

高速炉配管合流部における サーマルストライピング条件の解析的検討（I）

—配管合流部における流速比に関する検討—

1998年2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

高速炉配管合流部におけるサーマルストライピング条件の解析的検討 (I)

- 配管合流部における流速比に関する検討 -

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（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。

本研究では、高速炉配管合流部におけるサーマルストライピング条件を解析的に検討するため、内径の等しい 90° エルボ付き主配管と枝管から成る配管系合流部に対し、流速比をパラメータ（主配管流速 / 枝管流速：0.25, 0.50, 1.00, 2.00 および 4.00）としたサーマルストライピング解析を、直接シミュレーションコード DINUS-3 で行った。得られた結果は、次の通りである。

- (1) 配管合流部下流側に形成される温度ゆらぎ挙動は、主配管流れと枝管からの噴流との相互干渉により生じる比較的周波数の低い変動 (< 7.0 Hz) に、枝管外縁から放出される比較的周波数の高い変動 (< 10.0 Hz) が重畳したものである。
- (2) 主配管内天井面における温度ゆらぎ振幅のピーク値は、主配管内流速を増加させることによって減少した後増加する傾向を示し、その発生箇所位置は主配管内下流側に移動する。
- (3) 主配管内床面における温度ゆらぎ振幅のピーク値は、主配管内流速を増加させることによって増加する傾向となり、その発生箇所位置は主配管内下流側に移動する。

今後の研究では、配管径比、流量比、合流部上流のエルボ個数、レイノルズ数、温度差などの効果を含め、実験的研究による現象論的な考察結果を加味しながら、挙動の定量化を図ってゆく必要がある。

*：大洗工学センター基盤技術開発部熱流体技術開発室

Numerical Investigation on Thermal Striping Conditions for a Tee Junction of LMFBR Coolant Pipes (I)

- Investigation on Velocity Ratio Between the Coolant Pipes -

Toshiharu MURAMATSU*

Abstract

This report presents numerical results on thermal striping characteristics at a tee junction of LMFBR coolant pipe, carried out using a direct numerical simulation code DINUS-3. In the numerical investigations, it was considered a tee junction system consisted of a main pipe (1.33 cm^{I.D.}) with a 90° elbow and a branch pipe having same inner diameter to the main pipe, and five velocity ratio conditions between both the pipes, i.e., ($V_{\text{main}} / V_{\text{branch}}$) = 0.25; 0.5; 1.0; 2.0 and 4.0.

From the numerical investigations, the following characteristics were obtained:

- (1) Temperature fluctuations in the downstream region of the tee junction were formulated by lower frequency components (< 7.0 Hz) due to the interactions between main pipe flows and jet flows from the branch pipe, and higher frequency components (> 10.0 Hz) generated by the vortex released frequency from the outer edge of the branch pipe jet flows.
- (2) On the top plane of the main pipe, peak values of the temperature fluctuation amplitude was decreased with increasing flow velocity in the main pipe, and its position was shifted to downstream direction of the main pipe by the increase of the main pipe flow velocity.
- (3) On the bottom plane of the main pipe, contrary to (2), peak values of the temperature fluctuation amplitude was increased with increasing flow velocity in the main pipe.

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

高速炉配管合流部におけるサーマルストライピング条件の解析的検討 (I)

- 配管合流部における流速比に関する検討 -

目 次

第 1 章	緒 言
第 2 章	解析的研究の現状と今後の課題
2. 1	解析的研究の現状
2. 2	最近の動向
2. 3	今後の課題
第 3 章	配管合流部熱流動解析
3. 1	解析条件
3. 2	解析結果
第 4 章	検 討
4. 1	温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度関数
4. 2	温度ゆらぎ挙動のコヒーレンス関数
4. 3	温度ゆらぎ挙動の流速比依存性
第 5 章	結 言
	参考文献
	謝 辞

List of Figures

- Fig. 3. 1 Mesh Arrangement for Tee Junction Systems with 90° Elbow for DINUS-3 Calculations
- Fig. 3. 2 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Upstream from the Junction for Case-1
- Fig. 3. 3 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Upstream from the Junction for Case-1
- Fig. 3. 4 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Downstream from the Junction for Case-1
- Fig. 3. 5 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Downstream from the Junction for Case-1
- Fig. 3. 6 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-1
- Fig. 3. 7 Time-Averaged Sodium Temperature Transients for Case-1
- Fig. 3. 8 Time-Averaged Sodium Temperature Fluctuation Transients for Case-1
- Fig. 3. 9 Sodium Temperature Transients at l=1 Position for Case-1
- Fig. 3. 10 Sodium Temperature Transients at l=5 Position for Case-1
- Fig. 3. 11 Sodium Temperature Transients at l=10 Position for Case-1
- Fig. 3. 12 Sodium Temperature Transients at l=15 Position for Case-1
- Fig. 3. 13 Sodium Temperature Transients at l=20 Position for Case-1
- Fig. 3. 14 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Downstream from the Junction for Case-2
- Fig. 3. 15 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Downstream from the Junction for Case-2
- Fig. 3. 16 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-2
- Fig. 3. 17 Time-Averaged Sodium Temperature Transients for Case-2
- Fig. 3. 18 Time-Averaged Sodium Temperature Fluctuation Transients for Case-2
- Fig. 3. 19 Sodium Temperature Transients at l=1 Position for Case-2
- Fig. 3. 20 Sodium Temperature Transients at l=5 Position for Case-2
- Fig. 3. 21 Sodium Temperature Transients at l=10 Position for Case-2
- Fig. 3. 22 Sodium Temperature Transients at l=15 Position for Case-2
- Fig. 3. 23 Sodium Temperature Transients at l=20 Position for Case-2
- Fig. 3. 24 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Downstream from the Junction for Case-3
- Fig. 3. 25 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Downstream from the Junction for Case-3
- Fig. 3. 26 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-3
- Fig. 3. 27 Time-Averaged Sodium Temperature Transients for Case-3
- Fig. 3. 28 Time-Averaged Sodium Temperature Fluctuation Transients for Case-3
- Fig. 3. 29 Sodium Temperature Transients at l=1 Position for Case-3
- Fig. 3. 30 Sodium Temperature Transients at l=5 Position for Case-3

- Fig. 3. 31 Sodium Temperature Transients at $l=10$ Position for Case-3
- Fig. 3. 32 Sodium Temperature Transients at $l=15$ Position for Case-3
- Fig. 3. 33 Sodium Temperature Transients at $l=20$ Position for Case-3
- Fig. 3. 34 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Downstream from the Junction for Case-4
- Fig. 3. 35 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Downstream from the Junction for Case-4
- Fig. 3. 36 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-4
- Fig. 3. 37 Time-Averaged Sodium Temperature Transients for Case-4
- Fig. 3. 38 Time-Averaged Sodium Temperature Fluctuation Transients for Case-4
- Fig. 3. 39 Sodium Temperature Transients at $l=1$ Position for Case-4
- Fig. 3. 40 Sodium Temperature Transients at $l=5$ Position for Case-4
- Fig. 3. 41 Sodium Temperature Transients at $l=10$ Position for Case-4
- Fig. 3. 42 Sodium Temperature Transients at $l=15$ Position for Case-4
- Fig. 3. 43 Sodium Temperature Transients at $l=20$ Position for Case-4
- Fig. 3. 44 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Downstream from the Junction for Case-5
- Fig. 3. 45 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Downstream from the Junction for Case-5
- Fig. 3. 46 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-5
- Fig. 3. 47 Time-Averaged Sodium Temperature Transients for Case-5
- Fig. 3. 48 Time-Averaged Sodium Temperature Fluctuation Transients for Case-5
- Fig. 3. 49 Sodium Temperature Transients at $l=1$ Position for Case-5
- Fig. 3. 50 Sodium Temperature Transients at $l=5$ Position for Case-5
- Fig. 3. 51 Sodium Temperature Transients at $l=10$ Position for Case-5
- Fig. 3. 52 Sodium Temperature Transients at $l=15$ Position for Case-5
- Fig. 3. 53 Sodium Temperature Transients at $l=20$ Position for Case-5
- Fig. 4. 1 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-1
- Fig. 4. 2 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-2
- Fig. 4. 3 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-3
- Fig. 4. 4 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-4
- Fig. 4. 5 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-5
- Fig. 4. 6 Peak Frequency Characteristics with the Increasing of Reynolds Number
- Fig. 4. 7 Coherence Functions for Case-1
- Fig. 4. 8 Coherence Functions for Case-2
- Fig. 4. 9 Coherence Functions for Case-3
- Fig. 4. 10 Coherence Functions for Case-4
- Fig. 4. 11 Coherence Functions for Case-5

Fig. 4. 12 Comparison of Standard Deviation of Temperature Fluctuations at the Top Plane of the Main Pipe

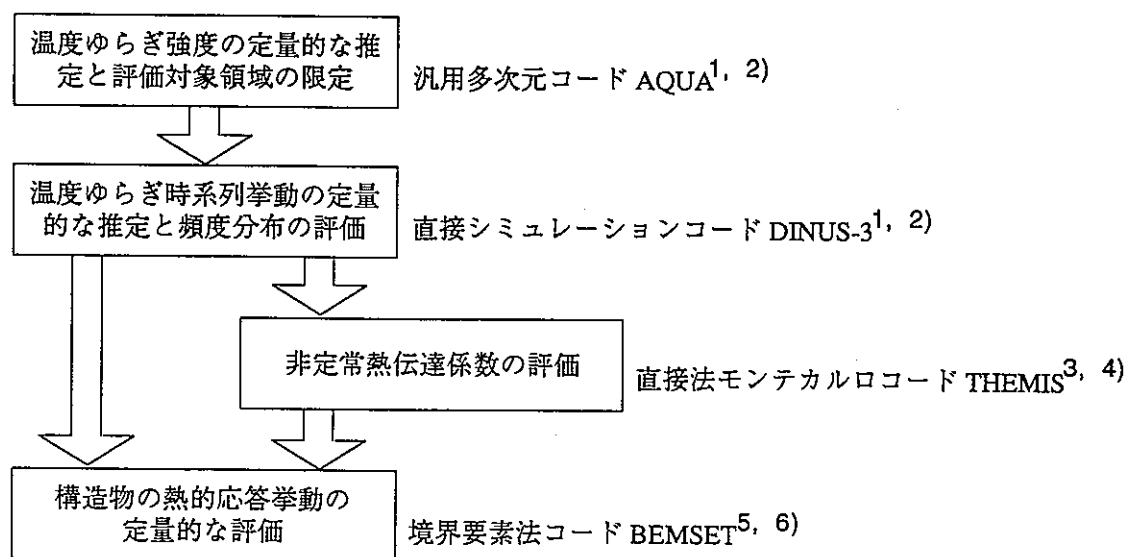
Fig. 4. 13 Comparison of Standard Deviation of Temperature Fluctuations at the Bottom Plane
of the Main Pipe

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。



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

って、評価すべき原子炉構造物表面での温度ゆらぎ挙動の時系列挙動を、現存する計算機能力の範囲内で得ることができ、構造物の定量的な熱的応答を評価することが可能となる。

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

他方、国際原子力機関 (IAEA; International Atomic Energy Agency) では、高速炉プラントの多くの部位で発生する流体温度ゆらぎによる高サイクル熱疲労 (サーマルストライピング) に対し、解析的評価手法開発の現状を把握するとともにその高度化を図ることを目的として、フランス高速原型炉フェニックスの 2 次主冷却系配管で発生した熱疲労事象を評価対象とした国際ベンチマーク演習が計画 (1996 - 1998) され、現在実施の段階にある [7]。当該ベンチマーク演習において回答が要求されている情報は、(1) 高低温冷却材の混合領域の空間位置、(2) 構造部材各部での温度ゆらぎ挙動、(3) 構造部材の熱疲労発生箇所、(4) 初期亀裂発生までの運転時間、(5) 構造部材に印加される熱サイクルに対する亀裂進展特性、(6) 90,000 時間運転後の亀裂深さなど、原子炉設計段階で必要となると考えられる具体的項目が挙げられており、上記解析的評価システムによる結果の定量的な妥当性を検討する上で極めて有益な知見を得ることができる。

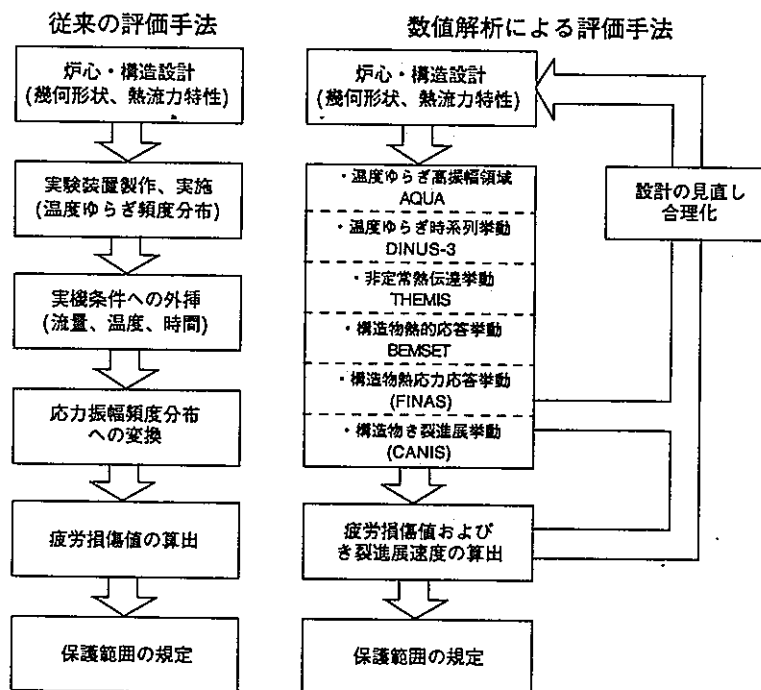
本報では、配管合流部におけるサーマルストライピング現象の基本的特性を把握することを目的として、当該部における流速比を変化させた場合の特徴について述べる。

第2章 解析的研究の現状と今後の課題

2.1 解析的研究の現状

2.1.1 解析的評価システム

これまでに開発された解析的評価システムを、従来の実験的手法による評価法と比較して以下に示す。下図に示した解析的評価システムの特徴は、従来では過度な保守性を見込まざるを得なかった実機条件への外挿や応力振幅頻度分布への変換、更には設計合理化達成のための繰り返し作業の実施を阻んでいた膨大な費用と時間が要求される大型ナトリウムモックアップ実験の実施などの問題を留意に解決することができる点にある。また、原子炉設計時に考慮すべき現実的な安全裕度などを具体的に定量化することによって、高度に確保された安全性と大幅に向上された経済性を両立する原子炉構造を創出することができる面も合わせ持つ。



2.1.2 解析コードの概要

(1) 汎用多次元コード AQUA [1, 2]

AQUA コードの特徴は、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 次の正確度を有する QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) 法 [8] を、また乱流モデルとして k-e [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 (モデル定数は何れも文献記載の標準値を使用) 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 (観測変数: 流速成分、乱流諸量およびエンタルピーの時間ステップ間での相対変動率、制御変数: クーラン条件に対する緩和係数、メンバーシップ関数: 相対変動率では 10^{-6} - 10^2 、緩和係数では 0 - 1 の台集合をガウス分布関数により均等 5 分割、推論合成法: 直接法) した点にある。

(2) 直接シミュレーションコード DINUS-3 [1, 2]

DINUS-3 コードの主たる特徴は、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]、また数値振動の発生を除去するため、定性推論手法による学習機構を取り入れた時刻幅に対する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も寄与している。

(3) 直接法モンテカルロコード THEMIS [3, 4]

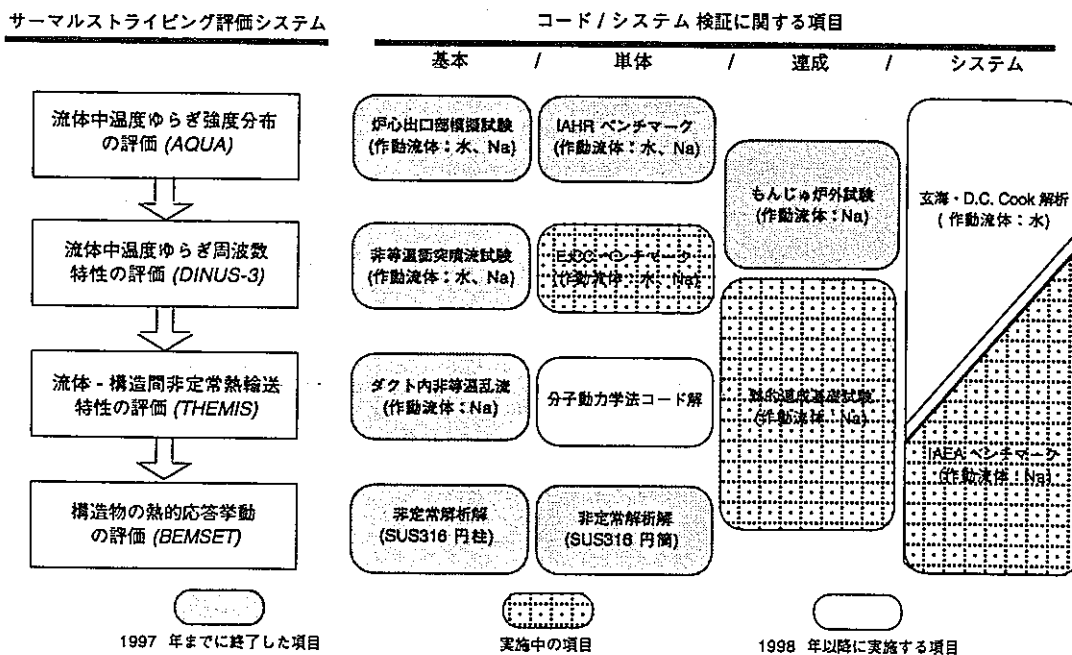
THEMIS コードの特徴は、分子運動論でのボルツマン方程式を基礎式とし、これを Bird による直接法モンテカルロモデル [16] により求解することにある。分子モデルの規定では、液体ナトリウムを単原子分子と仮定し、これを剛体球として取り扱う。なお、分子境界条件では、(i) 鏡面反射モデル、(ii) 拡散反射モデルおよび (iii) 流入境界モデルを用意し、この内、拡散反射モデルでは反射分子の温度は壁温と異なる値を取ることを許容するとともに、反射分子の速度は半面マクスウェル分布に従うと仮定している。計算スキームでは、分離の原理 (the principle of uncoupling) に基づくタイムマーチング法が使用される。

(4) 構造物熱的応答評価コード BEMSET [5, 6]

BEMSET コードの特徴は、熱弾性線形化式を基礎式とし、時間積分に 2 次時間内挿法を用い、また形状近似関数に四角形 2 次要素を用いた境界要素法によって離散化していることにある。この境界要素法は、評価対象の領域境界だけを要素分割して問題としての次元を 1 次元下げることができる境界型解法であり、有限要素法などの領域型解法に比べ入力データや計算時間を初めとするコード運用上の取り扱いが極めて容易であるという特徴を持つ数値解法である。

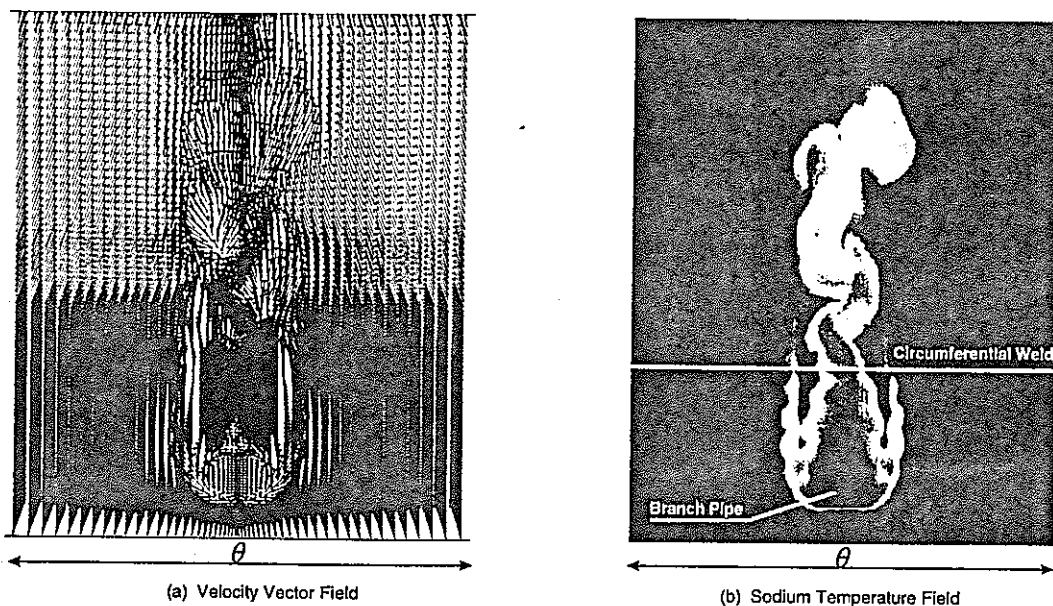
2. 1. 3 解析コード検証の現状

解析コード単体および連成条件での検証状況は以下の通りであって、その大半が概ね終了した段階にある。



2.2 最近の動向

国際原子力機関主催ベンチマーク問題の熱流動解析結果によれば、以下に示す様に、枝管から流出した高温ナトリウムが主配管壁に沿って左右に振動しながら下流側に押し流される様子が評価された。これは、枝



管からの高温ナトリウムが主配管内において柔な障害物の役割を果たしたことによる、一種のカルマン渦に起因した流動挙動であることが推察される。更に、枝管から流出した高温ナトリウム噴流の両脇から、概ね左右対称に下流側に広がる高温領域が認められる。これは、噴流両外縁から剥離する流れに起因するものである。なお、高サイクル疲労による破損が生じた噴流両外縁と周方向溶接線とが交差する周方向 2ヶ所での温度ゆらぎ時系列挙動は、比較的周波数の低い温度ゆらぎ (~ 0.1 Hz オーダー) の上に乱流混合によって発生したと考えられる周波数の高い温度ゆらぎ (~ 100 Hz オーダー) が重畳したものであることが、DINUS-3 コードによる解析結果 (エルボによる 2 次流れを境界条件として入力; 実験結果 [17], [18]) およびフェニックス炉での配管外壁温度測定結果から明らかとなっている。また、構造物の熱応力解析結果 [19] によれば、この低周波温度ゆらぎによる熱荷重と配管系にかかる現実的な平均応力を考慮した場合、比較的短時間でクラックが構造物を貫通する可能性が評価されている。

このような構造物の健全性に有意な熱荷重を与える低周波温度ゆらぎ挙動の影響は、これまでの炉心上部機構下端領域を対象としたサーマルストライピング評価では問題視されてこなかった。この背景には、これまで評価の対象としてきた炉心上部機構下端領域でのレイノルズ数 Re が極めて大きく、乱流混合のみに着目してきたこと、また実プラントで考えられる外乱要素を考慮してこなかったことなどが挙げられる。すなわち前者については、当該領域でのレイノルズ数が 10^6 のオーダーであり、また燃料集合体内を冷却材が高流速で通過した直後の熱流動挙動であることから、温度ゆらぎ挙動の低周波成分は (実験的にも [20]) 評価の対象とはされてこなかった。一方後者については、実プラントで想定しうる外乱要素として、主循環ポンプの脈動、主循環流量の定値制御変動、構造物などによるクロスフロー成分 (以上、炉心上部機構下端領域) や配管エルボなどによる 2 次流れ成分、配管内流速分布未発達 (以上、配管系合流領域) などを排除し、理想化された条件の下で様々なサーマルストライピング研究が展開されてきたことに起因するものである。

以上のような知見の下、「もんじゅ」安全総点検の一環としてナトリウム内包壁の健全性評価が実施され、合流部ノズル有無の効果、上流側エルボ有無の効果、合流配管間平均温度差の効果などが解析的に検討されつつある。

2.3 今後の課題

サーマルストライピング現象の素過程（含む、低周波温度ゆらぎ挙動および構造評価）に対する検証の現状を以下にまとめる。

	解析コード	開発	検証 (単体)	検証 (システム)
高周波温度 ゆらぎ成分 (乱流混合)	AQUA DINUS-3			With DINUS-3 With BEMSET
低周波温度 ゆらぎ成分 (流動不安定性)	AQUA DINUS-3			
境界層温度 ゆらぎ減衰特性	DINUS-3			With BEMSET
熱伝達過渡特性	THEMIS BEMSET			With DINUS-3
き裂発生条件	FINAS			
き裂進展特性	CANIS			
実機総合評価	all			

上図においてハッチングを施した項目は、現時点で検証が終了している項目である。解析コードの単体検証として唯一残されている項目は、前節で述べた外乱などに起因して発生すると考えられる低周波温度ゆらぎ成分の模擬性の確認である。今後の研究では、基礎実験などによって低周波温度ゆらぎ挙動の特性を定量的に把握するとともに、構造評価コードまでを含めた解析コード群のシステムレベルでの検証に重点を置く必要がある。

第3章 配管合流部熱流動解析

3.1 解析条件

解析的検討を行うに当たっての基本体系として、内径 ($d : 0.0133 \text{ m}$) の等しい主配管と枝管の合流部を取り上げる (Fig. 3.1 参照)。なお、合流部上流 $6.4 d$ 位置 (主配管) に 90° エルボを考慮する。また、合流部下流側 $2 d$ 位置 (主配管) に、典型的な T 字継手を考慮して周方向溶接線が存在するものとする。主配管と枝管との間の流速比は、以下の 5 ケースを対象とする。

	Inlet Velocity (m/s)		Vm / Vb
	Main Pipe, Vm	Branch Pipe, Vb	
Case-1	0.072	0.288	0.25
Case-2	0.144	ditto	0.50
Case-3	0.288	ditto	1.00
Case-4	0.576	ditto	2.00
Case-5	1.152	ditto	4.00

以下に数値計算条件を列記する。

項	目	内	容
解析コード	:	直接シミュレーションコード	DINUS-3
座標系	:	x-y-z 直交	3次元
メッシュ分割	:	$28^i \times 28^j \times 74^k$	(Fig. 3.1 参照)
重力方向	:	x 方向	
入口流速分布	:	断面平均値	一様
入口温度	:	主配管 120°C
		枝管 230°C
サンプリング間隔	:	10 msec	

3.2 解析結果

Case-1 を代表例として、エルボ通過直後 (合流部より、4 d および 1 d 上流側) の 2 次流れ分布の様子を Figs. 3.2 - 3.3 に示す。同図中には、4.0 秒から 5.8 秒までについて 0.2 秒毎に 2 次流れ分布の時間推移を示した。結果より分かるように、エルボ通過直後から枝管合流部までの区間では、2 次流れは安定恒常的に発生し、有意な時間変化は生じていない。

[Case-1]

Figs. 3.4 - 3.5 に、それぞれ枝管合流部から 1 d および 4 d 下流側での 2 次流れ分布の時間推移 (t = 18.2 秒 - 20.0 秒) を示す。結果より分かるように、流速 u 成分と流速 v 成分の合成値 $((u^2 + v^2)^{0.5})$ に関するホットスポット領域が時間的に大きく変動し、その程度は枝管合流部からより下流側に離れた位置 (枝管合流部より 4 d 下流側) で顕著である。これは枝管から主配管内に垂直に流入した噴流が、合流と同時に主配管流れ方向に運動量ベクトルを代え、下流側に向かうにしたがって 2 次流れ成分ホットスポットの非定常変動長周期成分が確立されてゆくためであると解釈できる。

Fig. 3.6 に、主配管中央断面 (j = 10) における 2 次流れ (流速 u 成分と流速 v 成分の合成値 $((u^2 + v^2)^{0.5})$) 分布の時間推移 (t = 18.2 秒 - 19.2 秒) を示す。同図に示した結果では、枝管から主配管内に垂直に流入した噴流から、周期的に 2 次流れ成分ホットスポットが剥離を起こし、これが主配管内上下方向に振動しながら下流側に押し流されている様子を見ることができる。

Figs. 3.7 - 3.8 は、10 秒間のシミュレーションで得られた温度時系列データ (10 ms 間隔で 1000 点) を、それぞれ下式により時間平均操作を施した平均温度およびその標準偏差の空間分布 (j = 10; 主配管中央断面) である。

$$\bar{T}(x, y, z) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i(x, y, z) \tag{3-1}$$

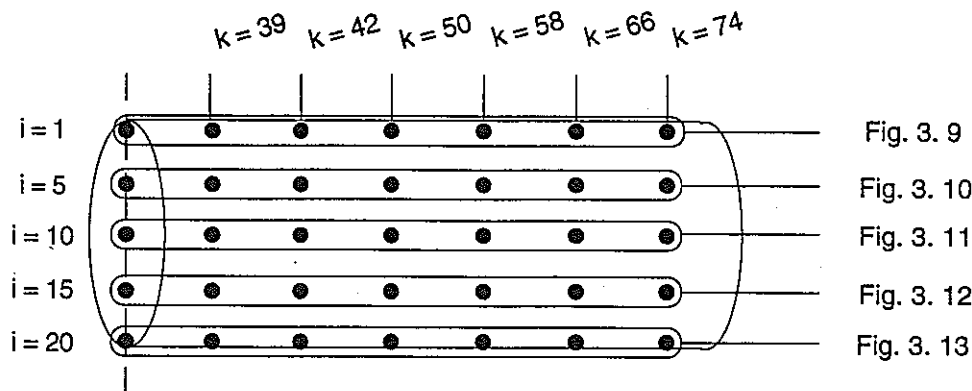
$$\sigma(x, y, z) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i(x, y, z) - \bar{T}(x, y, z))^2} \tag{3-2}$$

ここで、

- \bar{T} : 時間平均温度
- σ : 温度ゆらぎ標準偏差
- N : データ点数 (= 1000)
- T_i : データ i 番目の温度
- (x, y, z) : 座標

である。時間平均温度分布の結果では、枝管から主配管内に流出する高温ナトリウムのインベントリが主配管のその 4 倍と大きいため、合流部より下流側での平均温度は枝管からの高温ナトリウム温度に極めて近い温度となっている。この場合の温度剪断面は、合流部に極めて近い場所に位置している。一方、温度ゆらぎ標準偏差の分布では、温度剪断面直下で最も大きな値を示していることが分かる。またその上下方向位置は、配管天井面に隣接した場所であることが理解できる。これは、枝管から主配管内に流出する高温ナトリウムの流速が主配管内のそれよりも大きく、これが主配管天井面に衝突することに起因する。

Figs. 3. 9 - 3. 13 に、主配管内各位置での温度時系列挙動を 10 秒間について比較する。比較位置は次の通りである。



まず全体的な傾向として、合流部から下流側に向かうに従い、温度ゆらぎ振幅および周波数が減少することが分かる。すなわち、合流部直下位置で見られる高振幅・高周波成分を持つ温度ゆらぎ挙動は、主配管内を下流方向に流れるに伴い、減衰している。この傾向は、主配管内上下各位置 ($i = 1, 5, 10, 15$ and 20) について同様である。また、最も大きな温度ゆらぎ振幅を示す位置は、 $k = 42$ (周方向溶接線位置直下) であり、これは各主配管内上下各位置で同様な場所である。一方、各主配管内上下各位置で最も大きな温度ゆらぎ振幅を示す位置は $k = 5$ (主配管天井面より約 3 mm 位置) であり、 $k = 1$ (主配管天井面より約 0.3 mm 位置) での振幅よりも大きい。これは、 $k = 1$ が境界層内に位置し、境界層内での乱流拡散効果低下による減衰作用を受けた結果であると解釈できる。

[Case-2]

枝管合流部から 1 d および 4 d 下流側での 2 次流れ分布の時間推移を Figs. 3. 14 - 3. 15 に示す。同図による結果は、Case-1 でのそれらと同様に、流速 u 成分と流速 v 成分の合成値に関するホットスポット領域が時間的に大きく変動し、枝管合流部からより下流側に位置する 4 d での変動の方が 1 d でのものよりも顕著である。この主因も同様に、枝管合流部下流側に向かうに従い、2 次流れ成分ホットスポットの非定常変動長周期成分が確立されてゆくことによるものであると推察される。

主配管中央断面 ($j = 10$) における 2 次流れ分布の時間推移を Fig. 3. 16 に示す。結果より分かる通り、枝管より流出した噴流から、周期的に 2 次流れ成分ホットスポットを剥離・放出し、主配管内上下方向に振動しながら下流側に押し流される。この傾向は Case-1 でのそれと概ね等価であるものの、次の点で差異が生じている。すなわち、(1) 2 次流れホットスポット領域の大きさが拡大していること、および (2) ホットスポット領域が主配管天井面まで到達していないことである。これらは、主配管流速が Case-1 に比べて 2 倍となっていると同時に、主配管流速が枝管からの噴流流出をブロックしたことによるものであると考えることができる。すなわち、主配管流速の増加は、枝管からの噴流の剥離量を増加させ、また天井面に到達しようとする枝管噴流を妨害するように作用したと解釈できる。

式 (3-1) および式 (3-2) を用いて時間平均された主配管中央断面 ($j = 10$) における温度分布およびその標準偏差分布を Figs. 3. 17 - 3. 18 に示す。時間平均温度分布の結果では、主配管内を流れる低温ナトリウム量が Case-1 でのその 2 倍と大きくなっていることから、枝管合流部下流側の温度は Case-1 での結果よりも低めの値を示すようになっている。なお、枝管合流部下流側での熱流動挙動が不安定温度成層流 (重力方

向に対し、上側が低温流体に、また下側が高温流体に満たされた状態) となっていることも、温度拡散を促進させ枝管合流部下流側の時間平均温度を均一化させた一つの要因であると考えることができる。一方、温度ゆらぎ標準偏差分布では、Case-1 での結果に比べ、高振幅領域が主配管天井面により近接し、また下流側に拡大していることが分かる。これらの挙動は、主配管内流速が増加し、配管内全体の乱流強度が上昇したことによるものであると考えることができる。

主配管内各位置での10秒間の温度時系列挙動を、Figs. 3. 19 - 3. 23 に比較する。比較対象点は、Case-1 の場合と同じである。結果より分かるように、枝管合流部から下流側に向かうに従って低下する高振幅・高周波成分の挙動については、Case-1 でのものに概ね等しい。しかしながら、 $k = 1$ (主配管天井面より約0.3 mm 位置) での挙動は Case-1 の結果に比べ、相対的に低周波成分の寄与が増大しており、より非定常性が増したものとなっている。

[Case-3]

枝管合流部下流側 $1d$ および $4d$ 位置における2次流れ分布の推移を Figs. 3. 24 - 3. 25 にそれぞれ示す。同結果は、Cases-1 および -2 と同様に、流速 u 成分と流速 v 成分の合成値に関するホットスポット領域が時間的に大きく変動している様子を見ることができる。しかしながら、下流側位置の違いによる2次流れ分布の大きさの差異は、Cases-1 および -2 の場合よりも小さなものとなっている。この原因は、次に述べるエルボによる2次流れ強度が強ク影響しているものと考えられる。

主配管中央断面 ($j = 10$) における2次流れ分布の時間推移を Fig. 3. 26 に示す。同図に示した当該分布に関する大きな特徴は、 90° エルボにより生じた2次流れの強さが、枝管合流部下流側でのそれと同等である点にある。これによって、枝管より流出する噴流は、エルボで生じた間欠的に振動する2次流れを持つ主流の衝突を受け、合流後の熱流動挙動を複雑なものにしている。すなわち、枝管噴流から剥離・放出される2次流れ成分ホットスポットは、枝管合流前の2次流れ変動周期の影響を受け、2次流れ成分は枝管噴流テール部で合体・分離が見られるようになる。

主配管中央断面 ($j = 10$) における時間平均温度分布 (式 (3-1) 使用) および温度ゆらぎの時間平均標準偏差分布 (式 (3-2) 使用) を Figs. 3. 27 - 3. 28 に示す。時間平均温度分布の結果では、主配管側の流速が大きく、枝管からの噴流をブロックしているため、枝管からの高温ナトリウムは主配管天井面壁には到達できず、主配管床面壁を這うように下流側に押し流されている様子が再現されている。また、不安定な温度成層化現象の存在から、主配管下流側の温度分布は急激に解消され、ほぼ均一の温度となっていることが分かる。一方、温度ゆらぎ標準偏差分布では、Cases-1 および -2 の結果に比べ、高振幅領域が主配管天井面により近接し、また下流側に拡大していることが分かる。

主配管内各位置での10秒間の温度時系列挙動を、Figs. 3. 29 - 3. 33 に比較する。比較対象点は、前記と同様である。全体的な傾向としては、主配管流速の増加により、乱流現象に特有な定常不規則温度ゆらぎ挙動が生じていることが分かる。また興味深い挙動として、主配管天井面 ($i = 1$) 上の $k = 39$ 位置 (Fig. 3. 29 最上図参照) において、スパイク状の温度ゆらぎが生じている点が挙げられる。これは前述の通り、枝管噴流から周期的に剥離・放出される2次流れ成分ホットスポットによって、主配管内を流れる低温ナトリウム中に枝管からの高温ナトリウムが間欠的に進入している挙動の存在を示唆するものである。このようなスパイク状の温度ゆらぎが生じる位置は主配管中央に向かうに従って減衰し、主配管中央断面より下側の領域では定常不規則な温度ゆらぎ挙動が支配的なものとなる。

[Case-4]

Figs. 3. 34 - 3. 35 に、枝管合流部下流側 1 d および 4 d 位置における 2 次流れ分布の推移をそれぞれ示す。同結果は、Cases-1 - 3 と同様に、流速 u 成分と流速 v 成分の合成値に関するホットスポット領域が時間的に大きく変動している様子を見ることができる。しかしながら、下流側位置の違いによる 2 次流れ分布の大きさの差異は、Cases-1 - 3 での場合よりも小さなものとなっており、上流側エルボによる 2 次流れ強度が強く影響した結果となっている。

主配管中央断面 ($j = 10$) における 2 次流れ分布の時間推移を Fig. 3. 36 に示す。同図に示した当該分布に関する大きな特徴は Case - 3 と同様に、 90° エルボにより生じた 2 次流れの強さが、枝管合流部下流側でのそれと同等である点にある。これによって、枝管より流出する噴流は、エルボで生じた間欠的に振動する 2 次流れを持つ主流の衝突を受け、合流後の熱流動挙動を複雑なものにしている。

主配管中央断面 ($j = 10$) における時間平均温度分布および温度ゆらぎの時間平均標準偏差分布を Figs. 3. 37 - 3. 38 に示す。時間平均温度分布の結果では、主配管側の流速が大きく、枝管からの噴流をブロックしているため、枝管からの高温ナトリウムは主配管天井面壁には到達できず、主配管床面壁を這うように下流側に押し流されている様子が、以上のケースに比べてより強調されたものとなっている。一方、温度ゆらぎ標準偏差分布では、Cases-1 - 3 での結果に比べ、高振幅領域が主配管天井面により近接するとともに、下流側に拡大していることが分かる。

主配管内各位置での 10 秒間の温度時系列挙動を、Figs. 3. 39 - 3. 43 に比較する。比較対象点は、前記と同様である。全体的な傾向としては、主配管流速の増加により、乱流現象に特有な定常不規則温度ゆらぎ挙動が生じていることが分かる。また主配管天井面 ($i = 1$) 上の $k = 39$ 位置 (Fig. 3. 29 最上図参照) での挙動では、スパイク状の温度ゆらぎが明確に現れていることが分かる。これは前述の通り、枝管噴流から周期的に剥離・放出される 2 次流れ成分ホットスポットによって、主配管内を流れる低温ナトリウム中に枝管からの高温ナトリウムが間欠的に進入している挙動の存在を示唆するものである。このようなスパイク状の温度ゆらぎが生じる位置は主配管中央に向かうに従って減衰し、主配管中央断面より下側の領域では定常不規則な温度ゆらぎ挙動が支配的なものとなる。

[Case-5]

Figs. 3. 44 - 3. 45 に、枝管合流部下流側 1 d および 4 d 位置における 2 次流れ分布の推移をそれぞれ示す。同結果は、Cases-1 - 3 と同様に、流速 u 成分と流速 v 成分の合成値に関するホットスポット領域が時間的に大きく変動し、その領域を広げている様子を見ることができる。しかしながら、下流側位置の違いによる 2 次流れ分布の大きさの差異は、極めて小さな結果となっている。

主配管中央断面 ($j = 10$) における 2 次流れ分布の時間推移を Fig. 3. 66 に示す。同図に示した当該分布に関する結果より、極めて広い範囲で 2 次流れ分布が生じていることが分かる。

主配管中央断面 ($j = 10$) における時間平均温度分布および温度ゆらぎの時間平均標準偏差分布を Figs. 3. 47 - 3. 48 に示す。時間平均温度分布の結果より、主配管側の流速が極めて大きく、枝管からの噴流をブロックしているため、枝管からの高温ナトリウムは主配管床面壁を這うように下流側に押し流されている様子が分かる。一方、温度ゆらぎ標準偏差分布では、Cases-1 - 3 での結果に比べ、高振幅領域が主配管天井面により近接するとともに、主配管床面にまで拡大していることが分かる。

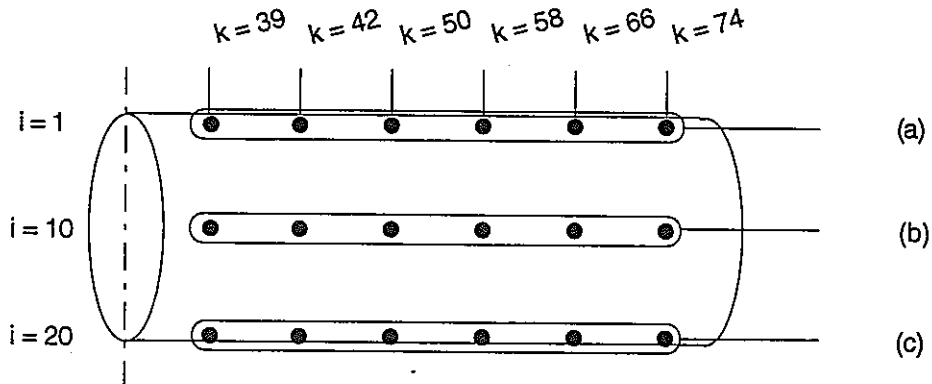
主配管内各位置での 10 秒間の温度時系列挙動を、Figs. 3. 49 - 3. 53 に比較する。比較対象点は、前記と同様である。全体的な傾向としては、主配管流速の増加により、乱流現象に特有な定常不規則温度ゆらぎ挙

動が卓越していることが分かる。また主配管天井面 ($i = 1$) 上の $k = 39$ 位置 (Fig. 3. 29 最上図参照) での挙動では、スパイク状の温度ゆらぎがより鮮明に現れていることが分かる。このようなスパイク状の温度ゆらぎが生じる位置は主配管中央に向かうに従って減衰し、主配管中央断面より下側の領域では定常不規則な温度ゆらぎ挙動が支配的なものとなっている。

第4章 検討

4.1 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度関数

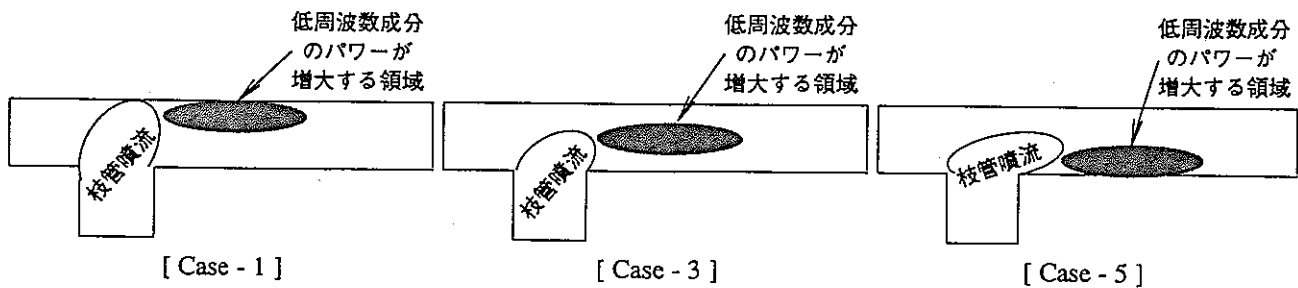
Figs. 4.1 - 4.5 に、主配管内主要位置における自己パワースペクトル密度関数の比較を各ケースについて示す。比較対象点は、次の通りである。



結果より分かる通り、主配管内流速を増加させた場合 (Case - 1 → Case - 5) の特徴は、以下の 2 点に縮約することができる。すなわち、

- (1) 低周波帯 (< 7.0 Hz) におけるパワースペクトル密度の増減に関する点
- (2) 高周波帯 (> 10.0 Hz) に現れるピーク周波数の変動に関する点

である。(1) のパワースペクトル密度の増減に関する特徴は、主配管内流速を増加させることにより、低周波帯全体のパワースペクトル密度が上昇を起こす主配管内上下方向位置 ($i = 1 \sim 20$) が変化する点にある。すなわち Cases-1、-3 および -5 の結果 (それぞれ Figs. 4.1、4.3 および 4.5 参照) を比較した場合、低周波帯全体のパワースペクトル密度が上昇する主配管内上下方向位置が、 $i = 1$ 位置から $i = 20$ 位置へと移動していることが分かる。これは、枝管からの噴流が主配管内に流入する過程の熱流動現象に着目すると、以下のように解釈することができる。すなわち、主配管内流速が増加する場合、枝管からの噴流は主配管内の天井面に到達することができなくなり、枝管からの噴流は下図のように主配管内下流側に押し流されたものとなる。ここで、その下流側での低周波帯全体のパワースペクトル密度が増加する領域を重ね合わせると、こ

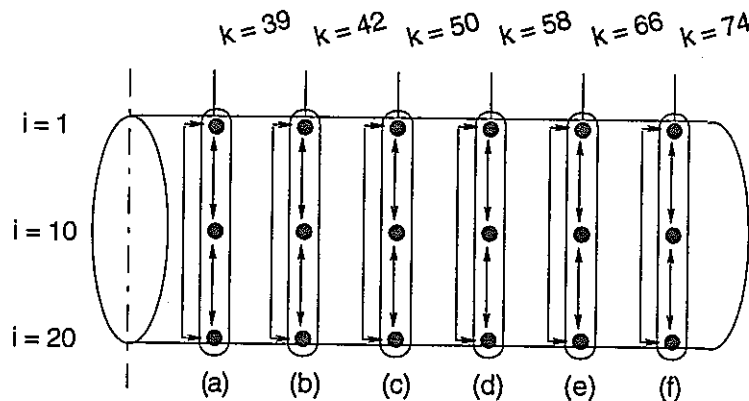


のパワースペクトル密度の増加は主配管内流動と枝管からの噴流の相互作用によって生じているものと推察することができる。更にこの相互作用は、枝管噴流全体の不安定挙動など、比較的ゆっくりとした運動に支配されるものであると考えられる。

(2) の高周波帯 (> 10.0 Hz) に現れるピーク周波数の変動に関する特徴は、主配管内流速を増加させることにより、高周波帯中に現れる比較的鋭いピーク周波数位置が高周波側にシフトする点にある。このシフト挙動をレイノルズ数 Re の関数として Fig. 4.6 にまとめる。なお、レイノルズ数算出に際しては、主配管内平均流速、主配管内径および主配管入口ナトリウム温度 (120 °C) での動粘性係数を特性量として用いた。結果より分かる通り、レイノルズ数の増加に対して高周波帯中のピーク周波数はほぼ直線的に増大するものの、高レイノルズ数帯域でこの増加が鈍化している。この傾向から同ピーク周波数の増加は、主配管内流速の増加に伴う枝管噴流外縁からの渦放出周波数の増大に起因したものであると推定できる。この事実は、主配管内流速を増加させるに従い、主配管のより下流側にも同ピークが現れ始めることから裏付けられる。すなわち、枝管噴流外縁から放出される渦の強度が、主配管内流速に対して直線的に増加することを示唆している。

4.2 温度ゆらぎ挙動のコヒーレンス関数

主配管内主要位置同士の温度ゆらぎ挙動に関するコヒーレンス関数を Figs. 4.7 - 4.11 に示す。同関数計算に関する位置関係は、次の通りである。



同比較結果より、以下の特徴を見ることができる。

- (1) 主配管下流側に向かうに従い、10 Hz 近傍以下の帯域でのコヒーレンシが増加する。この帯域のコヒーレンシが増加を始める主配管内位置は、主配管内流速が増加するに従って下流側に移行する。
- (2) 10 Hz 近傍以下の帯域でのコヒーレンシが増加した場所においては、主配管内上下各点相互のコヒーレンシはすべて大きな値を持つ。
- (3) 高周波帯中に現れる比較的鋭いピーク周波数位置 (前節参照) でのコヒーレンシは、主配管内流速の大小に依らず、枝管合流部直後から大きな値を持つ。しかしながら、主配管下流側に向かうに従い、同ピーク周波数位置でのコヒーレンシの値は低下する。

以上の特徴より、枝管合流部直下では枝管噴流外縁からの高周波渦放出挙動が顕著となるものの、主配管下流側に向かうに従って急激に減衰し、替わって枝管噴流全体の不安定挙動などに起因して発生する比較的ゆっくりとした運動が支配的となることが分かる。

4.3 温度ゆらぎ挙動の流速比依存性

主配管内天井面および床面での温度ゆらぎ標準偏差分布を、Figs. 4. 12 - 4. 13 に示す。まず、天井面での標準偏差分布の傾向では、主配管内流速が増加するに従い、温度ゆらぎ標準偏差ピーク値が一旦減少した後、増加してゆく様子が見られる。また、このピーク値を示す主配管内位置は主配管内流速の増加に対して下流側に移動する。これら傾向の内、温度ゆらぎ標準偏差ピーク値が主配管内流速の増加に伴って減少してゆく挙動は、主配管内流速が増加することによって枝管噴流が主配管内天井面にまで到達できなくなり、結果として主配管内上下方向中央位置領域において温度ゆらぎ挙動の強度が卓越するためである。また、主配管内流速の増加に対して、途中から温度ゆらぎ標準偏差ピーク値が増加に転じる挙動は、系全体での平均的な温度ゆらぎ標準偏差レベルが、境界層内での温度ゆらぎ振幅の減衰挙動を上回ったことに対応する。一方、温度ゆらぎ標準偏差ピークが発生する位置が主配管内流速の増加に伴って主配管内下流側に移動してゆく挙動は、主配管内流速の増加に伴って枝管噴流が主配管内下流側に押し流され、主配管内上下方向中央位置領域で発生した温度ゆらぎ挙動が主配管内主流に輸送され、この輸送過程で温度ゆらぎ挙動が主配管内天井面に到達するためであると解釈できる。

主配管内床面での温度ゆらぎ標準偏差分布の傾向は、主配管内流速の増加により、標準偏差ピーク値が増大するとともに、その発生位置が主配管内下流側に移動してゆく様子が見られる。これは主配管内流速の増加により枝管噴流が主配管内下流側に押し流されるため、これによる後流が大きく寄与していると判断できる。すなわち前節で述べたように、主配管流速の増加によって、比較的low周波の温度ゆらぎ挙動の発生位置が主配管内天井面から床面に移動するためであると考えられる。

以上より、今回検討した枝管合流不幾何形状条件下においては、

- (1) 主配管内天井面における温度ゆらぎ振幅のピーク値は、主配管内流速を増加させることによって減少した後増加する傾向を示し、その発生箇所位置は主配管内下流側に移動する。
- (2) 主配管内床面における温度ゆらぎ振幅のピーク値は、主配管内流速を増加させることによって増加する傾向となり、その発生箇所位置は主配管内下流側に移動する。

ことが明らかとなった。今後の研究では、

- (a) 配管径比
- (b) 流量比
- (c) 合流部上流のエルボ個数
- (d) レイノルズ数
- (e) 温度差

などの効果を含め、実験的研究による現象論的な考察結果を加味しながら、挙動の定量化を図ってゆく必要がある。

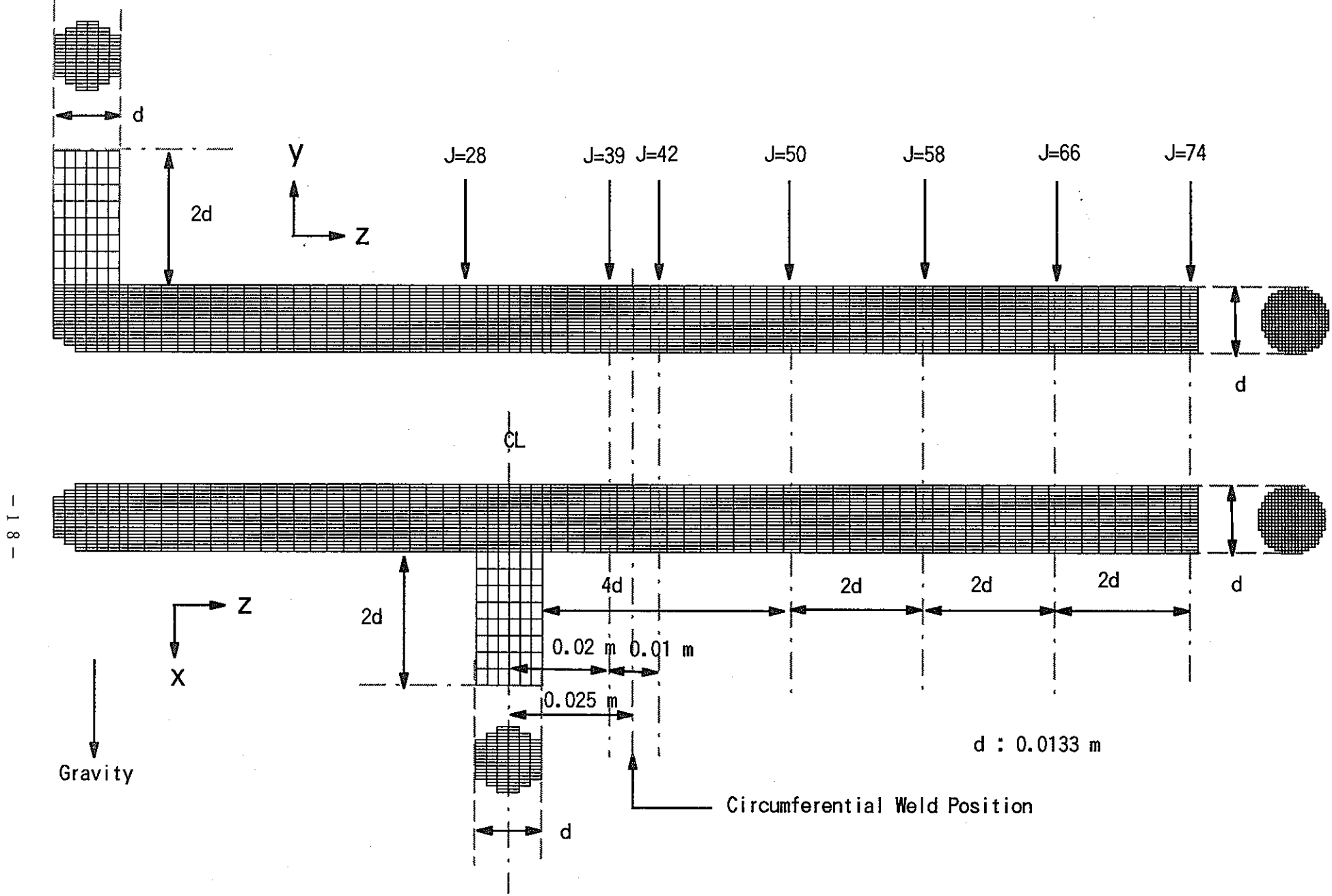
第5章 結 言

内径の等しい 90° エルボ付き主配管と枝管から成る配管系合流部に対し、流速比をパラメータ (主配管流速 / 枝管流速 : 0.25, 0.50, 1.00, 2.00 および 4.00) としたサーマルストライピング解析を、直接シミュレーションコード DINUS-3 で行った。得られた結果は、次の通りである。

- (1) 配管合流部下流側に形成される温度ゆらぎ挙動は、主配管流れと枝管からの噴流との相互干渉により生じる比較的周波数の低い変動 (< 7.0 Hz) に、枝管外縁から放出される比較的周波数の高い変動 (< 10.0 Hz) が重畳したものである。
- (2) 主配管内天井面における温度ゆらぎ振幅のピーク値は、主配管内流速を増加させることによって減少した後増加する傾向を示し、その発生箇所位置は主配管内下流側に移動する。
- (3) 主配管内床面における温度ゆらぎ振幅のピーク値は、主配管内流速を増加させることによって増加する傾向となり、その発生箇所位置は主配管内下流側に移動する。

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、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 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 (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、国際原子力機関主催「実炉データを用いた熱構造力学・熱流動解析コードの検証」研究プログラム(I)、仏国高速炉フェニックスでの高サイクル熱疲労事象の係わる熱流動ベンチマーク、PNC TN9410 97-058 (1997).
- (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) 須藤 浩三、高見 敏弘、矢野 賢司、円形断面をした 90° ベンド内の乱流、日本機械学会誌論文集 (B 編)、58 巻 548 号 (1992).
- (18) 須藤 浩三、高見 敏弘、ベンド内の旋回流れ、日本機械学会誌論文集 (B 編)、60 巻 570 号 (1994).
- (19) 笠原 直人、国際原子力機関主催「実炉データを用いた熱構造力学・熱流動解析コードの検証」研究プログラム(II)、仏国高速炉フェニックスでの高サイクル熱疲労事象の係わる構造ベンチマーク、PNC TN9410 97-082 (1997).
- (20) Betts, C., Boorman, C., Sheriff, N., Thermal Striping in Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactors, Proc. 2nd Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp. 1292-1301, Santa Barbara, USA (1983).



- 18 -

Fig. 3. 1 Mesh Arrangement for Tee Junction Systems with a 90° Elbow for DINUS-3 Calculations

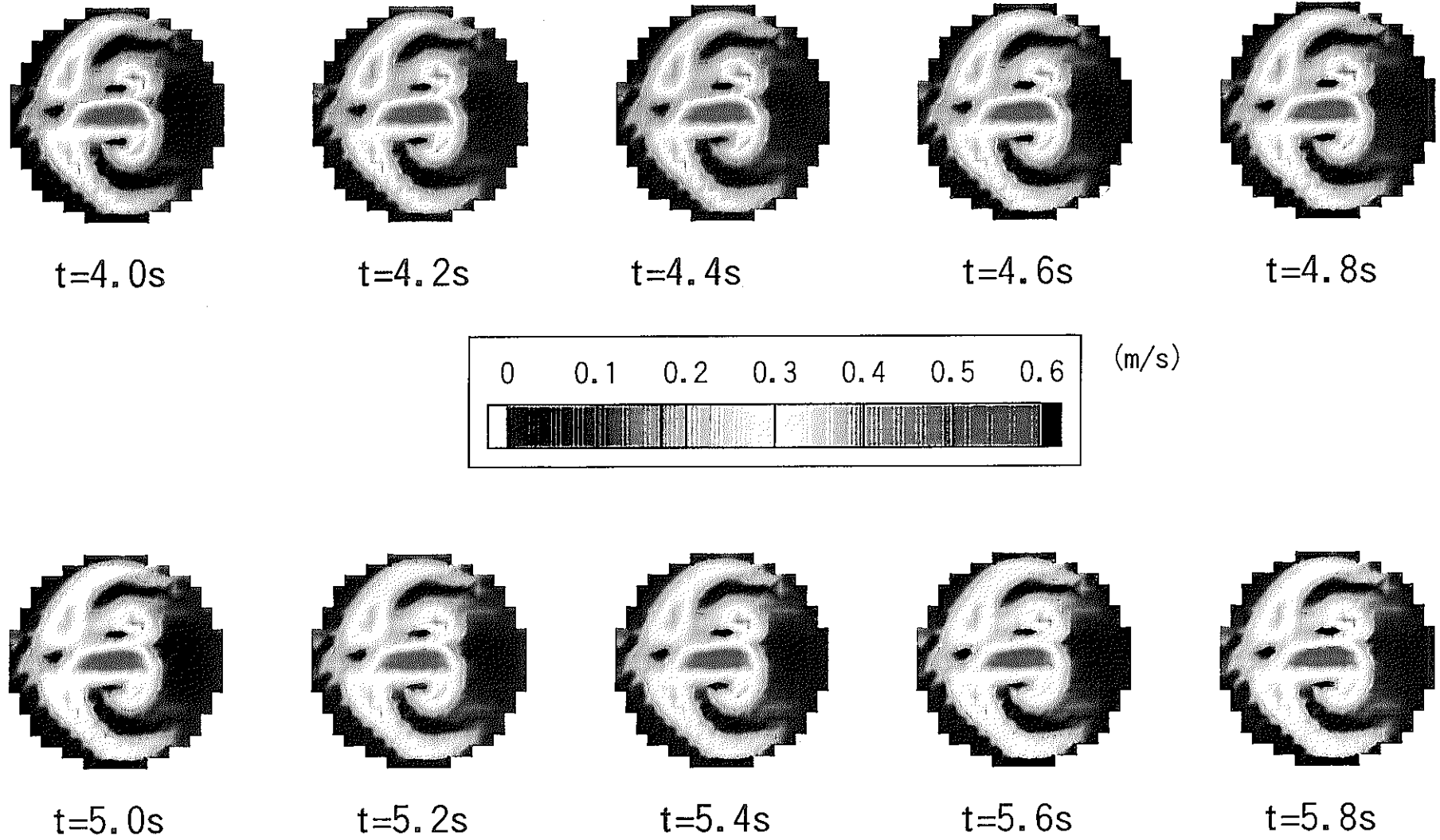


Fig. 3. 2 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Upstream from the Junction for Case-1

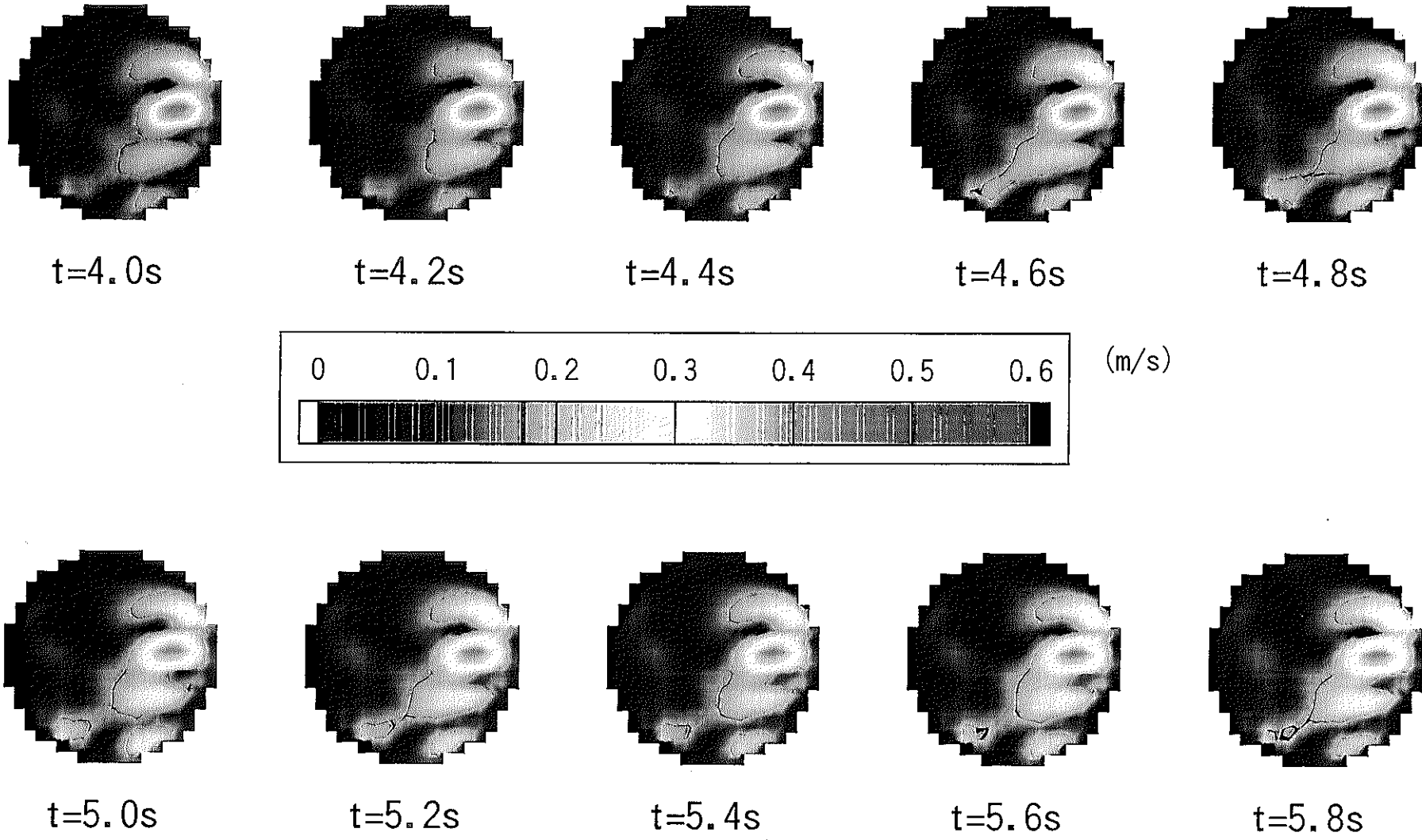
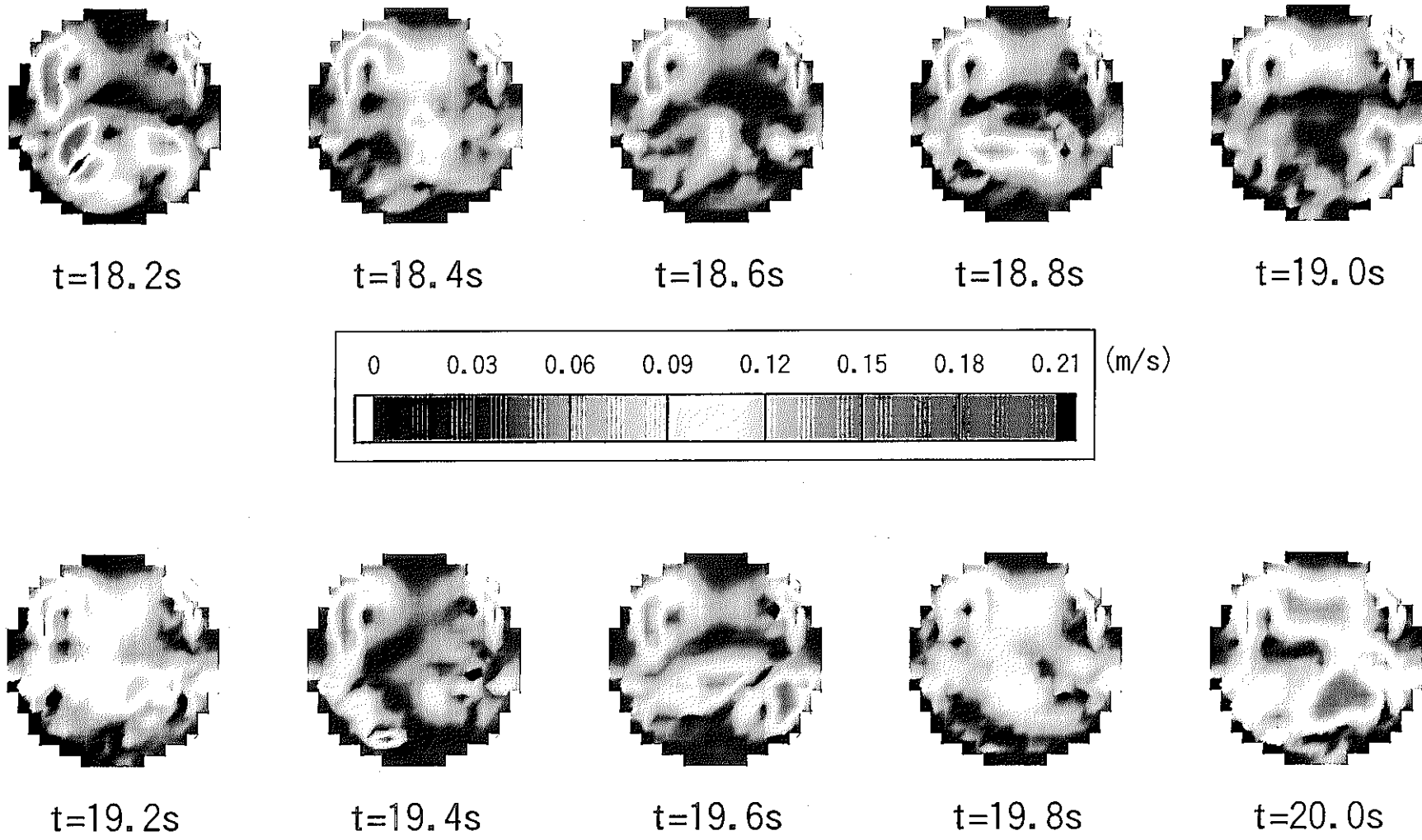
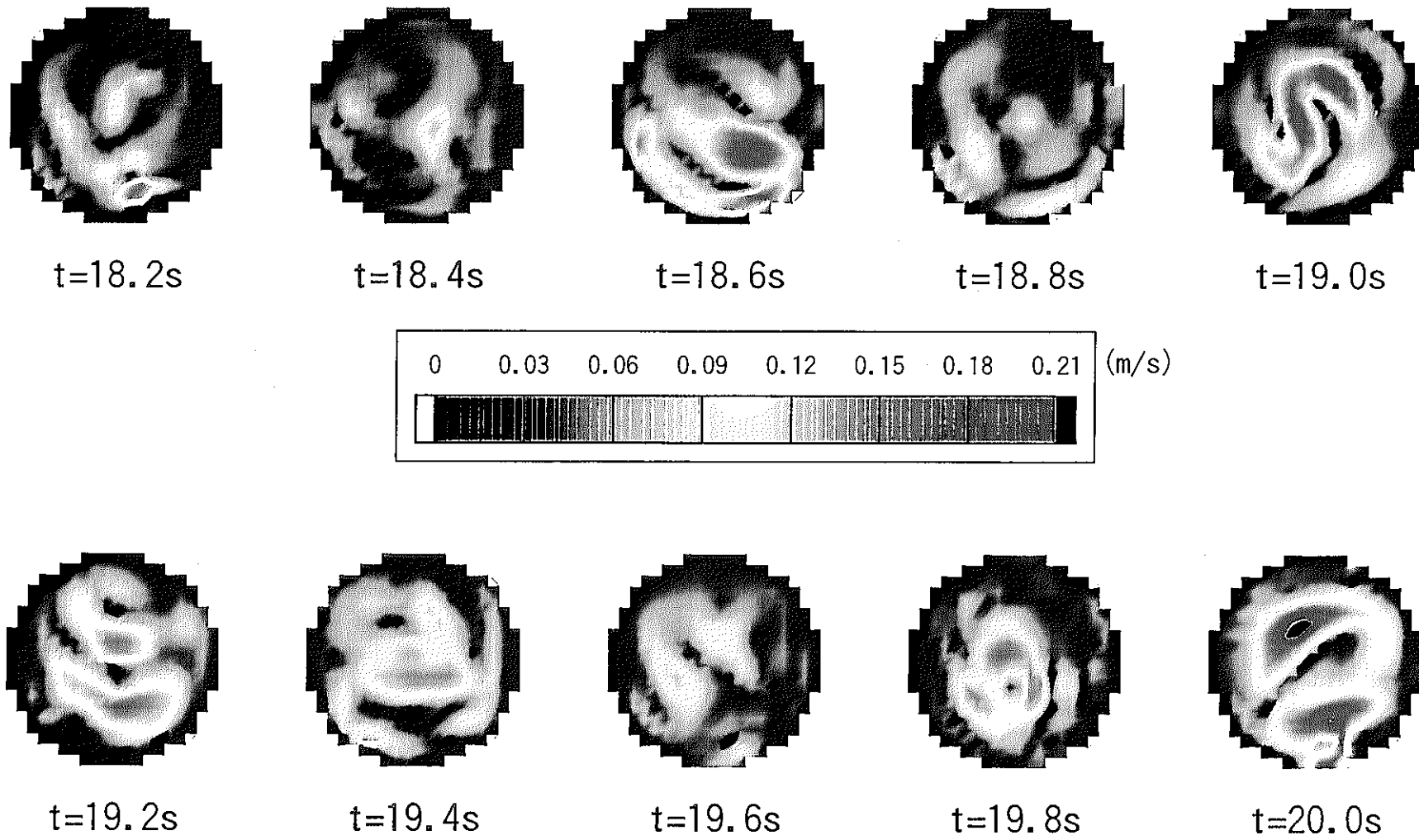


Fig. 3. 3 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Upstream from the Junction for Case-1



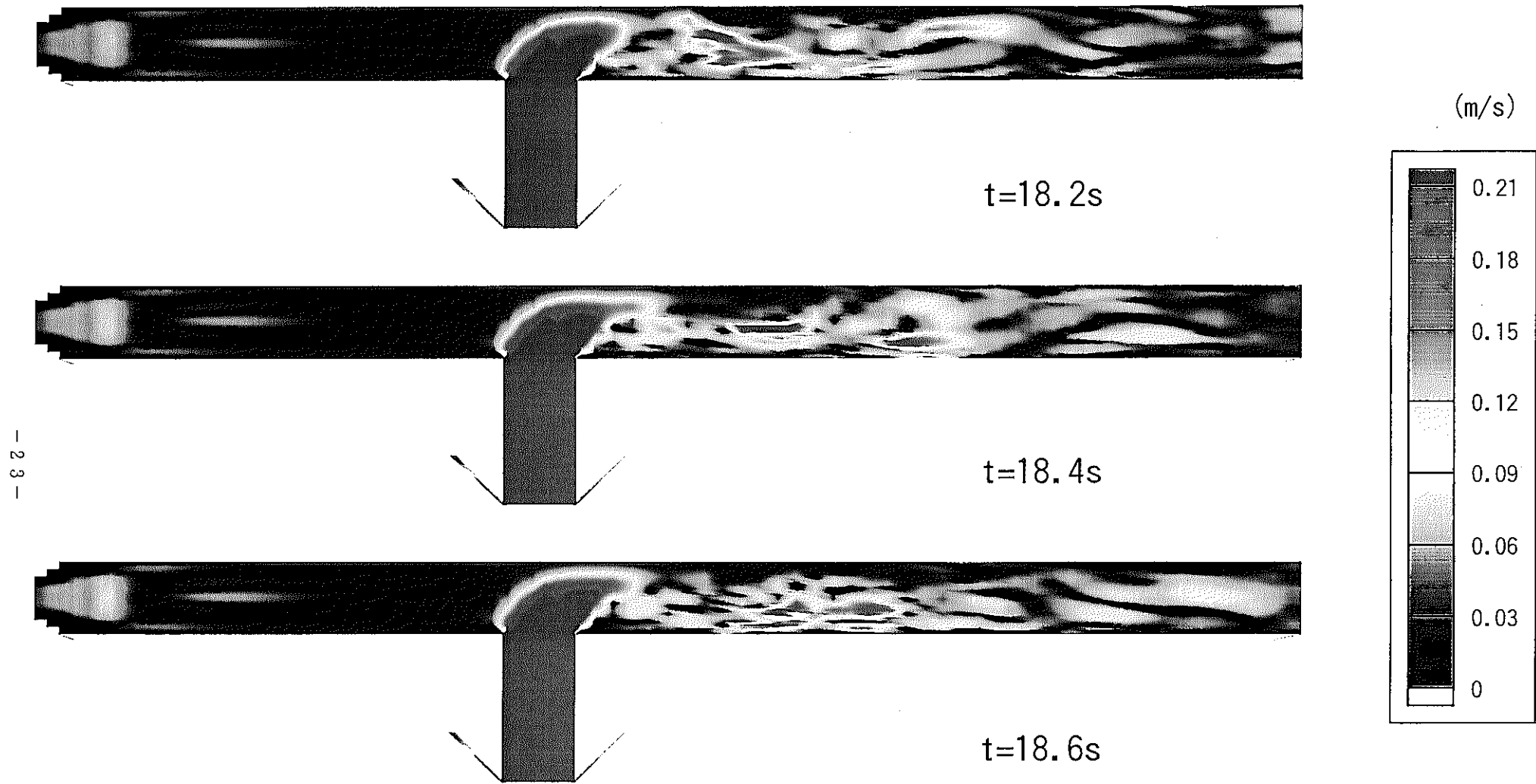
- 21 -

Fig. 3. 4 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Downstream from the Junction for Case-1



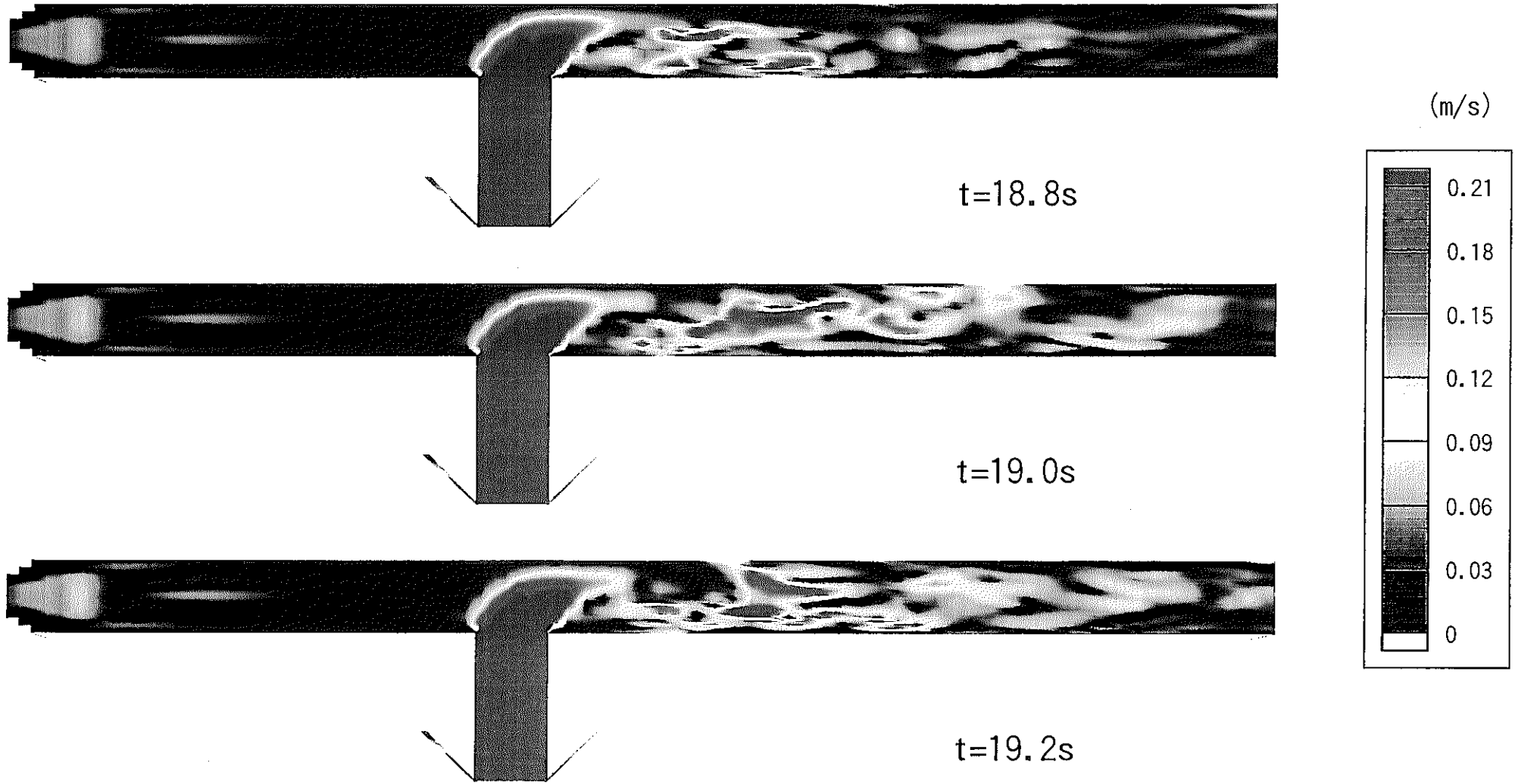
- 22 -

Fig. 3. 5 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Downstream from the Junction for Case-1



- 23 -

Fig. 3. 6 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-1 (1/2)



- 24 -

Fig. 3. 6 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-1 (2/2)

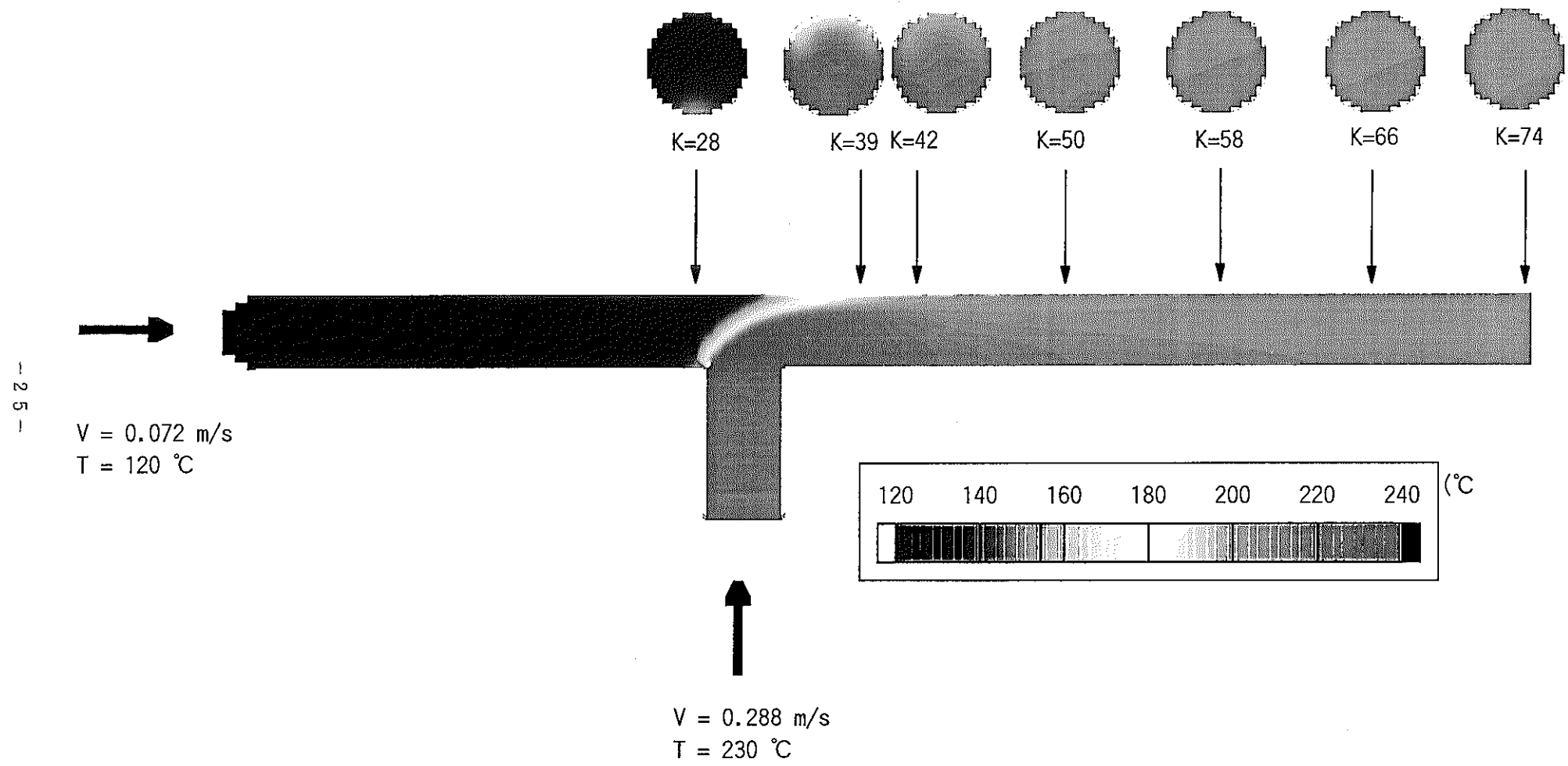
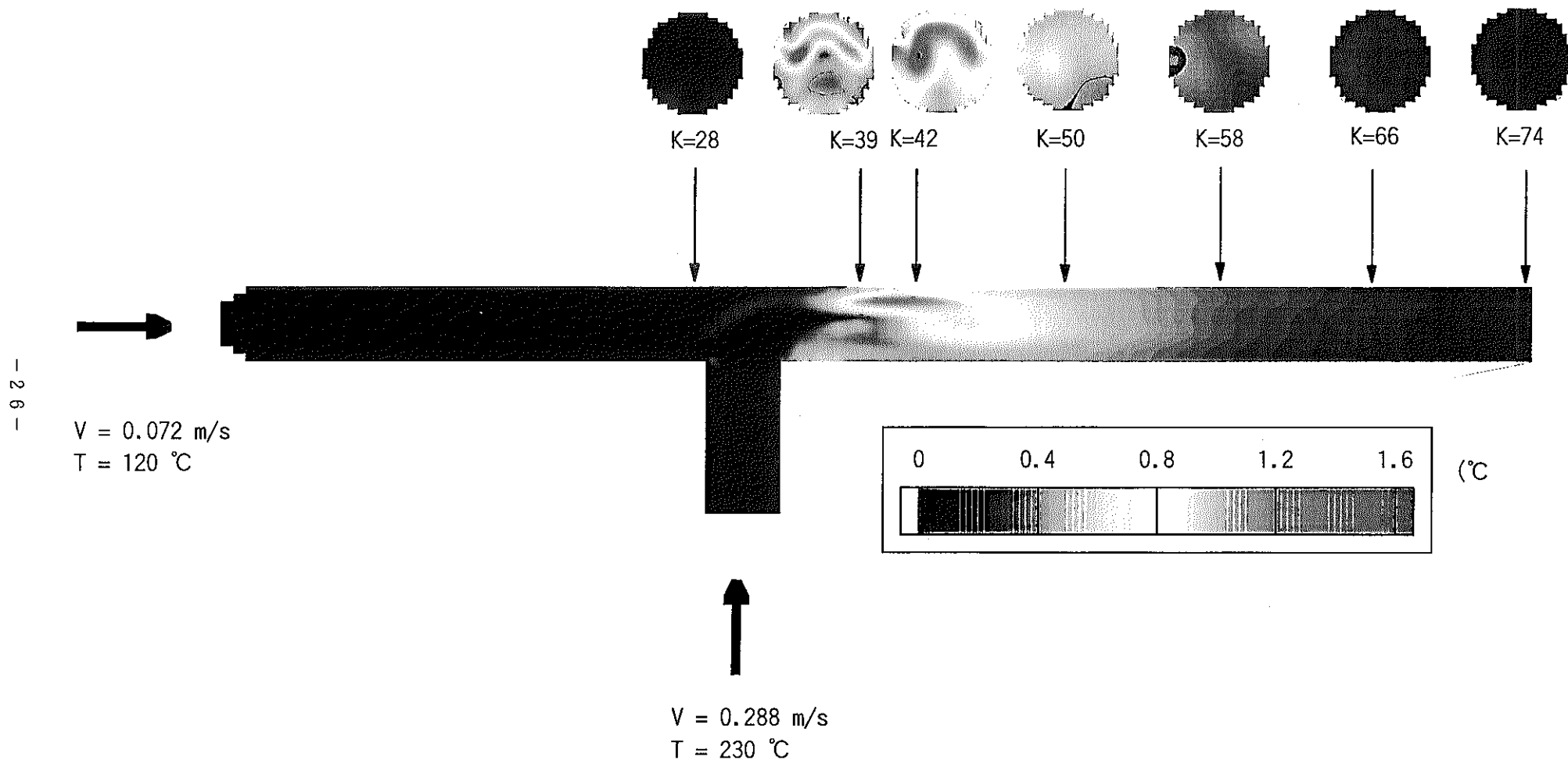


Fig. 3. 7 Time-Averaged Sodium Temperature Transients for Case-1



- 26 -

Fig. 3. 8 Time-Averaged Sodium Temperature Fluctuation Transients for Case-1

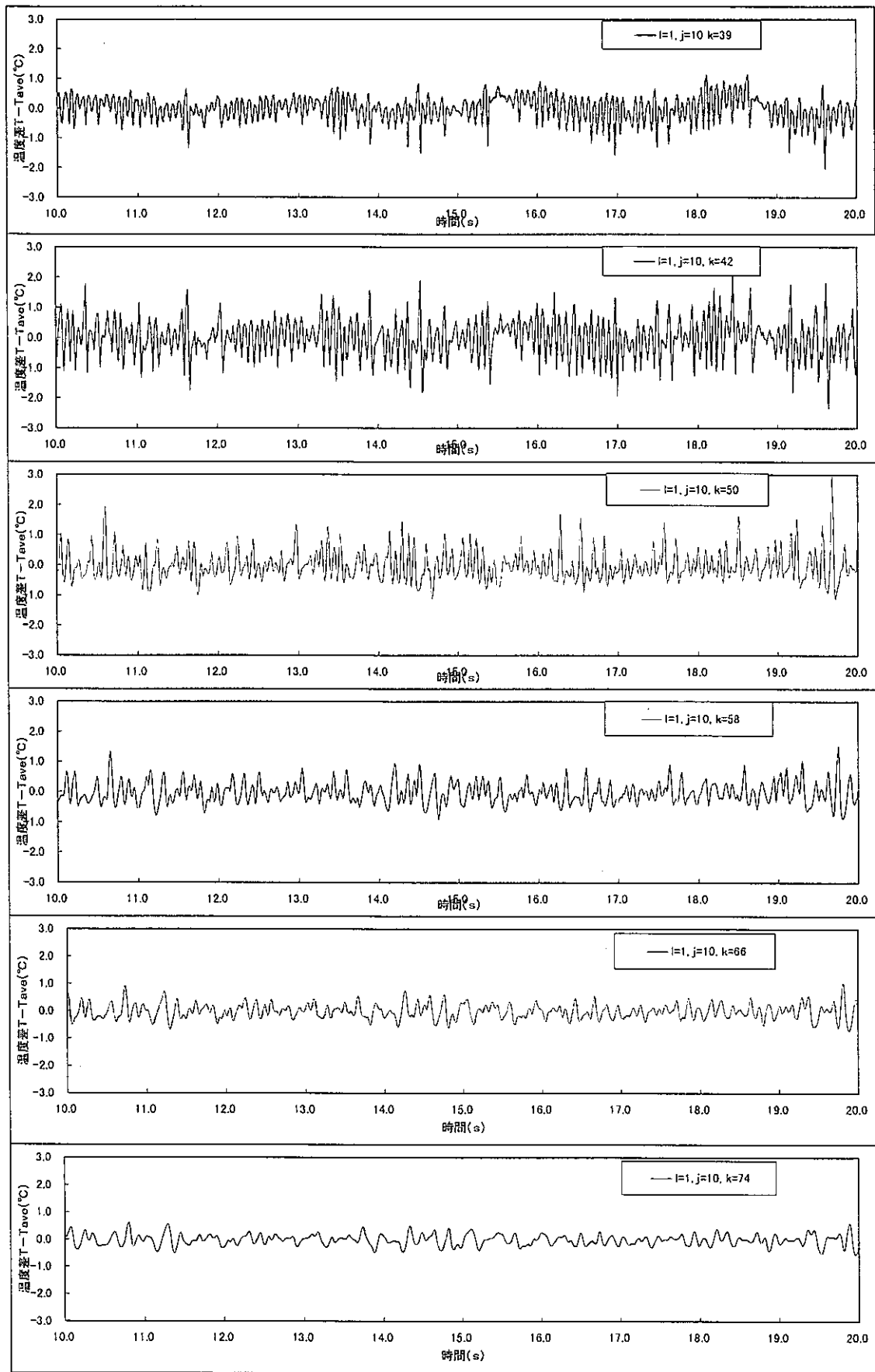


Fig. 3. 9 Sodium Temperature Transients at $l=1$ Position for Case-1

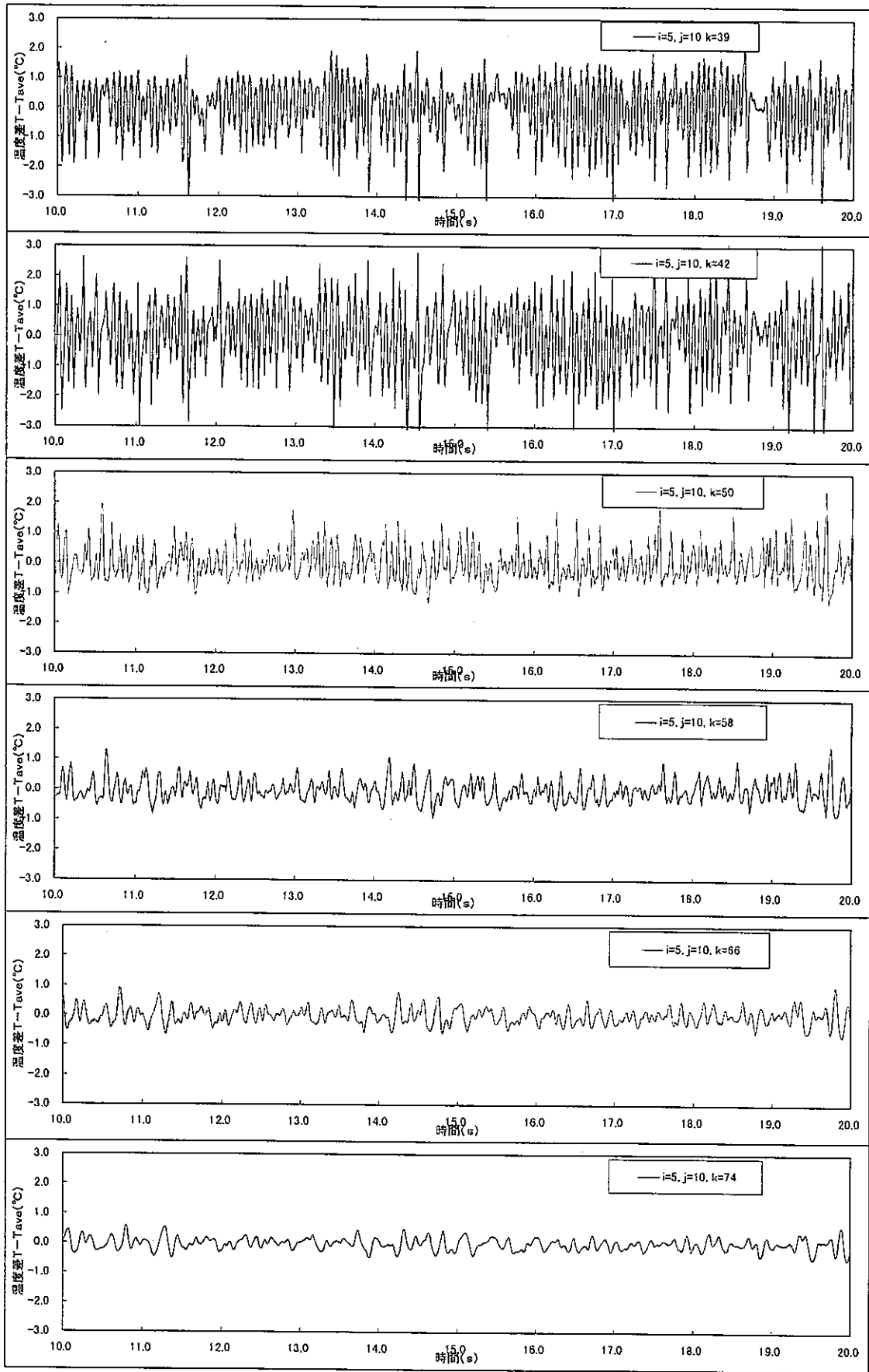


Fig. 3. 10 Sodium Temperature Transients at l=5 Position for Case-1

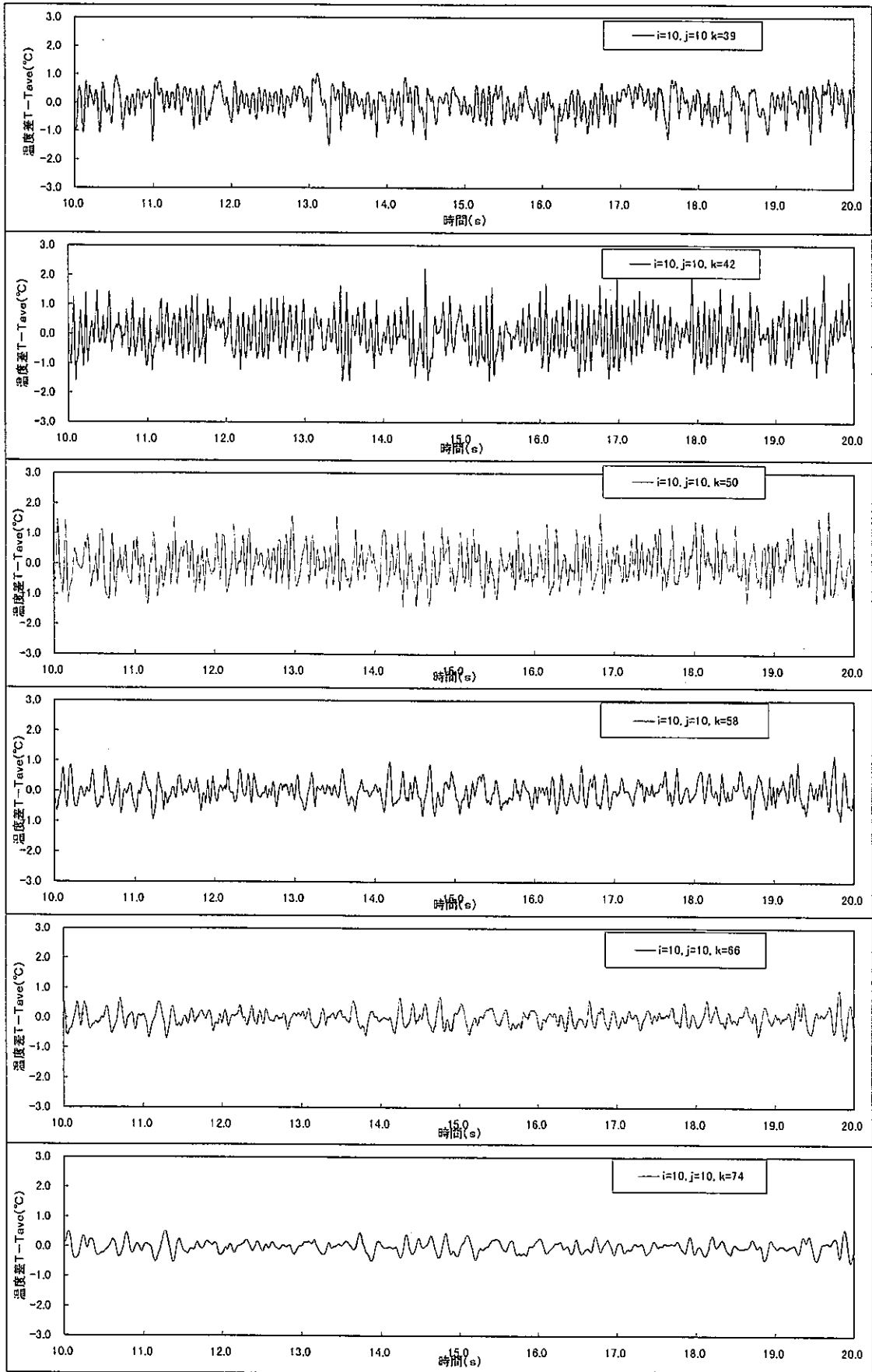


Fig. 3. 11 Sodium Temperature Transients at $l=10$ Position for Case-1

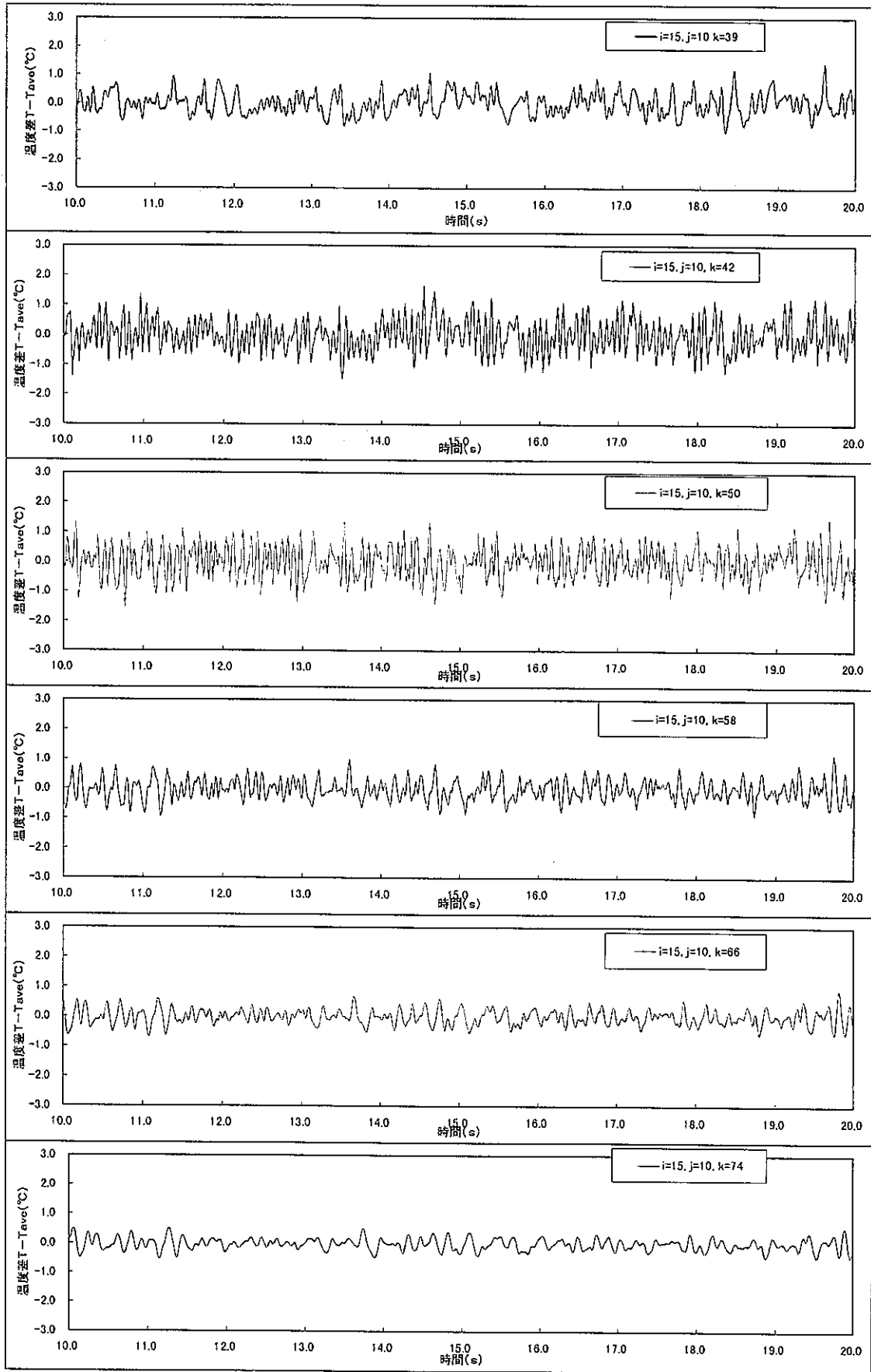


Fig. 3. 12 Sodium Temperature Transients at l=15 Position for Case-1

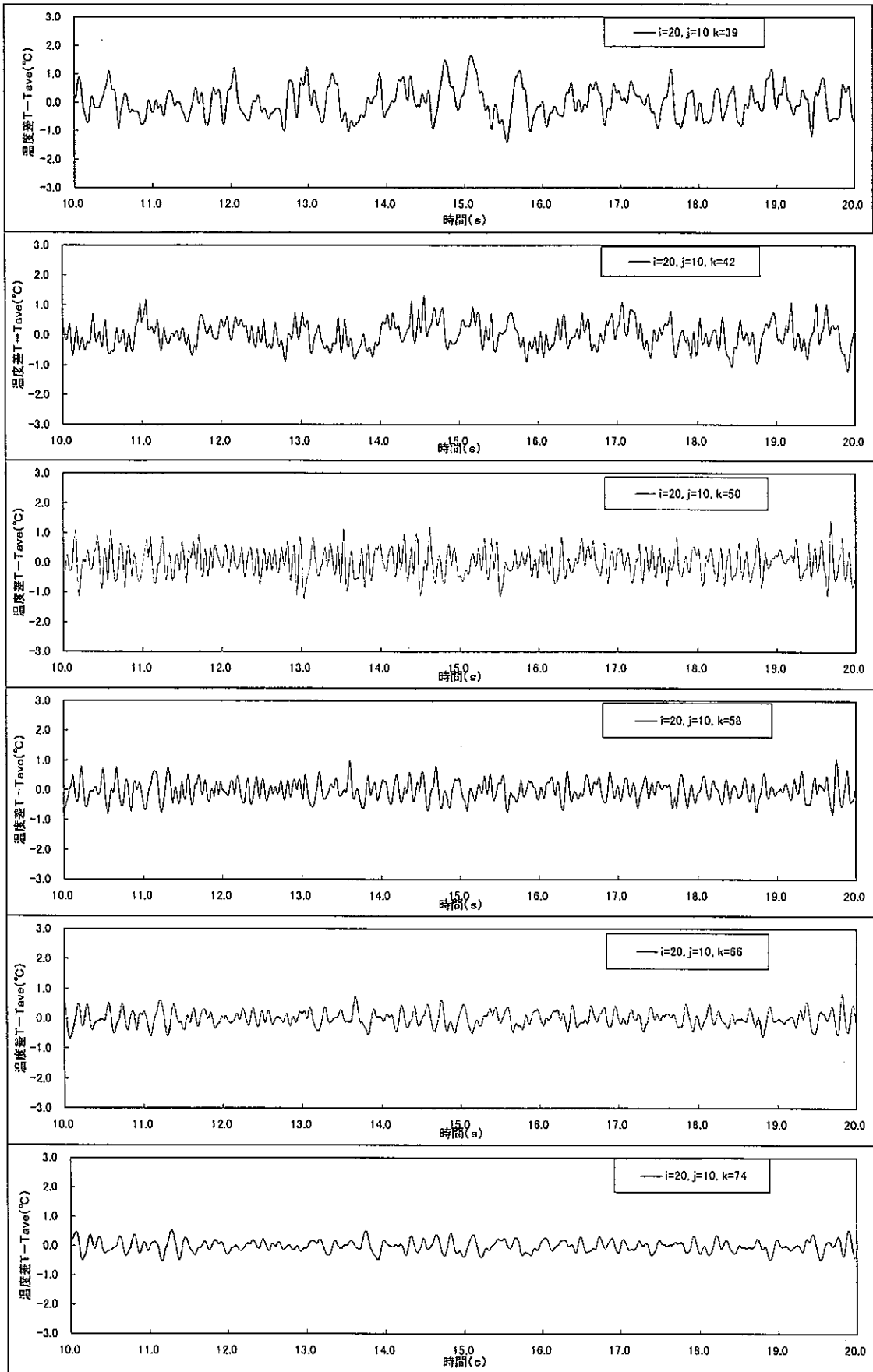
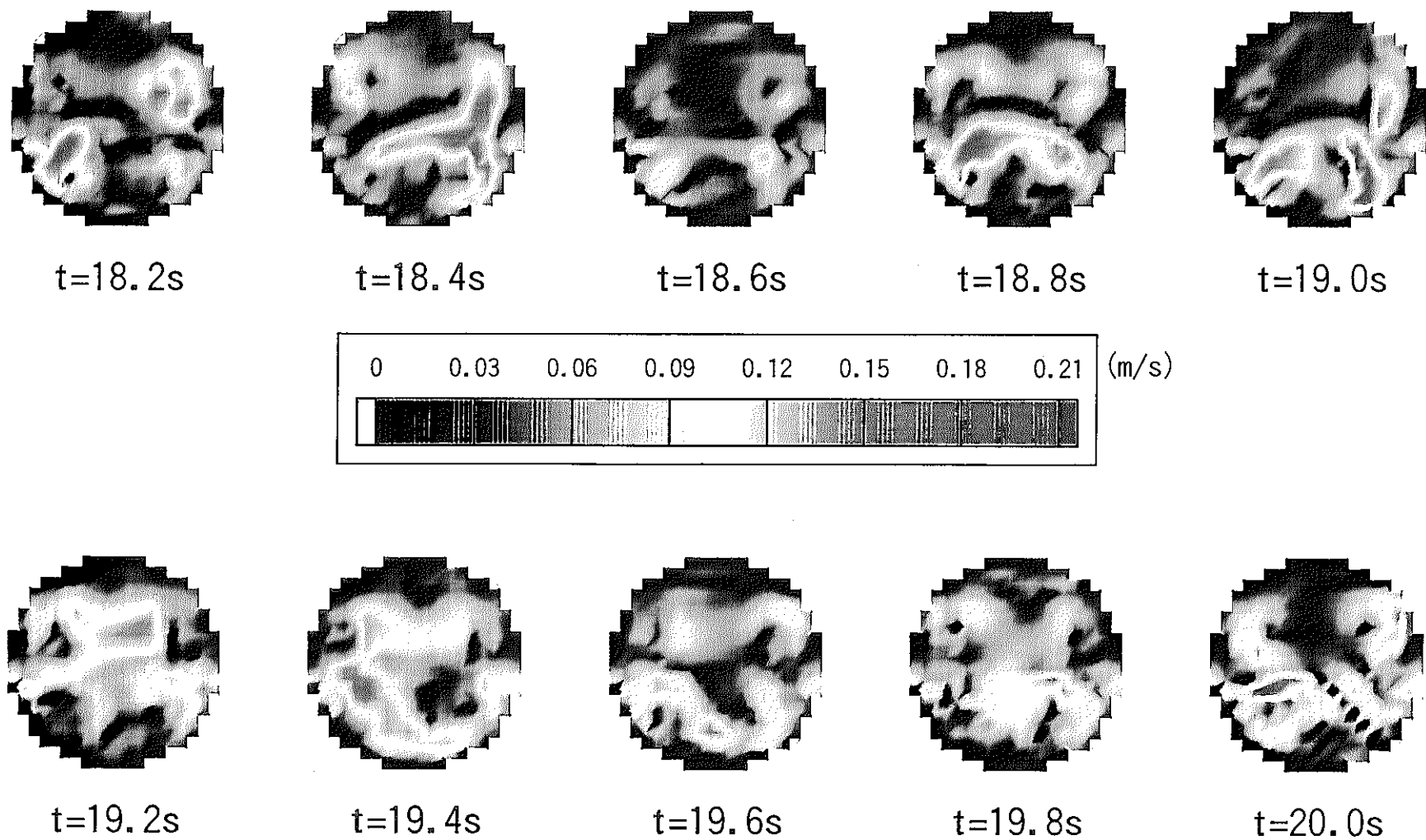


Fig. 3. 13 Sodium Temperature Transients at $l=20$ Position for Case-1



- 32 -

Fig. 3. 14 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Downstream from the Junction for Case-2

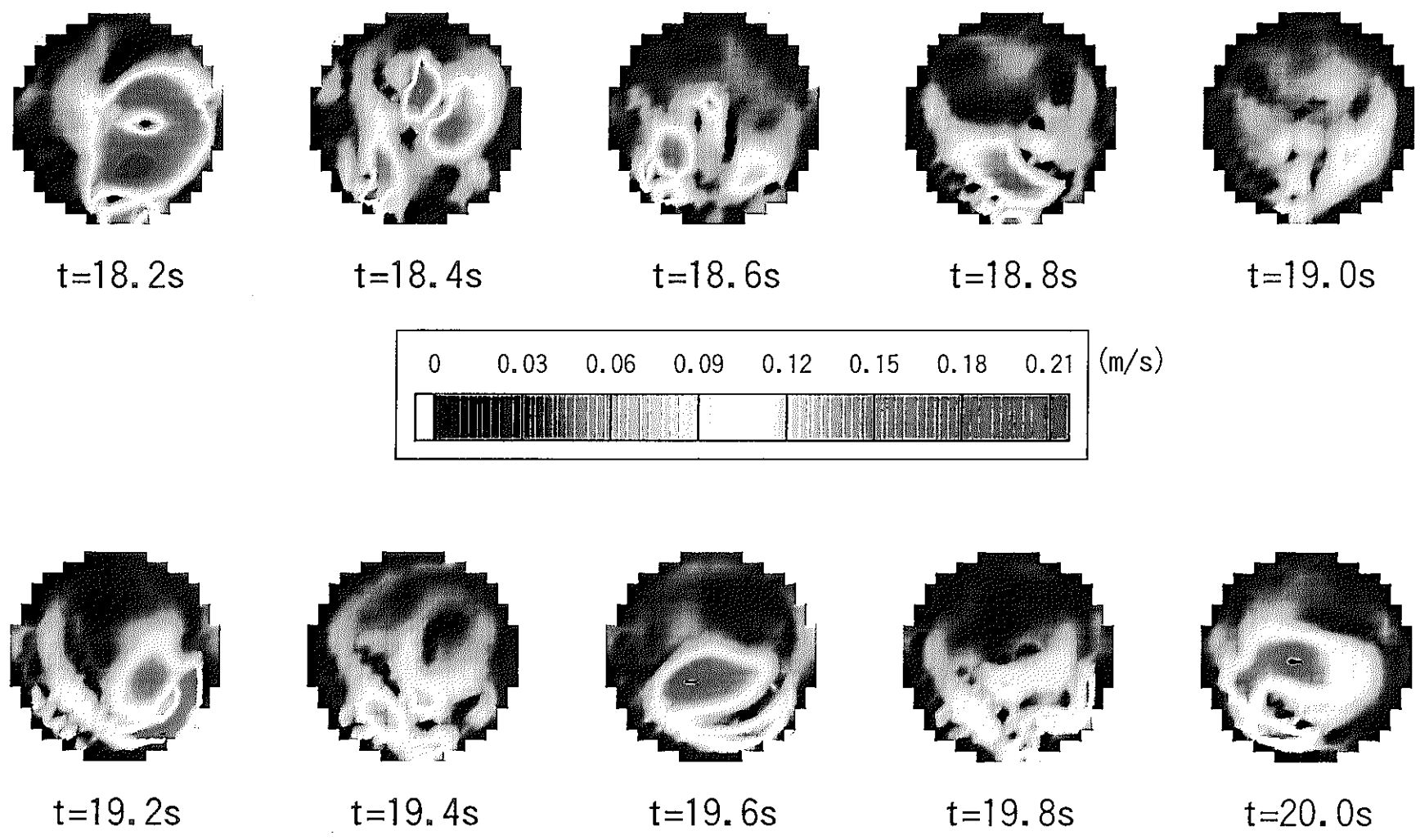


Fig. 3. 15 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Downstream from the Junction for Case-2

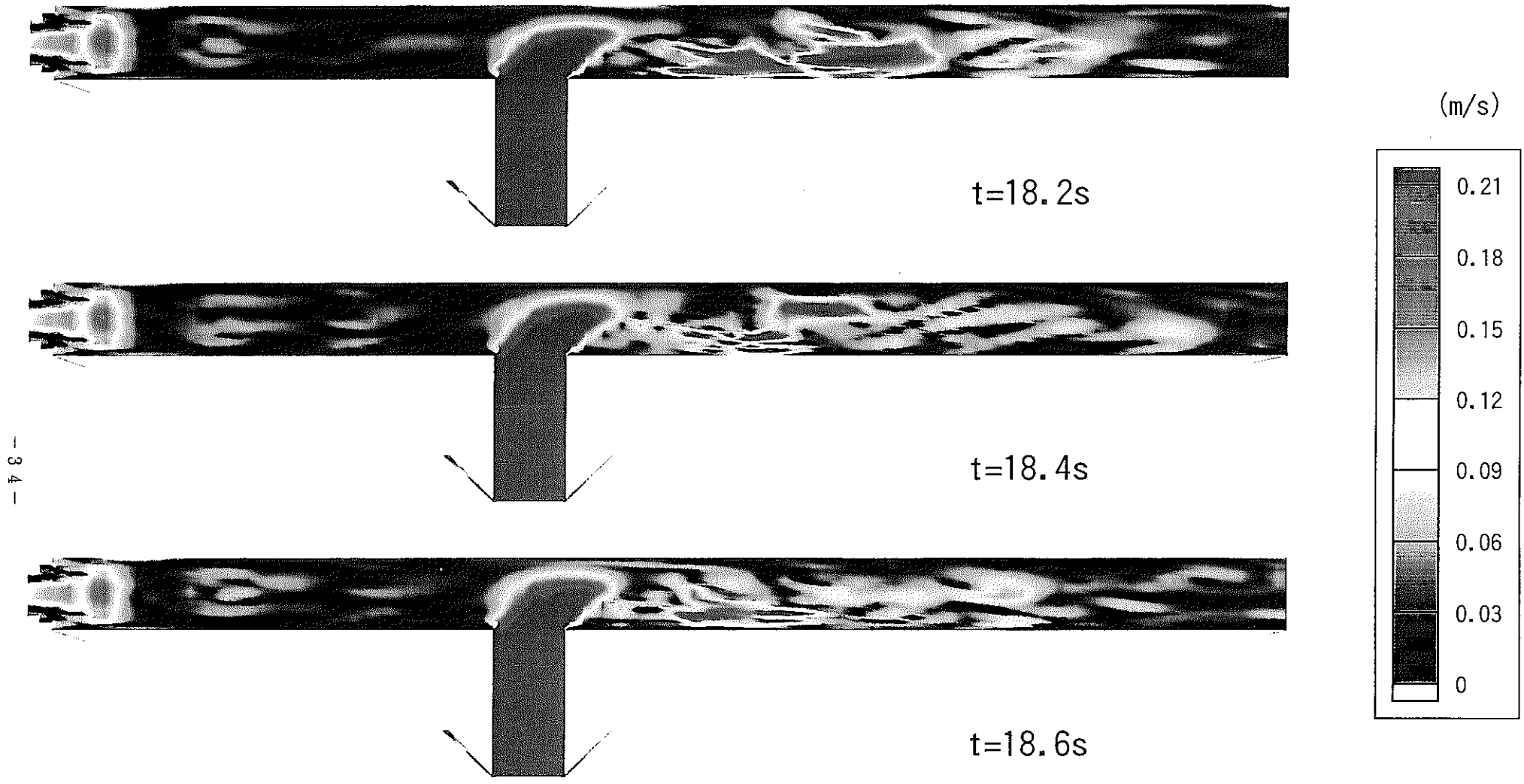
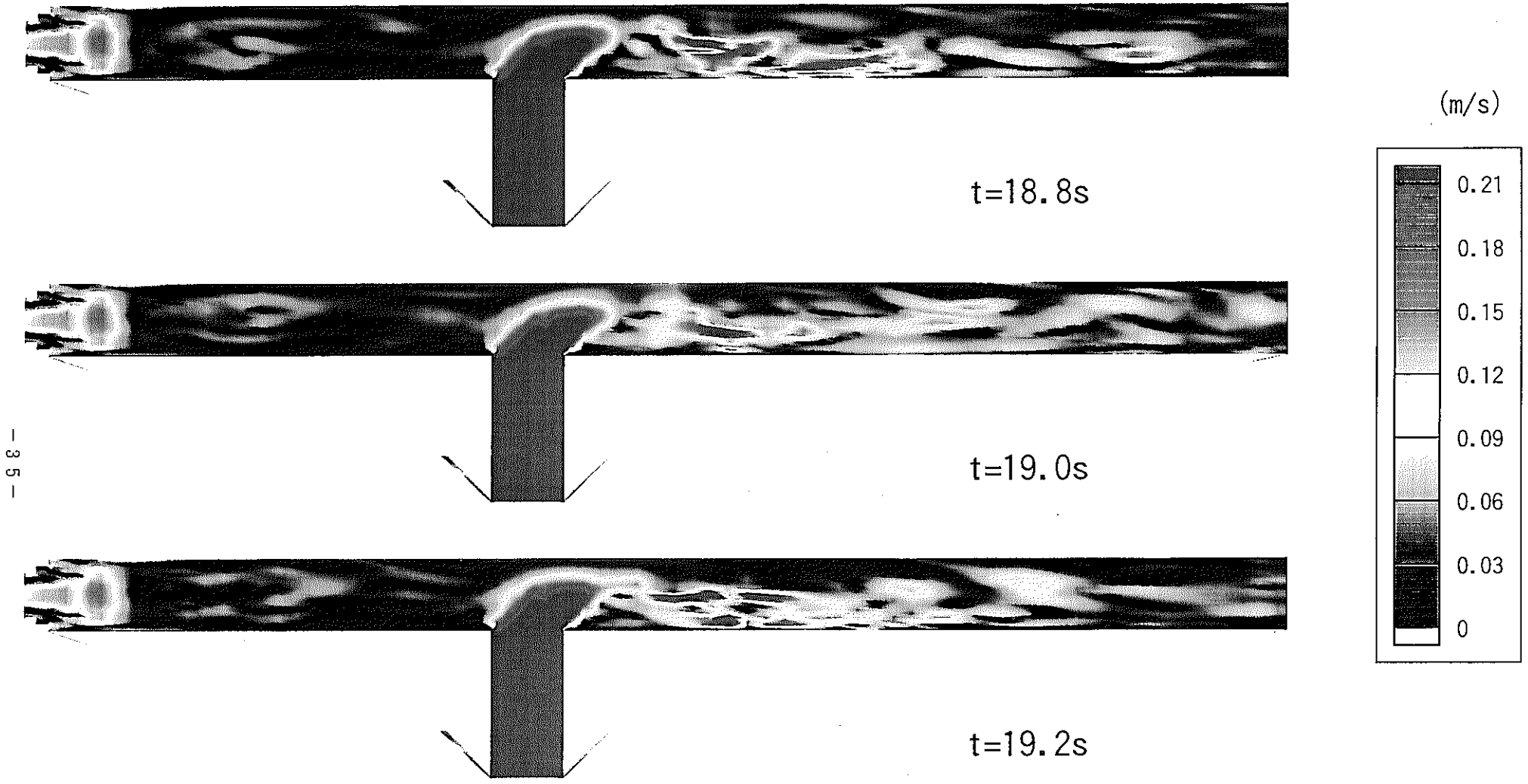


Fig. 3. 16 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-2 (1/2)



- 35 -

Fig. 3. 16 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-2 (2/2)

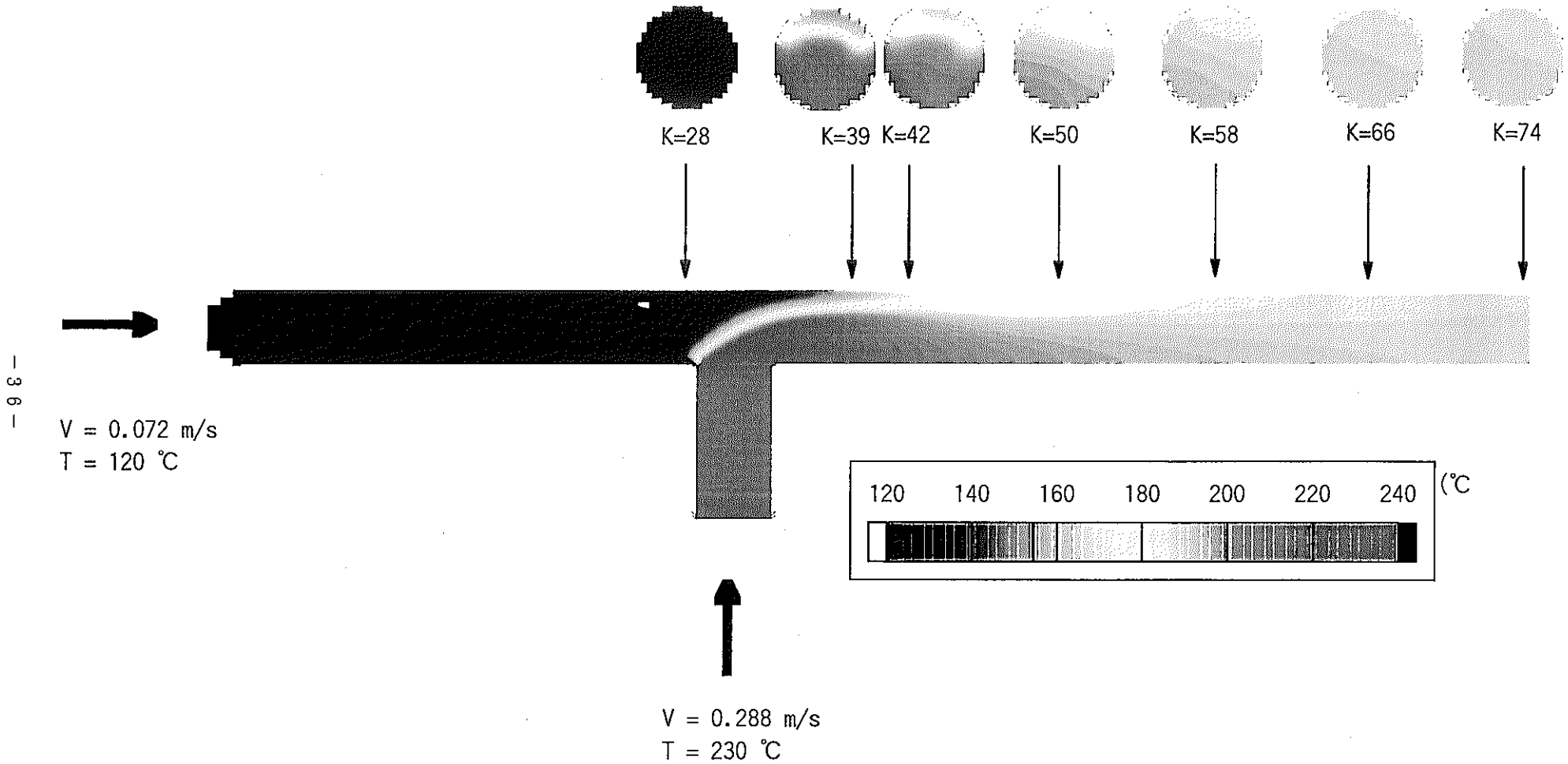


Fig. 3. 17 Time-Averaged Sodium Temperature Transients for Case-2

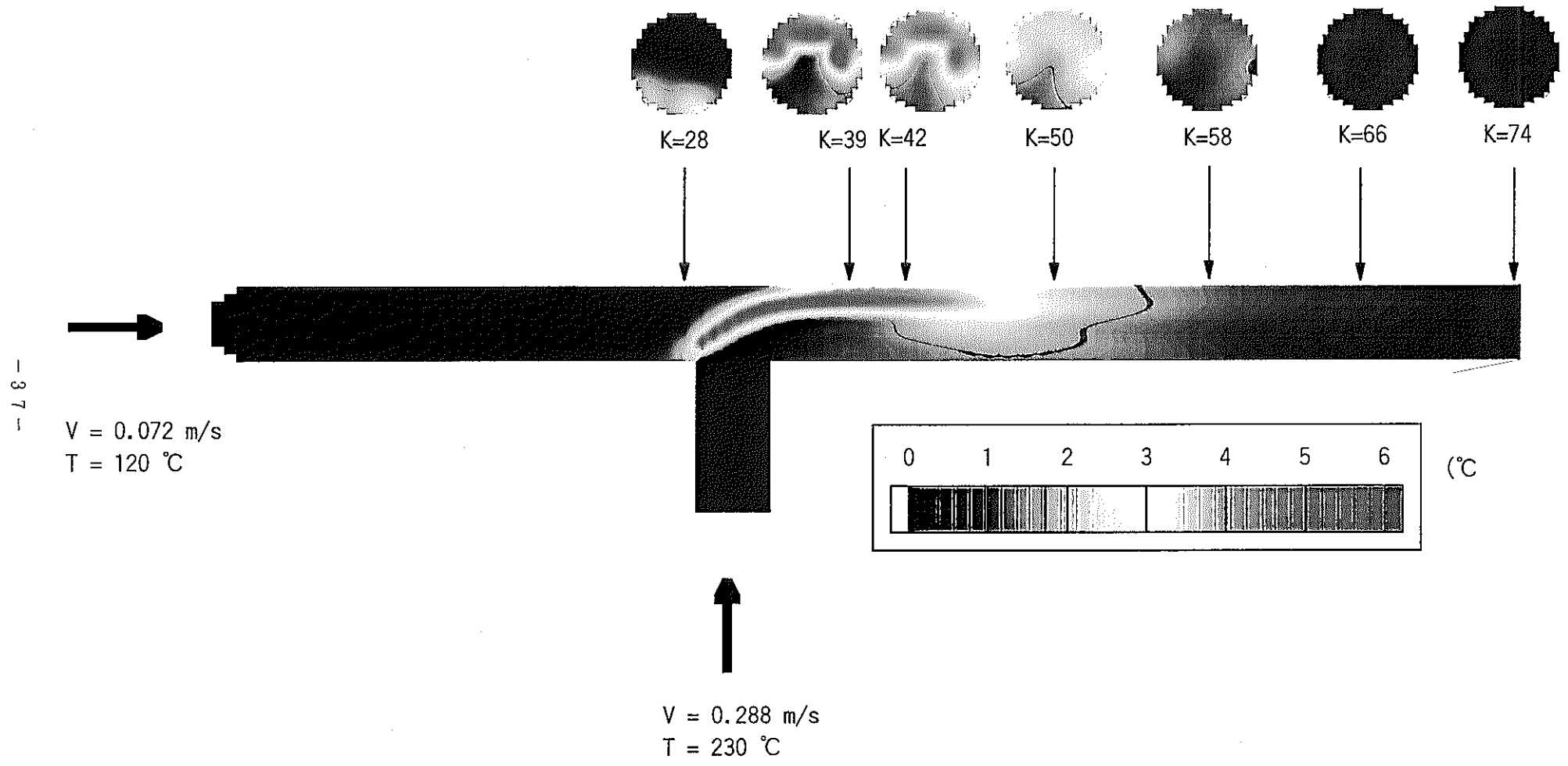


Fig. 3. 18 Time-Averaged Sodium Temperature Fluctuation Transients for Case-2

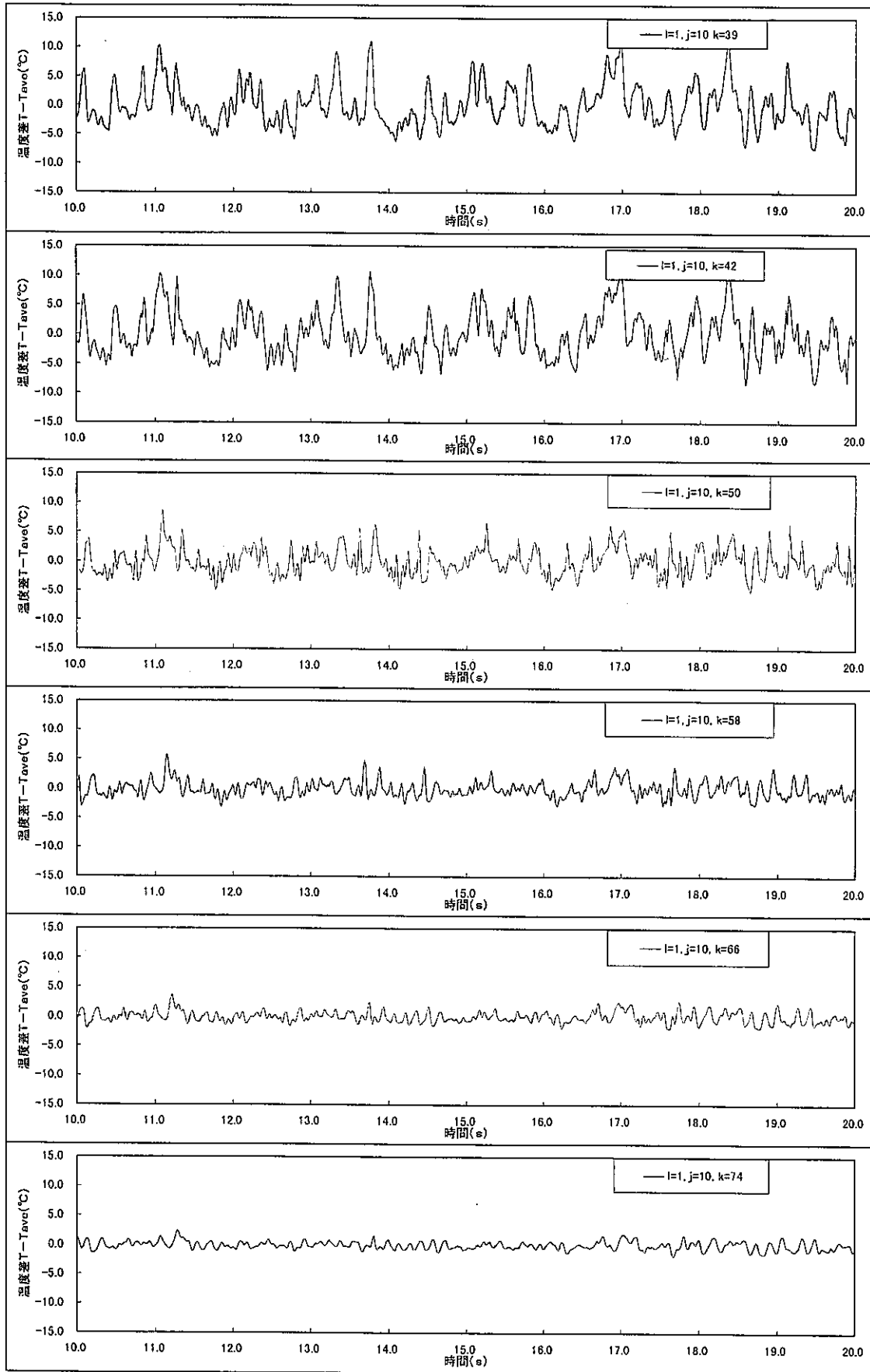


Fig. 3. 19 Sodium Temperature Transients at $l=1$ Position for Case-2

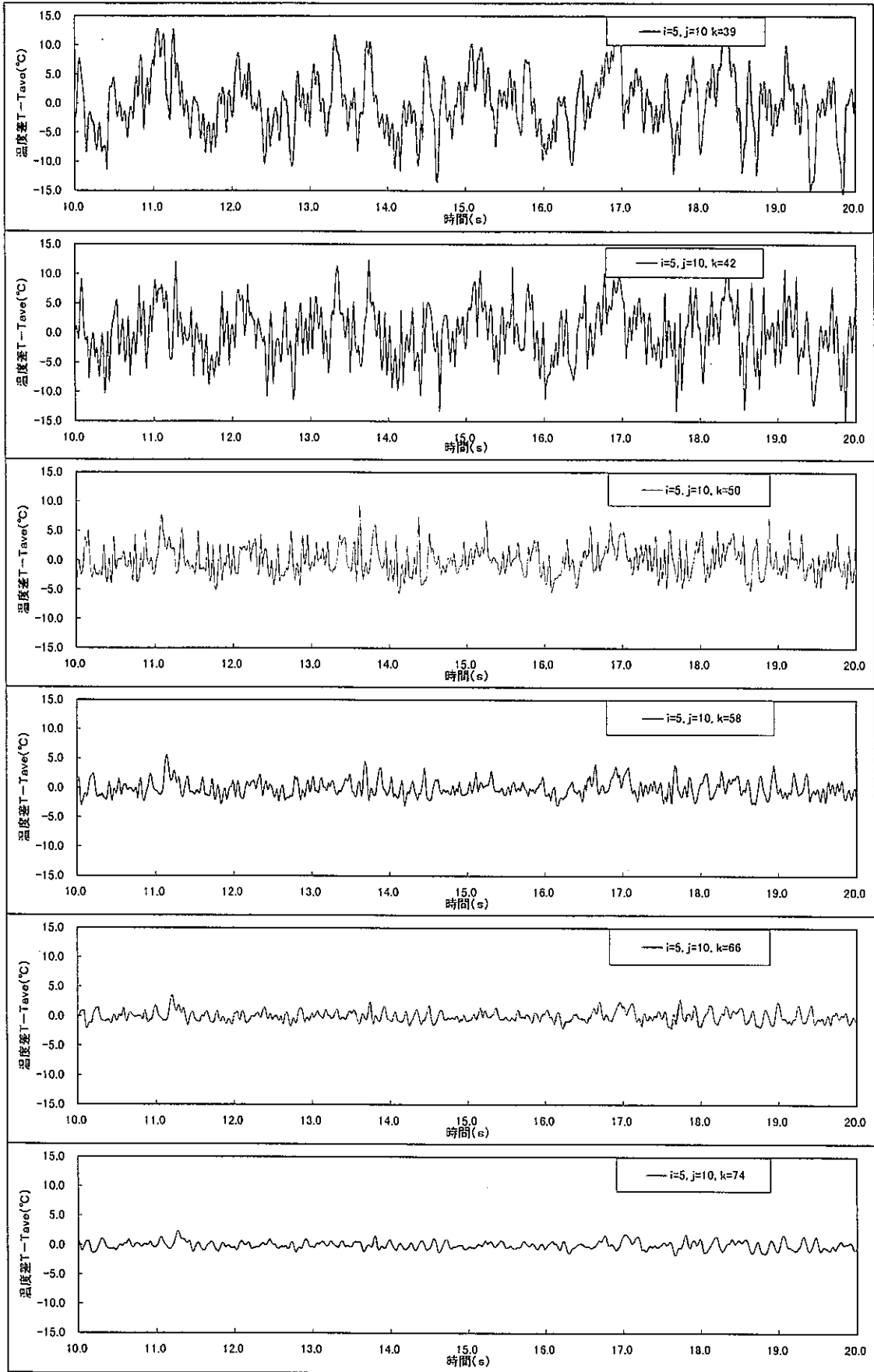


Fig. 3. 20 Sodium Temperature Transients at l=5 Position for Case-2

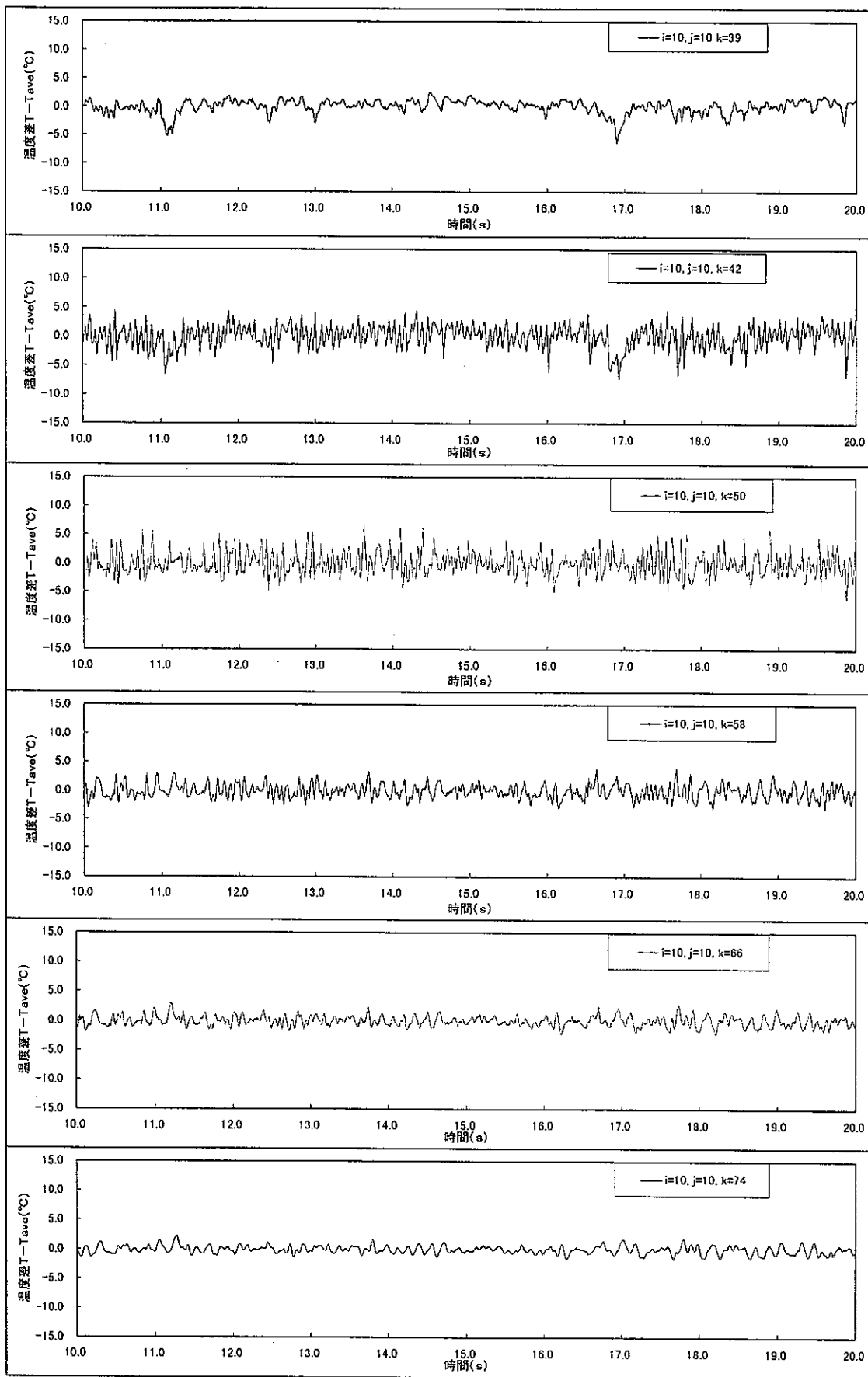


Fig. 3. 21 Sodium Temperature Transients at $l=10$ Position for Case-2

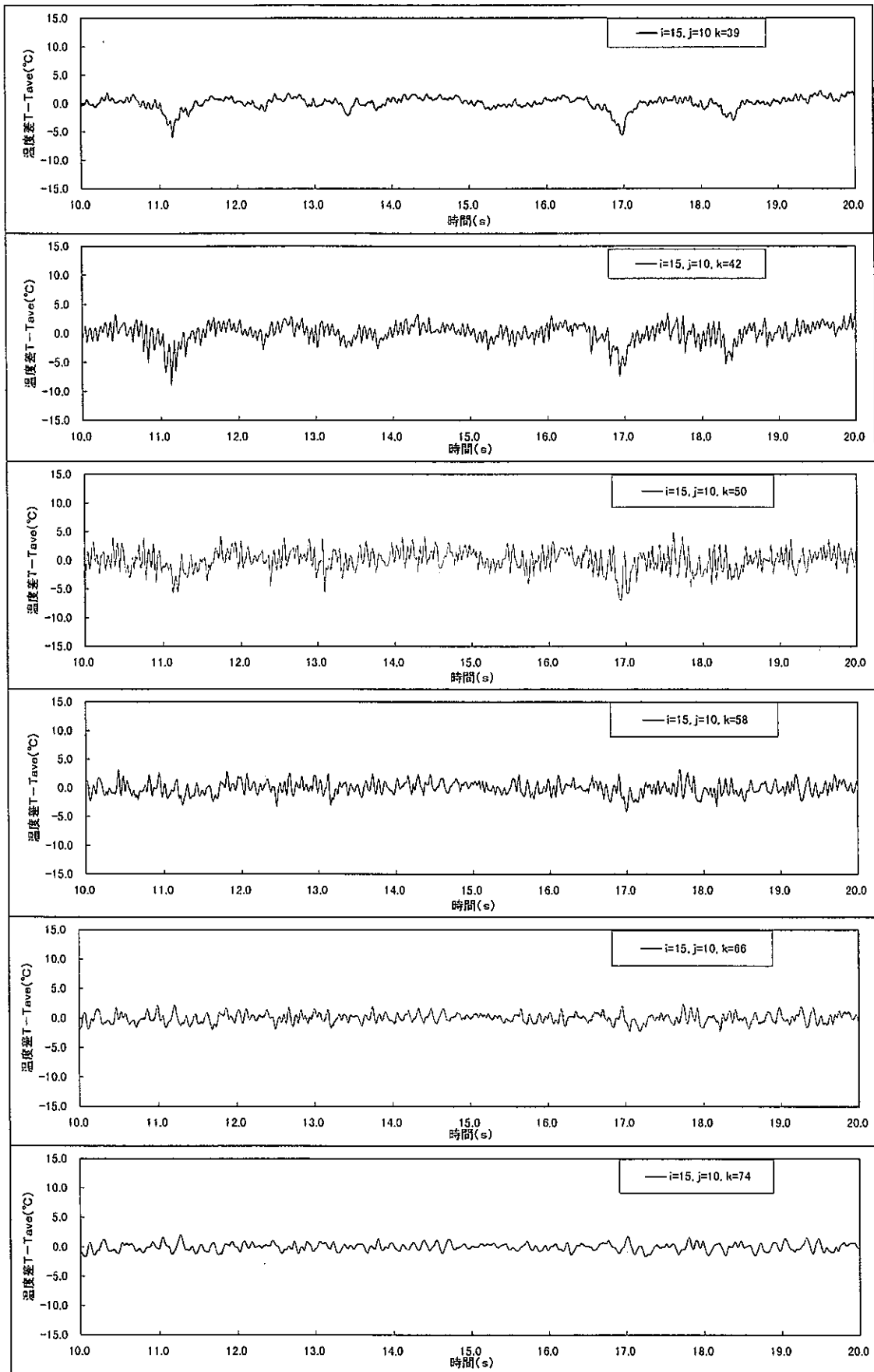


Fig. 3. 22 Sodium Temperature Transients at l=15 Position for Case-2

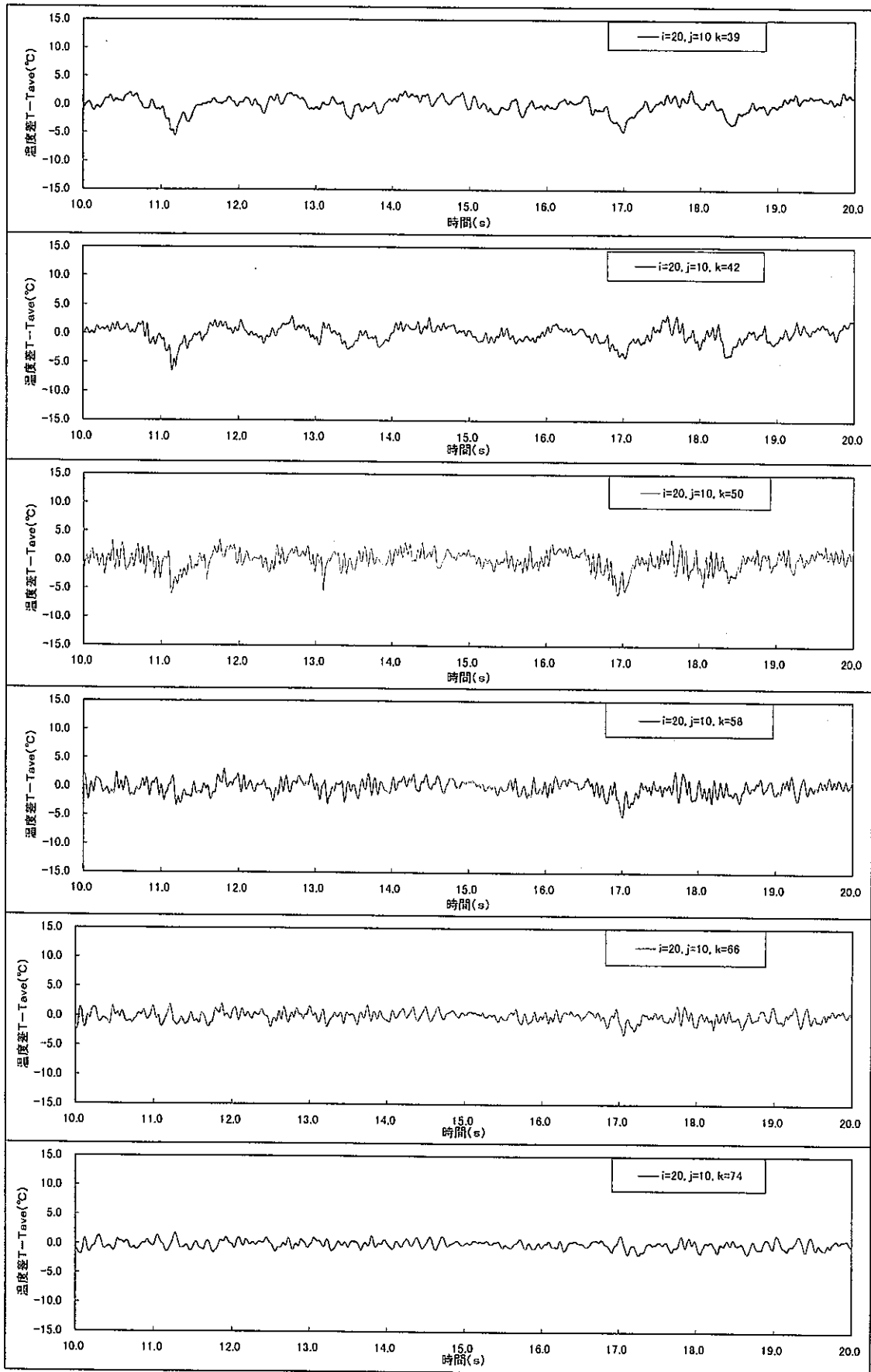


Fig. 3. 23 Sodium Temperature Transients at $l=20$ Position for Case-2

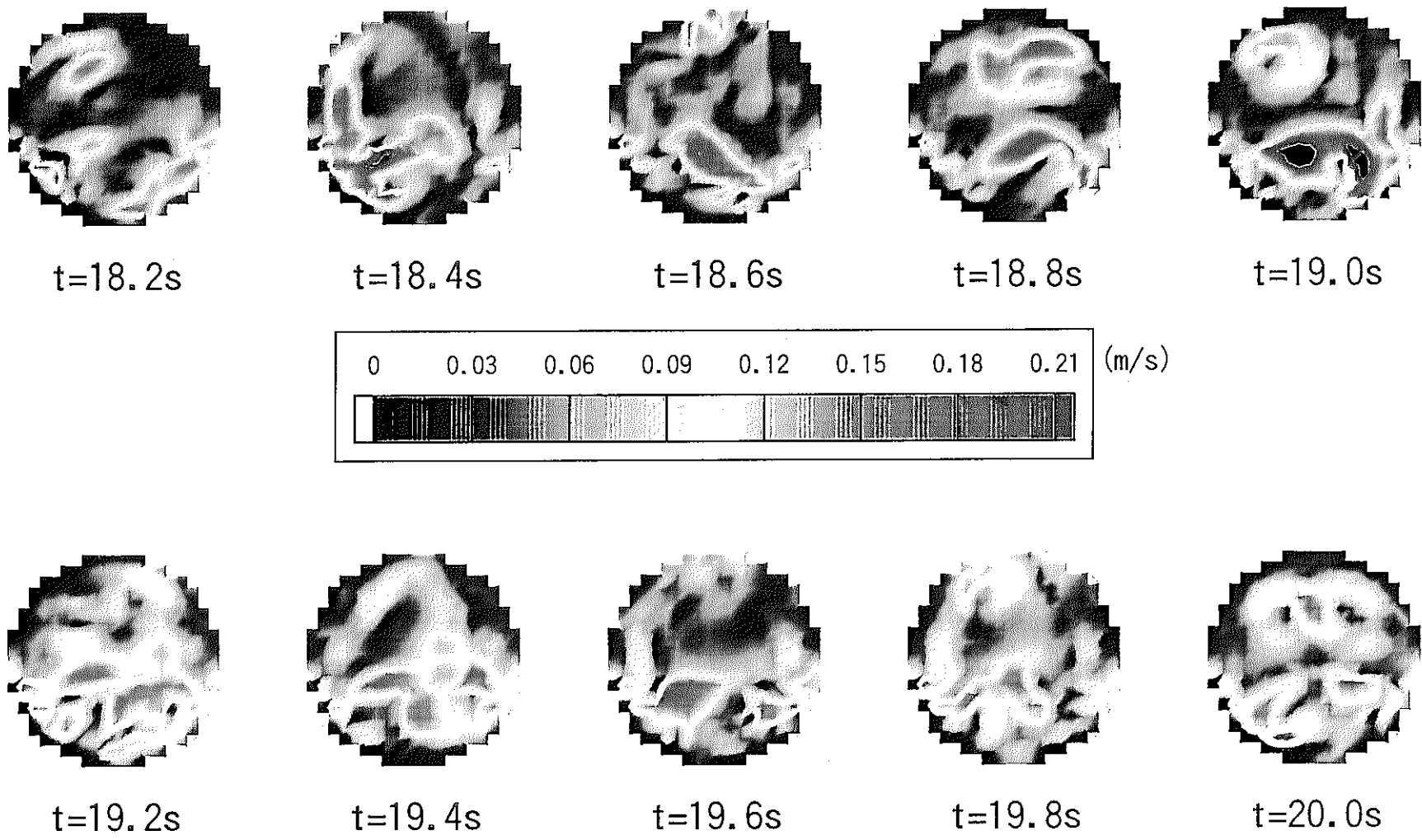
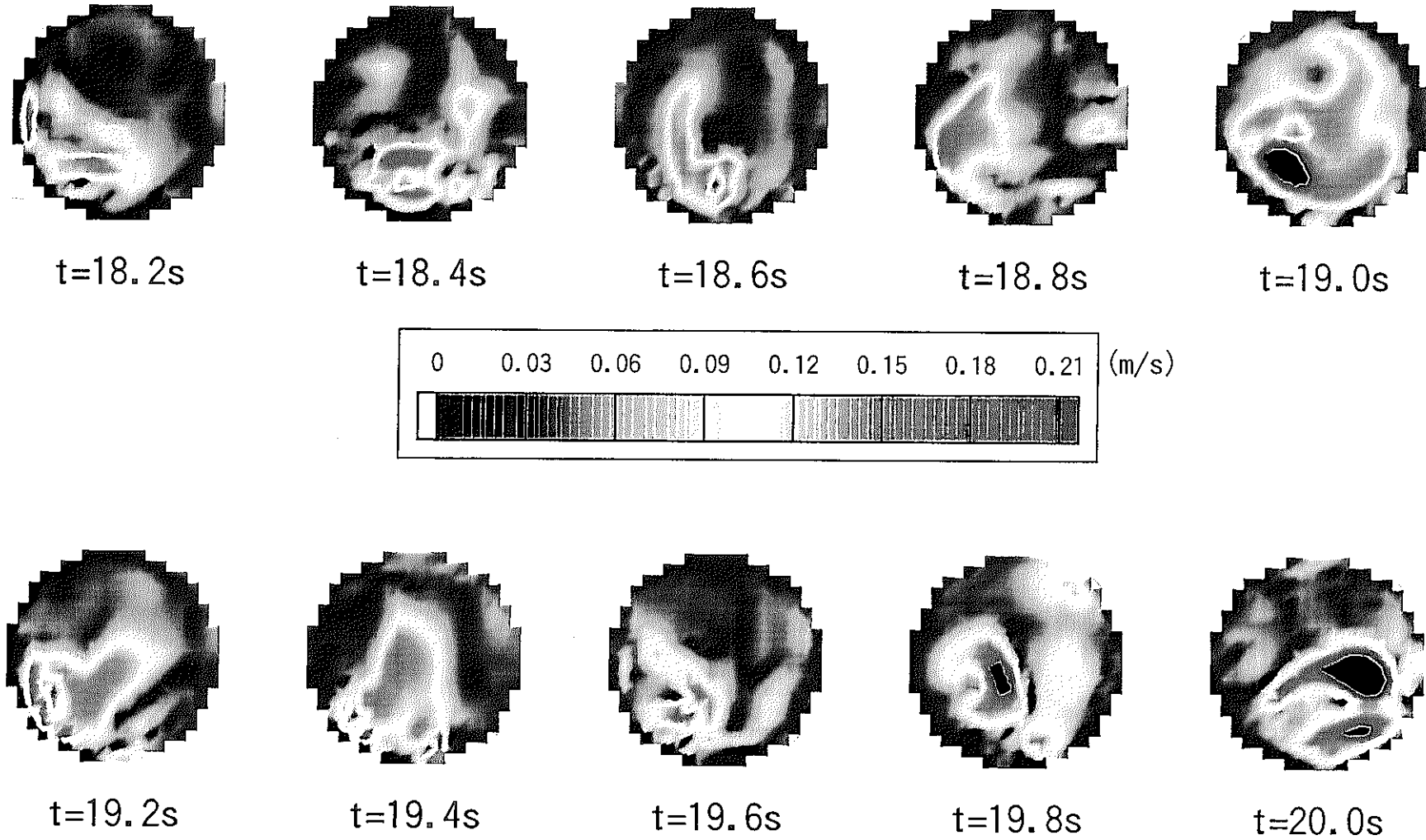


Fig. 3. 24 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Downstream from the Junction for Case-3



- 44 -

Fig. 3. 25 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Downstream from the Junction for Case-3

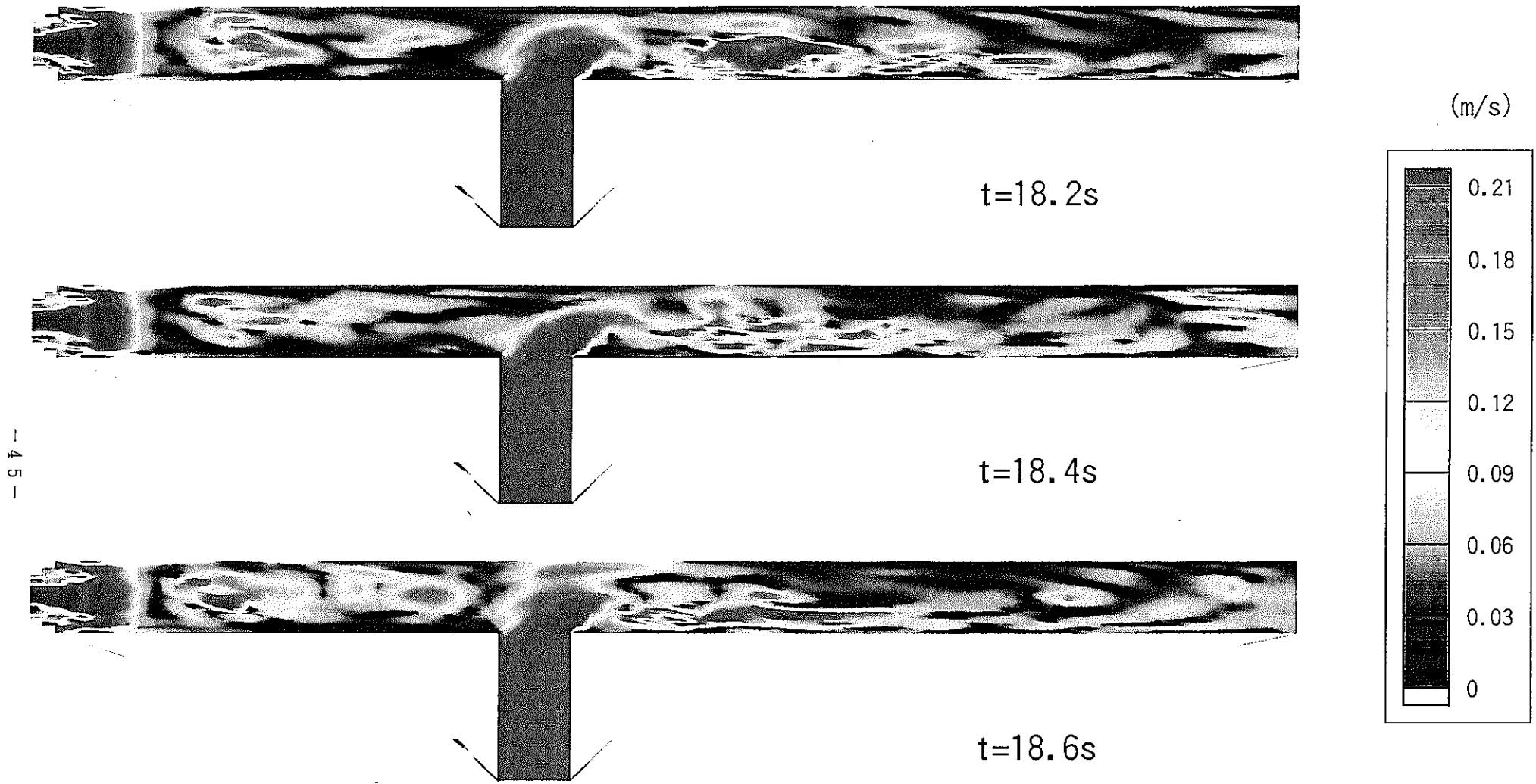
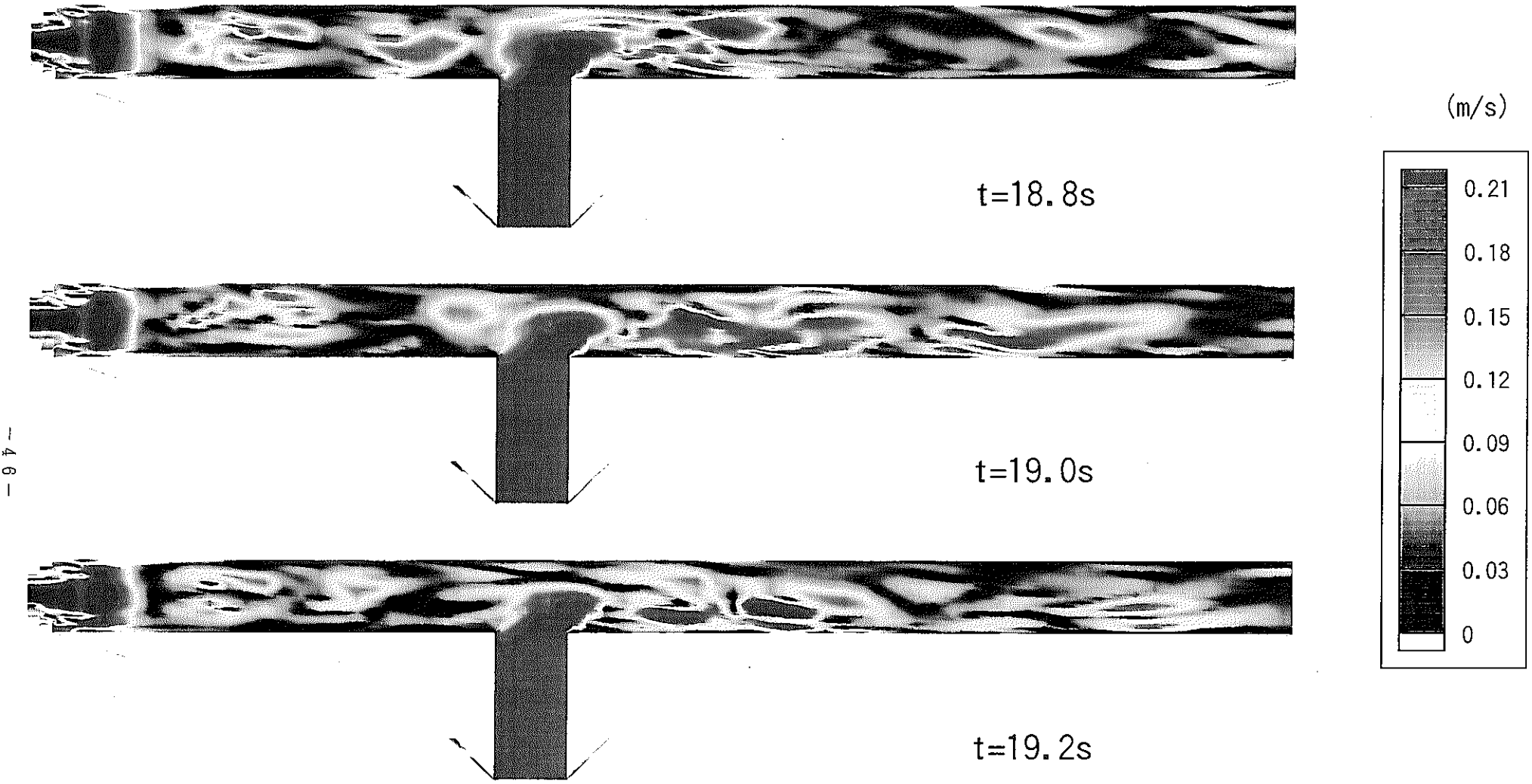


Fig. 3. 26 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-3 (1/2)



-- 46 --

Fig. 3. 26 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-3 (2/2)

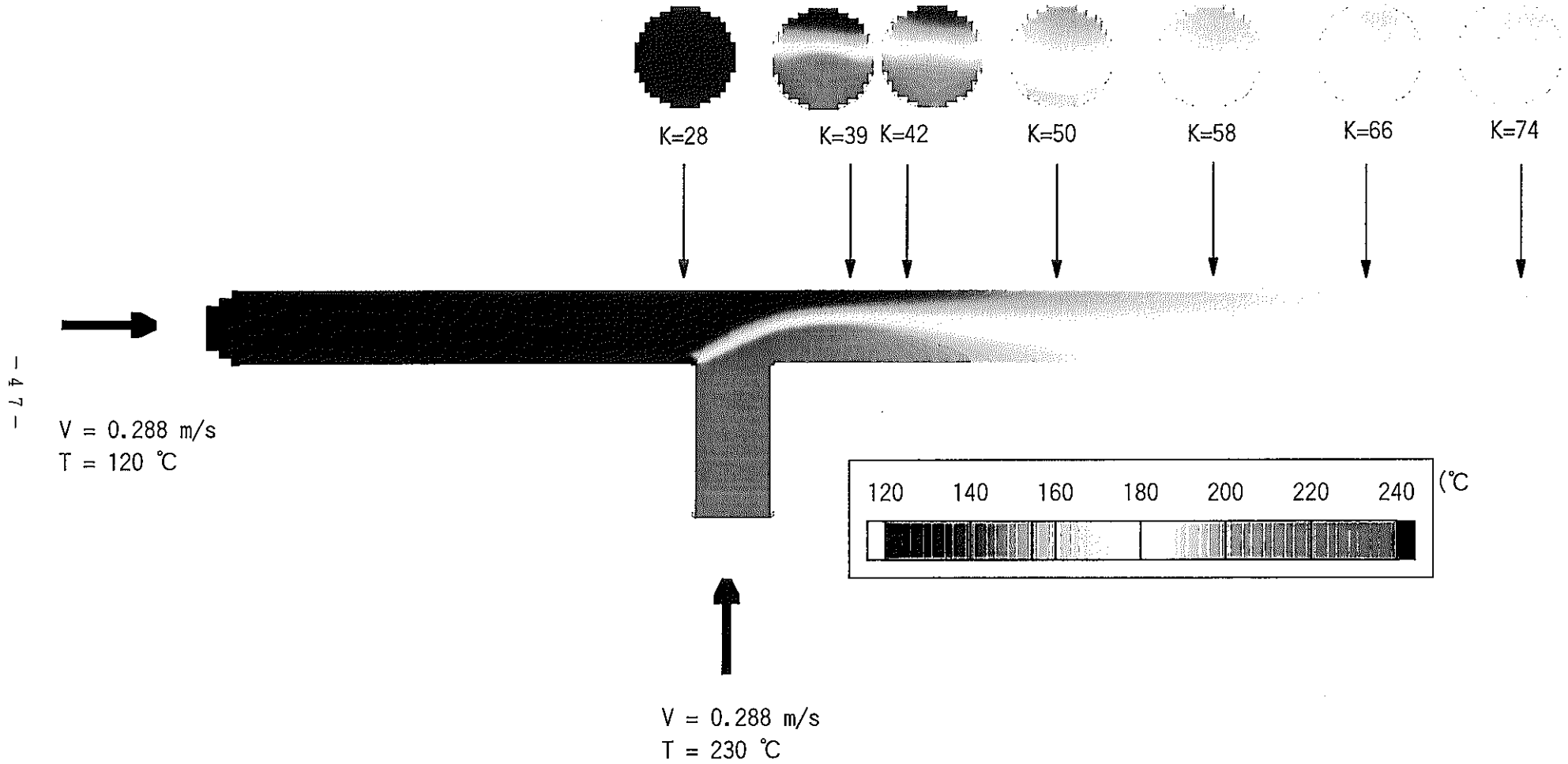


Fig. 3. 27 Time-Averaged Sodium Temperature Transients for Case-3

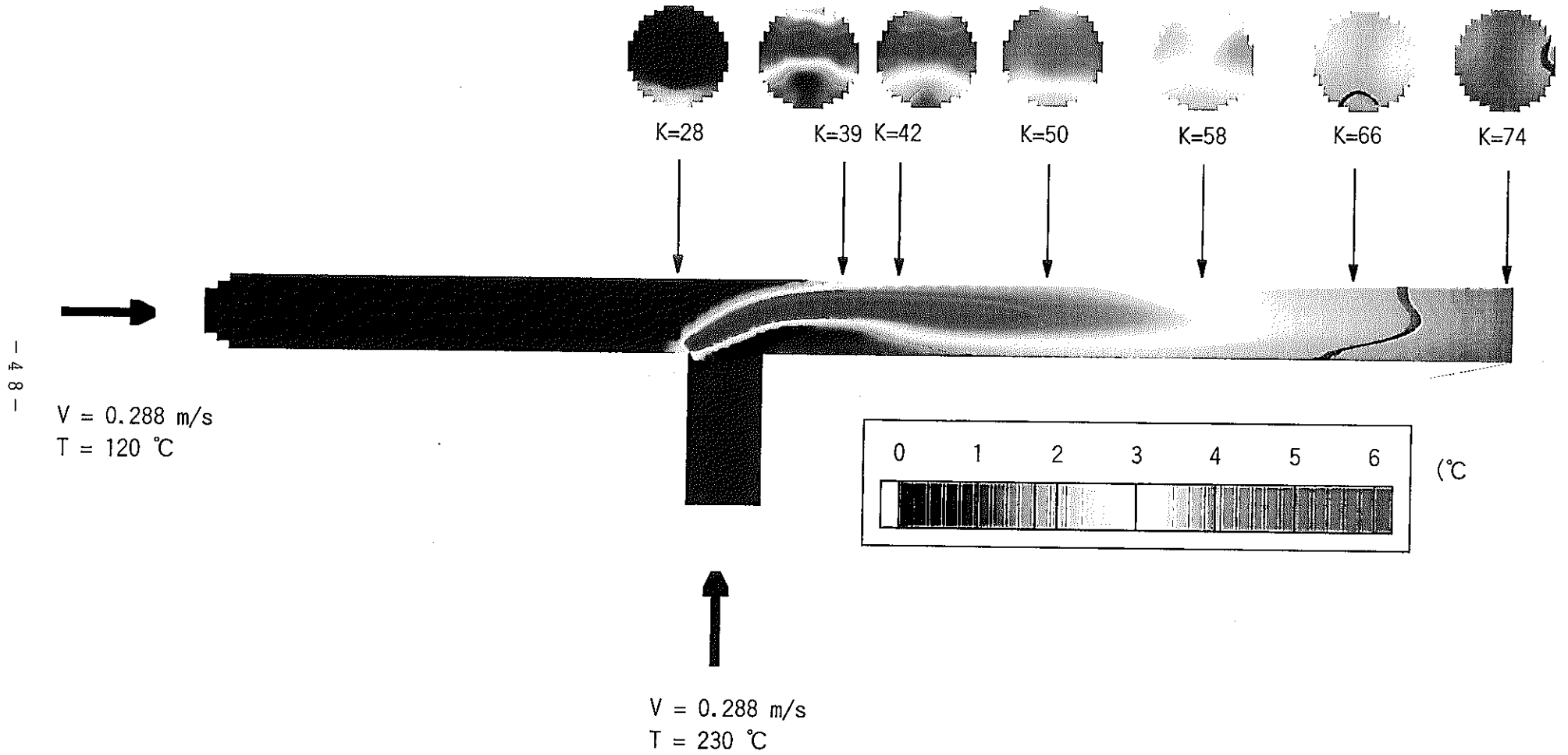


Fig. 3. 28 Time-Averaged Sodium Temperature Fluctuation Transients for Case-3

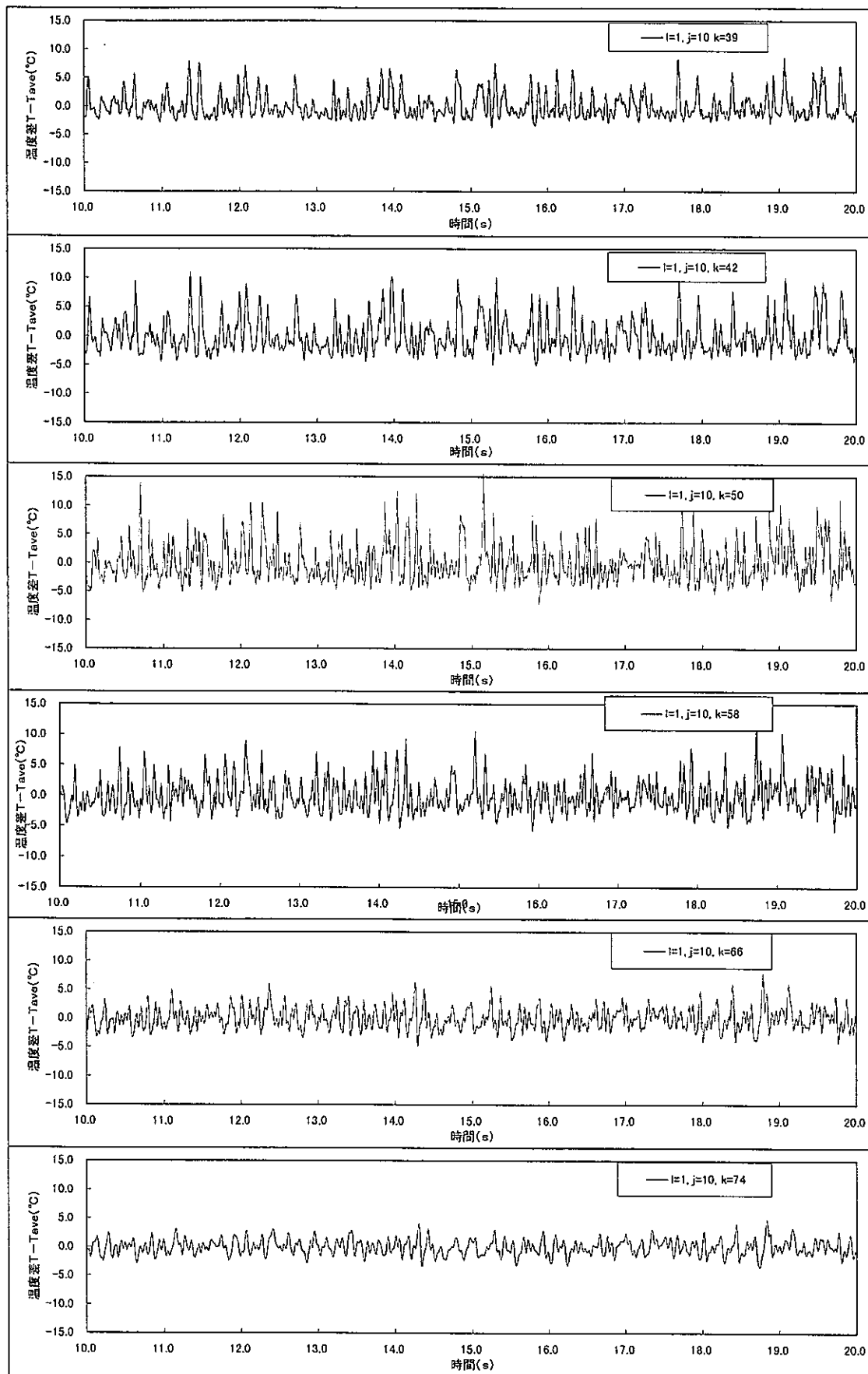


Fig. 3. 29 Sodium Temperature Transients at $l=1$ Position for Case-3

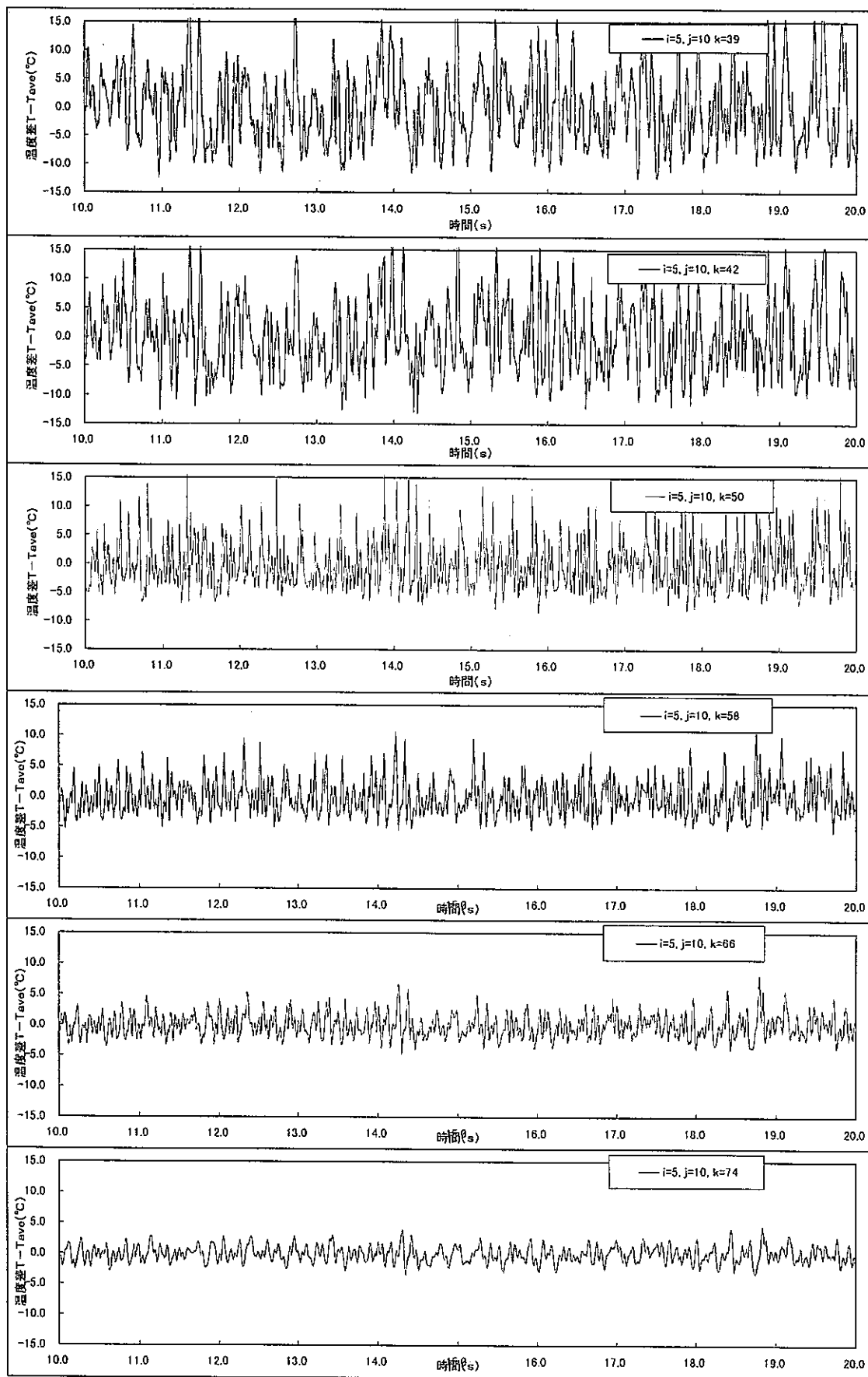


Fig. 3. 30 Sodium Temperature Transients at $l=5$ Position for Case-3

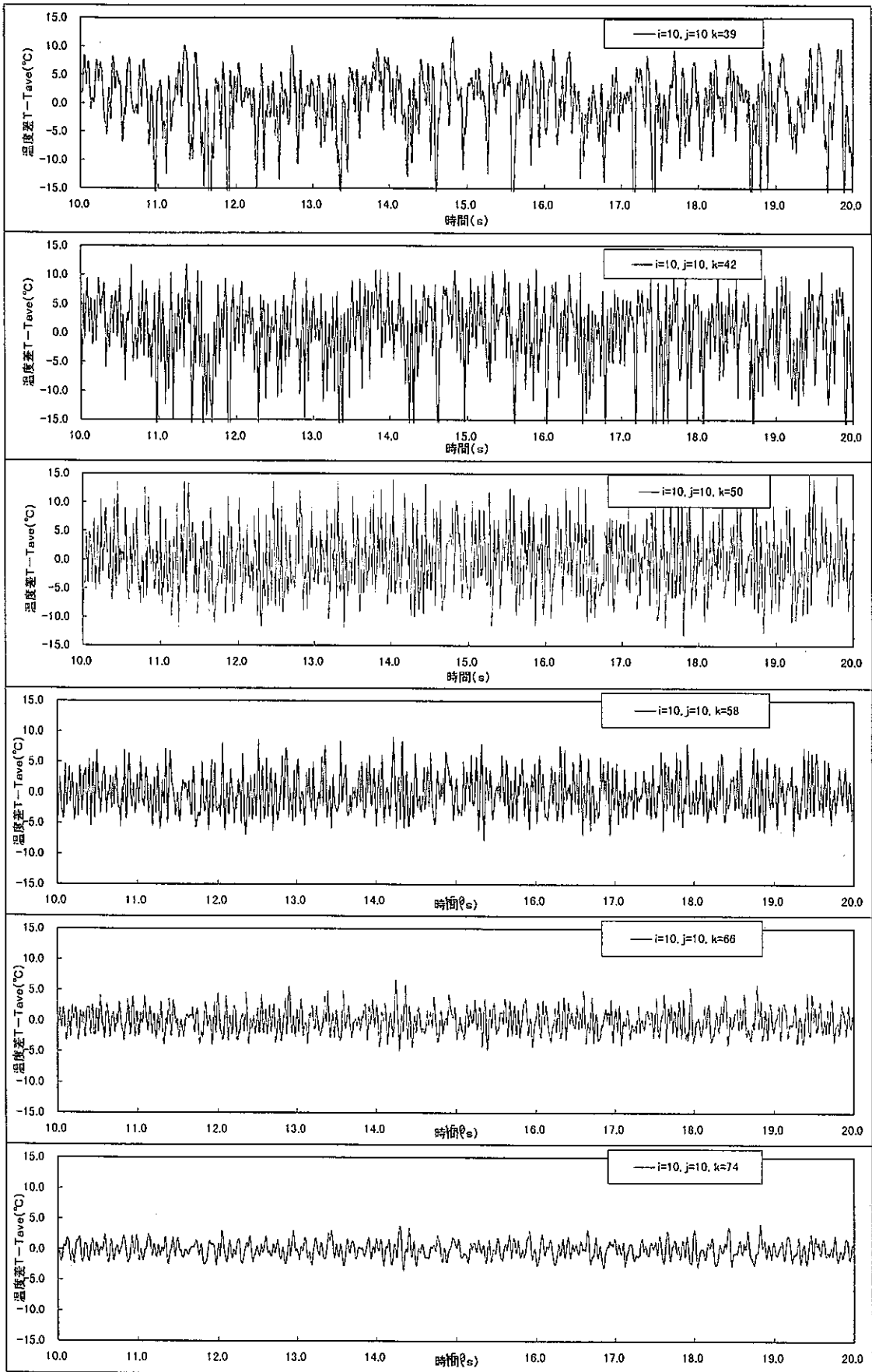


Fig. 3. 31 Sodium Temperature Transients at l=10 Position for Case-3

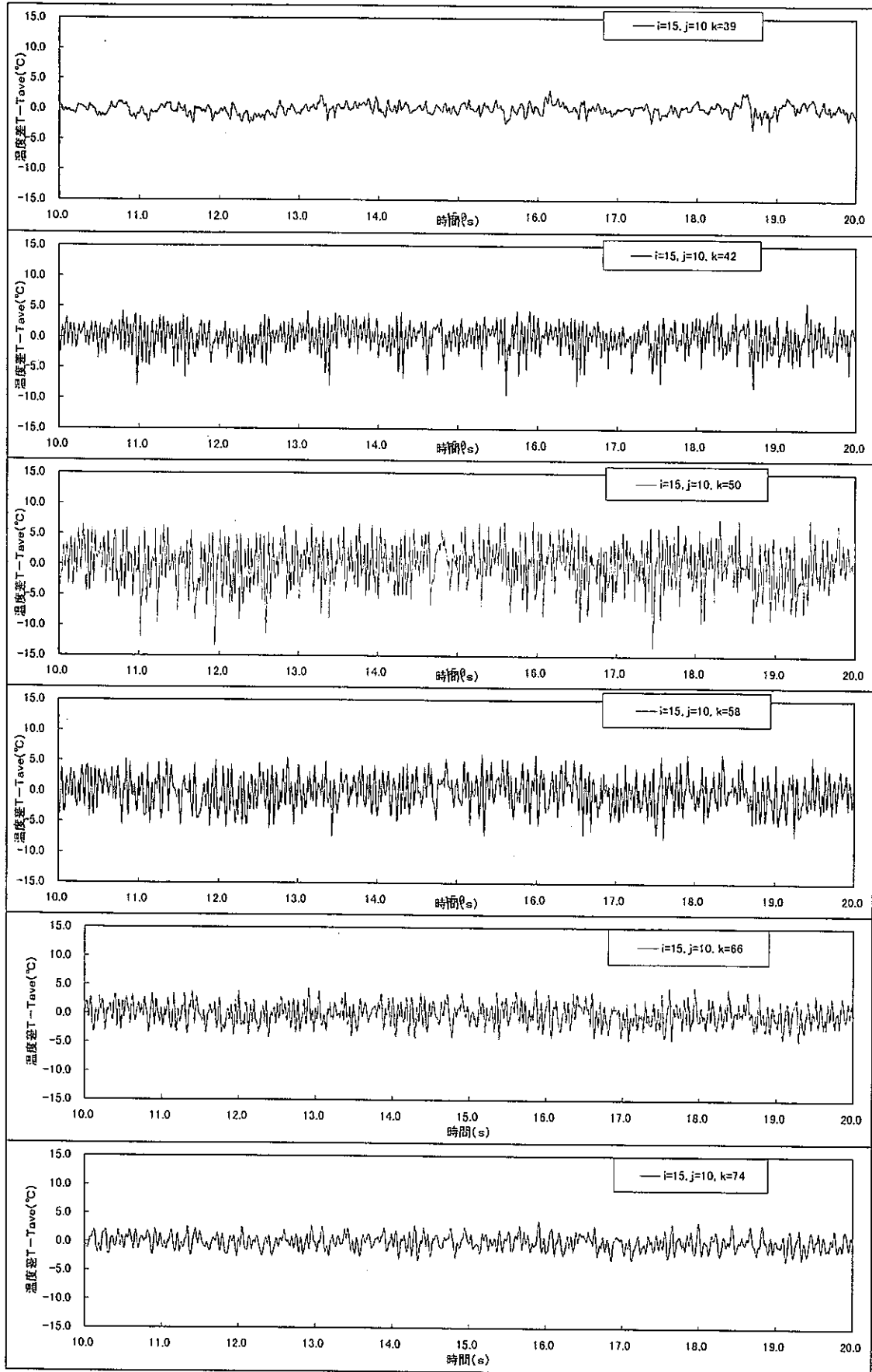


Fig. 3. 32 Sodium Temperature Transients at $l=15$ Position for Case-3

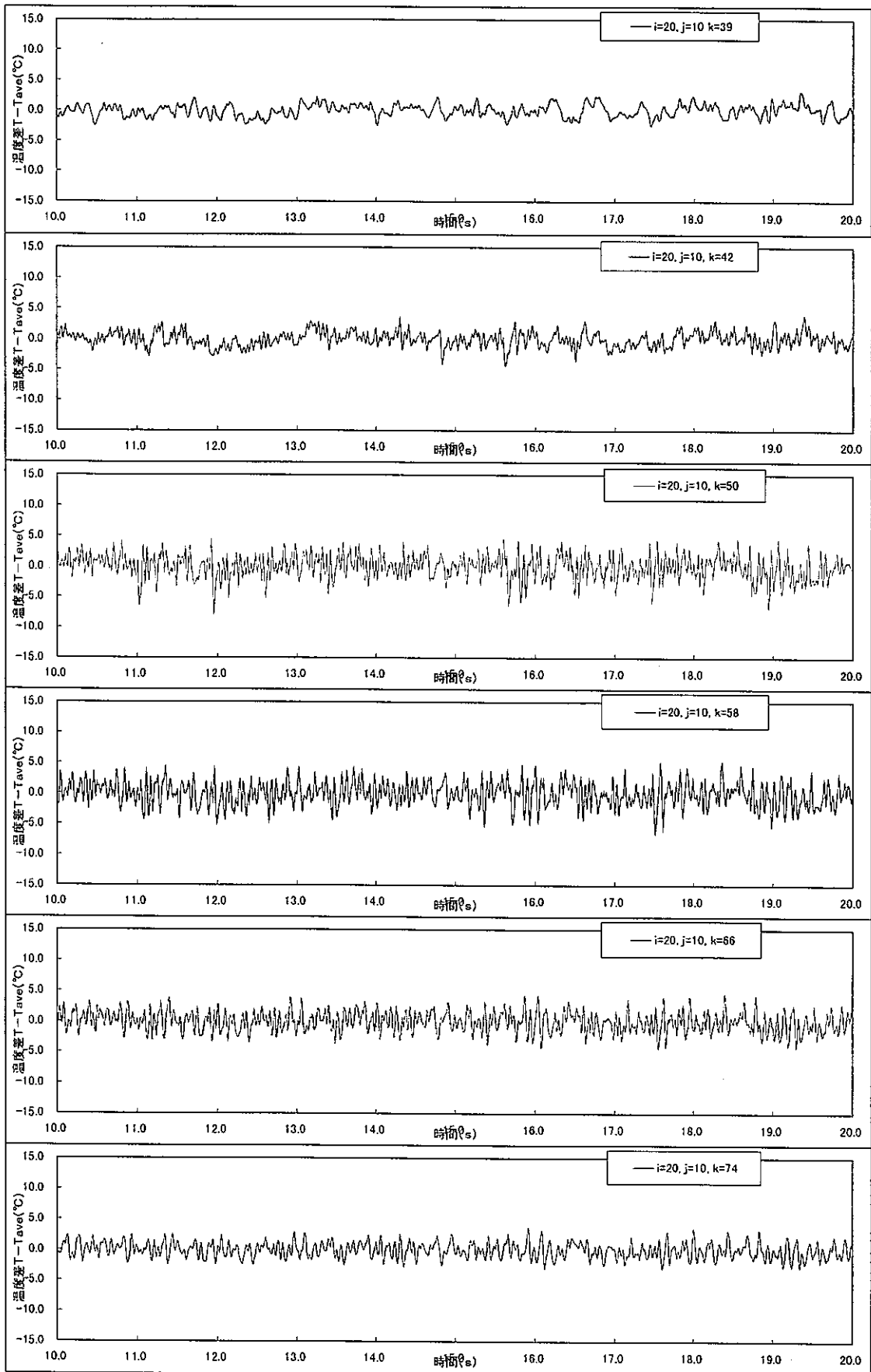


Fig. 3. 33 Sodium Temperature Transients at $i=20$ Position for Case-3

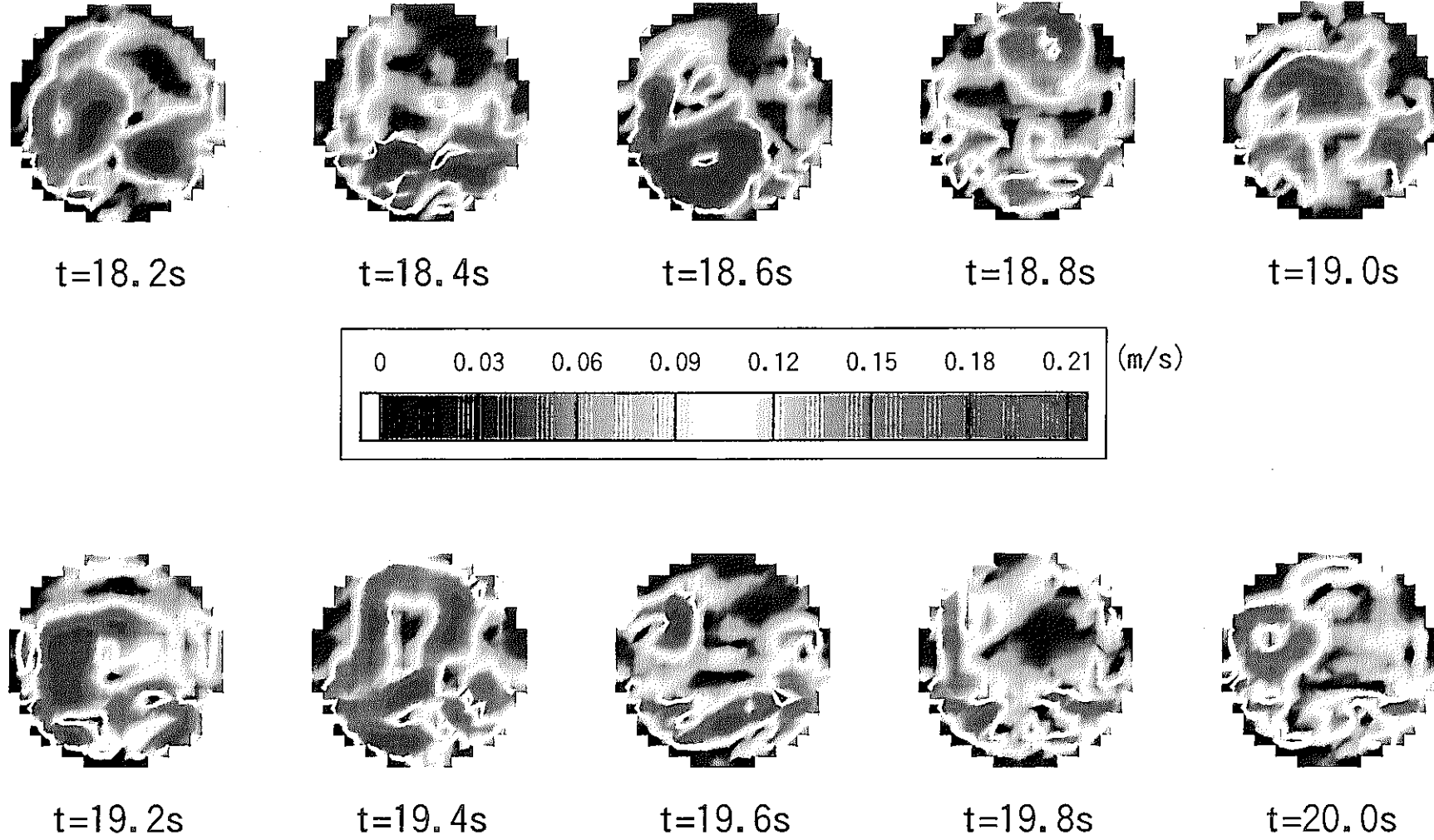


Fig. 3. 34 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Downstream from the Junction for Case-4

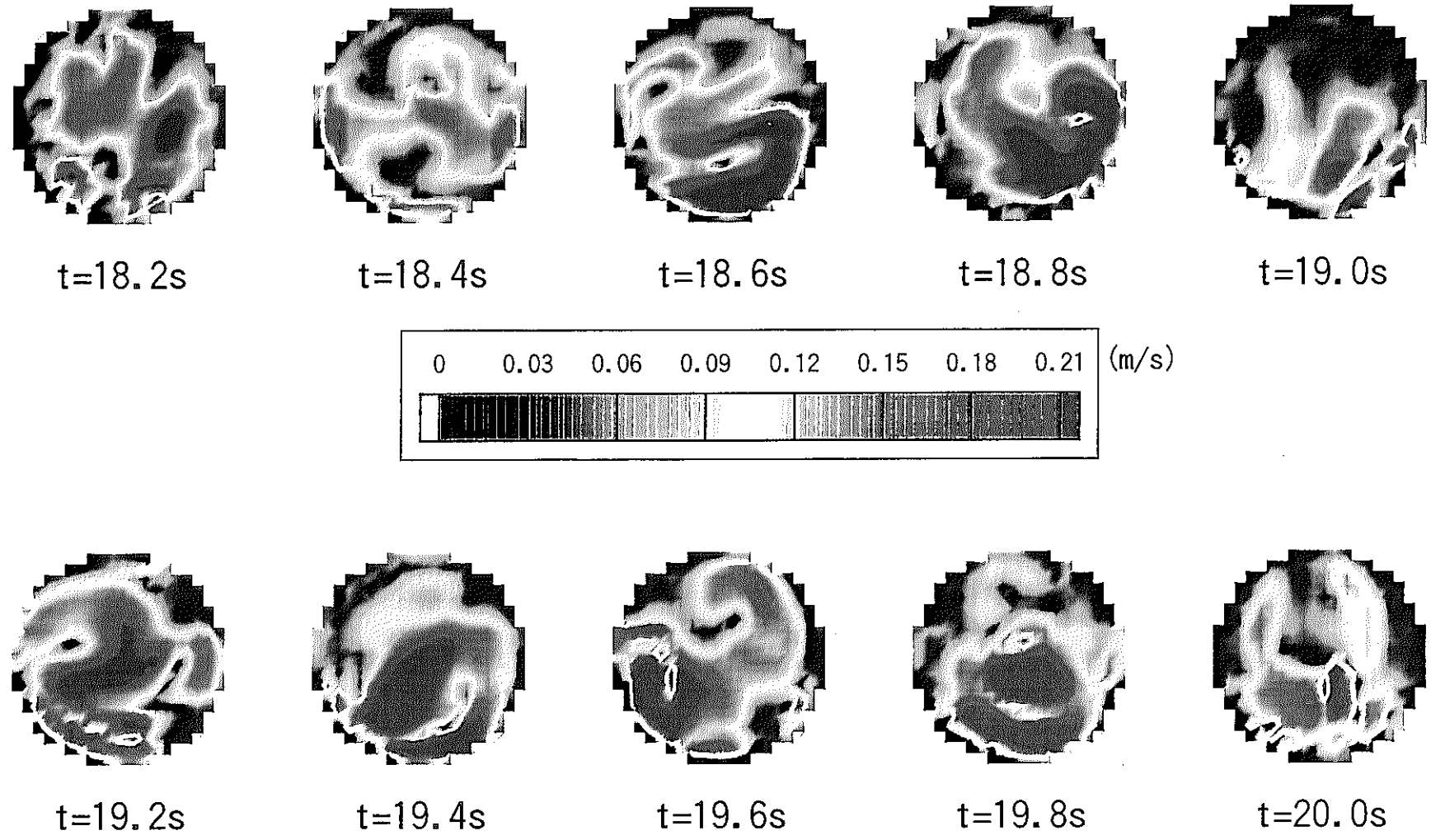


Fig. 3. 35 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Downstream from the Junction for Case-4

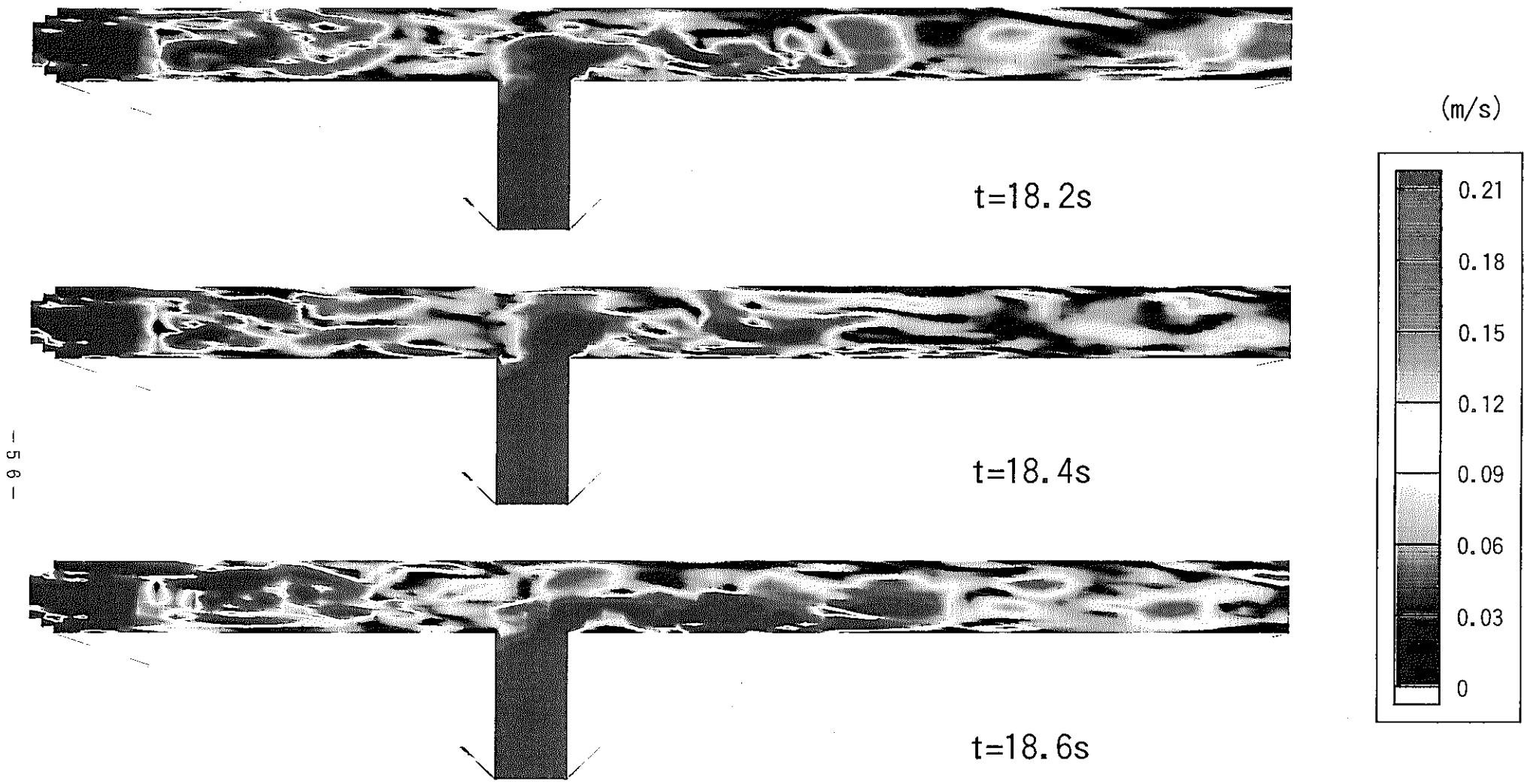


Fig. 3. 36 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-4 (1/2)

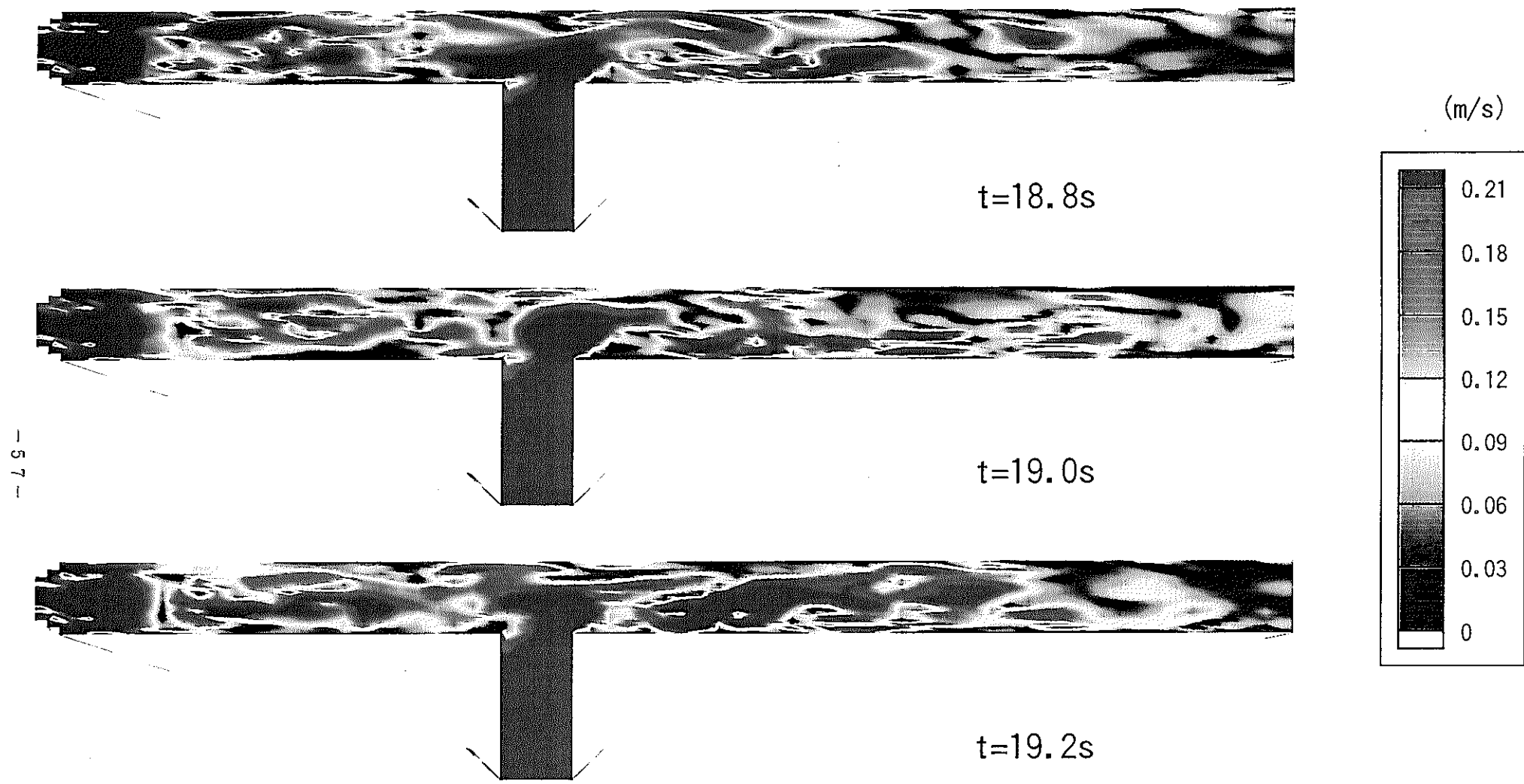


Fig. 3. 36 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-4 (2/2)

- 58 -

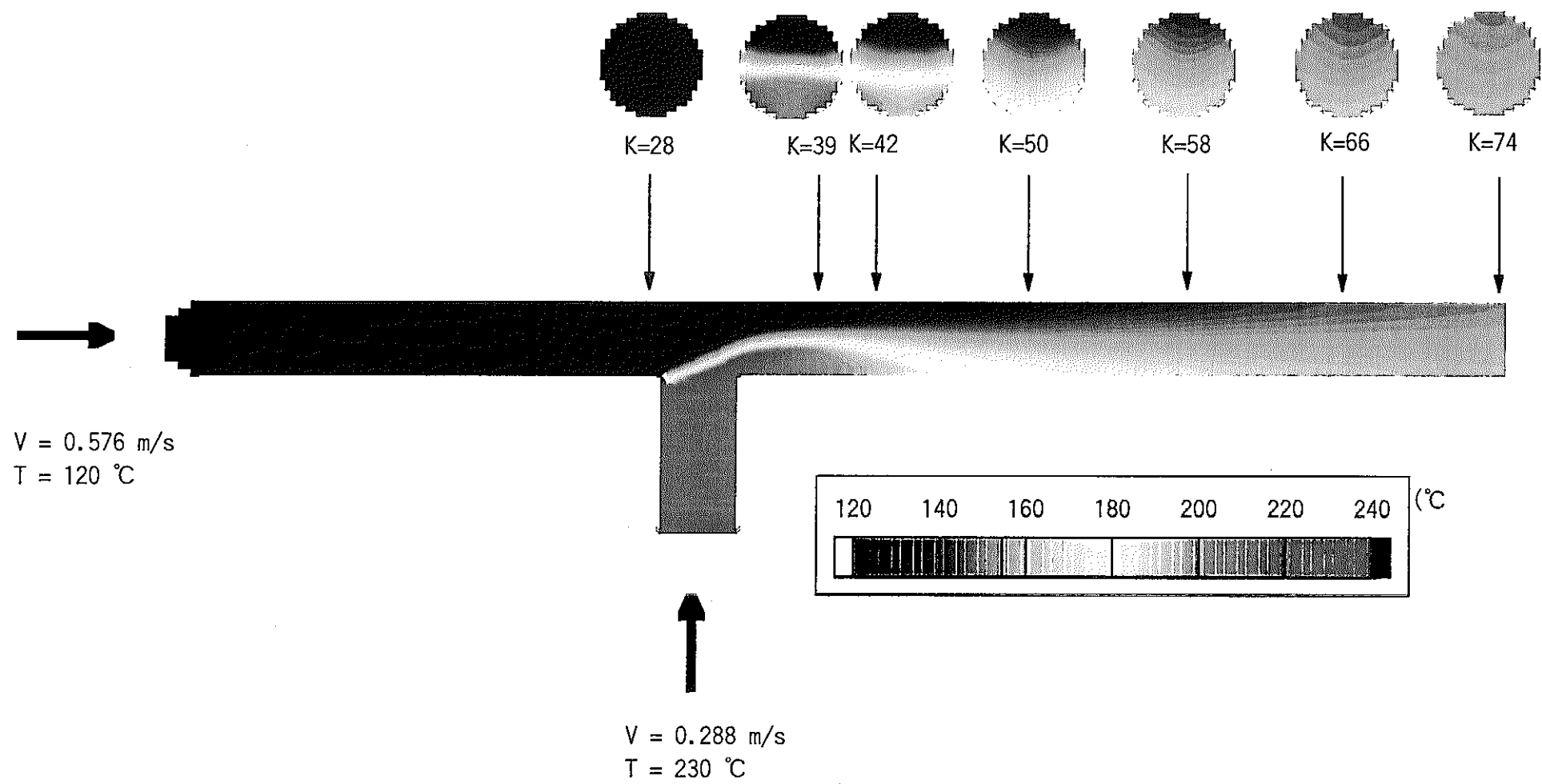


Fig. 3. 37 Time-Averaged Sodium Temperature Transients for Case-4

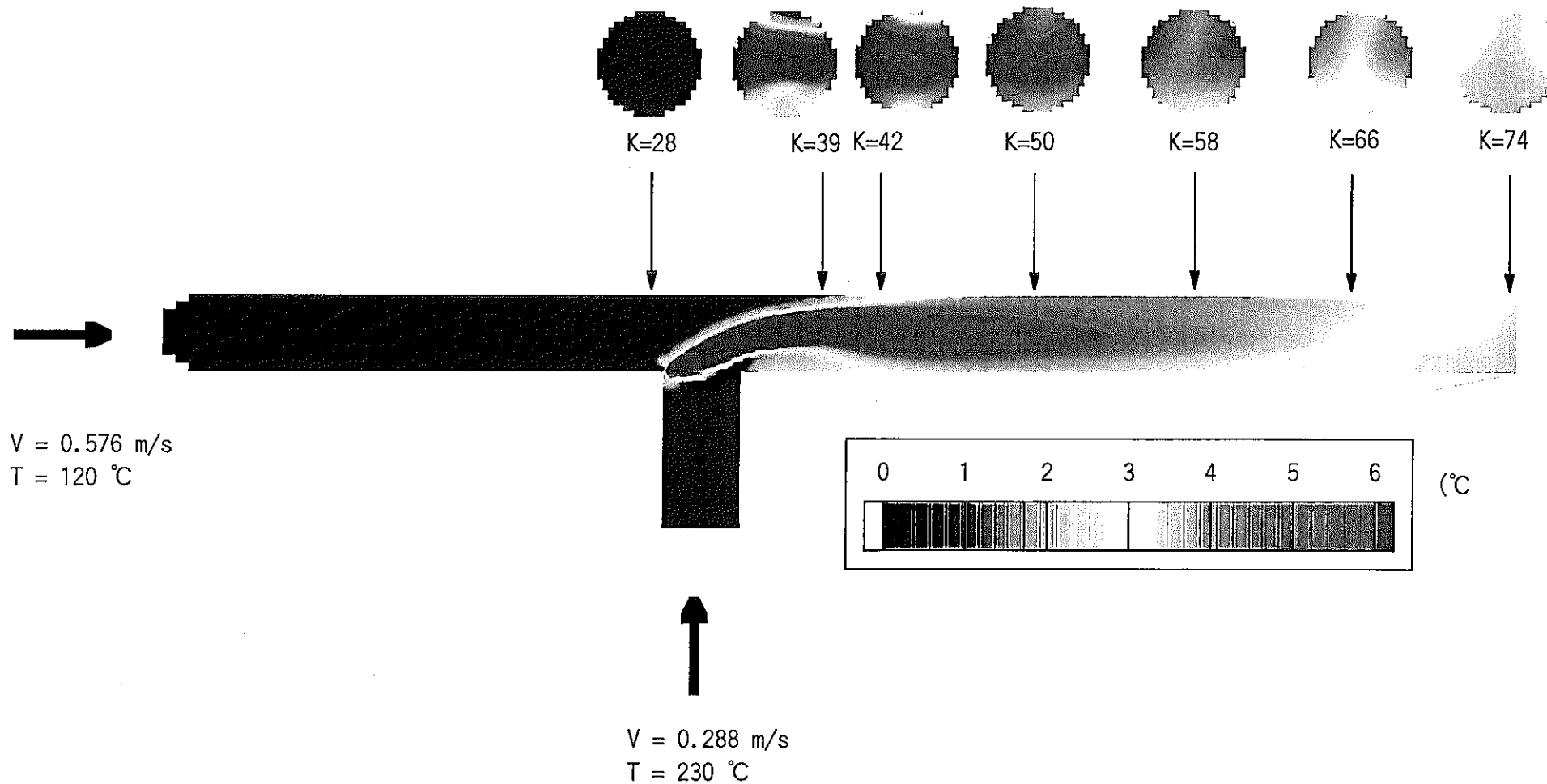


Fig. 3. 38 Time-Averaged Sodium Temperature Fluctuation Transients for Case-4

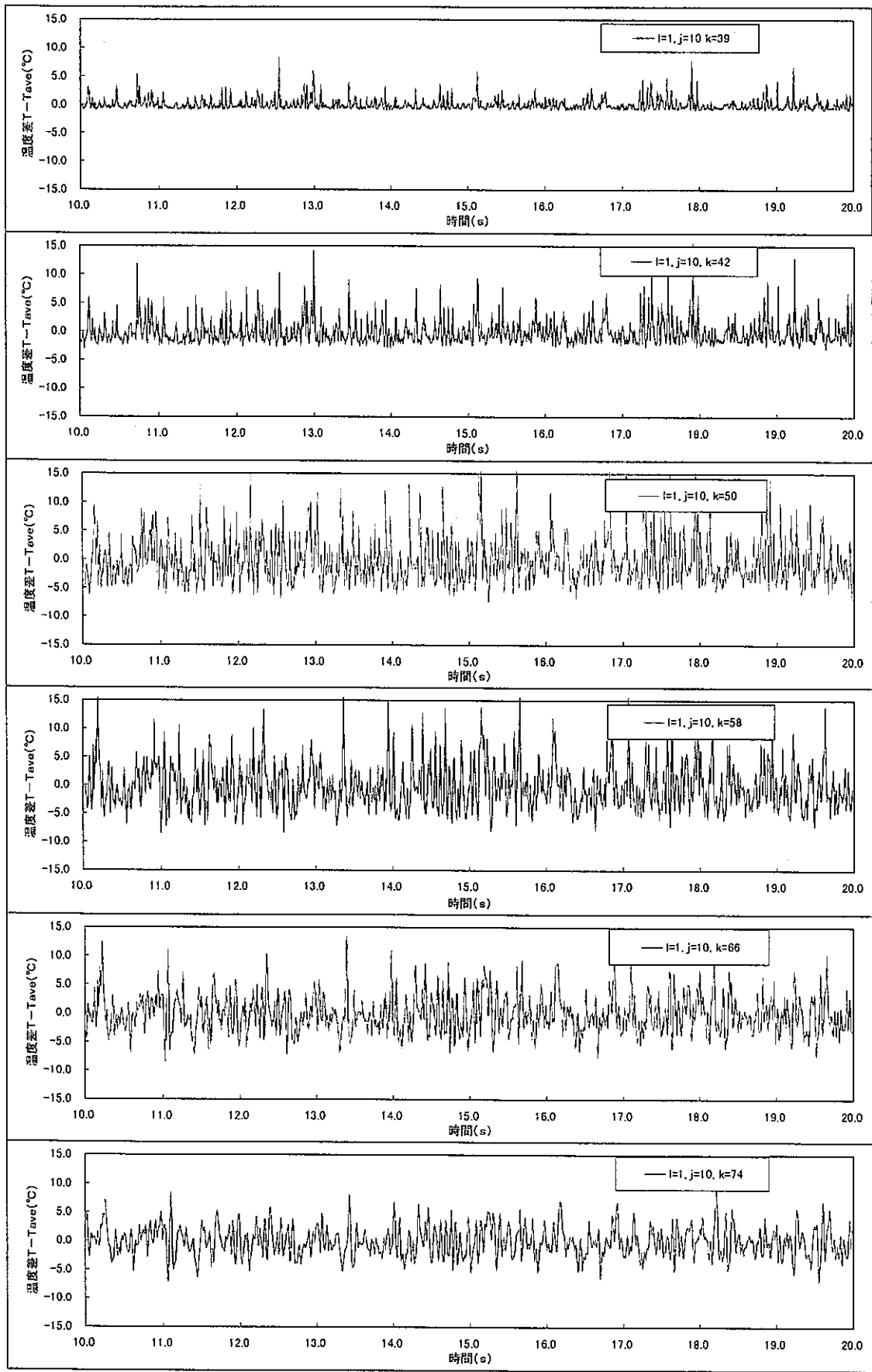


Fig. 3. 39 Sodium Temperature Transients at l=1 Position for Case-4

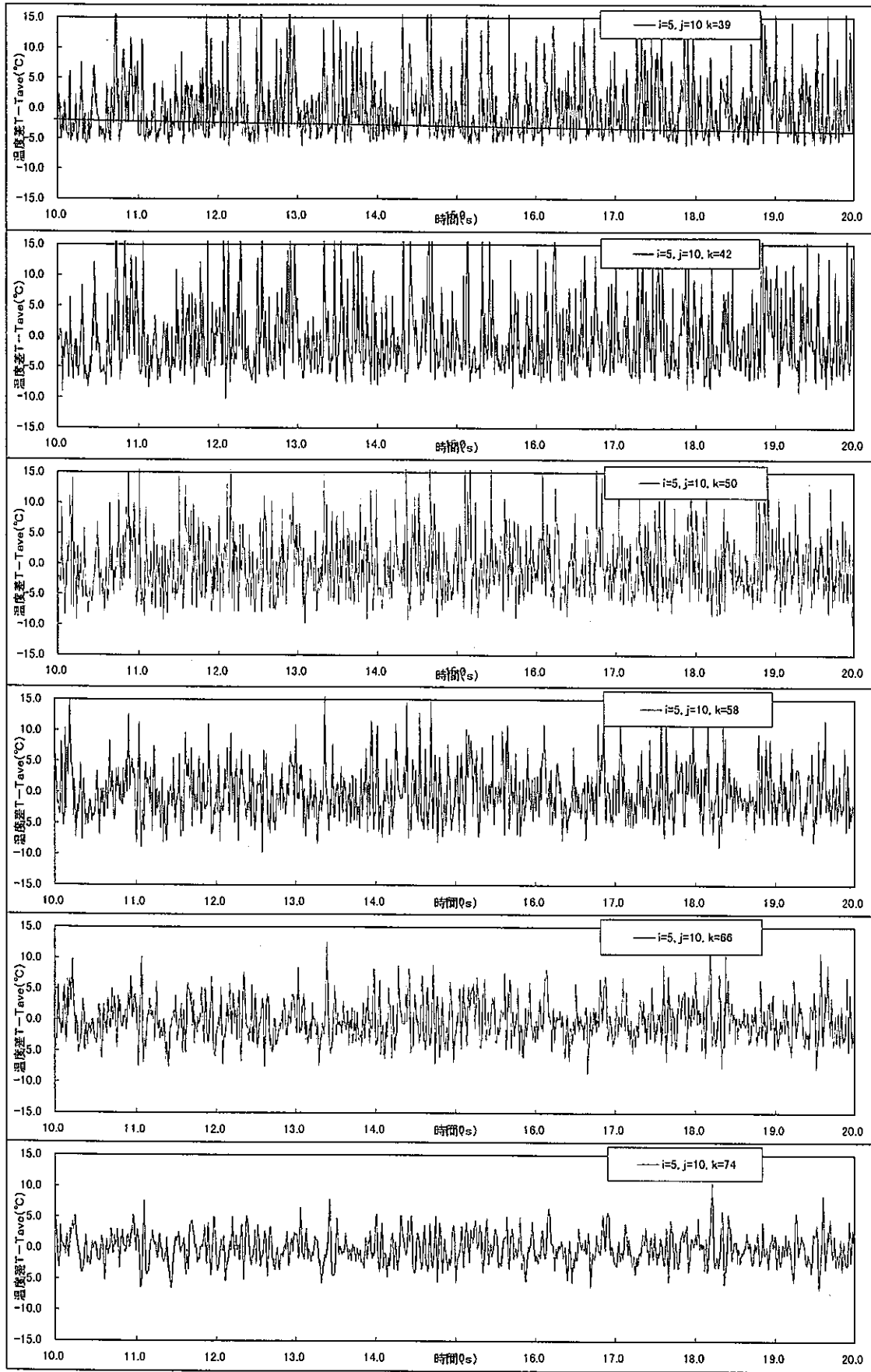


Fig. 3. 40 Sodium Temperature Transients at $i=5$ Position for Case-4

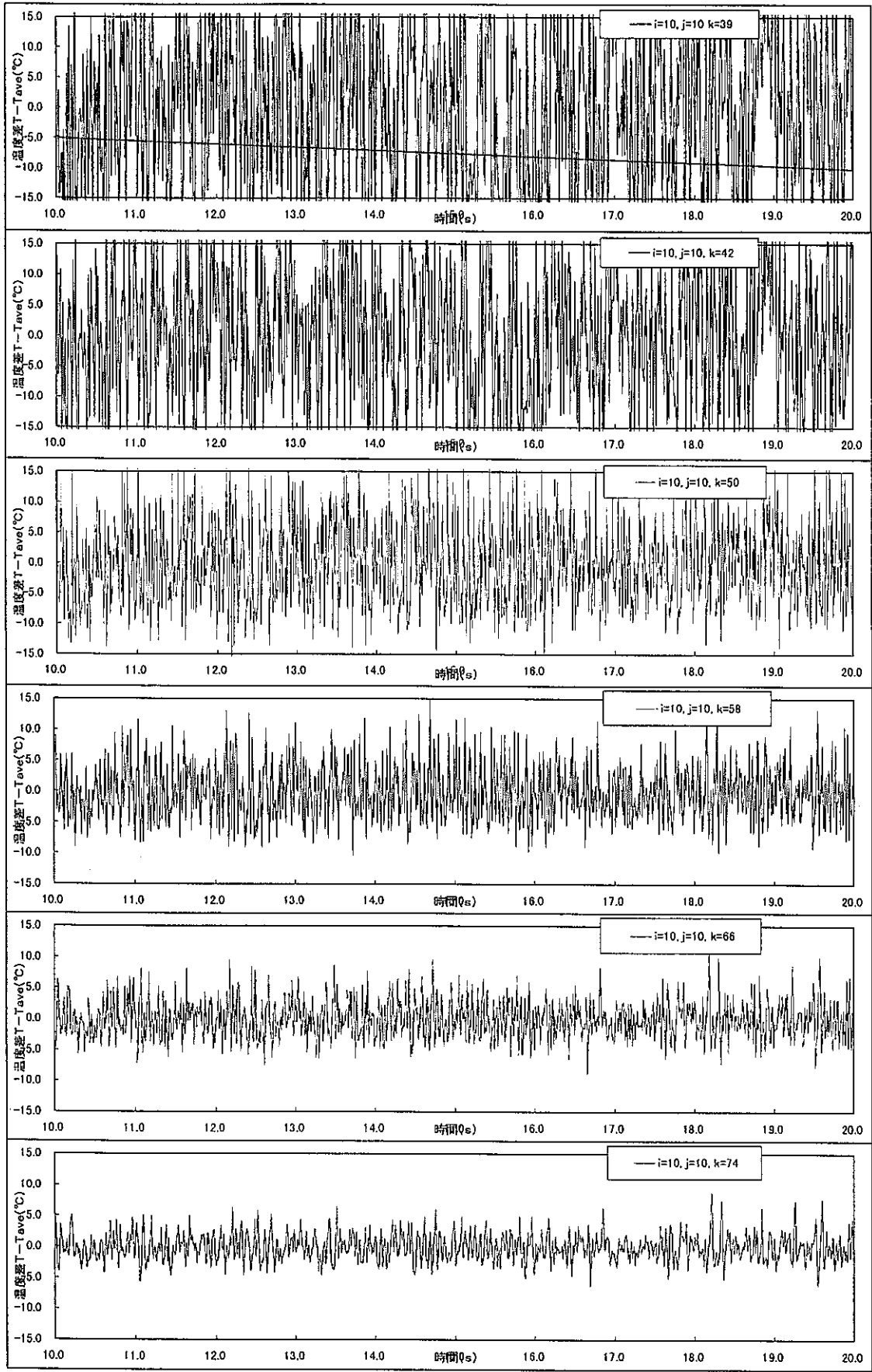


Fig. 3. 41 Sodium Temperature Transients at l=10 Position for Case-4

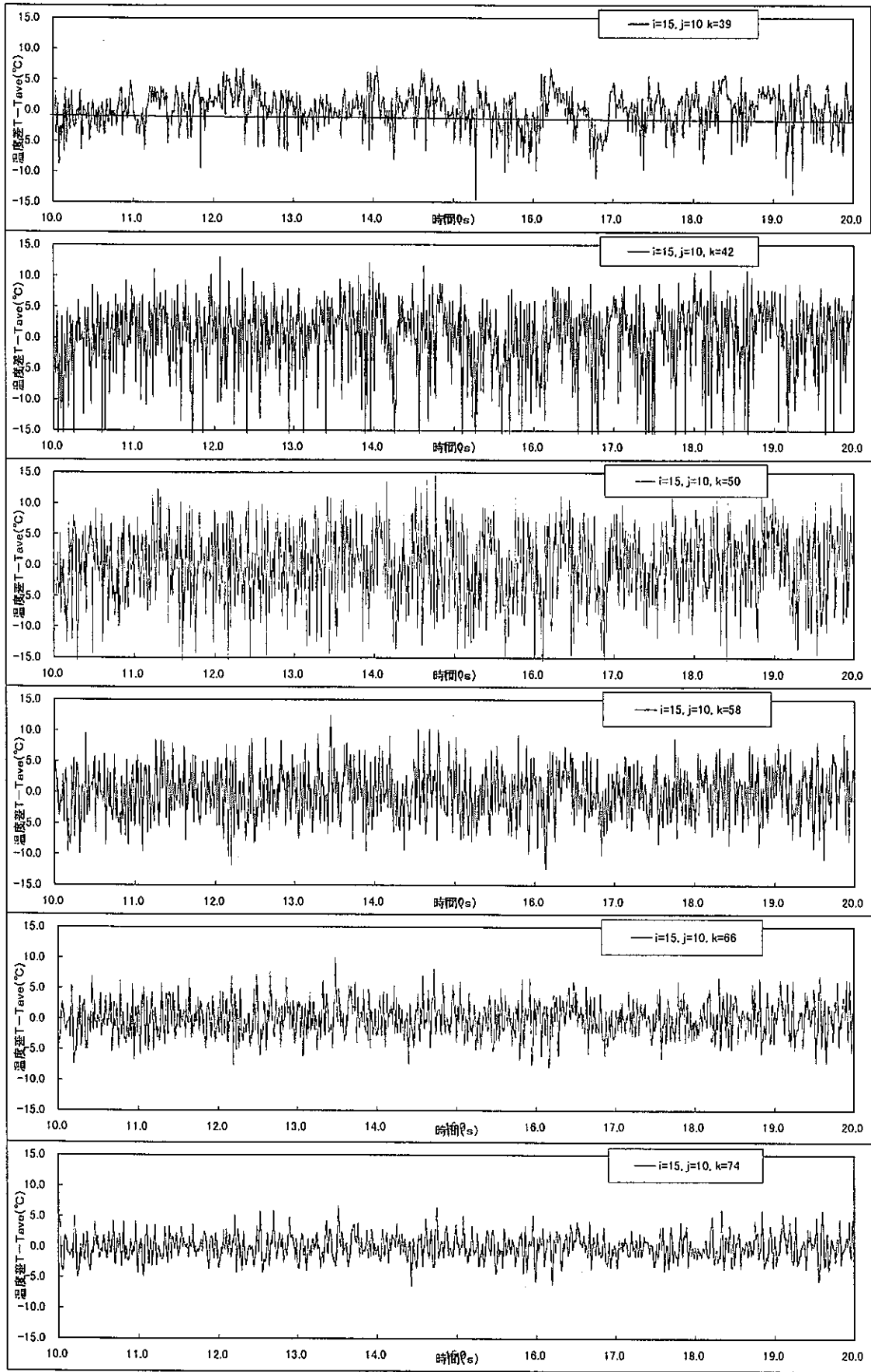


Fig. 3. 42 Sodium Temperature Transients at l=15 Position for Case-4

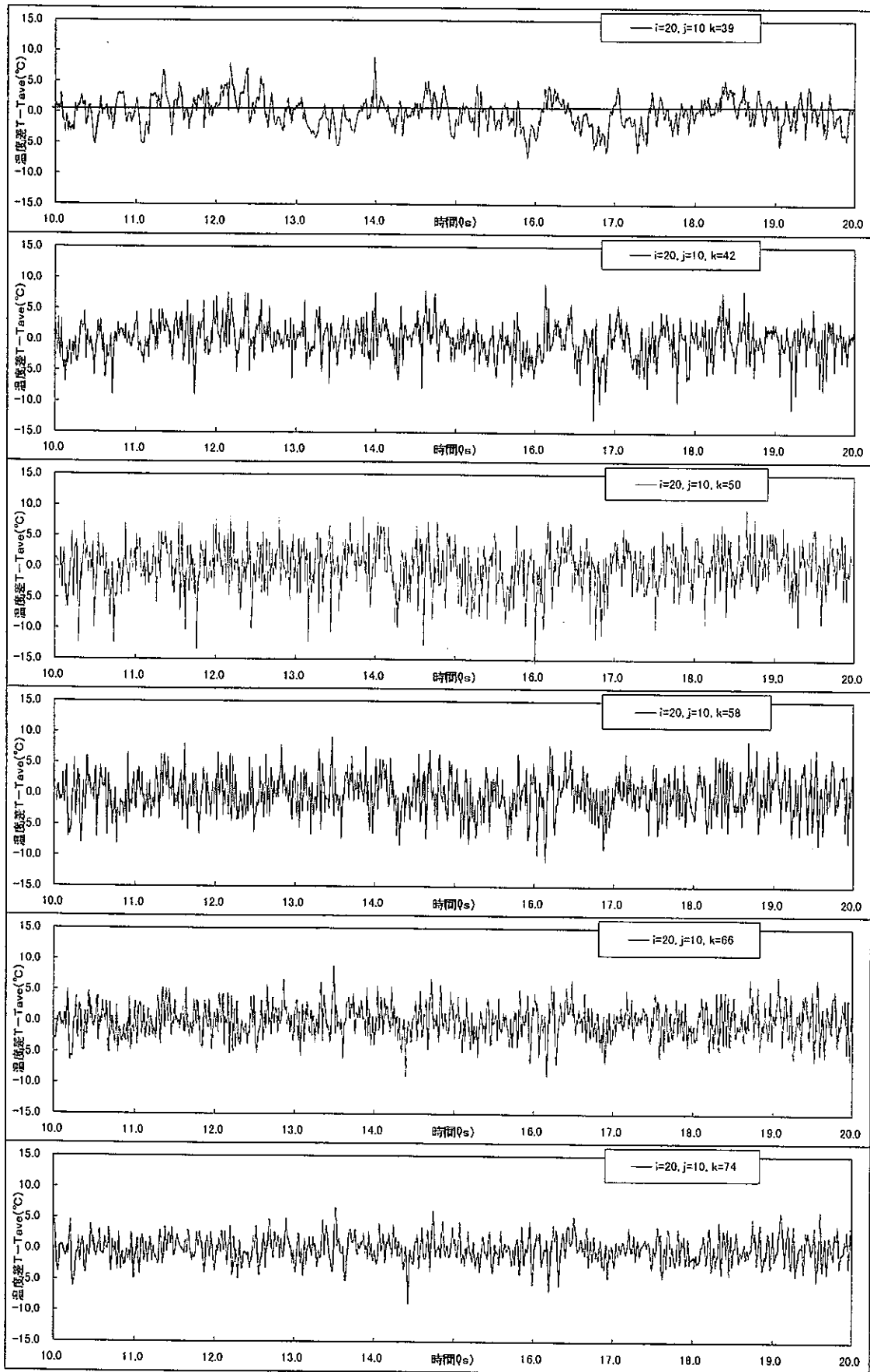


Fig. 3. 43 Sodium Temperature Transients at l=20 Position for Case-4

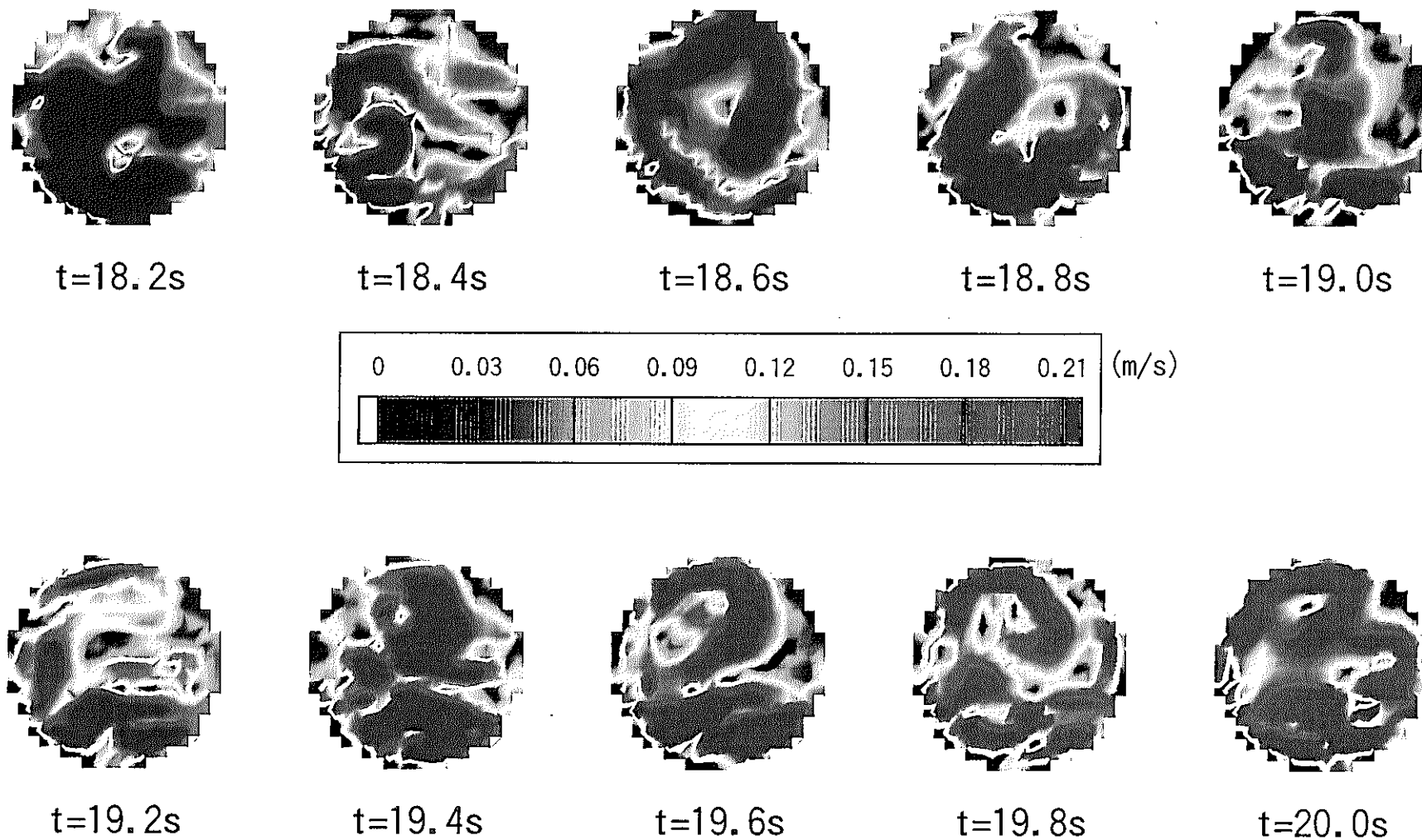


Fig. 3. 44 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 1d of Downstream from the Junction for Case-5

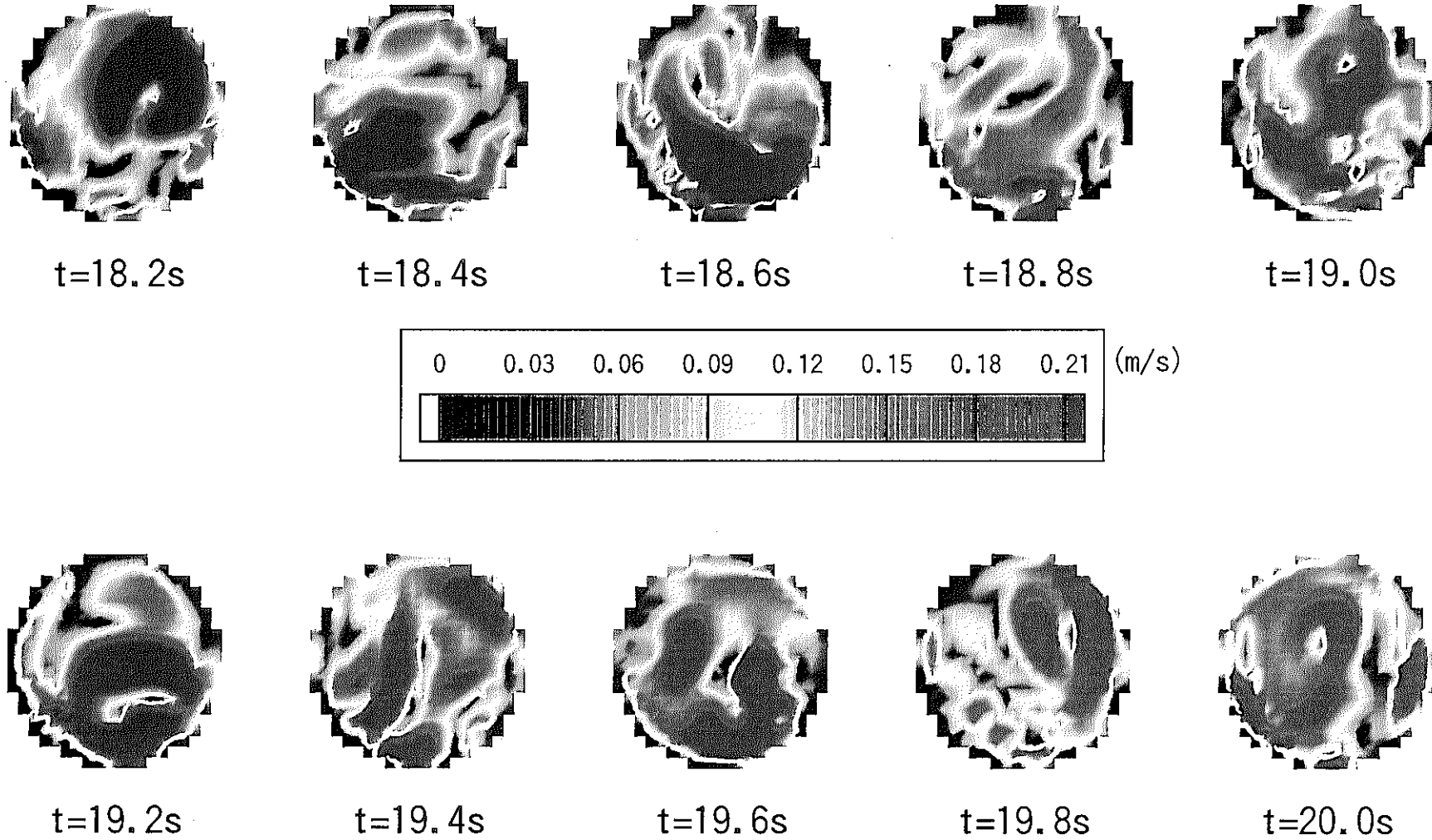


Fig. 3. 45 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients at 4d of Downstream from the Junction for Case-5

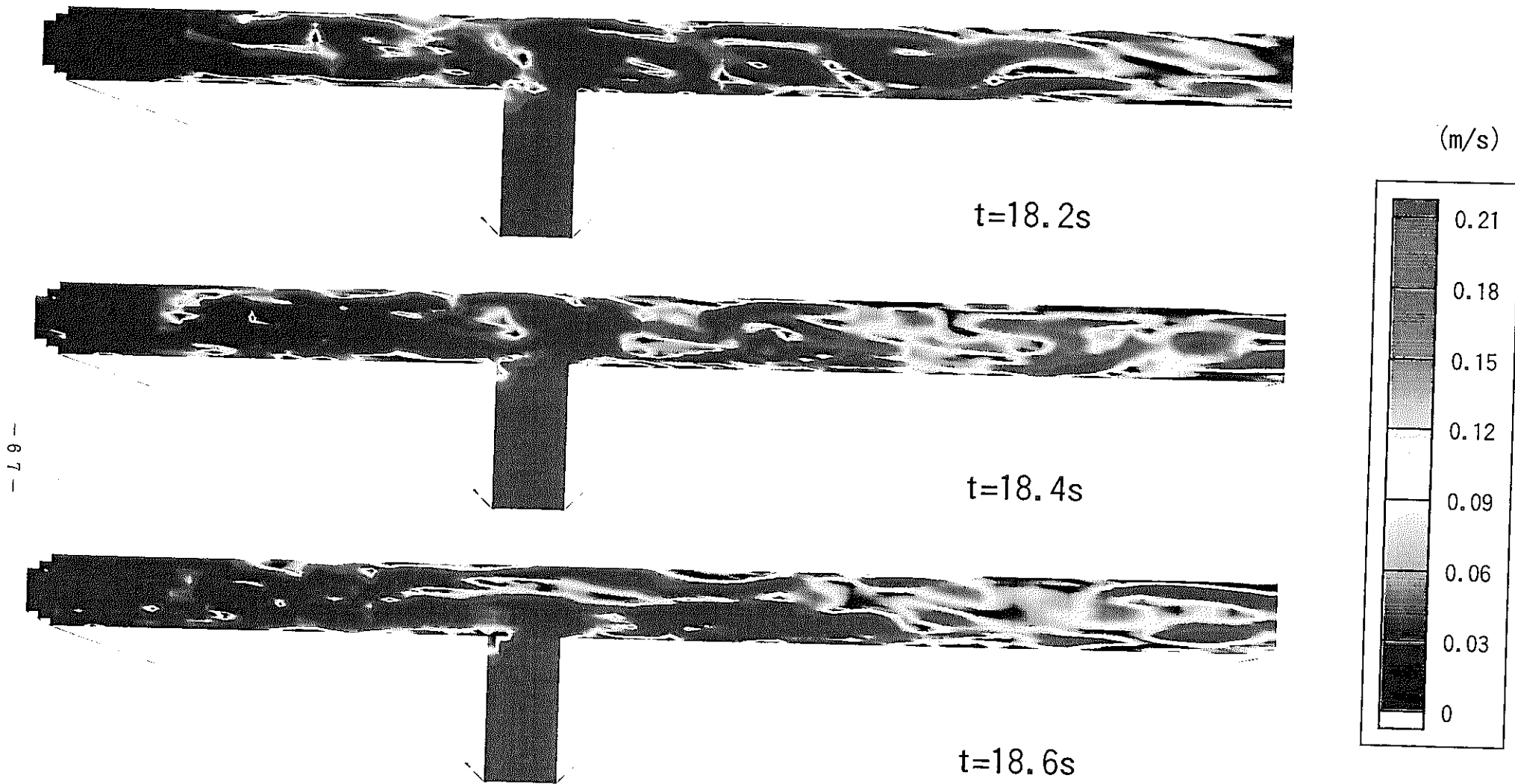
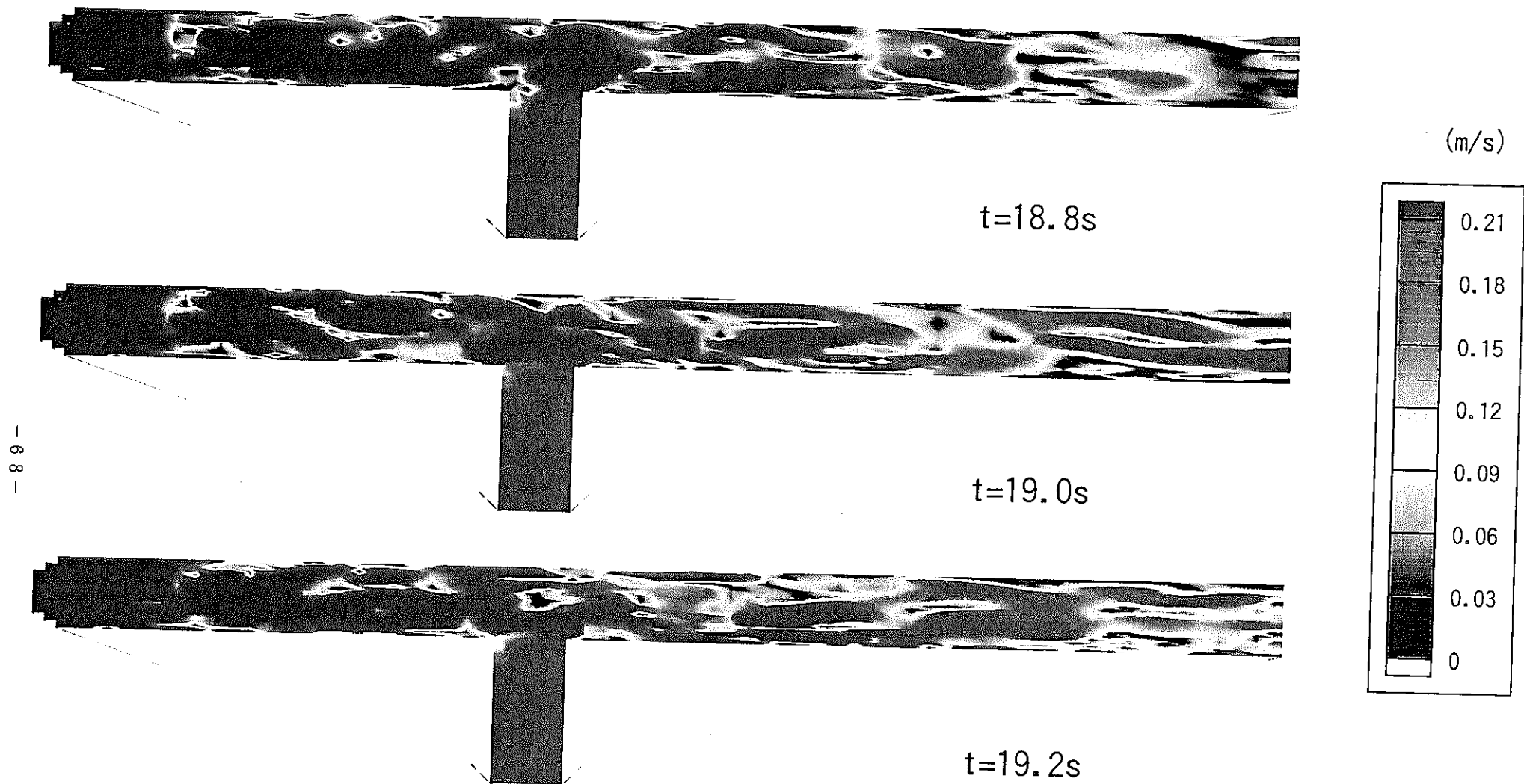


Fig. 3. 46 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-5 (1/2)



- 8 -

Fig. 3. 46 Composed Velocity Intensity $((u^2+v^2)^{0.5})$ Transients for Case-5 (2/2)

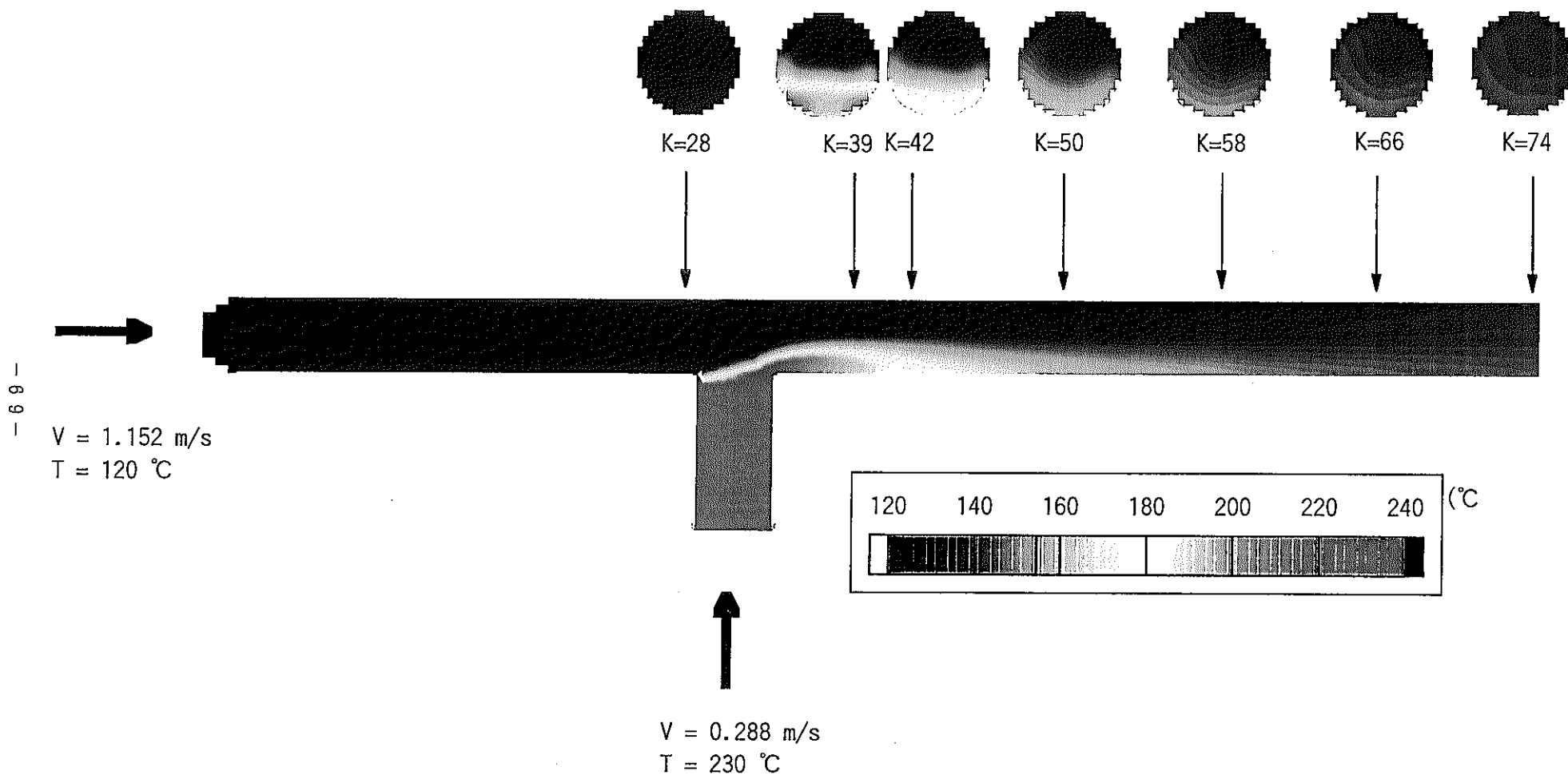


Fig. 3. 47 Time-Averaged Sodium Temperature Transients for Case-5

- 89 -

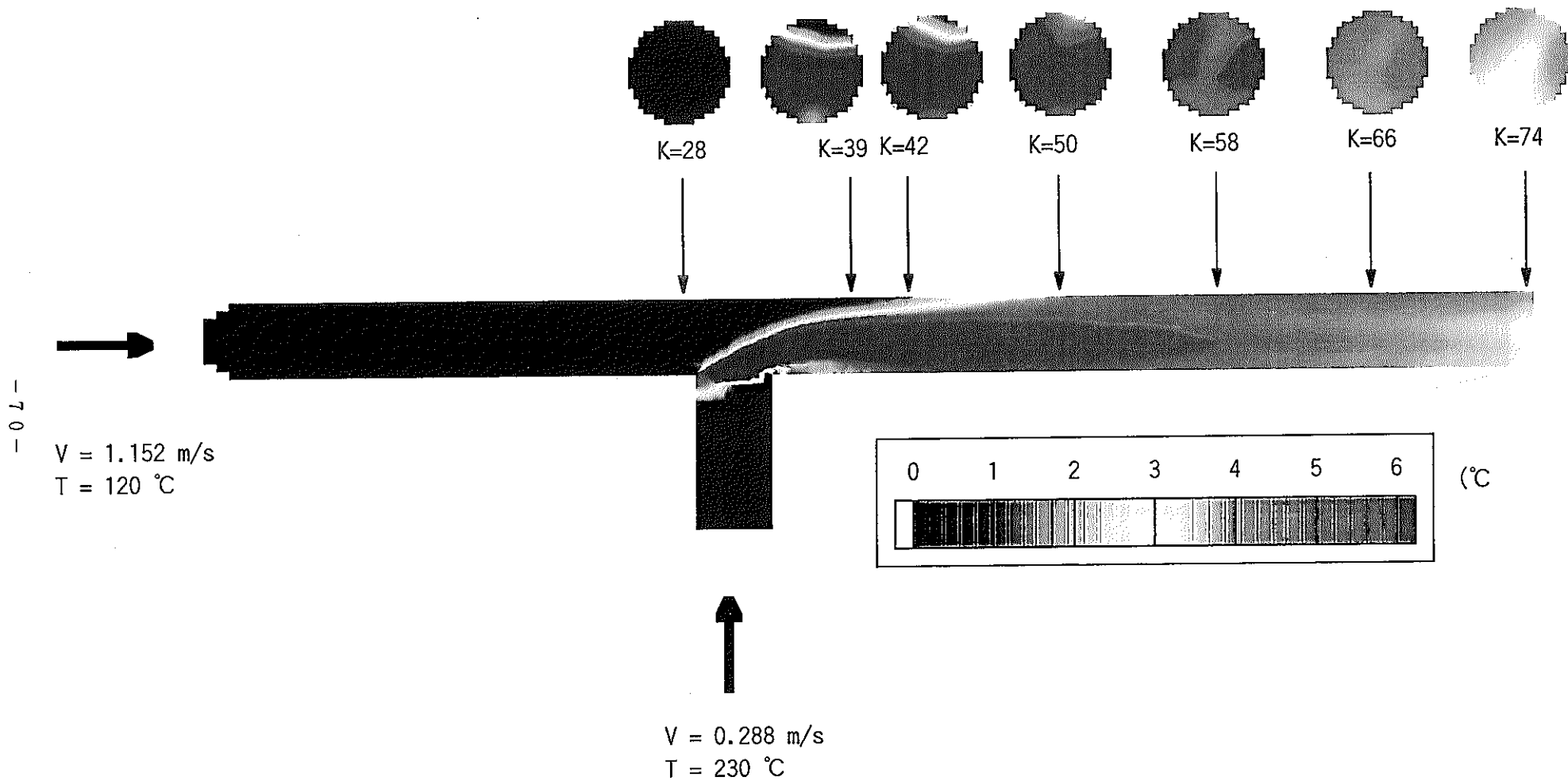


Fig. 3. 48 Time-Averaged Sodium Temperature Fluctuation Transients for Case-5

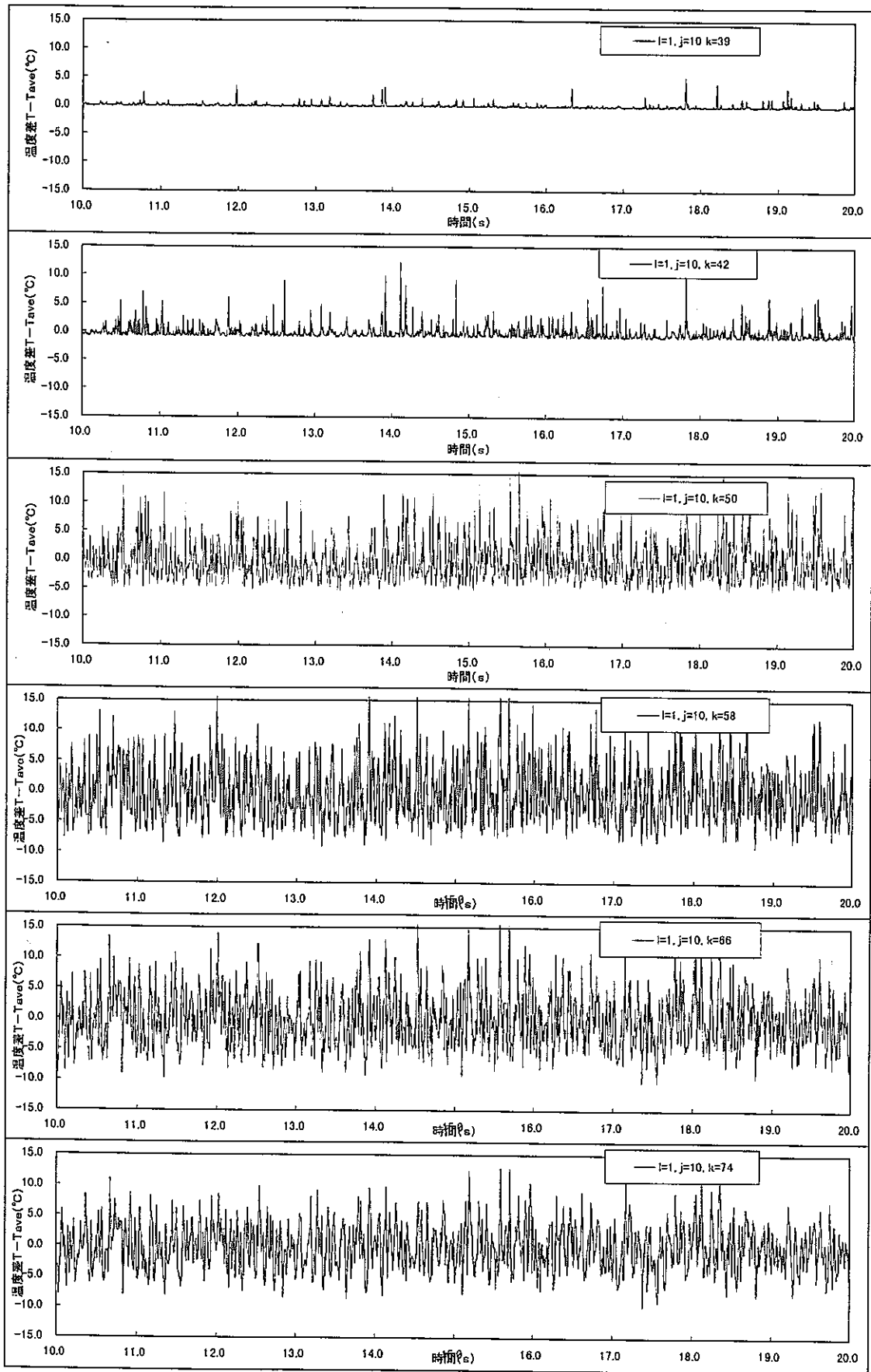


Fig. 3. 49 Sodium Temperature Transients at $i=1$ Position for Case-5

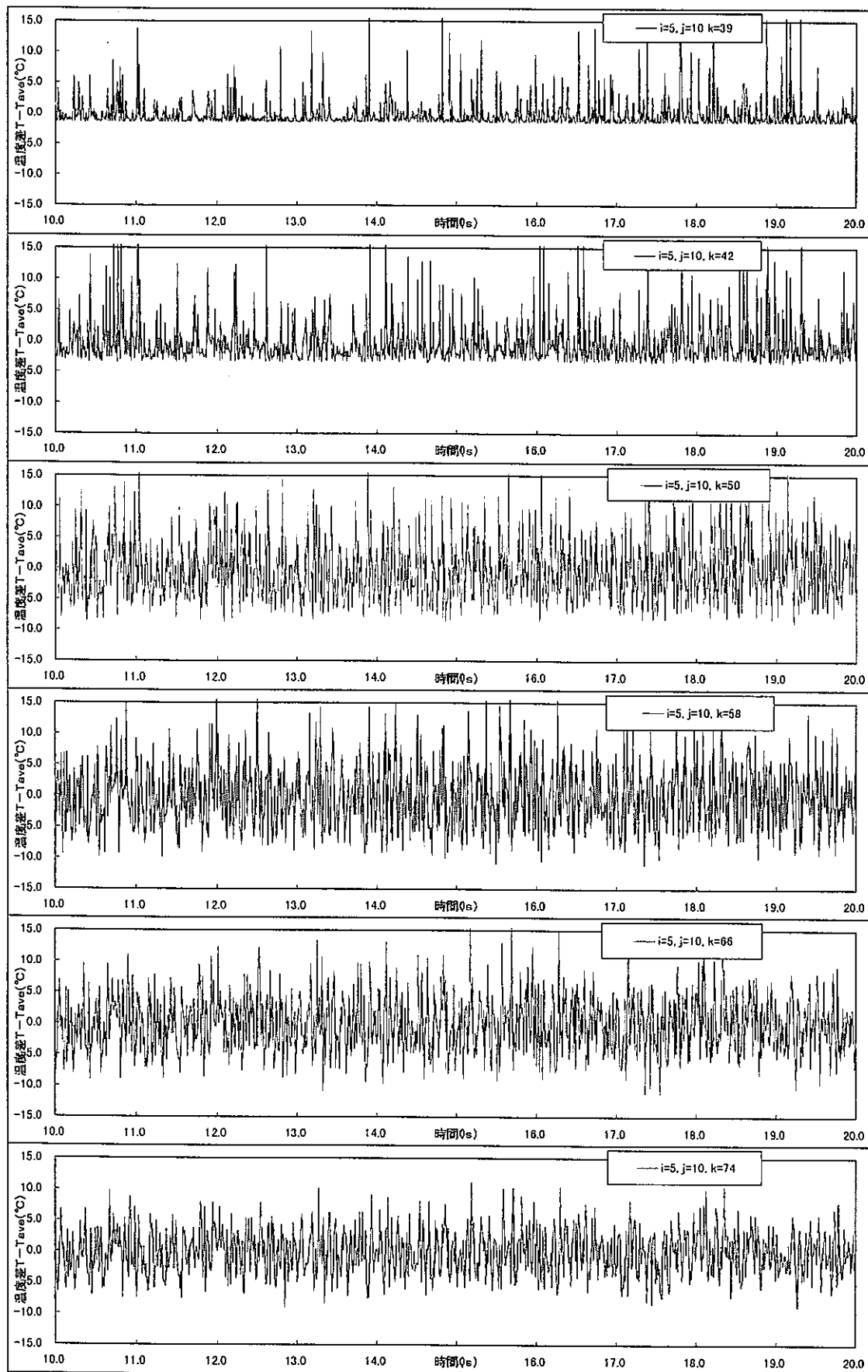


Fig. 3. 50 Sodium Temperature Transients at I=5 Position for Case-5

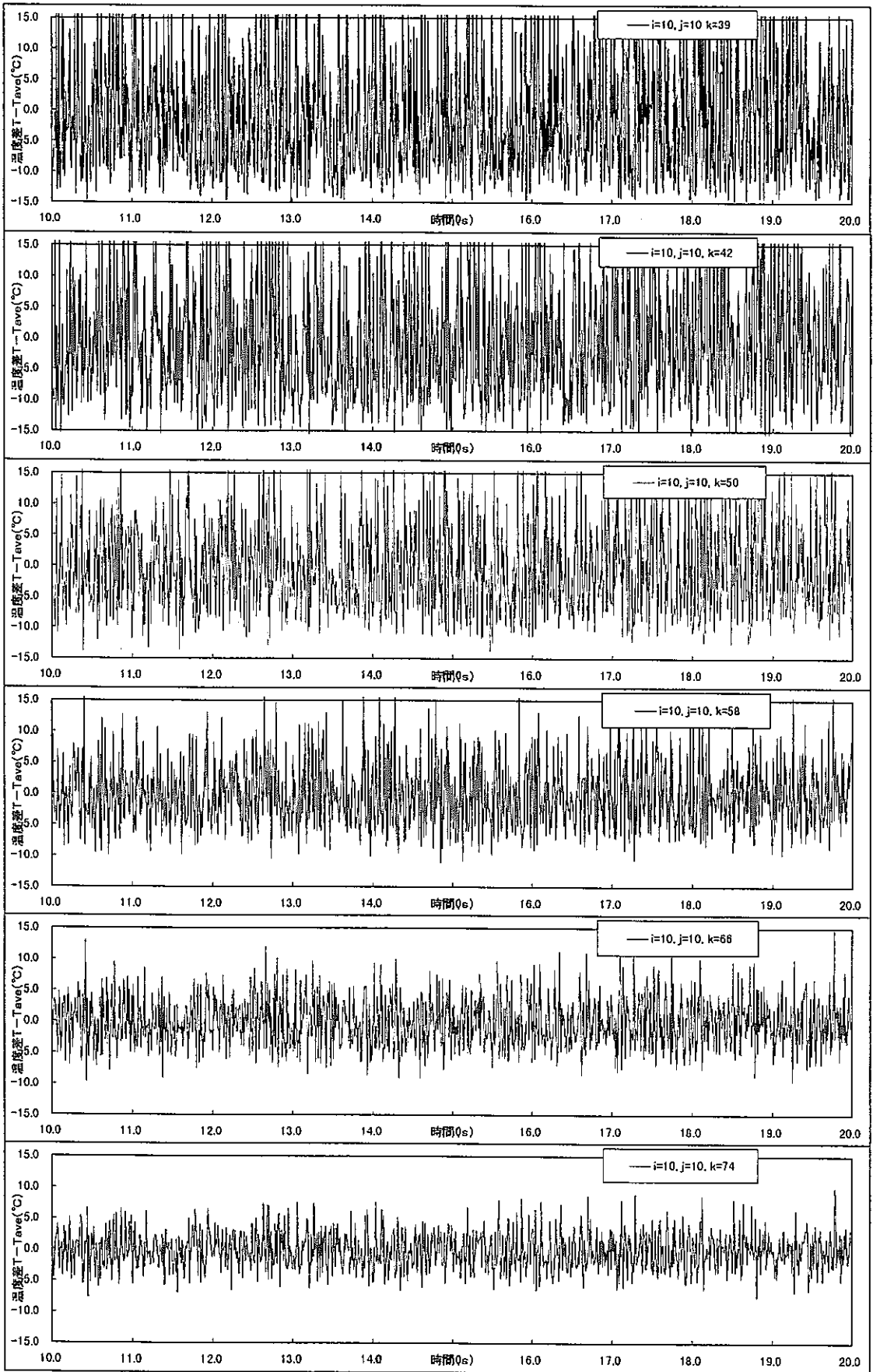


Fig. 3. 51 Sodium Temperature Transients at $l=10$ Position for Case-5

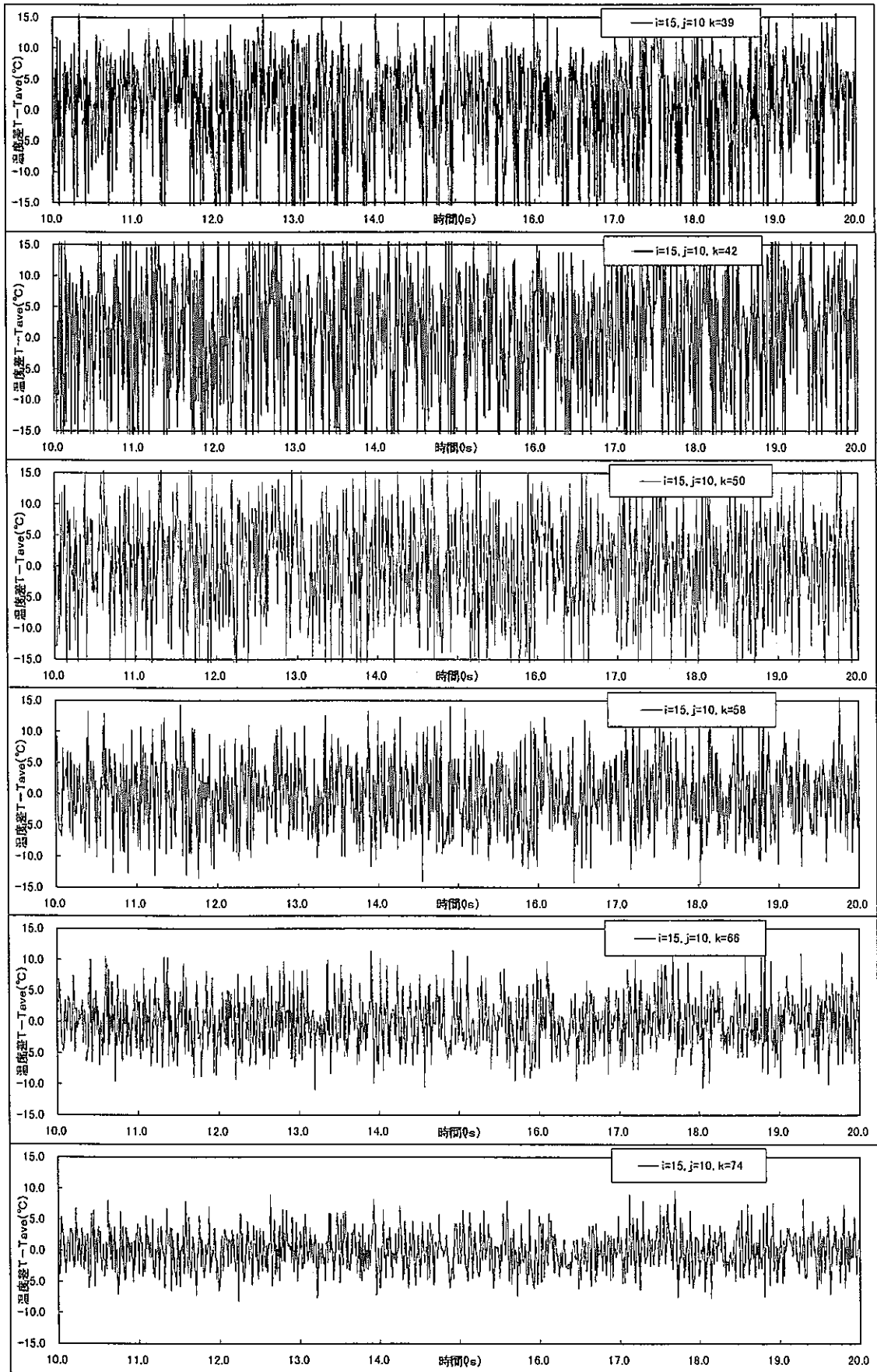


Fig. 3. 52 Sodium Temperature Transients at l=15 Position for Case-5

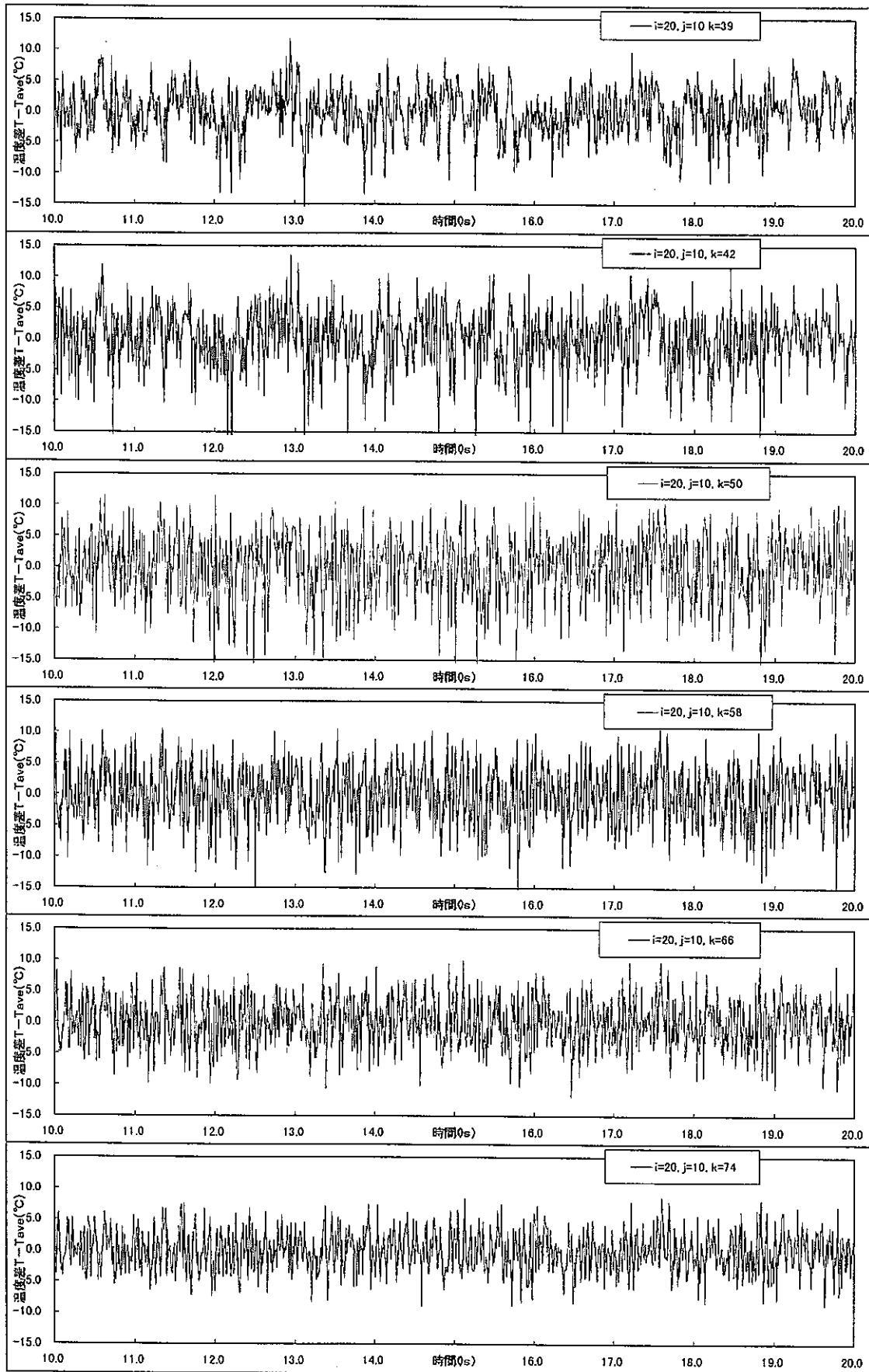


Fig. 3. 53 Sodium Temperature Transients at $l=20$ Position for Case-5

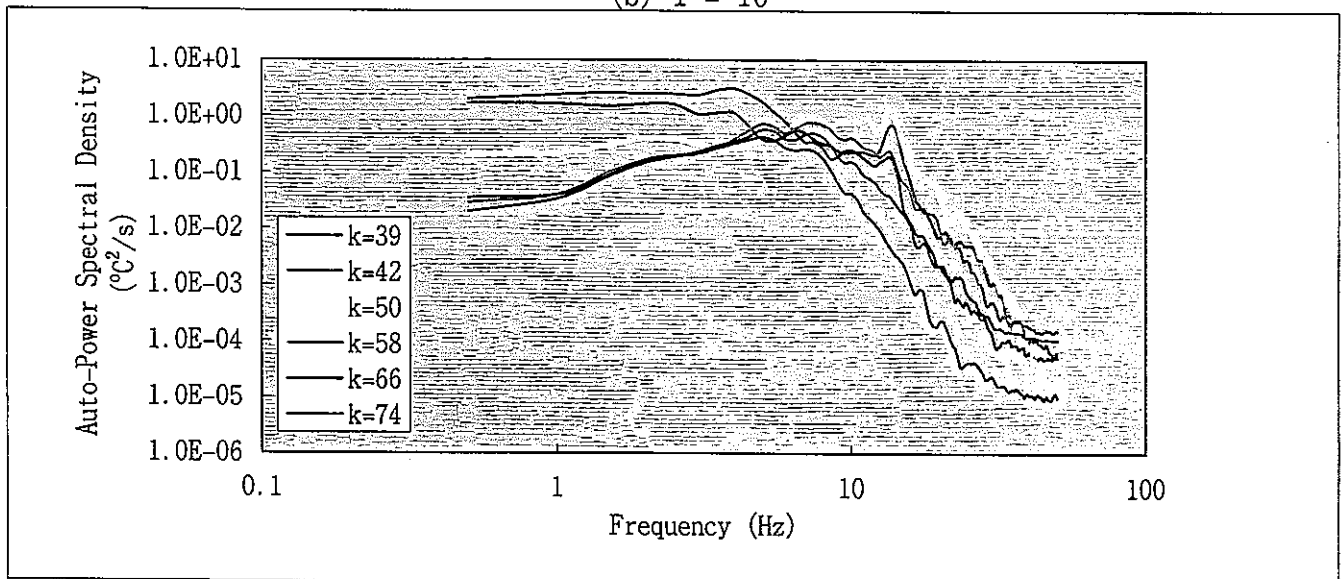
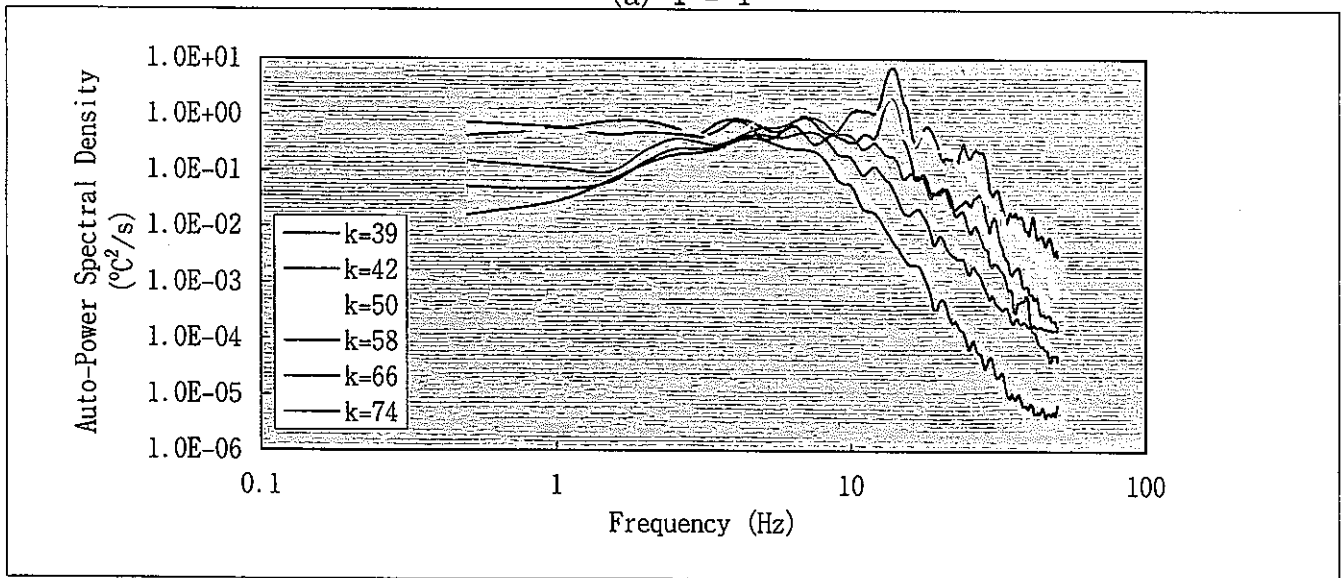
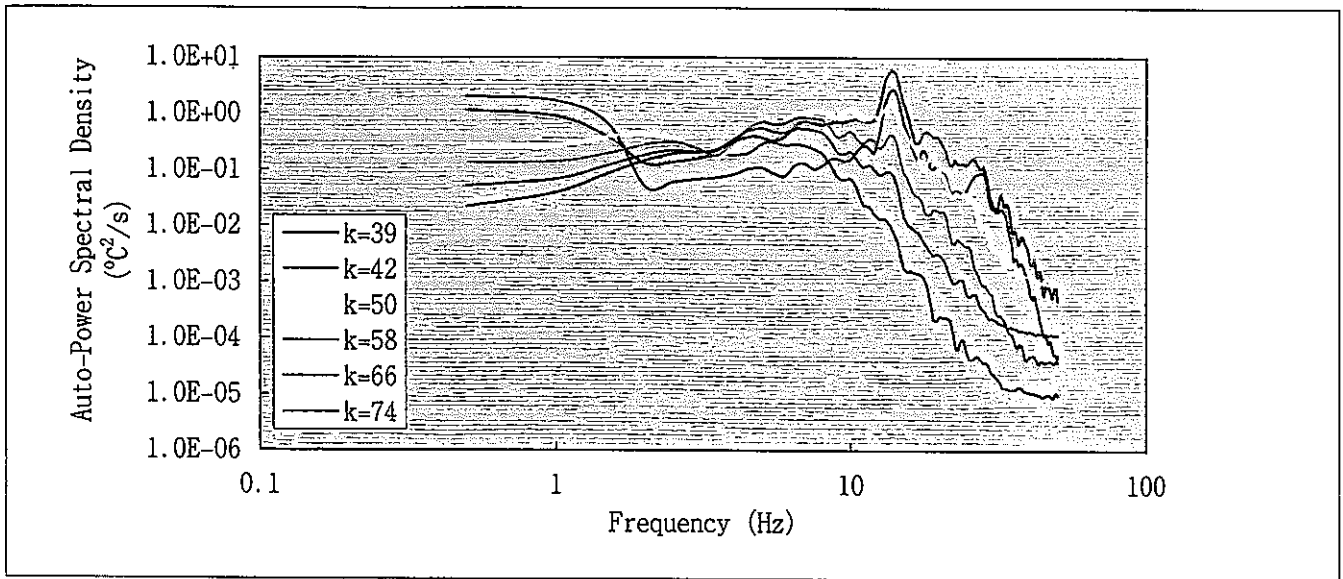


Fig. 4. 1 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-1

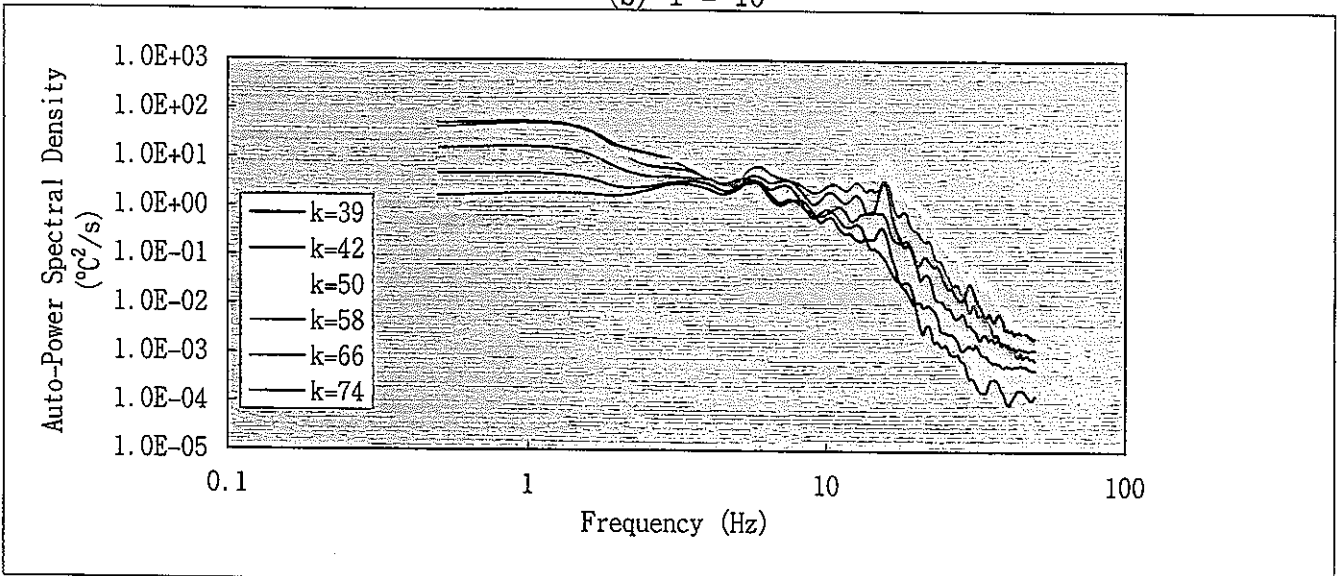
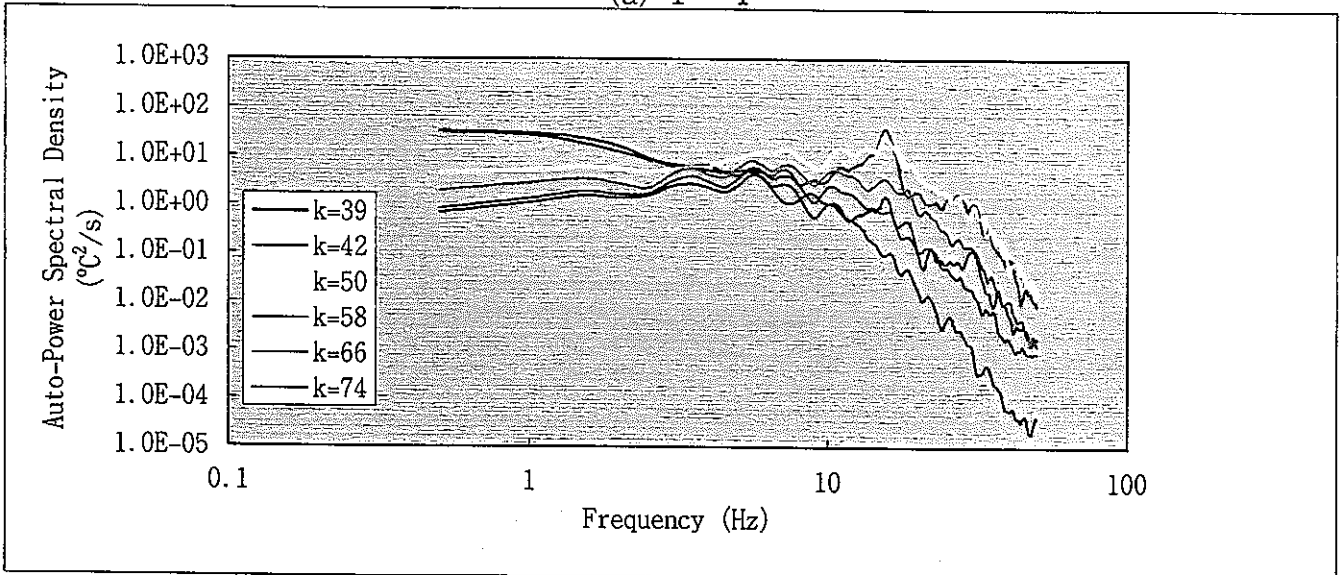
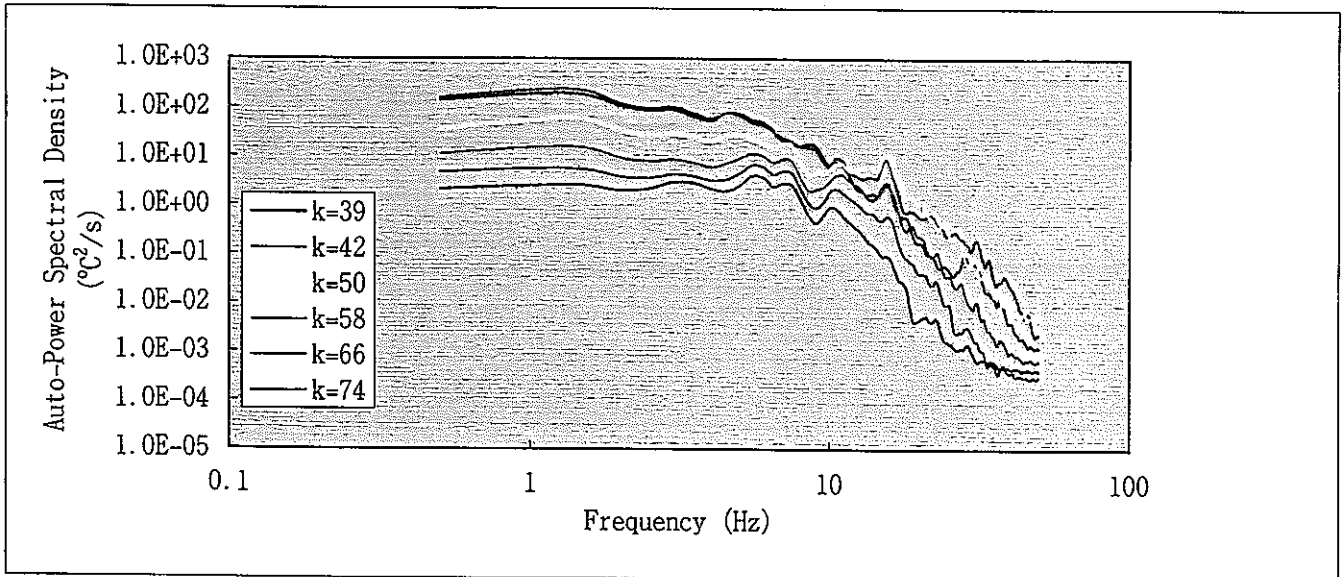
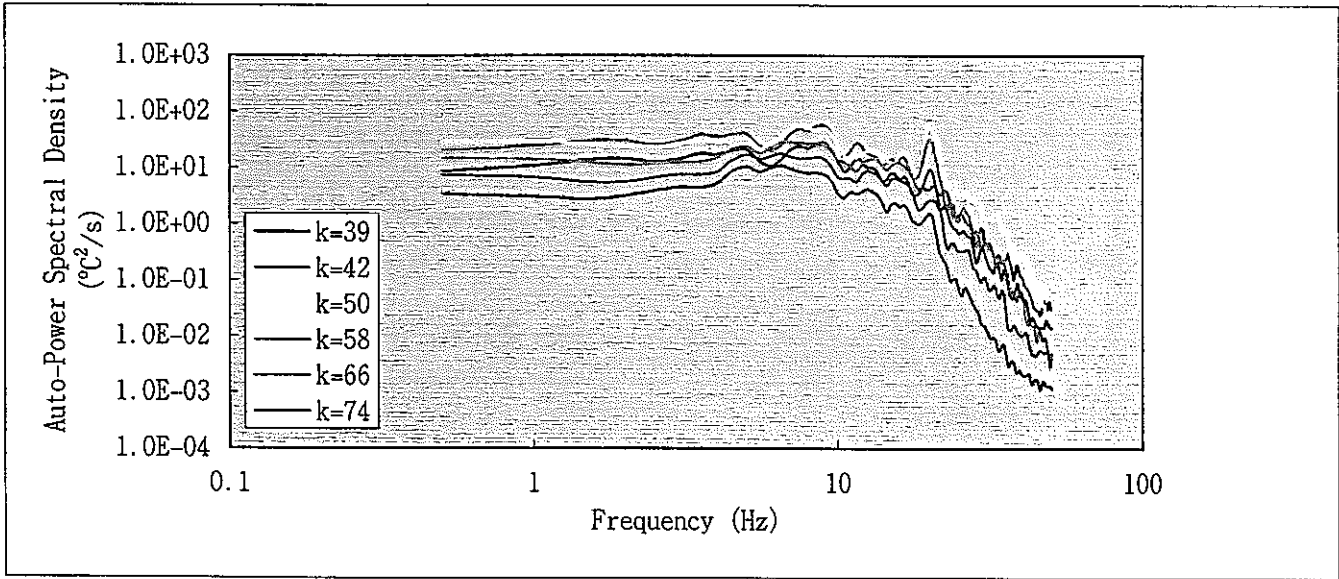
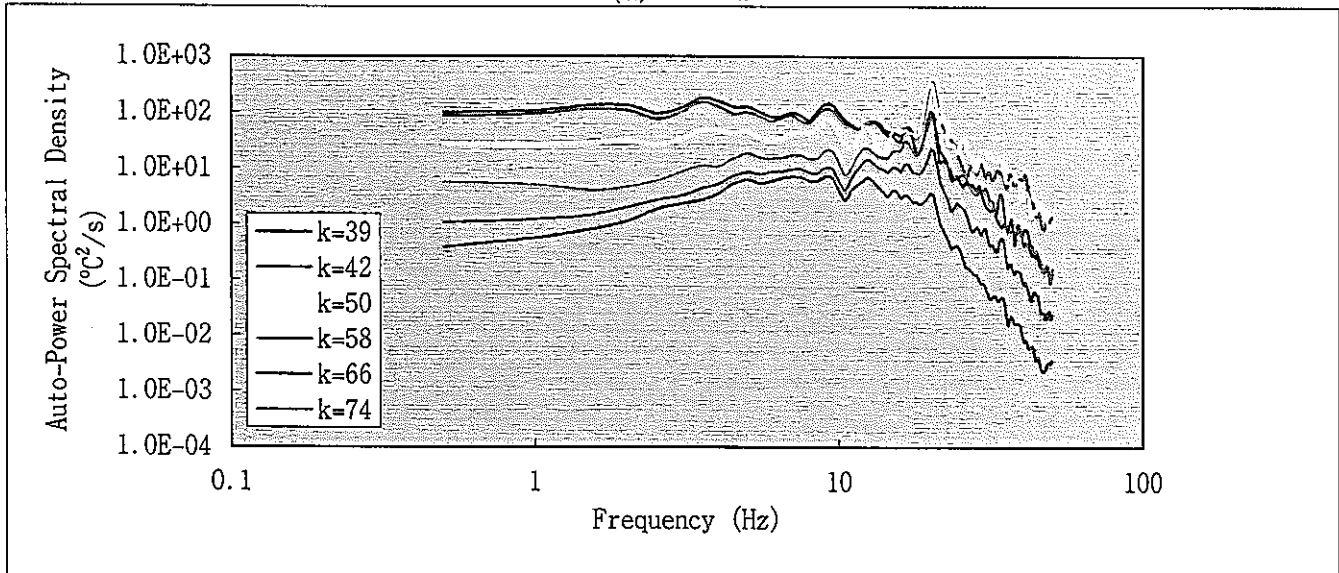


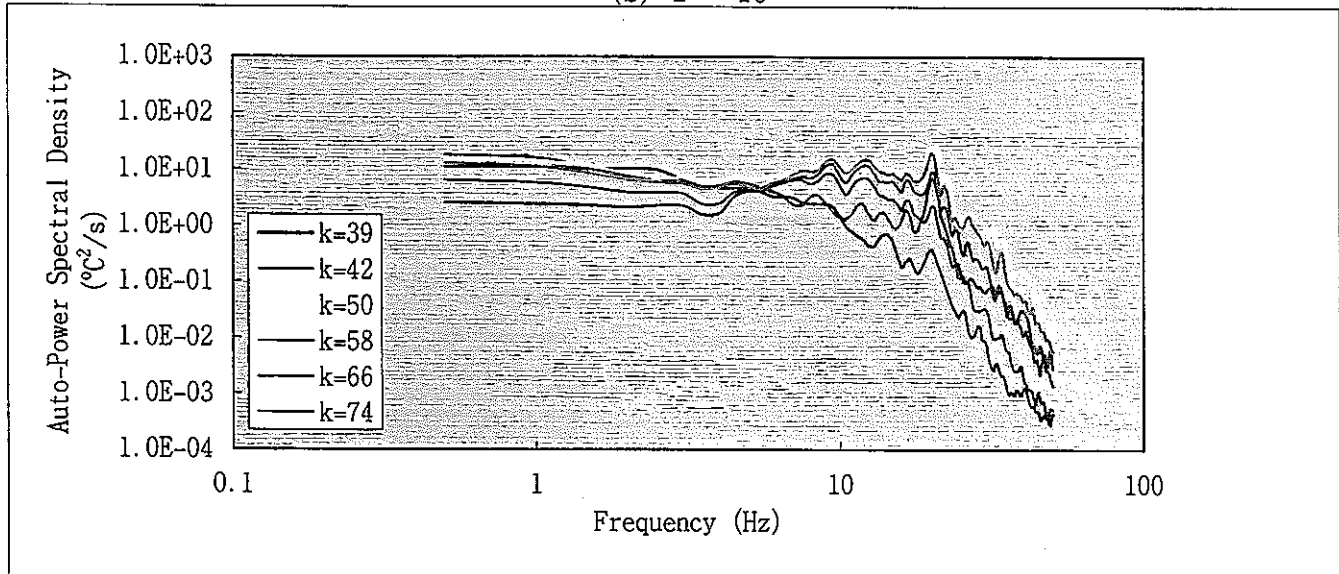
Fig. 4. 2 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-2



(a) I = 1



(b) I = 10



(c) I = 20

Fig. 4. 3 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-3

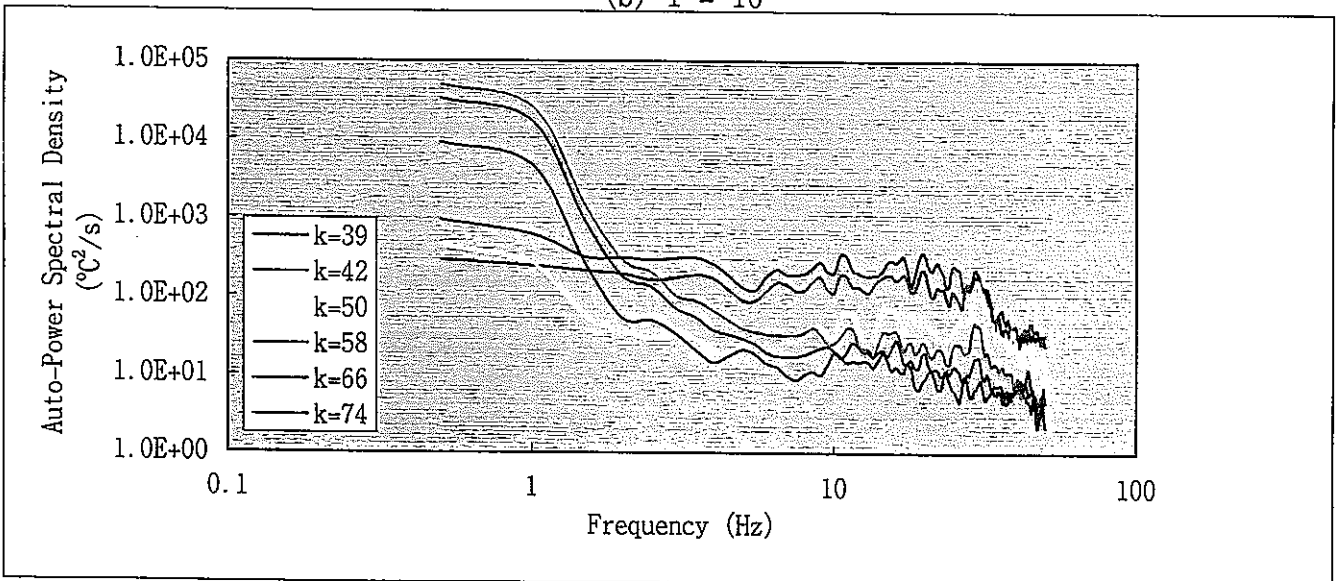
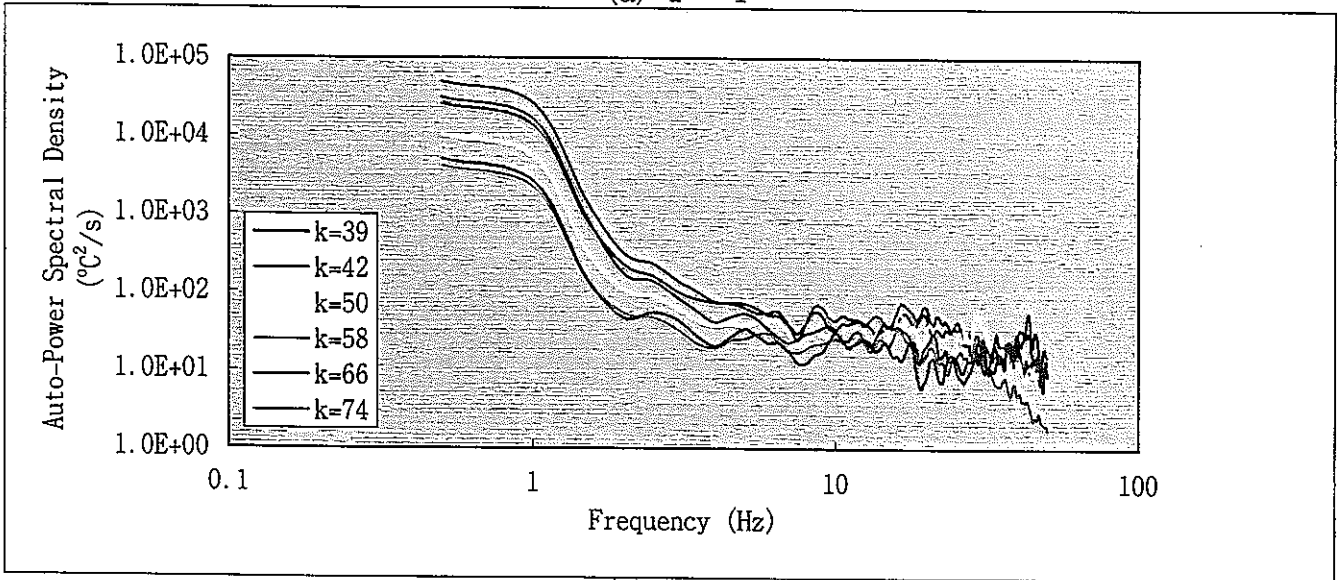
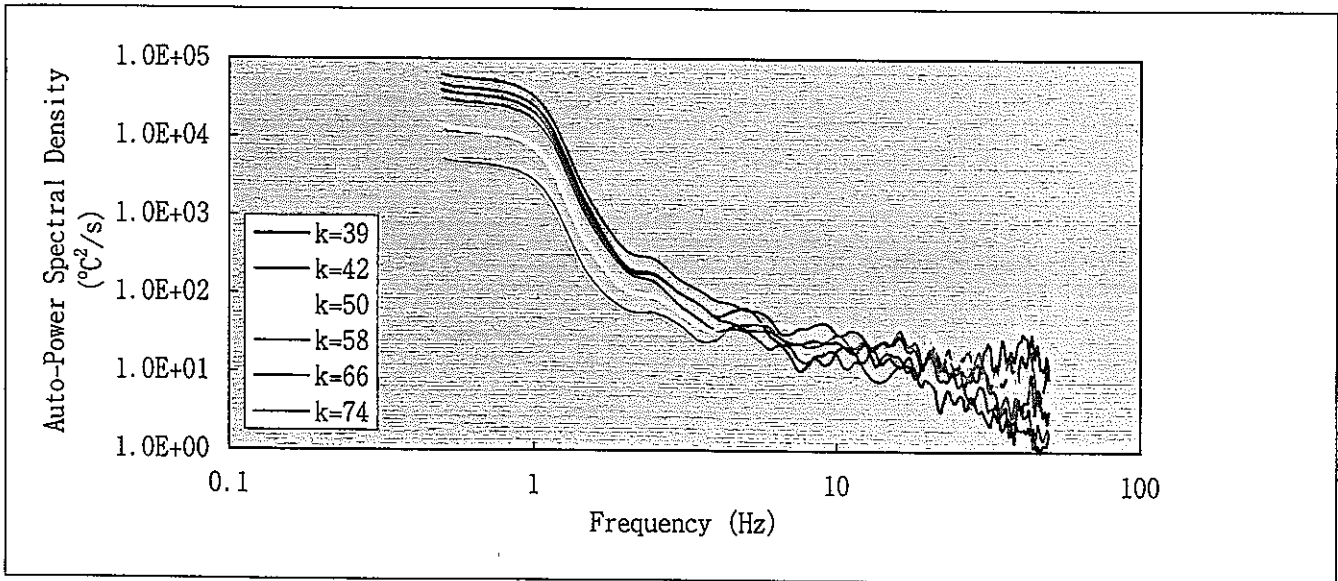


Fig. 4. 4 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-4

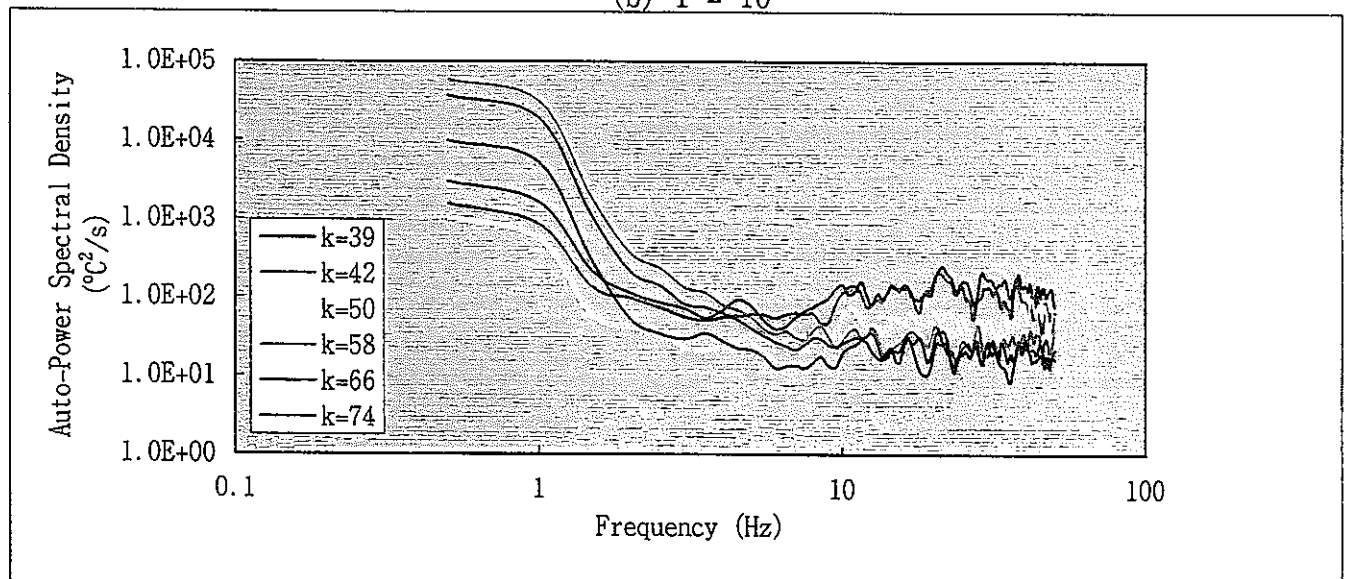
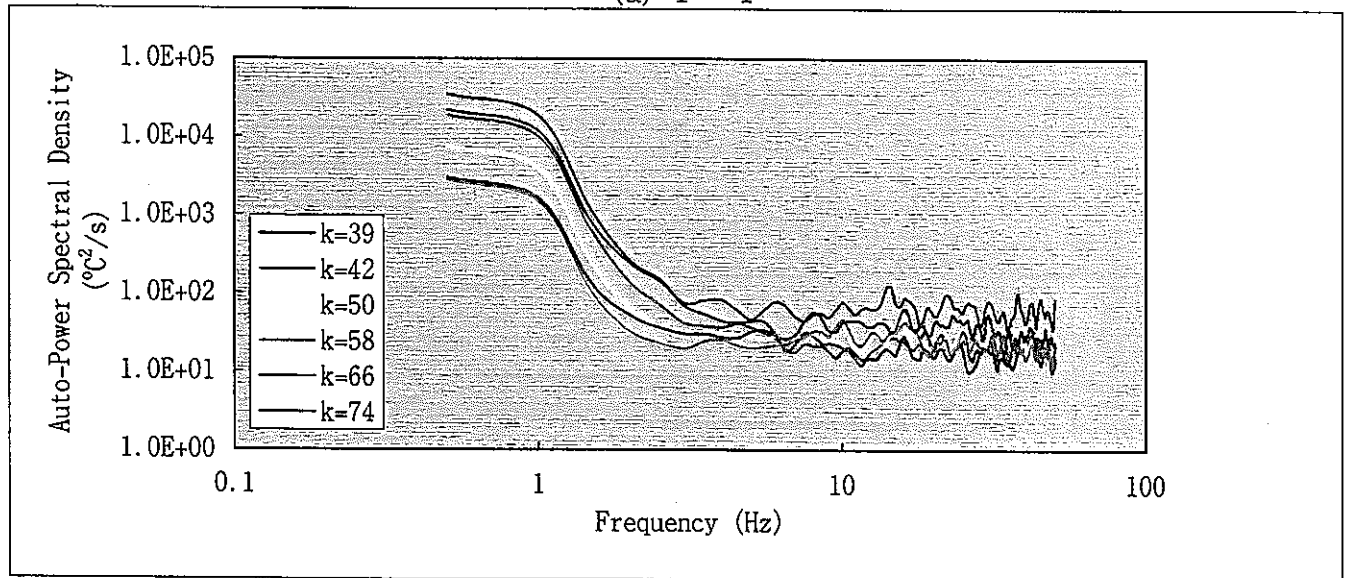
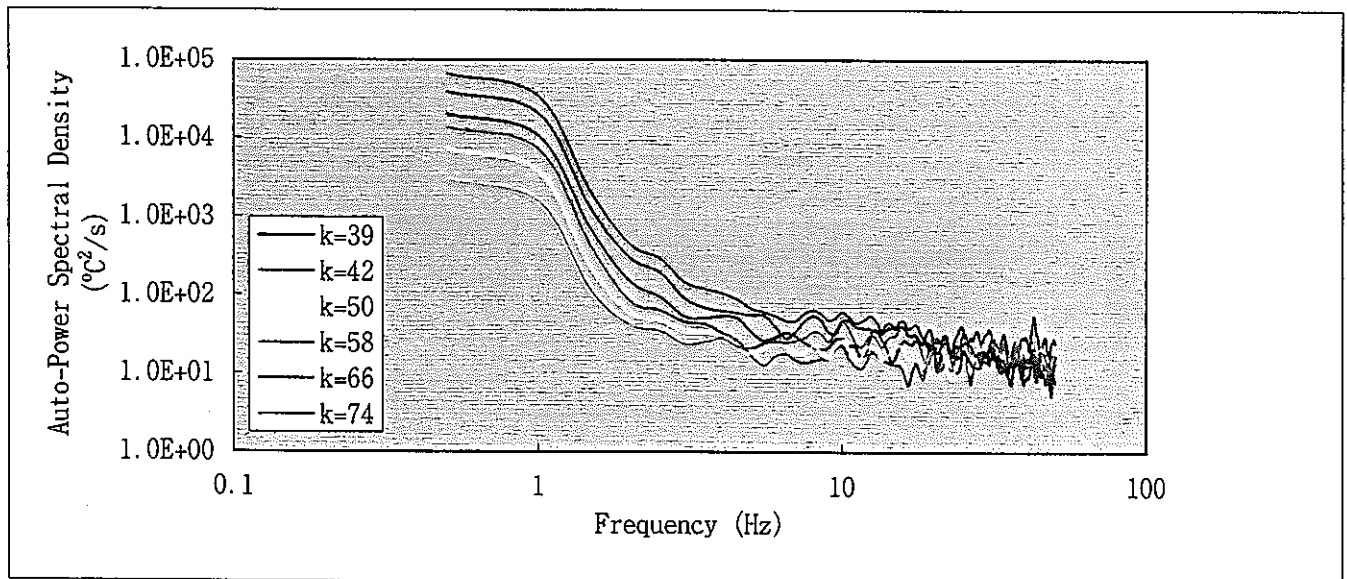


Fig. 4. 5 Auto-Power Spectral Density Functions for Case-5

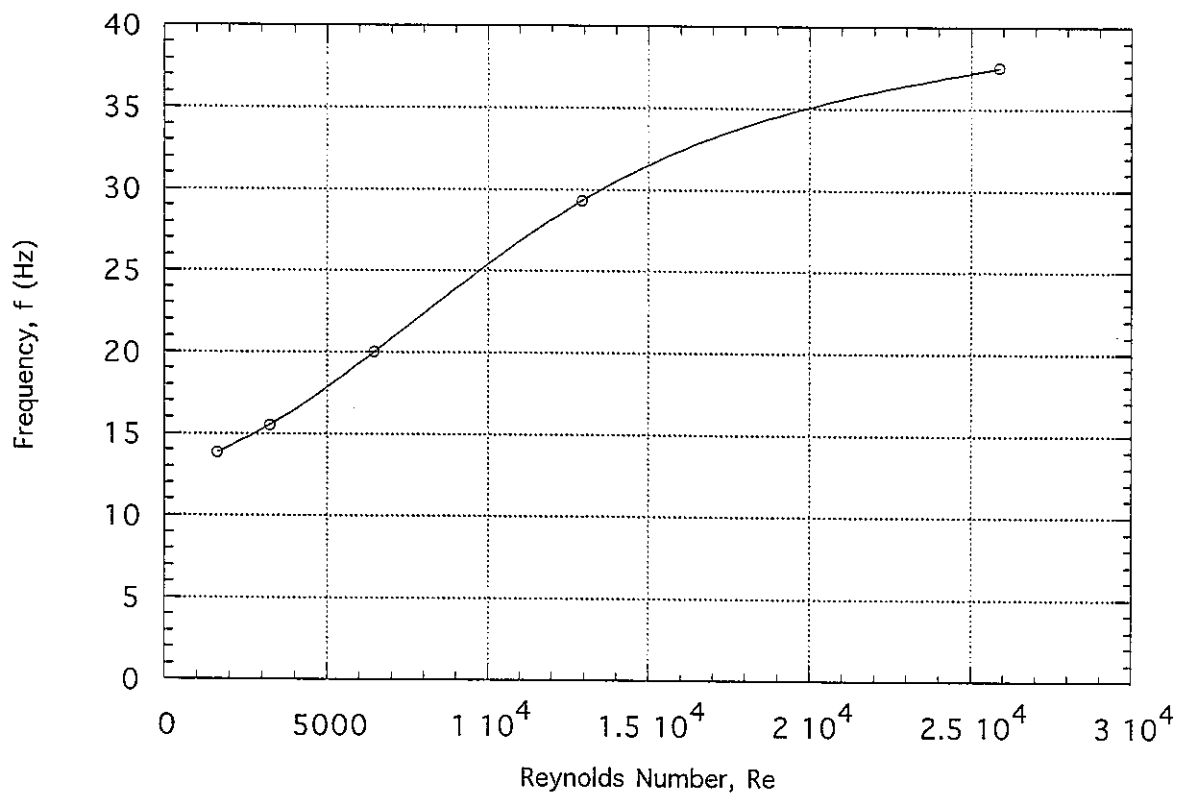


Fig. 4. 6 Peak Frequency Characteristics with the Increasing of Reynolds Number

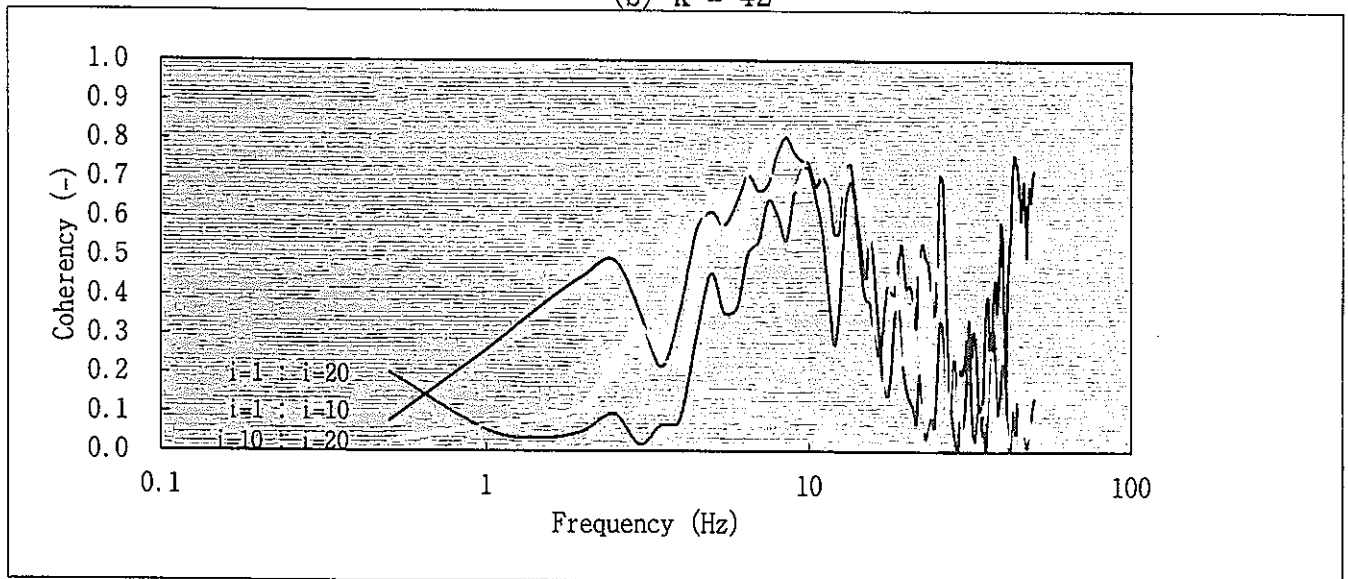
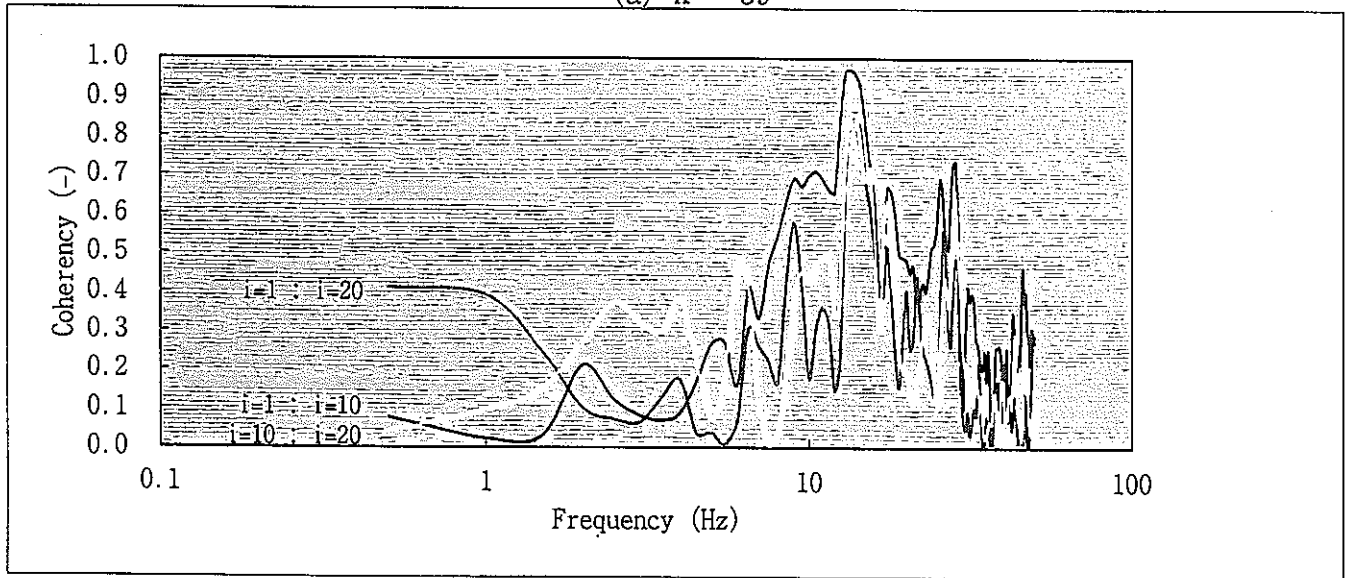
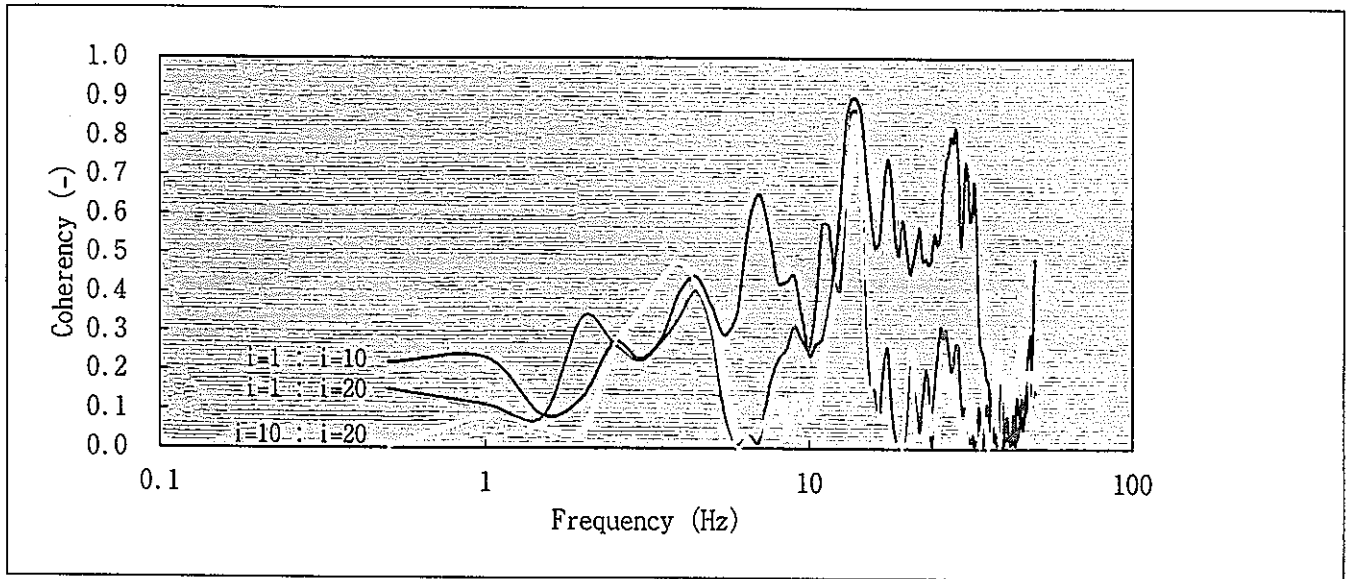


Fig. 4. 7 Coherence Functions for Case-1 (1/2)

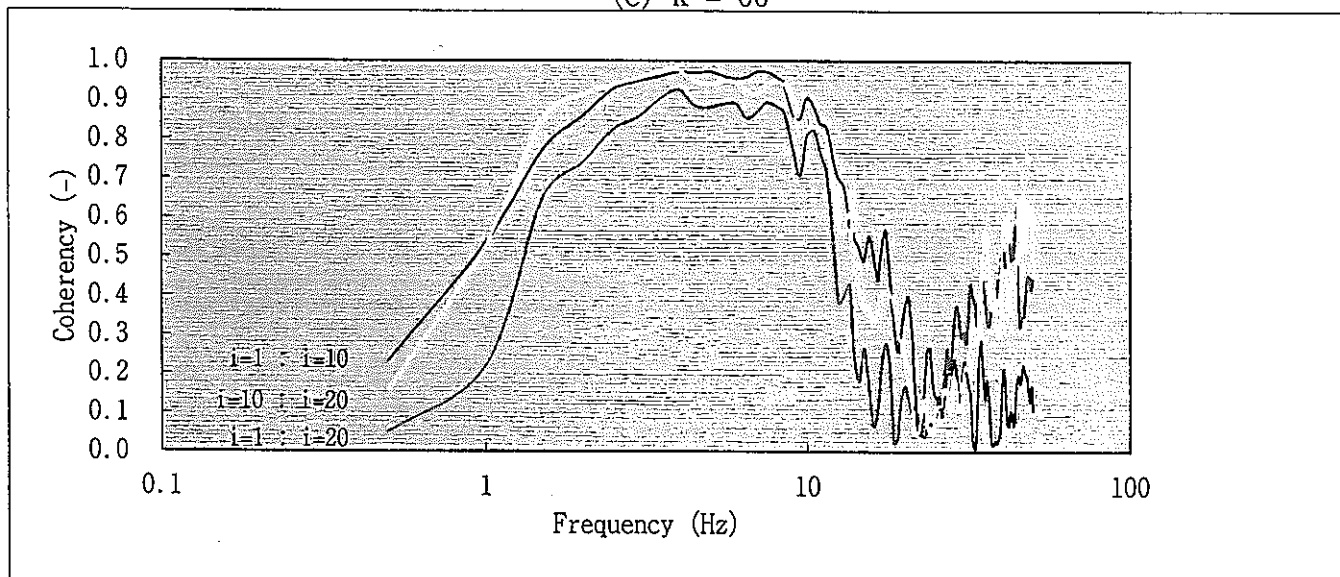
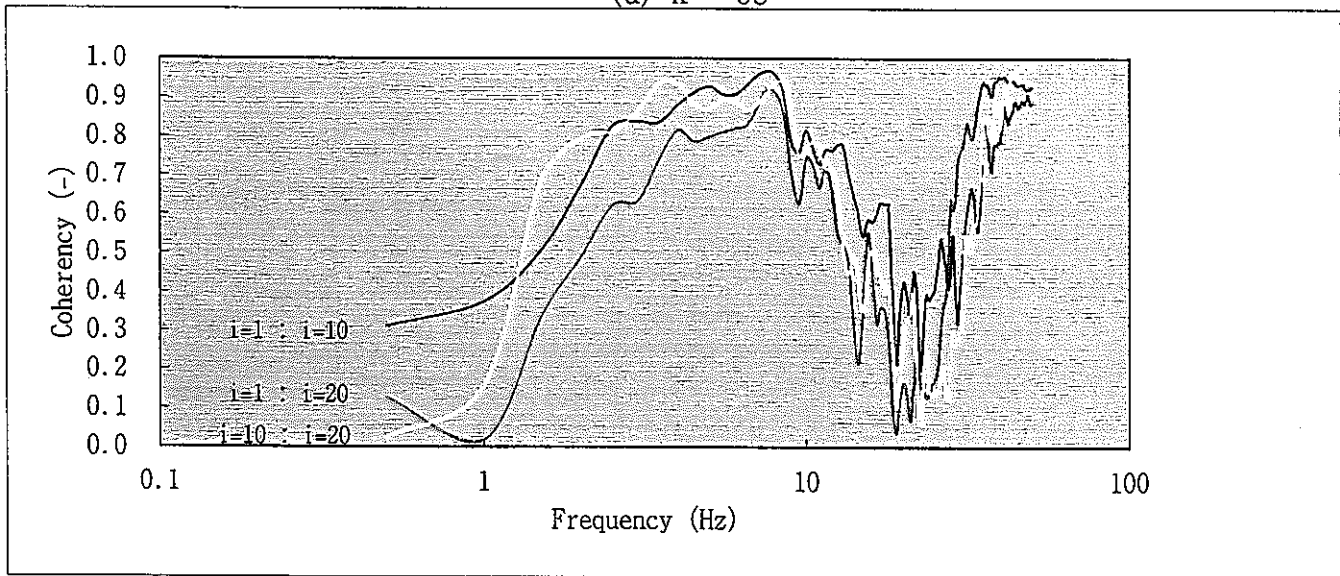
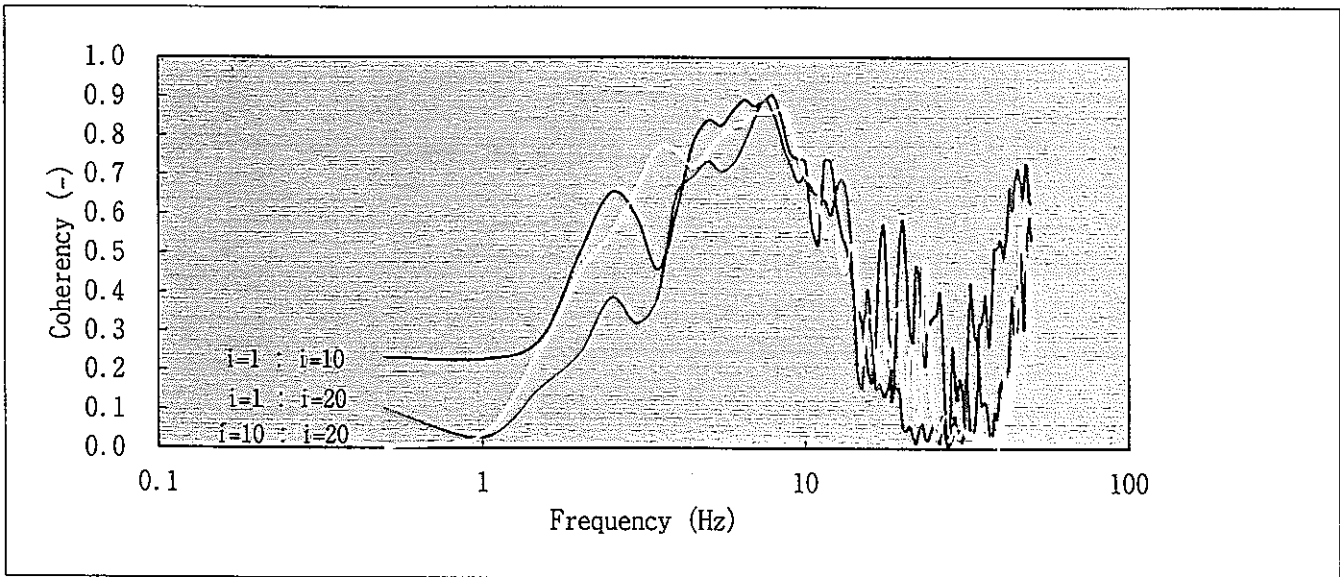


Fig. 4. 7 Coherence Functions for Case-1 (2/2)

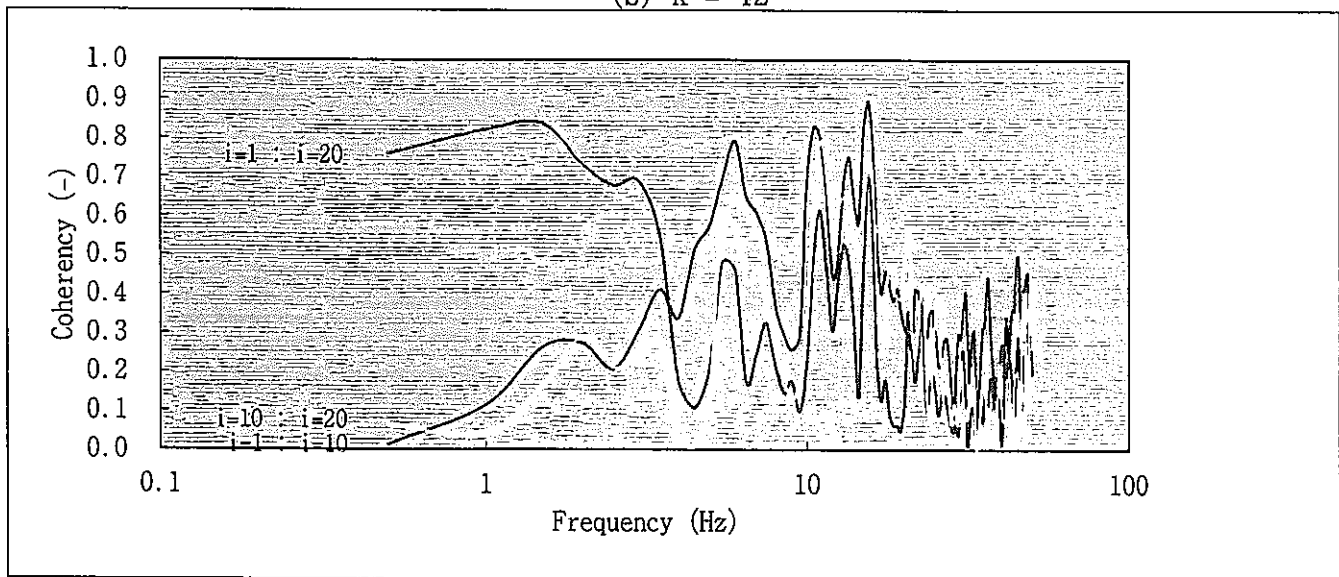
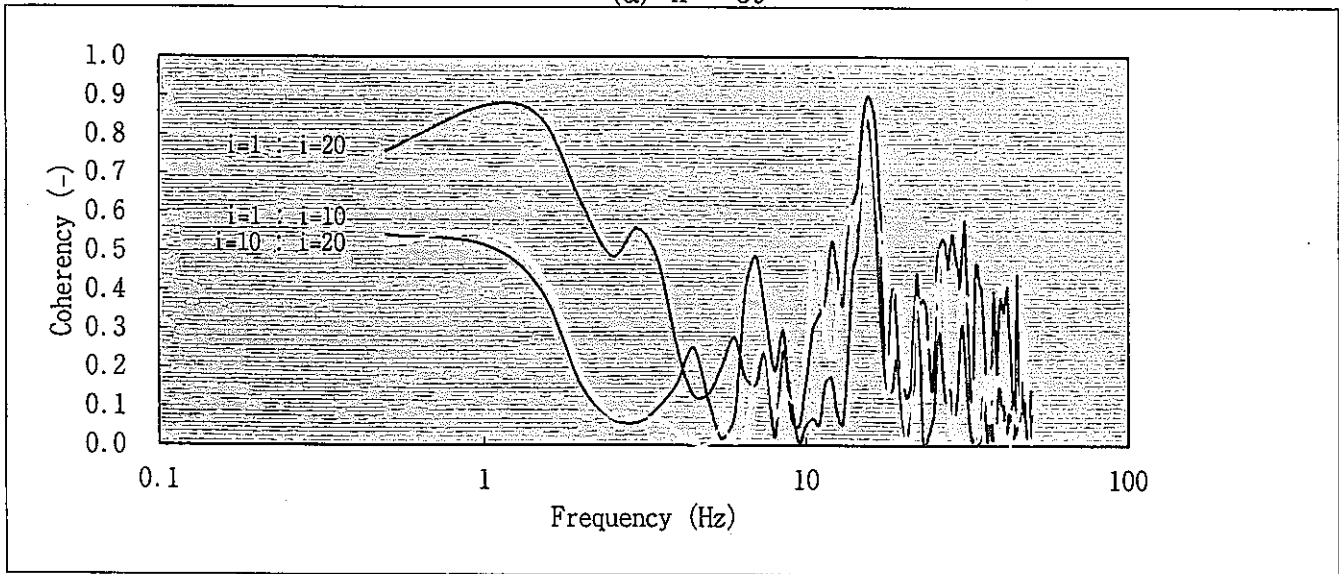
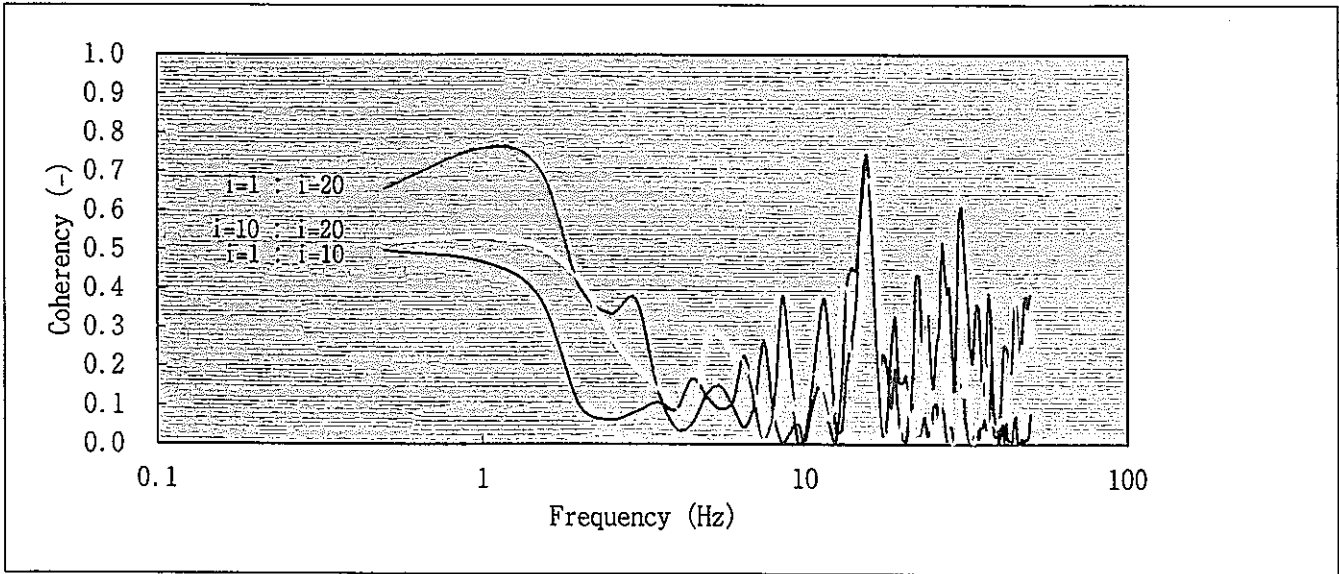
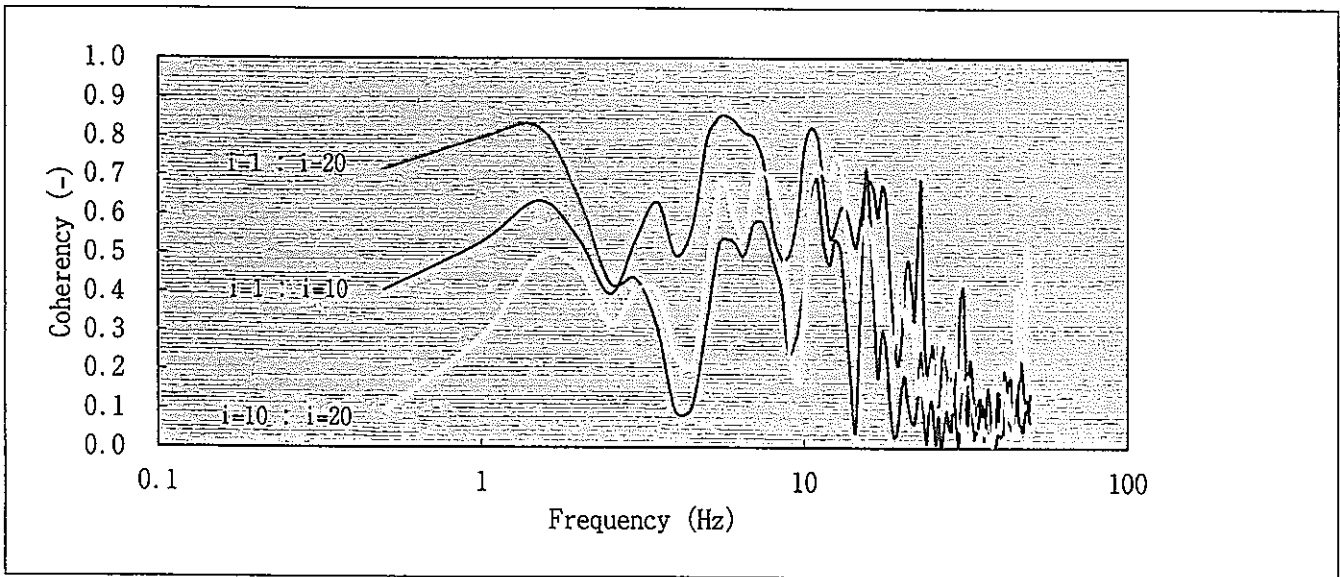
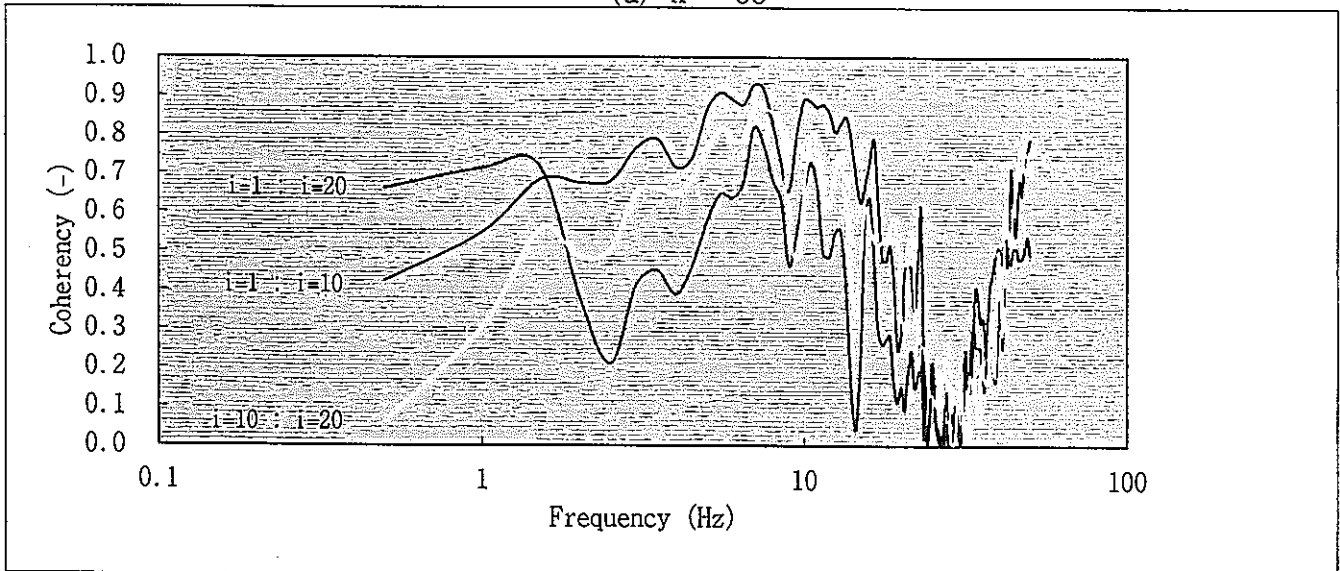


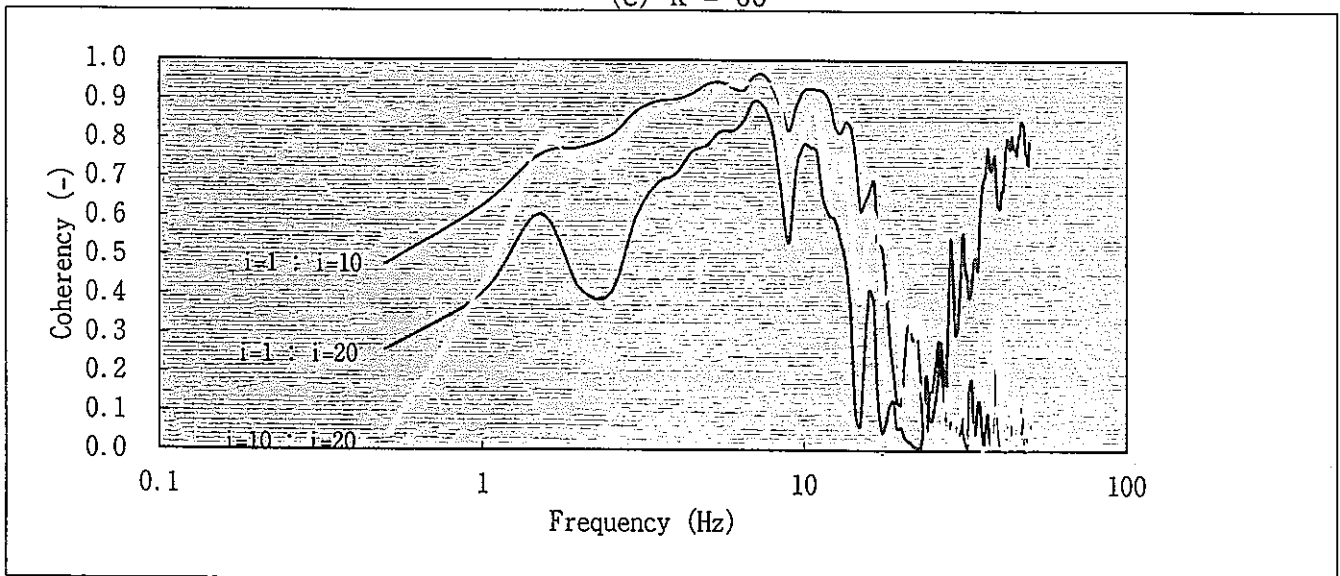
Fig. 4. 8 Coherence Functions for Case-2 (1/2)



(d) $k = 58$



(e) $k = 66$



(f) $k = 74$

Fig. 4. 8 Coherence Functions for Case-2 (2/2)

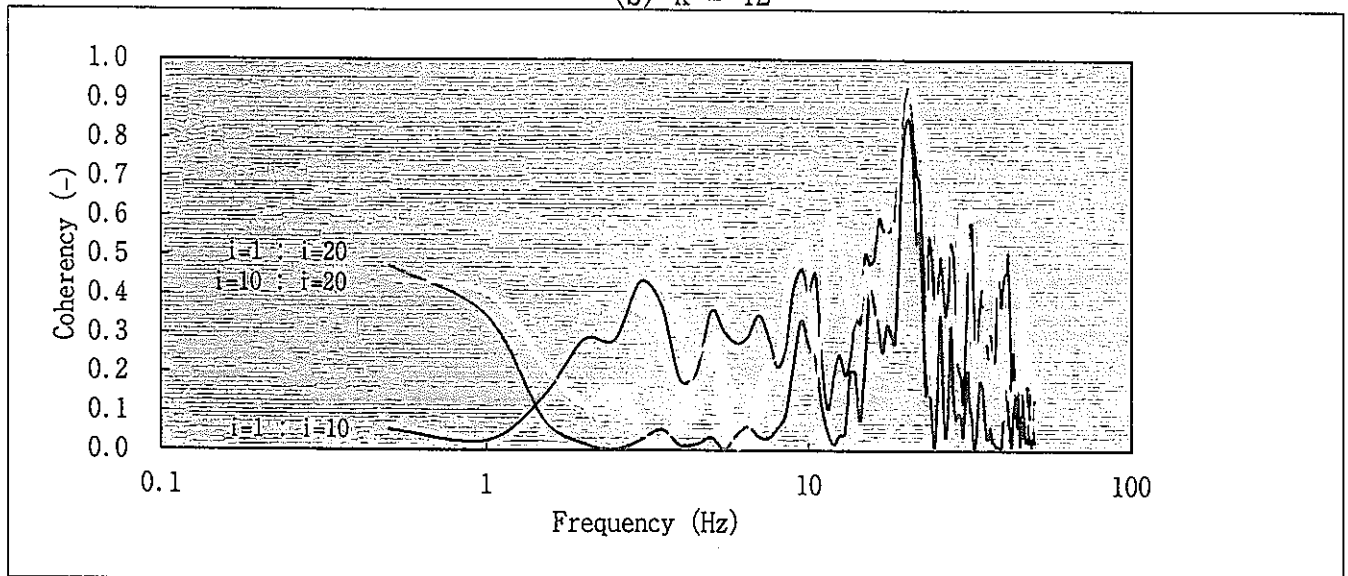
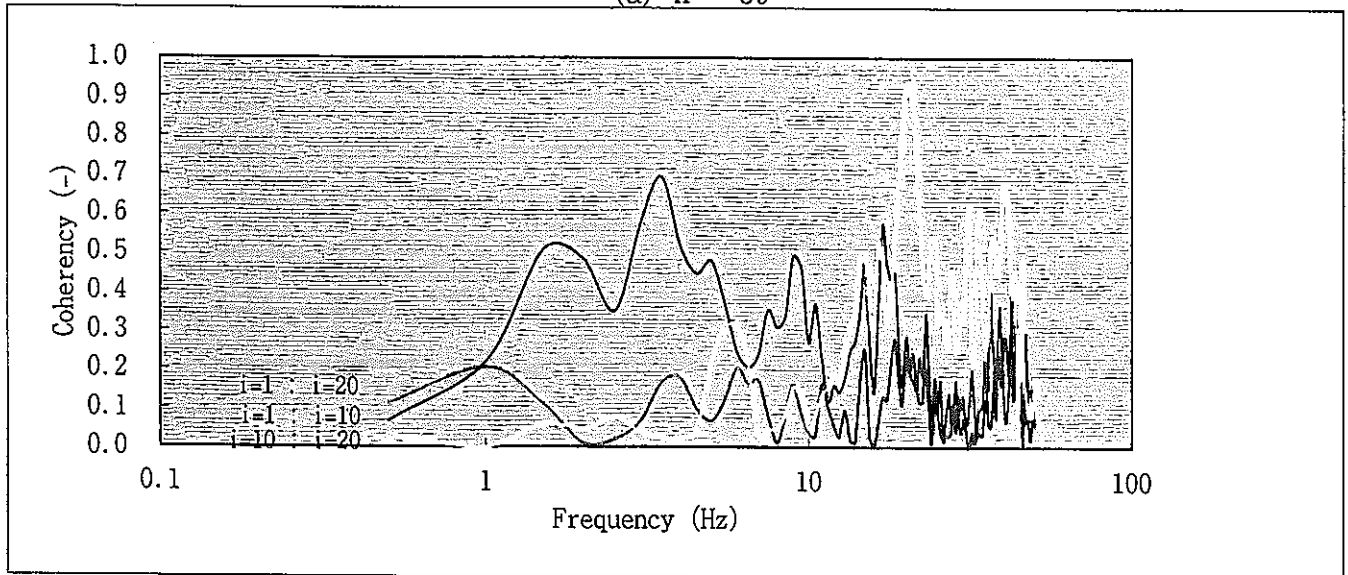
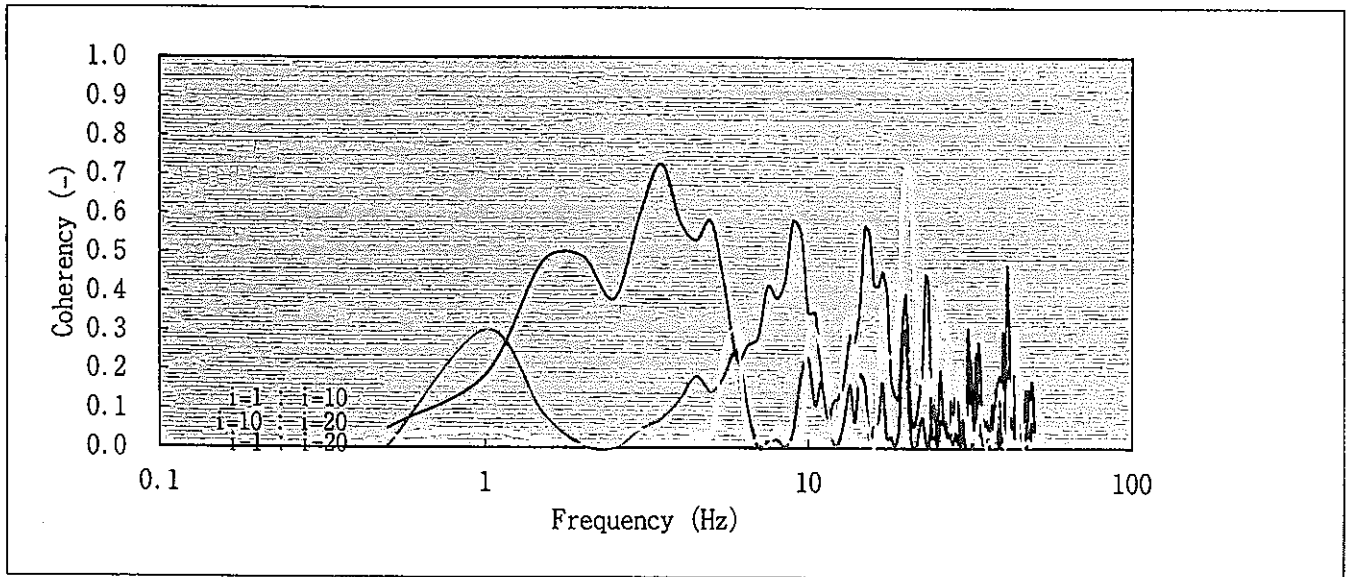
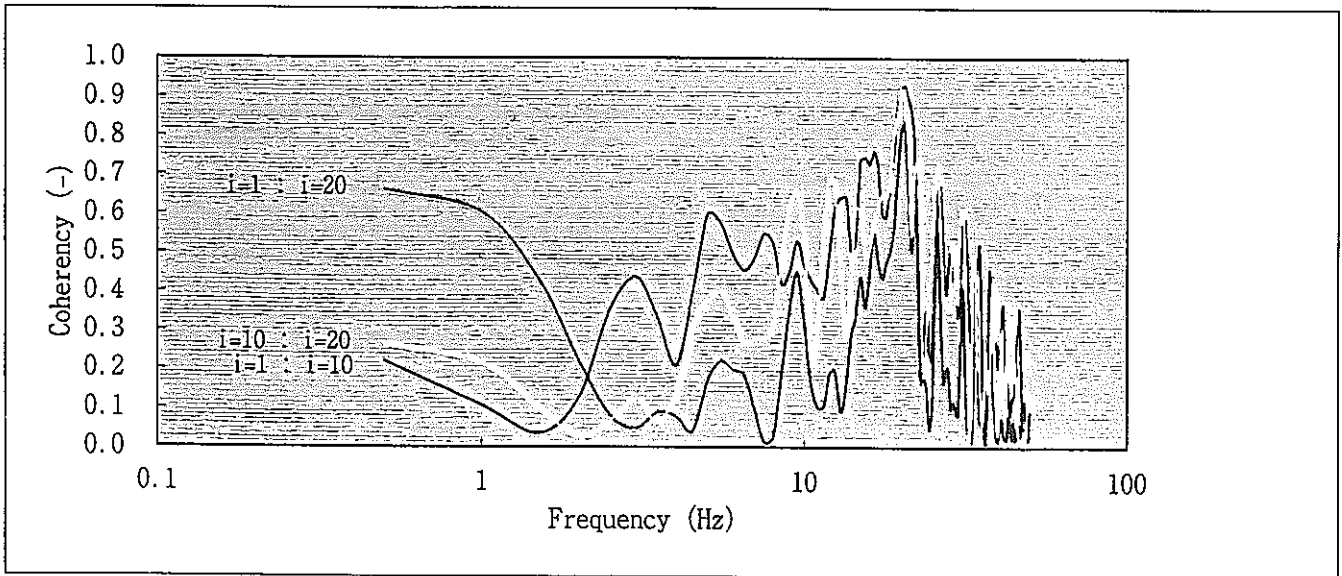
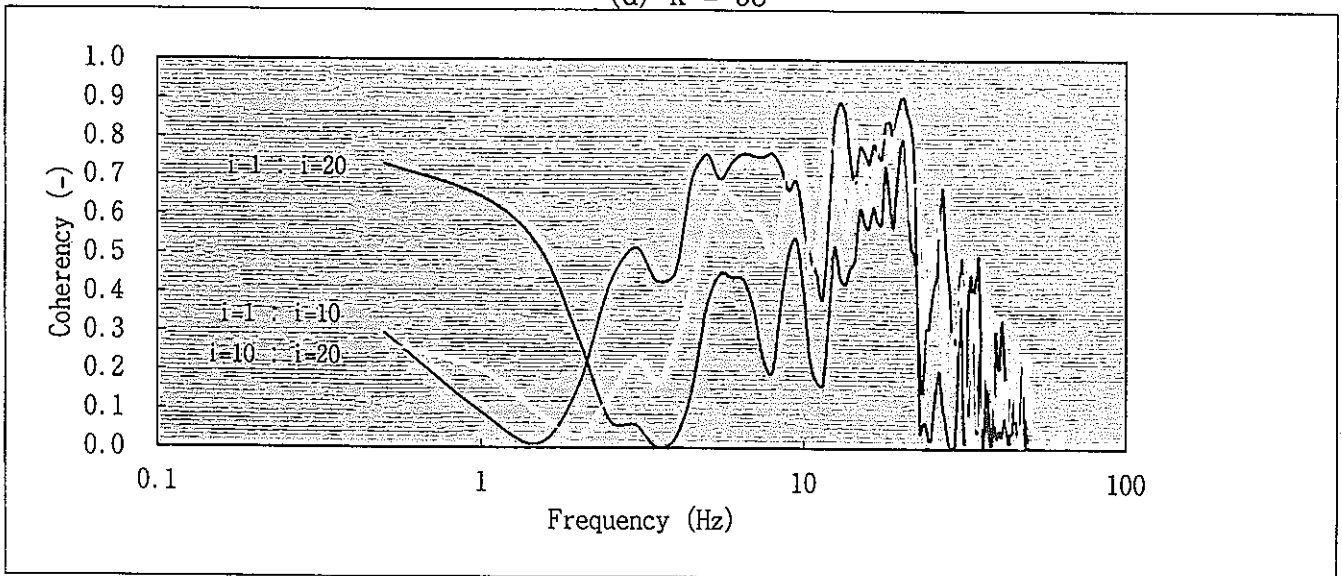


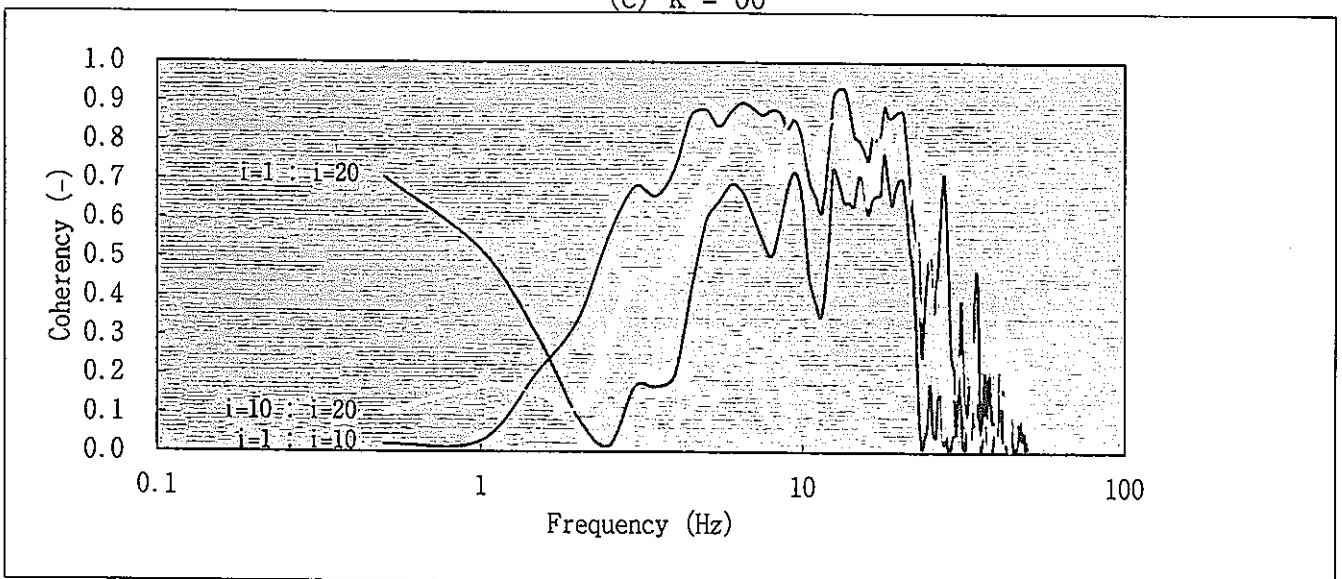
Fig. 4. 9 Coherence Functions for Case-3 (1/2)



(d) $k = 58$

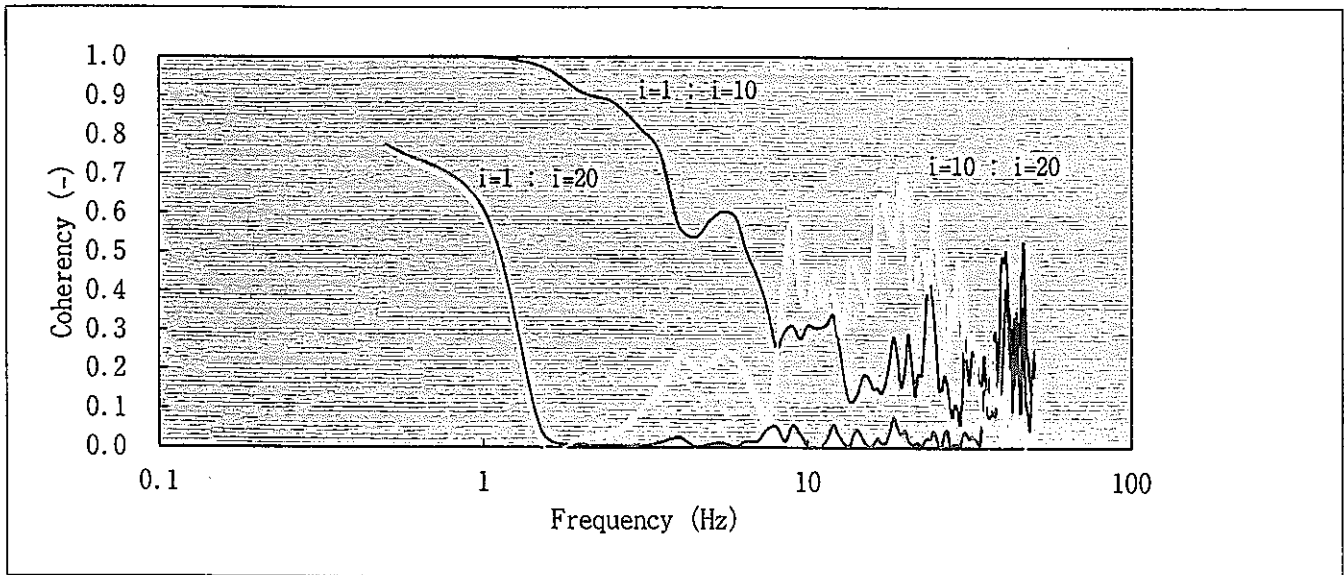


(e) $k = 66$

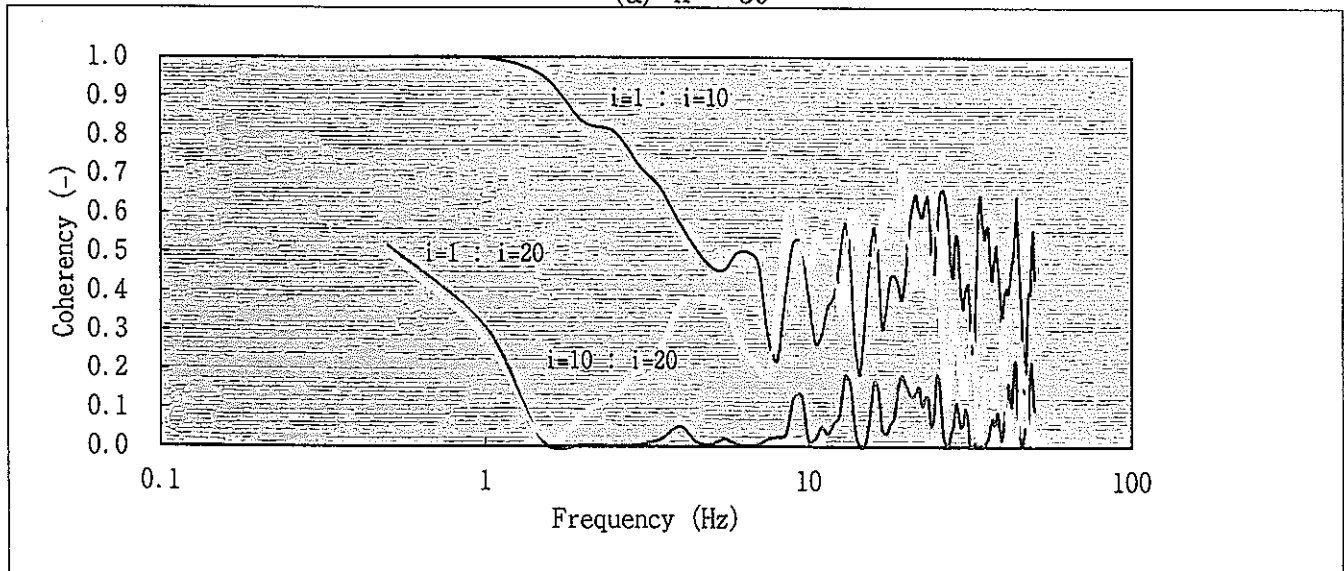


(f) $k = 74$

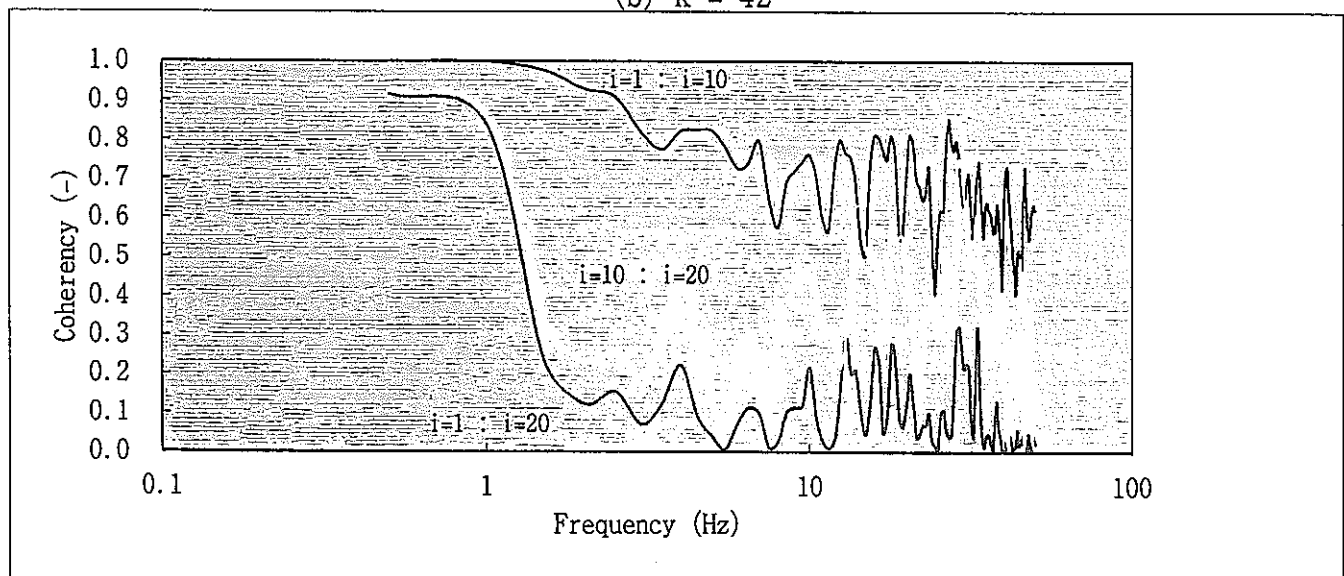
Fig. 4. 9 Coherence Functions for Case-3 (2/2)



(a) $k = 39$

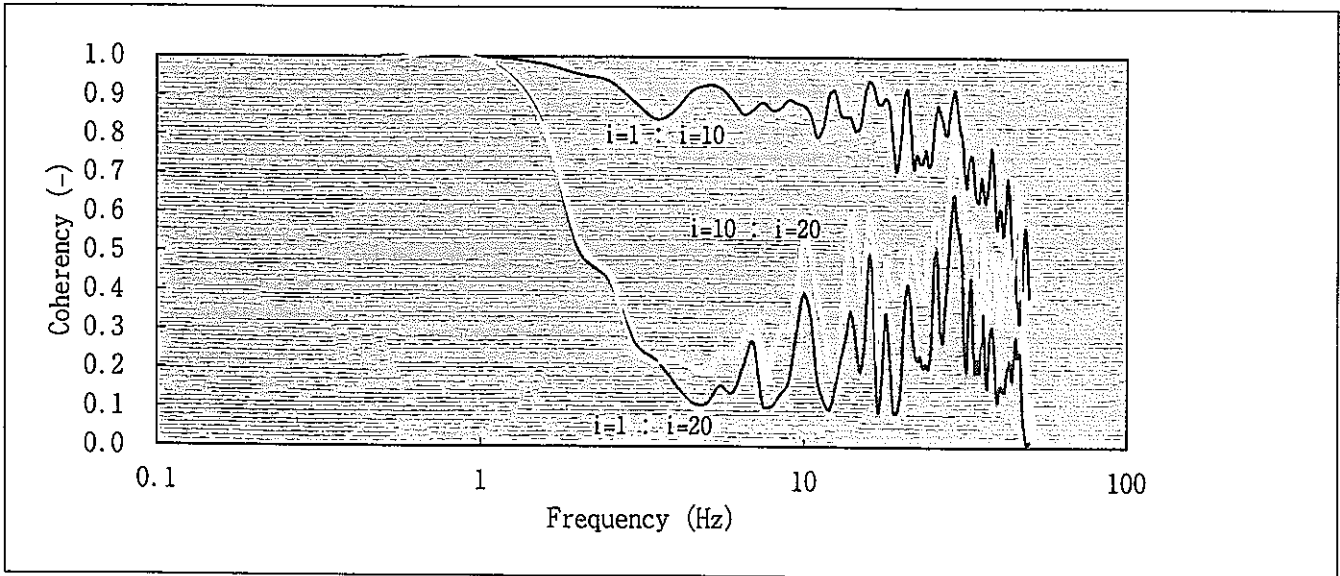


(b) $k = 42$

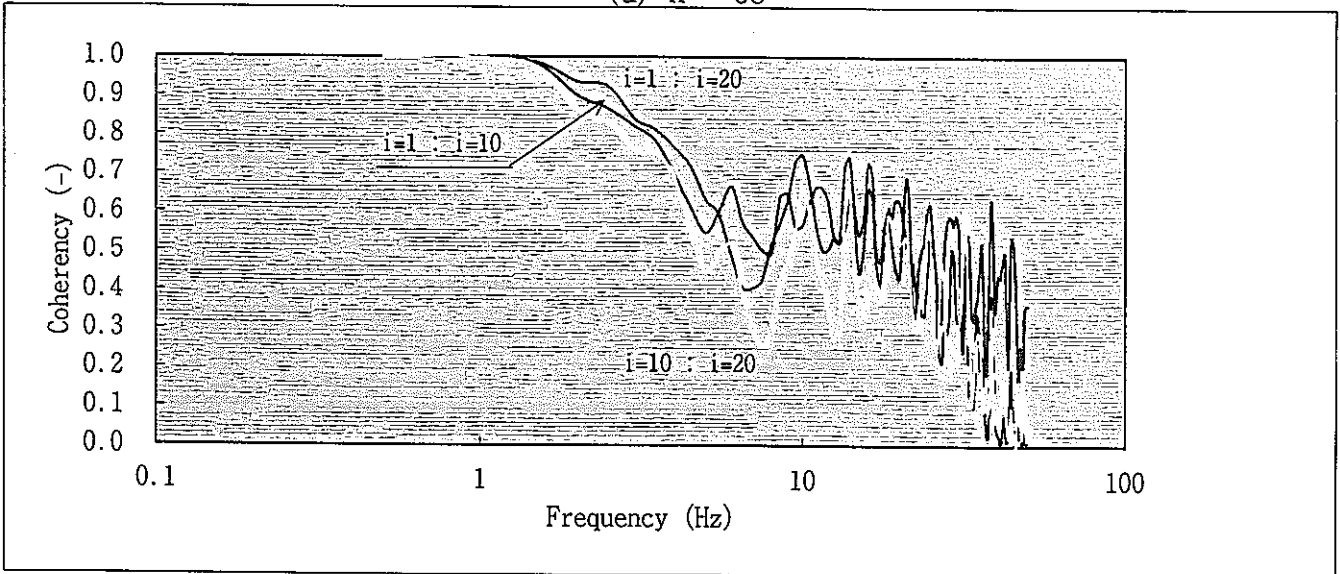


(c) $k = 50$

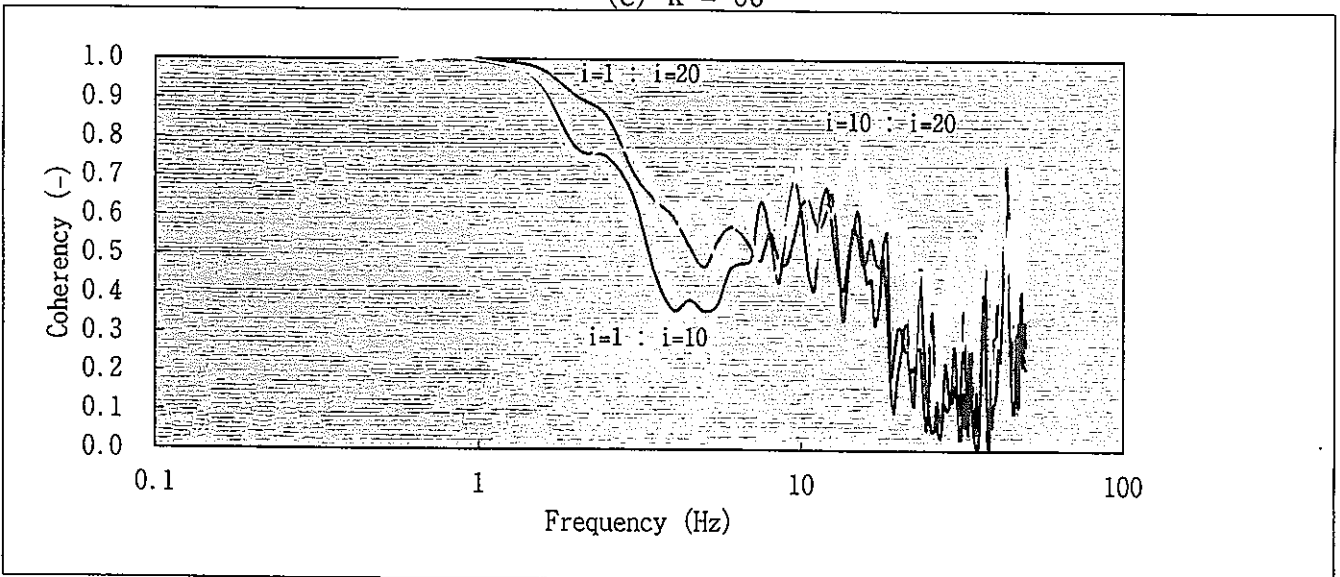
Fig. 4. 10 Coherence Functions for Case-4 (1/2)



(d) $k = 58$



(e) $k = 66$



(f) $k = 74$

Fig. 4. 10 Coherence Functions for Case-4 (2/2)

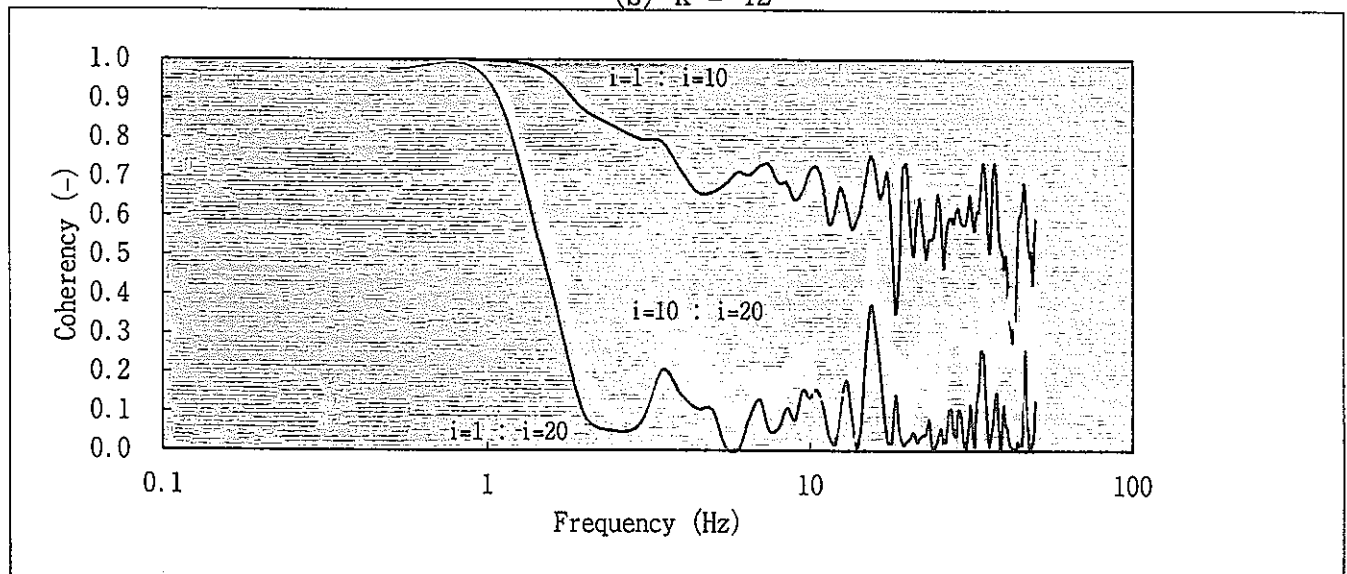
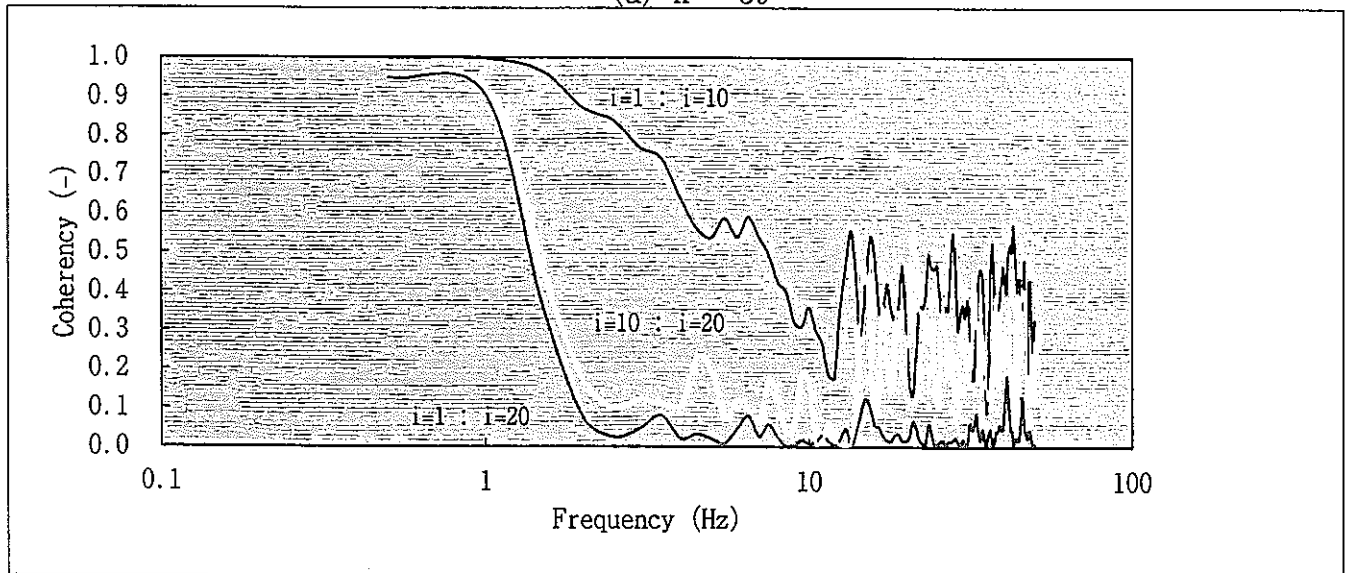
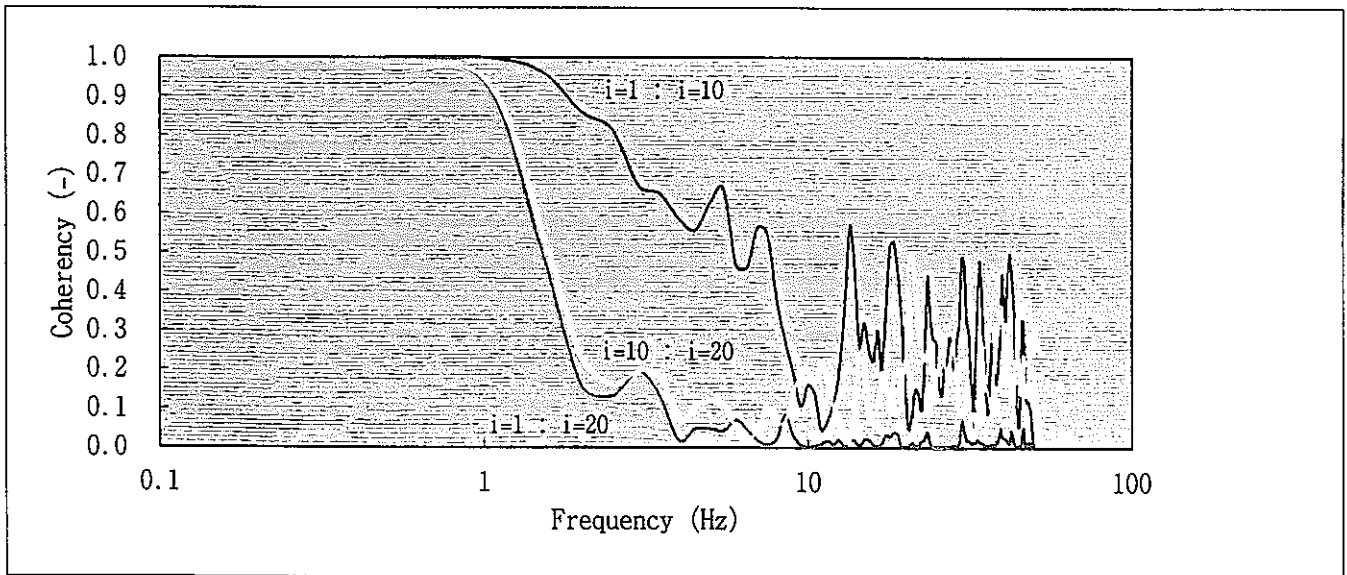
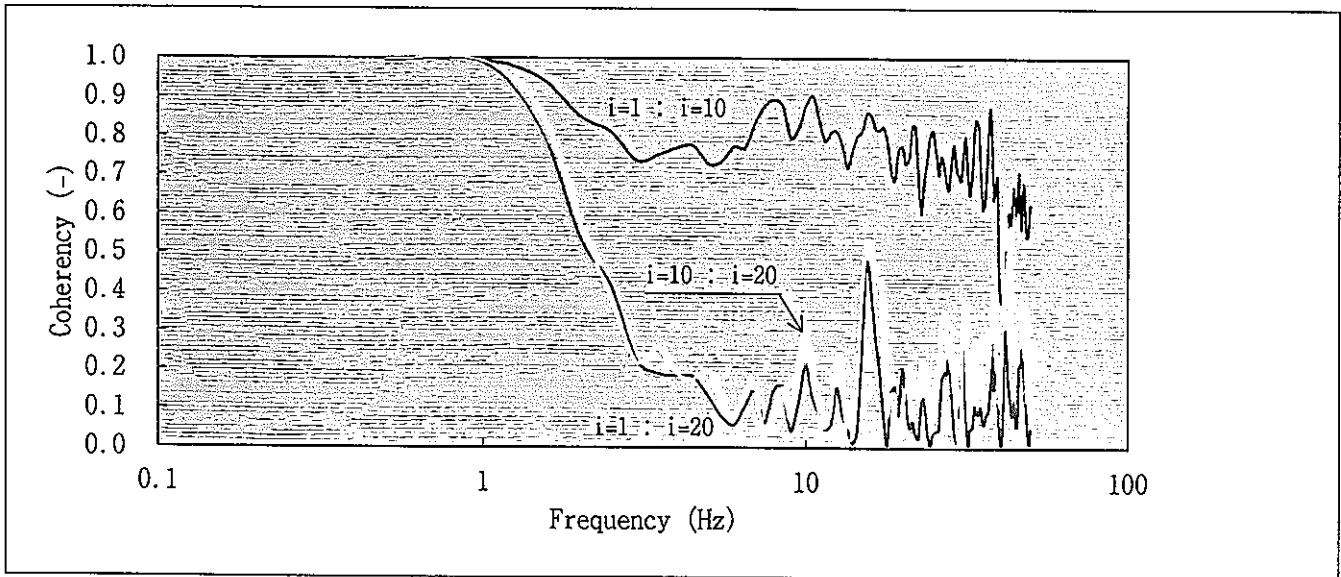
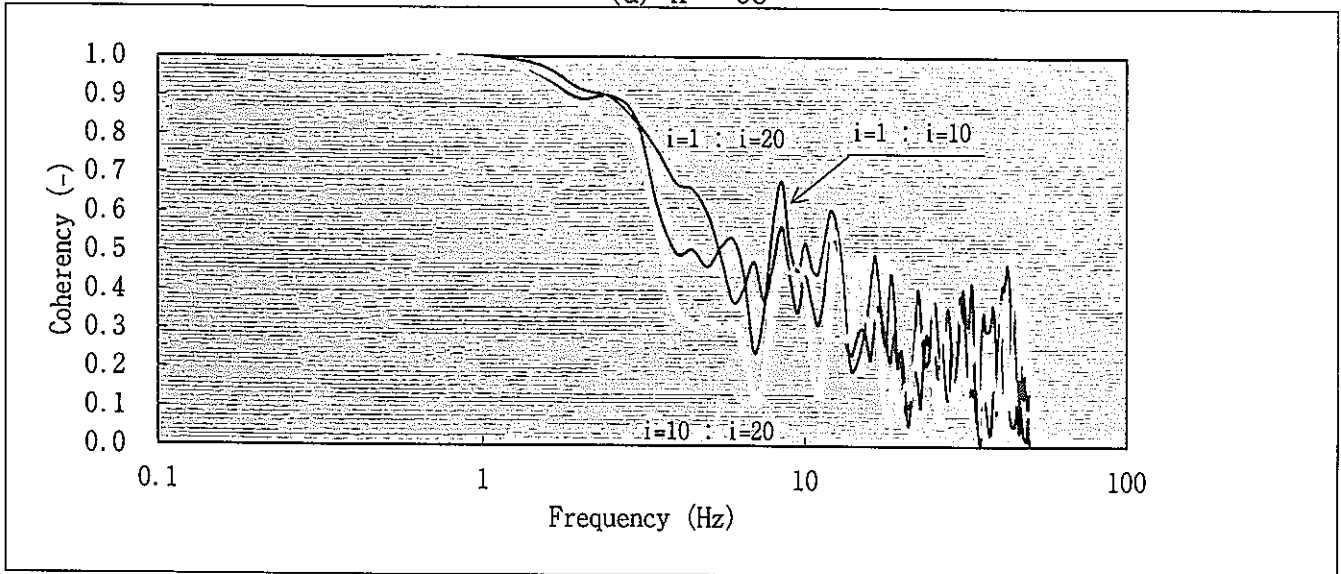


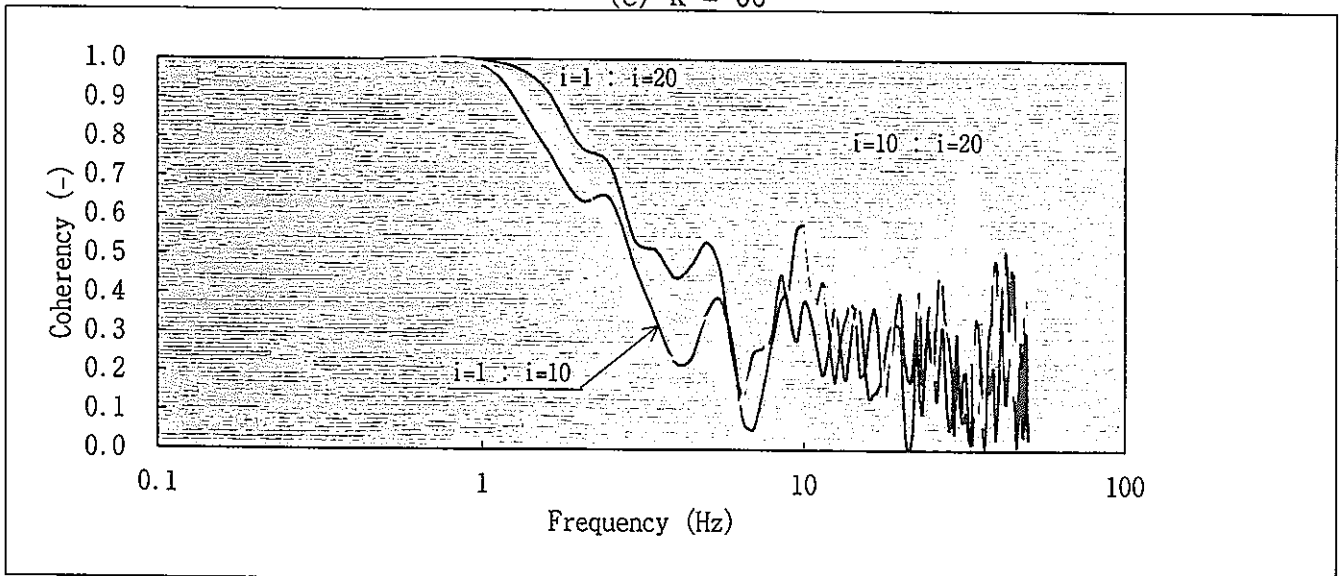
Fig. 4. 11 Coherence Functions for Case-5 (1/2)



(d) $k = 58$



(e) $k = 66$



(f) $k = 74$

Fig. 4. 11 Coherence Functions for Case-5 (2/2)

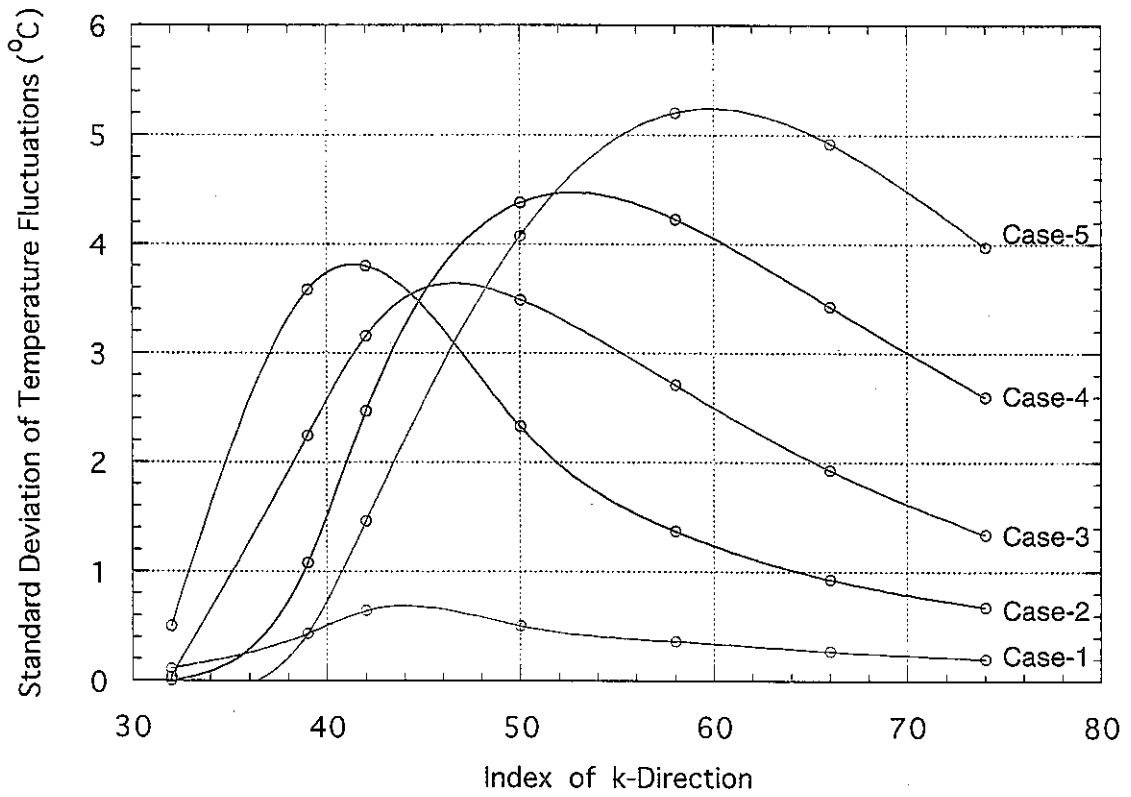


Fig. 4. 12 Comparison for Standard Deviation of Temperature Fluctuations at the Top Plane of the Main Pipe

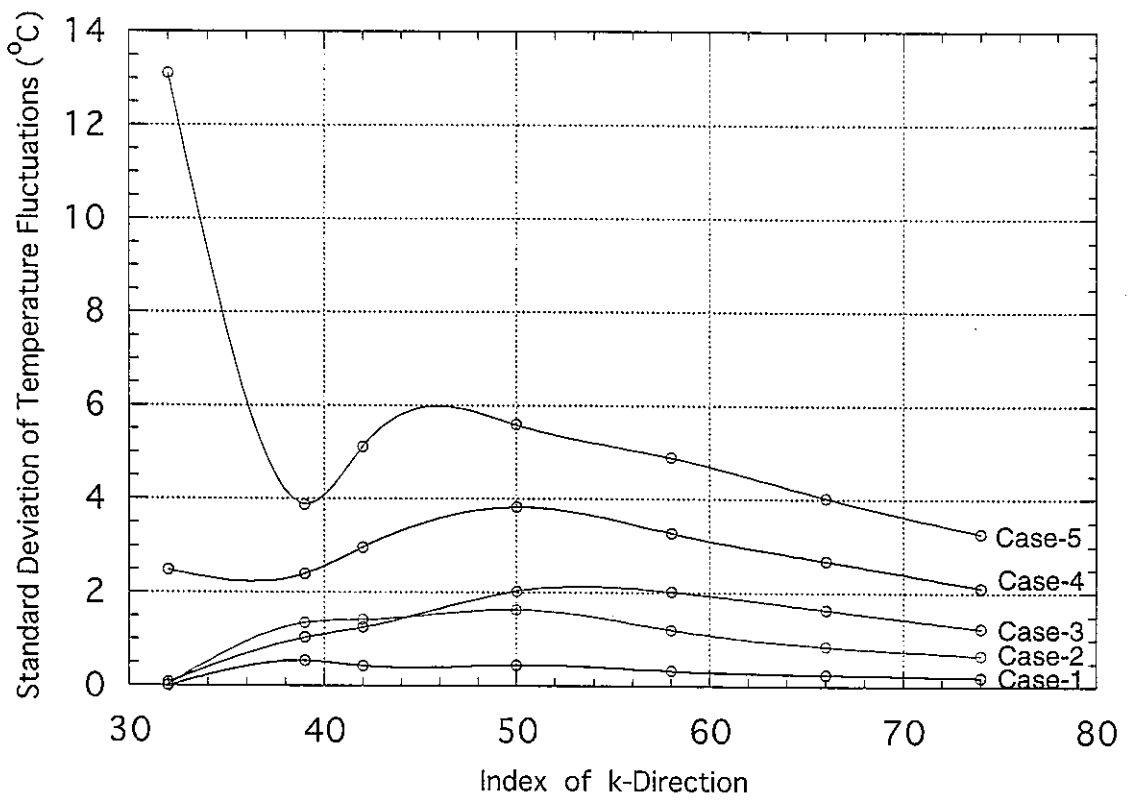


Fig. 4. 13 Comparison for Standard Deviation of Temperature Fluctuations at the Bottom Plane of the Main Pipe