

## 冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発(X)

境界要素法コードBEMSETによる構造物熱的応答基本特性の検討

1996年5月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

公開資料

PNC TN9410 96-136

1996年5月

## 冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発(X)

～境界要素法コード BEMSET による構造物熱的応答基本特性の検討～

### 要旨

村松 壽晴\*

高速炉の炉心出口近傍では、炉心構成要素毎の熱流力特性（集合体発熱量、集合体流量）の違いから、炉心燃料集合体間あるいは炉心燃料集合体・制御棒集合体などで冷却材に温度差が生じ、それらが混合する過程で不規則な温度ゆらぎ挙動が発生する。この温度ゆらぎを伴った冷却材が炉心上部機構各部（整流筒、制御棒上部案内管、炉心出口温度計装ウェルなど）の表面近傍を通過すると、冷却材中の不規則な温度ゆらぎが構造材中に伝播し、その材料は高サイクル熱疲労を受ける（サーマルストライピング）。特に、冷却材として液体金属ナトリウムを使用する高速炉では、大きな熱伝導率を持つナトリウムの性質から、この熱疲労に対する配慮が必要である。

本研究では、構造物熱応答挙動を容易に解析評価できるようにするために開発されている境界要素法コード BEMSET を用い、各種の温度過渡条件（正弦波温度過渡、一様乱数温度過渡および正弦波上に一様乱数を重畳させた温度過渡）下における SUS 316 製円筒構造物の熱的応答基本特性を検討した。この検討の結果から、温度過渡挙動が明瞭な周期性を持たない実際の高速炉プラントを評価の対象とする場合には、炉内構造物の熱的応答特性は流体中の不規則温度ゆらぎ挙動に強く依存することが考えられるため、これを発生させる乱流現象の評価が極めて重要であることを明らかとした。

PNC TN9410 96-136

May, 1996

## Development of Analytical Model for Evaluating Temperature Fluctuation in Coolant (X)

~Investigation of Thermally Response Characteristics of In-Vessel Structures Using the BEMSET Code~

Toshiharu MURAMATSU \*

### Abstract

Thermal striping phenomena characterized by stationary random temperature fluctuations are observed in the region immediately above the core exit of liquid-metal-cooled fast breeder reactors (LMFBRs) due to the interactions of cold sodium flowing out of a control rod (C/R) assembly and hot sodium flowing out of adjacent fuel assemblies (F/As). Therefore the in-vessel components located in the core outlet region, such as upper core structure (UCS), flow guide tube, C/R upper guide tube, etc., must be protected against the stationary random thermal process which might induce high-cycle fatigue.

In this study, thermally response characteristics of the flow guide tube made by SUS 316 stainless steels were investigated using a boundary element method code BEMSET under the temperature transient conditions of Sine wave, quasi-random wave, and Sine wave with quasi-random components. From the numerical investigations, it was concluded that the detailed handling on turbulence phenomena in coolant is very important in the evaluation of actual LMFBRs, because of the thermally response of the structures are influenced significantly on random fluctuating components.

---

\* : Thermal Hydraulic Research Section, Advanced Technology Division, OEC, PNC

## 冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発（X）

～境界要素法コードB E M S E Tによる構造物熱的応答基本特性の検討～

### 目 次

第1章 緒 言 .....	1
第2章 S U S 3 1 6 円筒構造物の熱的応答解析 .....	3
2. 1 解析体系および条件 .....	3
2. 2 解析結果 .....	4
2. 2. 1 正弦波温度印加条件に対する応答 .....	4
2. 2. 2 亂数波温度印加条件に対する応答 .....	4
2. 2. 3 正弦波上に乱数が重畳する温度印加条件に対する応答 .....	4
第3章 検討および考察 .....	6
3. 1 頻度分布特性 .....	6
3. 1. 1 構造物内温度 .....	6
3. 1. 2 構造物内垂直方向熱応力 .....	7
3. 2 振動振幅と振動周波数間での二次元確率分布特性 .....	8
第4章 結 言 .....	9
参考文献 .....	10
謝 辞 .....	11

## List of Figures

- Fig. 2. 1 Boundary Element Configuration in Analysis of Plane Strain Problem for the Monju Flow Guide Tube with the BEMSET Code
- Fig. 2. 2 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 3 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 4 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 5 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 6 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 7 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 8 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 9 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 10 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 11 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 12 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 13 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 14 Calculated Responses of Temperature and Thermal Stress Amplitudes in the Flow Guide Tube under the Various Input Conditions of Sine Wave Frequency to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 15 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.01 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 16 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 17 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.10 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 18 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.20 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 19 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.50 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 20 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 1.00 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 21 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.01 sec to the Tube Outer Wall

- Fig. 2. 22 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 23 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.10 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 24 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.20 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 25 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.50 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 26 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 1.00 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 27 Calculated Responses of Temperature and Thermal Stress Amplitudes in the Flow Guide Tube under the Various Input Conditions of Time Interval for Random Components to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 28 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 29 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 30 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 31 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 32 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 33 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 34 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 35 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 36 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 37 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 38 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall
- Fig. 2. 39 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 2. 40 Calculated Responses of Temperature and Thermal Stress Amplitudes in the Flow Guide Tube under the Various Input Conditions for Sine Wave Frequency with Random Components to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 1 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 2 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 3 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 4 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 5 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 6 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 7 Comparison of Cumulative Histograms for Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequencies with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 8 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 9 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 10 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 11 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 12 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 13 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 14 Comparison of Cumulative Histograms for Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequencies with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 15 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 16 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 17 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 18 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 19 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 20 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 21 Comparison of Cumulative Histograms for Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequencies with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 22 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 23 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 24 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 25 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 26 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 27 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 28 Comparison of Cumulative Histograms for Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequencies with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 29 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3. 30 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3.31 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3.32 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3.33 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3.34 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3.35 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3.36 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3.37 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3.38 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

Fig. 3.39 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

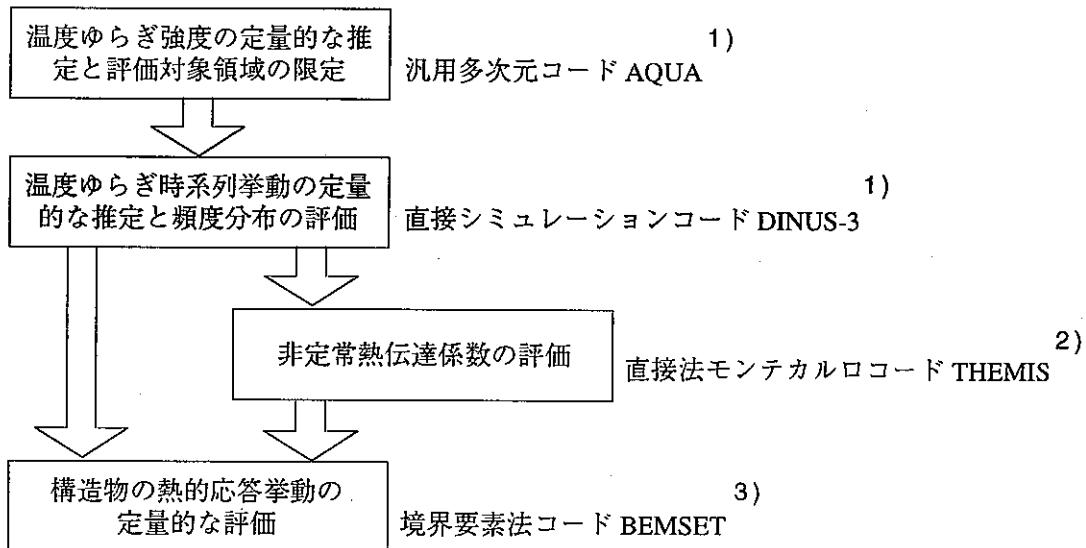
Fig. 3.40 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube

## 第1章 緒 言

高速炉の炉心出口近傍では、炉心構成要素毎の熱流力特性（集合体発熱量、集合体流量）の違いから、炉心燃料集合体間あるいは炉心燃料集合体 - 制御棒集合体間などで冷却材に温度差が生じ、それらが混合する過程で不規則な温度ゆらぎ挙動が発生する。この温度ゆらぎを伴った冷却材が炉心上部機構各部（整流筒、制御棒上部案内管、炉心出口温度計装ウェルなど）の表面近傍を通過すると、冷却材中の不規則な温度ゆらぎが構造材中に伝播し、その材料は高サイクル熱疲労を受ける（サーマルストライピング）。特に、冷却材として液体金属ナトリウムを使用する高速炉では、大きな熱伝導率を持つナトリウムの性質から、この熱疲労に対する配慮が必要である。

従来の構造健全性評価では、サーマルストライピングによる熱疲労の影響を実寸大ナトリウムモックアップ実験を通じて確認し、原子炉構造設計に反映させる手段が取られていた。しかしながら、このモックアップ実験にかかる費用と実験時間の節約、さらには設計の見直しを効率良く行うことには、解析的評価手法の確立が不可欠である。これにより、実証炉以降の原子炉構造設計では大型モックアップ実験に依ることなく解析的アプローチによる設計（Design by Analysis）がなされるべきである。この背景には、これまで原子炉構造設計の段階で、とかく受身になりがちであったサーマルストライピングに対する対策を、解析的評価手法を積極的に活用して合理的な原子炉設計に反映することにより、経済性の向上を図るという目的がある。

筆者らはサーマルストライピングに対する解析的評価手法として、現存する計算機能力との調和を考慮した以下に示す評価手順と解析コードをこれまで開発し、その有効性を報告してきた。



上記解析的評価手法の特徴は、工学問題に一般的に用いられてきている汎用多次元コードの役割と直接シミュレーションコードの役割を明確に分離し、直接シミュレーションコードが計算機に要求する性能を可能な限り低減させていることにある。すなわち、汎用多次元コード AQUA に温度ゆらぎ強度の定量的な推定と、これに基づく評価対象領域の限定の役割を持たせることによって、サーマルストライピング評価上の解析対象領域を狭め、これを受けた直接シミュレーションコード DINUS-3 が境界層内での温度ゆらぎ減衰効

果を考慮した温度ゆらぎ時系列挙動の推定と、温度ゆらぎ頻度分布特性の評価を行うものである。これによって、評価すべき原子炉構造物表面での温度ゆらぎ挙動の時系列挙動を、現存する計算機能力の範囲内で得ることができ、構造物の定量的な熱的応答を評価することが可能となる。

一方、境界層による温度ゆらぎ減衰効果と構造材の熱容量を考慮した直接シミュレーションコードによる温度ゆらぎ時系列挙動の評価では、時間的に不規則に変動する温度ゆらぎ場における熱伝達係数を定義する必要が生じる。従来、工学問題を対象に用いられている熱伝達係数は、強制あるいは自然対流場における時間平均量として定義されていることから、サーマルストライピングで対象とするような境界層厚さや温度差が時間的に不規則に変動する挙動の評価には用いることができない。このような時間的に不規則に変動する熱量輸送を取り扱うためには、流体中での温度ゆらぎ時系列挙動の評価に直接シミュレーションコードが必要であったように、構造材との相互作用を考慮した流体 - 構造系を対象とした微視的かつ直接的なアプローチが不可欠となる。このため、分子運動論でのボルツマン方程式 (Boltzmann Equation) を直接法モンテカルロモデル (Direct Simulation Monte Carlo Method; DSMC 法) により解く汎用コード THEMIS<sup>2)</sup> を開発した。更に、流体と構造物とが熱的に相互作用する場合の構造物内熱的応答特性を評価するため、熱弾性線形化式を基礎式とし、これを境界要素法によって離散化して解く汎用コード BEMSET<sup>3)</sup> を開発した。

本報では、実際の高速炉システムでしばしば遭遇する流体 - 構造熱的連成条件として、SUS 316 構造物が不規則に変動する流体温度ゆらぎ場に置かれた場合を取り上げ、当該構造物の熱的な応答基本特性を BEMSET コードによって定量化する。

## 第2章 SUS 316 円筒構造物の熱的応答解析

### 2.1 解析体系および条件

解析体系は、内半径 34 mm、外半径 39 mm (肉厚 5 mm) の高速原型炉 もんじゅ の整流筒相当の中空円筒 1/4 セクターである。なお、円筒の上下端面は拘束されており、平面ひずみ状態にあると仮定する。解析評価での材料物性は、弾性係数 197 GPa、ポアソン比 0.37、線熱膨張係数  $17.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、温度伝導度 22  $\text{mm}^2 / \text{s}$  の一定値を使用する。

Fig. 2.1 に、境界要素分割図を示す。境界要素は外表面 31 節点、内表面 13 節点、対称面 11 節点の合計 66 節点、内部要素は 11 点 (0.417 mm 均等)とした。円筒温度条件の規定では、初期温度を 200 °C 一定とし、外表面のみに対して以下の温度過渡条件を印加する。

#### (1) 正弦波温度印加条件

- (ケース A) 200 °C ± 50 °C の 0.5 Hz 正弦波
- (ケース B) 200 °C ± 50 °C の 1.0 Hz 正弦波
- (ケース C) 200 °C ± 50 °C の 2.0 Hz 正弦波
- (ケース D) 200 °C ± 50 °C の 3.0 Hz 正弦波
- (ケース E) 200 °C ± 50 °C の 4.0 Hz 正弦波
- (ケース F) 200 °C ± 50 °C の 5.0 Hz 正弦波

#### (2) 乱数波温度印加条件

- (ケース G) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 0.01 秒単位の一様乱数列
- (ケース H) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 0.05 秒単位の一様乱数列
- (ケース I) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 0.10 秒単位の一様乱数列
- (ケース J) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 0.20 秒単位の一様乱数列
- (ケース K) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 0.50 秒単位の一様乱数列
- (ケース L) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 1.00 秒単位の一様乱数列

#### (3) 正弦波上に乱数を重畠させた温度印加条件

- (ケース M) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 0.5 Hz 正弦波に 0.05 秒単位の一様乱数列を重畠
- (ケース N) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 1.0 Hz 正弦波に 0.05 秒単位の一様乱数列を重畠
- (ケース O) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 2.0 Hz 正弦波に 0.05 秒単位の一様乱数列を重畠
- (ケース P) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 3.0 Hz 正弦波に 0.05 秒単位の一様乱数列を重畠
- (ケース Q) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 4.0 Hz 正弦波に 0.05 秒単位の一様乱数列を重畠
- (ケース R) 200 °C ± 50 °C を最大振幅とする 5.0 Hz 正弦波に 0.05 秒単位の一様乱数列を重畠

## 2. 2 解析結果

### 2. 2. 1 正弦波温度印加条件に対する応答

正弦波温度を印加した場合(ケース A - F)の温度時系列応答を Fig. 2. 2 - Fig. 2. 7 に、また垂直熱応力成分  $\sigma_{yy}$  の時系列応答を Fig. 2. 8 - Fig. 2. 13 に示す。まず、温度応答に関する全体的な傾向では、円筒の外表面から内表面に向かうに従って伝搬する温度振幅が急激に減衰するとともに、また印加周波数を増加させるに従って伝搬する温度振幅が減衰する。一方、垂直熱応力応答に関する全般的な傾向では、円筒内表面の温度を 200 °C 一定としていることから、内表面近傍での熱応力振幅が最も大きくなり、肉厚中央近傍で最も小さくなる。なお、円筒内表面近傍を除き、各位置での熱応力振幅値は印加周波数に大きく依存しない。

Fig. 2. 14 に、印加周波数を変化させた場合の温度振幅および熱応力振幅の分布を比較する。温度振幅分布に関する比較では、印加周波数を上昇させるに従って円筒内部に伝搬する温度振幅が大きく減衰し、印加周波数を 5.0 Hz とした条件では肉厚方向約 1.4 mm で全温度差の約 10 % まで減衰する。一方、熱応力振幅分布に関する比較では、印加周波数を増加させるに従って、高振幅領域が温度勾配の大きな円筒外表面近傍に限定されるようになる。これらの結果は、文献 4) に実験結果での傾向として述べられている「印加周波数が 2.0 Hz 以上となると有意な温度振幅示す領域が表面より 1.0 mm 程度以内に集中する」挙動を良好に再現している。

### 2. 2. 2 乱数波温度印加条件に対する応答

一様乱数により規定された温度過渡条件を印加した場合(ケース G - L)の温度時系列応答を Fig. 2. 15 - Fig. 2. 20 に、また垂直熱応力成分  $\sigma_{yy}$  の時系列応答を Fig. 2. 21 - Fig. 2. 26 に示す。まず、温度応答に関する傾向は、一様乱数列に与える時間間隔を増加(印加周波数を低下させることに相当)させるに従って、円筒内部に伝搬する温度振幅が増大する。一方、垂直熱応力成分の応答傾向についても、一様乱数列に与える時間間隔を増加させることによって、円筒内部に生じる垂直方向の熱応力振幅が増加していることが分かる。

これらの結果に基づき、一様乱数列に与える時間刻み幅を変化させた場合の温度振幅および垂直方向熱応力の振幅の空間分布を比較した結果を Fig. 2. 27 に示す。結果より分かる通り、温度振幅および熱応力振幅の各分布は、時間刻み幅を大きくして円筒外表面に印加する周波数を低下させるに従って大きな振幅を示す領域が肉厚方向に広がり、正弦波温度を印加した場合と比較的同様な傾向を示す。しかしながら、熱応力振幅に関する分布の傾向は、周期性を持たない一様乱数を印加させることにより、時間刻み幅の大小関係に依存した一定傾向は示していない。特に、円筒外表面から 2.0 mm までの領域での傾向は、正弦波温度を印加した場合と大きく異なり、当該領域に熱応力がより集中した結果となっている。この結果は、印加する温度過渡条件を一様乱数(非定常不規則過程)とすることによって、円筒構造物が影響を受ける領域が表層近傍で顕著となることを示唆している。

### 2. 2. 3 正弦波上に乱数が重畠する温度印加条件に対する応答

正弦波上に一様乱数を重畠させた不規則温度過渡条件を印加した場合(ケース M - R)の温度時系列応答を Fig. 2. 28 - Fig. 2. 33 に、また垂直熱応力成分  $\sigma_{yy}$  の時系列応答を Fig. 2. 34 - Fig. 2. 39 に示す。なお、温度時系列応答を示した Fig. 2. 28 - Fig. 2. 33 中には、円筒外表面に印加した温度過渡条件を点線で併せて示してある。まず、温度応答に関する傾向では、正弦波のみを印加した場合と同様に、印加する正弦波周波数を増加させるに従って円筒内に伝搬する温度振幅が減衰する。しかしながら、最終的に円筒内表面(肉厚最

深部) に伝搬される温度ゆらぎ振幅は印加周波数に依らず極めて小さく、正弦波のみを温度過渡条件として印加した場合での結果と大きく異なっている。

一方、垂直熱応力成分の応答挙動では、印加する正弦波周波数を増加させるに従って各位置で発生する熱応力の値が減少する傾向を示すものの、円筒内表面での熱応力振幅は印加周波数に依らずほぼ一定の値を示している。これは、円筒内表面での熱応力応答 (Fig. 2. 34 - Fig. 2. 39 での (c) 図) から分かるように、印加する正弦波周波数を増加させるに従い、これとは異なるより低い振動モードが正弦波振動と一樣乱数による振動による共鳴によって生じ、結果的にこの低周波振動モードに起因した熱応力が当該領域に生じたためであると解釈できる。

Fig. 2. 40 に、印加周波数を変化させた場合の温度振幅および熱応力振幅の分布を比較する。温度振幅の分布は印加周波数に対して大きく依存せず、この結果は時間間隔を 0.05 秒とした一樣乱数を印加した場合 (ケース H、Fig. 2. 16 参照) と同様な傾向を示している。また、熱応力振幅の分布に関しても、印加する正弦波周波数に依らず温度振幅に対応した同様な傾向を示し、円筒外表面から 1.3 mm 近傍に発生するピーク振幅が変動するのみである。

以上の結果より、構造物における非定常熱応力挙動を支配するパラメータは、最大熱応力値に関しては周期性を持った入力過渡条件 (この場合正弦波周波数) であるものの、その分布はむしろ不規則過程の性質 (乱数列周期) であると言える。

## 第3章 検討および考察

## 3.1 頻度分布特性

## 3.1.1 構造物内温度

正弦波上に一様乱数を重畠させた不規則温度過渡条件を印加した場合(ケースM-R)の構造物内温度振幅に対する頻度分布特性を、Fig. 3.1 - Fig. 3.6 に示す。また、各ケース間の累積頻度分布特性を Fig. 3.7 に比較する。なお、波形分解にはレインフロー法<sup>5)</sup>を使用した。各図に示した結果より分かる通り、不規則温度を印加する円筒外表面から円筒内表面(肉厚最深部)に向かうに従って、各位置で計数される不規則温度波の振幅が急激に減少するとともに、その計数値も全体的に低下する。また、正弦波周波数を増加させることによっても、各位置で計数される温度振幅とその計数値が低下することが分かる。以下に、円筒肉厚各点における温度最大振幅区間  $\Delta T_{max}$  を境界条件でのそれと比較する。

			境界条件		$r = 0.417 \text{ mm}$		$r = 2.502 \text{ mm}$		$r = 4.587 \text{ mm}$	
			$\Delta T_{max}$	Count	$\Delta T_{max}$	Count	$\Delta T_{max}$	Count	$\Delta T_{max}$	Count
印加正弦波周波数	0.5 Hz Case-M	$^{\circ}\text{C}/\text{度数}$	23.0	16	18.0	10	0.2	16	0.05	15
		比率*	1.0	—	0.7826	—	0.0008	—	0.0002	—
	1.0 Hz Case-N	$^{\circ}\text{C}/\text{度数}$	9.0	18	7.0/13.0	10/10	0.2	15	0.05	15
		比率*	1.0	—	0.78/1.44	—	0.0222	—	0.0056	—
	2.0 Hz Case-O	$^{\circ}\text{C}/\text{度数}$	3.0	14	5.0/6.0	10/10	0.1	16	0.02	12
		比率*	1.0	—	1.67/2.0	—	0.0333	—	0.0067	—
	3.0 Hz Case-P	$^{\circ}\text{C}/\text{度数}$	9.0	12	17.0	9	2.5	9	0.02	10
		比率*	1.0	—	1.8889	—	0.2778	—	0.0022	—
	4.0 Hz Case-Q	$^{\circ}\text{C}/\text{度数}$	67.0	12	5.0	14	0.3	22	0.02	13
		比率*	1.0	—	0.0746	—	0.0045	—	0.0003	—
	5.0 Hz Case-R	$^{\circ}\text{C}/\text{度数}$	43.0	12	5.0/8.0	10/10	0.1	16	0.02	13
		比率*	1.0	—	0.12/0.19	—	0.0023	—	0.0005	—

\* : 境界における温度振幅値に対する比率

上記比較結果より分かる通り、円筒外表面から  $0.417 \text{ mm}$  位置での傾向では、境界位置において最大度数を取る温度最大振幅値よりも大きな振幅値が有意となる場合(ケースN, O および P)が存在し、境界位置における頻度分布特性からの外挿によって当該位置での特性が一意に規定できないことを示している。このような特性が生じる要因としては、疑似白色雑音を非線形系に印加した場合に頻繁に観測される「うなり(Beats)」によるものであると考えられる。なお、円筒外表面より  $2.502 \text{ mm}$  および  $4.587 \text{ mm}$  の各位置において計数される有意な振幅値は、境界におけるそれの  $1/10$  以下の値を取る。

構造物内温度振動周波数の頻度分布特性を、Fig. 3.8 - Fig. 3.13 に、また累積頻度分布の比較を Fig. 3.

14 に示す。累積頻度分布の比較結果より分かる通り、一様乱数に与えた時間間隔に対応する振動周波数(10 Hz)の相対的な寄与が、正弦波周波数を増加させるに従って減少している。またこの円筒肉厚方向の減少割合は、印加正弦波周波数を大きくした場合の方が顕著となっている。以下に、円筒肉厚各点における温度振動周波数の最大度数区間  $f_{\max}$  を境界条件でのそれと比較する。

			境界条件		$r = 0.417 \text{ mm}$		$r = 2.502 \text{ mm}$		$r = 4.587 \text{ mm}$	
			$f_{\max}$	Count	$f_{\max}$	Count	$f_{\max}$	Count	$f_{\max}$	Count
印 加 正 弦 波 周 波 数	0.5 Hz Case-M	Hz/度数	10.0	78	10.0	65	10.0	28	5.0	12
		比率*	1.0	—	1.0	—	1.0	—	0.5	—
	1.0 Hz Case-N	Hz/度数	10.0	86	10.0	84	10.0	30	5.0	14
		比率*	1.0	—	1.0	—	1.0	—	0.5	—
	2.0 Hz Case-O	Hz/度数	10.0	67	10.0	63	10.0	36	5.0	10
		比率*	1.0	—	1.0	—	1.0	—	0.5	—
	3.0 Hz Case-P	Hz/度数	10.0	35	10.0	48	5.0/10.0	16/16	5.0	14
		比率*	1.0	—	1.0	—	0.5/1.0	—	0.5	—
	4.0 Hz Case-Q	Hz/度数	5.0	39	10.0	46	10.0	43	10.0	13
		比率*	1.0	—	2.0	—	2.0	—	2.0	—
	5.0 Hz Case-R	Hz/度数	10.0	42	10.0	67	10.0	26	5.0	11
		比率*	1.0	—	1.0	—	1.0	—	0.5	—

\* : 境界における温度振動卓越周波数に対する比率

以上に示した比較結果では、円筒外表面から内表面に向かうに従って優勢周波数が低周波側にシフトし、この傾向は円筒外表面に印加する正弦波周波数を増加させた場合の方が顕著である。なお、円筒内表面における優勢周波数は、円筒外表面でのその  $1/2$  の値を取る場合が大半である。

### 3.1.2 構造物内垂直方向熱応力

正弦波上に一様乱数を重畠させた不規則温度過渡条件を印加した場合(ケース M - R)の構造物内熱応力振幅に対する頻度分布特性を Fig. 3. 15 - Fig. 3. 20 に示す。結果より分かる通り、円筒外表面に印加する正弦波周波数を変化させた場合、円筒外表面近傍( $r = 0.417 \text{ mm}$ )位置での応力振幅値は概ね 0 - 60 MPa の範囲の値となり、また円筒肉厚中心位置( $r = 2.502 \text{ mm}$ )では 0 - 30 MPa の範囲の応力振幅が支配的となる。しかしながら、円筒内表面近傍( $r = 4.587 \text{ mm}$ )位置での応力振幅値は、円筒外表面に印加する正弦波周波数を増加させるに従って、その最大度数を示す振幅区間は 0 - 15 MPa から 30 - 90 MPa へと遷移している。

Fig. 3. 21 に、各ケースについての累積頻度分布特性を比較する。結果より明らかなように、円筒外表面に印加する正弦波周波数を増加させるに従い、優勢な応力振幅範囲は低振幅側から高振幅側に推移している。なお、円筒外表面に印加する正弦波周波数を増加することにより高振幅側の寄与が増加する要因は、円筒内表面近傍( $r = 4.587 \text{ mm}$ )位置における高振幅波の度数が、低振幅波のそれに比べて相対的に増大したためである。これは、Fig. 2. 34 - Fig. 2. 39 に示した応力の時系列挙動から分かるように、円筒外表面に印加する正弦波周波数を増加することによって、うなりによる高振幅波が明瞭に現れ始めることに起因している。

構造物内熱応力の振動周波数に対する頻度分布特性を Fig. 3. 22 - Fig. 3. 27 に示す。また、累積頻度分布の比較を Fig. 3. 28 に示す。円筒構造物内各点における頻度分布特性および累積頻度分布特性は、Fig. 3. 8 - Fig. 3. 14 に示した温度振動周波数のそれと酷似しており、極めて密接な関係にある。

以上に示した温度および熱応力の頻度分布に関する特性から、構造物の熱的応答特性を評価する場合には、その境界条件となる不規則温度過渡挙動の特性に加え、周期性を持つ成分と不規則な成分との相互作用から新たに生じるうなり周波数の影響を定量的に評価することが重要である。

### 3. 2 振動振幅と振動周波数間の二次元確率分布特性

正弦波上に一様乱数を重畠させた不規則温度過渡条件を印加した場合の、構造物内温度振動の振幅と周波数(レインフロー法を用いた波形分解による)に関する二次元確率分布を Fig. 3. 29 - Fig. 3. 34 に示す。まず、円筒外表面(境界条件)での分布の傾向として、印加する正弦波周波数が低い場合(0.5 Hz - 2.0 Hz; ケース M - ケース O)、低振動周波数帯では高振幅温度波が、また高振動周波数帯では低振幅温度波が不規則温度振動の全体挙動を支配している。

一方、印加する正弦波周波数が高い場合(3.0 Hz - 5.0 Hz; ケース P - ケース R)には、高振動周波数帯における高振幅温度波の割合が増加しており、これは正弦波の周波数と一様乱数列にの時間間隔から決まる周波数(この場合、10.0 Hz)の重ね合わせに起因して高振幅温度波の割合いが増したことによる。したがって、一様乱数の周波数が 10.0 Hz 一定である条件では、正弦波周波数が高い場合の方が低い場合に比べて、境界条件としての不規則温度振動挙動はより白色性の卓越した統計的性質を持つと言える。

円筒構造物内各点における分布の傾向では、円筒外表面から内表面に向かう( $r = 0.417 \text{ mm} \rightarrow 4.587 \text{ mm}$ )に従い、各点で計数される温度波の振幅絶対値が減少するとともに、高振動周波数帯で計数される温度波が急激に減少していることが分かる。また、円筒外表面から 2.502 mm 位置および 4.587 mm 位置における振動周波数帯の分布傾向は大きな差異が生じていないことから、周期性を持つ正弦波の周波数に依らず、基本的にはその分布は相似であると判断できる。

Fig. 3. 35 - Fig. 3. 40 に、構造物内各点における熱応力振動の振幅と周波数に関する二次元確率分布を各ケースについて示す。各ケースの全体の傾向では、温度振動に対する分布の傾向と同様に、円筒外表面から内表面に向かうに従い、高振動周波数帯で計数される熱応力波が急激に減少している。また、全体的な熱応力波の値は、印加正弦波周波数を増加させるに従って減少する傾向を示している。なお、その振幅値は今回の計算の条件では円筒内表面での温度を  $200^{\circ}\text{C}$  一定としていることから、円筒肉厚中心近傍( $r = 2.502 \text{ mm}$  位置)で最も小さな値となり、円筒内表面近傍( $r = 4.587 \text{ mm}$  位置)で最も大きな値を取る。

以上より、円筒構造物内各点における温度振動および熱応力振動の基本特性は、周期性を持つ正弦波成分よりも、白色性を有する不規則成分に強く依存すると言える。すなわち、実際の高速炉プラントのように流体温度ゆらぎ挙動が明確な周期性を持たない場合を想定すると、ここに置かれた構造物の非定常熱過渡挙動は流体中の不規則温度振動挙動そのものに強く支配されることを示唆している。また、これを評価する場合、流体中の不規則温度振動挙動を生成する要因である乱流現象の評価自体が、極めて重要であることを裏付けている。

## 第4章 結 言

SUS 316 製円筒構造物の熱的応答特性を、境界要素法コード BEMSET を用いて評価した。今回の評価では、(1) 正弦波温度、(2) 一様乱数波温度および(3) 正弦波上に一様乱数を重畠させた温度の 3 種類を境界過渡温度条件とし、これらの正弦波周波数および乱数列周期を変化させることにより、円筒構造物の熱的応答基本特性を定量化した。

### [ 正弦波温度過渡 ]

構造物内温度振幅では、正弦波周波数を増加させるに従って構造物内部に伝搬する温度振幅が大きく減衰し、印加周波数を 5.0 Hz とした条件では、肉厚方向約 1.4 mm 位置で全温度差の約 10 % まで減衰した。一方、垂直方向熱応力振幅は、正弦波周波数を増加させるに従って高振幅領域が構造物表面近傍に限定される傾向を示し、印加周波数を 2.0 Hz 以上とした条件では、有意な振幅を示す領域が表面近傍約 1.0 mm 以内に集中した。

### [ 一様乱数温度過渡 ]

一様乱数列に与える時間間隔を増加させるに従い、構造物内の温度振幅および熱応力振幅が増加する傾向を示した。なお、両者の構造物内分布は、時間間隔を増加させることで有意な広がりを示した。

### [ 正弦波上に一様乱数を重畠させた温度過渡 ]

構造物内の温度振幅および熱応力振幅の特性は、周期性を持つ正弦波周波数には大きく変化せず、不規則成分に強く依存した。なお、構造物の熱的応答特性の評価では、正弦波周波数と一様乱数列周波数の相互作用の取り扱いが重要となる。

以上より、流体温度ゆらぎ挙動が明瞭な周期性を持たない実際の高速炉プラントを評価の対象とする場合には、炉内構造物の熱的応答特性は流体中の不規則温度ゆらぎ挙動に強く依存することになるため、これを発生させる乱流現象の評価が極めて重要であることが示された。

## 参考文献

- 1) 村松 壽晴、サーマルストライピング現象の数値解析に関する研究、東京工業大学、学位論文 (1994)
- 2) 村松 壽晴、非定常熱伝達挙動の解析的評価手法の開発 (I)、直接法モンテカルロコード THEMIS の開発、日本原子力学会、1995 年春の年会
- 3) 村松 壽晴、境界要素法による構造物の熱的応答評価コード BEMSET の開発、日本原子力学会、1996 年春の年会
- 4) 福田 嘉男、佐藤 喜美 他、液体金属ナトリウムによるサーマルストライピング下の亀裂進展停留挙動、日本材料学会 論文集、Vol. 43, No. 495, pp. 1591 - 1596 (1994)
- 5) Endo, T., Damage Evaluation of Materials for Random or Varing Loading, Proc. Sympo. on Mechanical Behavior of Materials, Vol. 1, pp. 371-380.

謝 辞

BEMSET コードによる構造物の熱的応答特性の解析および結果の統計処理などの作業では、CSK 株式会社の松本 英一 氏に多くの協力を頂いた。ここに感謝申し上げる。

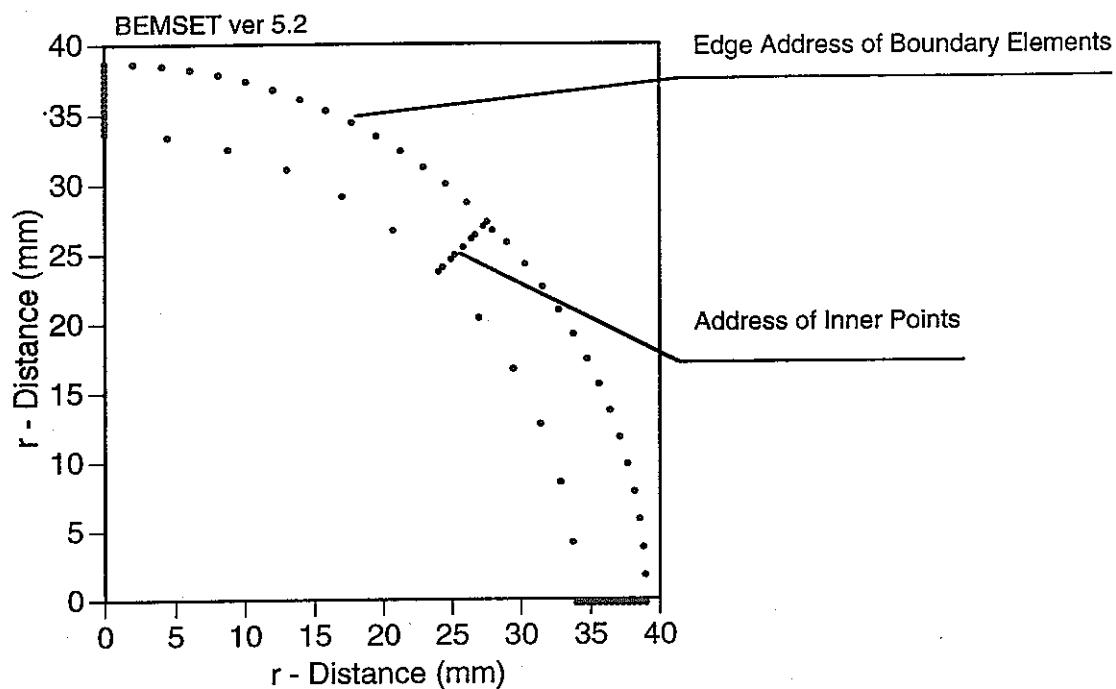


Fig. 2. 1 Boundary Element Configuration in Analysis  
of Plane Strain Problem for the MONJU Flow  
Guide Tube with the BEMSET Code

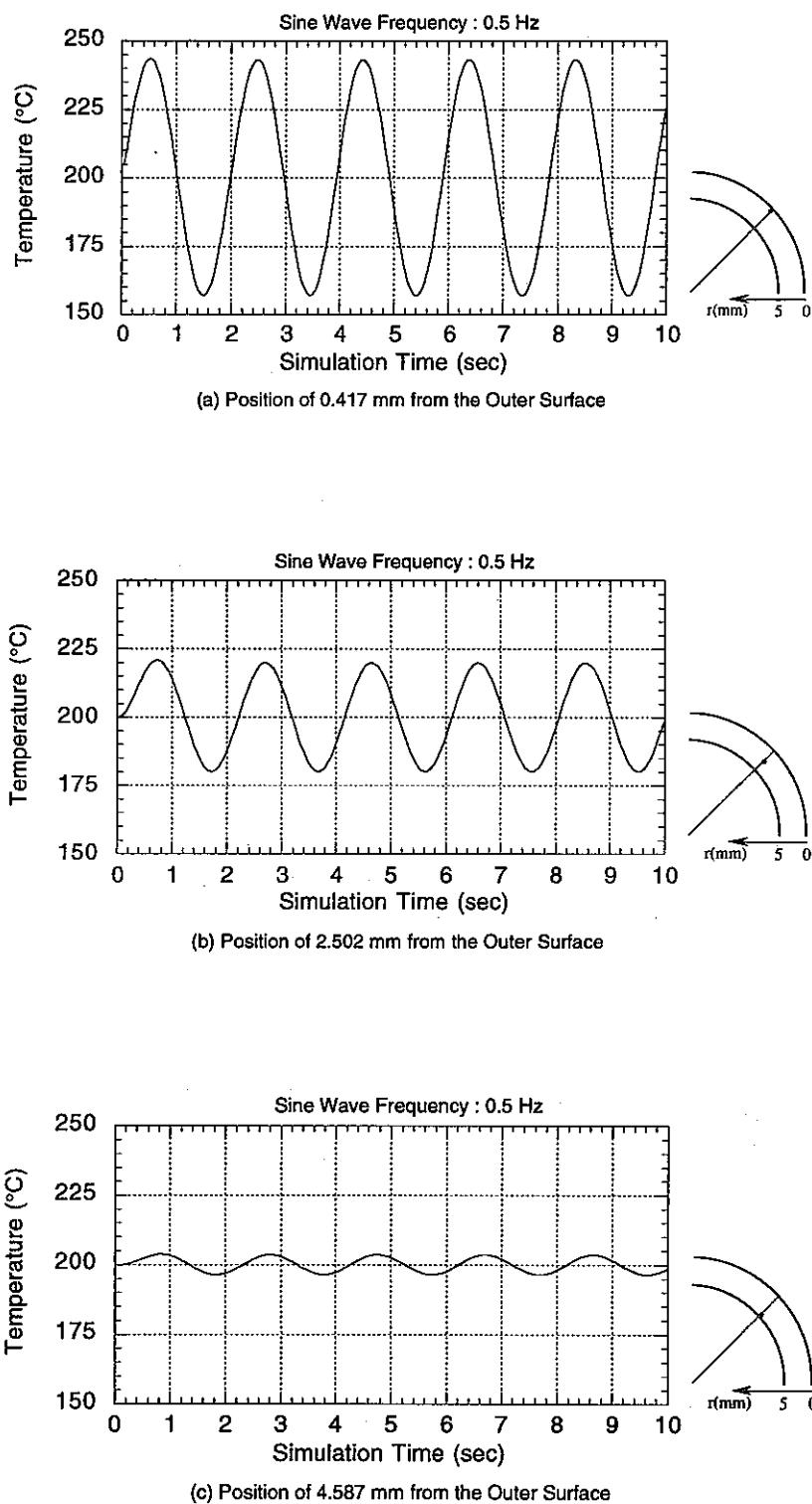


Fig. 2. 2 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz to the Tube Outer Wall

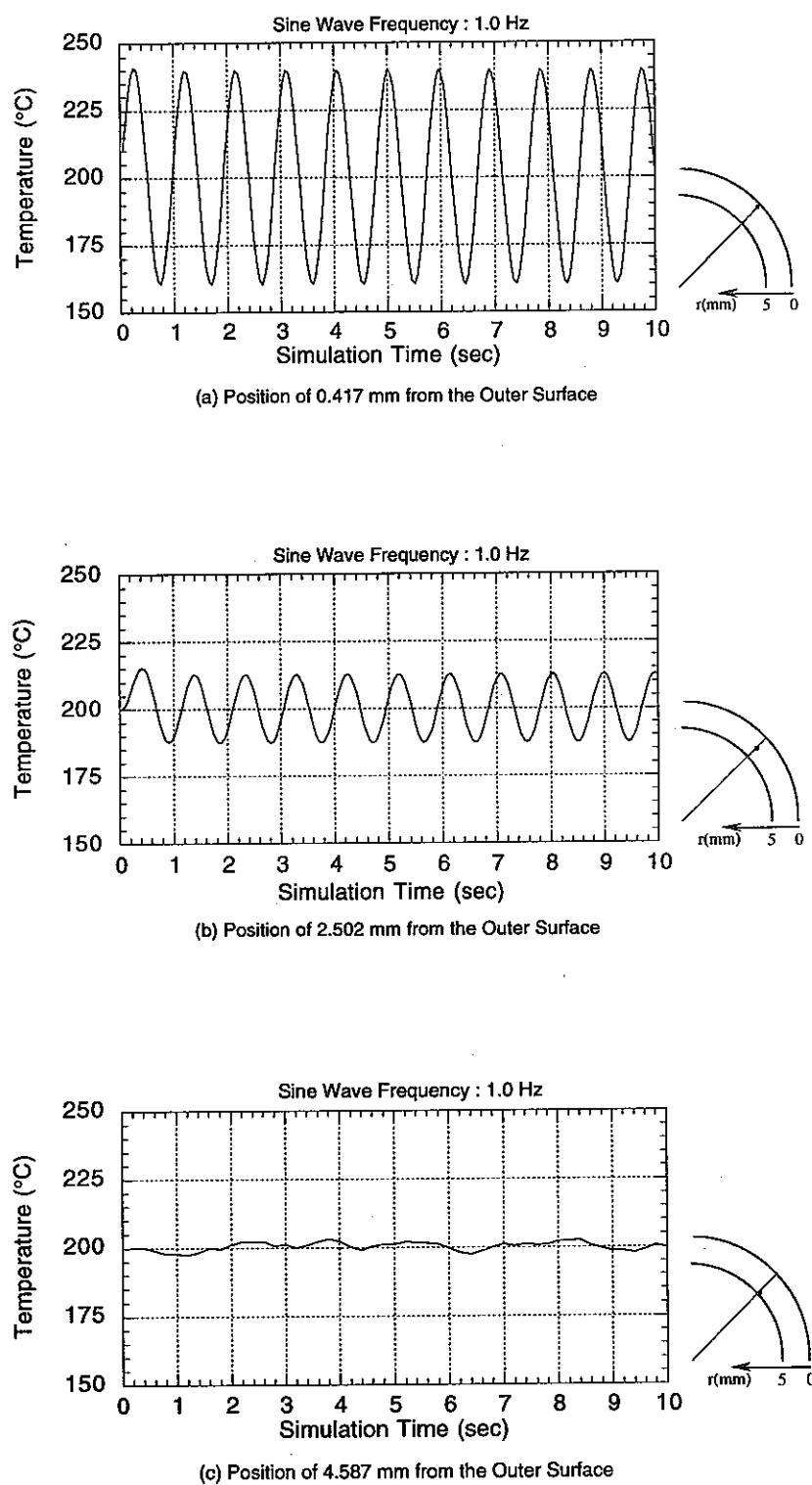


Fig. 2.3 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz to the Tube Outer Wall

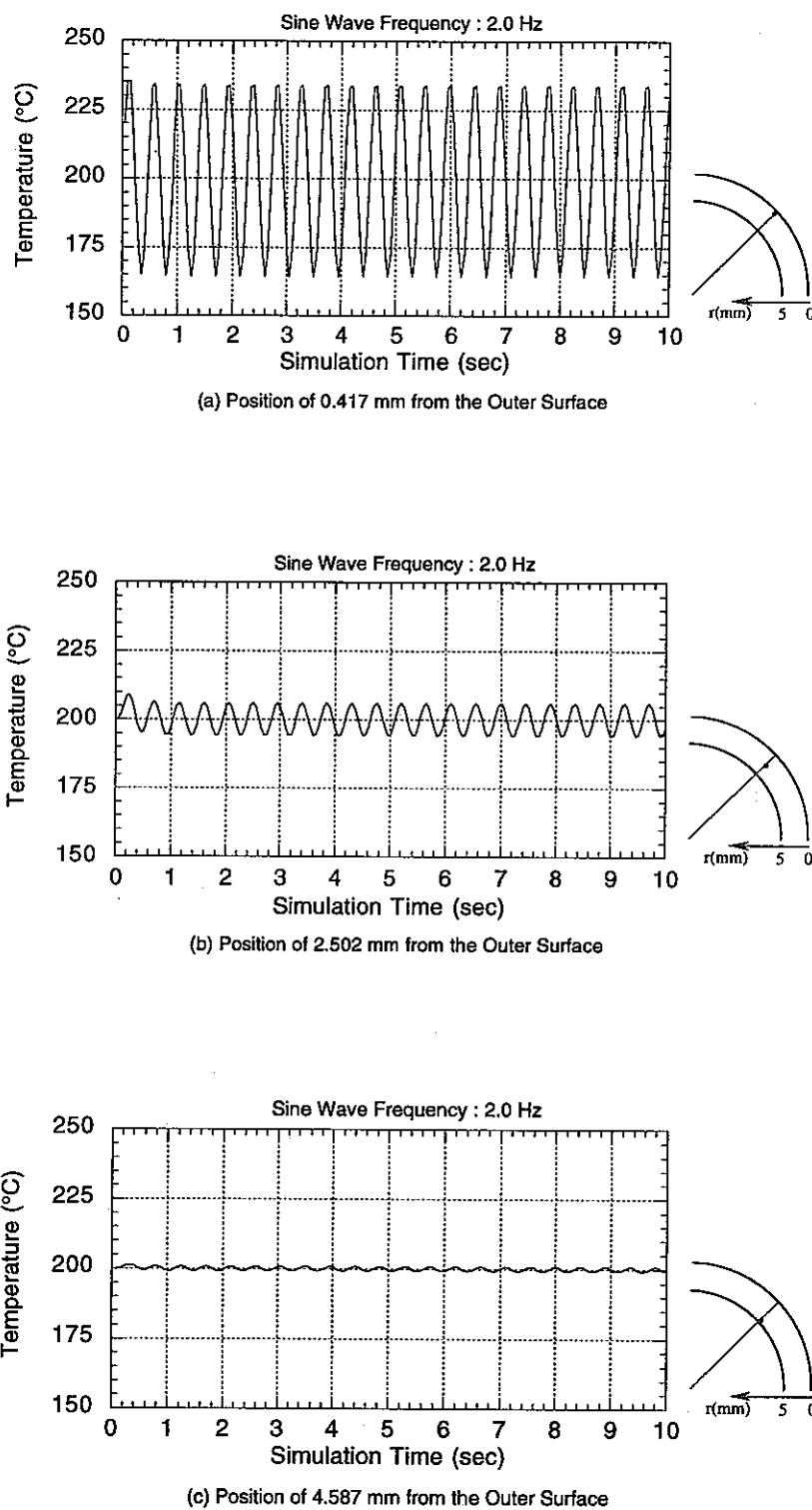


Fig. 2. 4 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz to the Tube Outer Wall

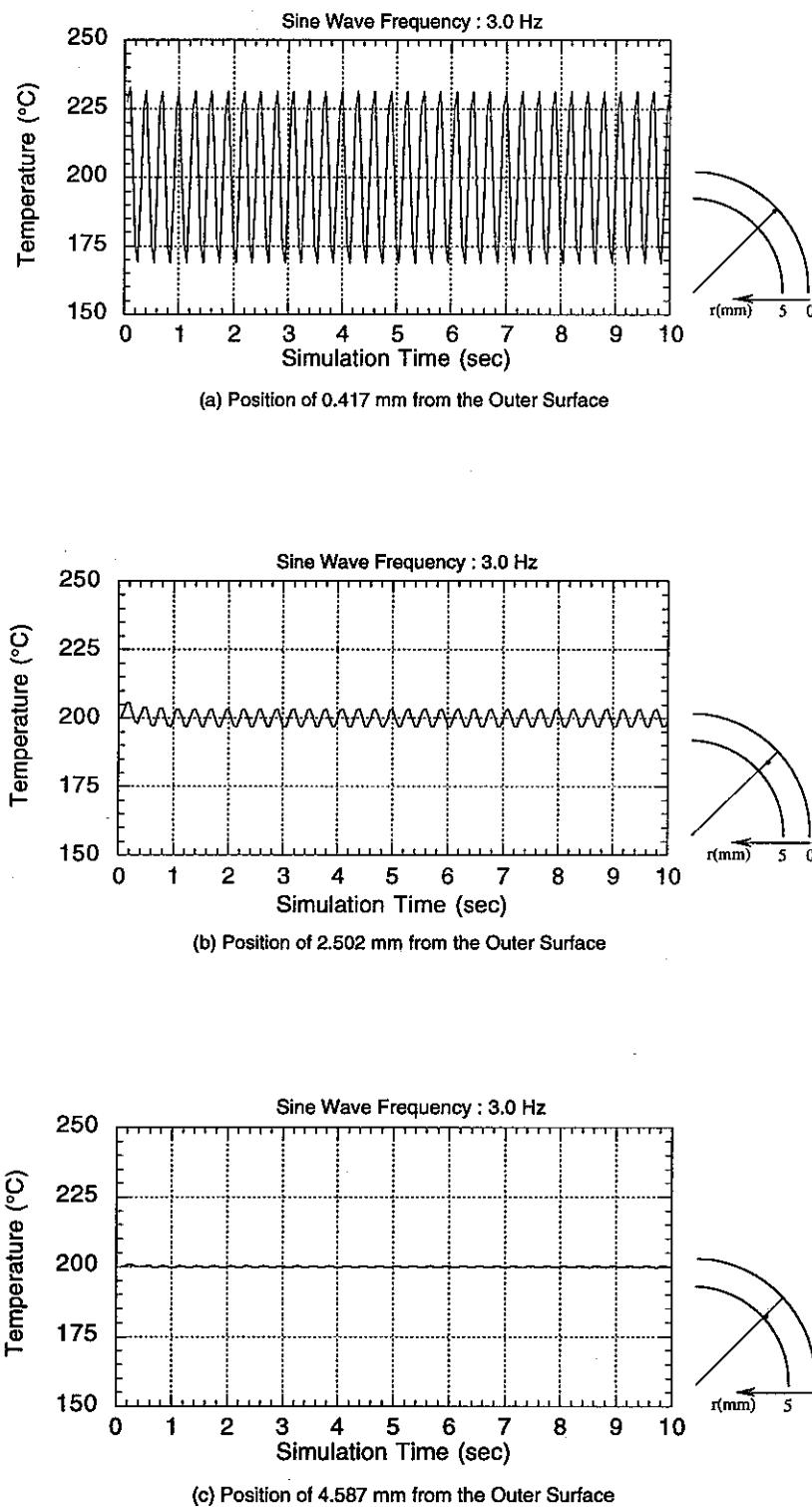


Fig. 2. 5 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz to the Tube Outer Wall

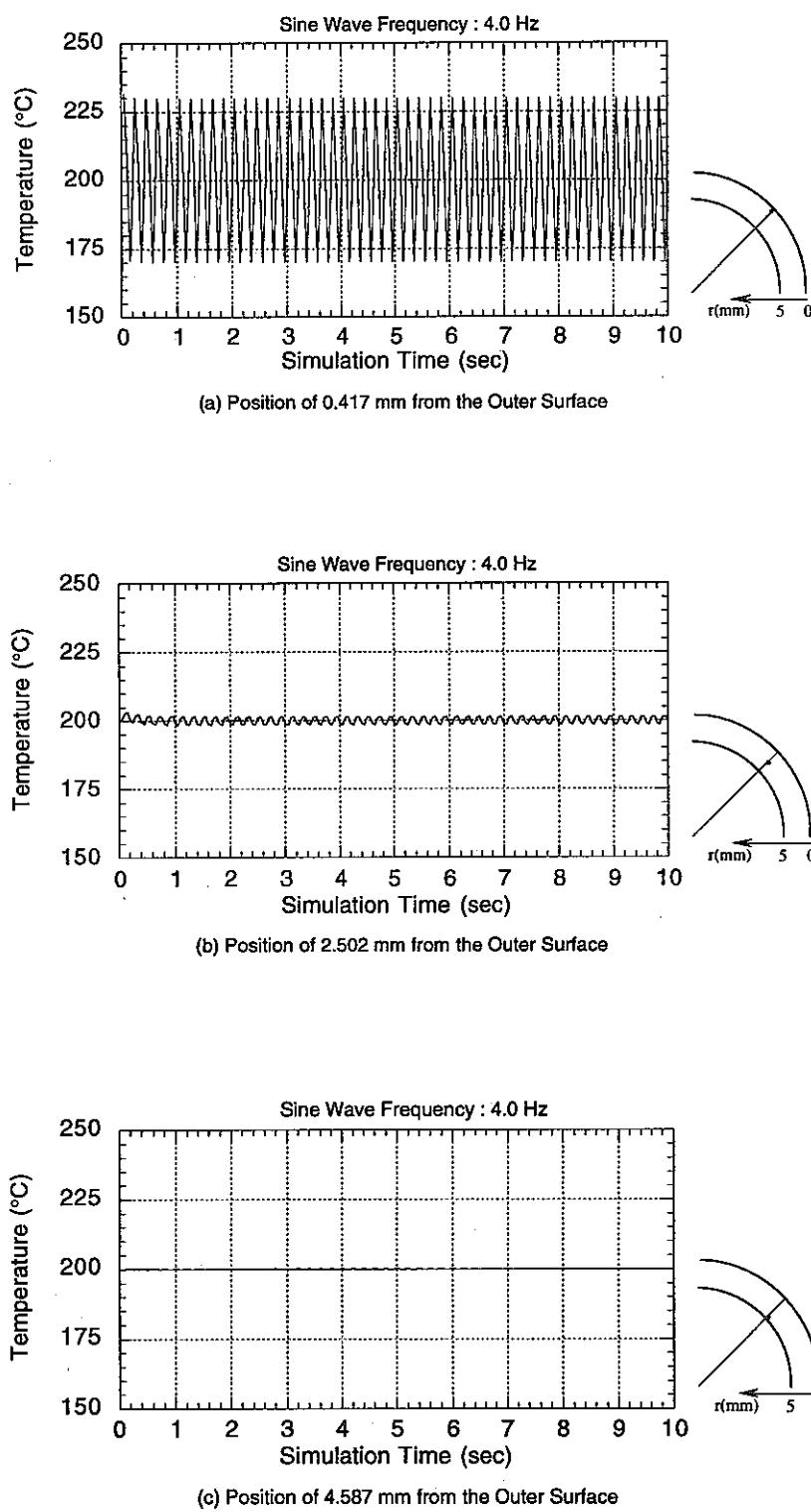


Fig. 2. 6 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz to the Tube Outer Wall

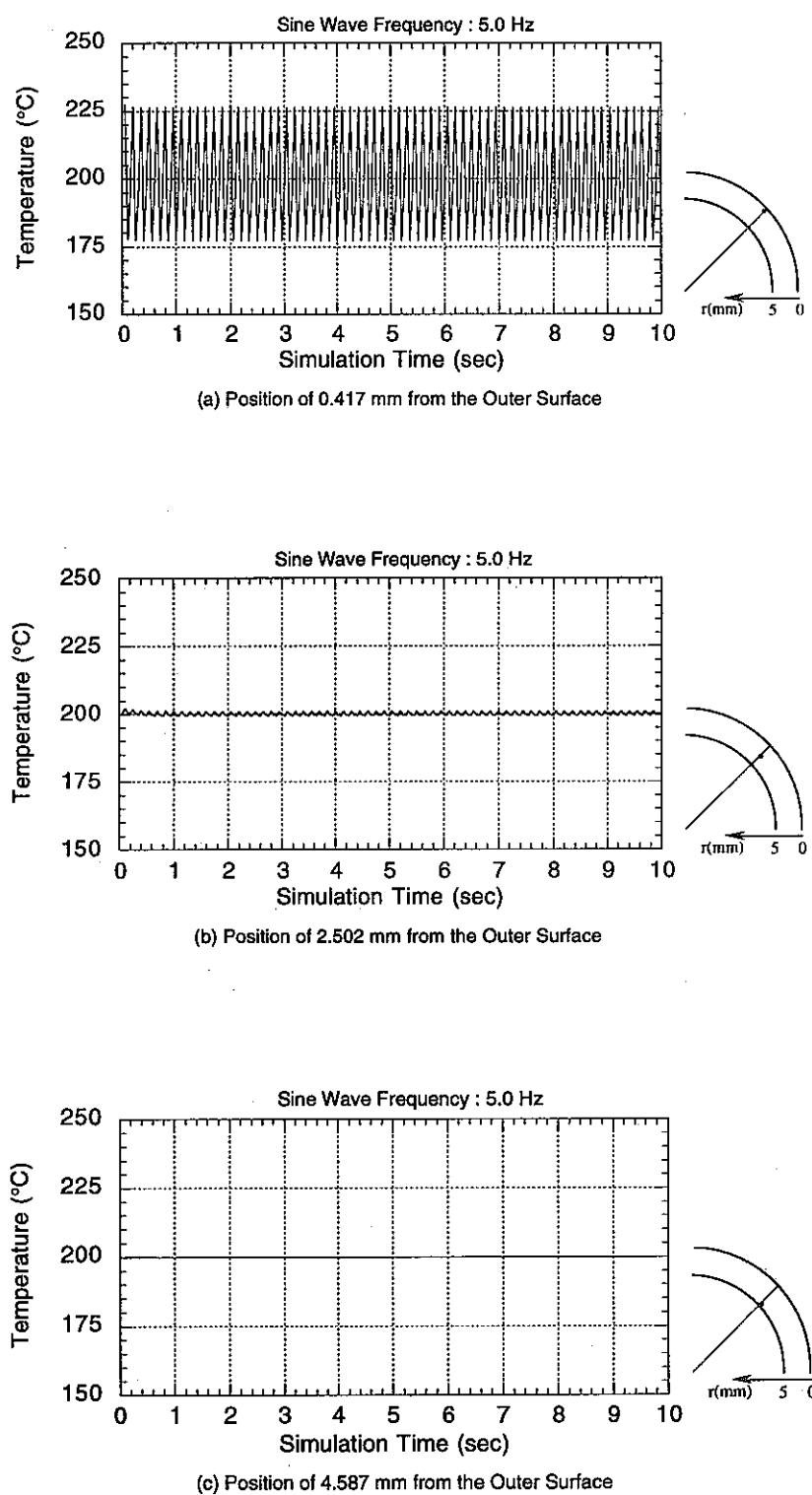


Fig. 2. 7 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz to the Tube Outer Wall

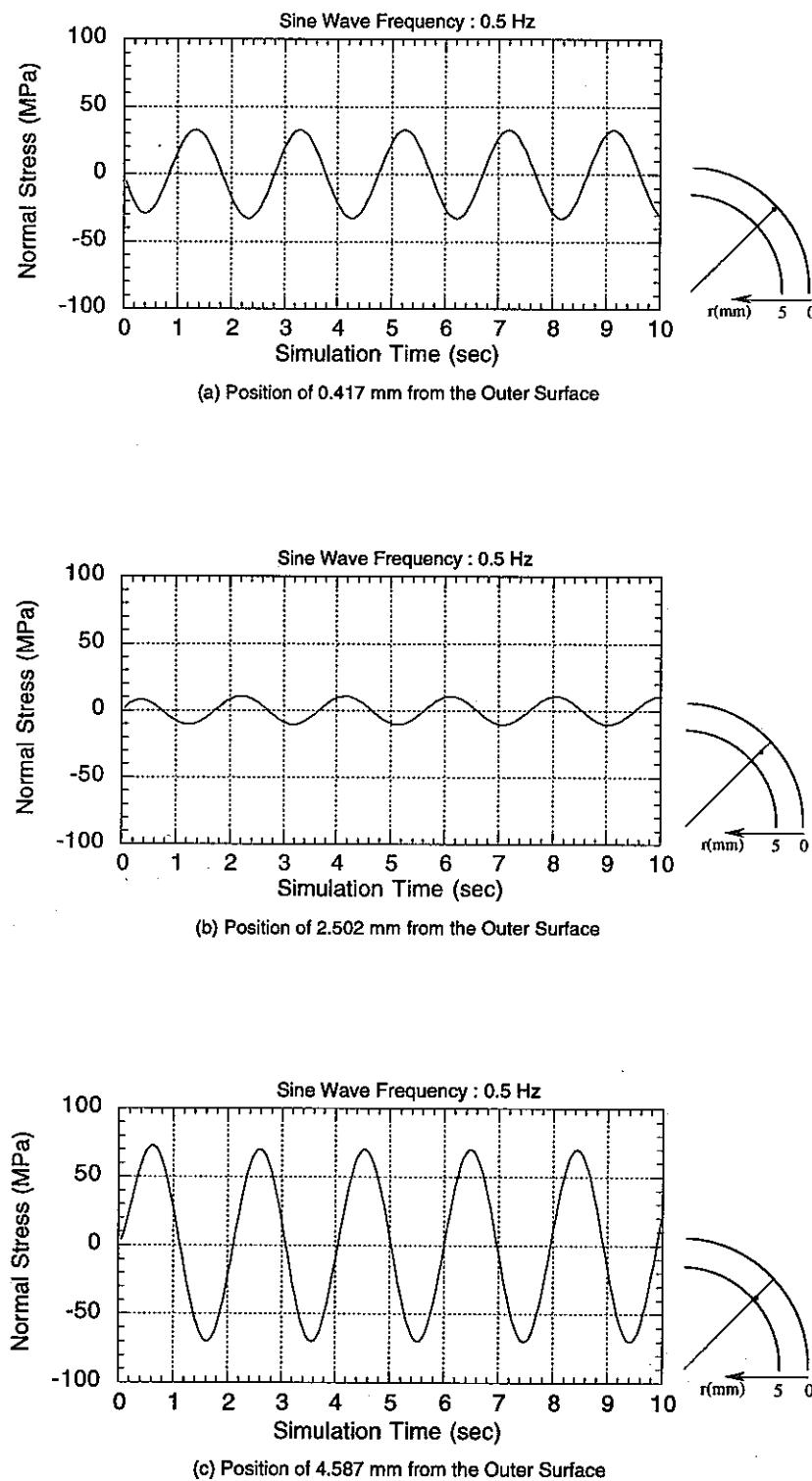


Fig. 2. 8 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz to the Tube Outer Wall

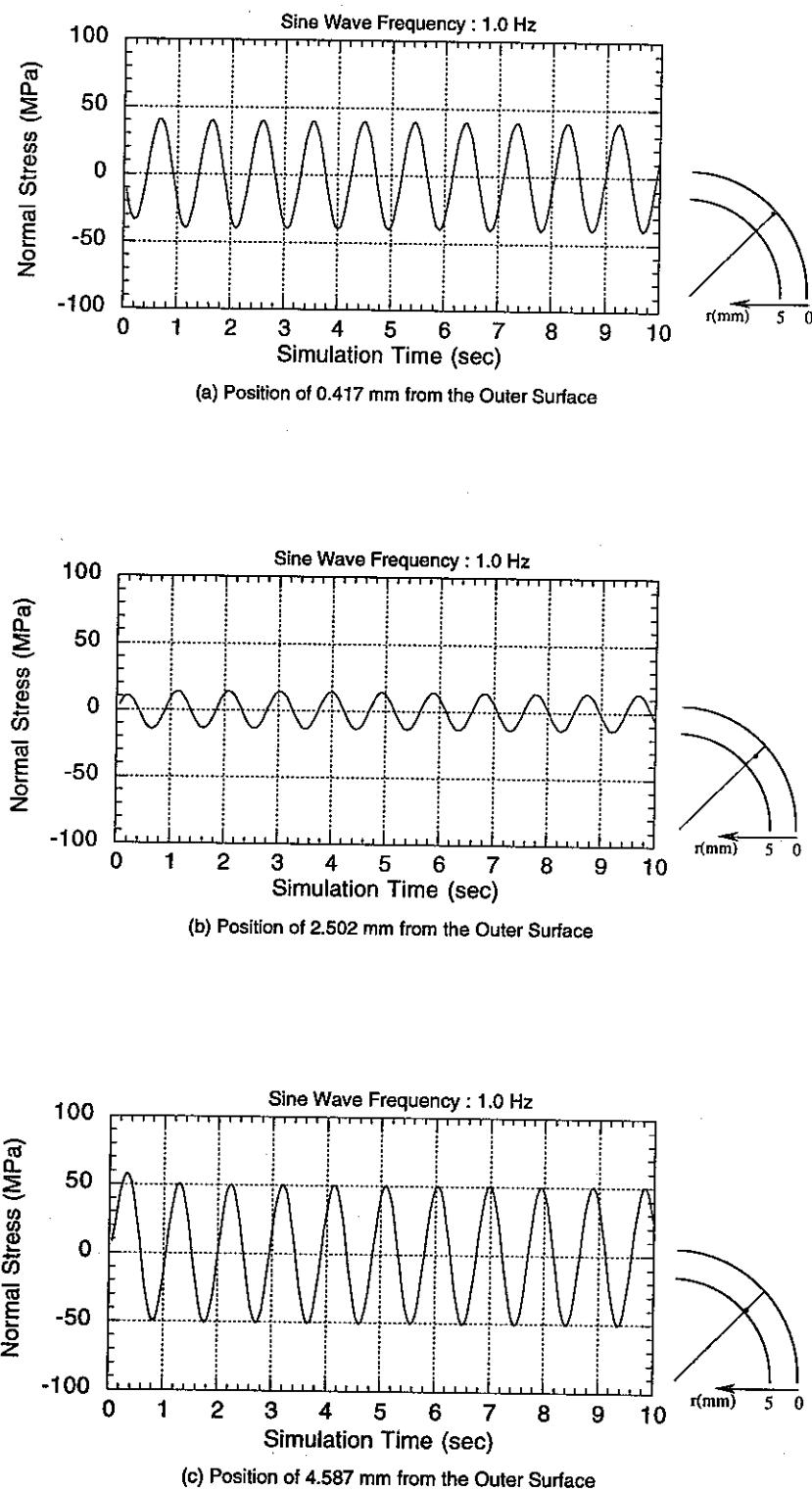


Fig. 2. 9 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz to the Tube Outer Wall

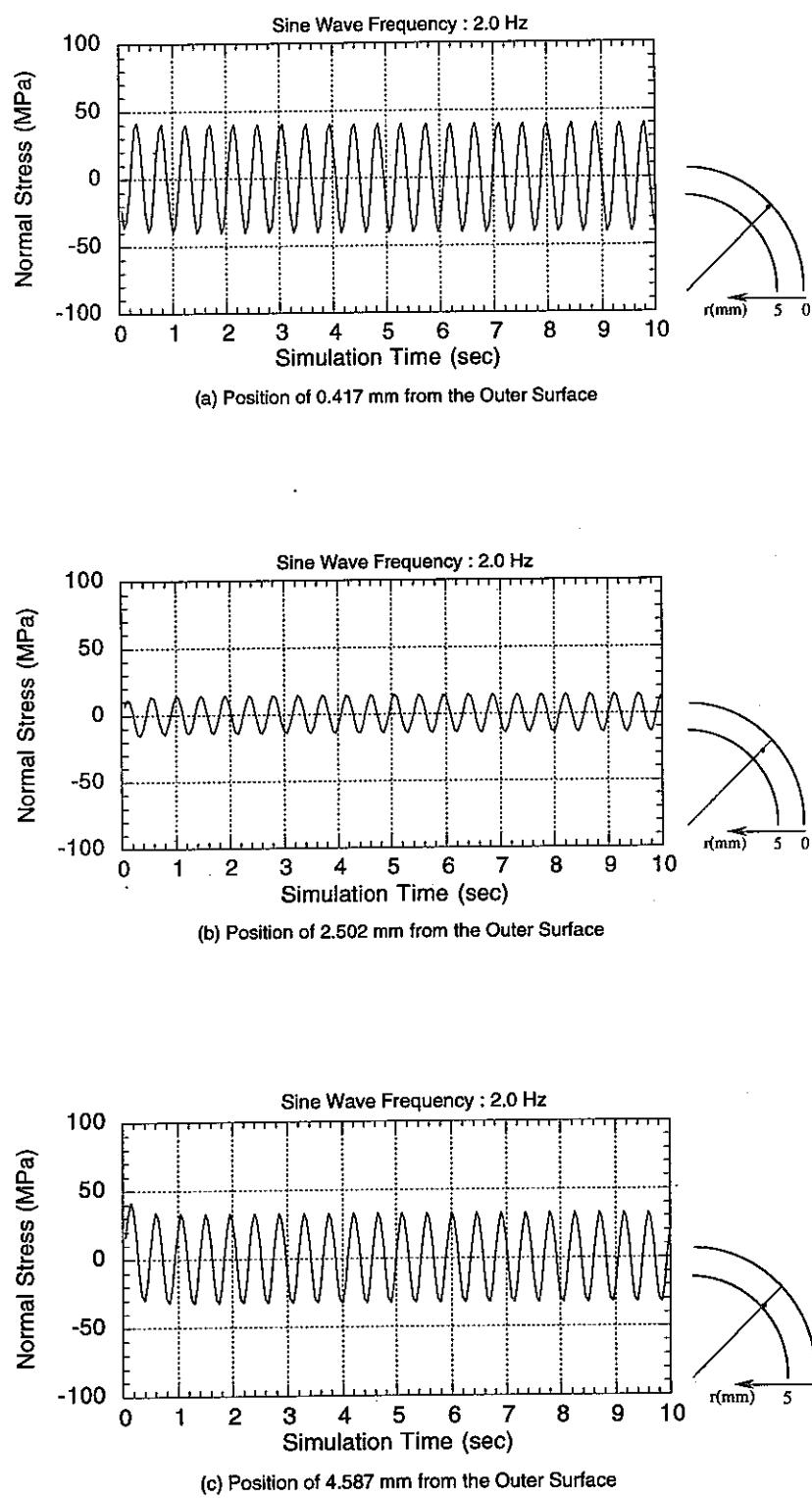


Fig. 2. 10 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz to the Tube Outer Wall

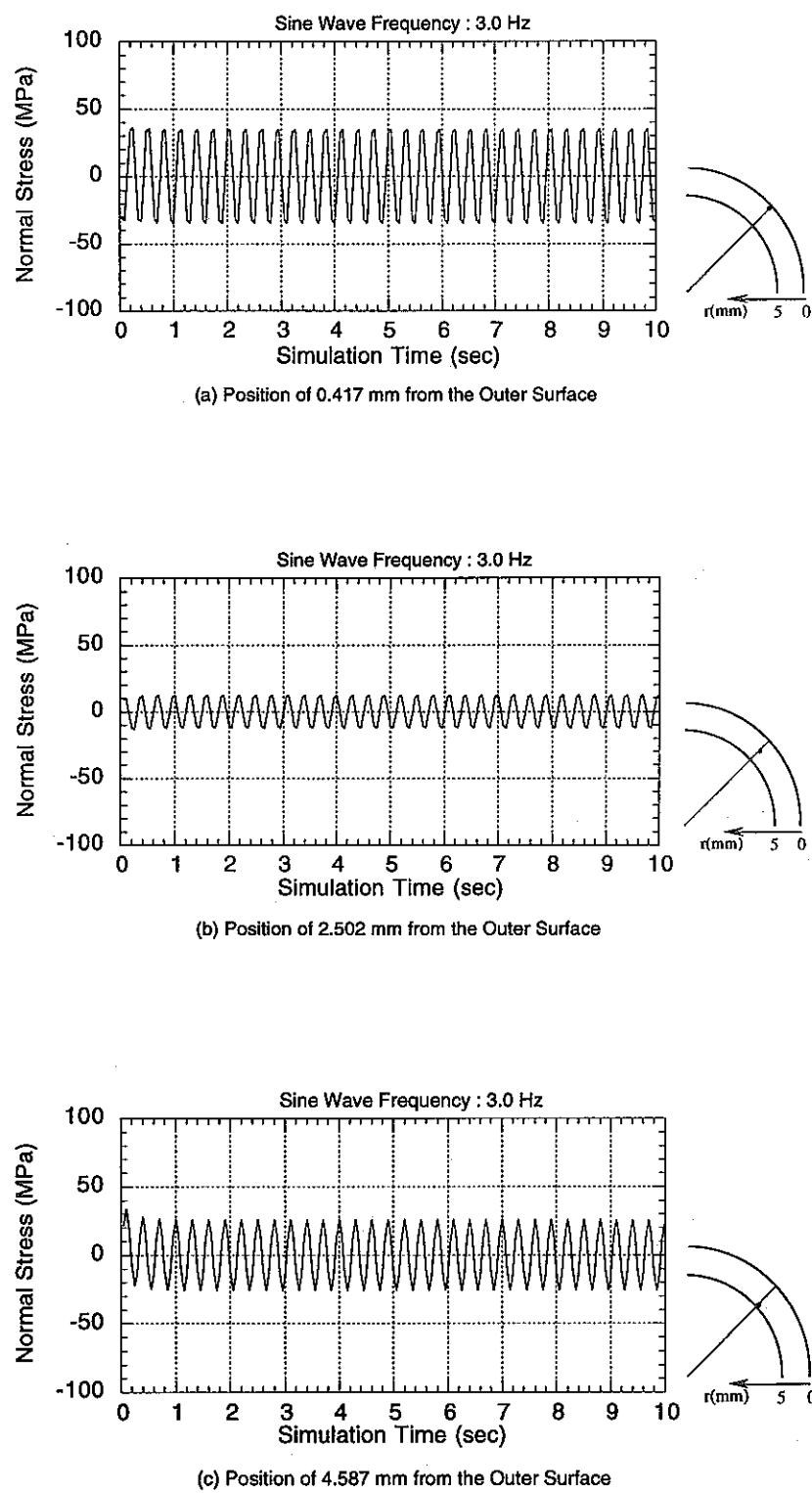


Fig. 2. 11 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz to the Tube Outer Wall

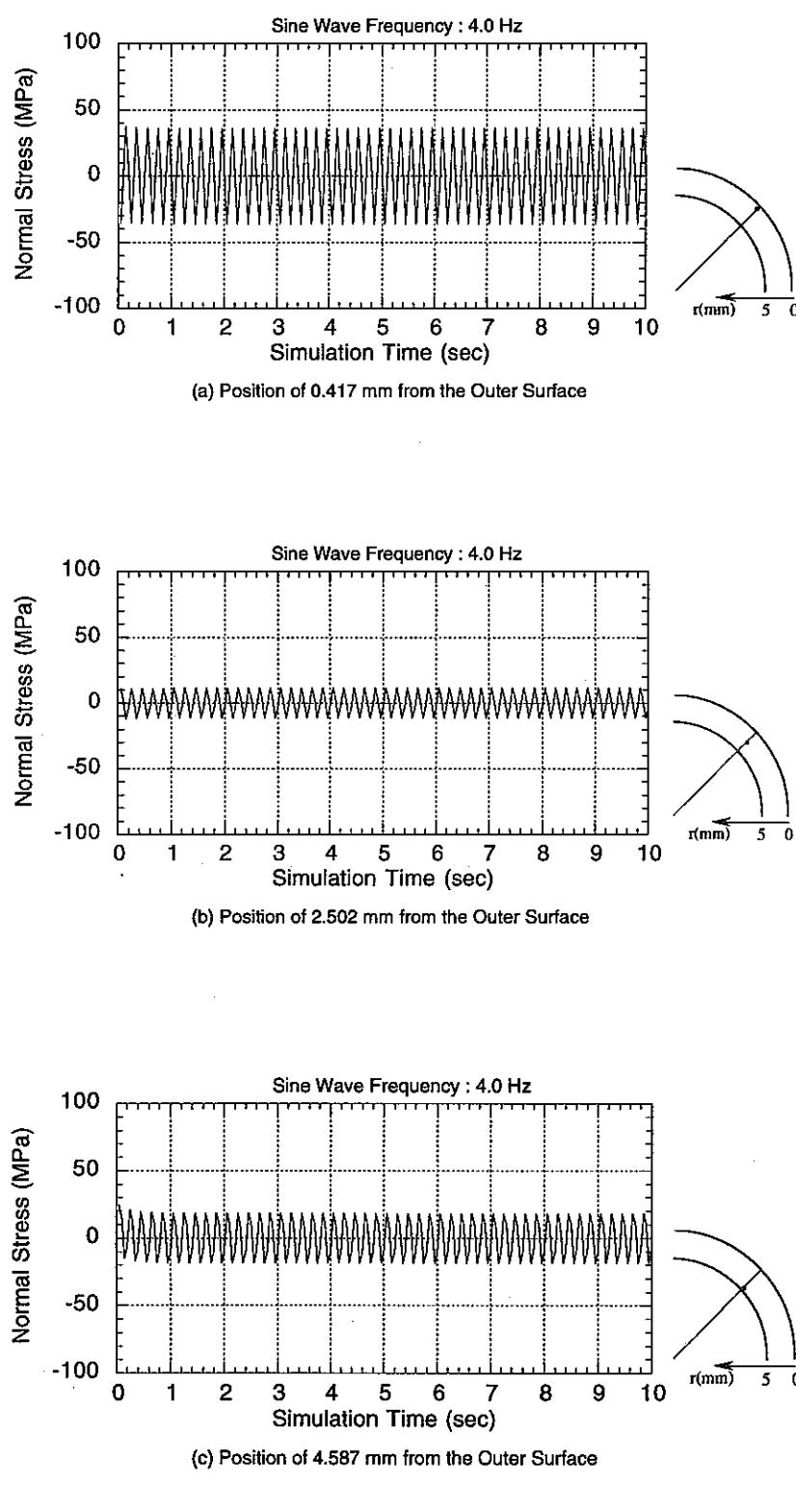


Fig. 2. 12 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz to the Tube Outer Wall

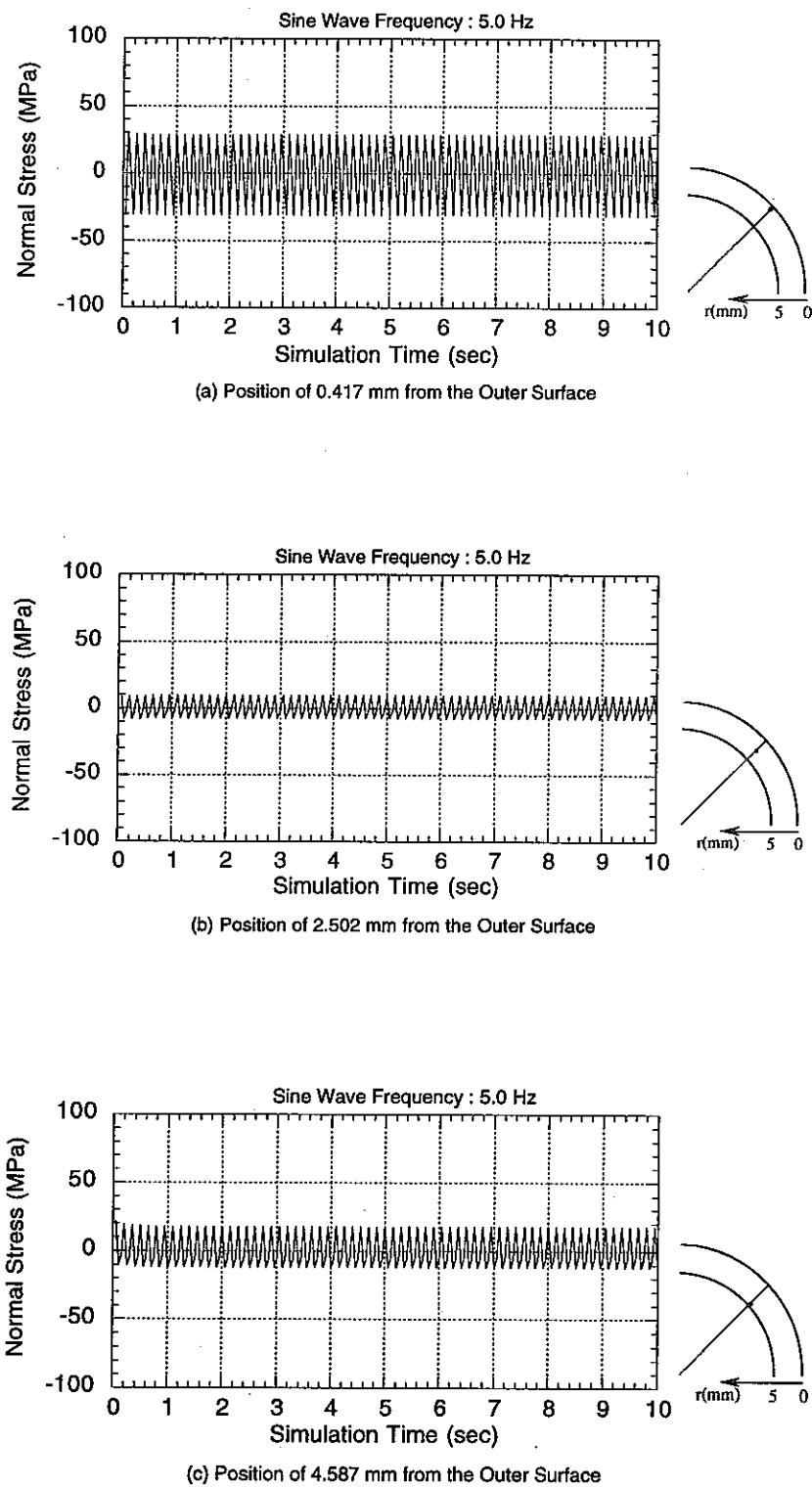


Fig. 2. 13 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz to the Tube Outer Wall

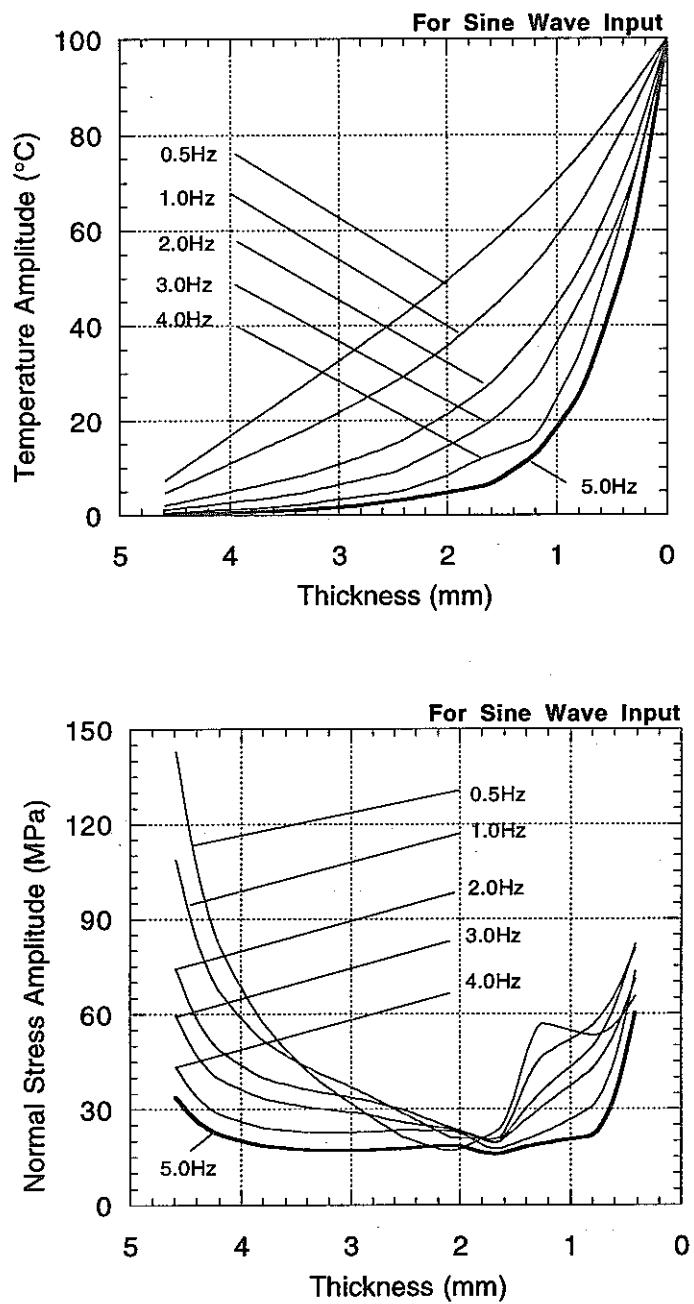


Fig. 2. 14 Calculated Responses of Temperature and Thermal Stress Amplitudes in the Flow Guide Tube under the Various Input Conditions of Sine Wave Frequency to the Tube Outer Wall

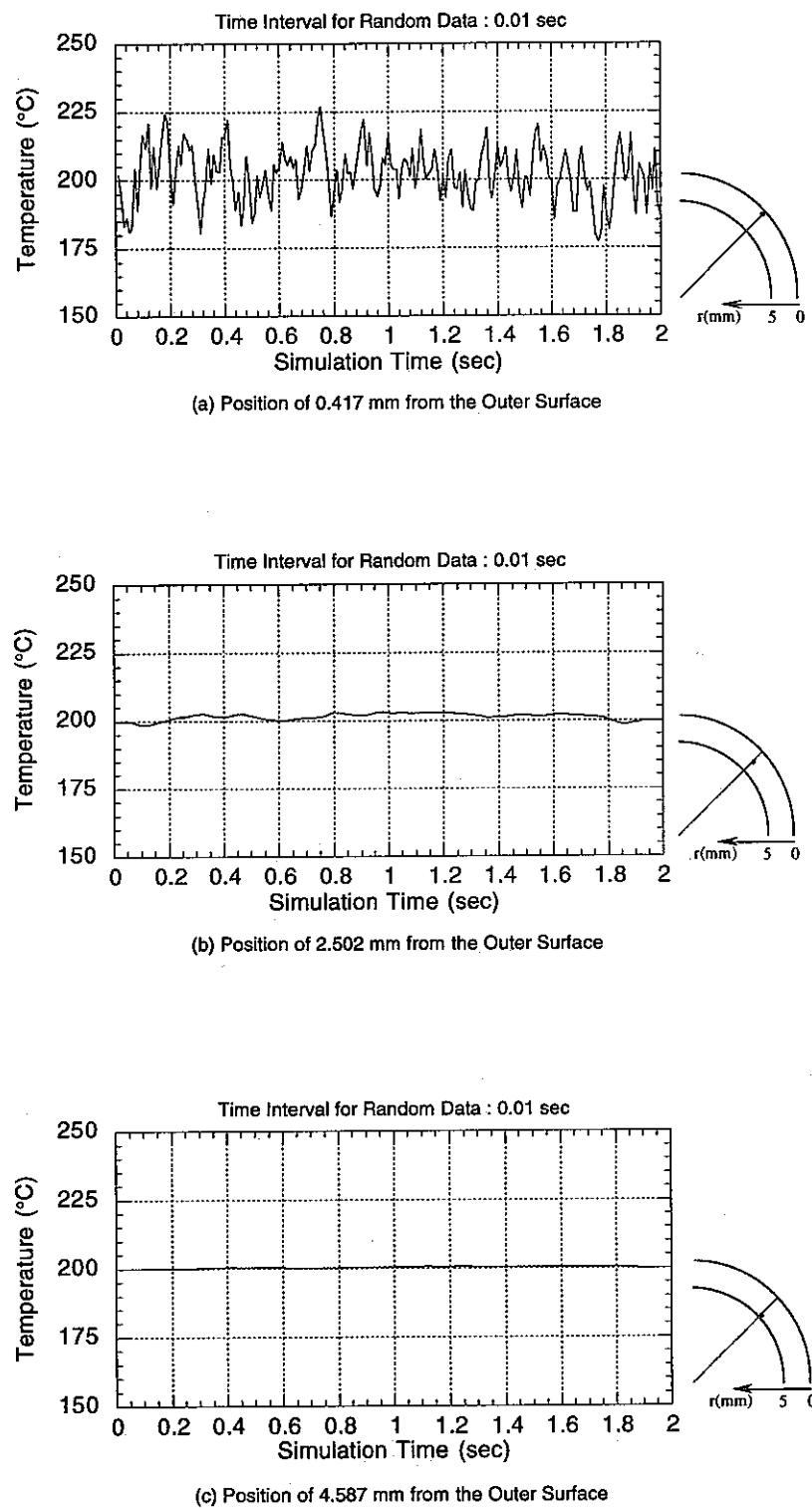


Fig. 2. 15 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.01 sec to the Tube Outer Wall

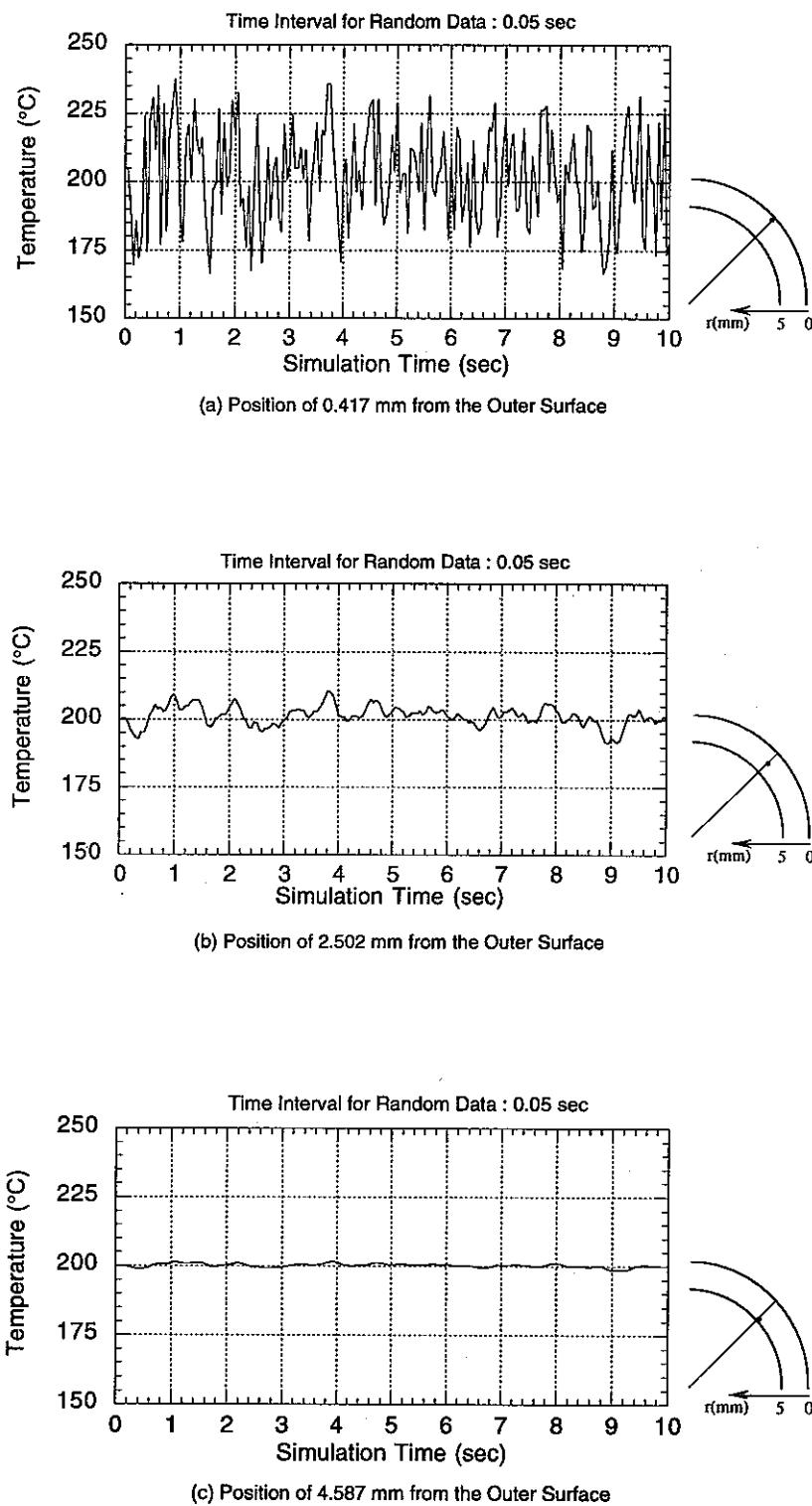


Fig. 2. 16 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

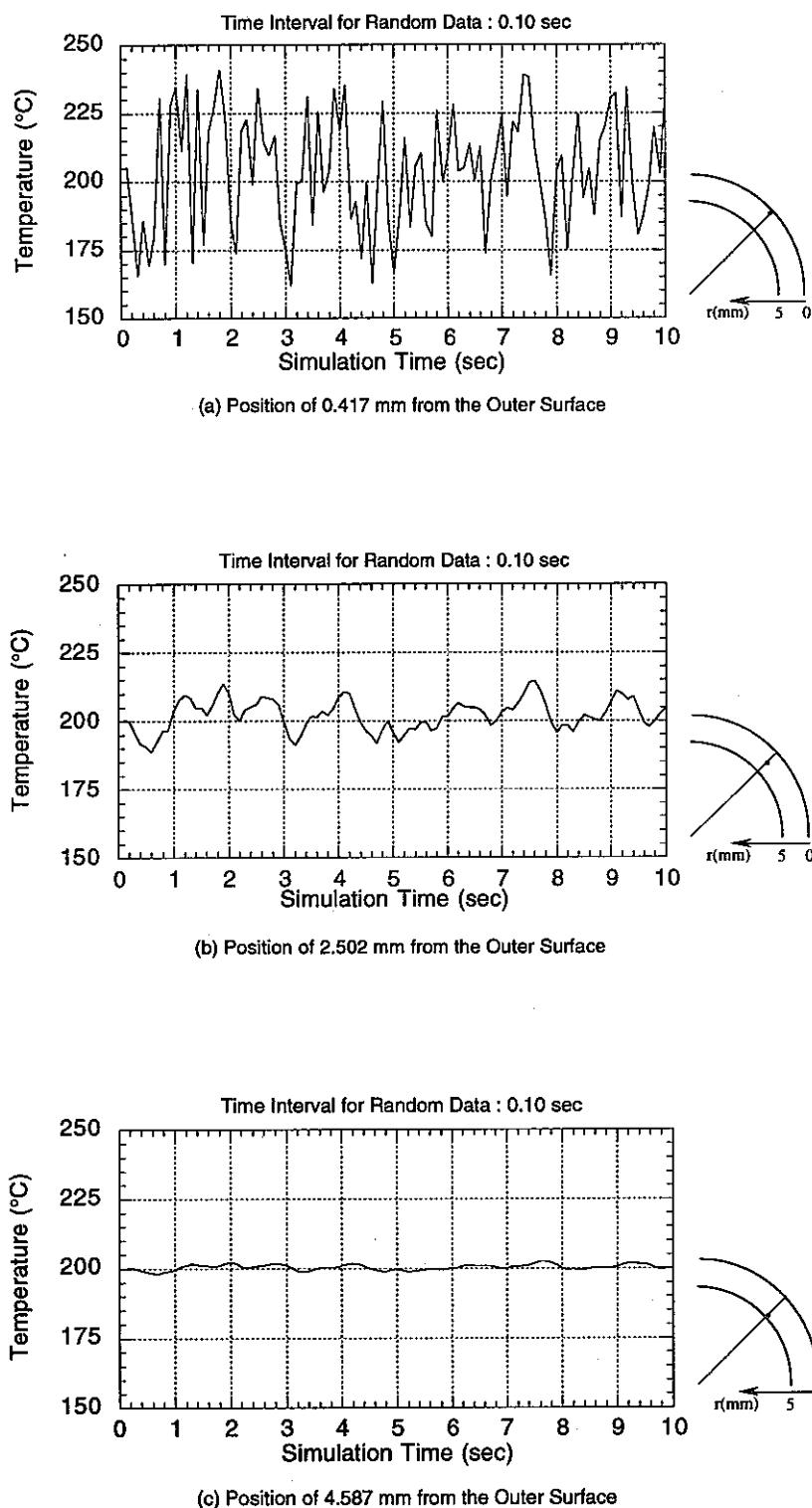


Fig. 2. 17 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.10 sec to the Tube Outer Wall

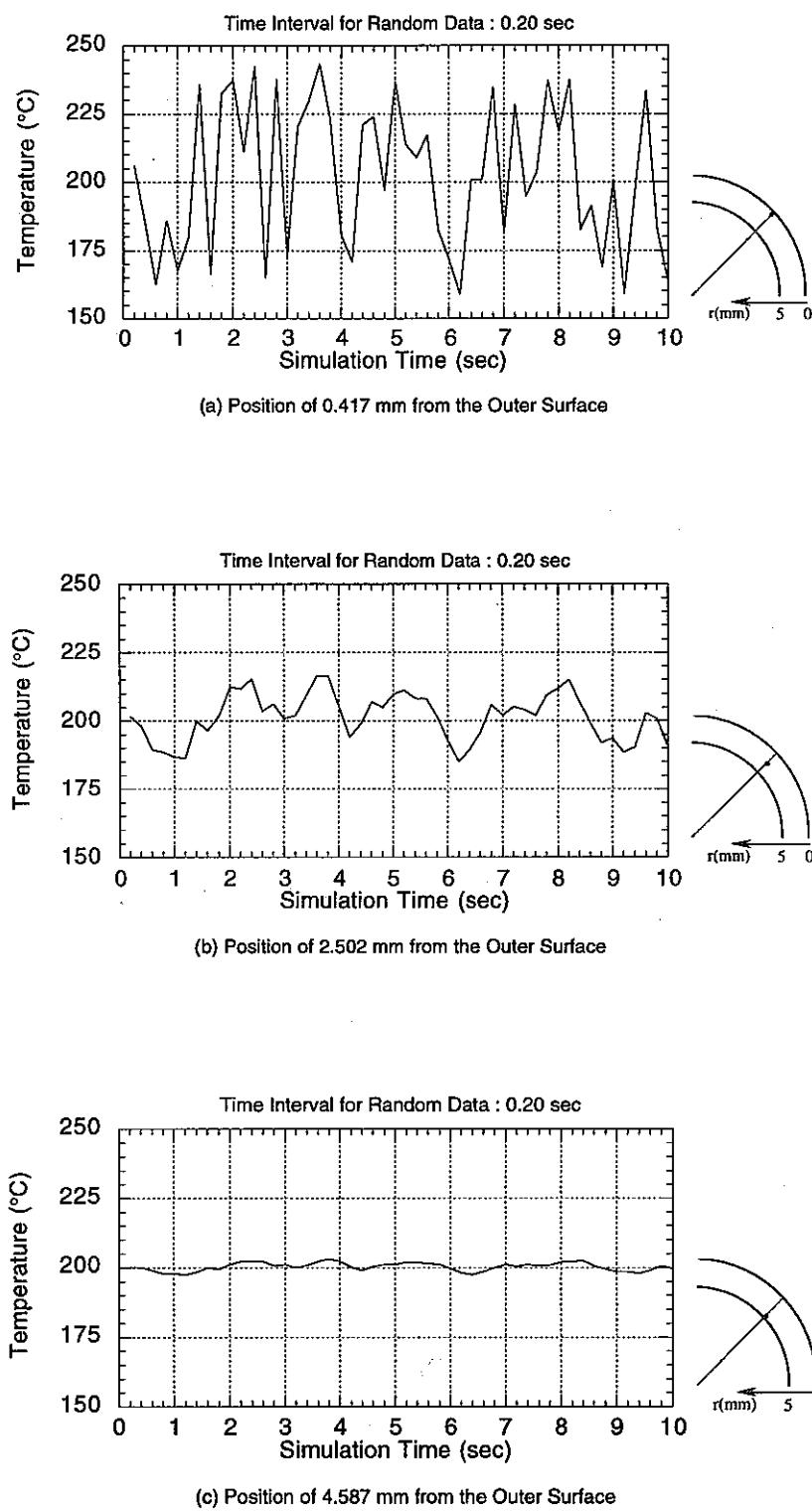


Fig. 2. 18 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.20 sec to the Tube Outer Wall

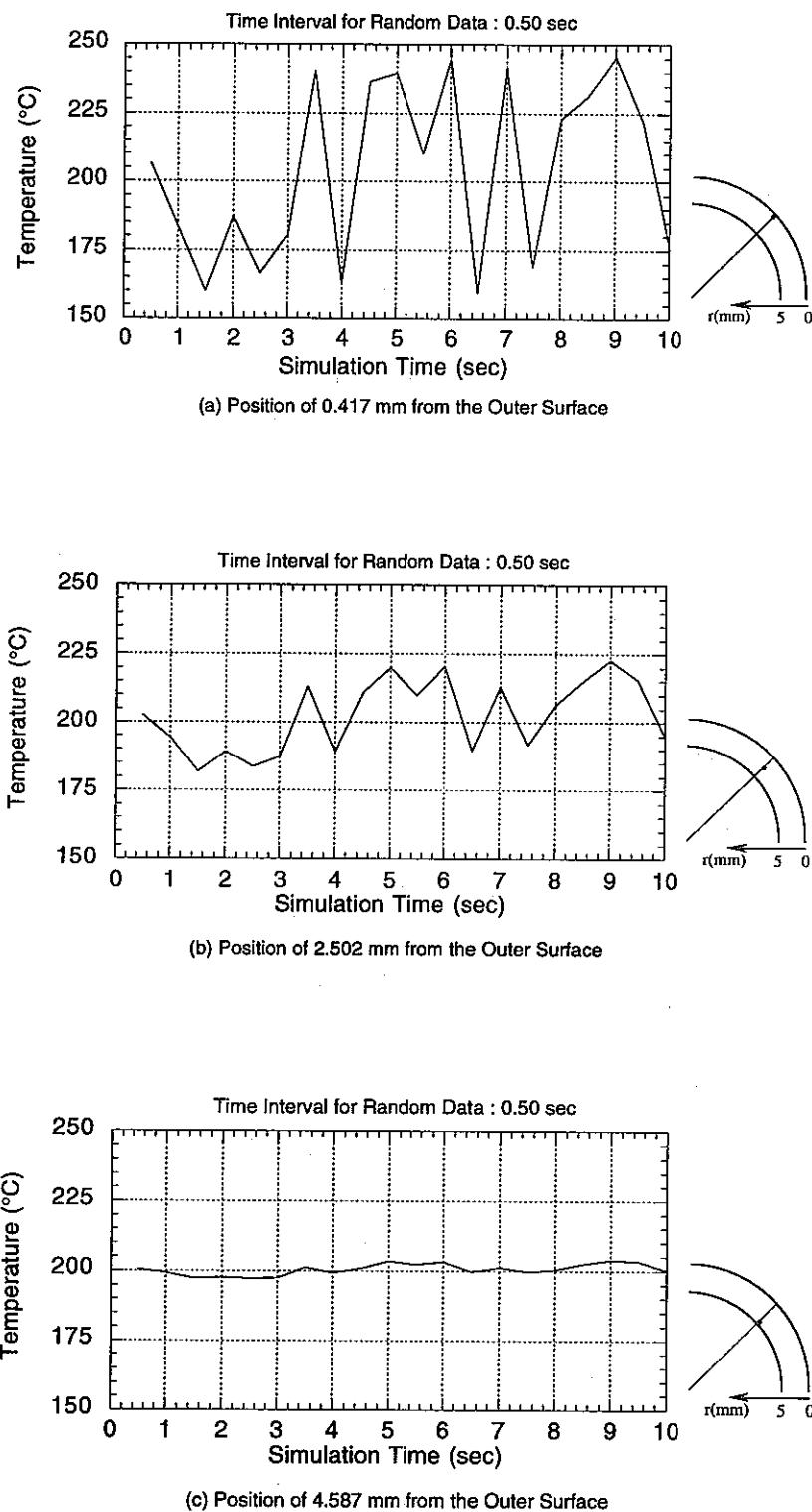


Fig. 2. 19 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.50 sec to the Tube Outer Wall

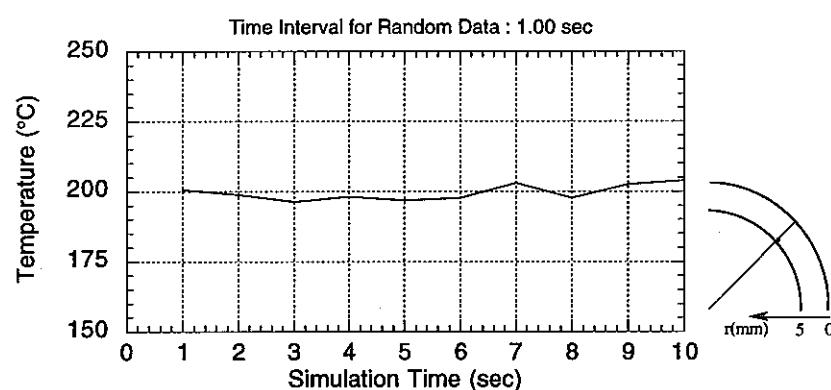
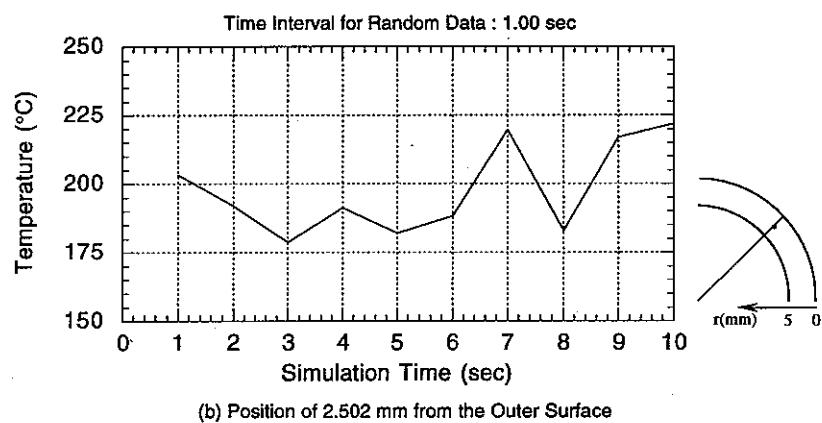
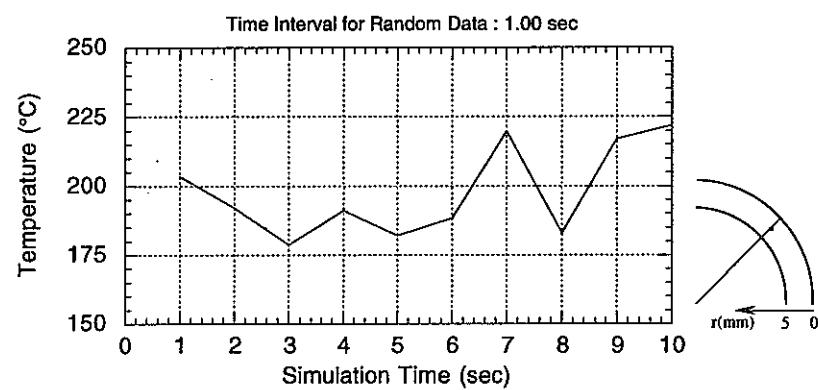


Fig. 2. 20 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 1.00 sec to the Tube Outer Wall

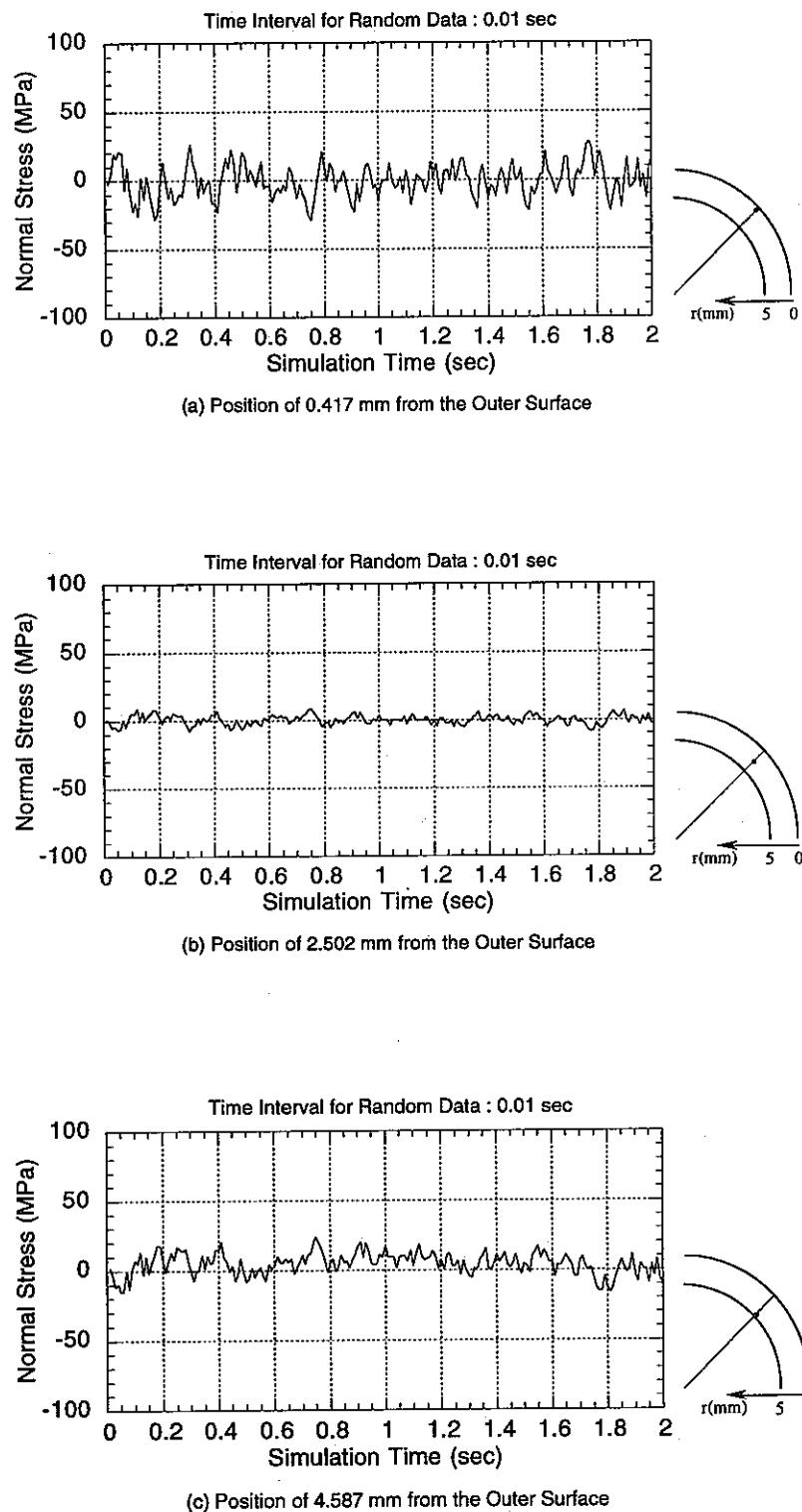


Fig. 2.21 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.01 sec to the Tube Outer Wall

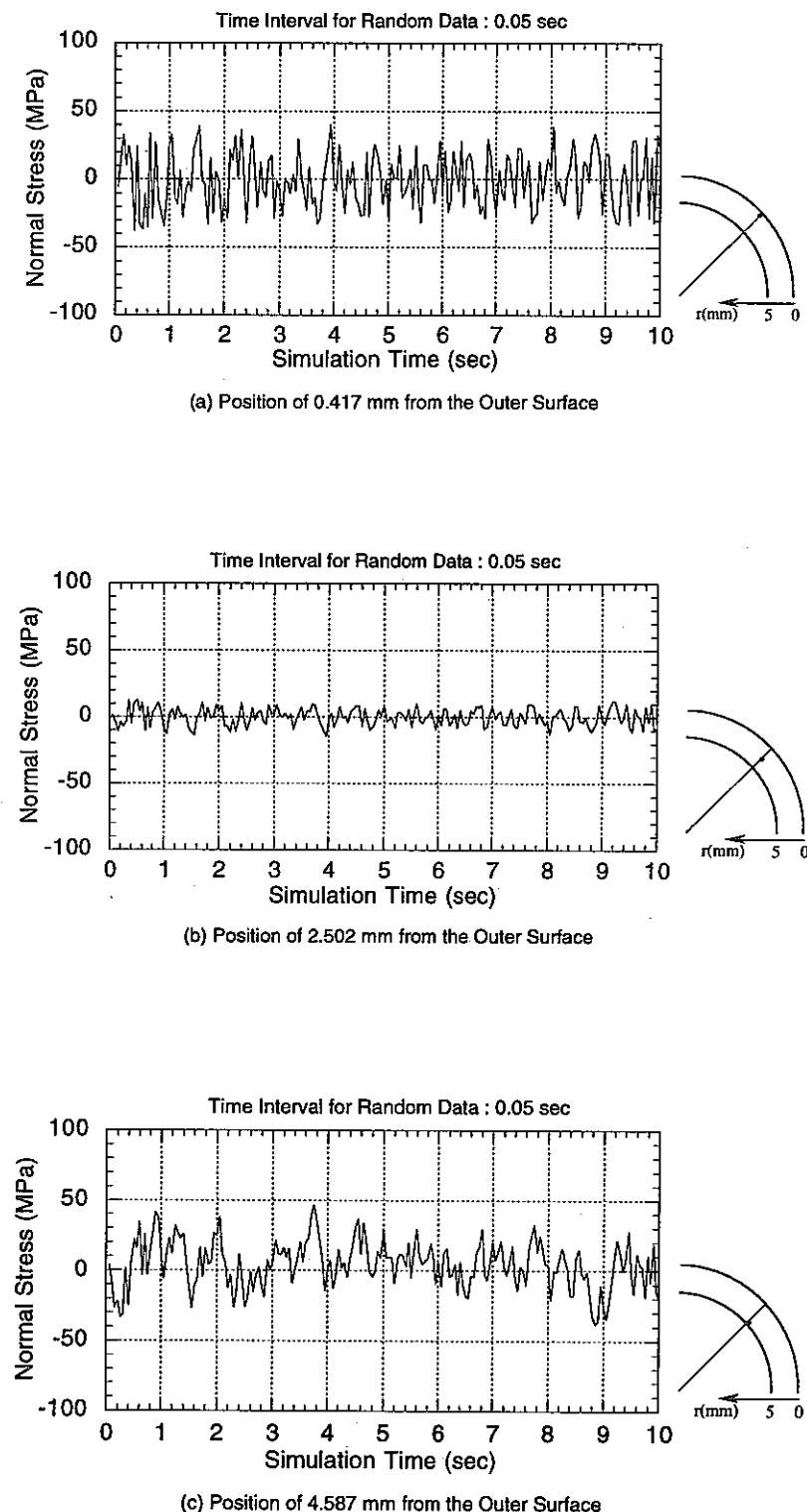


Fig. 2. 22 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

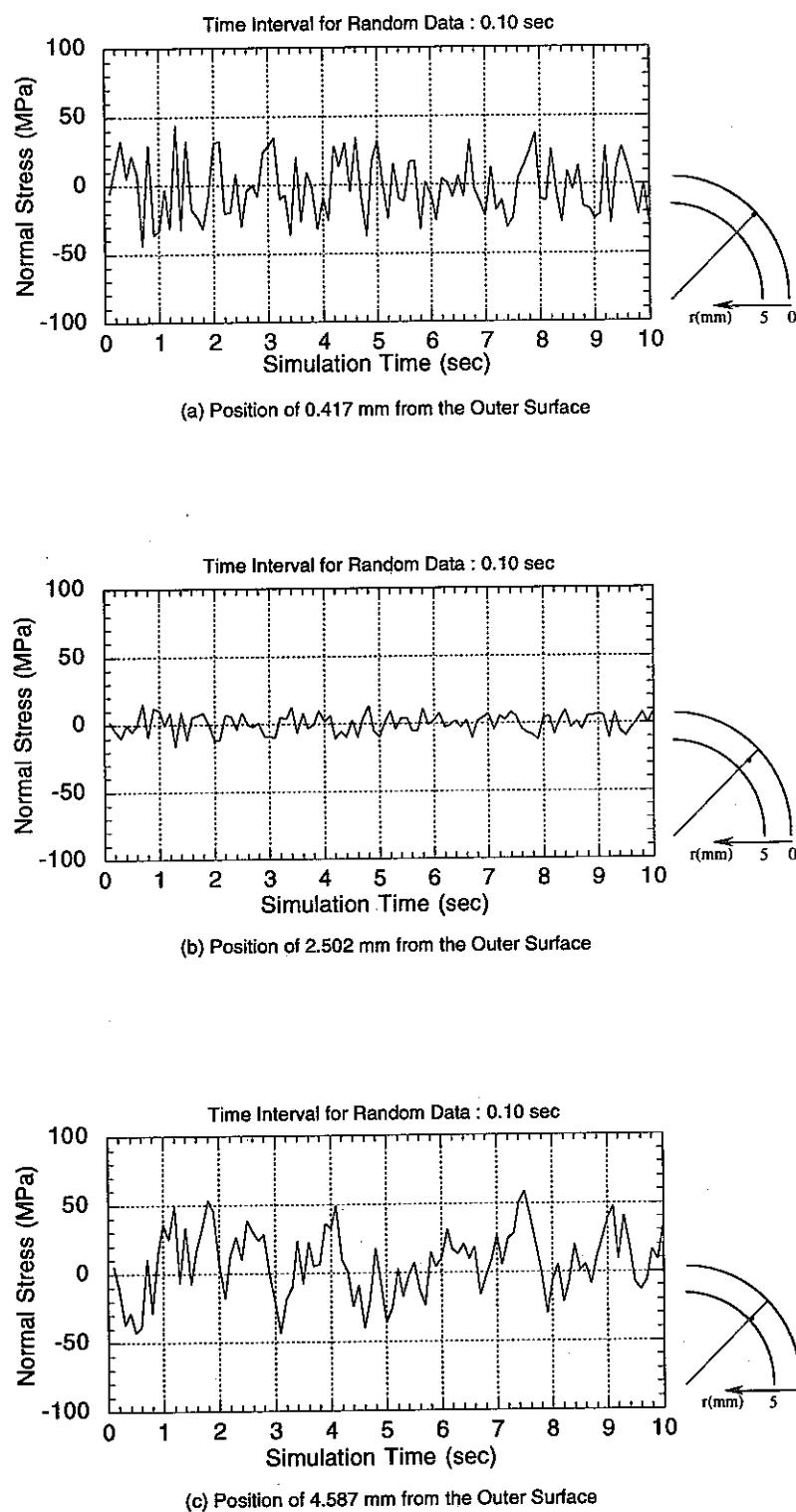


Fig. 2. 23 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.10 sec to the Tube Outer Wall

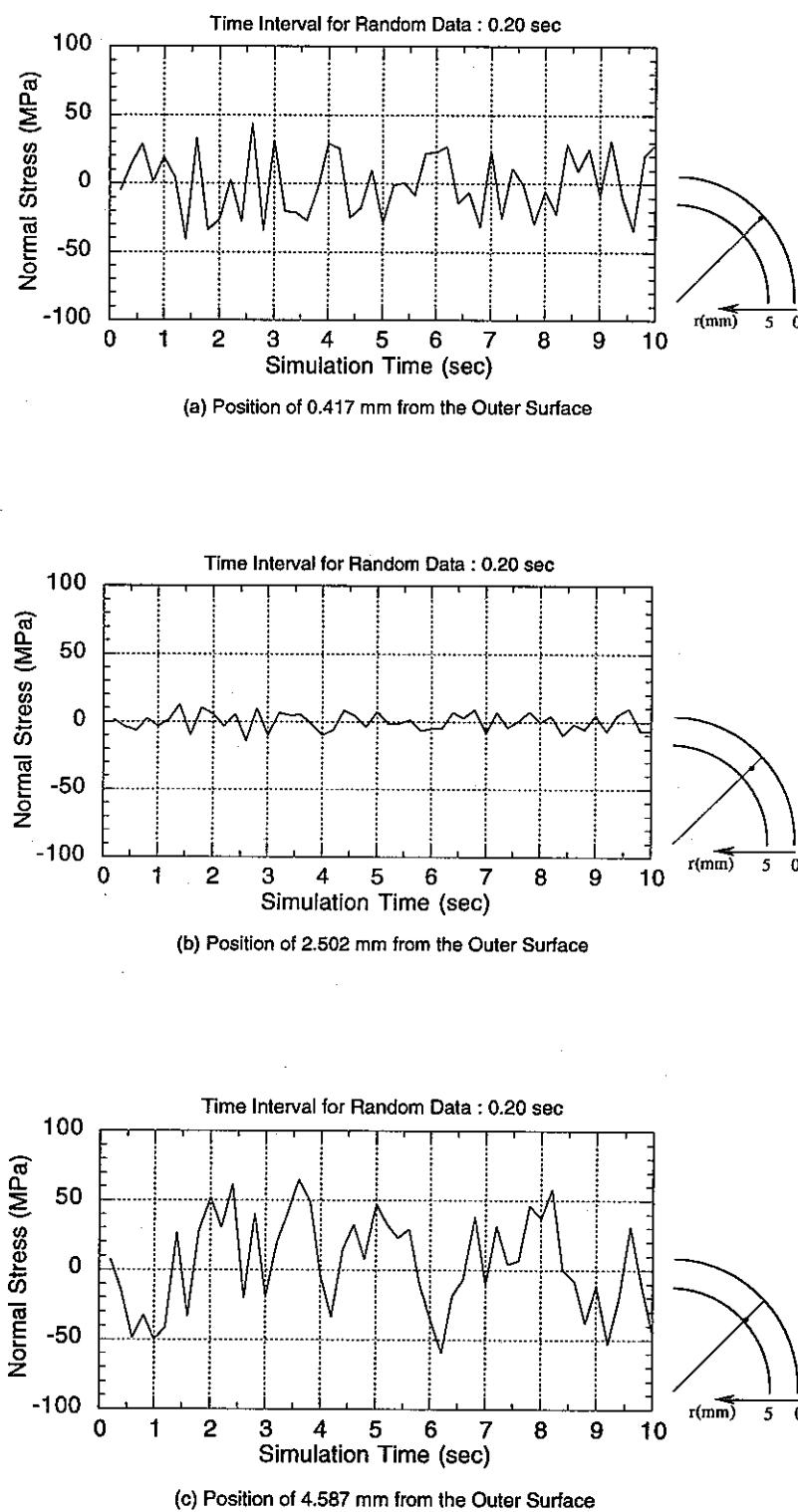


Fig. 2. 24 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.20 sec to the Tube Outer Wall

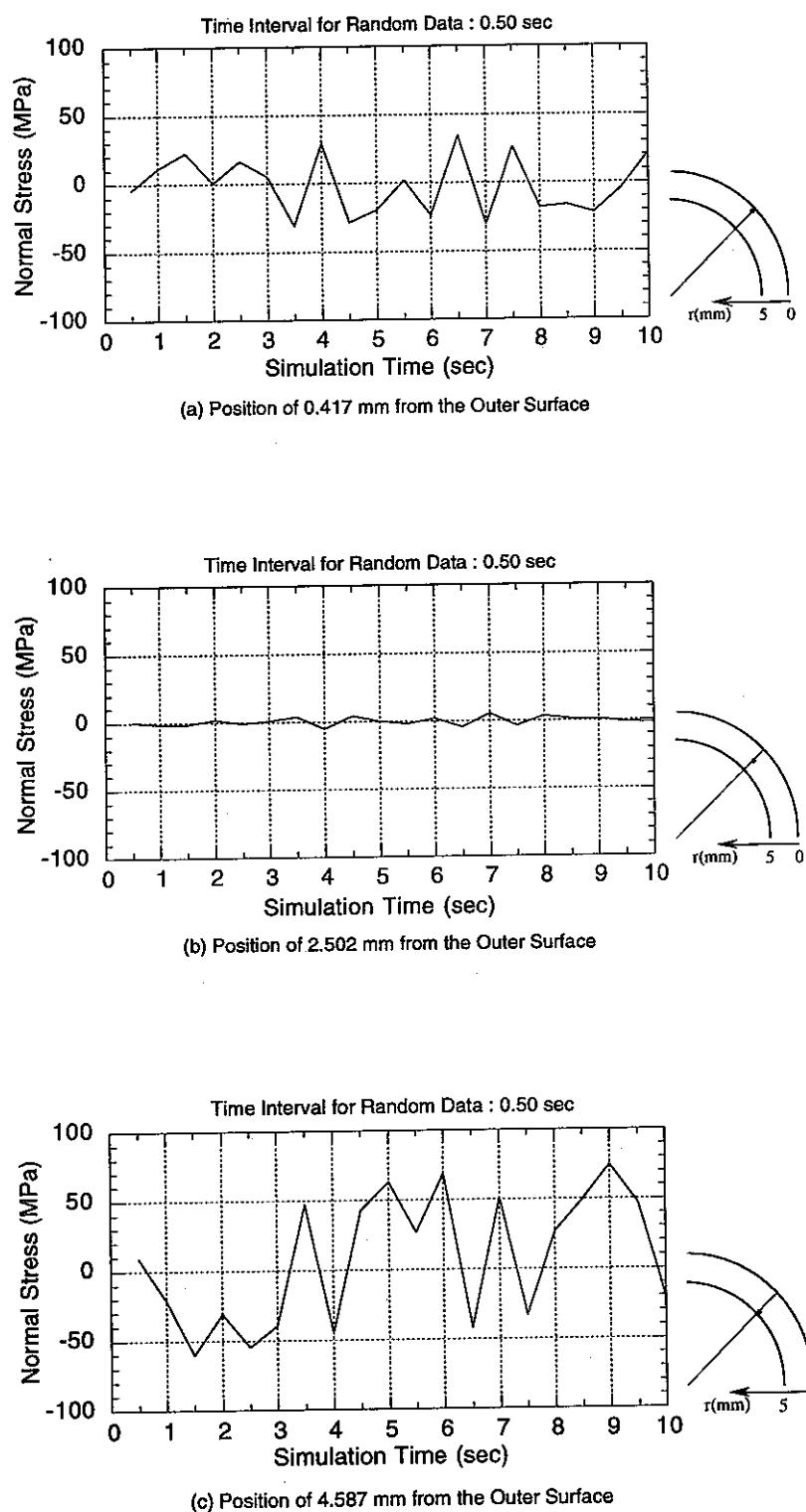


Fig. 2. 25 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 0.50 sec to the Tube Outer Wall

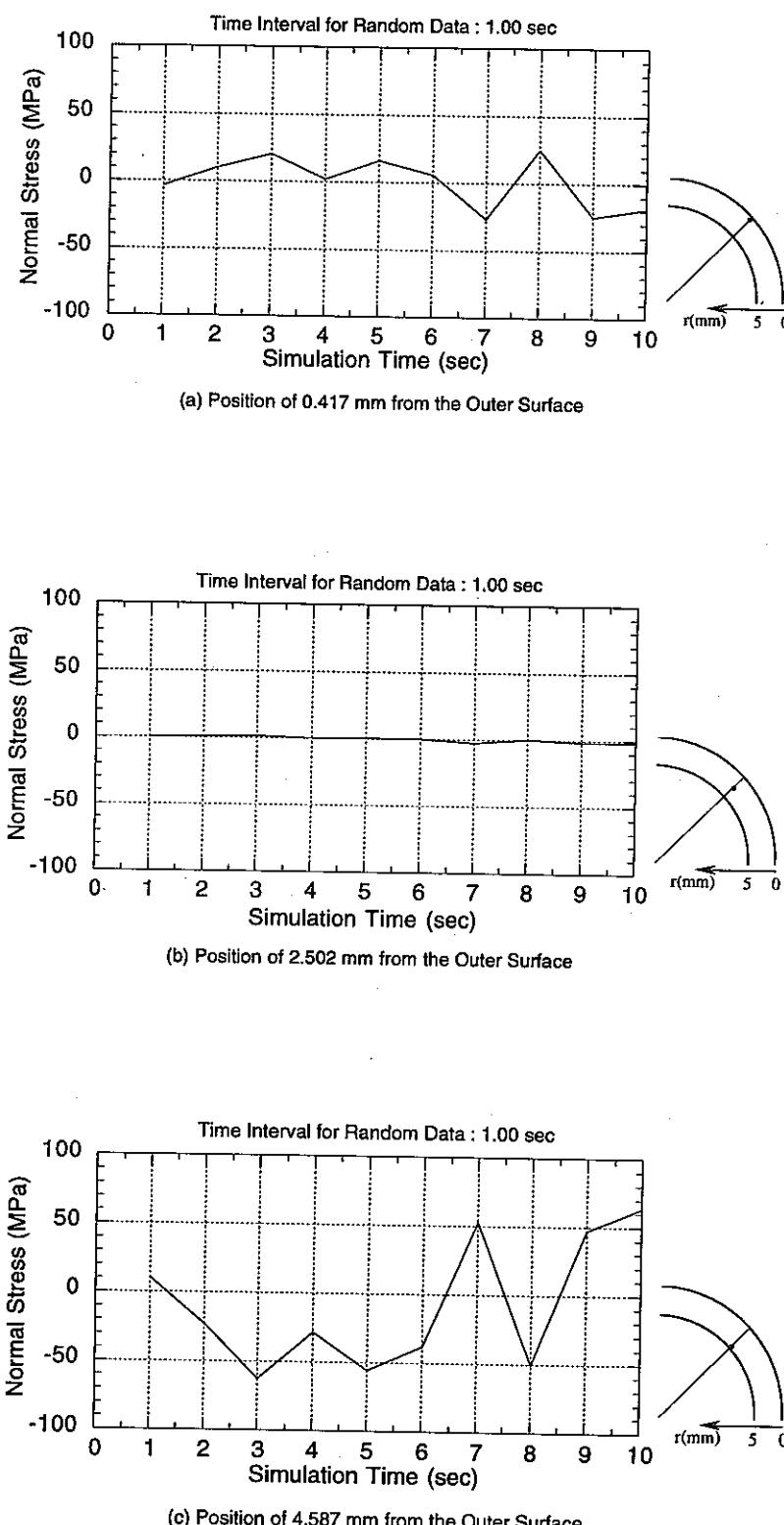


Fig. 2.26 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Random Components with the Time Interval 1.00 sec to the Tube Outer Wall

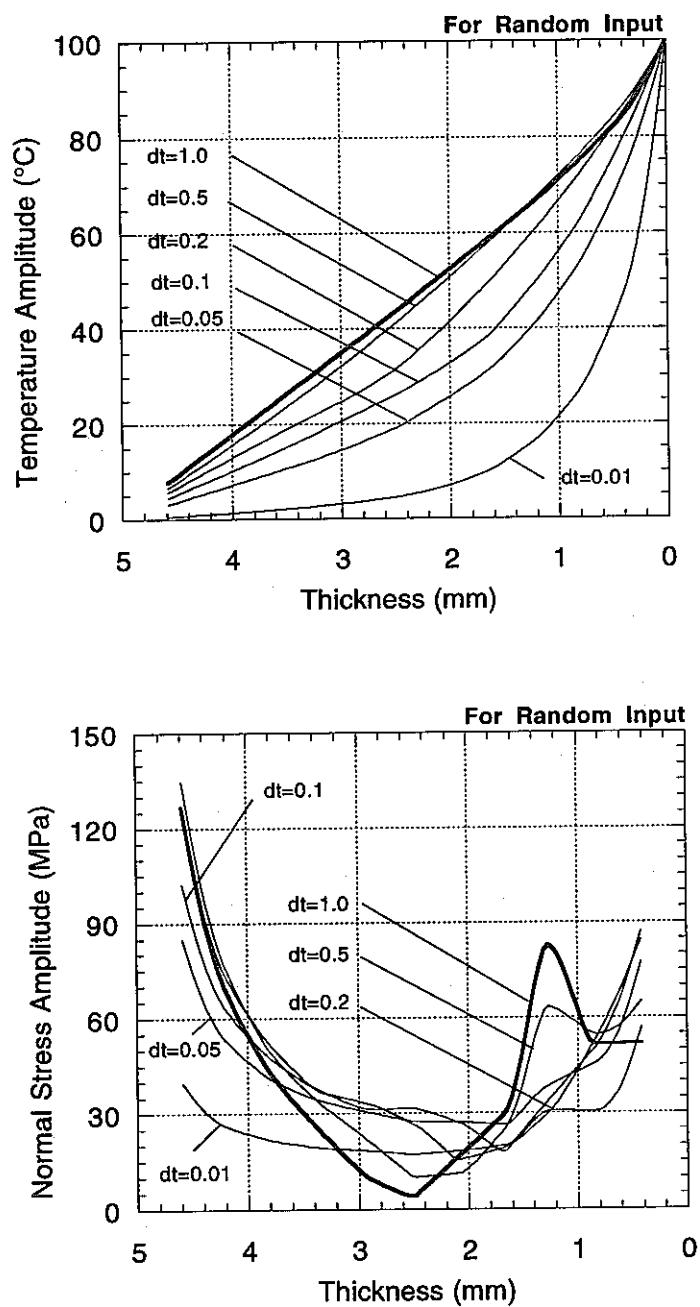


Fig. 2. 27 Calculated Responses of Temperature and Thermal Stress Amplitudes in the Flow Guide Tube under the Various Input Conditions of Time Interval for Random Components to the Tube Outer Wall

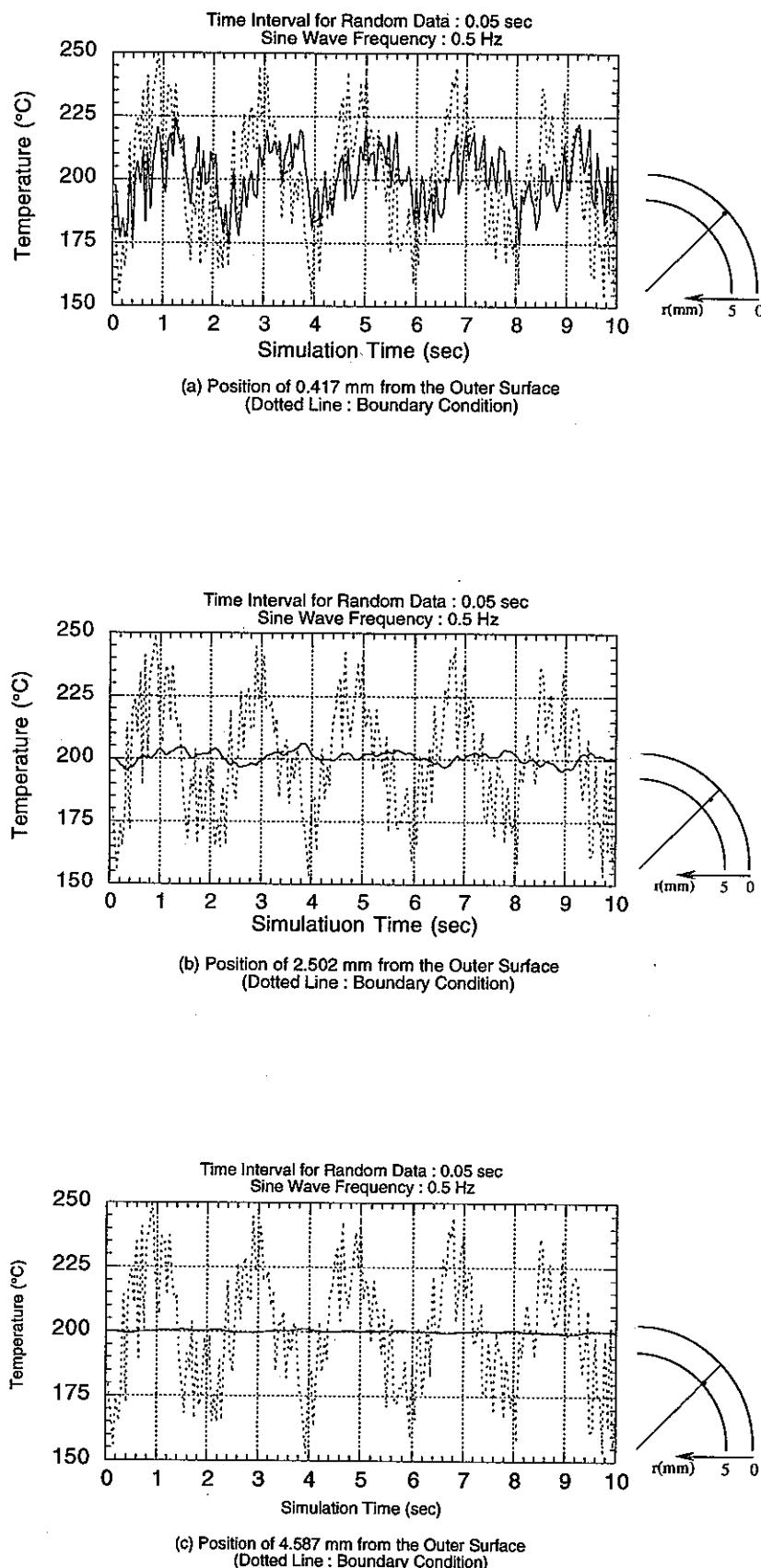


Fig. 2.28 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

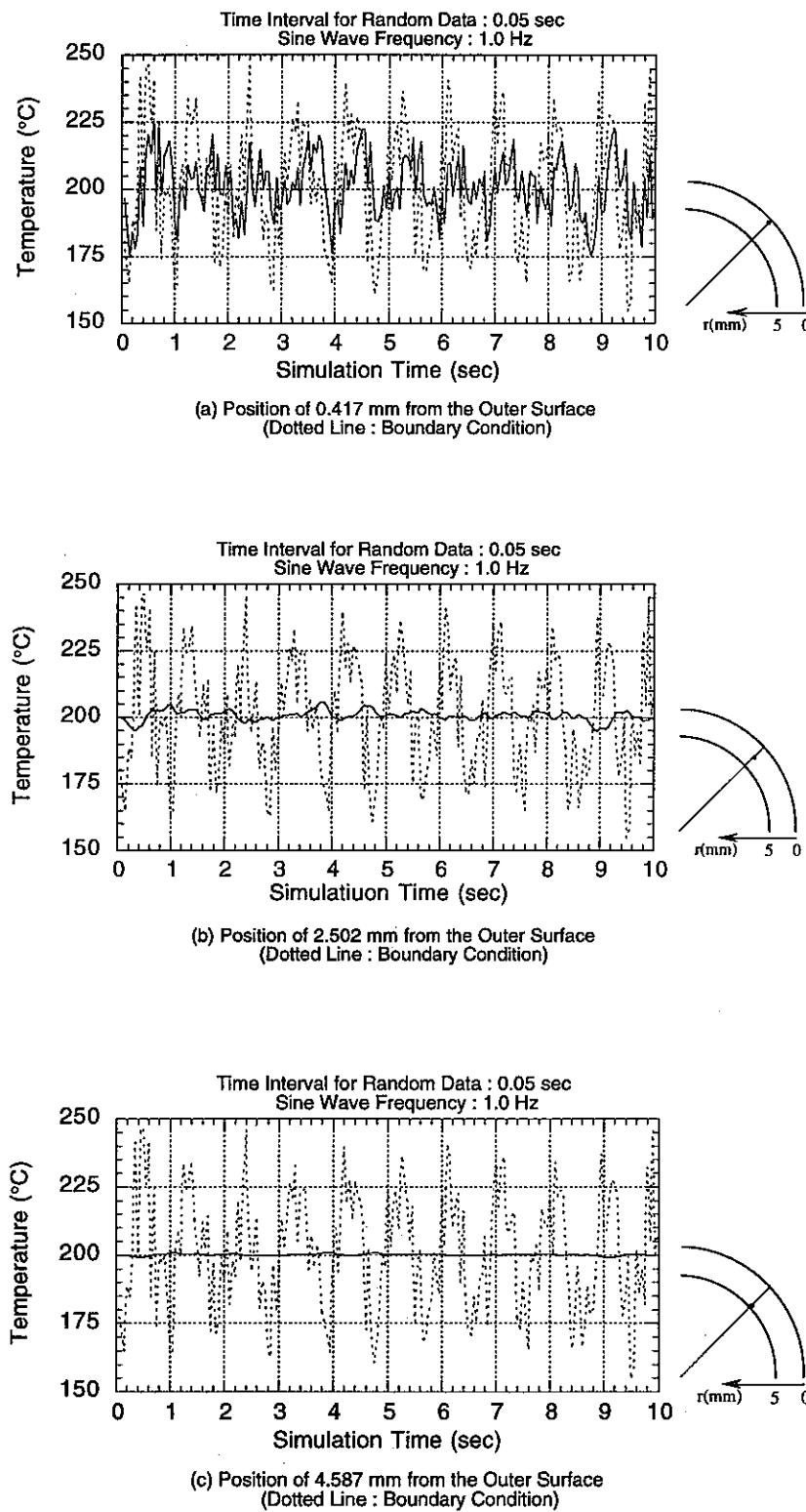


Fig. 2. 29 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

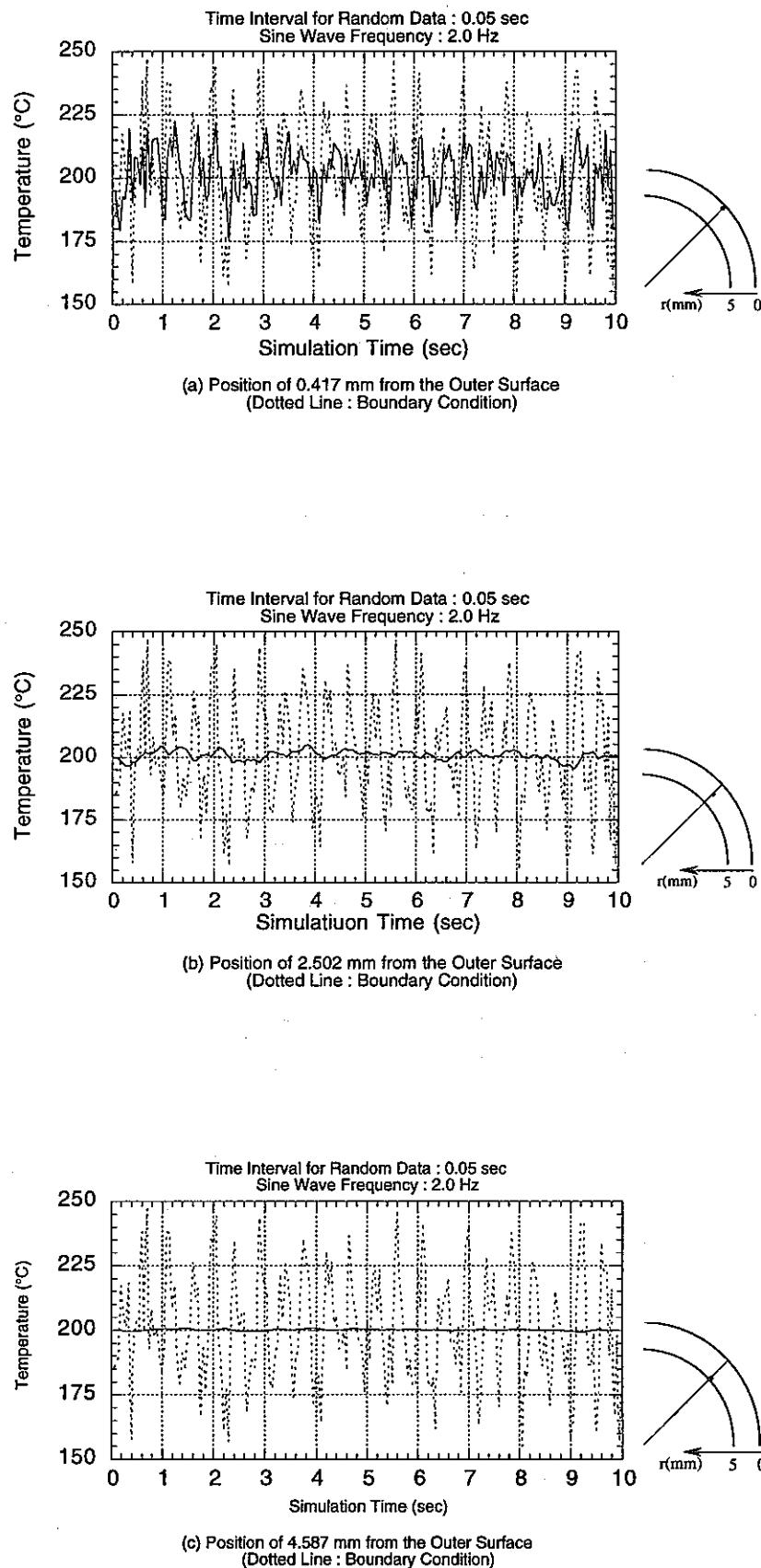


Fig. 2. 30 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

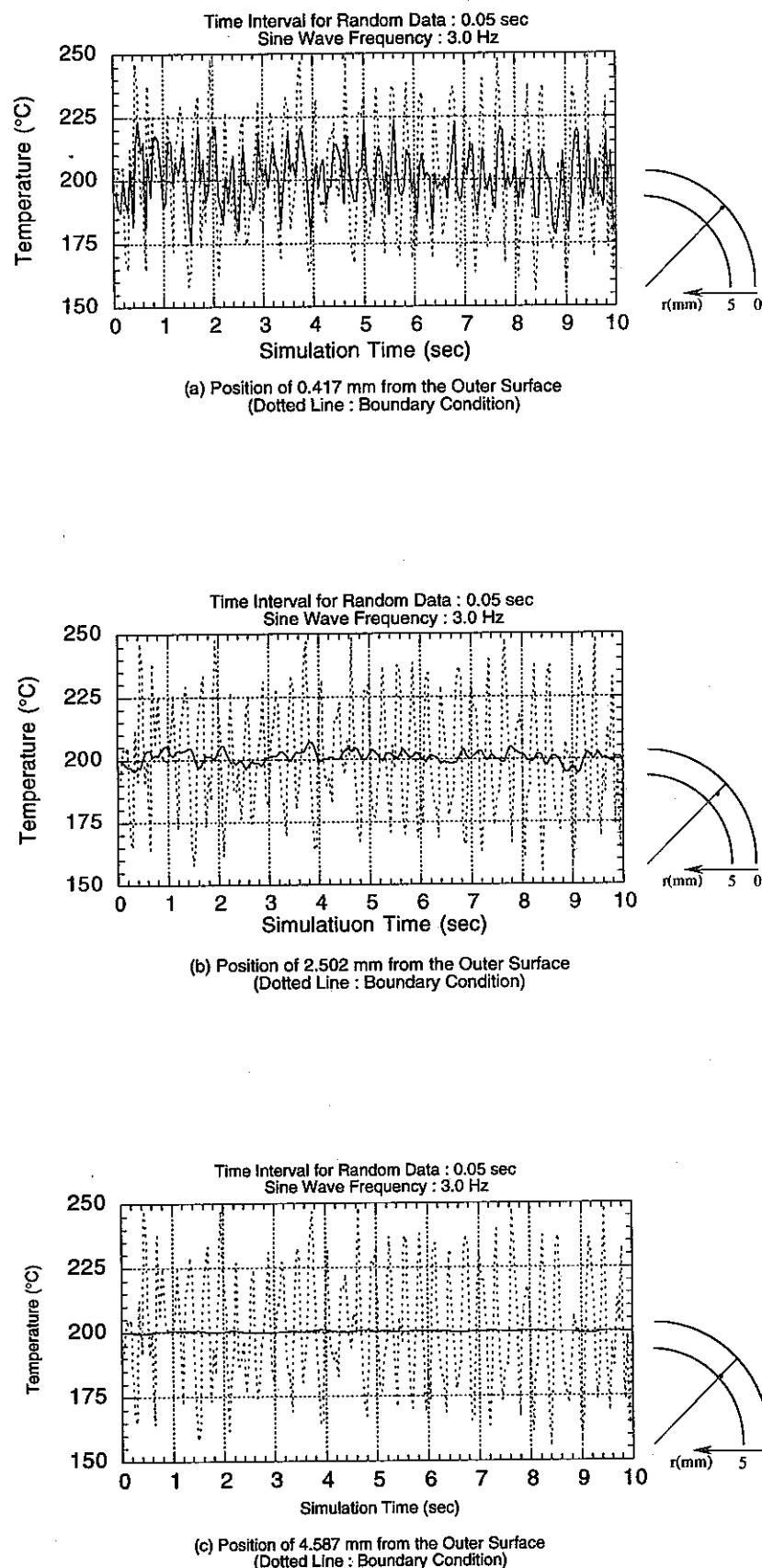


Fig. 2.31 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

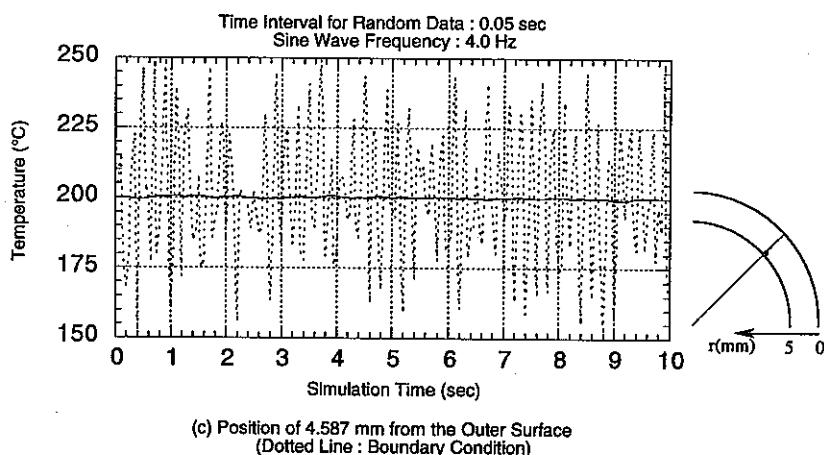
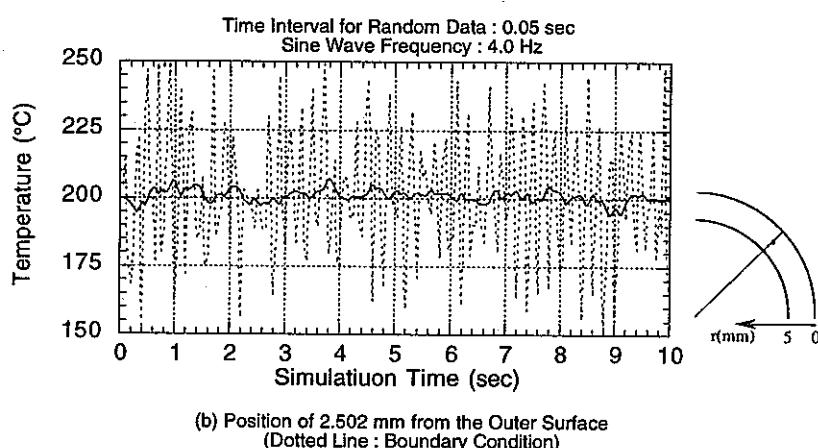
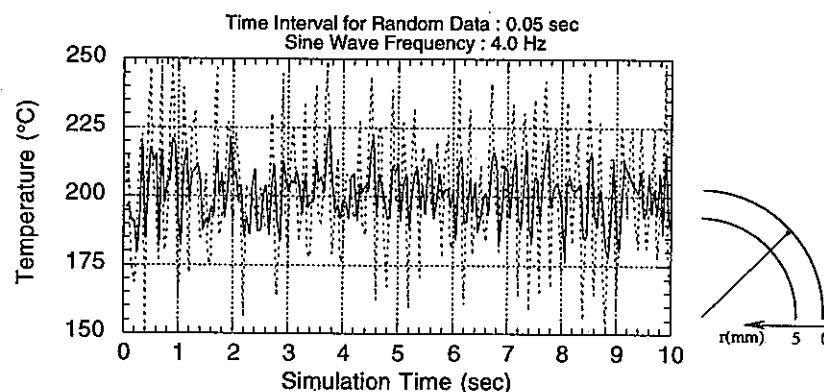


Fig. 2. 32 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

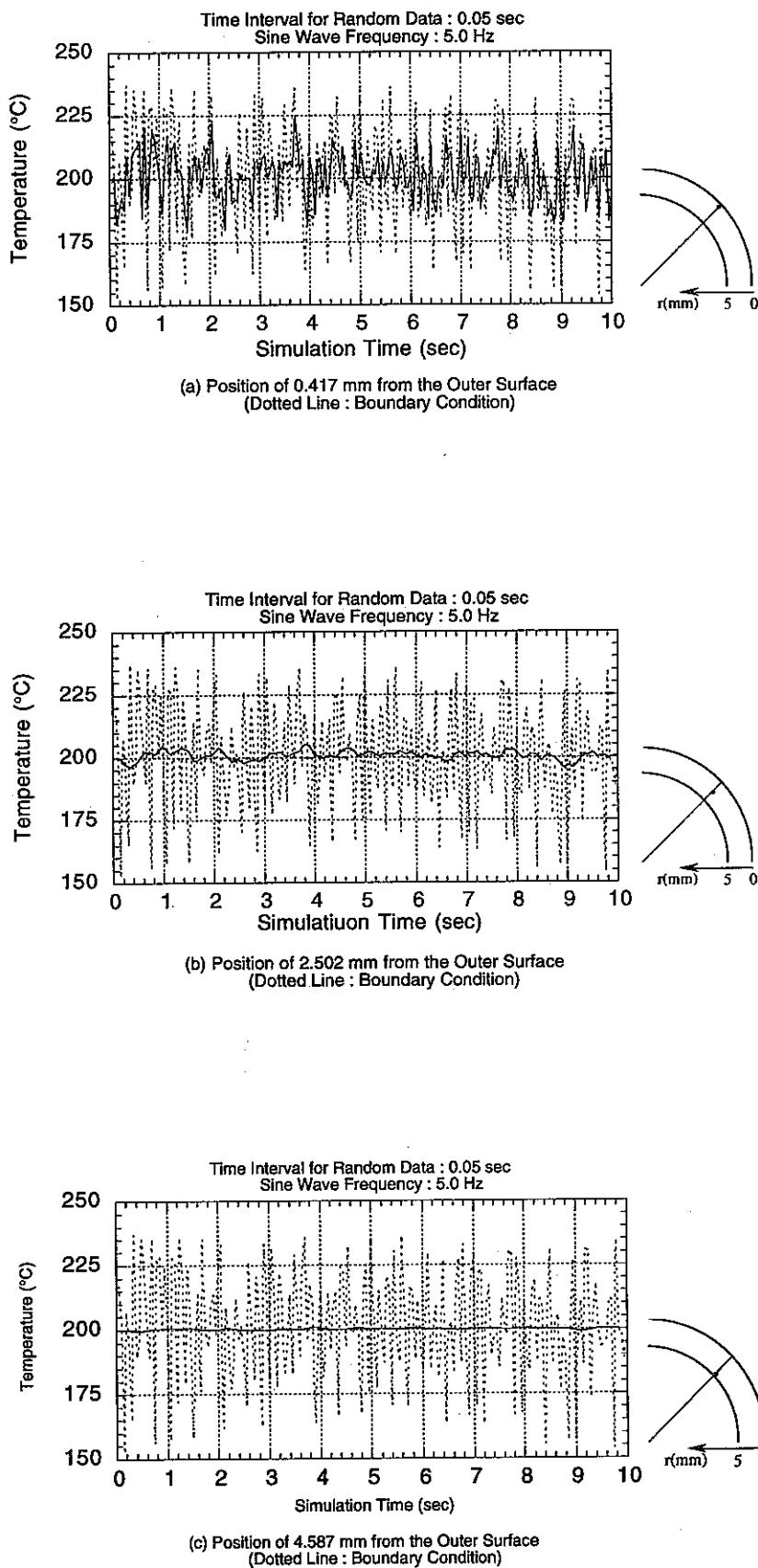


Fig. 2.33 Temperature Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

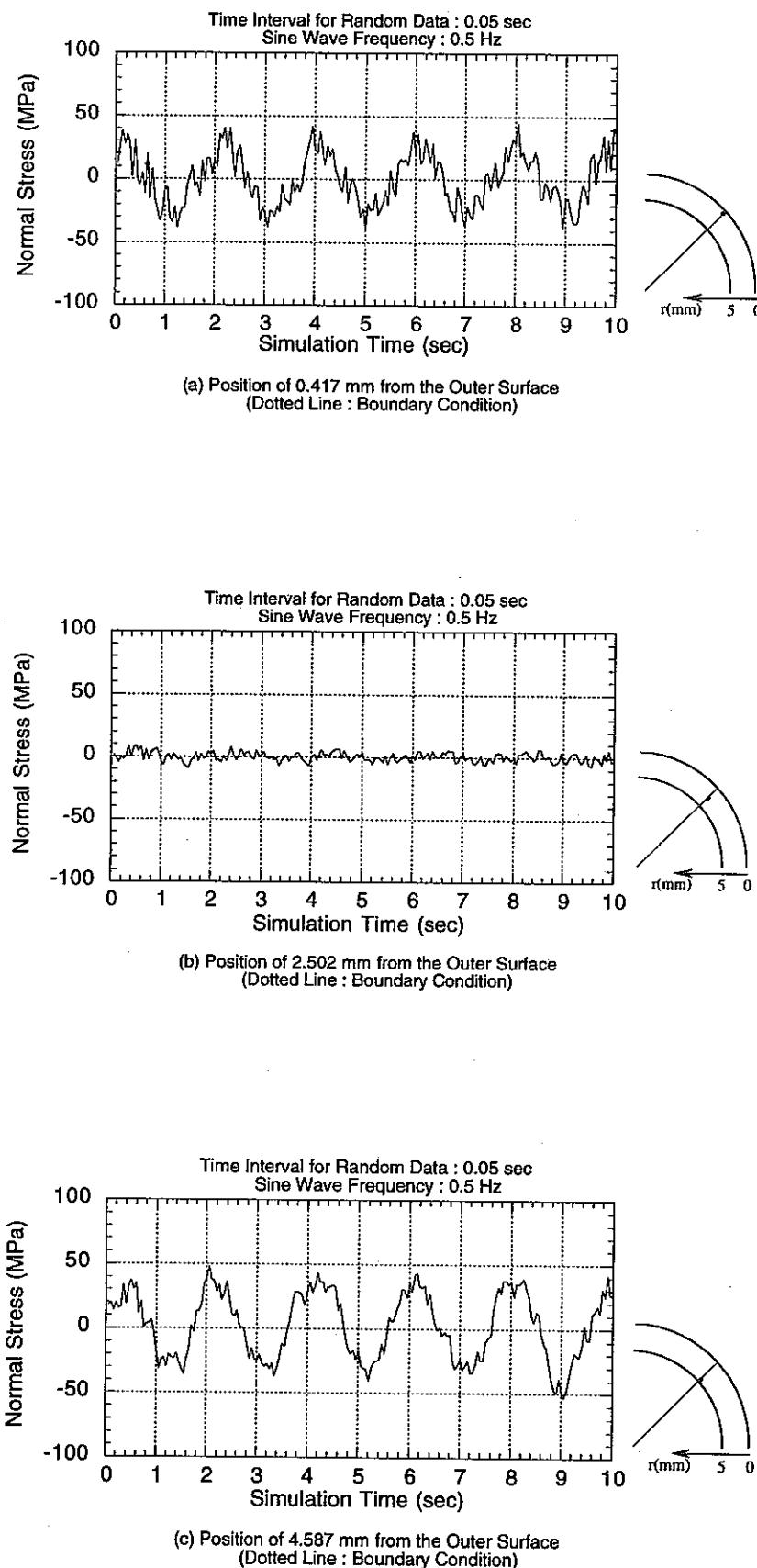


Fig. 2. 34 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

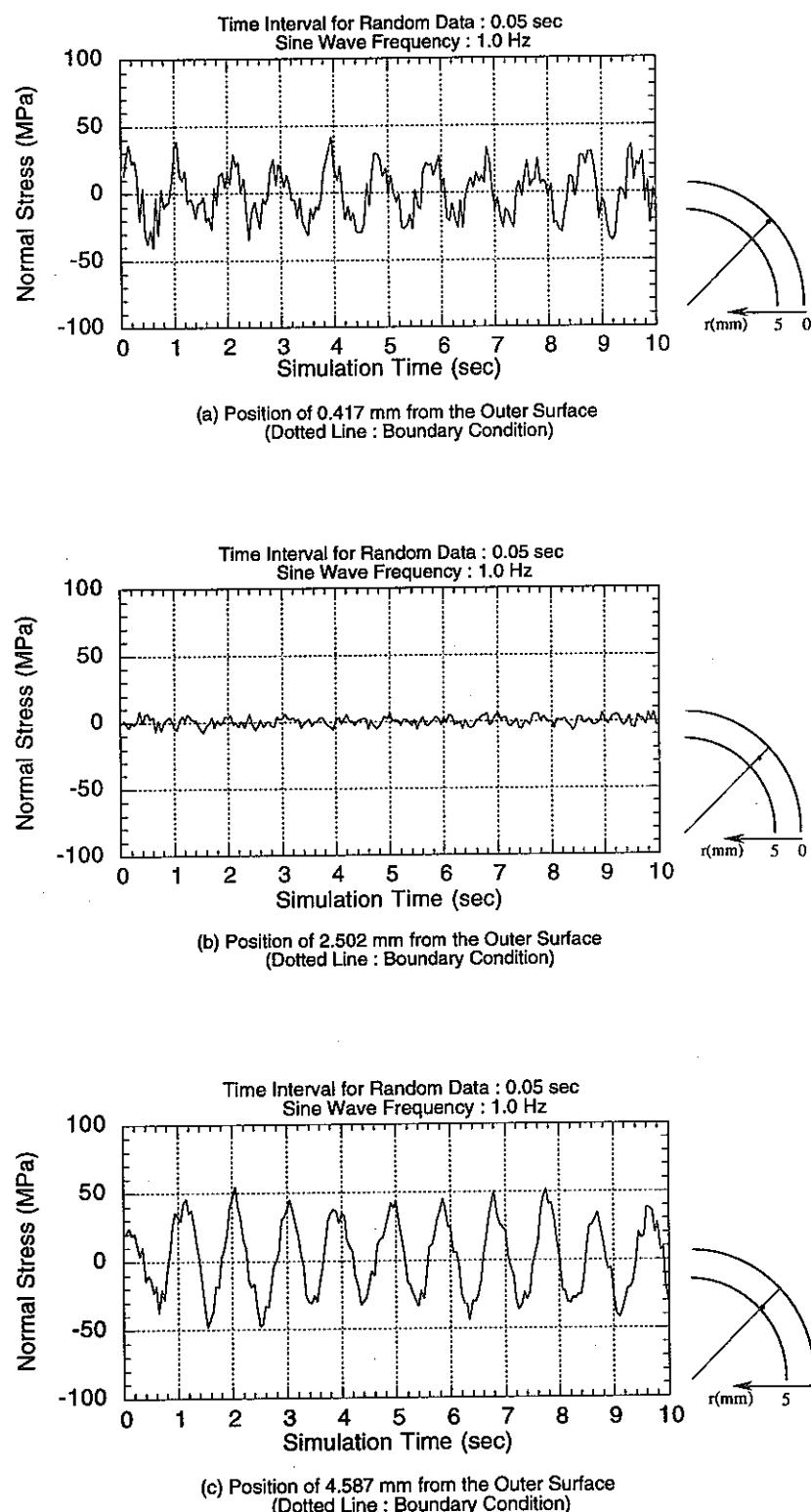


Fig. 2.35 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

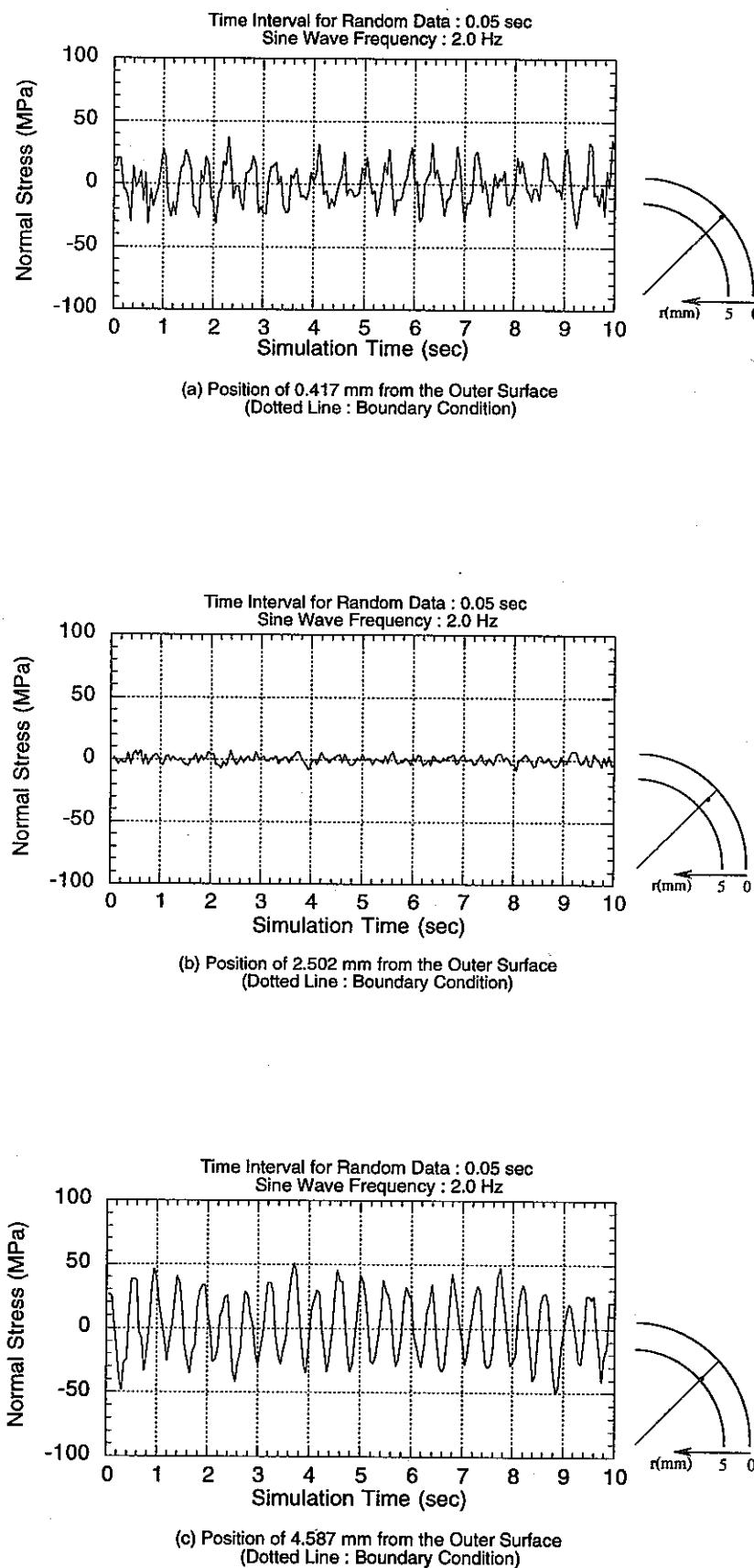


Fig. 2. 36 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

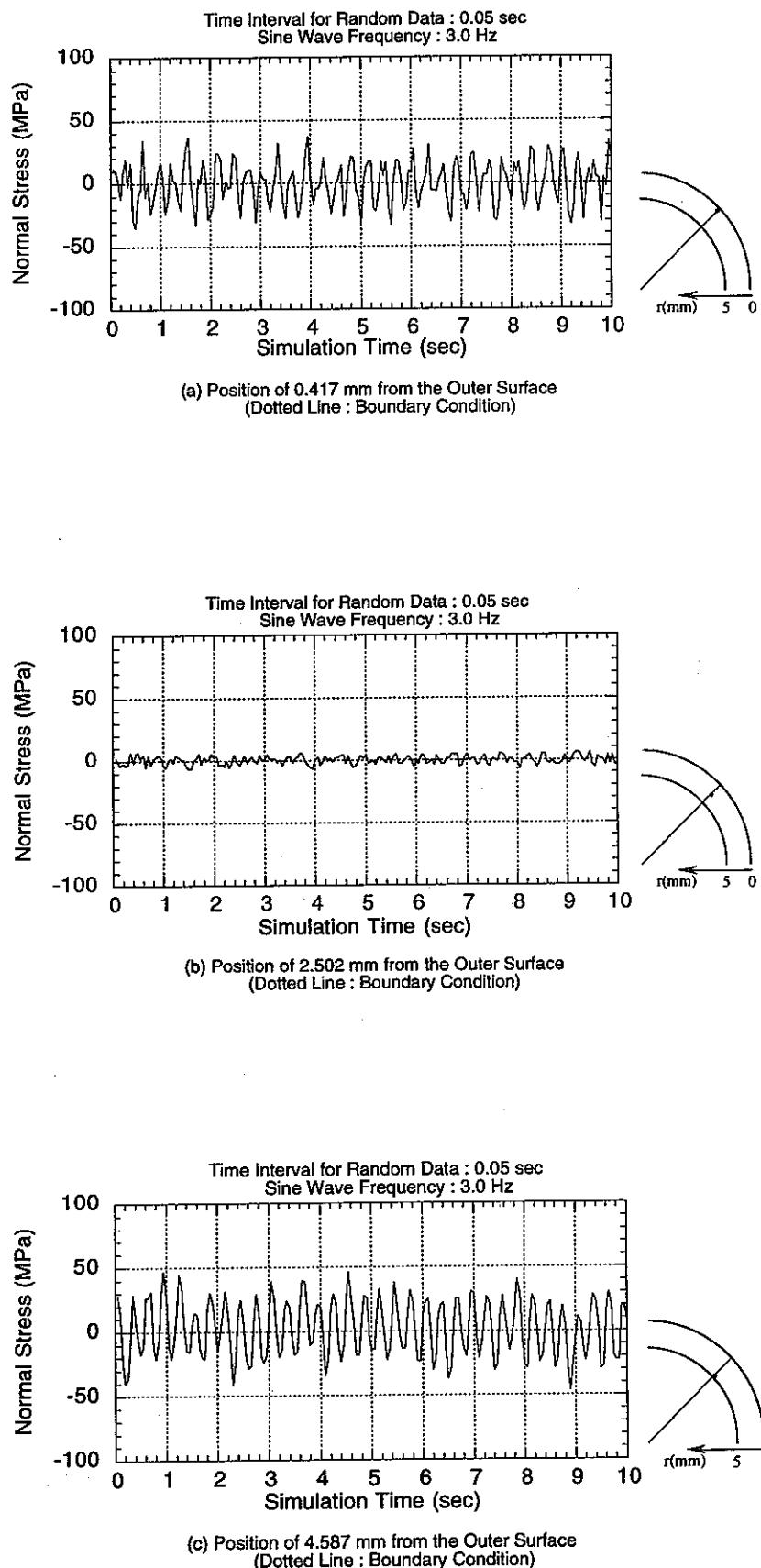


Fig. 2.37 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

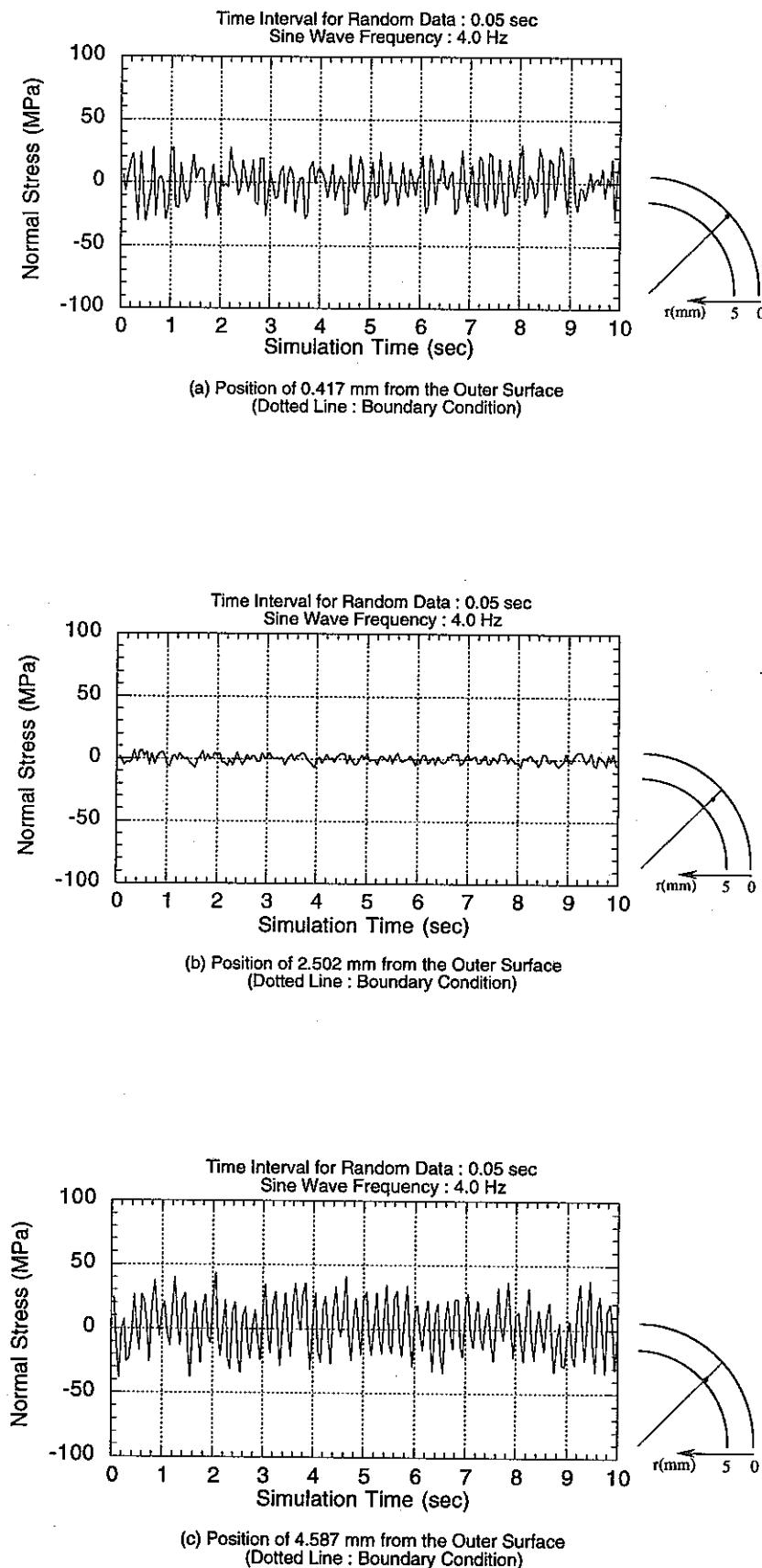


Fig. 2. 38 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

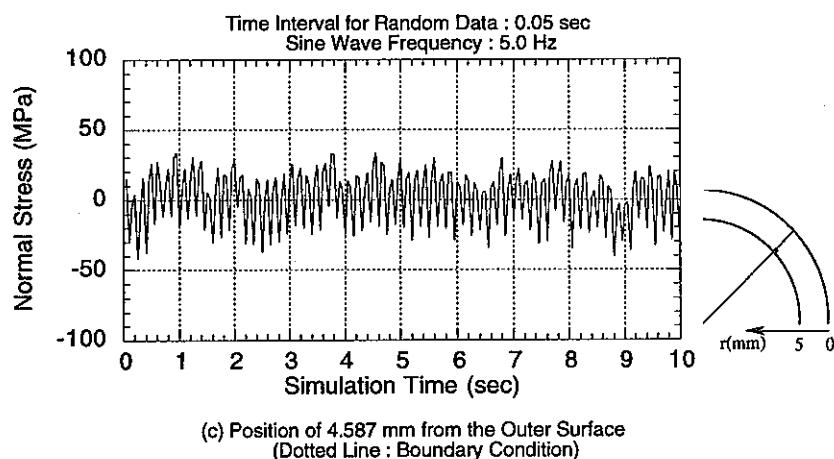
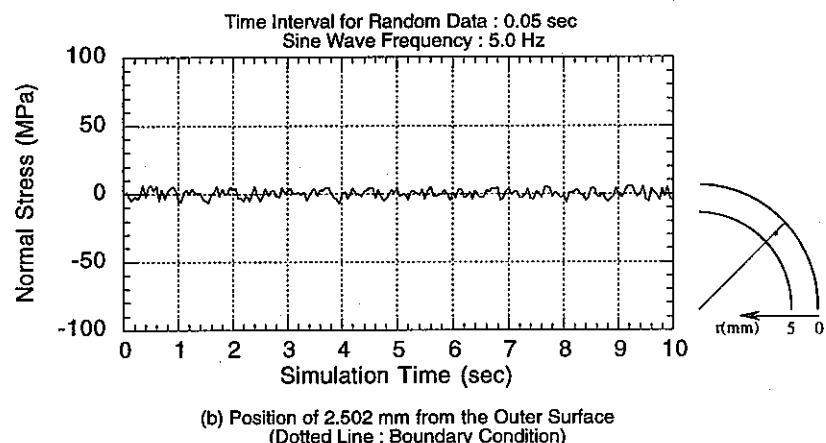
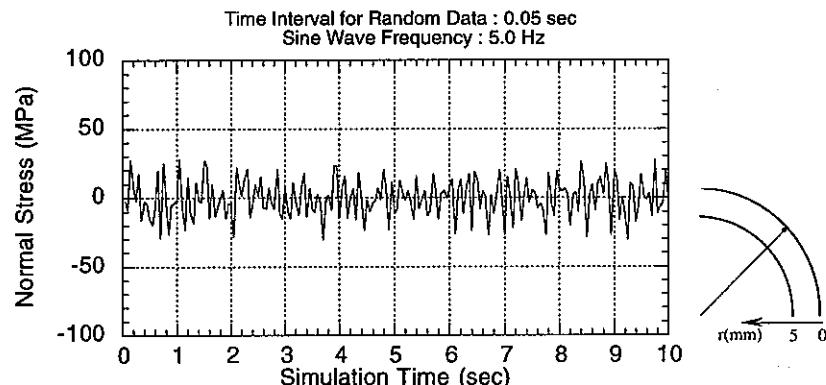


Fig. 2. 39 Thermal Stress Transients in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

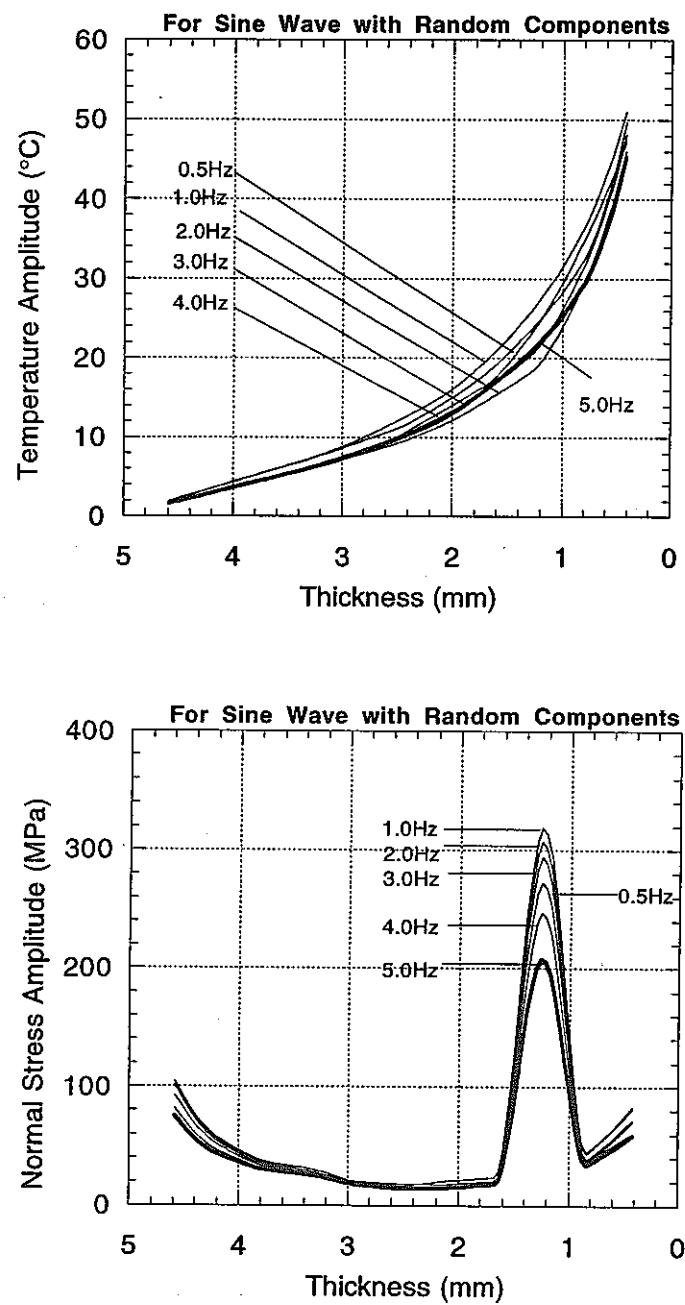


Fig. 2. 40 Calculated Responses of Temperature and Thermal Stress Amplitudes in the Flow Guide Tube under the Various Input Conditions for Sine Wave Frequency with Random Components to the Tube Outer Wall

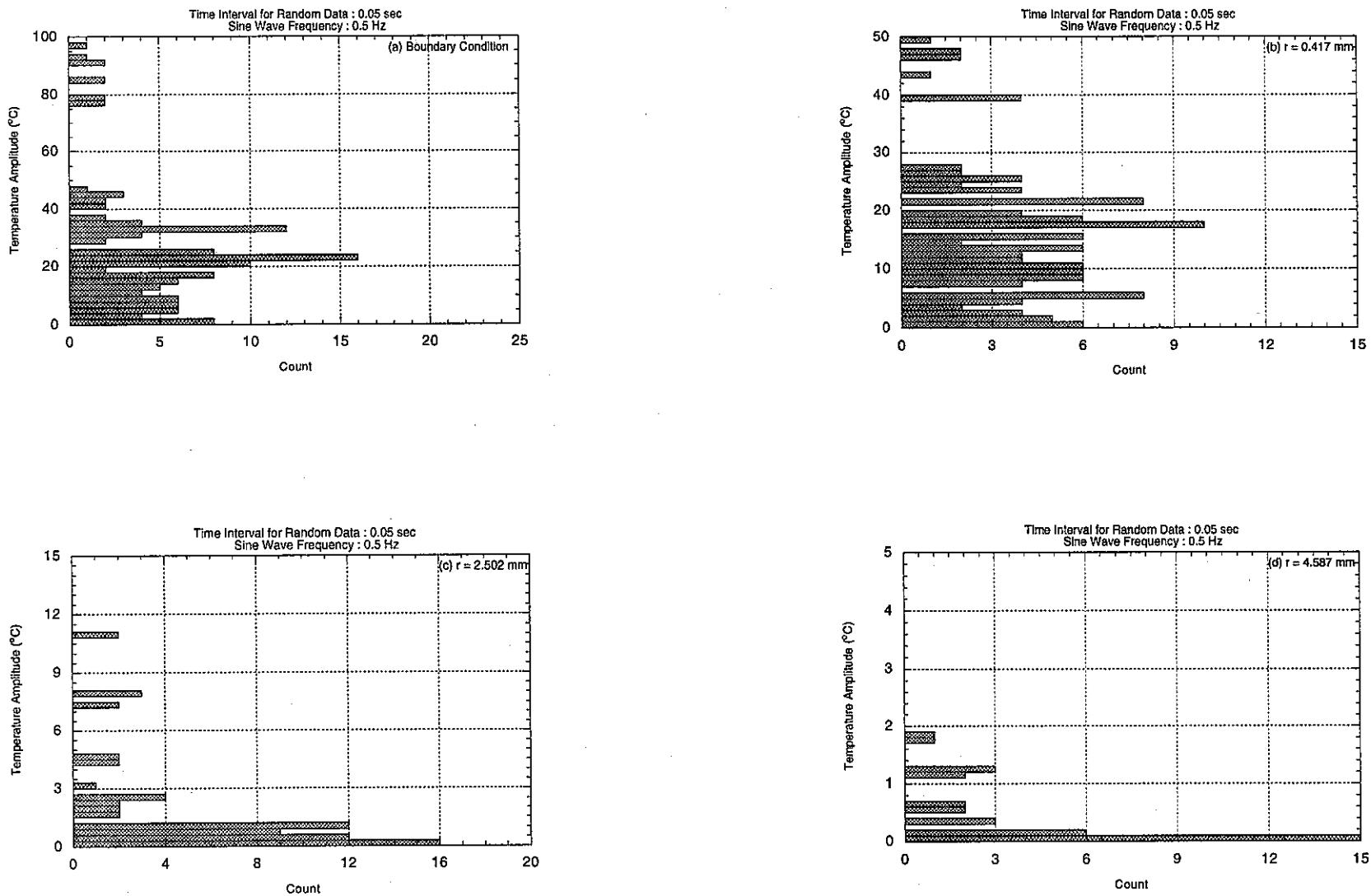


Fig. 3. 1 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube  
under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of  
the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

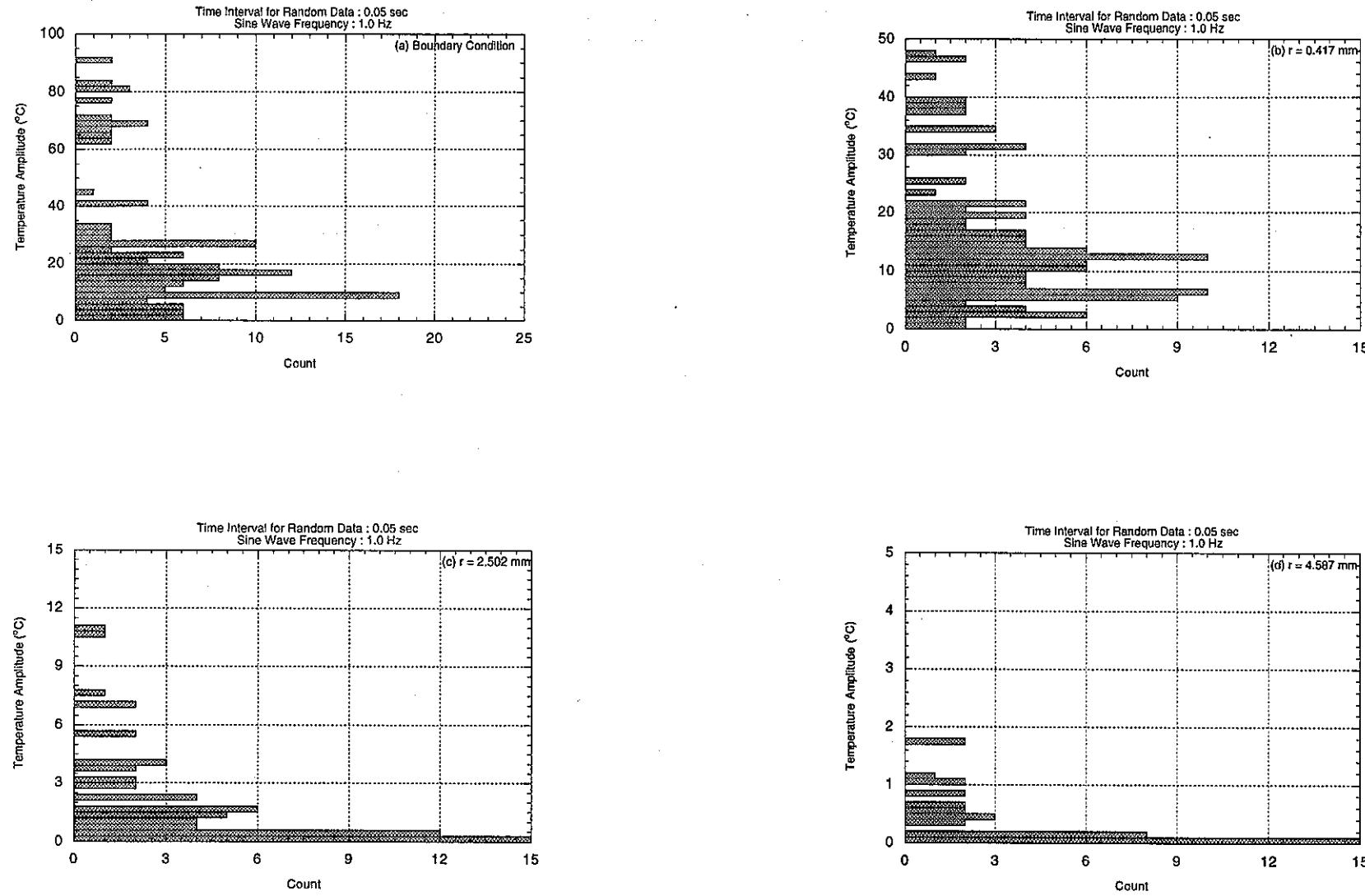


Fig. 3. 2 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube  
under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of  
the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

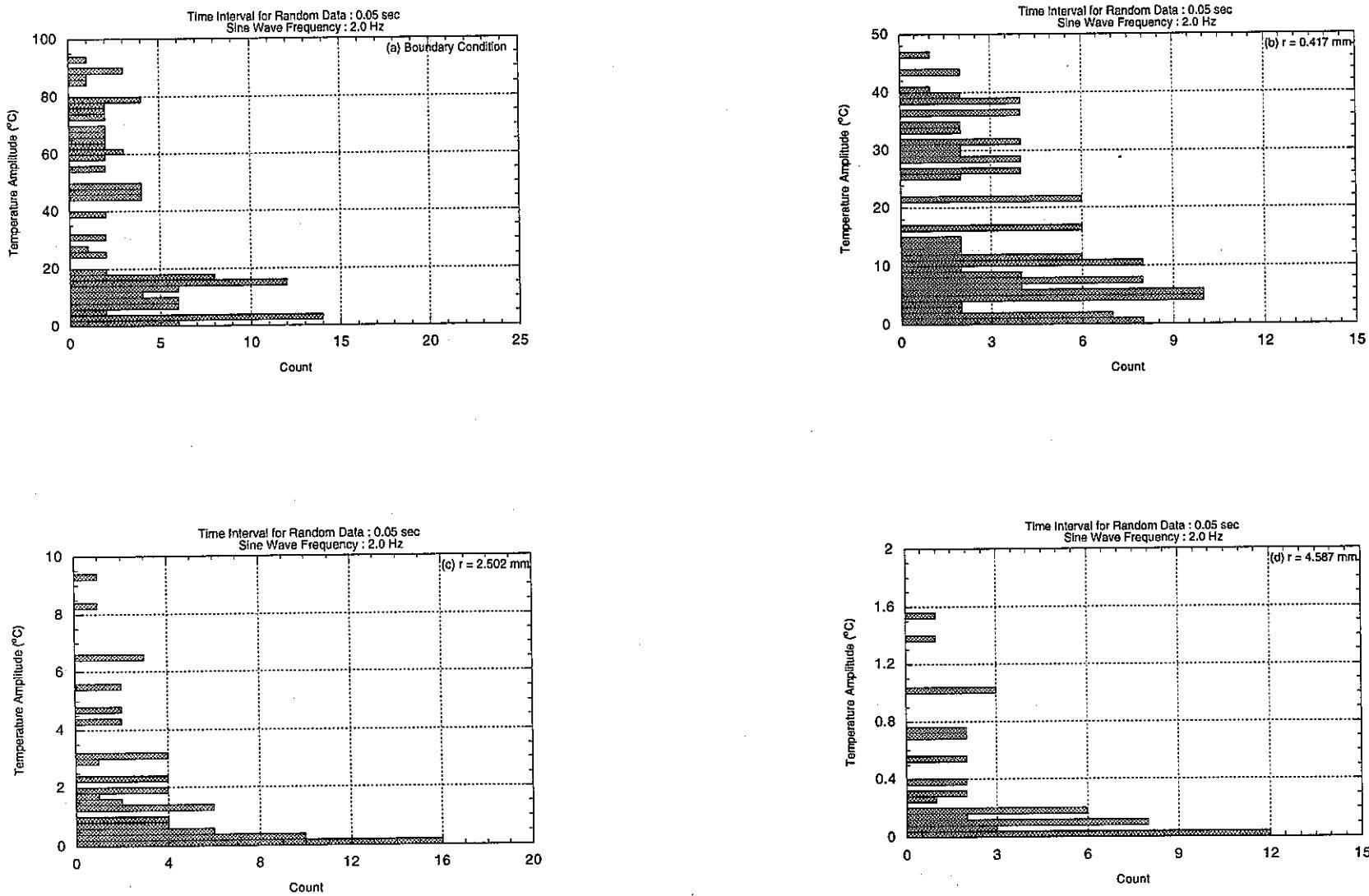


Fig. 3.3 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

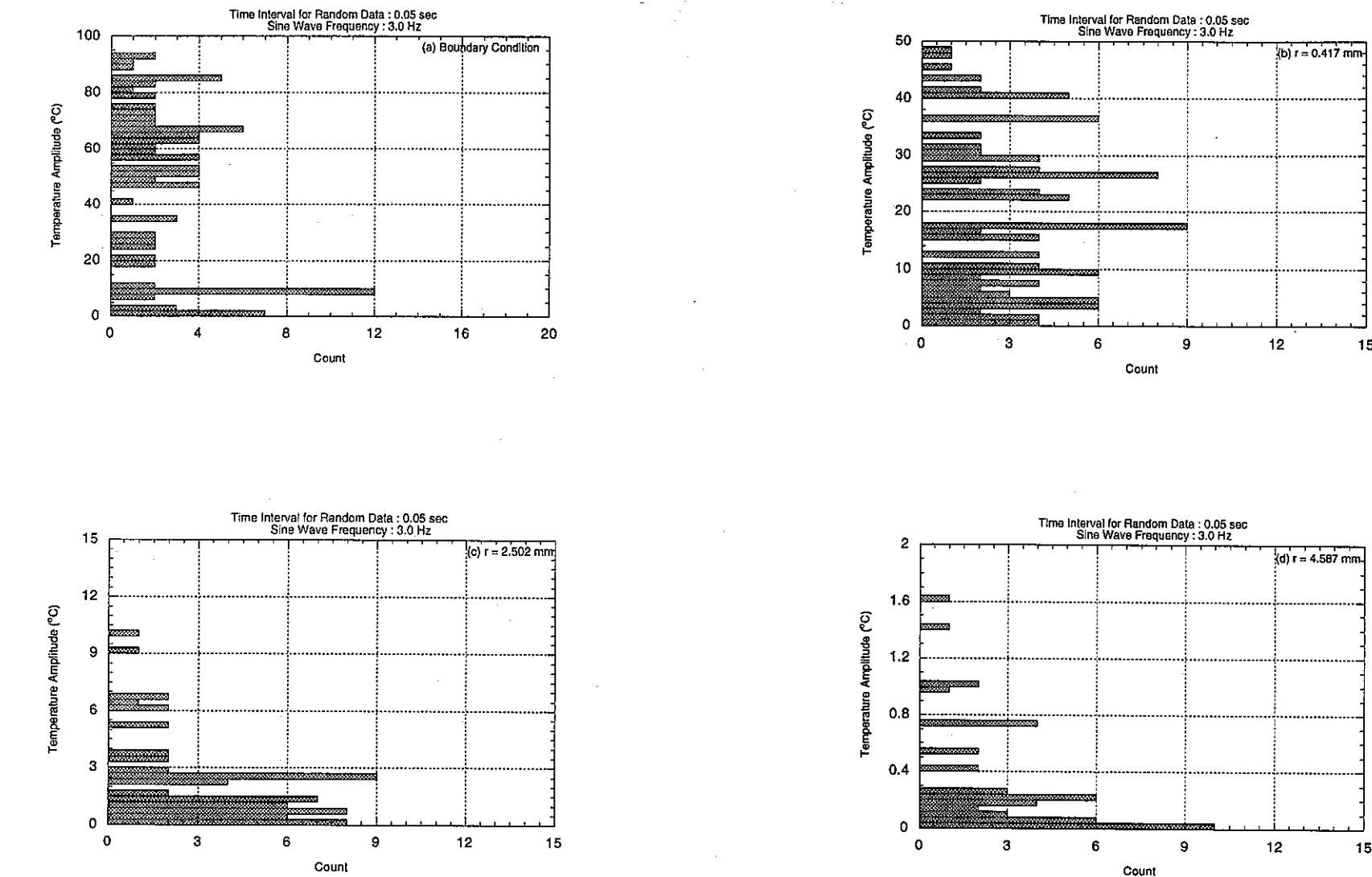


Fig. 3.4 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

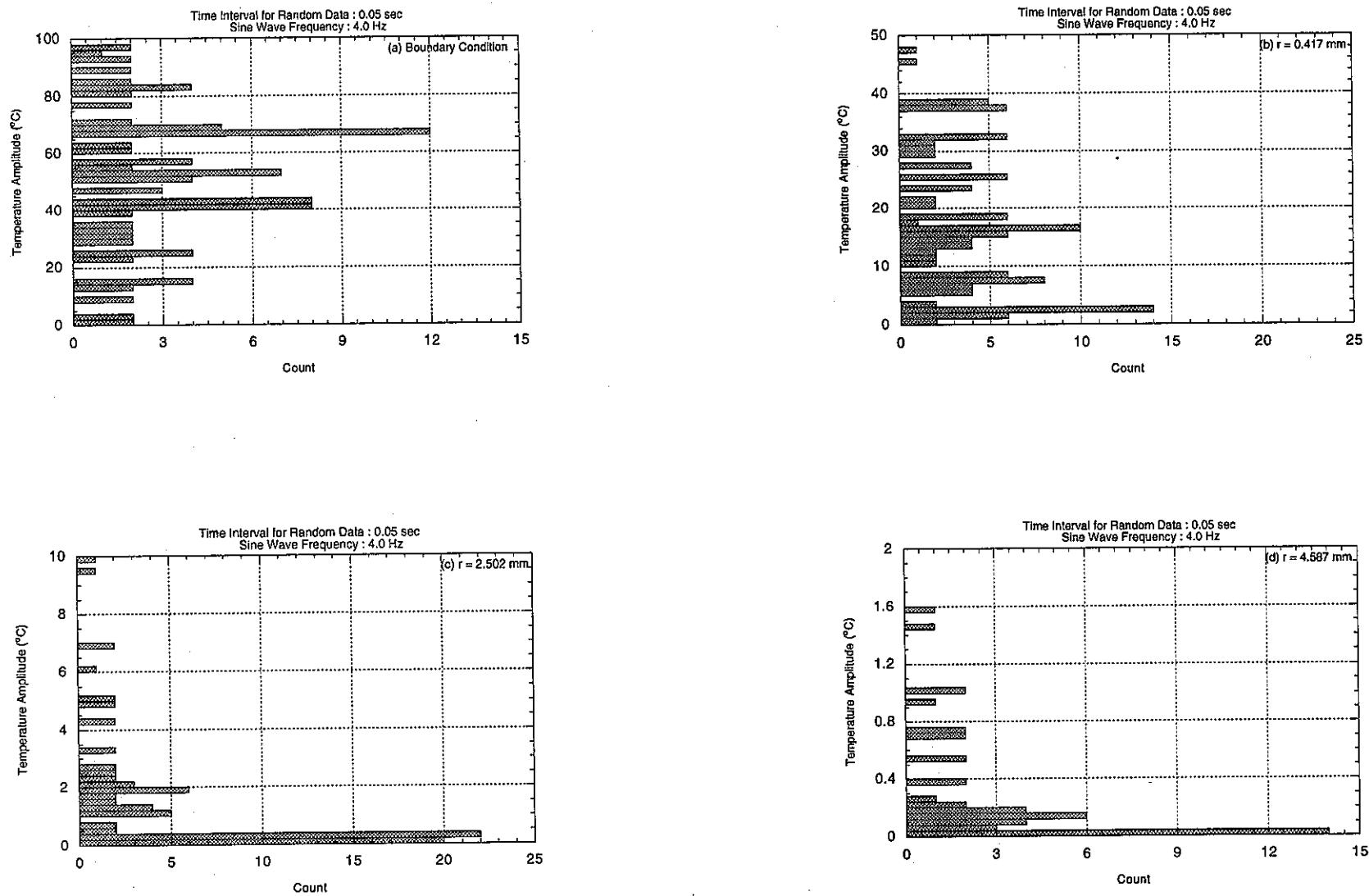


Fig. 3. 5 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube  
under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of  
the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

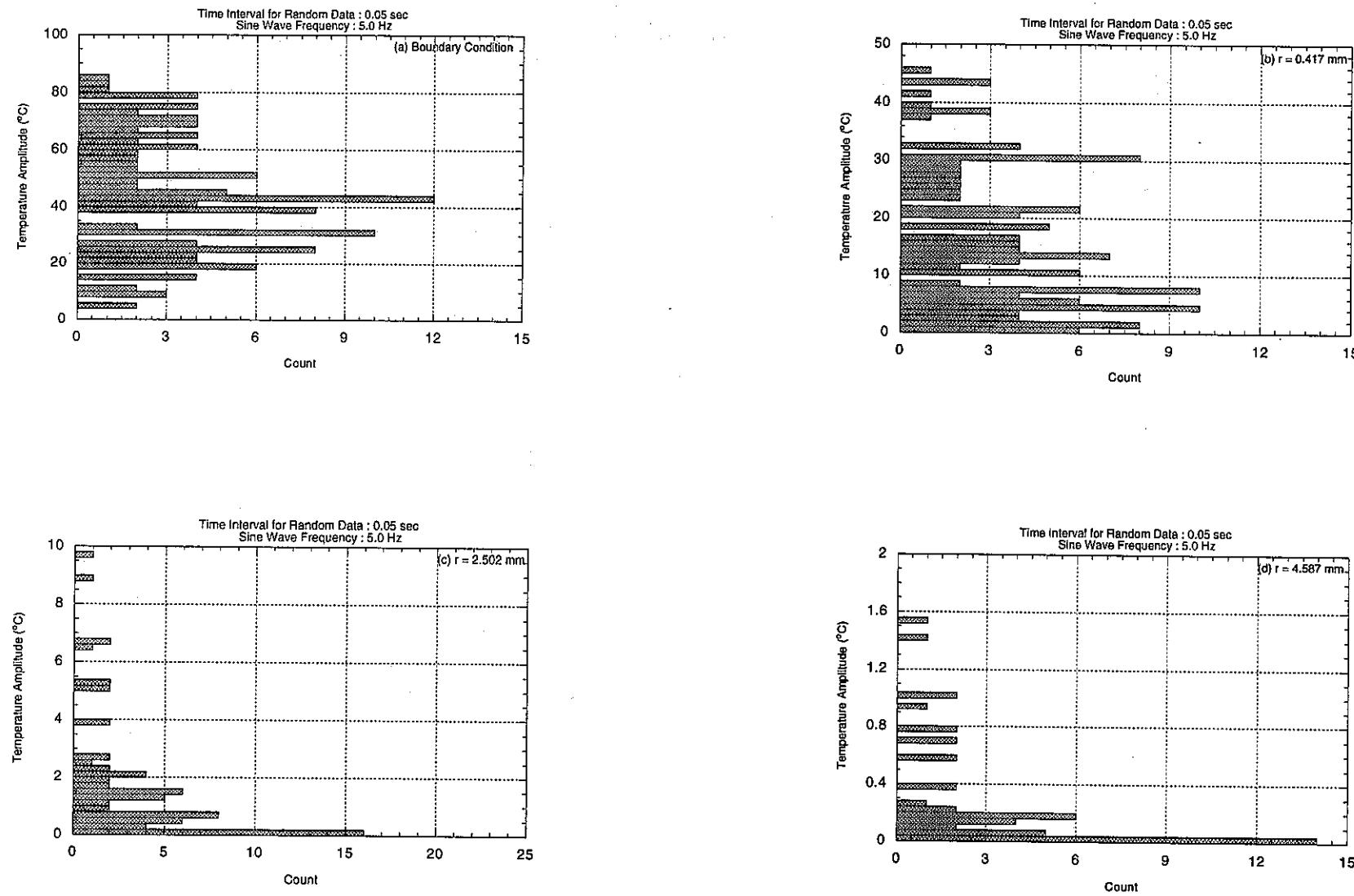


Fig. 3. 6 Histograms of Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube  
under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of  
the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

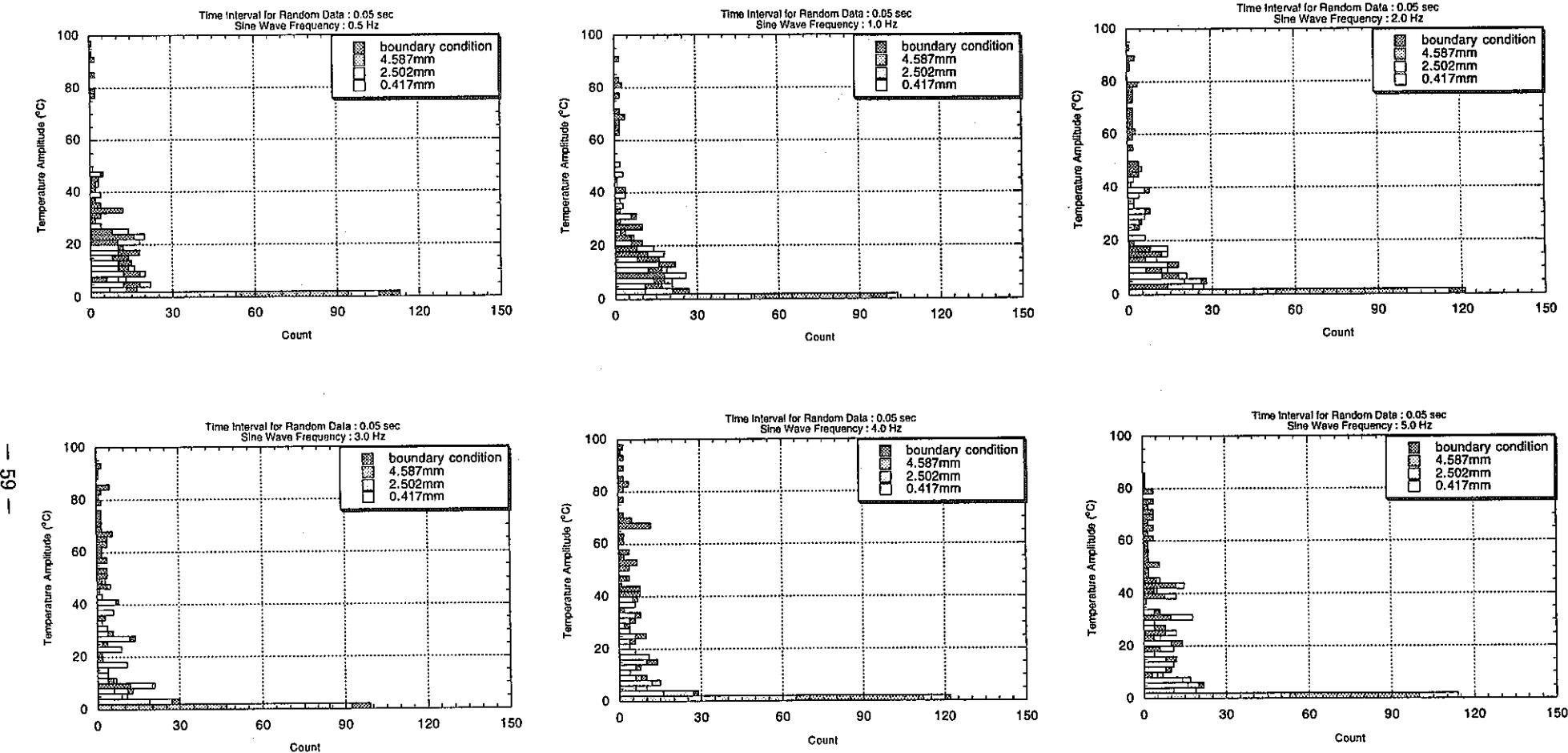


Fig. 3.7 Comparison of Cumulative Histograms for Temperature Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequencies with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

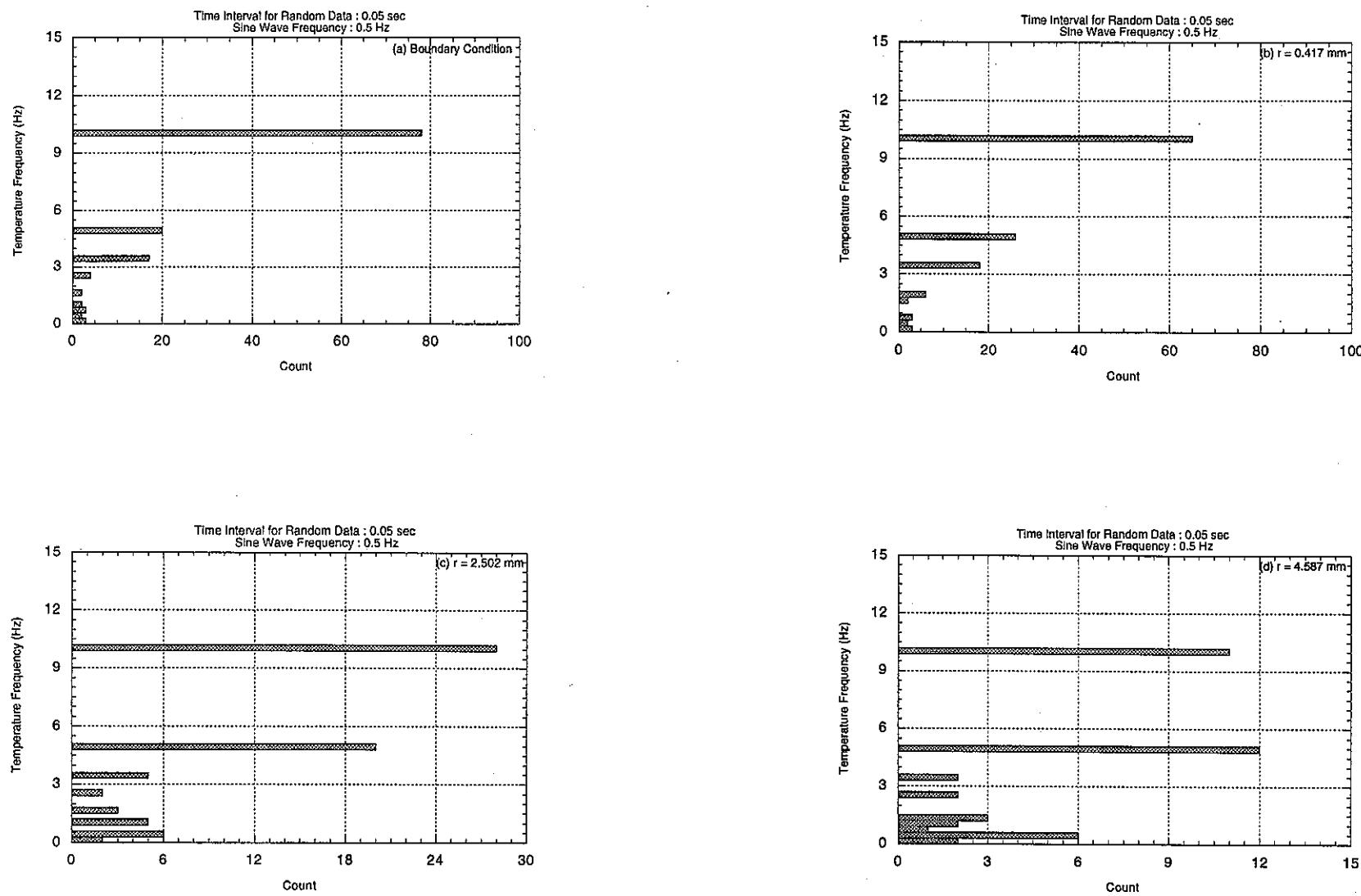


Fig. 3. 8 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube  
under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of  
the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

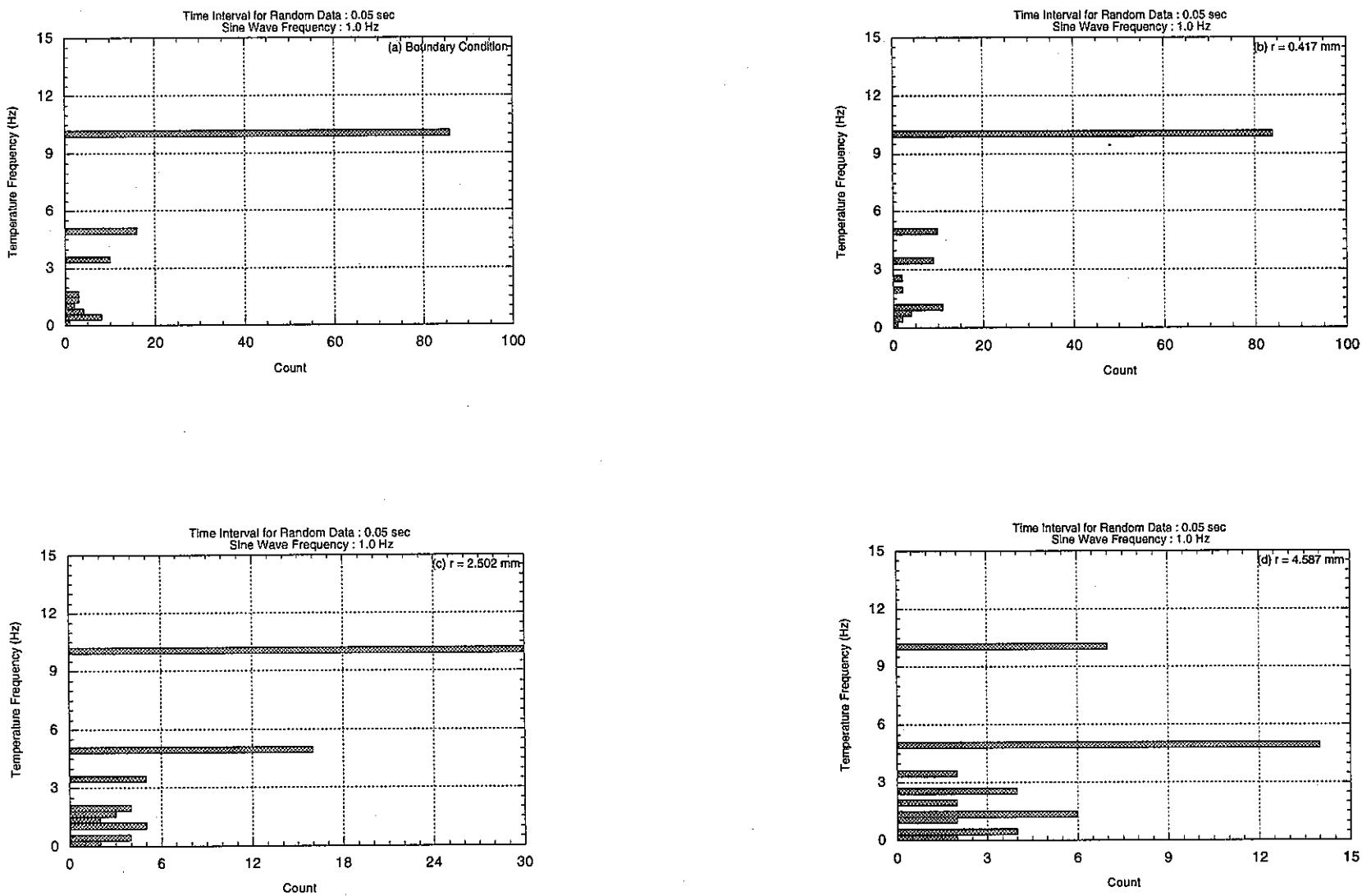


Fig. 3.9 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

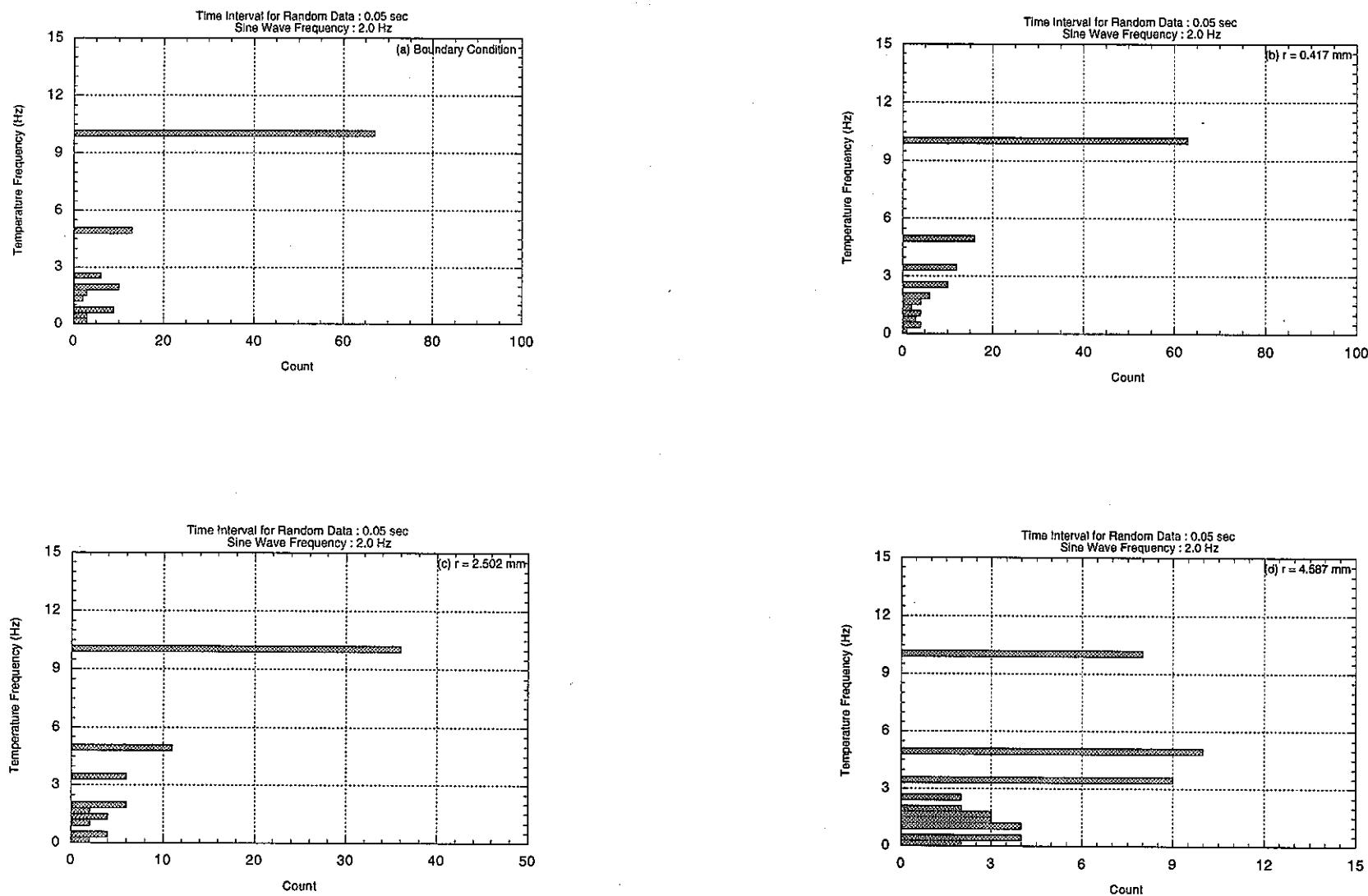


Fig. 3. 10 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube  
under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of  
the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

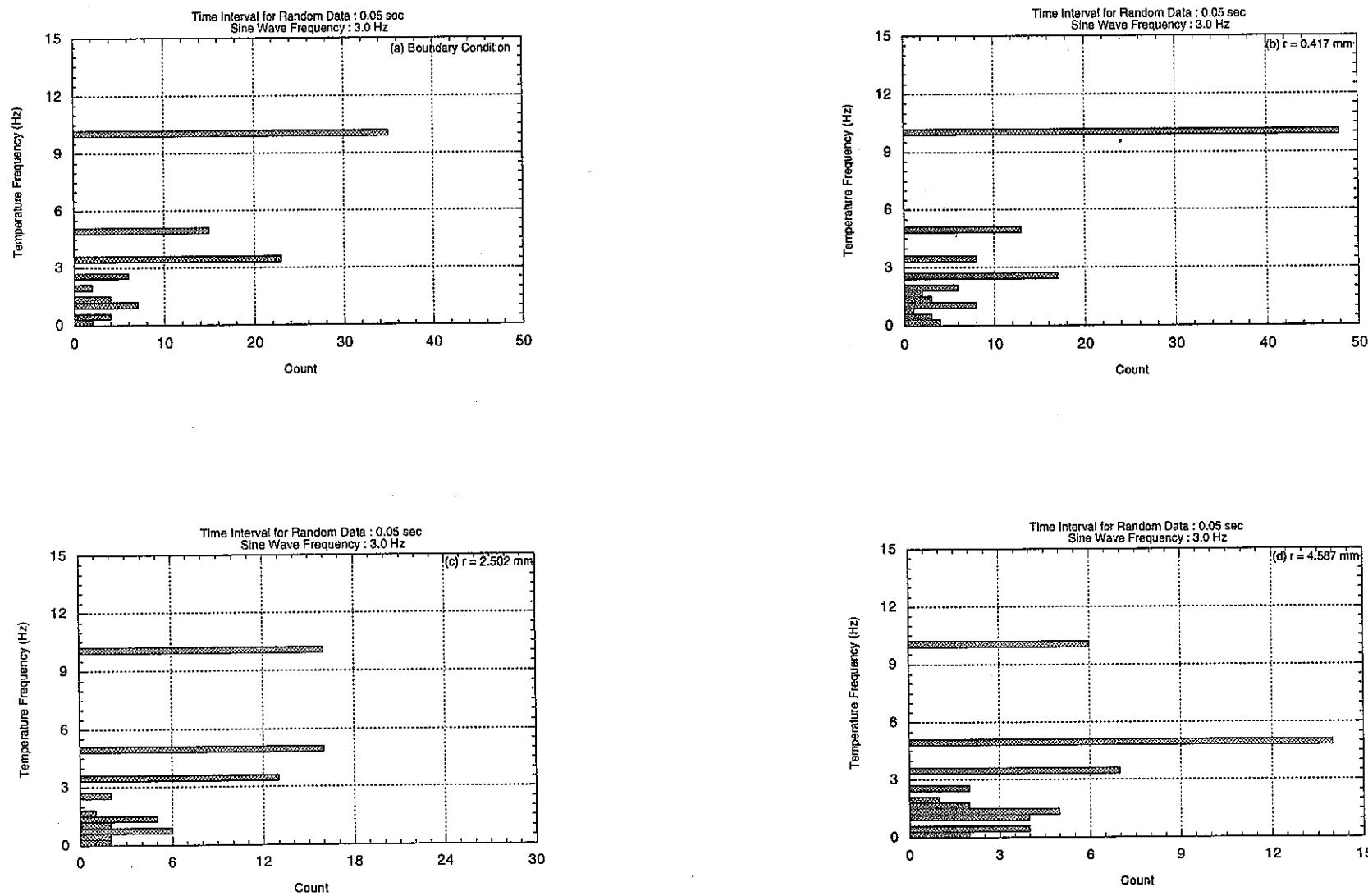


Fig. 3. 11 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube  
under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of  
the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

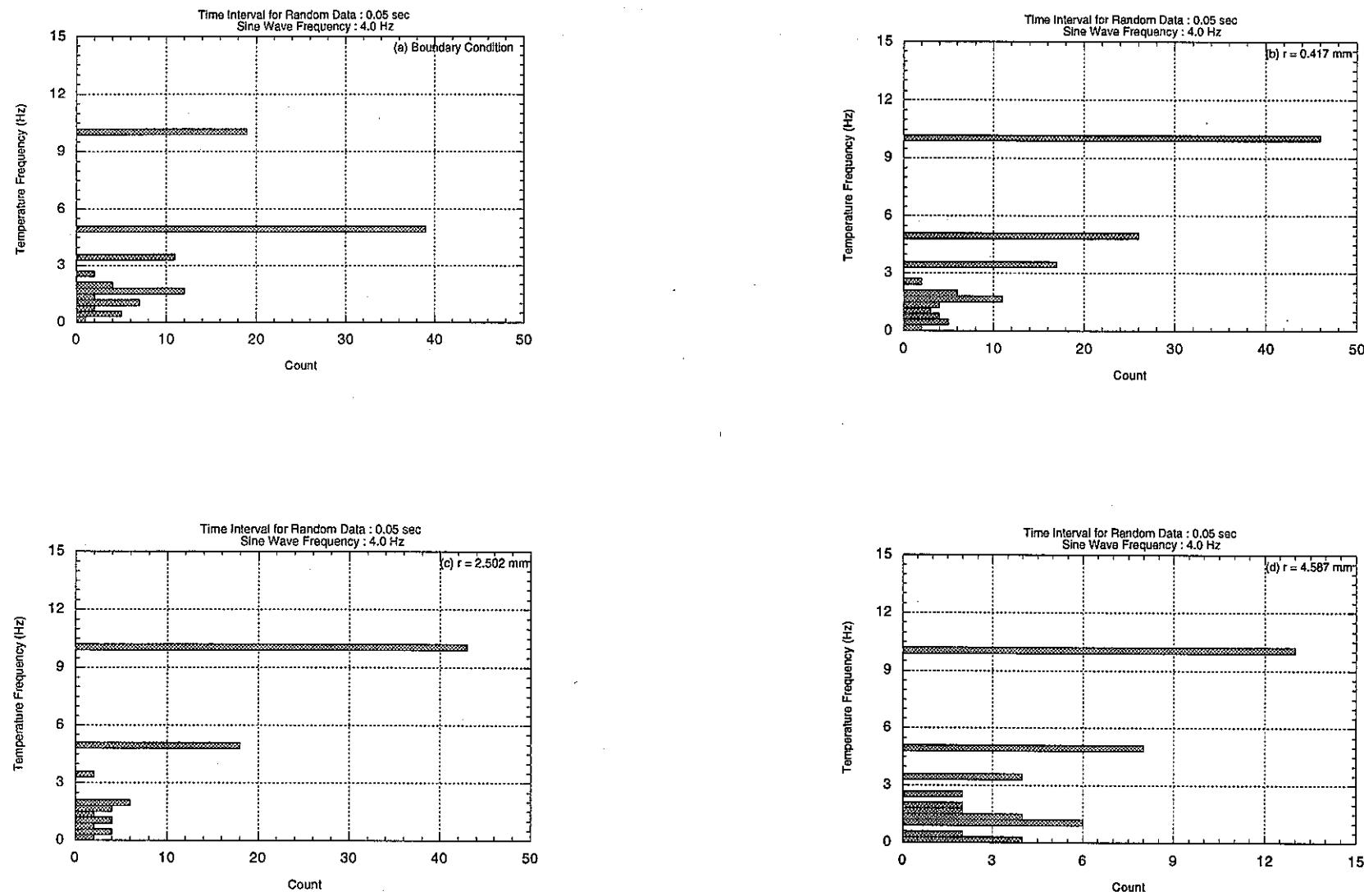


Fig. 3. 12 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube  
under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of  
the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

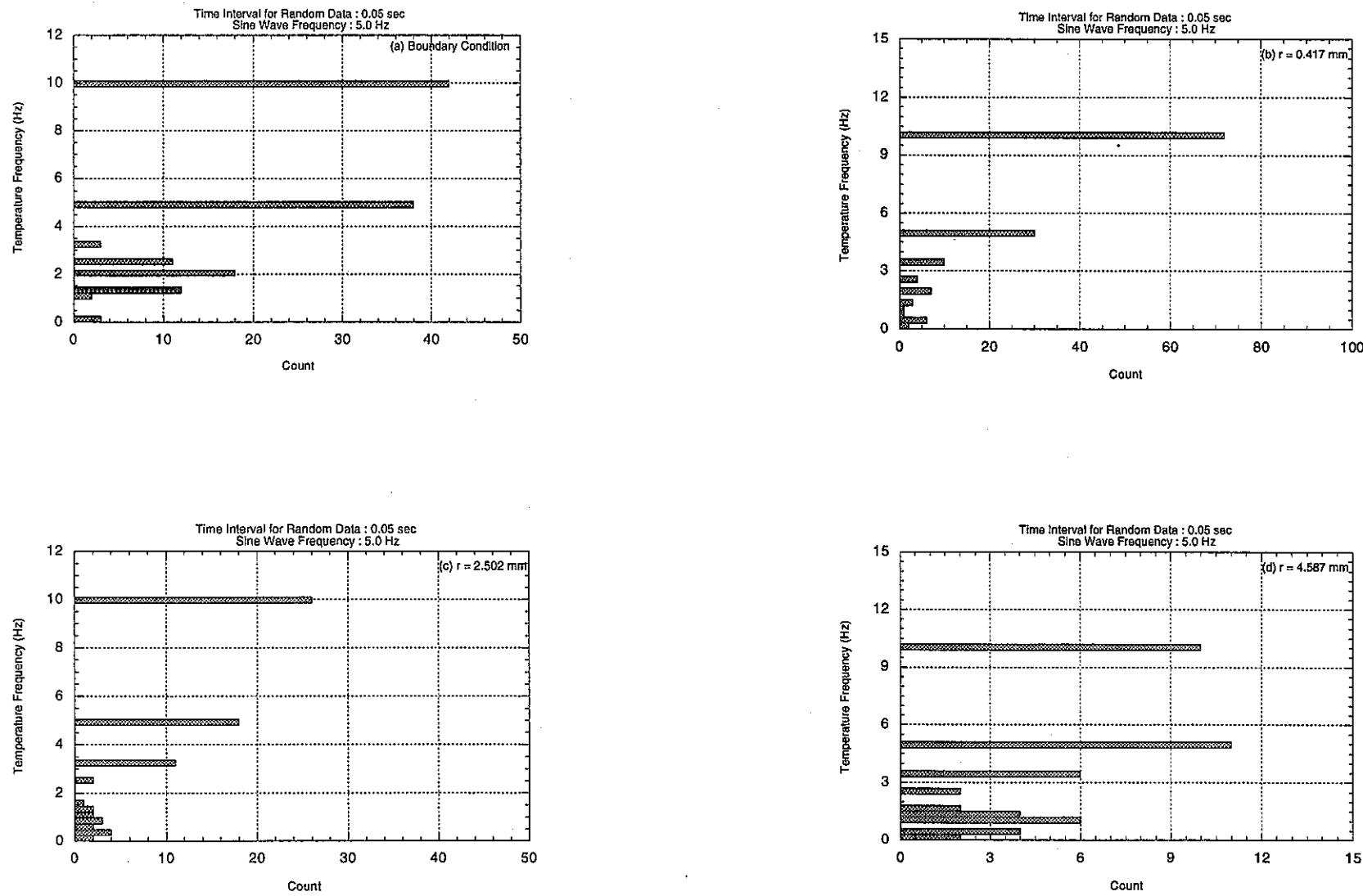


Fig. 3. 13 Histograms of Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

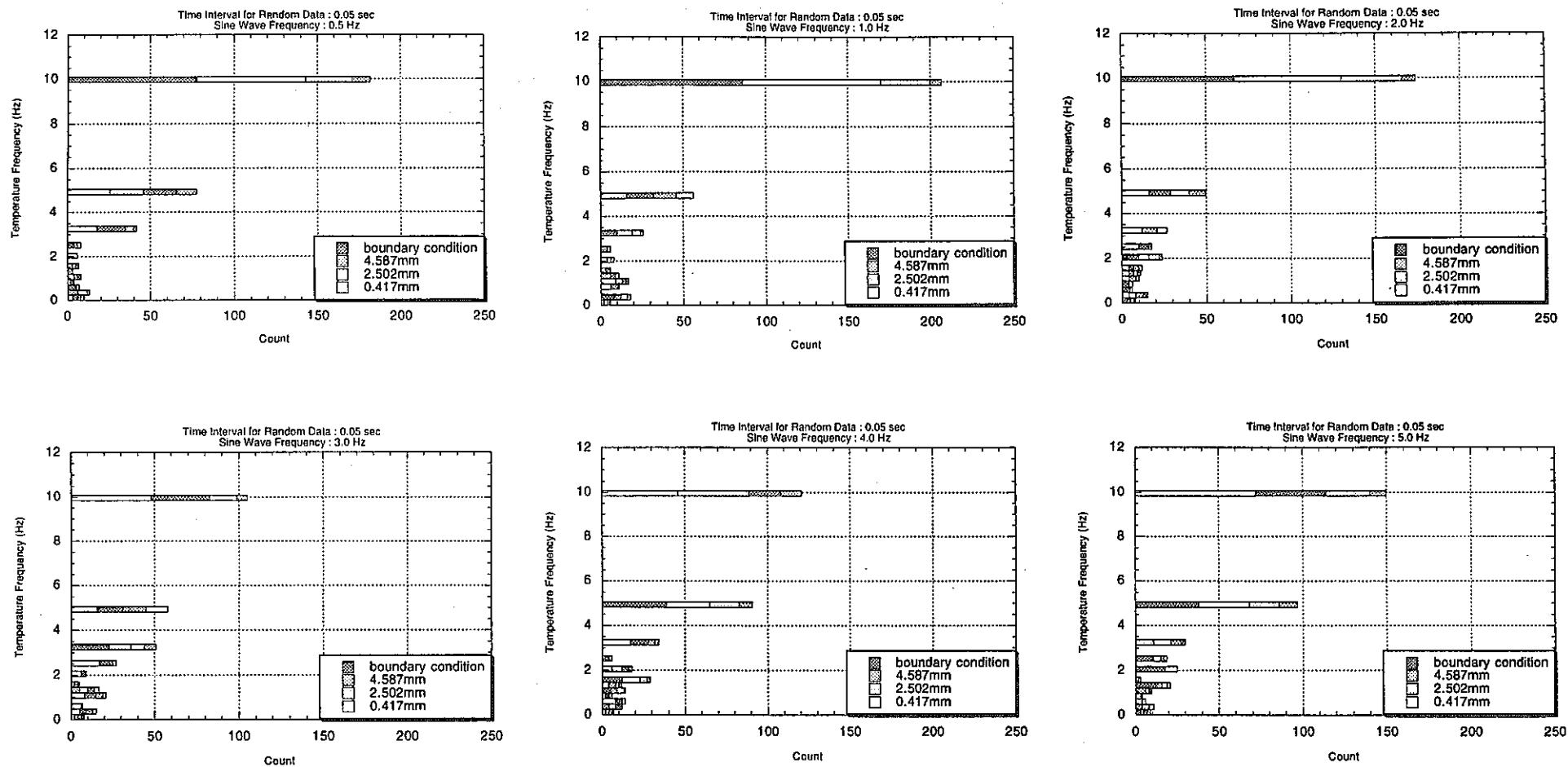


Fig. 3. 14 Comparison of Cumulative Histograms for Temperature Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequencies with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

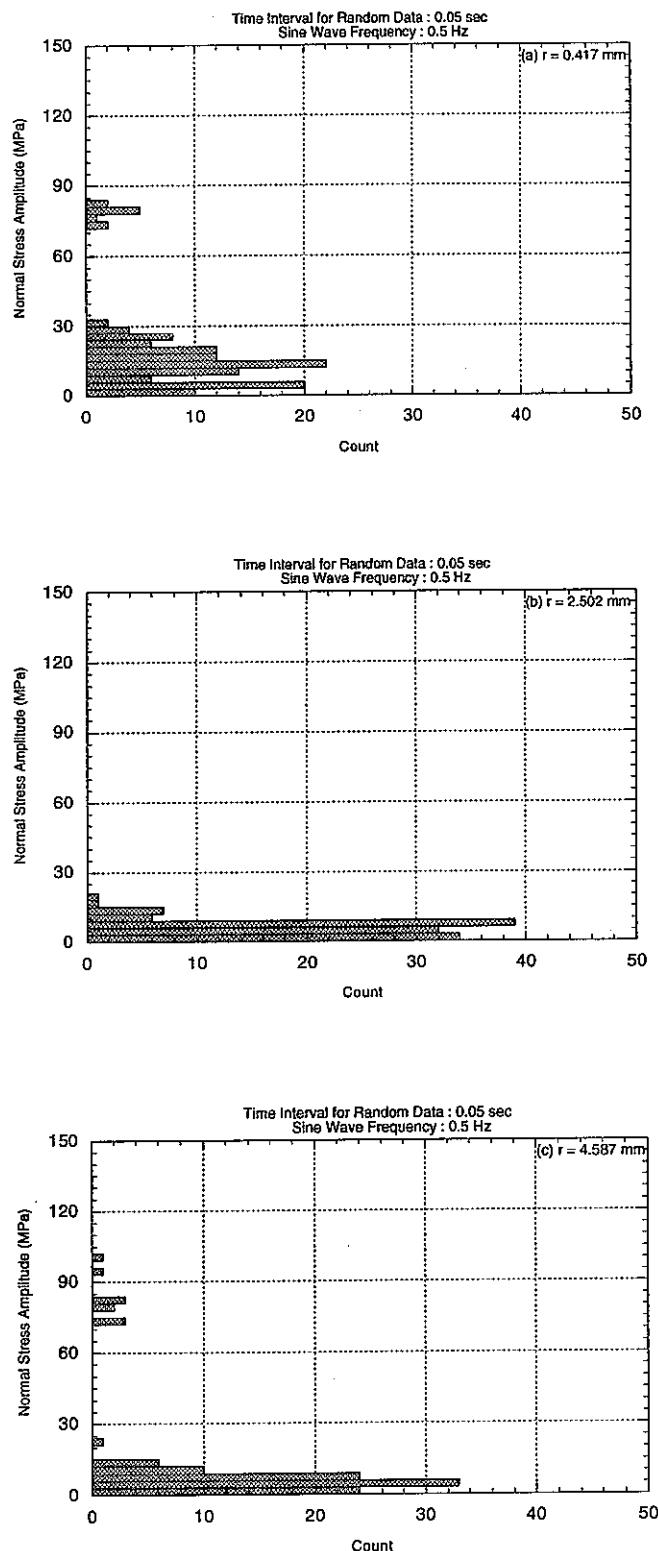


Fig. 3. 15 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

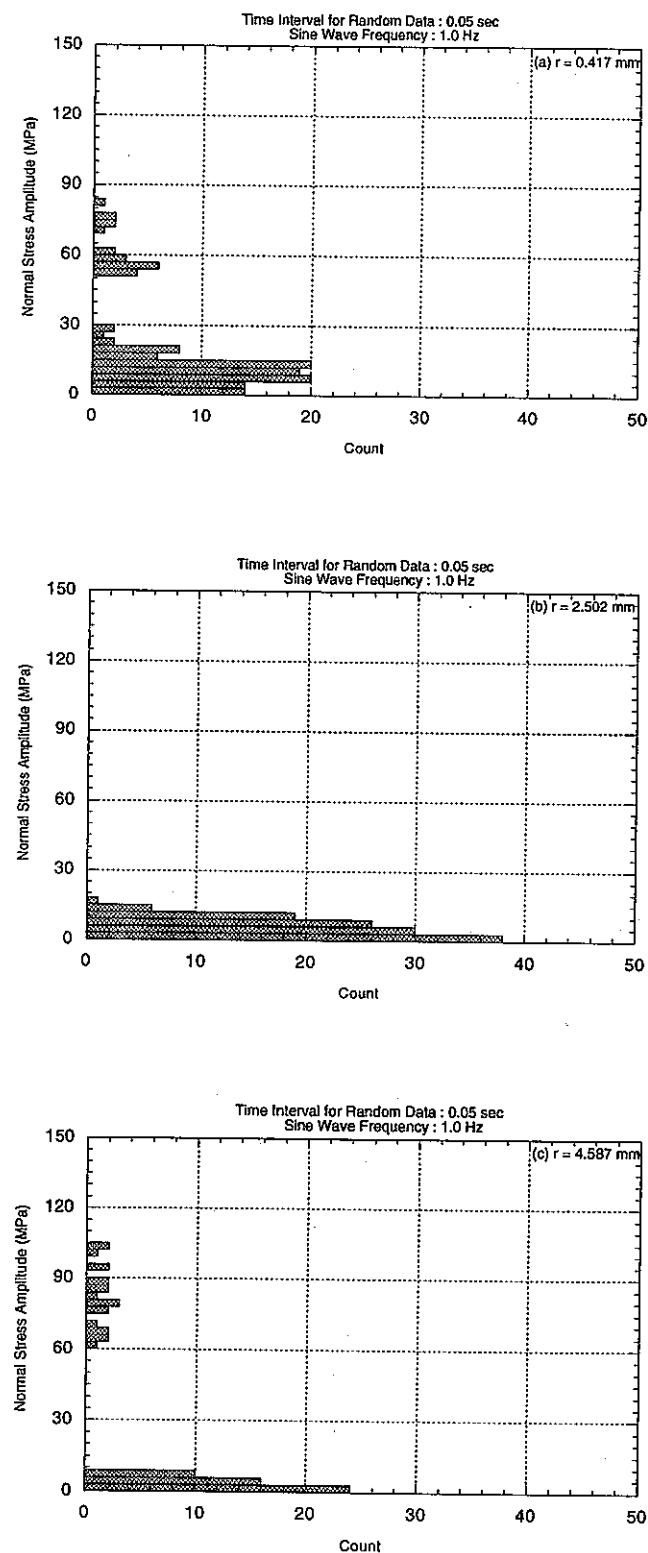


Fig. 3. 16 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

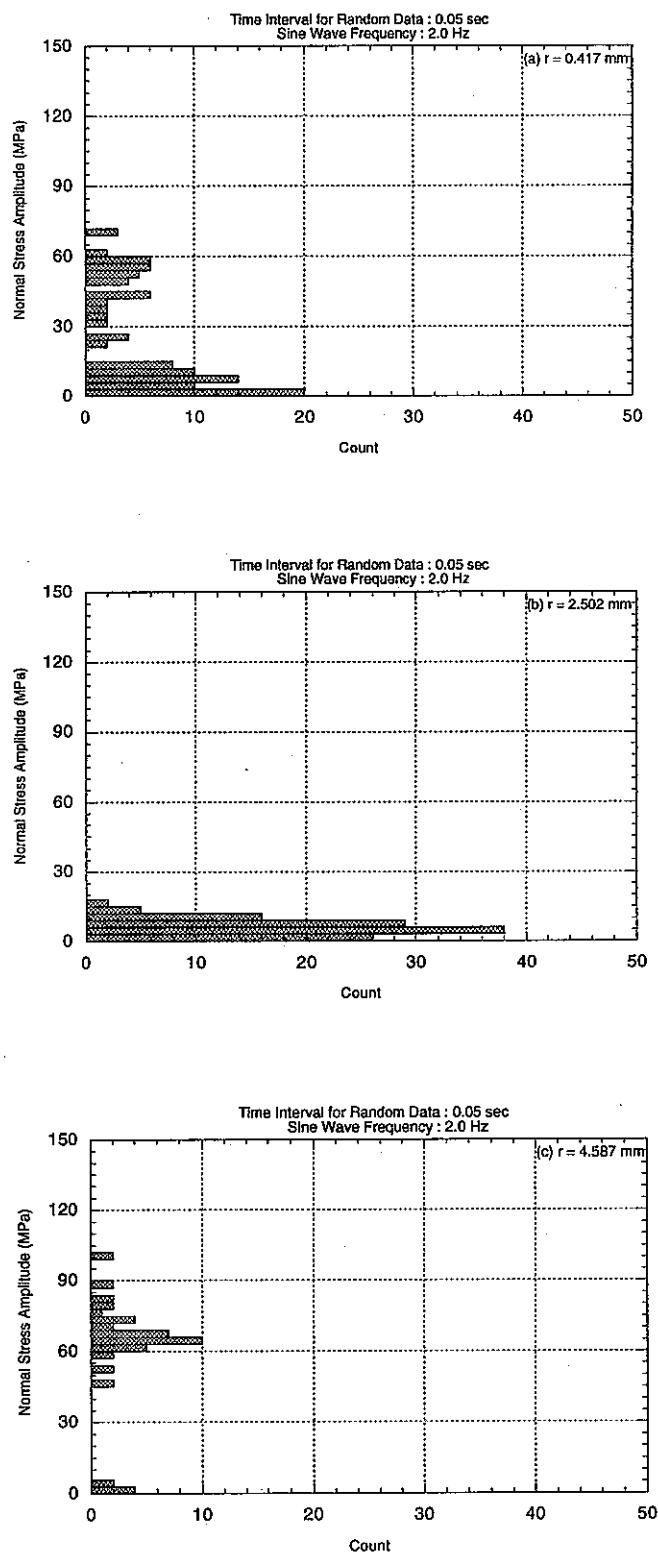


Fig. 3. 17 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

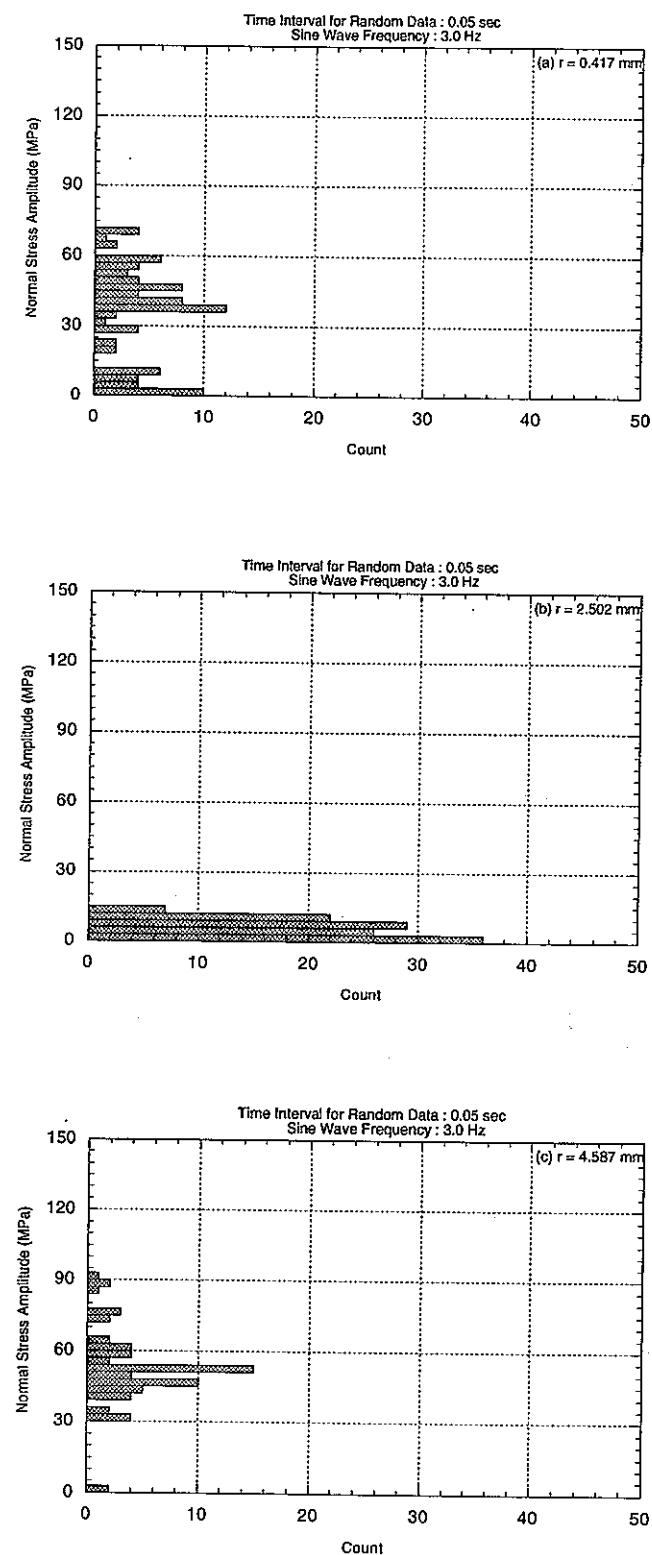


Fig. 3. 18 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

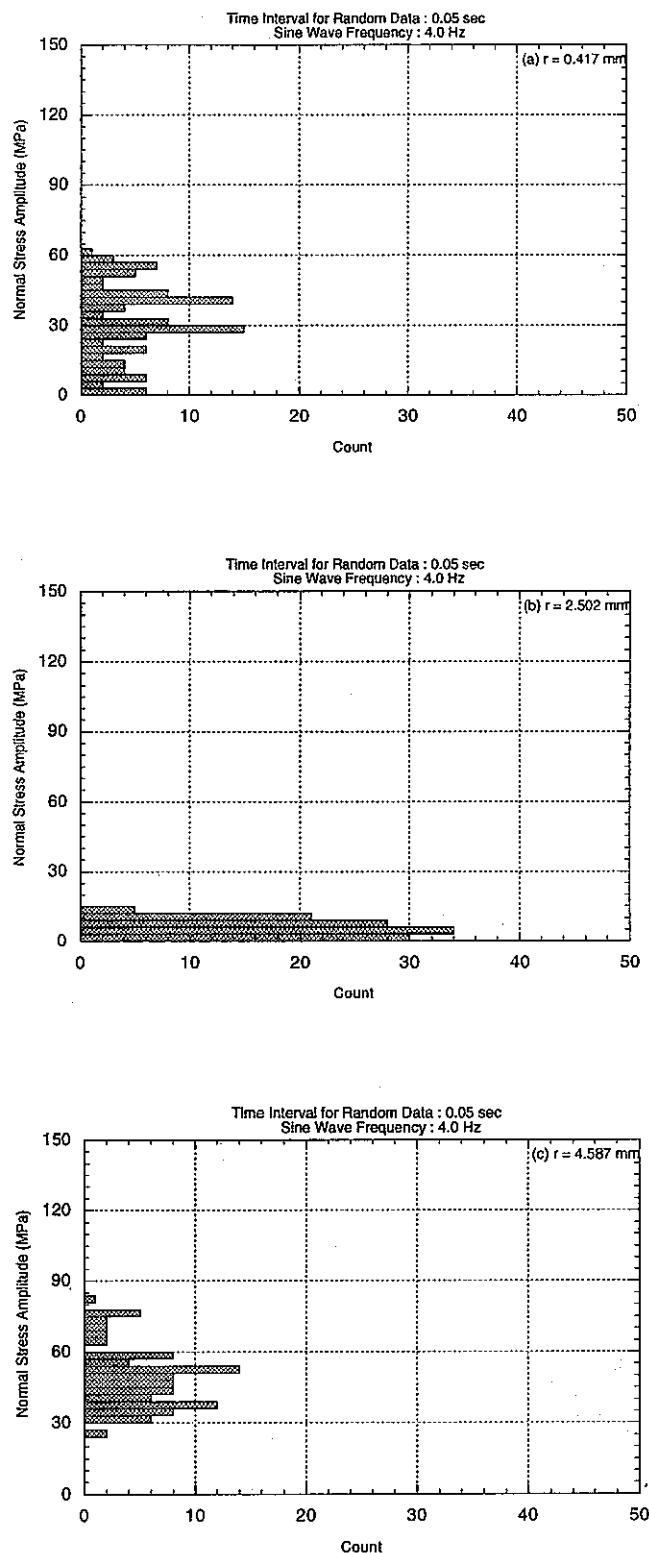


Fig. 3. 19 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

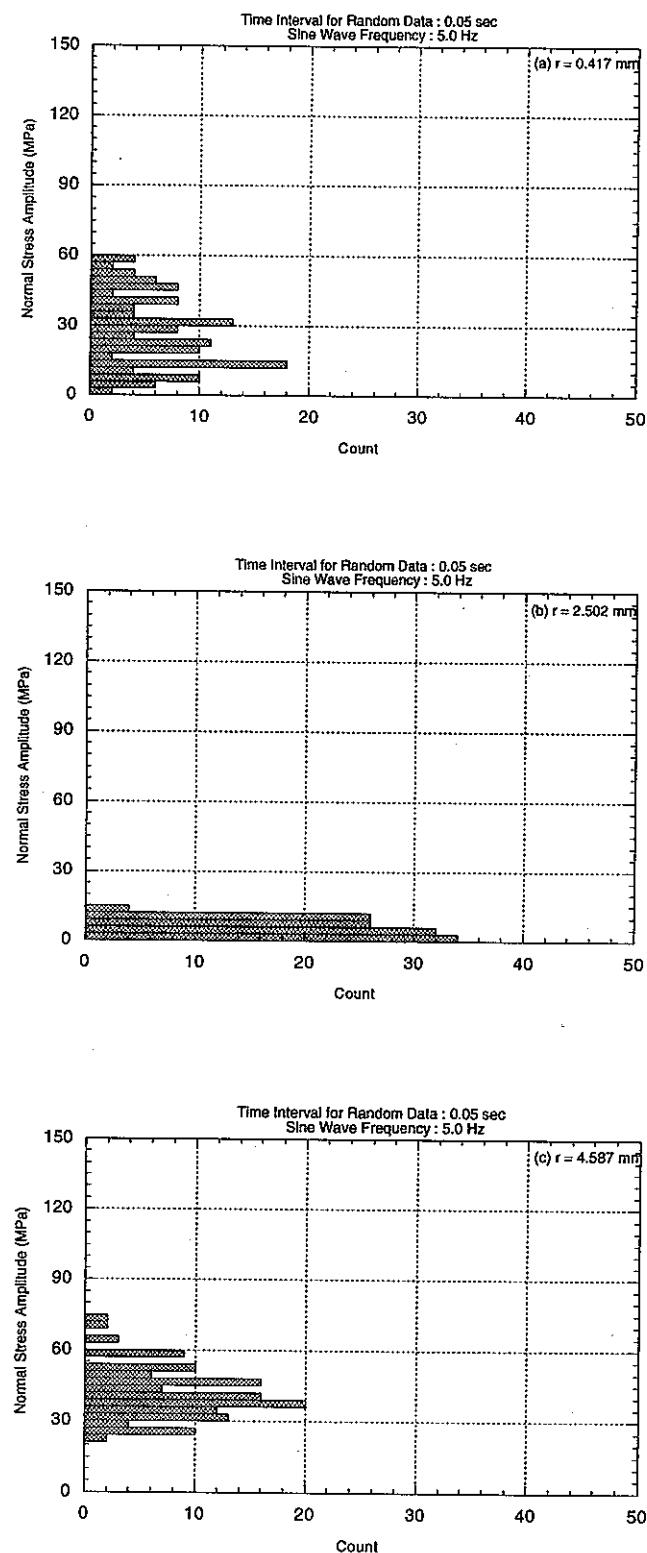


Fig. 3. 20 Histograms of Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

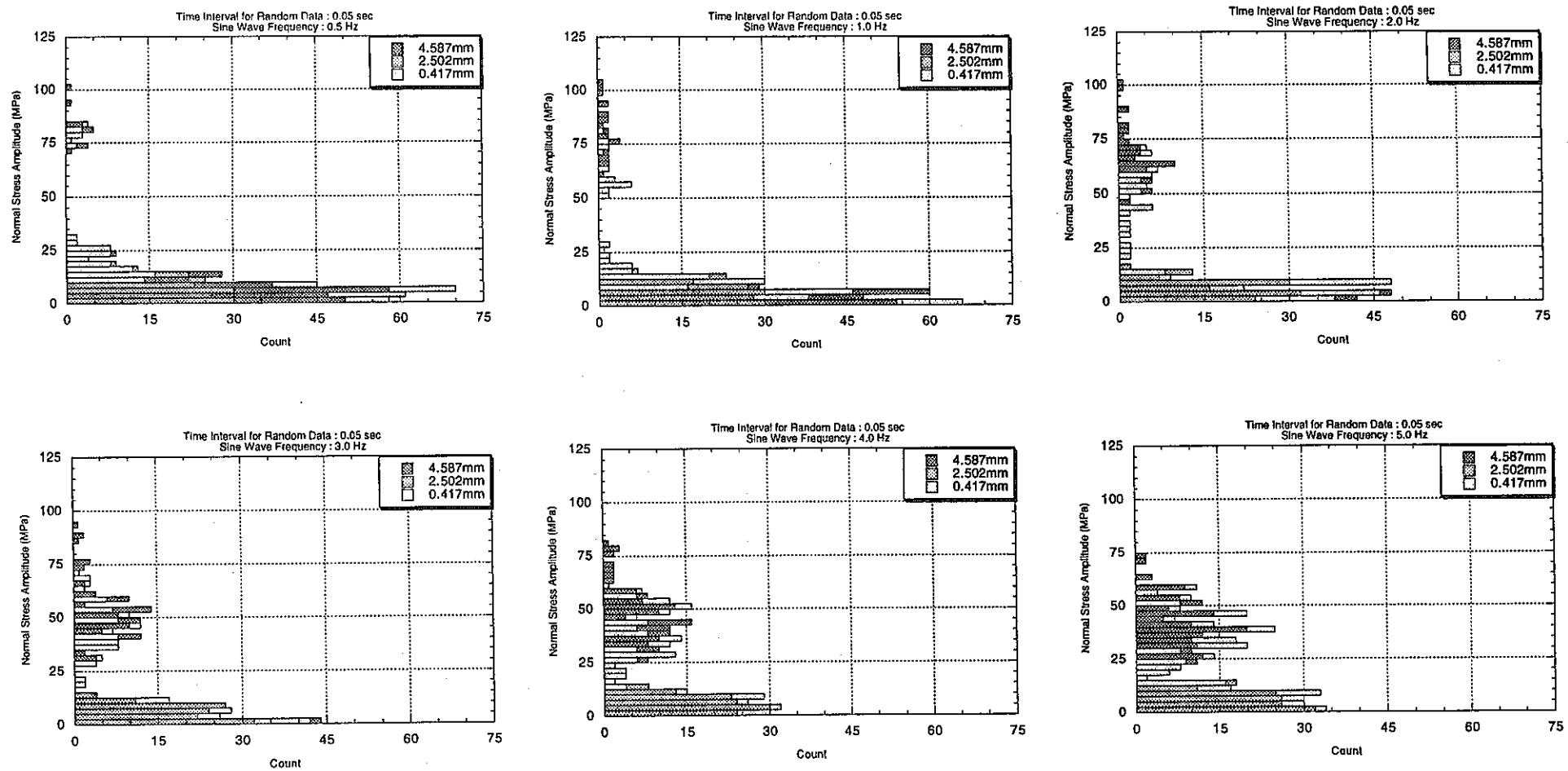


Fig. 3.21 Comparison of Cumulative Histograms for Normal Stress Amplitudes at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequencies with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

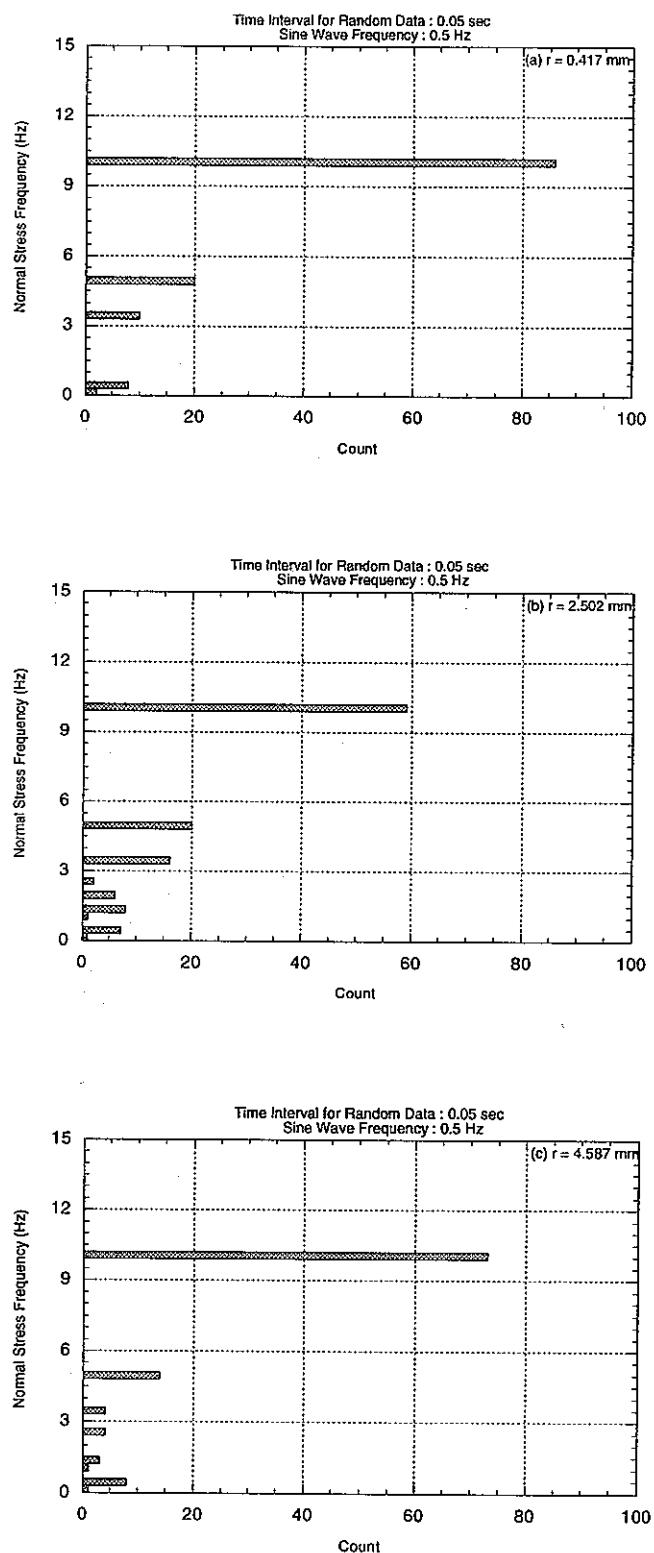


Fig. 3. 22 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

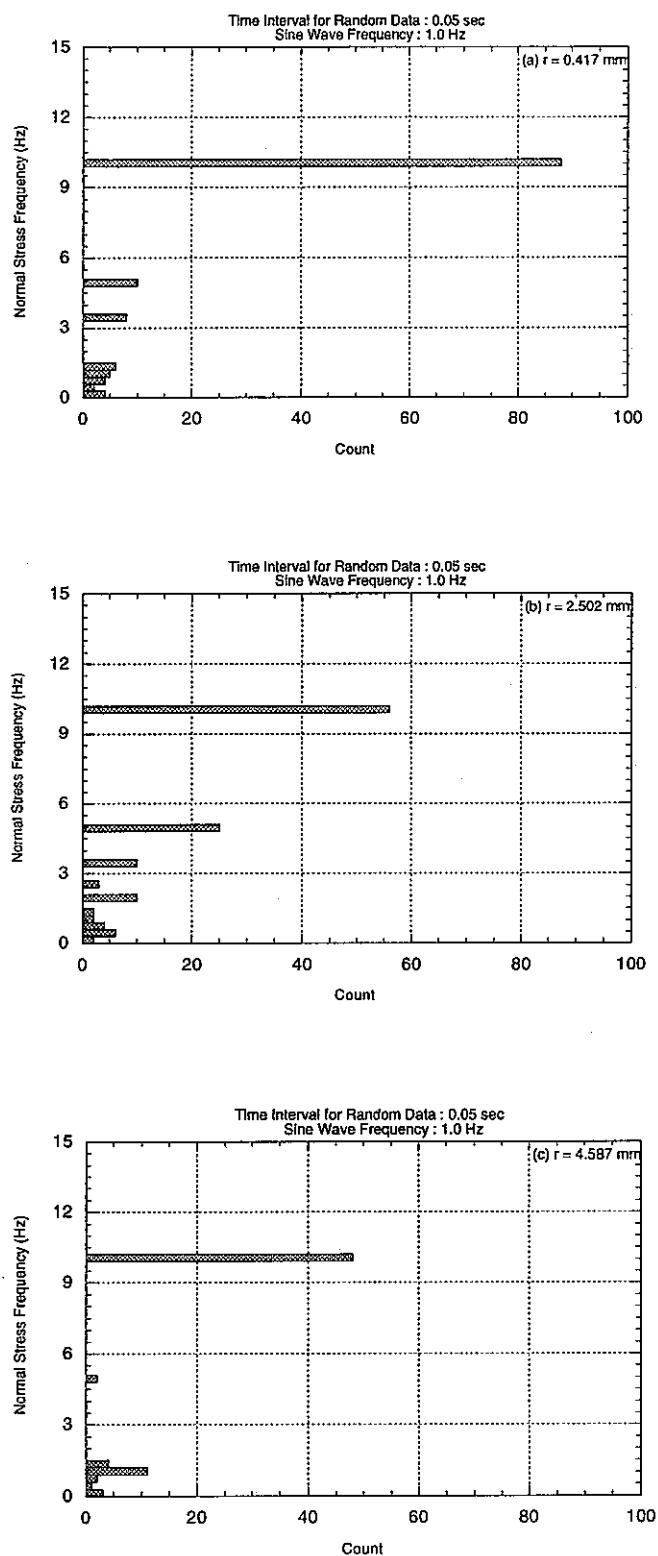


Fig. 3. 23 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

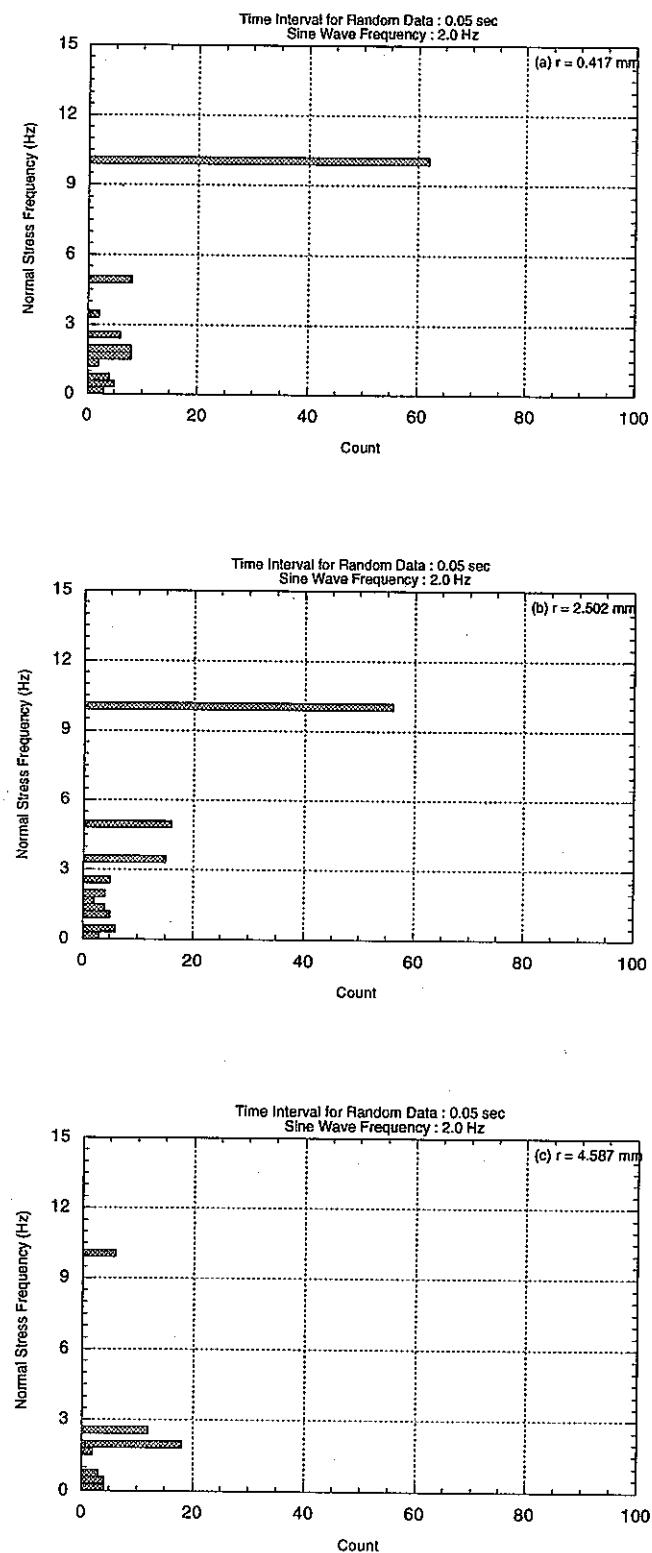


Fig. 3. 24 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

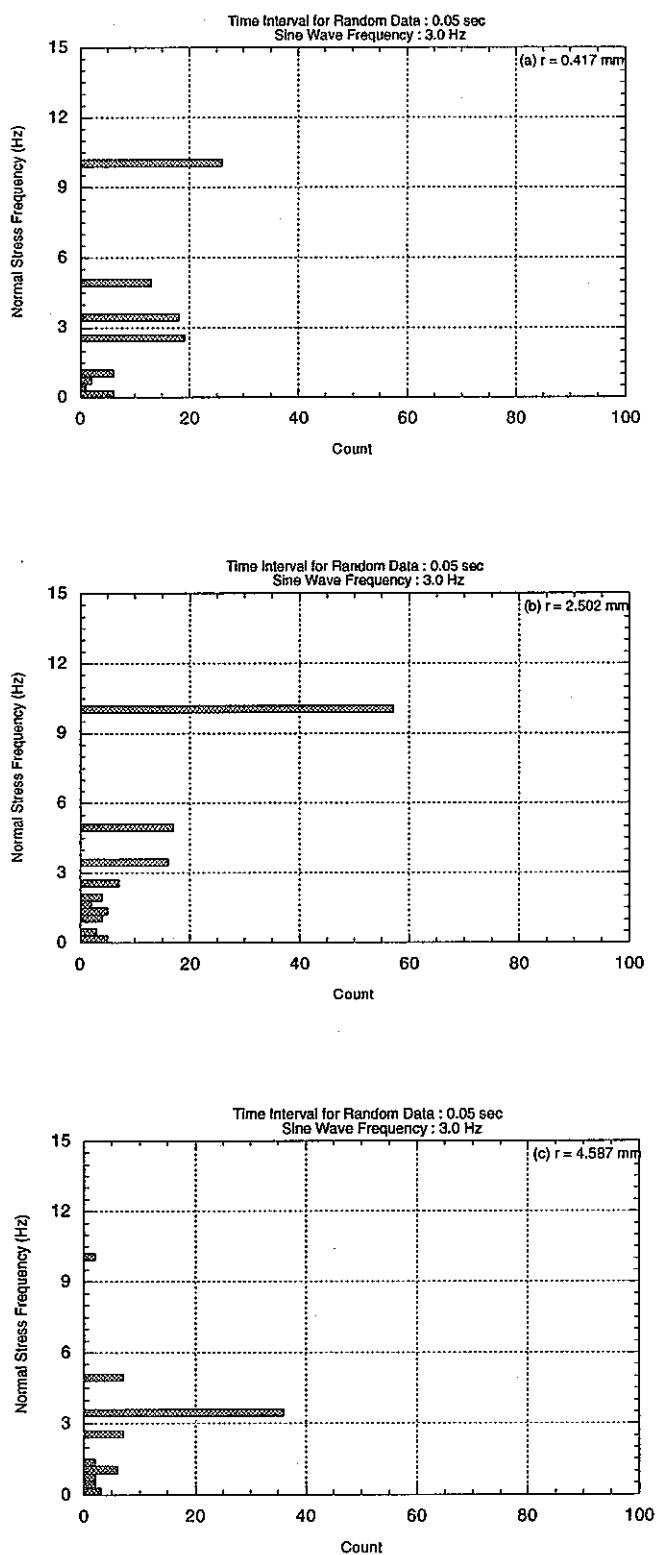


Fig. 3. 25 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

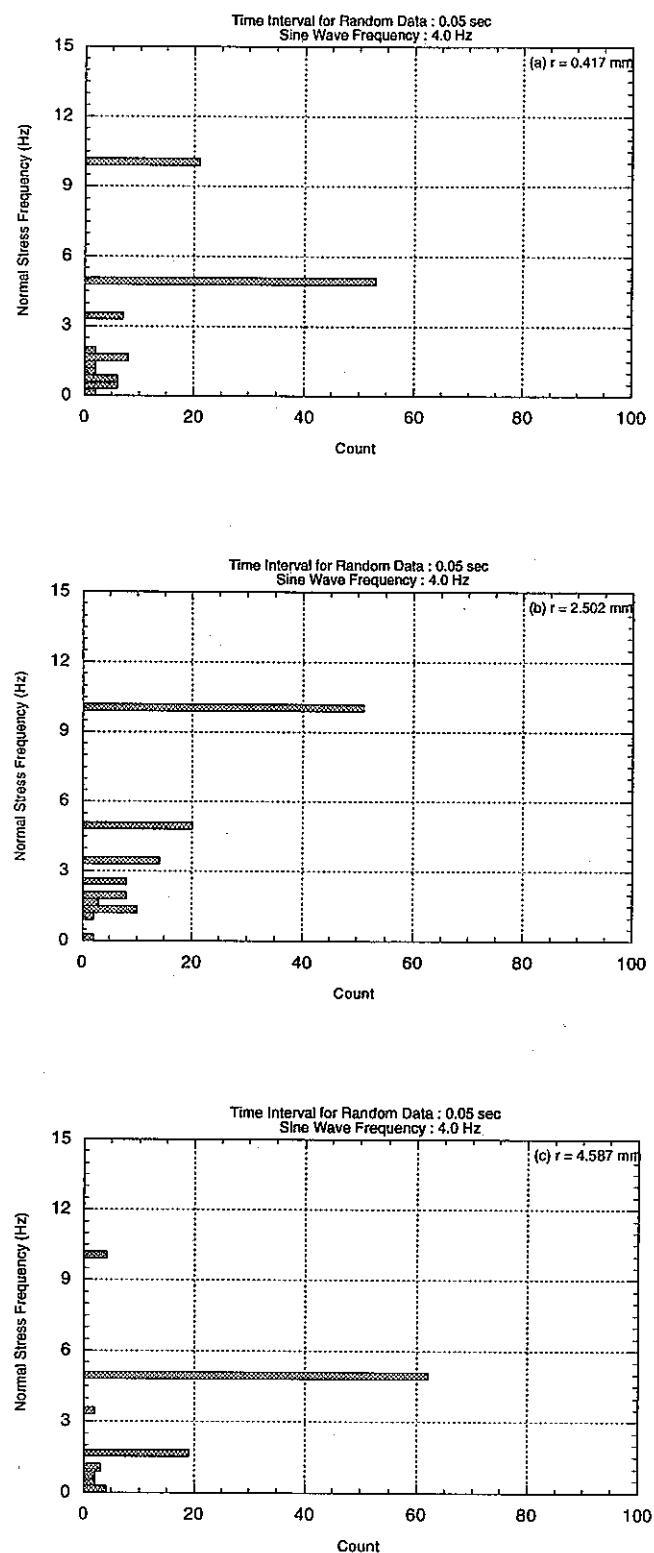


Fig. 3. 26 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

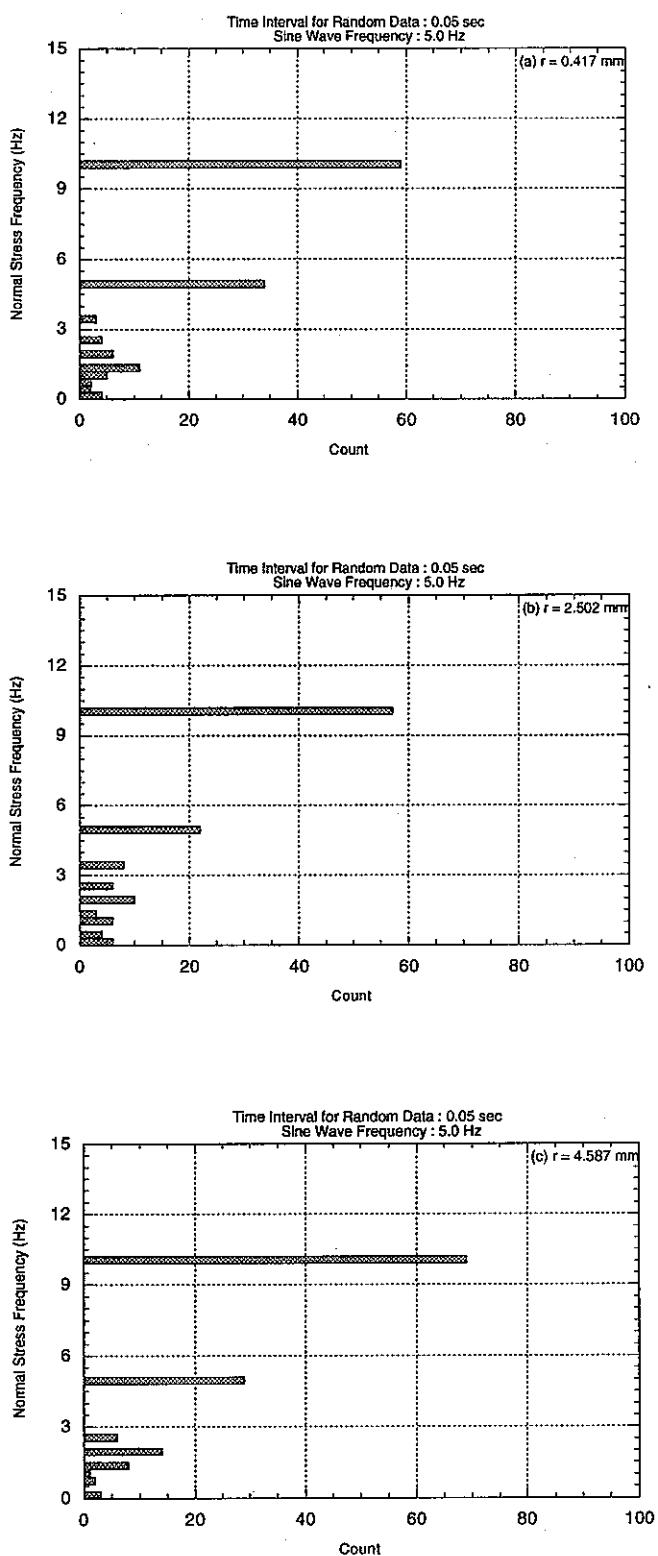


Fig. 3. 27 Histograms of Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

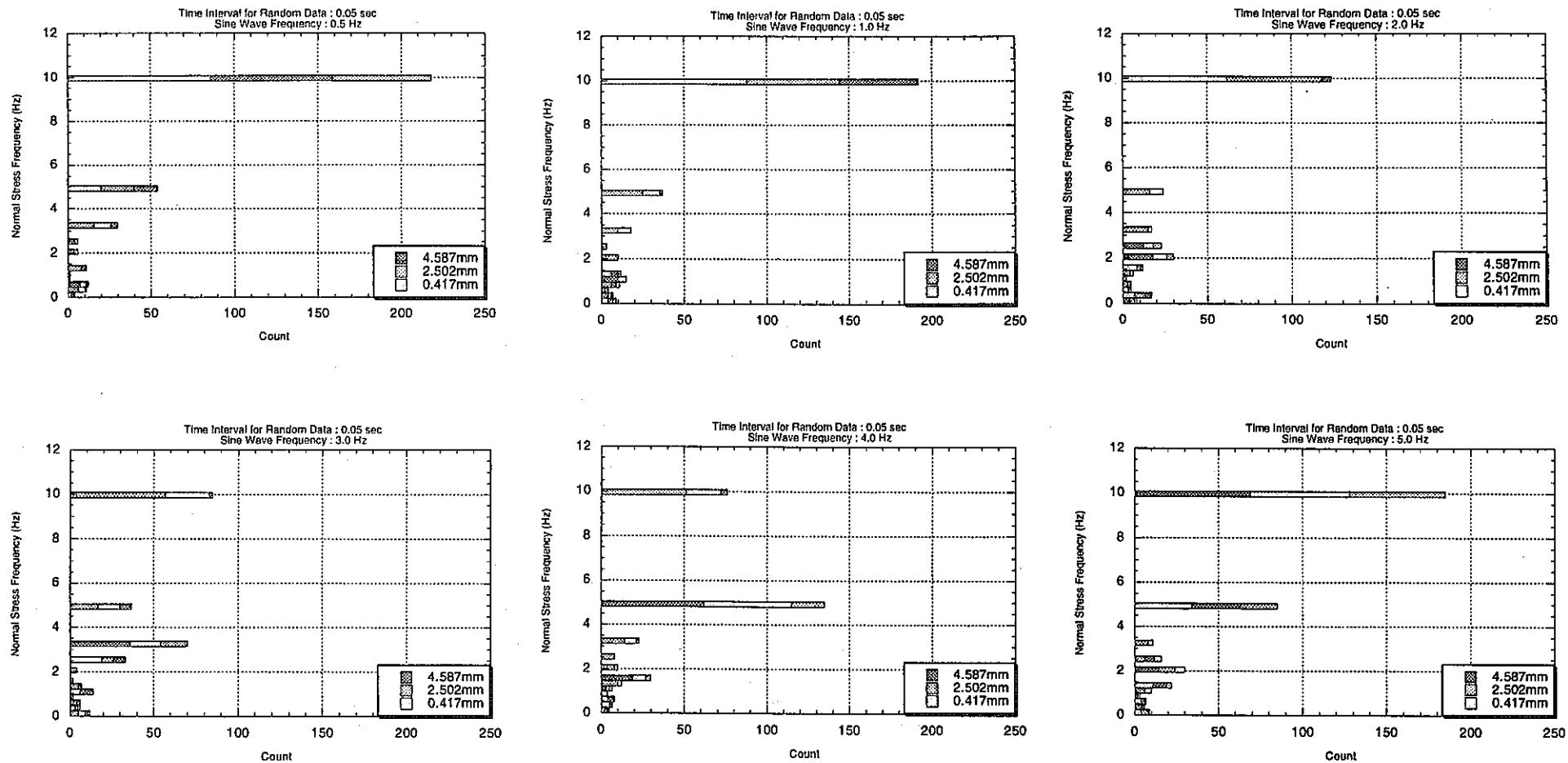


Fig. 3.28 Comparison of Cumulative Histograms for Normal Stress Frequencies at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Input Condition of Sine Wave Frequencies with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

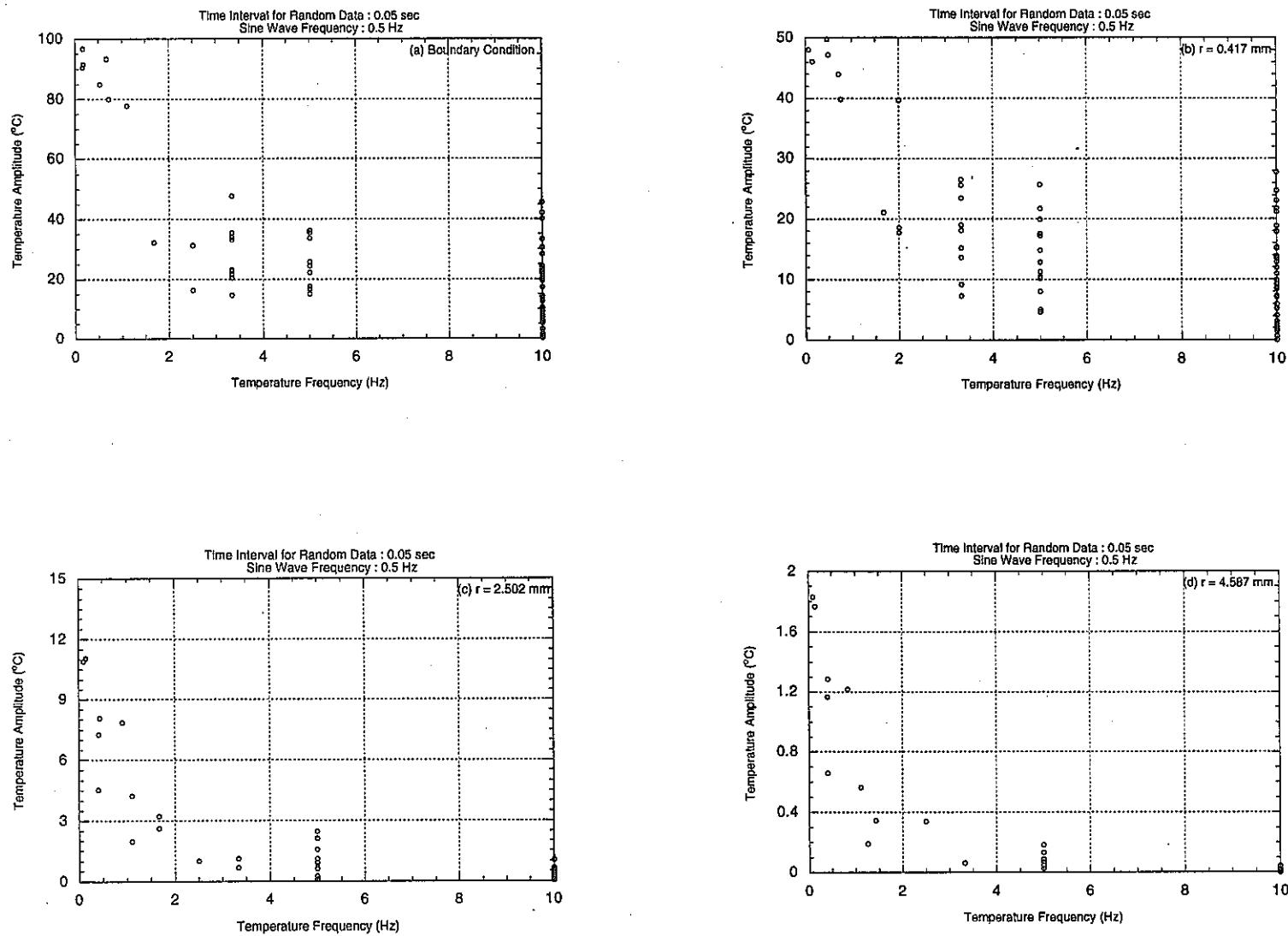


Fig. 3.29 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

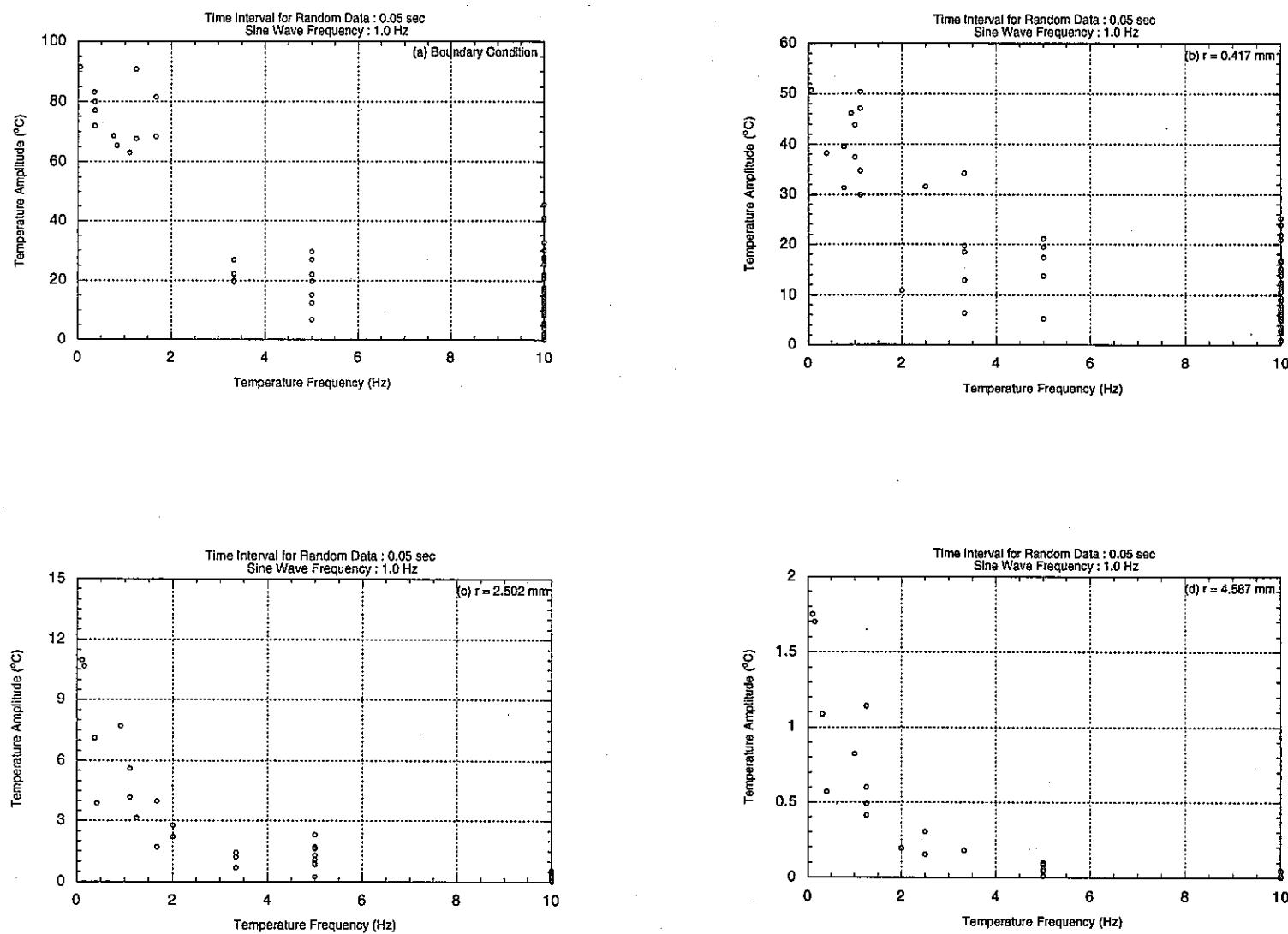


Fig. 3. 30 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

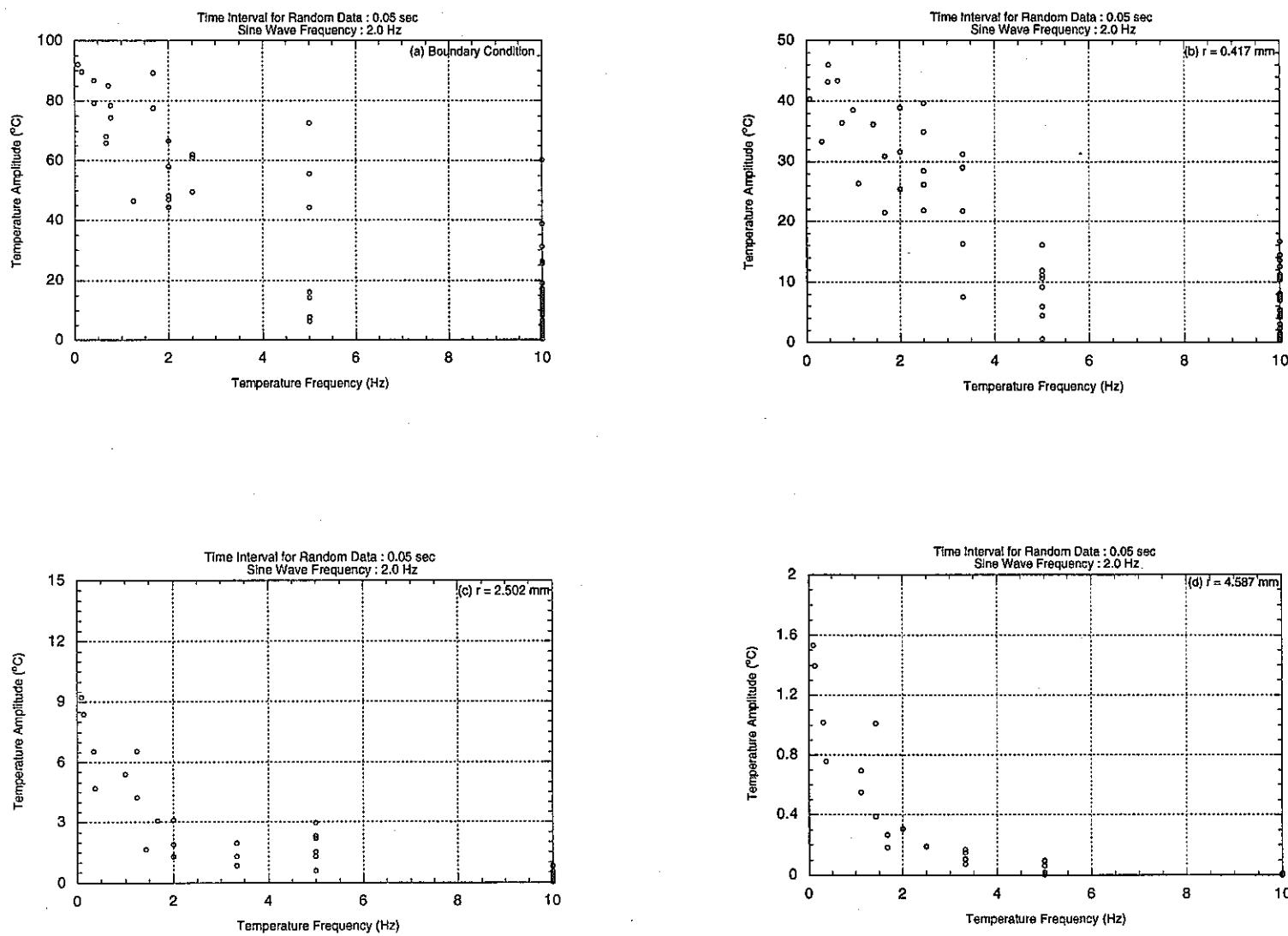


Fig. 3. 31 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

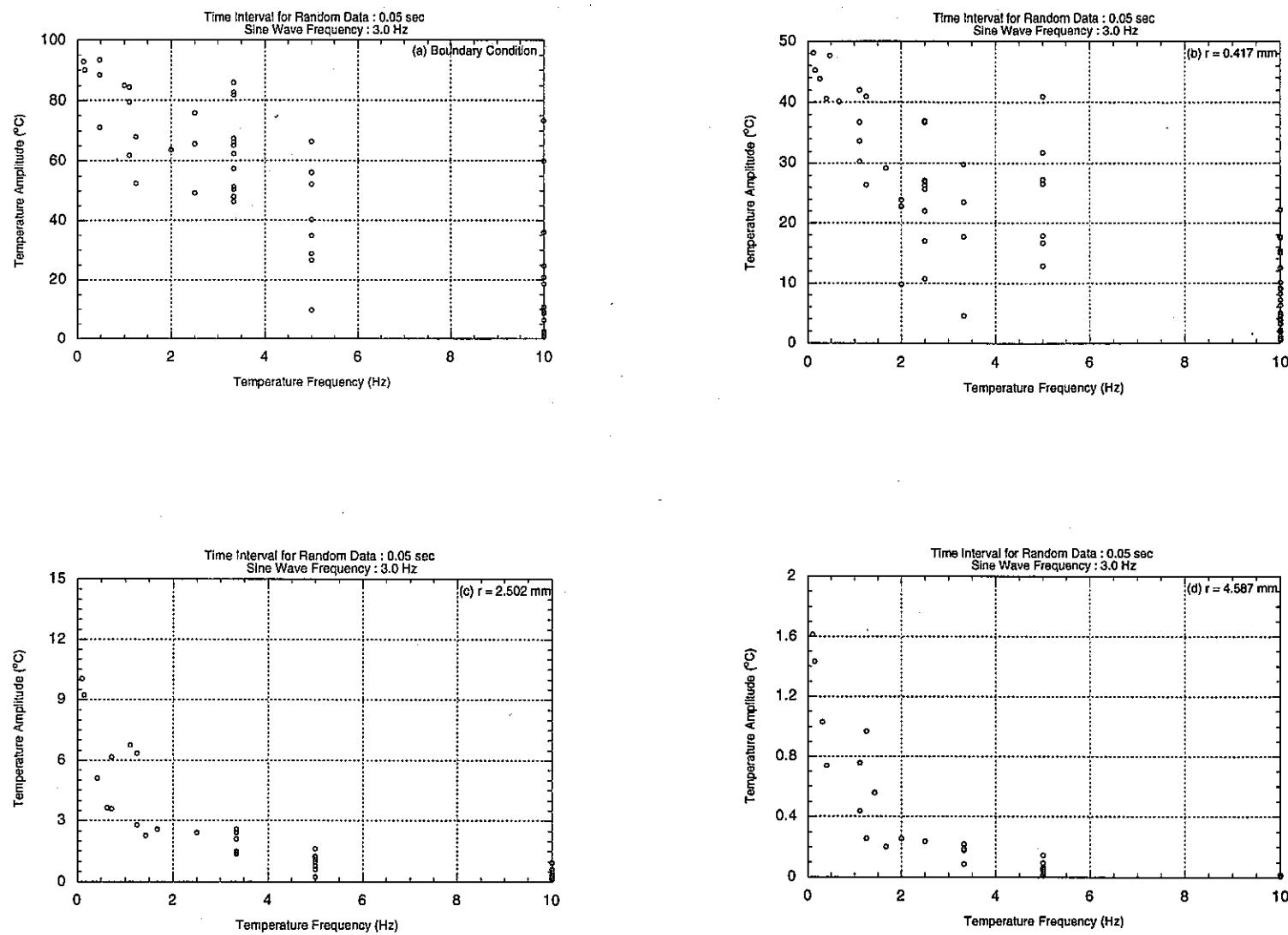


Fig. 3. 32 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

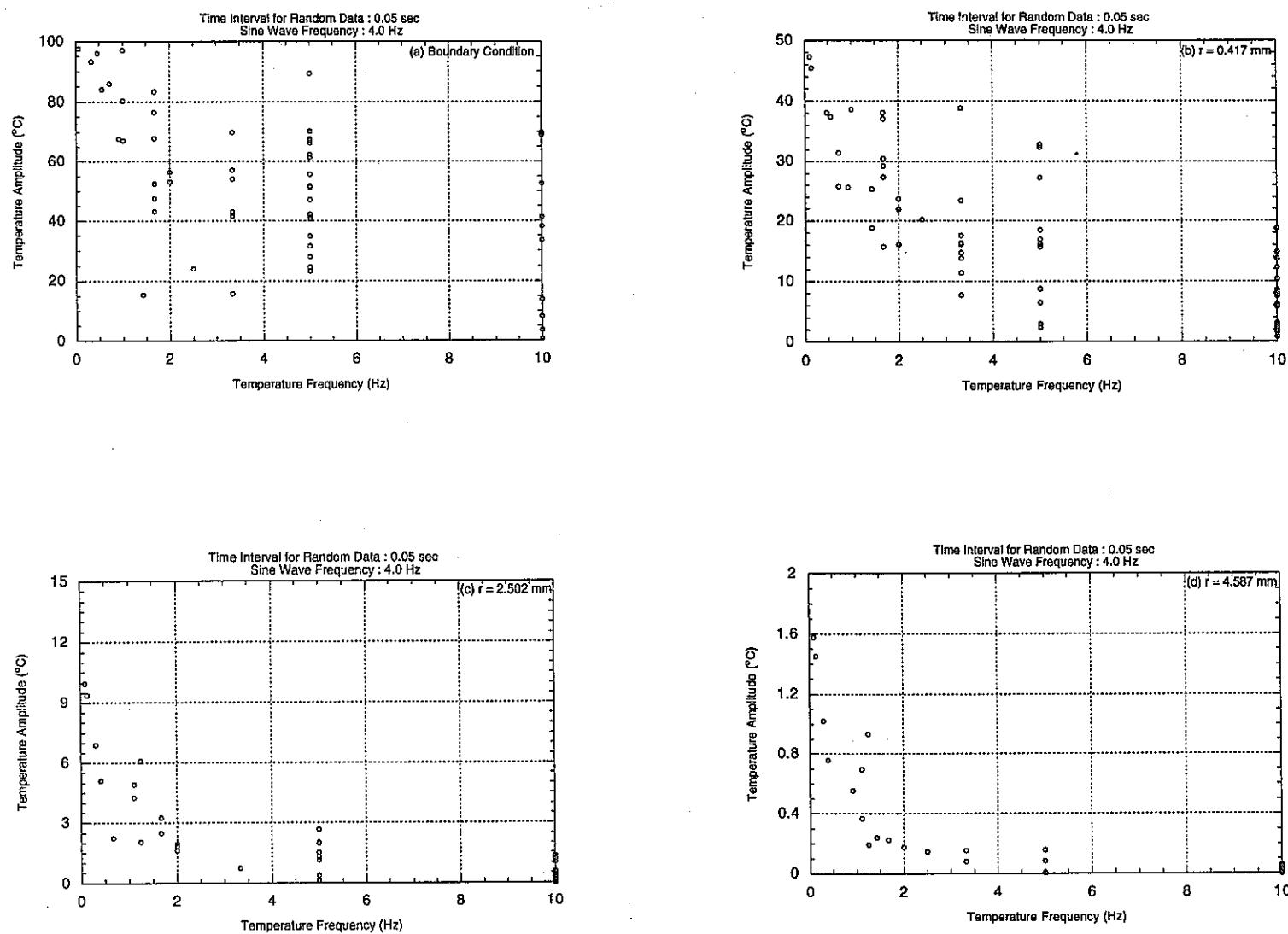


Fig. 3.33 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

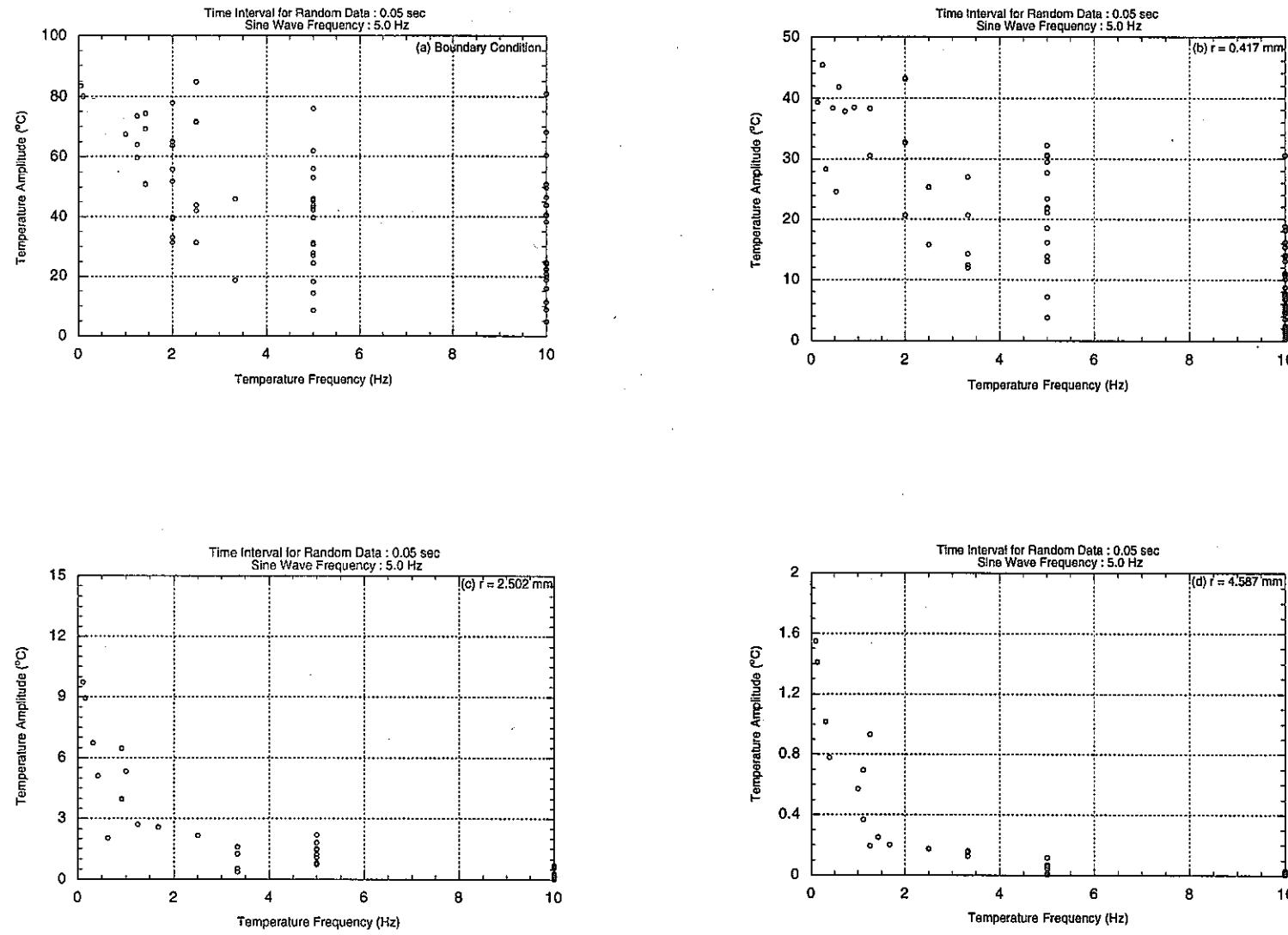


Fig. 3. 34 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Temperatures at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

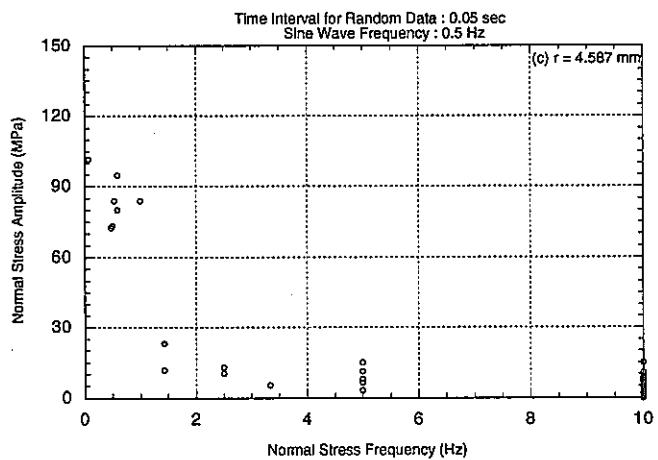
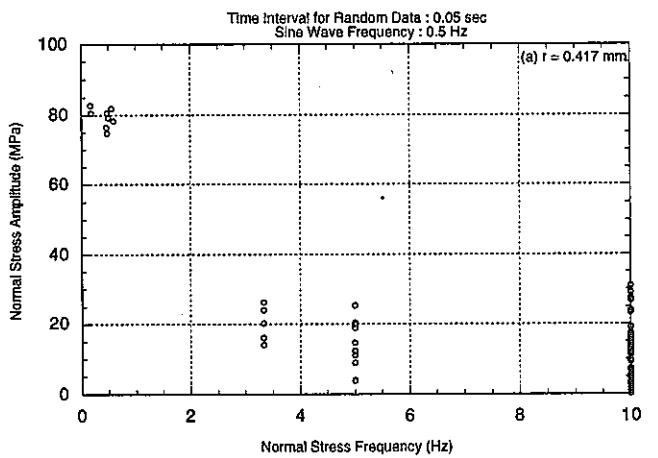
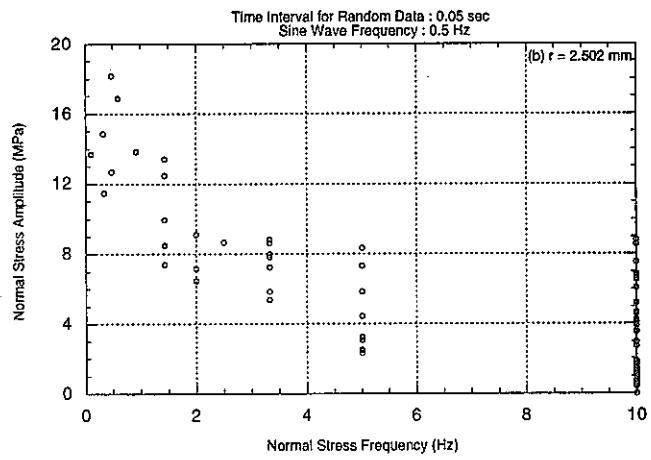


Fig. 3. 35 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 0.5 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

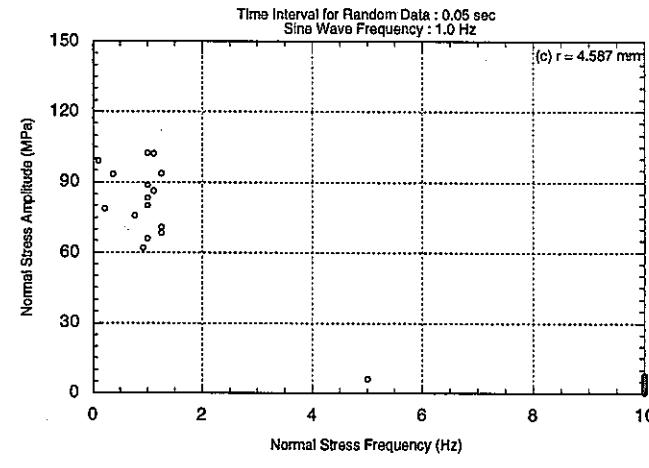
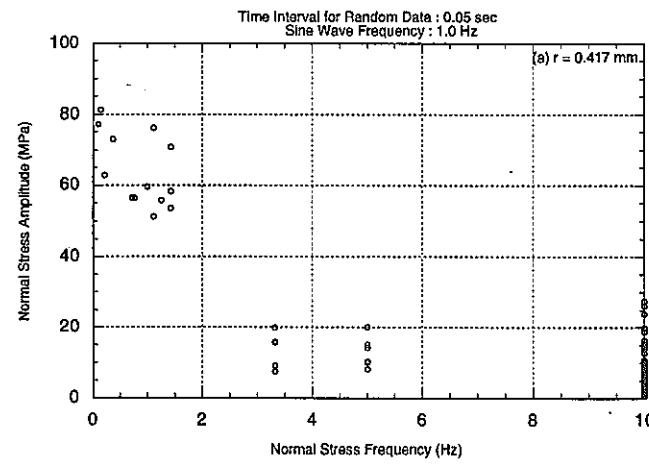
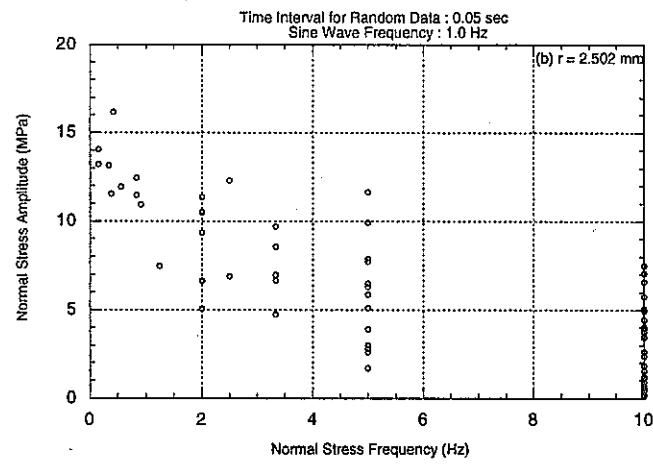


Fig. 3. 36 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 1.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

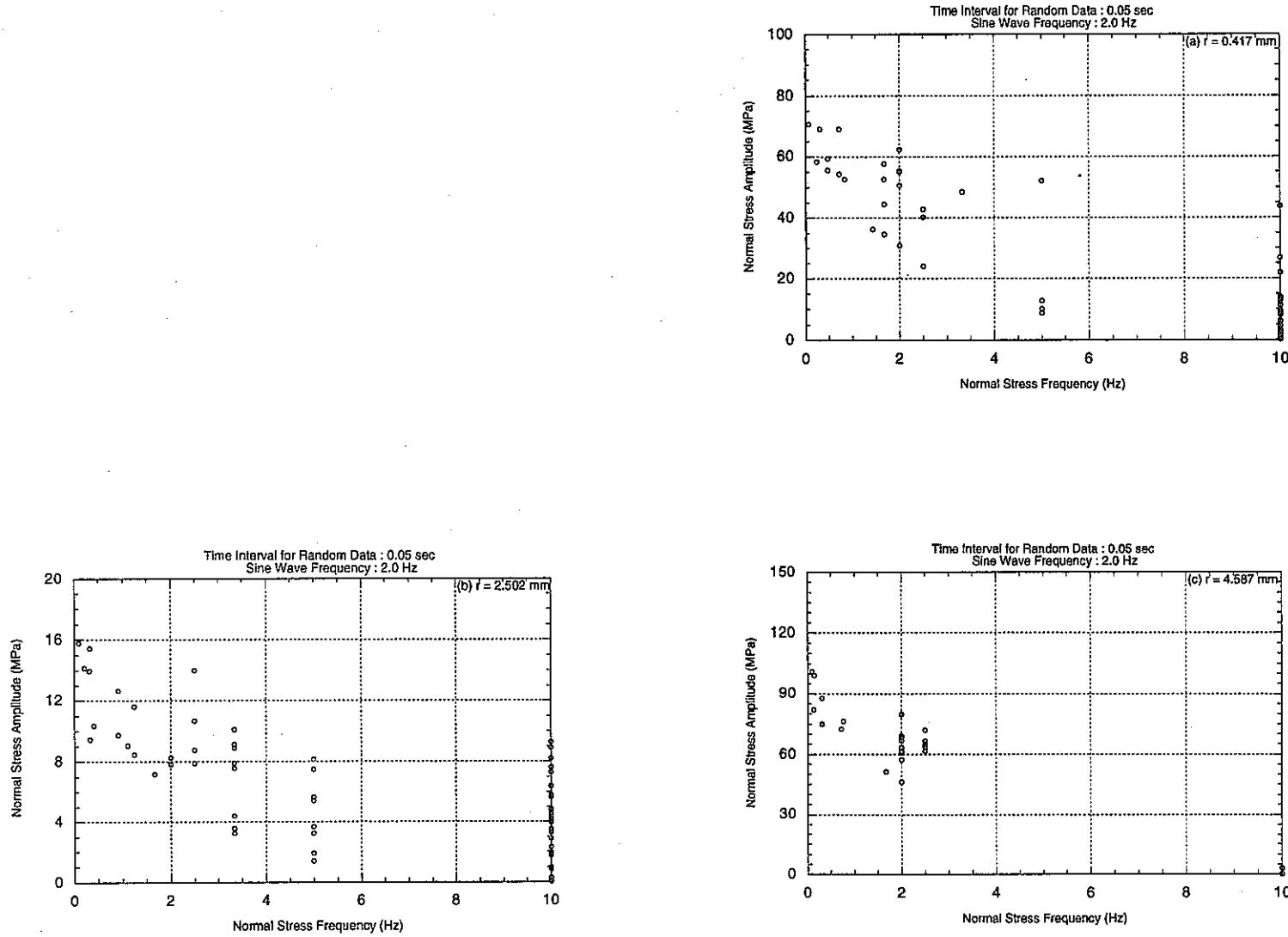


Fig. 3.37 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 2.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

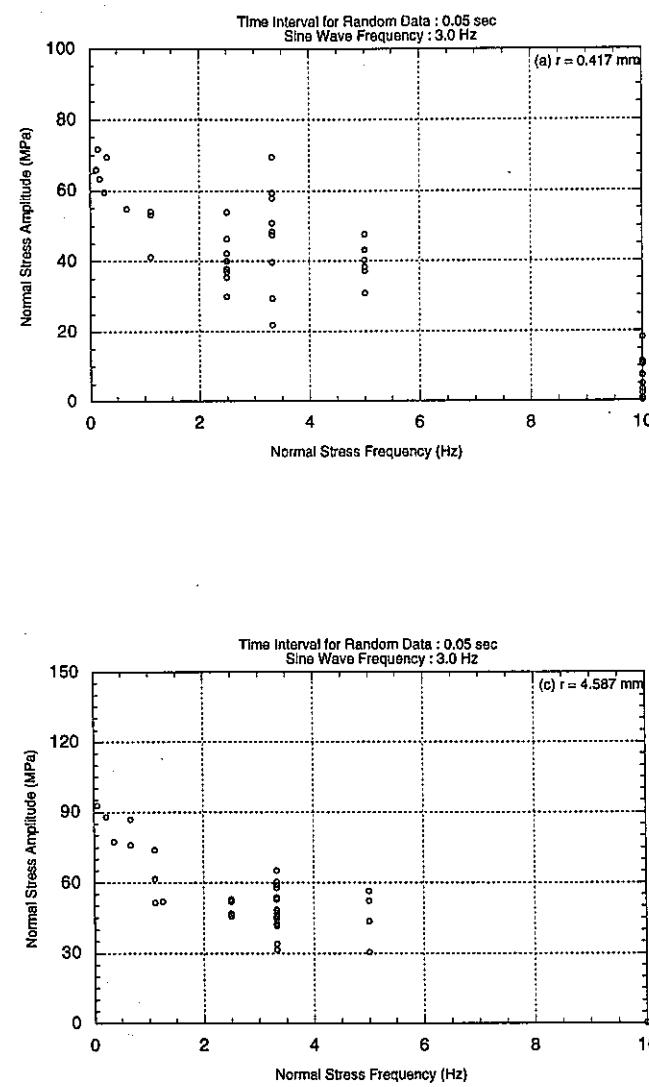
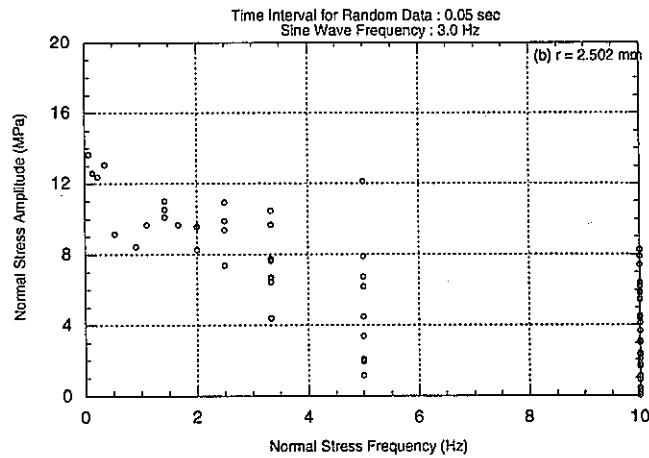


Fig. 3. 38 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 3.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

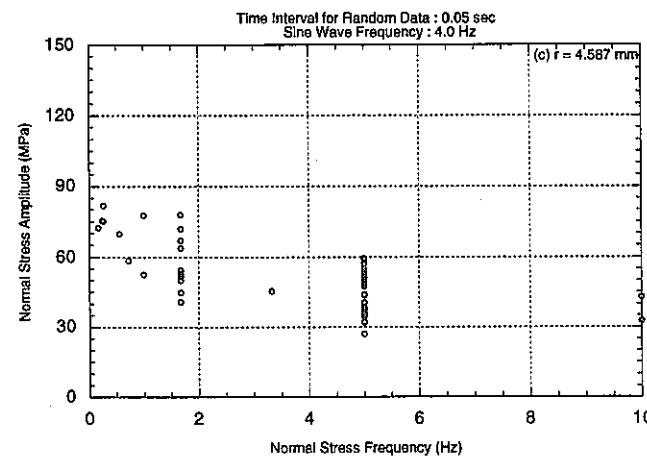
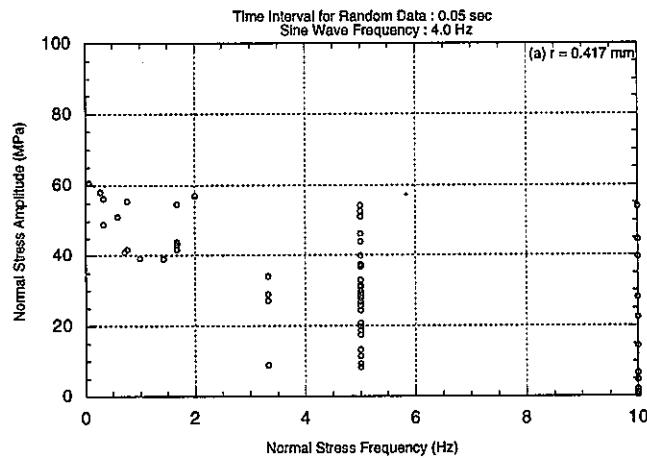
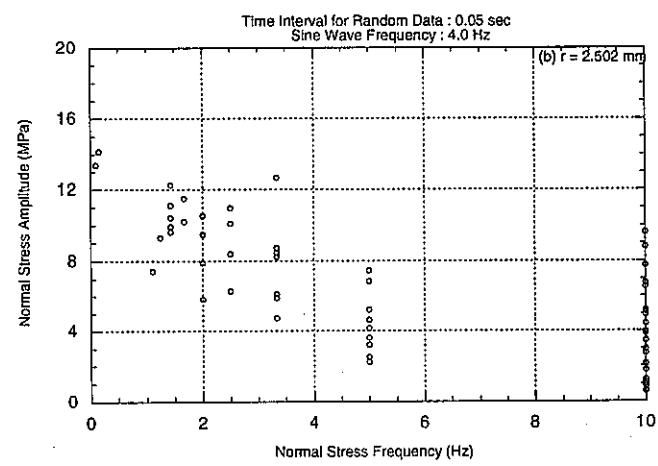


Fig. 3.39 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 4.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube Outer Wall

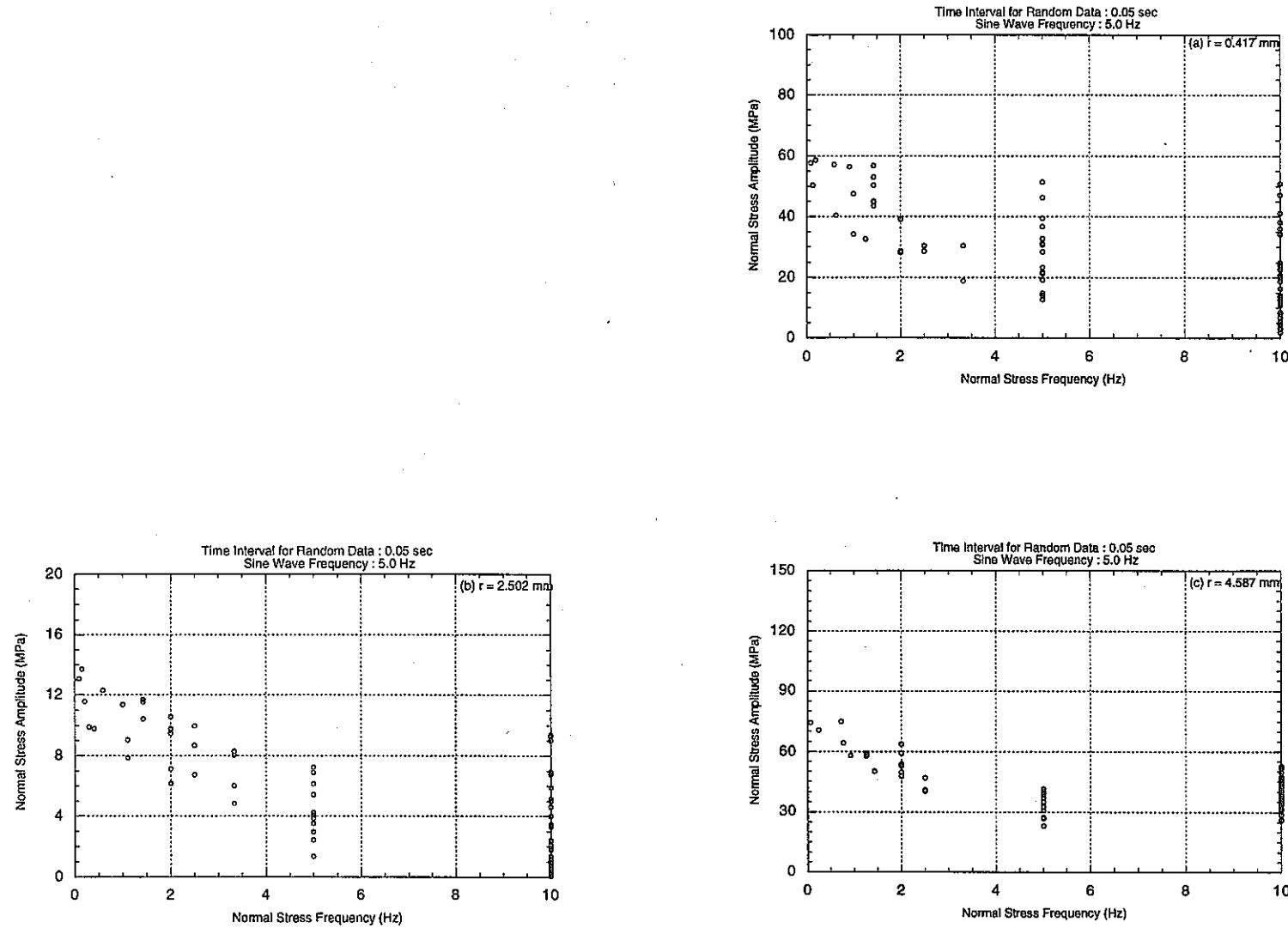


Fig. 3. 40 Two-Dimensional Probability Functions Between Amplitudes and Frequencies of the Fluctuating Normal Stresses at Various Positions in the Flow Guide Tube under the Condition of Sine Wave Frequency 5.0 Hz with Random Components of the Time Interval 0.05 sec to the Tube