JNC TN9400 2002-059

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 ―

（研究報告）

２００２年９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－
（研究報告）

木村暢之[1)]、三宅康洋[2)]、宮越博幸[1)]
長澤一嘉[3)]、五十嵐実[1)]、上出英樹[1)]

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、流体から構造材への温度変動の伝達挙動に着目した平行三噴流ナトリウム試験を実施し、非定常熱伝達挙動の定量化を行った。試験は中央の噴流を低温、左右の噴流を高温に設定し、噴流が壁面に沿って流れる体系で実施した。また、片側の高温噴流を止めた二噴流体系での試験も実施した。試験パラメータは、噴流の吐出速度とした。

流体から構造材へ温度変動が伝達する際に、変動の周波数が高くなるにつれて、温度変動強度が減衰することを定量的に明らかにした。また、構造材へ温度変動が伝達する際の時間遅れは、噴流の吐出速度が大きくなるにつれて小さくなることがわかった。

また、流体から構造材への非定常熱伝達挙動は、時間的に一定の熱伝達率で整理できることが明らかとなった。熱伝達率は、噴流の吐出流速比によって異なるフローパターンによらず、Peclet 数の 0.8 乗で整理できることがわかった。

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。

1)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
2)株式会社エヌデーデー
3)原子力システム株式会社

Experimental Study on Thermal Striping Phenomena - Evaluation on Transfer Characteristics of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure -

(Research Report)

Nobuyuki KIMURA[1)], Yasuhiro MIYAKE[2)], Hiroyuki MIYAKOSHI[1)]
Kazuyoshi NAGASAWA[3)], Minoru IGARASHI[1)] and Hideki KAMIDE[1)]

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, heat transfer from fluid to structural surface and thermal conduction into structure.

In this study, a sodium experiment of parallel triple jets configuration was performed in order to evaluate transfer characteristics of temperature fluctuation from fluid to structure. As for the experimental geometry, a cold jet at the center and hot jets in both sides flowed vertically along a wall. The temperature fluctuation is transferred from fluid to the wall in the wall jet geometry. In addition, double jets experiment was carried out. The experimental parameters were discharged velocities of the jets.

The temperature fluctuation intensity decreased as the frequency of temperature fluctuation increased where temperature fluctuation was transferred from fluid to structure. The time-delay of transfer of temperature fluctuation from fluid to structure decreased as the discharged velocity increased.

The non-stationary heat transfer characteristics from fluid to structure could be described by using a time-constant heat transfer coefficient. The heat transfer coefficient was proportional to Peclet number to the power of 0.8 and independent of the flow pattern in which the ratio of discharged velocities of the jets was varied.

---

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

2) NDD

3) Nuclear Energy System Incorporation

目次

1．緒言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 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．実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
3.1 流体－構造間での温度変動振幅の減衰 ・・・・・・・ 5
3.2 流体－構造間での温度変動挙動の相関性 ・・・・・・ 7
4．考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9
4.1 熱伝達率算出方法 ・・・・・・・・・・・・・・ 9
4.2 流体－構造間の熱伝達率算出方法の検討 ・・・・・・ 10
4.3 熱伝達率の流速・周波数依存性 ・・・・・・・・・・ 12
5．結言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 14

謝辞 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15

参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16

Nomenclatures

A: Amplitude of Temperature Fluctuation
a: Thermal Diffusivity of Structure
D: Representative Length (Slit Width) (=20mm)
D_e: Hydraulic Length
F_f: Spectrum of Temperature in Fluid
$F_{f\text{-}w}$: Cross Spectrum of Temperature between Fluid and Structure
F_w: Spectrum of Temperature in Structure
f: Frequency of Temperature Fluctuation
$H_{f\text{-}w}$: Transfer Function
h: Heat Transfer Coefficient
h^*: $=h/\lambda$
k: $=\sqrt{2\omega/a}$
Nu: Nusselt number
Pe: Peclet number
R: Cross-Correlation Coefficient of Temperatures between Two Points
Re: Reynolds number
r: Discharged Velocity Ratio of Cold Jet to Hot Jet ($=V_c/V_h$)
T_{avg}: Time-averaged Temperature
T_{avg}^*: Non-dimensional Time-averaged Temperature
T_f: Instantaneous Temperature in Fluid
T_i: Instantaneous Temperature
T_i^*: Non-dimensional Instantaneous Temperature
T_c: Temperature of Cold Jet
T_h: Temperature of Hot Jet
T_{RMS}: root-mean-square of Temperature (Temperature Fluctuation Intensity)
T_{RMS}^*: Non-dimensional Temperature Fluctuation Intensity
T_w: Instantaneous Temperature in Structure
t: Time
V_c: Discharged Velocity of Cold Jet
V_h: Discharged Velocity of Hot Jet
V_{space}: Space-averaged Discharged Velocity
x: Horizontal Position
y: Depth Position

z:	Vertical Position
ΔT:	Discharged Temperature Difference ($=T_h-T_c$)
ε:	Phase Delay
γ:	Coherence of Temperatures between Two Points
φ:	Initial Phase
λ:	Thermal Conductivity of Structure
ω:	Angular Velocity
$\Im$:	Fourier Transform

Tables List

Table 2.1 Experimental Conditions.
Table 2.2 Experimental Parameters.

Figures List

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. 2.1.6 Locations of Nozzles, Test Plate and Thermocouples Tree.
Fig. 3.1.1 Example of Contours of Time-Averaged Temperature and Temperature Fluctuation Intensity.
Fig. 3.1.2 Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 3.1.3 Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 3.1.4 Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Double-Jet Condition.
Fig. 3.1.5 Time-Averaged Temperature and Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 3.1.6 Time-Averaged Temperature and Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 3.1.7 Time-Averaged Temperature and Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Double-Jet Condition.
Fig. 3.1.8 Effect of Structural Wall on Power Spectrum Density under Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 3.1.9 Effect of Structural Wall on Power Spectrum Density under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 3.1.10 Effect of Structural Wall on Power Spectrum density under Double-Jet Condition.
Fig. 3.2.1 Cross-Correlation of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure under Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 3.2.2 Cross-Correlation of Temperature Fluctuation between Fluid and

Structure under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 3.2.3 Cross-Correlation of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure under Double-Jet Condition.
Fig. 3.2.4 Relationship between Time Delay of Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure and Discharged Velocities.
Fig. 3.2.5 Dependence of Coherence of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure on Frequency under Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 3.2.6 Dependence of Coherence of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure on Frequency under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 3.2.7 Dependence of Coherence of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure on Frequency under Double-Jet Condition.
Fig. 4.2.1 Transfer Function Characteristics of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 4.2.2 Transfer Function Characteristics of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 4.2.3 Transfer Function Characteristics of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Double-Jet Condition.
Fig. 4.2.4 Comparison of Power in Transfer Function between Experiment and Fitting Line.
Fig. 4.2.5 Comparisons of Phase Delay of Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure between Theory and Experiment under Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 4.2.6 Comparisons of Phase Delay of Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure between Theory and Experiment under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 4.2.7 Comparisons of Phase Delay of Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure between Theory and Experiment under Double-Jet Condition.
Fig. 4.2.8 Comparisons of Time-Trends of Temperature between Experiment and Prediction under Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 4.2.9 Comparisons of Time-Trends of Temperature between Experiment and Prediction under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.
Fig. 4.2.10 Comparisons of Time-Trends of Temperature between Experiment and Prediction under Double-Jet Condition.
Fig. 4.2.11 Comparisons between Power in Transfer Function and Ratio of Power Spectrum Density. (Vh=0.5m/s, Vc=0.5m/s)

Fig. 4.3.1 Relationship between Heat Transfer Coefficient and Peclet number in Wall Jet Geometry.

Fig. 4.3.2 Effect of Heat Transfer Coefficient on Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure.

1．緒言

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、高サイクル熱疲労が生じる場合がある（サーマルストライピング現象、以下、本現象）[1]-[6]。ナトリウム冷却高速炉では、冷却材の熱伝導率が水に比べ、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。流体中で発生した温度変動は、構造材近傍の境界層、構造材表面、構造材内部に伝わる過程で特性が変化する。構造材中の温度分布により、熱応力が発生する。構造材内部の温度分布が急峻であるほど、熱応力が大きくなることは明白である。一般に、流体の温度変動周期が非常に短い場合、構造材の温度が追従せず、温度変動幅が小さくなる。逆に非常に長い場合、構造材全体が均一温度となり、両者とも構造材の熱応力はさほど大きくならない。つまり、ある温度変動周期において、構造材の熱応力が極大となると考えられる[7]。構造材の熱応力に感度のある温度変動の周期は、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、温度分布が３次元の場合は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与えられる場合、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[8]。

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[9]-[11]。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[12][13]。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[14]-[19]。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、流体から構造材の温度を詳細に計測している。前報[20]では、噴流吐出速度および噴流吐出温度をパラメータとし、温度変動挙動に対し、変動のスペクトル密度および流体中と構造材中の温度変動の伝達関数を用いた評価を実施した。

本報では、流体から構造材への温度変動伝達挙動に着目し、非定常熱伝達挙動の定量化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 1600*l*/min)、流量調節弁、電磁流量計、および試験容器より形成される。ナトリウムは高温ライン２系統、低温ライン１系統の計３系統を通って試験容器に流入する。

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 の円筒容器である。試験容器は、流入したナトリウムを噴流として吐出させるための噴流吐出ノズル、流体中の温度を計測するために複数の熱電対が取り付けられた上下可動式熱電対ツリー、構造材中の温度を計測するために熱電対を埋め込んだ熱応答供試板より構成される。

Fig. 2.1.3 に噴流吐出ノズルの概略を示す。ノズルの形状は、20mm×180mm 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。

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 製である。板厚は 12mm で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。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は決定した。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。

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

Fig. 2.1.6 にノズル、熱応答供試板、熱電対ツリーの位置関係の概要を示す。座標系は、熱応答供試板に平行な水平方向を x、板の法線方向を y、板に平行な鉛直方向を z とした。また、原点は、板表面の中心の低温噴流のノズル高さとし、板に平行な右方向に x を正、板から離れる法線方向に y を正、上方に z を正とし

た。

2.2 実験条件

Table 2.1 に実験条件を示す。前報[20]にて噴流吐出速度が 0.2～1.0m/s の範囲においては、噴流吐出温度差、および動粘性係数（ν=0.34～0.43×10^{-6} m^2/s）が温度変動挙動に影響しないことを確認した。

そこで、本試験では噴流吐出速度をパラメータとした三噴流等速、非等速条件および二噴流等速条件の試験を実施した。前報[20]および水試験[15]により、等速条件では噴流間に形成される渦の不安定性により、流速に依存した周期的な温度変動が発生する。一方、非等速条件では周期的な温度変動が発生しないことが明らかとなっている。このように温度変動特性の異なる条件下での流体から構造材への非定常熱伝達特性を明らかにする。

Table2.2 に試験ケースと試験条件の一覧を示す。試験では以下の３つの項目について影響を評価した。

(1) 等速条件における噴流吐出速度の影響

三本の噴流の吐出速度を同じ、つまり、低温噴流と高温噴流の吐出流速比 r ($=V_c/V_h$) を 1.0 に固定したときの噴流間の温度変動挙動および構造物への温度変動の伝達特性を確認する。

噴流吐出速度は 0.2、0.3、0.33、0.38、0.5、0.57、0.7、0.8、1.0(m/s)に変化させた。

(2) 非等速条件における噴流吐出速度の影響

低温噴流と高温噴流の吐出速度比 r ($=V_c/V_h$) を 0.67 に固定したときの噴流間の温度変動挙動および構造物への温度変動の伝達特性を確認する。低温噴流の吐出速度を 0.2、0.33、0.53、0.67(m/s)に変化させ、それに応じて高温噴流の吐出速度を 0.3、0.5、0.8、1.0(m/s)とした。

(3) 二噴流等速条件における噴流吐出速度の影響

中心噴流（低温噴流）と高温噴流の片側のみを用いた二噴流等流速試験を吐出速度をパラメータにして行い、三噴流体系とはフローパターンが異なる場合の非定常熱伝達への影響を確認する。

噴流吐出速度は 0.2、0.3、0.33、0.5、0.8、1.0(m/s)と変化させた。

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℃、300℃、350℃、400℃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。

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

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

3．実験結果

3.1　流体－構造間での温度変動振幅の減衰

Fig. 3.1.1 に三噴流等速条件、三噴流非等速条件、二噴流等速条件における壁面より最も離れた位置（y=90mm）と壁面に最も近い計測位置（y=0.5mm）での時間平均温度および温度変動強度コンターの一例を示す。水平、垂直、奥行き方向の座標は、それぞれ噴流吐出口のスリット幅(D=20mm)で規格化した。三噴流等速条件の場合、低温噴流はほぼ鉛直に流れ、両側の高温噴流が低温噴流側に傾いて流れることがわかる。三噴流非等速条件の場合、低温噴流が片側の高温噴流側に傾いて流れる。二噴流等速条件では、低温噴流と高温噴流が近づいて流れていくことがわかる。前報[20]にて、壁面からの距離（奥行き方向位置）が変化した場合においても、ほぼ同様のコンターを示しているとともに、平均温度場が吐出速度の絶対値に依存していないことを示した。温度変動強度は、高温噴流と低温噴流がぶつかる領域付近で大きな値を示していることがわかる。

Fig. 3.1.2、Fig. 3.1.3、Fig. 3.1.4 に三噴流等速条件、三噴流非等速条件、二噴流等速条件における時系列温度変化の奥行き方向位置による違いを示す。時系列温度は以下の式で無次元化した。

$$T_i^* = \frac{T_i - T_c}{\Delta T} \tag{3.1}$$

計測位置は温度変動強度が大きい位置として、水平方向位置 x/D=-0.75 (x=-15mm)、鉛直方向位置 z/D=5.0 (z=100mm)とし、この位置で奥行き方向にほぼ同一ライン上にある計測点を選択した。なお、各位置の計測温度は同時刻のデータである。

前報[20]で報告したように、等速条件の場合は壁面から最も離れた位置(A)では周期的な温度変動が発生しており、噴流吐出速度が大きくなるにつれて、この周期が短くなっている。また、壁面近傍(**D**)では温度変動の振幅はわずかに小さくなり、構造材内部（**E**、**F**）では、大幅に減衰していることがわかる。

非等速条件の場合は等速条件のときのような周期的な温度変動は発生していないが、温度変動の振幅が構造材内で大幅に減衰していることがわかる。

二噴流等速条件の場合においても、三噴流非等速条件の場合と同様に、周期的な温度変動挙動が見られず、壁面近傍(**D**)で温度変動の振幅が小さくなり、構造材内において更に減衰している。噴流吐出速度 0.2m/s の条件で温度変動挙動の傾向が異なるのは、レイノルズ数が 10000 程度であり他の流速とは挙動が異なっていることが考えられる[4]。

Fig. 3.1.5、Fig. 3.1.6、Fig. 3.1.7 に三噴流の等速条件、非等速条件および二噴流条件での計測位置 x/D=-0.75、z/D=5.0 における時間平均温度と時間平均温度変動強度の奥行き方向分布を示す。時間平均温度と時間平均温度変動強度は以下の式で無次元化した。

$$T^*_{avg} = \frac{T_{avg} - T_c}{\Delta T} \tag{3.2}$$

$$T^*_{RMS} = \frac{T_{RMS} - T_c}{\Delta T} \tag{3.3}$$

ここで、

$$T_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(T_i - T_{avg})^2}{N}} \tag{3.4}$$

である。

また、三噴流条件での吐出速度は、３本の噴流吐出速度の平均から算出した空間平均吐出速度とした。

$$V_{space} = \frac{2 \times V_h + V_c}{3} \tag{3.5}$$

時間平均温度は、各条件において、壁面に近づくにつれて徐々に上昇している。これは、供試板の裏側が噴流の平均温度となっているためである。

また、温度変動強度については、等速条件下で流体中の変動強度が壁面に近づくにつれて小さくなり、非等速条件下では壁面近傍の流体中で温度変動強度が大きくなっていることがわかる。

Fig. 3.1.8～Fig. 3.1.10 に三噴流等速、三噴流非等速、二噴流条件におけるパワースペクトル密度（PSD）の奥行き方向での比較を示す。流体中の温度変動の PSD に関して、三噴流等速条件の場合、噴流の吐出速度が小さいケースで僅かに構造材近傍でパワーが減衰しているが、吐出速度が大きい場合では、流体中での温度変動の減衰がほとんどないことがわかる。構造材中に温度変動が伝達する過程を経ると、温度変動の PSD は急激に小さくなっている。特に高周波数成分での PSD の減衰が大きいことがわかる。三噴流非等速条件において、流体中の温度変動の PSD をみると、構造材近傍では表面より離れた位置に比べ、PSD が大きくなっている。これは、三噴流非等速条件下では、構造材表面より離れた位置と構造材表面近傍での噴流間の混合形態が異なっていることに起因していると考えられる。構造材中へ温度変動が伝達すると、等速条件と同様に急激に PSD が小さくなっていることがわかる。二噴流条件においても同様に、構造

材中へ温度変動が伝達すると温度変動の PSD が小さくなっていることがわかる。三噴流条件と二噴流条件とも噴流間の対流混合によって温度変動が発生するが、その位置や温度変動の特性が異なっているために、構造材表面近傍での流体中の温度変動の減衰挙動が違っていると考えられる。構造材内部では三噴流条件と同様な減衰が見られる。

3.2 流体－構造間での温度変動挙動の相関性

Fig. 3.2.1～Fig. 3.2.3 に三噴流等速、三噴流非等速、二噴流条件下における、壁近傍の流体(y/D=0.025)と構造材(y/D=-1.25E-3)の温度変動の相互相関係数を示す。右図は左図の時間軸を詳細にしたものである。相互相関係数 R は２つの信号の類似性を示すものであり、R=1 は信号が全く同じであることを示す。

$$R(j)=\frac{\sum_i T_{Fi}(i)T_{Si}(i+j)}{\sqrt{\sum_i T_{Fi}(i)^2}\sqrt{\sum_i T_{Si}(i+j)^2}} \qquad (j=0,1,2,\ldots) \qquad (3.6)$$

(a)～(e)は水平および鉛直方向における収録位置を表す。三噴流等速条件では、相互相関値のピークが周期的に現れており、高温、低温噴流が混合する際に発生する周期的な温度変動挙動が構造材に伝わっていることが確認できる。また、噴流吐出速度が大きくなるにつれ１次ピークの時間遅れが小さくなっていることがわかる。これは、流体から構造材への温度変動挙動の伝達速度が噴流吐出速度の増加に伴い大きくなっていることを意味する。

非等速条件においては、流体中の温度変動挙動に周期性がないため、相互相関値についても周期性は現れていない。相互相関値のピークは等速条件時と同様に、吐出速度が大きくなると時間遅れが小さくなる傾向にある。

二噴流等速条件では、三噴流の非等速条件と同様の傾向にあることがわかる。

Fig. 3.2.4 に温度変動の相関係数が最大値（１次ピーク）となる時間（遅れ）と噴流吐出速度の関係を示す。横軸については、左図は噴流吐出速度を３本の平均吐出速度としたものであり、右図は低温噴流の吐出速度としたものである。これによると、水平方向の計測位置（x=-5～-15mm）が高温噴流位置（x=-60mm）より低温噴流（x=0mm）寄りにあるために、低温噴流の吐出速度で遅れ時間が整理できることがわかる。流体から構造材への温度変動挙動の時間遅れは、噴流吐出速度を増加させることにより指数関数的に小さくなることがわかる。

Fig. 3.2.5～Fig. 3.2.7 に三噴流等速、三噴流非等速、二噴流条件における壁面近傍の流体と構造材の温度変動のコヒーレンスを示す。コヒーレンス[21]は以下の式により求めた。

$$\gamma(f)=\sqrt{\frac{|F_{f-w}(f)|^2}{|F_f(f)|^2|F_w(f)|^2}} \tag{3.7}$$

ここで、$F_{f-w}(f)$は流体温度変動と構造材温度変動のクロススペクトル、$F_f(f)$、$F_w(f)$はそれぞれ流体温度変動と構造材温度変動のスペクトルである。コヒーレンスは、低周波数成分で大きく、高周波数成分になるに従い、値が小さくなっていることがわかる。また、噴流吐出速度が大きくなるにつれて、高周波数成分でのコヒーレンスの減衰が小さくなっている。高周波数成分は構造材の熱容量の影響で構造材まで伝達しにくいことからコヒーレンスが小さくなっていると考えられる。前述の傾向は、噴流吐出条件によらずほぼ同じである。

4．考察

4.1　熱伝達率算出方法

流体から構造材への温度変動伝達挙動を評価する上で、構造材表面での熱伝達率を求める必要がある。通常、熱伝達率はバルク温度と加熱（冷却）壁表面温度の時間平均値の差と壁面から（あるいは壁面へ）の時間平均熱流束から求められる（定常熱伝達)。しかしながら、温度変動の伝達挙動に関しては、壁面近傍の流体と構造材の時間平均温度はほぼ同じであり、流体から構造材への時間平均熱流束はゼロであるから、時間平均値に基づく熱伝達率の評価手法は使用することができない。そこで、単一周期の温度変動が発生している場合における構造材内部の温度変動伝達特性の理論解について検討する。前報にて、構造材のある位置の温度変動挙動から別の位置の温度変動挙動を単一周期の一次元非定常熱伝導方程式の重ね合わせで予測できることを示した。本報では、構造材表面における流体の温度変動が、時間的に一定とした熱伝達率を介し、構造材へ伝わる場合の構造材の温度応答を求める。構造材表面(x=0)の流体の温度変動が次式のような単一周期 $2\pi/\omega$ で与えられる場合、

$$T_f(t) = A\sin(\omega t + \varphi) \tag{4.1}$$

構造材表面での熱伝達率を時間的に一定で、周波数に対して線形であることを仮定すると、半無限平板における構造材内部(x→正)の温度応答は以下の式で示すことができる[22]。

$$T_w(x,t) = \frac{Ah^*}{\sqrt{(h^*+k)^2+k^2}}\exp(-kx)\sin(\omega t + \varphi - kx - \varepsilon) \tag{4.2}$$

ここで、A は温度変動の振幅、t は時刻、ωは角振動数、a は構造材の温度伝導率、φは初期位相、h は熱伝達率、λは構造材の熱伝導率である。また、$k=\sqrt{\omega/2a}$ 、$h^*=h/\lambda$ 、$\varepsilon=\tan^{-1}\left[k/(h^*+k)\right]$である。

式(4.1)と式(4.2)を比較し、流体から構造材へ温度変動が伝達する過程での変化は以下のようになる。

振幅の減衰：$\dfrac{h^*}{\sqrt{(h^*+k)^2+k^2}}\exp(-kx)$ (4.3)

位相の遅れ：$kx+\varepsilon$

前報にて、構造材内部のランダム波の温度変動伝播挙動に対しては、一次元

非定常熱伝導方程式で表されることが明らかになっているので、構造材内部の構造材表面近傍の温度変動より、構造材表面位置での構造材の温度変動を求めることができる。よって、式(4.3)を構造材表面位置における流体と構造材の熱伝達による温度変動の振幅の減衰と位相の遅れとして示すと次式のようになる。

$$\text{振幅の減衰：} \frac{h^*}{\sqrt{(h^*+k)^2+k^2}} \qquad (4.4)$$

$$\text{位相の遅れ：} \varepsilon = tan^{-1}\left[k/(h^*+k)\right]$$

次節にて、式(4.4)に示した単一周期の理論式に基づいた構造材表面での流体から構造材への温度変動の伝達挙動（振幅の減衰と位相の遅れ）について、実際の流体混合による温度変動、すなわち複数周期変動（ランダム変動）に対する適用性を評価する。

4.2 流体ー構造間の熱伝達率算出方法の検討

単一周期における流体から構造材へ温度変動が伝達する過程での変動の振幅の減衰および位相の遅れについては、式(4.4)に示すとおりである。式(4.4)の複数周期を有する温度変動に対する適用性を検討するために、構造材表面近傍の流体温度（構造材表面より 0.5mm、y=0.5mm）と構造材温度（構造材表面より 0.25mm、y=-0.25mm）の２カ所の温度変動から２点間の伝達関数（周波数応答）を求め、その振幅と位相と式(4.4)との比較を行う。その際に、構造材温度は、一次元非定常熱伝導方程式に基づき、構造材表面の温度変動に変換した。伝達関数は以下の手順により求めた。

① 流体温度と構造材温度の時系列データを１番目から 1024 番目まで抜き出す。

$$T_f(t)、\ t=1, 1024 \qquad (4.5)$$

$$T_w(t)、\ t=1, 1024$$

② 抜き出した時系列データをフーリエ変換によりスペクトルへ変換する。

$$F_f(f)=\Im\{T_f(t)\} \qquad (4.6)$$

$$F_w(f)=\Im\{T_w(t)\}$$

③ 伝達関数を次式により求める。

$$H_{f-w}(f)=\frac{F_w(f)}{F_f(f)} \tag{4.7}$$

④ 流体温度と構造材温度を抜き出す位置100ステップずつ変え（101番目から1124番目）、②から③を約200回繰り返し、それぞれ伝達関数を求める。

⑤ 得られた伝達関数をアンサンブル平均化する。

Fig. 4.2.1～Fig. 4.2.3 に構造材表面近傍（y=0.5mm）の流体温度と構造材温度（y=-0.25mm）から得られた温度変動の伝達関数のパワー（振幅の二乗）と位相の遅れを示す。パワーおよび位相遅れは、高周波数成分になるに従って、減衰量および位相遅れとも大きくなっていることがわかる。噴流の吐出条件が三噴流・等速条件、三噴流・非等速条件、二噴流条件の各ケースにおいて、それぞれ噴流吐出速度が大きくなるにつれて、パワーの減衰量および位相遅れが小さくなっていることがわかる。

熱伝達率が温度変動の周波数と時間によらず一定であると仮定すると、各周波数成分に対して得られた伝達関数の振幅と式(4.4)の振幅の周波数特性は同じであると考えられる。そこで、式(4.4)に対して $\boldsymbol{h}$ をパラメータとして伝達関数の振幅にフィッティングさせ、最小二乗法により熱伝達率 $\boldsymbol{h}$ を求めた。その一例を Fig. 4.2.4 に示す。その際に、有意な周波数成分の伝達関数の振幅値のみを使用するために、流体側と構造材側の温度データに相関がある周波数成分に関してのみ、フィッティングを行った。すなわち、2点間の温度データのコヒーレンスが0.5以上の周波数成分の伝達関数（振幅）を使用した。ここでは、振幅を二乗し、パワーとしてフィッティングを行った。

上記手法により求めた熱伝達率の妥当性を検証するために、伝達関数の位相と式(4.4)に得られた熱伝達率を代入した位相遅れとの比較を行った。Fig. 4.2.5～Fig. 4.2.7 に三噴流等速、三噴流非等速、二噴流条件における位相遅れの比較結果をそれぞれ2例ずつ示す。これによると、各試験条件とも低周波数成分において、伝達関数の位相と式(4.4)に示した位相遅れがほぼ同じであることがわかる。高周波数成分では、伝達関数を求める2点間のデータの相関が小さい上に、対象とする周波数成分に対してサンプリング周波数（100Hz）が粗いことにより、誤差が大きくなっていると考えられる。

本熱伝達率導出方法の妥当性を評価するために、得られた熱伝達率を使用して、構造材近傍での流体中温度変動から構造材内部の温度変動の推定を行った。その手順は、以下の通りである。

①流体温度変動（y=0.5mm）の時系列データを FFT により周波数領域へ変換
②式(4.3)により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。その際に、２点間の温度データのコヒーレンスが 0.5 以上の周波数成分の振幅と位相のみを使用。コヒーレンスが 0.5 未満の周波数成分の振幅と位相はゼロに置換。
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

Fig. 4.2.8～Fig. 4.2.10 に上記手法により得られた熱伝達率を用いて、構造材中の温度変動を推定した結果を示す。同図には推定した場所（構造材表面より 0.25mm 内面）の計測結果および推定に用いた構造材表面近傍の流体温度変動も合わせて示す。これによると、本手法により得られた熱伝達率を用いることにより、構造材表面近傍の流体温度変動から構造材内部の温度変動が良好に再現できることがわかる。つまり、流体から構造材への温度変動の伝達特性は、温度変動の周波数に依存せず、時間的に一定の熱伝達率で表すことができることが明らかとなった。

上記の熱伝達率の導出方法では、相関性の高い（コヒーレンスの大きい）構造材表面近傍の流体温度と構造材温度から伝達関数を求めた上で熱伝達率の導出を行った。図 4.2.11 に２点間の伝達関数のパワーと２点のパワースペクトル密度（PSD）の比の比較を示す。加えて、２点間のコヒーレンスを示す。流体側の計測位置が構造材表面から離れると、構造材表面近傍の温度変動との相関が失われていることがわかる。その場合、２点間の伝達関数のパワーと PSD の比は大きく異なる値を示していることがわかる。一方、構造材表面近傍の流体温度を用いた場合、２点間のコヒーレンスは大きくなり、伝達関数のパワーとパワースペクトル密度の比はほぼ同程度の値となっていることがわかる。よって、流体と構造材の２点の温度変動から熱伝達率を求める際は、２点間の相関性が高い範囲であることを確認した上で、伝達関数あるいはパワースペクトル密度の比から熱伝達率を求めることができる。

4.3 熱伝達率の流速・周波数依存性

前節において、構造材表面近傍の流体中と構造材中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の吐出条件の異なるケースにおいて、その条件と熱伝達率の関係について求める。Fig. 4.3.1 に三噴流等速、三噴流非等速、二噴流の各噴流吐出条件における Peclet 数と熱伝達率の関係を示す。計測位置

は、水平方向 x=-15mm、鉛直方向 z=100mm とした。Peclet 数を求めるにあたっては、水平方向における計測位置が中心の低温噴流に近いことから、代表流速として、低温噴流の吐出速度を使用し、平行平板の定常熱伝達率と比較するために、代表長さを平板間の距離の２倍（D_e=360mm）とした。三噴流等速条件では噴流間の流体混合において、噴流間に交番渦が形成され、その成長・消滅によって周期的な噴流振動が発生する。一方、三噴流非等速条件では、低温噴流が片側の高温噴流側に傾いて流れ、周期的な温度変動を伴う噴流振動は発生しない。二噴流条件でも三噴流非等速と同様に卓越した周波数成分を有する温度変動は発生していない。フローパターンの異なる各噴流吐出条件において、各条件によらず低温噴流の吐出速度が上昇するに従って、ほぼ同じ勾配で熱伝達率が上昇していることがわかる。また、Hartnett[23]により得られた液体金属における平行平板の熱伝達相関式；

$$Nu_{D_e} = \frac{2}{3} Nu_s + 0.019 Pe_{D_e}^{0.8}$$

から求めた熱伝達率の Pe 数依存を示した。本試験結果を Pe 数の 0.8 乗で近似した式を本図に加えてあるが、これによると、本試験により得られた熱伝達率の流速依存性は、ほぼ Pe 数の 0.8 乗となっていることがわかる。ただし、流体中温度の測定点が壁から 0.5mm と近いこともあり、既存の平行平板の相関式より約１桁大きい。

本ナトリウム試験により、構造材表面のごく近傍のランダムな流体温度変動と構造材表面温度の伝達特性は、時間的に一定で周波数依存性のない熱伝達率を用いることで表せることがわかった。これより、式(4.3)にある変動振幅の減衰と位相遅れに対して h をパラメータとしてステンレス鋼（SUS316）に適用すると、Fig. 4.3.2 のようになる。式は半無限固体を仮定しているが、実用上は板厚が 10mm 以上であればほとんど変わらない。0.1Hz の周波数を有する温度変動の場合、熱伝達率が 10000W/m^{2}K のとき 64%、50000W/m^{2}K のとき 90%に振幅が減衰することから、熱伝達率が小さいと温度変動の減衰が大きくなる。また、熱伝達率が 10000W/m^{2}K の場合、0.1Hz の周波数を有する温度変動は 64%に振幅が減衰するのに対し、1Hz の温度変動は 34%に減衰することから、高周波数成分の温度変動が大きく減衰することがわかる。よって、流体中の温度変動の周波数成分と熱伝達率を適切に評価することによって、熱応力範囲が過剰な裕度なしに求められ、設計合理化が図れる。

５．結言

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、流体から構造材への温度変動の伝達挙動を把握するために、３本のスリットから平行に噴流が吐出し、噴流に沿って壁面のある壁噴流体系にて、平行三噴流ナトリウム試験（PLAJEST）を実施し、以下の結果を得た。

○流体中で発生した温度変動が構造材近傍に到達する際の減衰量はほとんどなく、構造材へ伝達する過程で大きく減衰していることがわかった。構造材への伝達過程においては、温度変動の高周波数成分の減衰量が大きく、低周波数成分の減衰は小さいことがわかった。
○流体から構造材へ温度変動が伝達する際の時間遅れは、噴流吐出速度が大きくなるにつれて小さくなることが明らかとなった。
○構造材近傍の流体と構造材の温度変動の相関の周波数依存性（コヒーレンス）は、低周波数成分で相関が強く、高周波数成分になるにつれて小さくなっていた。
○構造材表面での流体から構造材への温度変動の伝達挙動は、周波数と時間に依存しない一定の熱伝達率で評価できることが明らかとなった。また、この熱伝達率は、流体－構造間の伝達関数のパワーから求めることができ、伝達関数の位相遅れについて実験結果と整合する特性を与えた。
○温度変動の伝達特性を評価することのできる熱伝達率は、流れの形態によらずPeclet数の0.8乗に比例していることがわかった。

以上の結果より、サーマルストライピング現象において重要な流体から構造材へランダムな温度変動が伝達する際の評価方法を明らかにした。

謝辞

本研究を実施するにあたり、(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、川崎重工業 (株) パワープラント事業部開発部の西村元彦氏に多大なご助言を賜りました。また、大洗工学センター流体計算工学研究グループの村松壽晴主任研究員、および構造信頼性研究グループの笠原直人研究主幹に多大なご指導・ご鞭撻を頂きました。ここに感謝いたします。

最後に、実験の実施に関して、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, 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, 2nd International Topical Mtg. on Nuclear Reactor Thermal Hydaulics, 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、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.

[21]日野幹雄、スペクトル解析、朝倉書店、1977.

[22]日本機械学会、伝熱工学資料改訂第４版、日本機械学会、1986.

[23]Hartnett, J. P., et al., 57-NESC-30, Philadelphia, 1957.

Table 2.1 Experimental Conditions.

Case Name	Run Name	Left Jet (Hot)				Center Jet (Cold)				Right Jet (Hot)				T_{mix} (°C)	Gr ($\times 10^6$)	ΔT (°C)	r $=V_c/V_h$
		V_{h_L} (m/s)	Re_{h_L} ($\times 10^4$)	Pe_{h_L} ($\times 10^2$)	T_{h_L} (°C)	V_c (m/s)	Re_c ($\times 10^4$)	Pe_c ($\times 10^2$)	T_c (°C)	V_{h_R} (m/s)	Re_{h_R} ($\times 10^4$)	Pe_{h_R} ($\times 10^2$)	T_{h_R} (°C)				
Case-1	SJ3-A01	0.20	1.13	0.63	342.7	0.20	1.06	0.62	310.5	0.20	1.13	0.63	342.8	332.1	5.07	32.2	1.0
Case-2	SJ3-A02	0.30	1.68	0.93	350.1	0.30	1.55	0.91	310.0	0.30	1.66	0.92	349.7	336.6	6.39	39.9	1.0
Case-3	SJ3-A03	0.34	1.87	1.03	349.5	0.33	1.72	1.01	310.7	0.33	1.85	1.03	349.1	336.5	6.18	38.6	1.0
Case-4	SJ3-A04	0.38	2.15	1.18	351.6	0.38	1.94	1.15	306.2	0.38	2.11	1.16	351.2	336.5	7.23	45.2	1.0
Case-5	SJ3-A05	0.51	2.83	1.57	347.7	0.51	2.60	1.55	304.5	0.50	2.81	1.56	347.3	333.2	6.80	43.0	1.0
Case-6	SJ3-A06	0.57	3.15	1.74	349.9	0.56	2.89	1.71	307.5	0.56	3.13	1.73	350.5	336.1	6.83	42.7	1.0
Case-7	SJ3-A07	0.70	3.85	2.14	344.7	0.69	3.59	2.11	310.0	0.70	3.88	2.16	344.7	333.2	5.48	34.7	1.0
Case-8	SJ3-A08	0.82	4.51	2.51	344.3	0.81	4.22	2.48	309.5	0.82	4.51	2.51	344.3	332.7	5.49	34.8	1.0
Case-9	SJ3-A09	1.01	5.53	3.09	340.8	1.00	5.18	3.05	309.8	1.00	5.52	3.09	340.4	330.4	4.82	30.8	1.0
Case-10	SJ3-A10	0.30	1.70	0.94	352.4	0.20	1.04	0.61	311.0	0.31	1.72	0.95	352.2	342.1	6.74	41.3	0.65
Case-11	SJ3-A11	0.51	2.87	1.58	349.8	0.32	1.68	0.99	311.0	0.51	2.87	1.59	349.8	340.5	6.30	38.7	0.63
Case-12	SJ3-A12	0.81	4.45	2.49	340.8	0.54	2.79	1.64	309.8	0.80	4.41	2.47	341.2	333.2	4.90	31.0	0.66
Case-13	SJ3-A13	1.01	5.54	3.11	338.5	0.68	3.50	2.06	308.5	1.00	5.48	3.08	337.9	330.7	4.70	30.0	0.67
Case-14	SJ3-A14	0.50	2.72	1.54	332.5	0.09	0.49	0.29	312.1	0.50	2.68	1.52	331.9	330.5	3.19	20.4	0.19
Case-15	SJ3-A15	0.21	1.15	0.63	352.3	0.20	1.02	0.60	309.8	—	—	—	—	331.5	5.07	42.5	1.0
Case-16	SJ3-A16	0.30	1.70	0.94	351.5	0.29	1.53	0.90	310.3	—	—	—	—	331.2	6.39	41.2	1.0
Case-17	SJ3-A17	0.33	1.85	1.02	349.4	0.33	1.73	1.02	308.9	—	—	—	—	329.1	6.18	40.5	1.0
Case-18	SJ3-A18	0.50	2.79	1.54	350.0	0.51	2.65	1.56	309.9	—	—	—	—	329.7	7.23	40.1	1.0
Case-19	SJ3-A19	0.80	4.45	2.48	344.3	0.80	4.15	2.44	309.0	—	—	—	—	326.7	6.80	35.3	1.0
Case-20	SJ3-A20	0.99	5.52	3.06	345.9	0.99	5.15	3.03	310.6	—	—	—	—	328.3	6.83	35.4	1.0

Table 2.2 Experimental Parameters.

Case Name	Run Name	Average in both Hot Jets		Center Jet (Cold)		T_{mix} (°C)	ΔT (°C)	V_{space} (m/s)	r $=V_c/V_h$	Discharged Velocity	
		V_h (m/s)	T_h (°C)	V_c (m/s)	T_c (°C)					Iso-velocity	Non-Iso-velocity
Case-1	SJ3-A01	0.20	342.7	0.20	310.5	332.1	32.2	0.20	1.0	O	
Case-2	SJ3-A02	0.30	350.1	0.30	310.0	336.6	39.9	0.30	1.0	O	
Case-3	SJ3-A03	0.34	349.5	0.33	310.7	336.5	38.6	0.33	1.0	O	
Case-4	SJ3-A04	0.38	351.6	0.38	306.2	336.5	45.2	0.38	1.0	O	
Case-5	SJ3-A05	0.51	347.7	0.51	304.5	333.2	43.0	0.51	1.0	O	
Case-6	SJ3-A06	0.57	349.9	0.56	307.5	336.1	42.7	0.56	1.0	O	
Case-7	SJ3-A07	0.70	344.7	0.69	310.0	333.2	34.7	0.70	1.0	O	
Case-8	SJ3-A08	0.82	344.3	0.81	309.5	332.7	34.8	0.81	1.0	O	
Case-9	SJ3-A09	1.01	340.8	1.00	309.8	330.4	30.8	1.00	1.0	O	
Case-10	SJ3-A10	0.30	352.4	0.20	311.0	342.1	41.3	0.27	0.65		O
Case-11	SJ3-A11	0.51	349.8	0.32	311.0	340.5	38.7	0.45	0.63		O
Case-12	SJ3-A12	0.81	340.8	0.54	309.8	333.2	31.0	0.72	0.66		O
Case-13	SJ3-A13	1.01	338.5	0.68	308.5	330.7	30.0	0.90	0.67		O
Case-14	SJ3-A14	0.50	332.5	0.09	312.1	330.5	20.4	0.36	0.19		O
Case-15	SJ3-A15	0.21	352.3	0.20	309.8	331.5	42.5	0.20	1.0	O	
Case-16	SJ3-A16	0.30	351.5	0.29	310.3	331.2	41.2	0.30	1.0	O	
Case-17	SJ3-A17	0.33	349.4	0.33	308.9	329.1	40.5	0.33	1.0	O	
Case-18	SJ3-A18	0.50	350.0	0.51	309.9	329.7	40.1	0.51	1.0	O	
Case-19	SJ3-A19	0.80	344.3	0.80	309.0	326.7	35.3	0.80	1.0	O	
Case-20	SJ3-A20	0.99	345.9	0.99	310.6	328.3	35.4	0.99	1.0	O	

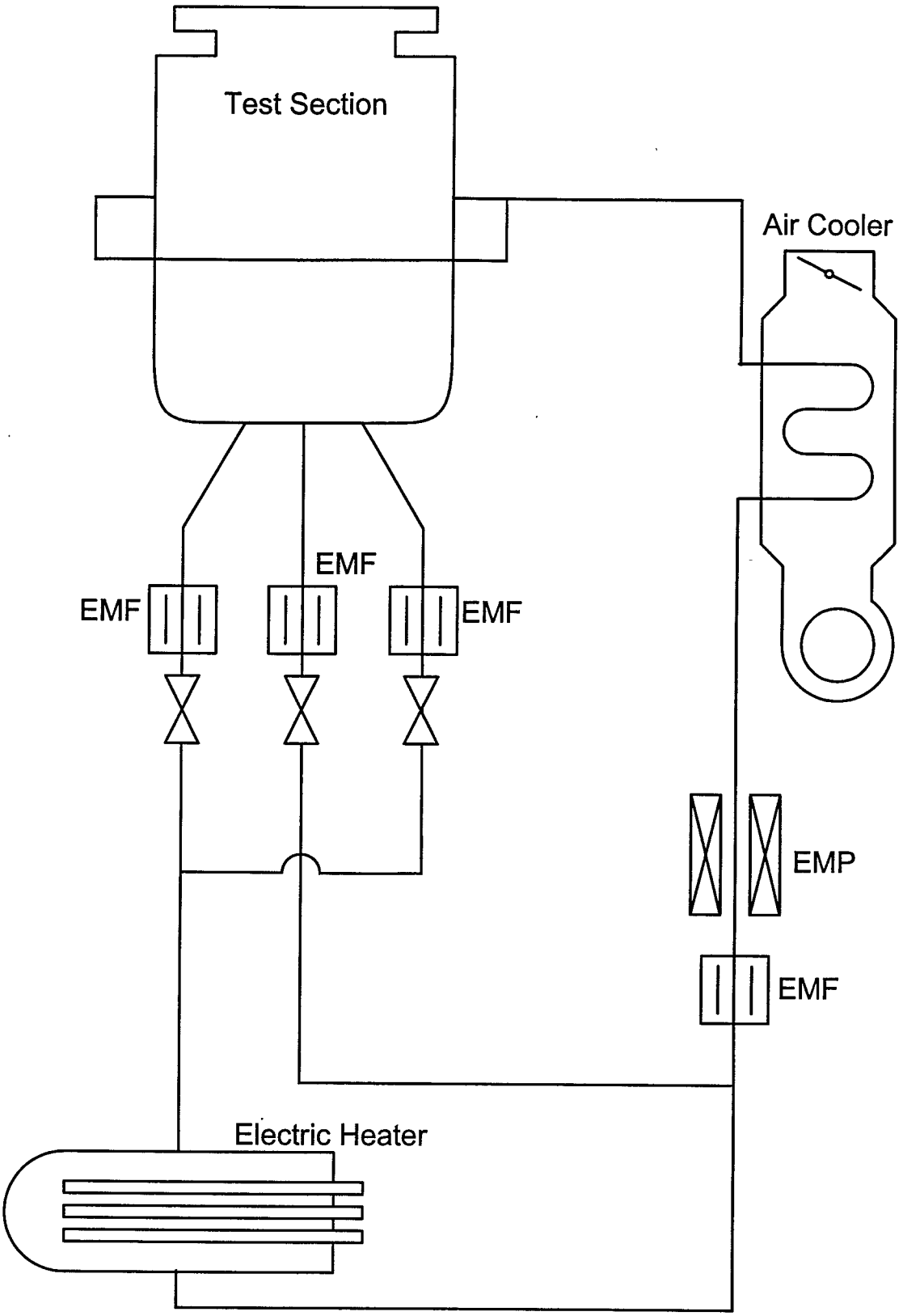


Fig. 2.1.1 Experimental Loop.

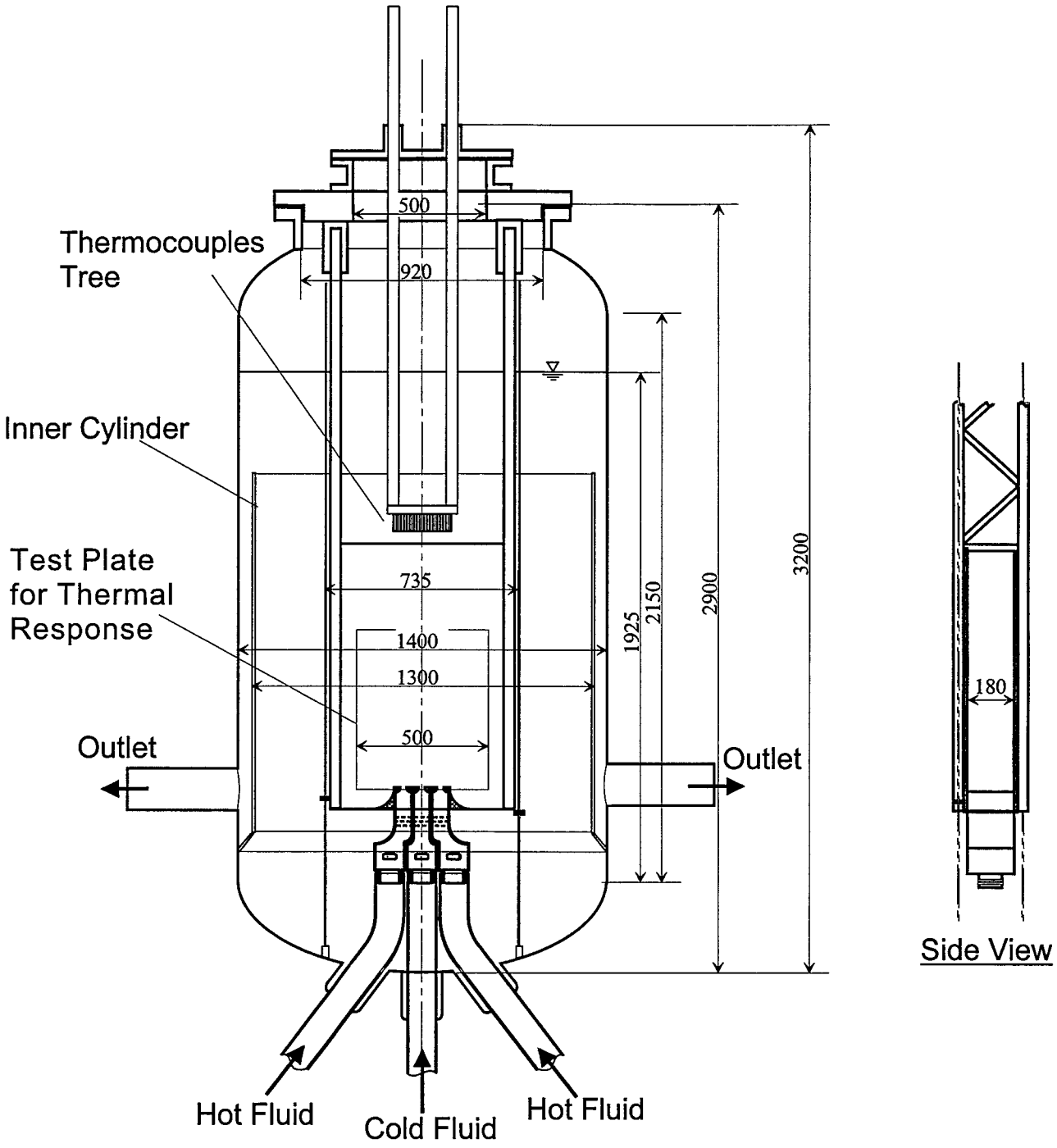


Fig. 2.1.2 Test Plenum.

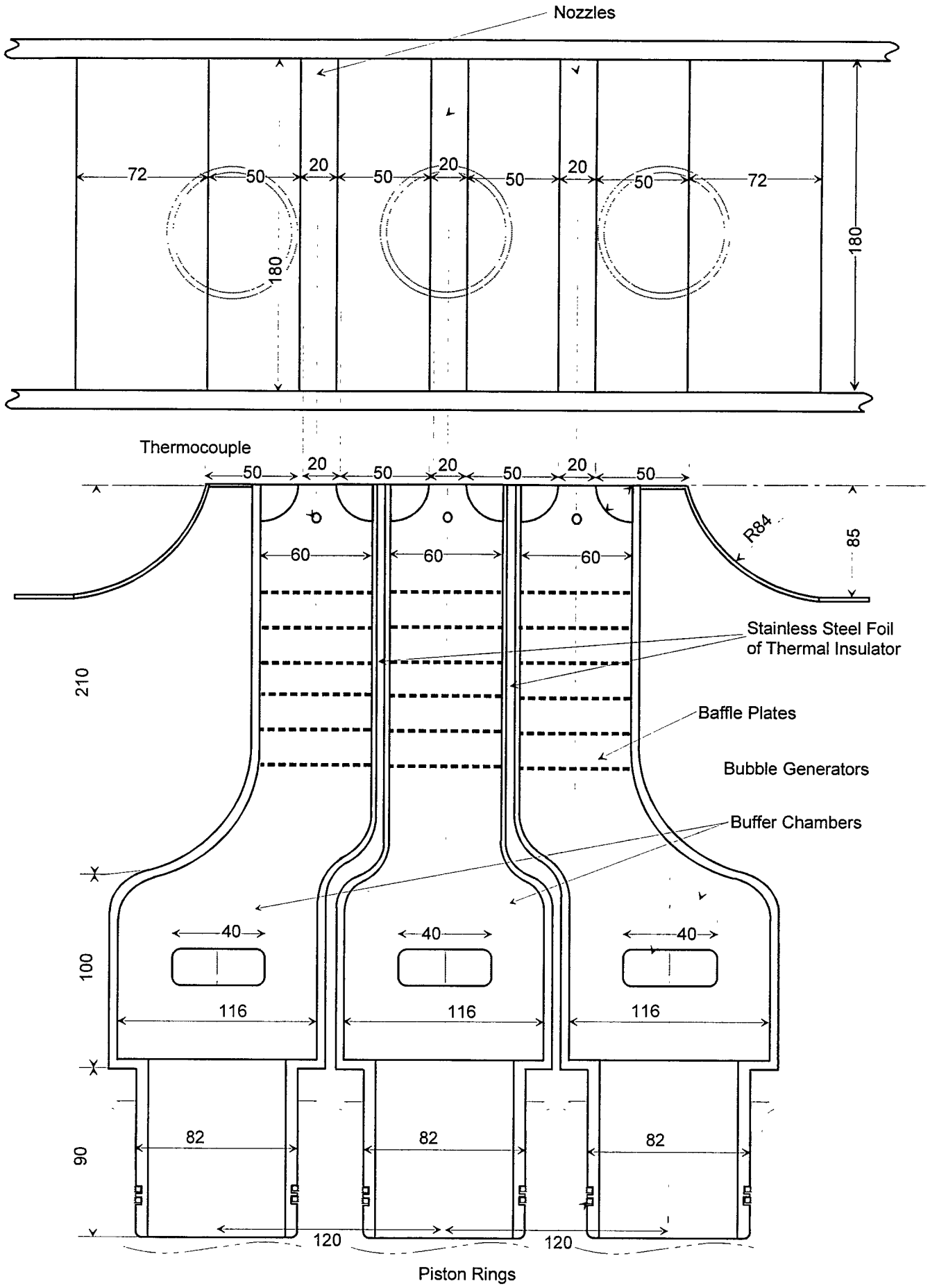


Fig. 2.1.3 Discharged Nozzles of Triple Jets.

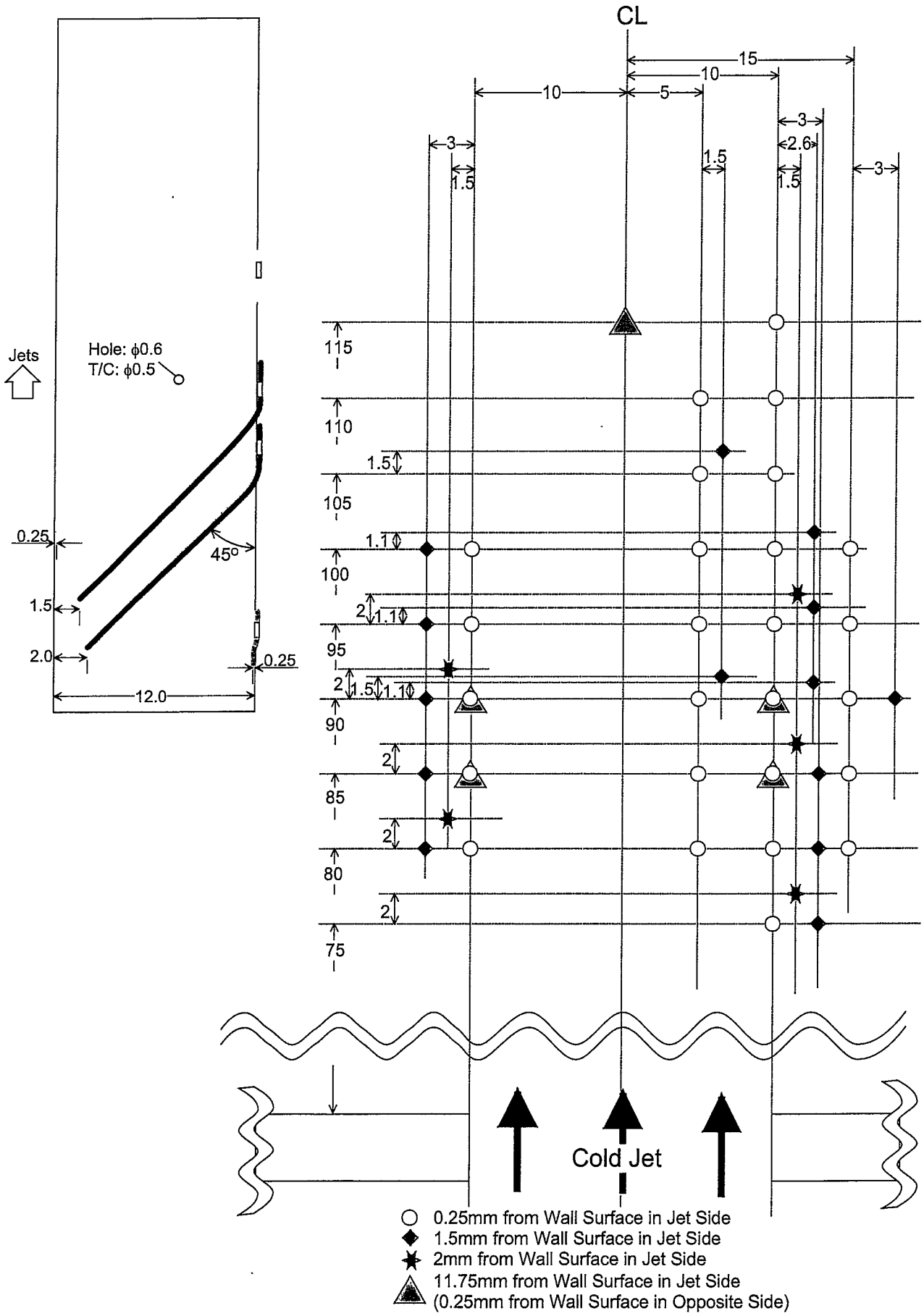


Fig. 2.1.4 Arrangement of Thermocouples in Test Plate for Thermal Response.

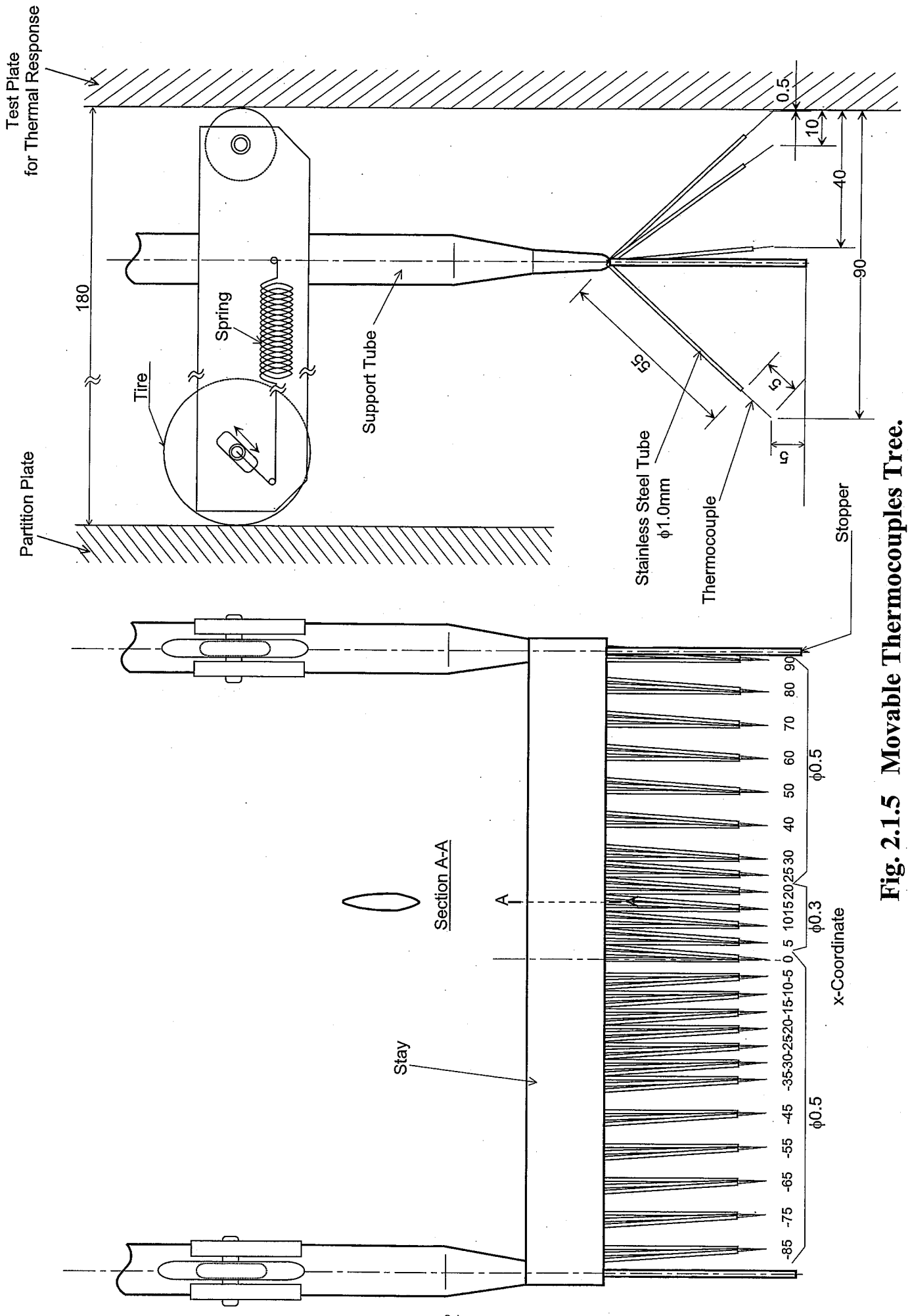


Fig. 2.1.5 Movable Thermocouples Tree.

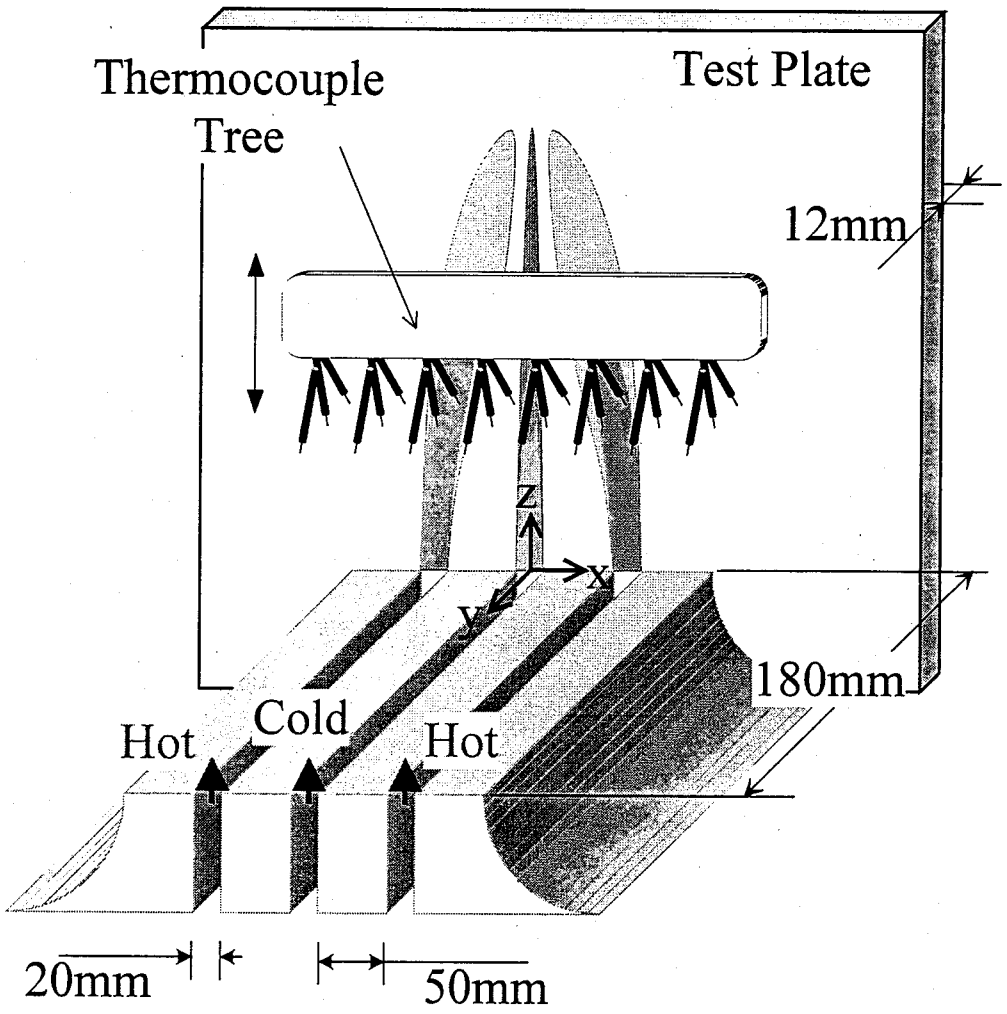
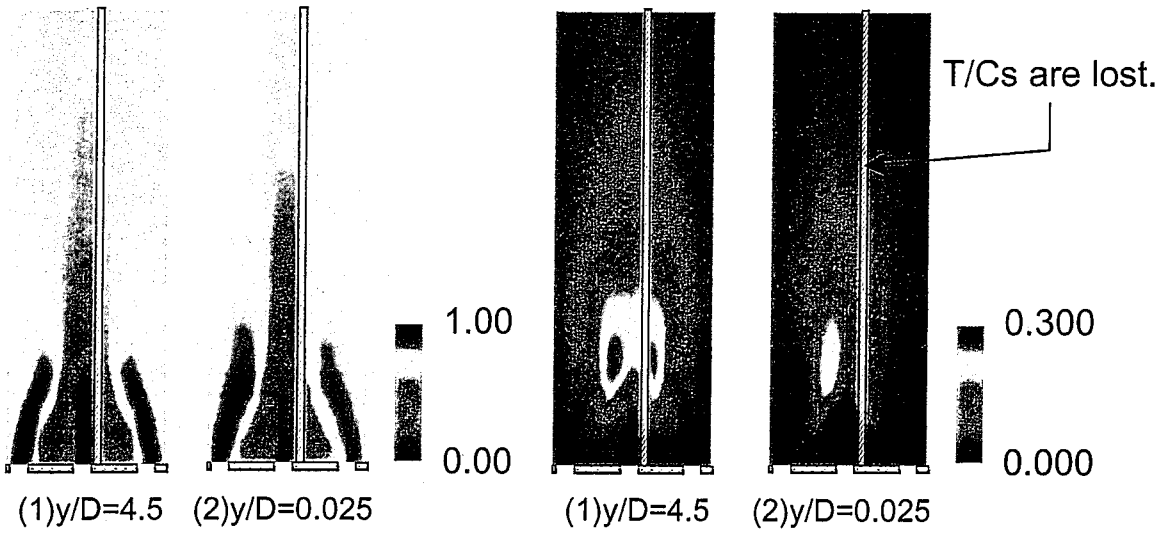
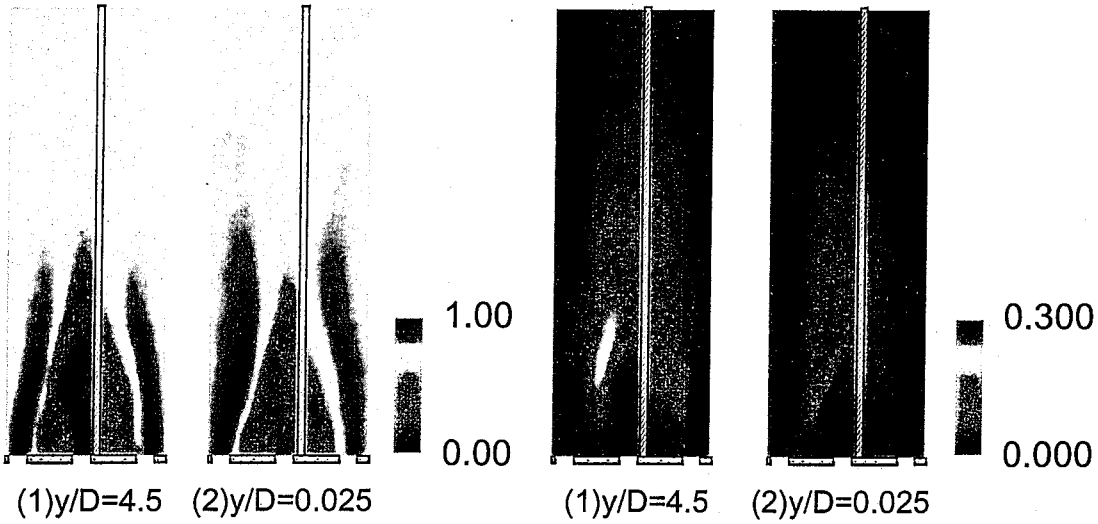


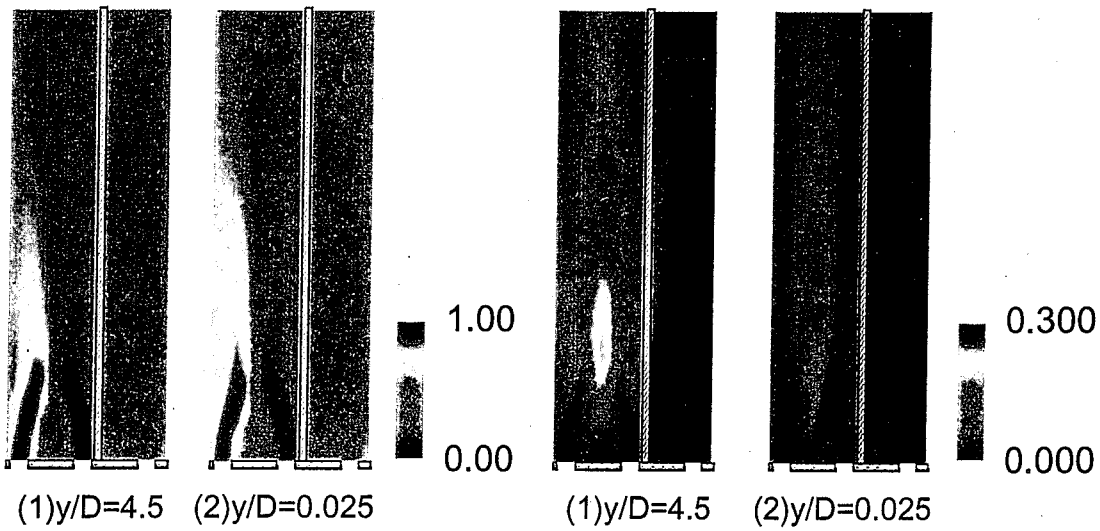
Fig. 2.1.6 Locations of Nozzles, Test Plate and Thermocouples Tree.



(a)Isovelocity Triple-Jet Condition. (V_h=V_c=0.5m/s)



(b)Non-Isovelocity Triple-Jet Condition. (V_h=0.5m/s、V_c=0.33m/s)



(c)Double-Jet Condition. (V_h=V_c=0.5m/s)

Fig.3.1.1 Example of Contours of Time-Averaged Temperature and Temperature Fluctuation Intensity.

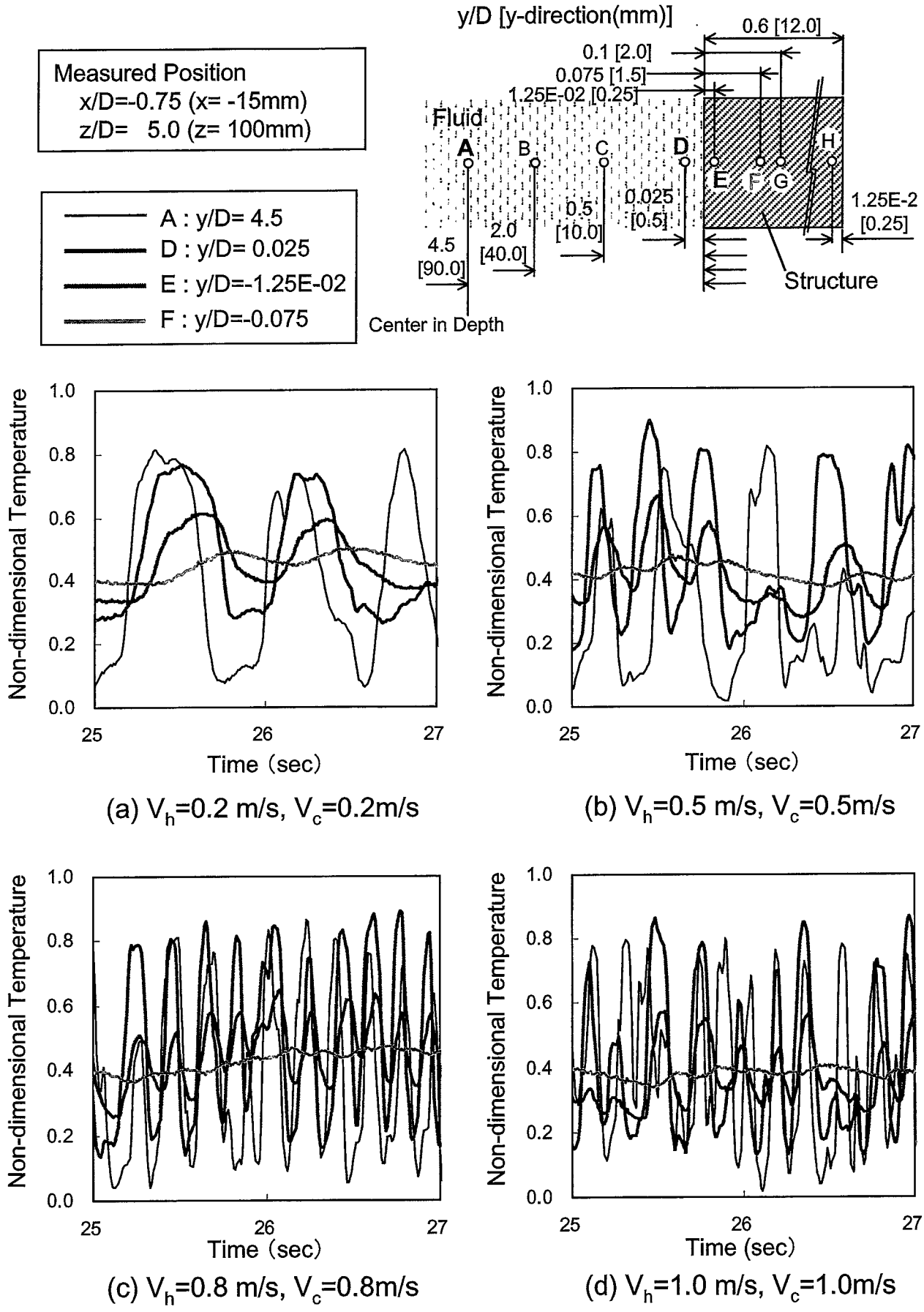


Fig.3.1.2 Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Isovelocity Triple-Jet Condition.

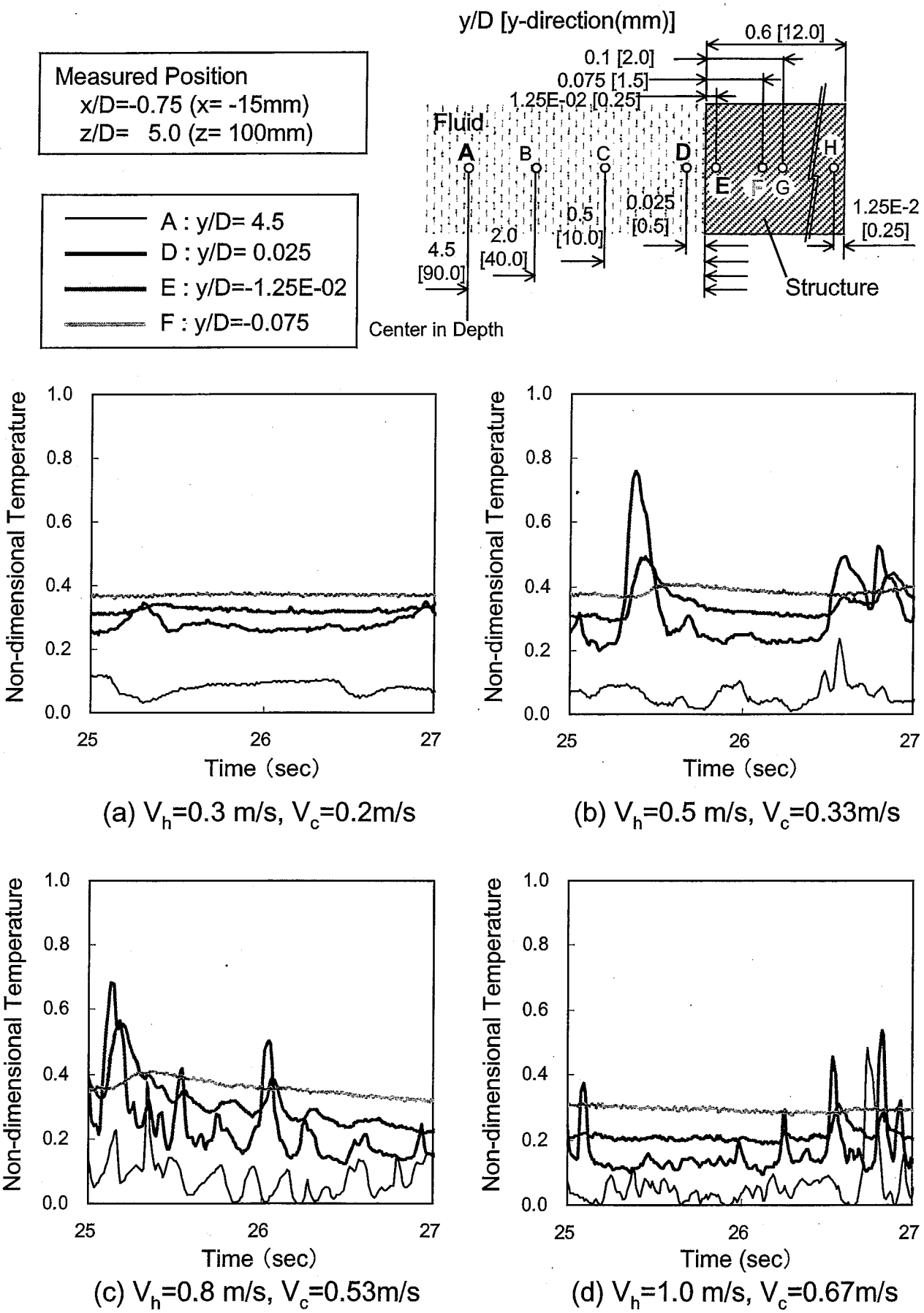


Fig.3.1.3 Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

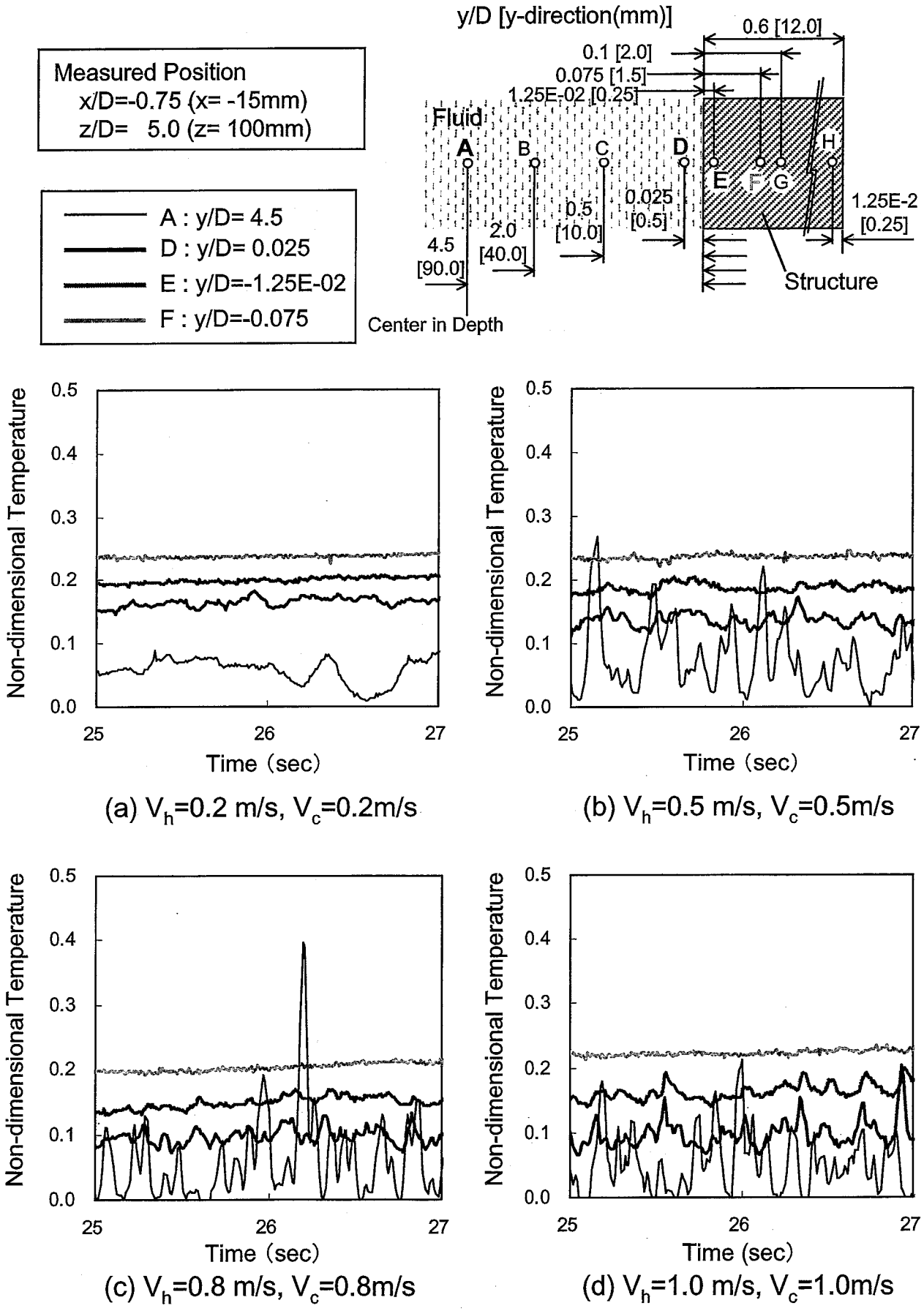
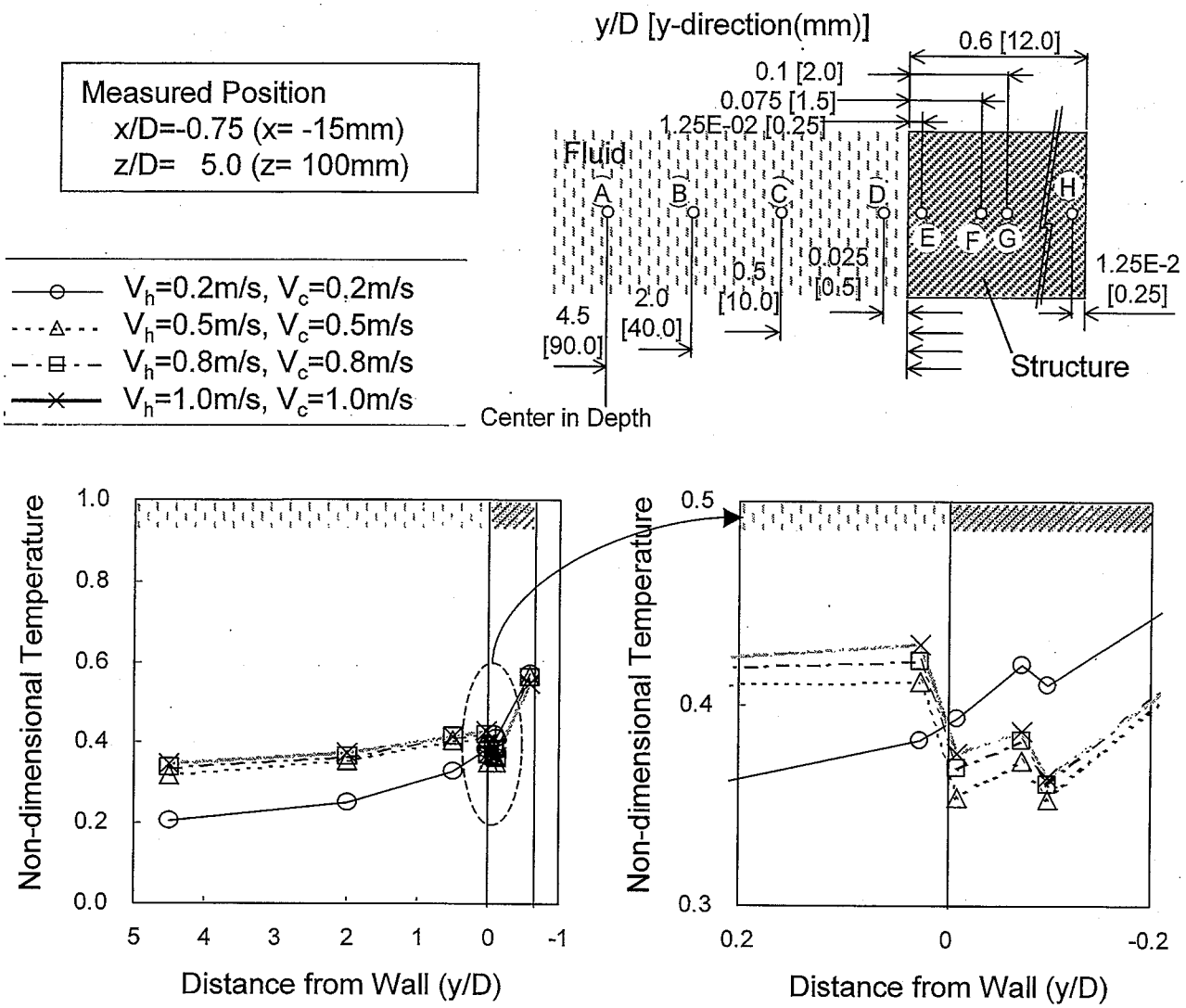
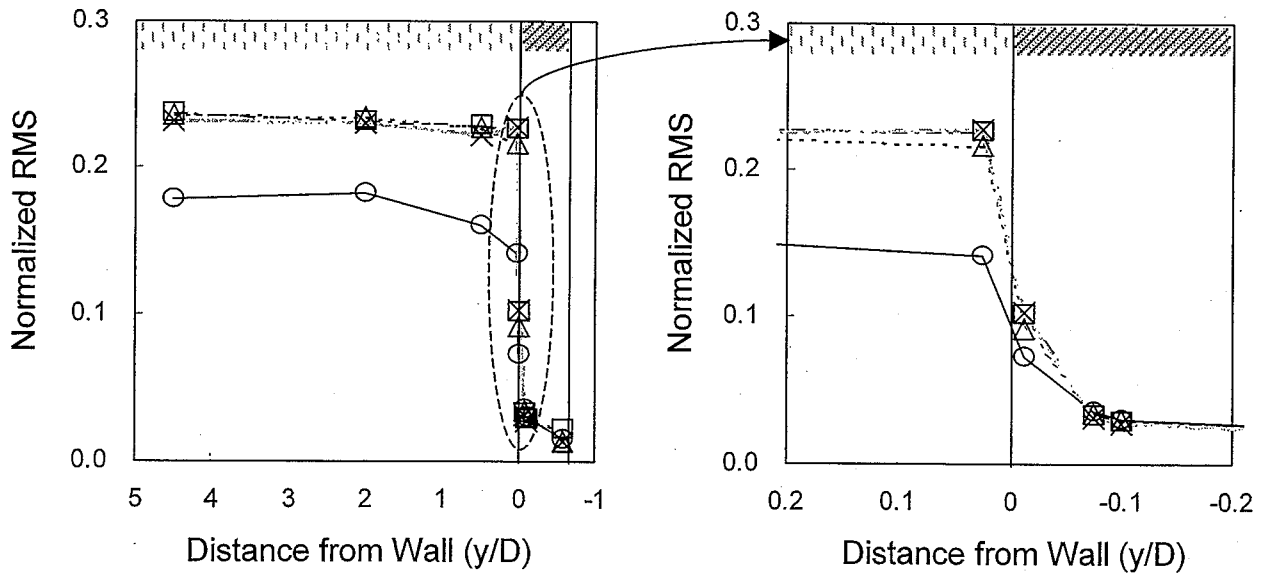


Fig.3.1.4 Effect of Structural Wall on Temperature Fluctuating Characteristics under Double-Jet Condition.

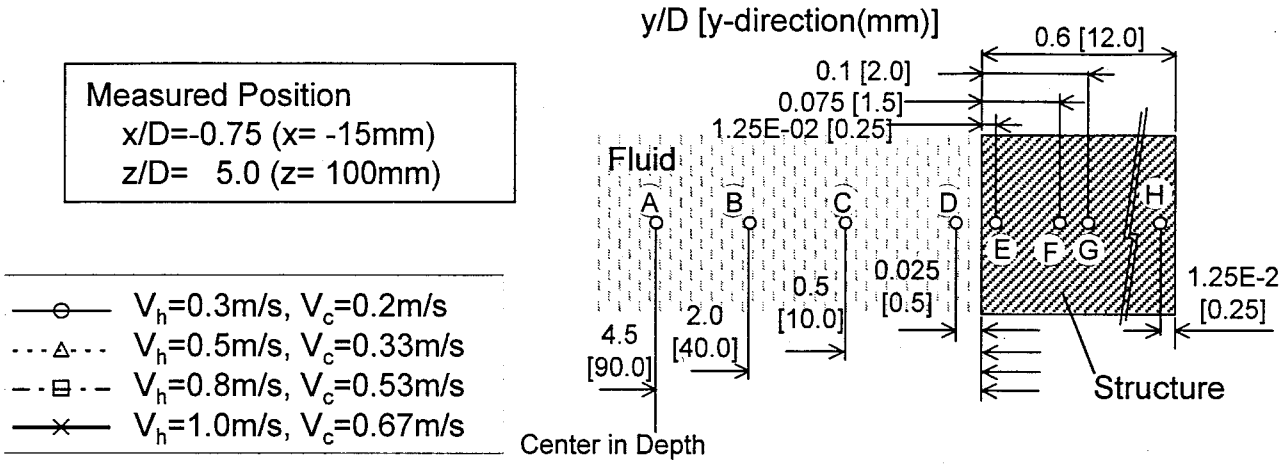


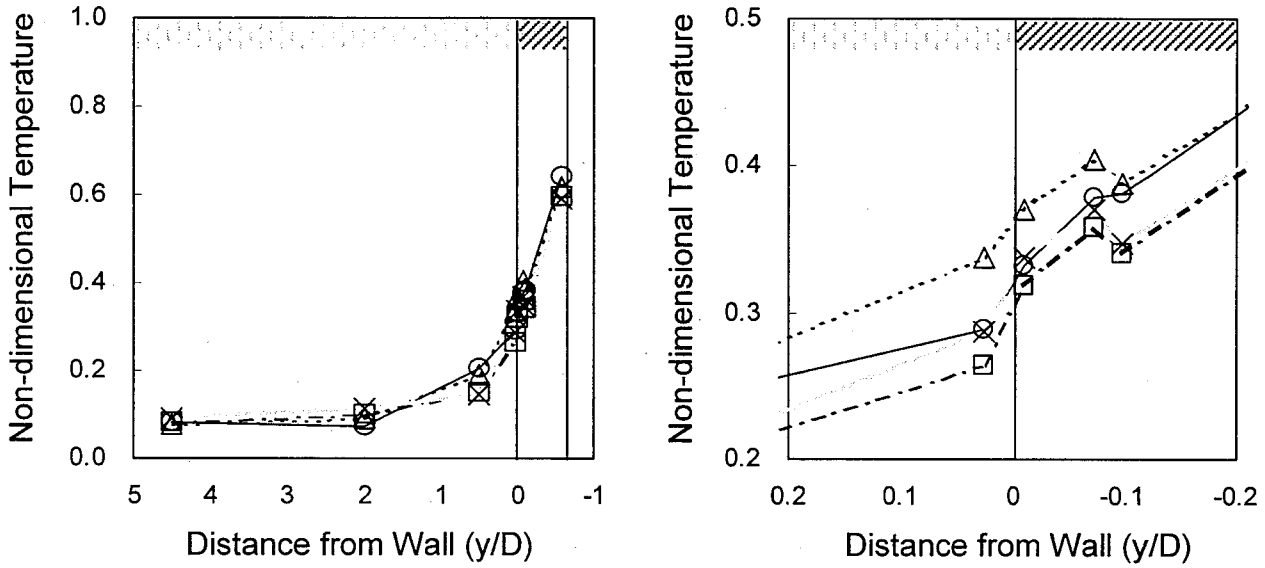
(a) Time-Averaged Temperature



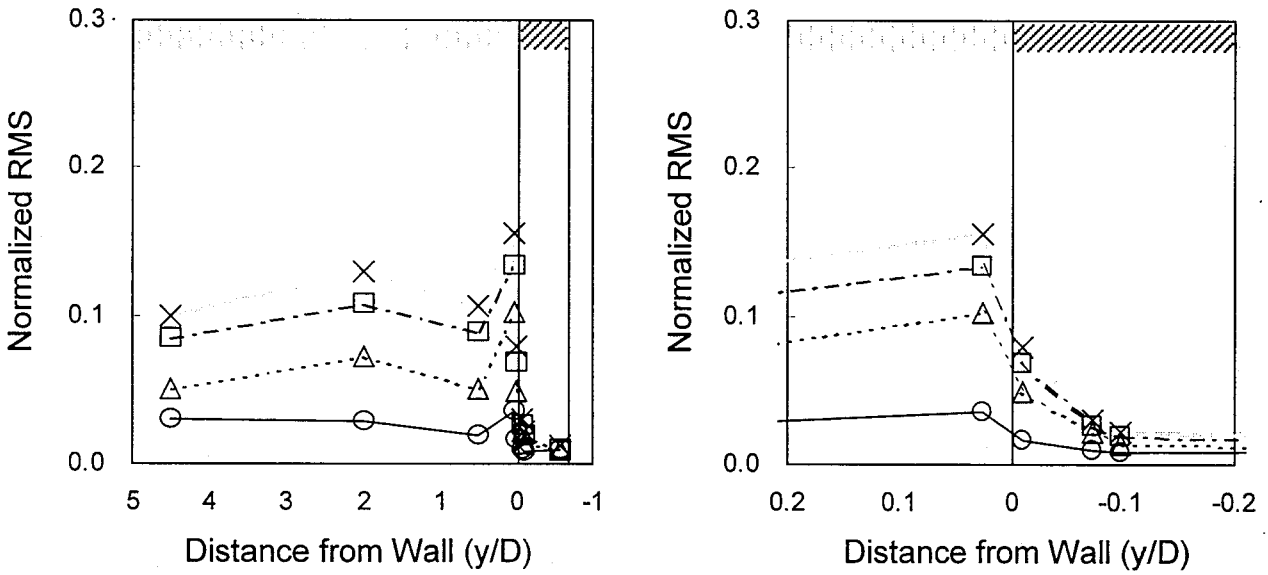
(b) Temperature Fluctuation Intensity

Fig.3.1.5 Time-Averaged Temperature and Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Isovelocity Triple-Jet Condition.



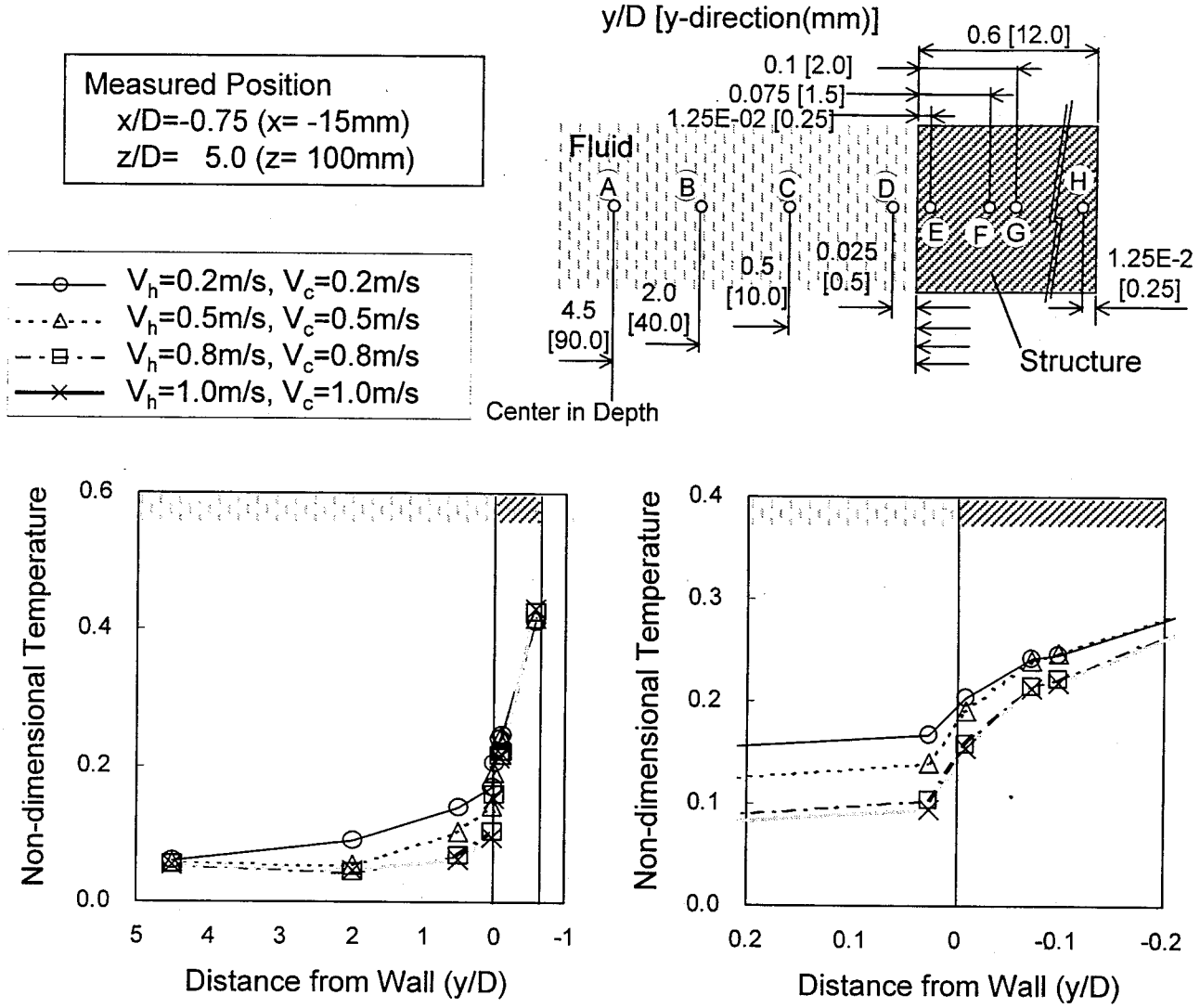


(a) Time-Averaged Temperature

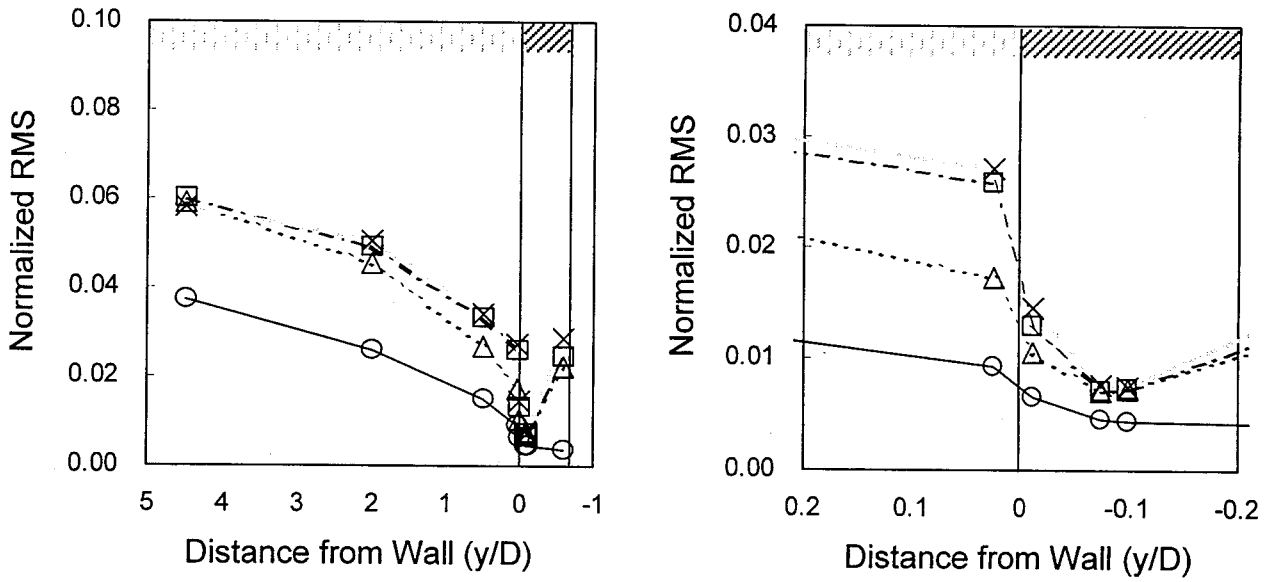


(b) Temperature Fluctuation Intensity

Fig.3.1.6 Time-Averaged Temperature Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.



(a) Time-Averaged Temperature



(b) Temperature Fluctuation Intensity

Fig.3.1.7 Time-Averaged Temperature Temperature Fluctuation Intensity in Depth Direction under Double-Jet Condition.

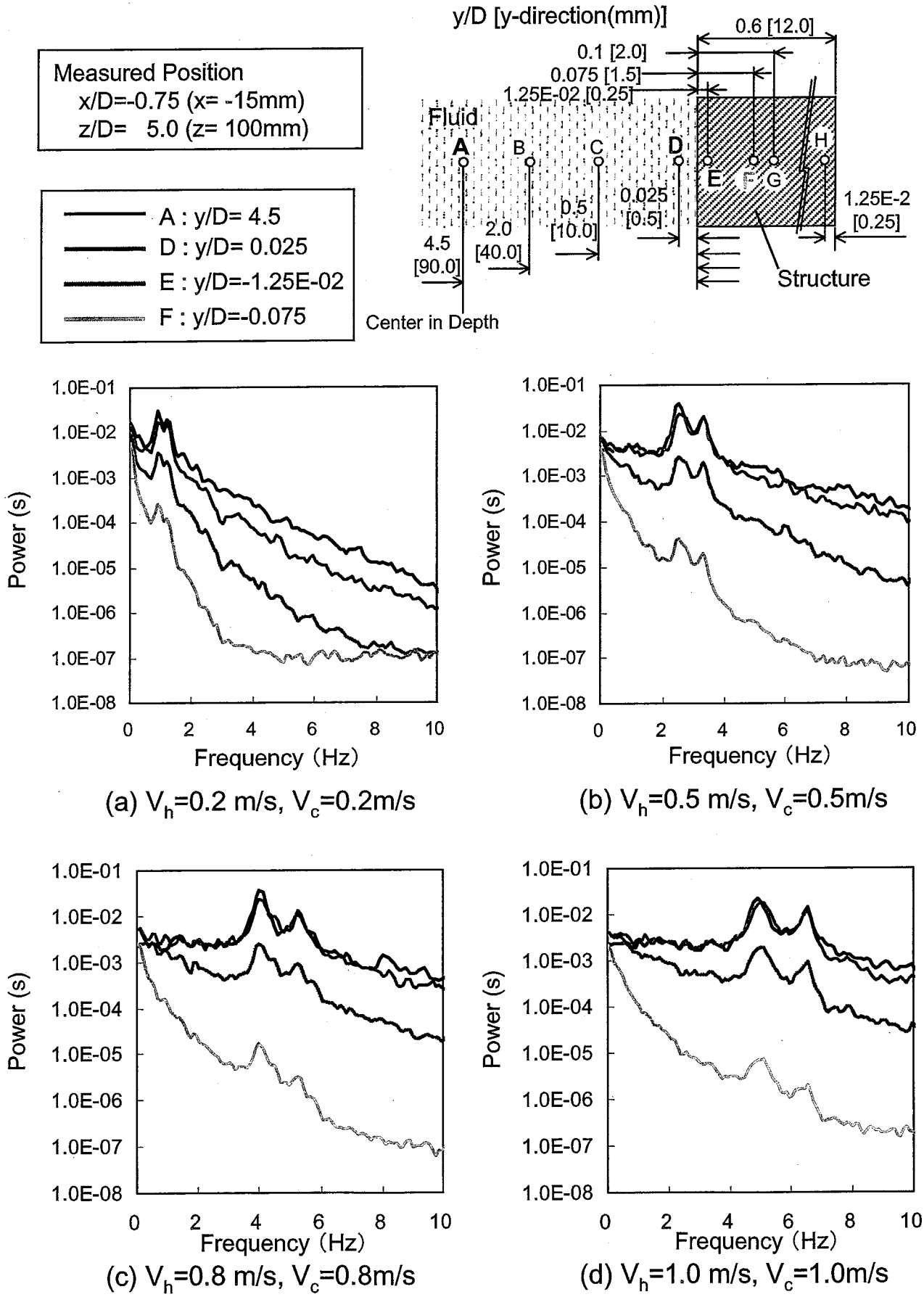


Fig.3.1.8 Effect of Structural Wall on Power Spectrum Density under Isovelocity Triple-Jet Condition.

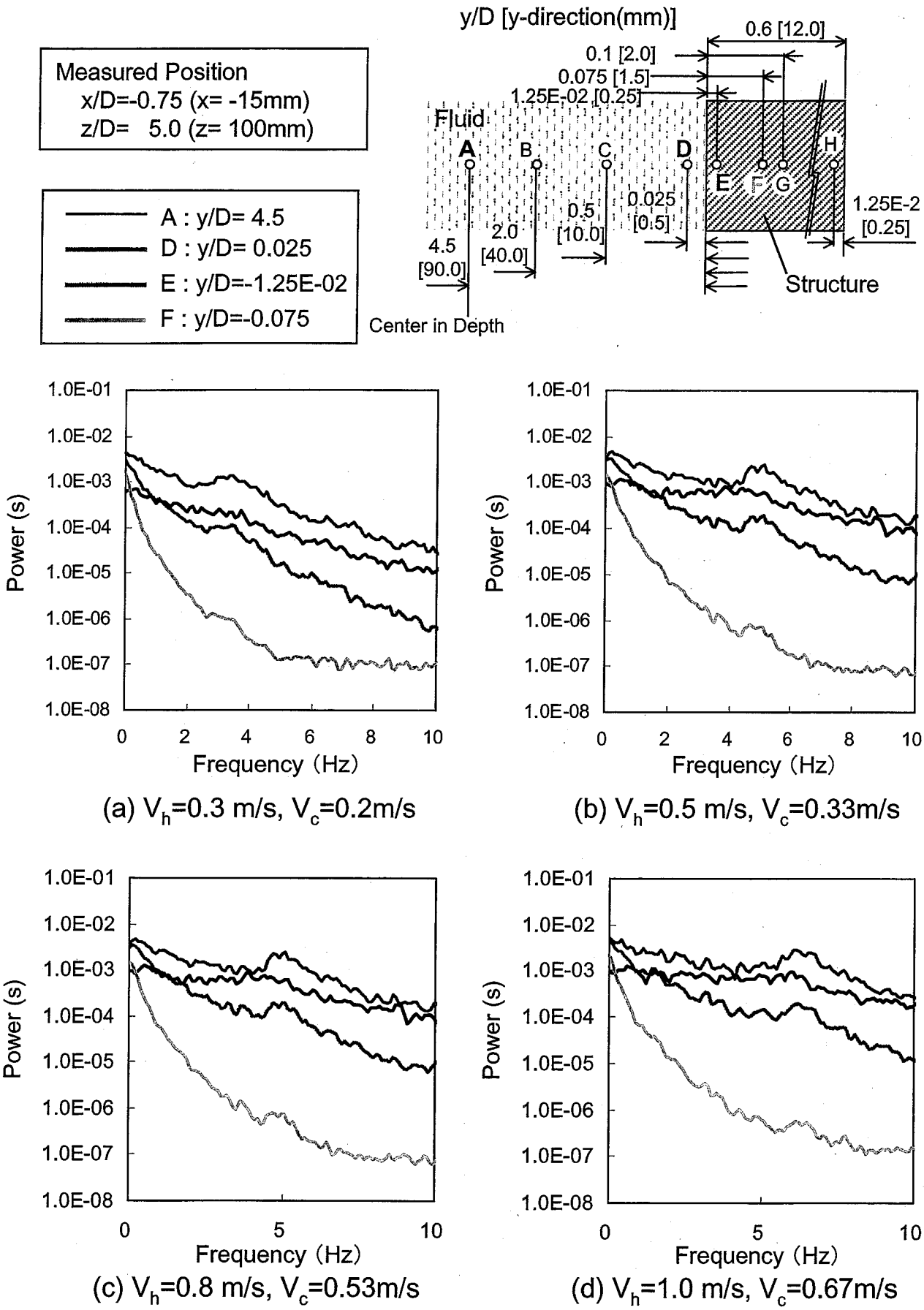


Fig.3.1.9 Effect of Structural Wall on Power Spectrum Density under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

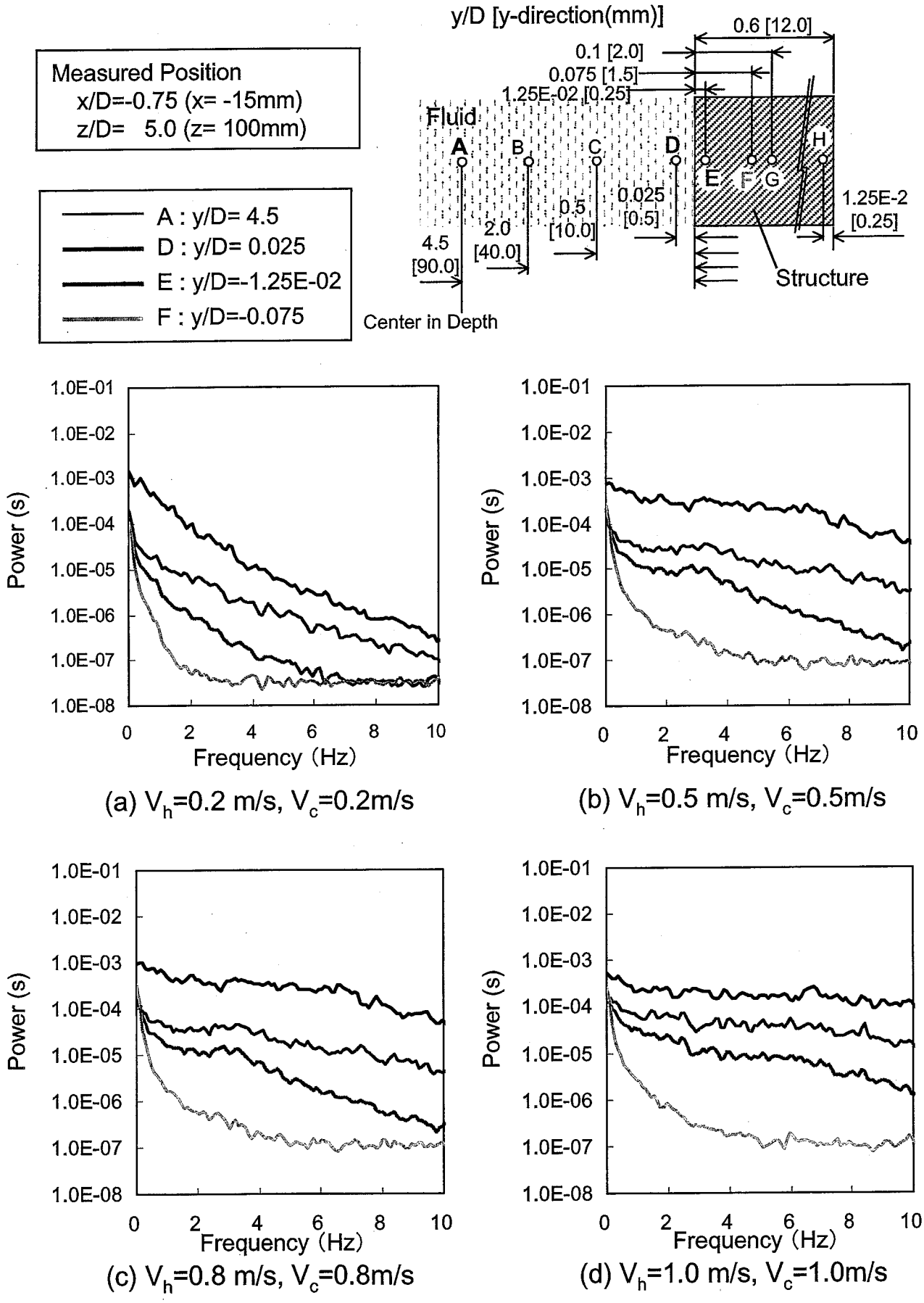


Fig.3.1.10 Effect of Structural Wall on Power Spectrum density under Double-Jet Condition.

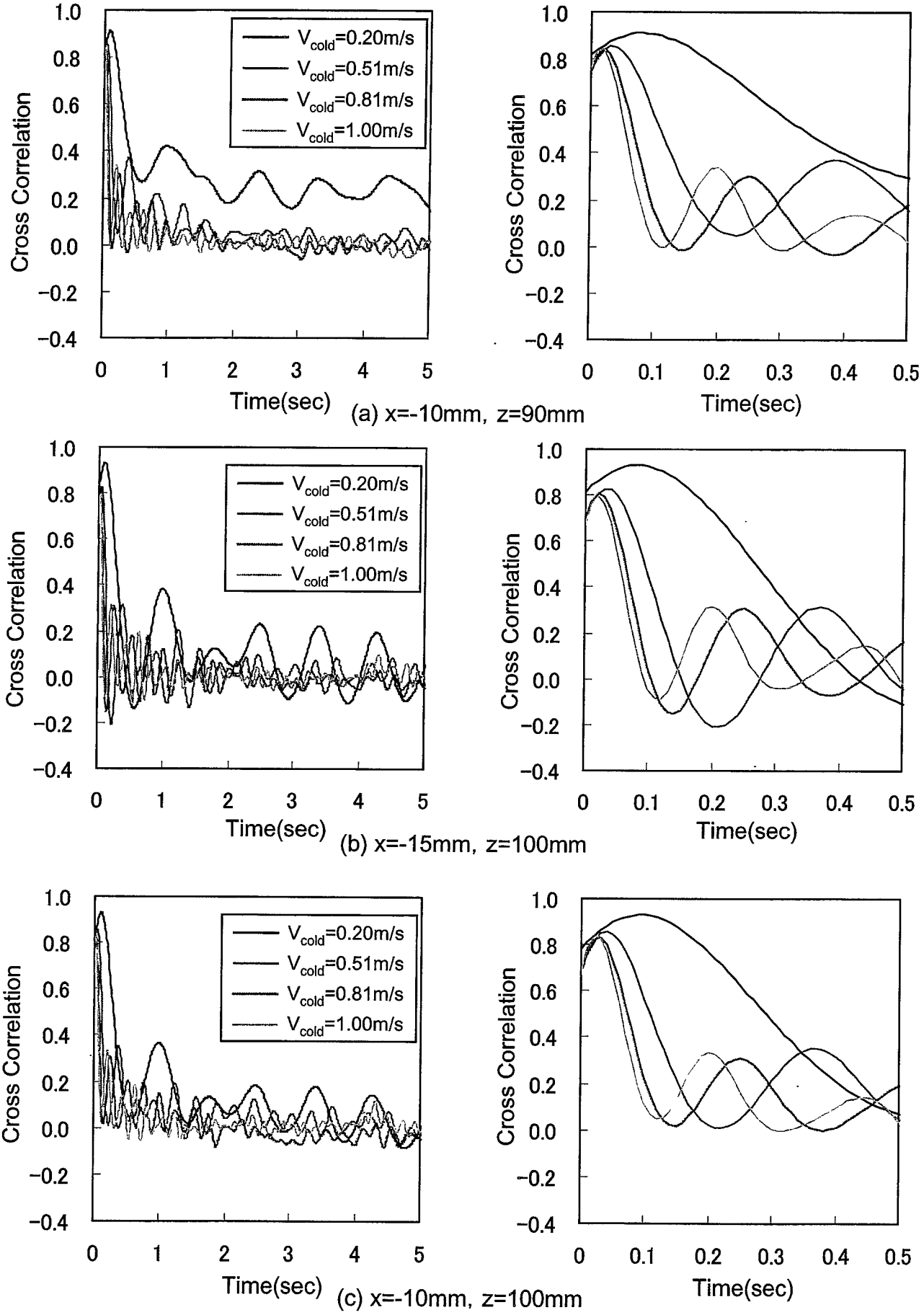


Fig.3.2.1 Cross-Correlation of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure under Isovelocity Triple-Jet Condition.

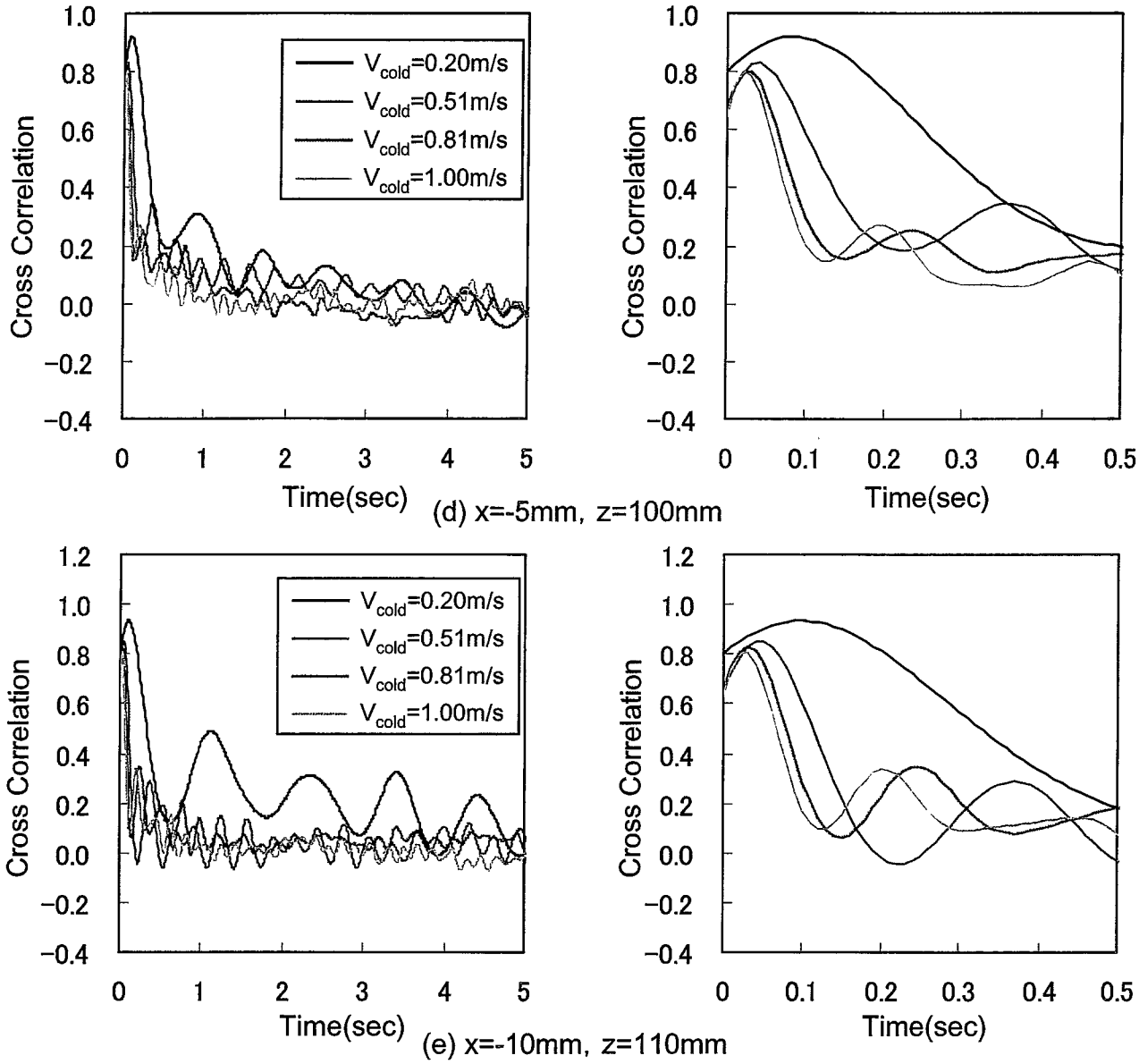


Fig.3.2.1 Cross-Correlation of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure under Isovelocity Triple-Jet Condition.

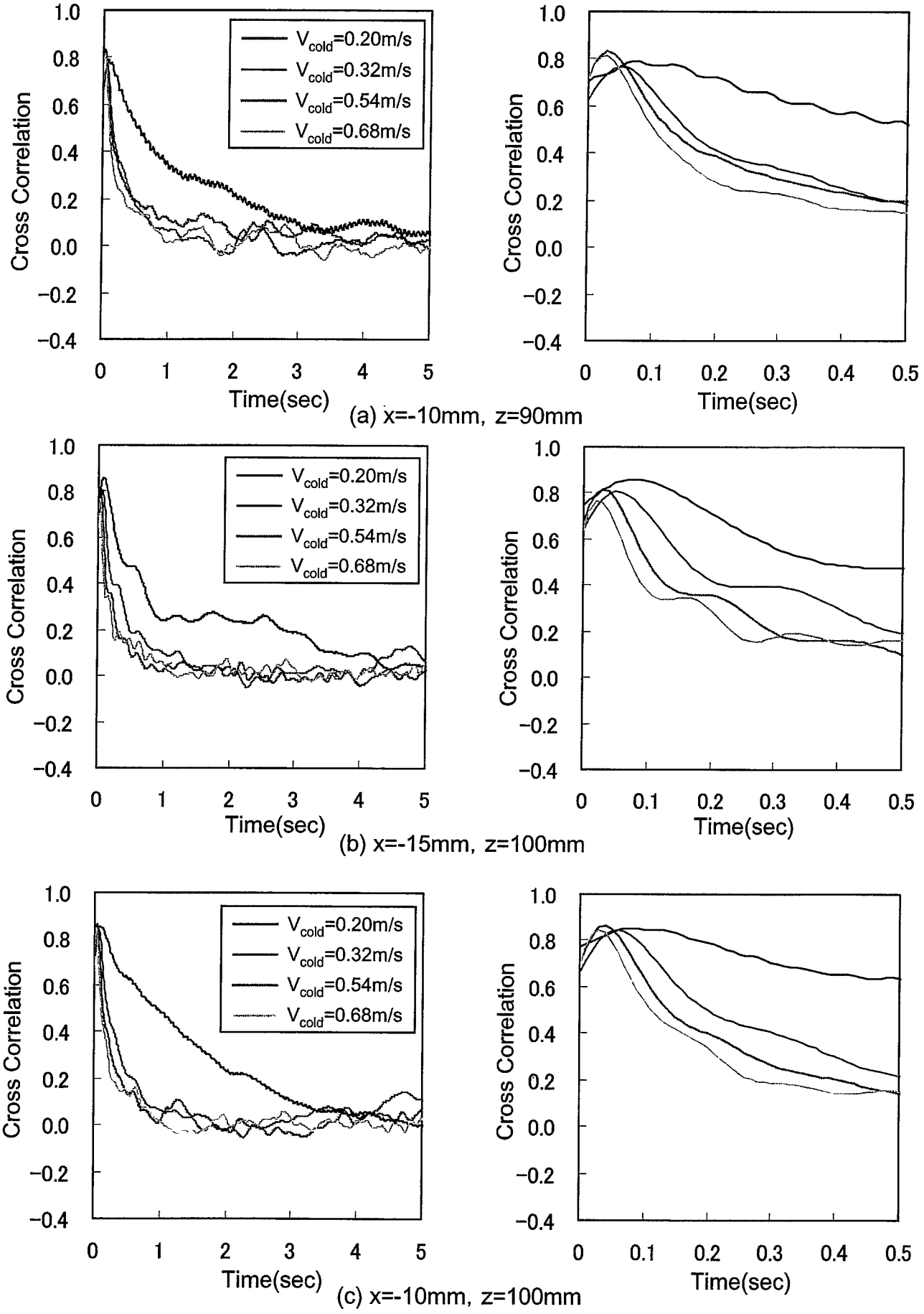


Fig.3.2.2 Cross-Correlation of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

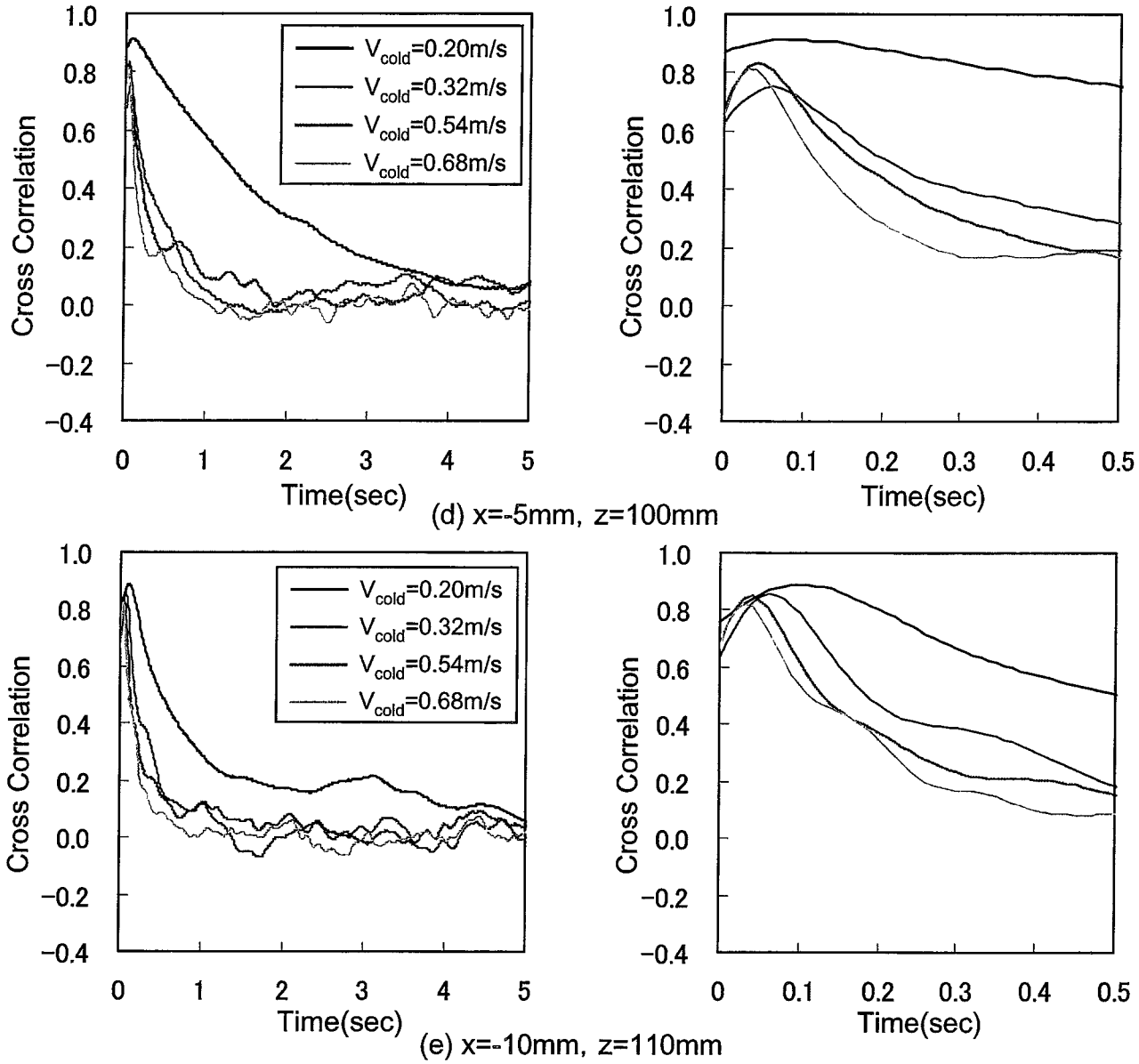
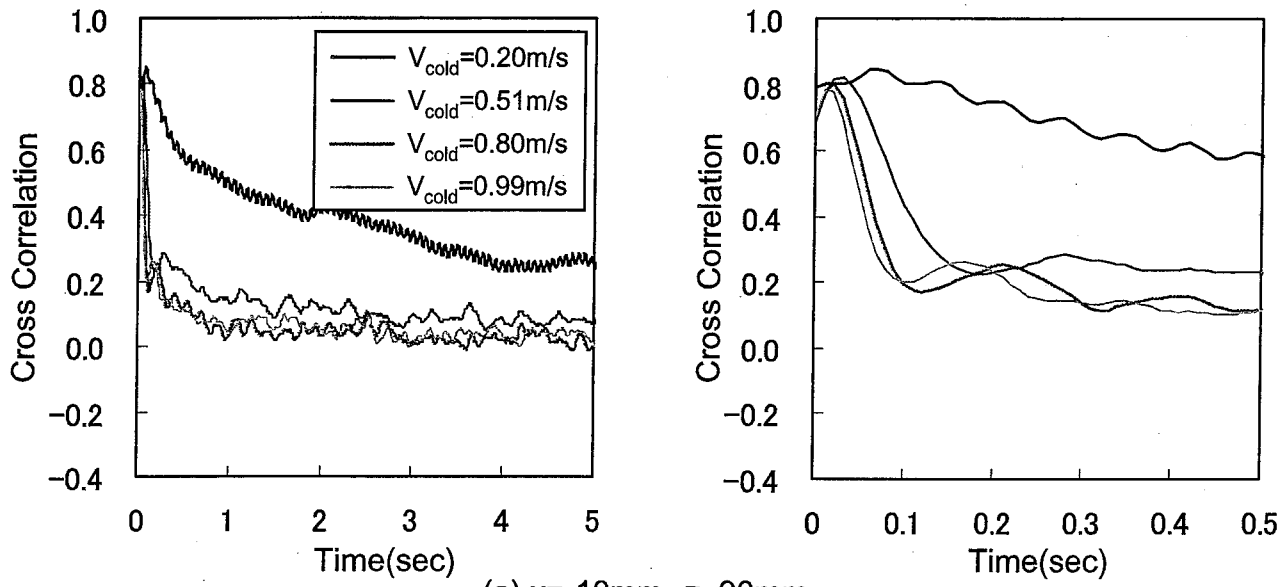
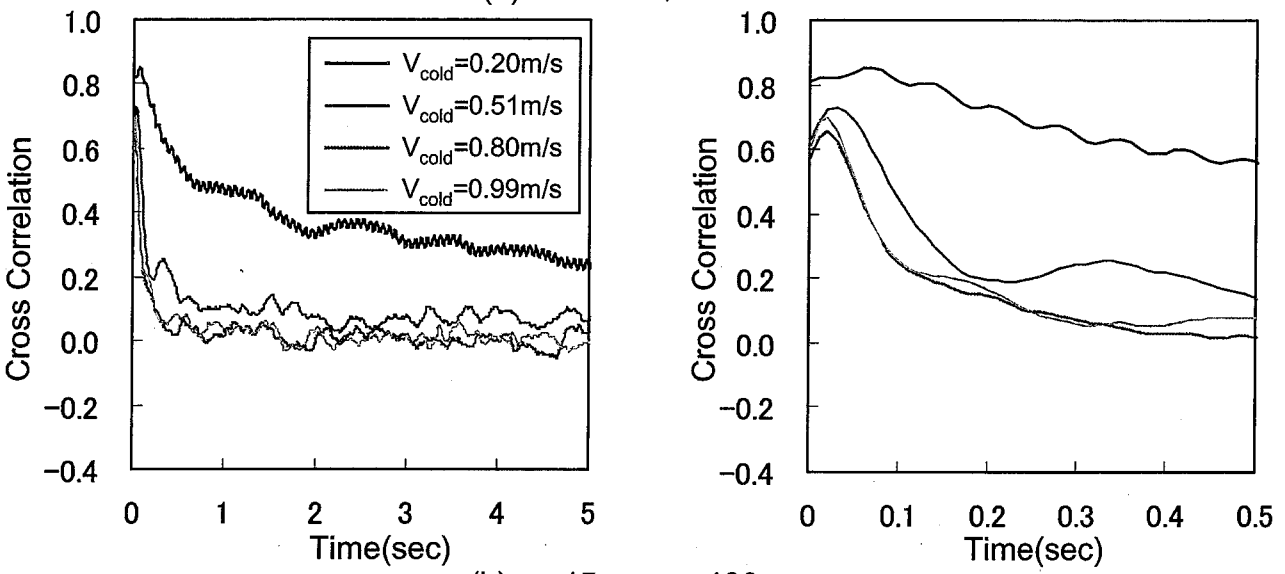


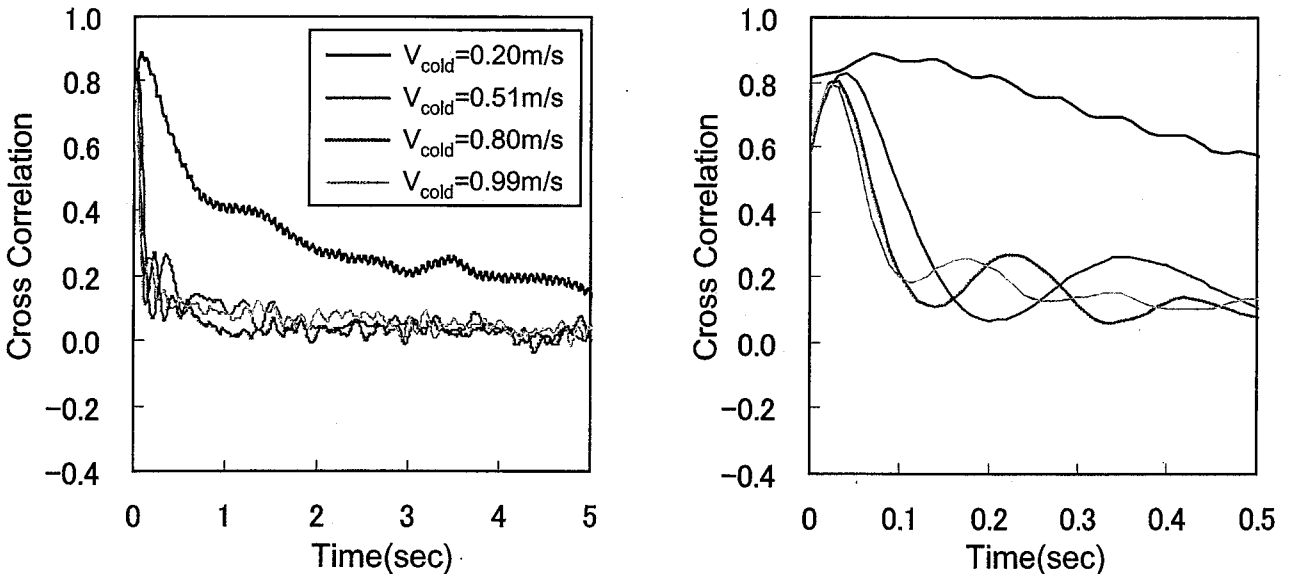
Fig.3.2.2 Cross-Correlation of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.



(a) x=-10mm, z=90mm

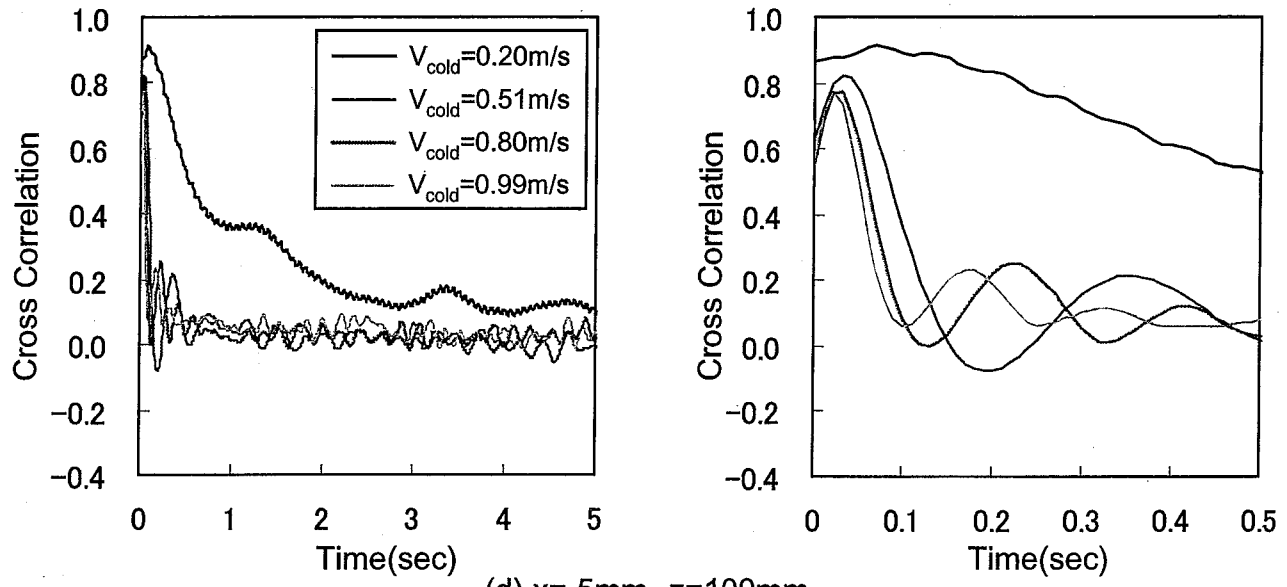


(b) x=-15mm, z=100mm

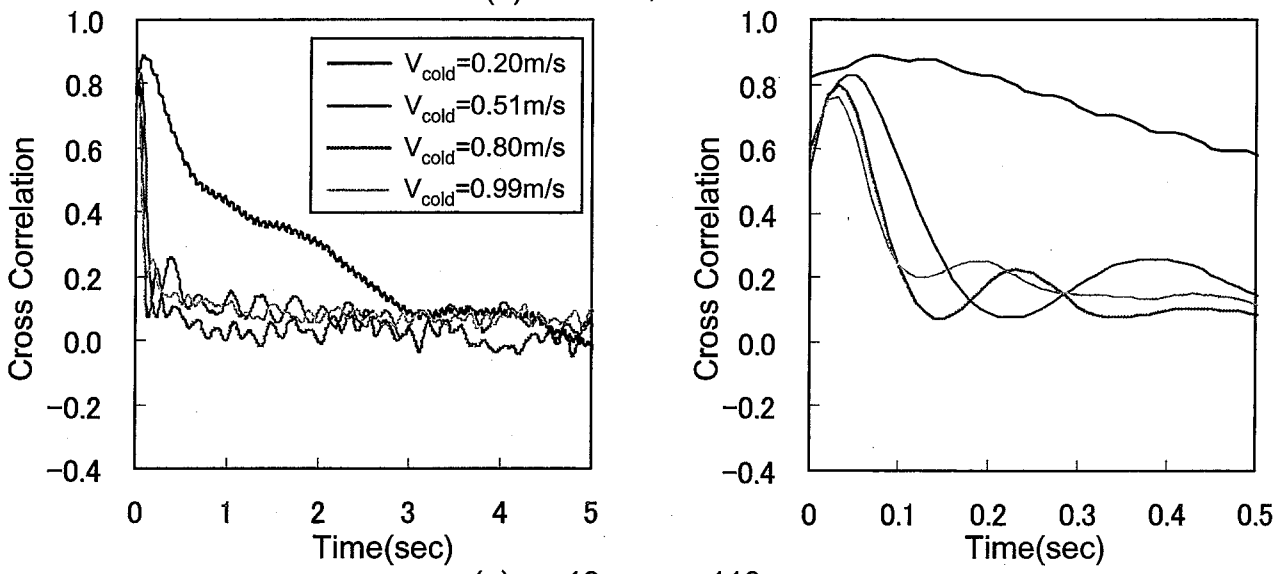


(c) x=-10mm, z=100mm

Fig.3.2.3 Cross-Correlation of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure under Double-Jet Condition.

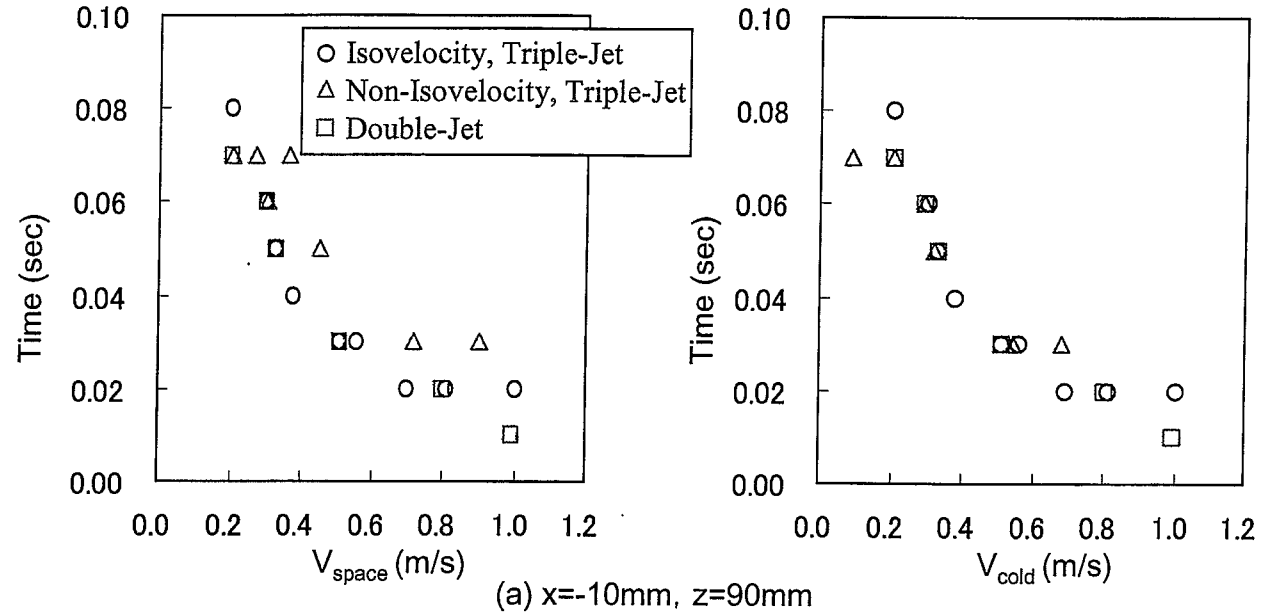


(d) x=-5mm, z=100mm

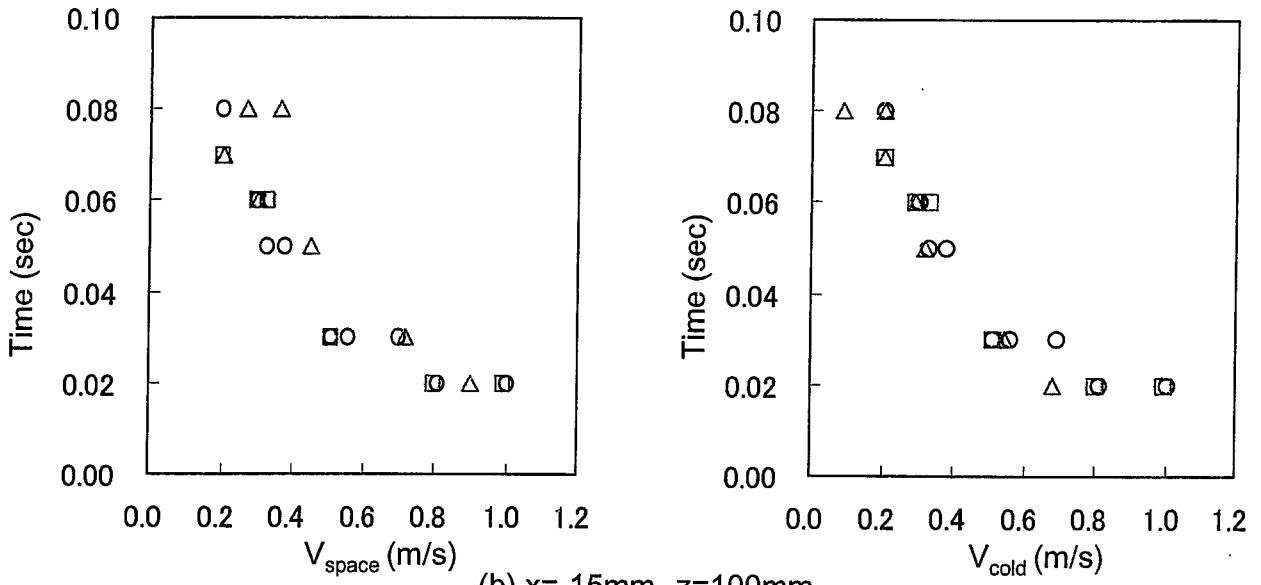


(e) x=-10mm, z=110mm

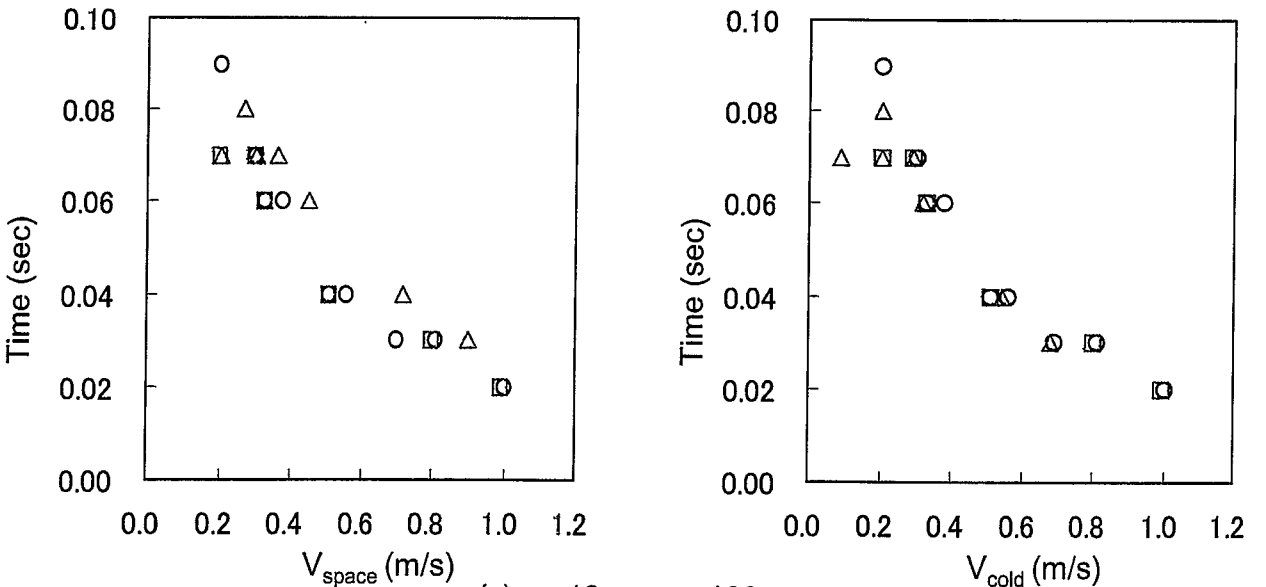
Fig.3.2.3 Cross-Correlation of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure under Double-Jet Condition.



(a) x=-10mm, z=90mm

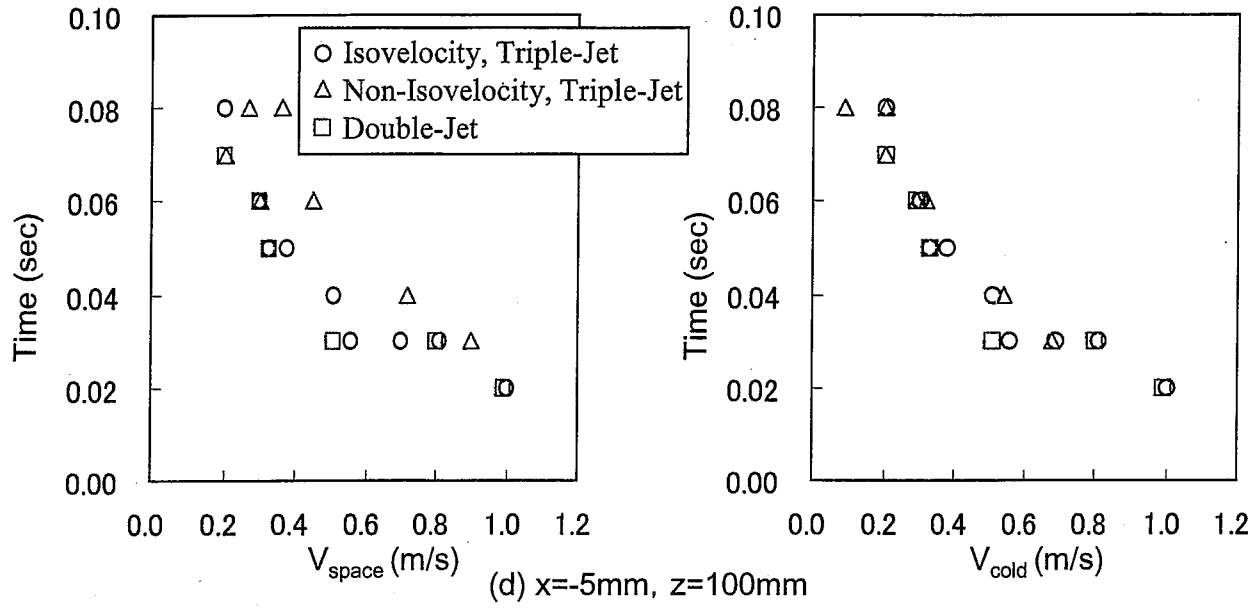


(b) x=-15mm, z=100mm



(c) x=-10mm, z=100mm

Fig.3.2.4 Relationship between Time Delay of Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure and Discharged Velocities.



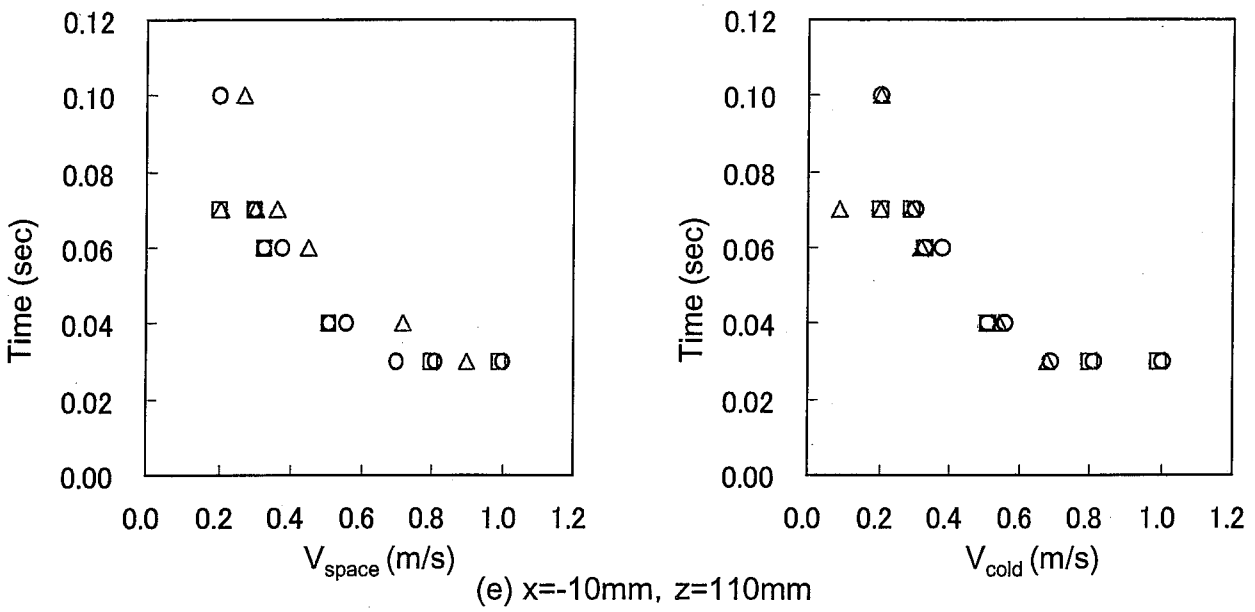


Fig.3.2.4 Relationship between Time Delay of Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure and Discharged Velocities.

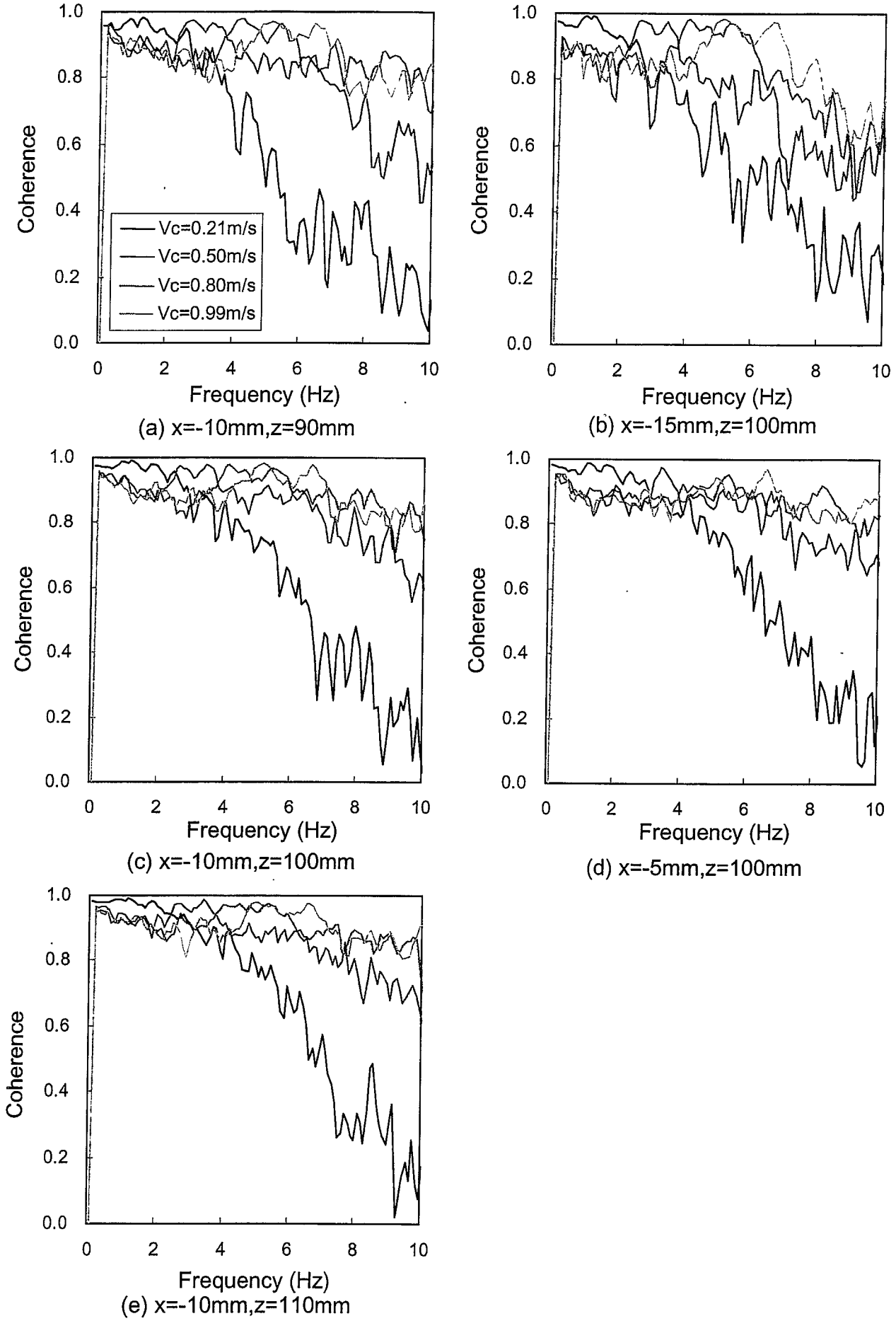


Fig.3.2.5 Dependence of Coherence of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure on Frequency under Isovelocity Triple-Jet Condition.

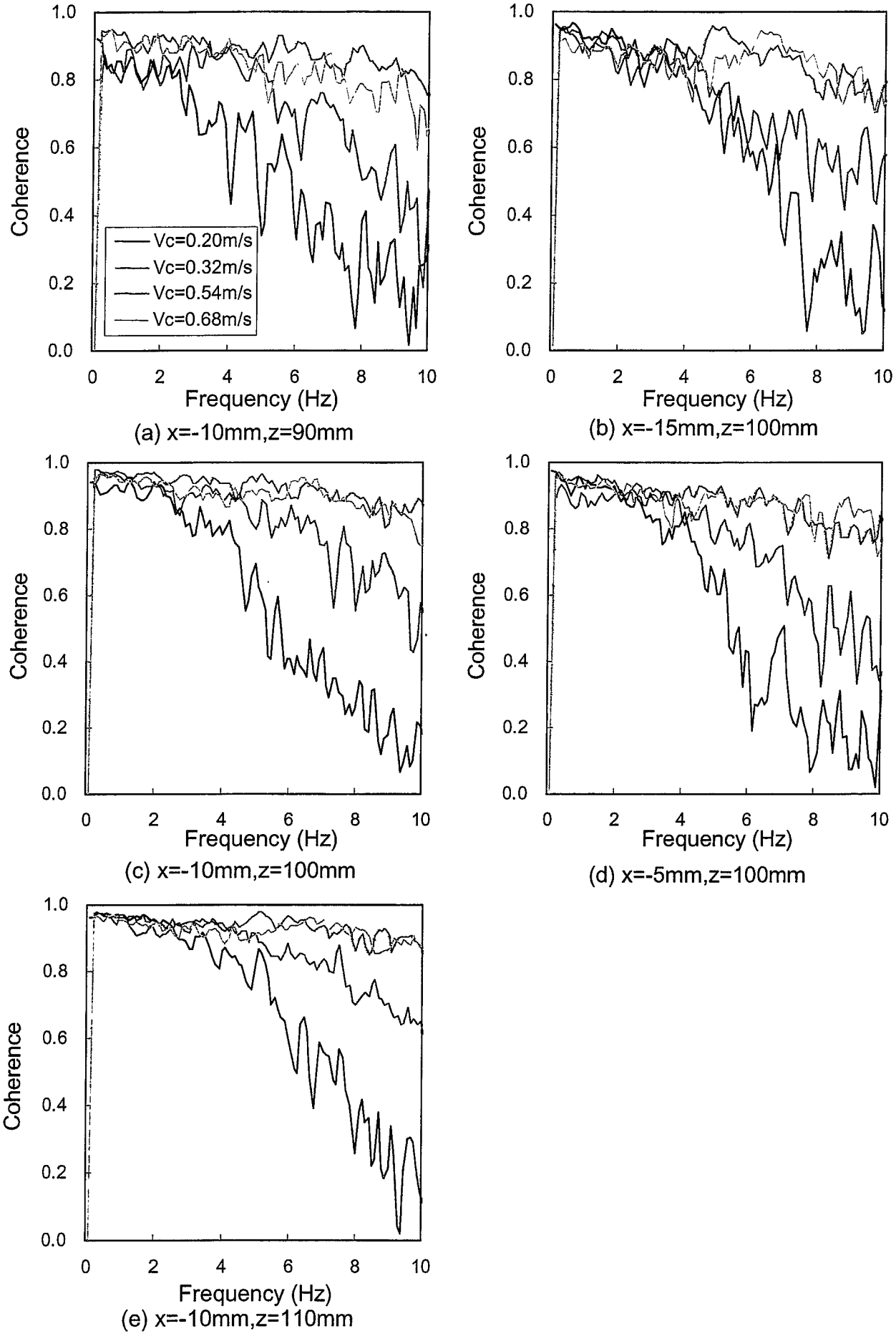


Fig.3.2.6 Dependence of Coherence of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure on Frequency under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

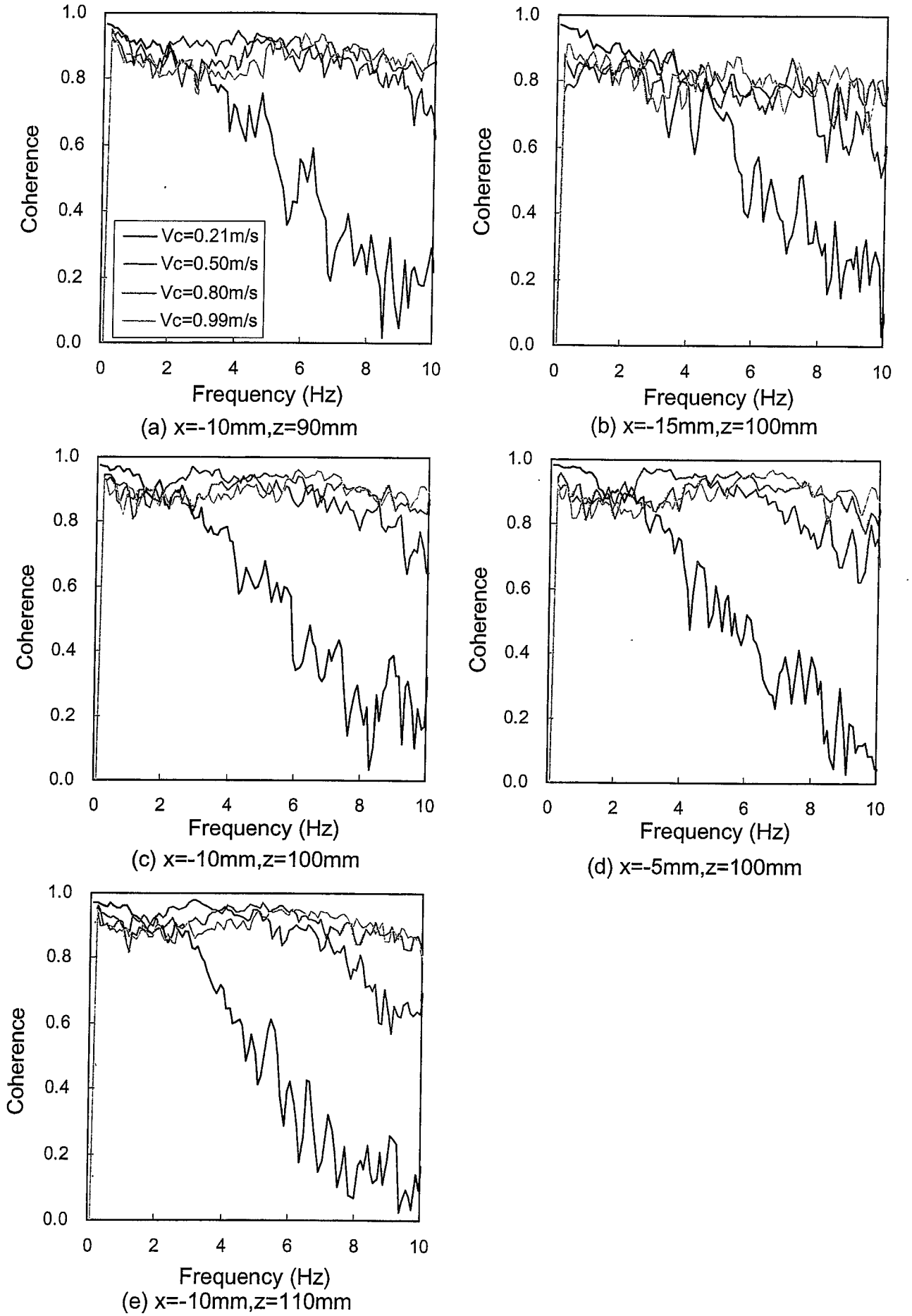


Fig.3.2.7 Dependence of Coherence of Temperature Fluctuation between Fluid and Structure on Frequency under Double-Jet Condition.

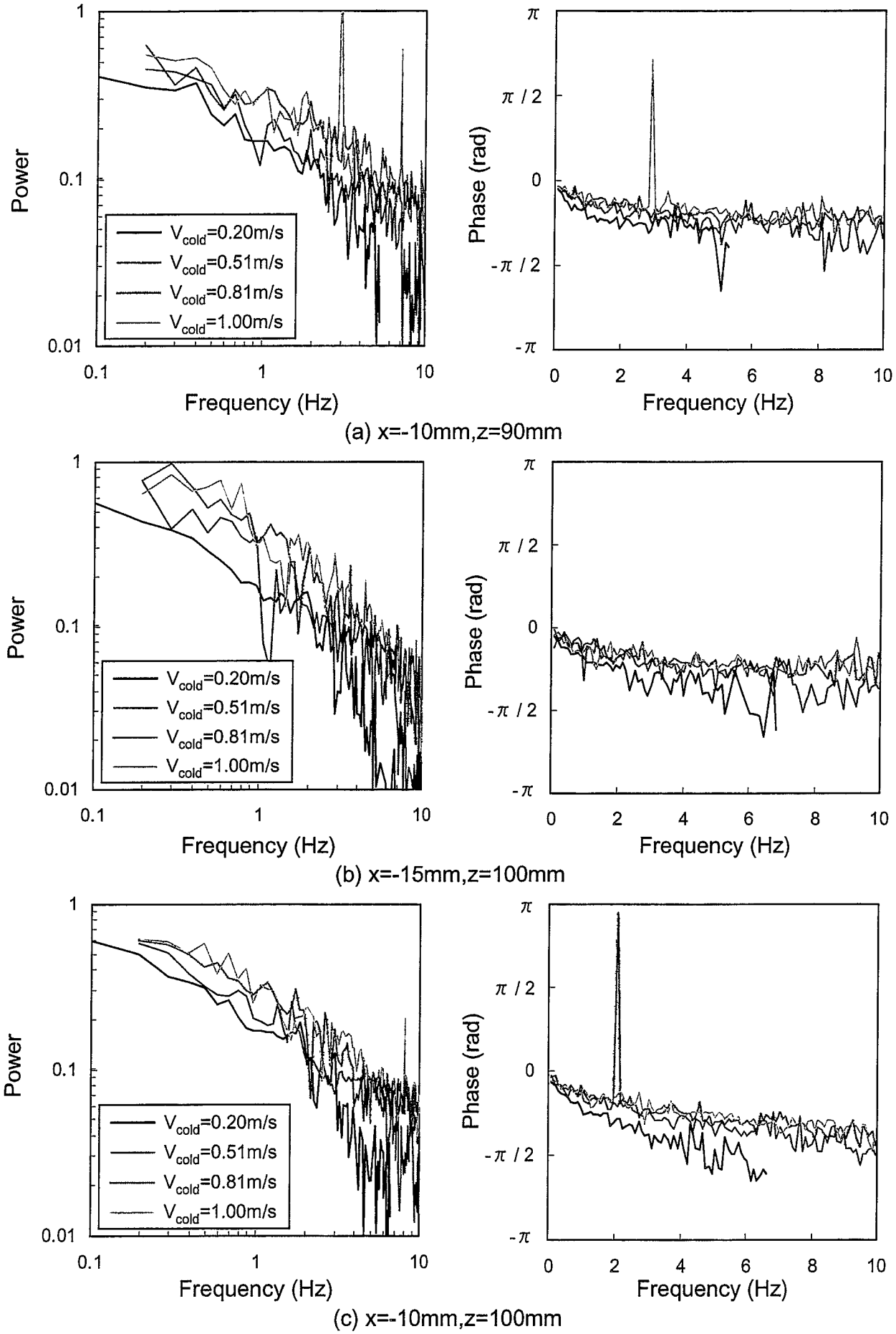


Fig.4.2.1 Transfer Function Characteristics of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Isovelocity Triple-Jet Condition.

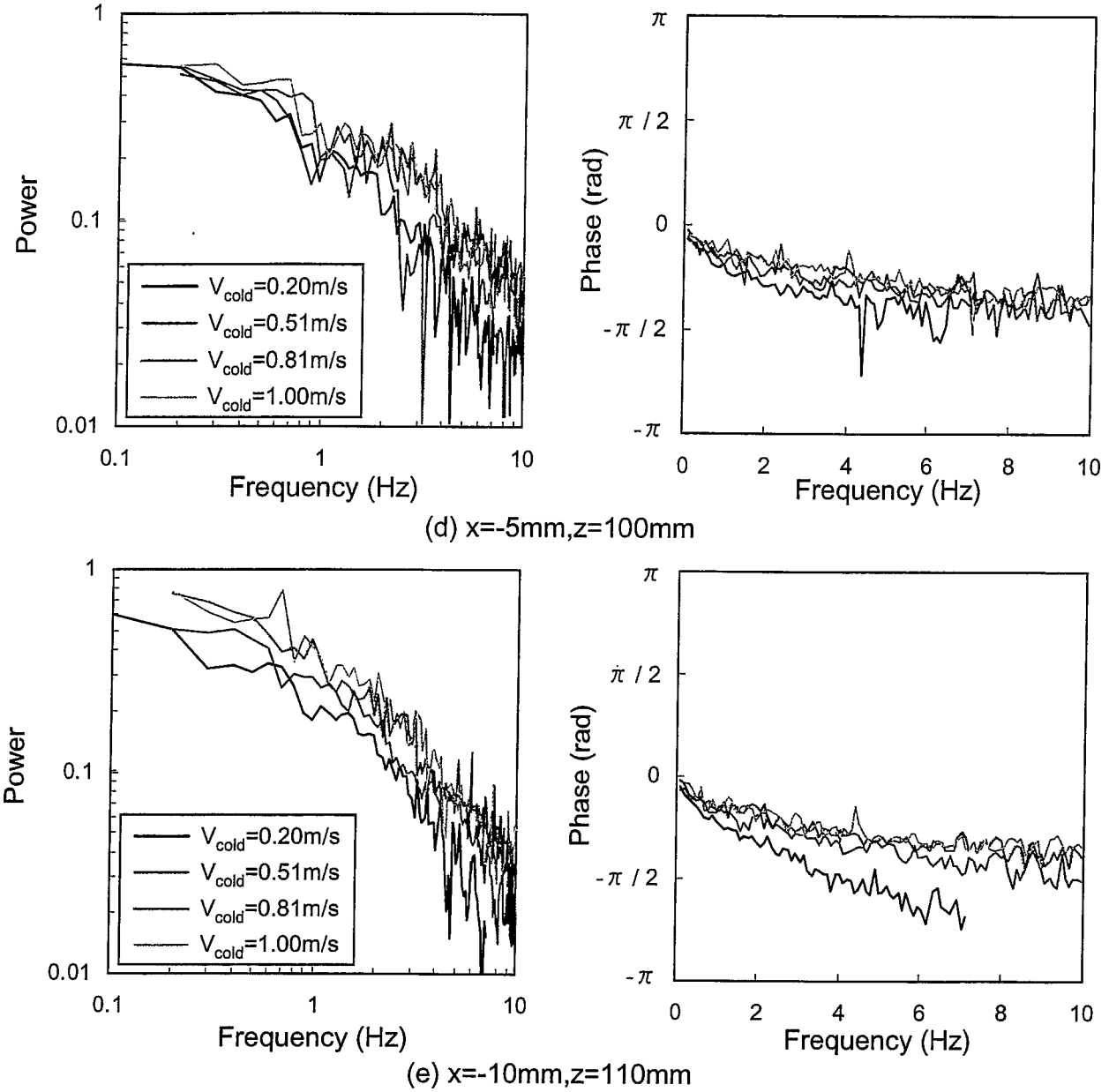
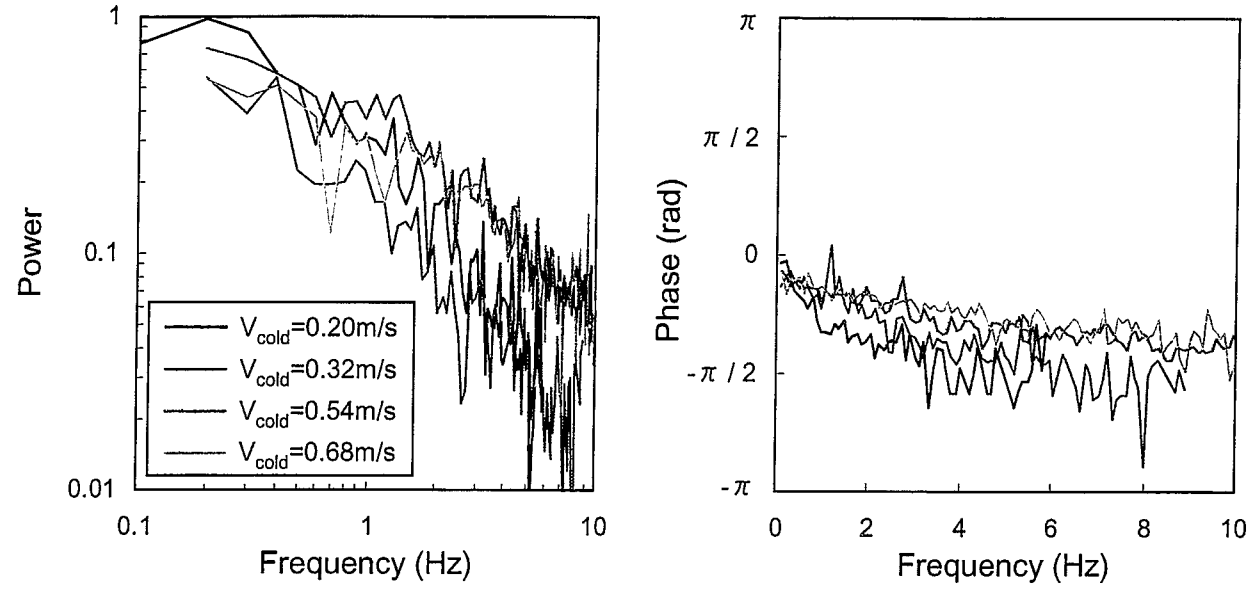
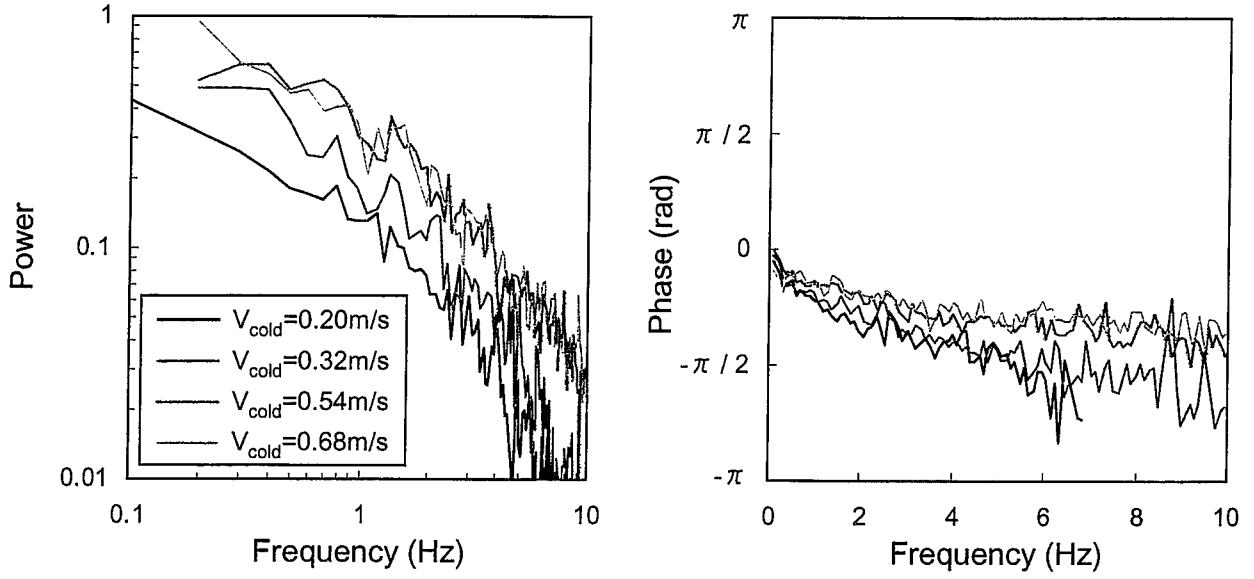


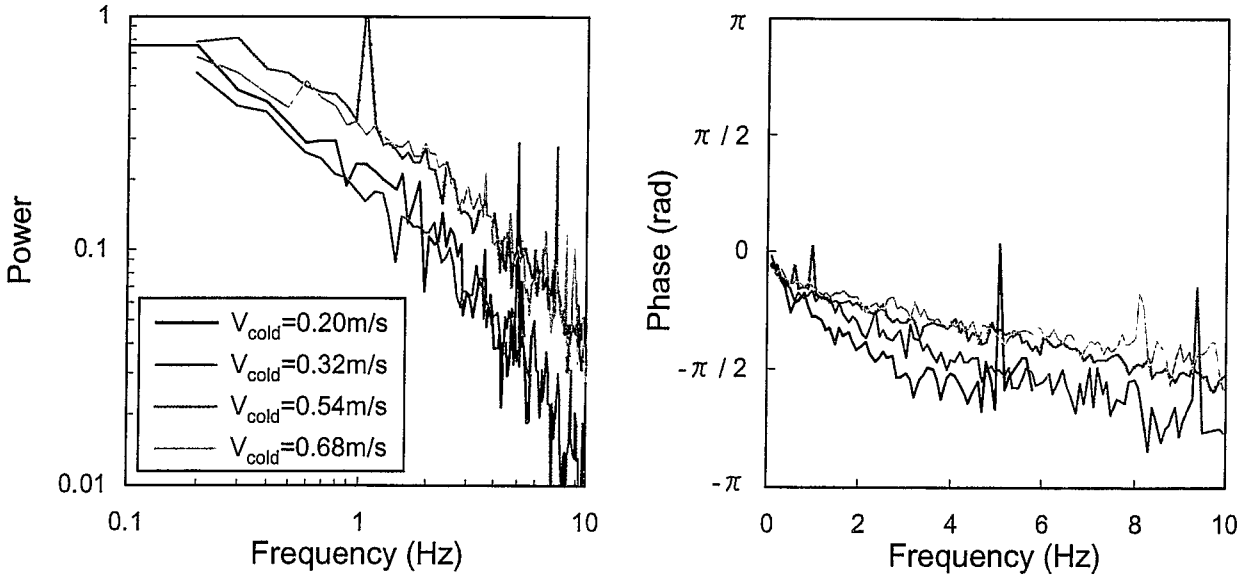
Fig.4.2.1 Transfer Function Characteristics of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Isovelocity Triple-Jet Condition.



(a) x=-10mm,z=90mm



(b) x=-15mm,z=100mm



(c) x=-10mm,z=100mm

Fig.4.2.2 Transfer Function Characteristics of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

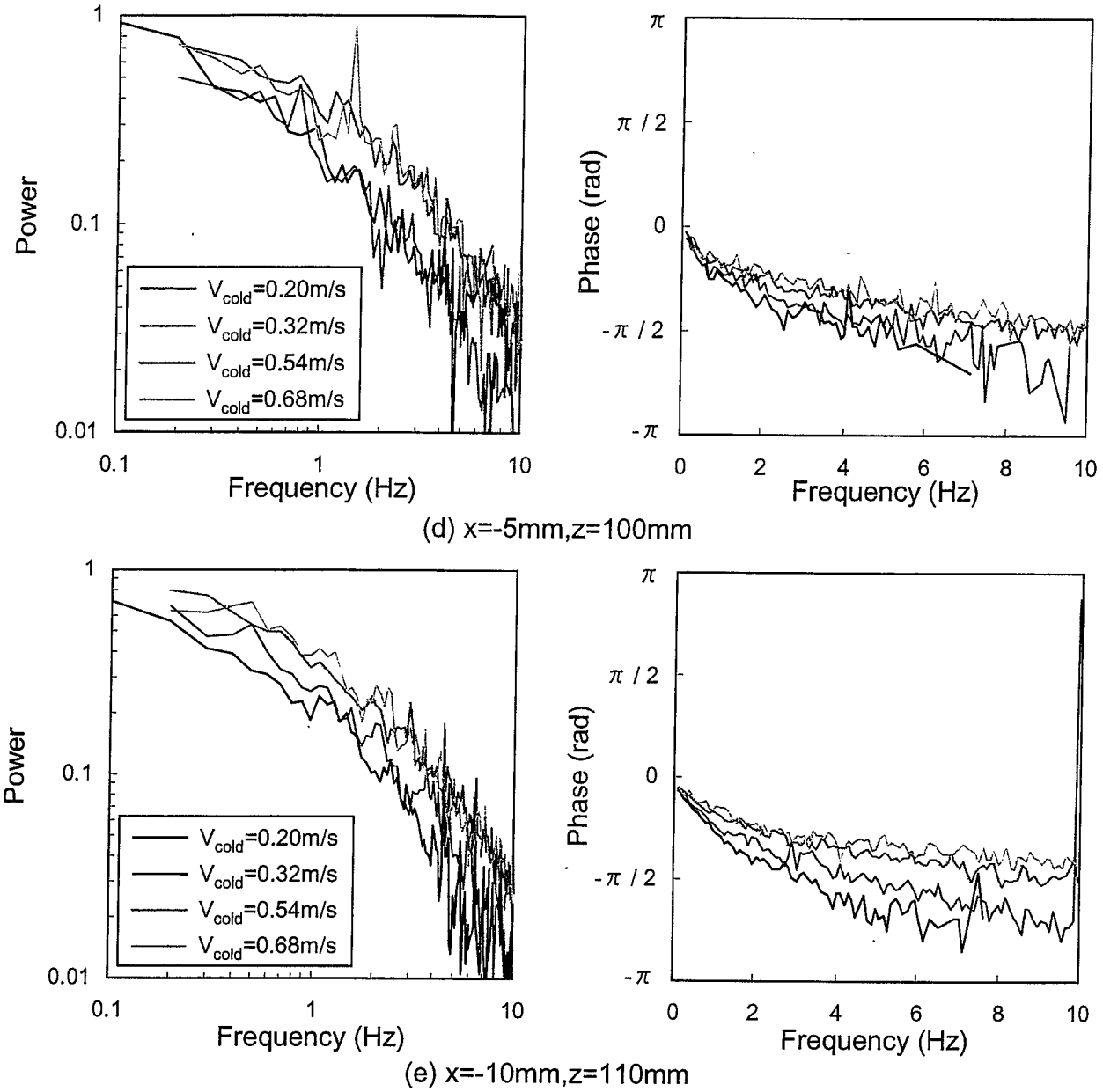
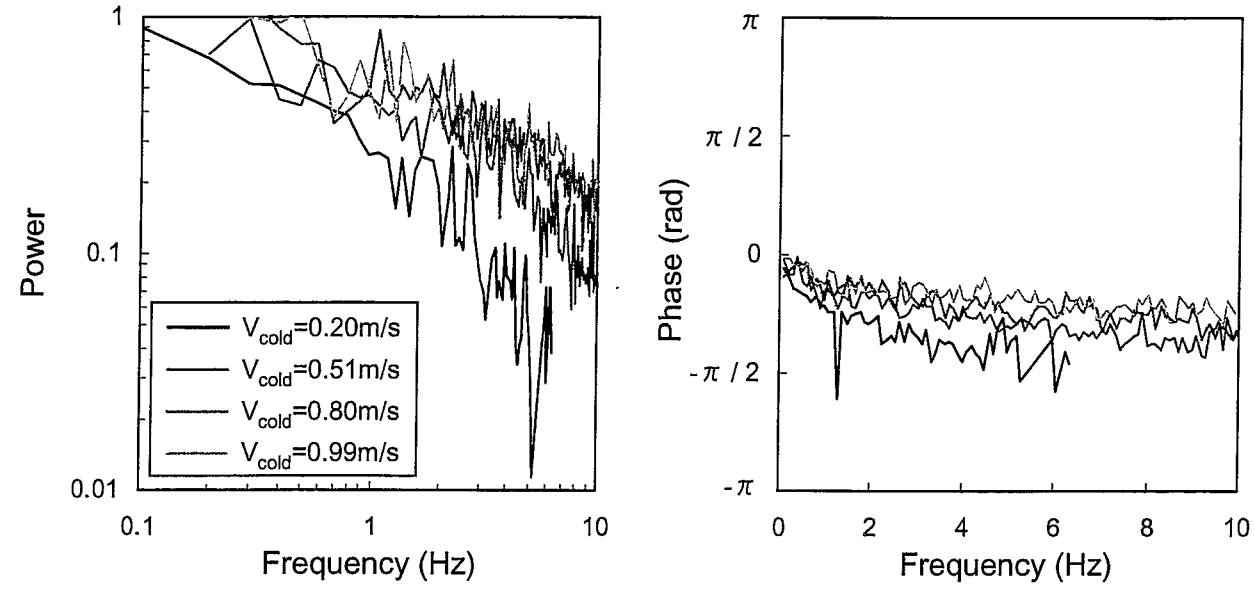
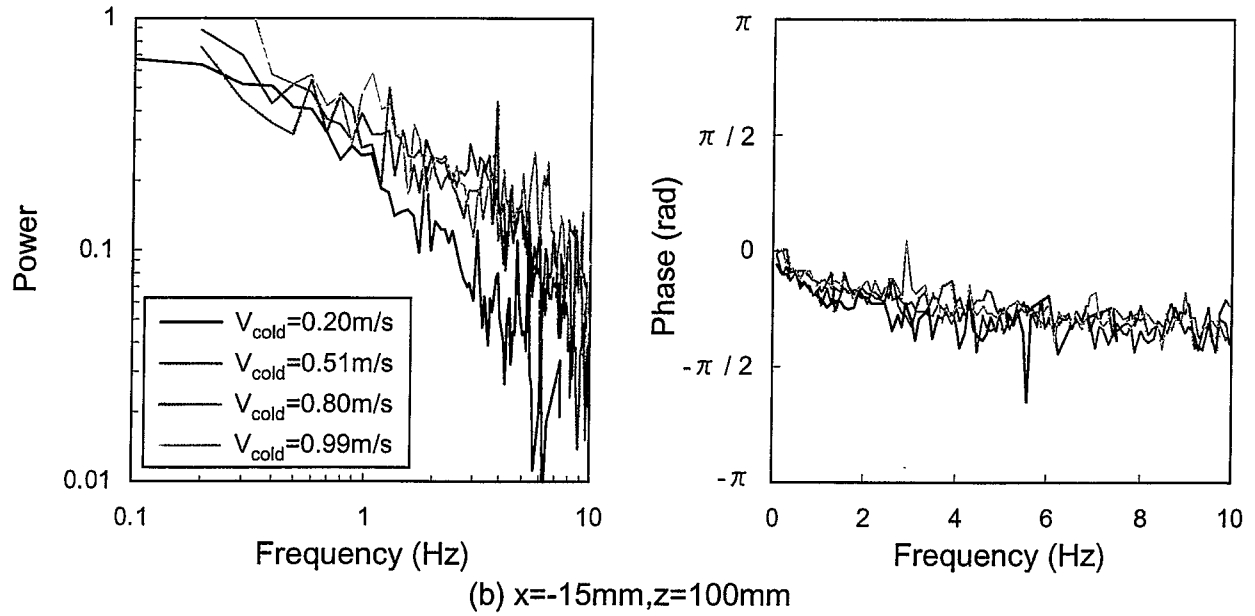


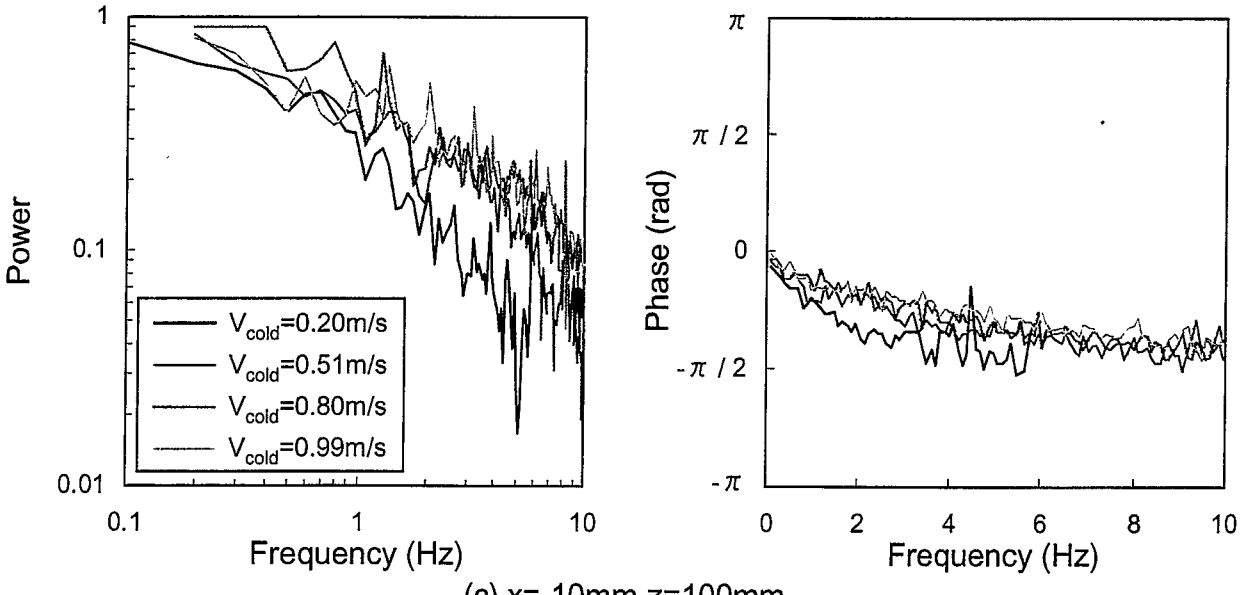
Fig.4.2.2 Transfer Function Characteristics of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.



(a) x=-10mm,z=90mm



(b) x=-15mm,z=100mm



(c) x=-10mm,z=100mm

Fig.4.2.3 Transfer Function Characteristics of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Double-Jet Condition.

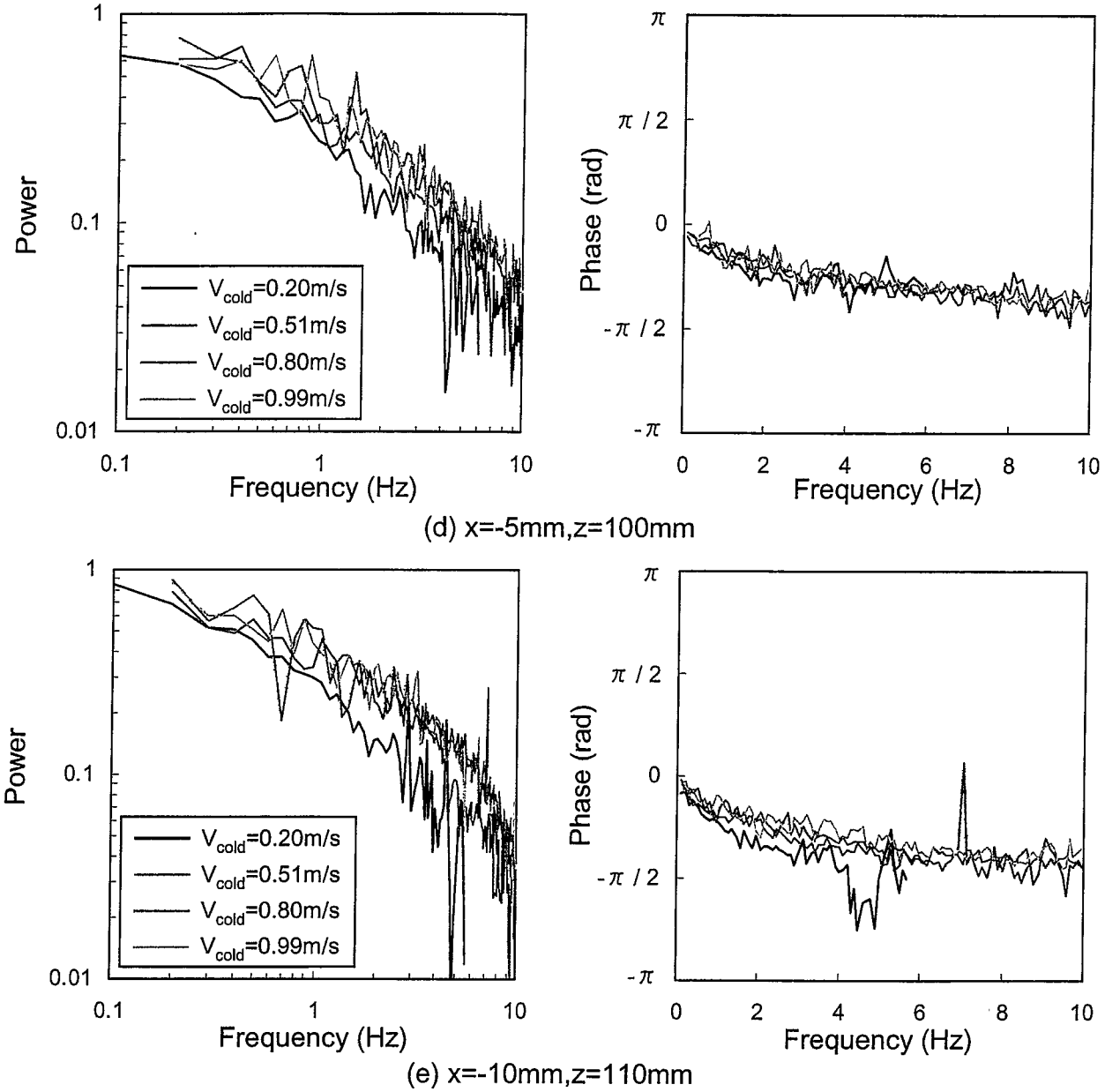
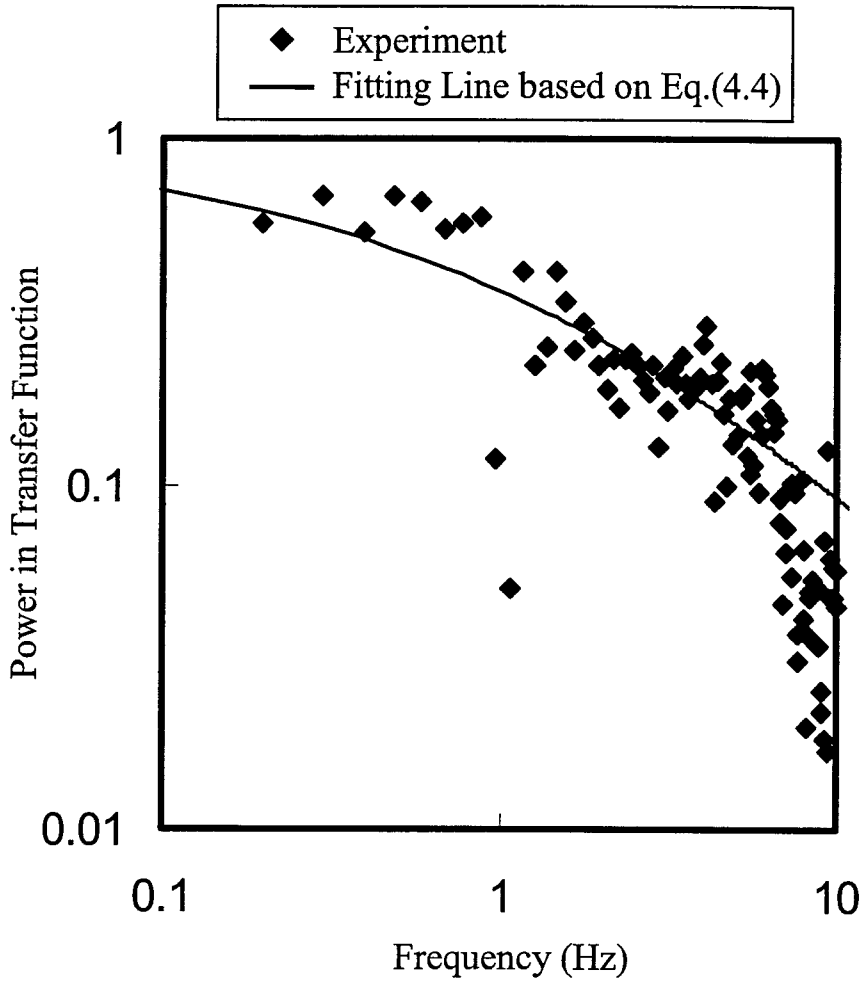
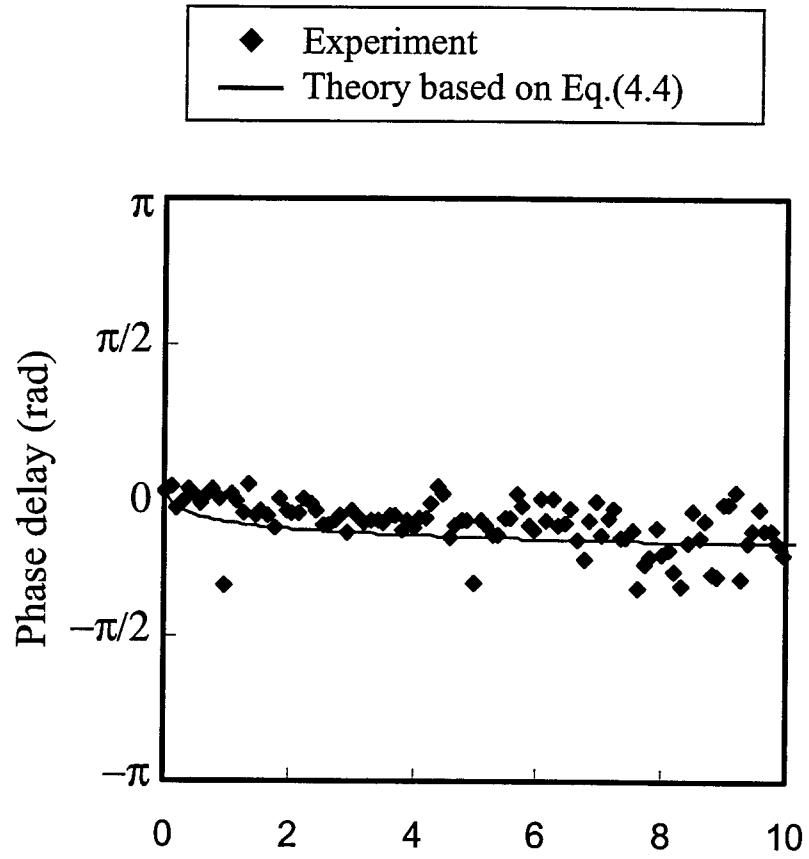


Fig.4.2.3 Transfer Function Characteristics of Temperature Fluctuation between Fluid to Structure under Double-Jet Condition.

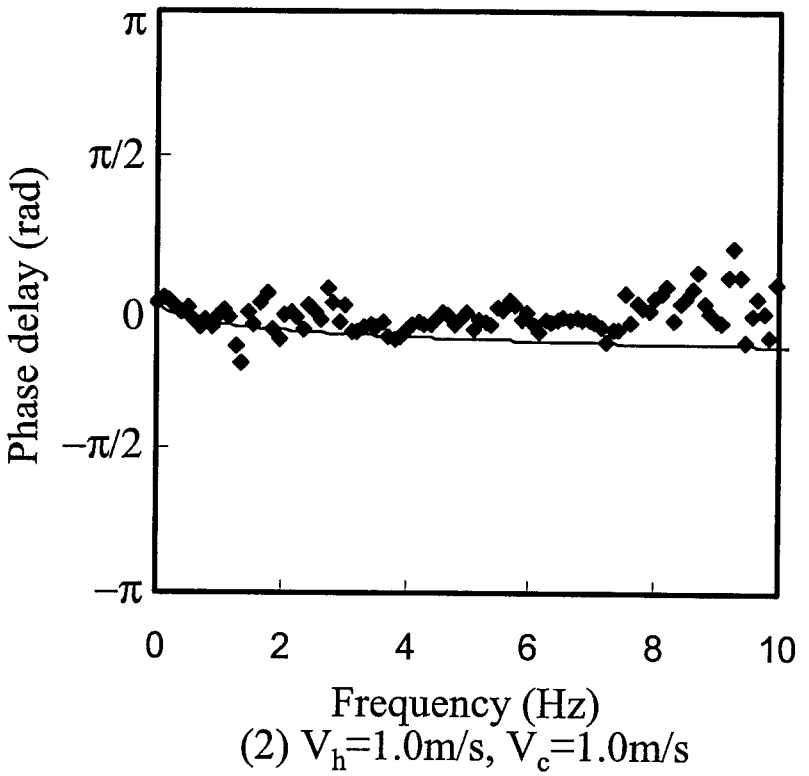


Experimental Condition: Isovelocity, V_h=0.5m/s, V_c=0.5m/s

Fig. 4.2.4 Comparison of Power in Transfer Function between Experiment and Fitting Line.



(1) V_h=0.5m/s, V_c=0.5m/s



(2) V_h=1.0m/s, V_c=1.0m/s

Fig. 4.2.5 Comparisons of Phase Delay of Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure between Theory and Experiment under Isovelocity Triple-Jet Condition.

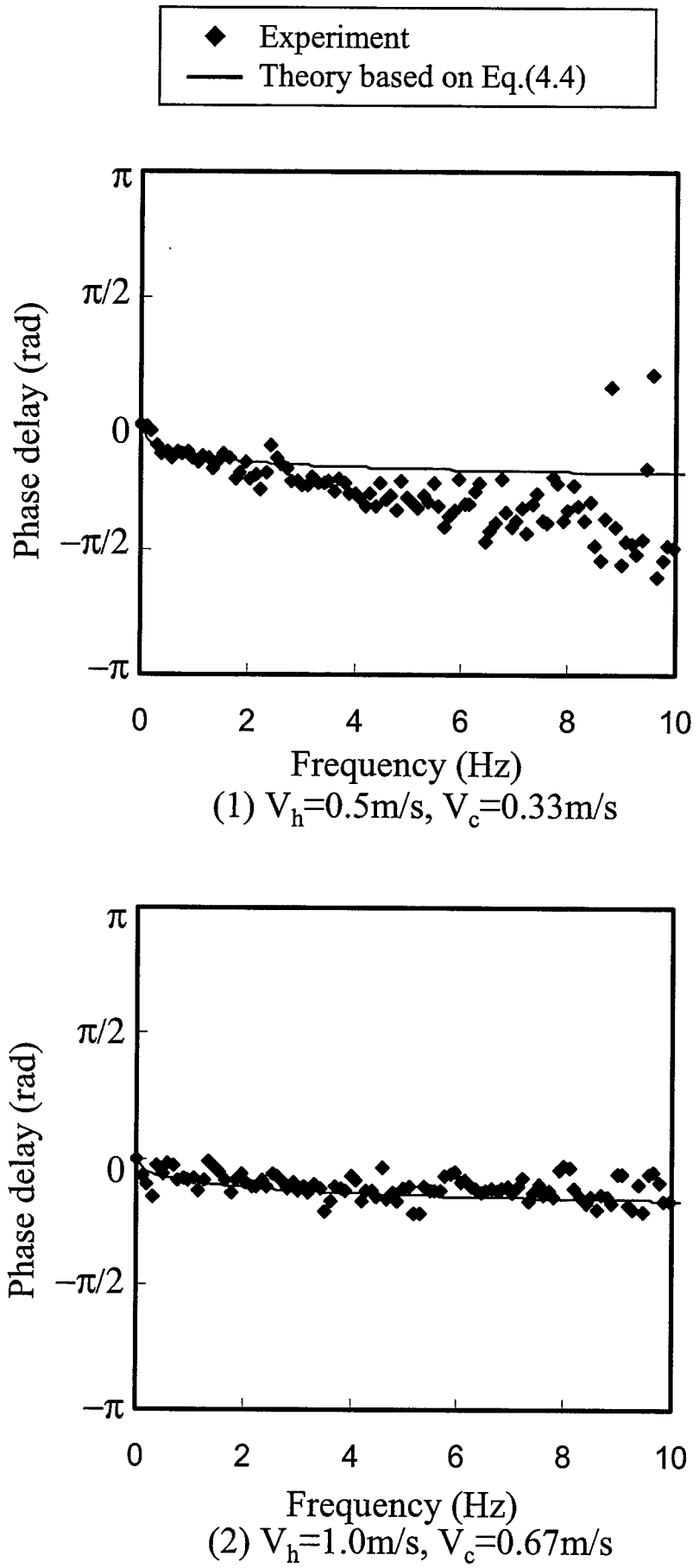
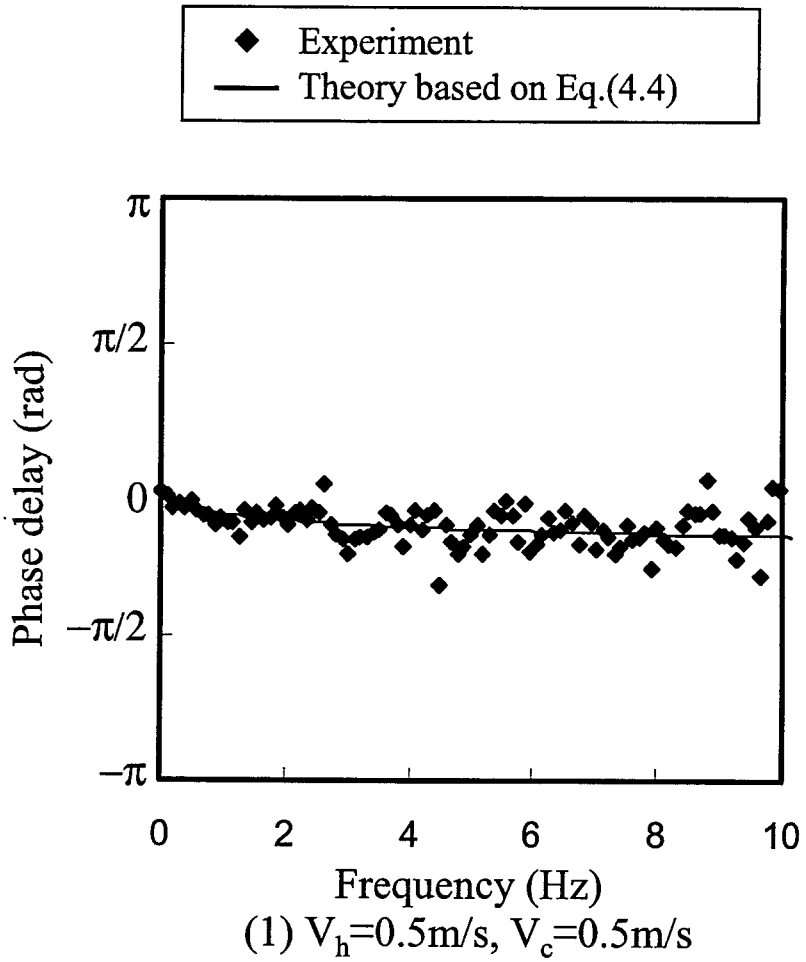
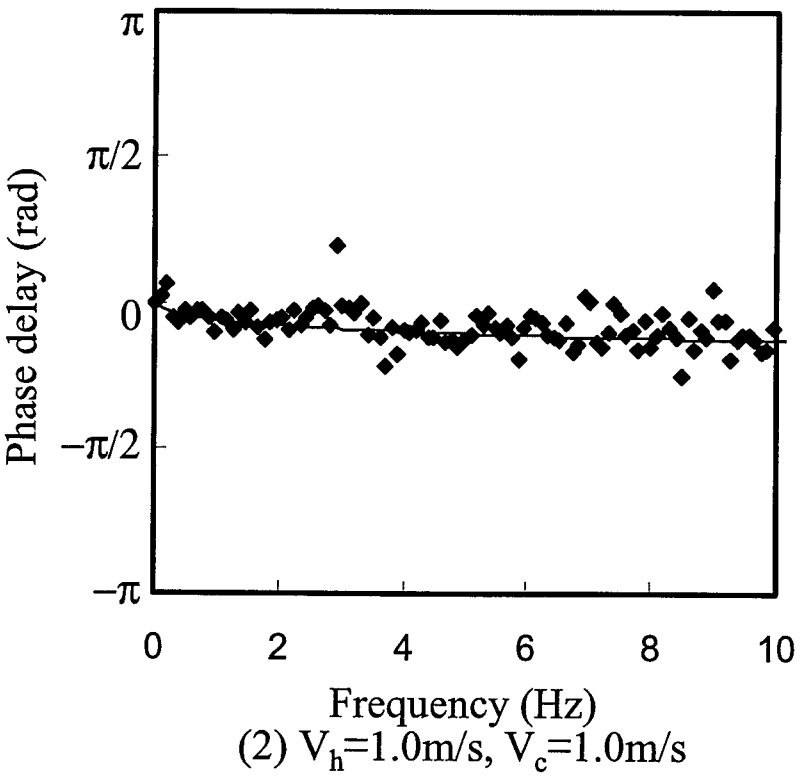


Fig. 4.2.6 Comparisons of Phase Delay of Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure between Theory and Experiment under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.



(1) V_h=0.5m/s, V_c=0.5m/s



(2) V_h=1.0m/s, V_c=1.0m/s

Fig. 4.2.7 Comparisons of Phase Delay of Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure between Theory and Experiment under Double-Jet Condition.

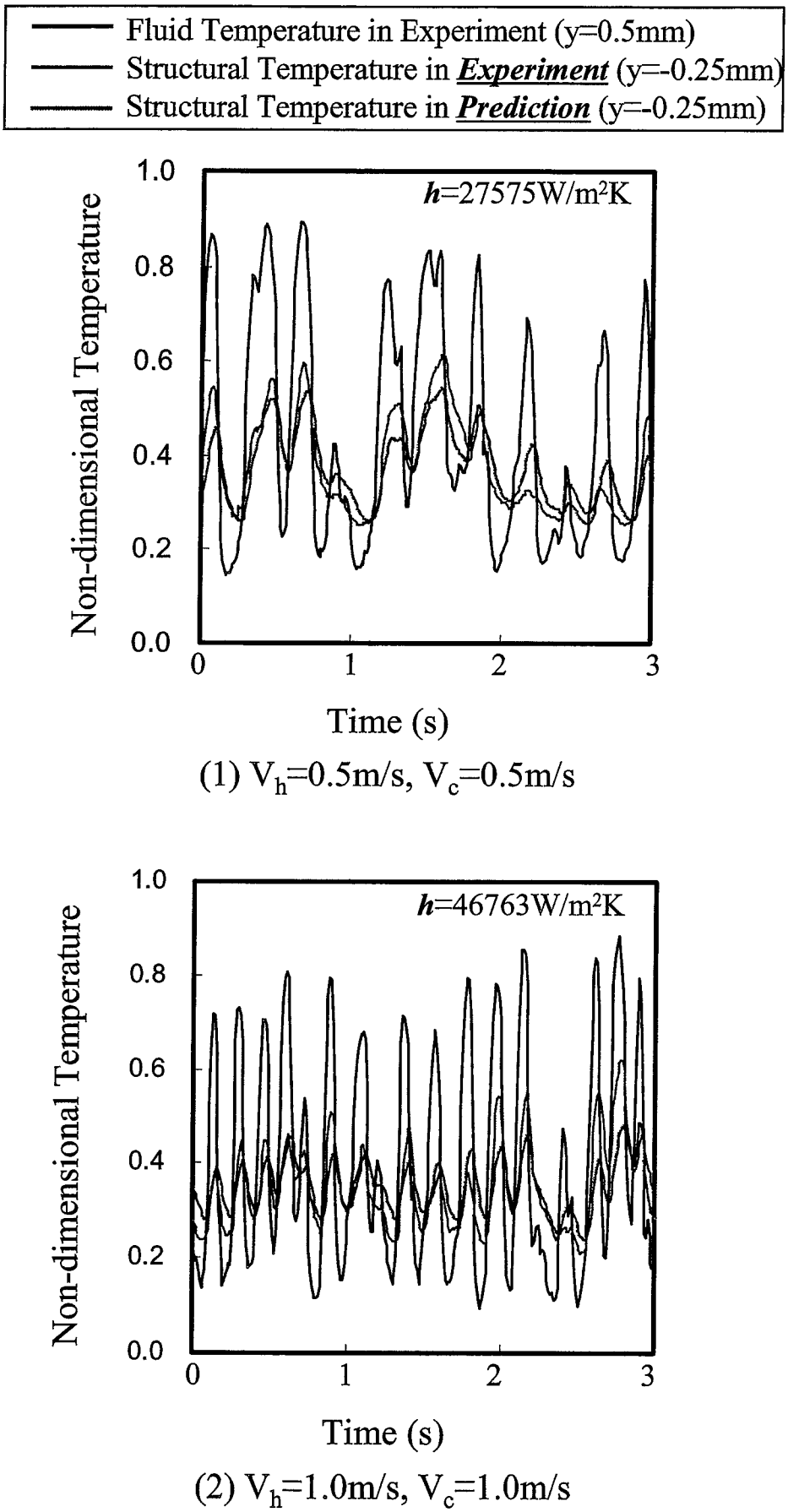


Fig. 4.2.8 Comparisons of Time-Trends of Temperature between Experiment and Prediction under Isovelocity Triple-Jet Condition.

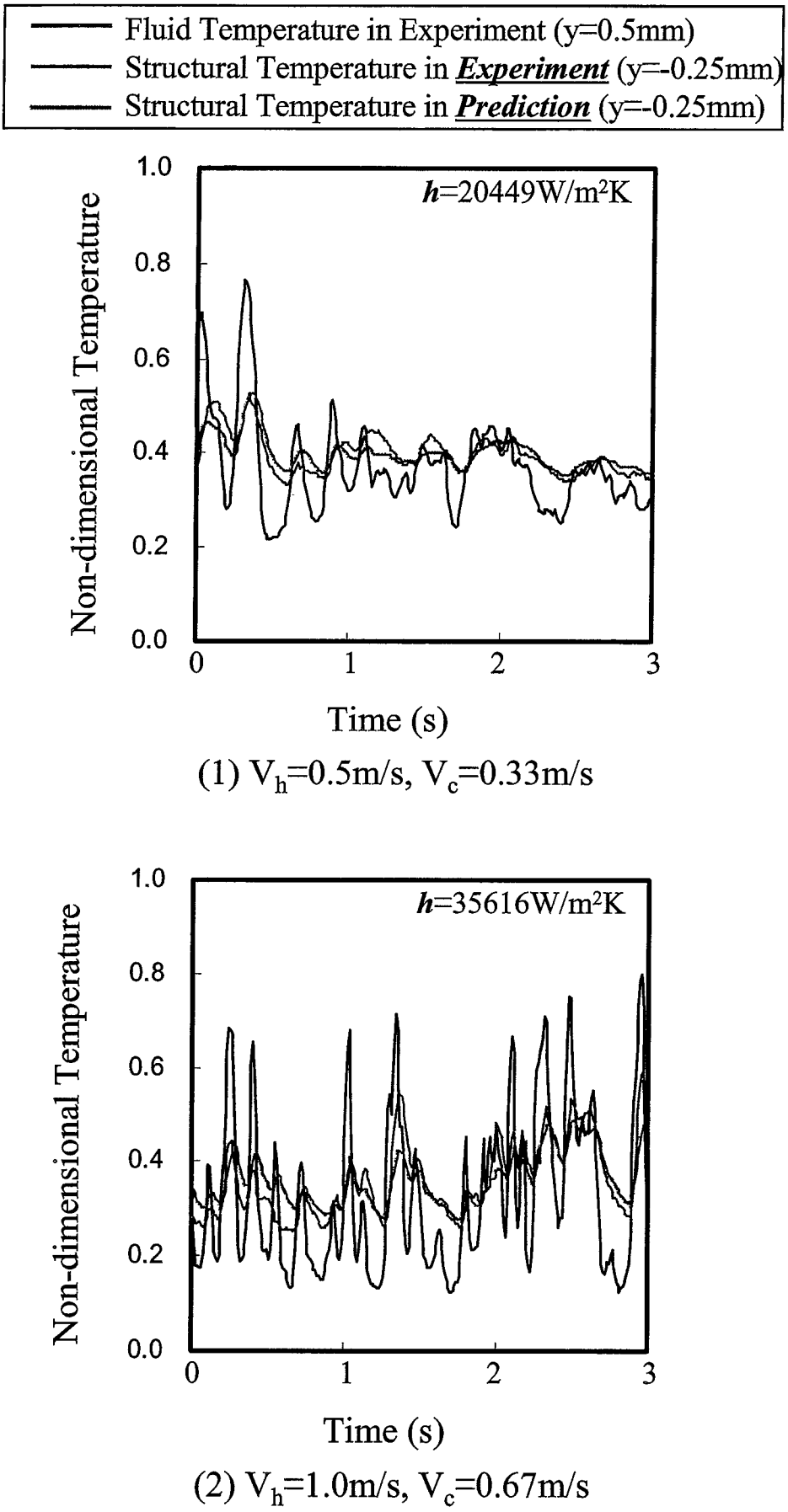


Fig. 4.2.9 Comparisons of Time-Trends of Temperature between Experiment and Prediction under Non-Isovelocity Triple-Jet Condition.

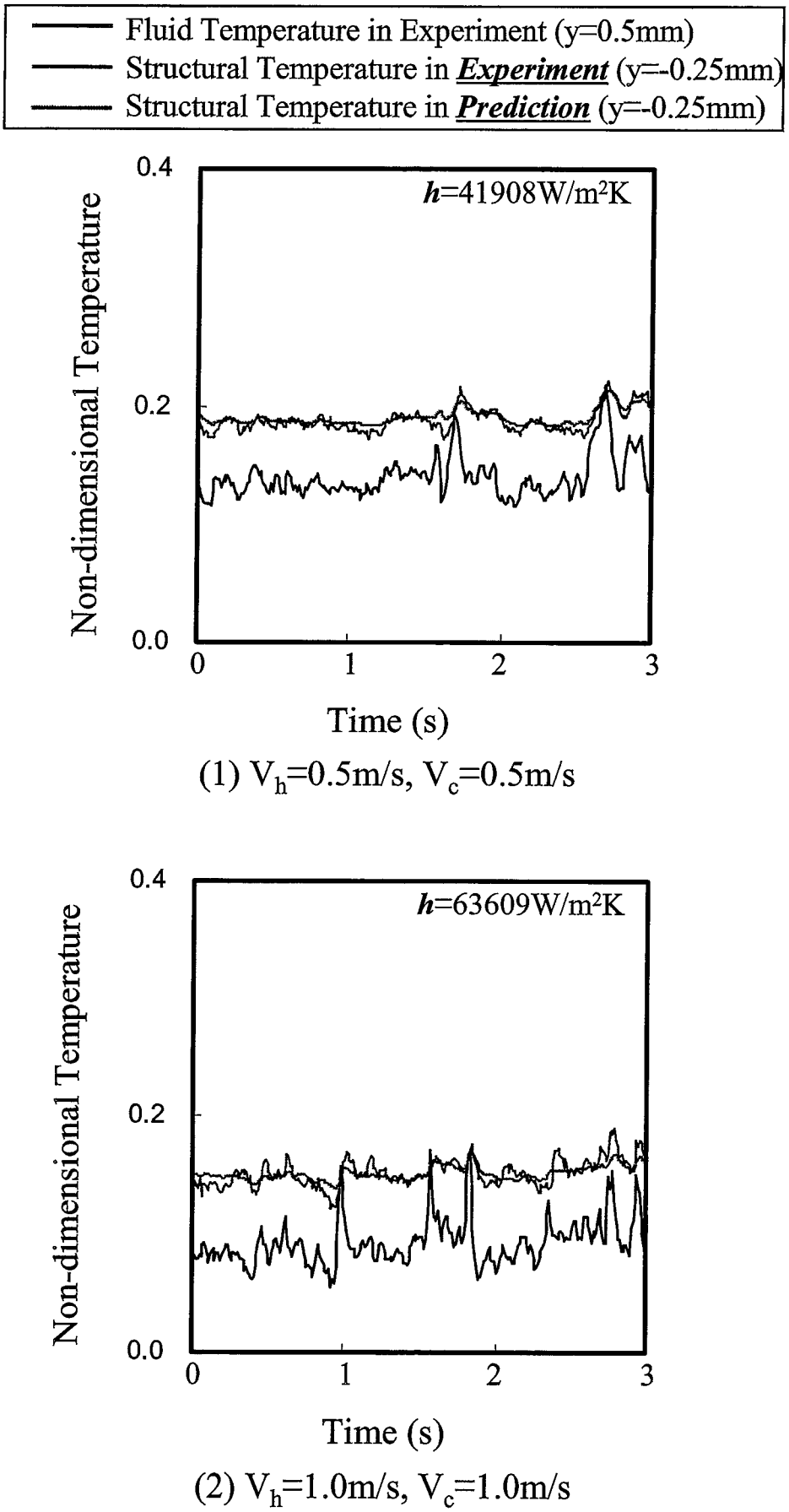


Fig. 4.2.10 Comparisons of Time-Trends of Temperature between Experiment and Prediction under Double-Jet Condition.

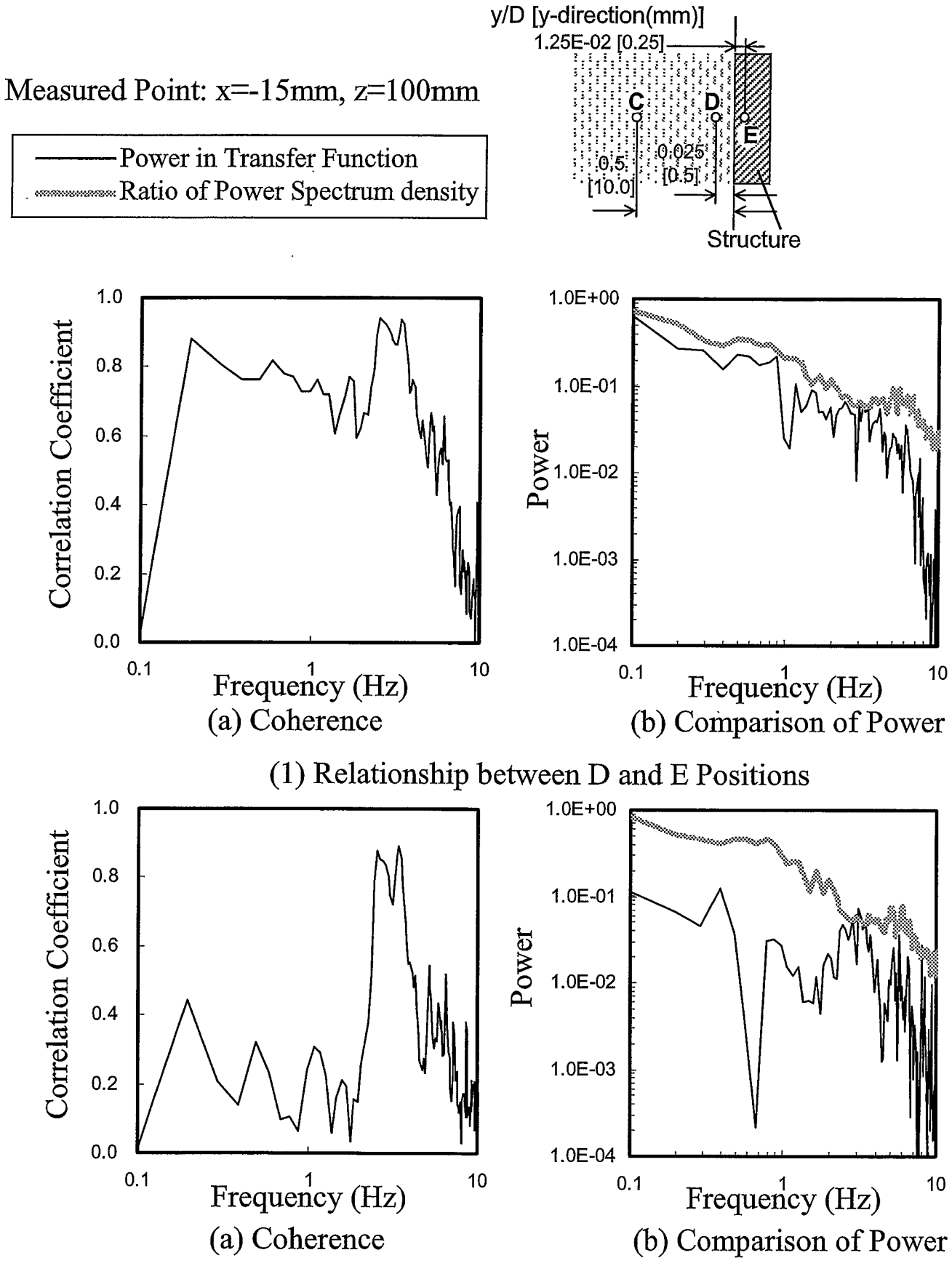


Fig. 4.2.11 Comparisons between Power in Transfer Function and Ratio of Power Spectrum Density.
(V_h=0.5m/s, V_c=0.5m/s)

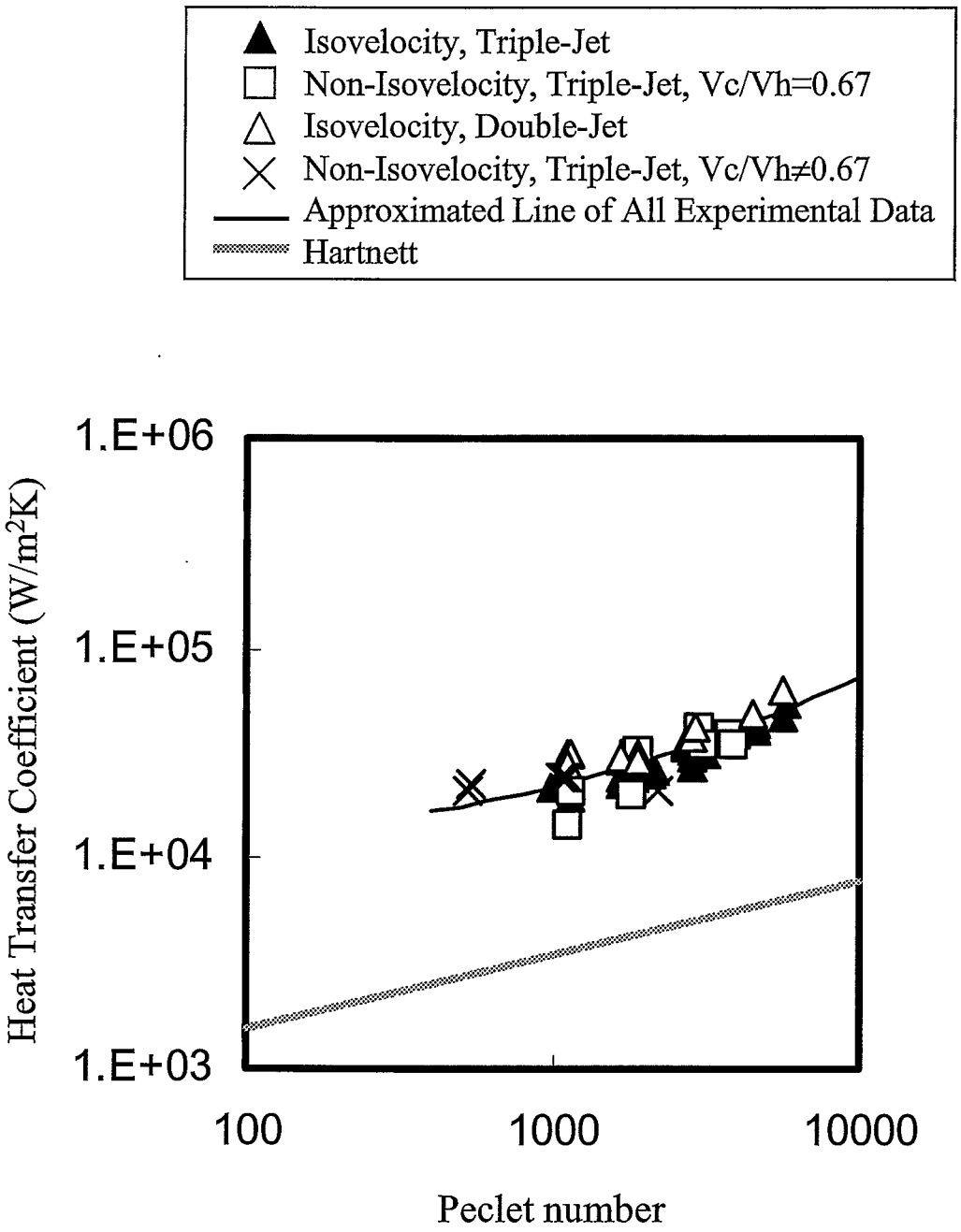
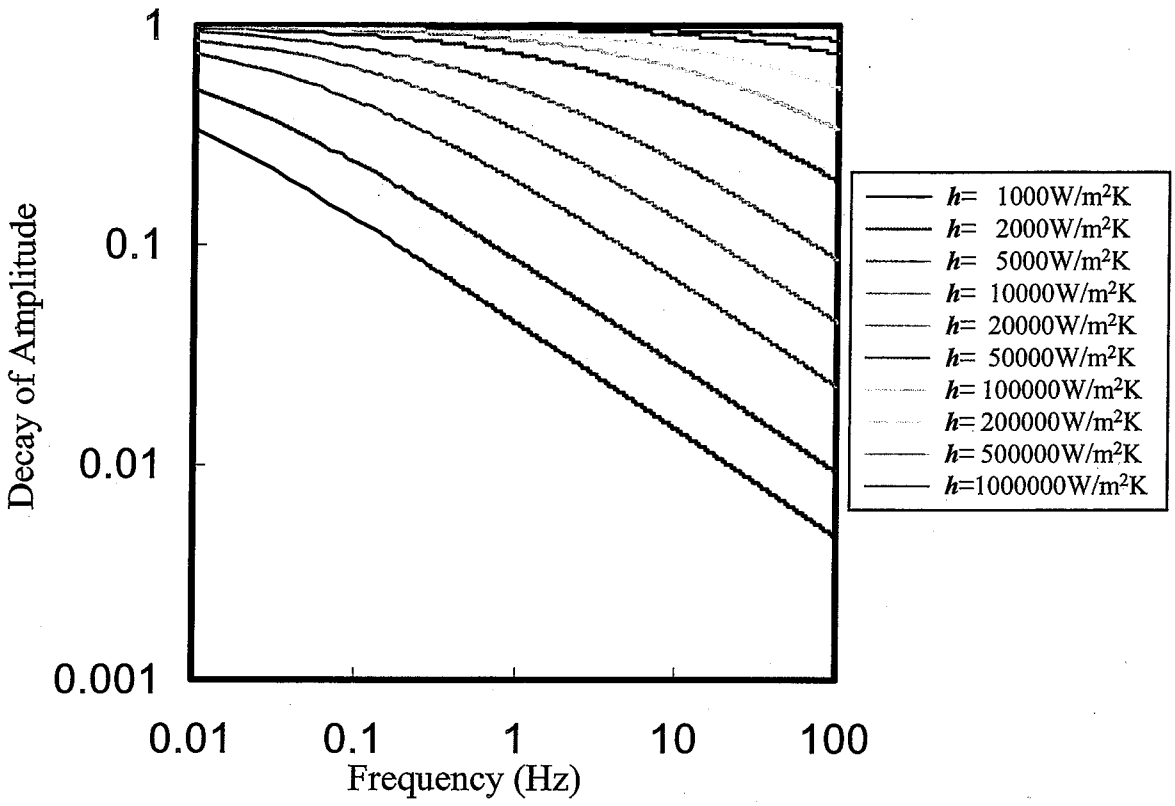
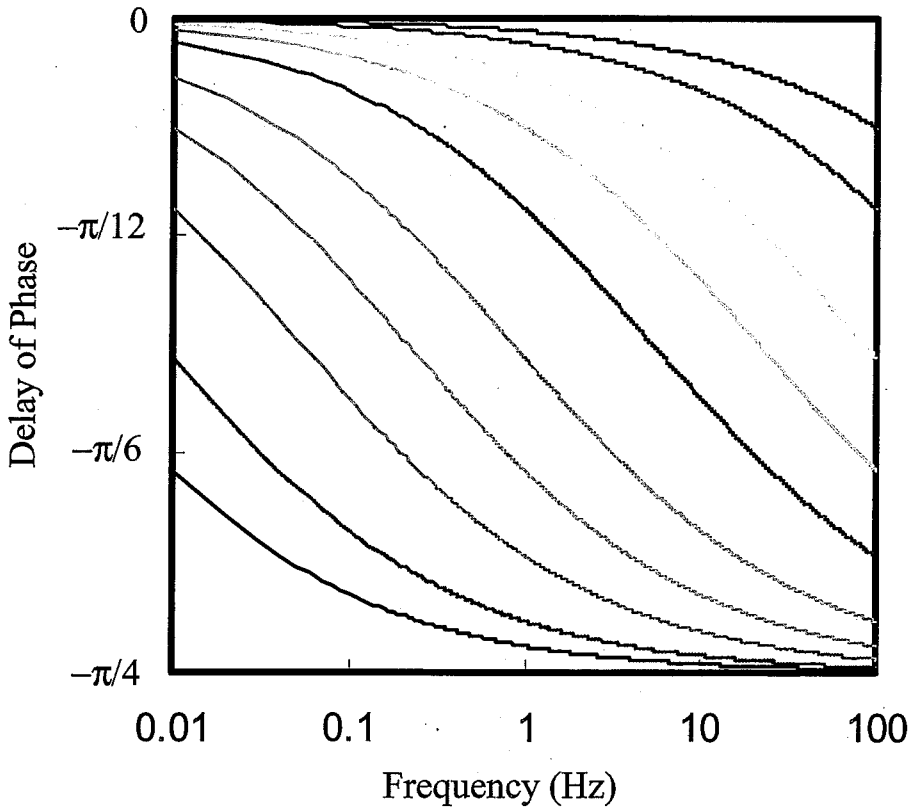


Fig. 4.3.1 Relationship between Heat Transfer Coefficient and Peclet number in Wall Jet Geometry.



(1) Decay of Amplitude in Temperature Fluctuation



(2) Delay of Phase in Temperature Fluctuation

Fig.4.3.2 Effect of Heat Transfer Coefficient on Transfer of Temperature Fluctuation from Fluid to Structure.