

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—

1997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)1997

公開資料
PNC TN9410 97-039
1997年3月

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 -

村松 壽晴*

要旨

4種類の解析コード(汎用多次元コード AQUA、直接シミュレーションコード DINUS-3、直接法モンテカルロコード THEMIS および境界要素法コード BEMSET)より成るサーマルストライピング解析評価手法のシステムレベルでの検証を行うため、流体 - 構造非定常熱的応答に関する既往ナトリウム試験の数値解析を行った。検証に用いたナトリウム試験は、4 mm 隔てて平行に置かれた噴流ノズル(5 mm × 9 mm)の下流側 35 mm 位置に速応性熱電対を横方向に 2 mm 間隔で貼り付けた試験片(SUS 304 鋼)を設置し、噴流ナトリウム温度を $300 \pm 20^{\circ}\text{C}$ に固定した条件で噴流流速を変化させ、温度ゆらぎ挙動を測定したものである。

得られた解析結果に基づき、温度ゆらぎ実効値、温度ゆらぎ振幅および周波数の頻度分布、温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度および境界層内温度ゆらぎ減衰特性などの統計量を評価し、実験によるそれらとの比較を行った。この比較の結果、同解析評価システムにより、流体 - 構造非定常熱的応答挙動を精度良く模擬できることを確認した。

* : 大洗工学センター 基盤技術開発部 热流体技術開発室

PNC TN9410 97-039
May , 1997

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

- Validation of the Evaluation Model for Thermally Fluid - Structure Interaction Phenomena -

Toshiharu MURAMATSU*

Abstract

A numerical evaluation system, which is consisted of four codes, AQUA, DINUS-3, THEMIS and BEMSET has been developed for thermal striping phenomena. To validate the system for the phenomena, thermally fluid - structure interaction analysis was carried out using a existing sodium experiment of parallel impinging jet simulating the outlet region of an LMFBR core.

Calculational results on the RMS values of temperature fluctuation, the histograms of temperature amplitudes and frequencies, the auto-power spectral density distributions of temperature fluctuations and the damping characteristics of temperature fluctuations showed good agreement with the measured values under the test conditions of various flow velocity. From the comparisons with the experimental data, it was concluded that the numerical evaluation system is applicable to the evaluation of thermally fluid - structure interaction phenomena related to the thermal striping.

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

- 流体・構造非定常熱的応答特性に係わる評価手法の検証 -

目 次

第1章 緒 言

第2章 既往 流体・構造 非定常熱的応答基礎ナトリウム試験の調査

2.1 予備試験

2.2 試験方法

2.2.1 試験体

2.2.2 試験ループ

2.2.3 計測システム

2.2.4 試験手順

2.3 測定結果

2.3.1 温度ゆらぎ実効値の空間分布

2.3.2 温度ゆらぎ振幅および周波数の頻度分布

2.3.3 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル

2.3 検討

2.4.1 境界層内温度ゆらぎ減衰特性

2.4.3 流体・構造物間の伝達関数および相互相關関数

第3章 既往 流体・構造 非定常熱的応答基礎ナトリウム試験の数値解析

3.1 サーマルストライピング解析評価システムの概要

3.2 時間平均場における温度ゆらぎ特性の解析

3.2.1 解析モデルおよび解析条件

3.2.2 解析結果

3.3 瞬時場における温度ゆらぎ特性の解析

3.3.1 解析モデルおよび解析条件

3.3.2 解析結果

3.4 試験片内非定常熱伝導特性の解析

3.4.1 解析モデルおよび解析条件

3.4.2 解析結果

第4章 試験結果と数値解析結果との比較および検討

4.1 温度ゆらぎ実効値の空間分布

4.2 温度ゆらぎ振幅および周波数の頻度分布

4.3 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度

4.4 境界層内温度ゆらぎ減衰特性

第5章 結 言

参考文献

謝 辞

付 錄

付録 A 試験部の詳細

付録 B 温度変化(ch1, ch2, ch3, ch4, ch13, ch14, ch15, ch16)

付録 C 自己パワースペクトル(ch1, ch2, ch3, ch4, ch5, ch6, ch10, ch12, ch13, ch14, ch15, ch16)

図表リスト

第2章

- 図 2.1 セラミックス系接着材の Na 中試験
 図 2.2 予備試験体形状
 図 2.3 热電対付き試験体の製作手順概要
 図 2.4 加工途中の試験体表面
 図 2.5 温度測定法(断面図)
 図 2.6 热電対取付け位置(平面図)
 図 2.7 Na 中高周波热衝撃実験装置
 図 2.8 Na 中高周波热衝撃実験装置外観写真
 図 2.9 試験容器
 図 2.10 热電対付きノズル
 図 2.11 データ収録装置のシステム
 図 2.12 温度変化(Na 流速 1 m/s)
 図 2.13 温度変化(Na 流速 1 m/s)
 図 2.14 温度変化(Na 流速 1.5 m/s)
 図 2.15 温度変化(Na 流速 1.5 m/s)
 図 2.16 温度変化(Na 流速 2 m/s)
 図 2.17 温度変化(Na 流速 2 m/s)
 図 2.18 温度ゆらぎの実効値(単位: °C)
 図 2.19 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 1 m/s、ch 8)
 図 2.20 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 1 m/s、ch 7)
 図 2.21 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 1 m/s、ch 11)
 図 2.22 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 1 m/s、ch 9)
 図 2.23 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 1.5 m/s、ch 8)
 図 2.24 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 1.5 m/s、ch 7)
 図 2.25 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 1.5 m/s、ch 11)
 図 2.26 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 1.5 m/s、ch 9)
 図 2.27 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 2 m/s、ch 8)
 図 2.28 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 2 m/s、ch 7)
 図 2.29 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 2 m/s、ch 11)
 図 2.30 温度ゆらぎ幅頻度(Na 流速 2 m/s、ch 9)
 図 2.31 周波数頻度(Na 流速 1 m/s、ch 8)
 図 2.32 周波数頻度(Na 流速 1 m/s、ch 7)
 図 2.33 周波数頻度(Na 流速 1 m/s、ch 11)
 図 2.34 周波数頻度(Na 流速 1 m/s、ch 9)

- 図 2.35 周波数頻度 (Na 流速 1.5 m/s、ch 8)
 図 2.36 周波数頻度 (Na 流速 1.5 m/s、ch 7)
 図 2.37 周波数頻度 (Na 流速 1.5 m/s、ch 11)
 図 2.38 周波数頻度 (Na 流速 1.5 m/s、ch 9)
 図 2.39 周波数頻度 (Na 流速 2 m/s、ch 8)
 図 2.40 周波数頻度 (Na 流速 2 m/s、ch 7)
 図 2.41 周波数頻度 (Na 流速 2 m/s、ch 11)
 図 2.42 周波数頻度 (Na 流速 2 m/s、ch 9)
 図 2.43 自己パワースペクトル (Na 流速 1 m/s、ch 8)
 図 2.44 自己パワースペクトル (Na 流速 1 m/s、ch 7)
 図 2.45 自己パワースペクトル (Na 流速 1 m/s、ch 11)
 図 2.46 自己パワースペクトル (Na 流速 1 m/s、ch 9)
 図 2.47 自己パワースペクトル (Na 流速 1.5 m/s、ch 8)
 図 2.48 自己パワースペクトル (Na 流速 1.5 m/s、ch 7)
 図 2.49 自己パワースペクトル (Na 流速 1.5 m/s、ch 11)
 図 2.50 自己パワースペクトル (Na 流速 1.5 m/s、ch 9)
 図 2.51 自己パワースペクトル (Na 流速 2 m/s、ch 8)
 図 2.52 自己パワースペクトル (Na 流速 2 m/s、ch 7)
 図 2.53 自己パワースペクトル (Na 流速 2 m/s、ch 11)
 図 2.54 自己パワースペクトル (Na 流速 2 m/s、ch 9)
 図 2.55 温度ゆらぎ幅の減衰効果
 図 2.56 伝達関数 (Na 流速 1 m/s、入力 ch 8 - 出力 ch 7)
 図 2.57 伝達関数 (Na 流速 1 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 9)
 図 2.58 伝達関数 (Na 流速 1 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 11)
 図 2.59 伝達関数 (Na 流速 1 m/s、入力 ch 11 - 出力 ch 9)
 図 2.60 伝達関数 (Na 流速 1.5 m/s、入力 ch 8 - 出力 ch 7)
 図 2.61 伝達関数 (Na 流速 1.5 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 9)
 図 2.62 伝達関数 (Na 流速 1.5 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 11)
 図 2.63 伝達関数 (Na 流速 1.5 m/s、入力 ch 11 - 出力 ch 9)
 図 2.64 伝達関数 (Na 流速 2 m/s、入力 ch 8 - 出力 ch 7)
 図 2.65 伝達関数 (Na 流速 2 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 9)
 図 2.66 伝達関数 (Na 流速 2 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 11)
 図 2.67 伝達関数 (Na 流速 2 m/s、入力 ch 11 - 出力 ch 9)
 図 2.68 相互相関関数 (Na 流速 1 m/s、入力 ch 8 - 出力 ch 7)
 図 2.69 相互相関関数 (Na 流速 1 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 9)
 図 2.70 相互相関関数 (Na 流速 1 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 11)
 図 2.71 相互相関関数 (Na 流速 1 m/s、入力 ch 11 - 出力 ch 9)
 図 2.72 相互相関関数 (Na 流速 1.5 m/s、入力 ch 8 - 出力 ch 7)
 図 2.73 相互相関関数 (Na 流速 1.5 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 9)

- 図 2.74 相互相関関数 (Na 流速 1.5 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 11)
- 図 2.75 相互相関関数 (Na 流速 1.5 m/s、入力 ch 11 - 出力 ch 9)
- 図 2.76 相互相関関数 (Na 流速 2 m/s、入力 ch 8 - 出力 ch 7)
- 図 2.77 相互相関関数 (Na 流速 2 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 9)
- 図 2.78 相互相関関数 (Na 流速 2 m/s、入力 ch 7 - 出力 ch 11)
- 図 2.79 相互相関関数 (Na 流速 2 m/s、入力 ch 11 - 出力 ch 9)

第3章

- 表 3.1 サーマルストライピング解析評価システムの主要目
- 図 3.1 サーマルストライピング解析評価システムの構成
- 図 3.2 温度ゆらぎ解析モデル (AQUA および DINUS-3 コード)
- 図 3.3 AQUA コードによる時間平均流速ベクトル (ケース 1)
- 図 3.4 AQUA コードによる時間平均流速ベクトル (ケース 2)
- 図 3.5 AQUA コードによる時間平均流速ベクトル (ケース 3)
- 図 3.6 自由噴流特性 (ケース 1)
- 図 3.7 自由噴流特性 (ケース 2)
- 図 3.8 自由噴流特性 (ケース 3)
- 図 3.9 AQUA コードによる時間平均ナトリウム温度分布 (ケース 1)
- 図 3.10 AQUA コードによる時間平均ナトリウム温度分布 (ケース 2)
- 図 3.11 AQUA コードによる時間平均ナトリウム温度分布 (ケース 3)
- 図 3.12 AQUA コードによる時間平均ナトリウム温度ゆらぎ分布 (ケース 1)
- 図 3.13 AQUA コードによる時間平均ナトリウム温度ゆらぎ分布 (ケース 2)
- 図 3.14 AQUA コードによる時間平均ナトリウム温度ゆらぎ分布 (ケース 3)
- 図 3.15 DINUS-3 コードによる瞬時流速ベクトル (ケース 1)
- 図 3.16 DINUS-3 コードによる瞬時流速ベクトル (ケース 2)
- 図 3.17 DINUS-3 コードによる瞬時流速ベクトル (ケース 3)
- 図 3.18 DINUS-3 コードによる瞬時ナトリウム温度分布 (ケース 1)
- 図 3.19 DINUS-3 コードによる瞬時ナトリウム温度分布 (ケース 2)
- 図 3.20 DINUS-3 コードによる瞬時ナトリウム温度分布 (ケース 3)
- 図 3.21 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時間推移 (ケース 1)
- 図 3.22 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時間推移 (ケース 2)
- 図 3.23 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時間推移 (ケース 3)
- 図 3.24 非定常熱伝導解析モデル (BEMSET コード)
- 図 3.25 BEMSET コードによる試験片内温度の時間推移 (ケース 1)
- 図 3.26 BEMSET コードによる試験片内温度の時間推移 (ケース 2)
- 図 3.27 BEMSET コードによる試験片内温度の時間推移 (ケース 3)

第4章

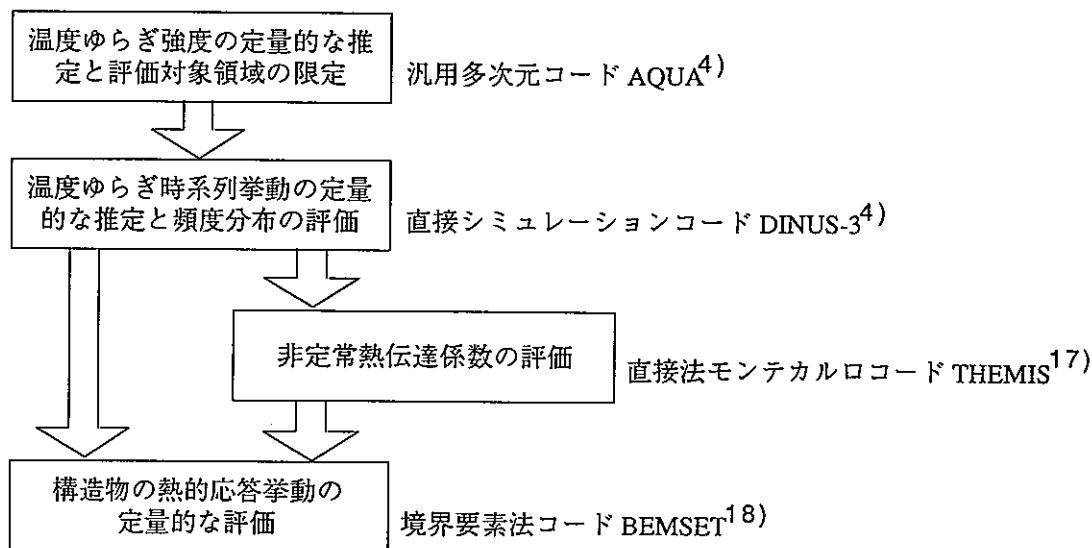
- 図 4. 1 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ実効値の時間平均空間分布 (ケース 1)
 図 4. 2 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ実効値の時間平均空間分布 (ケース 2)
 図 4. 3 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ実効値の時間平均空間分布 (ケース 3)
 図 4. 4 試験片近傍における温度ゆらぎ実効値の比較 (ケース 1)
 図 4. 5 試験片近傍における温度ゆらぎ実効値の比較 (ケース 2)
 図 4. 6 試験片近傍における温度ゆらぎ実効値の比較 (ケース 3)
 図 4. 7 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布 (ケース 1)
 図 4. 8 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布 (ケース 2)
 図 4. 9 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布 (ケース 3)
 図 4. 10 BEMSET コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布 (ケース 1)
 図 4. 11 BEMSET コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布 (ケース 2)
 図 4. 12 BEMSET コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布 (ケース 3)
 図 4. 13 温度ゆらぎ振幅頻度分布の比較 (ケース 1)
 図 4. 14 温度ゆらぎ振幅頻度分布の比較 (ケース 2)
 図 4. 15 温度ゆらぎ振幅頻度分布の比較 (ケース 3)
 図 4. 16 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布 (ケース 1)
 図 4. 17 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布 (ケース 2)
 図 4. 18 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布 (ケース 3)
 図 4. 19 BEMSET コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布 (ケース 1)
 図 4. 20 BEMSET コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布 (ケース 2)
 図 4. 21 BEMSET コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布 (ケース 3)
 図 4. 22 温度ゆらぎ周波数頻度分布の比較 (ケース 1)
 図 4. 23 温度ゆらぎ周波数頻度分布の比較 (ケース 2)
 図 4. 24 温度ゆらぎ周波数頻度分布の比較 (ケース 3)
 図 4. 25 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度 (ケース 1)
 図 4. 26 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度 (ケース 2)
 図 4. 27 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度 (ケース 3)
 図 4. 28 BEMSET コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度 (ケース 1)
 図 4. 29 BEMSET コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度 (ケース 2)
 図 4. 30 BEMSET コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度 (ケース 3)
 図 4. 31 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較 (ケース 1)
 図 4. 32 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較 (ケース 2)
 図 4. 33 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較 (ケース 3)
 図 4. 34 温度ゆらぎ減衰特性の比較

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となる。

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。

報告者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^{1, 4, 5, 17, 18)}。



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 AQUA⁴⁾ 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、これを受けて直接シミュレーションコード DINUS-3⁴⁾ 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 THEMIS¹⁷⁾ 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 BEMSET¹⁸⁾ を開発した。

本報では、上記解析的評価手法のシステムレベルでの検証を行うことを目的として、流体・構造非定常熱的応答に関する既往ナトリウム試験結果について検討を加えるとともに、同試験の数値解析を行って当該解析的評価システムの適用性を評価する。

第2章 既往 流体-構造非定常熱的応答基礎ナトリウム試験の調査

熱的応答基礎ナトリウム試験では、ナトリウム容器内の静止ナトリウム場において、2個の固定ノズルより高温および低温の局所ナトリウム噴流を材料表面に衝突させて、温度ゆらぎデータが取得された²⁾。本章では、実験で用いられた試験ループ、試験体及び計測システムなど試験装置や測定結果について調査・検討するとともに、統計的手法により非定常温度特性を評価する。

2.1 予備試験

熱的応答基礎ナトリウム試験では、応答性に優れた接地型の極細熱電対を試験体表面および内部に取付けて試験が行われた。通常、熱電対を試験体に取付ける場合、溶接等で固定するが、極細熱電対を溶接するとシース部が破損して測定が不可能となることが考えられる。そこで、セラミックス系接着剤を用いて熱電対が固定された。しかしながら、セラミックス系接着剤の耐ナトリウム性が不明であったことから、セラミックス系接着剤のナトリウム浸漬試験が実施された。さらに、極細熱電対をセラミックス系接着剤により試験体へ固定する取付け試験も実施された。また、極細熱電対のシース部肉厚は約 $30 \mu\text{m}$ 程度であり、ナトリウム中腐食によりシース部が破損し、絶縁が保てなくなる可能性がある。そこで、極細熱電対を用い、ナトリウム中実験を実施し、絶縁性能が確認された。

予備試験の内容を以下に示す。

(a) セラミックス系接着剤の耐Na性能試験

通常、熱電対を材料に取付ける場合、溶接等による方法が取られる。しかしながら、ここで使用される熱電対は最小直径が 0.25mm と細く、シース部肉厚は約 $30 \mu\text{m}$ 程度であり、溶接時にシース部が破損する可能性がある。このため、熱電対を取付ける方法として、セラミックス系接着剤が用いられた。ただし、耐ナトリウム性のあるセラミックスとしてアルミナがあるが、接着剤中には結合剤や溶剤として種々の成分が含まれており、耐ナトリウム性が低下することが考えられる。そのため、本試験を模擬してセラミックス系接着剤を SUS 材中に埋め込んだ試料を作成し、ナトリウム中実験を実施し、これをもとに水を溶剤とする接着剤が選定された。セラミックス系接着剤のナトリウム中試験条件は、温度 300°C 、浸漬時間 75h、ナトリウム中酸素濃度 1ppm である。なお、水を溶剤とする接着剤を用いた試験では、室温中に放置乾燥した後、電気炉中で熱処理を施し水分が除去された。

図 2-1(a)に試料形状、図 2-1(b)に実験後の試料の状況を示す。

(b) 極細熱電対の試験体取付け試験

本試験体の製作に関して、極細径の穴加工性や熱電対取付け性を確認するため、予備試験体を用いて試験体取付け試験が行われた。なお、上記の接着剤を用いて、予備試験体に非接地型

の熱電対(シース部径 0.25mm)を取付けて絶縁抵抗を測定するとともに、本試験体の製作手順や製作性が確認された。

図 2-2 に、取付け試験に用いた試験体形状を示す。

(c) 極細熱電対の耐ナトリウム性能試験

上記のように熱電対のシース部肉厚は約 $30 \mu\text{m}$ 程度と薄く、ナトリウム中腐食によりシース部が破損し、絶縁が保てなくなる可能性がある。このため、非接地型の熱電対(シース部径 0.25mm)を用い、温度 300°C、浸漬時間 50h、ナトリウム中酸素濃度 1ppm の条件でナトリウム中実験を実施し、絶縁性能が確認された。

2.2 試験方法

2.2.1 試験体

ナトリウム試験では、ナトリウム容器内の静止ナトリウム場において、固定ノズルより高温および低温の局所ナトリウム噴流を材料表面に衝突させて、試験体に取付けた熱電対により温度ゆらぎデータが取得された。試験では、流体および構造物の温度を測定するため、近接した位置に熱電対が取付けられた。

熱電対製作では、熱電対先端から熱接点までの距離を特定するため、先端部が X 線で撮影された。この X 線撮影の結果から、熱電対先端から熱接点までの距離が長いものについては熱電対先端をエメリーペーパーで削った後、X 線撮影で確認し、所定の長さのものが採用された。また、熱電対先端から熱接点までの距離が短いものについては使用されなかった。なお、試験体製作では、熱電対挿入用のスリーブを製作後、試験体内部に設置してレーザ溶接にて固定し、溶接部を含む試験体表面を切削加工して所定の厚さ (15mm) に調整された。

図 2-3 に熱電対付き試験体の製作手順を、図 2-4 に加工途中の試験体表面を示す。また、熱電対を取り付けた試験体の断面図と平面図を図 2-5 と図 2-6 に示す。各熱電対は、試験体中央部を中心位置として 2mm 間隔の正方格子状に配置された。ここで比較的、早い応答速度が必要な流体境界層外(材料表面より 1.5mm)、流体境界層内(材料表面より 0.3mm) および材料表面における熱電対として、シース外径 0.25mm の接地型 CA 热電対が取付けられた。上記熱電対において、熱電対先端から熱接点までの距離は 0.1mm である。

材料内部温度計測用としては、シース外径 0.5mm の接地型 CA 热電対が試験体(SUS304 鋼)に取付けられた。材料内部温度計測用の熱電対において、先端から熱接点までの距離は断面図に示すとおりである。なお、通常のシース外径 0.25mm と 0.5mm の接地型熱電対の 90% 応答時間は、それぞれ約 30ms と約 50ms であった。上記熱電対を取付けた試験体の反対の面には、シース外径 1mm の非接地型 CA 热電対を取付け、温度を監視した。

2.2.2 試験装置

装置全体の構成を図 2-7 に示す。本実験装置は純度管理した高温及び低温ナトリウムを試験

体に衝突させる構造となっている。ナトリウムループは主に貯蔵タンク、コールドトラップ、電磁ポンプ、流量計および試験容器からなる。コールドトラップはナトリウム中不純物を捕獲するメッシュを内蔵している。高温及び低温ナトリウムが流れる配管系にはそれぞれ加熱器及び冷却器が取り付けられ、電磁流量計と流調弁によりナトリウムを所定の流量に設定することが可能である。

図 2-8 に実験装置の外観写真を示す。また、試験容器の詳細を図 2-9 に示す。ナトリウム容器内において、2 個の固定ノズル(内寸 5×9mm)より高温および低温の局所ナトリウム噴流を試験体下面に衝突させる構造となっている。ナトリウム液面は、試験体上面より上側 35mm の位置に設定し、試験体の内部温度が平均温度となるよう保持された。また、ノズル先端は試験体下面より下側 35mm の位置に取付け、試験体下面がミキシング領域になるように設定された。なお、ノズル先端より上流側 50mm の位置に熱電対を取り付け、ナトリウム温度が計測された。

図 2-10 に熱電対付きノズルの写真を示す。本試験では、試験体とノズルを精度よく配置することが必要である。このため容器フランジの上部に、ノズル位置決め用の中間フランジと試験体取付け用の上部フランジが設けられた。また、ノズルは、中間フランジの下部に取付けた支持枠によって、所定の位置に設置された。さらに、中間フランジと上部フランジを外部から位置調整することにより、試験体中心とノズル中心の位置を決定することができる。なお実験では、試験体中心に取付けた熱電対(流体境界層外のナトリウム温度計測用)の温度が、平均温度(400°C)を中心として不規則にゆらいでいることが確認された。付録 A に、試験部の詳細図面を示す。

2.2.3 計測システム

既往流体-構造非定常熱的応答基礎ナトリウム試験に使用したデータ収録処理システムを図 2-11 に示す。本システムはデータ収録及び FFT 演算処理機能を備えた HIOKI 製 FFT アナライザ(高速波形記録計 8825)、データ変換及び計算処理の日立製 FLORA パソコン(5DS01-A80A5)及び図形を修正する Macintosh パソコン(Quadra 840AV)で構成されている。

試験部には極細径の熱電対 16 本が配置されている。この熱電対信号は、16ch の温度ユニットを介してデジタル変換されアナライザに収録された。なお、アナライザの測定モードをレコーダモードに設定することによって、温度を常時監視することができる。温度ゆらぎデータは、アナライザの測定モードをメモリモードにしてサンプリング周期を 5ms(200Hz)で 100 秒間測定された。測定されたデータは温度波形を確認後、フロッピイディスク(以下 F/D1)にファイルされた。実験終了後、各 ch の温度補正を行い、その補正後のデータを F/D2 にファイルされた。

温度ゆらぎデータの FFT 解析は、アナライザに F/D2 をロードして伝達関数、相互相関関数、自己パワースペクトル等を求め、その結果が F/D3 にファイルされた。次に FLORA パソコンで F/D3 のデータの File Format を DOS/V+Windows に変換した後、Microsoft EXCEL で FFT 結果の各々の図を作成し、F/D4 にファイルされた。温度ゆらぎ振幅、周波数の頻度解析及び実効値解

析は、F/D2 の温度揺らぎデータを FFT 解析と同様に、FLORA パソコンで File Format を変換後、Quick Basic によるプログラムで頻度計算及び図形処理をし、これらの結果は F/D5 にファイルされた。さらに、F/D4 及び F/D5 にファイルした図形データは、Macintosh パソコンで File Format を変換し、マックドローで最終図が作成された。

2.2.4 試験手順

サーマルストライピング実験に先立ち、ナトリウムの純化運転が行われた。なお純化運転時におけるコールドトラップのメッシュ部最低温度は、120℃に制御された。この時のナトリウム中酸素濃度は、Eichelberger の酸素溶解度式から 1.0ppm となる。

ナトリウムの純化運転後、サーマルストライピング実験が実施された。実験条件は、高温側ノズルの出口温度を 320℃、低温側ノズルの出口温度を 280℃とし、各ノズルのナトリウム流速を 1, 1.5, 2m/s として実施された。試験ループが定常の温度状態になったことを確認した後、上記の計測システムにより、サンプリング速度 200Hz、計測時間 100s で各温度データが採取された。

2.3 測定結果

図2-12～2-17に、各流速条件における試験体中心部(ch5, ch6, ch7, ch8, ch9, ch10, ch11, ch12)の温度変化を示す。各流速において、試験体中心に取付けた ch8(流体境界層外)の温度は平均温度300℃を中心にゆらいでおり、試験体中心位置と2個のノズル中心位置が一致していることがわかる。また、各流速条件における結果では、ゆらぎ振幅は ch8(流体境界層外)が最も大きく、次に ch7(流体境界層内)が大きく、これらについては周波数も高いものとなっている。一方、ノズル中央列に位置する ch9(構造内深さ0.2mm)は、ch7とch8の流体側に比較してゆらぎ振幅が小さく、また周波数も低い。なお、ノズル中央列に位置する ch8 と ch7 および ch9 は、それぞれ関連性をもって温度変動していることがわかる。ch8 と ch7 および ch9 においては、流速が速くなるほどゆらぎ振幅は大きくなり、また周波数も高くなる傾向になっていることがわかる。

高温ノズルに近い ch5(流体境界層内)と ch6(構造材表面)の温度は平均温度300℃よりも高温側の値を示し、低温ノズルに近い ch10(流体境界層外)と ch11(構造材表面)の温度は平均温度300℃よりも低温側でゆらいでいることがわかる。なお、ch5(流体境界層内)と ch6(構造材表面)は同列に位置しているが、ch6の温度変化は小さく、ノズル中心列からわずか2mmの構造材表面温度の変動は小さいものであることがわかる。このような傾向は、ch6と反対側にあり、ノズル中心列から同じ2mmの場所にある ch11(構造材表面)においても見ることができる。なお、流体中に位置する ch5 と ch10 においては、流速が速くなるほどゆらぎ振幅は大きくなり、また周波数も高くなる傾向であることがわかる。一方、試験体中心から離れた所にある ch1, ch2, ch3, ch4, ch13, ch14, ch15, ch16 における温度ゆらぎ振幅は極めて小さい(付録B参照)。

2.3.1 温度ゆらぎ実効値の空間分布

図2-18に、各流速条件下における温度ゆらぎ実効値の分布を示す。なお、この温度ゆらぎ実効値は、2秒間の計測データによって計算された。各流速下における温度ゆらぎ実効値は、ノズル中央列に位置する ch8(流体境界層外)が最も大きく6.3～7.5℃の範囲内にあり、次に ch7(流体境界層内)が大きく3.0～4.4℃の範囲内にある。この2つの温度ゆらぎの実効値は、流速が速くなるほど大きい。ゆらぎ実効値が1℃～2℃のものは、ch2(流体境界層外)、ch5(流体境界層内)、ch10(流体境界層外)と流体中のものであり、その大きさの順番は流速によって変化している。なお、ノズル中央列に位置する ch9 を含めたその他の ch の実効値は、そのほとんどが1℃以下と小さいものとなっている。

2.3.2 温度ゆらぎ幅及び周波数の頻度分布

頻度分布を求めるにあたり、波形計数法としてヒステリシスループ法³⁾が採用された。本手法は、T_i、T_j、T_kを連続する極値とすると、相次ぐ2個の極値によって生じる温度範囲であるΔT_{ij}、ΔT_{jk}を比較して以下の手順により温度範囲をカウントするものである。

①ΔT_{ij}≤ΔT_{jk}となったときにのみΔT_{ij}をカウントする。

- ②温度範囲の比較は3個のレジスターに極値が記憶された時点で実施する。
- ③カウントされた極値はレジスターから消去し、順次極値をレジスターに繰り上げて読み込む。

周波数の頻度も、上記①に対応する時間(Δt_{ij})より求められた。

試験体中央部の熱電対(ch8, ch7, ch11, ch9)における各流速条件下での温度ゆらぎ幅の頻度分布を、図2-19～2-30に示す。図中、横軸の温度ゆらぎ幅は高温および低温ナトリウムの温度差40°Cで規格化を施し、また縦軸の相対頻度は頻度の最大度数で規格化を施している。図中では、流体中のch8とch7における横軸の最大値を80%、構造材中のch11とch9における横軸の最大値を20%としている。結果より、各流速条件下で各chとも指数関数的に頻度が減少していることがわかる。このうち、ch8(流体境界層外)が最も大きな温度ゆらぎ幅を示しており、流速が速くなるほど温度ゆらぎ幅は増大する傾向を示している。ch9(構造内深さ0.2mm)はch11(構造材表面)よりも温度ゆらぎ幅が大きくなっているが、これはch11が試験体中央から2mm離れているのに対して、ch9が試験体中央部に位置していることによる。同様に熱電対(ch8, ch7, ch11, ch9)における温度ゆらぎ周波数の頻度分布を、図2-31～2-42に示す。これらの結果より、流体中のch8とch7では低周波から高周波にかけて相対頻度が減少から増加に転じる傾向を示している。またch8とch7の最大頻度は、ほぼ48～52Hzの周波数帯で発生していることがわかる。構造中のch11とch9では、周波数帯が増加するのにともない、相対頻度は指数関数的に減少し、構造材料には低周波の温度ゆらぎのみが伝搬していることがわかる。また、流速が速くなるにしたがって最大度数は増加し、また高周波領域まで発生しやすいことがわかる。

2.3.3 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル

試験体中央部の熱電対(ch8, ch7, ch11, ch9)における、各流速ごとの自己パワースペクトルを図2-43～2-54に示す。自己パワースペクトルは、1000点のデータ毎に自己パワースペクトルを求めてこれを20回繰返し、その平均値より求められた。各流速条件下においてけるパワーでは、ch8(流体境界層外)が最も高く、次にch7(流体境界層内)が続く。また、ch7はch8に比較して、周波数の増加に対してパワーの減衰勾配が急であり、流体境界層内において高周波成分が大きく減少する様子を示唆している。また流速が速くなると、除々に強度が高くなる傾向を示している。さらに、構造材のch9(構造内深さ0.2mm)とch11(構造材表面)では、流体側のch7とch8に比較して、パワーが低くなっていることがわかる。一方、ch9はch11に比較して、周波数の増加に対してパワーの減衰勾配が急であり、構造材料内部においても高周波成分が大きく減少する傾向を示している。またノズル中央列に位置するch9の特徴では、流速1m/sと2m/sを比較すると、流速が速くなると周波数領域全体にわたってパワーが大きくなる傾向を示している。一方、ノズル中央列から2mm離れた位置にあるch11のパワーは大きく変化せず、この位置では流速変化の影響は小さいことがわかる。付録Cに、温度ゆらぎの小さい他の自己パワースペクトルを示す。

2.4 検討

2.4.1 境界層内ゆらぎ減衰特性

図2-55は、試験体中央列の3個の熱電対(ch8, ch7, ch9)による測定結果を用いて、温度の減衰特性を各流速ごとに表したものである。ここでは80秒間の温度データとともに、高温と低温ノズルの温度差40℃を100%として各減衰率が求められた。ノズル出口-境界層外側間の減衰率G1(乱流混合による減衰)の算出方法は、ch8(流体境界層外)における最大温度および最低温度の差 ΔT ($T_{max} - T_{min}$)より減衰量 $40 - \Delta T$ を求め、減衰率 $G1 = (40 - \Delta T)/40$ が算出された。境界層外側-内側間の減衰率G2の算出方法は、ch7(流体境界層内)での減衰率 $(40 - \Delta T)/40$ を求め、この値より上記減衰率G1を差し引いて算出された。同様に境界層内側-材料表面間の減衰率G3の算出方法は、ch9(構造内深さ0.2mm)での減衰率 $(40 - \Delta T)/40$ を求め、この値よりG1とG2を差し引いて算出された。

ノズル出口-境界層外側間では、流速が速くなるとゆらぎ幅 ΔT ($T_{max} - T_{min}$)が増大するため、減衰率(乱流混合による減衰)が減少する傾向となる。同様に境界層外側-内側間でも、流速が速くなると減衰率が減少するが、各流速間の変化はノズル出口-境界層外側間よりも小さく、約1/5になっている。境界層内側-材料表面間でも流速が速くなると減衰率が減少し、その変化はノズル出口-境界層外側間とほぼ同等となっている。材料表面におけるゆらぎ幅 ΔT は、流速1、1.5、2m/sでそれぞれ18、20、21%と、流速が増加するのにともなって増加している。この結果より、材料表面での最大ゆらぎ幅 ΔT は、ノズル出口間の温度差の約2割と小さいことがわかる。

2.4.2 流体-構造物間の伝達関数及び相互相関関数

(a) 伝達関数

図2-56～2-67は、試験体中央部の4個の熱電対(ch8, ch7, ch9, ch11)による測定結果を用いて、ch8(入力)-ch7(出力)、ch7-ch9、ch7-ch11、ch11-ch9の伝達関数を求めたものである。なおここで伝達関数は、1000点のデータ毎に伝達関数を求めてこれを20回繰返し、その平均値より算出されたものである。まず流体中のch8(流体境界層外)-ch7(流体境界層内)の振幅比についてみると、各流速条件において、全体的に低周波ほど振幅比が増加する傾向にあり、相関が強くなる。また流速が増加すると、ピーク値が高周波側に現れることがわかる。同ch間において、各流速毎に位相の違いはあまり見られない。

次に、試験体中央列のch8-ch7とch7-ch9を比較すると、各流速条件において、流体中のch8(流体境界層外)-ch7(流体境界層内)の振幅比が、ch7(流体境界層内)-ch9(構造内深さ0.2mm)よりも増加しており相関が強くなることがわかる。これは、流体間の方が流体-構造間よりも温度ゆらぎが伝達しやすいことを示唆している。この傾向は、各流速条件において概ね同じである。また位相に着目すると、流体-構造間であるch7-ch9の方が、流体間のch8-ch7よりも位相が大きくずれているのが確認できる。この傾向も、各流速条件において概ね同じである。

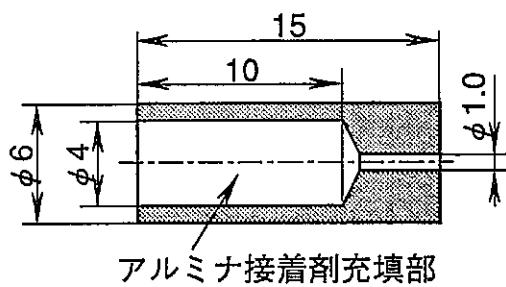
ch7(流体境界層内)-ch9(構造内深さ0.2mm)と、ch7(流体境界層内)-ch11(構造材表面)を比較

すると、ch7-ch11 の振幅比は、試験体中央列にある ch7-ch9 よりも減少していることがわかる。これは、ch11 が試験体中央列よりも 2 離れた位置にあり、ゆらぎ振幅が小さいことによる。逆に、ch11(構造材表面)-ch9(構造内深さ 0.2mm)の振幅比は、各 ch 間で最大となっており、これは上と同様に ch11 のゆらぎ振幅が小さいことに起因していると考えられる。また、位相は大きくずれているが、流速が増加するとこの傾向は明確でなくなる。

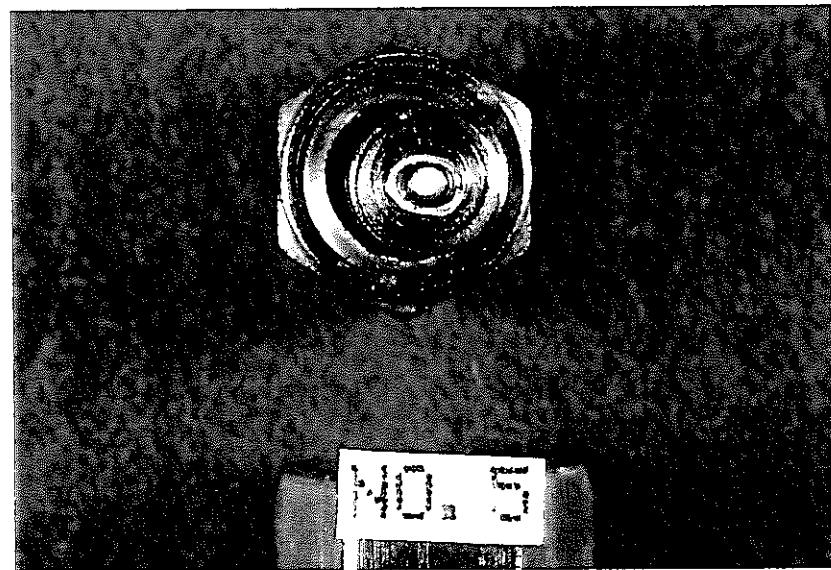
(b) 相互相関関数

図 2-68～2-79 は、試験体中央部の 4 個の熱電対(ch8, ch7, ch9, ch11)による測定結果を用いて、ch8(入力)-ch7(出力)、ch7-ch9、ch7-ch11、ch11-ch9 の相互相関関数を求められたものである。ここで相互相関関数は、1000 点のデータ毎に相互相関を求めてこれを 20 回繰返し、その平均値より算出された。各流速条件において、流体中の ch8(流体境界層外)-ch7(流体境界層内)の相互相関が最大であり、相関が強いことがわかる。また、流速が増加するにしたがって、相互相関係数が増加する傾向にある。これは、伝達関数の振幅比と同様の結果である。

次に相関が強いのは ch7(流体境界層内)-ch9(構造内深さ 0.2mm)であり、これも流速が増加するにしたがって、相互相関係数が増加する傾向にある。次に相関が強くなるのは ch11(構造材表面)-ch9(構造内深さ 0.2mm)と ch7(流体境界層内)-ch11(構造材表面)の順であり、これらは流速が増加してもほとんど変化しない。これは、各 ch の配置列が異なることによるものと推定される。



(a) 試料形状



(b) 実験後の試料状況

図2-1 セラミックス系接着剤のNa中試験

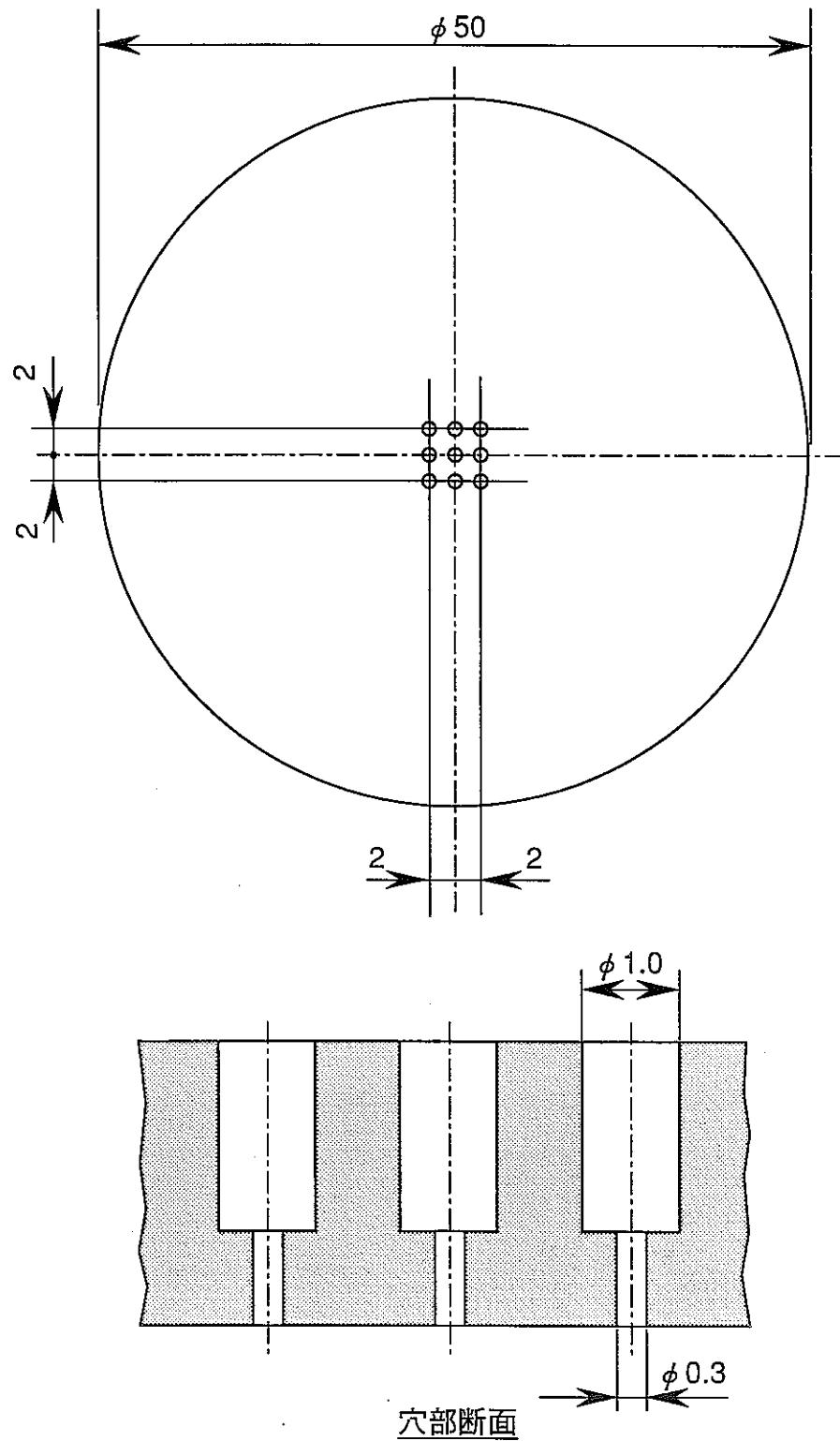


図2-2 予備試験体形状

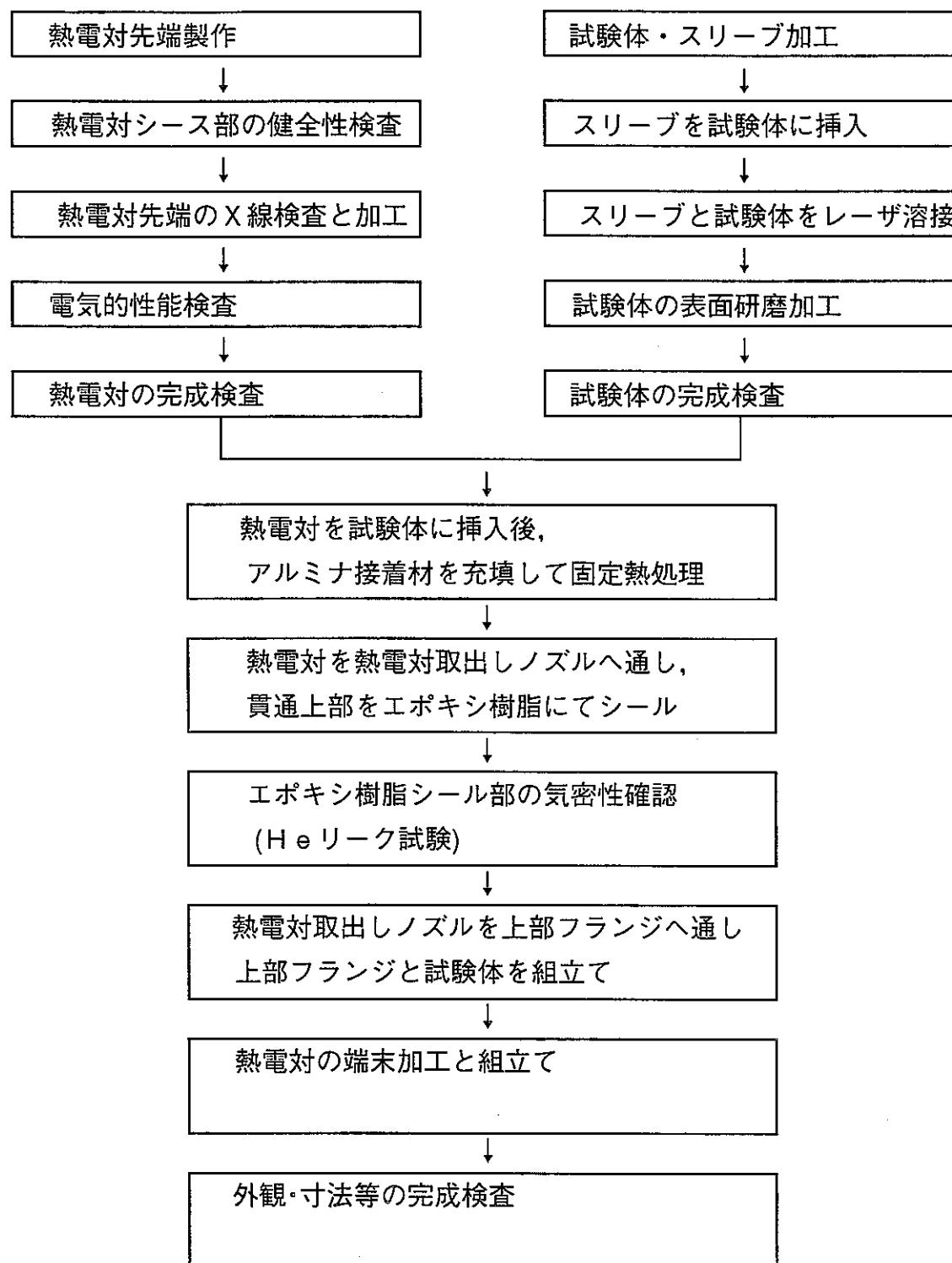
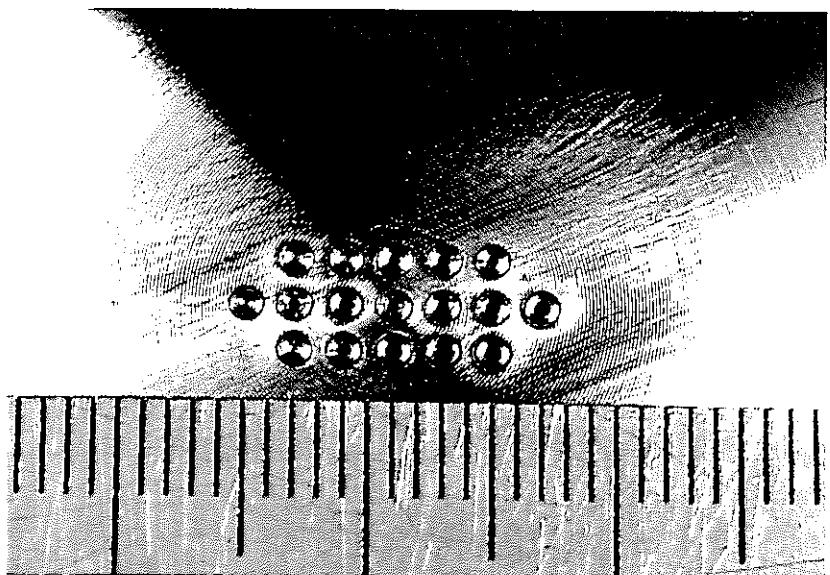
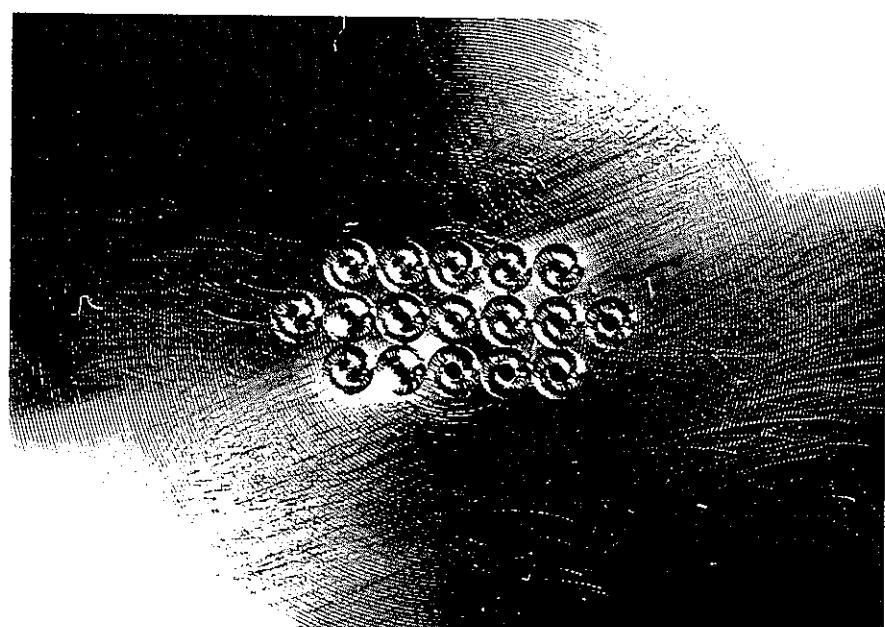


図2-3 热電対付き試験体の製作手順概要



(a) スリープ挿入後の試験体表面



(b) レーザ溶接後の試験体表面

図2-4 加工途中の試験体表面

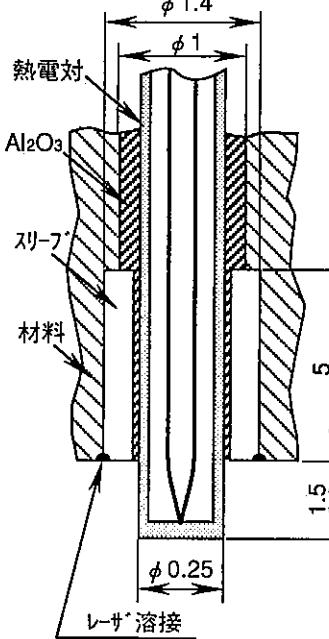
	流体境界層外温度	流体境界層内温度	構造材表面温度	構造材内温度A	構造材内温度B
取付け概要	 <p>熱電対 Al_2O_3 スリーブ 材料 レーザ溶接</p> <p>φ1.4 φ1 5 1.5 φ0.25 φ0.25 φ0.3 φ1.4 φ0.25 φ0.6 φ1.4 φ0.5 φ0.3 φ0.5 0.3 5 φ0.25 φ0.3 φ0.5 φ0.5 φ0.3 φ0.5</p> <p>単位: mm</p>				
熱電対				CAシース線, 接地型	
シース外径		0.25mm		0.5mm	

図2-5 温度測定法（断面図）

<記号>
外：流体境界層外温度
内：流体境界層内温度
表：構造材表面温度

材A_{0.2}：構造内温度A（深さ0.2mm）
材A_{0.3}：構造内温度A（深さ0.3mm）

材B_{0.3}：構造内温度B（深さ0.3mm）
材B_{0.5}：構造内温度B（深さ0.5mm）

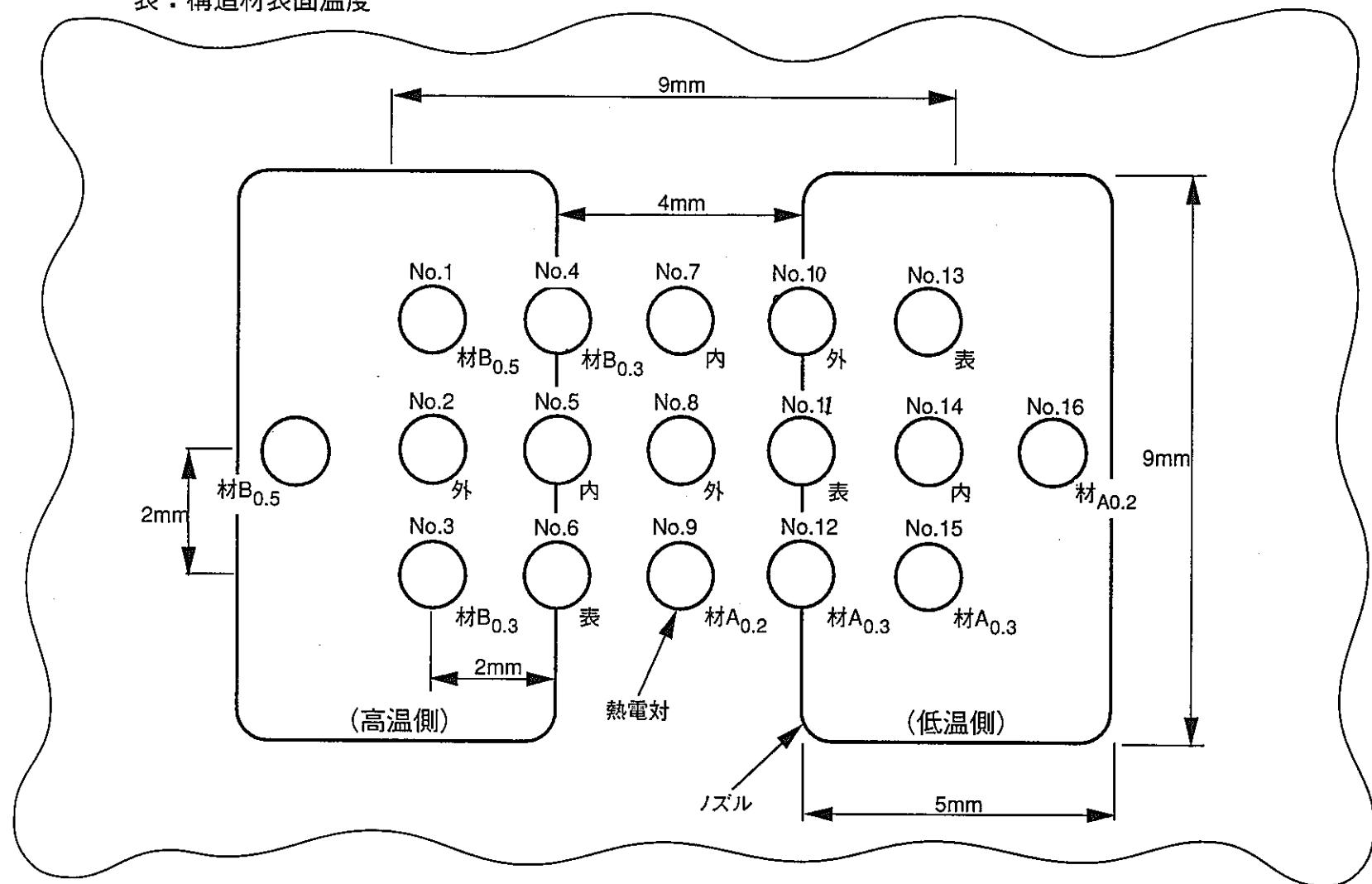


図2-6 热電対取付け位置 (平面図)

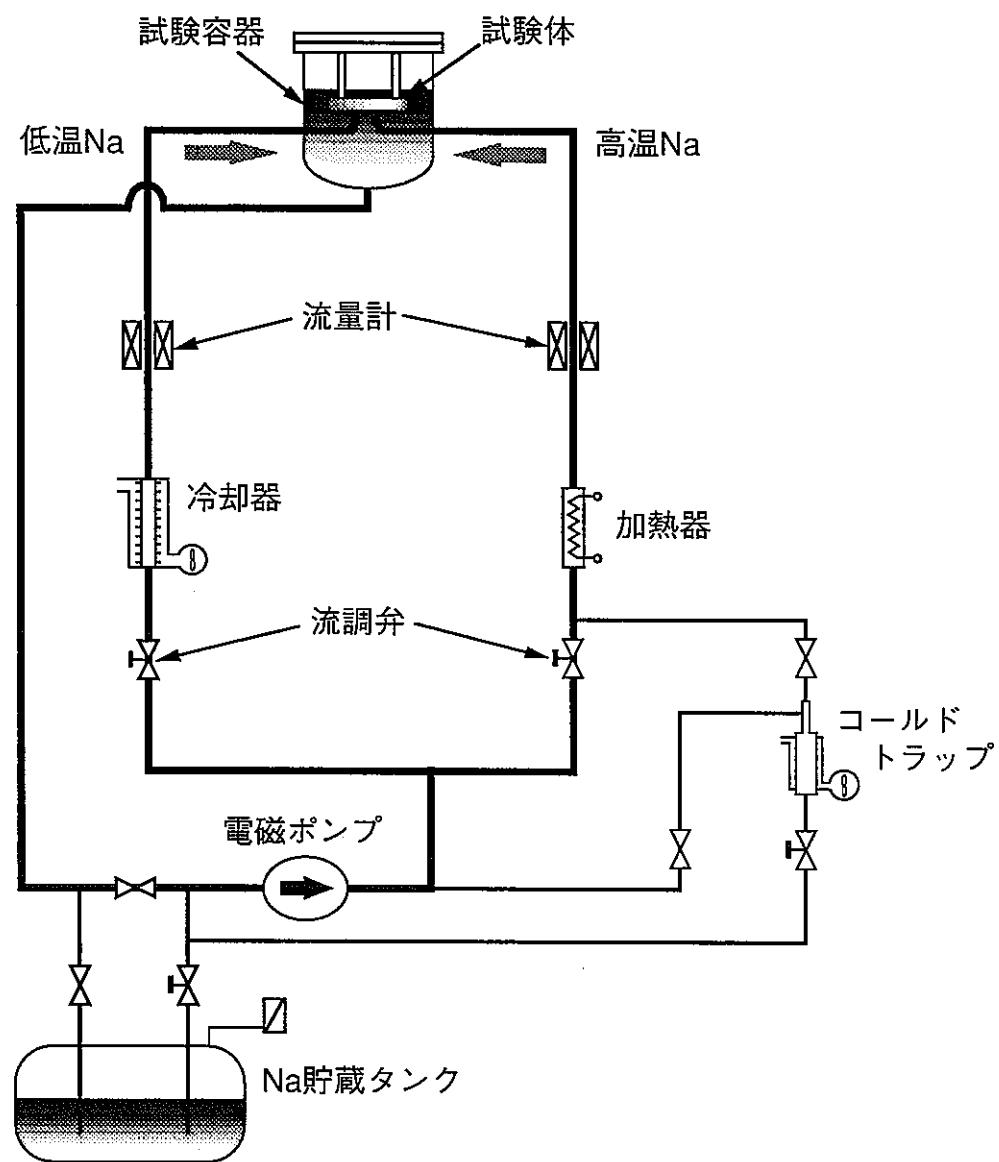
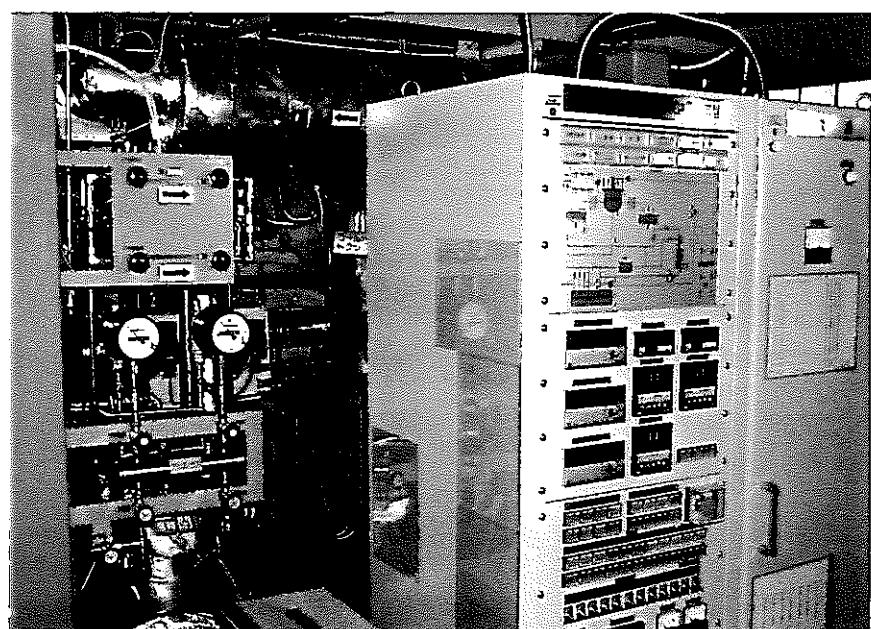


図2-7 Na 中高周波熱衝撃実験装置



(a) 装置全景



(b) 制御盤とNaループ

図2-8 Na中高周波熱衝撃実験装置外観写真

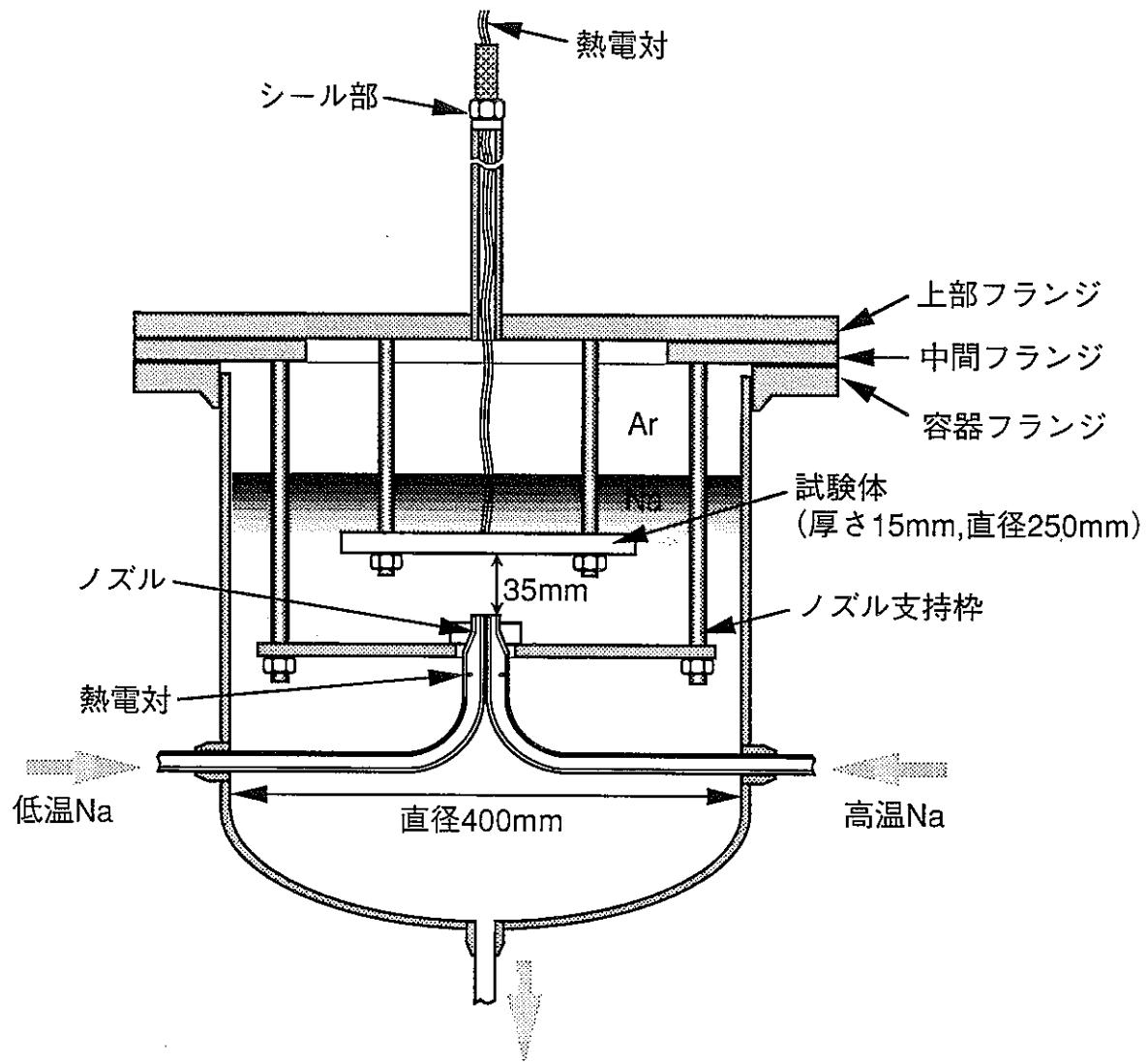


図2-9 試験容器

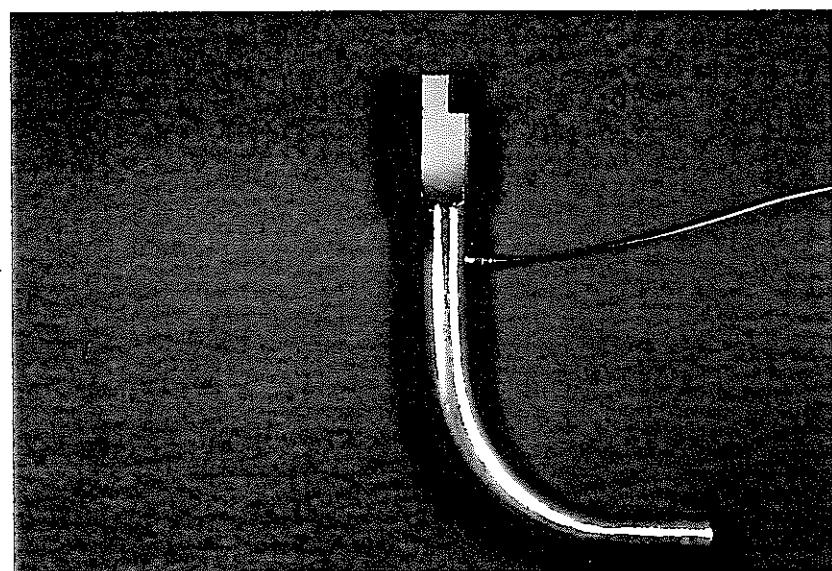


図2-10 热電対付きノズル

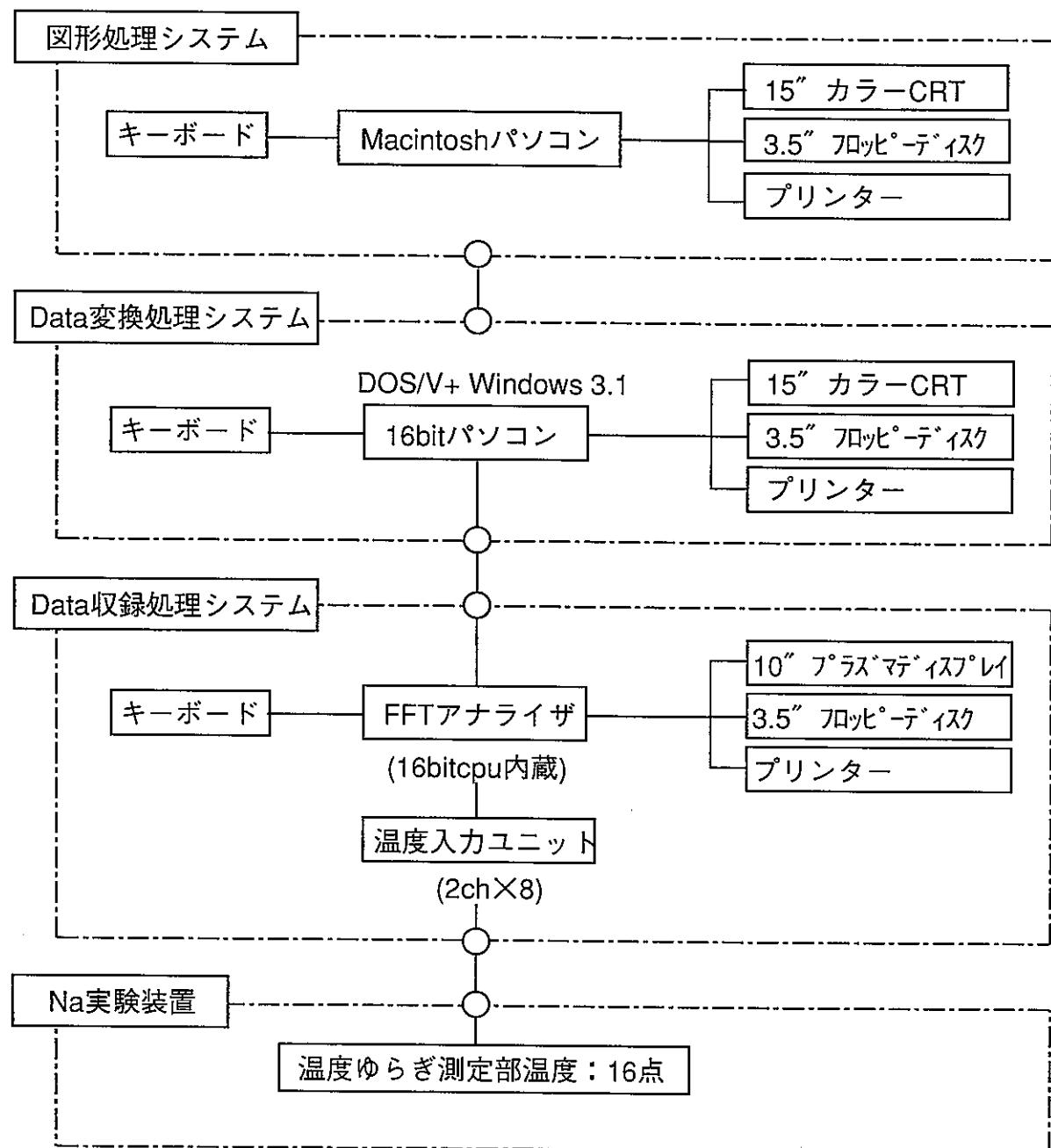


図2-11 データ収録装置のシステム

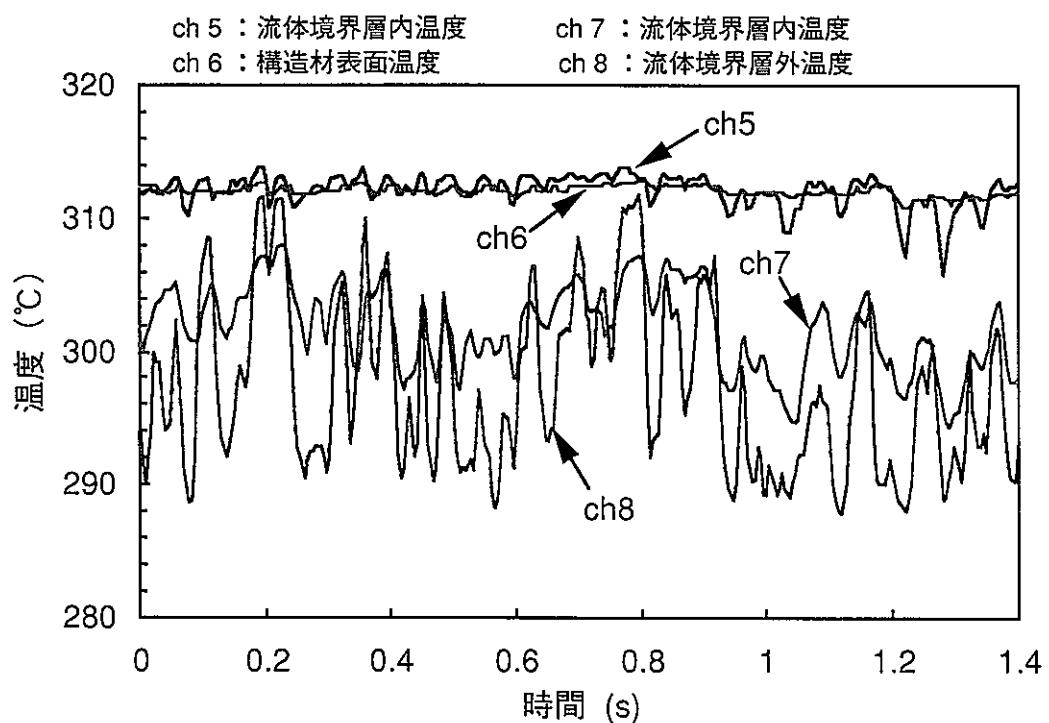


図2- 12 温度変化 (Na流速1m/s)

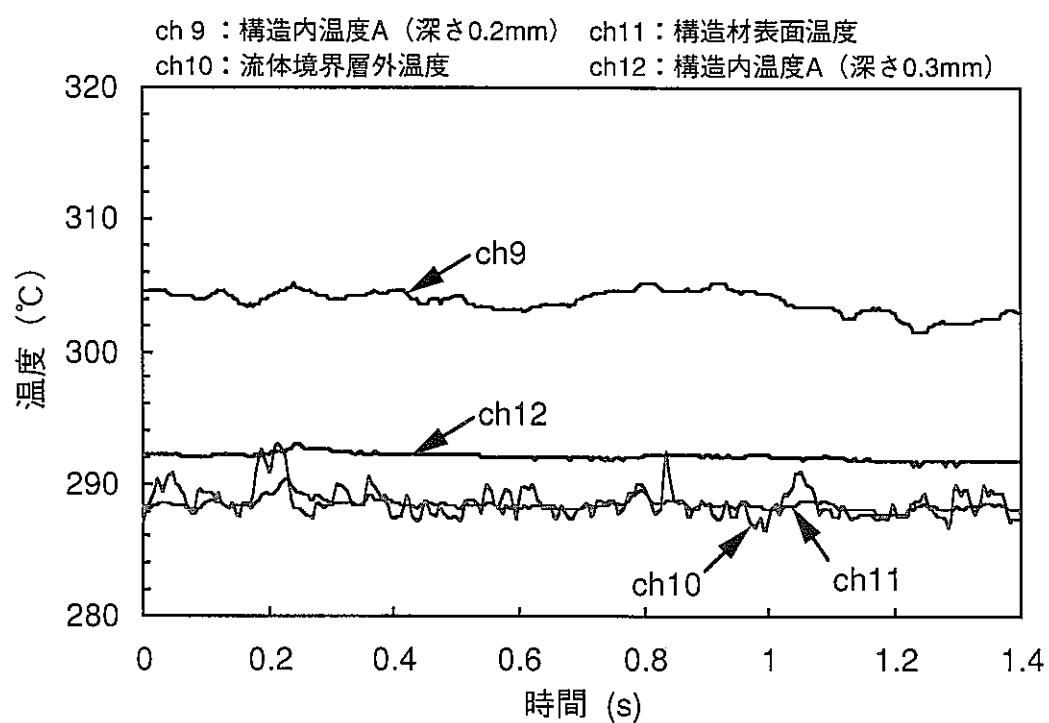


図2- 13 温度変化 (Na流速1m/s)

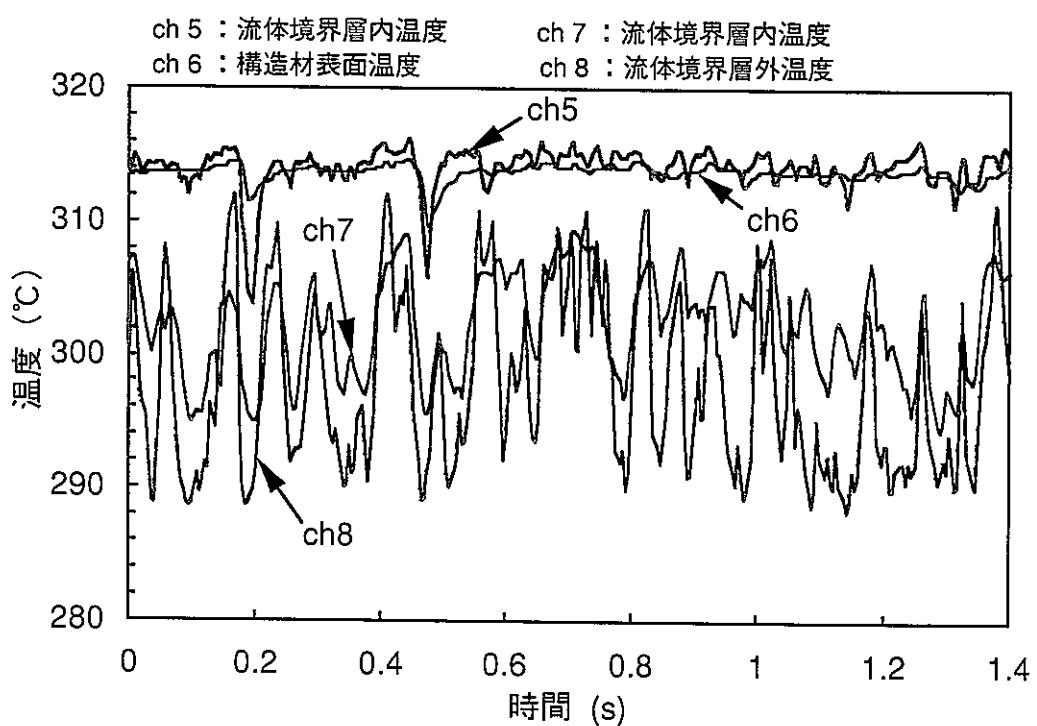


図2-14 温度変化 (Na流速1.5m/s)

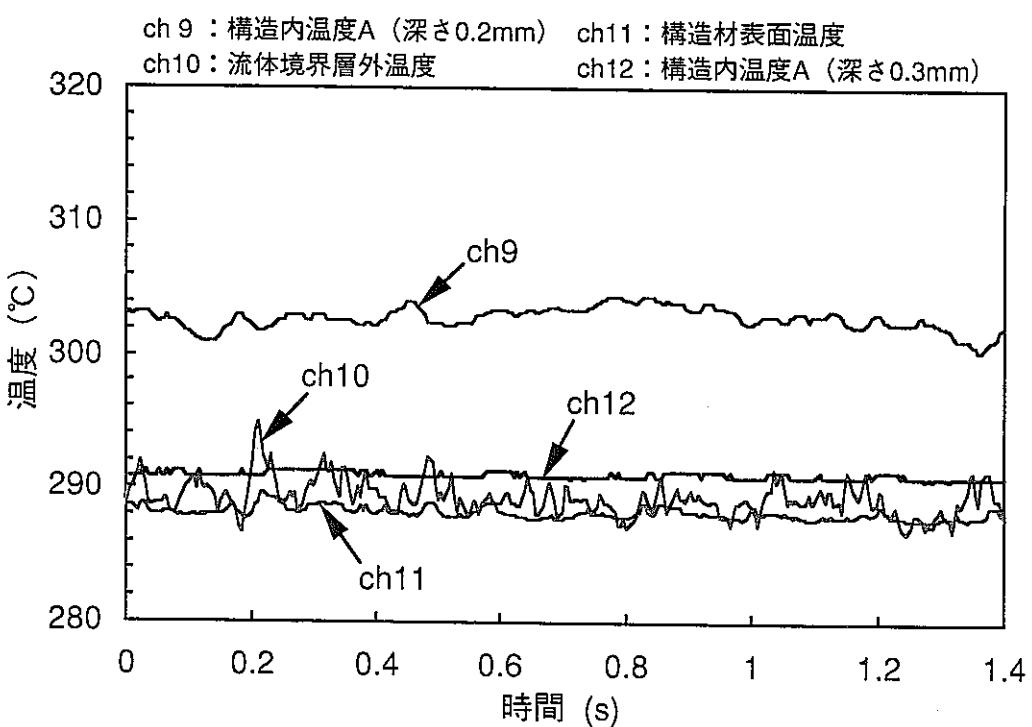


図2-15 温度変化 (Na流速1.5m/s)

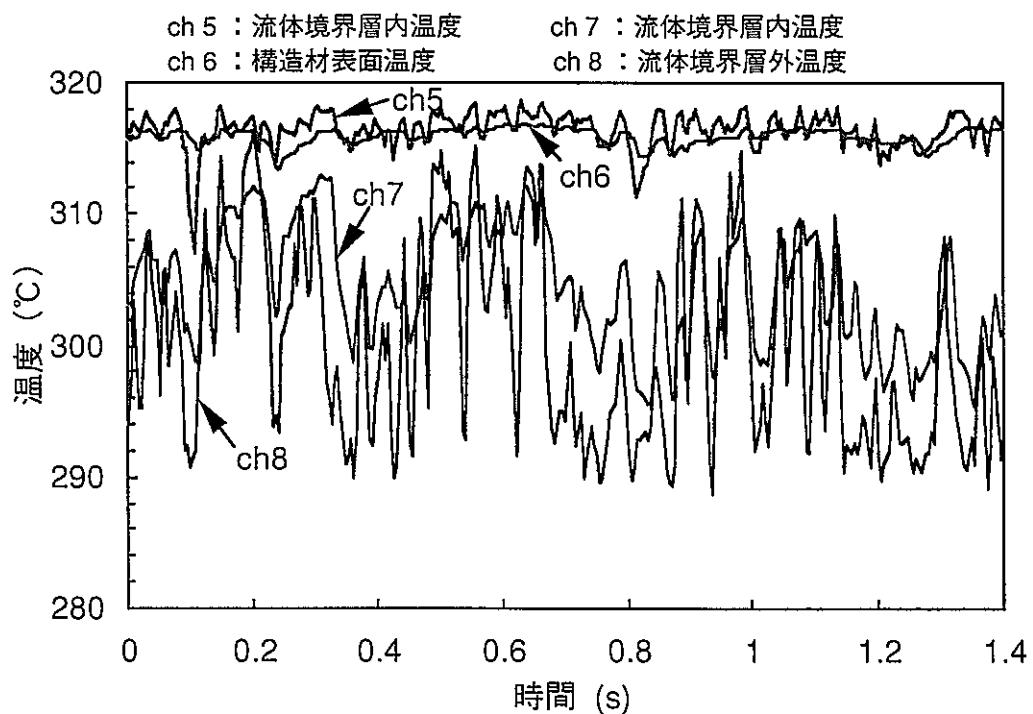


図2-16　温度変化 (Na流速2m/s)

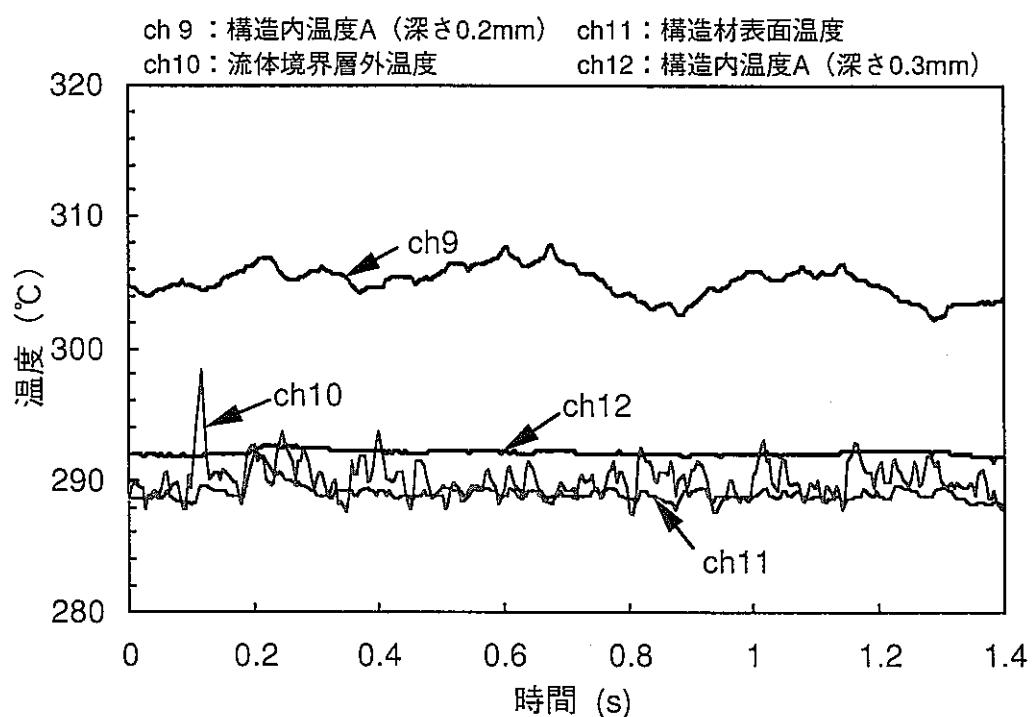
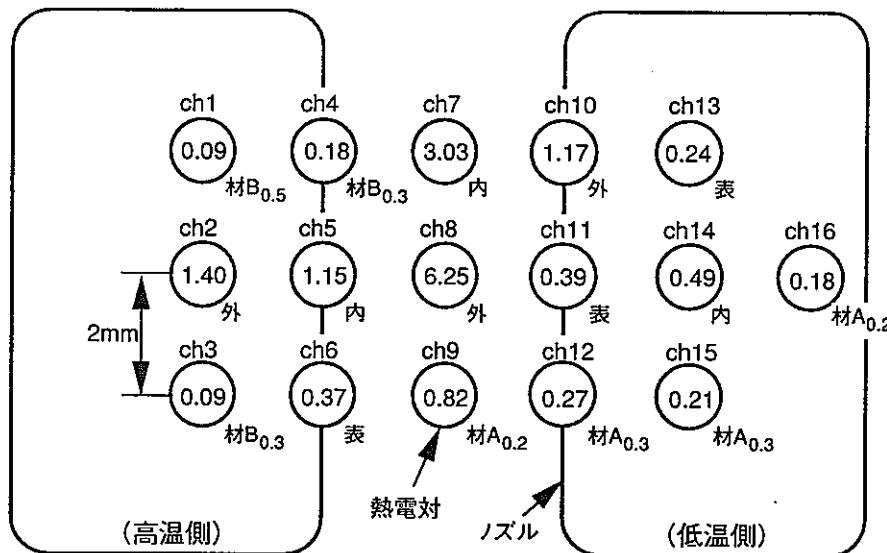


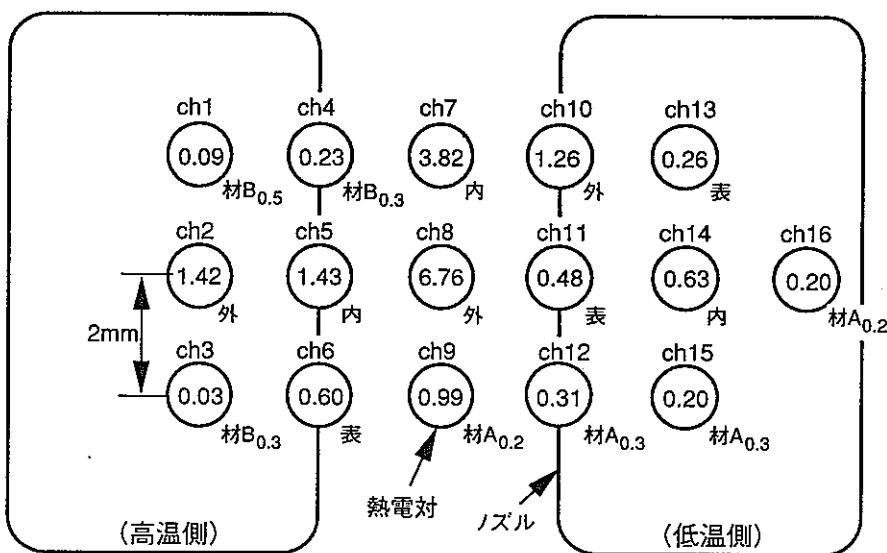
図2-17　温度変化 (Na流速2m/s)



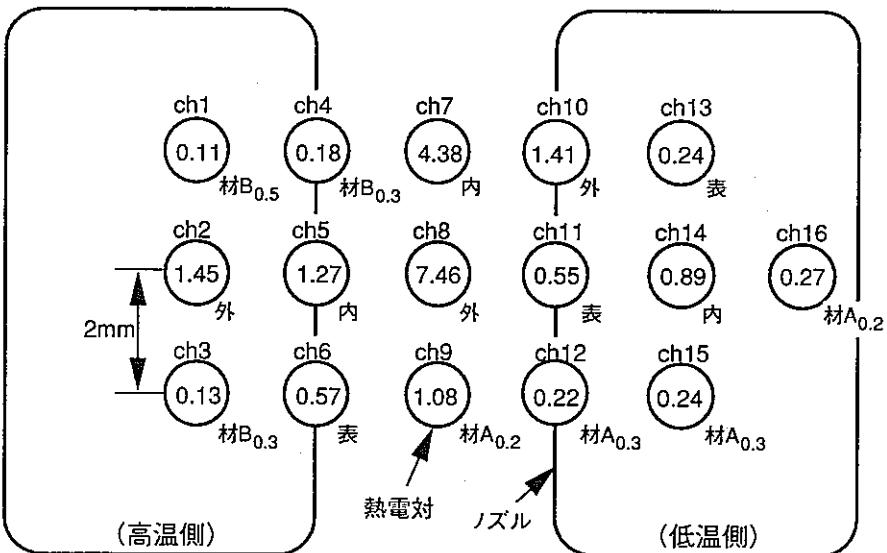
<記号>

- 外：流体境界層外温度
- 内：流体境界層内温度
- 表：構造材表面温度
- 材A_{0.2}：構造内温度A
(深さ0.2mm)
- 材A_{0.3}：構造内温度A
(深さ0.3mm)
- 材B_{0.3}：構造内温度B
(深さ0.3mm)
- 材B_{0.5}：構造内温度B
(深さ0.5mm)

(a) Na流速 1m/s



(b) Na流速 1.5m/s



(c) Na流速 2m/s

図2-18 温度揺らぎの実効値 (単位: °C)

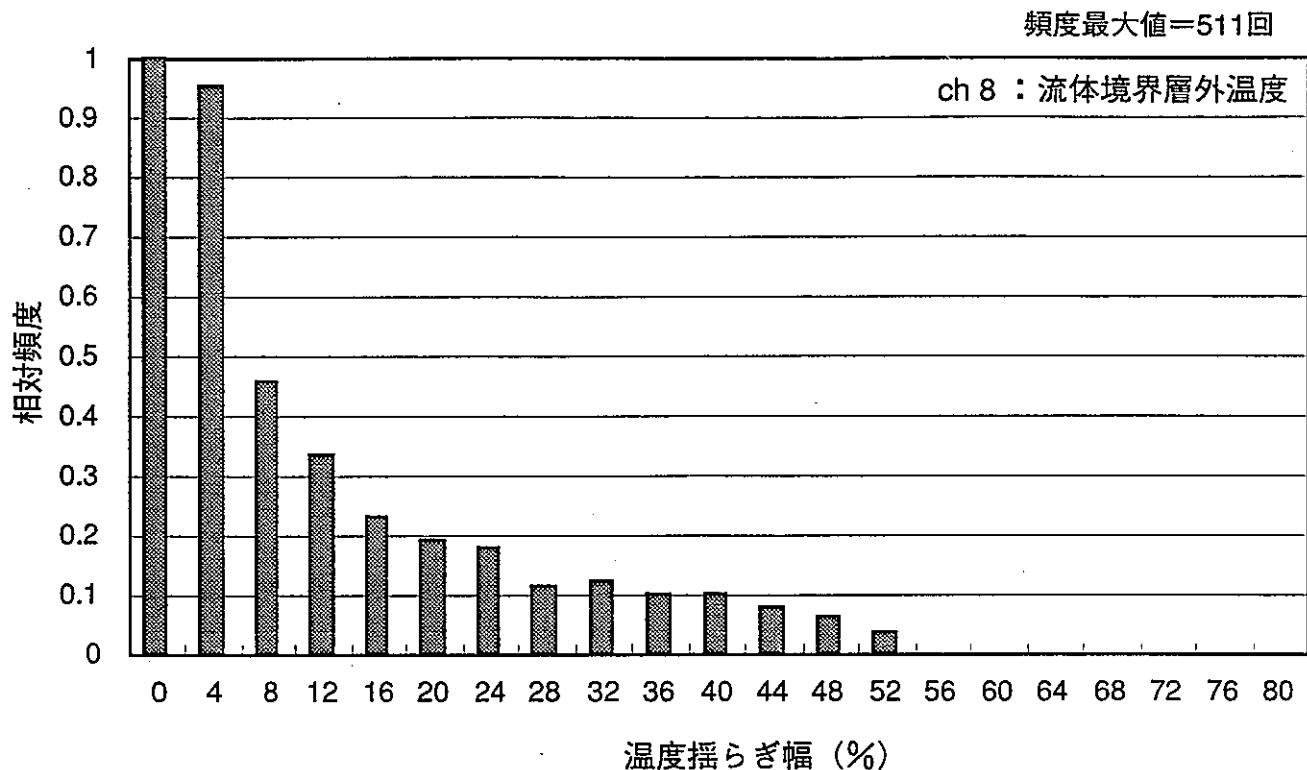


図2-19 溫度揺らぎ幅頻度 (Na流速1m/s, ch8)

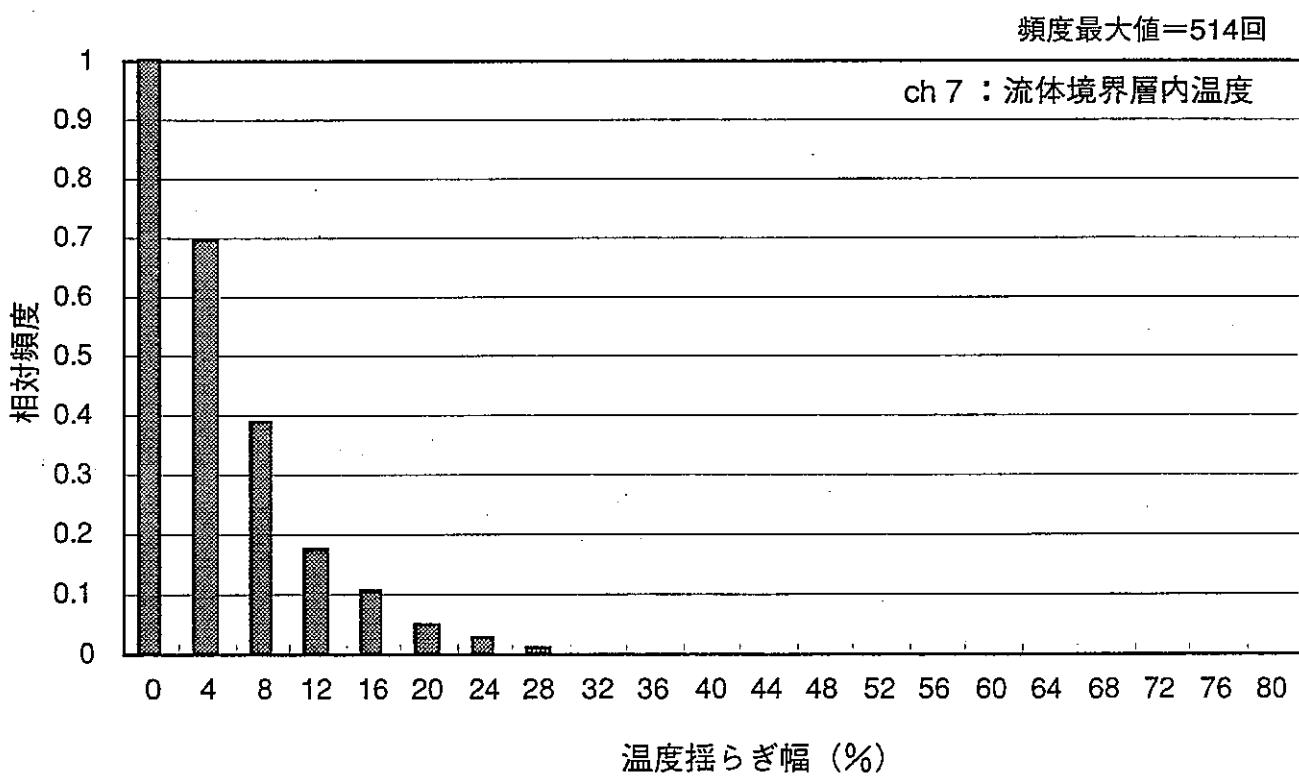


図2-20 溫度揺らぎ幅頻度 (Na流速1m/s, ch7)

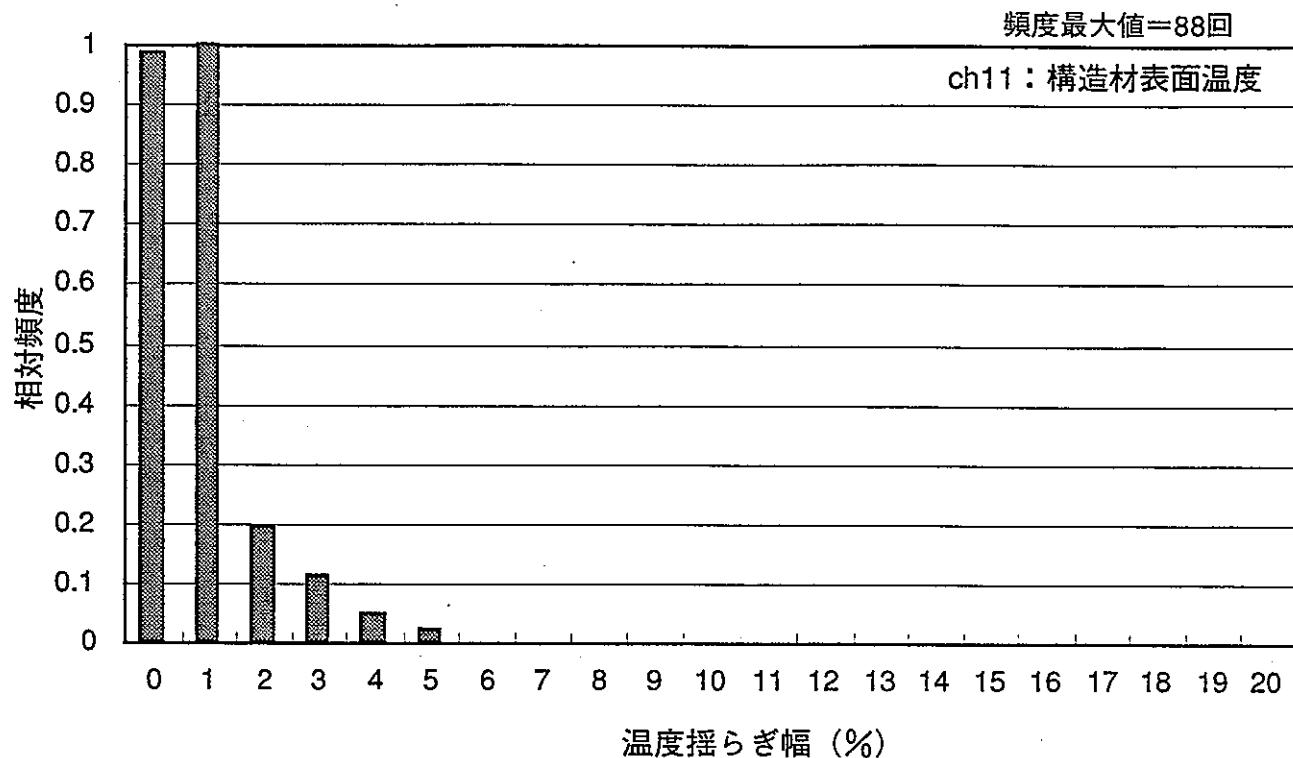


図2-21 温度揺らぎ幅頻度 (Na流速1m/s, ch11)

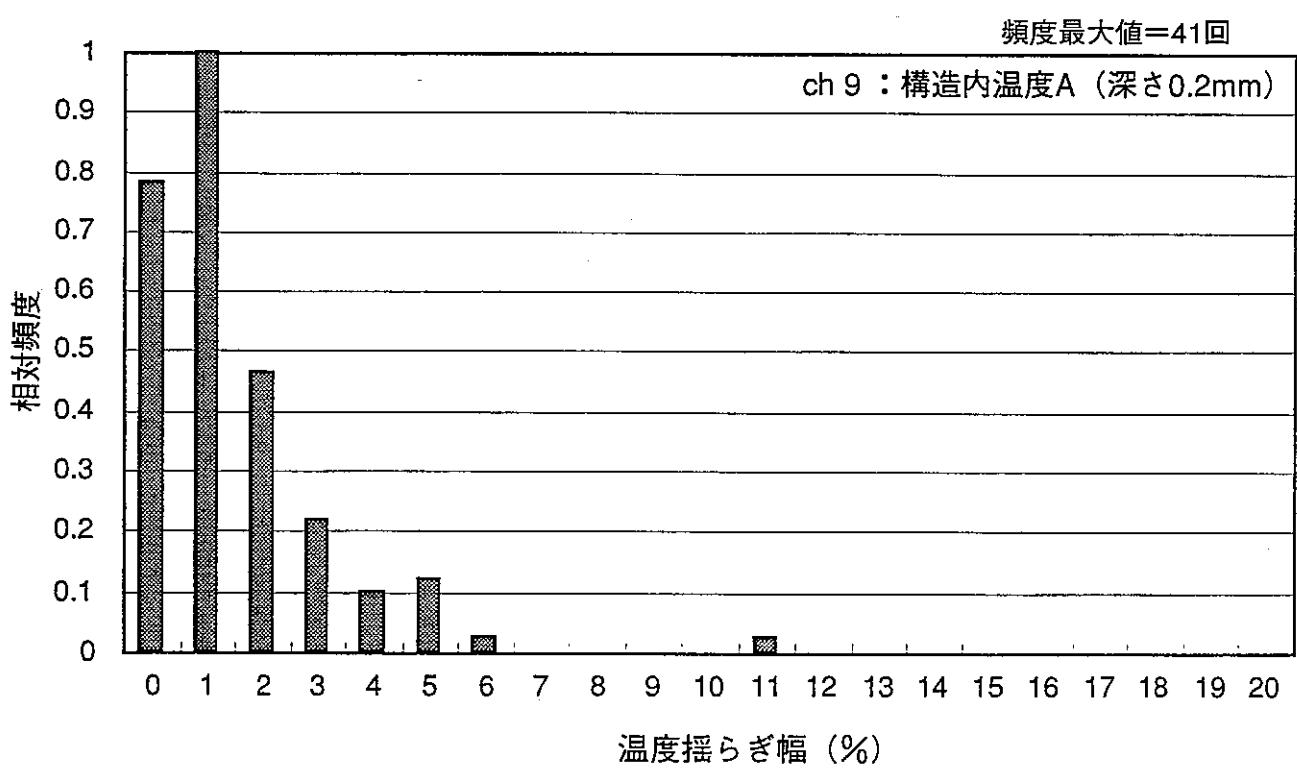


図2-22 温度揺らぎ幅頻度 (Na流速1m/s, ch9)

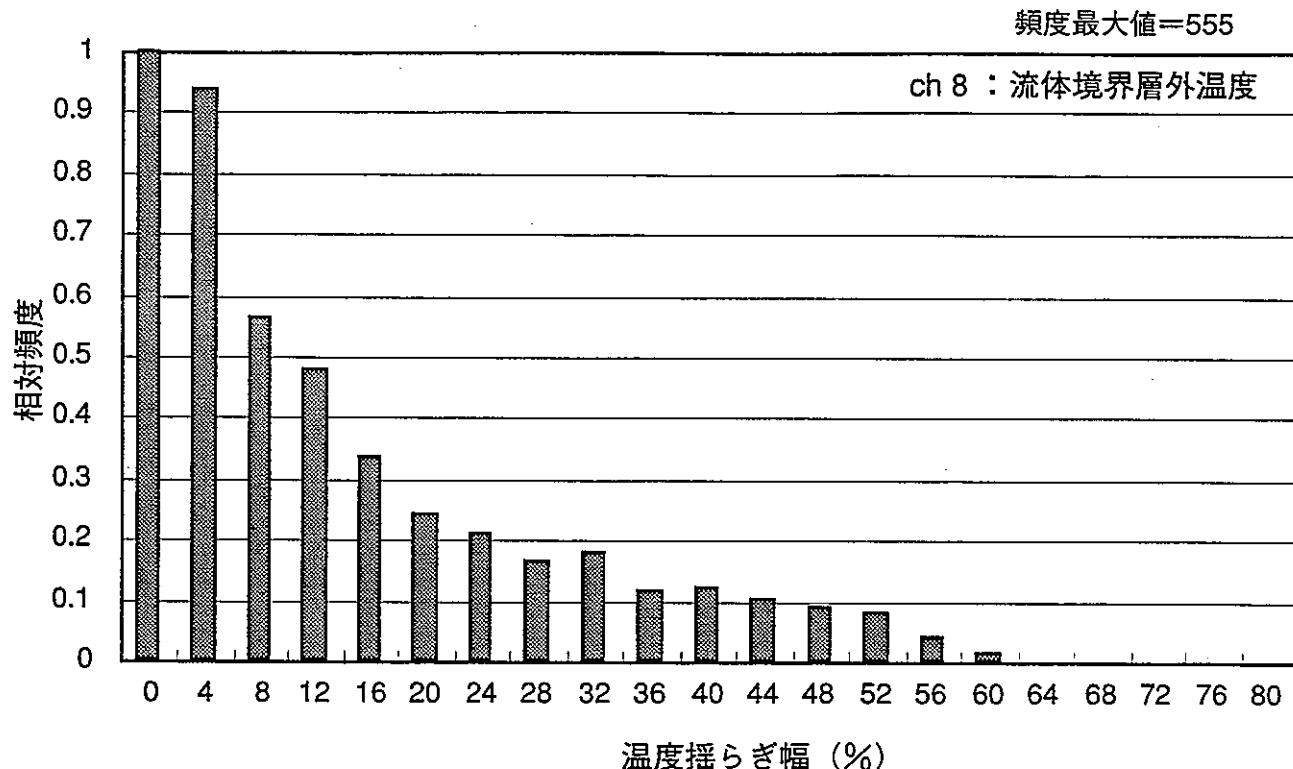


図2-23 温度揺らぎ幅頻度 (Na流速1.5m/s, ch8)

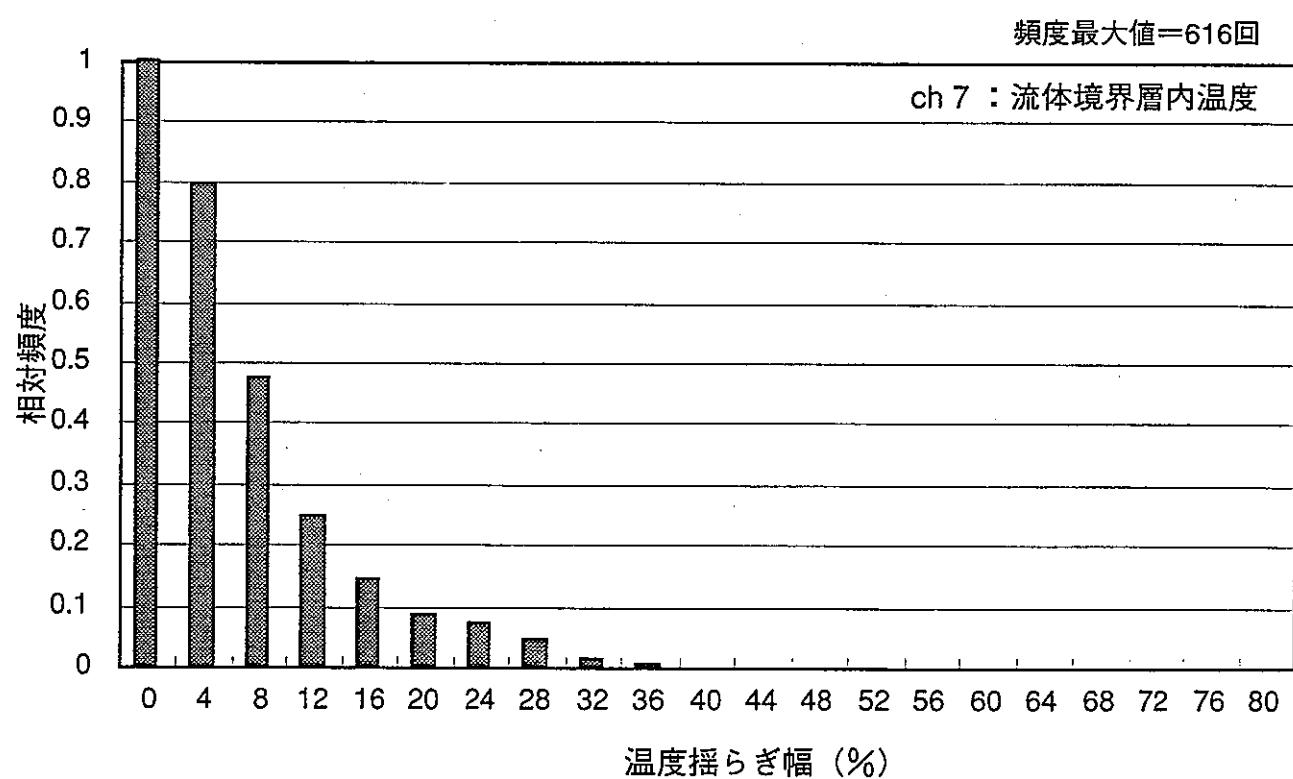


図2-24 温度揺らぎ幅頻度 (Na流速1.5m/s, ch7)

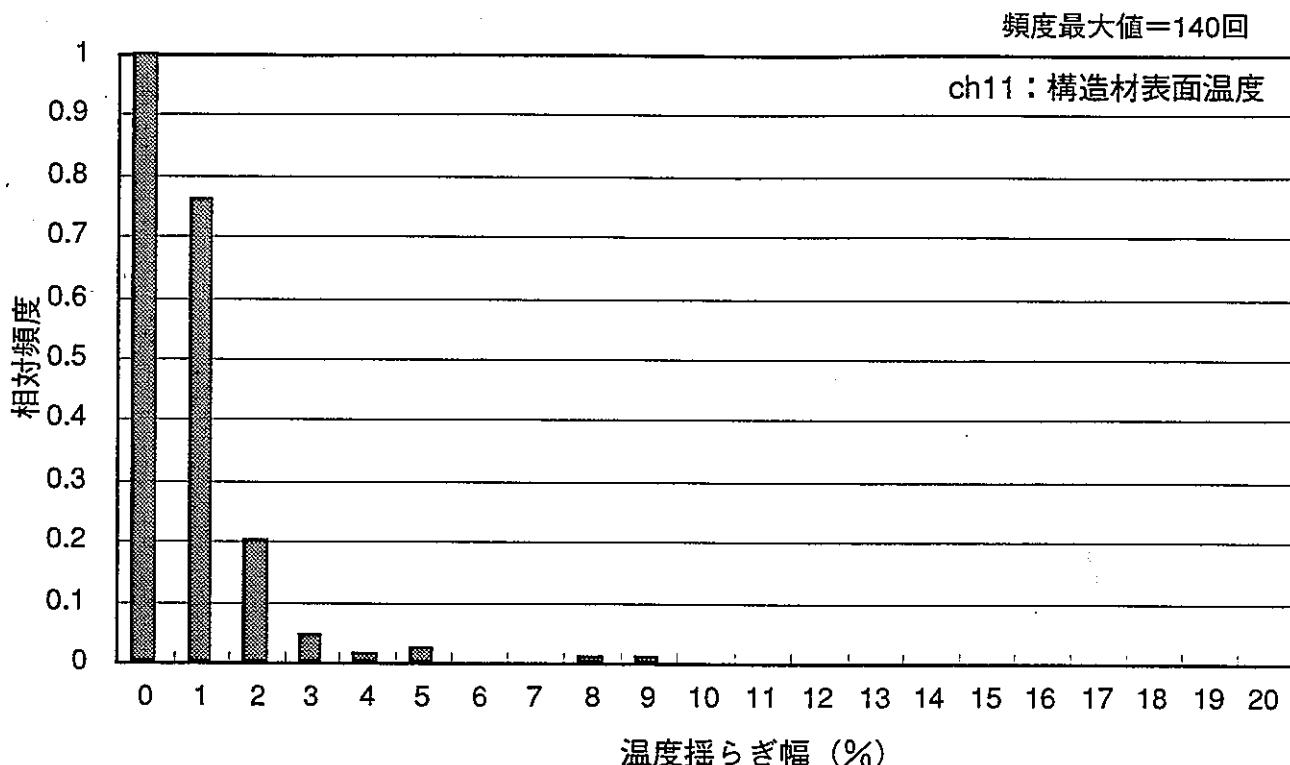


図2-25 温度揺らぎ幅頻度 (Na流速1.5m/s, ch11)

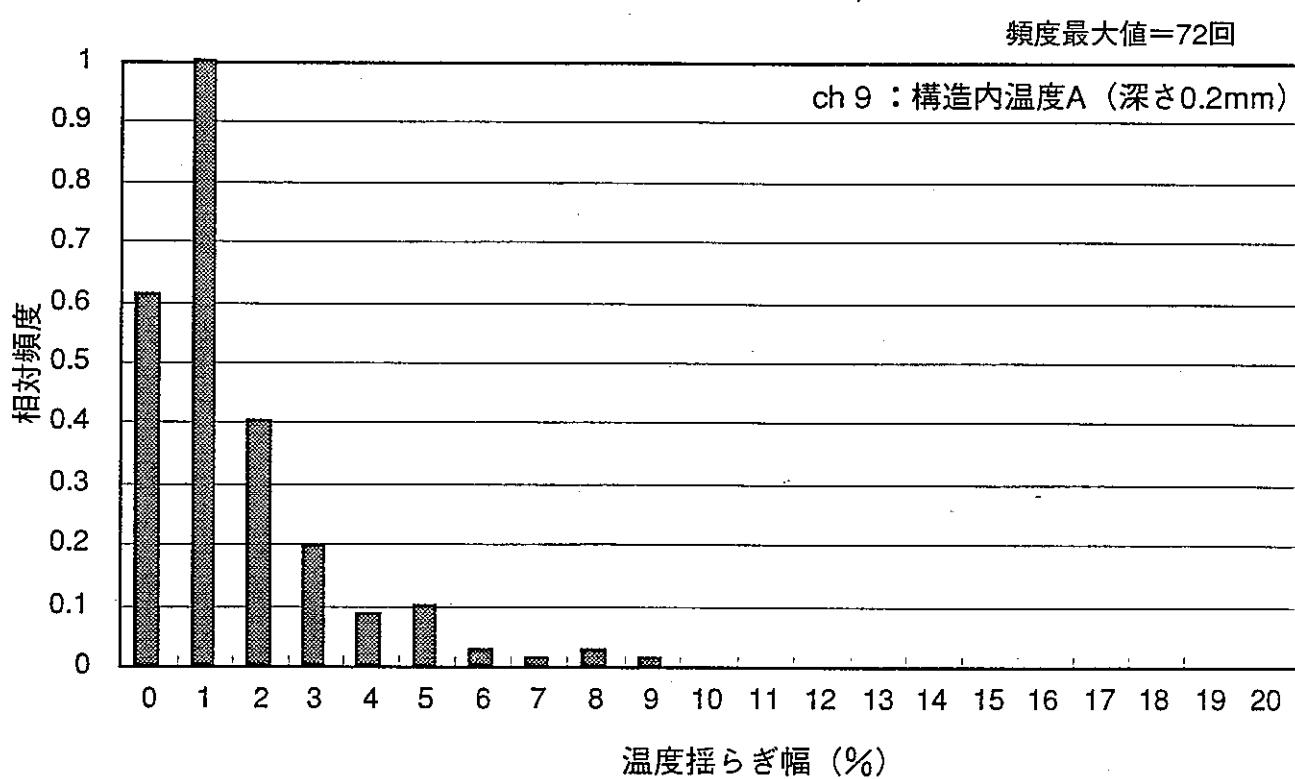


図2-26 温度揺らぎ幅頻度 (Na流速1.5m/s, ch9)

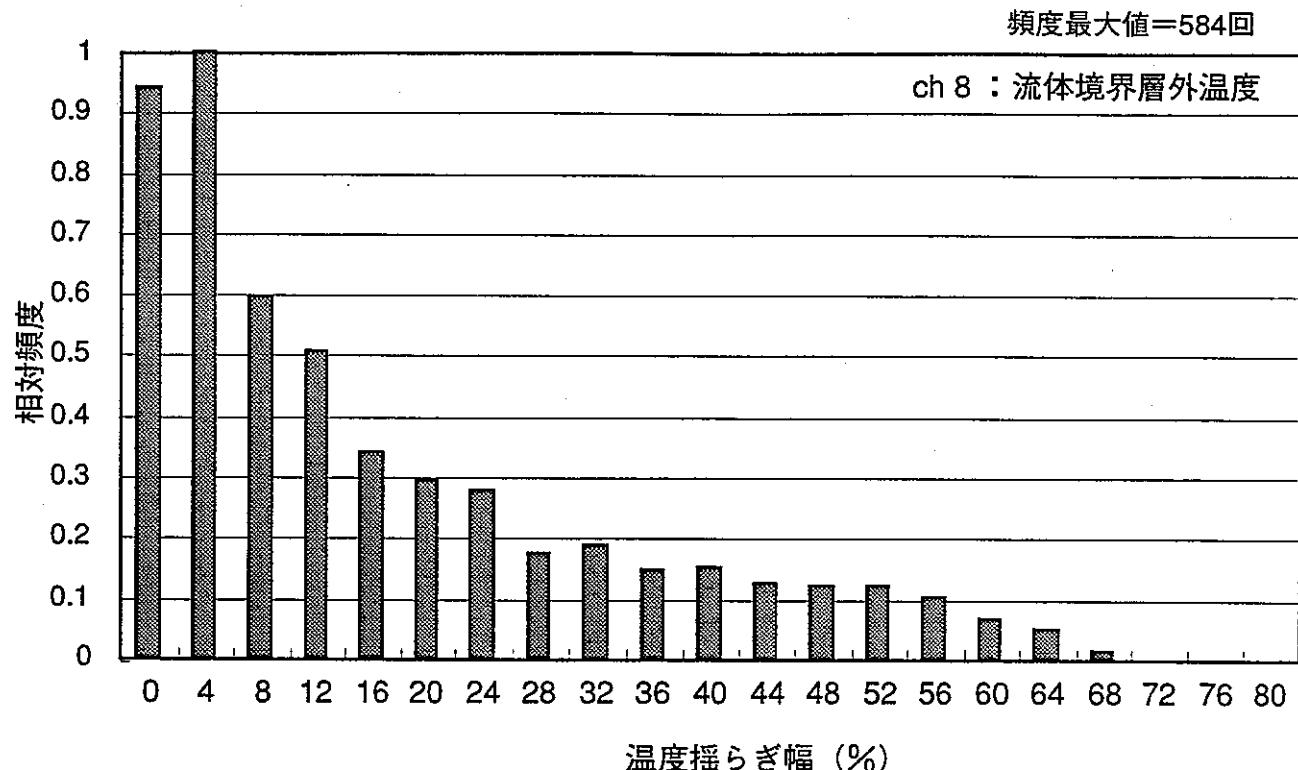


図2-27 温度揺らぎ幅頻度 (Na流速2.0m/s, ch8)

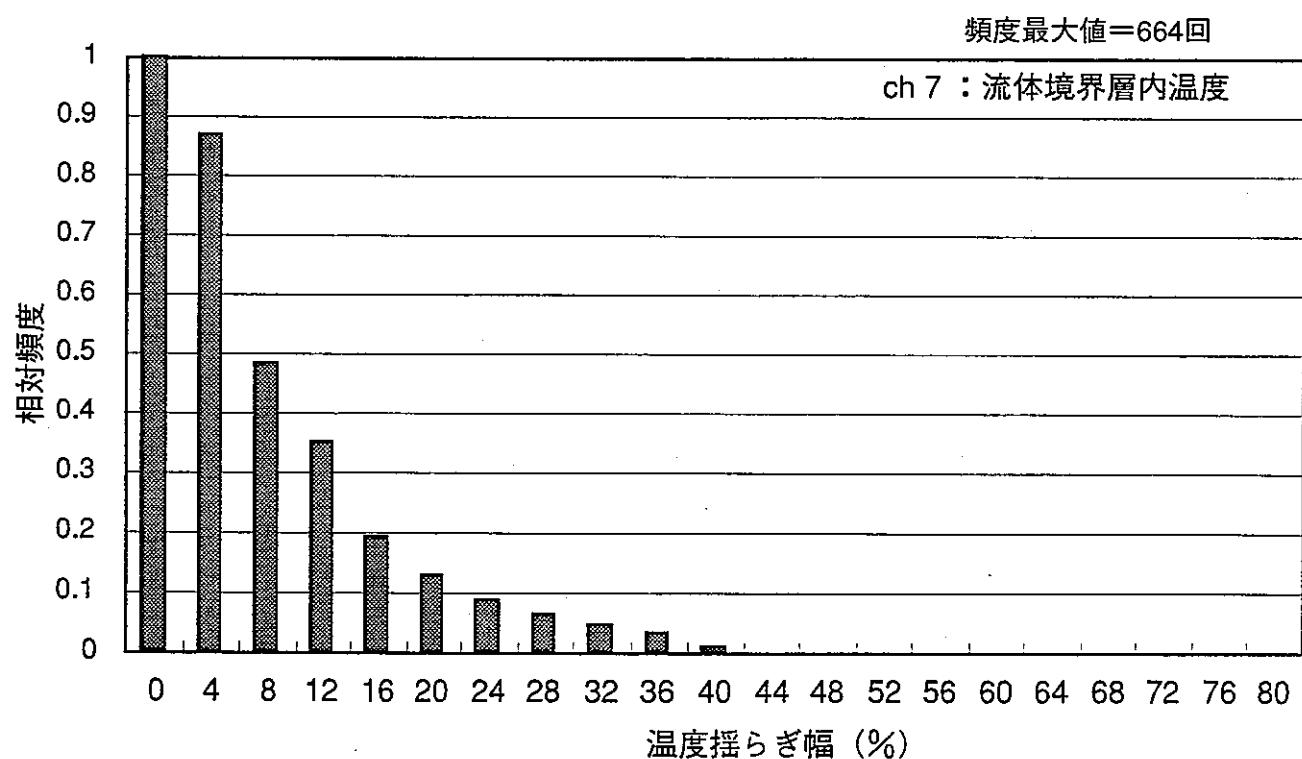


図2-28 温度揺らぎ幅頻度 (Na流速2.0m/s, ch7)

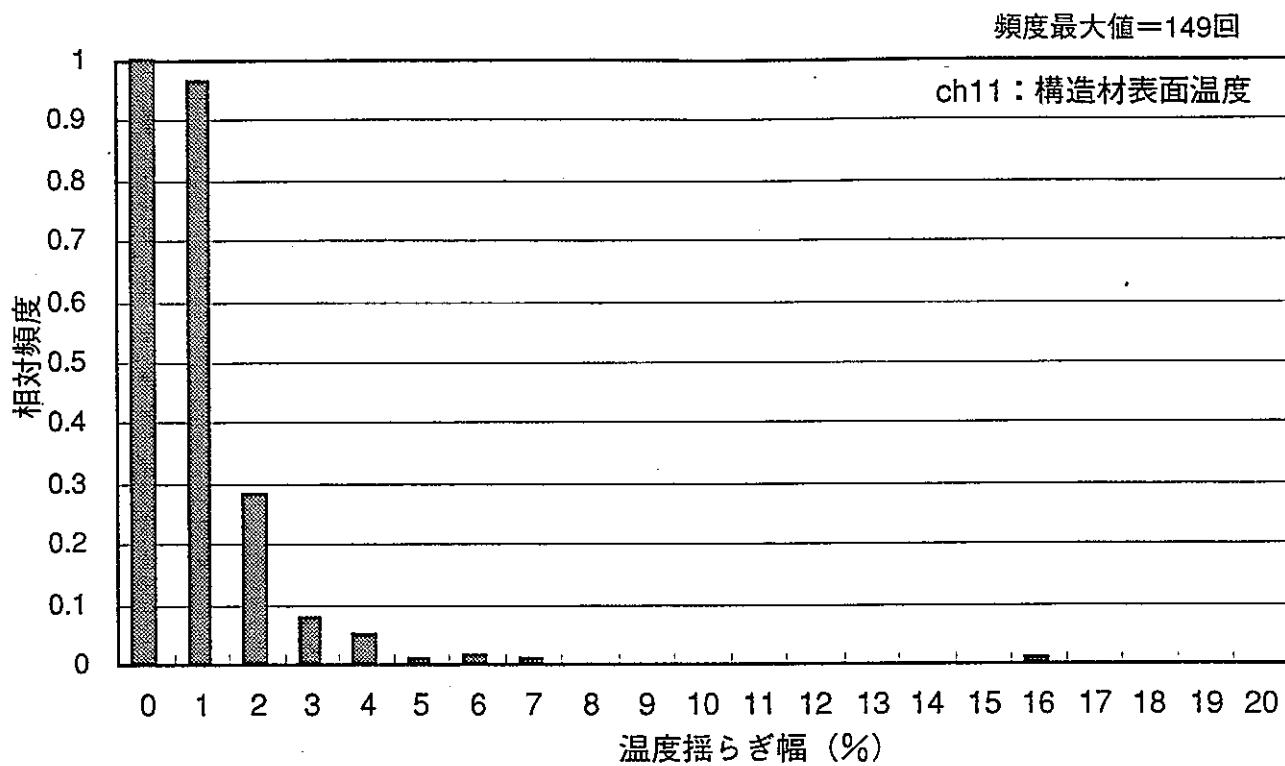


図2-29 温度揺らぎ幅頻度 (Na流速2m/s, ch11)

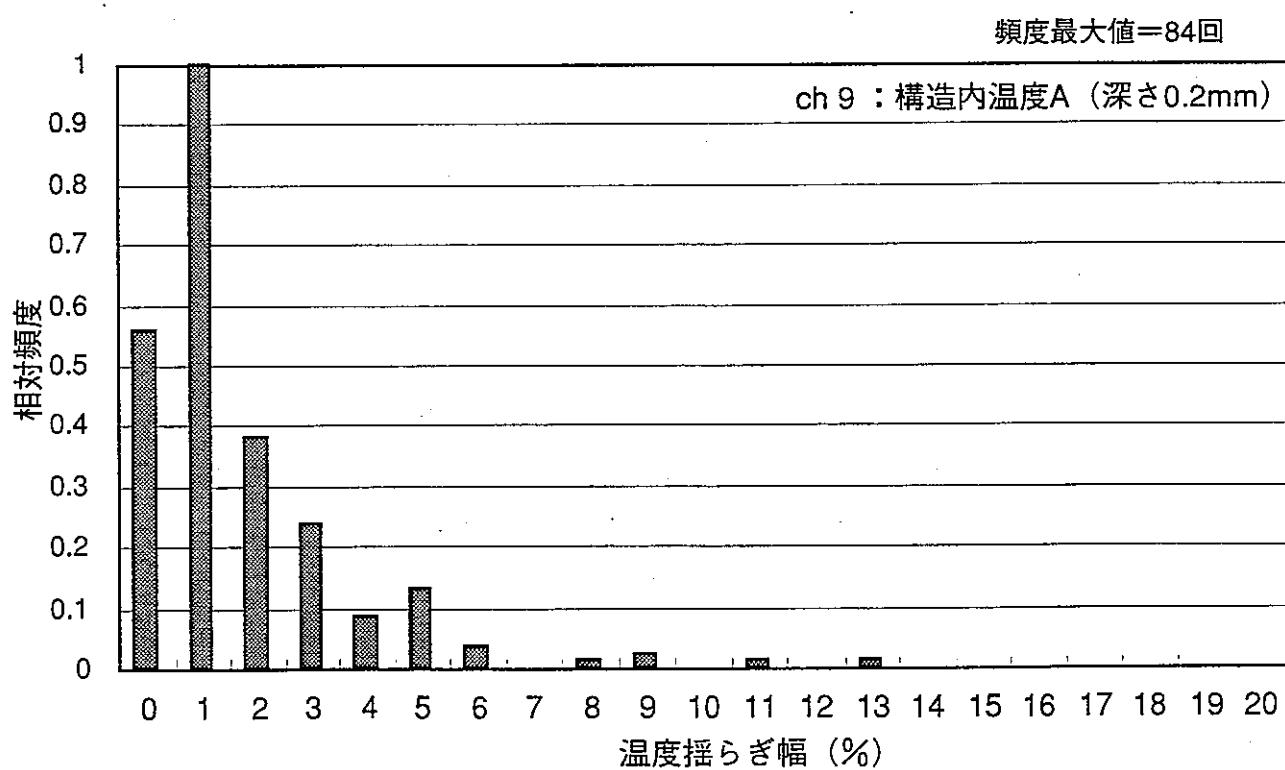


図2-30 温度揺らぎ幅頻度 (Na流速2m/s, ch9)

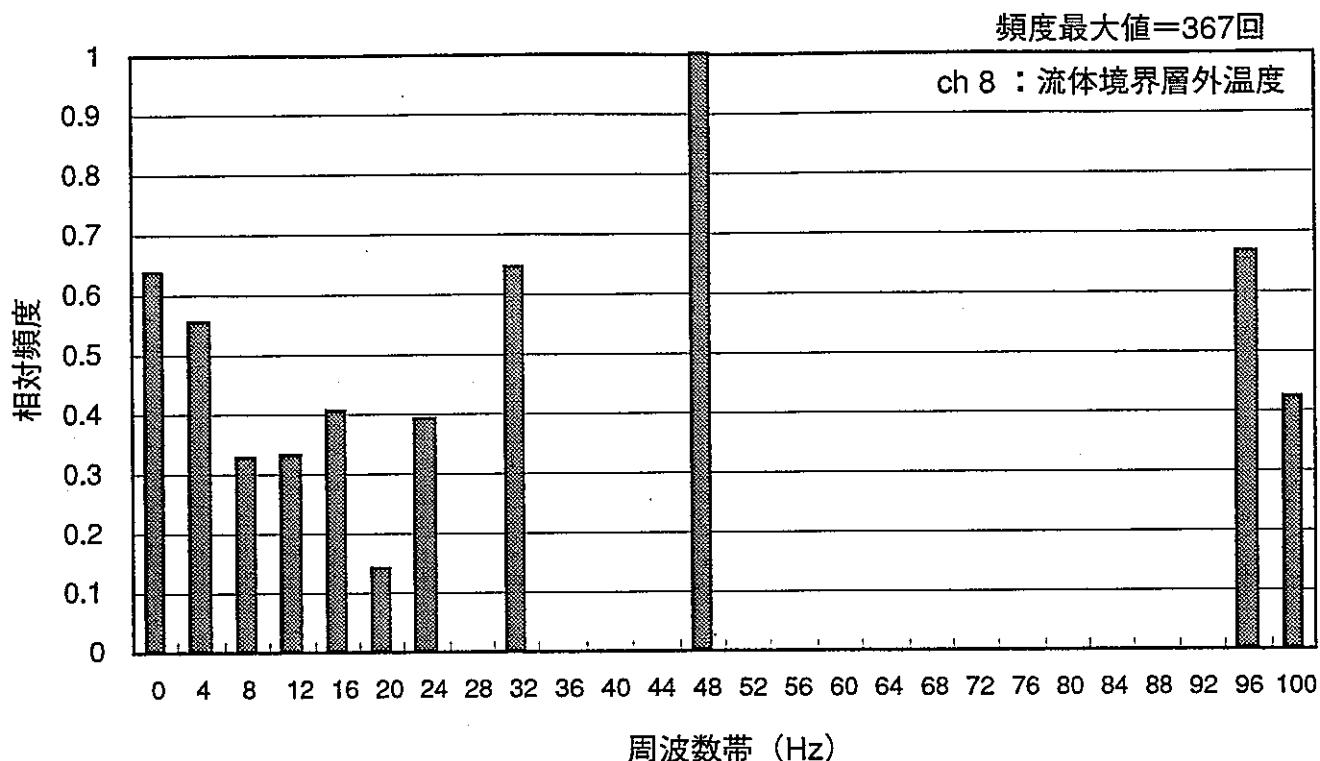


図2-31 周波数頻度 (Na流速1m/s, ch8)

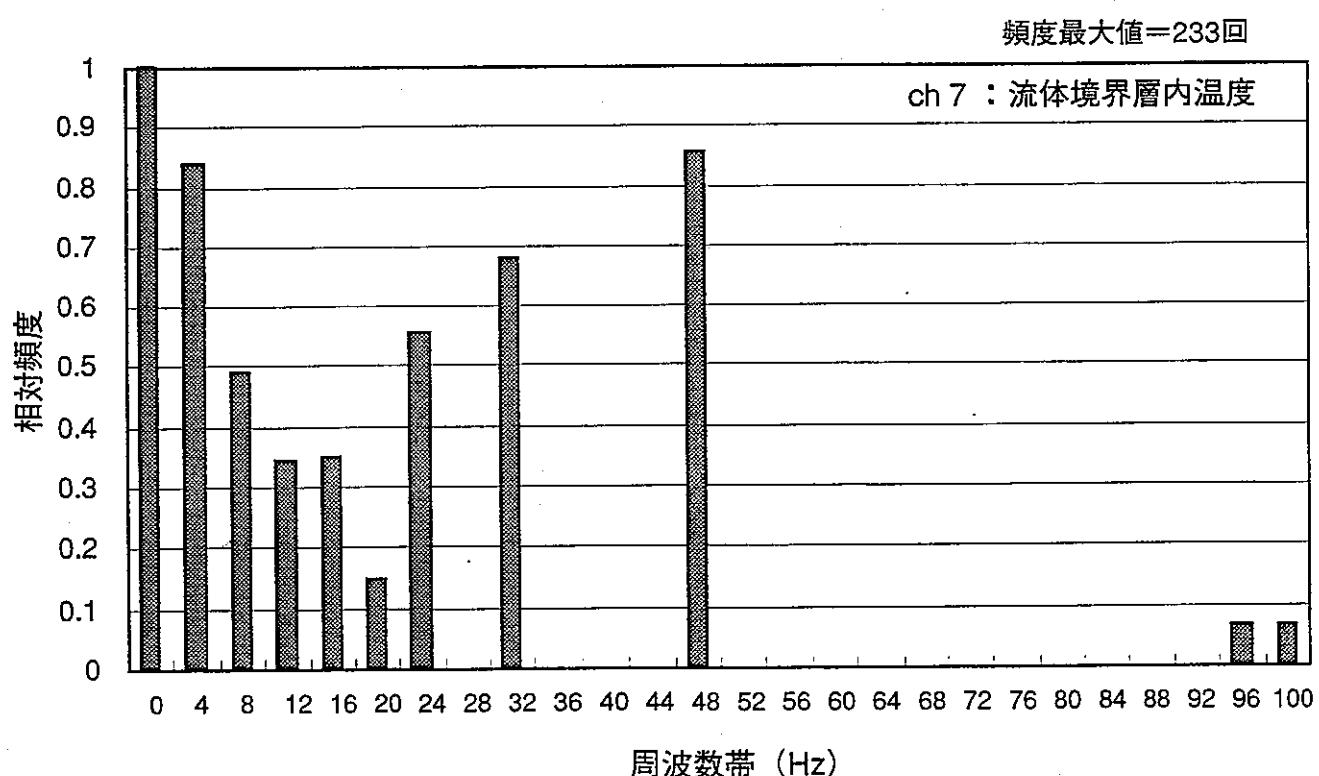


図2-32 周波数頻度 (Na流速1m/s, ch7)

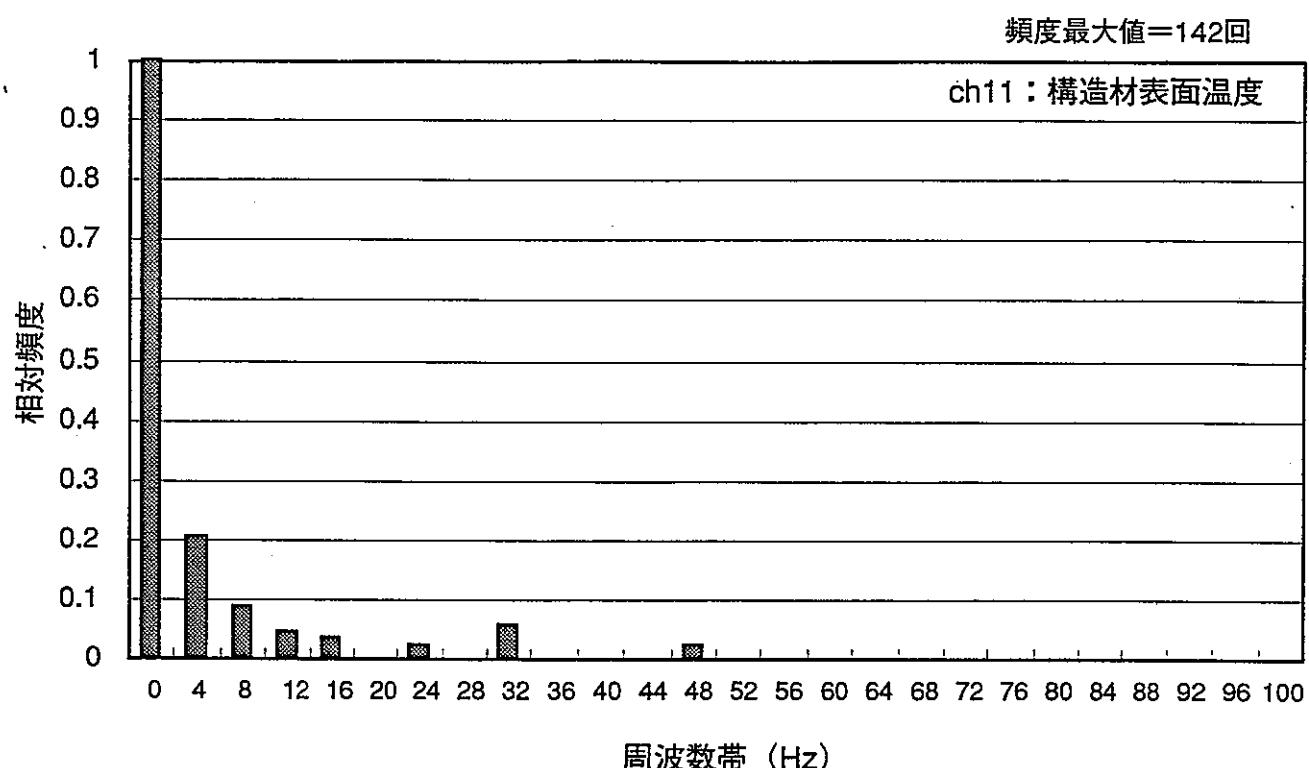


図2-33 周波数頻度 (Na流速1m/s, ch11)

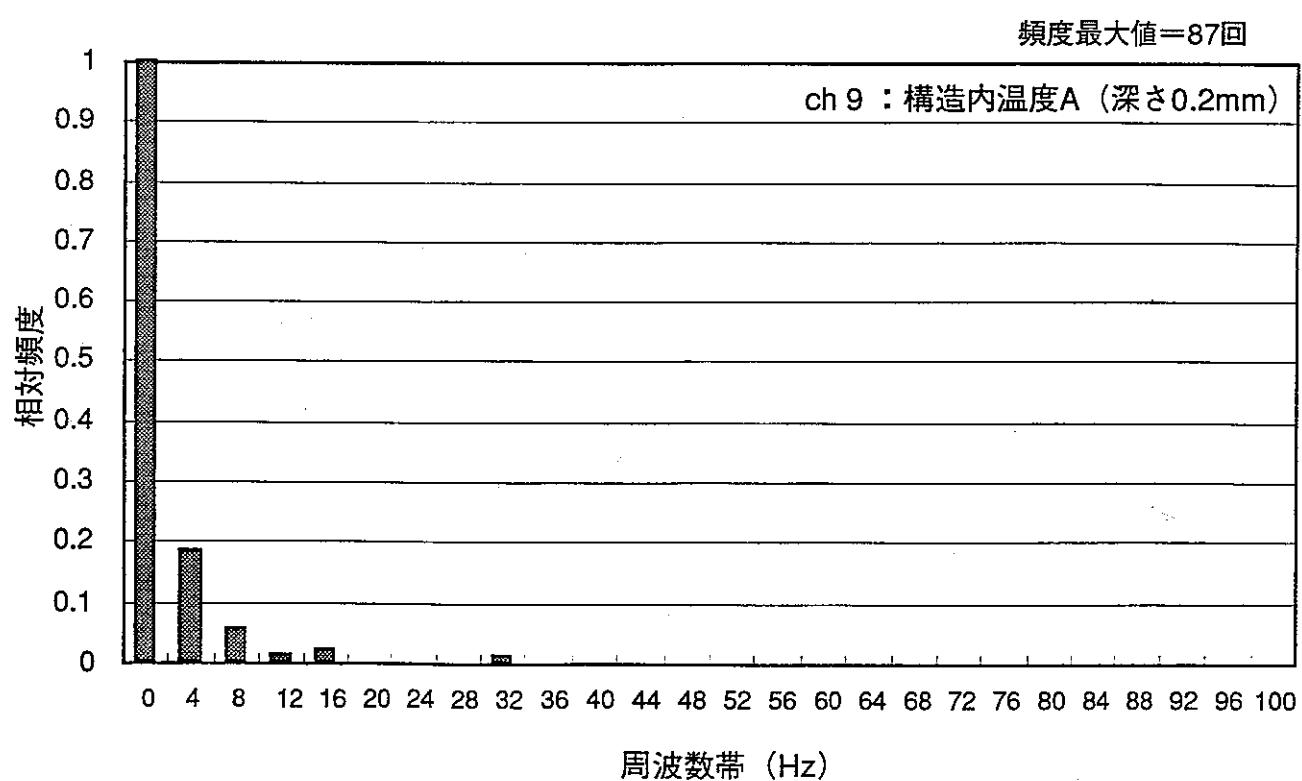


図2-34 周波数頻度 (Na流速1m/s, ch9)

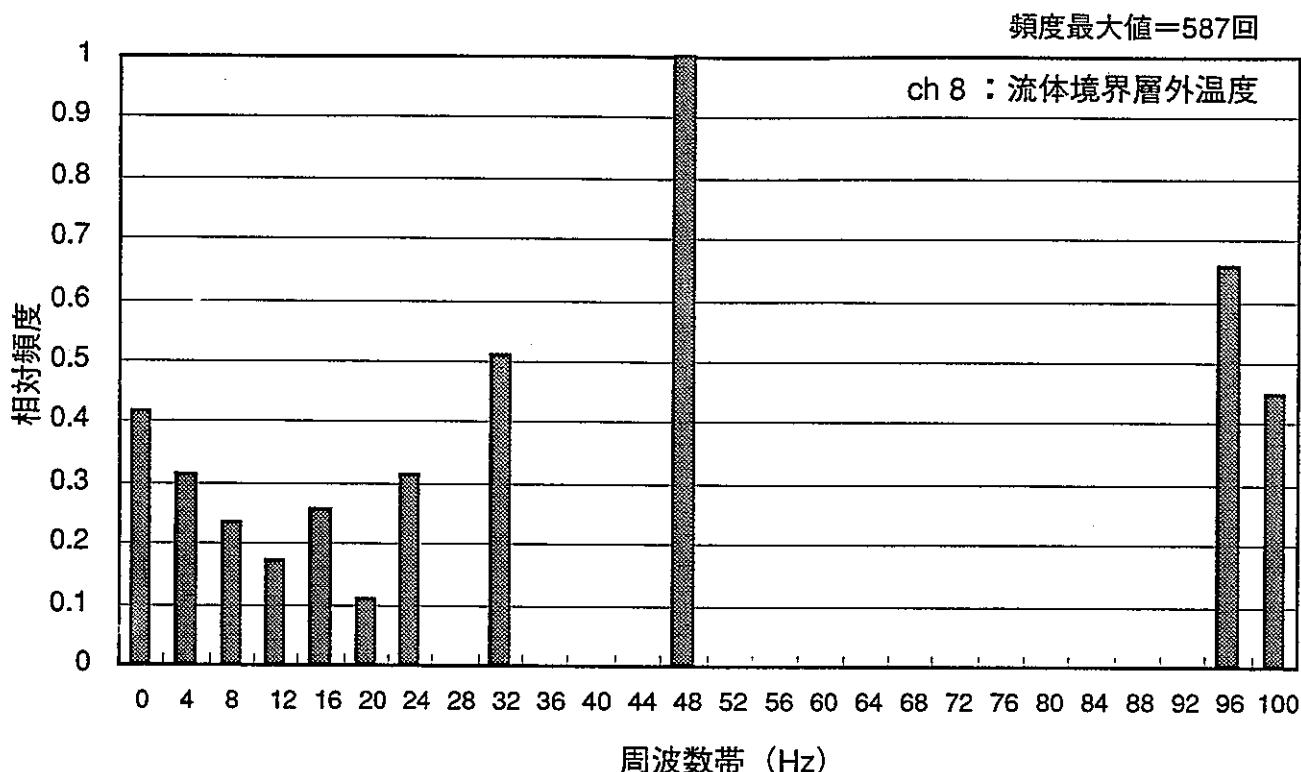


図2-35 周波数頻度 (Na流速1.5m/s, ch8)

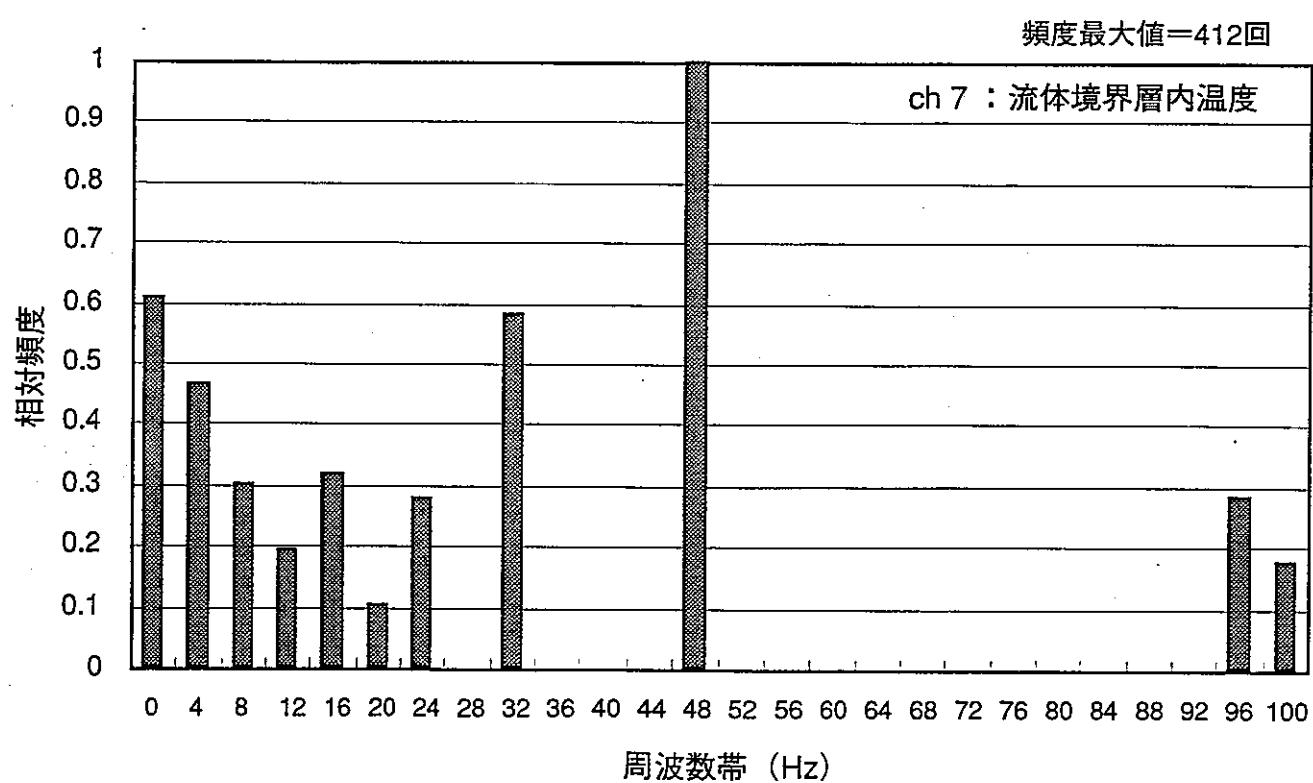


図2-36 周波数頻度 (Na流速1.5m/s, ch7)

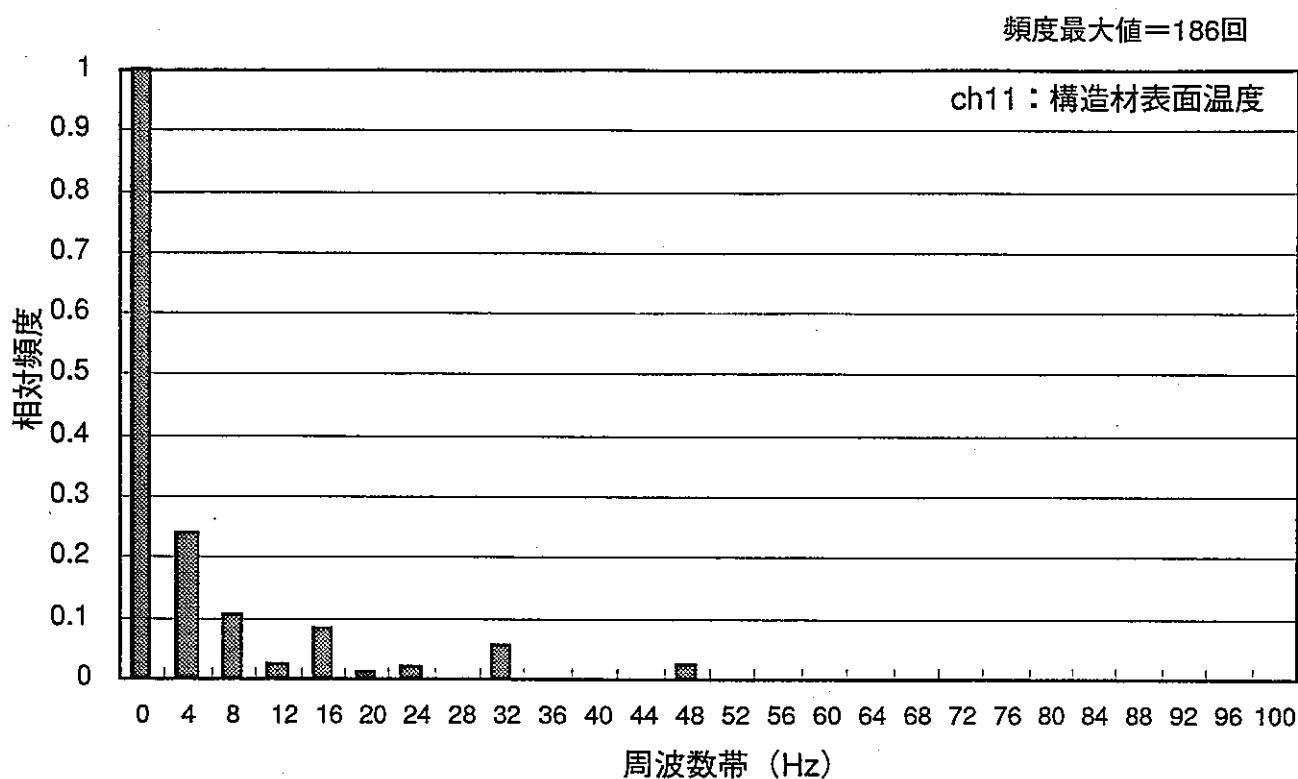


図2-37 周波数頻度 (Na流速1.5m/s, ch11)

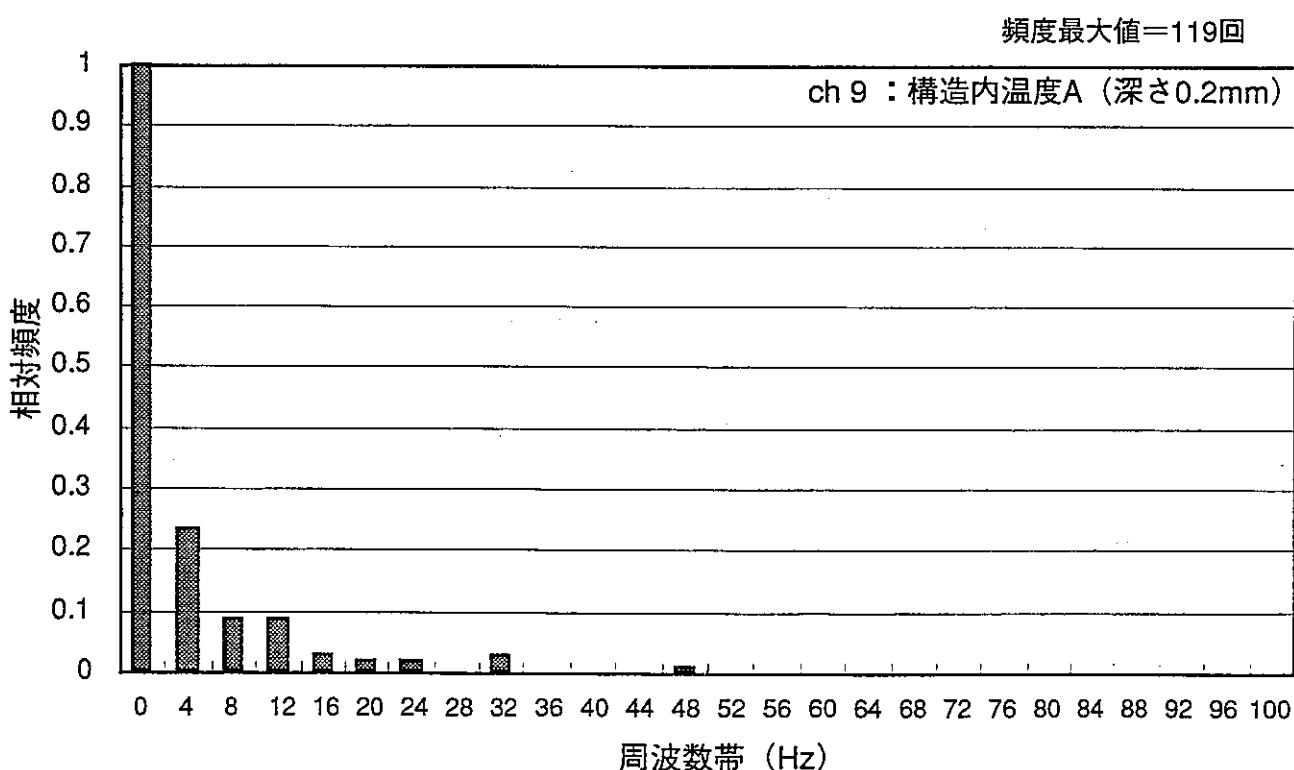


図2-38 周波数頻度 (Na流速1.5m/s, ch9)

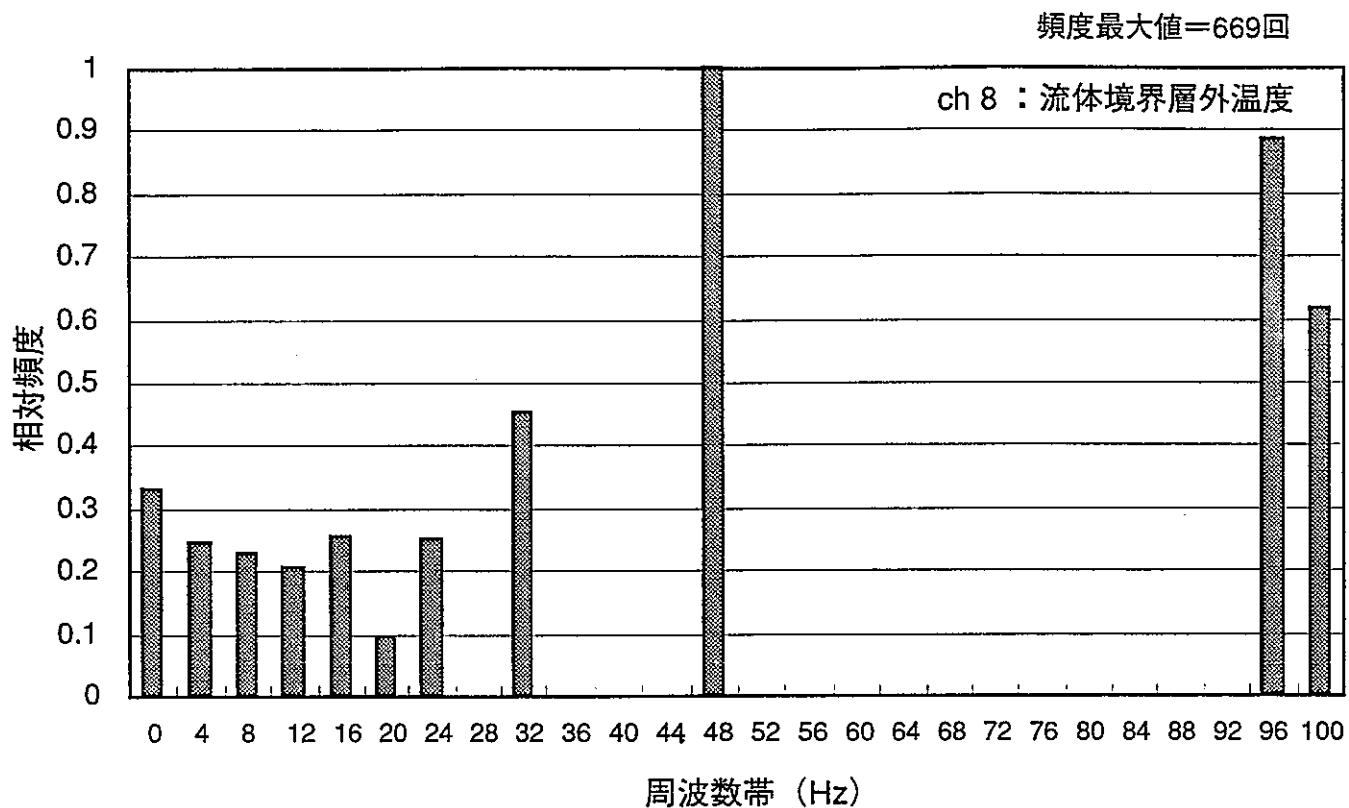


図2-39 周波数頻度 (Na流速2.0m/s, ch8)

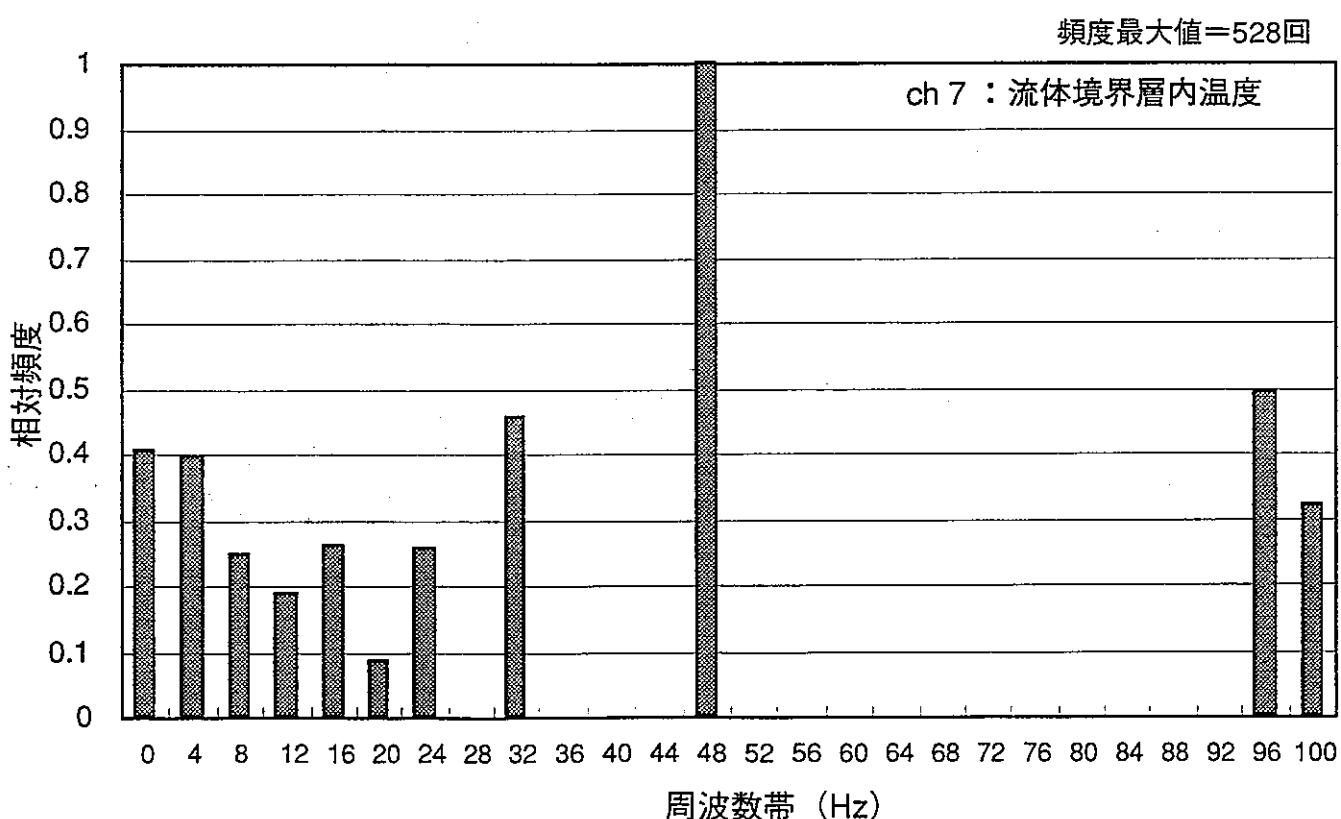


図2-40 周波数頻度 (Na流速2.0m/s, ch7)

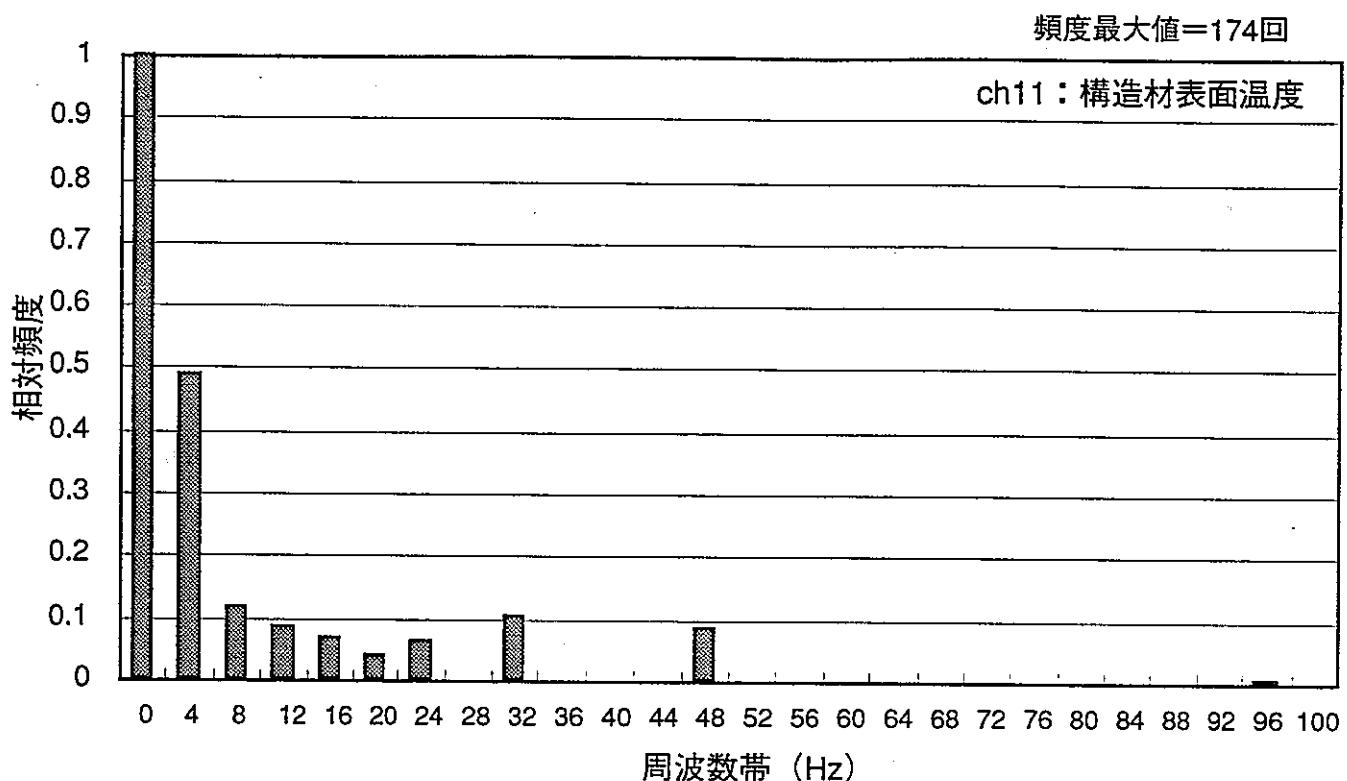


図2-41 周波数頻度 (Na流速2m/s, ch11)

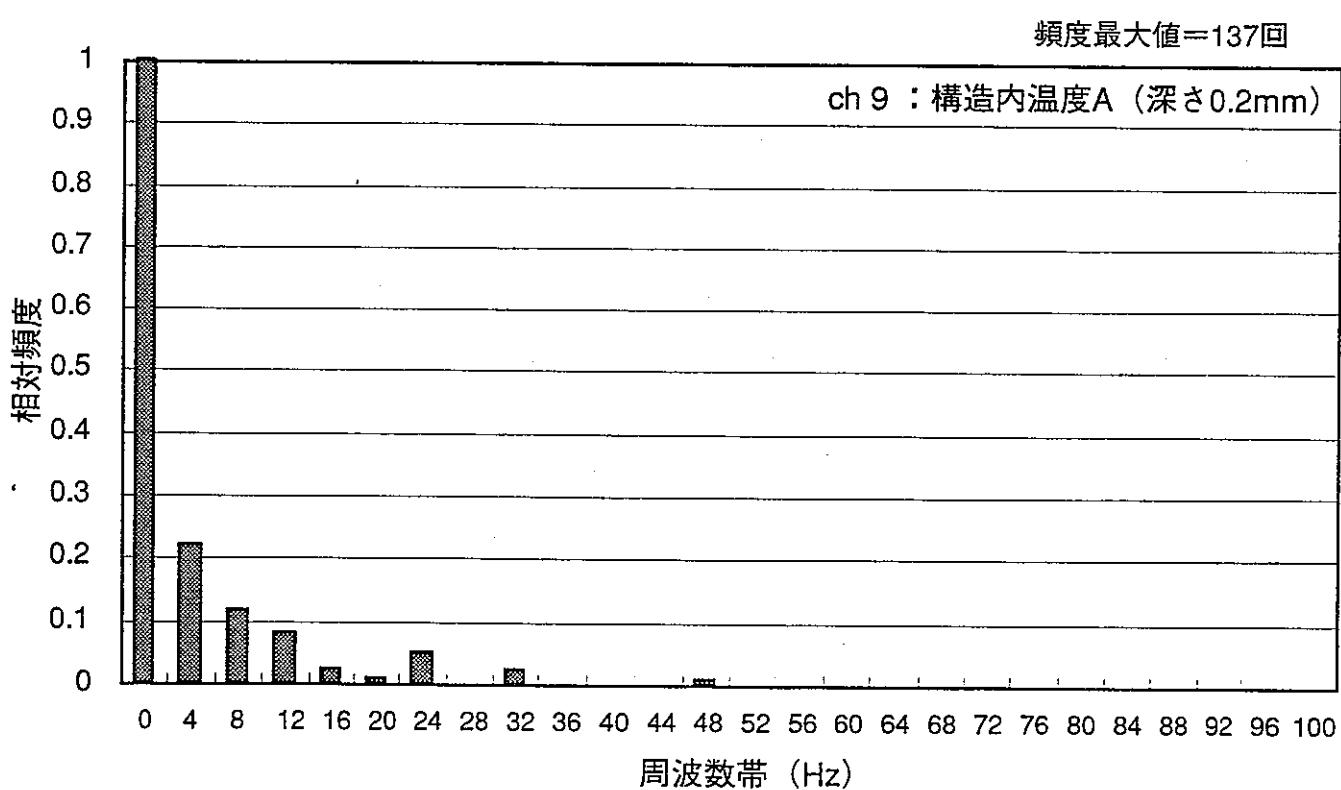


図2-42 周波数頻度 (Na流速2m/s, ch9)

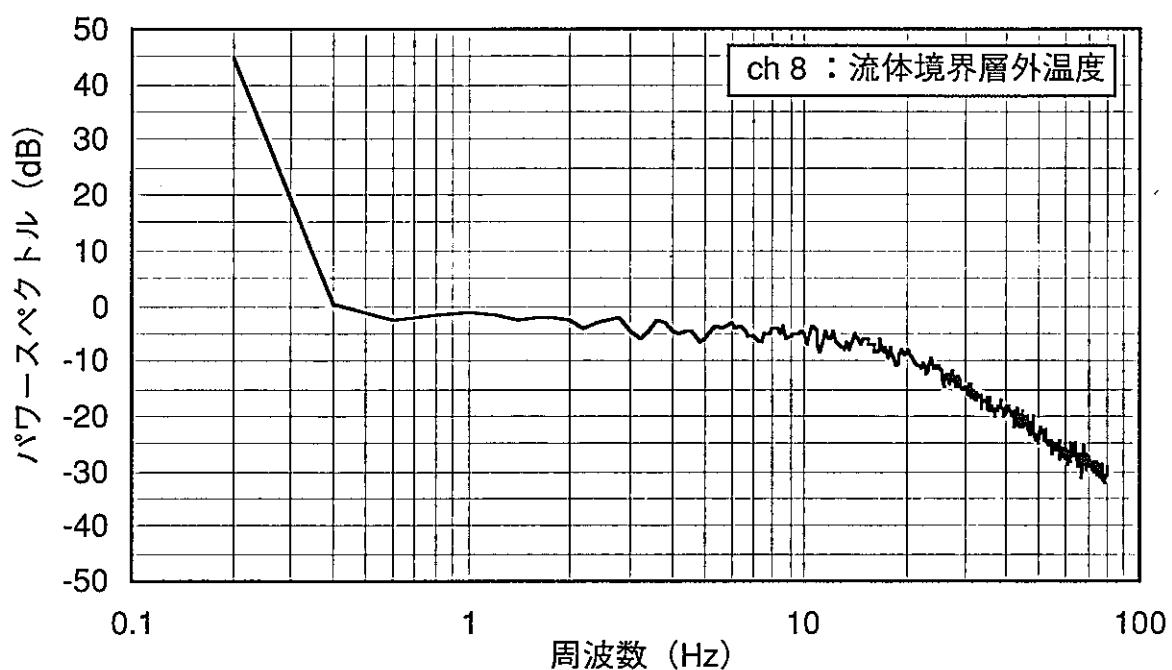


図2-43 自己パワースペクトル (Na流速 1m/s, ch8)

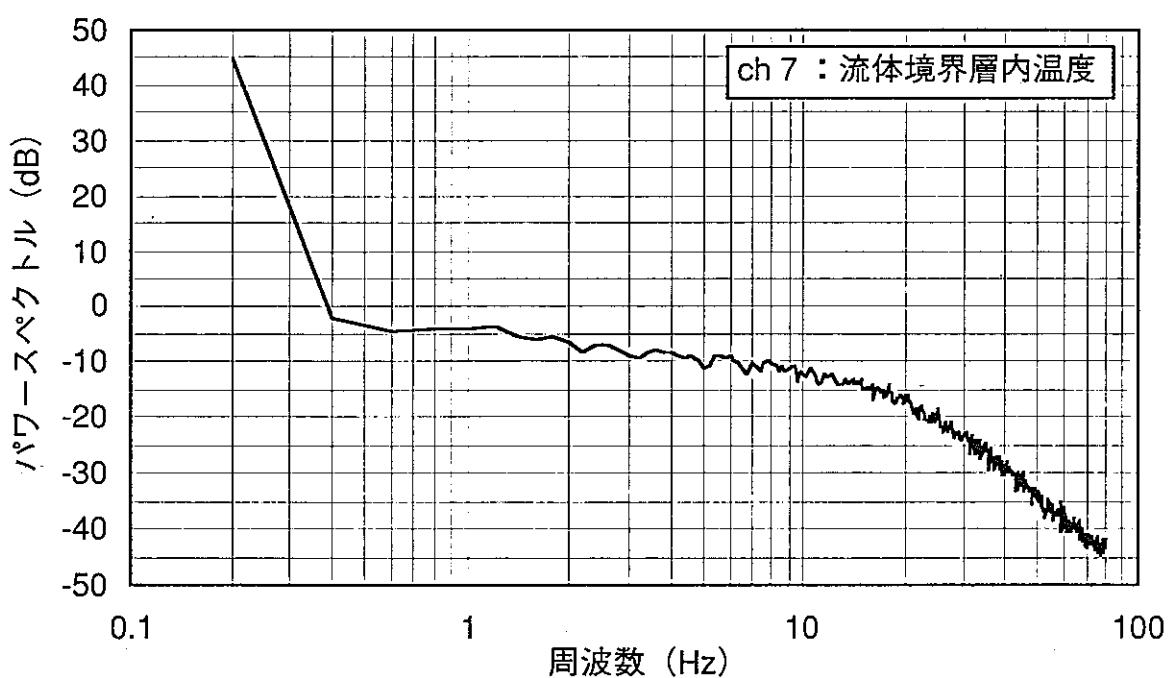


図2-44 自己パワースペクトル (Na流速 1m/s, ch7)

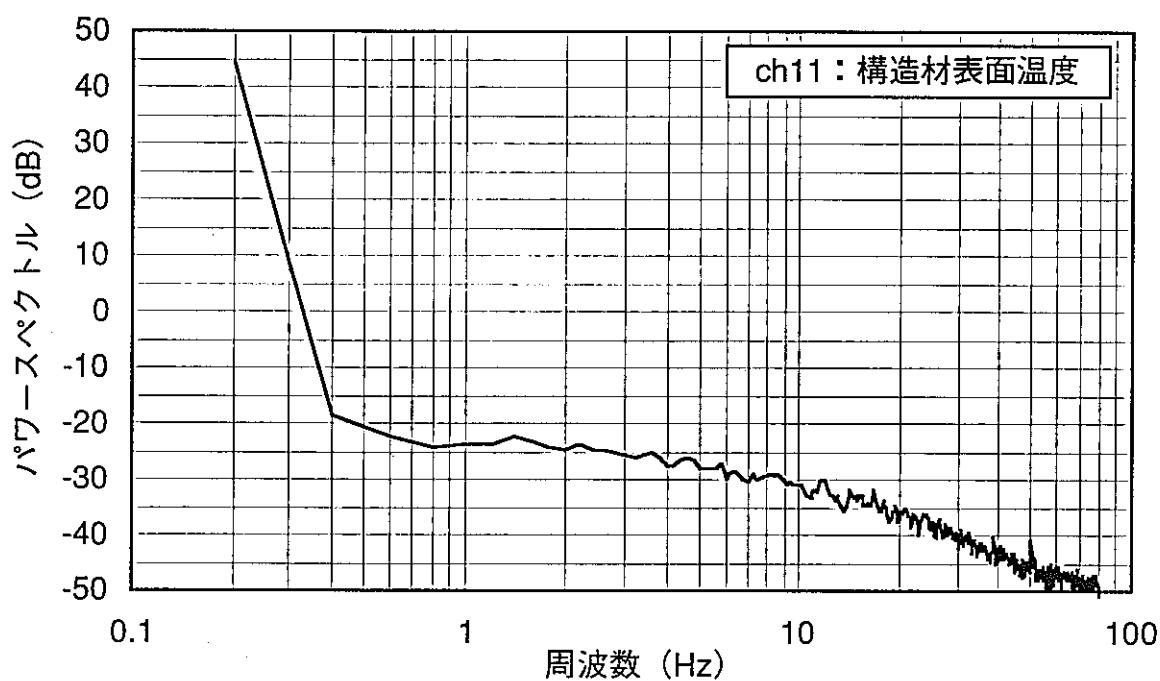


図2-45 自己パワースペクトル (Na流速 1m/s, ch11)

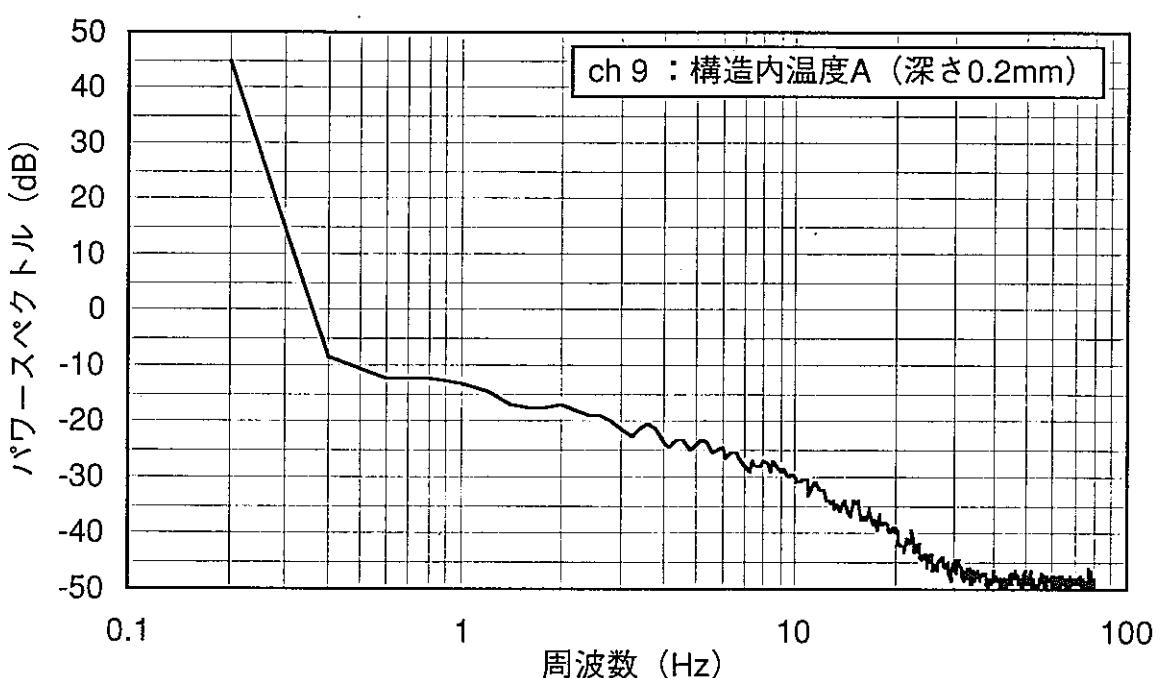


図2-46 自己パワースペクトル (Na流速 1m/s, ch9)

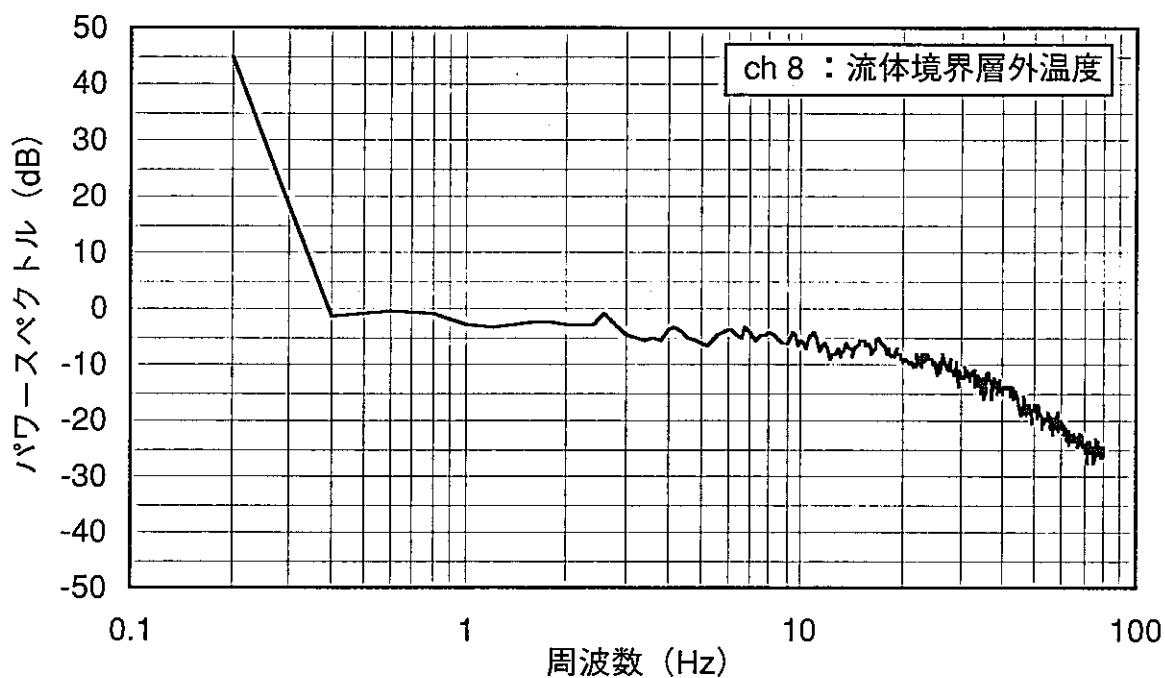


図2-47 自己パワースペクトル (Na流速 1.5m/s, ch8)

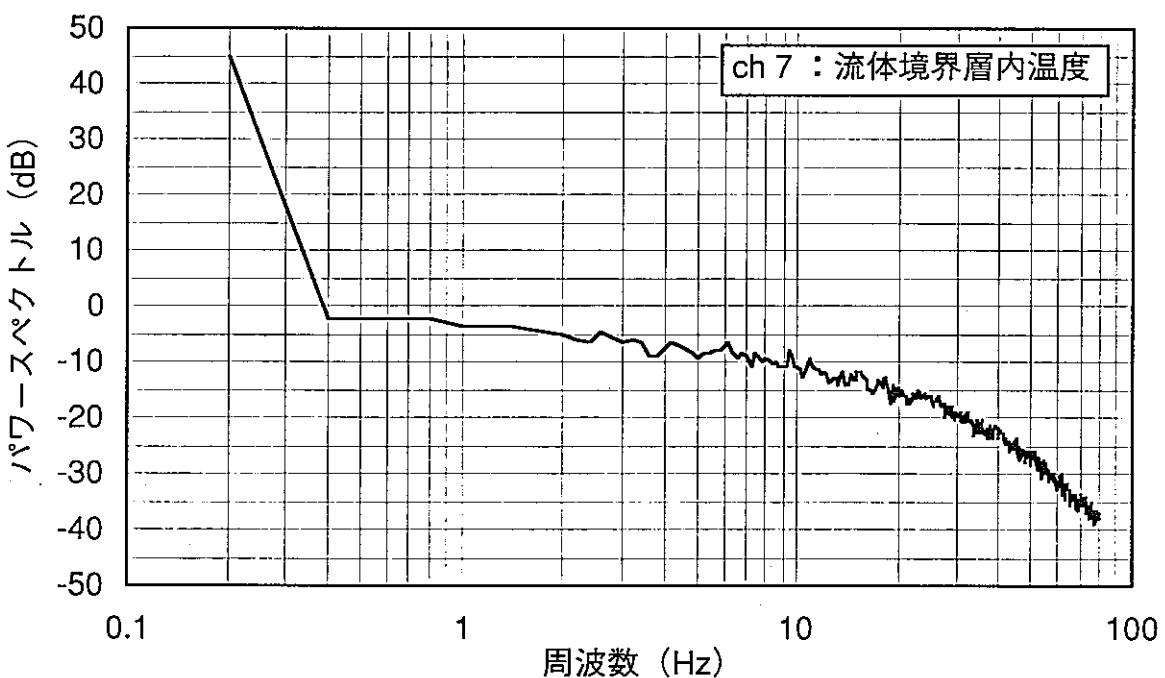


図2-48 自己パワースペクトル (Na流速 1.5m/s, ch7)

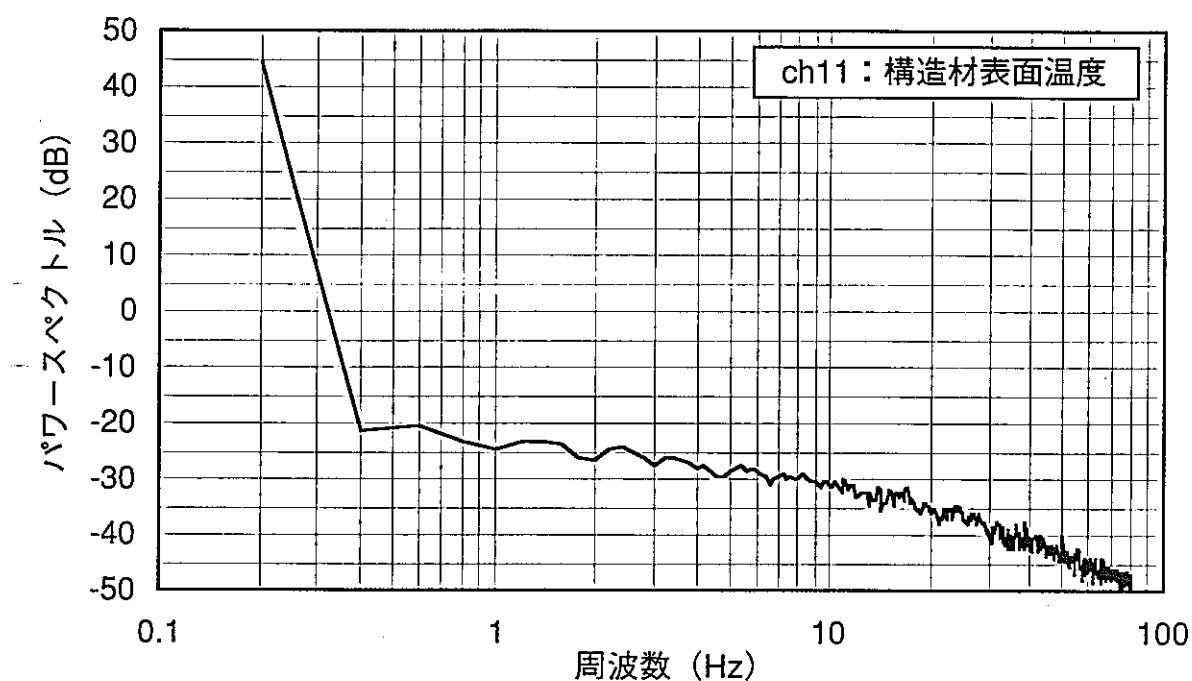


図2-49 自己パワースペクトル (Na流速 1.5m/s, ch11)

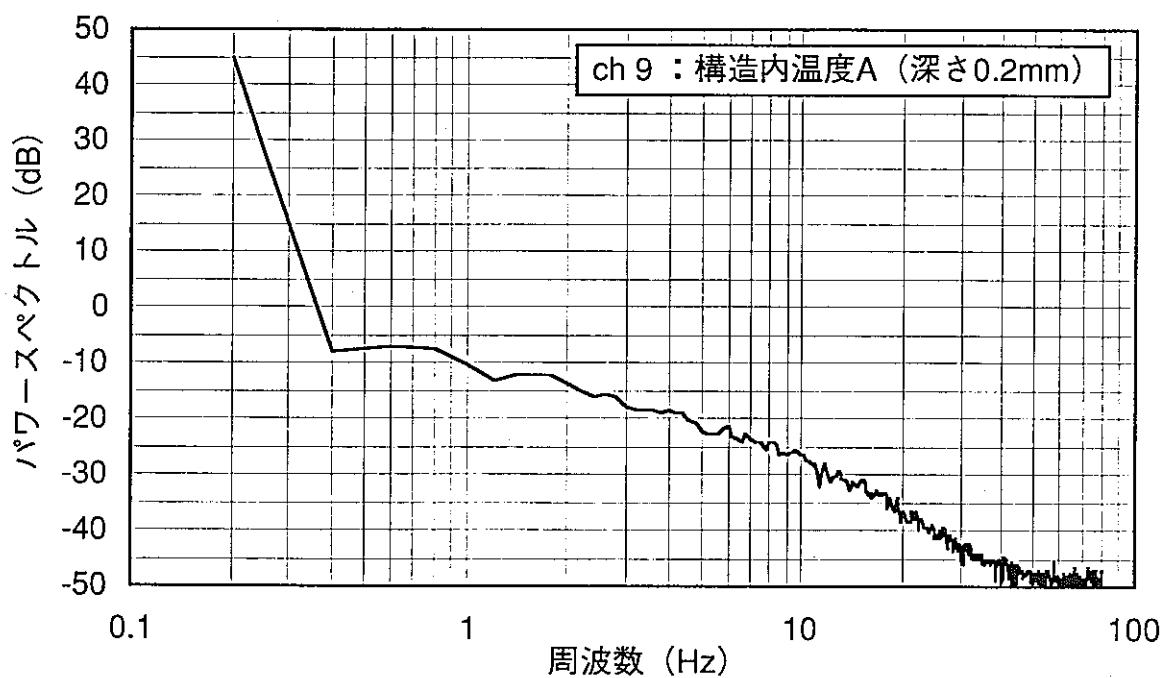


図2-50 自己パワースペクトル (Na流速 1.5m/s, ch9)

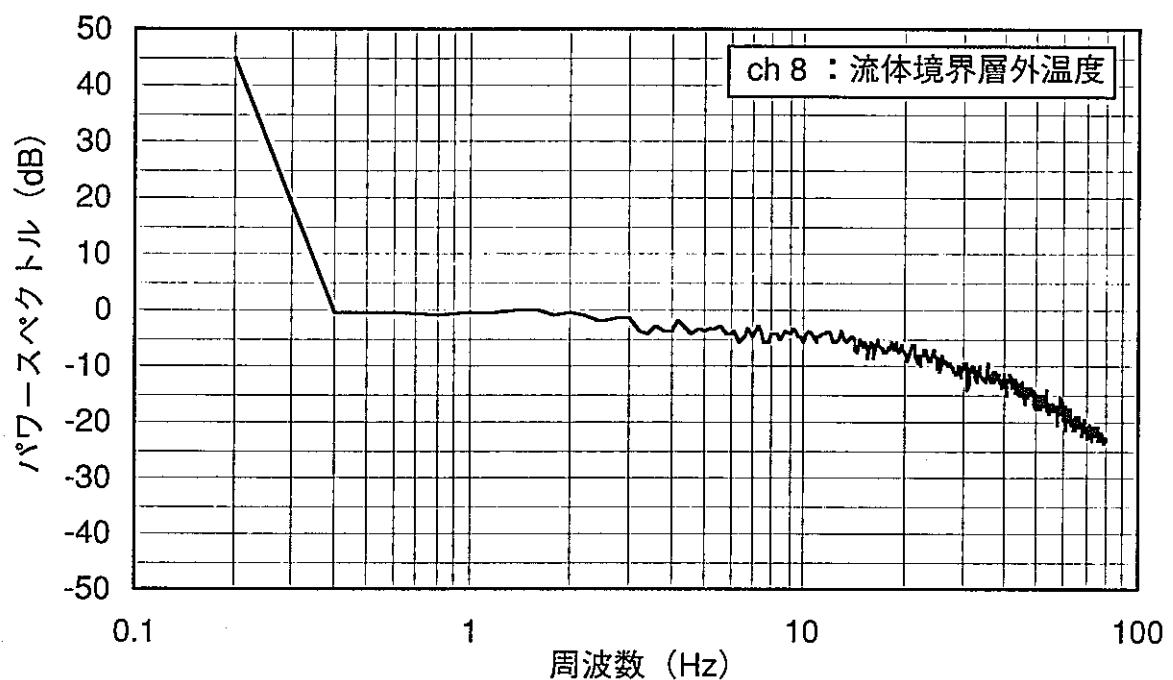


図2-51 自己パワースペクトル (Na流速 2m/s, ch8)

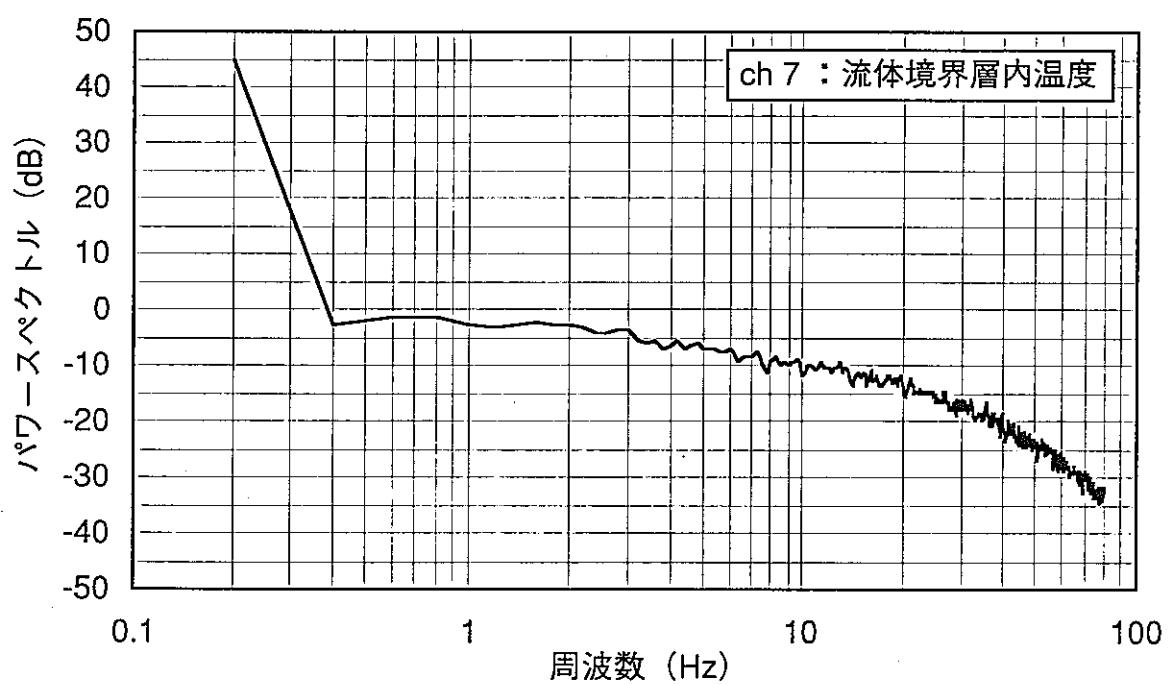


図2-52 自己パワースペクトル (Na流速 2m/s, ch7)

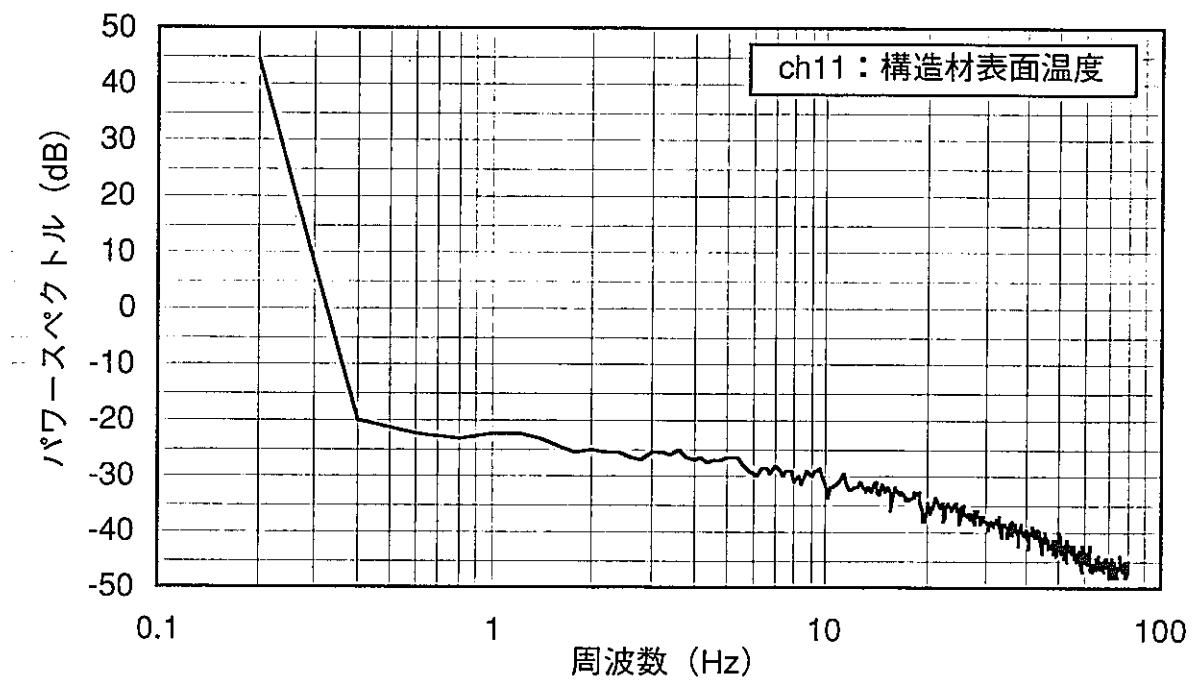


図2-53 自己パワースペクトル (Na流速 2m/s, ch11)

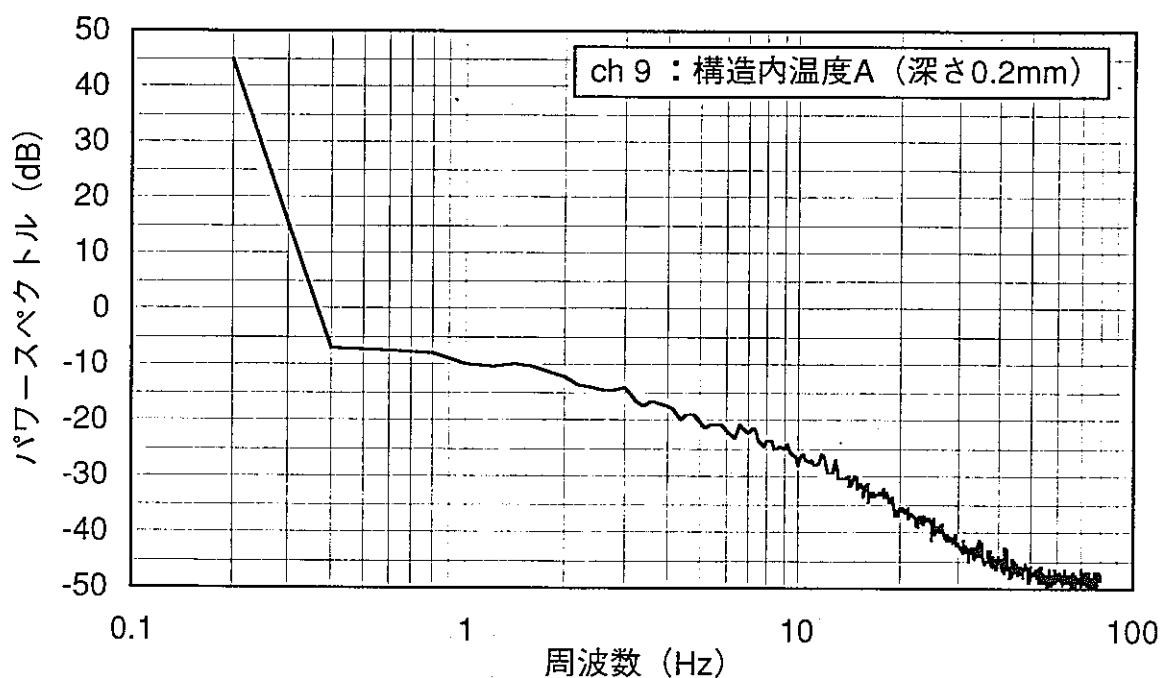


図2-54 自己パワースペクトル (Na流速 2m/s, ch9)

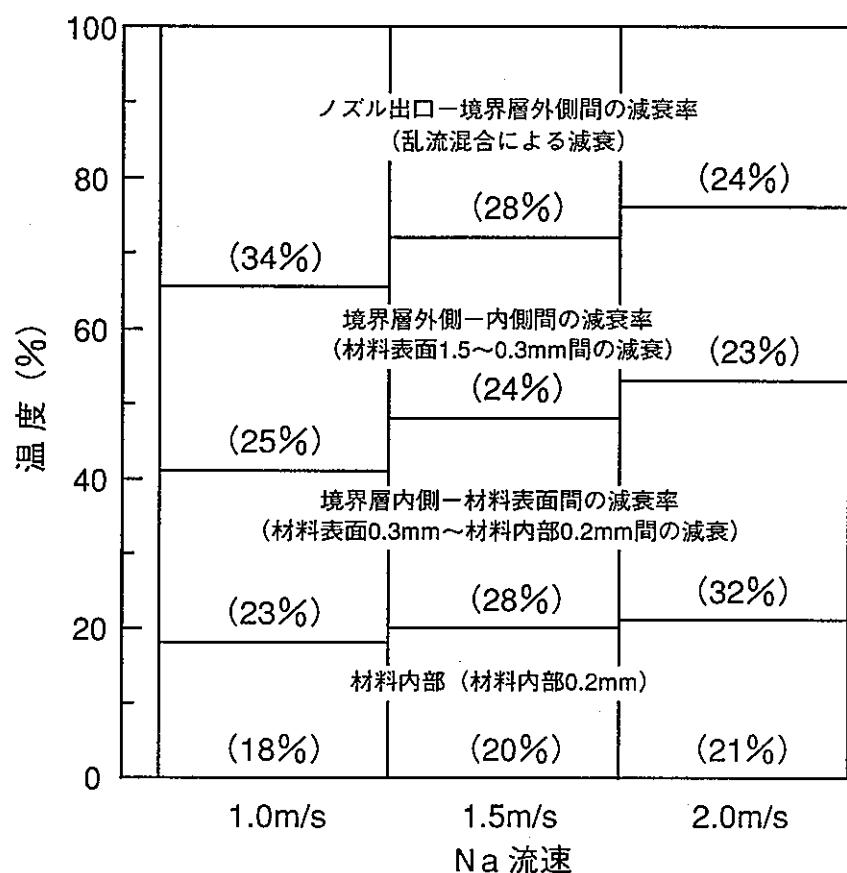
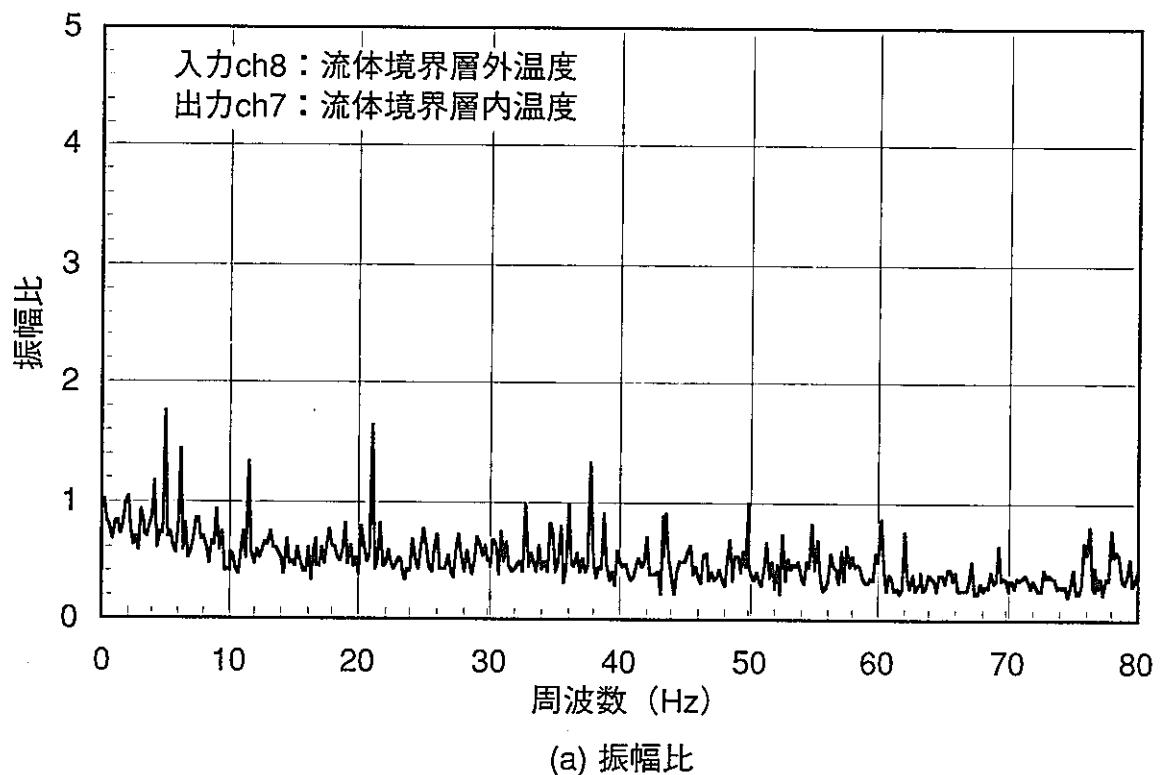
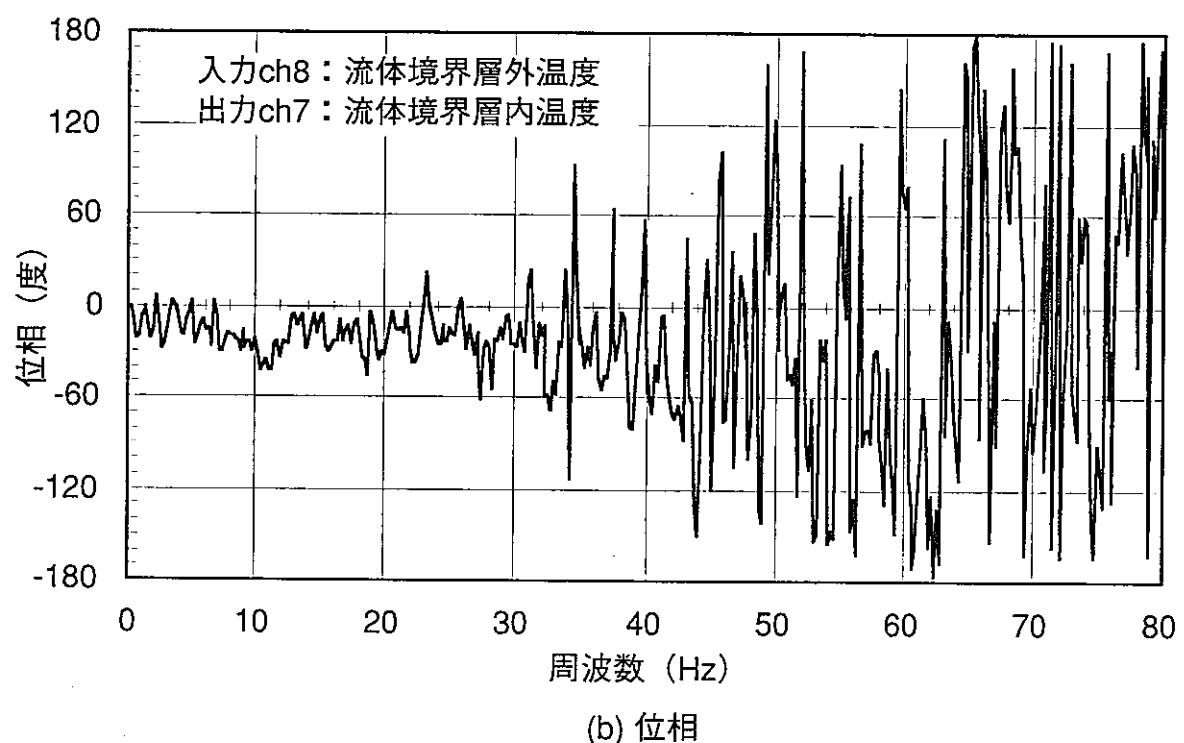


図2-55 温度揺らぎ幅の減衰効果



(a) 振幅比



(b) 位相

図2-56 伝達関数 (Na流速1m/s, 入力ch8-出力ch7)

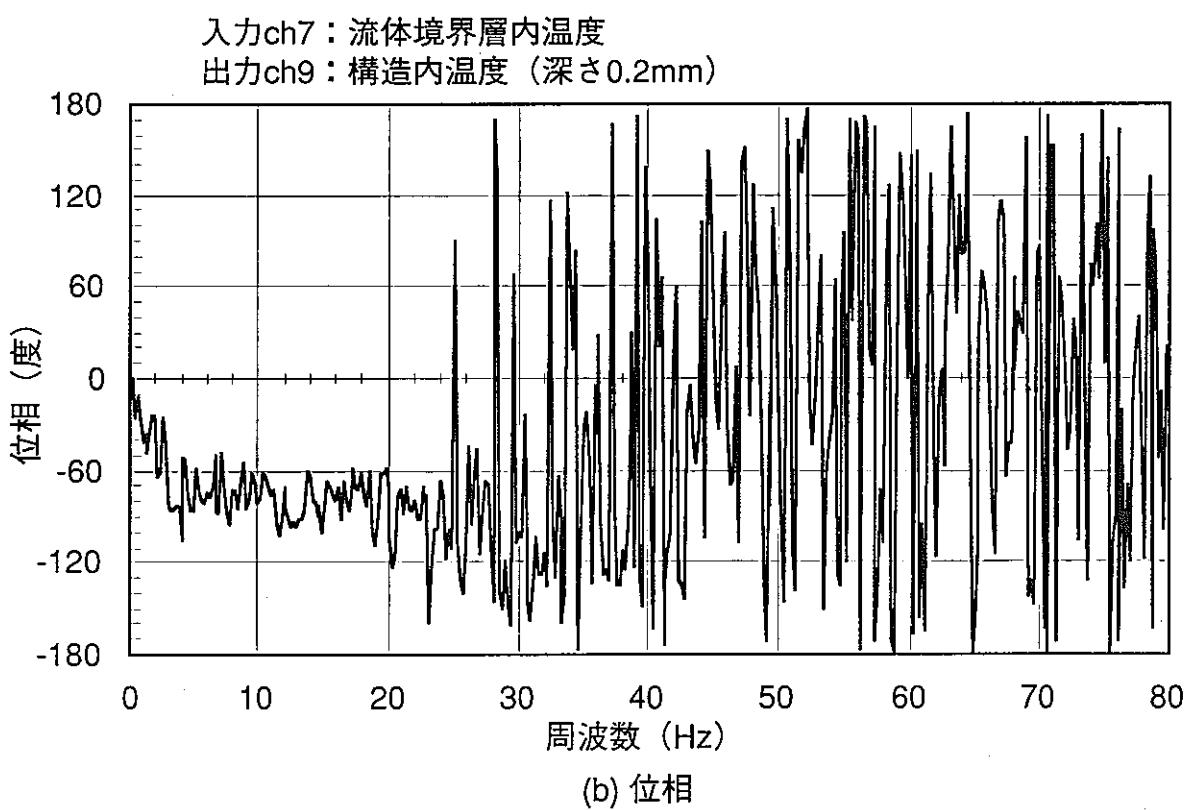
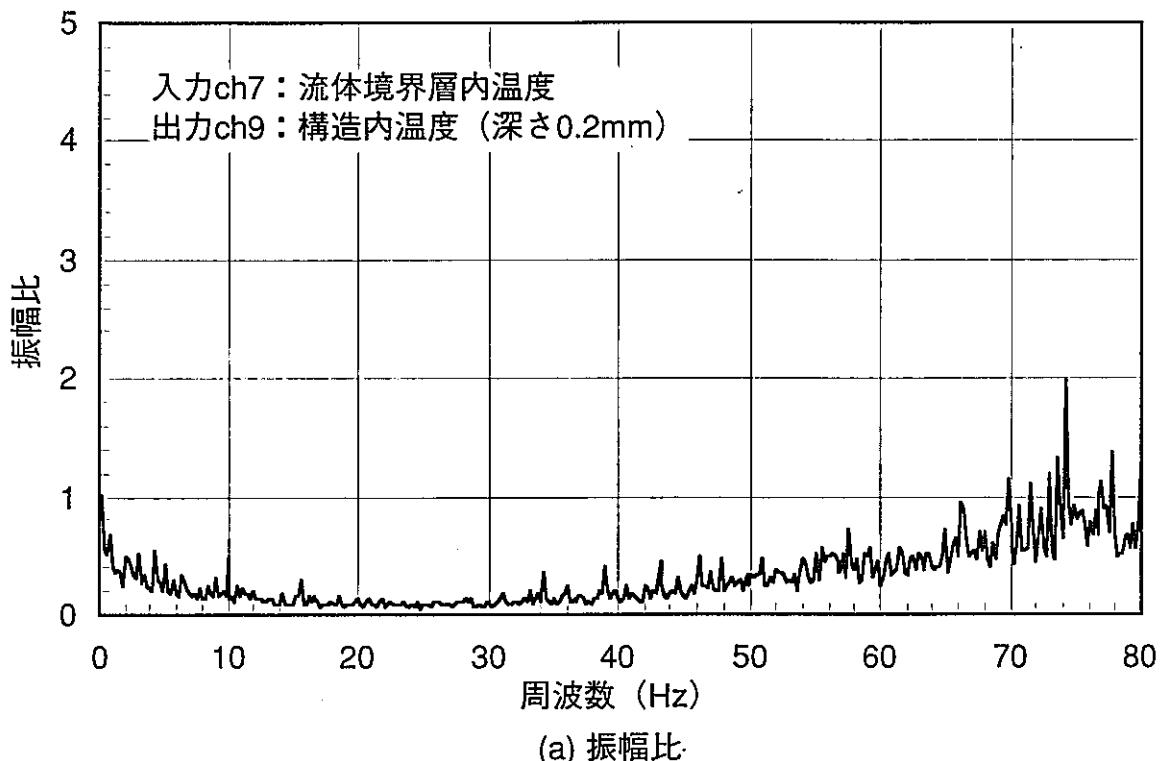


図2-57 伝達関数 (Na流速1m/s, 入力ch7-出力ch9)

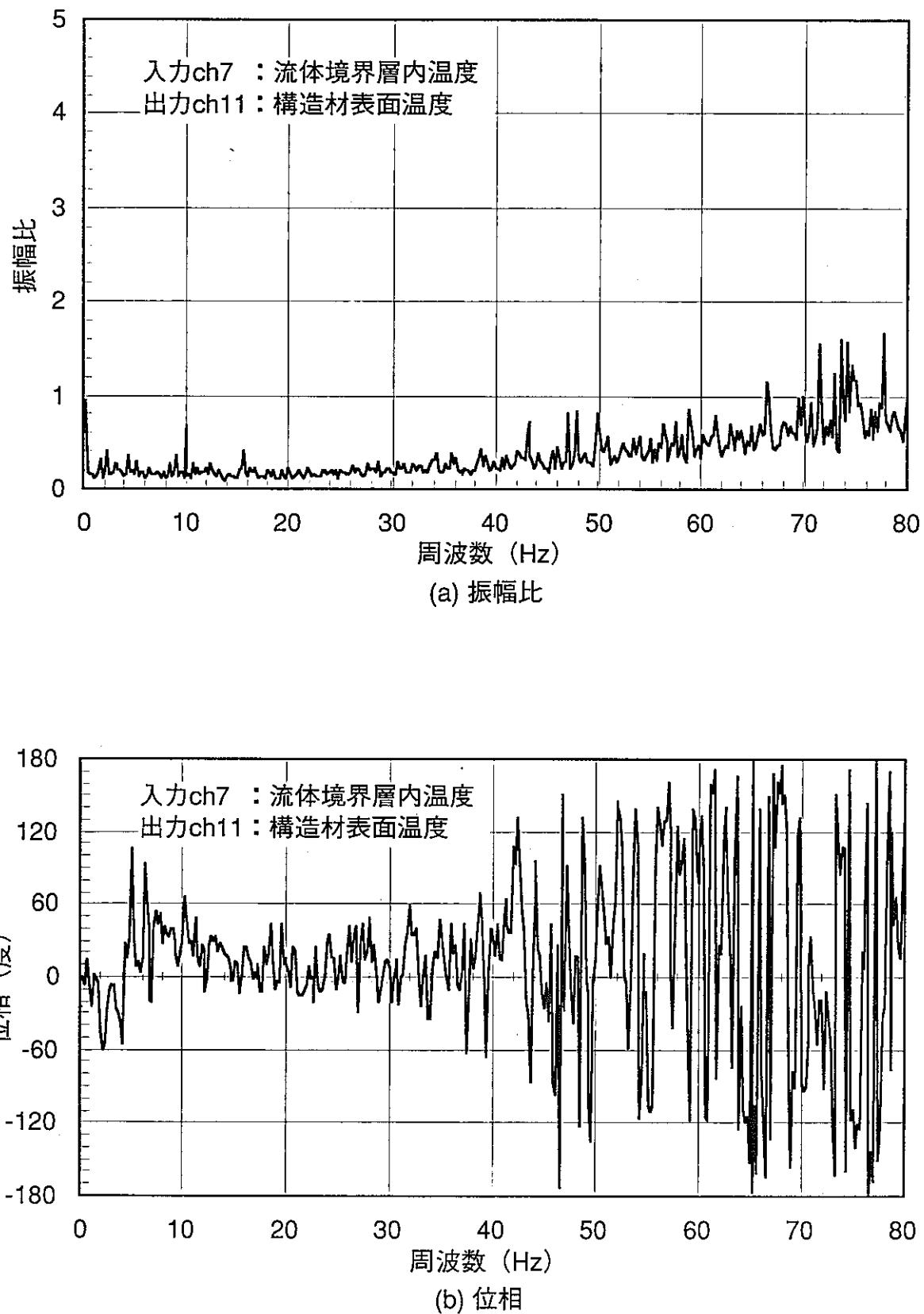


図2-58 伝達関数 (Na流速1m/s, 入力ch7-出力ch11)

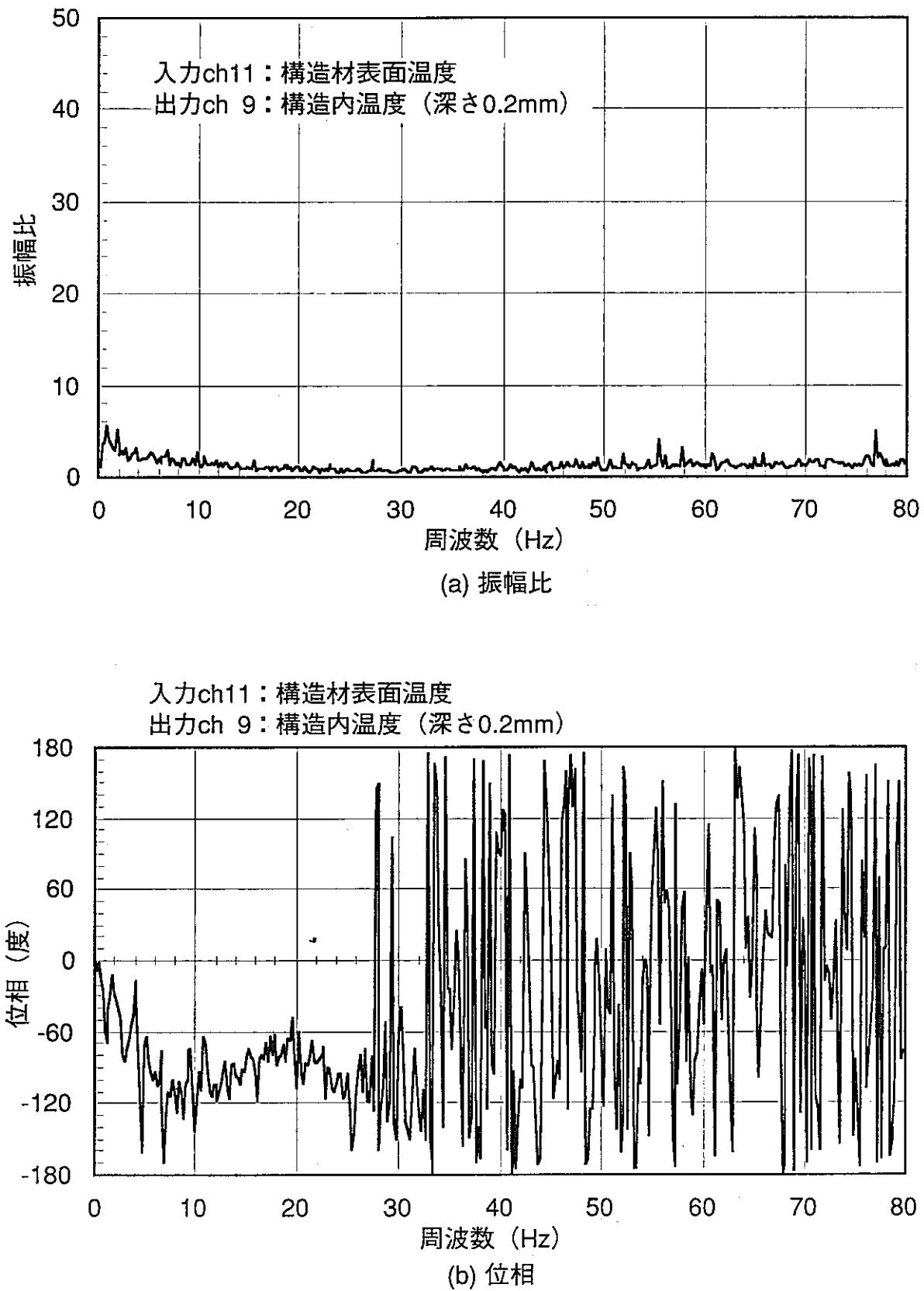


図2-59 伝達関数 (Na流速1m/s, 入力ch11-出力ch9)

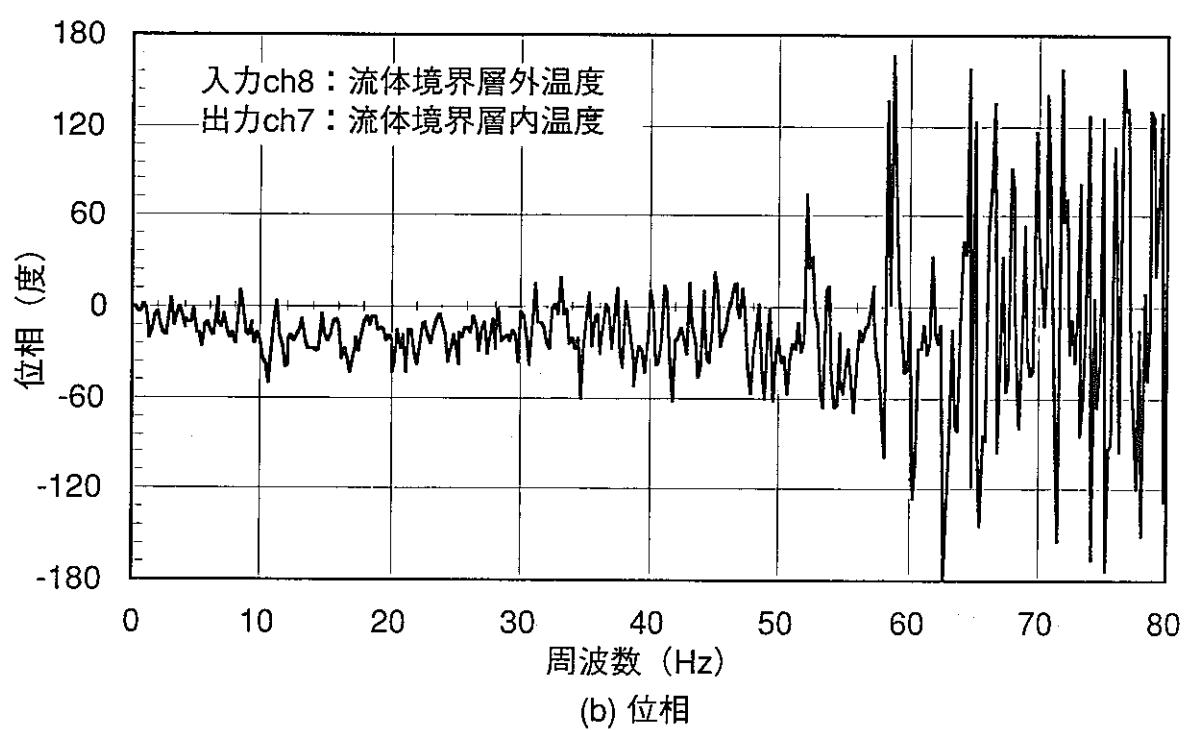
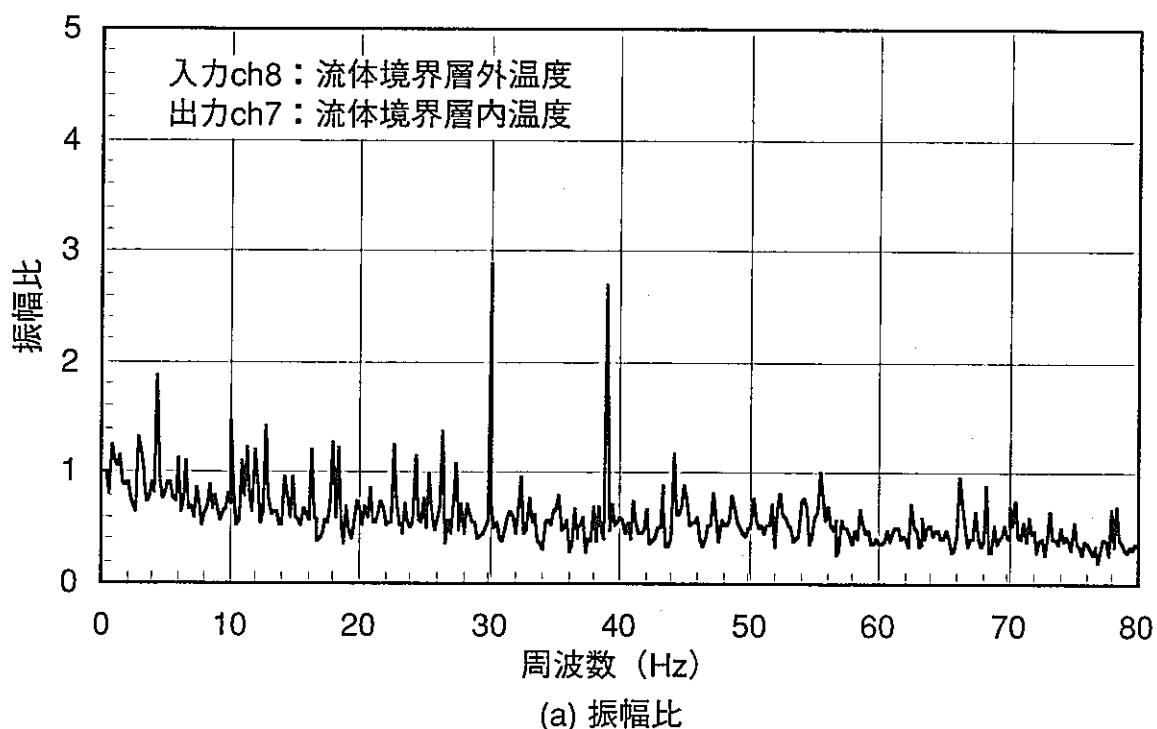


図2-60 伝達関数 (Na流速1.5m/s, 入力ch8-出力ch7)

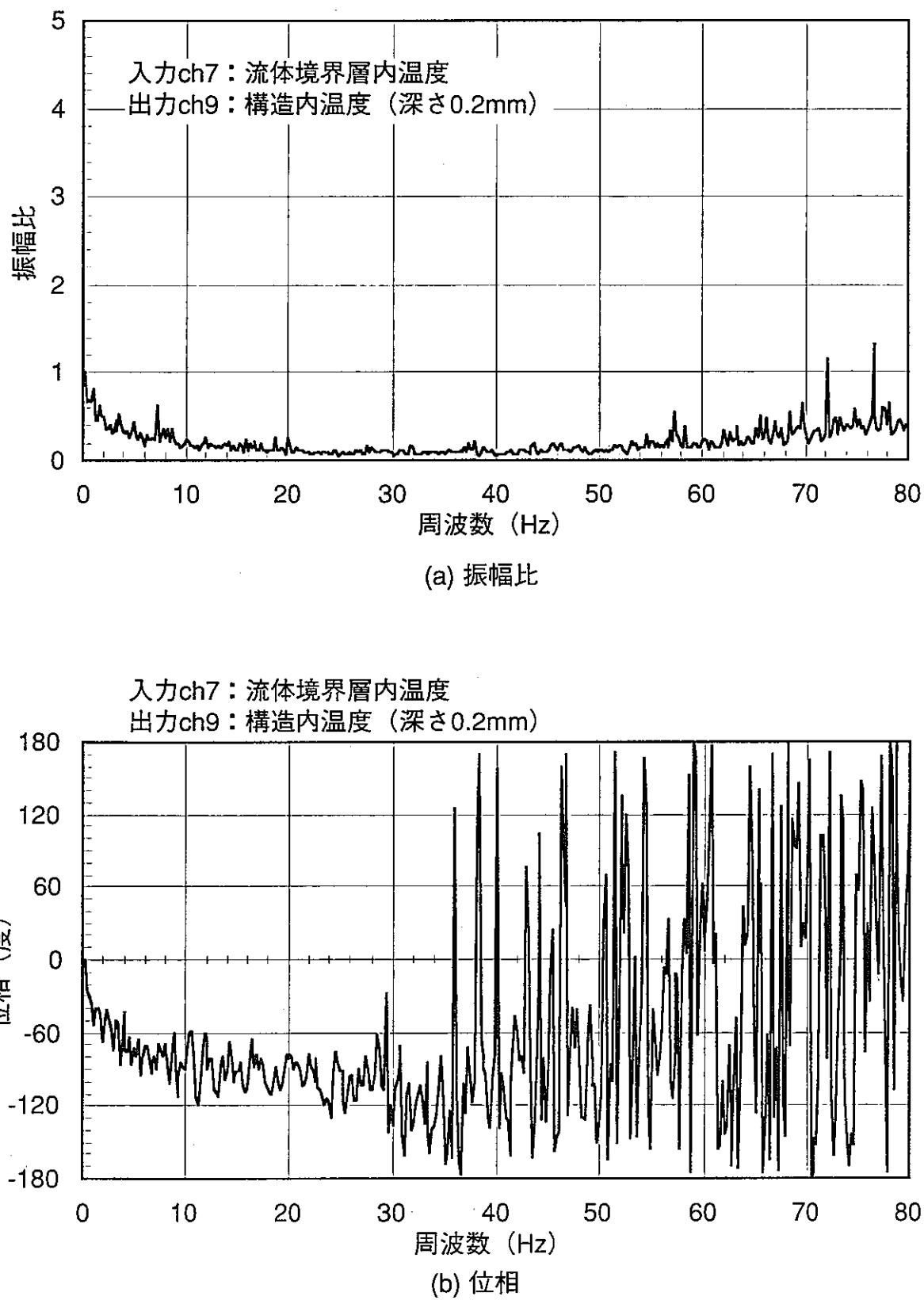


図2-61 伝達関数 (Na流速1.5m/s, 入力ch7-出力ch9)

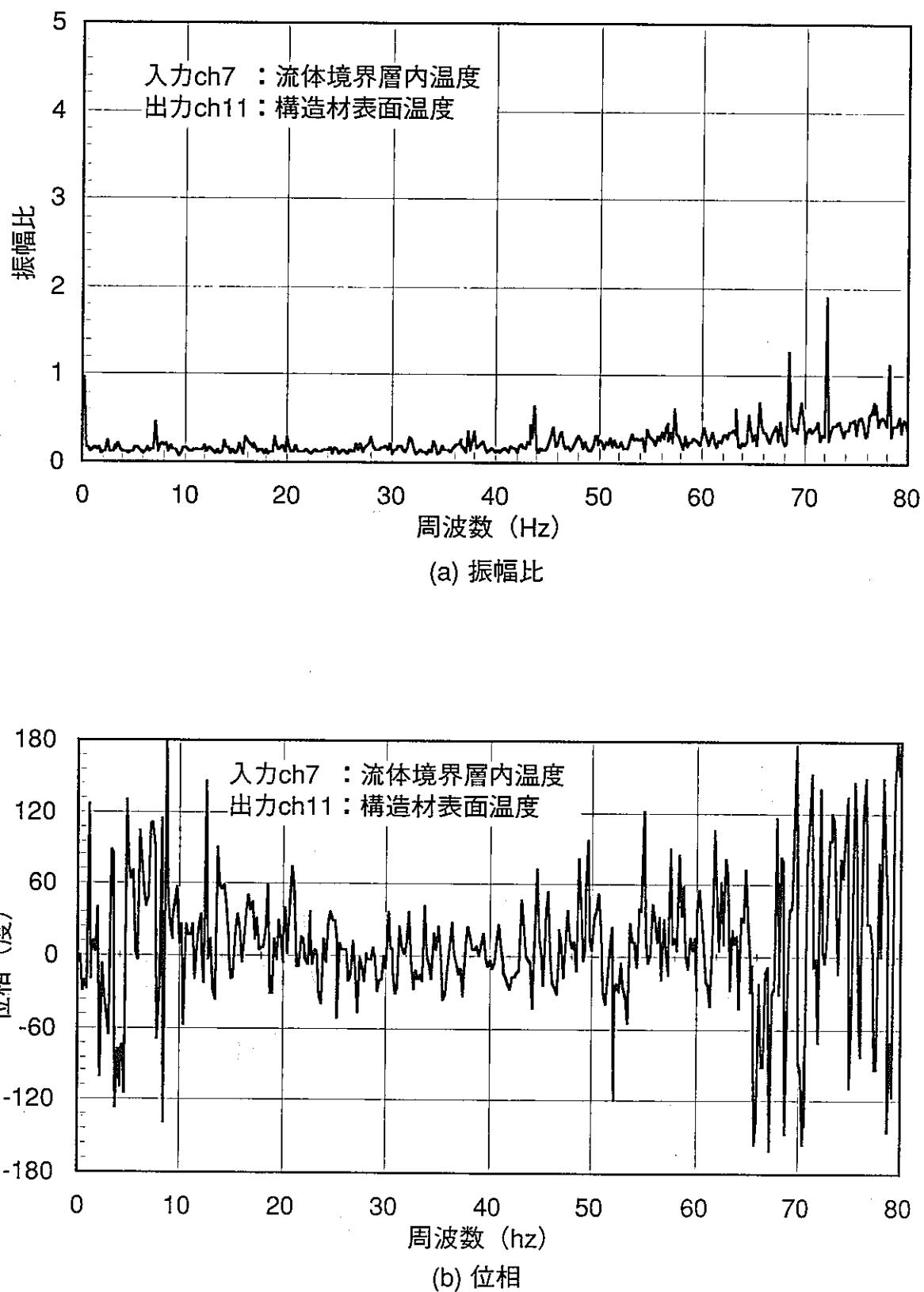
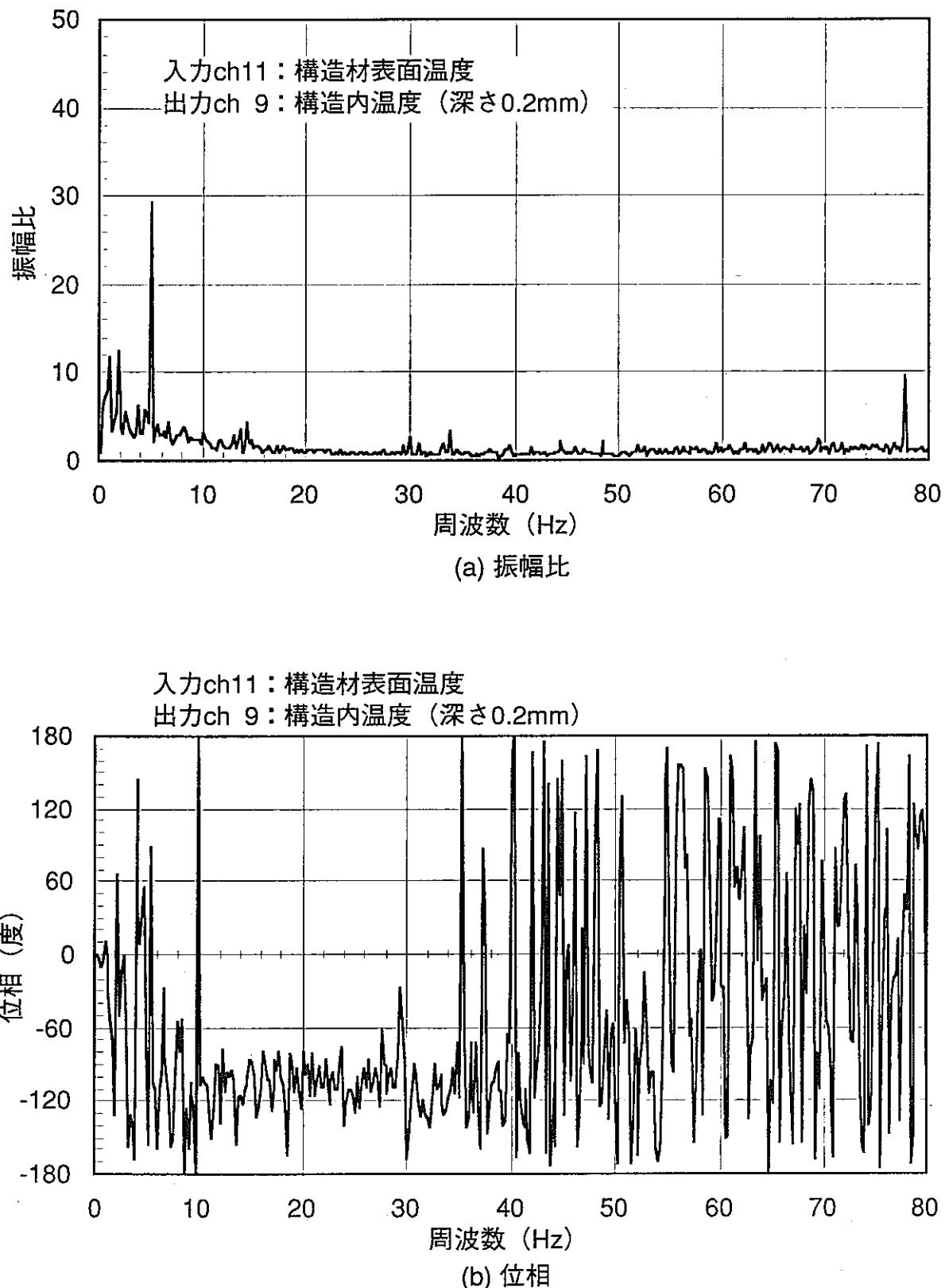
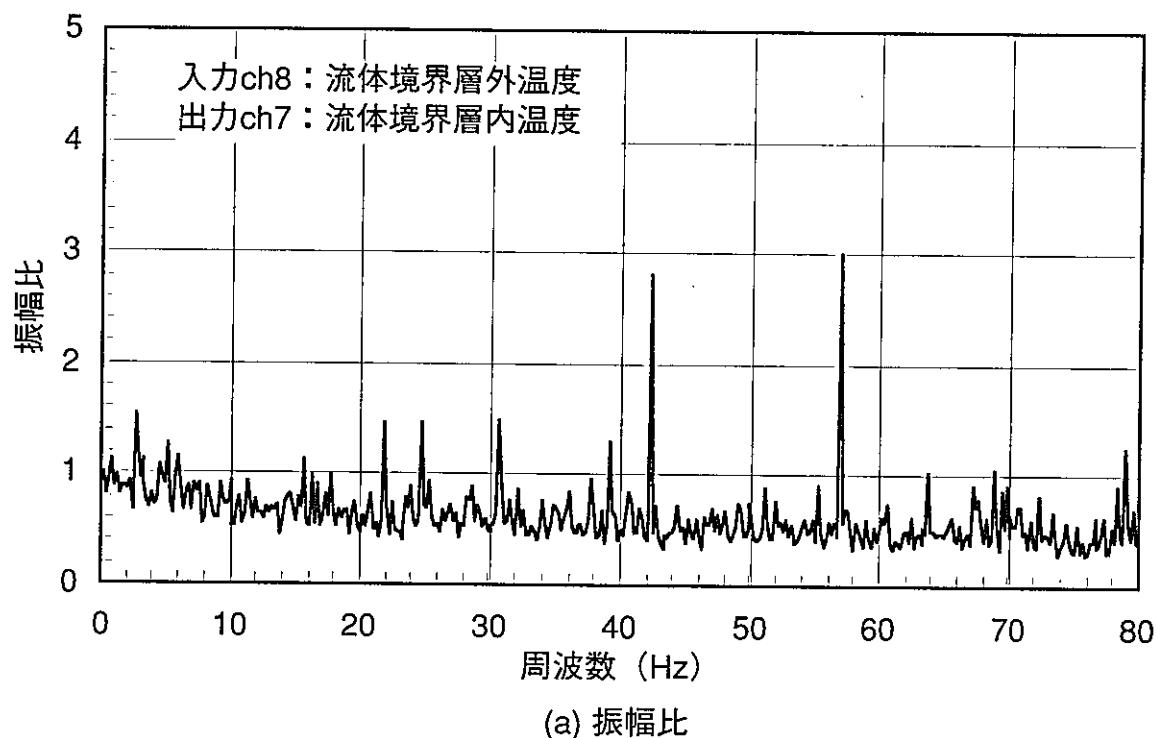
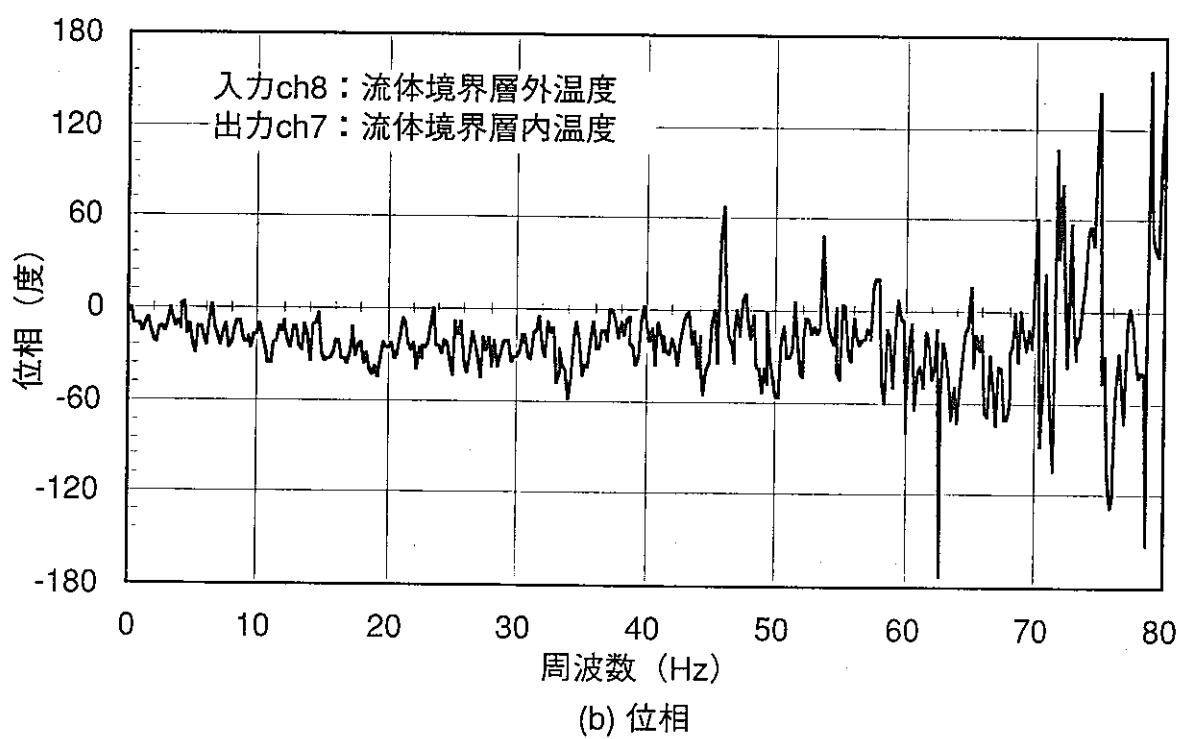


図2-62 伝達関数 (Na流速1.5m/s, 入力ch7-出力ch11)





(a) 振幅比



(b) 位相

図2-64 伝達関数 (Na流速2m/s, 入力ch8-出力ch7)

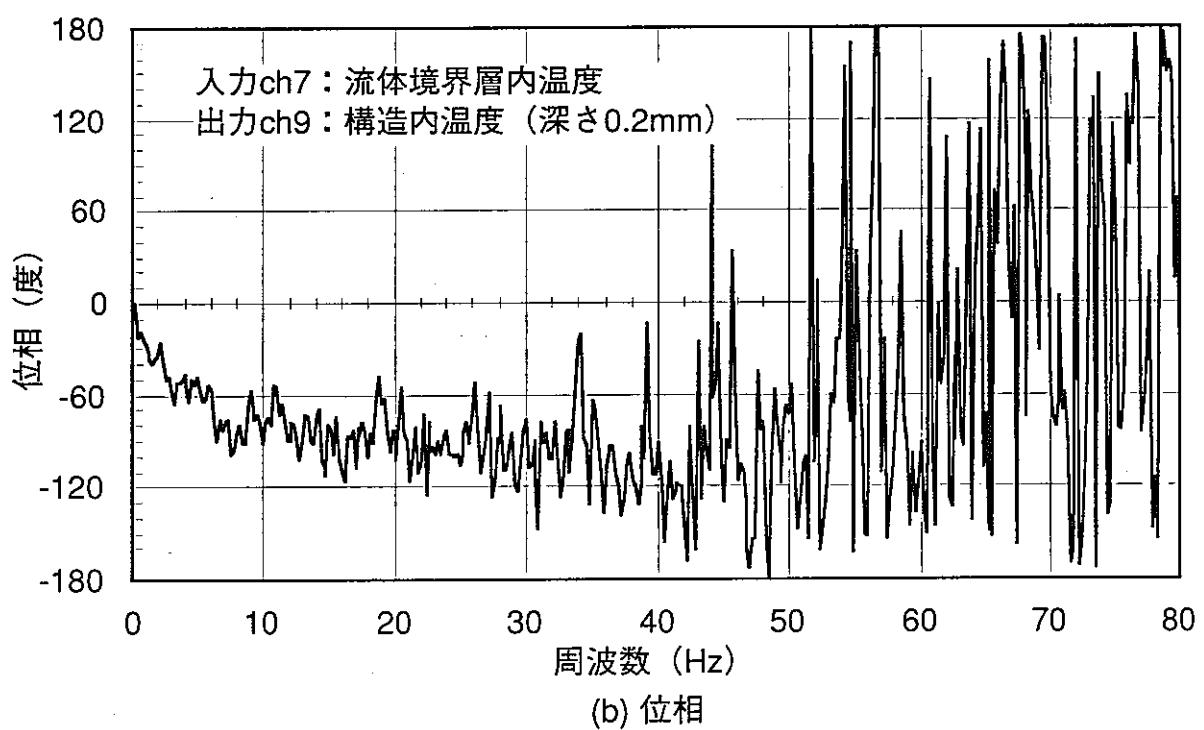
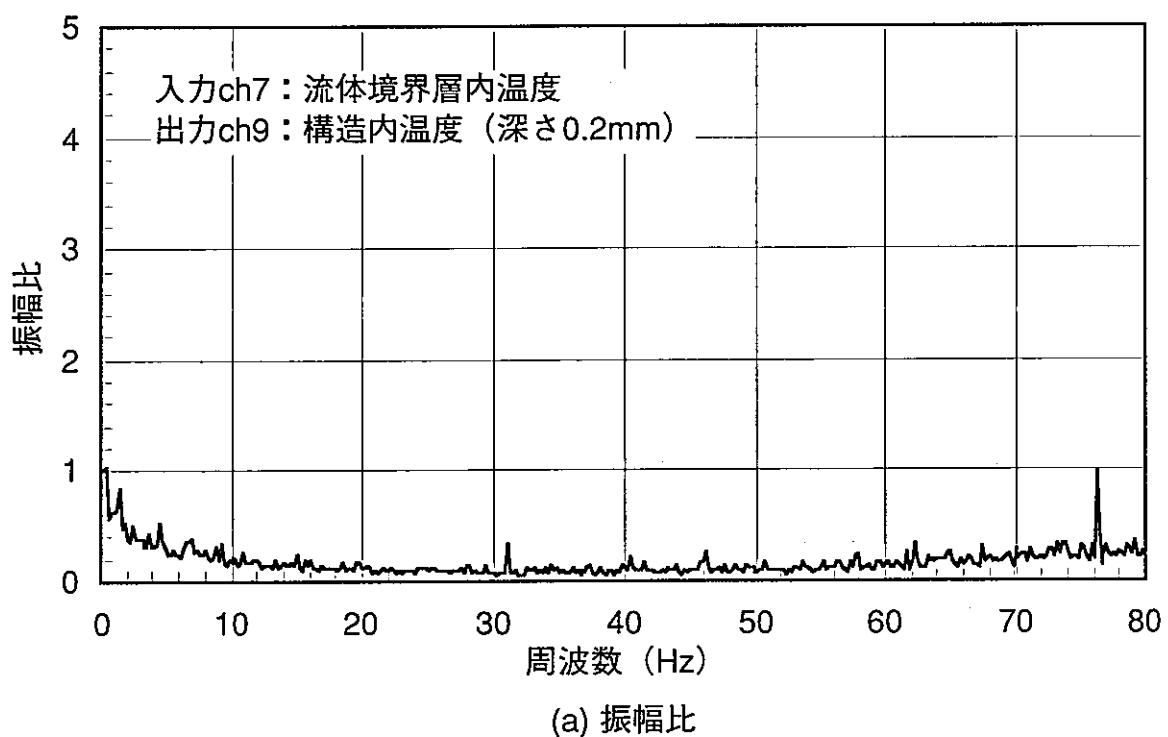


図2-65 伝達関数 (Na流速2m/s, 入力ch7-出力ch9)

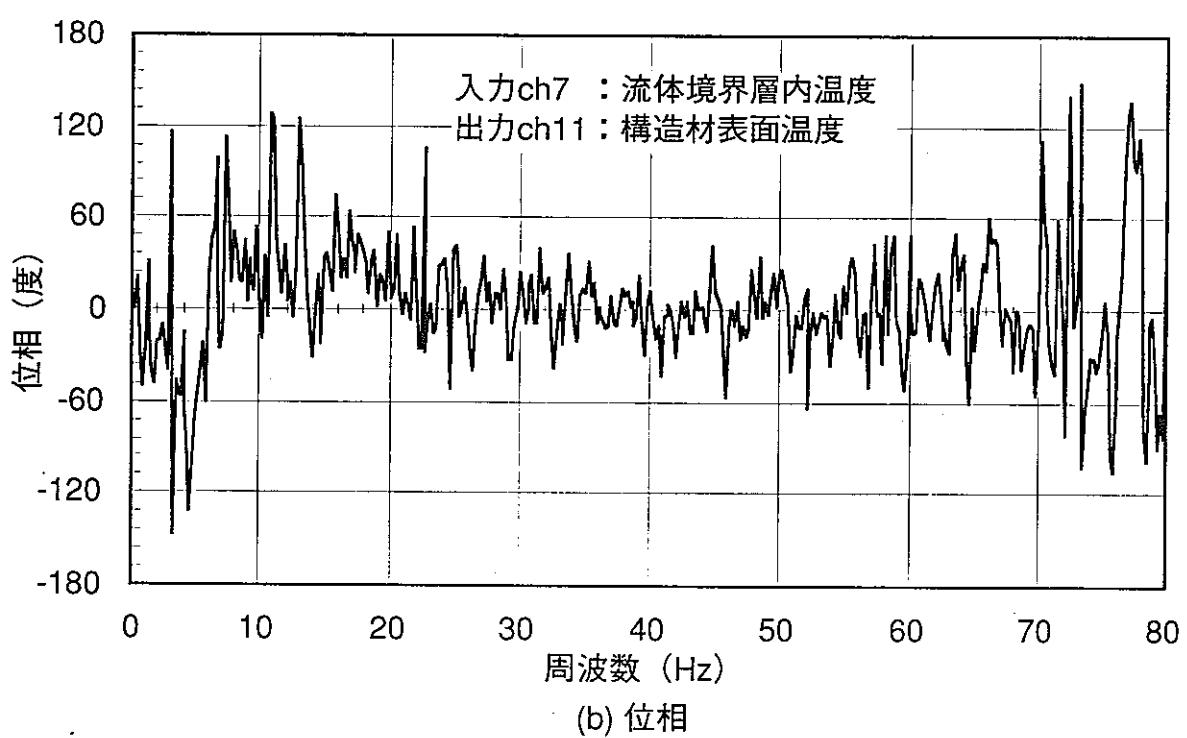
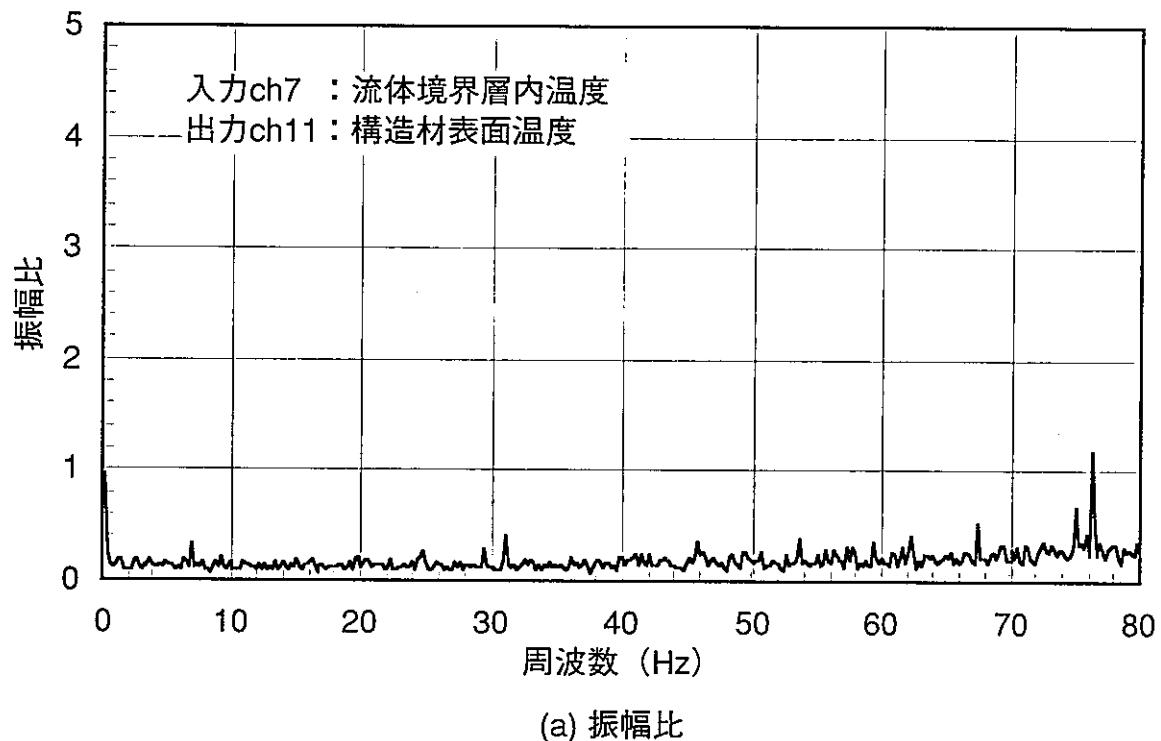


図2-66 伝達関数 (Na流速2m/s, 入力ch7-出力ch11)

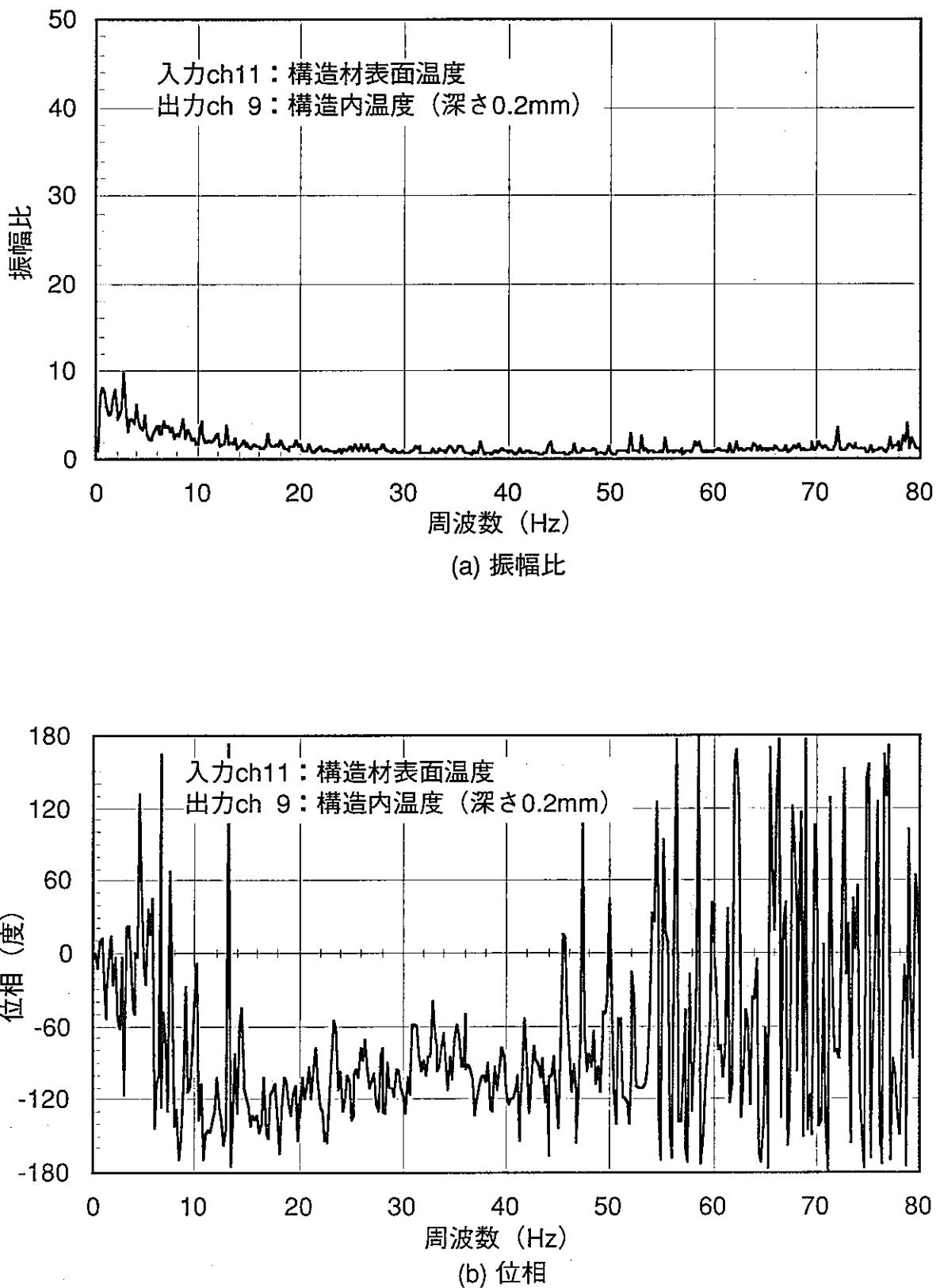


図2-67 伝達関数 (Na流速2m/s, 入力ch11-出力ch9)

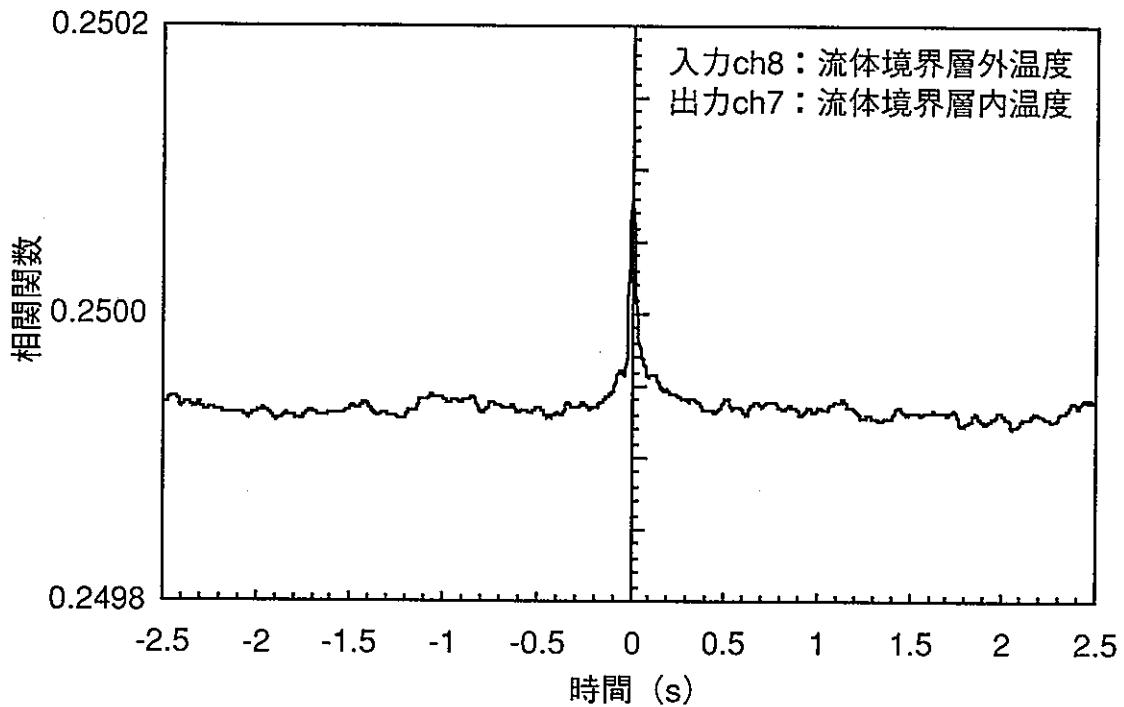


図2-68 相互相関関数 (Na流速1m/s, 入力ch8-出力ch7)

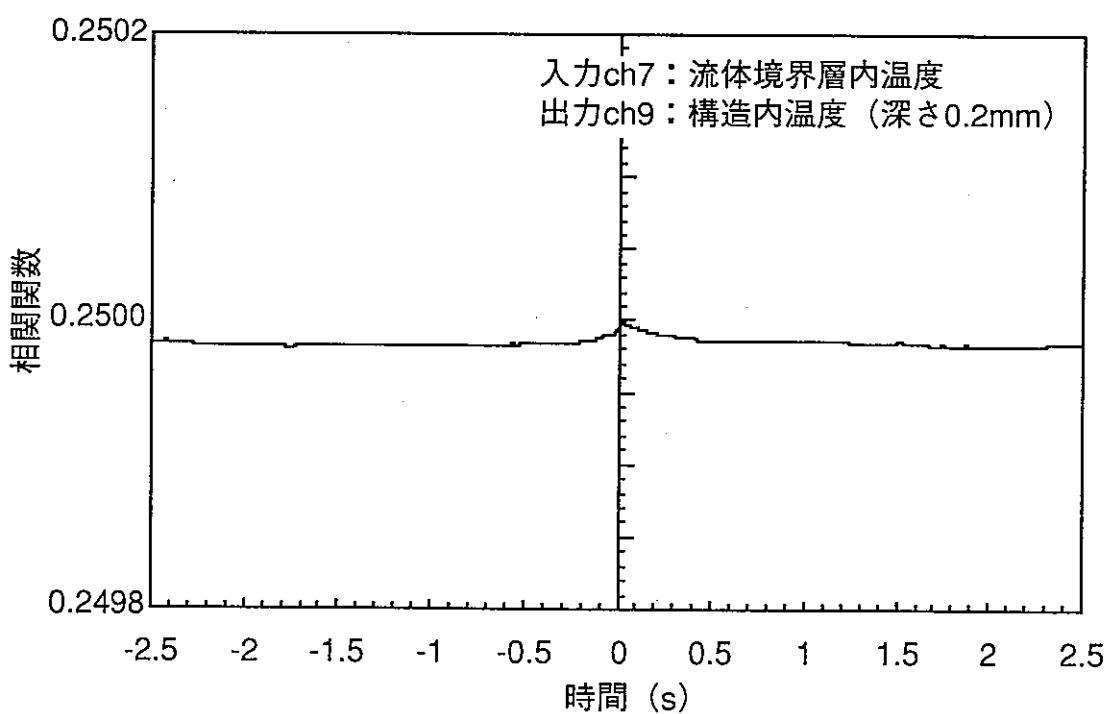


図2-69 相互相関関数 (Na流速1m/s, 入力ch7-出力ch9)

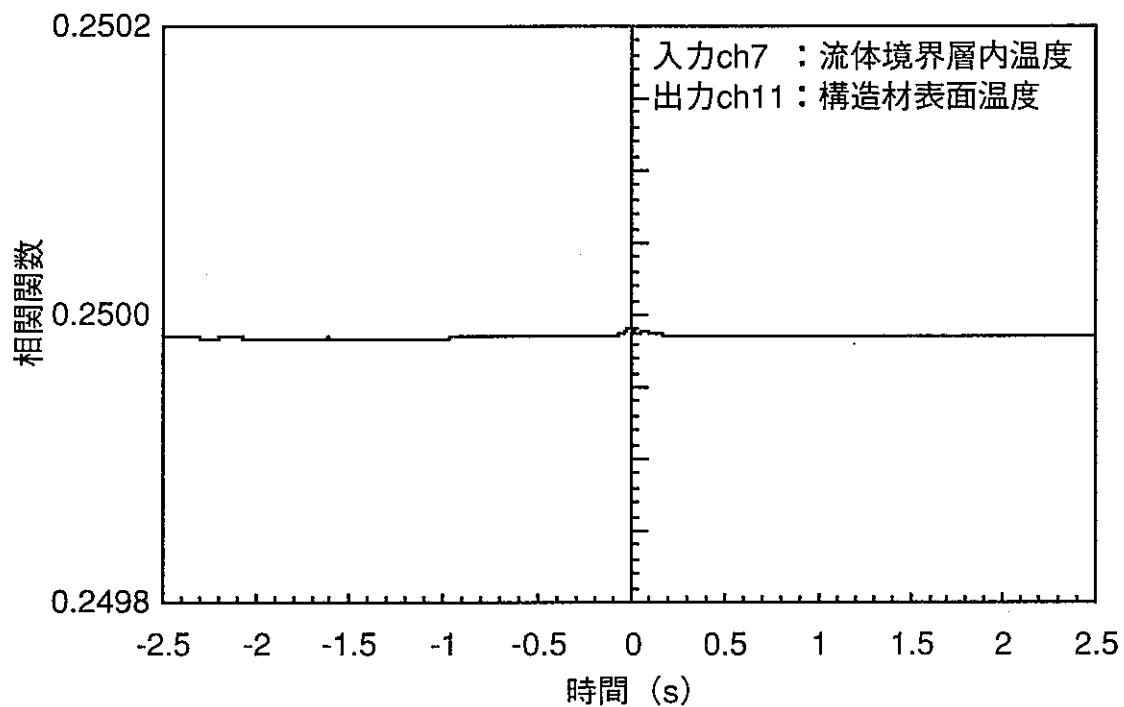


図2-70 相互相関関数 (Na流速1m/s, 入力ch7-出力ch11)

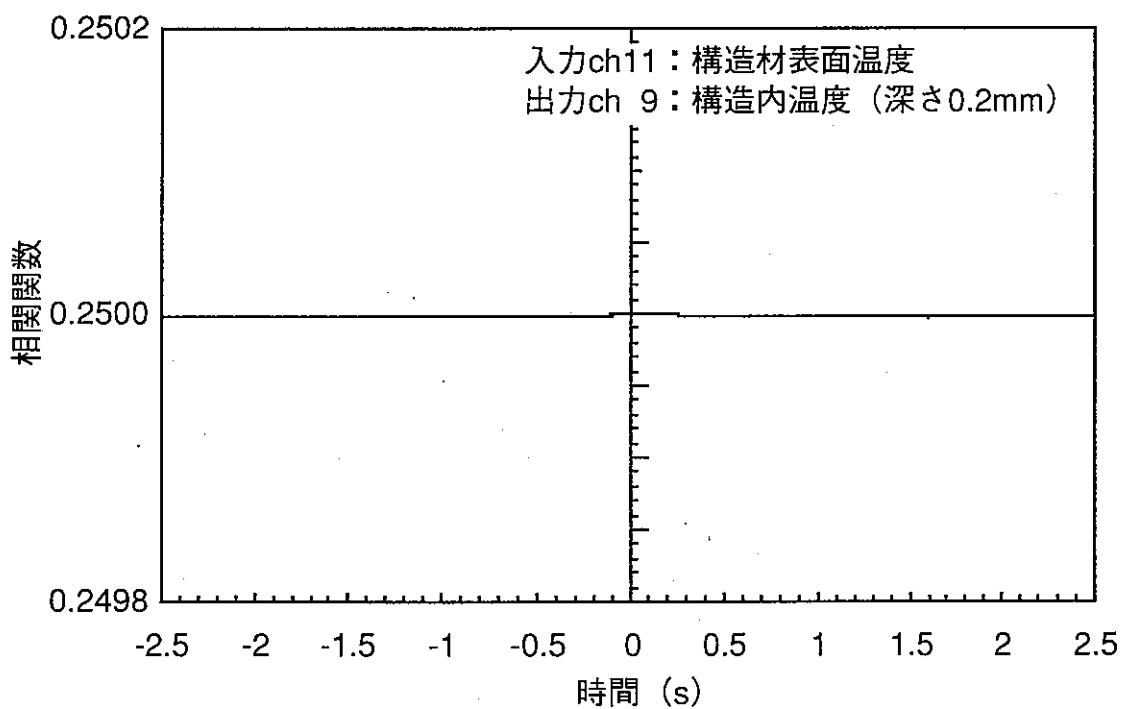


図2-71 相互相関関数 (Na流速1m/s, 入力ch11-出力ch9)

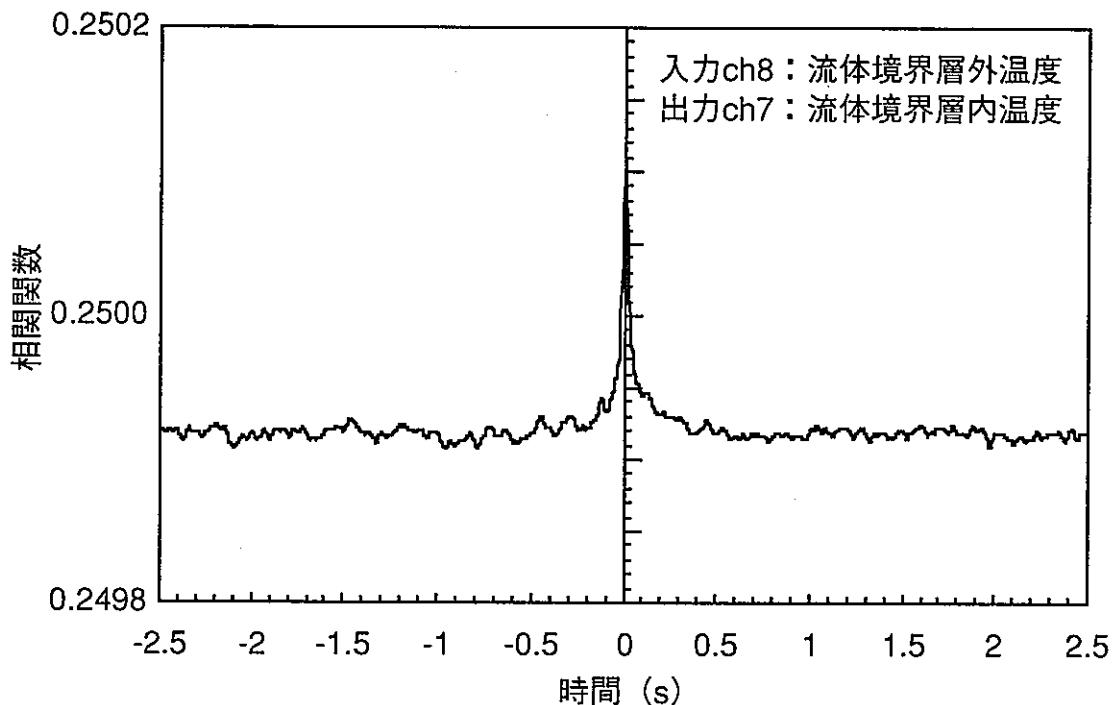


図2-72 相互相関関数 (Na流速1.5m/s, 入力ch8-出力ch7)

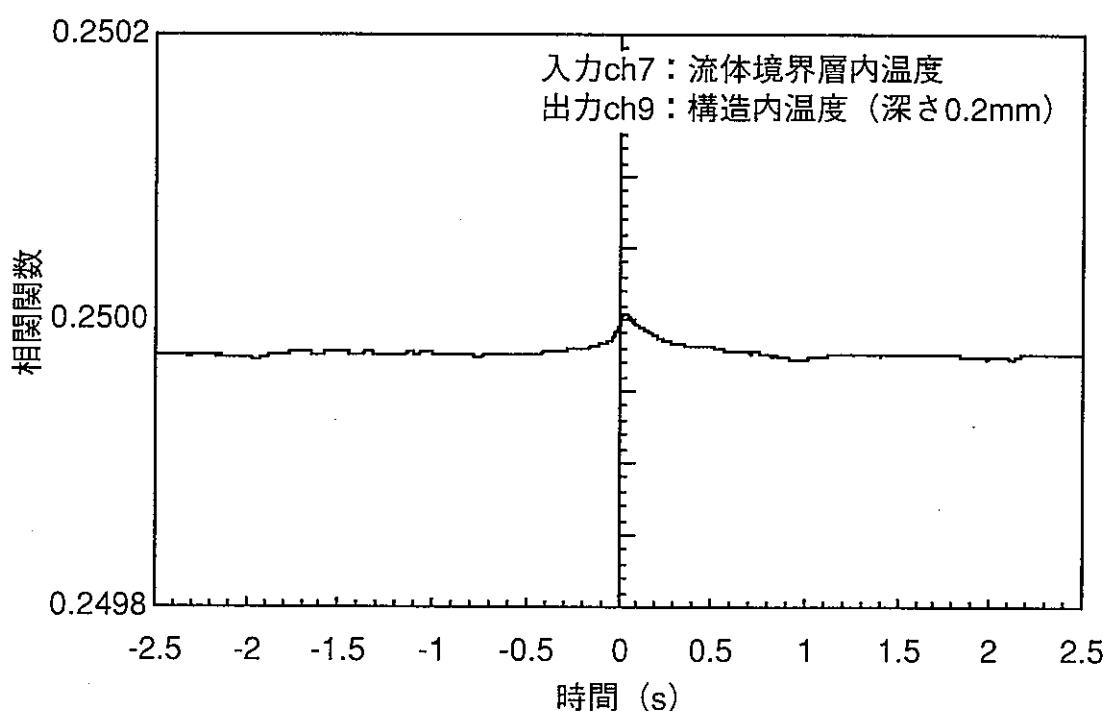


図2-73 相互相関関数 (Na流速1.5m/s, 入力ch7-出力ch9)

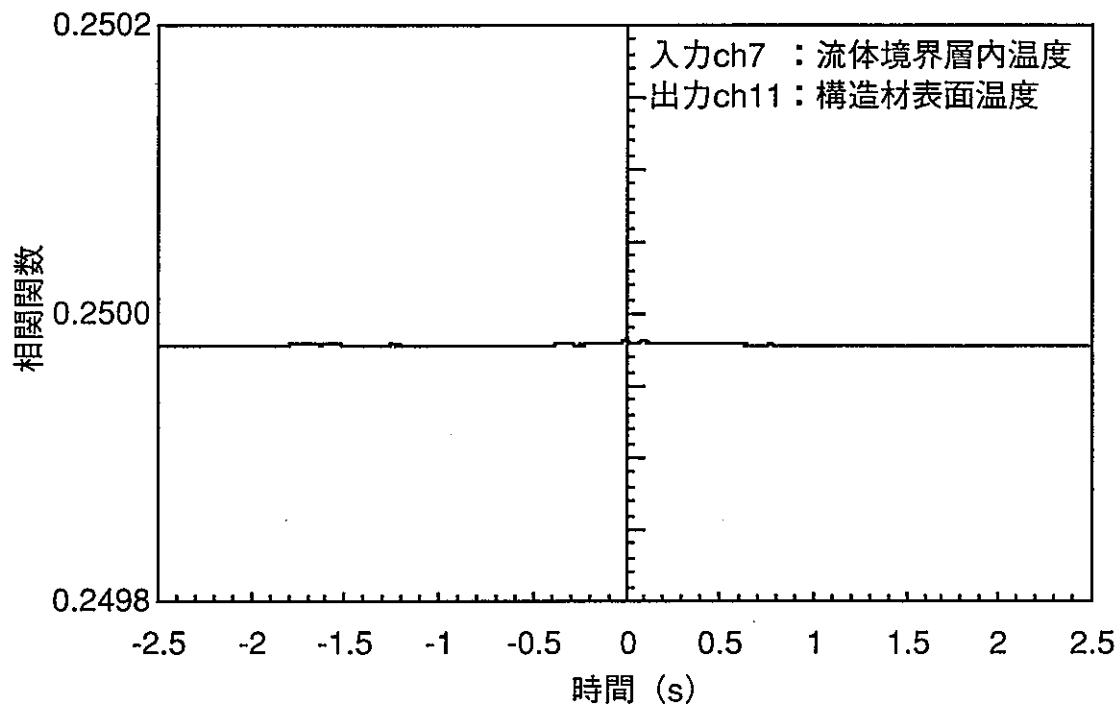


図2-74 相互相関関数 (Na流速1.5m/s, 入力ch7-出力ch11)

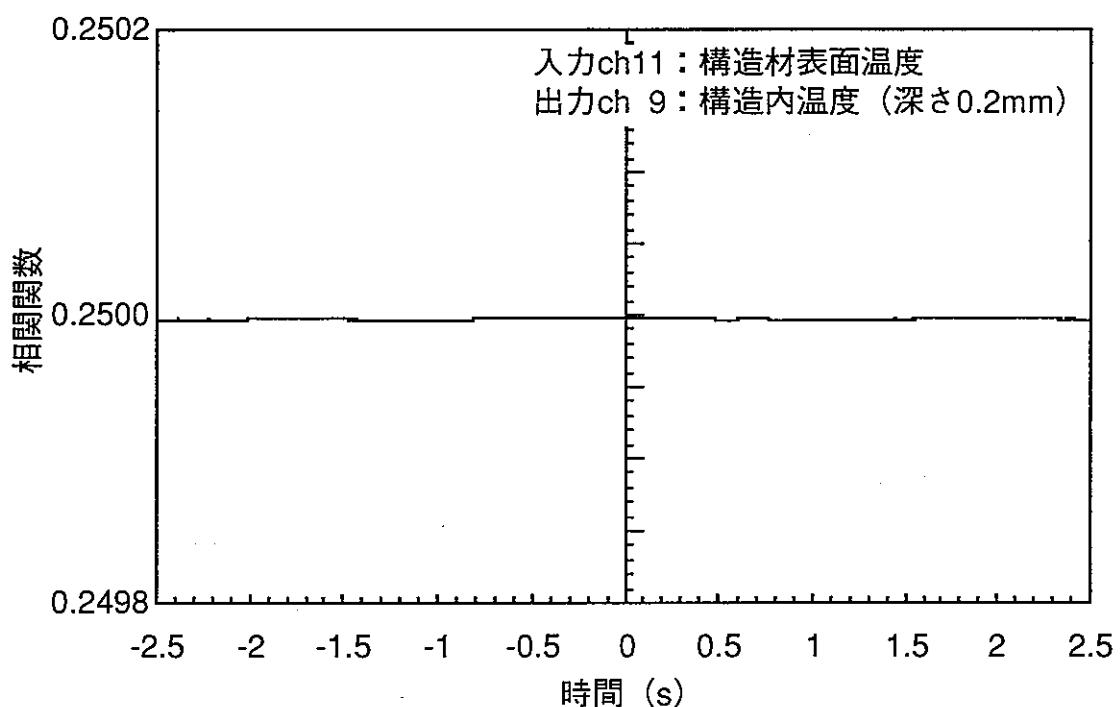


図2-75 相互相関関数 (Na流速1.5m/s, 入力ch11-出力ch9)

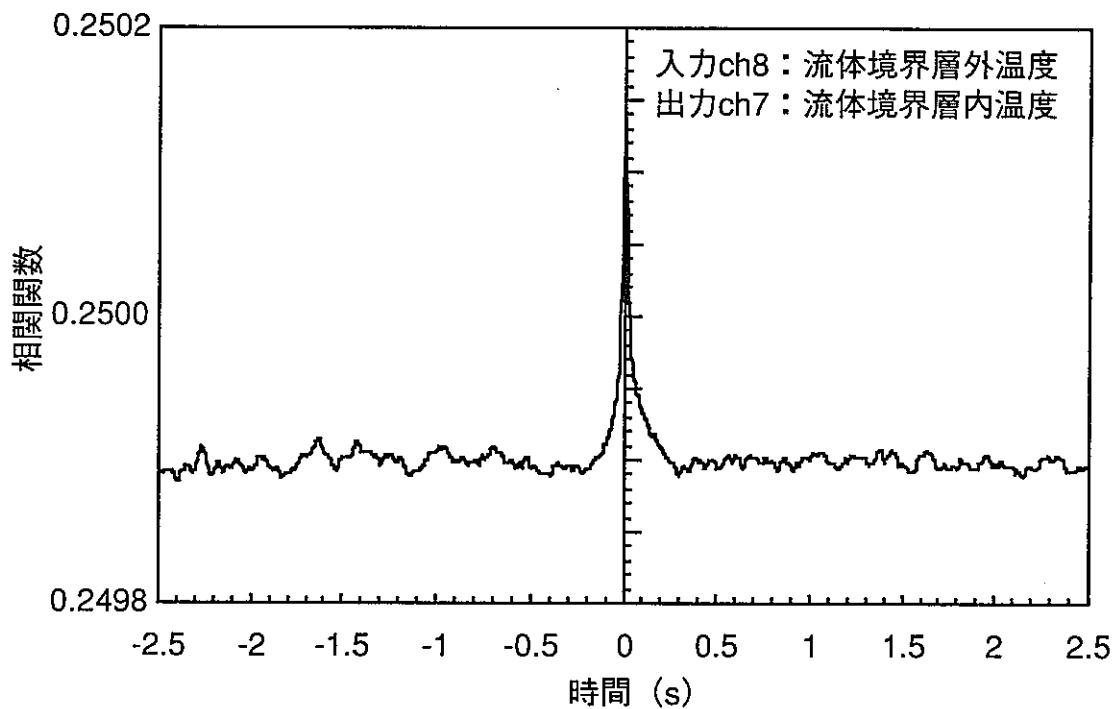


図2-76 相互相関関数 (Na流速2m/s, 入力ch8-出力ch7)

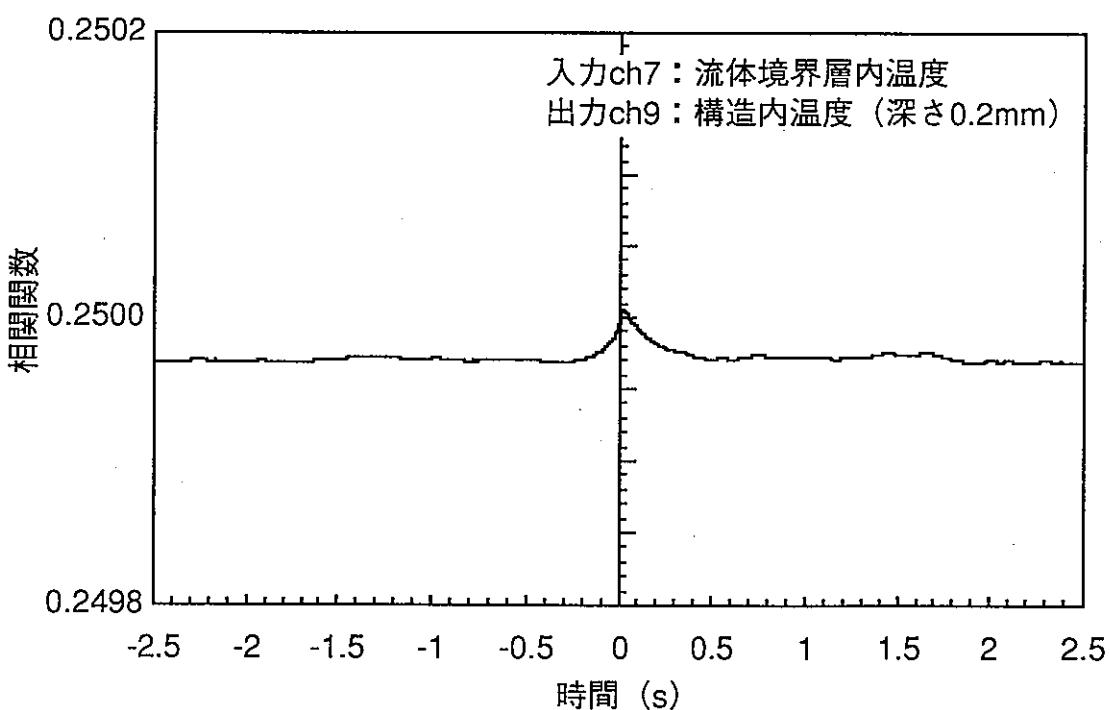


図2-77 相互相関関数 (Na流速2m/s, 入力ch7-出力ch9)

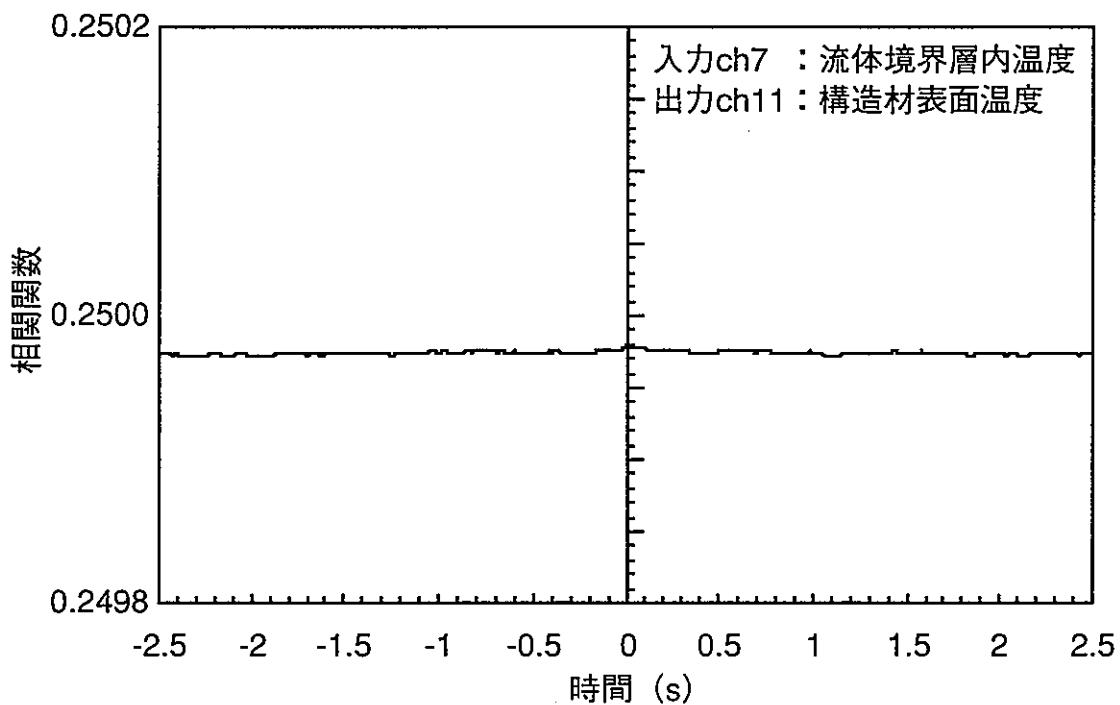


図2-78 相互相関関数 (Na流速2m/s, 入力ch7-出力ch11)

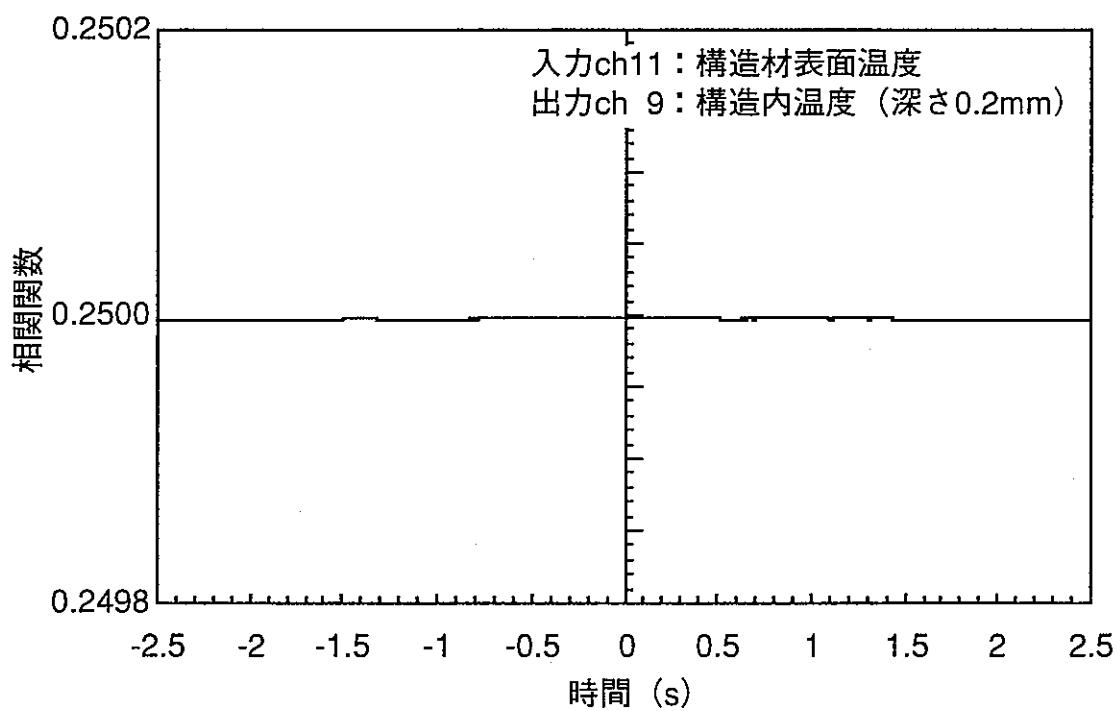


図2-79 相互相関関数 (Na流速2m/s, 入力ch11-出力ch9)

第3章 既往 流体 - 構造非定常熱的応答基礎ナトリウム試験の数値解析

3.1 サーマルストライピング解析評価システムの概要 4, 5, 6, 7)

本章の数値解析では、動力炉・核燃料開発事業団・大洗工学センター、基盤技術開発部・熱流体技術開発室で開発された解析評価システムを使用する。同解析評価システムの構成を、図 3.1 に示す。また、同システムを構成する解析コードの主要目を、表 3.1 に示す。

時間平均輸送モデルを使用する汎用多次元熱流動解析コード AQUA を特徴づける主要な機能は、各種偏微分輸送方程式内の対流項の離散化に、空間について 2 次の正確度を持つ QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) 法⁸⁾ を、また乱流モデルとして $k-\epsilon$ ⁹⁾ / ASM (Algebraic Stress Turbulence Model)¹⁰⁾ / RSM (Reynolds Stress Turbulence Model)¹¹⁾ の 3 種類をオプションとして採用した点、更には計算効率を積極的に向上させるため、時間刻み幅に対するファジィ適応制御器¹²⁾ を採用したことにある。

一方、直接シミュレーションコード DINUS-3 の主な特徴は、時間積分法に 2 次の正確度を持つ Leap-Frog 法¹³⁾ を、対流項の離散化に空間に関し 3 次の正確度を持つ風上差分法¹⁴⁾ を、また数値振動の発生を抑制するため、定性推論手法による学習機構を取り入れたファジィ適応制御器¹⁵⁾ を採用した点にある。これら特徴の内、3 次精度風上差分法の採用は、スペクトル法による直接シミュレーションやラージエディシミュレーションなどでは取り扱うことのできない任意固体壁を含む体系下での適用性の向上に寄与している。

直接法モンテカルロモデル¹⁶⁾を用いる THEMIS コード¹⁷⁾は、分子運動論でのボルツマン方程式を連続場に適用し、境界層厚さや温度差が時間的および空間的に変動する場における非定常熱伝達係数を数値的に評価するものである。THEMIS コードでは、仮想流体粒子の対流挙動をモンテカルロモデルによって確率的に評価するものの粒子間衝突を直接的に取り扱い、固体壁に衝突する単位時間単位面積当たりの流体粒子数から、流体から固体壁への熱輸送挙動を時々刻々評価する。

汎用熱的応答評価コード BEMSET¹⁸⁾は、熱弾性線形化式を基礎式とし、時間積分法に 2 次時間内挿法を、また形状近似関数に四角形 2 次要素を使用した境界要素法コードである。数値計算上の境界条件は、上記直接シミュレーションコード DINUS-3 により評価された固体壁表面温度の時系列データである。

3.2 時間平均場における温度ゆらぎ特性の解析

3.2.1 解析モデルおよび解析条件

解析モデルを図 3.2 に示す。また、解析条件を以下に列記する。

座 標 系	: x - y - z 3 次元直交座標
メ ッ シ ュ 分 割	: $108^i \times 3^j \times 80^k$ (0.5 mm 均等メッシュ)
時 間 積 分 法	: 修正 ICE 法 ¹⁹⁾
乱 流 モ ル	: ASM
対 流 項 差 分 法	: 運 動 量 式 . . . QUICK 法 エ ネ ル ギ ー 式 . . . QUICK-FRAM 法 ²⁰⁾ 乱 流 量 式 . . . 1 次風上差分法

固体壁条件	: 運動量 ··· すべり無し (No-Slip) 条件
	エネルギー ··· 断熱条件 (試験片: 1 次元熱伝導)
流入流速条件	: 流速比 $\beta (V_c / V_h) = 1.0$ ($V_c = V_h = 1.0 \text{ m/s}$; ケース 1 = 1.5 m/s; ケース 2 = 2.0 m/s; ケース 3)
流入温度条件	: 温度差 $\Delta T (T_h - T_c) = 40.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (ケース 1, 2, 3)

3. 2. 2 解析結果

(1) 流速分布

図3.3-図3.5に、各ケースについての流速ベクトルを示す。各ケースとも、ノズルから流出した高温ナトリウムは、周囲のナトリウムを巻き込みながら垂直に上昇し、試験片底面に衝突した後左右に分かれて出口面に向かう。また、両ノズルに挟まれた間隙部のナトリウムも同様に、連行領域に巻き込まれて垂直に上昇する。

図 3.6 - 図 3.8 に、各ケースについての自由噴流特性を比較する。図中 (a) 図の横軸は水平方向距離、縦軸は軸方向流速(境界条件)を用いた規格化流速、また、図中 (b) 図の横軸はノズル出口端での軸方向流速(境界条件)を用いた規格化流速、縦軸はノズル端からの軸方向距離である。各ケースともに軸方向流速は、ノズル下流側約 18 mmまでの区間で約 2 割が徐々に減衰し、その後試験片表面に至るまでに残りの約 8 割が急激に減衰する。純粋な自由噴流条件の場合、ノズル下流側に約 30 mm のポテンシャルコア領域 ($= 6b$; b : ノズル幅) が存在するが、今回の形状ではノズル下流側に試験片が存在する衝突噴流体系であること、および両ノズル噴流の相互作用が卓越することから、ポテンシャルコア長さが大幅に短縮されたものとなっている。

(2) 平均温度分布

図 3.9 - 図 3.11 に、各ケースについての平均温度分布を示す。図中の温度は、最大温度差 (40.0°C) を用いて下式により規格化を施している。

$$T_N(\%) = \frac{(T - T_c)}{40.0} \times 100 \quad (3.1)$$

各ケースとも、ノズルから流出した高低温ナトリウムは、連行挙動によって周囲のナトリウムを巻き込みながら上昇して試験片に衝突した後出口面に向かう挙動を示し、概ね等価な平均温度分布となっている。

(3) 温度ゆらぎ強度分布

図 3.12 - 図 3.14 に、各ケースについての温度ゆらぎ強度分布を示す。図中の温度ゆらぎ強度は、それが平均温度のまわりで統計的に一様にゆらいでいると仮定し、最大温度差 (40.0°C) を用いて下式により規格化をしている。

$$\overline{\theta'N} (\%) = \frac{\sqrt{\theta'^2}}{40.0} \times 100 \quad (3.2)$$

各ケースとも、両ノズルに挟まれた間隙部および試験片下面領域で温度ゆらぎ振幅が大きく評価されている。また、ノズル出口流速が大きくなるに従い、試験片下面領域に現れる温度ゆらぎ振幅も大きくなる。これは、出口流速が増加することにより乱流熱流束も増加し、これが温度ゆらぎ強度輸送方程式内の生成項(式(3.3)参照)にフィードバックされた結果である。

$$\overline{P_{\theta^2}} = 2 \rho \overline{u'_j \theta' \frac{\partial T}{\partial x_j}} \quad (3.3)$$

3.3 瞬時場における温度ゆらぎ特性の解析

3.3.1 解析モデルおよび解析条件

用いた解析モデルは、前節(時間平均場における温度ゆらぎ特性の解析)で使用したものと同じである(図3.2参照)。以下に、解析条件を列記する。

座 標 系	: x - y - z 3次元直交座標
メッシュ分割	: $108^i \times 3^j \times 80^k$ (0.5 mm 均等メッシュ)
時 間 積 分 法	: Leap - Frog 法
乱 流 モ テ ル	: 使用せず
対 流 項 差 分 法	: 運 動 量 式 . . . 3次風上差分法 エネルギー式 . . . 3次風上差分法
固 体 壁 条 件	: 運 動 量 . . . すべり無し(No-Slip)条件 エネルギー . . . 断熱条件(試験片:1次元熱伝導)
流 入 流 速 条 件	: 流速比 $\beta(V_c / V_h) = 1.0$ ($V_c = V_h = 1.0$ m/s; ケース 1) = 1.5 m/s; ケース 2 = 2.0 m/s; ケース 3)
流 入 温 度 条 件	: 温度差 $\Delta T(T_h - T_c) = 40.0$ °C

3.3.2 解析結果

図3.15 - 図3.17 それぞれに、各ケースについての瞬時流速ベクトルを示す。両ノズルから流出したナトリウムは、両噴流の相互干渉に起因して左右に振動しながら上昇し、試験片に衝突した後出口面に向かう。図3.18 - 図3.20は、各ケースでの瞬時ナトリウム温度分布を示したものである。各図中の温度は、式(3.1)を用いて規格化を施したものである。各ケースともに、左右に振動して上昇する流速ベクトルに起因し、高温ナトリウムも同様に左右に振動する様子が確認できる。

図3.21 - 図3.23に、体系内19点におけるナトリウム温度の時系列を各ケースについて示す。各図中の縦軸は、最大温度差により規格化している。体系内19点の空間位置は次の通りである。

- (i) 両ノズル間中心位置 (I=54) 垂直方向 5点
- (ii) 試験片表面から 1.25 mm 位置 (K=78) 水平方向 7点
- (iii) 試験片表面から 0.25 mm 位置 (K=80) 水平方向 7点

まず、両ノズル間中心位置での垂直方向 5 点の比較では、各ケースとともに、ノズルから下流側に向かうに従い、噴流相互作用に起因して発生するナトリウム温度の正弦波振動挙動が大きく減衰する。更に、試験片表面から 0.25 mm の距離に相当する位置 ($I=52, J=2, K=80$) での挙動は、この上流側位置で見られる比較的高周波で不規則振動するナトリウム温度ゆらぎ挙動が消滅している。これは、試験片表面に形成される境界層（層流域）を不規則温度ゆらぎが通過する際、境界層内ナトリウムが高周波で振動する挙動に追随できないことを示唆している。これに関する詳細は、次章で述べる。

試験片表面から 1.25 mm 位置および 0.25 mm 位置における水平方向各 7 点 (2 mm 間隔) の比較より、各位置での全体的なナトリウム温度挙動は概ね共通であり、この水平方向範囲の挙動が左右に不規則振動する単一の流体挙動により支配されていることが分かる。また、水平方向位置の違いにより、温度ピークが現れる時間に差異が生じていることが分かる。

3.4 試験片内非定常熱伝導特性の解析

3.4.1 解析モデルおよび解析条件

用いた解析モデルを図 3.24 に示す。また、解析条件を以下に列記する。

解析 モ デ ル	: $50 \text{ mm}_x \times 15 \text{ mm}_y$ 2 次元平面ひずみ状態
	: 260 境界要素、203 内部要素 (0.5 mm 均等要素配置)
弾 性 係 数	: 197 GPa
ポ ア ソン 比	: 0.37
線 热 膨 張 係 数	: $17.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
温 度 伝 导 度	: $22 \text{ mm}^2 / \text{s}$

3.4.2 解析結果

図 3.25 - 図 3.27 に、各ケースについての試験片内 5 点における材料温度の時間推移を示す。各図中の縦軸は、流体最大温度差により規格化している。試験片内 5 点の空間位置は、次の通りである。

- (i) 試験片表面より 0.5 mm 位置 (両ノズル間中心位置)
- (ii) 試験片表面より 1.0 mm 位置 (両ノズル間中心位置)
- (iii) 試験片表面より 2.0 mm 位置 (両ノズル間中心位置)
- (iv) 試験片表面より 5.0 mm 位置 (両ノズル間中心位置)
- (v) 試験片表面より 10.0 mm 位置 (両ノズル間中心位置)

各ケース間で共通な点は、試験片表面からその内部に向かうにしたがって、材料温度のゆらぎ振幅が大きく減衰し、試験片表面より 5.0 mm 位置では概ね一定の温度となる。このように、流体から伝播した不規則温度ゆらぎの影響は、試験片のごく表層のみに限られ、サーマルストライピングとしての熱的特性の本質を明瞭に示している。

表3.1 サーマルストライピング解析評価システムの主要目

Items	AQUA	DINUS-3	THEMIS	BEMSET
1. Basic Equation	Time-Averaged N-S Eq.	Instantaneous N-S Eq.	Boltzmann Eq.	Thermoelastic Linealized Eq.
2. Mathematical Models				
Descretization	FDM	FDM		BEM
Solution Algorithm	Modified ICE	Leap-Frog	DSMC	
Approx. Method for Convection Terms	2nd Order QUICK	3rd Order Upwind		
Boundary Elements				Rectangular Element
Matrix Solver	ICCG	ICCG		Direct
Coordinate System	x-y-z / r-θ-z	x-y-z / r-θ-z	x-y-z / r-θ-z	x-y-z / r-θ-z
3. Physical Models				
Turbulence Model	ASM / RSM	None		Monoatomic Sphere
Molecular Model				Bird's Model
Collision Model				
4. Others				
Numerical Stabilizer	Fuzzy Controller	Fuzzy Controller		

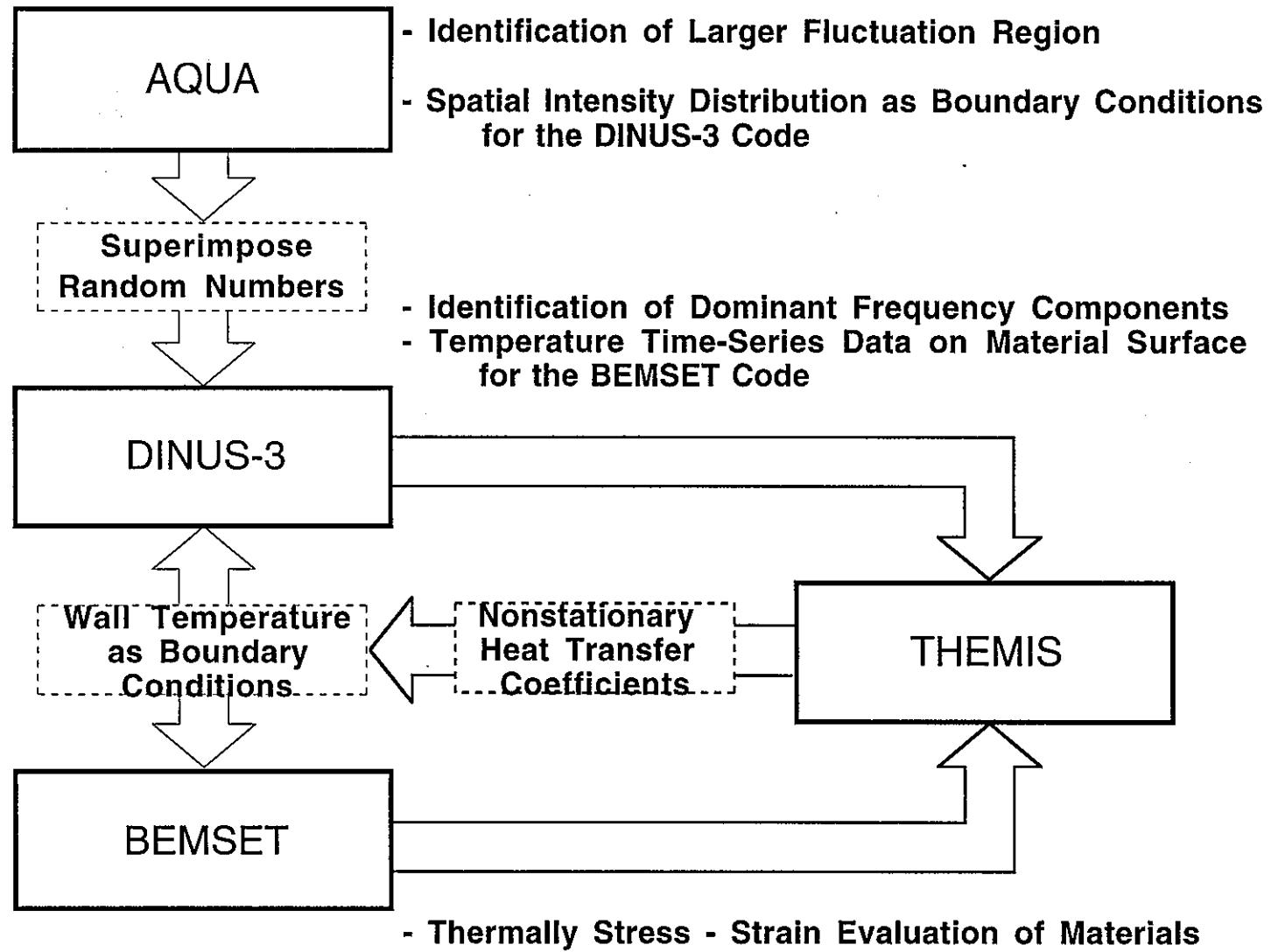


図3.1 サーマルストライピング解析評価システムの構成

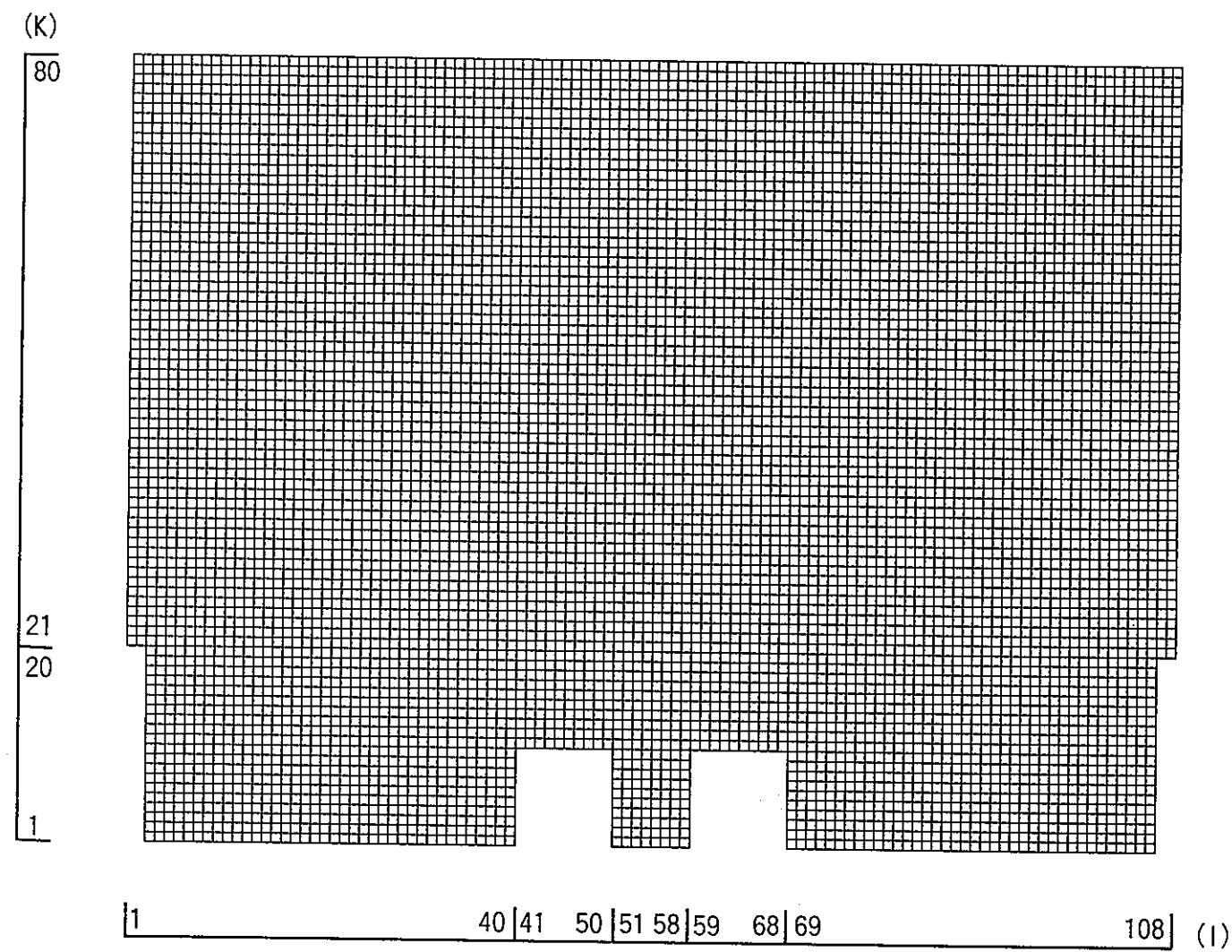


図3.2 溫度ゆらぎ解析モデル(AQUAコードおよびDINUS-3コード)

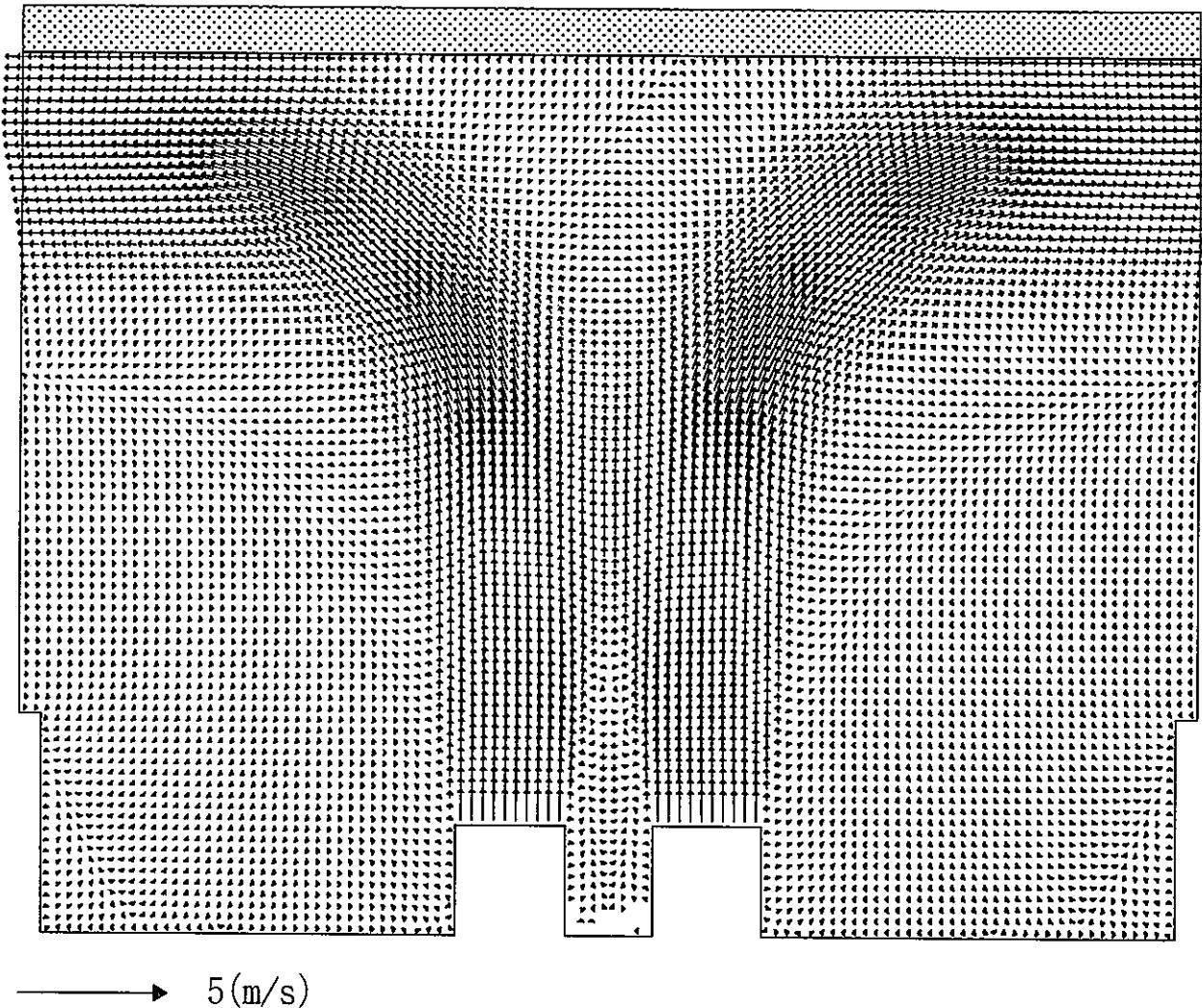


図3.3 AQUAコードによる時間平均流速ベクトル（ケース1）

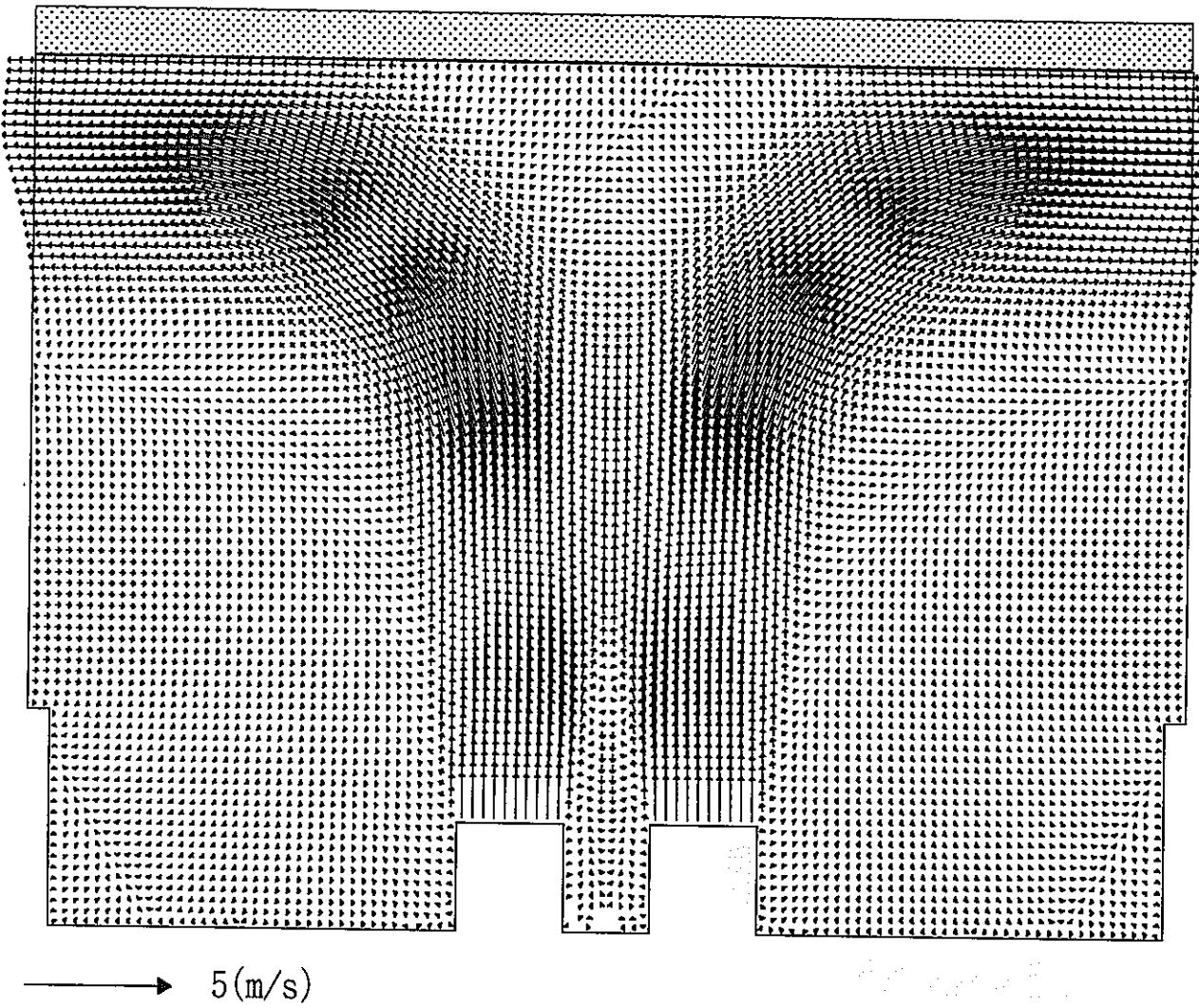


図3.4 AQUAコードによる時間平均流速ベクトル（ケース2）

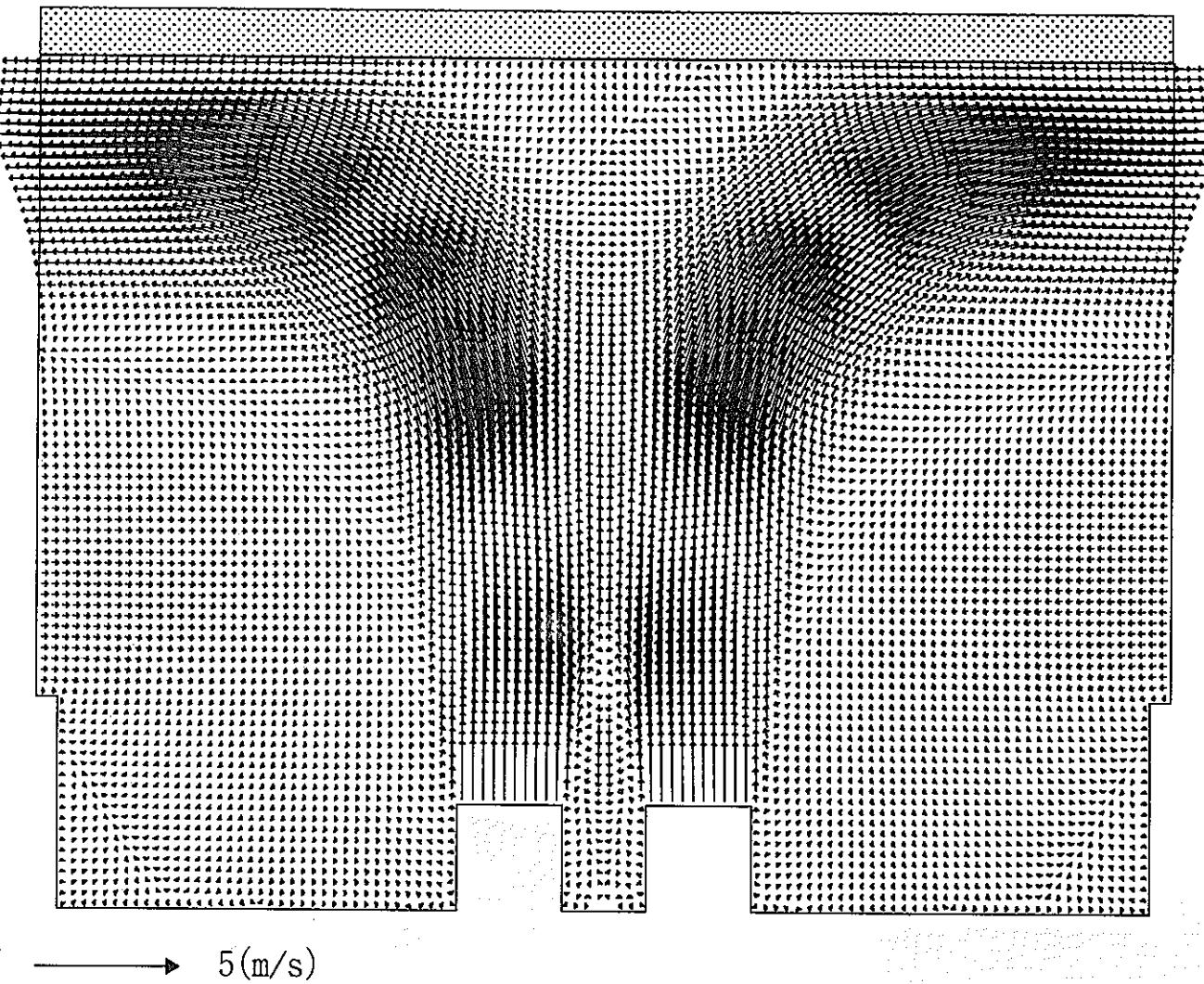
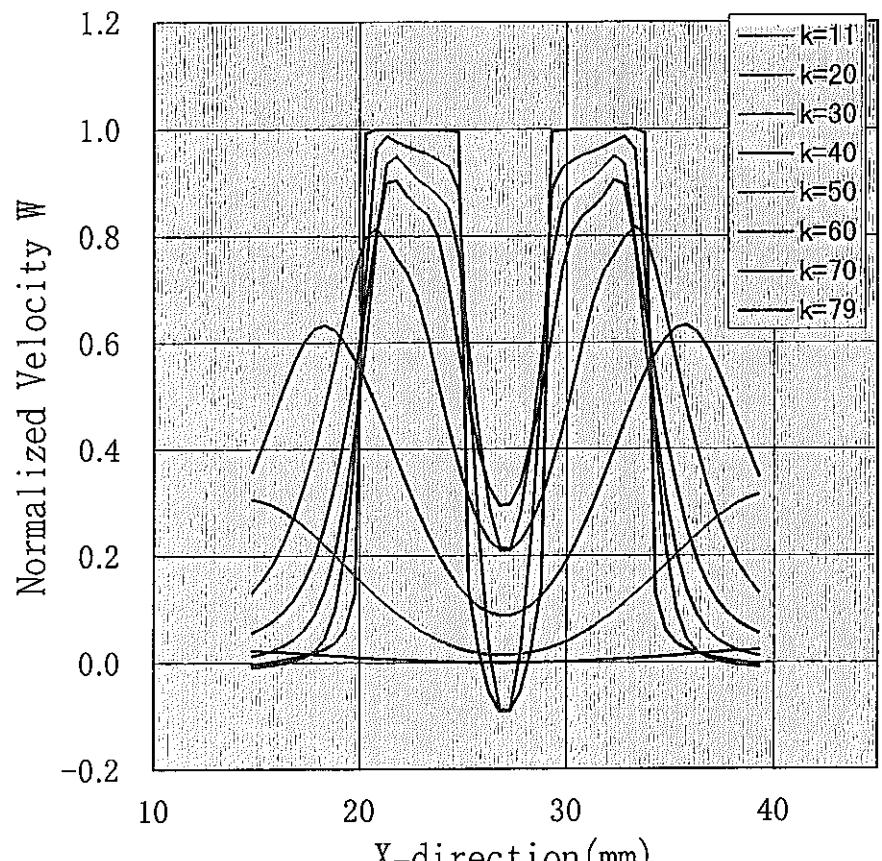
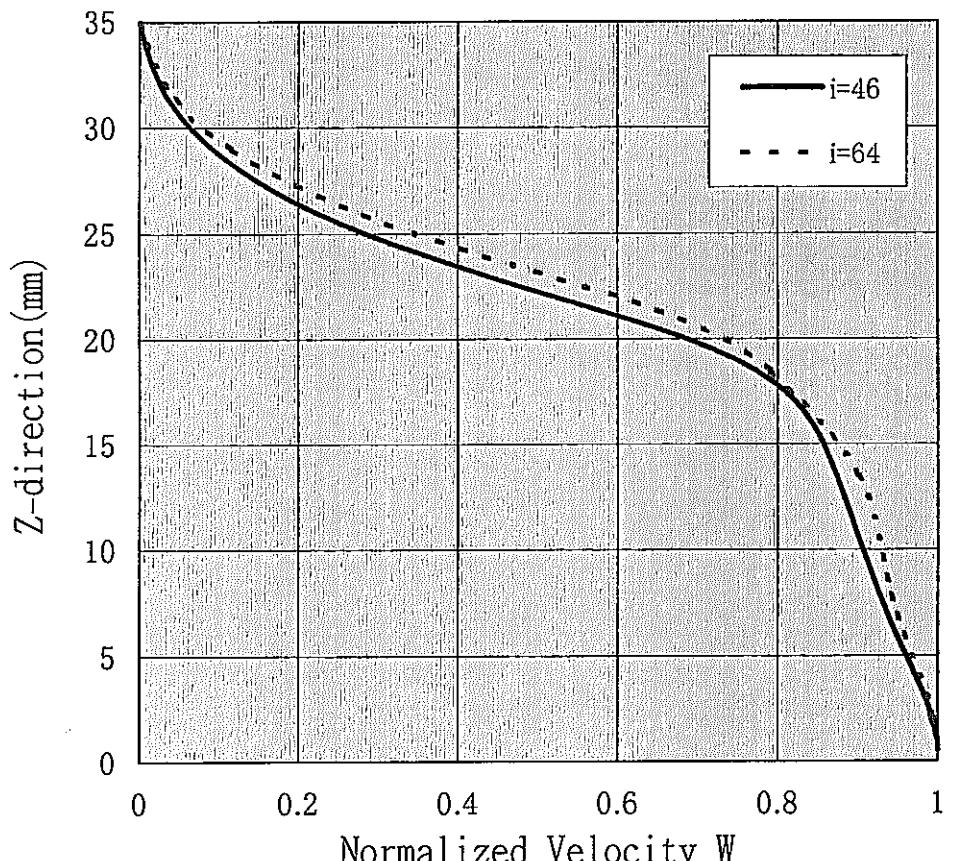


図3.5 AQUAコードによる時間平均流速ベクトル（ケース3）

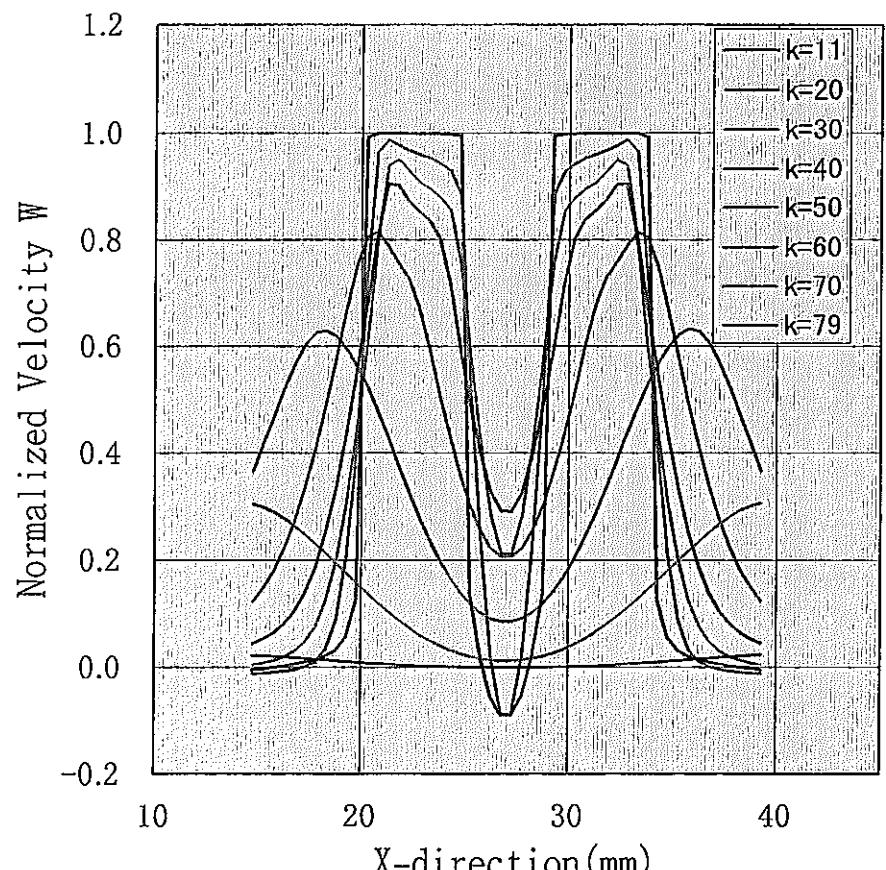


(a) 水平方向分布

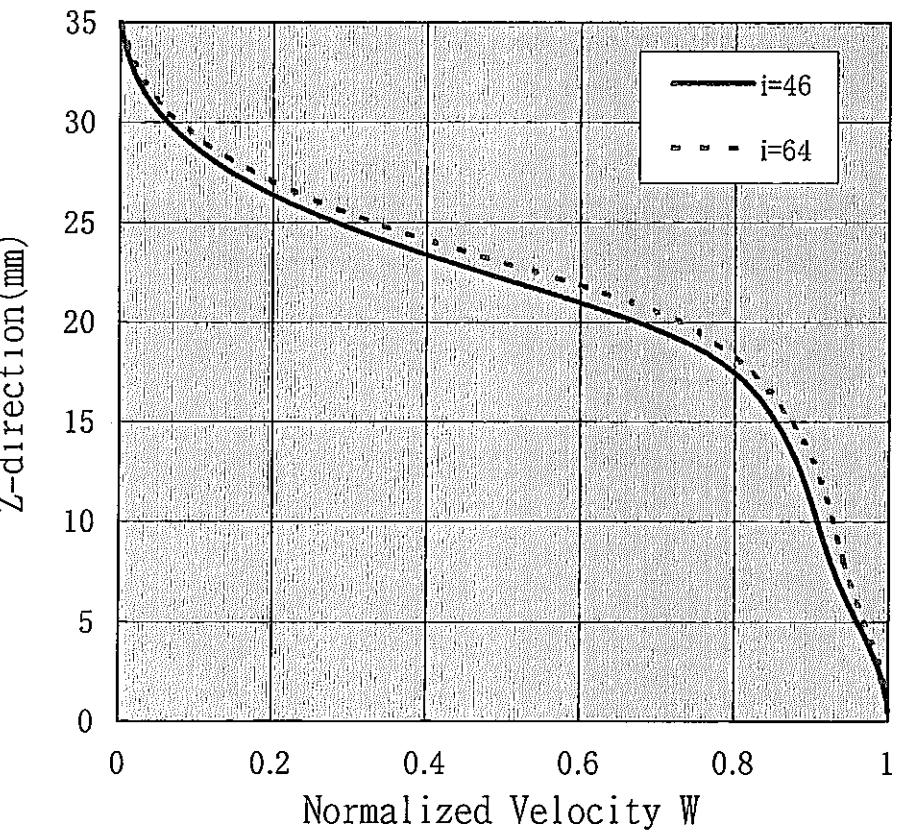


(b) 垂直方向分布

図 3.6 自由噴流特性（ケース 1）

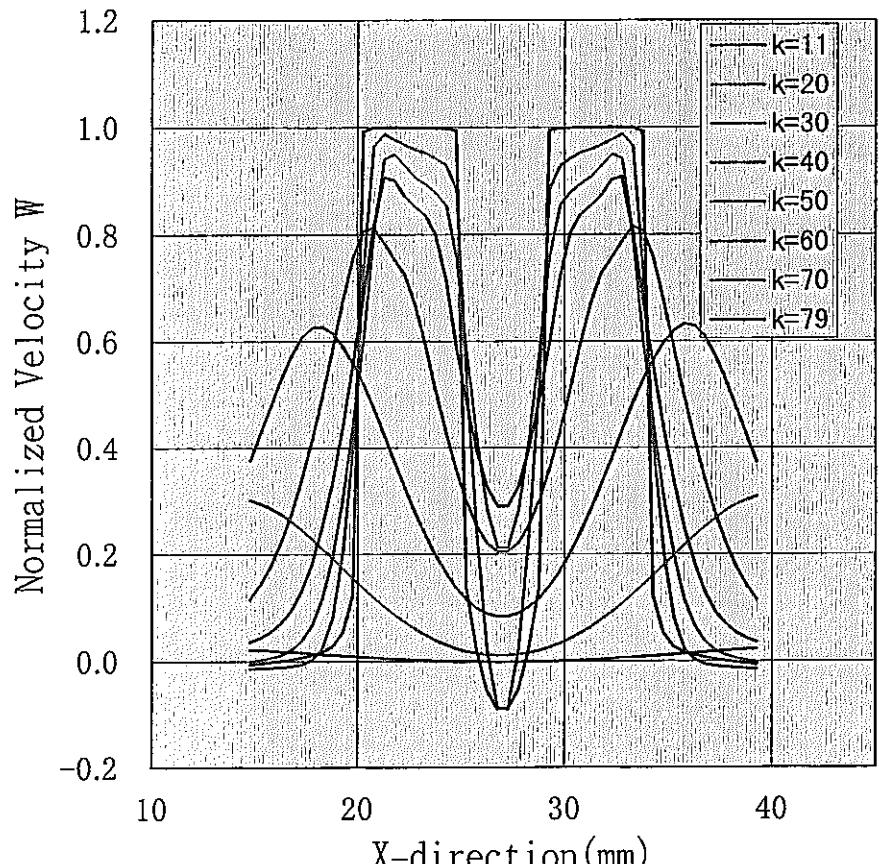


(a) 水平方向分布

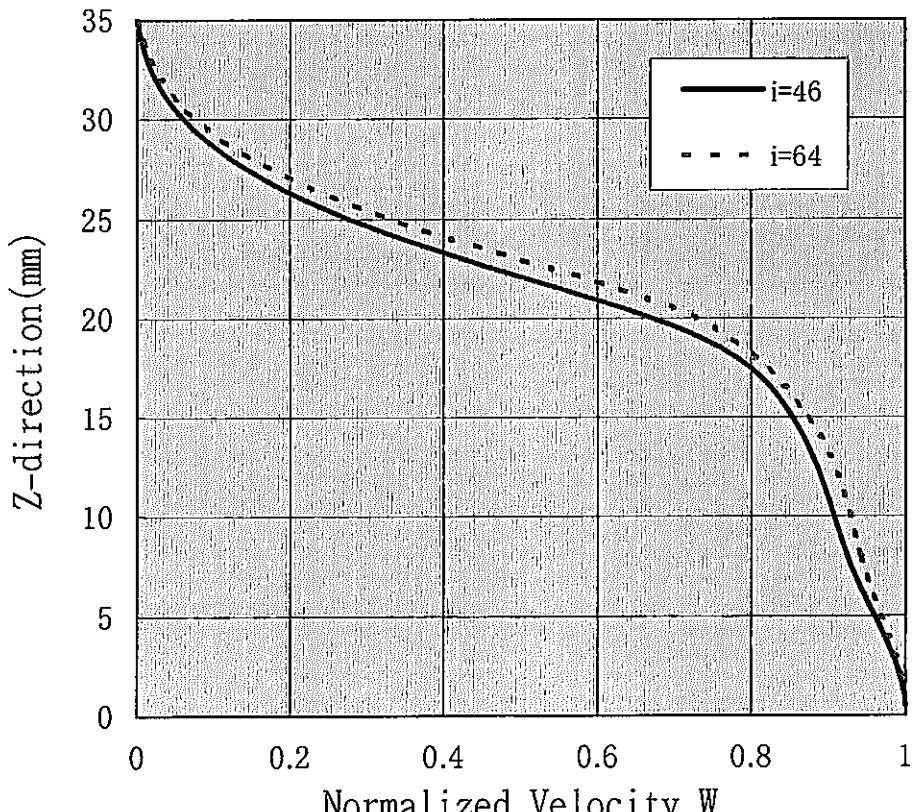


(b) 垂直方向分布

図 3.7 自由噴流特性（ケース 2）



(a) 水平方向分布



(b) 垂直方向分布

図 3.8 自由噴流特性（ケース 3）

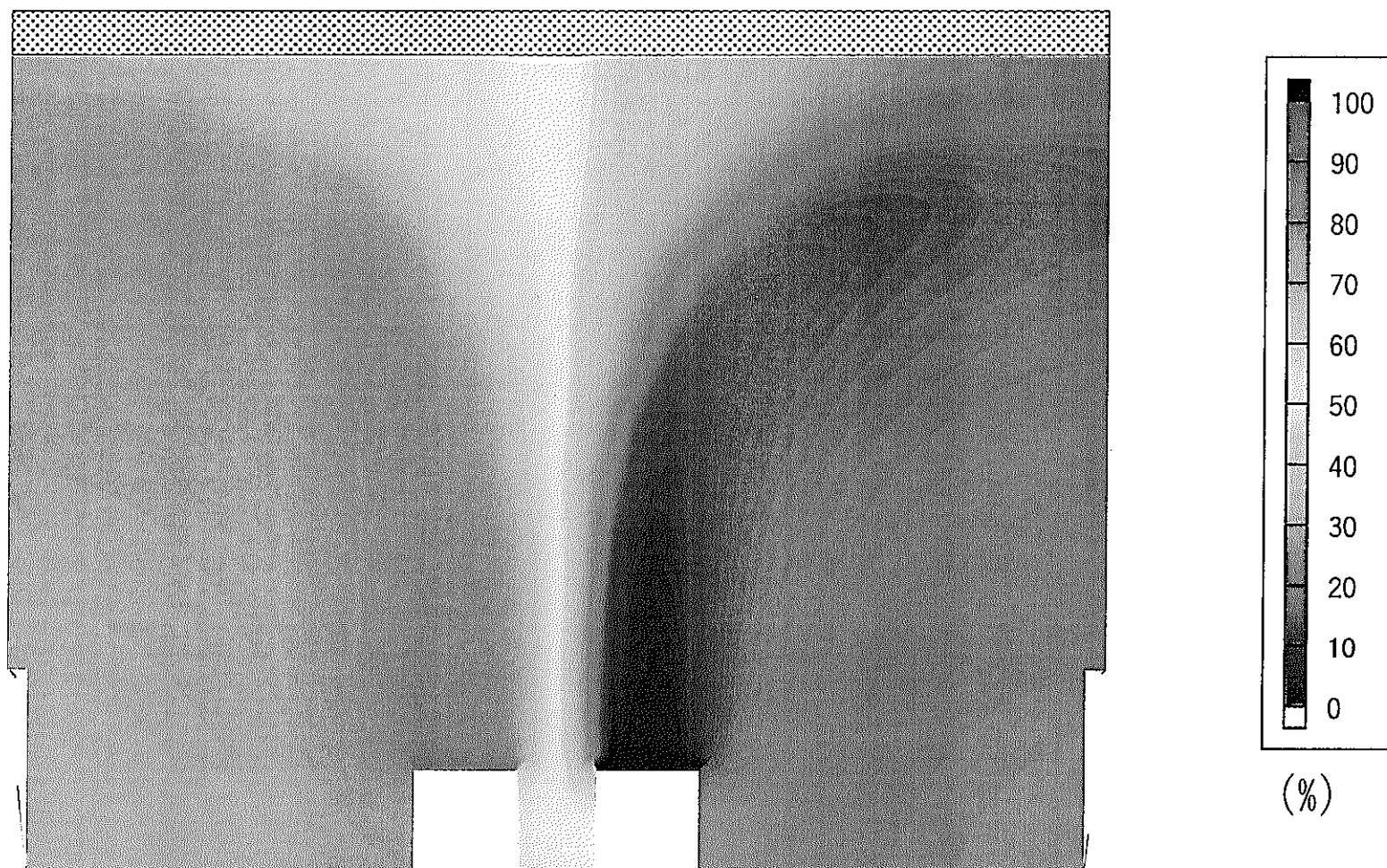


図3.9 AQUAコードによる時間平均ナトリウム温度分布（ケース1）

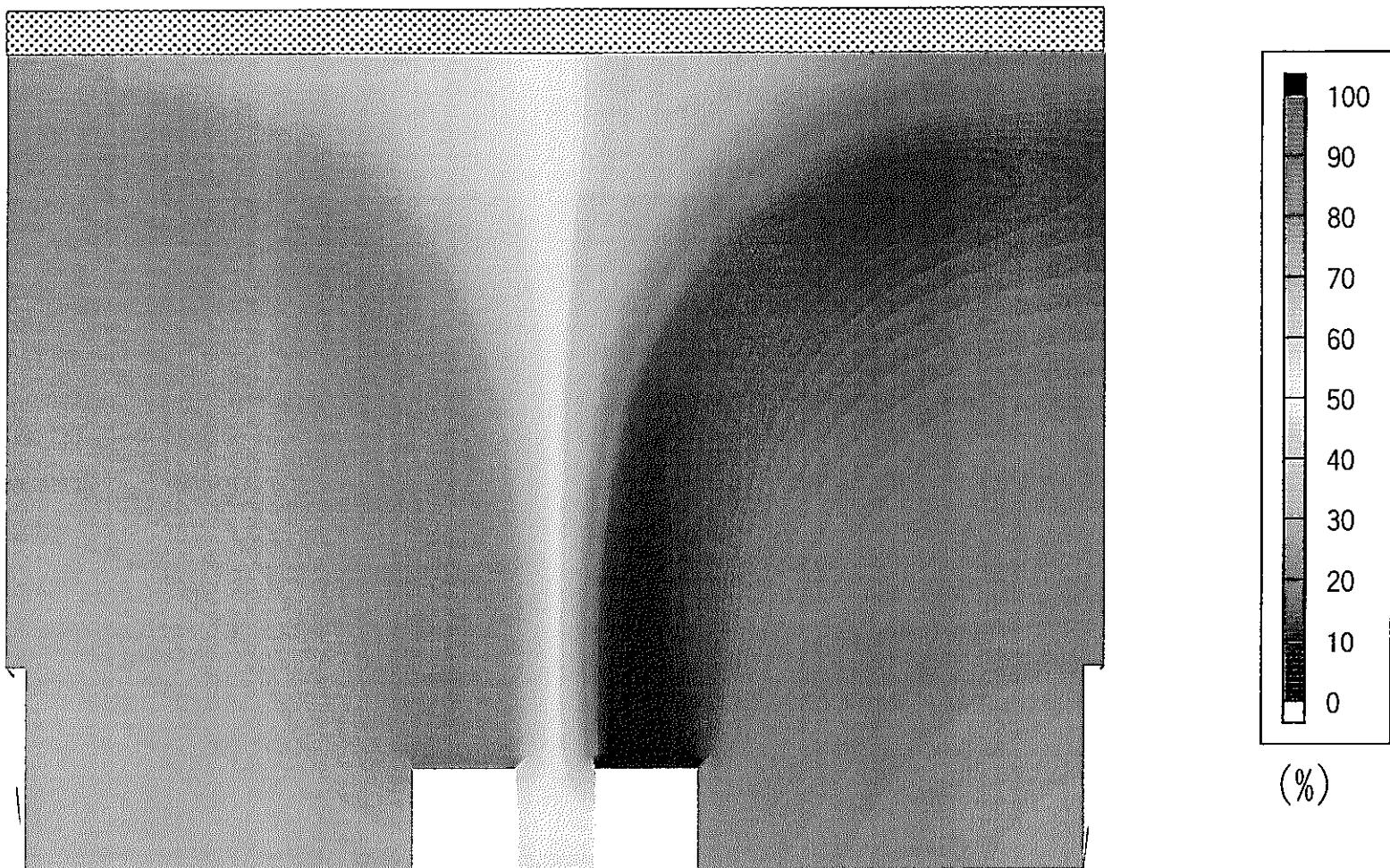


図3.10 AQUAコードによる時間平均ナトリウム温度分布（ケース2）

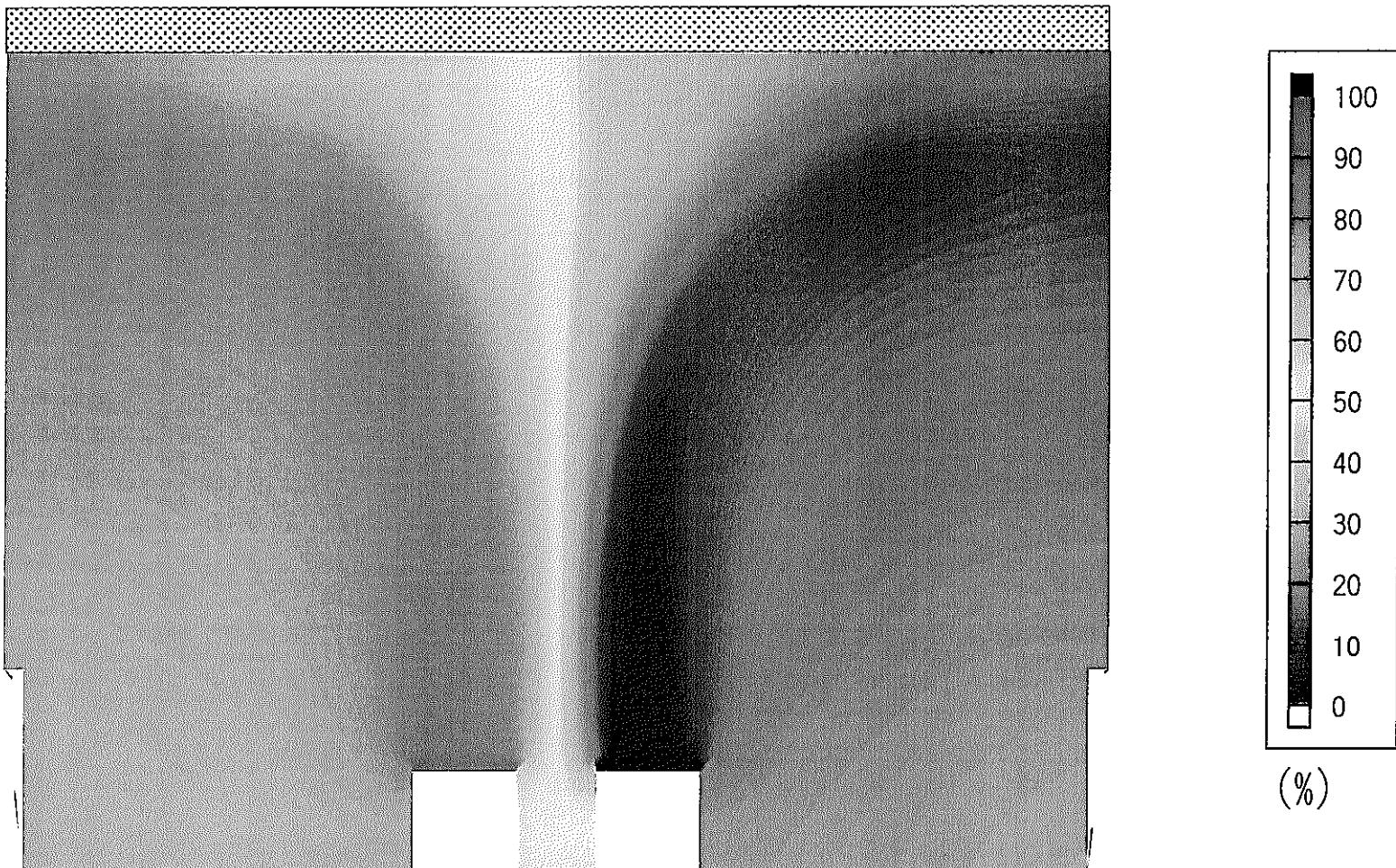


図3.11 AQUAコードによる時間平均ナトリウム温度分布（ケース3）

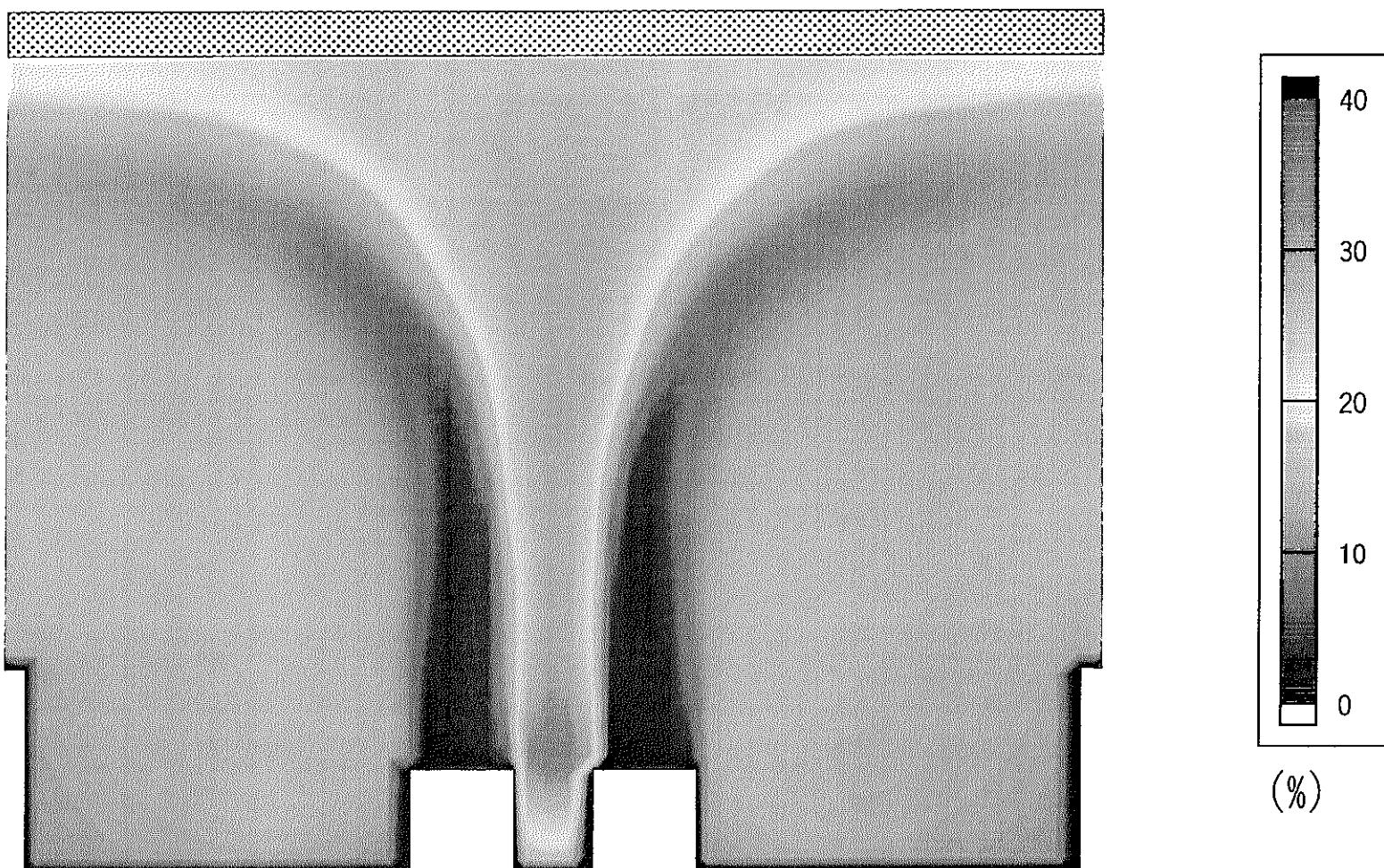


図3.12 AQUAコードによる時間平均ナトリウム温度ゆらぎ分布（ケース1）

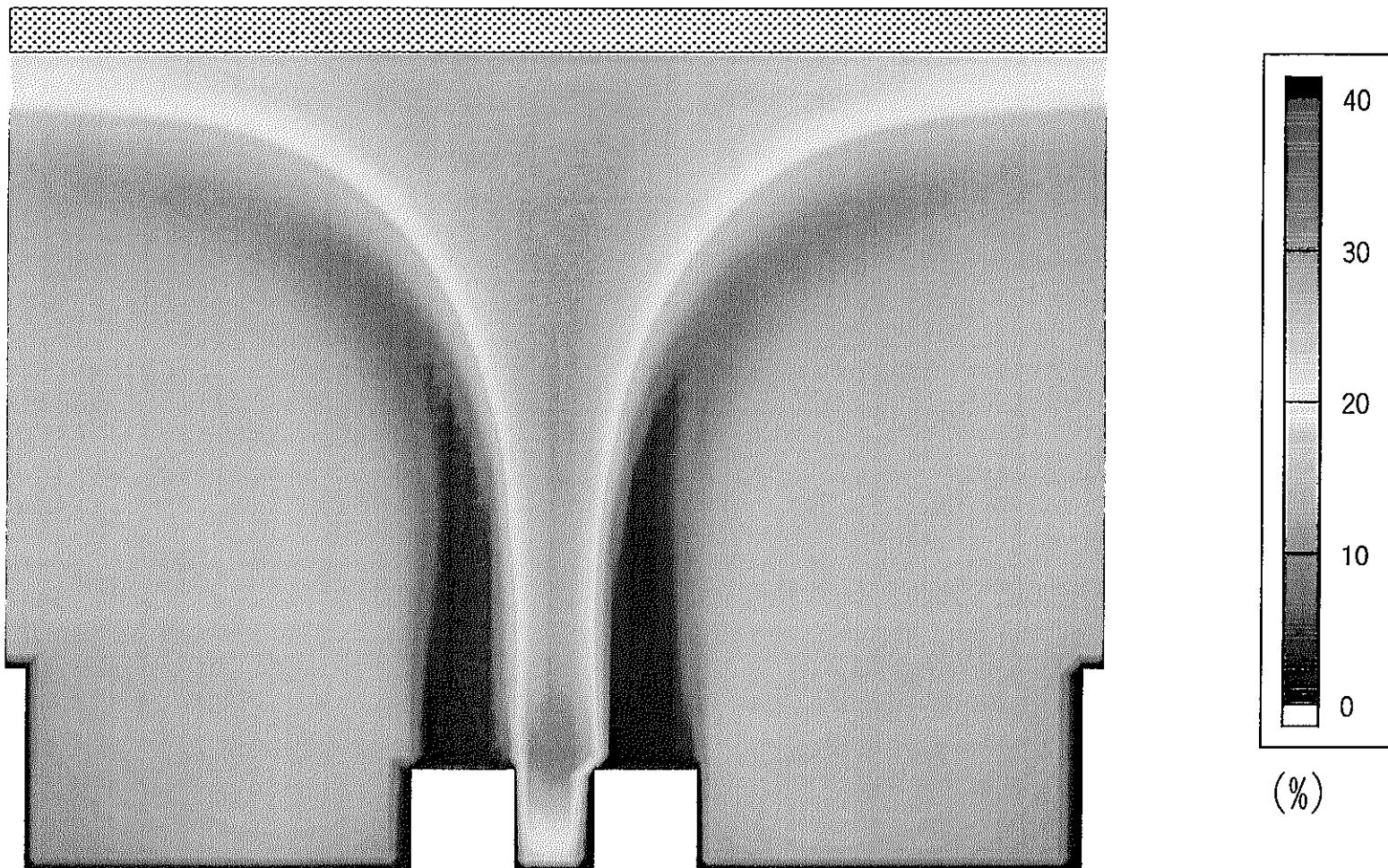


図3.13 AQUAコードによる時間平均ナトリウム温度ゆらぎ分布（ケース2）

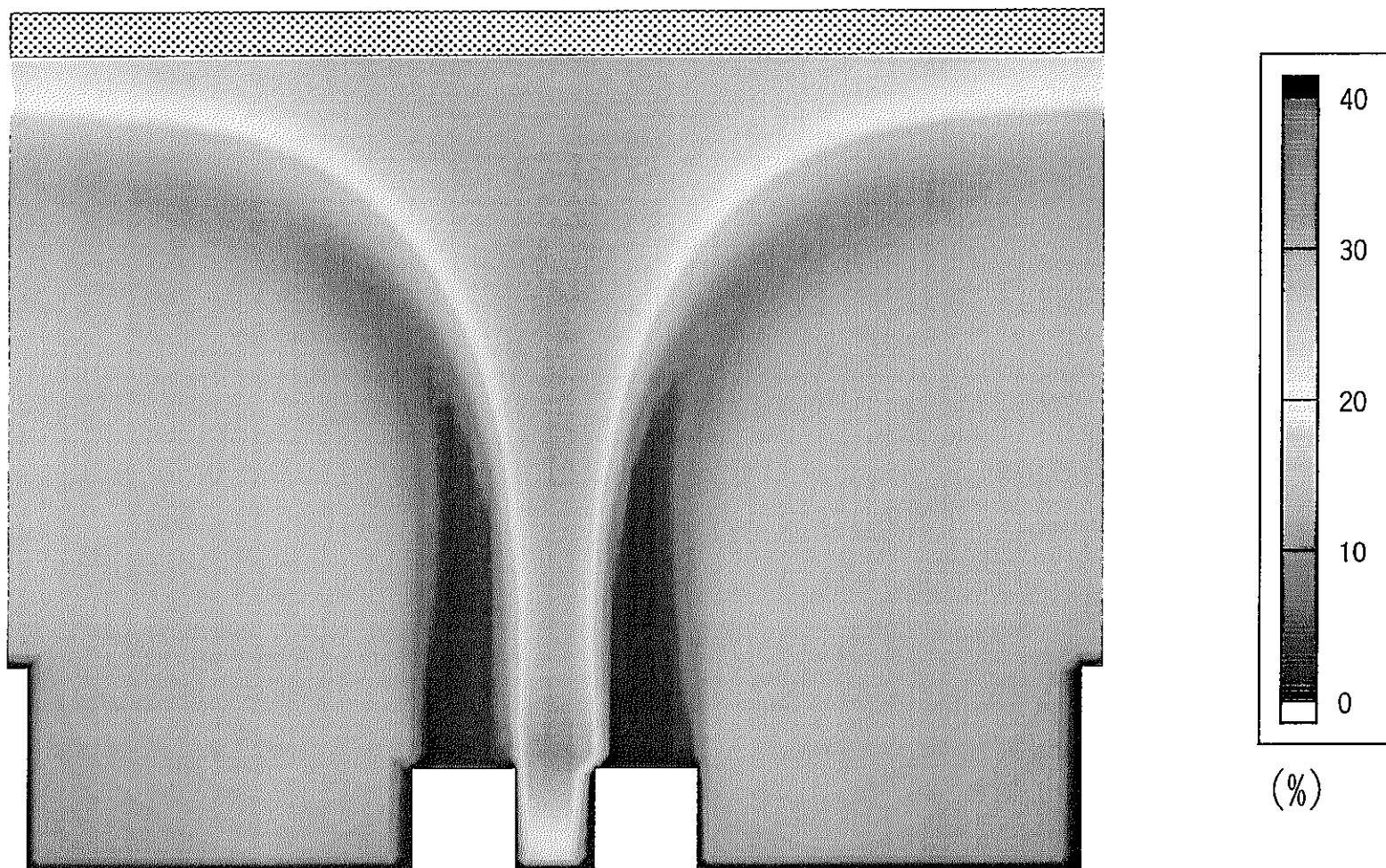


図3.14 AQUAコードによる時間平均ナトリウム温度ゆらぎ分布（ケース3）

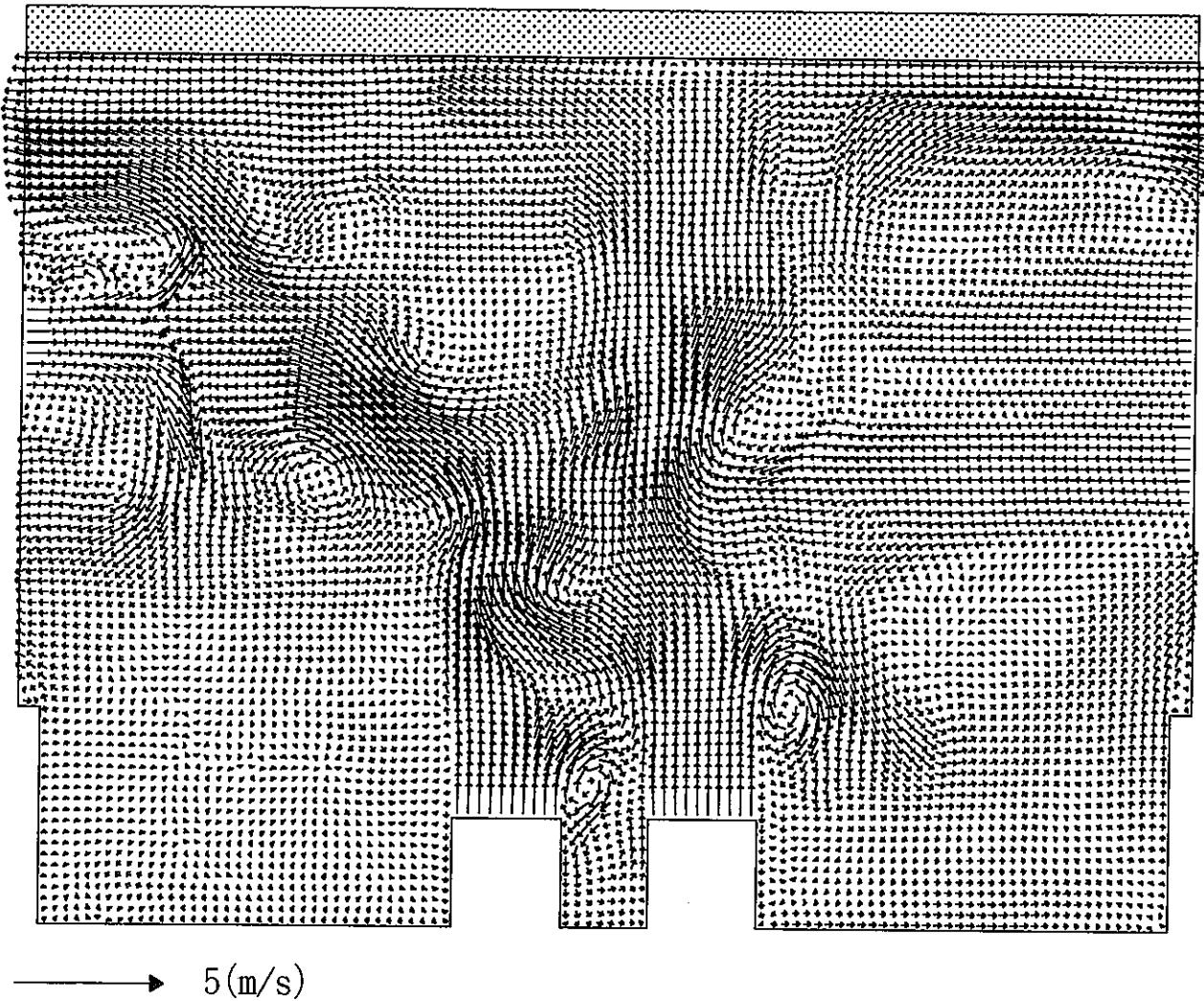


図3.15 DINUS-3コードによる瞬時流速ベクトル（ケース1）

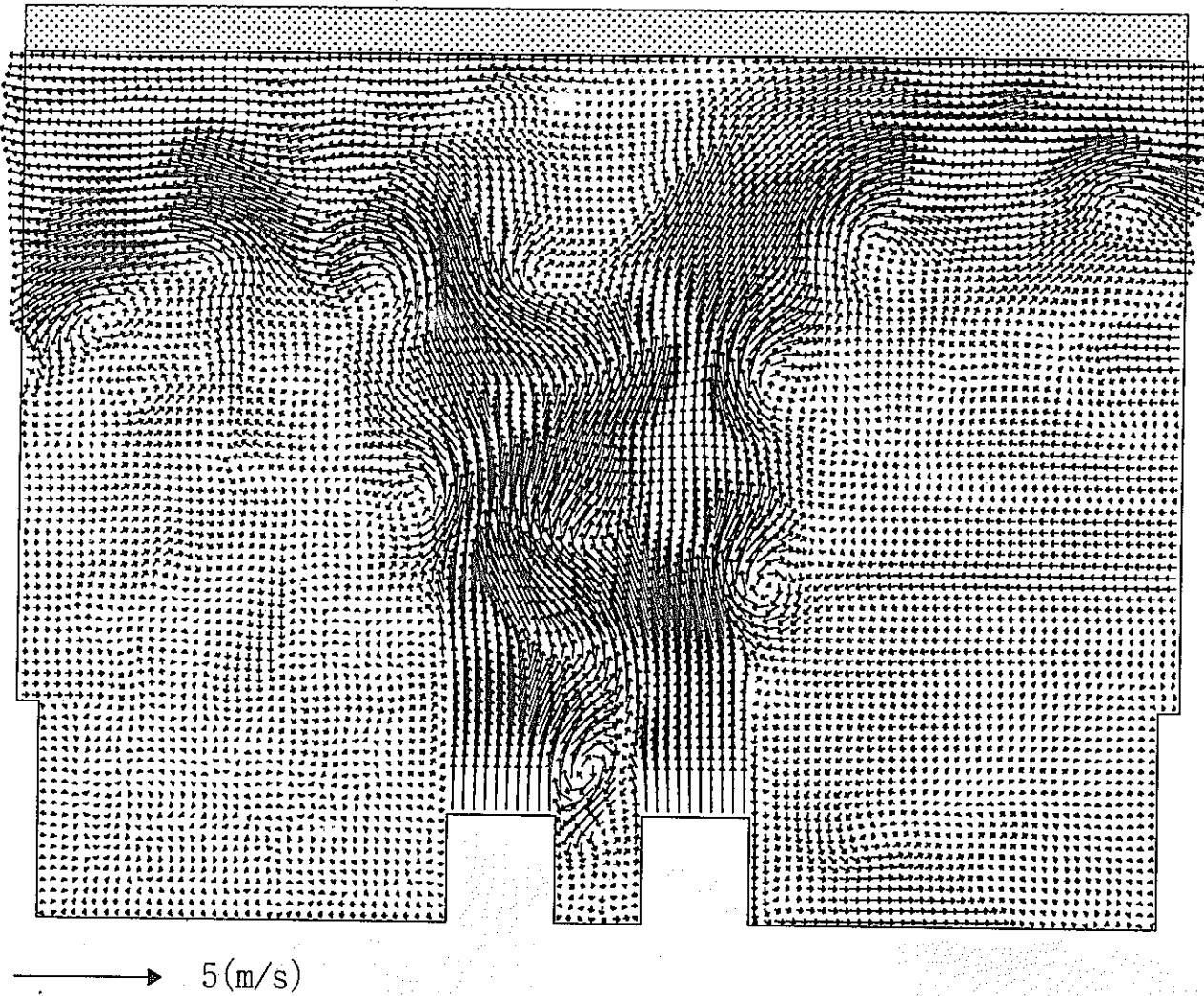


図3.16 DINUS-3コードによる瞬時流速ベクトル（ケース2）

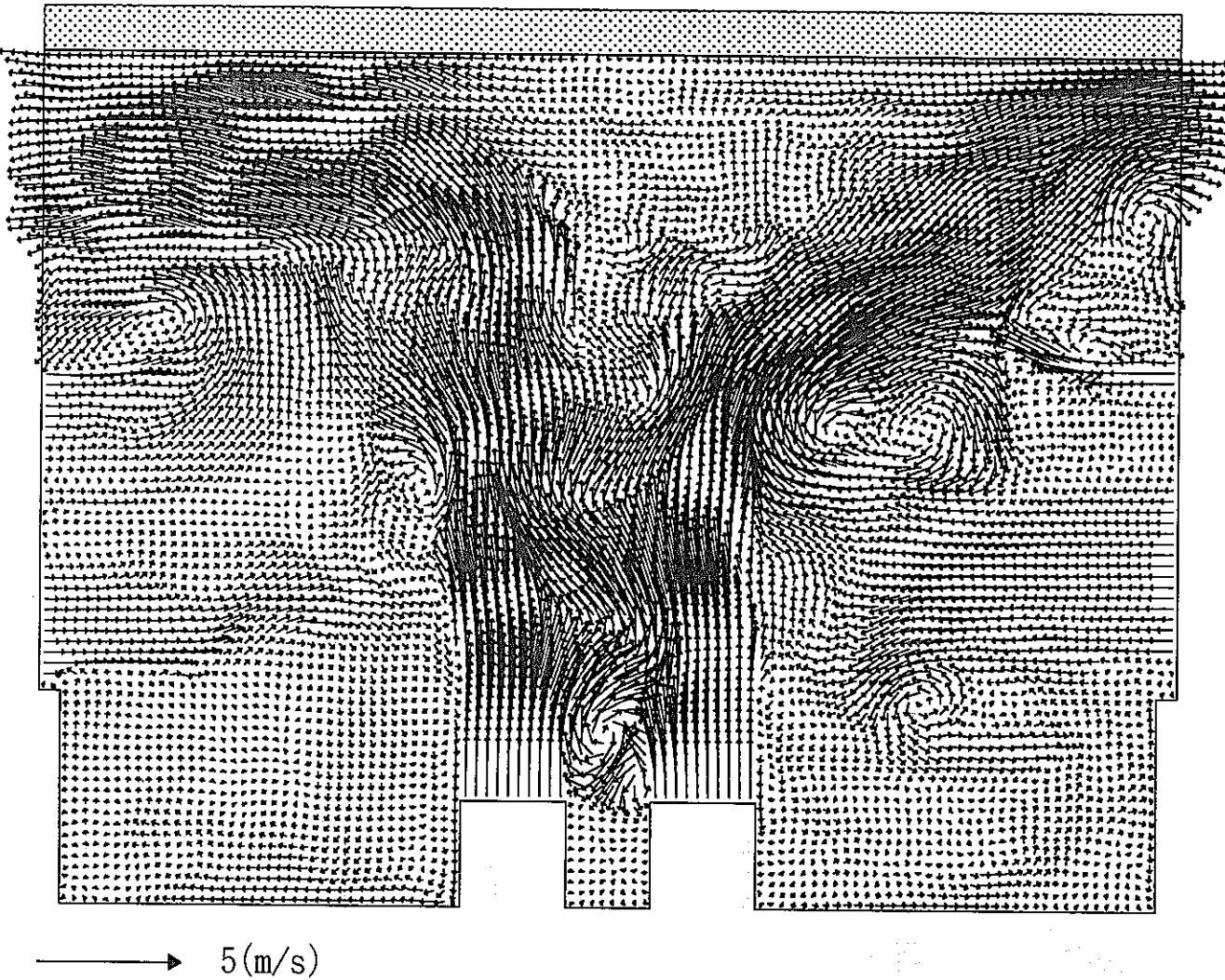


図3.17 DINUS-3コードによる瞬時流速ベクトル（ケース3）

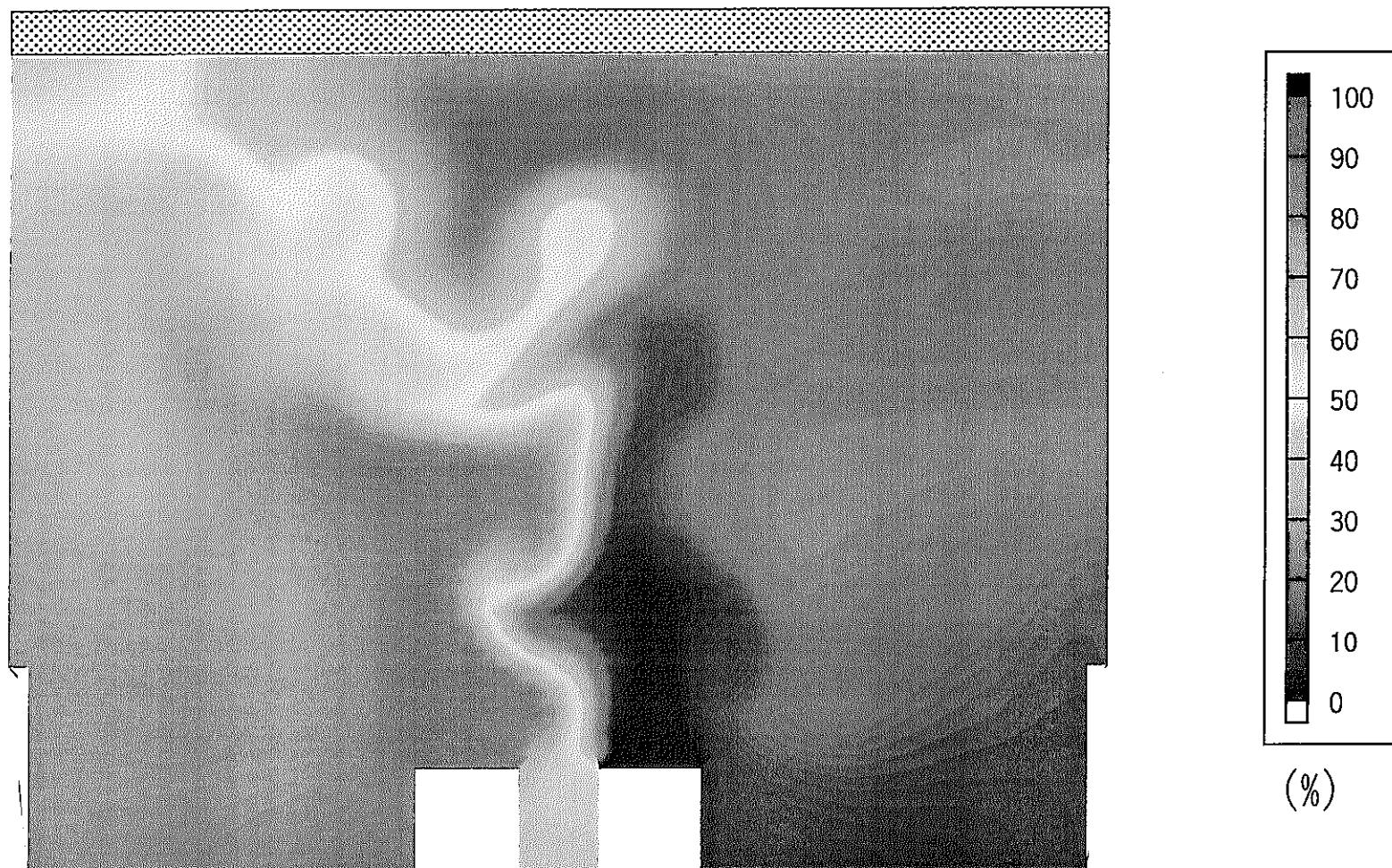


図3.18 DINUS-3コードによる瞬時ナトリウム温度分布（ケース1）



図3.19 DINUS-3コードによる瞬時ナトリウム温度分布（ケース2）

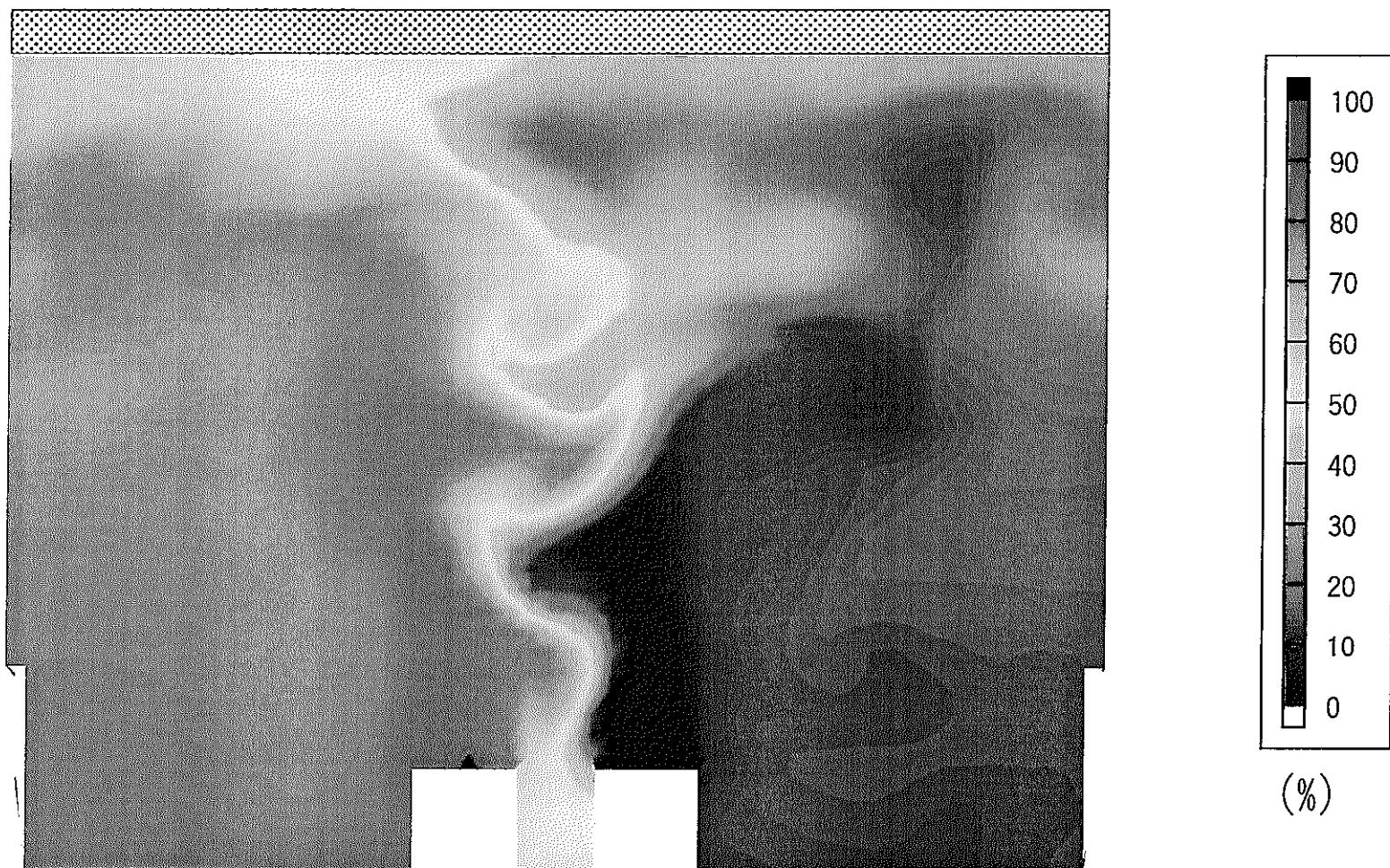


図3.20 DINUS-3コードによる瞬時ナトリウム温度分布（ケース3）

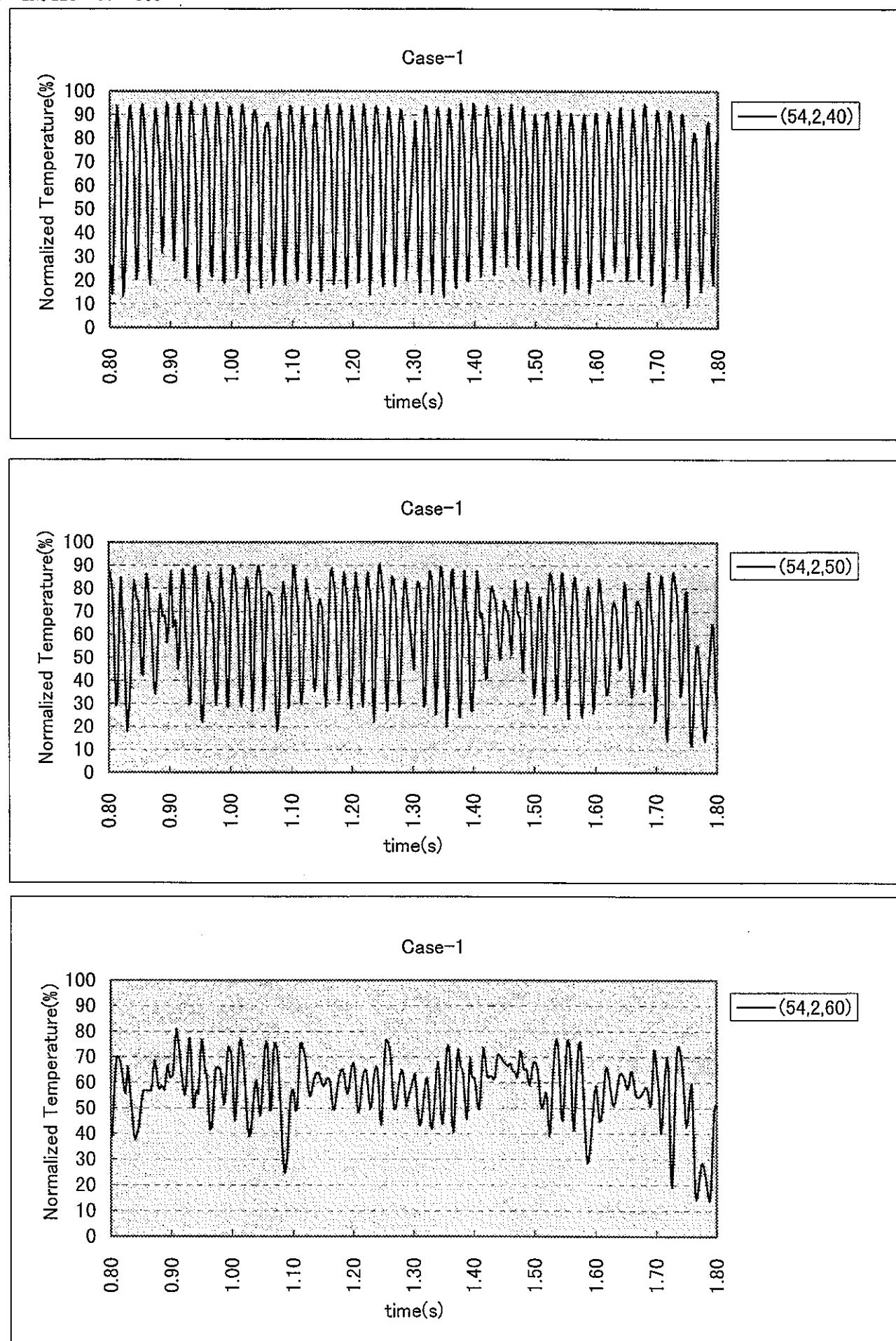


図 3. 21 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時系列（ケース 1） (1/3)

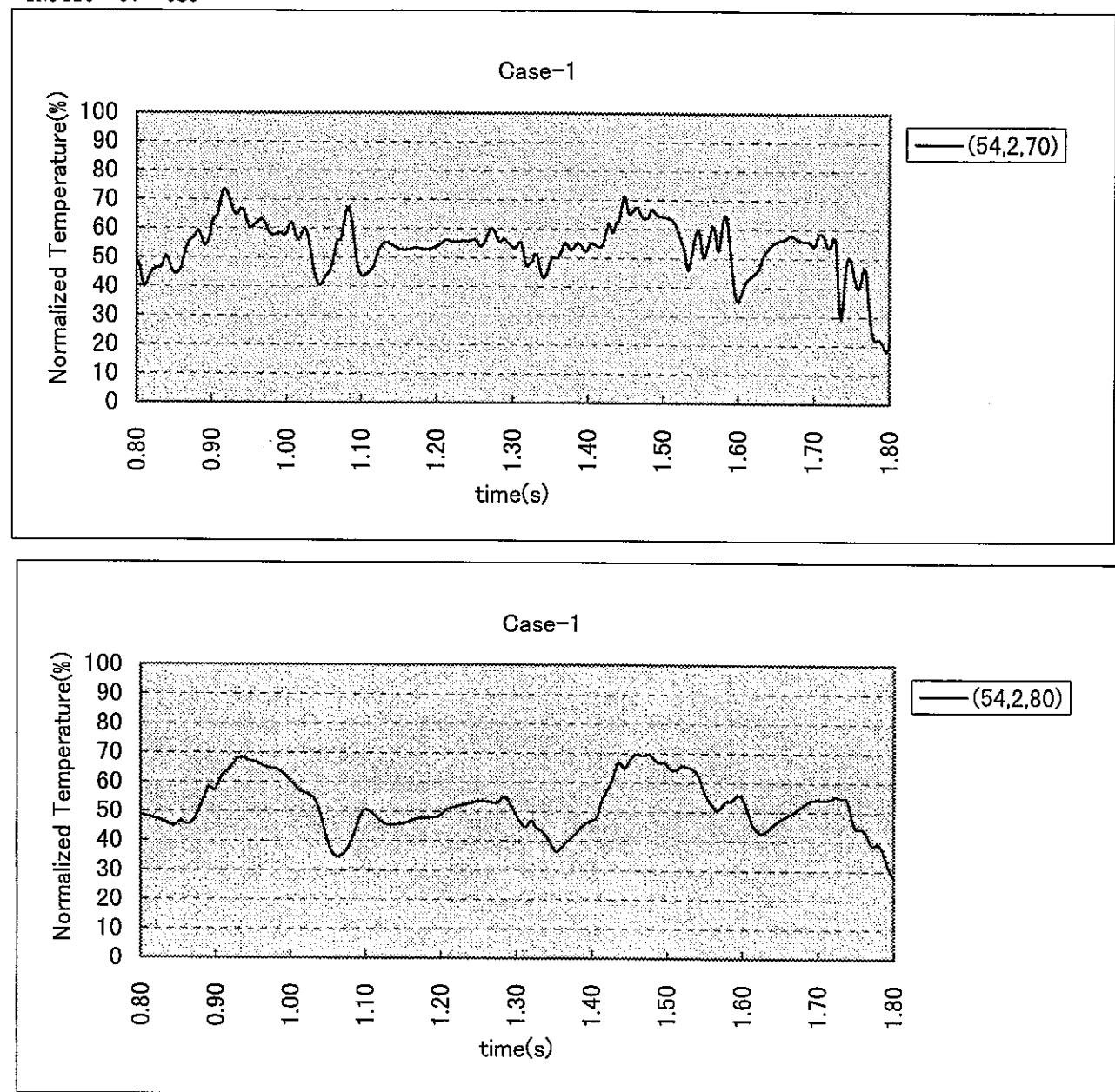


図 3. 21 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時系列（ケース 1） (2/3)

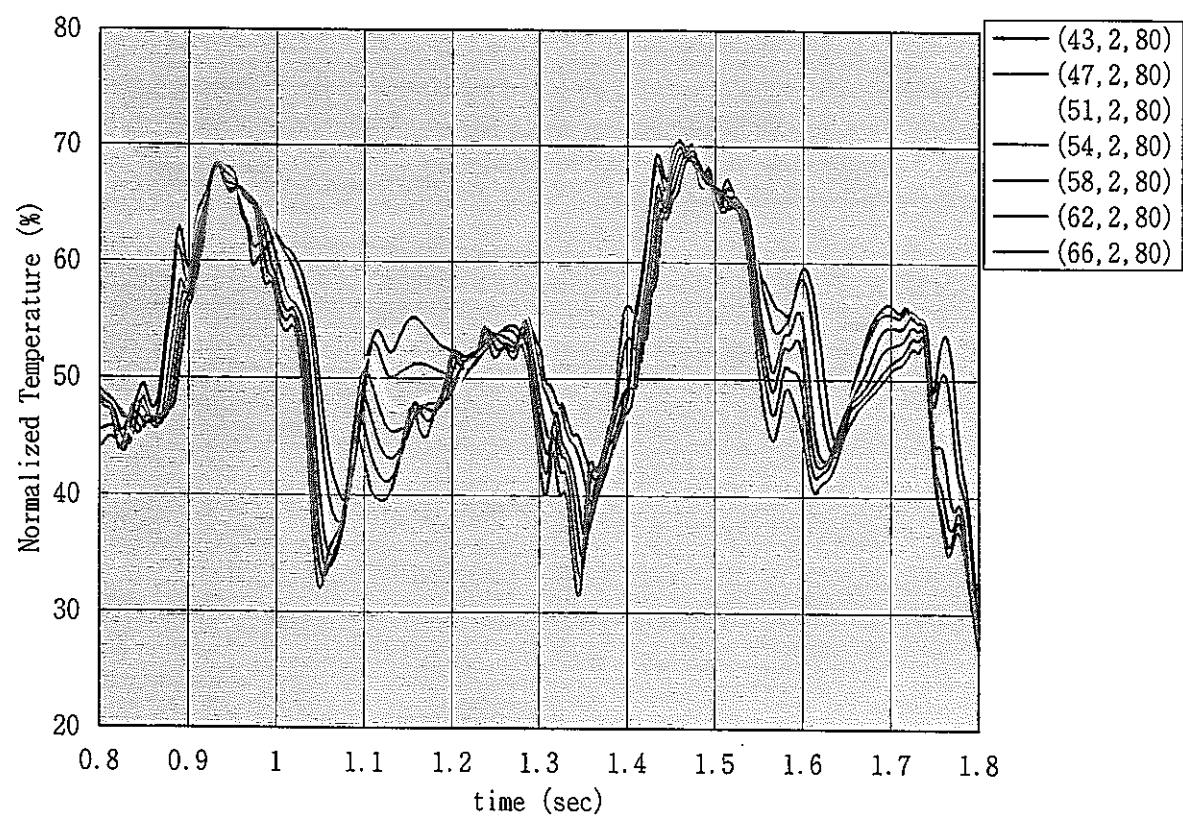
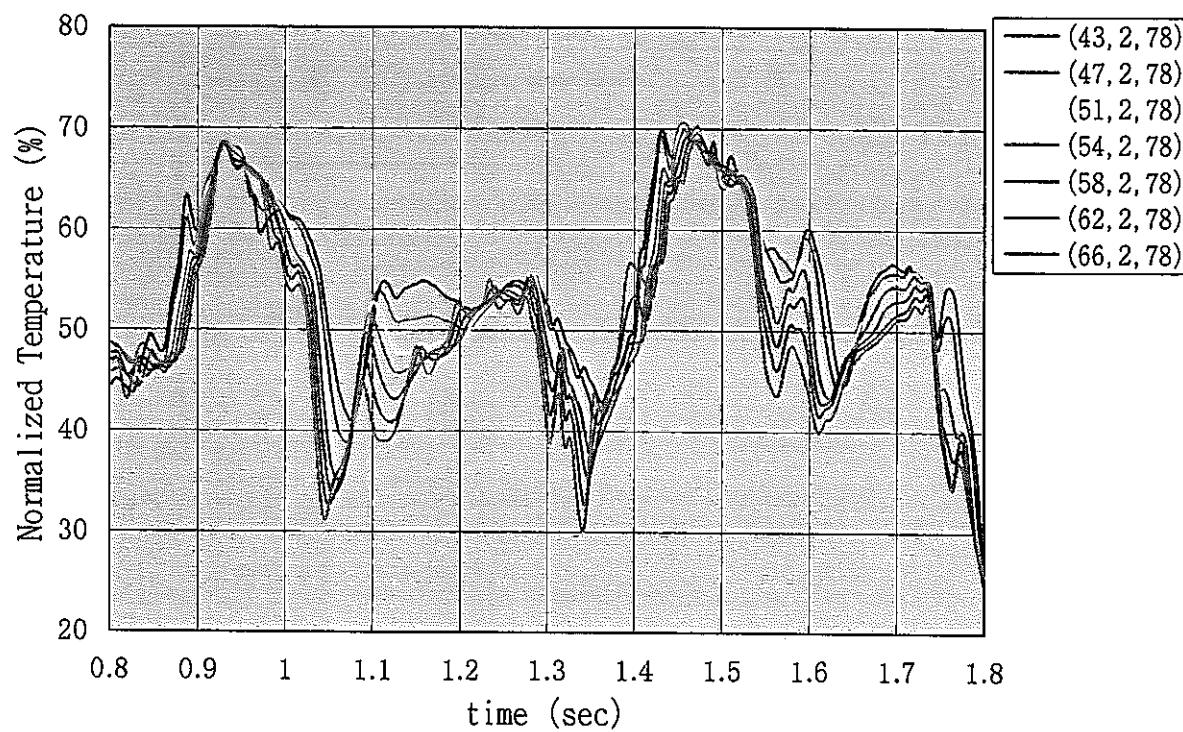


図 3. 21 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時系列（ケース 1） (3/3)

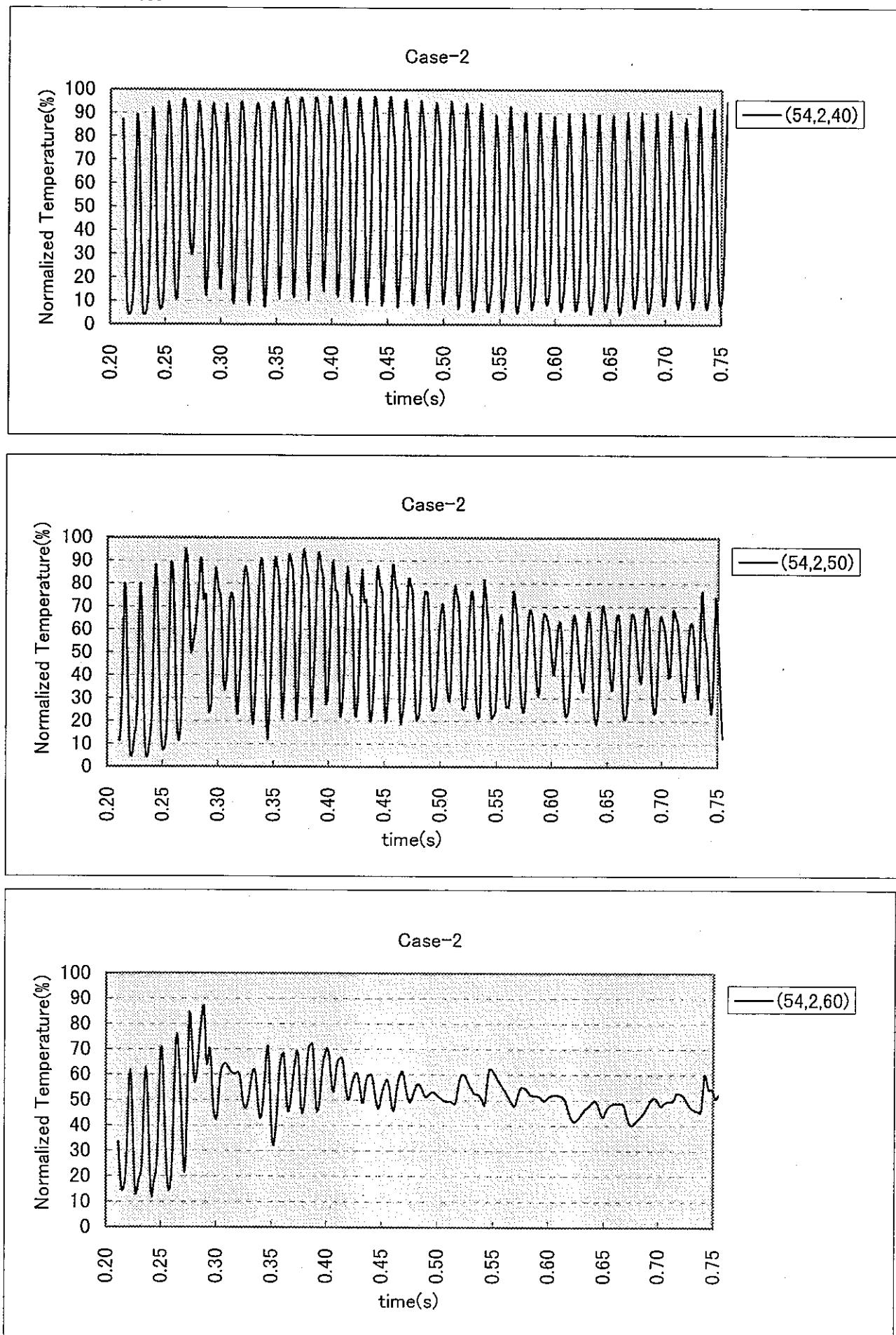


図 3. 22 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時系列（ケース2） (1/3)

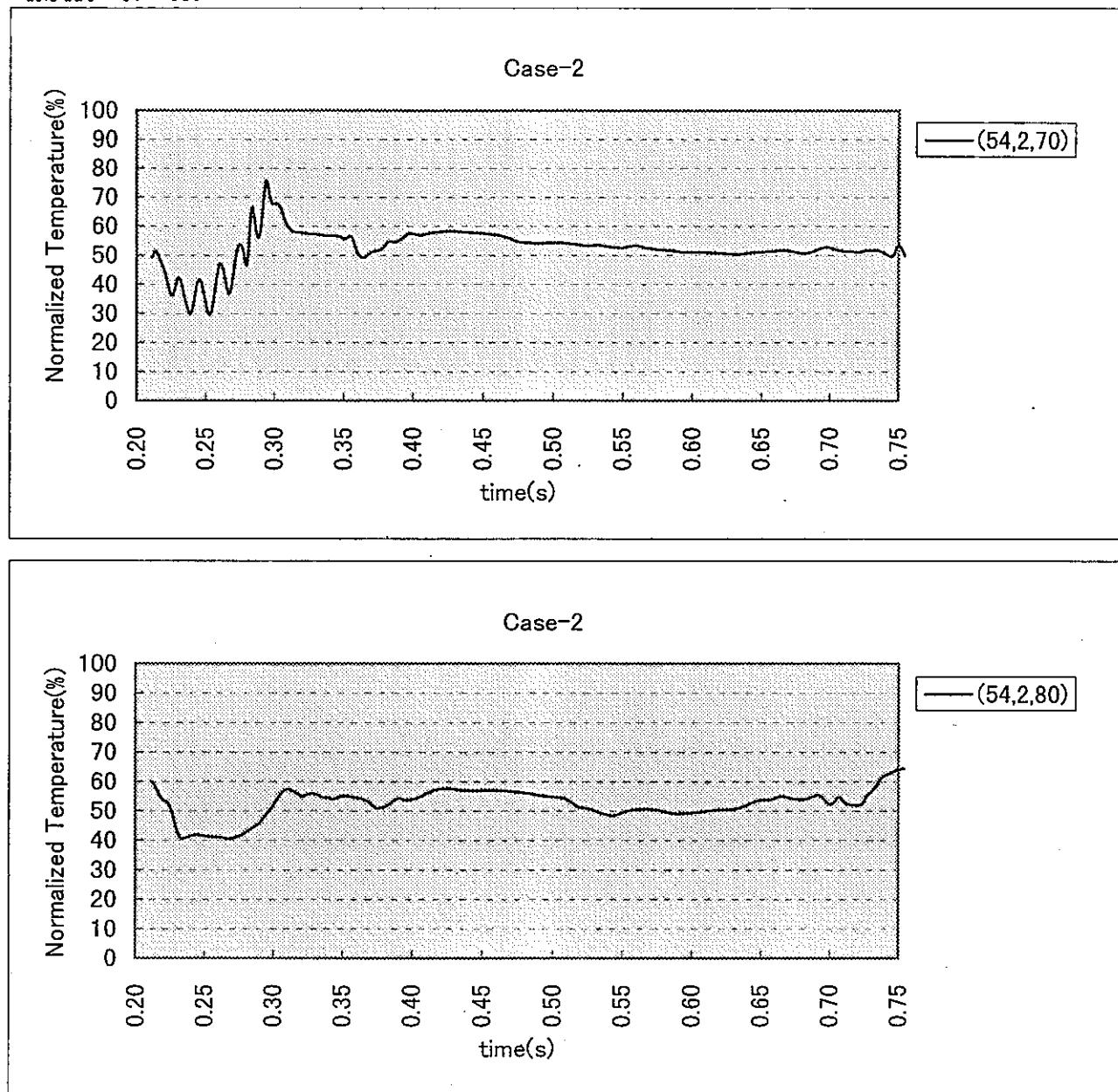
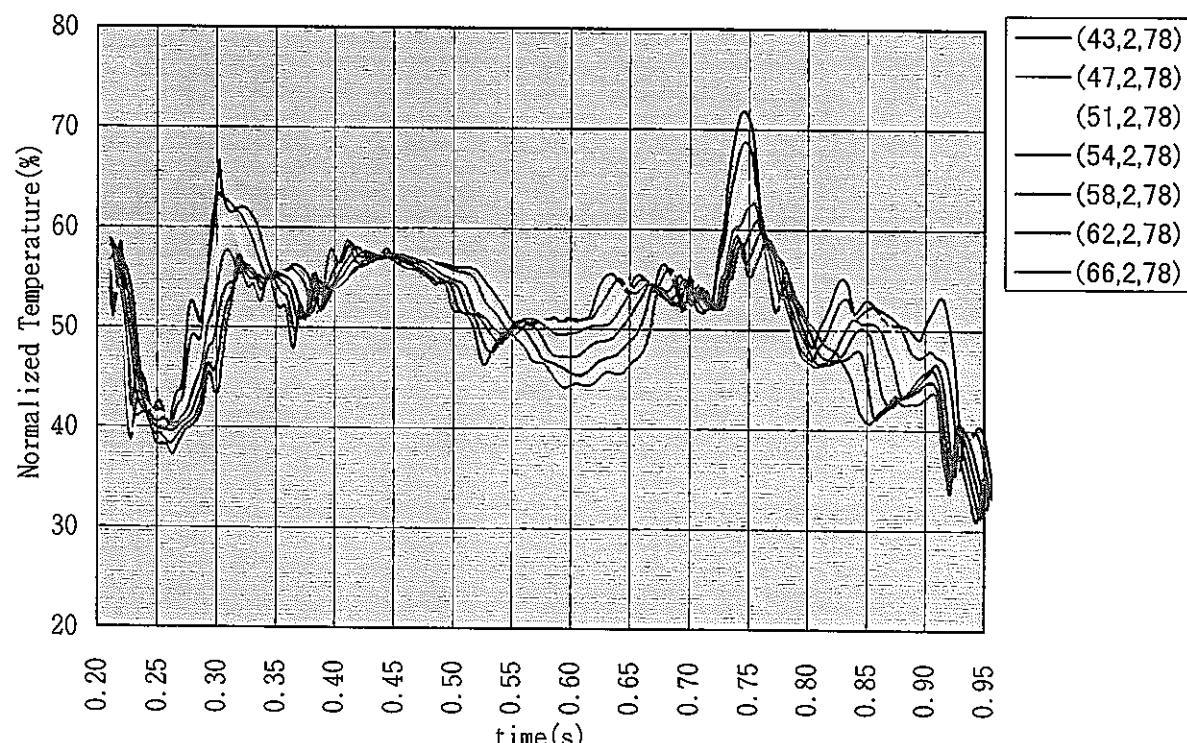


図 3. 22 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時系列（ケース2） (2/3)

Case-2



Case-2

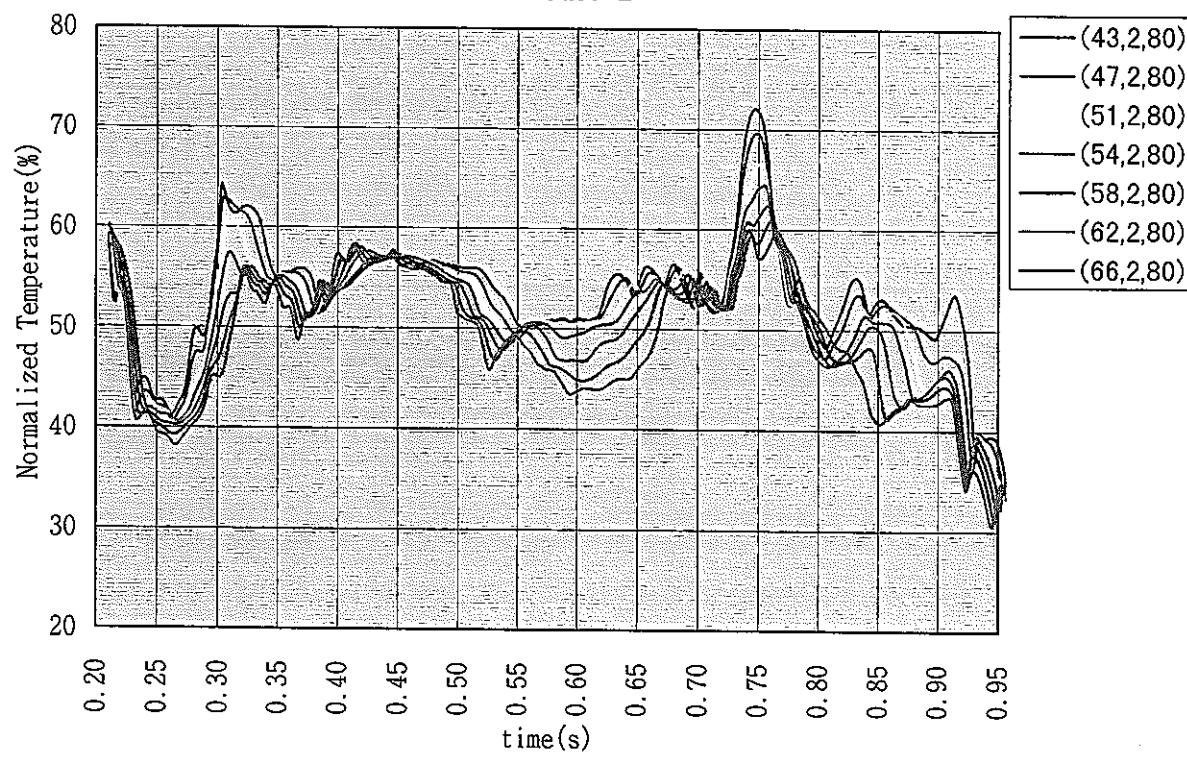


図 3. 22 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時系列 (ケース2) (3/3)

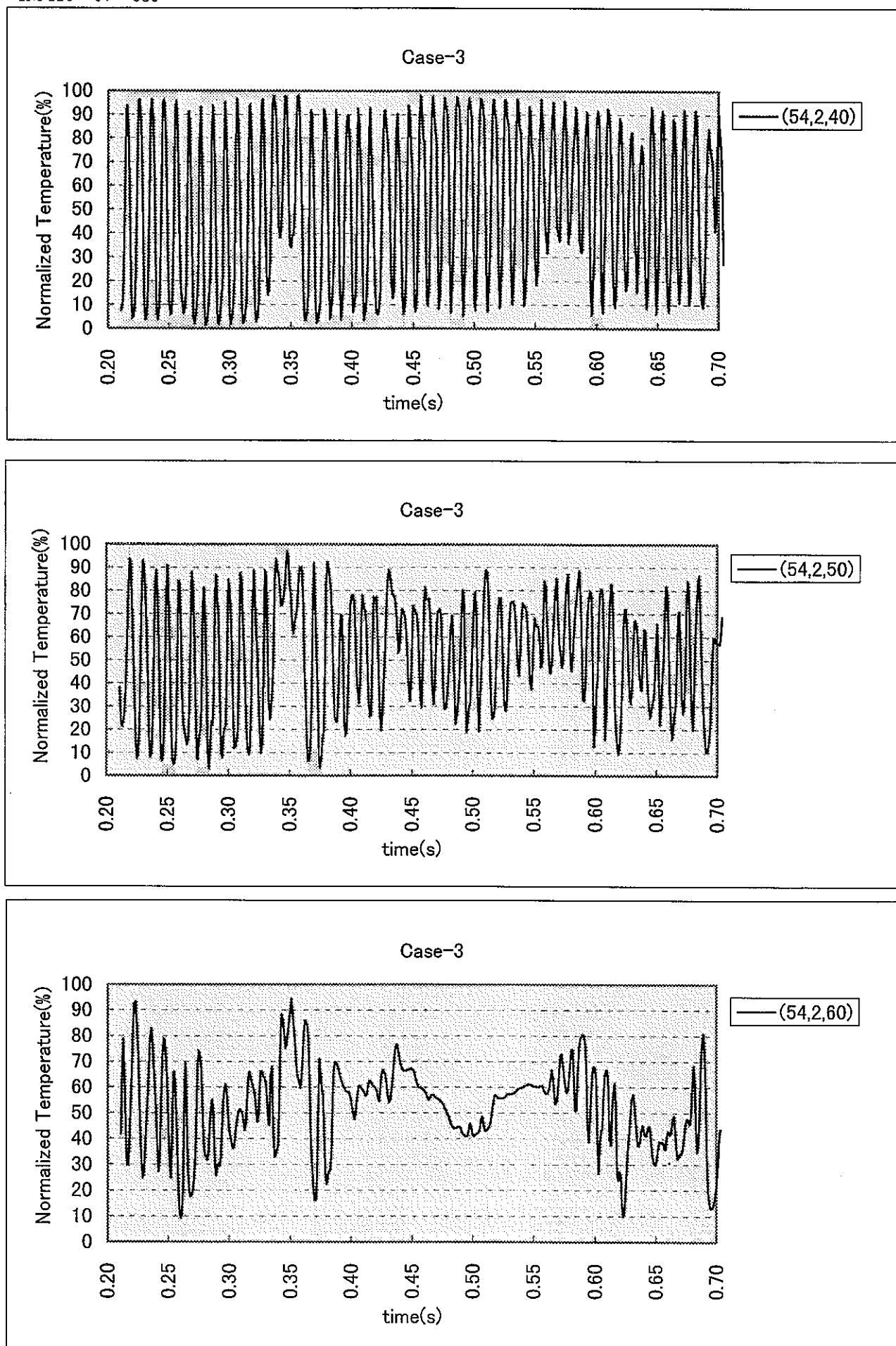


図 3. 23 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時系列 (ケース 3) (1/3)

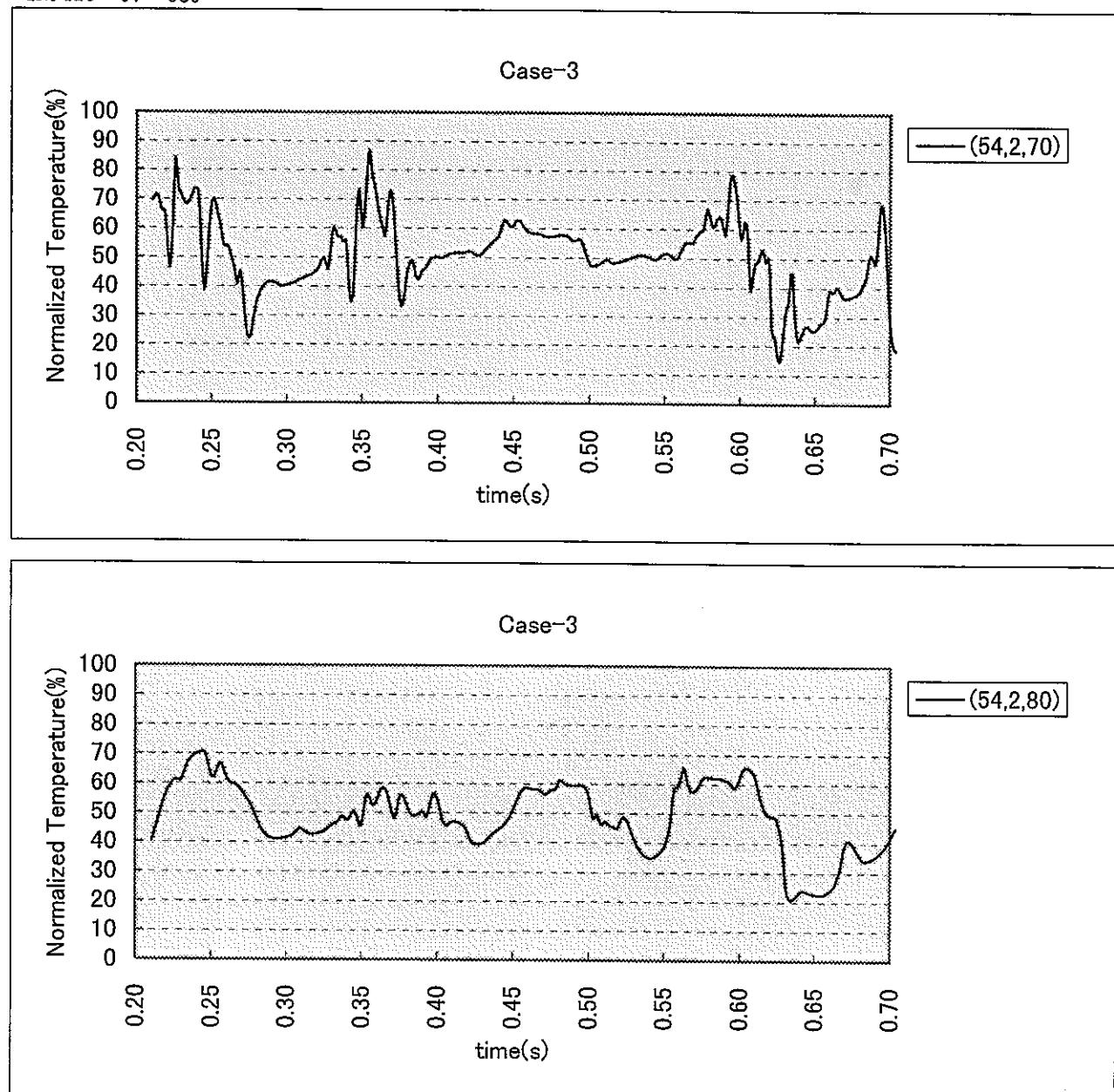


図 3. 23 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時系列（ケース 3） (2/3)

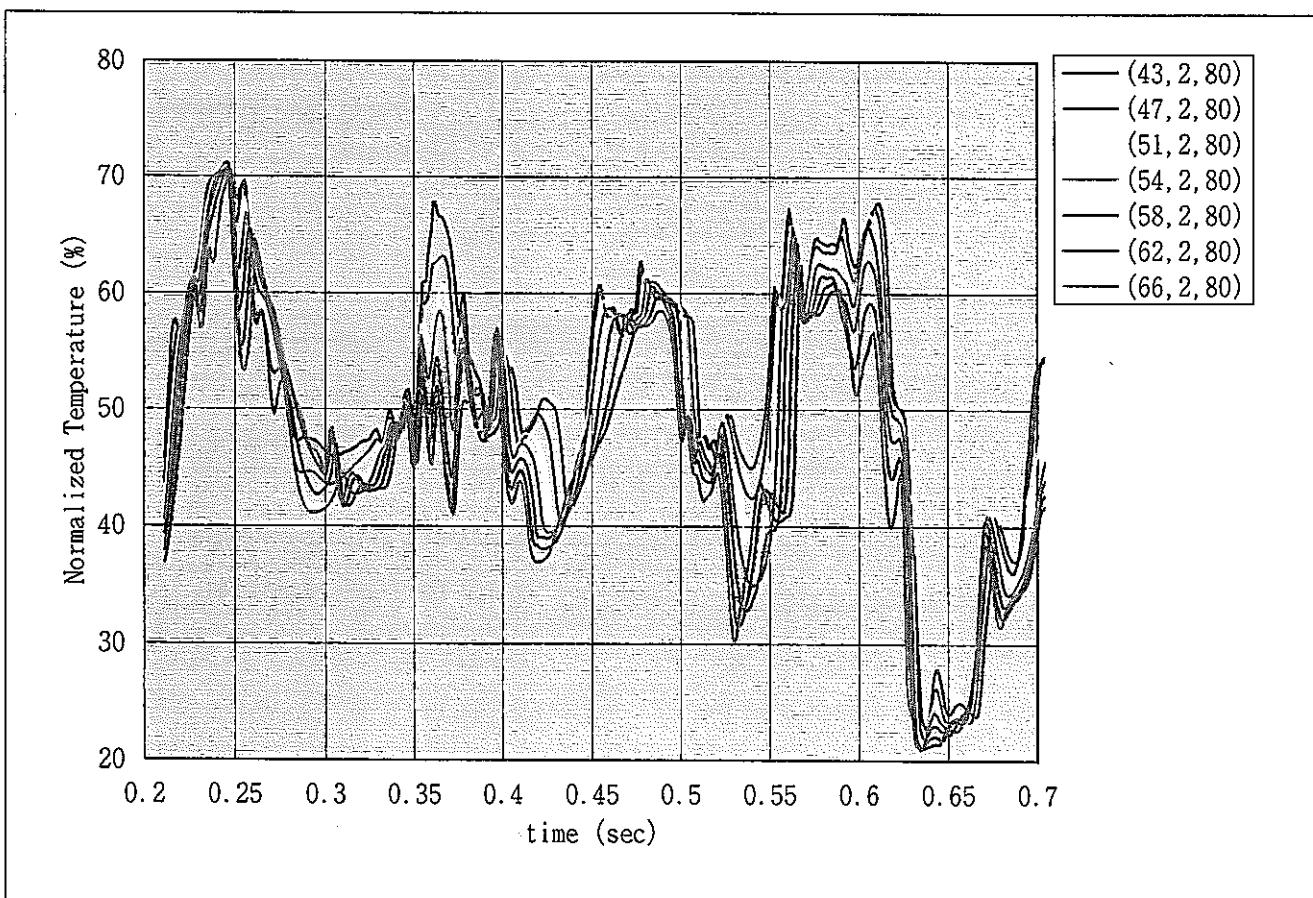
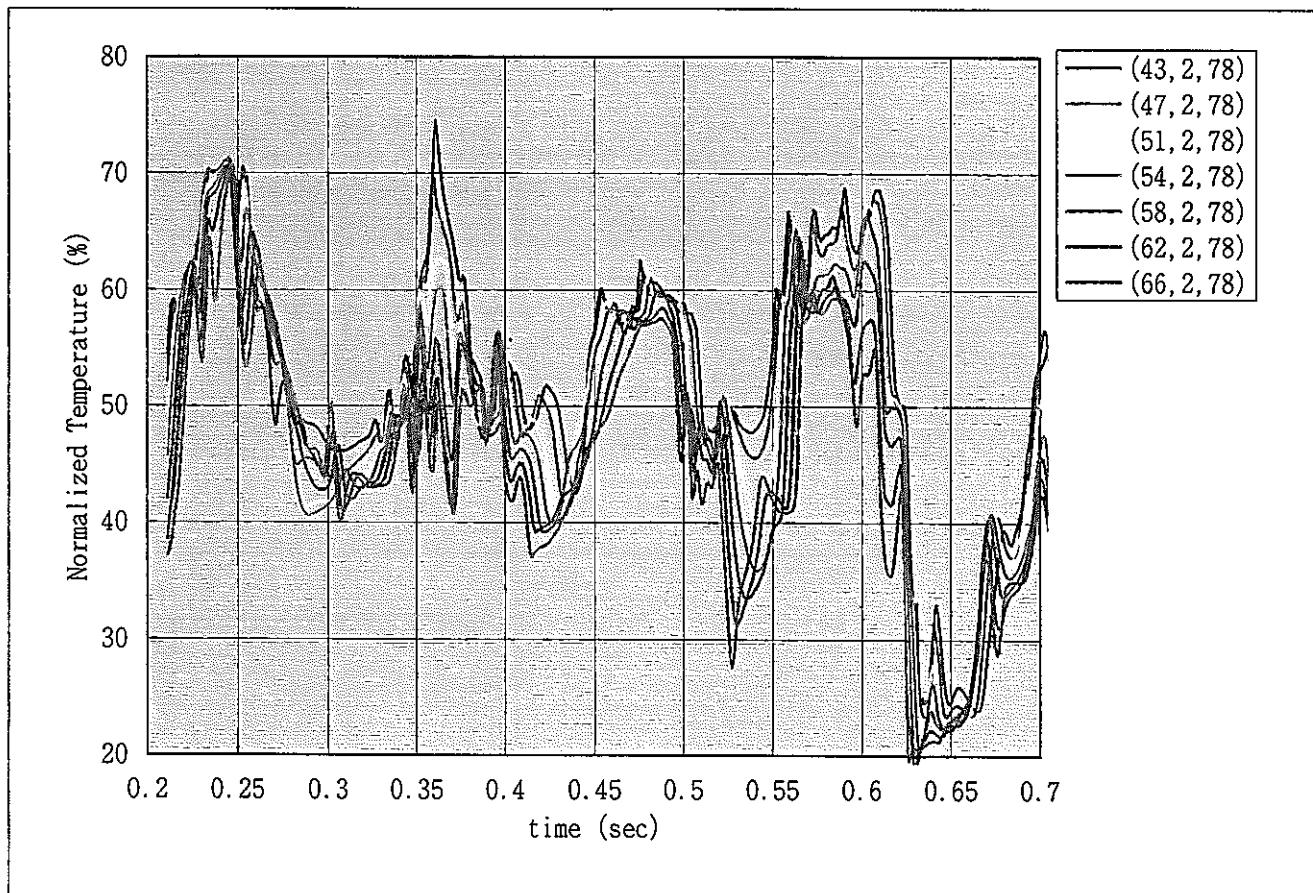


図 3. 23 DINUS-3 コードによるナトリウム温度の時系列（ケース 3） (3/3)

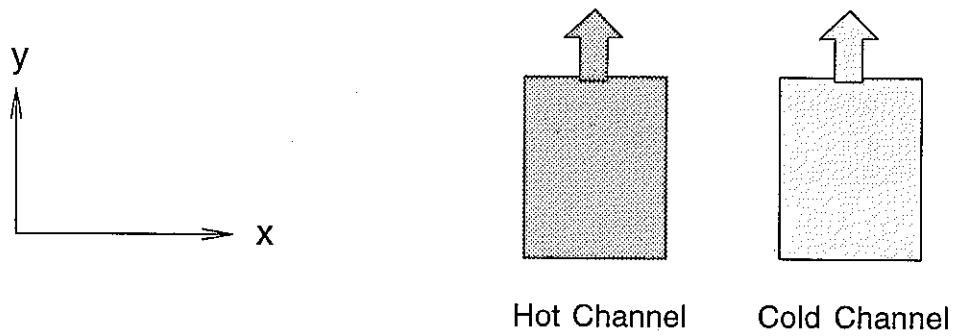
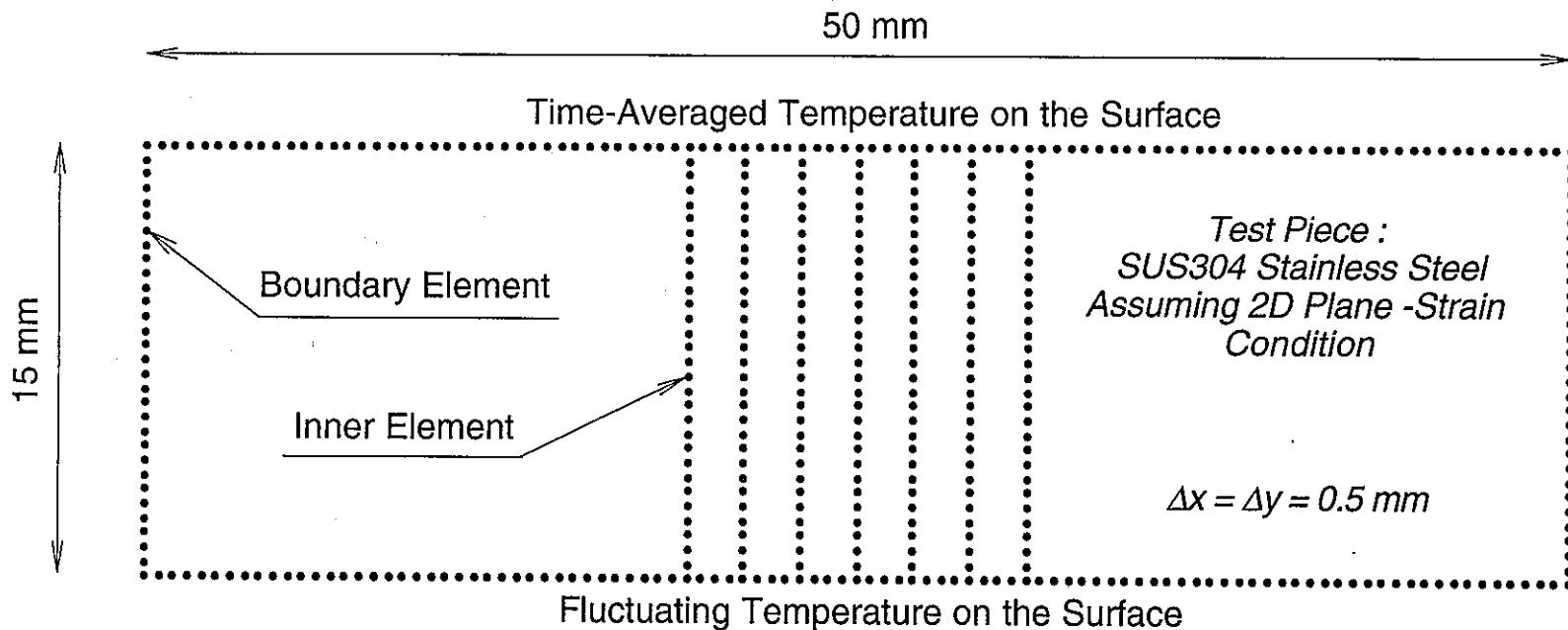


図 3.24 非定常熱伝導解析モデル (BEMSET コード)

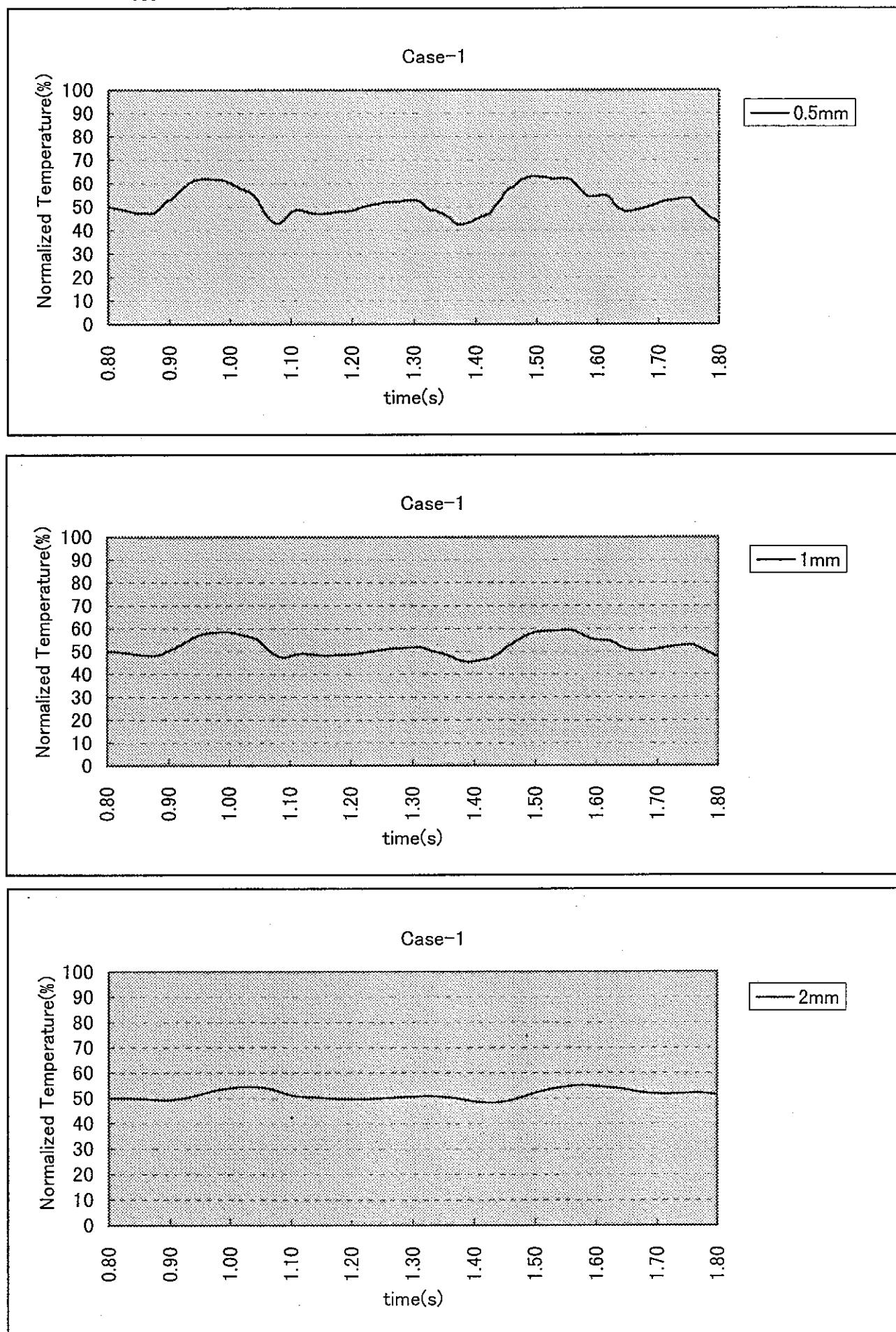


図 3. 25 BEMSET コードによる試験片内温度の時間推移（ケース 1） (1/2)

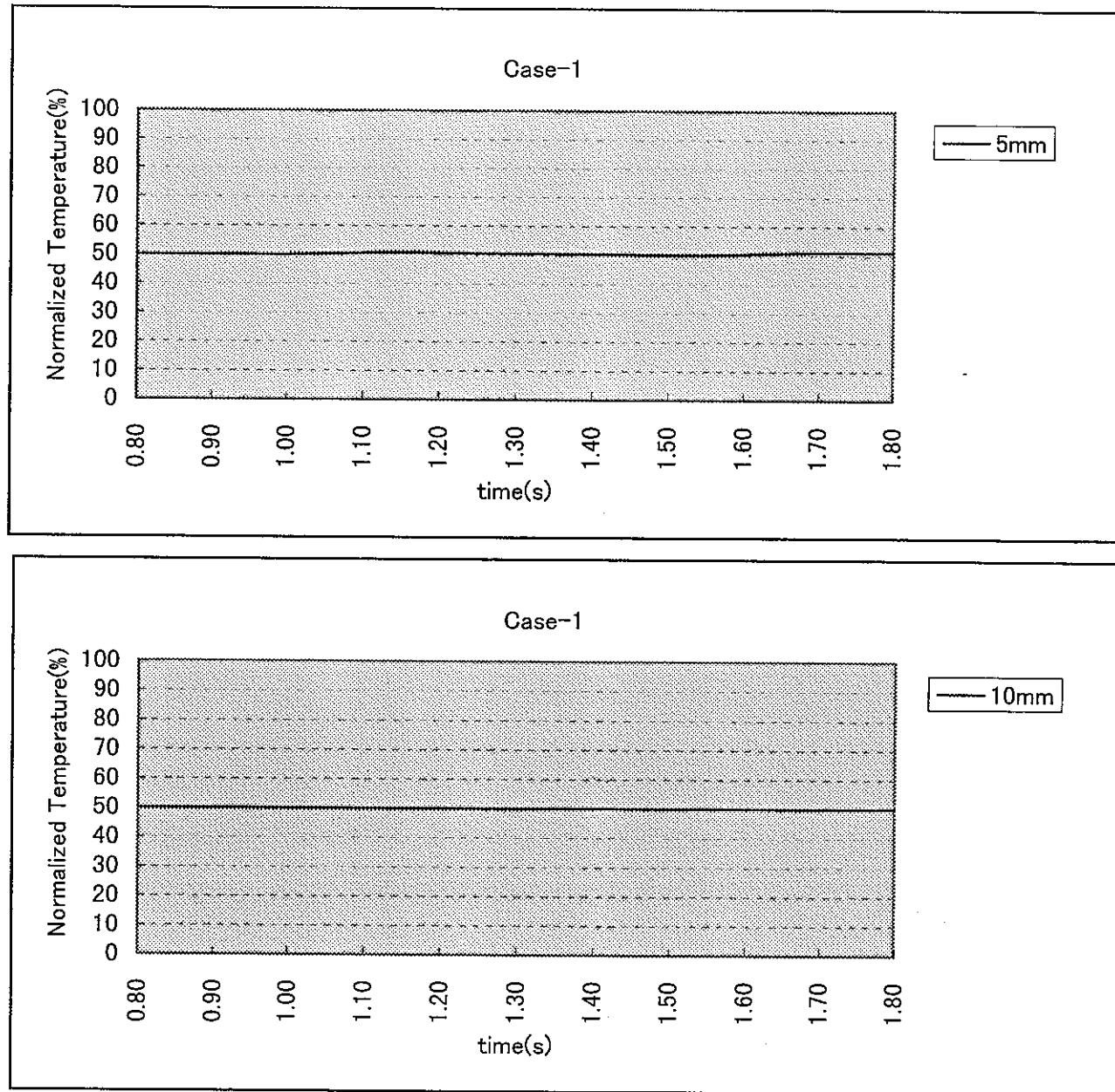


図 3. 25 BEMSET コードによる試験片内温度の時間推移 (ケース 1) (2/2)

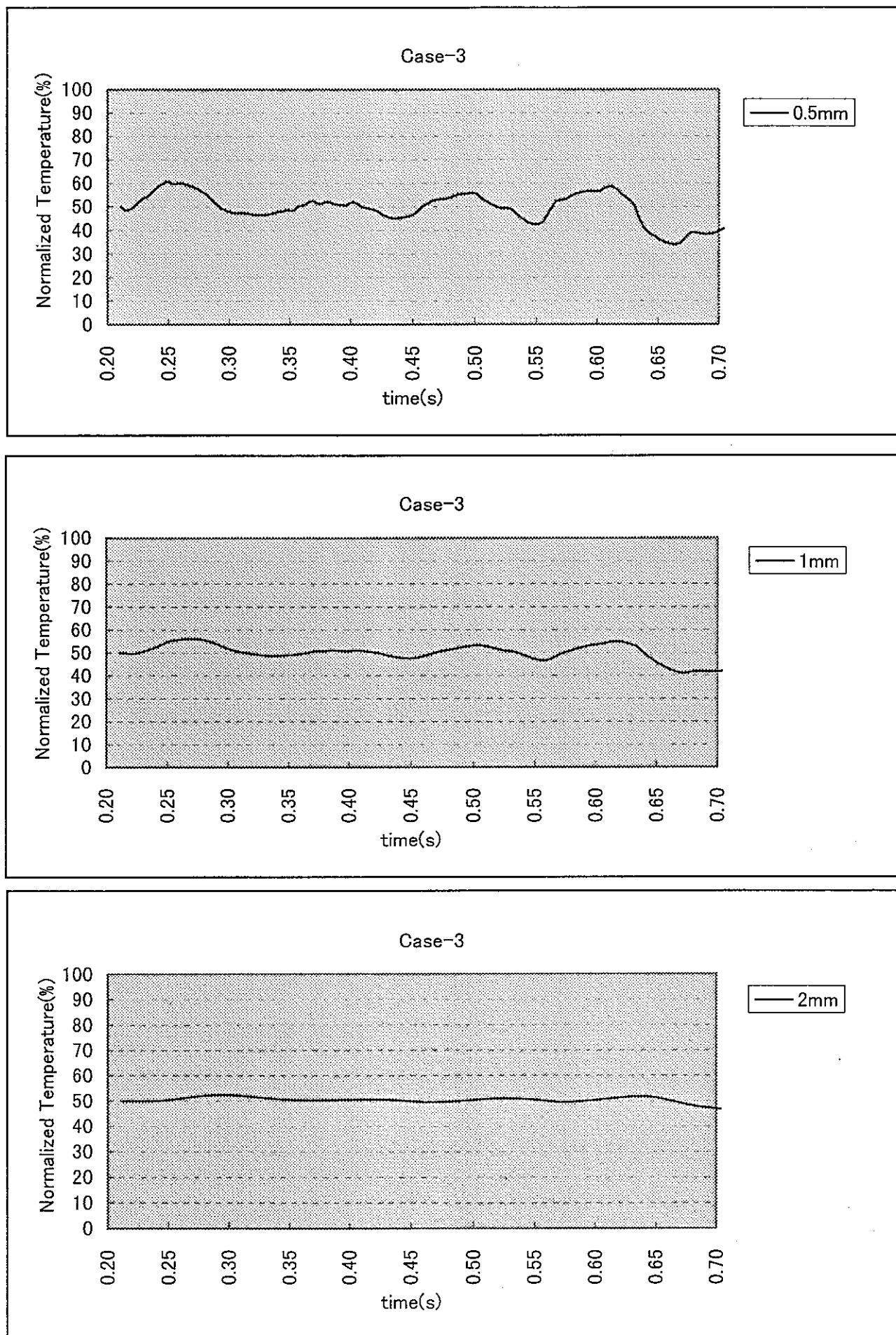


図 3. 27 BEMSET コードによる試験片内温度の時間推移（ケース 3） (1/2)

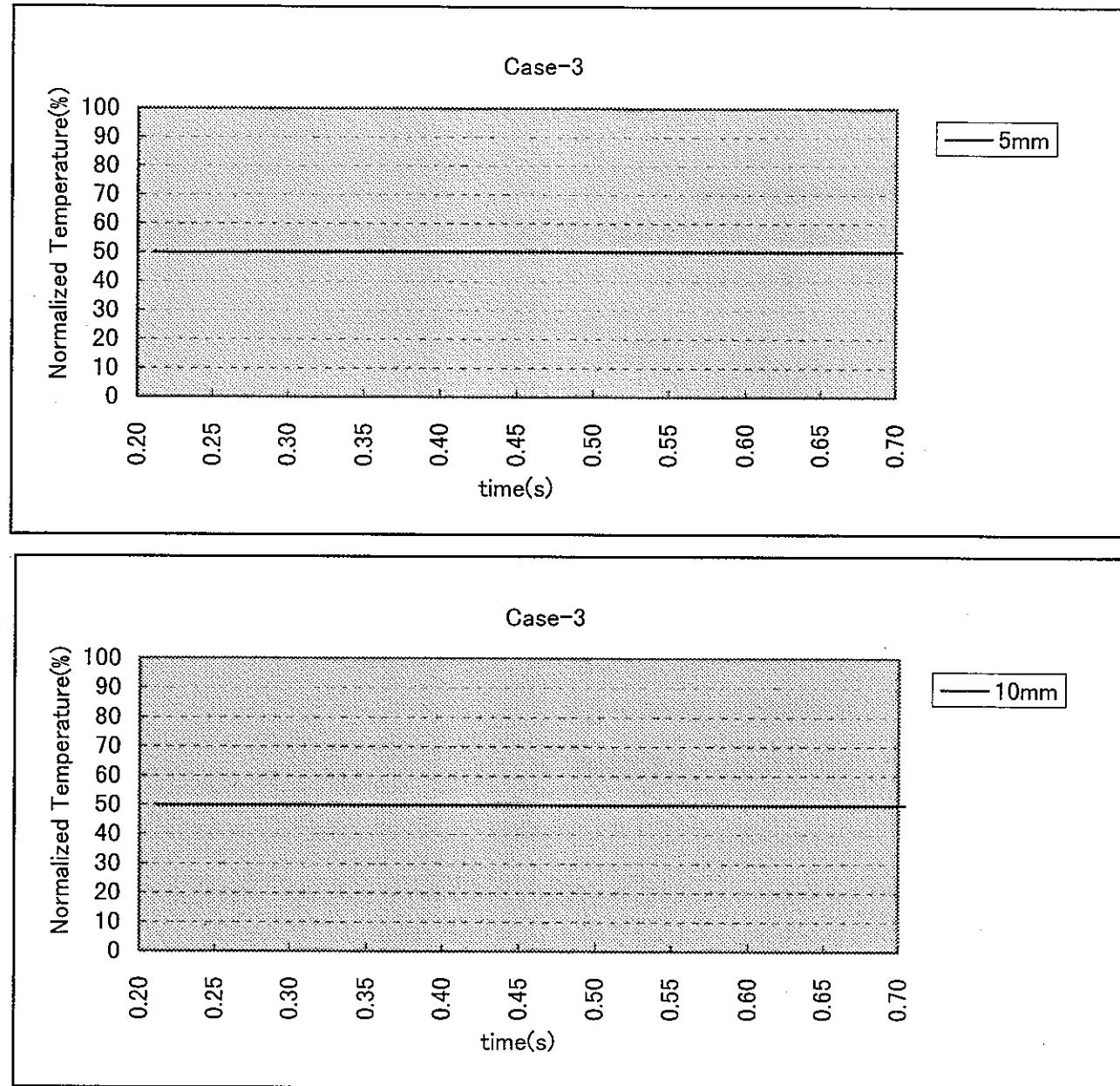


図 3. 27 BEMSET コードによる試験片内温度の時間推移（ケース 3） (2/2)

第4章 試験結果と数値解析結果との比較および検討

4.1 温度ゆらぎ実効値の空間分布特性

DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ時系列挙動に基づき、式(4.1)を用いて算出された温度ゆらぎ実効値の時間平均空間分布を図4.1-図4.3に示す。

$$\overline{\theta'}_{\text{RMS}} (\%) = \frac{\left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2 \right\}^{0.5}}{\Delta T_{\max}} \times 100.0 \quad (4.1)$$

ここで、

- T_i : DINUS-3 コードにより計算された温度ゆらぎ挙動の瞬時値
- \bar{T} : DINUS-3 コードにより計算された温度ゆらぎ挙動の時間平均値
- N : DINUS-3 コードにより計算された温度ゆらぎ挙動のサンプリング点総数
- ΔT_{\max} : 体系内最大温度差 ($= 40^{\circ}\text{C}$)
- $\overline{\theta'}_{\text{RMS}}$: 時間平均温度ゆらぎ実効値

である。

結果より、噴流ノズルからのナトリウム流速を増加させるに従い、大きな値を示す温度ゆらぎ実効値の空間領域が拡大していることが分かる。このような定性的傾向は、前章で示した AQUA コードによるそれと概ね一致する(図3.12-図3.14 参照)が、試験片近傍での温度ゆらぎ実効値分布に差異が見られる。すなわち、AQUA コードによる各ケースの結果では、大きな温度ゆらぎ実効値を示す領域が試験片表面にまで到達しているが、DINUS-3 コードによる結果では到達していない。これは、DINUS-3 コードにより評価されたナトリウムの正弦波振動挙動(図3.15-図3.17 参照)による流体混合を、AQUA コードが模擬できていないこと(図3.3-図3.5 参照)に起因するものと考えられる。すなわち、AQUA コードによる計算では、乱流微細構造による流体混合効果(比較的高周波成分による寄与)を代数応力モデル(ASM)によって考慮するものの、DINUS-3 コードによる結果に見られるような正弦波振動挙動による流体混合効果(乱流微細構造による流体混合に比べ、比較的低周波成分による寄与)を結果として考慮できていないためである。このことは、比較的低周波の規則的振動成分を定常的に含む(あるいは重畠する)乱流現象の数値シミュレーションに対し、AQUA コードで使用されたような時間平均 Navier-Stokes 方程式と代数応力モデルとを併用する手法の限界を示唆していると言える。

図4.4-図4.6に、試験片表面から 1.25 mm および 0.25 mm 位置における水平方向の温度ゆらぎ実効値分布を実験結果(前記各位置に対応する測定値のみをピックアップ)と比較する。なお、図中の横軸は、試験片の横軸長さを用いて無次元化している。各ケースについての実験結果では、試験片中央位置で大きな温度ゆらぎ実効値のピークが確認できるものの、AQUA コードあるいは DINUS-3 コードによる結果では明瞭なピークは確認できない。なお、解析結果同士の比較では、AQUA コードによるものの方が温度ゆらぎ実効値を全体的に大きく評価していることが分かる。両解析結果ともに、実験結果に見られる温度ゆらぎ実効値

値のピークを再現できていない原因は現時点では明らかではないが、使用した解析モデルに大きな差異要因があるものと推察される。すなわち、実験に使用された試験片は直径 50 mm の円盤であるのに対し、解析ではこれを奥行き 1.5 mm (0.5 mm × 5 メッシュ) の矩形体系でモデル化を行った。これにより解析では、実験で生じている 3 次元(奥行き)方向に対する各種減衰量を考慮できることになる。なお、今回の解析では、ノズル奥行き 9 mm に対して 1.5 mm を解析モデルとしていることから、各種生成量は概ね正確に評価している(各種状態量分布は、主に横方向の勾配により支配)ものと考えられる。

4.2 温度ゆらぎ振幅および周波数の頻度分布

図 4.7 - 図 4.9 に、両ノズル間中心位置 ($I=54$) での垂直方向 4 点 ($K=40, 50, 60$ および 70) における流体温度ゆらぎ振幅(DINUS-3 コード)の頻度分布を比較する。なお、波形分解には、ヒステリシスループ法³⁾を使用した。結果より分かるように、各ケースともにノズルから下流側に向かうに従って、大振幅波の度数が急激に減少し、代わって小振幅波の度数が増加する。これは、第 4.1 節で述べたように、噴流相互作用に起因して発生するナトリウム温度の正弦波振動挙動がノズルから下流側に向かって大きく減衰することに起因している。

図 4.10 - 図 4.12 に、試験片内 5 点(試験片表面より 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm, 5.0 mm および 10.0 mm 位置)における温度ゆらぎ振幅(BEMSET コード)の頻度分布を比較する。結果より分かる通り、試験片表面から内部に向かうに従い、カウントされる波の数が激減する。また、流体中における波の総カウント数に比べると、材料中のそれは極めて少ないものであることが分かる。

図 4.13 - 図 4.15 に、ch. 7(試験片表面より 0.3 mm 位置での境界層内ナトリウム温度)、ch. 8(試験片表面より 1.5 mm 位置での境界層外ナトリウム温度)、ch. 9(試験片表面より 0.2 mm 位置での材料温度)および ch. 11(試験片表面温度)相当の各位置における温度ゆらぎ振幅の頻度分布について、実験結果と解析結果を比較する。なお図中の頻度は、比較のため各位置での最大度数により規格化を施している。比較結果より分かる通り、解析結果から計数された度数が極めて少ないと、頻度が滑らかな分布となっていないものの、最大度数を示す位置などについては実験結果と比較的良い一致を示している。

図 4.16 - 図 4.18 に、両ノズル間中心位置 ($I=54$) での垂直方向 4 点 ($K=40, 50, 60$ および 70) における流体温度ゆらぎ周波数(DINUS-3 コード)の頻度分布を比較する。結果より、各ケースともにノズルから下流に向かうに従い、低周波側から高周波側に度数が増加することが分かる。この傾向は温度ゆらぎ振幅の頻度分布のそれと逆であり、これは大きな渦スケール(長波長渦塊)のエネルギーが小さな渦スケール(短波長渦塊)に連続的に伝達されてゆく過程(エネルギー CASCADE)に起因しているものと解釈できる。

図 4.19 - 図 4.21 に、試験片内 5 点(試験片表面より 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm, 5.0 mm および 10.0 mm 位置)における温度ゆらぎ周波数(BEMSET コード)の頻度分布を比較する。結果より分かるように、各ケースとも、試験片表面から内部に向かうに従い、高周波成分の寄与が減少すると共に、各周波数帯においてカウントされる波の数が大幅に減少する。

図 4.22 - 図 4.24 に、ch. 7, ch. 8, ch. 9 および ch. 11 相当の各位置における温度ゆらぎ周波数の頻度分布について、実験結果と解析結果を比較する。温度ゆらぎ振幅の頻度分布と同様に、解析結果から計数された度数が極めて少ないと頻度が滑らかな分布となっていないものの、温度ゆらぎが境界層を通過し、また試験片表面からの距離が増すにつれて低下する温度ゆらぎ周波数の頻度分布を概ね妥当に評価できていることが分かる。

4.3 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度

図 4. 25 - 図 4. 27 に、両ノズル間中心位置 ($I=54$) での垂直方向 4 点 ($K=40, 50, 60$ および 70) における流体温度ゆらぎ挙動 (DINUS-3 コード) の自己パワースペクトル密度を比較する。各ケースともに、ノズルから下流側に向かうに従い、パワースペクトル全体に対する高周波成分の寄与が大きく低下する様子が見られる。これは、ノズル流出直後に噴流相互作用により発生した正弦波振動挙動が、下流側に向かって消滅していく様子を表している。

図 4. 28 - 図 4. 30 に、試験片内 5 点 (試験片表面より 0.5 mm , 1.0 mm , 2.0 mm , 5.0 mm および 10.0 mm 位置) の自己パワースペクトル密度 (BEMSET コード) を示す。試験片内の温度ゆらぎ挙動についても、試験片表面から内部に向かうに従い、高周波成分の寄与が減少して行く様子が見られる。なお、ノズル出口流速が大きいケース 3 での高周波成分の寄与が減少割合は、ノズル出口流速が小さいケース 1 あるいは 2 でのそれに比べて大きいものであることが理解できる。

図 4. 31 - 図 4. 33 に、ch. 7, ch. 8, ch. 9 および ch. 11 相当の各位置における温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度について、実験結果と解析結果を比較する。各ケースについての解析結果は、シミュレーション時間が短いため低周波成分についての比較は難しいが、温度ゆらぎ挙動が境界層を通過し、また試験片表面からの距離が増すに従って相対的に低下する高周波成分の寄与割合は、比較的良好に模擬できている。

4.4 境界層内温度ゆらぎ減衰特性

温度ゆらぎ振幅に関する比較結果を図 4. 34 に示す。実験結果に関する傾向は、第 2 章で述べた通り、以下の特徴を持つ。

- (1) 乱流混合に関しては、ノズル出口流速が増加すると発生する温度ゆらぎ振幅も増大するため、境界層外側に到達する温度ゆらぎ振幅が大きくなる。結果的に、乱流混合による温度ゆらぎ振幅の減衰は、ノズル出口流速が増加に対して小さなものとなる。
- (2) 境界層通過による温度ゆらぎ振幅の減衰についても同様に、ノズル出口流速が増加すると振幅の減衰は小さくなる。
- (3) 境界層内流体から試験片表面までの熱伝達では、ノズル出口流速が増加するとその減衰が大きくなる。
- (4) 試験片内熱伝導による温度ゆらぎ振幅の減衰についても、ノズル出口流速が増加すると増加する傾向を持つ。

結果より分かる通り、解析による結果についても実験での傾向を概ね良好に再現している。ただし、解析における各要因による温度ゆらぎ振幅の減衰量は、各ケースについてばらつきがあり、結果として試験片表面に到達する温度ゆらぎ振幅をは、過小評価傾向を示している。

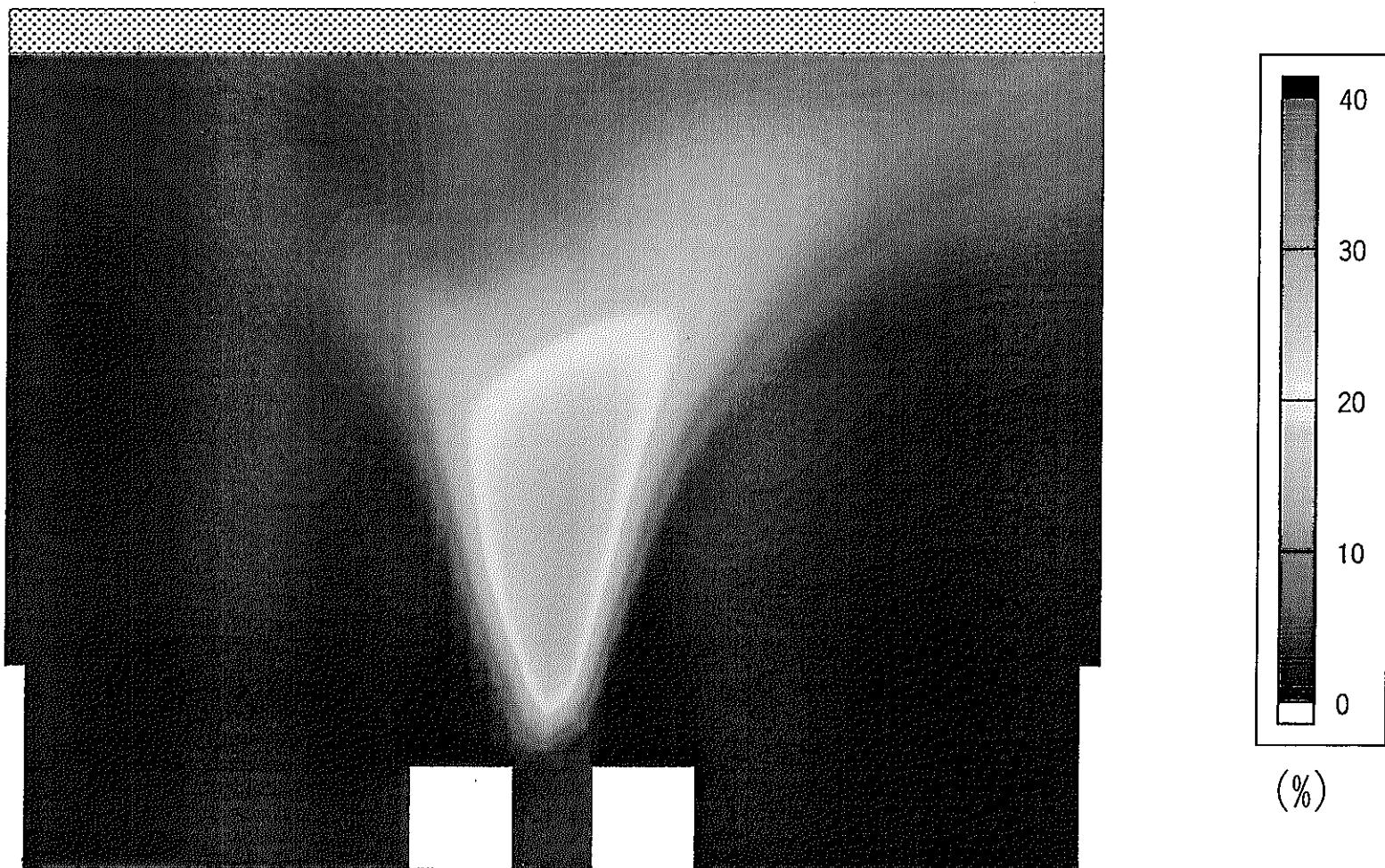


図 4.1 DINUS-3コードによる温度ゆらぎ実効値の時間平均空間分布（ケース1）

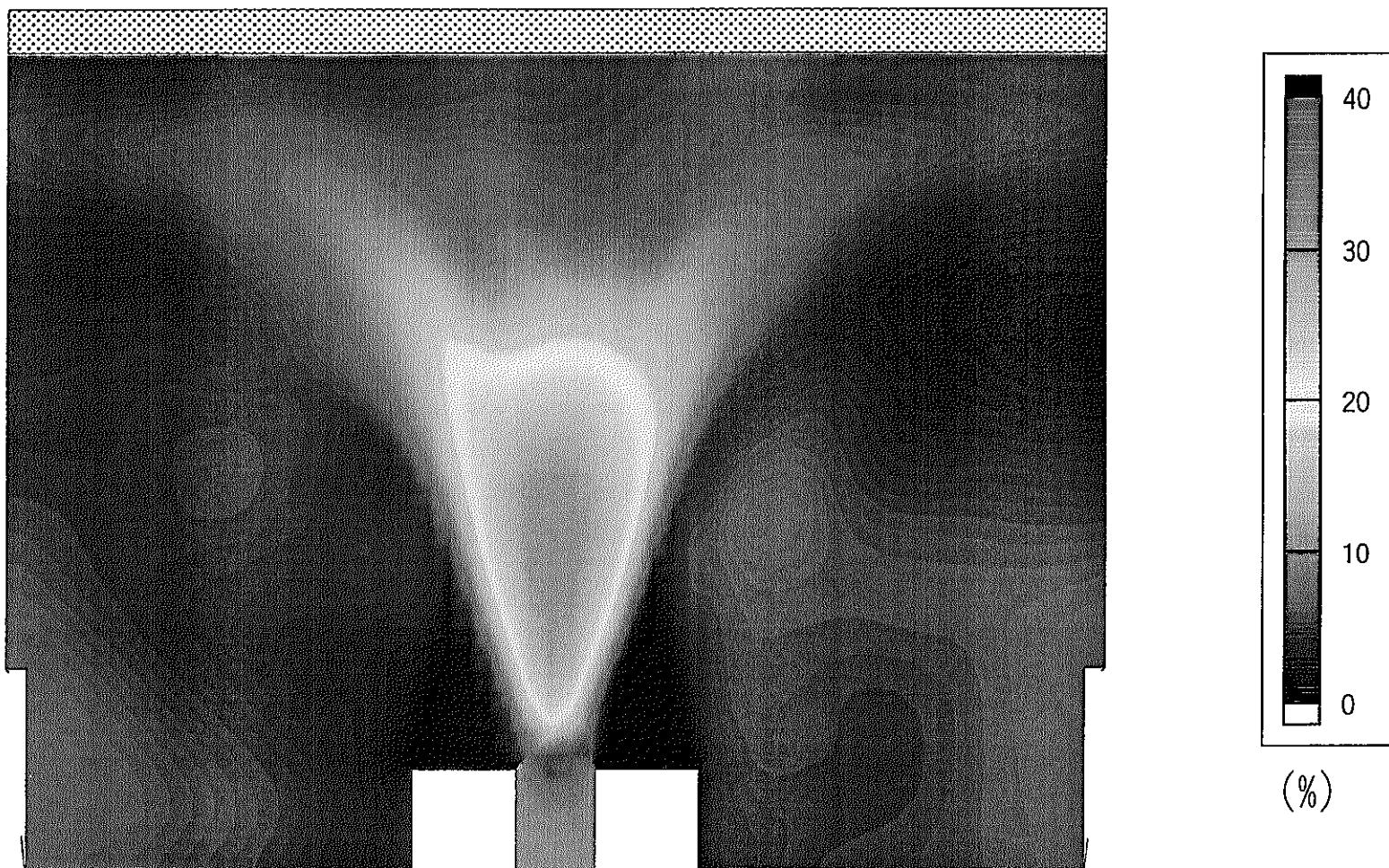


図 4.2 DINUS-3コードによる温度ゆらぎ実効値の時間平均空間分布（ケース2）

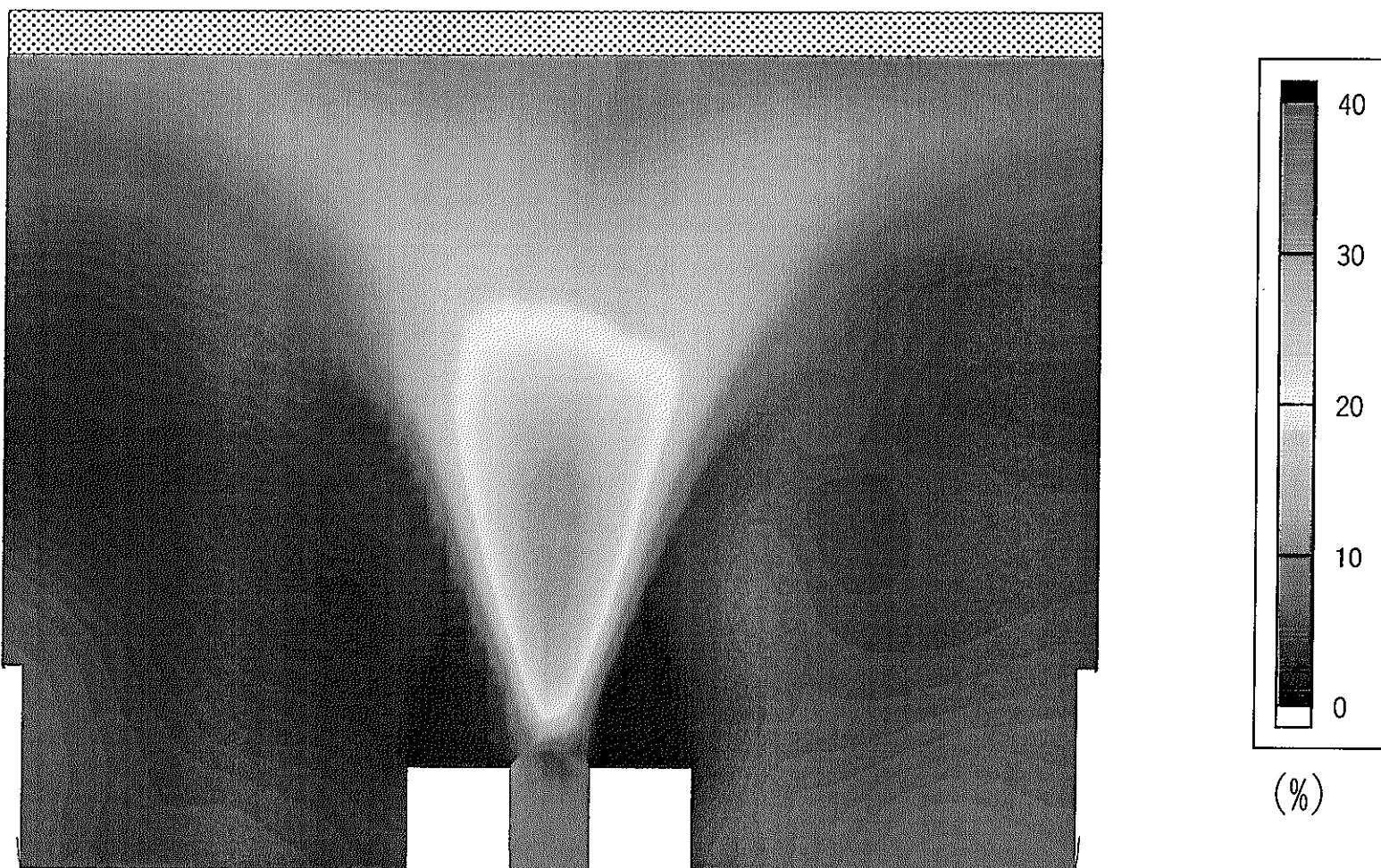
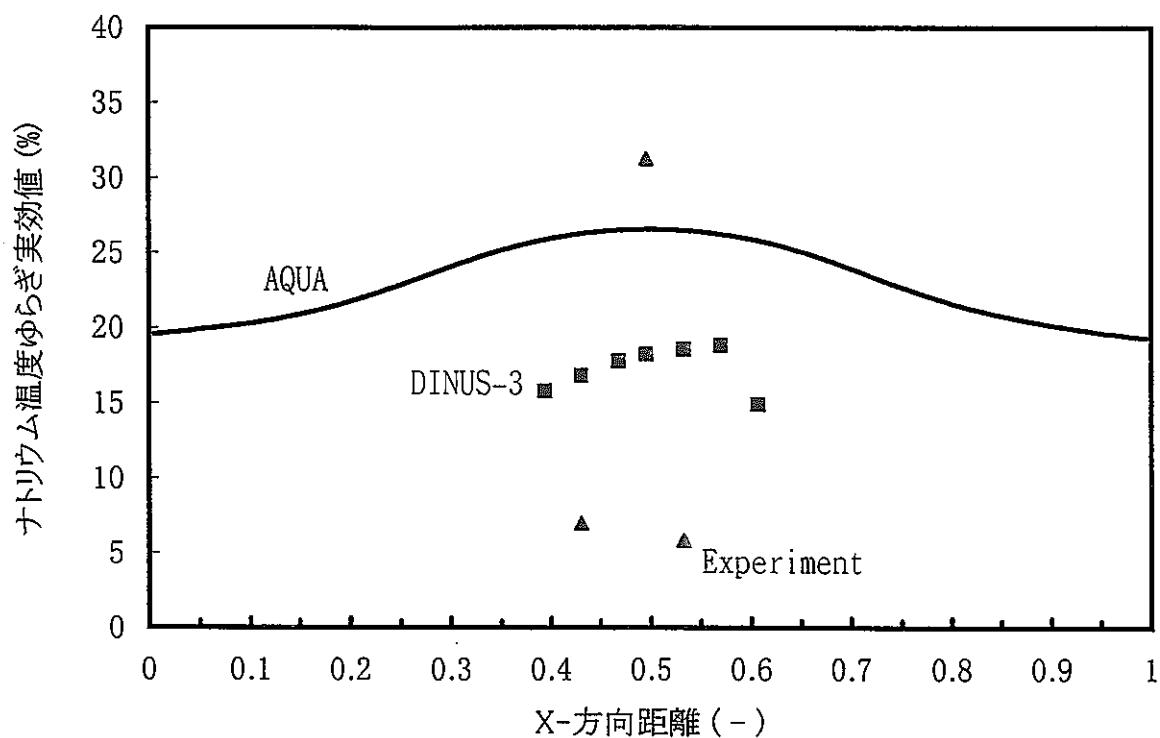
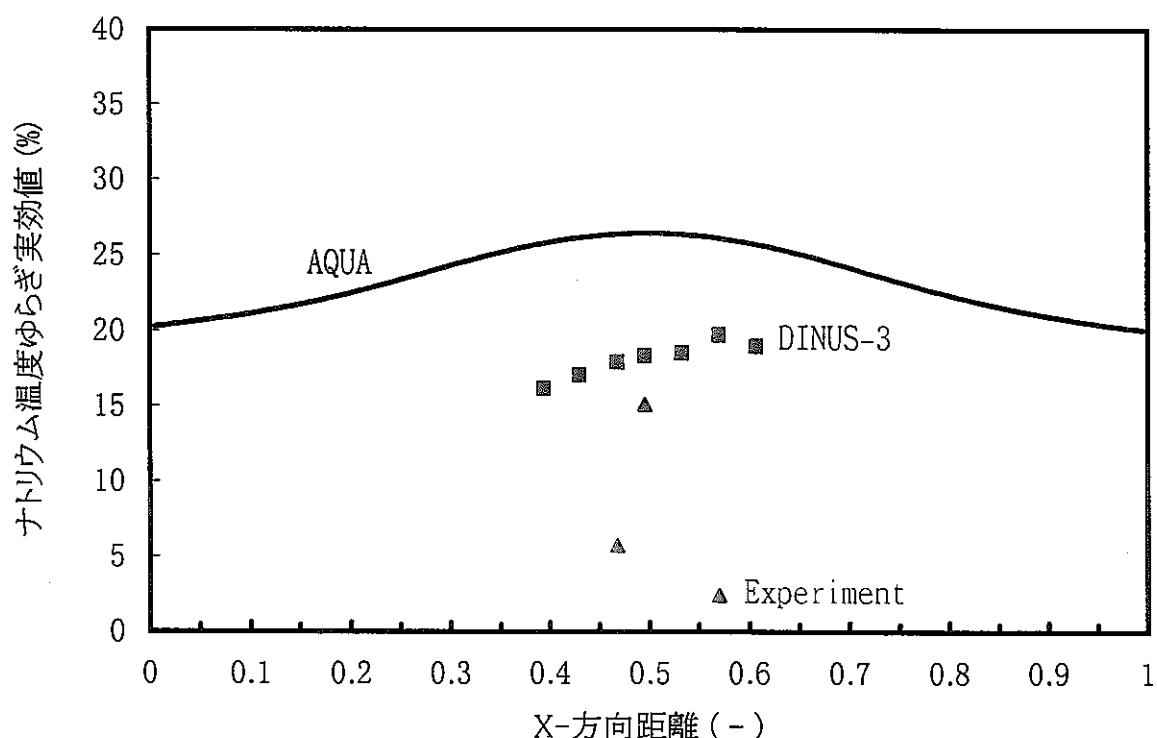


図 4.3 DINUS-3コードによる温度ゆらぎ実効値の時間平均空間分布（ケース3）

Case1

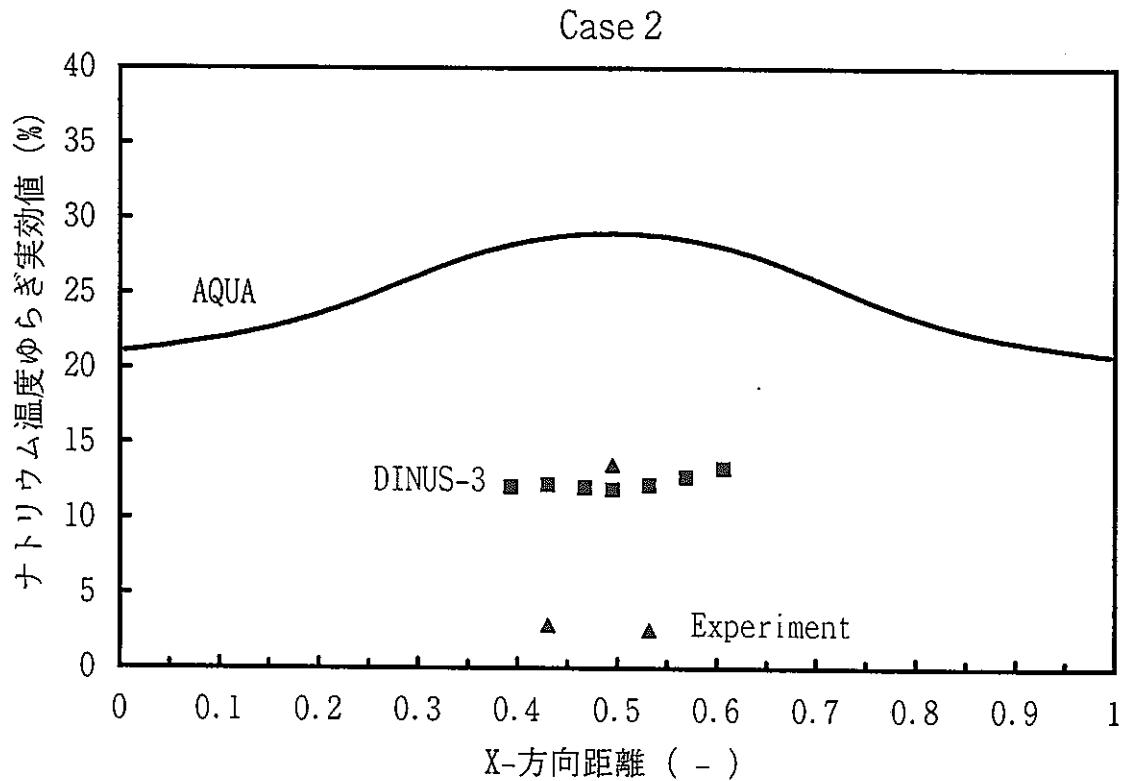


(a) 試験片表面より 1.25 mm 位置

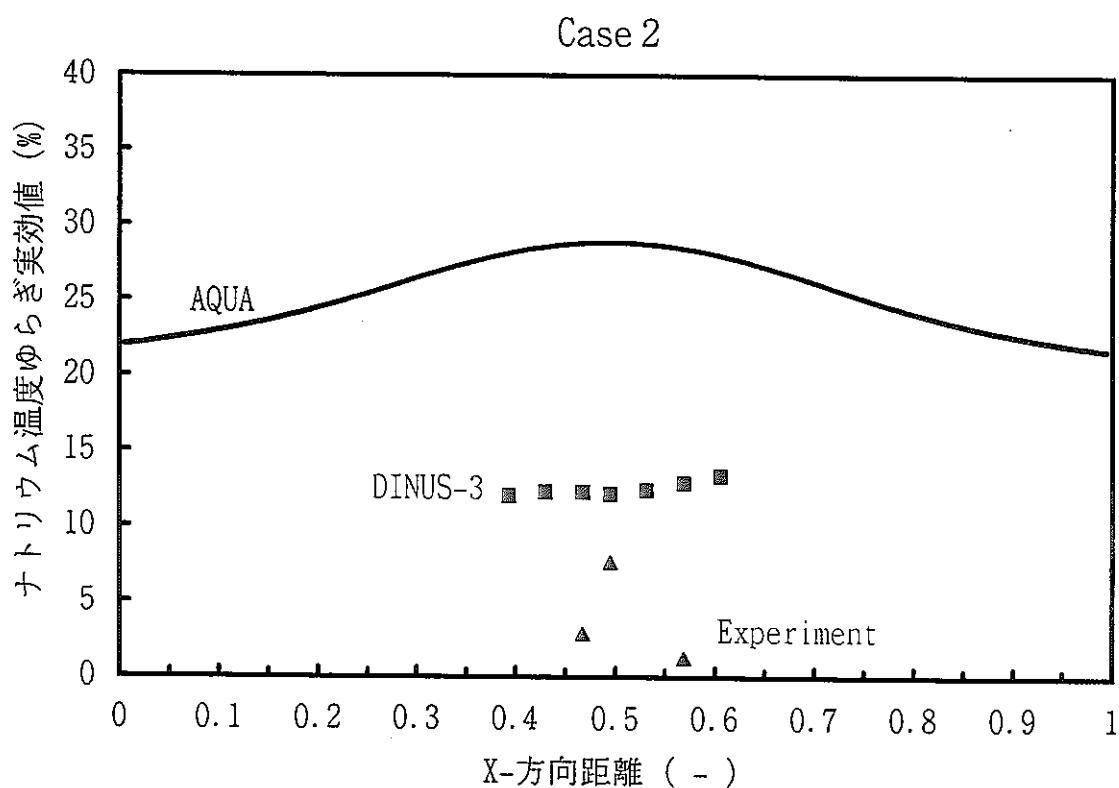


(b) 試験片表面より 0.25 mm 位置

図4.4 温度ゆらぎ実効値の比較（ケース1）



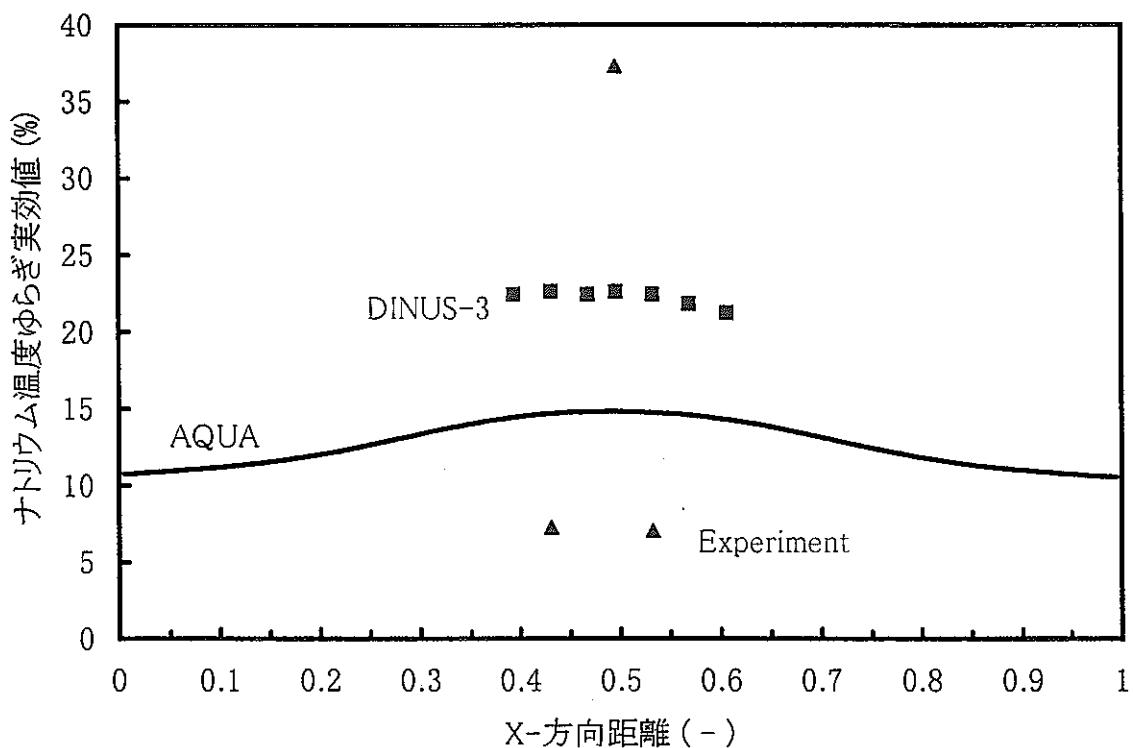
(a) 試験片表面より 1.25 mm 位置



(b) 試験片表面より 0.25 mm 位置

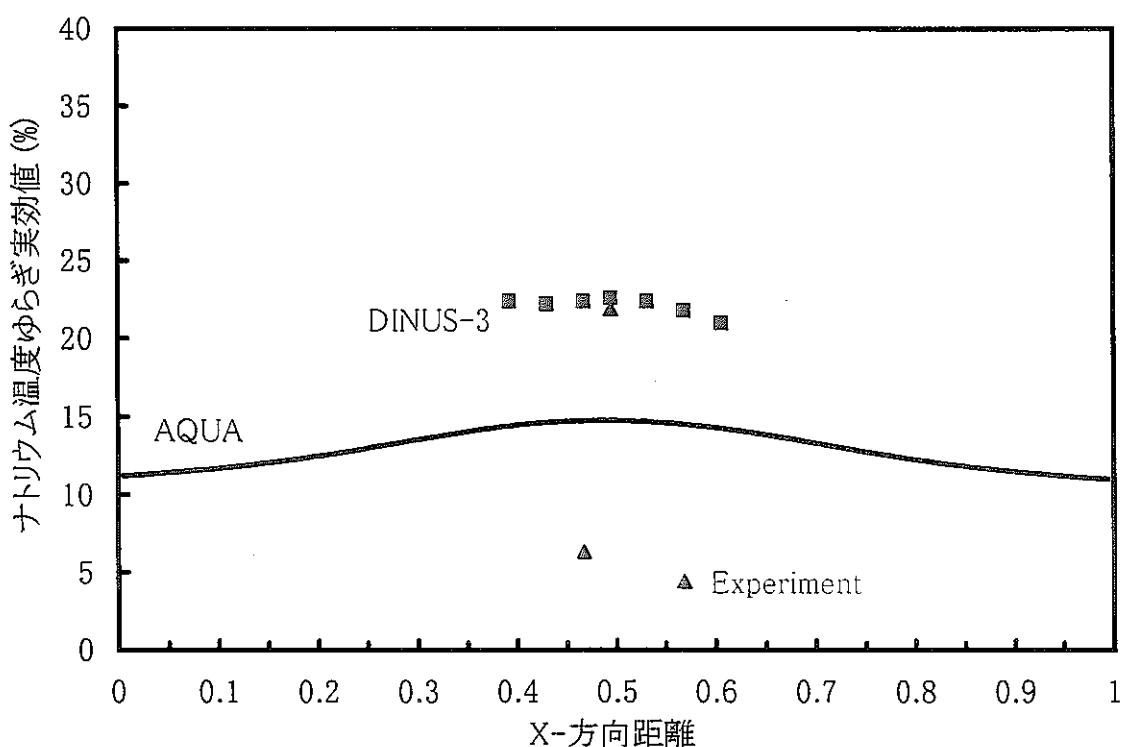
図4.5 温度ゆらぎ実効値の比較（ケース2）

Case3



(a) 試験片表面より 1.25mm 位置

Case3



(b) 試験片表面より 0.25mm 位置

図4.6 温度ゆらぎ実効値の比較（ケース3）

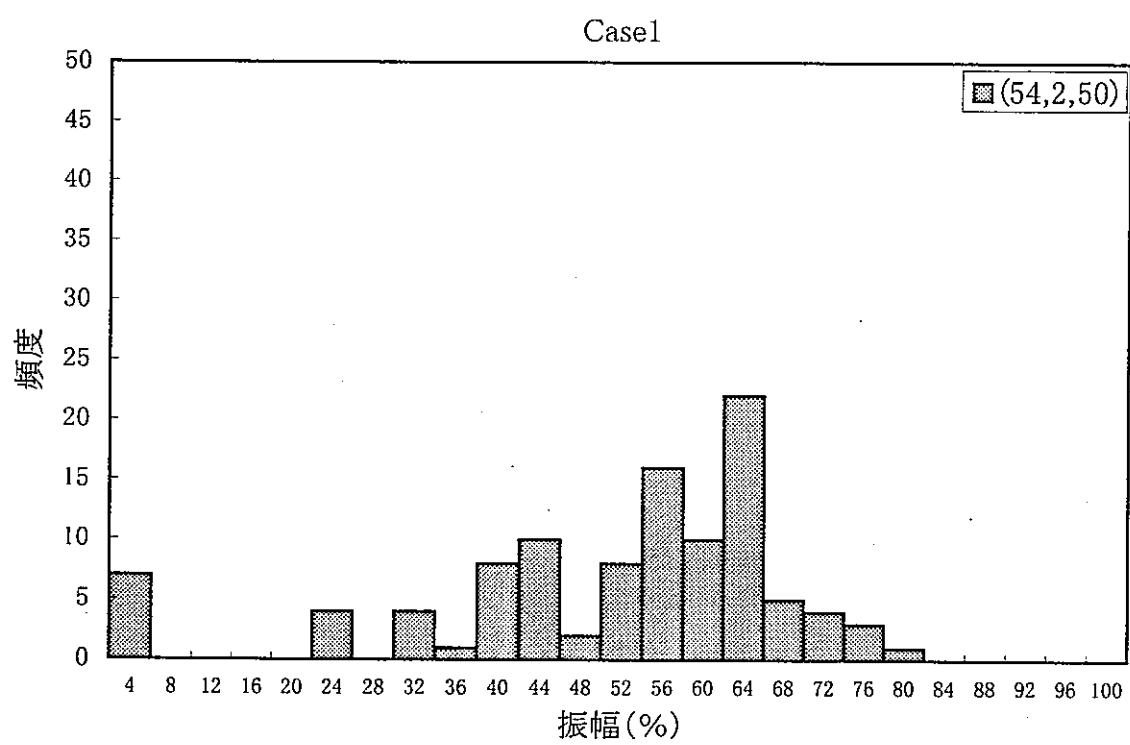
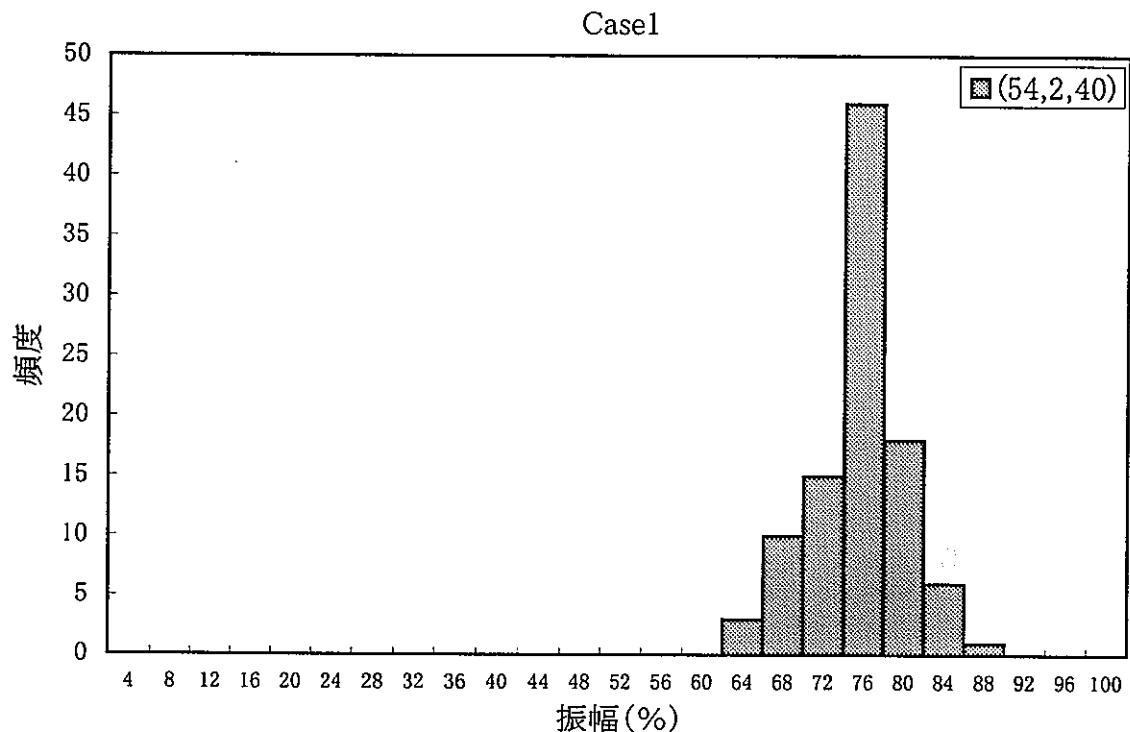


図 4. 7 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 1） (1/2)

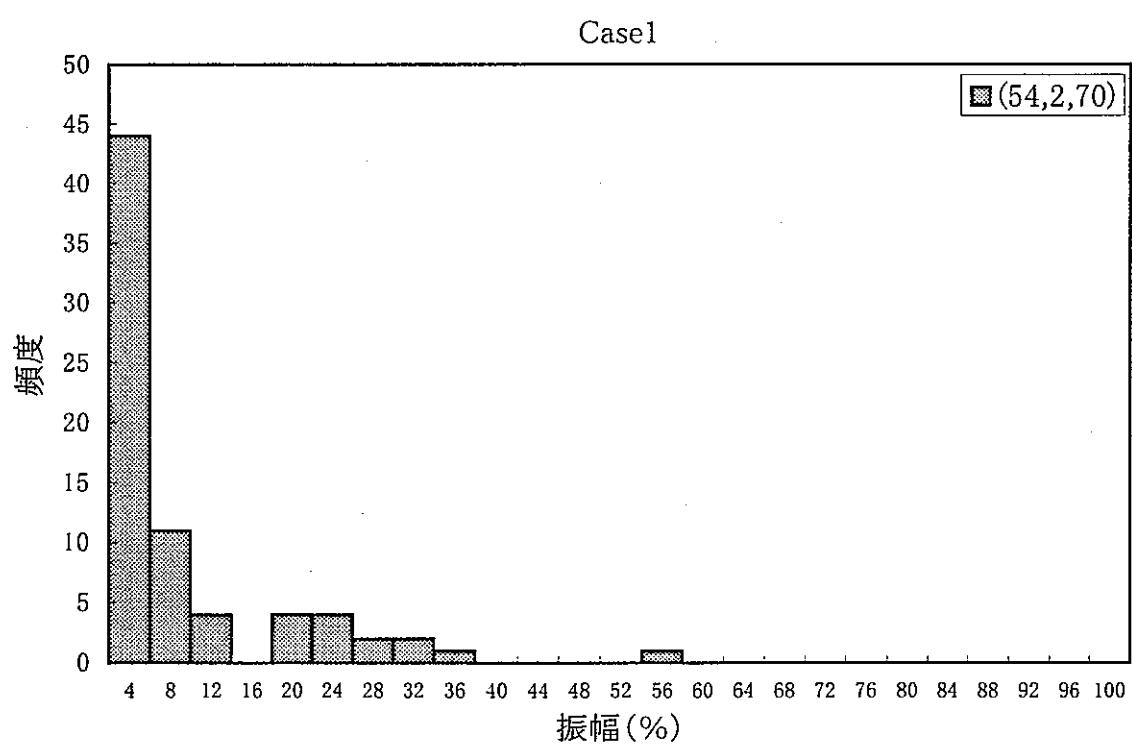
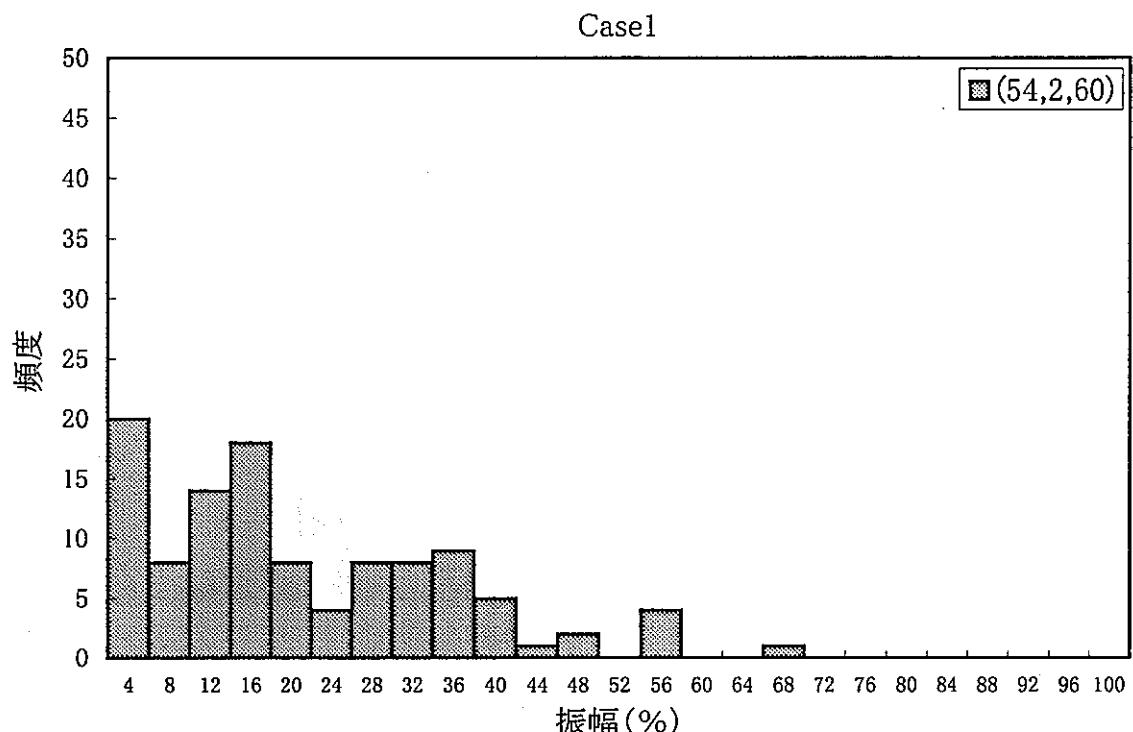


図 4. 7 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 1） (2/2)

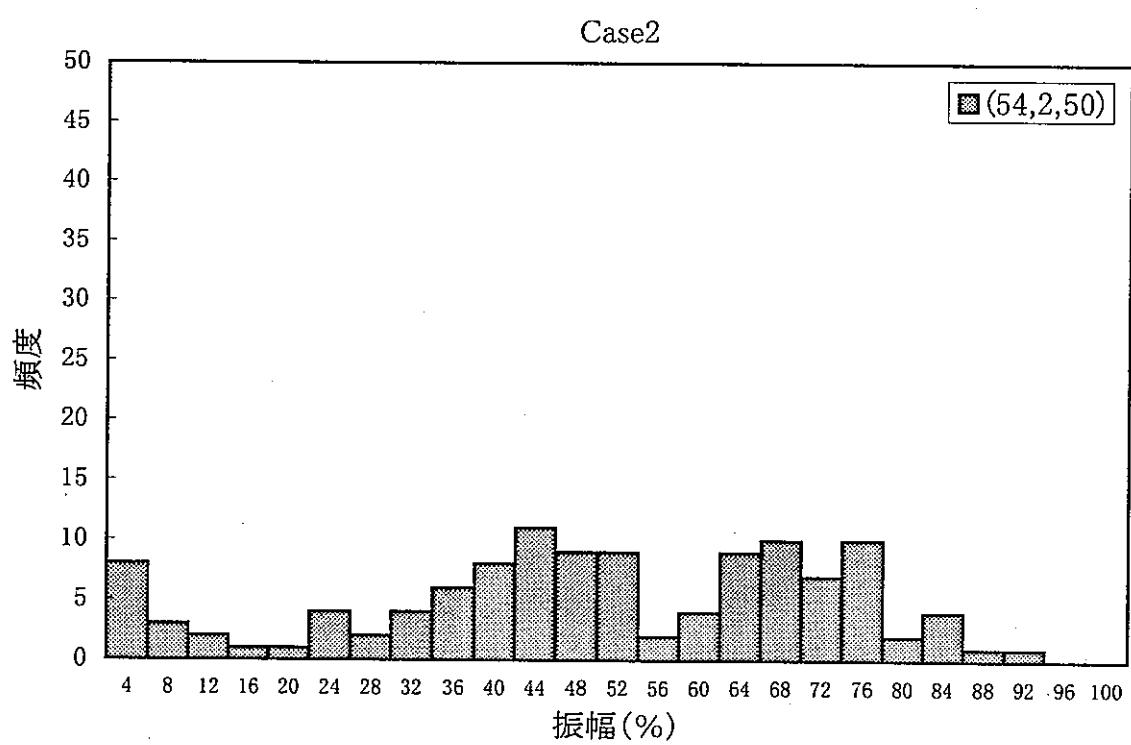
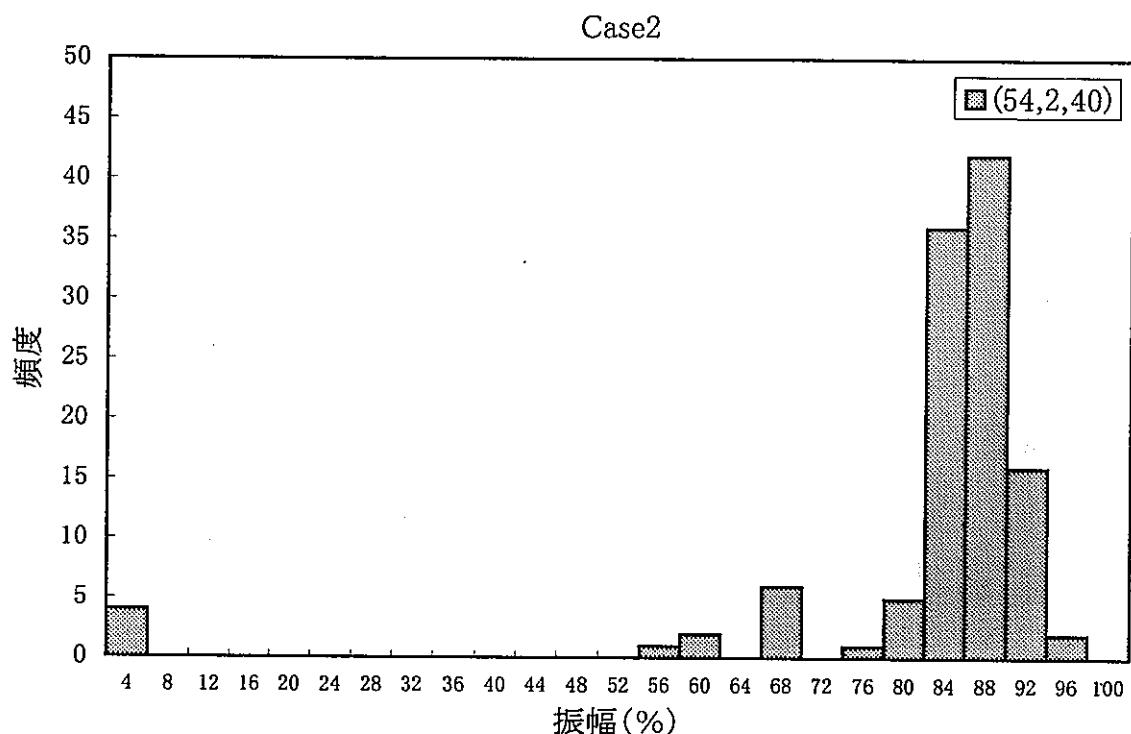


図 4. 8 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 2） (1/2)

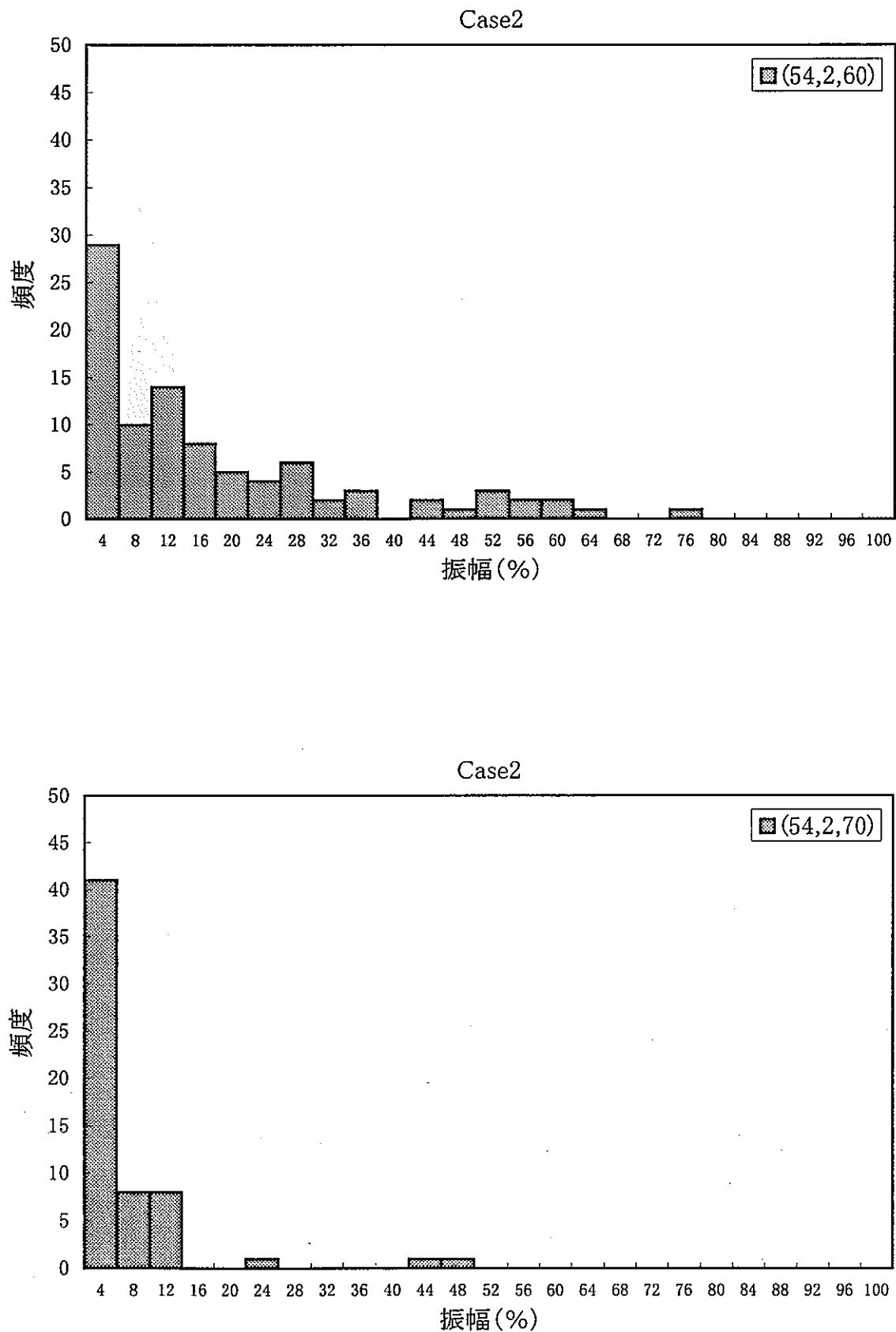


図 4. 8 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 2） (2/2)

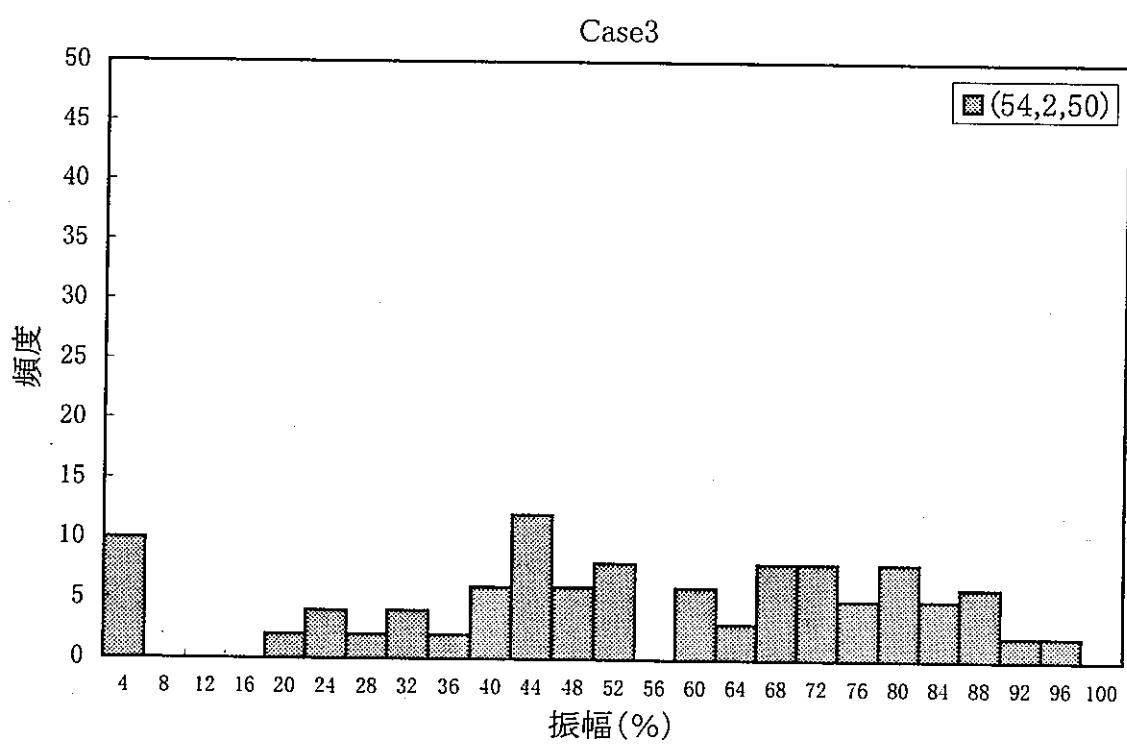
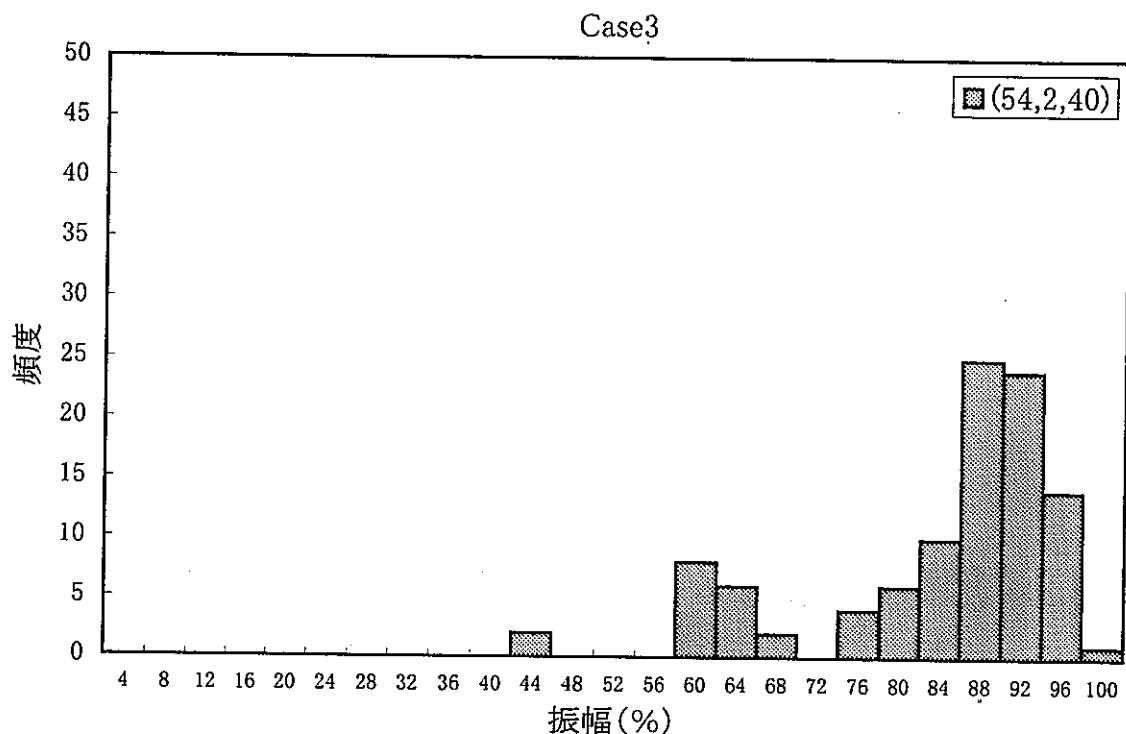


図 4. 9 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 3） (1/2)

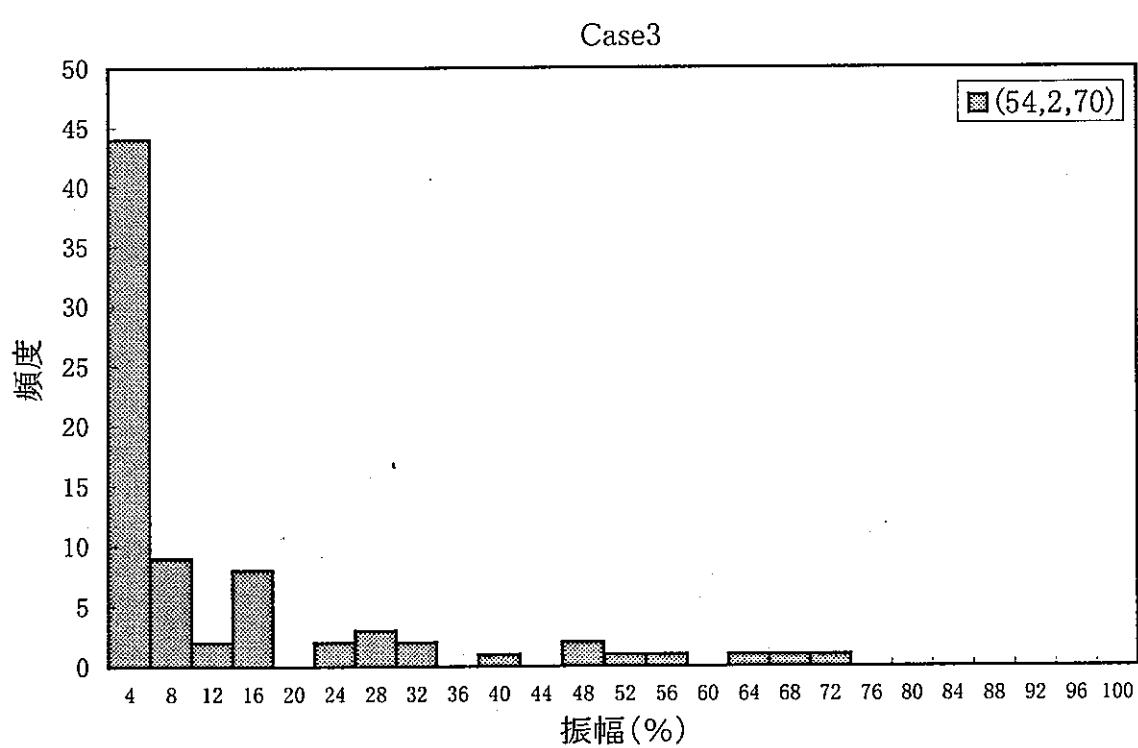
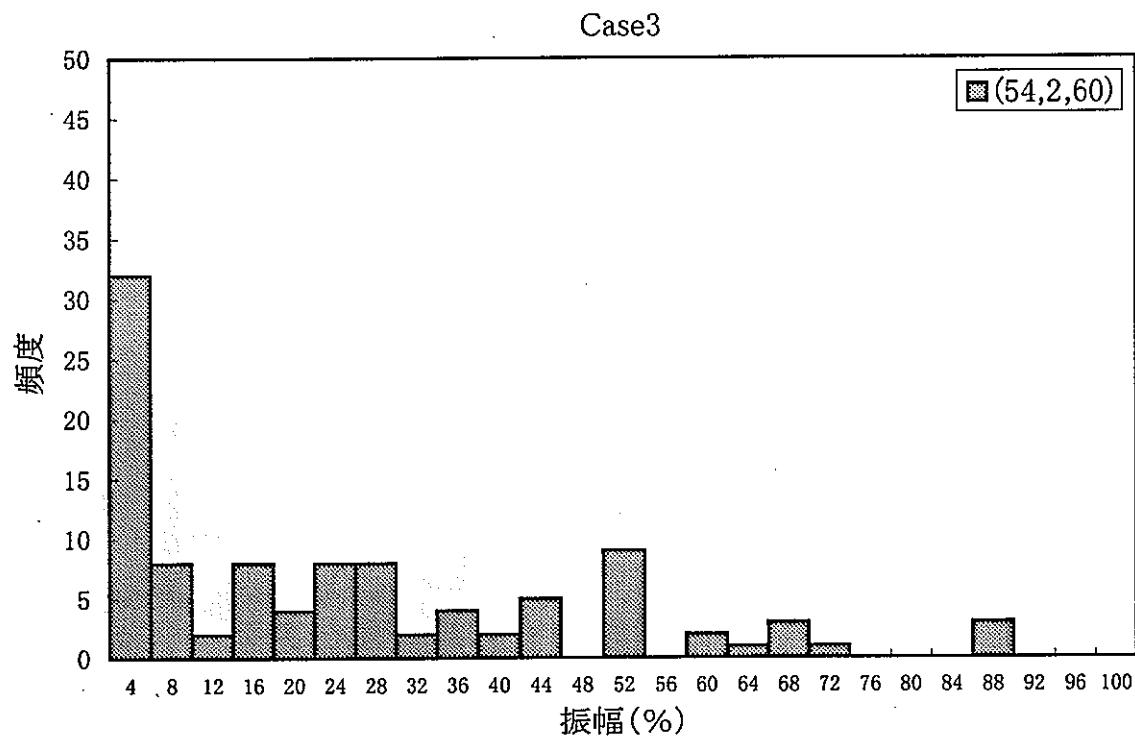


図 4. 9 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 3） (2/2)

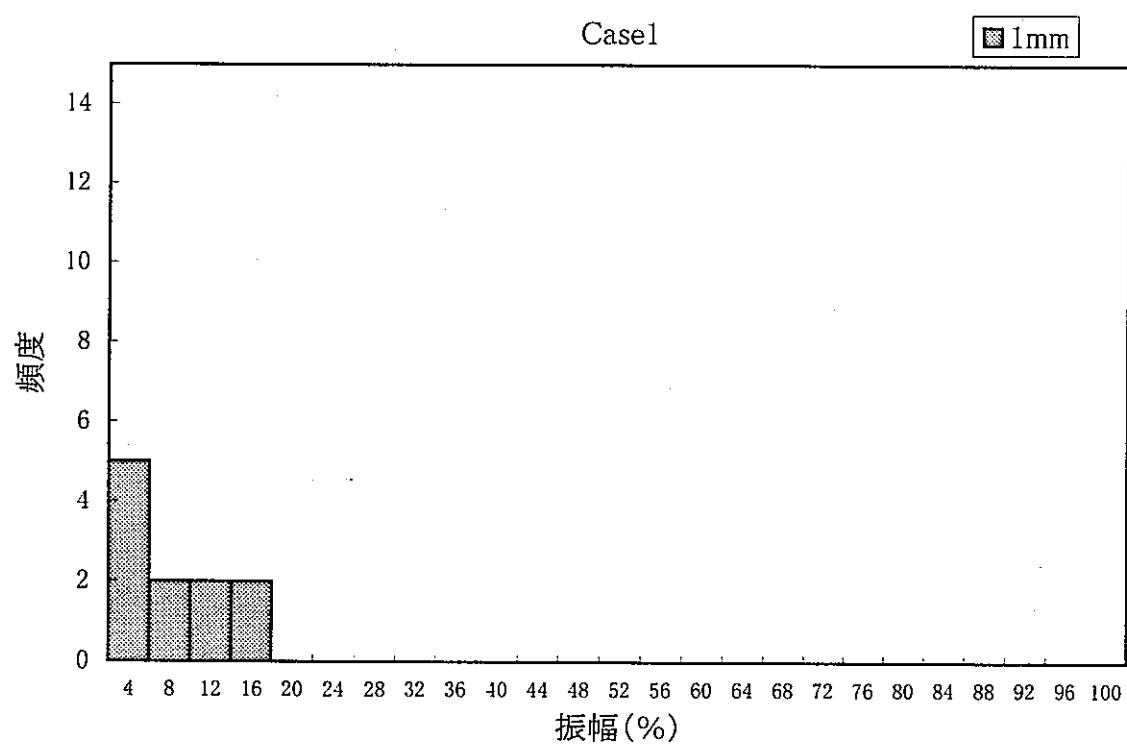
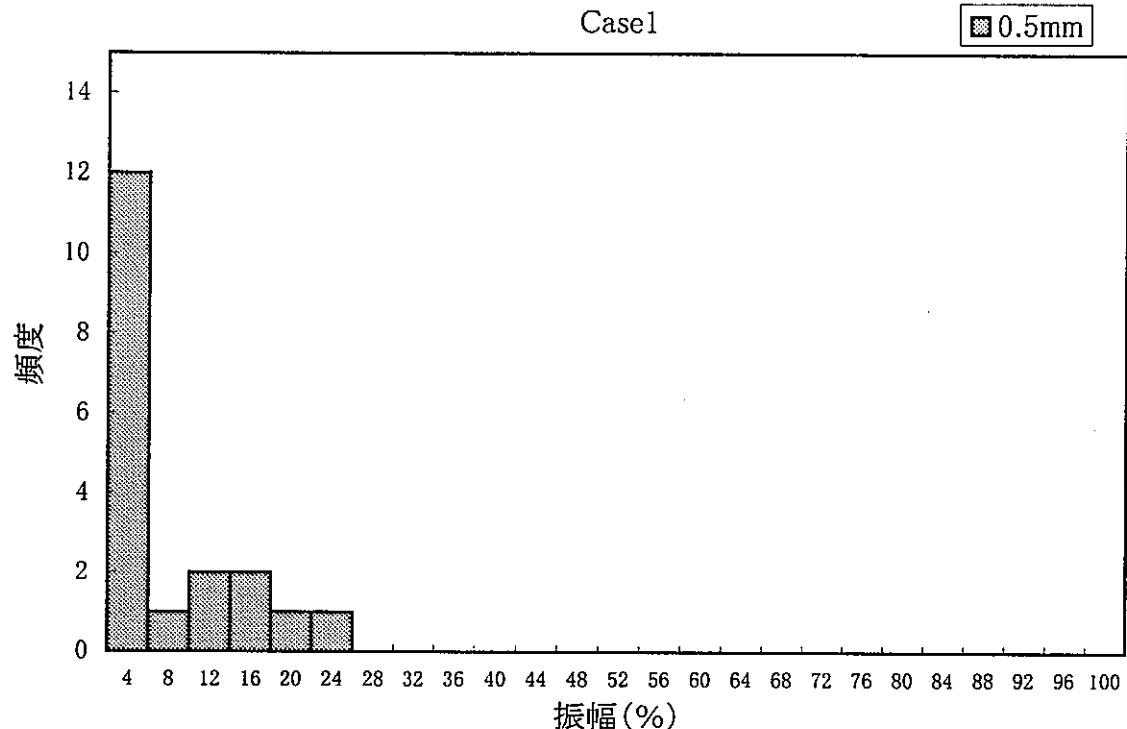


図 4. 10 BEMSET コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 1） (1/3)

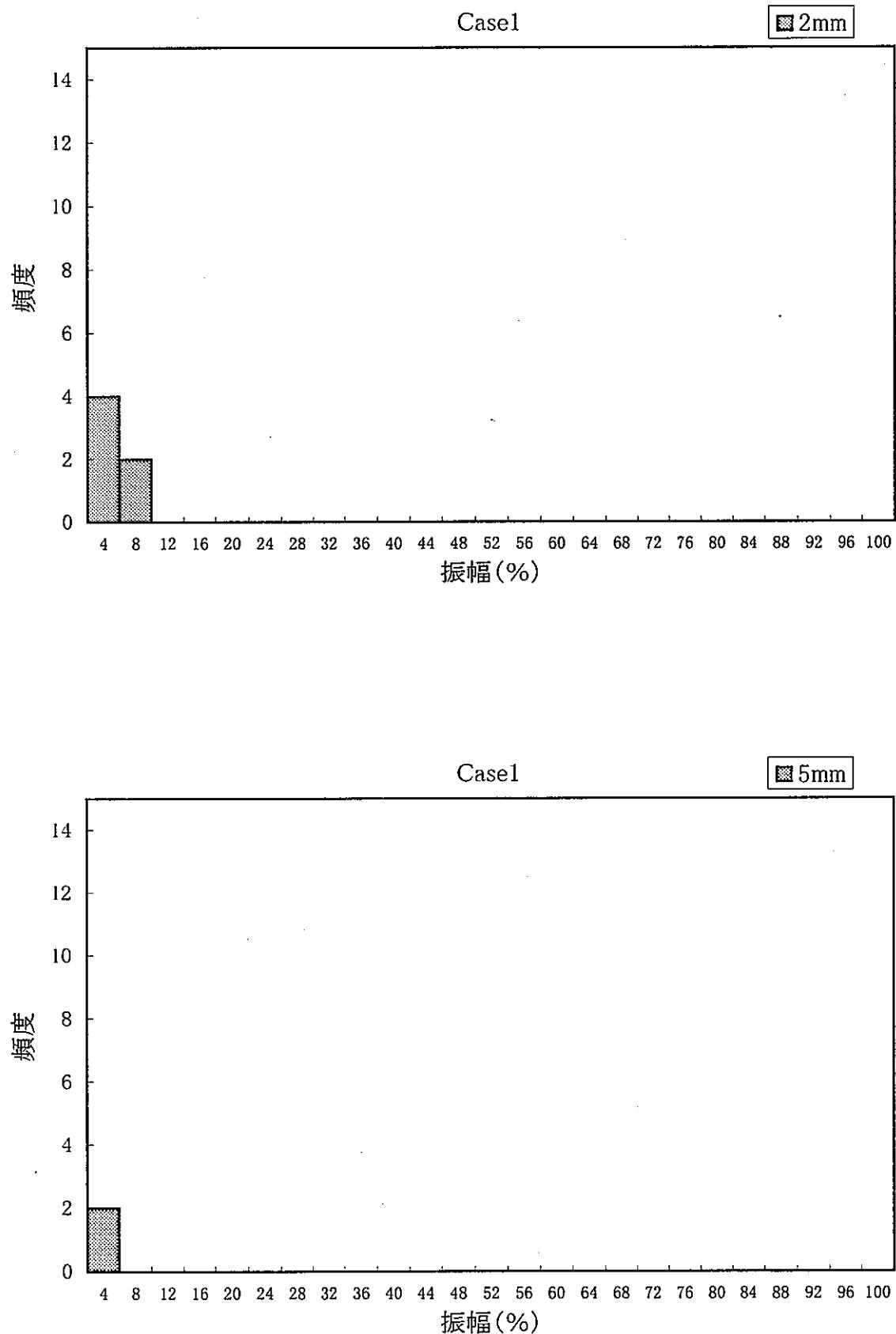


図 4. 10 BEMSET コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 1） (2/3)

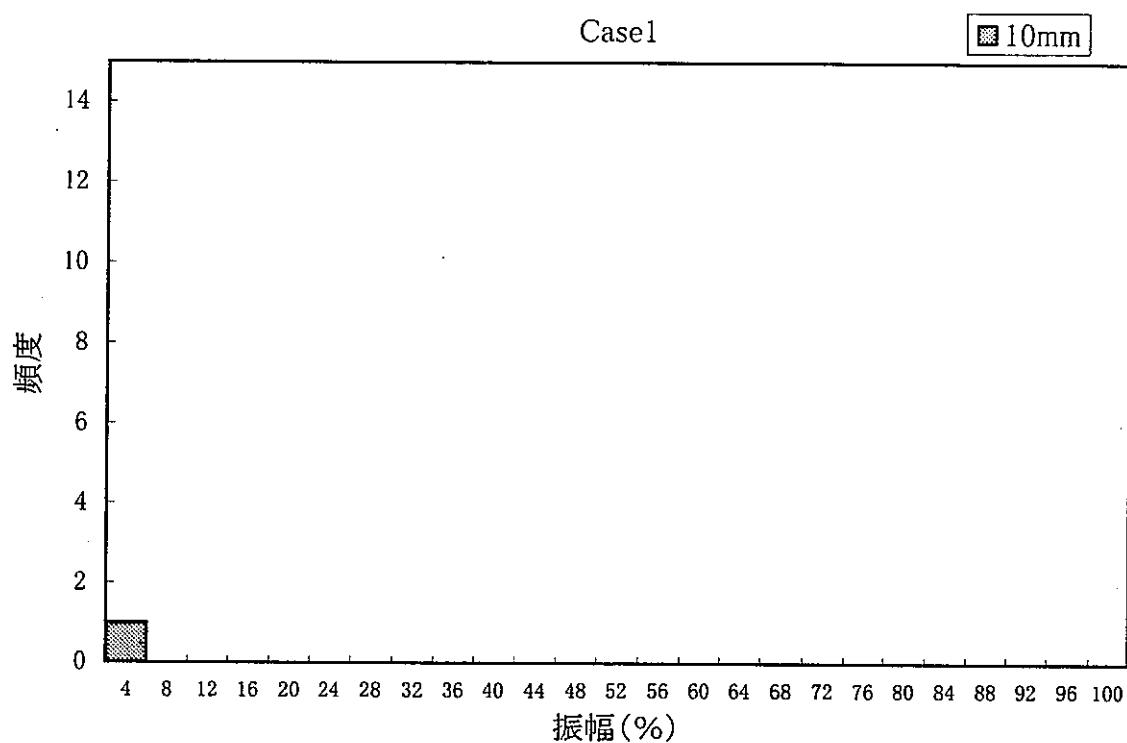


図 4. 10 BEMSET コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 1） (3/3)

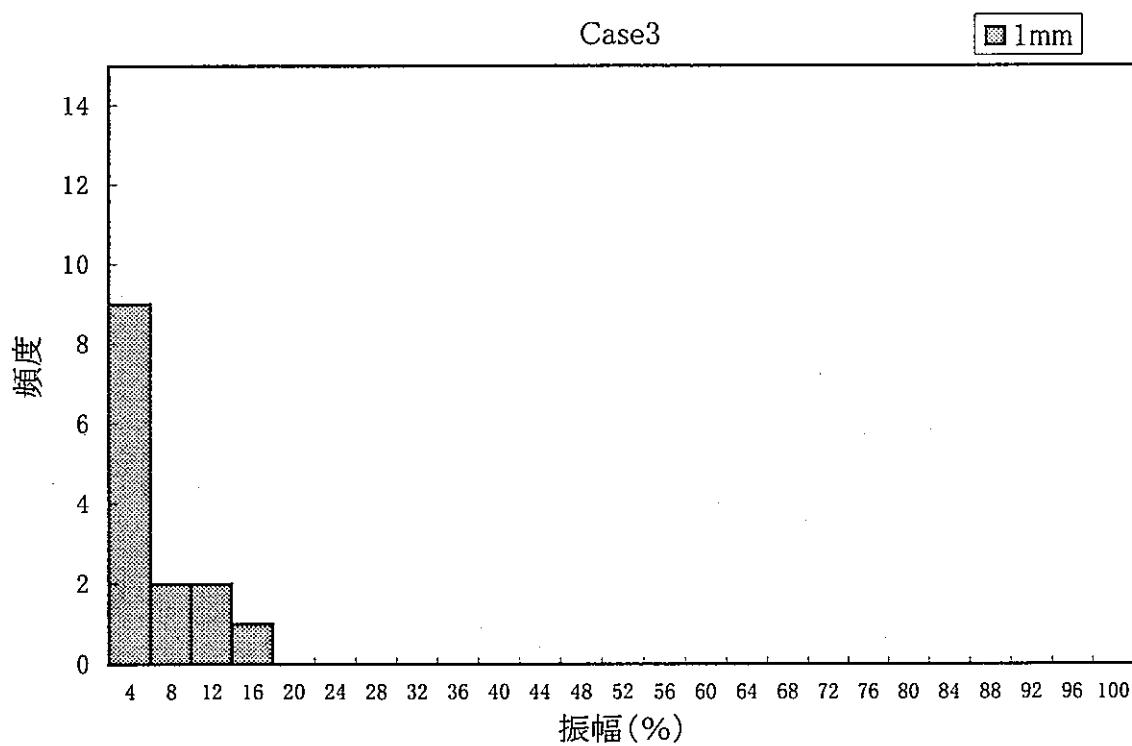
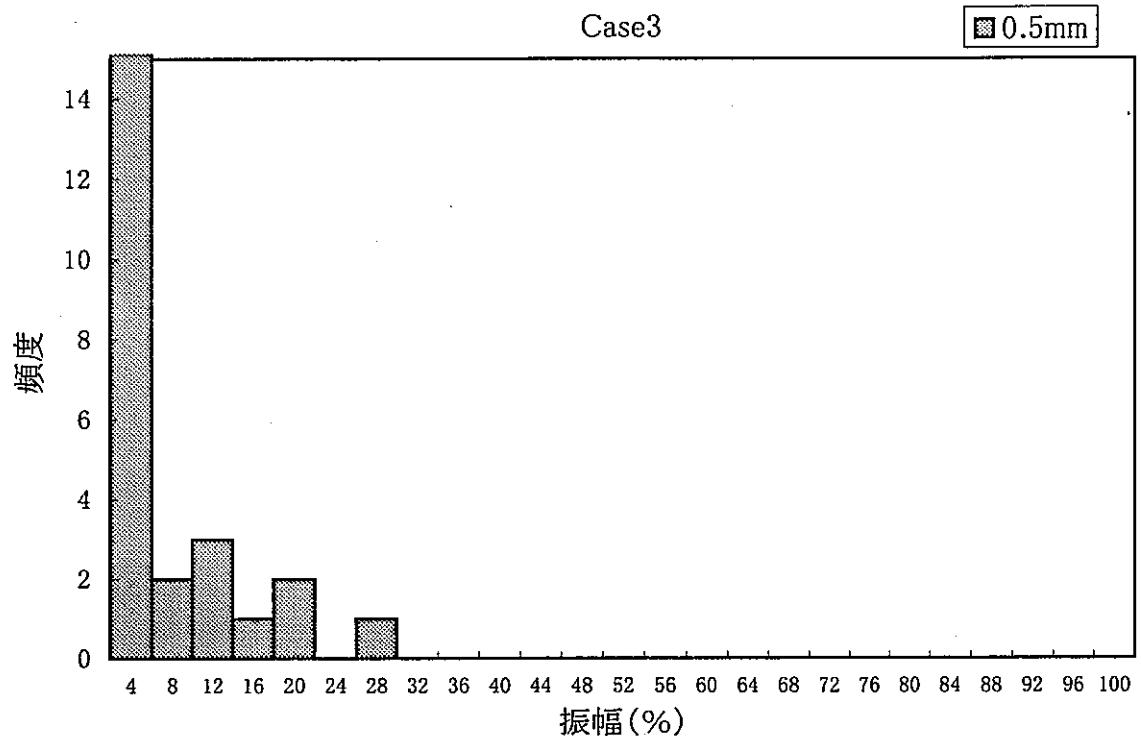


図 4. 12 BEMSET コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 3） (1/3)

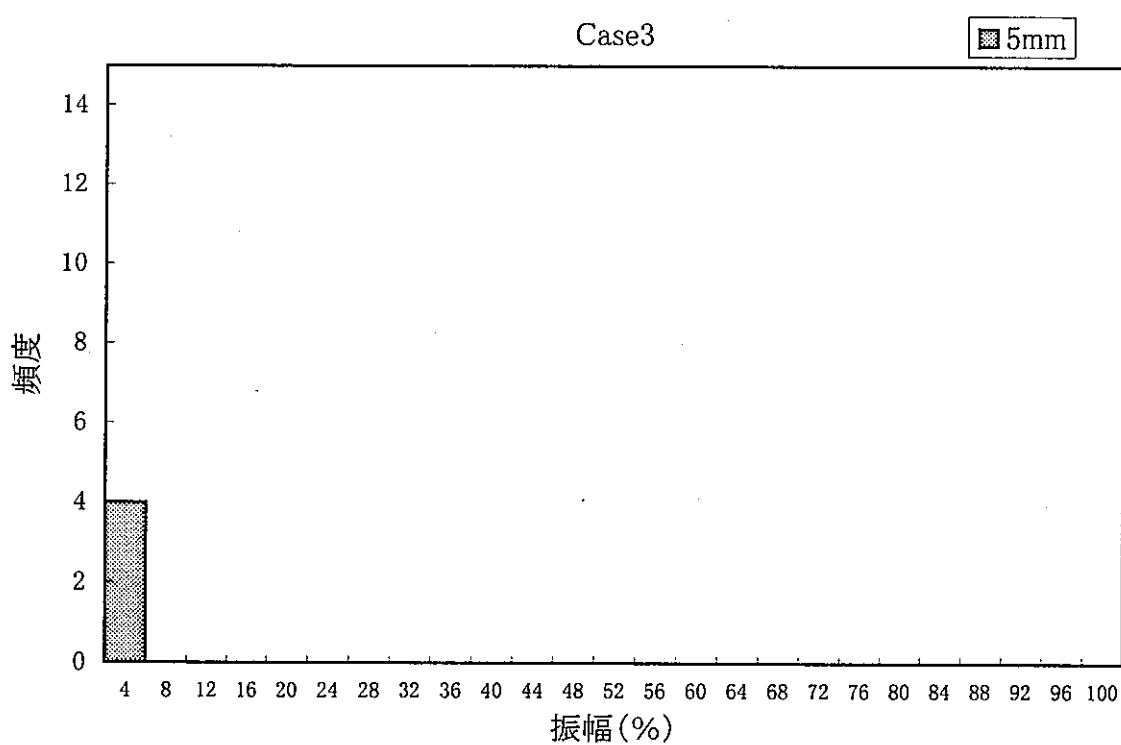
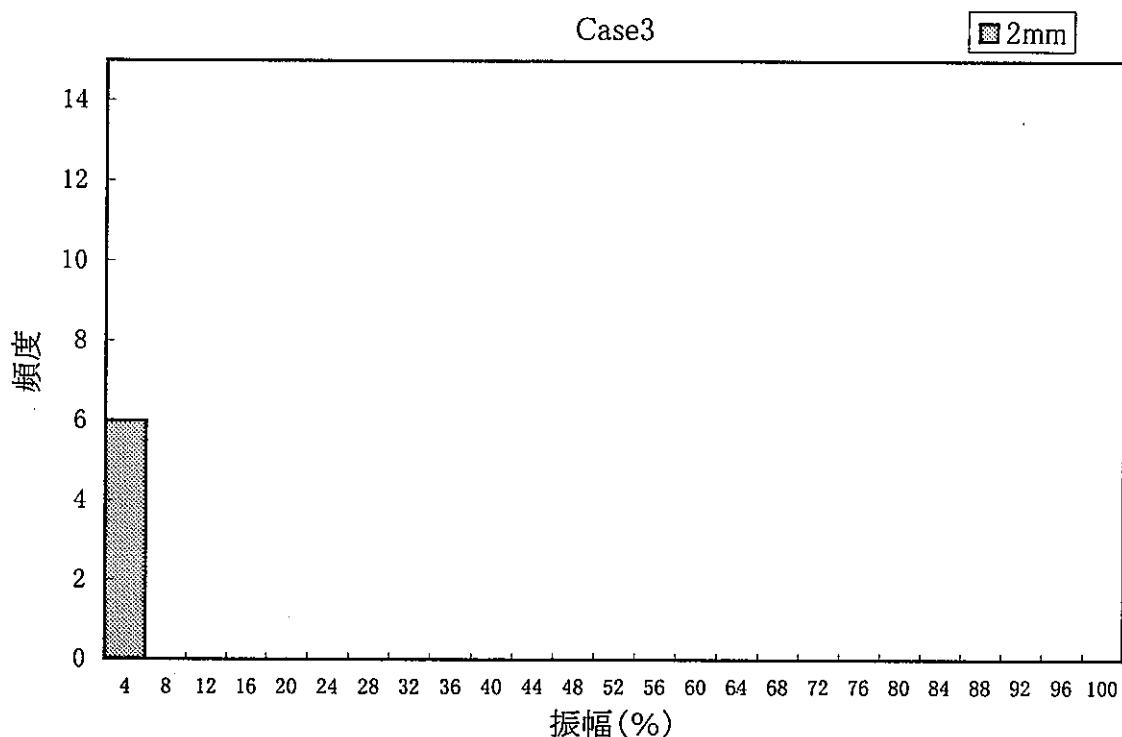


図 4. 12 BEMSET コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 3） (2/3)

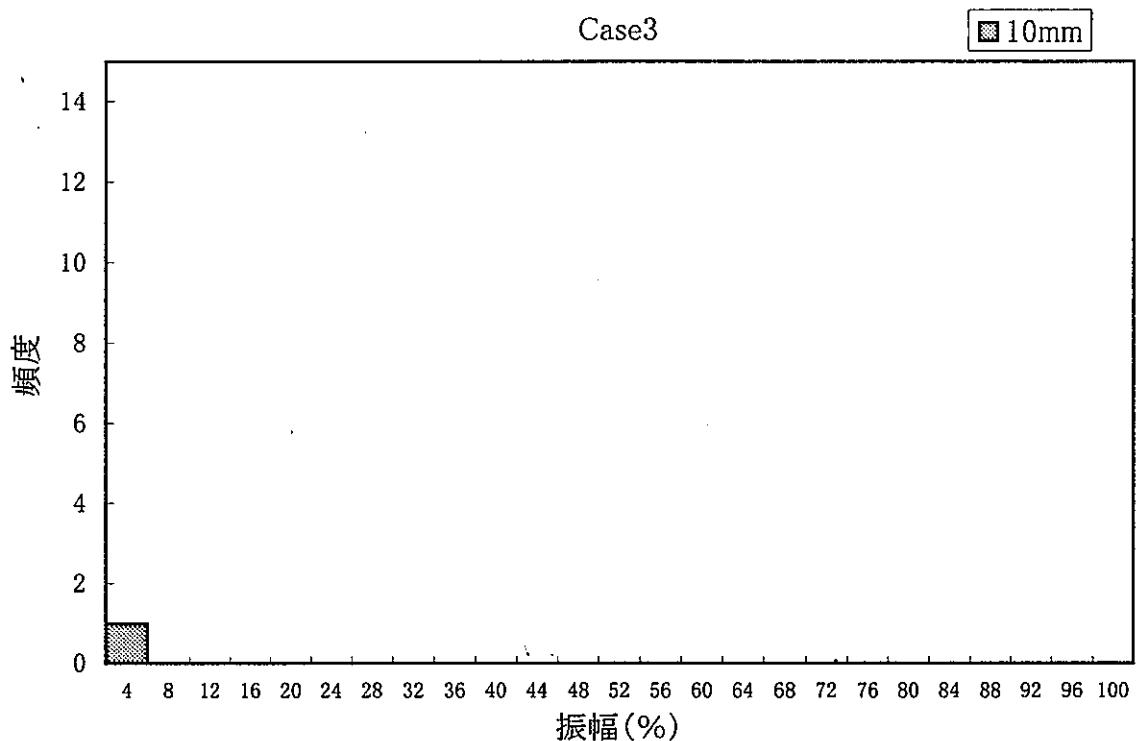
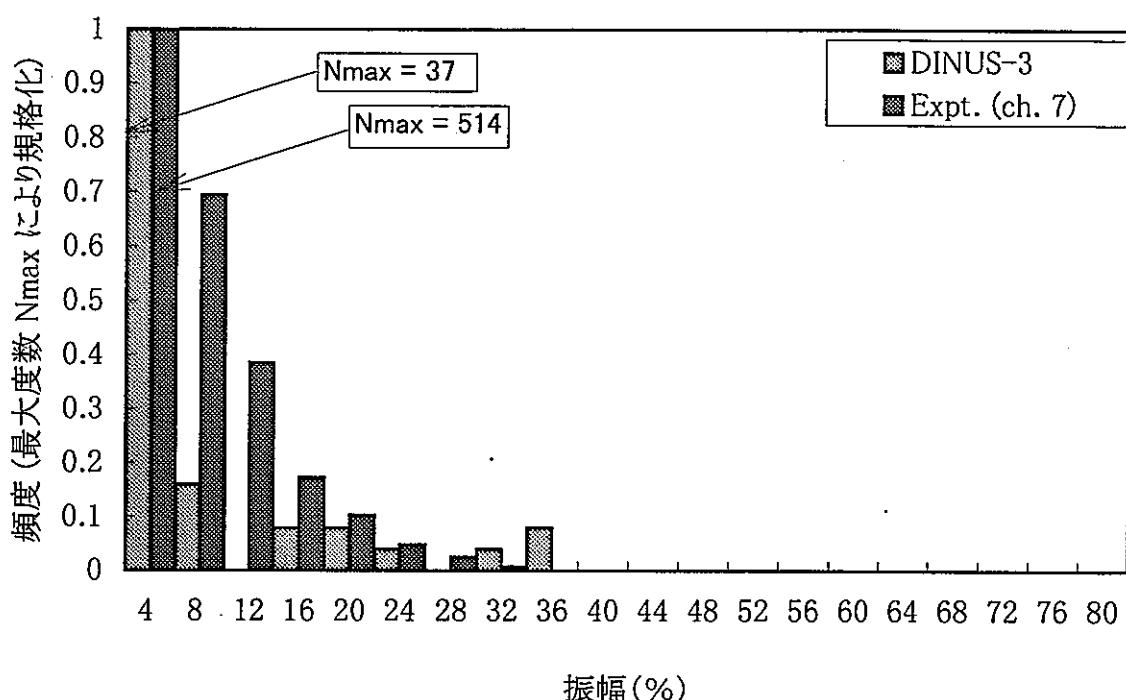


図 4. 12 BEMSET コードによる温度ゆらぎ振幅頻度分布（ケース 3） (3/3)

Case1



Case1

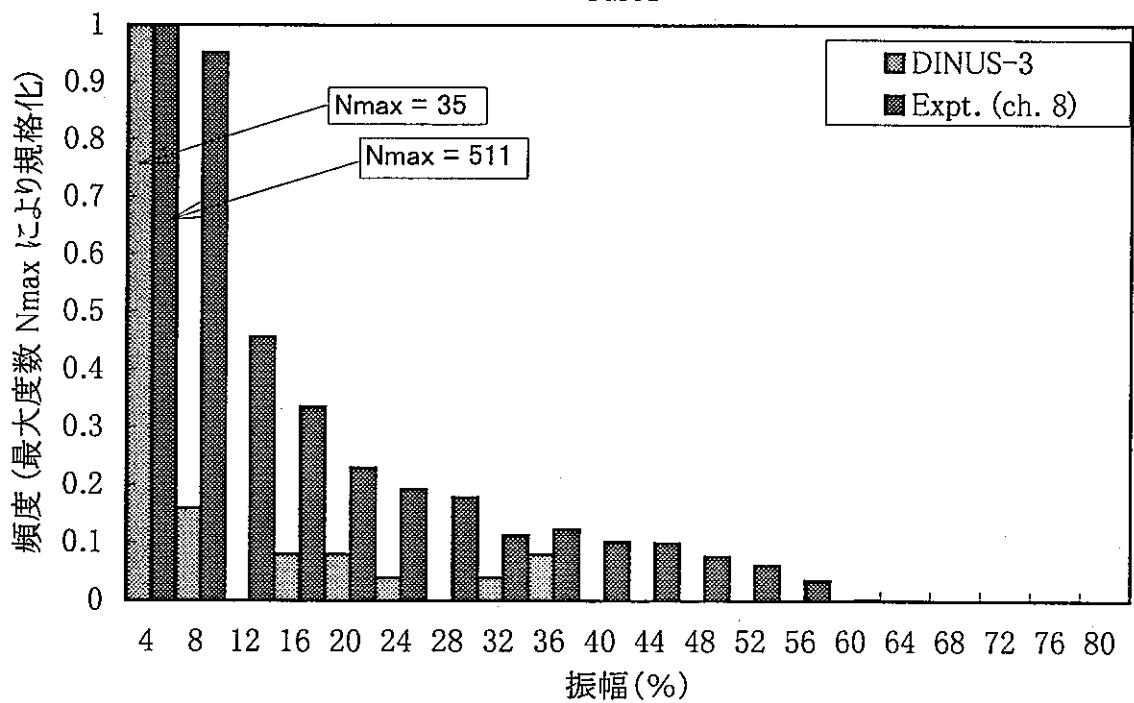
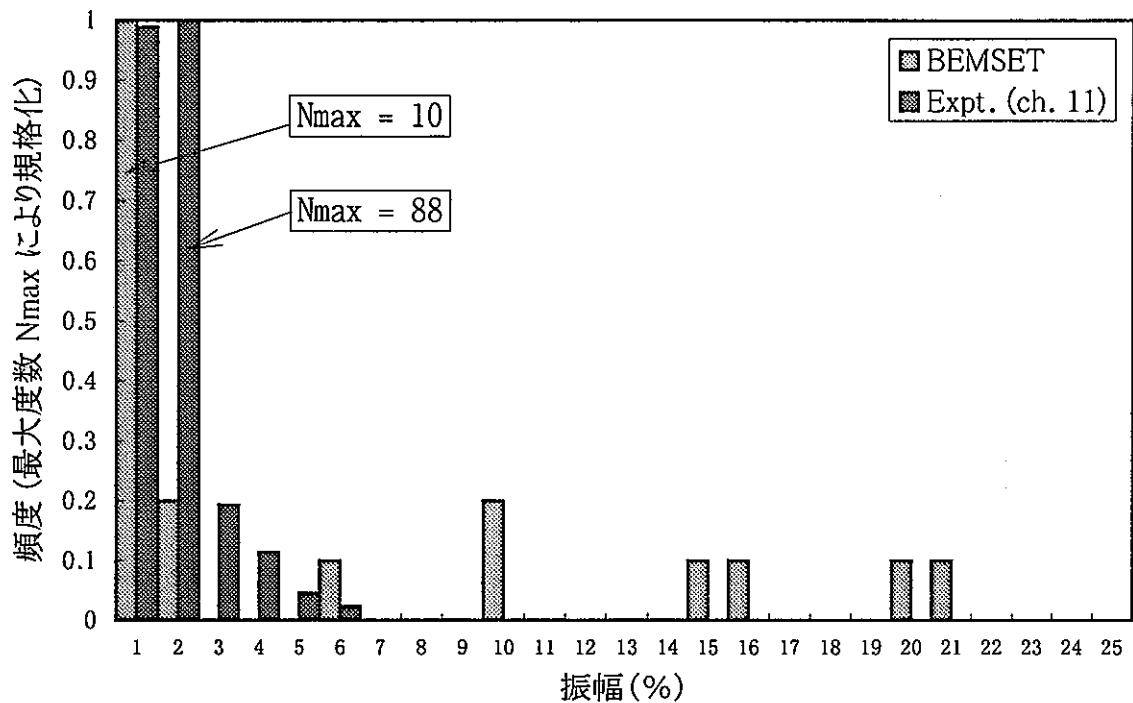


図 4. 13 溫度ゆらぎ振幅頻度分布の比較 (ケース 1) (1/2)

Case1



Case1

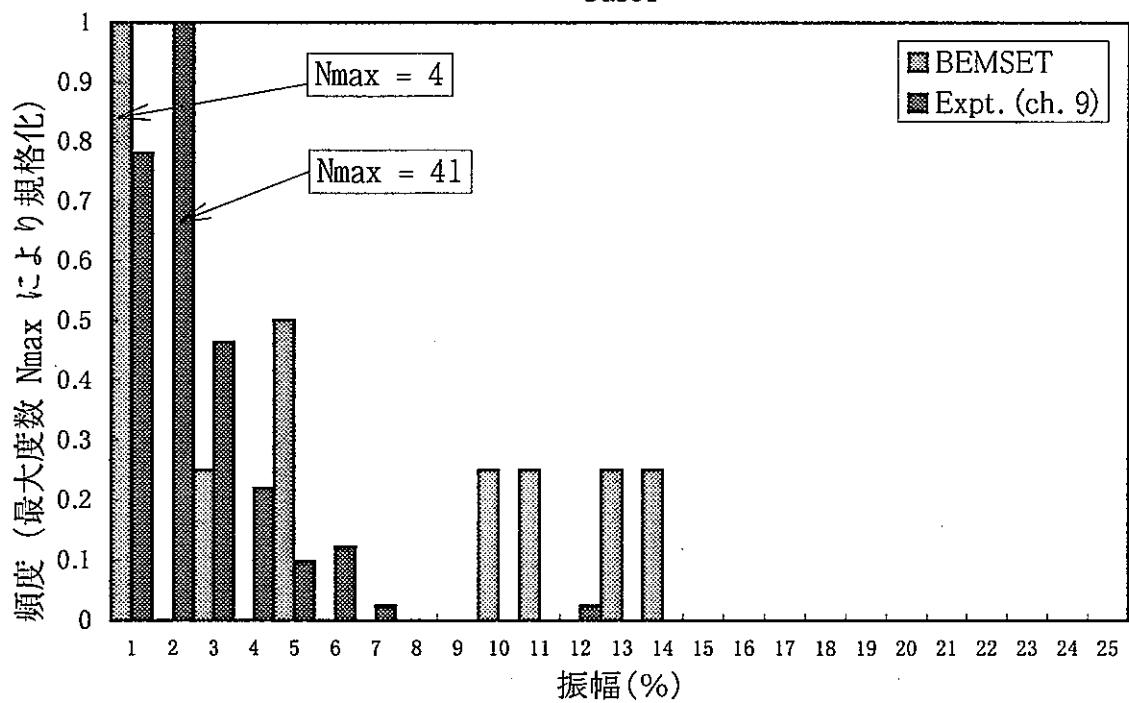


図 4. 13 溫度ゆらぎ振幅頻度分布の比較 (ケース 1) (2/2)

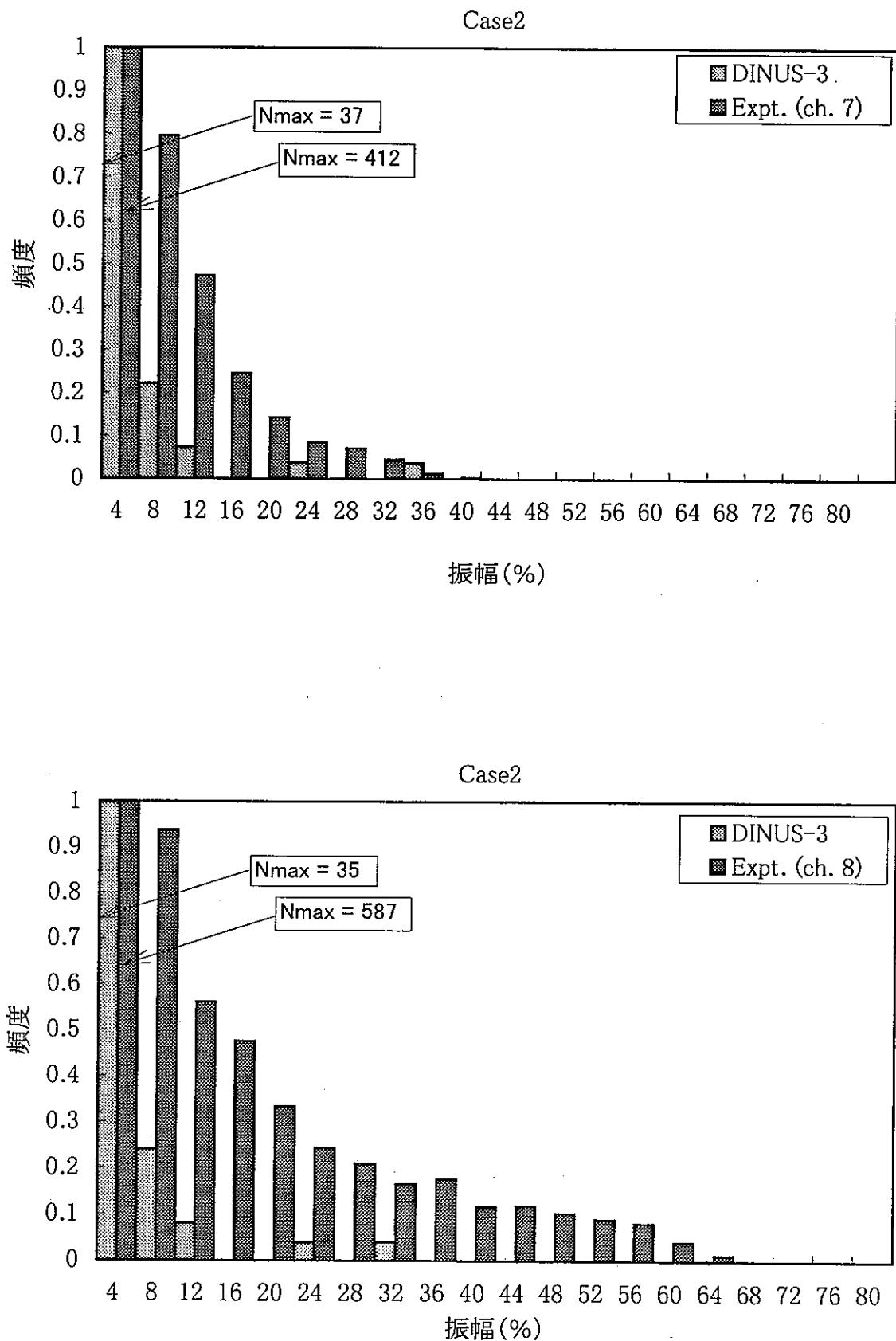
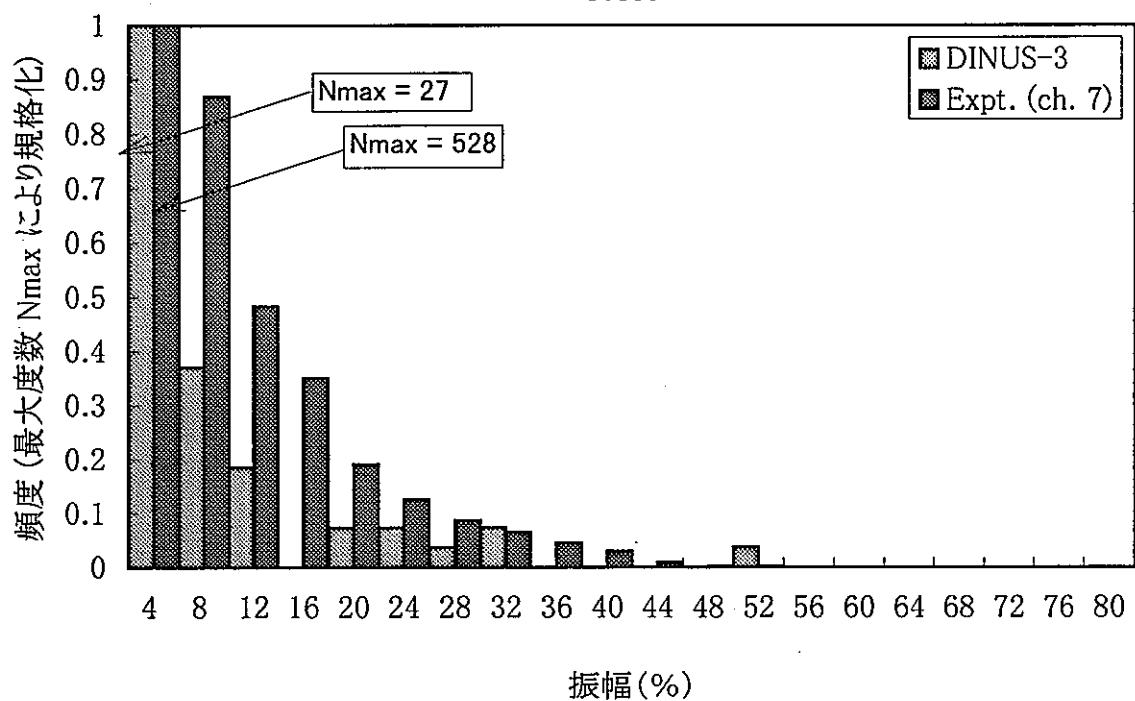


図 4. 14 溫度ゆらぎ振幅頻度分布の比較（ケース 2） (1/2)

Case3



Case3

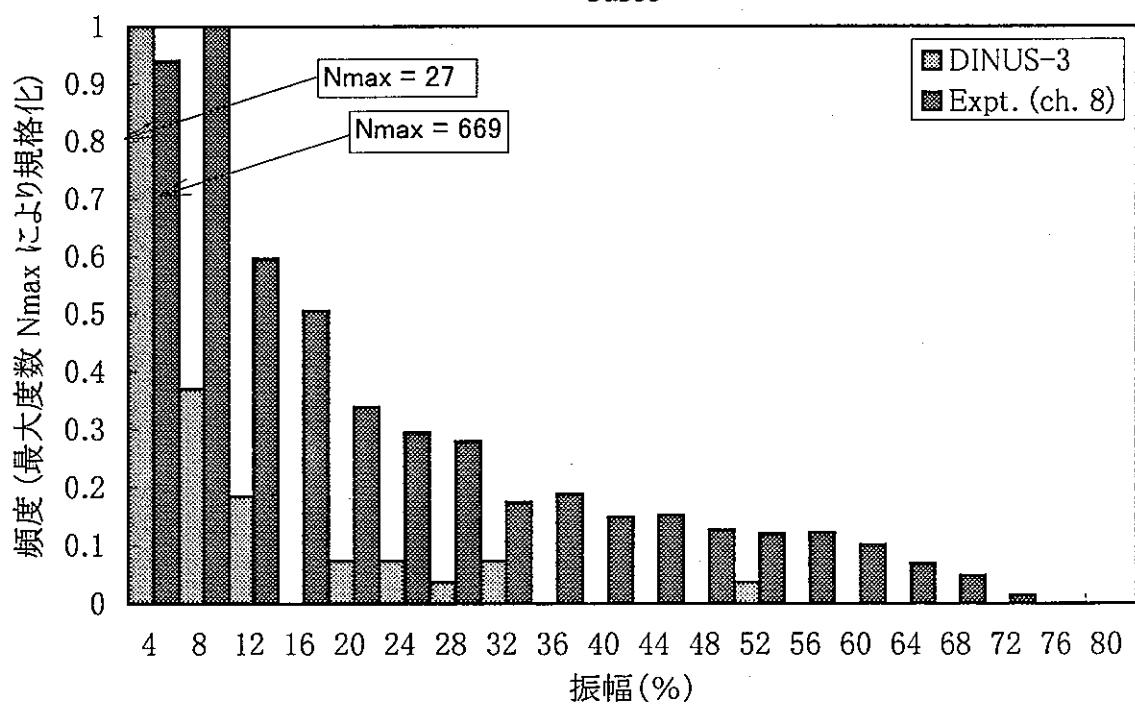
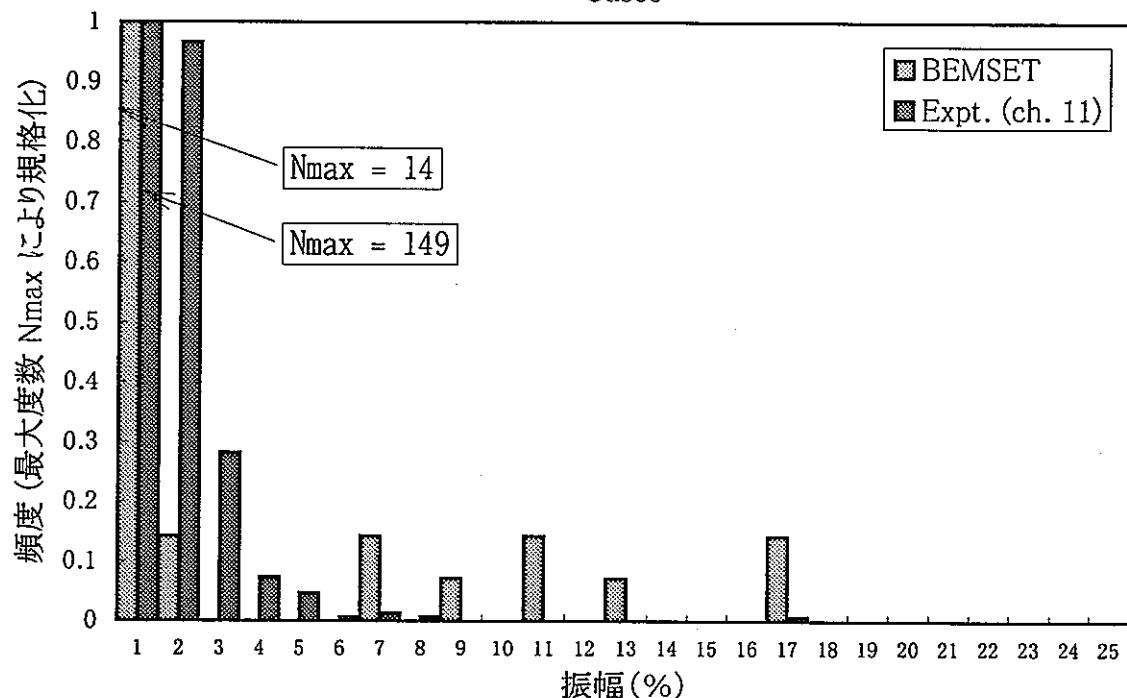


図 4. 15 溫度ゆらぎ振幅頻度分布の比較（ケース 3） (1/2)

Case3



Case3

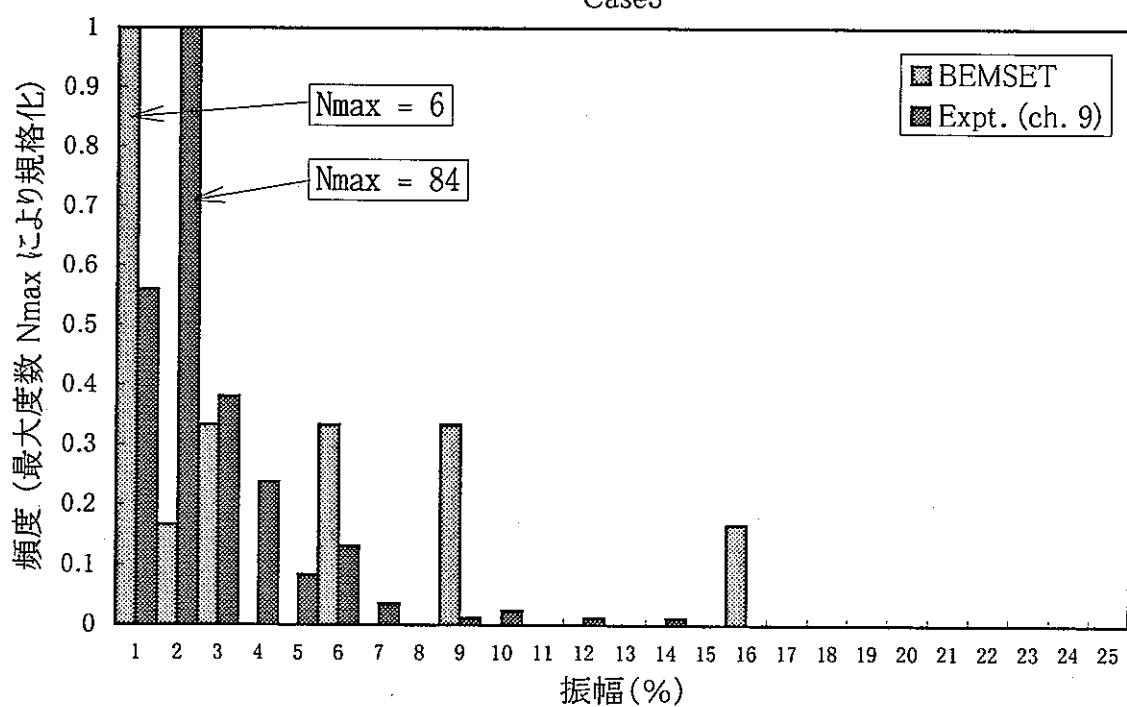


図 4. 15 溫度ゆらぎ振幅頻度分布の比較 (ケース 3) (2/2)

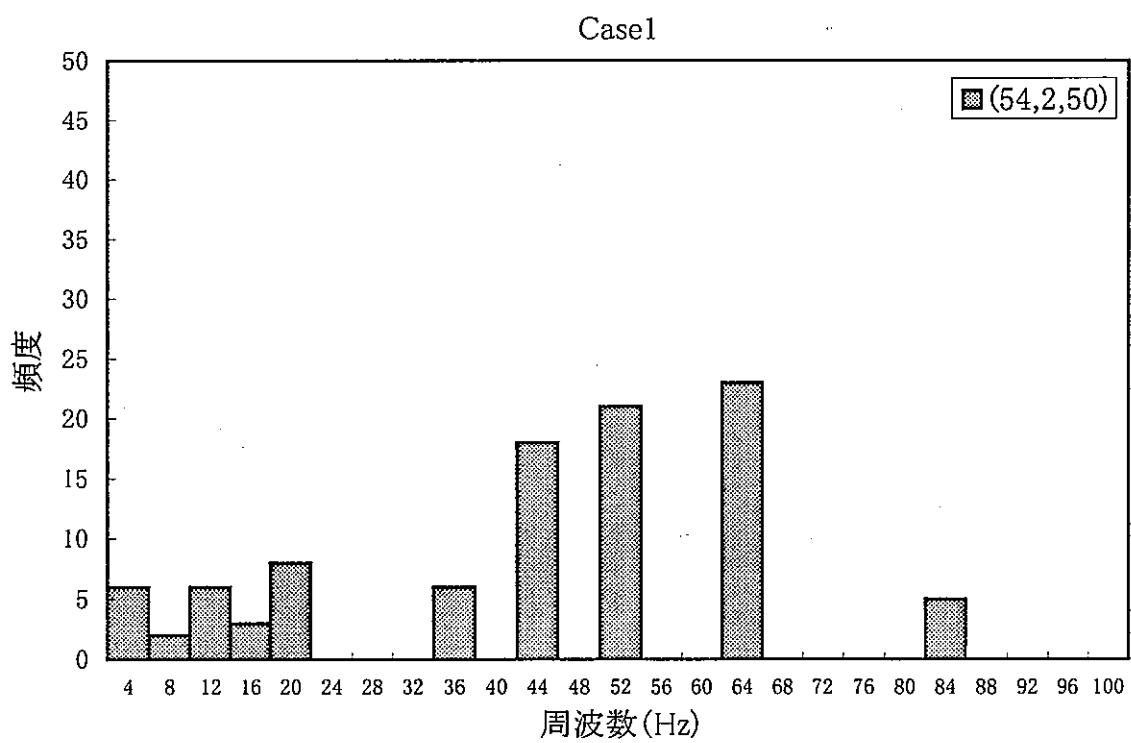
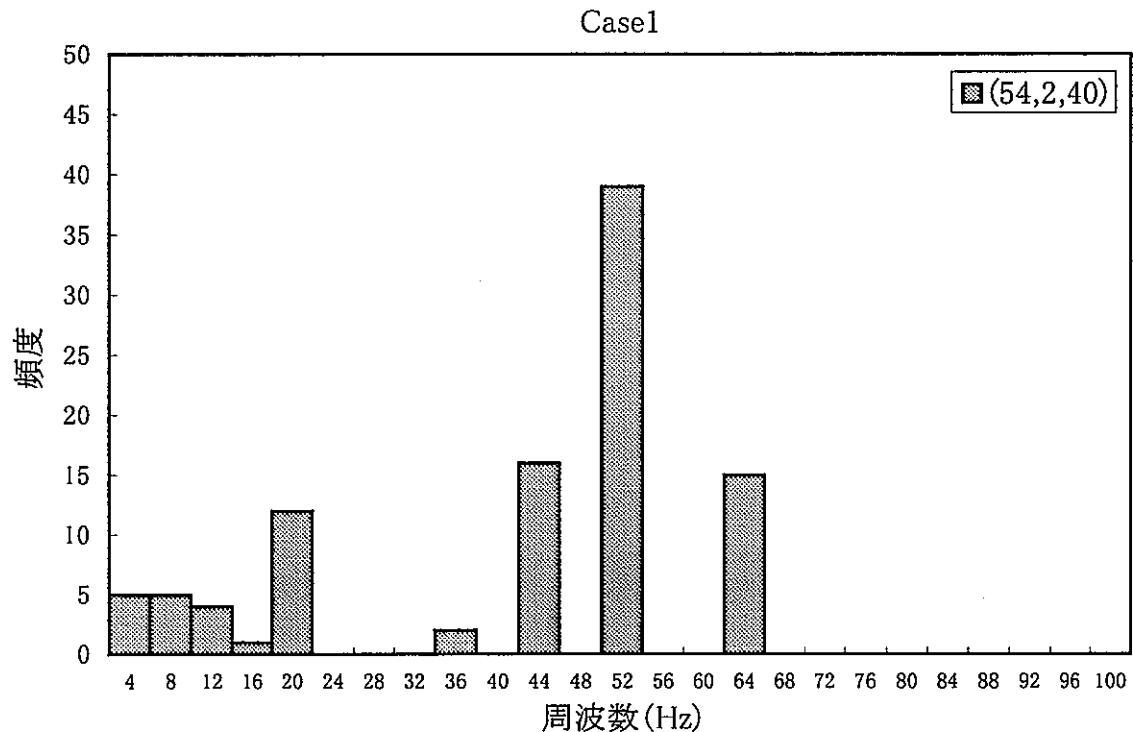


図 4. 16 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 1） (1/2)

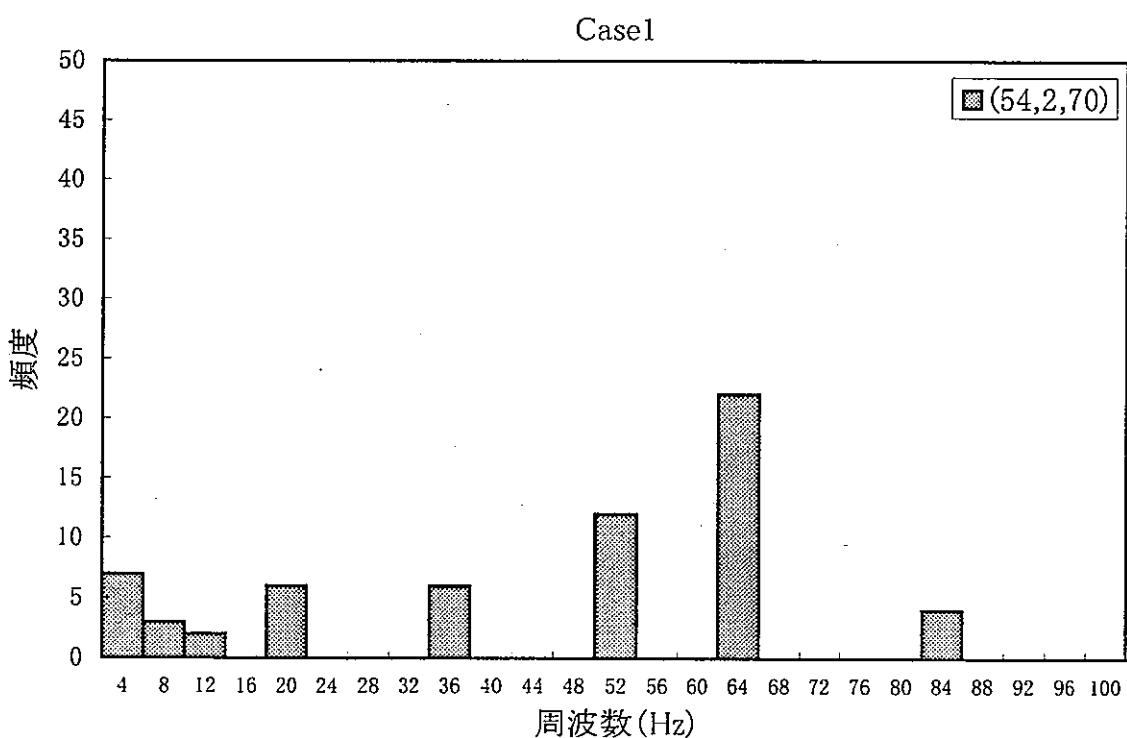
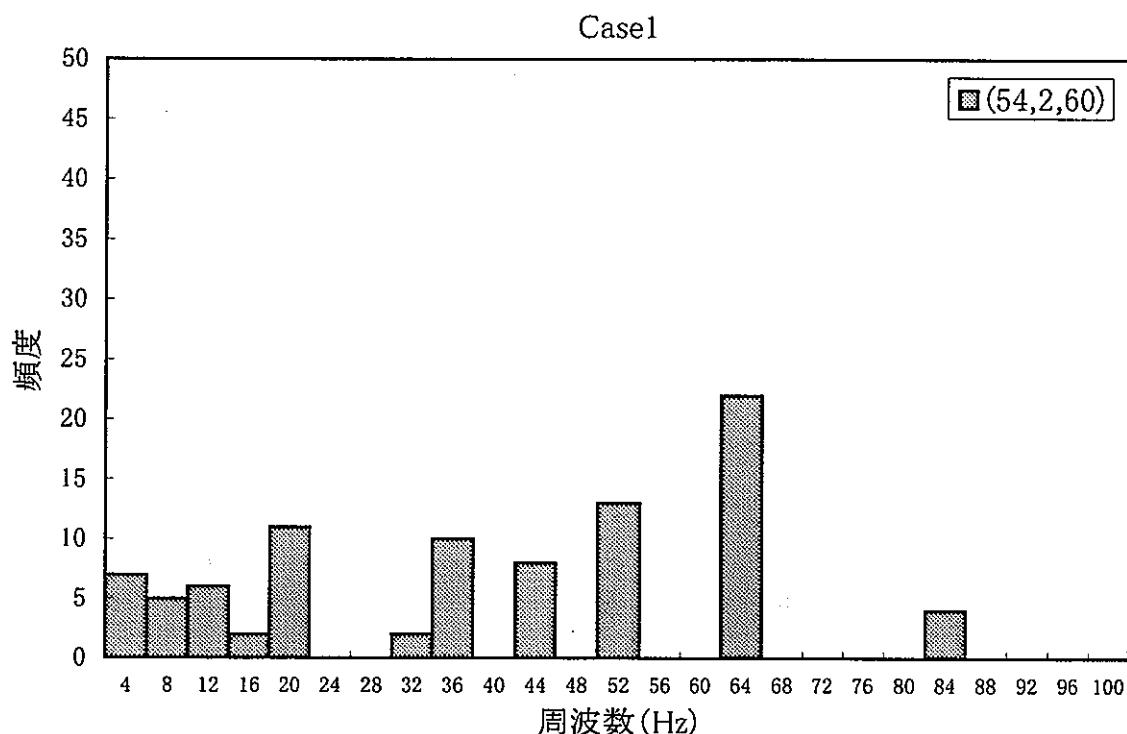


図 4. 16 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 1） (2/2)

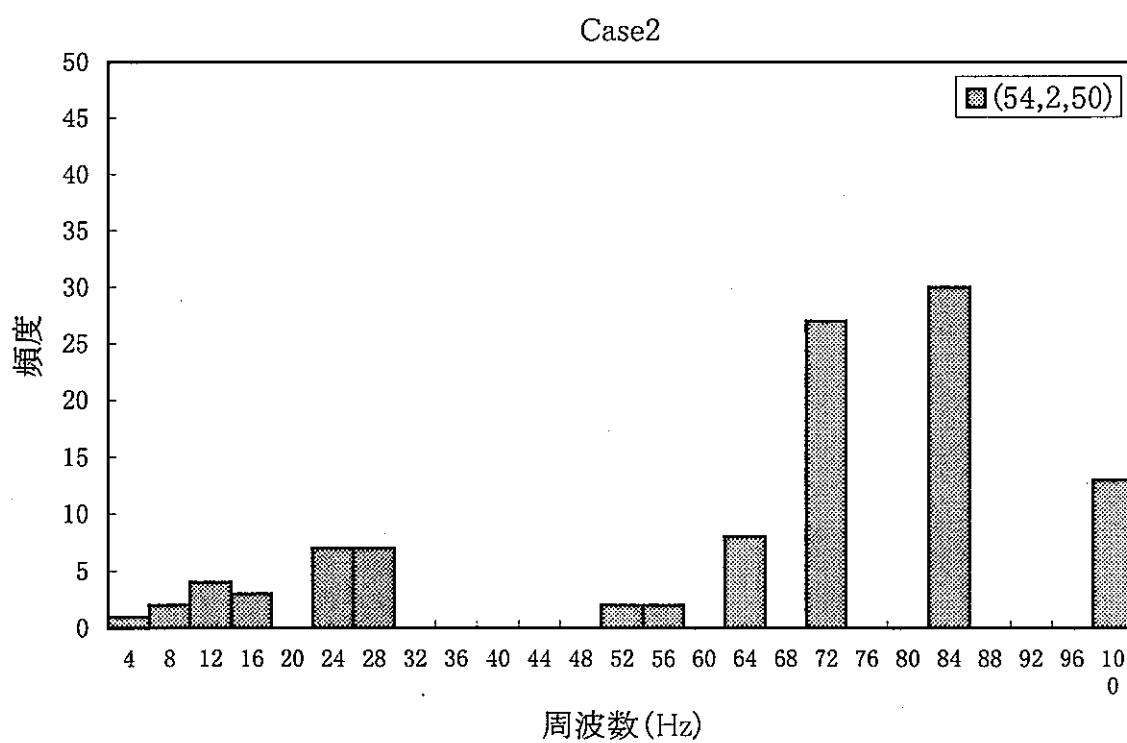
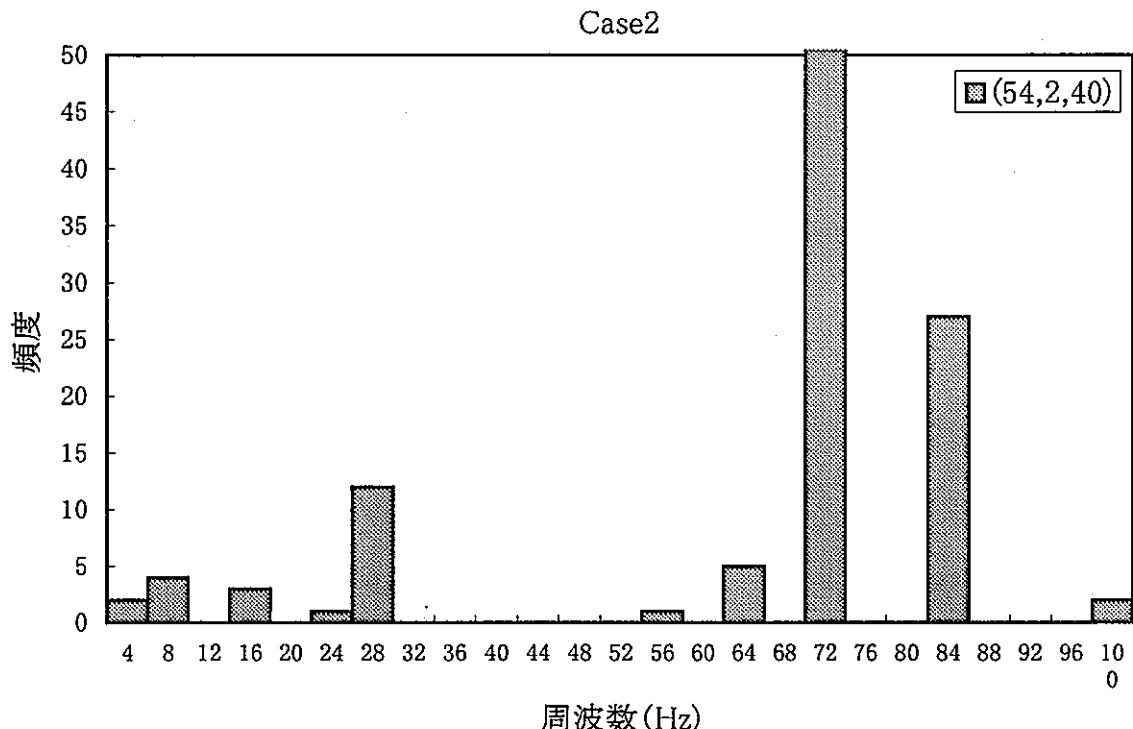


図 4. 17 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 2） (1/2)

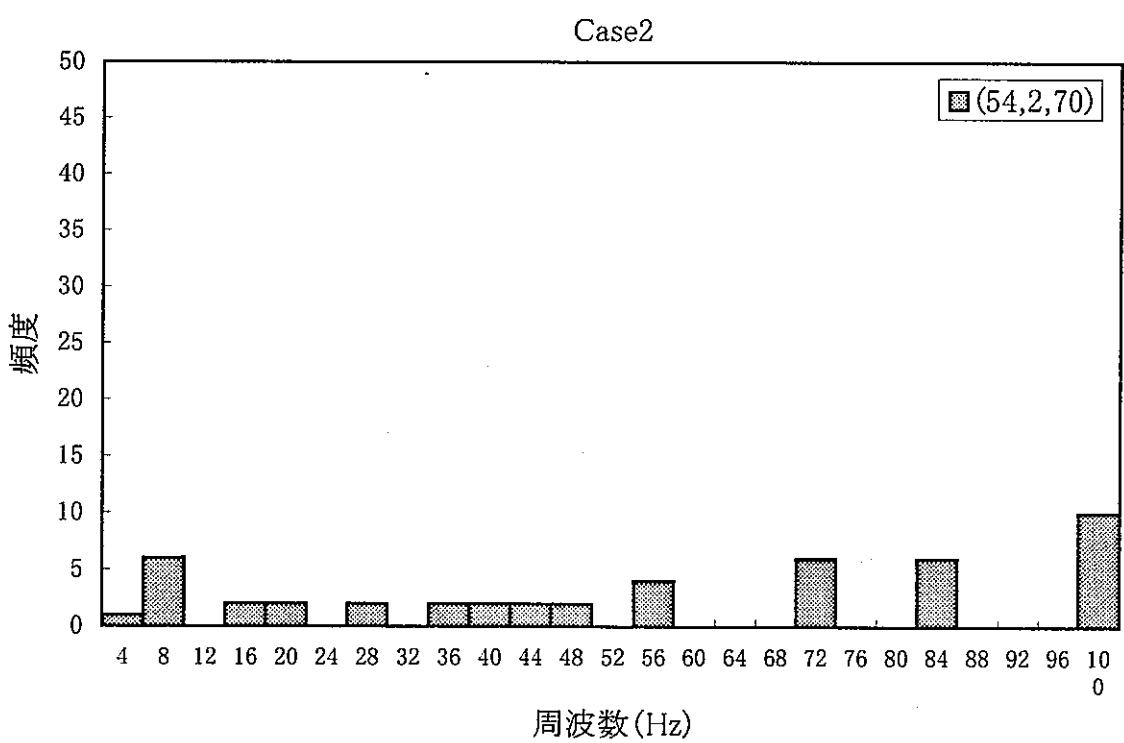
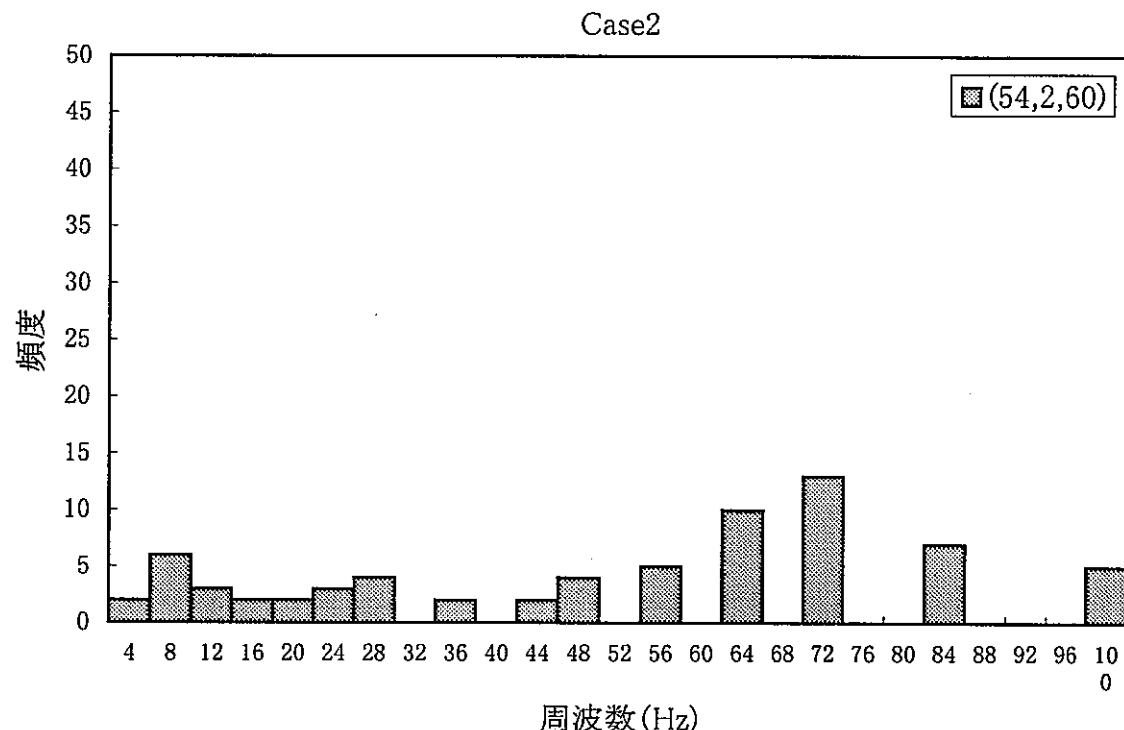


図 4. 17 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 2） (2/2)

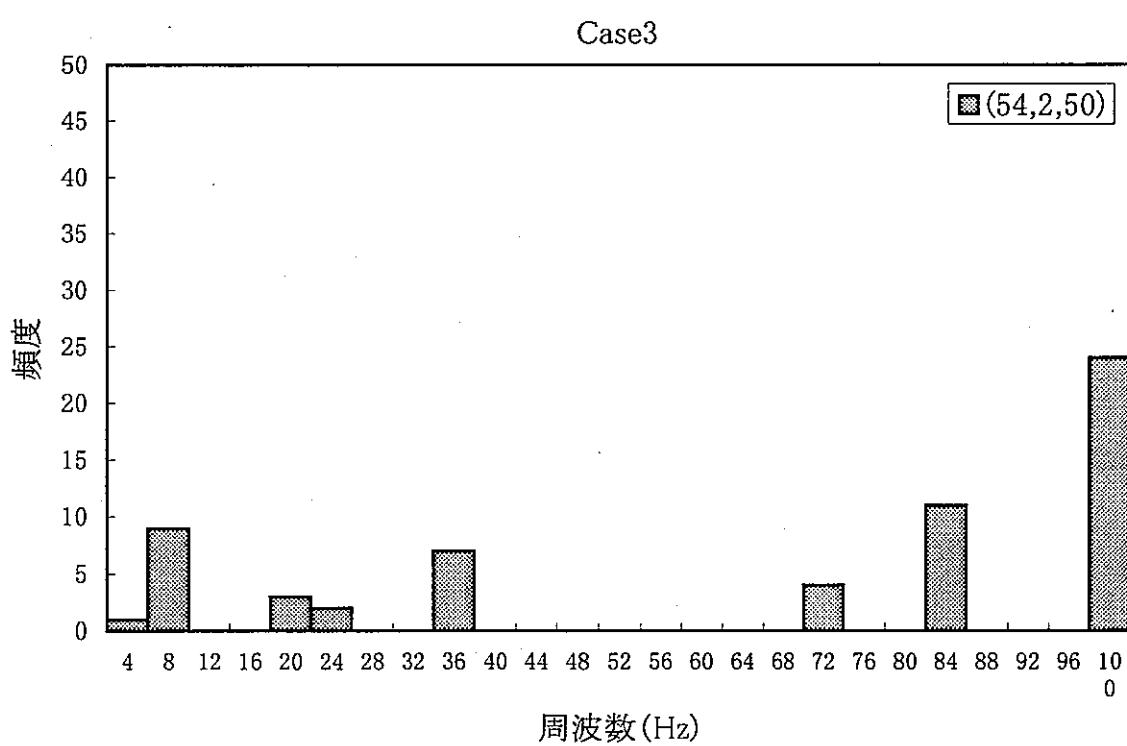
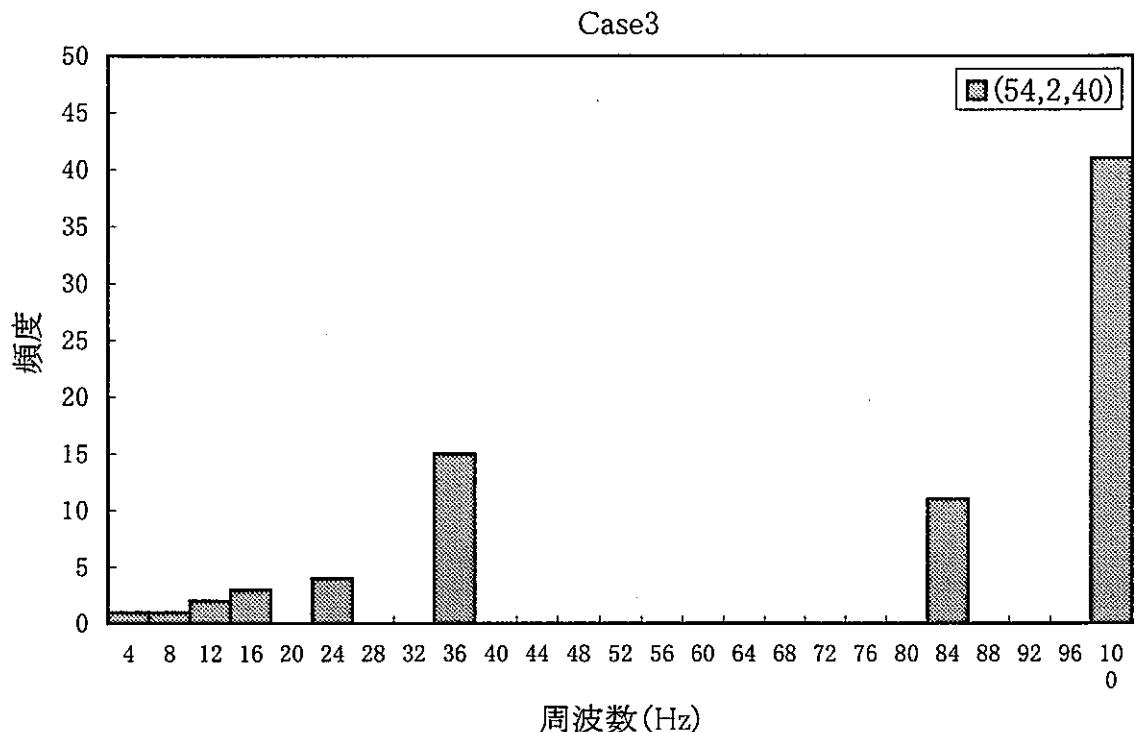


図 4. 18 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 3） (1/2)

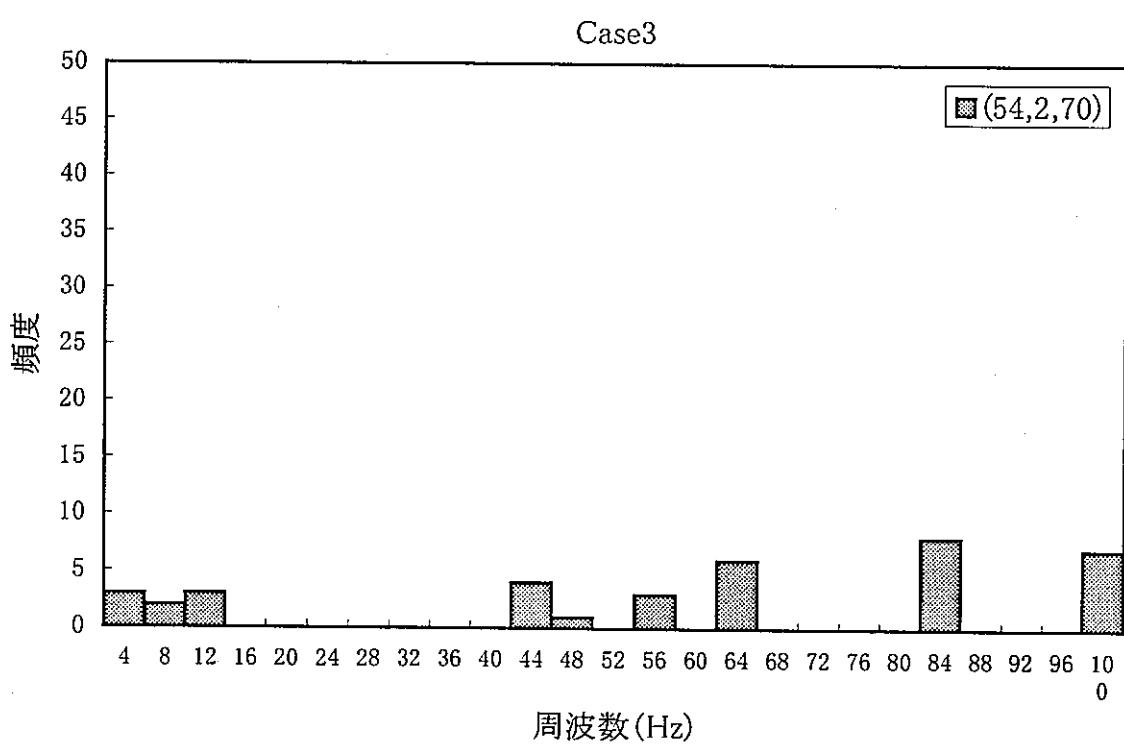
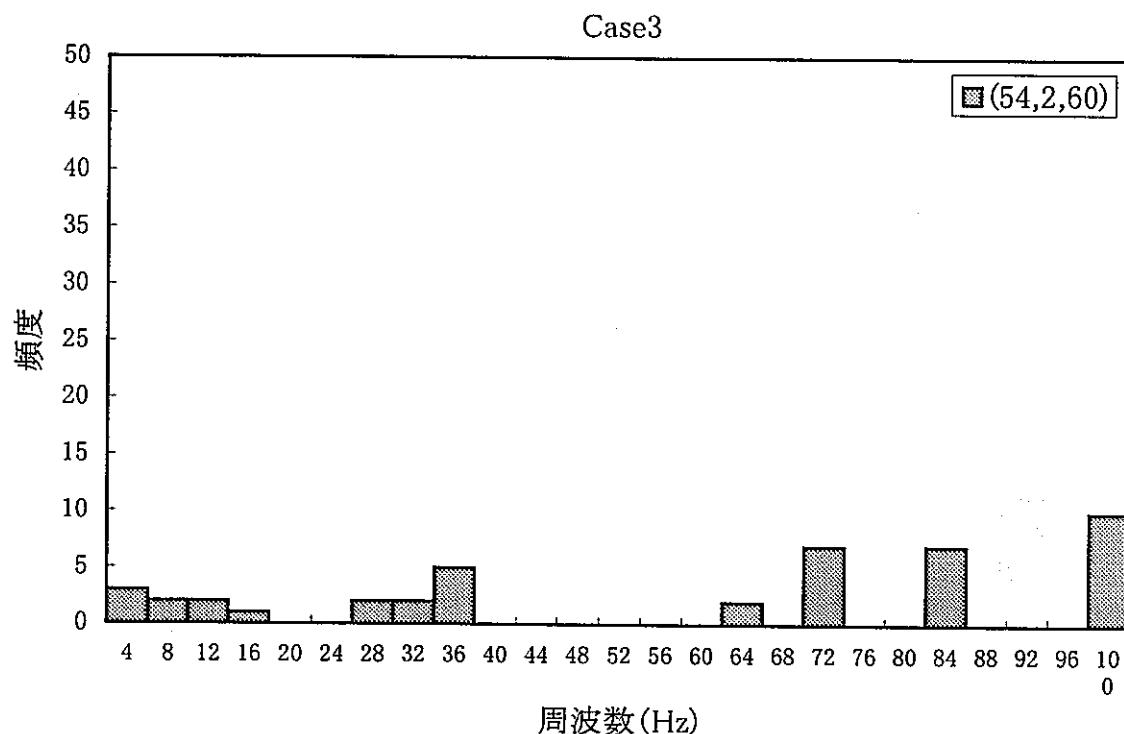


図 4. 18 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 3） (2/2)

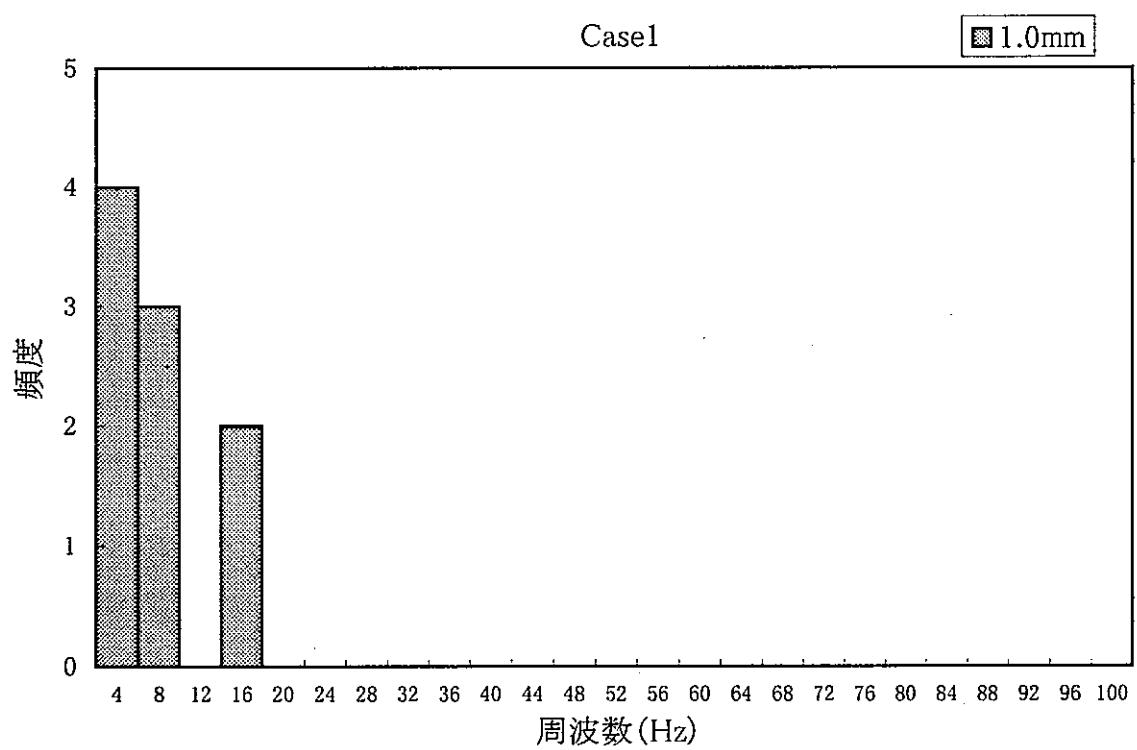
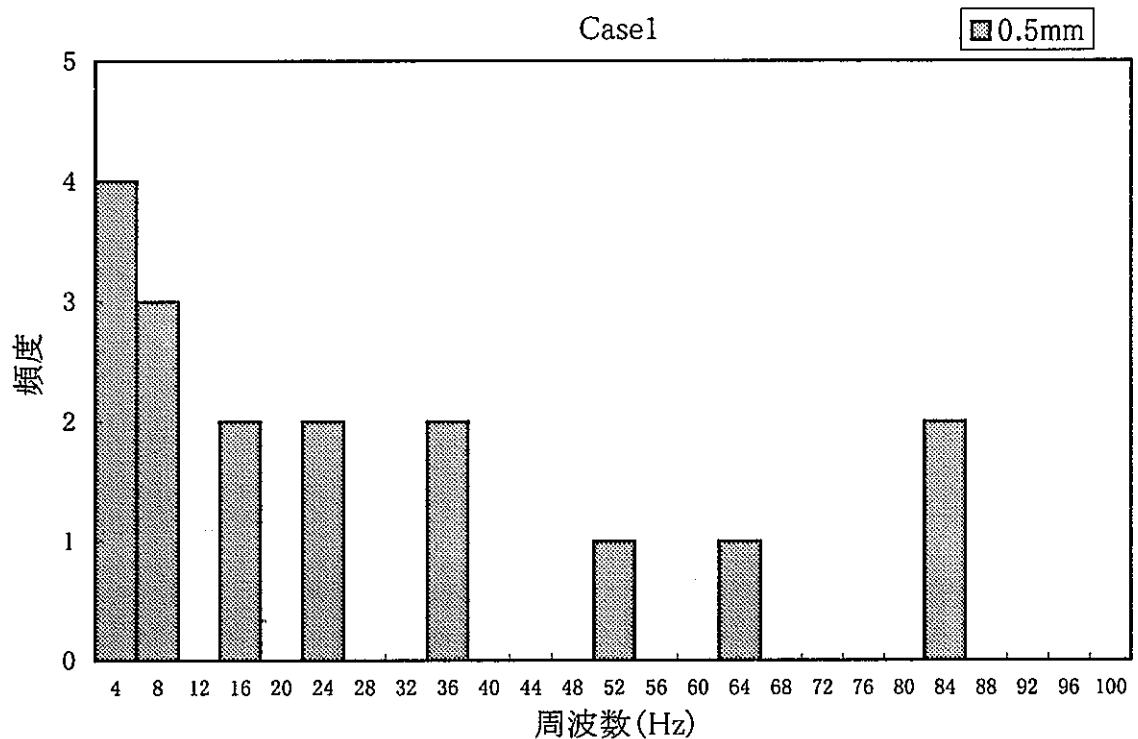


図 4. 19 BEMSET コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 1） (1/3)

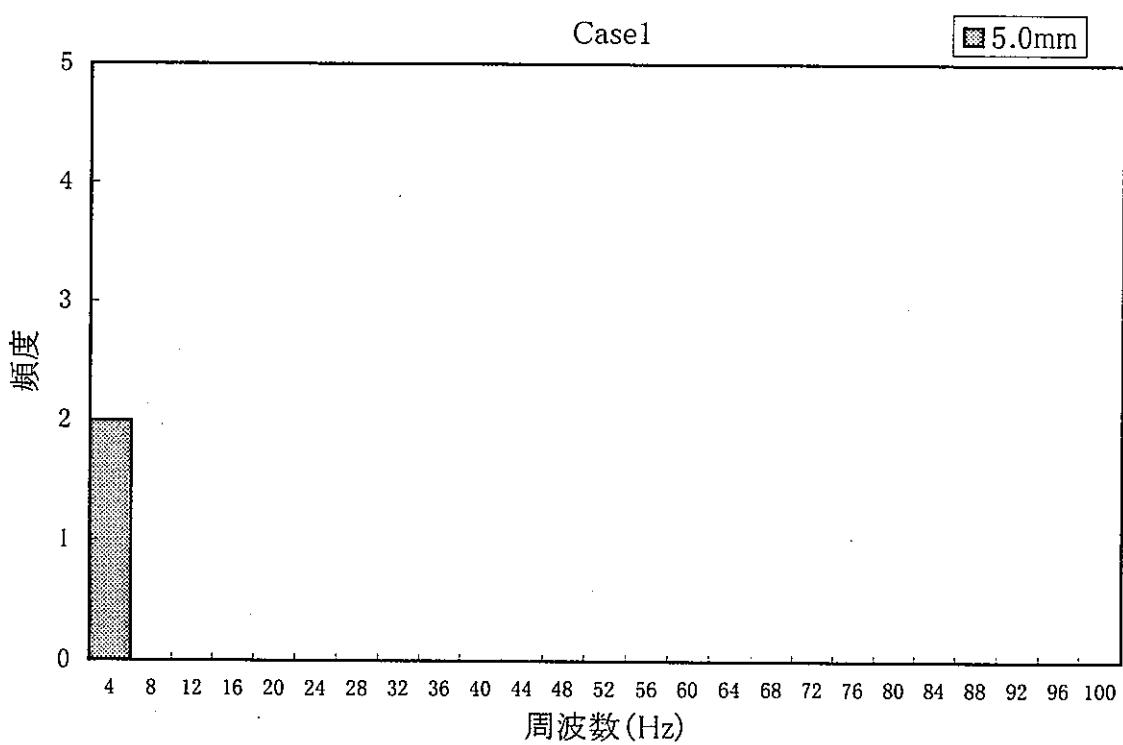
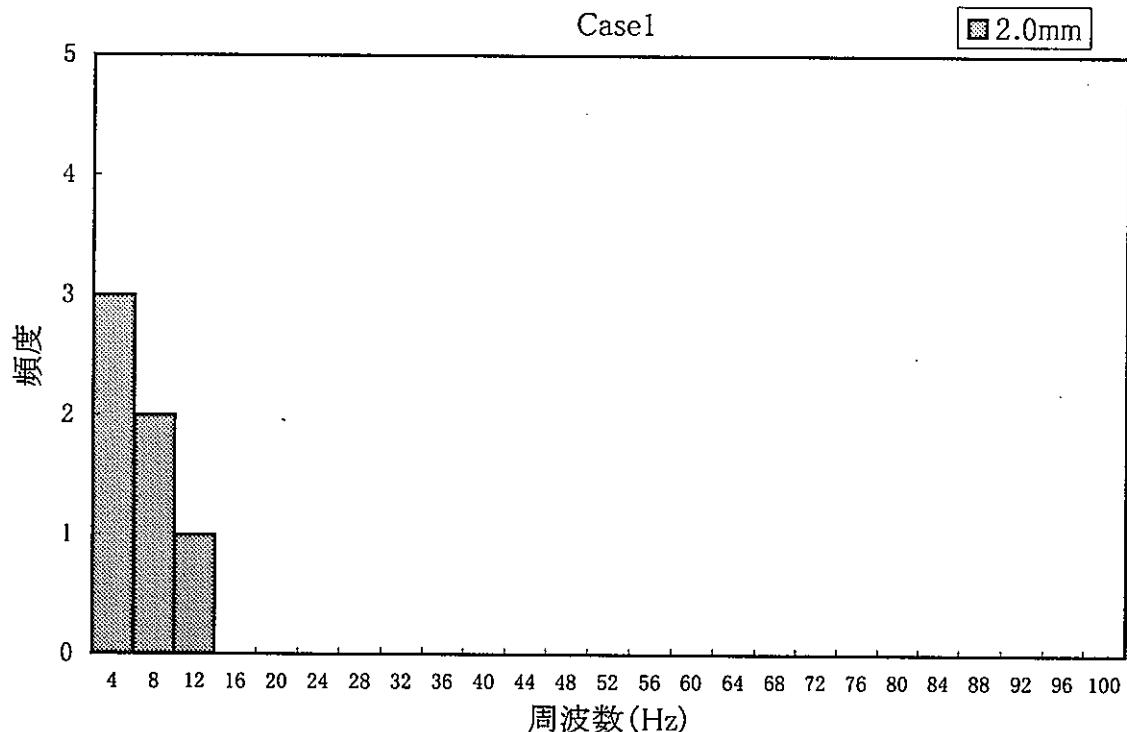


図 4. 19 BEMSET コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 1）（2 /3）

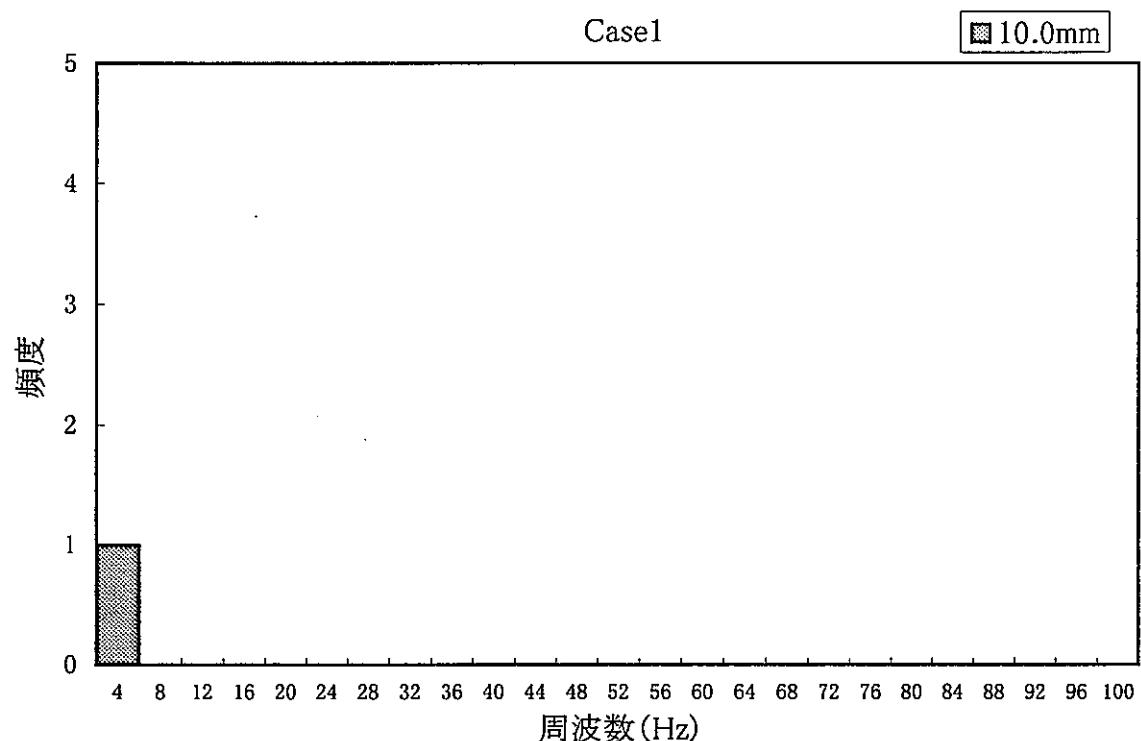


図 4. 19 BEMSET コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 1） (3/3)

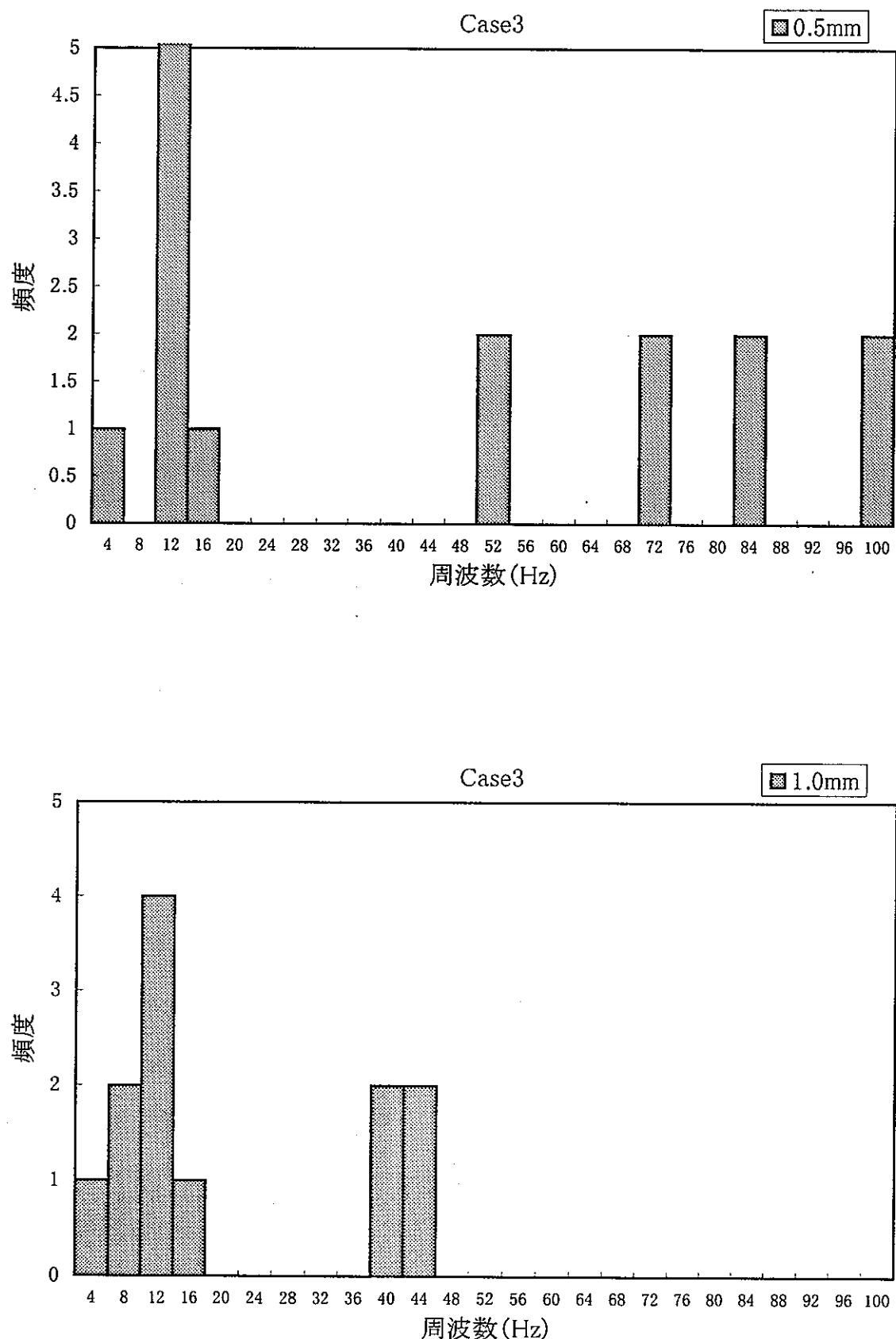


図 4. 21 BEMSET コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 3） (1/3)

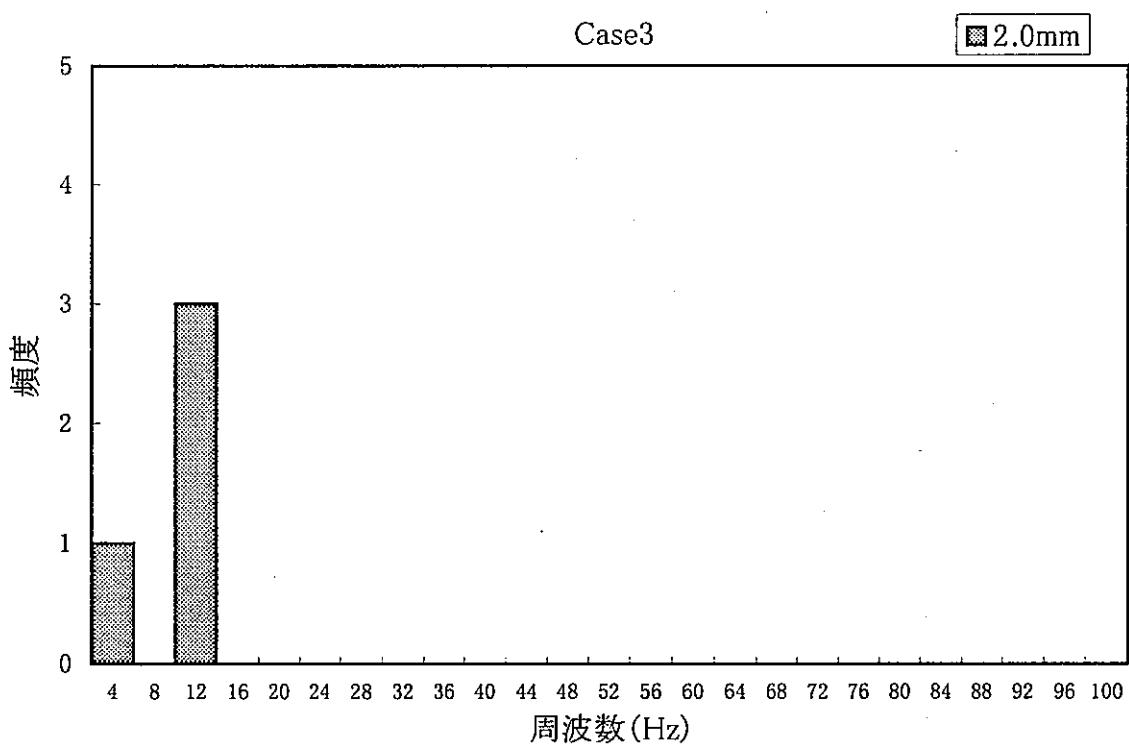
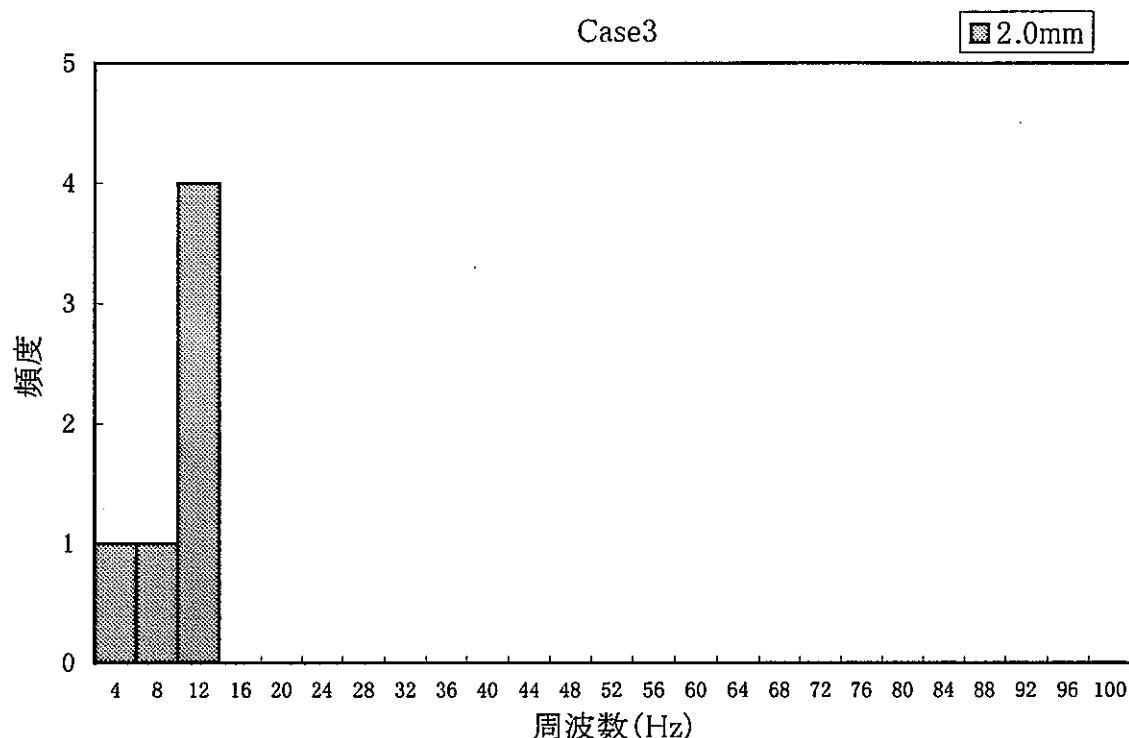


図 4. 21 BEMSET コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 3） (2/3)

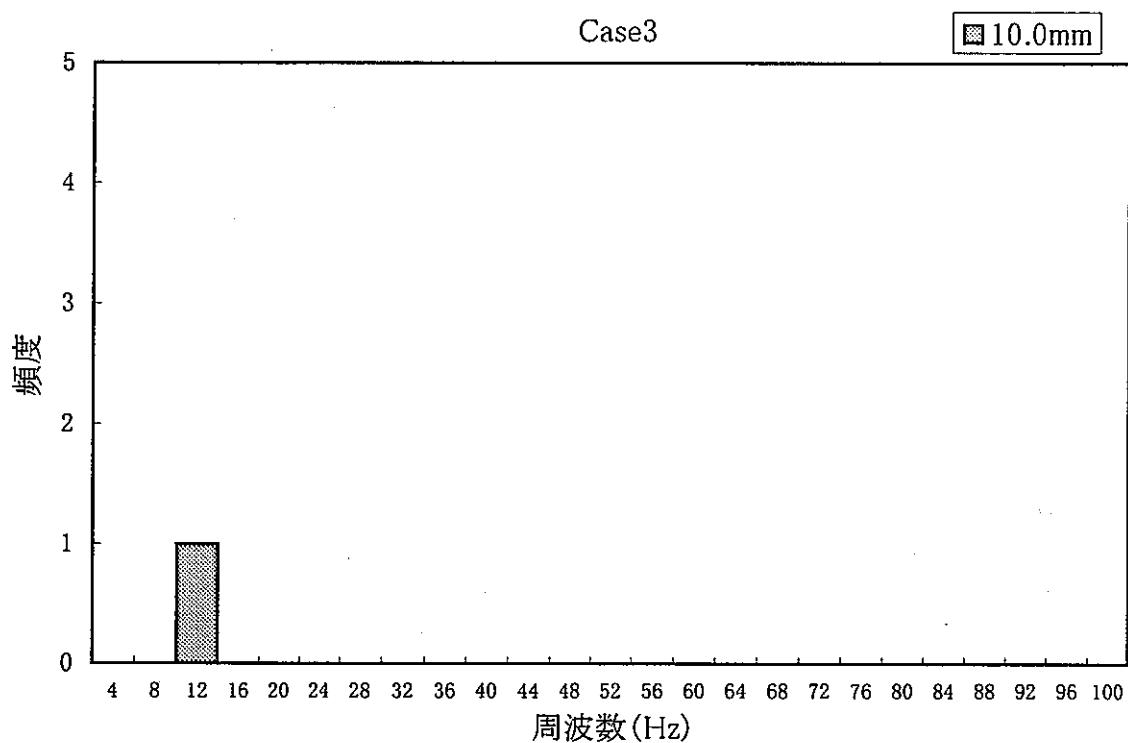


図 4. 21 BEMSET コードによる温度ゆらぎ周波数頻度分布（ケース 3） (3/3)

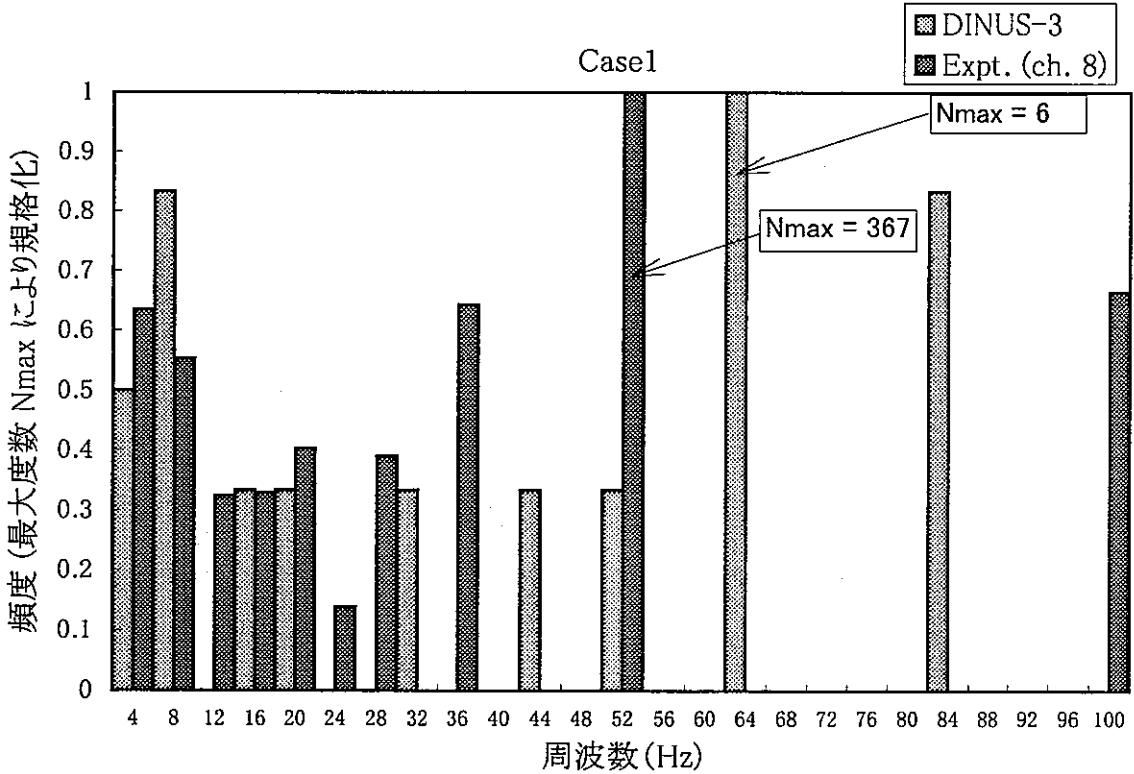
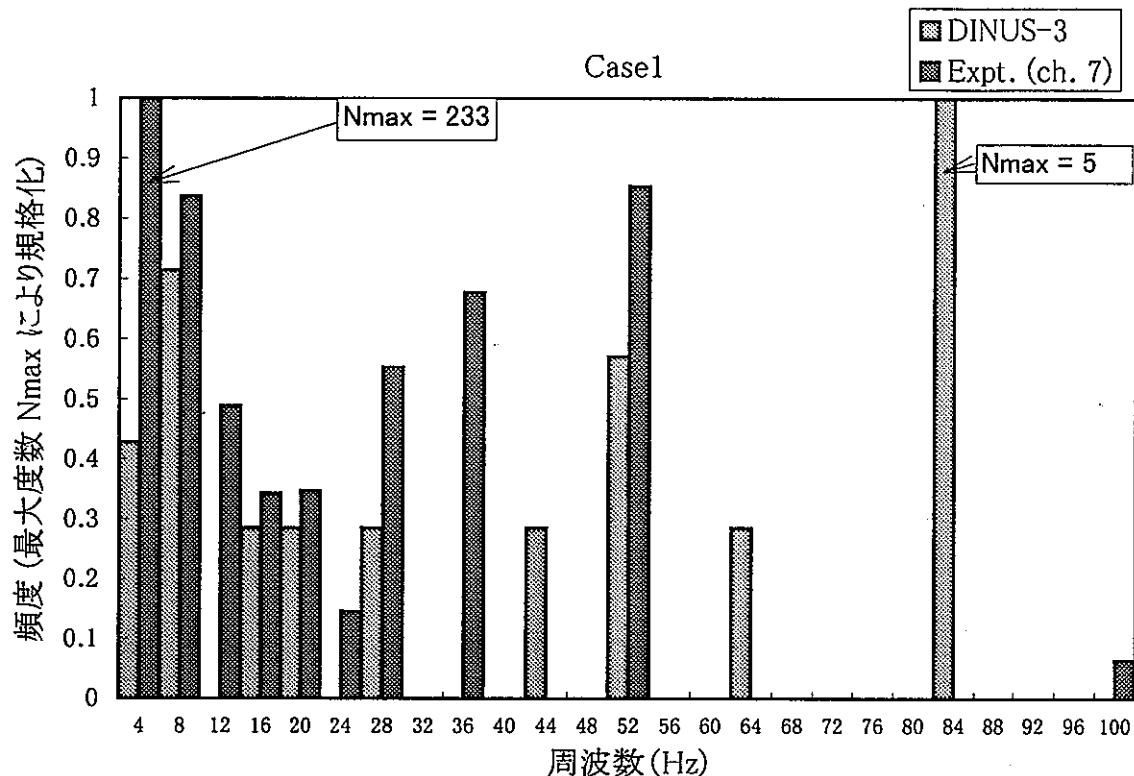


図 4. 22 溫度ゆらぎ周波数頻度分布の比較（ケース 1） (1/2)

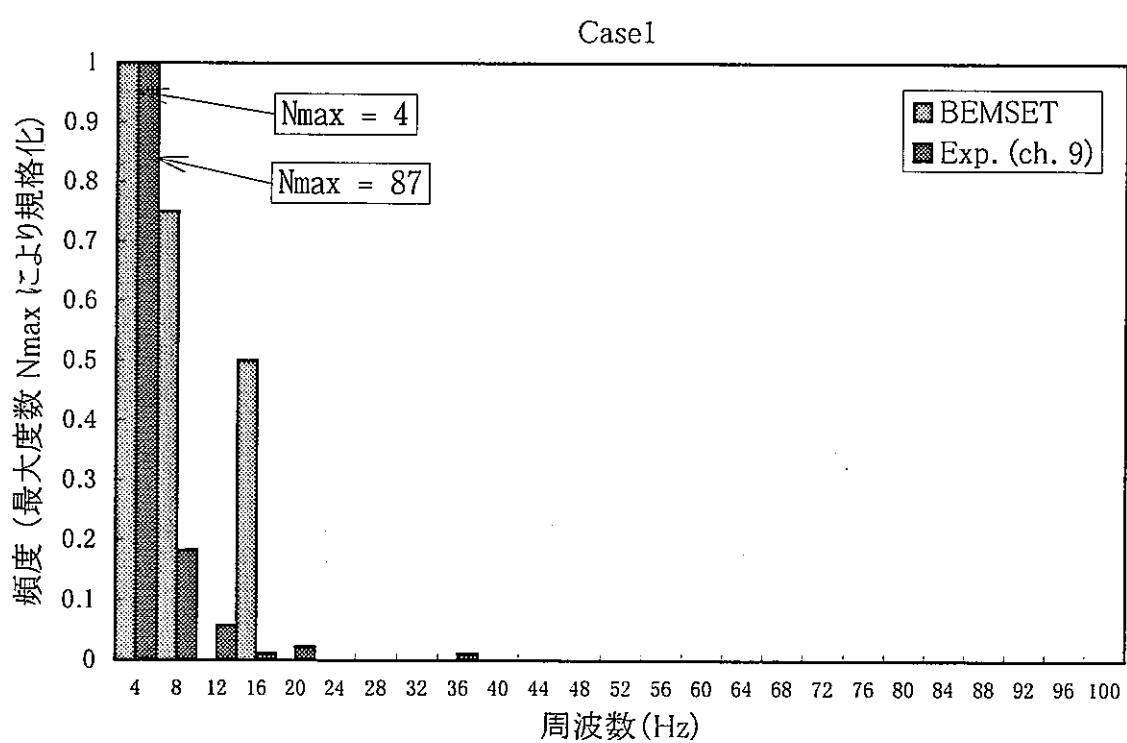
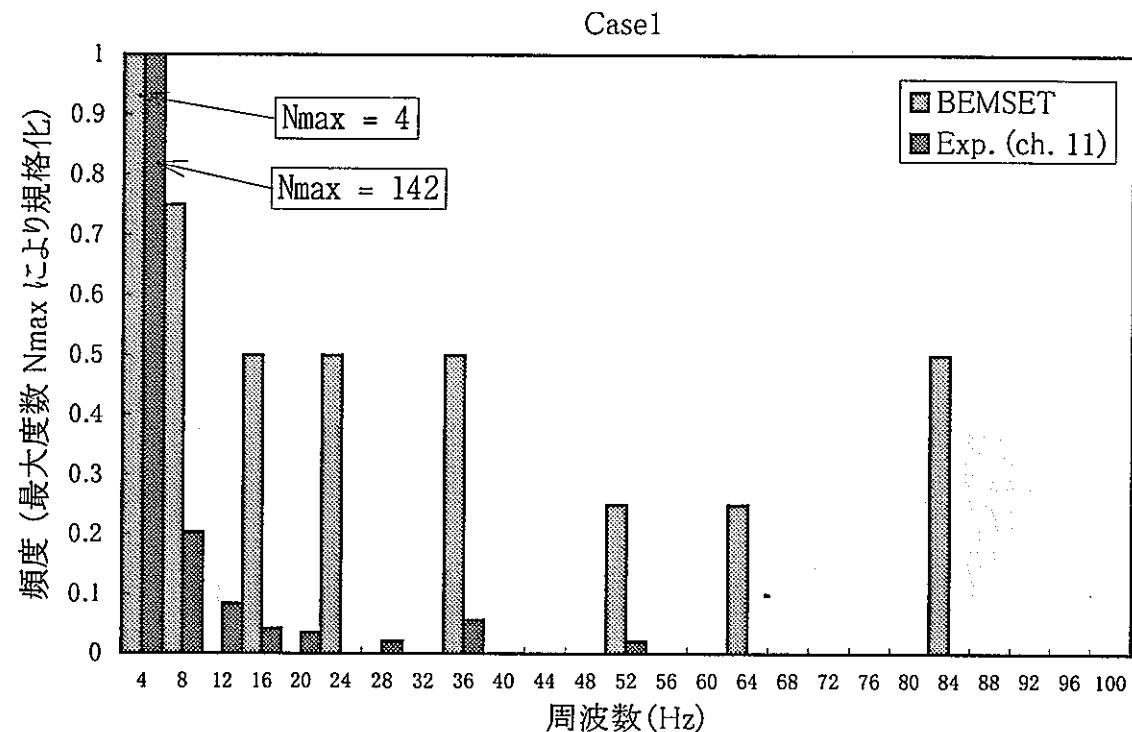


図 4. 22 温度ゆらぎ周波数頻度分布の比較（ケース 1）(2/2)

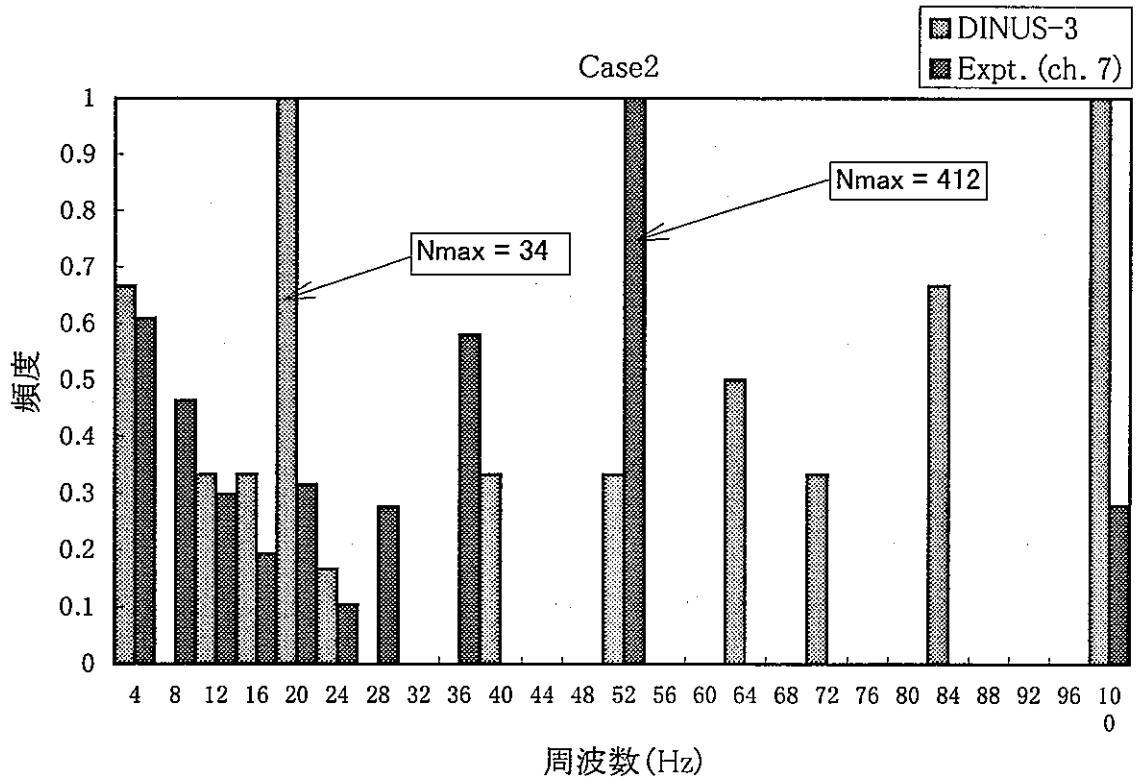
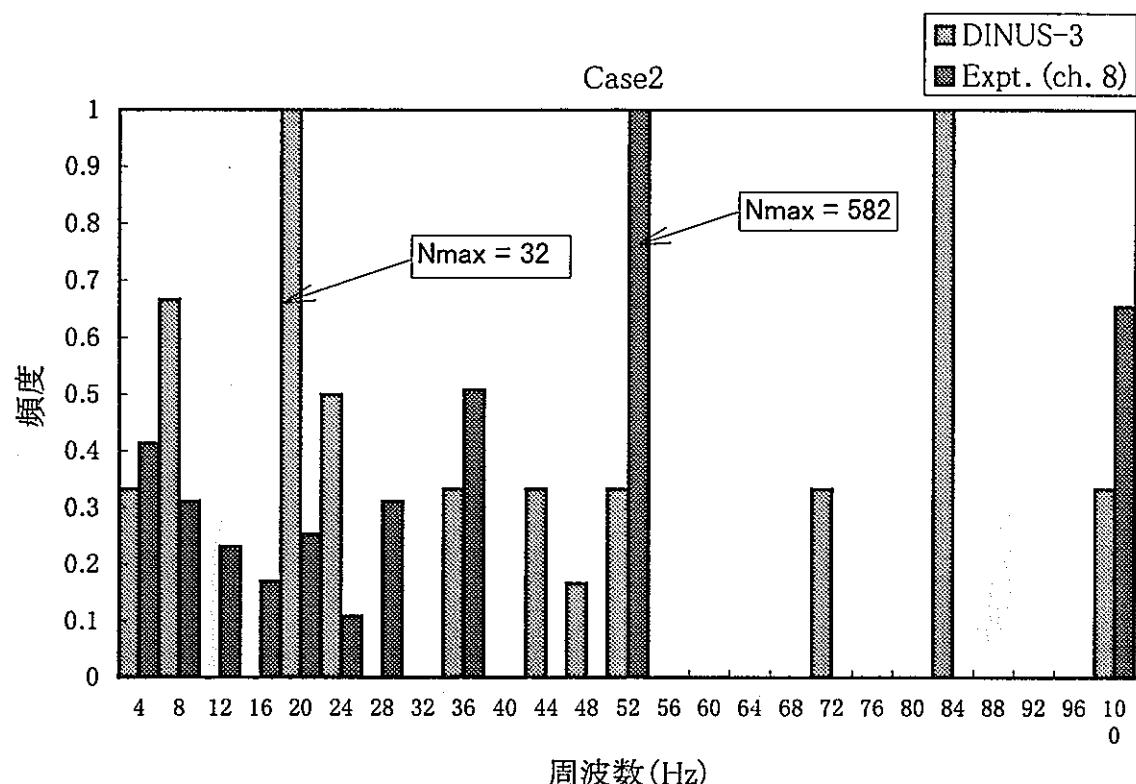


図 4. 23 溫度ゆらぎ周波数頻度分布の比較（ケース 2） (1/2)

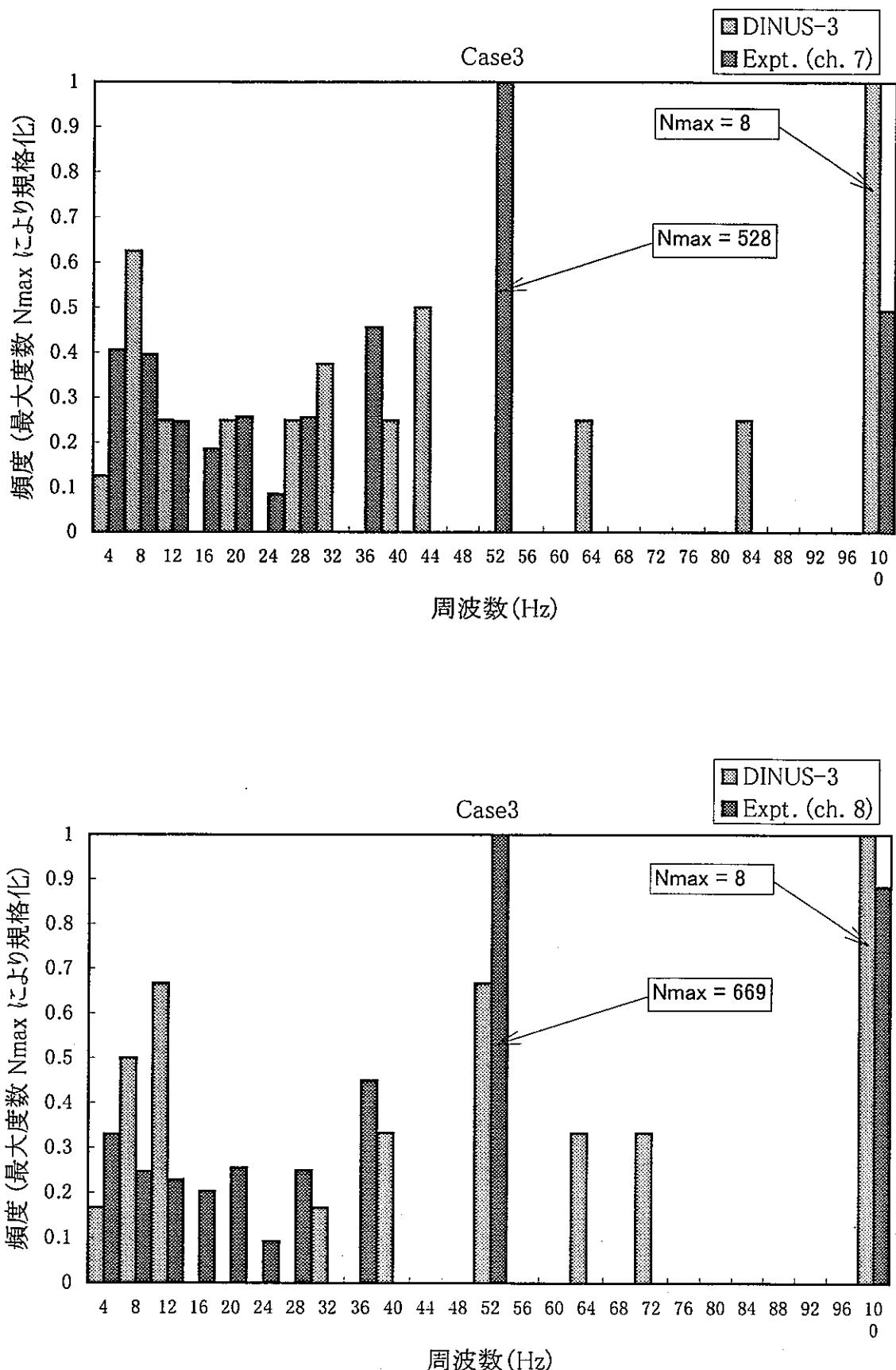
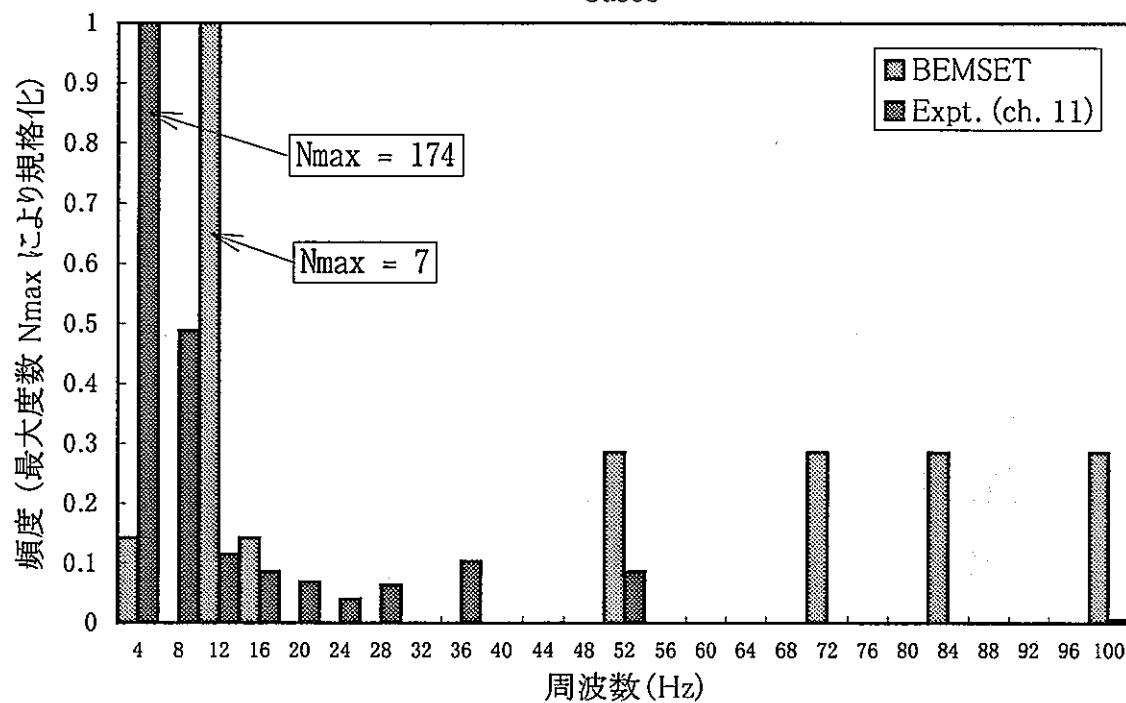


図 4. 24 温度ゆらぎ周波数頻度分布の比較（ケース 3） (1/2)

Case3



Case3

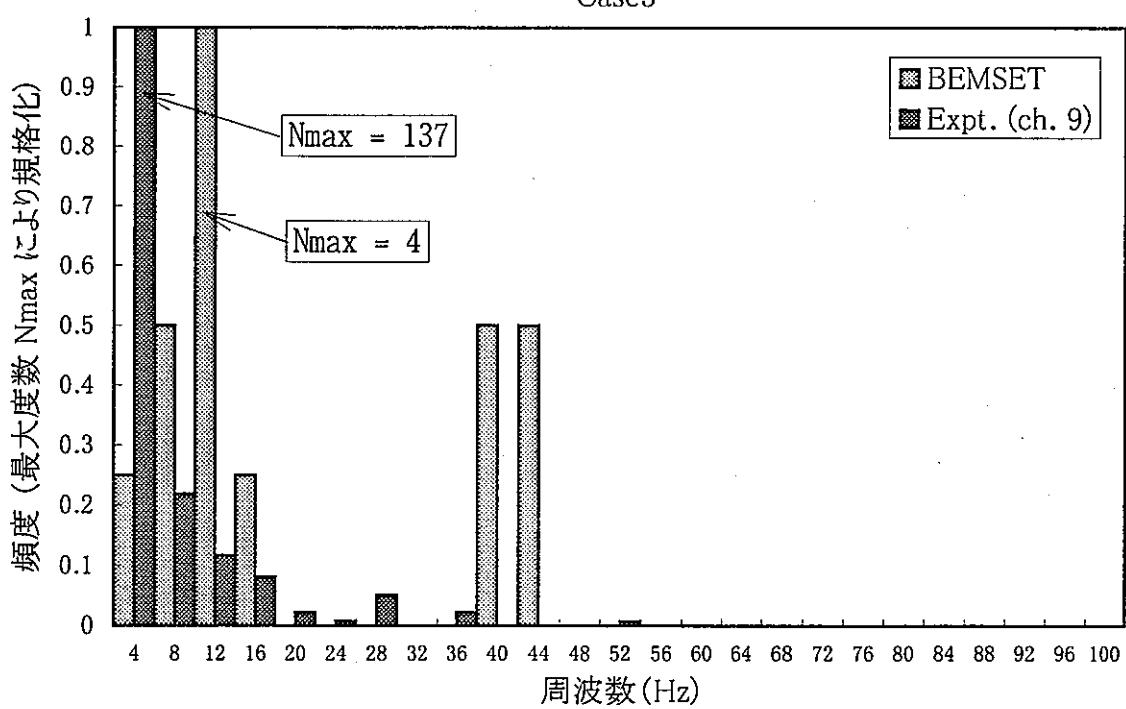


図 4. 24 溫度ゆらぎ周波数頻度分布の比較（ケース 3）（2/2）

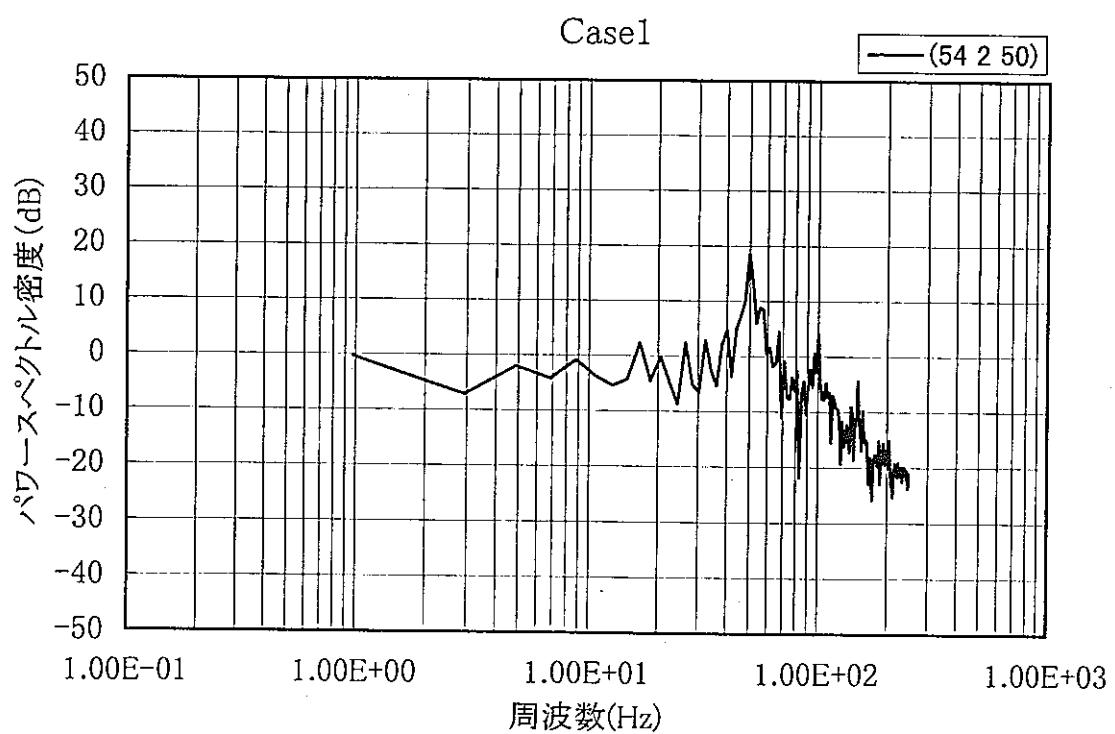
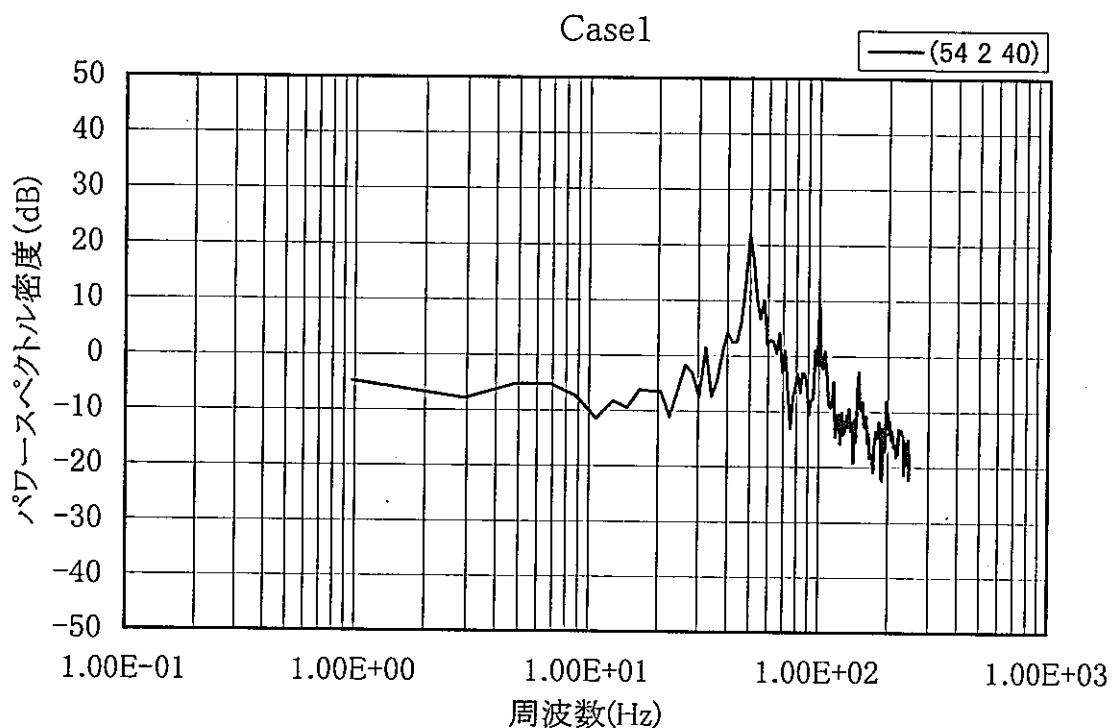


図 4. 25 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度（ケース 1） (1/2)

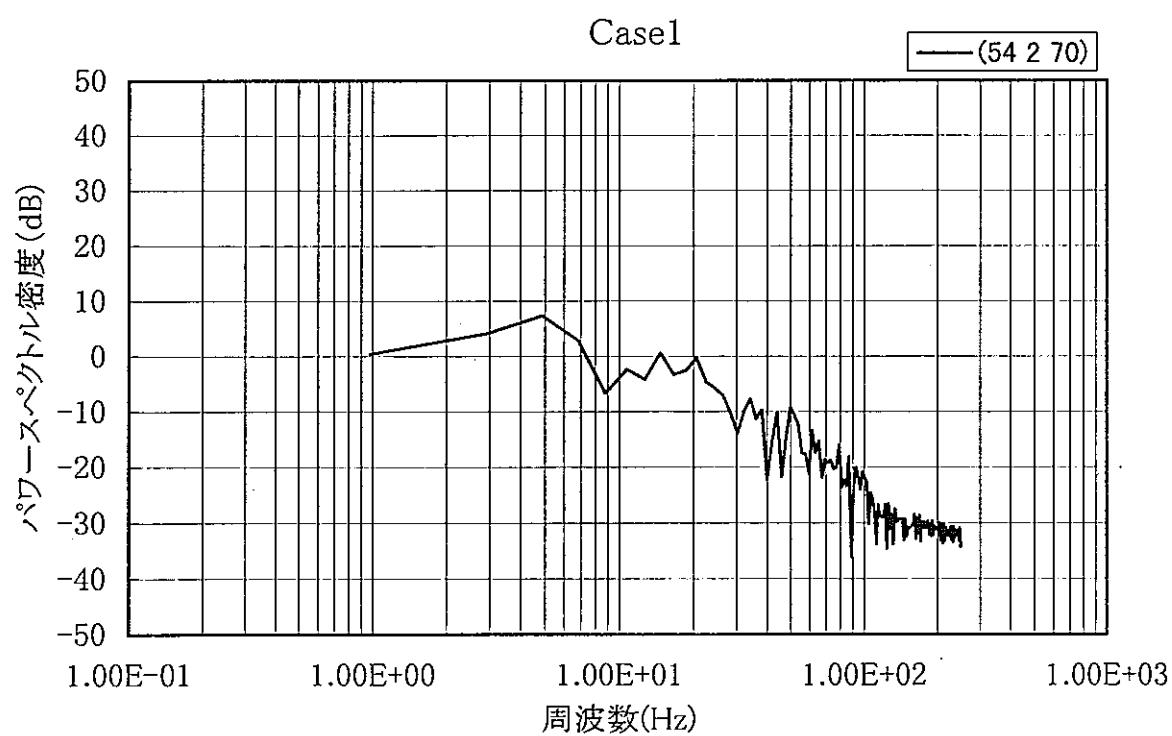
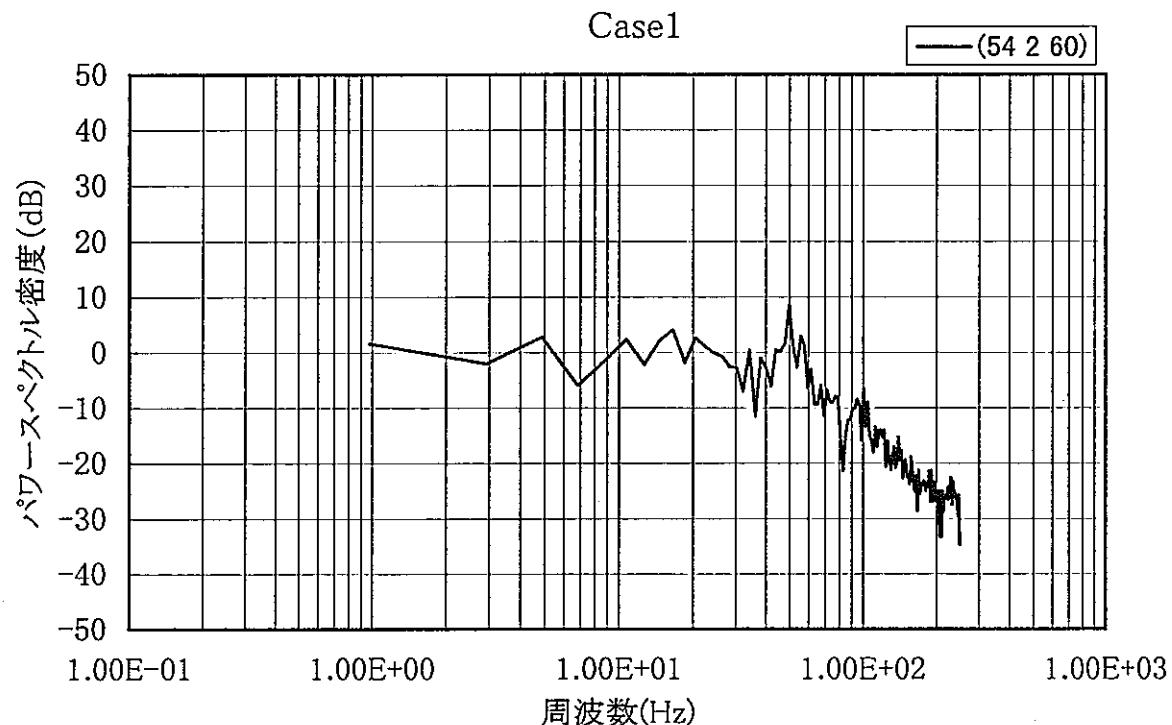


図 4. 25 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度（ケース 1） (2/2)

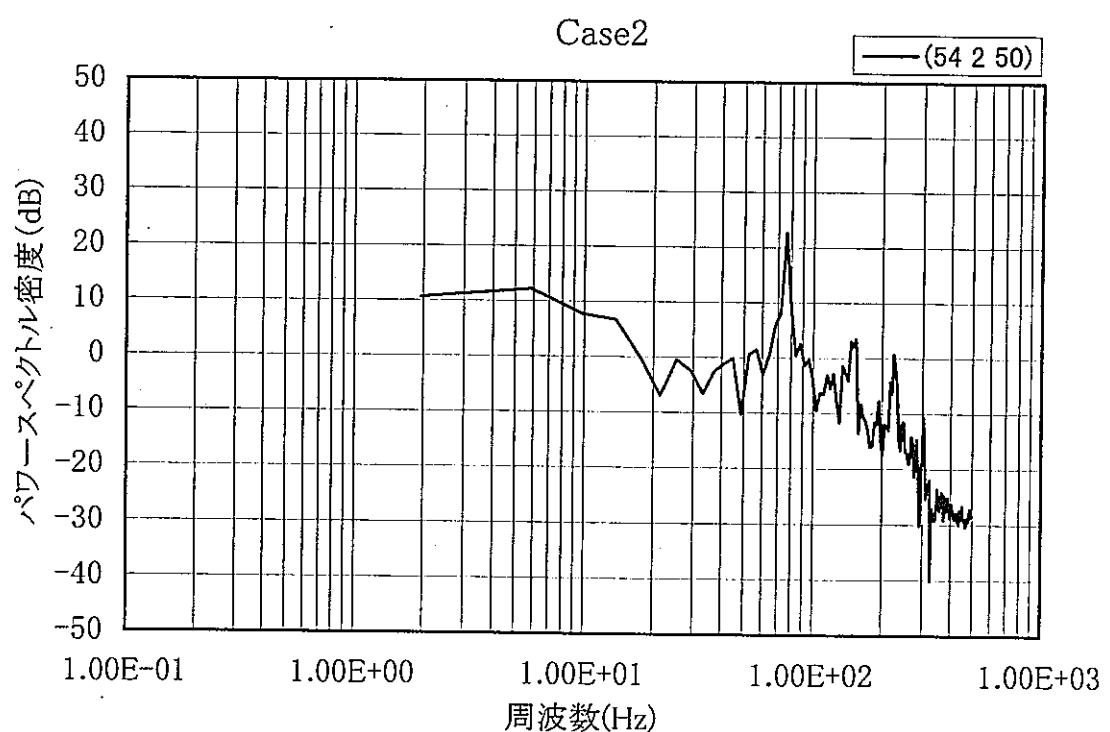
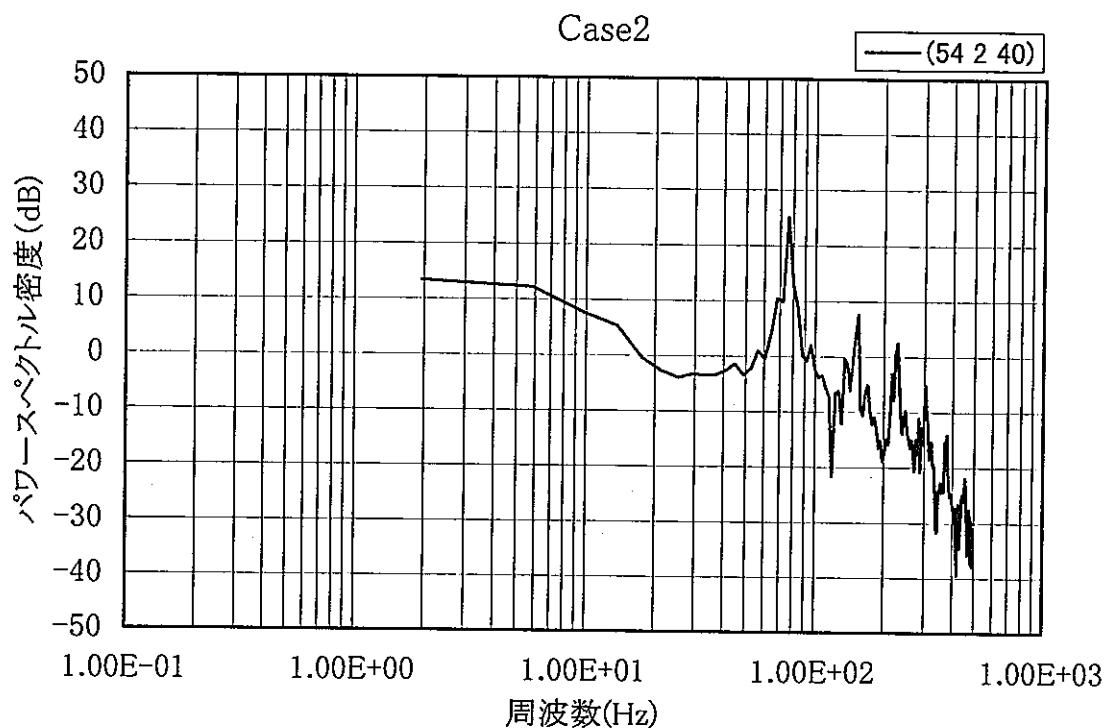


図 4. 26 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度（ケース 2） (1/2)

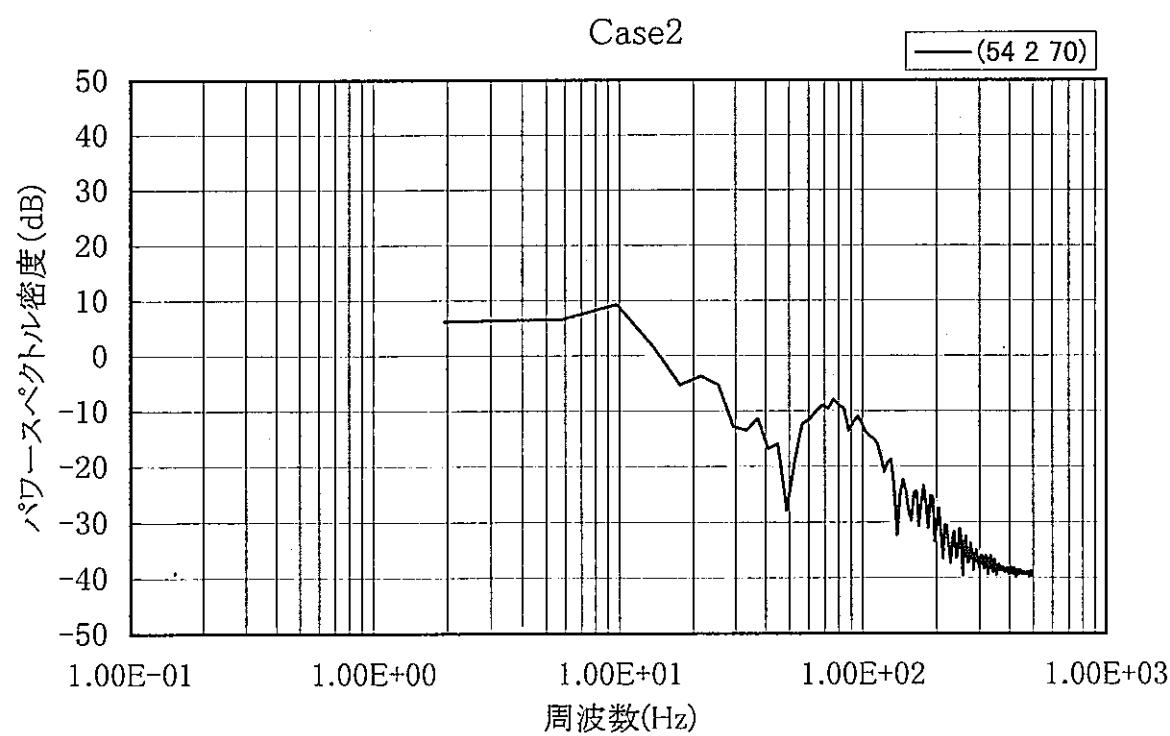
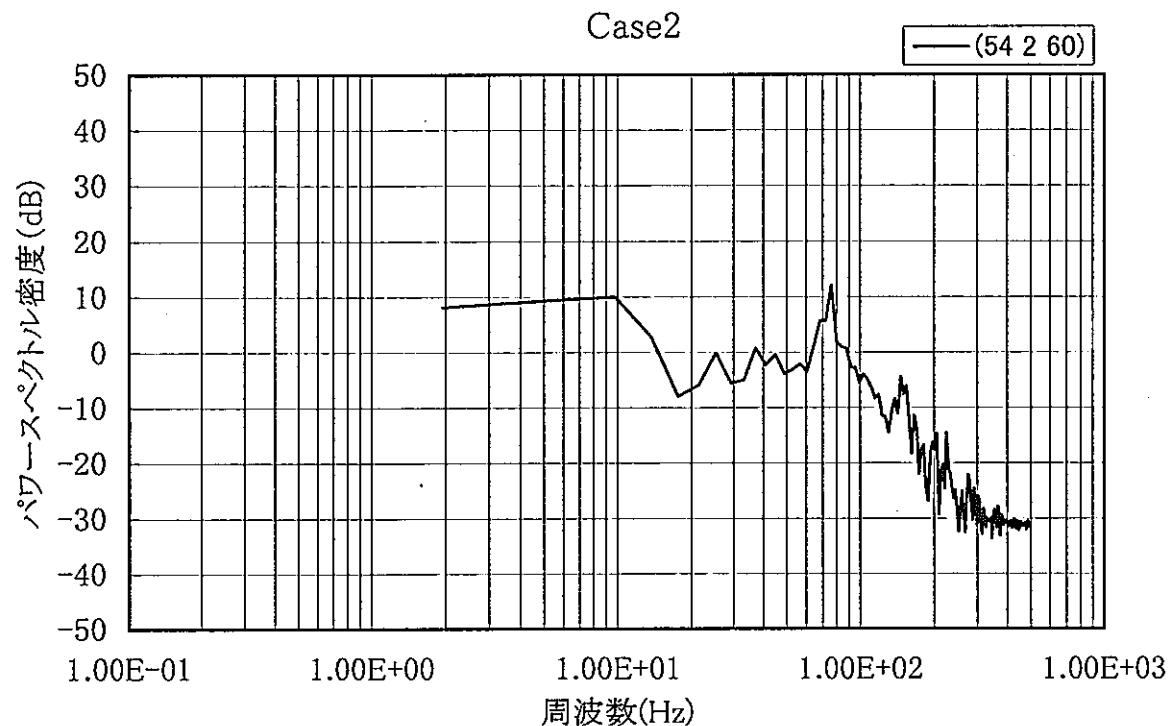


図 4. 26 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度 (ケース 2) (2/2)

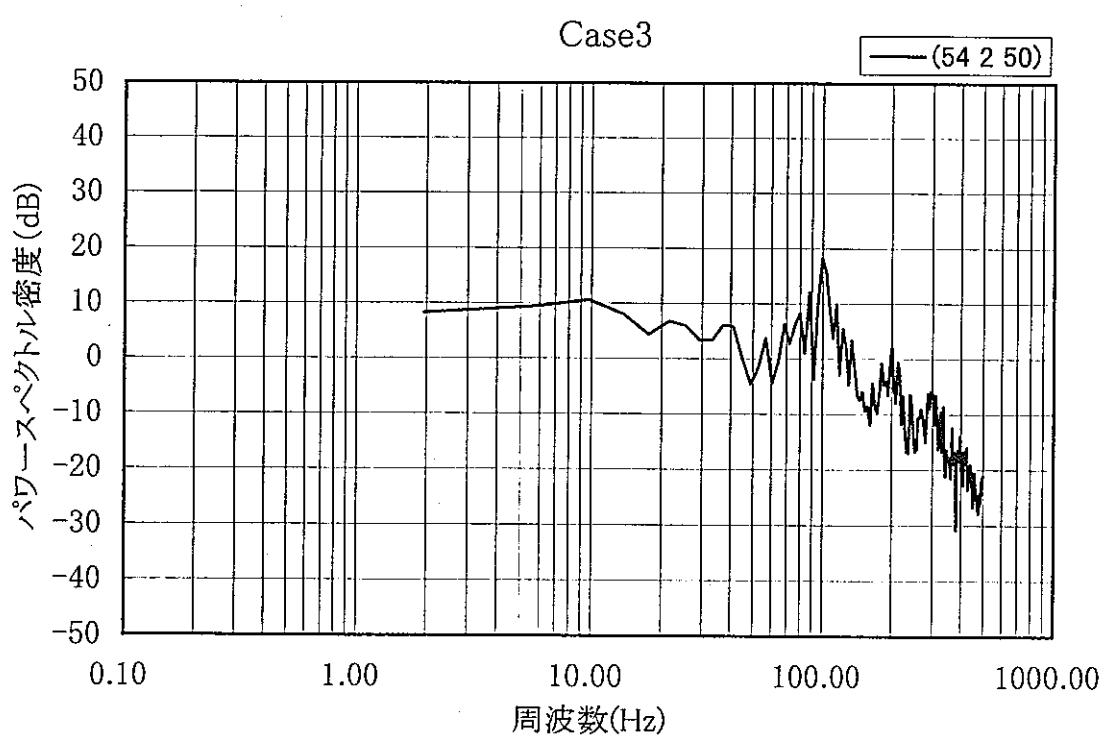
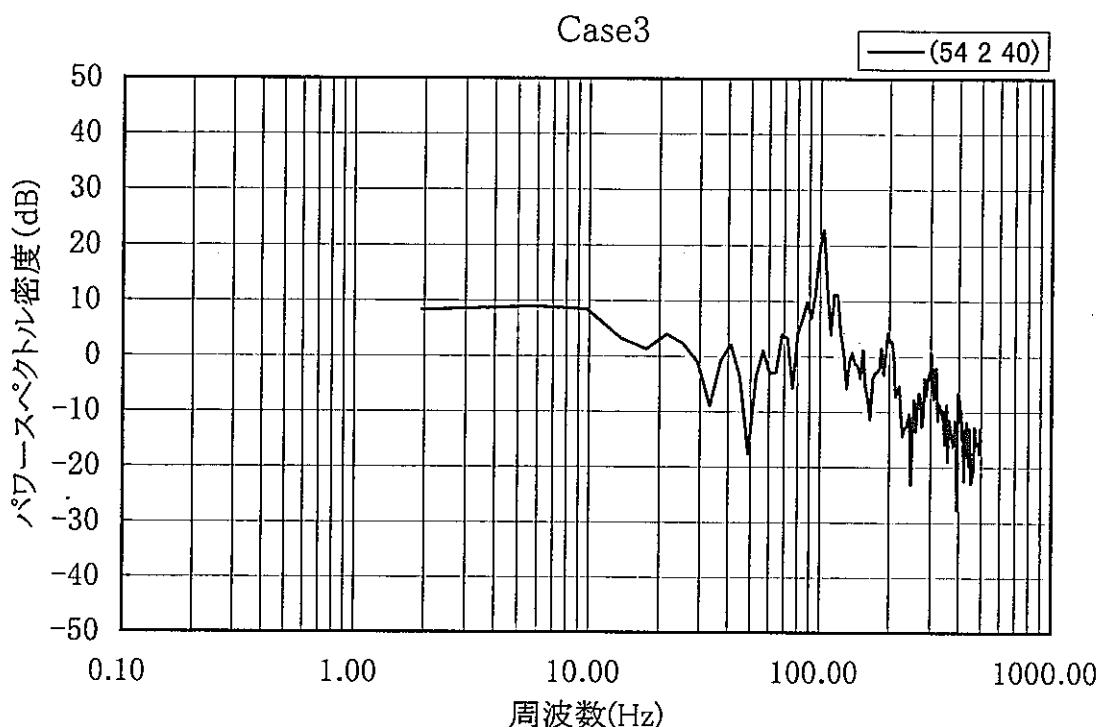


図 4. 27 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度（ケース 3） (1/2)

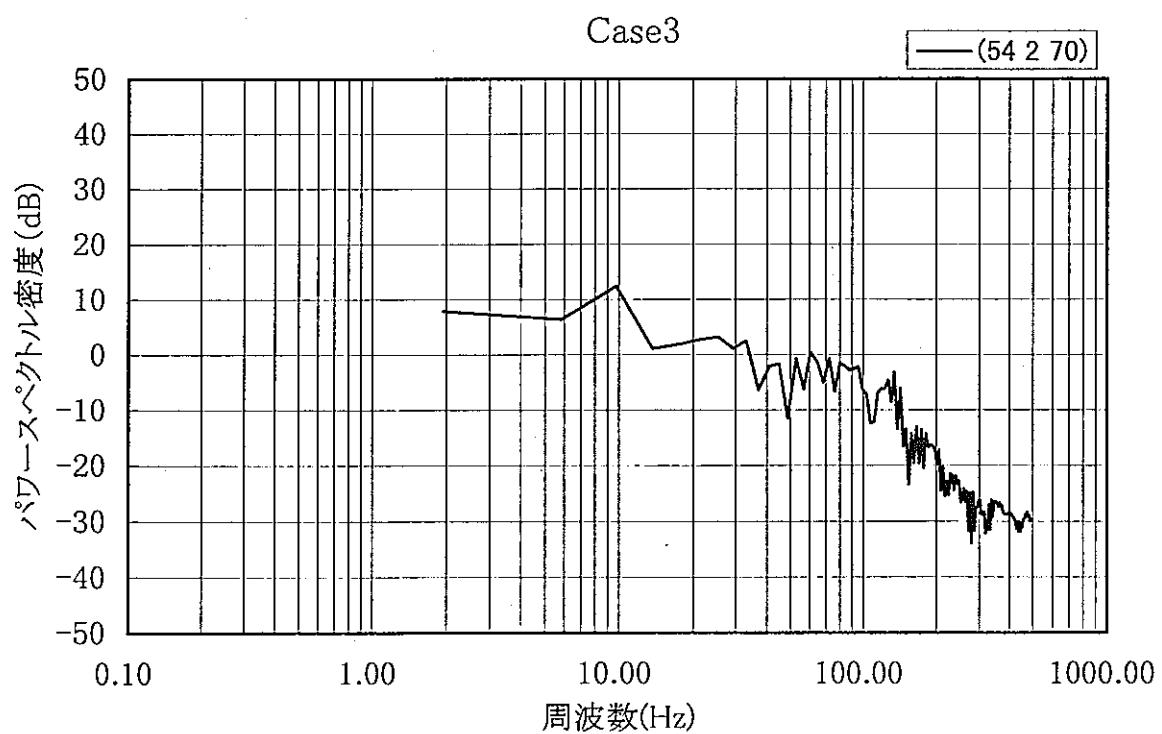
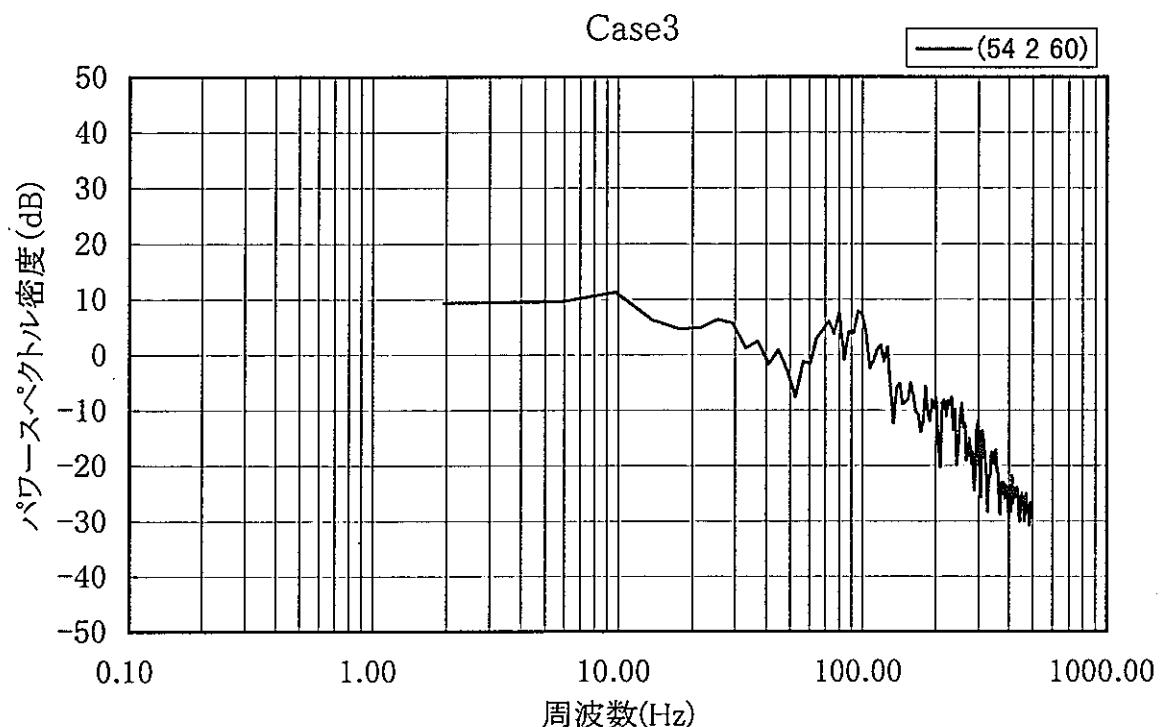


図 4. 27 DINUS-3 コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度（ケース 3） (2/2)

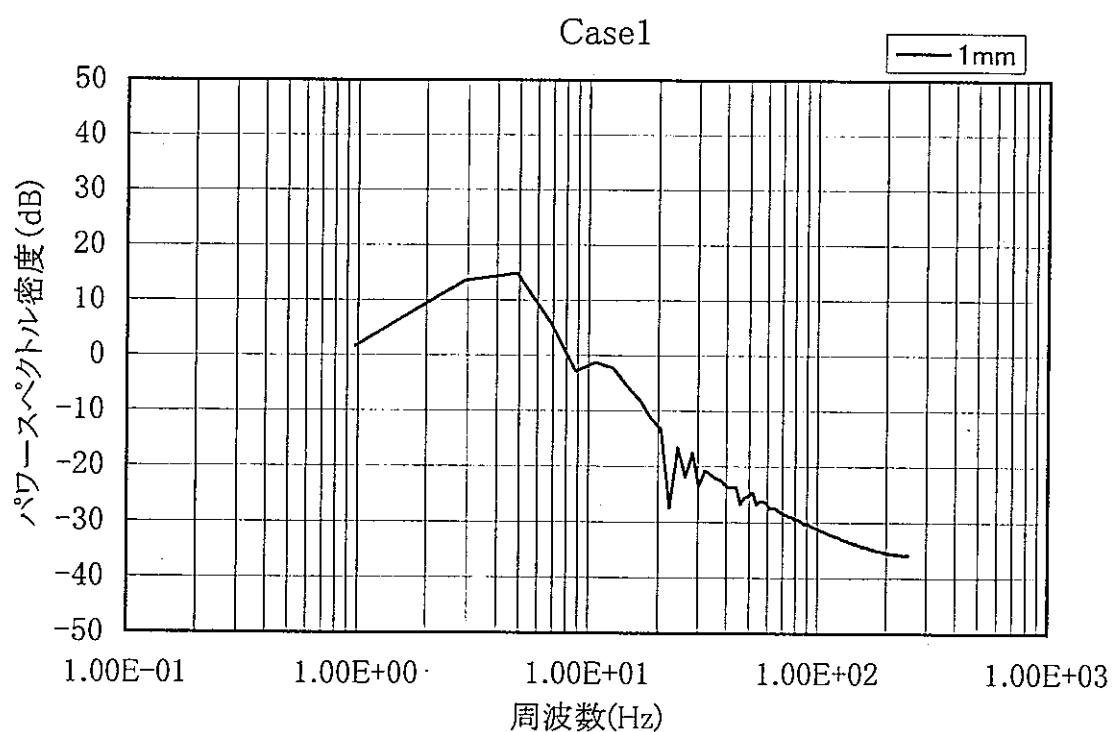
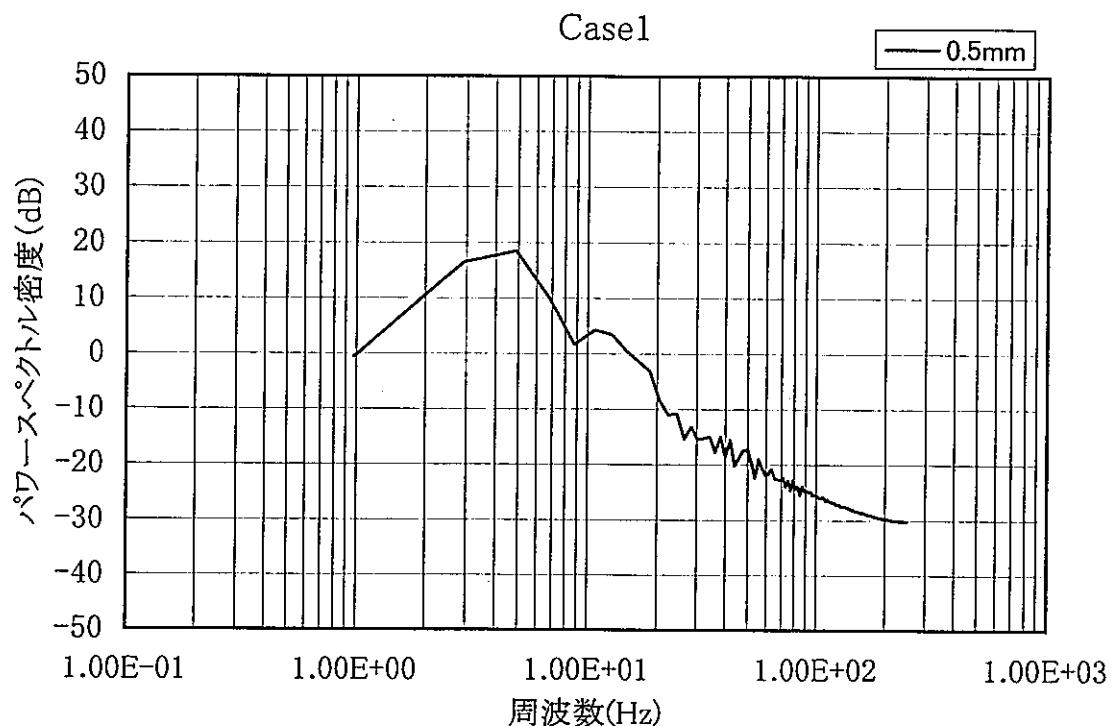


図 4. 28 BEMSET コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度（ケース 1） (1/3)

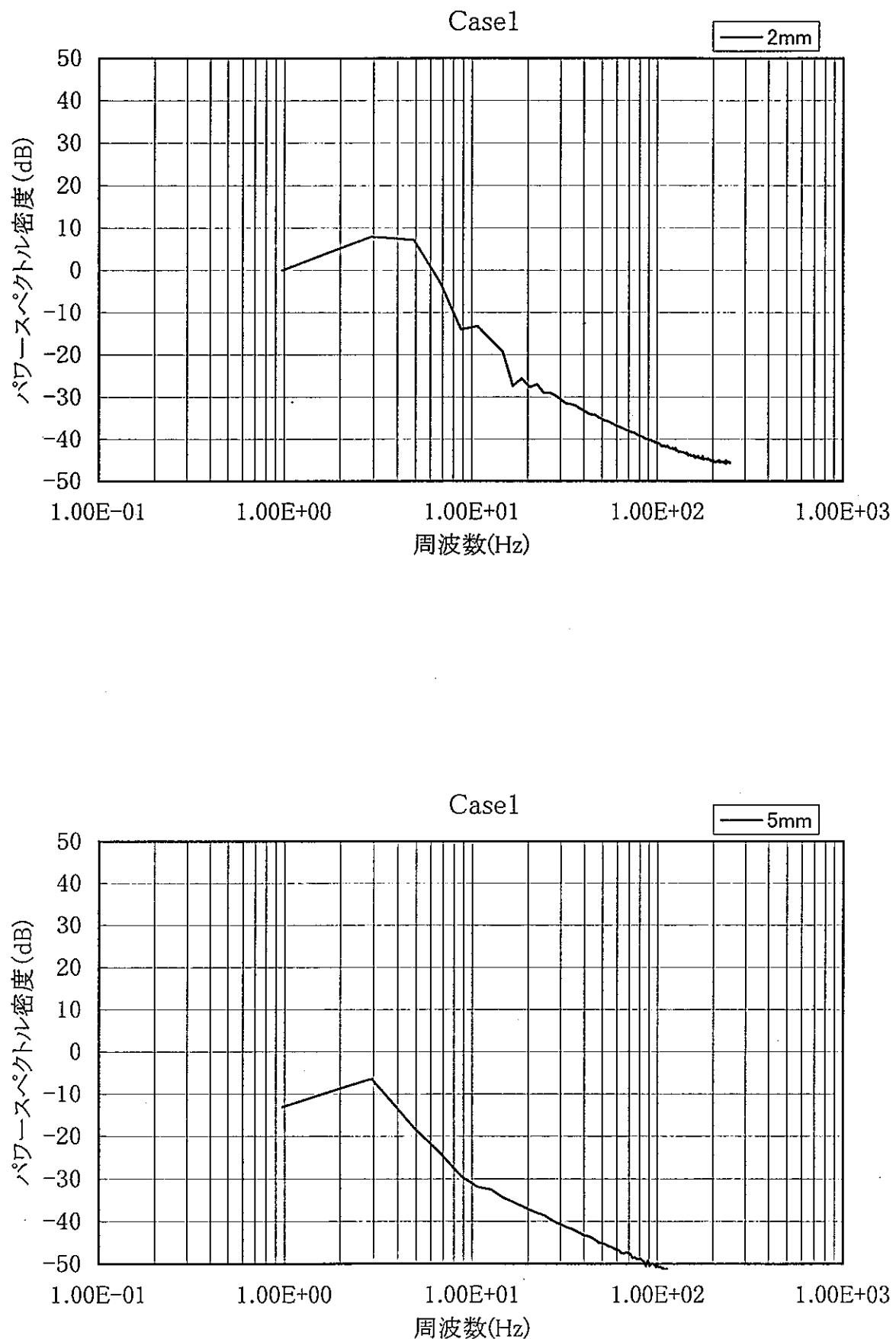


図 4. 28 BEMSET コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度（ケース 1） (2/3)

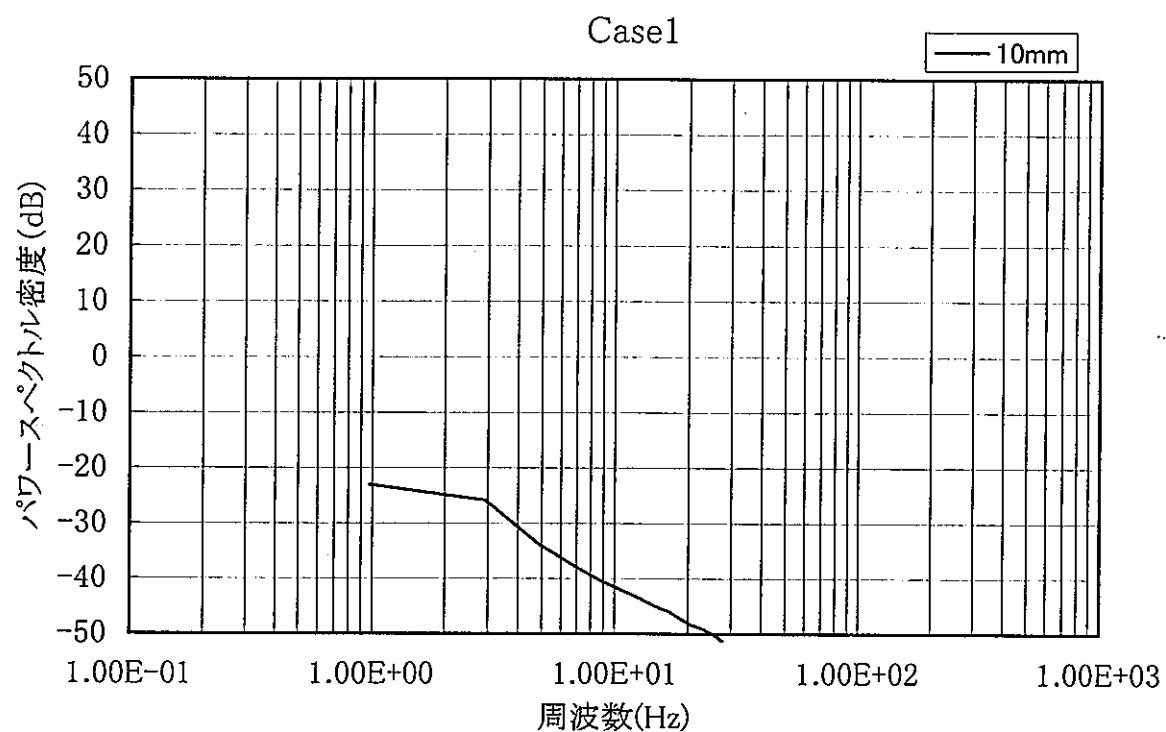


図 4. 28 BEMSET コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度（ケース 1） (3/3)

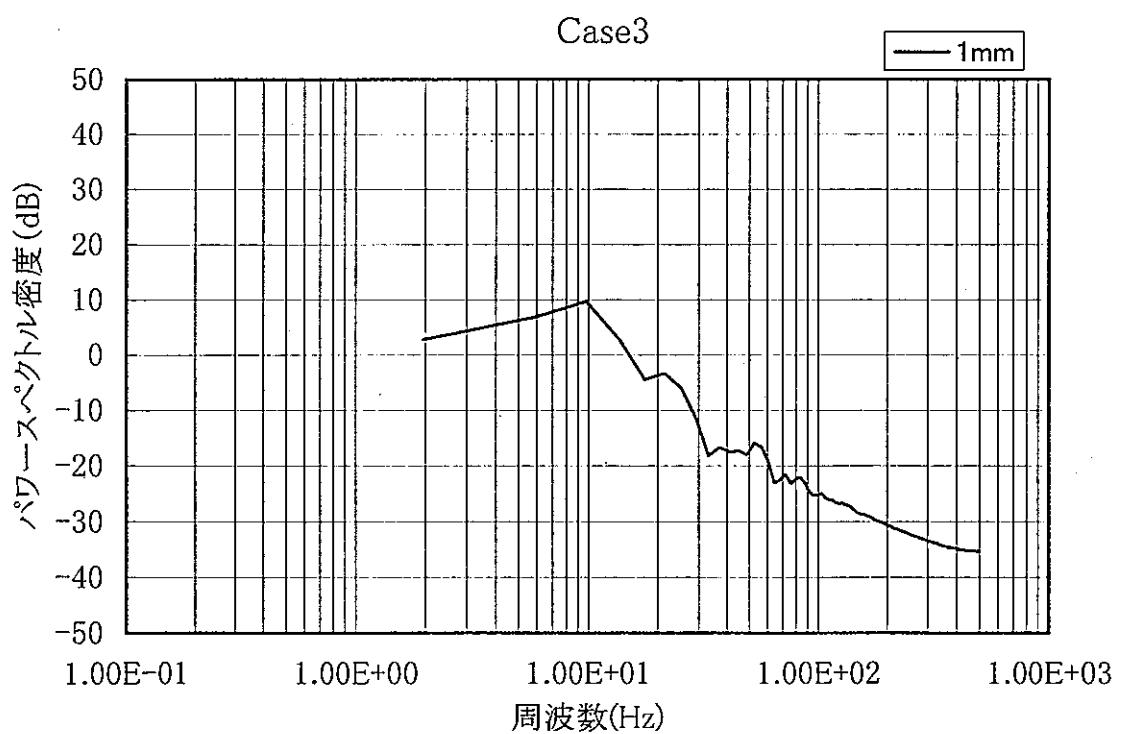
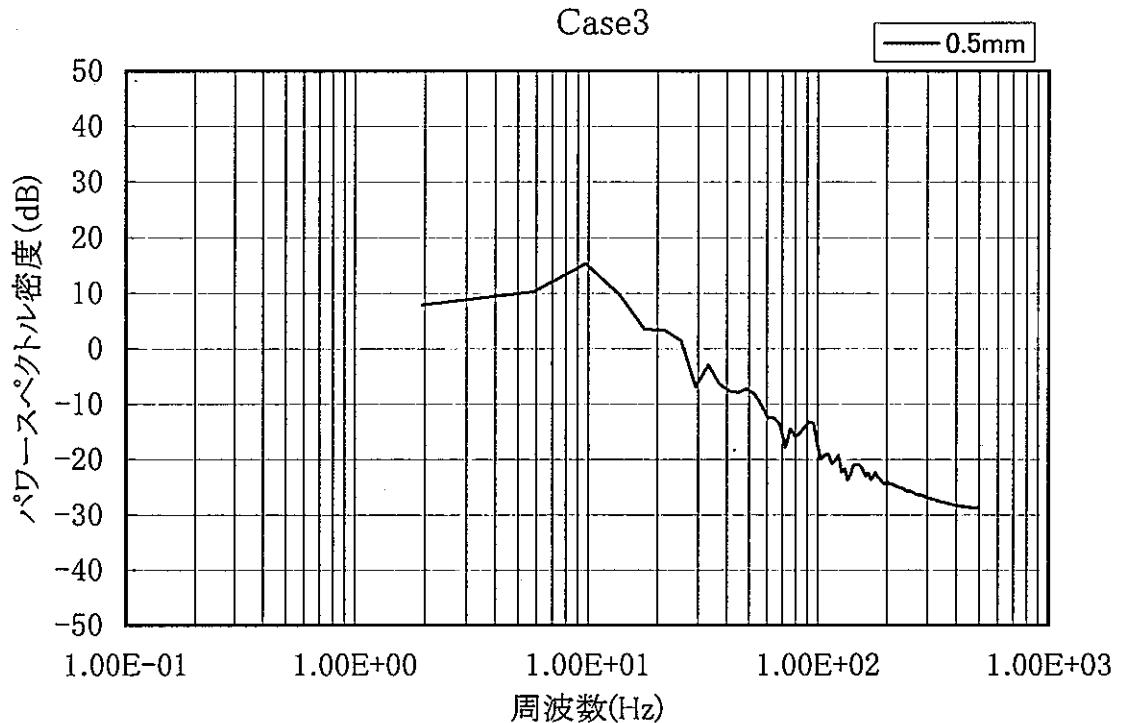


図 4. 30 BEMSET コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度（ケース 3） (1/3)

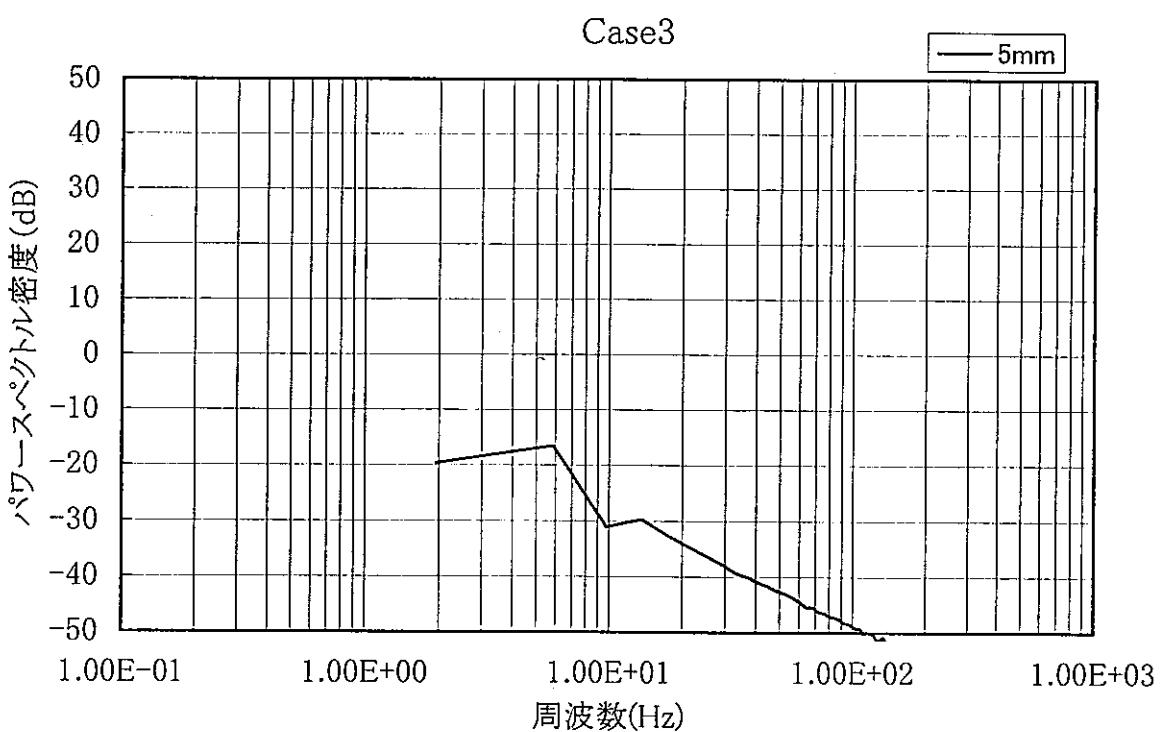
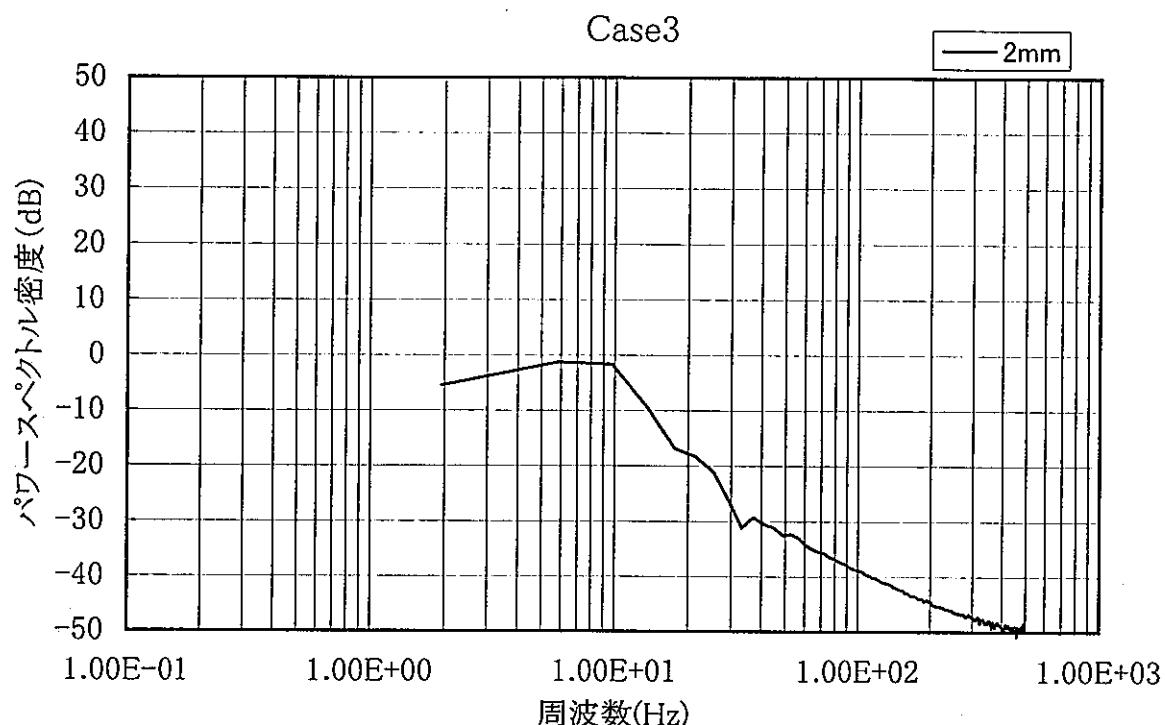


図 4. 30 BEMSET コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度（ケース 3） (2/3)

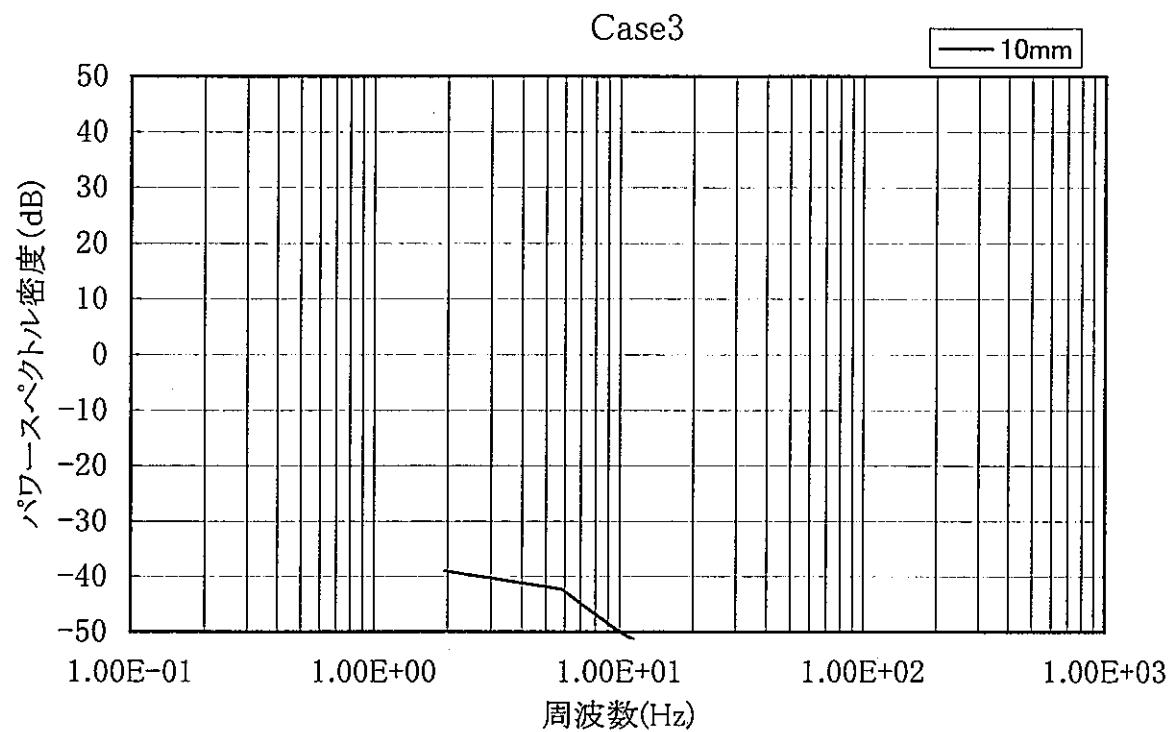


図 4. 30 BEMSET コードによる温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度（ケース 3） (3/3)

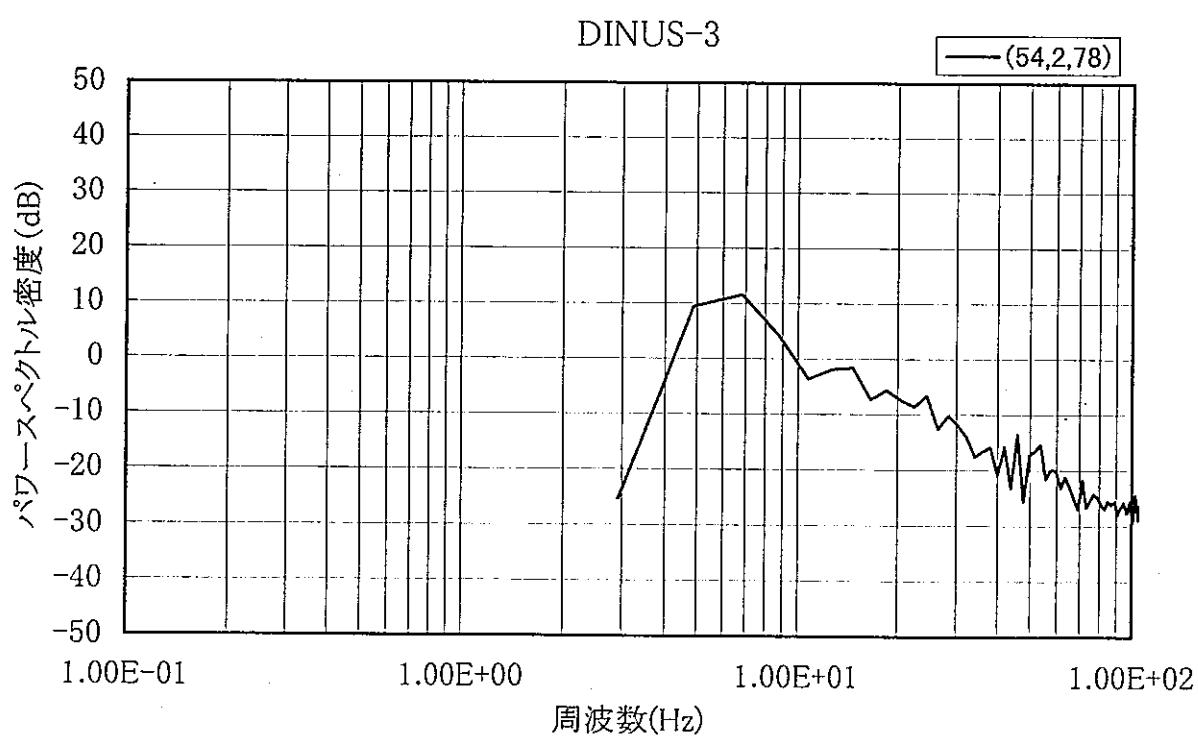
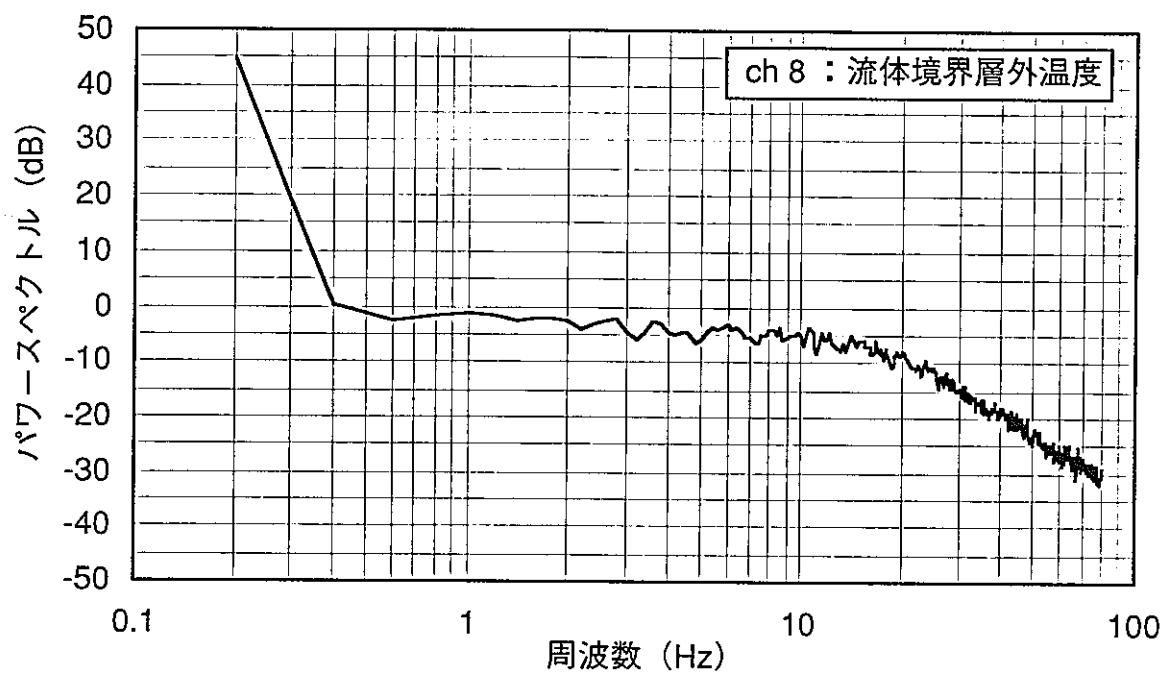


図 4. 31 溫度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較（ケース 1） (1/4)

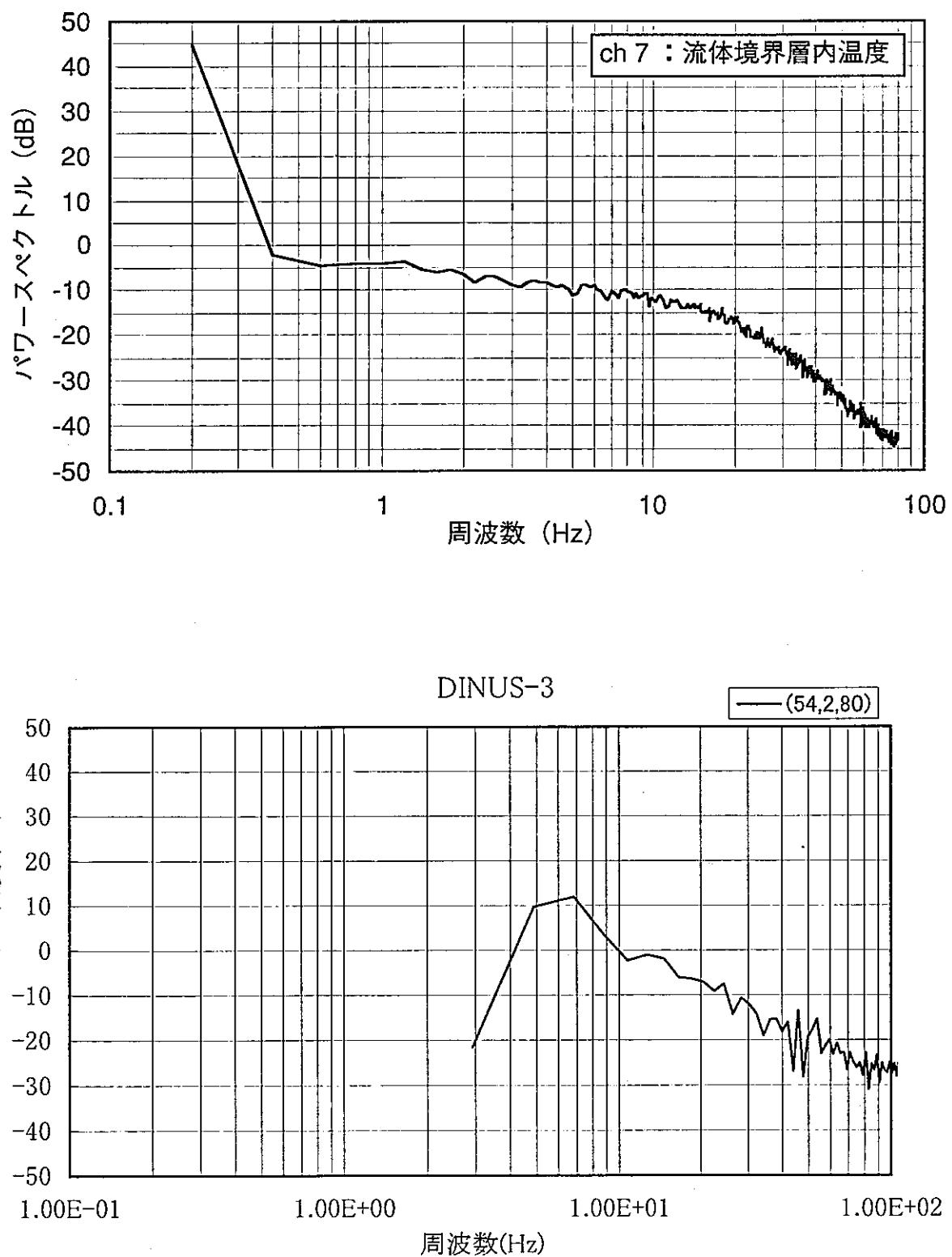


図 4. 31 溫度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較（ケース 1） (2/4)

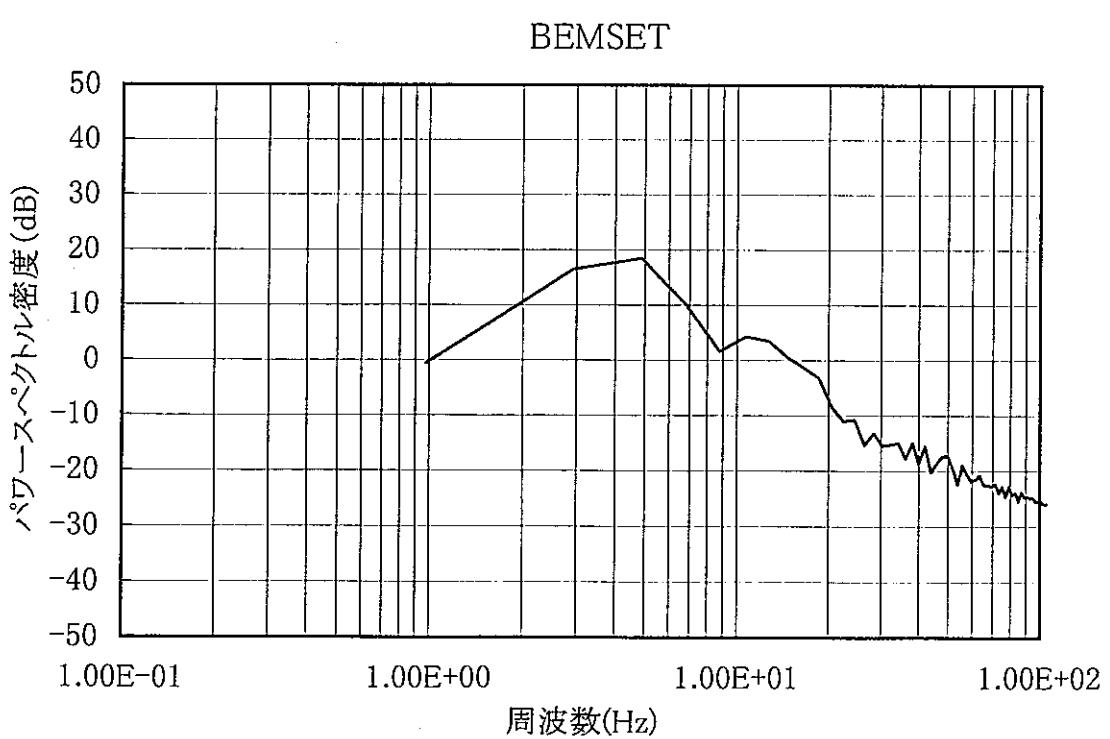
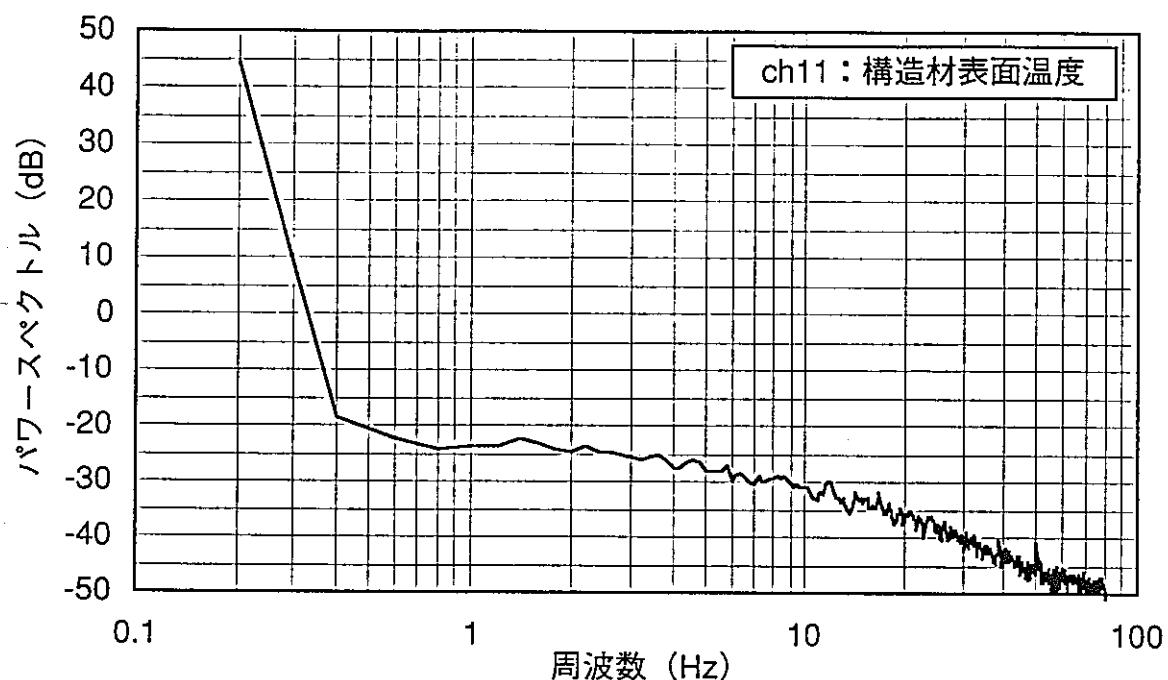


図 4. 31 溫度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較（ケース 1）(3/4)

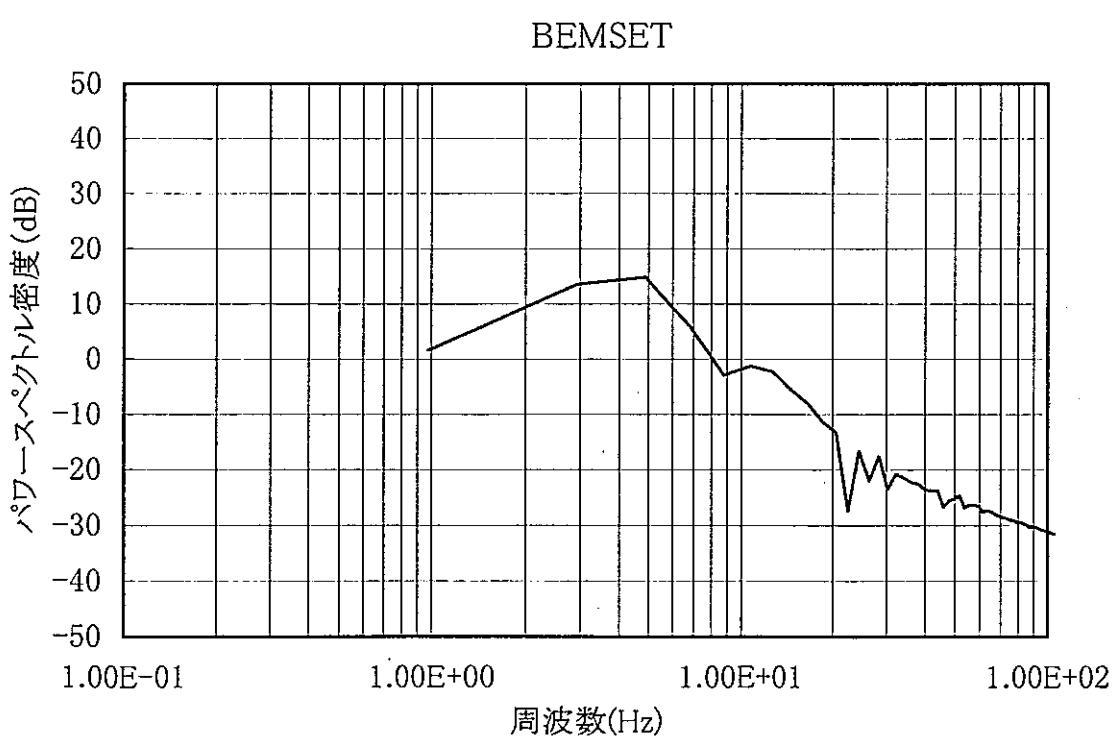
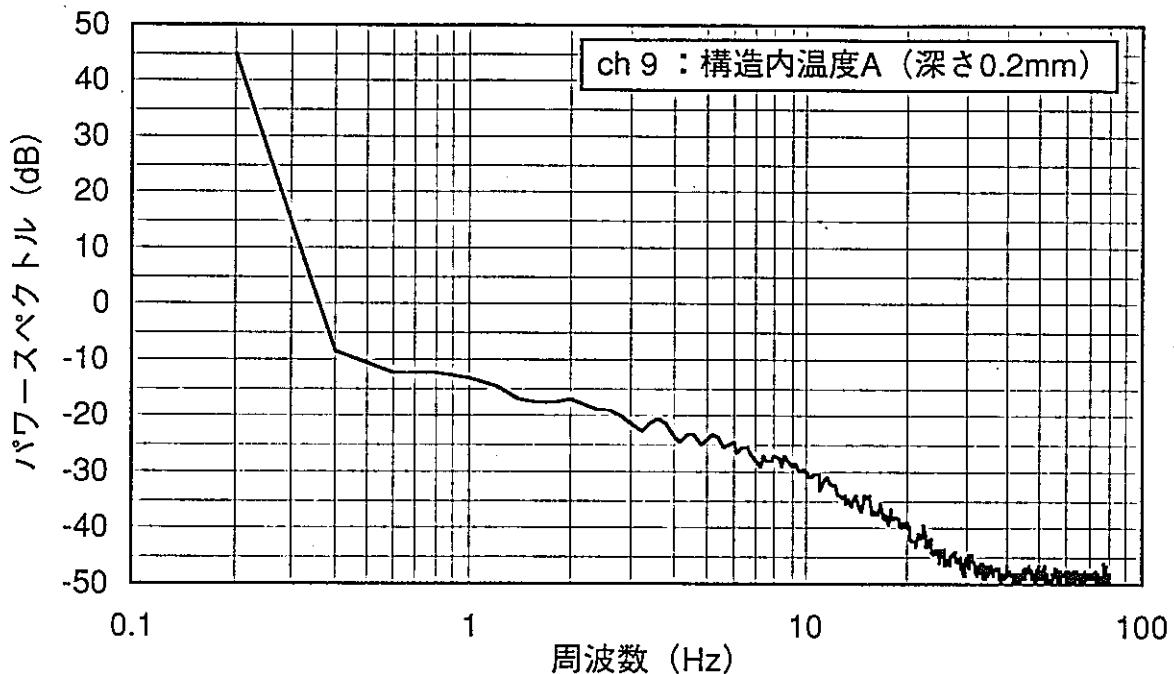


図 4. 31 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較（ケース 1）(4/4)

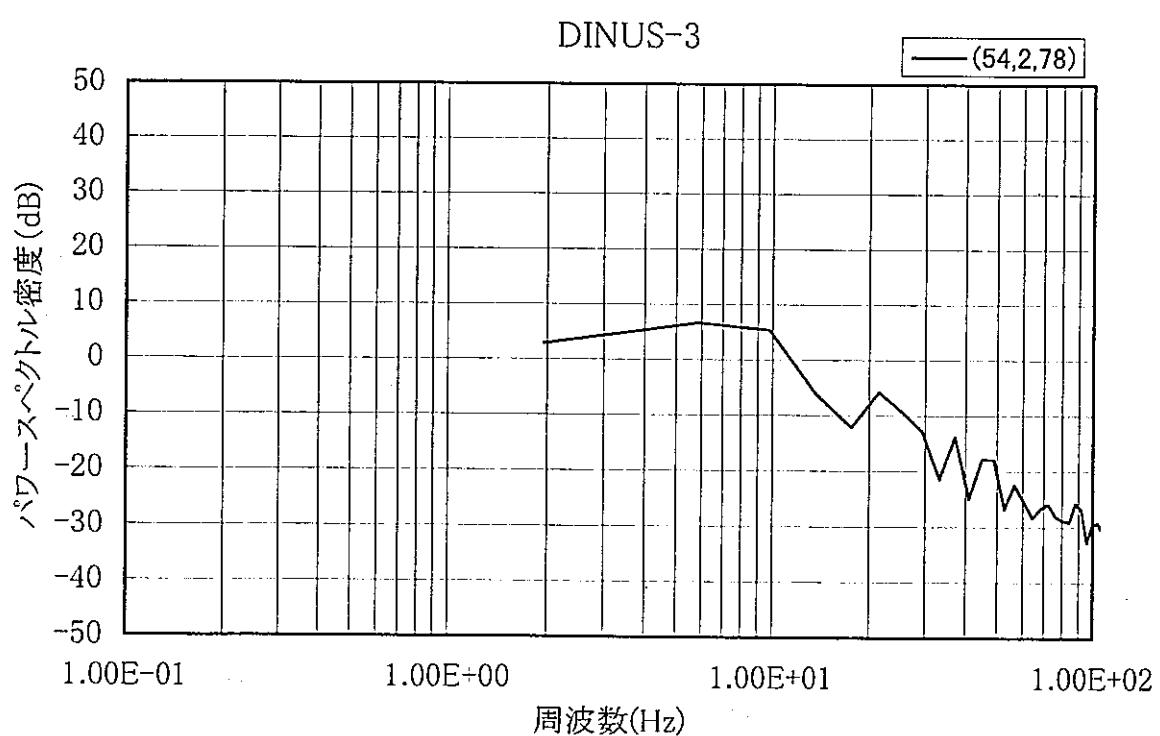
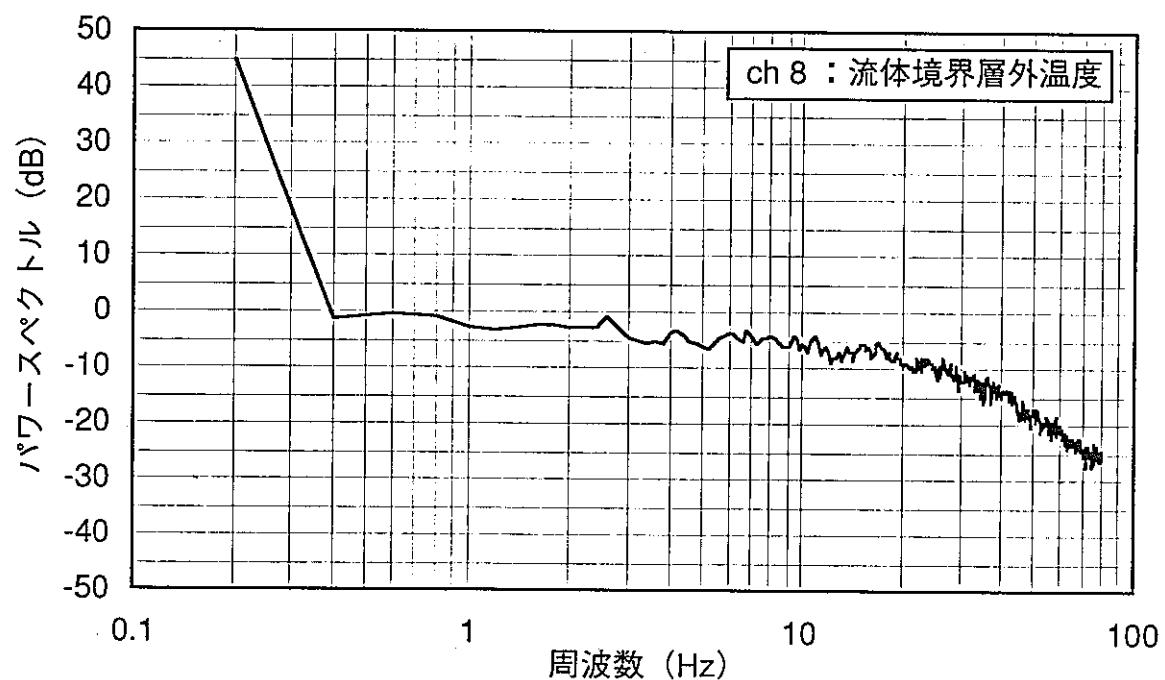


図 4. 32 溫度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較（ケース 2） (1/4)

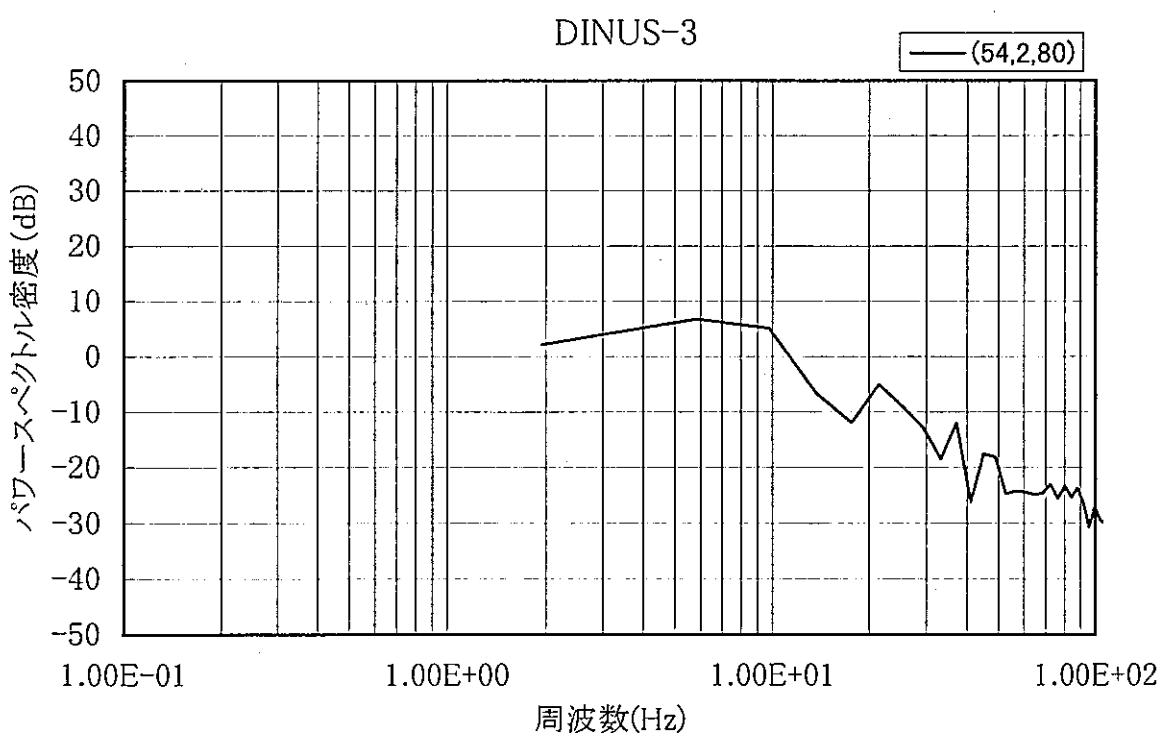
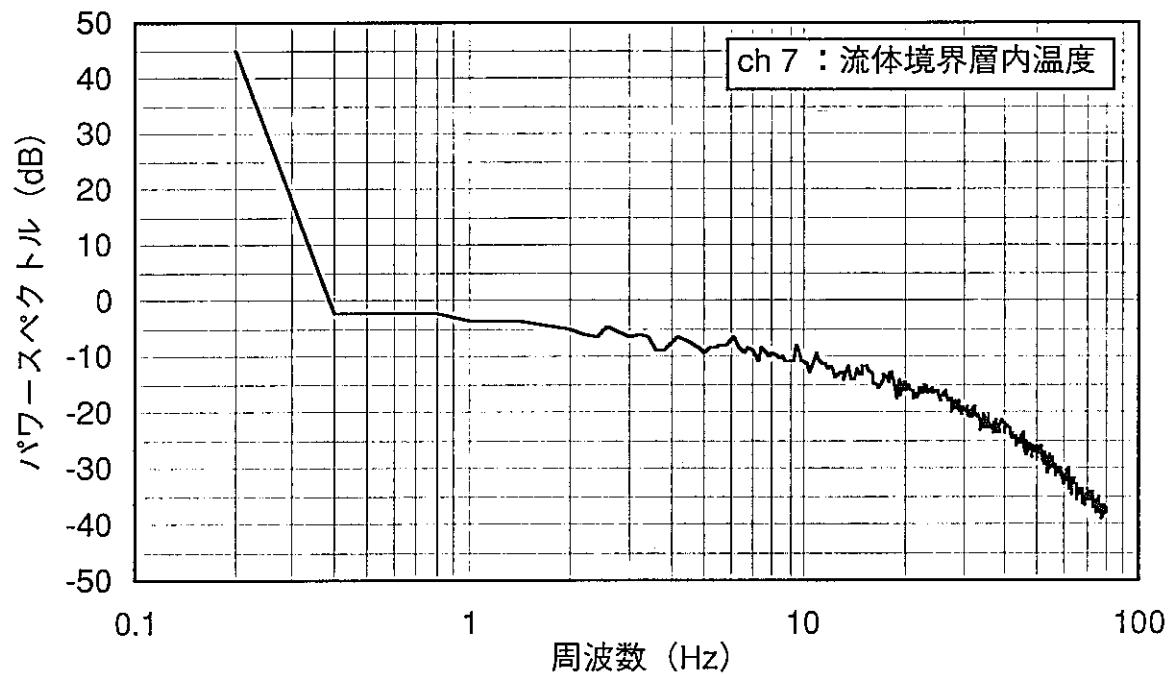


図 4. 32 溫度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較（ケース 2） (2/4)

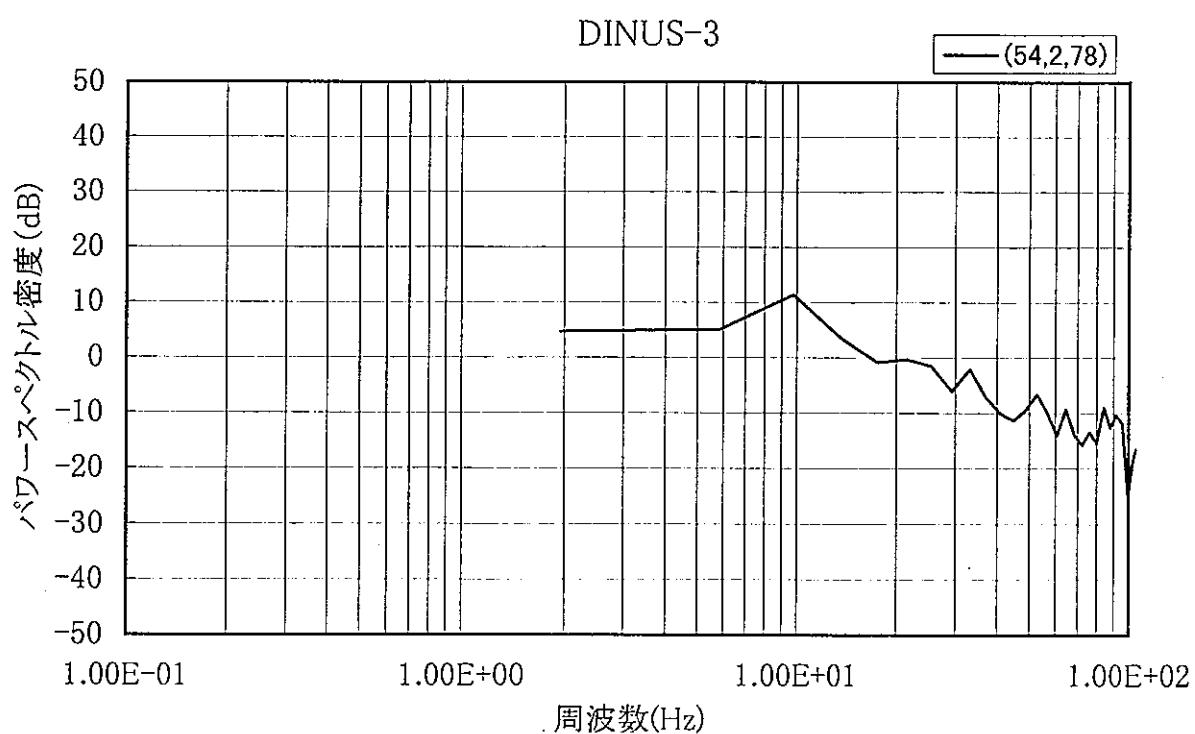
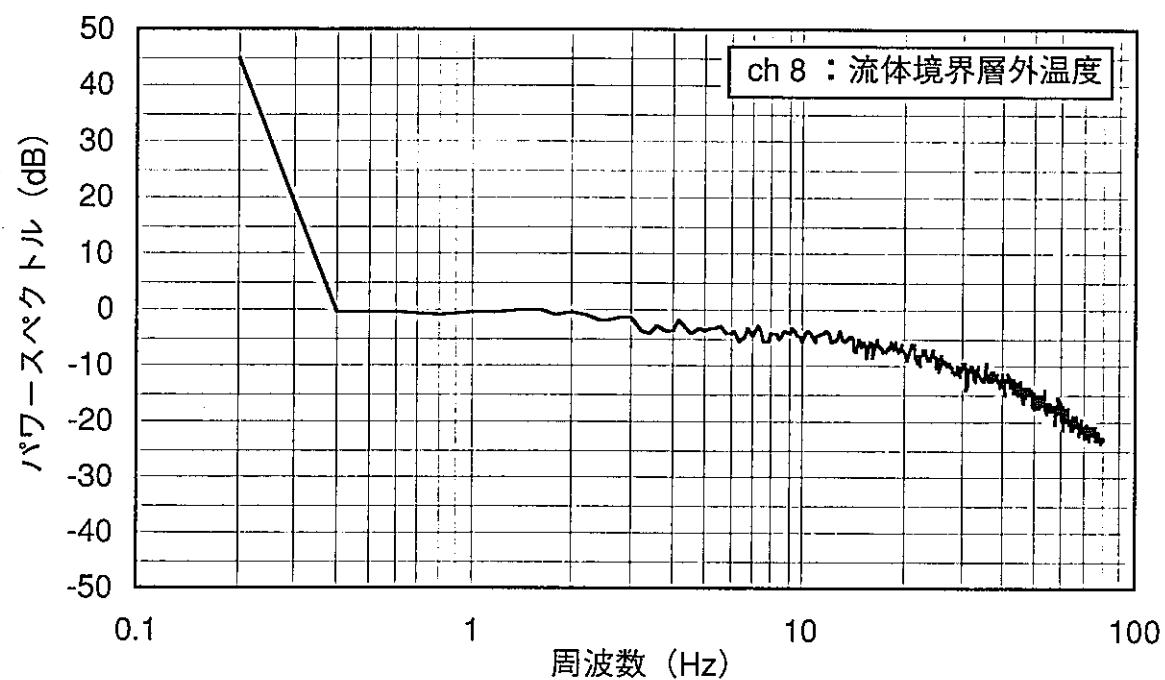


図 4. 33 溫度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較（ケース 3） (1/4)

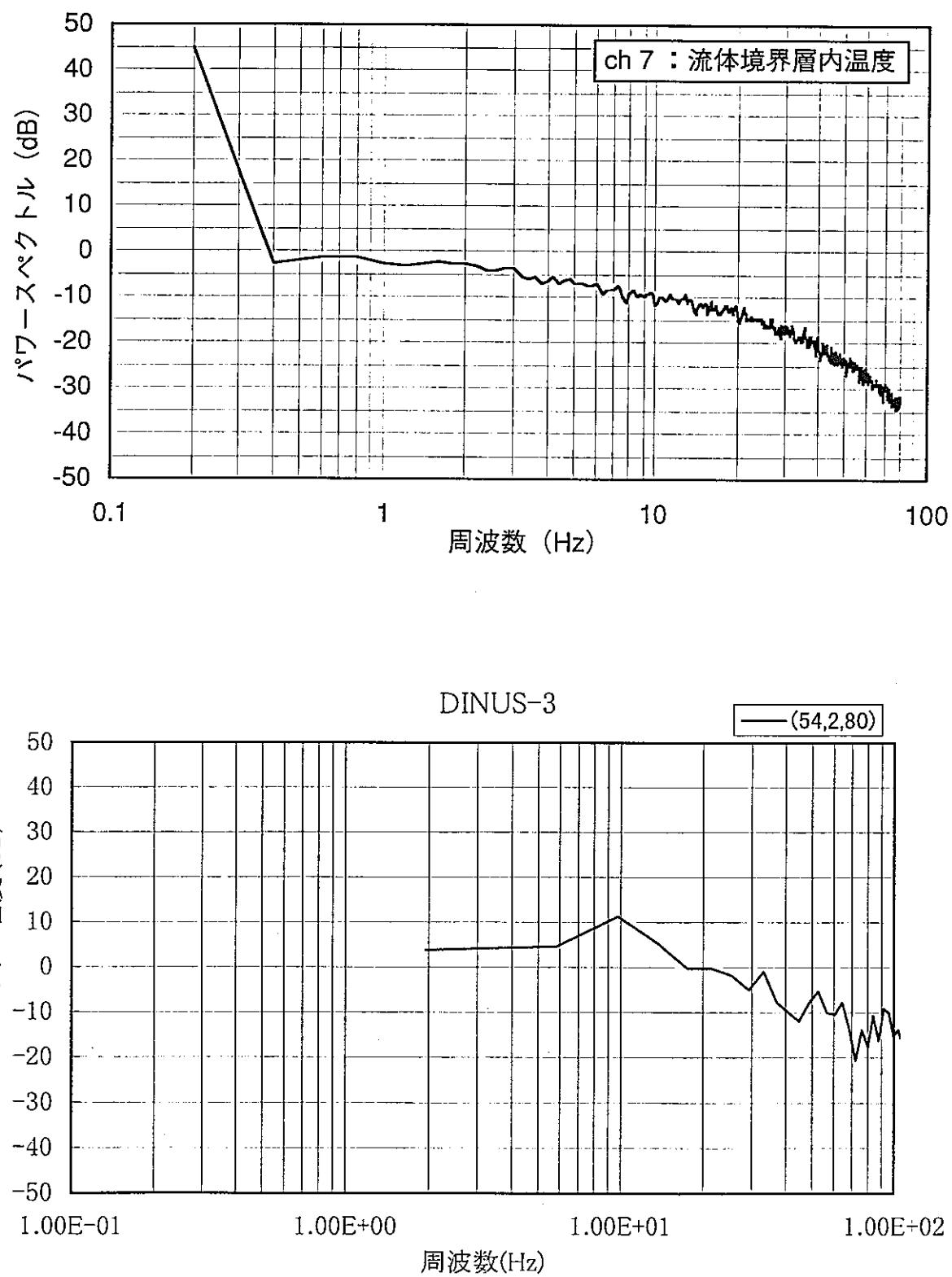


図 4. 33 溫度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較（ケース 3） (2/4)

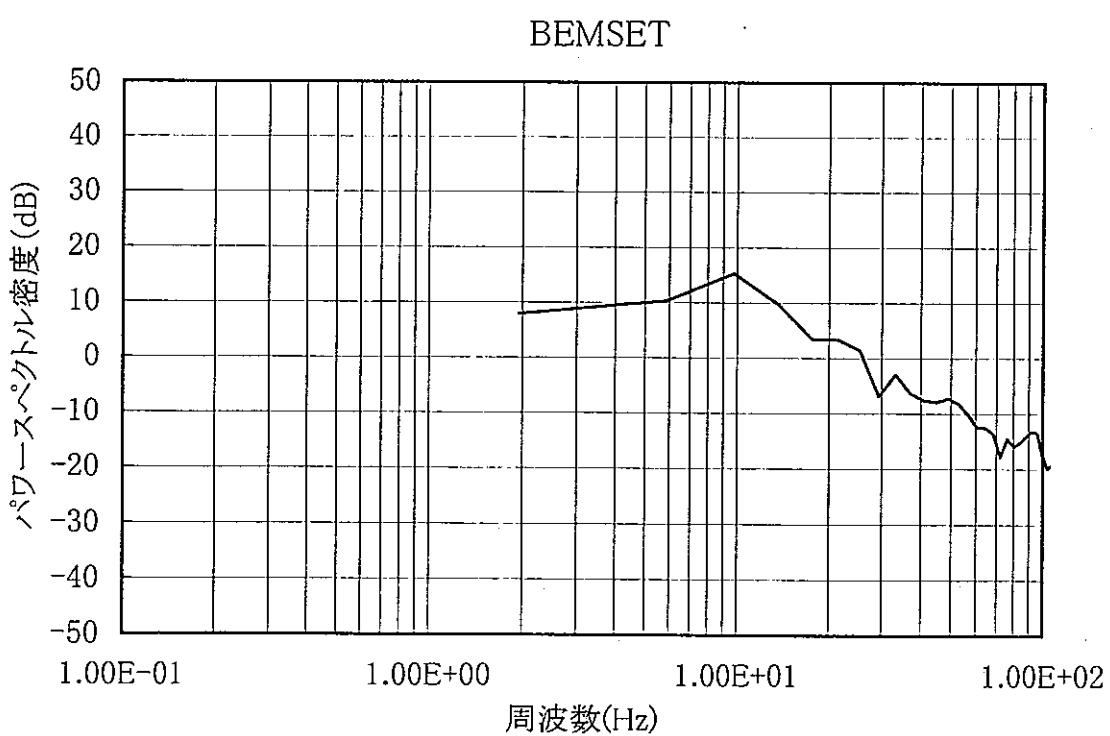
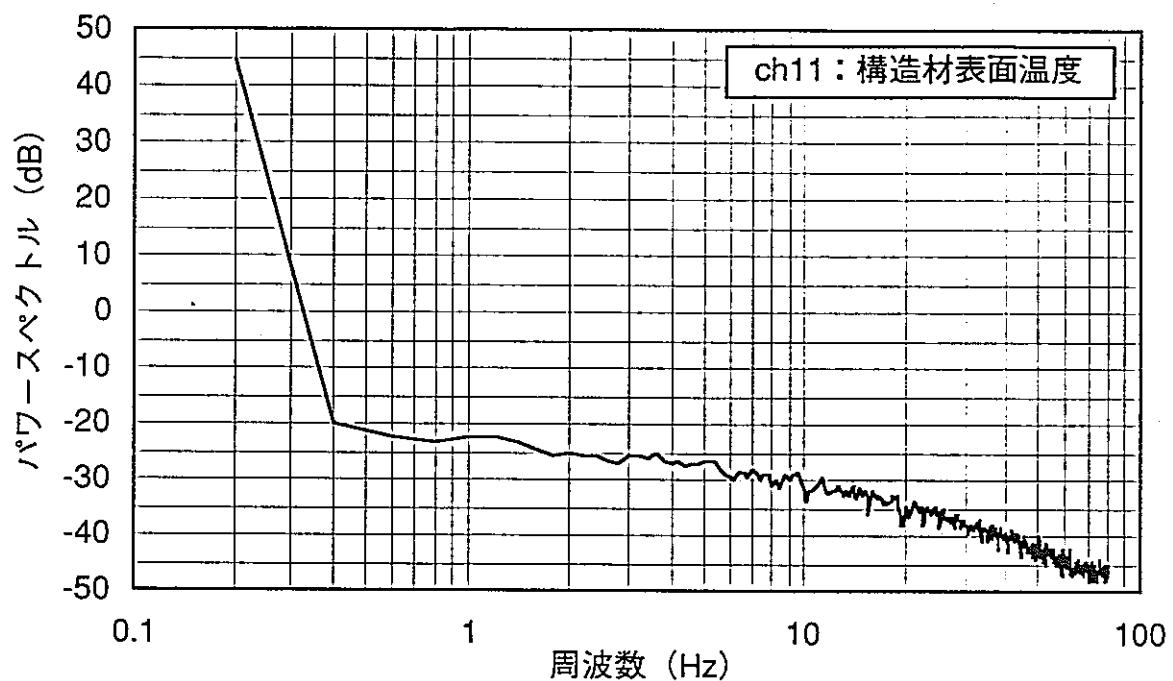


図 4. 33 溫度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較（ケース 3） (3/4)

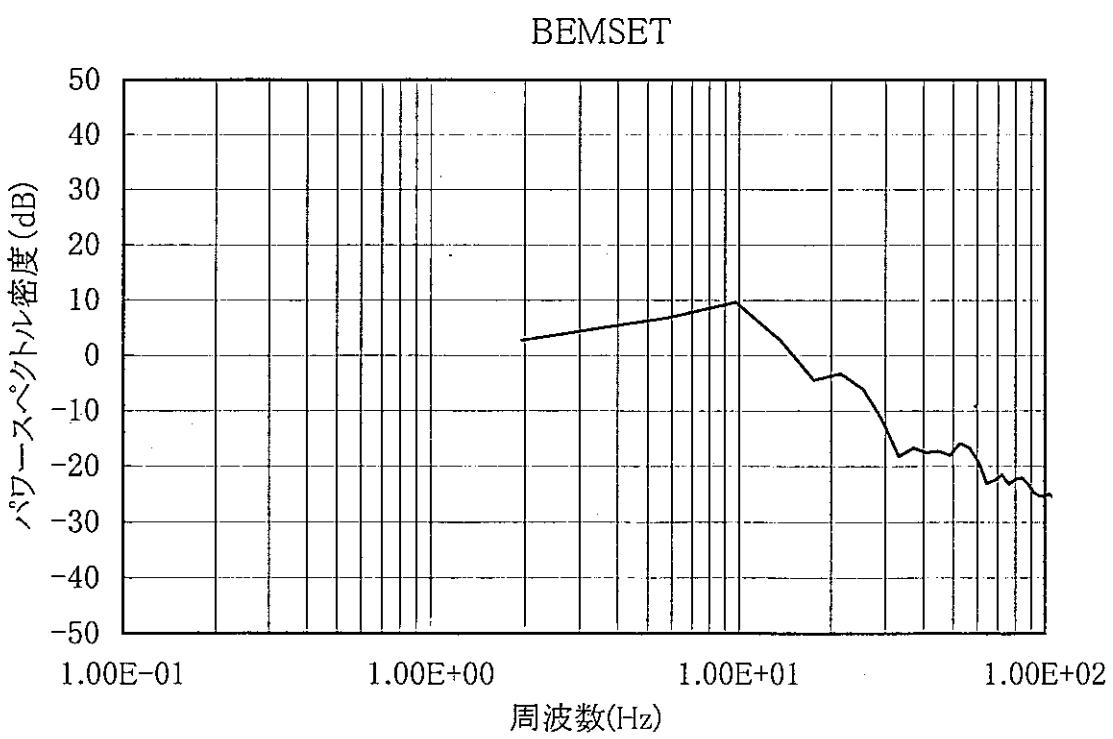
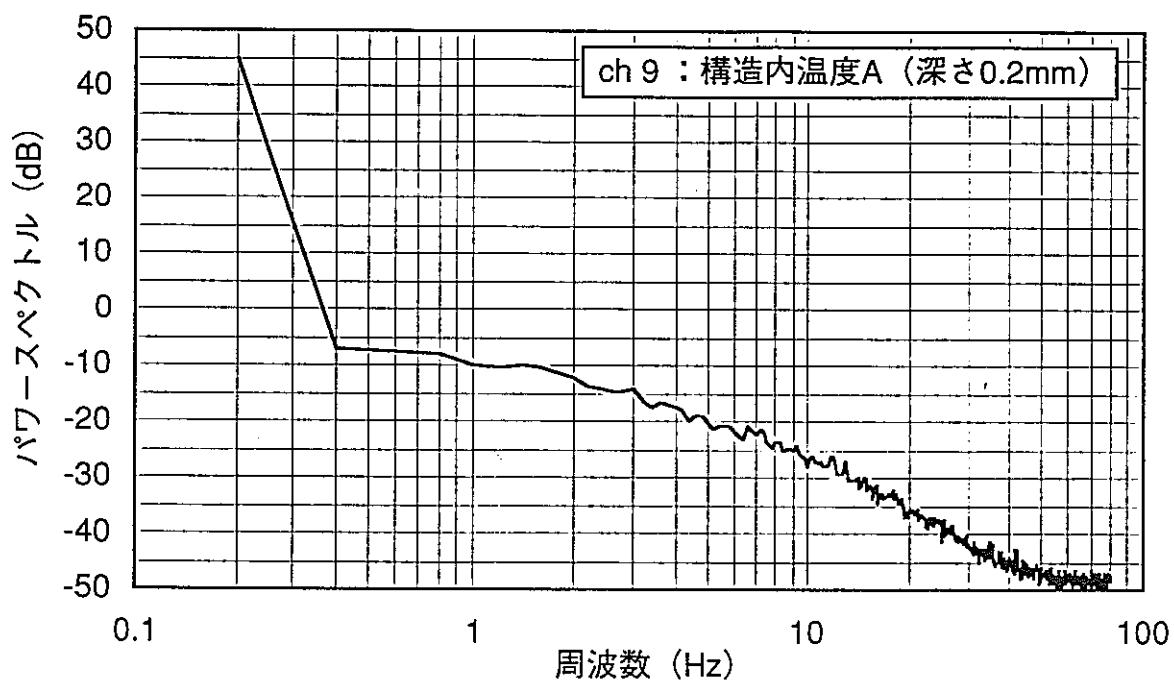


図 4. 33 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較（ケース3）(4/4)

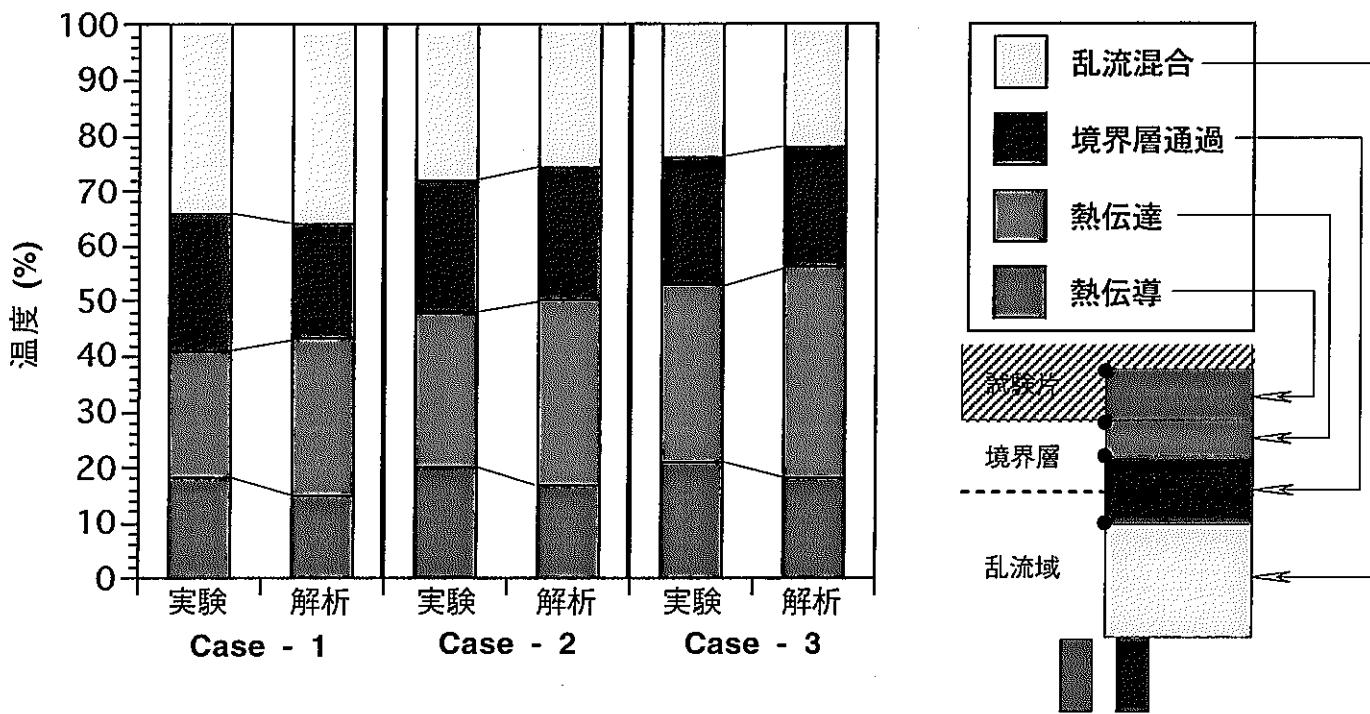


図 4.34 温度ゆらぎ減衰特性の比較

第5章 結 言

4種類の解析コード(汎用多次元コード AQUA、直接シミュレーションコード DINUS-3、直接法モンテカルロコード THEMIS および境界要素法コード BEMSET)より成るサーマルストライピング解析評価手法のシステムレベルでの検証を行うため、流体・構造非定常熱的応答に関する既往ナトリウム試験の数値解析を行った。さらに得られた解析結果に基づき、温度ゆらぎ実効値、温度ゆらぎ振幅および周波数の頻度分布、温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度および境界層内温度ゆらぎ減衰特性などの統計量を評価し、実験によるそれらとの比較を行った。この比較の結果、同解析評価システムにより、流体・構造非定常熱的応答挙動を精度良く模擬できることを確認した。

参考文献

- (1) 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(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、PNC TN9410 96-136 (1996)
- (2) 安部 英昭、横田 憲克、Na 中サーマルストライピングによる浸炭材の停留亀裂、日本機械学会論文集、60巻 578号、pp. 2207 - 2212 (1994)
- (3) 薄 一平、岡村 弘之、定常ランダム荷重下の疲労亀裂進展、日本機械学会論文集、44巻 386号、pp. 3322 - 3332 (1978)
- (4) 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、博士論文 (1994)
- (5) 村松 壽晴、二ノ方 壽、サーマルストライピング現象に対する解析的評価手法の開発、日本原子力学会誌、Vol. 36、No. 12、pp. 1152-1163 (1994)
- (6) Muramatsu, T., A Direct Simulation Monte-Carlo Code for the Evaluation of Non-stationary Heat Transfer Phenomena in LMFR Thermohydraulics, Proc. 8th IAHR Working Group Meeting on Advanced Nuclear Reactors Thermal Hydraulics, Prag, Czech Republic (1995)
- (7) Muramatsu, T., Thermal Response Evaluation of Austenitic Stainless Steels Due to Random Sodium Temperature Fluctuations Using BEMSET and DINUS-3 Codes, Proc. Joint ASME / ICPVT-8 PVP Conference, Vol. 337, pp. 215-223 (1996)
- (8) Leonard, B. P., A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation, Comp. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 19, pp. 59 (1978).
- (9) Launder, B. E. and Spalding, D. B., The Numerical Computation of Turbulent Flows, Comp. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 3, pp. 269 (1974).
- (10) Rodi, W., A New Algebraic Relation for Calculating the Reynolds Stress, ZAMM 56, T219-T221 (1976).
- (11) Launder, B. E., Reece, G. J. and Rodi, W., Progress in the Development of a Reynolds Stress Turbulence Closure, J. Fluid Mech., Vol. 68 (1975).
- (12) 村松 壽晴、熱流動解析コードの運用効率化、計算力学と CAE シリーズ「4. ファジィ推論」、第3章、培風館 (1991)
- (13) Roache, P. J., Computational Fluid Dynamics, Helmosa Publishers Inc., New York (1976).
- (14) Kawamura, T. and Kuwahara, K., Direct Numerical Simulation of Turbulent Inner Flow by Finite-Difference Methods, Proc. 23rd Aerospace Science Mtg., pp. 1 (1985)
- (15) 村松 壽晴、ファジィ推論による熱流動数値計算不安定性の除去手法の開発、日本機械学会、第3回 設計工学・システム部門講演会 (1993)
- (16) Bird, G. A., Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows, Oxford Science Publications (1994)
- (17) 村松 壽晴、非定常熱伝達挙動の解析的評価手法の開発(1)、直接法モンテカルロコード THEMIS の開発、日本原子力学会、1995年春の大会
- (18) 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年春の大会
- (19) Harlow, F. H. and Amsden, A. A., A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for All Speeds, J. Comp. Physics, Vol. 8 (1971)
- (20) Leonard, B. P., A Survey of Finite Difference With Upwinding for Numerical Modeling of the Incompressible Convective Diffusion Equation, Comp. Tech. in Transient and Turbulence Flow, Vol. 2, Pineridge (1981)

謝 辞

本作業の遂行にあたっては、株式会社 日立製作所 電力・電機開発本部 原子力1部 の安部 英昭 主任研究員より、同社による貴重な実験データをお貸し頂くと共に、実験結果に関する有益なコメントを頂きました。ここに深く感謝致します。

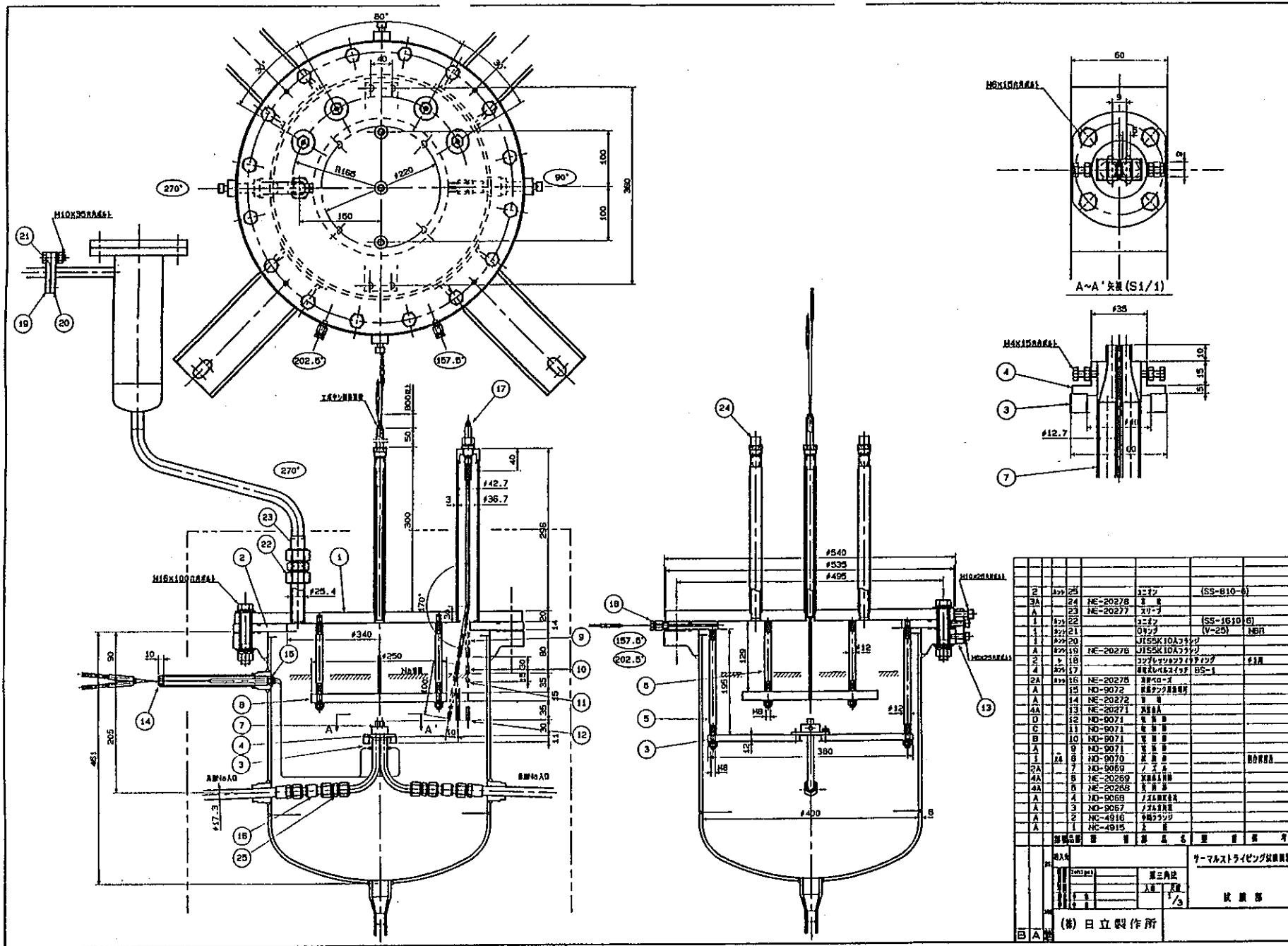
また、サーマルストライピング解析評価システムによる実験解析および事後統計処理などの作業では、CSK 株式会社の松本 英一 氏に多くの協力を頂いた。ここにあらためて謝意を表します。

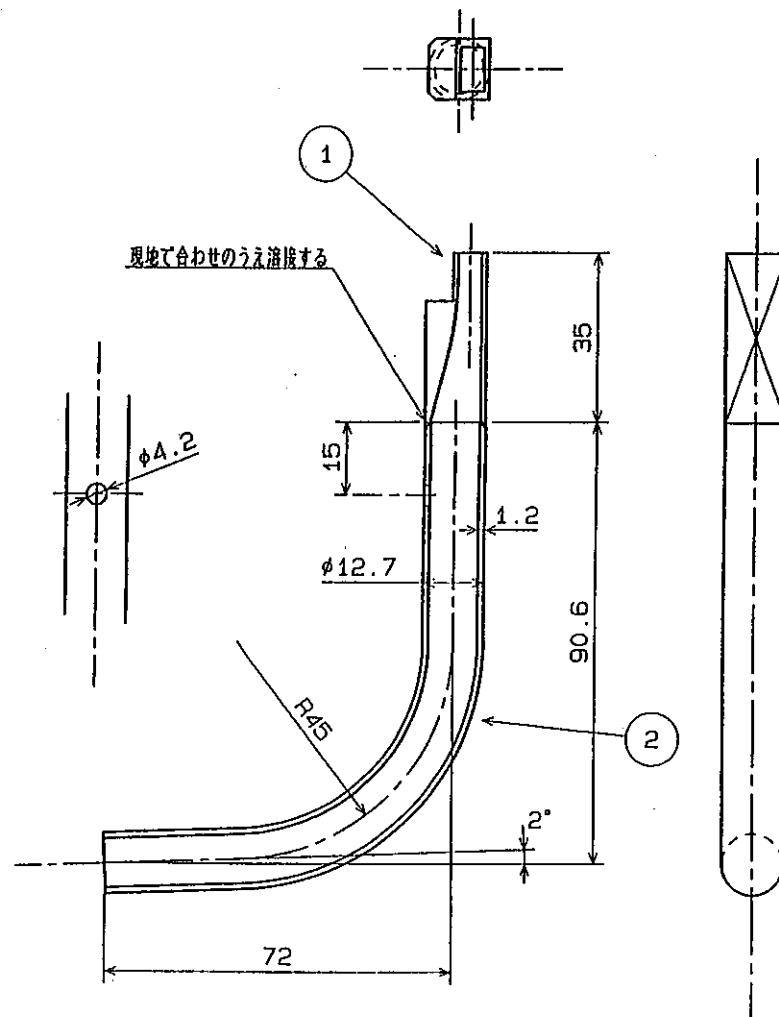
[付録]

付録A：試験部の詳細図面

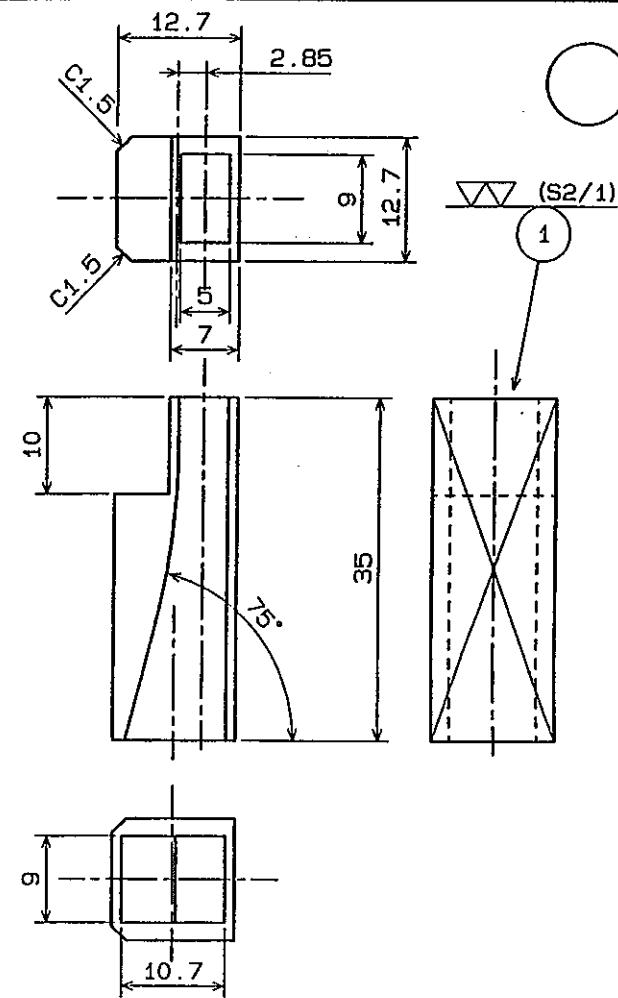
付録B：温度変化(ch1,ch2,ch3,ch4,ch13,ch14,ch15,ch16)

付録C：自己パワースペクトル(ch1,ch2,ch3,ch4,ch5,
ch6, ch10, ch12, ch13, ch14, ch15, ch16)



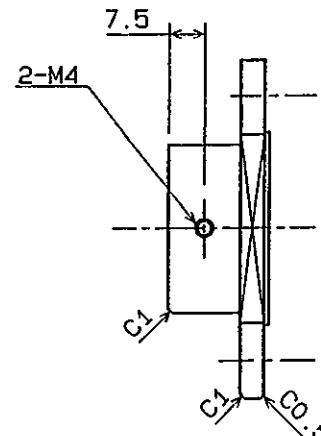
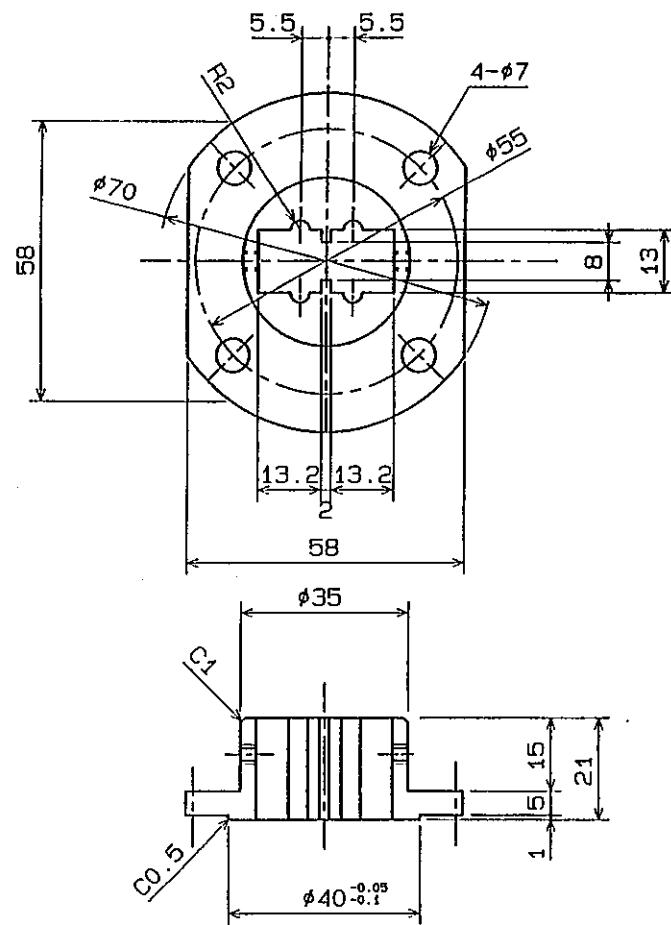
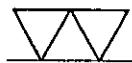


2個製作



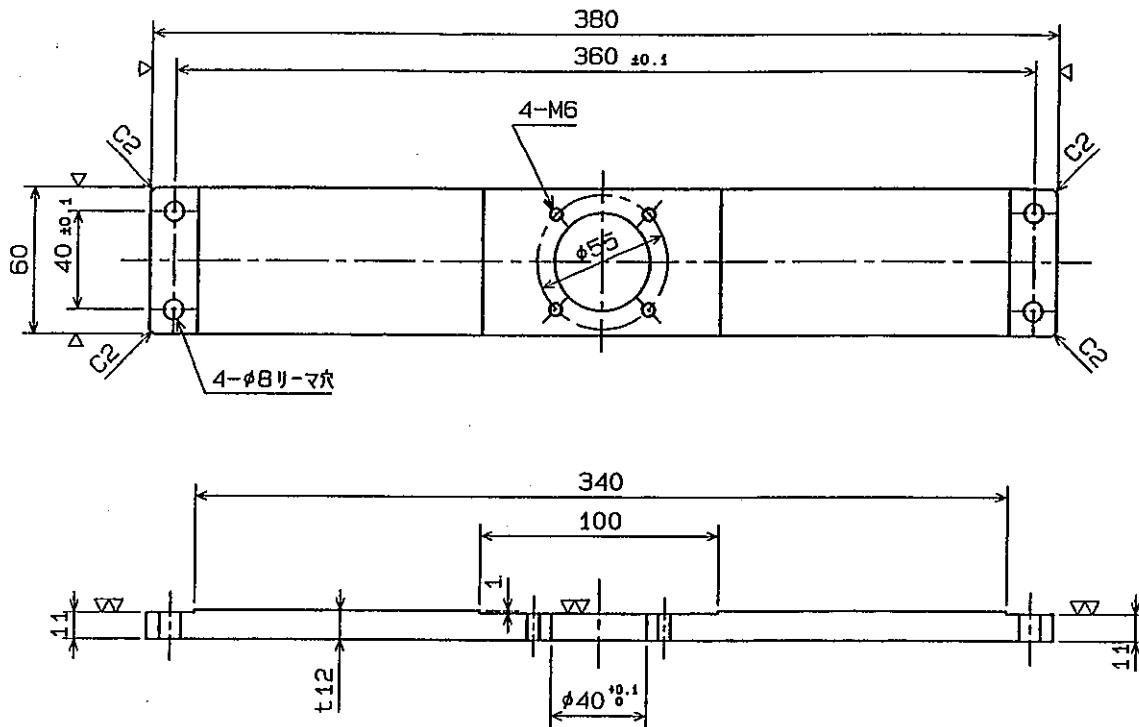
1	カソ	2	バイナ	SUS304	ø12.7xt1	2-300		
1	キ	1	ノズル	SUS304	角20-45			
	部署	品番	部品名	型番	材質	素材寸法	素材仕上 重量(kg)	備考
研 磨	鋼 板	Ishigai	鋼 板	第三角法	サーマルストライピング試験装置			ノズル
	重 鉛							
	電 鍍							
	電 鍍	小池	尺 度	1 / 1				
塗 装	中島							
B	A	業 者	(株) 日立製作所					

- 1 -



1 個製作

4	シ	3	M6X15ボ.スワ.	平ワ	SUS			
2	シ	2	M4X15ボ.スワ.	ナット	SUS			
1	キ	1	金 具		SUS304	#75-30		
	部署	品番	部 品 名	型 番	材 質	素 材 尺 法	素材仕上 重量 (kg)	備考
開 発 部	開 発	Ishigai		面法	第三角法		サーマルストライピング試験装置	
	計 量			度			ノズル固定金具	
	写 真							
	監 査	小 池						
承 認	認 可	中 島						
	業 者							
B	A	(株) 日立製作所						



1 個製作

1	牛	1	板		SUS304	t12X70-390	
	部署	品番	部品名	型番	材質	素材寸法	素材仕上 重量(kg)
実験 室	製図	Ishigai		直角法	第三角法	サーマルストライピング試験装置 ノズル支持板	
	重計						
	写真			尺度	1 / 2		
	實査	小池					
	承認	中島					
B	A	業	(株) 日立製作所				

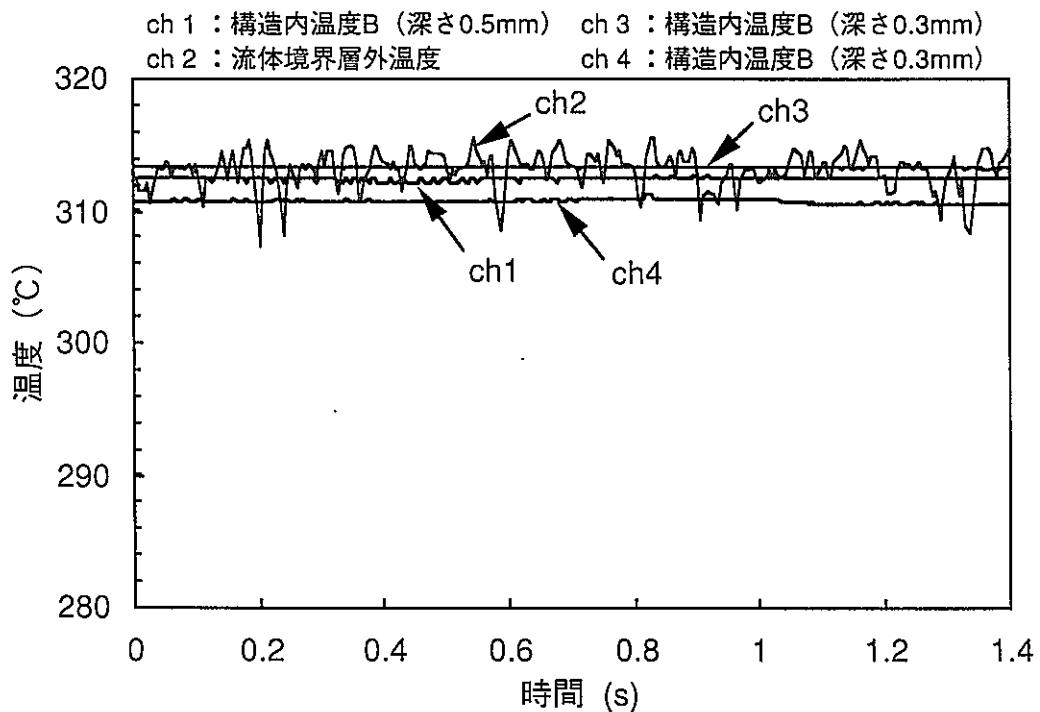


図1 温度変化 (Na流速1m/s)

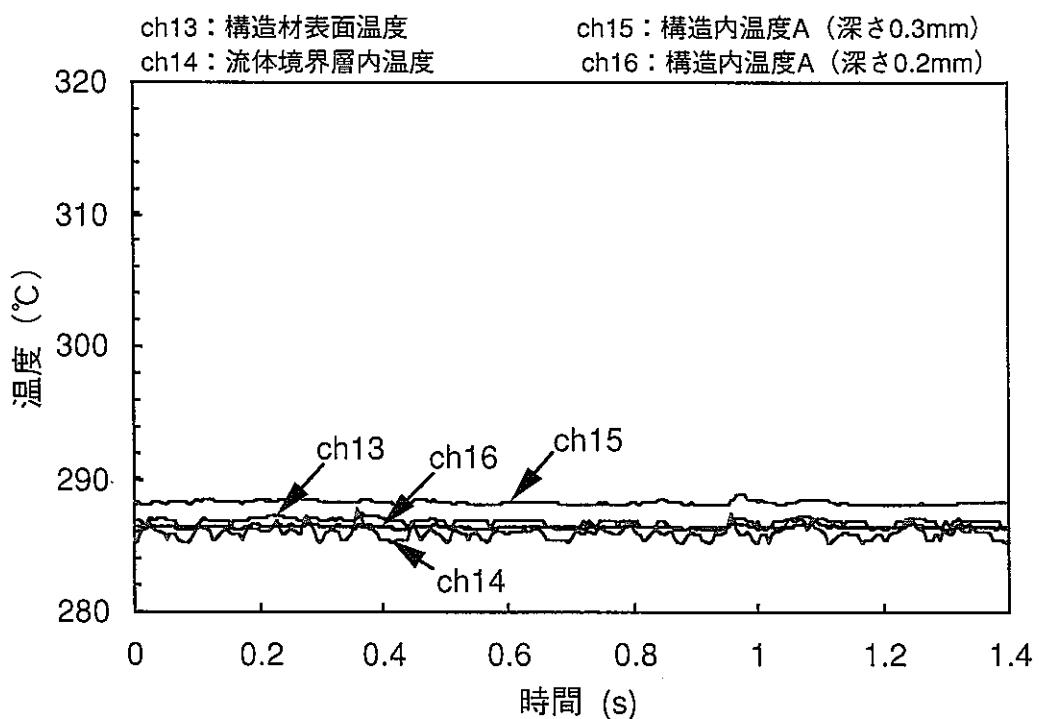


図2 温度変化 (Na流速1m/s)

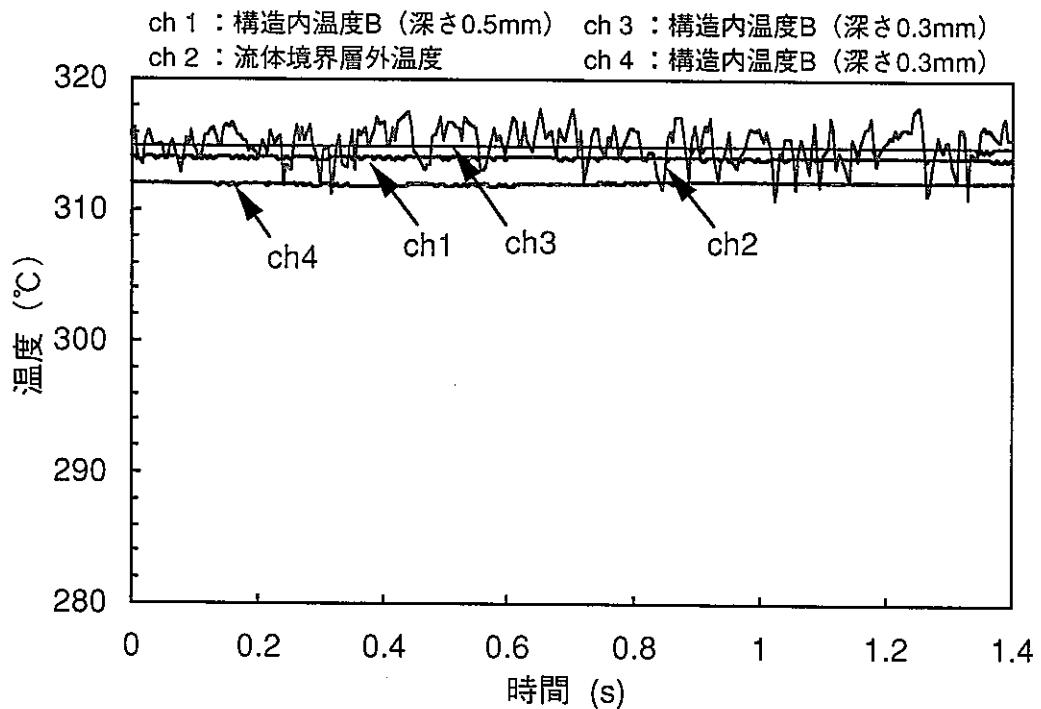


図3 温度変化 (Na流速1.5m/s)

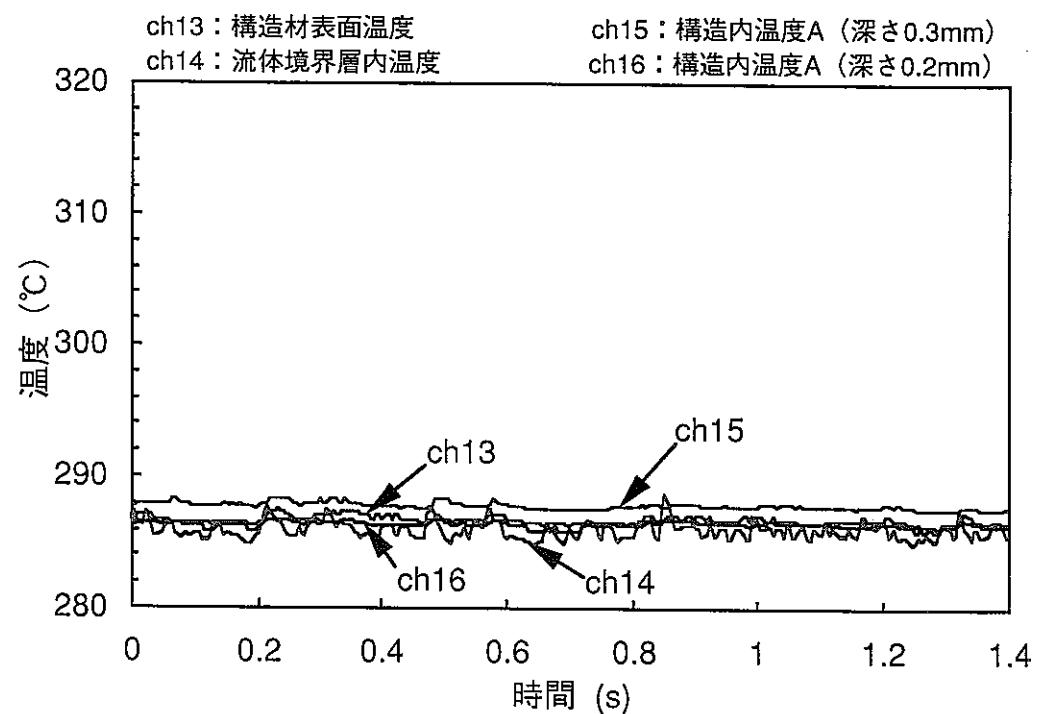


図4 温度変化 (Na流速1.5m/s)

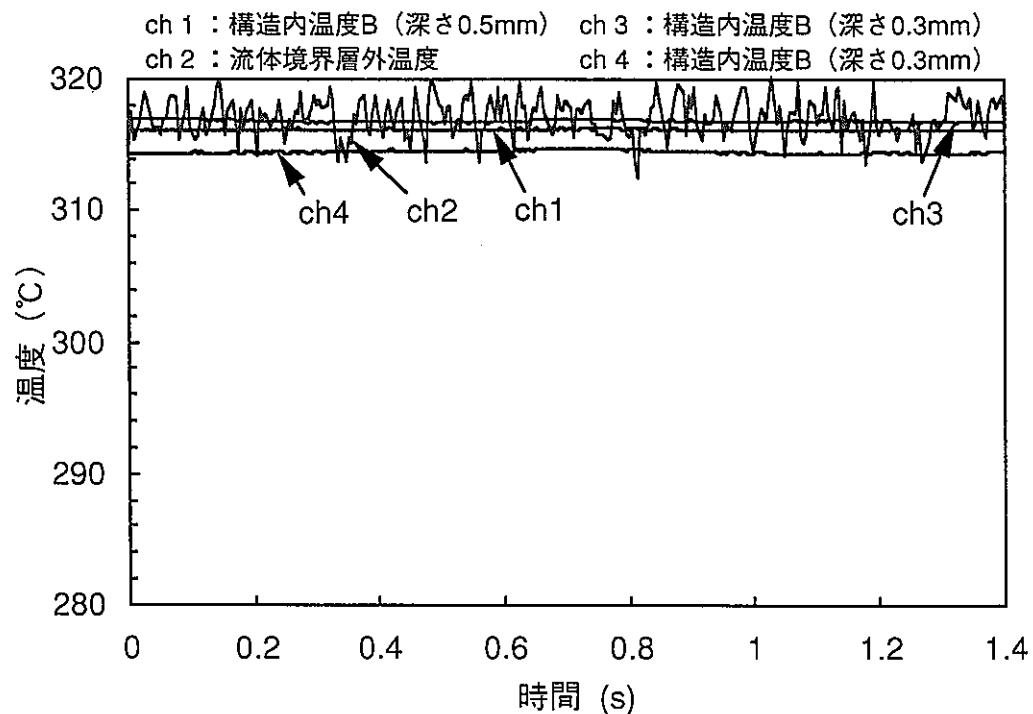


図5 温度変化 (Na流速2m/s)

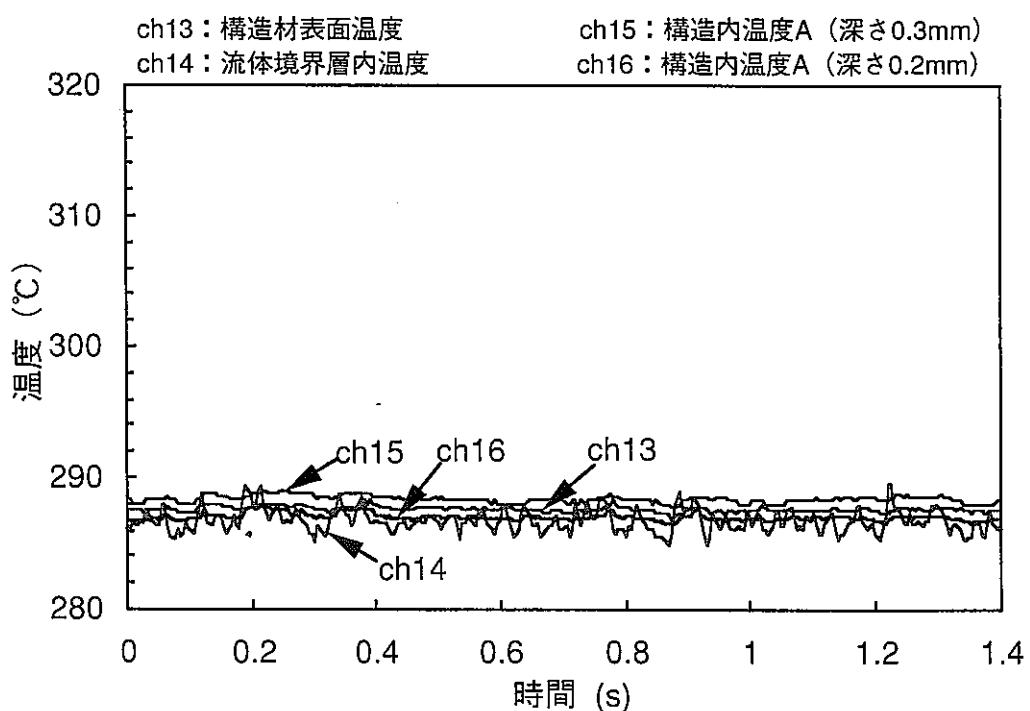


図6 温度変化 (Na流速2m/s)

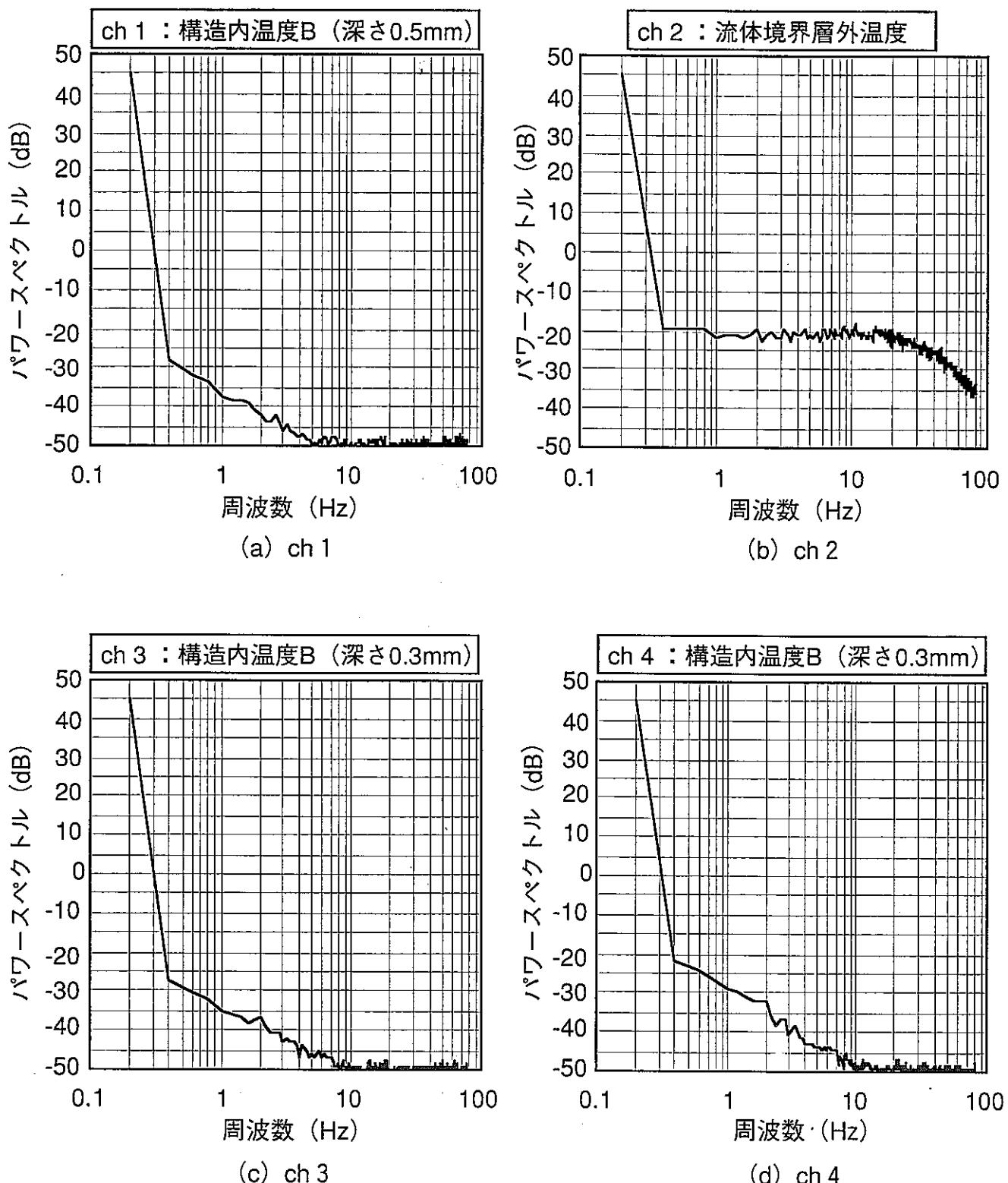


図1 自己パワースペクトル (Na流速 1m/s)

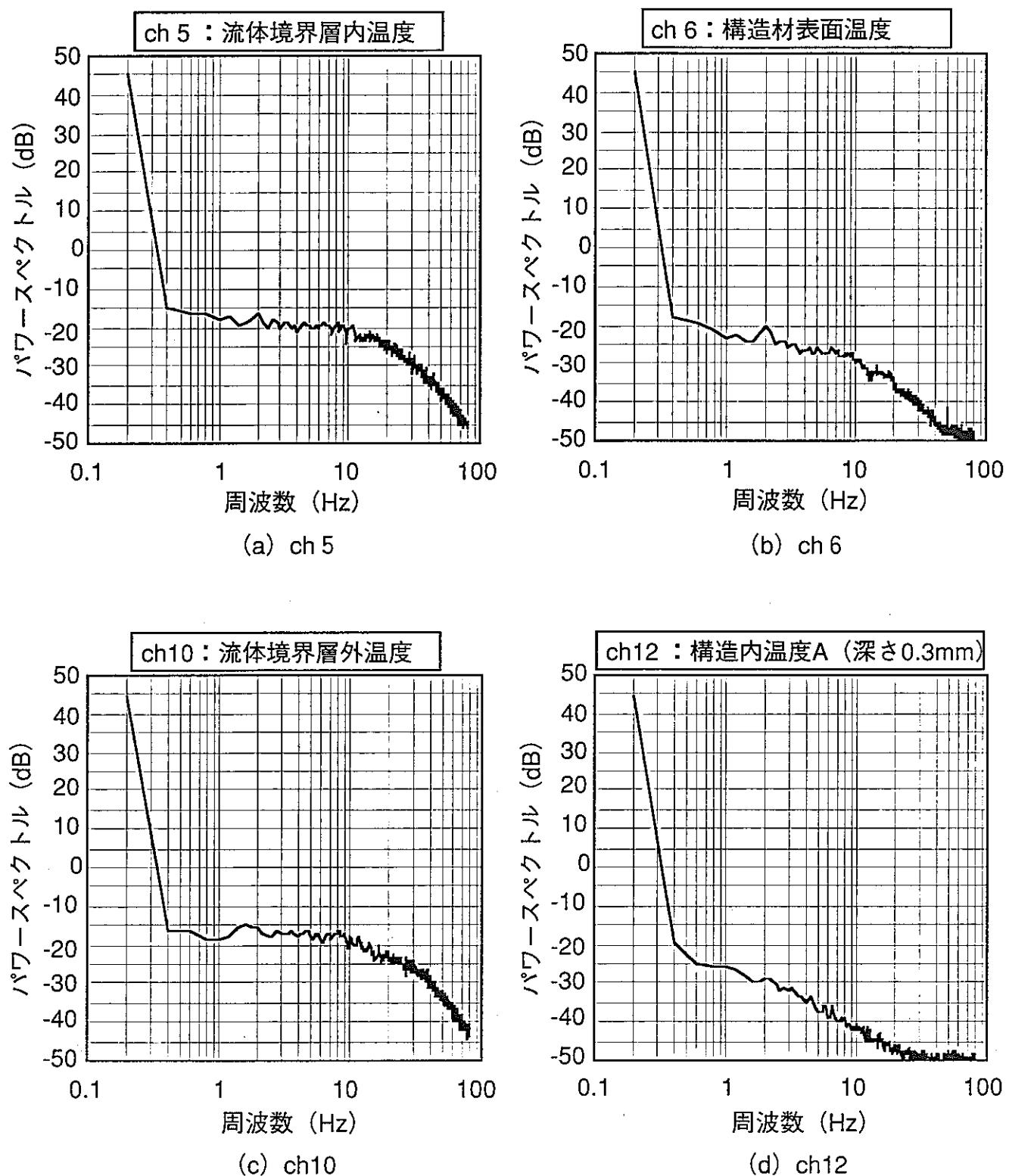


図2 自己パワースペクトル (Na流速 1m/s)

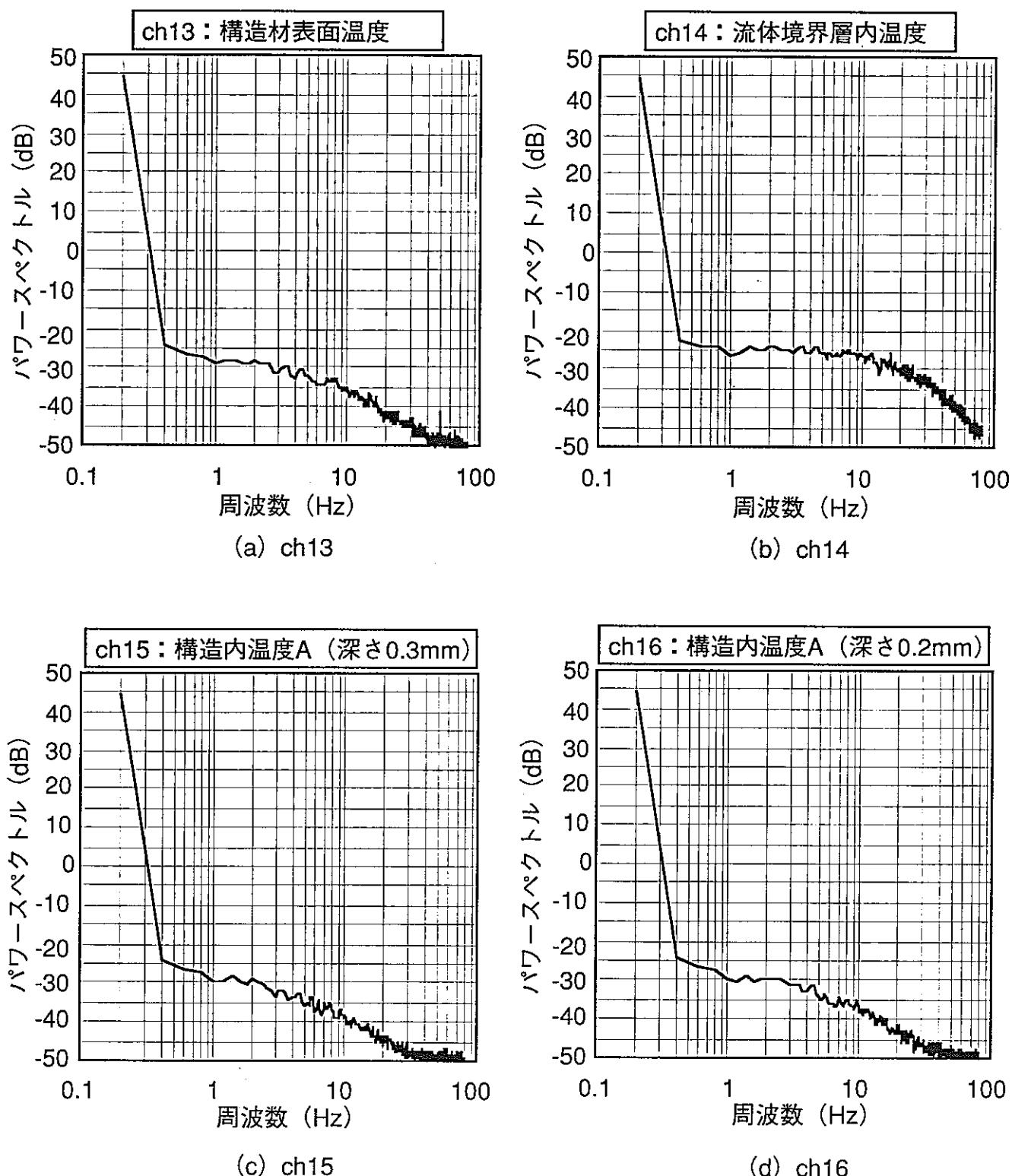


図3 自己パワースペクトル (Na流速 1m/s)

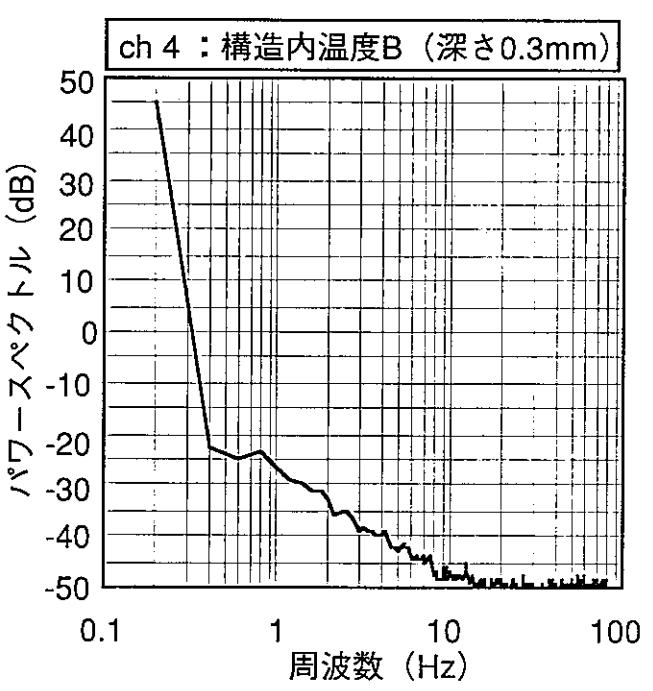
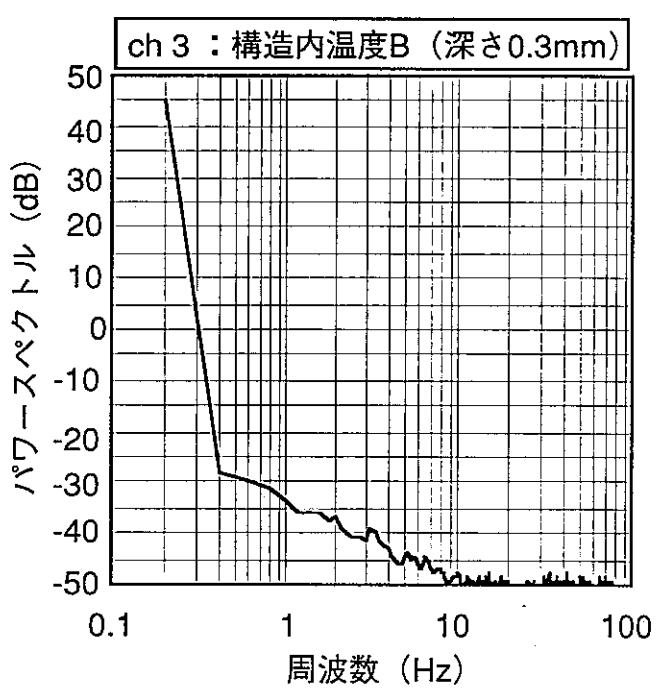
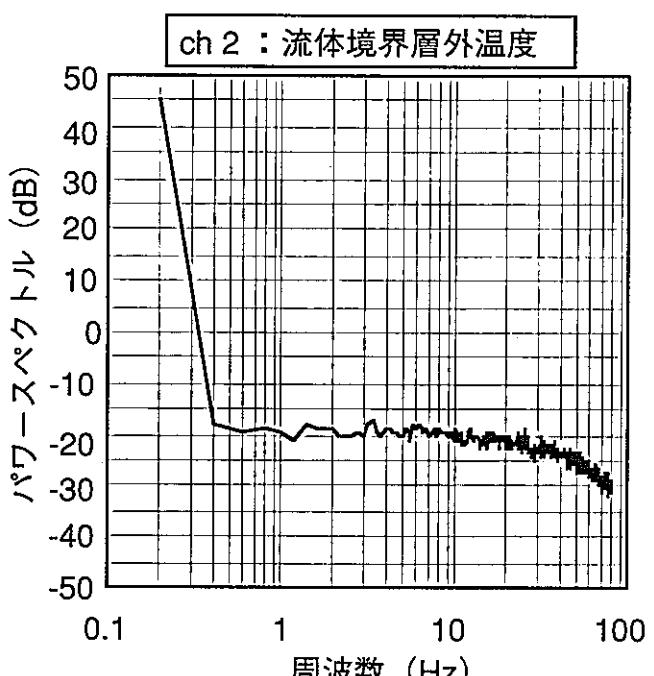
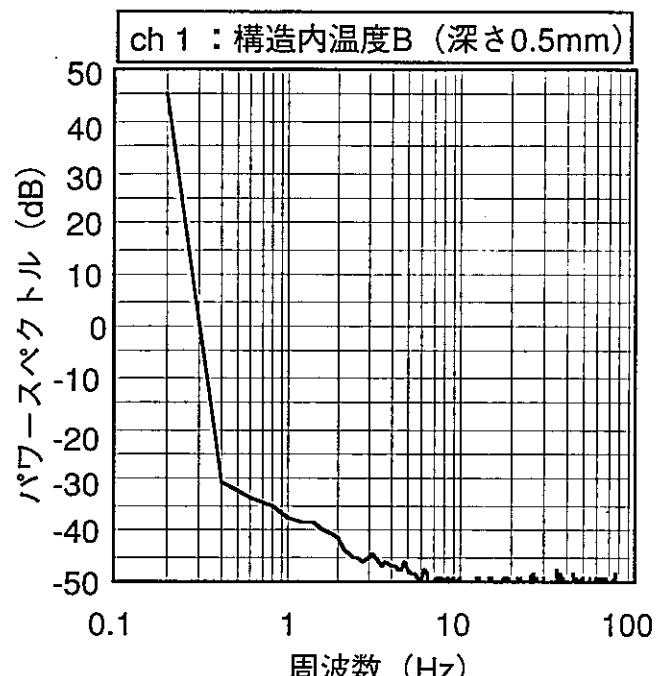


図4 自己パワースペクトル (Na流速 1.5m/s)

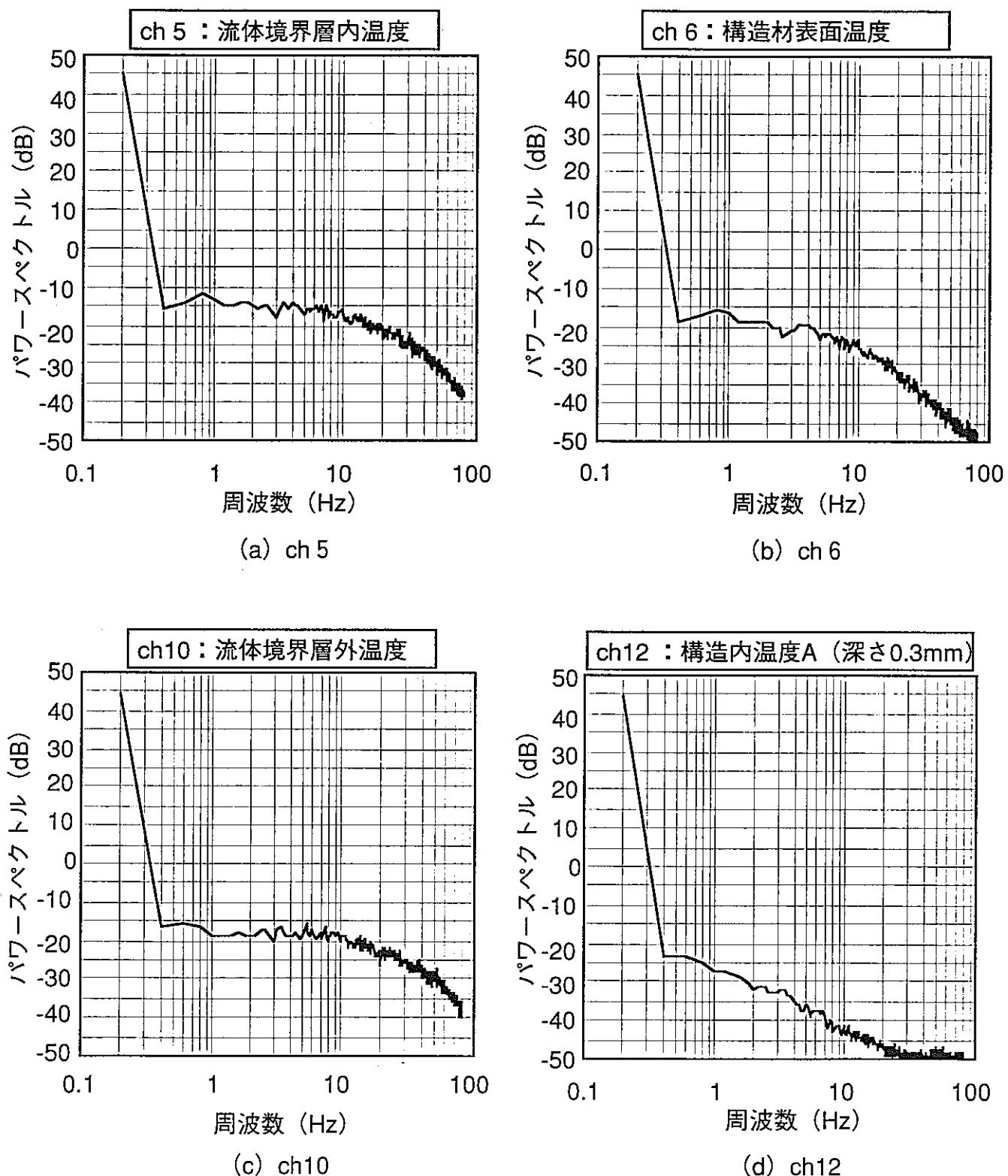


図5 自己パワースペクトル (Na流速 1.5m/s)

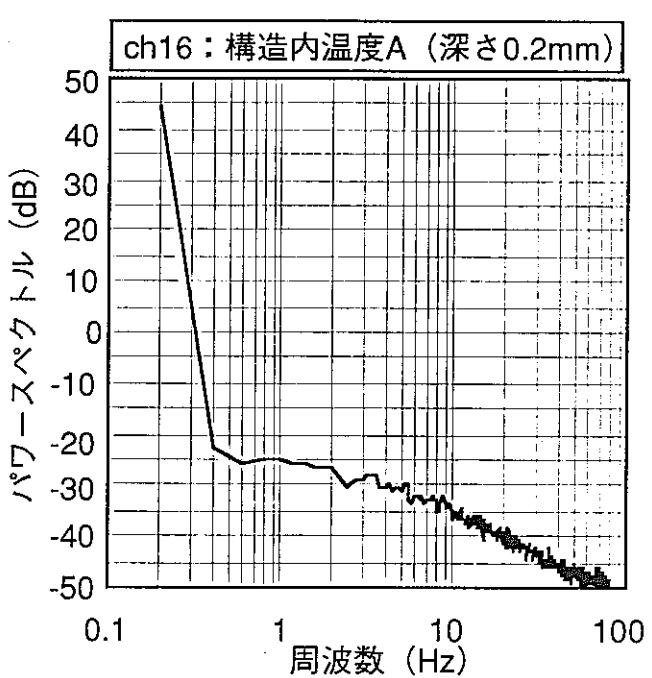
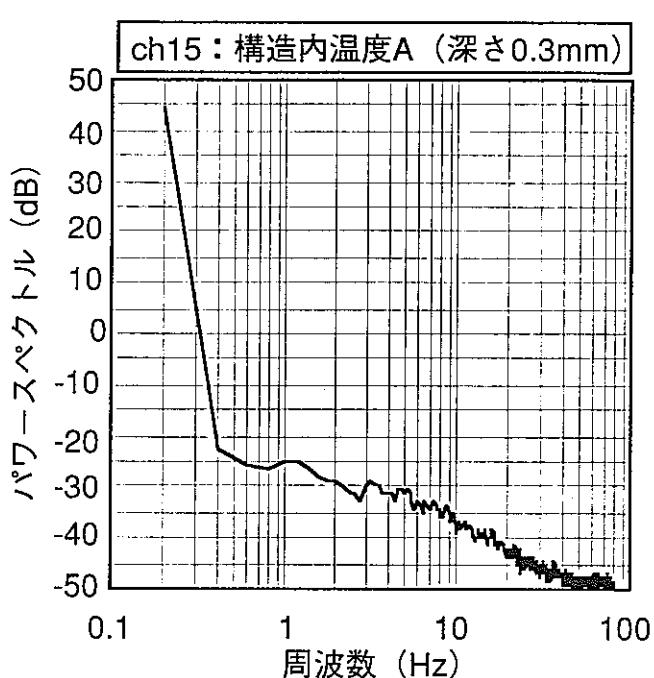
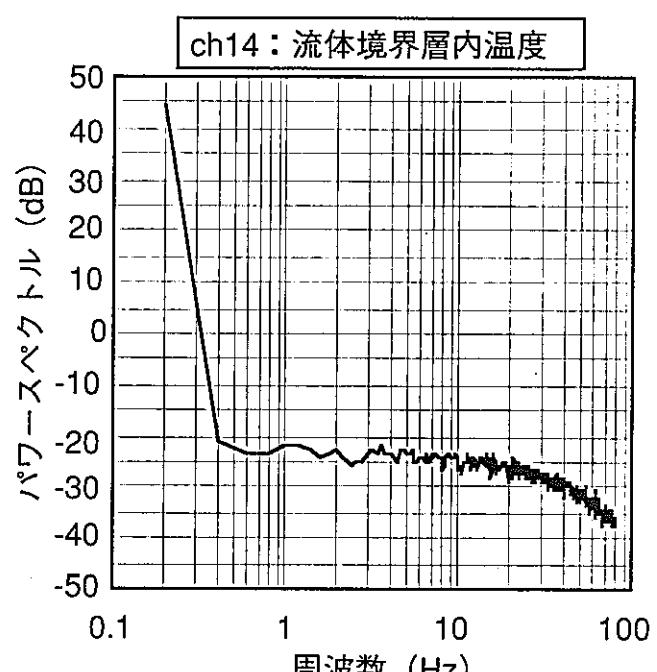
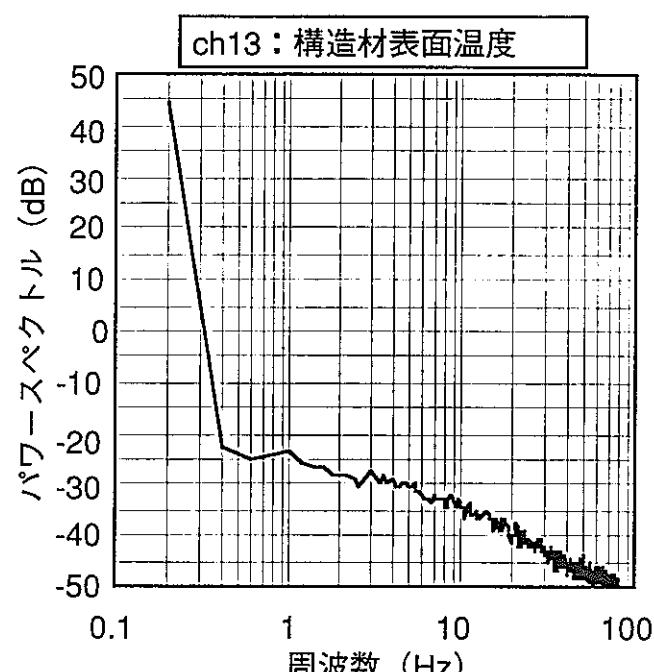
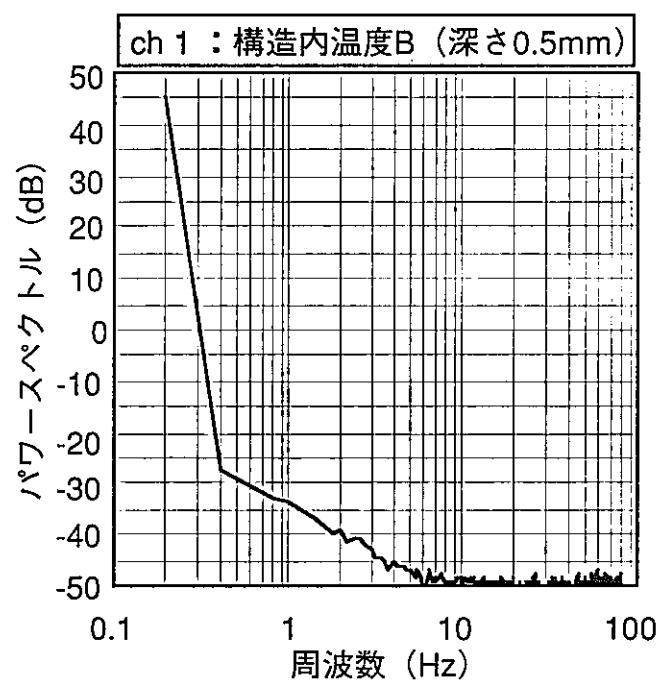
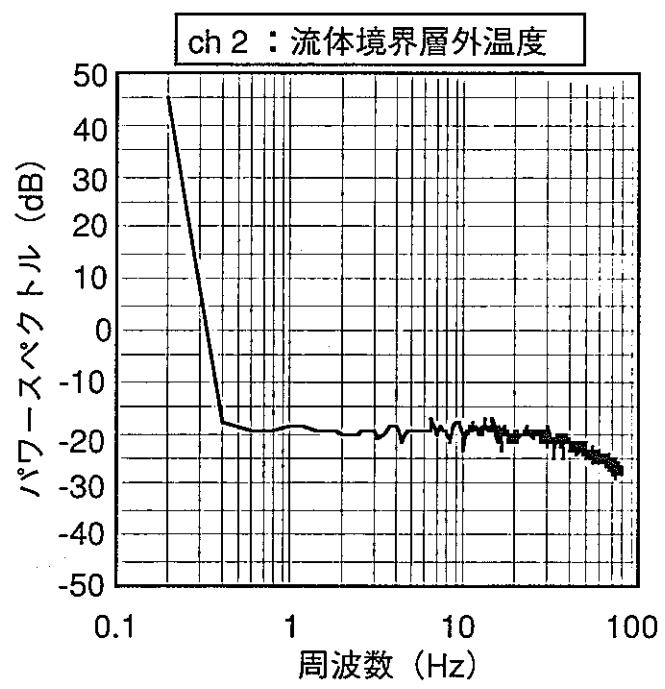


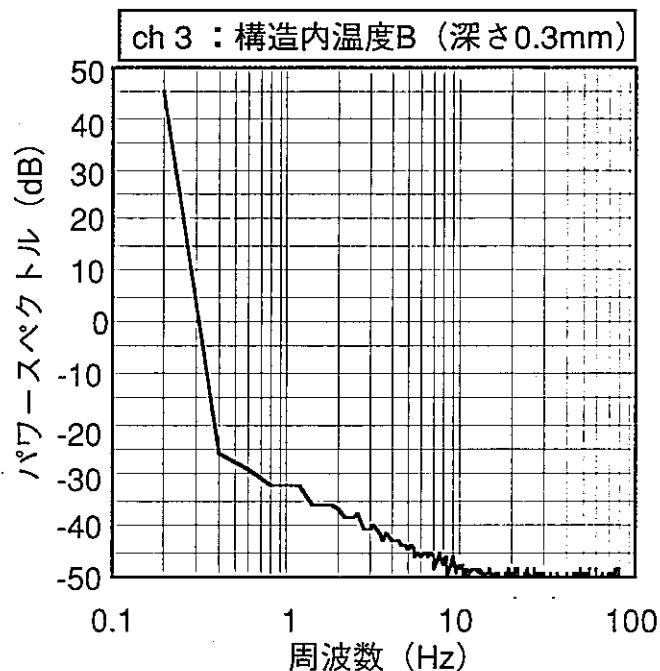
図6 自己パワースペクトル (Na流速 1.5m/s)



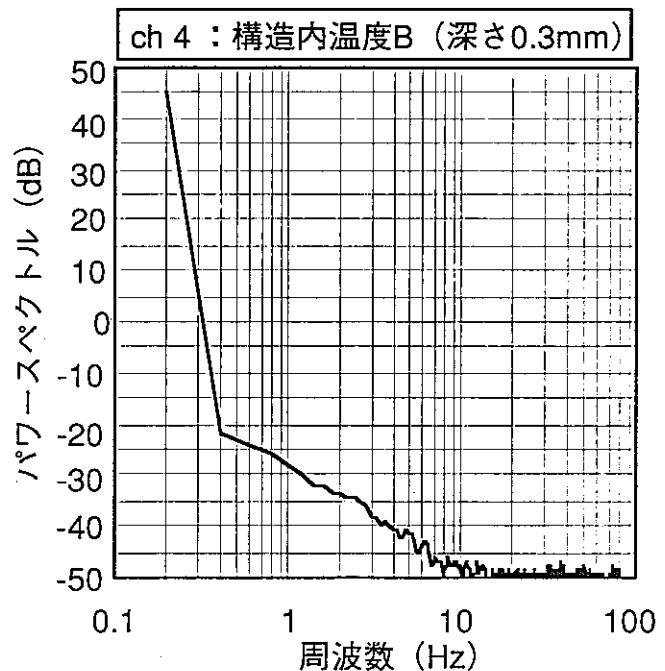
(a) ch 1



(b) ch 2



(c) ch 3



(d) ch 4

図7 自己パワースペクトル (Na流速 2m/s)

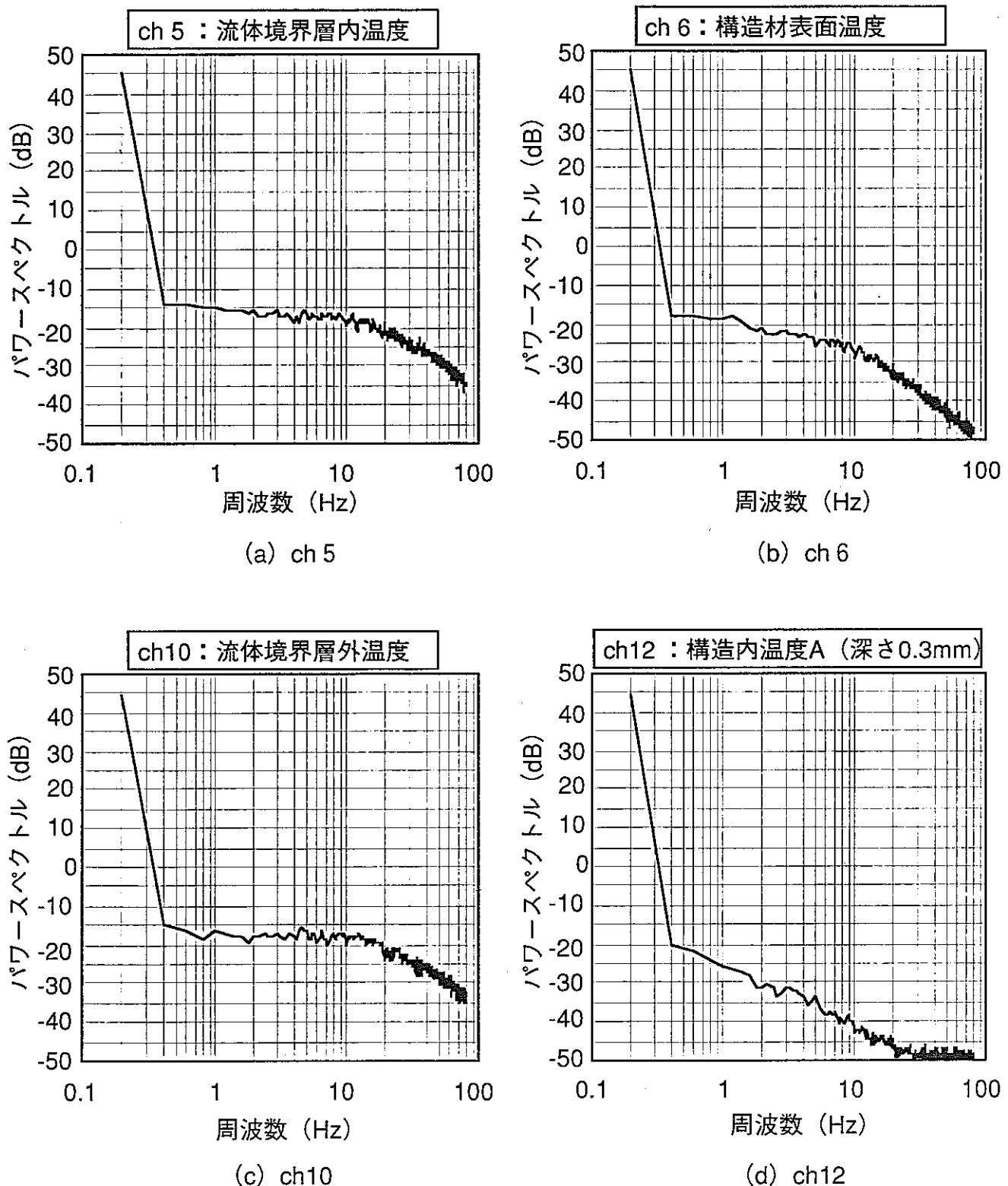


図8 自己パワースペクトル (Na流速 2m/s)

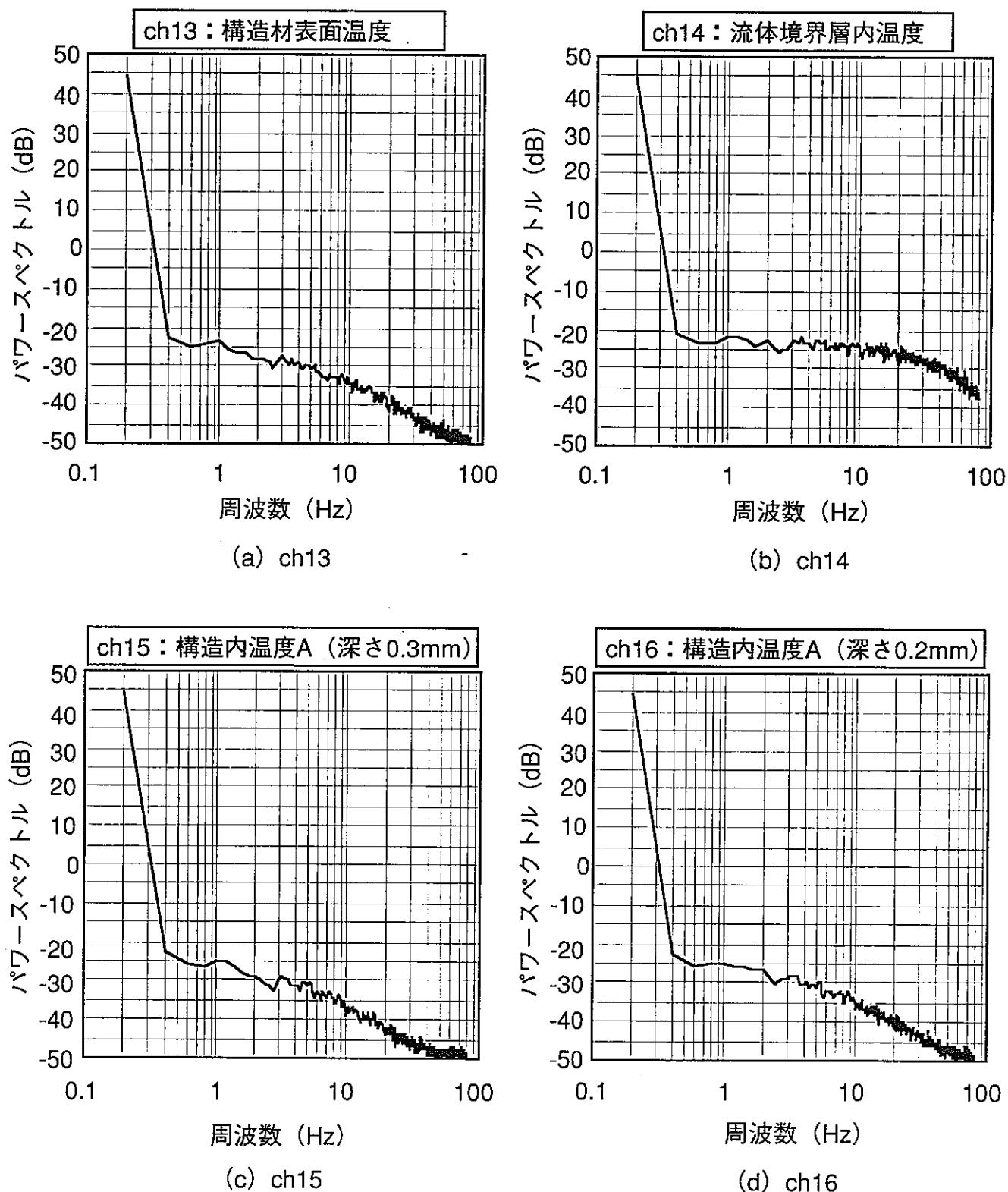


図9 自己パワースペクトル (Na流速 2m/s)