

温度成層流における乱流混合の直接シミュレーション

～非等温場における乱流混合～

1997年7月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997



温度成層流における乱流混合の直接シミュレーション ～非等温場における乱流混合～

土井 穎浩*、村松 寿晴*

要旨

高速炉のスクレム過渡時に発生する温度成層化現象は、構造材に熱応力を与えるため、温度成層化挙動の特徴を評価することは機器の構造健全性および安全性を確認する観点から重要である。この温度成層流は、上部の密度が下部よりも小さい安定成層流であり、上部と下部の流速が異なるために流れは境界面付近で強い剪断を持ち、二次元的な大規模渦構造による乱れが流体の混合に関与することが実験的、解析的に示されている。

本研究は成層流の乱流特性を表現する数値解析モデルの検討を目的として、流体に水を用いた矩形流路内成層乱流実験について密度差のある非等温場を差分法による直接シミュレーションコードによって解析し、乱流量の評価を行ったものである。

流路の上層と下層の温度差をパラメータとし、 Ri 数を変化させて2次元解析を実施した。非等温場においても等温場の場合と同様に、低速側流体と高速側流体の境界面で乱れを生じ、下流側に向かうに従い渦の合体と成長によって剪断層が発達する様子が見られた。主流方向の下流側で時間平均した流速分布、速度変動分布、レイノルズ応力分布、温度分布および速度変動分布を求め測定結果と比較した。その結果、主流方向流速は、 Ri 数による差異が小さく、この傾向は測定結果と解析結果で一致した。しかしながら、高さ方向流速は、測定結果では Ri 数が 0 の場合にのみ見られるのに対し、解析結果では Ri 数が大きくなるに従い大きくなる傾向を示した。解析による速度変動およびレイノルズ応力は、 Ri 数が大きくなるに従い小さくなり、測定による傾向と一致した。温度分布は、解析結果では温度の軸方向勾配が 3 段階に変化しているが、測定結果ではそのような明確な勾配の変化は見られない。また、温度変動分布に関しても解析結果では二つの極大値が見られるが、測定結果では明確な温度変動の極大値は見られない。また、渦の合体に関して、本結果は測定で得られた渦の合体が起きる Ri 数の範囲を模擬していること、渦の合体が起きる場合には渦の合体が起きない場合に比べて大きなレイノルズ応力を生じることがわかった。

* 大洗工学センター 基盤技術開発部 热流体技術開発室

Direct Numerical Analysis of Turbulent Mixing in a Thermally Stratified Flows
-Turbulent Mixing in thermally stratified flows-

Yoshihiro Doi*, Toshiharu Muramatsu*

Abstract

Thermal stratification phenomena are observed in an upper plenum of liquid metal fast breeder reactors (LMFBRs) under reactor scram conditions, which give rise to thermal stress on in-vessel structural components. Therefore it is important to evaluate characteristics of the phenomena in the design of components in an LMFBR plenum. The phenomena are a stable stratified flow and shear layers are formed due to the velocity difference between upper and lower flows. Previous many experiments and numerical simulations confirmed the exist of the layer dominated by large, spanwise coherent vortex structures and the structures had important effect on mixing.

In this study, to evaluate numerical models and constants used in the model for the thermal stratification phenomena, numerical analyses were carried out for a shear flow water test in rectangular duct. In the analyses, a direct numerical simulation code was used. The numerical results could indicate the large spanwise coherent structures with the growing and the pairing of vortexes. The analyses for different Richardson (Ri) number conditions were carried out and then calculated distributions of time-averaged velocities, velocity fluctuations, Reynolds stresses, time-averaged temperatures and temperature fluctuations were compared with the measured results. Through the comparisons, the calculated time-averaged velocities and velocity fluctuations in the main flow direction were agreed well with measured value and the velocity fluctuations decreased with increasing of the Ri number. Though calculated time-averaged temperature distributions and temperature fluctuations had three different temperature gradient regions, those were not found in the measured value. The region of Ri numbers observed the vortexes pairing is in good agreement with the calculated results and the vortexes pairing would cause large Reynolds stresses.

* Thermalhydraulic Research Section, Advanced Technology Division, OEC, PNC

目 次

第1章 緒 言	.....	1
第2章 解析条件	.....	2
2.1 解析対象	.....	2
2.2 解析コード	.....	3
2.3 解析ケース	.....	4
第3章 解析結果	.....	5
3.1 解析ケース 1	.....	5
3.2 解析ケース 2	.....	7
3.3 解析ケース 3	.....	9
第4章 考 察	.....	11
4.1 リチャードソン数による解析結果の相違	.....	11
4.2 測定結果と解析結果の相違	.....	14
第5章 結 言	.....	17
謝 辞	.....	18
参考文献	.....	19

表リスト

表 2.1 実験条件	.....	21
表 2.2 解析条件	.....	21
表 4.1 全域的リチャードソン数	.....	22

図リスト

図 2.1 実験装置概念図	.....	23
図 2.2 実験結果	.....	24
図 2.3 解析体系と解析メッシュ図	.....	26
図 2.4 流入流速分布、温度分布	.....	27
図 3.1 湍度分布（20 秒間隔）（解析ケース 1）	.....	28
図 3.2 温度分布（20 秒間隔）（解析ケース 1）	.....	28
図 3.3 湍度分布（2 秒間隔）（解析ケース 1）	.....	29
図 3.4 湍度分布（2 秒間隔）（解析ケース 1）	.....	31
図 3.5 主流方向、高さ方向流速分布（解析ケース 1）	.....	33
図 3.6 速度変動の時間変化（解析ケース 1）	.....	33
図 3.7 速度変動分布（解析ケース 1）	.....	34
図 3.8 レイノルズ応力分布（解析ケース 1）	.....	35
図 3.9 温度変動の時間変化（解析ケース 1）	.....	35
図 3.10 温度分布（解析ケース 1）	.....	35
図 3.11 温度変動分布（解析ケース 1）	.....	35
図 3.12 湍度分布（20 秒間隔）（解析ケース 2）	.....	36
図 3.13 温度分布（20 秒間隔）（解析ケース 2）	.....	36
図 3.14 主流方向、高さ方向流速分布（解析ケース 2）	.....	37
図 3.15 速度変動の時間変化（解析ケース 2）	.....	37
図 3.16 速度変動分布（解析ケース 2）	.....	38
図 3.17 レイノルズ応力分布（解析ケース 2）	.....	38
図 3.18 温度変動の時間変化（解析ケース 2）	.....	39
図 3.19 温度分布（解析ケース 2）	.....	39
図 3.20 温度変動分布（解析ケース 2）	.....	39

図 3.21 涡度分布(20秒間隔)(解析ケース3)	40
図 3.22 温度分布(20秒間隔)(解析ケース3)	40
図 3.23 主流方向、高さ方向流速分布(解析ケース3)	41
図 3.24 速度変動の時間変化(解析ケース3)	41
図 3.25 速度変動分布(解析ケース3)	42
図 3.26 レイノルズ応力分布(解析ケース3)	42
図 3.27 温度変動の時間変化(解析ケース3)	43
図 3.28 温度分布(解析ケース3)	43
図 3.29 温度変動分布(解析ケース3)	43
 図 4.1 文献(21)のhiの定義	44
図 4.2 卷き波の発生と崩壊	45
図 4.3 速度の積分厚さの下流位置による変化	46
図 4.4 密度の積分厚さの下流位置による変化	46
図 4.5 Ri数による速度分布の相違	47
図 4.6 Ri数による速度変動の自己スペクトルの相違	47
図 4.7 Ri数による速度変動分布の相違	48
図 4.8 Ri数によるレイノルズ応力分布の相違	48
図 4.9 解析ケース1の下流方向位置によるレイノルズ応力の相違	48
図 4.10 Ri数による温度変動の自己スペクトルの相違	49
図 4.11 Ri数による温度分布の相違	49
図 4.12 Ri数による温度変動分布の相違	49

第1章 緒 言

原子炉容器上部プレナム内の温度成層化現象は、高速炉のスクラム過渡時に高温の冷却材に満たされた上部プレナム内に炉心からの低温ナトリウムが流れ込むことにより発生する。炉心からの低温ナトリウムは、その慣性力が負の浮力効果よりも小さい場合、上部プレナム内の下層に低温ナトリウムの領域を、上層に高温ナトリウムの領域を生じ、その境界に温度成層界面を形成する。この温度成層界面では軸方向に温度勾配が大きく、時間とともに界面の位置が変化するため構造材料に熱応力を与える。このため、温度成層界面の挙動や特徴を把握することは機器の構造健全性および安全性を評価する観点から重要であり、これまでに作動流体にナトリウムや水を用いた試験⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾や多次元熱流動解析⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾が行われてきており、成層流の乱流特性を表現する表示式や数値解析モデルが提案されている。

高速炉における温度成層流は、上部の密度が下部よりも小さい安定成層流であること、上部と下部の流速が異なるために流れは境界面付近で強い剪断を持ち、これにより発生する乱れが流体の混合に関与することが特徴である。境界面付近の平面的な剪断層中には、二次元的な大規模渦構造が存在し、渦の合体や成長によって剪断層が発達することが実験的に示されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。一方、平面剪断層の挙動を解析的に評価するため、離散渦法による解析⁽⁹⁾、差分法⁽¹⁰⁾あるいはLESによる解析^{(11)、(12)、(13)、(14)}や擬スペクトル法^{(15)、(16)}による直接シミュレーションが行われてきた。しかし、離散渦法では渦糸の集中により数値的な分解が困難となり精度の低下が懸念され⁽¹⁷⁾、また、LESや擬スペクトル法では一対の渦について着目しているため、ある長さを持った領域での複数の渦の挙動を把握することは困難であった。また、従来は直接シミュレーションでは平均量を計算するために非常に長い計算時間が必要であったため、十分な時間平均を取ることはできなかった。著者らは、既に成層界面における剪断にのみ着目し、密度差のない等温場における乱流混合に関して検討を行った⁽¹⁸⁾。その結果、低速側流体と高速側流体の境界面で乱れを生じ、下流側に向かうに従い渦の合体と成長によって剪断層が発達する様子が見られた。

本報告は、流体に水を用いた成層乱流実験⁽¹⁰⁾の低速側流体と高速側流体に温度差が存在する非等温場における熱流動挙動を差分法による直接シミュレーションコードによって解析し、等温場における乱流混合と非等温場における乱流混合を比較検討した結果について報告するものである。

第2章 解析条件

2.1 解析対象

解析の対象となる実験の概要を以下に示す。

2.1.1 実験装置

図2.1に実験装置の概念図を示す。本試験の作動流体は水である。実験装置は長さ5m、高さ0.3m、幅0.1mの矩形開水路の試験体と温水循環系、冷水循環系により構成されている。矩形開水路の試験体は水路の流入部から流れ方向に1.4mまでの位置をセパレータにより0.1mの高さで上下に仕切る構造となっている。このセパレータで仕切られた上下に流速および温度の異なる水を流し、セパレータの下流部に安定成層流を形成させる。

流速および温度の測定には、それぞれレーザードップラー流速計とシース熱電対（シース外径0.25mm、温度の回復時間0.01秒のC-A熱電対）を使用し、平均流速、流速変動、レイノルズ応力、温度分布および温度変動を計測している。

2.1.2 実験条件

表2.1に実験条件を示す。上部と下部の流速はそれぞれ一定であり、上部の流体を高温、下部の流体を低温とし、上部と下部の流体温度差を変えることによりリチャードソン数を設定している。レイノルズ数およびリチャードソン数の定義は以下の通りである。

$$Re = \frac{\Delta u h}{\nu} \quad (2.1)$$

$$Ri = \frac{g \beta \Delta T h}{\Delta u^2} \quad (2.2)$$

ここに Δu は上部と下部の平均流速の差、 ΔT は上部流体と下部流体の平均温度の差、 h は上部と下部の高さの合計（全高さ）であり、 g 、 β 、 ν はそれぞれ重力加速度、体膨張係数、動粘性係数である。なお、本報における解析対象は表2.1の実験ケース2、3および6である。実験ケース1は既往研究⁽¹⁸⁾において評価し、実験ケース4、5および7は実験の全体概要を示すために記載した。

2.1.3 実験結果

本報では非等温場を対象としているので、実験ケース2および3の温度差がそれぞれ7°C、20°C ($Ri=0.4$ 、 1.16 、 $Re=1.7 \times 10^4$) の条件での測定結果について説明する。（実験ケース6の測定結果は参考文献(10)に記載されていない。）図2.2にセパレータ終端から下流部への距離 x が0.9mの位置で測定された主流方向流速、高さ方向流速、主流方向速度変動、高さ方向速度変動、レイノルズ応力、平均温度および温度変動の高さ方向分布を示す。図

2.2 中の各変数は、主流方向、高さ方向の流速をそれぞれ u 、 w 、流路の上方と下方の流速差を Δu 、主流方向、高さ方向の速度変動をそれぞれ u' 、 w' で示している。RMS 値は、 $RMS u' = \sqrt{u'^2}$ 、 $RMS w' = \sqrt{w'^2}$ であり、レイノルズ応力は $-\overline{u'w'}$ として表す。温度に関しては、温度を T 、上部の流体温度を T_H 、下部の流体温度を T_C 、上部と下部の温度差を ΔT 、温度変動を T' で示し、RMS 値は、 $RMS T' = \sqrt{T'^2}$ である。また、高さ方向の位置はセパレータの位置を 0 とし、セパレータからの距離を流路高さで無次元化して表示している。図中には実験ケース 1 の等温条件 ($Ri=0$) の結果も合わせて示した。

測定は 50Hz のサンプリングレートで 1024 回行われた測定値を時間平均したものである。図中の流速と流速変動の分布は、セパレータ上方と下方の流速差 Δu で無次元化され、レイノルズ応力は流速差 Δu の 2 乗で無次元化されて表示してある。また、温度分布は低温側との温度差を高温側と低温側の温度差 ΔT で、温度変動は温度差 ΔT の 2 乗で無次元化して表示している。

$x=0.9m$ の位置における測定結果から得られる Ri 数を変更した場合の定性的な傾向は、主流方向流速は、 Ri 数による相違がほとんど見られないが、高さ方向流速は、 $Ri=0$ の場合に $Ri=0.4$ 、 1.16 (実験ケース 3、2) よりも大きくなっている。しかしながら、 $Ri=0.4$ と $Ri=1.16$ ではほとんど差が見られず 0 に近い値となっている。一方、主流方向速度変動および高さ方向速度変動では、 Ri 数が大きくなると主流方向、高さ方向ともに変動量は小さくなる。この傾向はレイノルズ応力に関しても同様である。温度分布は、 $Ri=0.4$ の方が $Ri=1.16$ の場合よりも流路内の高さ方向の温度勾配が急である。また、温度変動は $Ri=0.4$ と $Ri=1.16$ でその大きさに顕著な相違はないが、分布形は異なっている。以上から、 Ri 数が大きくなる場合には、高さ方向の流速は減少し、速度の変動量は小さくなり、温度の変動量は分布形が相違するようになる。これは高温側の密度と低温側の密度の差が大きくなることによって、成層流は安定化する方向に向かうためであると考えられる。

2.1.4 解析対象

表 2.1 の温度差が 7°C、20°C および 30°C の実験ケース 2、3 および 6 について、主流方向にはセパレータの下流 1 m を、高さ方向にはセパレータの上側 (高さ 0.1 m) と下側 (高さ 0.1 m) をあわせた 0.2 m を解析対象範囲とした。

2.2 解析コード

解析に使用する解析コードは DINUS-3⁽¹⁹⁾ である。DINUS-3 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解く乱流直接シミュレーションコードである。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中心差分法を使用しており、時間項に関する差分近似法は Leap-Frog 法である。

2.3 解析ケース

解析ケースを表 2.2 に示す。著者らによる既往の検討結果⁽¹⁸⁾から、解析体系、解析メッシュ幅および流入流速分布を設定した。解析体系は 2 次元であり、解析メッシュ幅は主流方向(x 方向)、高さ方向(z 方向)にそれぞれ 2 mm とした。解析メッシュ図を図 2.3 に示す。流入流速分布は、セパレータの上方と下方でそれぞれ一定値とし、主流部については表 2.1 の流量から計算される平均流速を与え、乱流境界層について 1/7 乗則に従う流速分布を仮定した。なお、いずれのケースについても x、z 方向の流速変動は 0 とし、入り口での乱れは与えないものとした。

高温側と低温側の温度差は、解析ケース 1 を 20°C として、温度差を 7°C と小さくした場合を解析ケース 2、温度差を大きくし 30°C とした場合を解析ケース 3 とした。従って、解析ケース 1、2 および 3 は、それぞれ表 2.1 の実験ケース 3、2 および 6 にそれぞれ対応する。温度分布は上方、下方で高さ方向に同一とし、変動は考慮しない。図 2.4 に流入流速分布と温度分布を示す。

境界条件は、流路壁は全て断熱とし、壁面はノンスリップ条件、自由液面はスリップ条件とした。

第3章 解析結果

3.1 解析ケース1

3.1.1 湍度分布および温度分布

図3.1に解析ケース1(温度差20℃、 $Ri=1.16$)の準定常状態の湍度分布と準定常状態の時刻を0としたときから20秒後の湍度分布を、図3.2に同時刻の温度分布を示す。また、図3.3、3.4に時刻20秒から38秒までの湍度分布と温度分布をそれぞれ2秒間隔で示す。湍度は以下の式により求めた。

$$w = -\frac{du}{dz} + \frac{dw}{dx} \quad (3.1)$$

ここに du 、 dw はそれぞれ x 方向、 z 方向の隣接する計算ノード間の流速差であり、 dx 、 dz はそれぞれ x 方向、 z 方向の隣接する計算ノード間隔である。湍度分布では、図中の赤は負の値(反時計まわり)を青は正の値(時計まわり)を表す。また、温度分布では赤は高温側(最大値46.85℃)を青は低温側(最小値16.85℃)を表す。

図3.1および図3.3から流れが下流に向かうに従い、渦の成長によって剪断層が発達していく様子がわかる。セパレータから下流側への距離 x が0.4mの付近で高さ方向に変動を生じ、下流に向かうに従い渦が成長し、二次元的な大規模渦構造が見られるようになる。セパレータから下流側への距離 x が0.6m付近よりも下流側では渦の合体が見られる。また、渦の下流側へ向かう速度は約0.08m/sであり、ほぼ上方と下方の速度差で流れている。

図3.2および3.4の温度分布では、高さ0付近で高温側の流体と低温側の流体が混合する領域が見られる。この領域は図3.1および3.3において渦が見られる範囲にほぼ対応しているように見える。高温側流体と低温側流体の混合は、渦の上流側(図中左側)では高温の流体が低温側へ、渦の下流側(図中右側)では低温の流体が高温側へ流入して生じているが、これは渦が反時計周りに回転しているためと考えられる。

3.1.2 流速分布

図3.5にセパレータから下流側への距離 x が0.9mの位置での高さ方向断面における主流方向平均流速分布と高さ方向平均流速分布を示す。平均流速は図3.1から図3.4に示した湍度分布および温度分布の時刻0から時刻20秒に対して、50Hzのサンプリングレートで各時刻における主流方向、高さ方向流速を時間平均したものである。流速は主流方向の流速を u 、高さ方向の流速を w とし、流路の上方と下方の流速差 Δu で無次元化した $u/\Delta u$ 、 $w/\Delta u$ で表示されている。また、高さ方向の位置はセパレータの位置を0とし、セパレータからの距離を流路高さで無次元化して表示している。図中には測定結果⁽¹⁰⁾の流速分布も合わせて表示した。

解析結果の主流方向流速分布はセパレータよりも下方で測定結果よりも小さい値とな

っているが、高さが $z=-0.1$ から 0.2 の範囲では良く一致している。しかしながら、高さ方向の流速は、解析結果では高さ $z=0$ 付近で約 0.03 m/s であるのに対し、測定結果ではほぼ 0 になっている。

3.1.3 速度変動の時間変化

図 3.6 は高さ方向 $z=0$ における $x=0.9 \text{ m}$ での主流方向流速 u と高さ方向流速 w から 20 秒間の平均流速 \bar{u} 、 \bar{w} をそれぞれ差し引いた速度変動 u' 、 w' の時間変化を示したものである。図中の変動量はこれをセパレータ上下の流速差 Δu で無次元化して表示している。

$x=0.9 \text{ m}$ の位置では、主流方向、高さ方向それぞれに周期的な速度変動が見られる。その変動周期は主流方向、高さ方向ともほぼ同じであり約 $2\sim3$ 秒であるが、速度変動のピークを生じる時刻は、主流方向と高さ方向で一致していない。

3.1.4 速度変動分布

図 3.7 に $x=0.9 \text{ m}$ における主流方向と高さ方向速度変動の RMS 値を示す。

$$\text{RMS 値は、 } \text{RMS } u' = \sqrt{\bar{u}^2} \text{, RMS } w' = \sqrt{\bar{w}^2} \quad (3.2)$$

である。図中では RMS 値を流速差 Δu で無次元化して表示している。

主流方向速度変動は、解析結果と測定結果で高さ $z=0$ 付近でその大きさが一致しているが、流路の上方と下方では一致していない。また、高さ方向の速度変動は、解析結果の値は測定結果の約 3 倍大きくなっている。

3.1.5 レイノルズ応力分布

図 3.8 にレイノルズ応力の分布を示す。レイノルズ応力は $-\overline{u'w'}$ であり、3.1.3 項で示した主流方向の速度変動 u' と高さ方向の速度変動 w' の積をサンプリングレート 50 Hz で 20 秒間時間平均したものである。図中では $-\overline{u'w'}$ を流速差 Δu の二乗で無次元化して表示している。

レイノルズ応力は、解析結果の方が測定結果よりも大きく、測定結果では高さ $z=-0.1$ から $z=0.2$ の範囲で値を有しているのに対して、測定結果ではより広い範囲で大きな値となっている。

3.1.6 温度変動の時間変化

図 3.9 は高さ方向 $z=0$ における $x=0.9 \text{ m}$ での温度 T から 20 秒間の平均温度 \bar{T} を差し引いた温度変動 T' の時間変化を示したものである。図中の変動量はこれをセパレータ上下の温度差 ΔT で無次元化し表示している。 $x=0.9 \text{ m}$ の位置における温度変動は周期的であり、その変動周期は約 $1\sim1.5$ 秒で、速度変動の周期の約 $1/2$ である。

3.1.7 温度分布

図 3.10 にセパレータから下流側への距離 x が 0.9 m の位置での高さ方向断面における平均温度分布を示す。サンプリング時刻およびサンプリングレートは流速および流速変動を評価した場合と同じものである。温度分布は解析結果の温度 T から低温側の流体温度 T_C を差し引いた $(T - T_C)$ を同断面内の最高温度と最低温度の差 ΔT で無次元化して表示している。図中には測定結果⁽¹⁰⁾の温度分布も合わせて示した。測定結果では温度勾配が急峻な温度成層の範囲はおおよそ高さ $z = -0.1$ から 0.3 であるが、解析結果では流路のほぼ全高さに渡って温度勾配があり、測定結果と異なっている。

3.1.8 温度変動分布

図 3.11 に $x = 0.9$ m における温度変動の RMS 値を示す。

$$RMS \text{ 値は}, RMS T' = \sqrt{T^2} \quad (3.3)$$

である。図中では RMS 値を温度差 ΔT で無次元化して表示している。

温度変動は高さ $z = -0.1$ よりも下側では測定結果と一致しているが、同高さよりも上方では解析結果の方が小さくなってしまい、解析結果の値は測定結果の約 1/2 である。

3.2 解析ケース 2

3.2.1 湍度分布

図 3.12 に解析ケース 2 の準定常状態の湍度分布と準定常状態の時刻を 0 としたときから 20 秒後の湍度分布を、図 3.13 に同時刻の温度分布を示す。

図 3.12 から解析ケース 2 の場合にも、解析ケース 1 の場合と同様に流れが下流に向かうに従い、渦の合体と成長によって剪断層が発達していく様子が見られる。また、温度分布についても解析ケース 1 と同様であり、高さ 0 付近で高温側の流体と低温側の流体が混合する領域が見られる。

3.2.2 流速分布

図 3.14 に $x = 0.9$ m の位置での高さ方向断面における主流方向平均流速分布と高さ方向平均流速分布を示す。平均流速は図 3.12 に示した湍度分布の時刻 0 から 20 秒に対して、解析ケース 1 と同様のサンプリングレート、サンプリング時間で平均化したものである。図中には測定結果⁽¹⁰⁾の流速分布も合わせて示した。

$x = 0.9$ m の位置では、解析結果の主流方向流速分布は測定結果よりも勾配が急になっている。また、解析結果では高さ方向の流速が負の値となっているが、その大きさは測定結果と同程度であり、高さ方向に速度が生じていると考えるよりも、ほぼ 0 の値であると考える方が適切なように思われる。

3.2.3 速度変動の時間変化

図 3.15 は高さ方向 $z=0$ における $x=0.9\text{m}$ での主流方向流速 u と高さ方向流速 w の 20 秒間の平均値からの変動量の時間変化を示したものである。主流方向、高さ方向ともに周期的な変動が見られる。その変動周期は主流方向、高さ方向ともほぼ同じであり約 2 から 3 秒であり、解析ケース 1 とはほぼ同じである。

3.2.4 速度変動分布

図 3.16 に $x=0.9\text{ m}$ における主流方向と高さ方向速度変動の *RMS* 値を示す。図中では *RMS* 値を流速差 Δu で無次元化して表示している。主流方向速度変動は、解析結果と測定結果で良く一致しているが、高さ方向の速度変動に関しては、解析結果の値は測定結果の約 2 倍以上大きくなっている。

3.2.5 レイノルズ応力分布

図 3.17 にレイノルズ応力の分布を示す。図中では $-\overline{u'w'}$ を流速差 Δu の二乗で無次元化して表示している。レイノルズ応力は、解析結果と測定結果でほぼ同じ大きさとなっている。また、高さ方向の分布形も解析結果は測定結果と良く一致している。

3.2.6 温度変動の時間変化

図 3.18 は高さ方向 $z=0$ における $x=0.9\text{ m}$ での温度 T から 20 秒間の平均温度 \bar{T} を差し引いた温度変動 T' の時間変化を示したものである。図中の変動量はこれをセパレータ上下の温度差 ΔT で無次元化し表示している。 $x=0.9\text{m}$ の位置における温度変動は周期的であり、その変動周期は約 1.5 秒であり、速度の変動周期の約 1/2 になっている。

3.2.7 温度分布

図 3.19 にセパレータから下流側への距離 x が 0.9 m の位置での高さ方向断面における平均温度分布を示す。サンプリング時刻およびサンプリングレートは流速および流速変動を評価した場合と同じものである。温度分布は解析結果の温度 T から低温側の流体温度 T_C を差し引いたを $(T-T_C)$ を同断面内の最高温度と最低温度の差 ΔT で無次元化して表示している。図中には測定結果⁽¹⁰⁾の温度分布も合わせて示した。測定結果では温度勾配が急峻な温度成層の範囲はおおよそ高さ $z=0.2$ から 0.2 であるが、解析結果では流路のほぼ全高さに渡って温度勾配があり、測定結果と異なっている。

3.2.8 温度変動分布

図 3.20 に $x=0.9\text{ m}$ における温度変動の *RMS* 値を示す。図中では *RMS* 値を温度差 ΔT で無次元化して表示している。解析結果の温度変動は測定結果に比べて小さく、その高さ方向分布も測定結果と一致していない。

3.3 解析ケース 3

3.3.1 湍度分布

図 3.21 に解析ケース 3 の準定常状態の湍度分布と準定常状態の時刻を 0 としたときから 20 秒後の湍度分布を、図 3.22 に同時刻の温度分布を示す。

図 3.21 から解析ケース 3 の場合にも、解析ケース 1 の場合と同様に流れが下流に向かうに従い、渦の成長によって剪断層が発達していく様子が見られるが、この時刻の範囲内では渦の合体は見られなかった。また、温度分布については、高さ 0 付近で高温側の流体と低温側の流体が混合する領域が見られるが、渦の合体による大きな流体の混合は見られない。

3.3.2 流速分布

図 3.23 に $x=0.9\text{m}$ の位置での高さ方向断面における主流方向平均流速分布と高さ方向平均流速分布を示す。平均流速は図 3.21 に示した湍度分布の時刻 0 から 20 秒に対して、解析ケース 1 と同様のサンプリングレート、サンプリング時間で平均化したものである。本解析条件に対応する測定結果は参考文献(10)に示されていない。

$x=0.9\text{m}$ の位置では、解析結果の主流方向流速分布は解析ケース 1 の場合と類似している。一方、高さ方向の流速分布は主流方向流速の大きい下側の範囲で大きくなっている。

3.3.3 速度変動の時間変化

図 3.24 は高さ方向 $z=0$ における $x=0.9\text{m}$ での主流方向流速 u と高さ方向流速 w の 20 秒間の平均値からの変動量の時間変化を示したものである。主流方向、高さ方向ともに周期的な変動が見られる。その変動周期は主流方向、高さ方向ともほぼ同じ約 1 秒から 1.5 秒であり、解析ケース 1 や 2 の場合に比べて短くなっている。

3.3.4 速度変動分布

図 3.25 に $x=0.9\text{ m}$ における主流方向と高さ方向速度変動の RMS 値を示す。図中では RMS 値を流速差 Δu で無次元化して表示している。主流方向速度変動は、解析ケース 1 よりも小さくなってしまっており、高さ方向の速度変動も解析ケース 1 に比べて小さくなっている。

3.3.5 レイノルズ応力分布

図 3.26 にレイノルズ応力の分布を示す。図中では $-\overline{u'w'}$ を流速差 Δu の二乗で無次元化して表示している。レイノルズ応力は、高さ方向に渡ってほぼ 0 となっている。

3.3.6 温度変動の時間変化

図 3.27 は高さ方向 $z=0$ における $x=0.9\text{ m}$ での温度 T から 20 秒間の平均温度 \bar{T} を差し引いた温度変動 T' の時間変化を示したものである。図中の変動量はこれをセパレータ上下の温度差 ΔT で無次元化し表示している。 $x=0.9\text{m}$ の位置における温度変動は周期的であり、その変動周期は約 1 秒から 1.5 秒である。この温度変動の周期は、速度変動の周期とほぼ同じである。

3.3.7 温度分布

図 3.28 にセパレータから下流側への距離 x が 0.9 m の位置での高さ方向断面における平均温度分布を示す。サンプリング時刻およびサンプリングレートは流速および流速変動を評価した場合と同じものである。温度分布は解析結果の温度 T から低温側の流体温度 T_C を差し引いた $(T - T_C)$ を同断面内の最高温度と最低温度の差 ΔT で無次元化して表示してある。高さ $z=0$ 付近に温度分布の緩やかな領域があり、この温度分布の傾向は解析ケース 1 の場合と類似している。

3.3.8 温度変動分布

図 3.29 に $x=0.9\text{ m}$ における温度変動の *RMS* 値を示す。図中では *RMS* 値を温度差 ΔT で無次元化して表示している。この温度変動の分布形は解析ケース 1 と類似しているが、その大きさは解析ケース 1 よりも小さくなっている。

第4章 考 察

4.1 リチャードソン数による解析結果の相違

4.1.1 湍度分布および温度分布

Ri 数を変化させた場合の湍度分布の相違は、解析ケース1の $Ri=1.16$ 、解析ケース2の $Ri=0.4$ の場合には渦の合体が見られるが、解析ケース3の $Ri=1.76$ の場合には渦の合体が見られないことである。

参考文献(21)では以下の無次元数を用いて渦の合体が起きる Ri 数の範囲を示している。

$$Re = \frac{\Delta u h_i}{\nu} \quad (4.1)$$

$$Ri = \frac{g \Delta \rho h_i}{\rho_{AV} \Delta u^2} \quad (4.2)$$

h_i は図4.1で定義される流入境界付近の速度勾配が急峻な領域の高さ方向の範囲である。この Ri 数は全般的 Ri 数と言われる⁽²²⁾。 $\Delta \rho$ と ρ_{AV} はそれぞれ上層と下層の密度差と密度の平均値をそれぞれ表している。参考文献(21)には、(4.1)式で計算される Re 数が 300 の場合に、全般的 Ri 数が 0.15 を超えると浮力の影響により渦の合体は見られなくなると報告されている。また、同文献によれば、全般的 Ri 数が 0.15 より小さい場合には、成層流は巻き波型の乱れを形成するが、全般的 Ri 数が 0.15 よりも大きい場合には、図4.2に示されるように巻き波型の乱れは崩壊すると報告されている(参考文献(22)では全般的 Ri 数が 0.125 を超えると渦の合体は生じないと報告されている。)。

本解析条件において(4.1)式と(4.2)式で計算される Re 数と全般的 Ri 数は、 h_i を流入境界条件で考慮したセパレータ下部の境界層厚さ 13 mm とし、動粘性係数を温度 16.85°C の $\nu=1.087 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ とすれば、表4.1に示すように Re は 1004、全般的 Ri 数は解析ケース1、2 および3 のそれぞれについて、0.099、0.027 および 0.171 となる。渦の合体が見られなかった解析ケース3の全般的 Ri 数は 0.171 で 0.15 より大きく、本解析の解析ケース3において渦の合体が見られないという定性的な傾向は、既往の測定結果と一致している。

参考文献(21)では二次元的な渦構造の発達を二つの積分厚さ (Integral Thickness) により示している。速度に対する積分厚さ θ_u は、

$$\theta_u = \left[\frac{1}{(\Delta U)^2} \right]_{-\infty}^{\infty} (U_B - \bar{u}(z)) \bar{u}(z) - U_T dz \quad (4.3),$$

密度に対する積分厚さ θ_ρ は、

$$\theta_\rho = \left[\frac{1}{(\Delta \rho)^2} \right]_{-\infty}^{\infty} (\rho_B - \bar{\rho}(z)) \bar{\rho}(z) - \rho_T dz \quad (4.4)$$

である。ここに各変数は、

U_B ：下部の平均流速

U_T ：上部の平均流速

$\bar{u}(z)$ ：高さ z における時間平均流速

ρ_B : 下部の平均密度

ρ_T : 上部の平均密度

$\bar{\rho}(z)$: 高さ z における時間平均密度

である。

代表積分長さ (Characteristic integral length) 6_i は、文献では、流入境界からの距離が 1cm の位置における 6_u である。本解析結果では渦度分布の図から各解析ケースの渦の発生が見られない $x=0.45m$ の位置における 6_u を 6_i とした。図 4.3 と 4.4 は等温場の場合の既往の解析結果⁽¹⁸⁾ ($Ri=0$) と参考文献(21)の結果 (図中の線分; $Ri=0.05, 0.1$ および 0.15) を解析ケース 1, 2 および 3 の計算結果と比較して示したものである。

図 4.3 の速度の積分厚さに関して、解析ケース 1 (全域的 $Ri=0.099$) は、全域的 Ri 数が 0.1 の測定結果と良く一致している。解析ケース 2 (全域的 $Ri=0.027$) と全域的 Ri 数が 0.05 の測定結果を比較すると、解析結果の方が積分厚さは小さいが、下流側に向かっての変化率は測定結果と解析結果ではほぼ一致している。解析ケース 3 では下流に向かって積分厚さの増加が見られず、全域的 Ri 数が 0.15 の測定結果と一致していない。全域的 Ri が 0.15 の測定結果において積分厚さの増加が見られなくなるのは、 $x/6_i$ が 600 よりも下流の位置である。一方、図 4.4 の密度の積分厚さに関しては、解析ケース 1, 2 および 3 は測定結果よりも積分厚さが大きく、上流側からあまり変化していない。

以上から、速度の積分厚さに関しては、解析結果は測定結果と良く一致しているものの、密度の積分厚さは、解析結果では上流側の位置から大きくなっている測定結果と一致していない。この測定結果と解析結果の相違は、測定では上部と下部の流体を仕切るセパレータを介して上部と下部の流体の熱交換が行われ、流入境界から温度勾配を有しているのに對し、解析結果ではそのような温度勾配を考慮していないことによると考えられる。

4.1.2 流速分布

図 4.5 に解析ケース 1, 2 および 3 の $x=0.9m$ の位置での高さ方向断面における主流方向平均流速分布と高さ方向平均流速分布を示す。主流方向の大きさは各解析ケースでほぼ同じである。しかしながら、主流方向流速の分布形は、解析ケース 1 と 2 では同じであるが、解析ケース 3 では、速度勾配の急峻な範囲が上方へ移動している。解析ケース 3 において速度勾配の急峻な範囲が上方に移動するのは、高さ方向流速が解析ケース 3 では解析ケース 1 や 2 よりも大きいためと考えられる。

4.1.3 速度変動の周期

図 4.6 は高さ方向 $z=0$ における $x=0.9m$ での主流方向流速 u と高さ方向流速 w の速度変動量の自己スペクトルを各解析ケースで比較したものである。主流方向の速度変動の自己スペクトルでは、解析ケース 1 と 2 のピークはほぼ同じ $0.44Hz$ (周期 2.3 秒) であるが、解析ケース 3 における速度変動の自己スペクトルのピークは $0.68Hz$ (周期 1.5 秒) 付近にある。また、解析ケース 1 と 2 ではピークの周波数よりも周波数の小さい領域でパワースペ

クトルが大きくなっている。解析ケース3よりも周期の長い変動が見られる。解析ケース1と2で周波数の小さい領域でパワースペクトルが大きくなるのは、渦の合体によるものと考えられる。また、主流方向速度変動の自己スペクトルに見られるピークの周波数は、高さ方向速度変動のピークを生じる周波数とほぼ同じである。

4.1.4 速度変動分布

図4.7にx=0.9mにおける主流方向と高さ方向速度変動のRMS値を解析ケース1、2および3について示す。主流方向の速度変動はRi数が大きくなるに従い小さくなっている。一方、高さ方向の速度変動は解析ケース1と2ではほとんど相違しないが、解析ケース3では解析ケース1、2に比べて小さくなっている。このRi数が大きくなるに従い速度変動が小さくなる傾向は、既往の測定結果と一致している。

4.1.5 レイノルズ応力分布

図4.8にx=0.9mにおける解析ケース1、2および3のレイノルズ応力の分布を示す。レイノルズ応力の大きな領域はRi数が大きくなるに従い上方に移動している。これはRi数が大きくなるに従い、高さ方向の上方に向かう流速が大きくなるため、渦の中心位置が上方に移動しているためと考えられる。

また、解析ケース3のレイノルズ応力の大きさは、解析ケース1や2に比べて小さくなっている。解析ケース3においてレイノルズ応力が解析ケース1や2よりも小さくなるのは、解析ケース3で渦の合体が起きないためと考えられる。図4.9は解析ケース1のレイノルズ応力の高さ方向分布を、渦の合体が起きていないx=0.6mの位置と渦の合体が起きているx=0.9mの位置で比較したものである。渦の合体が起きていないx=0.6mの位置でのレイノルズ応力は、渦の合体が起きているx=0.9mの位置でのレイノルズ応力に比べて小さくなっている。解析ケース1のx=0.6mの位置におけるレイノルズ応力の大きさは、解析ケース3のx=0.9mの位置におけるレイノルズ応力の大きさとほぼ同じである。このことから、渦の合体が起きる場合には、単一の渦で生じるレイノルズ応力よりも大きなレイノルズ応力が発生すると考えられる。

4.1.6 温度変動の周期

図4.10は高さ方向z=0におけるx=0.9mでの温度変動量の自己スペクトルを各解析ケースで比較したものである。解析ケース1における温度変動の自己スペクトルのピークは0.83Hz(周期1.2秒)であり、解析ケース2では0.93Hz(周期1.1秒)、解析ケース3では0.68Hz(周期1.47秒)である。また、解析ケース1と2ではより周波数の短い領域でパワースペクトルが大きくなっている。解析ケース3よりも周期の長い変動が見られる。この解析ケース1、2と解析ケース3のピーク周波数の相違は、速度変動の場合と同様に渦の合体によるものと考えられる。

解析ケース3では、速度変動の自己スペクトルに見られるピークの周波数は温度変動のピークを生じる周波数とほぼ同じである。これに対して、解析ケース1と2では温度変動のピークの周波数は速度変動のピークの周波数と異なり、温度変動のピークの周波数は速度変動のピークの周波数の約2倍になっている。

解析ケース1では速度変動のピーク周波数は0.44Hzであり、温度変動のピーク周波数は0.83Hzである。このことから合体した渦では、1周期の速度変動に対して2周期の温度変動が含まれていると考えられる。

4.1.7 温度分布

図4.11に解析ケース1、2および3のx=0.9mの位置での高さ方向断面の温度分布を示す。高さ方向の温度分布は、解析ケース1と3は類似しておりz=0から0.1の範囲で緩やかな温度勾配が見られ、全高さの範囲で温度の勾配は3段階に変化している。参考文献(11)によれば渦の成長が顕著な場合には、平均濃度分布に関して勾配が3段階に変化すると報告されており、本解析結果の温度分布の勾配が3段階に変化していることと一致している。

4.1.8 温度変動分布

図4.12にx=0.9mにおける温度変動のRMS値を解析ケース1、2および3について示す。図中ではRMS値を温度差 ΔT で無次元化して表示している。この温度変動の分布形は解析ケース1と解析ケース3では類似しており、二つの極大値を持っている。このような極大値を持つ分布形は、参考文献(11)によれば渦の成長が顕著な場合には、変動濃度分布は二つないし三つの極大値を持つと報告されており、本解析結果の温度変動分布が二つの極大値を持っていることと一致している。

4.2 測定結果と解析結果の相違

R_i 数を変化させた場合の測定結果の定性的な傾向は2.1.3節の実験結果で示したように以下のとおりであった。

- ① 主流方向流速については、 R_i 数による相違はほとんど見られないが、高さ方向流速は、 $R_i=0.4$ と $R_i=1.16$ でほとんど差が見られず0に近い値となっており、 $R_i=0$ の場合に $R_i=0.4$ 、 1.16 (実験ケース3、2)よりも大きくなっている。
- ② 主流方向速度変動および高さ方向速度変動については、 R_i 数が大きくなるに従い変動量は小さくなる傾向を示している。
- ③ レイノルズ応力に関して、 R_i 数が大きくなるとレイノルズ応力は小さくなる。
- ④ 温度分布は、 $R_i=0.4$ の方が $R_i=1.16$ の場合よりも流路内の高さ方向の温度勾配が急である。
- ⑤ 温度変動は $R_i=0.4$ と $R_i=1.16$ でその最大値に顕著な相違はないが、分布形は異なつ

ており、 $Ri=0.4$ の場合の方が高さ方向全体にわたって温度変動が大きい。

一方、解析結果の Ri 数を変化させた場合の定性的な傾向は 4.1 節のリチャードソン数による解析結果の相違から以下のようにまとめられる。

- ① 主流方向流速については、 Ri 数による相違は見られないが、高さ方向の流速は、 Ri 数が 0 の場合にほぼ 0 であり、 Ri 数が大きくなるに従い高さ方向流速は大きくなる。
- ② 主流方向の速度変動は、 Ri 数が大きくなると小さくなる。また、高さ方向の速度変動は解析ケース 1($Ri=1.16$)と 2($Ri=0.4$)でほとんど相違しないが、解析ケース 3($Ri=0.176$)では解析ケース 1、2 に比べて小さくなる。
- ③ レイノルズ応力は、解析ケース 3($Ri=0.176$)の場合に、解析ケース 1($Ri=1.16$)や 2($Ri=0.4$)に比べて小さくなる。
- ④ 温度分布は、解析ケース 1($Ri=1.16$)と 2($Ri=0.4$)では類似しており $z=0$ から 0.1 の範囲で緩やかな温度勾配が見られ、全高さの温度勾配は 3 段階に変化している。
- ⑤ 温度変動の分布形は解析ケース 1($Ri=1.16$)と解析ケース 3($Ri=0.176$)では類似しており、二つの極大値を持っている。

Ri 数に対する定性的な傾向を測定結果と解析結果で比較すると以下のようになる。

- ① 主流方向速度は、測定結果、解析結果とも Ri 数による差異が小さく、主流方向速度については解析結果と測定結果で良く一致している。
- ② 高さ方向速度は、測定結果では Ri 数が大きくなるに従い小さくなるが、解析結果では Ri 数が大きくなるに従い大きくなっているが、解析結果と測定結果で一致しない。
- ③ 主流方向速度変動および高さ方向速度変動は、測定結果、解析結果とも Ri 数が大きくなるに従い小さくなっているが、解析結果と測定結果で一致している。
- ④ レイノルズ応力は、測定結果、解析結果とも Ri 数が大きくなるに従い小さくなっているが、解析結果と測定結果で一致している。
- ⑤ 温度分布は、解析結果では温度の勾配が 3 段階に変化しているが、測定結果ではそのような明確な勾配の変化は見られず、解析結果と測定結果は一致しない。
- ⑥ 温度変動分布は、解析結果では二つの極大値が見られるが、測定結果ではそのような明確な温度変動の極大値は見られず、解析結果と測定結果は一致しない。

測定結果では、 Ri 数が大きくなると高温側の密度と低温側の密度差が大きくなり、成層流は安定化する方向に向かう傾向を示している。解析結果においても、 Ri 数が大きくなるに従い、速度変動とレイノルズ応力は小さくなる傾向を示しており、成層界面での流れの Ri 数に対する傾向は解析結果と測定結果で一致している。このことから密度差が大きくなることによって成層流が安定するという傾向を解析結果は模擬できていると考えられる。

解析結果と測定結果で顕著な差異を生じるのは、高さ方向の速度、温度分布および温度

変動分布である。高さ方向の速度は高さ方向の密度差に起因すると考えられるため、測定結果と解析結果で差異を生じる理由は、解析結果において温度の勾配が3段階に変化し、温度変動分布が二つの極大値を持ったことによると考えられる。この温度勾配と温度変動は二次元的な渦構造の内部では十分な混合が起こり、渦の上下では低温側と高温側の流体が接することになるため、顕著な渦の成長がある場合には適切なように考えられ、既往の解析結果⁽¹¹⁾とも一致している。

しかしながら、参考文献(21)のしきい値から予測すれば、本解析の温度差30℃の解析ケース3は全域的Ri数が0.171であり、Re数の相違はあるものの、渦は崩壊し大規模な二次元的渦構造は生じないことになる。仮に二次元的な渦構造が生じず、より小スケールの渦によって成層界面での混合が行われる場合には温度分布の勾配は拡散勾配と類似のものとなり、温度変動は顕著な極大値を持たないと考えられる。

以上から本解析結果は、渦の合体に関して測定で得られた渦の合体が起きるRi数の範囲を模擬し、二次元的な大規模渦構造を捉えている。また、本解析結果の評価から、渦の合体が起きる場合には、渦の合体が起きない場合よりも大きなレイノルズ応力を生じることが示され、成層流の乱流量を評価する上で非常に重要であることが明らかとなった。しかしながら、全域的Ri数が0.15以上の場合には、さらに検討を行う必要があると考えられる。

今後は、本知見を踏まえて、実機の高速炉で生じる温度成層界面のRi数の検討を行い、実機の温度成層化現象を適切に表現できる代数応力乱流モデルの検討を行う予定である。

第5章 結 言

流体に水を用いた成層乱流実験に関して、低速側流体と高速側流体に温度差が存在する非等温場における流動を差分法による乱流直接シミュレーションコード DINUS-3 コードによって解析し、測定結果と解析結果を比較した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 主流方向速度は、 Ri 数による差異が小さく、この傾向は測定結果と解析結果で一致している。
- (2) 高さ方向速度は、測定結果では Ri 数が大きくなるに従い小さくなるが、解析結果では Ri 数が大きくなるに従い大きくなる。
- (3) 主流方向速度変動および高さ方向速度変動は、 Ri 数が大きくなるに従い小さくなり、この傾向は測定結果と解析結果で一致している。
- (4) レイノルズ応力は、測定結果、解析結果とも Ri 数が大きくなるに従い小さくなり、この傾向は測定結果と解析結果で一致している。
- (5) 温度分布は、解析結果では温度の勾配が3段階に変化しているが、測定結果ではそのような明確な勾配の変化は見られない。
- (6) 温度変動分布は、解析結果では二つの極大値が見られるが、測定結果ではそのような明確な温度変動の極大値は見られない。
- (7) 本解析により、渦の合体に関して測定で得られた渦の合体が起きる Ri 数の範囲を模擬し、二次元的な大規模渦構造を捉えられる。
- (8) 渦の合体が起きる場合には、渦の合体が起きない場合よりも大きなレイノルズ応力を生じることがわかった。

謝　　辞

DINUS-3 コードによる計算の実行に協力して頂いた（株）CSK 川上 一夫 氏に感謝致します。

参考文献

- (1) Y.Ieda、I.Maeckawa、T.Muramatu、S.Nakanishi、Experimental and analytical studies of the thermal stratification phenomenon in the outlet plenum of fast breeder reactors、Nuclear Engineering and Design 120 (1990) 403-414
- (2) N.Tanaka、S.Moriya、S.Ushijima、T.Koga、Prediction method for thermal stratification in a reactor vessel、Nuclear Engineering and Design 120 (1990) 395-402
- (3) 桃井 一光、林 謙二、磯崎 正、上出 英樹、家田 芳明、上部プレナム温度成層化現象に関する研究(I)－成層界面上昇速度－、日本原子力学会 1995 年春の年会要旨集、1995 年 3 月、A38
- (4) Toshiharu Muramatsu、Hisashi Ninokata、Investigation of turbulence modelling in thermal stratification analysis、Nuclear Engineering and design 150 (1994) 81-93
- (5) 土井 稔浩、村松 寿晴、高速炉の炉上部プレナム内温度成層化現象に関する解析手法の検証、日本原子力学会 1997 年春の年会要旨集、1997 年 3 月、F8
- (6) 牛島 省、温度成層流における乱流現象のモデル化とその適用性に関する研究、博士論文、1989 年 10 月
- (7) Brown,G.L. 、Roshko,A.、On Density Effects and Large Structures in Turbulent Mixing Layers、Journal of Fluid Mechanics 64 (1974) 775-816
- (8) Oster,D、Wygnanski,I、The Forced Mixing Layer Between Paralell Streams、Journal of Fluid Mechanics、123 (1982) 91-130
- (9) 長谷川 達也、山口 誉起、大岩 紀生、平面剪断層における物質輸送の数値解析、日本機械学会論文集 (B 編) 53 卷 485 号 (昭 62-1)、102-107
- (10) 岩重 健五、非等温場における乱流混合現象に関する研究、博士論文
- (11) 宮内 敏雄、斎藤 拓也、谷 雅弘、乱流混合の Large Eddy Simulation (第 1 報、二次元場) 、日本機械学会論文集 (B 編) 53 卷 487 号 (昭 62-3)、816-823

- (12) 宮内 敏雄、斎藤 拓也、乱流混合の Large Eddy Simulation (第2報、三次元場)、日本機械学会論文集 (B編) 55巻 512号 (1989-4)、978-983
- (13) 宮内 敏雄、川野 浩一郎、乱流混合の Large Eddy Simulation (第3報、初期ランダム場)、日本機械学会論文集 (B編) 56巻 522号 (1990-2)、336-341
- (14) 宮内 敏雄、川野 浩一郎、新郷 美紀、乱流混合の Large Eddy Simulation (第4報、乱流の組織的構造)、日本機械学会論文集 (B編) 56巻 530号 (1990-10)、2879-2883
- (15) 宮内 敏雄、店橋 譲、擬スペクトル法による乱流混合層の直接数値シミュレーション、日本機械学会論文集 (B編) 57巻 533号 (1991-1)、44-50
- (16) J.J.Riley、R.W.Metcalfe、Direct Numerical Simulations of Chemically Reacting Turbulent Mixing Layers、AIAA-85-0321、AIAA 23rd Aerospace Sciences Meeting、January 14-17、1985/Reno、Nevada
- (17) 保原 充、大宮司 久明 編、数値流体力学 基礎と応用、東京大学出版会、1992年
- (18) 土井 稔浩、村松 寿晴、温度成層流における乱流混合の直接シミュレーション、PNC TN9410 97-03、1997年4月
- (19) 村松 寿晴、サーマルストライピング現象の数値解析に関する研究、東京工業大学 学位論文、1994年
- (20) M.V.Dyke、An Album of Fluid Motion、The Parabolic Press、1982
- (21) C.G.Koop、F.K.Browand、Instability and turbulence in a stratified fluid with shear、Journal of Fluid Mechanics (1979)、vol.93、part1、pp135-159
- (22) 谷 一郎 編、流体力学の進歩 亂流、丸善、1980

表 2.1 実験条件

実験 ケース	上部 流量 (m ³ /s)	下部 流量 (m ³ /s)	上部 流速 (m/s)	下部 流速 (m/s)	温度差 (°C)	流速差 (m/s)	Re 数	Ri 数
1	3.3E-4	1.17E-3	3.3E-2	1.17E-1	0.0	8.4E-2	1.7E4	0
2					7.0			0.40
3					20.0			1.16
4	3.3E-4	1.17E-3	3.3E-2	1.17E-1	25.5	8.4E-2	1.7E4	1.47
5					27.5			1.61
6					30.0			1.76
7					32.5			1.91

注) 本報における解析対象は実験ケース 2、3 および 6 である。実験ケース 1、4、5 および 7 は実験の全体概要を示すために記載してある。

表 2.2 解析条件

解析ケース	対応する 実験ケース	温度差 (°C)	2 次元/3 次元	メッシュ幅 $\Delta x \times \Delta z$ (mm)	流入流速
1	3	20	2 次元	2×2	一定
2	2	7			
3	6	30			

表 4.1 全域的リチャードソン数

解析 ケース	上部 流速 (m/s)	上部 流速 (m/s)	上部 温度 (°C)	下部 温度 (°C)	平均 密度 (kg/m ³)	密度差 (kg/m ³)	(4.1)式 による Re 数	全域的 Ri 数
1	3.3E-2	1.17E-1	36.85	16.85	996.15	5.45	1004	0.099
2			23.85		998.14	1.47		0.027
3			46.85		994.15	9.44		0.171

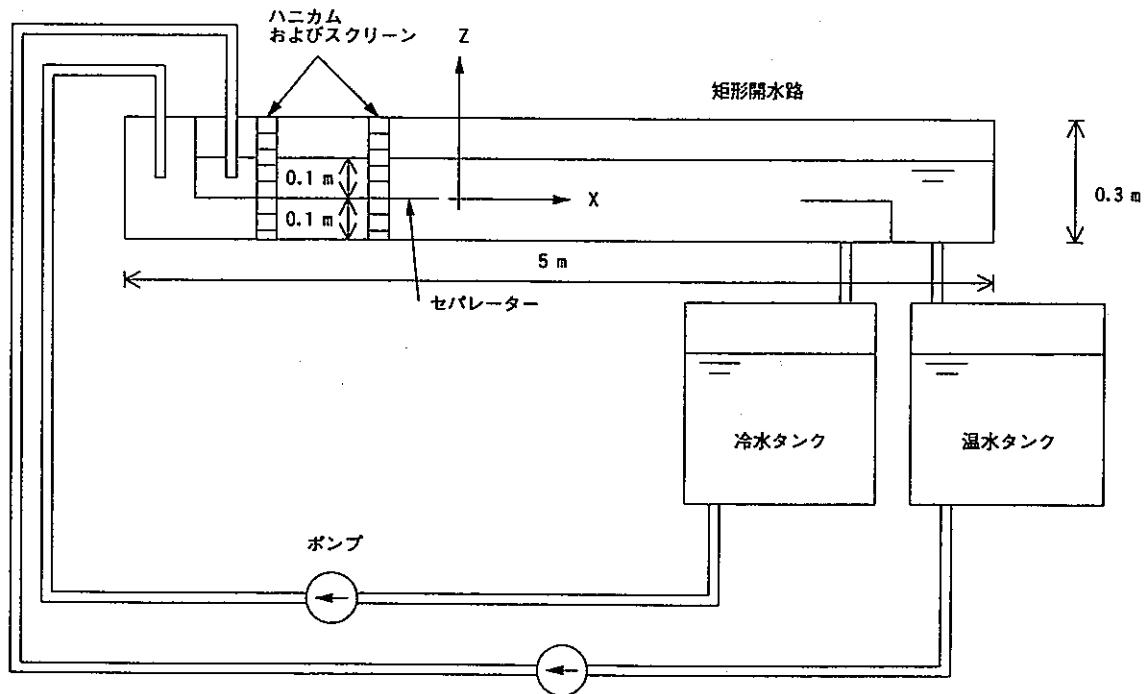


図 2.1 実験装置概念図

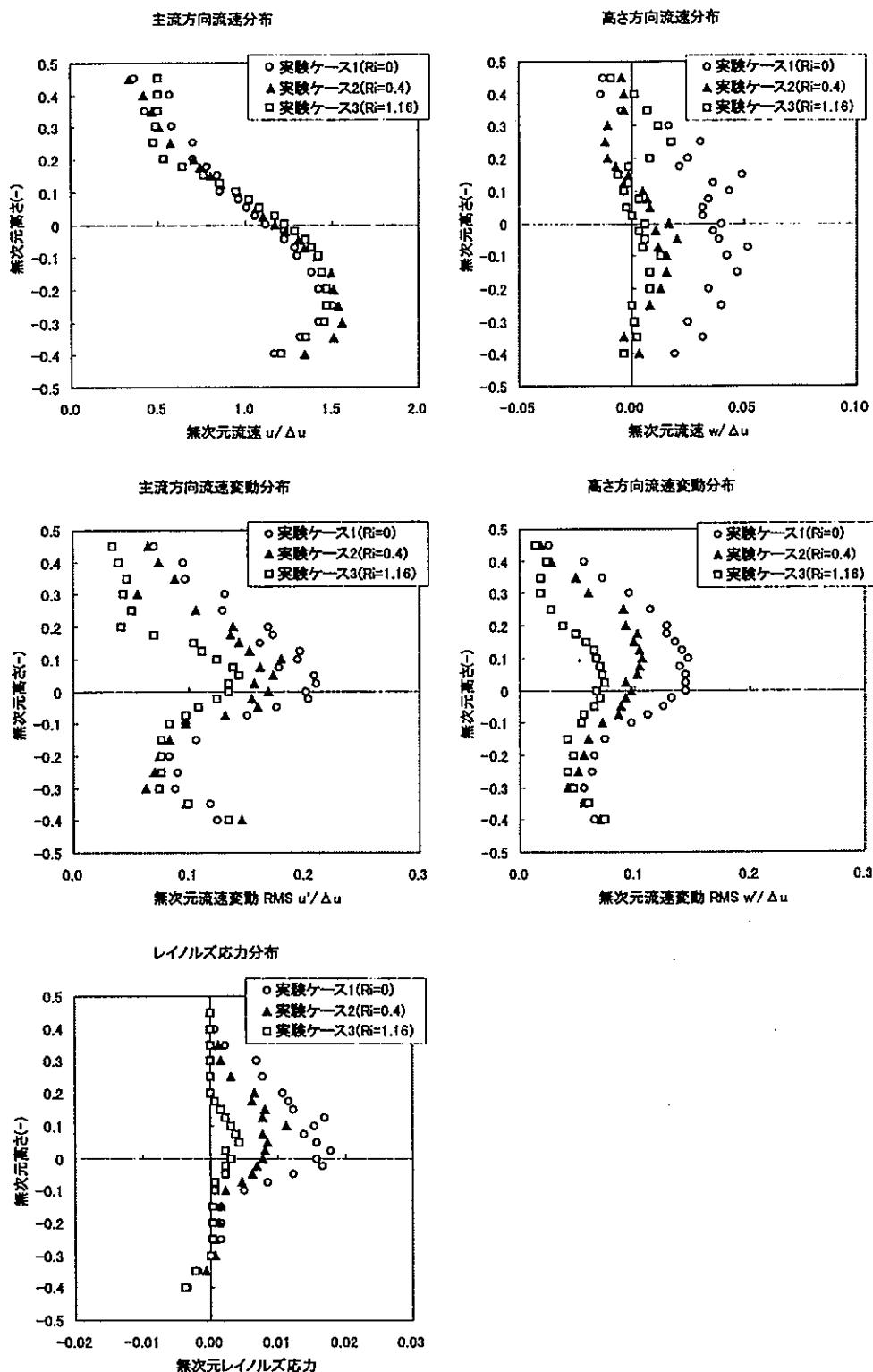


図 2.2(1/2) 実験結果

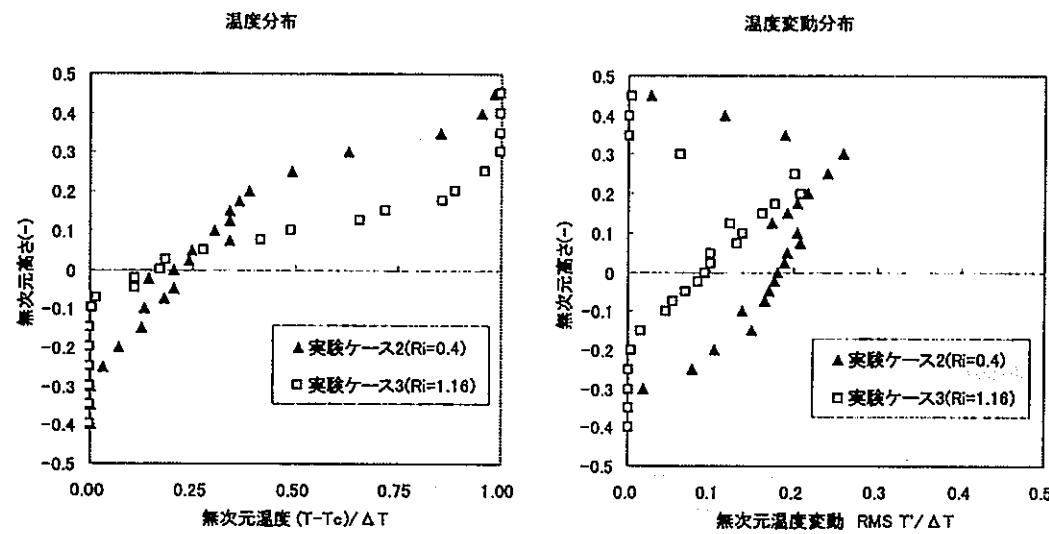
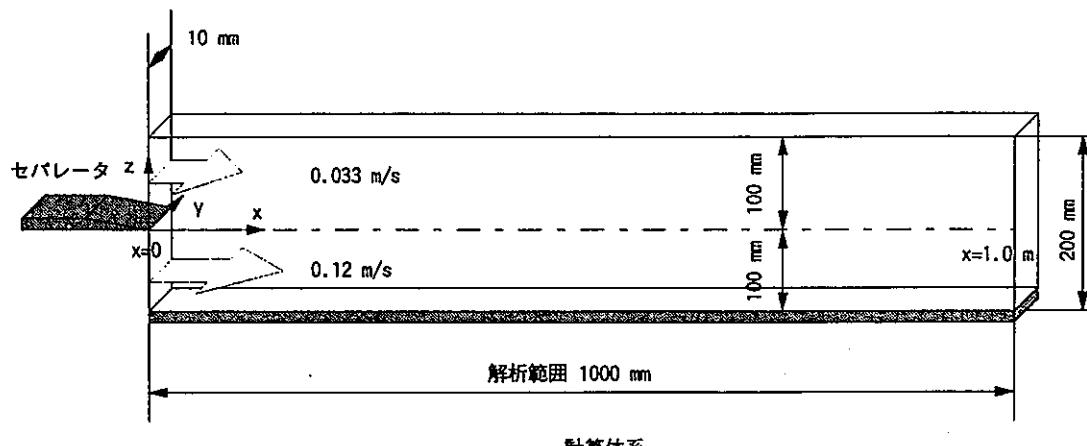
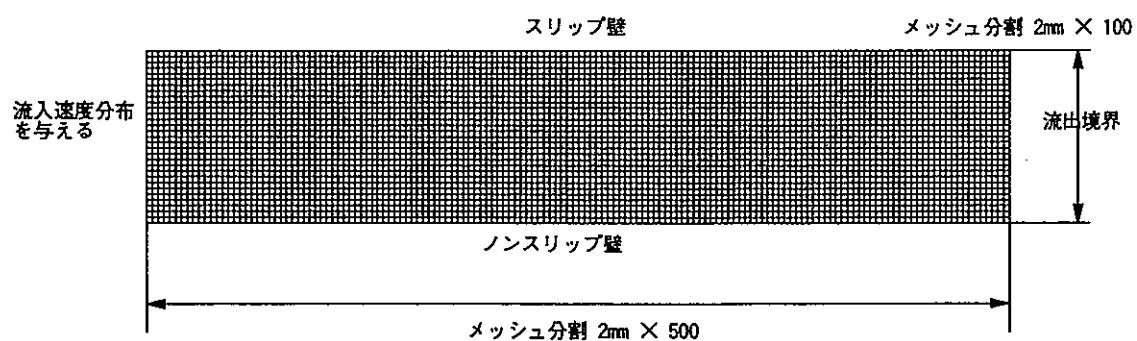


図 2.2(2/2) 実験結果



計算体系



解析メッシュ図

図 2.3 解析体系と解析メッシュ図

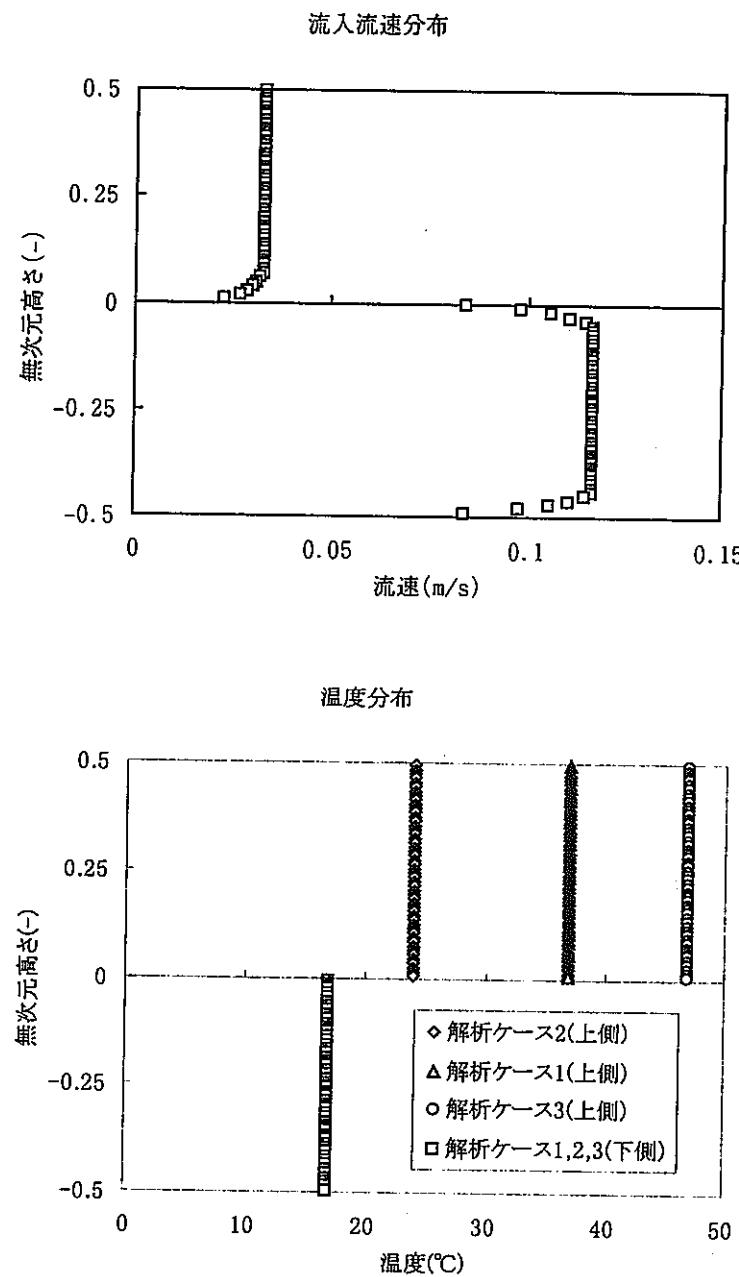


図 2.4 流入流速分布、温度分布

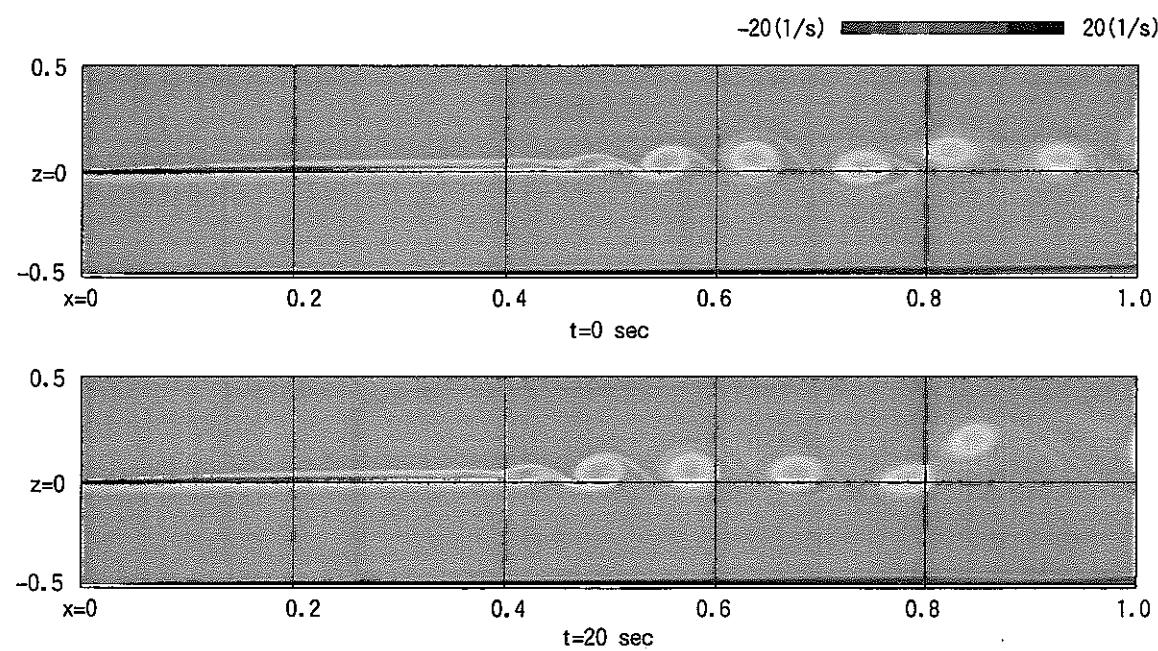


図 3.1 涡度分布 (20 秒間隔) (解析ケース 1)

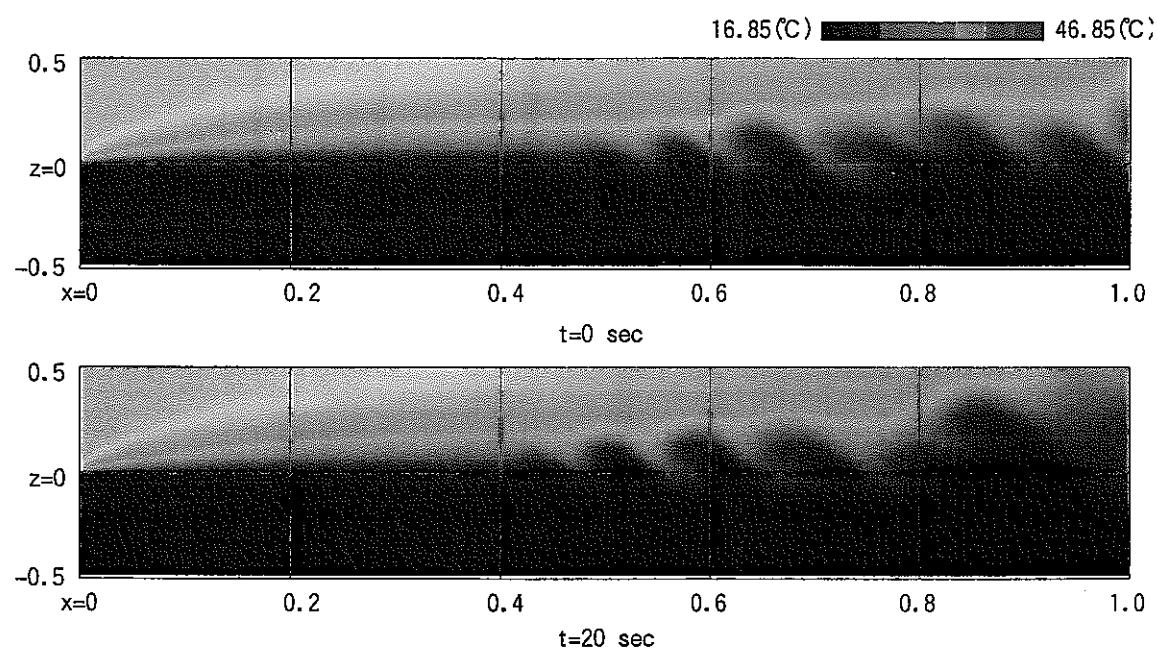


図 3.2 温度分布 (20 秒間隔) (解析ケース 1)

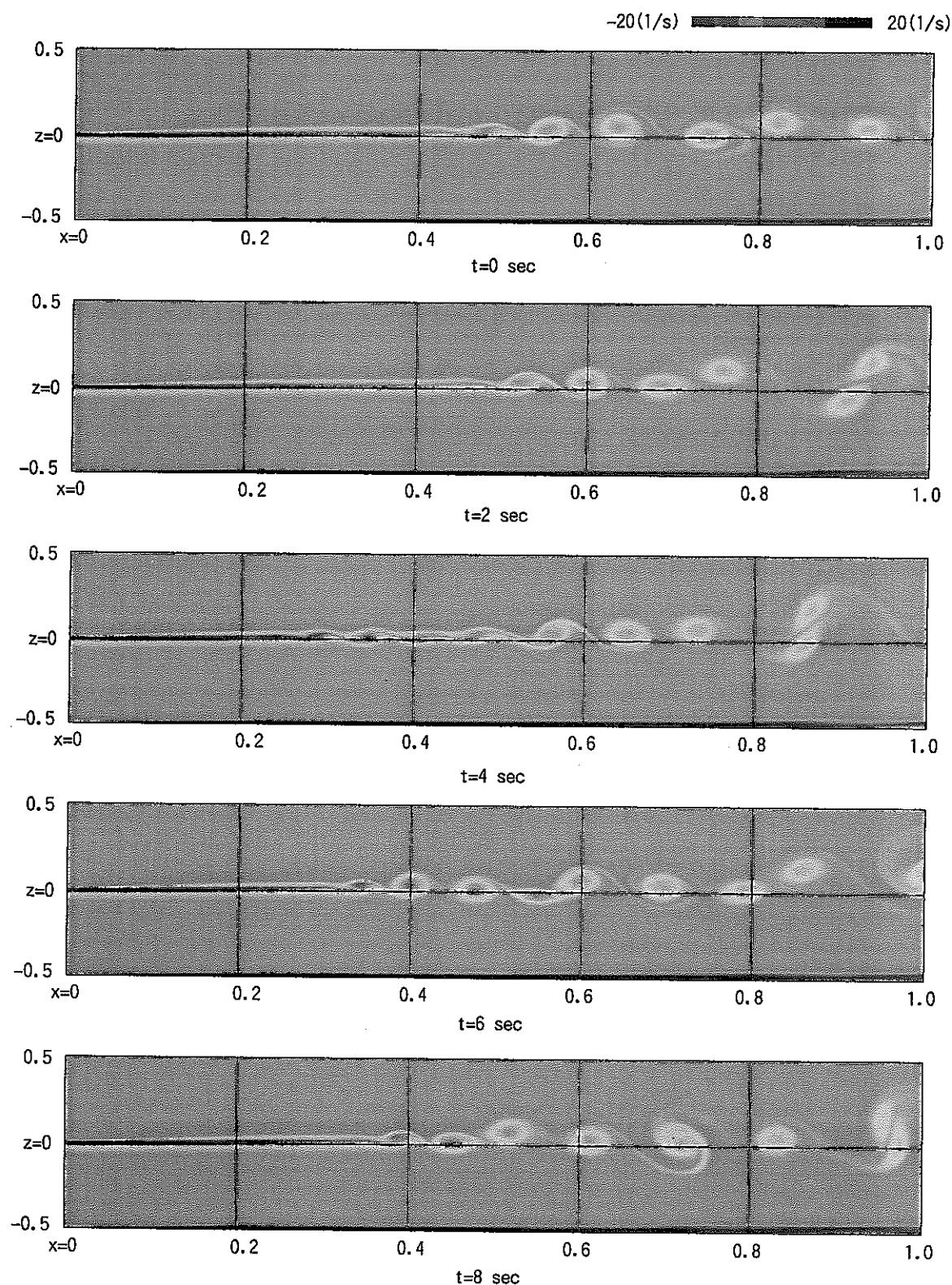


図 3.3(1/2) 湍度分布 (2 秒間隔) (解析ケース 1)

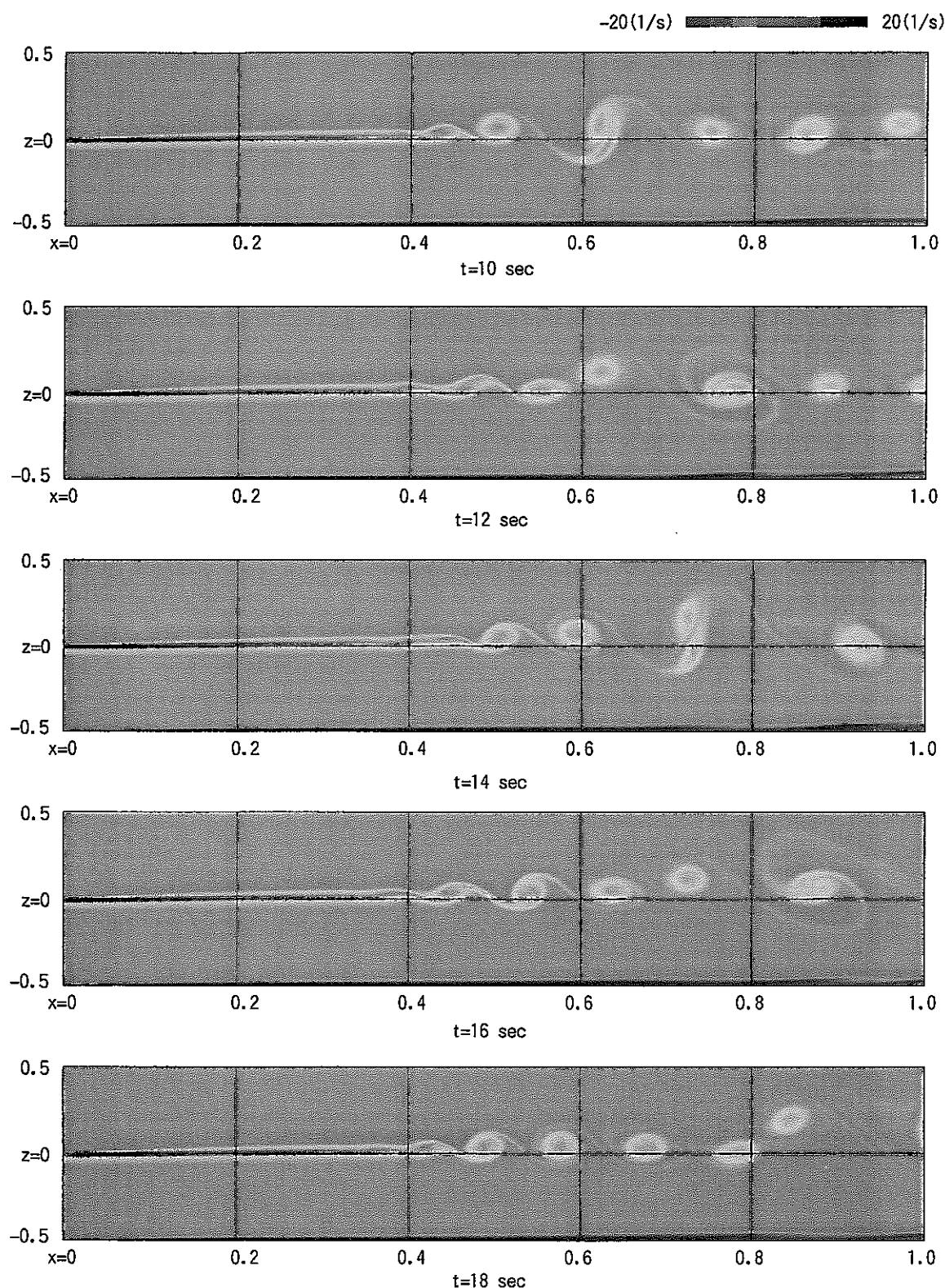


図 3.3(2/2) 涡度分布 (2 秒間隔) (解析ケース 1)

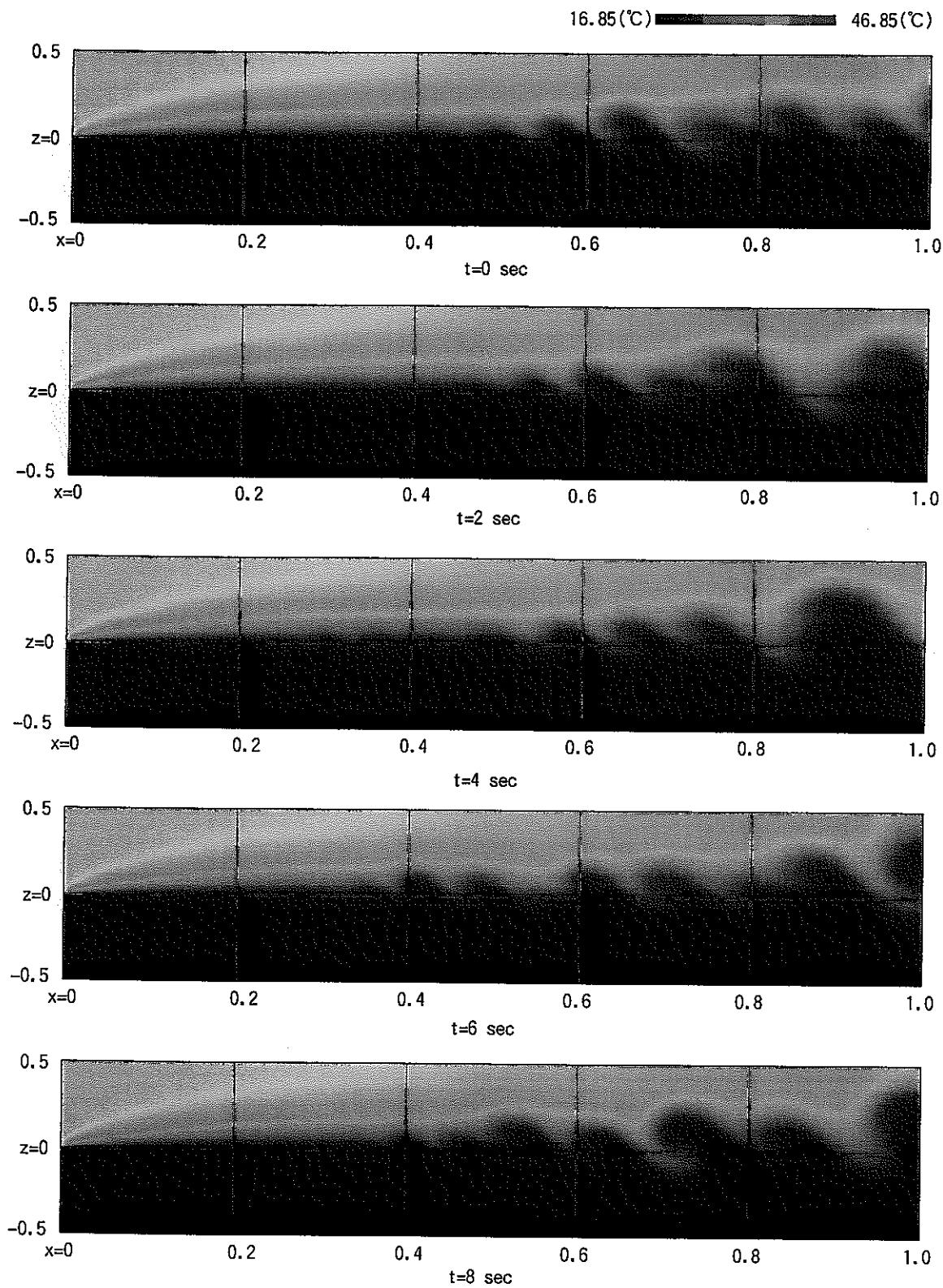


図 3.4(1/2) 温度分布 (2秒間隔) (解析ケース 1)

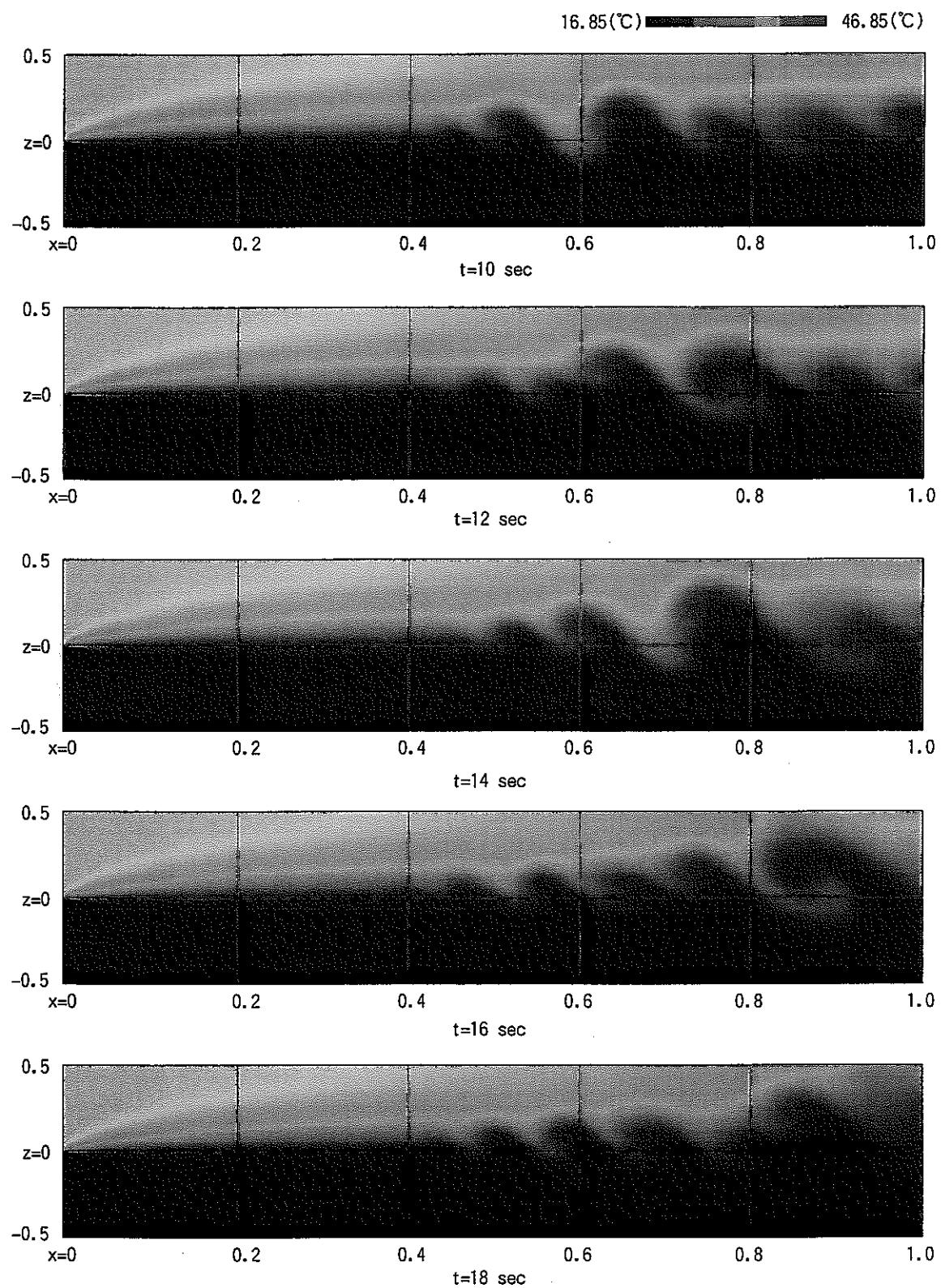
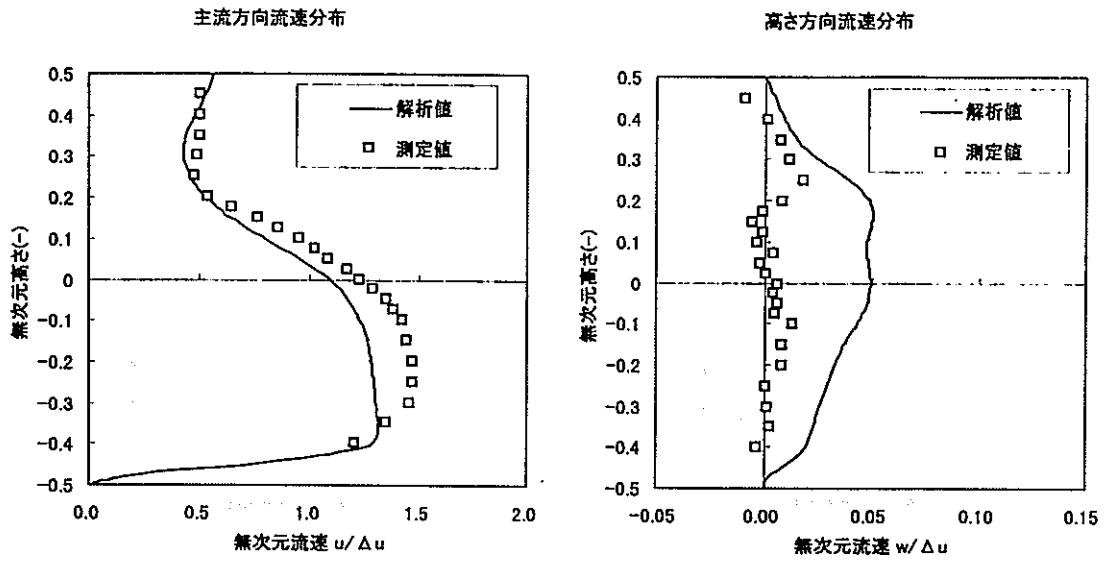
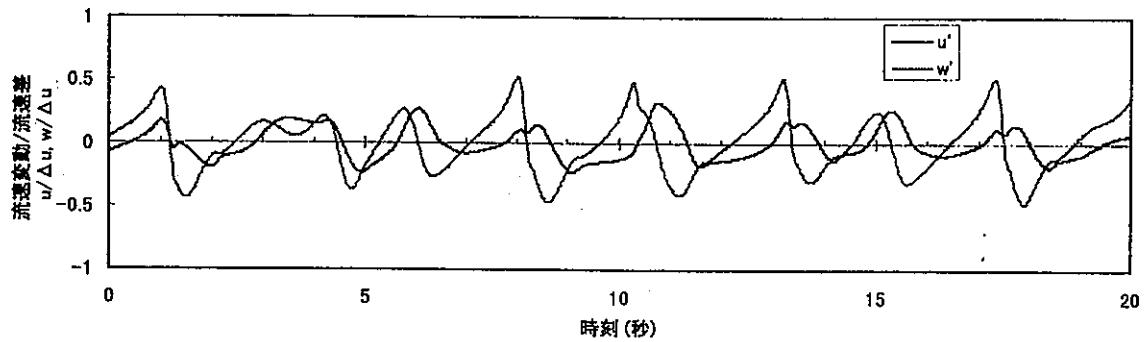


図 3.4(2/2) 温度分布 (2 秒間隔) (解析ケース 1)



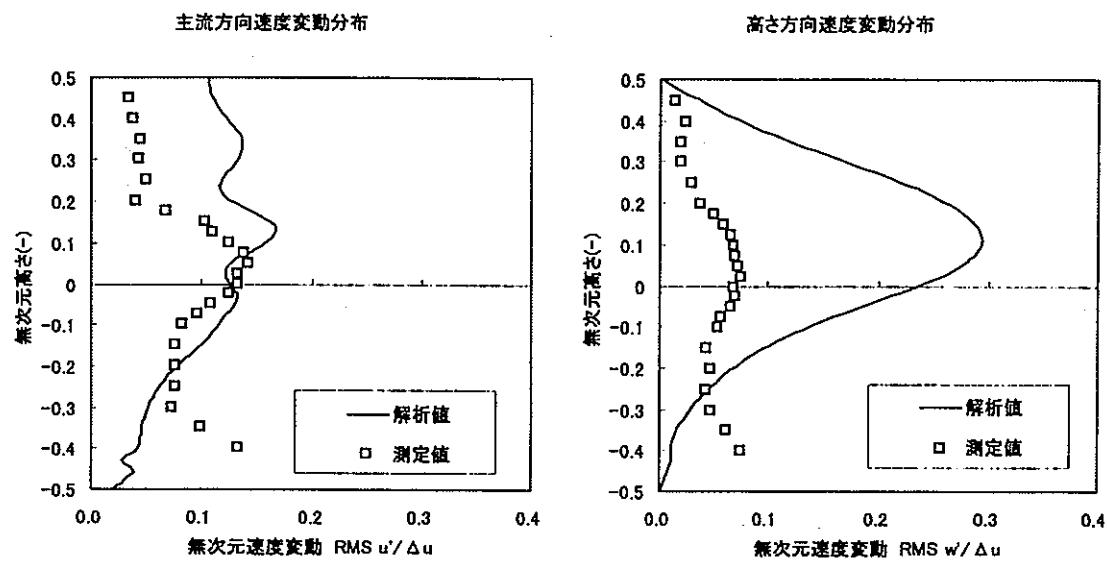
$x=0.9 \text{ m}$

図 3.5 主流方向、高さ方向流速分布（解析ケース 1）

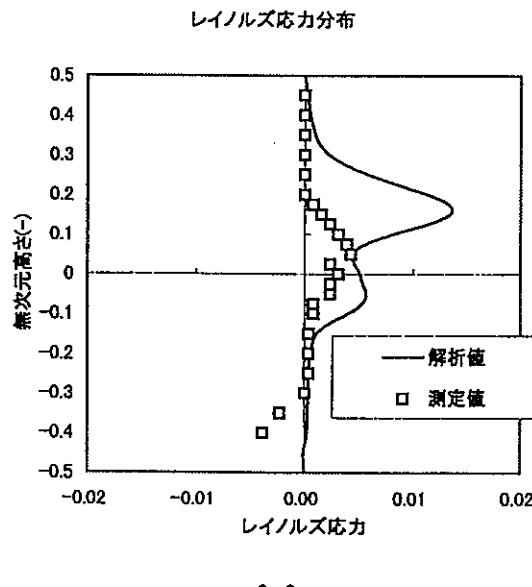


$x=0.9 \text{ m}$

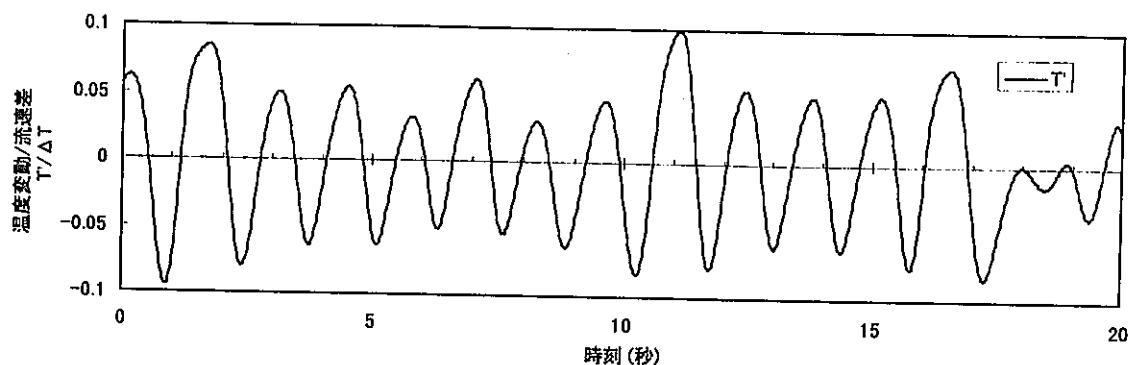
図 3.6 速度変動の時間変化（解析ケース 1）



$x=0.9$ m
図 3.7 速度変動分布（解析ケース 1）

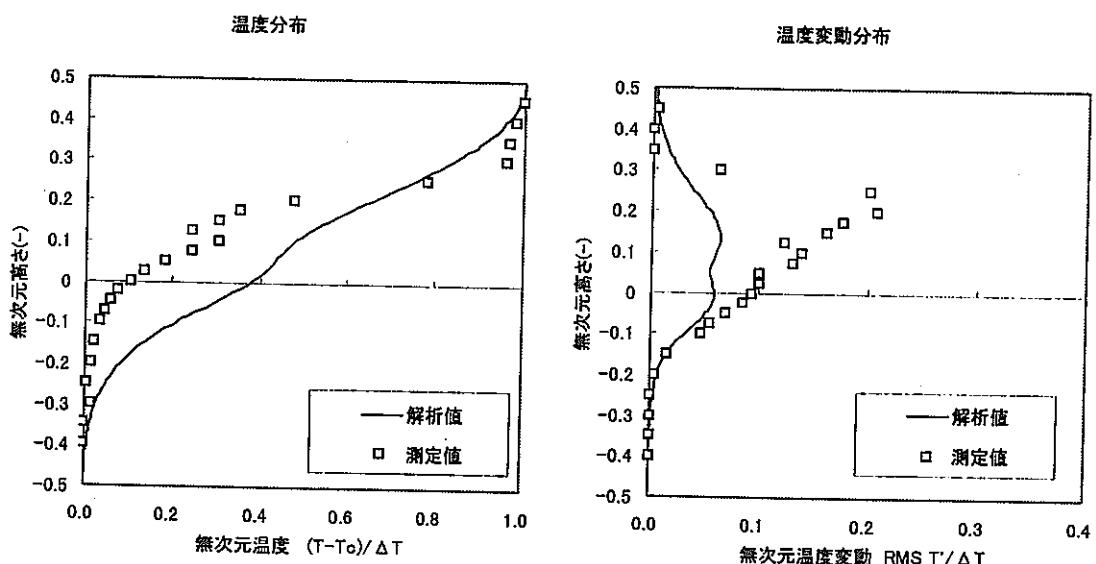


$x=0.9$ m
図 3.8 レイノルズ応力分布（解析ケース 1）



$x=0.9 \text{ m}$

図 3.9 溫度変動の時間変化（解析ケース 1）



$x=0.9 \text{ m}$

$x=0.9 \text{ m}$

図 3.10 溫度分布（解析ケース 1）

図 3.11 溫度変動分布（解析ケース 1）

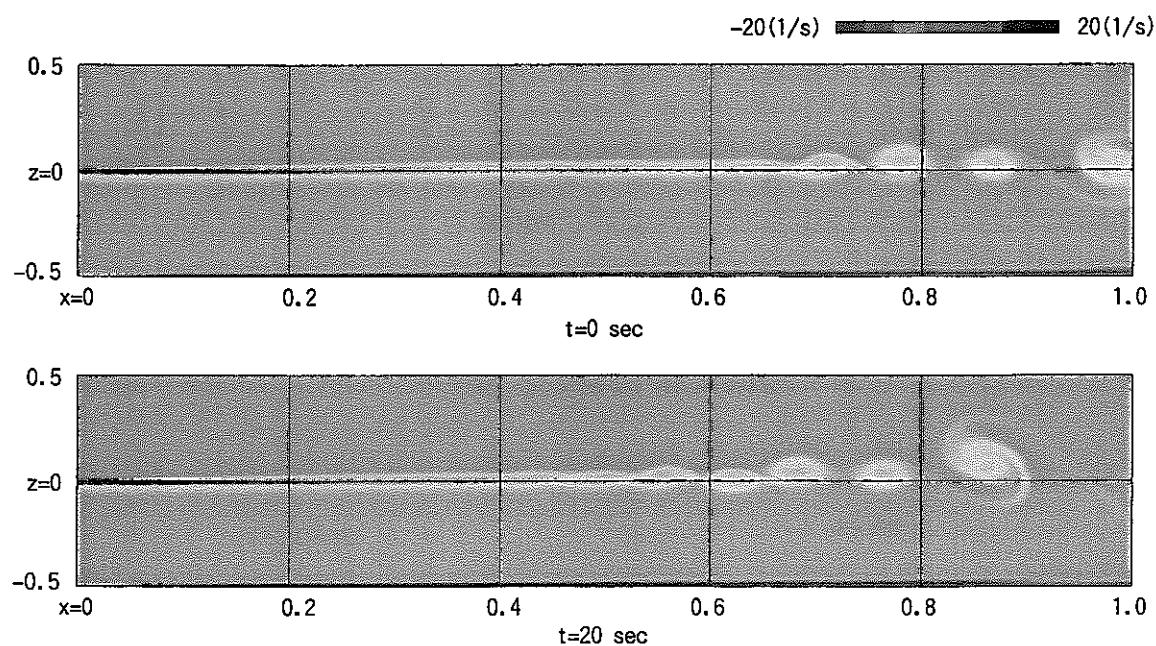


図 3.12 湍度分布 (20 秒間隔) (解析ケース 2)

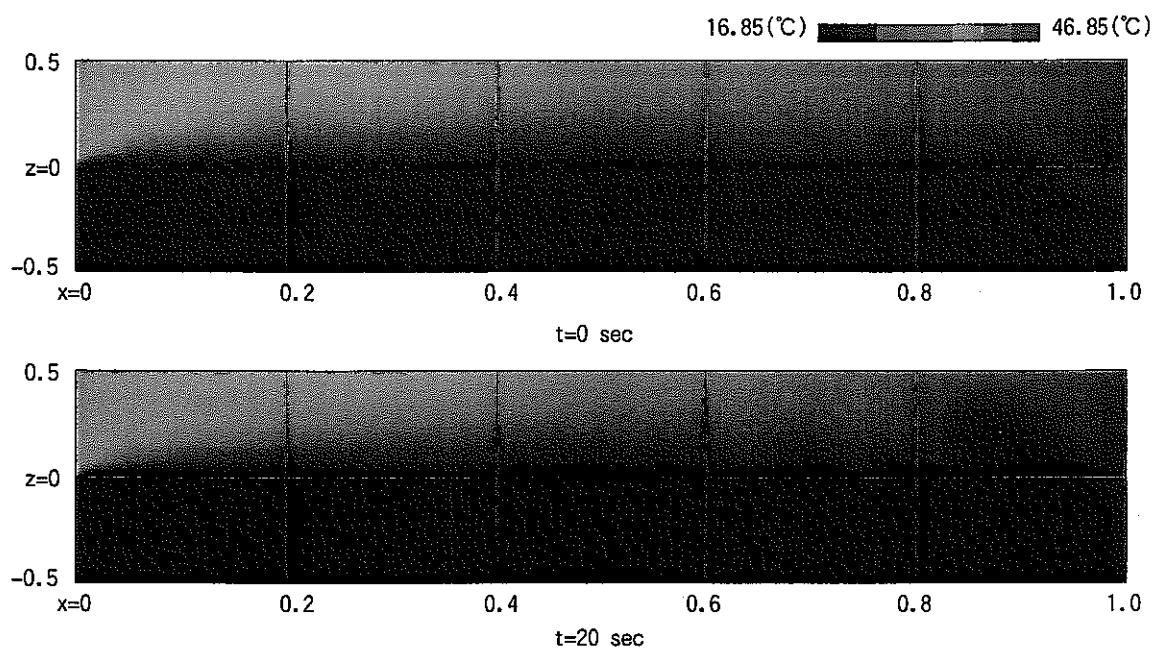
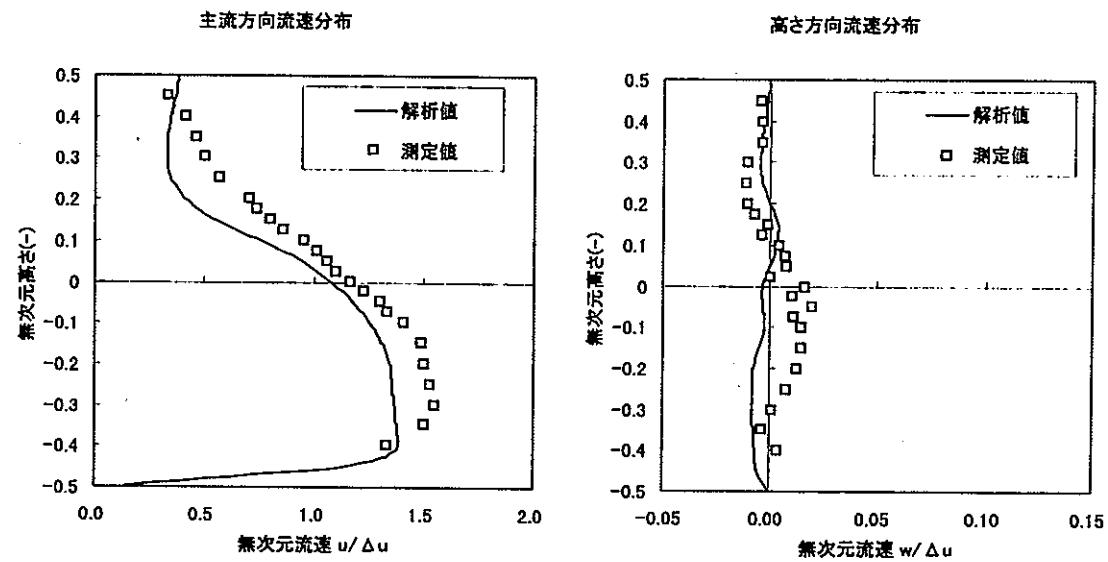
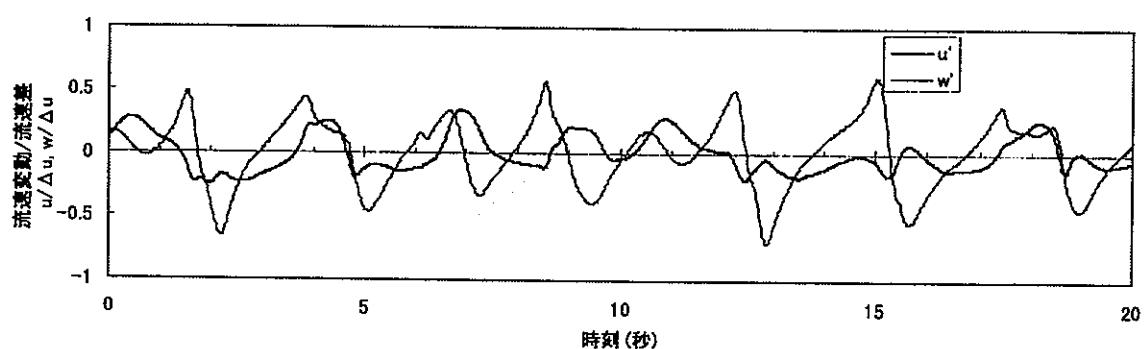


図 3.13 温度分布 (20 秒間隔) (解析ケース 2)



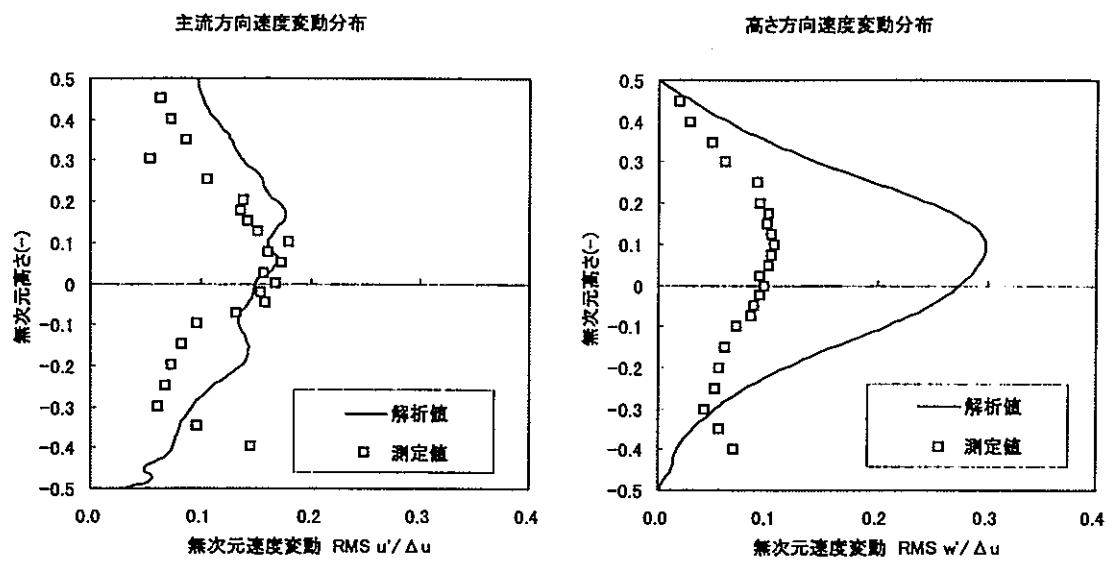
$x=0.9$ m

図 3.14 主流方向、高さ方向流速分布（解析ケース 2）

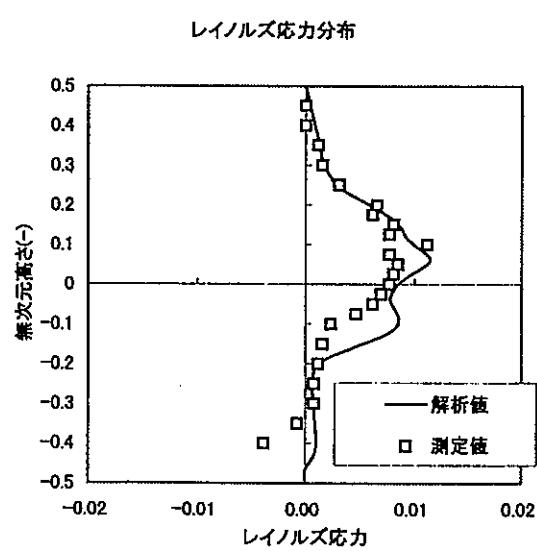


$x=0.9$ m

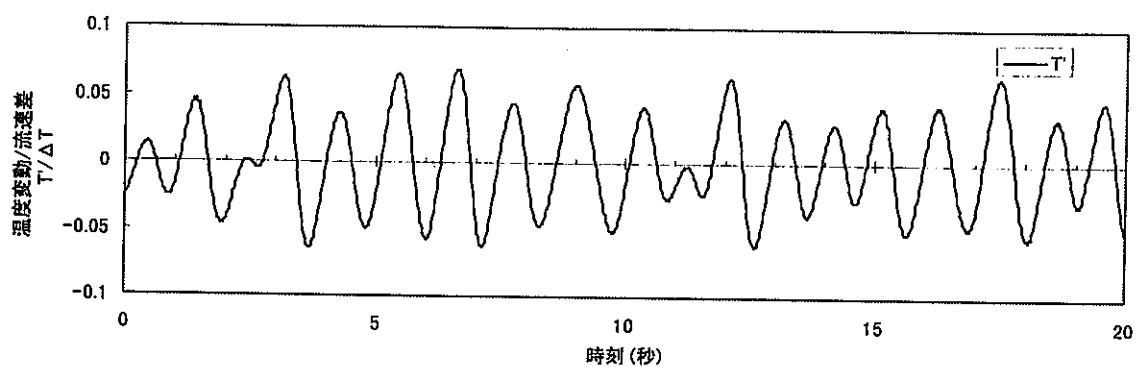
図 3.15 速度変動の時間変化（解析ケース 2）



$x=0.9$ m
図 3.16 速度変動分布（解析ケース 2）

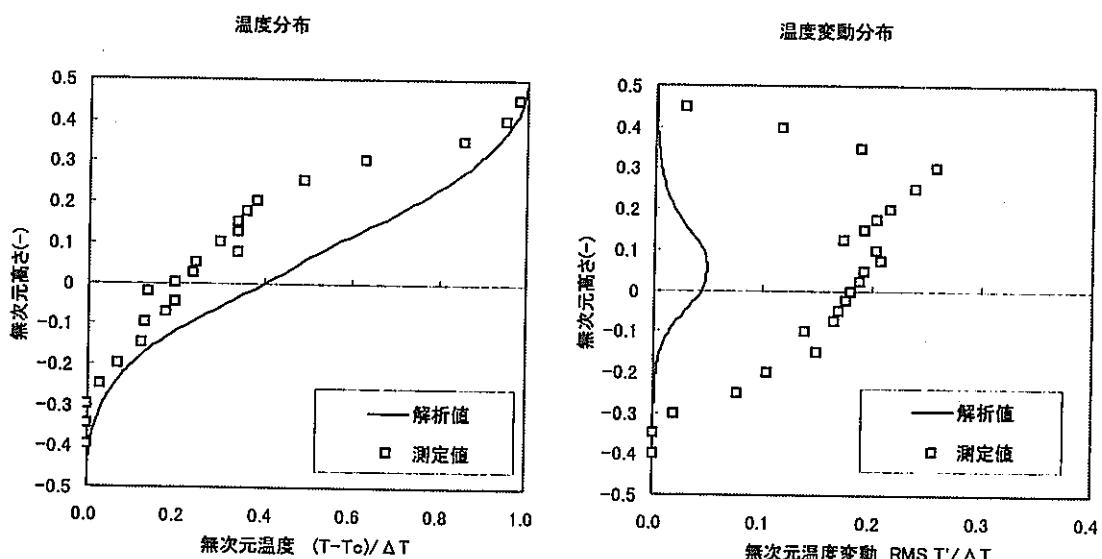


$x=0.9$ m
図 3.17 レイノルズ応力分布（解析ケース 2）



$x=0.9 \text{ m}$

図 3.18 温度変動の時間変化（解析ケース 2）



$x=0.9 \text{ m}$

$x=0.9 \text{ m}$

図 3.19 温度分布（解析ケース 2）

図 3.20 温度変動分布（解析ケース 2）

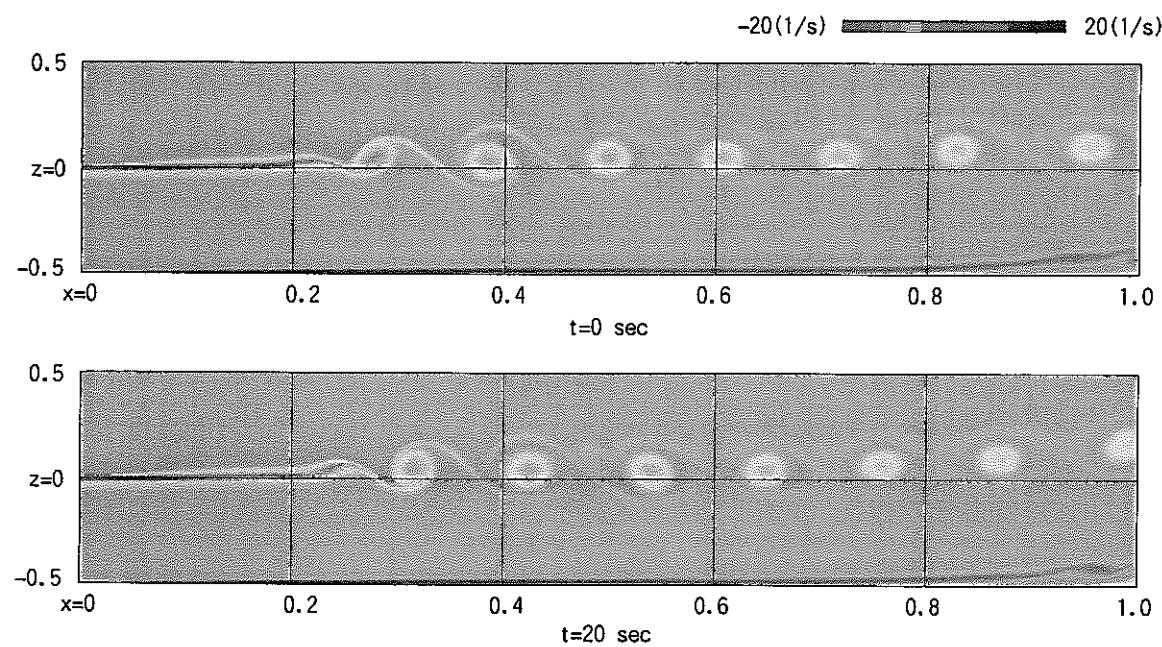


図 3.21 涡度分布 (20 秒間隔) (解析ケース 3)

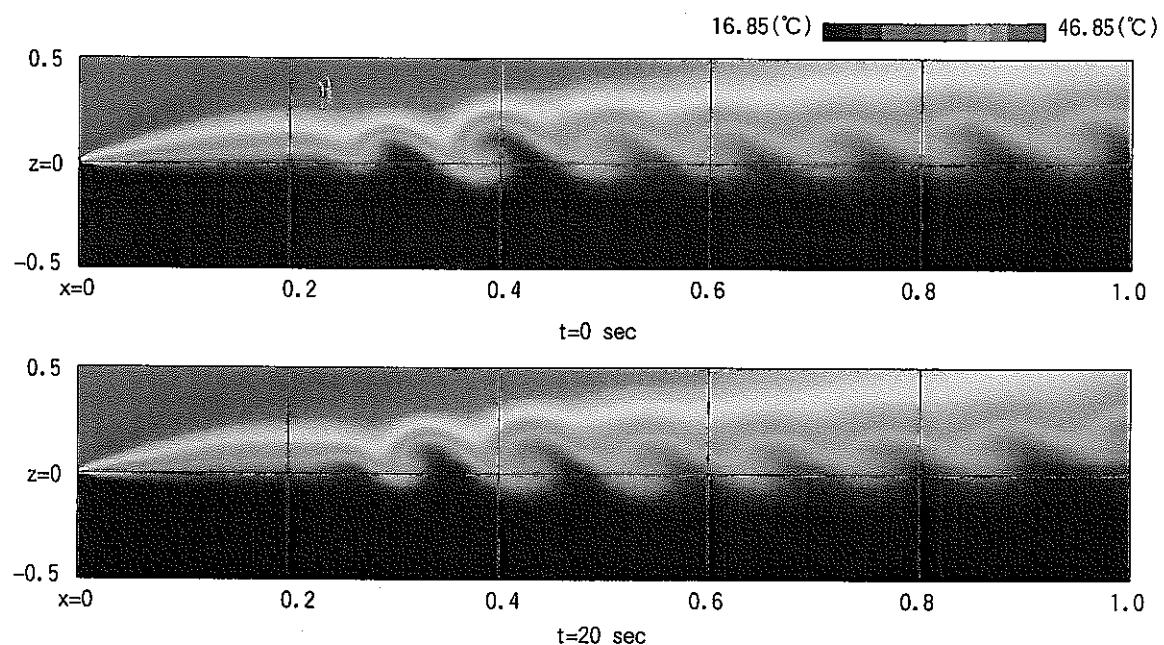
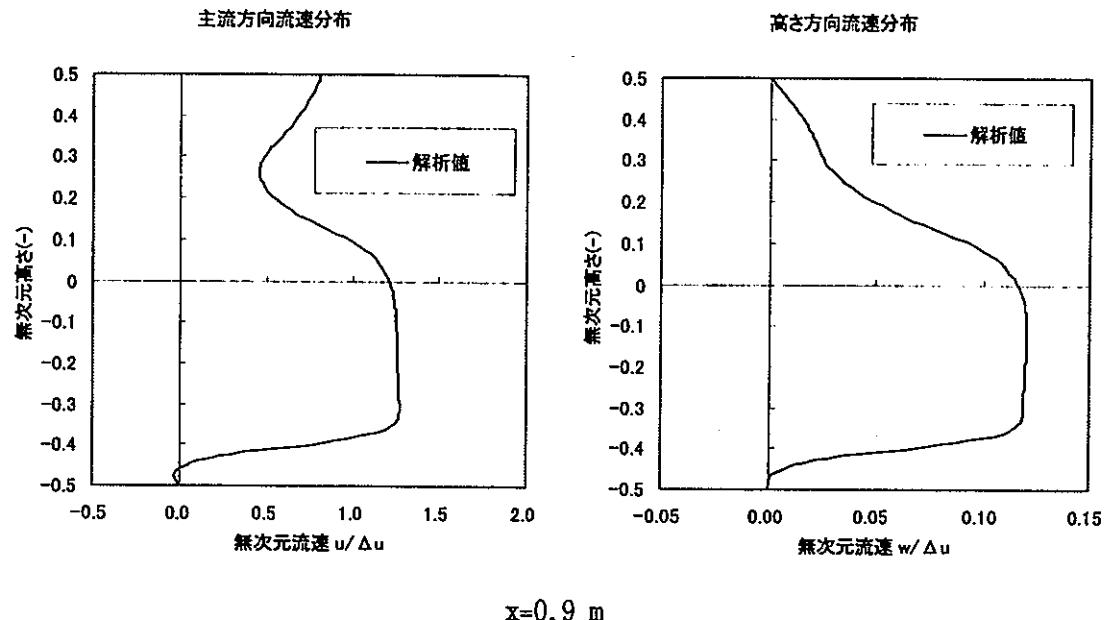
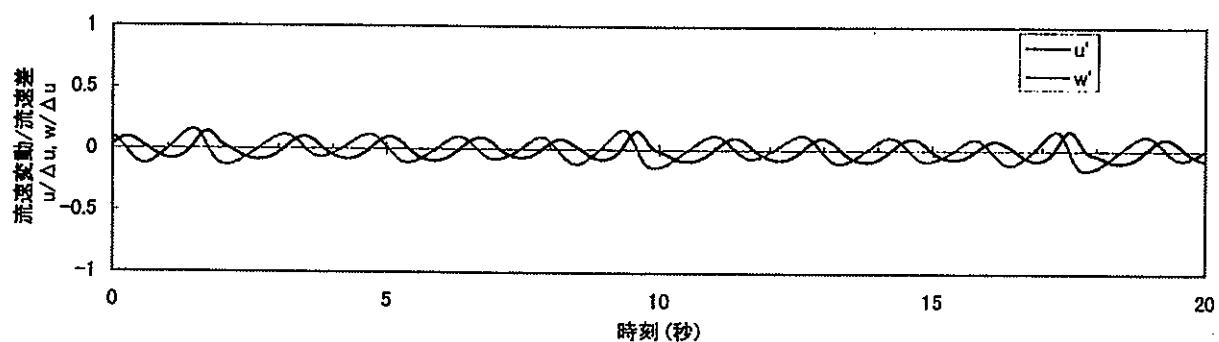


図 3.22 温度分布 (20 秒間隔) (解析ケース 3)



$x=0.9 \text{ m}$

図 3.23 主流方向、高さ方向流速分布（解析ケース 3）



$x=0.9 \text{ m}$

図 3.24 速度変動の時間変化（解析ケース 3）

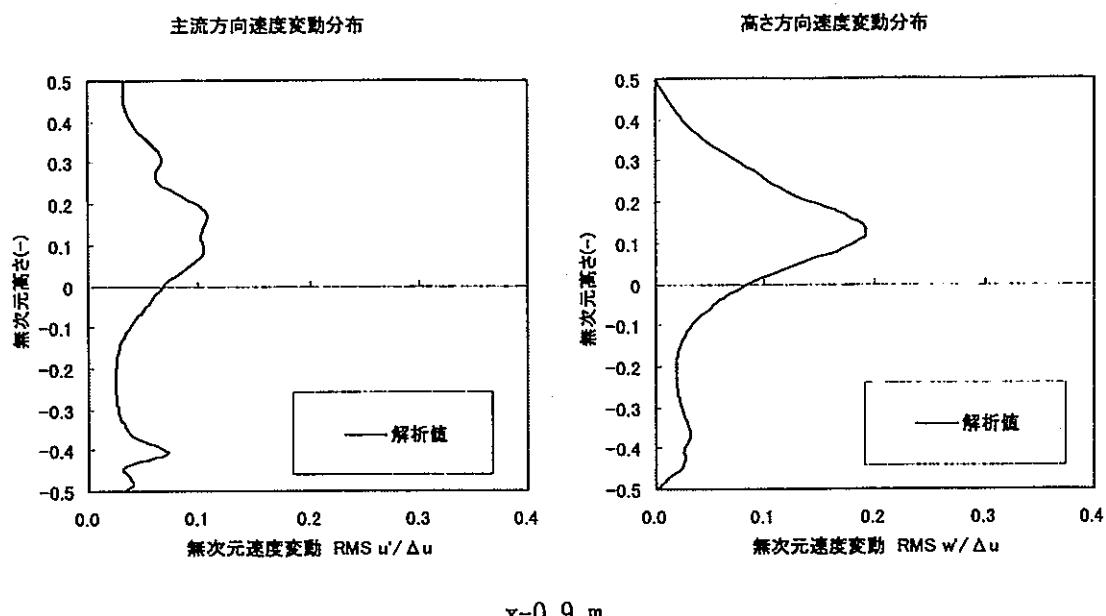


図 3.25 速度変動分布（解析ケース 3）

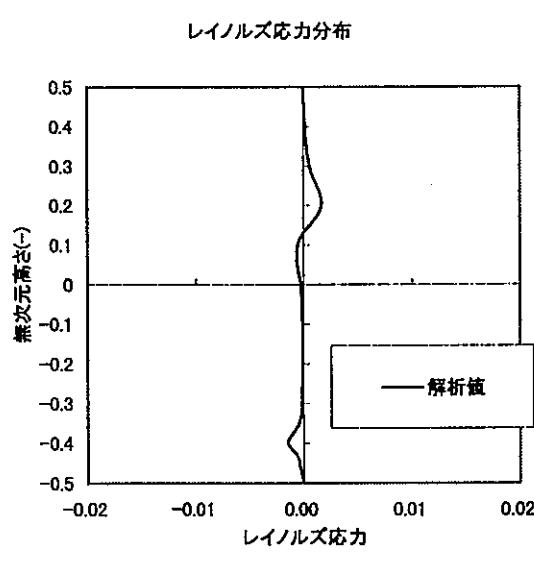


図 3.26 レイノルズ応力分布（解析ケース 3）

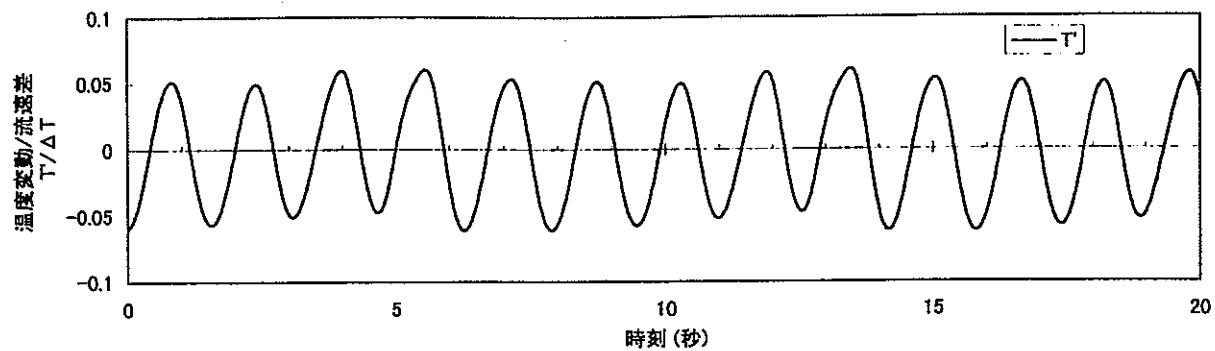
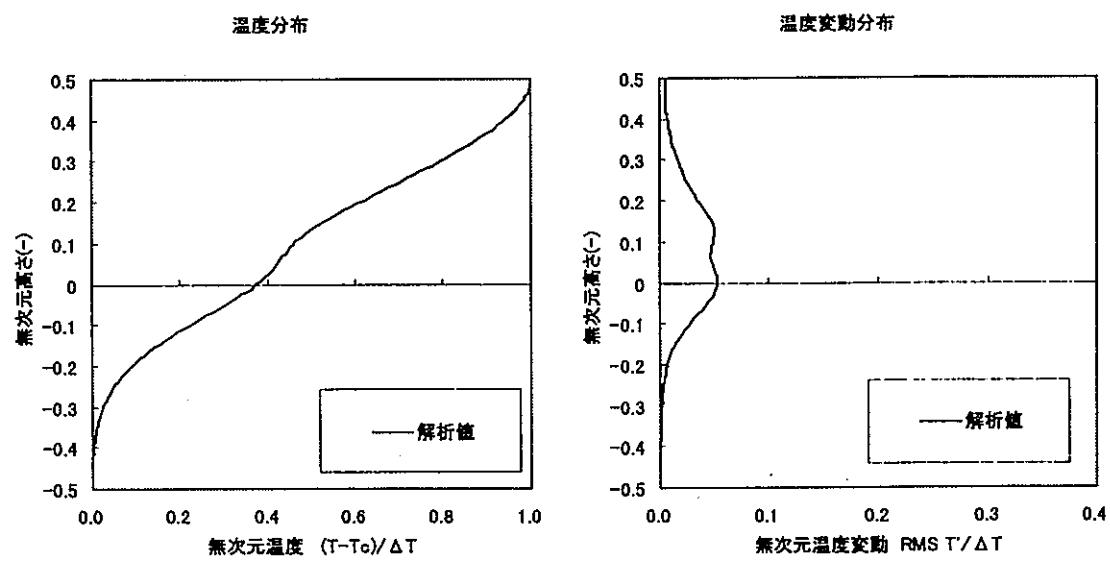
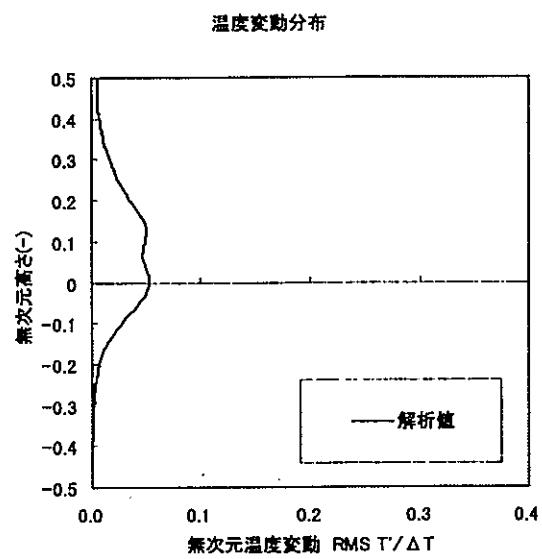


図 3.27 温度変動の時間変化（解析ケース 3）



$x=0.9 \text{ m}$

図 3.28 温度分布（解析ケース 3）



$x=0.9 \text{ m}$

図 3.29 温度変動分布（解析ケース 3）

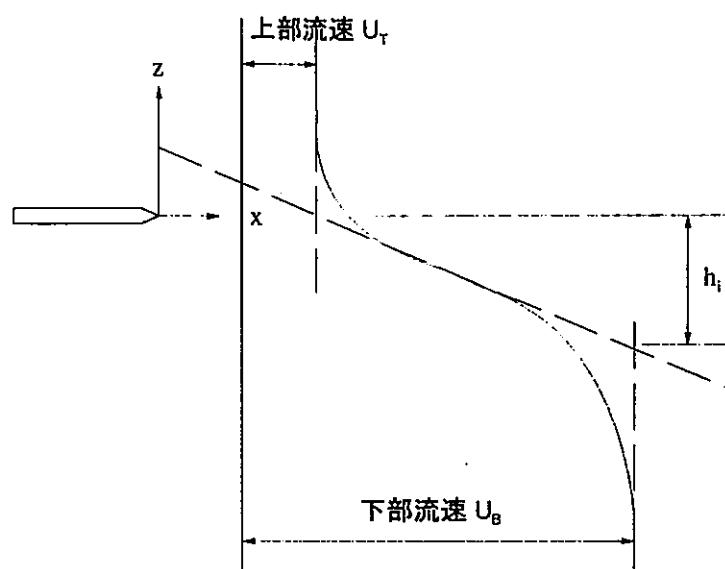
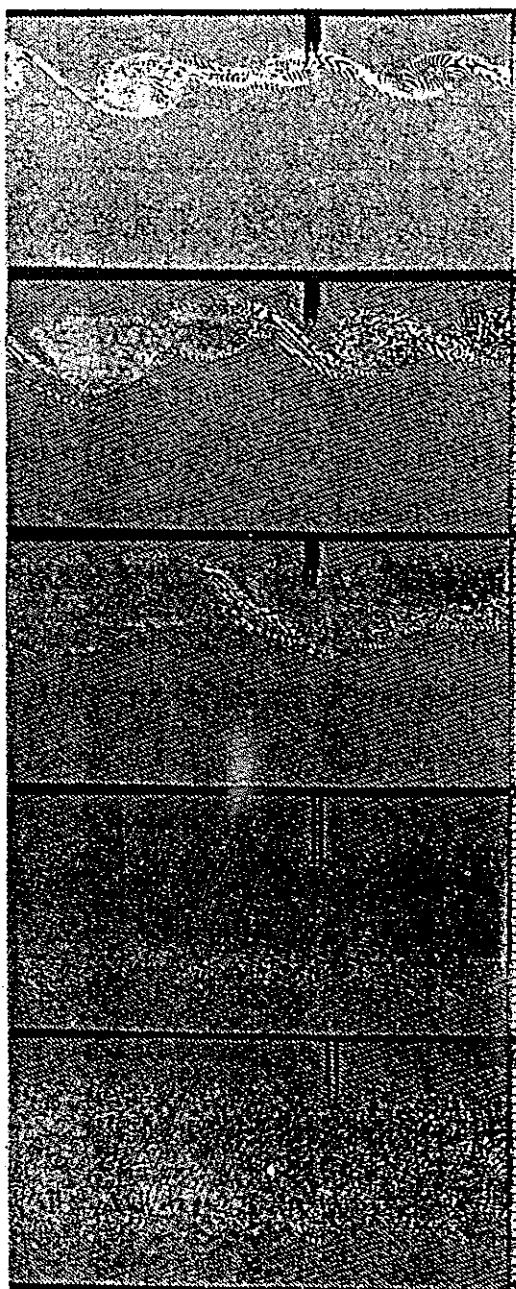


図 4.1 文献(21)の h_i の定義



ケルビン・ヘルムホルツ不安定による巻き波の発生と崩壊 (Thope, J. Fluid Mech. 61, 1973)

図 4.2 巷き波の発生と崩壊

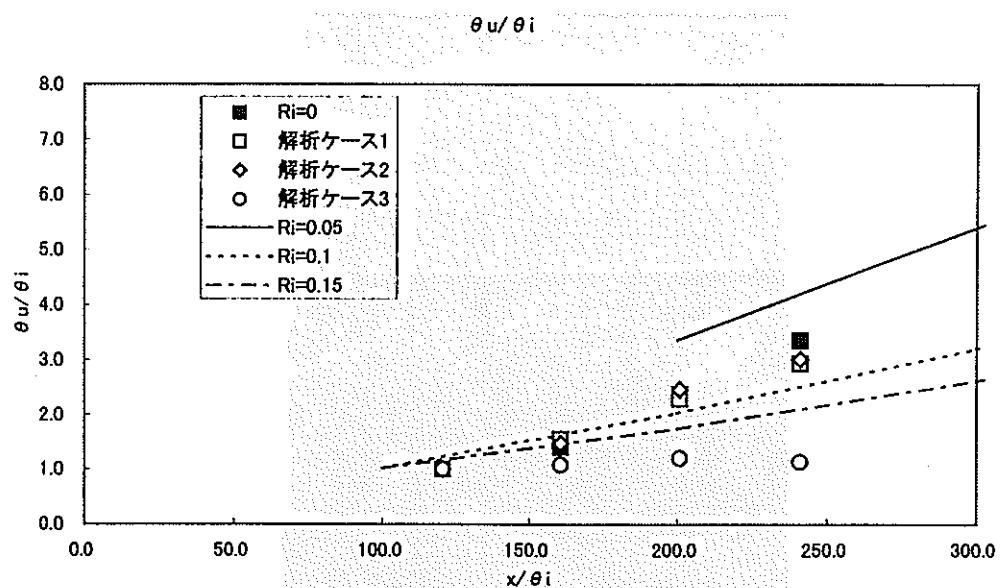


図 4.3 速度の積分厚さの下流位置による変化

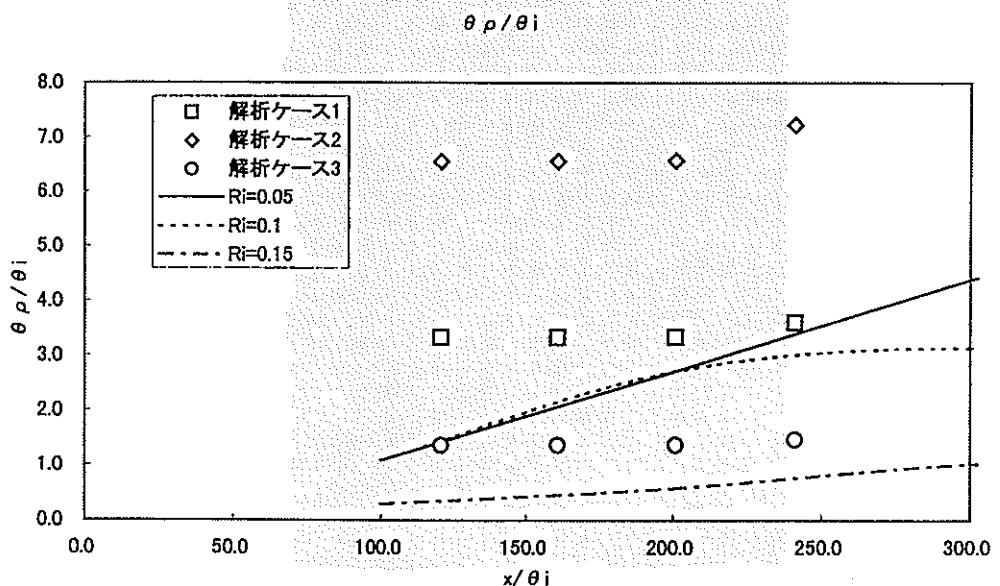


図 4.4 密度の積分厚さの下流位置による変化

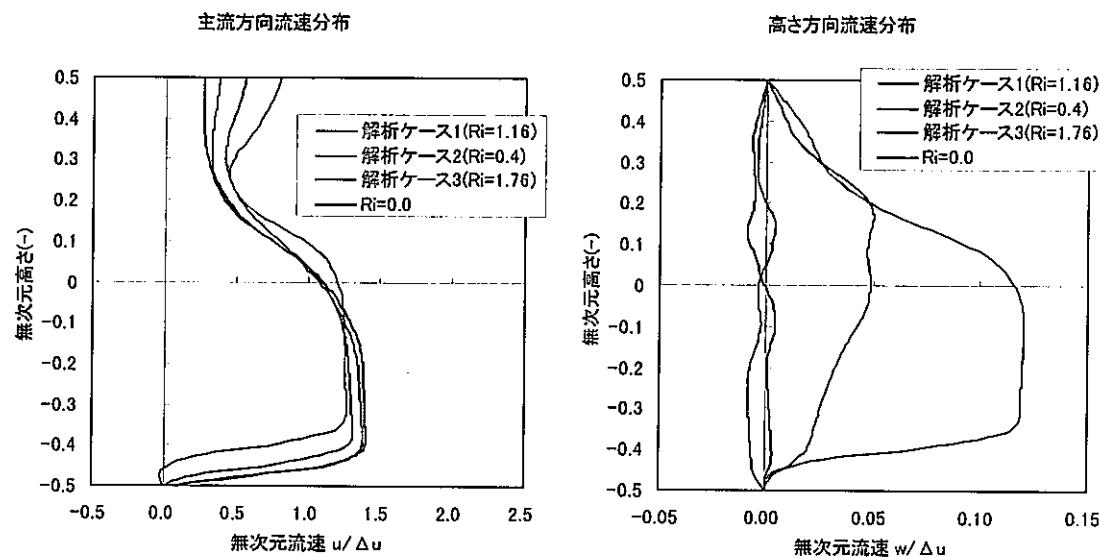


図 4.5 Ri 数による速度分布の相違

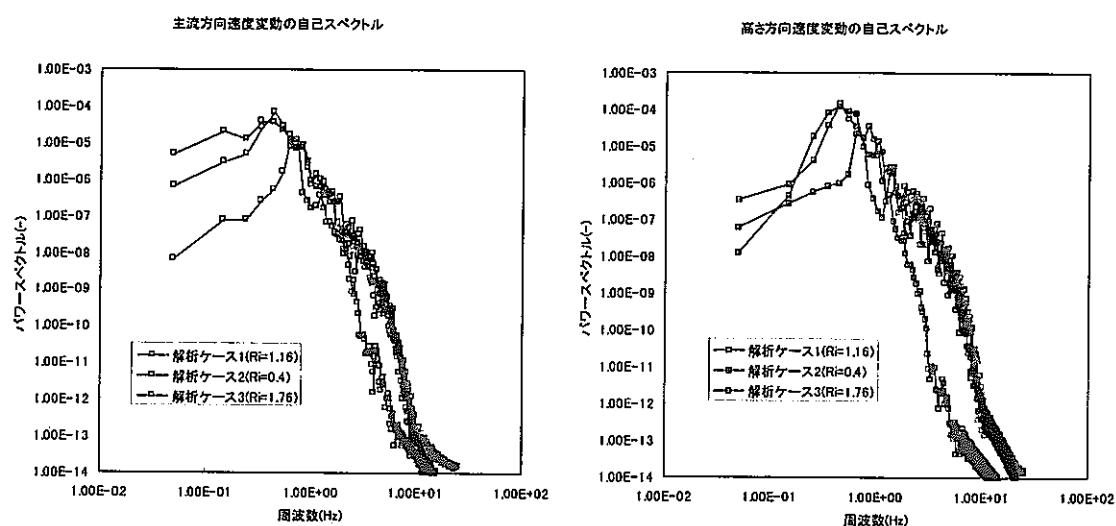


図 4.6 Ri 数による速度変動の自己スペクトルの相違

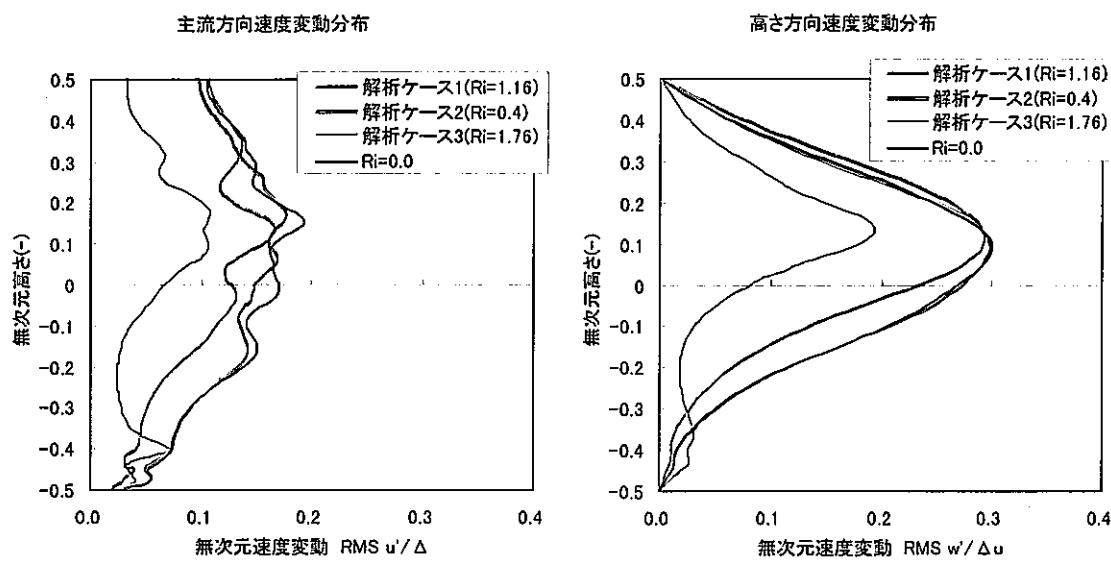


図 4.7 Ri 数による速度変動分布の相違

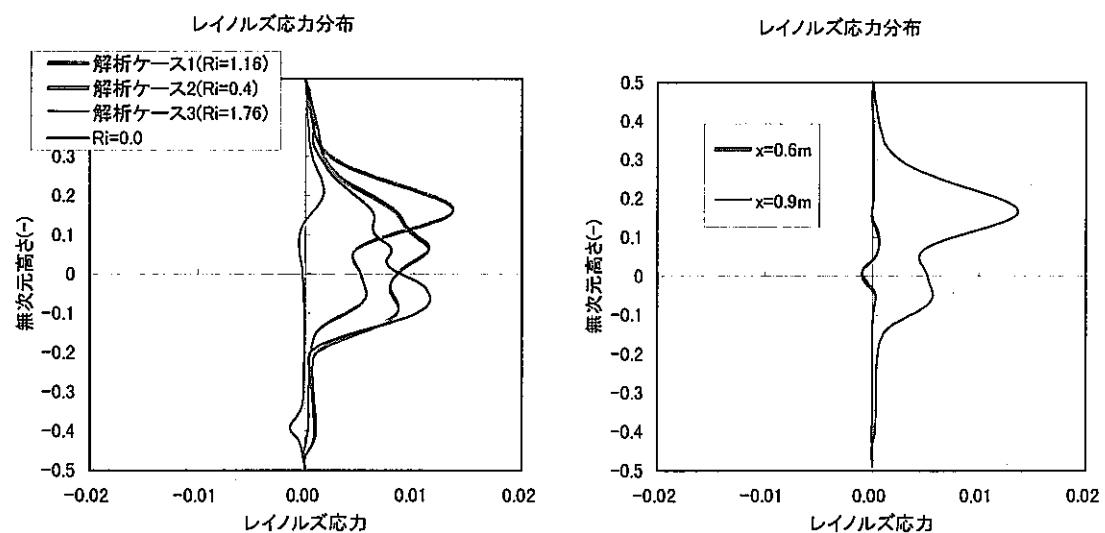


図 4.8 Ri 数によるレイノルズ応力分布の相違 図 4.9 解析ケース 1 の下流方向位置によるレイノルズ応力の相違

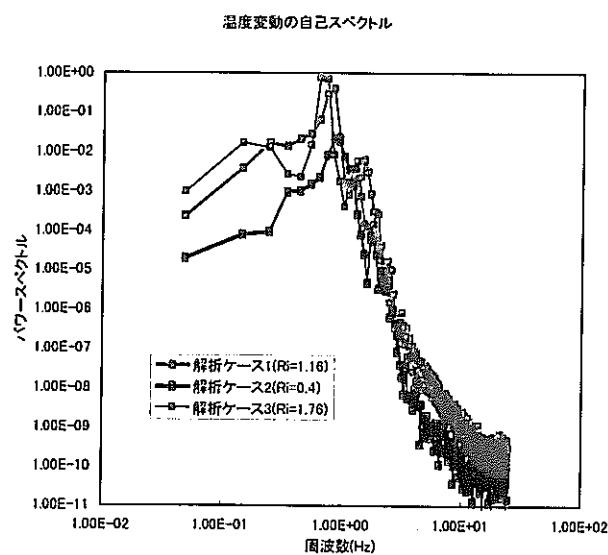


図 4.10 R_i 数による温度変動の自己スペクトルの相違

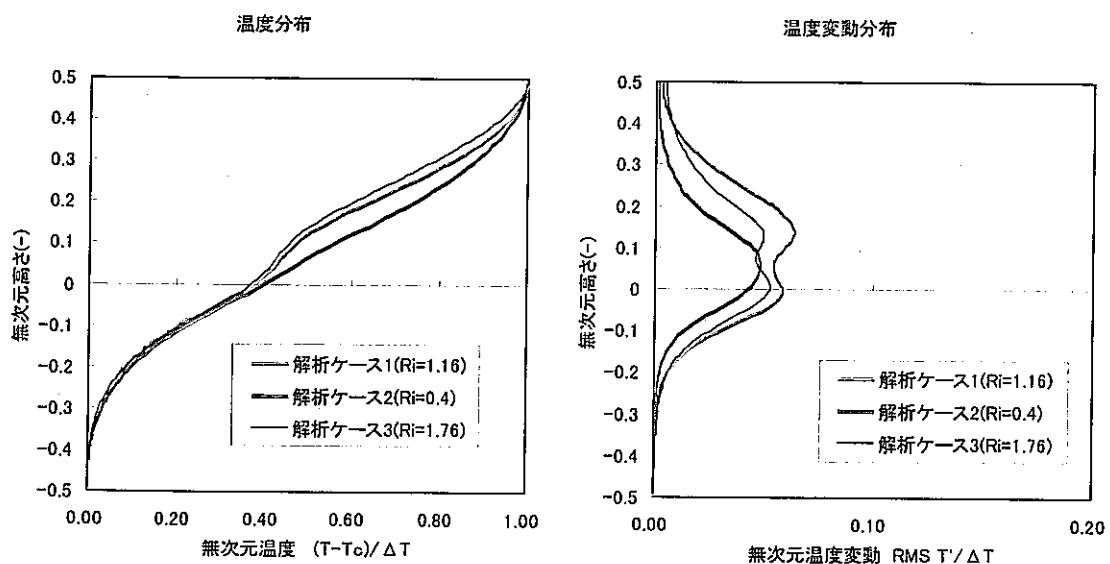


図 4.11 R_i 数による温度分布の相違

図 4.12 R_i 数による温度変動分布の相違