

# 冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (XII)

— 一定常不規則温度ゆらぎ挙動の周波数領域における検討 —

1998年3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。

〒311-1393 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 311-1393, Japan.

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation)1998

## 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 -

村松 壽晴\*

#### 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こし、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衝突噴流ナトリウム実験（TIFFSS-I）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領域での検討を行った。得られた結果は、次の通りである。

#### [ 自己パワースペクトル密度関数 ]

- (1) 流体境界層外から試験片内部に向かうに従い、高周波成分の寄与が大きく低下する。これは、境界層および流体から試験片への熱伝達による高周波成分に対するフィルタ作用によるものである。
- (2) ノズル流速に対する依存性は、境界層外温度、境界層内温度および試験片表面温度で観察される。ただしこの依存性は、20 Hz 以上の周波数帯についてのみ顕著である。これはノズル流速による乱流強度（乱流微細渦スケールのパワー）の上昇によるものと考えられる。

#### [ コヒーレンス関数 ]

- (1) 流体境界層内温度同士のコヒーレンシは極めて小さい。これは流体境界層外温度が、乱流現象の本質である不規則挙動に支配されていることを示唆している。
- (2) 異なる種類の熱電対間でのコヒーレンシは、近距離にあるもの同士についてのみ高い値を示す。しかしながら、有意なコヒーレンシ値を示す周波数帯は、比較的低周波成分のみに限られる。

#### [ 伝達関数 ]

- (1) 流体境界層外から流体境界層内、および流体境界層内から試験片表面への伝達関数では、3 - 10 Hz 近傍にゲインの高い領域が生じる。なお、20 Hz 以上の周波数領域では、非線形特性が卓越するようになるため、伝達関数に連続性が無くなる。
- (2) 伝達関数はノズル流速の変化に対して大きな変化を示さず、普遍的表示式の導出に関する見通しを得た。

---

\*：大洗工学センター基盤技術開発部熱流体技術開発室

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

- Investigation of Stationary Random Temperature Fluctuation Characteristics in Frequency Domain -

Toshiharu MURAMATSU\*

Abstract

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

In this study, frequency characteristics of stationary random temperature fluctuations were investigated by the use of the time-series data from parallel impinging jet experiments, TIFFSS-I. From the investigations, the following results have been obtained:

[ Auto-Power Spectral Density Functions ]

- (1) Higher frequency components were decreased drastically with the close to the test piece surface, due to the presence of filtering effect by the laminar sub-layer and heat transfer to the surface from coolant.
- (2) Dependence to the nozzle velocities was observed at the outside and inside positions of the laminar sub-layer region. It was due to the increasing of turbulent intensities with increase of the nozzle velocities.

[ Coherence Functions ]

- (1) Coherency between outer temperatures of the laminar sub-layer was very small. One of the main reasons is that the outer temperatures of the laminar sub-layer were dominated by the stationary random phenomena of turbulence flows.
- (2) It was confirmed that the coherency between immediate positions of different thermocouples had relatively higher values.

[ Transfer Functions ]

- (1) The dominant frequency band of the gain was about 3 - 10 Hz for the transfer functions of the outer position to the inner position of the laminar sub-layer, and of the inner position of the laminar sub-layer to the test piece surface.
- (2) There was no dependence of the transfer function to the nozzle velocities. Therefore it was concluded that universal description was possible.

---

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

冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (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 -

目 次

第 1 章 緒 言

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

2. 1 試験装置および試験条件

2. 2 試験結果

2. 2. 1 温度ゆらぎ時系列特性

2. 2. 2 温度ゆらぎ強度分布特性

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

3. 2 温度ゆらぎ挙動のコヒーレンス関数

3. 3 温度ゆらぎ挙動の伝達関数

第 4 章 結 言

参考文献

## List of Figures

- Fig. 2. 1 Apparatus of the TIFFSS-I Experiment  
Fig. 2. 2 Thermocouple Arrangements to the Test Piece  
Fig. 2. 3 Specifications of the Thermocouples  
Fig. 2. 4 Temperature Transients for Case-1  
Fig. 2. 5 Temperature Transients for Case-2  
Fig. 2. 6 Temperature Transients for Case-3  
Fig. 2. 7 Distributions of Temperature Fluctuation Intensity
- Fig. 3. 1 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-1  
Fig. 3. 2 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-2  
Fig. 3. 3 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-3  
Fig. 3. 4 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions  
Fig. 3. 5 Cut-Off Frequency Characteristics at Various Thermocouple Positions  
Fig. 3. 6 Coherence Functions for Case-1  
Fig. 3. 7 Coherence Functions for Case-2  
Fig. 3. 8 Coherence Functions for Case-3  
Fig. 3. 9 Comparison of Coherence Functions for Case-1  
Fig. 3. 10 Comparison of Coherence Functions for Case-2  
Fig. 3. 11 Comparison of Coherence Functions for Case-3  
Fig. 3. 12 Comparison of Coherence Functions for Case-1  
Fig. 3. 13 Comparison of Coherence Functions for Case-2  
Fig. 3. 14 Comparison of Coherence Functions for Case-3  
Fig. 3. 15 Comparison of Transfer Functions from Ch. 8 to Ch. 7  
Fig. 3. 16 Comparison of Transfer Functions from Ch. 5 to Ch. 6

## 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) 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 [7]。

本報では、上記衝突平行噴流ナトリウム実験 (TIFFSS-I) 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詳細な検討を行う。

## 第2章 流体-構造非定常熱的応答基礎ナトリウム試験 TIFSS-I 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、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ノズル (内寸: 5 x 9 mm) から流出させ、この下流側 35 mm 位置に置かれた試験片下面に衝突させる構造となっている。ナトリウム液面は、試験片上面より上側 35 mm 位置に設定し、試験体内部温度が平均温度 (300 °C) となるように保持された。また試験片下面領域は、ノズルから流出した高低温噴流の混合領域となるように設定された。

試験片下面には、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 16 本取り付けられた。ノズルと熱電対との水平位置関係を Fig. 2.2 に、また試験片に設置した熱電対の仕様を Fig. 2.3 に示す。各熱電対は、試験片中央部を中心位置として 2 mm の正方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、16 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 (m/s)	Hotter Side Nozzle	1.0	1.5	2.0
	Colder Side Nozzle	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、試験片の水平方向中心位置に設置した Ch. 8 (流体境界層外) の温度は、平均温度 300 °C を中心としてゆらいでおり、この結果から試験片中心位置とノズル中心位置とが合致していることが推定される。また、各流速条件における結果では、温度ゆらぎ振幅は Ch. 8 が最も大きく、次いで Ch. 7 (流体境界層内) となっている。一方、ノズル中央列に位置する Ch. 9 (試験片内深さ 0.2 mm) は、Ch. 7 および Ch. 8 の流体中温度に比べてゆらぎ振幅が小さなものとなっている。なお、Chs. 8, 7 および 9 の温度ゆらぎ振幅は、ノズル流速の増加に伴って増大している様子が分かる。

高温側ノズルに近い Ch. 5 (流体境界層内) および Ch. 6 (試験片表面) の温度ゆらぎは、平均温度 300 °C よりも高温側の値を示し、低温側ノズルに近い Ch. 10 (流体境界層外) および Ch. 11 (試験片表面) の御おは、平均温度よりも低温側でゆらいでいることが分かる。なお、Ch. 5 (流体境界層内) および Ch. 6 (試験片表面) は同列上に位置しているものの、Ch. 6 の温度ゆらぎ振幅は小さく、ノズル中心列からわずか 2 mm 離れた位置では温度ゆらぎの変動が小さくなっていることが分かる。このような傾向は、Ch. 6 と反対側にあつて、ノズル中心列上から 2 mm 離れた Ch. 11 (試験片表面) においても見る事ができる。なお、流体中に位置する Ch. 5 および Ch. 10 では、流速の増加に伴って温度ゆらぎ振幅が増大している様子を見る事ができる。一方、試験片の水平方向中心位置から離れた場所位置にある Chs. 1, 2, 3, 4, 13, 14, 15 および 16 での温度ゆらぎ振幅は、ノズル流速によらず極めて小さいことが理解できる。

### 2.2.2 温度ゆらぎ強度分布特性

Fig. 2.7 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 (°C として表示) の空間分布特性を示す。

$$\overline{\theta_{ch}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (T_{sch} - \overline{T_{ch}})^2} \quad (2.1)$$

$$\overline{T_{ch}} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N T_{sch} \quad (2.2)$$

ここで、

$\overline{T}$	: 時間平均温度
$\overline{\theta_{ch}}$	: 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。

結果より分かるように、各流速条件下における温度ゆらぎ強度は、ノズル中央列に位置する Ch. 8 (流体境界層外) が最も大きく (6.3 °C - 7.5 °C の範囲内の値)、次いで Ch. 7 (流体境界層内) がこれに続く (3.0 °C - 4.4 °C の範囲内の値)。この 2 点における温度ゆらぎ強度は、ノズル流速の増加に従って増大しているこ

とが分かる。Ch. 2 (流体境界層外)、Ch. 5 (流体境界層内) およびCh. 10 (流体境界層外) での温度ゆらぎ強度は、 $1.0^{\circ}\text{C}$  -  $2.0^{\circ}\text{C}$  の値をとっている。なお、ノズル中央列に位置する Ch. 9 を含めたその他の位置での温度ゆらぎ強度は、そのほとんどが  $1.0^{\circ}\text{C}$  以下の小さな値を示している。

## 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. 2, 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、試験片の横方向中心列上に位置する Ch. 8 のパワーが最も大きく、Chs. 2 および 10 でのパワーはこれよりも 1 桁以上小さなものとなっている。なお、20 Hz を越える高周波帯では、それらの差異が縮小してきている様子が分かる。これは次のように解釈することができる。すなわち、試験片の横方向中心列上では、両ノズルからの噴流が相互作用することによって比較的低周波の温度ゆらぎ成分が生じるものの、これが試験片下面壁に沿って下流側に輸送される過程では、この帯域のパワーが大きく減衰するとともに乱流渦が微細化(乱流運動エネルギーのカスケード輸送)するためであると考えられる。

流体境界層内位置 (Chs. 5, 7 および 14) における比較でも同様に、試験片の横方向中心列上に位置する Ch. 7 のパワーが最も大きく、Chs. 5 および 14 でのパワーは Ch. 7 でのそれよりも 1 桁以上小さなものとなっている。なお、20 Hz を越える高周波帯における Ch. 間での差異は、流体境界層外位置でのものより更に縮小していることが特徴として挙げられる。これは、前記の温度ゆらぎ輸送過程における周波数スペクトル分布の変化に加え、境界層を温度ゆらぎが通過することによって、高周波温度ゆらぎ成分が相対的に大きく減衰(境界層内では乱流(高周波)拡散効果が減少し、替わって分子(低周波)拡散効果が相対的に卓越)したためであると解釈できる。

試験片表面位置 (Chs. 6, 11 および 13) での比較では、2 Hz 以上の周波数帯のパワーが更に減衰していると同時に、Ch. 間での差異も縮小している様子を見ることができる。この主原因も前記と同様に、境界層を通過することで、分子拡散効果卓越による一種の(ローパス)フィルターが作用した結果であると考えられる。なお、Ch. 13 位置では、50 Hz 近傍でのパワーがノイズレベル程度( $10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^2/\text{s}$ )にまで減衰していることが分かる。

試験片内 0.2 mm 位置 (Chs. 9 および 16)、試験片内 0.3 mm 位置 (Chs. 3, 4, 12 および 15) および試験片内 0.5 mm 位置 (Ch. 1) での比較では、2 Hz 以上の周波数帯のパワー低下が顕著であり、また前記ノイズレベルに到達するまでの周波数が試験片内奥に向かうにしたがって低下する様子がわかる。これは、試験片内における温度ゆらぎの輸送過程が固体熱伝導により支配され、この領域においても高周波温度ゆらぎ成分を減衰させるフィルタ作用が存在していることを裏付けている。

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パワースペクトル密度を Fig. 3. 4 に比較する。

[ 流体境界層外温度; Chs. 2, 8 および 10 ]

- ・ 20 Hz 以上の高周波帯で、ノズル流速の増加に伴うパワーの増大傾向が見られる。これは、ノズル流速の増加に直接的に関連する乱流強度 (微細渦スケールのパワー) の上昇である。
- ・ 2 Hz - 20 Hz の中間周波数帯では、ノズル流速に対する顕著な依存性は見られない。
- ・ 2 Hz 以下の低周波帯では、Ch. 8 以外の位置 (Chs. 2 および 10) においてノズル流速によるパワーの差異が見られる。ただし、ノズル流速の大小関係に明瞭に依存したものではない。これは、試験片下面壁に沿って下流側に輸送される温度ゆらぎがノズルからの噴流の影響を受け、新たな低周波数成分が発生したためであると考えられる。これは、試験片の水平方向中心軸から大きく離れた熱電対位置でのみ、この傾向が見られることからの推定である。

[ 流体境界層内温度; Chs. 5, 7 および 14 ]

- ・ 流体境界層外温度の傾向と同様に、20 Hz 以上の高周波帯においてノズル流速の増加に伴うパワーの増大傾向が見られる。
- ・ 流体境界層外温度の傾向とは異なり、2 Hz - 20 Hz の中間周波数帯で、ノズル流速の増加に伴うパワーの増大傾向が見られる。これは、境界層内において乱流 (高周波) 拡散効果が減少し、替わって分子 (低周波) 拡散効果が相対的に卓越し始めているためである。
- ・ 2 Hz 以下の低周波帯では、Ch. 14 位置のみでノズル流速によるパワーの差異が見られる。

[ 試験片表面温度; Chs. 6, 11 および 13 ]

- ・ 周波数スペクトル全体について、ノズル流速の増加に対する若干の依存性 (スライド上昇) が見られる。これは、温度ゆらぎが境界層を通過することで周波数帯全般に亘るフィルタ作用を受けた結果であると解釈できる。

[ 試験片内 0.2 mm および 0.3 mm 位置温度; Chs. 3, 4, 9, 12, 15 および 16 ]

- ・ 周波数スペクトル全体について、ノズル流速の増加に対する極めて小さな依存性が見られる。ただし、周波数スペクトル分布の形状は、2 Hz 以下を除き概ね相似形である。これは、境界層の通過および試験片内熱伝導によるフィルタ作用によって、高周波帯 (> 2.0 Hz) が減衰を受けた結果である。

[ 試験片内 0.5 mm 位置温度; Ch. 1 ]

- ・ 2 Hz 以下の周波数帯において若干のノズル流速依存性が残るものの、周波数スペクトル全体についての依存性は無視できる程度である。境界層通過および試験片内熱伝導によるフィルタ作用をより強く受けたものとなっている。

各熱電対位置における自己パワースペクトル密度 (Figs. 3. 4 参照) につき、当該各パワー値が  $10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^2/\text{s}$  となる周波数 (ノイズレベルに達する切断周波数として定義) を算出した。この結果を Fig. 3. 5 に示す。なお、自己パワースペクトル密度の値が  $10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^2/\text{s}$  にまで減少していない熱電対位置 (流体境界層外温度 (Chs. 2, 8 および 10)、流体境界層内温度 (Chs. 5, 7 および 14) および試験片表面温度 (Chs. 6, 11 および 13)) につ

いては、指数近似曲線により外挿処理を行った。結果より分かるように、熱電対の種類およびその空間位置によって切断周波数が大きく変化すると同時に、ノズル流速にも依存して切断周波数が変化している。まず、ノズル流速に対する依存性に関しては、ノズル流速が増大するに従い、全般的に切断周波数が増加している。この増加傾向は、流体境界層外温度が最も大きく、試験片内部に向かって大きく減少する。これは、境界層外温度のゆらぎ周波数がノズル流速から決まる乱流強度（あるいはレイノルズ数）に強く依存していることを示唆しており、一方試験片内部では境界層などの存在によるフィルタ作用により、ノズル流速などの熱流体的パラメータの影響が除去された結果であると解釈できる。なお、試験片内 0.3 mm 位置の温度を計測する Chs. 3 および 4 (B タイプ熱電対) と Chs. 12 および 15 (A タイプ熱電対) の切断周波数に関する有意な差異は、温度ゆらぎが熱電対温接点に到達するまでの熱抵抗差によるものである。すなわち、A タイプ熱電対では、温度ゆらぎが熱電対シースを経て直接温接点に到達するのに対して、B タイプ熱電対では試験片材料である SUS 304 から熱電対シースを経て温接点に到達するため、SUS 304 と熱電対シース間での熱抵抗分により切断周波数が低下したものと考えられる。

一方、同種類の熱電対の内、空間位置の違いによる切断周波数の差異では、ノズル中央列から遠距離の熱電対ほど切断周波数が高い値を取る傾向が見られ、この傾向は流体中から試験片表面までの熱電対位置で顕著である。これは、流体温度ゆらぎが試験片下面に沿って下流側に輸送される過程で、試験片壁面による剪断応力によって乱れが流体中に絶えず供給されることにより、切断周波数が上昇した結果であると考えられることができる。

### 3.2 温度ゆらぎ挙動のコヒーレンス関数

Figs. 3. 6 - 3. 8 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 (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)

$$\gamma^2(f) = \frac{P_{yy}(f)}{P_{zz}(f)} \quad (3.3)$$

$$P_{yy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i 2 \pi f \tau) R_{yy}(\tau) d\tau \quad (i^2 = -1) \quad (3.4)$$

$$P_{zz}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i 2 \pi f \tau) R_{zz}(\tau) d\tau \quad (i^2 = -1) \quad (3.5)$$

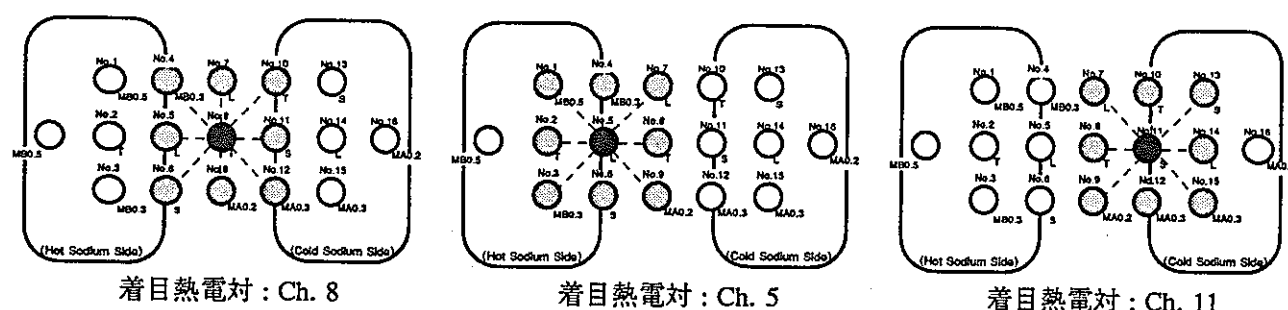
$$= P_{yy}(f) + P_{nn}(f) \quad (3.6) \text{ 注)}$$

の比較を示す。まず、流体境界層外温度 (Chs. 2, 8 および 10) 同士のコヒーレンシの比較では、Case-1 条件で若干高いコヒーレンシ値 ( $\sim 0.3$ ) を示す周波数帯が存在するものの、全般的にはこれら熱電対間での関連性は極めて小さい。これは流体境界層外での熱流動状況が強い乱流場にあつて、乱流現象の本質である不規則挙動に温度ゆらぎ挙動が覆い隠されているためであると解釈できる。一方、流体境界層内温度 (Chs. 5, 7 および 14) 同士の比較では、熱電対間距離が短いもの (例えば、Ch. 5 - Ch. 7 間) に限って、低周波帯側

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

で比較的高いコヒーレンシが見られるようになる。これは温度ゆらぎが境界層中に入って、乱流不規則挙動の影響が低減したためであると考えられる。さらに、試験片表面温度 (Chs. 6, 11 および 13) 同士のコヒーレンシでは、熱電対間距離が短いもの (例えば、Ch. 11 - Ch. 13 間) について、30 Hz 程度までの周波数帯で高いコヒーレンシ値を示すようになる。一方、試験片内 0.2 mm および 0.3 mm 位置温度 (Chs. 3, 4, 9, 12, 15 および 16) 同士の比較では、Ch. 12 - Ch. 15 間でのコヒーレンシを除き、低周波帯のみで強い関連性を示すものとなる。

次に、Ch. 8 (流体境界層外温度), Ch. 5 (流体境界層内温度) および Ch. 11 (試験片表面温度) とこれらを取り囲む熱電対間でのコヒーレンス関数を、各流速条件について Figs. 3. 9 - 3. 11 に比較する。具体的な検討対象点は以下の通りである。



まず、流体境界層外温度 Ch. 8 と周囲熱電対温度 (Chs. 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11 および 12) とのコヒーレンシの比較では、流体境界層外温度である Ch. 10 との関係に限り、周波数全体に亘って低めのコヒーレンシ値を示す。この原因は前記のように、両温度ゆらぎ挙動が乱流不規則挙動の影響を強く受け、両者が独立且つ不規則に変動しているためである。なお、Ch. 8 とその他の周囲熱電対間のコヒーレンシは、周波数帯により若干の変動はあるものの、概ね Ch. 8 の入力線形部分との関連性を持って変動していることが分かる。

次に流体境界層内温度 Ch. 5 と周囲熱電対温度 (Chs. 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 および 9) との関連性では、流体温度 (Chs. 2, 6, 7 および 8) との関連性は周波数全体に亘って大きく、また試験片内温度 (Chs. 1, 3, 4 および 9) とも低周波数帯について大きなコヒーレンシを示している。この内、Ch. 5 から異なる距離にある同種類の熱電対 (Chs. 3 および 4; 試験片内 0.3 mm 位置温度) の比較では、Ch. 5 からの距離が短い Ch. 4 (2 mm) の方が Ch. 3 ( $2.83 \text{ mm} (= (2^2 + 2^2)^{0.5})$ ) よりも周波数全域に亘って高いコヒーレンシを示している。

試験片表面温度 Ch. 11 に着目した場合も同様に、流体温度 (Ch. 7, 8, 10, 13 および 14) とのコヒーレンシは周波数全域に亘って大きく、試験片内温度 (Ch. 9, 12 および 15) との関連性は低周波数帯についてのみ大きくなっている。また、Ch. 11 から距離の異なる同種類熱電対 (Ch. 7 および Ch. 14; 流体境界層内温度と Ch. 12 および Ch. 15; 試験片内 0.3 mm 位置温度) の比較についても同様に、Ch. 11 からの距離が短い方が高いコヒーレンシを示している。

参考として、上記着目熱電対と、この位置から横方向に 1 列隔てた熱電対群とのコヒーレンス関数を Figs. 3. 12 - 3. 14 に比較する。結果より分かるように、何れの熱電対間についても周波数全域に亘って低めのコヒーレンシを示している。

以上のコヒーレンス関数の傾向より、近距離にある異なる熱電対信号を用いて、ここでの伝達関数を比較的高い精度で求めることが可能であると言える。

### 3.3 温度ゆらぎ挙動の伝達関数

近距離にある異なる熱電対信号間のシステム応答が線形系であると仮定し、式 (3. 7) を用いて伝達関数 (複素周波数応答関数) を計算した。ここで  $h(t)$  は、インパルス応答関数である。

$$H(\omega) = \int_0^{\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \quad \left( = \sqrt{\frac{p_{zz}(\omega)}{p_{yy}(\omega)}} \right) \quad (3. 7)$$

流体境界層外温度 (Ch. 8 熱電対) から境界層内温度 (Ch. 7 熱電対) への伝達関数および境界層内温度 (Ch. 5 熱電対) から試験片表面温度 (Ch. 6 熱電対) への伝達関数を、それぞれ Fig. 3. 15 および Fig. 3. 16 に示す。まず、流体境界層外温度から流体境界層内温度へ伝達関数の内、ゲイン要素の比較では、3 Hz - 10 Hz の周波数帯に比較的大きなゲイン領域が見られ、この周波数帯における減衰比が小さなものであることが分かる。ただし、1 Hz 近傍の周波数成分は、この領域で選択的な減衰が作用する結果となっている。一方、位相要素については、周波数が増加するに従い、位相遅れが顕著となる。なお、20 Hz 以上の成分では、非線形効果が卓越するようになるため、位相要素に連続性が見られなくなり、この結果は流体境界層外温度と流体境界層内温度とのコヒーレンシ値の低下領域と一致する (Figs. 3. 9 - 3. 11 参照)。以上の伝達関数の特性は、ノズル流速が変化した場合も変化しておらず、一般性を持ったものであることが推察できる。

境界層内温度から試験片表面温度への伝達関数の比較では、周波数帯域全体に亘って減衰が作用した結果となっており、ゲイン要素が全域について小さなものとなっていることが分かる。しかしながら、上記傾向と同様に、3 Hz から 10 Hz にかけて比較的ゲインの大きな領域が発生している。なお、位相要素については、周波数の増加により、位相遅れが正の値を持つようになる。これは境界層内温度が試験片表面温度の影響を強く受けていることを示唆しており、ここで熱的な連成挙動が生じていることを裏付けている。

## 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衝突噴流ナトリウム実験 (TIFFSS-I) 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領域での検討を行った。得られた結果は、次の通りである。

## 〔自己パワースペクトル密度関数〕

- (1) 流体境界層外から試験片内部に向かうに従い、高周波成分 ( $> 2.0$  Hz) の寄与が大きく低下する。これは、境界層および流体から試験片への熱伝達による高周波成分に対するフィルタ作用によるものである。
- (2) ノズル流速に対する依存性は、境界層外温度、境界層内温度および試験片表面温度で観察される。ただしこの依存性は、20 Hz 以上の周波数帯についてのみ顕著である。これはノズル流速による乱流強度(乱流微細渦スケール)の上昇によるものと考えられる。

## 〔コヒーレンス関数〕

- (1) 流体境界層内温度同士のコヒーレンシは極めて小さい。これは流体境界層外温度が、乱流現象の本質である不規則挙動に支配されていることを示唆している。
- (2) 異なる種類の熱電対間でのコヒーレンシは、近距離にあるもの同士についてのみ高い値を示す。しかしながら、有意なコヒーレンシ値を示す周波数帯は、比較的低周波成分 ( $< 10.0$  Hz) のみに限られる。

## 〔伝達関数〕

- (1) 流体境界層外から流体境界層内、および流体境界層内から試験片表面への伝達関数では、3 - 10 Hz 近傍にゲインの高い領域が生じる。なお、20 Hz 以上の周波数領域では、非線形特性が卓越するようになるため、伝達関数に連続性が無くなる。
- (2) 伝達関数はノズル流速の変化に対して大きな変化を示さず、普遍的表示式の導出に関する見通しを得た。



参考文献

- (1) 村松 壽晴、サーマルストライピング現象の数値解析に関する研究、東京工業大学、博士論文、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 LAHR 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 (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 (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).

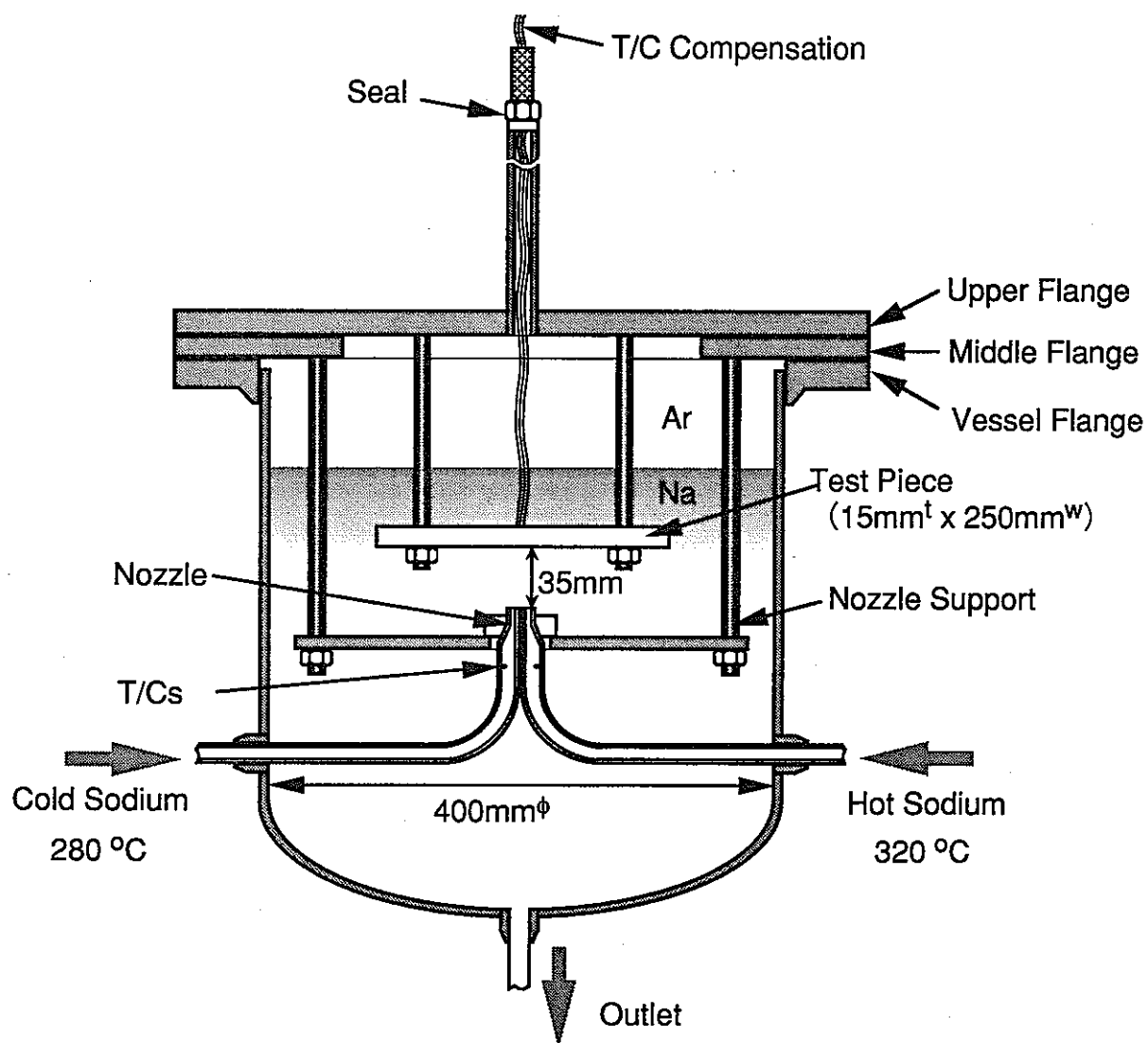


Fig. 2. 1 Apparatus of the Tiffess-I Experiment

<Notation> T : Fully Turbulence Region    MA0.2 : In-Structure (A) (Depth 0.2 mm)    MB0.3: In-Structure (B) (Depth 0.3 mm)  
 L : Laminar Sub-Layer    MA0.3 : In-Structure (A) (Depth 0.3 mm)    MB0.5: In-Structure (B) (Depth 0.5 mm)  
 S : Test Piece Surface

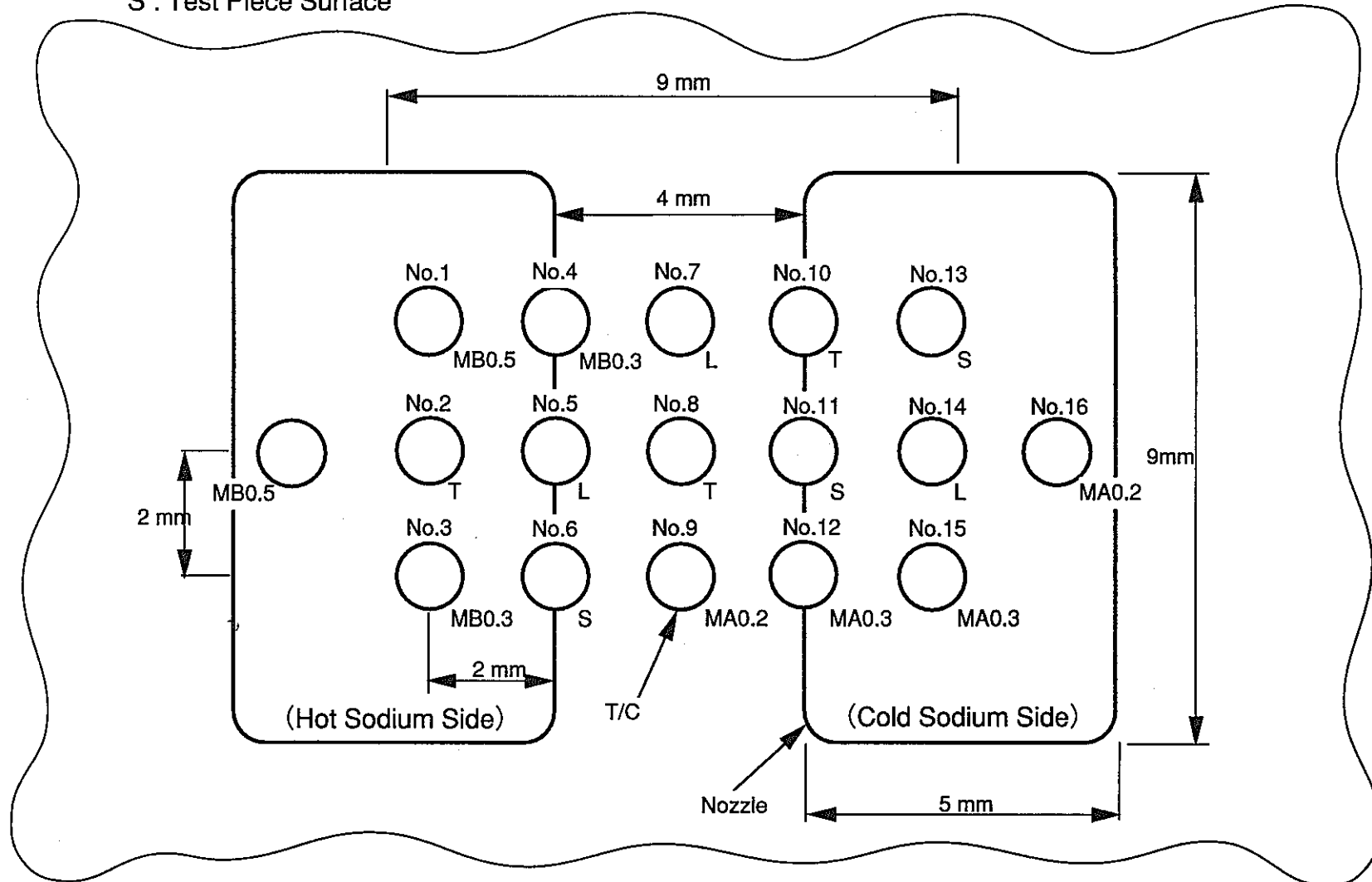


Fig. 2. 2 Thermocouple Arrangements to the Test Piece

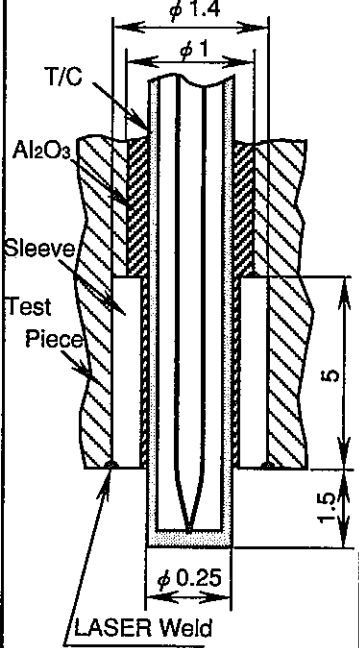
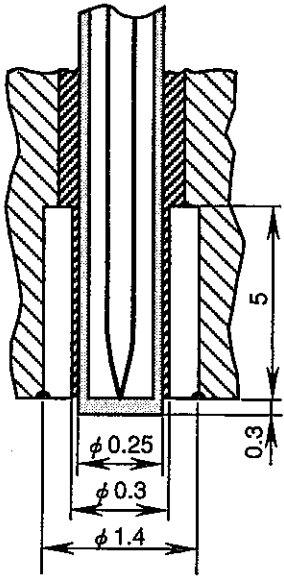
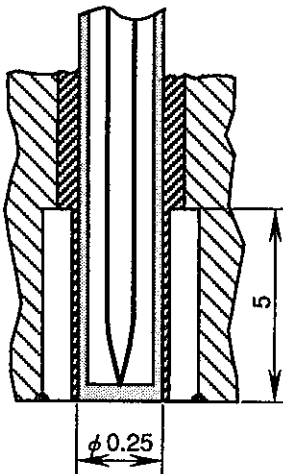
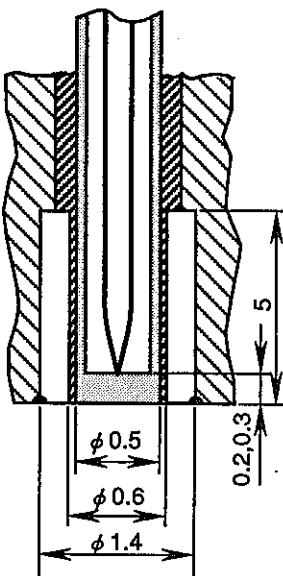
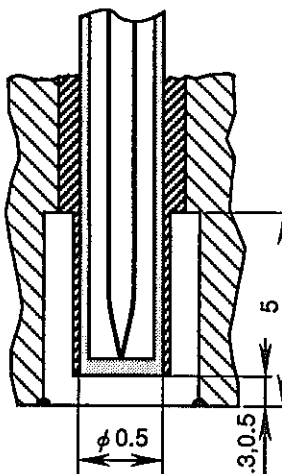
	Fully Turbulence Region (T)	Laminar Sub-Layer Region (L)	Test Piece Surface (S)	Inside of Structure (MA0.2, MA0.3)	Inside of Structure (MB0.3, MB0.5)
Attachments	 <p>Unit : mm</p>				
T/C	CA				
Dia.	0.25 mm			0.5 mm	

Fig. 2. 3 Specifications of the Thermocouples

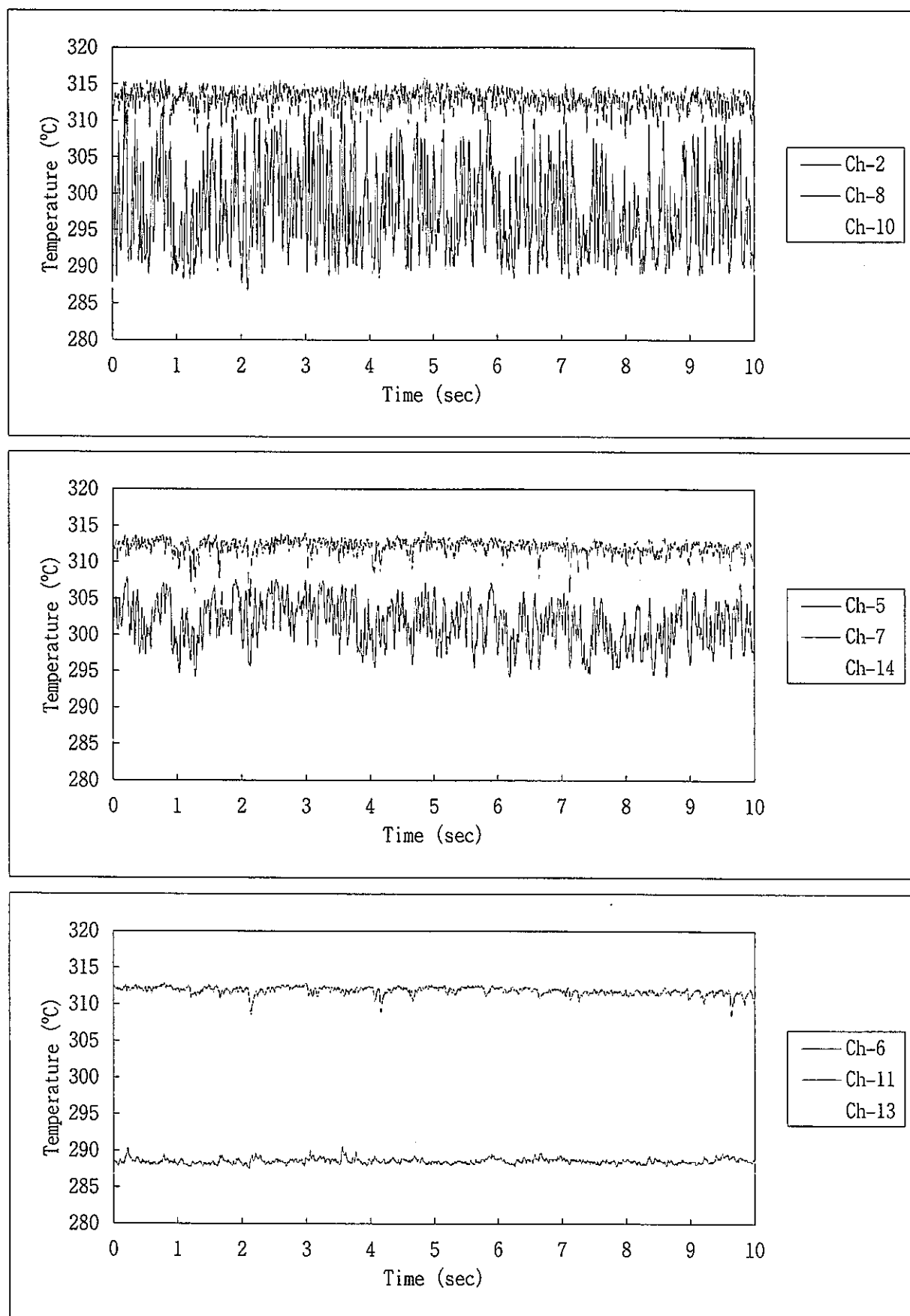


Fig. 2. 4 Temperature Transients for Case-1 (1/2)

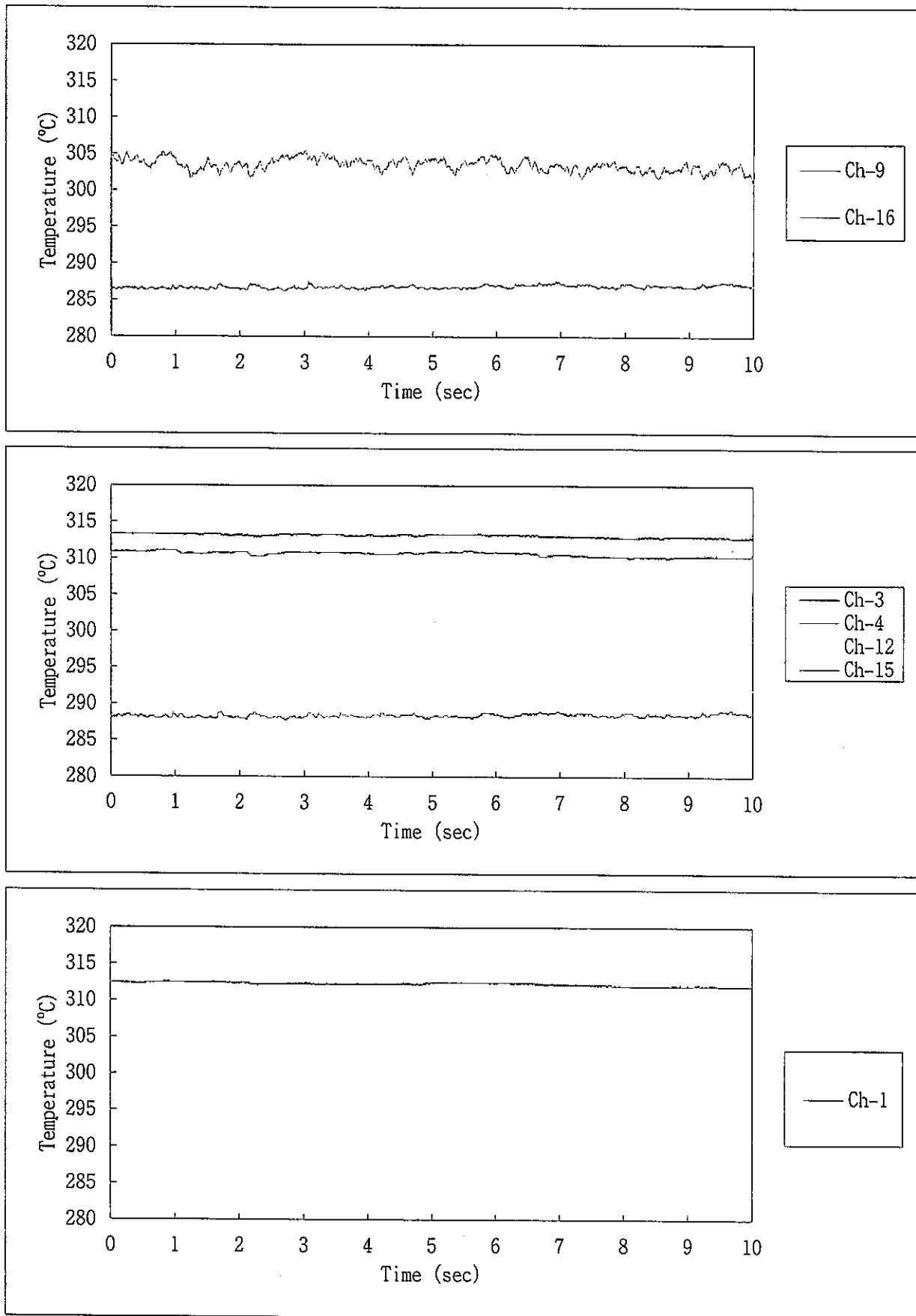


Fig. 2. 4 Temperature Transients for Case-1 (2/2)

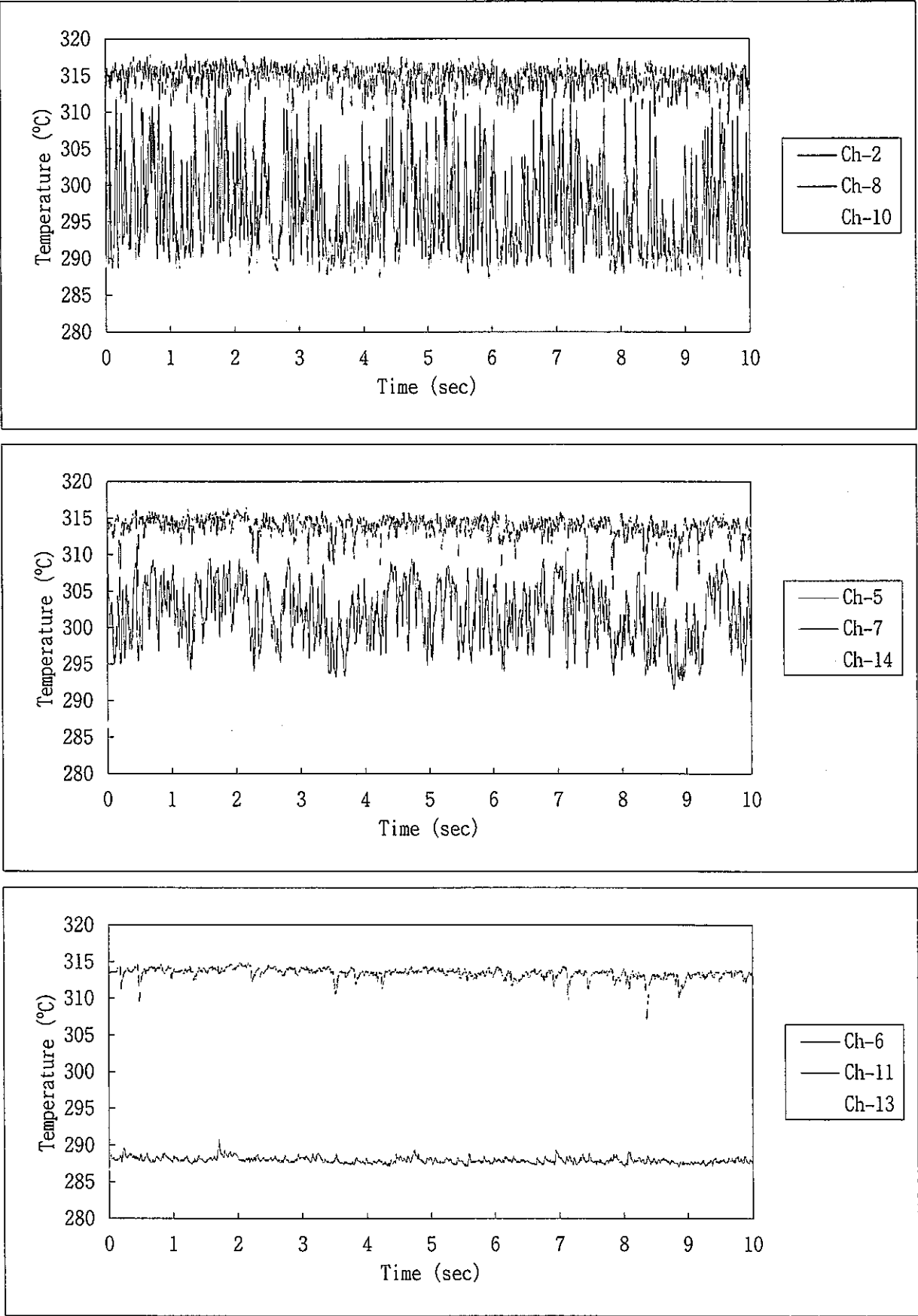


Fig. 2. 5 Temperature Transients for Case-2 (1/2)

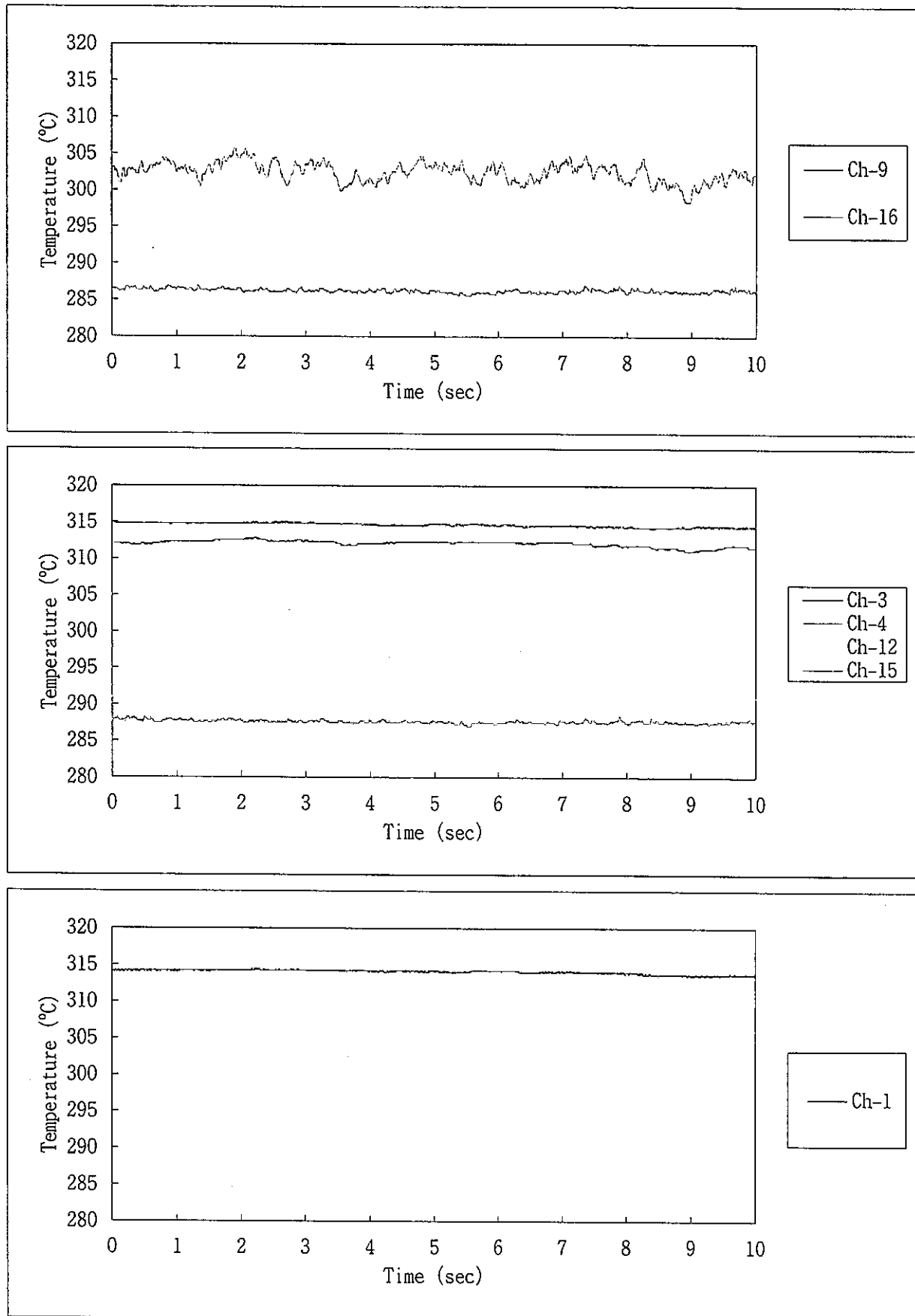


Fig. 2. 5 Temperature Transients for Case-2 (2/2)



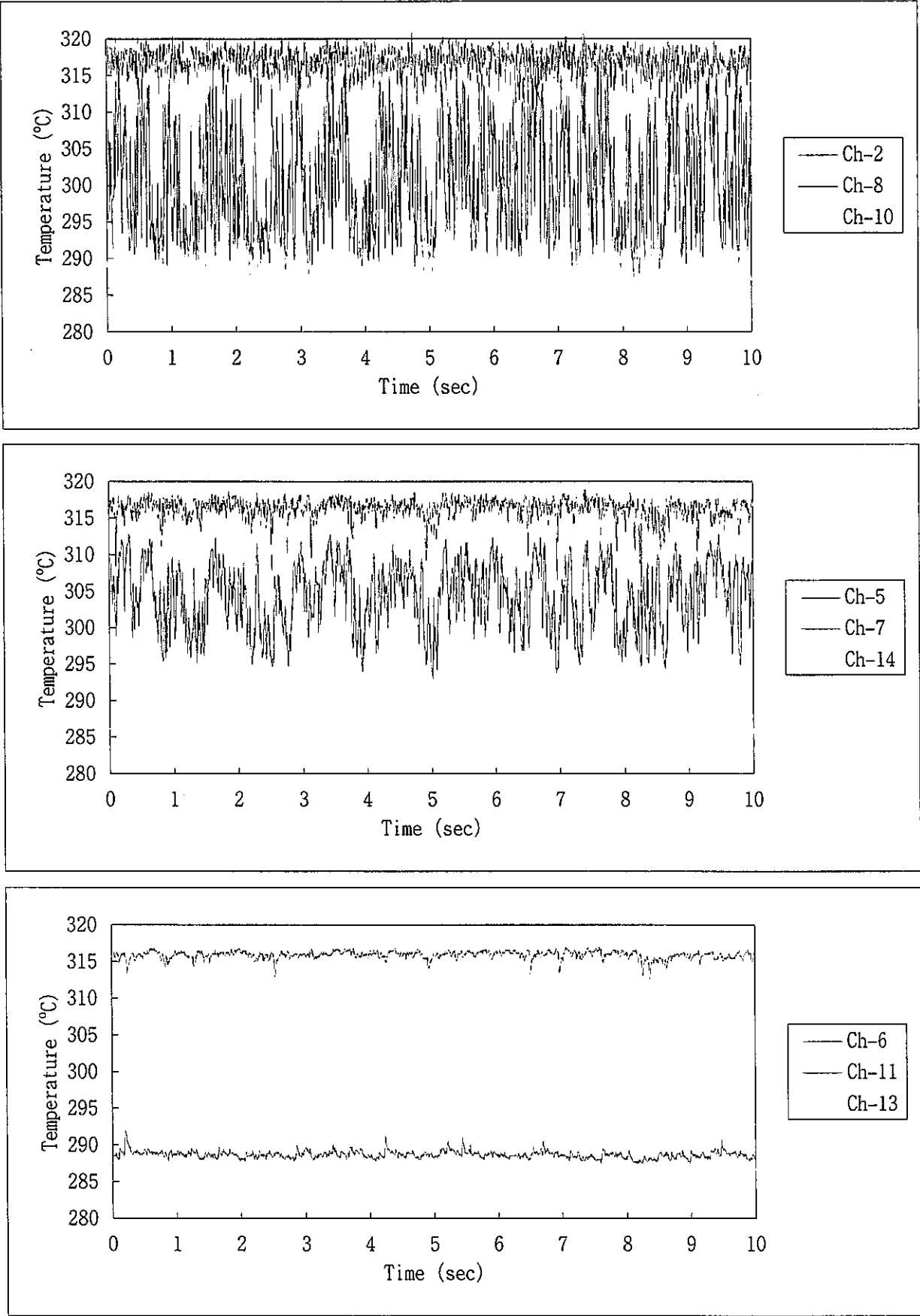


Fig. 2. 6 Temperature Transients for Case-3 (1/2)

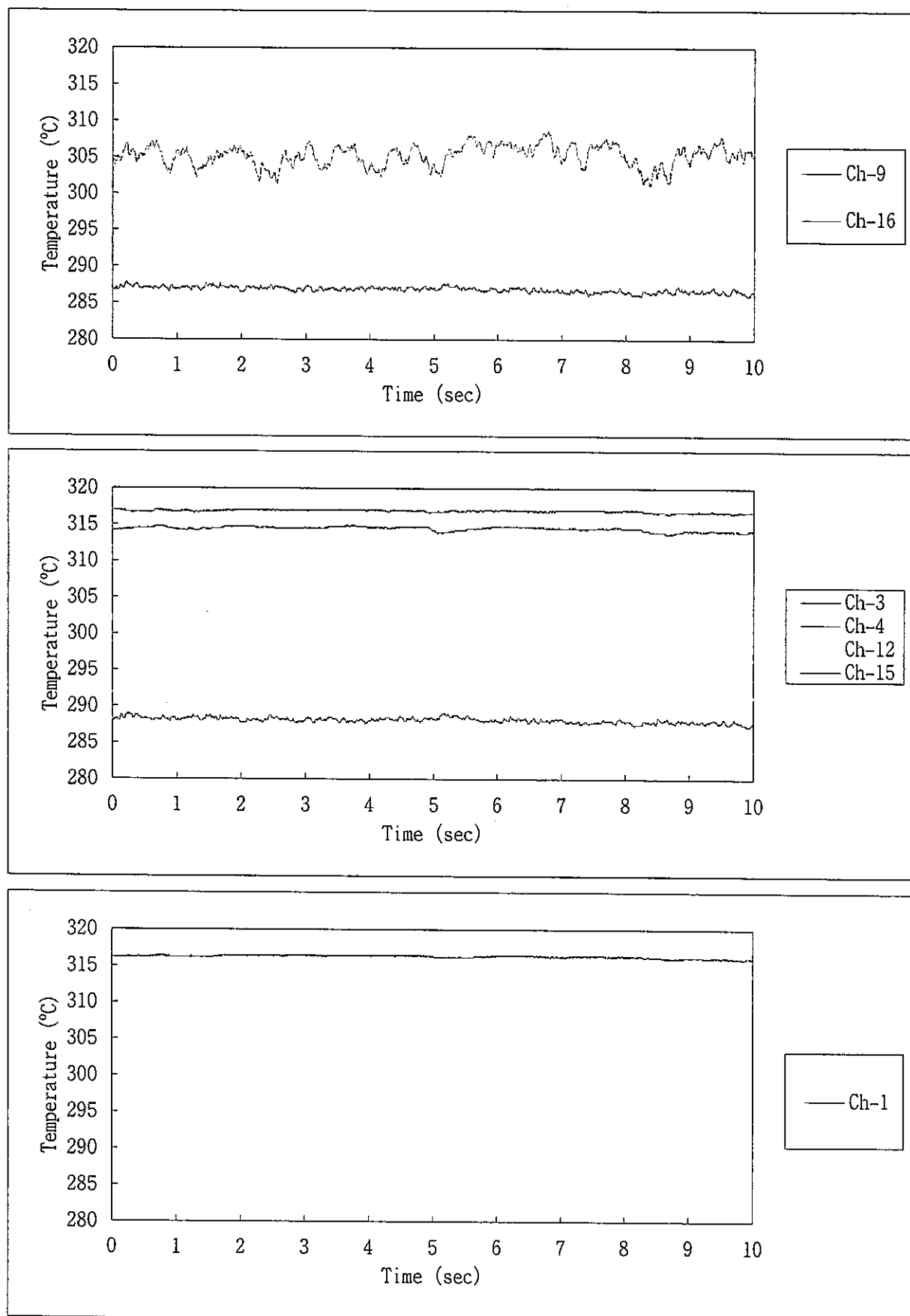
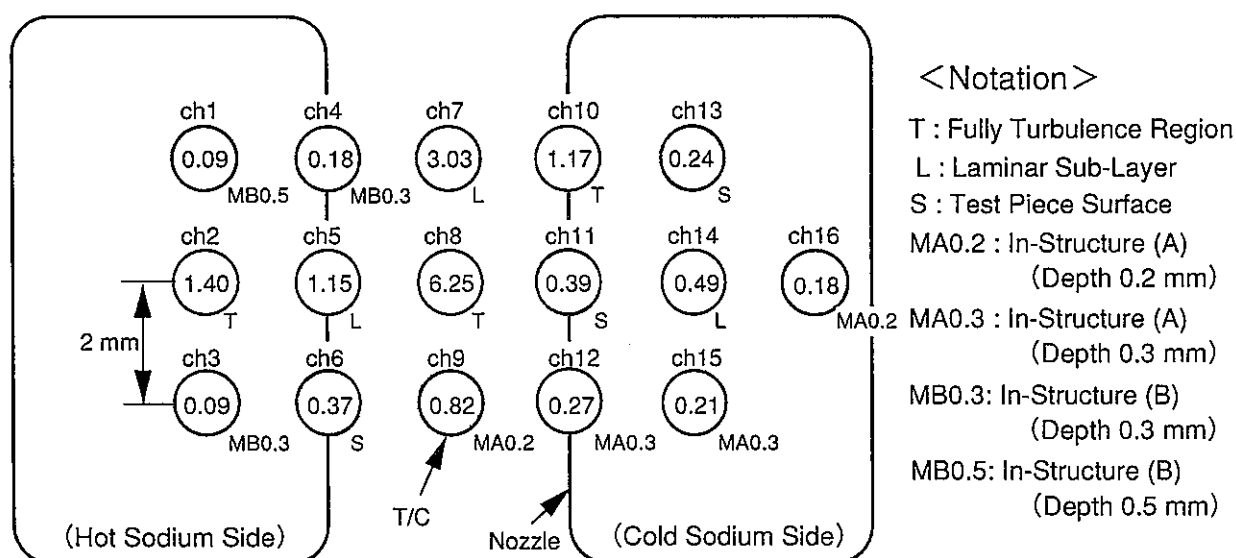
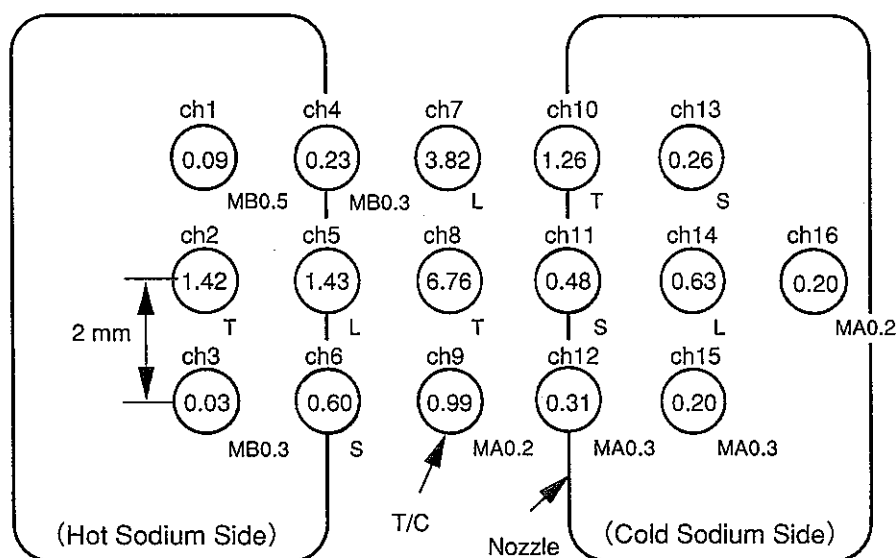


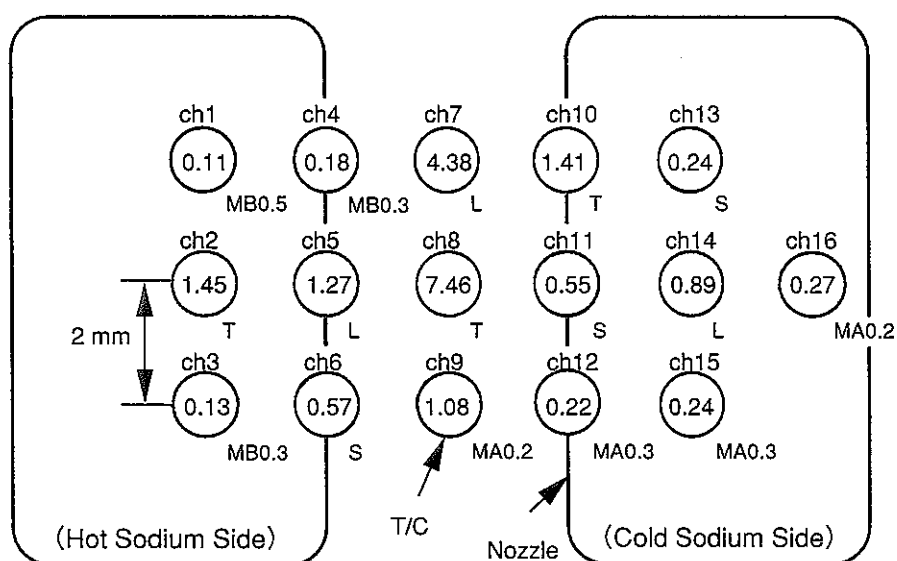
Fig. 2. 6 Temperature Transients for Case-3 (2/2)



(a) Case-1 (1 m/s)



(b) Case-2 (1.5 m/s)



(c) Case-3 (2 m/s)

Fig. 2. 7 Distributions of Temperature Fluctuation Intensity

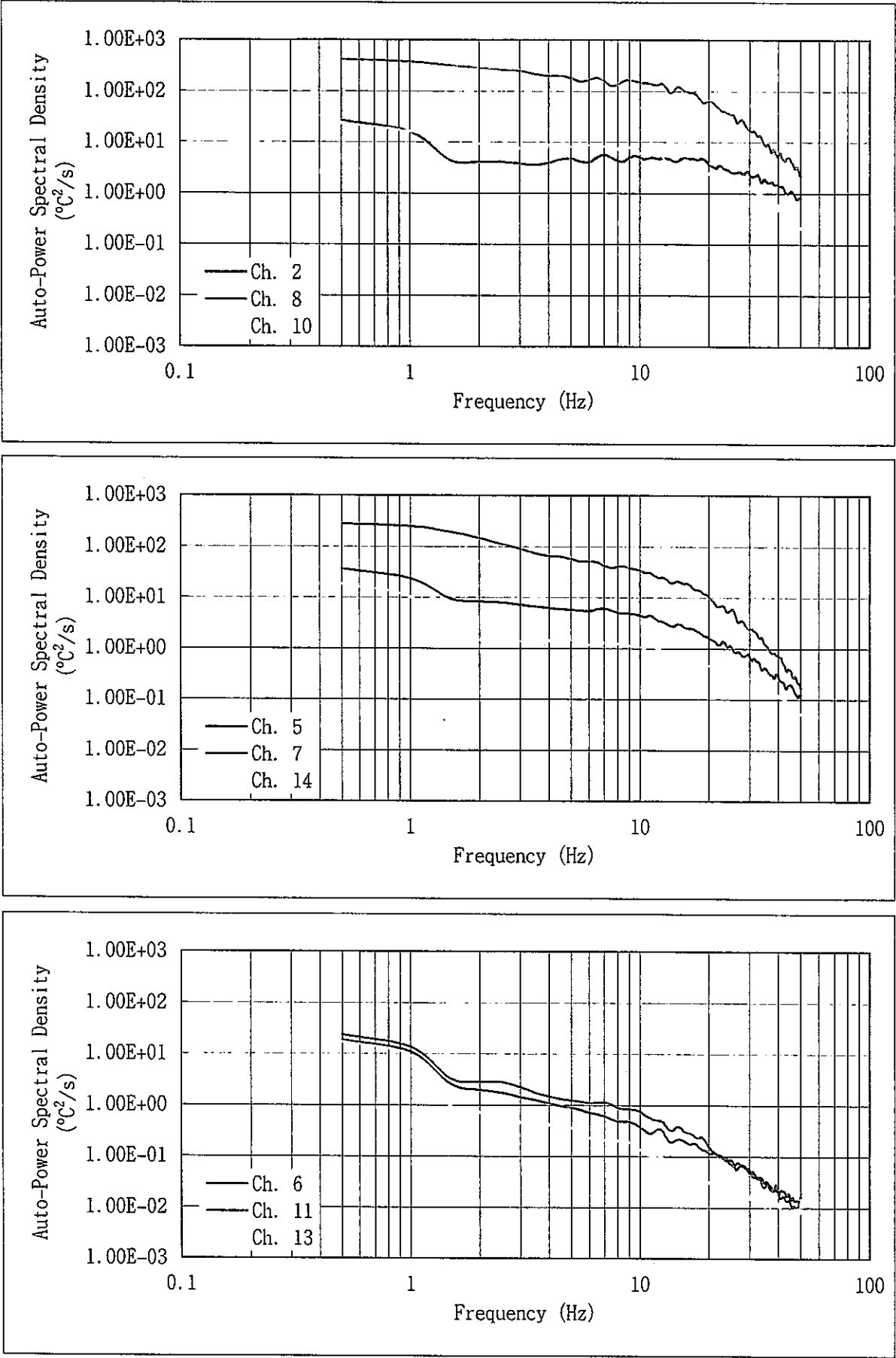


Fig. 3. 1 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-1 (1/2)

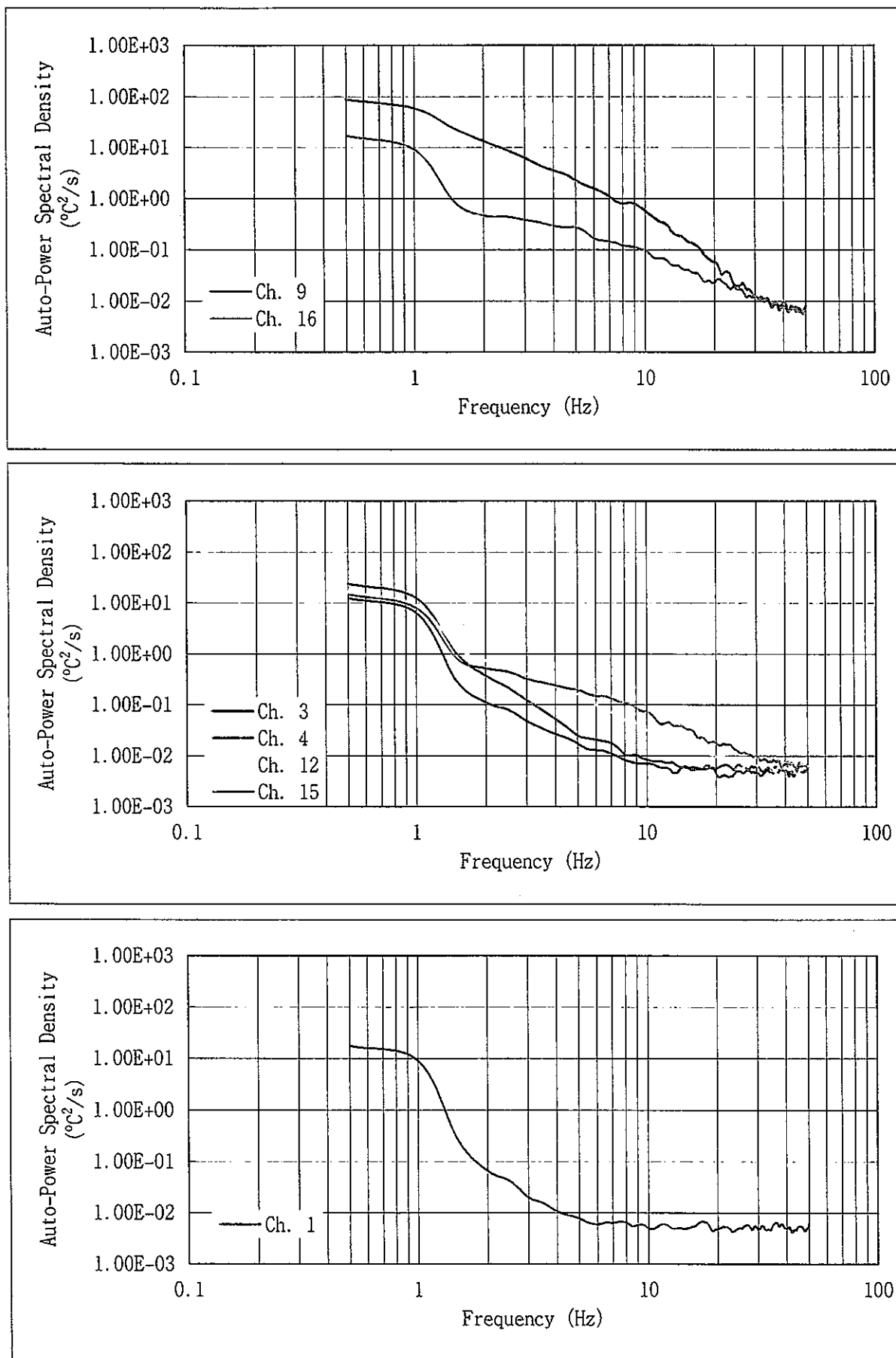


Fig. 3. 1 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-1 (2/2)

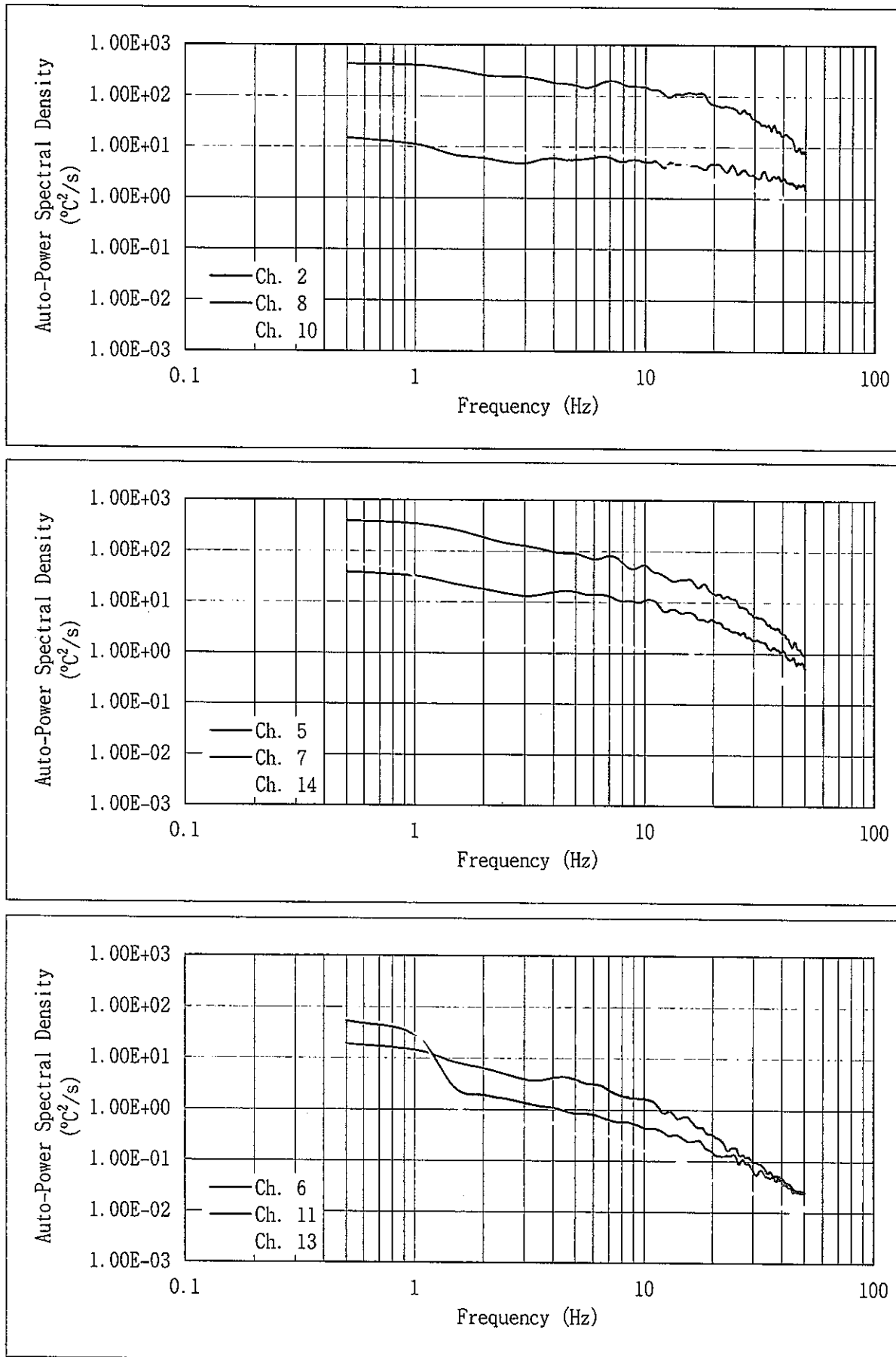


Fig. 3. 2 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-2 (1/2)

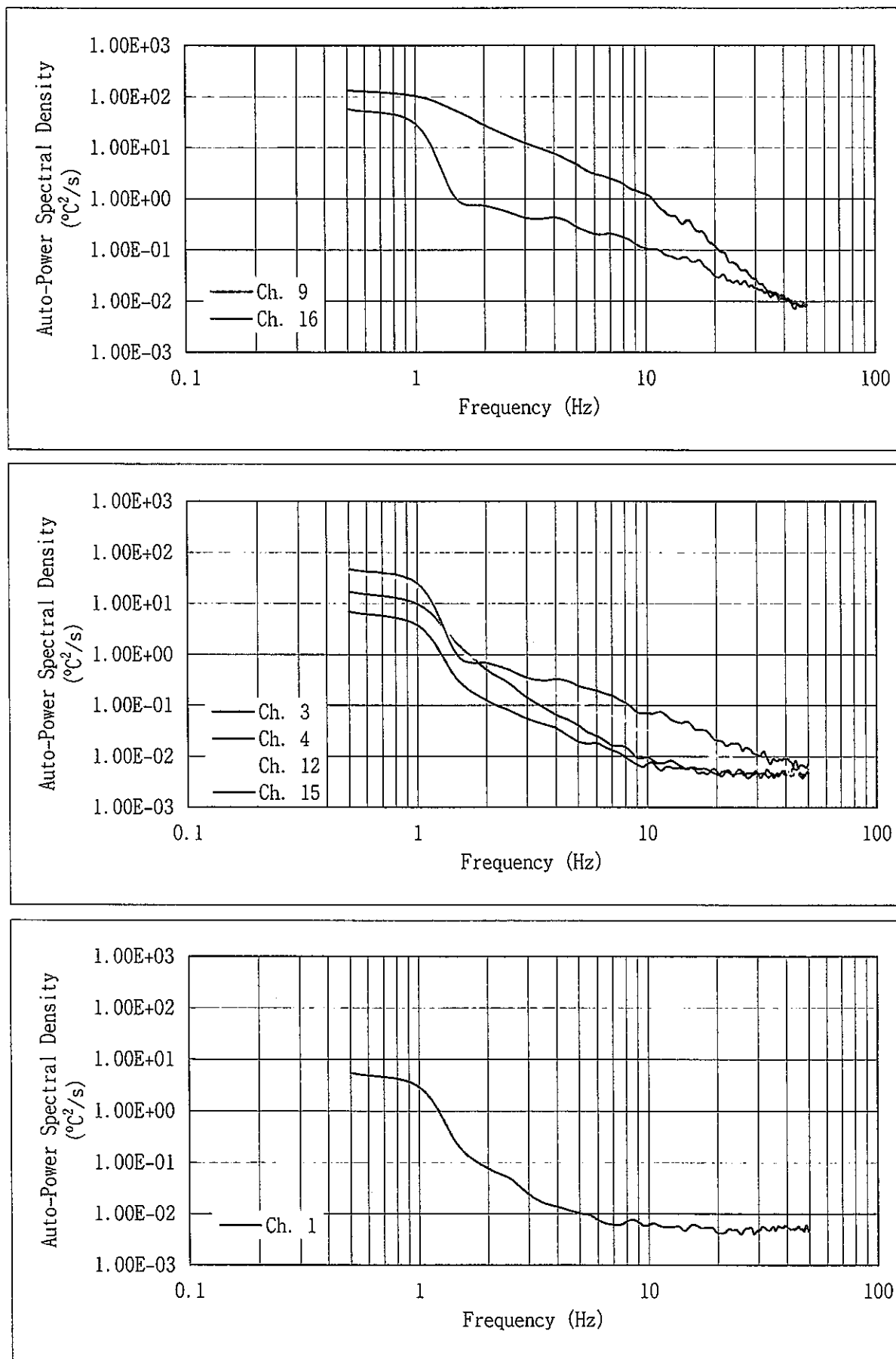


Fig. 3. 2 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-2 (2/2)

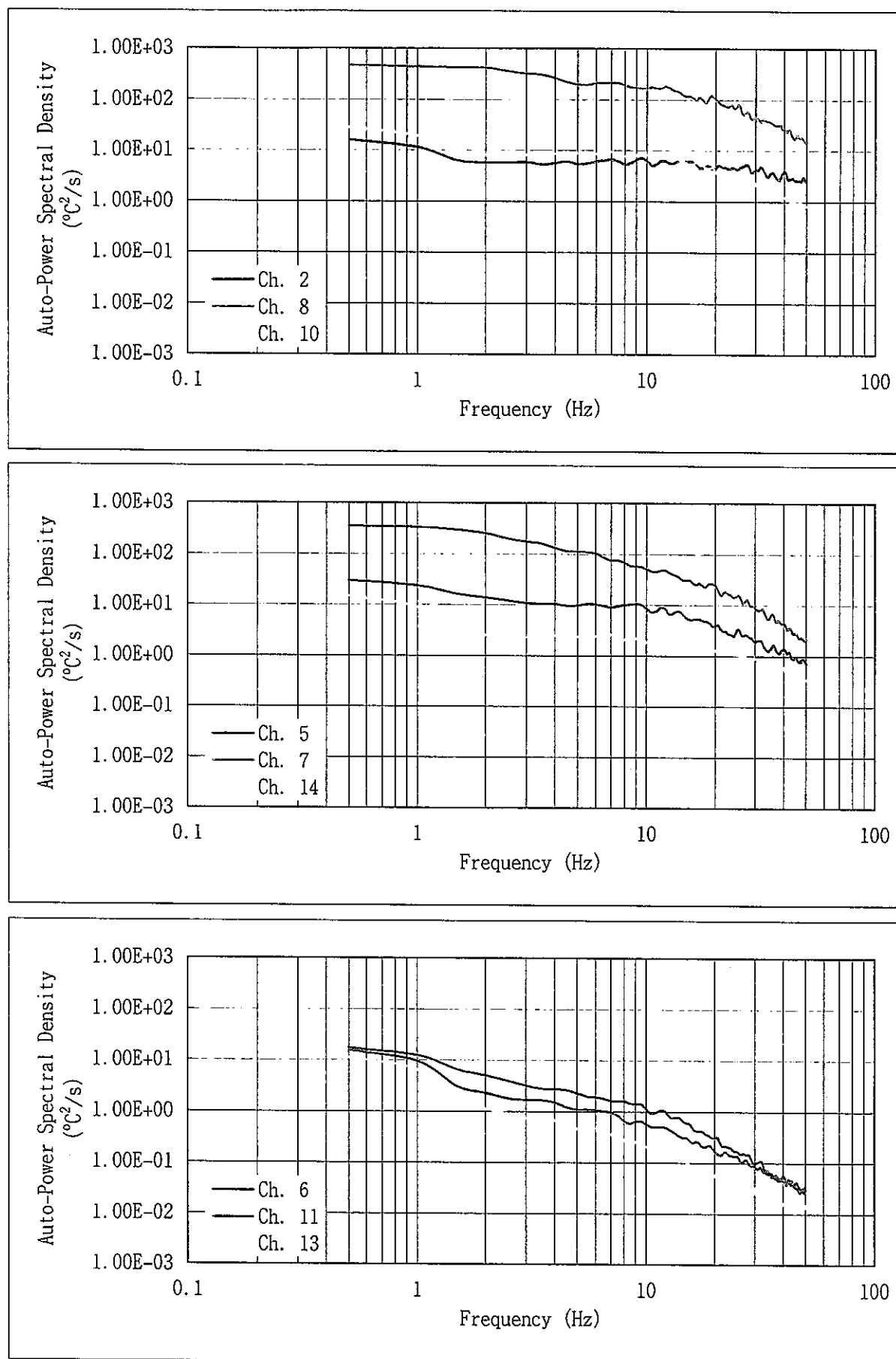


Fig. 3. 3 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-3 (1/2)



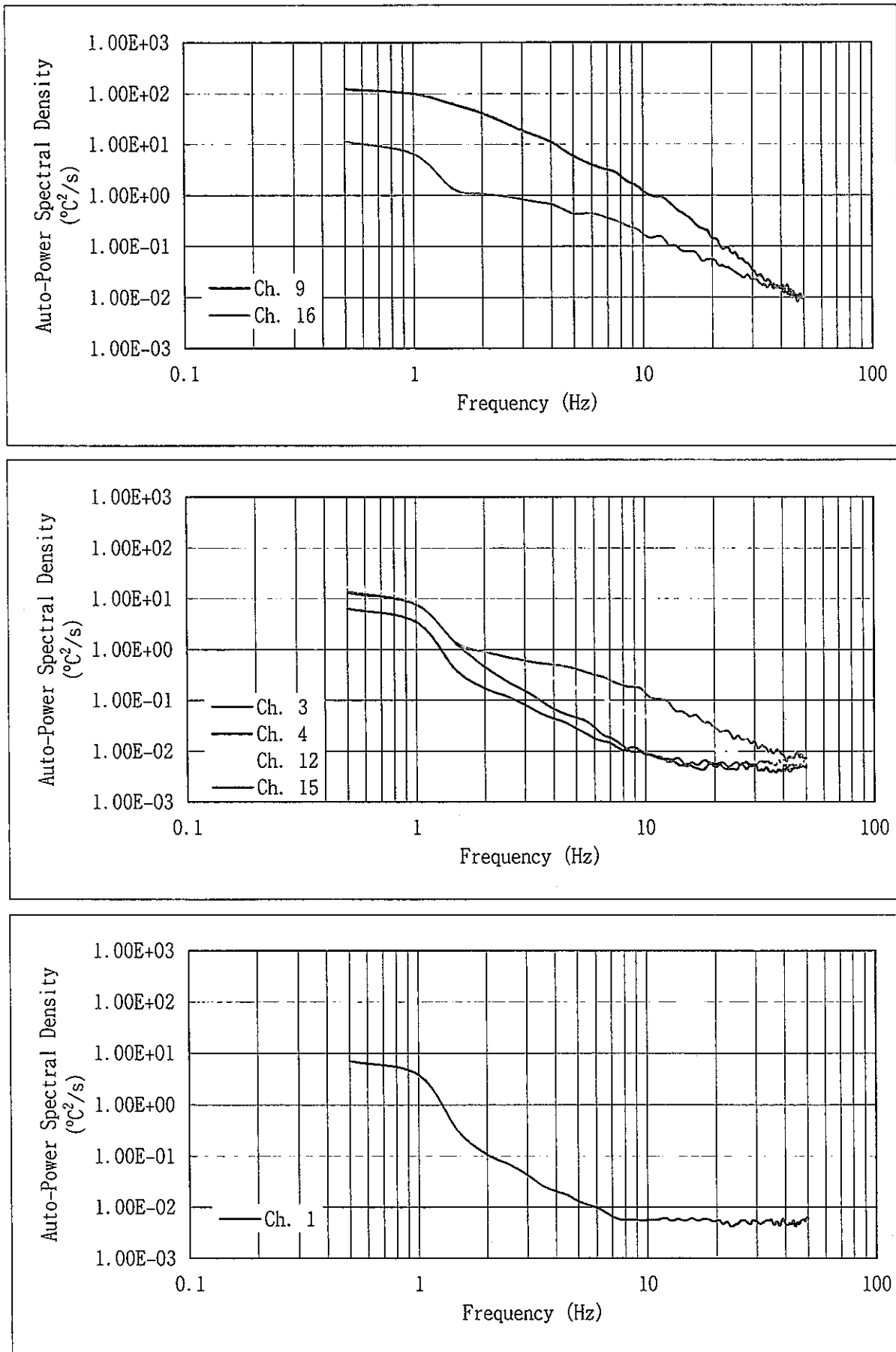


Fig. 3. 3 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-3 (2/2)

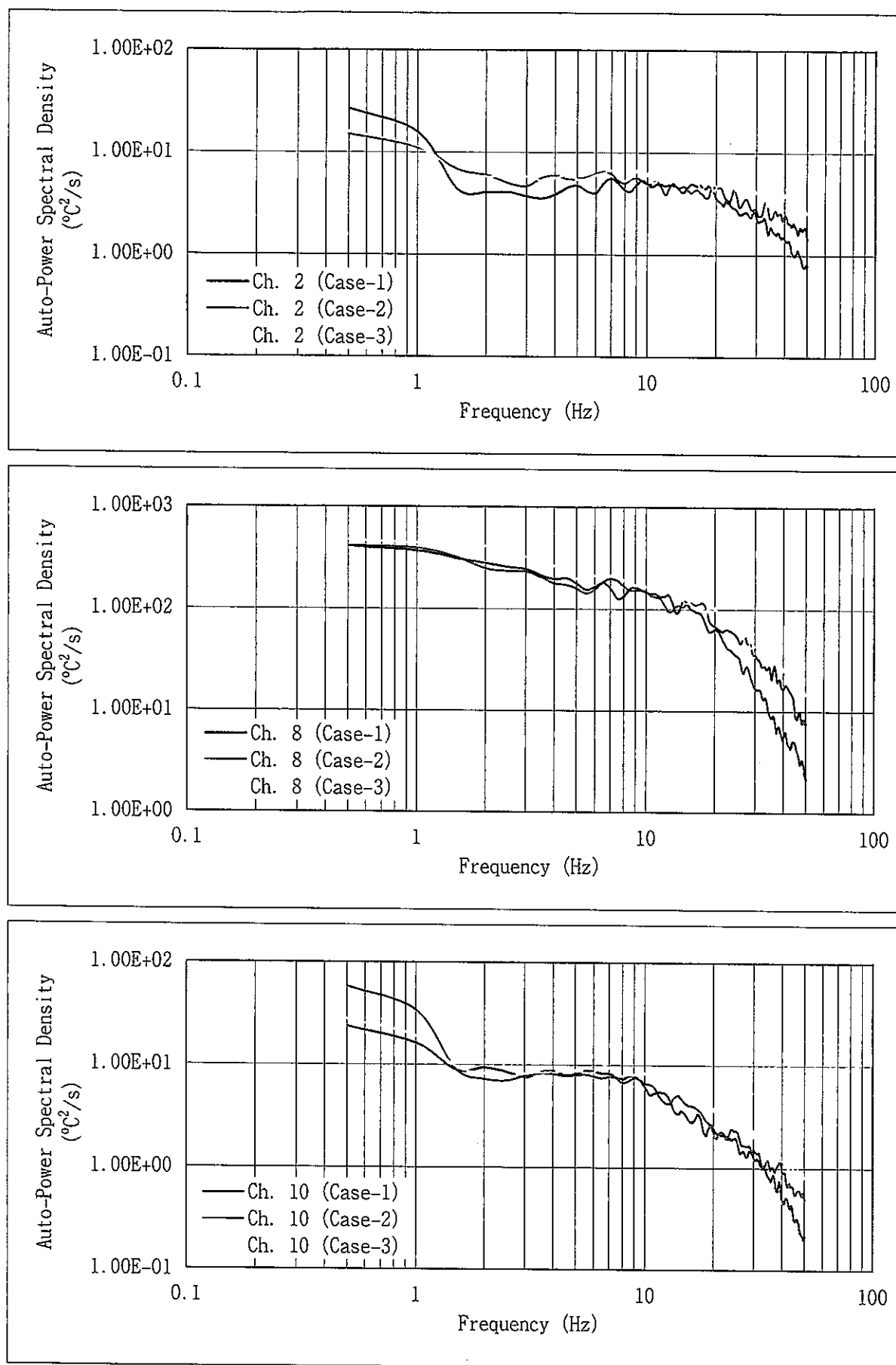


Fig. 3. 4 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions (1/6)

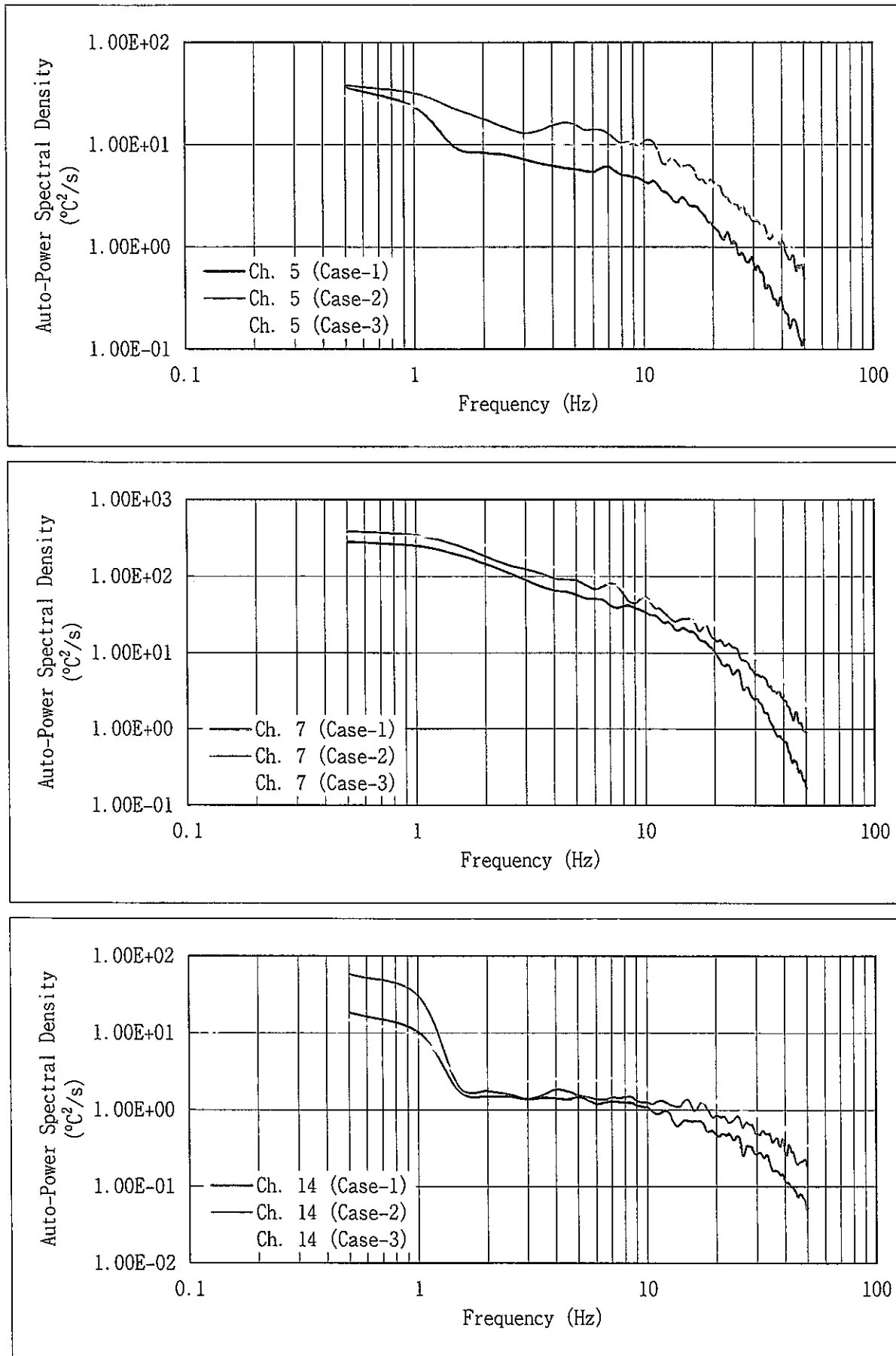


Fig. 3. 4 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions (2/6)

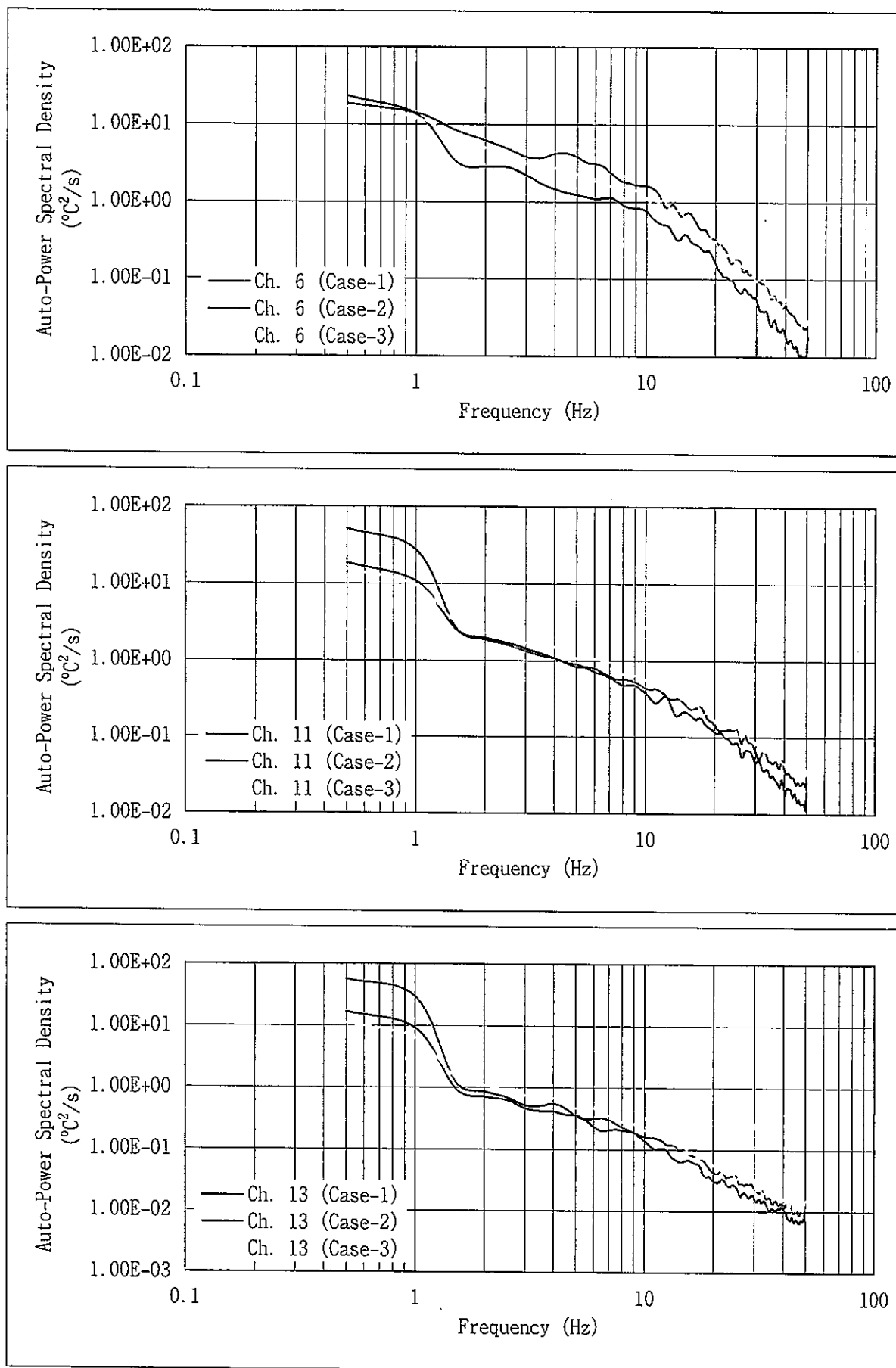


Fig. 3. 4 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions (3/6)

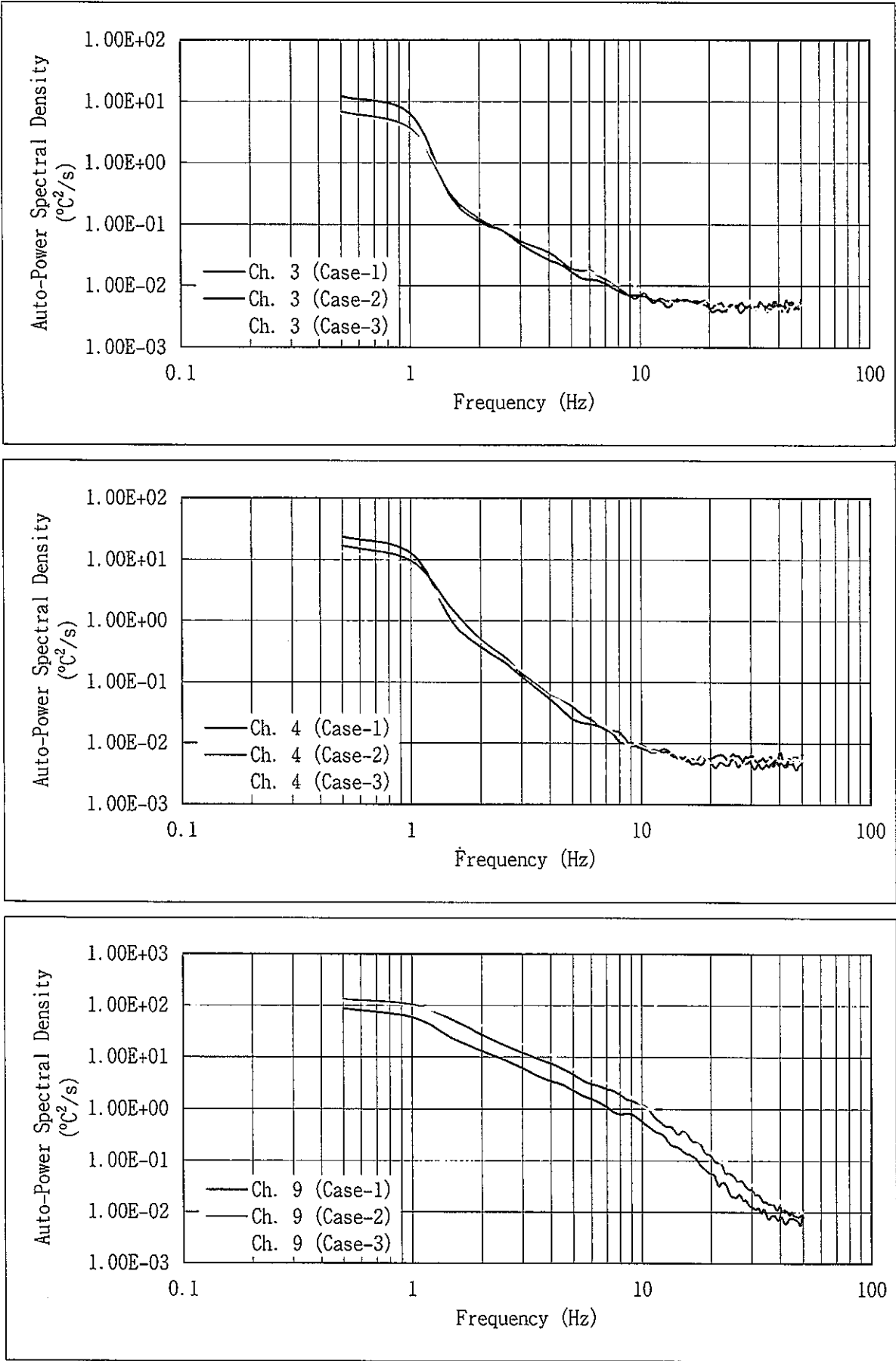


Fig. 3. 4 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions (4/6)

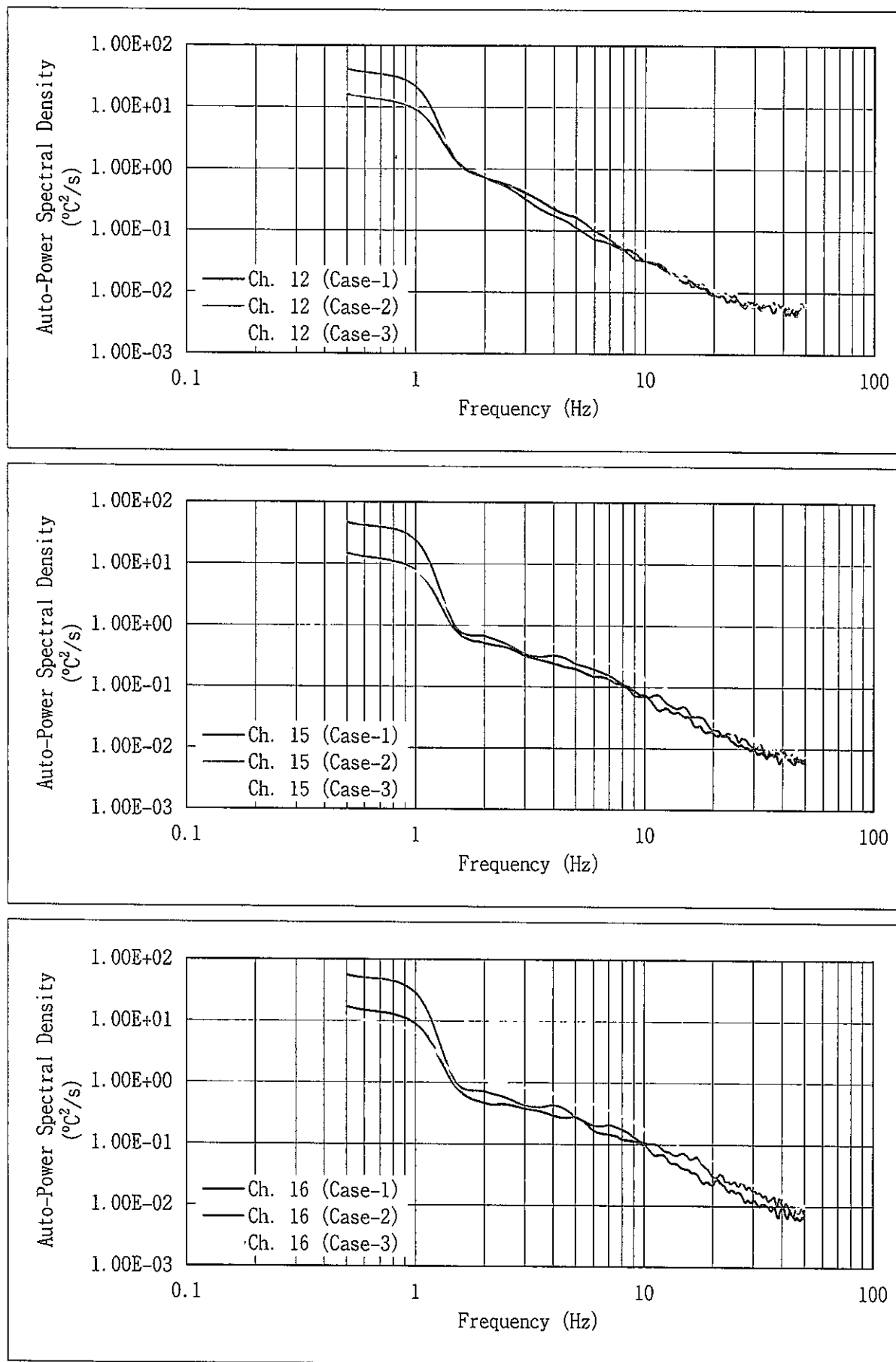


Fig. 3. 4 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions (5/6)

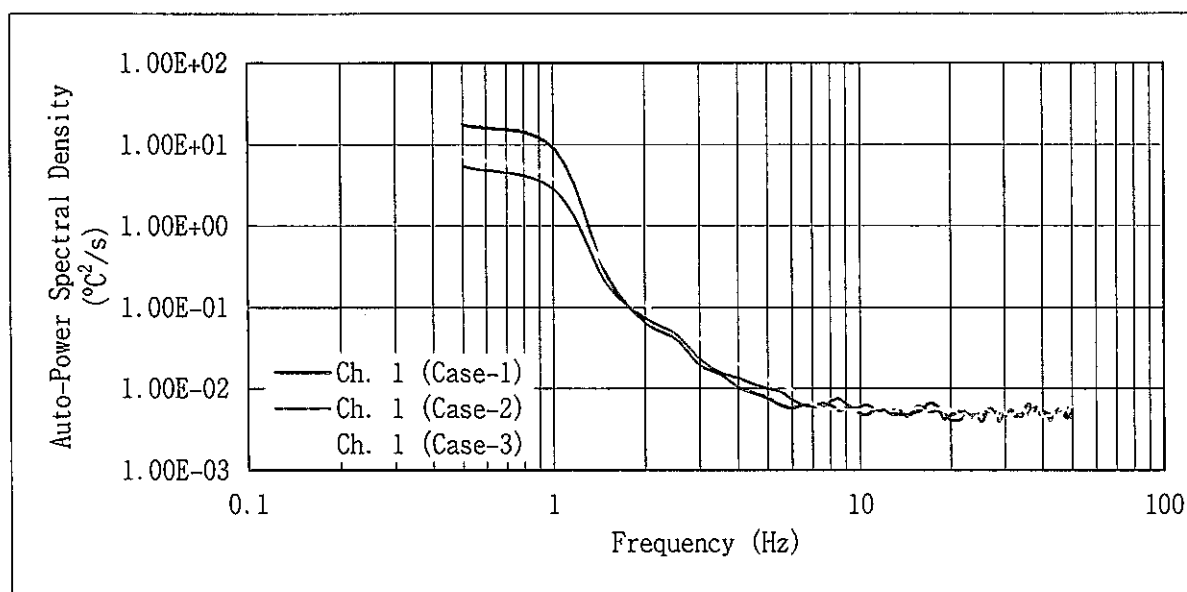


Fig. 3. 4 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions (6/6)

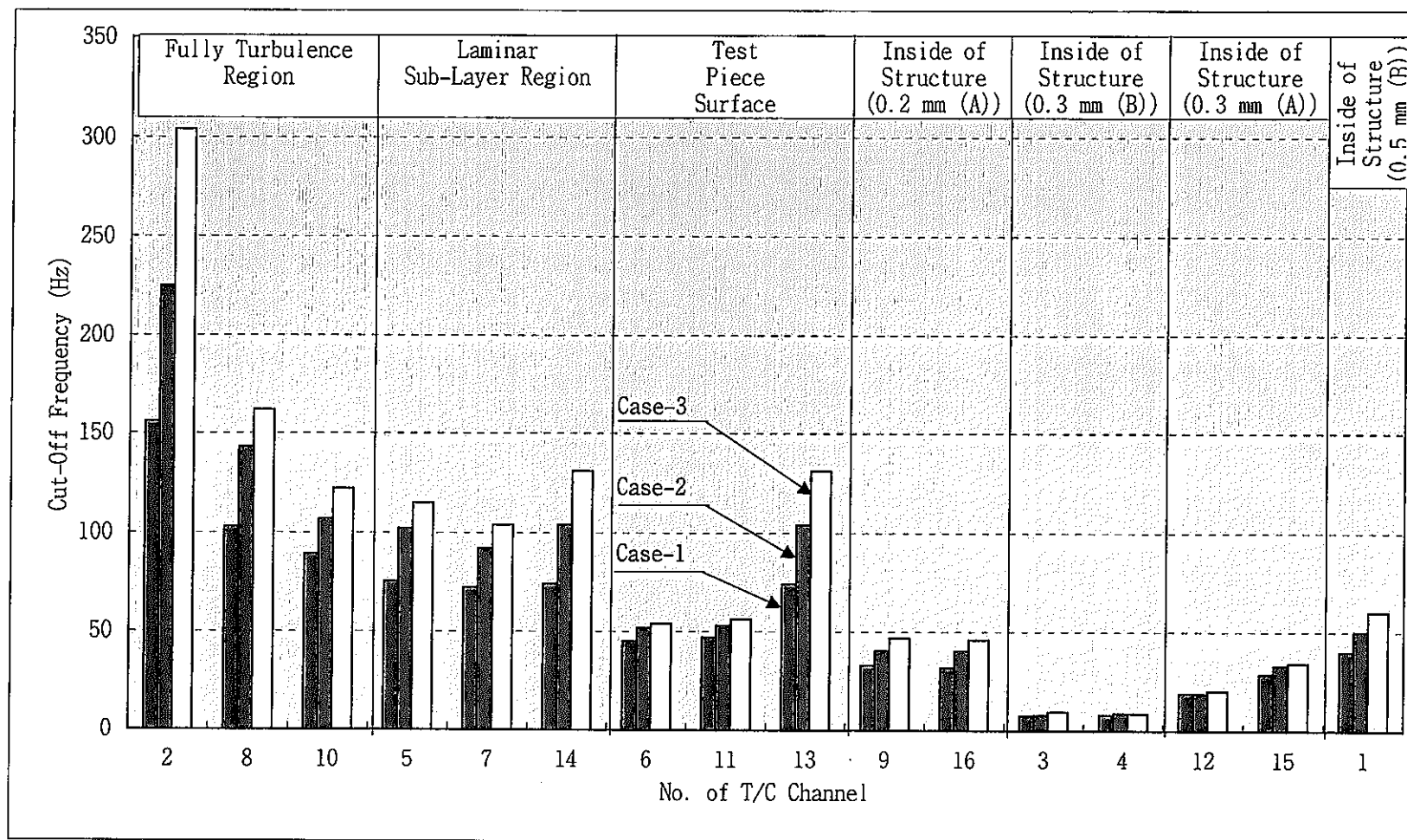


Fig. 3. 5 Cut-Off Frequency Characteristics at Various Thermocouple Positions



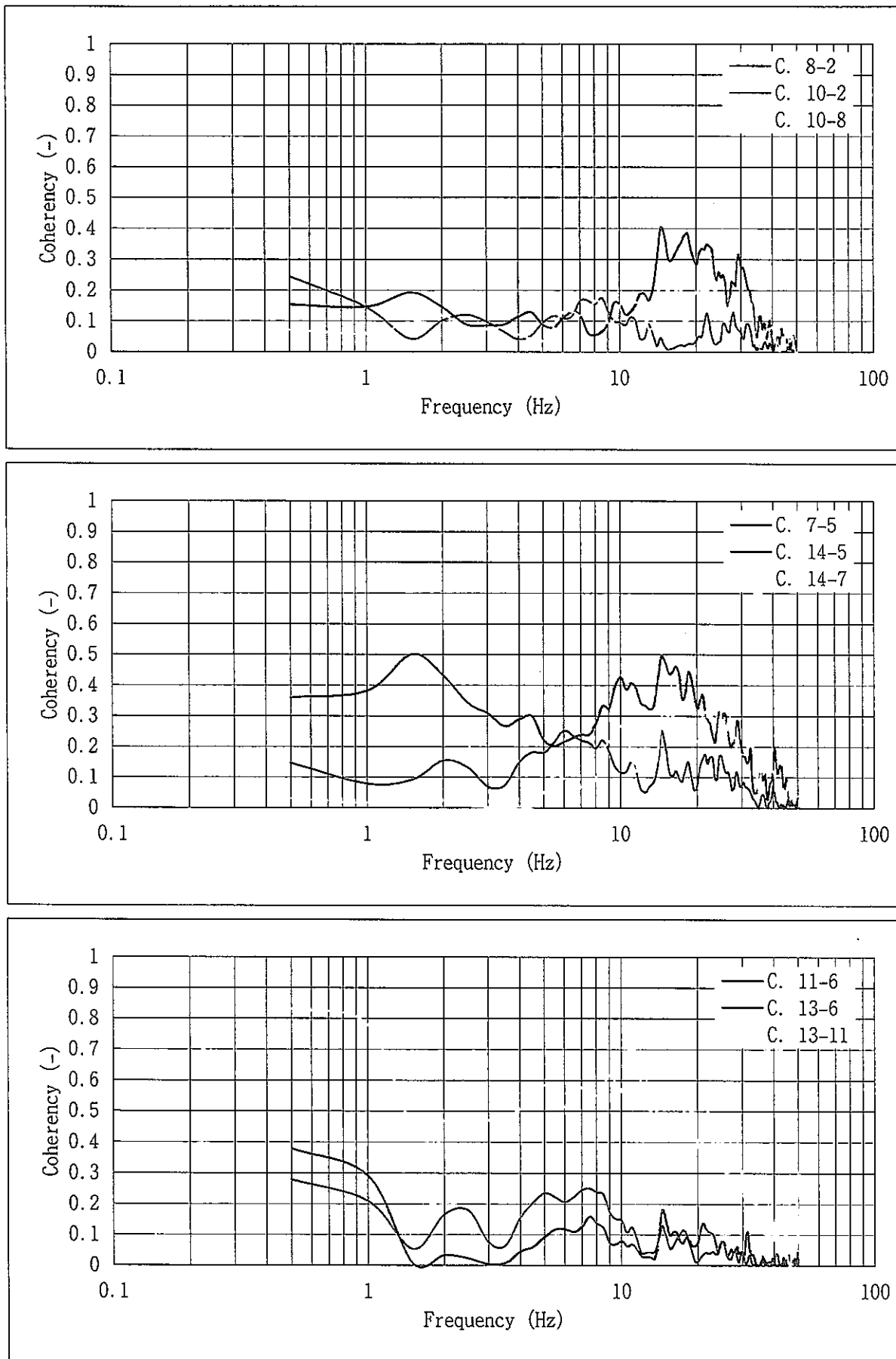


Fig. 3. 6 Coherence Functions for Case-1 (1/2)

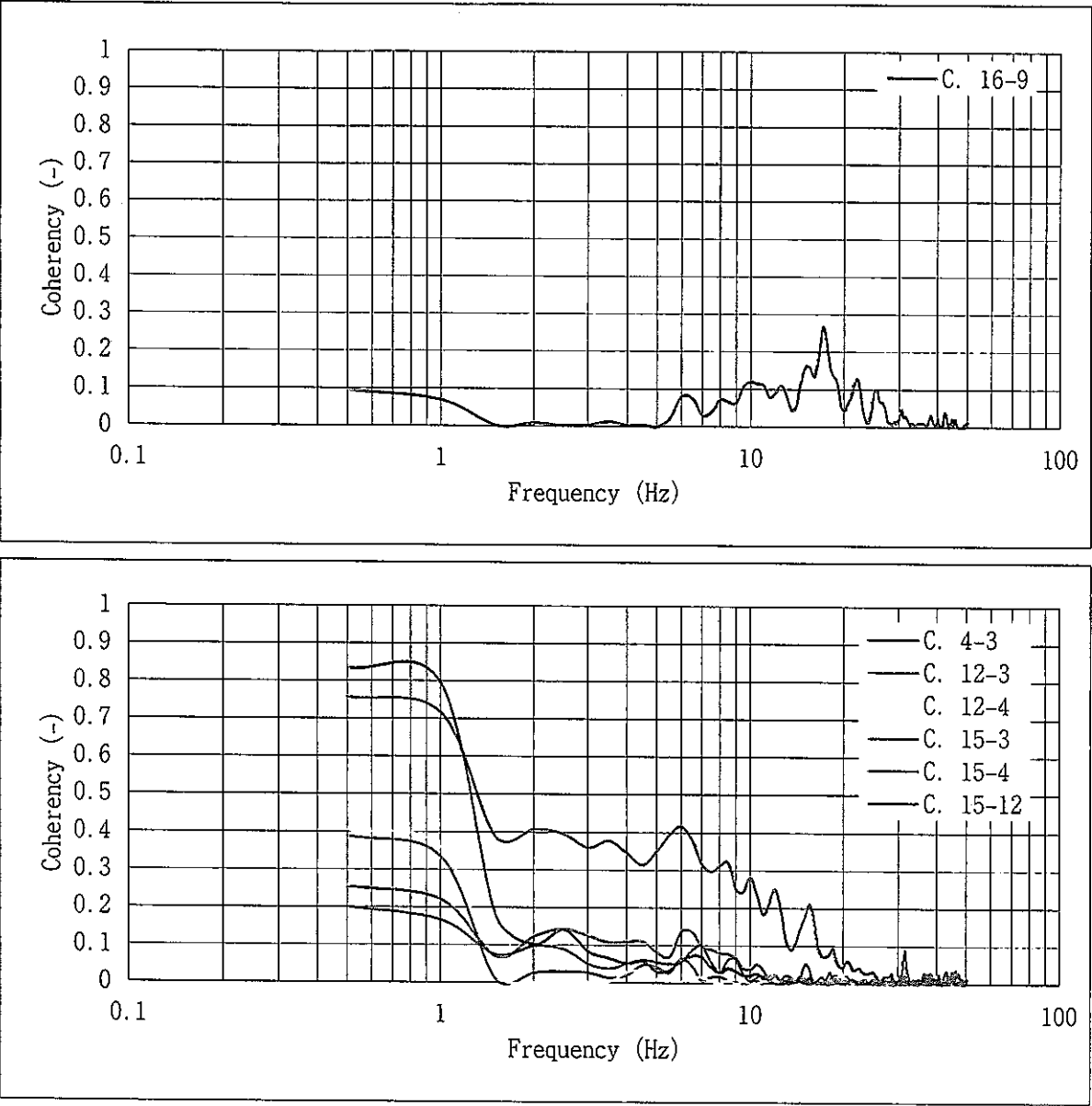


Fig. 3. 6 Coherence Functions for Case-1 (2/2)

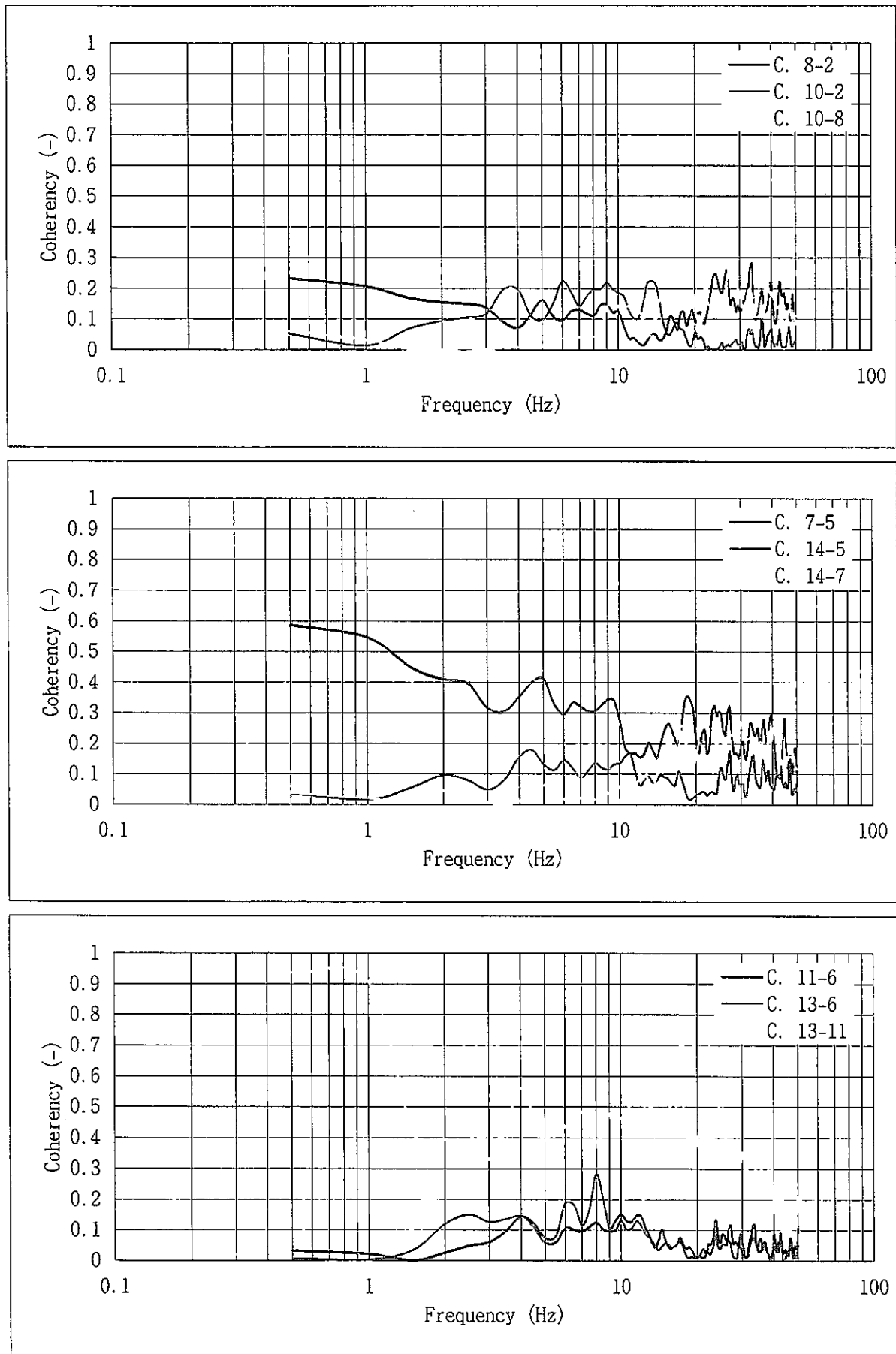


Fig. 3. 7 Coherence Functions for Case-2 (1/2)

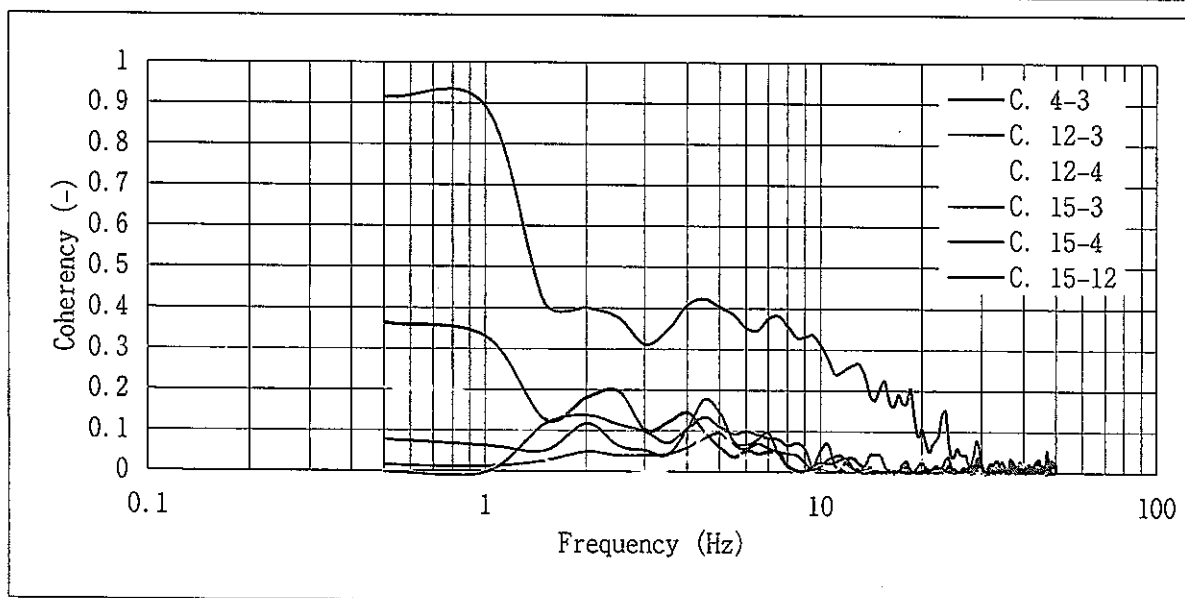
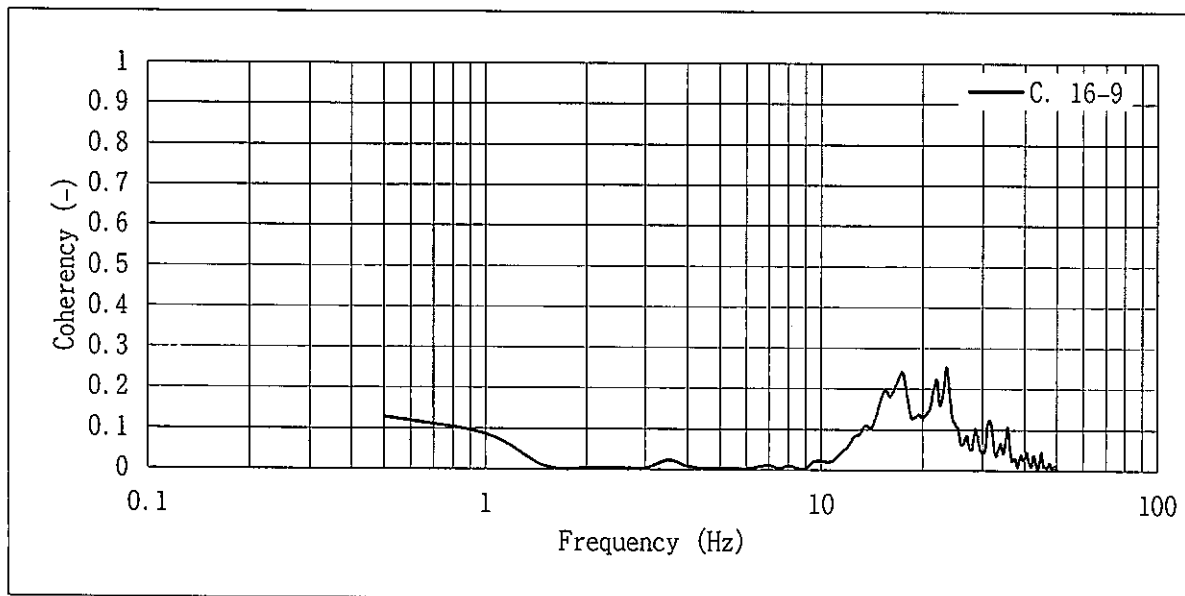


Fig. 3. 7 Coherence Functions for Case-2 (2/2)

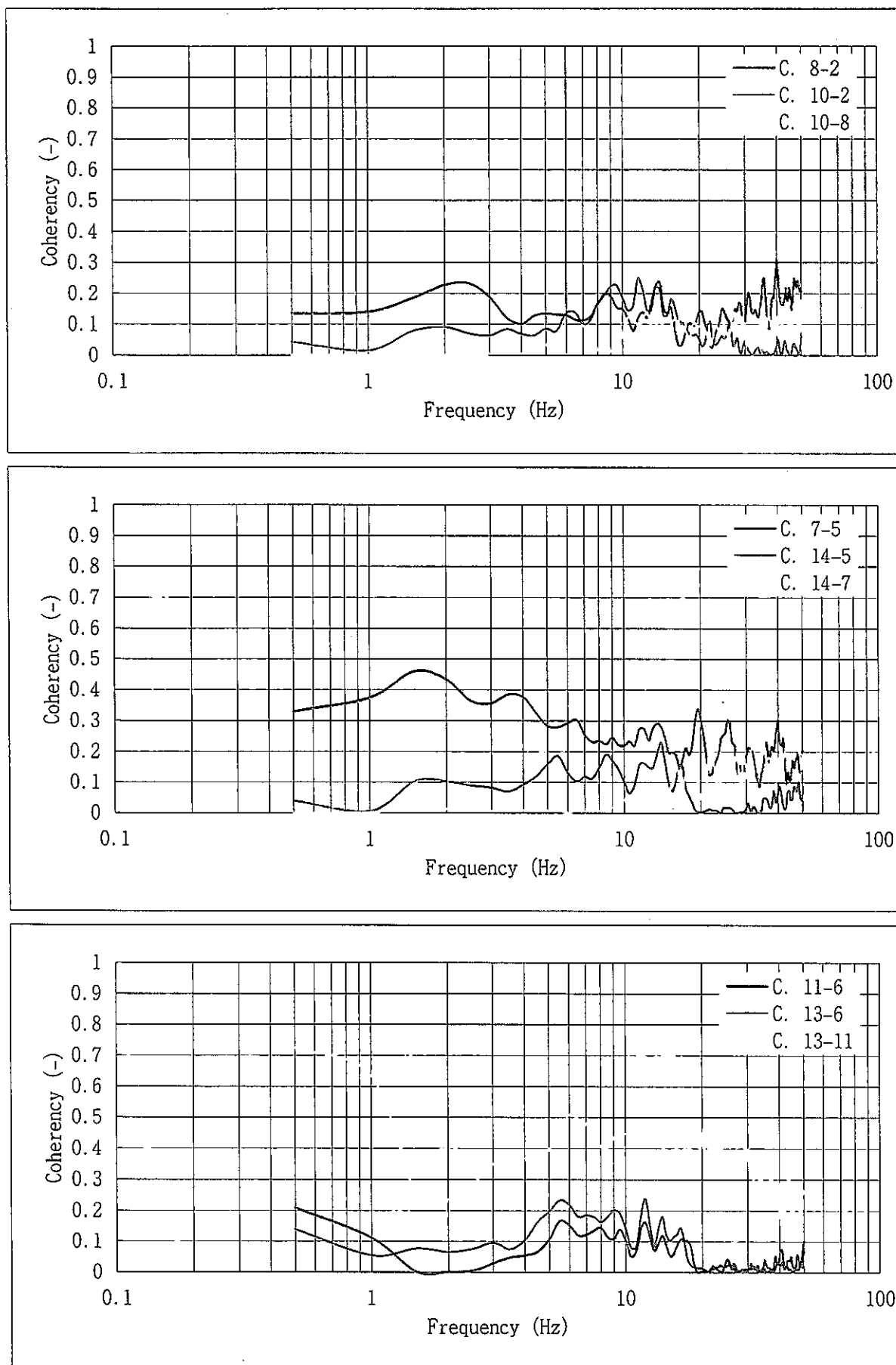


Fig. 3. 8 Coherence Functions for Case-3 (1/2)

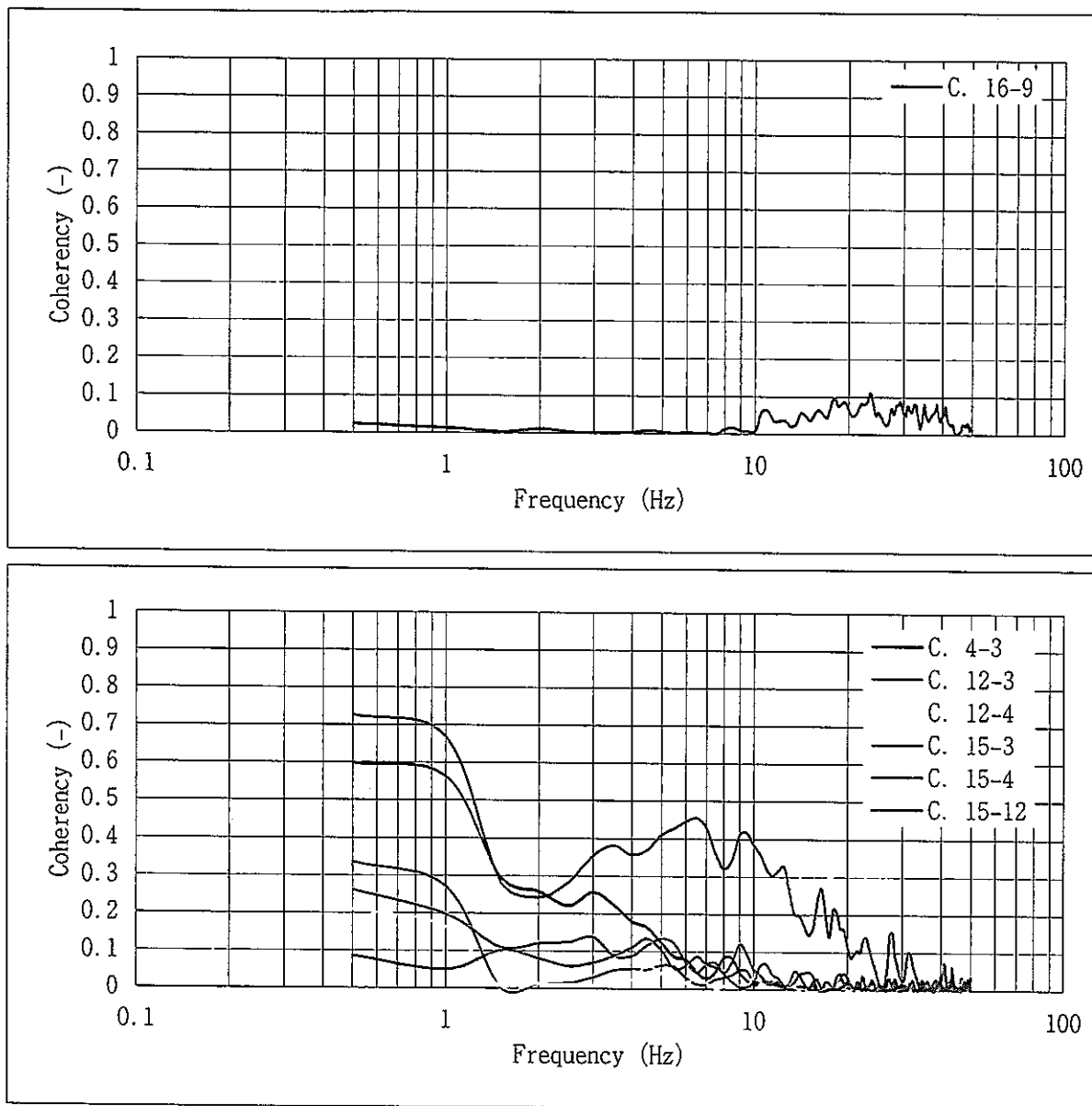


Fig. 3. 8 Coherence Functions for Case-3 (2/2)

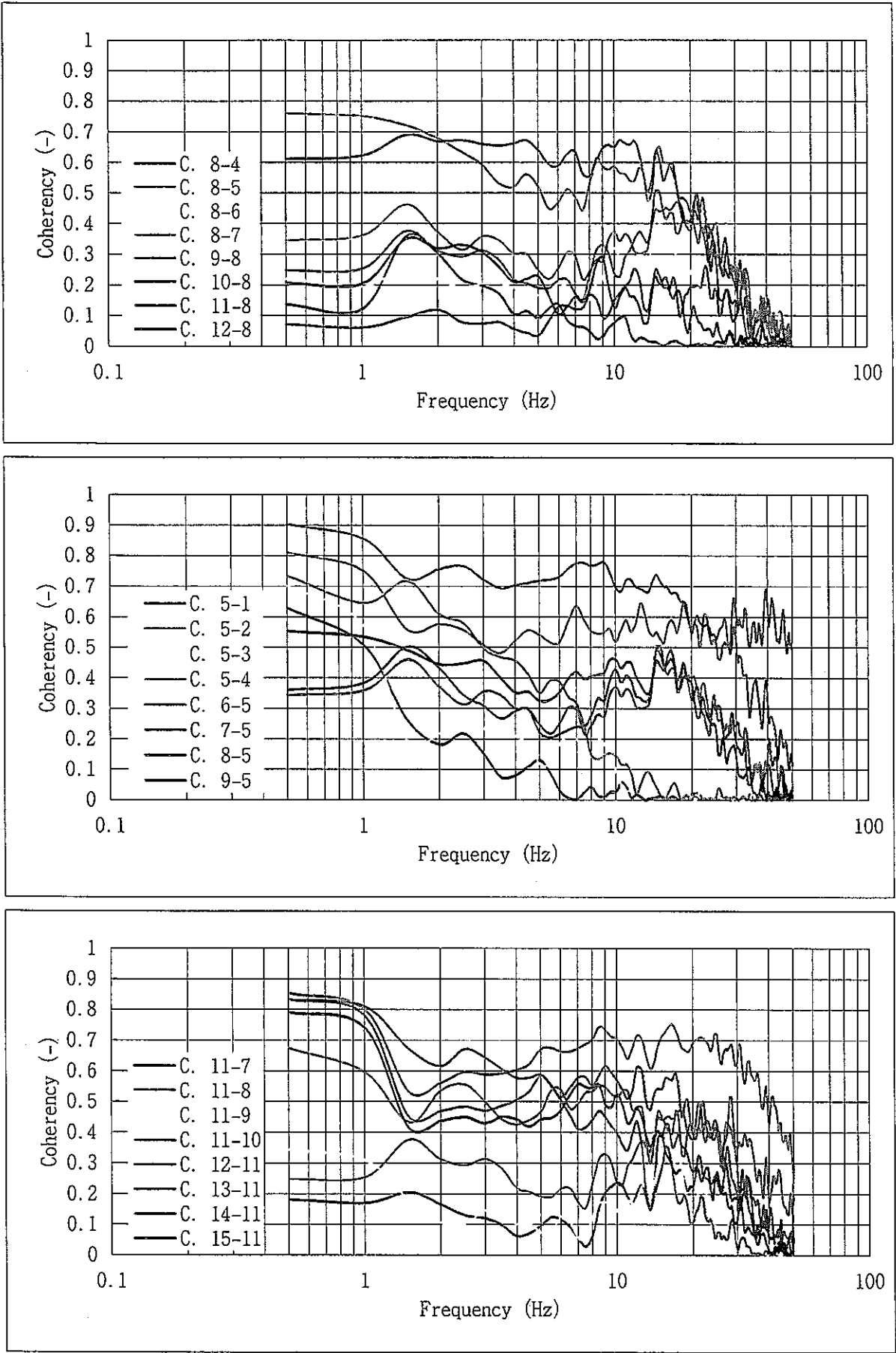


Fig. 3. 9 Comparison of Coherence Functions for Case-1

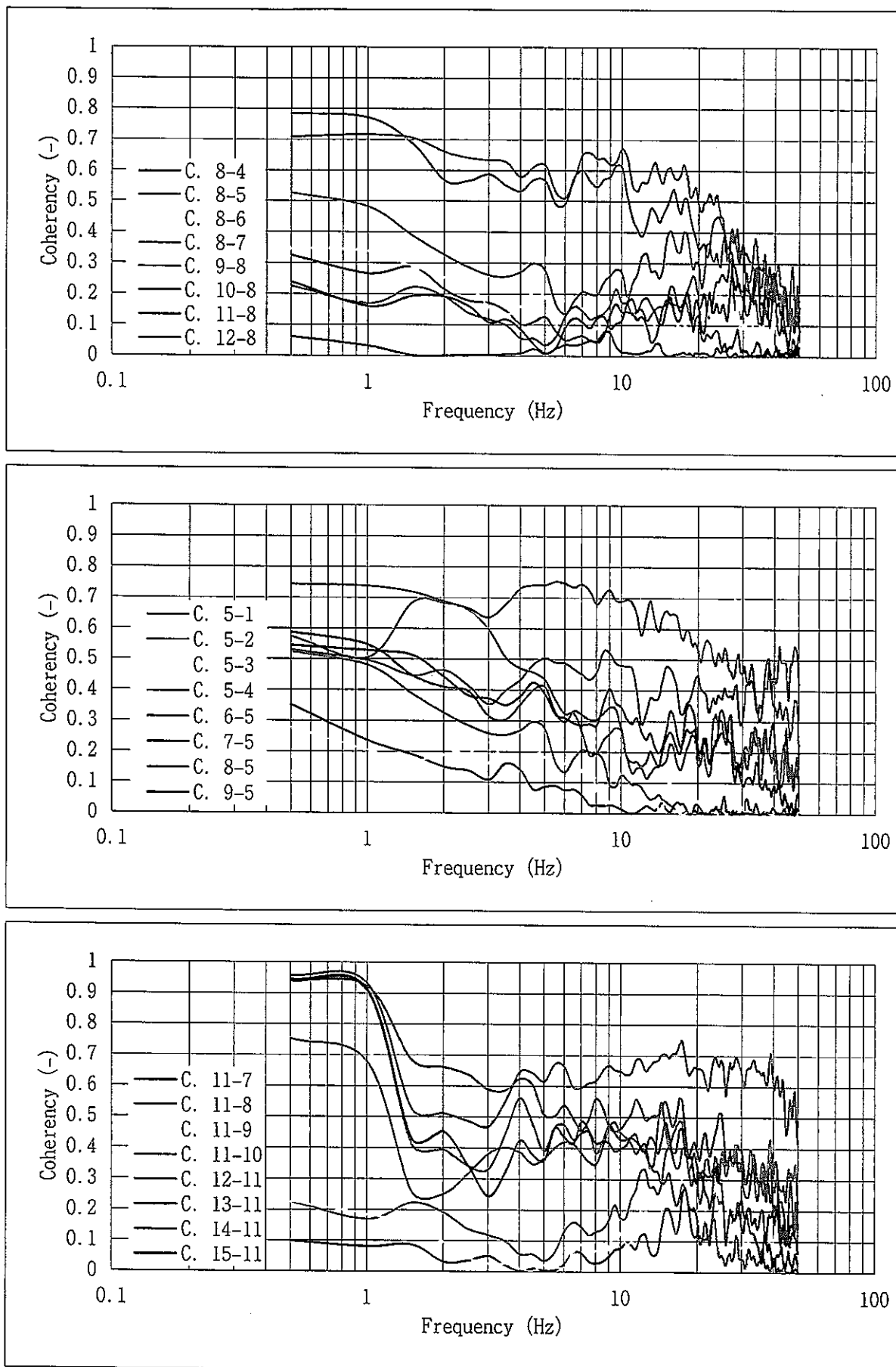


Fig. 3. 10 Comparison of Coherence Functions for Case-2



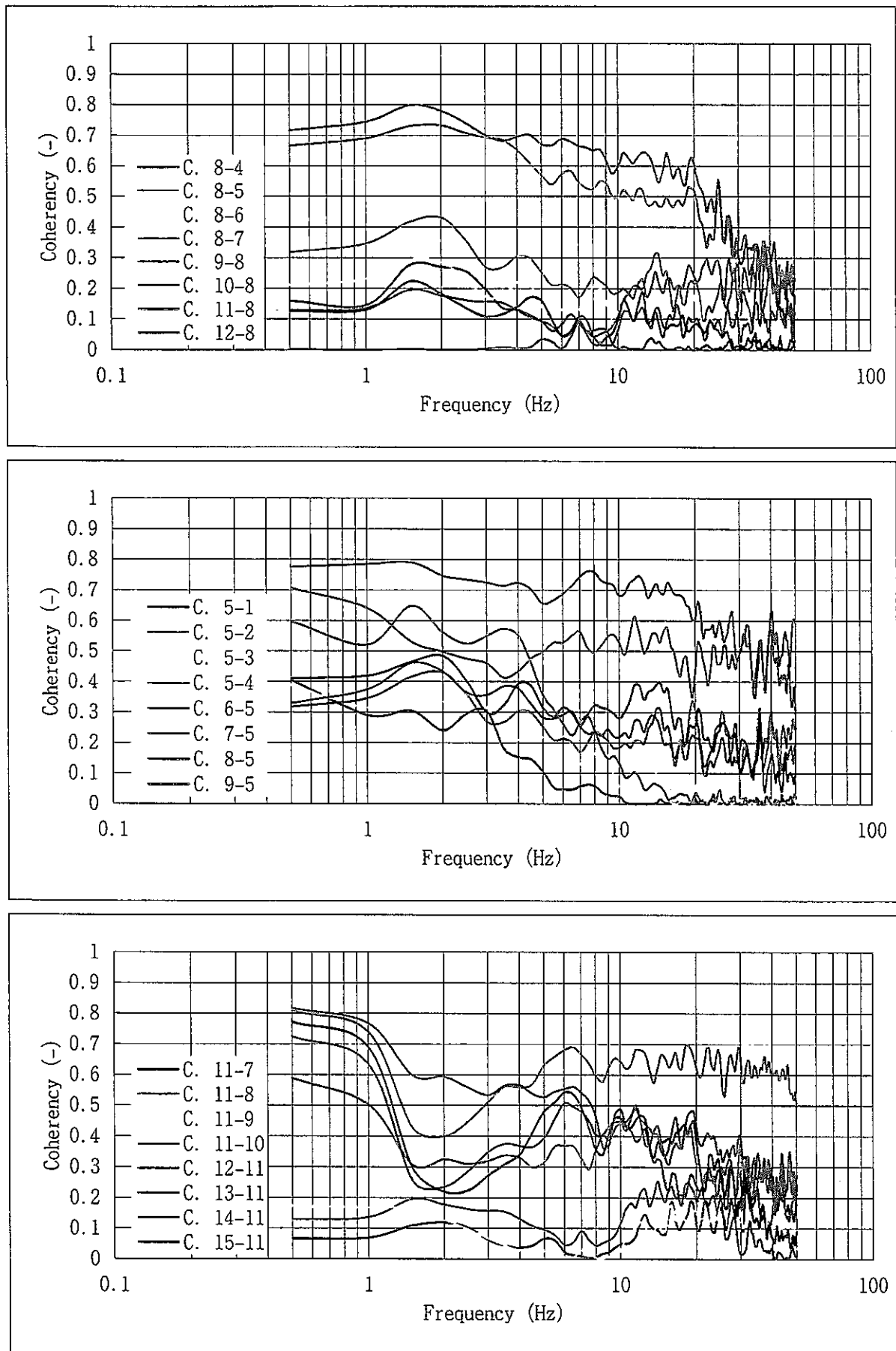


Fig. 3. 11 Comparison of Coherence Functions for Case-3

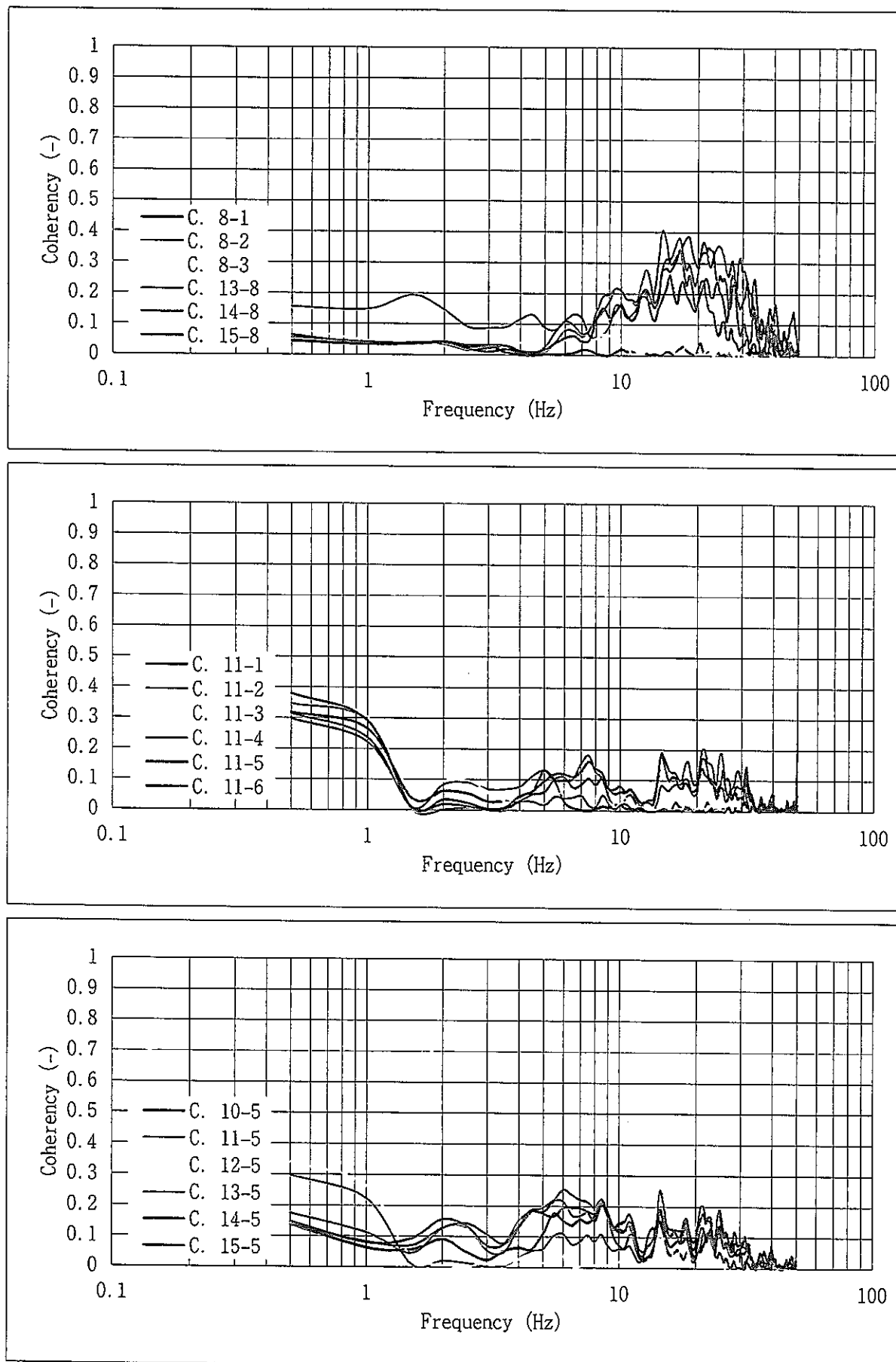


Fig. 3. 12 Comparison of Coherence Functions for Case-1

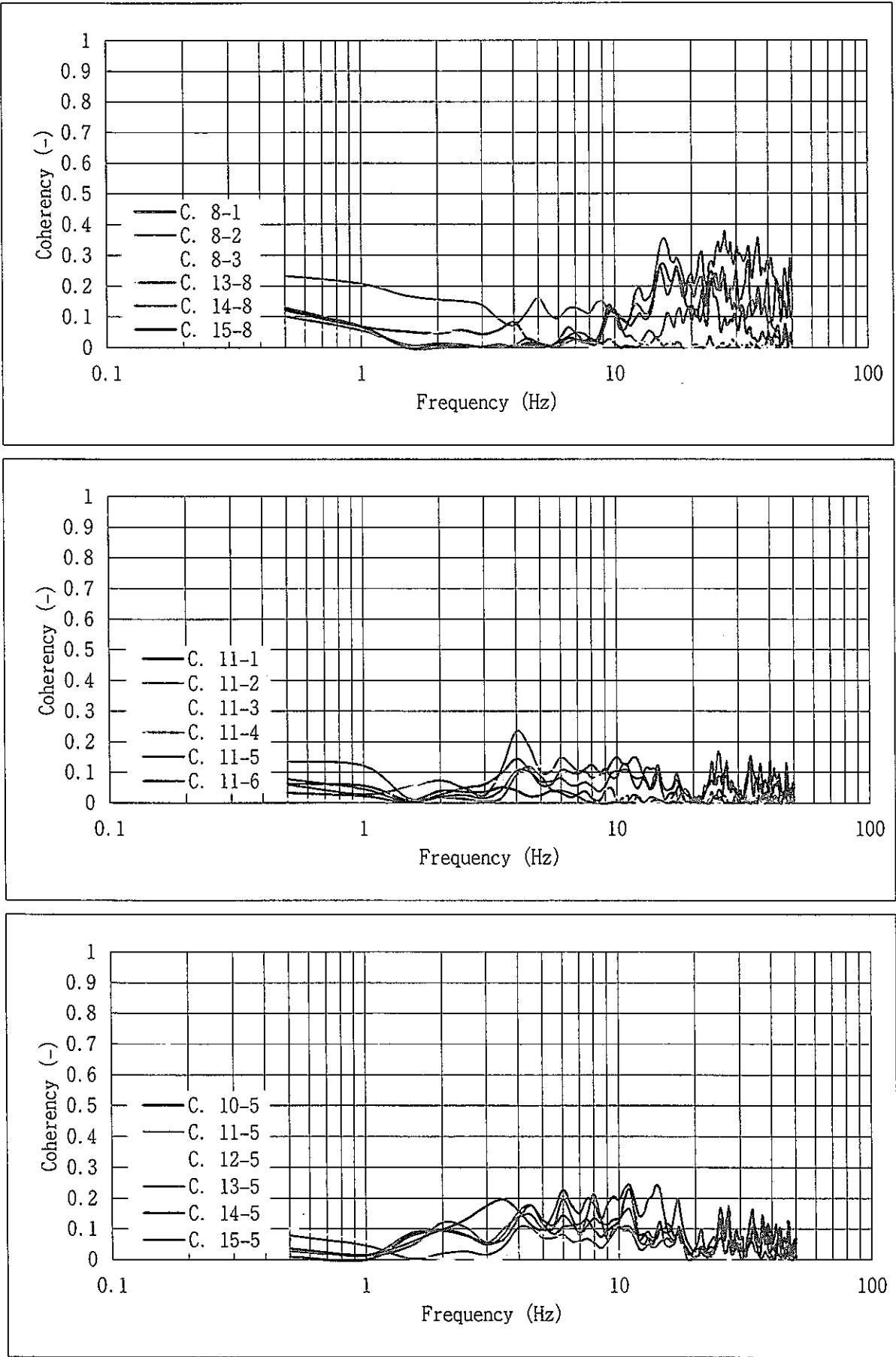


Fig. 3. 13 Comparison of Coherence Functions for Case-2

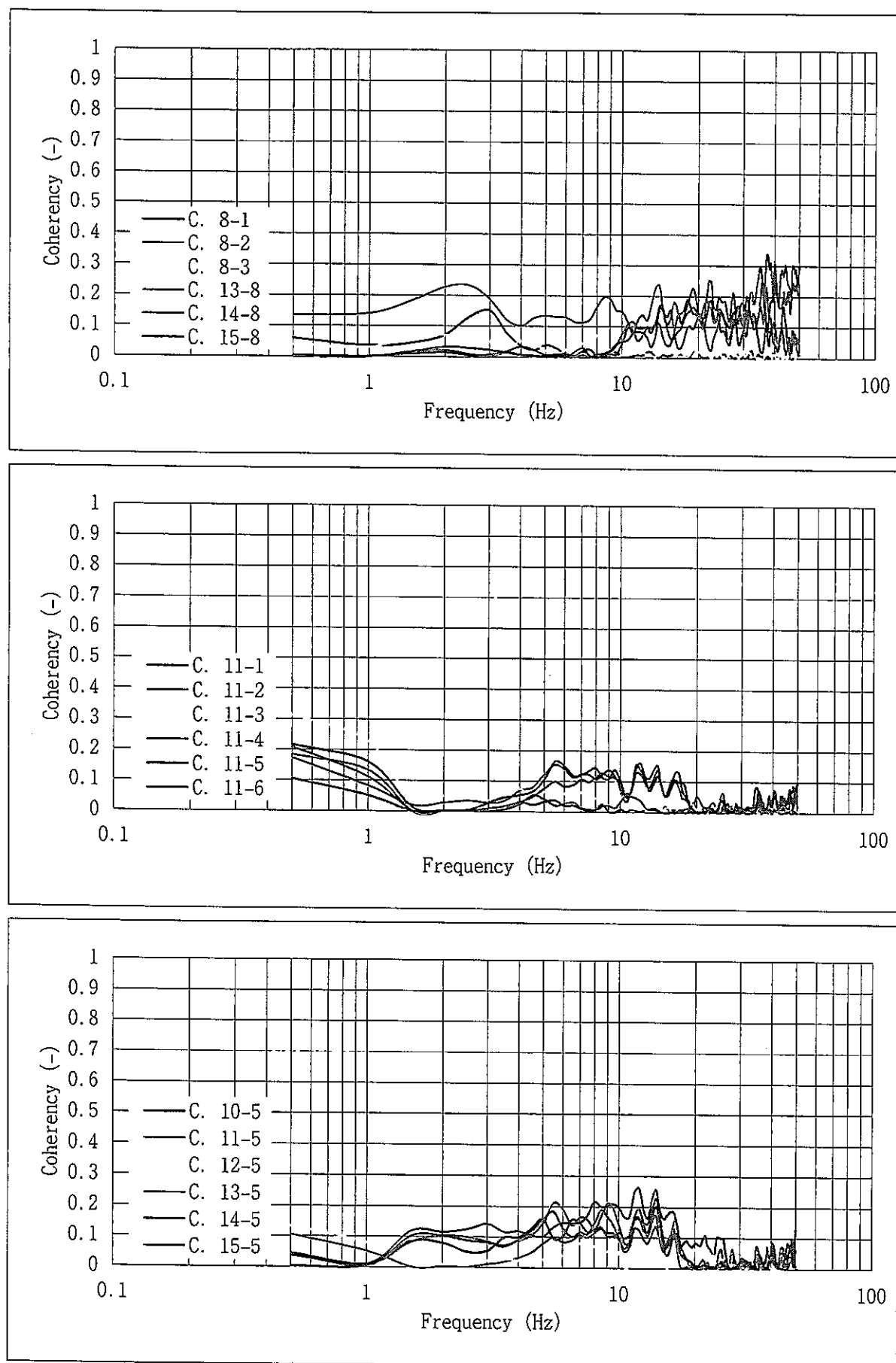


Fig. 3. 14 Comparison of Coherence Functions for Case-3

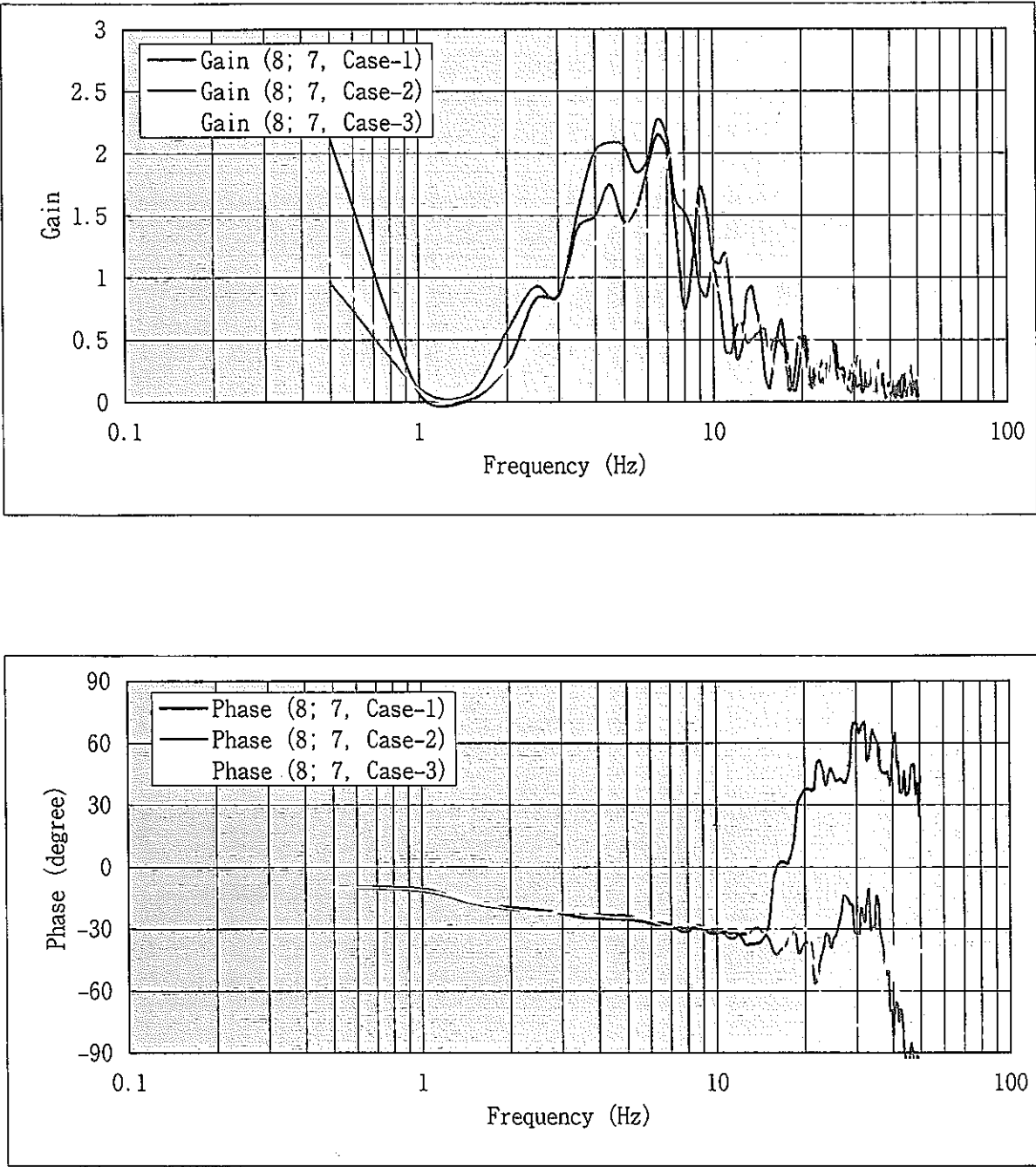


Fig. 3. 15 Comparison of Transfer Functions from Ch. 8 to Ch. 7

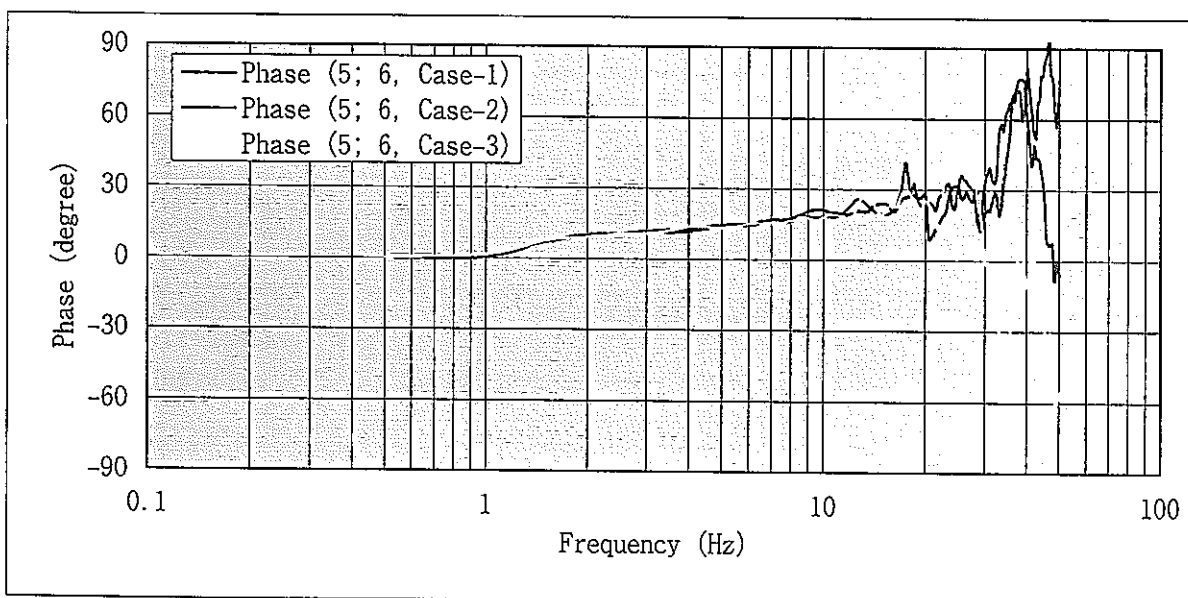
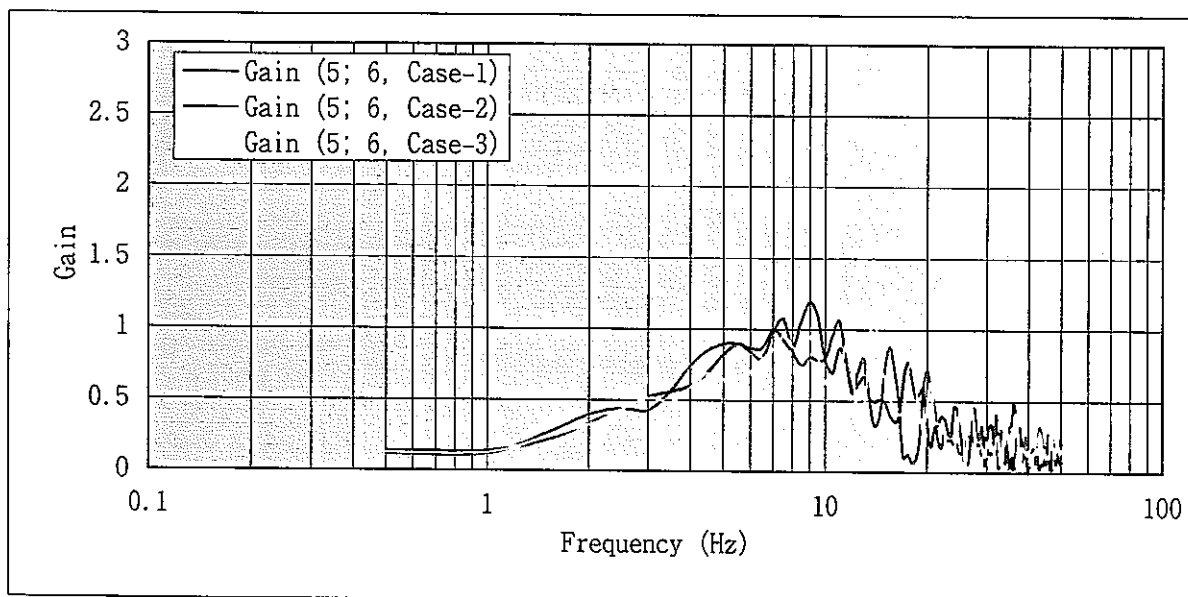


Fig. 3. 16 Comparison of Transfer Functions from Ch. 5 to Ch. 6