

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

—構造物との温度変動伝達に及ぼす構造材熱物性の影響—

(研究報告)

2005年8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](mailto: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)

2005

サーマルストライピング現象の熱流動に関する研究  
—構造物との温度変動伝達に及ぼす構造材熱物性の影響—  
(研究報告)

木村暢之<sup>1)</sup>、長澤一嘉<sup>2)</sup>、三宅康洋<sup>3)</sup>  
小川博志<sup>1)</sup>、上出英樹<sup>1)</sup>

要旨

近年の原子力プラントにおいて、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に伝わることにより、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）を原因とする冷却材漏洩事象が散見され、高速炉も例外ではない。その評価手法を確立することは重要な課題となっている。サーマルストライピング現象を評価する上で、流体中の温度変動特性、流体中から構造材への伝達特性、構造材中の温度変動の伝播特性を考慮し、温度変動の減衰を取り込むことで、安全性を確保した合理的な設計が可能となる。

本研究では、非定常熱伝達特性に対する構造材の熱物性の影響を評価するために、構造材材質をパラメータとした平行三噴流体系水試験を実施した。流体温度は移動式の熱電対ツリーによって計測し、構造材中の温度は熱電対を埋め込んだ仕切板を噴流の流れ方向に設置することによって計測した。仕切板の材質を、アクリル、SUS316、銅とした試験を実施した。

その結果、流体中の温度変動強度は、壁面から離れた位置では構造材の影響は見られないが、壁面近傍位置では、アクリルに比べ、SUS316、銅の金属材の場合に温度変動強度が小さくなる傾向を示し、構造材との熱の授受の影響を受けていることがわかった。また、構造材表面(0.125mm 内部)の温度変動強度は、アクリルが最も大きく、SUS316、銅の順に小さくなり、構造材材質の熱拡散率が大きいほど温度変動が小さくなることがわかった。

各構造材材質について、流体と構造の温度変動の伝達関数から熱伝達率を求めた。熱伝達率は、銅が最も大きく、アクリルが最も小さくなってしまっており、熱拡散率が大きい構造材ほど熱伝達率が大きくなることがわかった。また、ヌッセルト数とレイノルズ数の関係、および既存相関式の比較結果より、各構造材とも、ヌッセルト数のレイノルズ数依存性は、既存式とほぼ同等であった。

---

本報告書には、(株) NESI および (株) エヌデータ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>株式会社エヌデーター

**Study on Thermalhydraulics in Thermal Striping Phenomena**  
**- Effect of Structural Materials on Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to**  
**Structure -**  
**(Research Report)**

Nobuyuki KIMURA<sup>1)</sup>, Kazuyoshi NAGASAWA<sup>2)</sup>, Yasuhiro MIYAKE<sup>3)</sup>  
Hiroshi OGAWA<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 reactor safety.

The consideration of decay of temperature fluctuation based on the phenomenological mechanism enables a legitimate design with reactor integrity.

In this study, we performed a parallel triple-jet water experiment along a wall. In this experiment, the material of the wall was changed to acrylic resin, type 316 stainless steel and copper in order to evaluate an effect of thermal properties in wall materials on the transfer characteristics of temperature fluctuation from fluid to structure. The fluid temperature was measured by a movable thermocouple-tree and the structural temperature was measured by thermocouples embedded on the wall surface.

The effect of the wall material on the temperature fluctuation in fluid was not observed at the further position from the wall. In the vicinity of the wall, on the other hand, the temperature fluctuation intensity in fluid decreased as the thermal diffusivity of the wall material was large. The temperature fluctuation intensity in structure was small as the thermal diffusivity of the wall material was large.

For each wall material, the heat transfer coefficient was obtained from a transfer function between fluid and structure temperature fluctuations.

It was seen that the heat transfer coefficient was large as the thermal diffusivity of material was large. In this experiment, furthermore, the dependence of Nusselt number on Reynolds number was close to the existing correlation in every materials.

---

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 -----	2
2.1 試験装置 -----	2
2.2 溫度計測 -----	3
2.3 実験条件 -----	4
3. 仕切板表面温度の熱電対による計測の妥当性 -----	6
3.1 仕切板と熱電対の設置 -----	6
3.2 数値解析モデル -----	6
3.3 解析結果 -----	7
4. 実験結果および考察 -----	10
4.1 時間平均温度に対する構造材材質の影響 -----	10
4.2 溫度変動特性に対する構造材材質の影響 -----	10
4.3 流体温度と構造材温度の相関に対する構造材材質の影響 -----	14
4.4 異なる構造材材質における熱伝達率算出方法の妥当性 -----	14
4.5 溫度変動伝達過程における熱伝達相関式による評価 -----	16
5. 結論 -----	18
謝辞 -----	19
参考文献 -----	20

## Nomenclatures

- D***: Representative Length (Slit Width) (=20mm)  
***F<sub>f</sub>***: Spectrum of Temperature Fluctuation in Fluid  
***F<sub>f-w</sub>***: Cross Spectrum of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure  
***F<sub>w</sub>***: Spectrum of Temperature Fluctuation in Structure  
***f***: Frequency of Temperature Fluctuation  
***H<sub>f-w</sub>***: Transfer Function  
***h***: Heat Transfer Coefficient  
***h\****:  $=h/\lambda$   
***k***:  $=\sqrt{2\omega/a}$   
***Nu***: Nusselt number  
***Re***: Reynolds number  
***PSD***: Power Spectrum Density  
***PSD\****: Non-dimensional Power Spectrum Density  
***r***: Discharged Velocity Ratio of Cold Jet to Hot Jet ( $=V_c/V_h$ )  
***st***: Strouhal Number  
***T<sub>avg</sub>***: Time-averaged Temperature  
***T<sub>avg</sub>\****: Non-dimensional Time-averaged Temperature  
***T<sub>f</sub>***: Instantaneous Temperature in Fluid  
***T***: Instantaneous Temperature  
***T<sub>i</sub>\****: Non-dimensional Instantaneous Temperature  
***T<sub>c</sub>***: Discharged Temperature of Cold Jet  
***T<sub>h</sub>***: Discharged Temperature of Hot Jet  
***T<sub>RMS</sub>***: root-mean-square of Temperature Fluctuation (Temperature Fluctuation Intensity)  
***T<sub>RMS</sub>\****: Non-dimensional Temperature Fluctuation Intensity  
***T<sub>w</sub>***: Instantaneous Temperature in Structure  
***V<sub>c</sub>***: Discharged Velocity of Cold Jet  
***V<sub>h</sub>***: Discharged Velocity of Hot Jet  
***V<sub>space</sub>***: Space-averaged Discharged Velocity  
***x***: Horizontal Position  
***y***: Depth Position  
***z***: Vertical Position  
***ΔT***: Discharged Temperature Difference ( $=T_h-T_c$ )  
***ε***: Phase Delay

$\gamma$ : Coherence of Temperatures Fluctuation between Two Points

$\lambda$ : Thermal Conductivity of Structure

$\omega$ : Angular Velocity

## 表リスト

Table 2.1	Physical Properties of Fluid, Structure and T/C. -----	22
Table 2.2	Experimental Conditions. -----	23
Table 3.1	Calculation Condition. -----	25

## 図リスト

Fig.2.1.1	Schematic of Experimental Loop. -----	26
Fig.2.1.2	Schematic of Test Section. -----	27
Fig.2.1.3	Discharged Nozzles of Triple Jets. -----	28
Fig.2.1.4	Thermocouples Tree. -----	29
Fig.2.1.5	Partition Plate with T/C. -----	30
Fig.3.1.1	Structure of Thermocouple. -----	31
Fig.3.2.1	Analytical Model. -----	32
Fig.3.2.2(a)	Mesh Width Increased as position was far from T/C. -----	33
Fig.3.2.2(b)	Mesh Arrangement near T/C. -----	34
Fig.3.2.3	Boundary Condition. -----	35
Fig.3.3.1	Temperature measurement position. -----	36
Fig.3.3.2	Effect of T/C Installation on Time-Trends of Temperature. -----	37
Fig.3.3.3	Effect of T/C Installation on Transfer Function Characteristics from Fluid to Structure. -----	39
Fig.4.1.1	Comparisons of Time-Averaged Temperature in Depth Direction under Isovelocity Triple-Jet Condition. -----	40
Fig.4.1.2	Comparisons of Time-Averaged Temperature in Depth Direction under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition. -----	42
Fig.4.2.1	Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Isovelocity Triple-Jet Condition. -----	44
Fig.4.2.2	Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition. -----	46
Fig.4.2.3	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Isovelocity Triple-Jet Condition. -----	48
Fig.4.2.4	Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition. -----	50
Fig.4.2.5	Effect Thermal Diffusivity on Temperature Fluctuation Intensities in Fluid and structure -----	52

Fig.4.2.6	Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Isovelocity Triple-Jet Condition. ( $V_h=0.5\text{m/s}$ , $V_c=0.5\text{m/s}$ ) -----	53
Fig.4.2.7	Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Isovelocity Triple-Jet Condition. ( $V_h=0.4\text{m/s}$ , $V_c=0.4\text{m/s}$ ) -----	54
Fig.4.2.8	Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Isovelocity Triple-Jet Condition. ( $V_h=0.3\text{m/s}$ , $V_c=0.3\text{m/s}$ ) -----	55
Fig.4.2.8	Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Isovelocity Triple-Jet Condition. ( $V_h=0.25\text{m/s}$ , $V_c=0.25\text{m/s}$ ) --	56
Fig.4.2.10	Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition. ( $V_h=0.5\text{m/s}$ , $V_c=0.33\text{m/s}$ ) -----	57
Fig.4.2.11	Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition. ( $V_h=0.4\text{m/s}$ , $V_c=0.27\text{m/s}$ ) -----	58
Fig.4.2.12	Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition. ( $V_h=0.3\text{m/s}$ , $V_c=0.2\text{m/s}$ ) -----	59
Fig.4.2.13	Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition. ( $V_h=0.25\text{m/s}$ , $V_c=0.17\text{m/s}$ ) -----	60
Fig.4.2.14	Comparisons of Ratio of PSD under Isovelocity and Non-Isovelocity Triple-Jet Conditions. -----	61
Fig.4.2.15	Effect of Structural Wall on Power Spectrum Density under Isovelocity Triple-Jet Condition. -----	62
Fig.4.2.16	Effect of Structural Wall on Power Spectrum Density under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition. -----	63
Fig.4.2.17	Comparisons Histograms of Peak-to-Peak of Temperature Fluctuation Calculated by Rain flow Method. -----	64
Fig.4.3.1	Transfer Functions of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Isovelocity Triple-Jet Condition. -----	65
Fig.4.3.2	Transfer Functions of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition. -----	67
Fig.4.4.1	Comparisons of Power in Transfer Function between Experimental Result and Fitting Line. -----	69
Fig.4.4.2	Comparisons of Phase Delay of Transfer of Fluctuation from Fluid to Structure between Theory and Experimental Result. -----	70

Fig.4.4.3	Comparisons of Time-Trends of Temperature between Experiment and Prediction.	71
Fig.4.5.1	Relationship between Nusselt number and Reynolds number in Wall Jet Geometry.	72

## 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、温度変動が発生し、構造材に繰り返し熱荷重が印加され、高サイクル熱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>。高速炉では冷却材として水に比べて熱伝導率が約100倍大きいナトリウムを使用していることから、流体中で発生した温度変動が構造材に伝わりやすいという特徴を有している。

流体中で発生する温度変動挙動は、流体の種類、混合する体系（流路形状）、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は、構造材近傍の境界層において温度変動の振力や周波数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達過程では、流体ならびに構造材の物性の影響を受けるとともに、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<sup>[7]</sup>。

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）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>[8]-[10]</sup>。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（WATLON）<sup>[11]-[14]</sup>、および水、ナトリウムを作動流体とし平行スリットから3本の噴流を吐出させ、噴流間の混合により温度変動を発生させる平行三噴流試験を実施している。水試験（WAJECO）では、流体中での噴流間の流体混合挙動に起因する温度変動発生挙動、および構造材（壁面）近傍での境界層による温度変動の減衰挙動を明らかにした<sup>[15]-[22]</sup>。ナトリウム試験（PLAJEST）では、流体中での温度変動挙動に加え、流体から構造材への温度変動の伝達特性について定量化した<sup>[23]-[25]</sup>。また、温度場／速度場の両面から水とナトリウムの物性の違いによる噴流間混合現象への影響について明らかにした<sup>[26]-[27]</sup>。

ナトリウム試験では、流体から構造材への非定常熱伝達特性について定量化を行ってきたが、流体（ナトリウム）と構造材（SUS316）は固定であるため、それらの熱物性の影響を評価するには至っていない。非定常熱伝達の場合、構造材表面での熱流束の時間平均値はゼロであるが、瞬時の熱流束は大きく変化する。また、構造材の熱物性の影響を受け、熱流束の絶対値が変化すると考えられる。そこで、本報では、噴流混合により発生した温度変動の構造材近傍での減衰過程、および非定常熱伝達特性に対する構造材の熱物性の影響を明らかにするため、噴流が沿って流れる壁面の材質をアクリル、SUS316、銅として、平行三噴流水試験を実施した。

## 2. 実験

### 2.1 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、仕切板に平行な水平方向を  $x$ 、板の法線方向を  $y$ 、鉛直方向を  $z$ とした。また、原点は、低温噴流の中心( $x$ )、仕切板表面( $y$ )、ノズル出口高さ( $z$ )とし、板に平行な右方向に  $x$  を正、板から離れる法線方向に  $y$  を正、流れ方向に  $z$  を正とした。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 2000mm 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。また、構造材内部の温度を計測するために、熱電対を埋め込んだ仕切板に設置した。仕切板の構造材材質は、アクリル、SUS316、銅とし、取り替えて試験ができるようにした。

Table 2.1 に、各材質の物性値を示す。本試験では、温度幅が小さいため、構造材の物性値は本表に示す 30°C のデータを使用した。非定常熱伝達に影響する熱物性値と考えられる熱拡散率は、 $116 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ （銅）、 $3.37 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ （SUS316）、 $0.126 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ （アクリル）とオーダーが 3 衡程度違っている。これにより、構造材内部に温度変動が達した後の温度変動の拡散挙動の違いを明確化できる上、

流体から構造材への熱伝達挙動に対する構造材材質の影響が評価できると考えられる。また、熱電対 (K型) は、表面のシース材 (SUS316) と絶縁材 (MgO)、素線 (クロメル、アルメル) から構成されている。素線は、シース材、絶縁材に比べ、十分に細いと考えられる。本表にシース材および絶縁材の熱物性値も合わせて示す。SUS316 と MgO の熱拡散率はほぼ同程度の値となっていることがわかる。

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 ピッチで配置されている。ノズル出口面から 25mm 上流側には、噴流の温度を計測するための熱電対、1000mm 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一管を設置している。

## 2.2 溫度計測

流体の温度測定は、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ェ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り、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。

構造材内の温度測定は、熱電対を埋め込んだ仕切板を用いて行った。Fig.2.1.5 に仕切板に埋め込んだ熱電対の配置を示す。仕切板は、幅 440mm、高さ 405mm のアクリル、SUS316、銅製で 3 種類製作した。板厚は 15mm で仕切板中に埋め込んだ熱電対は、K型非接地のシース外径 0.25mm、シース材質は SUS316 であり、これまでの試験結果から噴流間の流体混合が活発である領域に配置した。熱電対は、表面温度が重要なのでシースの表面と噴流側の面（表）が同一面になるように製作した。熱電対と板との接着は、アクリル板の場合、アクリルと同種類の樹脂系接着剤、SUS316 板と銅板の場合、高い熱伝導度を有するカーボン系の接着剤を使用した。シース外径が 0.25mm であることから、熱電対の熱接点の位置は、表面より 0.125mm の深さにあると考えられる。また、仕切板中に埋め込んだ熱電対に関しては、3 章で計測の妥当性を確認した。

ツリー、および仕切板の熱電対は、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、その結果、

測定誤差は、 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  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。

温度計測に関して、今回の試験は、非定常熱伝達特性に対する構造材の物性値の影響を把握することが重要であるため、流体中の奥行き方向計測位置については、壁面に近い位置での温度を詳細に取得するために、壁面より 0.5mm、1mm~10mm までを 1mm 間隔、10mm~20mm までを 2mm 間隔とした。鉛直方向位置に関しては、仕切板に埋め込んだ熱電対の高さと対応する位置として噴流間の流体混合が活発である領域、噴流吐出ノズル高さより 100mm、および 110mm の 2ヶ所を対象とした。計測は、熱電対ツリーを移動し、仕切板と各奥行き方向位置との同時計測、およびプロセス量を計測した。各計測位置でのデータは、5ms (=200Hz サンプリング) 間隔で 20000 点 (=100 秒) の時系列データを取得した。

## 2.3 実験条件

Table 2.2 に実験条件を示す。前報<sup>[25]</sup>にて噴流吐出速度が 0.2m/s~1.0m/s の範囲において、ナトリウムから構造材への温度変動の伝達特性について確認した。本試験では、流体を水とし、仕切板をアクリル、SUS316、銅の順に取り替えて、噴流吐出速度をパラメータとした三噴流等速、非等速条件の試験を実施した。

### (1) 等速条件における噴流吐出速度の影響

3 本の噴流吐出速度が同じとし、低温噴流と高温噴流の吐出流速比  $r$  ( $=V_o/V_h$ ) を 1 に固定したときの噴流間の温度変動挙動および構造材への温度変動の伝達特性を確認した。

噴流吐出速度は 0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.45、0.5(m/s)とした。

### (2) 非等速条件における噴流吐出速度の影響

中心の低温噴流の吐出速度を両側の高温噴流より小さく設定し、低温噴流と高温噴流の吐出速度比  $r$  ( $=V_o/V_h$ ) を 0.65~0.68 に固定したときの噴流間の温度変動挙動および構造材への温度変動の伝達特性を確認した。

低温噴流の吐出速度を 0.13、0.17、0.2、0.23、0.27、0.3、0.33(m/s)に変化させ、それに応じて高温噴流の吐出速度を、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.45、0.5(m/s)とした。

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。

$$\begin{aligned} Re_h &= \frac{V_h D}{\nu} \\ Re_c &= \frac{V_c D}{\nu} \end{aligned} \tag{2.1}$$

ここで、代表長さ  $D$  は噴流出口のスリット幅 (=20mm) を用いた。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。

$$\Delta T = T_h - T_c \tag{2.2}$$

$$T_{space} = \frac{V_c \times T_c + 2V_h \times T_h}{(V_c + 2V_h)} \tag{2.3}$$

$$V_{space} = \frac{V_c + 2 \times V_h}{3} \tag{2.4}$$

### 3. 仕切板表面温度の熱電対による計測の妥当性

本試験では、非定常熱伝達特性に対する構造材の熱物性値の影響を確認するため、壁面をアクリル、SUS316、銅にした温度計測を行う。しかし、熱電対に比べて熱拡散係数が大きく異なるアクリルや銅を対象にする場合には、熱電対が壁内部の熱輸送現象を乱すことで、壁のみの場合と測定結果で温度変動挙動が異なる可能性がある。

そこで、汎用非線形構造解析システム FINAS<sup>[30]</sup>とそのプリ・ポストプログラム FEMAP<sup>[31]</sup>を用いて、壁面材（仕切板）と仕切板に埋め込まれた熱電対に着目した非定常熱伝導解析を実施し、熱電対による温度計測の妥当性を確認した。

#### 3.1 仕切板と熱電対の設置

仕切板はアクリル、SUS316、銅の3種類とした。Fig.3.1.1 に仕切板への熱電対の設置図および熱電対の構造図を示す。熱電対はシース外径 0.25mm の K 型非接地型で、仕切板の表面に 0.3mm 深さの溝を切り、埋め込むことによってシース表面と仕切板の表面が同じとなるように設置した。シース材質は SUS316 で厚さは 0.025mm、シース内側には絶縁物として MgO が充填されている。

#### 3.2 数値解析モデル

##### 3.2.1 解析体系

解析体系の概要を Fig.3.2.1 に示す。解析体系は、熱電対 1 本を板の奥行き方向(Y)と高さ方向 (Z) で構成される面で切断する 2 次元体系とした。解析範囲は熱電対を高さ方向に 2 等分する 1/2 セクターとし、板厚方向は板の実寸値である 15.0mm、高さ方向も同様に 15.0mm を解析範囲とした。

解析対象は仕切板の一部と熱電対および熱電対を設置するための溝（接着剤を挿入）とする。熱電対はシースと絶縁体を材質の異なる領域として模擬するが、素線は考慮しない。接着剤部の材質に関しては、各仕切板の物性値と類似したものを使用していることから、同領域に板材質と同じ物性値を与える。各材質の物性値に関しては Table 2.1 に示す。

##### 3.2.2 要素設定

要素設定図を Fig.3.2.2(a)、(b) に示す。今回の解析は比較的、要素設定を詳細にしたため、熱伝導要素として平板の 4 接点四辺形要素 (HQMEM4) を適用し、熱伝達には 2 接点辺要素 (FLIN2) を適用した。<sup>[31]</sup>

要素分割は熱電対部を詳細に設定し、熱電対から離れるに従って粗くなるようにした。総要素数は 53396 で、最も小さな要素の大きさは、要素の一辺が  $0.278 \times 10^{-3}$  mm 程度、大きな要素は 0.277mm 程度とした。

### 3.2.3 境界条件

境界条件を Fig.3.2.3 に示す。壁面に熱拡散率が大きく異なる熱電対があることで、流体から壁に向かう熱流束が変化する可能性がある。そこで、熱電対の設置している面の流体温度を振動させることにした。流体温度変動を単周波数の Sin 波とし、流体と構造材間の熱伝達率として予備試験結果から導出された概算値 ( $4000\text{W/m}^2\text{K}$ )を与えた。

計測面の裏側は、ほとんど流れがなく、高温、低温噴流の混合温度となつていると予測されるため、計測面で与えている温度変動の時間平均値を流体温度一定( $30^\circ\text{C}$ )として与え、計測面と同様に熱伝達率( $4000\text{W/m}^2\text{K}$ )を与えた。解析体系の下辺は対称境界条件とし、上辺は断熱条件とした。

### 3.2.4 解析ケース

解析ケースの一覧を Table 3.1 に示す。本解析では、流体の温度変動の周波数 (Sin 波) をパラメータとし、温度変動の振幅の減衰と位相遅れの周波数特性を確認した。試験の温度計測は 200Hz サンプリングで行われているが、流体と構造材の温度変動のコヒーレンスは 5Hz 以上になると低下することが確認されていることからあまり高い周波数については不要であると考え、0.1、1、3、5、10、30Hz の周波数をもつ Sin 波を流体温度変動として設定することとした。また、Sin 波形は試験条件に近い値として、平均温度  $30^\circ\text{C}$ 、振幅  $10^\circ\text{C}$  を設定する。計算時間は Sin 波 6 周期分、計算ステップは 1 周期を 100 等分した時間を設定した。

## 3.3 解析結果

熱電対が設置してある箇所と設置していない無垢の板の温度変動挙動を比較することで、熱電対設置の影響を確認した。Fig.3.3.1 に温度変動挙動を比較する計測位置を示す。計測位置は、板奥行き方向に 0.15mm の熱電対中心部（以下、熱電対部とする）を計測点 "T/C"、熱電対部から 1.0mm 上方の位置を無垢の板(以下、無垢の板部とする)とし、計測点 "Plate" とする。図中のカラーは、周波数 0.15Hz の条件で板材がアクリル板の場合に得られた瞬時温度変動の解析結果である。

### 3.3.1 温度変動挙動

Fig.3.3.2 に熱電対部(計測点 T/C)と無垢の板部(計測点 Plate)の温度変動挙動の

比較を示す。負荷した温度変動の周波数は、0.1、1、3、5、10、30Hz である。SUS 板、銅板に関しては、各周波数で熱電対部と無垢の板部の温度変動挙動がほぼ一致しており、熱電対設置による影響は現れていない。アクリル板に関しては、温度変動が高周波数成分になるに従って、位相が若干ずれる傾向にあるが、振幅に関しては、熱電対部と無垢の板部でほぼ同じ大きさとなっている。

### 3.3.2 振幅の減衰と位相

板表面の流体温度変動と構造材内部の温度変動に関して、振幅の減衰と位相遅れを熱電対設置箇所、無垢の板部、理論値で比較した。理論値については、次に示す半無限平板の式を用いた。<sup>[25]</sup>

$$\text{パワーの減衰 : } \left( \frac{h^*}{\sqrt{(h^* + k)^2 + k^2}} \exp(-kx) \right)^2 \quad (3.1)$$

$$h^* = h / \lambda \quad k = \sqrt{\omega / 2a}$$

$$\begin{aligned} \text{位相の遅れ : } & ky + \varepsilon \\ & \varepsilon = \tan^{-1} [k / (h^* + k)] \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで、 $h$  は熱伝達率、 $\lambda$  は構造材の熱伝導率、 $\omega$  は流体温度変動の角振動数、 $a$  は構造材の熱拡散率、 $y$  は構造材表面から構造材内部の計測点までの距離を示す。解析結果の振幅の減衰、位相の遅れに関しては、各計測点の温度変動の Peak-to-Peak を検出し、流体と構造材計測位置での振幅比、ピーク検出時の時刻差を元に次式で求めている。

$$\text{振幅の減衰 : } \frac{\overline{\Delta T_s}}{\Delta T_F} \quad (3.3)$$

$$\text{位相の遅れ : } \varepsilon = \overline{(t_F - t_s)} \cdot 2\pi \cdot \omega$$

ここで、 $\Delta T_F$ 、 $\Delta T_s$  は流体温度、構造材温度の振幅を、 $t_F$ 、 $t_s$  は流体、構造材の対応する波における温度変動のピーク時刻を示す。

Fig.3.3.3 に流体温度と熱電対部および無垢の板部の温度から得られた温度変動の伝達関数のパワー（振幅の二乗）と位相の遅れの周波数特性を示す。同一材質における伝達関数のパワーと位相の遅れは、理論値では伝達関数のパワーが大きくなると位相の遅れが小さく、伝達関数のパワーが小さくなると位相の遅れが大きくなる傾向にある。

数値解析で得られた伝達関数のパワーは各材質ともに温度変動が高周波数成分となるに従って小さくなり、それに伴い位相の遅れは大きくなっている。SUS

板、銅板に関しては、伝達関数のパワー、位相の遅れとともに、理論値と無垢の板部(計測点 Plate)、熱電対部(計測点 T/C)でほぼ一致しており、熱電対設置による影響がないことが確認できる。アクリル板に関しては、伝達関数のパワー、位相とともに理論値と無垢の板部でよく一致している。熱電対部に関して、パワーについては、10Hzまでは良く一致し、30Hzでは、1オーダー程度T/C位置のほうが大きくなる。位相遅れについては、1Hzまでは良く一致し、5Hzでは50%程度T/C位置のほうが位相遅れは大きくなる。

これらの結果から、熱電対の設置による温度計測への影響は小さく、板構造材内部の温度変動挙動は板の材質が異なっていても正しく計測できることを確認した。但し、アクリルの場合 10Hz以下の周波数について計測が妥当な結果を与えると考えられる。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 時間平均温度に対する構造材材質の影響

Fig.4.1.1～Fig.4.1.2 に、壁の構造材をパラメータとした三噴流等速条件、および非等速条件における時間平均温度の奥行き方向分布を示す。原点は、低温噴流を中心とし、水平方向を  $x$ 、奥行き方向を  $y$ 、鉛直方向を  $z$  とした。座標軸は、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。

温度の時間平均化は、全収録データ 20000 点 (100 秒間) に対して行い、時間平均温度は以下の式で無次元化した。

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

等速条件における流体中の平均温度は、ほぼフラットな分布を示しているのに対し、非等速条件では、壁面に近づくにつれて、平均温度が高くなっていることがわかる。また、構造材の異なるケース間で比べると、僅かに差異は生じているが、全体の分布傾向は一致していることがわかる。構造内部の平均温度に関しては、銅が最も高く、アクリルが最も低くなっていることがわかる。これは、仕切板の裏側が噴流の平均温度（3本の噴流が混合した後の温度で、等速条件の場合 0.67、非等速条件の場合は 0.75）になっていることで、熱伝導率が大きくなるにつれて、仕切板の裏側の温度の影響を受けているためと考えられる。

### 4.2 温度変動特性に対する構造材材質の影響

Fig.4.2.1～Fig.4.2.2 に壁の構造材をパラメータとした三噴流等速条件、非等速条件における水平方向位置  $x=15\text{mm}$ 、鉛直方向  $z=100\text{mm}$  の構造材内部（構造材表面より  $-0.125\text{mm}$ ）、および流体中の壁面近傍（構造材表面より  $1\text{mm}$ ）の温度の時系列を示す。

流体中の時系列温度変化に関しては、等速条件、非等速条件の各ケースにおいて、噴流吐出速度が大きくなるにつれて周期が短くなっている。これは、前報<sup>[25]</sup>で示したように、主たる温度変動は噴流間の流動不安定によって生じる噴流の振動に起因しており、噴流の振動は、噴流の吐出速度に基づく Strouhal 数で

整理できる。つまり、噴流吐出速度に比例して、噴流の振動周波数は大きくなるためである。流体中の温度変動については、構造材の異なるケース間に有意な違いは判断できない。構造材内部の温度変動は、流体中の温度変動に比べ、各構造材とも振幅が減衰していることがわかり、熱拡散率が小さいアクリルの温度変動が最も大きく、熱拡散率が大きくなるにつれて温度変動の振幅が小さく（アクリル>SUS316>銅）なることがわかる。これは、熱拡散率が大きいほど、構造材内部での温度は早い時間で均一化されるため、温度変動はより鈍され、温度変動の振幅が小さくなるためであると考えられる。

Fig.4.2.3～Fig.4.2.4 に壁の構造材をパラメータとした三噴流等速条件、非等速条件における温度変動強度の奥行き方向分布を示す。温度変動強度は以下の式を用いた。

温度変動強度は、温度変動の二乗平均（標準偏差）として次の式で求めた。

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

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。

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

等速条件、および非等速条件における流体中の温度変動強度を構造材の異なるケース間で比べると、壁面から離れた位置では、各構造材とも分布傾向はほぼ一致しており構造材材質の影響がないことがわかる。一方、壁面近傍位置 1mm では、流速条件によって多少異なっているが、SUS316、銅の金属材ケースの温度変動強度は、アクリルに比べ、同等もしくは若干小さくなっている。これは、構造材の熱拡散率が大きくなるにつれて、壁面での熱流束が大きくなると考えられる。そのため、熱拡散率が大きい構造材ほど流体との熱的相互作用が強くなり、その結果、構造材で鈍された温度変動が流体の温度変動にフィードバックされ、構造材近傍の流体の温度変動強度が低下すると考えられる。

Fig.4.2.5 に壁の構造材をパラメータとした三噴流等速条件、非等速条件における熱拡散率と構造材内部（構造材表面より -0.125mm）の温度変動強度、および流体中の壁面近傍（構造材表面より 1mm）の温度変動強度の関係を示す。

壁面近傍の流体温度変動強度は、僅かであるが構造材の熱拡散率の大小に伴う流体-構造間の相互作用の程度の違いにより、アクリルに比べ、SUS316 と銅の温度変動強度が小さくなっていることが確認できる。また、構造材内部の温度変動強度は、等速条件、非等速条件とも、噴流吐出速度条件によらず、直線的な右下がりの分布を示し、構造材の熱拡散率が大きくなるにつれて温度変動強度は小さくなることがわかる。

Fig.4.2.6～Fig.4.2.13 に壁の構造材をパラメータとした三噴流等速条件、非等速条件における各奥行き断面での流体温度変動のパワースペクトル密度（以下、PSD）を示す。PSD は、高速フーリエ変換（FFT）を用いて求めた。PSD は、窓の大きさ 1024 データ（5.12 秒間）のガウス窓を設定し、この窓関数を全データに乗じた上で FFT 处理を行い、全データ範囲（100 秒間）をカバーするように 5 秒づつ窓を移動させることにより得られた 20 個のパワーを平均化することによって温度変動のスペクトル密度を算出した。その際、得られたパワーに窓関数によって低下した割合の補正を行った。ストローハル数は、以下の式で定義した。

$$St = \frac{fD}{V_{space}} \quad (4.4)$$

また、PSD のパワーは以下の式で規格化した。

$$PSD^* = \frac{I}{(\Delta T)^2} \frac{PSD \cdot V_{space}}{D} \quad (4.5)$$

三噴流等速条件、非等速条件の各ケースにおいて、壁面から離れた流体中の位置 ( $y=20\text{mm}$ 、 $10\text{mm}$ ) では、低周波数成分から高周波数成分にかけて PSD はほぼ一致していることがわかる。壁面近傍位置 1mm においても、本図では PSD に対する構造材材質の影響は確認できなかった。そこで、壁面近傍位置での温度変動に対する構造材材質の影響の有無を確認するために、壁面から離れた位置  $y=20\text{mm}$  と壁面近傍位置  $y=1\text{mm}$ 、および壁面から離れた位置  $y=20\text{mm}$  と壁面からの中間位置  $y=10\text{mm}$  での温度変動の PSD の比を求めた。ここでは、壁面から離れた位置 ( $y=20\text{mm}$ ) においては構造材の影響はないと仮定した。Fig.4.2.14

に三噴流等速条件 ( $V_h=0.5\text{m/s}$ ,  $V_c=0.5\text{m/s}$ ) と非等速条件 ( $V_h=0.5\text{m/s}$ ,  $V_c=0.33\text{m/s}$ ) の結果を示す。 $y=20\text{mm}$  に対する  $y=10\text{mm}$  の PSD の比を見ると、構造材材質の違いによる PSD の比の差はみられず、1.0を中心各周波数成分の PSD の比が分布していることから、 $y=10\text{mm}$  の位置では、流体温度変動に対する構造材の違いによる影響はほとんどないことが確認できる。これに対し、 $y=20\text{mm}$  に対する  $y=1\text{mm}$  の PSD の比においては、等速条件の場合、高周波数成分の PSD の比が1.0を下回るとともに低周波数成分での PSD の比が1.0より大きくなっていることがわかる。また、アクリルに比べ、SUS316と銅の場合の PSD の比は、高周波数成分領域 ( $St>0.3$ ) で僅かに小さくなっており構造材の影響を受けて温度変動が小さくなっていることが確認できた。非等速条件では、周波数依存性が小さくなるものの  $St>0.1$  の高い周波数において、アクリルに比べて、SUS316と銅の PSD の比は小さくなっている構造材の影響を受けていることがわかる。

Fig.4.2.15～Fig.4.2.16 に壁の構造材をパラメータとした三噴流等速条件、非等速条件における構造材内部の温度変動のパワースペクトル密度を示す。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。

三噴流等速条件、および非等速条件の各ケースにおいて、PSD を構造材の異なるケース間で比べると、低周波数成分では、アクリルが最も大きく、SUS316、銅の順に小さくなっています。高周波数成分になると、PSD の減衰は、アクリルが最も顕著であり、銅が最も小さいことがわかる。つまり、熱拡散率が大きくなるにつれて高周波数成分の PSD の減衰が小さくなる傾向を示している。

構造材の疲労損傷を評価する上で、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、実験で得られた構造材内部での温度変動に対して、波形解析を行い、その違いを比較した。今回の波形解析にはレインフロー法を用いた。レインフロー法はランダム波を多層の屋根と見なして、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り、疲労強度設計等に広く利用されている<sup>[29]</sup>。計測位置は流体混合が活発な位置として、水平方向位置  $x=15\text{mm}$ 、鉛直方向位置  $z=100\text{mm}$  とした。

Fig.4.2.17 にレインフロー法より求めた三噴流等速条件、非等速条件の各ケースにおける構造材内部の温度変動の Peak-to-Peak ( $\Delta T$ ) のヒストグラムの比較を示す。横軸は Peak-to-Peak の大きさを示し、範囲は0.0～1.0で、分割幅は0.1とした。縦軸は、1秒間当たりの波の数がわかるように各区分データの波の数を計

測時間（100秒）で割った値であり、1秒当たりの波の数に相当する等価周波数とした。

等速条件、および非等速条件の各ケースにおいて、温度変動の振幅を構造材の異なるケース間で比べると、各構造材とも、0.0～0.1の範囲で頻度が大きくなっていることがわかる。また、振幅の大きさの範囲で比べると、0.3～0.5の範囲ではアクリルが最も大きく、銅が最も小さくなっていることがわかる。このことにより、構造材の熱拡散率が大きくなるにつれて、構造材内部での温度変動の拡散が大きくなり、温度変動のPeak-to-Peakが小さくなることが確認できた。

#### 4.3 流体温度と構造材温度の相関に対する構造材材質の影響

Fig.4.3.1～Fig.4.3.2に壁の構造材をパラメータとした三噴流等速条件、非等速条件における、流体温度（構造材表面より1mm）と構造材温度（構造材表面より-0.125mm）の温度変動の伝達関数のパワーと位相遅れの比較を示す。伝達関数は、2点間の温度データの相関を示しているものであるから、2点間の温度変動履歴のコヒーレンス（周波数空間での相関関数）が小さい周波数成分の伝達関数は意味をなさない。通常、低周波数成分の温度変動は、高周波数成分の温度変動に比べてスケールの大きい渦が要因となって発生していると考えられることから、2点間のコヒーレンスは、スケールの大きい渦（低周波数成分）で大きく、スケールの小さい渦（高周波数成分）で小さくなる。そこで、2点間のコヒーレンスが0.5未満となった周波数成分をしきい値として、しきい値より低周波数成分の伝達関数のみを有意な値として表示した。伝達関数は、前報<sup>[25]</sup>で示したように、流体温度と構造材温度の温度変動から求めた。

等速条件、および非等速条件において伝達関数のパワーを構造材の異なるケース間で比べると、低周波数成分の（～1Hz）では、アクリルのパワーが最も大きく、銅が最も小さくなっていることがわかる。これは、熱拡散率の小さい構造材では、構造材表面に到達した温度変動が構造材表面で拡散しないため、流体の温度変動が比較的小さい減衰量で構造材に達することによると考えられる。

位相遅れに関しては、アクリルが最も大きく、SUS316、銅の順で位相遅れが小さくなる傾向を示し、熱拡散率が大きくなるにつれて位相遅れが小さくなることがわかる。

#### 4.4 異なる構造材材質における熱伝達率算出方法の妥当性

流体中の温度変動から構造材への温度変動伝達挙動を予測するには、熱伝達率が必要となる。サイクル機構では、单一周期の温度変動に関する理論解に実

験で得られた流体・構造間の伝達関数の値をフィッティングすることにより熱伝達率を推定する方法を提案している<sup>[25]</sup>。以下にその概要を示す。

半無限固体に対して  $T = A \sin(\omega t + \phi)$  で温度が変動する流体から熱伝達率  $h$  で熱が伝わる場合の温度応答は以下の式で表せる。

$$T_w(y, t) = \frac{Ah^*}{\sqrt{(h^* + k)^2 + k^2}} \exp(-ky) \sin(\omega t + \phi - ky - \varepsilon) \quad (4.6)$$

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

ここで、 $A$  は流体温度変動の振幅、 $t$  は時刻、 $\omega$  は角振動数、 $a$  は構造材の熱拡散率、 $\phi$  は初期位相、 $h$  は熱伝達率、 $\lambda$  は構造材の熱伝導率、 $y$  は構造材表面からの距離（構造材内部）である。

式(4.6)から、温度変動のパワーの減衰と位相遅れは以下の式となる。

$$\text{パワーの減衰 : } \left( \frac{h^*}{\sqrt{(h^* + k)^2 + k^2}} \exp(-ky) \right)^2$$

$$\text{位相の遅れ : } ky + \varepsilon \quad (4.7)$$

ここでは、流体中 ( $y=1\text{mm}$ ) と構造材内部 ( $y=-0.125\text{mm}$ ) の温度変動から 2 点間の伝達関数を求め、得られた伝達関数のパワーを理論式 (4.7) に  $h$  をパラメータとして最小二乗法によりフィッティングさせ、各構造材の熱伝達率を求めた。その例を構造材の材質別に Fig.4.4.1 に示す。その際、有意な周波数成分の伝達関数のパワーを使用するために、流体側と構造材側の温度変動のコヒーレンスが 0.5 以上ある周波数成分のパワーに対してフィッティングを行った。

また、伝達関数の位相（2 点間の位相遅れに相当）と得られた熱伝達率を理論式 (4.7) に代入した位相遅れとの比較を行った。Fig.4.4.2 に構造材の材質別に、三噴流等速条件 ( $V_h=0.5\text{m/s}, V_c=0.5\text{m/s}$ ) と非等速条件 ( $V_h=0.5\text{m/s}, V_c=0.33\text{m/s}$ ) の位相遅れの比較結果の例を示す。これによると、三噴流等速条件、および非等速条件のケースにおいて、実験で得られた銅の位相遅れが理論値よりも小さくなっているが大よそ実験結果で得られた伝達関数の位相遅れと理論式 (4.7) から求められた位相遅れとほぼ同様であることから、伝達関数のパワーを理論式 (4.7) に対してフィッティングすることにより求めた熱伝達率は妥当な結果

が得られていると考えられる。

ここで得られた熱伝達率を用いて流体中の温度変動から構造材内部の温度変動の推定を行い、各構造材で得られた熱伝達率の妥当性を確認した。以下にその手順を示す。

- ① 流体温度変動 ( $y=1\text{mm}$ ) の時系列データを FFT により周波数領域へ変換した。
- ② 理論式 (4.7) により得られた熱伝達率を代入し、各周波数成分における構造材内部の温度変動の振幅と位相を推定。その際、データの信頼性の点で 2 点間の温度データの実験で求めめた壁と流体温度間が 0.5 以上の周波数成分の振幅と位相のみを使用した。
- ③ 得られた振幅と位相から逆 FFT により温度変動の時系列データを算出した。

Fig.4.4.3 に、三噴流等速条件、非等速条件の構造材内部での温度変動を推定した結果を構造材の材質別に示す。同図には推定した位置（構造材表面より、 $y=-0.125\text{mm}$ ）の実験結果および推定に用いた構造材表面近傍（構造材表面より、 $y=1\text{mm}$ ）の流体温度変動も合わせて示す。構造材（仕切板）は、板の裏面が、ほぼ 3 本の噴流の混合平均温度になっているために、板厚方向に平均温度勾配が存在する。サーマルストライピング評価においては温度変動成分が重要であるため、ここでの平均温度（温度の直流成分）は、推定値と実験値の時間平均値を一致させるように推定値に温度の直流成分を加えた。また、上記の推定に使用した熱伝達率を以下の通りである。

等速条件 アクリル :  $1242\text{W/m}^2\text{K}$

SUS316 :  $4675\text{W/m}^2\text{K}$

銅 :  $8570\text{W/m}^2\text{K}$

非等速条件 アクリル :  $869\text{W/m}^2\text{K}$

SUS316 :  $3112\text{W/m}^2\text{K}$

銅 :  $8116\text{W/m}^2\text{K}$

実験で得られた温度変動と推定した温度変動の結果を各構造材でみると、振幅、周期ともほぼ同様な分布傾向を示していることがわかり、構造材材質が違っても本手法により得られた熱伝達率を適用することで構造材内の温度変動を推定できることができた。

#### 4.5 温度変動伝達過程における熱伝達相関式による評価

4.4 節において、流体中と構造材内部の温度変動から熱伝達率を求めたが、その手法を用いて噴流吐出速度条件の異なるケースに対して、流速とヌッセルト数の関係について求め、既存の局所乱流熱伝達相関式<sup>[29]</sup>と比較した。Fig.4.5.1

に壁面の構造材をアクリル、SUS316、銅とした三噴流等速条件、非等速条件の各ケースにおけるレイノルズ数とヌッセルト数の関係、および相関式の比較を示す。計測位置は、流体混合が活発な位置として、水平方向位置  $x=15\text{mm}$ 、鉛直方向位置  $z=100\text{mm}$  とした。レイノルズ数およびヌッセルト数を求めるに当たっては、平行平板の熱伝達率と比較するため、流れに沿う平板の長さとして、代表長さをノズルからの高さ  $100\text{mm}$  とした。また、代表流速として、3本の噴流吐出速度の平均を使用した。また、既存の局所乱流熱伝達相関式を以下に示す。

$$\begin{aligned} Nu_x &= \frac{0.0296 Re_x^{0.8} Pr}{1 + B Re_x^{-0.1} (Pr - 1)} \\ B &= 0.860 \{1 + \ln[(1 + 5 Pr)/6]/(Pr - 1)\} \\ Re_x &= V_{space} \cdot x / \nu \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$x = 100\text{mm}$$

三噴流等速条件、および非等速条件の各ケースにおいて、噴流吐出速度が上昇すると右上がりの分布を示し、各構造材ともヌッセルト数のレイノルズ数依存性は既存式とほぼ同様な分布傾向を示していることがわかる。また、ヌッセルト数は、銅が最も大きく、アクリルが最も小さくなってしまっており熱拡散率が大きい構造材ほど熱伝達率が大きくなることがわかる。これは、熱拡散率が大きい構造材の場合、4.2節で示したように壁面近傍の流体温度変動はごく僅かであり、熱拡散率が小さい構造材に比べて、壁面近傍の流体温度変動を用いて求めた熱伝達率を、相対的に大きく算出しているためと考えられる。

## 5. 結論

温度の異なる流体が混合することにより発生する温度変動により構造材への高サイクル熱疲労が発生するサーマルストライピング現象について、非定常熱伝達特性に対する構造材の熱物性値（特に熱拡散率）の影響を明らかにするために、壁面の構造材をアクリル、SUS316、銅とした平行三噴流水試験を実施した。以下に結果を示す。

- 流体中の温度変動に関して、壁面から離れた位置では、構造材材質の影響は見られないが、壁面近傍位置では、アクリルと比べ SUS316、銅の温度変動が小さくなっていること、構造材材質の影響を受けていることがわかった。
- 構造材内部の温度変動強度について、構造材材質の熱拡散率の違いによる影響で、アクリルが最も大きく、SUS316、銅の順で温度変動が小さくなることがわかった。
- 構造材内部温度のパワースペクトル密度（PSD）の周波数依存性について、低周波数領域では、アクリルが最も大きく、銅が最も小さくなるが、温度変動の周波数が大きくなったときの PSD は、アクリルが最も大きく、銅が最も小さい。つまり、熱拡散率が大きくなると PSD の減衰量は小さくなることがわかった。
- 伝達関数のパワーについて、低周波数成分（~1Hz）では、アクリルのパワーが最も大きく、銅が最も小さいことがわかった。また、位相遅れについては、アクリル、SUS316、銅の順で大きくなっていることがわかった。この傾向は、熱伝達の定義式、および非定常熱伝導式の結果と一致した。
- 热伝達式と熱伝導式の理論式に流体-構造の温度変動の伝達関数をフィッティングすることによって得られる熱伝達率により流体温度変動から構造材内部の温度変動を推定できることがわかった。
- ヌッセルト数は、銅が最も大きく、アクリルが最も小さくなっていること、熱拡散率が大きい構造材ほど熱伝達率が大きくなることがわかった。また、各構造材ともヌッセルト数のレイノルズ数依存性は既存式と同様であることがわかった。

### 謝辞

本研究を行うにあたり、(財)電力中央研究所我孫子研究所流体科学部の守屋祥一上席研究員に多大なご助言を賜りました。また、大洗工学センター構造信頼性研究グループの笠原直人グループリーダーに多大なご指導・ご鞭撻を頂きました。ここに感謝いたします。

最後に、本試験を行うにあたり、常陽産業(株)の方々にご尽力頂きました。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, LMFBTR 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. 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 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. 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.

- [17]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.
- [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－壁面近傍での混合現象の変化－、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－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.
- [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－DNS を用いた噴流間の流体混合現象の解明－、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－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.
- [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－DNS を用いた平行三噴流ナトリウム試験解析－、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－平行三噴流間混合の温度場と速度場－、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－平行三噴流ナトリウム試験－、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－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.
- [26]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－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－、JNC TN9400 2003-077、2003.
- [27]木村暢之、長澤一嘉、三宅康洋、宮越博幸、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－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－、JNC TN9400 2004-064,2004.
- [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）日本機会学会論文集（第 1 部）44 卷 386 号（昭 53-10）
- [29]von karman, T., Trans. ASME, 61(1939), 705.
- [30]汎用非線形構造解析システム FINAS for Windows ver7.0  
使用説明書 1995 年 7 月、PNC ZN9520 95-014
- [31]汎用有限要素法プリプロセッサ FEMAP v8.3.0J (日本語版)  
開発元 UGS Corp、販売元 株式会社 エヌ・エス・ティ

Tabele 2.1 Physical Properties of Fluid, Structure and T/C.

Fluid	Fluid Species	Water		
	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	995.74		
	Dynamic Viscosity ( $\times 10^{-6}$ ) [m <sup>2</sup> /s]	0.808		
	Thermal Diffusivity ( $\times 10^{-6}$ ) [m <sup>2</sup> /s]	0.1478		
	Thermal Conductivity [W/m·K]	0.615		
	Specific Heat [KJ/kg·K]	4.179		
	Prandtl Number	5.451		
	Refarence Temperature [°C]	30		
Structure	Material	Acryl	SUS316	Copper
	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1190	7968	8879
	Specific Heat [KJ/kg·K]	1.4	0.493	0.383
	Thermal Conductivity [W/m·K]	0.21	13.2	397.9
	Thermal Diffusivity ( $\times 10^{-6}$ ) [m <sup>2</sup> /s]	0.126	3.37	116.6
	Refarence Temperature [°C]	30	30	30
T/C	Material	SUS316 (Sheath)		MgO (Insulator)
	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	7968		3512
	Specific Heat [KJ/kg·K]	0.493		0.917
	Thermal Conductivity [W/m·K]	13.2		48.3
	Thermal Diffusivity ( $\times 10^{-6}$ ) [m <sup>2</sup> /s]	3.37		15.1
	Refarence Temperature [°C]	30		30

Table 2.2(a) Experimental Conditions.

## Acryl

Case Name	Left Jet (Hot)			Center Jet (Cold)			Right Jet (Hot)			$\Delta T$ (°C)		
	$V_{h,L}$ (m/s)	$Re_{h,L}$ ( $\times 10^3$ )	$Pe_{h,L}$ ( $\times 10^3$ )	$T_{h,L}$ (°C)	$V_c$ (m/s)	$Re_c$ ( $\times 10^3$ )	$Pe_c$ ( $\times 10^3$ )	$T_c$ (°C)	$V_{h,R}$ (m/s)	$Re_{h,R}$ ( $\times 10^3$ )	$Pe_{h,R}$ ( $\times 10^3$ )	$T_{h,R}$ (°C)
WJ4a-A01	0.48	16.3	60.5	46.8	0.48	13.5	57.6	36.3	0.48	16.3	60.5	46.8
WJ4a-A02	0.43	14.5	54.6	45.8	0.43	12.0	51.8	34.9	0.43	14.5	54.6	45.8
WJ4a-A03	0.38	12.9	47.9	46.6	0.38	10.5	45.7	34.5	0.38	12.9	47.9	46.6
WJ4a-A04	0.34	10.9	41.8	44.0	0.34	8.6	39.2	30.5	0.34	10.9	41.8	44.0
WJ4a-A05	0.29	9.6	36.1	46.0	0.29	7.5	33.8	32.2	0.29	9.6	36.2	46.0
WJ4a-A06	0.24	8.0	30.1	45.4	0.24	6.0	27.6	30.4	0.24	8.0	30.1	45.5
WJ4a-A07	0.19	6.3	23.5	46.1	0.19	4.8	21.9	30.9	0.19	6.3	23.5	46.2
WJ4a-A08	0.48	15.9	59.9	45.7	0.32	8.7	38.1	33.9	0.48	15.9	59.9	45.7
WJ4a-A09	0.43	14.4	54.2	45.7	0.29	7.7	34.1	33.7	0.43	14.4	54.2	45.7
WJ4a-A10	0.38	12.7	47.6	45.7	0.26	6.8	30.0	33.0	0.38	12.7	47.6	45.7
WJ4a-A11	0.34	11.2	42.1	45.4	0.22	5.8	26.1	32.4	0.34	11.2	42.2	45.4
WJ4a-A12	0.29	9.6	36.2	45.2	0.19	4.9	22.1	31.7	0.29	9.6	36.2	45.2
WJ4a-A13	0.24	7.8	29.5	45.6	0.16	4.4	18.9	35.4	0.24	7.8	29.5	45.5
WJ4a-A14	0.19	6.4	24.1	45.6	0.13	3.3	15.0	32.0	0.19	6.4	24.1	45.6

Case Name	Left Jet (Hot)			Center Jet (Cold)			Right Jet (Hot)			$\Delta T$ (°C)		
	$V_{h,L}$ (m/s)	$Re_{h,L}$ ( $\times 10^3$ )	$Pe_{h,L}$ ( $\times 10^3$ )	$T_{h,L}$ (°C)	$V_c$ (m/s)	$Re_c$ ( $\times 10^3$ )	$Pe_c$ ( $\times 10^3$ )	$T_c$ (°C)	$V_{h,R}$ (m/s)	$Re_{h,R}$ ( $\times 10^3$ )	$Pe_{h,R}$ ( $\times 10^3$ )	$T_{h,R}$ (°C)
WJ4s-A01	0.48	14.5	58.6	40.3	0.48	12.5	56.3	32.0	0.48	14.5	58.6	40.3
WJ4s-A02	0.43	12.8	52.8	38.3	0.43	10.9	50.0	30.1	0.43	12.8	52.8	38.3
WJ4s-A03	0.38	11.0	46.5	36.8	0.39	9.4	43.9	28.6	0.38	11.0	46.4	36.8
WJ4s-A04	0.34	10.5	41.6	42.0	0.33	9.0	39.5	33.8	0.34	10.5	41.6	42.0
WJ4s-A05	0.29	9.1	35.6	42.4	0.29	7.8	34.2	34.2	0.29	9.0	35.6	42.1
WJ4s-A06	0.24	7.6	29.8	42.9	0.24	6.6	28.7	34.7	0.24	7.6	29.8	42.8
WJ4s-A07	0.19	6.1	23.8	43.1	0.19	5.2	22.6	34.8	0.19	6.1	23.8	43.1
WJ4s-A08	0.48	15.0	59.5	41.9	0.32	8.6	37.9	33.6	0.48	15.0	59.4	41.9
WJ4s-A09	0.43	13.7	53.7	42.6	0.29	7.9	34.3	34.4	0.43	13.7	53.7	42.6
WJ4s-A10	0.38	12.4	47.9	43.5	0.26	7.1	30.5	35.2	0.38	12.4	47.9	43.5
WJ4s-A11	0.33	10.3	41.2	40.7	0.23	6.0	26.5	32.6	0.33	10.3	41.2	40.7
WJ4s-A12	0.29	8.7	35.5	39.9	0.19	5.0	22.5	31.7	0.29	8.7	35.5	39.9
WJ4s-A13	0.24	7.4	29.6	40.9	0.16	4.3	19.2	32.8	0.24	7.4	29.6	40.9
WJ4s-A14	0.19	5.8	23.5	39.5	0.13	3.3	14.9	31.4	0.19	5.8	23.5	39.5

Table 2.2(b) Experimental Conditions.

Case Name	Left Jet (Hot)						Center Jet (Cold)						Right Jet (Hot)			$\Delta T$ (°C)
	$V_{h,L}$ (m/s)	$Re_{h,L}$ ( $\times 10^3$ )	$Pe_{h,L}$ ( $\times 10^3$ )	$T_{h,L}$ (°C)	$V_c$ (m/s)	$Re_c$ ( $\times 10^3$ )	$Pe_c$ ( $\times 10^3$ )	$T_c$ (°C)	$V_{h,R}$ (m/s)	$Re_{h,R}$ ( $\times 10^3$ )	$Pe_{h,R}$ ( $\times 10^3$ )	$T_{h,R}$ (°C)				
WJ4c-A01	0.5	16.3	60.4	47.1	0.5	12.2	55.6	30.7	0.5	16.4	60.4	47.1	16.4			
WJ4c-A02	0.43	14.4	54.1	45.8	0.43	11.0	50.0	30.8	0.43	14.4	54.1	45.8	15.0			
WJ4c-A03	0.38	12.8	48.3	45.6	0.39	9.8	44.8	30.6	0.38	12.8	48.3	45.6	15.0			
WJ4c-A04	0.33	10.5	41.4	41.8	0.34	7.9	37.7	26.9	0.33	10.5	41.4	41.8	14.9			
WJ4c-A05	0.29	8.7	35.5	39.2	0.29	6.4	31.6	24.4	0.29	8.7	35.5	39.3	14.9			
WJ4c-A06	0.24	7.0	29.1	38.6	0.24	5.2	26.1	23.6	0.24	7.0	29.1	38.6	14.9			
WJ4c-A07	0.19	5.9	23.5	42.0	0.19	4.4	21.1	27.1	0.19	6.0	23.5	42.1	14.9			
WJ4c-A08	0.48	15.8	60.2	44.8	0.32	8.0	37.2	29.6	0.48	15.8	60.2	44.9	15.3			
WJ4c-A09	0.43	14.5	54.3	45.9	0.29	7.3	33.4	30.9	0.43	14.5	54.3	45.9	15.0			
WJ4c-A10	0.38	12.8	47.9	46.2	0.25	6.5	29.5	31.2	0.38	12.8	47.9	46.3	15.1			
WJ4c-A11	0.34	11.1	42.1	45.2	0.22	5.6	25.5	30.2	0.34	11.1	42.1	45.2	15.0			
WJ4c-A12	0.29	8.9	35.8	40.5	0.19	4.4	21.2	25.4	0.29	8.9	35.8	40.5	15.1			
WJ4c-A13	0.24	6.9	28.9	37.8	0.16	3.4	16.9	23.0	0.24	6.9	28.9	37.8	14.8			
WJ4c-A14	0.19	5.4	22.9	36.0	0.13	2.6	13.5	21.2	0.19	5.4	22.9	36.0	14.8			

Table 3.1 Calculation Condition.

No	Case Name	Boundary on measurement side				Boundary on the back				Calculation Time			Test Plate Material
		Averaged Temp. (°C)	Temp. Amplitude (°C)	Sine-wave (Hz)	Heat transfer coefficient (W/m²·K)	Averaged Temp. (°C)	Heat transfer coefficient (W/m²·K)	Time (sec)	ΔT (sec)	STEP			
1	B_HT_Acryl_0001	30	10	0.1	4000	30	4000	60.000	1.00E-01	600	Acryl		
2	B_HT_Acryl_0010	30	10	1	4000	30	4000	11.000	1.00E-02	1100	Acryl		
3	B_HT_Acryl_0030	30	10	3	4000	30	4000	2.000	3.33E-03	600	Acryl		
4	B_HT_Acryl_0050	30	10	5	4000	30	4000	1.200	2.00E-03	600	Acryl		
5	B_HT_Acryl_0100	30	10	10	4000	30	4000	0.600	1.00E-03	600	Acryl		
6	B_HT_Acryl_0300	30	10	30	4000	30	4000	0.200	3.33E-04	600	Acryl		
7	B_HT_SUS_0001	30	10	0.1	4000	30	4000	60.000	1.00E-01	600	SUS316		
8	B_HT_SUS_0010	30	10	1	4000	30	4000	11.000	1.00E-02	1100	SUS316		
9	B_HT_SUS_0030	30	10	3	4000	30	4000	2.000	3.33E-03	600	SUS316		
10	B_HT_SUS_0050	30	10	5	4000	30	4000	1.200	2.00E-03	600	SUS316		
11	B_HT_SUS_0100	30	10	10	4000	30	4000	0.600	1.00E-03	600	SUS316		
12	B_HT_SUS_0300	30	10	30	4000	30	4000	0.200	3.33E-04	600	SUS316		
13	B_HT_Copper_0001	30	10	0.1	4000	30	4000	60.000	1.00E-01	600	Copper		
14	B_HT_Copper_0010	30	10	1	4000	30	4000	11.000	1.00E-02	1100	Copper		
15	B_HT_Copper_0030	30	10	3	4000	30	4000	2.000	3.33E-03	600	Copper		
16	B_HT_Copper_0050	30	10	5	4000	30	4000	1.200	2.00E-03	600	Copper		
17	B_HT_Copper_0100	30	10	10	4000	30	4000	0.600	1.00E-03	600	Copper		
18	B_HT_Copper_0300	30	10	30	4000	30	4000	0.200	3.33E-04	600	Copper		

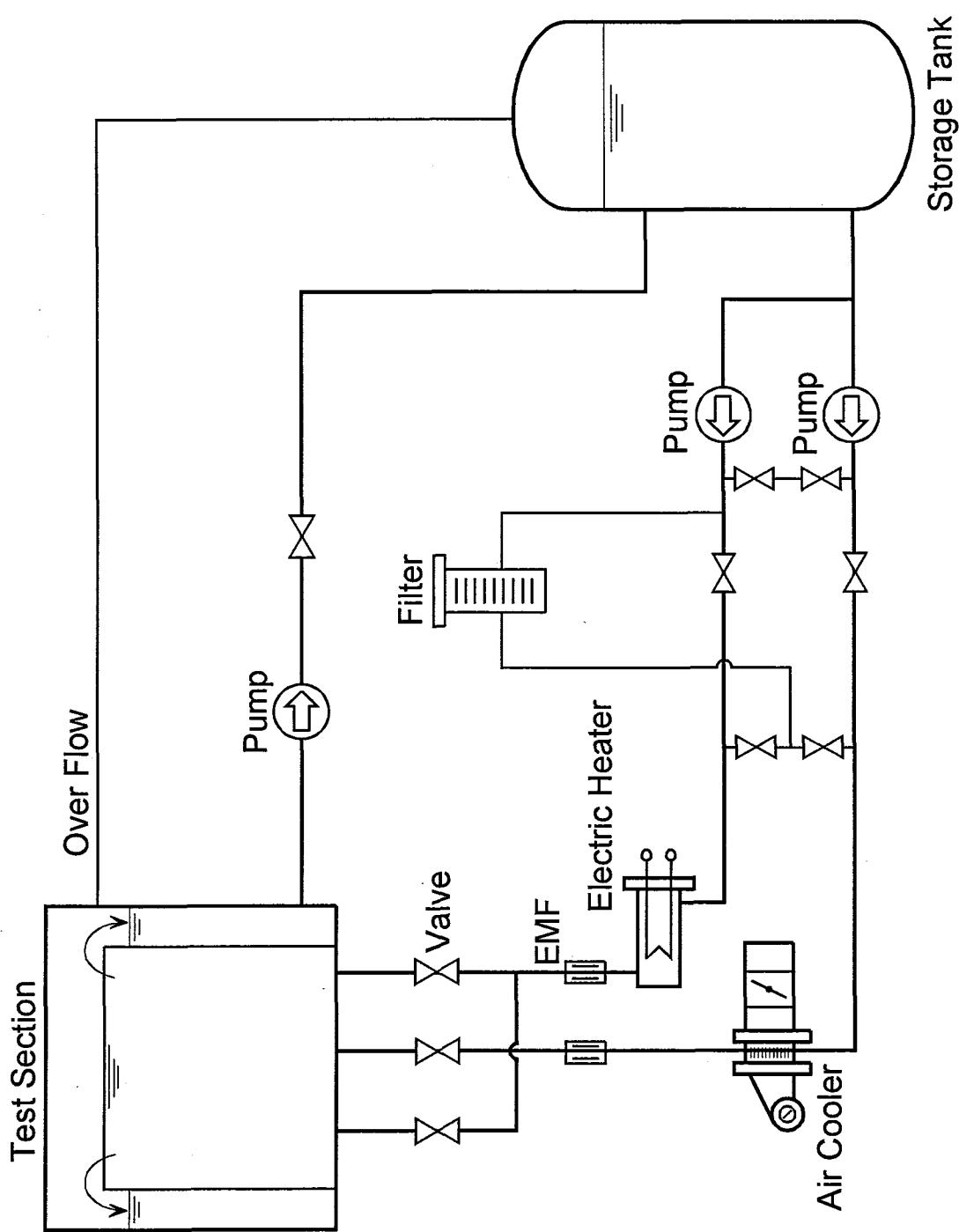
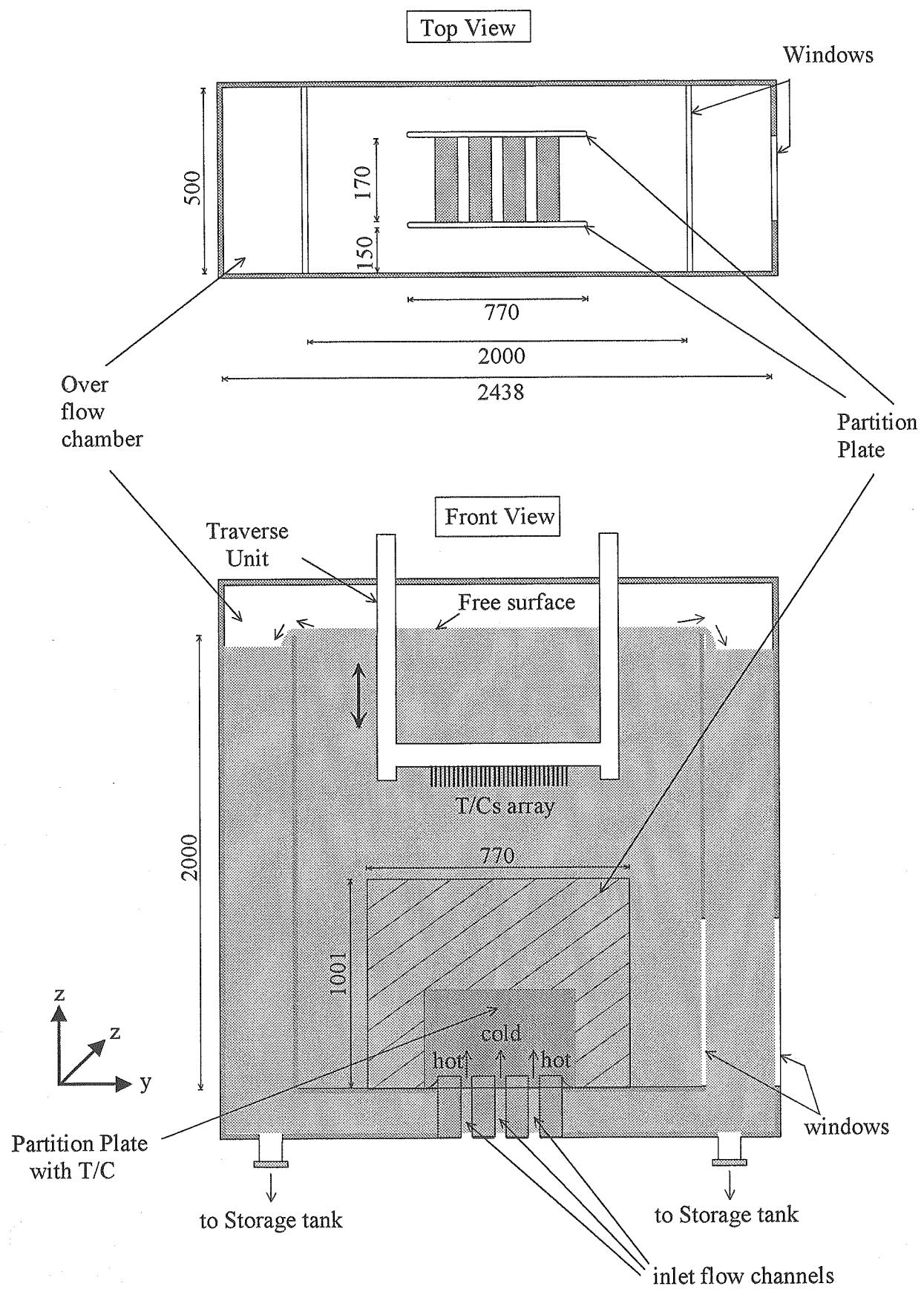


Fig.2.1.1 Schematic of Experimental Loop.



(unit: mm)

Fig.2.1.2 Schematic of Test Section.

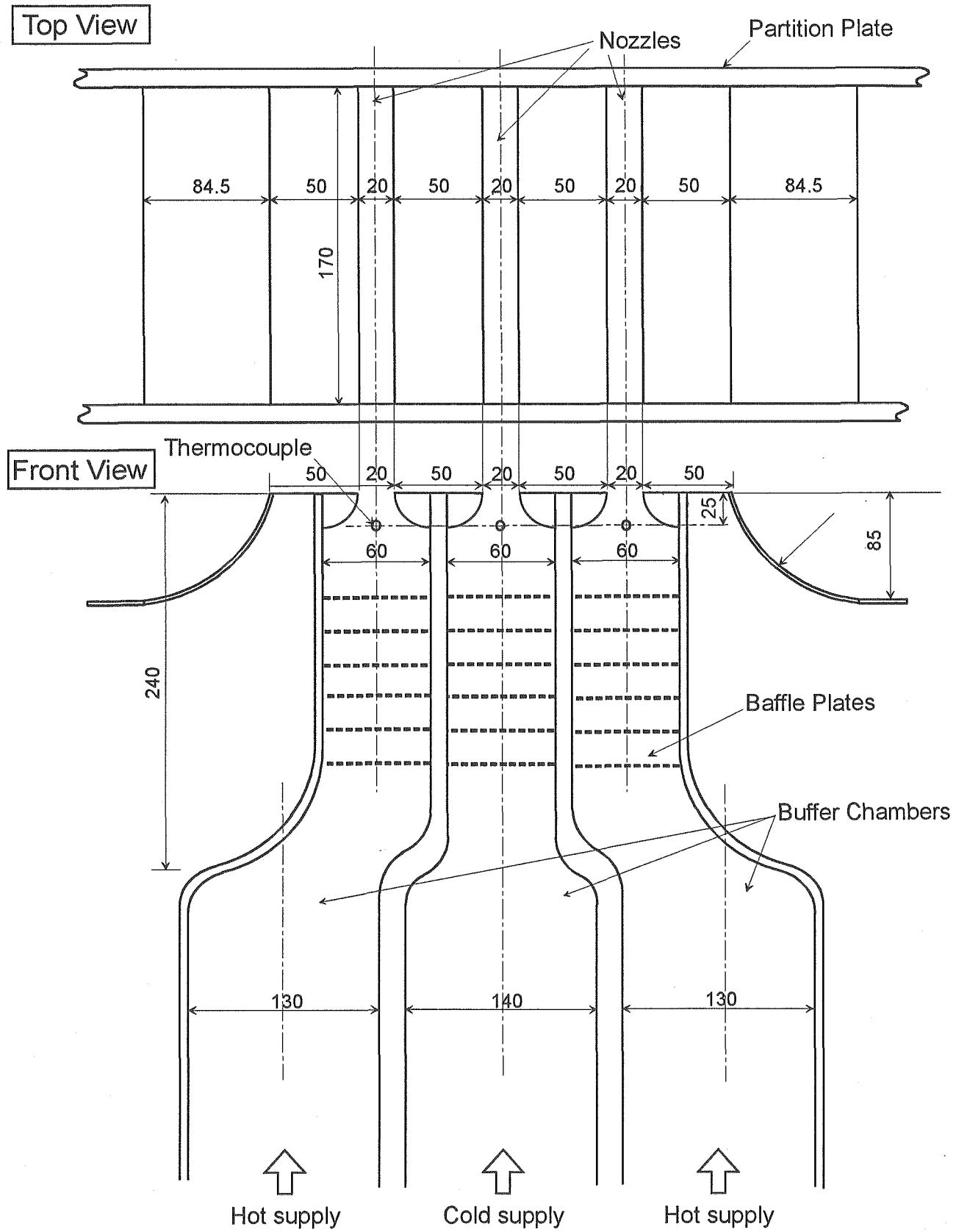


Fig. 2.1.3 Discharged Nozzles of Triple Jets .

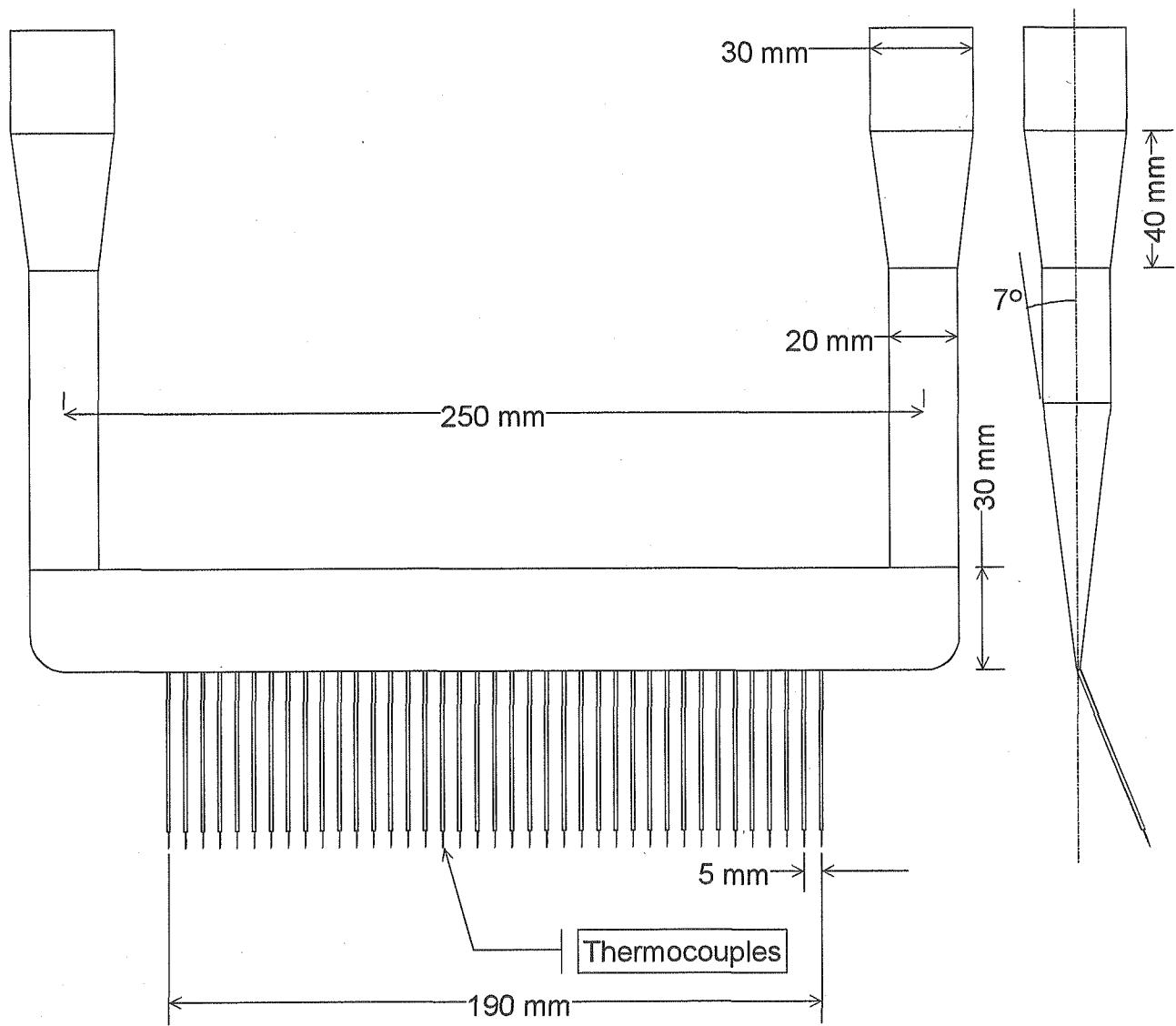


Fig.2.1.4 Thermocouples Tree .

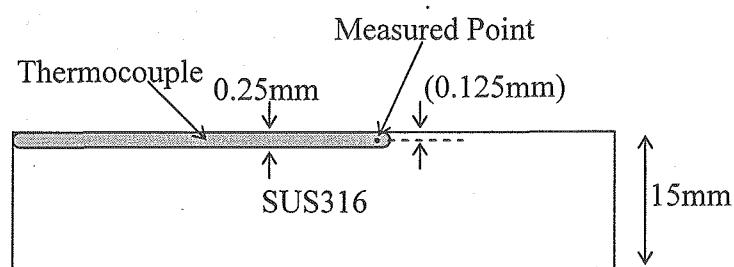
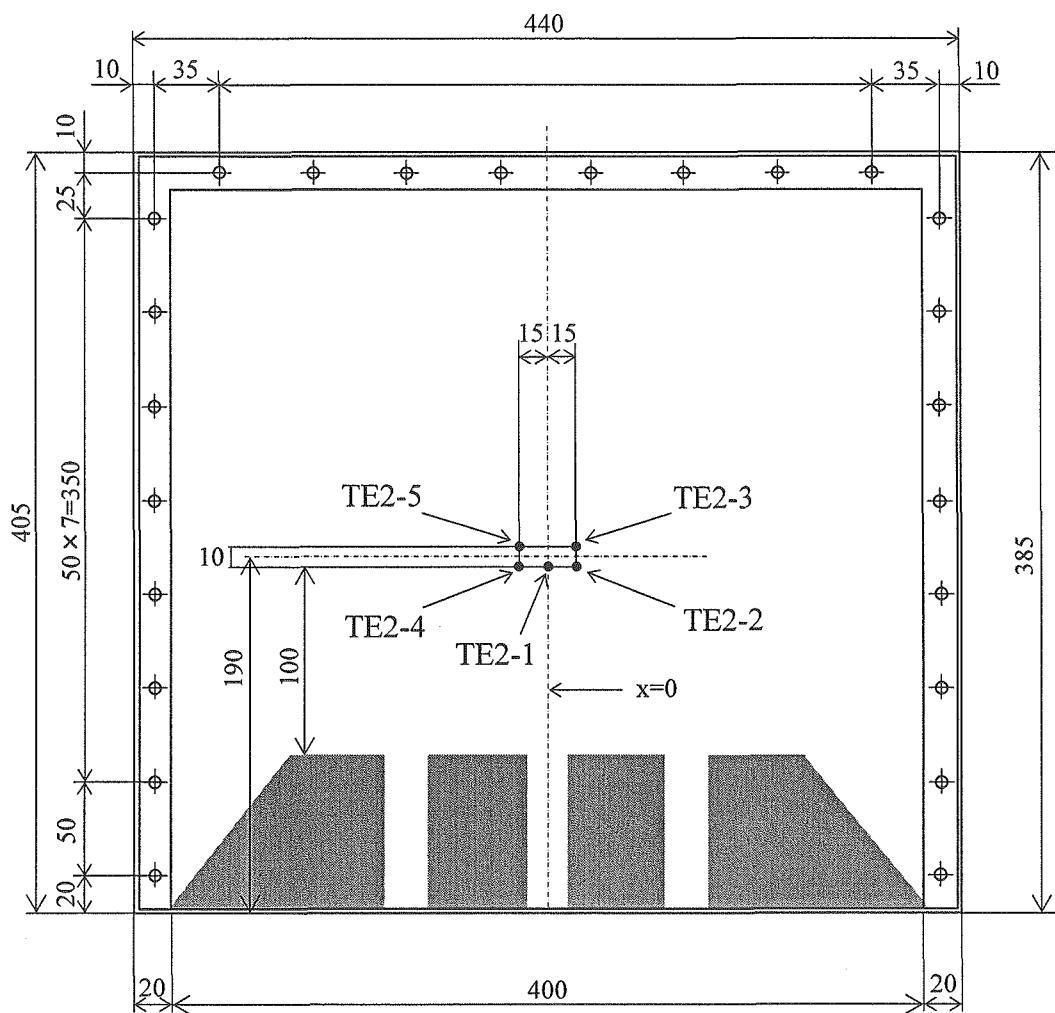
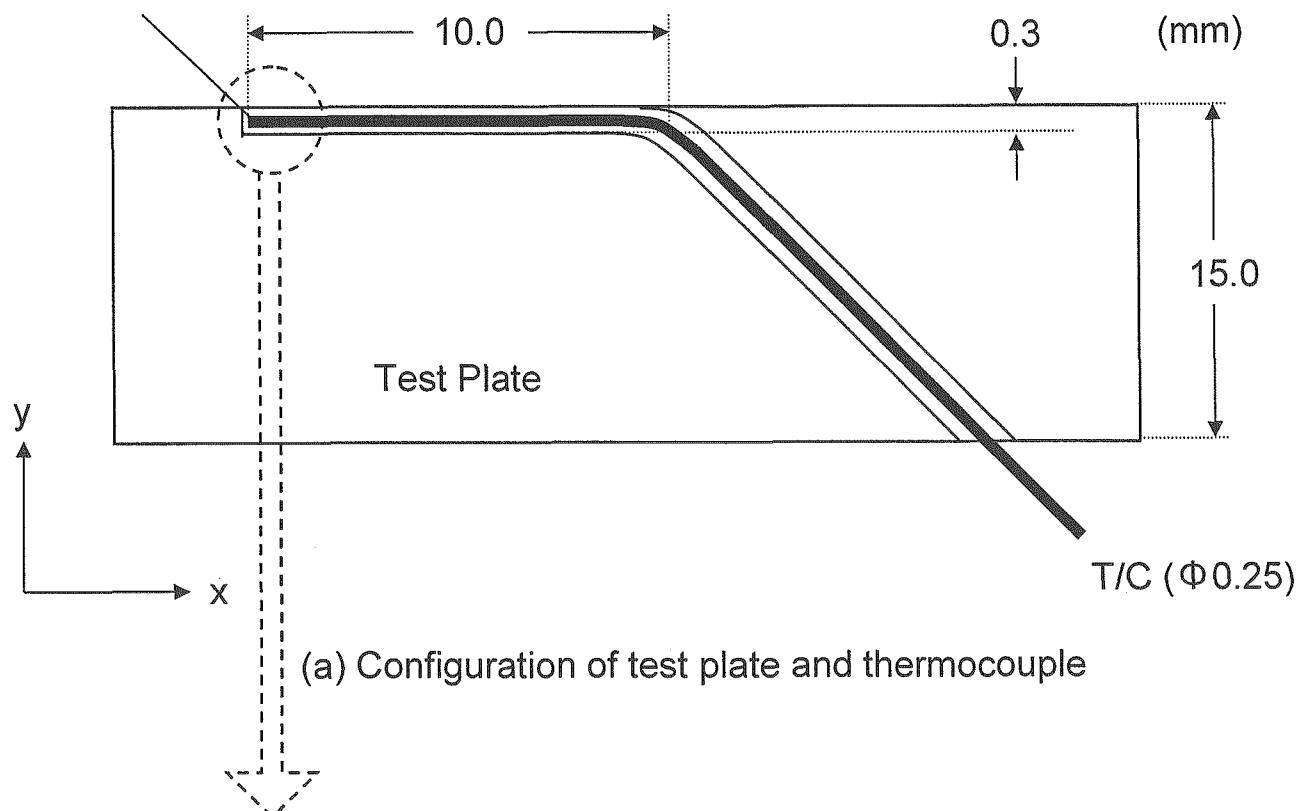


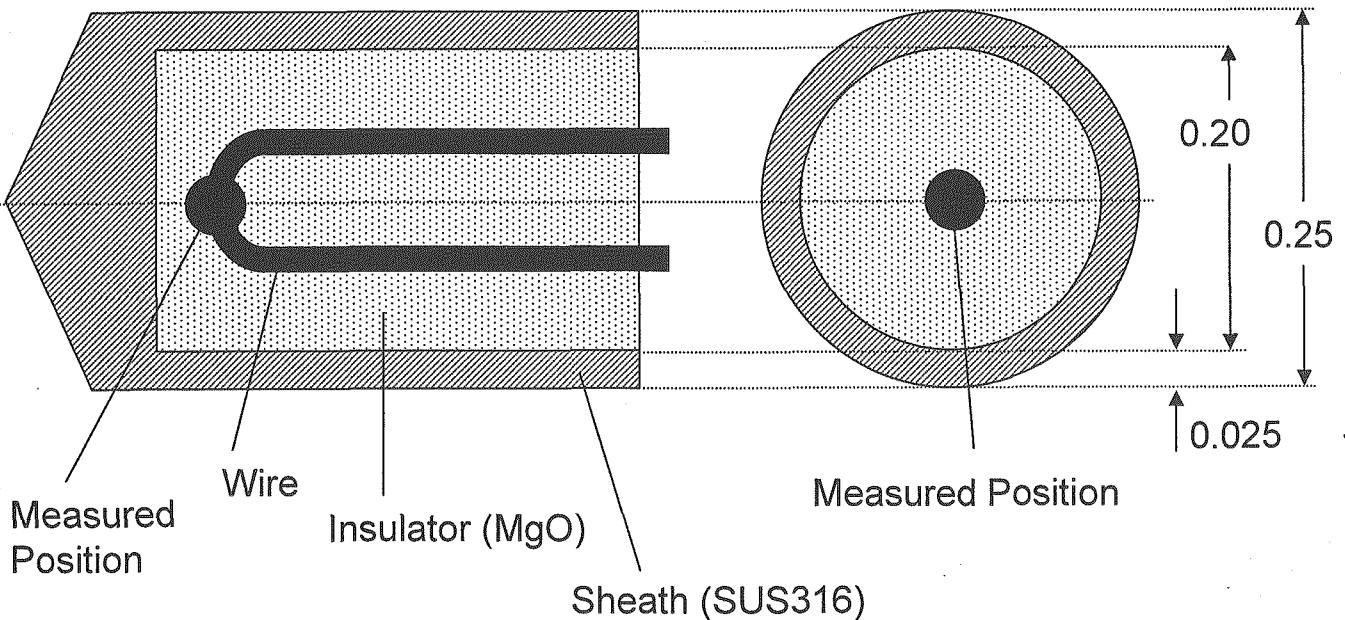
Fig.2.1.5 Partition Plate with T/C.

**Measured Position**

(longitudinal cross section)

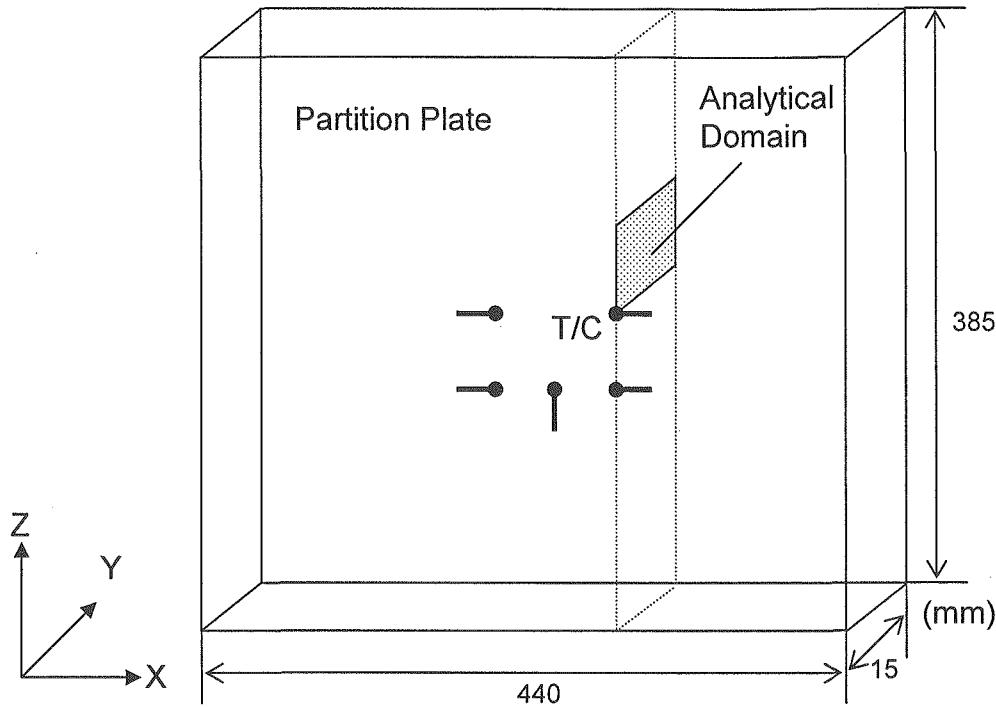
(radial cross section)

(mm)

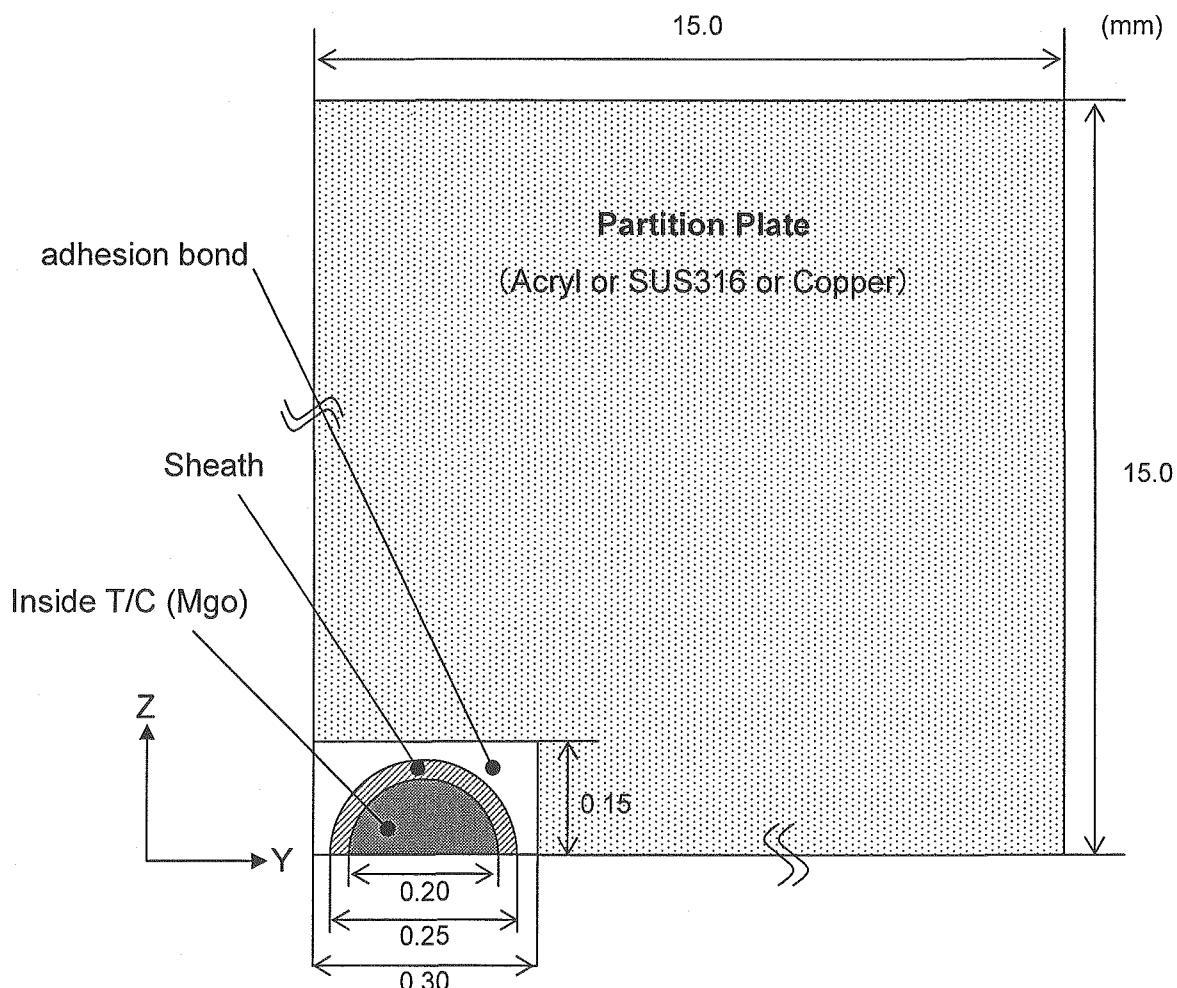


(b) Structure of Thermocouple

Fig.3.1.1 Structure of Thermocouple.



(a) Outline of Partition Plate



(b) Analytical Domain

Fig.3.2.1 Analytical Model.

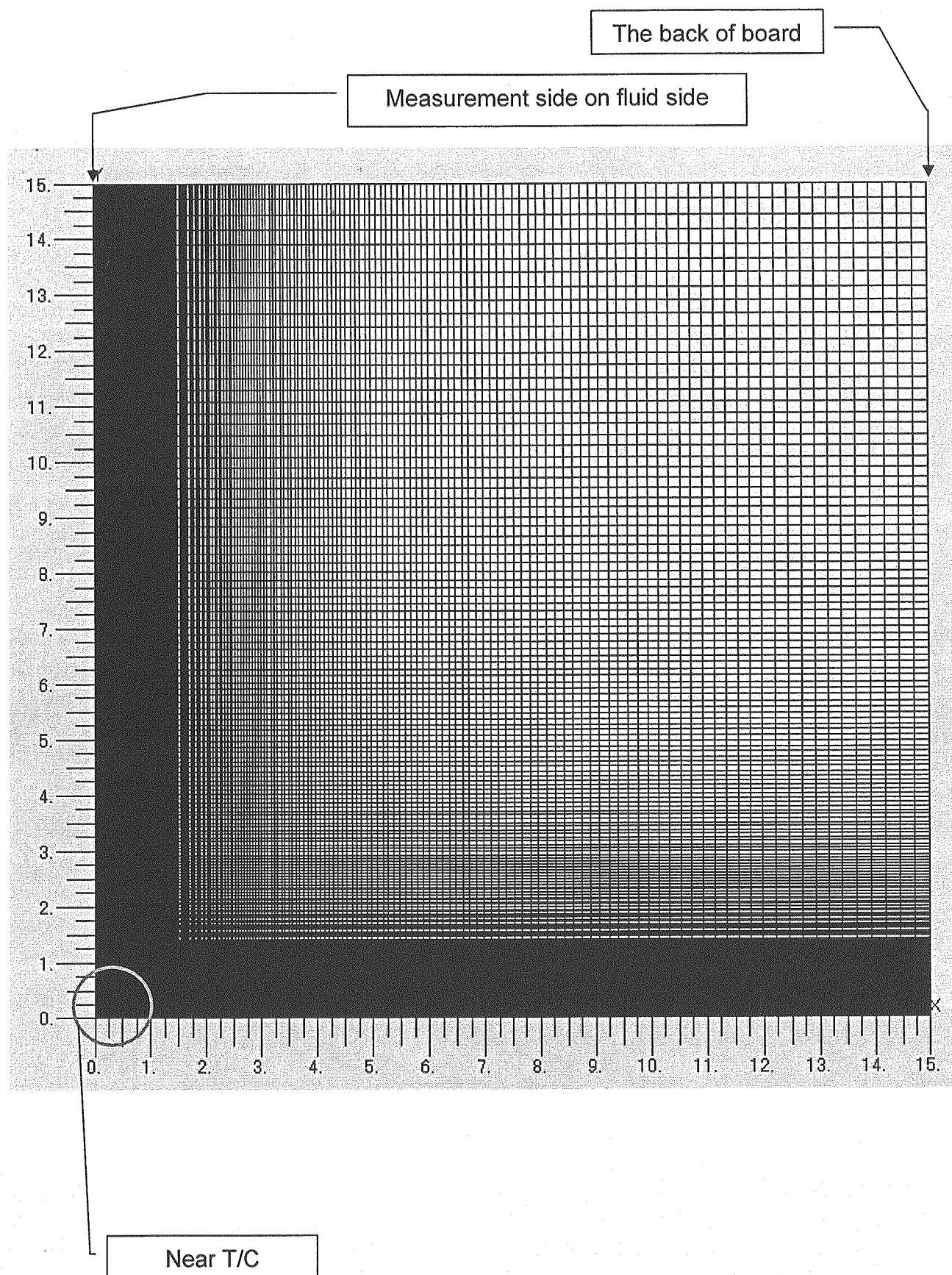


Fig.3.2.2(a) Mesh Width Increased as position was far from T/C.

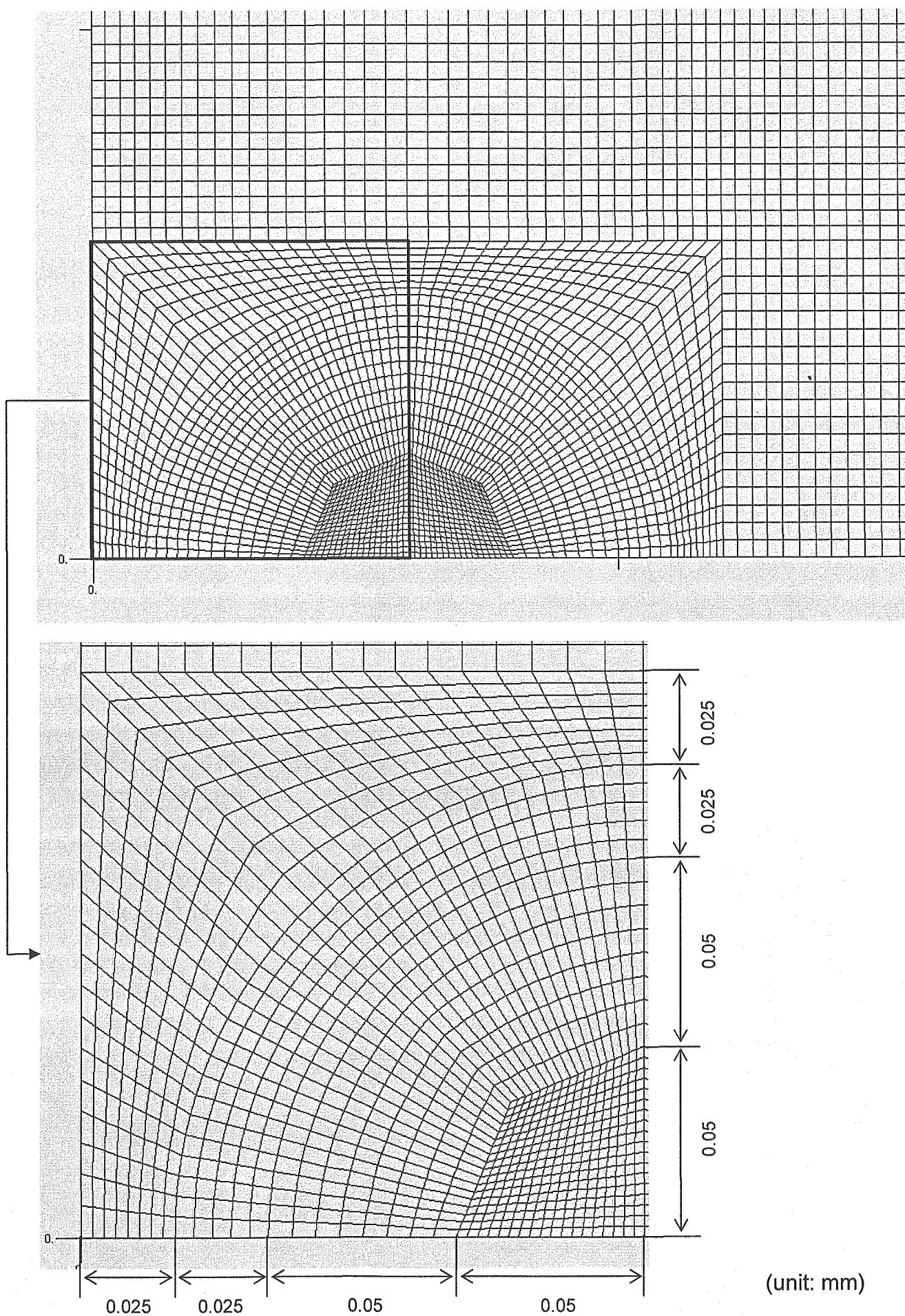


Fig.3.2.2(b) Mesh Arrangement near T/C.

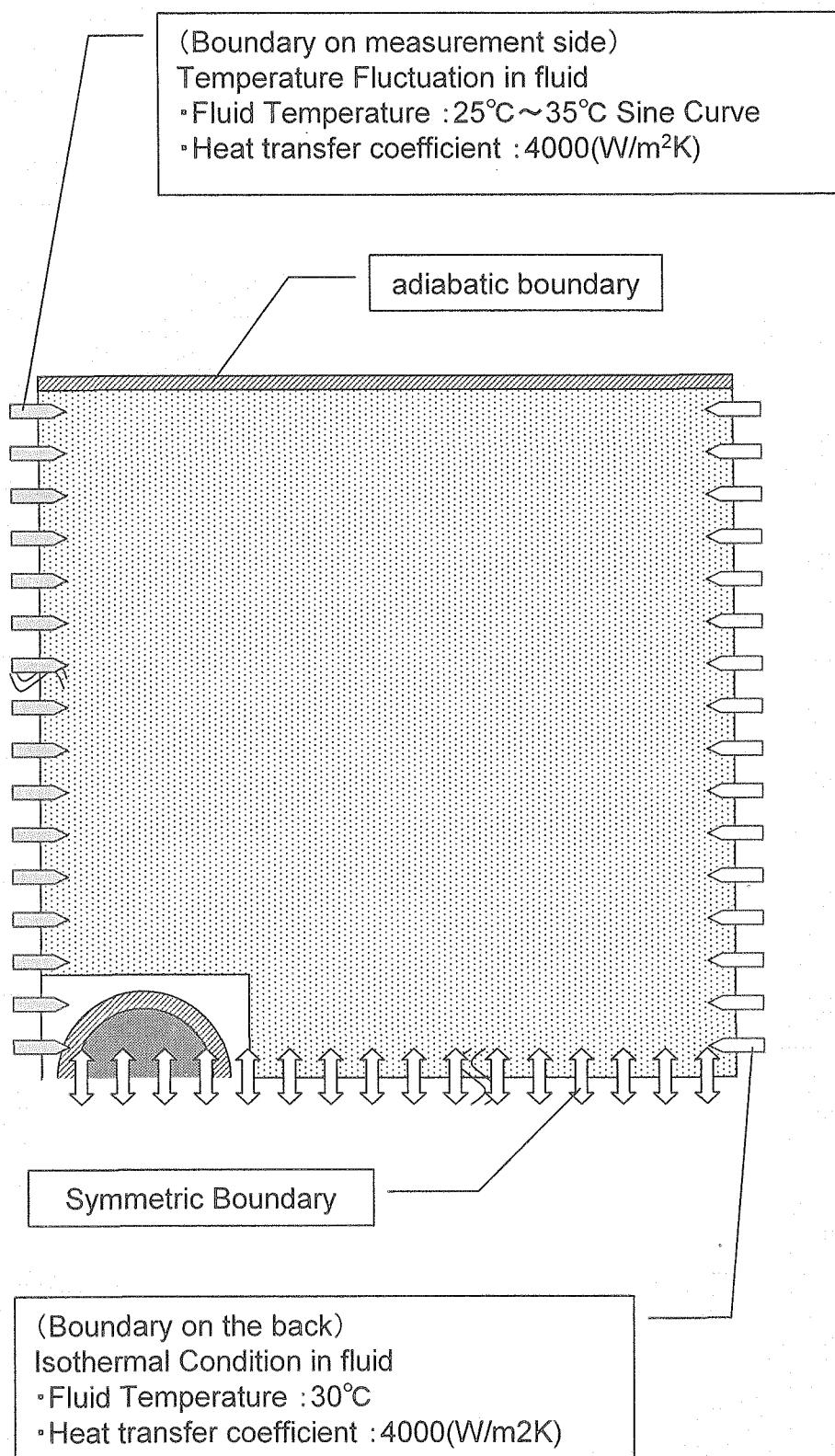


Fig.3.2.3 Boundary Condition.

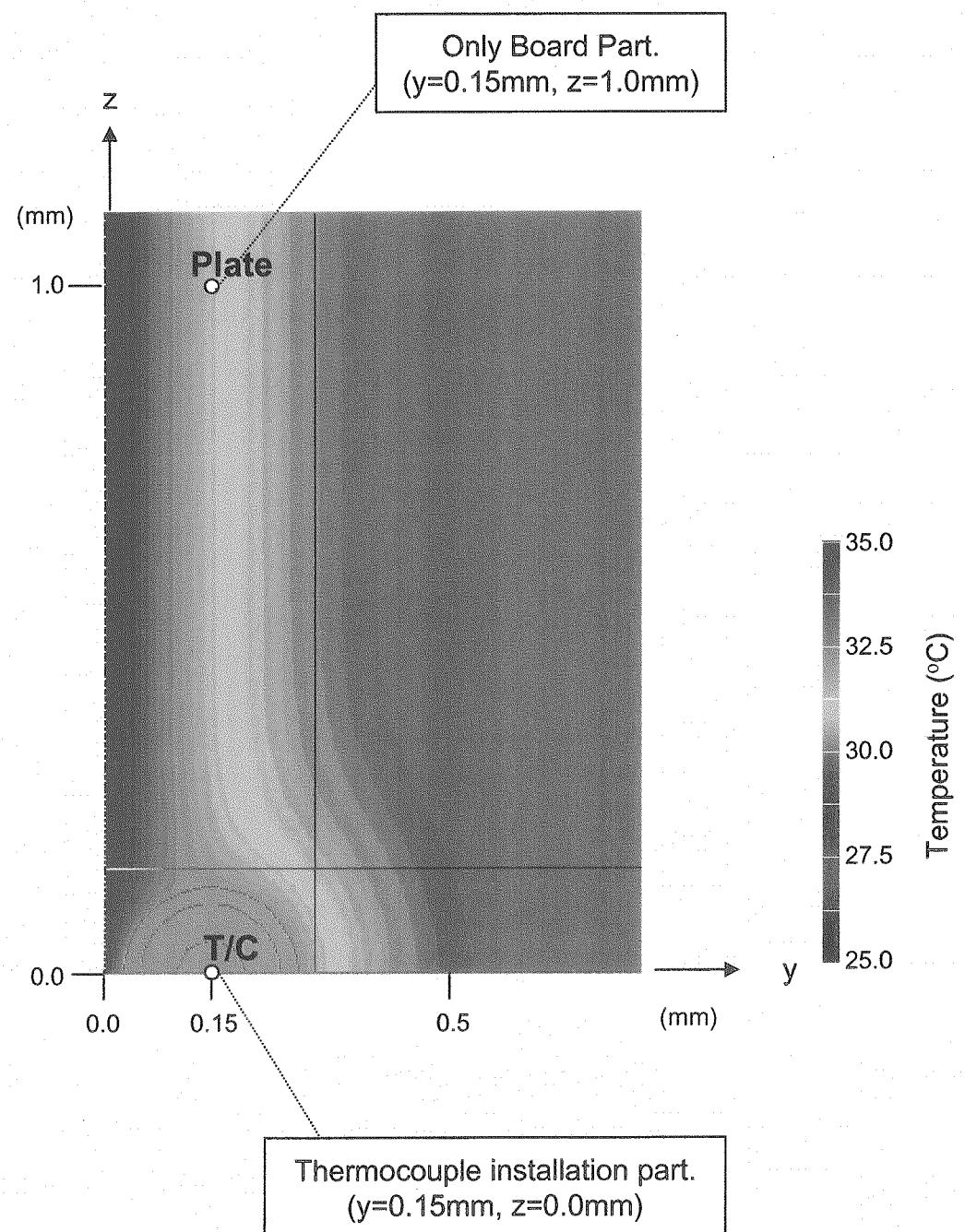


Fig.3.3.1 Temperature measurement position.

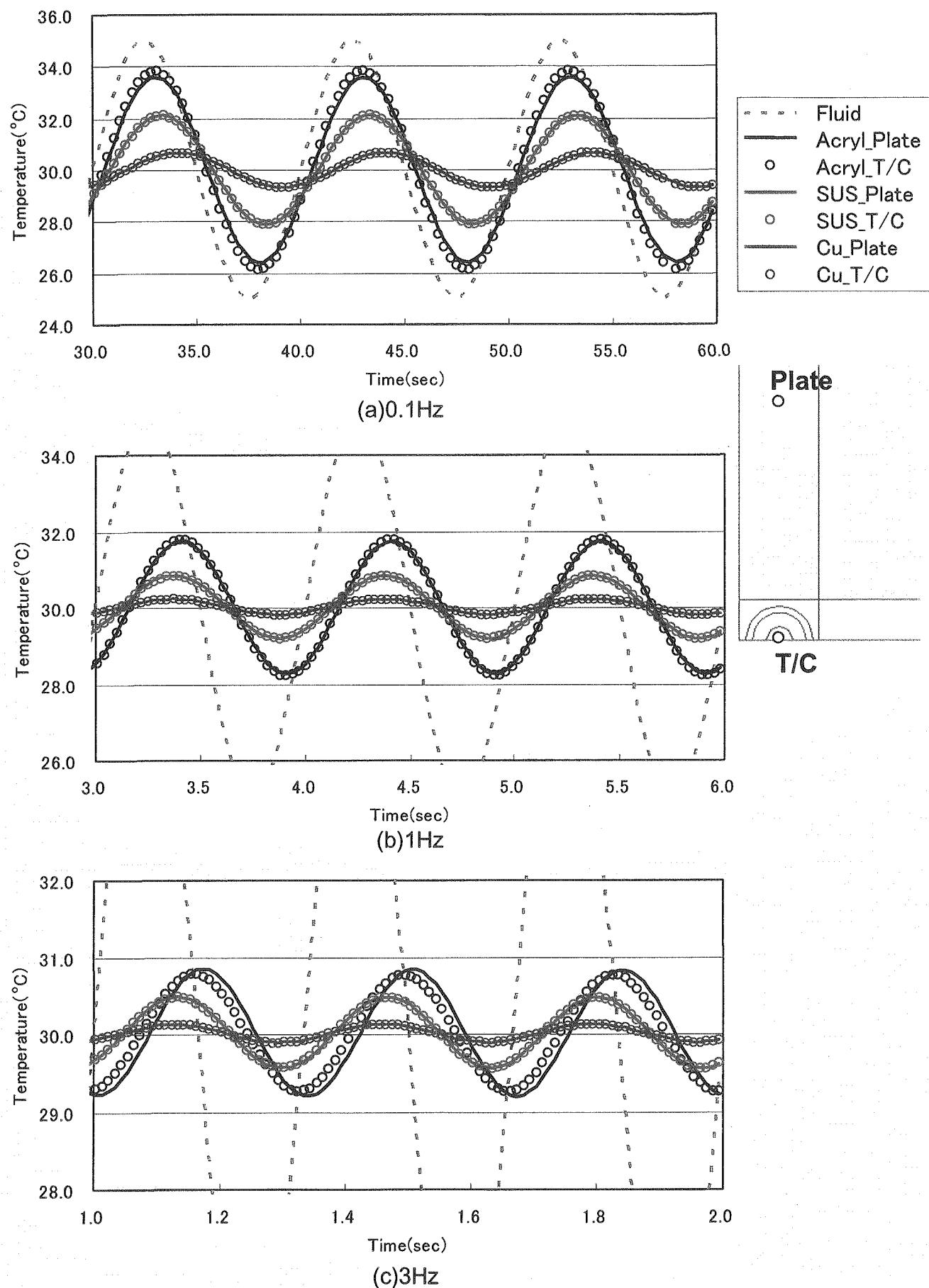


Fig.3.3.2(a) Effect of T/C Installation on Time-Trends of Temperature.

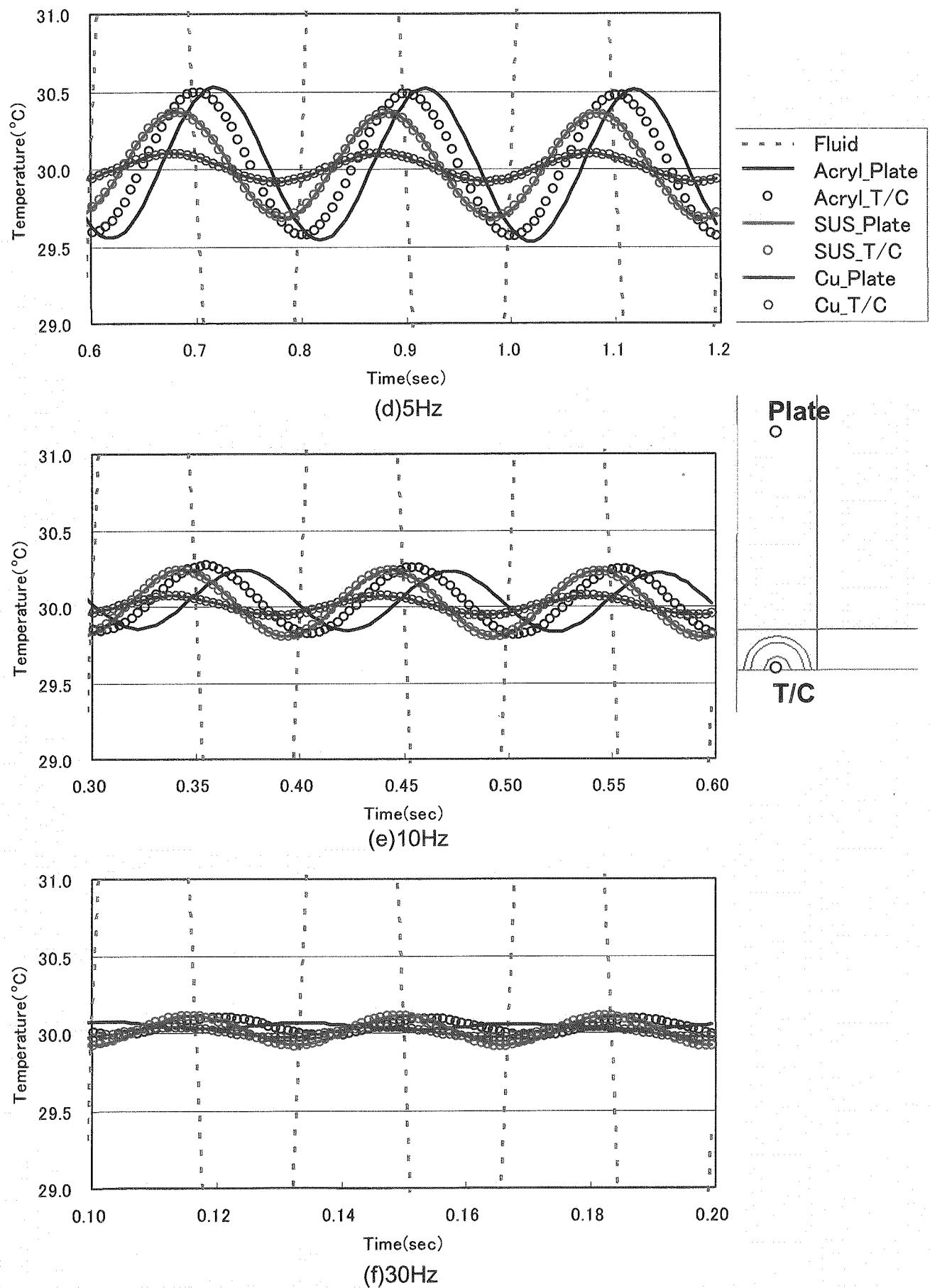


Fig.3.3.2(b) Effect of T/C Installation on Time-Trends of Temperature.

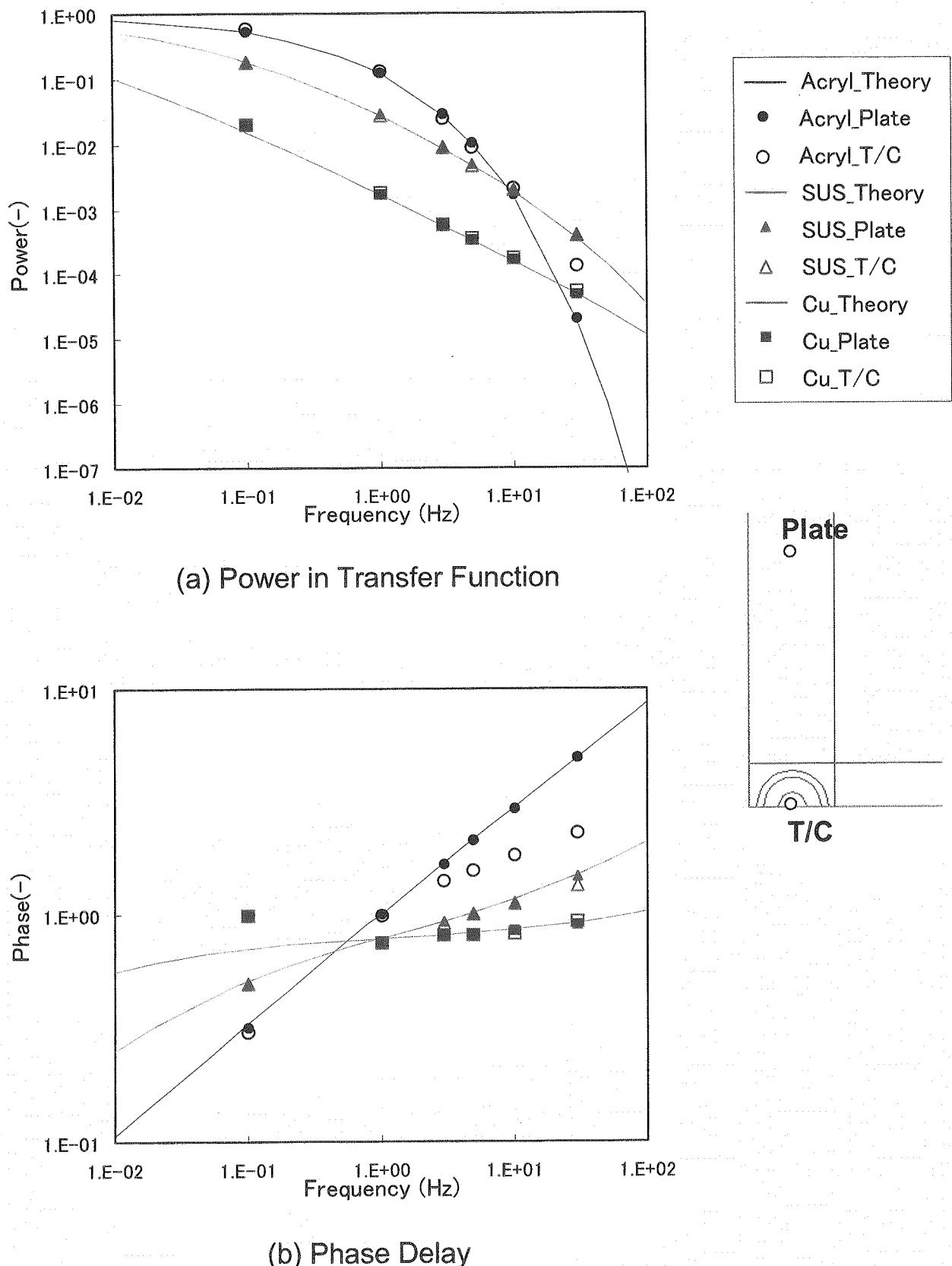


Fig.3.3.3 Effect of T/C Installation on Transfer Function Characteristics from Fluid to Structure.

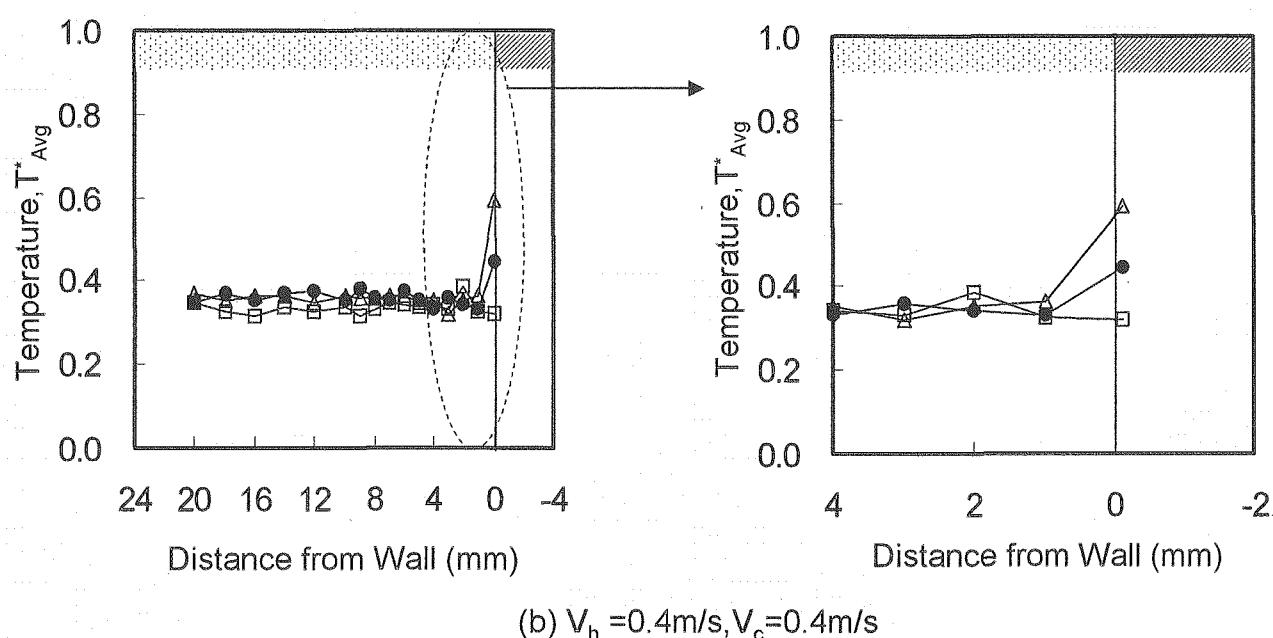
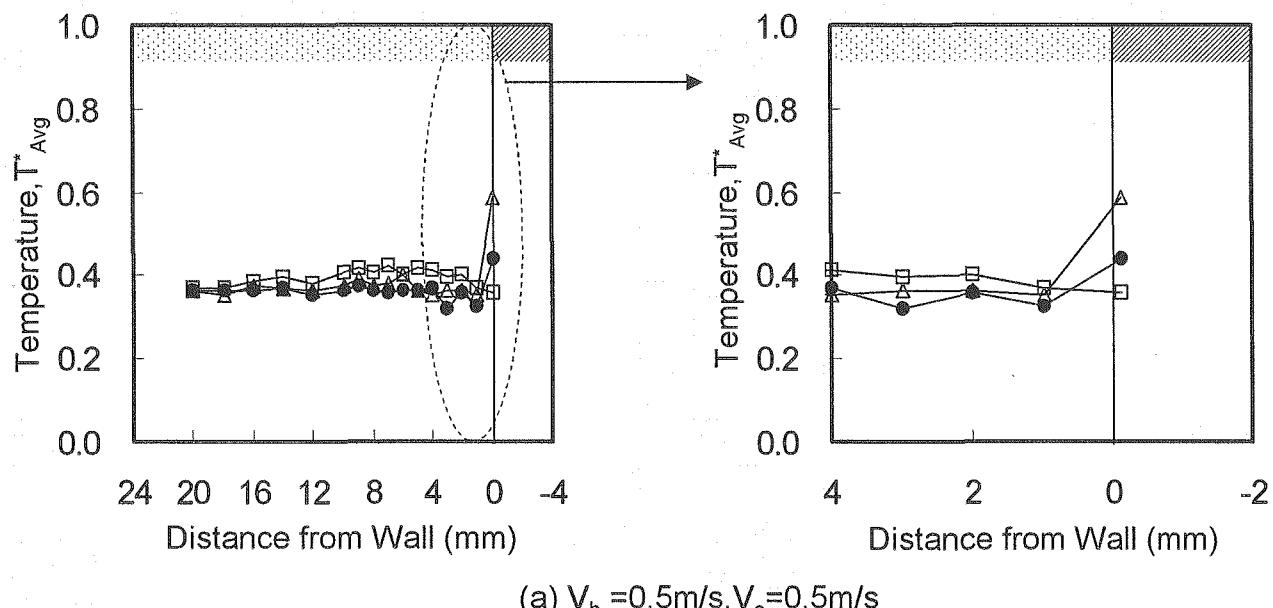
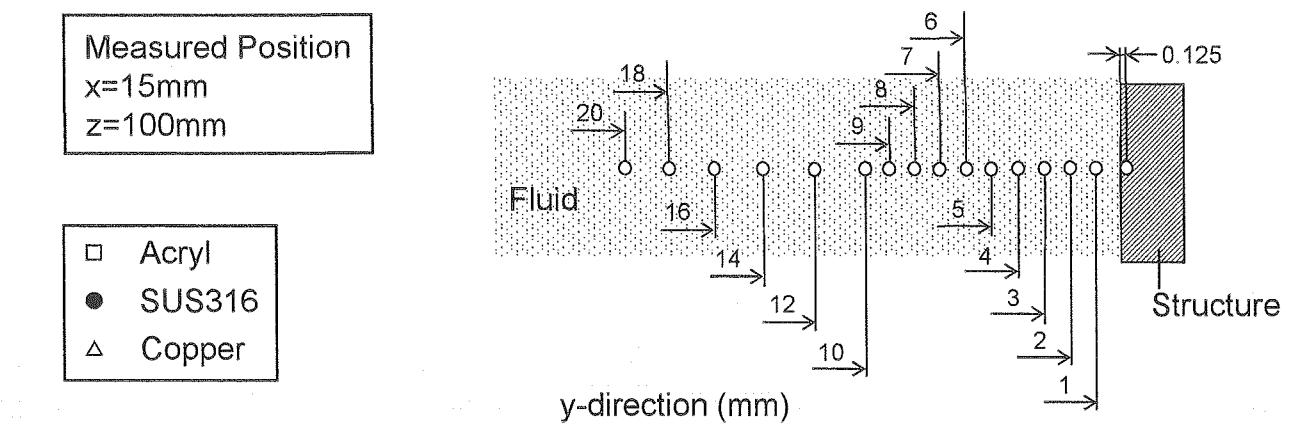


Fig.4.1.1(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature in Depth Direction under Isovelocity Triple-Jet Condition.

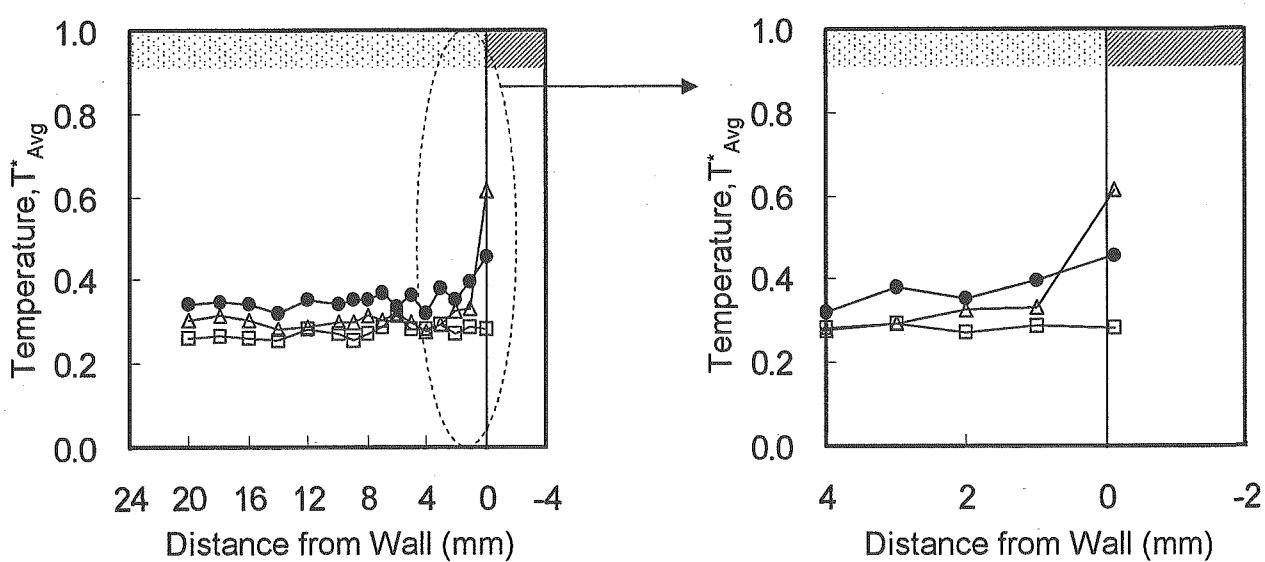
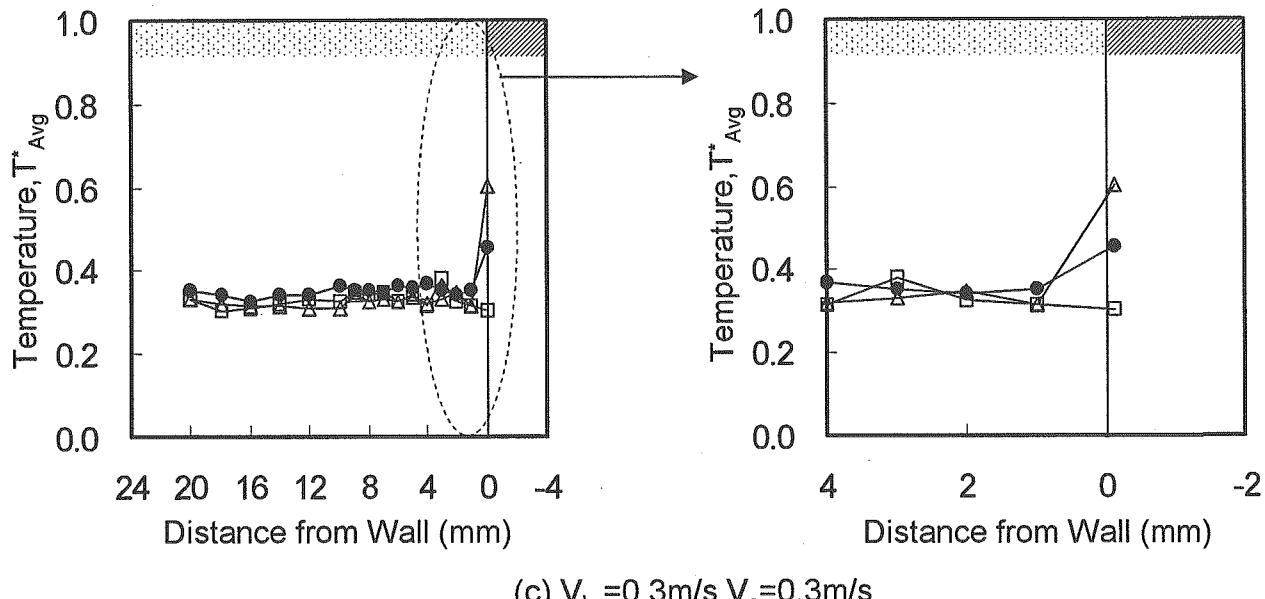
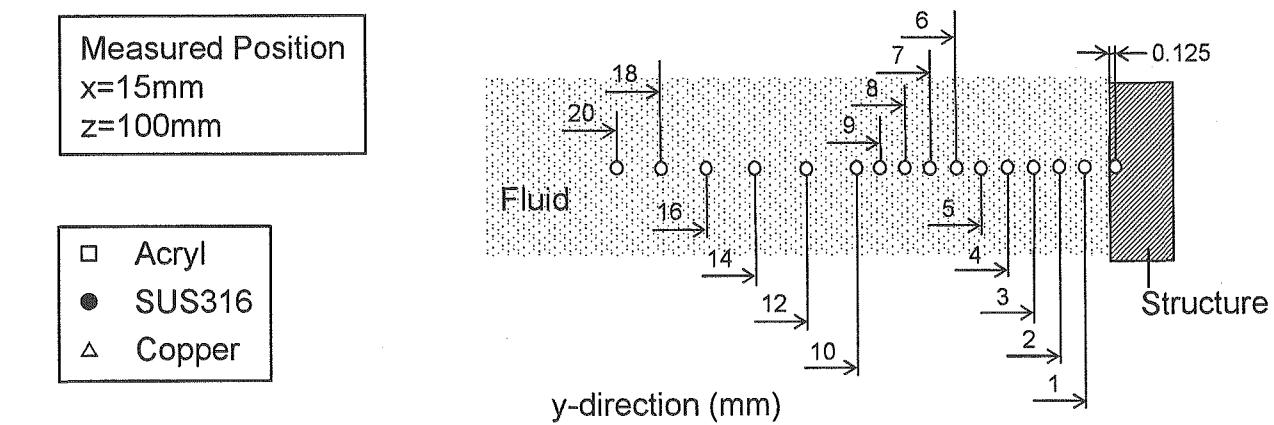


Fig.4.1.1(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature in Depth Direction under Isovelocity Triple-Jet Condition.

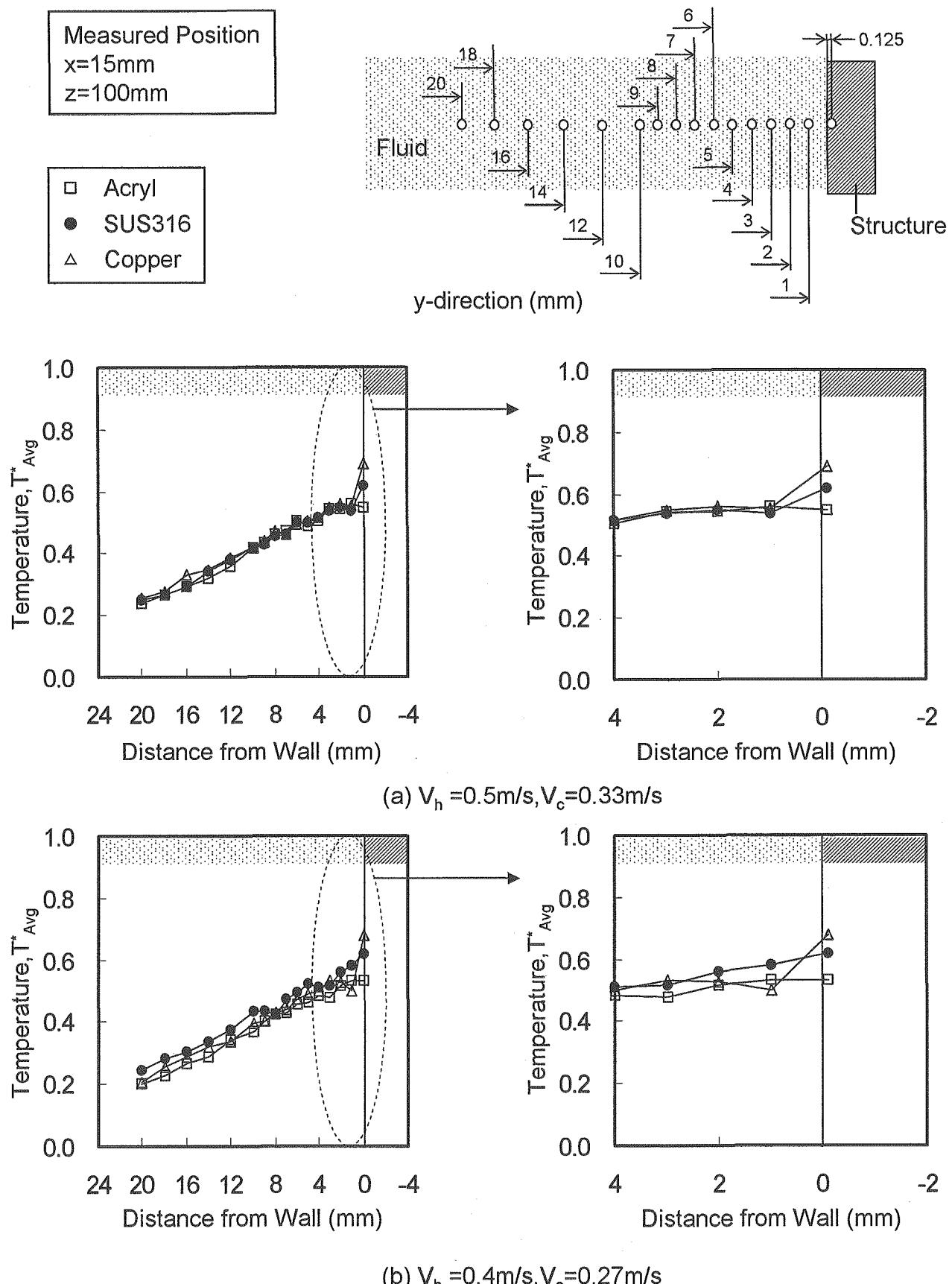


Fig.4.1.2(a) Comparisons of Time-Averaged Temperature in Depth Direction under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

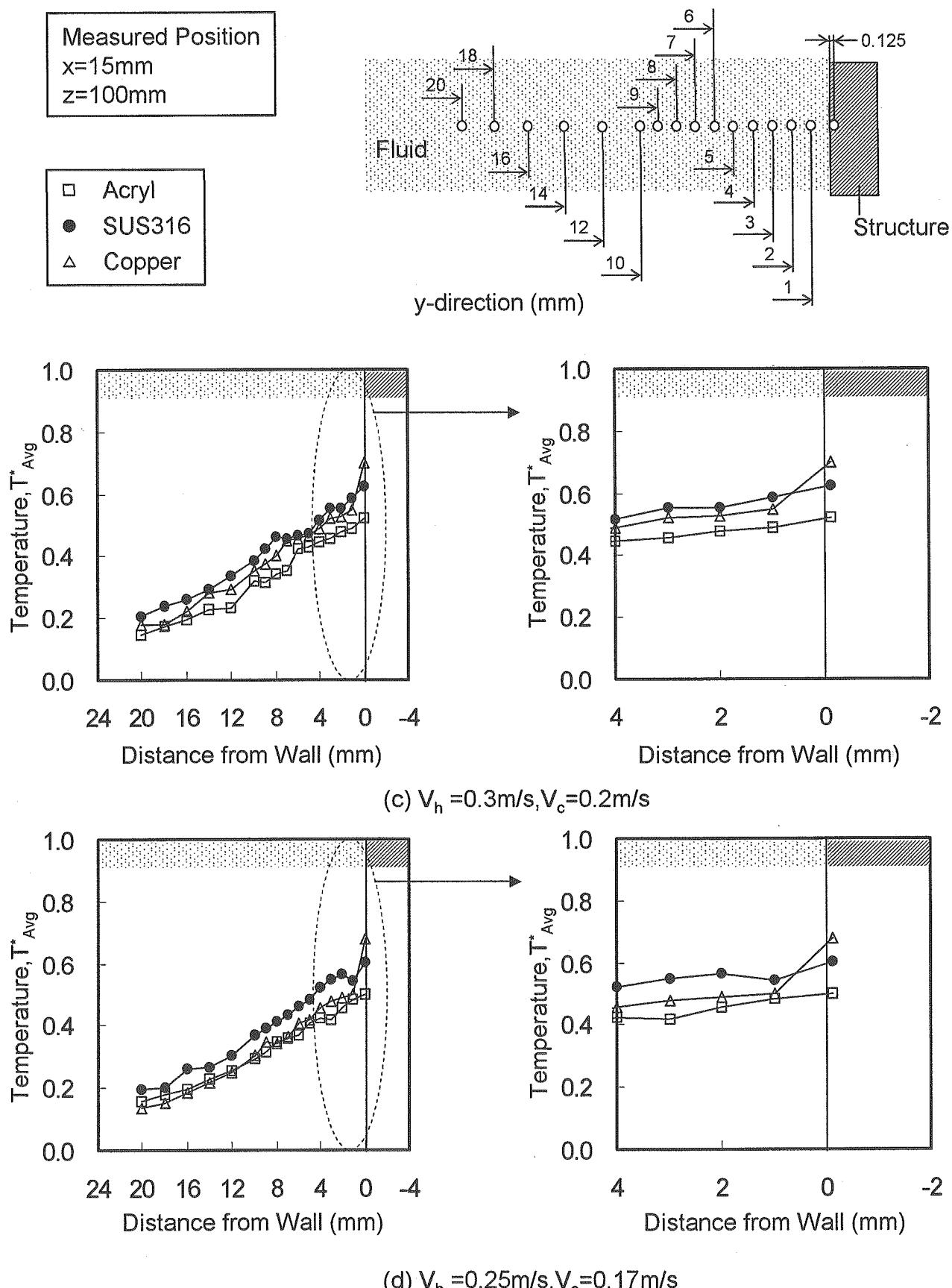


Fig.4.1.2(b) Comparisons of Time-Averaged Temperature in Depth Direction under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

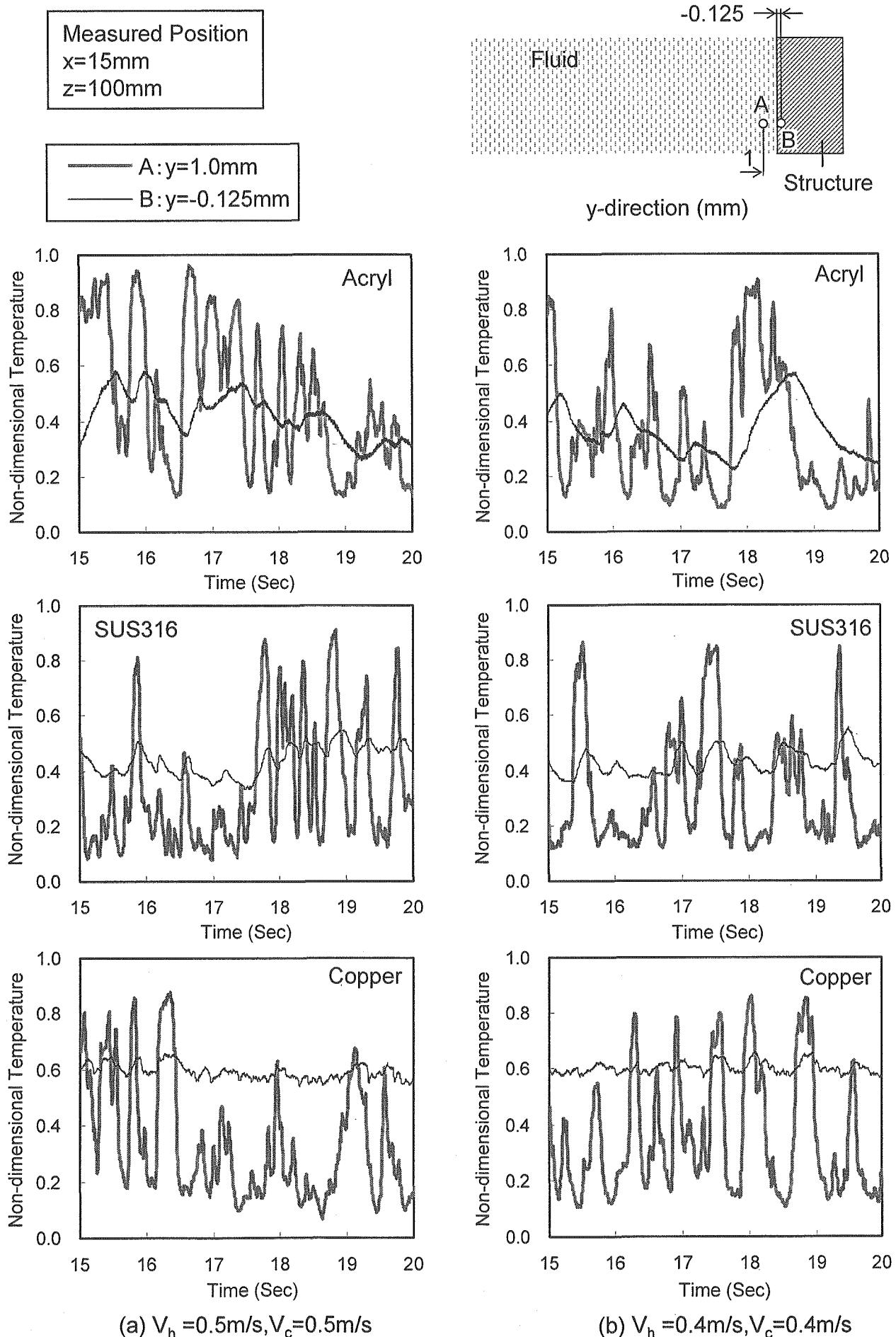


Fig.4.2.1(a) Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Isovelocity Triple-Jet Condition.

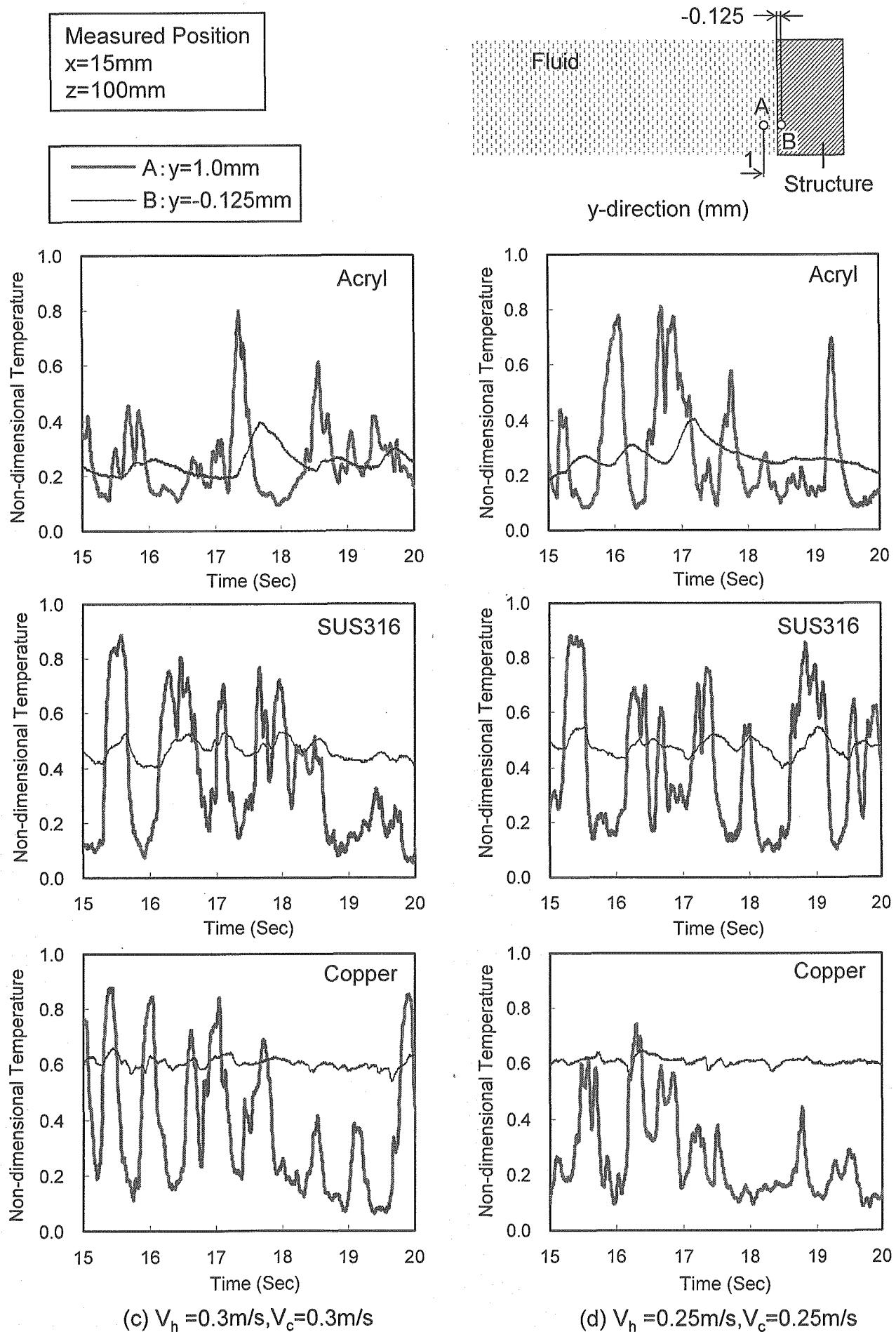


Fig.4.2.1(b) Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Isovelocity Triple-Jet Condition.

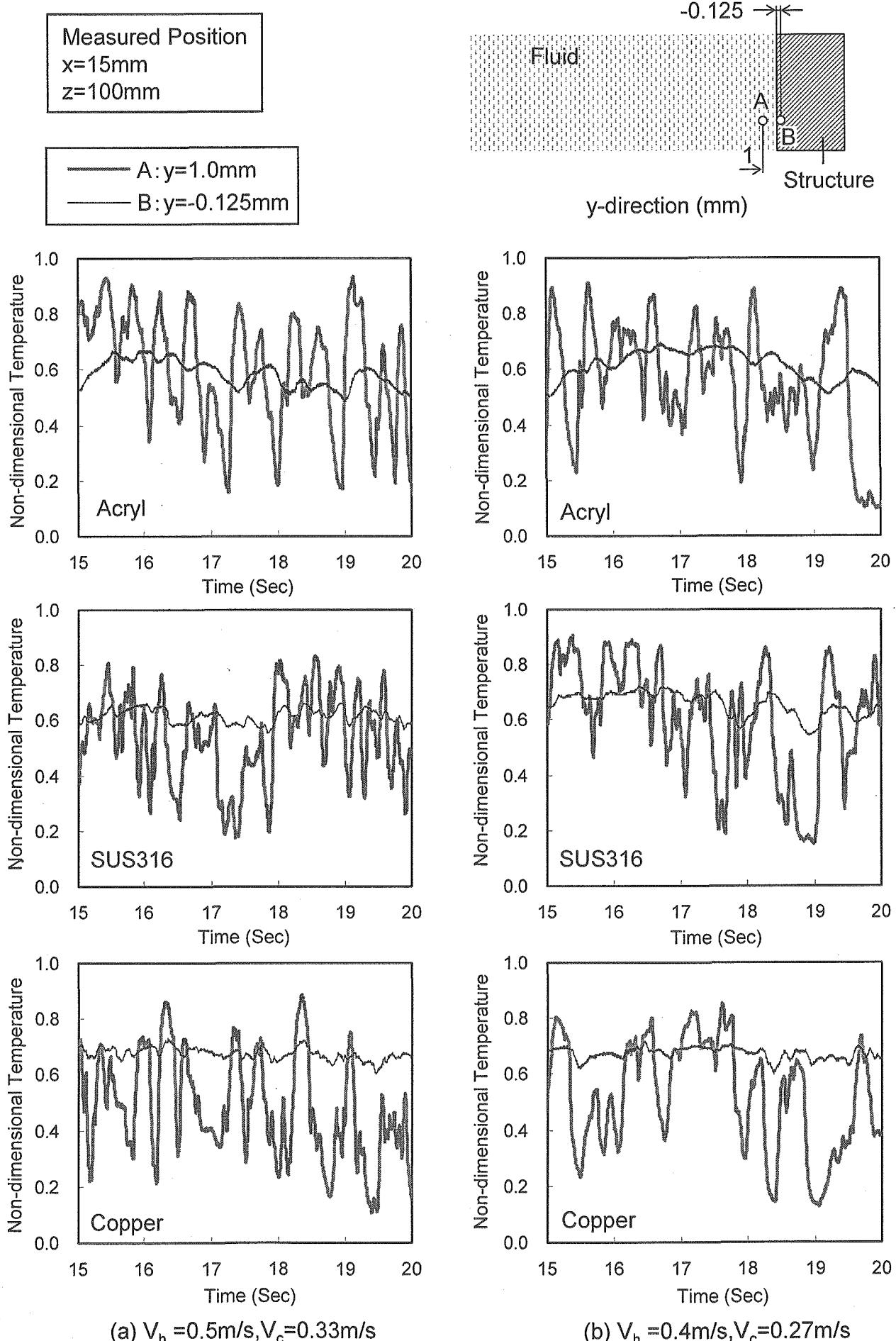


Fig.4.2.2(a) Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

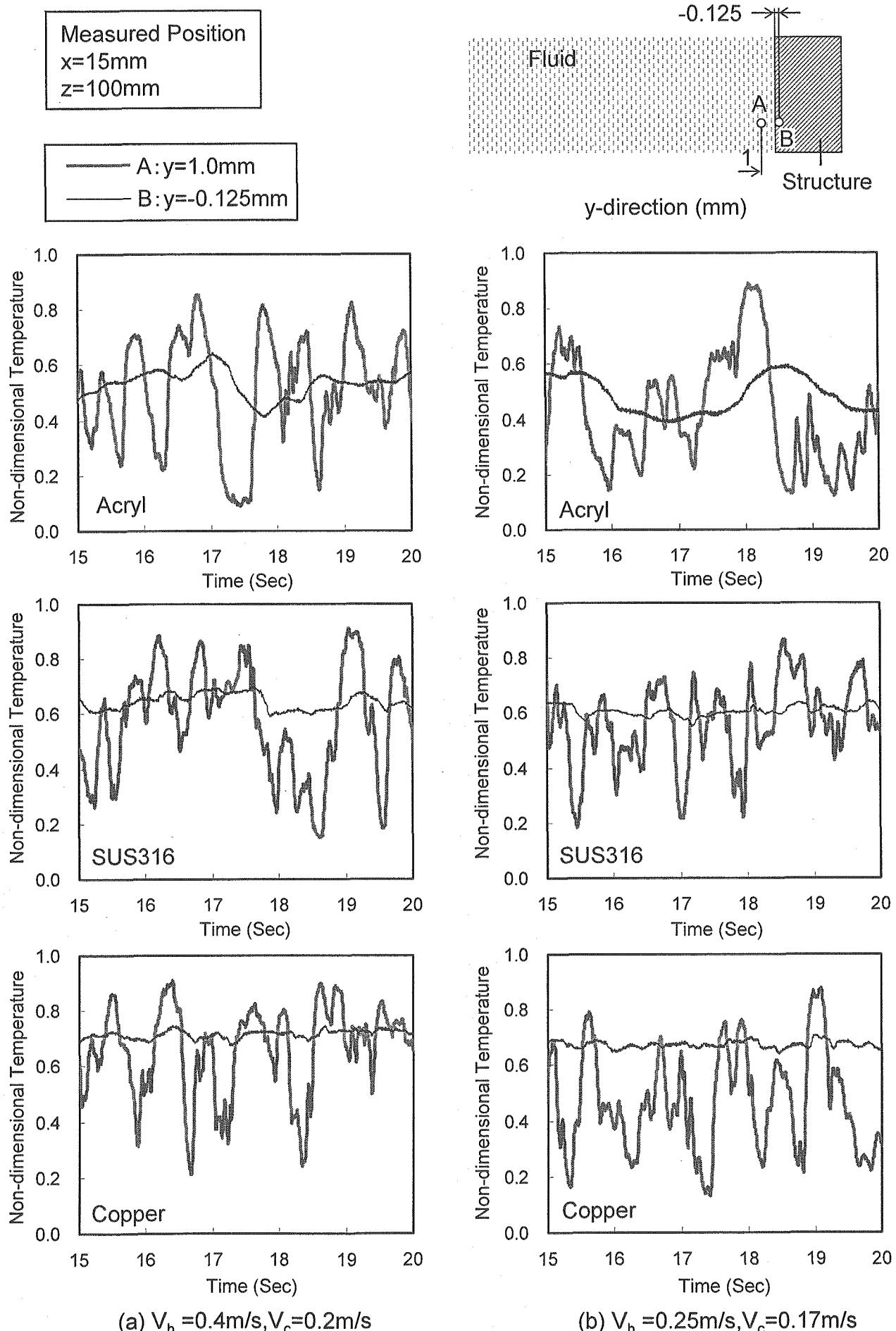


Fig.4.2.2(b) Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

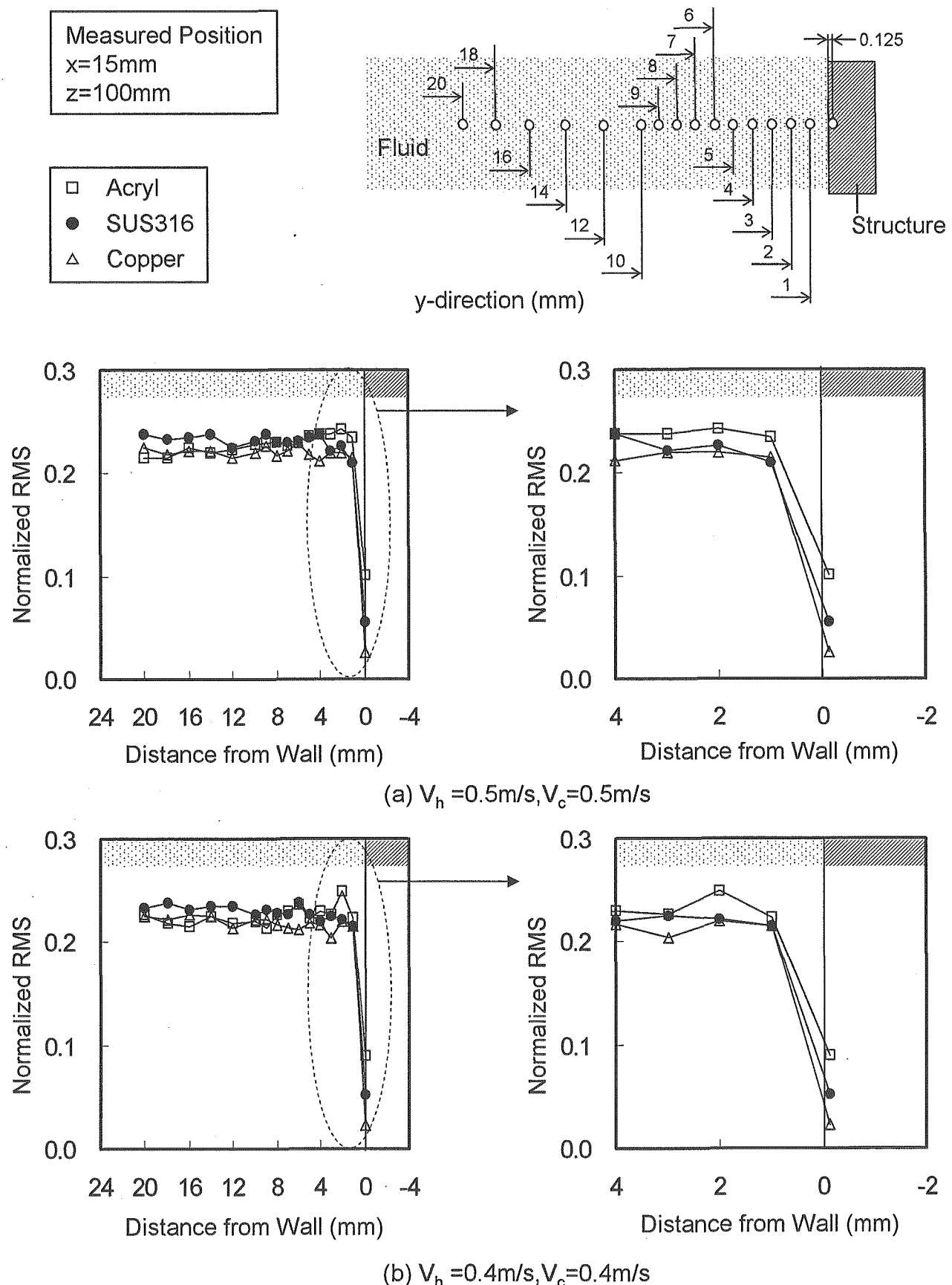


Fig.4.2.3(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Isovelocity Triple-Jet Condition.

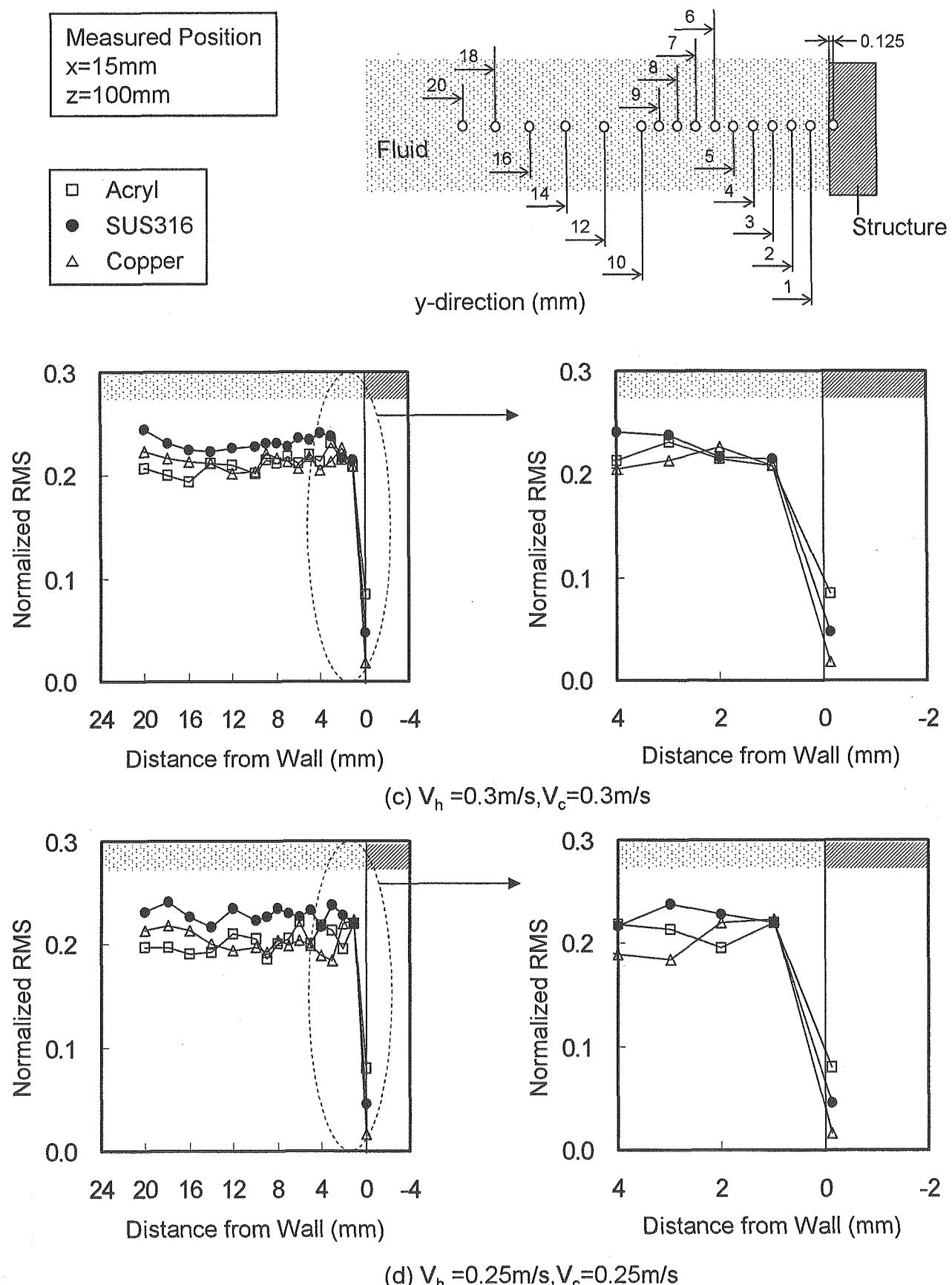


Fig.4.2.3(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Isovelocity Triple-Jet Condition.

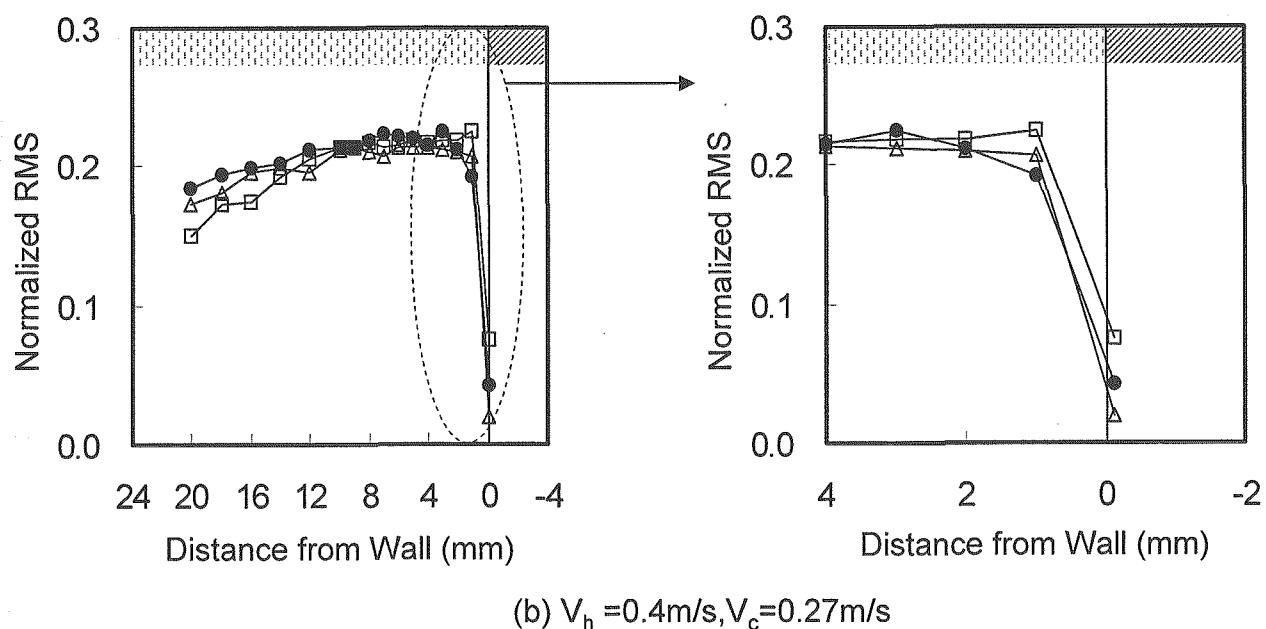
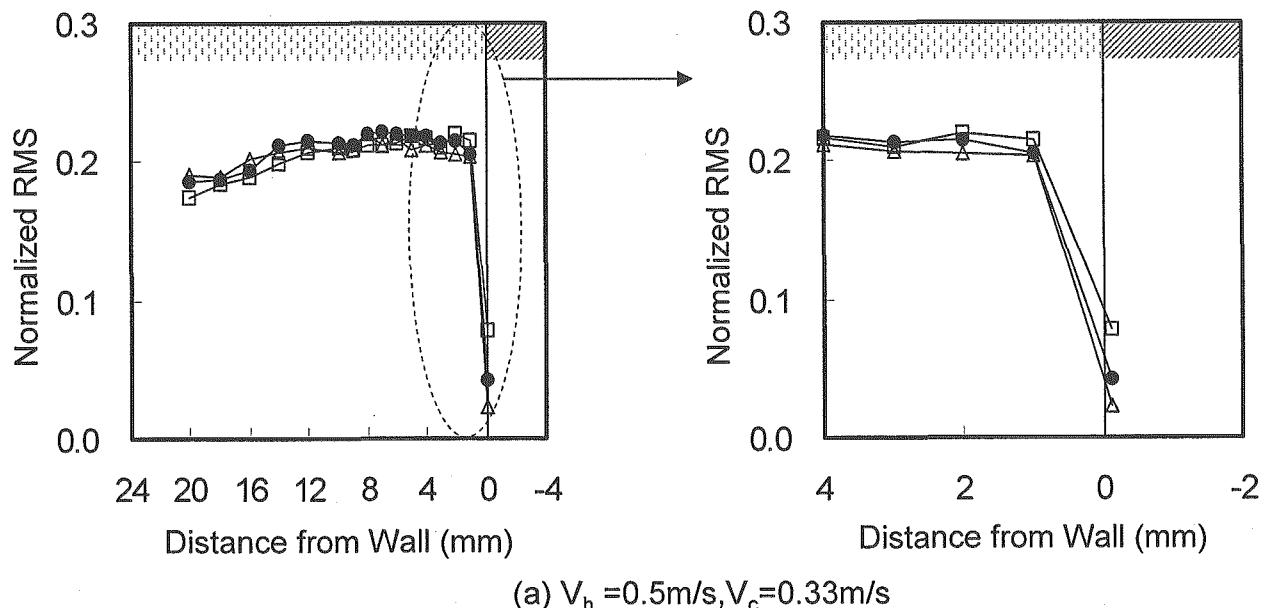
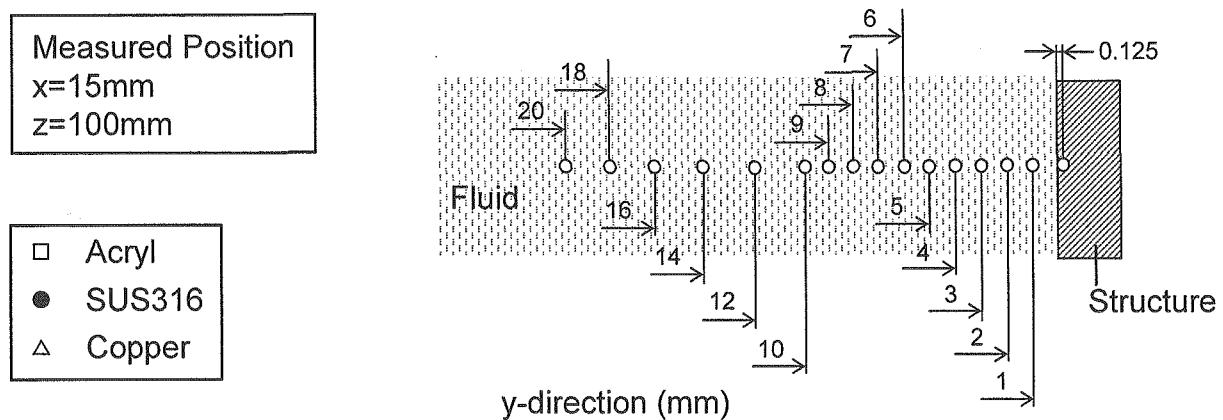


Fig.4.2.4(a) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

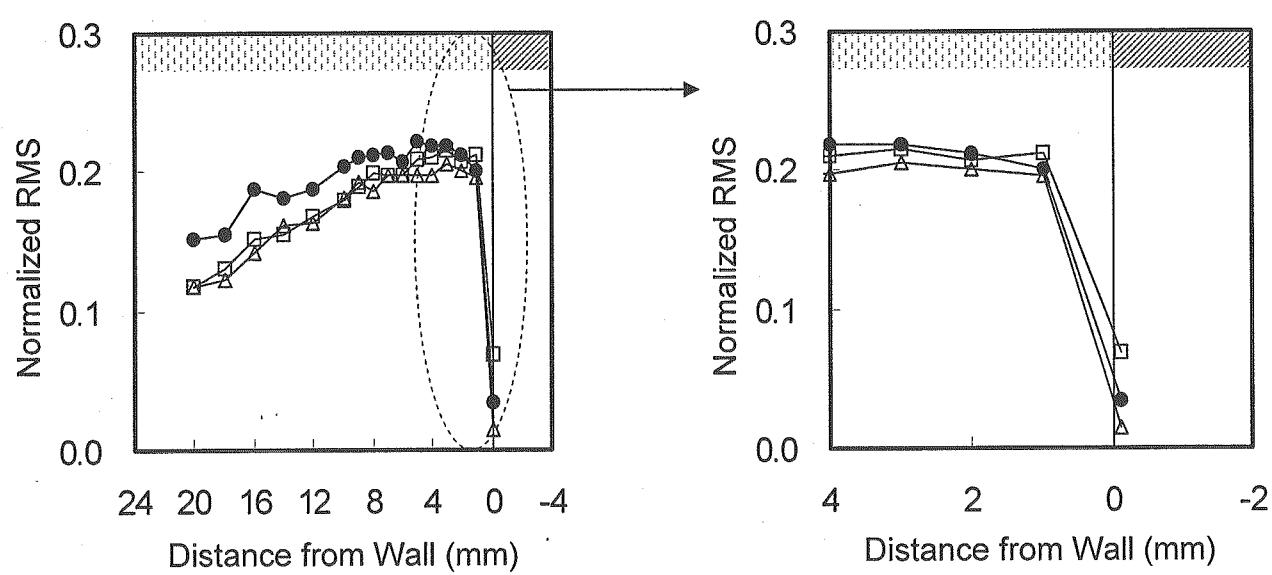
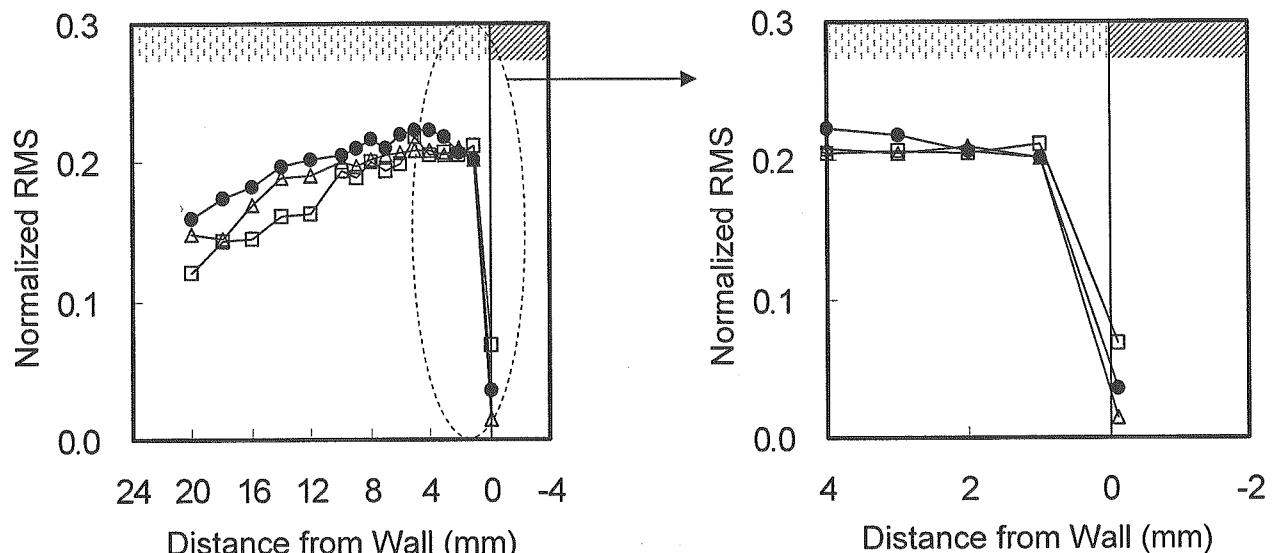
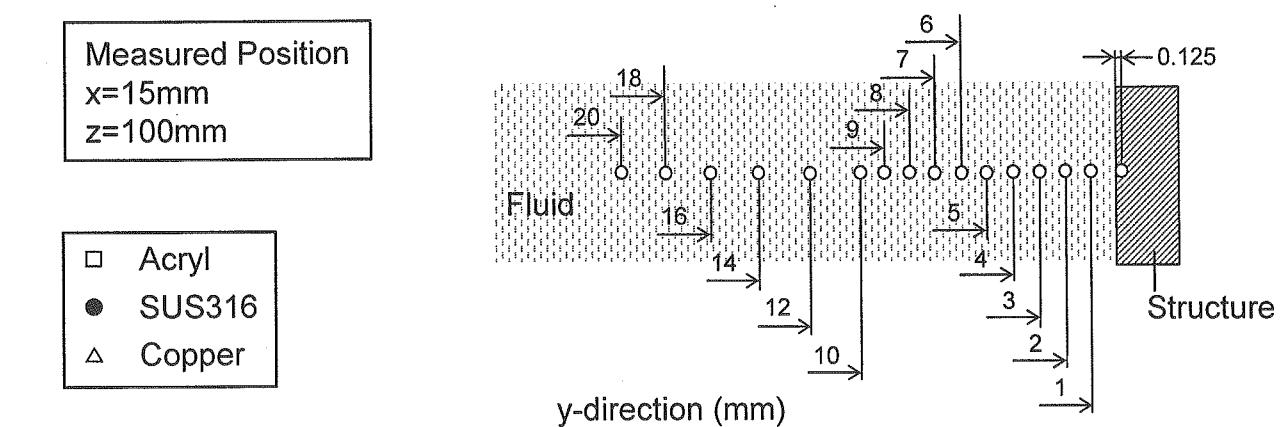
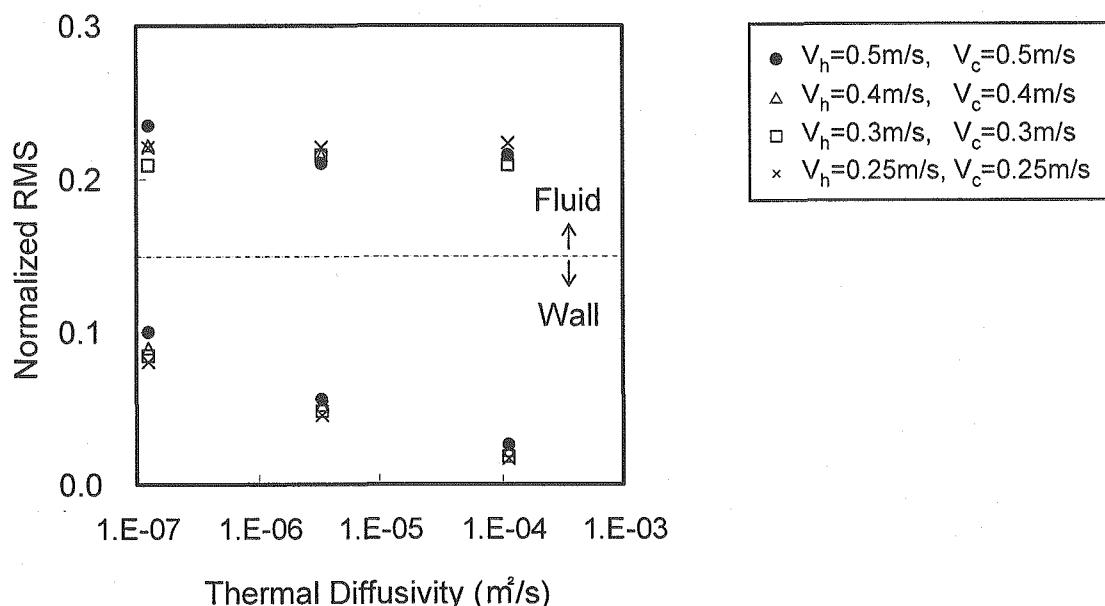
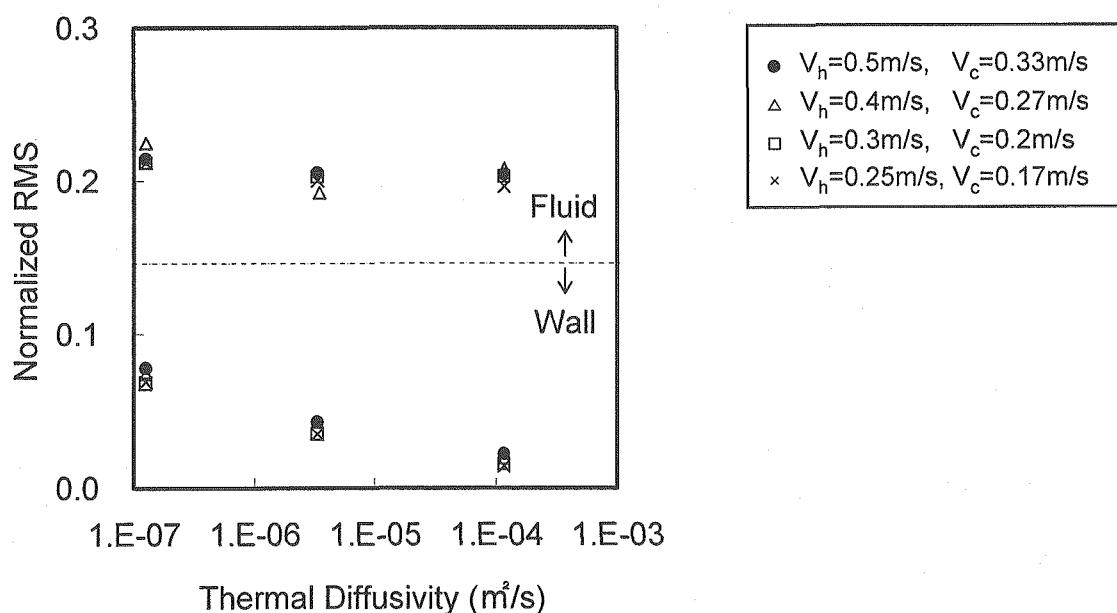


Fig.4.2.4(b) Comparisons of Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.



Experimental Condition: Isovelocity Triple jet



Experimental Condition: Non-Isovelocity Triple jet

Fig.4.2.5 Effect of Thermal Diffusivity on Temperature Fluctuation Intensities in Fluid and structure.

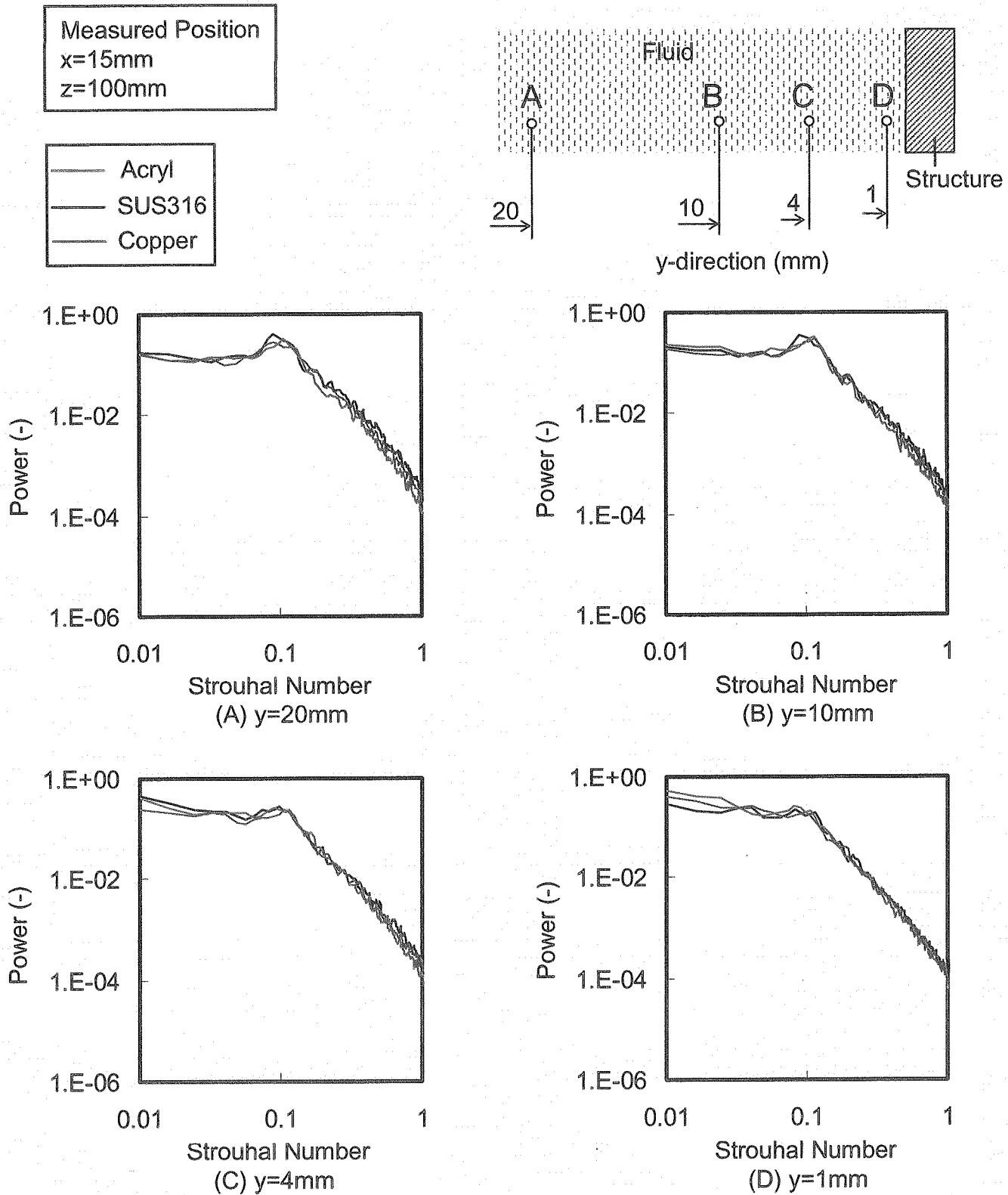


Fig.4.2.6 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Isovelocity Triple-Jet Condition.  
 $(V_h=0.5\text{m/s}, V_c=0.5\text{m/s})$

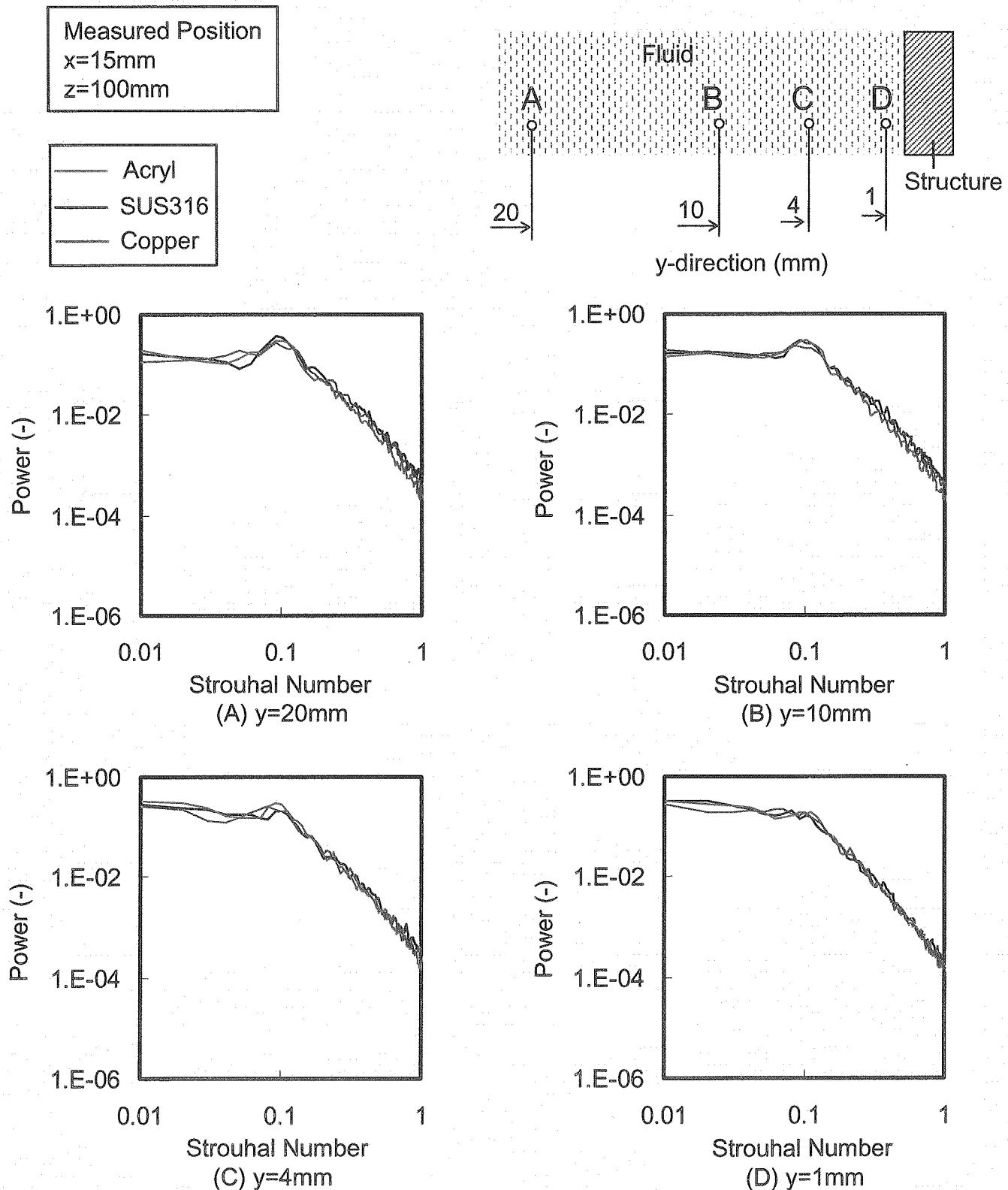


Fig.4.2.7 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Isovelocity Triple-Jet Condition.  
 $(V_h=0.4\text{m/s}, V_c=0.4\text{m/s})$

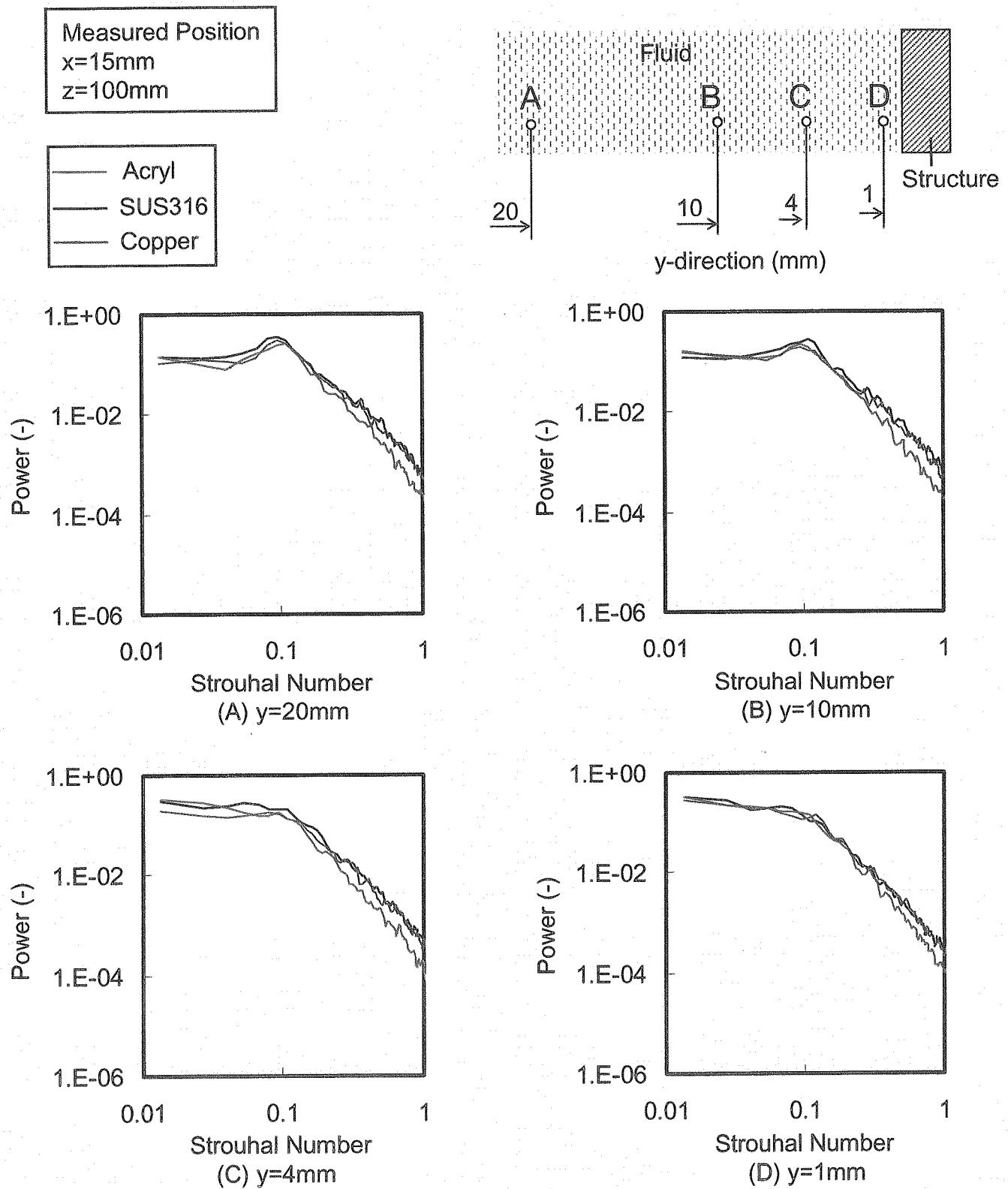


Fig.4.2.8 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Isovelocity Triple-Jet Condition.  
 $(V_h=0.3\text{m/s}, V_c=0.3\text{m/s})$

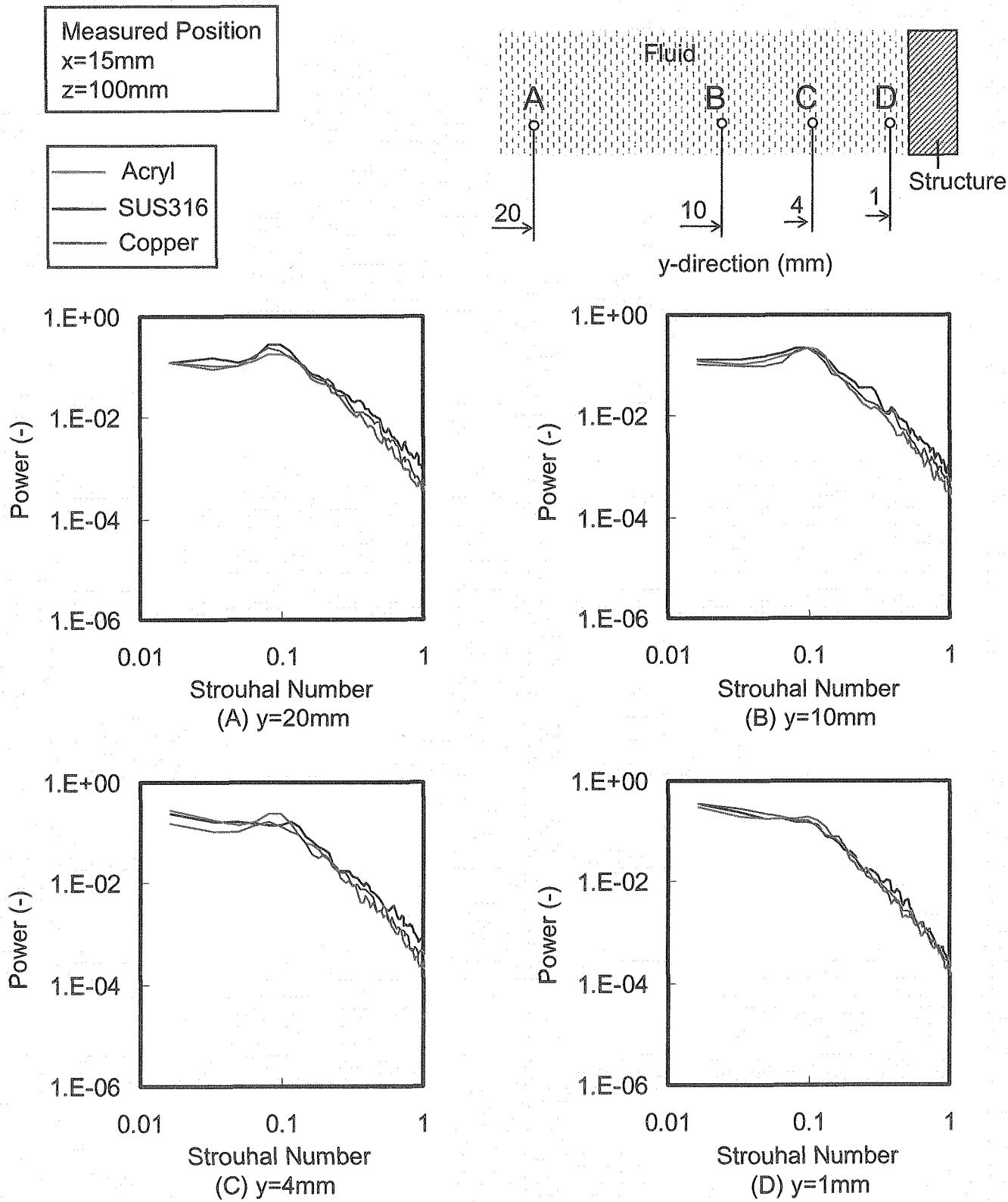


Fig.4.2.9 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Isovelocity Triple-Jet Condition.  
 $(V_h=0.25\text{m/s}, V_c=0.25\text{m/s})$

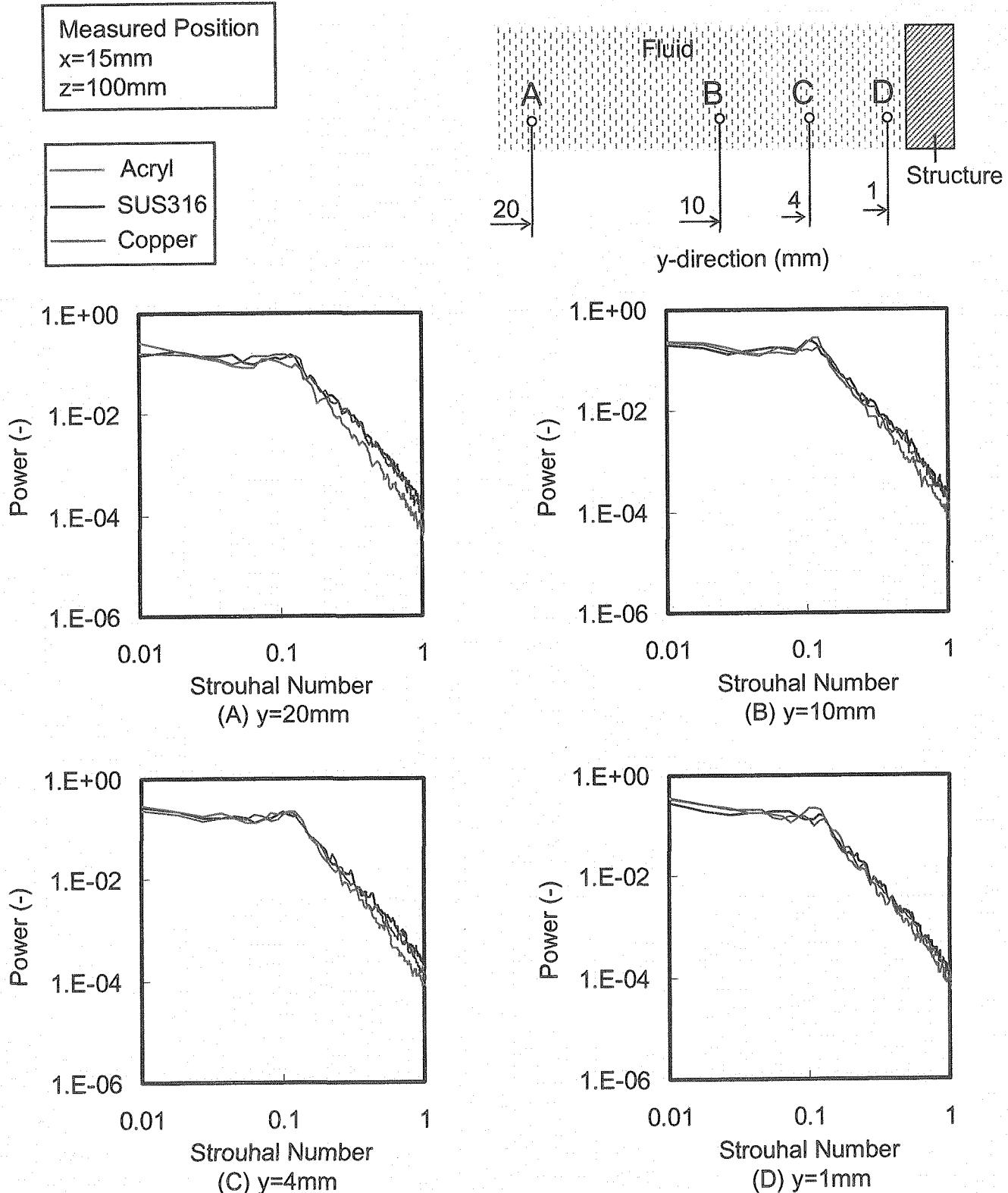


Fig.4.2.10 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.  
 $(V_h=0.5\text{m/s}, V_c=0.33\text{m/s})$

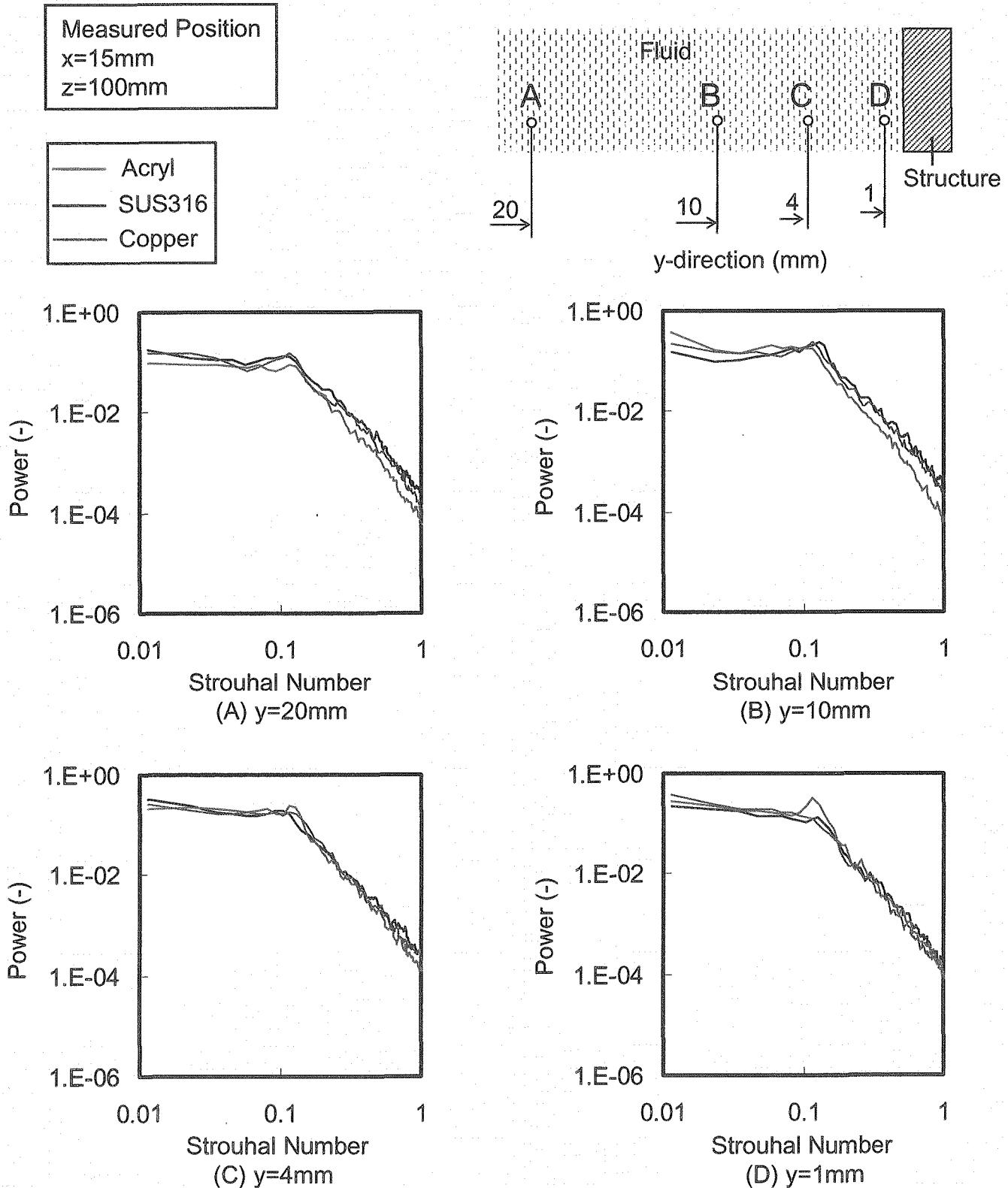


Fig.4.2.11 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.  
 $(V_h=0.4\text{m/s}, V_c=0.27\text{m/s})$

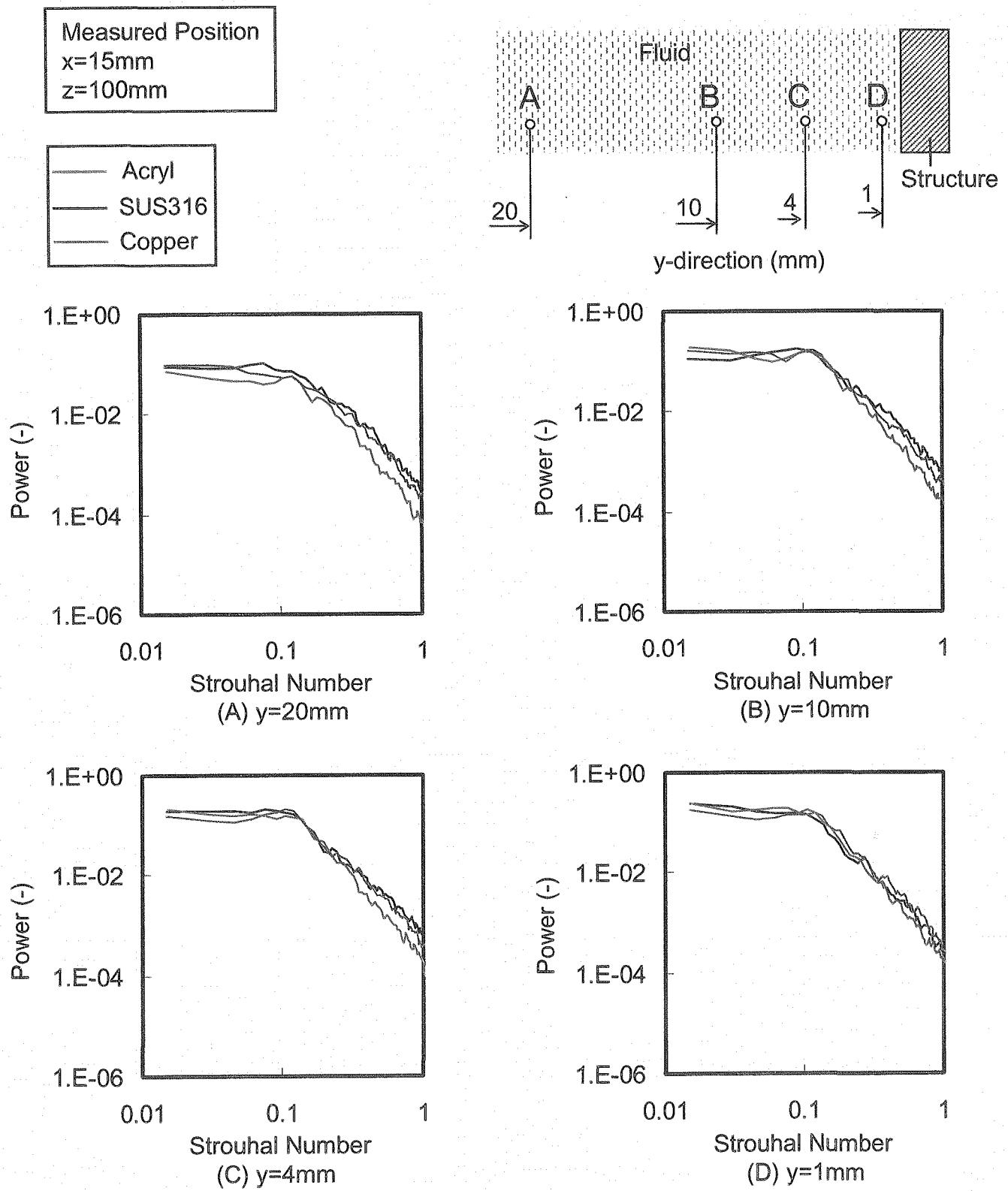


Fig.4.2.12 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.  
 $(V_h=0.3\text{m/s}, V_c=0.2\text{m/s})$

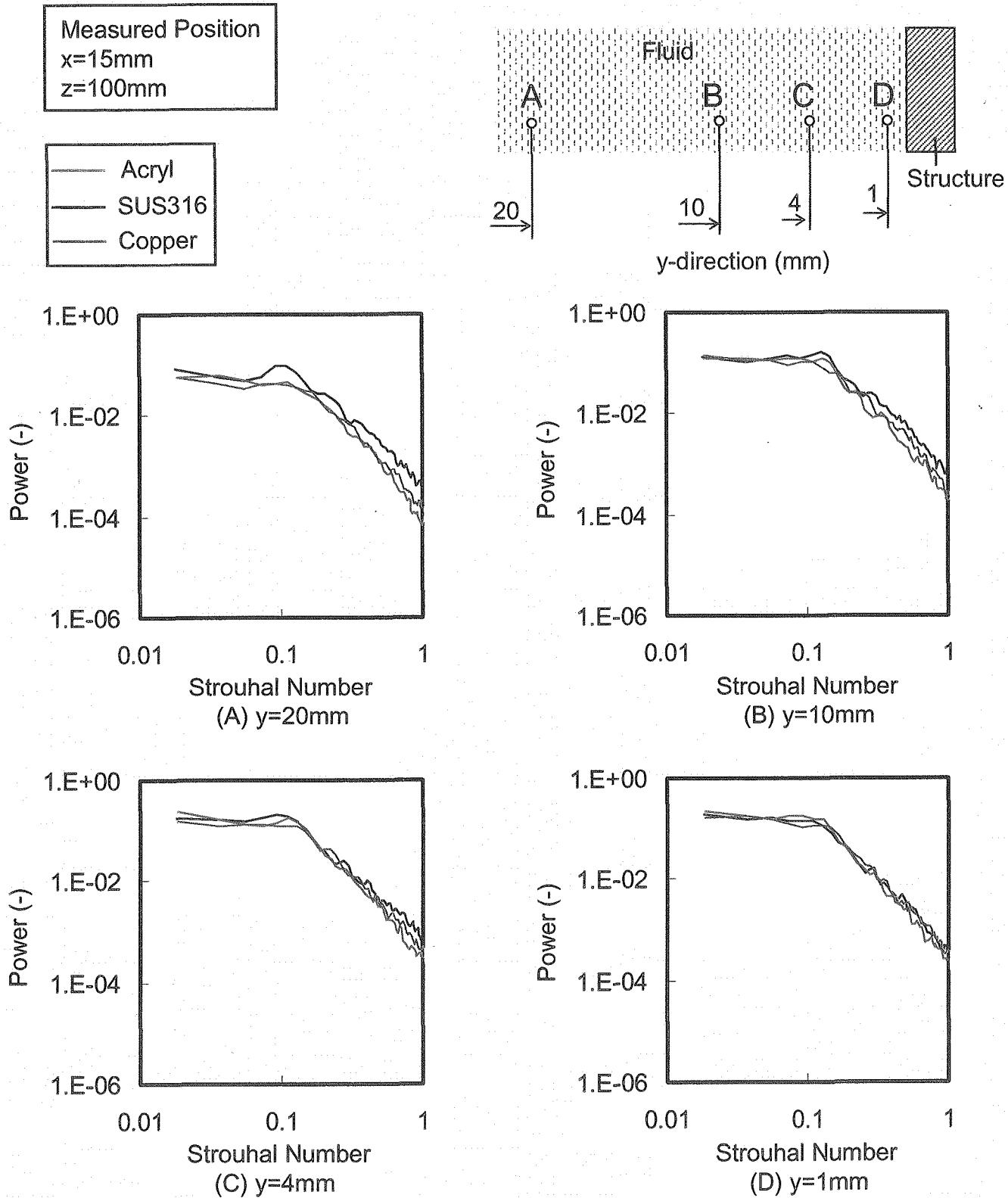


Fig.4.2.13 Comparisons of Power Spectrum Density of Temperature Fluctuation under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.  
 $(V_h=0.25\text{m/s}, V_c=0.17\text{m/s})$

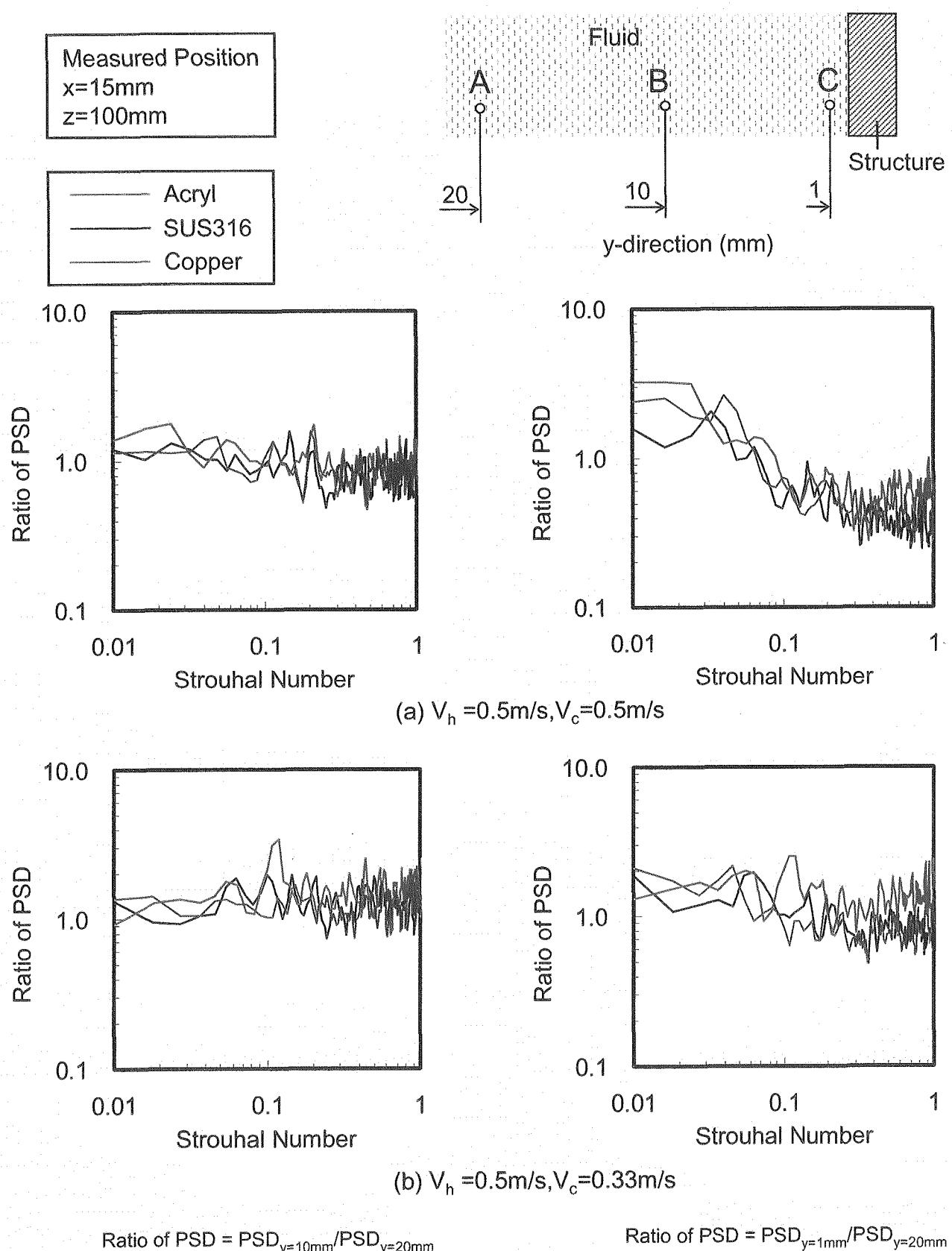


Fig.4.2.14 Comparisons of Ratio of PSD under Isovelocity and Non-Isovelocity Triple-Jet Conditions.

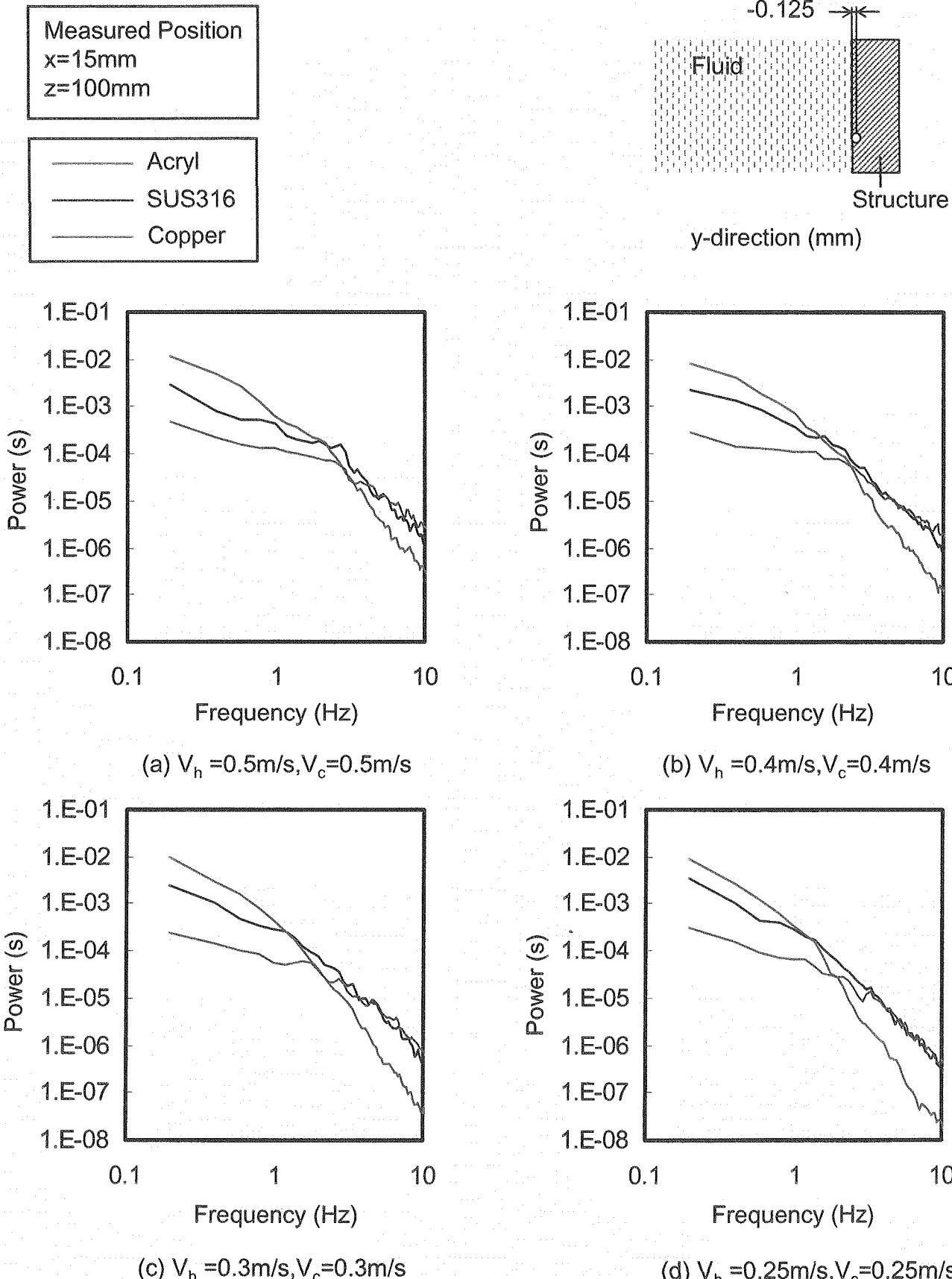


Fig.4.2.15 Effect of Structural Wall on Power Spectrum Density under Isovelocity Triple-Jet Condition.

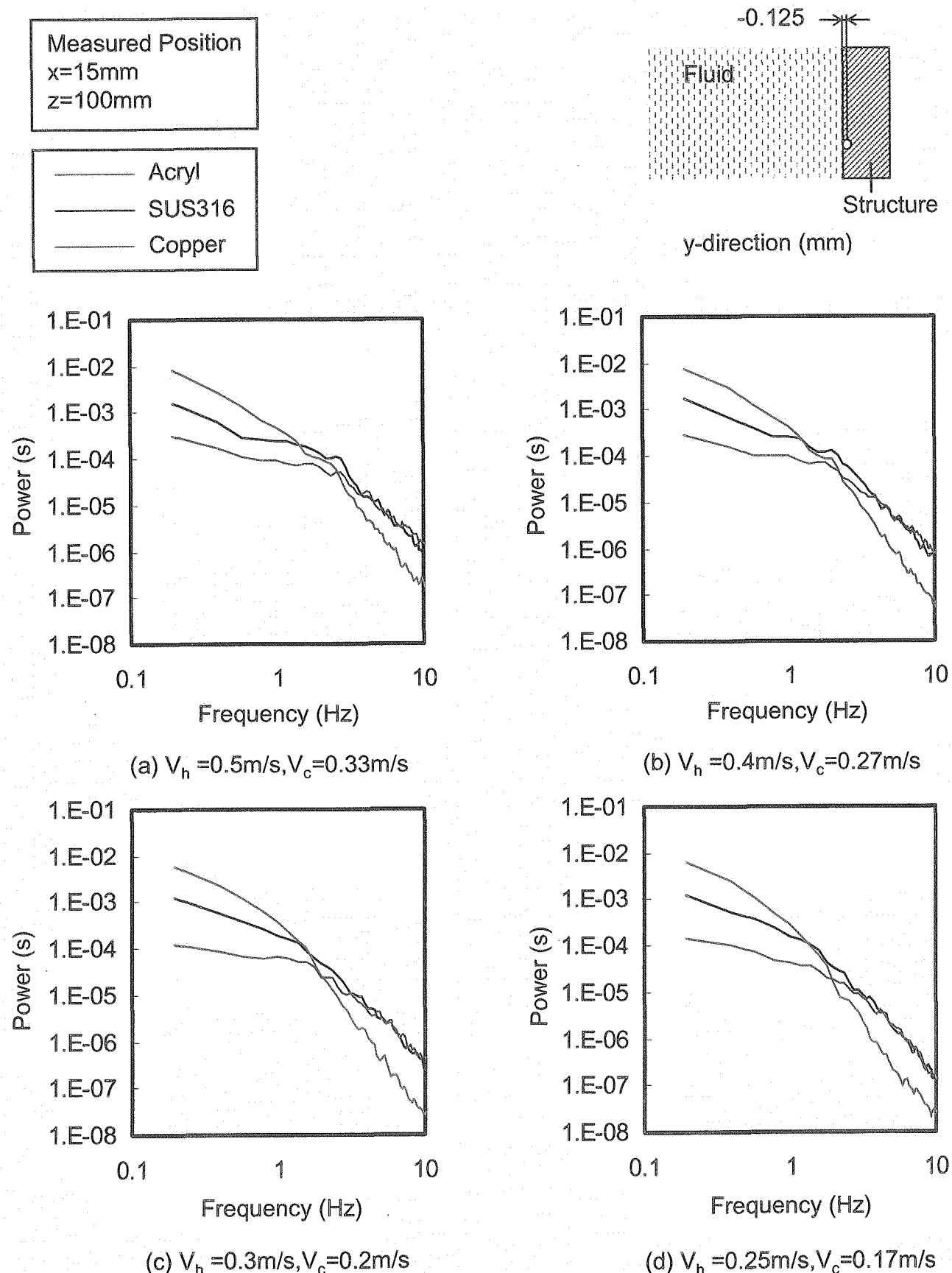


Fig.4.2.16 Effect of Structural Wall on Power Spectrum Density under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

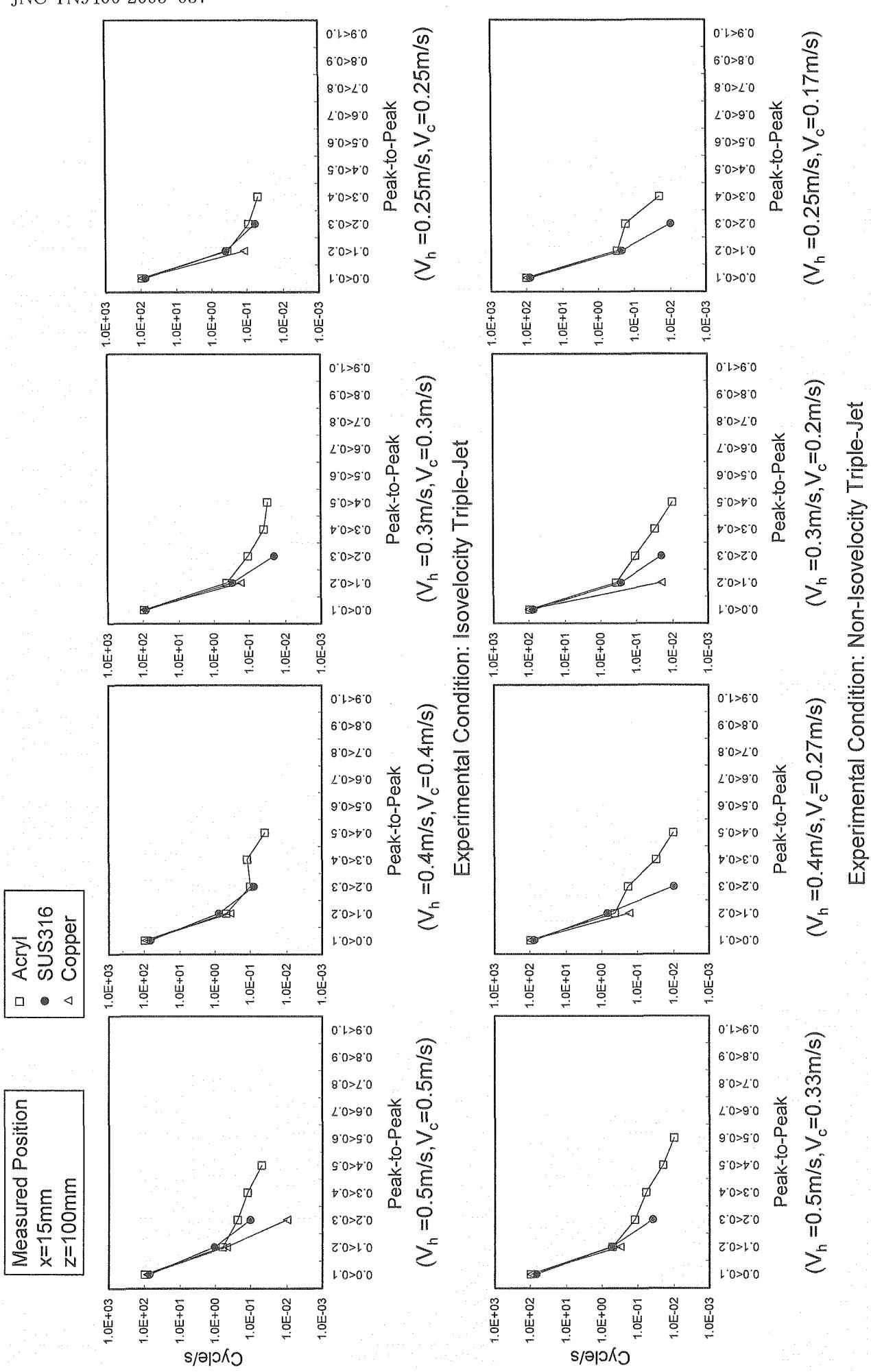


Fig 4.2.17 Comparisons Histograms of Peak-to-Peak of Temperature Fluctuation Calculated by Rain flow Method.

Measured Position  
 $x=15\text{mm}$   
 $z=100\text{mm}$

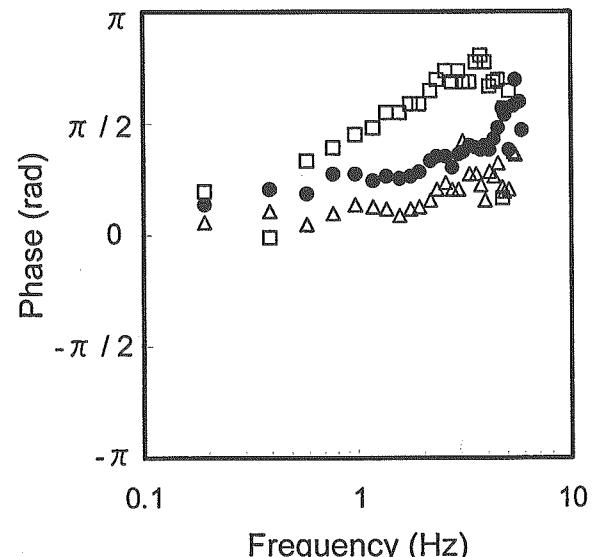
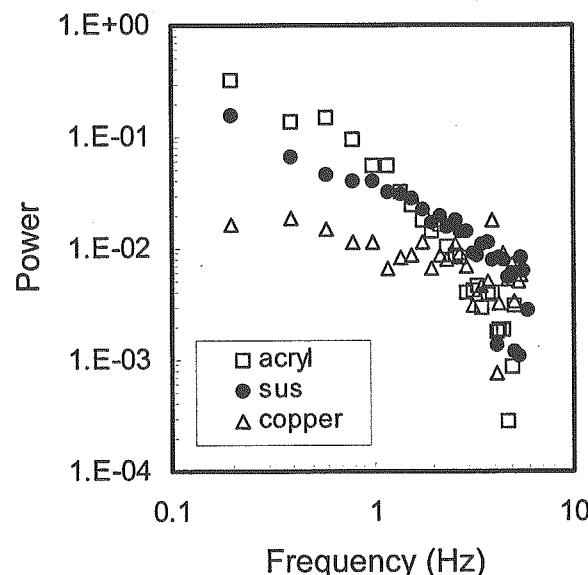
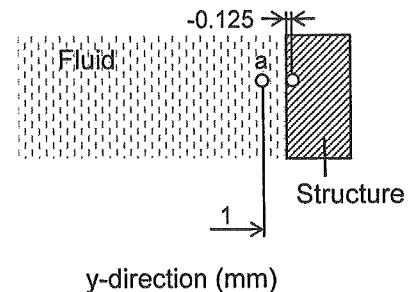
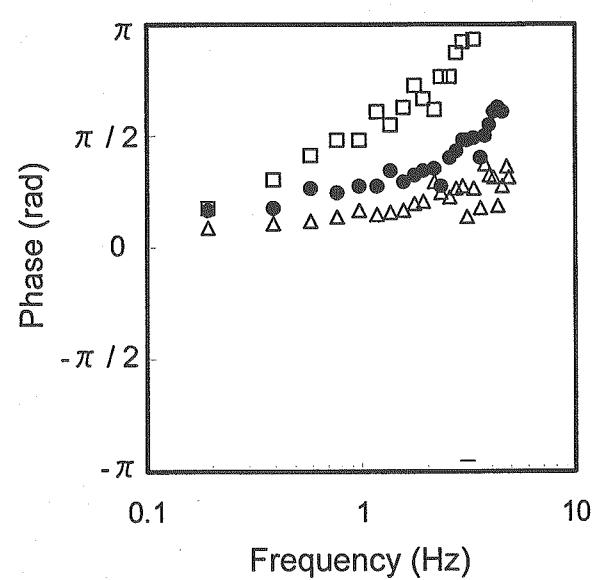
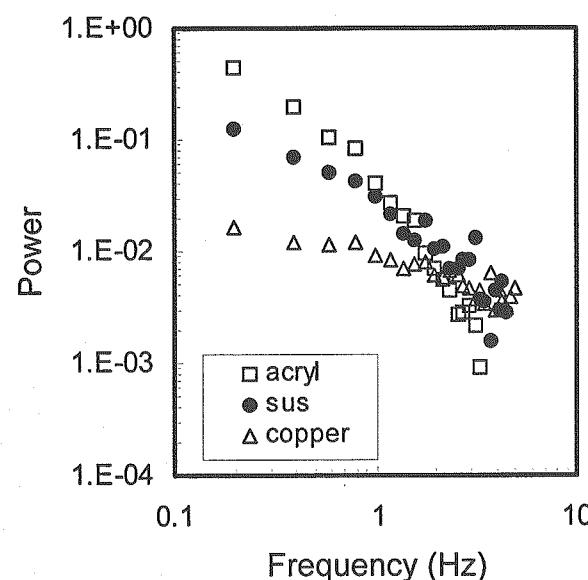
(a)  $V_h = 0.5\text{m/s}, V_c = 0.5\text{m/s}$ (b)  $V_h = 0.4\text{m/s}, V_c = 0.4\text{m/s}$ 

Fig.4.3.1(a) Transfer Functions of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Isovelocity Triple-Jet Condition.

Measured Position  
 $x=15\text{mm}$   
 $z=100\text{mm}$

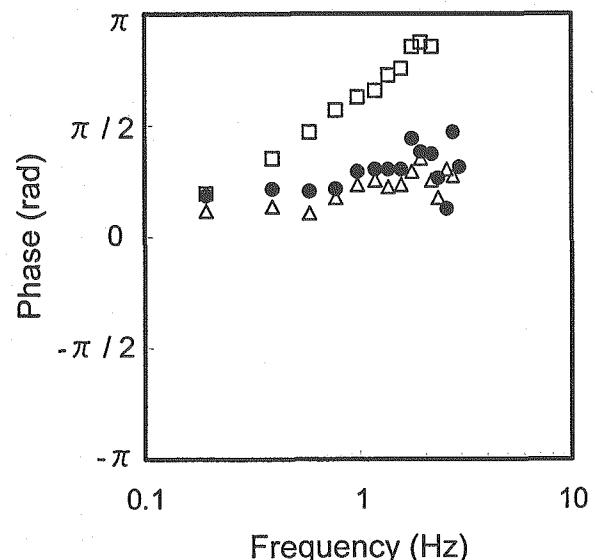
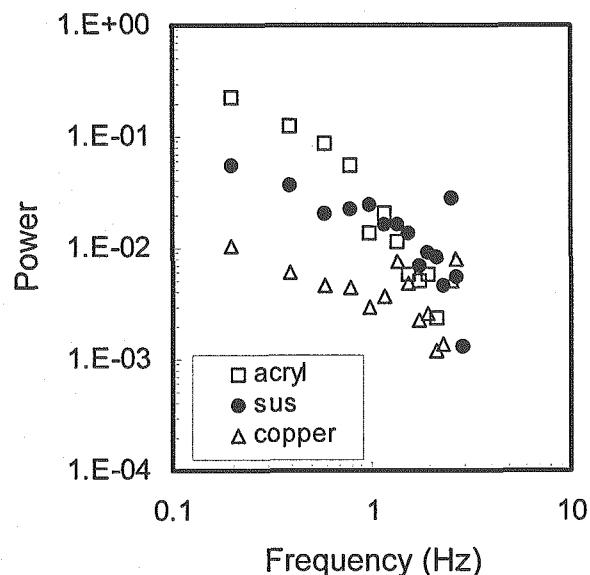
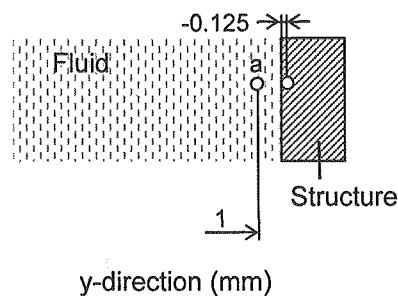
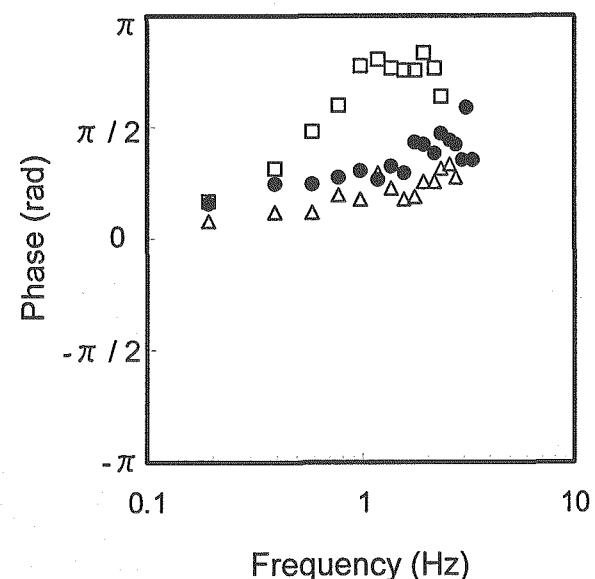
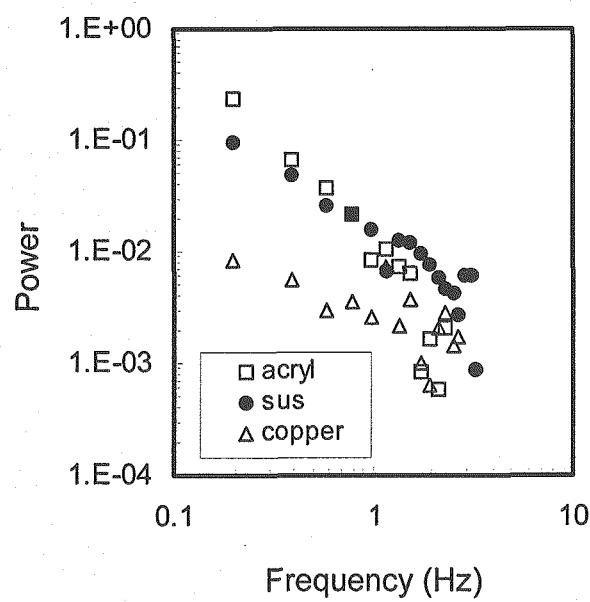
(c)  $V_h = 0.3\text{m/s}, V_c = 0.3\text{m/s}$ (d)  $V_h = 0.25\text{m/s}, V_c = 0.25\text{m/s}$ 

Fig.4.3.1(b) Transfer Functions of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Isovelocity Triple-Jet Condition.

Measured Position  
 $x=15\text{mm}$   
 $z=100\text{mm}$

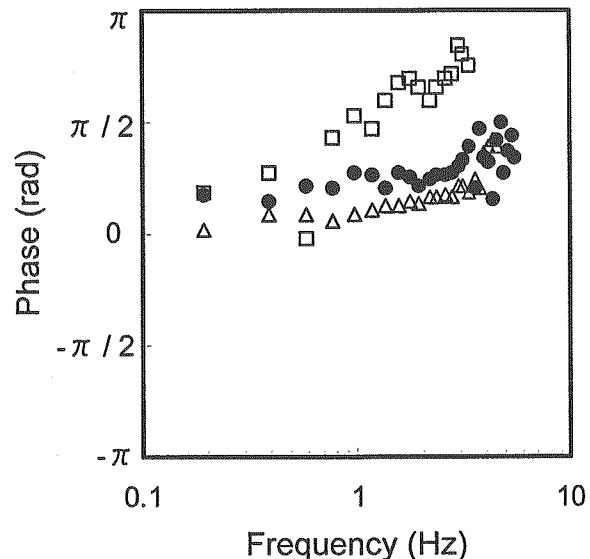
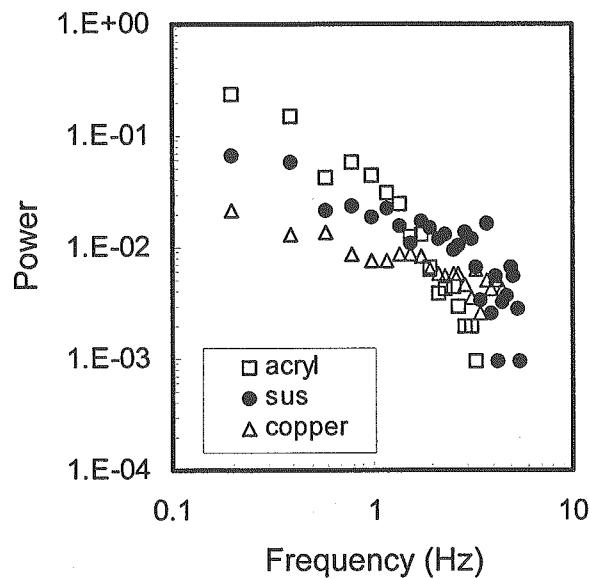
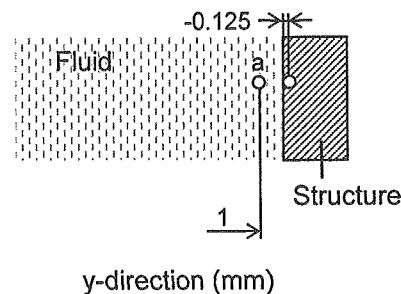
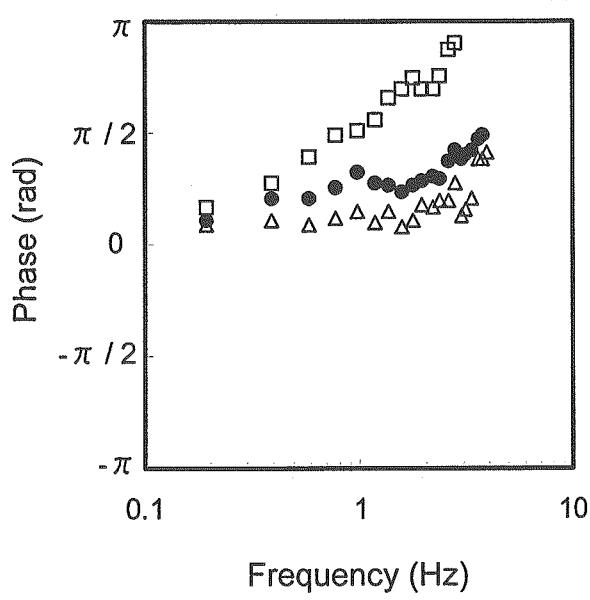
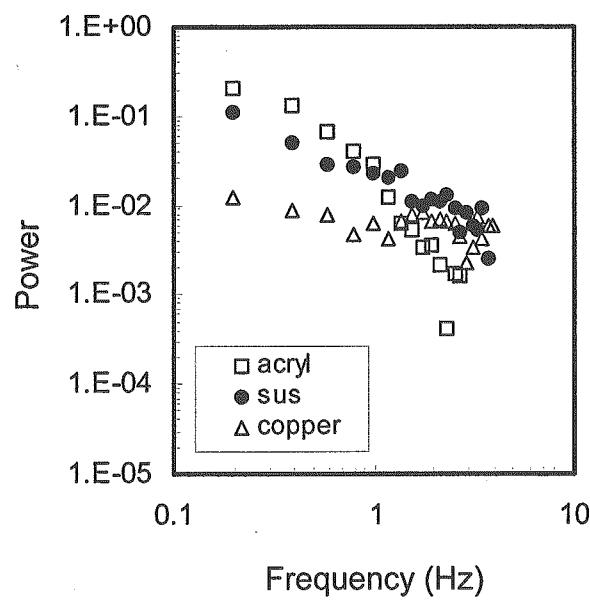
(a)  $V_h = 0.5\text{m/s}, V_c = 0.33\text{m/s}$ (b)  $V_h = 0.4\text{m/s}, V_c = 0.27\text{m/s}$ 

Fig.4.3.2(a) Transfer Functions of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

Measured Position  
 $x=15\text{mm}$   
 $z=100\text{mm}$

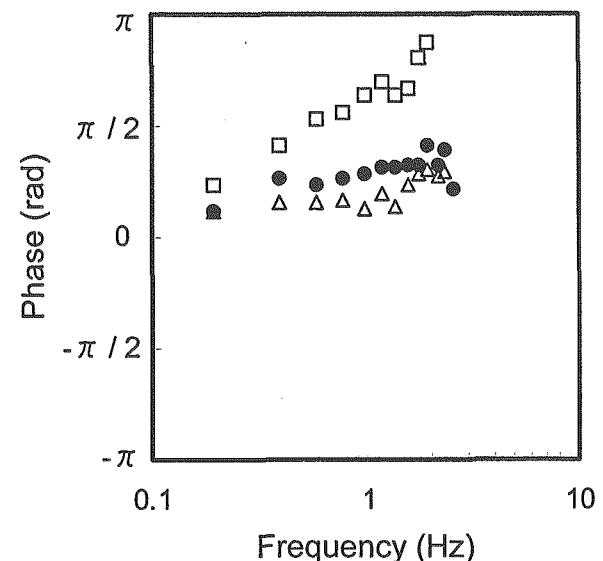
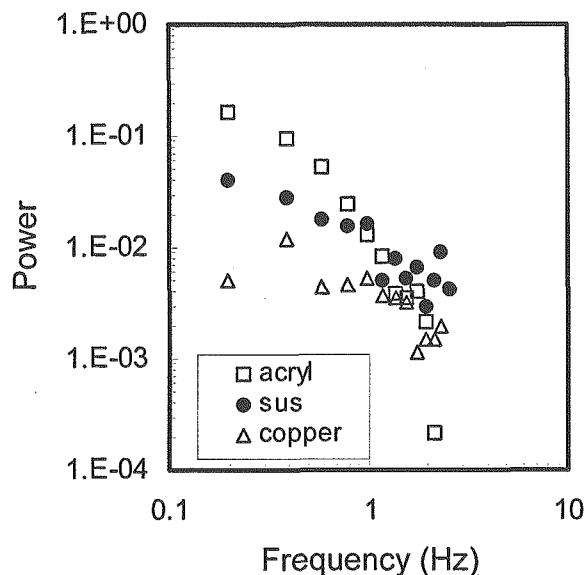
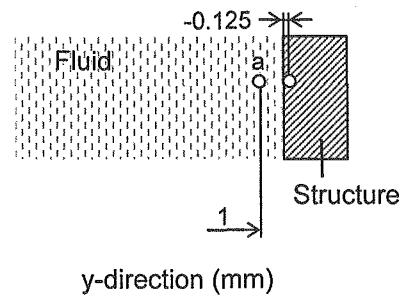
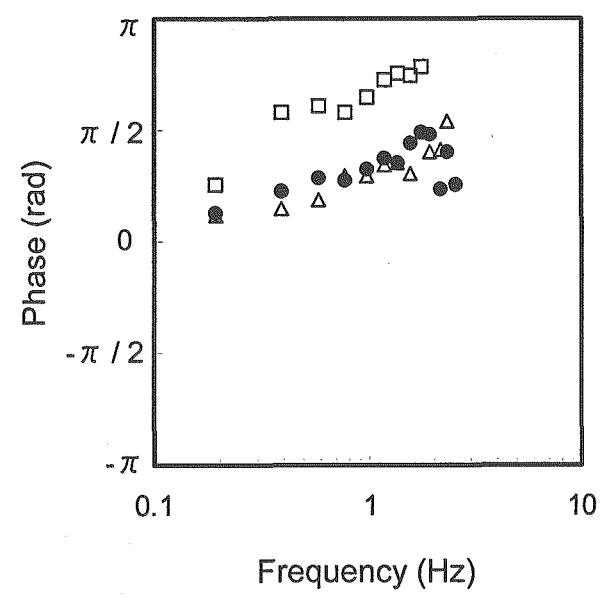
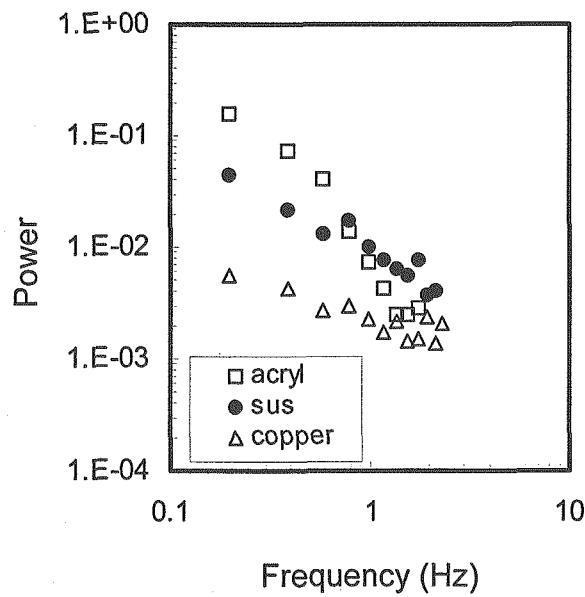
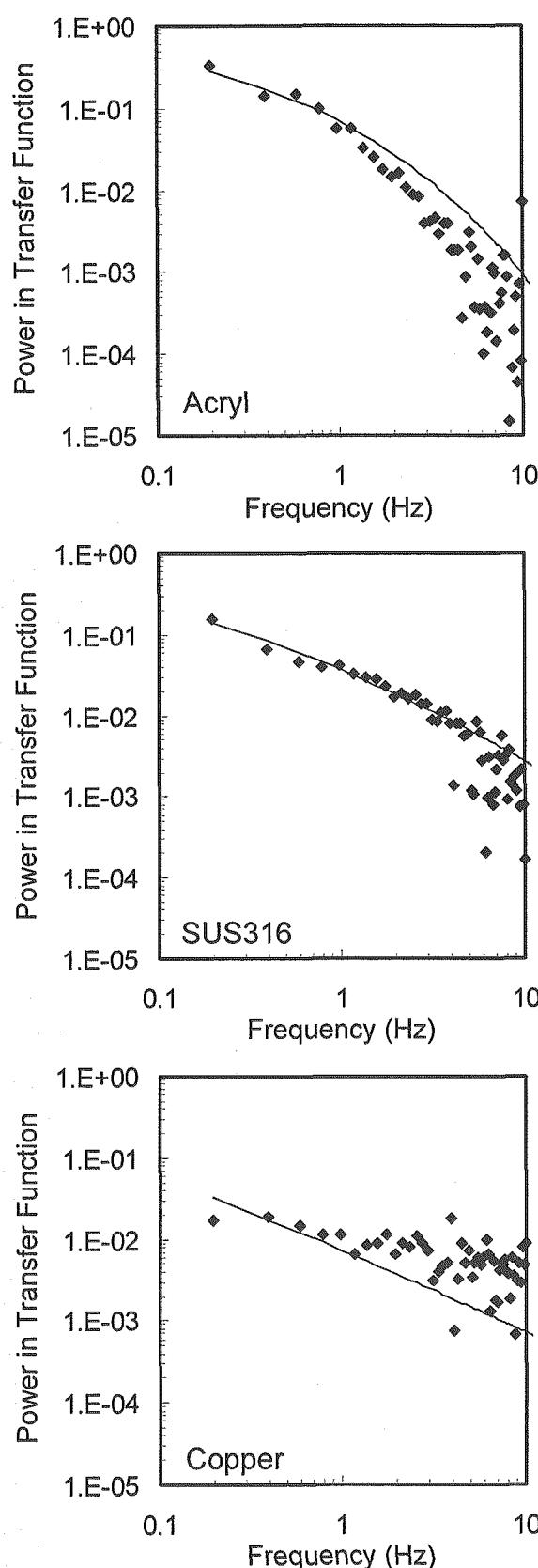
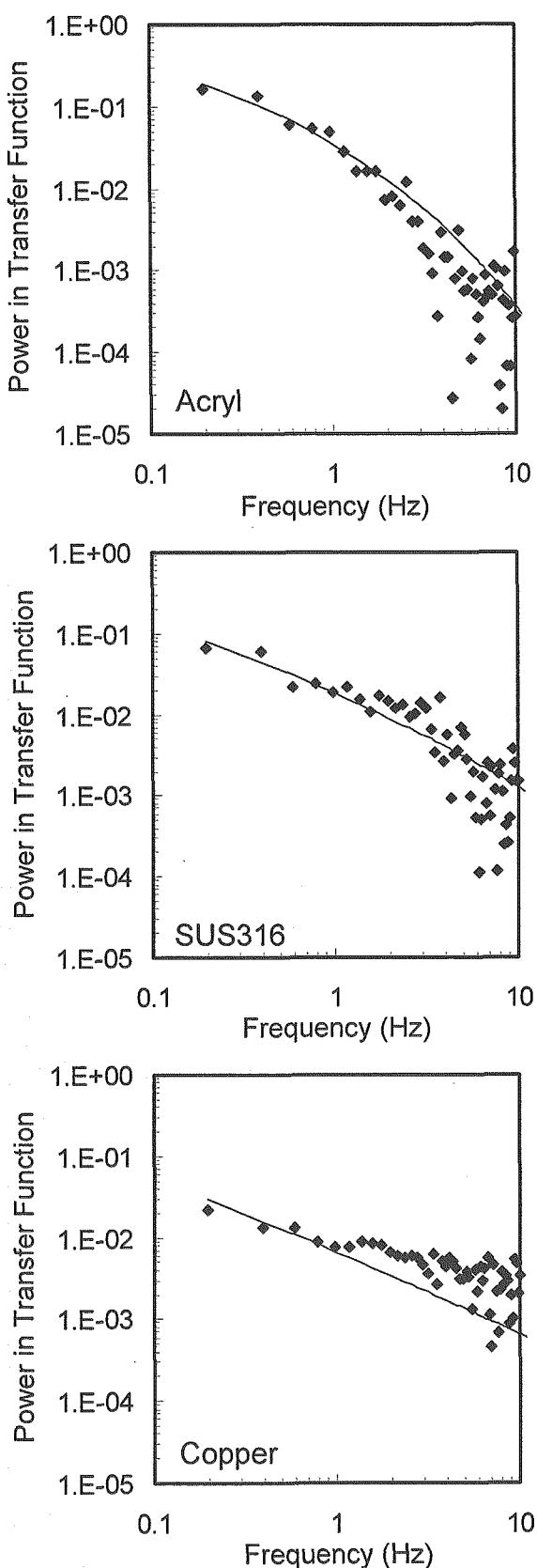
(a)  $V_h = 0.3\text{m/s}, V_c = 0.2\text{m/s}$ (b)  $V_h = 0.25\text{m/s}, V_c = 0.17\text{m/s}$ 

Fig.4.3.2(b) Transfer Functions of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

◆ Experiment  
— Fitting Line based on Eq.(4.7)

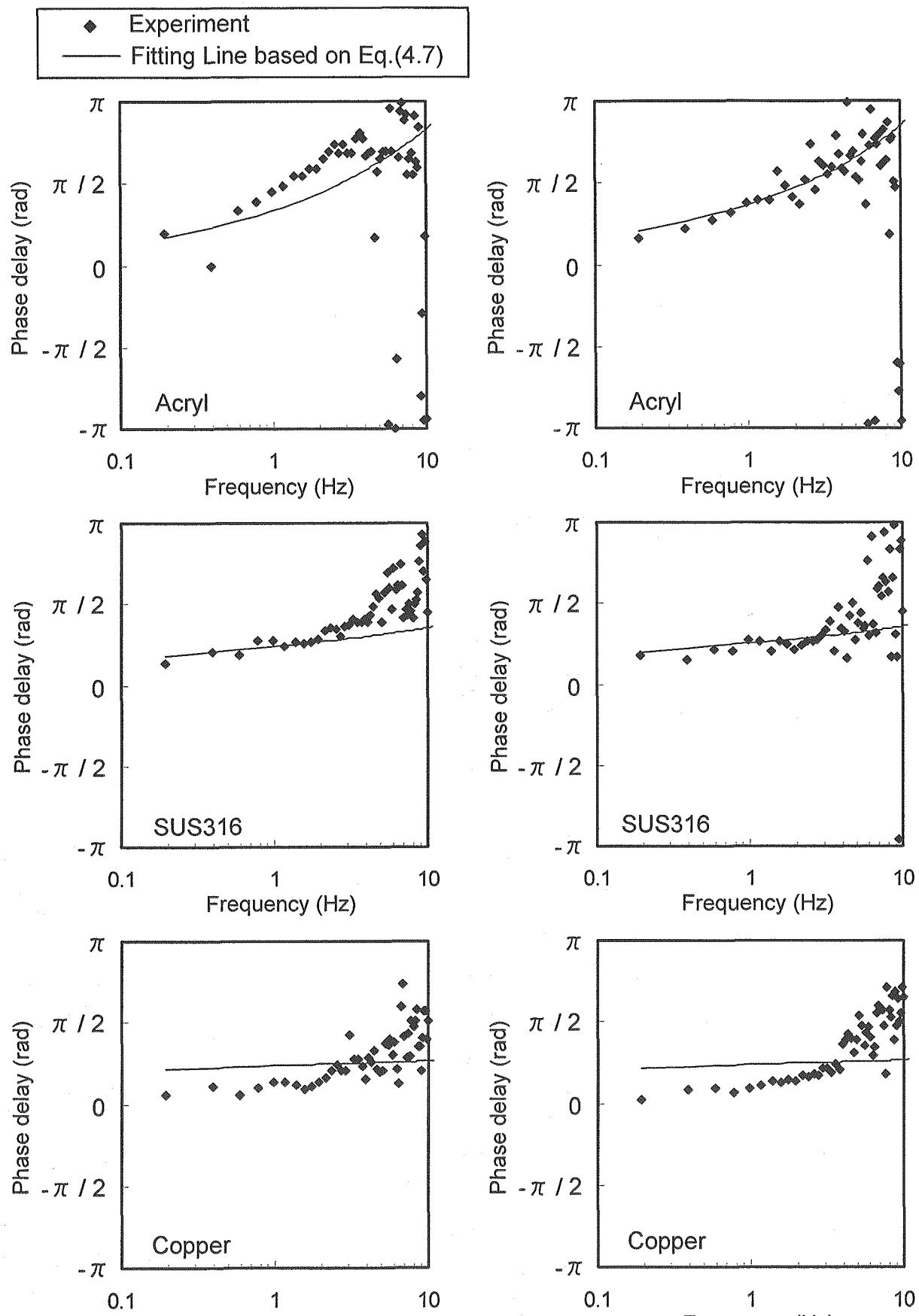


Experimental Condition:  
Isovelocity,  $V_h=0.5\text{m/s}$ ,  $V_c=0.5\text{m/s}$



Experimental Condition:  
Non- Isovelocity,  $V_h=0.5\text{m/s}$ ,  $V_c=0.33\text{m/s}$

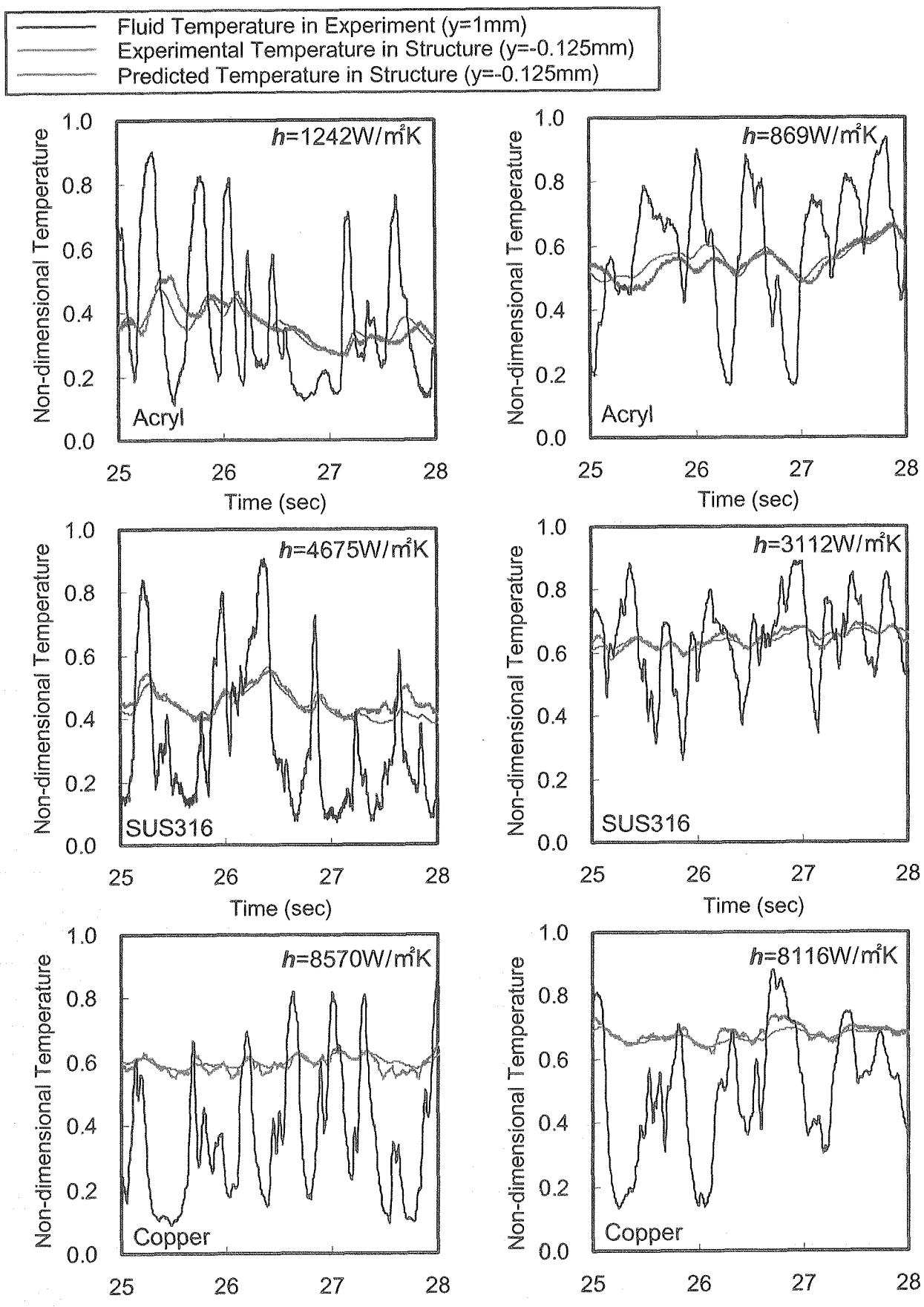
Fig.4.4.1 Comparisons of Power of Transfer Function between Experimental Result and Fitting Line.



Experimental Condition:  
Isovelocity,  $V_h=0.5\text{m/s}$ ,  $V_c=0.5\text{m/s}$

Experimental Condition:  
Isovelocity,  $V_h=0.5\text{m/s}$ ,  $V_c=0.33\text{m/s}$

Fig.4.4.2 Comparisons of Phase Delay of Transfer of Fluctuation  
from Fluid to Structure between Theory and Experimental Result.



Experimental Condition:  
Isovelocity,  $V_h=0.5\text{m/s}, V_c=0.5\text{m/s}$

Experimental Condition:  
Isovelocity,  $V_h=0.5\text{m/s}, V_c=0.33\text{m/s}$

Fig.4.4.3 Comparisons of Time-Trends of Temperature between Experiment and Prediction.

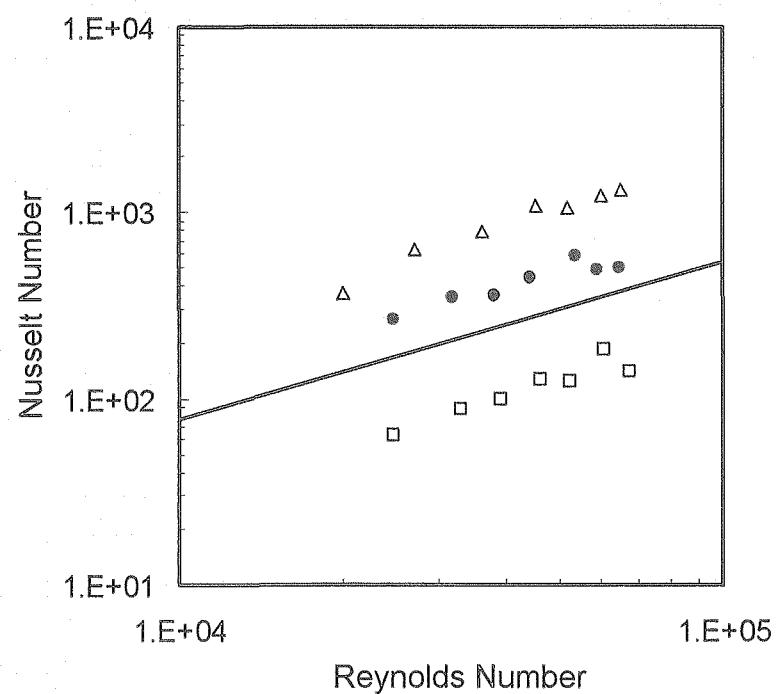
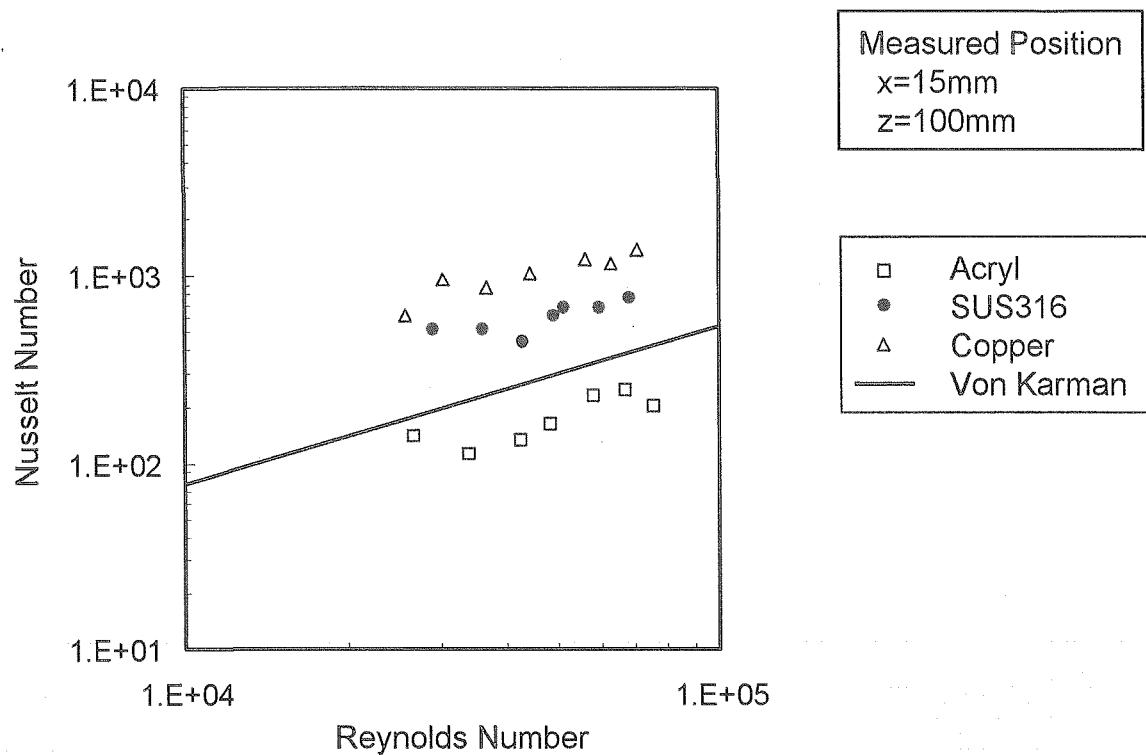


Fig.4.5.1 Relationship between Nusselt number and Reynolds number in Wall Jet Geometry.