

サーマルストライピング現象の熱流動  
に関する研究  
—DNSを用いた平行三噴流ナトリウム試験解析—  
(研究報告)

2002年10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

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)

2002

サーマルストライピング現象の熱流動に関する研究  
—DNS を用いた平行三噴流ナトリウム試験解析—  
(研究報告書)

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

## 要旨

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

流体中での温度変動特性が構造材表面へ達する過程において、流体混合により発生した温度変動が、構造材近傍に存在する流体の速度／温度境界層により、変化することが考えられる。そこで、本研究では、流体の速度境界層における温度変動挙動の変化を明らかにするために、構造物の熱容量による温度変動の減衰効果を切り離し、境界層による挙動の変化のみに着目した DNS 解析を実施した。本解析は、3 本の噴流を平行に設置し、鉛直に吐出する平行三噴流ナトリウム試験に対して実施した。中央の噴流を低温、左右の噴流を高温に設定し、3 つの噴流の吐出速度が 0.5m/s で等しい条件について実施した。

本解析結果と実験結果を比較すると、壁面から離れた位置では時間平均温度場および温度変動のスペクトル密度はよく一致しており、本解析により実験の温度／速度場を良好に模擬できていることがわかった。実験では壁面近傍で温度変動強度が小さくなるのに対し、解析では壁面近傍での温度変動強度の減衰は見られなかった。すなわち、Na 体系では流体の速度境界層による温度変動の減衰効果はごく小さい。壁面のごく近傍における流体の温度変動強度は、壁（構造材）との熱的相互作用により減衰することが示され、現象を評価する上でその考慮が重要である。また、解析結果より乱流 2 次モーメントを求め、壁面の摩擦による影響を評価した。

本報告書には、(株)エヌデーデーおよび原子力システム(株)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>原子力システム株式会社

<sup>3)</sup>株式会社エヌデーデー

**Study on Thermalhydraulics in Thermal Striping Phenomena**  
**- Experimental Analysis of Sodium Parallel Triple-Jet using DNS -**  
(Research Report)

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

**ABSTRACT**

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

The reasonable and safety design could be approved by taking account of decay of temperature fluctuation in fluid, during heat transfer from fluid to structural surface and thermal conduction in the structure.

Temperature fluctuation characteristics due to convective mixing will be influenced by the velocity/temperature boundary layers near the structure. In this study, an experimental analysis was performed using DNS in order to separate influence of heat capacity of the structure and to evaluate an attenuation due to the boundary layer near the wall surface for a sodium experiment of parallel triple jets configuration. In the experiment, a cold jet on center and hot jets on both sides flowed vertically and along the wall, and the discharged velocities of triple jets were 0.5m/s equally.

The calculated temperature field was in good agreement with the experimental result at further position from the wall surface, including the power spectrum density of the temperature fluctuation. On the other hand, at near position from the wall surface, calculated temperature fluctuation intensity was not attenuated whereas the experimental intensity was decreased. This means that the intensity of temperature fluctuation is not decreased by the boundary layer. Thermal interaction between fluid and the wall will decrease the temperature fluctuation intensity in the fluid near the wall. The effect of wall friction on second moments of turbulence was evaluated

- 
- 1) Japan Nuclear Cycle development Institute, O-arai Engineering Center, Advanced Technology Division, New Technology Development Group
  - 2) Nuclear Energy System Incorporation
  - 3) NDD

## 目次

1. 序論	1
2. 実験	2
2.1 実験装置	2
2.2 実験条件	3
2.3 実験方法	4
3. 数値解析	6
3.1 解析コードの概要	6
3.2 解析体系	6
3.3 境界条件	6
3.4 解析手順	7
4. 解析結果	8
4.1 時間平均温度場における DNS の模擬性	8
4.2 温度変動挙動における DNS の模擬性	9
5. 考察	11
5.1 乱流 2 次モーメントに対する壁面の影響	11
5.2 乱流熱流束に対する壁面の影響	12
6. 結論	14
謝辞	15
参考文献	16

## 記号表

D :	スリット幅	(=0.02m)
g :	重力加速度	(=9.81m/s <sup>2</sup> )
N :	時系列データ数	
Pe :	Peclet 数	
Pr :	Prandtl 数	
Re :	Reynolds 数	
T :	噴流吐出温度	( <sup>0</sup> C)
T <sub>RMS</sub> :	温度変動強度	( <sup>0</sup> C)
T' :	温度変動	( <sup>0</sup> C)
u' :	水平方向流速の変動成分	(m/s)
V :	吐出速度	(m/s)
v' :	奥行き方向流速の変動成分	(m/s)
w' :	鉛直方向流速の変動成分	(m/s)
x :	水平方向位置	(m)
y :	奥行き方向位置	(m)
z :	鉛直方向位置	(m)
$\alpha$ :	温度伝導率	(m <sup>2</sup> /s)
$\Delta T$ :	噴流吐出温度差	( <sup>0</sup> C)
$\nu$ :	動粘性係数	(m <sup>2</sup> /s)

## 上添字

\* : 噴流吐出条件 ( $\Delta T$  または V) で規格化

## 下添字

avg :	時間平均
c :	高温噴流
h :	高温噴流
space :	噴流吐出速度の空間平均

## 表リスト

- Table 3.1 Numerical Methods used in Experimental Analysis.  
Table 3.2 Number of Calculated Meshes in Analysis.

## 図リスト

- Fig. 2.1.1 Experimental Loop.  
Fig. 2.1.2 Test Plenum.  
Fig. 2.1.3 Discharged Nozzles of Triple Jets.  
Fig. 2.1.4 Arrangement of Thermocouples in Test Plate for Thermal Response.  
Fig. 2.1.5 Movable Thermocouples Tree.  
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 Contours of Temperature Fluctuation Intensity between Experimental and Numerical Results.  
Fig. 4.1.3 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )  
Fig. 4.1.4 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.025$ )  
Fig. 4.1.5 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )  
Fig. 4.1.6 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.025$ )  
Fig. 4.1.7 Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D=-0.75$ )  
Fig. 4.1.8 Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D=0.5$ )

- Fig. 4.1.9 Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D=2.0$ )
- Fig. 4.1.10 Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D=3.0$ )
- Fig. 4.2.1 Comparisons of Contours of Peak-to-Peak Values based on Rain-flow Method between Experimental and Numerical Results.
- Fig. 4.2.2 Comparisons of Temperature Trends between Experimental and Numerical Results.
- Fig. 4.2.3 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation between Experimental and Numerical Results.
- Fig. 5.1.1 Effect of Wall on Time-Averaged Velocity Vectors.
- Fig. 5.1.2 Effect of Wall on Contours of Normal Components of Second Moments in Turbulence.
- Fig. 5.1.3 Effect of Wall on Contours of Shear Components of Second Moments in Turbulence.
- Fig. 5.1.4 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence.
- Fig. 5.1.5 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Depth Normal Components of Second Moments in Turbulence.
- Fig. 5.1.6 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence.
- Fig. 5.1.7 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Depth Directions in Turbulence.
- Fig. 5.1.8 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Shear Components of Second Moments in between Depth and Vertical Directions in Turbulence.
- Fig. 5.1.9 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Shear Components of Second Moments in between Vertical and Horizontal Directions in Turbulence.
- Fig. 5.1.10 Effect of Wall on Second Moments in Turbulence.
- Fig. 5.2.1 Effect of Wall on Contours of Turbulent Heat Fluxes.
- Fig. 5.2.2 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Horizontal Turbulent Heat Fluxes.

- Fig. 5.2.3 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Depth Turbulent Heat Fluxes.
- Fig. 5.2.4 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Vertical Turbulent Heat Fluxes.
- Fig .5.2.5 Effect of Wall on Turbulent Heat Fluxes.

## 1. 序論

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

流体中で発生する温度変動挙動は、流体の混合体系、フローパターン、混合前の流速等に影響される。構造材に温度変動が到達する過程で、流体中に生じた温度変動は、構造材近傍の境界層内で、温度変動の周波数や振幅が変化すると考えられる。また、温度変動が流体から構造材表面へ伝達する過程では、温度変動の周波数・振幅が、流体速度、構造材の物性（熱伝導率、比熱、熱拡散率など）の影響を受けて、変化する。さらに構造材内部に伝わる過程では、構造材の物性により温度変動特性が変化する。その結果、構造材中の温度分布が時間的に変化することにより、構造材に繰り返し熱応力が発生する。構造材内の熱応力は、流体中の温度変動のある周波数において、極大となると考えられる<sup>[7]</sup>。構造材の熱応力に感度のある温度変動の周波数は、構造材の熱拡散率と肉厚に依存する。構造材表面の温度変動が既知であるとすると、面内に温度分布がない場合は板厚方向の一次元非定常熱伝導方程式、3 次元の温度分布は FEM 解析で求めた構造材内部の温度分布を基に、構造材の熱応力を求めることができる。しかしながら、流体から構造材へ温度変動が伝わる場合、流体と構造材の接触面での熱伝達過程を明らかにする必要がある<sup>[8]</sup>。

核燃料サイクル開発機構では、本現象に対して、流体から構造まで一貫して評価可能な非定常熱的応答挙動の解析評価システムの構築を行っている<sup>[9]-[11]</sup>。また、本現象への実験的なアプローチとして、実機の配管合流部を模擬した水試験を実施しており、配管の流速比をパラメータとしたフローパターンの違い、および温度変動の発生挙動について明らかにしている<sup>[12]-[13]</sup>。さらに、水を作動流体とした平行スリットからの 3 本鉛直噴流試験装置（WAJECO）を用い、自由噴流体系（WAJECO-I）および噴流の流れ方向と平行に壁面を設けた壁噴流体系（WAJECO-II）による噴流間の流体混合挙動評価を行っている<sup>[14]-[20]</sup>。また、WAJECO-II と同体系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非定常熱伝達挙動を時間的に一定の熱伝達率を用いて評価できることを明らかにした<sup>[21]-[22]</sup>。

本報では、PLAJEST 試験に対して、構造材の熱容量による温度変動の減衰効果と速度／温度境界層による温度変動の減衰効果とを分離するために構造材表面を断熱と仮定した条件下で、準直接シミュレーションコード DINUS-3<sup>[9]</sup>を用いた多次元熱流動解析を実施し、構造材近傍の速度／温度境界層による流体中の温度変動挙動の評価を行うことを目的とした。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

Fig. 2.1.1 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。3 系統にはそれぞれ電磁流量計、流量調節弁が設置されており、試験容器に流入するナトリウム流量を所定値に設定することができる。試験ループの配管径は 3B あるいは 4B である。各機器は、デジタル計測制御システムにより集中コントロールされている。

Fig. 2.1.2 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。各構成要素の詳細については後述する。

試験容器に流入したナトリウムは、熱応答供試板と SUS316 製仕切板に挟まれた噴流吐出ノズルにより 3 本の矩形噴流となり、試験容器内に吐出する。3 本の矩形噴流は中央が低温、左右が高温の噴流となっている。3 本の噴流は熱応答供試板に沿って鉛直上向き方向に流れ、噴流間の流体混合を生じた後、試験容器と内筒の隙間を下降し、2 方向に設けた出口配管より流出する。

Fig. 2.1.3 に噴流吐出ノズルの概略を示す。ノズルは、熱膨張を吸収するために設けた接続用ノズルを介して試験容器に挿入された配管に接続されている。配管からノズルに流入したナトリウムは、バッファチャンバ、バッフル板を通り、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。ノズルの形状は、20mm × 180mm であり、水力等価直径は 36mm である。ノズルから吐出した流体は、熱応答供試板と仕切板で挟まれた領域を鉛直上方に流れる。ノズルの出口を四分円で絞ることにより、試験容器内にはほぼ一様流速で流入させることができる。また、バッファチャンバには気泡発生器が設置されており、微小気泡をトレーサとして利用することにより、超音波流速計の適用が可能な構造となっている。3 本の噴流吐出ノズルの間は、試験容器流入前に噴流間の温度差が小さくならないように、SUS 製のサーマルライナを設けてある。しかしながら、実験ではノズルに入る前の高温／低温の温度差が、特に低流量条件においてノズル中で大きく低下することが確認された。そこで、噴流が吐出する直前の位置に設けた熱電対により、試験容器に吐出する各噴流の温度を計測し、これを噴流間の吐出温度差とした。

Fig. 2.1.4 に熱応答供試板に埋め込んだ熱電対の配置を示す。熱応答供試板は、横 500mm × 高さ 600mm の SUS316 製であり、板厚は 12mm である。熱応答供試板中に埋め込んだ熱電対は、K 型非接地のシース外径 0.5mm であり、シース材質は SUS316 である。噴流吐出ノズルと熱応答供試板は一つの治具に取り

付けており、相対位置が変化しないようにしているとともに、噴流吐出ノズルと熱応答供試板の継ぎ目に段差が生じないようにしている。水試験(WAJECO)で得られた噴流間の流体混合が活発である領域を基にして熱電対の配置を決定した。熱電対は、板厚方向に噴流側の面(表)より 0.25mm 深さの位置に 26 点、1.5mm の位置に 14 点、2mm の位置に 5 点、11.75mm(裏面より 0.25mm)の位置に 5 点の計 50 点設置した。

熱電対の取り付け方法は以下の通りである。板厚 14mm(最終的に表面側を 2mm 削る)の熱応答供試板に、45° の角度で貫通孔(径 0.6mm)を開ける。その際に、供試板の内部に設置する熱電対(板表面より 1.5mm および 2mm)に関しては、貫通孔の中心が計測する位置を通過するようとする。板表面より 0.25mm の熱電対に関しては、計測位置より 2mm 程度ずらした位置に貫通孔を開ける。熱電対に関して、通常の非接地型熱電対は、熱接点よりシース先端までは 0.5~1mm 程度であるが、ここでは熱接点よりシース先端までを 2~3mm 程度の熱電対を作成し、事前にシース先端から熱接点までの位置を X 線撮影により測定する。板表面より 1.5mm および 2mm 内面の熱電対は、熱接点の位置が所定の計測位置に設置されるようにシース先端を板表面より突起させて固定し、最後に余分なシース先端とともに板表面を 2mm 削る。板表面・裏面より 0.25mm の位置の熱電対は、シース外径と同等の溝を加工し、その中を板面に沿わせ、ポンチでカシメて固定する。板表面より 0.25mm 内側の位置は、シースの中心(その位置に熱接点がある)に相当する。貫通孔(0.6mm)と熱電対シース外径(0.5mm)の隙間にはナトリウムが浸入し、不要な熱抵抗が発生しない構造とした。

45° の角度で供試板中に熱電対を取り付け、各温度計測位置の板厚方向には貫通孔などの熱抵抗を発生させる要因を排除することにより、ほぼ同一点での板厚方向の温度計測が可能となる。

Fig. 2.1.5 に熱電対ツリーの概略を示す。熱応答供試板表面から板の法線方向(奥行き方向)に 0.5mm、10mm、40mm、90mm の位置に各 25 本ずつ熱電対が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付近は 5mm 間隔、それ以外は 10mm 間隔で設置されている。熱電対は、K 型非接地タイプで、シース外径 0.3mm および 0.5mm である。熱電対は流線型のステイより長さ 55mm、外径 1mm の SUS 製保護管の中を通り、先端の 5mm のみ流体中に置かれている。熱電対のシースはステイ、支持管を通り、試験容器外へ取り出される。

熱電対ツリーは、上下に移動することができ、任意の位置でデータを収録することにより流体中の温度を計測することができる。上下移動時に熱電対ツリーと熱応答供試板の間隔を一定に保つ必要があることから、熱電対ツリーから熱応答供試板に軸の固定された車輪を出し、ノズルを挟むもう一枚の板(仕切板)側に軸にバネのついた車輪を押しつける構造とした。

## 2.2 実験条件

以下に実験条件を示す。本実験は、3 本の噴流の吐出流速を等速(0.5m/s)と

し、両側の高温噴流と中央の低温噴流の吐出温度差を 40°Cとした条件で行った。

#### 周辺（高温）噴流

吐出流速 : 0.5m/s

吐出流速 : 350°C

#### 中心（低温）噴流

吐出流速 : 0.5m/s

吐出流速 : 310°C

本体系における噴流吐出口での Reynolds 数、Peclet 数は以下の定義に基づく。

$$Re_h = \frac{V_h D}{\nu} = 2.8 \times 10^4 \quad (2.1)$$

$$Re_c = \frac{V_c D}{\nu} = 2.6 \times 10^4 \quad (2.2)$$

$$Pe_h = Re_h Pr_h = \frac{V_h D}{a} = 1.6 \times 10^2 \quad (2.3)$$

$$Pe_c = Re_c Pr_c = \frac{V_c D}{a} = 1.6 \times 10^2 \quad (2.4)$$

ここで、代表長さ  $D$  は噴流吐出口のスリット幅 (20mm) とした。また、 $\nu$ 、 $a$  は各ノズルの吐出温度での値を用いた。

### 2.3 実験方法

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 200 倍に増幅し、電源ノイズ等を消去するための 40Hz のローパスフィルタを通した後に、16bit の AD 変換ロガーにより収録を行った。その他の物理量(流量、Na 液位計、カバーガス圧力)は直接ロガーへ接続して収録した。

主循環系電磁流量計、および 3 本の噴流に対応する配管に接続された電磁流量計は、試験容器からの落下法により絶対校正を行った。

熱電対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、各ノズルに取り付けられた 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。上記 3 本の熱電対については、装置に取り付ける前に起電力の絶対校正を行っている。

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、噴流吐出口高さ 10mm、20mm、…、500mm(最上部位置)と 10mm ピッチで熱電対ツリーを上昇させ、各位置で熱電対ツリー、熱応答供試板、噴流吐出口温度、およびプロセス量を取得した。各位置でのデータは、10ms

(=100Hz サンプリング) 間隔で 20000 点 (=200s) 収録した。

### 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定量的に把握する事が必要である。

温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り、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ある程度求めることができるが、乱流に起因する高周波数の温度変動成分は時間平均の統計量として評価され、時系列や変動振幅を直接求めるすることはできない。

そこで、温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<sup>[9]</sup>を用いて実施した。

#### 3.1 解析コードの概要

DINUS-3 は、空間に関して 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 Table3.1 に示す。

#### 3.2 解析体系

Table 3.2、Fig. 3.1 に解析メッシュの概要およびメッシュ図を示す。

解析範囲は、水平方向 410mm、鉛直方向 401mm とし、奥行き方向を熱応答供試板表面より 14mm とした。水平方向の解析領域は、試験体下部の 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 ±80mm を水平方向に 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。噴流吐出ノズルから乱流速度境界層が平板に沿って発達する場合、実験から得られた流体混合が活発に発生するノズル高さから 100mm の位置では、速度境界層厚さが 4mm 強になることから、その範囲を 6 メッシュ程度に分割した。

本解析モデルの固体領域を含む解析メッシュ数は、 $230 \times 11 \times 226$  ( $x \times y \times z$ ) であり、代表的なメッシュ幅は  $1\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 1\text{mm}$  角である。

#### 3.3 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、ストレーナーの役割をもたせるように出口境界面の法線方向に 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ダミーセルを設定した。

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ノンスリップ境界、階段状にモデル化した傾斜部をフリースリップ境界に設定した。熱応答供試板の壁面に関しては、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ノンスリップ境界、構造材の熱容量の影響を排除するために熱的境界を断熱境界に設定した。

### 3.4 解析手順

本解析では、高温流体と低温流体が混合する際、流動不安定から生じる熱輸送が活発に行われることが予測される。そのため、計算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 等温の流れ場を 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 非等温、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)

- ④ 高次差分に切り換えて流れ場を解く。

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)

- ③ 高次差分による過渡計算の実行

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)

- ④ 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)

本解析は、富士通製のベクトル計算機 vpp300 にて実施し、シミュレーション時間 1 秒を計算するのに要する時間は、約 8 日であった。

## 4. 解析結果

### 4.1 時間平均温度場における DNS の模擬性

Fig. 4.1.1～4.1.2 に実験および解析によって得られた奥行き方向位置  $y/D=0.025$  (壁面から 0.5mm の位置)、 $y/D=0.5$  (壁面から 10mm の位置) での時間平均温度センターおよび時間平均温度変動強度センターの比較を示す。

実験の温度計測は、200 秒間、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 :  $y$ )、噴流吐出口高さ (鉛直方向 :  $z$ ) とした。各位置は、噴流吐出口のノズル幅 ( $D=20\text{mm}$ ) 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  $\phi 0.5\text{mm}$  の熱電対の時定数(30ms)に相当する一次遅れを加えて評価した。

時間平均温度は、以下に示す式で無次元化を行った。

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

時間平均温度に関して、DNS の解析は、奥行き方向位置  $y/D=0.025$ 、 $y/D=0.5$  とも、低温、高温噴流の占める領域 (各噴流の核)、および下流域の温度場が概ね実験結果と一致している。

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。

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

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。

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

時間平均温度変動強度に関して、DNS の解析は、奥行き方向位置  $y/D=0.025$ 、 $y/D=0.5$  とも、実験結果と比べて温度変動の大きい領域の広がりが大きくなっているが、概ね分布形状は一致していることがわかる。ただし、実験では、壁面近傍  $y/D=0.025$  の位置では、ノズルの熱容量の影響で噴流吐出温度差が小さくなっている上、壁面の熱容量により高温と低温噴流の温度差が小さく温度変動強度が  $y/D=0.5$  に比べて僅かに小さくなっているのに対し、解析では、ノズ

ルから一様温度流出で、壁面の境界条件は断熱としているため、構造材の熱容量による温度変動強度の減衰がないことがわかる。

Fig. 4.1.3～4.1.6 に実験および解析によって得られた奥行き断面での水平方向温度分布および水平方向温度変動強度分布の比較を示す。

水平方向温度分布に関して、DNS の解析は、 $y/D=0.025$ 、 $y/D=0.5$  の鉛直方向全ての位置で、概ね全体の分布形状は一致していることがわかる。

水平方向温度変動強度に関して、DNS の解析は、 $y/D=0.025$ 、 $y/D=0.5$  の鉛直方向位置とも、全体の分布がほぼ実験結果と一致していることがわかる。

Fig. 4.1.7～Fig. 4.1.10 に実験および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。奥行き方向位置は、 $y/D=0.0$  が壁面であり、壁面から 10mm の位置が  $y/D=0.5$  である。

時間平均温度に関して、実験では  $y/D=0.5$  と 0.025 ではほぼ同一温度であり、解析は、フラットな分布を示しており、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 の解析は、鉛直方向位置  $z/D=1.0$  では、実験結果と分布形状が一致している。鉛直方向位置  $z/D=3.5, 5.0, 10$  における解析結果から、前述の通り壁面近傍で温度変動強度の値が全く減衰していないことがわかる（僅かに増加）。一方、実験では、温度変動強度が僅かに減衰している。

前報[22]にて、構造材表面における流体から構造材への温度変動の伝達挙動は、時間的に一定の熱伝達率により評価できることを示した。また、その熱伝達率を用いて構造材表面での瞬時の熱流束を求めるこにより、「流体から構造材」と「構造材から流体」の熱の移動が発生していることが明らかになっている。つまり、構造材とその近傍の流体間では熱的相互作用が発生しており、それによつて構造材近傍の流体中の温度変動が減衰していると考えられることから、サーマルストライピング現象を評価する上でその作用を考慮することは重要である。

## 4.2 温度変動挙動における DNS の模擬性

Fig. 4.2.1 に実験および解析で得られた奥行き方向位置  $y/D=0.025$ 、 $y/D=0.5$  での Peak-to-Peak (レインフロー検出法) [23] コンターを示す。Peak-to-Peak の値は、レインフロー法で抽出した Peak-to-Peak の値の最大値を示した。

解析結果は、実験結果と比べ、全体の分布形状をほぼ再現していることがわかる。また、温度変動強度コンターと同様に、実験では、壁面から離れた位置 ( $y/D=0.5$ ) に比べ、壁近傍 ( $y/D=0.025$ ) での Peak-to-Peak 値が小さくなっているのに対し、解析では壁面に近傍においても Peak-to-Peak 値が小さくなっていないことがわかる。

Fig. 4.2.2 に噴流間の流体混合が活発な位置での実験および解析で得られ温度の時間変化の比較を示す。DNS の解析では、両方の位置 (Measured Position ①、②) とも、温度変動の周期および振幅は、実験結果とほぼ同様になってい

ることがわかる。

Fig. 4.2.3 に実験および解析で得られた奥行き方向位置  $y/D=0.025$ 、 $y/D=0.5$  の温度変動パワースペクトル密度 (PSD) の比較を示す。比較位置は噴流間の流体混合が活発な位置とし、温度変動パワースペクトル密度は、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、窓の幅 512 点 (5.12s) のガウス窓を設定し、この窓関数を全データに乗じて、温度変動の周波数一パワーを算出する。その際、得られたパワーに窓関数により低下した割合の補正を行う。この窓関数を 0.1s 毎に移動させ、上記の処理を繰り返し、得られたパワーのアンサンブル平均を行うことによりパワースペクトル密度を求めた。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である。

DNS による解析は、 $y/D=0.025$ 、 $y/D=0.5$  の位置とも、卓越した周波数成分が存在していることがわかる。2.3Hz 付近で卓越周波数をもち、実験と解析結果のパワースペクトル密度は卓越周波数成分を含めてよく一致していることがわかる。また、壁面からの位置によらず同様のスペクトルとなっており、壁面からの距離による依存性が小さいことがわかる。

## 5. 考察

### 5.1 乱流2次モーメントに対する壁面の影響

Fig. 5.1.1 に  $x\text{-}z$  平面における時間平均流速ベクトル図を示す。時間平均温度センターで示したように、高温噴流が低温噴流側に傾いて流れていることがわかる。壁面近傍 ( $y/D=0.025$ ) では、壁面から離れた位置に比べて、流速値が小さくなってしまい、壁面の摩擦の影響を受けていると考えられる。また、壁面からの距離によらず、高温噴流の低温噴流側への傾き方は、ほぼ同様であることがわかる。

Fig. 5.1.2 および Fig. 5.1.3 に  $x\text{-}z$  平面における乱流2次モーメントを示す。Fig. 5.1.2 は垂直応力 ( $\overline{u'u'}$ ,  $\overline{v'v'}$ ,  $\overline{w'w'}$ )、Fig. 5.1.3 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 ( $\overline{u'u'}$ ) は、壁面より 4mm ( $y/D=0.2$ ) 付近で極大となっていることがわかる。その位置より壁面に近づくと、水平方向の垂直応力は低下している。また、鉛直方向の垂直成分 ( $\overline{w'w'}$ ) は、低温噴流と高温噴流の間で壁面に近づくにつれて徐々に値が大きくなっていることがわかる。奥行き方向の垂直成分 ( $\overline{w'w'}$ ) は、壁面に近づくにつれて小さくなることがわかる。

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、壁面に近づくと絶対値が減少している。一方、噴流の振動に起因する  $\overline{w'u'}$  は、 $y/D=0.2$  付近で最も絶対値が大きくなってしまい、その位置より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. 5.1.4～Fig. 5.1.6 に壁面からの距離による垂直応力の水平 ( $x$ ) 分布の違いを示す。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。水平方向成分および鉛直方向成分は、 $y/D=0.1$  から  $y/D=0.05$  まではわずかに低下する傾向を有しているもののほぼ同じ分布形状を示しており、壁面のごく近傍 ( $y/D=0.025$ ) でのみ分布形状が異なっていることがわかる。壁面近傍位置 ( $y/D=0.025$ ) では、壁面から離れた位置に比べ、分布形状が平坦になっていることがわかる。既報<sup>[20]</sup>で示したように、噴流間の混合は、噴流の周期的な振動を伴って発生する。噴流の振動は、低温噴流と高温噴流の間に形成される大規模な双子の渦構造が交互に成長／衰退を繰り返すことにより生じる。壁面から離れた位置では、周期的な噴流の振動により、低温噴流と高温噴流の間の領域で乱流2次モーメントが大きな値を示すが、壁面のごく近傍では、壁面の摩擦により大規模渦構造の生成が抑制されるため、小規模の渦に拡散し、乱流2次モーメントの水平方向の分布形状が平坦化すると考えられる。また、奥行き方向成分は、壁面に近づくにつれて、徐々に値が小さくなっている。これは、壁面により速度変動の自由度が小さくなっていることによると考えられる。

Fig. 5.1.7～Fig. 5.1.9 に壁面からの距離による剪断応力の水平分布の違いを示す。横軸と縦軸は前図と同じである。低温噴流と高温噴流がぶつかる  $z/D=3.5$ 、 $5.0$  で乱流2次モーメントの剪断応力は大きな値を示していることがわかる。ま

た、壁面近傍での各剪断応力の絶対値は、小さい。このことから、壁面近傍では、大規模な渦構造による効果が低減し、小規模の渦構造となっていると考えられる。

Fig. 5.1.10 に乱流 2 次モーメントの壁面の影響を示す。横軸は奥行き方向位置、縦軸は噴流吐出流速で規格化した各乱流 2 次モーメント値を示す。水平方向と鉛直方向位置は、 $x/D=-0.75$ 、 $z/D=5.0$  であり、噴流間の混合が活発に発生している位置に相当する。垂直応力に関して、水平方向成分と鉛直方向成分が奥行き方向成分より値が大きくなっている。壁面に平行な準 2 次元的な挙動をしていることがわかる。水平方向と鉛直方向の乱流 2 次モーメントの垂直応力は、壁面に近づくと徐々に値が増加する ( $y/D=0.6 \rightarrow 0.2$  付近) が、さらに壁面に近づくと、値が小さくなることがわかる。これは、配管内などの乱流運動エネルギーの分布形状<sup>[24]</sup>に類似しており、平行平板においても同様の傾向となることを示している。剪断応力に関しては、 $\overline{u'v'}$  は壁面に近づくにつれて絶対値が低下しているが、 $\overline{v'w'}$ 、 $\overline{w'u'}$  は一旦絶対値が大きくなっている。壁面の最近傍では各剪断応力の絶対値は低下している。このことから、壁面の影響を受け、一旦非等方的な流れが強くなるが、さらに壁面に近づくと渦の消散により等方的な乱れに遷移することが示唆される。

## 5.2 乱流熱流束に対する壁面の影響

Fig. 5.2.1 に各方向における乱流熱流束センターの奥行き方向位置の違いを示す。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。各乱流熱流束の絶対値は、高温噴流と低温噴流がぶつかる領域付近で大きくなっていることがわかる。また、各断面の各乱流熱流束の分布パターンは、絶対値は異なるものの壁面からの距離によらず、ほぼ同様である。水平方向と鉛直方向の乱流熱流束は、壁面から離れた位置 ( $y/D=0.5$ ) から壁面に近づくと、一旦絶対値が大きくなり、その後さらに壁面に近づくと絶対値が小さくなる傾向を示す。一方、奥行き方向の乱流熱流束は、壁面に近づくにつれて徐々に小さくなっている。これらの傾向は、乱流 2 次モーメントの変化と同じであることがわかる。

Fig. 5.2.2～Fig. 5.2.4 に壁面からの距離による乱流熱流束の水平方向分布の違いを示す。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。水平方向の乱流熱流束は、奥行き方向および鉛直方向の乱流熱流束と比べ、絶対値が大きくなっている。噴流間の流体混合に最も寄与していると考えられる。水平方向の乱流熱流束は、低温噴流と高温噴流の間の領域で絶対値が大きく、 $x/D < 0$  で正値、 $x/D > 0$  で負値を示している。このことから流体混合により高温噴流から低温噴流側へ熱が伝わっていることがわかる。また、壁面に近づくにつれて、徐々に乱流熱流束の絶対値が小さくなっていることがわかる。奥行き方向および鉛直方向の乱流熱流束においても、壁面に近づくにつれて絶対値が小さくなっている。壁面の摩擦により流体混合による温度の均一化が抑制されることがわかる。乱流 2 次モーメントから、壁面のごく近傍では壁面の摩擦によって大規模な渦構造が小規模の渦構造へ遷移することを示したが、流体のみに着目した温度の均一化に対しては、低温噴流と高温噴流が入り混じる大規模

な渦構造が支配的であり、小規模な渦構造は大きく寄与していないことが推測される。つまり、壁表面を断熱とした本解析においては、壁面近傍での温度変動の減衰がないことから、壁面のごく近傍では、壁面摩擦で流体混合が抑制されたとしても、流体の熱伝導により、壁面から僅かに離れた位置で発生した温度変動が壁面近傍まで到達することが示唆される。

Fig. 5.2.5 に乱流熱流束に対する壁面の影響を示す。Fig. 5.1.10 と同様に噴流間の流体混合が活発な位置である  $x/D=-0.75$ 、 $z/D=5.0$  のデータを使用した。横軸は壁面からの距離  $y/D$ 、縦軸は噴流吐出条件で規格化した乱流熱流束を示す。奥行き方向の乱流熱流束はほぼゼロであり、壁面の法線方向の熱の流れはほとんどないことから、低温噴流と高温噴流の間で発生する温度の均一化は水平方向と鉛直方向の準2次元的な挙動であることがわかる。水平方向と鉛直方向の乱流熱流束は、乱流2次モーメントと同様に、壁面に近づくにつれて一旦絶対値が大きくなり、さらに壁面に近づくと絶対値が小さくなる傾向を示していることがわかる。

## 6. 結論

高速炉におけるサーマルストライピング現象を解明するために実施している平行三噴流ナトリウム試験（PLAJEST）に対して、構造材表面近傍での温度変動特性の定量的評価を行うために、準直接シミュレーションコード DINUS-3 を用いた 3 次元熱流動解析を実施した。今回は壁面近傍に存在する流体の速度／温度境界層による温度変動特性の変化に着目することから、構造材の熱的特性は考慮せず、構造材表面を断熱と仮定し、構造材壁面を Non-Slip 条件として実施した。以下にその結果を示す。

- 時間平均温度、温度変動強度の分布形状は、本解析により実験を模擬できることが明らかとなった。また、温度変動のパワースペクトル密度に関して、本解析は卓越周波数成分を含むほぼ全領域にわたって実験を模擬できていることがわかった。
- 実験では、壁面近傍での温度変動強度が減衰するのに対し、本解析では壁面近傍での温度変動強度の減衰は見られなかった。すなわち、ナトリウム体系では、流体の速度境界層による温度変動の減衰効果はごく小さいことが明らかとなった。壁のごく近傍における流体の温度変動強度は、壁（構造材）との熱的相互作用により減衰することが示され、現象を評価する上でその考慮が重要である。
- 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および剪断応力の絶対値は、壁面に近づくにつれて一旦大きくなるが、さらに壁面に近づくと小さくなることがわかった。
- 水平方向と鉛直方向成分における乱流熱流束は、乱流 2 次モーメントと同様に、壁面に近づくにつれて一旦増加するが、さらに壁面近傍では値が減少することがわかった。しかしながら、壁面近傍においても温度変動強度が減衰しないことから、壁面のごく近傍の温度変動特性に対しては、流体の混合により発生する温度変動以外の要因、例えばナトリウムの高い熱伝導率により、構造材から遠い位置での温度変動が、構造材に近い位置の流体に伝わるなどの影響が大きくなっていることが明らかとなった。

### 謝辞

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

## 参考文献

- [1]Wood, Proposal for Design against Thermal Striping, Nuclear Energy, Vol. 19, No. 6, 433-437, 1908.
- [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. Bett, C. Bourman, 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]T. Muramatsu, Frequency Evaluation of Temperature Fluctuations Related to Thermal Striping Phenomena Using a Direct Numerical Simulation Code DINUS-3, ASM PVP-C, Vol. 253, pp.111-121, 1993.
- [10]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)－流体－構造非定常熱的応答特性に係わる評価手法の検証－、PNC TN9410 97-039、1997.
- [11]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.
- [12]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－可視化試験結果と予測解析－、JNC TN9400 2001-024、2000。
- [13]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.
- [14]木村暢之、A. Tokuhiro、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－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－、PNC TN9410 96-296、1996.
- [15]A. Tokuhiro and N. Kimura, An experimental investigation on thermal striping. Mixing phenomena of a vertical non-buoyant jet with two adjacent buoyant jets as measured by ultrasound Doppler velocimetry, Nucl. Eng. Design, 188, pp.49-73, 1999.
- [16]木村暢之、A. Tokuhiro、上出英樹、サーマルストライピング現象における流体内混合に関する実験研究－平行三噴流間の混合過程と吐出速度の影響－、JNC TN9400 2000-027、2000。

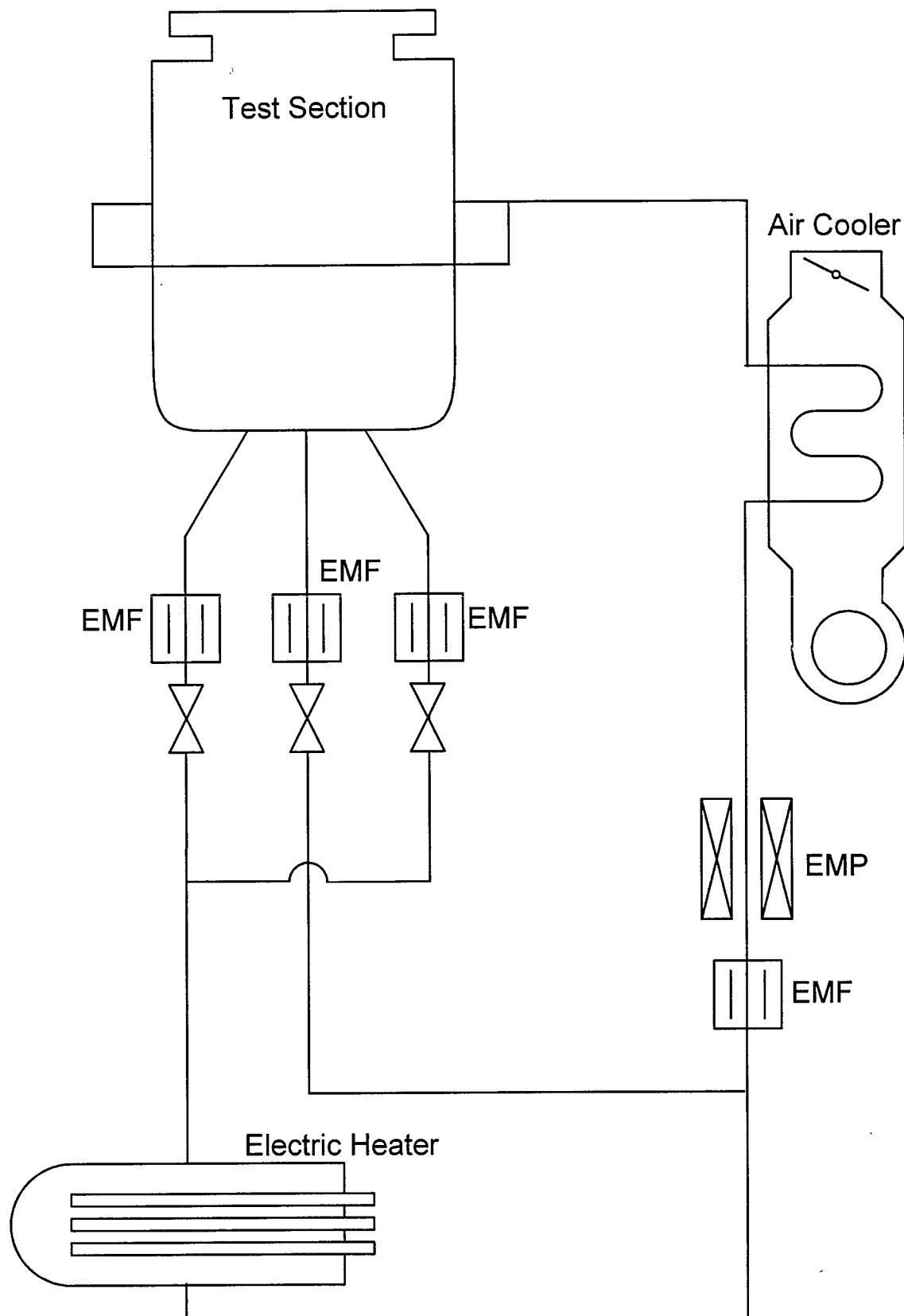
- [17]木村暢之、長澤一嘉、五十嵐実、上出英樹、サーマルストライピング現象における流体内混合に関する実験研究－壁面近傍での混合現象の変化－、JNC TN9400 2001-030、2000.
- [18]木村暢之、三宅康洋、西村元彦、上出英樹、サーマルストライピング現象における流体内混合に関する研究－平行三噴流間混合過程の数値解析と手法間の比較－、JNC TN9400 2000-099、2000.
- [19]木村暢之、五十嵐実、上出英樹、サーマルストライピング現象における流体内混合に関する研究－DNS を用いた噴流間の流体混合現象の解明－、JNC TN9400 2000-108、2000.
- [20]木村暢之、三宅康洋、長澤一嘉、五十嵐実、上出英樹、菱田公一、サーマルストライピング現象における流体内混合に関する研究－噴流間混合の乱流特性に対する DNS の模擬性評価－、JNC TN9400 2001-132、2002.
- [21]木村暢之、宮越博幸、三宅康洋、五十嵐実、上出英樹、サーマルストライピングに関する実験研究－平行三噴流ナトリウム試験－、JNC TN9400 2001-063、2001.
- [22]木村暢之、三宅康洋、宮越博幸、長澤一嘉、五十嵐実、上出英樹、サーマルストライピングに関する実験研究－流体－構造間における温度変動の伝達挙動の評価－、JNC TN9400 2002-059、2002.
- [23]Endo, T., et al., Proc. 1974 Symp. on Mech. Behav. Mat., 371, 1974.
- [24]日本機械学会編、新編伝熱工学の進展第2巻、養賢堂、1995.

Table 3.1 Numerical Methods used in Experimental Analysis.

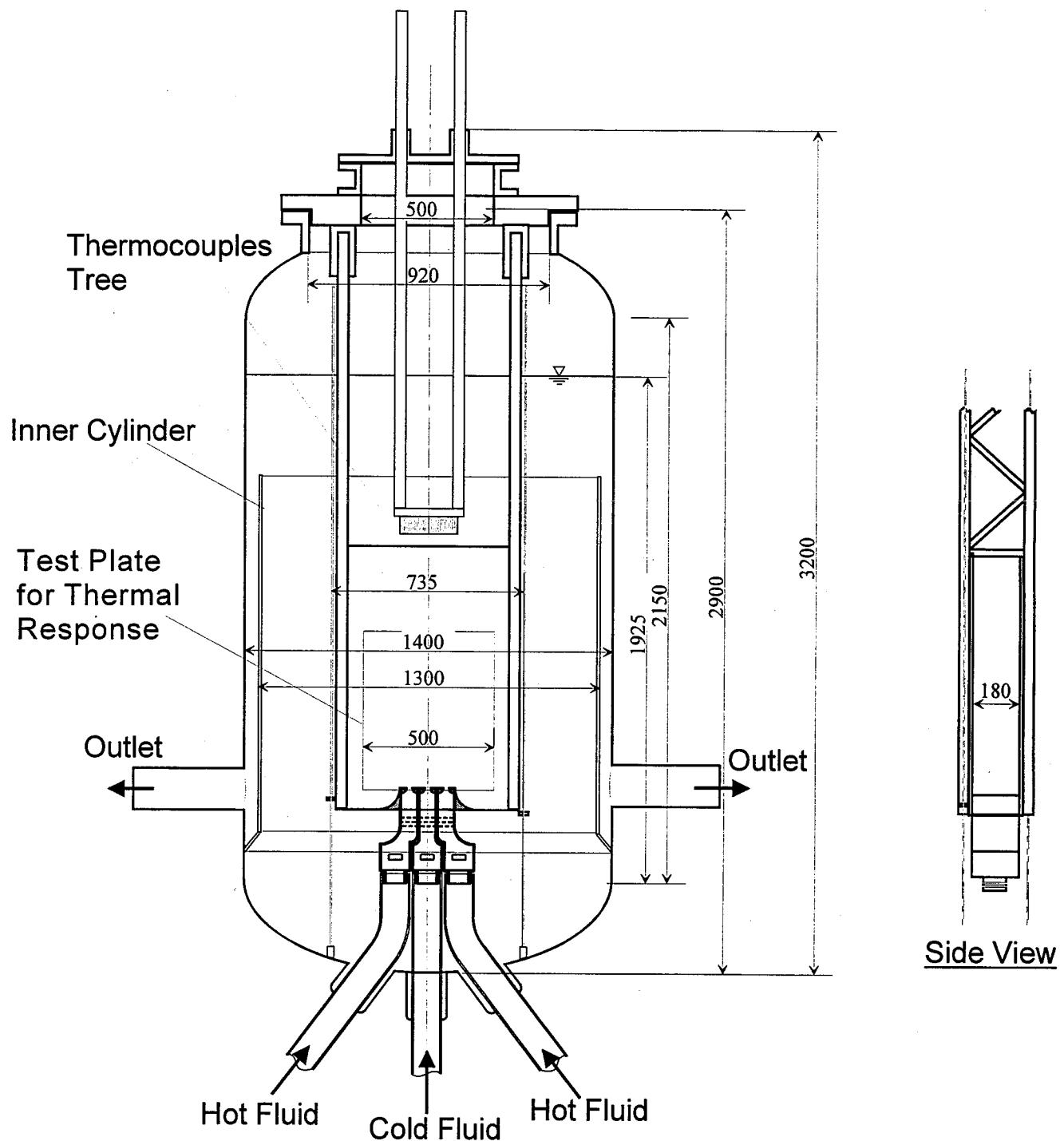
Analytical code	DINUS-3
Turbulence Model	None (DNS)
Coordinate	Cartesian
Descretization	FDM
Time Integration	2nd-order Euler
Convection Term	3nd-order Upwind
Diffusion Term	2nd-order Central
Solution algorithm	Leap-Frog
Matrix Solver	ICCG

Table 3.2 Number of Calculated Meshes in Analysis.

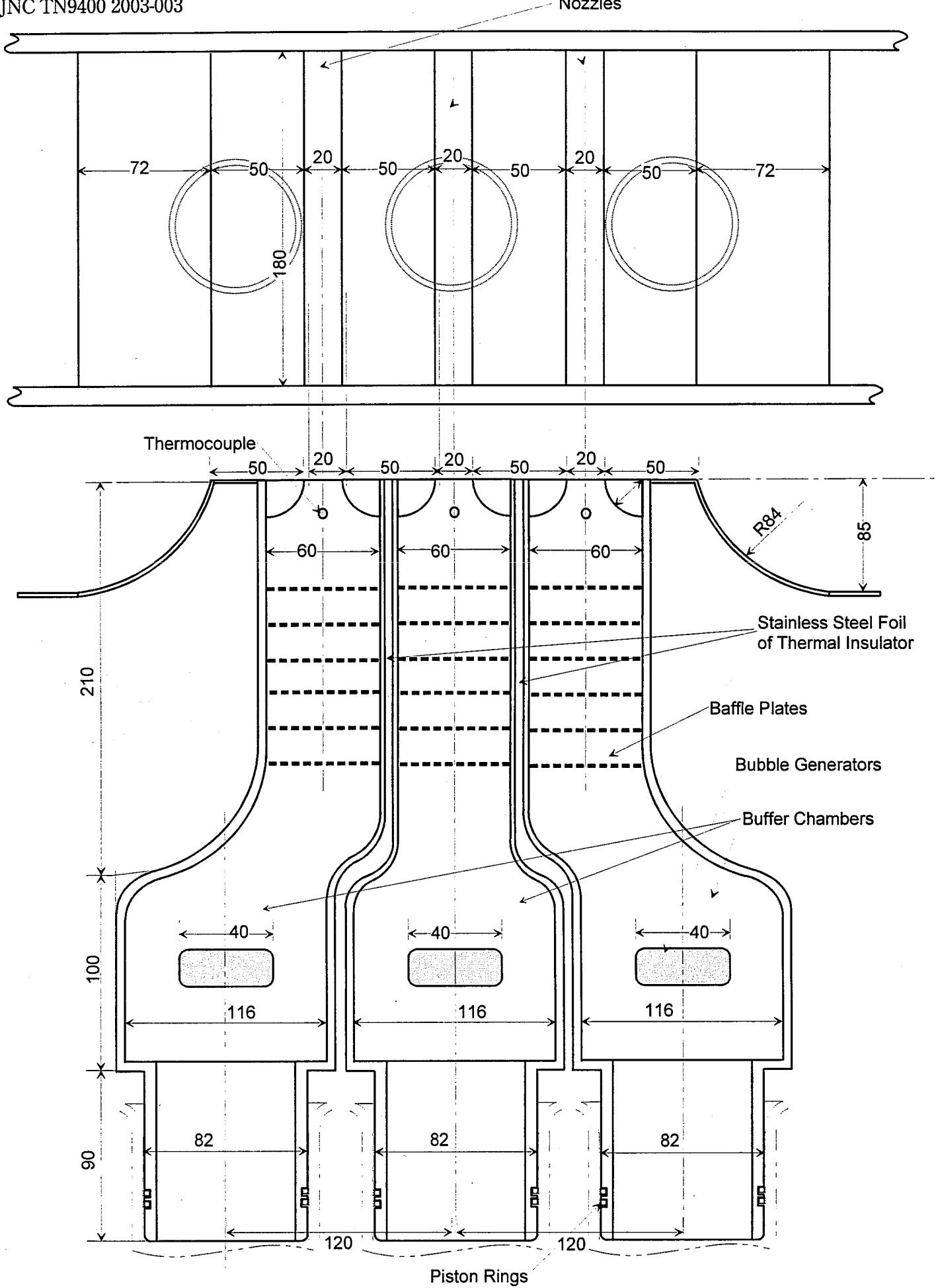
	DNS
x-mesh Number (Typical Mesh Size)	230 (1.0mm)
y-mesh Number (Typical Mesh Size)	11 (0.5mm)
z-mesh Number (Typical Mesh Size)	226 (1.0mm)



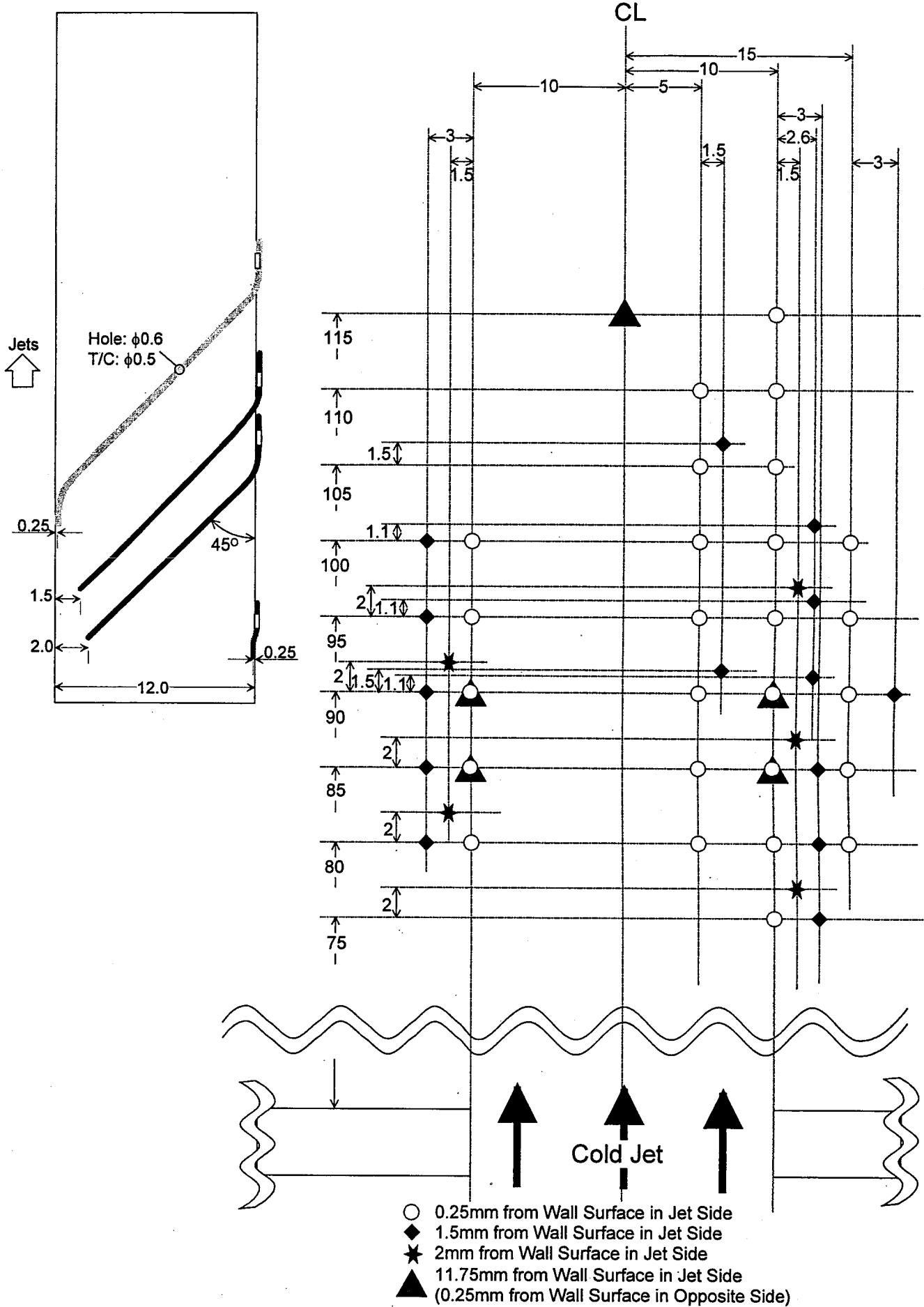
**Fig. 2.1.1 Experimental Loop.**



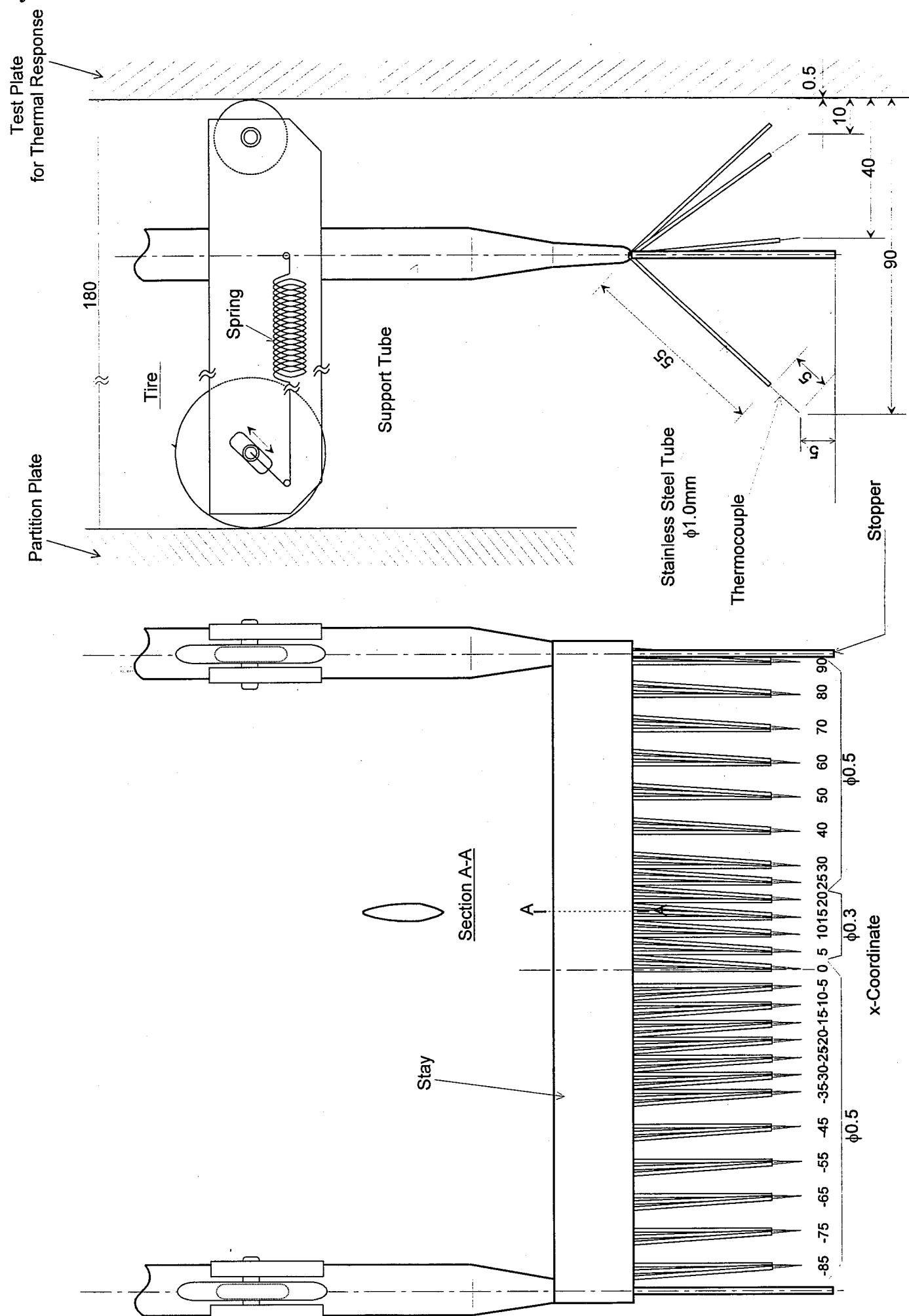
**Fig. 2.1.2 Test Plenum.**



**Fig. 2.1.3 Discharged Nozzles of Triple Jets.**



**Fig. 2.1.4 Arrangement of Thermocouples in Test Plate for Thermal Response.**



**Fig. 2.1.5** Movable Thermocouples Tree.

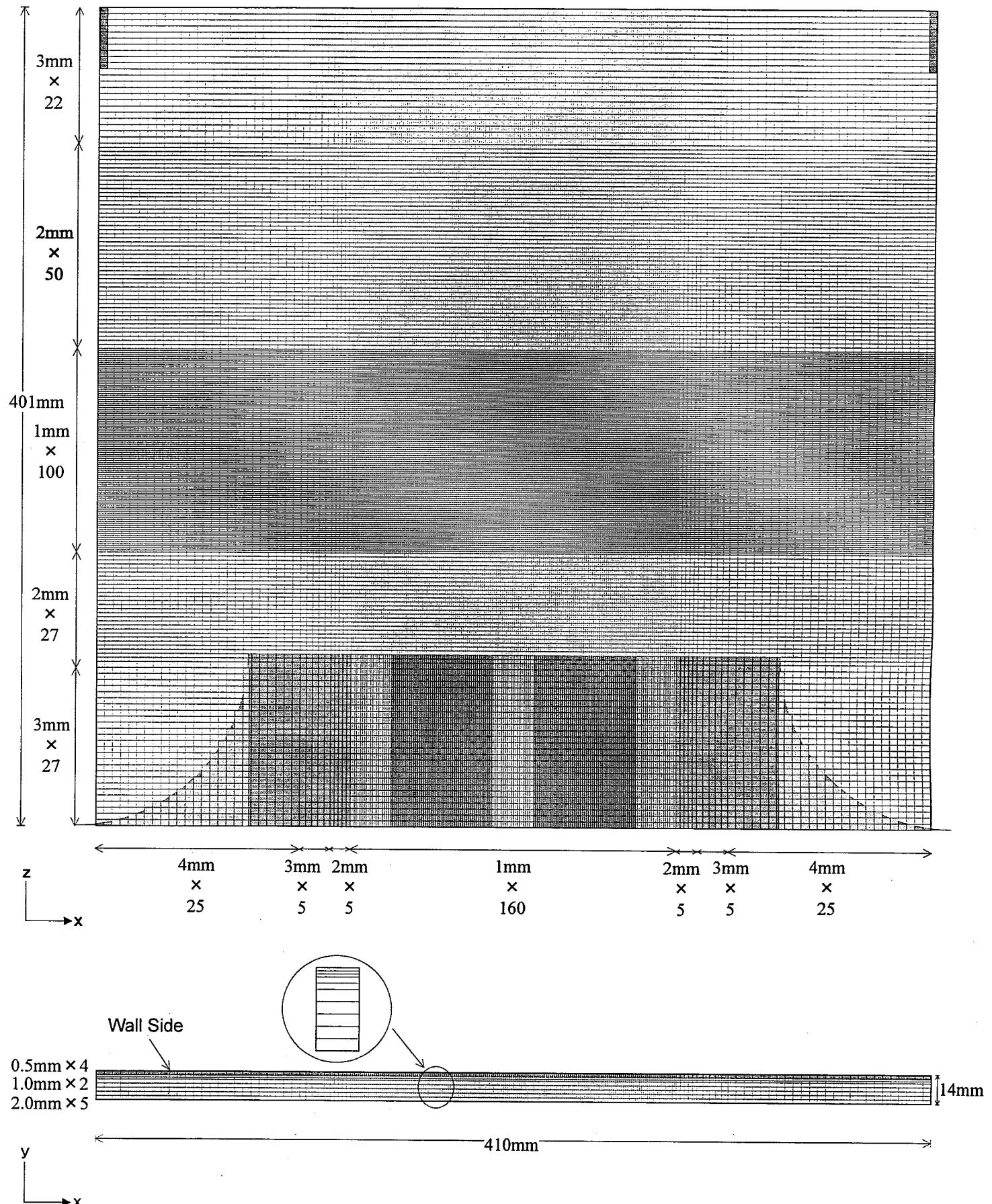


Fig. 3.1 Mesh Arrangement of DNS.

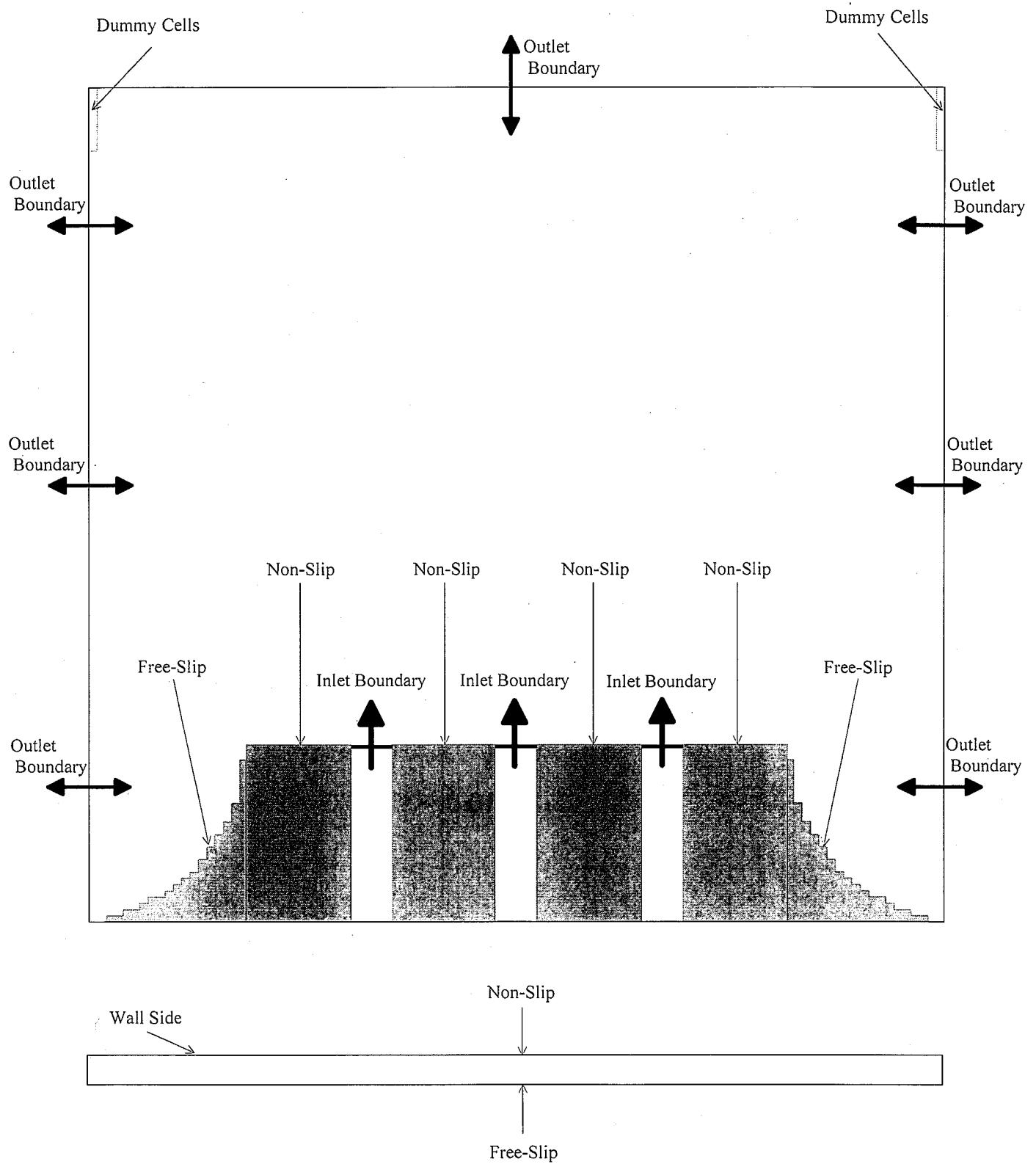


Fig. 3.2 Boundary Conditions.

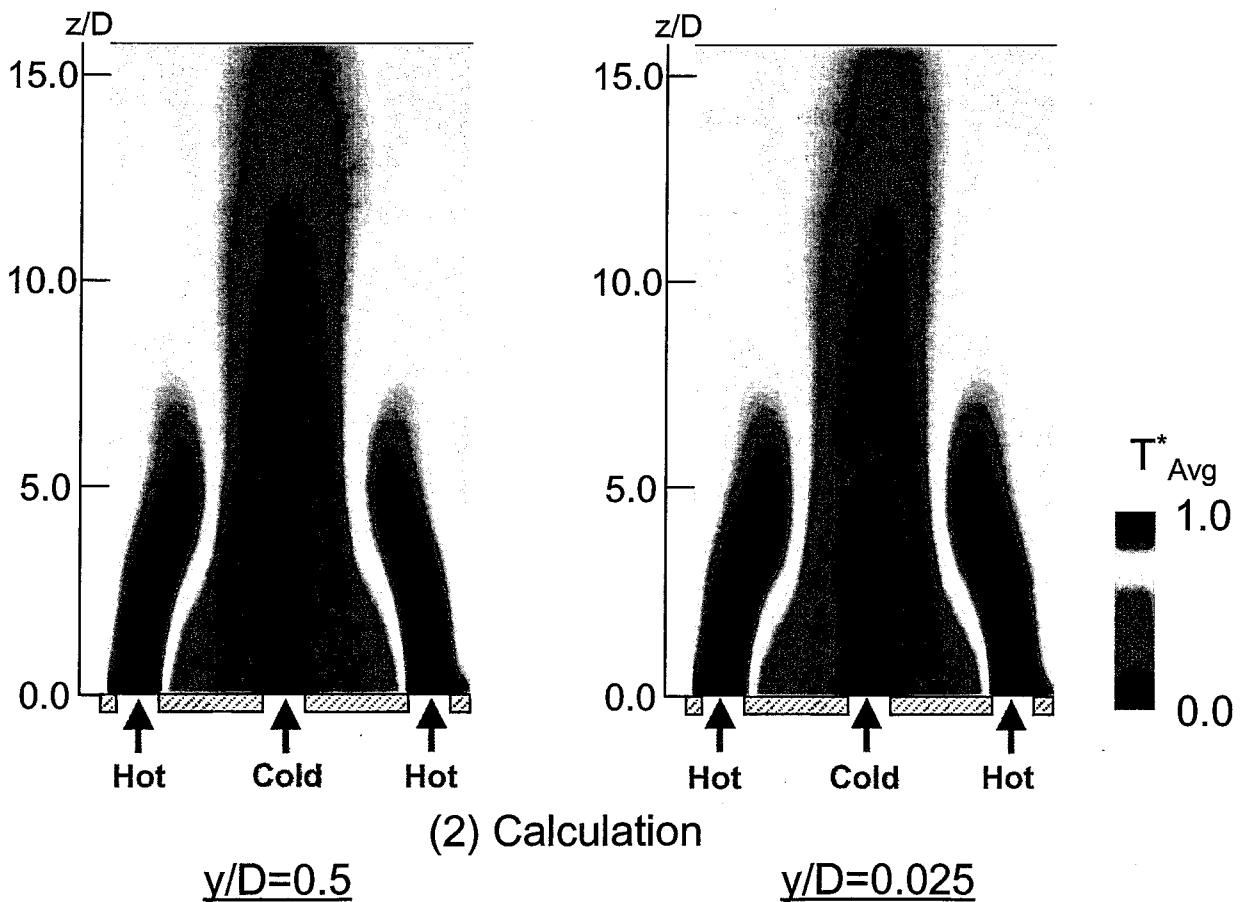
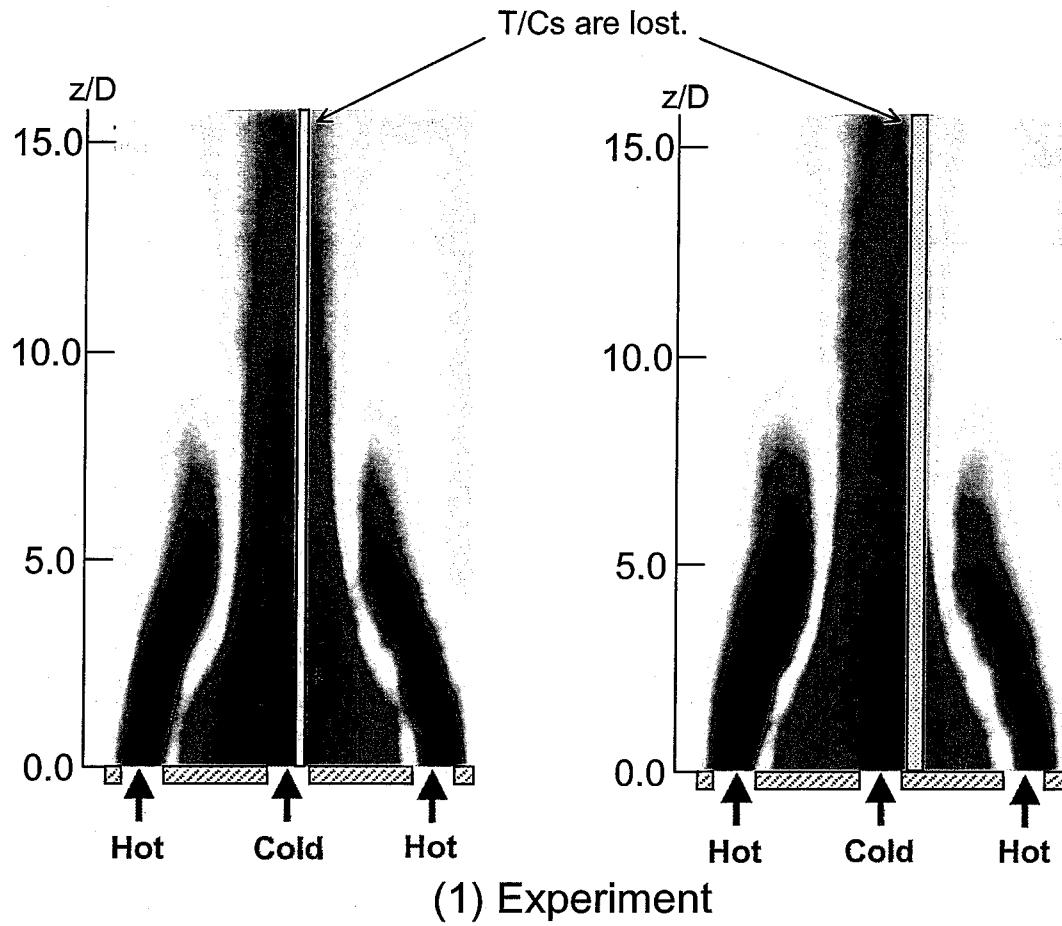


Fig. 4.1.1 Comparisons of Contours of Time-Averaged Temperature between Experimental and Numerical Results.

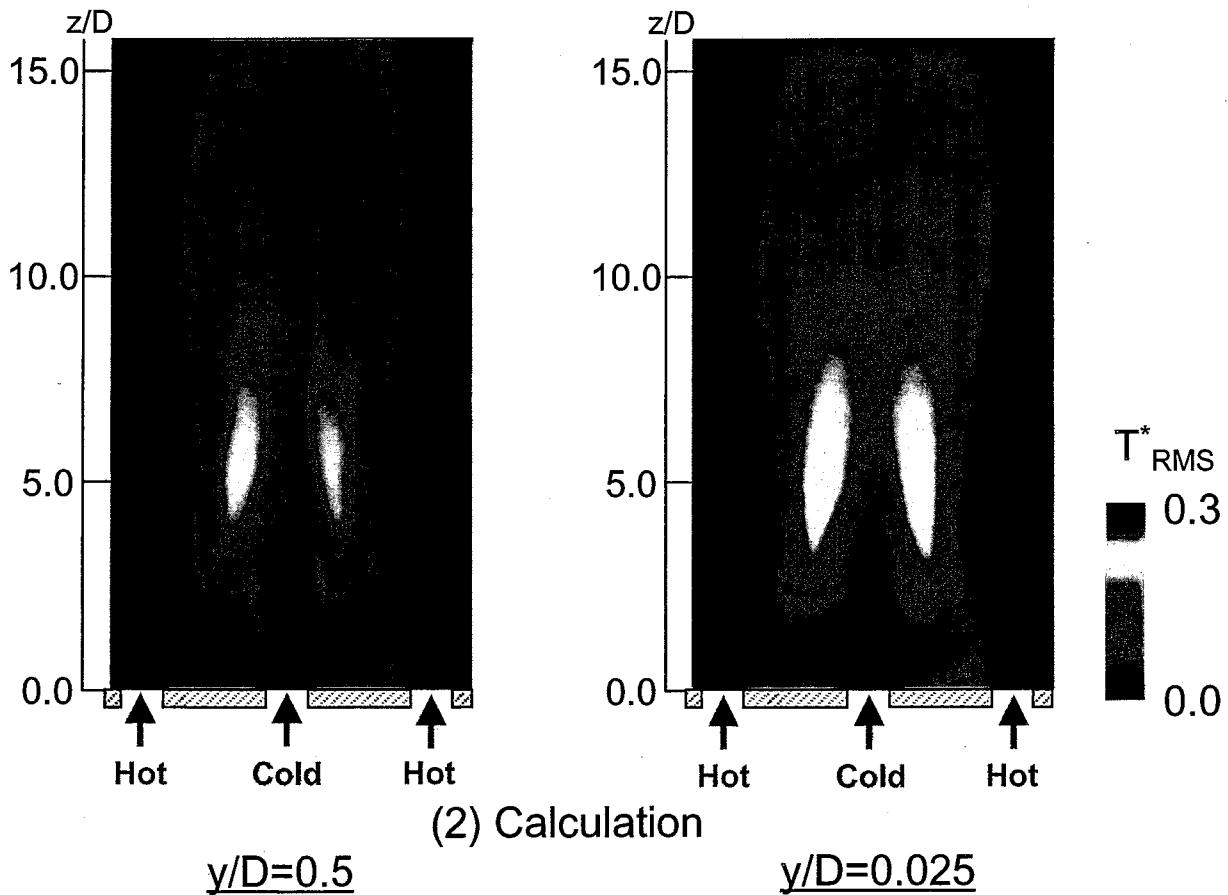
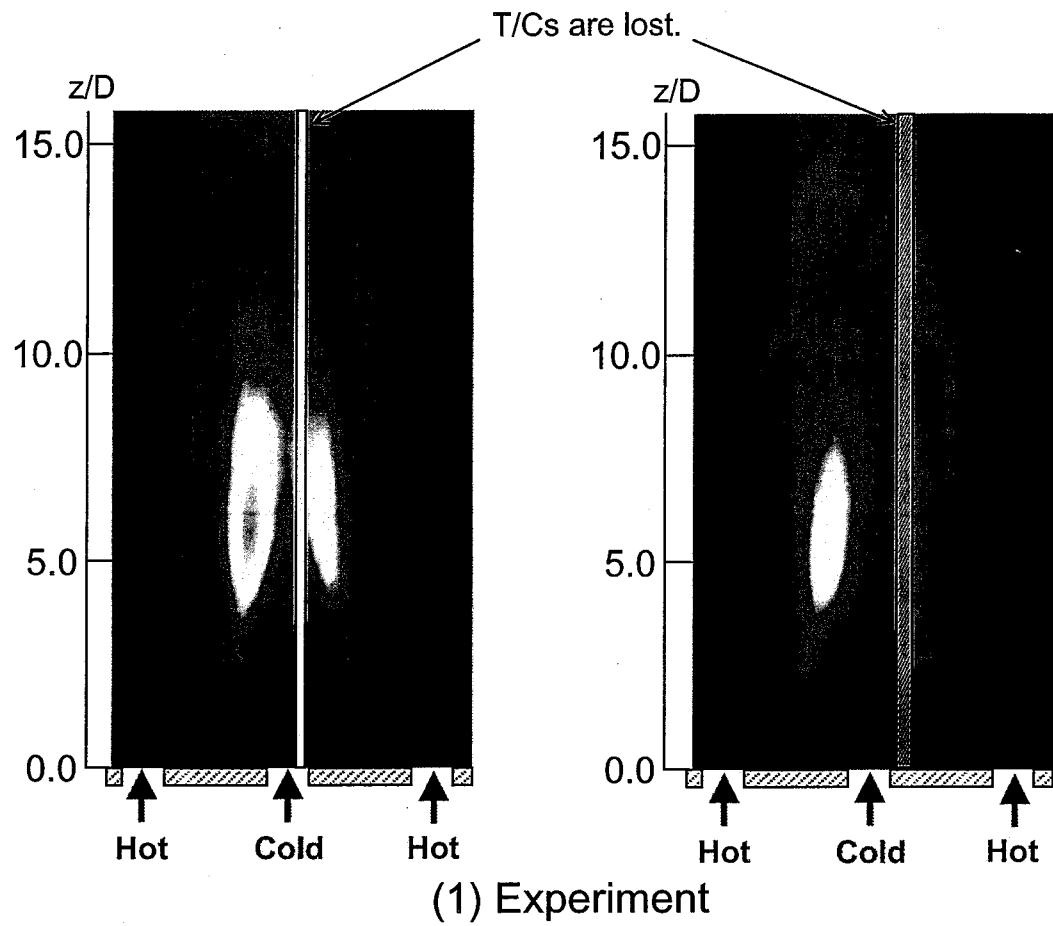


Fig. 4.1.2 Comparisons of Contours of Temperature Fluctuation Intensity between Experimental and Numerical Results.

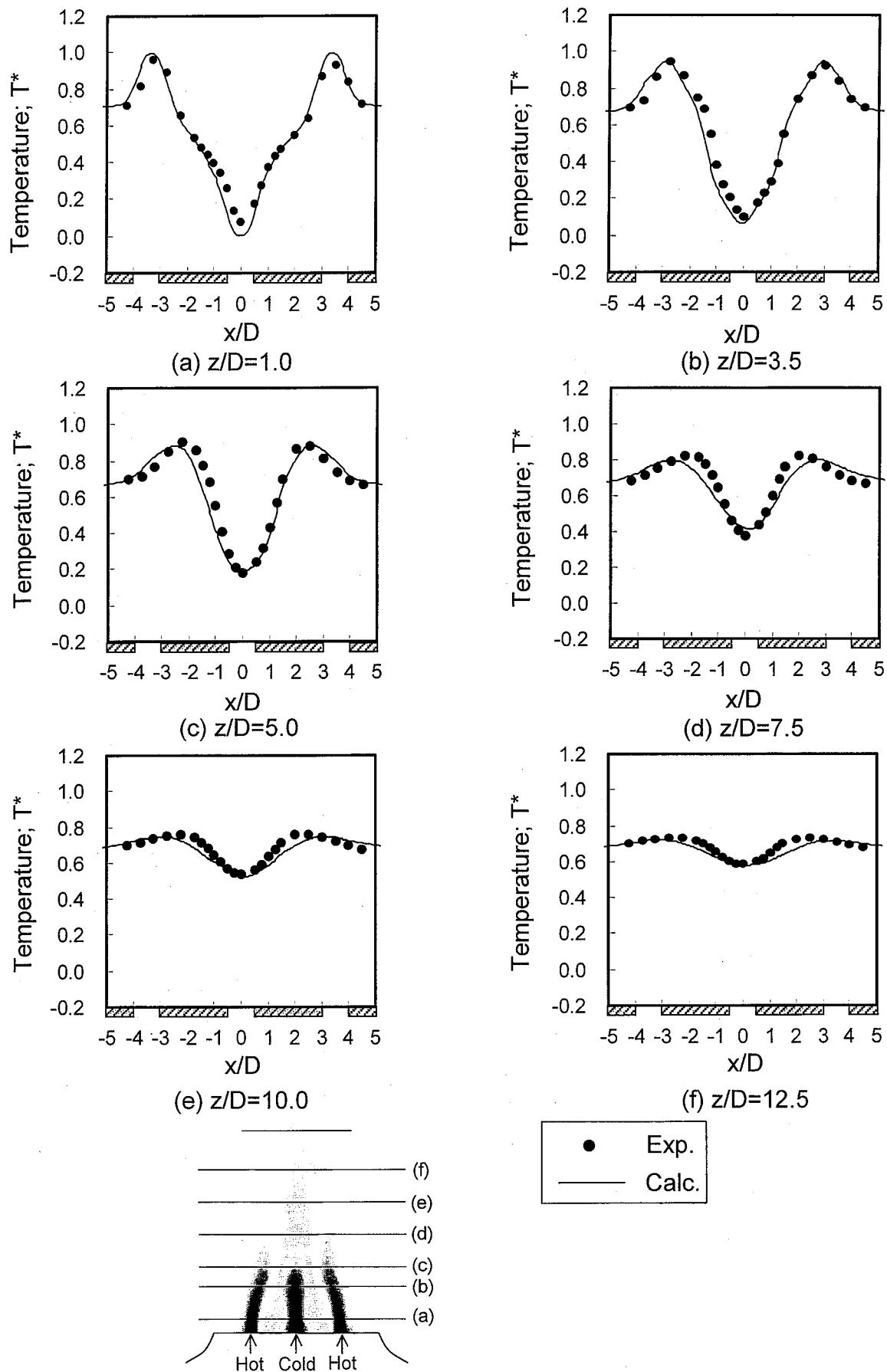


Fig. 4.1.3 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )

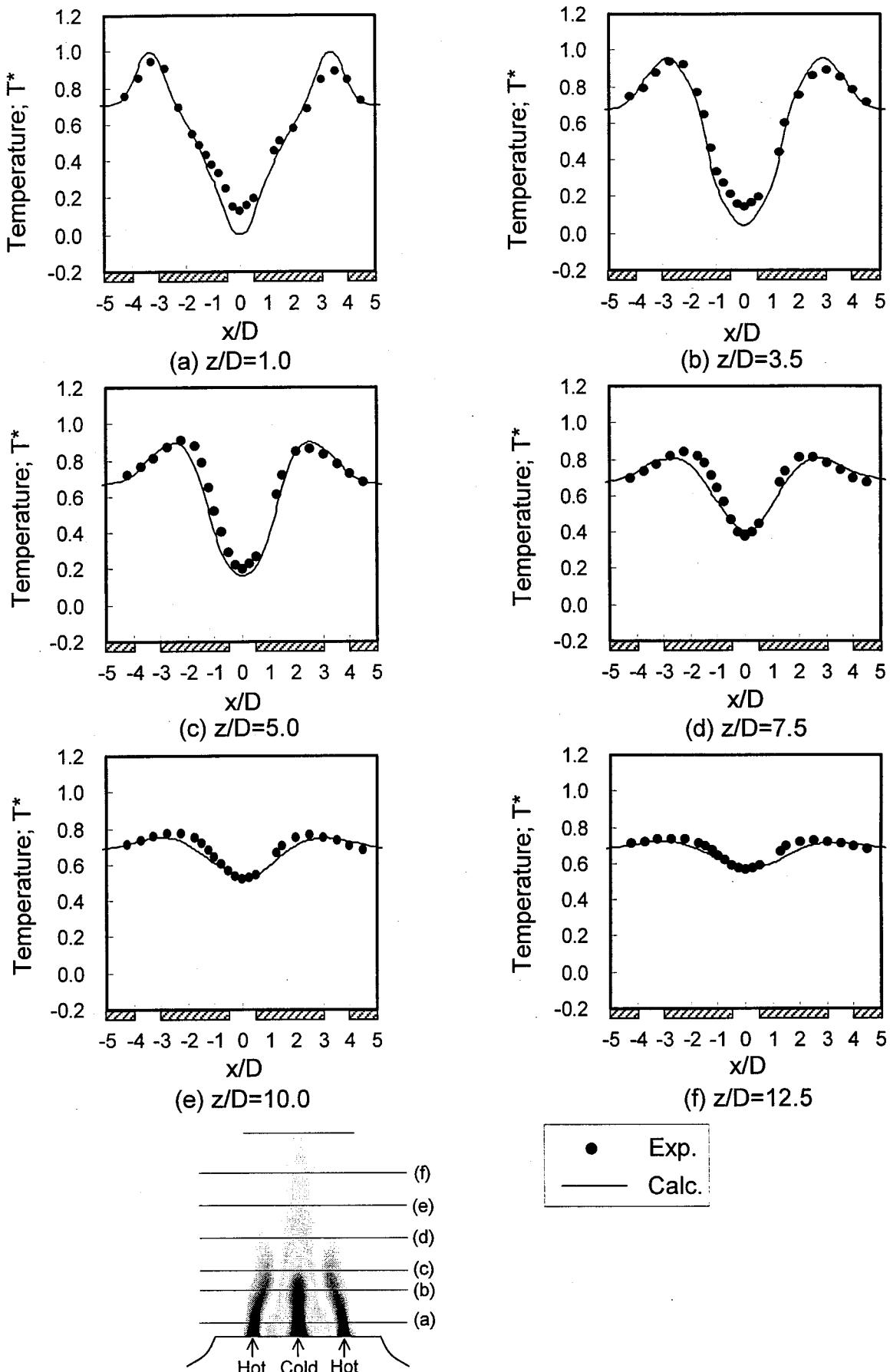


Fig. 4.1.4 Comparisons of Time-Averaged Temperature Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D = 0.025$ )

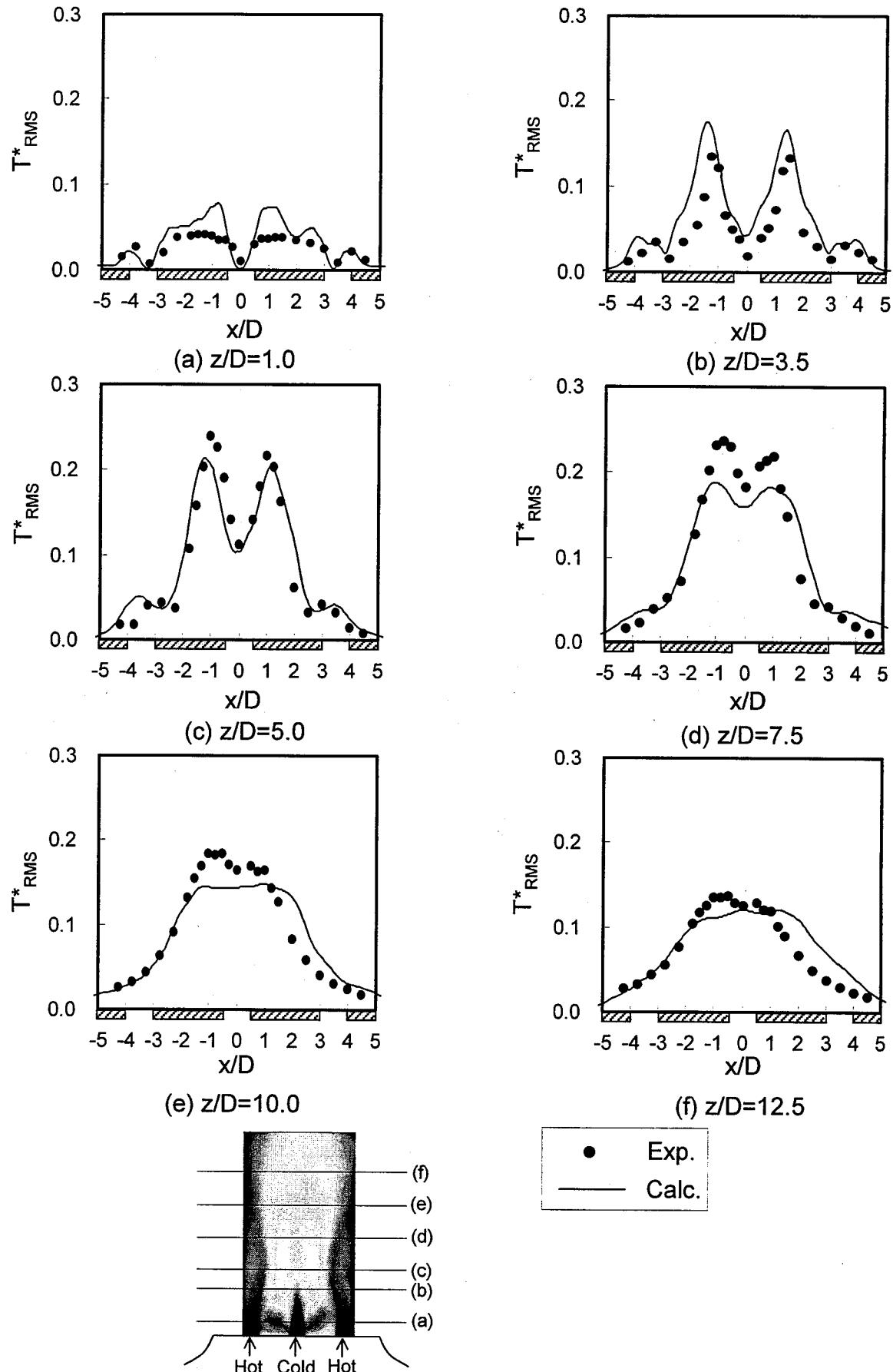


Fig. 4.1.5 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.5$ )

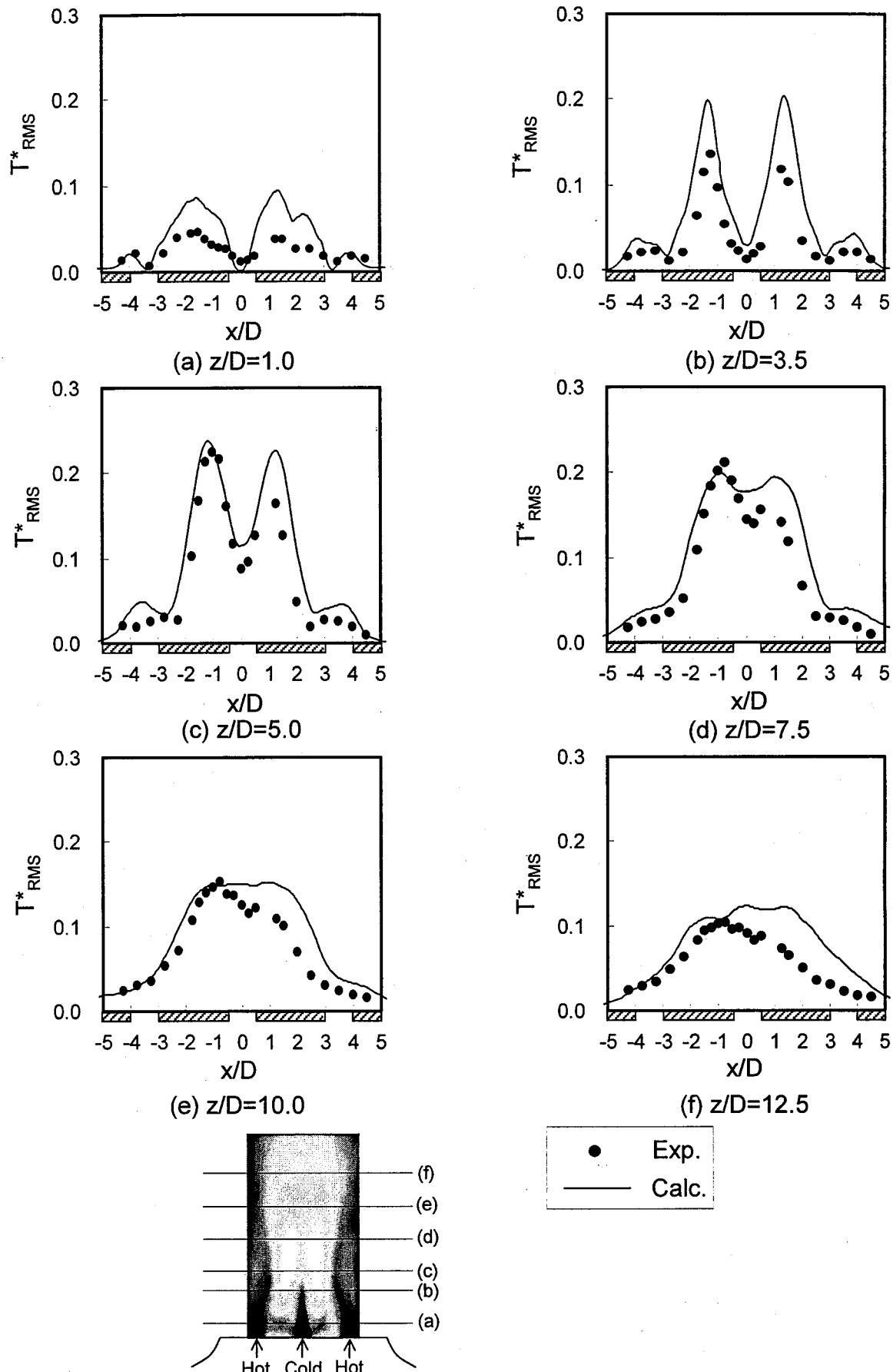
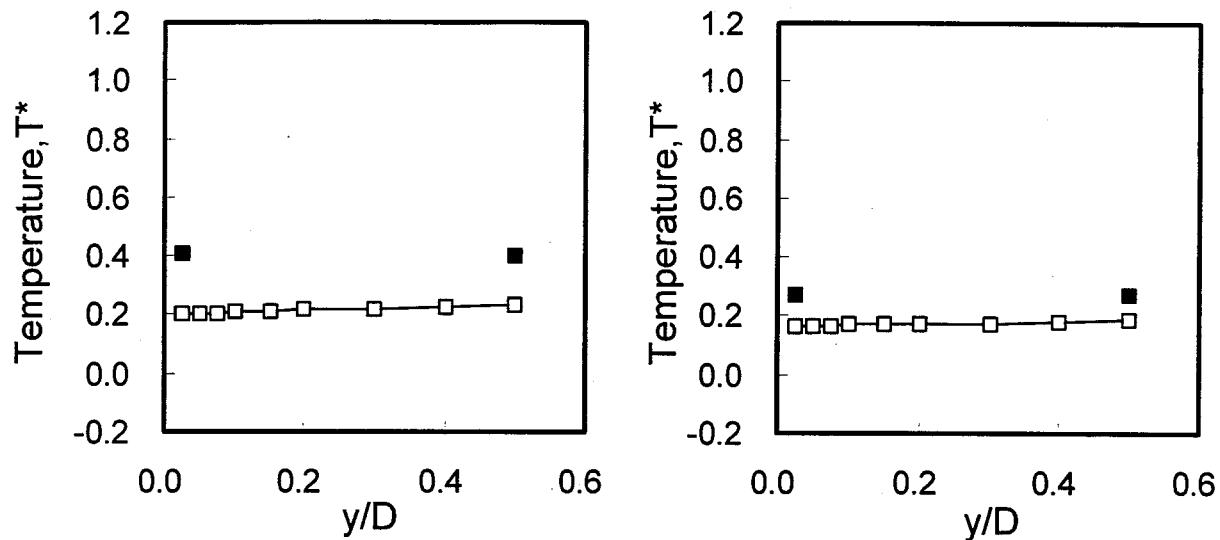
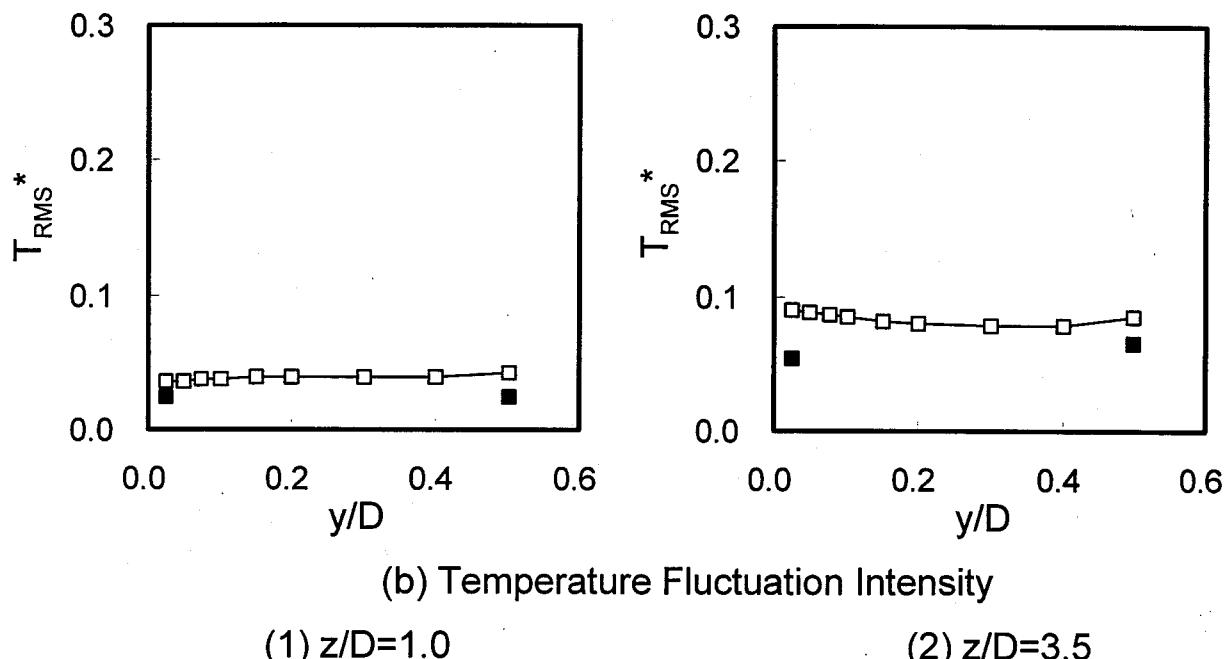


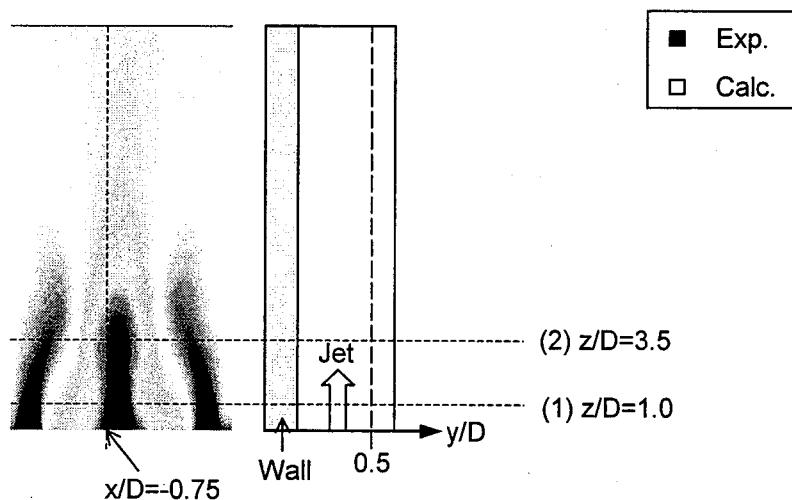
Fig. 4.1.6 Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity Distributions in Horizontal Direction between Experimental and Numerical Results. ( $y/D=0.025$ )

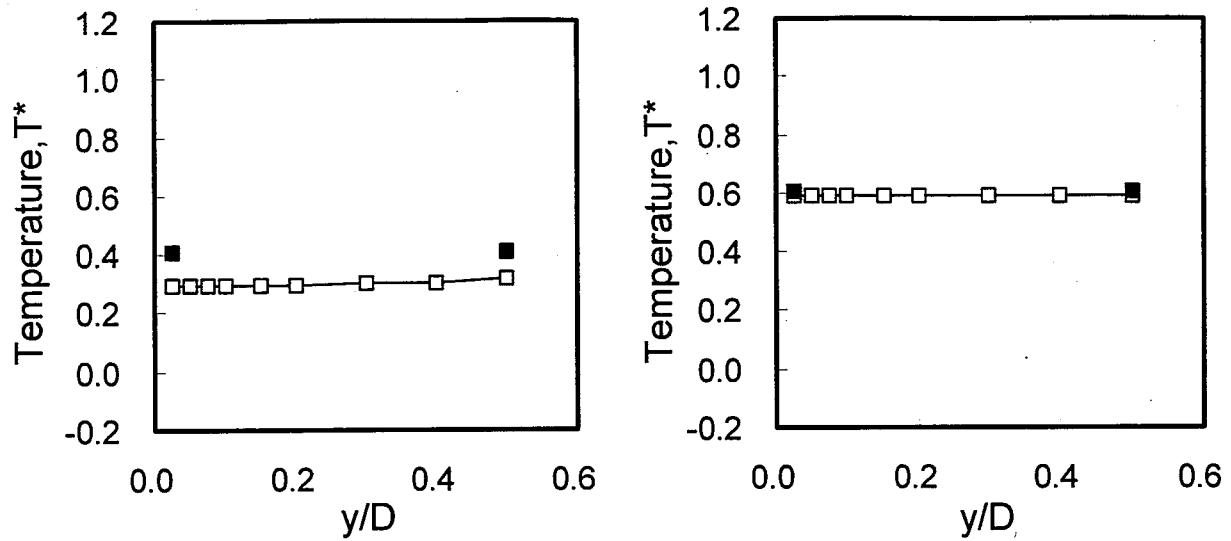


(a) Time-Averaged Temperature

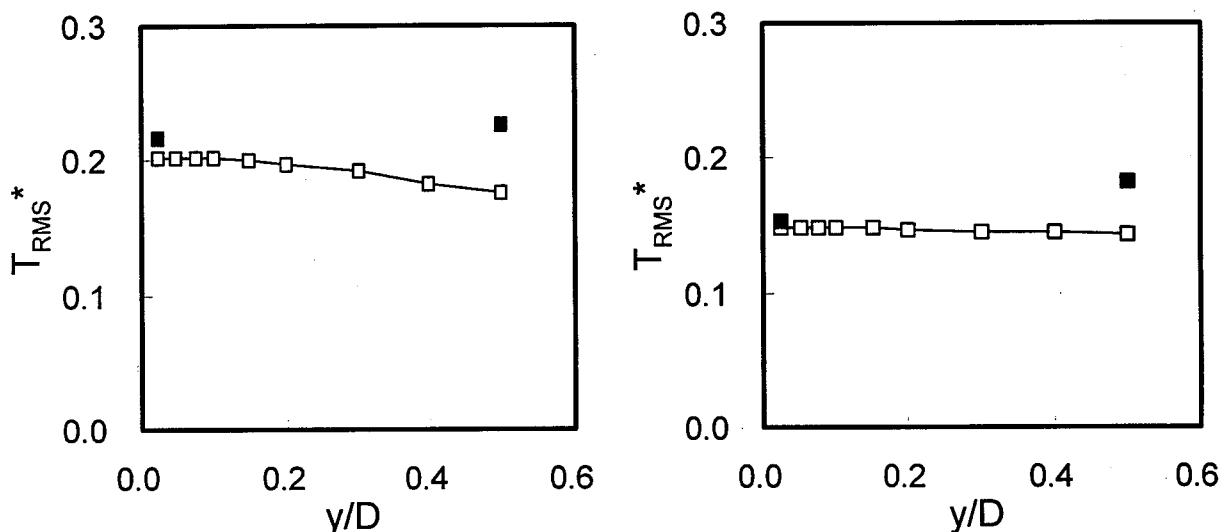


(b) Temperature Fluctuation Intensity

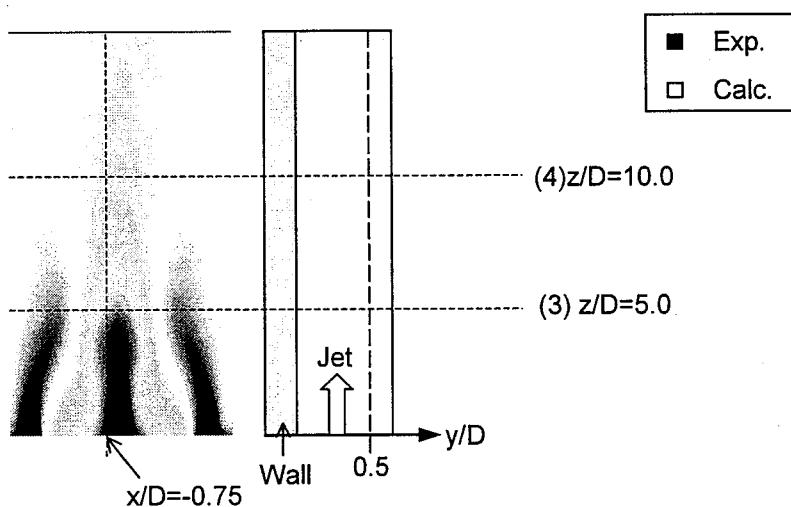
(1)  $z/D=1.0$ (2)  $z/D=3.5$ Fig. 4.1.7(a) Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D=-0.75$ )

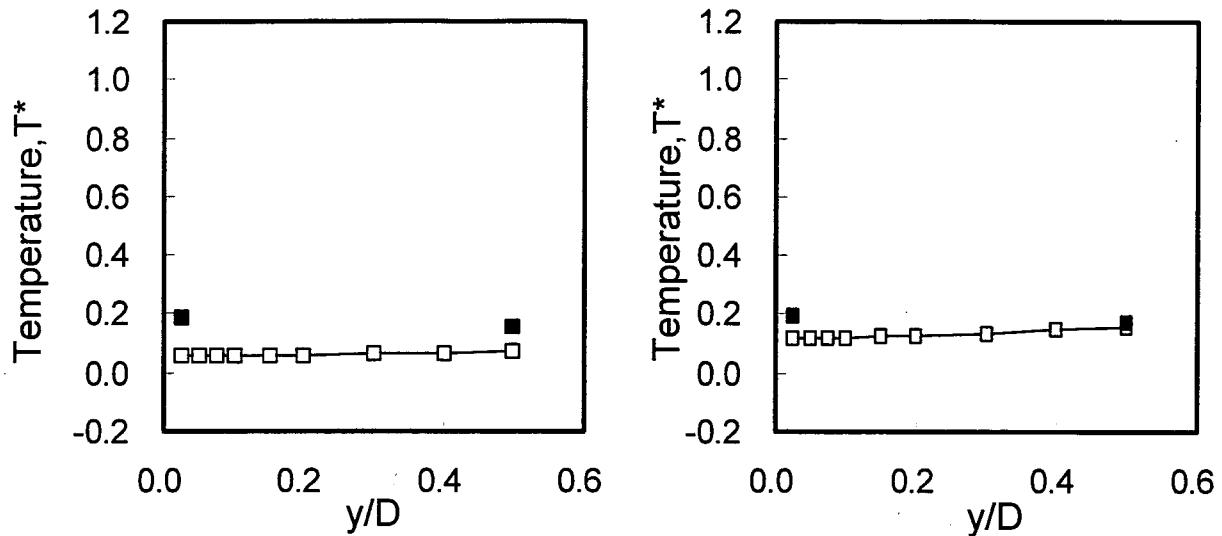


(a) Time-Averaged Temperature

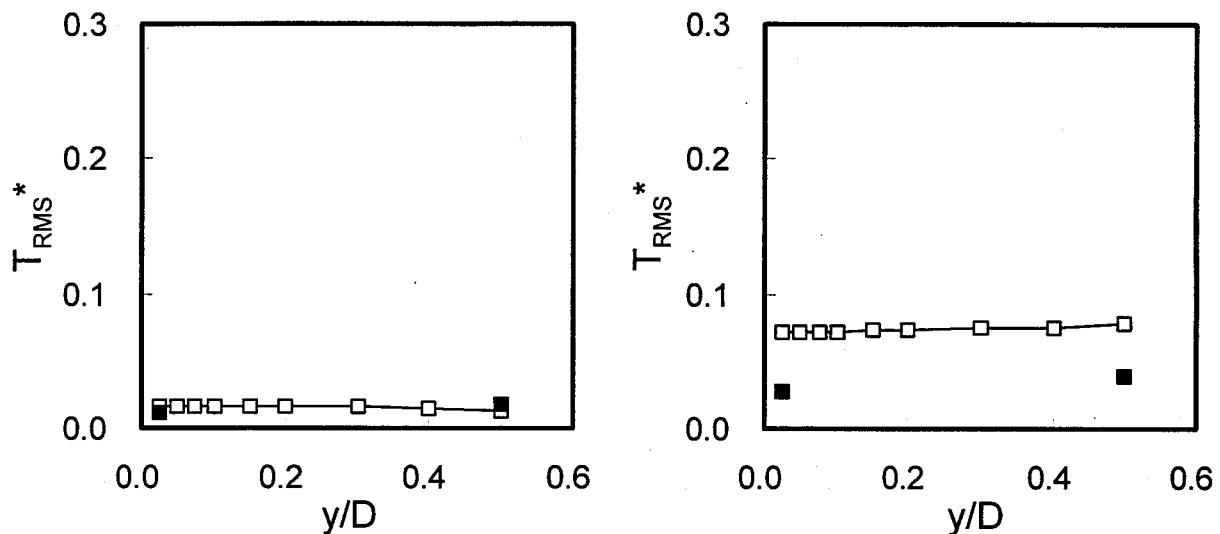


(b) Temperature Fluctuation Intensity

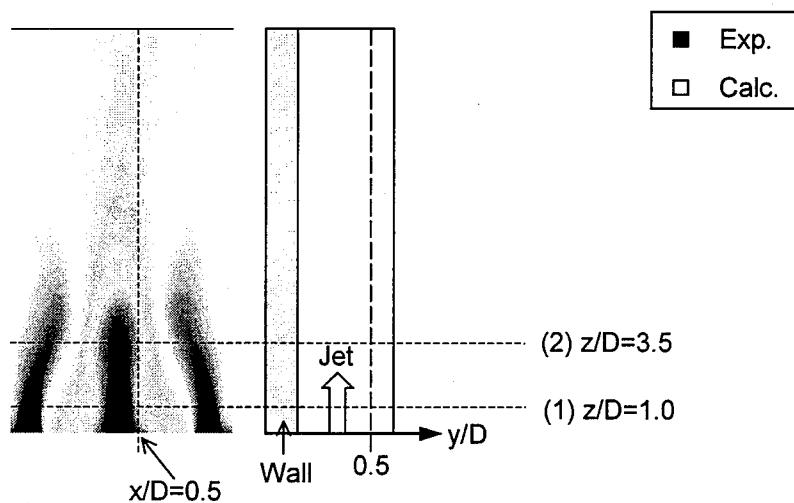
(3)  $z/D=5.0$ (4)  $z/D=10.0$ Fig. 4.1.7(b) Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D = -0.75$ )

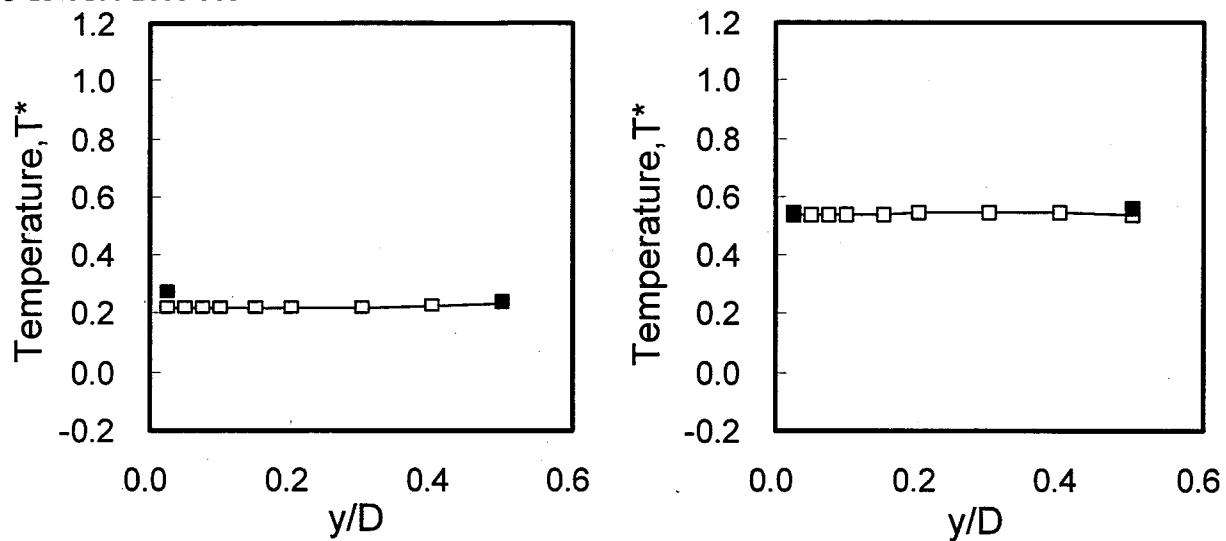


(a) Time-Averaged Temperature

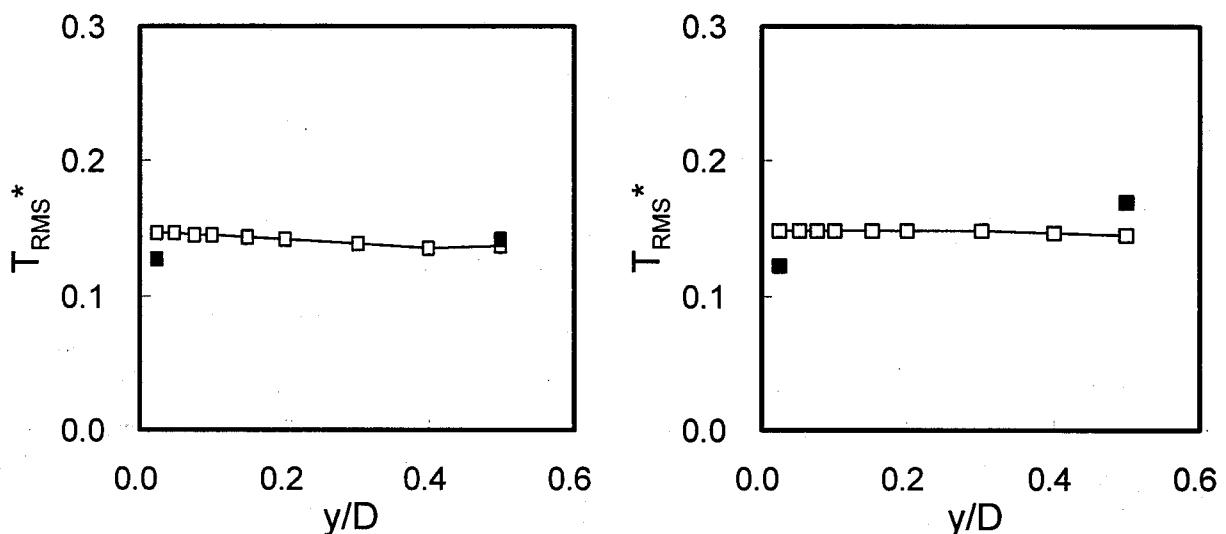


(b) Temperature Fluctuation Intensity

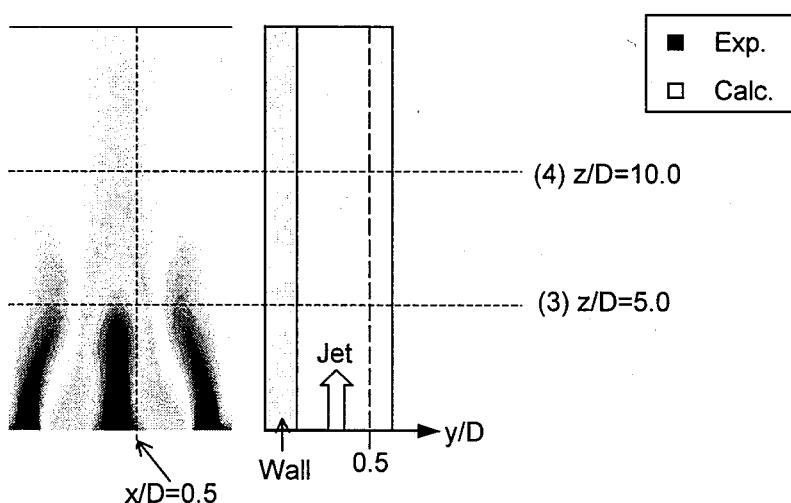
(1)  $z/D=1.0$ (2)  $z/D=3.5$ Fig. 4.1.8(a) Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D=0.5$ )

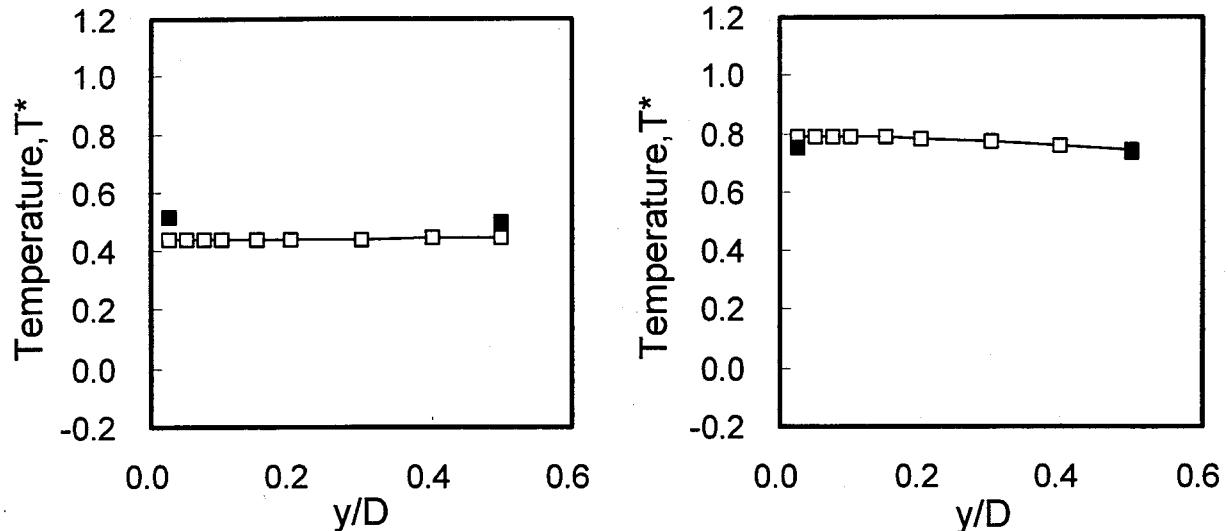


(a) Time-Averaged Temperature

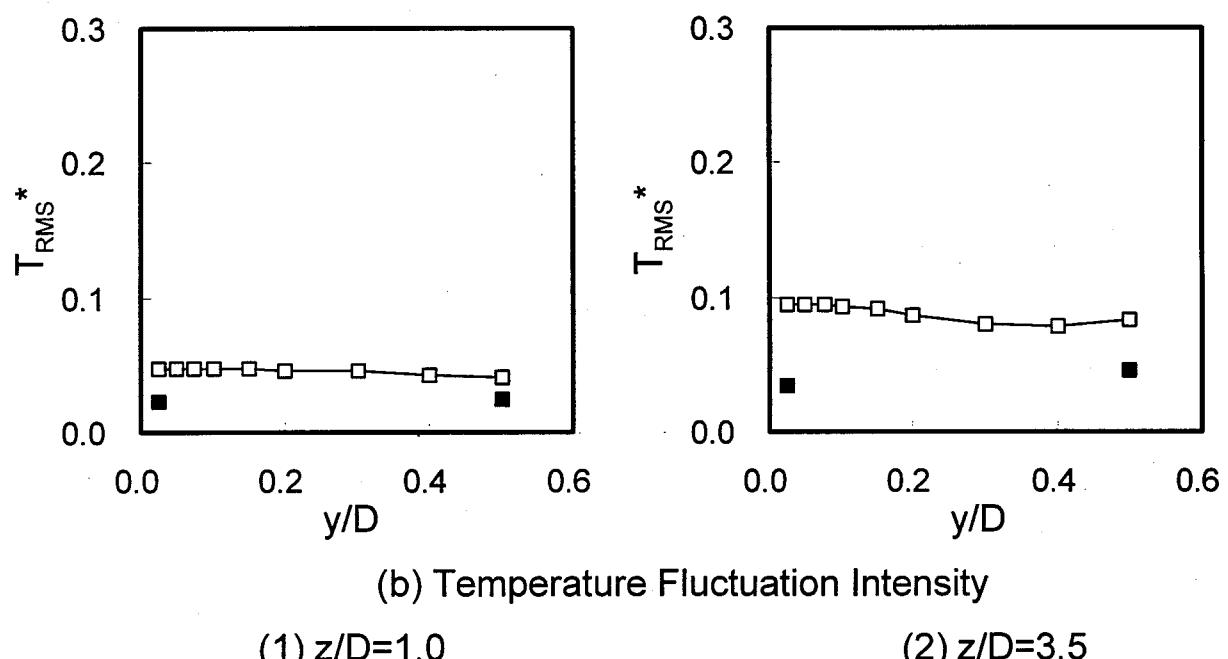


(b) Temperature Fluctuation Intensity

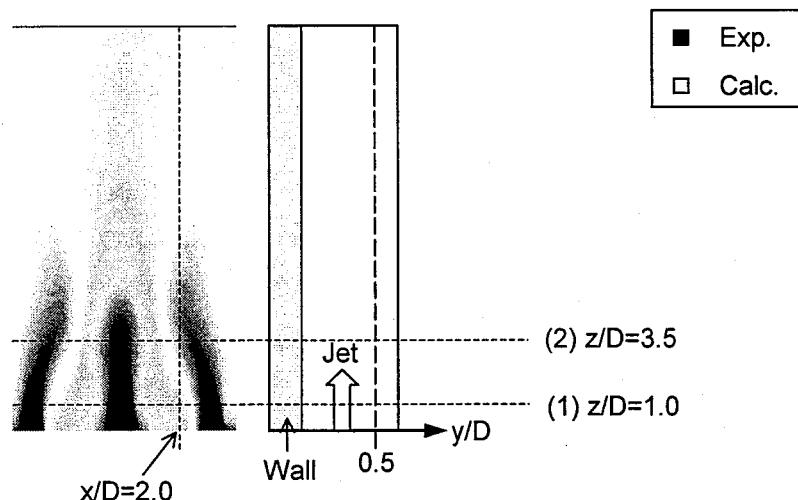
(3)  $z/D=5.0$ (4)  $z/D=10.0$ Fig. 4.1.8(b) Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D=0.5$ )

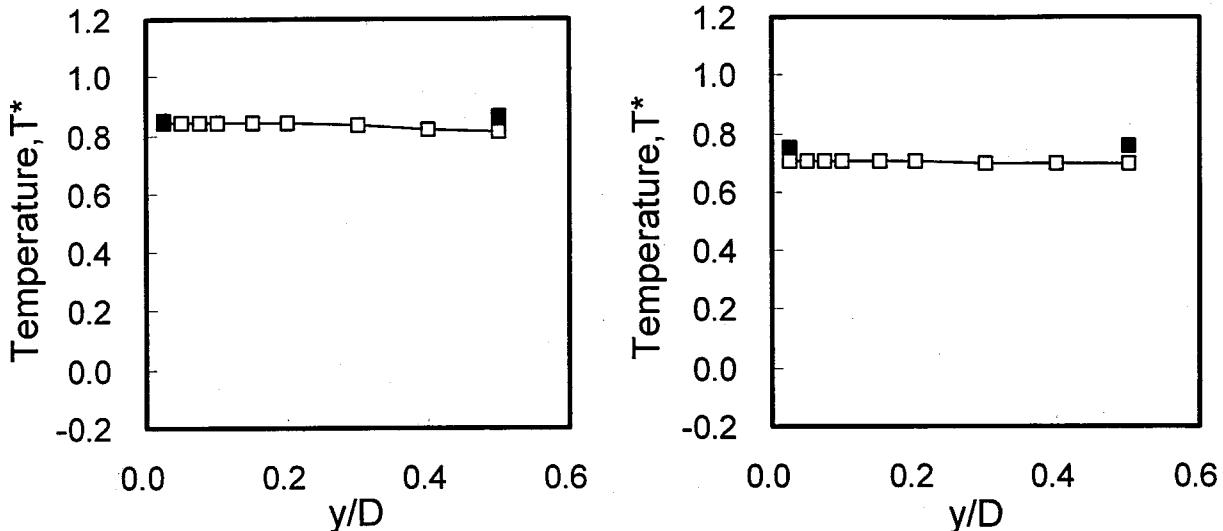


(a) Time-Averaged Temperature

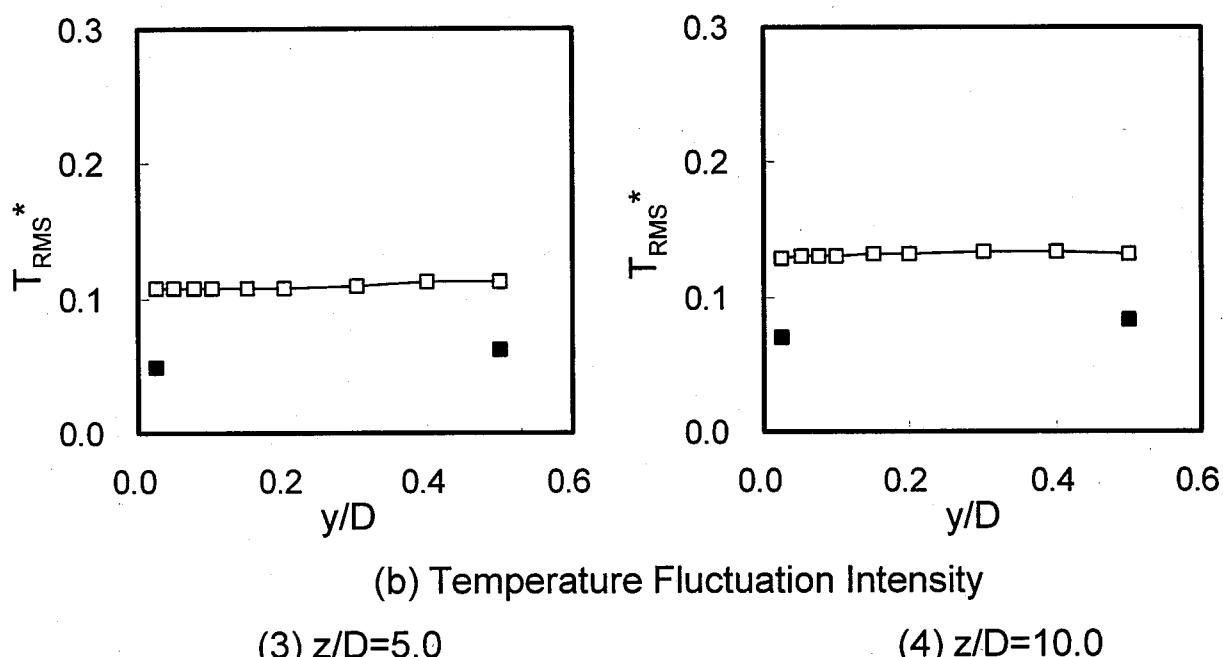


(b) Temperature Fluctuation Intensity

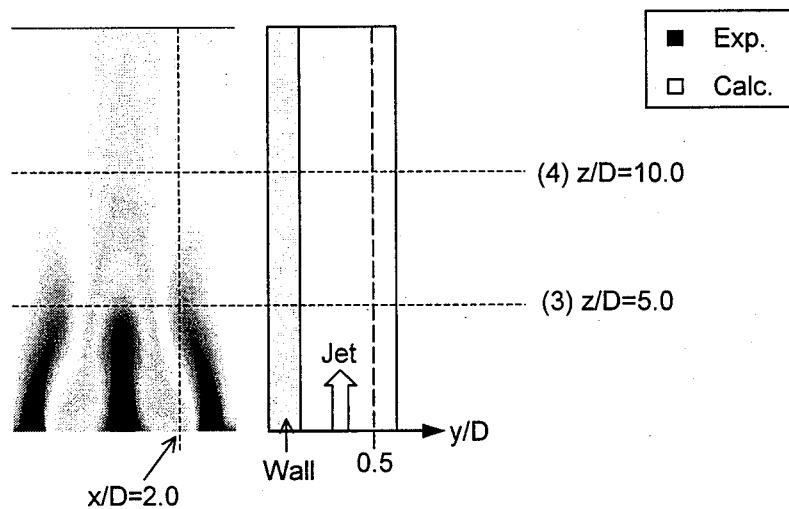
(1)  $z/D=1.0$ (2)  $z/D=3.5$ Fig. 4.1.9(a) Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D=2.0$ )

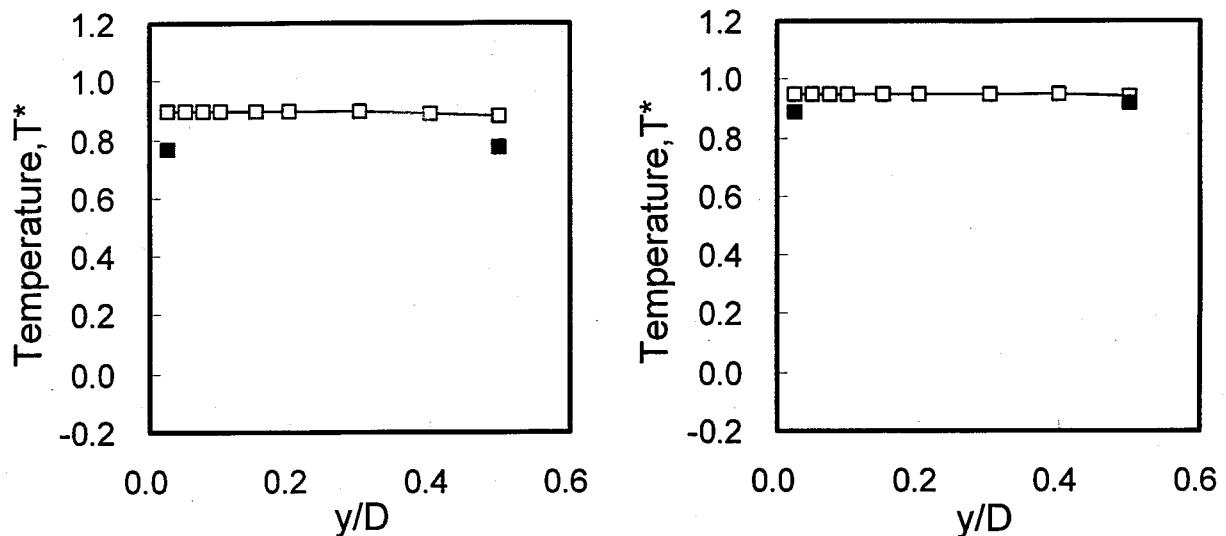


(a) Time-Averaged Temperature

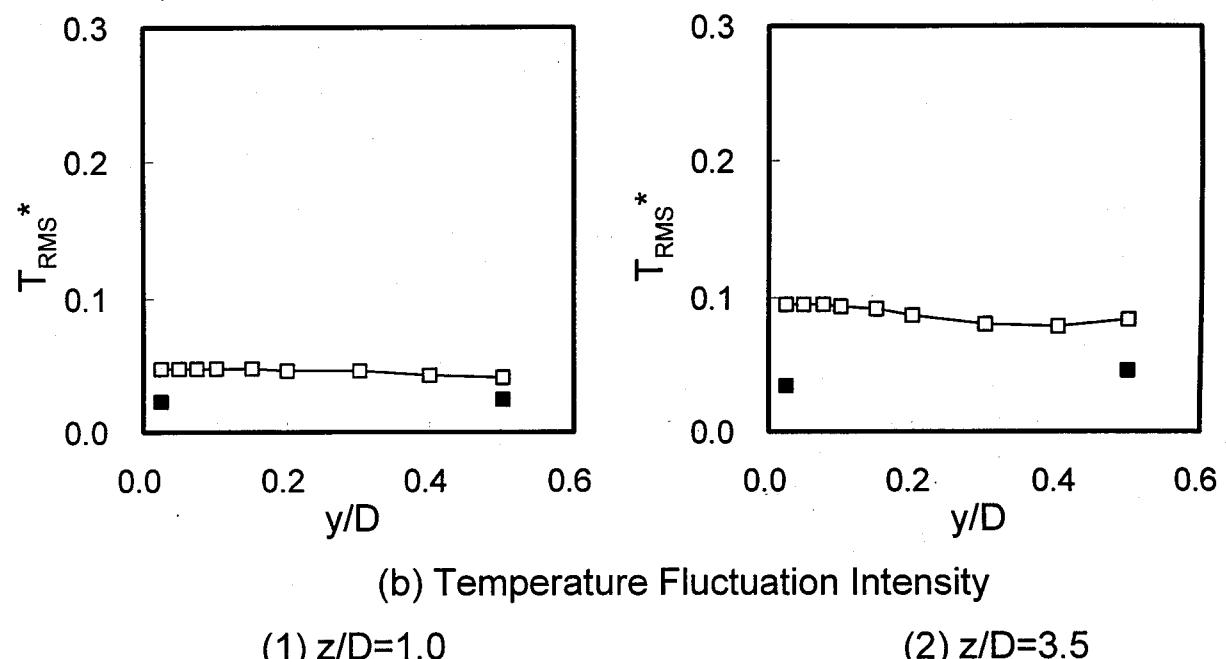


(b) Temperature Fluctuation Intensity

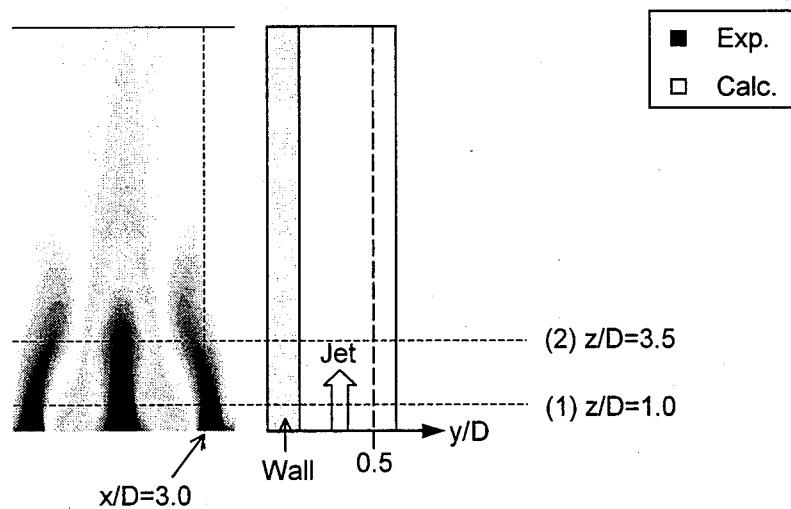
(3)  $z/D=5.0$ (4)  $z/D=10.0$ Fig. 4.1.9(b) Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D=2.0$ )

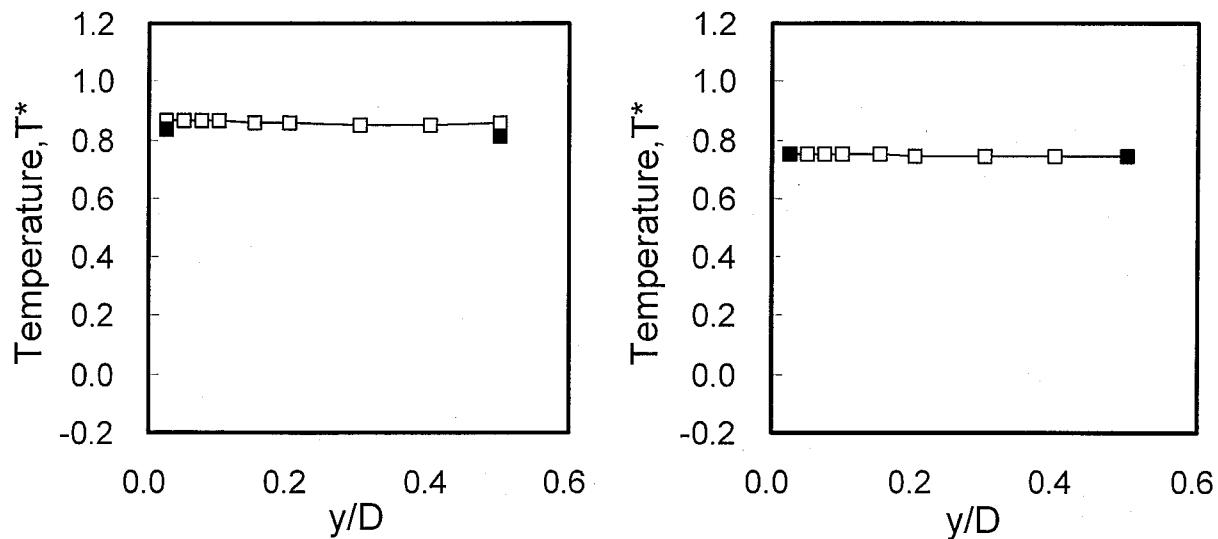


(a) Time-Averaged Temperature

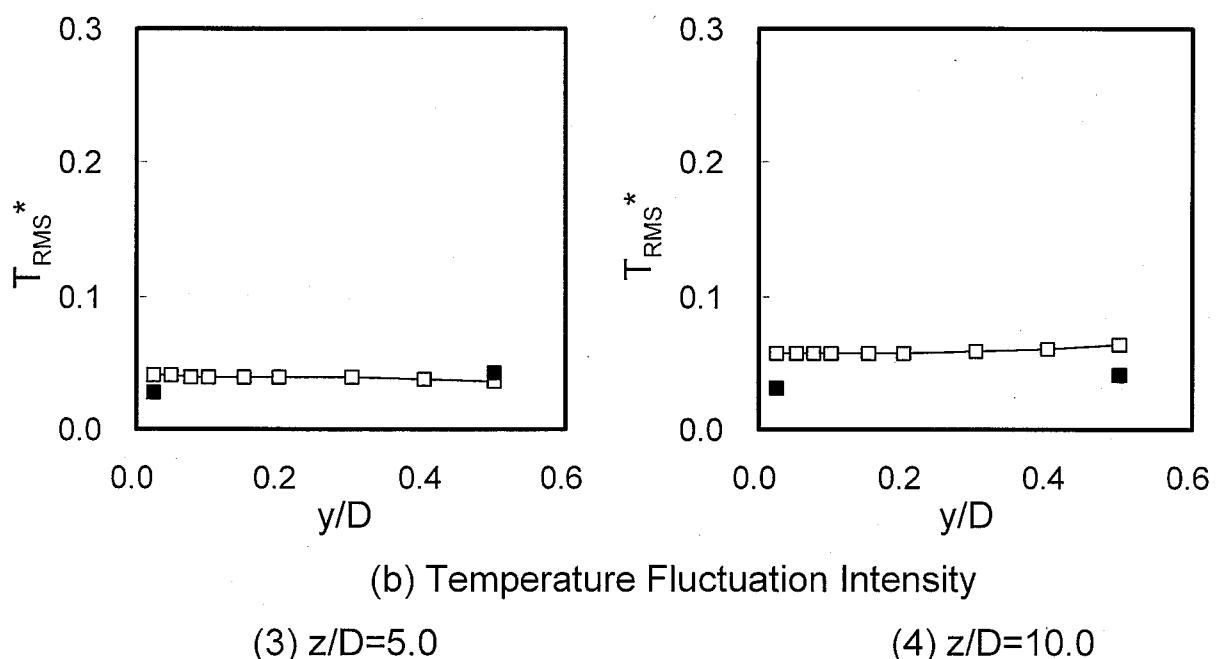


(b) Temperature Fluctuation Intensity

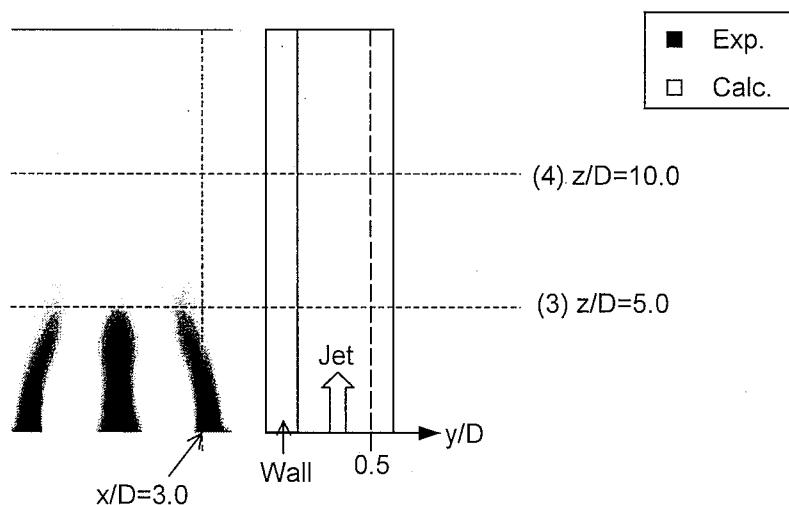
(1)  $z/D=1.0$ (2)  $z/D=3.5$ Fig. 4.1.10(a) Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D=3.0$ )



(a) Time-Averaged Temperature



(b) Temperature Fluctuation Intensity

(3)  $z/D=5.0$ (4)  $z/D=10.0$ Fig. 4.1.10(b) Comparisons of Effect of Wall of Time-Averaged Temperature Fields between Experimental and Numerical Results. ( $x/D=3.0$ )

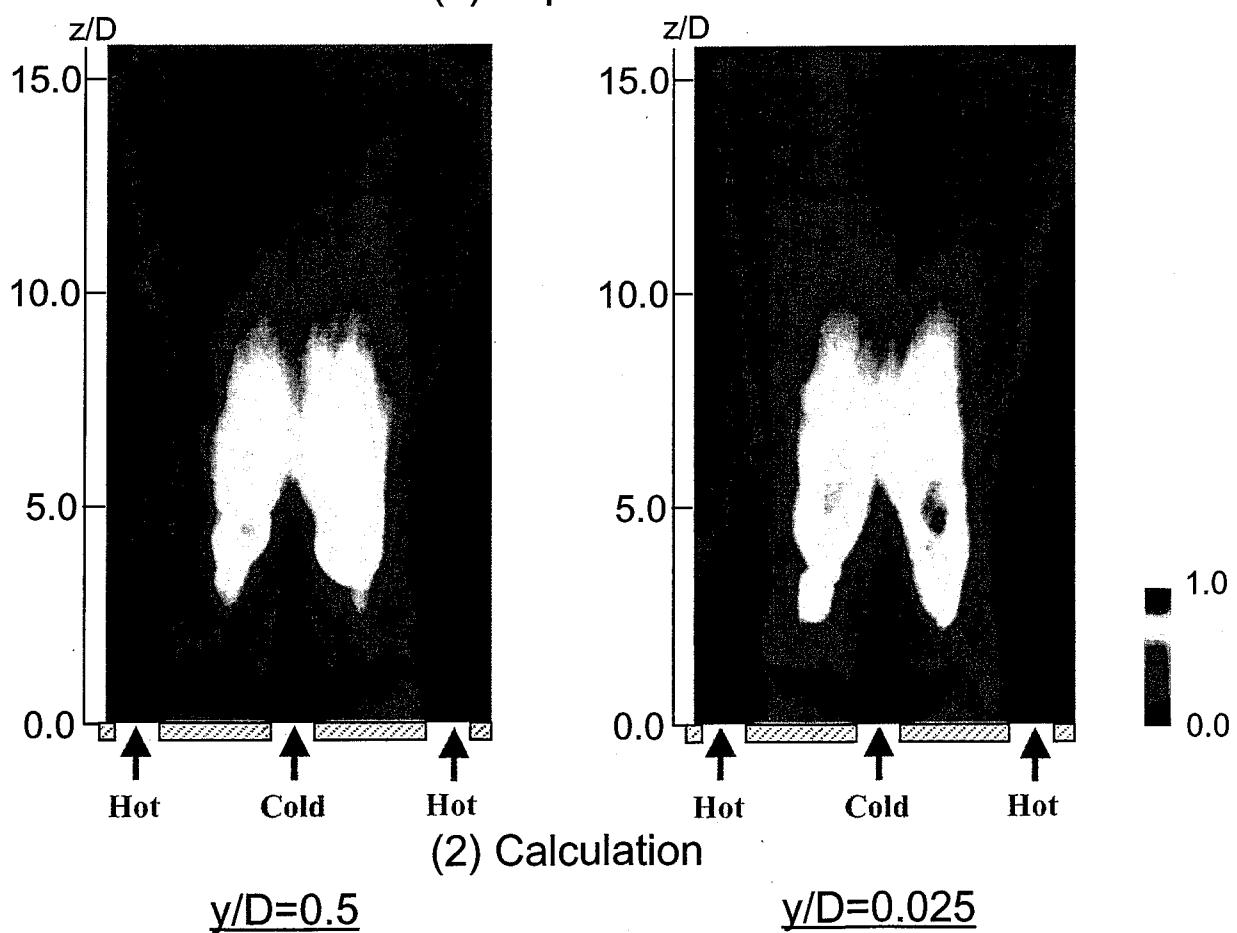
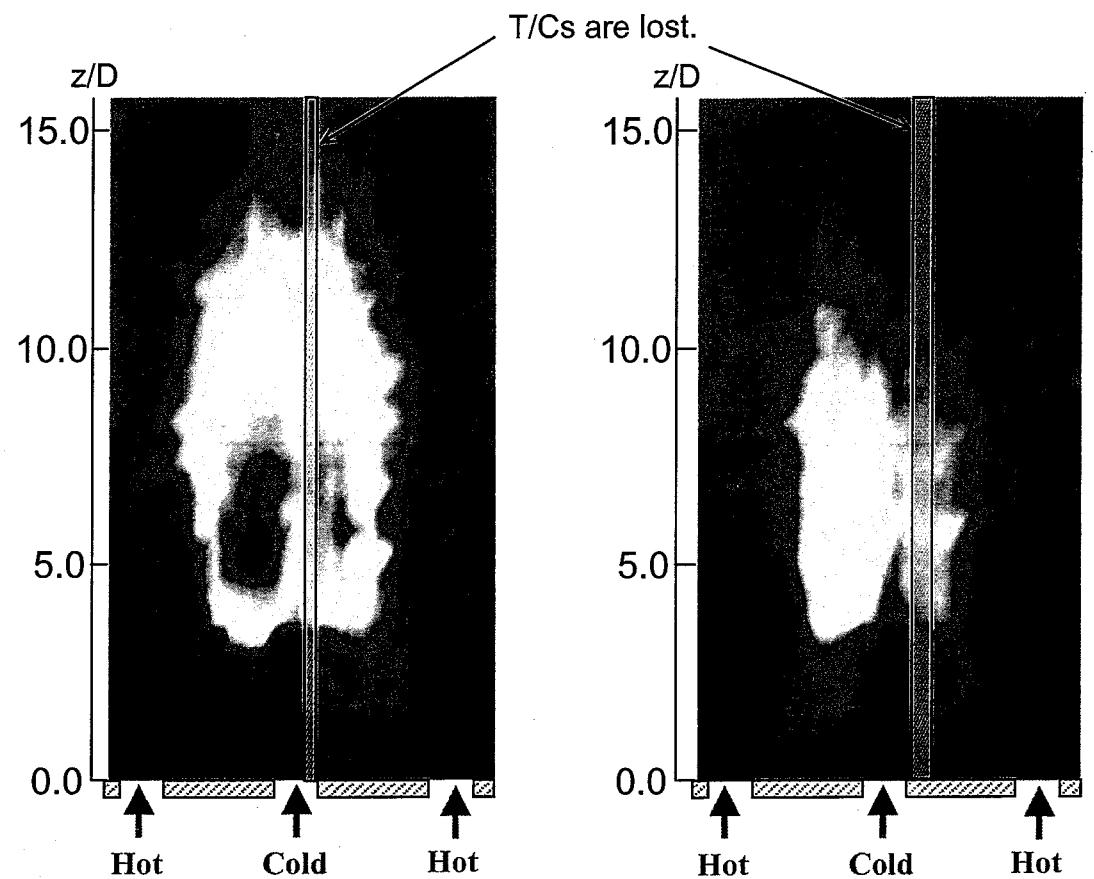


Fig. 4.2.1 Comparisons of Contours of Peak-to-Peak Values based on Rain-flow Method between Experimental and Numerical Results.

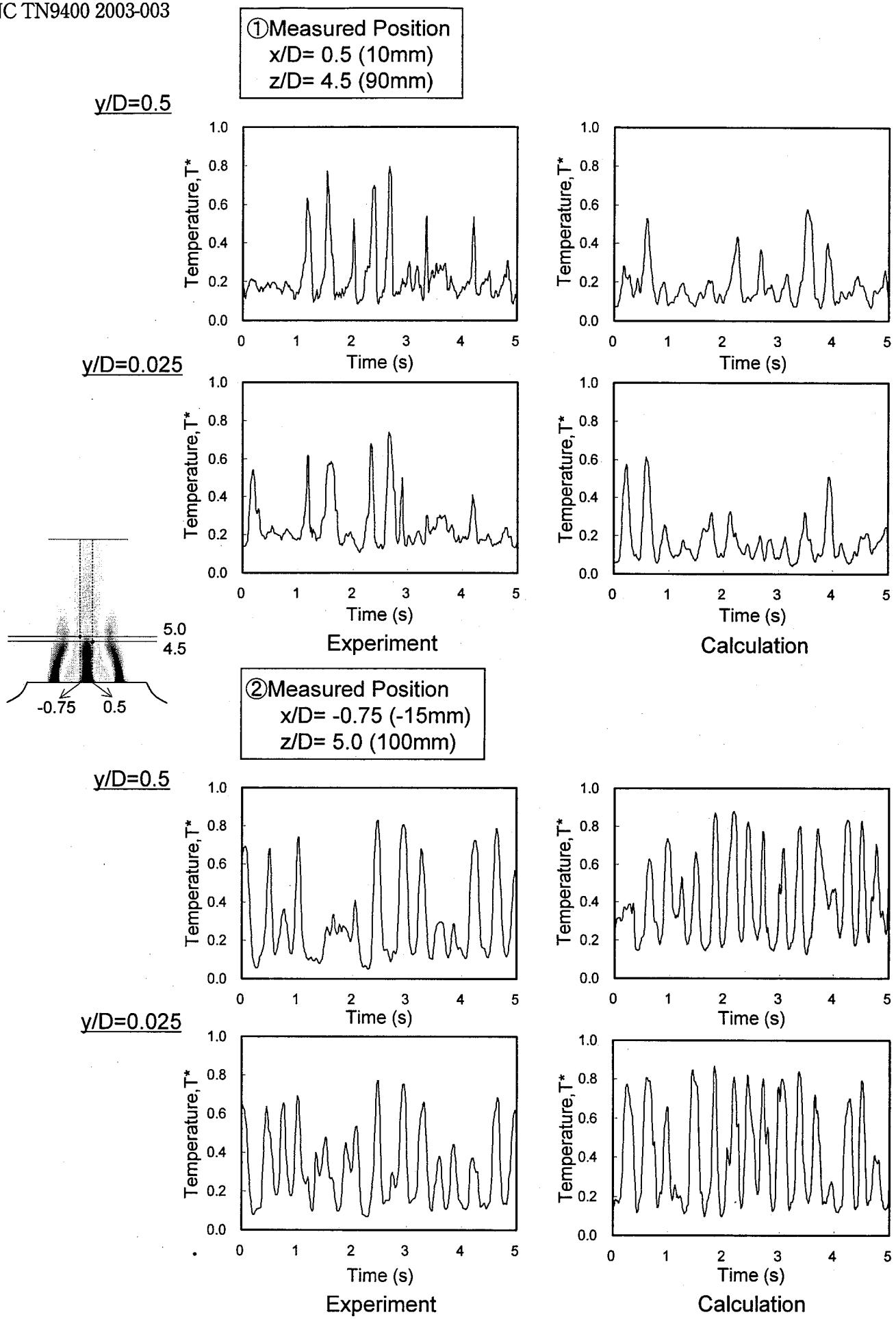


Fig. 4.2.2 Comparisons of Temperature Trends between Experimental and Numerical Results.

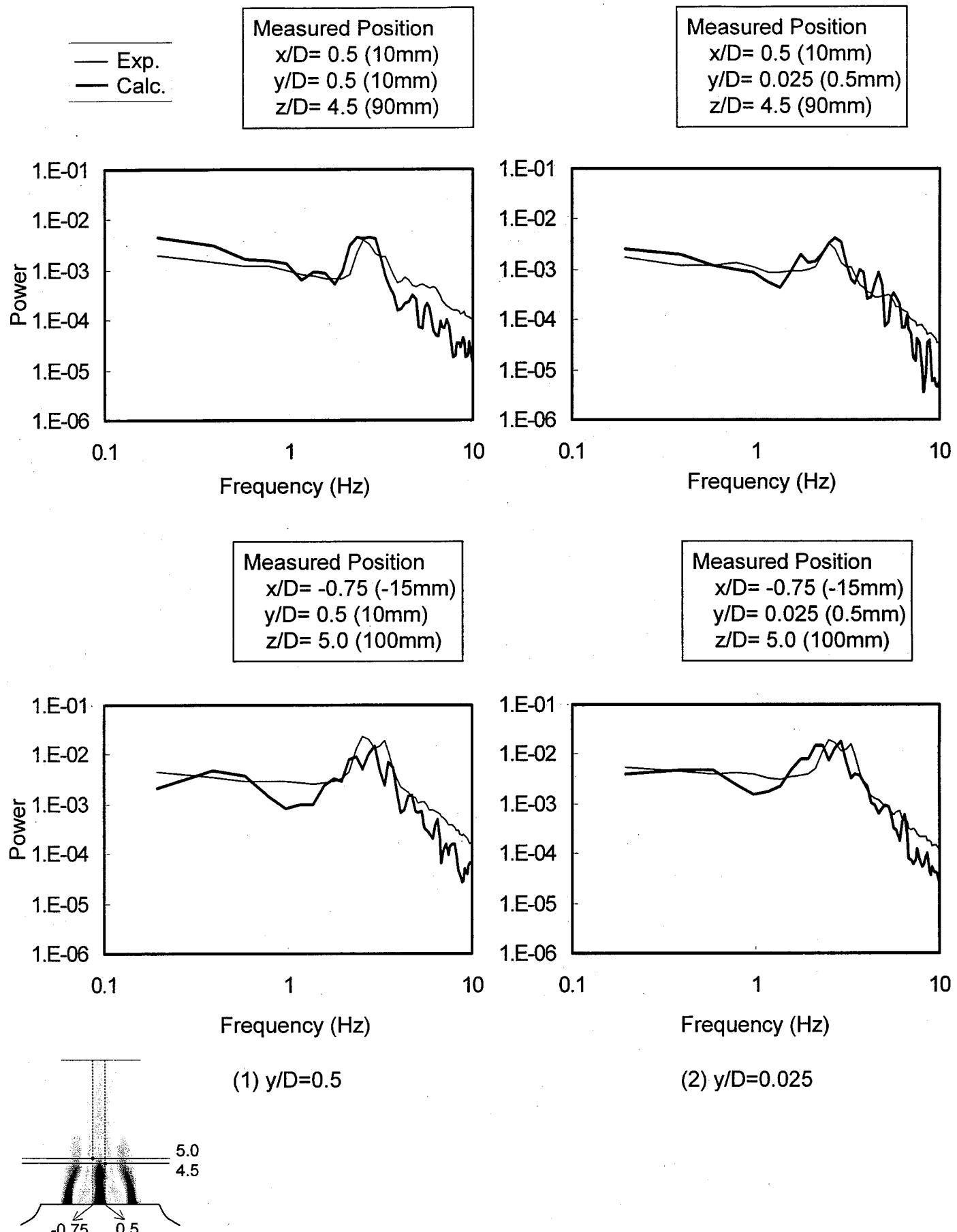


Fig. 4.2.3 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation between Experimental and Numerical Results.

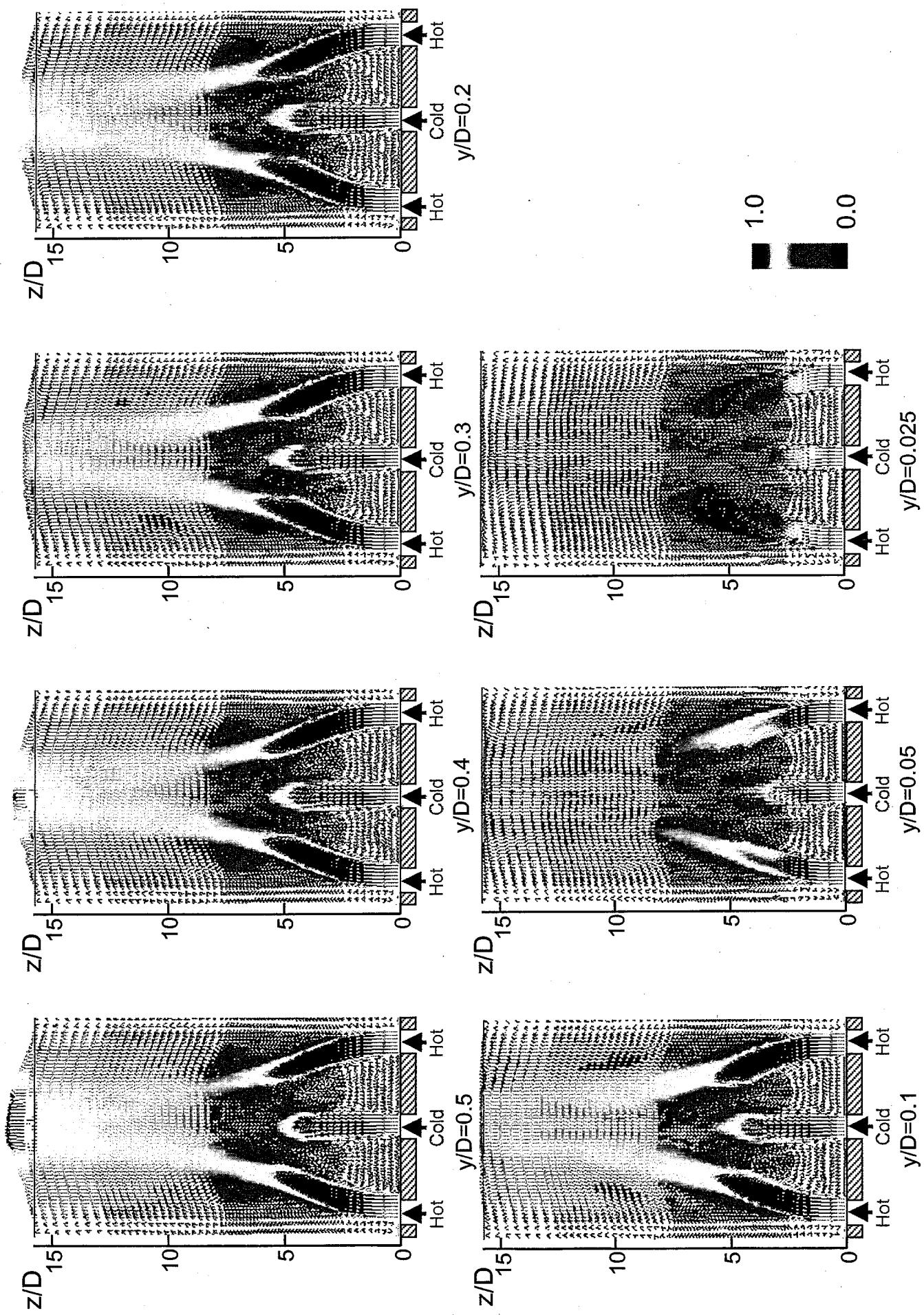


Fig. 5.1.1 Effect of Wall on Time-Averaged Velocity Vectors.

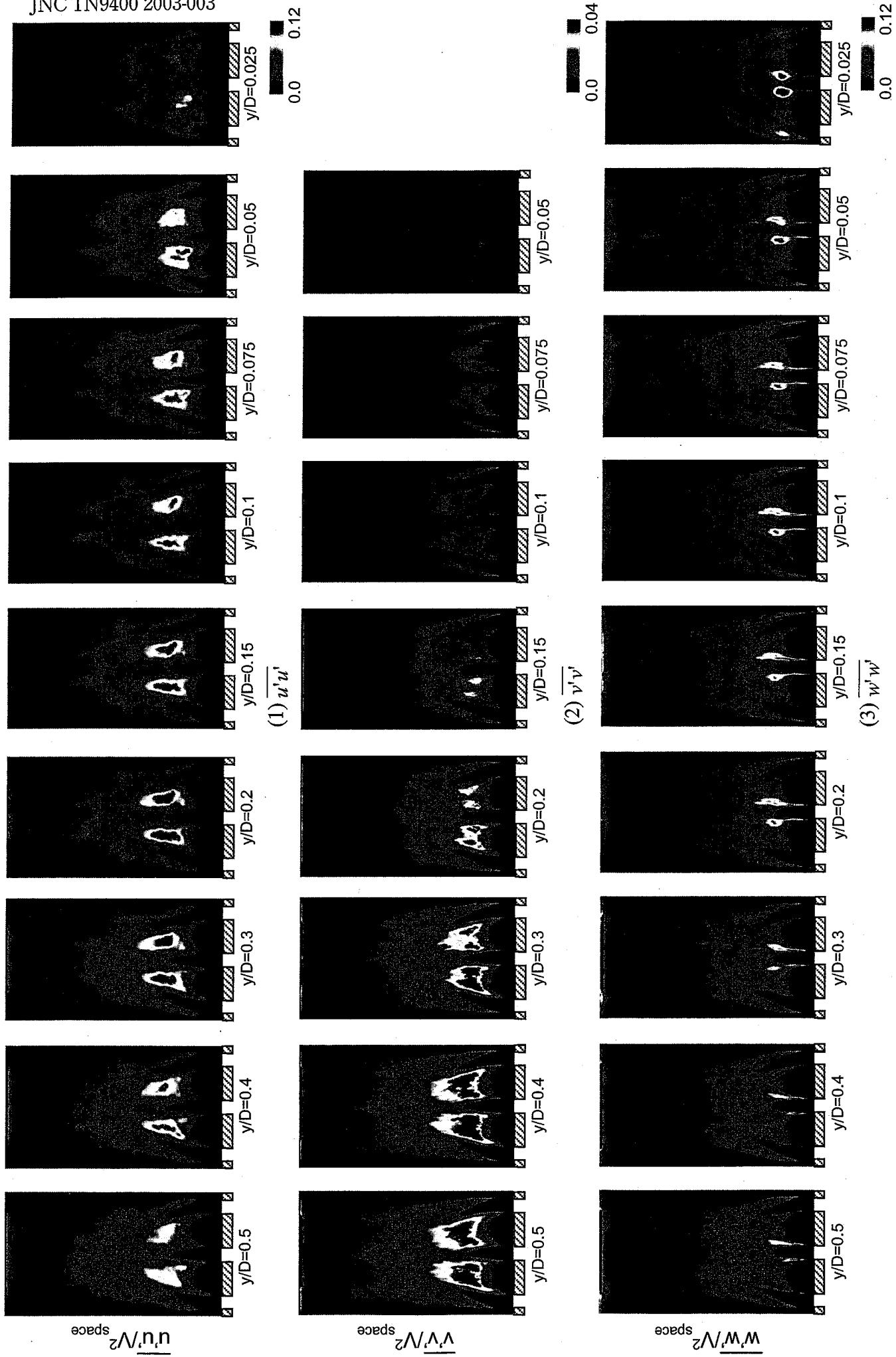


Fig. 5.1.2 Effect of Wall on Contours of Normal Components of Second Moments in Turbulence.

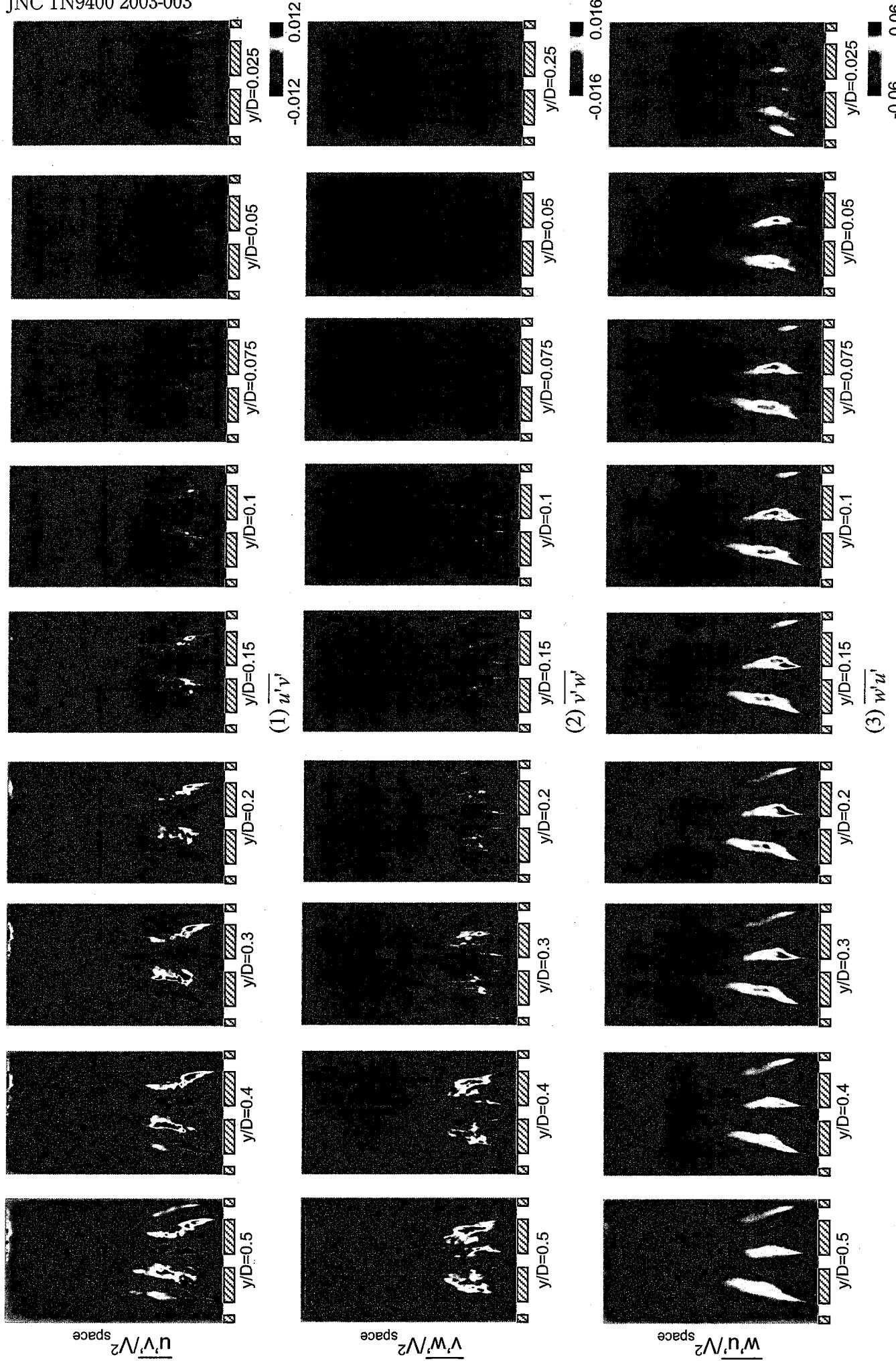


Fig. 5.1.3 Effect of Wall on Contours of Shear Components of Second Moments in Turbulence.

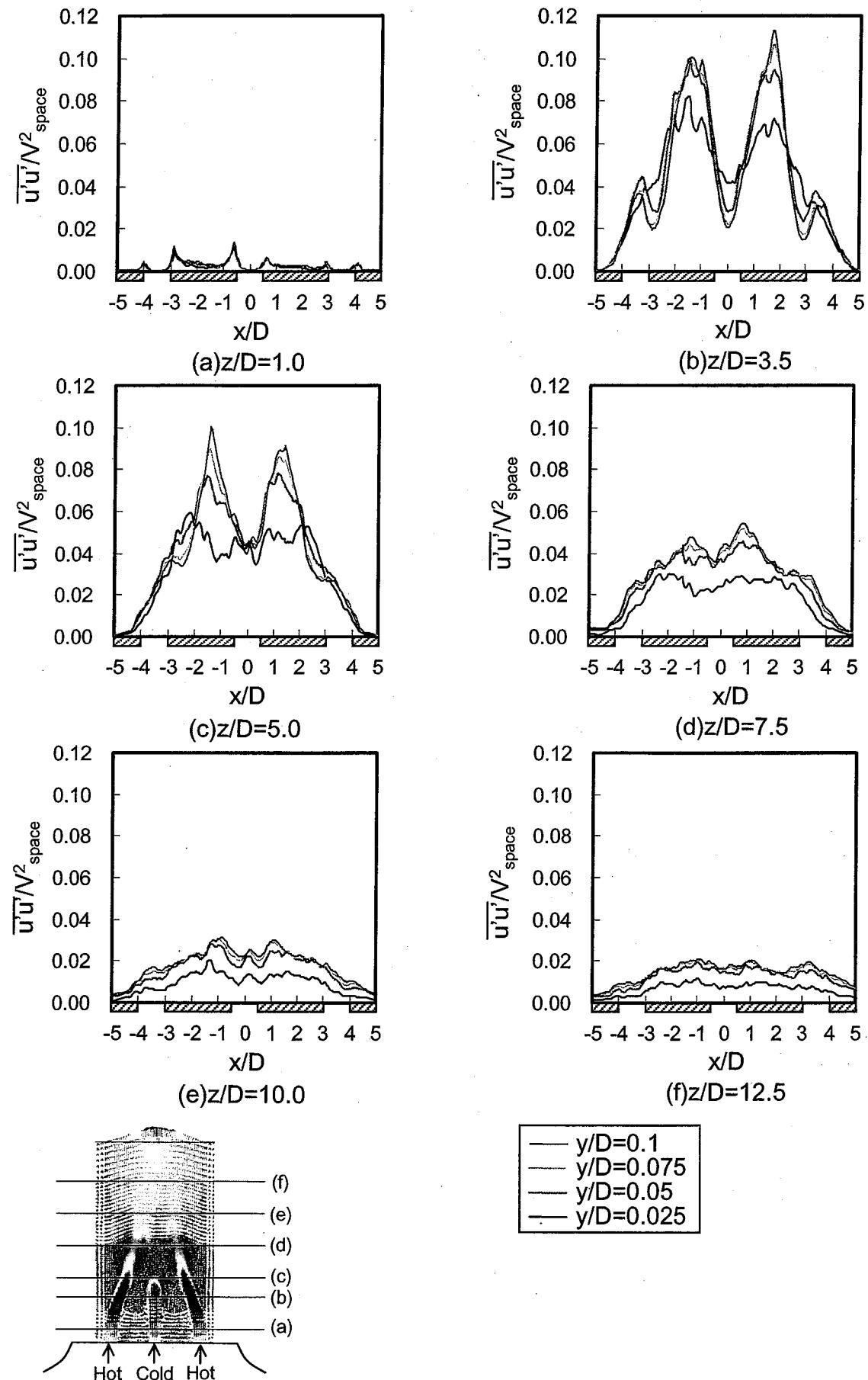


Fig. 5.1.4 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Horizontal Normal Components of Second Moments in Turbulence.

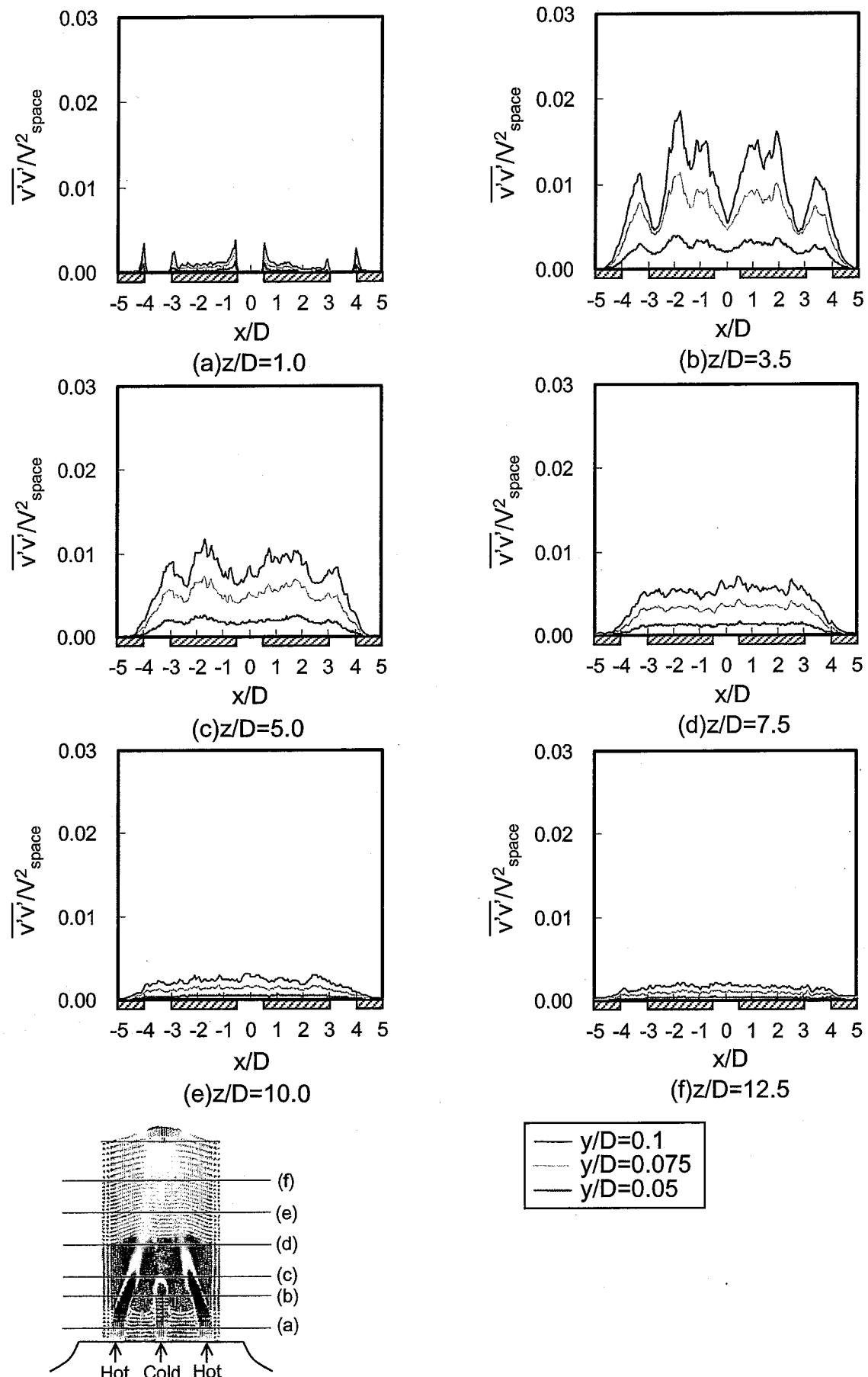


Fig. 5.1.5 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Depth Normal Components of Second Moments in Turbulence.

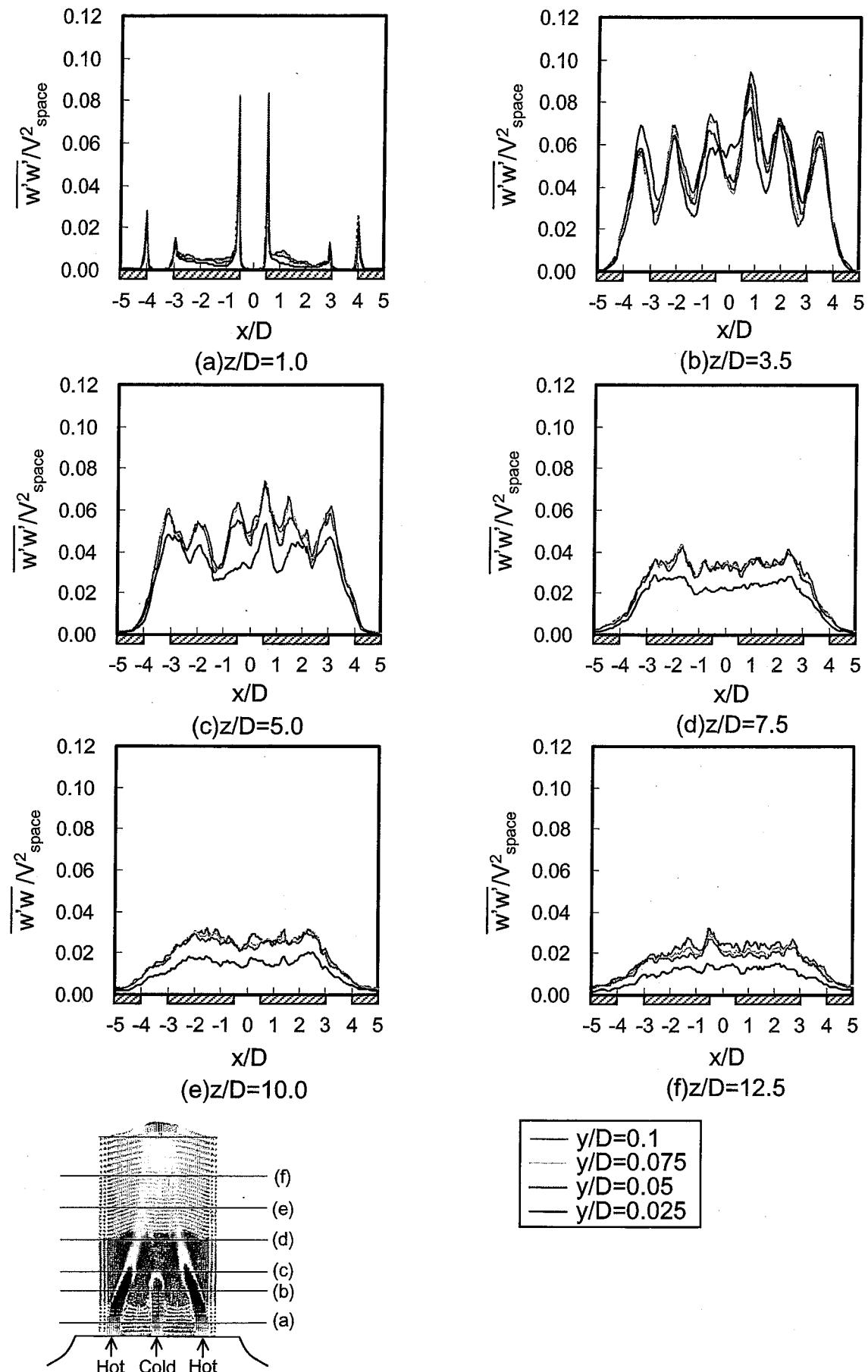


Fig. 5.1.6 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Vertical Normal Components of Second Moments in Turbulence.

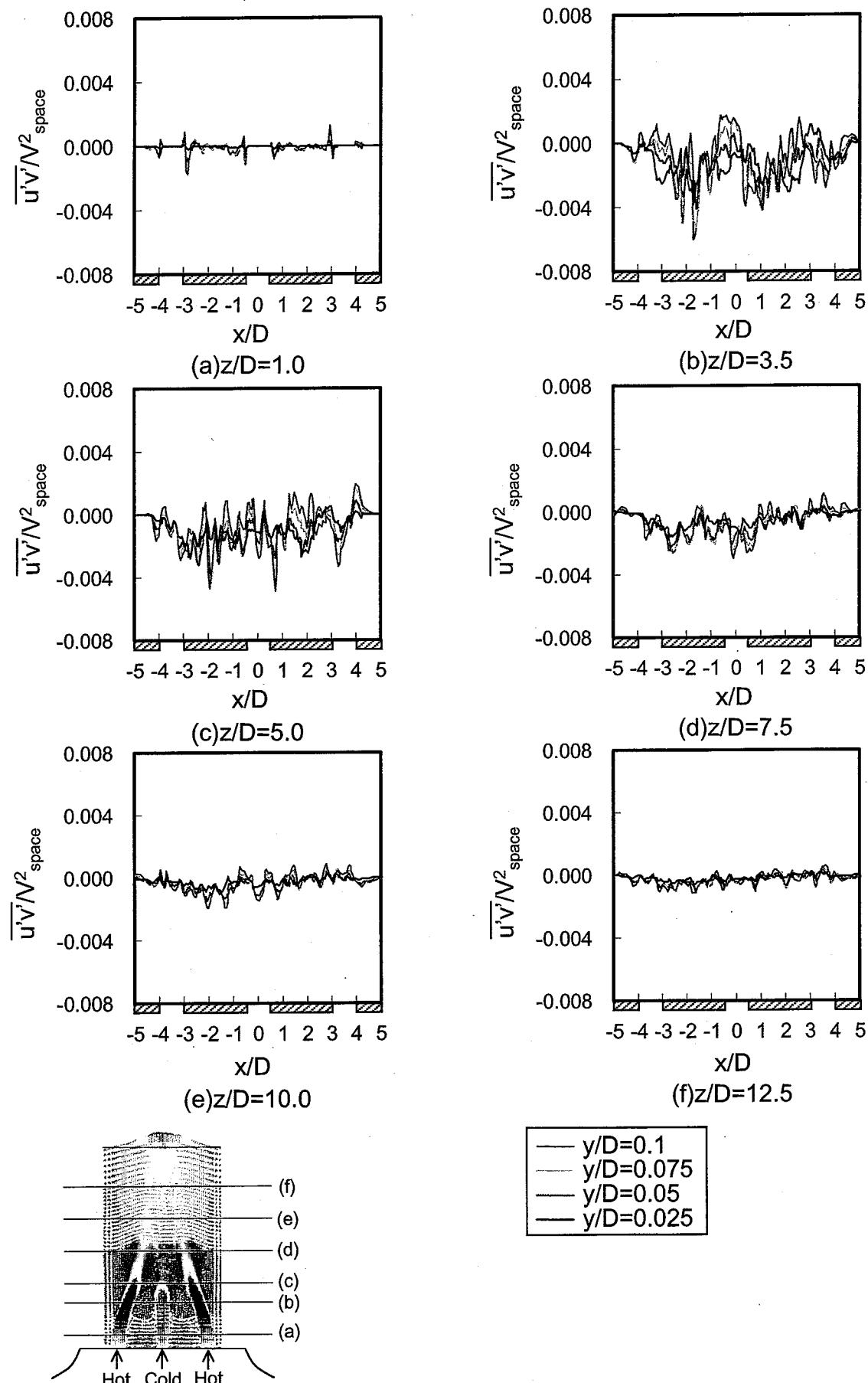


Fig. 5.1.7 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Shear Components of Second Moments in between Horizontal and Depth Directions in Turbulence.

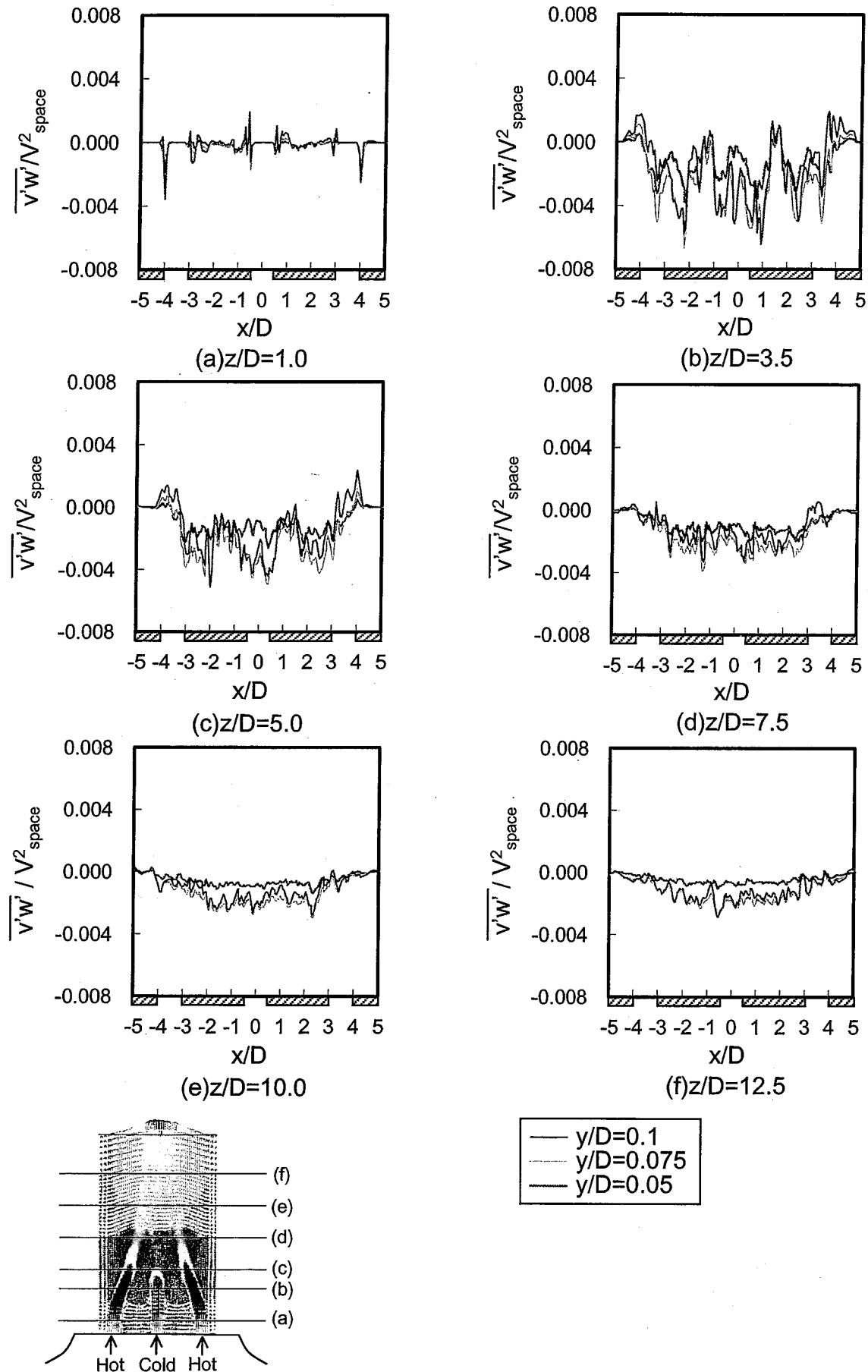


Fig. 5.1.8 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Shear Components of Second Moments in between Depth and Vertical Directions in Turbulence.

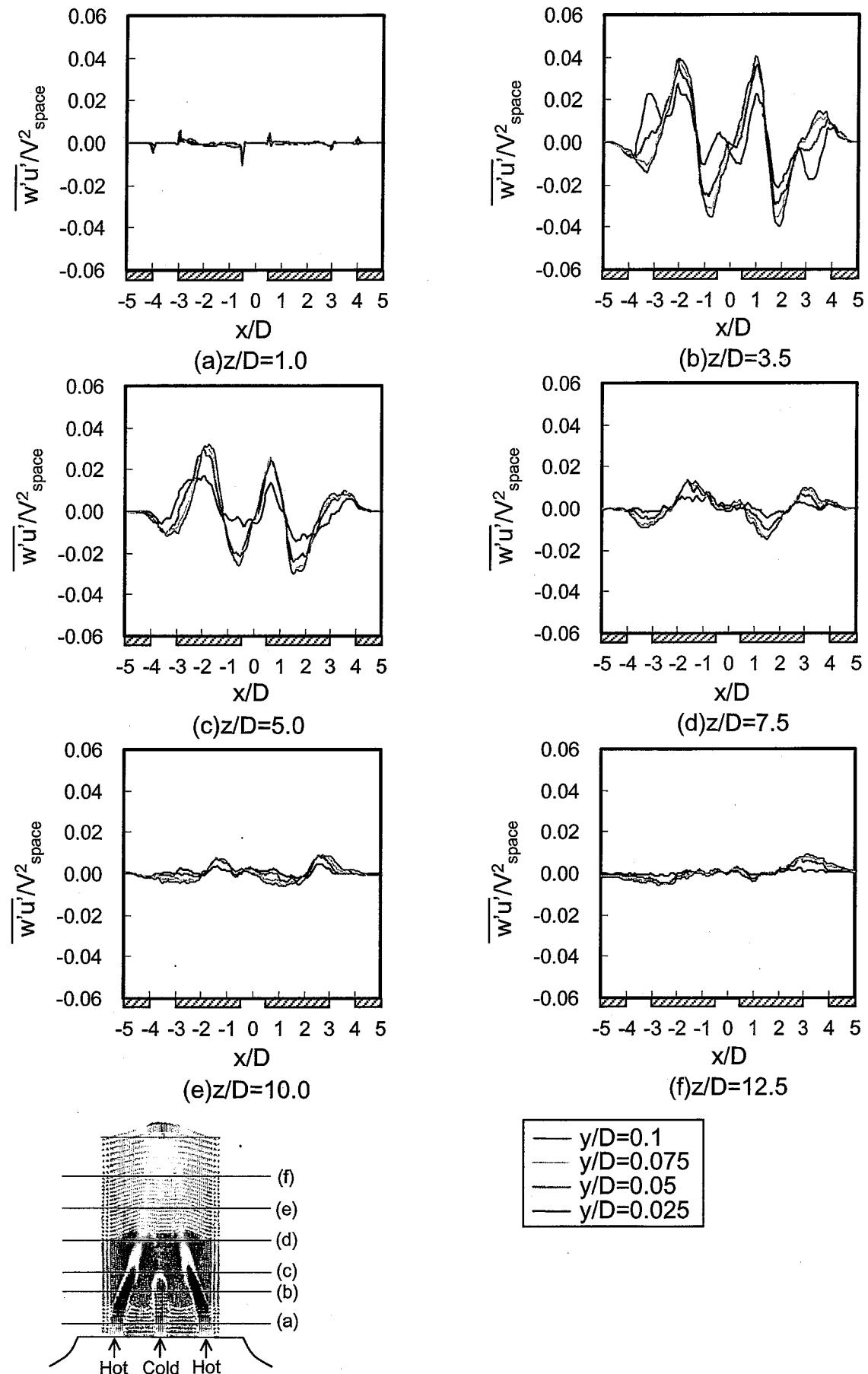


Fig. 5.1.9 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Shear Components of Second Moments in between Vertical and Horizontal Directions in Turbulence.

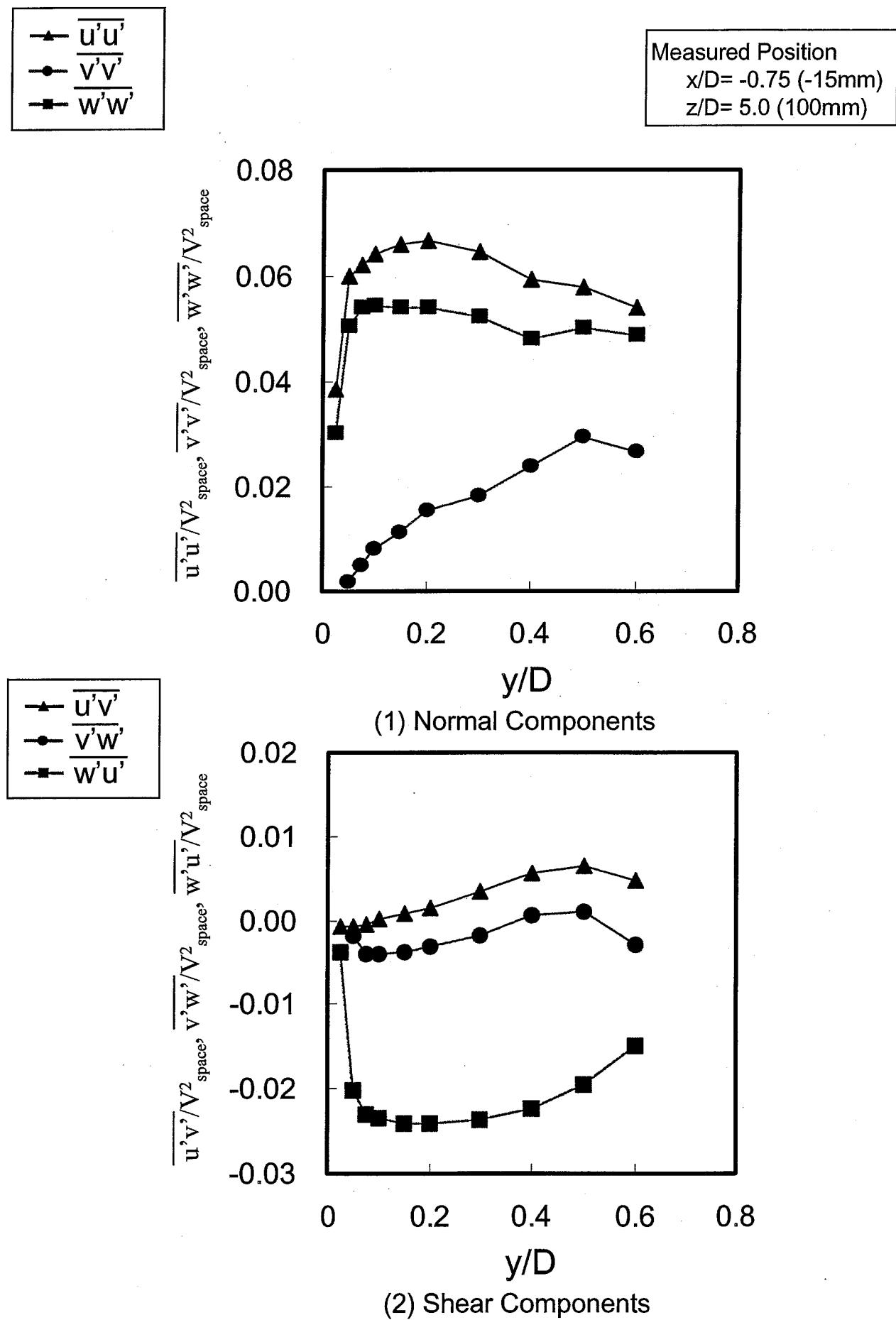


Fig. 5.1.10 Effect of Wall on Second Moments in Turbulence.

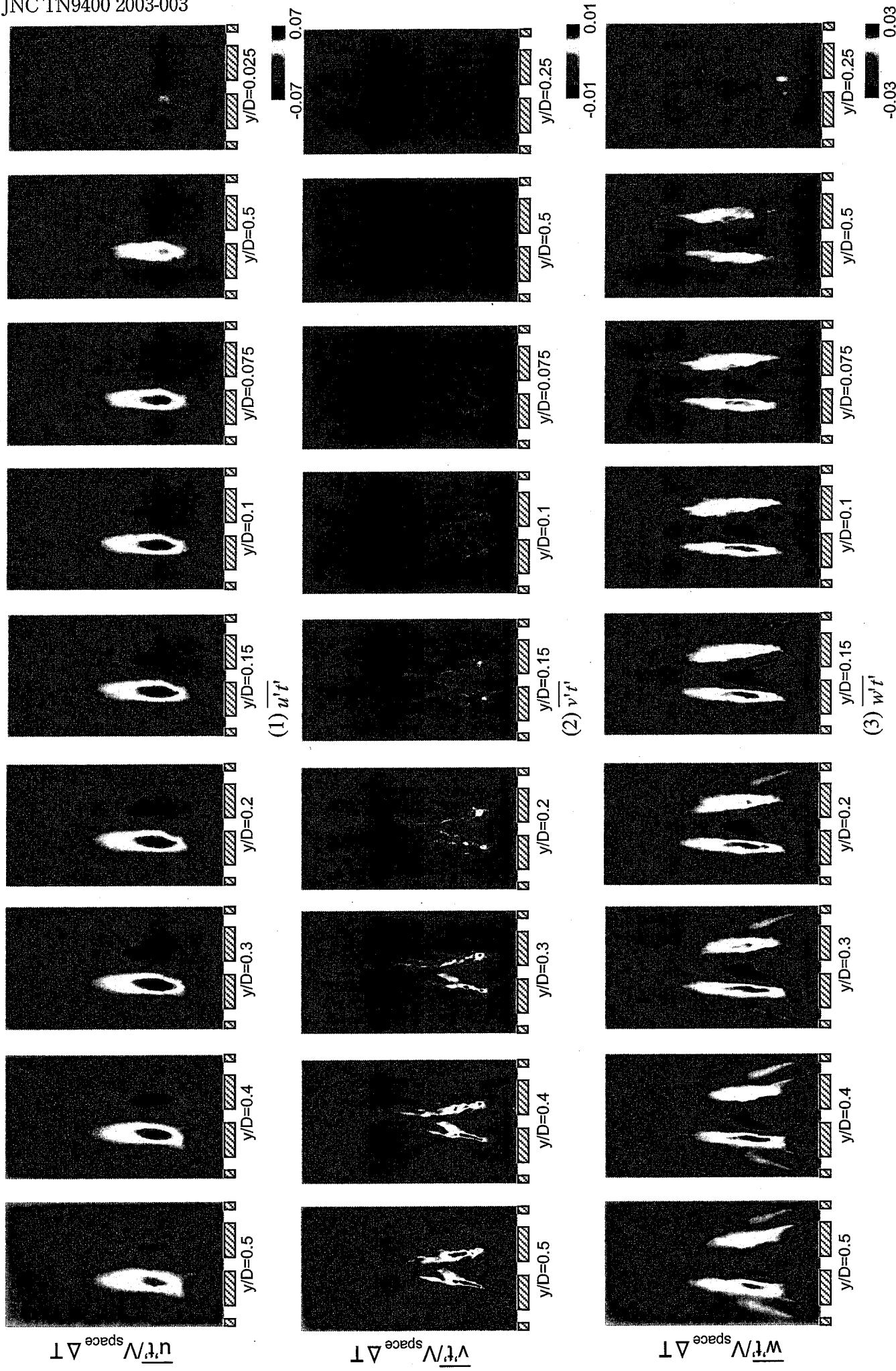


Fig. 5.2.1 Effect of Wall on Contours of Turbulent Heat Fluxes.

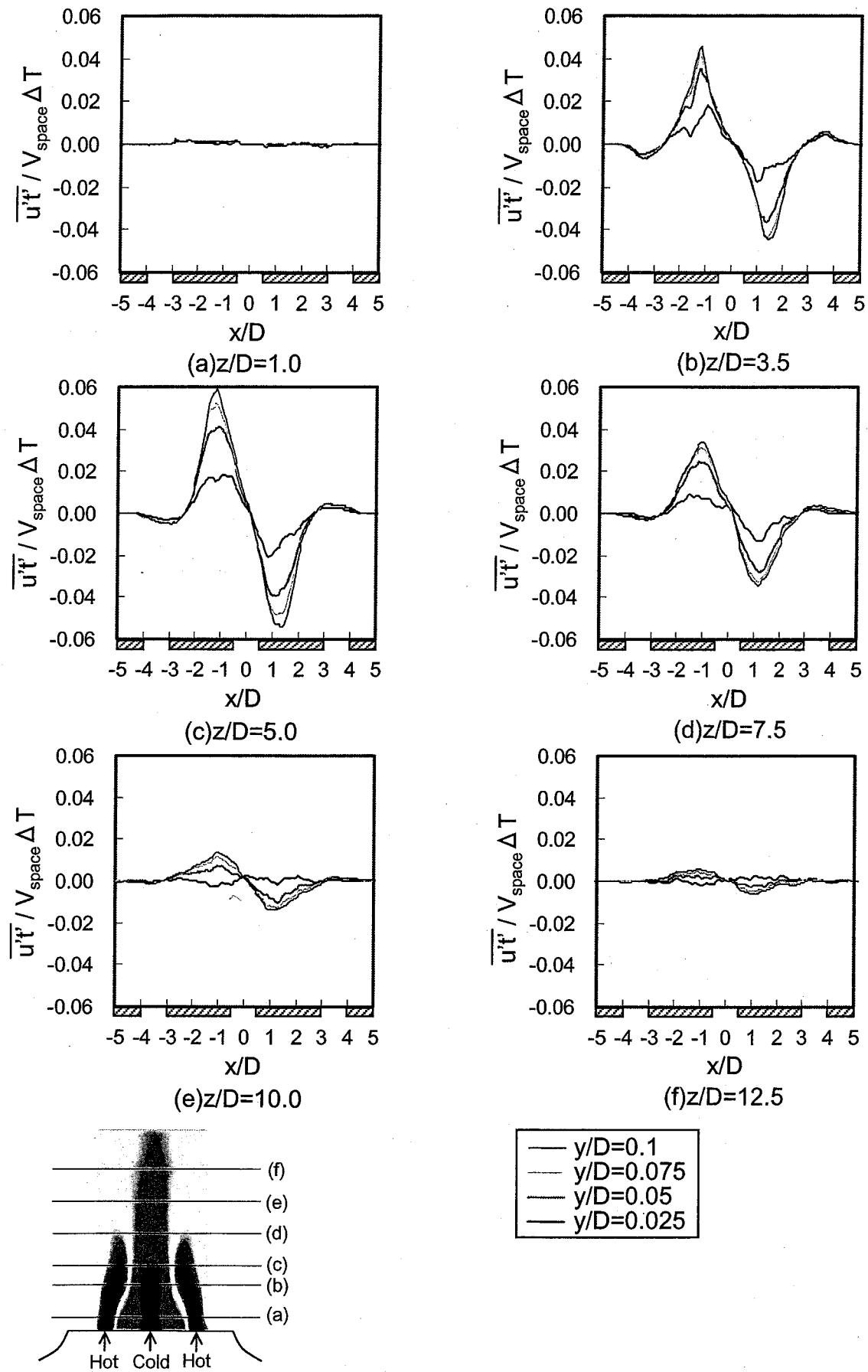


Fig. 5.2.2 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Horizontal Turbulent Heat Fluxes.

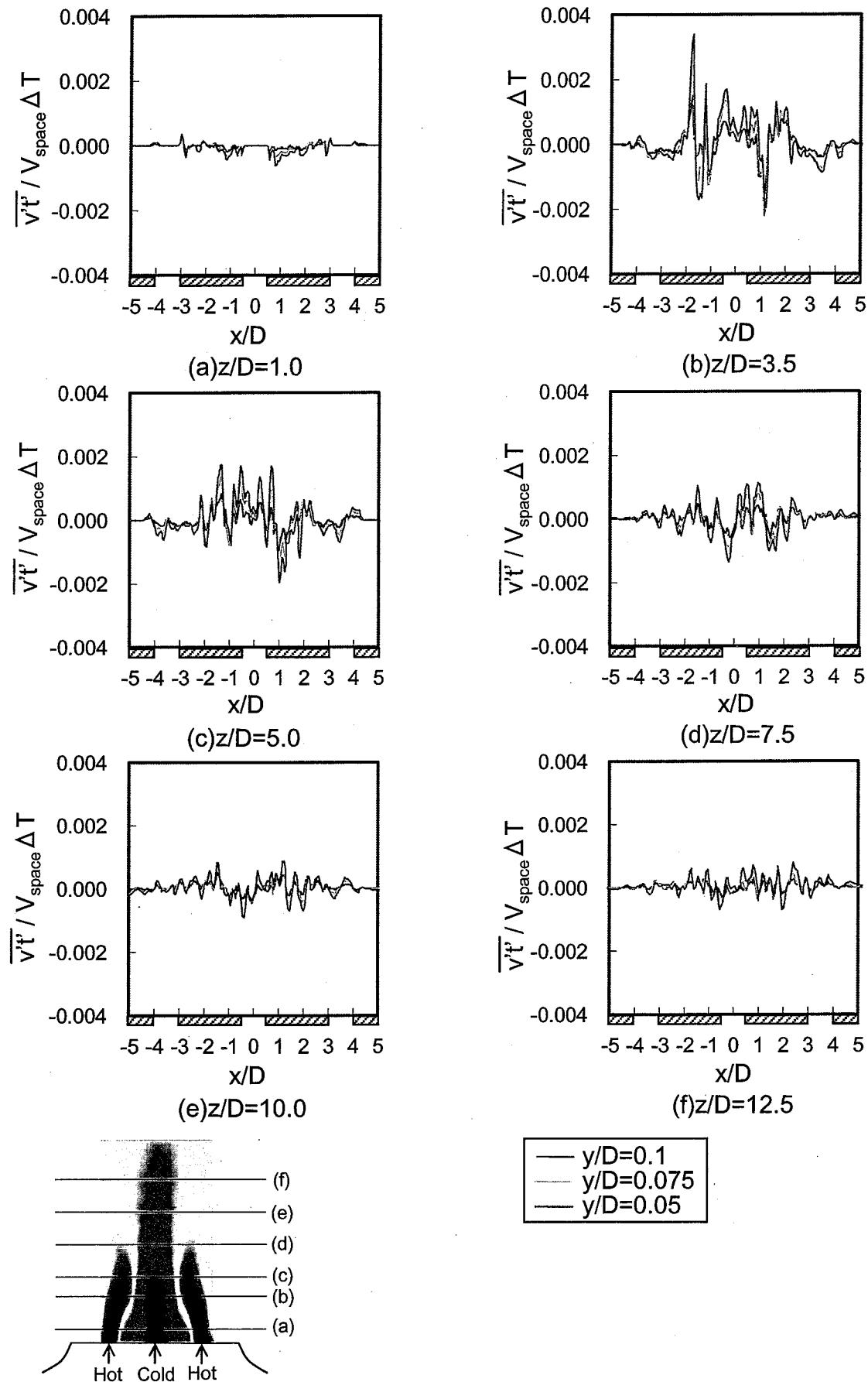


Fig. 5.2.3 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Depth Turbulent Heat Fluxes.

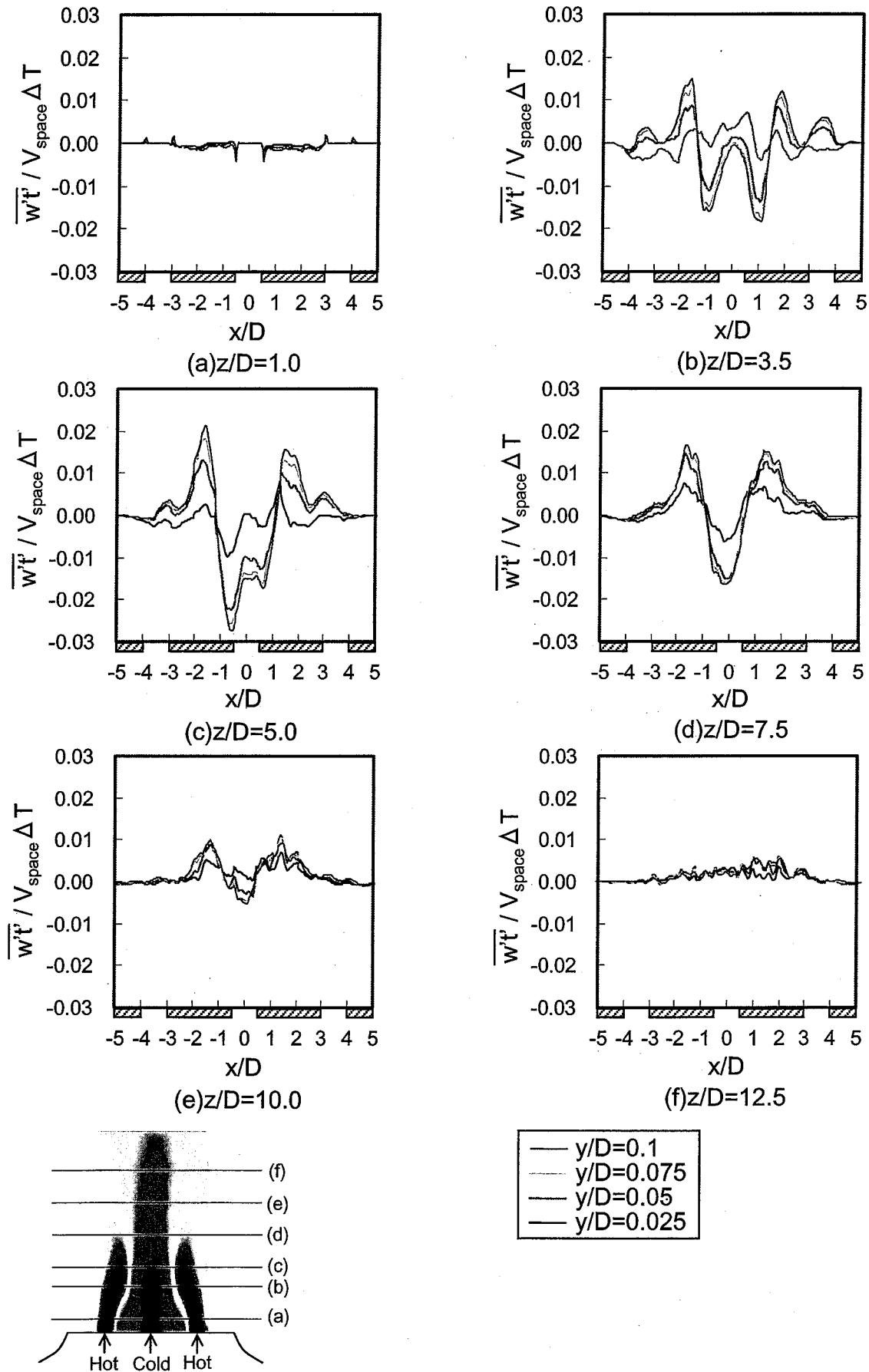


Fig. 5.2.4 Effect of Wall on Horizontal Distributions of Vertical Turbulent Heat Fluxes.

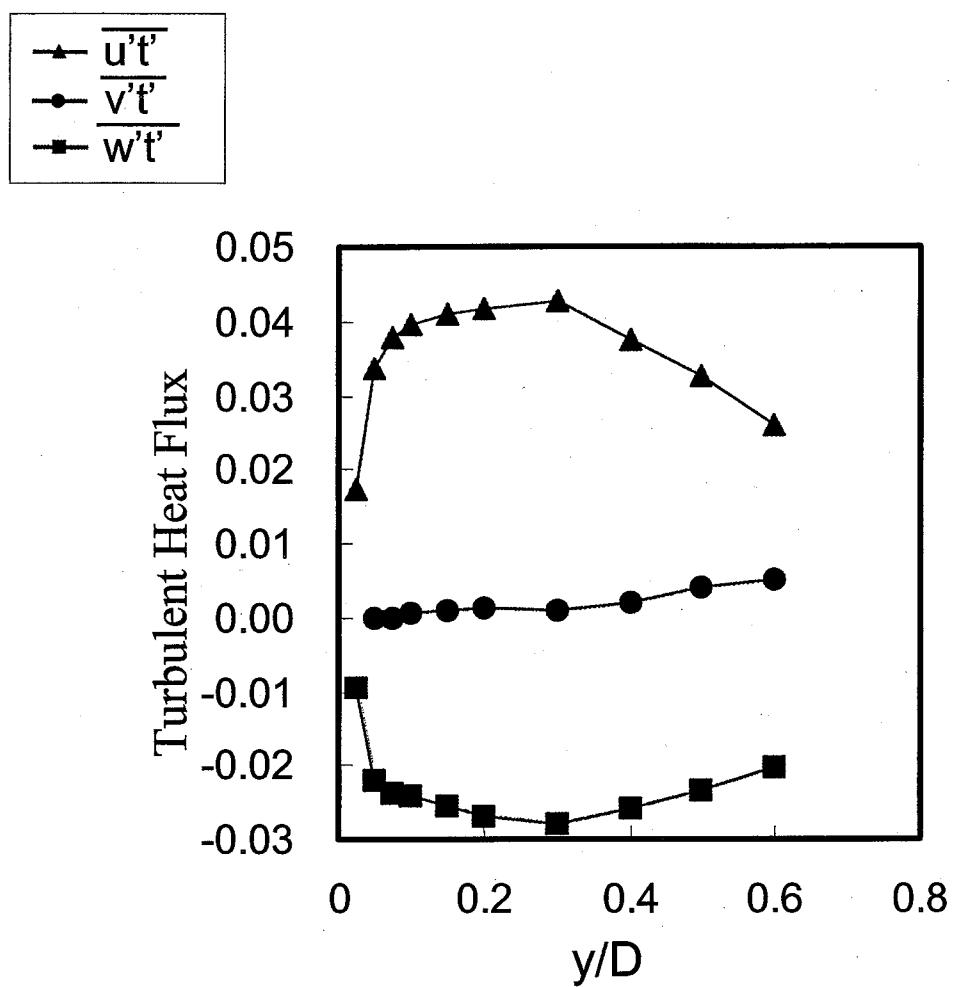


Fig .5.2.5 Effect of Wall on Turbulent Heat Fluxes.