

# サーマルストライピング条件下における 乱流混合特性の解析的検討

—作動流体による温度ゆらぎ挙動の特性変化に関する検討—

1999年5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  
してください。

〒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)  
1999

## サーマルストライピング条件下における乱流混合特性の解析的検討

### —作動流体による温度ゆらぎ挙動の特性変化に関する検討—

村上 諭\*、村松 壽晴\*\*

#### 要 旨

日欧合同調整委員会 (EJCC) 熱流動部会では、温度の異なる流体が混合することにより生じる温度ゆらぎの空間分布を初めとする熱流動特性を精度良く解析できるようにすることを目的として、二重円管垂直噴流実験 (作動流体: 空気およびナトリウム) を評価対象としたベンチマーク演習が計画された。サイクル機構では、同演習問題を直接シミュレーションコード DINUS-3 により解析し、以下の結果を得た。

- (1) ポテンシャルコア長さは、物性値 (作動流体) の違いに依らず、同軸自由噴流場における理論値 ( $5d-7d$ ) と一致する。
- (2) ポテンシャルコアなどの流動特性に関する物理量については、空気を作動流体とした場合の結果により、ナトリウム中での諸特性を推定することが可能である。
- (3) 熱的なポテンシャルコア長さについては、物性値の違いにより変化し、熱伝導度の良いナトリウムの方が空気の場合よりも短くなる。
- (4) 温度などの熱的特性については、空気を作動流体とした場合の結果から、ナトリウム中でのそれらを定量的に推定することは困難である。

---

\* : カストマシステム株式会社

\*\* : 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

Numerical Investigation on Turbulence Mixing Characteristics  
under Thermal Striping Flows

- Investigations on Fluid Temperature Fluctuation Phenomena in Air and Sodium -

Satoshi MURAKAMI\* and  
Toshiharu MURAMATSU\*\*

Abstract

A three-dimensional thermal striping analysis was carried out using a direct numerical simulation code DINUS - 3, for a coaxial jet configuration using air and sodium as a working fluid, within the framework of the EJCC thermo-hydraulic division. From the analysis, the following results have been obtained:

- (1) Calculated potential core length in air and sodium turbulence flows agreed with a theoretical value ( $5d - 7d$ ;  $d$ : diameter of jet nozzle) in the two-dimensional free jet theory.
- (2) Hydraulic characteristics in sodium flows as the potential core length can be estimated by the use of that of air flow characteristics.
- (3) Shorter *thermally* potential core length defined by spatial temperature distribution was evaluated in sodium flows, compared with that in air flows. This is due to the higher thermal conductivity of sodium.
- (4) Thermal characteristics in sodium flows as the *thermally* potential core length can not be evaluated, based on that air thermal characteristics.

---

\* : Customer System Co. Ltd.

\*\* : Thermal-Hydraulics Research Group, System Engineering Technology Division, OEC, JNC.

サーマルストライピング条件下における乱流混合特性の解析的検討

—作動流体による温度ゆらぎ挙動の特性変化に関する検討—

目 次

第 1 章	緒 言	1
第 2 章	EJCC ベンチマーク解析	2
2.1	二重円管垂直噴流実験の概要	2
2.2	解析ケース	2
2.3	解析コードおよび数値計算条件	3
2.4	解析結果	5
第 3 章	考 察	7
3.1	温度ゆらぎの時系列挙動	7
3.2	温度ゆらぎ挙動の周波数特性	10
3.3	時系列データの統計処理方法に関する検討	12
3.4	ポテンシャルコア長さに関する検討	14
第 4 章	結 言	17
	参考文献	18

## 図表目次

図 2.1	実験装置の概要	19
図 2.2	解析領域	20
図 2.3	メッシュ図	21
図 2.4	DINUS-3 コードによる瞬時渦度分布の時間推移 (ケース 1: ナトリウム, 1.0 m/s)	24
図 2.5	DINUS-3 コードによる瞬時温度分布の時間推移 (ケース 1: ナトリウム, 1.0 m/s)	25
図 2.6	DINUS-3 コードによる瞬時渦度分布の時間推移 (ケース 2: 空気, 3.0 m/s)	26
図 2.7	DINUS-3 コードによる瞬時温度分布の時間推移 (ケース 2: 空気, 3.0 m/s)	27
図 2.8	DINUS-3 コードによる瞬時渦度分布の時間推移 (ケース 3: 空気, 12.0 m/s)	28
図 2.9	DINUS-3 コードによる瞬時温度分布の時間推移 (ケース 3: 空気, 12.0 m/s)	29
図 3.1	ジェットを中心軸とノズルの幾何中心軸とのずれ	30
図 3.2	DINUS-3 コードによる温度時系列 (ケース 1: ナトリウム, 1.0 m/s, Z=0.2 m)	31
図 3.3	温度ゆらぎスパイクと空間温度分布との対応 (ケース 1: ナトリウム, 1.0 m/s, Z=0.2 m, R=0.0 m)	32
図 3.4	温度時系列に含まれる低周波成分とジェットの振動との対応 (ケース 1: ナトリウム, 1.0 m/s, Z=0.2 m, R=0.03 m)	33
図 3.5	DINUS-3 コードによる温度時系列 (ケース 2: 空気, 3.0 m/s, Z=0.2 m)	34
図 3.6	温度ゆらぎスパイクと空間温度分布との対応 (ケース 2: 空気, 3.0 m/s, Z=0.2 m, R=0.0 m)	35
図 3.7	DINUS-3 コードによる温度時系列 (ケース 3: 空気, 12.0 m/s, Z=0.2 m)	36
図 3.8	温度ゆらぎスパイクと空間温度分布との対応 (ケース 3: 空気, 12.0 m/s, Z=0.2 m, R=0.0 m)	37
図 3.9	温度ゆらぎ自己パワースペクトル密度分布の比較 (ケース 1: ナトリウム, 1.0 m/s)	38
図 3.10	温度ゆらぎ自己パワースペクトル密度分布の比較 (ケース 2: 空気, 3.0 m/s)	39
図 3.11	温度ゆらぎ自己パワースペクトル密度分布の比較 (ケース 3: 空気, 12.0 m/s)	40
図 3.12	時間平均温度の軸方向分布と標本数との関係 (R=0.0 m)	41
図 3.13	ポテンシャルコア長さと標本数との関係	42
図 3.14	規格化時間平均流速 w 成分の軸方向分布の比較 (R=0.0 m)	43
図 3.15	規格化瞬時渦度の空間分布の比較 (j=1)	44
図 3.16	規格化時間平均温度の空間分布の比較 (j=1)	45
図 3.17	規格化時間平均温度の軸方向分布の比較 (R=0.0 m)	46
図 3.18	規格化時間平均温度の軸方向分布の実験結果との比較 (R=0.0 m)	47
図 3.19	規格化温度ゆらぎ標準偏差の軸方向分布の実験結果との比較 (R=0.0 m)	48

## 第1章 緒 言

高速炉では、炉心を構成する各要素の熱流動特性の違いにより、炉心燃料集合体間あるいは炉心燃料集合体と制御棒集合体の間などで冷却材に温度差を生じる。これらの温度の異なる冷却材が炉心出口部で合流し混合する過程において、不規則に振動する流体温度ゆらぎが定常的に発生する。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に達すると、冷却材中の不規則な温度ゆらぎが構造材に伝わり、その材料は高サイクル熱疲労を受ける恐れがある（サーマルストライピング）。このような部位におけるサーマルストライピング条件を的確に把握するためには、流体混合領域中の温度ゆらぎ特性を高い精度で評価することが必要である。

日欧合同調整委員会（EJCC）では、温度の異なる流体が混合することにより生じる温度ゆらぎの空間分布を精度良く解析できるようにすることを目的として、二重円管垂直噴流実験 [1] を評価対象としたベンチマーク演習が計画された。この実験では作動流体として空気とナトリウムが用いられた。この実験の背景には、作動流体の違いによる温度ゆらぎ特性の相似性を確認し、ナトリウム以外の作動流体で温度ゆらぎ特性を把握してナトリウム場での当該特性を推定しようとする意図がある。

本報は、EJCC のベンチマーク問題となった二重円管垂直噴流実験（作動流体：空気およびナトリウム）を直接シミュレーションコード DINUS - 3 [2, 3] で解析し、ナトリウムの温度ゆらぎ特性と空気のその相違点に関する検討結果について報告するものである。

## 第2章 EJCC ベンチマーク解析

### 2.1 二重円管垂直噴流実験の概要

図 2.1 は、解析の対象となった実験装置の概観および幾何形状を示したものである。実験装置の幾何学的な特徴は次の通りである。

- 直径 1.2 m 、高さ 2.5 m の円筒容器
- 低温流体が噴出する直径 56.3 mm のノズルを容器の底部に設置
- 低温流体噴出ノズルを取り囲むように、高温流体が噴出する直径 110 mm のノズルを同心円軸上に設置
- 容器の頂部に出口配管を設置

実験では、作動流体として空気およびナトリウムを用い、高低温ノズル間の流速比を 1.0 に固定した条件において、両ノズルからの噴出流速（レイノルズ数  $Re$ ）を変化させて温度時系列データが測定された。温度データの測定では、トラバース可能な熱電対ツリーが使用され、ノズル下流側の複数位置において流体温度の半径方向分布が記録された。実験データの評価では、高  $Re$  数乱流条件下における物性値（作動流体）の違い（ペクレ数  $Pe$ ）による温度ゆらぎ特性の変化、および  $Pe$  数を概ね一致させた条件下における  $Re$  数による温度ゆらぎ特性の変化が検討された。

### 2.2 解析ケース

解析ケースは以下の 3 ケースについて行う。

ケース名	ケース 1	ケース 2	ケース 3
作動流体	ナトリウム	空気	空気
$V_c$ (m/s)	1	3	12
$V_h$ (m/s)	1	3	12
$T_c$ (°C)	200 272	30	30
$T_h$ (°C)	280 299	50	50
$\Delta T$ (°C)	80 27	20	20
$Re_c$	110000 130000	11000	44000
$Re_h$	130000 140000	9000	36000
$Pe_c$	820 780	7800	32000
$Pe_h$	780 770	6400	26000

※ 表中の斜線で区切られた値は、左上が実験、右下が本解析で用いた値を表す。

また、実験と解析で一致する条件については実験の値を省略してある。



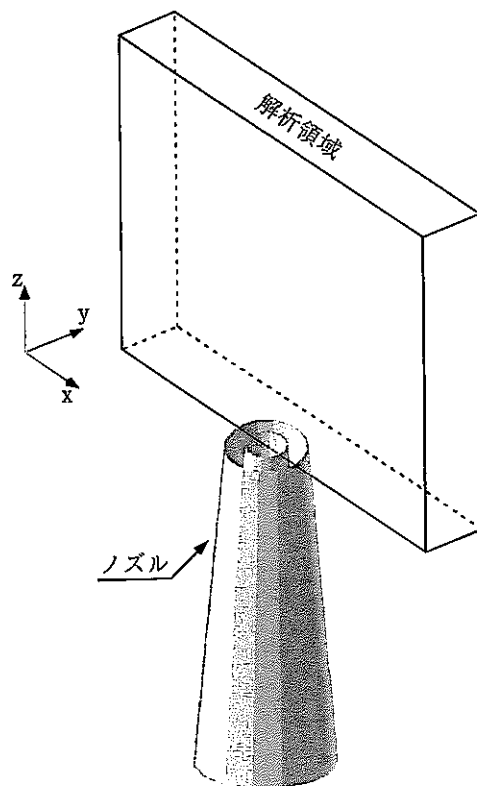
### 2.3 解析コードおよび数値計算条件

使用する解析コードは、直接シミュレーションコード DINUS-3 である。DINUS-3 コードは、時間平均操作を施さない瞬時の質量保存式、運動量保存式およびエネルギー保存式を工学モデルを用いずに解く差分法コードである。本コードでは、対流項の離散化には 3 次風上差分法を、拡散項の離散化には 2 次中心差分法を使用し、時間項に関する差分近似は Leap-Frog 法 (2 次精度) が用いられる。

解析における数値計算条件として、座標系には  $x$ - $y$ - $z$  直交系を用い主流方向を  $z$  軸とした。 $x$  軸および  $y$  軸の方向については下図の通りである。高温流体と低温流体の流入流量比は、 $x$  軸方向のメッシュを不等間隔として、実験時の流入流量比に一致させた。

解析対象範囲は、図 2.2 に示すように自由噴流挙動を特徴づけるポテンシャルコア長さを十分に包含する三次元領域を規定した。

図 2.3 にメッシュ図を示す。



主要な数値計算条件は下表の通りである。

項目		内容
座標系		$x-y-z$ 直交座標系
メッシュ分割		$161^i \times 7^j \times 161^k$
メッシュ幅	i 方向	2.5 mm (ノズル部以外) 2.44 ~ 2.448 mm (ノズル部)
	j 方向	10 mm
	k 方向	5 mm
速度境界条件	入口	一様流入
	出口	等質量流出 (mass)
	壁	ノズルの中心軸を含む j 面はスリップ その他の壁面は非スリップ
温度境界条件		断熱条件

## 2.4 解析結果

### (1) ケース 1 (ナトリウム, 1.0 m/s)

図 2.4-2.5 に、 $x-z$  平面 ( $j=1$ ) における過渡開始 5.0 秒から 5.9 秒までの瞬時の渦度分布と温度分布の推移を 0.1 秒間隔で示す。

渦度の値は、以下の式で得られた渦度ベクトル  $\omega$  の各成分の合成値 (2 乗の根) を採用した。

$$\omega = i \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + j \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + k \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

図 2.4 より、渦度の小さな領域がノズル噴出口の直上領域において観察される。この領域では、ノズル端直上部で小さな渦度値を示す範囲が保存されているのに対し、下流に向かうに従って、その外側に隣接する周囲流体を巻き込んでこの範囲が次第に縮小し、渦度の大きな乱流領域が空間的に拡大・発達してゆく様子が分かる。

図 2.5 より、青色領域で示される低温流体のジェットが、ノズル出口部から下流側に定常的に分布しており、その下流側フロント部において、ジェット先端の低温流体が間欠的に分離・放出され、それが出口境界に達する前に消滅する様子が観察できる。また、同図からは確認できないが、約 5 秒の長周期で噴流が振動する様子が観察された。この振動挙動については 3 章で詳しく述べる。

### (2) ケース 2 (空気, 3.0 m/s)

図 2.6-2.7 に、 $x-z$  平面 ( $j=1$ ) における過渡開始 6.5 秒から 6.725 秒までの瞬時の渦度分布と温度分布の推移を 0.025 秒間隔で示す。

図 2.6 より、渦度の小さな領域が、ノズル噴出口の直上領域において観察される。この領域では、ノズル端直上部で小さな渦度値を示す範囲が保存されているのに対し、下流に向かうに従って、その外側に隣接する周囲流体を巻き込んでこの範囲が次第に縮小し、渦度の大きな乱流領域が空間的に拡大・発達してゆく様子が分かる。以上の挙動は、ケース 1 でのものと同じである。

図 2.7 より、青色領域で示される低温流体のジェットが、ノズル出口部から下流側に定常的に分布しており、その下流側フロント部において、ジェット先端の低温流体が間欠的に分離・放出され、それが出口境界に達する前に消滅する様子が観察できる。このような全体的な過渡挙動はケース 1 でのものと同じであるが、低温流体が分離・放出される位置が、ケース 1 のものとは比べて、より出口境界に近づいている。

## (3) ケース 3 (空気, 12.0 m/s)

図 2.8-2.9 に、 $x-z$  平面 ( $j=1$ ) における過渡開始 5.0 秒から 5.09 秒までの瞬時の渦度分布と温度分布の推移を 0.01 秒間隔で示す。

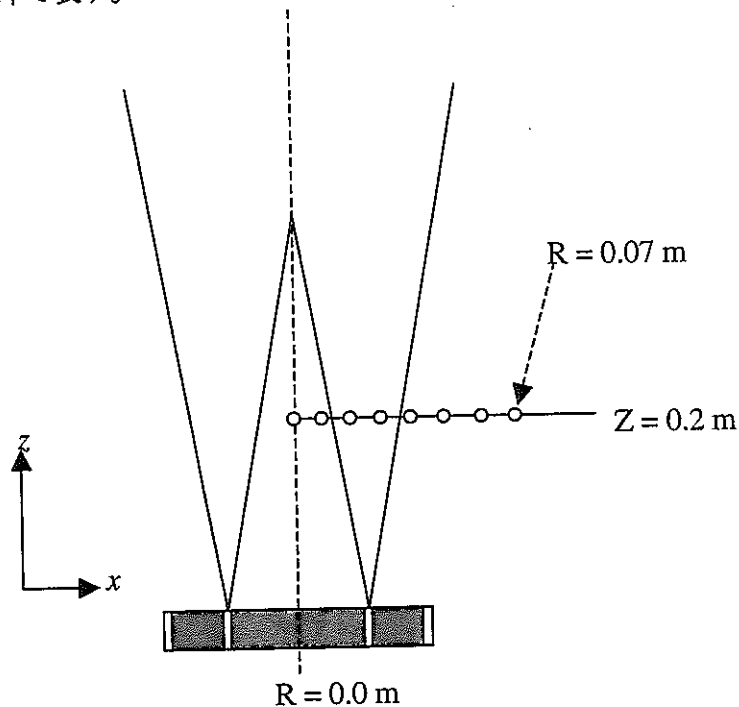
図 2.8 より、渦度の小さな領域がノズル噴出口の直上領域において観察される。この領域では、ノズル端直上部で小さな渦度値を示す範囲が保存されているのに対し、下流側に向かうに従って、その外側に隣接する周囲流体を巻き込んでこの範囲が次第に縮小し、渦度の大きな乱流領域が空間的に拡大・発達してゆく様子が分かる。以上の挙動は、ケース 1 およびケース 2 と同じである。

図 2.9 より、青色領域で示される低温流体のジェットが、ノズル出口部から下流に定常的に分布しており、その下流側フロント部において、ジェット先端の低温流体が間欠的に分離・放出され、それが出口境界に達する前に消滅する様子が観察できる。また、低温流体が分離・放出される位置が出口境界に接近している傾向は、ケース 2 と同じである。

## 第3章 考 察

## 3.1 温度ゆらぎの時系列挙動

温度時系列挙動の詳細な検討を行った空間点は 3 ケース共通であり、軸方向高さを 0.2 m に固定して、ジェットを中心軸から 0.01 m の等間隔で径方向に 8 点とした。空間位置関係を下図の丸印で表す。



なお、ジェットを中心軸（原点）は、各軸方向高さにおける時間平均温度の径方向分布から、最も低い温度を示す位置とした。この規定方法によるジェットを中心軸とノズルの幾何中心軸とのずれを図 3.1 に示す。

また以下に、本節で検討を行う軸方向高さ（ $Z = 0.2 \text{ m}$ ）における両者の中心軸のずれ量を示す。

ケース 1 (ナトリウム, 1.0 m/s)	: 0.9 cm
ケース 2 (空気, 3.0 m/s)	: 1.2 cm
ケース 3 (空気, 12.0 m/s)	: 0.5 cm

## (1) ケース 1 (ナトリウム, 1.0 m/s)

図 3.2 に空間位置 8 点における温度時系列挙動を示す。まず、ポテンシャルコア領域内 ( $R = 0.0 \text{ m}$ ) での挙動では、スパイク状の温度ゆらぎが生じていることが分かる。このスパイクが生じた瞬間 (1.93 秒) の空間温度分布を図 3.3 に示す。図中の丸印で示した空間位置では、低温流体領域が左側にくびれており、ここに外側の低温流体が進入していることが分かる。これは外側ノズルから流出した高温流

体が、内側ノズルから流出する低温流体の上側に浮力によって回り込んだことによる挙動であると考えられる。このスパイク状の温度ゆらぎ挙動は、中心軸上および  $R = 0.01$  m の位置で特徴的なものとなっている。  $R = 0.02, 0.03, 0.04$  m の各位置における温度ゆらぎ挙動は、乱流混合による不規則な成分が支配的であり、連行領域に特有なものであると解釈できる。なお、図 3.4 に見られる同領域での比較的低周波の温度ゆらぎ挙動は、ポテンシャルコアおよび連行領域が、径方向に長周期で振動したことによるものである。この領域中における温度ゆらぎ挙動は、上記低周波成分と乱流混合に起因する高周波成分（約 5 Hz）とが重畳したものである。

$R = 0.05$  m の位置では、温度ゆらぎ挙動の振幅が連行領域中のものに比べて減衰しており、また低周波成分の割合が不明瞭になっていることから、同領域は連行領域の外側に位置すると考えられる。さらに、 $R = 0.05$  m より外側では、温度ゆらぎ振幅の減衰が顕著なものとなっている。

## (2) ケース 2 (空気, 3.0 m/s)

温度時系列挙動を図 3.5 に示す。ポテンシャルコア領域内 ( $R = 0.0, 0.01$  m) では、ケース 1 と同様なスパイク状の温度ゆらぎが生じていることが分かる。図 3.6 に、このスパイク状の温度ゆらぎが生じた瞬間 (5.35 秒) の温度分布を示す。この挙動もケース 1 と同様に、外側ノズルから流出した高温流体が、内側ノズルから流出する低温流体の上側に浮力によって回り込んだ ( $j$  方向) ことに起因するものである。  $R = 0.02, 0.03, 0.04$  m の位置では、定常不規則な温度ゆらぎ挙動が支配的なものになっており、これらは連行領域中に位置すると解釈できる。

$R = 0.05$  m の位置での挙動は、温度ゆらぎ振幅が減衰していることから、連行領域の外側に位置していると考えられる。  $R = 0.05$  より外側に向かうに従って、温度ゆらぎ振幅が減少しているものの、この傾向はケース 1 ほど顕著ではない。これは、空気の熱伝導度がナトリウムのそれよりも小さく、空間温度分布を解消する効果が小さいためであると解釈できる。

## (3) ケース 3 (空気, 12.0 m/s)

温度時系列挙動を図 3.7 に示す。まず、ポテンシャルコア領域内 ( $R = 0.0$  m) では、前述 2 ケースと同様にスパイク状の温度ゆらぎが生じていることが分かる。このスパイク状の温度ゆらぎが生じた瞬間 (1.39 秒) の空間温度分布 (図 3.8) から、この挙動は噴流自体の振動によるものであることが分かる。  $R = 0.02, 0.03, 0.04$  m の位置では、定常不規則な温度ゆらぎ挙動が支配的なものになっており、これらの位置は連行領域中にあると考えられる。  $R = 0.05$  m の位置は、温度ゆらぎ振幅が減衰していることから、連行領域の外側に位置していると考えられる。  $R = 0.05$  m より外側の位置では、温度ゆらぎ振幅について、ケース 1 のような顕著な減衰傾向は見られない。この理由も前述のとおり、ナトリウムと空気の熱伝導度の違いによるものであると考えられる。

(4) ケース間での比較

[ポテンシャルコア内]

- 噴流自体の振動に起因したスパイク状の温度ゆらぎ挙動が発生する。同挙動に関しては、物性の違いによる影響は見られない。

[連行領域内]

- 乱流混合に起因して発生する温度ゆらぎ挙動の振動は、ナトリウムよりも空気の方が大きい。これは、乱流混合により発生する渦塊スケールの減衰特性が、空気の場合の方が小さいことに起因している。詳しくは次節で述べる。
- 噴流自体の振動に起因する低周波の温度ゆらぎ挙動が発生する。ケース 1 については、振動周期が 5 秒のものが比較的卓越しているが、その他のケースについては卓越した周期は見られず、噴流の振動周期を規定することが困難である。

[連行領域外側]

- 連行領域から外側に向かうに従って見られる温度ゆらぎ振幅の減衰効果は、空気よりもナトリウムの方が大きい。これは、熱伝導度の大きいナトリウムの方が空間温度分布を解消する作用が大きいためである。

### 3.2 温度ゆらぎ挙動の周波数特性

#### (1) ケース 1 (ナトリウム, 1.0 m/s)

前節で規定した空間各位置における温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度の比較を図 3.9 に示す。結果の全体的な特徴として、ポテンシャルコア領域を除いた全ての測定点 ( $R=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07$  m) において、1 Hz 以下の低周波成分のパワーが相対的に大きいことが挙げられる。これは、噴流自体の振動 (周期 5 秒) に起因したものである。一方、10 Hz よりも高周波側で、パワーが有意に減少していることが分かる。なお、4 Hz 付近のピークは、乱流混合に起因して発生する温度ゆらぎ挙動の周波数 (4 ~ 5 Hz) に対応し、この挙動が支配的となる連行領域中 ( $R=0.02, 0.03$  m) において、最もパワーが大きくなっている。

#### (2) ケース 2 (空気, 3.0 m/s)

温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度を図 3.10 に示す。この結果の全体的な特徴として、全周波数帯に亘ってパワーが一様に分布しており、有意なピークは見られない。ただし、連行領域中 ( $R=0.02, 0.03$  m) の温度ゆらぎ挙動には、約 1 Hz 以下の低周波成分が比較的卓越していることが分かる。10 Hz 以上の高周波領域では、ケース 1 で見られたパワーの顕著な減少傾向は見られない。これは、熱伝導度の違いにより、小スケール渦 (高周波) でのパワーの減衰効果に差異が生じていることに起因している。すなわち、熱伝導度の大きなナトリウムは、大スケール渦から小スケール渦へのエネルギー輸送が促進され、高周波側のパワーが有意な減衰を示すものの、熱伝導度の小さな空気は、このエネルギー輸送が小さくなり、結果として高周波側のパワーの減衰が抑制されたものとなる。

#### (3) ケース 3 (空気, 12.0 m/s)

温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度を図 3.11 に示す。この結果の全体的な特徴では、ケース 2 と同様に、全周波数帯に亘ってパワーが一様に分布し、有意なピークは見られない。また、連行領域中 ( $R=0.02, 0.03$  m) での温度ゆらぎ挙動に約 1 Hz 以下の低周波成分が比較的卓越していることもケース 2 と同じである。さらに、10 Hz 以上の高周波領域では、ケース 1 で見られたパワーの減少傾向は見られず、ケース 2 と同じ特性を示している。



(4) ケース間での比較

[低周波 (< 1.0 Hz) 領域]

- この領域では、物性の違いに依らず比較的パワーが大きくなる。これは、噴流自体の振動に起因した低周波温度ゆらぎ挙動によるものである。

[中間周波数 (1.0 ~ 10.0 Hz) 領域]

- ナトリウムの場合では、約 4 Hz 付近でピークが見られるのに対し、空気の場合では、有意なピークは見られない。これは、乱流混合によって生じる渦塊スケールが作動流体により変化したためであると考えられる。

[高周波 (> 10.0 Hz) 領域]

- ナトリウムの場合では、この領域一帯でパワーが減衰するのに対し、空気の場合では、このような減衰傾向は見られない。これは、両者の熱伝導度の違いにより、大スケール渦から小スケール渦へのエネルギー輸送に差異が生じたためであると考えられる。

### 3.3 時系列データの統計処理方法に関する検討

本節では、各ケースにおける時系列データの標本数が統計的評価に必要十分な量であるかを判断するため、時系列データの標本数と時間平均温度分布の関係を調べる。また、この結果に基づき、ケース間での比較を詳細に行うための方法について検討を行う。

以下の表は、各ケースについての時系列データの収録情報を示したものである。

ケース名	サンプリングレート	総標本数	収録時間
ケース 1	50 Hz	322	6.44 秒
ケース 2	40 Hz	140	3.50 秒
ケース 3	50 Hz	335	6.70 秒

図 3.12 は、式 (3.1) による時間平均温度の軸方向分布と標本数との関係を示したものである。この結果から分かる通り、全てのケースにおいて、標本数の増加により軸方向時間平均温度分布が変化していることから、全ケースとも標本数が十分でないと判断できる。

$$\bar{T}_{x,y,z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{x,y,z}^i \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、

- $T^i$  :  $i$  番目に採取された温度
- $\bar{T}$  : 時間平均温度
- $N$  : 標本数
- $x, y, z$  : 座標

標本数の増加に対して軸方向時間平均温度分布が変化する主な要因は図 3.13 より説明できる。すなわち、温度ゆらぎ挙動の低周波成分を支配する噴流自体の振動が、温度時系列データの時間平均処理結果に大きく影響し、同じ 1 秒間のサンプリングデータであっても、低周波成分の存在によって、温度分布が大きく変化する。従って、ケース間で詳細な比較を行うためには、低周波成分の発生要因である噴流自体の振動回数を一定にすることが時間平均処理を行う上で必要である。

そこで、噴流自体の振動挙動が物性値の影響を受けず、体系に依存したものであると仮定し、各ケースでの噴流振動に対する時間スケールが一致するように平均化処理時間を規定した。

時間スケールを揃える一つの指標として、以下の体系内流体の入れ換え回数を考える。

$$N = \frac{U \times t}{L} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、

- N: 流体の入れ換え回数
- U: 流入流速
- t: 時系列データ収録時間
- L: 入口境界から出口境界までの軸方向距離 (= 0.8 m)

式 (3.2) により算出した各ケースでの流体入れ換え回数は次のようになる。

ケース名	流体入れ換え回数
ケース 1	8.1 回
ケース 2	13.1 回
ケース 3	100.5 回

以降では、流体入れ換え回数の最も少ないケース 1 (8.1 回) を基準とするため、ケース 2 およびケース 3 の平均化処理時間としてそれぞれ 2.15 秒および 0.54 秒を使用する。

### 3.4 ポテンシャルコア長さに関する検討

#### (1) 流速 $w$ 成分による規定

図 3.14 は、噴流中心軸上での流速  $w$  成分の時系列データに対し、前節で示した流体入れ換え回数が 8.1 回となる時間を用いて平均化を行い、その軸方向分布をケース間で比較したものである。なお、図中の縦軸は、各ケースでのノズル流速を用いて規格化している。

この比較結果から、軸方向流速  $w$  成分の値が減少し始める軸方向高さまでの距離は、各ケースとも同軸自由噴流場におけるポテンシャルコア理論長さの  $5d \sim 7d$  ( $d$ : 噴流ノズル径) と良好に一致し、さらにこの距離は物性値 (作動流体) に依存しないことがわかる。

#### (2) 渦度分布による規定

式 (3.3) により規格化した瞬時渦度分布 ( $j=1$ ) の比較を図 3.15 に示す。

$$\omega_{x,y,z}^* = \frac{\omega_{x,y,z}}{U/D} \dots\dots\dots (3.3)$$

ここで、

- $\omega^*$ : 規格化瞬時渦度
- $\omega$ : 瞬時渦度
- $U$ : 流入流速
- $D$ : 外側ノズル直径

比較結果より分かる通り、ノズル端直上部における渦度の小さな領域の下流側フロント部までの距離は、いずれのケースについても前述の理論値 ( $5d \sim 7d$ ) と概ね一致し、また物性値による違いは生じていない。

## (3) 温度分布による規定

各ケースについて、流体の入れ換え回数が 8.1 回となる時間を用いて平均化した空間温度分布を図 3.16 に比較する。なお図中の温度は、噴流ノズル端での最大温度差により規格化を施してある。

この比較結果より、低温流体が占めるポテンシャルコア領域（図中の青色で示される領域）の長さは、ケース 2 とケース 3 がほぼ等しく、またケース 1 はこれら 2 ケースに比べて短いことが分かる。規格化時間平均温度の軸方向分布 ( $R=0.0\text{ m}$ ) の結果からも、ポテンシャルコア長さは、ケース 1 が約  $0.19\text{ m}$  でもっとも短く、その他の 2 ケースは約  $0.23\text{ m}$  でほぼ等しいことが分かる。

以上より、温度分布から規定したポテンシャルコア長さは、物性値（作動流体）の影響を受け、熱伝導度が大きいナトリウムの場合に空気に比べて短くなることが分かる。

## (4) 総合評価

## [流動に関する物理量]

- 物性の違いに依らず、同軸自由噴流のポテンシャルコア長さの理論値である  $5d \sim 7d$  と一致する。
- 流動に関する物理量については、空気を作動流体とした場合の結果により、ナトリウム中での諸特性を推定することが可能であると考えられる。

## [温度に関する物理量]

- 物性の違いによって熱的ポテンシャルコア長さが変化し、熱伝導度の良いナトリウムの方が空気の場合に比べて短くなる。
- 温度に関する物理量については、空気を作動流体とした場合の結果から、ナトリウム中での諸特性を定量的に推定することは困難であると考えられる。

## (5) 実験結果との暫定比較

ここでは、解析と実験との比較を、温度時系列データに対して時間平均処理を施した結果について行う。ただし、第3.3節で説明した通り、定量的な比較を行う上では噴流自体の振動回数を一致させることが必要となるが、実験での時系列データの収録情報が不明であるため、両者の厳密な比較を行うことができない。このため、噴流自体の振動回数の違いによって変化するポテンシャルコア長さの比較は行わず、解析と実験でポテンシャルコア長さが一致したと仮定して、連行領域中での温度ゆらぎ挙動についてのみ比較を行う。

各ケースについて、流体の入れ換え回数が8.1回となる時間を用いて平均化した温度の軸方向分布 ( $R=0.0\text{ m}$ ) を図 3.18 に比較する。なお図中の温度は、噴流ノズル端での最大温度差により規格化を施してある。また、軸方向距離は外側ノズルの直径 (110 mm) で規格化してある。

この結果より分かる通り、いずれのケースについても、解析結果と実験結果との間で連行領域中の軸方向温度分布は良く一致している。ただし、下流側に向かうに従って解析結果と実験結果との間で温度差が大きくなっており、解析結果は規格化軸方向距離 5 付近から完全混合時の規格化温度である 0.7 付近に漸近してゆく様子が見られるものの、実験結果は体系内の最高温度まで上昇している。このような差異が生じた原因として、(i) 解析空間に対して実験容器の体積がはるかに大きいこと、(ii) 低温流体に対して高温流体の流入流量が約 3 倍であること、および (iii) 実験において容器内の流体があらかじめ高温側に保たれていたとすると、実験での低温流体のインベントリが解析でのそれに比べて無視できるほど小さくなることなどが挙げられる。

図 3.19 は、流体の入れ換え回数が8.1回となる時間を用いて算出した温度ゆらぎ標準偏差の軸方向分布 ( $R=0.0\text{ m}$ ) について、各ケースごとに解析結果と実験結果を比較したものである。なお図中の標準偏差は、噴流ノズル端での最大温度差により規格化を施してある。また、軸方向距離は前述と同様に外側ノズルの直径で規格化してある。

この比較結果より、いずれのケースについても、標準偏差のピーク値は解析結果の方が若干大きな値を示していることが分かる。この差異が生じた原因は現段階において不明であるが、前述の原因候補などにより高低温流体の混合量が変化し、標準偏差に影響を及ぼした可能性がある。この点に関しては、実験データの収録条件を調査することと合わせて今後の検討課題である。

## 第4章 結 言

EJCC のベンチマーク問題となった二重円管垂直噴流実験（作動流体：空気およびナトリウム）を直接シミュレーションコード DINUS - 3 で解析し、ナトリウムの温度ゆらぎ特性と空気のそれの相違点に関する検討を行った。得られた結果は次の通りである。

- (1) 流動に関する物理量については、空気を作動流体とした場合の結果により、ナトリウム中での諸特性を推定することが可能であると考えられる。
- (2) 熱的ポテンシャルコア長さは物性の違いによって変化し、熱伝導度の良いナトリウムの方が空気の場合に比べて短くなる。
- (3) 温度に関する物理量については、空気を作動流体とした場合の結果から、ナトリウム中での諸特性を定量的に推定することは困難であると考えられる。

参考文献

- (1) D. Tenchine and J. P. Moro, EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF COAXIAL JETS, Proc. 8th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp. 1381 - 1387, Kyoto, Japan (1997).
- (2) 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。
- (3) 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 年。



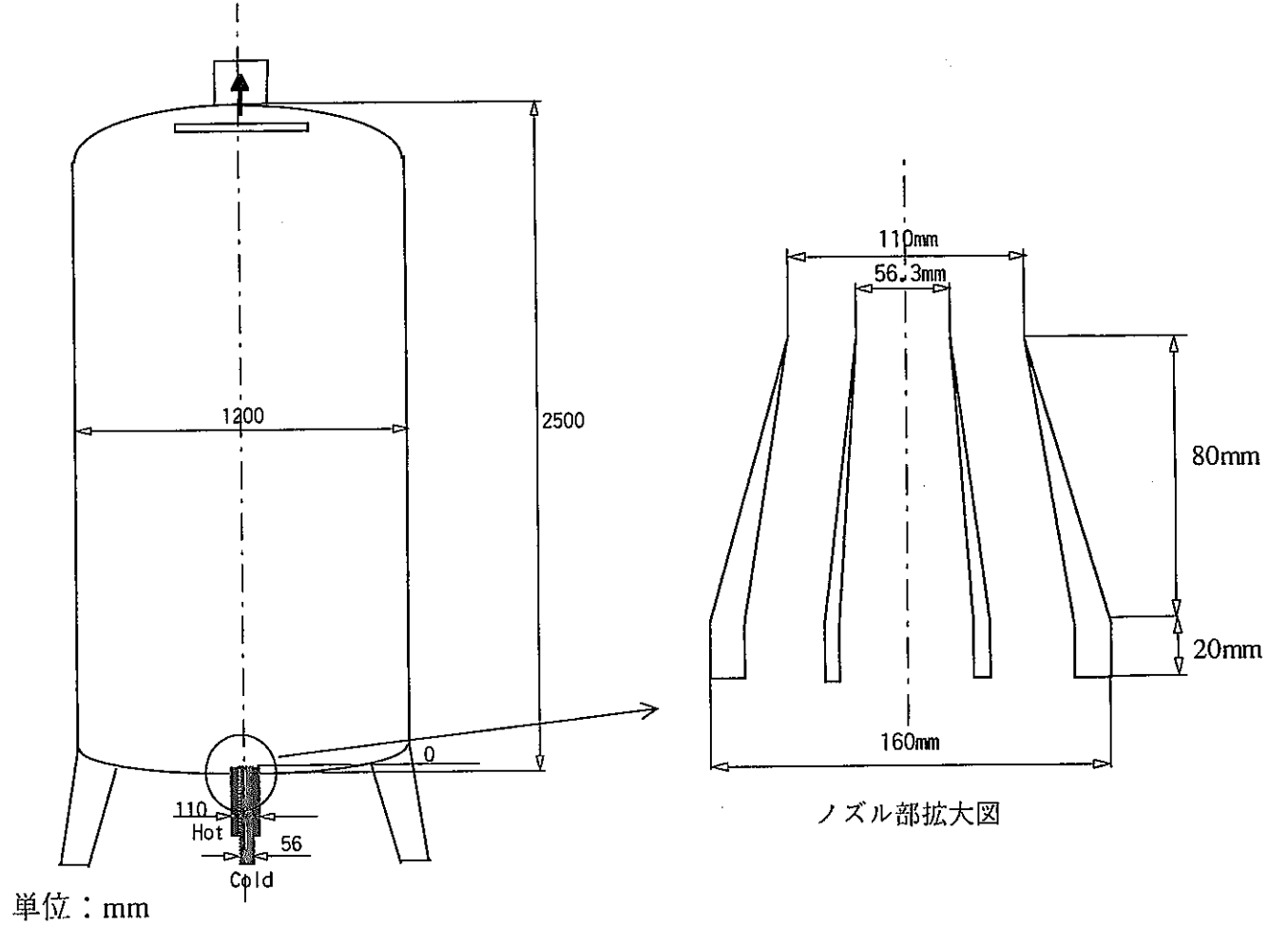
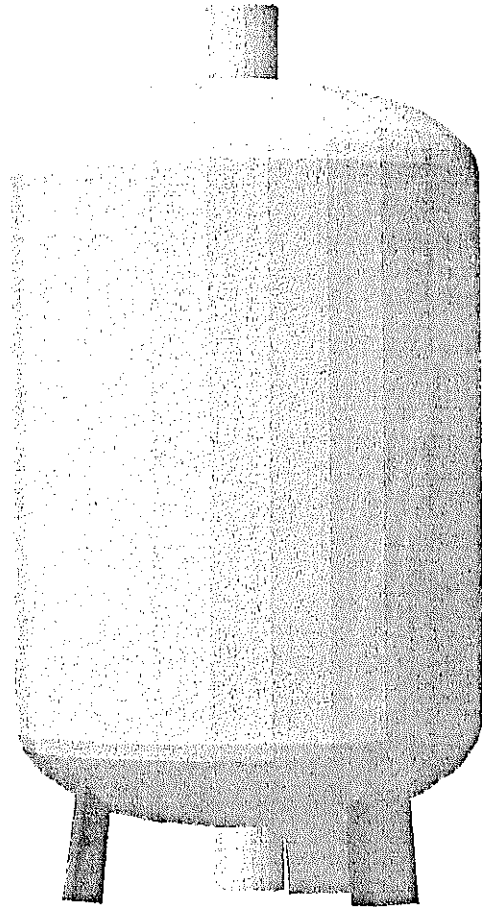
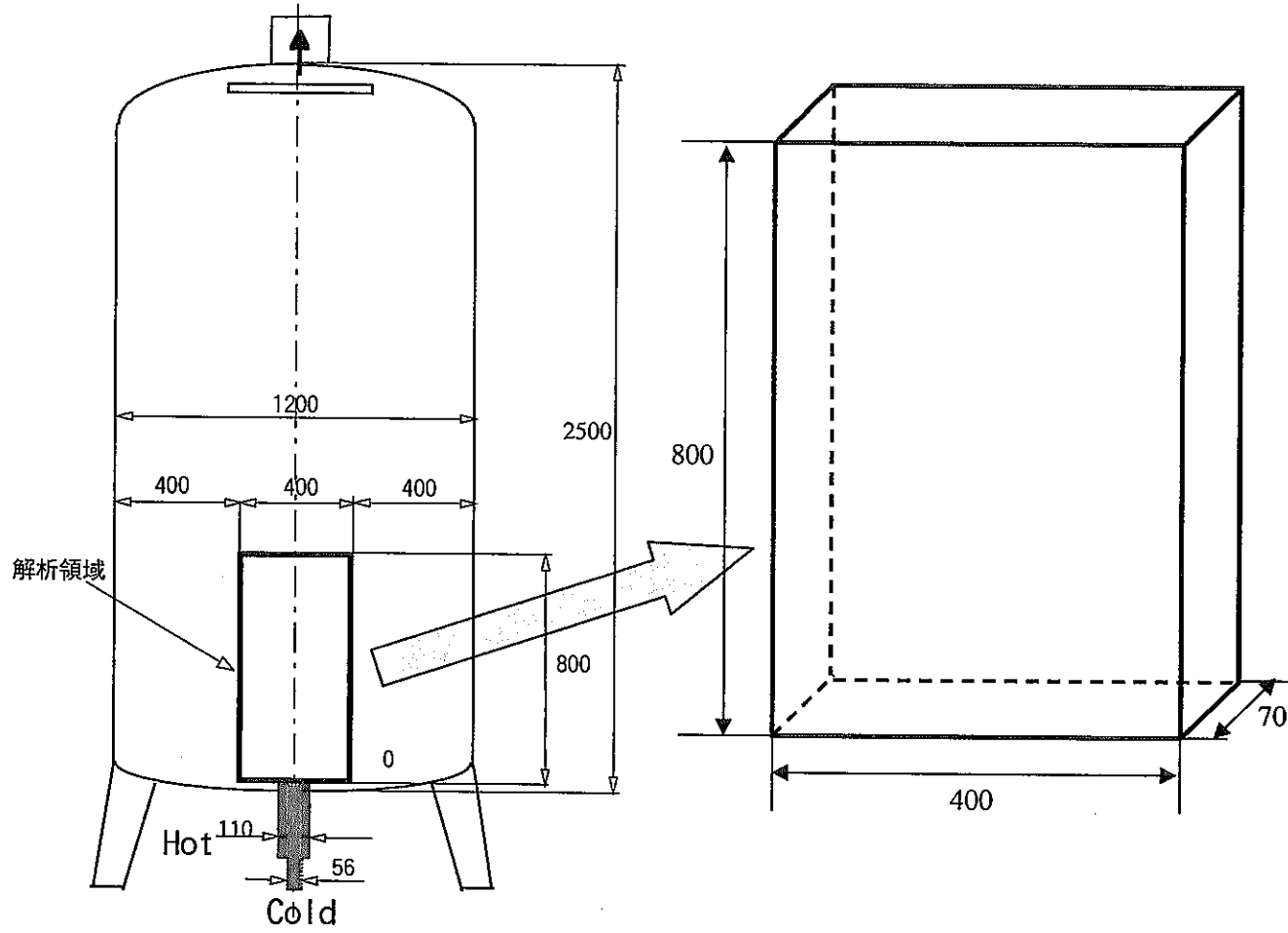


図 2.1 実験装置の概要



單位：mm

圖 2.2 解析領域

(K)  
161

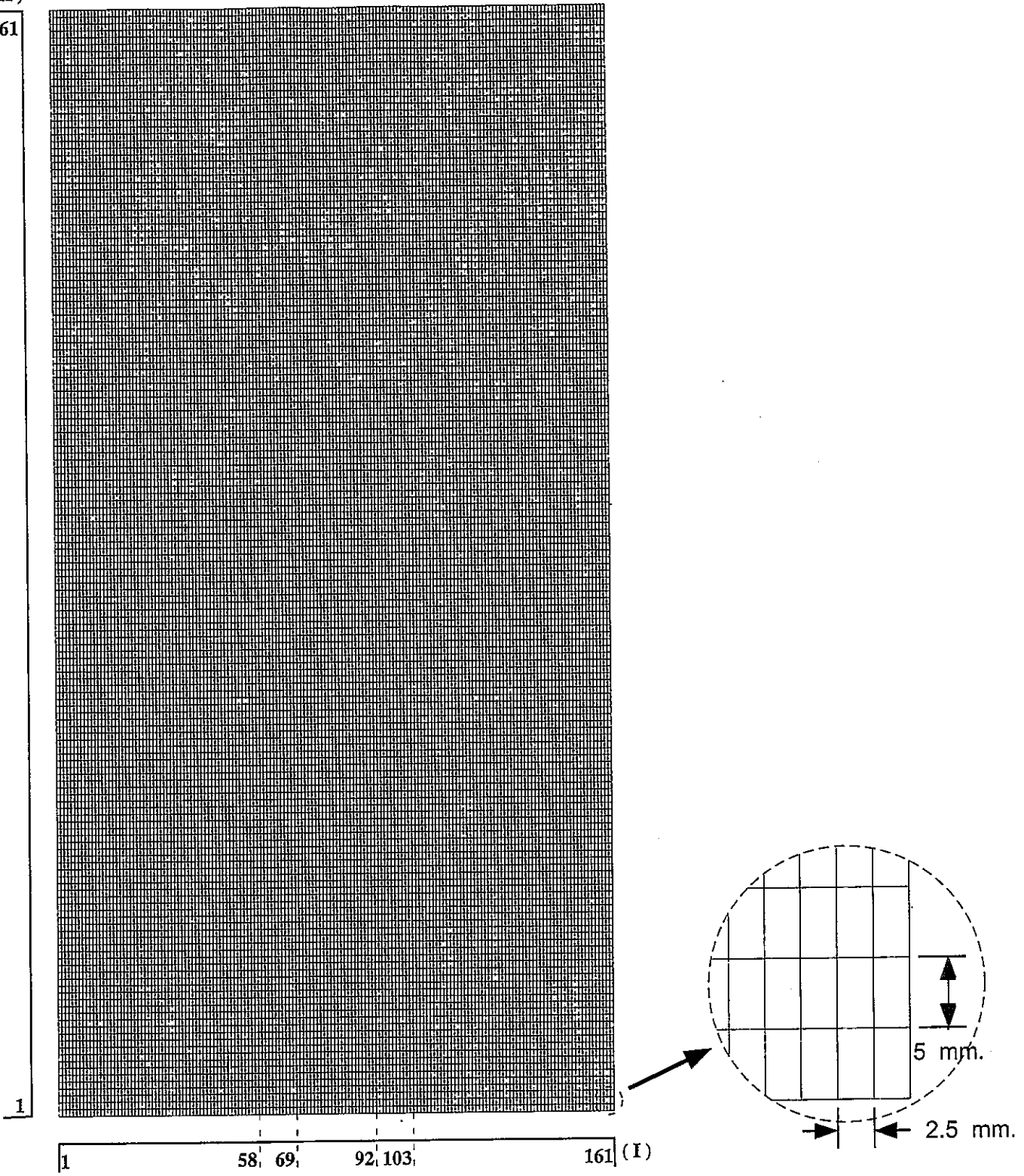


図 2.3 [1/3] メッシュ図 (x-z 面)

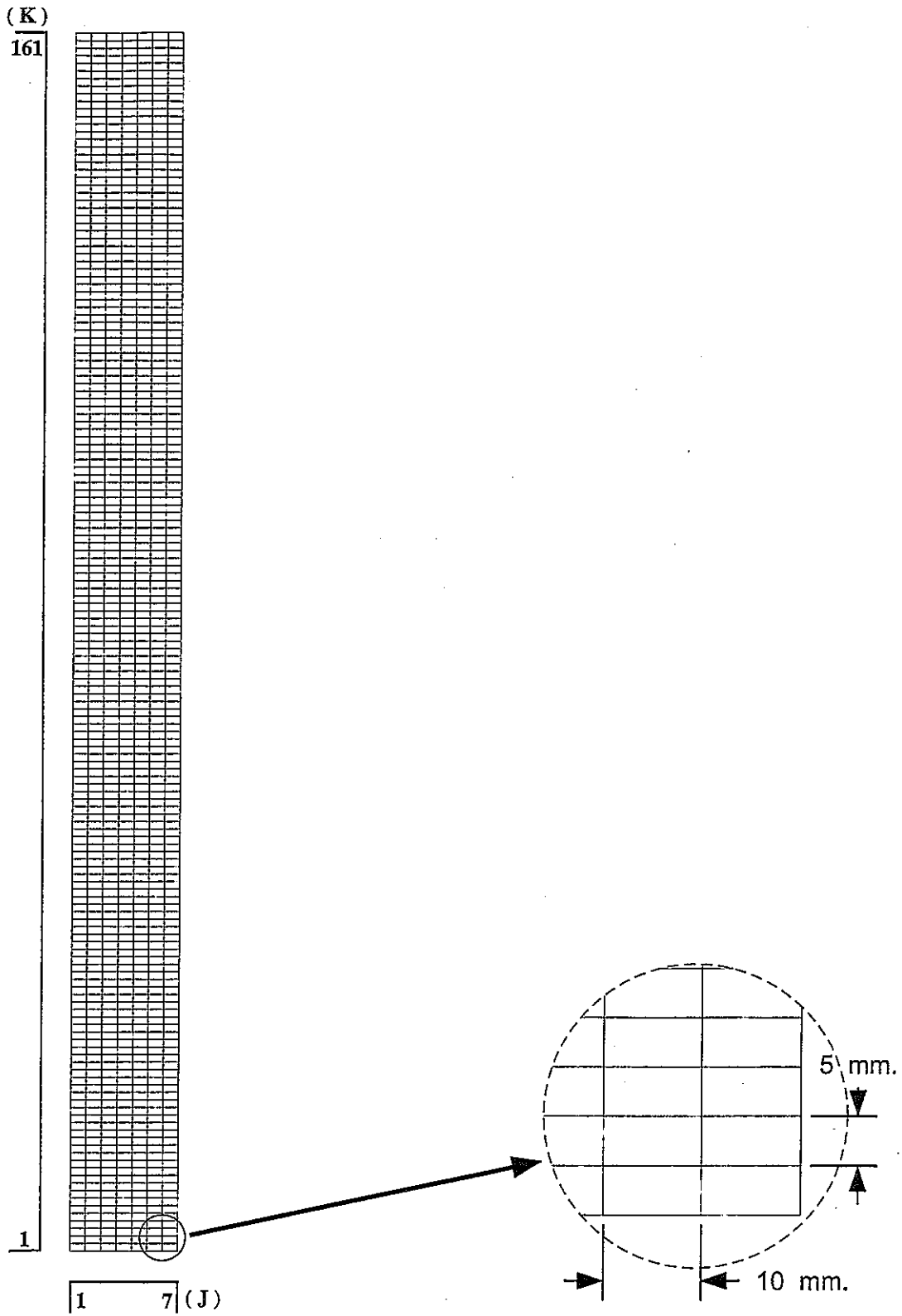


図 2.3 [2/3] メッシュ図 (y-z 面)

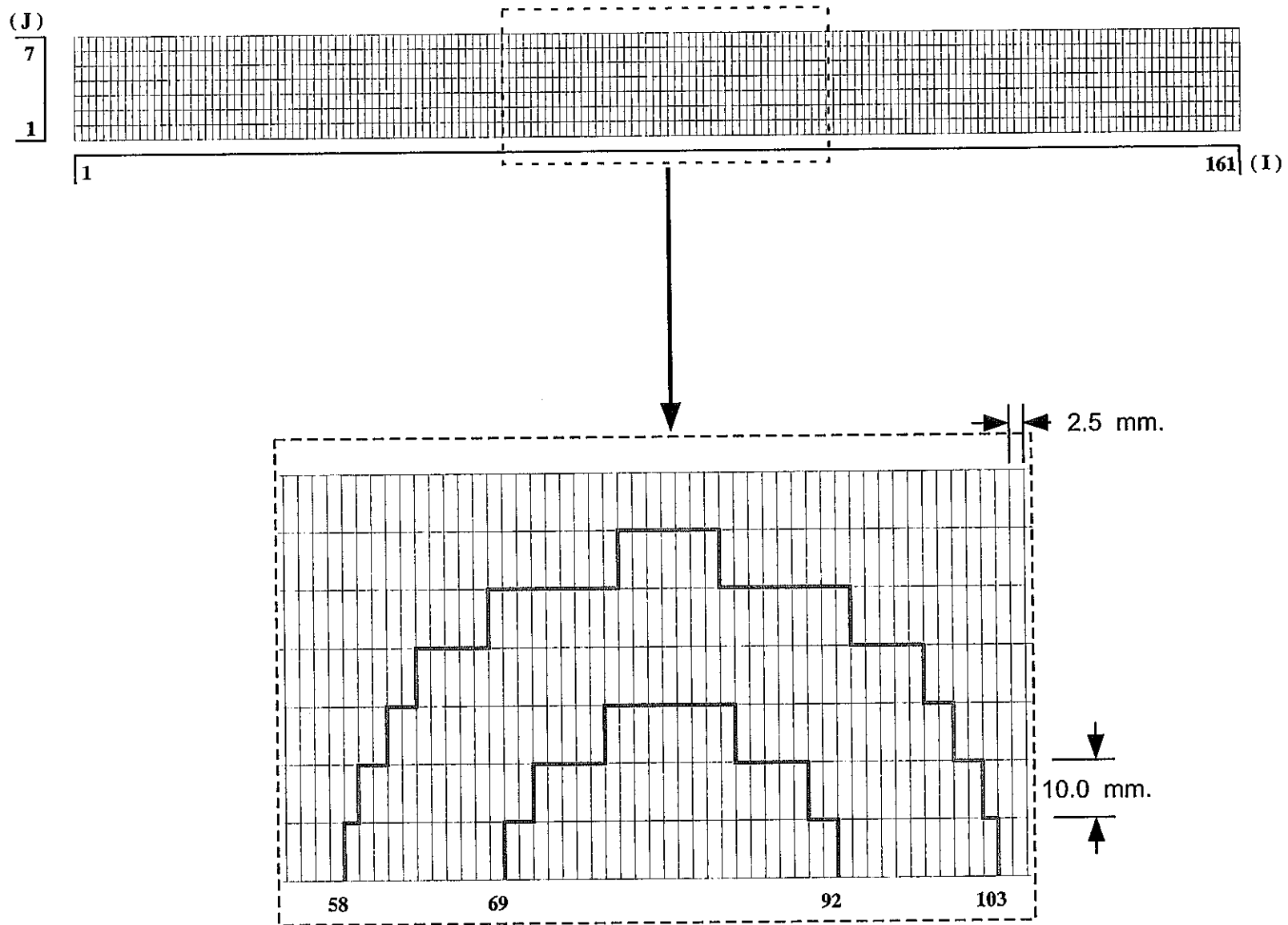


図 2.3 [3/3] メッシュ図 (x-y 面)

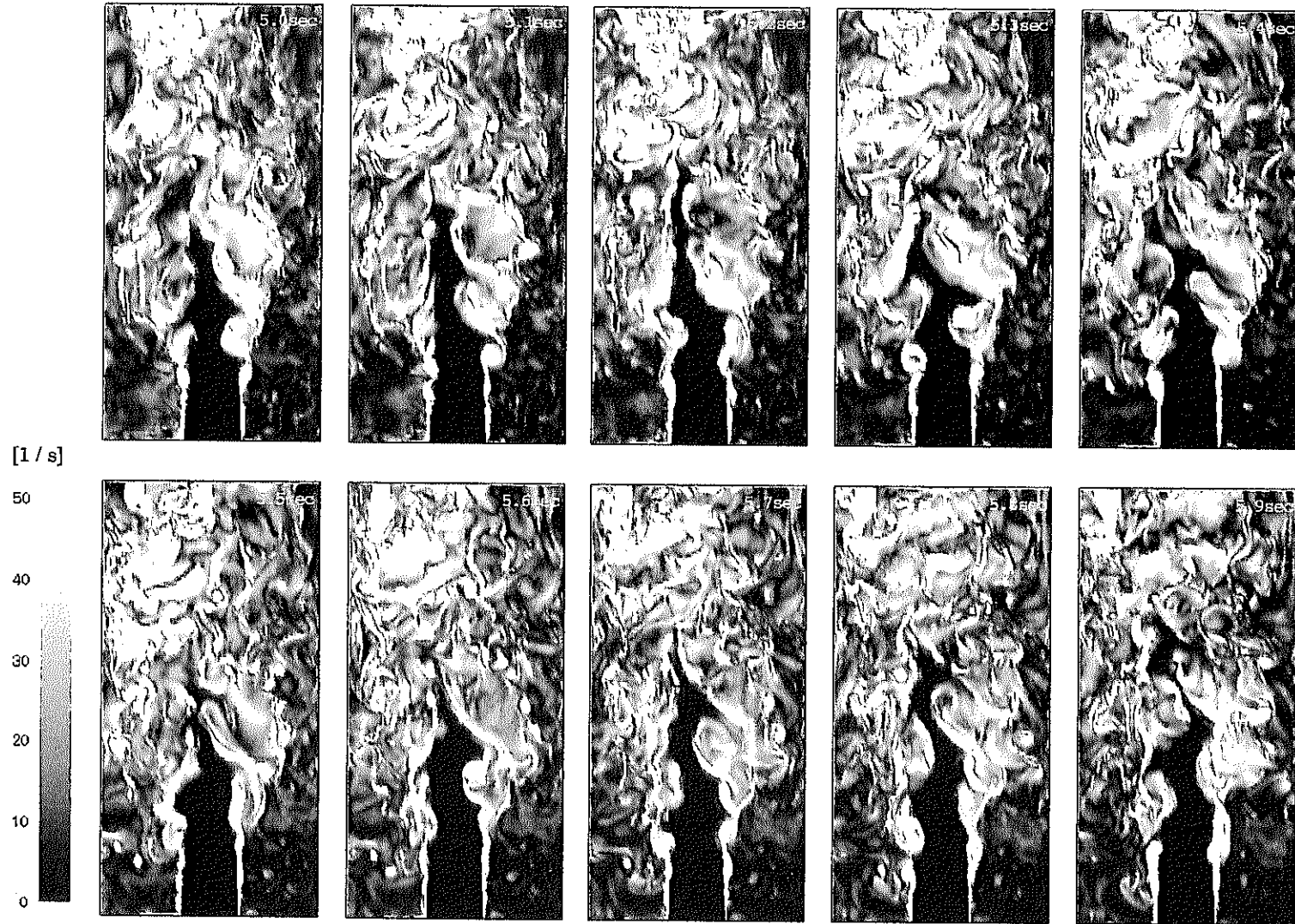


図 2.4 DINUS-3 コードによる瞬時渦度分布の時間推移 (ケース 1: ナトリウム,  $1.0 \text{ m/s}$ )

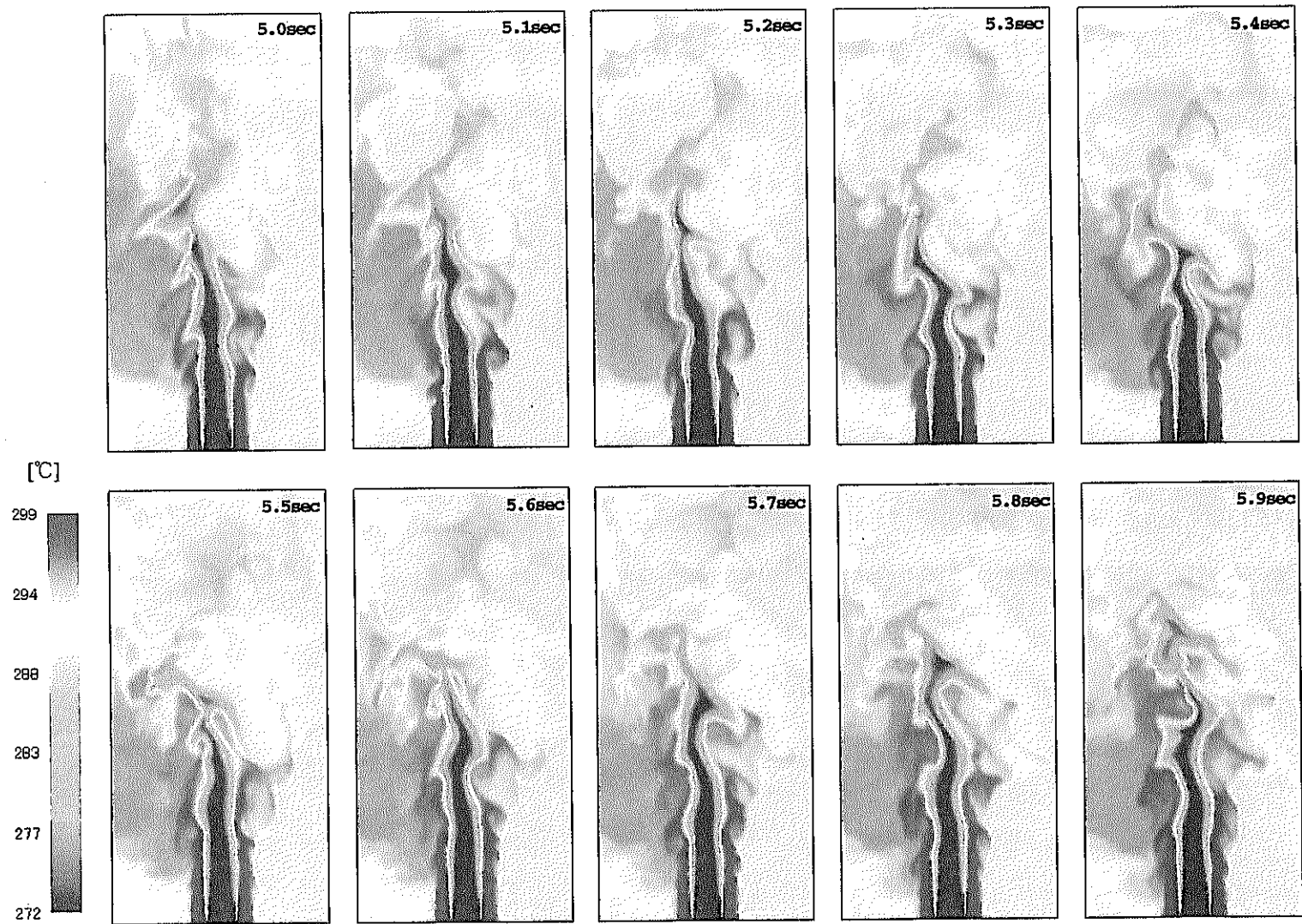


図 2.5 DINUS - 3 コードによる瞬時温度分布の時間推移 (ケース 1: ナトリウム, 1.0 m/s)



図 2.6 DINUS - 3 コードによる瞬時渦度分布の時間推移 (ケース 2: 空気, 3.0 m/s)



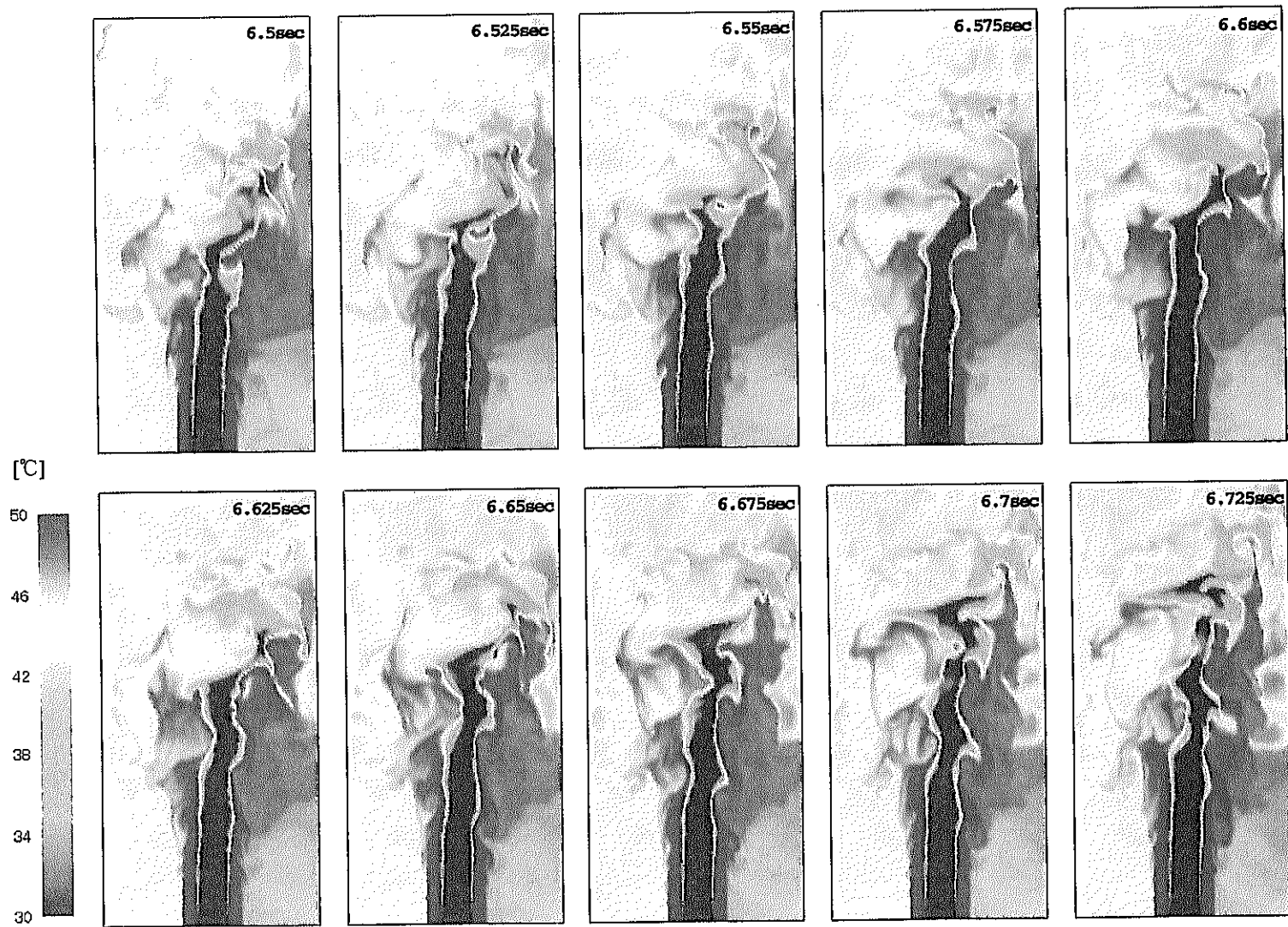


図 2.7 DINUS - 3 コードによる瞬時温度分布の時間推移 (ケース 2 : 空気 , 3.0 m/s)

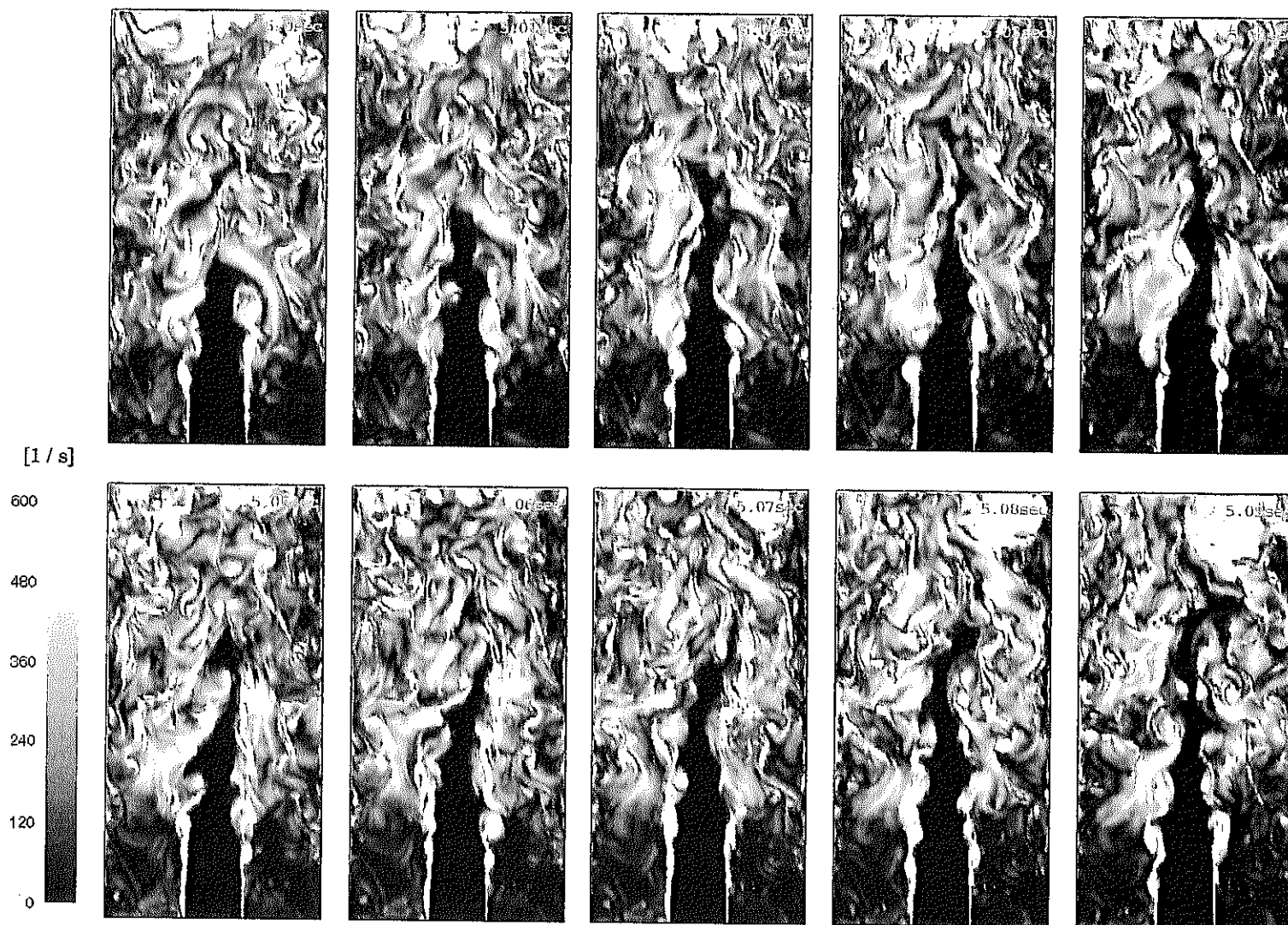


図 2.8 DINUS - 3 コードによる瞬時渦度分布の時間推移 (ケース 3 : 空気 , 12.0 m/s)

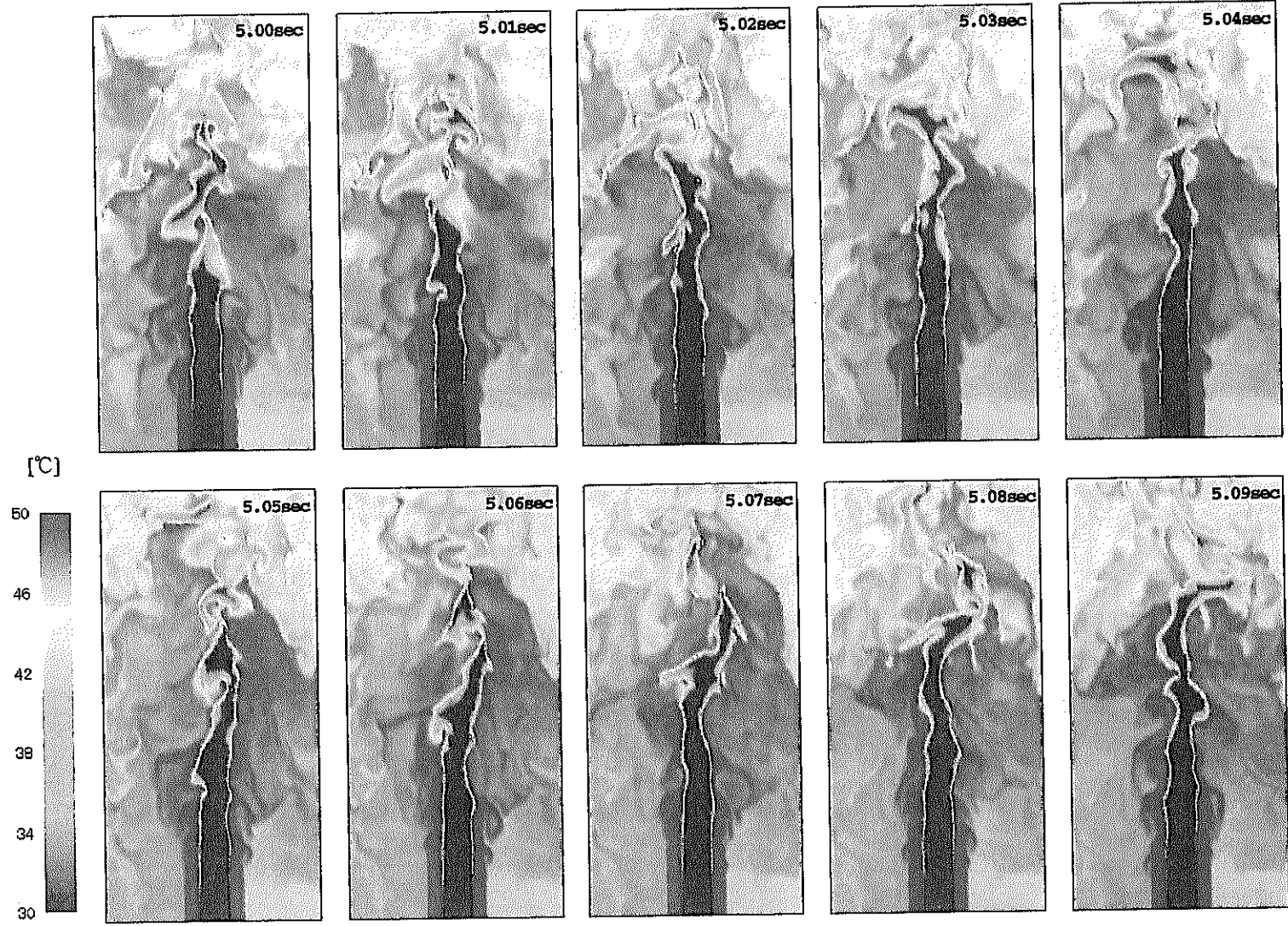


図 2.9 DINUS-3 コードによる瞬時温度分布の時間推移 (ケース 3: 空気, 12.0 m/s)

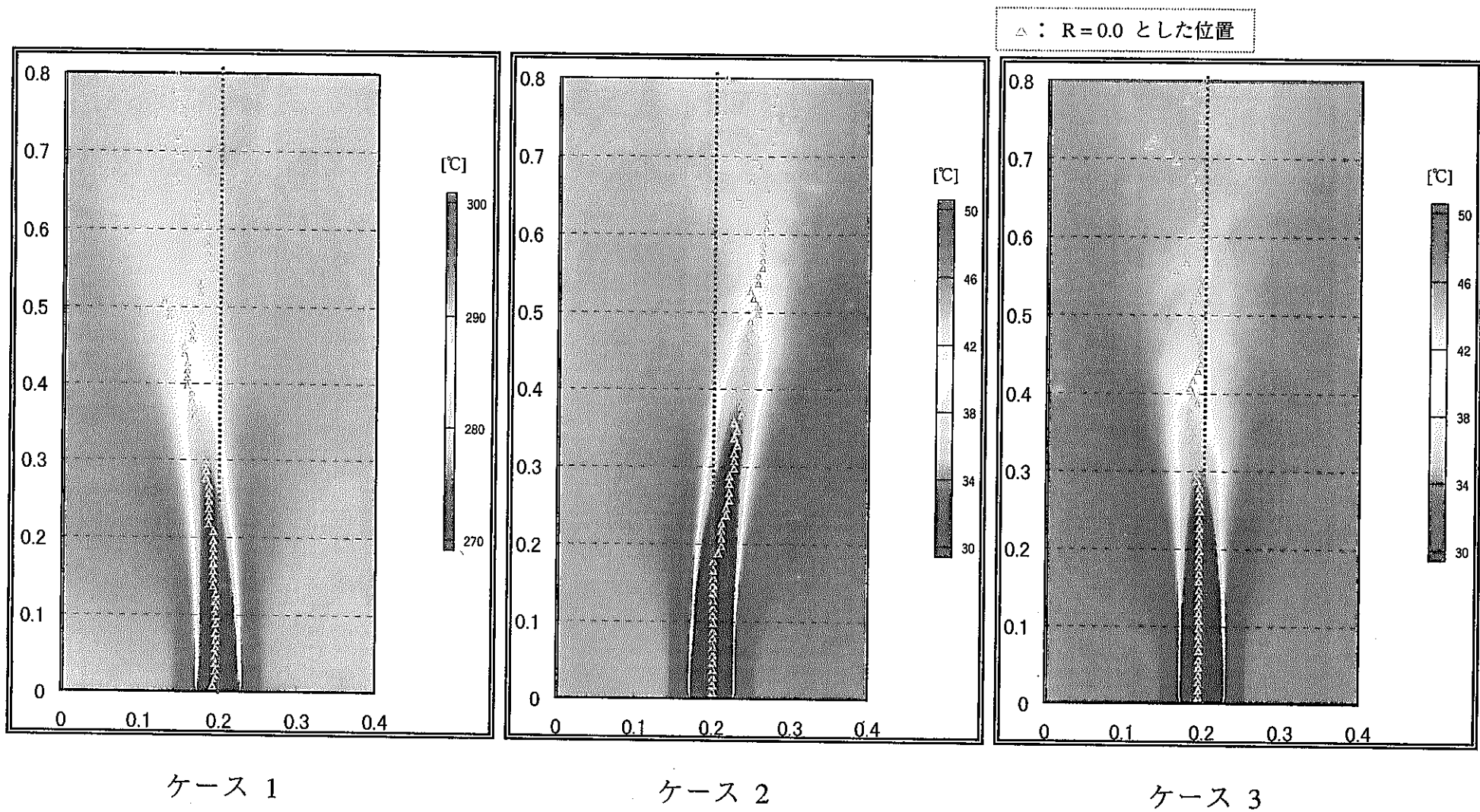


図 3.1 ジェットの中心軸とノズルの幾何中心軸とのずれ

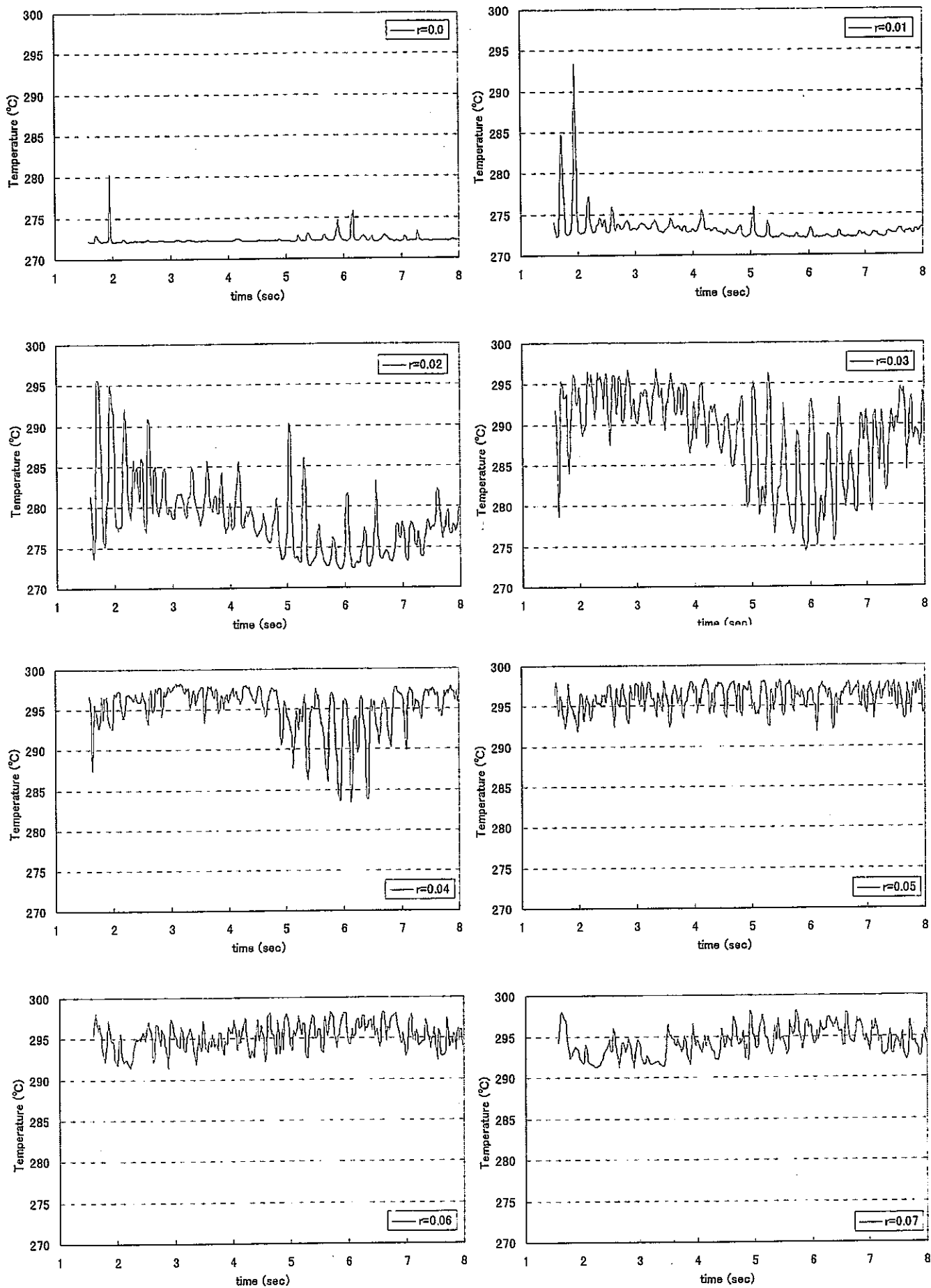
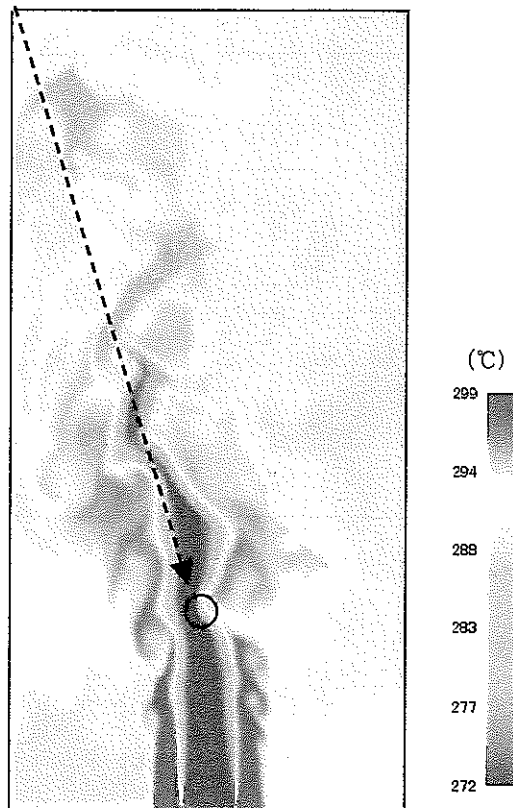
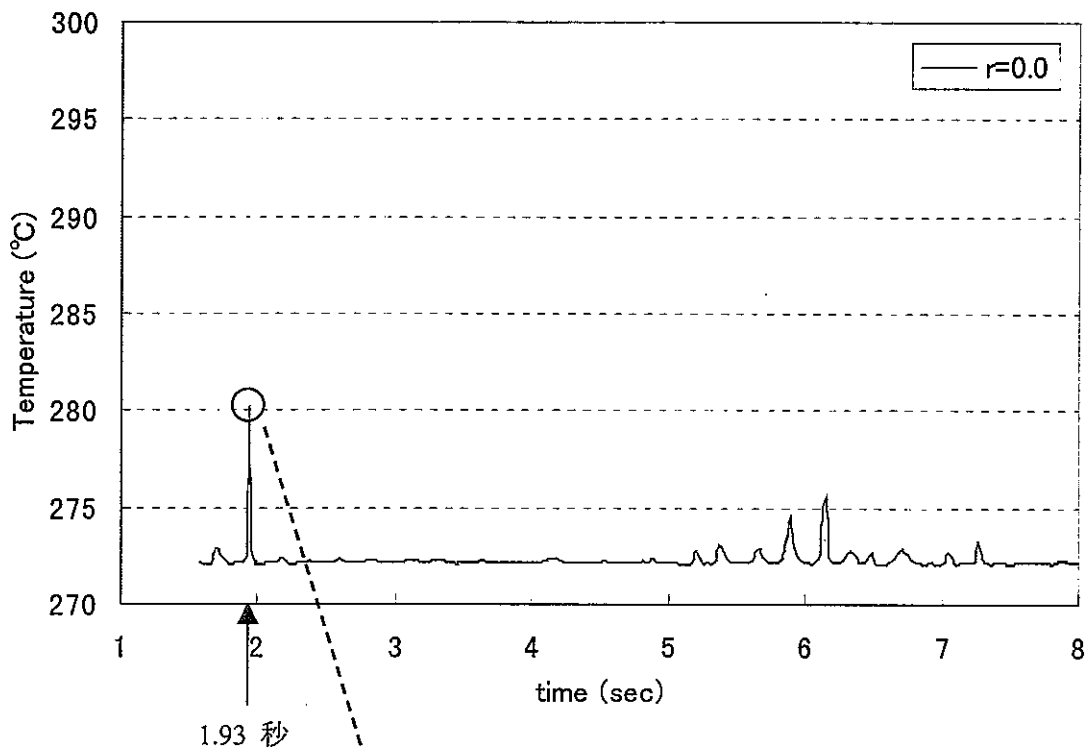


図 3.2 DINUS-3 コードによる温度時系列

(ケース 1: ナトリウム, 1.0 m/s, Z = 0.2 m)



瞬時温度分布 (ケース 1,  $j=1$ , 1.93 秒)

図 3.3 温度ゆらぎスパイクと空間温度分布との対応  
(ケース 1: ナトリウム, 1.0 m/s,  $Z=0.2$  m,  $R=0.0$  m)

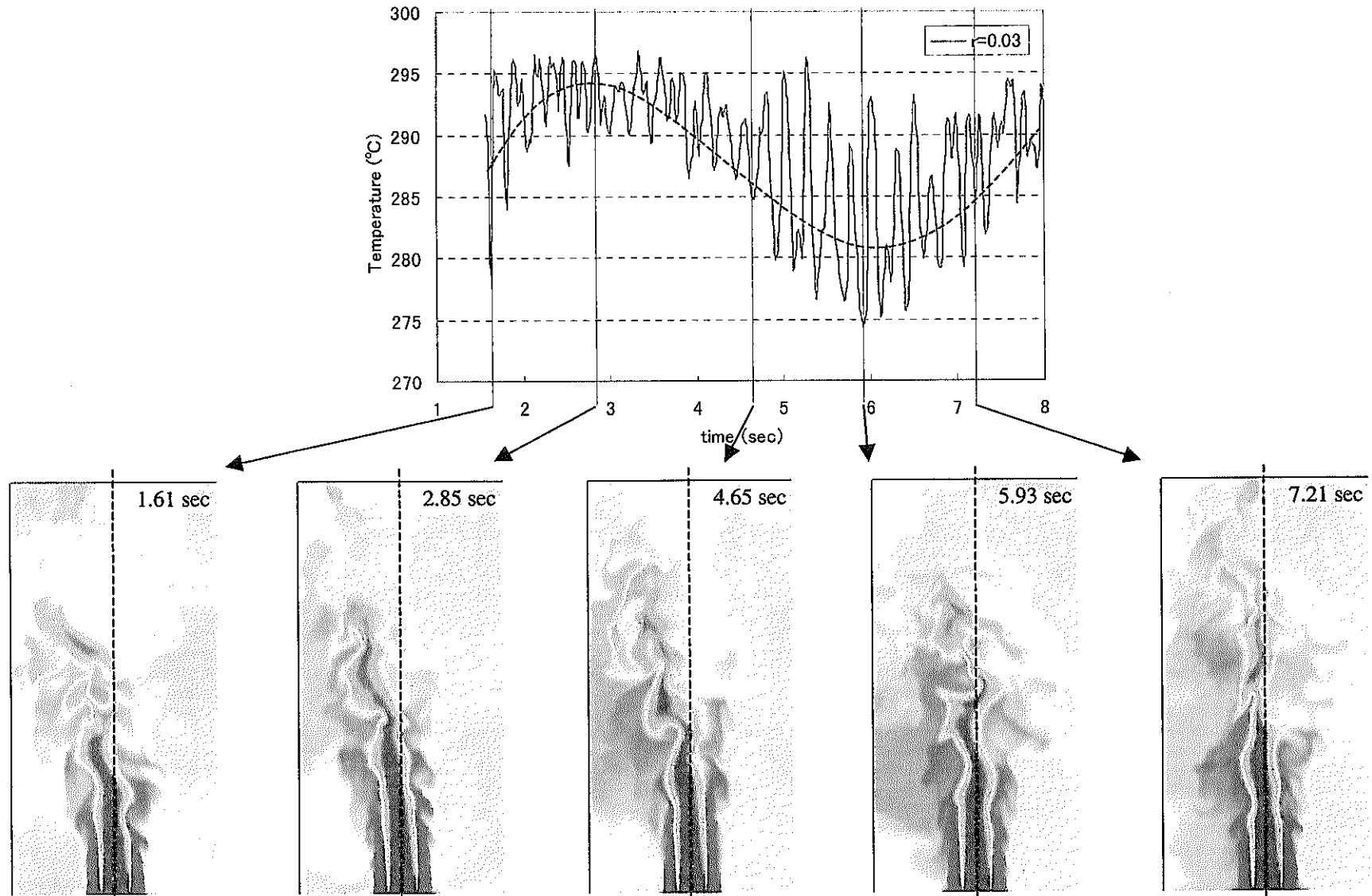


図 3.4 温度時系列に含まれる低周波成分とジェットの変動との対応  
(ケース 1: ナトリウム, 1.0 m/s,  $Z=0.2$  m,  $R=0.03$  m)

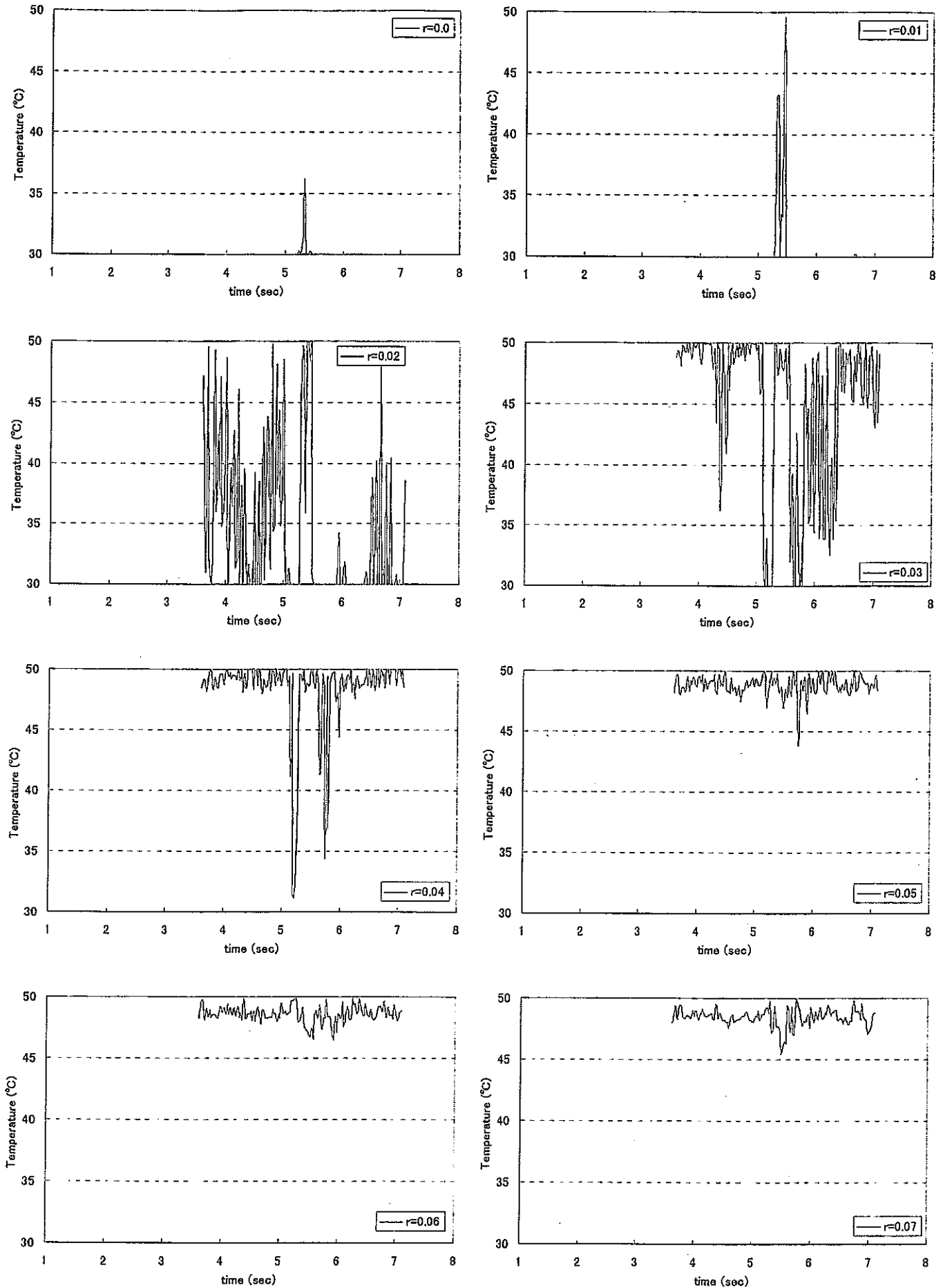
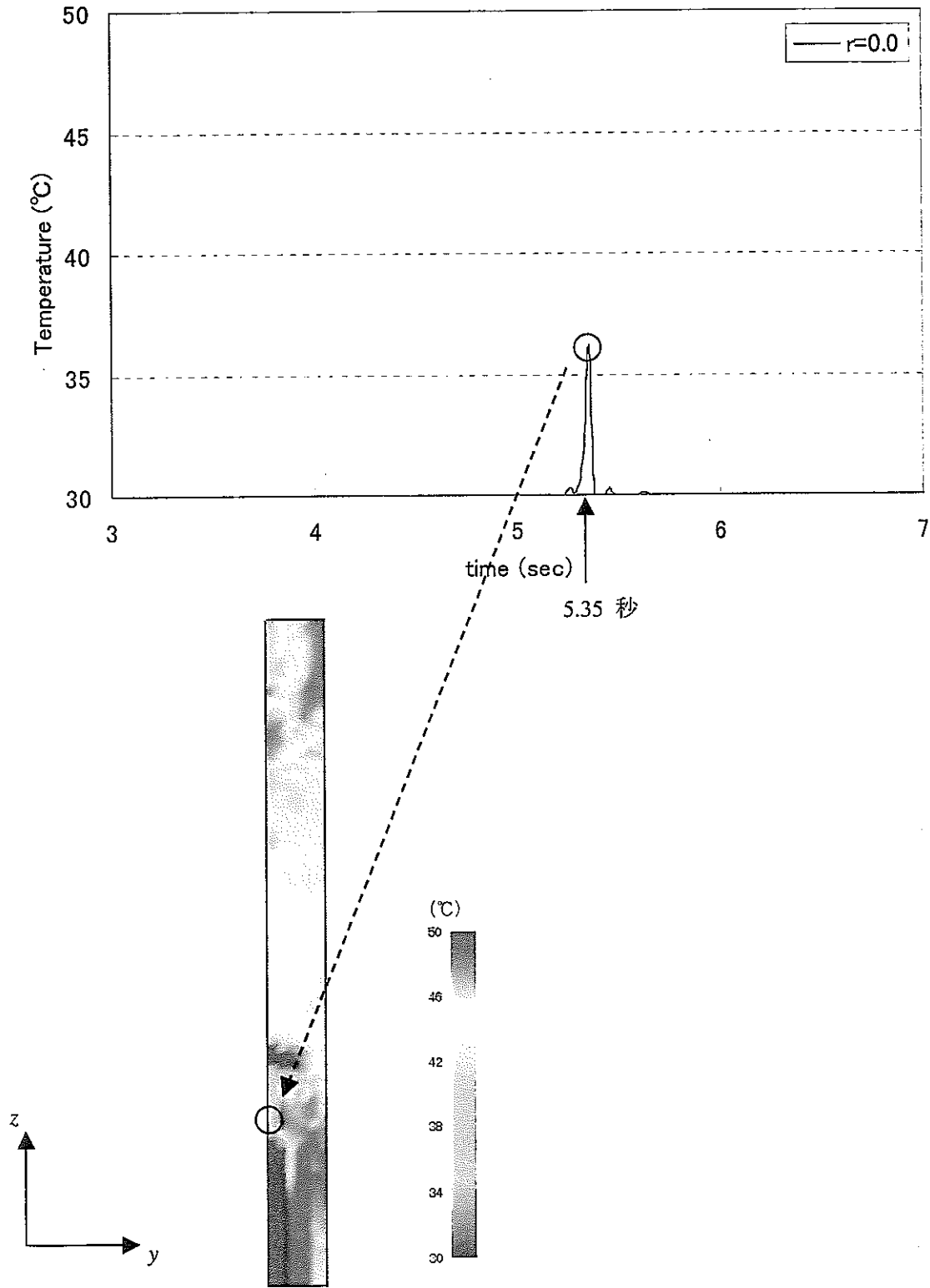


図 3.5 DINUS - 3 コードによる温度時系列

(ケース 2 : 空気, 3.0 m/s, Z = 0.2 m)





瞬時温度分布 (ケース 2 ,  $i=87$  , 5.35 秒)

図 3.6 温度ゆらぎスパイクと空間温度分布との対応  
(ケース 2 : 空気 , 3.0 m/s ,  $Z=0.2$  m ,  $R=0.0$  m)

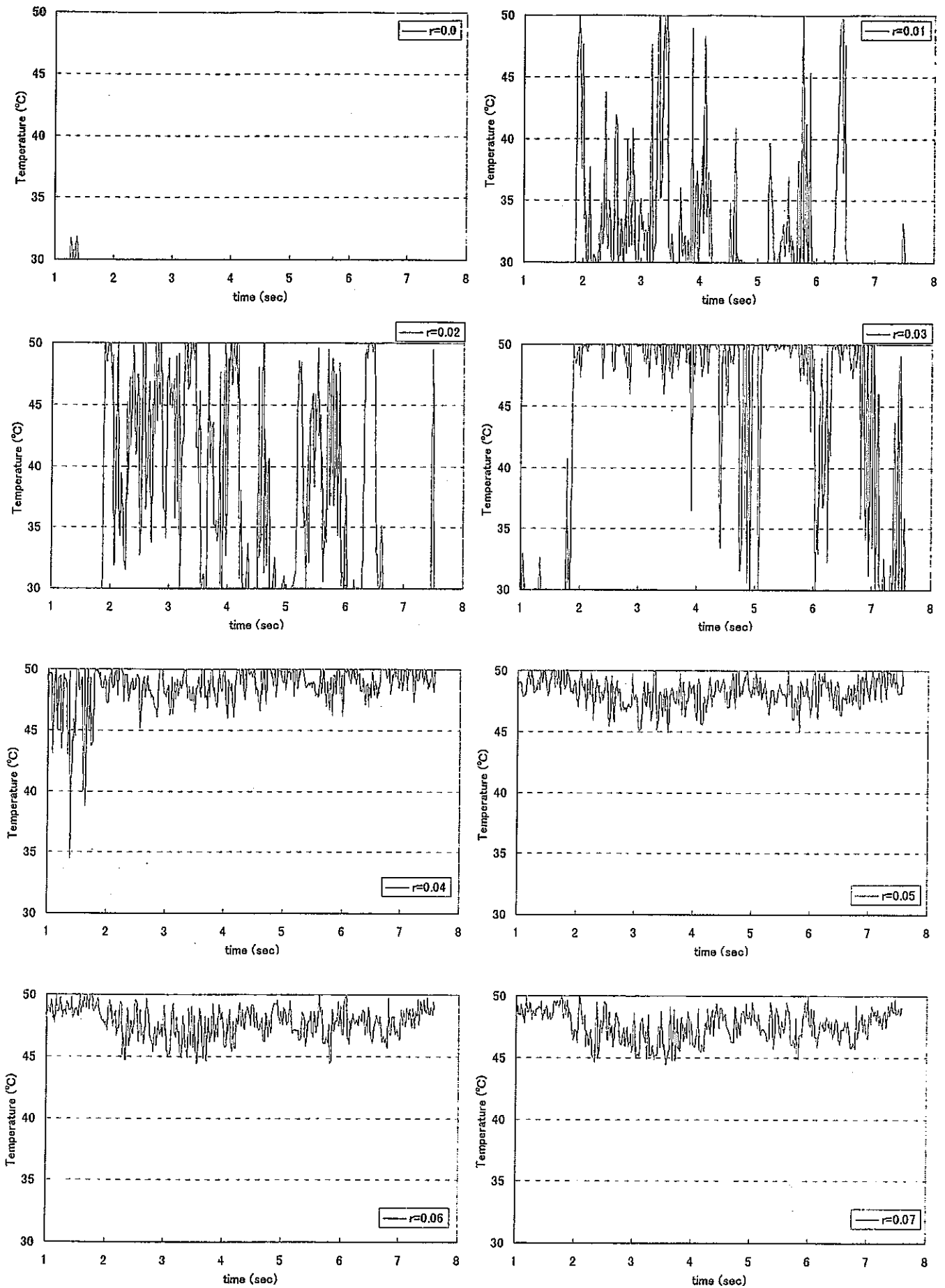
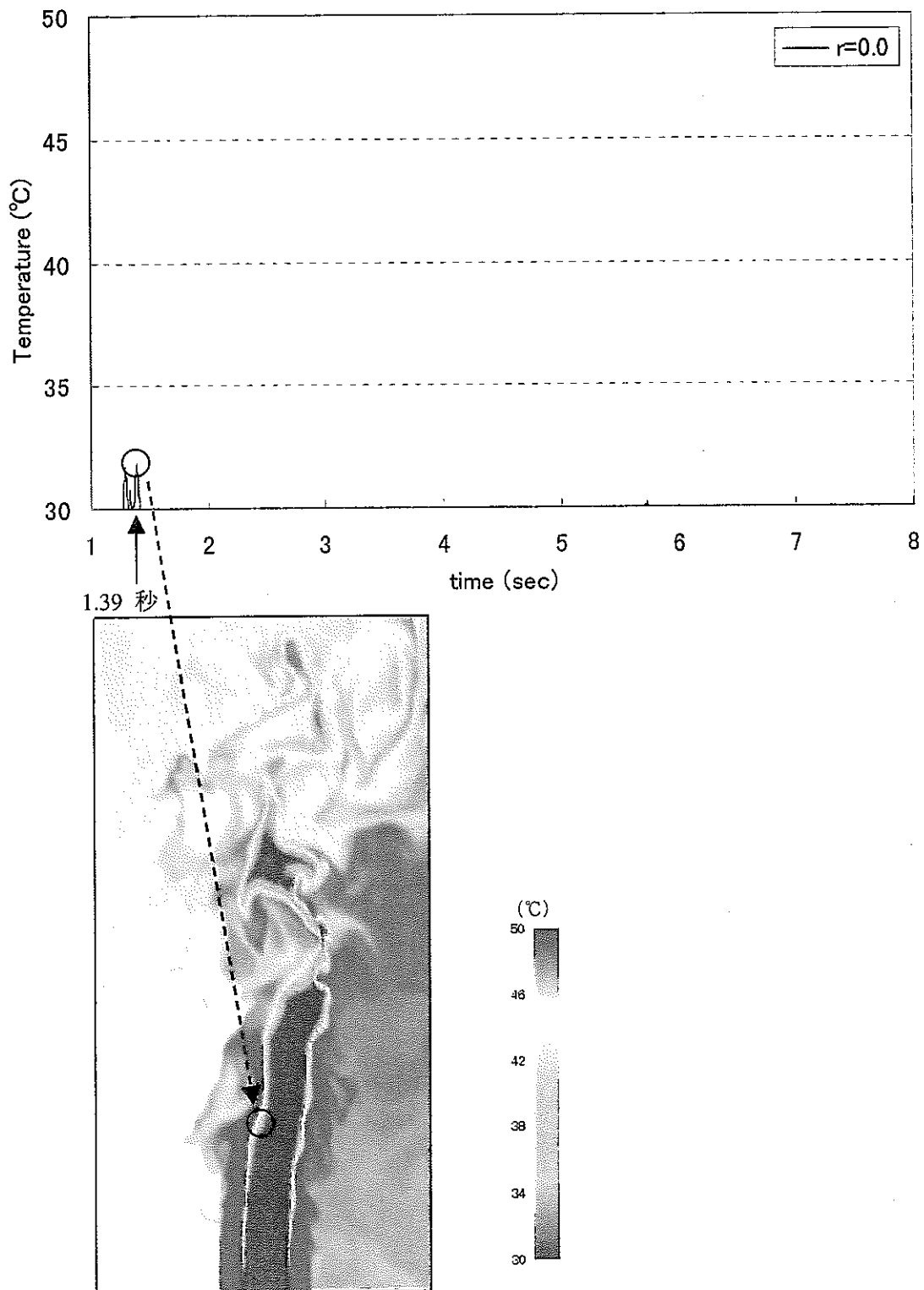


図 3.7 DINUS-3 コードによる温度時系列

(ケース 3 : 空気, 12.0 m/s, Z = 0.2 m)



瞬時温度分布 (ケース 3 ,  $j=1$  , 1.39 秒)

図 3.8 温度ゆらぎスパイク状と空間温度分布との対応  
(ケース 3 : 空気 , 12.0 m/s ,  $Z=0.2$  m ,  $R=0.0$  m)

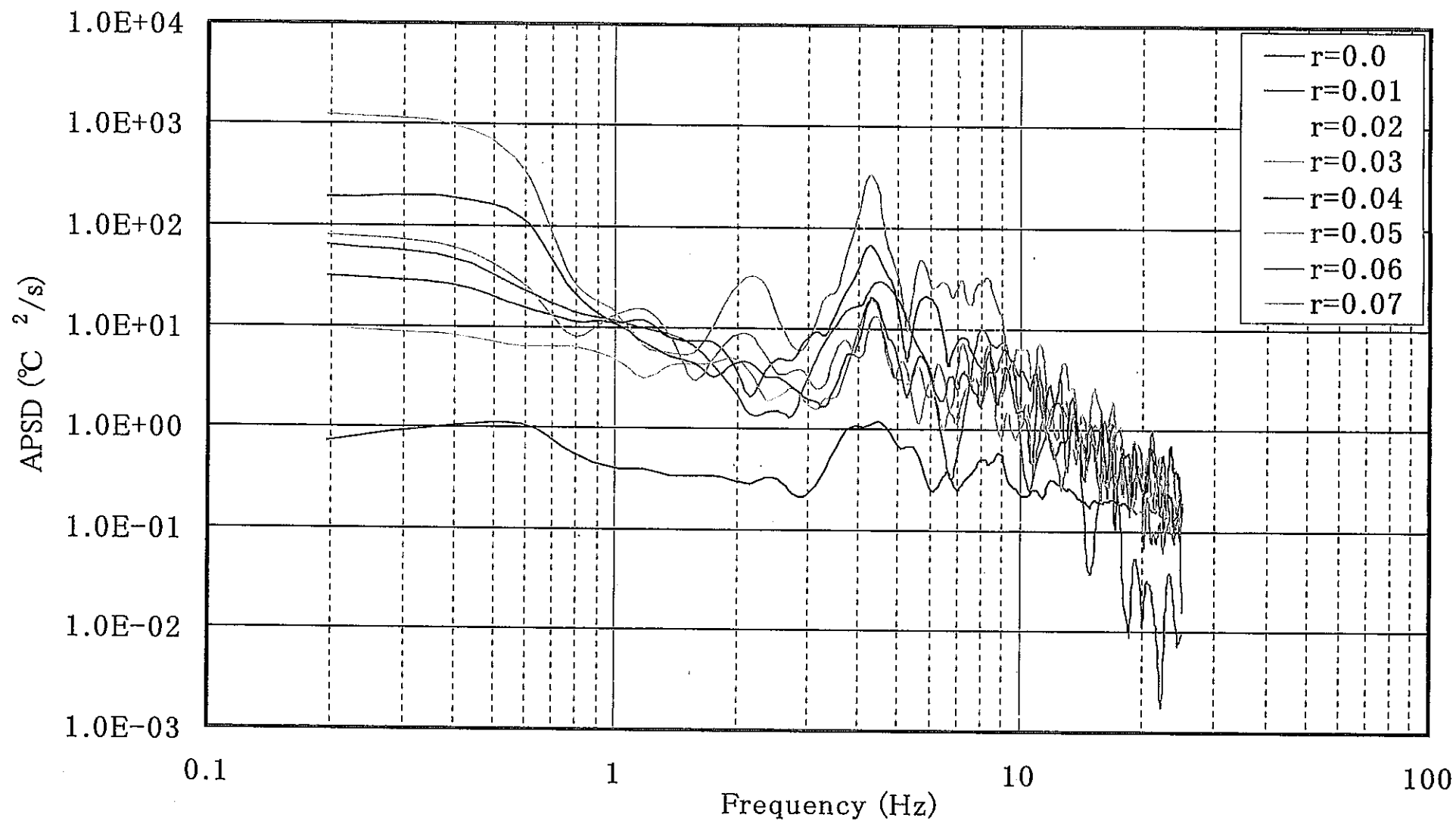


図 3.9 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度分布の比較 (ケース 1: ナトリウム, 1 m/s)

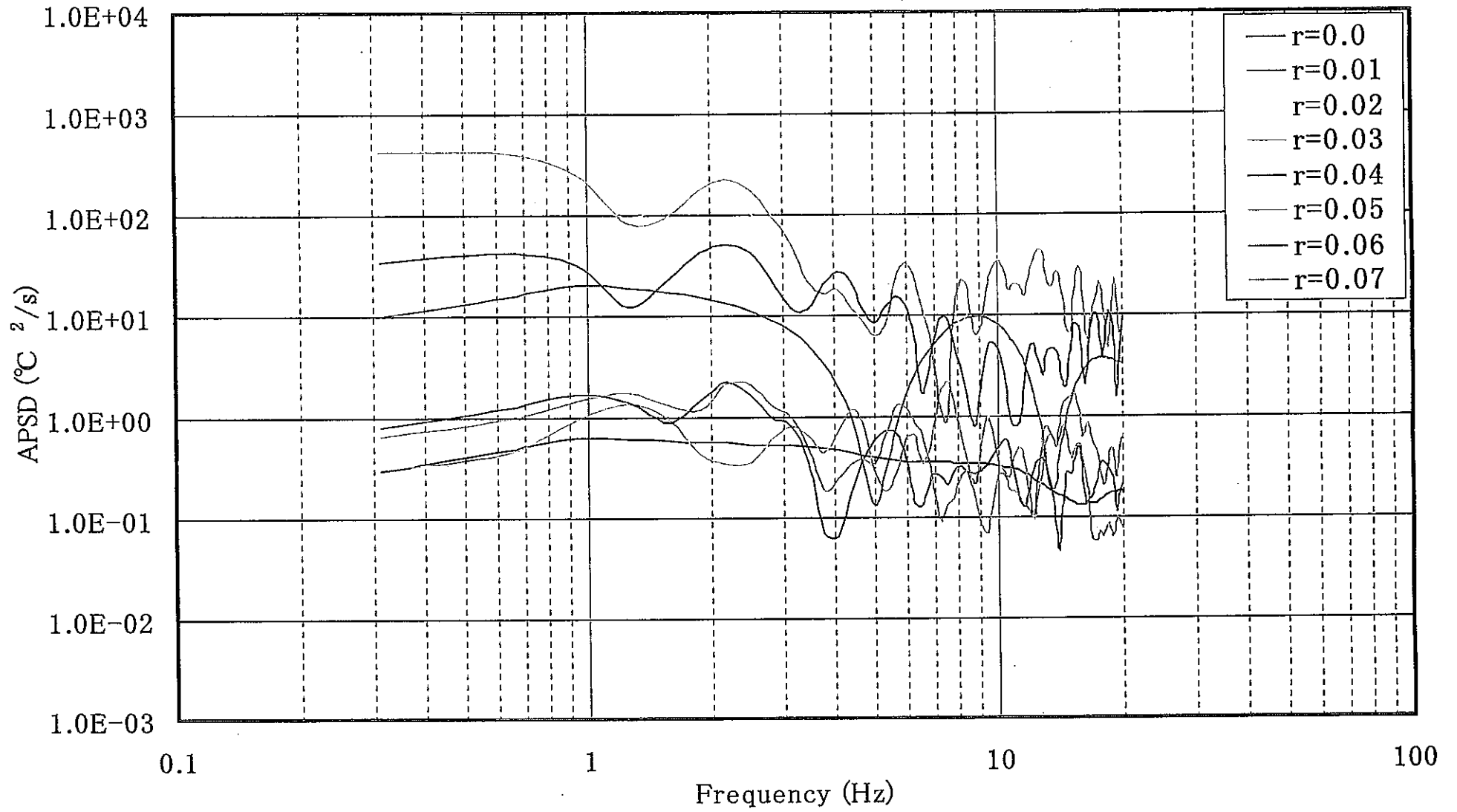


図 3.10 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度分布の比較 (ケース 2: 空気, 3 m/s)

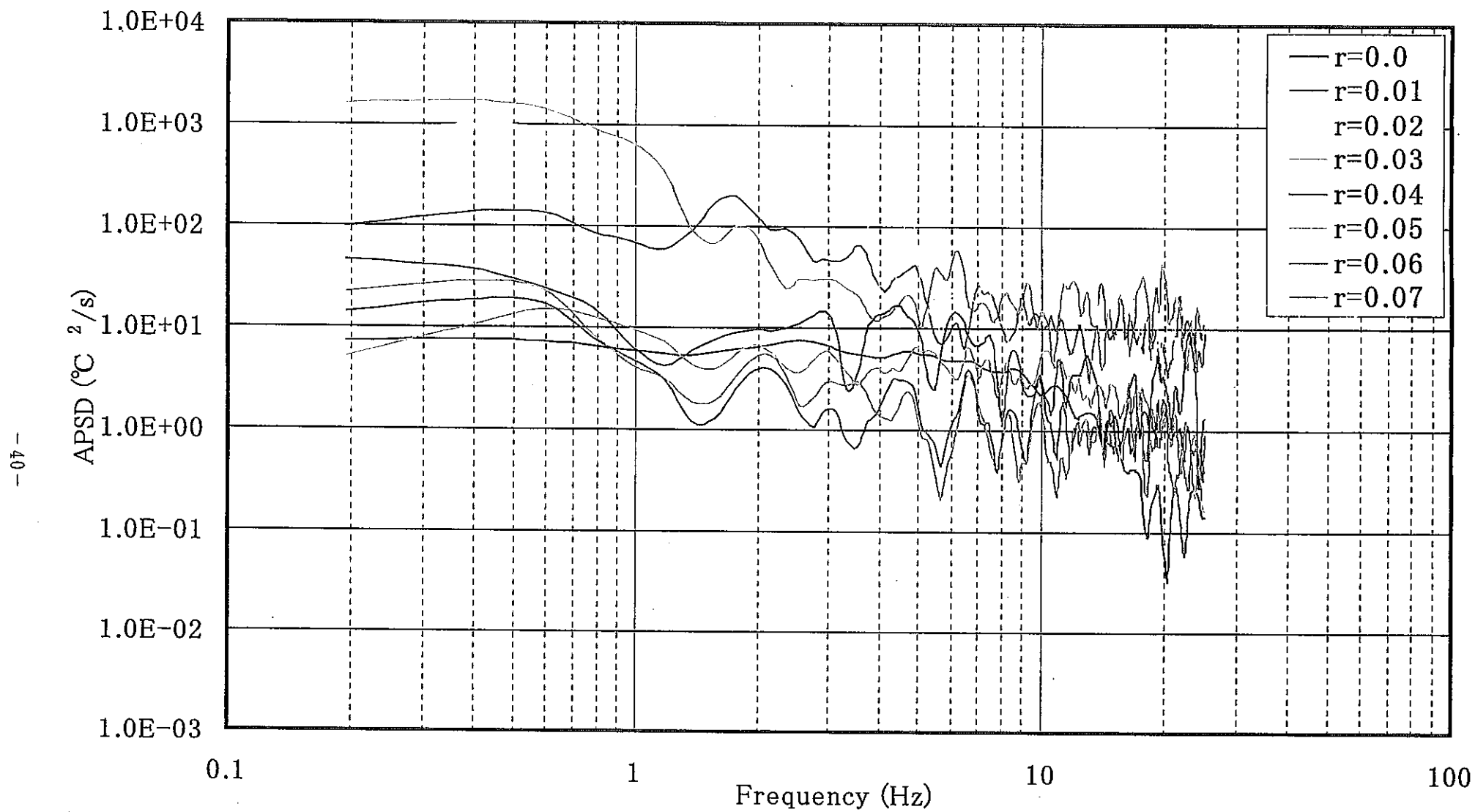


図 3.11 温度ゆらぎ挙動の自己パワースペクトル密度分布の比較 (ケース 3: 空気, 12 m/s)

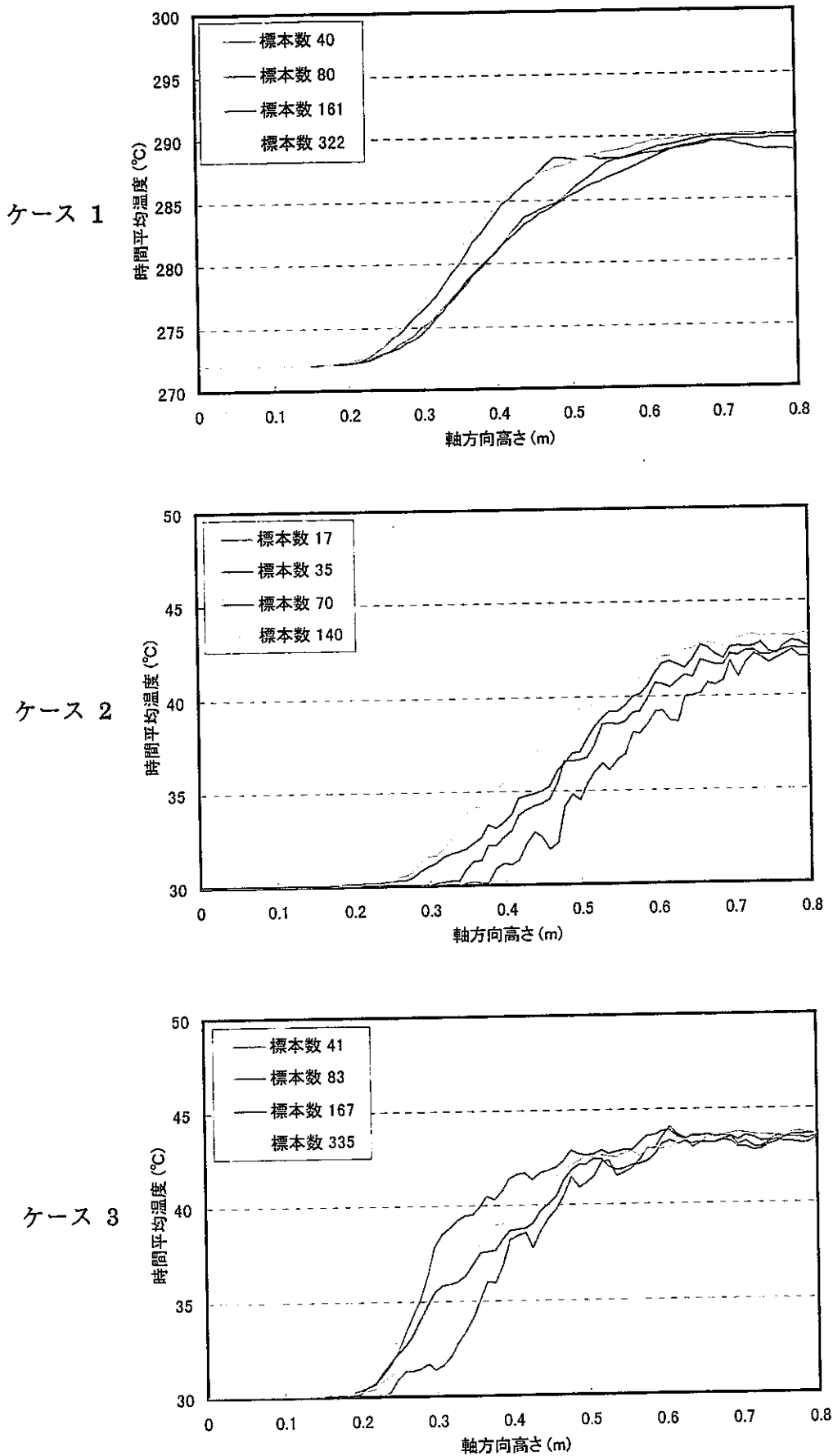


図 3.12 時間平均温度の軸方向分布と標本数との関係 (R = 0.0 m)

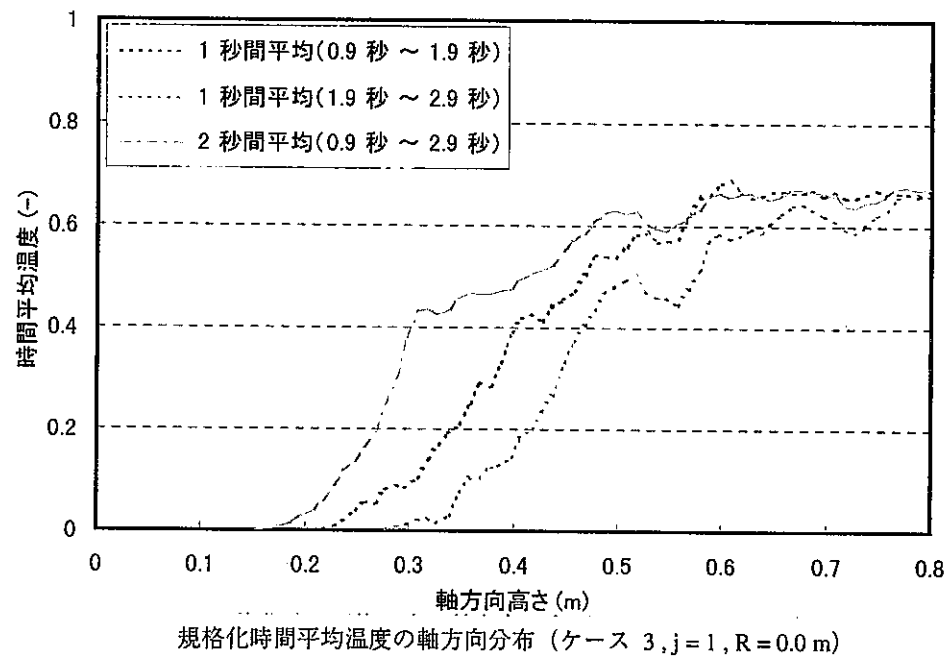
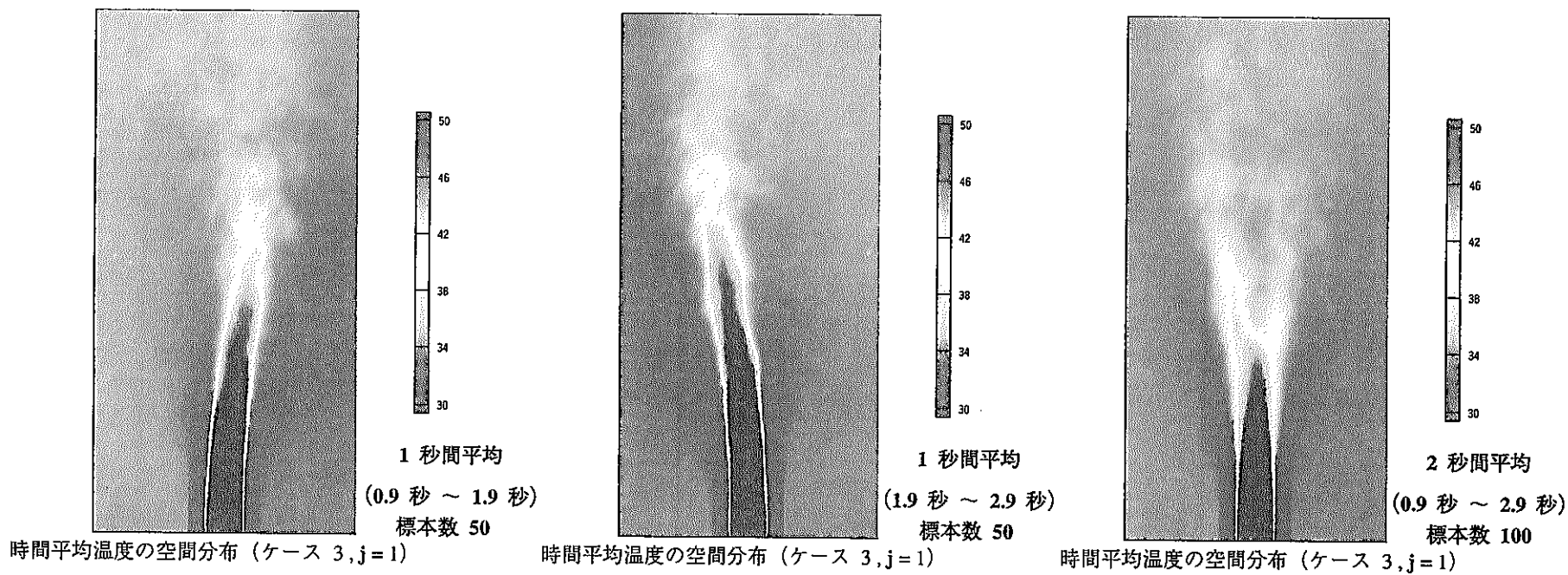


図 3.13 ポテンシャルコア長さ と 標本数 と の 関 係



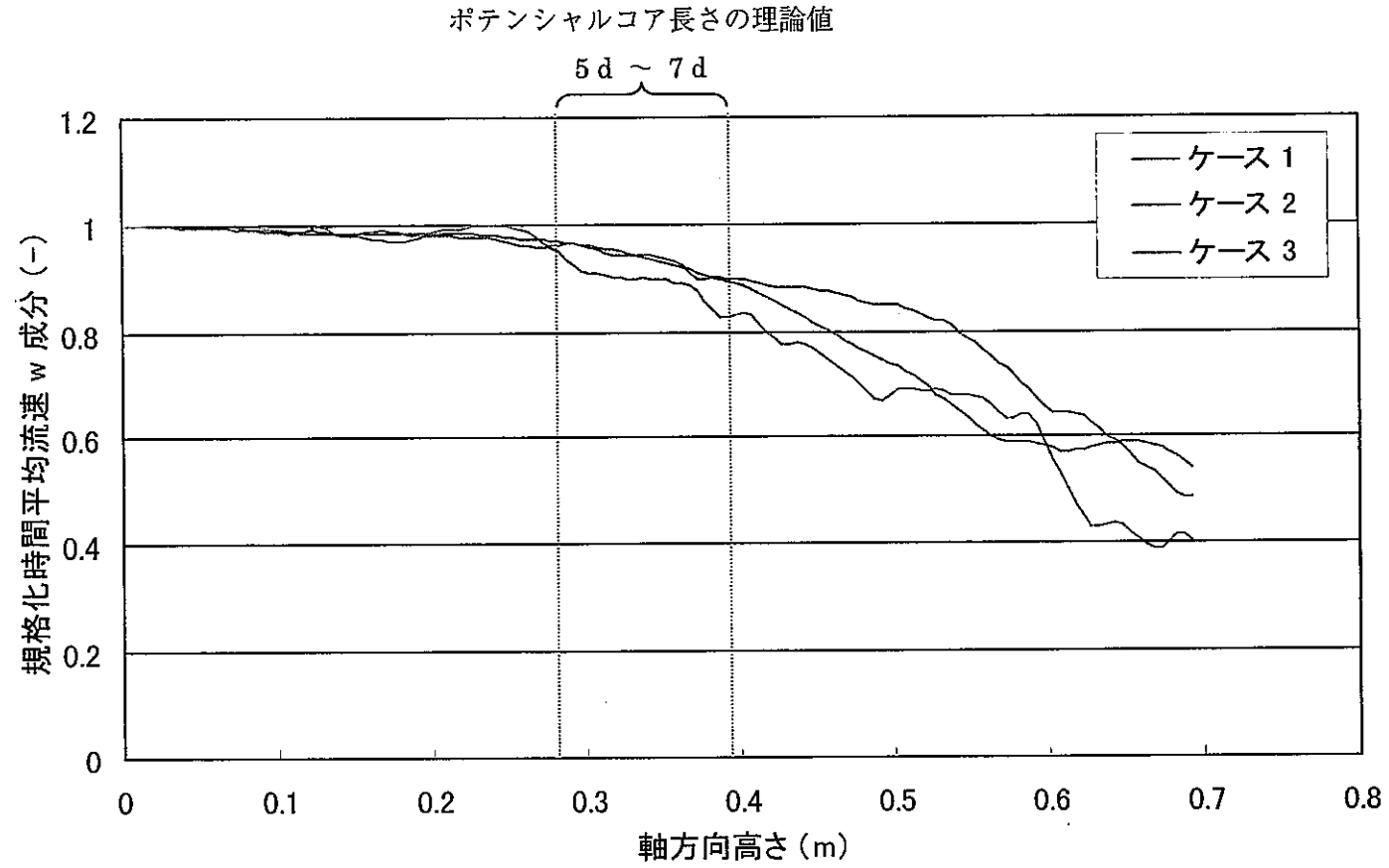


図 3.14 規格化時間平均流速  $w$  成分の軸方向分布の比較 ( $R = 0.0 \text{ m}$ )

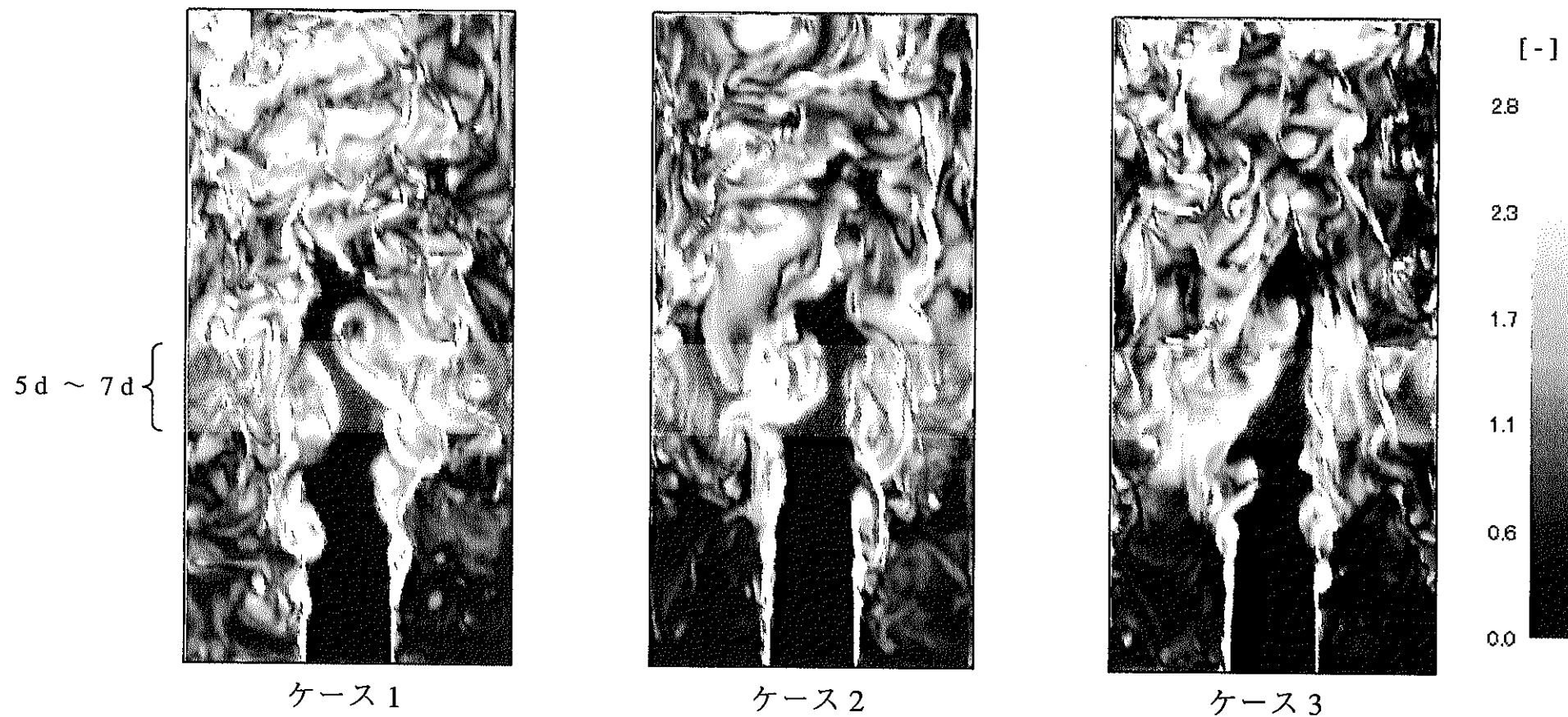


図 3.15 規格化瞬時渦度の空間分布の比較 ( $j=1$ )

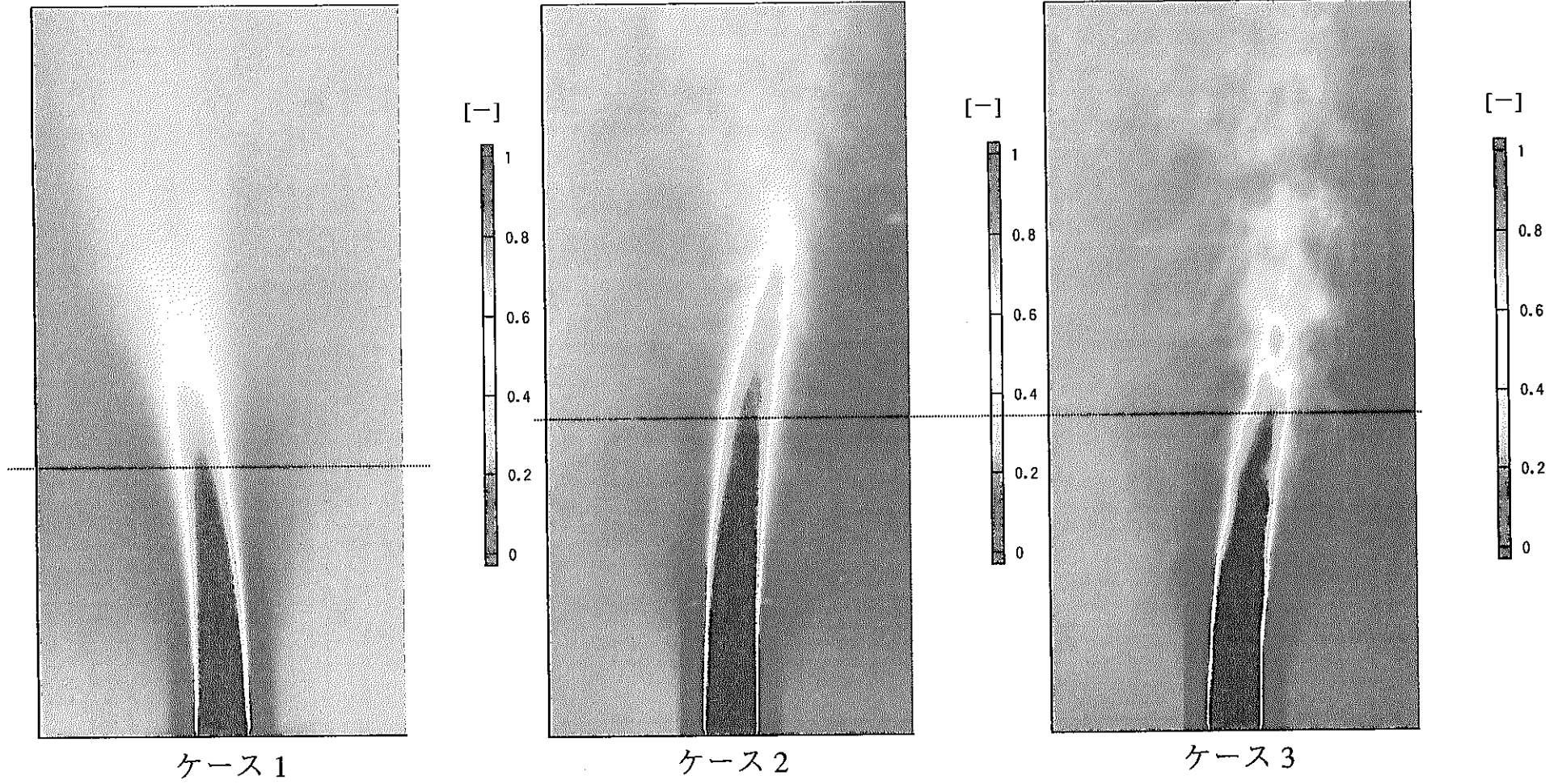


図 3.16 規格化時間平均温度の空間分布の比較 ( $j=1$ )

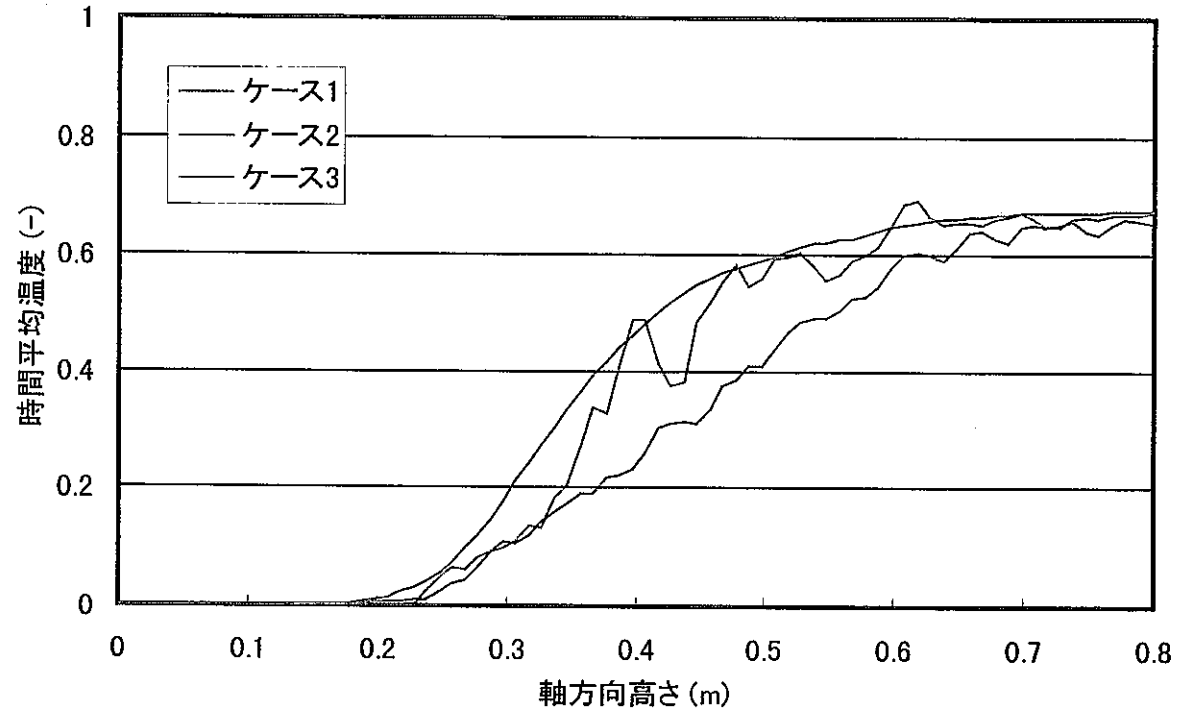


図 3.17 規格化時間平均温度の軸方向分布の比較 ( $R = 0.0 \text{ m}$ )

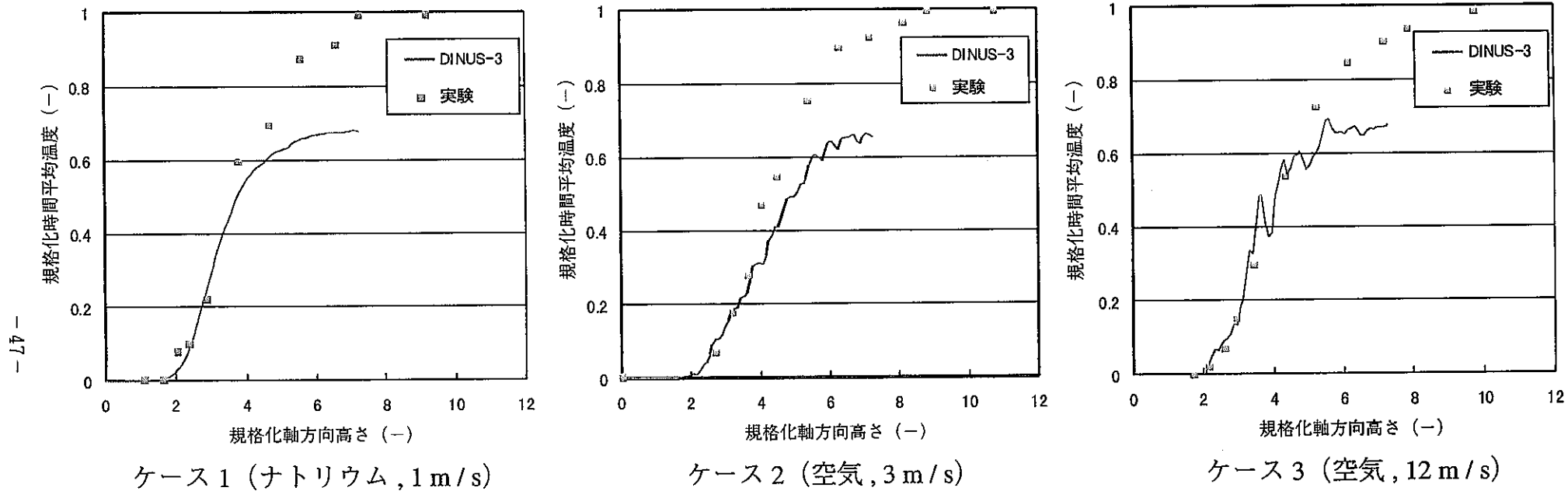


図 3.18 規格化時間平均温度の軸方向分布の実験結果との比較 ( $R = 0.0 \text{ m}$ )

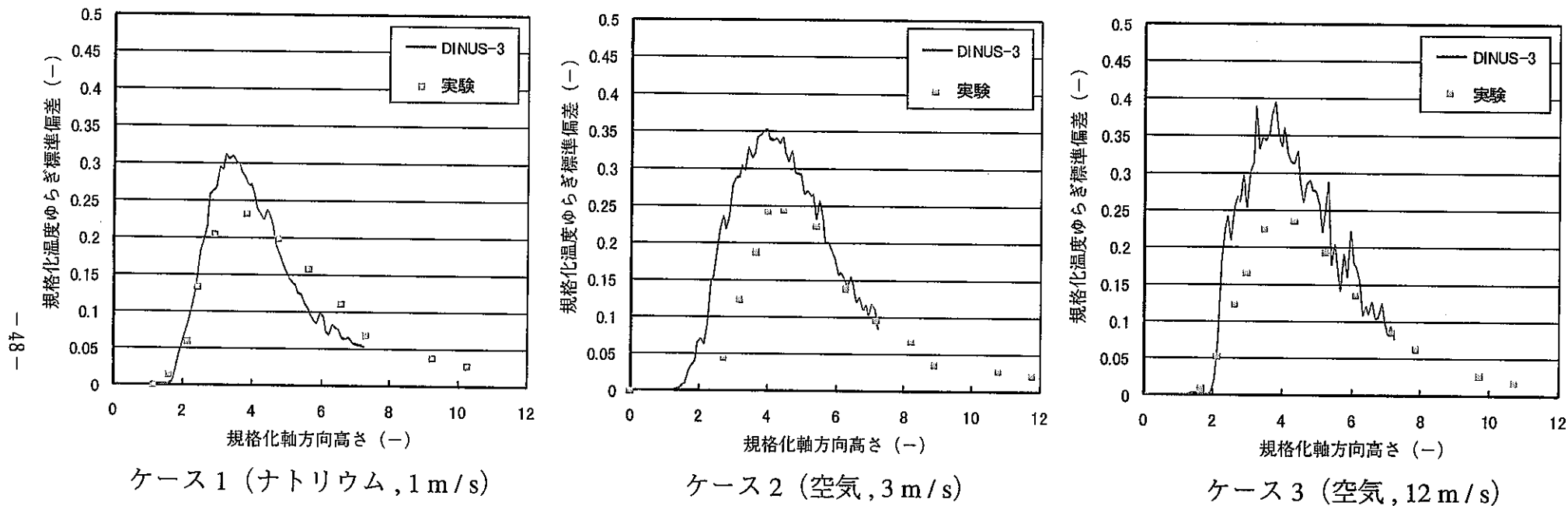


図 3.19 規格化温度ゆらぎ標準偏差の軸方向分布の実験結果との比較 ( $R = 0.0 \text{ m}$ )