

冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発(XIII)

—壁面噴流場における流体・構造非定常熱的応答特性の実験的検討—

1999年1月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section ,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1998

冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (XIII)

- 壁面噴流場における流体 - 構造非定常熱的応答特性の実験的検討 -

村松 壽晴*、大高 雅彦*

要 旨

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と構造物とが熱的な相互作用を起し、その構造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）。

本報では、当該熱的相互作用を定量的に把握する目的で行われた壁噴流ナトリウム実験（TIFSS-II）の時系列データを用い、定常不規則温度ゆらぎ挙動の周波数特性を含む検討を行った。得られた結果は、次の通りである。

〔温度ゆらぎ時系列特性〕

- (1) ノズルからより下流側に位置する熱電対ほど、大きな温度ゆらぎ振幅を与える。これは、壁面噴流場における連行領域厚さが、ノズル端から下流側に向かって発達し始めるためである。

〔温度ゆらぎ強度分布特性〕

- (1) ノズルからより下流側に位置する熱電対ほど、大きな温度ゆらぎ強度を与える。また、ノズル流速に対する依存性は、不明瞭である。これは、壁面近傍での運動量が減少したことによる浮力効果の顕在化によるものと推定される。

〔自己パワースペクトル密度関数〕

- (1) 流体境界層内外での自己パワースペクトル密度分布では、壁噴流場に特有なバースト挙動の発生によって、50 Hz 以上の周波数帯でパワーレベルが上昇する。なお、周波数スペクトル分布のノズル流速依存性は、上記浮力効果の顕在化によって明確には確認できない。

〔コヒーレンス関数〕

- (1) 大きなコヒーレンシを与える周波数帯は、大規模運動を支配する 4 Hz 以下の低周波数領域およびバースト挙動による 40 Hz 以上の高周波領域のみに限定される。このような中間周波数帯 (4 Hz - 30 Hz) でのコヒーレンシの欠落特性は、壁噴流場に特有なものである。

*：大洗工学センターシステム技術開発部熱流体技術開発グループ

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

- Experimental Investigations of Stationary Random Temperature Fluctuation Characteristics in Wall Jet Conditions -

Toshiharu MURAMATSU*, Masahiko OHTAKA*

Abstract

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

In this study, frequency characteristics of stationary random temperature fluctuations were investigated by the use of the time-series data from a parallel wall jet experiment, TIFSS-II. From the investigations, the following results have been obtained:

[Time-Series Data Characteristics]

- (1) Larger temperature amplitudes were observed at more downstream distance thermocouples from the outlet plane of the jet nozzles. One of the main reasons for this behavior was considered to be that the thickness of laminar sub-layer was developed toward to downstream.

[RMS Value Characteristics of Temperature Fluctuations]

- (1) Larger RMS values were calculated at more downstream distance thermocouples from the outlet plane of the jet nozzles. And the dependence on nozzle jet velocity was not clear. It was due to actualized buoyancy effects near the test piece wall.

[Auto-Power Spectral Density Functions]

- (1) Higher frequency components were increased drastically in sodium temperature fluctuations, due to the occurrence of the bursting behavior by existence of solid walls.

[Coherence Functions]

- (1) Frequency bands having larger coherency values between temperature fluctuations were limited in a lower frequency components (< 4.0 Hz) and a higher frequency components (> 40.0 Hz). This frequency behavior characterizes fluid-structure thermal interaction phenomena in wall jet flows.

* : Thermal Hydraulic Research Group, System Engineering and Technology Division, OEC, JNC.

冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (XIII)

-壁面噴流場における流体-構造非定常熱的応答特性の実験的検討-

目 次

第1章	諸 言	1
第2章	流体-構造非定常熱的応答基礎ナトリウム試験TIFSS-IIの概要	2
2.1	試験装置および試験条件	2
2.2	試験結果	3
2.2.1	温度ゆらぎ時系列特性	3
2.2.2	温度ゆらぎ強度分布特性	4
第3章	検 討	6
3.1	温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度	6
3.2	温度ゆらぎ挙動のコヒーレンス関数	7
第4章	結 言	9
	参考文献	10

List of Figures

Fig. 2. 1 Apparatus of the TIFFSS-II Experiment	11
Fig. 2. 2 Photograph of the Test Section	13
Fig. 2. 3 Thermocouple Arrangements to the Test Piece	15
Fig. 2. 4 Temperature Transients for Case-1 Condition	17
Fig. 2. 5 Temperature Transients for Case-2 Condition	20
Fig. 2. 6 Temperature Transients for Case-3 Condition	23
Fig. 2. 7 Damping Effects of Non-Stationary Temperature Fluctuations near Solid Walls	27
Fig. 2. 8 Comparison of Temperature Transients for a Short Period	29
Fig. 2. 9 Comparison Time-Averaged Mean Temperatures and Time-Averaged RMS Values of Temperature Fluctuations	31
Fig. 2. 10 Comparison of Time-Averaged RMS Values of Temperature Fluctuations	33
Fig. 3. 1 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-1	35
Fig. 3. 2 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-2	37
Fig. 3. 3 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-3	39
Fig. 3. 4 Calculated Bursting Behavior near the Test Piece with the DINUS-3 Code	41
Fig. 3. 5 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Sodium Temperature in Fully Turbulence Region	43
Fig. 3. 6 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Sodium Temperature in Laminar Sub-Layer Region	44
Fig. 3. 7 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Structural Temperature on Test Piece Surface	45
Fig. 3. 8 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Structural Temperature at 0.2 mm from the Test Piece Surface	46
Fig. 3. 9 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Structural Temperature at 0.4 mm from the Test Piece Surface	47
Fig. 3. 10 Comparison of Coherence Functions for Case-1	49
Fig. 3. 11 Comparison of Coherence Functions for Case-2	53
Fig. 3. 12 Comparison of Coherence Functions for Case-3	57

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エルなど）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、原子炉構造設計に直接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ためには、解析的評価手法の確立が不可欠であり、これまで報告者は流体および構造物中の定常不規則温度ゆらぎ挙動を評価する解析コードシステムを開発し、これら個々についての検証を行ってきた [1, 2, 3, 4, 5, 6]。

サーマルストライピングに代表される流体 - 構造熱的連成挙動の特徴は、流体と構造物とが強連結系（流体あるいは構造物の特性が対応する状態量の応答特性を支配する系）である点である。すなわち、このような系では、流体と構造物間での応答特性を 1 次遅れ要素などを用いた簡易モデルでは表現することができず、結果として非線形系における不規則過程としての取り扱いが要求されることにある。換言すれば、流体あるいは構造物のみに着目した解析コードの検証は、評価システム開発における第 1 段階に過ぎず、複数の解析コードの連成検証を以てその開発作業を終了し、評価システムの精度が担保されることになる。この観点から、流体 - 構造熱的連成挙動の模擬性を定量化することを目的として、衝突平行噴流ナトリウム実験 (TIFFSS-I) [7] の解析を行い、当該評価システムの基本的性能を報告した [8]。

本報では、新たに実施した平行壁面噴流ナトリウム実験 (TIFFSS-II) [9] の試験データに基づき、定常不規則温度ゆらぎ挙動の周波数領域における検討を行う。

第2章 流体 - 構造非定常熱的応答基礎ナトリウム試験 TIFSS-II の概要

2.1 試験装置および試験条件

試験装置の全体構成を Fig. 2.1 に示す。本試験装置は、垂直に設置した試験片に沿うように、純度管理した高温 (320 °C) および低温 (280 °C) ナトリウム (酸素濃度 < 1.0 ppm) を横方向に平行に設置した 2 本のノズル (内寸 : 5 x 9 mm) から流出させ、この試験片上で壁面噴流挙動を模擬する構造となっている。なお、この垂直に上昇する壁面噴流が自由液面に衝突して熱流動場を乱さないようにするため、ノズル上端面より 35 mm 位置に流動抑制板が設置されている (Fig. 2.2 参照)。

試験片には、流体中および試験片内部の温度を計測するための熱電対が合計 15 本取り付けられた。これらの熱電対の空間位置関係を Fig. 2.3 に示す。熱電対は、試験片の横方向中央部を基準として 3 mm ピッチの三角格子状に設置された。ここで、比較的早い応答が必要となる流体境界層外 (試験片表面より 1.5 mm)、流体境界層内 (試験片表面より 0.3 mm) および試験片表面においては、シース外径 0.25 mm の接地型 CA 熱電対が設置された。一方、試験片内部温度計測では、シース外径 0.5 mm の接地型 CA 熱電対が採用された。なお、シース外径 0.25 mm および 0.5 mm の応答速度 (90 % 応答) は、それぞれ約 30 ms および 50 ms であり、流体中および試験片内部の温度ゆらぎ挙動を計測する上で十分な応答速度を有した。

各熱電対からの温度ゆらぎ信号は、補償導線により試験装置外部に取り出され、零度補償が施された後、15 チャンネルの A-D 変換記録計に収録された。収録時のサンプリング周期およびサンプリング時間は、それぞれ 5 ms (200 Hz) および 100 s である。

試験は、下記のようにノズル流速をパラメータとして、実施された。試験条件を以下にまとめる。

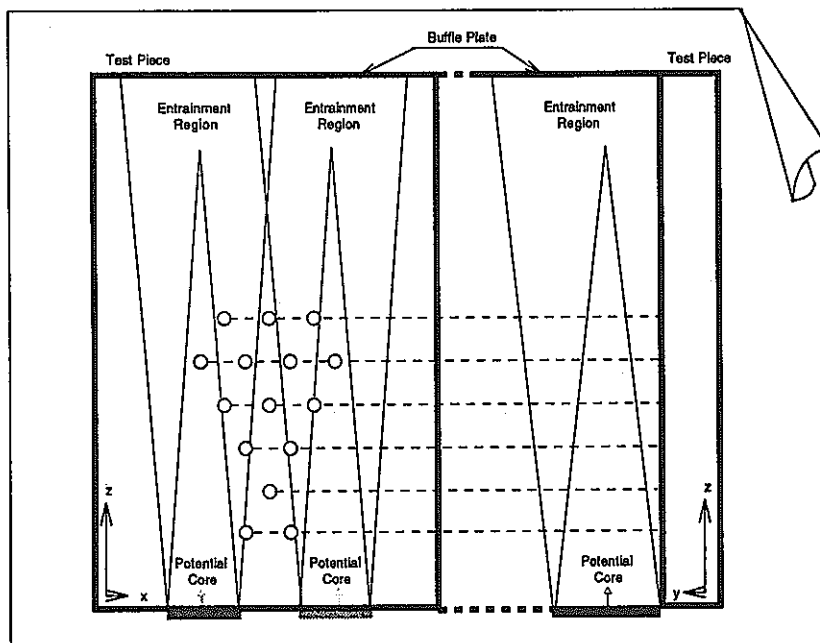
		Case - 1	Case - 2	Case - 3
Sodium Temperature (deg. C)	Hotter Side Nozzle	320.0		
	Colder Side Nozzle	280.0		
	Temperature Difference	40.0		
Sodium Velocity	Hotter Side Nozzle (m/s)	1.0	1.5	2.0
	Colder Side Nozzle (m/s)	1.0	1.5	2.0
	Velocity Ratio (-)	1.0	1.0	1.0
Sampling Speed (Hz)		200		
Sampling Length (sec)		100		
Oxygen Concentration (ppm)		~ 1.0		

2.2 試験結果

2.2.1 温度ゆらぎ時系列特性

Figs. 2.4 - 2.6 に、各流速条件の下で測定・記録された温度ゆらぎ挙動の 20 秒間の時系列結果を示す。結果より分かる様に、各流速条件において、境界層外側から試験片内部に向かうに従って温度ゆらぎ振幅が減少している。これは、Fig. 2.7 に示す温度ゆらぎ挙動に対する減衰作用、すなわち (1) 境界層外側での乱流混合による減衰、(2) 境界層内側において分子拡散効果が卓越することによる減衰、(3) 流体から構造物に非定常的に熱が伝達されることによる減衰、および (4) 構造物中における非定常熱伝導による減衰が働いたためであると解釈できる。

境界層外側のナトリウム温度ゆらぎを測定するために設置した熱電対同士 (ch. 1, ch. 8 および ch. 10) の温度ゆらぎ振幅の比較では、より下流側に位置する熱電対での温度ゆらぎ振幅が大きくなっている (ch. 10 > ch. 8 > ch. 1) ことが分かる。同様な傾向は、その他の熱電対同士についても確認することができる。これは、自由壁面噴流を仮定した場合の熱電対と連行領域との相対位置関係、および境界層の空間的発達を考えた場合の熱電対群の位置関係によって説明することが可能である。すなわち下図に示すように、TIFFSS-II 試験



装置を同軸壁面噴流挙動であると仮定する (実際には流動抑制板が設置されていることなどから、純粋な同軸壁面噴流特性は示さない) と、ノズル流出後の噴流挙動はポテンシャルコア (Potential Core) 領域と連行領域 (Entrainment Region) とによって特徴づけることができる。ポテンシャルコア領域内ナトリウムの流速および温度は、ノズル上流側のそれらを保持して周囲の影響を受けない。一方連行領域では、周囲の流体を巻き込みながら、流体の乱流混合が促進される。ここで、試験片に取り付けられている熱電対の位置関係を考えると、ノズル端からより下流側に設置されている熱電対ほど連行領域の中央に位置 (上図左側; x-z 面) し、流体混合の促進と相俟ってより下流側の熱電対ほど温度ゆらぎ振幅が大きくなる。y-z 面 (上図右側) についても同様に、ノズル端から下流側に向かうに従って連行領域 (境界層) 厚さが増し、より下流側の熱電対ほど激しい乱流混合場に晒されたと解釈できる。すなわち、連行領域厚さが薄いノズル直近の熱電対では、温接点が乱流域に位置していたとしてもポテンシャルコア内あるいはこれに近いナトリウム温度を測定することになるため、結果的に温度ゆらぎ振幅は小さなものとなる。

代表的な熱電対位置での 2 秒間の温度挙動を 3 ケースについて Fig. 2. 8 に比較する。まず、各ケースの全体傾向では、平均温度レベルは各熱電対とノズルとの相対位置関係によって高低差が見られるものの、温度ゆらぎ振幅は境界層外側位置から試験片内部に向かうに従って小さくなる特性を持つ。一方、ケース間での比較では、以下の特性変化を見ることができる。

- (1) 各ケースでの最大温度差 (ch. 13 : 試験片表面温度 と ch. 15 : 試験片内部 0.4 mm 位置温度との差) は、ノズル流速を増加 (Case-1 → Case-3) させるにしたがって増大する。
- (2) 境界層外ナトリウム温度 (ch. 10) および境界層内ナトリウム温度 (ch. 11) の過渡挙動については、ノズル流速を増加させるにしたがって高周波成分が卓越するとともに、スパイク状の間欠的過渡挙動が発生し始める。
- (3) 試験片表面温度 (ch. 13)、試験片内 0.2 mm 位置温度 (ch. 14) および試験片内 0.4 mm 位置温度 (ch. 15) の過渡挙動については、ノズル流速を増加させるにしたがって低周波成分が卓越し始める。

(1) の特性は、ノズル流速を増加させた結果、高温ナトリウムのインベントリが増し、各熱電対位置での平均温度が高温ナトリウム側あるいは低温ナトリウム側の温度により接近したために発生したと考えることができる。

(2) の挙動は、非定常性・3次元性・非線形性・間欠性などに特徴づけられる乱流現象の本質から発生したものであり、ナトリウム温度である ch. 10 および ch. 11 について顕著に現れている。

(3) は、流体から試験片に熱量が伝達される過程における周波数特性の変化に基づくものである。すなわち、流体 - 構造熱的連成挙動では流体と構造物間での熱量に関する周波数応答関数に非線形特性が卓越し、高周波温度ゆらぎ成分のパワーが低周波温度ゆらぎ側に移行 [8] する。この結果、ナトリウム中での高周波温度ゆらぎ成分のパワーがノズル流速の増加に伴って増加するものの、前記非線形効果の存在によって高周波成分が移行・消滅して、試験片温度では低周波温度ゆらぎ成分のみが観測されることになる。

2. 2. 2 温度ゆらぎ強度分布特性

Fig. 2. 9 に、下式により算出された各流速条件下における温度ゆらぎ強度 ($^{\circ}\text{C}$ として表示) の空間分布特性を示す。

$$\overline{\theta_{\text{ch}}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (T_{\text{scht}} - \overline{T_{\text{ch}}})^2} \quad (2. 1)$$

$$\overline{T_{\text{ch}}} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N T_{\text{scht}} \quad (2. 2)$$

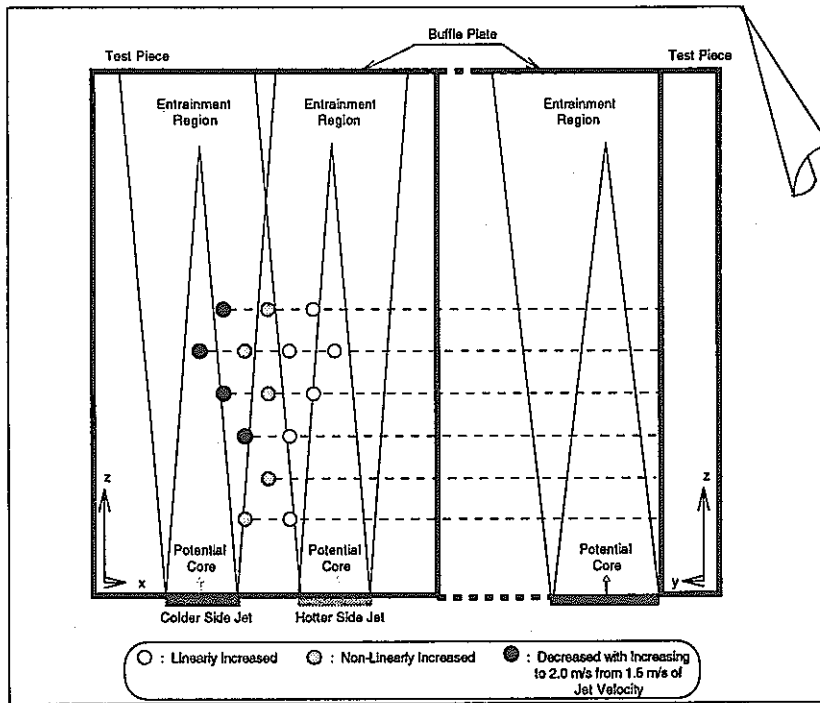
ここで、

\overline{T}	: 時間平均温度
$\overline{\theta_{\text{ch}}}$: 温度ゆらぎ強度
N	: データ点数
T_s	: データ s 番目の温度

である。

前節で述べたように、ノズル下流側に向かうにしたがって増加する温度ゆらぎ振幅に関する特性を、各ケースについて見る事ができる。

Fig. 2. 10 に、各熱電対位置における温度ゆらぎ強度のノズル流速に対する依存特性を示す。結果より分かる通り、ノズル流速の増大に対して温度ゆらぎ強度が線形に増加していない熱電対が認められる。更に、ノズル流速が 1.5 m/s (Case-2) から 2.0 m/s (Case-3) に増大することで、温度ゆらぎ強度が減少している熱電対も確認できる。これらの挙動を示す熱電対箇所を噴流ノズル位置とともに図示すると以下のようなになる。



上記スケッチより明らかなように、ノズル流速の増大に対して温度ゆらぎ強度が線形に増加していない、もしくは逆に減少している熱電対は、低温ナトリウムが流出する左側領域内に位置するものに限られ、高温側ノズル (右側) からのナトリウム流に影響を受けると考えられる右側領域内の熱電対群は何れもノズル流速の増大に対して線形に温度ゆらぎ強度が増加している。この原因は現時点において明らかではないが、噴流壁としての試験片が存在することによってこの近傍の運動量が減少し、この結果浮力の影響が顕在化したためであると考えられる。すなわち、右側ノズルから流出した高温ナトリウム流が、左側ノズルから流出する低温ナトリウム流の上側に浮力によって回り込んだためと解釈できる。このような流動状況では、低温ナトリウムが流出する左側領域内に位置する熱電対群は、左回りのモーメントを持つ高温ナトリウム流の影響下に置かれ、流体混合による温度ゆらぎ挙動の発生が抑制される。これらの推定原因の裏付けは、現在実施中の詳細解析結果の検討により為される。

第3章 検討

3.1 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度

Figs. 3. 1 - 3. 3 に、各流速条件の下で測定・記録された温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度関数(式 3. 1; 式 3. 2: 自己共分散関数)の比較を示す。まず、流体境界層外位置 (chs. 1, 8 および 10) におけるパ

$$P_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i 2 \pi f \tau) R_{xx}(\tau) d\tau \quad (i^2 = -1) \quad (3. 1)$$

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (T_{ch}(t+\tau) - \bar{T}_{ch})(T_{ch}(t) - \bar{T}_{ch}) dt \quad (3. 2)$$

ワースペクトル密度関数の比較では、ノズル端からより下流側に位置する熱電対において大きなパワーを示している。この傾向は 5 Hz 以上の比較的高周波帯において顕著であり、特に 30 Hz から 100 Hz の周波数帯でこの傾向が著しい。同様な傾向はノズル流速を増加させた場合 (Case-1 → Case-3) においても保持される。なお、Case-1 の結果に見られる 30 Hz から 70 Hz の周波数帯にかけてのパワーの増加は、ノズル流速を増加させるに従って、より高周波側にシフトしている様子を確認することができる。すなわち、Case-1 における同周波数帯でのピークが約 50 Hz 近傍に位置するのに対し、Case-2 では約 80 Hz、Case-3 では約 95 Hz と、より高い周波数帯に移動している。これは、ノズルから流出したナトリウムが試験片壁に沿って下流側に輸送される過程におけるバースト (Burst) 構造に起因しているであろうことが、直接シミュレーションコード DINUS-3 [1], [2] を用いた現在実施中の数値解析結果より明らかとなっている。Case-3 条件 (ノズル流速 2.0 m/s) を対象とした解析結果を Fig. 3. 4 に示す。同図は、試験片表面から 0.1 mm 位置における試験片表面法線方向の流速成分の瞬時等値線図であり、赤色領域がスイープ (Sweep; 吹き降ろし) を、青色領域がイジェクション (Ejection; 吹き出し) の空間領域を示している。この解析結果では、スイープ領域とイジェクション領域とが空間的に交互に現れ、且つこれらの領域が時間とともに空間を移動した。この移動に関する平均時間は、Case-3 条件の場合で約 10 msec 程度であり、(バースト挙動は本来、非周期的であるが)これが周期的挙動であると仮定するとその周波数は約 100 Hz に相当する。この周波数が、Fig. 3. 3 (Case-3 における ch. 10 の自己パワースペクトル密度関数)に見られる 90 Hz 近傍のピーク周波数に比較的近い値を示していることは大変興味深い。これらバースト構造に関する詳細は、次報で述べる。

流体境界層内位置 (chs. 2, 6 および 11) における比較でも同様に、ノズル端からより下流側に位置する熱電対において大きなパワーを示している。また、上記バースト構造に起因すると考えられる高周波帯域でのパワーの盛り上がりとノズル流速の増加に伴う同ピーク周波数の移動を見ることができる。なお、バースト構造が境界層厚さの 1/10 にも満たない領域で発生する微細挙動であることを考えれば、十分に説明が付くと思われる。

試験片表面位置 (chs. 3, 7 および 13) での比較では、流体境界層の内外位置で見られた上記の特徴的な挙動は観察されず、高周波帯域が急激に減衰する特性を示している。また、ノズル端から熱電対までの距離とそれぞれの位置でのパワーとの大小関係の情報も失われていることが分かる。なおこれらの特性は、バース

ト構造の影響が相対的に低下したこと、および流体 - 構造熱的連成過程における非線形効果による高周波成分のフィルタ作用により発生したと解釈できる。

試験片内 0.2 mm 位置 (chs. 4, 12 および 14) および試験片内 0.4 mm 位置 (chs. 5, 9 および 15) での比較では、何れも 30 Hz 以上の高周波帯域でバックグラウンドレベルにまでパワーが低下し、低周波帯域 (> 5 Hz) のパワーの寄与が相対的に大きくなっている。

温度ゆらぎ挙動のノズル流速依存性を確認するため、ノズル流速を変化させた場合の各熱電対位置での自己パワースペクトル密度関数を Fig. 3. 5 - Fig. 3. 9 に比較する。全体的なノズル流速依存性に関しては、高温ナトリウム流の影響を受ける領域に位置する熱電対群 (chs. 2, 3, 5, 7, 11, 12, 14 および 15) は、ノズル流速が増加するに従って周波数全域に亘ってパワーの上昇が見られる。しかしながら、低温ナトリウム流の影響を受けると考えられる領域に位置する熱電対群 (chs. 1, 4, 6, 9, 10 および 13) については、明瞭なノズル流速依存性は見られない。特に、これら熱電対群の周波数スペクトルの内、約 3 Hz 以下の低周波成分のパワーが、Case-2 条件から Case-3 条件に変化する過程で逆転する傾向が見られ、これらの逆転傾向が低周波成分を支配する大規模流れ (例えば、前章で示したような浮力効果の顕在化による主流の変化) によるものであることが推定できる。

4 Hz から 40 Hz 程度までの中間周波数帯でのパワーの挙動では、全ての熱電対ともに概ね同様な特性を持って高周波側に向かうに従い減衰する。ただし、前記の低周波帯でのパワー (当該周波数帯に注入されるエネルギー) の違いにより、ノズル流速依存性は明確には現れていない。

40 Hz 以上の高周波帯のパワーに関しては、試験片内熱電対のパワーレベルがバックグラウンドレベルにまで低下しており、ノズル流速依存性は確認できない。しかしながら、流体中熱電対のパワーレベルは、前記のように、バースト挙動の発生により、ノズル流速の増加に伴って上昇する。

3. 2 温度ゆらぎ挙動のコヒーレンス関数

Figs. 3. 10 - 3. 12 に、各流速条件下で測定・記録された温度ゆらぎ挙動について、同種類の熱電対間でのコヒーレンシイ (式 (3. 3): 入出力間での相関係数の 2 乗; 式 (3. 4) および式 (3. 5): 自己共分散関数)

$$\gamma^2(f) = \frac{P_{yy}(f)}{P_{zz}(f)} \quad (3. 3)$$

$$P_{yy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i 2 \pi f \tau) R_{yy}(\tau) d\tau \quad (i^2 = -1) \quad (3. 4)$$

$$P_{zz}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i 2 \pi f \tau) R_{zz}(\tau) d\tau \quad (i^2 = -1) \quad (3. 5)$$

$$= P_{yy}(f) + P_{nn}(f) \quad (3. 6) \text{ 注}$$

の比較を示す。まず、流体境界層外温度 (chs. 1, 8 および 10) 同士のコヒーレンシイの比較では、軸方向同軸上の熱電対同士 (例えば、ch. 1 と ch. 10) で低周波帯 (> 3.0 Hz) でのコヒーレンシイが高い。これは上流

注) P_{yy} : システム入力 (線形応答部分)、 P_{zz} : システム出力、 P_{nn} : 非線形応答部分

側で発生した大規模流れの情報が下流側に伝達されたものと解釈できる。なお、軸方向軸が異なる熱電対同士 (ch. 1 と ch. 8 および ch. 8 と ch. 10) のコヒーレンシは低い。一方、4 Hz から 30 Hz にかけての中間周波数帯でのコヒーレンシでは、何れの熱電対間についてもコヒーレンシが低い。なお、40 Hz から 70 Hz にかけての高周波帯におけるコヒーレンシが何れの熱電対間についても比較的高いことから、試験片壁面に沿って流れが上昇する過程で発生した局所流れが主流域での挙動を支配しているものと判断できる。

流体境界層内温度 (chs. 2, 6 および 11) 同士の比較では、コヒーレンシの値そのものは流体境界層外温度でのそれらよりも低いものの、同様な傾向を見ることができる。更に、試験片表面温度 (chs. 3, 7 および 13) 同士のコヒーレンシにおいては、上記の傾向に加えて、中間周波数帯 (4 Hz - 30 Hz) でのコヒーレンシが上昇を始めていることが分かる。これは、試験片上に到達した温度ゆらぎが熱伝導によって拡散してゆく過程で発生したものと考えることができる。同様な挙動は、試験片内 0.2 mm 位置温度 (chs. 4, 12 および 14) 同士および 試験片内 0.4 mm 位置温度 (chs. 5, 9 および 15) 同士でのコヒーレンシの比較結果においても確認できる。

以上に示した中間周波数帯 (4 Hz - 30 Hz) でのコヒーレンシの欠落特性は、前報 [7] に示した平行衝突噴流場では生じなかったものであり、壁噴流場に特徴的な挙動であると考えられる。

第4章 結言

流体 - 構造熱的連成挙動を定量的に把握する目的で行われた壁噴流ナトリウム実験 (TIFFSS-II) の時系列データを用い、定常不規則温度ゆらぎ挙動の周波数特性を含む検討を行った。得られた結果は、次の通りである。

[温度ゆらぎ時系列特性]

- (1) ノズルからより下流側に位置する熱電対ほど、大きな温度ゆらぎ振幅を与える。これは、壁面噴流場における境界層厚さが、ノズル端から下流側に向かって発達し始めるためである。

[温度ゆらぎ強度分布特性]

- (1) ノズルからより下流側に位置する熱電対ほど、大きな温度ゆらぎ強度を与える。また、ノズル流速に対する依存性は、不明瞭である。これは、壁面近傍での運動量が減少したことによる浮力効果の顕在化によるものであると推定される。

[自己パワースペクトル密度関数]

- (1) 流体境界層内外での自己パワースペクトル密度分布では、壁噴流場に特有なバースト挙動の発生によって、50 Hz 以上の周波数帯でパワーレベルが上昇する。なお、周波数スペクトル分布のノズル流速依存性は、上記浮力効果の顕在化によって明確には確認できない。

[コヒーレンス関数]

- (1) 大きなコヒーレンシを与える周波数帯は、大規模運動を支配する 4 Hz 以下の低周波数領域およびバースト挙動による 40 Hz 以上の高周波領域のみに限定される。このような中間周波数帯 (4 Hz - 30 Hz) でのコヒーレンシの欠落特性は、壁噴流場に特有なものである。

参考文献

- (1) 村松 壽晴、サーマルストライピング現象の数値解析に関する研究、東京工業大学 学位論文、1994 年 7 月。
- (2) 村松 壽晴、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).
- (3) 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).
- (4) 村松 壽晴、非定常熱伝達挙動の解析的評価手法の開発 (I)、直接法モンテカルロコード THEMIS の開発、日本原子力学会、1995 年春の年会
- (5) 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).
- (6) 村松 壽晴、境界要素法による構造物の熱的応答評価コード BEMSET の開発、日本原子力学会、1996 年春の年会
- (7) 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 (XII)、定常不規則温度ゆらぎ挙動の周波数領域における検討、PNC TN9410 98-013 (1998).
- (8) 村松 壽晴、冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (XI)、流体 - 構造非定常熱的応答特性に係わる評価手法の検証、PNC TN9410 97-039 (1997).
- (9) 山形 保男、小澤 一雅、床井 博見、サーマルストライピングによる構造物の熱的応答ナトリウム実験、PNC TJ9124 98-007 (1998).

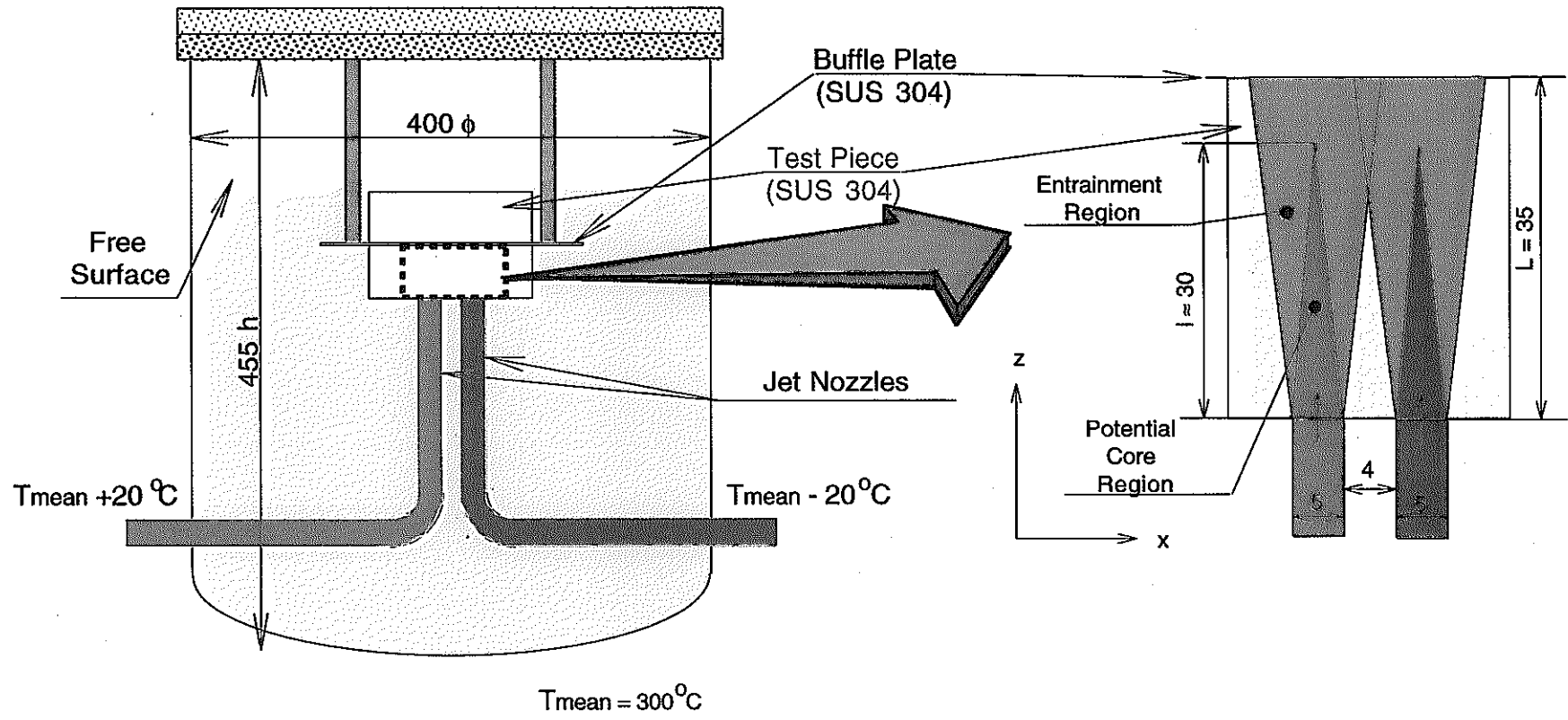


Fig. 2. 1 Apparatus of the TIFSS-II Experiment

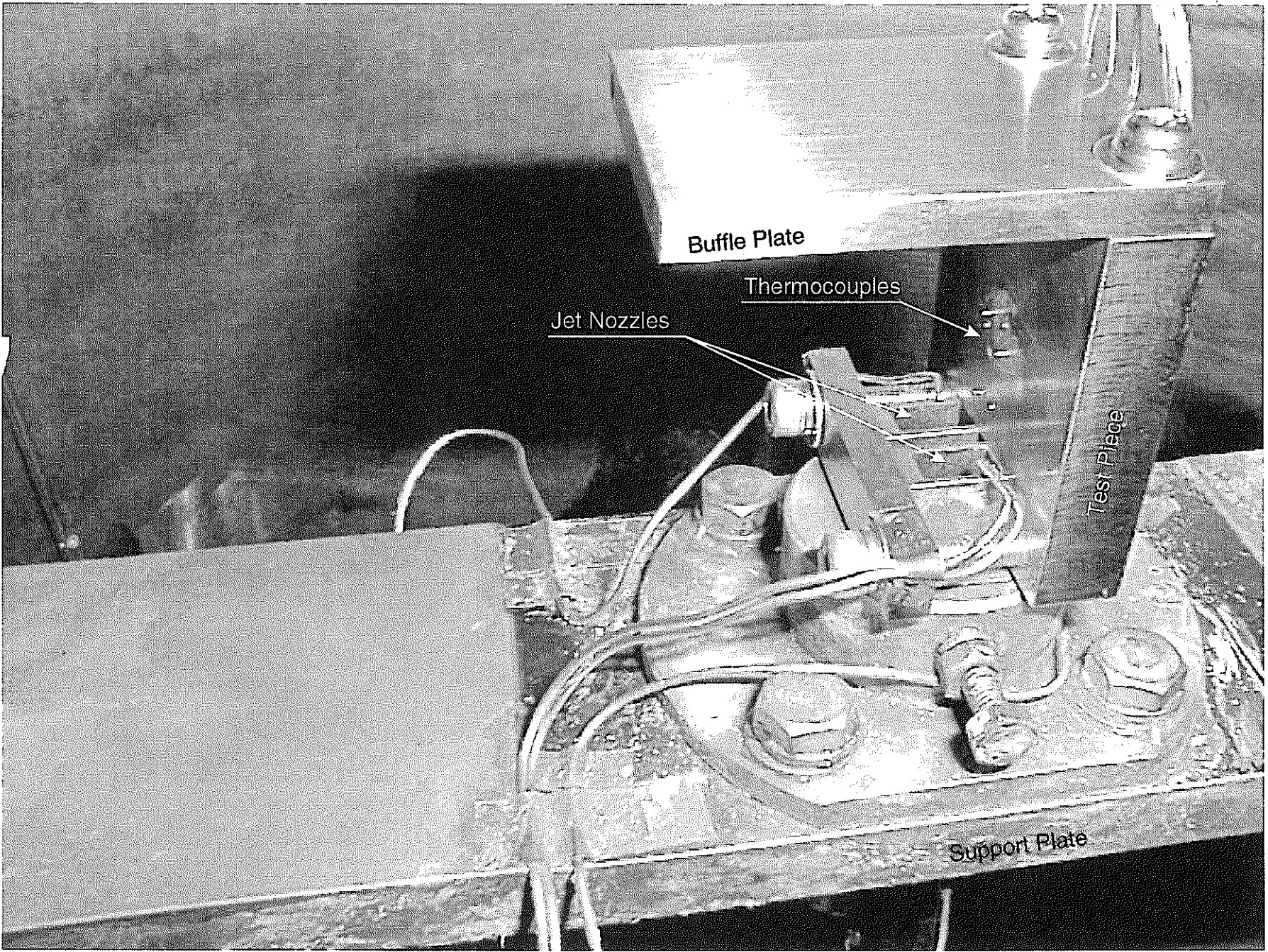


Fig. 2. 2 Photograph of the Test Section

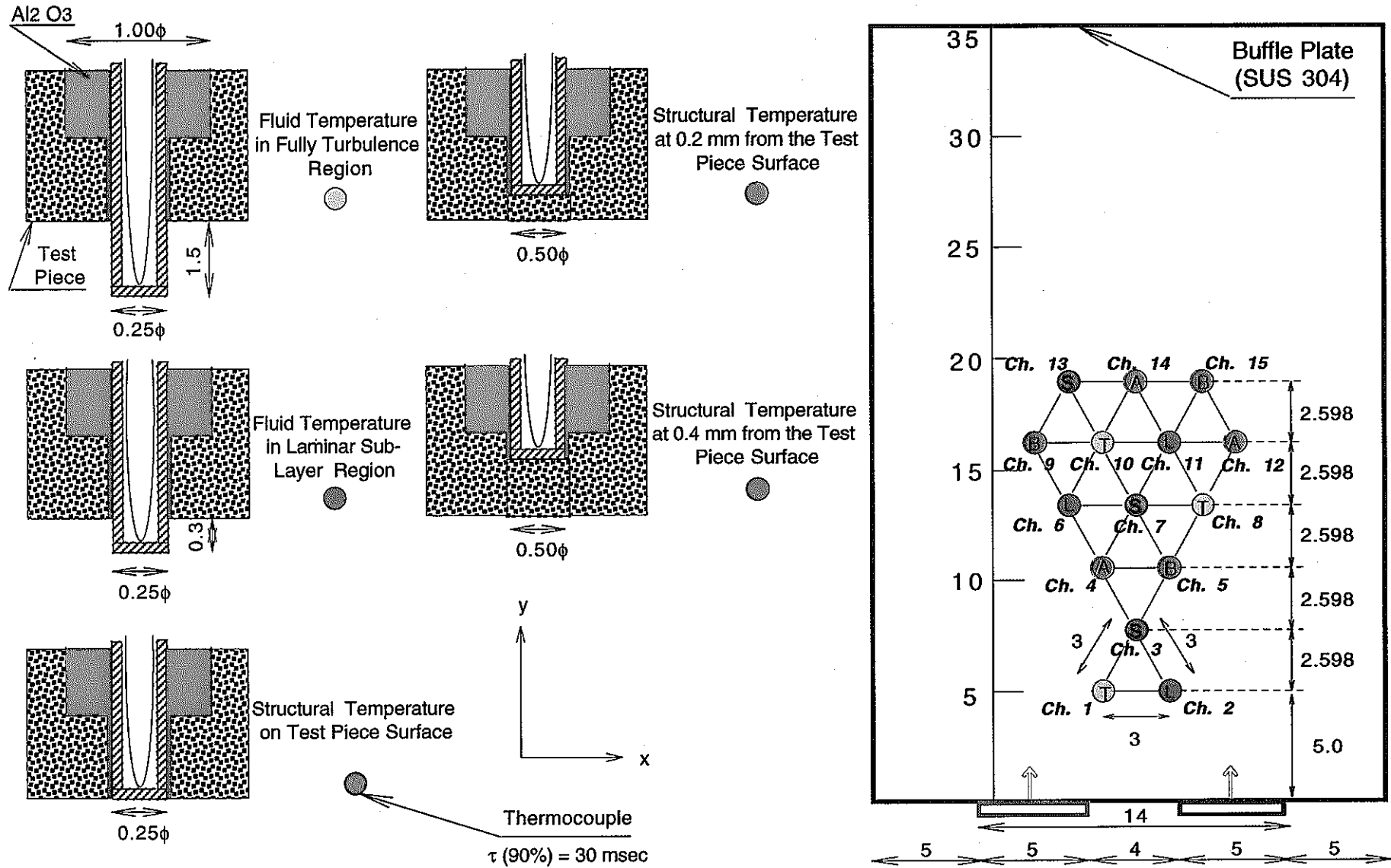


Fig. 2.3 Thermocouple Arrangements to the Test Piece

Case-1

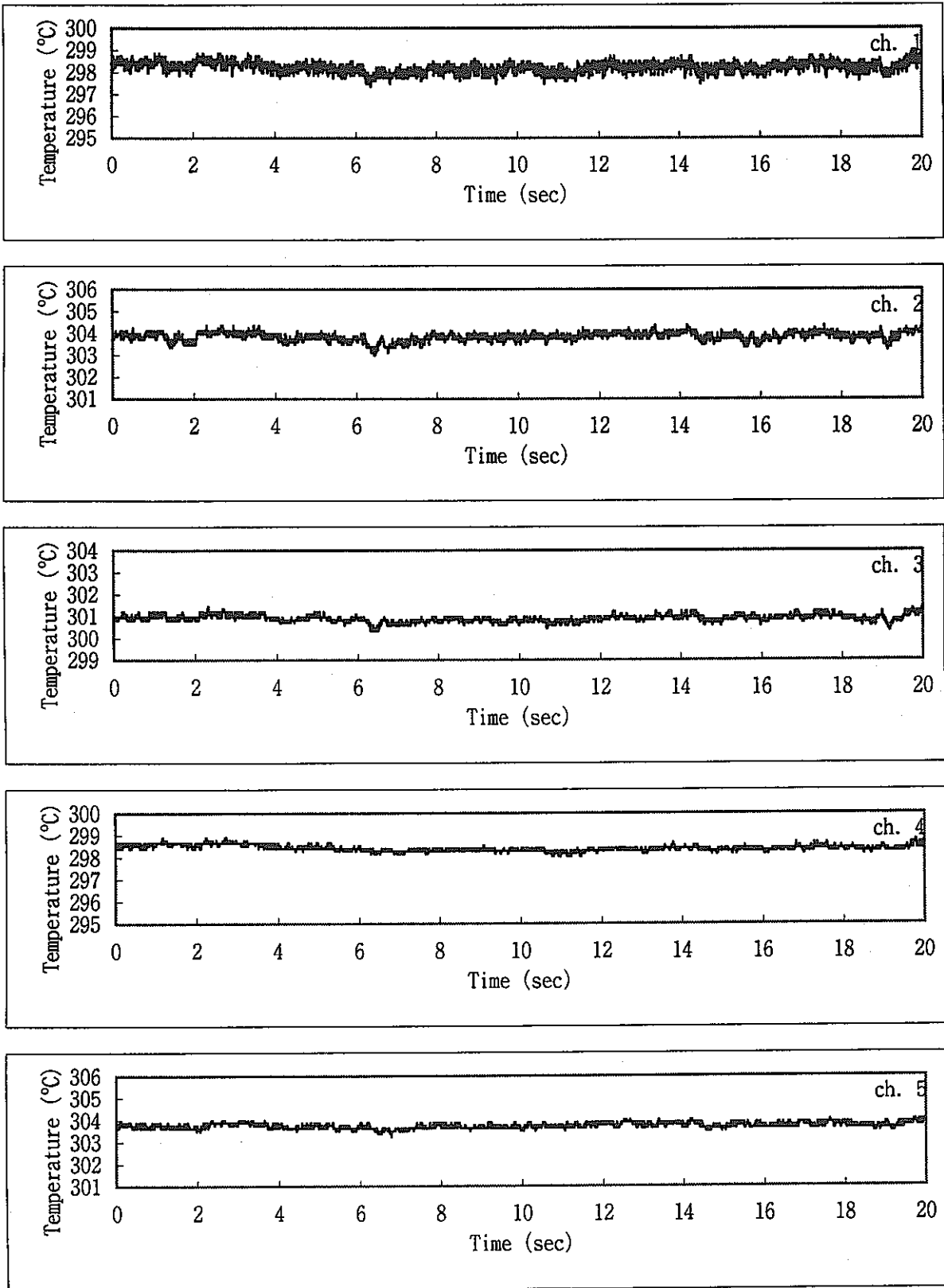


Fig. 2.4 Temperature Transients for Case-1 Condition (1/3)

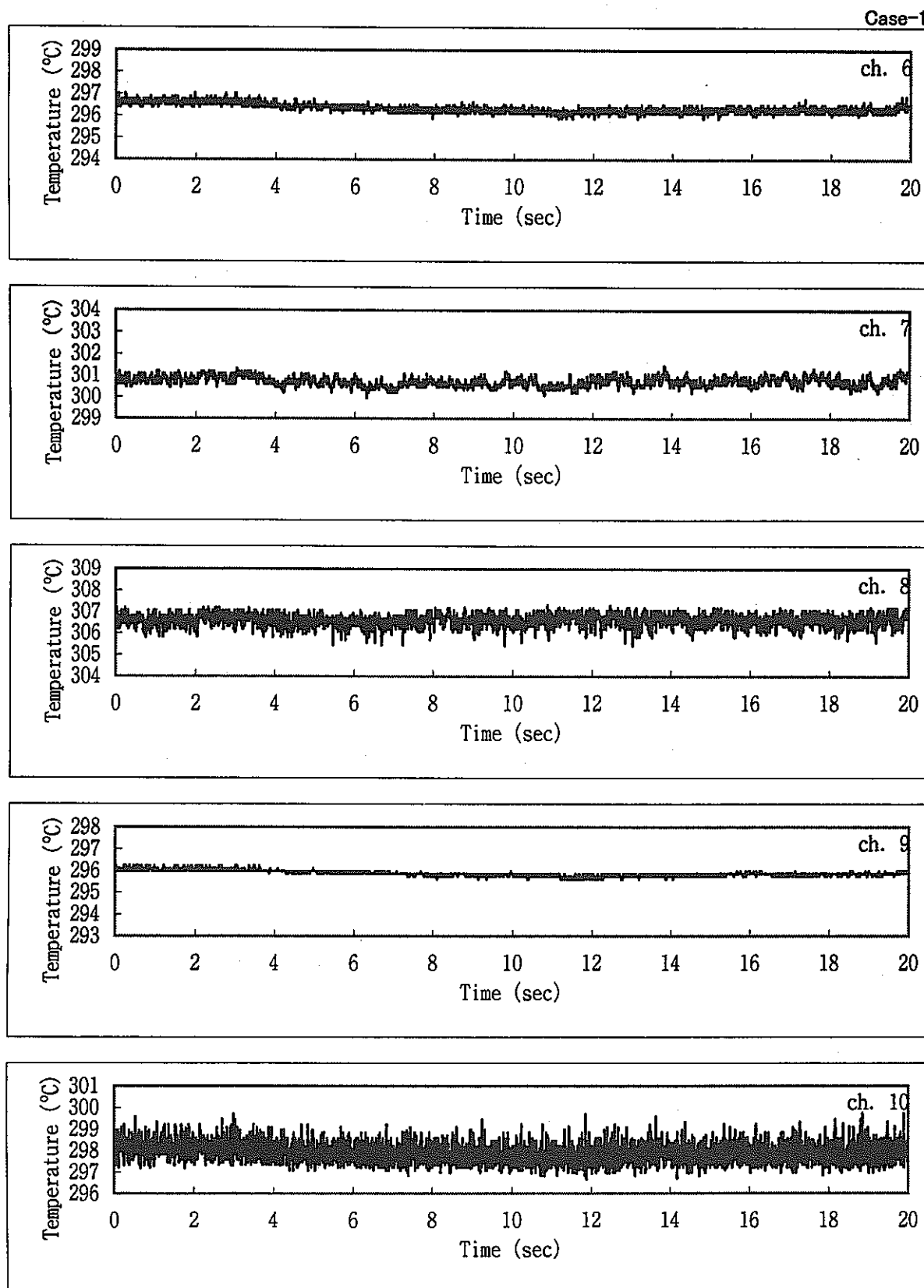


Fig. 2. 4 Temperature Transients for Case-1 Condition (2/3)

Case-1

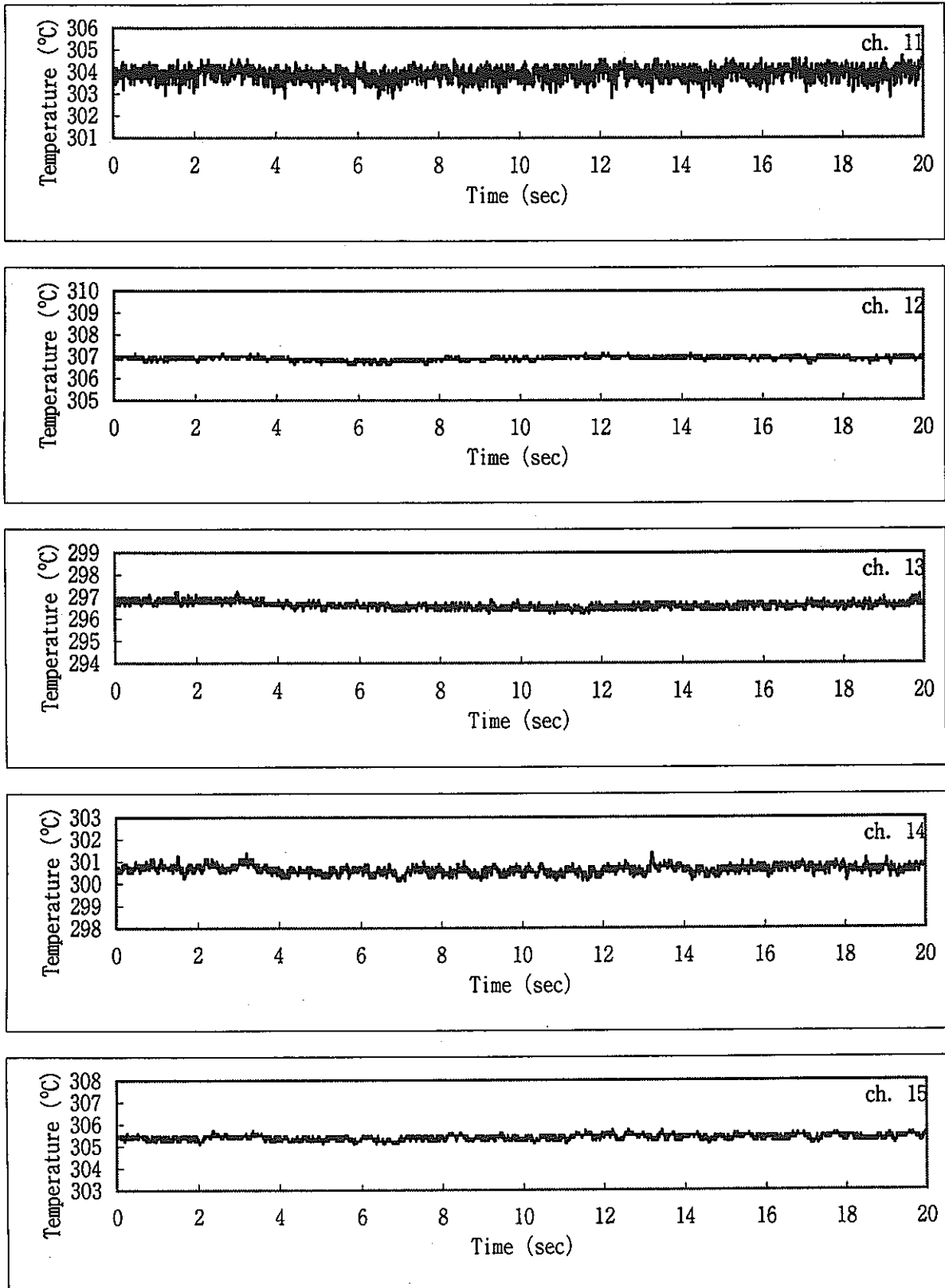


Fig. 2.4 Temperature Transients for Case-1 Condition (3/3)

Case-2

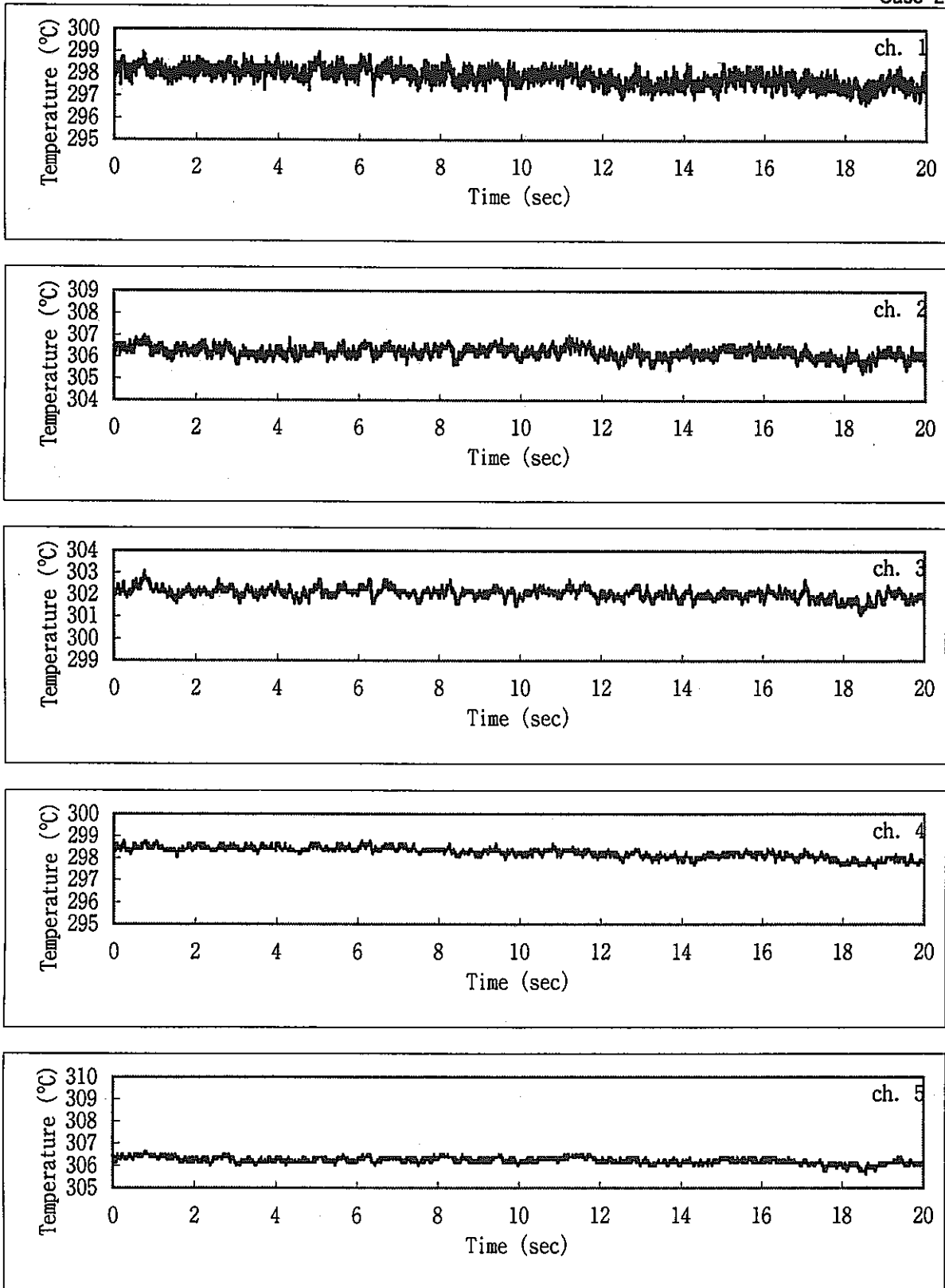


Fig. 2.5 Temperature Transients for Case-2 Condition (1/3)

Case-2

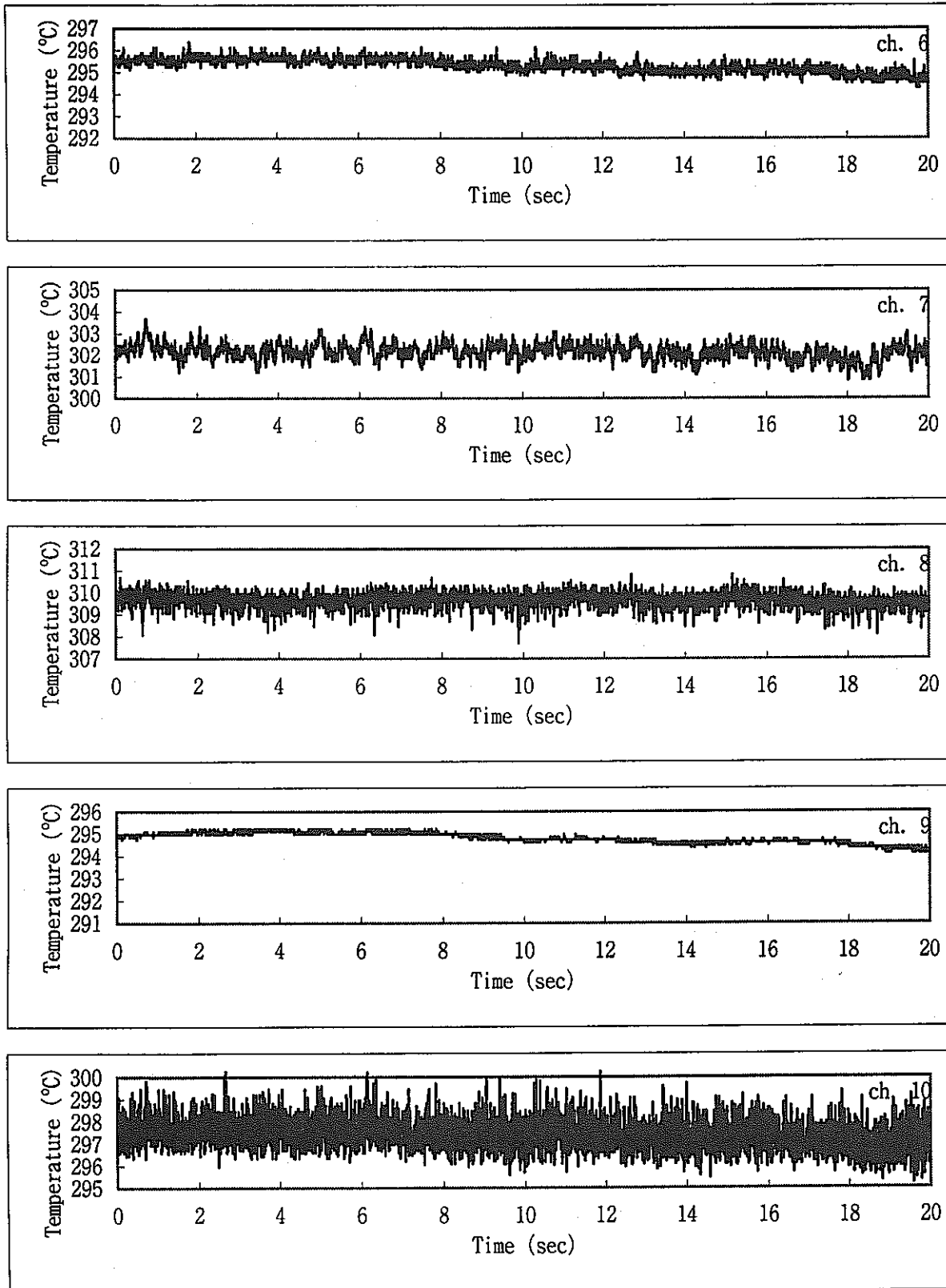


Fig. 2. 5 Temperature Transients for Case-2 Condition (2/3)

Case-2

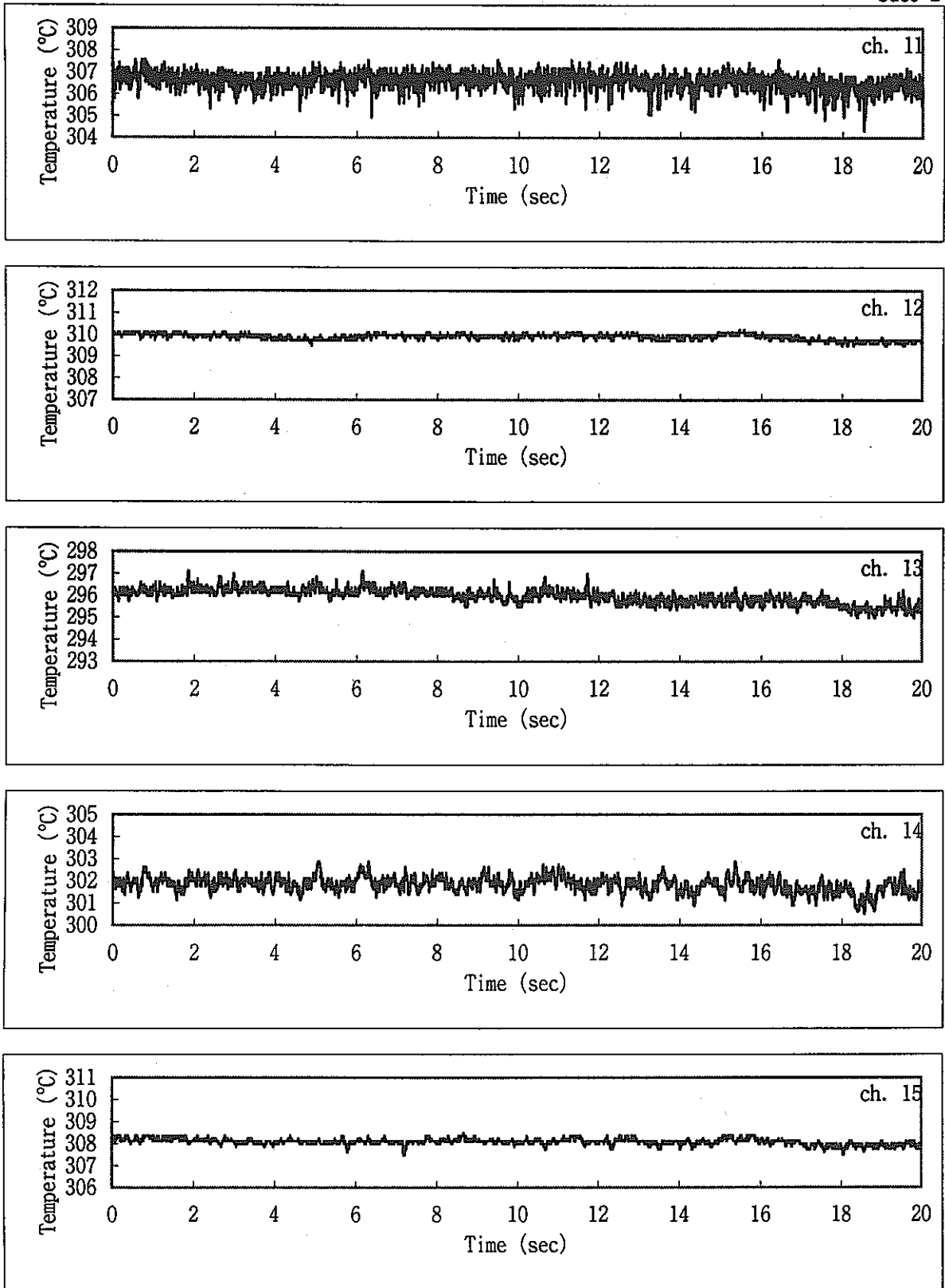


Fig. 2.5 Temperature Transients for Case-2 Condition (3/3)

Case-3

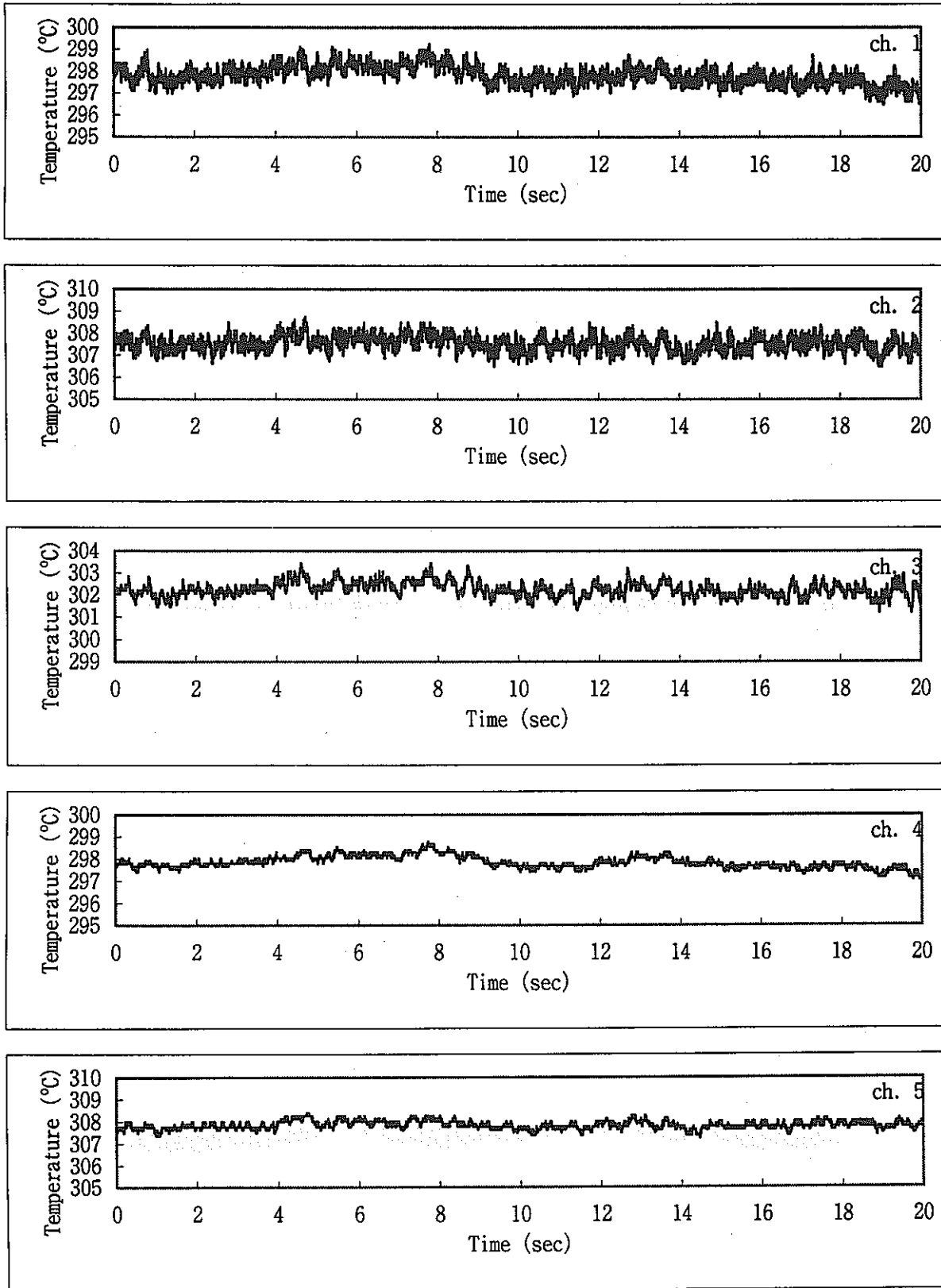


Fig. 2. 6 Temperature Transients for Case-3 Condition (1/3)

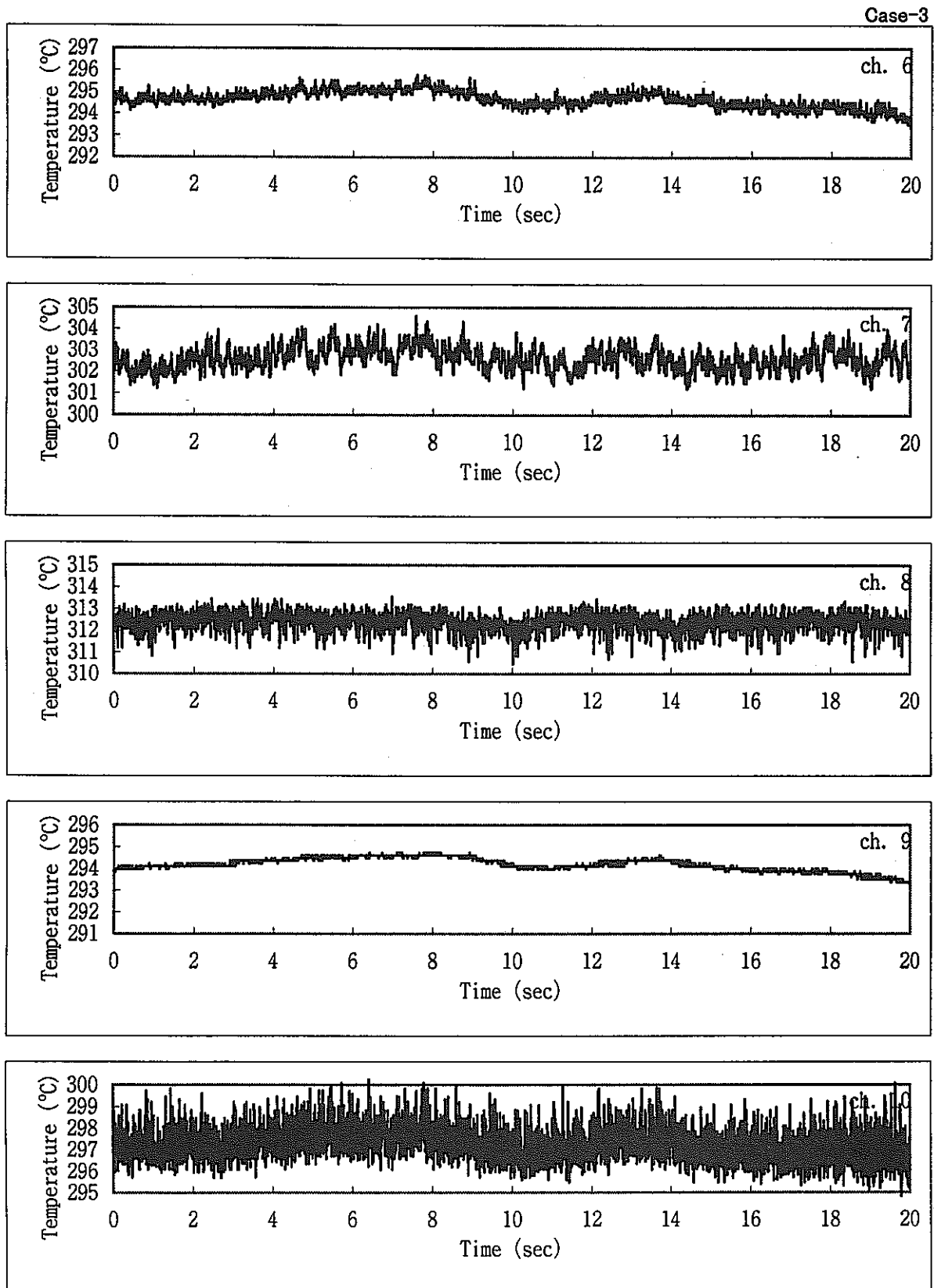


Fig. 2. 6 Temperature Transients for Case-3 Condition (2/3)

Case-3

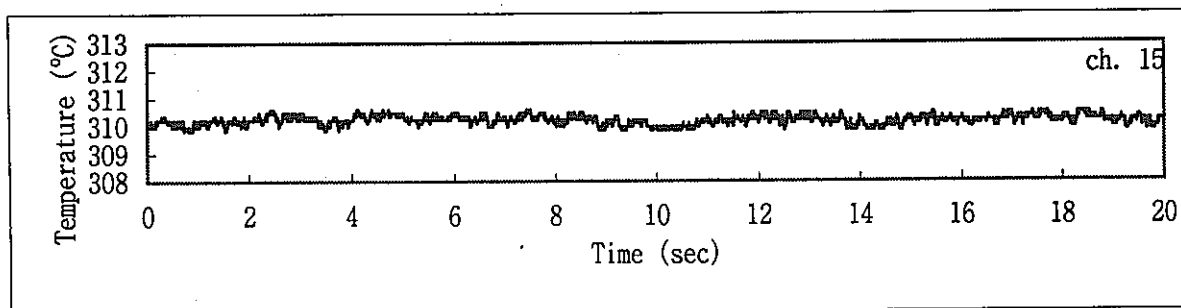
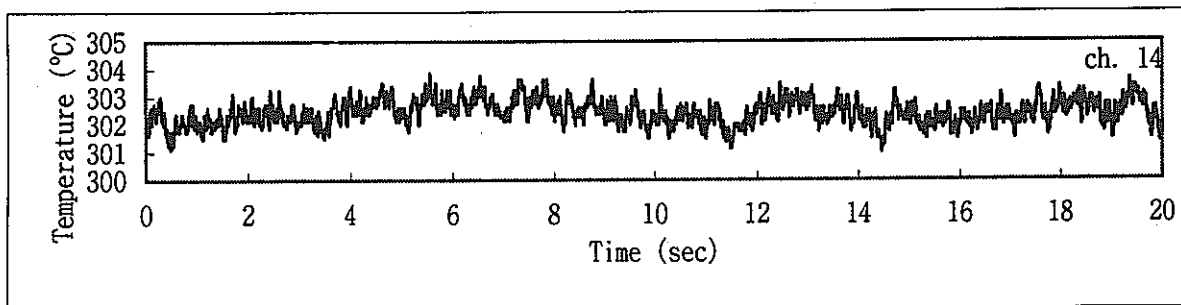
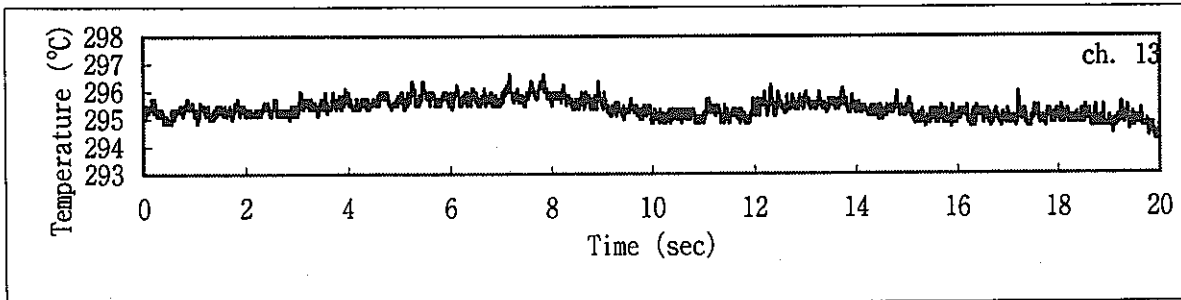
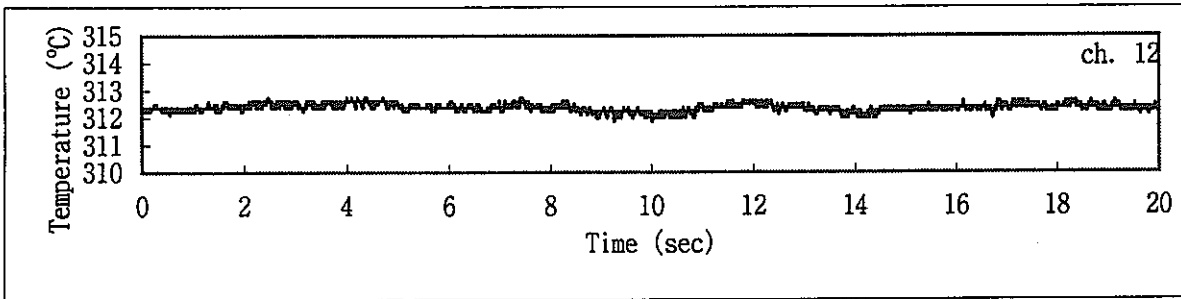
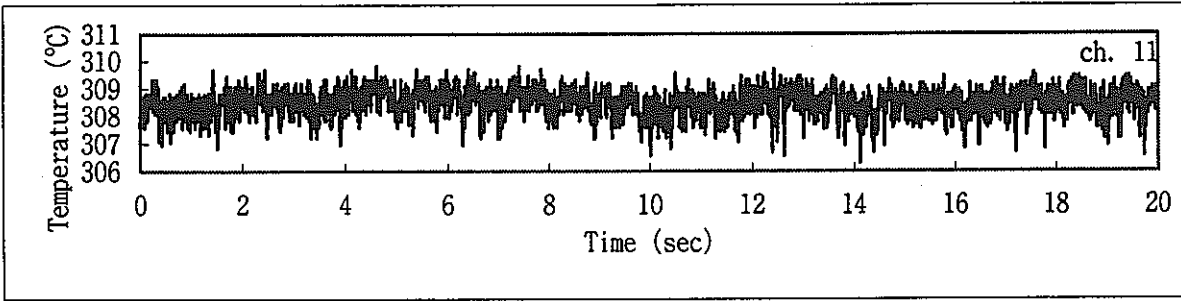


Fig. 2. 6 Temperature Transients for Case-3 Condition (3/3)

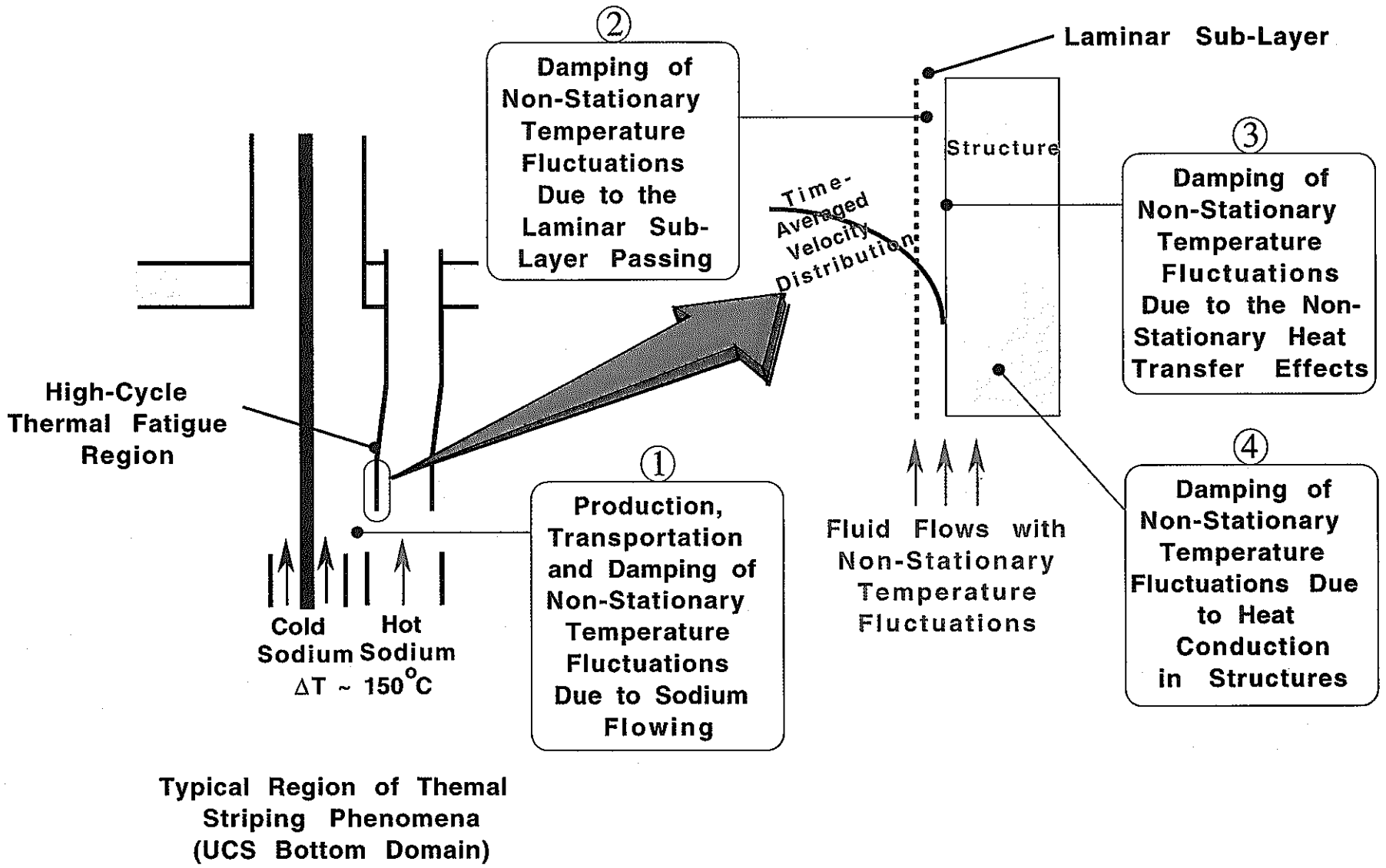


Fig. 2. 7 Damping Effects of Non-Stationary Temperature Fluctuations near Solid Walls

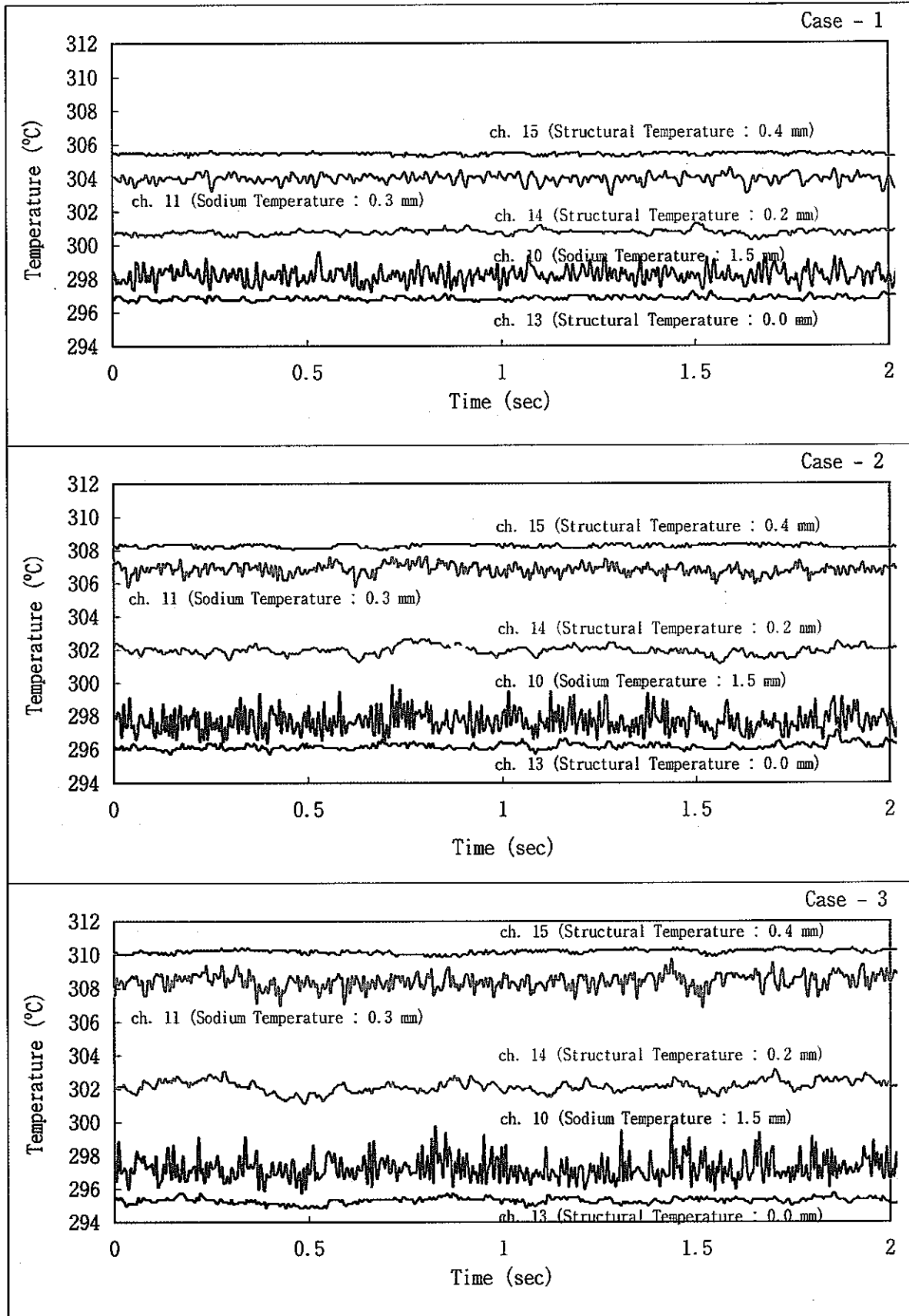


Fig. 2.8 Comparison of Temperature Transients for a Short Period

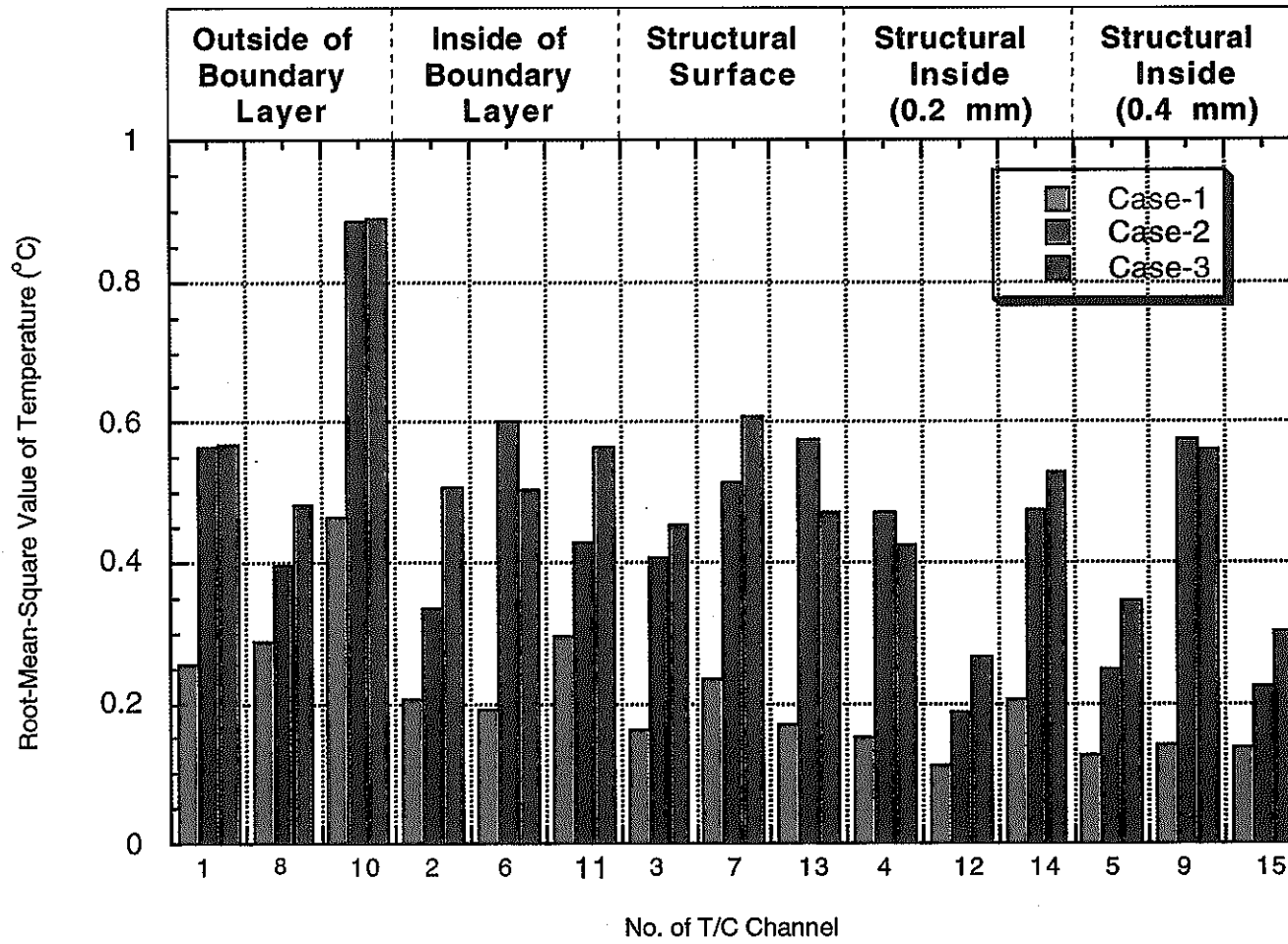


Fig. 2. 10 Comparison of Time-Averaged RMS Values of Temperature Fluctuations

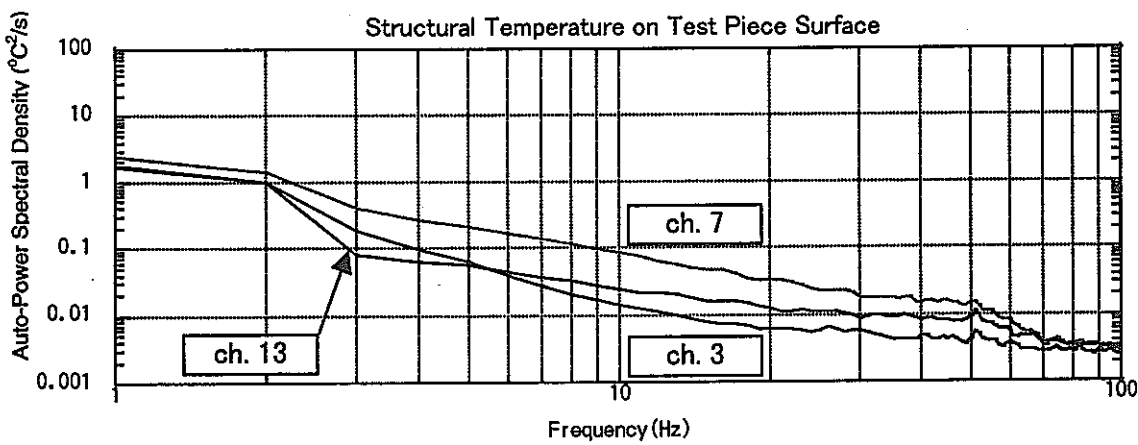
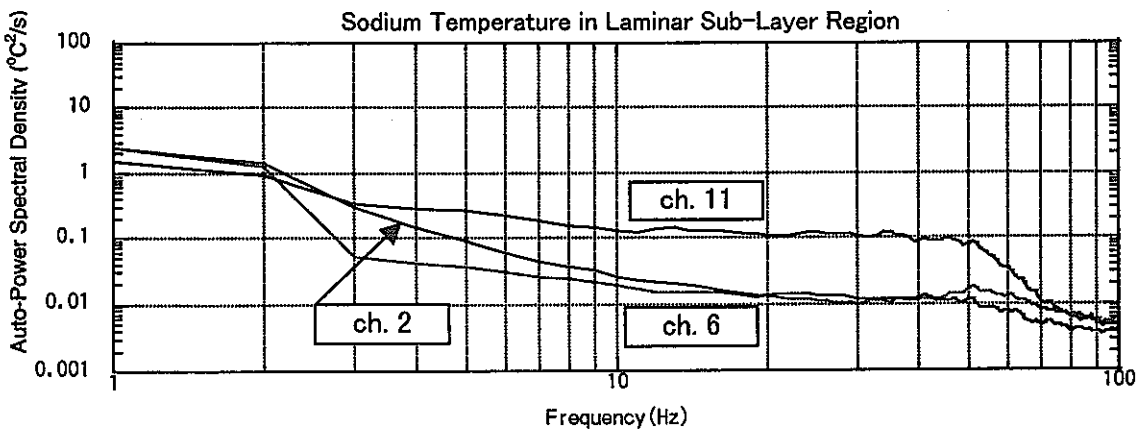
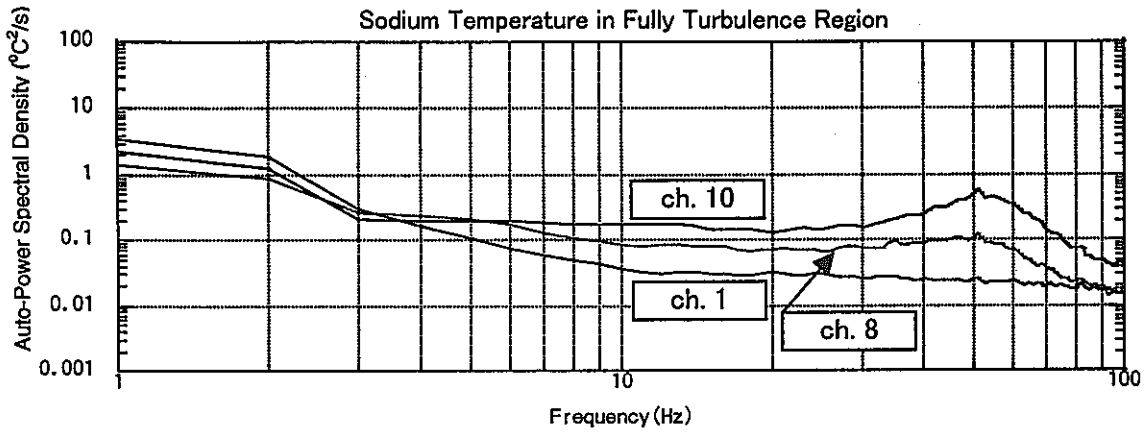


Fig. 3. 1 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Case-1 (1/2)

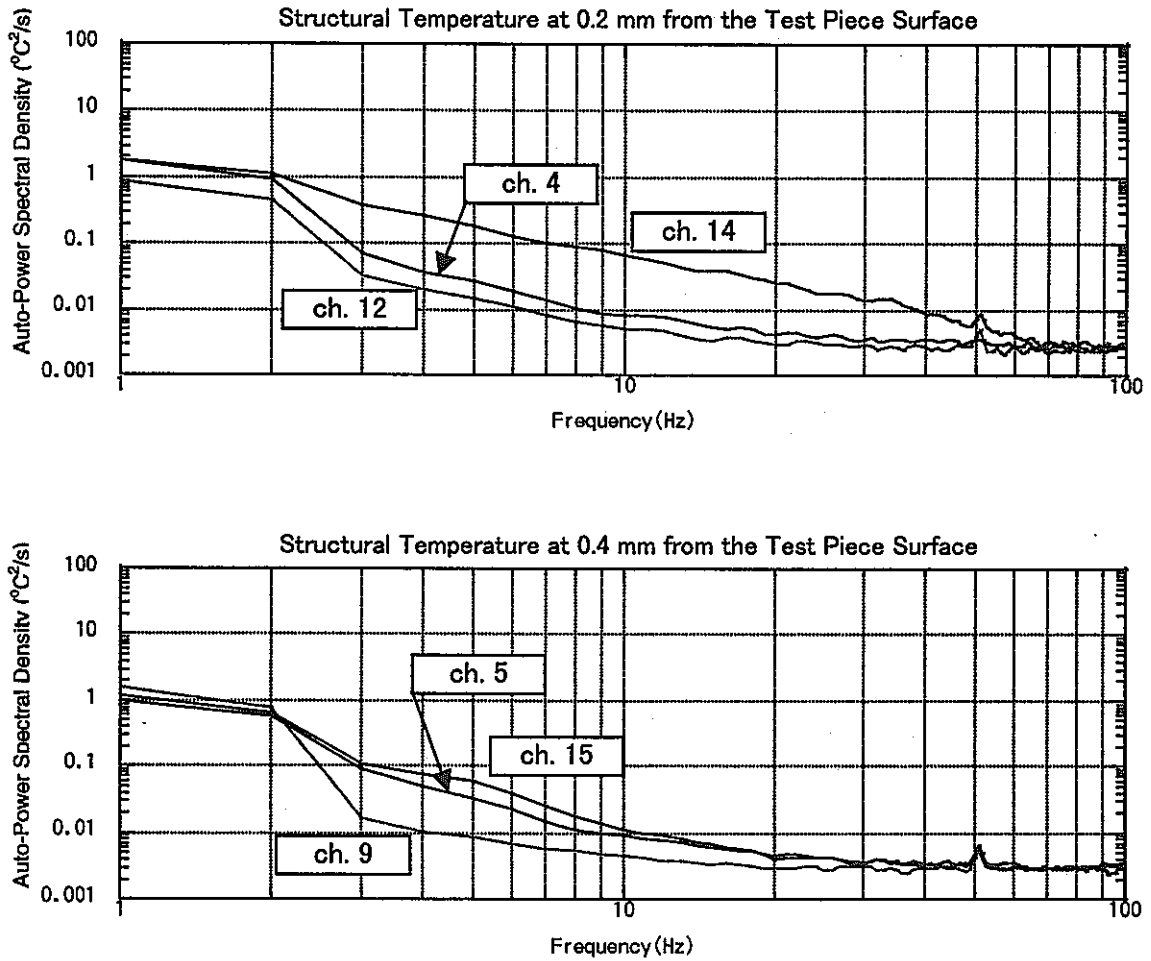


Fig. 3. 1 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Case-1 (2/2)

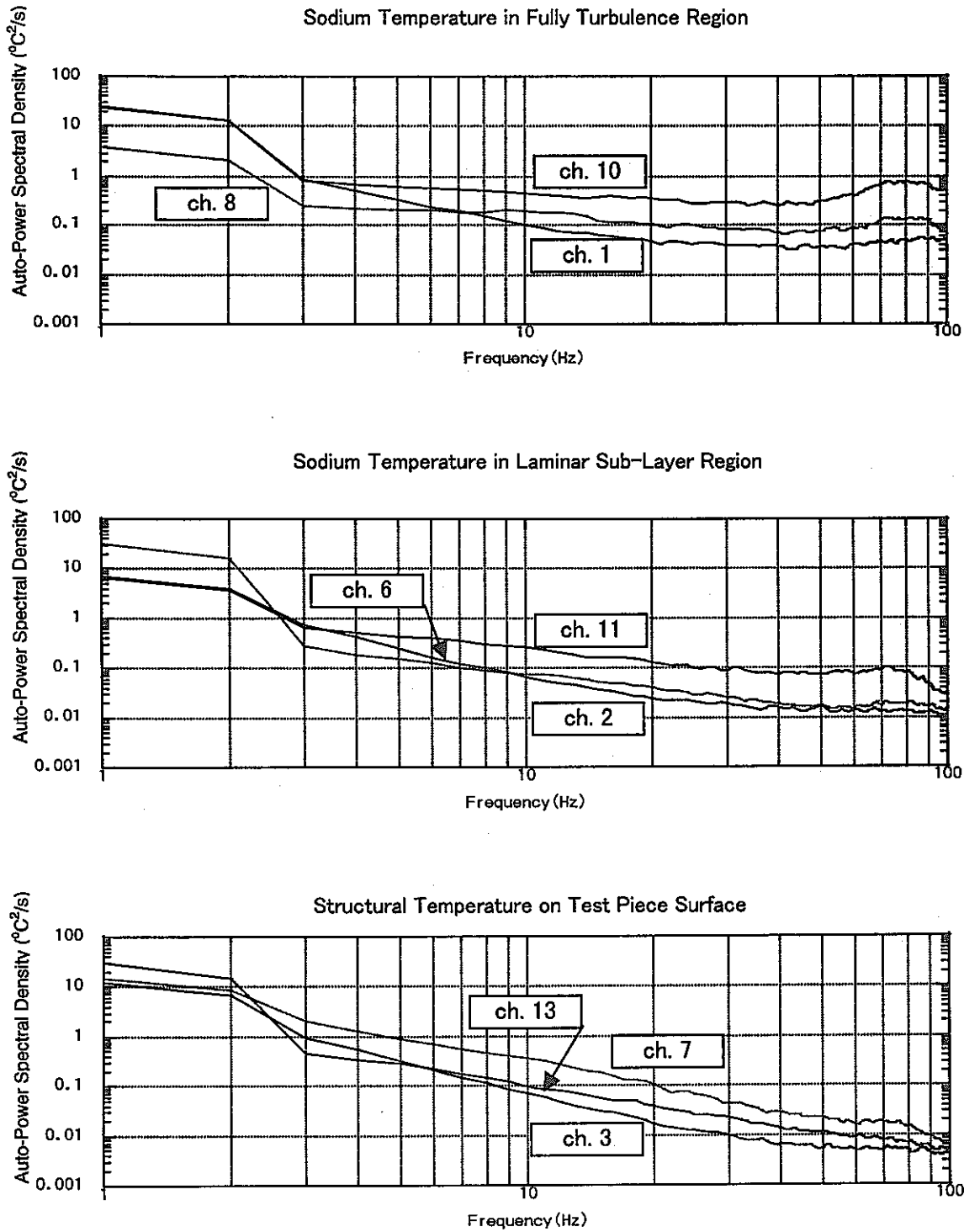


Fig. 3. 2 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Case-2 (1/2)

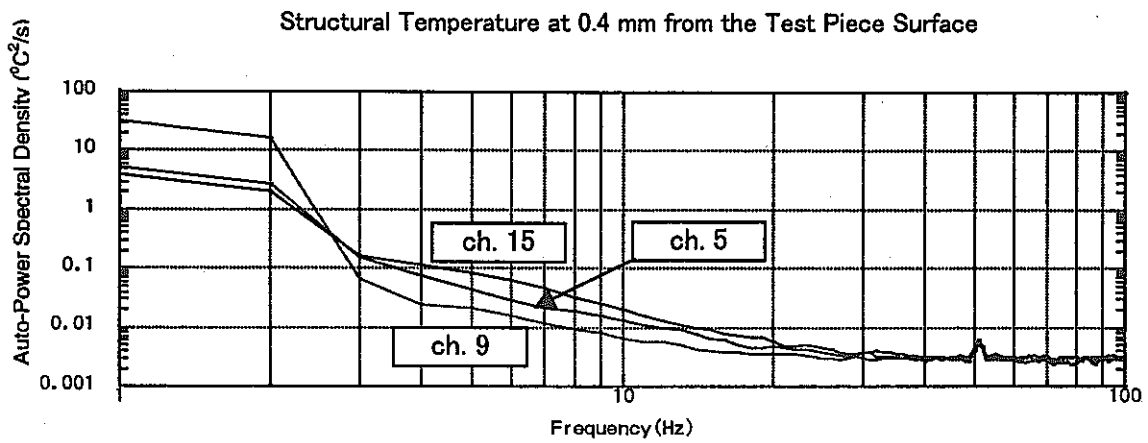
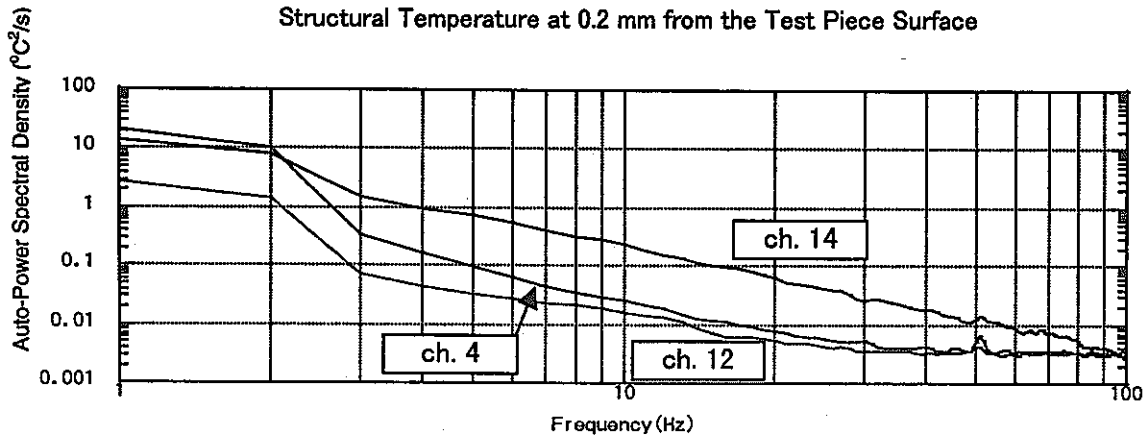


Fig. 3.2 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Case-2 (2/2)

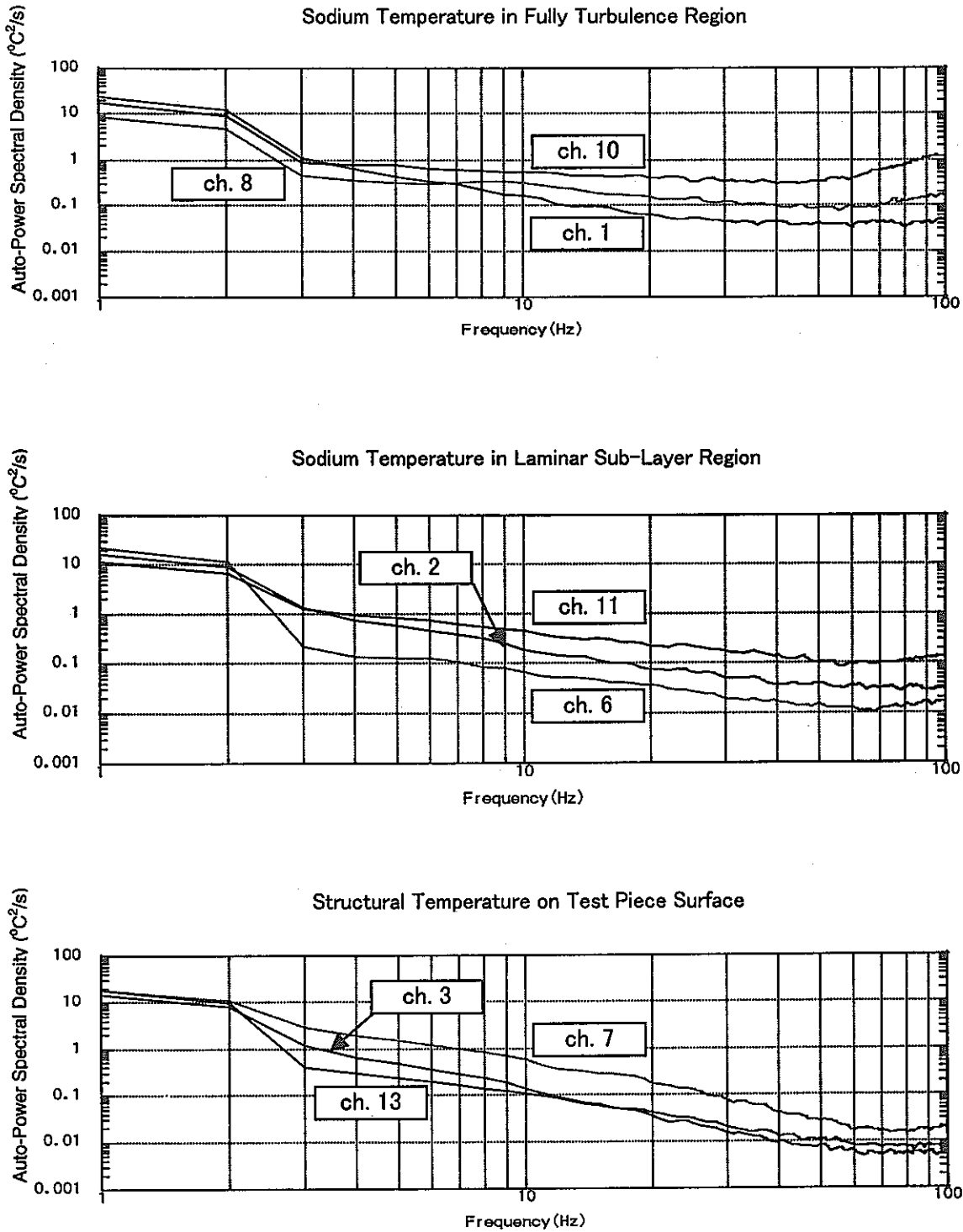


Fig. 3.3 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Case-3 (1/2)

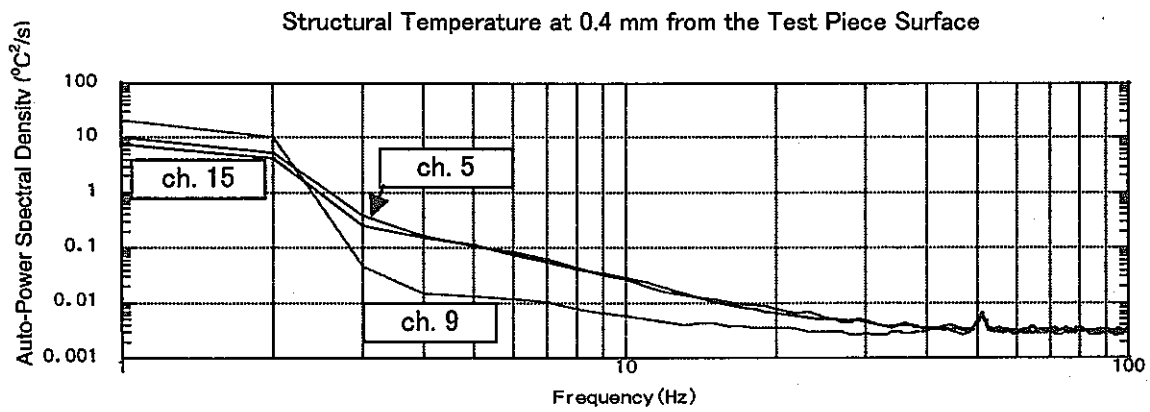
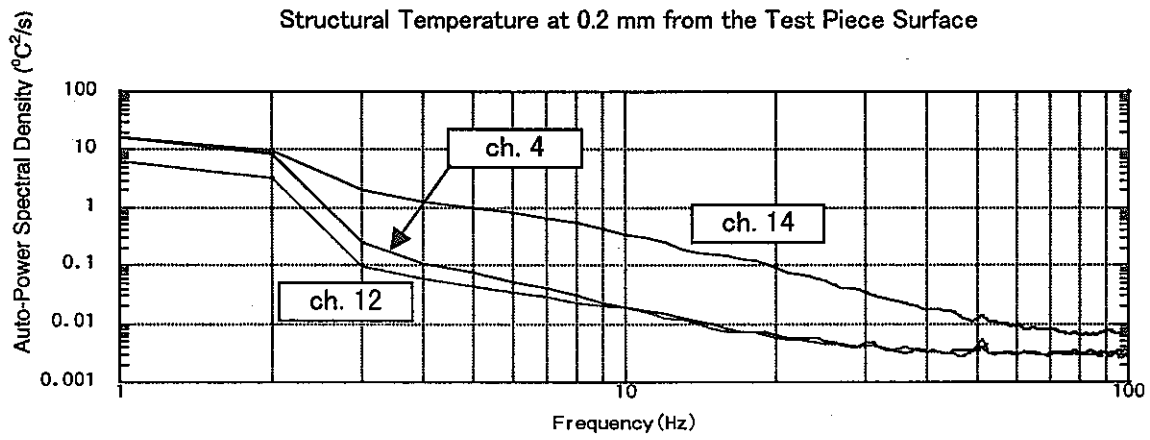


Fig. 3.3 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Case-3 (2/2)

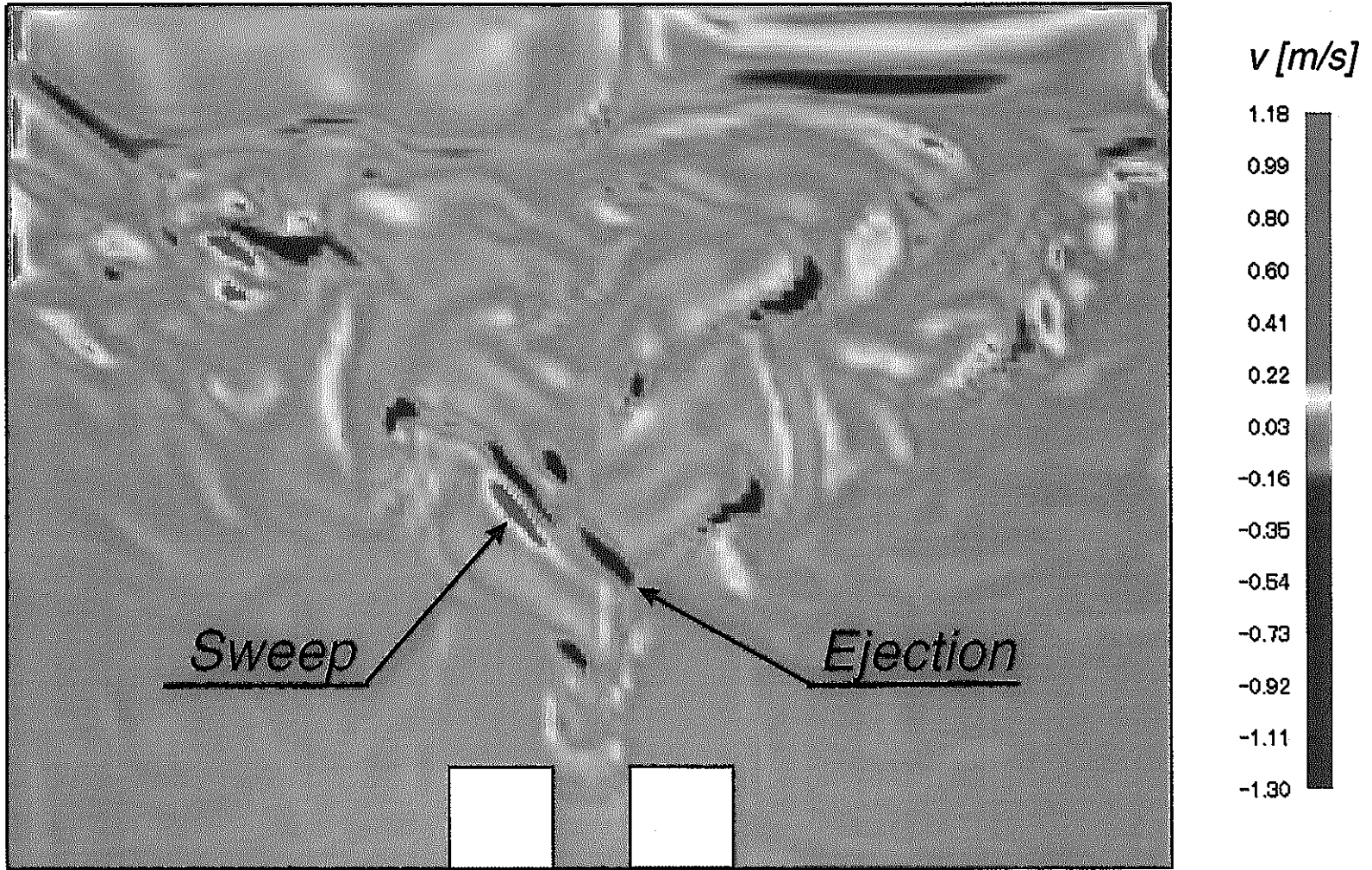


Fig. 3. 4 Calculated Bursting Behavior near the Test Piece with the DINUS-3 Code

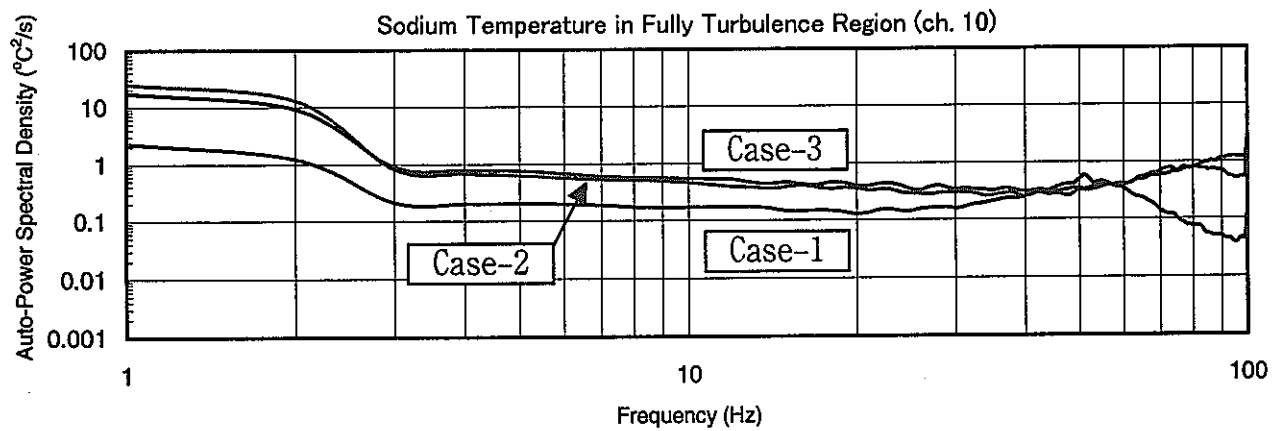
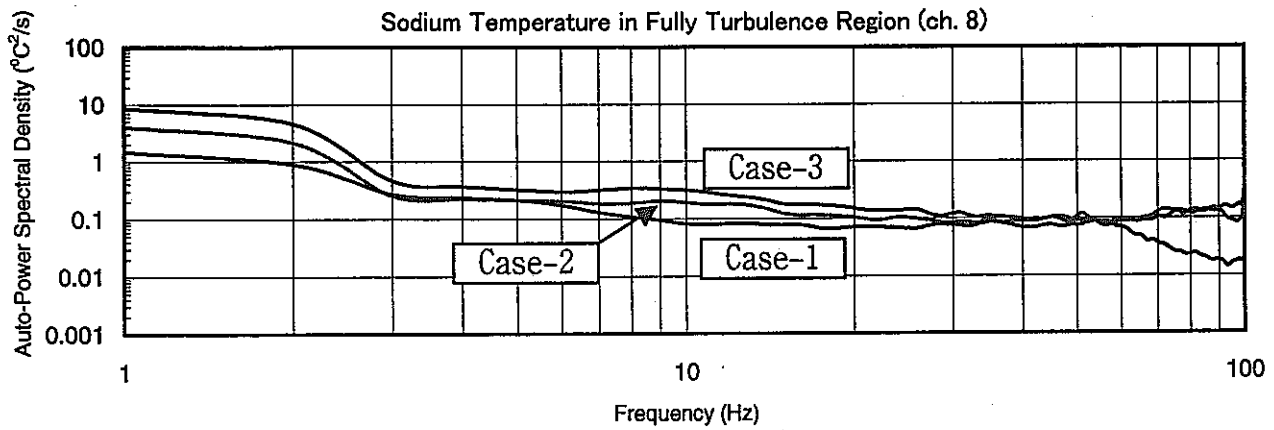
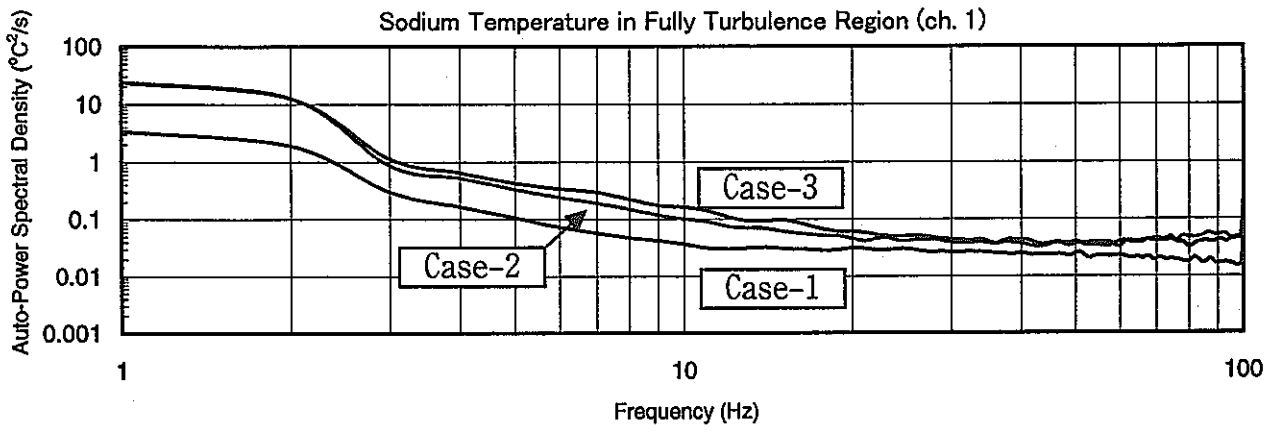


Fig. 3. 5 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Sodium Temperature in Fully Turbulence Region

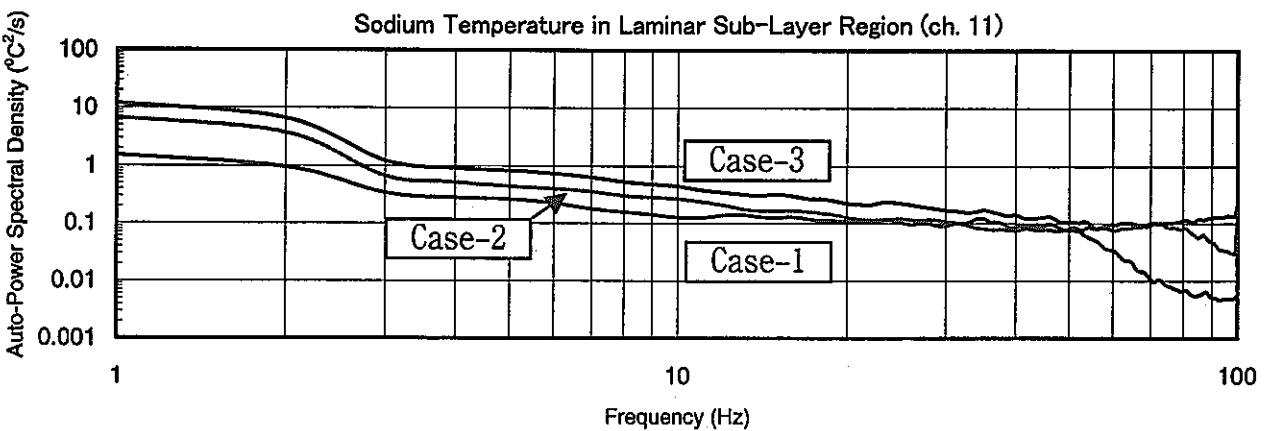
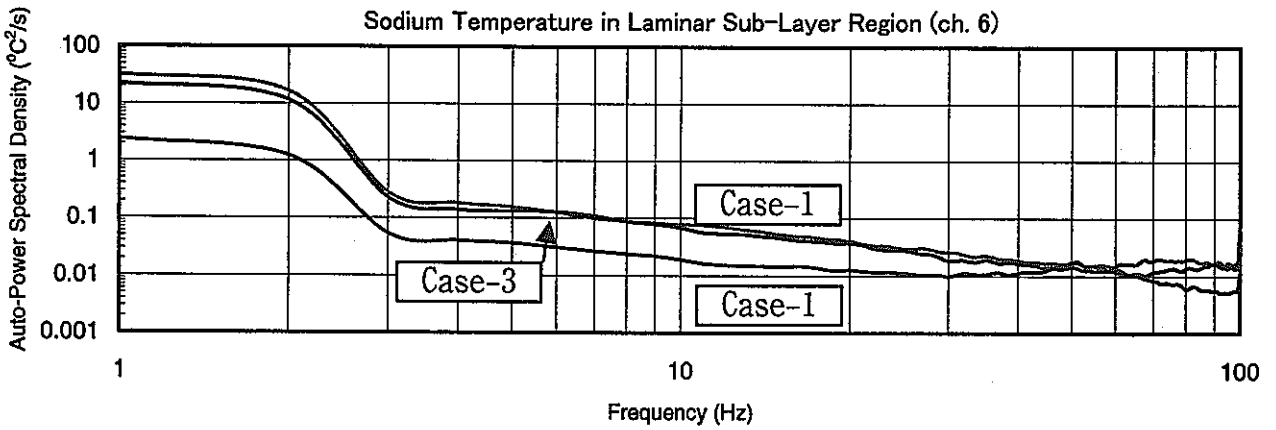
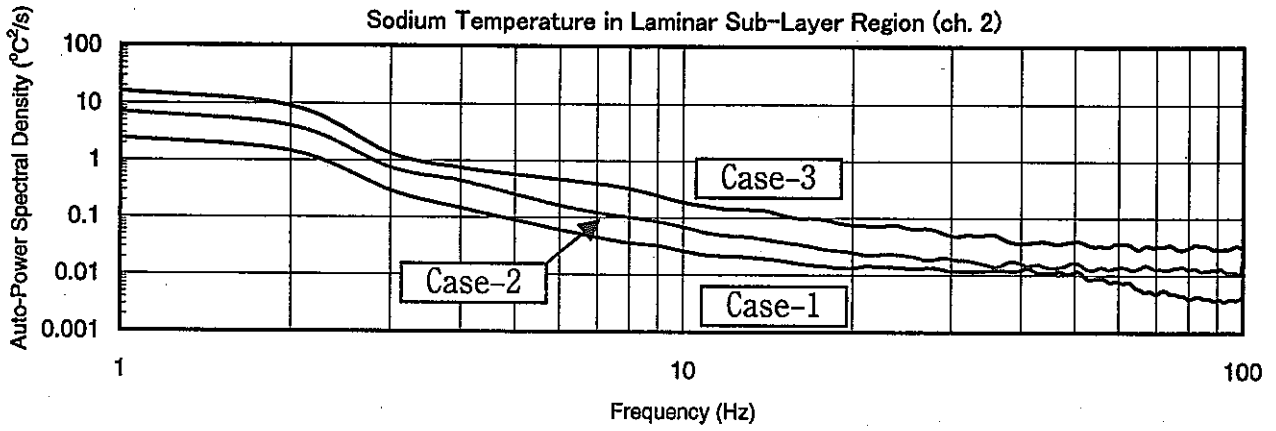


Fig. 3. 6 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Sodium Temperature in Laminar Sub-Layer Region

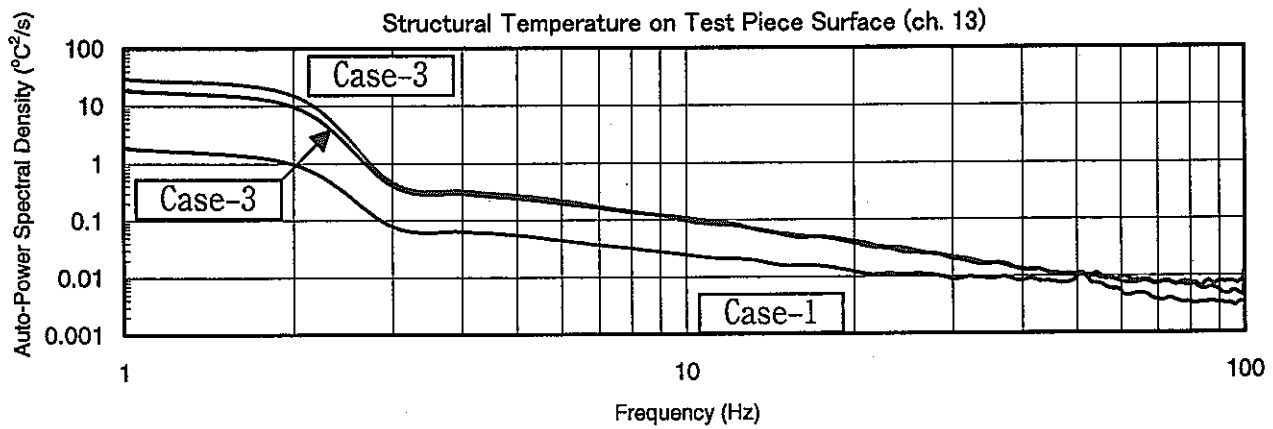
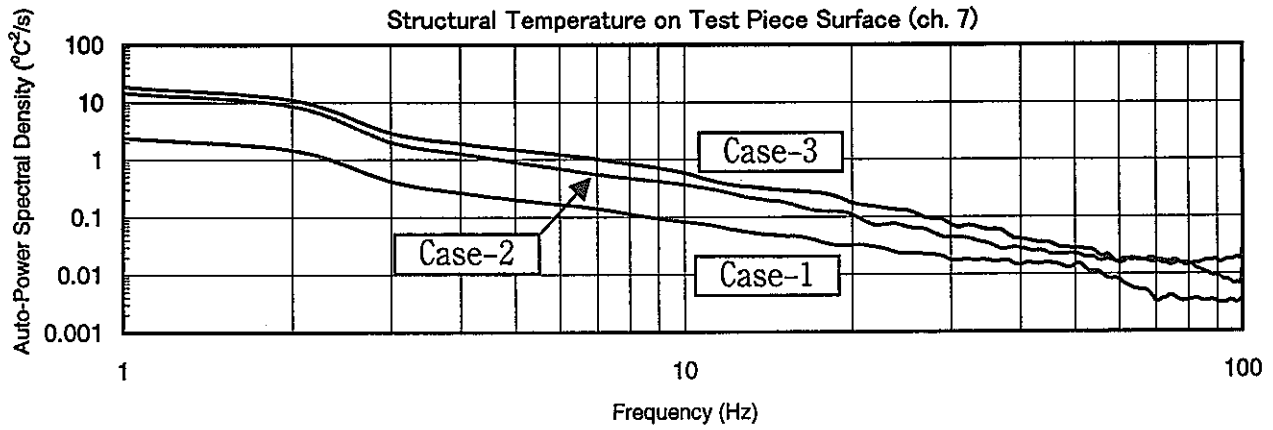
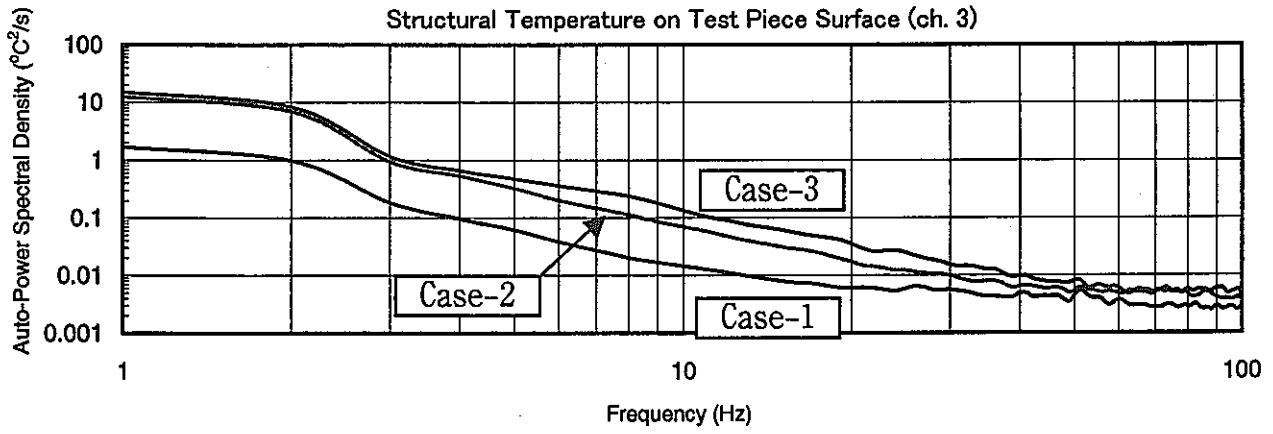


Fig. 3.7 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Structural Temperature on Test Piece Surface

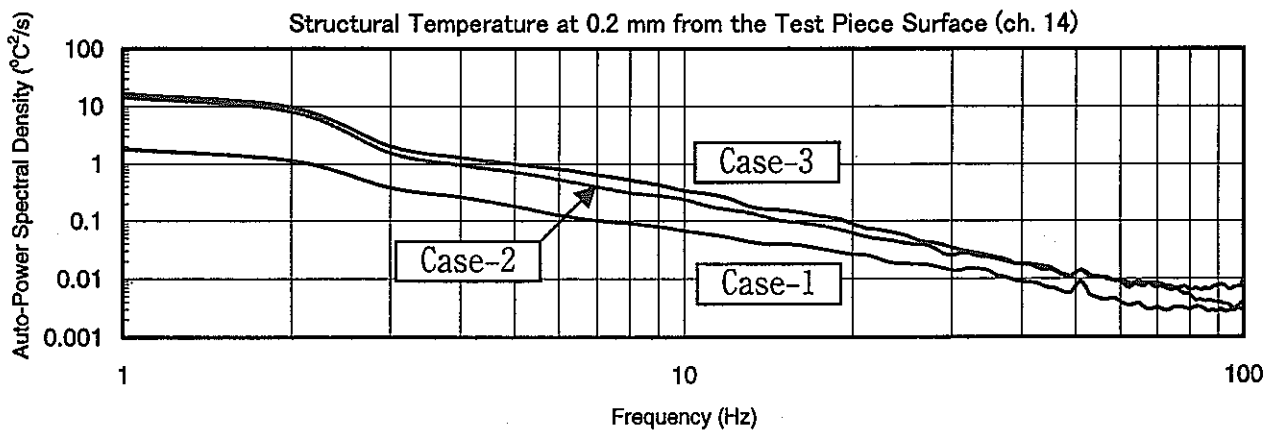
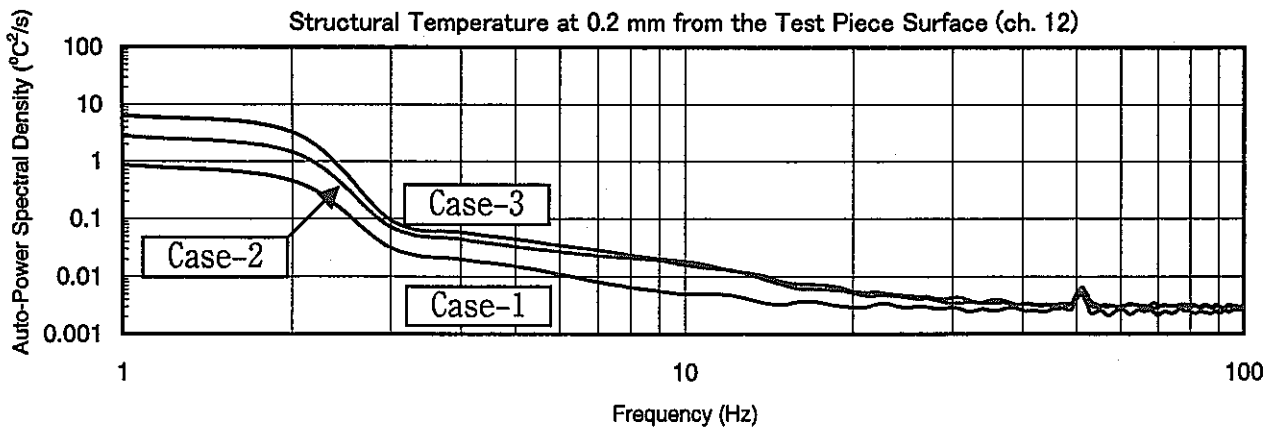
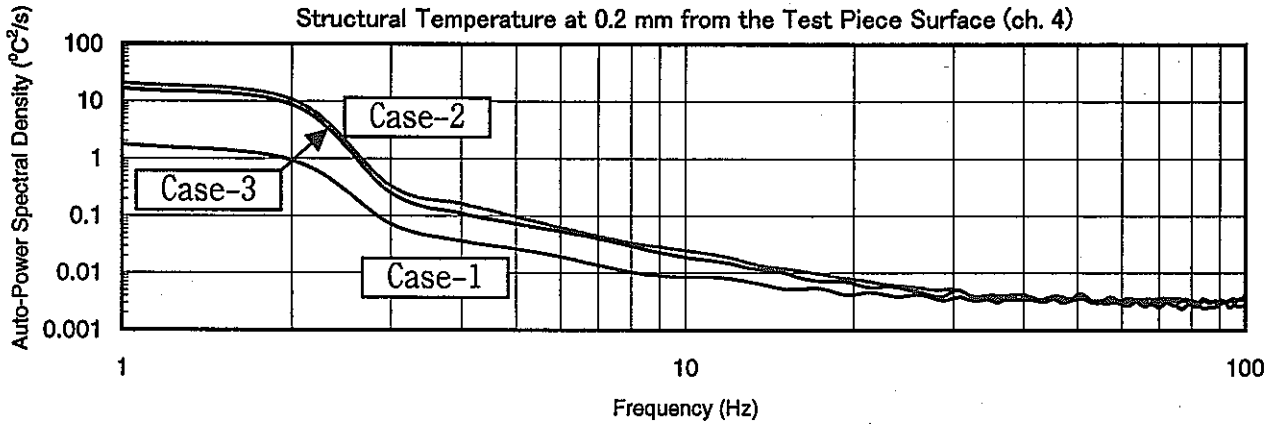


Fig. 3. 8 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Structural Temperature at 0.2 mm from the Test Piece Surface

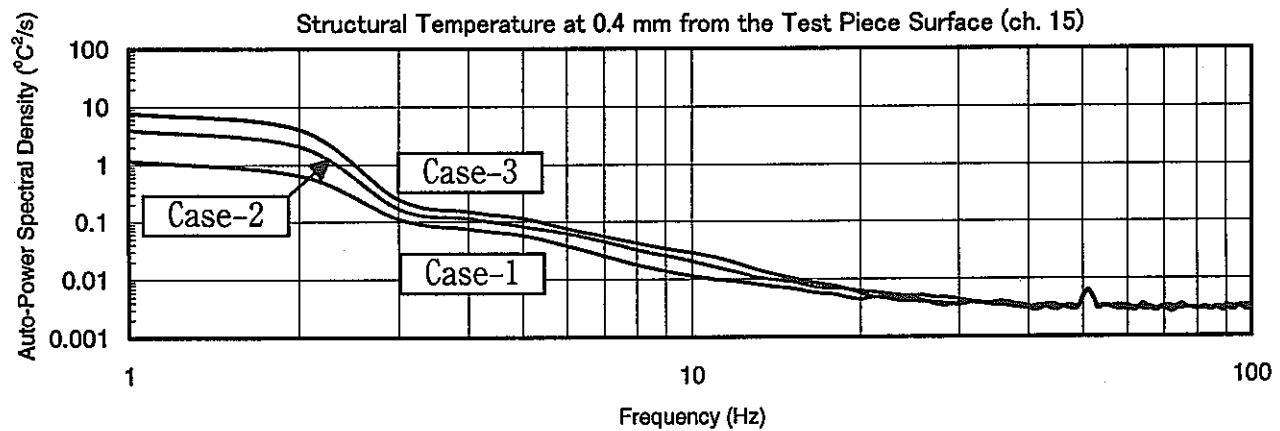
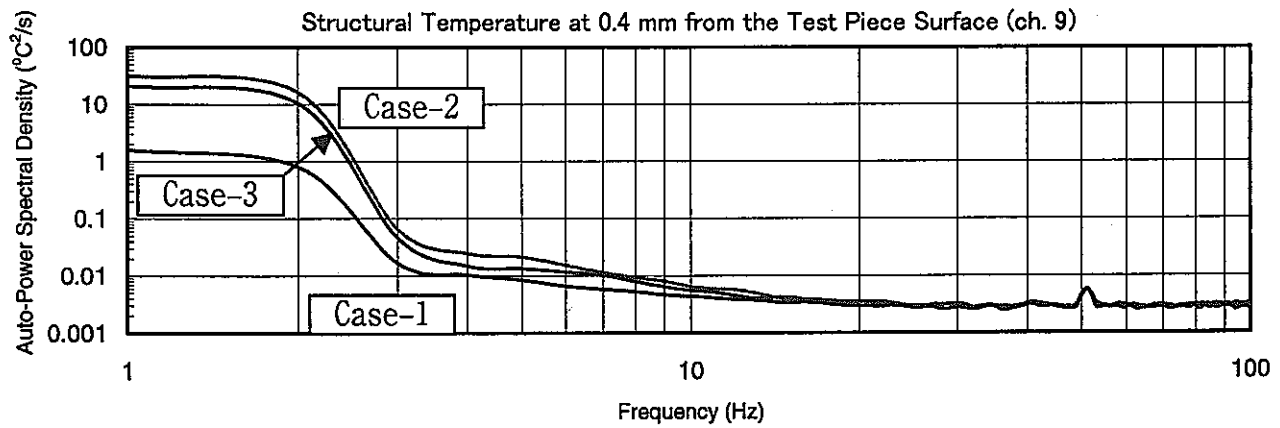
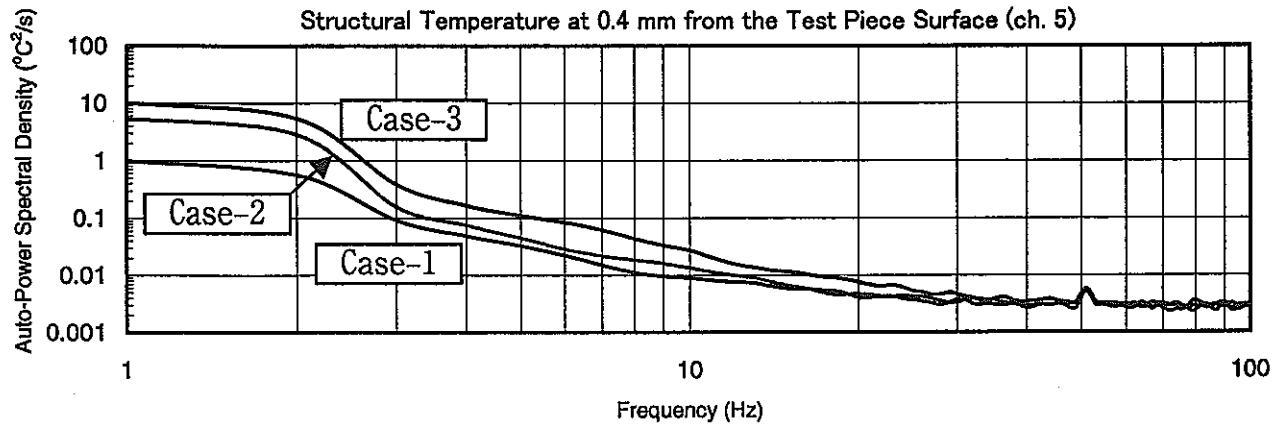


Fig. 3. 9 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Structural Temperature at 0.4 mm from the Test Piece Surface

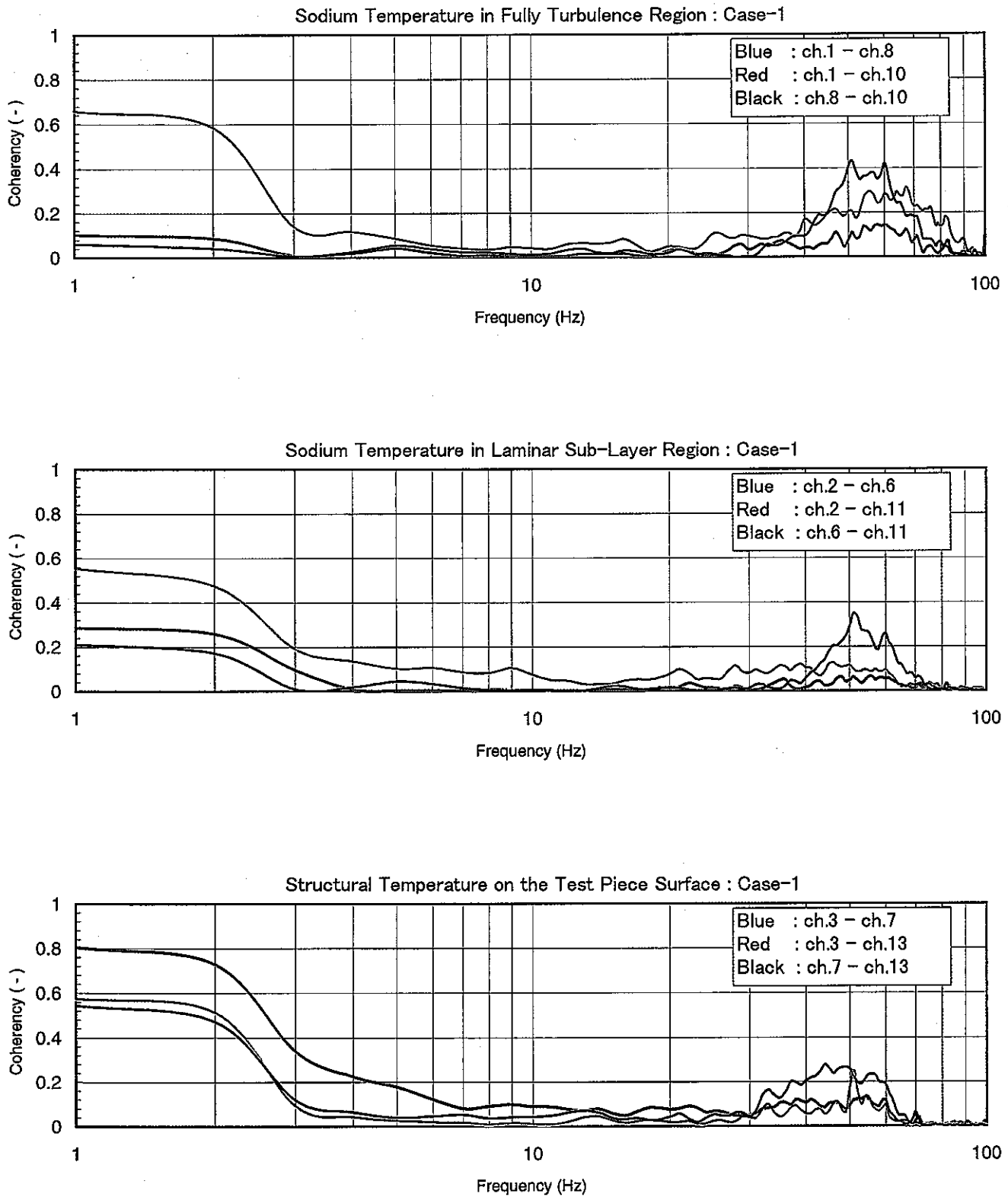


Fig. 3. 10 Comparison of Coherence Functions for Case-1 (1/2)

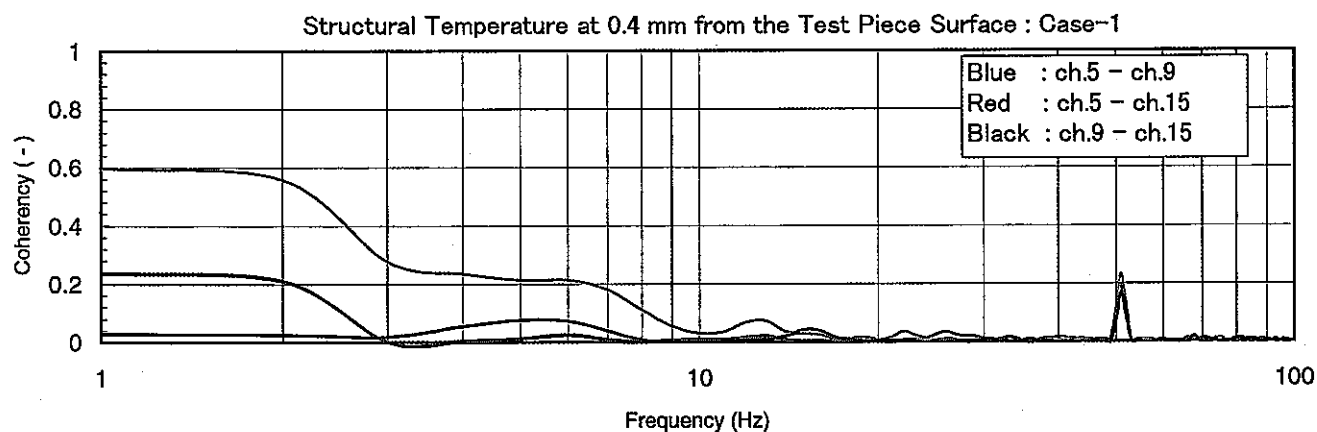
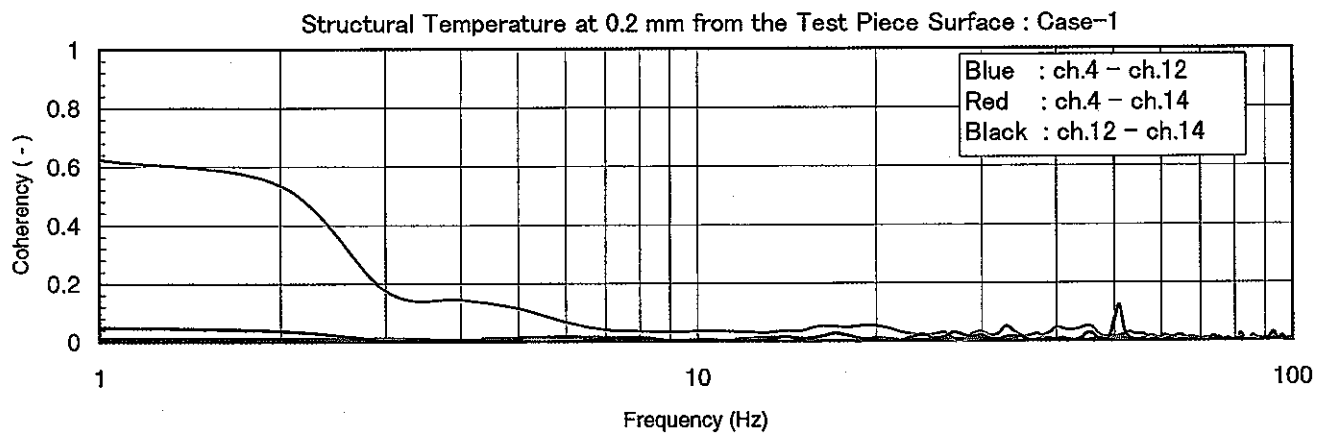


Fig. 3. 10 Comparison of Coherence Functions for Case-1 (2/2)

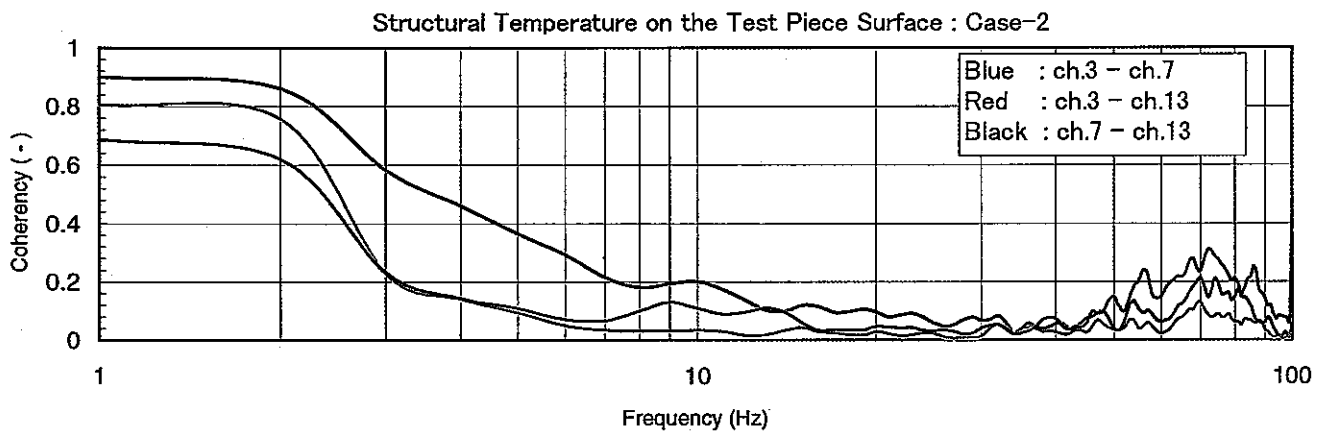
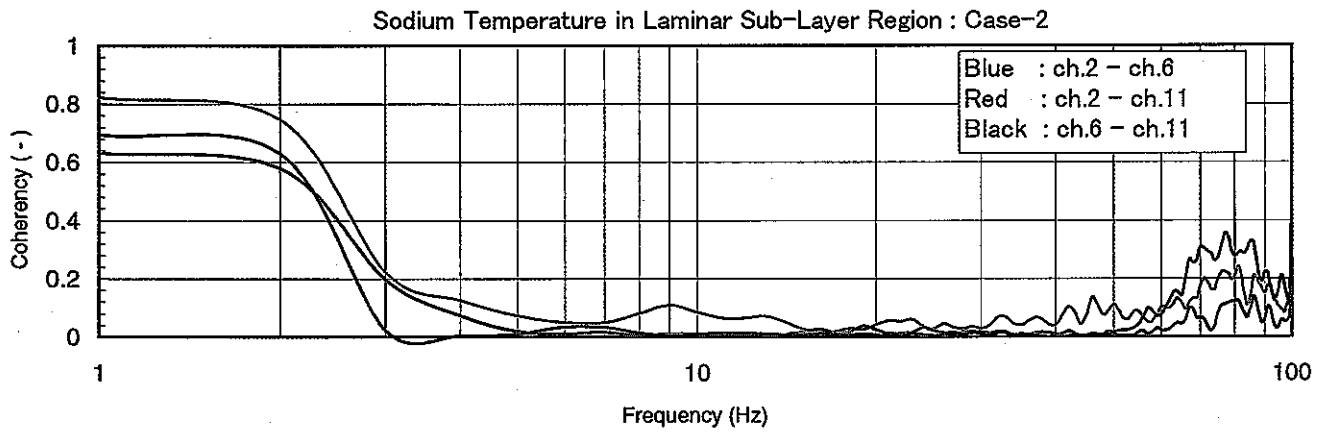
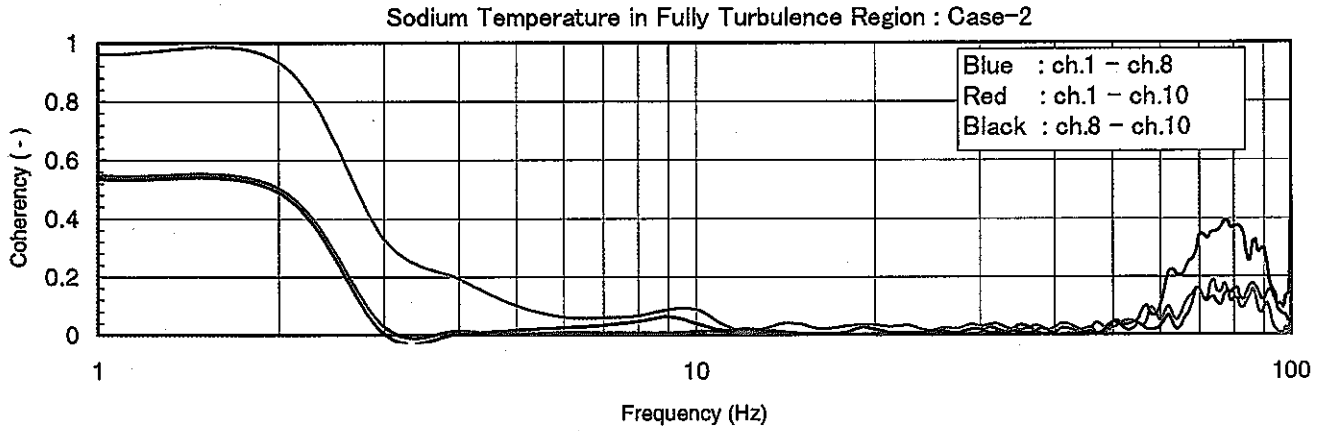


Fig. 3. 11 Comparison of Coherence Functions for Case-2 (1/2)

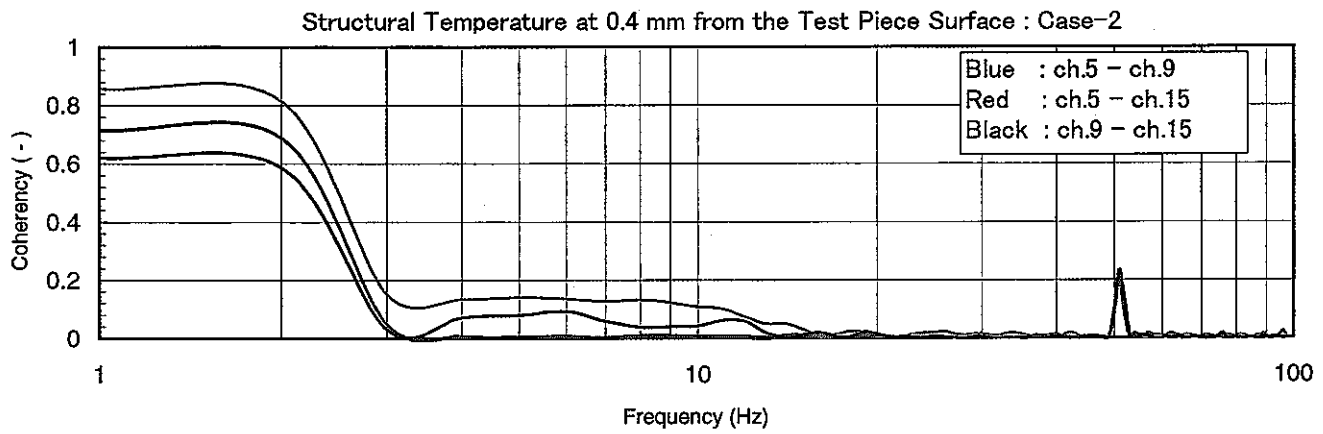
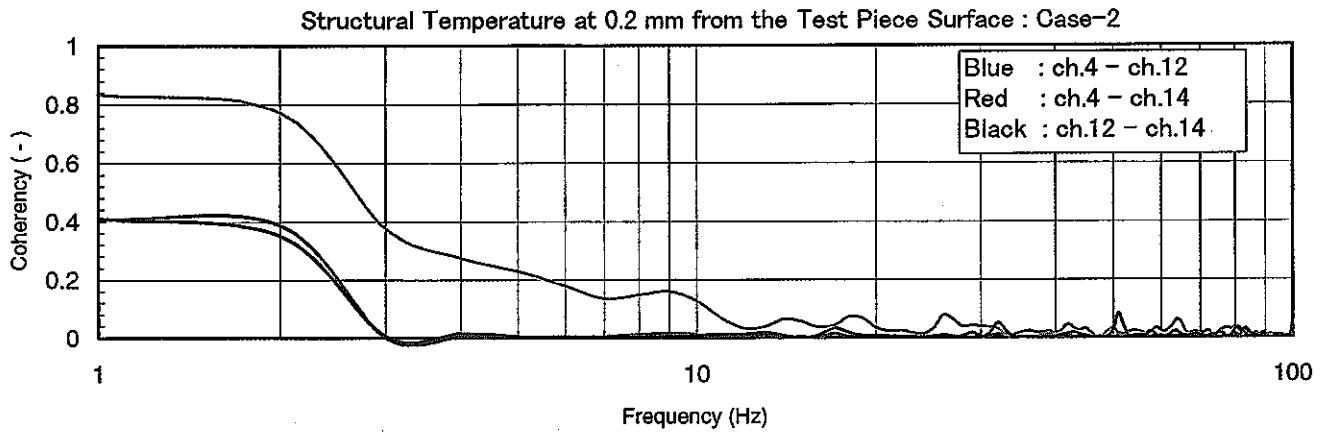


Fig. 3. 11 Comparison of Coherence Functions for Case-2 (2/2)

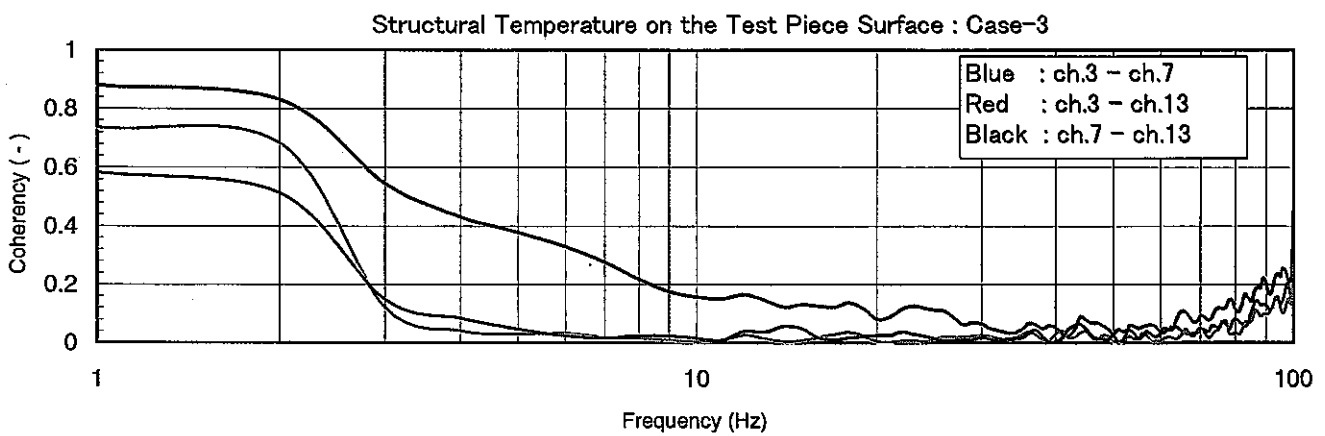
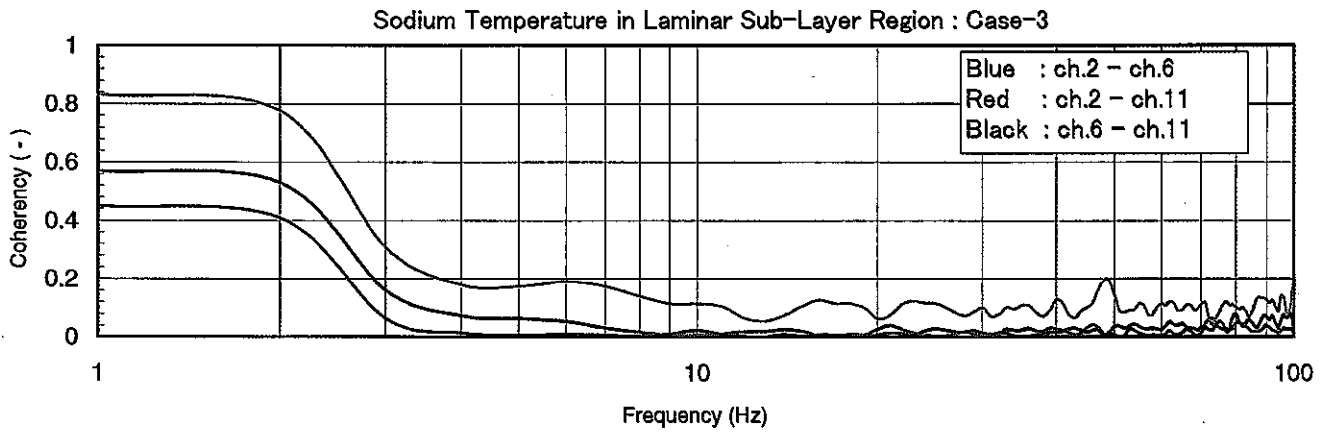
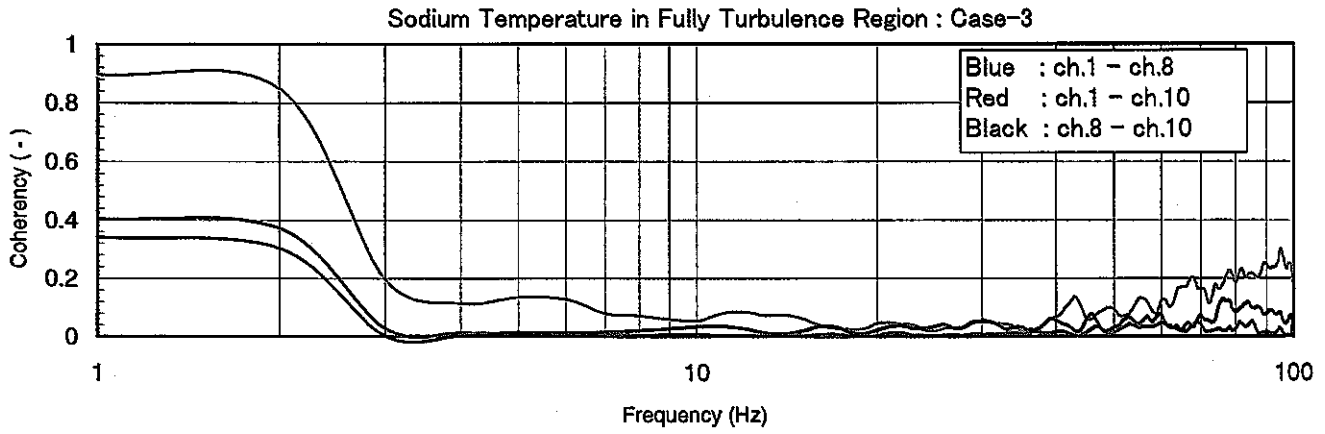


Fig. 3. 12 Comparison of Coherence Functions for Case-3 (1/2)

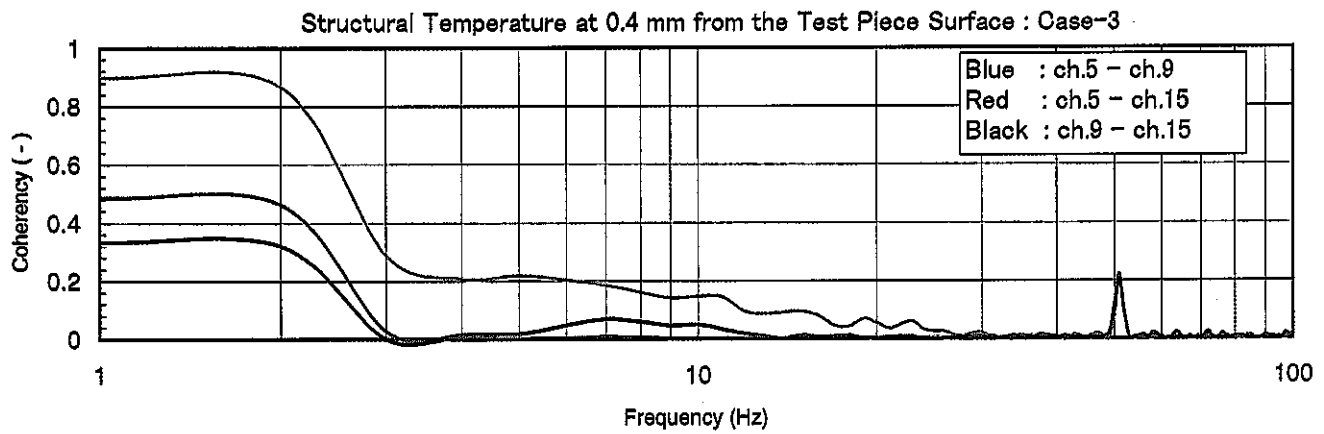
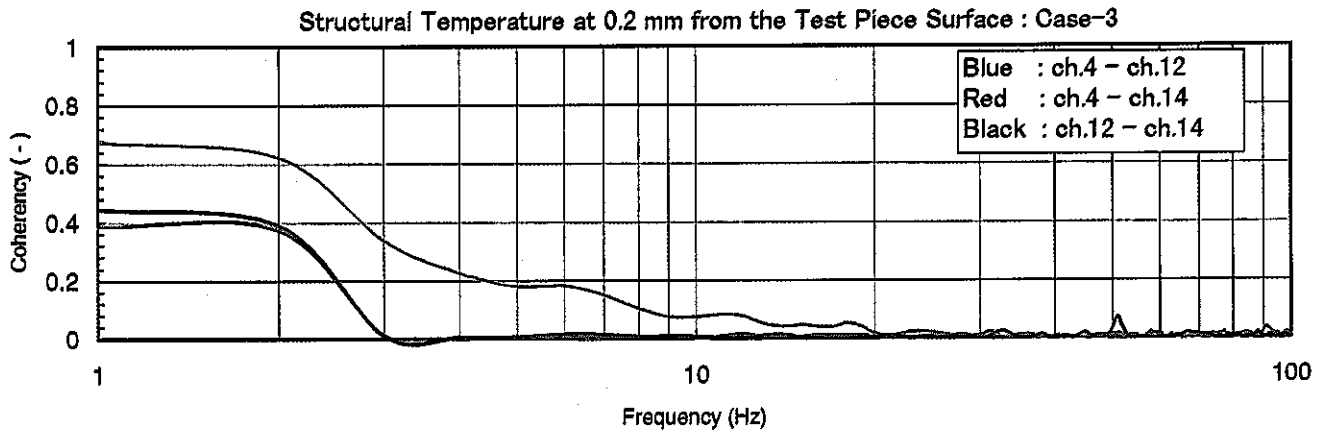


Fig. 3. 12 Comparison of Coherence Functions for Case-3 (2/2)