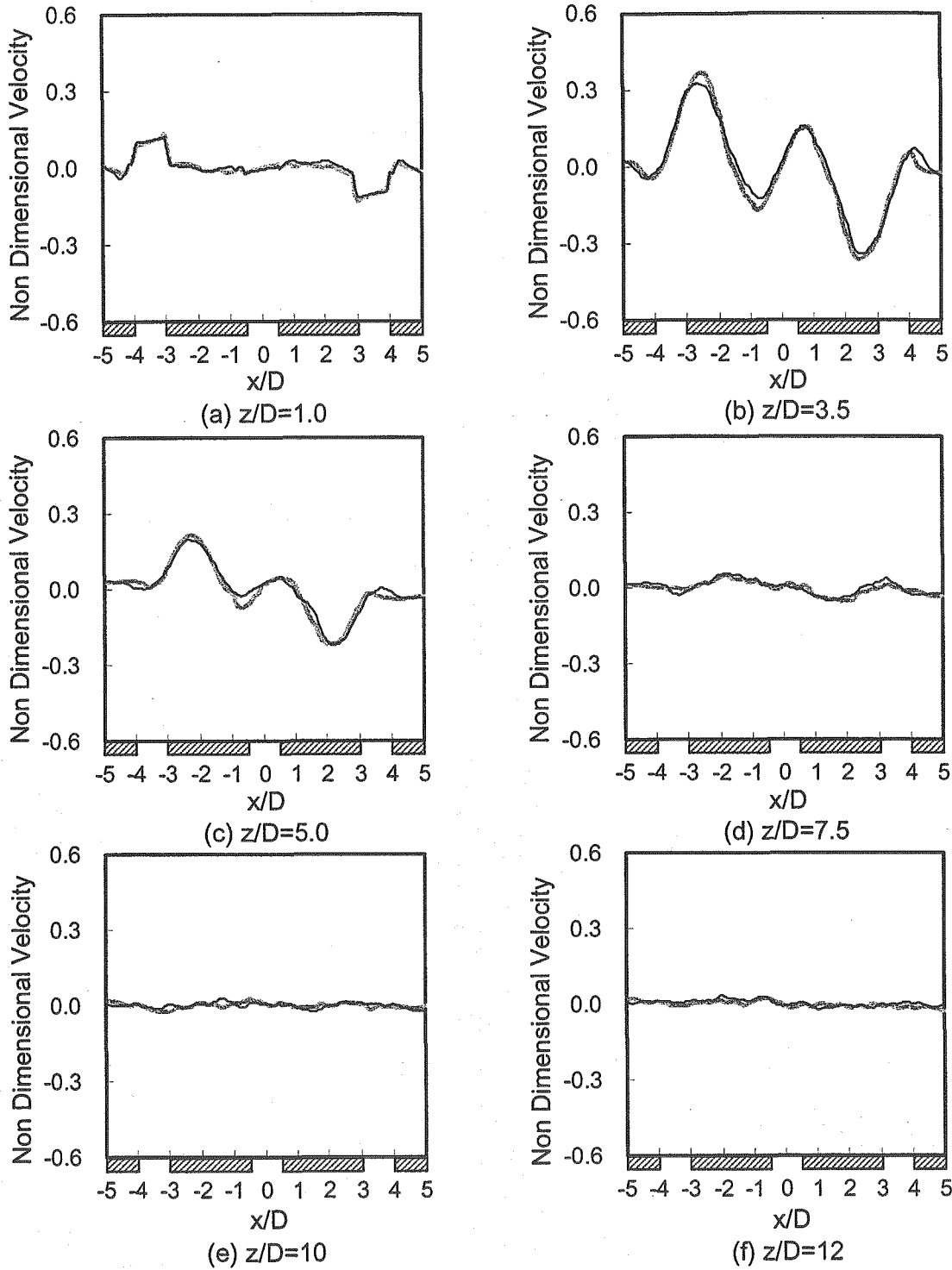
Fig.5.1.13 Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )



— Sodium (PLAJEST)  
 - - - Water (WAJECO)

Fig.5.1.14 Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )





— Sodium (PLAJEST)

— Water (WAJECO)

Fig.5.1.15 Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )

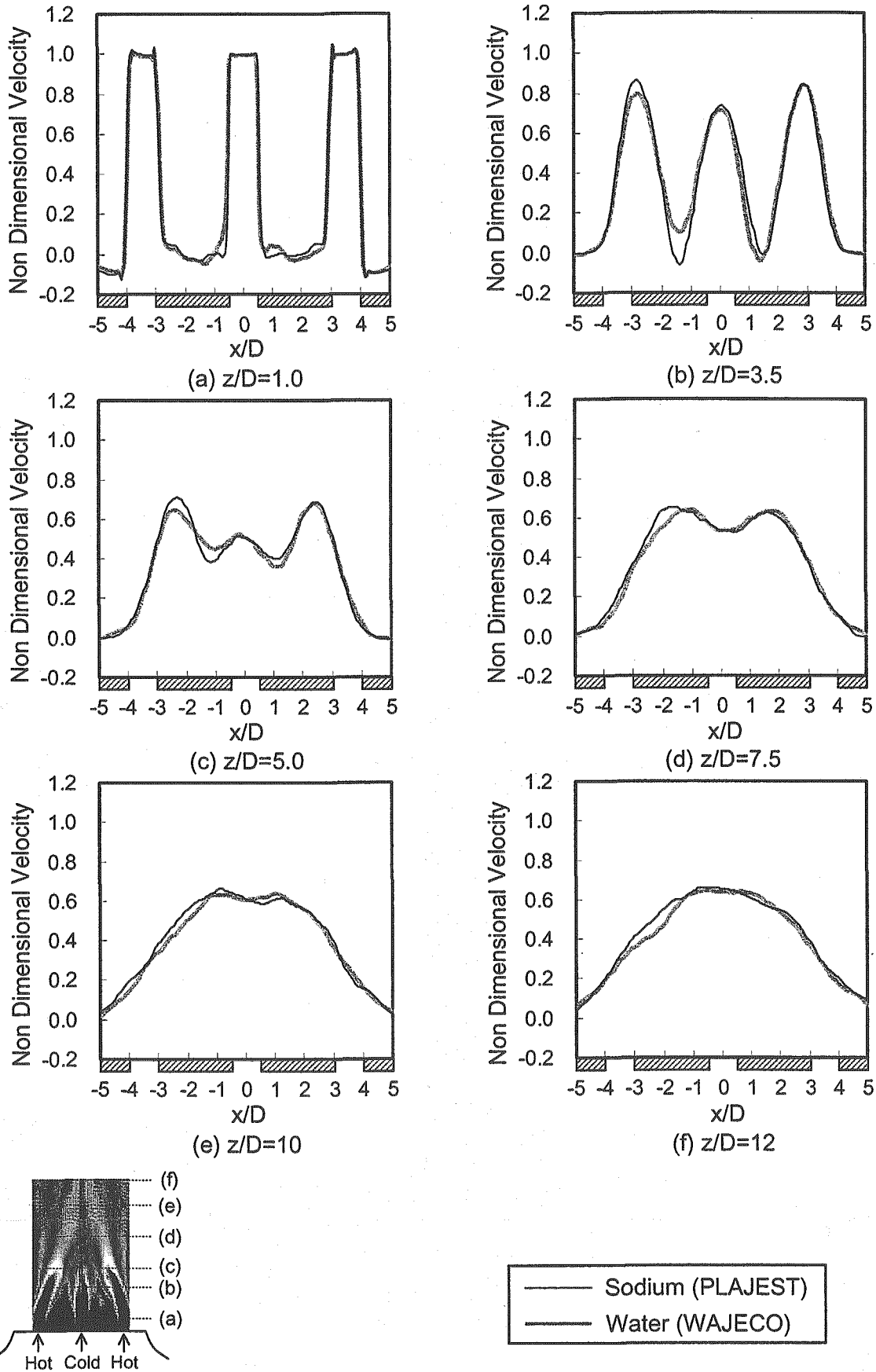
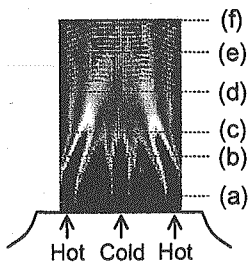
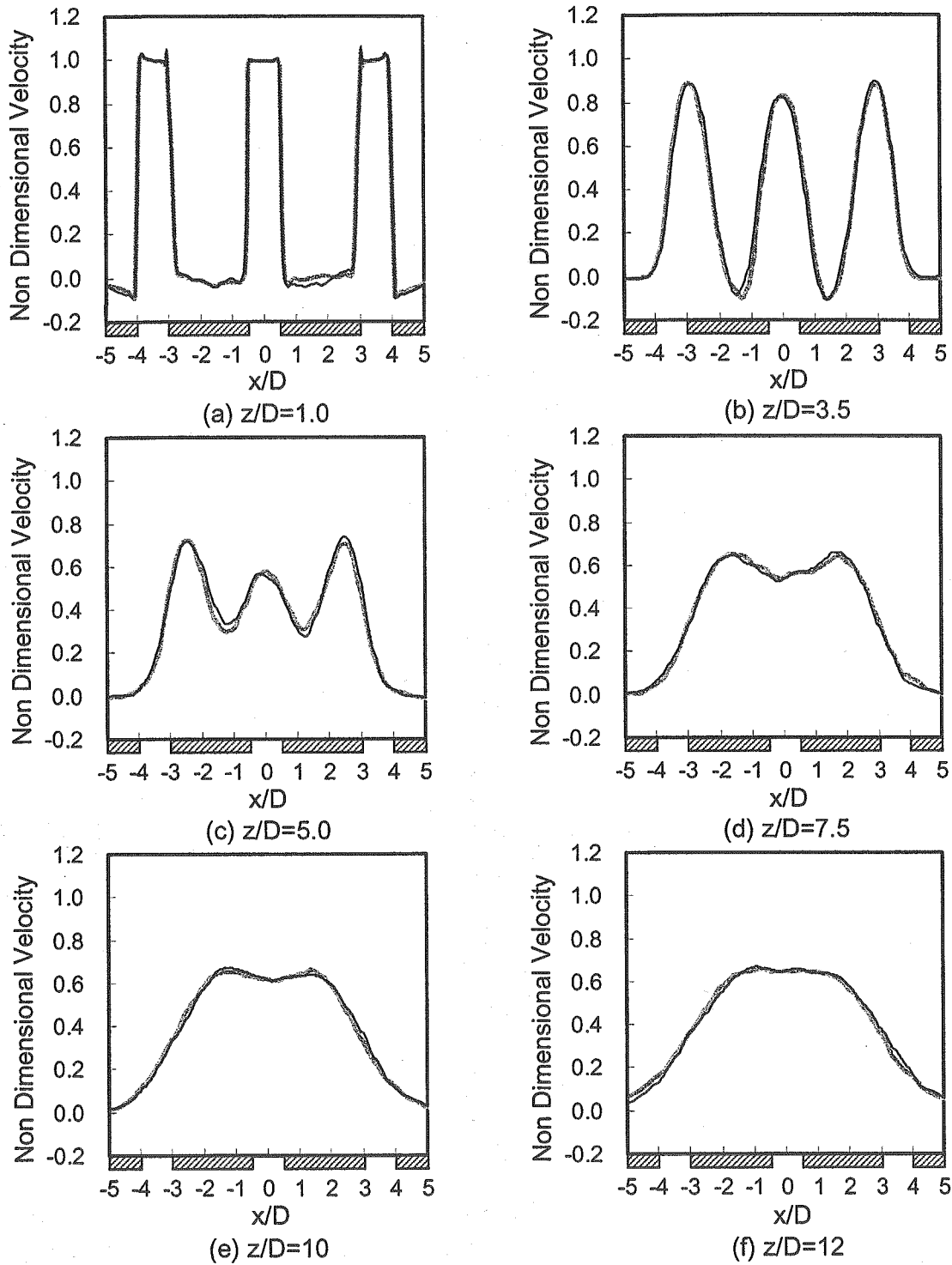


Fig.5.1.16 Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )



— Sodium (PLAJEST)  
 — Water (WAJECO)

Fig.5.1.17 Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )

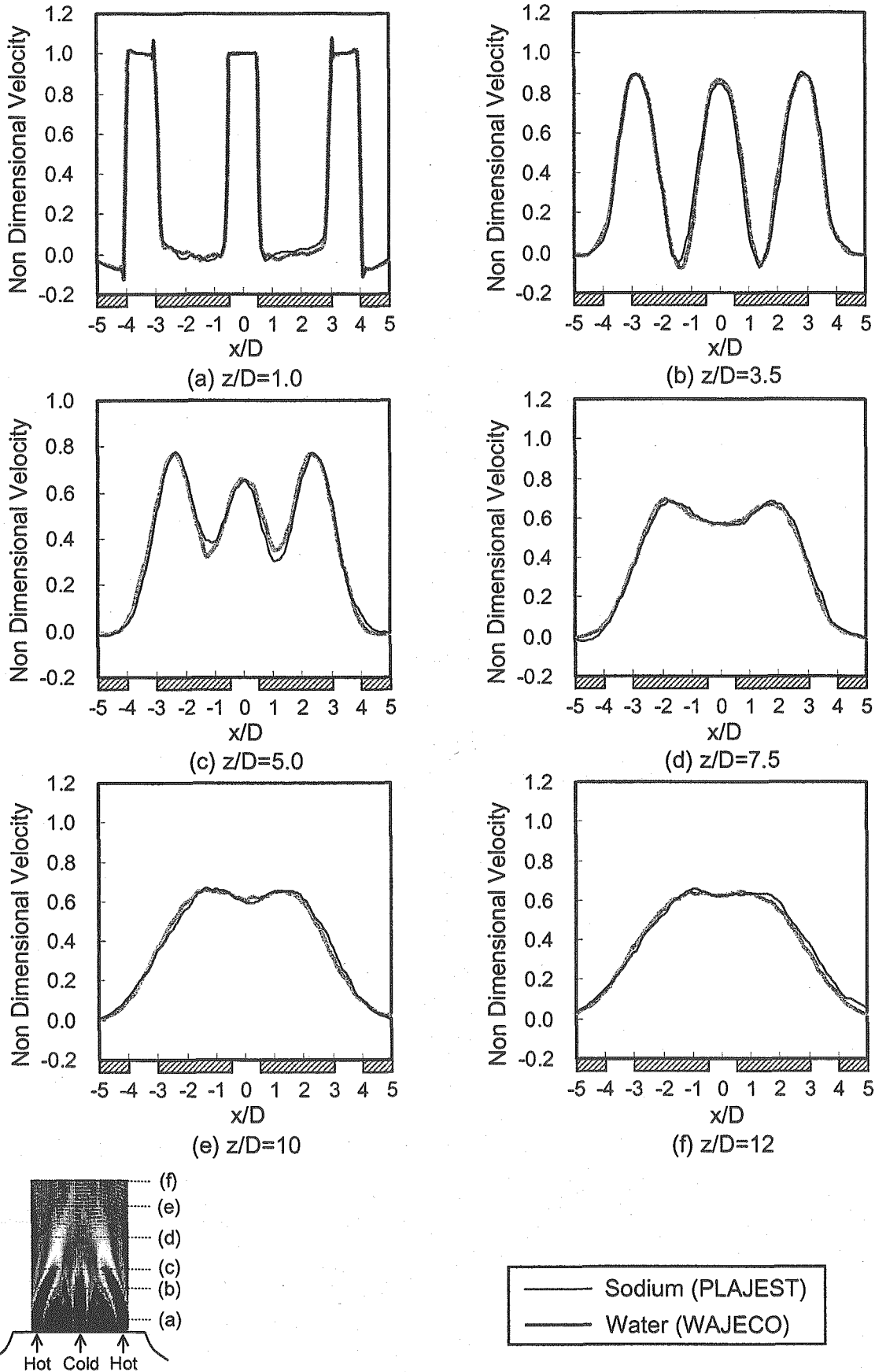


Fig.5.1.18 Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )

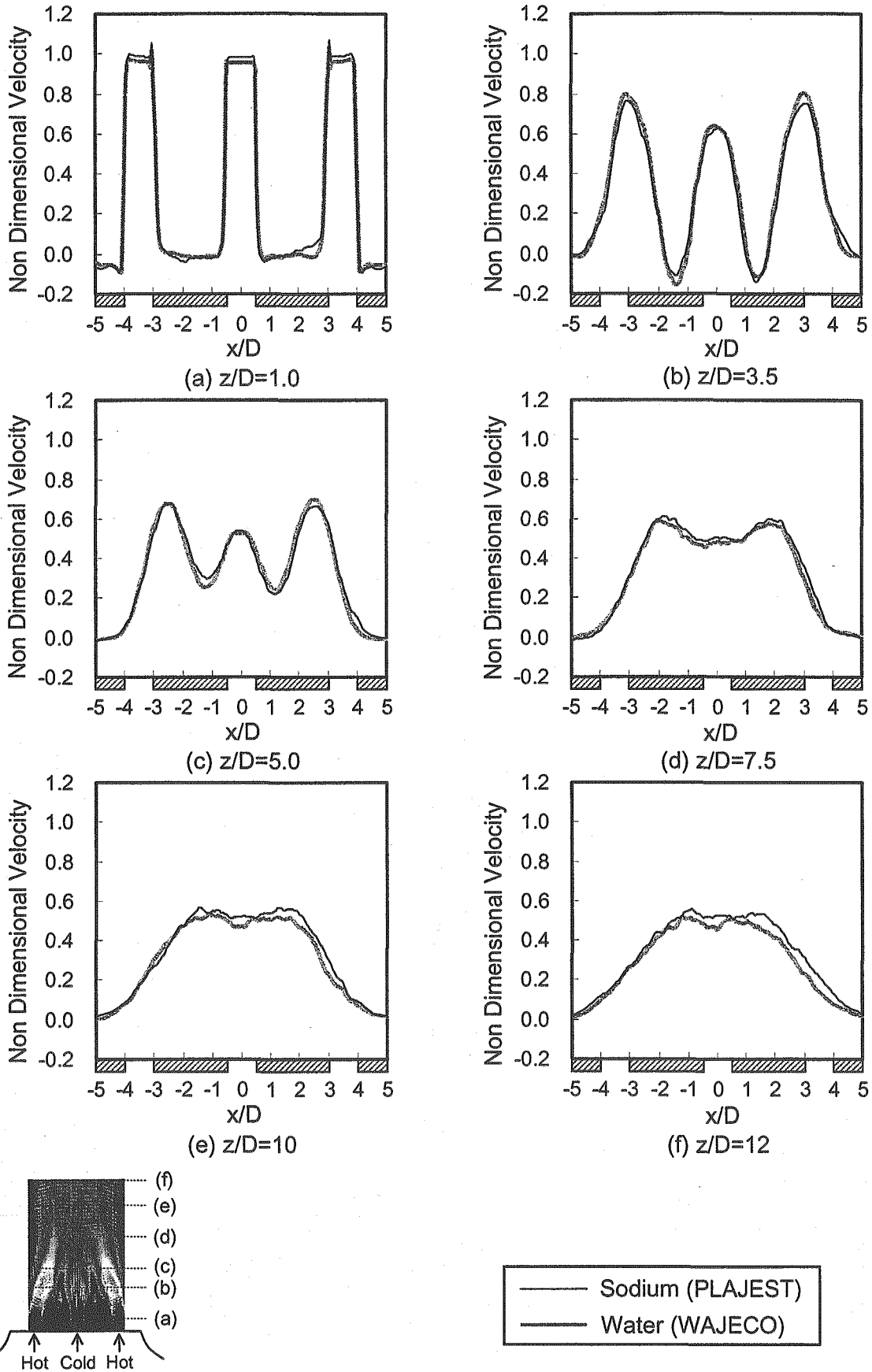


Fig.5.1.19 Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )

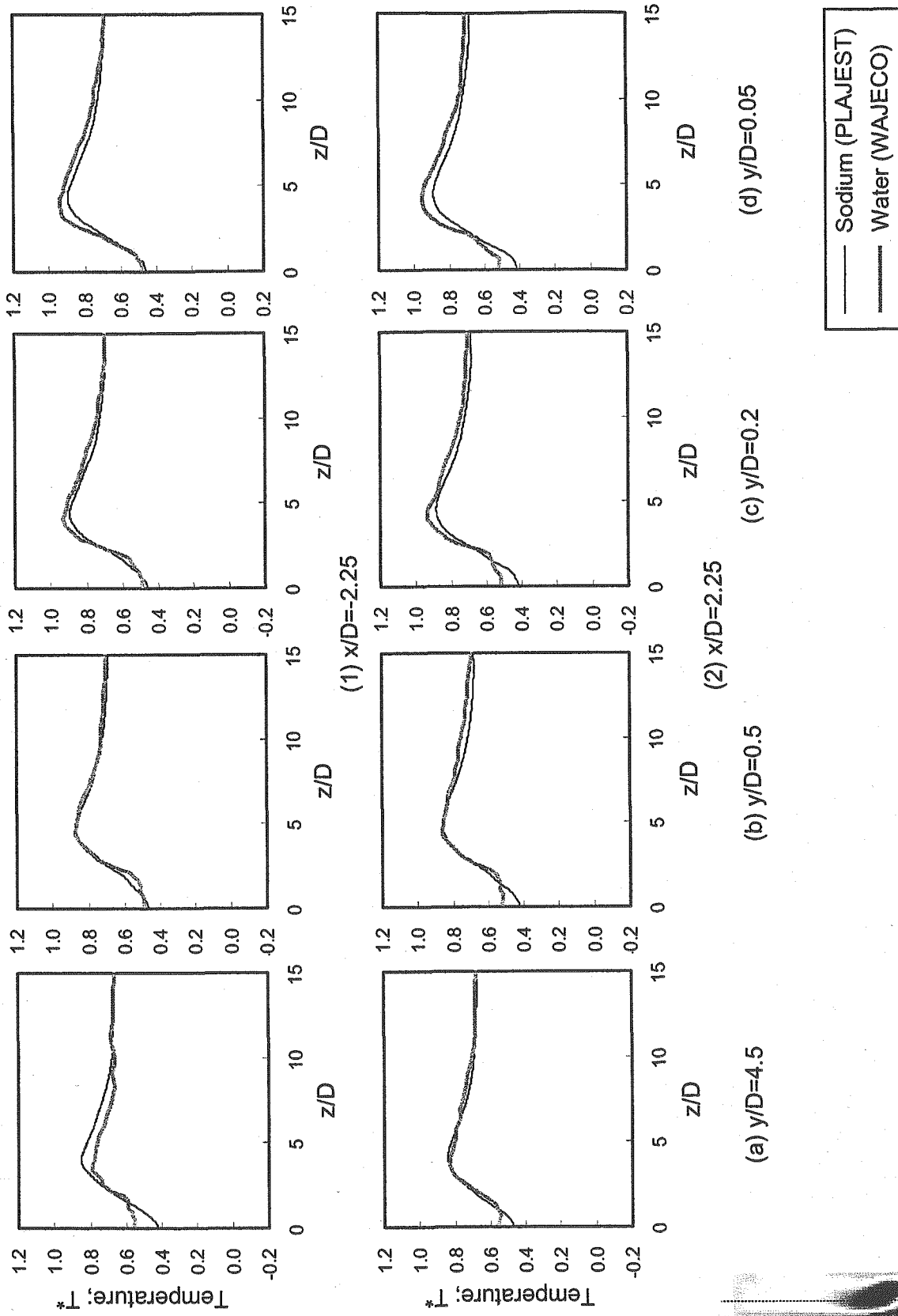


Fig.5.1.20(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction in between Sodium and Water Condition.

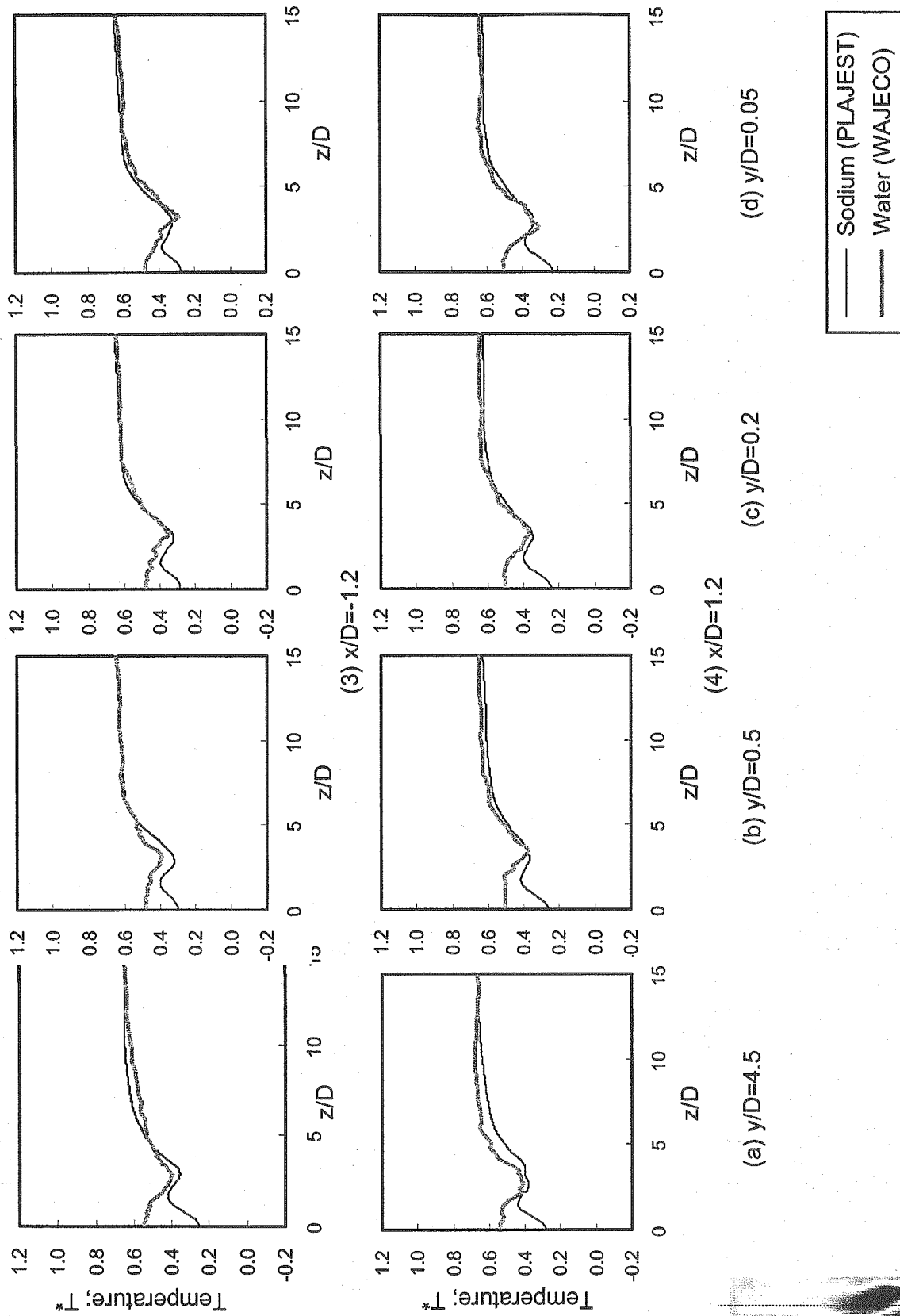


Fig.5.1.20(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction in between Sodium and Water Condition.

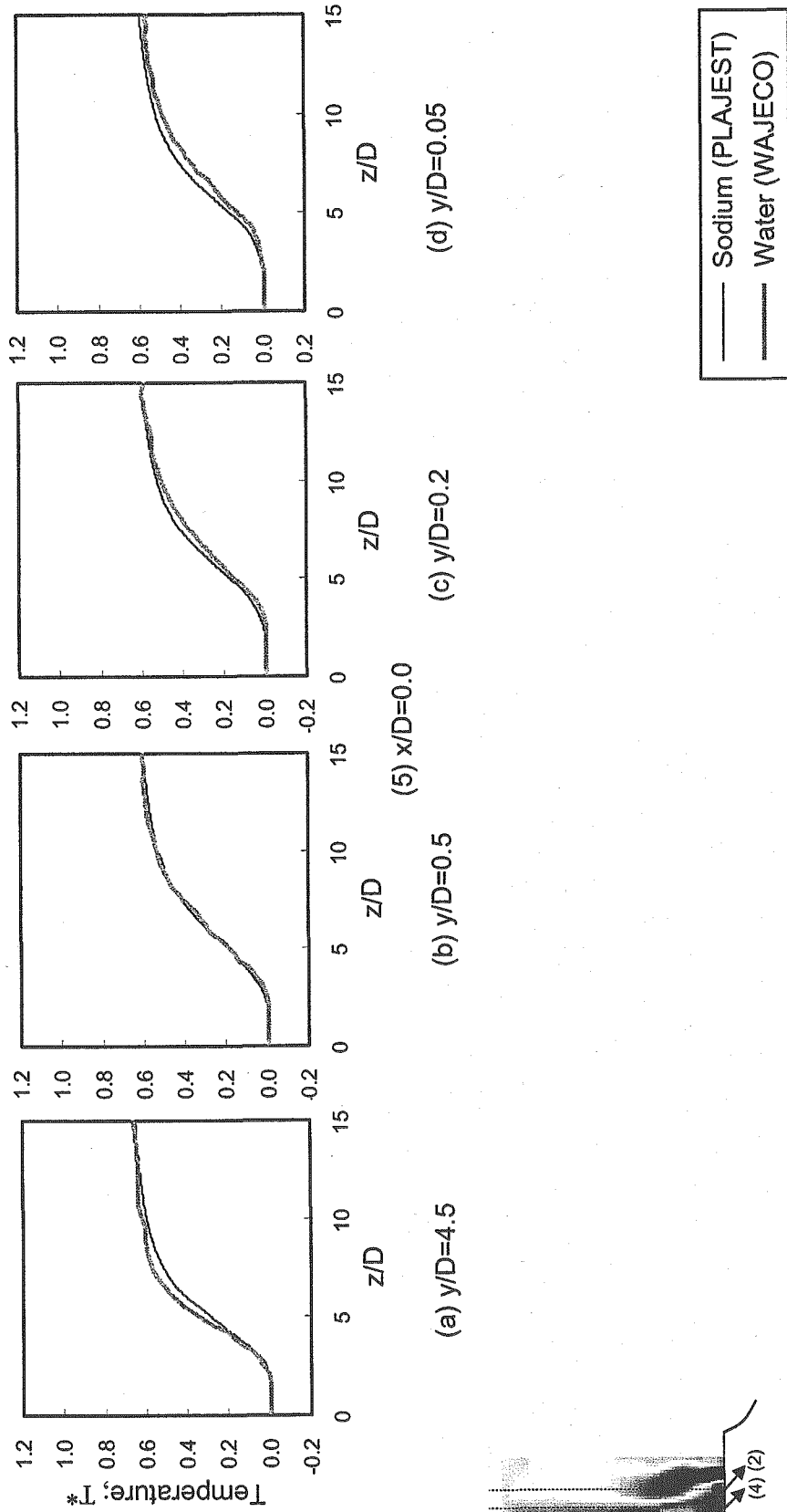


Fig.5.1.20(c) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Vertical Direction in between Sodium and Water Condition.



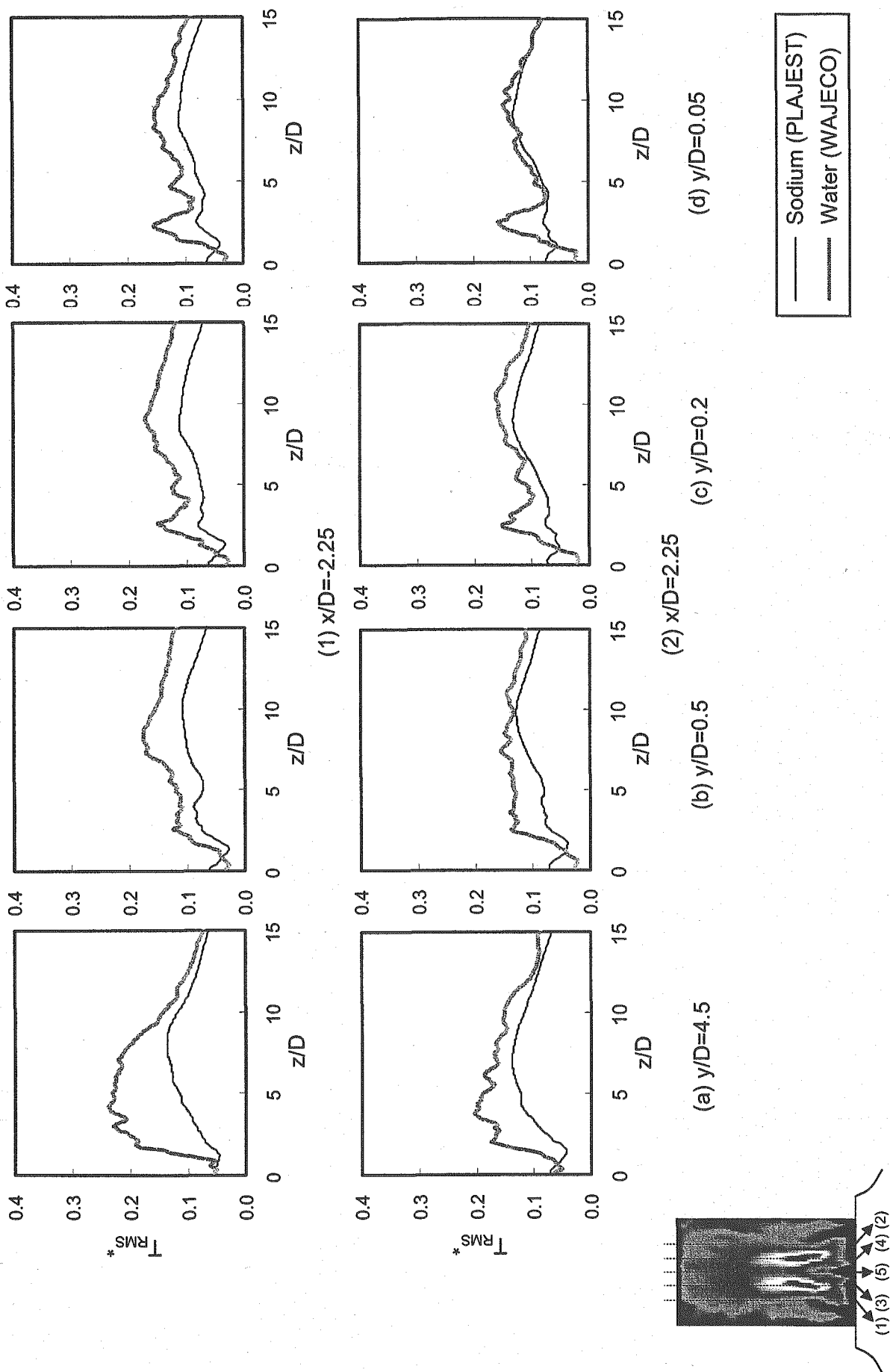


Fig.5.1.21(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition.

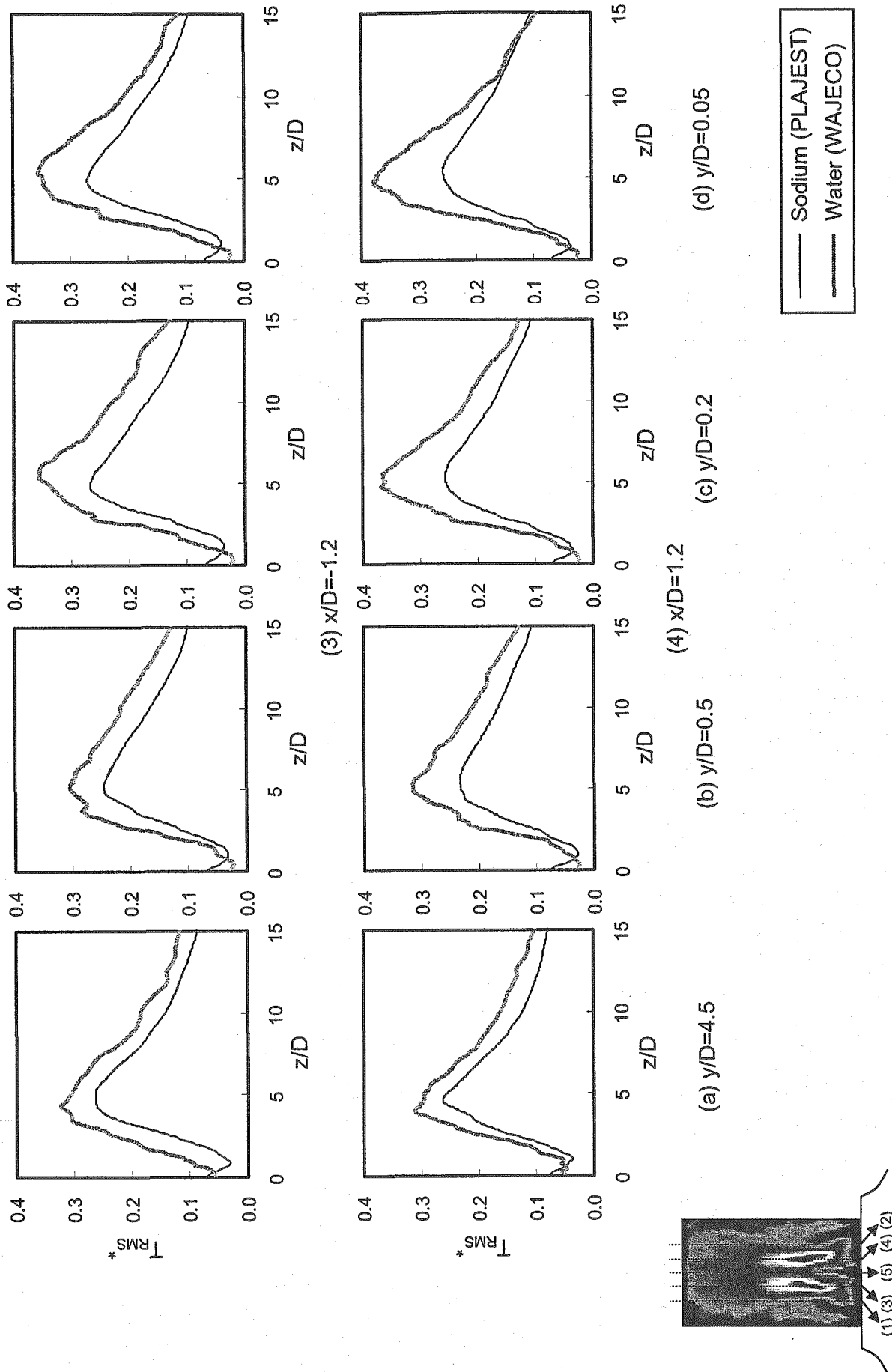


Fig.5.1.21(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition.

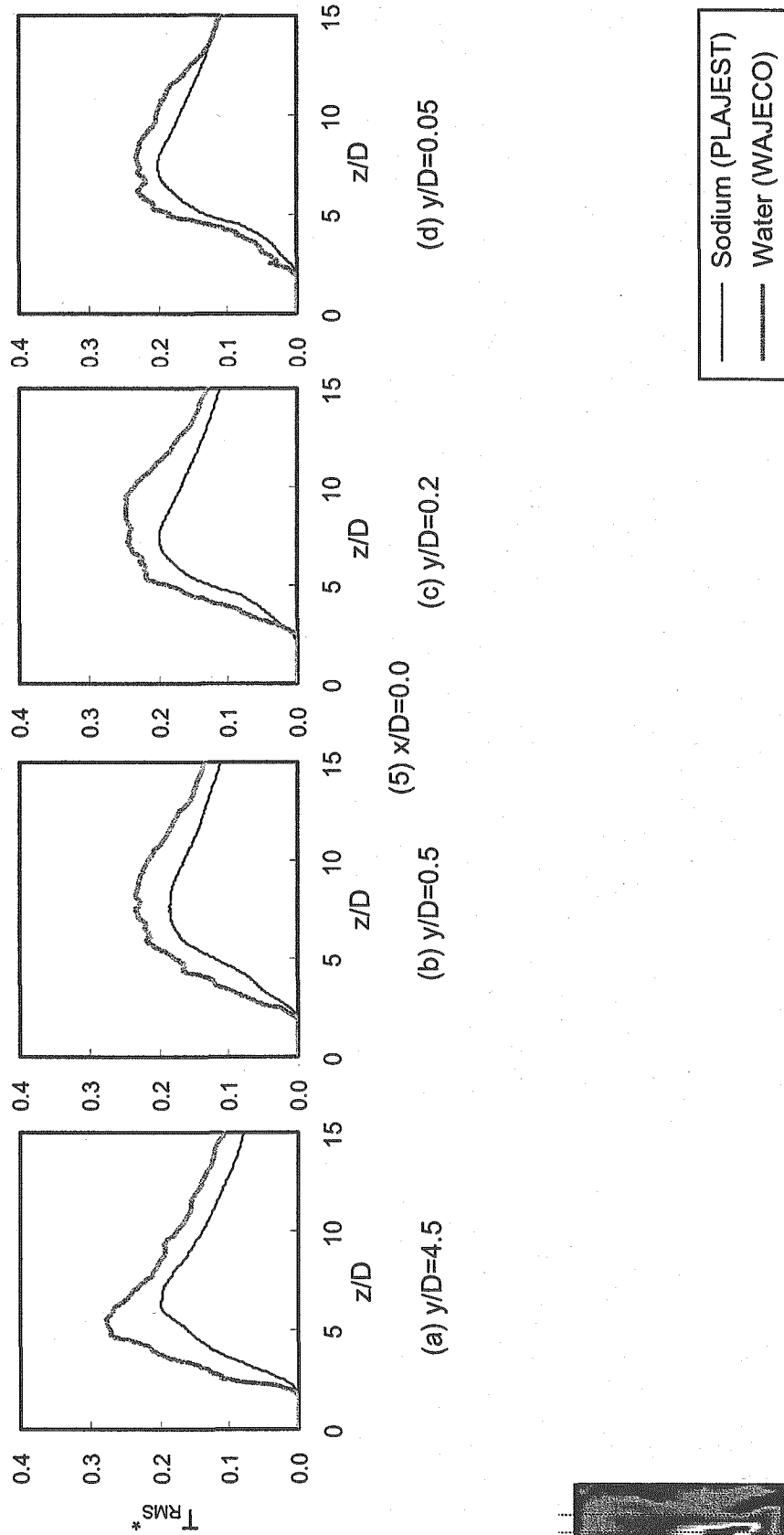


Fig.5.1.21(c) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition.

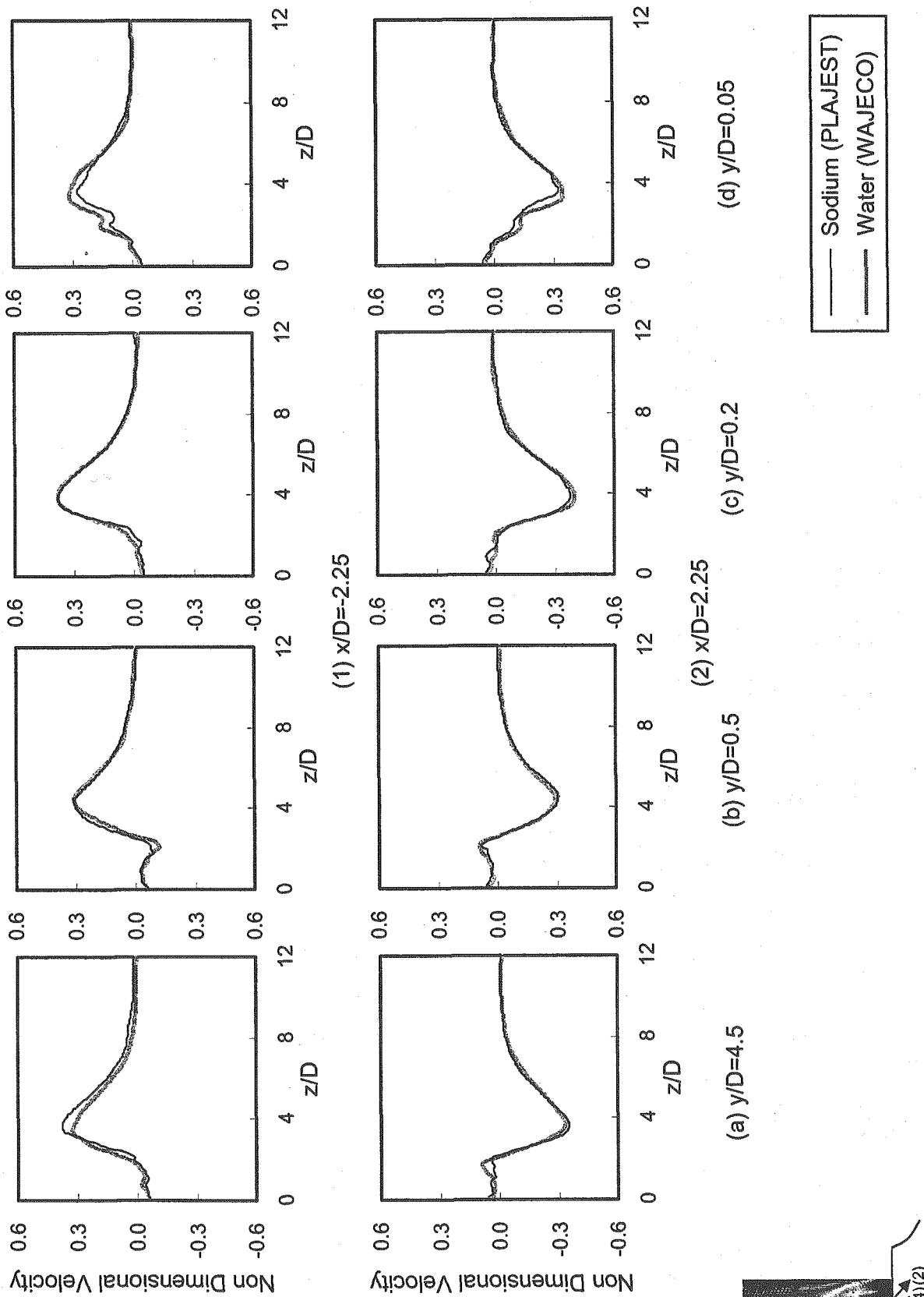


Fig.5.1.22(a) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition.

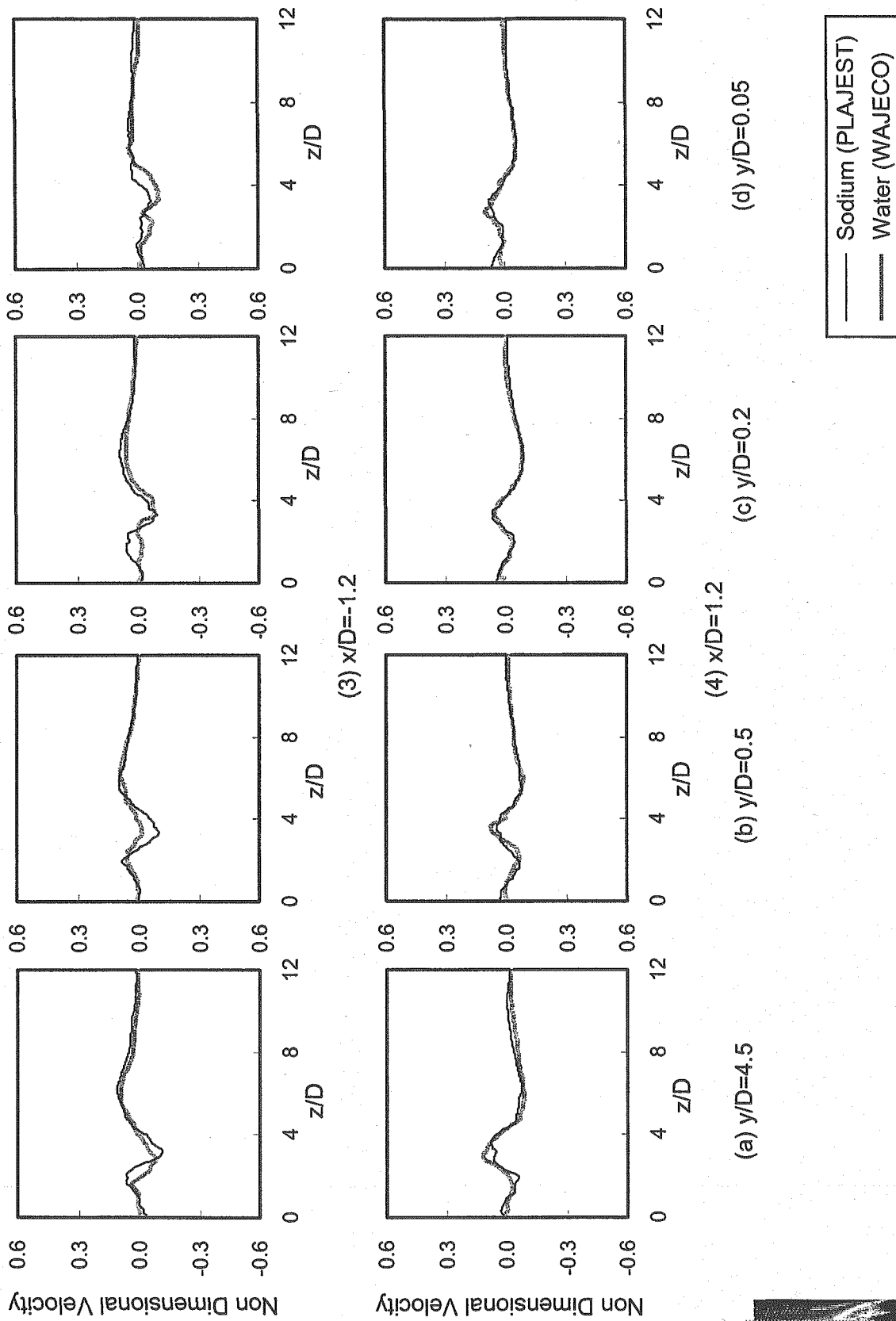


Fig.5.1.22(b) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition.

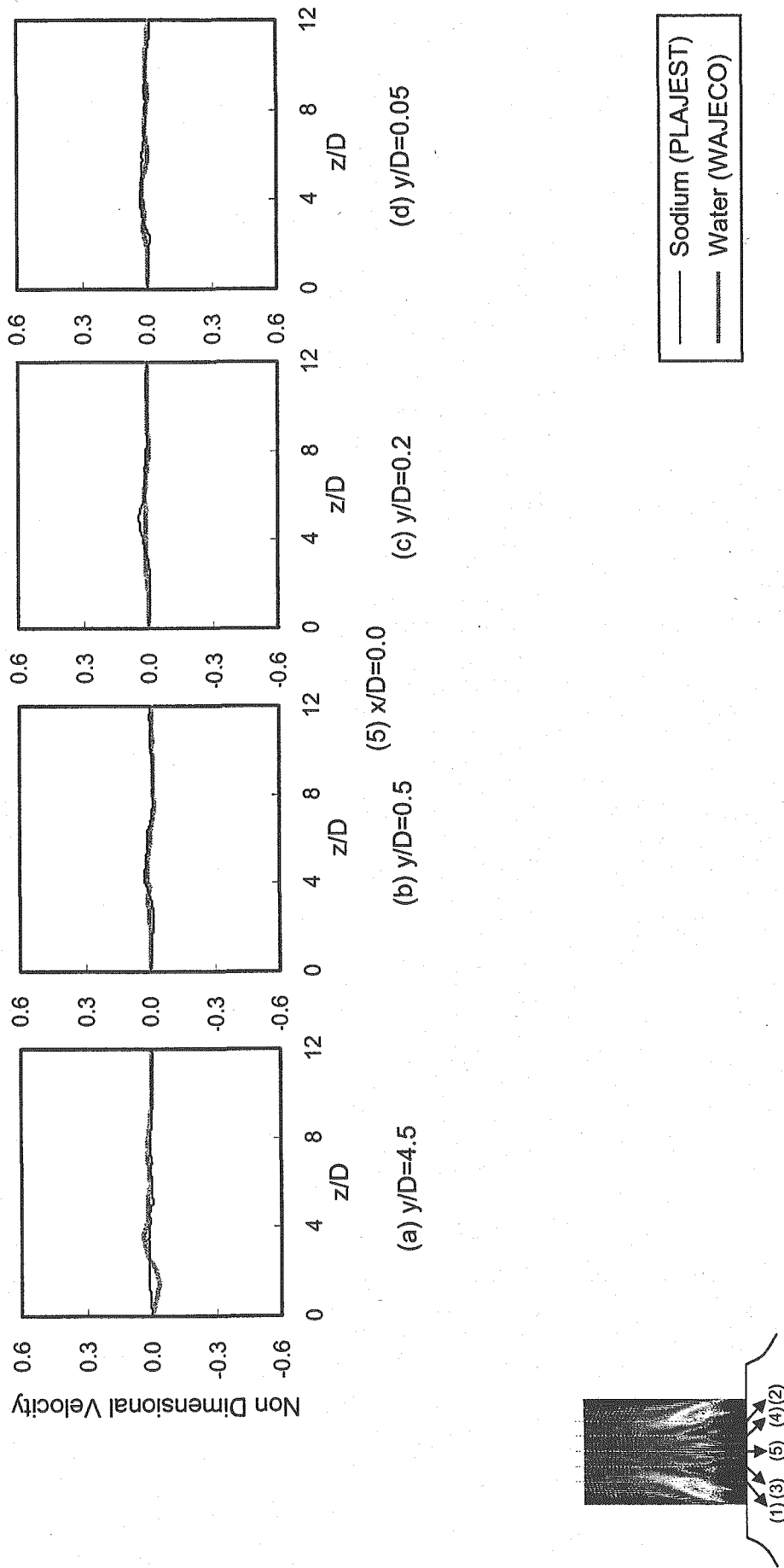


Fig.5.1.22(c) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition.

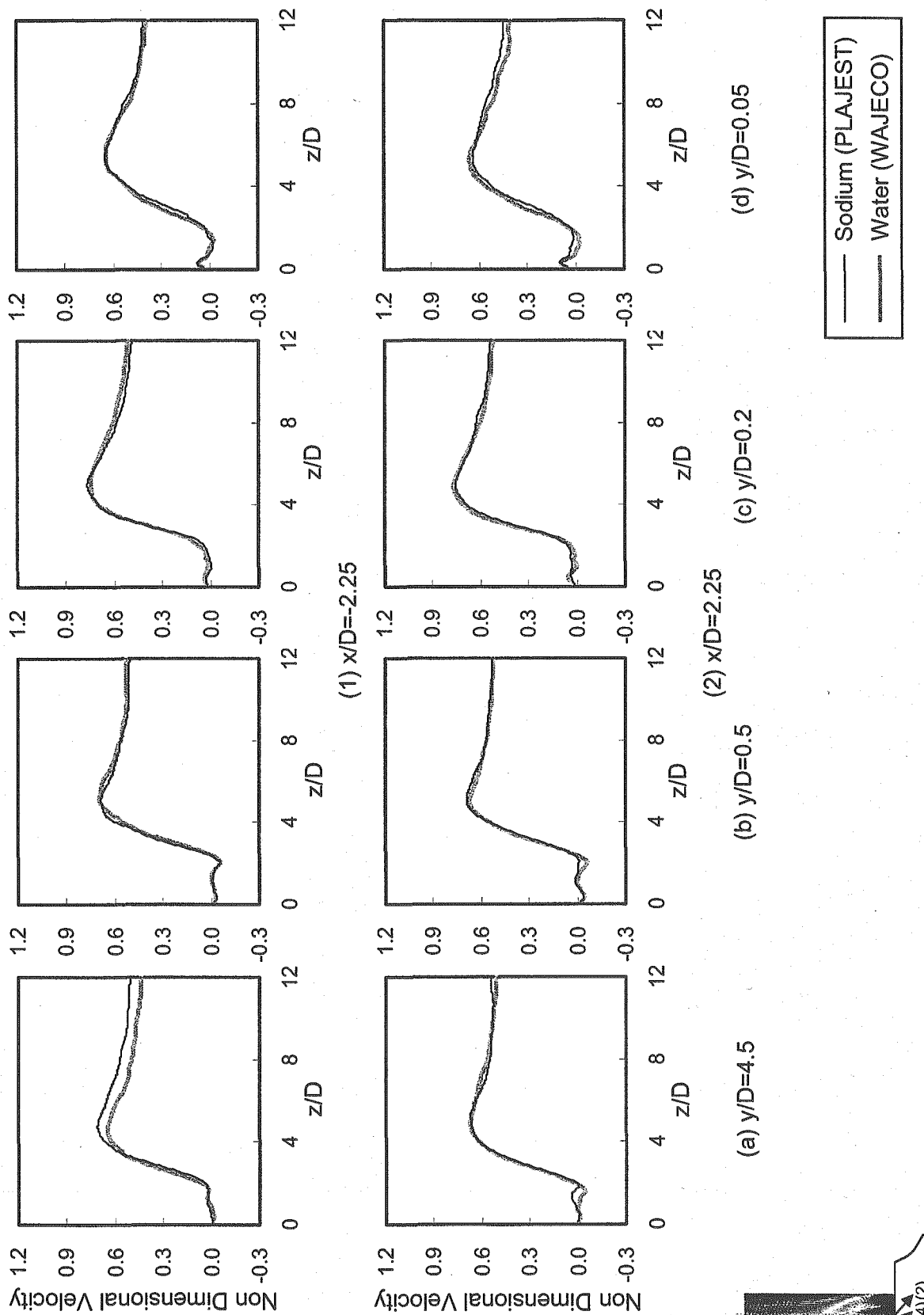


Fig.5.1.23(a) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition.

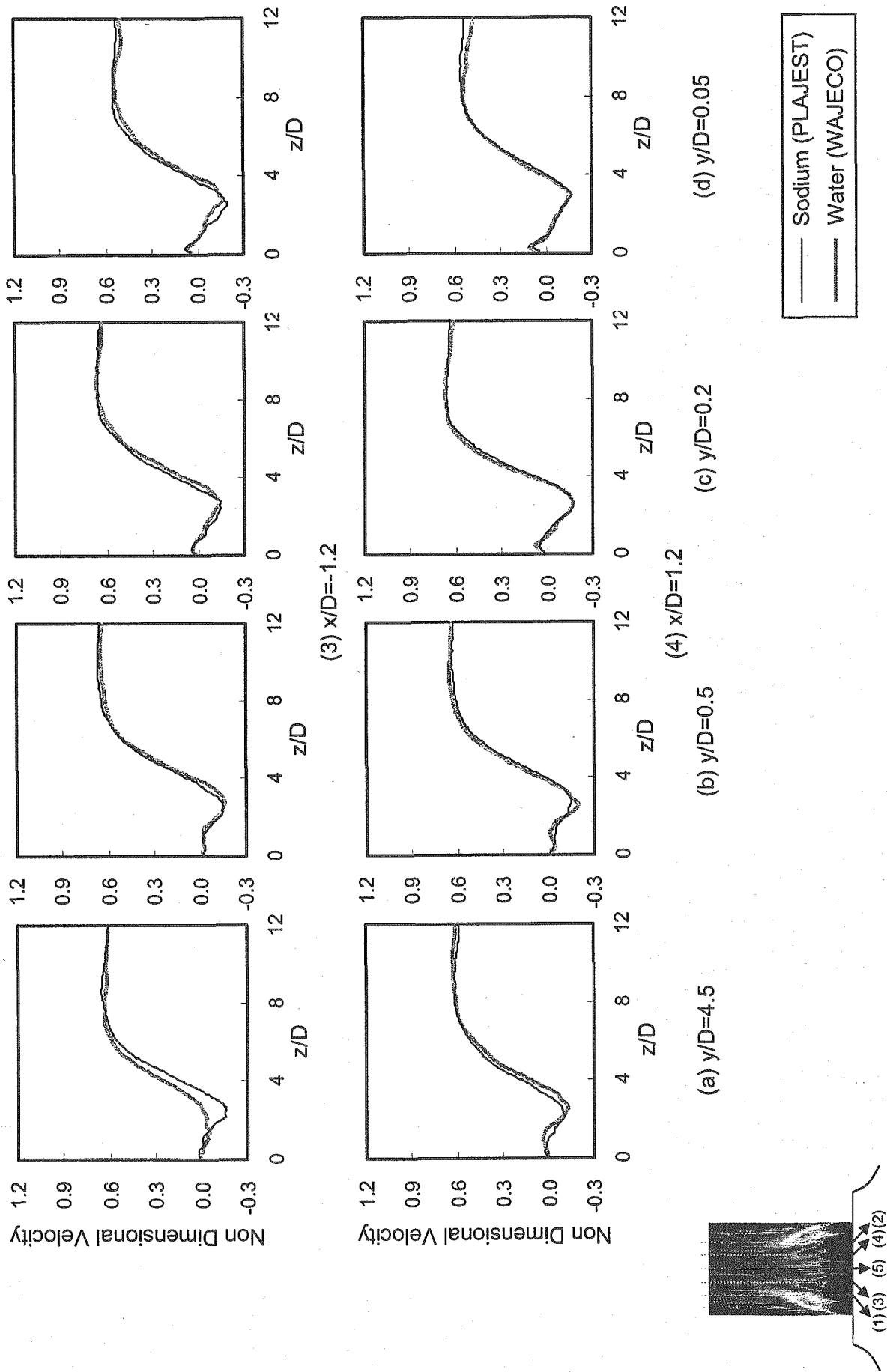


Fig.5.1.23(b) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition.



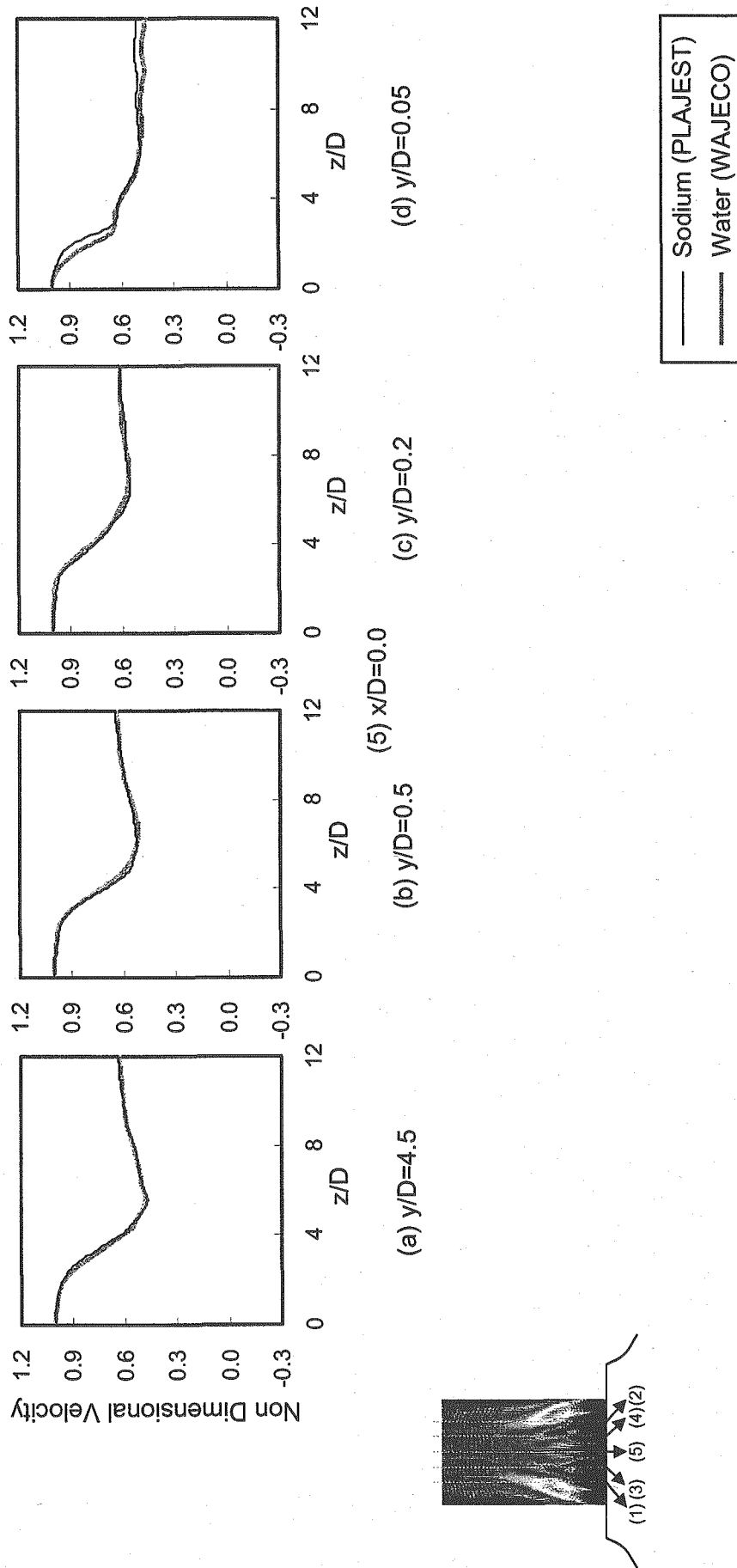


Fig.5.1.23(c) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Vertical Direction between Sodium and Water Condition.

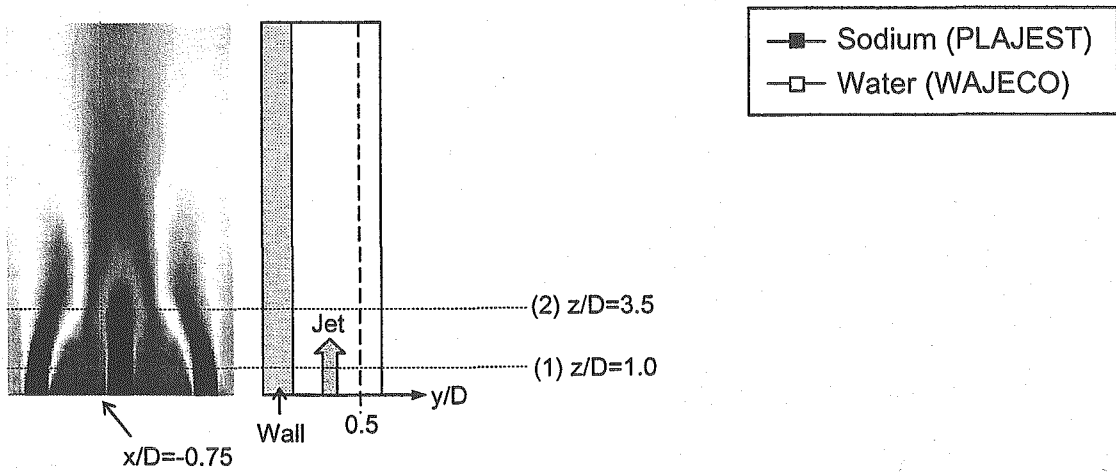
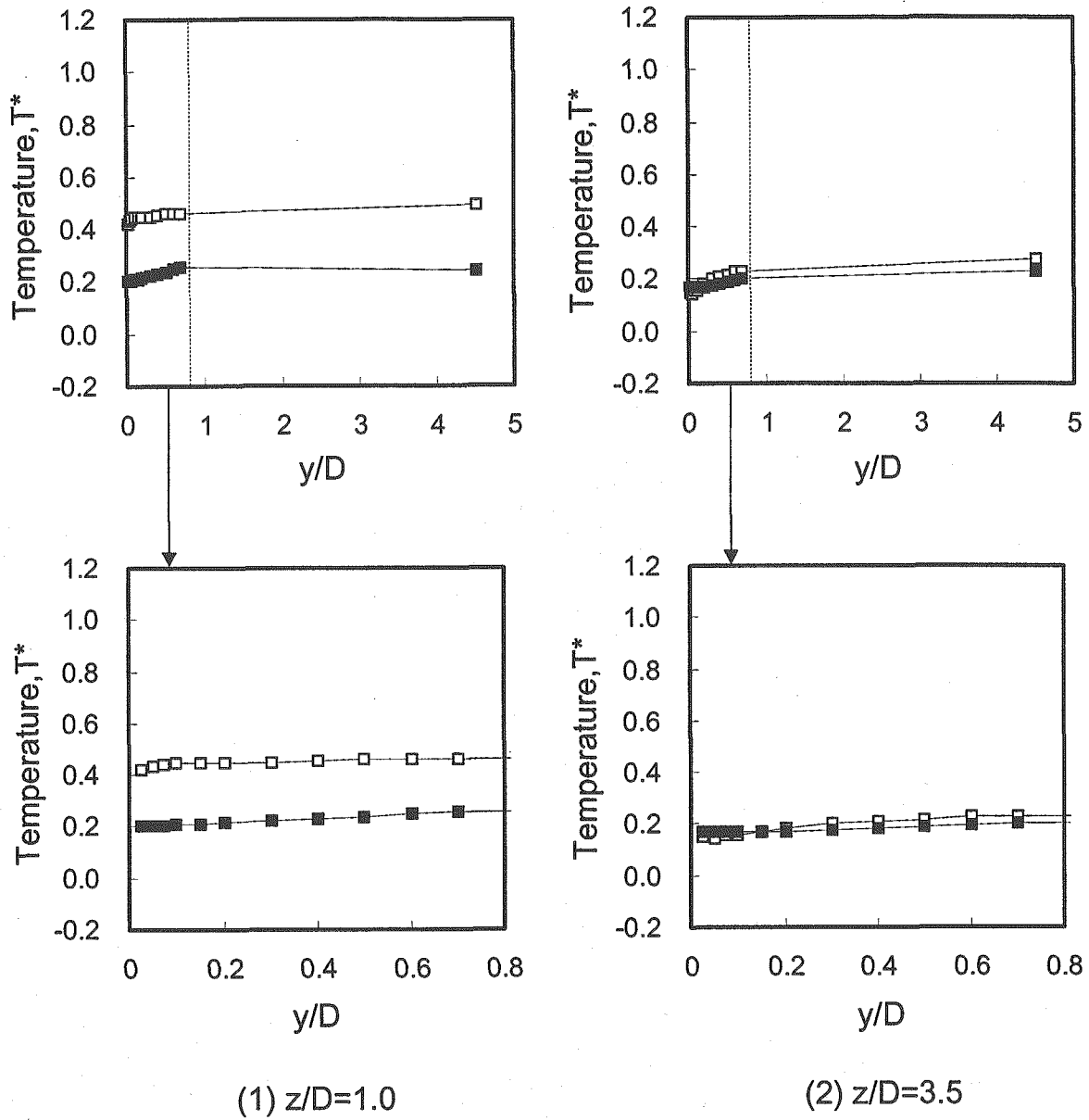


Fig. 5.1.24(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=-0.75$ )

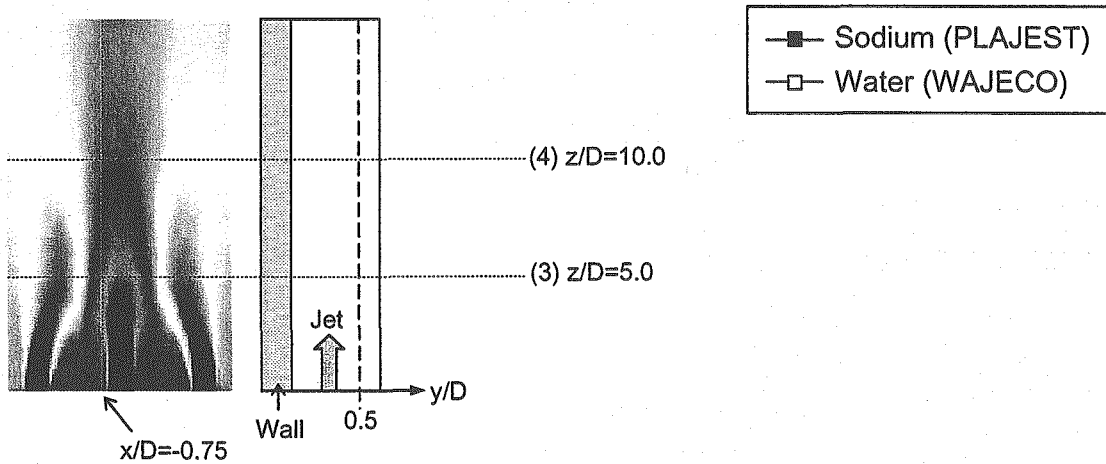
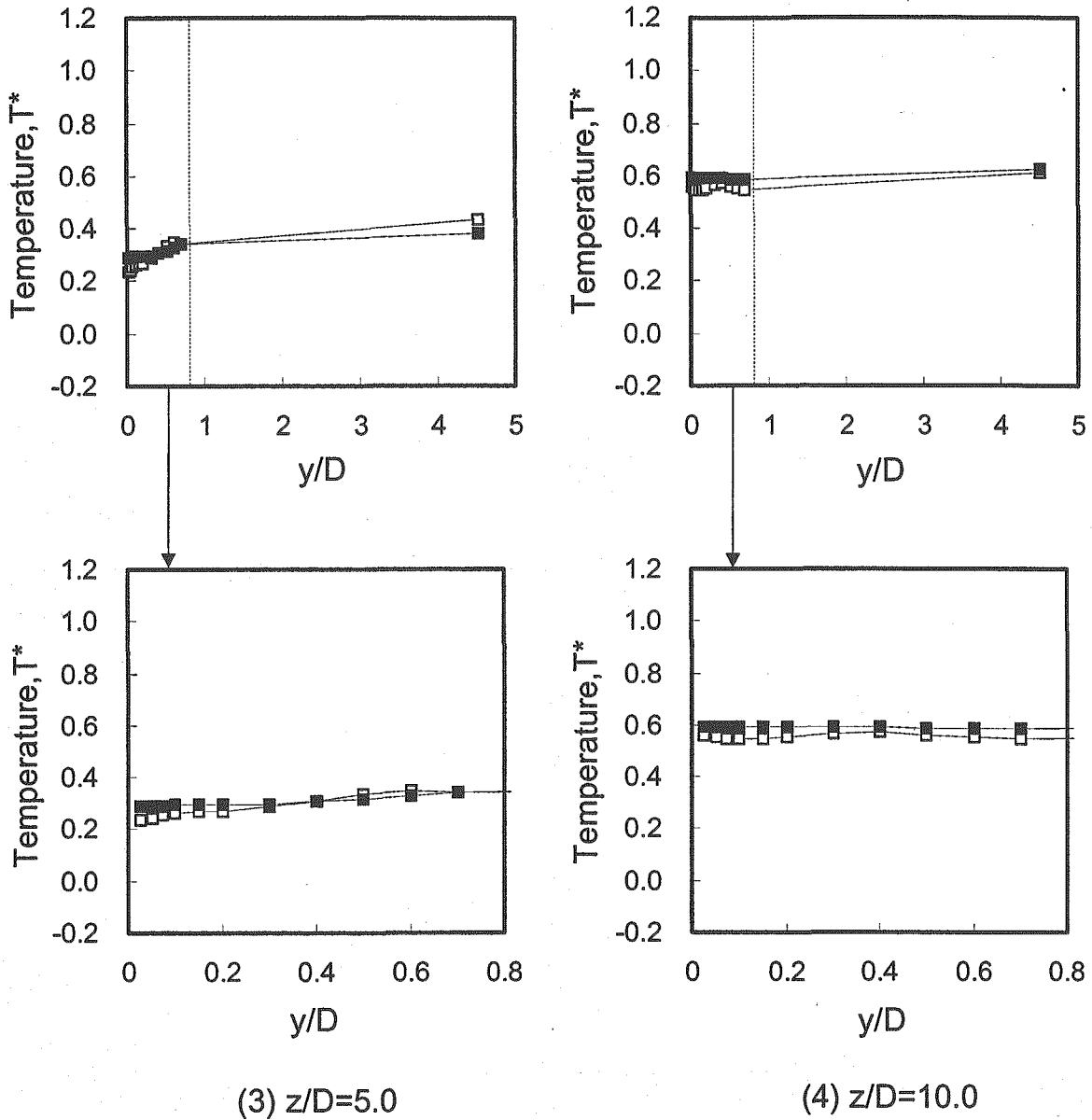


Fig. 5.1.24(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=-0.75$ )

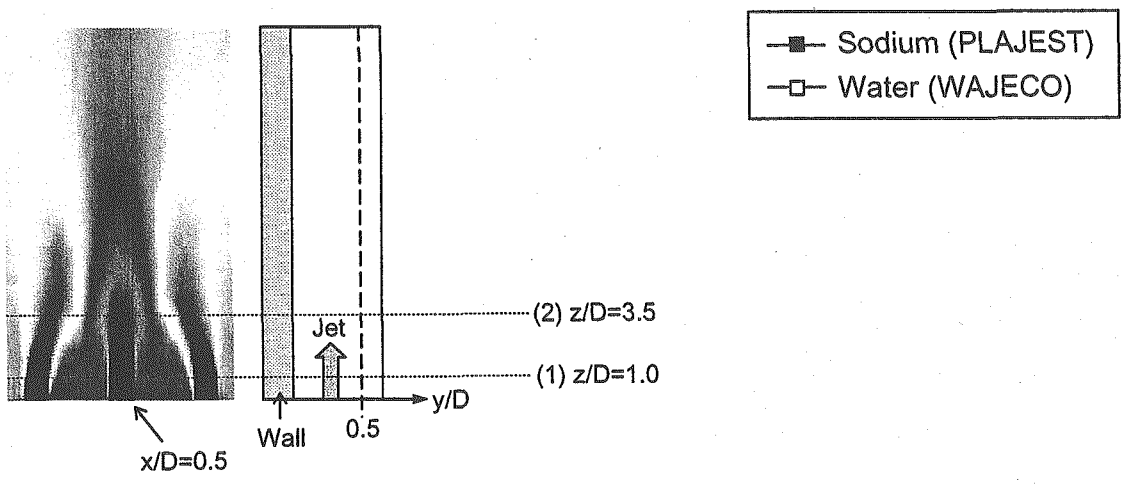
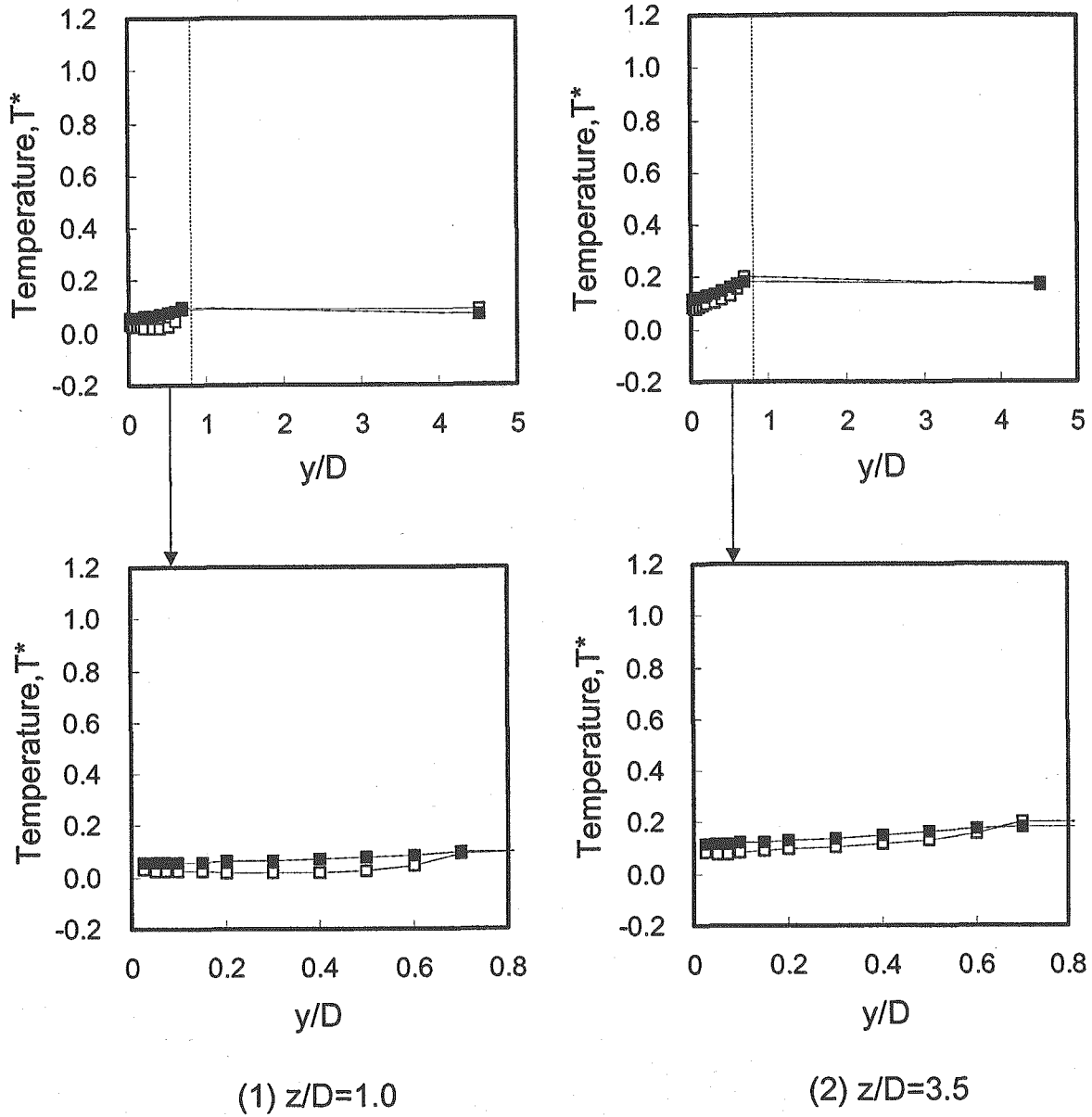


Fig. 5.1.25(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ )

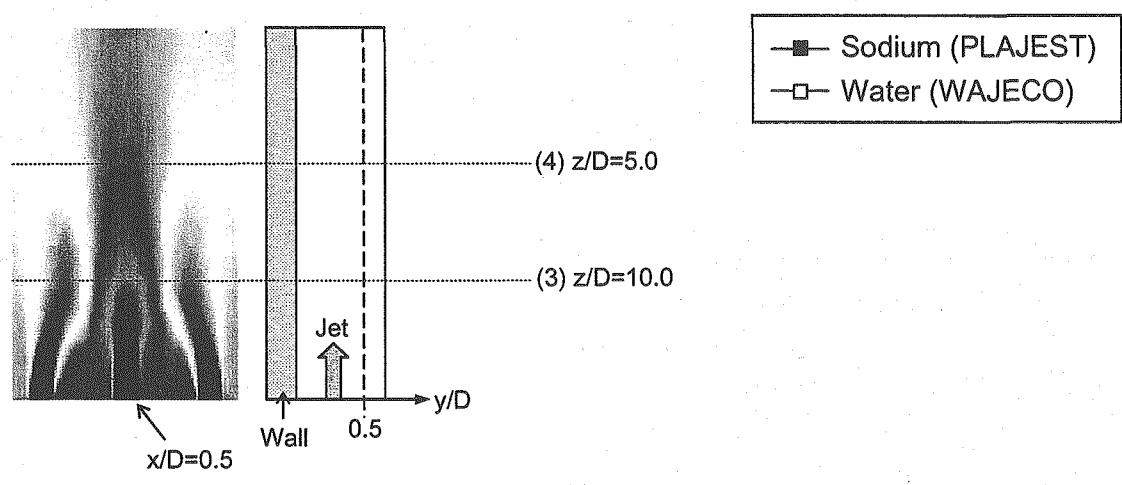
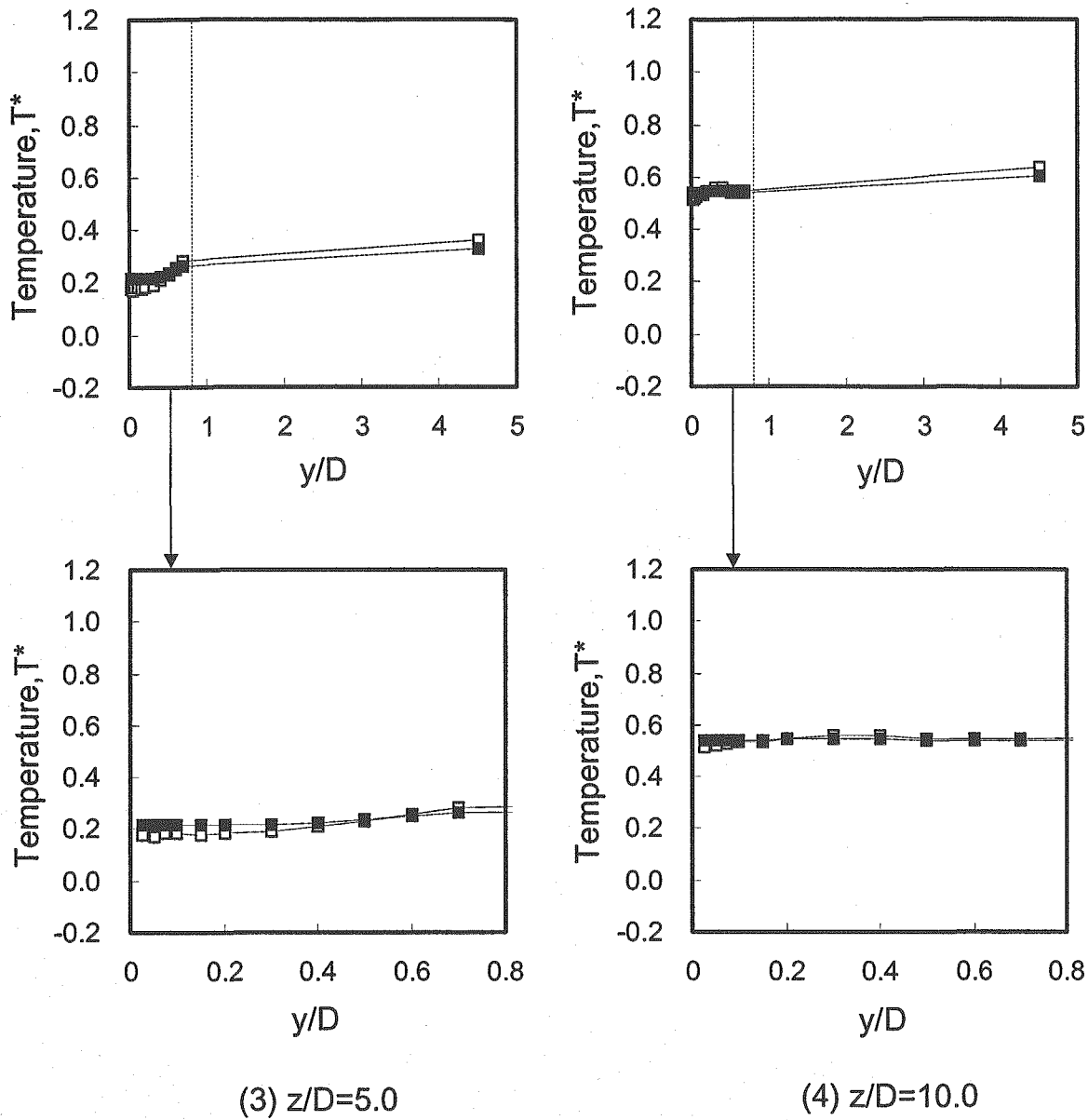


Fig. 5.1.25(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ )

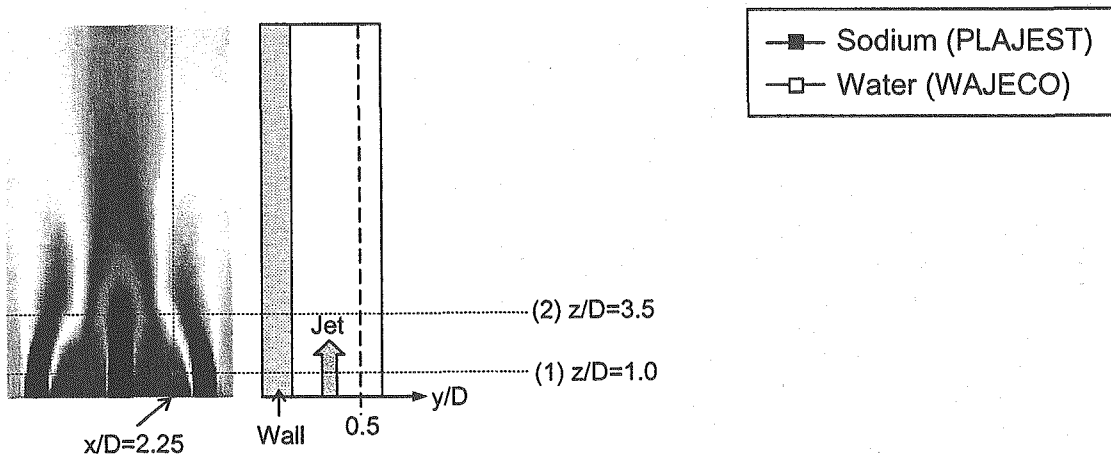
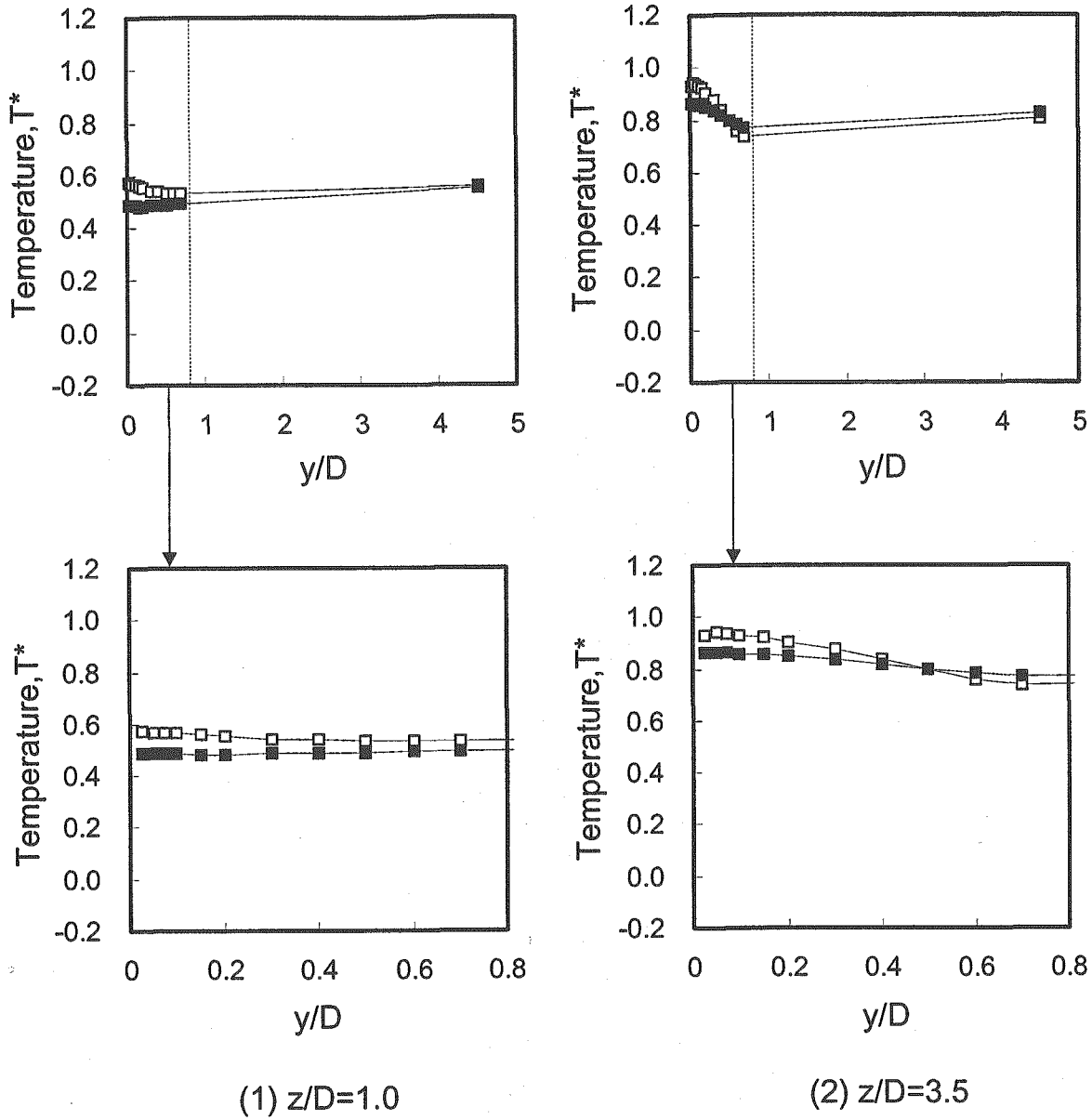


Fig. 5.1.26(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ )

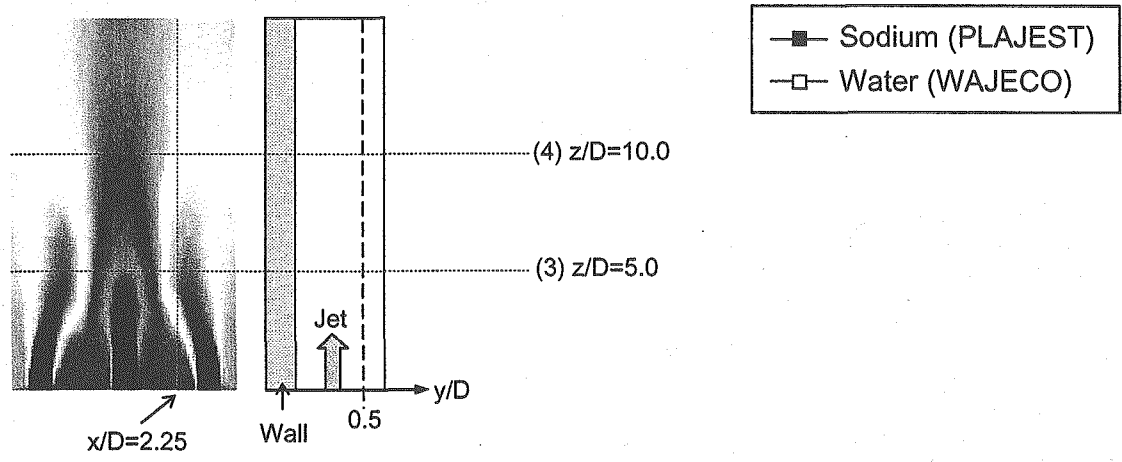
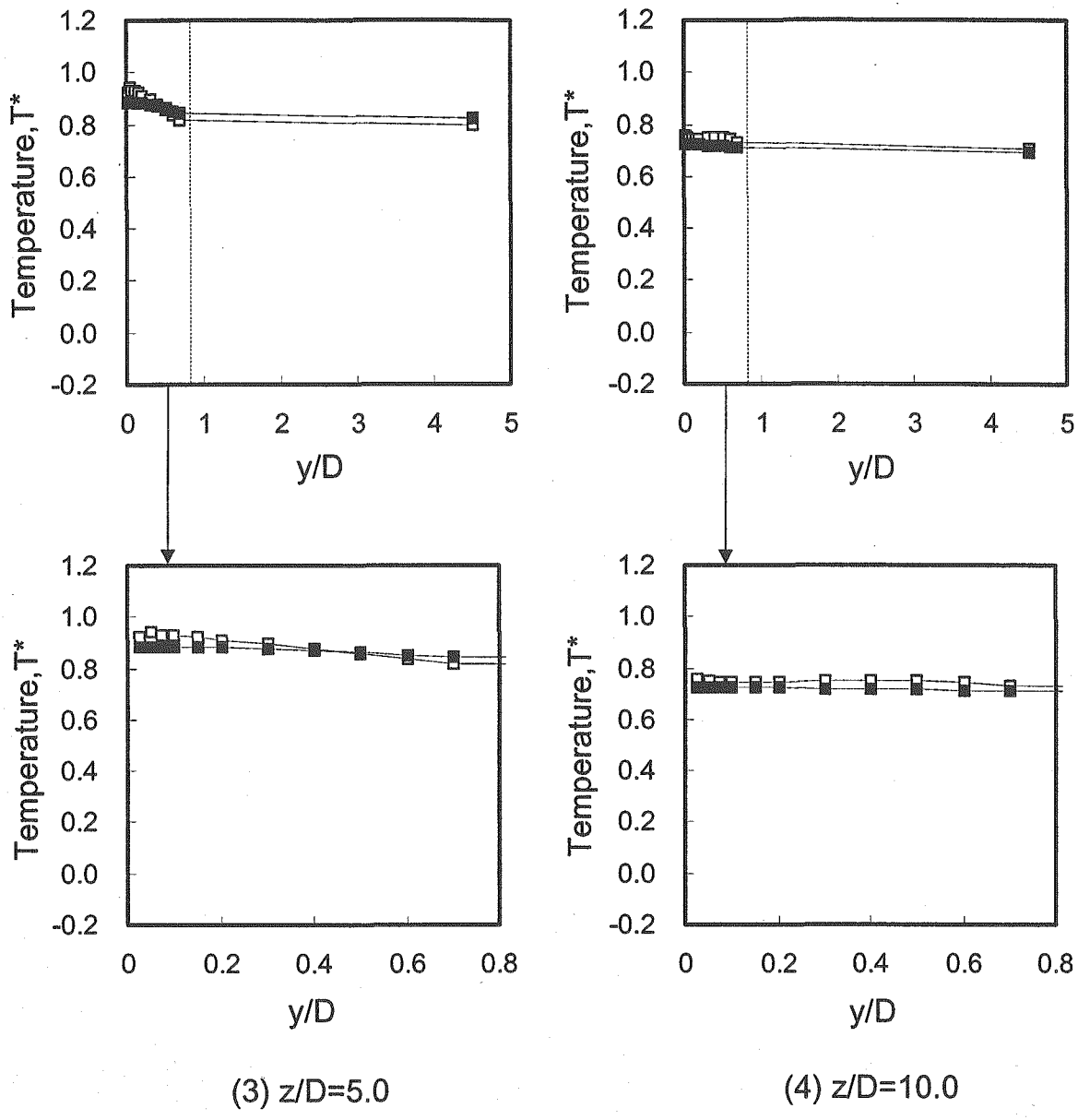
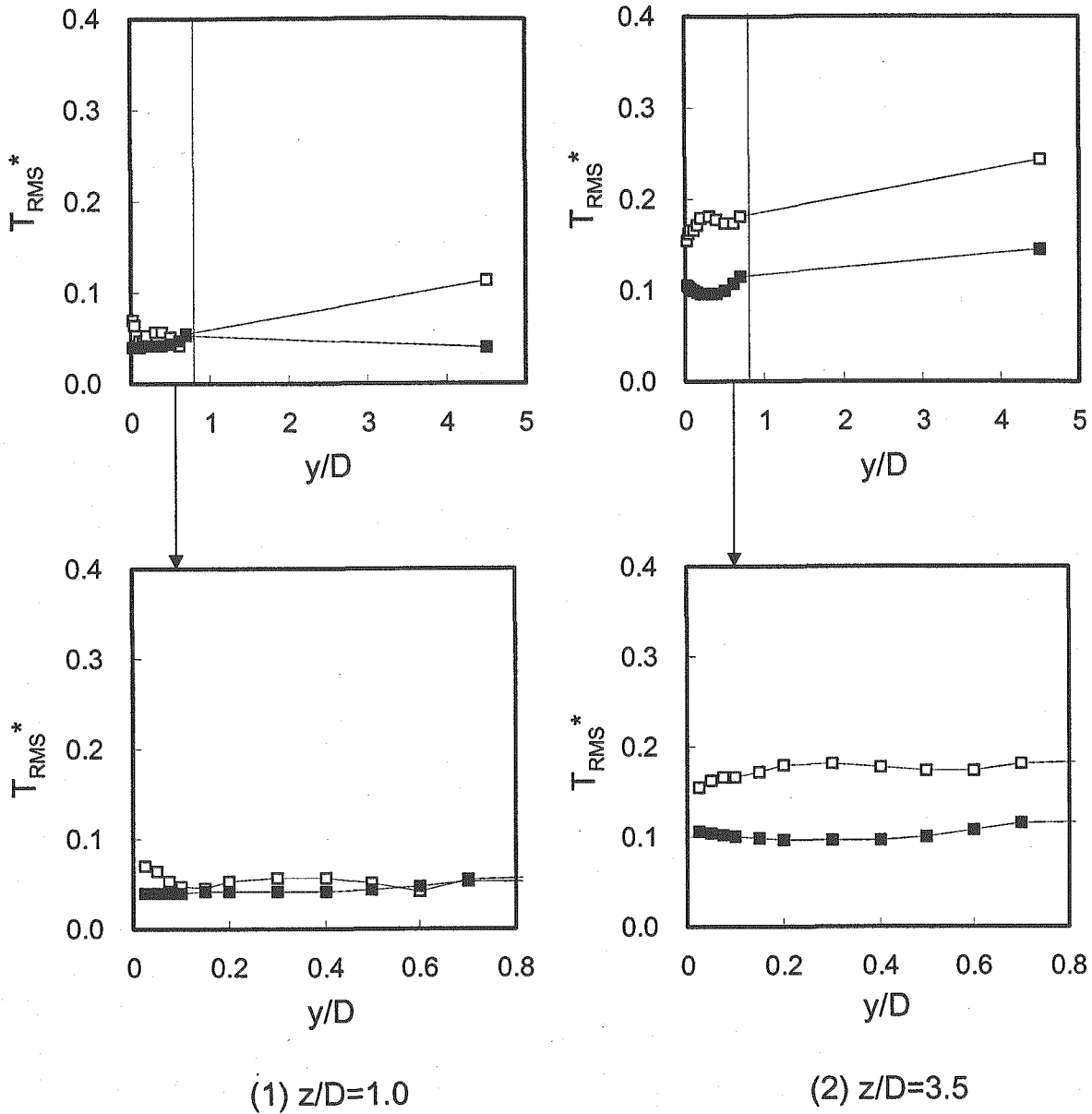


Fig. 5.1.26(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ )



(1) z/D=1.0

(2) z/D=3.5

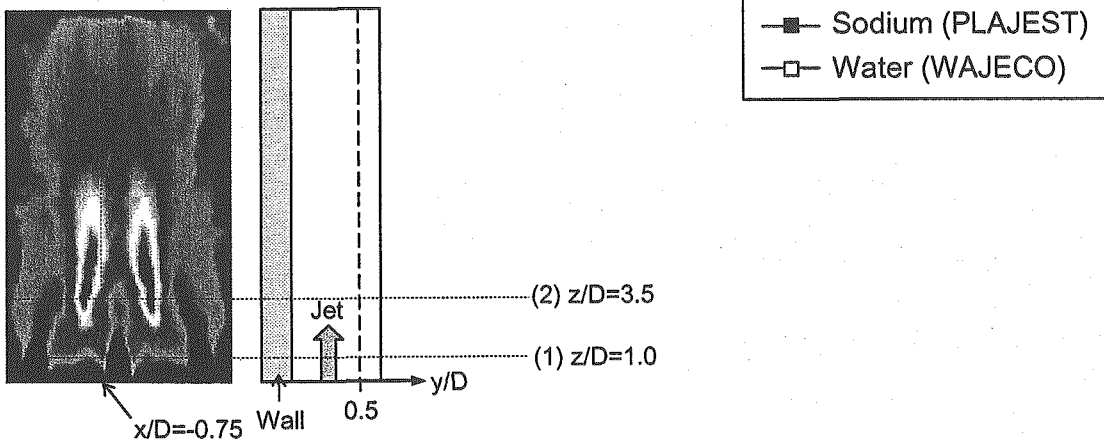


Fig. 5.1.27(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. (x/D=-0.75)



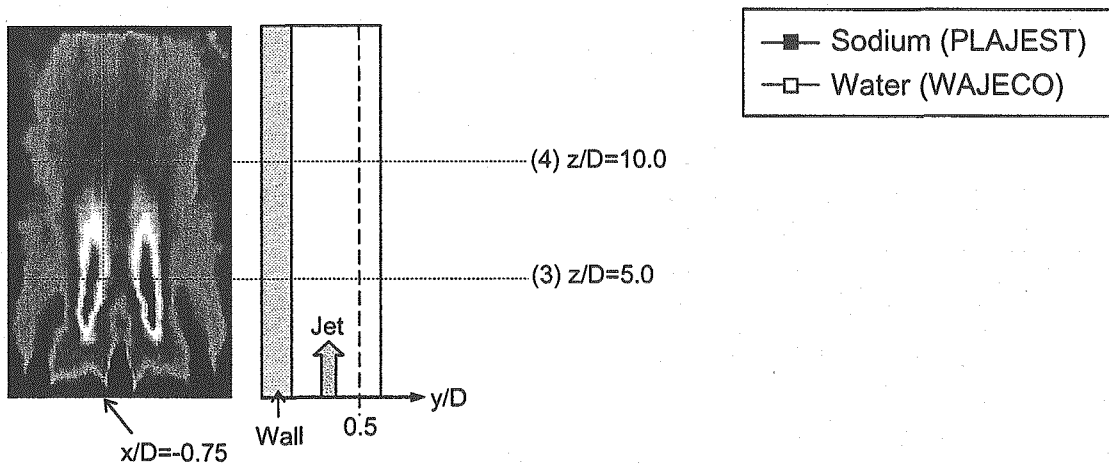
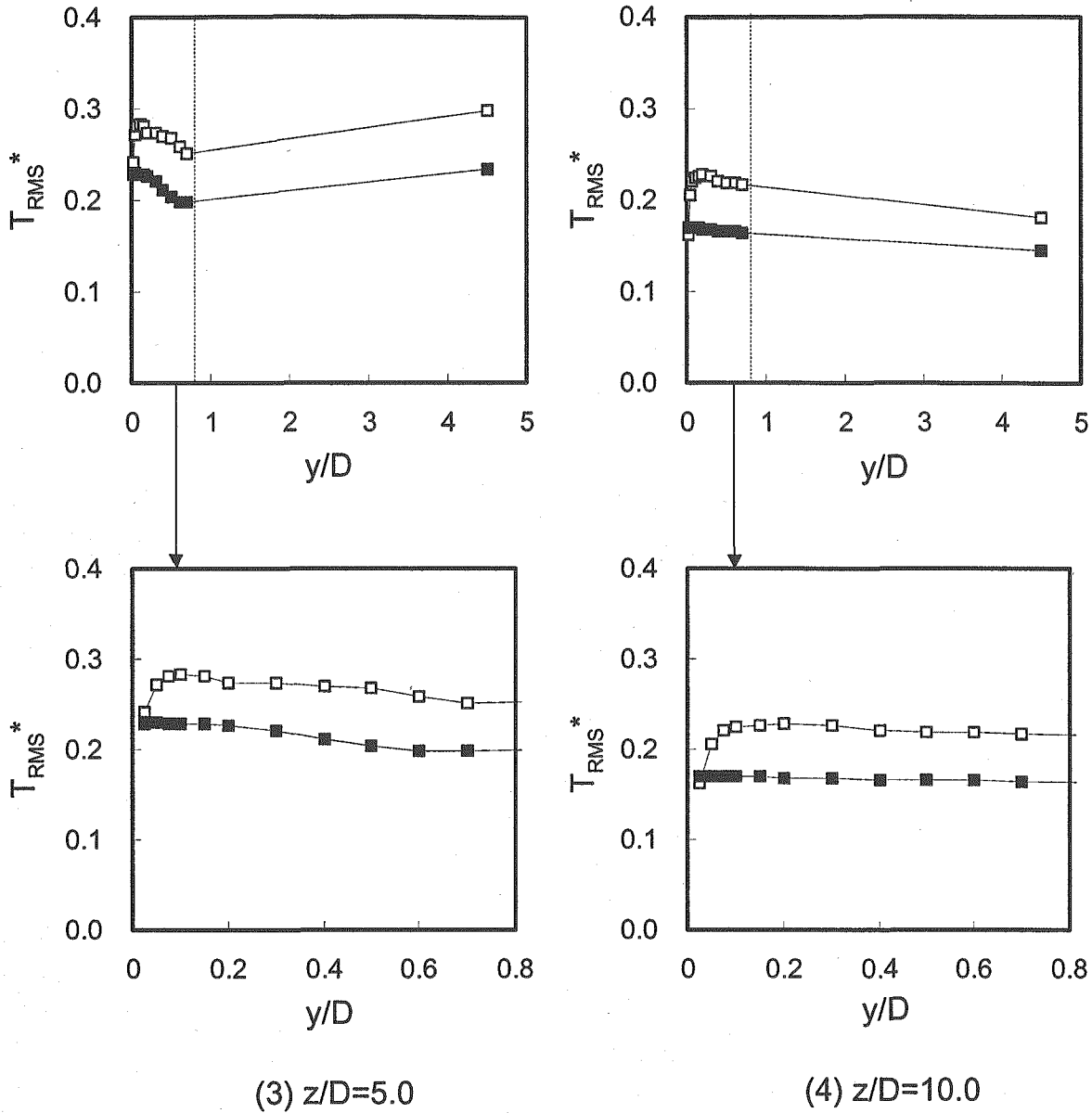


Fig. 5.1.27(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=-0.75$ )

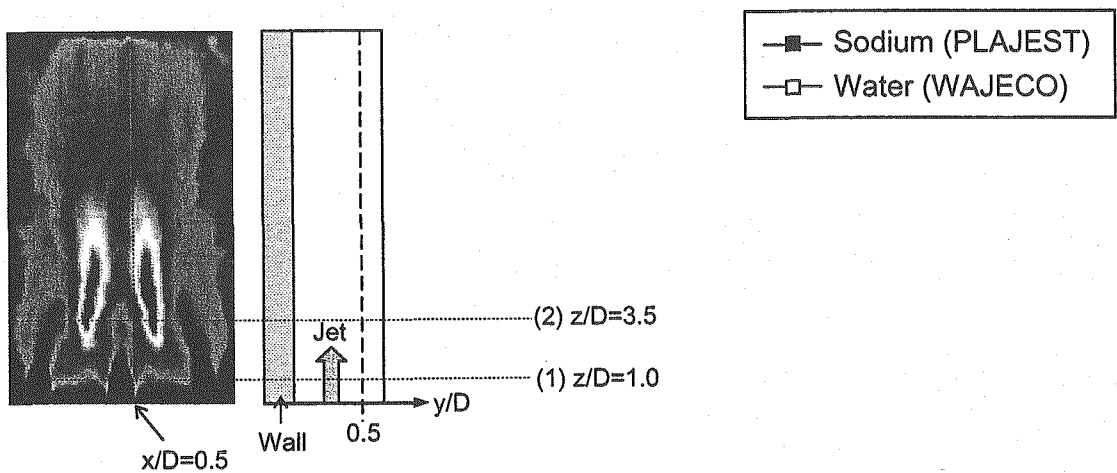
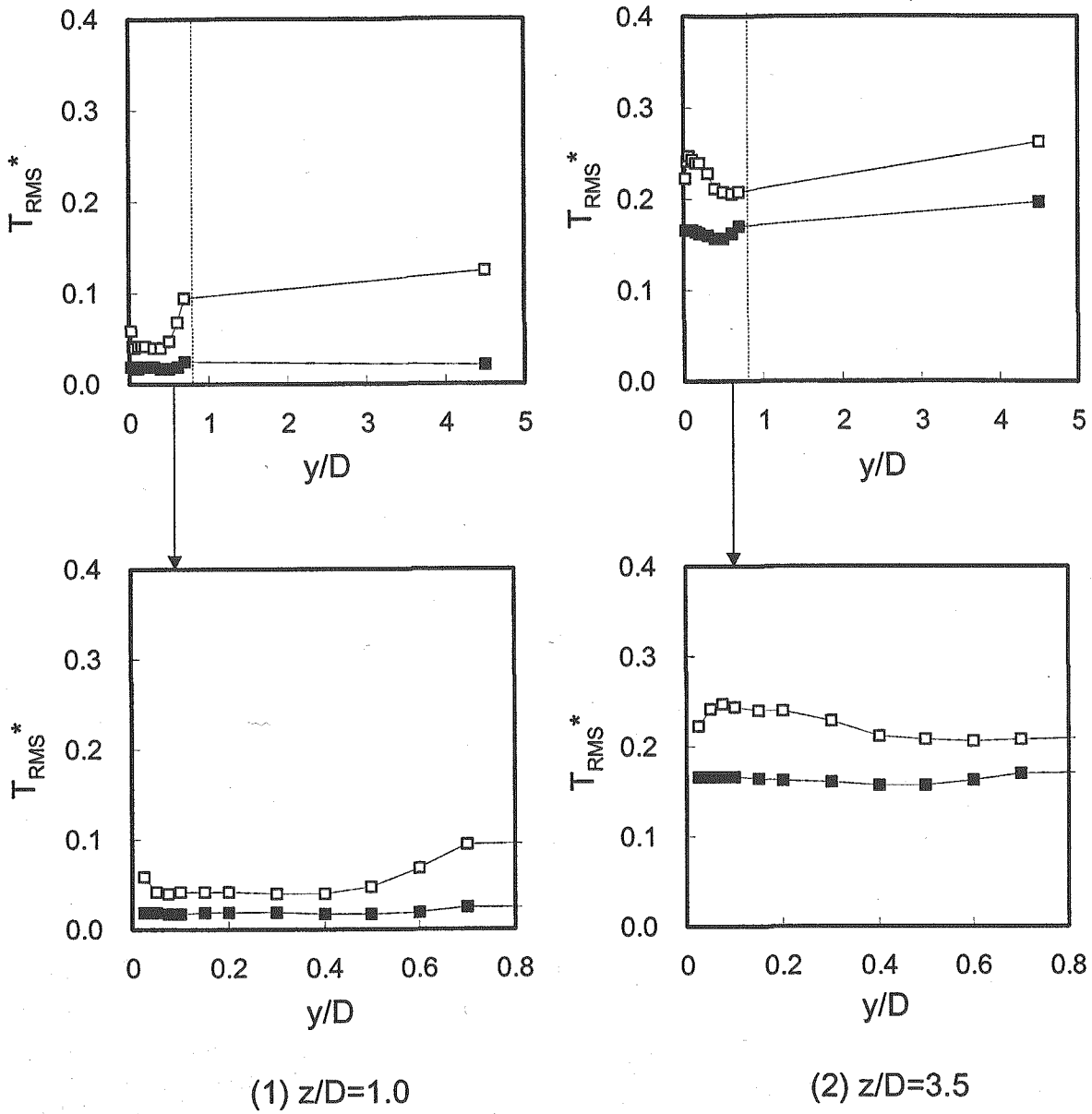


Fig. 5.1.28(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ )

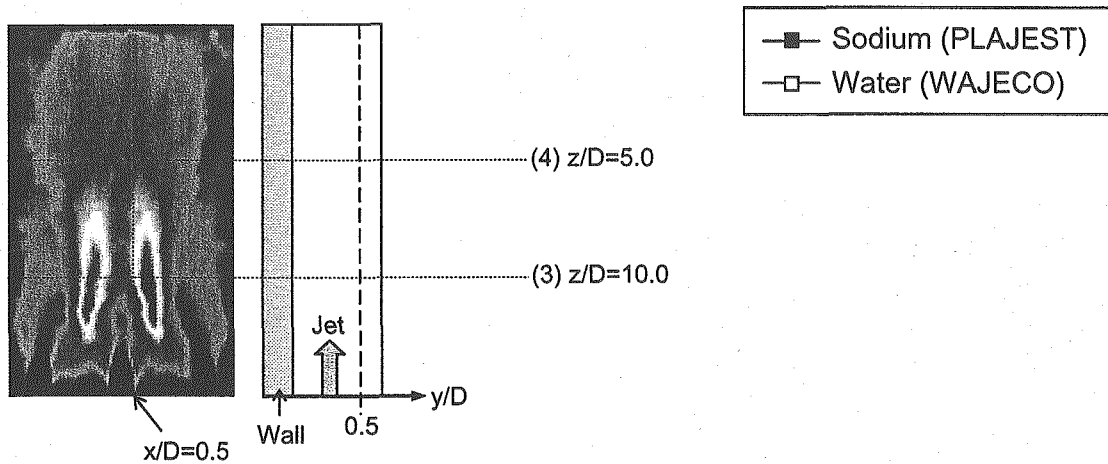
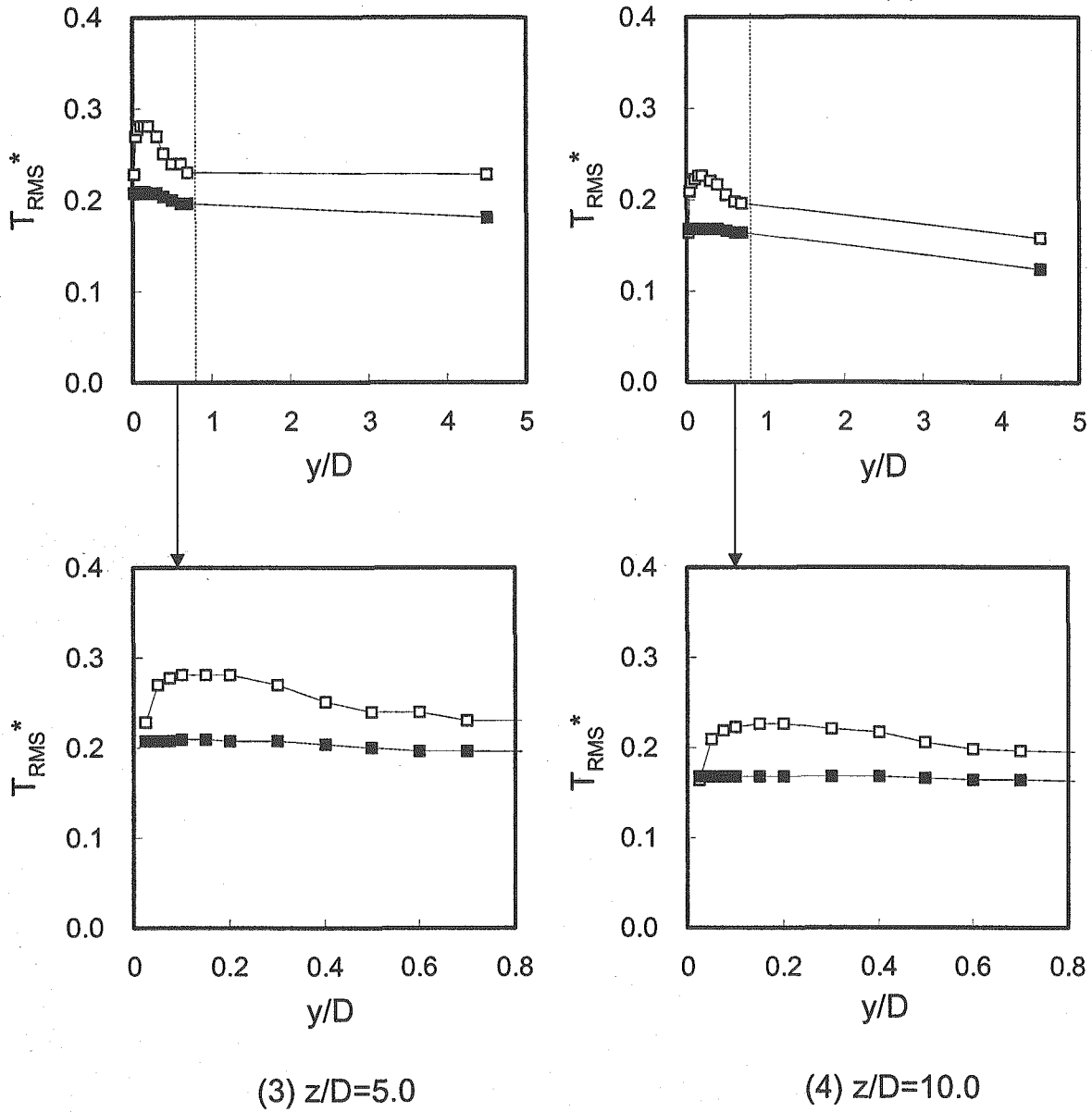


Fig. 5.1.28(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ )

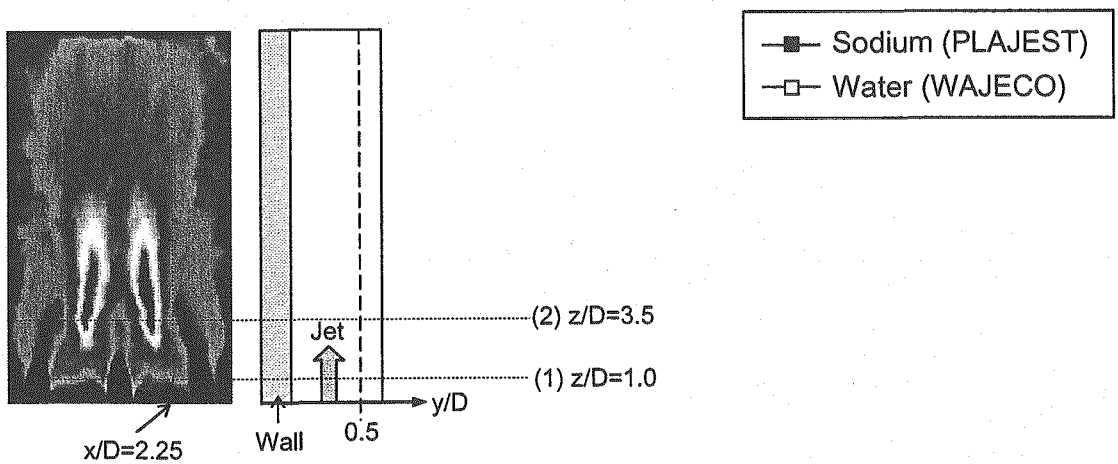
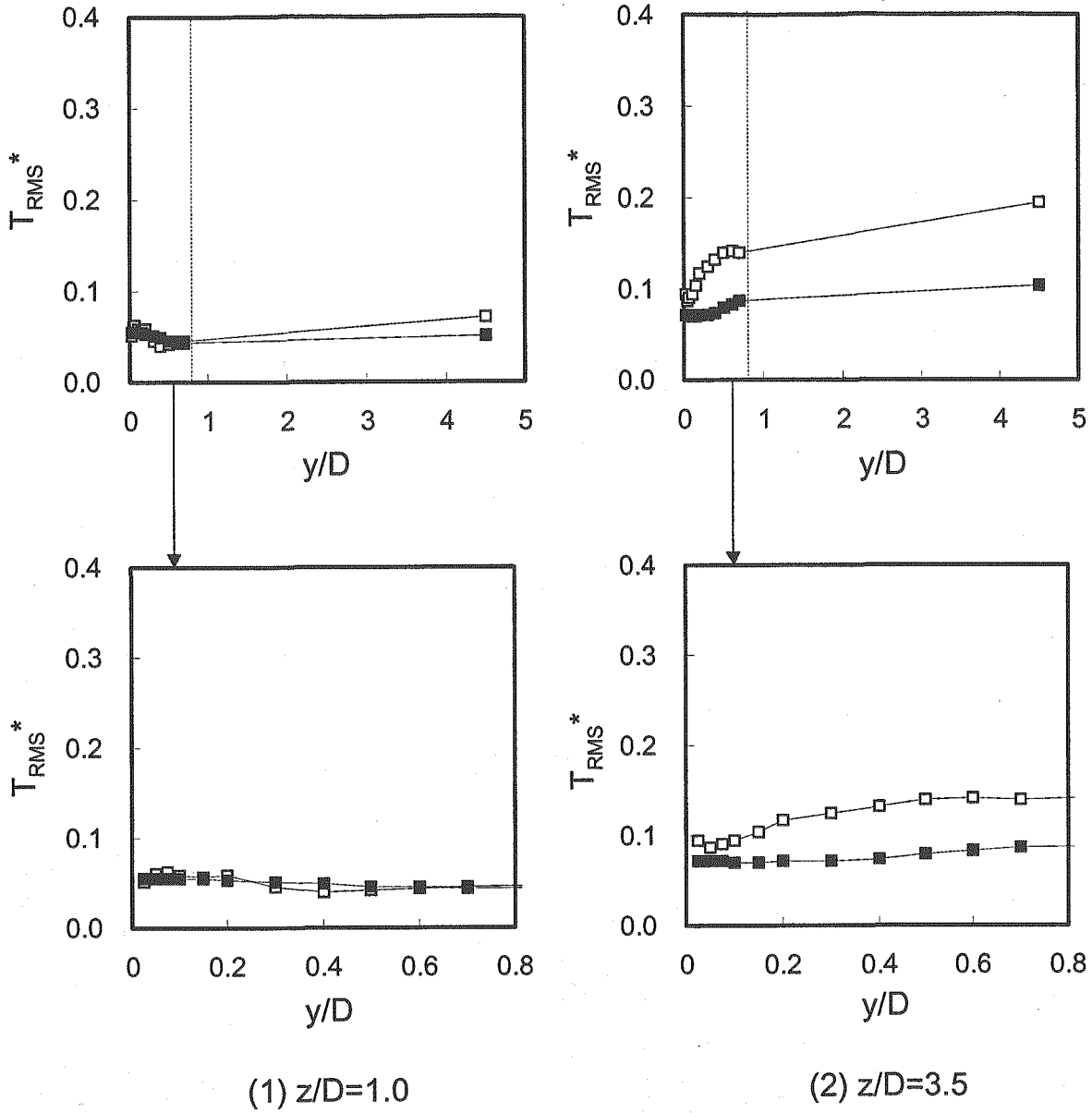


Fig. 5.1.29(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ )

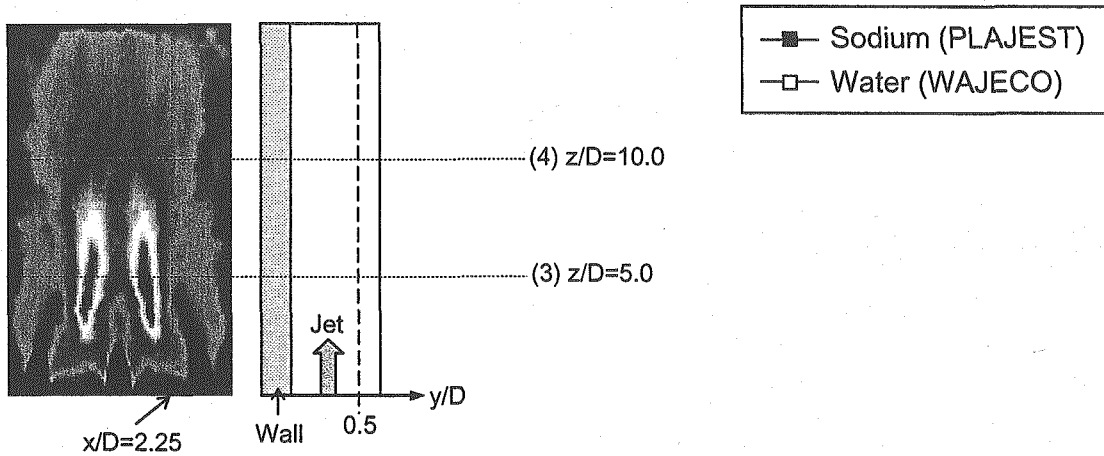
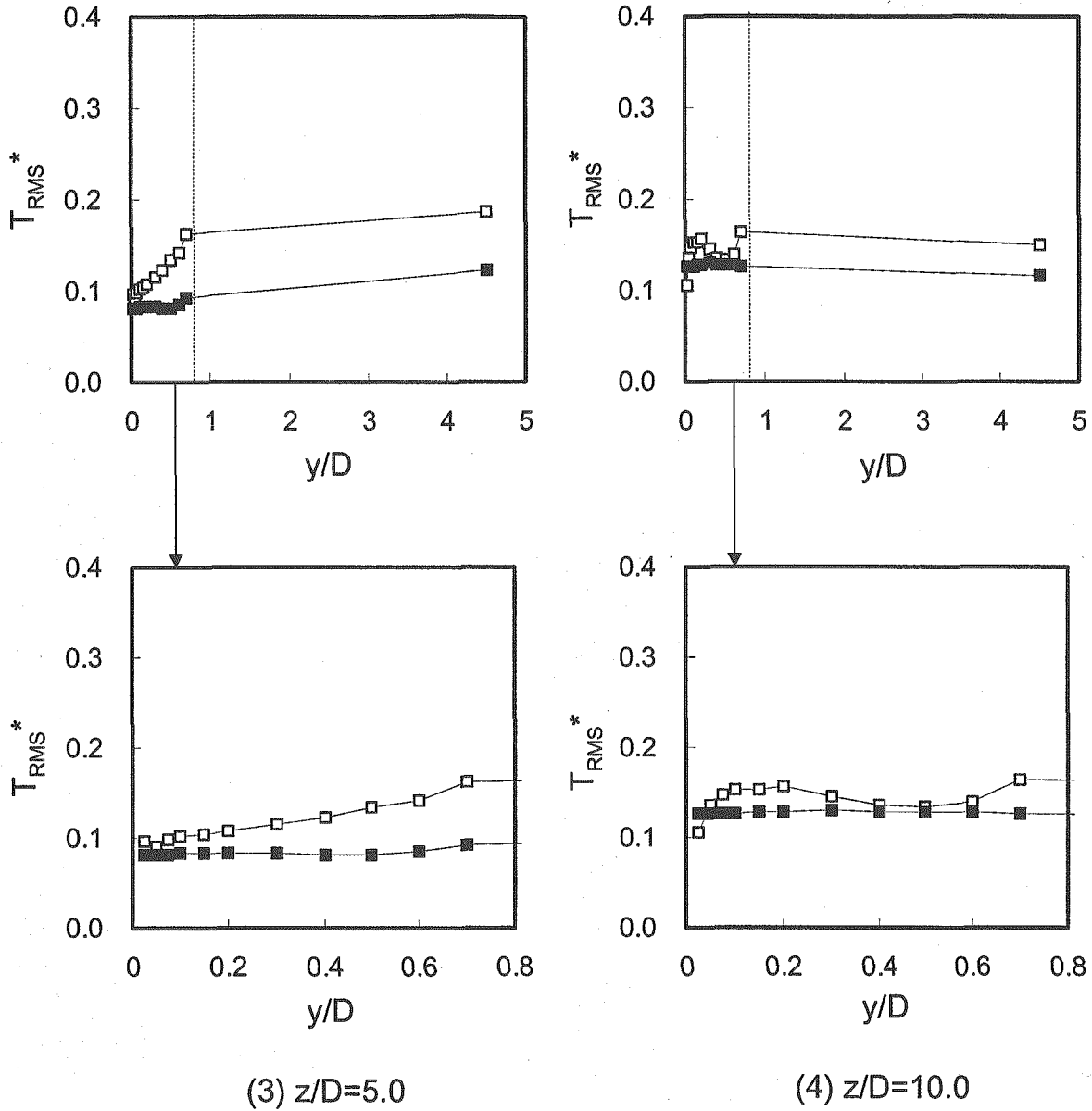


Fig. 5.1.29(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ )

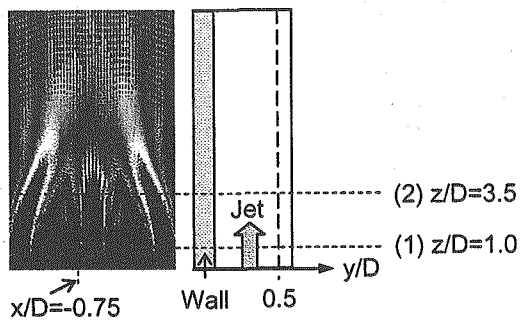
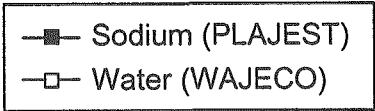
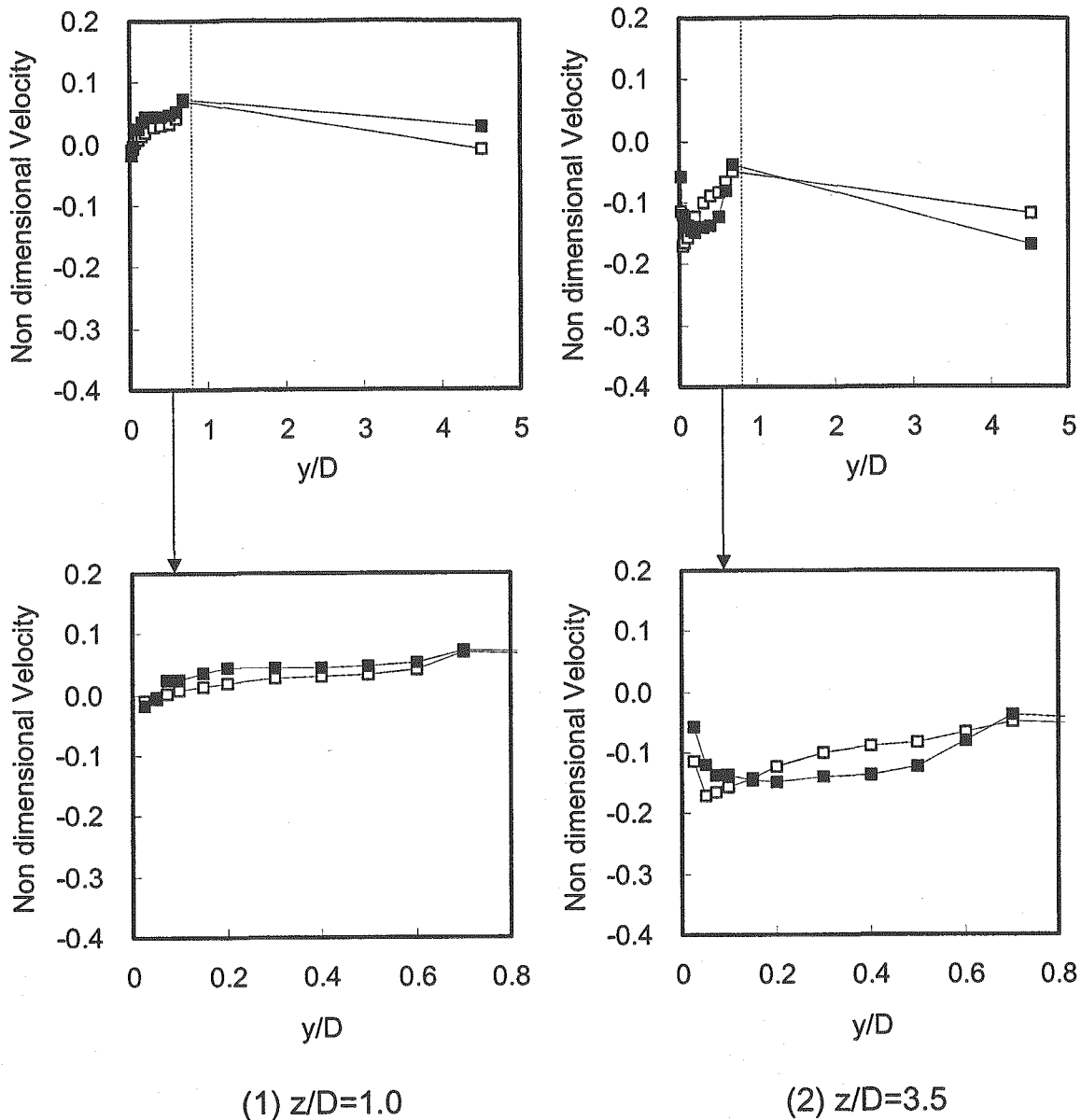


Fig. 5.1.30(a) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D = -0.75$ )

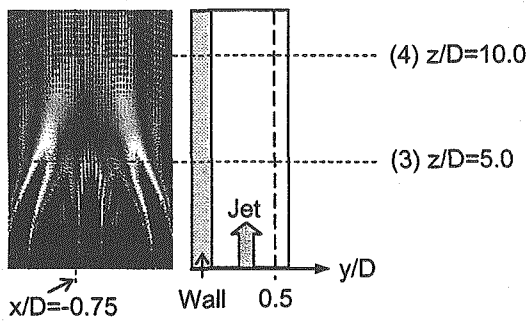
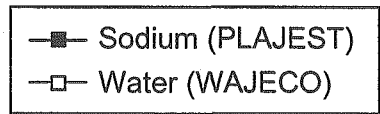
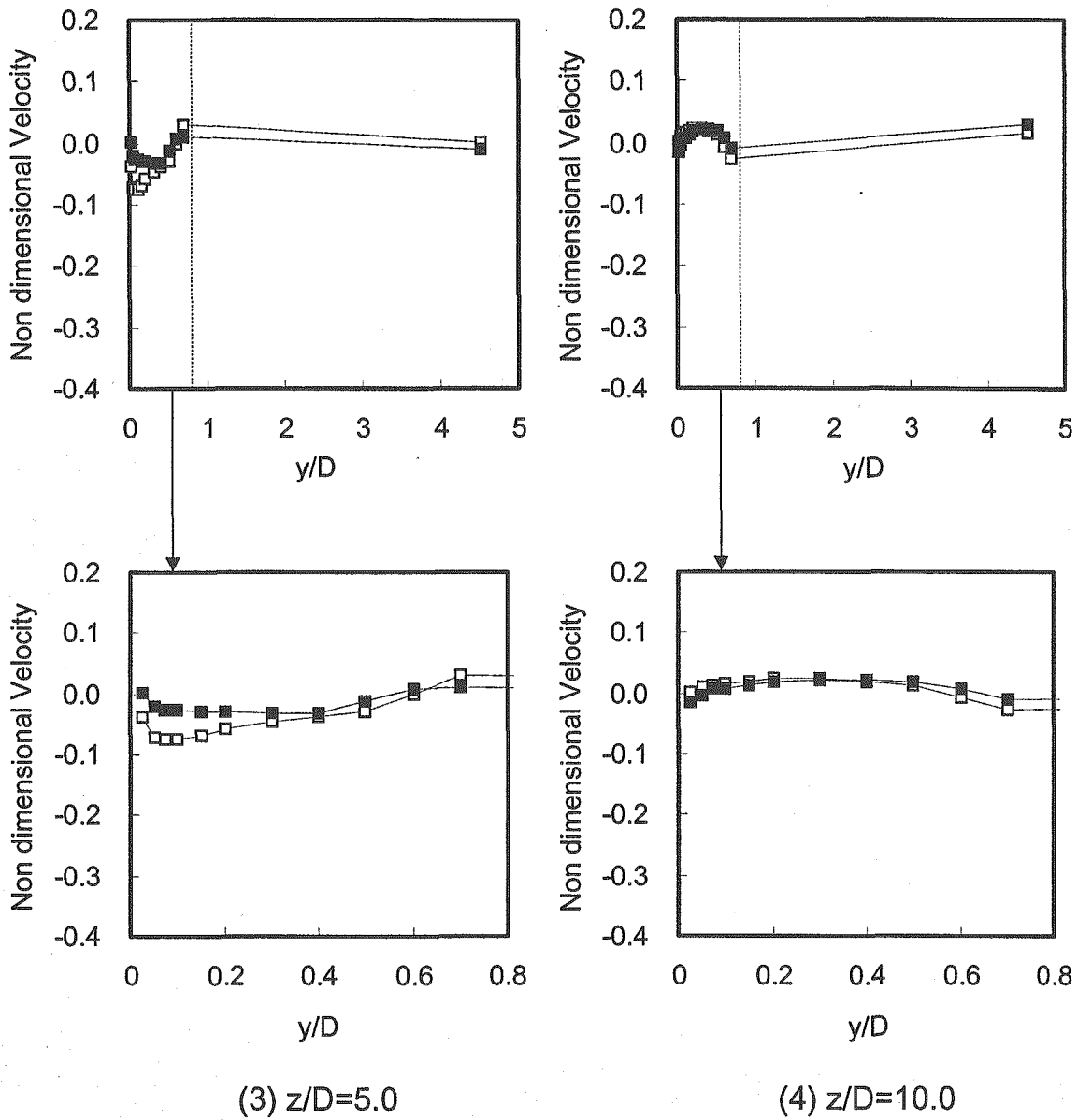


Fig. 5.1.30(b) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D = -0.75$ )

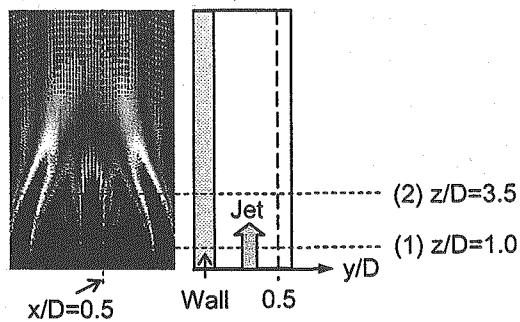
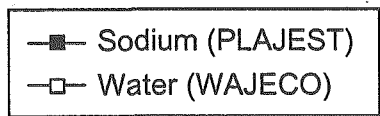
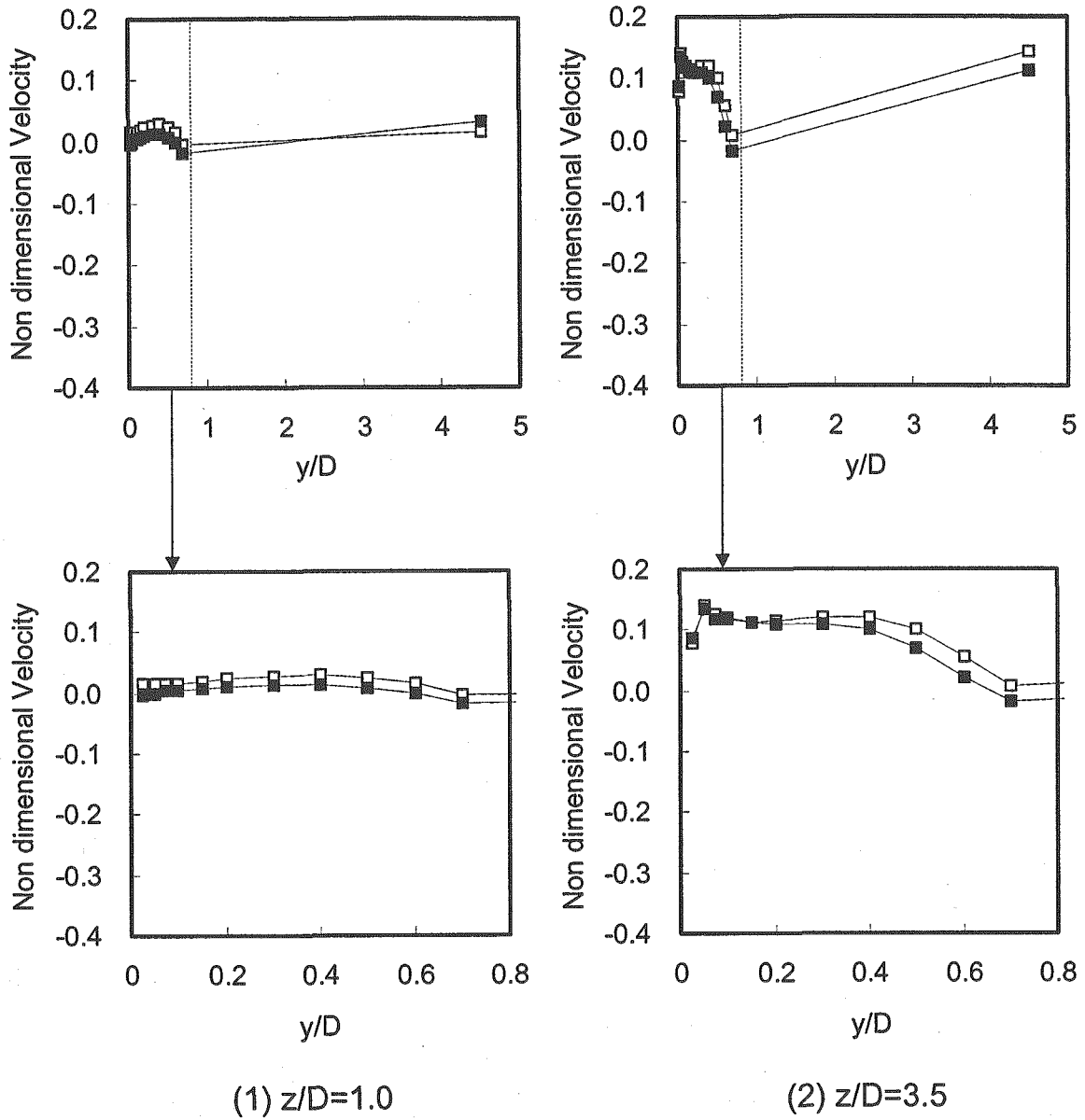


Fig. 5.1.31(a) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ )



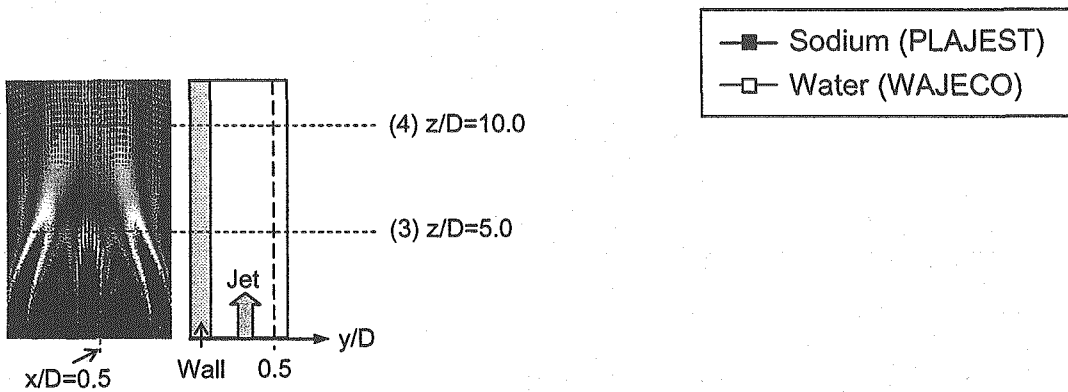
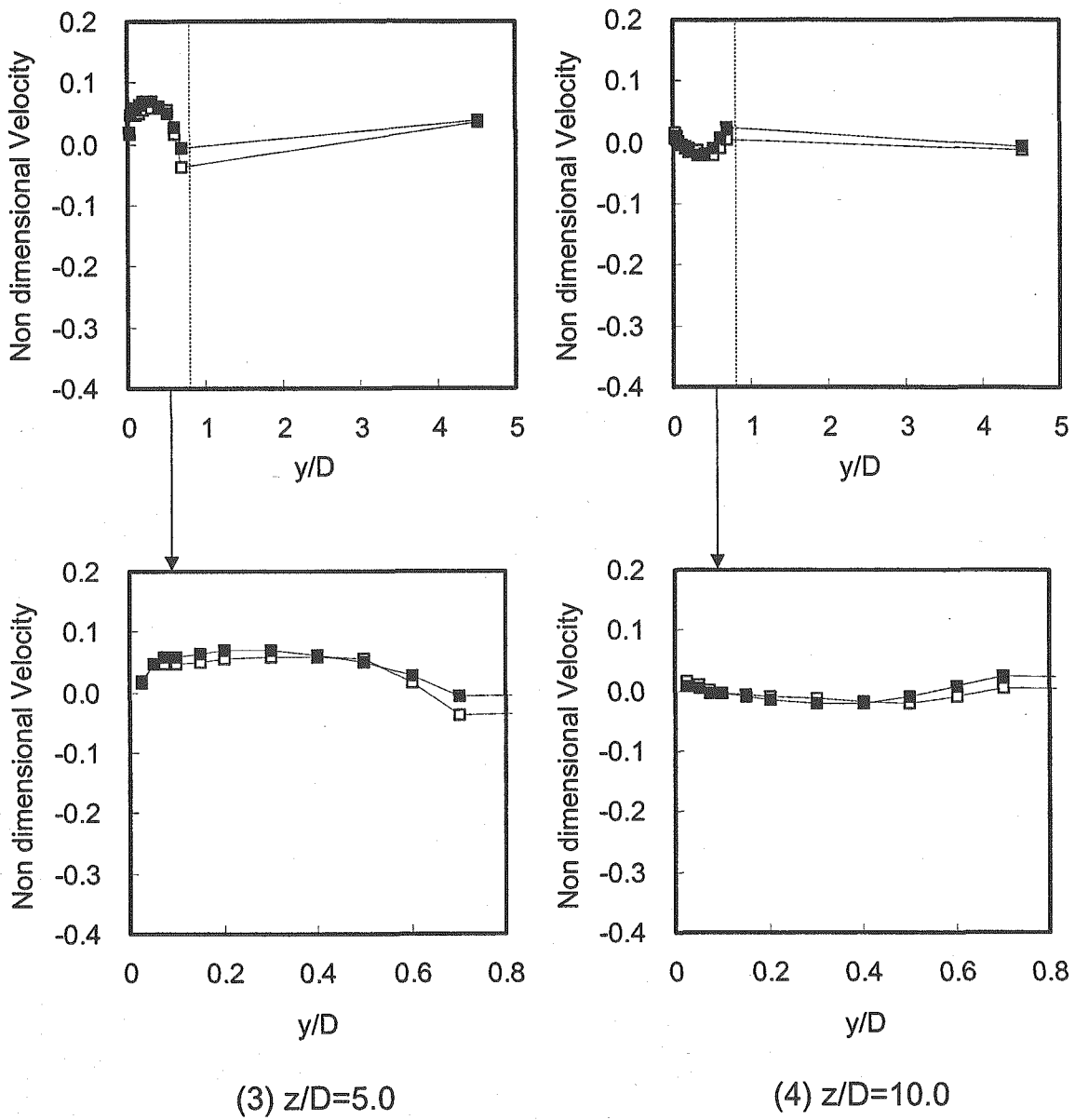


Fig. 5.1.31(b) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ )

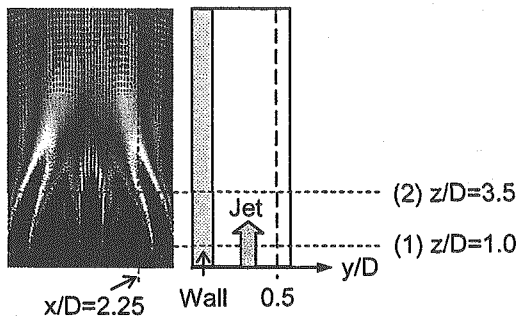
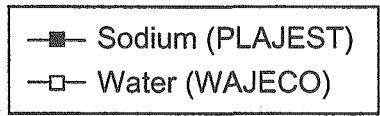
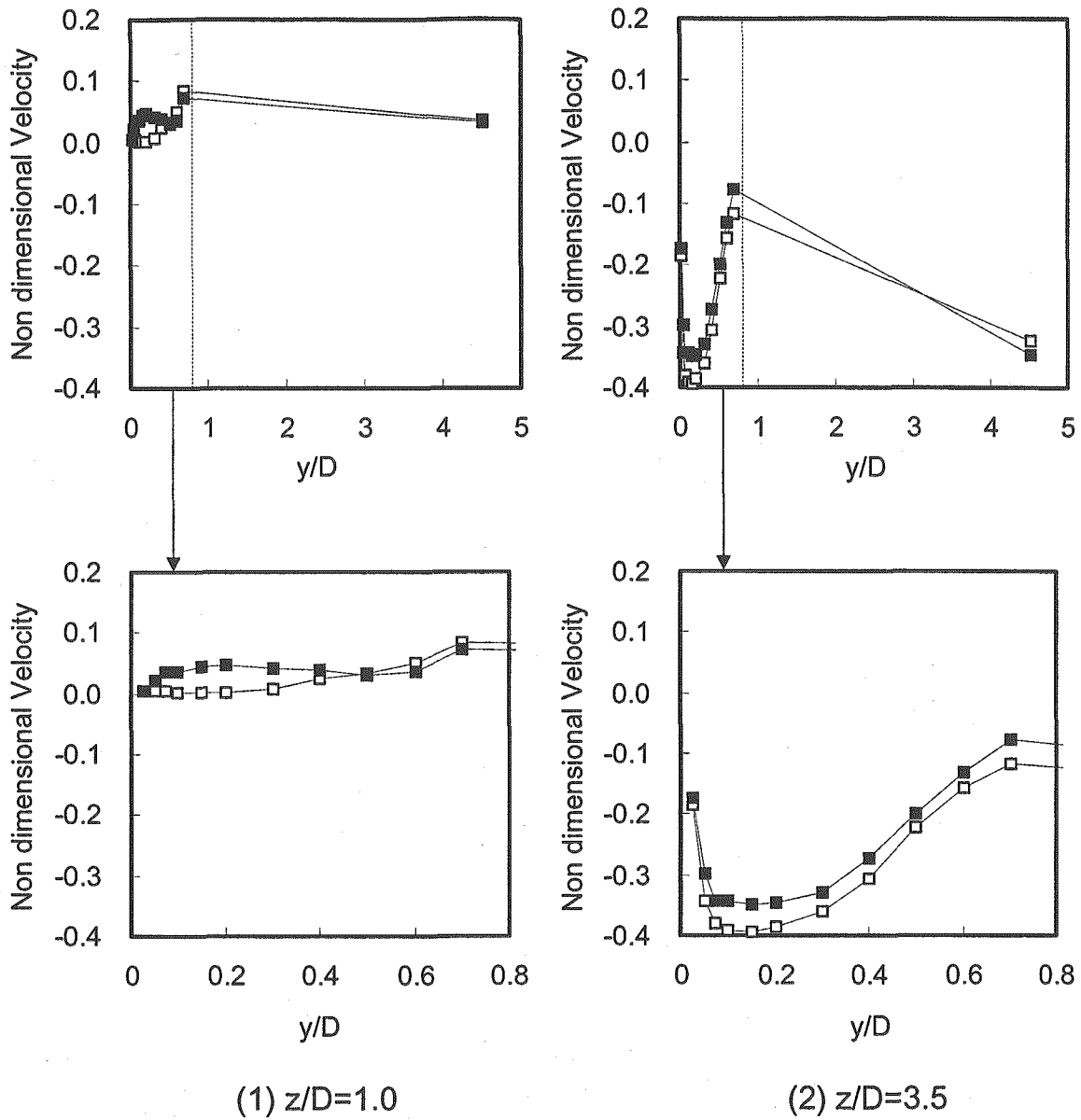


Fig. 5.1.32(a) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ )

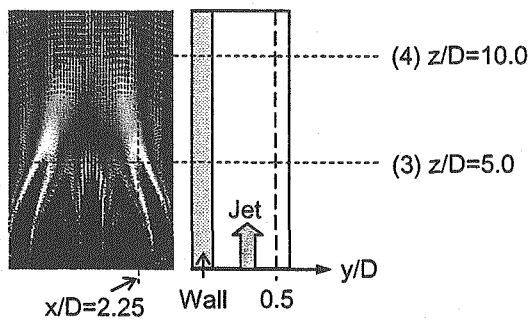
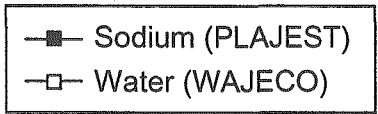
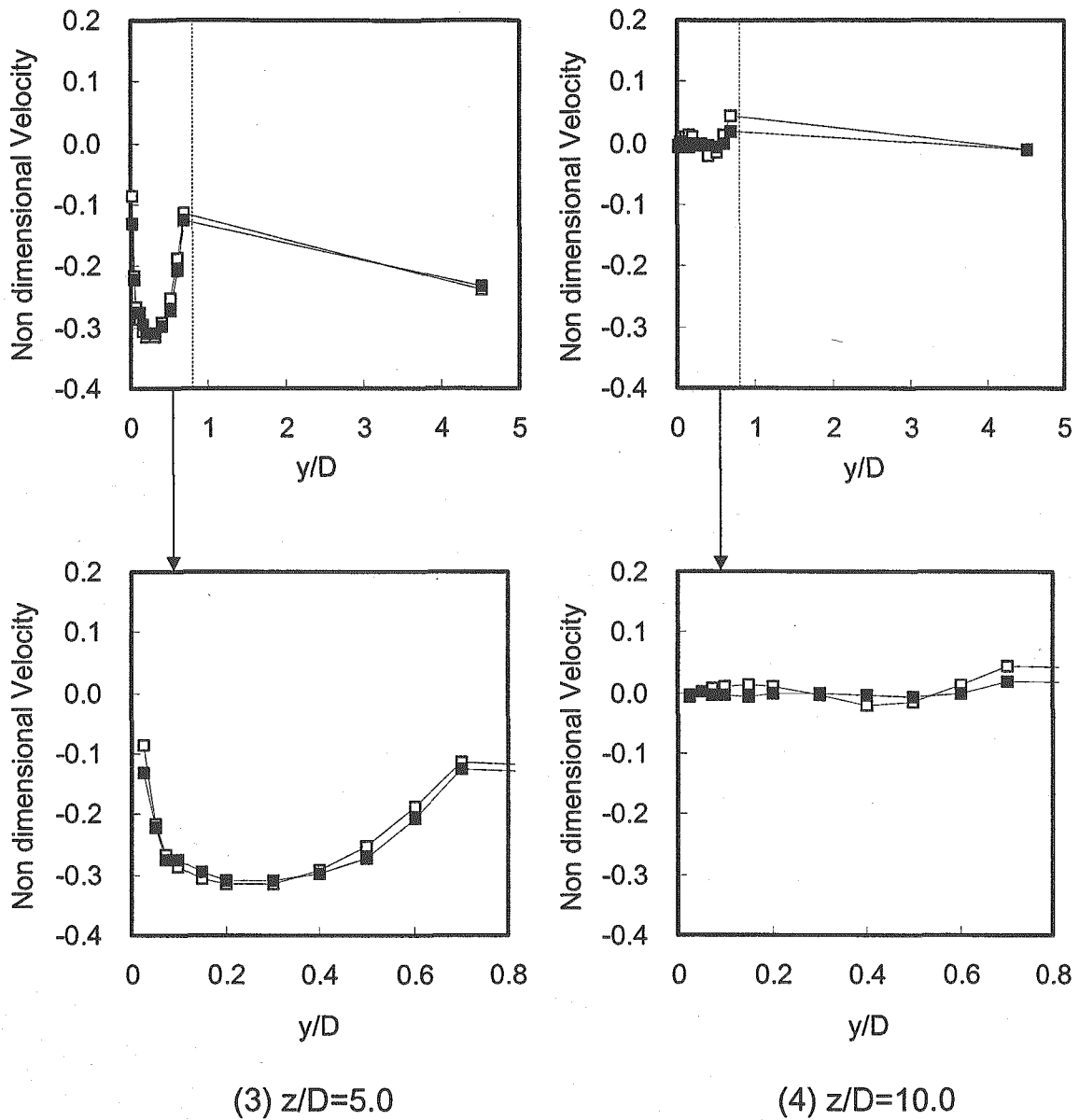


Fig. 5.1.32(b) Comparisons of Horizontal Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ )

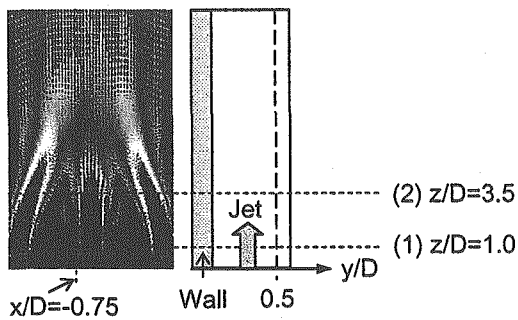
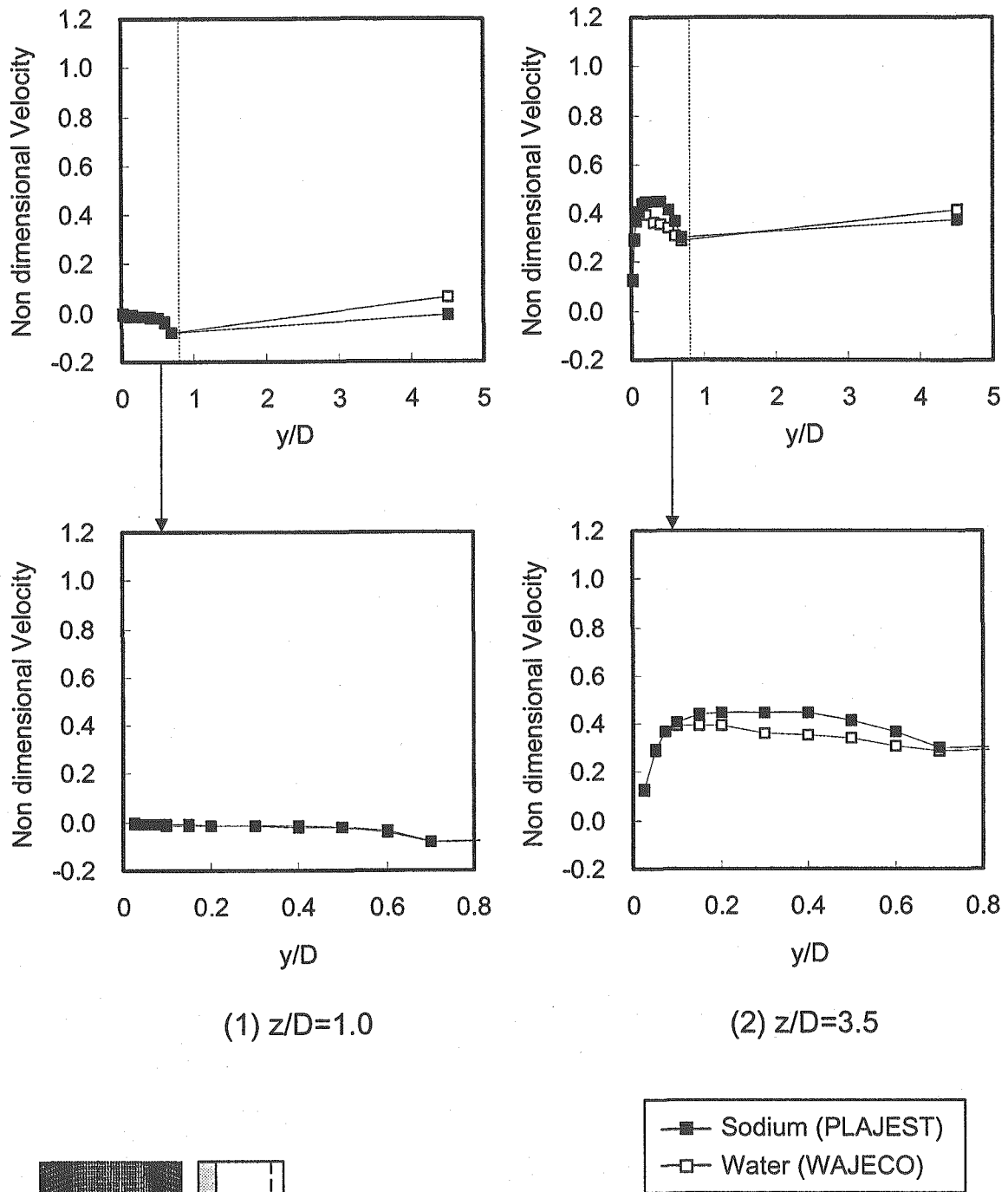


Fig. 5.1.33(a) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=-0.75$ )

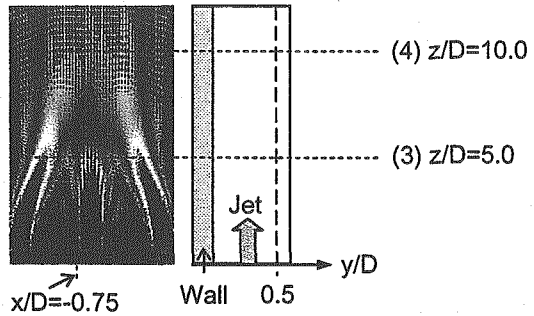
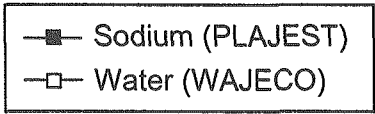
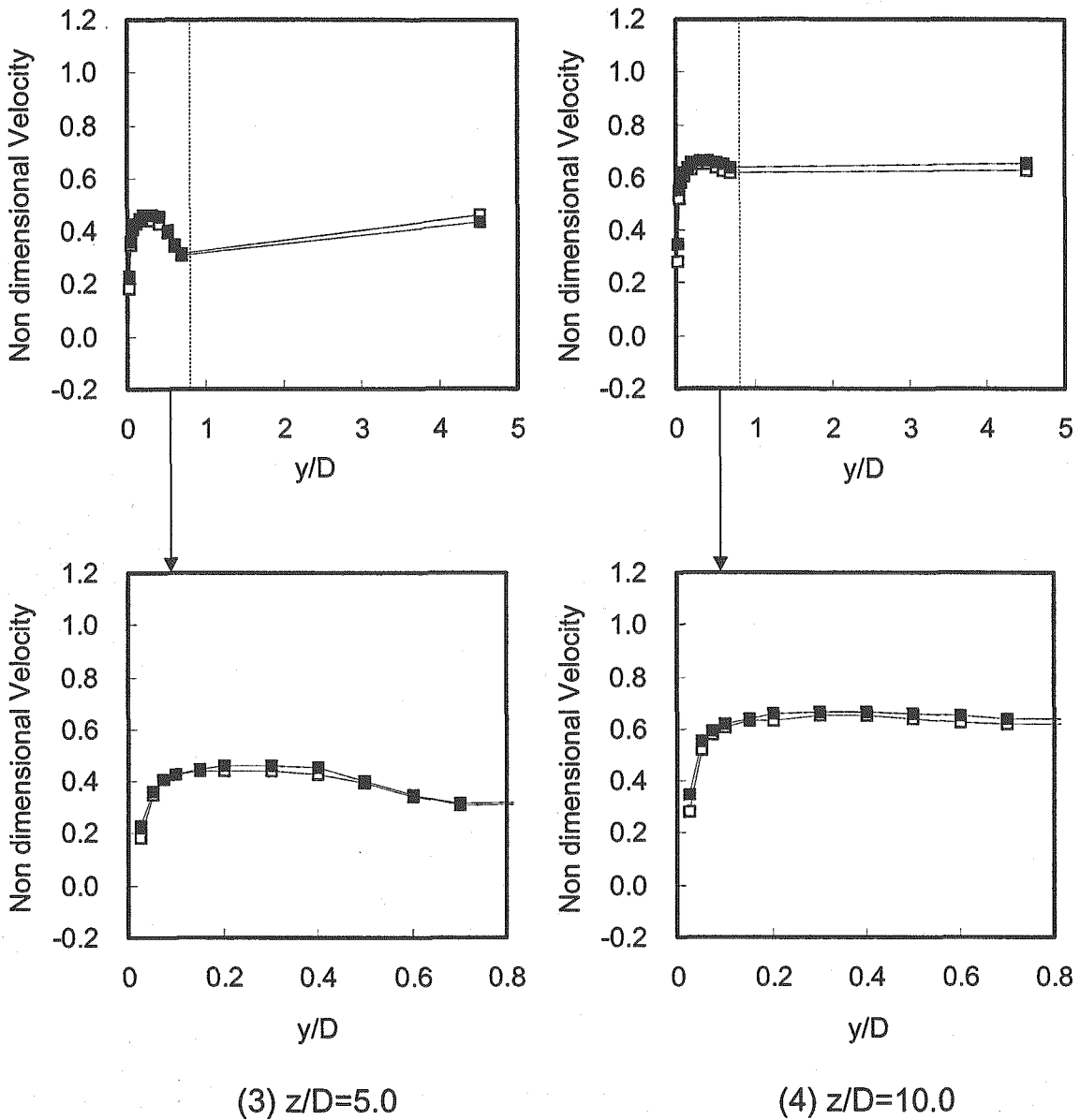


Fig. 5.1.33(b) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=-0.75$ )

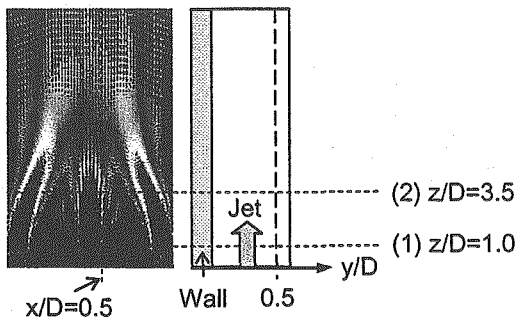
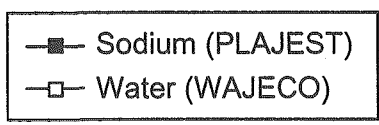
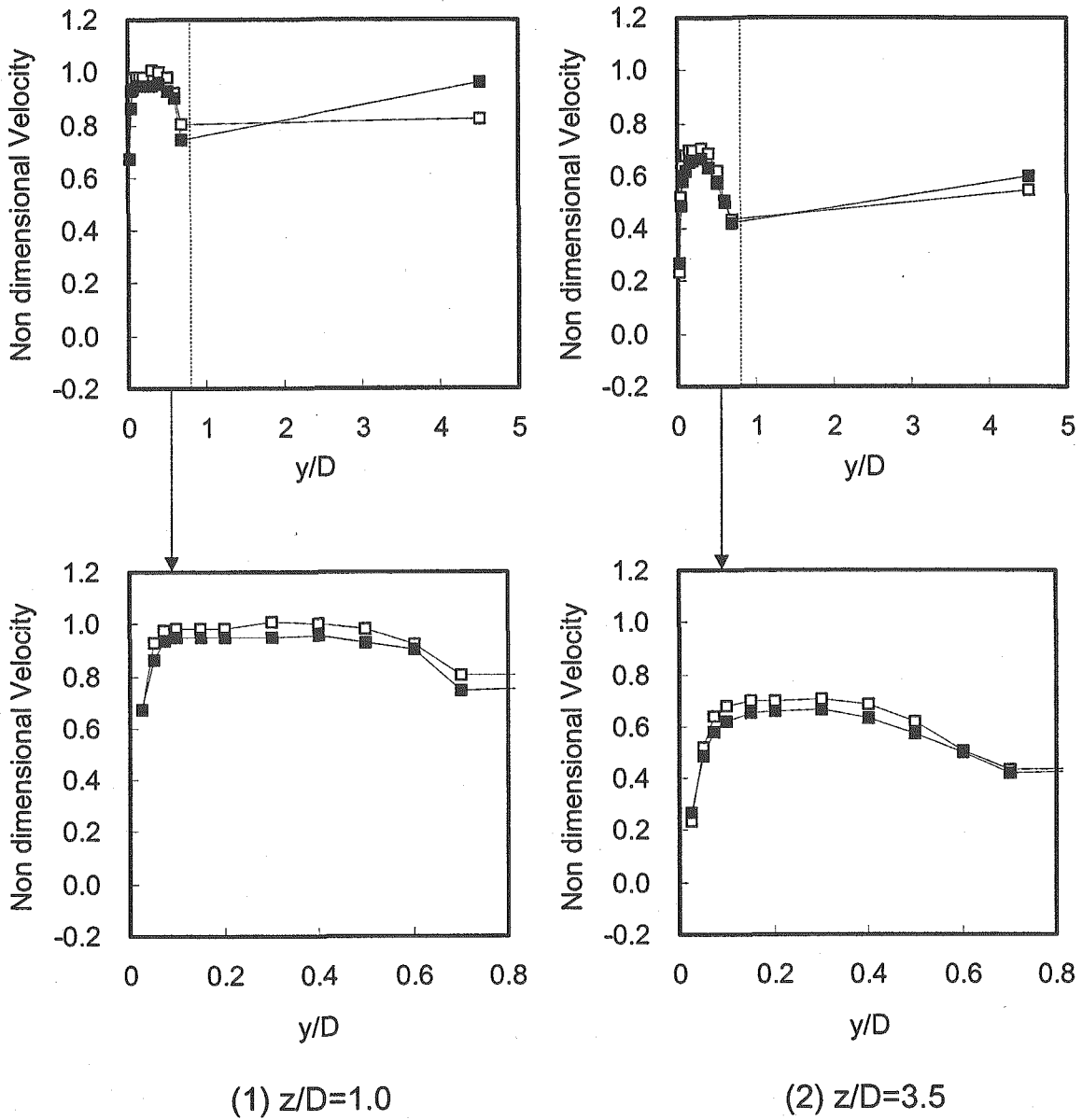


Fig. 5.1.34(a) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ )

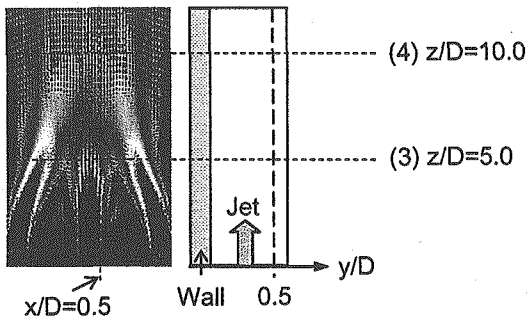
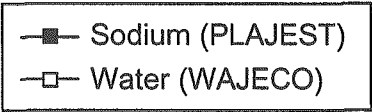
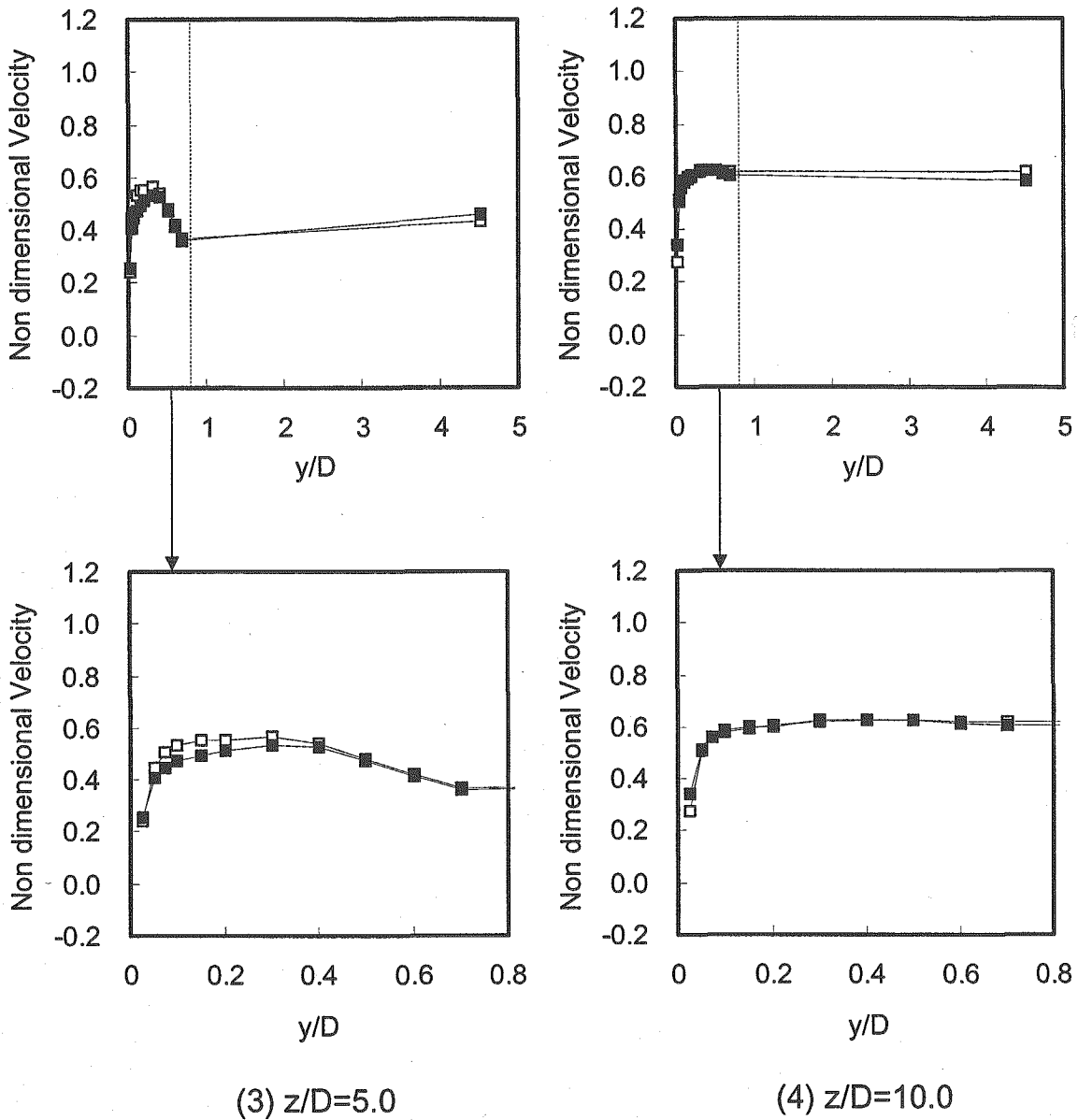


Fig. 5.1.34(b) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=0.5$ )

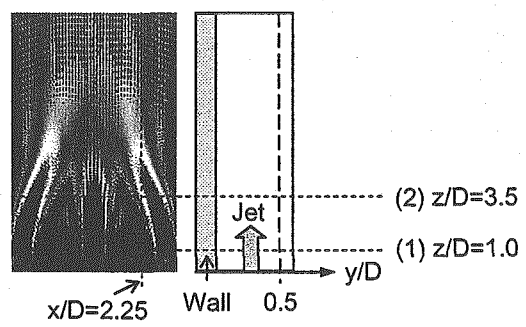
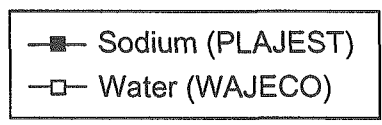
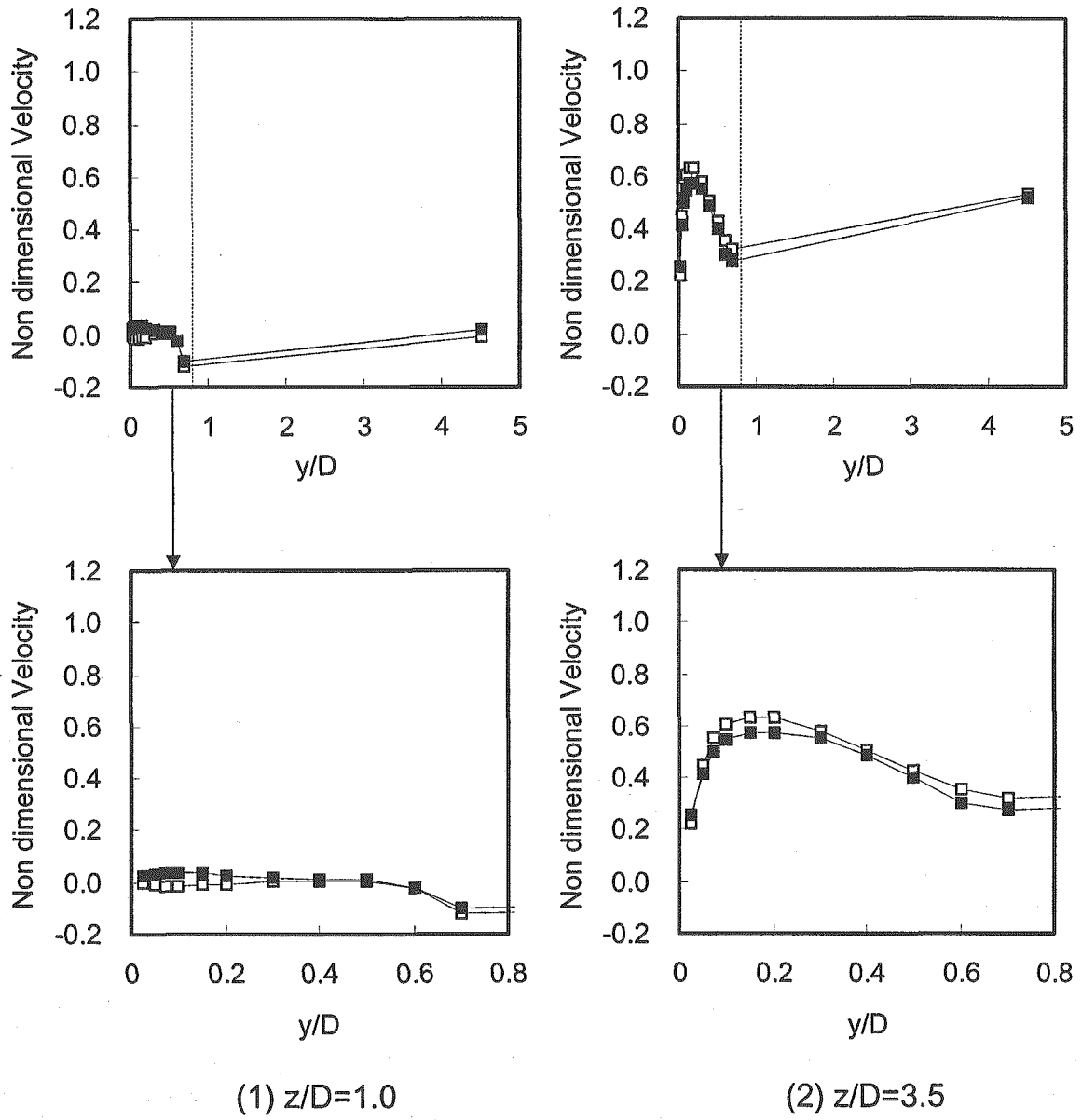


Fig. 5.1.35(a) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ )



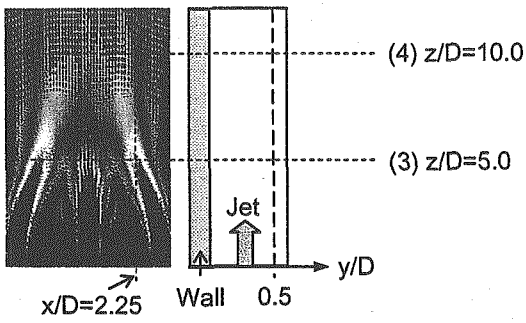
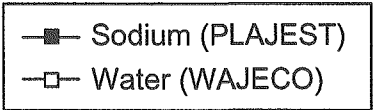
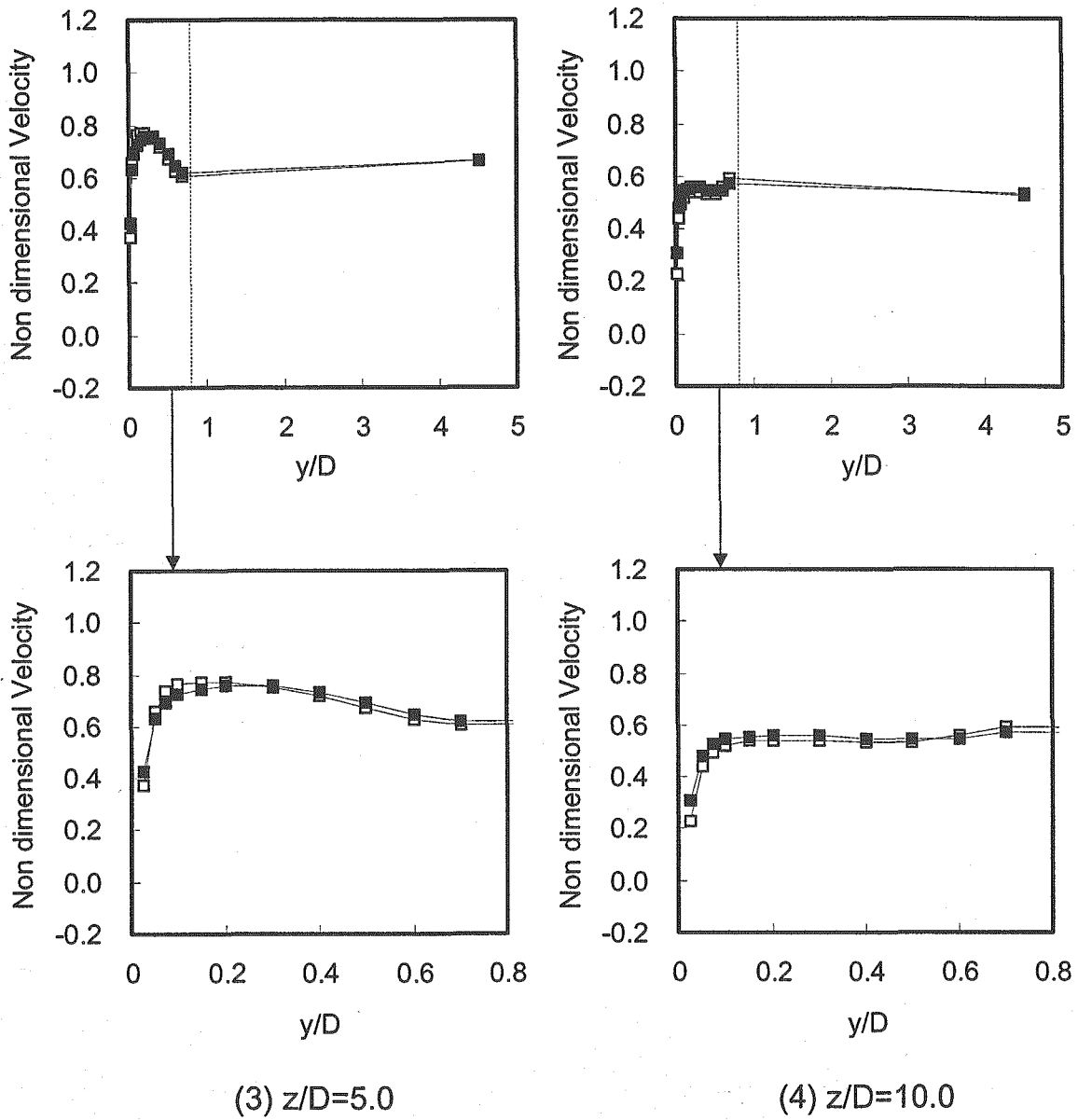
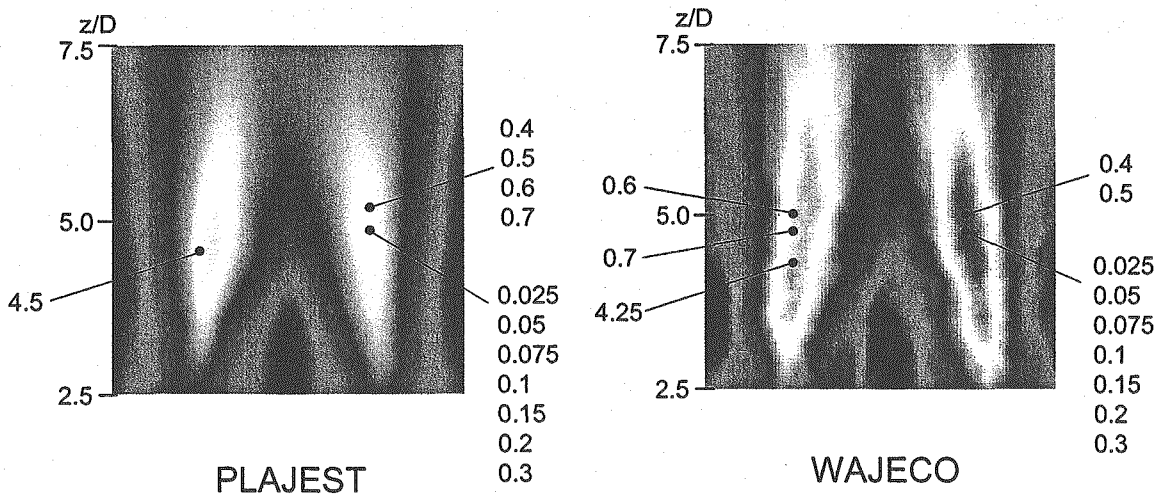
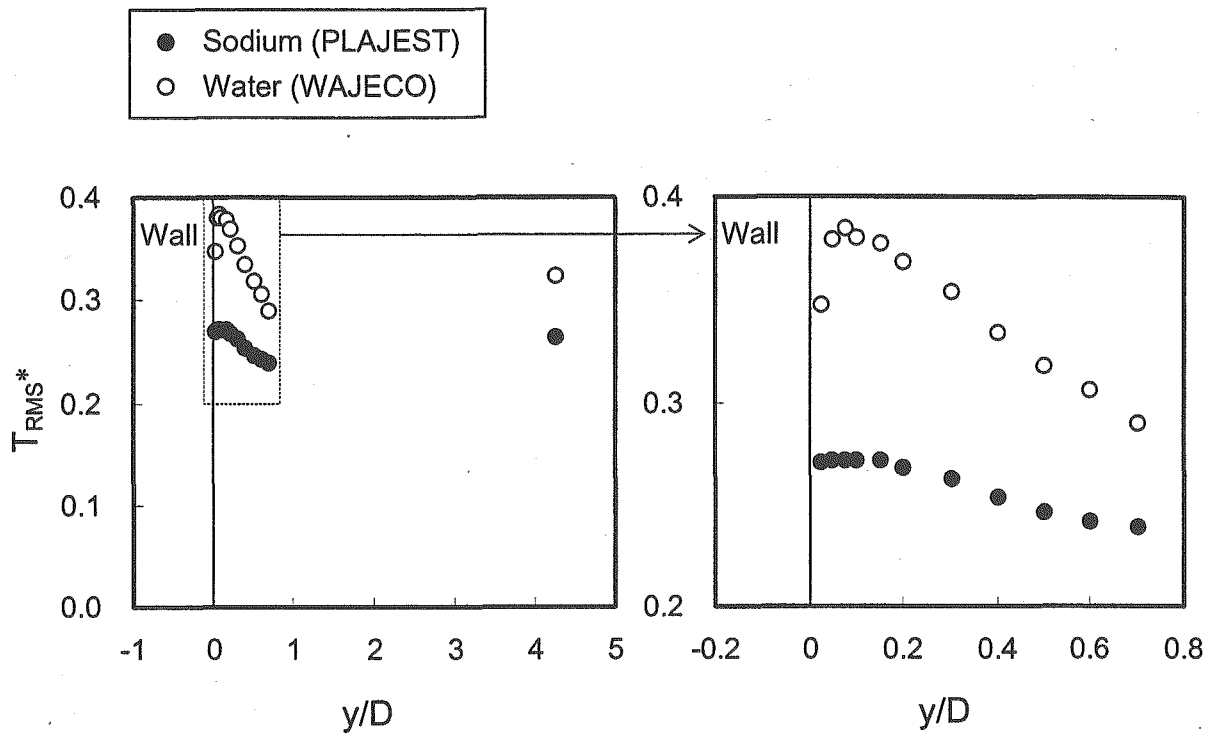


Fig. 5.1.35(b) Comparisons of Vertical Component in Time-Averaged Velocity Distributions in Depth Direction between Sodium and Water Condition. ( $x/D=2.25$ )



Measured at each  $y/D$  cross section where the maximum Temperature Fluctuations Intensity was found

Fig.5.1.36 Comparisons of Depth Distributions of Maximum Temperature Fluctuations Intensity at Each Cross-Section normal to Wall between Sodium and Water Condition.

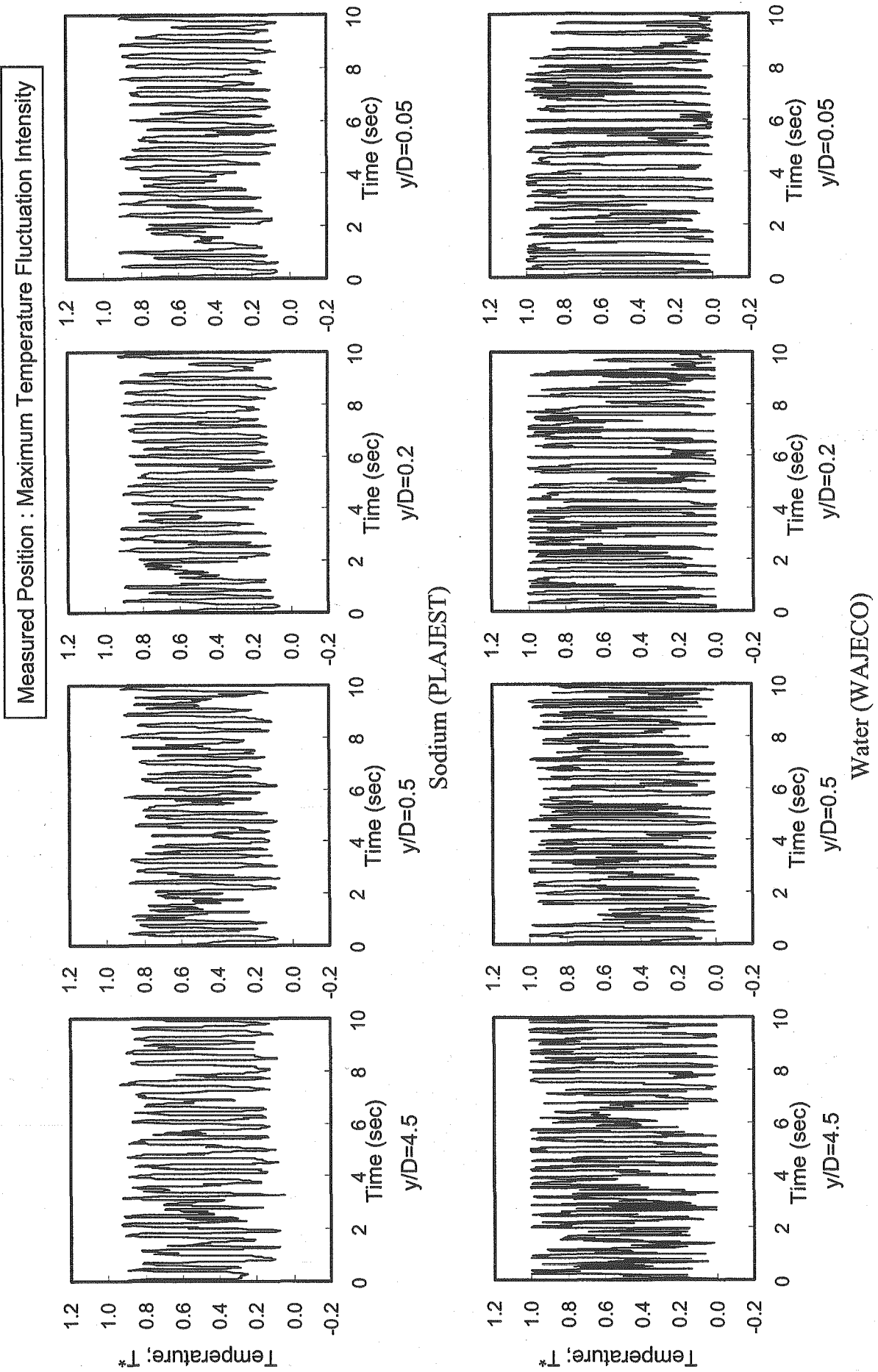


Fig.5.2.1(a) Comparisons of Temperature Trends between Sodium and Water Condition.

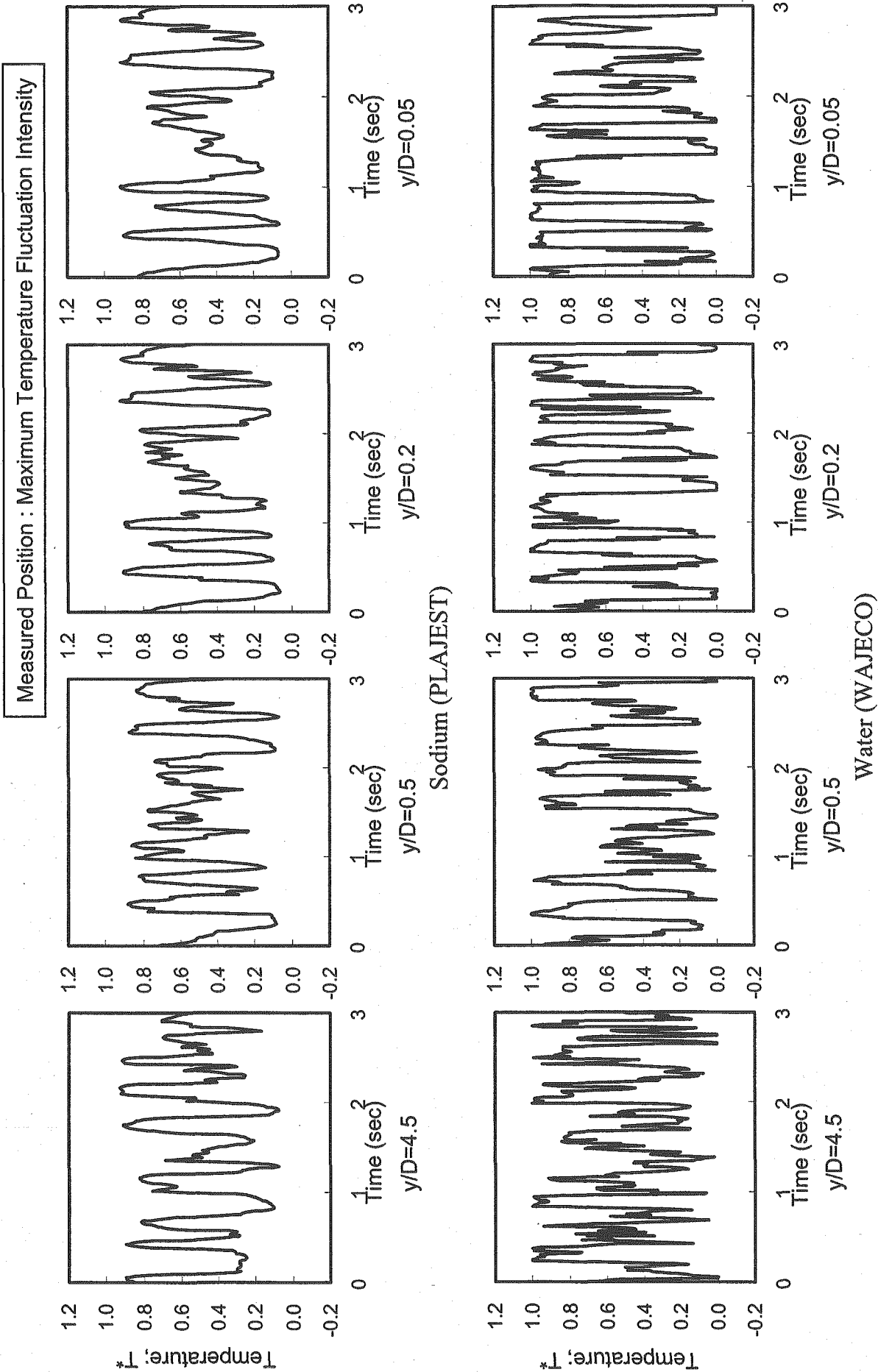


Fig.5.2.1(b) Comparisons of Temperature Trends between Sodium and Water Condition.

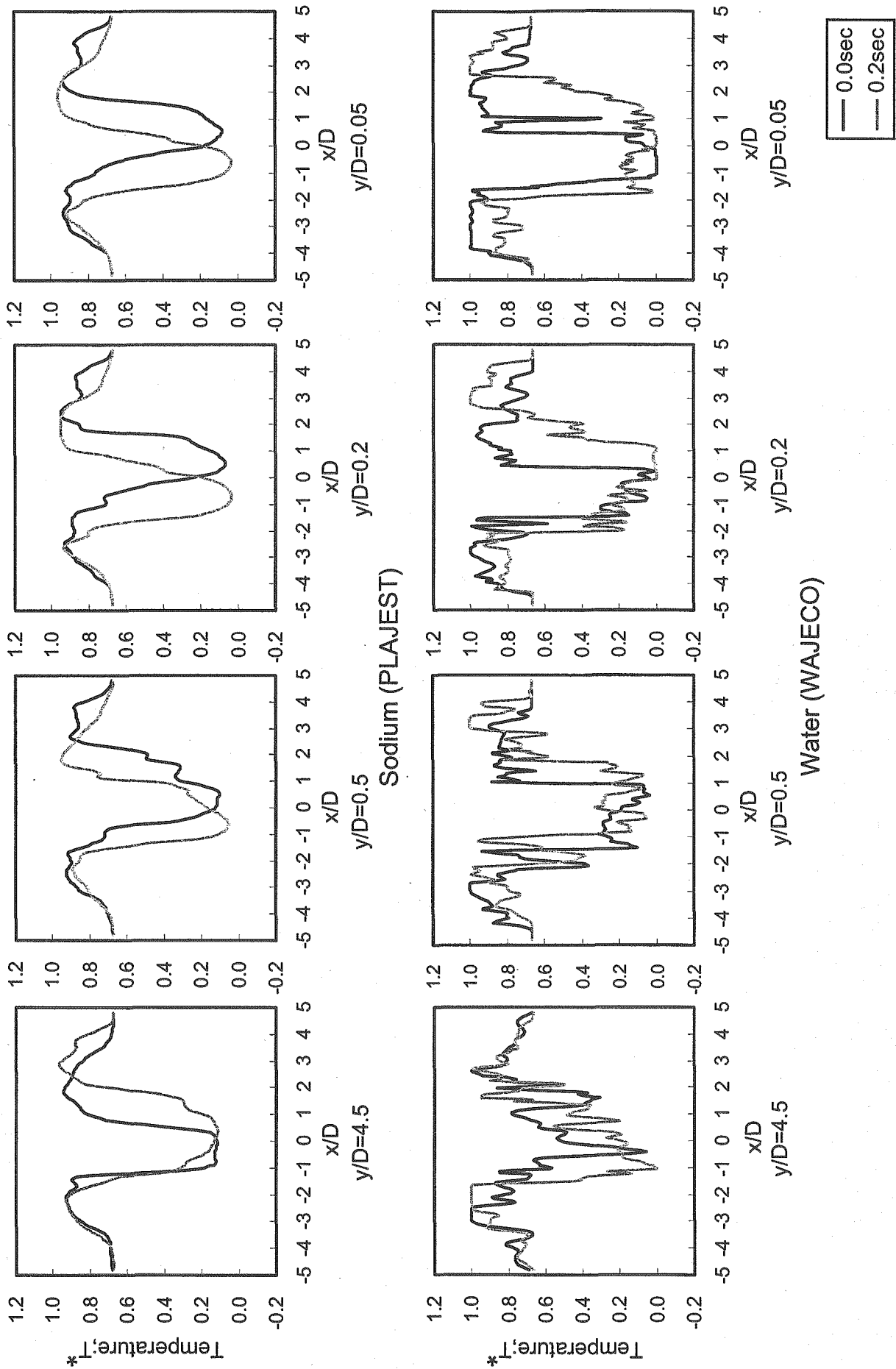
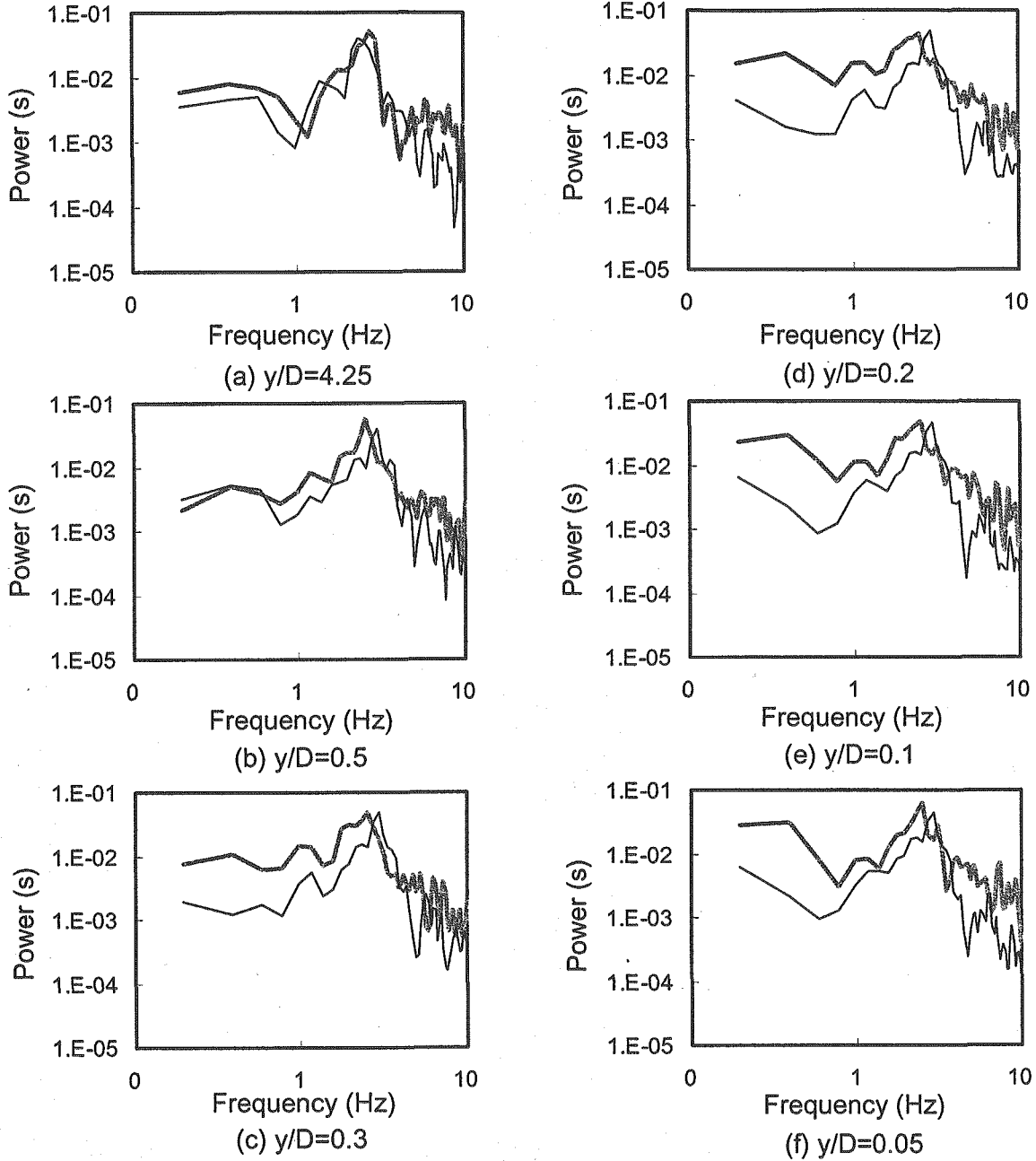


Fig.5.2.2 Comparisons of Temperature Distribution in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition.



— Sodium (PLAJEST)  
 — Water (WAJECO)

Measured Position:  
 Maximum Temperature  
 Fluctuation Intensity

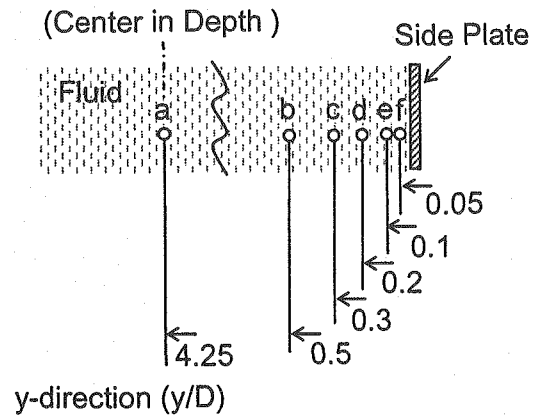
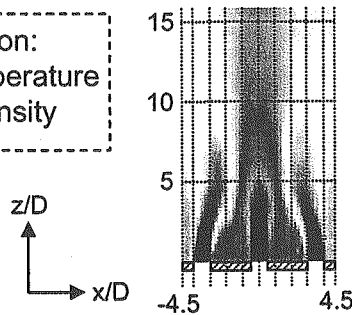


Fig.5.2.3 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation between Sodium and Water Condition.

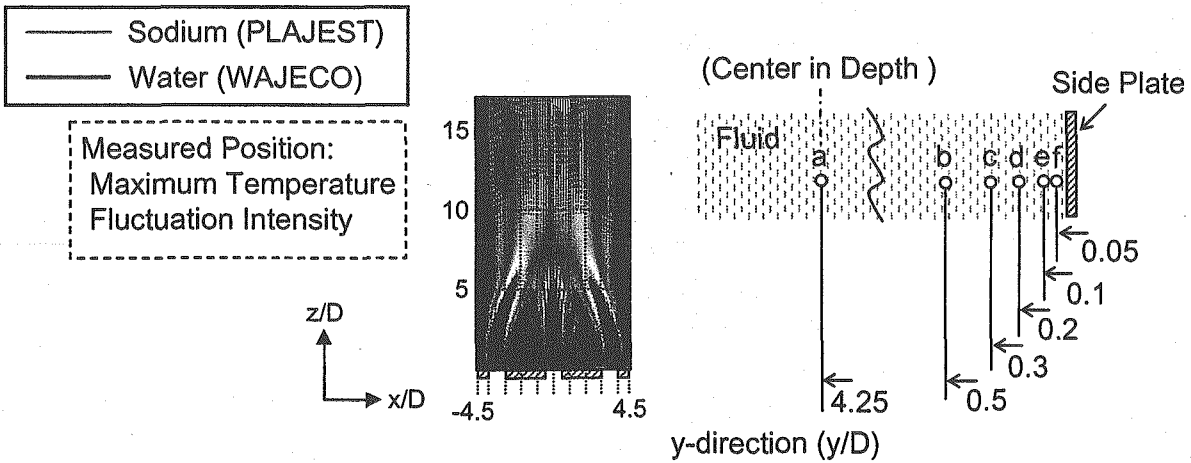
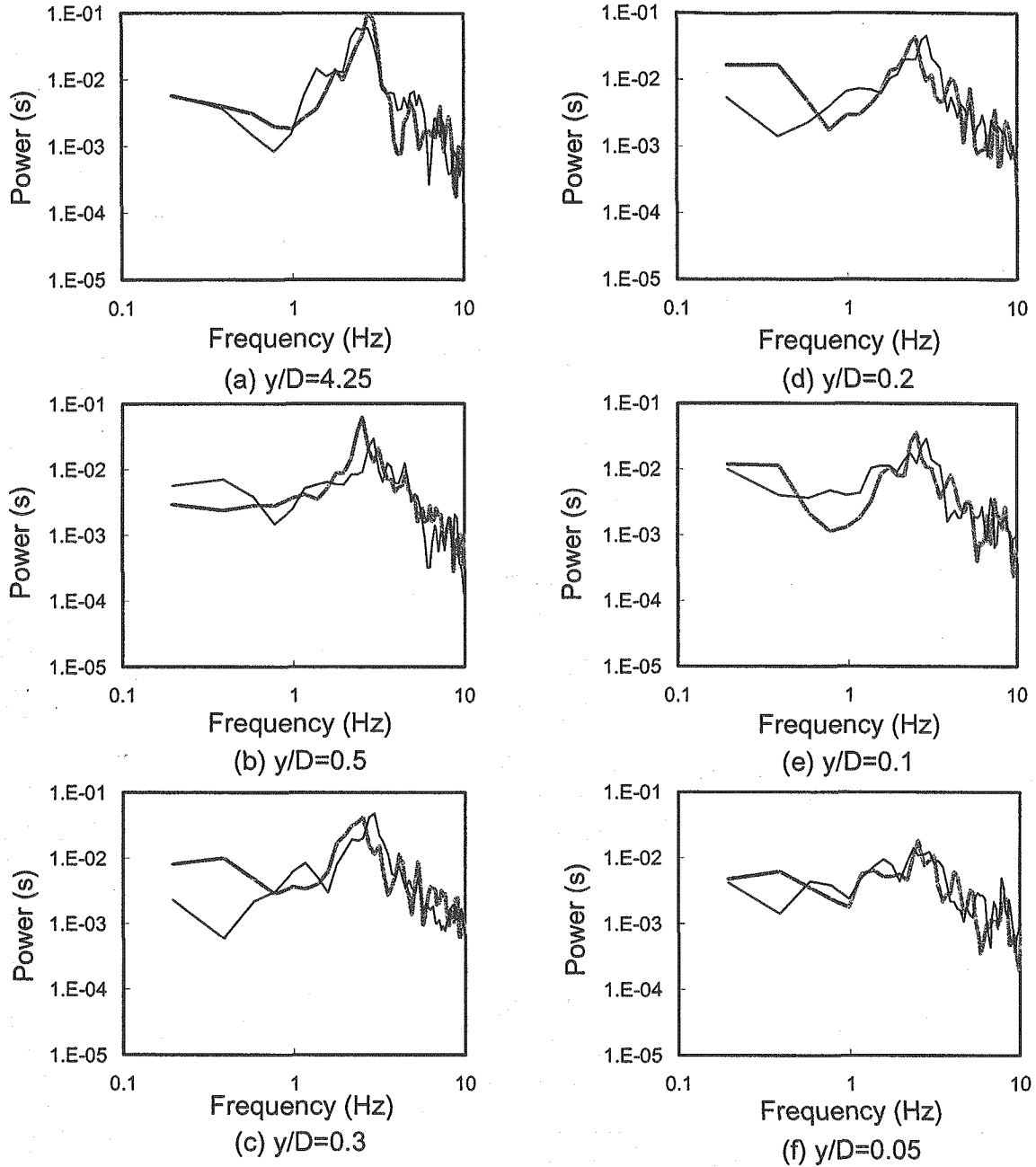


Fig.5.2.4 Comparisons of Power Spectrum Density of Horizontal Velocity between Sodium and Water Condition.

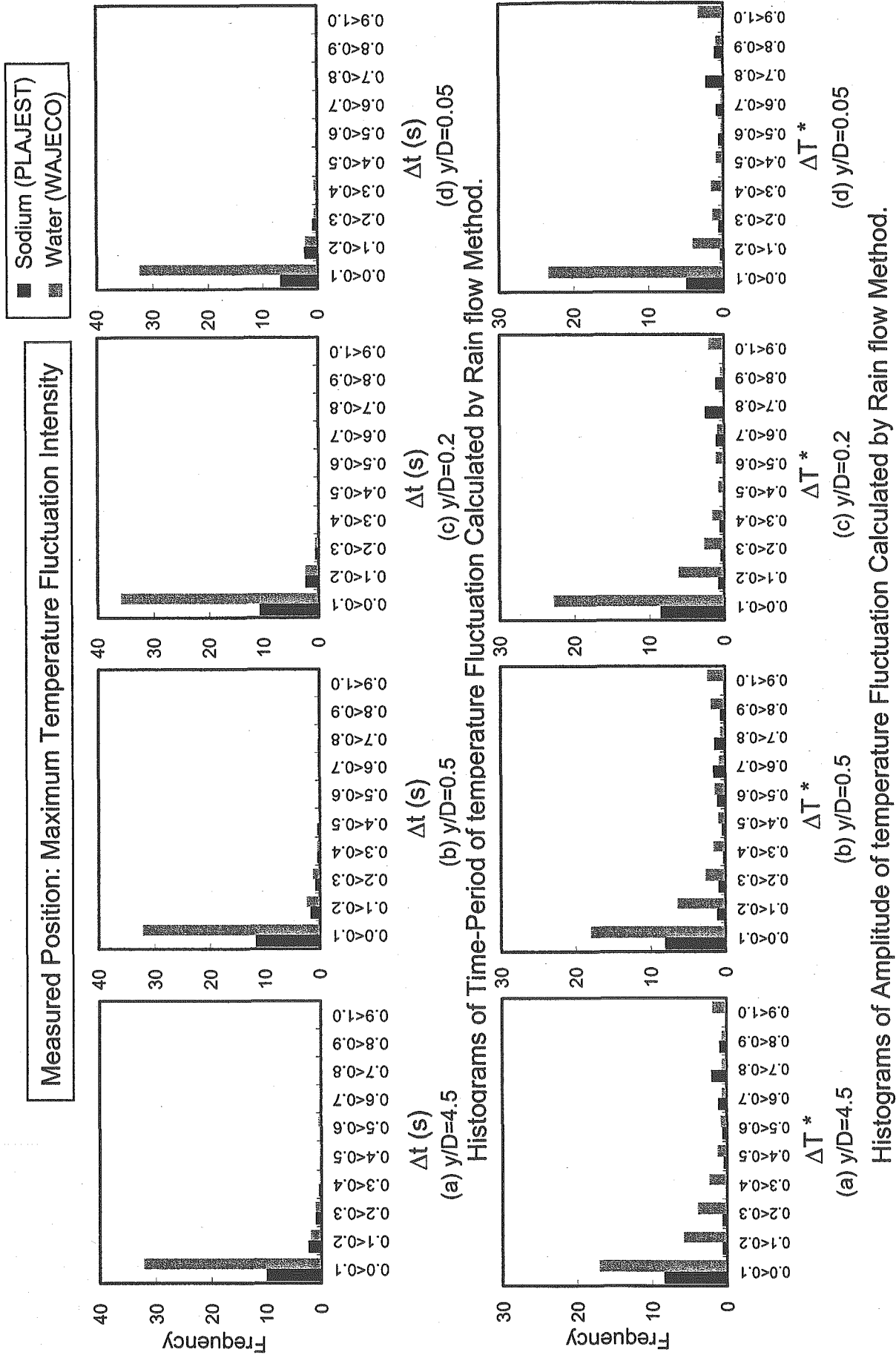


Fig.5.3.1 Comparisons of Histograms of Time-Period and Amplitude in Temperature Fluctuation Calculated by Rain Flow Method between Sodium and Water Condition.



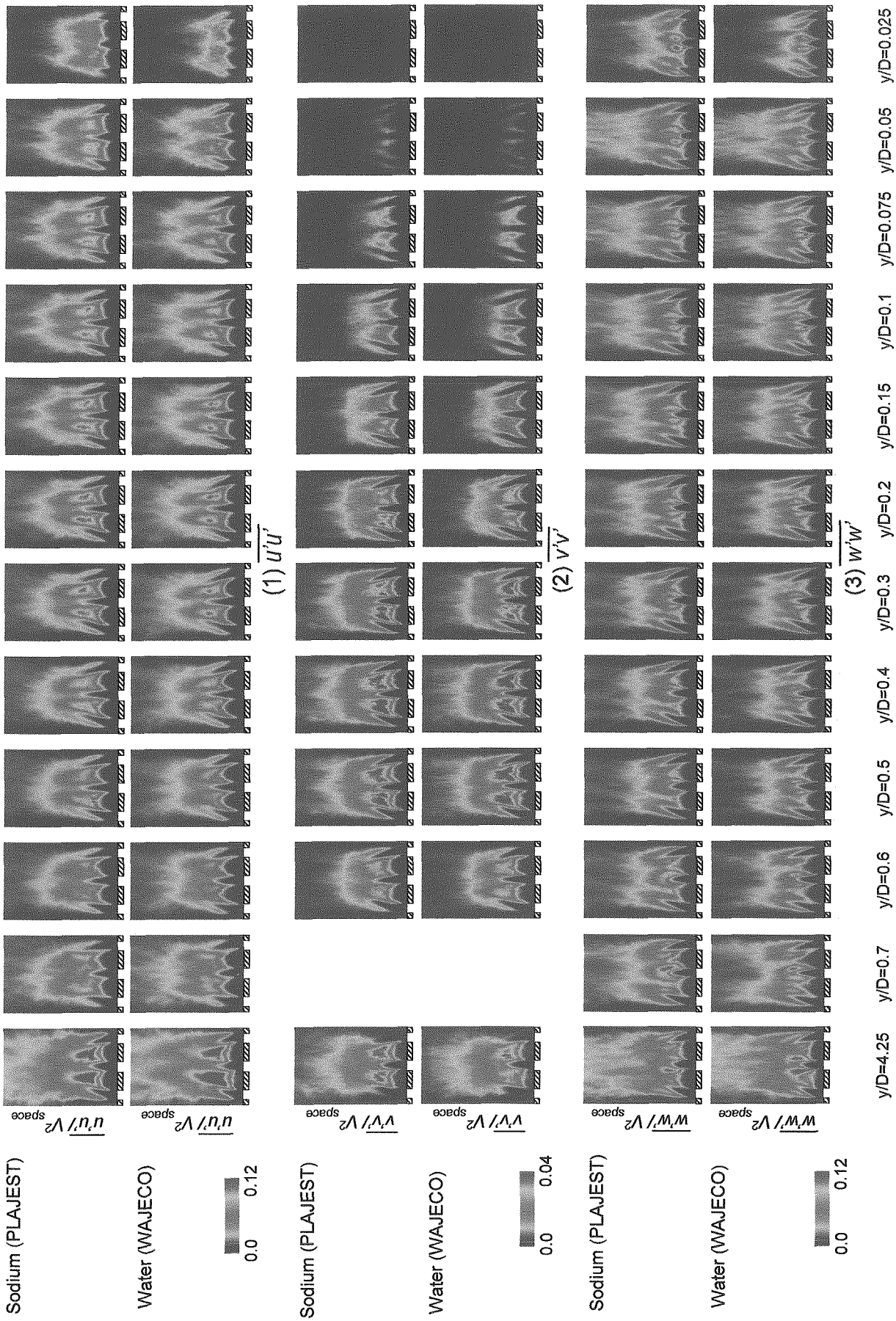


Fig.5.4.1 Comparisons of Normal Components of Second Moments in Turbulence Field between Sodium and Water Condition.

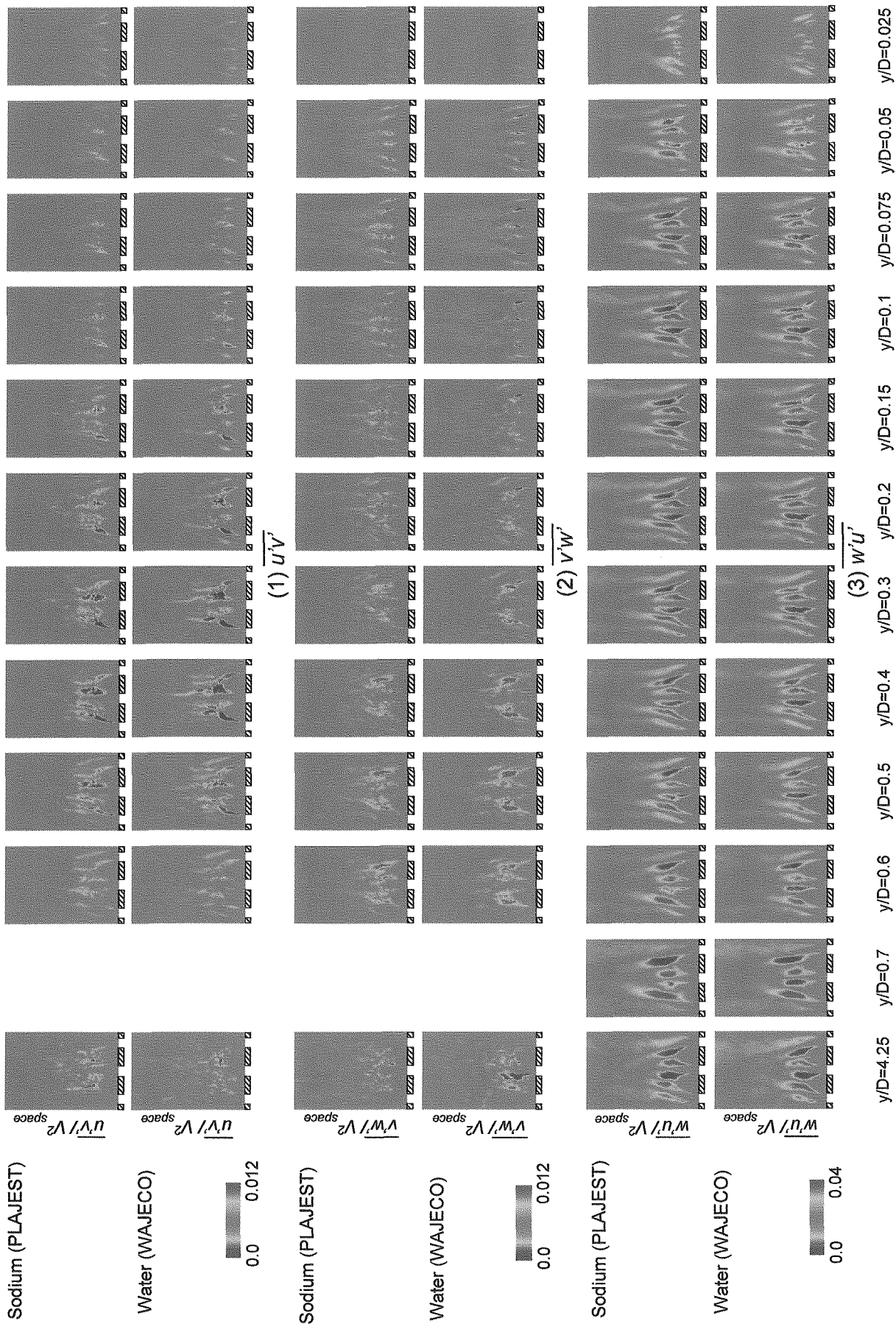


Fig.5.4.2 Comparisons of Shear Components of Second Moments in Turbulence Field between Sodium and Water Condition.

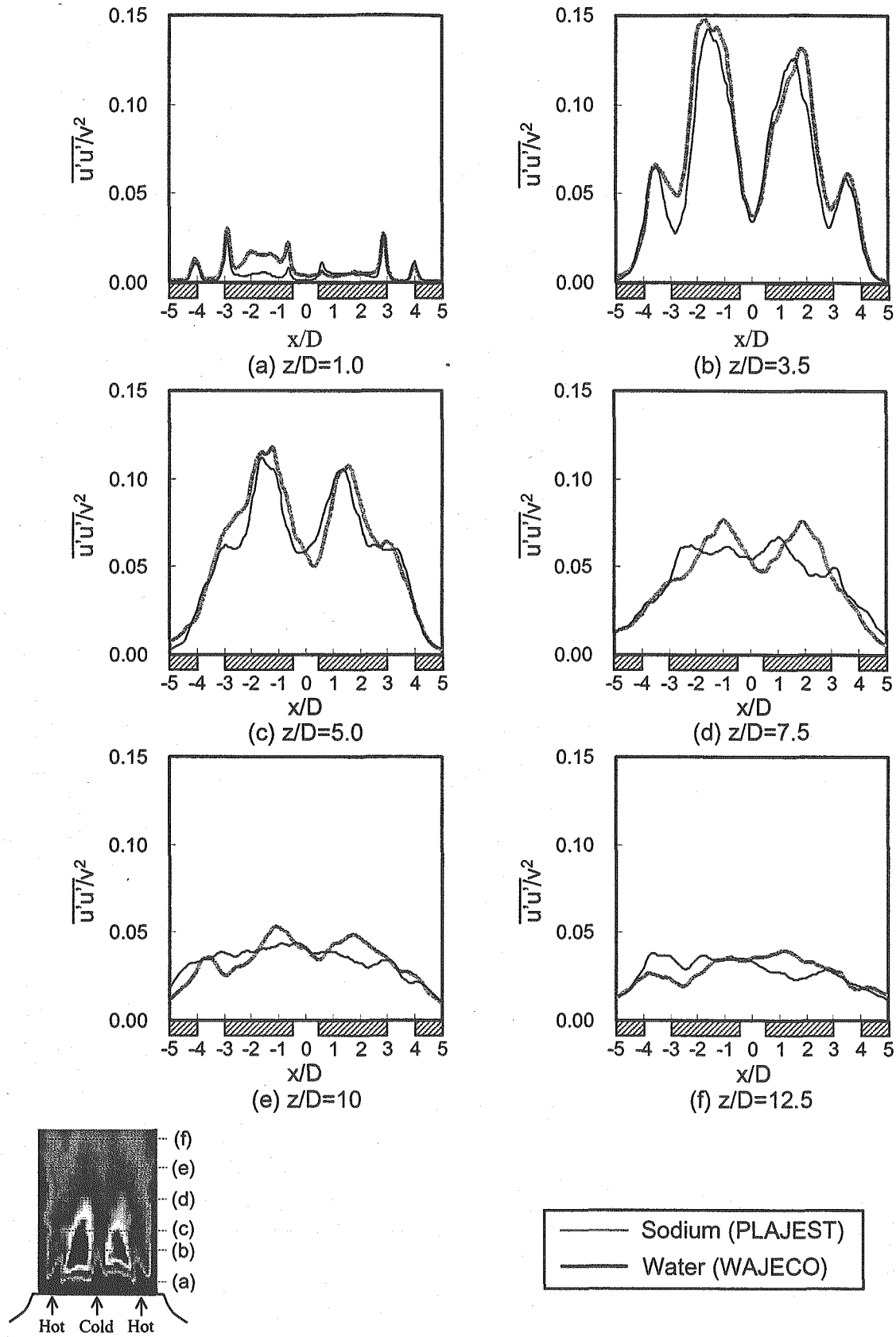


Fig.5.4.3 Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )

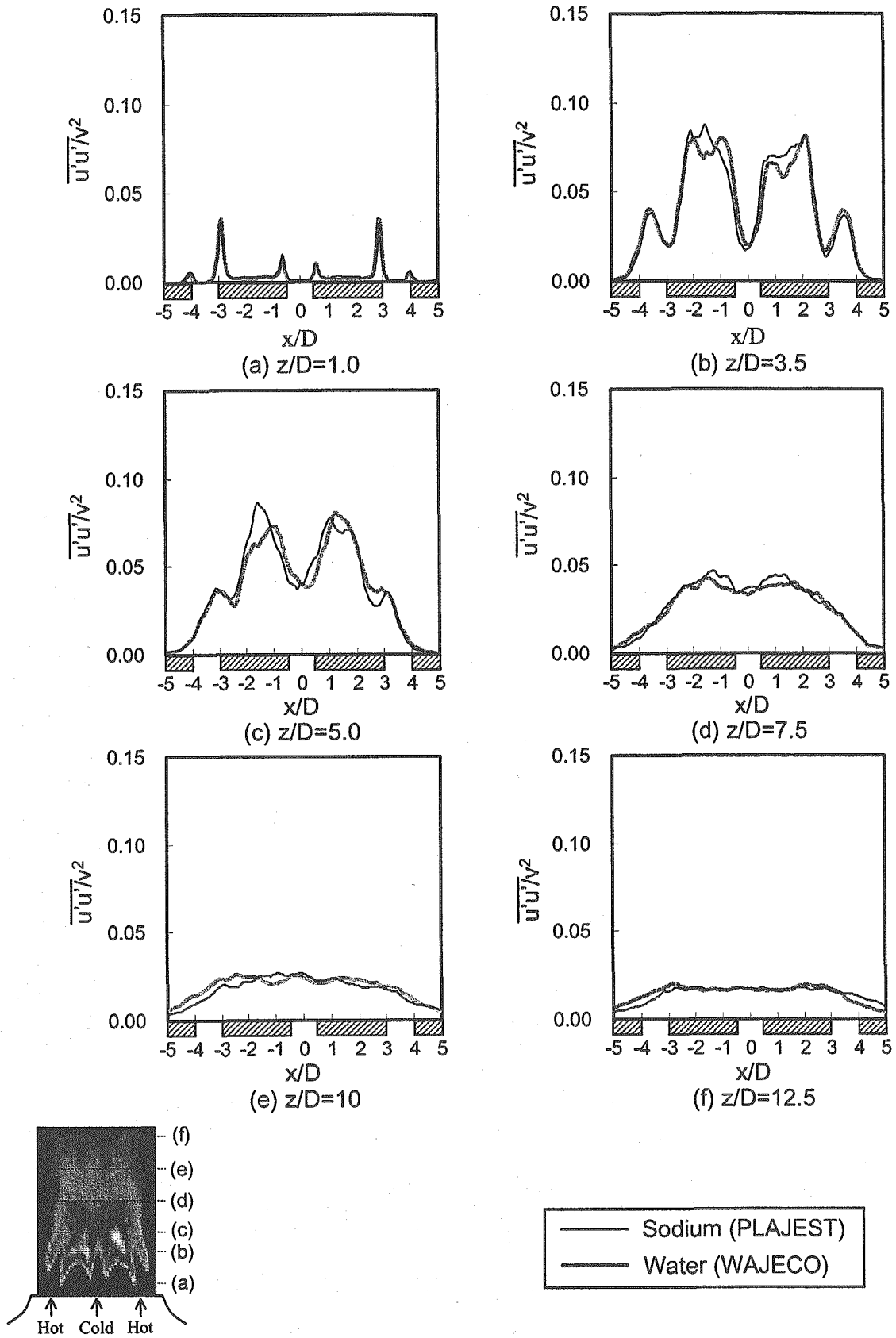
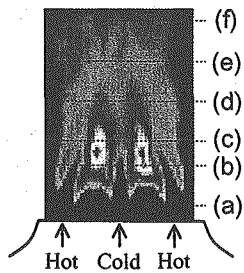
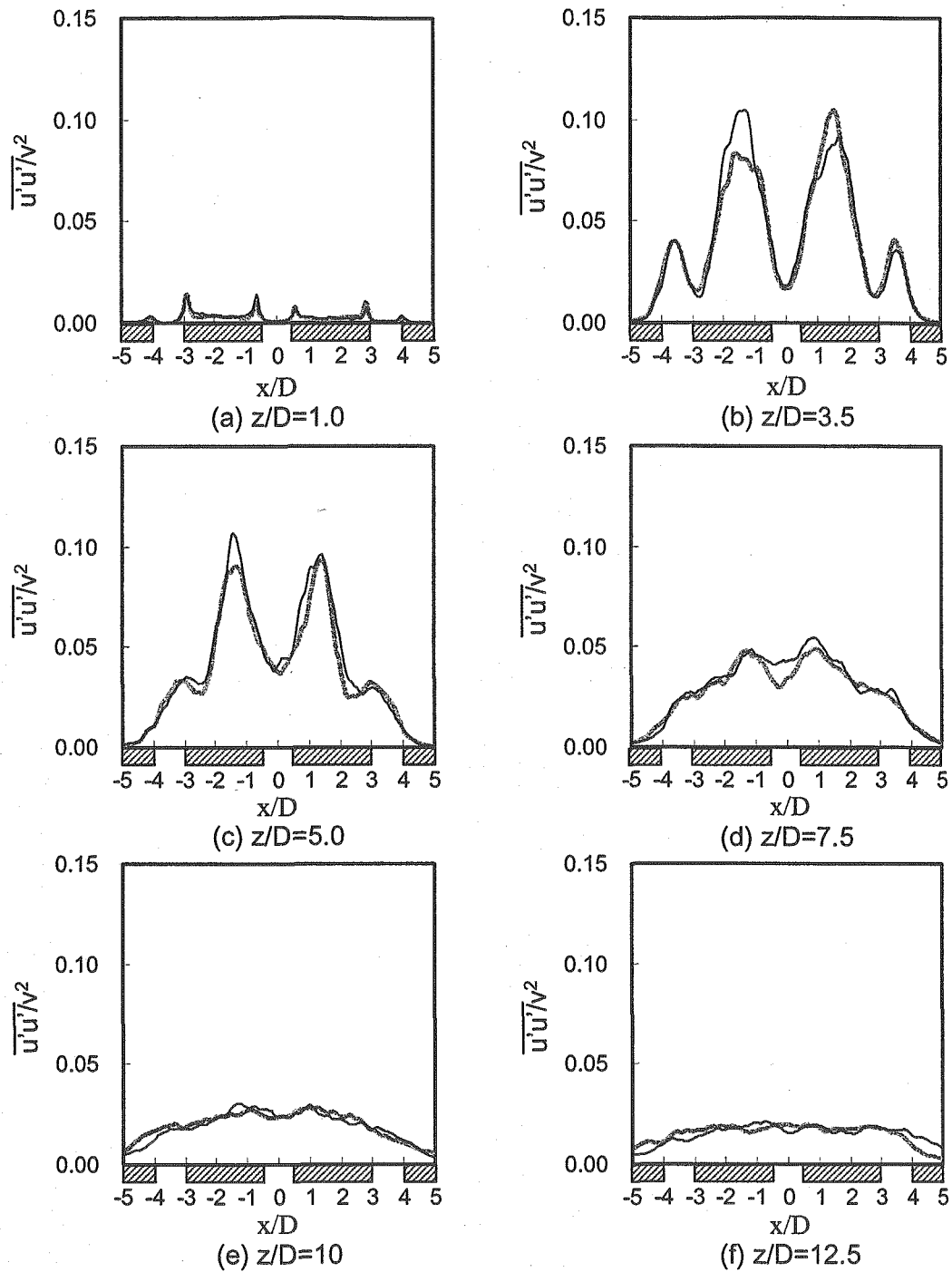


Fig.5.4.4 Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )



— Sodium (PLAJEST)  
 — Water (WAJECO)

Fig.5.4.5 Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )

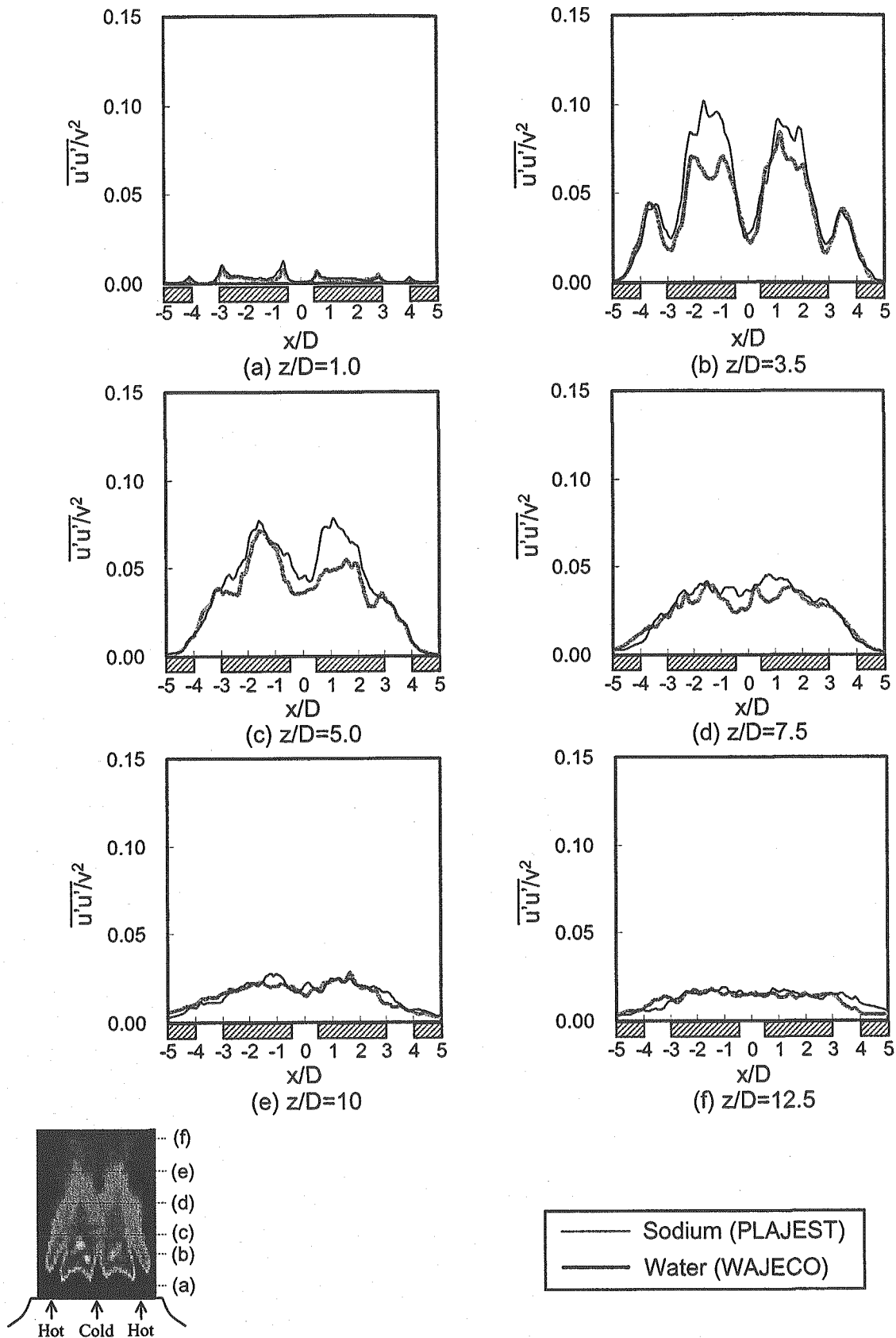
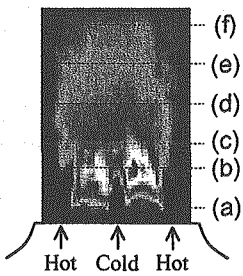
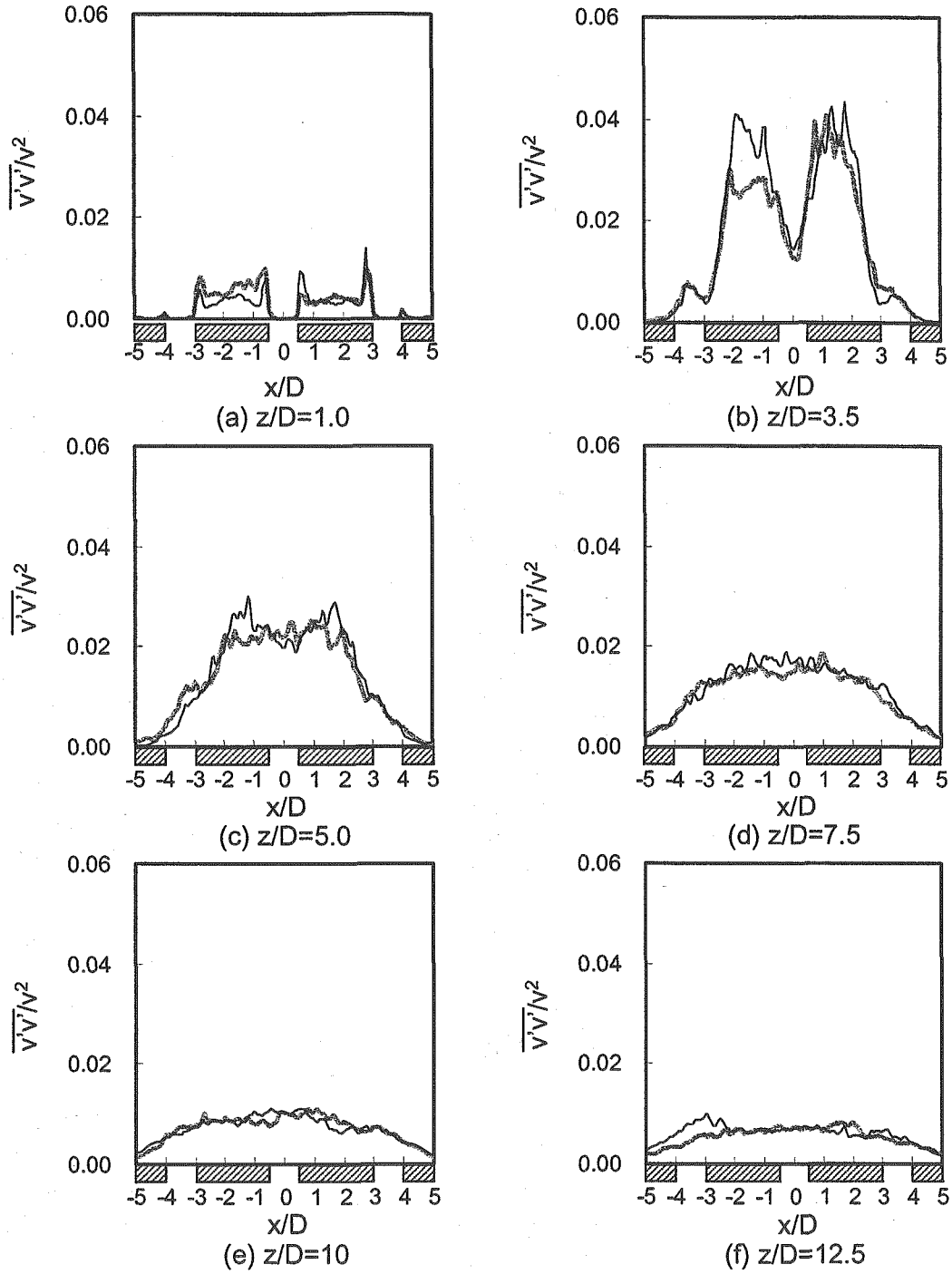


Fig.5.4.6 Comparisons of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )



— Sodium (PLAJEST)

- - - Water (WAJECO)

Fig.5.4.7 Comparisons of Depth Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )

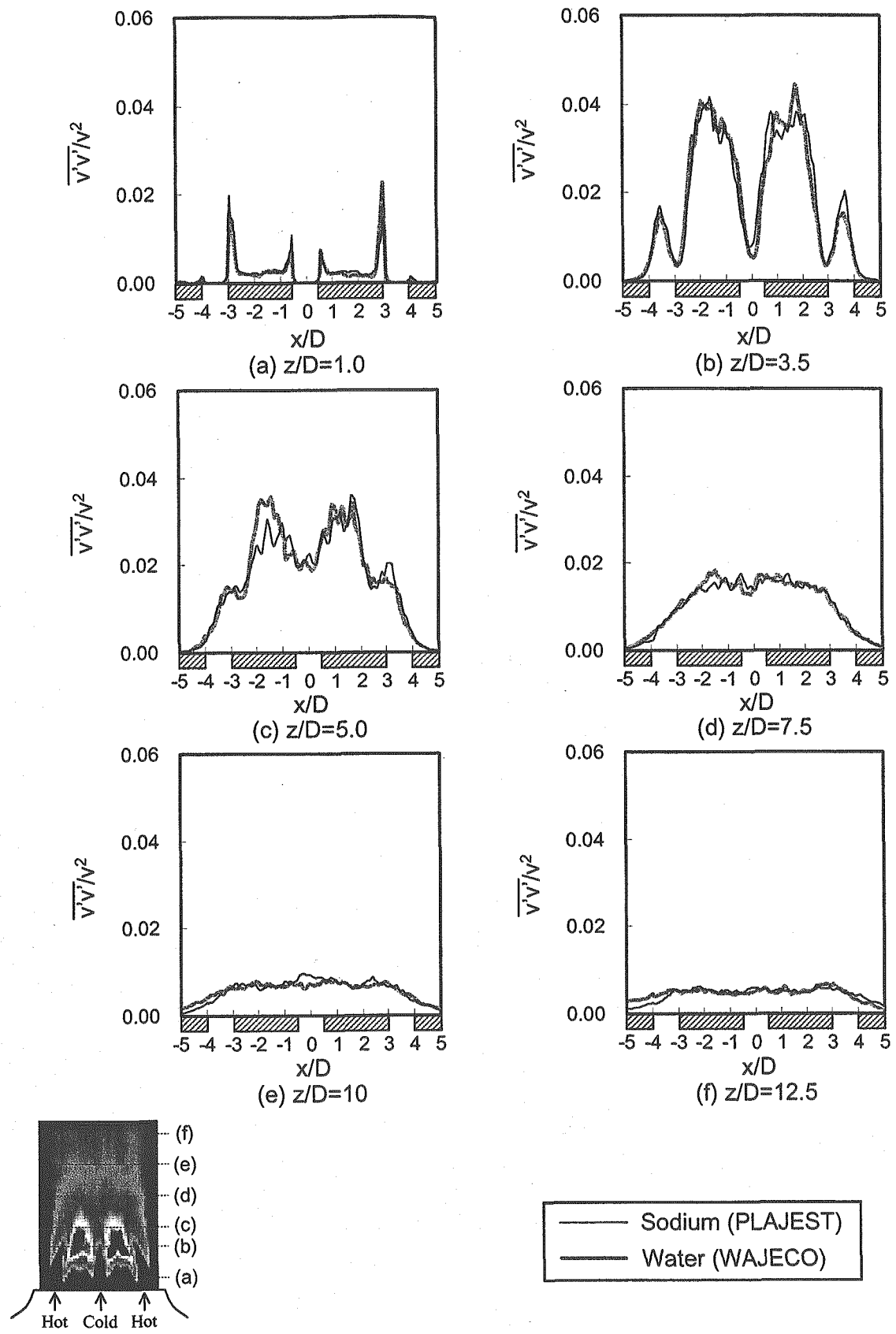


Fig.5.4.8 Comparisons of Depth Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )



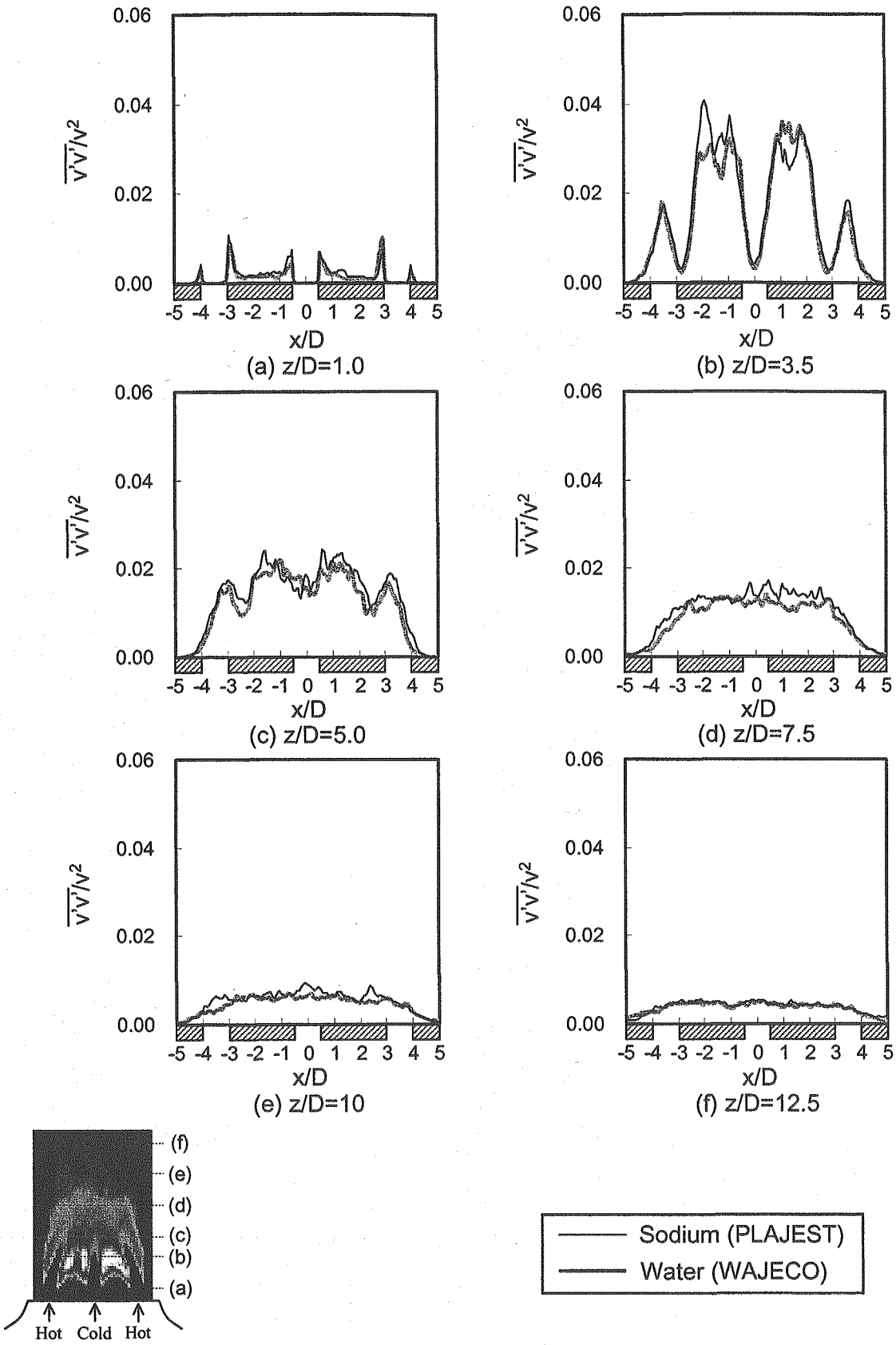


Fig.5.4.9 Comparisons of Depth Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )

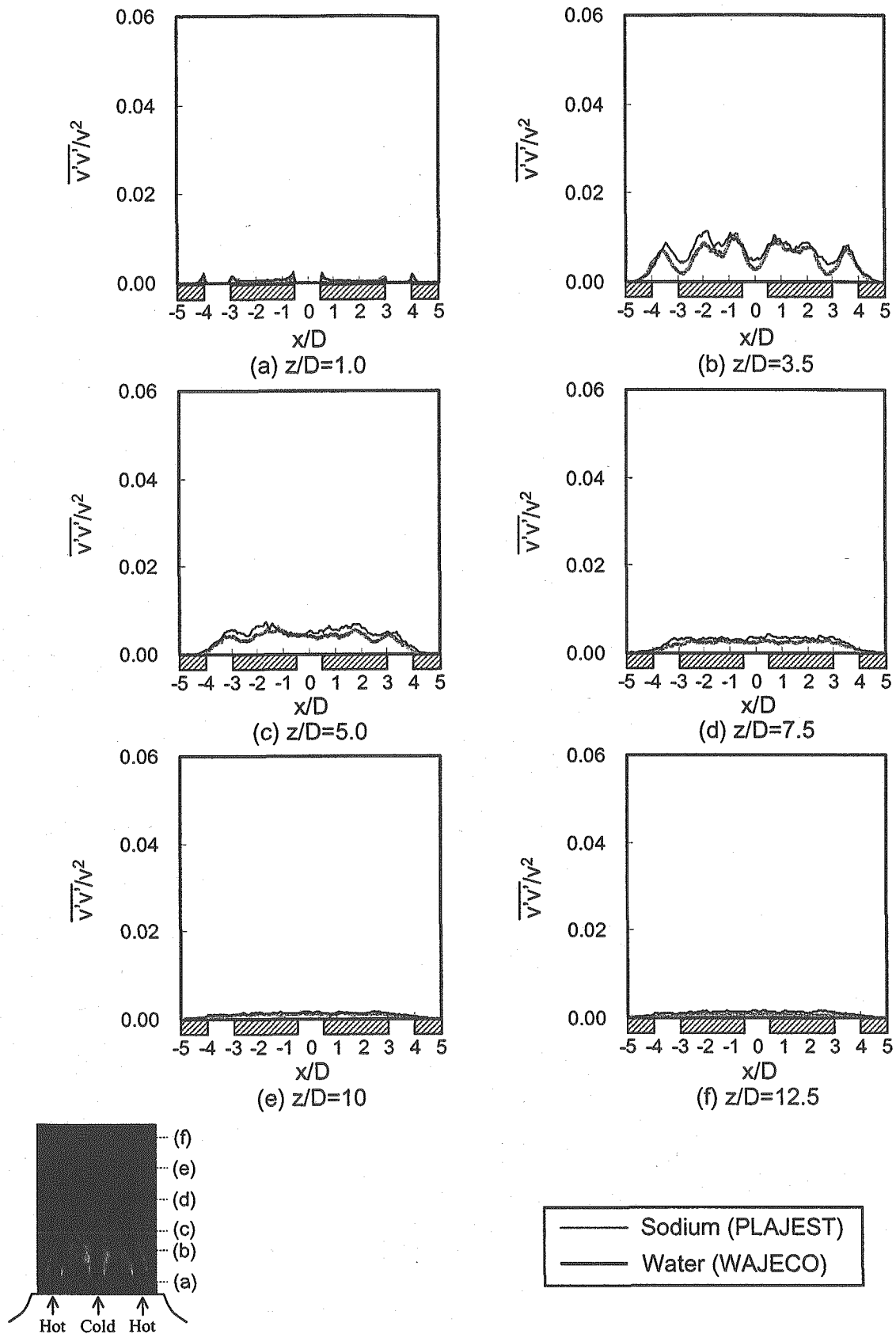


Fig.5.4.10 Comparisons of Depth Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )

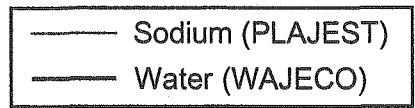
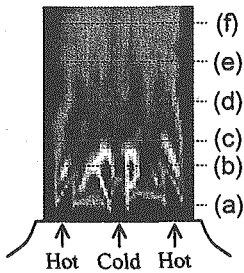
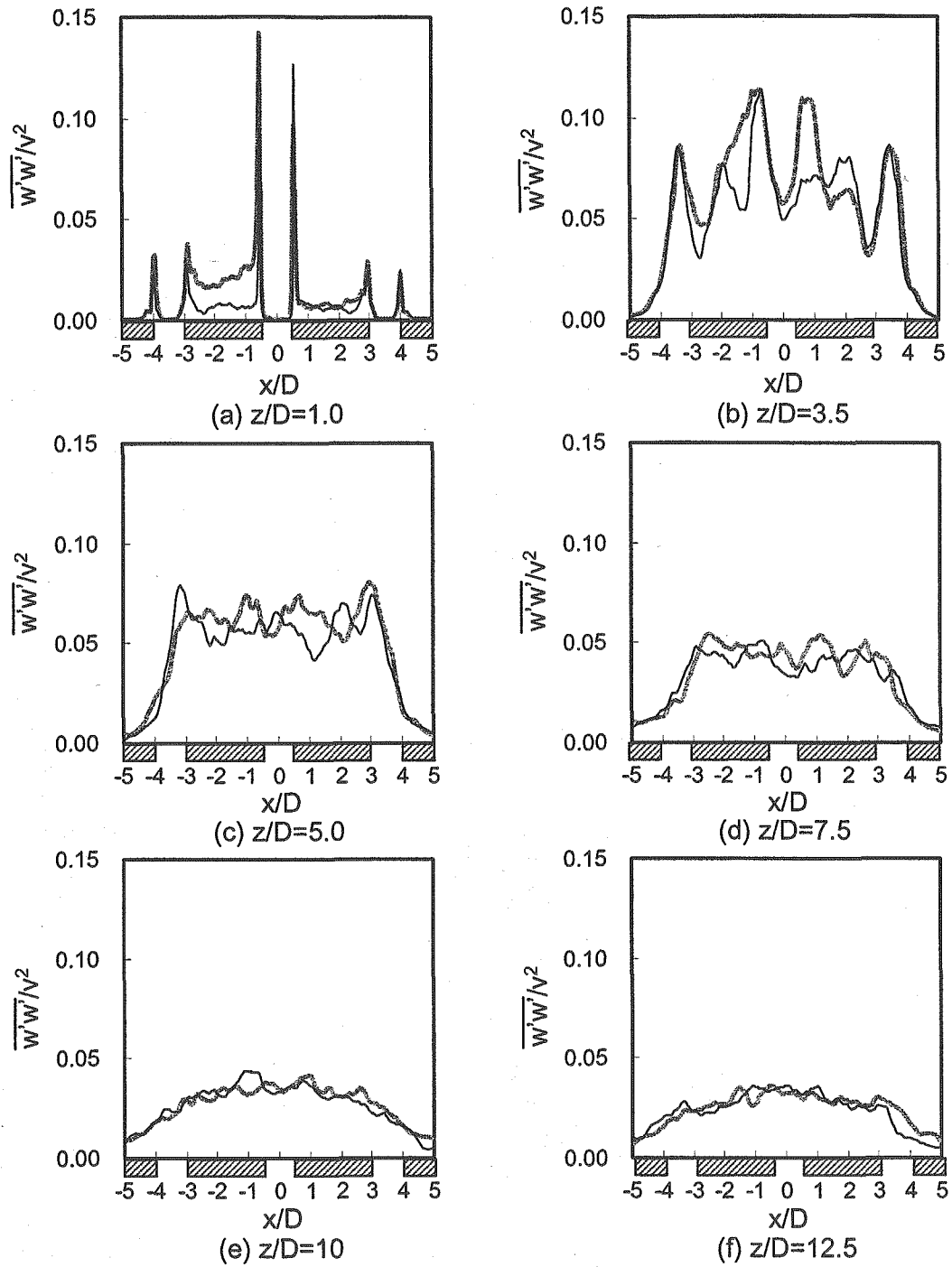


Fig.5.4.11 Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )

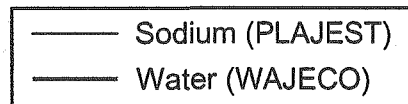
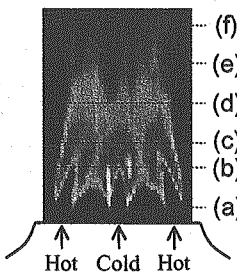
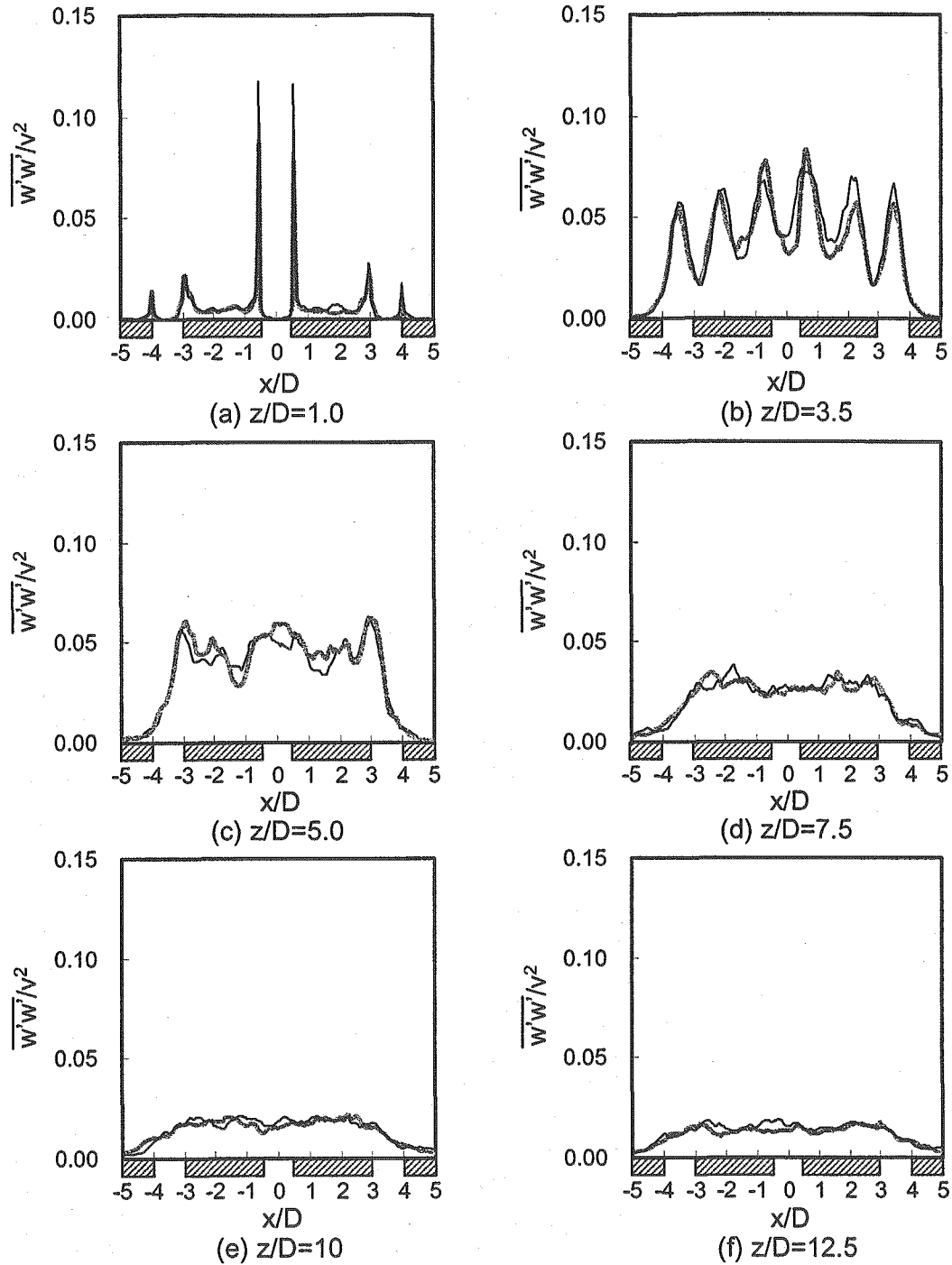
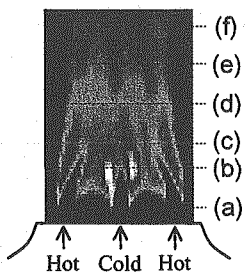
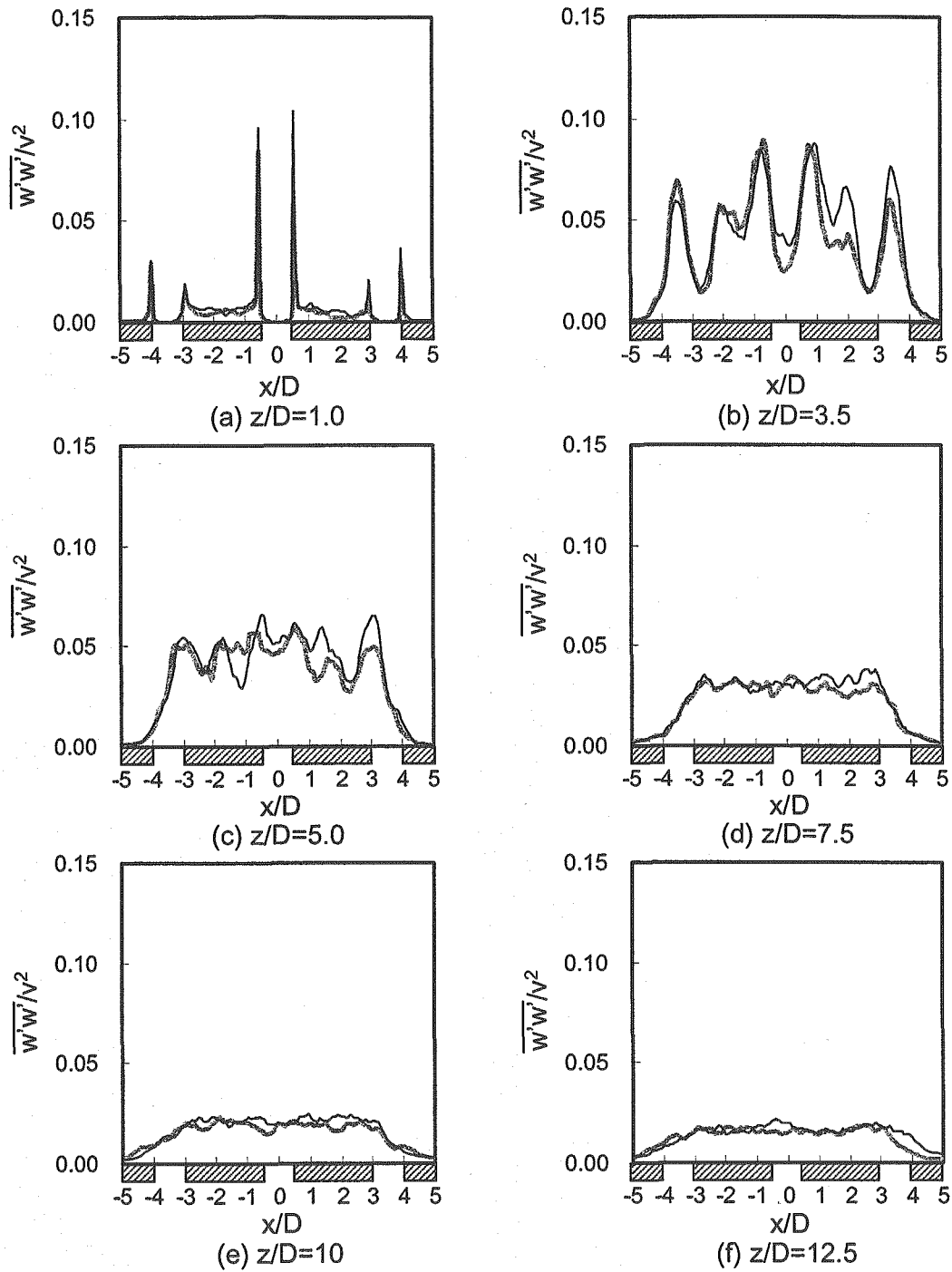


Fig.5.4.12 Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )



— Sodium (PLAJEST)  
 — Water (WAJECO)

Fig.5.4.13 Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )

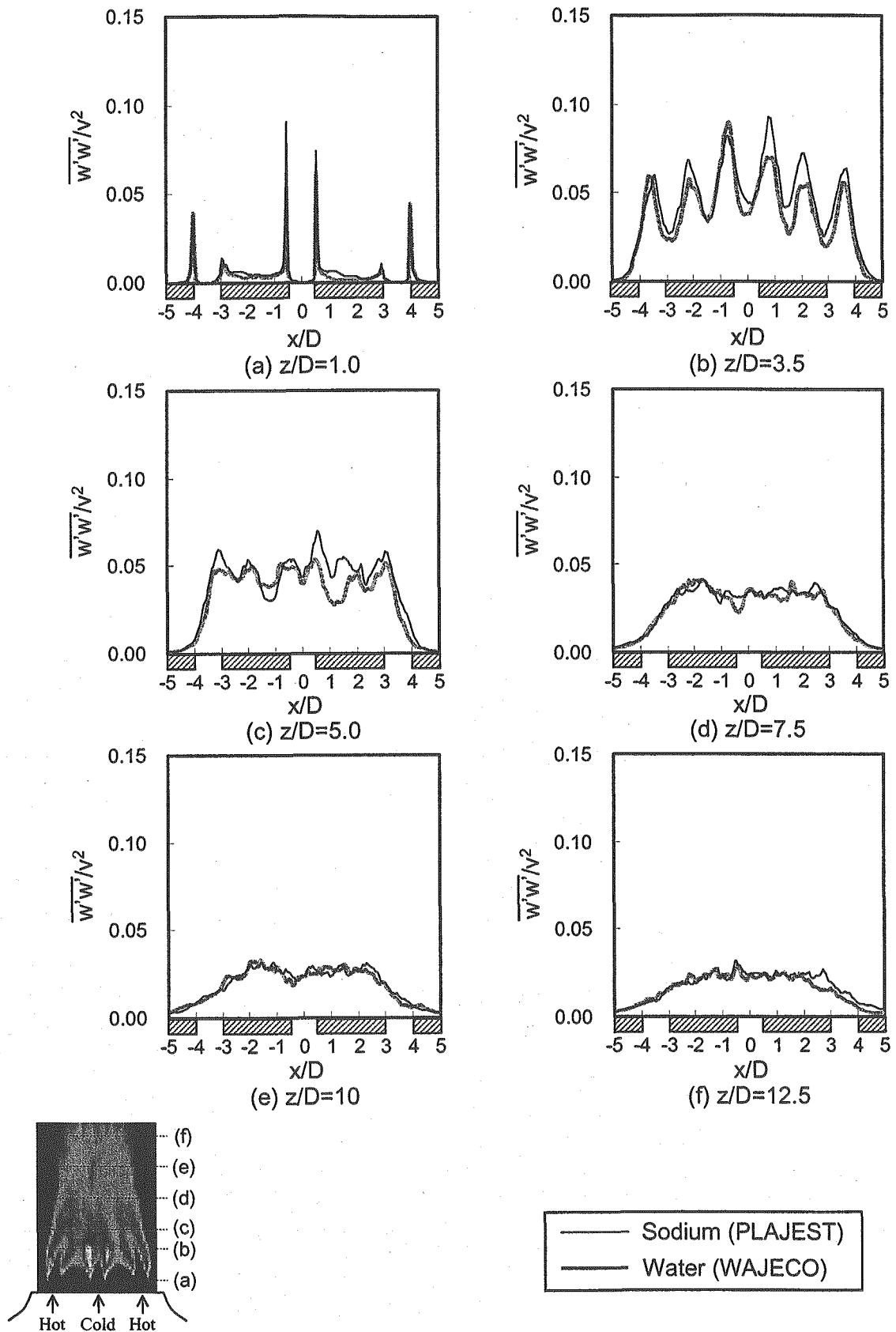


Fig.5.4.14 Comparisons of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )

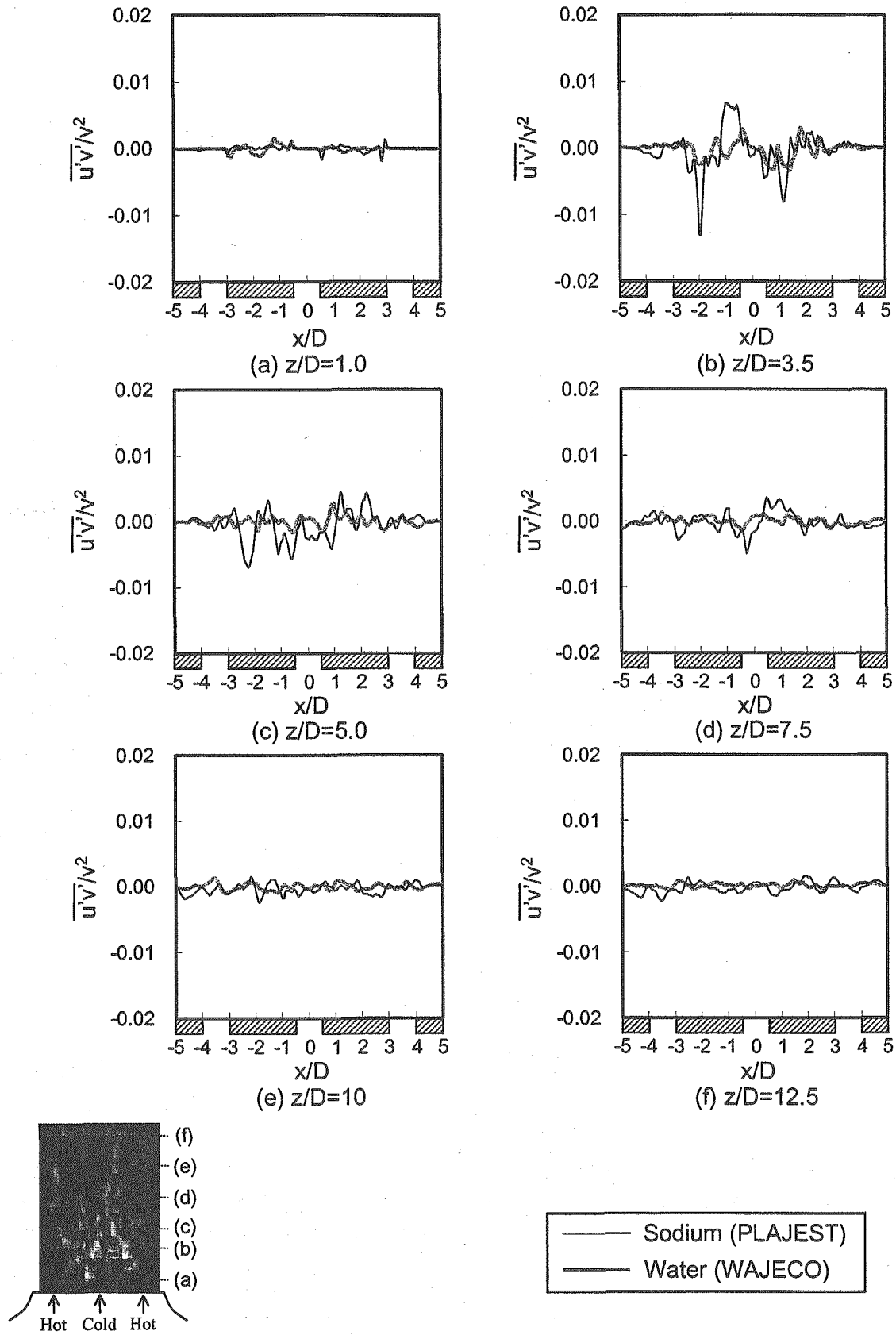
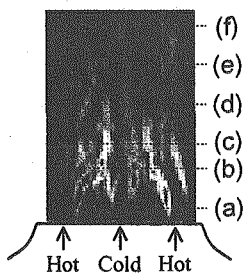
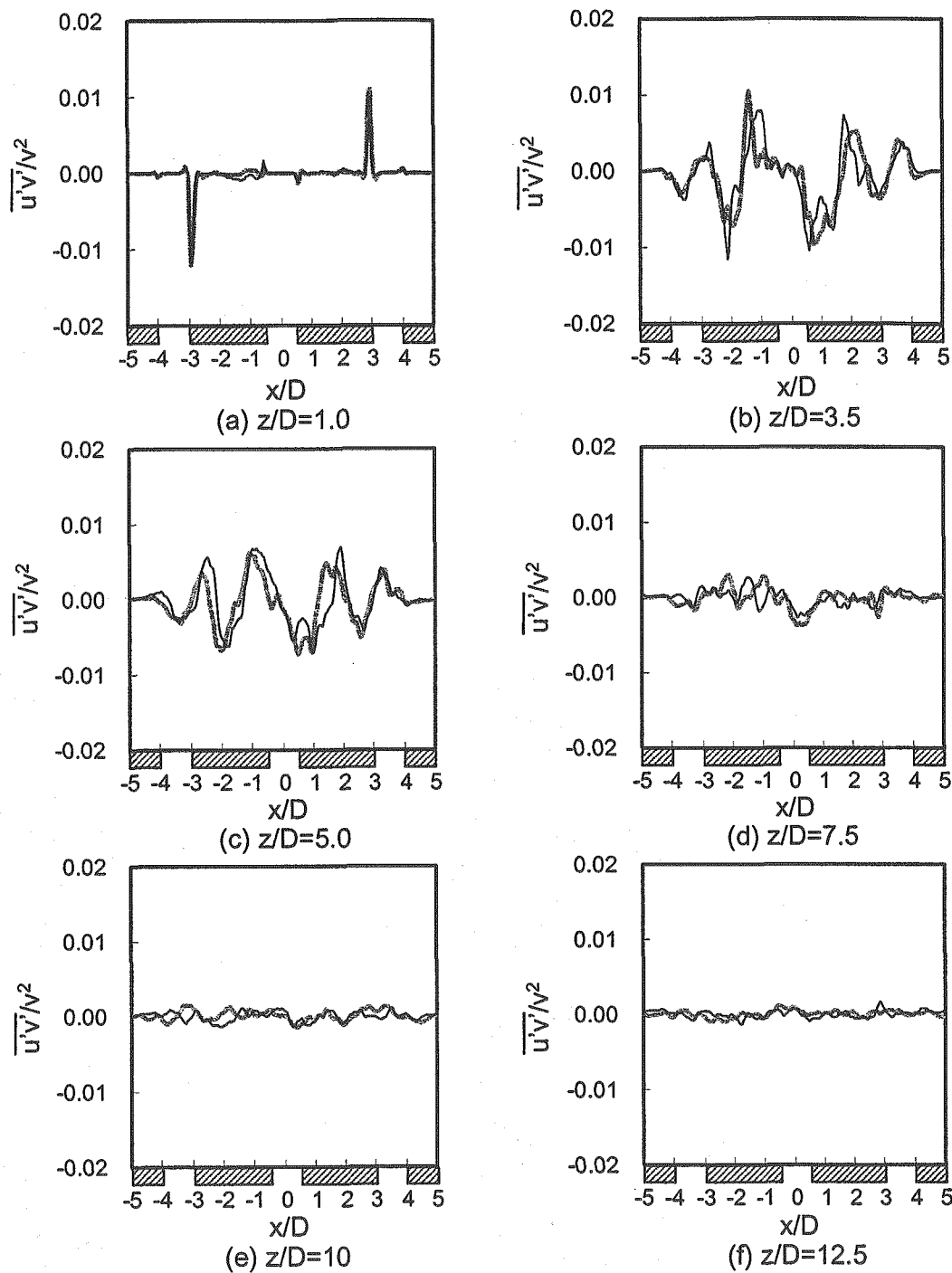


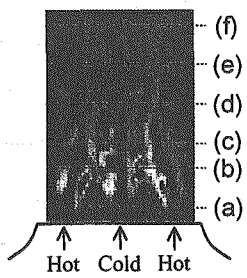
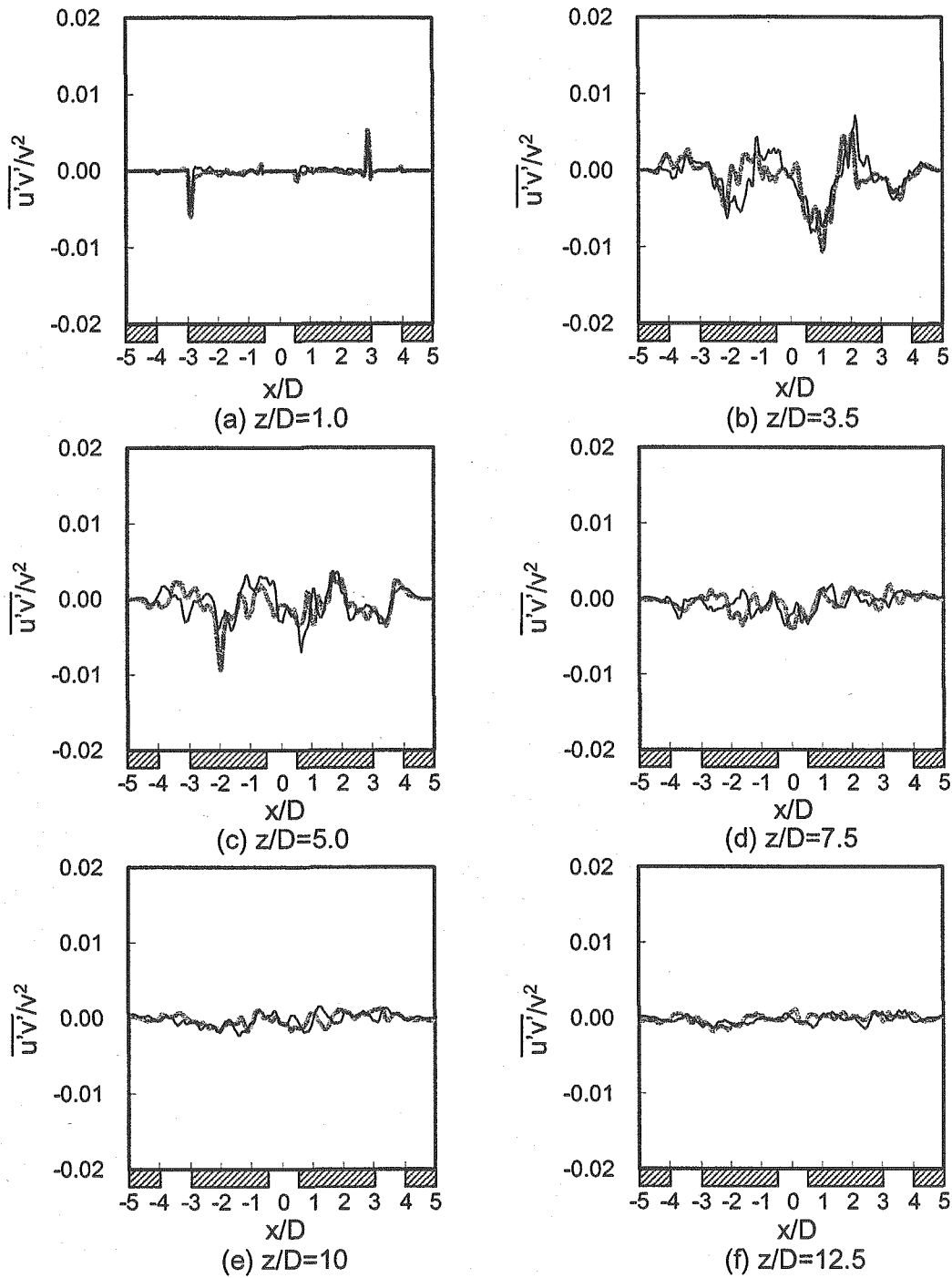
Fig.5.4.15 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Depth Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=4.5$ )



—	Sodium (PLAJEST)
—	Water (WAJECO)

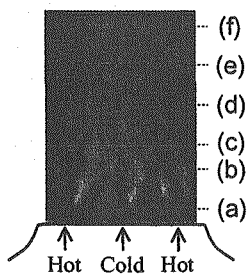
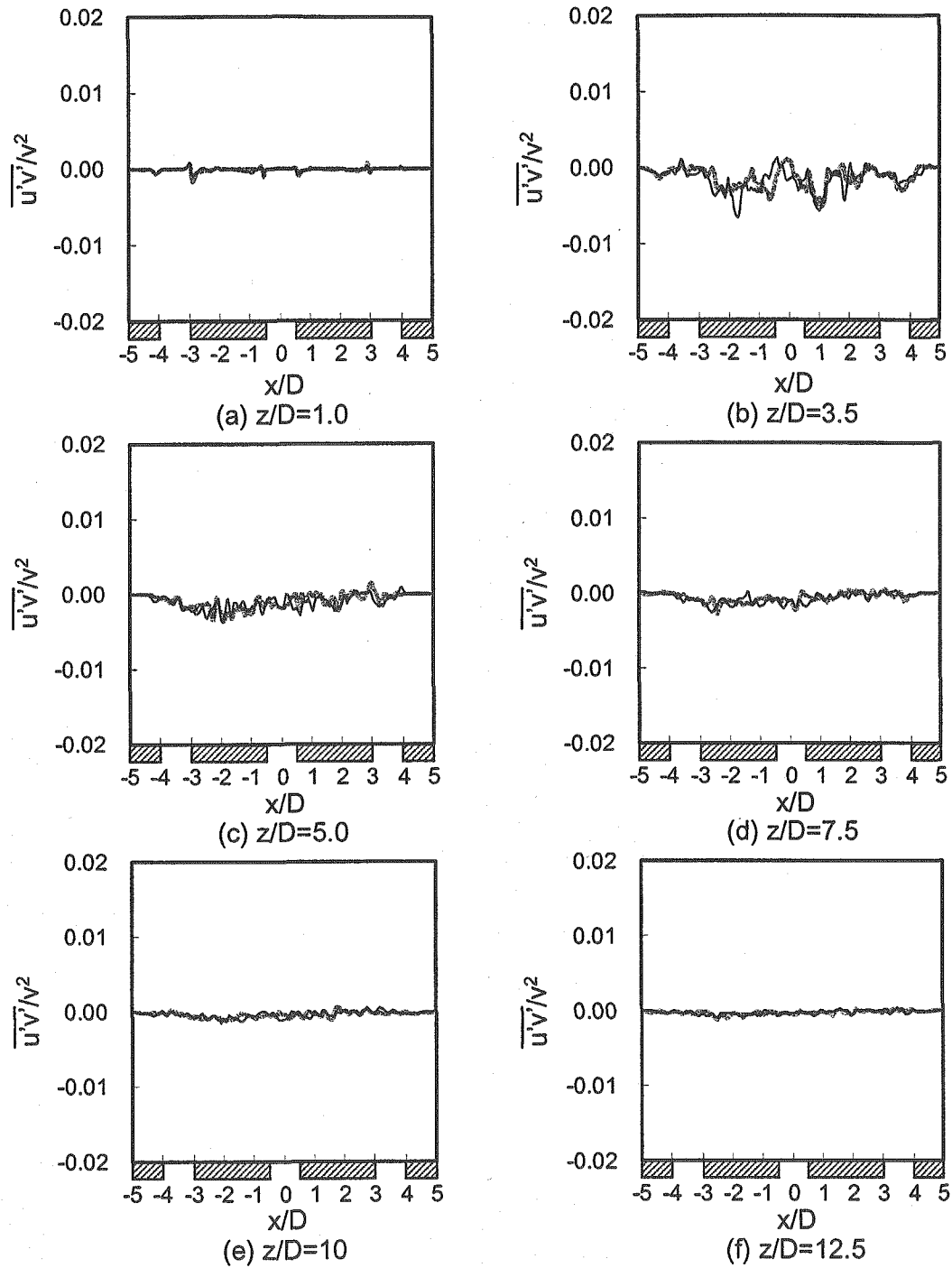
Fig.5.4.16 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Depth Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=0.5$ )





—	Sodium (PLAJEST)
—	Water (WAJECO)

Fig.5.4.17 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Depth Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=0.2$ )



— Sodium (PLAJEST)  
 — Water (WAJECO)

Fig.5.4.18 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Depth Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=0.05$ )

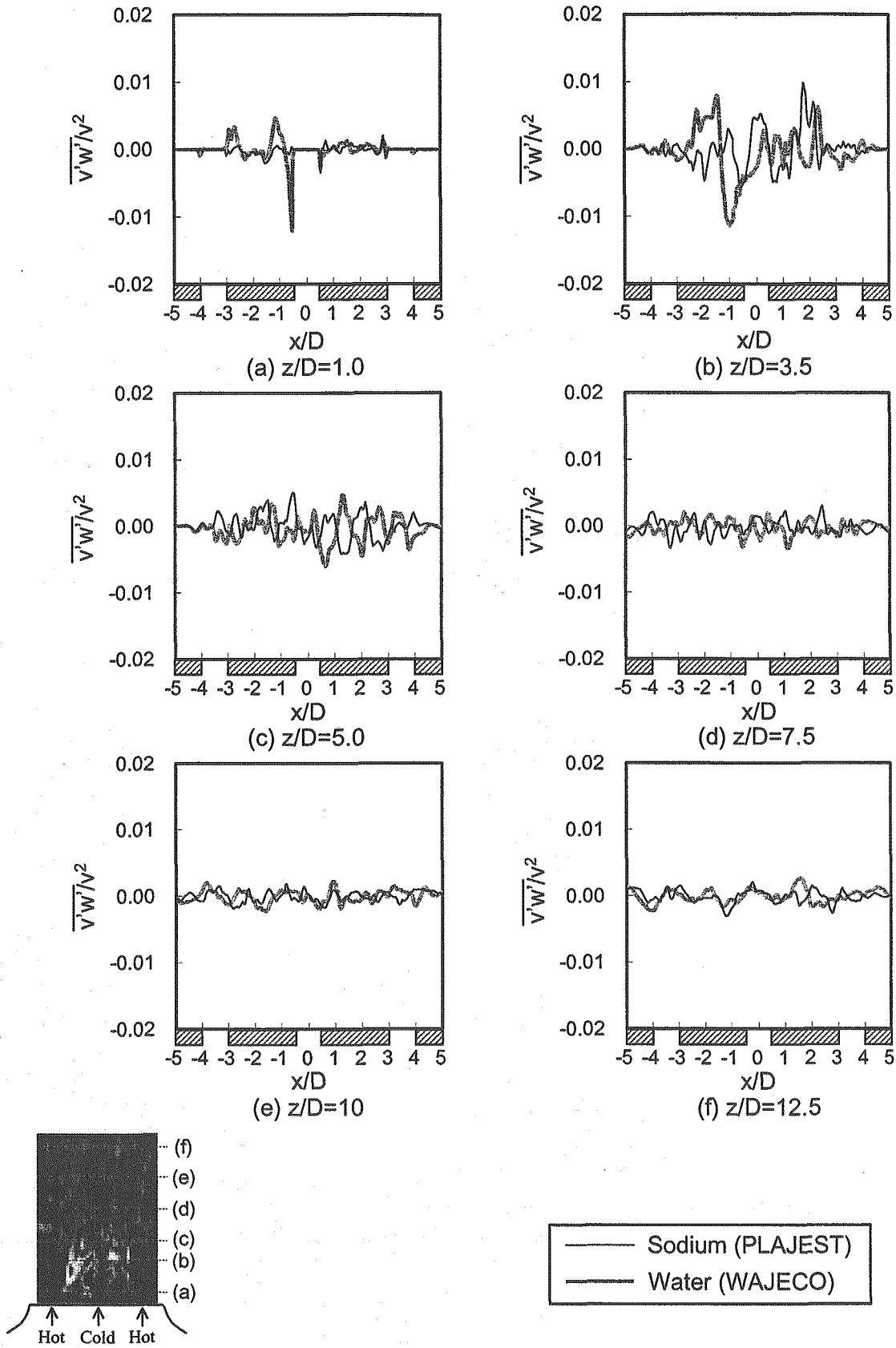
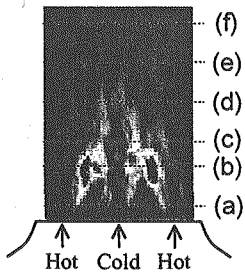
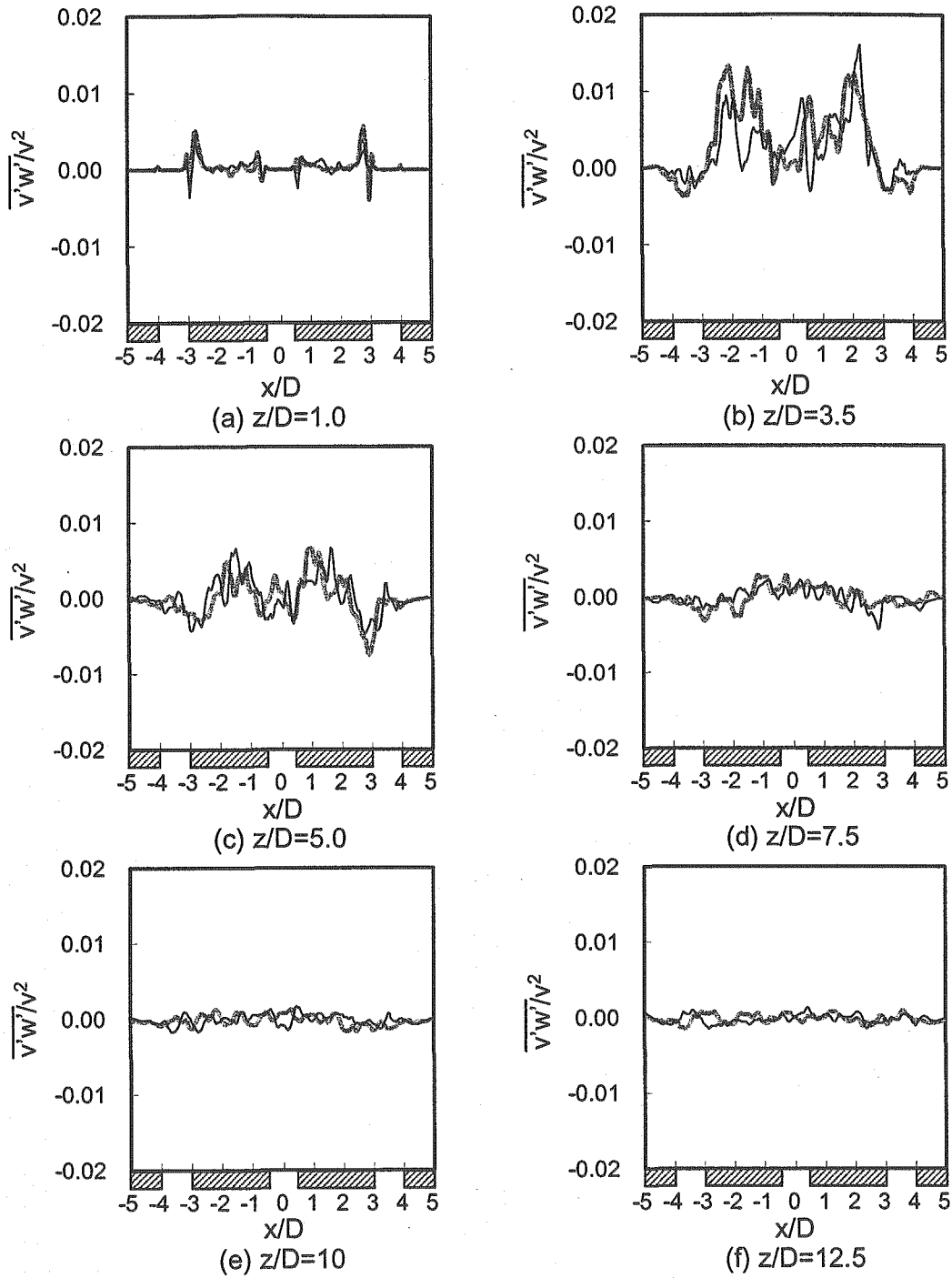


Fig.5.4.19 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Depth and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=4.5$ )



—	Sodium (PLAJEST)
—	Water (WAJECO)

Fig.5.4.20 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Depth and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=0.5$ )

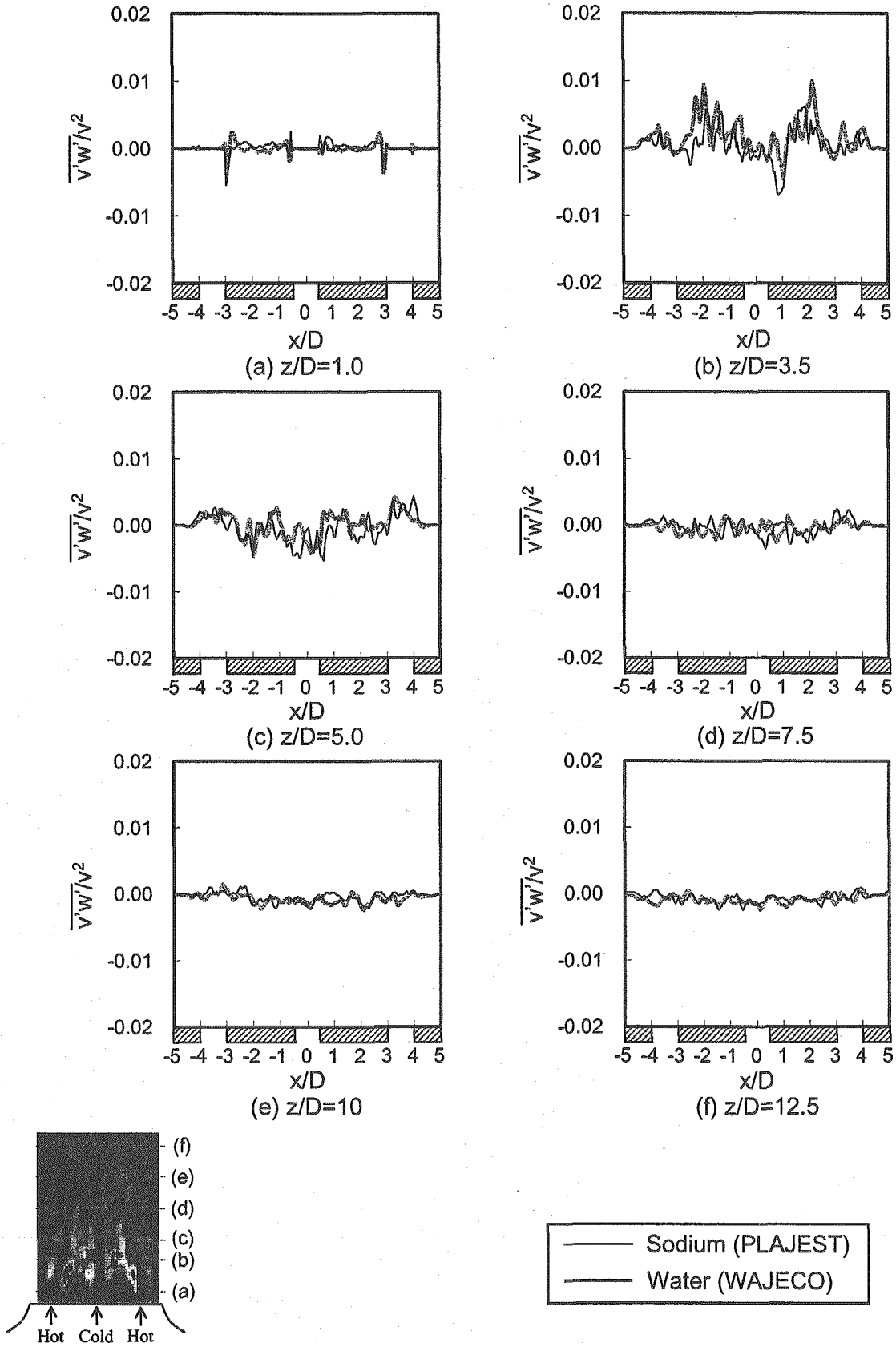


Fig.5.4.21 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Depth and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=0.2$ )

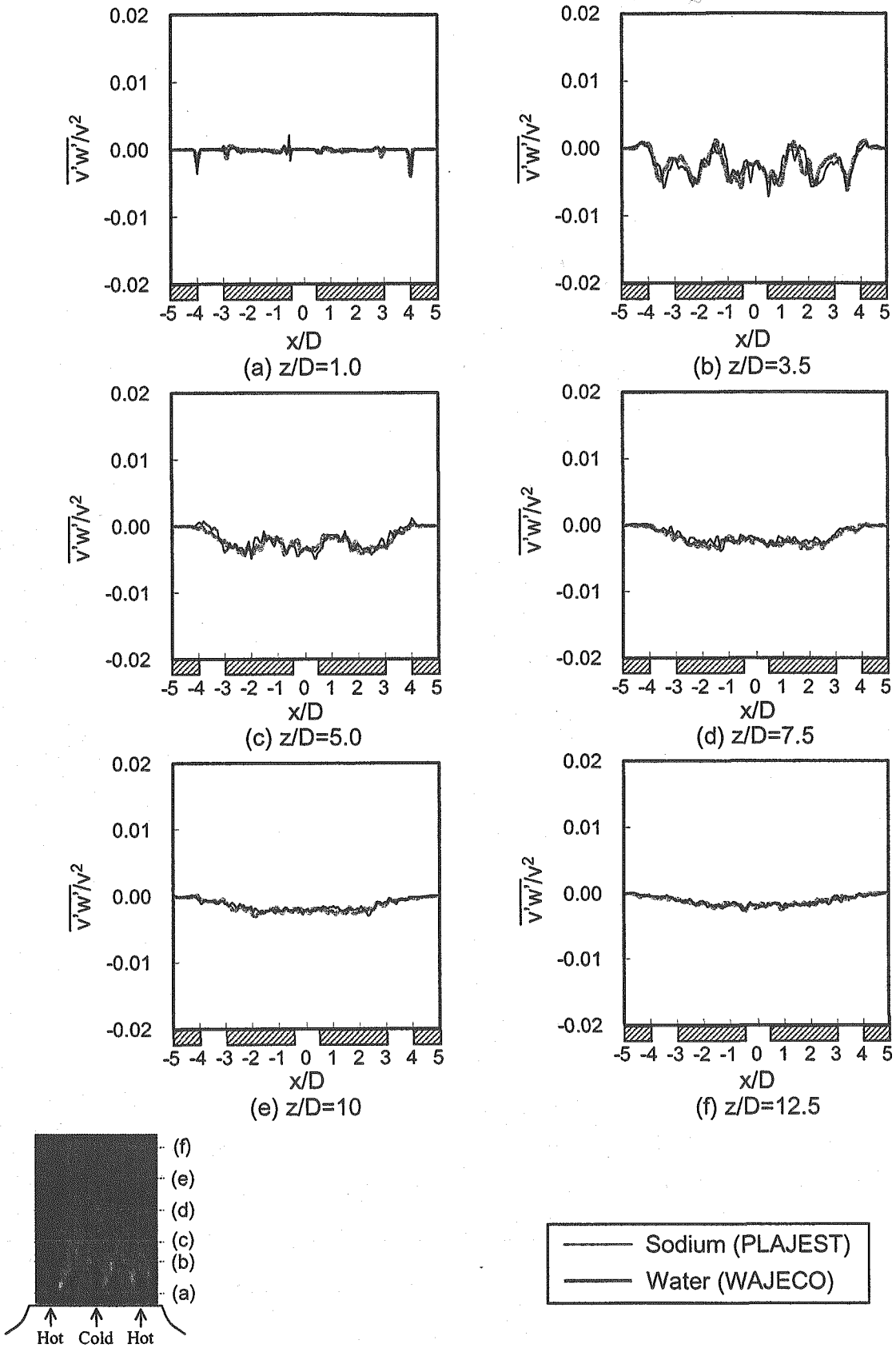


Fig.5.4.22 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Depth and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=0.05$ )

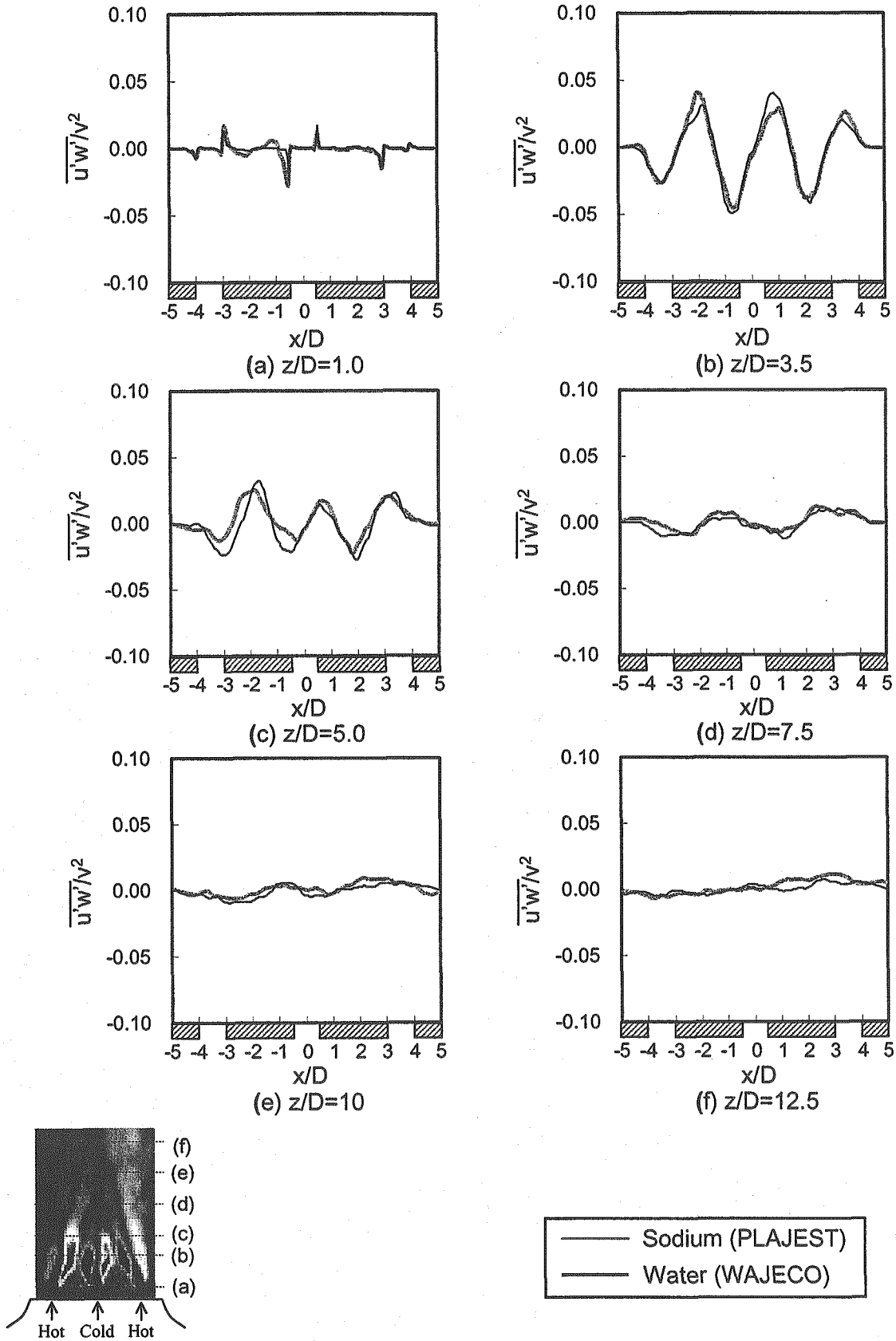


Fig.5.4.23 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=4.5$ )

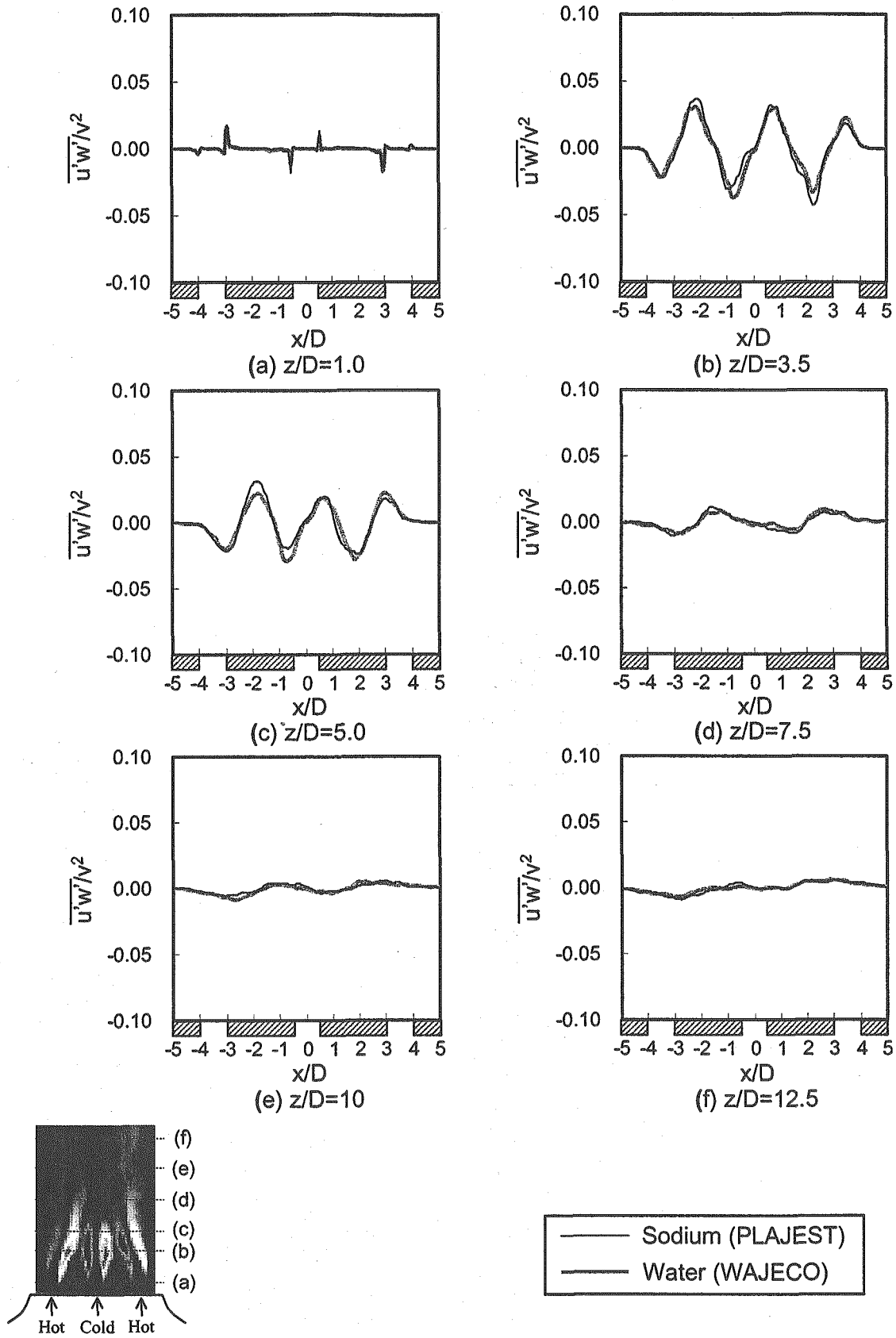
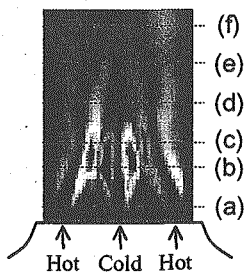
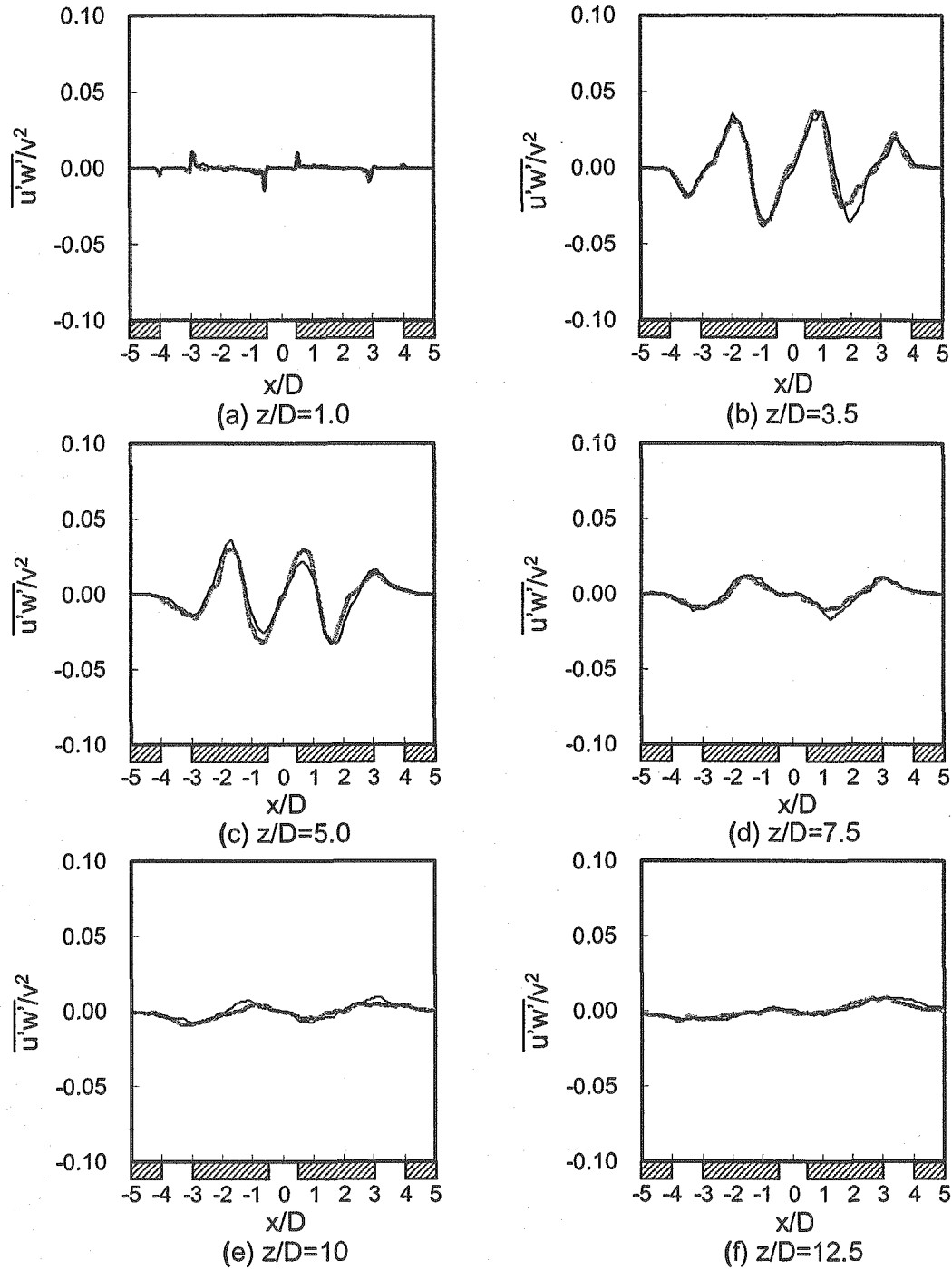


Fig.5.4.24 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=0.5$ )





—	Sodium (PLAJEST)
—	Water (WAJECO)

Fig.5.4.25 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=0.2$ )

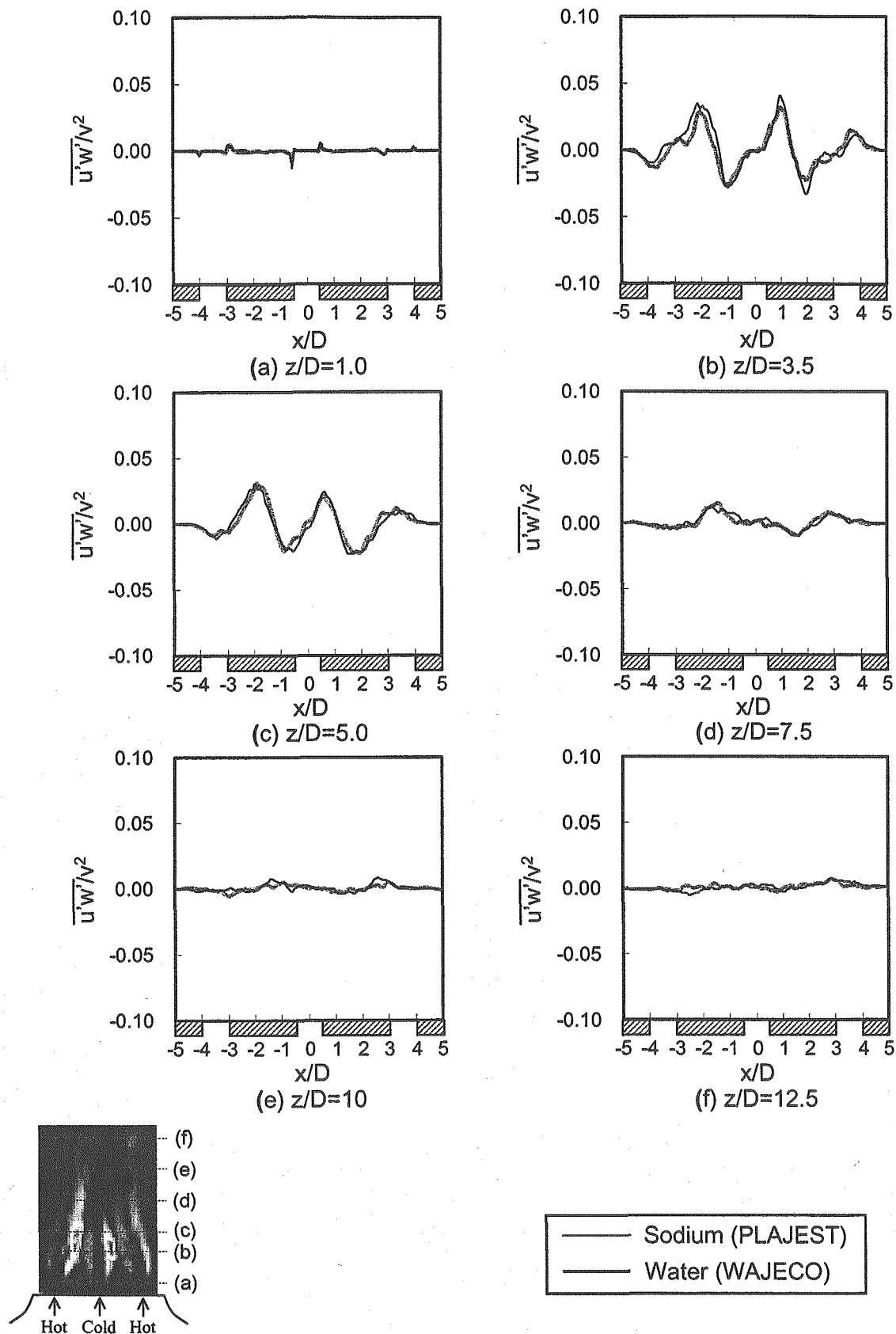


Fig.5.4.26 Comparisons of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Vertical Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Conditions. ( $y/D=0.05$ )

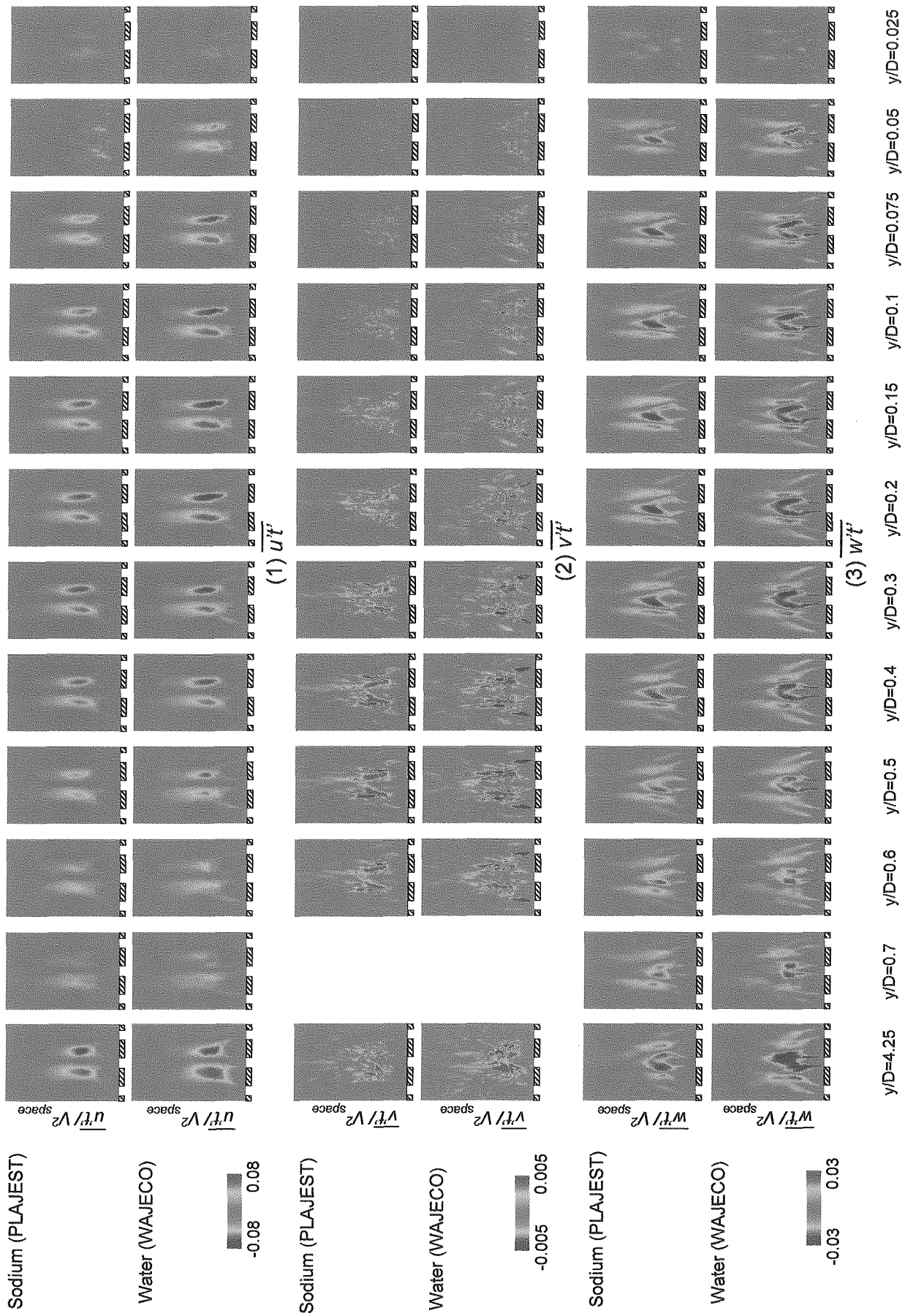


Fig.5.5.1 Comparisons of Turbulent Heat Fluxes Field between Sodium and Water Condition.

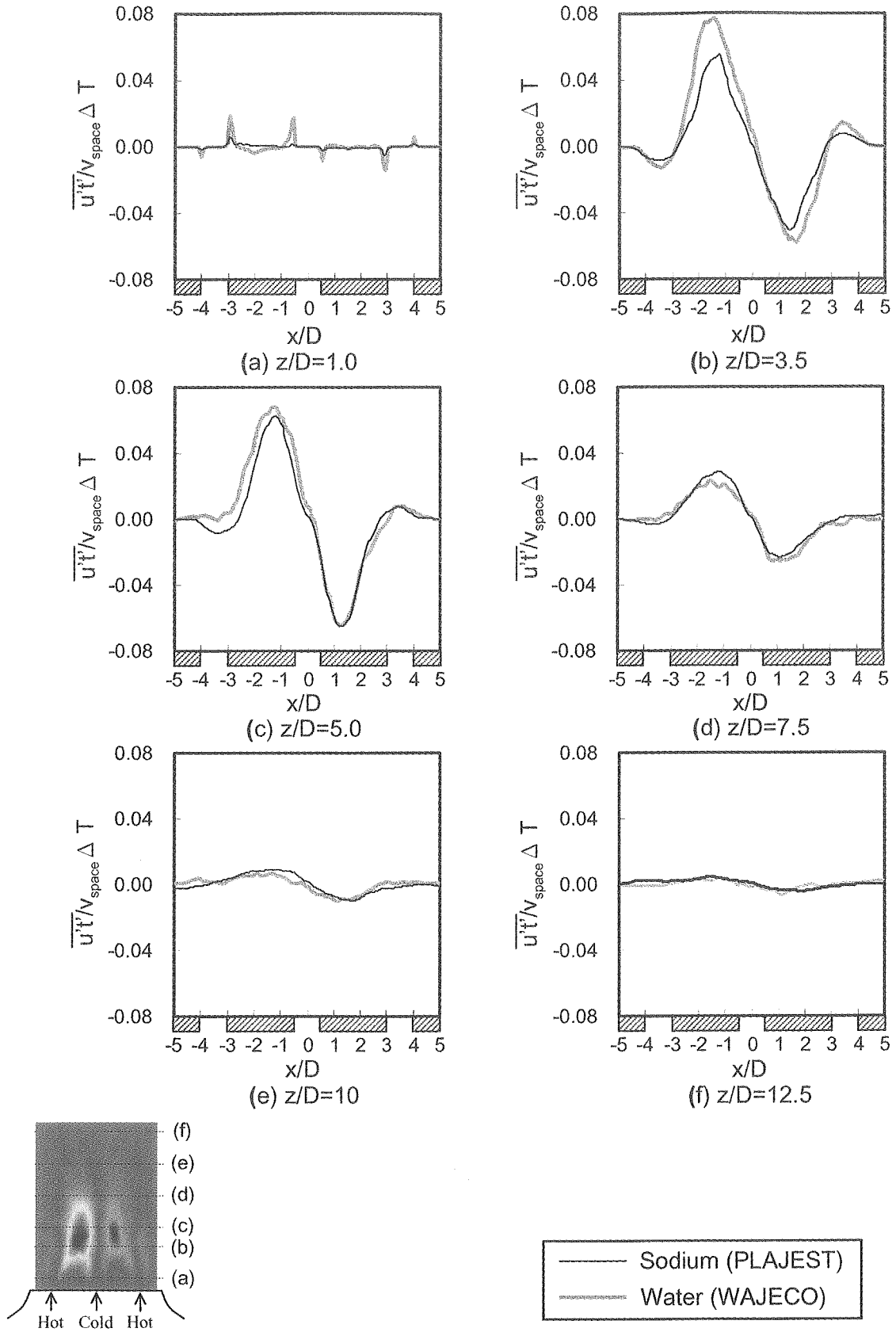


Fig.5.5.2 Comparisons of Horizontal Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )

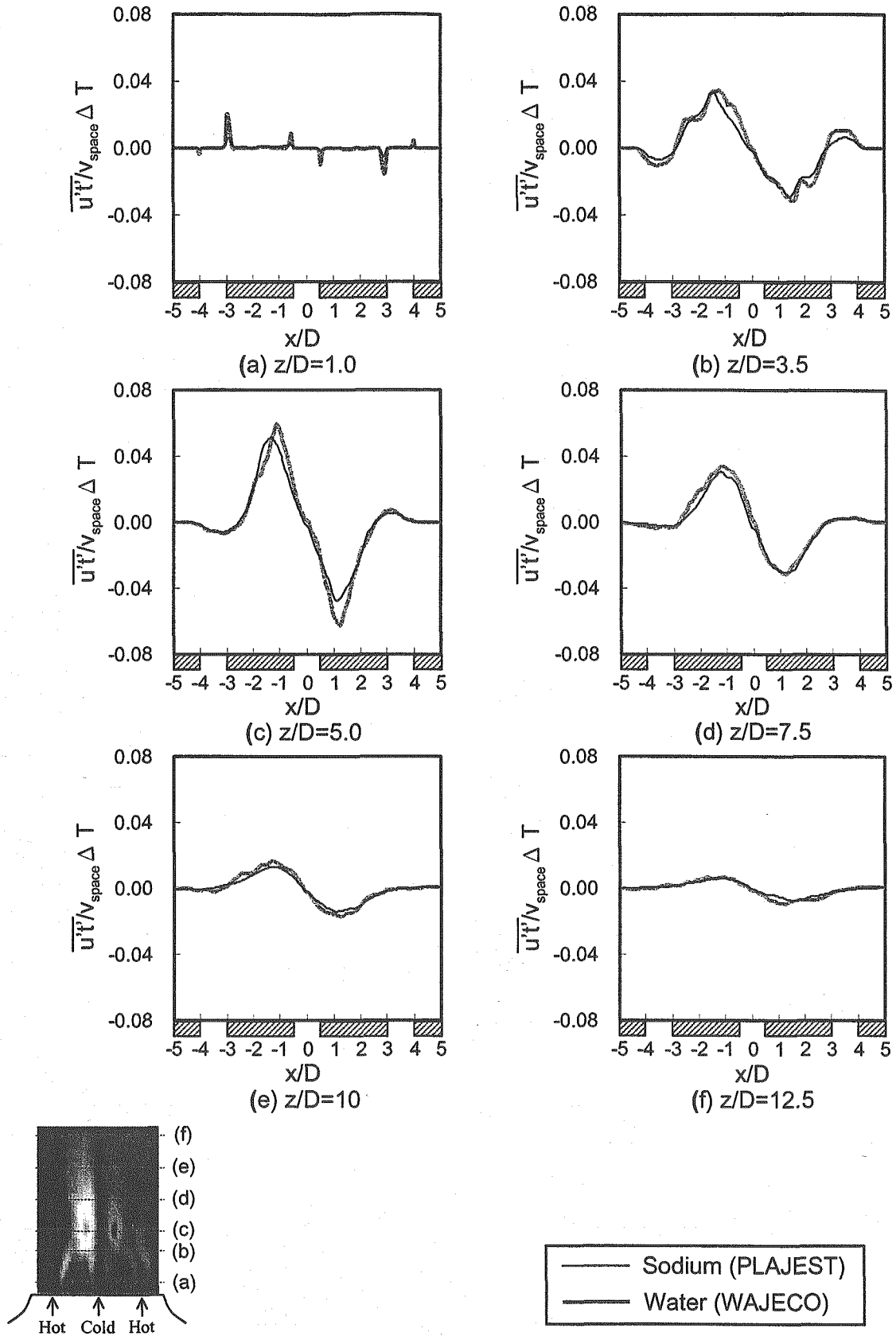


Fig.5.5.3 Comparisons of Horizontal Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )

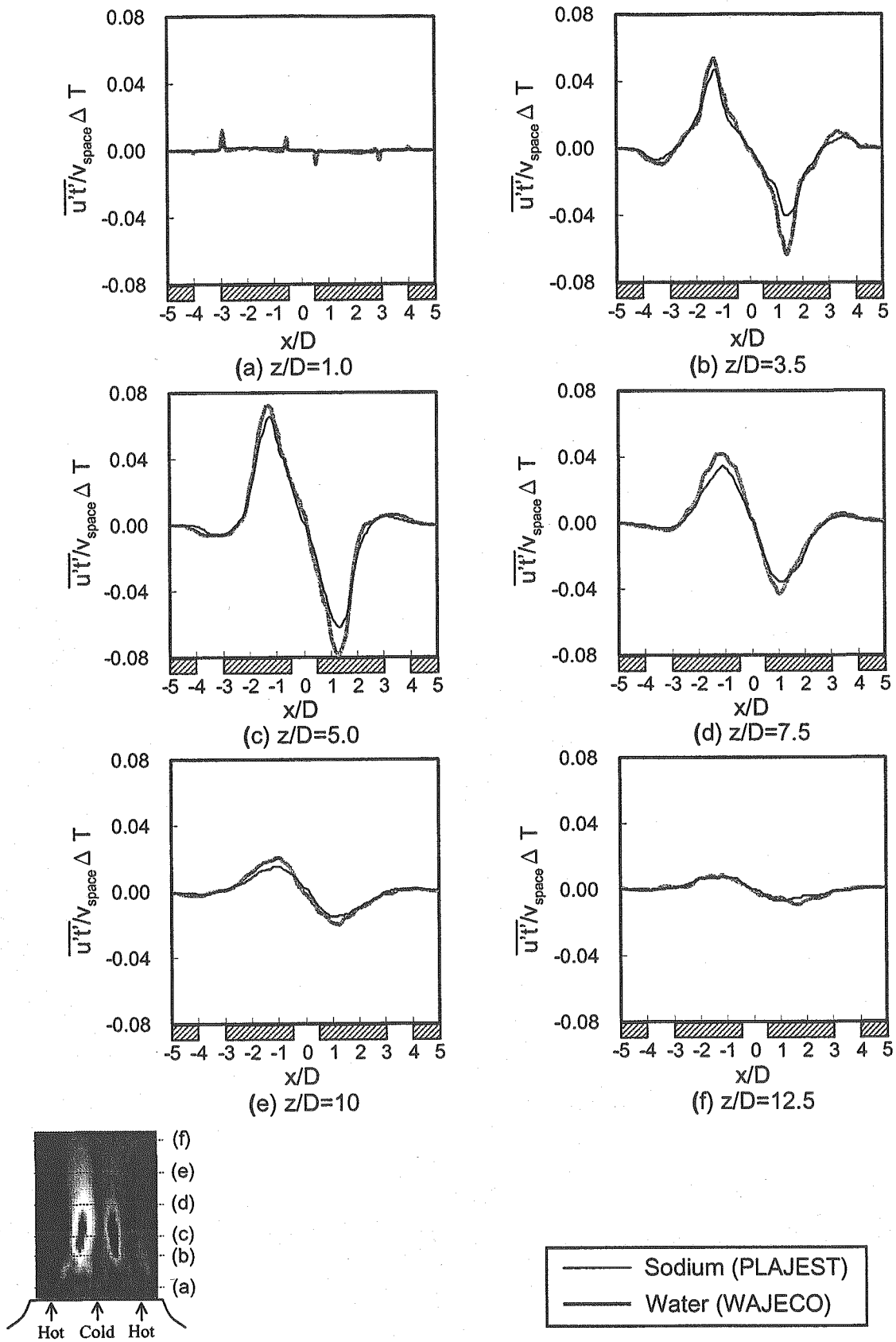
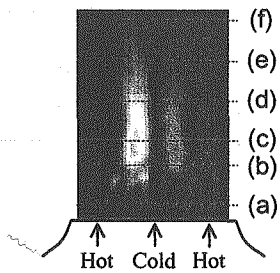
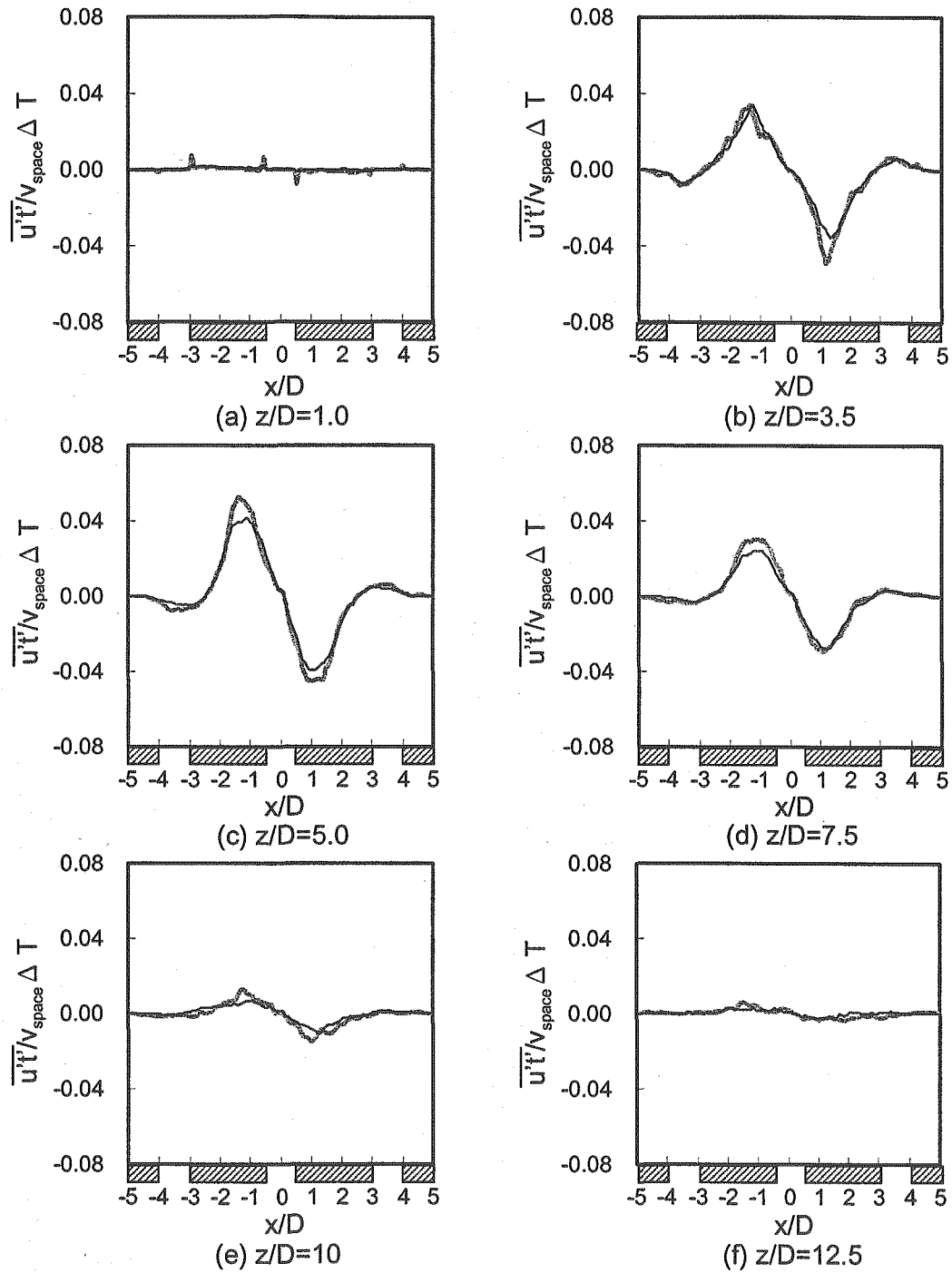


Fig.5.5.4 Comparisons of Horizontal Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )



— Sodium (PLAJEST)

— Water (WAJECO)

Fig.5.5.5 Comparisons of Horizontal Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )

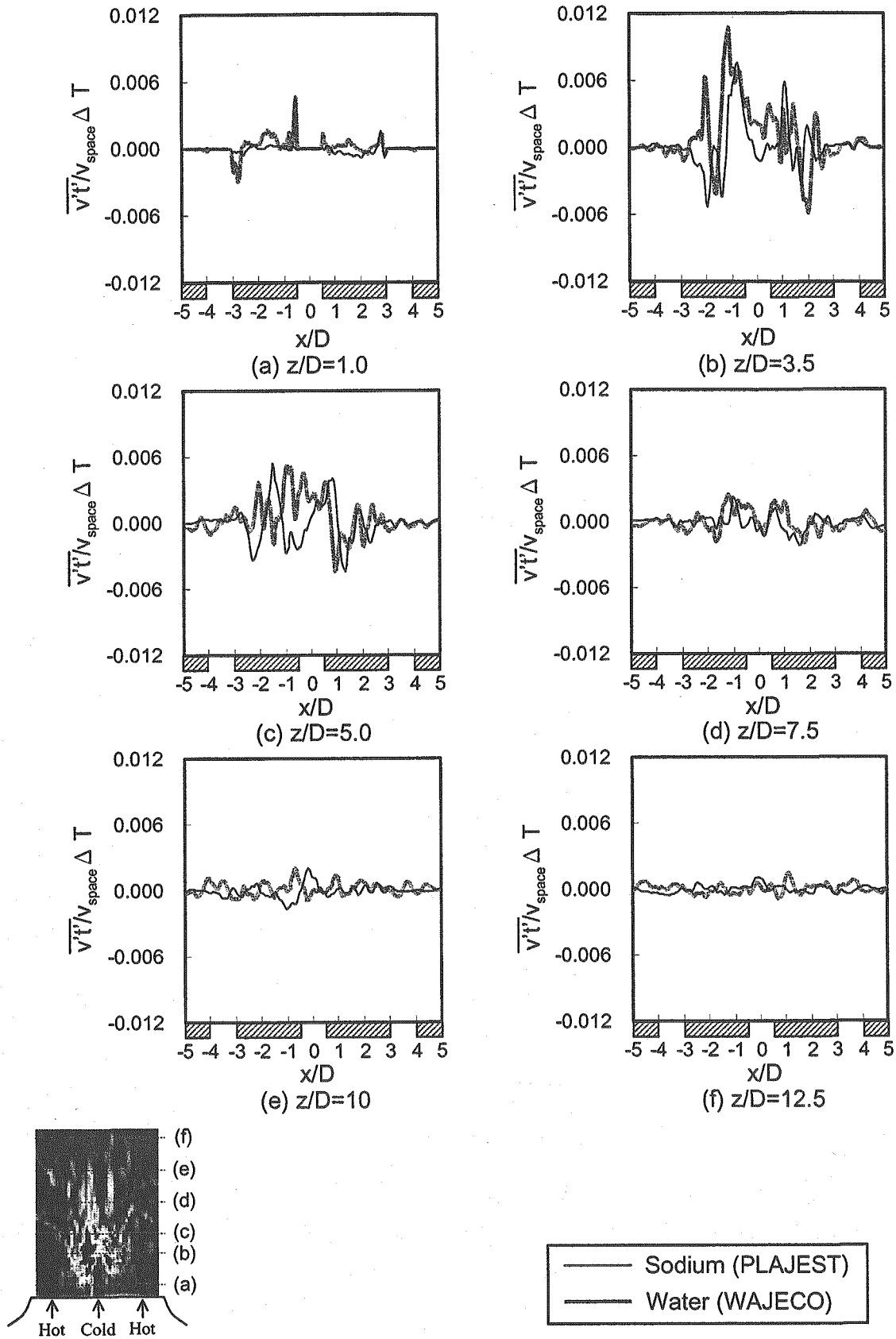


Fig.5.5.6 Comparisons of Depth Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )



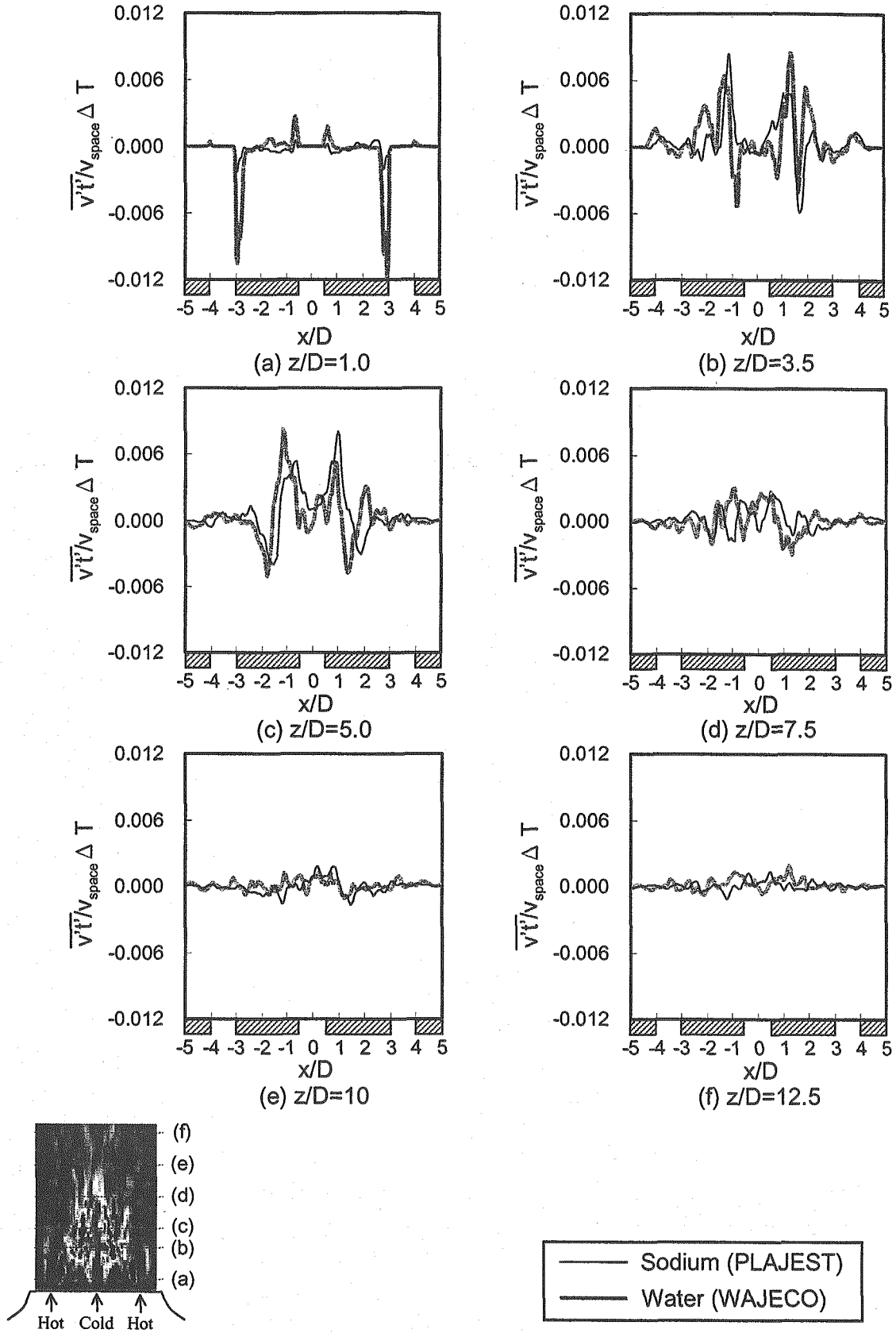


Fig.5.5.7 Comparisons of Depth Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )

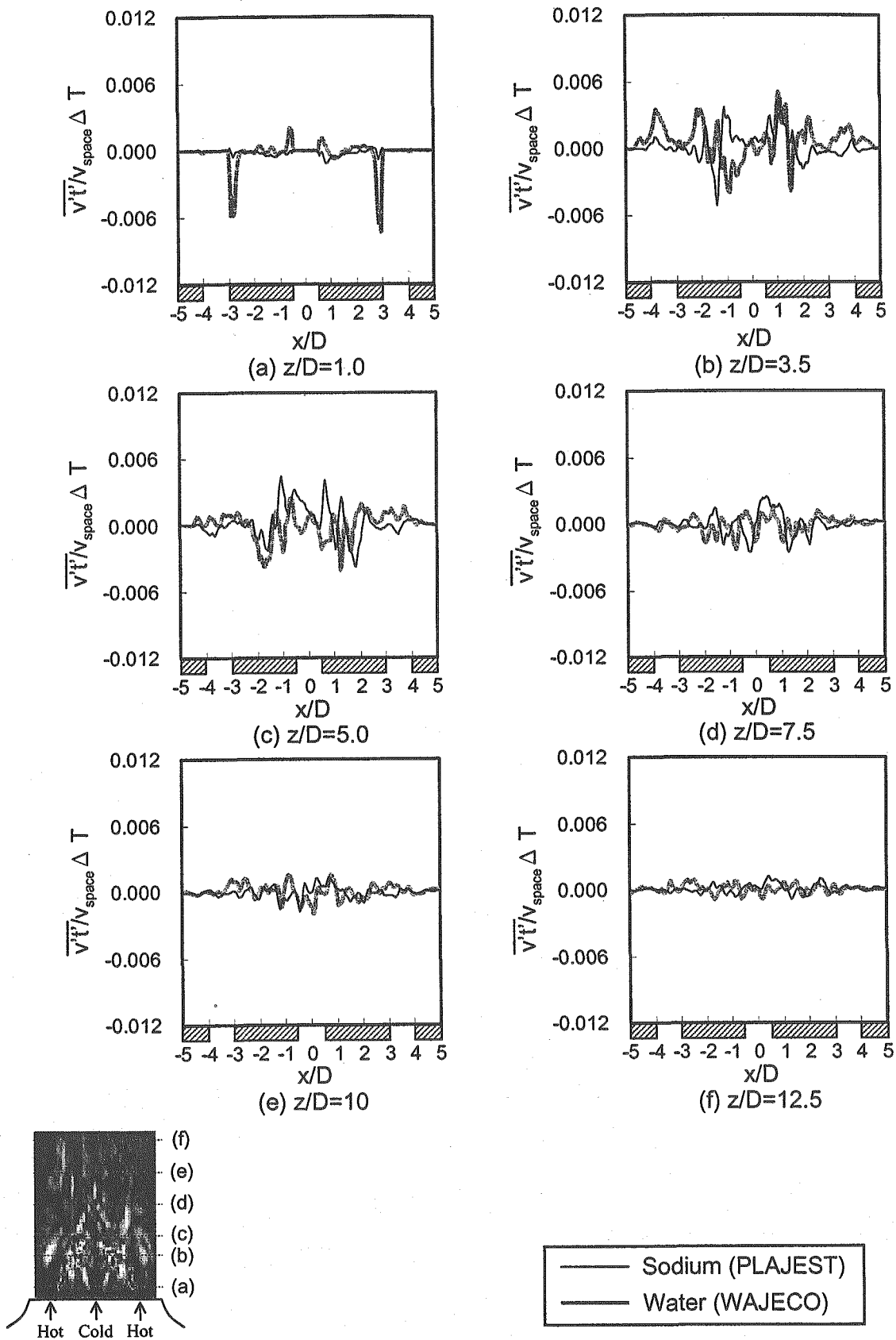


Fig.5.5.8 Comparisons of Depth Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )

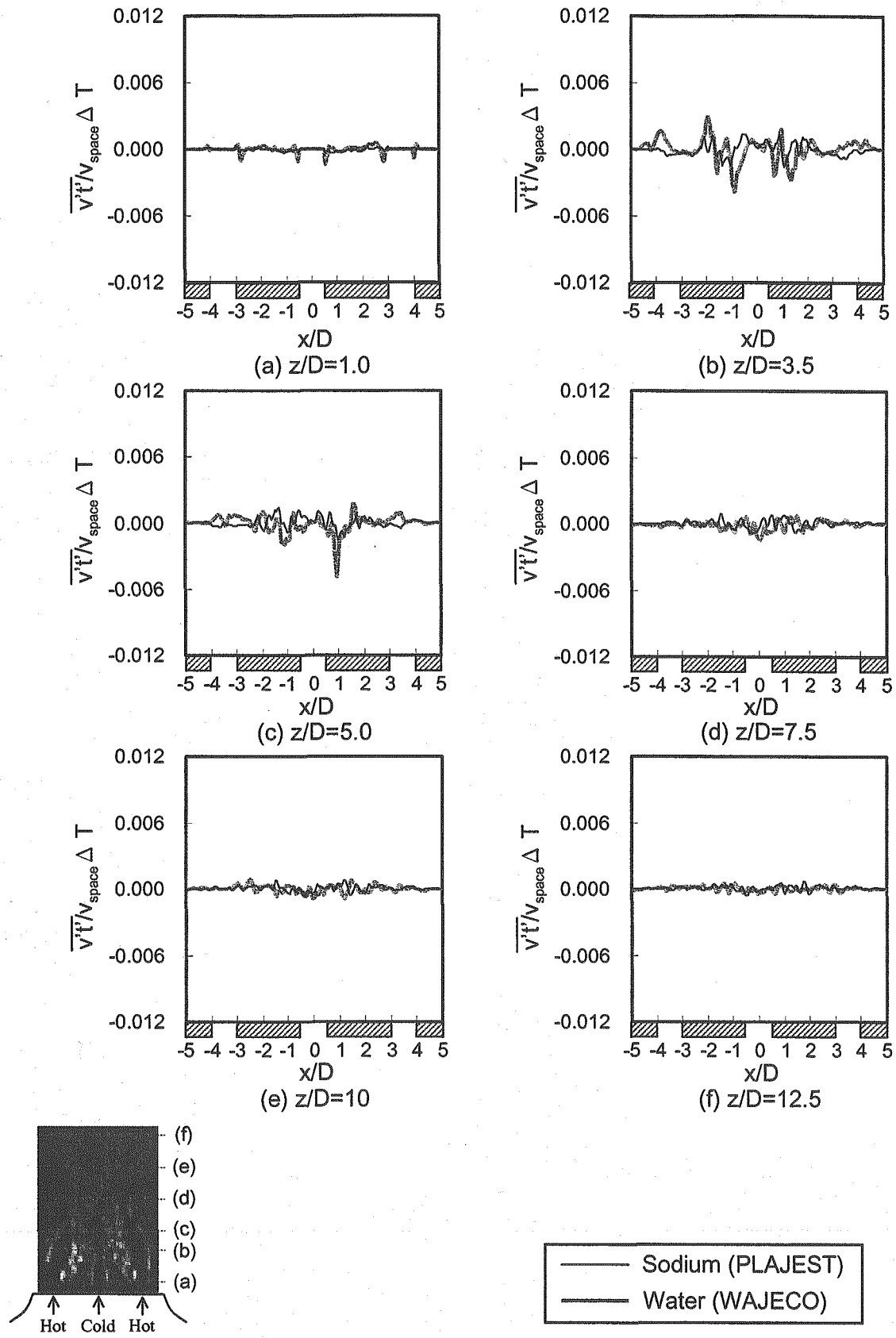


Fig.5.5.9 Comparisons of Depth Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )

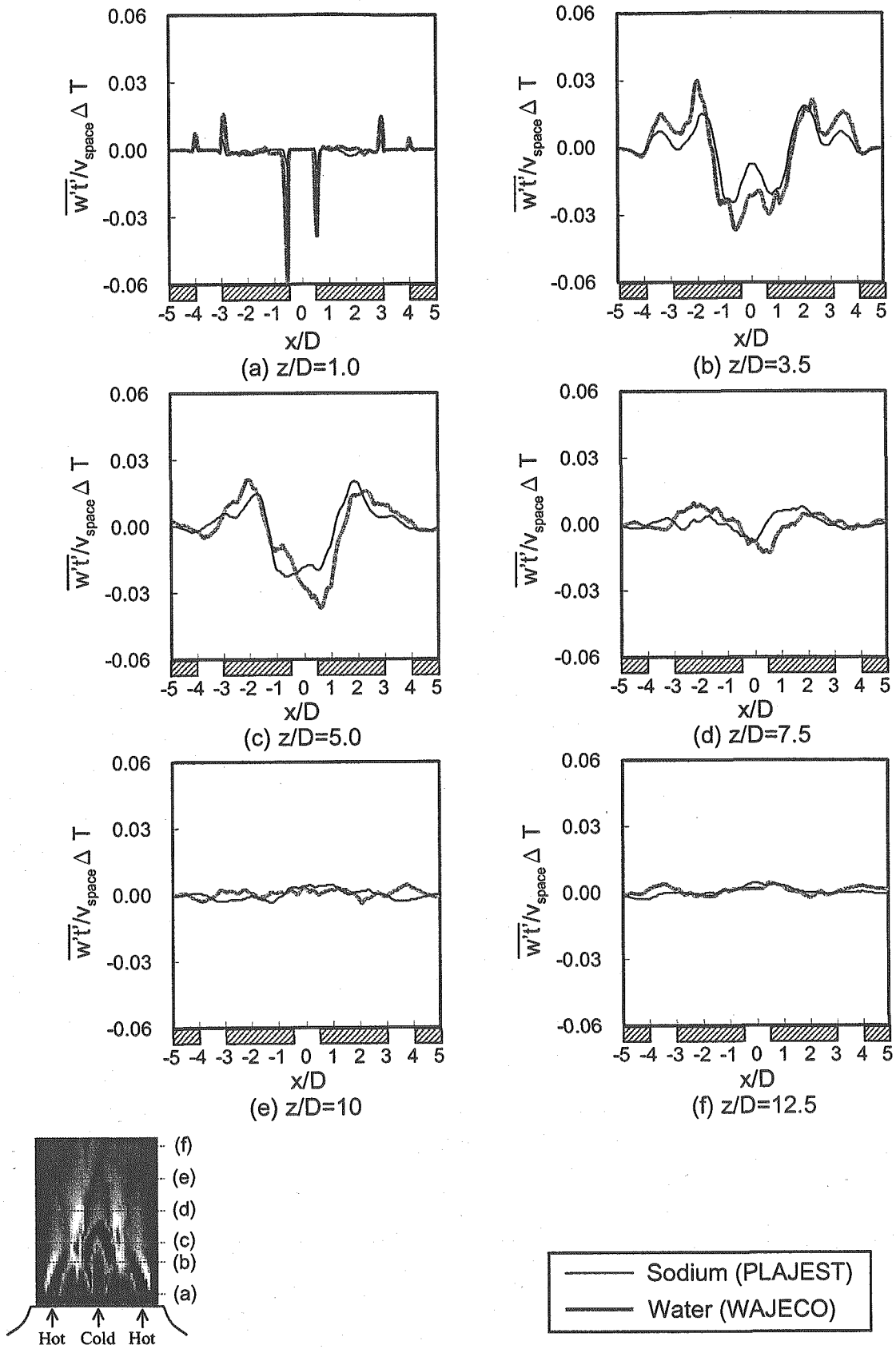


Fig.5.5.10 Comparisons of Vertical Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=4.5$ )

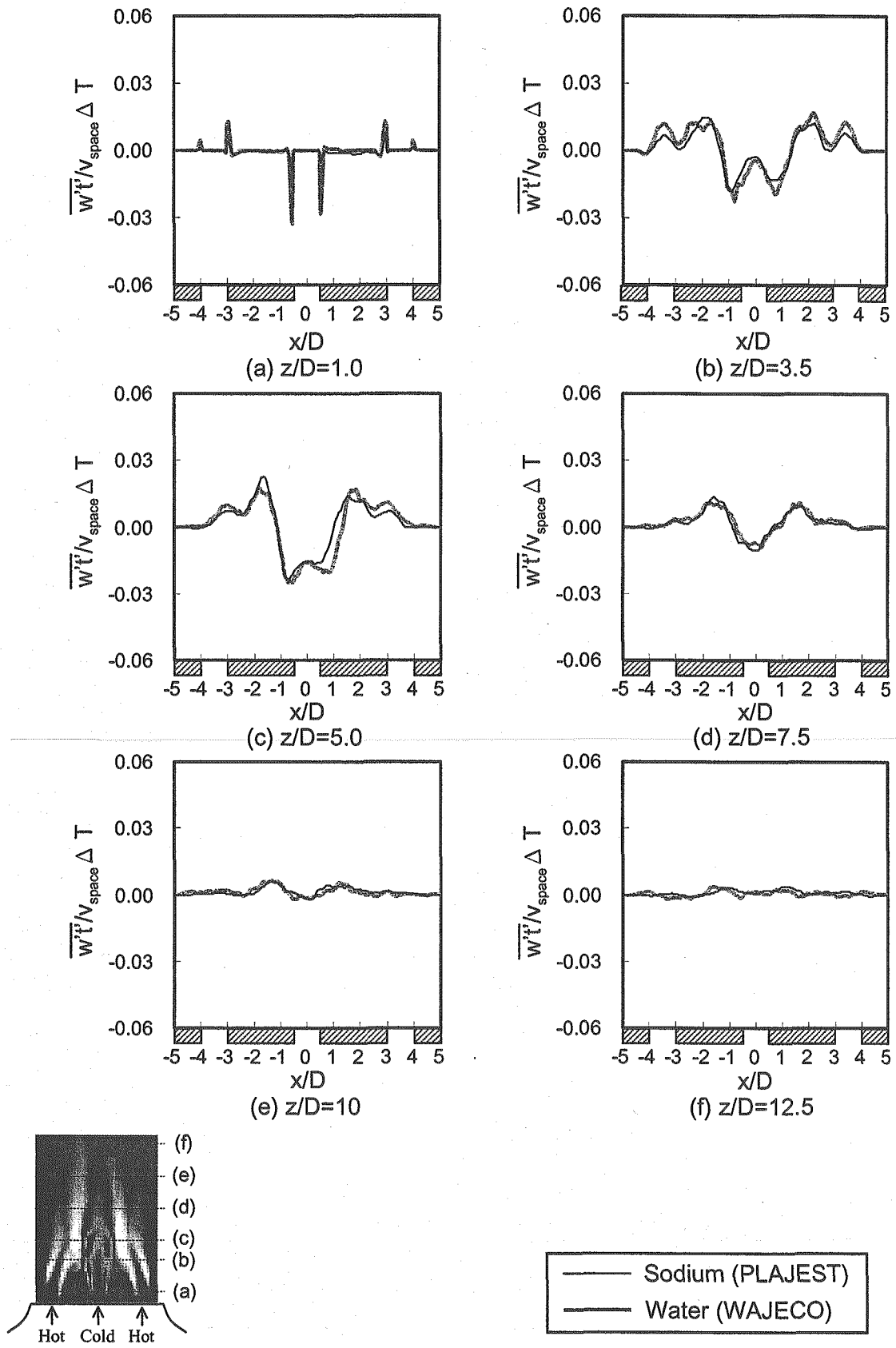


Fig.5.5.11 Comparisons of Vertical Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.5$ )

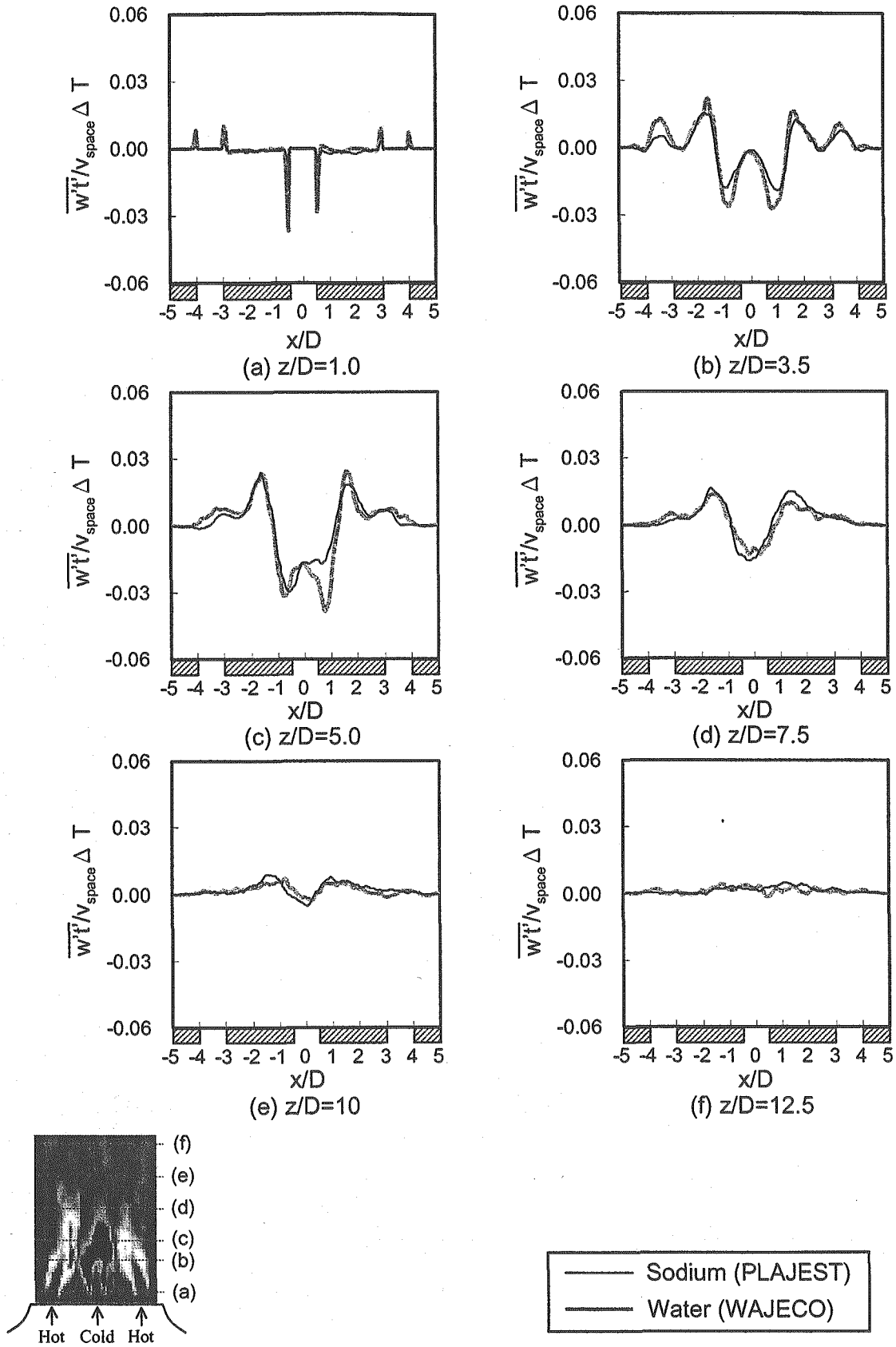


Fig.5.5.12 Comparisons of Vertical Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.2$ )

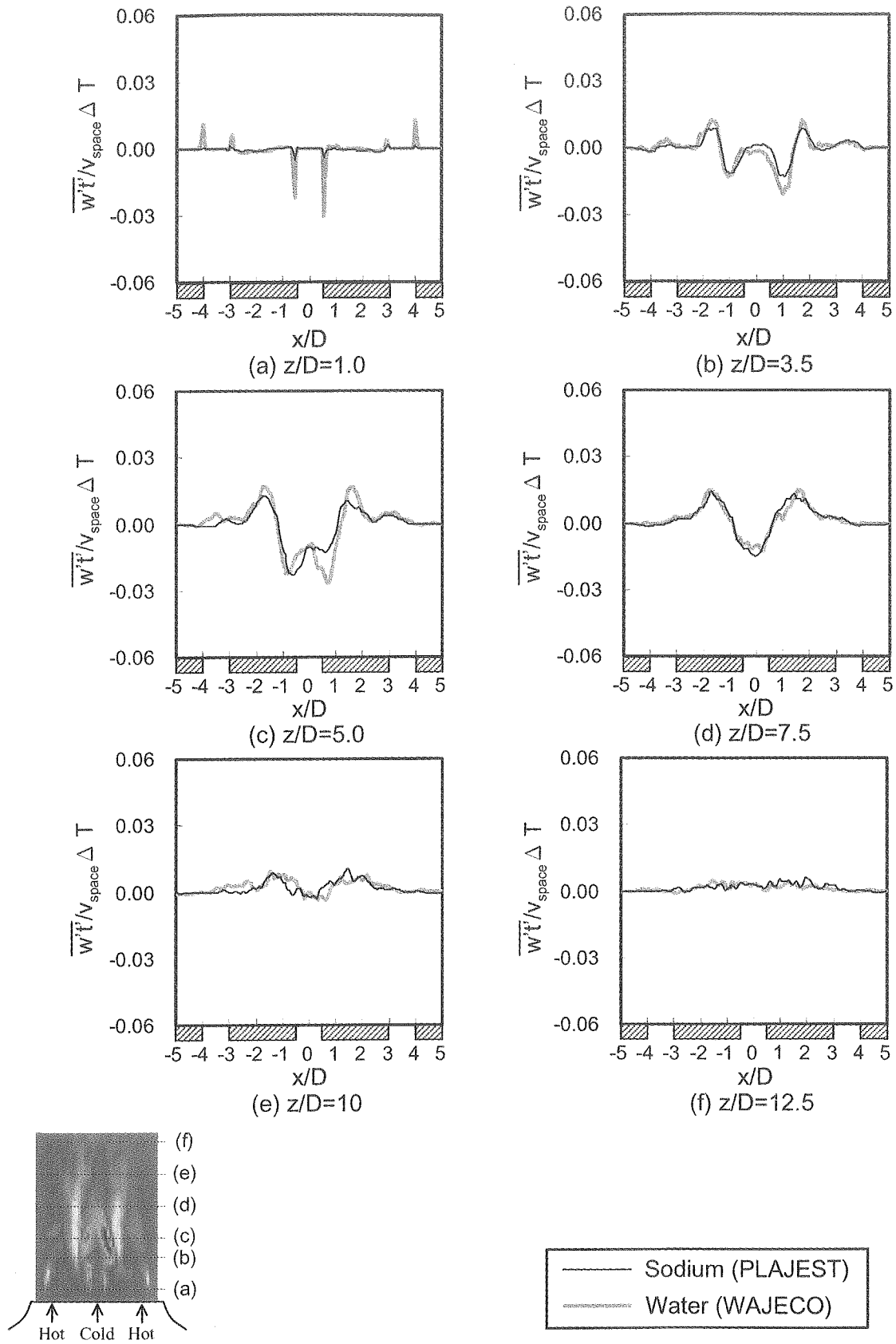
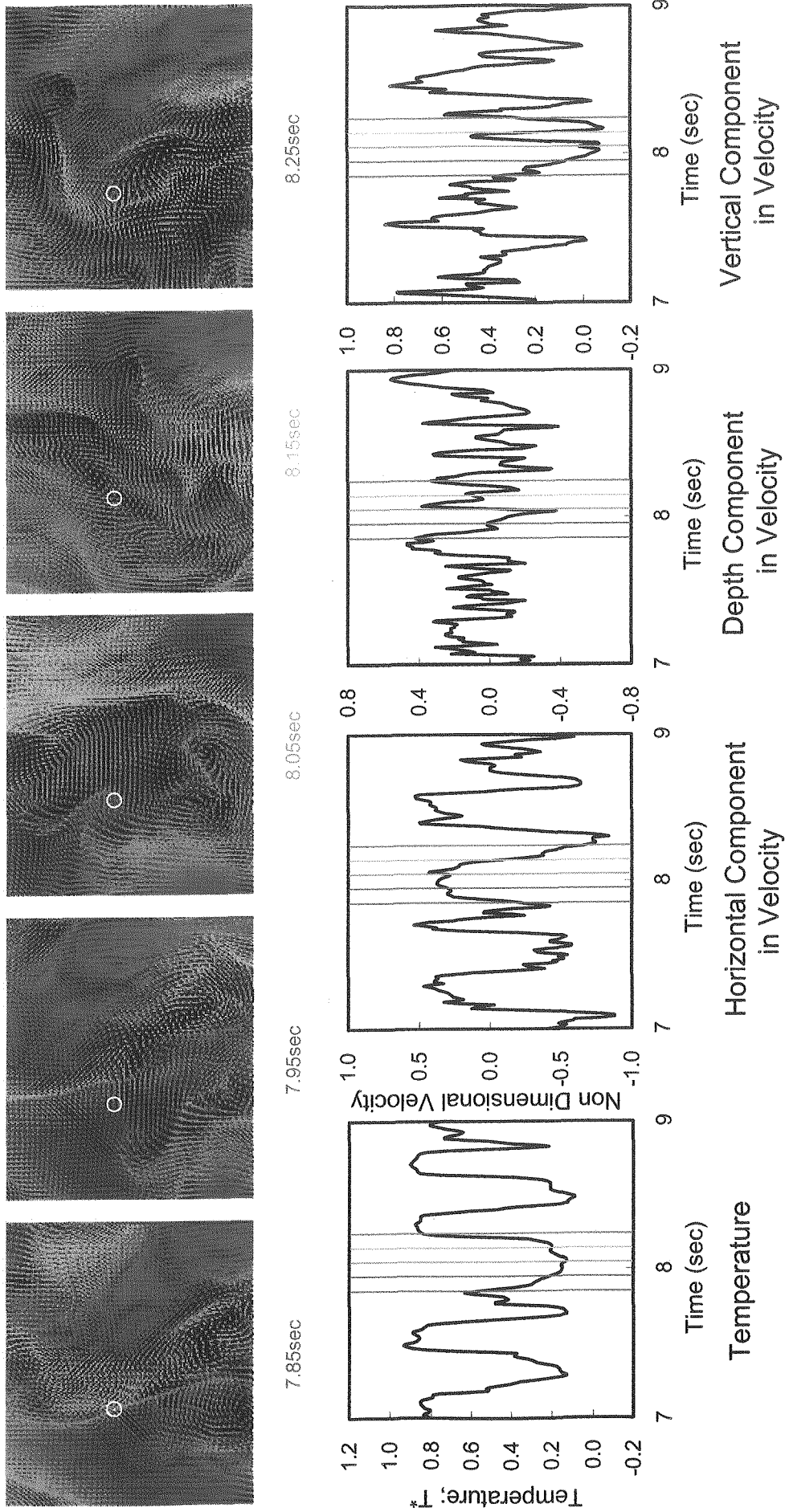


Fig.5.5.13 Comparisons of Vertical Turbulent Heat Fluxes Distributions in Horizontal Direction between Sodium and Water Condition. ( $y/D=0.05$ )



Sodium (PLAJEST)  $y/D=4.5$

Fig.5.6.1 Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Point in Sodium Calculation ( $y/D=4.5$ ).



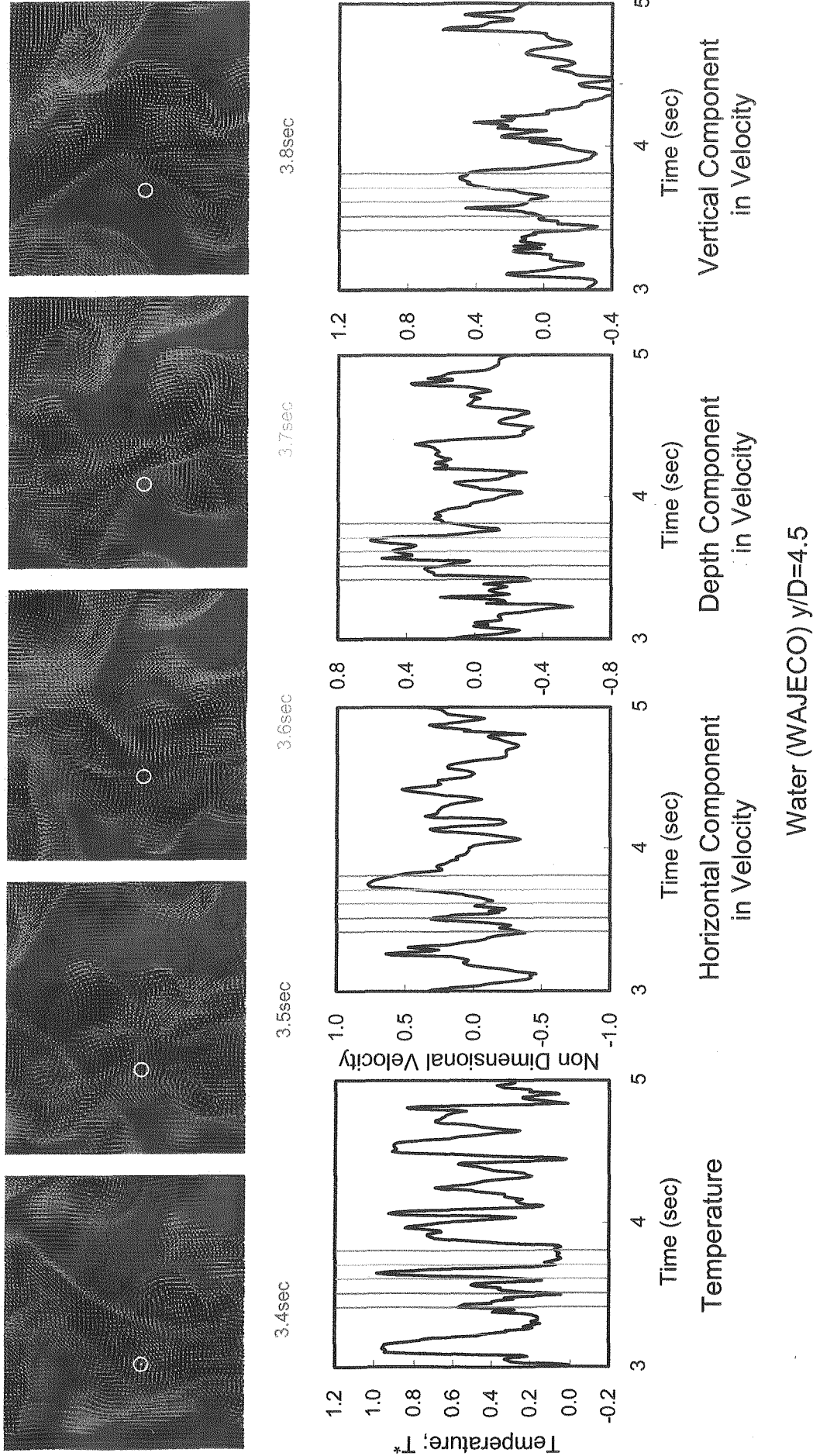


Fig.5.6.2 Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Point in Water Calculation ( $y/D=4.5$ ).

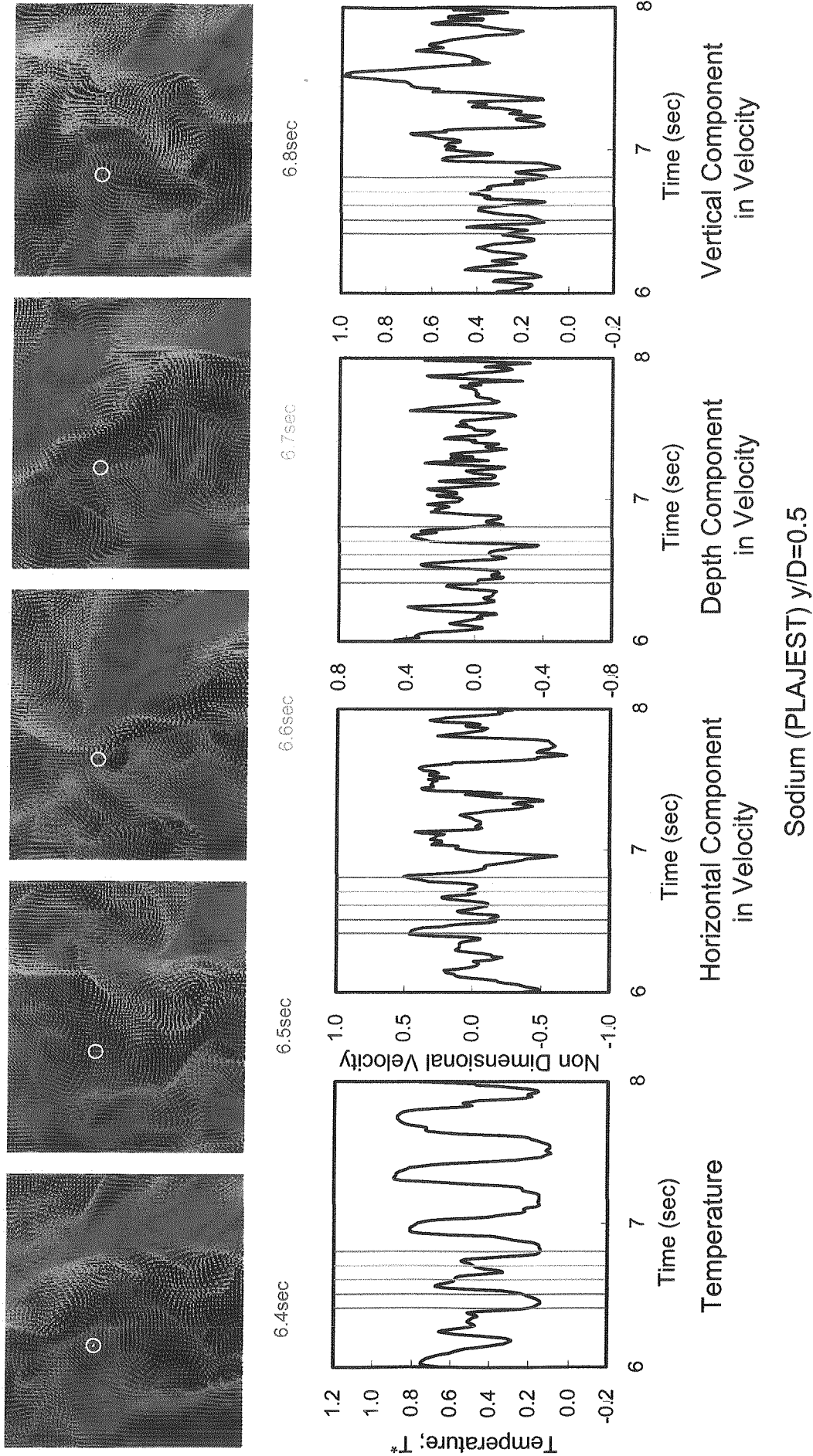


Fig.5.6.3 Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Point in Sodium Calculation ( $x/D=0.5$ ).

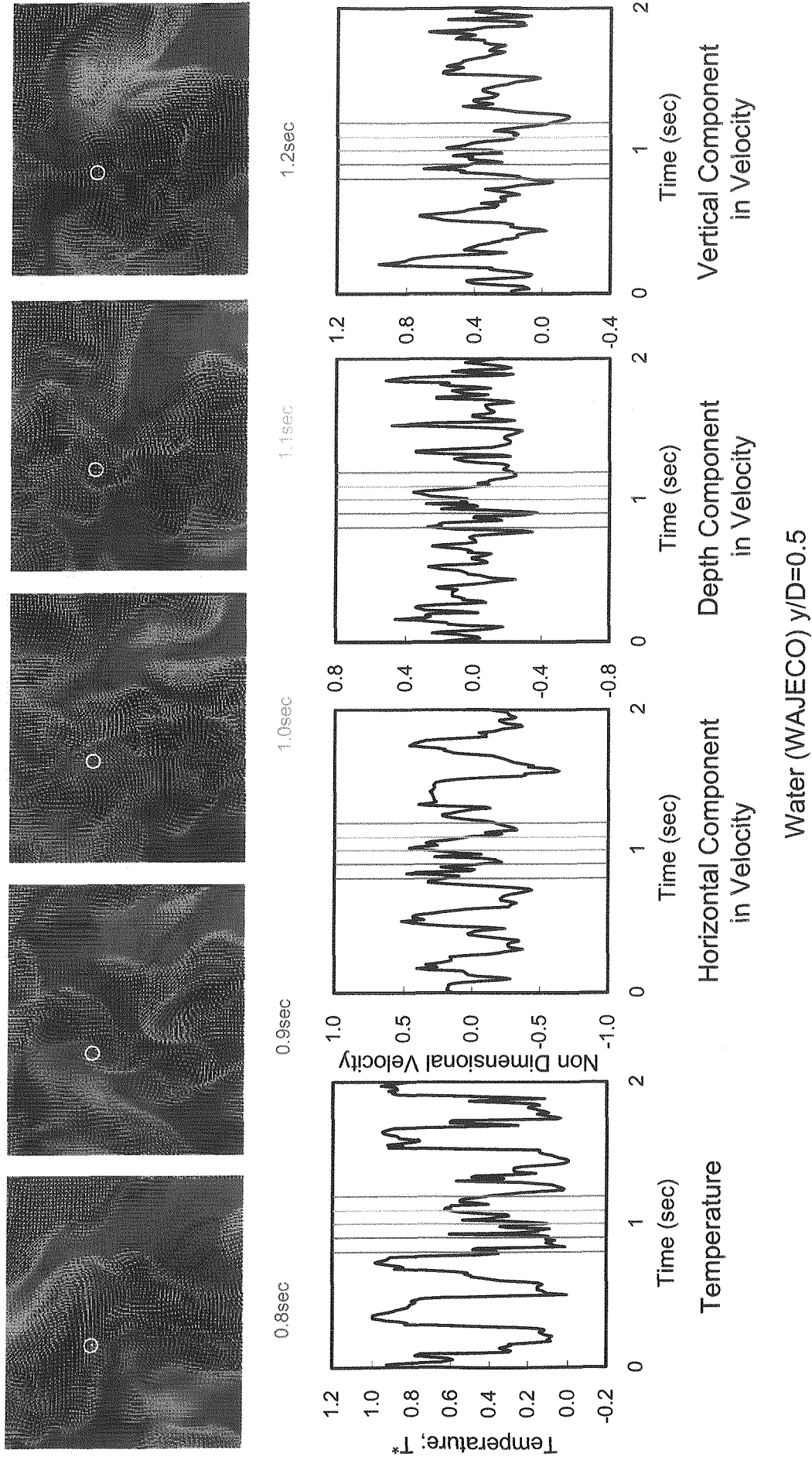


Fig.5.6.4 Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Point in Water Calculation ( $x/D=0.5$ ).

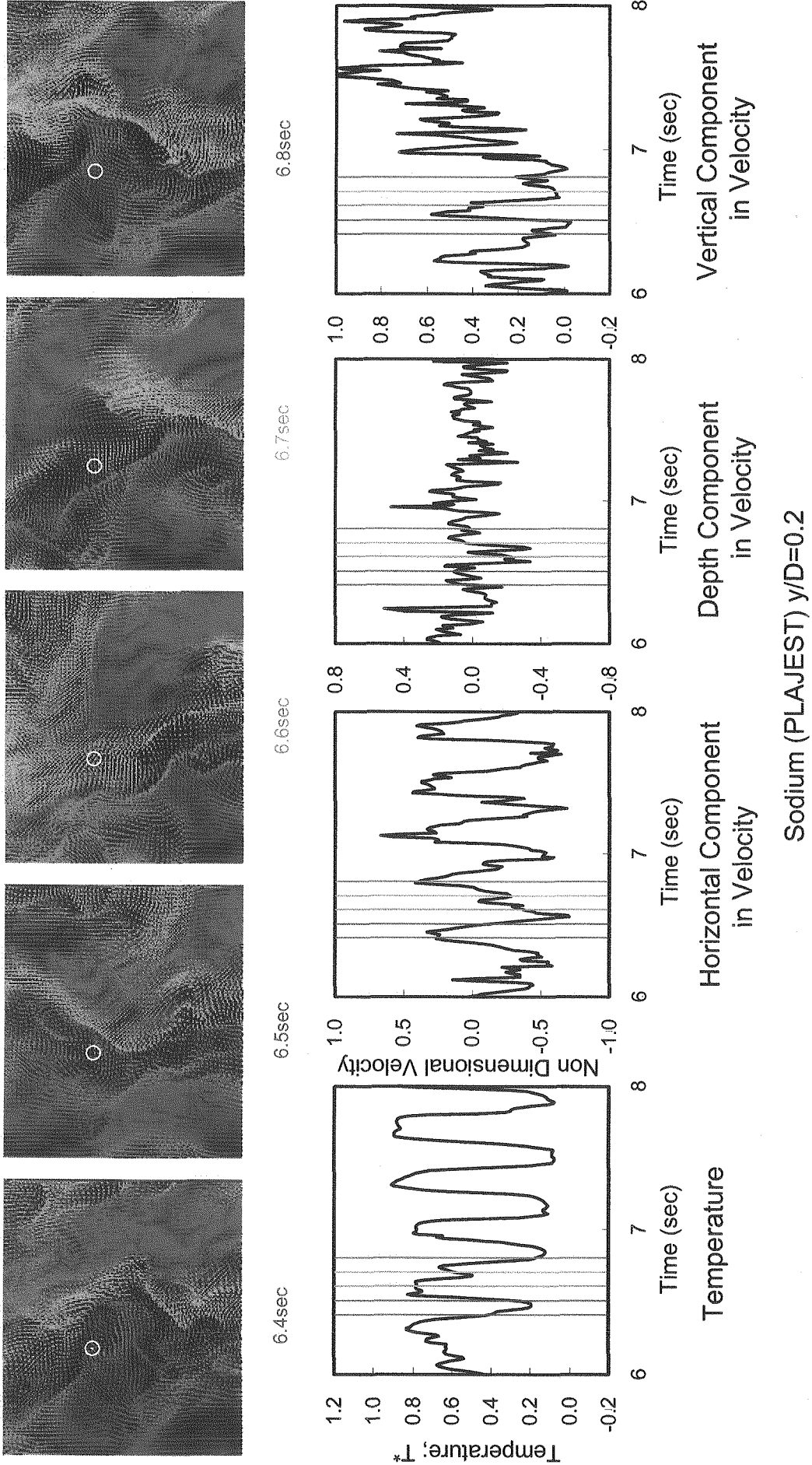


Fig.5.6.5 Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Point in Sodium Calculation ( $x/D=0.2$ ).

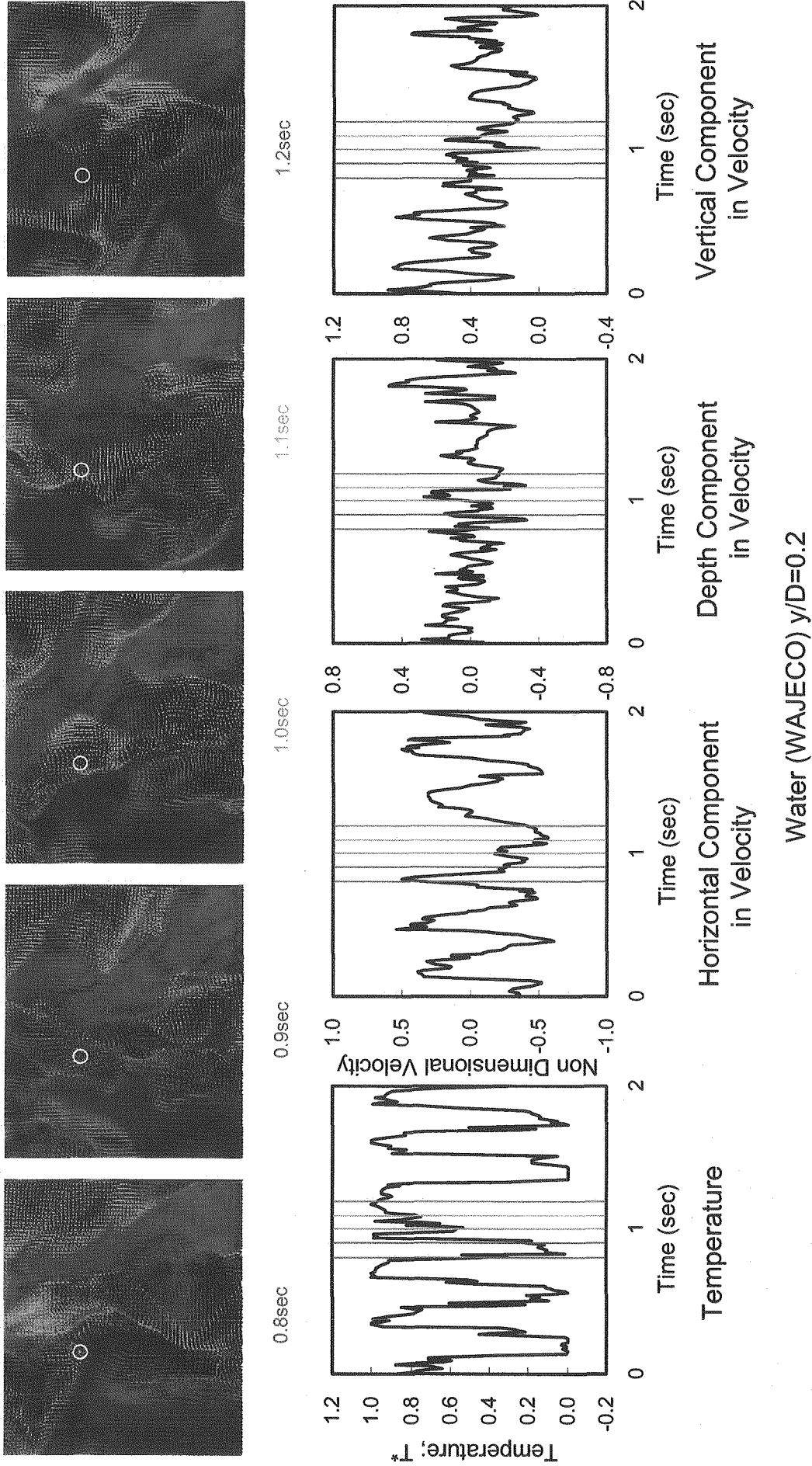


Fig.5.6.6 Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Point in Water Calculation ( $x/D=0.2$ ).

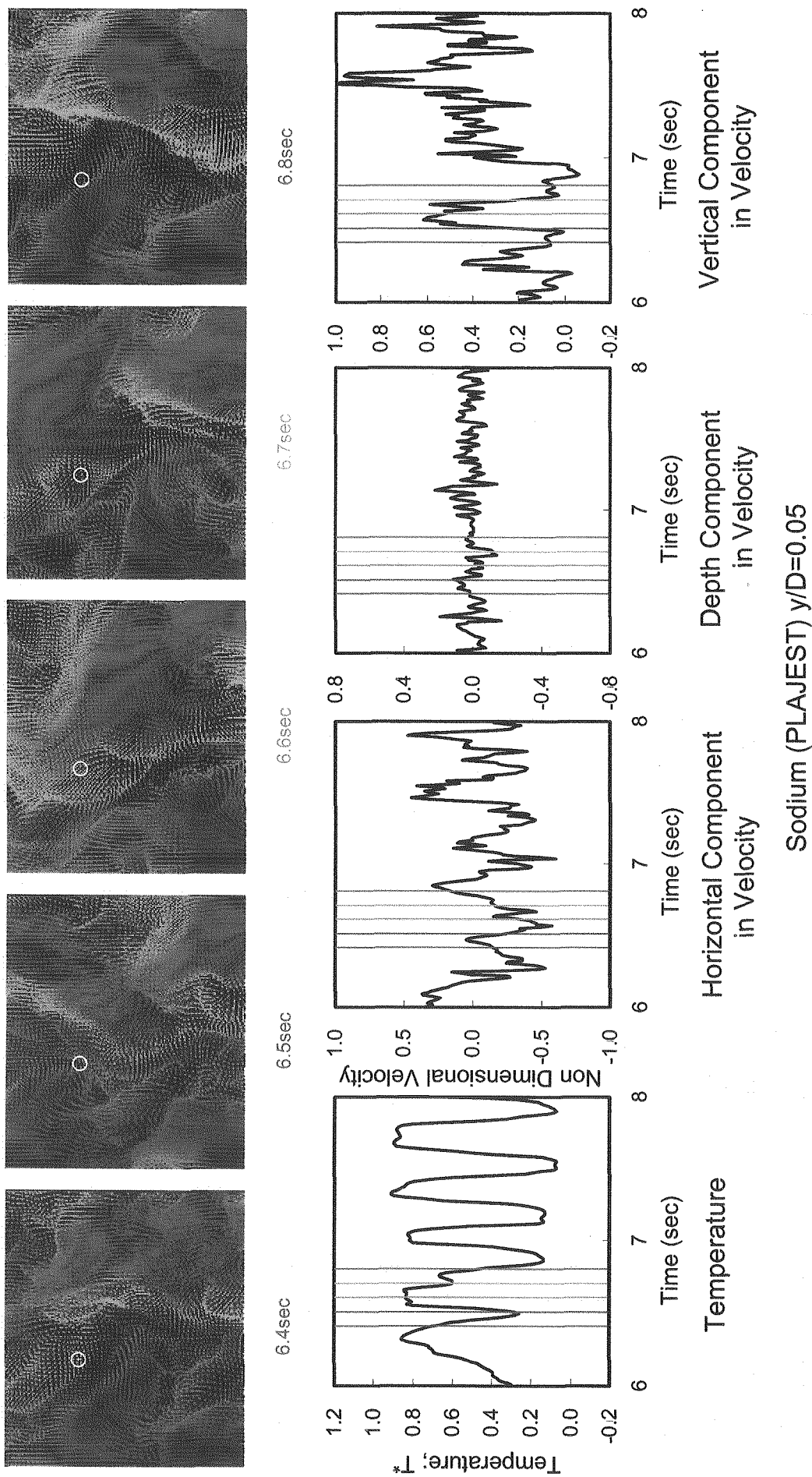


Fig.5.6.7 Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Point in Sodium Calculation ( $x/D=0.05$ ).

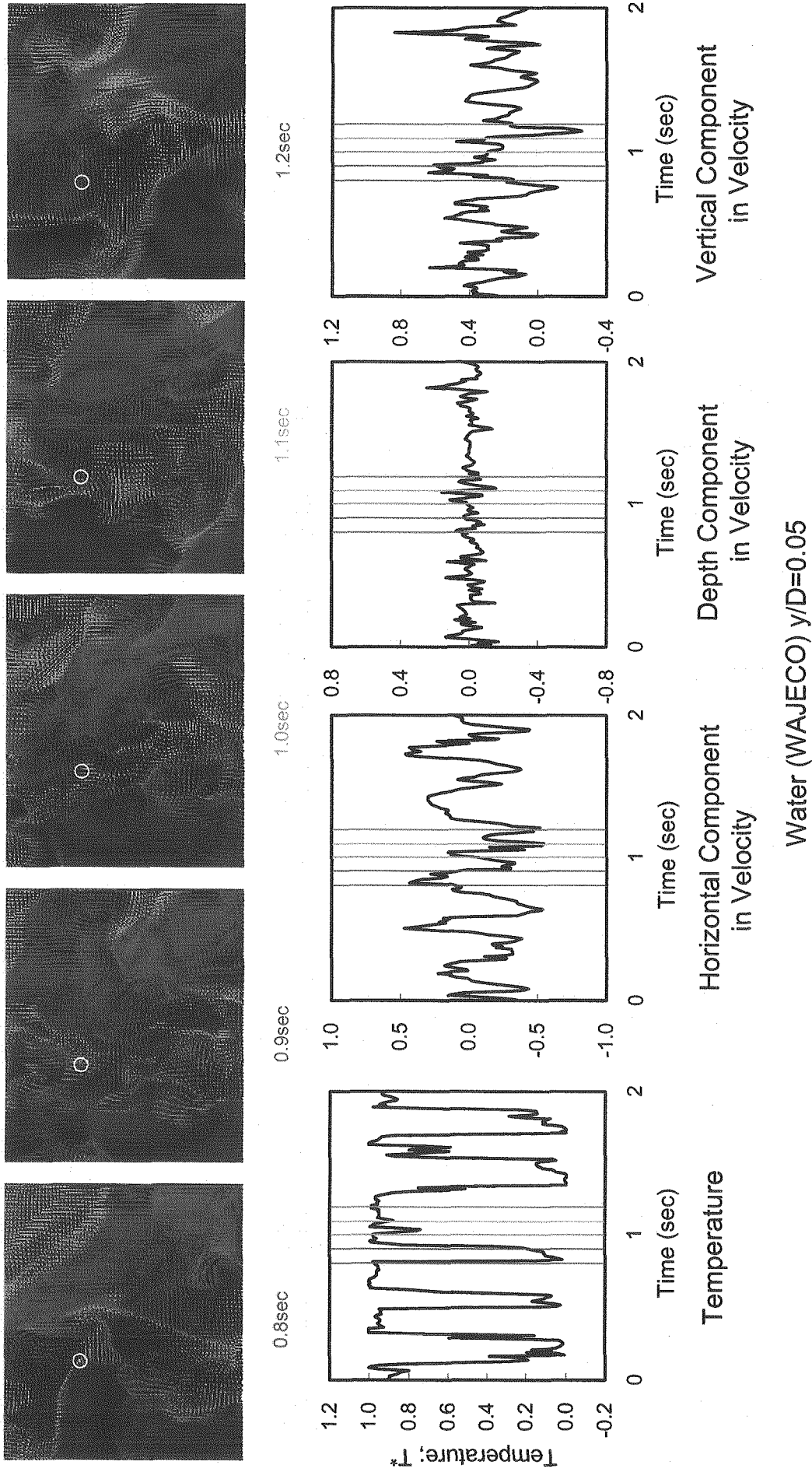


Fig.5.6.8 Instantaneous Velocity and Temperature Fields including Maximum Temperature Point in Water Calculation ( $x/D=0.05$ ).

Measured Position: Maximum Temperature Fluctuation Intensity

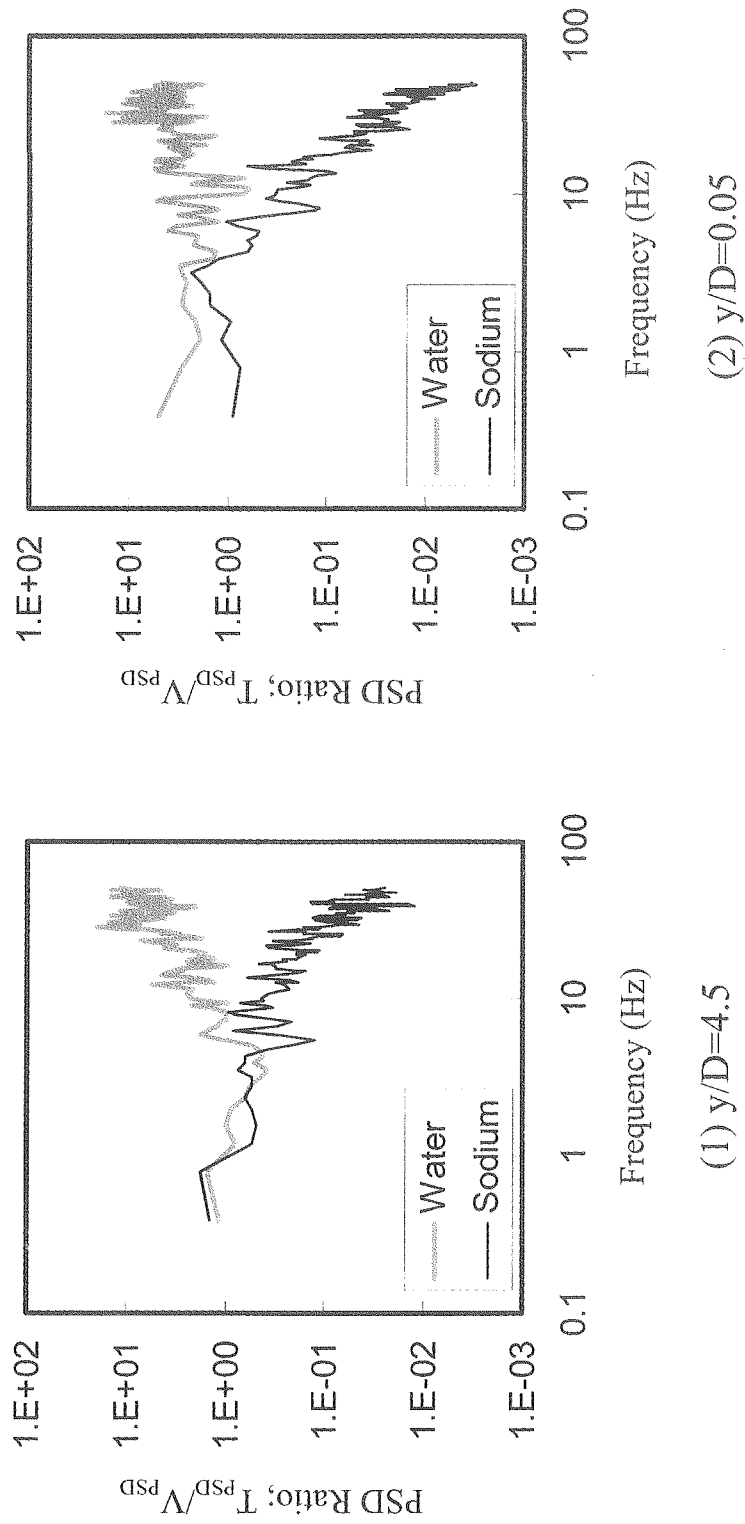


Fig. 5.6.9 Comparisons of PSD Ratio of Temperature to Horizontal Velocity between Sodium and Water Condition.