

温度成層流における乱流混合の直接シミュレーション

—等温場における乱流混合—

1997年4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

公開資料

PNC TN9410 97-033

1997年4月

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

土井 権浩*、村松 寿晴*

要　旨

高速炉のスクラ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の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が存在し、これ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。

本研究では成層流の乱流特性を表現する表示式や数値解析モデルの検証を目的として、流体に水を用いた成層乱流実験について密度差のない等温場を差分法による直接シミュレーションによって解析し、乱流量の評価を行った。

解析結果から、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。

解析メッシュ幅と流入流速分布を変更し、2次元解析と3次元解析を実施し、主流方向の上流側と下流側で流速分布、速度変動分布およびレイノルズ応力分布を求めた。解析結果に時間平均操作を施した流速、速度変動およびレイノルズ応力を測定結果と比較した。その結果、解析メッシュ幅を詳細化した場合にも下流側では速度変動量やレイノルズ応力に相違は生じず、不均一な流入流速分布は乱れを上流側で発達させ、上流側の位置での速度変動量やレイノルズ応力に影響を与えるが、下流側の位置においては、速度変動量やレイノルズ応力は流入流速分布に影響されないことがわかった。また、設定した3次元解析体系では、奥行き方向の変動が主流方向や高さ方向の変動に比べて非常に小さく、流速分布、速度変動およびレイノルズ応力について、2次元解析と3次元解析でほとんど差異を生じないことが示された。また、解析結果と測定結果の比較から、高さ方向の流速分布および速度変動は測定結果と相違するものの、主流方向については流速分布、速度変動とも測定結果と良く一致しており、二成層流における二次元的な大規模渦構造が解析的に模擬されている。

* 大洗工学センター 基盤技術開発部 热流体技術開発室

April, 1997

**Direct Numerical Analysis of Turbulent Mixing in a Thermally Stratified Flows
-Turbulent Mixing in Isothermal Field-**

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 structural components. Therefore it is important to evaluate characteristics of phenomena in the design of the internal structure in an LMFBR plenum. The phenomena is a stable stratified flow and shear layer is formed by bringing two streams of fluid. Previous many experiments and numerical simulations have shown the layer is dominated by large, spanwise coherent vortex structures and the structures have an important effect on mixing.

In this study, to evaluate numerical model and its constants for the thermal stratification phenomena, numerical analyses were carried out for a shear flow test with water. The test that had no temperature difference was analyzed with direct numerical simulation code. The numerical results could indicate the large spanwise coherent vortex structures with vortex growing and pairing. The analyses with different mesh arrangement, inlet velocity distribution and two dimensional and three dimensional arrangement were carried out and the numerical velocity, velocity fluctuation and Reynolds stress were compared with the experimental results. Through the comparison, the difference of mesh arrangement or the velocity distribution in inlet boundary did not cause distinction of the velocity, velocity fluctuation and Reynolds stress at 0.9 meter away from separator. Velocity fluctuations in the depth was very small in the three dimensional analysis and no difference was found in the comparison of the results with two dimensional analysis. The numerical velocity and velocity fluctuation in horizontal direction were well agreed with measured velocity, but the velocity and fluctuation in vertical direction were higher than measured value.

* 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	.....	3
2.4 境界条件	.....	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	.....	6
3.3 解析ケース 3	.....	8
3.4 解析ケース 4	.....	9
3.5 解析ケース 5	.....	10
第4章 考 察	.....	13
4.1 サンプリング時間の評価	.....	13
4.2 解析メッシュ幅による結果の相違	.....	13
4.3 流入流速による結果の相違	.....	14
4.4 2次元解析と3次元解析による結果の相違	.....	14
4.5 解析結果と測定結果との比較	.....	15
第5章 結 言	.....	16
謝 辞	.....	17
参考文献	.....	18

表リスト

表 2.1 実験条件	.....	20
表 2.2 解析条件	.....	20

図リスト

図 2.1 実験装置概念図	.....	21
図 2.2 実験結果(実験ケース 1)	.....	22
図 2.3 解析体系と解析メッシュ図	.....	23
図 2.4 流入流速分布	.....	24
 図 3.1 涡度分布(20 秒間隔) (解析ケース 1)	.....	25
図 3.2 涡度分布(2 秒間隔) (解析ケース 1)	.....	26
図 3.3 主流方向、高さ方向流速分布 (解析ケース 1)	.....	28
図 3.4 速度変動の時間変化 (解析ケース 1)	.....	29
図 3.5 速度変動分布(解析ケース 1)	.....	30
図 3.6 レイノルズ応力分布(解析ケース 1)	.....	31
図 3.7 涡度分布(解析ケース 2)	.....	32
図 3.8 主流方向、高さ方向流速分布 (解析ケース 2)	.....	33
図 3.9 速度変動の時間変化 (解析ケース 2)	.....	34
図 3.10 速度変動分布(解析ケース 2)	.....	35
図 3.11 レイノルズ応力分布(解析ケース 2)	.....	36
図 3.12 涡度分布(解析ケース 3)	.....	37
図 3.13 主流方向、高さ方向流速分布 (解析ケース 3)	.....	38
図 3.14 速度変動の時間変化 (解析ケース 3)	.....	39
図 3.15 速度変動分布(解析ケース 3)	.....	40
図 3.16 レイノルズ応力分布(解析ケース 3)	.....	41
図 3.17 涡度分布(解析ケース 4)	.....	42
図 3.18 主流方向、高さ方向流速分布 (解析ケース 4)	.....	43
図 3.19 速度変動の時間変化 (解析ケース 4)	.....	44
図 3.20 速度変動分布(解析ケース 4)	.....	45
図 3.21 レイノルズ応力分布(解析ケース 4)	.....	46
図 3.22 涡度分布(解析ケース 5)	.....	47
図 3.23 主流方向、高さ方向流速分布 (解析ケース 5)	.....	48

図 3.24 速度変動の時間変化(解析ケース 5)	49
図 3.25 速度変動分布(解析ケース 5)	50
図 3.26 レイノルズ応力分布(解析ケース 5)	51
図 4.1 サンプリング時間による結果の相違($x=0.45\text{ m}$)	52
図 4.2 サンプリング時間による結果の相違($x=0.9\text{ m}$)	53
図 4.3 解析メッシュ幅による結果の相違($x=0.45\text{ m}$)	54
図 4.4 解析メッシュ幅による結果の相違($x=0.9\text{ m}$)	55
図 4.5 流入流速分布による結果の相違($x=0.45\text{ m}$)	56
図 4.6 流入流速分布による結果の相違($x=0.9\text{ m}$)	57
図 4.7 2次元解析と3次元解析による結果の相違($x=0.45\text{ m}$)	58
図 4.8 2次元解析と3次元解析による結果の相違($x=0.9\text{ m}$)	59

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評価の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⁾が実施され、多次元熱流動解析による評価⁽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⁾、LESや擬スペクトル法によるもの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。

本研究は、流体に水を用いた成層乱流実験⁽¹⁰⁾を差分法による直接シミュレーションによって解析し、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それぞれ評価し、直接シミュレーションの結果を用いて応力代数式乱流モデルのモデル定数の検討を行うことを目的に実施されるものである。

本報は、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成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、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とし、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 は上部と下部の平均温度の差、 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 1 であり、実験ケース 2 から 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

本報では等温場を対象としているので、実験ケース 1 の温度差のない条件 ($Ri=0$ 、 $Re=1.7 \times 10^4$) の測定結果について説明する。図 2.2 にセパレータ終端から下流部への距離 x がそれぞれ 0.45 m、0.9 m で測定された主流方向流速分布、高さ方向流速分布、主流方向速度変動、高さ方向速度変動およびレイノルズ応力の分布を示す。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 $-u'w'/\Delta u^2$ として表す。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。

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。

測定結果から主流方向流速、主流方向流速変動、高さ方向流速分布、高さ方向流速変動およびレイノルズ応力は、 $x=0.45\text{ m}$ の場合の値よりも $x=0.9\text{ m}$ の場合の方が、各値は高さ方向の中央付近より上方で大きくなっている。この理由は境界面より上側の乱れが下流側に向かうに従って大きくなり、乱れが上方に向かって発達して行くことを示していると考えられる。高さ方向流速分布では、流路の高さ方向の全ての位置で、 $x=0.45\text{ m}$ の場合よりも $x=0.9\text{ m}$ の場合の流速の方が大きくなっている。これは高さ方向の変動が下流に向かうに従って大きくなることを示していると考えられる。また、主流方向と高さ方向の流速変動の大きさを比較するとセパレータ終端からの距離にかかわらず、主流方向の変動の方が大きく、これは既往の測定結果⁽⁸⁾と一致している。

2.1.4 解析対象

表 2.1 の温度差のない実験条件 $Ri=0$ 、 $Re=1.7\times 10^4$ （実験ケース 1）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⁽¹⁸⁾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多次元熱流動解析コードである。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。実験ケース 1 に対して、2 次元解析と 3 次元解析を行った。また、メッシュ幅の大きさによる影響を評価するため、解析メッシュ幅を変更した解析ケースと流入境界条件の影響を調べるため流入流速分布を変化させた解析ケースを設定した。以下に設定理由を示す。

2.3.1 解析メッシュ幅

解析メッシュ幅は主流方向(x 方向)、高さ方向(z 方向) および 3 次元の解析ケースの場合には奥行き方向(y 方向) に 2 mm を基準とし、高さ方向にメッシュ幅 1 mm の解析ケ

ースも設定した。既往の研究⁽¹⁰⁾では、最大波数 $k_{max} = 2\pi / \Delta x$ あるいは $2\pi / \Delta z$ ($\Delta x, \Delta z$ は x 方向、 z 方向のメッシュ幅) が測定された流速変動のエネルギースペクトルから推測される平衡領域の範囲内にあり、慣性小領域の波数よりも大きくなるように設定している。本解析で使用するメッシュ幅 2 mm での最大波数は 3141 であり、既往研究と同様の条件を満足する設定となっている。解析メッシュ図を図 2.3 に示す。

2.3.2 流入流速分布

流入流速分布が解析結果に与える影響を評価するため、流入流速分布をセパレータの上方と下方でそれぞれ一定値とする場合と測定結果⁽¹⁰⁾を用いた場合を設定した。セパレータの上方と下方でそれぞれ一定値とする場合には、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。3 次元解析における奥行き方向の流速分布は、2 次元解析と同じ分布を奥行き方向に設定した。流入流速を一定値とした場合と測定値とした場合の流入流速分布を図 2.4 に示す。なお、いずれのケースについても x, y, z 方向の流速変動は 0 とし、初期の乱れは与えないものとした。

2.3.3 2 次元解析/3 次元解析

従来は、二次元的な大規模渦構造に着目された解析が行われてきている。一方、奥行き方向の乱れが主流方向、高さ方向の乱れに影響することが一対の渦について解析された結果⁽¹¹⁾⁽¹²⁾により示されているため、3 次元解析を行い 2 次元解析との相違を評価することとした。

2.4 境界条件

解析体系に流入する流体の温度はセパレータの上方と下方で同一とし、20°Cとした。流路壁は全て断熱であり、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

図3.1に解析ケース1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、40秒後および60秒後の湍度分布を示す。また、図3.2に時刻40秒から58秒までの湍度分布を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。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。

図3.1および図3.2から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わかる。セパレータから下流側への距離 x が 0.5 m 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 0.8 m 付近よりも下流側では参考文献(19)で示されているような渦の合体が見られる。

3.1.2 流速分布

図3.3にセパレータから下流側への距離 $x=0.45$ m と $x=0.9$ 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3.1に示した湍度分布の時刻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⁽¹²⁾の流速分布も合わせて表示してある。

$x=0.45$ m の位置では、解析結果の主流方向流速分布は、流入境界で与えられた速度分布とほぼ同じであり、測定結果とは異なっている。また、高さ方向流速分布も解析結果と測定結果では異なっており、解析結果では高さ方向に大きな流れを生じていない。

$x=0.9$ m の位置では、解析結果の主流方向流速分布は測定結果と良く一致している。しかしながら、高さ方向の流速は、解析結果ではほとんど見られず、測定結果と異なっている。

この測定結果と解析結果の相違の理由については第4章 考察の項で検討する。

3.1.3 速度変動の時間変化

図3.4は高さ方向 $z=0$ における $x=0.45\text{ m}$ 、 $x=0.9\text{ m}$ 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されている。

$x=0.45\text{ m}$ の位置では、主流方向、高さ方向ともほとんど速度変動を生じていないが、 $x=0.9\text{ m}$ の下流側の位置では、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2~3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3.5に $x=0.45\text{ m}$ と $x=0.9\text{ m}$ における主流方向と高さ方向速度変動のRMS値を示す。
RMS値は、 $RMS u' = \sqrt{\bar{u}^2}$ 、 $RMS w' = \sqrt{\bar{w}^2}$

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。

$x=0.45\text{ m}$ における主流方向の速度変動と高さ方向の速度変動は、測定結果に比較して非常に小さくなっている。一方、 $x=0.9\text{ m}$ の位置では、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は解析結果の値は測定結果の約2倍大きくなっている。

3.1.5 レイノルズ応力分布

図3.6に $x=0.45\text{ m}$ と $x=0.9\text{ m}$ におけるレイノルズ応力の分布を示す。レイノルズ応力は $-\bar{u}'\bar{w}'$ 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50Hzで20秒間にについて時間平均したものである。図中では $-\bar{u}'\bar{w}'$ を流速差 Δu の二乗で無次元化して表示している。

$x=0.45\text{ m}$ の位置では、3.1.3で示したように解析結果の速度変動が主流方向、高さ方向ともに小さいためレイノルズ応力も小さくなる。一方、 $x=0.9\text{ m}$ の位置におけるレイノルズ応力は、セパレータより上方の位置で解析結果は測定結果よりも小さいが、両者の大きさは同程度である。

3.2 解析ケース2

3.2.1 湍度分布

図3.7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秒後の湍度分布を示す。

図3.7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。解析ケース1

との比較については第4章 考察の項で検討するが、解析ケース2では解析ケース1よりも上流側の $x=0.4\text{ m}$ の位置で渦が生じている。また、 $x=0.8\text{ m}$ 付近よりも下流側で見られる渦の混合は解析ケース1と同様である。

3.2.2 流速分布

図3.8に $x=0.45\text{m}$ と $x=0.9\text{m}$ 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3.7に示した渦度分布の時刻0から20秒に対して、50Hzのサンプリングレートで出力した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。図中には測定結果⁽¹²⁾の流速分布も合わせて示した。

$x=0.45\text{m}$ の位置では、解析結果の主流方向流速分布は、流入境界で与えられた速度分布とほぼ同じであり、測定結果とは異なっている。また、高さ方向流速分布は解析結果と測定結果と同じ大きさになっており、解析ケース1よりも大きい。一方、 $x=0.9\text{m}$ の位置では、解析結果の主流方向流速分布は測定結果と良く一致している。しかしながら、解析結果では高さ方向の流速はほとんど生じていない。

3.2.3 速度変動の時間変化

図3.9は高さ方向 $z=0$ における $x=0.45\text{m}$ 、 $x=0.9\text{m}$ 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。 $x=0.45\text{m}$ の位置では、ほとんど変動を生じないが、 $x=0.9\text{m}$ の位置では主流方向、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2~3秒である。変動の大きさは解析ケース2よりも小さくなっている。

3.2.4 速度変動分布

図3.10に $x=0.45\text{m}$ と $x=0.9\text{m}$ における主流方向と高さ方向速度変動のRMS値を示す。 $x=0.45\text{m}$ における主流方向の速度変動と高さ方向の速度変動は、測定結果に比較して小さい。 $x=0.9\text{m}$ における速度変動は、主流方向に関しては解析結果と測定結果で良く一致しているが、高さ方向に関しては解析結果の方が大きくなっている。

3.2.5 レイノルズ応力分布

図3.11に $x=0.45\text{m}$ と $x=0.9\text{m}$ におけるレイノルズ応力の分布を示す。 $x=0.45\text{m}$ の位置では、3.1.3で示したように解析結果の速度変動が主流方向、高さ方向とともに小さいためレイノルズ応力も小さくなる。 $x=0.9\text{m}$ の位置では流路の中央付近($z=0$)の位置で、解析結果のレイノルズ応力は測定結果よりも小さいが、ほぼ同様の分布形になっている。

3.3 解析ケース 3

3.3.1 湍度分布

図 3.12 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 秒後の湍度分布を示す。

図 3.12 から解析ケース 1、2 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わかる。解析ケース 3 では流入流速を高さ方向に不均一としているため、高さ方向に湍度の異なる領域が見られるが、流路の中心高さ付近では、二次元的な大規模渦構造が見られる。また、解析ケース 1、2 に比べて渦の挙動が不規則な流動状況を示している。

3.3.2 流速分布

図 3.13 に $x=0.45\text{ m}$ と $x=0.9\text{ m}$ の位置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の高さ方向分布を示す。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、50Hz でサンプリングした主流方向流速、高さ方向流速を時間平均したものである。図中には測定結果⁽¹⁰⁾の流速分布も合わせて示した。

$x=0.45\text{ m}$ の位置では、解析結果の主流方向流速分布は、流入境界で与えられた速度分布と類似しており、測定結果とは異なっている。また、高さ方向流速分布は、解析結果では高さ方向に大きな流れを生じておらず測定結果と異なっている。 $x=0.9\text{ m}$ の位置では、解析結果の主流方向流速分布は測定結果と良く一致している。しかしながら、高さ方向の流速は解析結果ではほとんど生じておらず、測定結果と一致していない。

3.3.3 速度変動の時間変化

図 3.14 は高さ方向 $z=0$ における $x=0.45\text{ m}$ 、 $x=0.9\text{ m}$ での速度変動の時間変化を示したものである。サンプリングレート、平均時間は解析ケース 1、2 の場合と同じである。 $x=0.45\text{ m}$ の位置において主流方向、高さ方向ともに周期的な速度変動が見られる。 $x=0.9\text{ m}$ の位置では主流方向、高さ方向ともに周期的な変動が見られ、その変動の大きさは約 0.5 であり、変動周期はいずれの方向もほぼ同じ約 2~3 秒と解析ケース 1 の場合と同様となっている。

3.3.4 速度変動分布

図 3.15 に $x=0.45\text{ m}$ と $x=0.9\text{ m}$ における主流方向と高さ方向速度変動の RMS 値を示す。 $x=0.45\text{ m}$ における主流方向の速度変動は、その分布形は測定結果に類似しているものの大きさは約 1/2 である。高さ方向の速度変動は無次元高さ 0 の付近において測定結果とほぼ同じ大きさとなっている。 $x=0.9\text{ m}$ における速度変動は、主流方向に関しては解析結果と測定結果で良く一致しているが、高さ方向に関しては解析結果の方が約 2 倍測定

結果よりも大きくなっている。

3.3.5 レイノルズ応力分布

図 3.16 に $x=0.45\text{ m}$ と $x=0.9\text{ m}$ におけるレイノルズ応力の分布を示す。

$x=0.45\text{m}$ の位置では、3.3.3 で示したように解析結果の速度変動が主流方向、高さ方向とともに測定結果よりも小さいためレイノルズ応力も小さくなっている。 $x=0.9\text{m}$ の位置ではセパレータより上方の位置で、解析結果のレイノルズ応力は測定結果よりも小さいが、ほぼ同様の大きさである。

3.4 解析ケース 4

3.4.1 湍度分布

図 3.17 に解析ケース 4 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 秒後の湍度分布を示す。

図 3.17 から 2 次元解析の解析ケース 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わかる。解析ケース 4 は奥行き方向を考慮した 3 次元解析であるが、二次元的な大規模渦構造は解析ケース 1 の場合と類似している。

3.4.2 流速分布

図 3.18 に $x=0.45\text{ m}$ と $x=0.9\text{ m}$ の位置での主流方向平均流速分布、奥行き方向流速分布および高さ方向流速分布を示す。それぞれの方向の平均流速は、図 3.18 に示した湍度分布の時刻 0 から 20 秒に対して、50Hz でサンプリングした各時刻の主流方向、奥行き方向および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 、奥行き方向の流速を v 、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 $u/\Delta u$ 、 $v/\Delta u$ および $w/\Delta u$ で表示している。主流方向と高さ方向には測定結果⁽¹⁰⁾の流速分布も合わせて示した。

$x=0.45\text{ m}$ の位置では、解析結果の主流方向流速分布は、流入境界で与えられた速度分布を保っており、測定結果とは異なっている。また、高さ方向流速分布は、解析結果では高さ方向に大きな流れを生じておらず、測定結果と異なっている。また、奥行き方向の速度は主流方向、高さ方向に比べて非常に小さくなっている。 $x=0.9\text{m}$ の位置では、解析結果の主流方向流速分布は測定結果と良く一致している。高さ方向の流速分布は、解析ケース 1 の場合と異なっているが、その流速は小さく解析ケース 1 と同様に測定結果と一致していない。また、奥行き方向の流速は $x=0.45\text{ m}$ における値よりも大きくなっているが、主流方向、高さ方向の流速に比べ、非常に小さくなっている。

3.4.3 速度変動の時間変化

図3.19は高さ方向 $z=0$ における $x=0.45\text{ m}$ 、 $x=0.9\text{ m}$ での主流方向流速、奥行き方向流速および高さ方向流速の時間変化を示したものである。図中の速度変動は各時刻における流速から3.4.2の平均流速を差し引いたものをセパレータの上方と下方の流速差で無次元化したものである。

$x=0.45\text{m}$ の位置では、主流方向、奥行き方向および高さ方向のいずれにおいても、ほとんど変動を生じていない。一方、 $x=0.9\text{ m}$ の位置では主流方向、高さ方向とともに周期的な変動が見られ、その流速変動の周期は、いずれの方向もほぼ同じ約2~3秒である。また、奥行き方向の変動は主流方向、高さ方向に比べて非常に小さく周期性も見られない。

3.4.4 速度変動分布

図3.20に $x=0.45\text{ m}$ と $x=0.9\text{ m}$ における主流方向、奥行き方向および高さ方向速度変動のRMS値を示す。

$x=0.45\text{m}$ における解析結果の主流方向および高さ方向の速度変動は測定結果に比べて小さい。また、奥行き方向の速度変動は流路の高さが0の位置で最も大きいが、その値は主流方向や高さ方向の変動量と比較して非常に小さくなっている。 $x=0.9\text{m}$ における速度変動は、主流方向に関しては解析結果と測定結果でほぼ一致しているが、高さ方向の速度変動は解析結果の方が約2倍大きくなっている。奥行き方向の速度変動は $x=0.45\text{m}$ の場合よりも大きくなり、高さ方向変動を生じている領域が広がっているものの、その値は主流方向や高さ方向の変動量に比べて非常に小さくなっている。

3.4.5 レイノルズ応力分布

図3.21に $x=0.45\text{m}$ と $x=0.9\text{m}$ におけるレイノルズ応力の分布を示す。

$x=0.45\text{m}$ の位置では、3.4.3で示したように解析結果の速度変動が主流方向、高さ方向とともに非常に小さいためにレイノルズ応力も小さくなっている。一方、 $x=0.9\text{m}$ の位置では解析結果のレイノルズ応力は測定結果よりも小さく、高さ方向 $z=0.1$ の位置で小さくなっており、レイノルズ応力の分布も測定結果と異なっている。

3.5 解析ケース5

3.5.1 湍度分布

図3.22に解析ケース5の準定常状態の渦度分布と準定常状態の時刻を0としたときから20秒後の渦度分布を示す。

図3.22から2次元解析の解析ケース3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わかる。解析ケース5は奥行き方向を考慮した3次元解析であるが、二次元的な大規模渦構造は2次元解析の場合と同様で

ある。

3.5.2 流速分布

図 3.23 に $x=0.45\text{ m}$ と $x=0.9\text{ m}$ の位置での主流方向流速分布と高さ方向流速分布を示す。平均流速は図 3.22 に示した渦度分布の時刻 0 から 20 秒に対して、50Hz でサンプリングした主流方向、奥行き方向および高さ方向の流速を時間平均したものである。図中には主流方向と高さ方向流速の測定結果⁽¹⁰⁾の分布も合わせて示した。

$x=0.45\text{ m}$ の位置では、解析結果の主流方向流速分布は、流入境界で与えられた速度分布を保っており、測定結果とは異なっている。一方、高さ方向流速分布は、解析結果と測定結果で同程度の大きさになっている。また、奥行き方向の速度は、主流方向、高さ方向に比べて非常に小さくなっている。 $x=0.9\text{ m}$ の位置では、解析結果の主流方向流速分布は測定結果と良く一致しているが、高さ方向の流速分布は、解析結果の値が小さく測定結果と一致していない。

3.5.3 速度変動の時間変化

図 3.24 は高さ方向 $z=0$ における $x=0.45\text{m}$ 、 $x=0.9\text{m}$ での主流方向流速、奥行き方向流速および高さ方向流速について、3.5.2 で求めた 20 秒間の平均流速を差し引いた変動量の時間変化を示したものである。

$x=0.45\text{ m}$ の位置では、主流方向と高さ方向に流速変動が周期的に生じているが、奥行き方向の変動はほとんど生じていない。 $x=0.9\text{ m}$ の位置では主流方向、高さ方向ともに周期的な変動が見られるが、奥行き方向の変動は非常に小さく不規則である。主流方向、高さ方向の流速変動の周期は、いずれの方向もほぼ同じ約 2~3 秒である。

3.5.4 速度変動分布

図 3.25 に $x=0.45\text{ m}$ と $x=0.9\text{ m}$ における主流方向、奥行き方向および高さ方向速度変動の RMS 値を示す。

$x=0.45\text{ m}$ における主流方向の速度変動は測定結果の約 1/2 と小さいが、高さ方向の速度変動は解析結果と測定結果で良く一致している。また、奥行き方向の速度変動は流路の高さが 0 の位置で最も大きいが、その値は主流方向や高さ方向の変動量に比して非常に小さくなっている。 $x=0.9\text{ m}$ における速度変動は、主流方向に関して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は解析結果の方が測定結果の約 2 倍大きくなっている。奥行き方向の速度変動は $x=0.45\text{ m}$ の場合よりも大きくなり、高さ方向に広がっているが、その値は主流方向や高さ方向の変動量に比して非常に小さい。

3.5.5 レイノルズ応力分布

図 3.26 に $x=0.45\text{ m}$ と $x=0.9\text{ m}$ におけるレイノルズ応力の分布を示す。

$x=0.45m$ の位置では、3.5.3 で示したように解析結果の速度変動が主流方向、高さ方向に小さいためレイノルズ応力も小さくなるが、高さ方向 $z=0$ で最大の値となっており、レイノルズ応力の分布形は測定結果と類似している。 $x=0.9m$ の位置では、解析結果のレイノルズ応力は測定値の約 1/2 と小さくなっている。

第4章 考 察

4.1 サンプリング時間の評価

本解析は直接シミュレーションであり、解析結果の流速分布や変動量を測定結果と比較する上、解析結果に適切な時間平均化の処理を行うことは重要である。第3章に示した解析結果では、サンプリングレート 50Hz、サンプリング時間 20秒とし、サンプル数は 1000 個について時間平均化処理を施した。

図4.1と図4.2はサンプリング時間の適切さを調べるために、解析ケース1についてサンプリング時間 20秒（サンプル数 1000個）と 60秒（サンプル数 3000個）で流速分布、速度変動分布およびレイノルズ応力分布を比較したものである。流速分布、速度変動分布およびレイノルズ応力について、セパレータからの距離が $x=0.45\text{ m}$ の位置と $x=0.9\text{ m}$ の位置について比較した。 $x=0.45\text{ m}$ 、 0.9 m ともに 20秒間の平均化処理を行った結果と 60秒間の平均化処理を行った場合で、流速分布、速度変動分布およびレイノルズ応力の分布はほとんど相違していない。また、サンプリングレートについては、第3章に示した各解析ケースの速度変動の時間変化から適切であると考えられる。以上より時間平均化の処理に使用したサンプリングレート 50Hz およびサンプリング時間 20秒は適切なものであると考えられる。

4.2 解析メッシュ幅による結果の相違

図4.3と図4.4は高さ方向の解析メッシュ幅の解析結果への影響を評価するために。解析ケース1の高さ方向メッシュ幅 2mm と解析ケース2の高さ方向メッシュ幅 1mmについて、流速分布、速度変動分布およびレイノルズ応力をセパレータからの距離が $x=0.45\text{ m}$ の位置と $x=0.9\text{ m}$ の位置について比較したものである。

$x=0.45\text{ m}$ の位置では流速分布についてメッシュ幅による解析結果の相違はほとんど見られない。一方、速度変動はメッシュ幅の細かい解析ケース2の方が大きくなっているが、測定結果と比べて小さいことはいずれの解析ケースでも同じである。レイノルズ応力は速度変動が大きい解析ケース2の方が大きくなるが、測定結果に比べ小さくなっている。 $x=0.9\text{ m}$ の位置では、流速分布、速度変動分布およびレイノルズ応力について解析メッシュ幅による相違はほとんど見られない。以上より解析メッシュを 1mmとした場合には、上流側における速度変動量、レイノルズ応力を解析メッシュを 2mmとした場合よりも良く模擬できるようになるが、流れが発達した下流側の位置ではメッシュ幅による相違は少なくなるものと考えられる。

4.3 流入流速による結果の相違

図4.5と図4.6は流入境界における流入流速分布の相違による流速分布、速度変動分布およびレイノルズ応力分布を比較したものである。解析ケース1はセパレータの上方と下方のそれぞれに一定の流速を与えた場合であり、解析ケース3は実験で測定された流速分布を与えた場合である。

$x=0.45\text{ m}$ の位置では主流方向、高さ方向流速とも流入流速による差は小さい。速度変動は、主流方向では測定結果との相違はあるが、流入流速分布に測定値を用いた解析ケース3の方が一定値を用いた解析ケース1よりも大きくなっている。高さ方向の速度変動も解析ケース3の方が大きくなっている。レイノルズ応力は、いずれの位置においても主流方向の速度変動が小さいため、測定結果よりも小さくなっている。一方、 $x=0.9\text{ m}$ の位置では、主流方向、高さ方向流速とともに流入流速分布の相違による解析結果の差は小さい。速度変動に関しても、主流方向、高さ方向ともに解析ケース1と解析ケース3でほとんど差を生じておらず、レイノルズ応力も解析ケース1と解析ケース3でほぼ同じ分布となっている。

流入流速分布の相違は、セパレータからの距離 x が 0.45 m の位置で速度変動、レイノルズ応力に影響を与えるが、距離が $x=0.9\text{ m}$ の位置では速度変動、レイノルズ応力に差異を生じさせていない。このことから、不均一な流入流速分布は乱れを上流側で発達させることになり、速度変動量やレイノルズ応力に影響を与えることになるが、下流側では影響しないことを示している。

4.4 2次元解析と3次元解析による結果の相違

図4.7と図4.8は解析ケース1の2次元解析と解析ケース4の3次元解析の流速分布、速度変動分布およびレイノルズ応力分布を比較したものである。

$x=0.45\text{ m}$ の位置では主流方向、高さ方向流速、速度変動およびレイノルズ応力に関して2次元解析と3次元解析の差はほとんど見られない。また、 $x=0.9\text{ m}$ の位置では、主流方向の流速分布に関しては差が見られず、高さ方向については流速の分布形は相違しているものの測定結果と比べて小さいことは2次元解析、3次元解析ともに同じ傾向である。速度変動に関しては、主流方向、高さ方向ともにほとんど差を生じていない。また、レイノルズ応力については、3次元解析の解析ケース4の値は2次元解析の解析ケース1に比べて小さくなっている。

以上から2次元解析と3次元解析で流速分布、速度変動およびレイノルズ応力についてほとんど差異を生じないのは、奥行き方向の変動が主流方向や高さ方向の変動に比べて非常に小さく、渦の3次元的な挙動を生じさせるに至っていないためであると考えられる。

4.5 解析結果と測定結果の比較

- 第3章解析結果および上記から、解析結果と測定結果の相違として以下があげられる。
- ①主流方向流速分布について、 $x=0.45\text{ m}$ の位置における解析結果は、流入境界における流速分布を保っており測定結果と一致していない。しかしながら、 $x=0.9\text{ m}$ の位置における流速分布は解析結果と測定結果で良く一致している。
 - ②高さ方向流速分布について、 $x=0.45\text{ m}$ 、 $x=0.9\text{ m}$ の位置ともに解析結果は測定結果よりも小さく解析結果と測定結果で一致していない。
 - ③主流方向速度変動分布について、 $x=0.45\text{ m}$ の位置における解析結果は、測定結果よりも小さい。しかしながら、 $x=0.9\text{ m}$ の位置では解析結果は測定結果と良く一致している。
 - ④高さ方向速度変動分布について、 $x=0.45\text{ m}$ の位置における解析結果は、流入流速分布を一定とした場合には解析結果よりも小さく、流入流速分布を測定値とした場合には、測定結果と一致している。しかしながら、 $x=0.9\text{ m}$ の位置では流入流速分布の違いによる解析結果の相違は見られず、解析結果の高さ方向速度変動が測定結果よりも大きい傾向は同じである。
 - ⑤ $x=0.9\text{ m}$ の位置において主流方向と高さ方向の速度変動の大きさを比較すると測定結果では主流方向の速度変動が大きく、解析結果では高さ方向の速度変動が大きい。
 - ⑥レイノルズ応力について、 $x=0.45\text{ m}$ 、 $x=0.9\text{ m}$ の位置ともに解析結果は測定結果よりも小さく解析結果と測定結果で一致していない。

①と③から本解析結果では $x=0.45\text{ m}$ の位置で乱れが発達していないが、 $x=0.9\text{ m}$ の位置では測定結果と同程度に乱れが発達し、主流方向の変動を解析的に模擬できていると考えられる。②と④については流入境界条件に与える流速分布あるいは変動量の大きさにより、解析結果が大きく変わることが参考文献(10)、(11)、(12)にも示されている。流入部の速度変動は層流から乱流への遷移過程に影響を与えており、実験結果では速度変動により流路の上流側で乱流域になっていると考えられる。解析条件に与える人工的な速度変動については今後の検討課題である。一方、⑤の高さ方向の速度変動が、測定結果より大きく主流方向の速度変動よりも大きくなる傾向は、参考文献(9)においても同様に見られる。同文献ではこの理由として2次元解析では縦渦のような3次元性の効果が無視されているためであると推定している。また、⑥については、レイノルズ応力について解析結果が測定結果よりも小さくなるのは、主流方向と高さ方向の速度変動の位相が測定結果と異なっているためであると推定される。

以上より本解析結果では、高さ方向の速度分布および速度変動が測定結果とは異なるものの、主流方向については速度分布、速度変動とも解析的に評価できていると考えられる。また、いずれの解析ケースにおいても、二次元的な大規模渦構造が解析的に捕らえられており、二成層流における乱流現象が模擬できていると考えられる。

第5章 結 言

流体に水を用いた成層乱流実験を差分法による直接シミュレーションコード DINUS-3 によって解析し、流速分布、速度変動およびレイノルズ応力を解析的に求め、測定結果と比較し以下のことが明らかとなった。

- (1) 流速分布、流速変動およびレイノルズ応力を評価するために、時間平均化の処理に使用したサンプリングレート 50Hz およびサンプリング時間 20 秒は $Re=1.7\times 10^4$ の解析結果に対して適切なものである。
- (2) 解析メッシュを詳細化した場合には、上流側における速度変動量、レイノルズ応力を解析メッシュが荒い場合よりも良く模擬できるようになるが、流れが発達した下流側の位置ではメッシュ幅による相違は少なくなる。
- (3) 不均一な流入流速分布は、亂れを上流側で発達させることになり、上流側の位置での速度変動量やレイノルズ応力に影響を与えるが、下流側の位置においては、速度変動量やレイノルズ応力は流入流速分布に影響されない。
- (4) 設定した 3 次元解析体系では、奥行き方向の変動が主流方向や高さ方向の変動に比べて非常に小さく、流速分布、速度変動およびレイノルズ応力について、2 次元解析と 3 次元解析でほとんど差異を生じない。
- (5) 本解析結果では、高さ方向の速度分布および速度変動が測定結果とは異なるものの、主流方向については速度分布、速度変動とも測定結果と良く一致しており、本解析により、二成層流における二次元的大規模渦構造が解析的に模擬されていると考えられる。

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。また、本検討にあたり多くの助言をいただいた原子炉工学室 西村 元彦 副主任研究員に感謝いたします。

参考文献

- (1) Y.Ieda、I.Maekawa、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 穎浩、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.Metcalf、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、数值流体力学 基礎と応用、東京大学出版会、1992年
- (18) 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、博士論文、1994年
- (19) M.V.Dyke、An Album of Fluid Motion、The Parabolic Press、1982

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					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 1 である。実験ケース 2 から 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	2 次元/3 次元	メッシュ幅 $\Delta x \times (\Delta y) \times \Delta z$ (mm)	流入流速
1-1	2 次元	2×2	一定
1-2	2 次元	2×1	一定
1-3	2 次元	2×2	測定値
1-4	3 次元	2×(2)×2	一定
1-5	3 次元	2×(2)×2	測定値

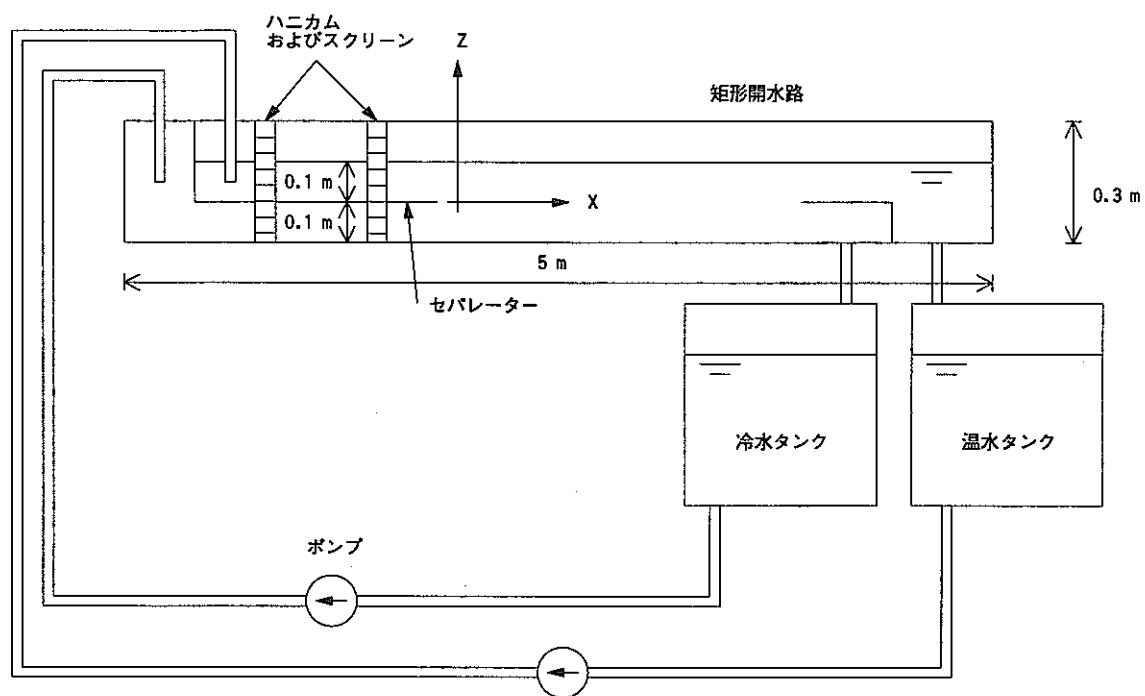


図 2.1 実験装置概念図

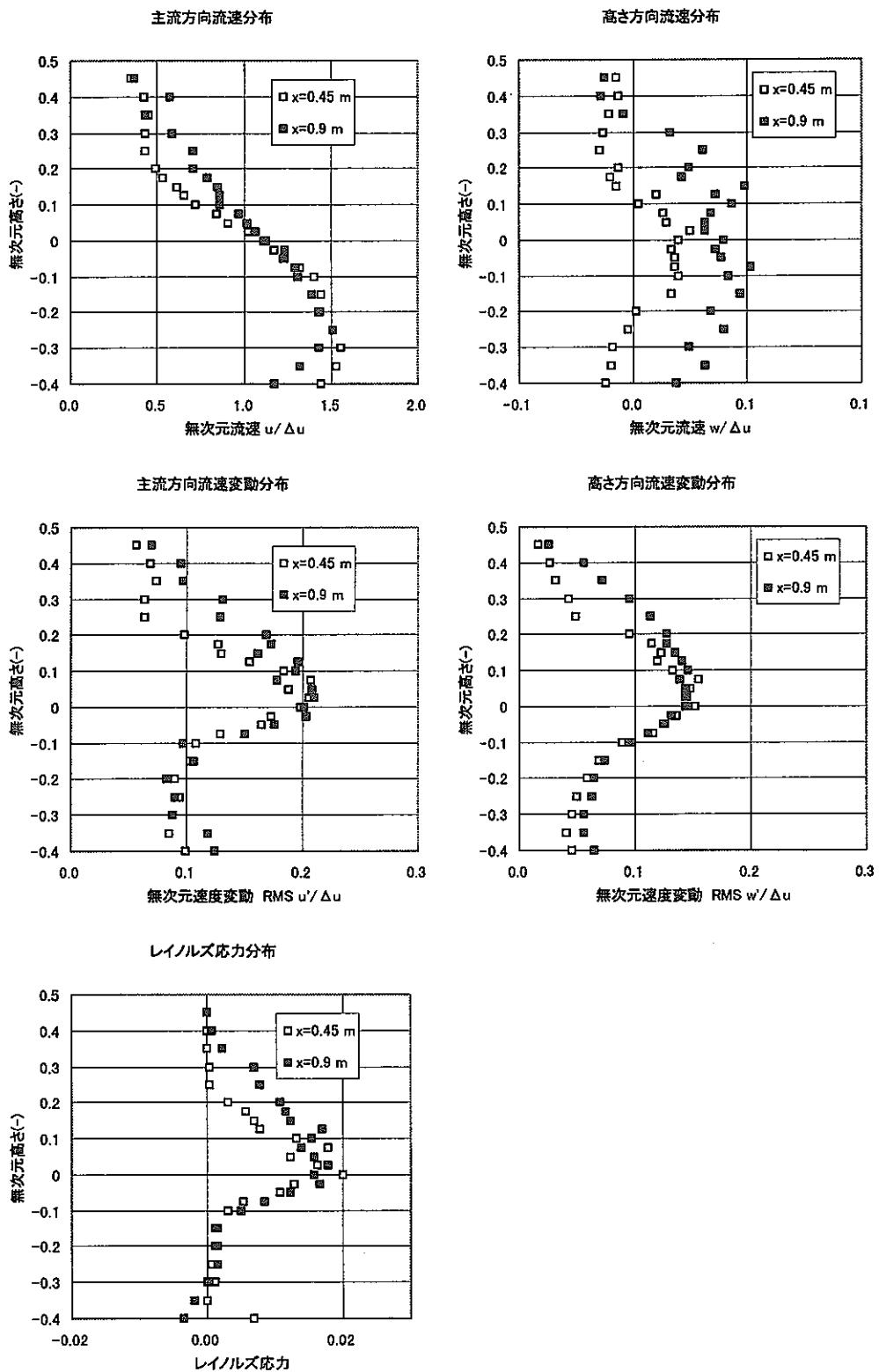
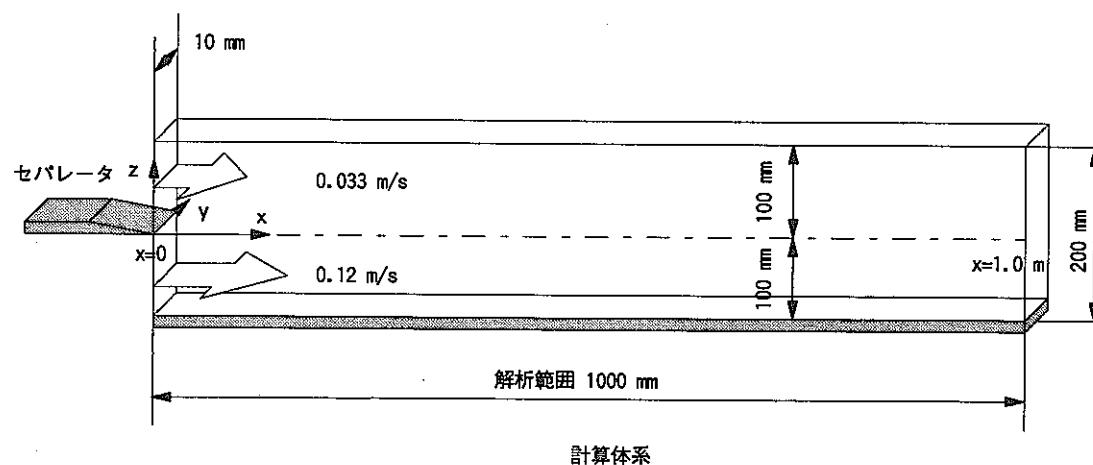


図 2.2 実験結果 (実験ケース 1)



計算体系

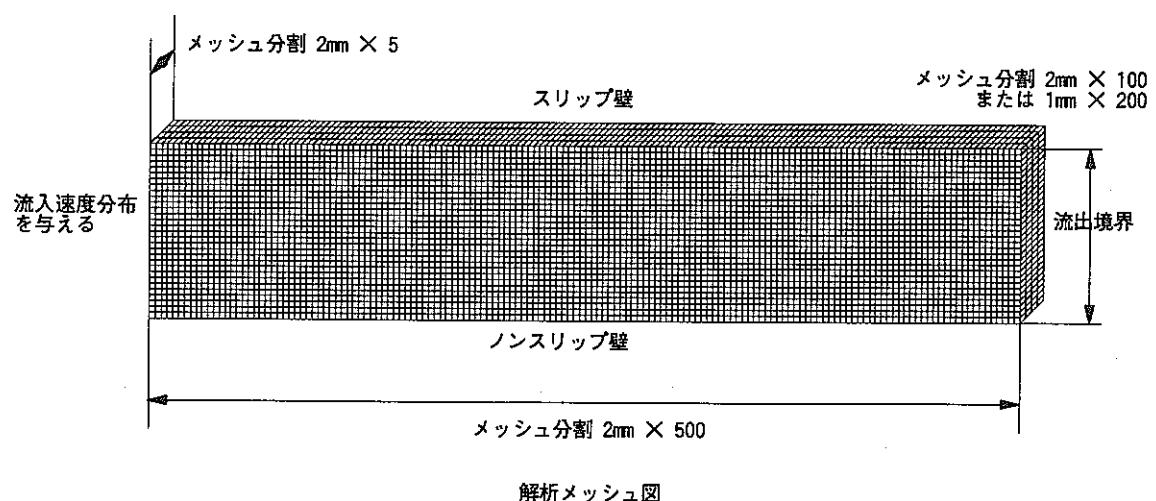


図 2.3 解析体系と解析メッシュ図

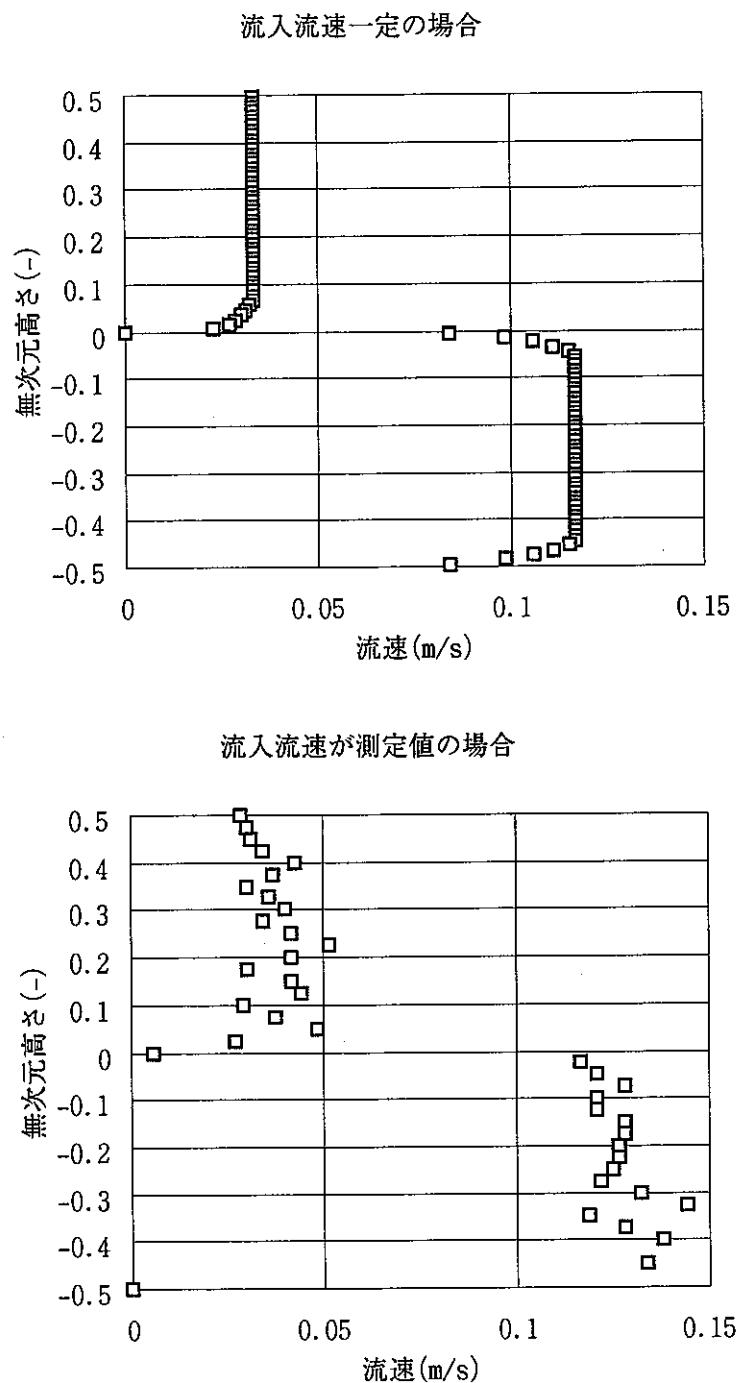


図 2.4 流入流速分布

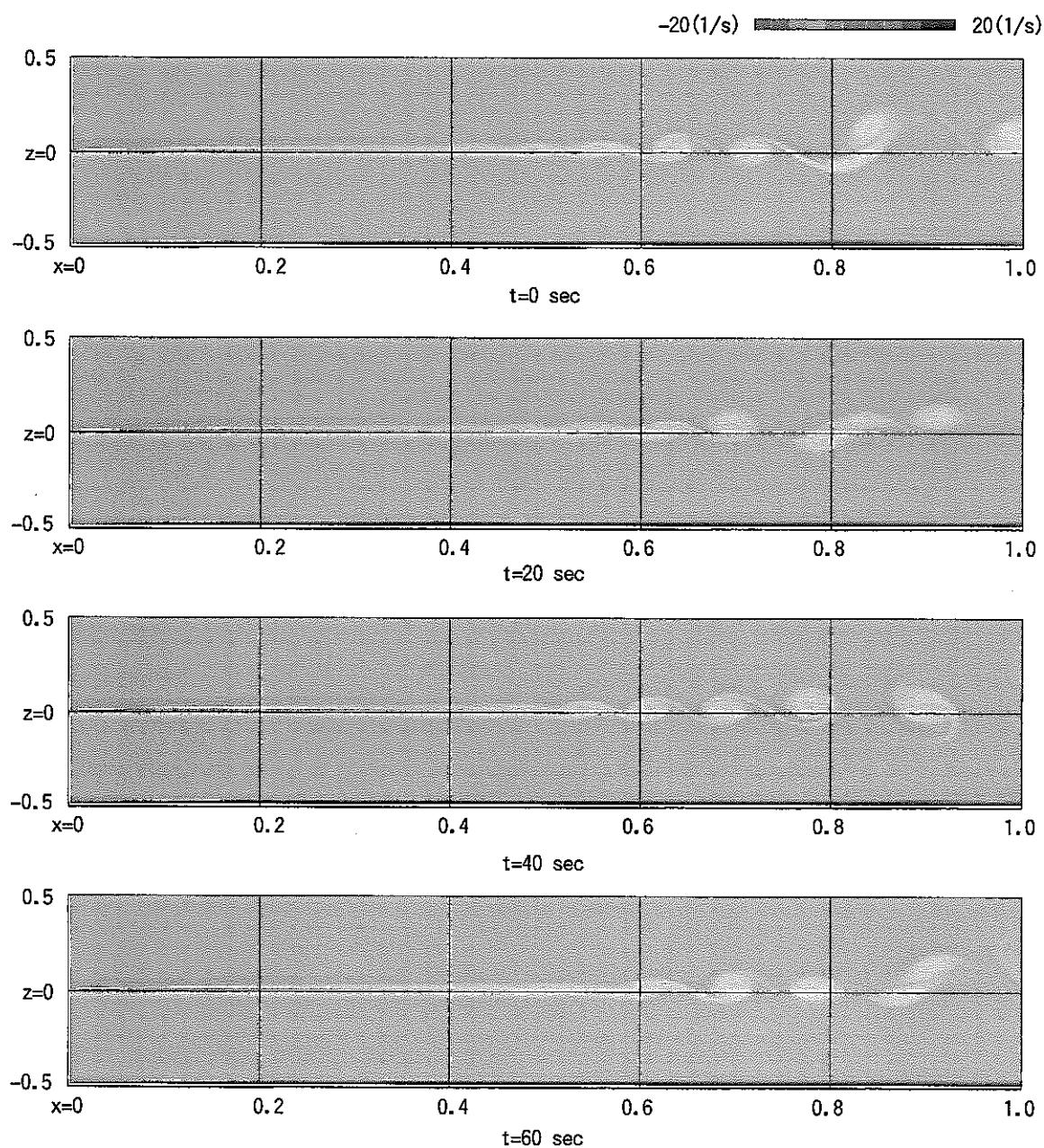


図 3.1 涡度分布 (20 秒間隔) (解析ケース 1)

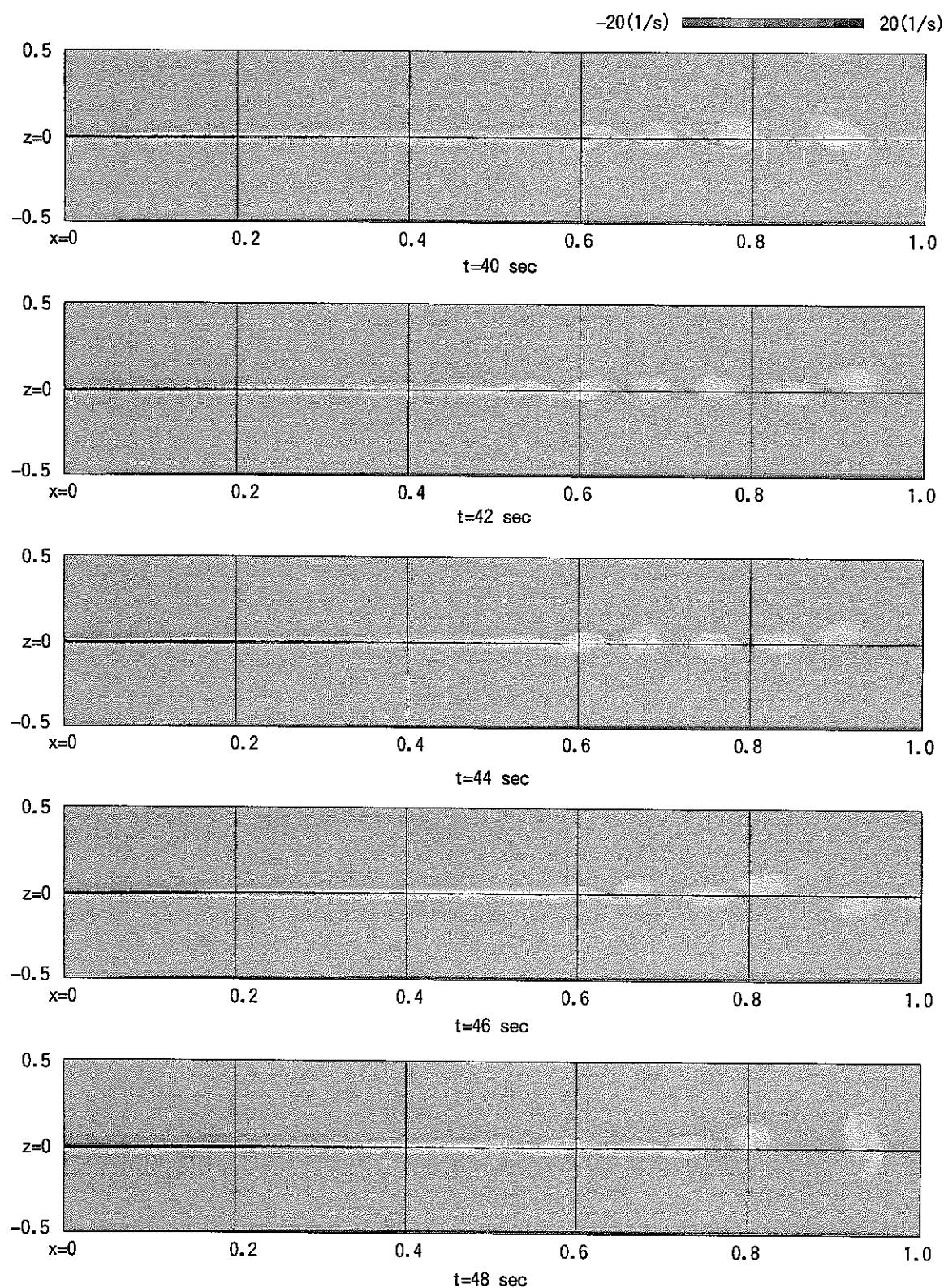


図 3.2(1/2) 湍度分布 (2 秒間隔) (解析ケース 1)

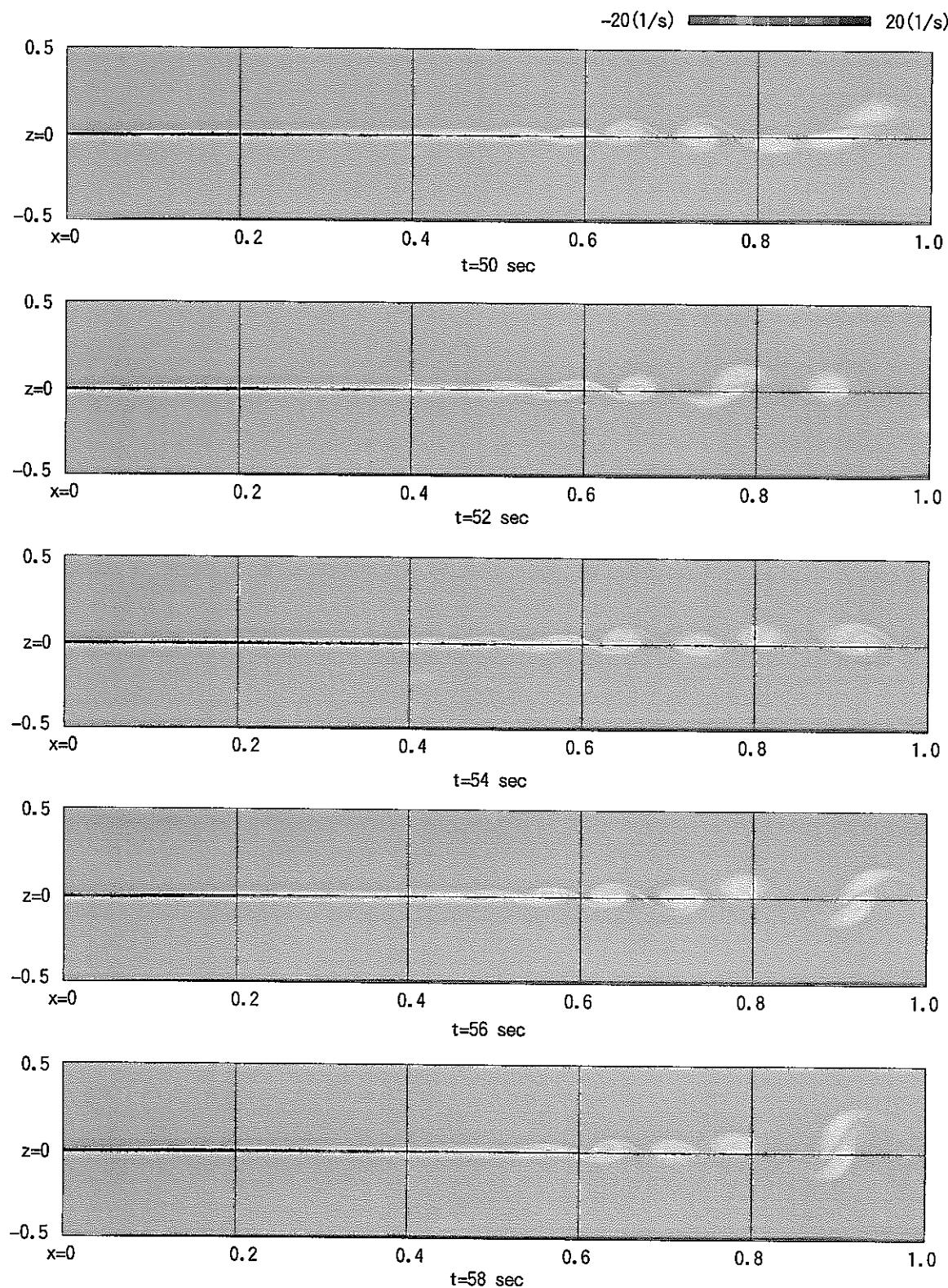


図 3.2(2/2) 涡度分布 (2秒間隔) (解析ケース 1)

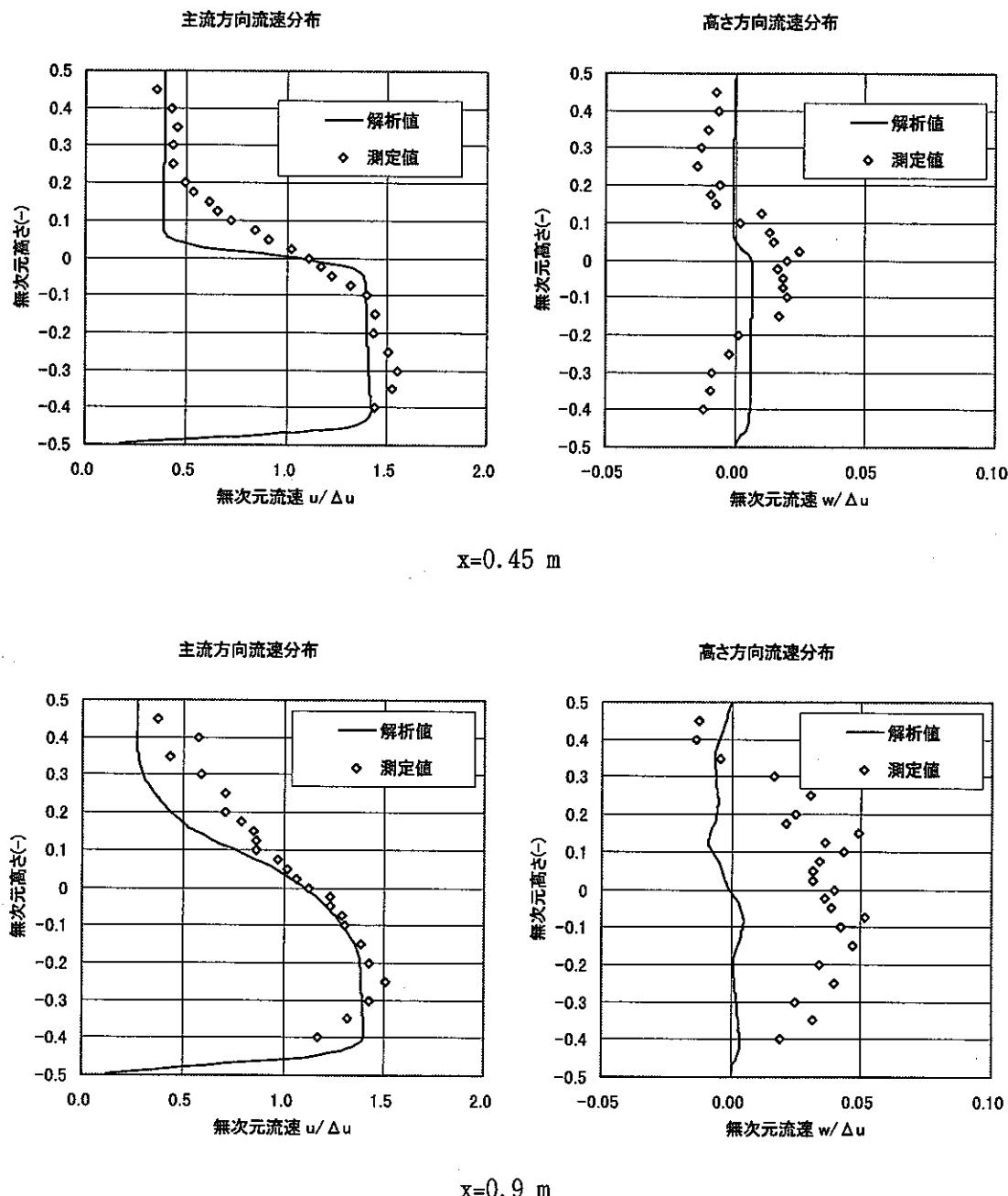
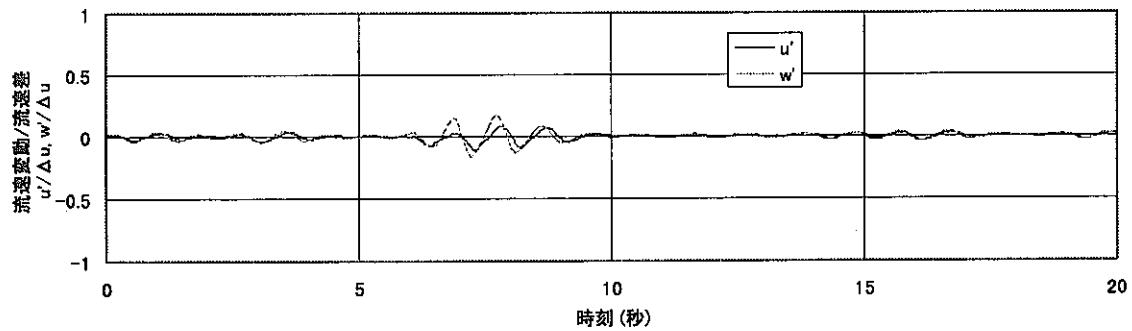
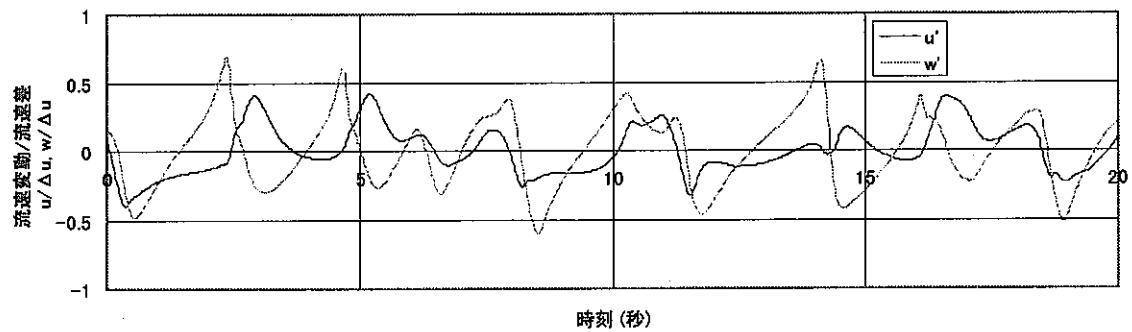


図 3.3 主流方向、高さ方向流速分布（解析ケース 1）



$x=0.45 \text{ m}$



$x=0.9 \text{ m}$

図 3.4 速度変動の時間変化（解析ケース 1）

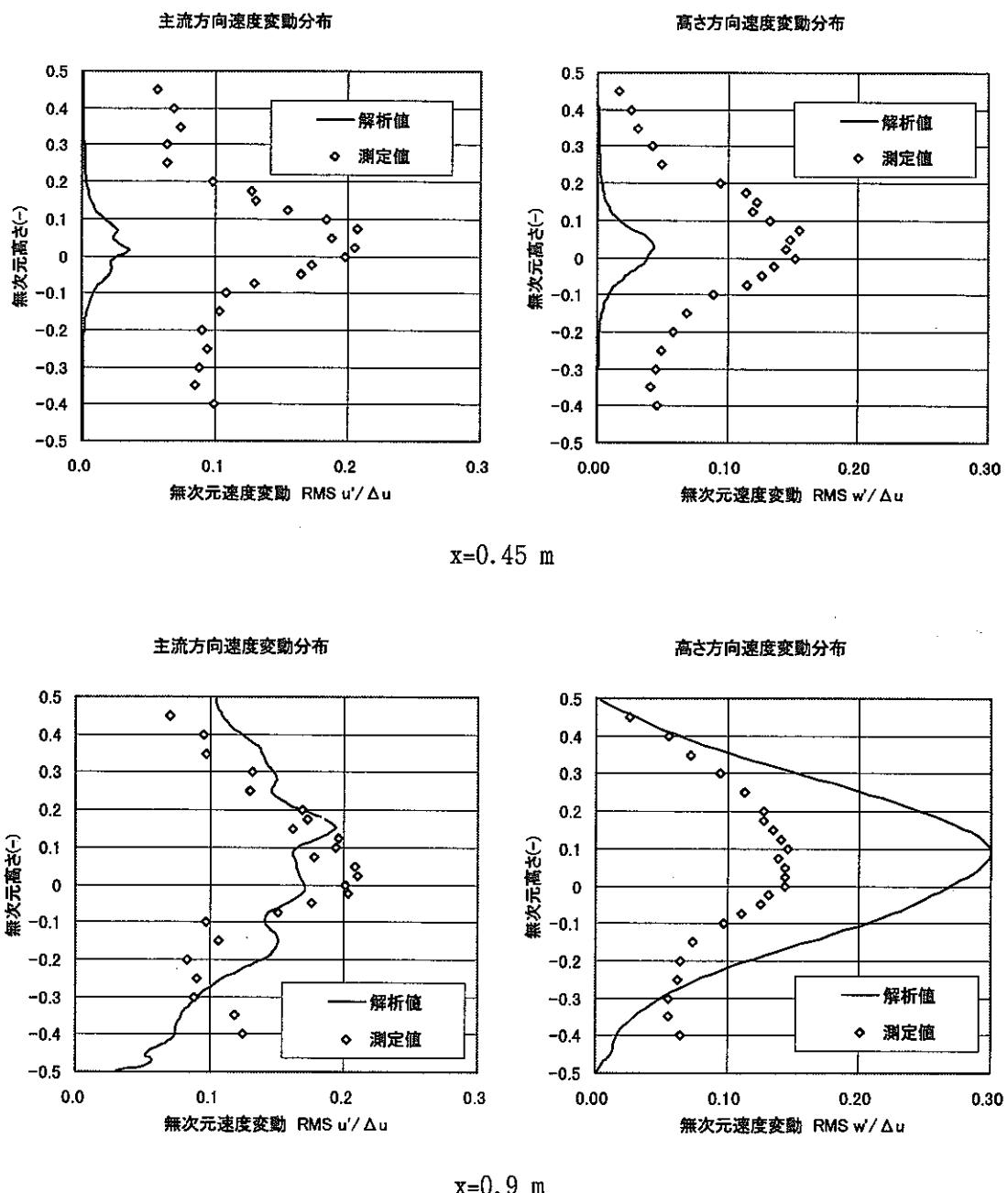


図 3.5 速度変動分布（解析ケース 1）

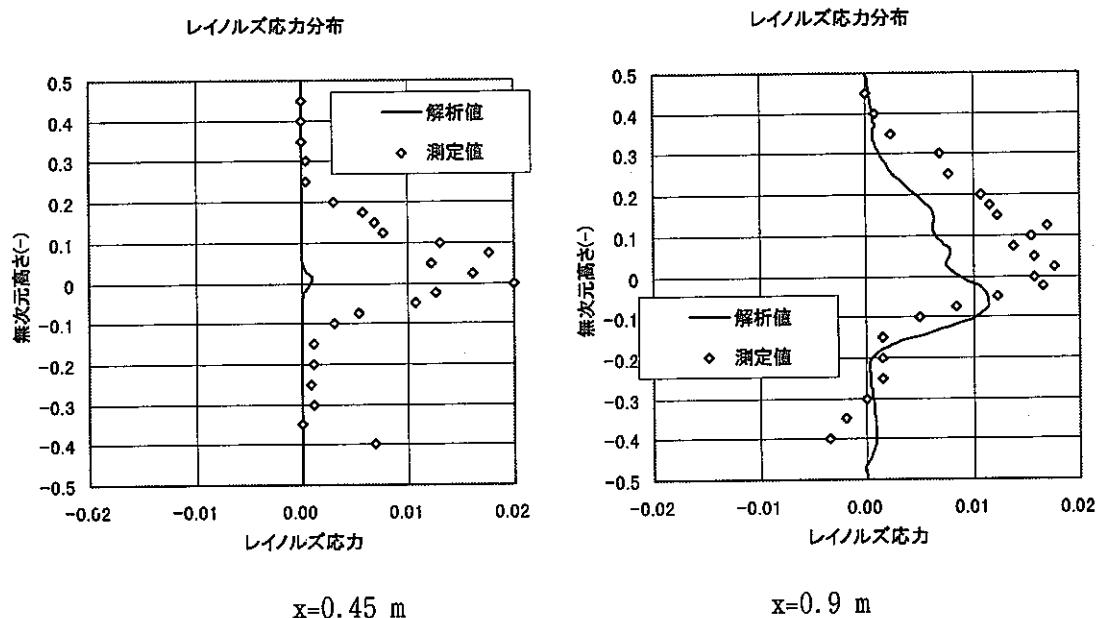


図 3.6 レイノルズ応力分布（解析ケース 1）

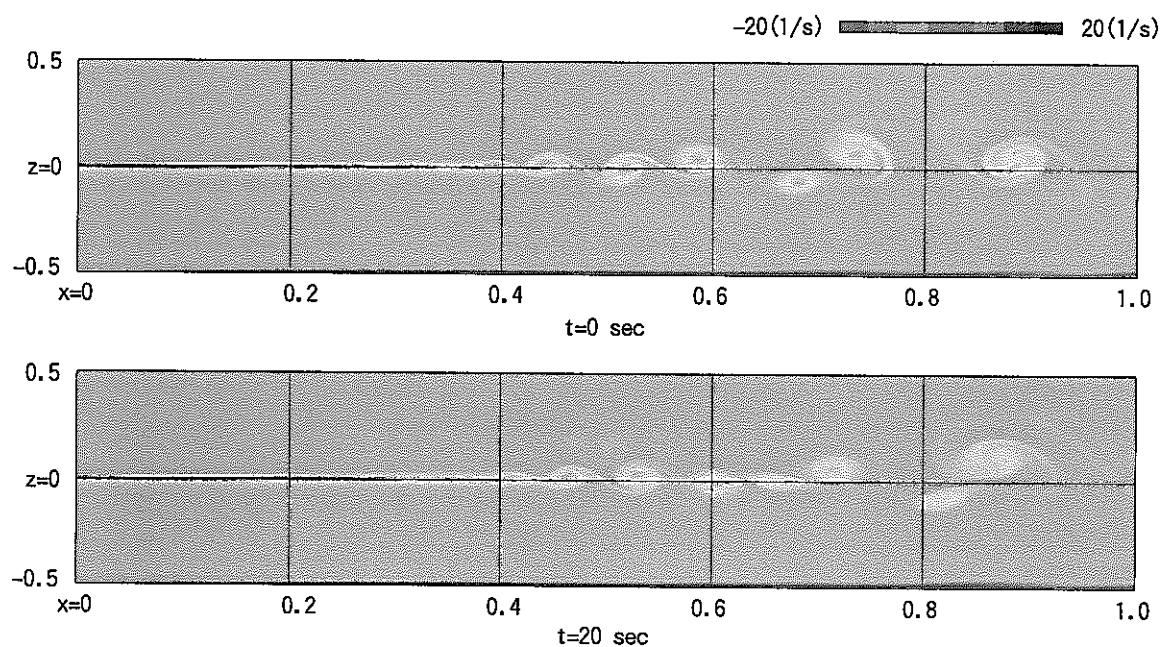
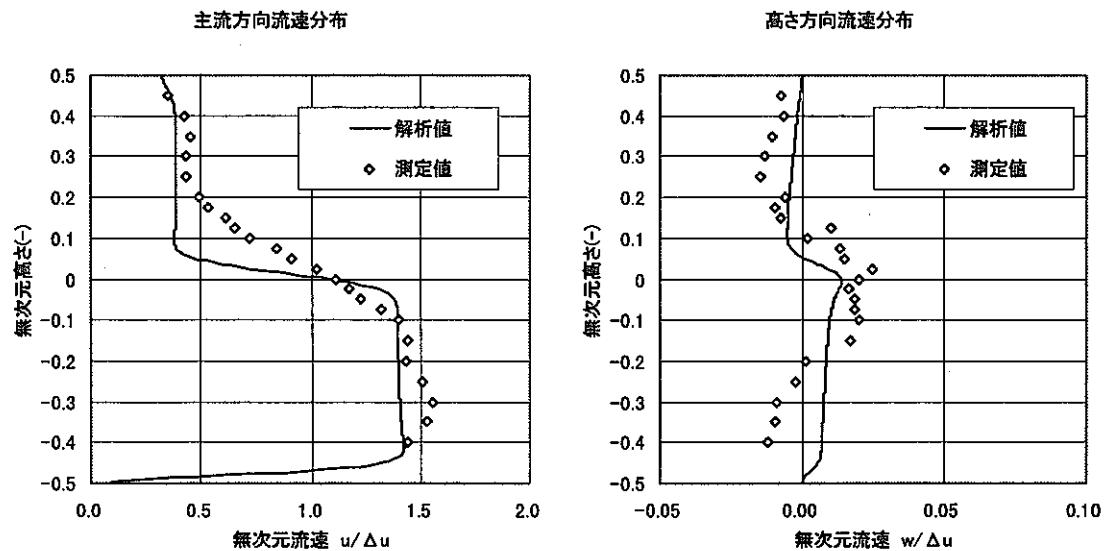
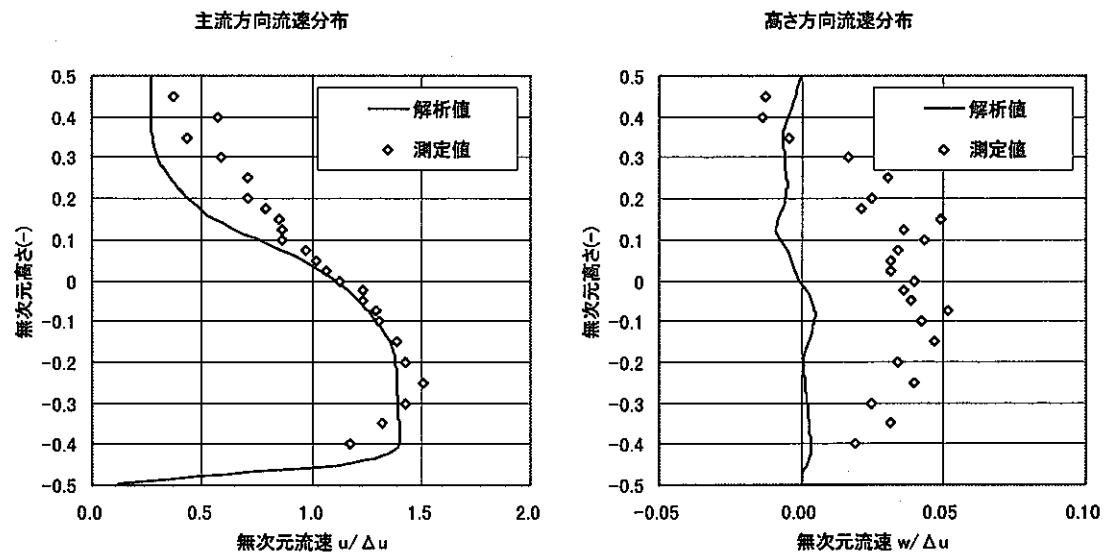


図 3.7 湍度分布（解析ケース 2）

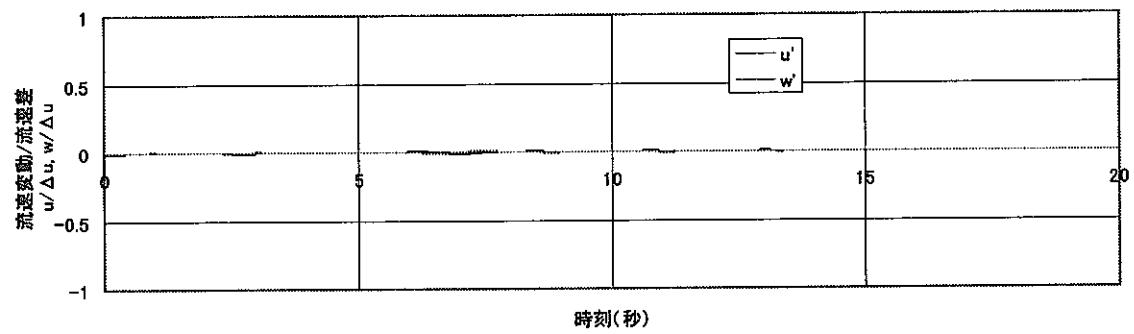


$x=0.45 \text{ m}$

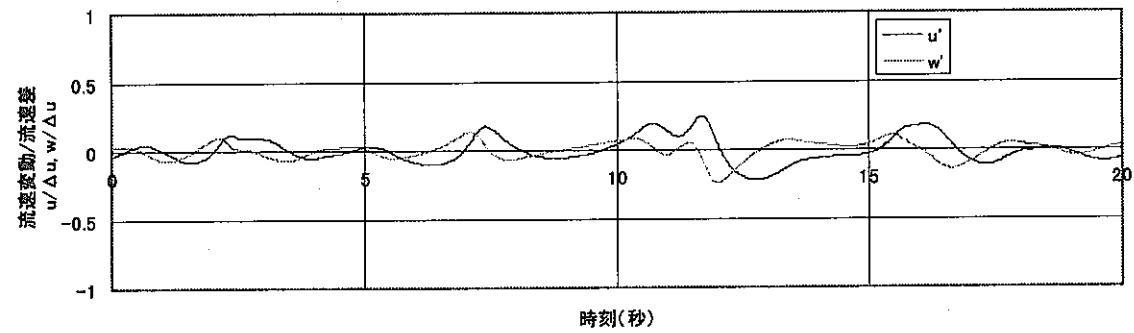


$x=0.9 \text{ m}$

図 3.8 主流方向、高さ方向流速分布（解析ケース 2）



$x=0.45 \text{ m}$



$x=0.9 \text{ m}$

図 3.9 速度変動の時間変化（解析ケース 2）

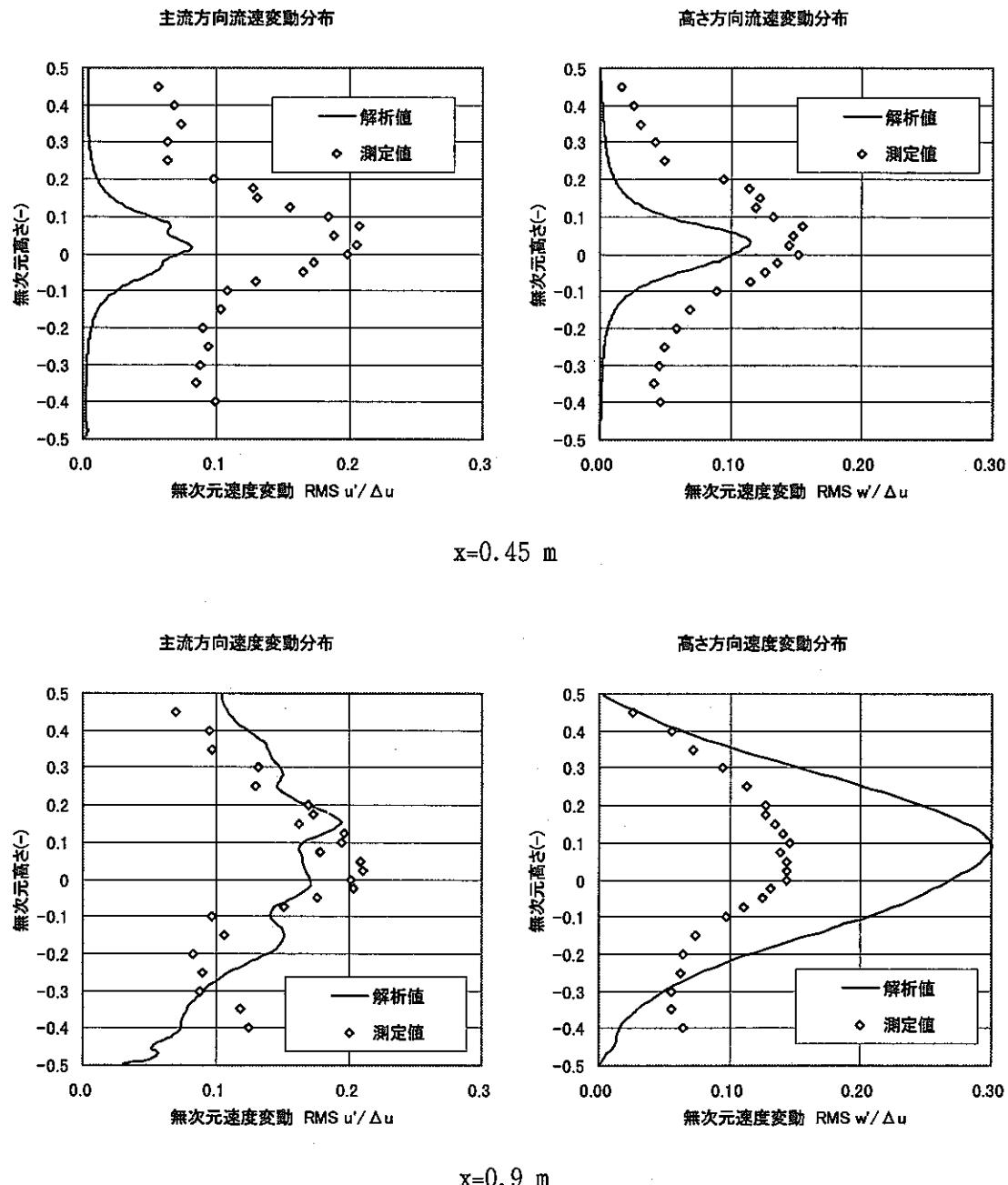


図 3.10 速度変動分布（解析ケース 2）

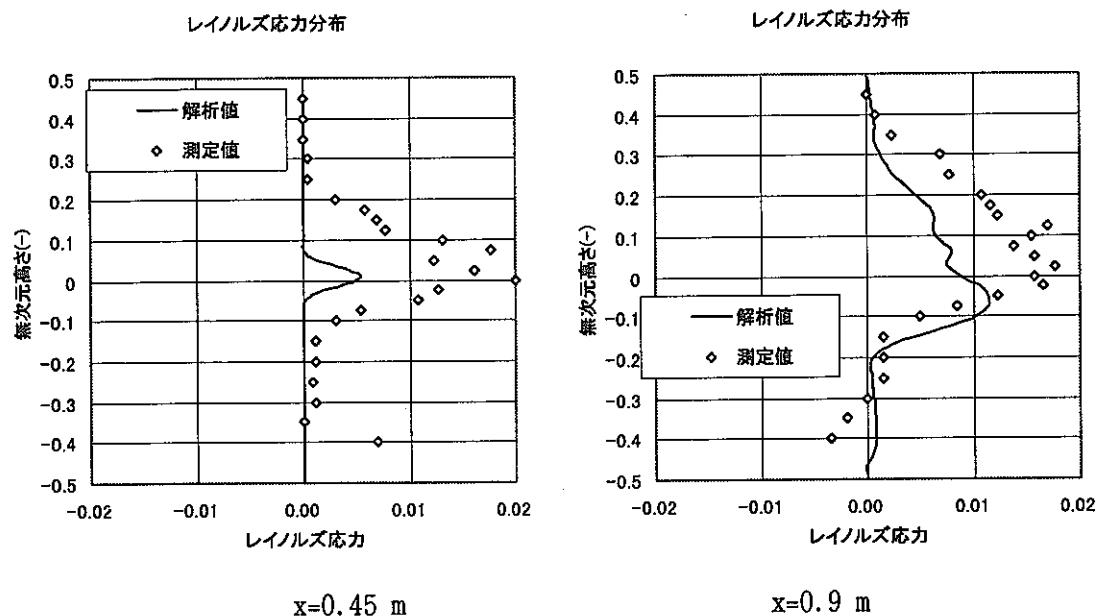


図 3.11 レイノルズ応力分布（解析ケース 2）

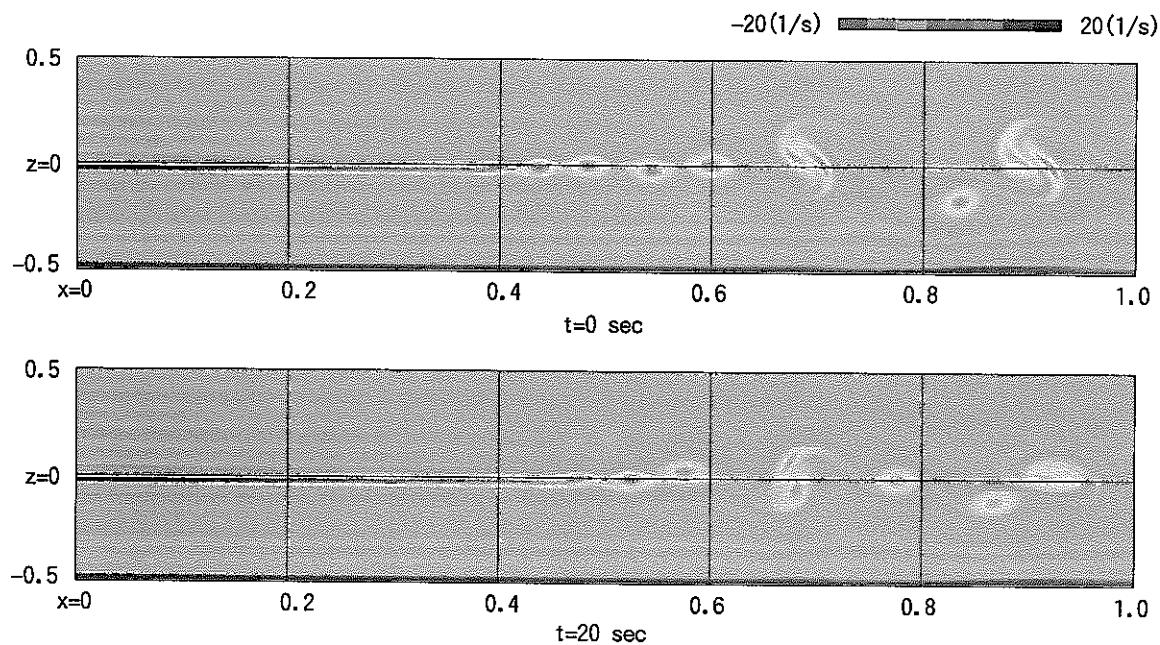


図 3.12 湍度分布（解析ケース 3）

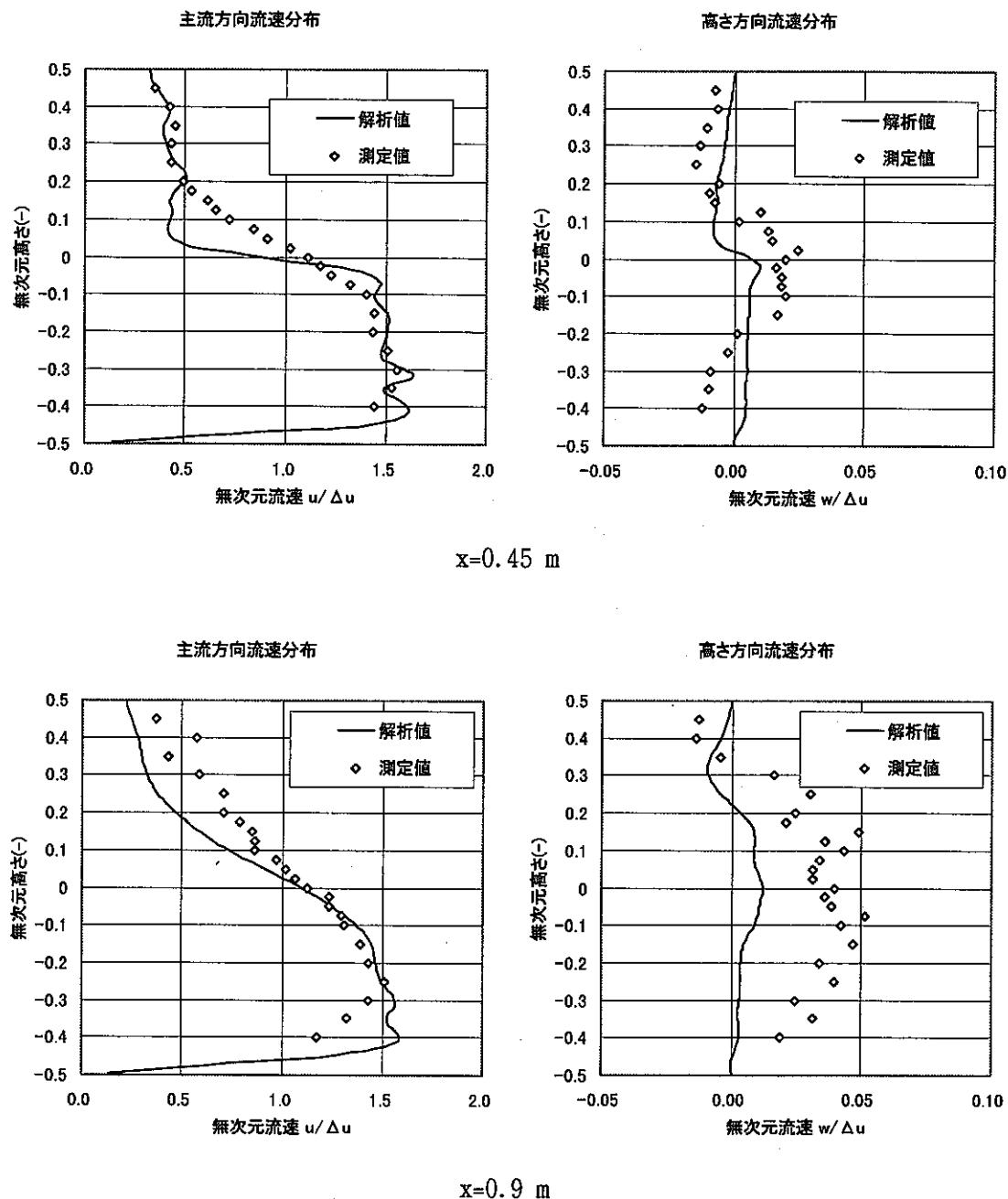


図 3.13 主流方向、高さ方向流速分布（解析ケース 3）

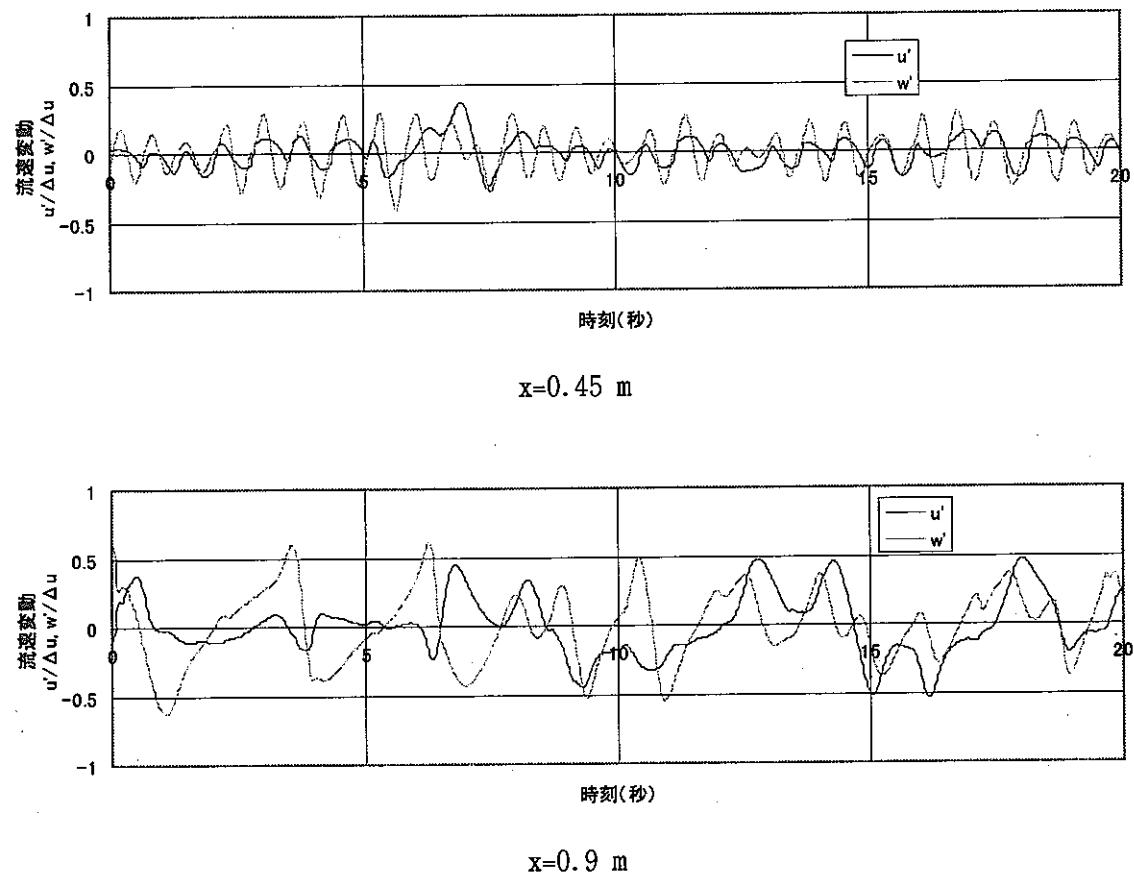


図 3.14 速度変動の時間変化（解析ケース 3）

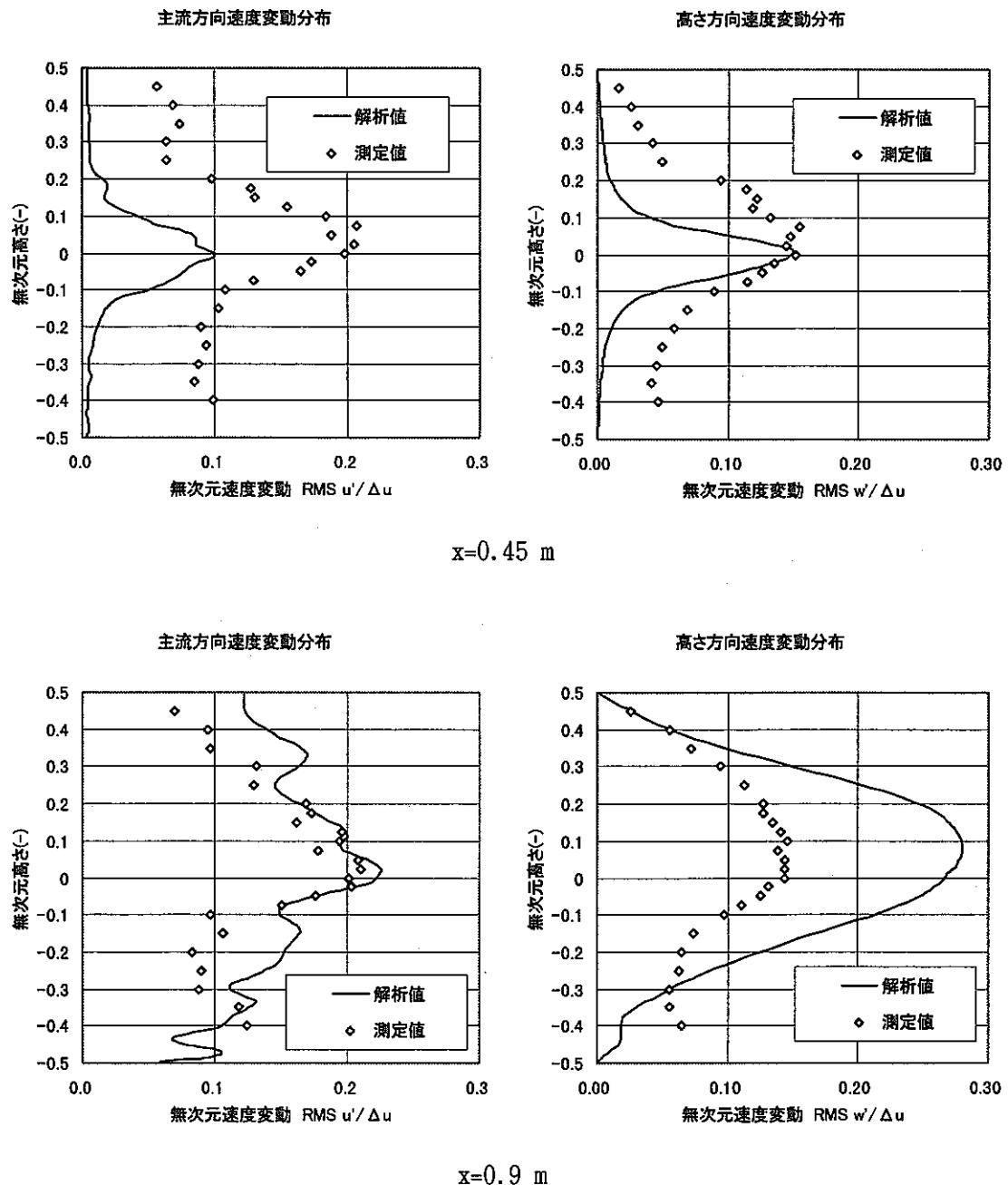


図 3.15 速度変動分布（解析ケース 3）

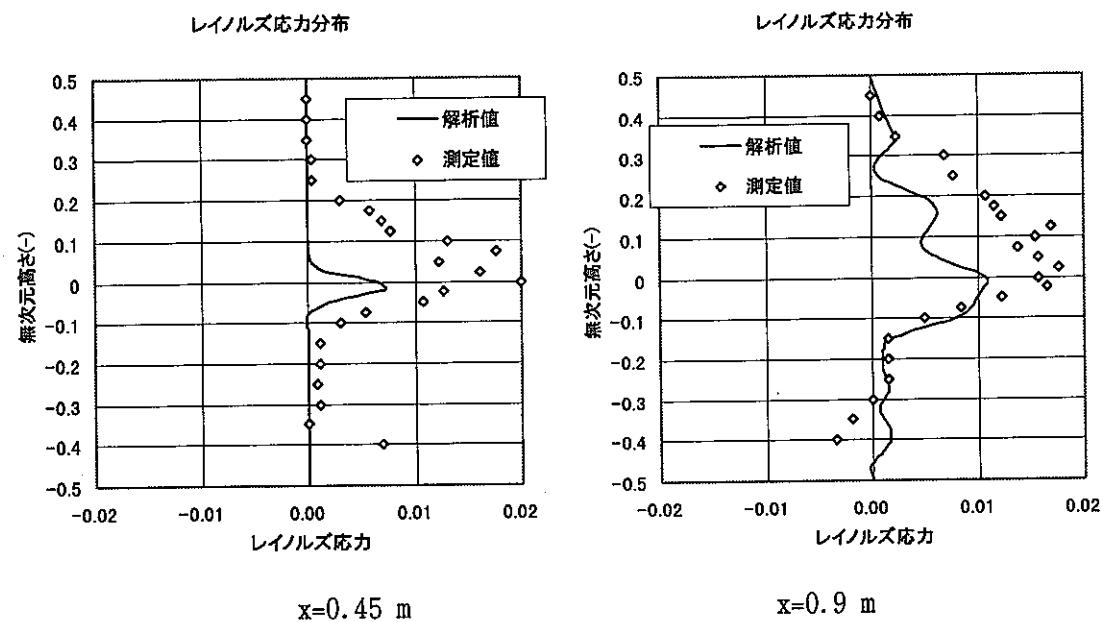


図 3.16 レイノルズ応力分布（解析ケース 3）

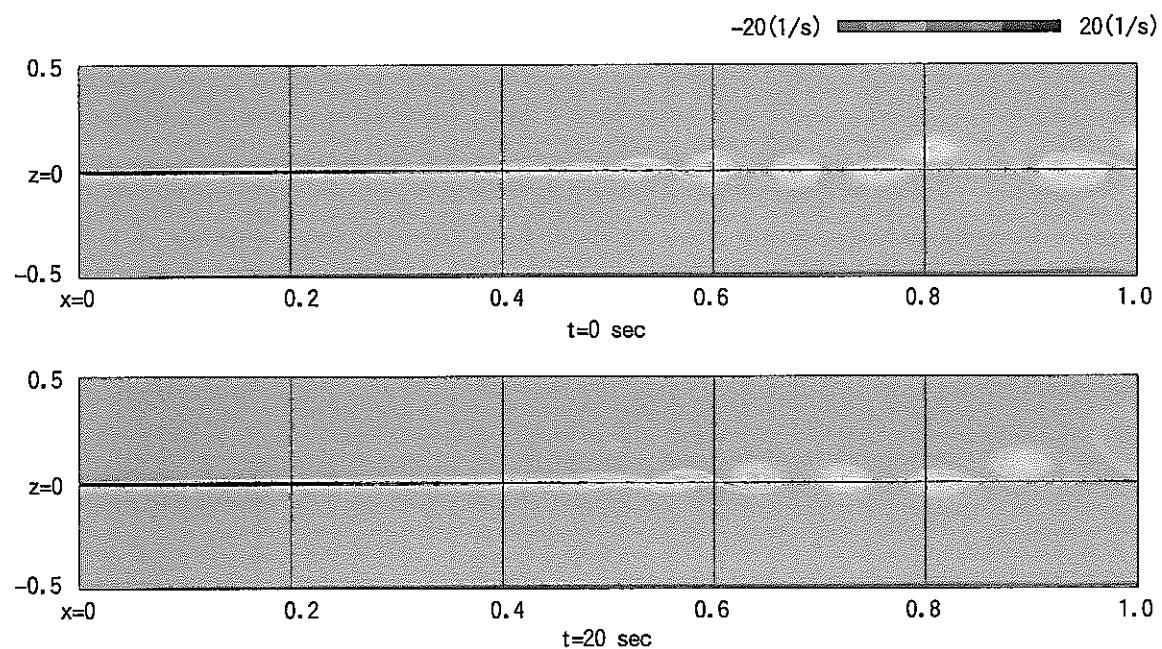
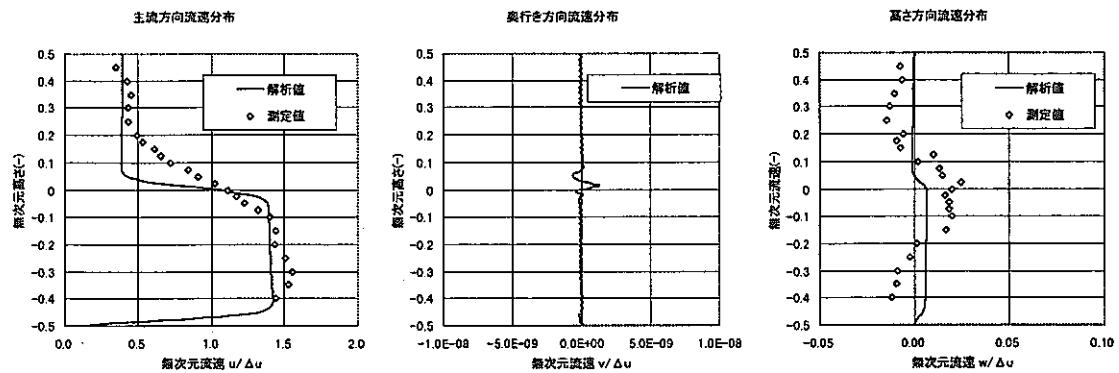
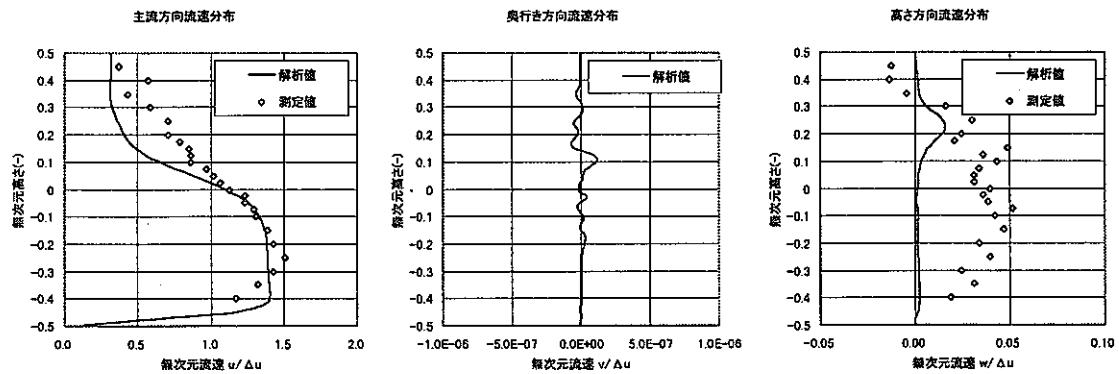


図 3.17 涡度分布（解析ケース 4）



$x=0.45 \text{ m}$



$x=0.9 \text{ m}$

図 3.18 主流方向、高さ方向流速分布（解析ケース 4）

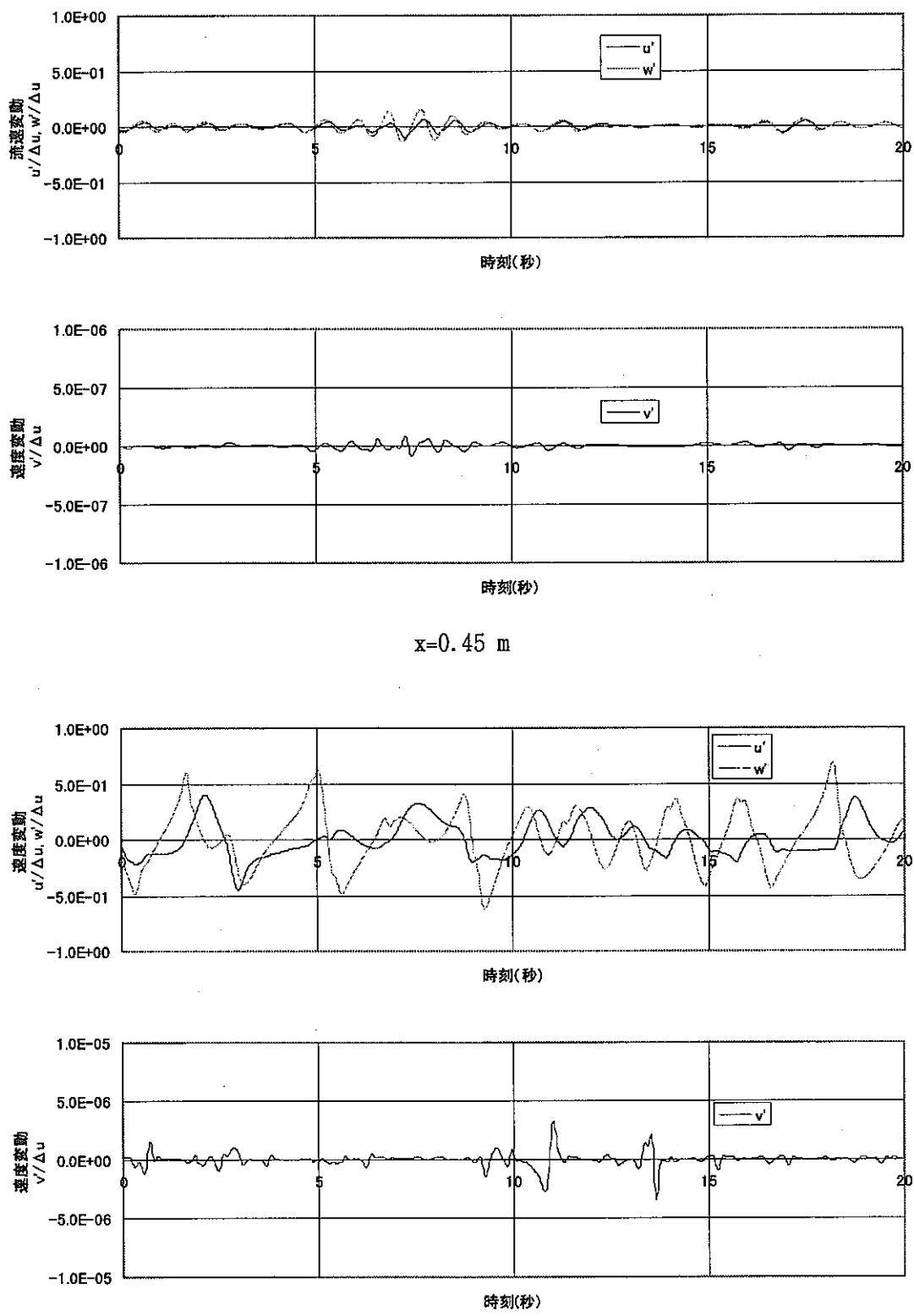


図 3.19 速度変動の時間変化 (解析ケース 4)

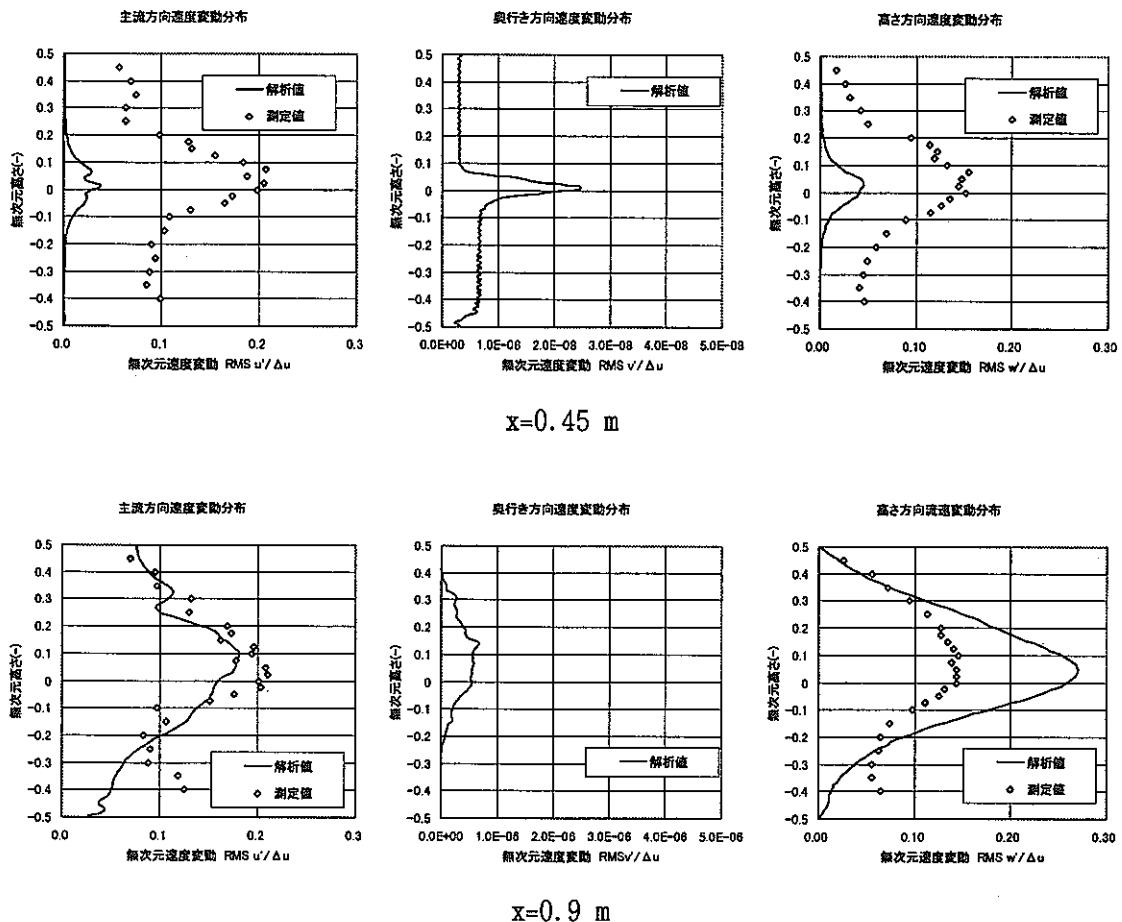


図 3.20 速度変動分布（解析ケース 4）

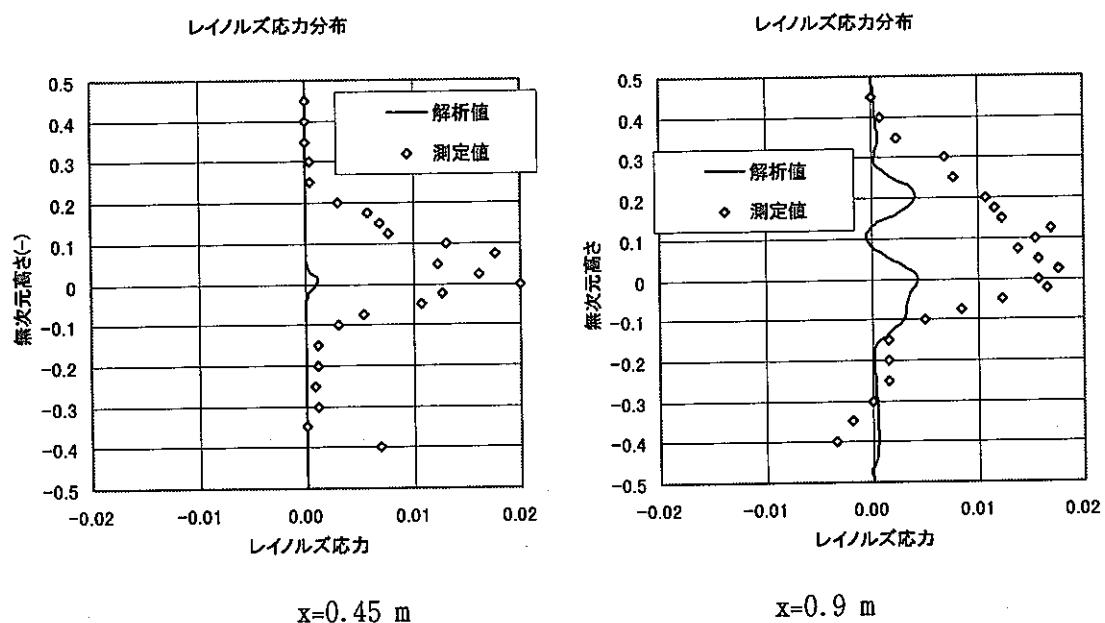


図 3.21 レイノルズ応力分布（解析ケース 4）

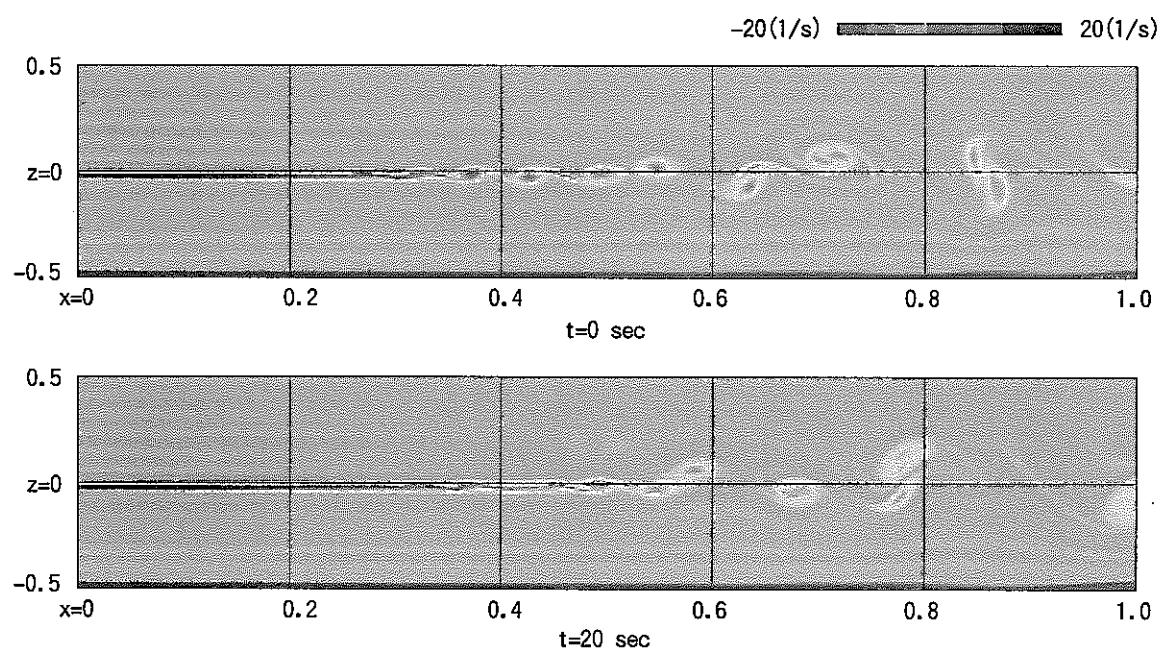
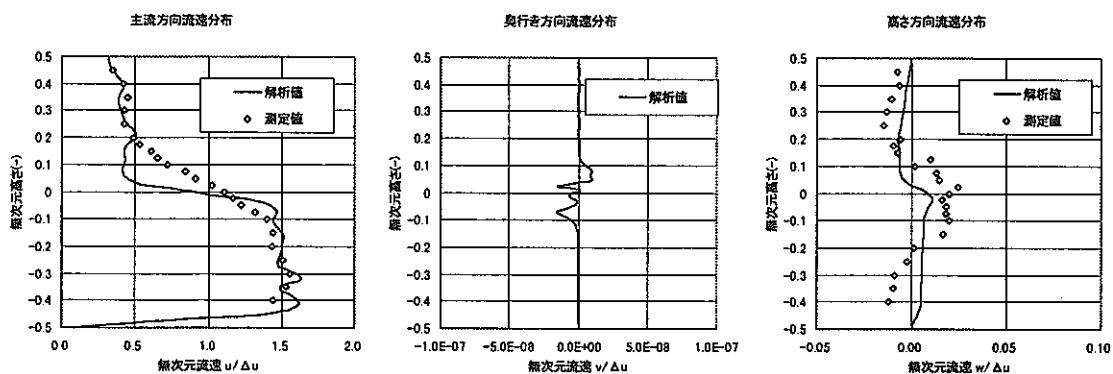
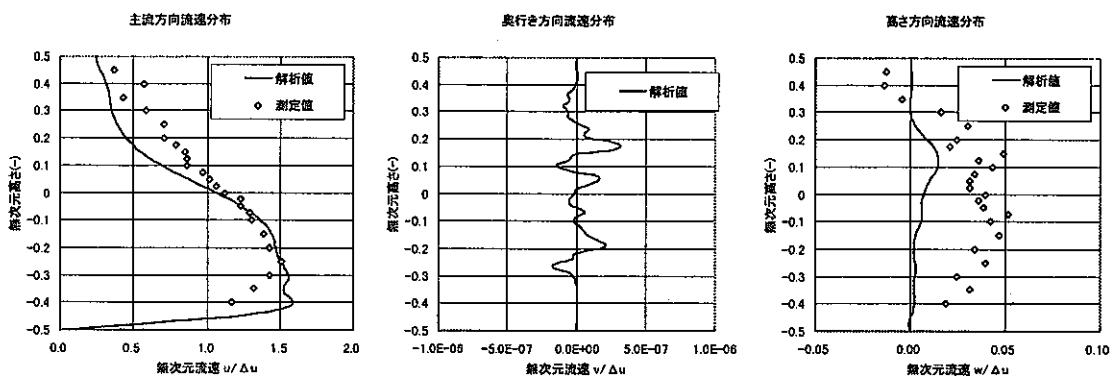


図 3.22 湍度分布(解析ケース 5)

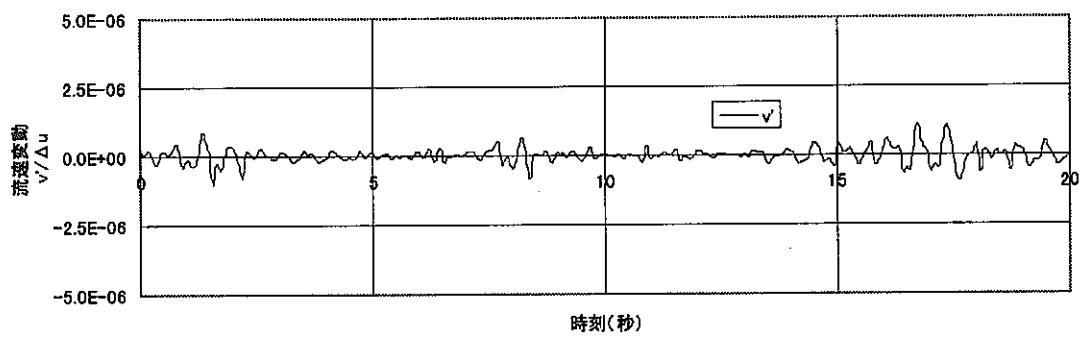
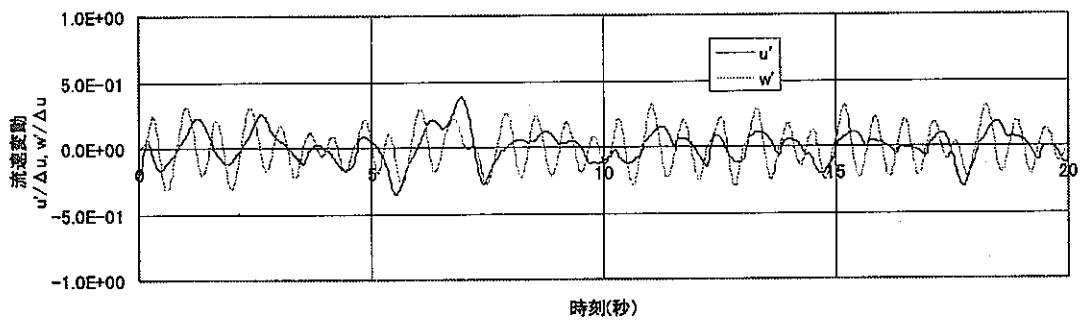


$x=0.45 \text{ m}$

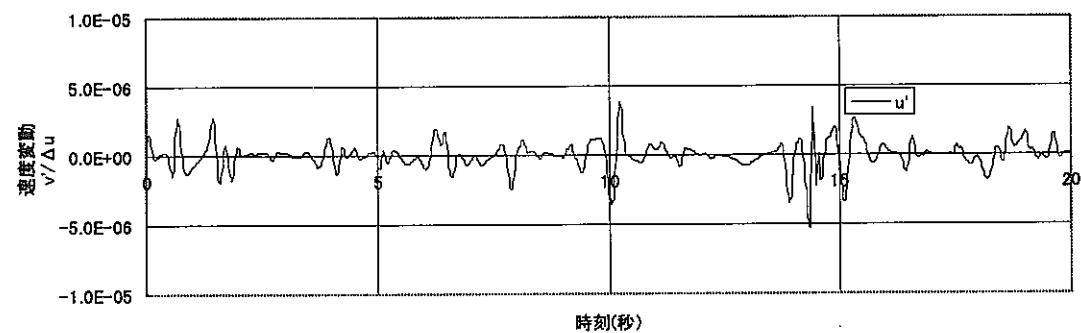
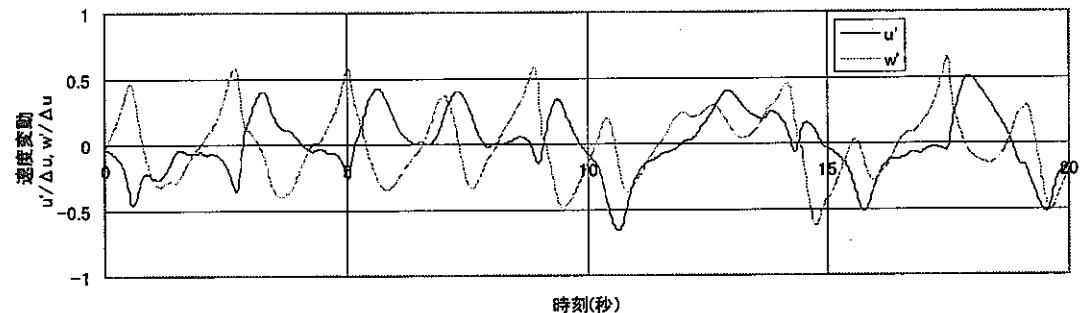


$x=0.9 \text{ m}$

図 3.23 主流方向、高さ方向流速分布（解析ケース 5）



$x = 0.45 \text{ m}$



$x = 0.9 \text{ m}$

図 3.24 速度変動の時間変化（解析ケース 5）

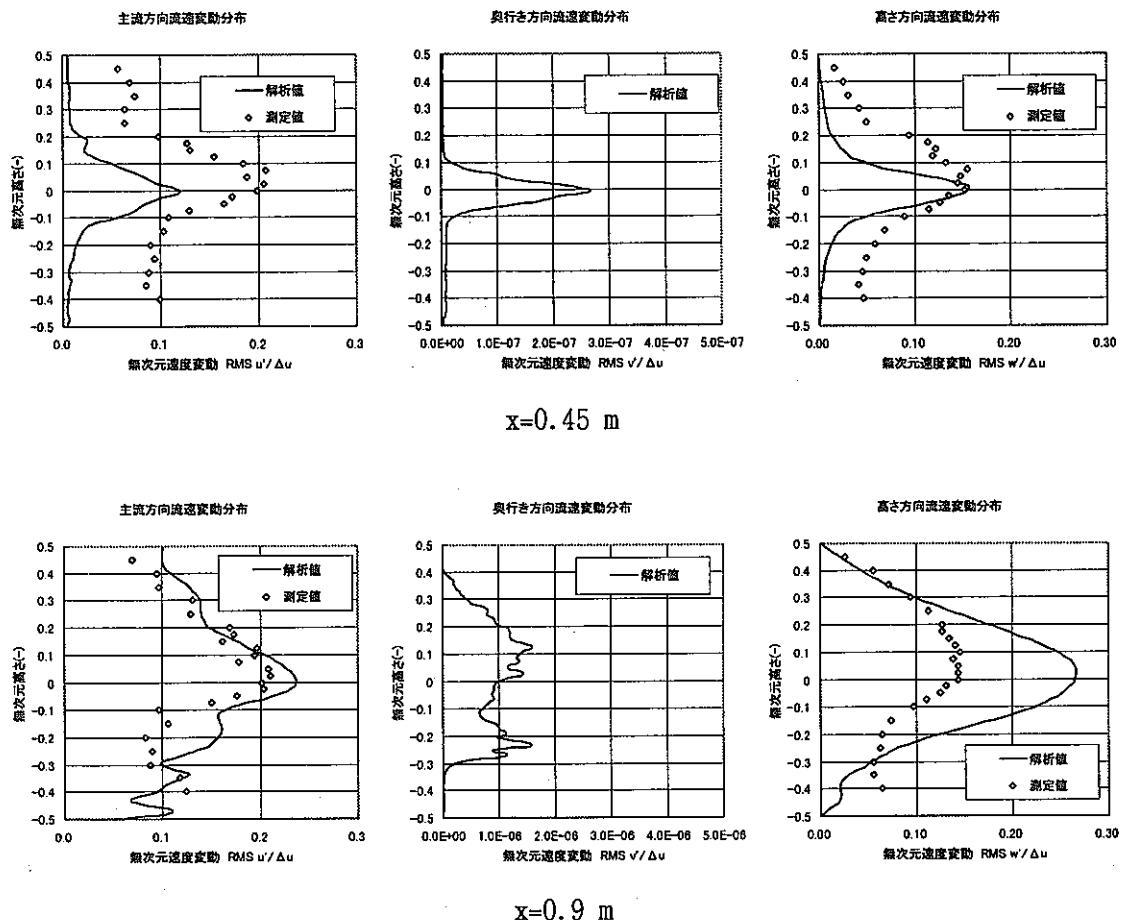


図 3.25 速度変動分布（解析ケース 5）

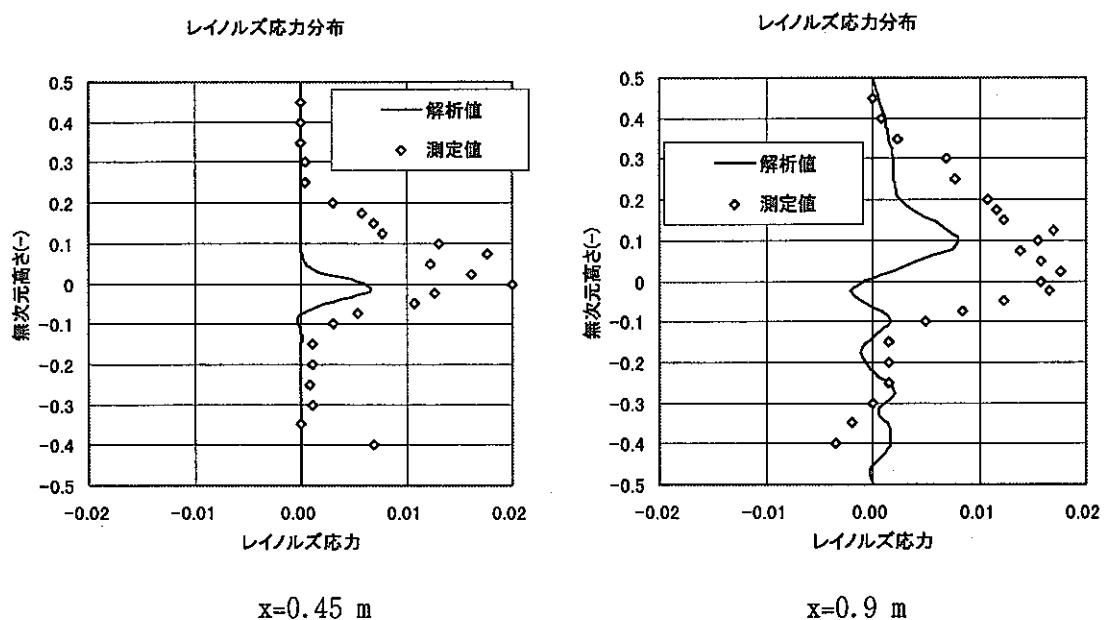


図 3.26 レイノルズ応力分布（解析ケース 5）

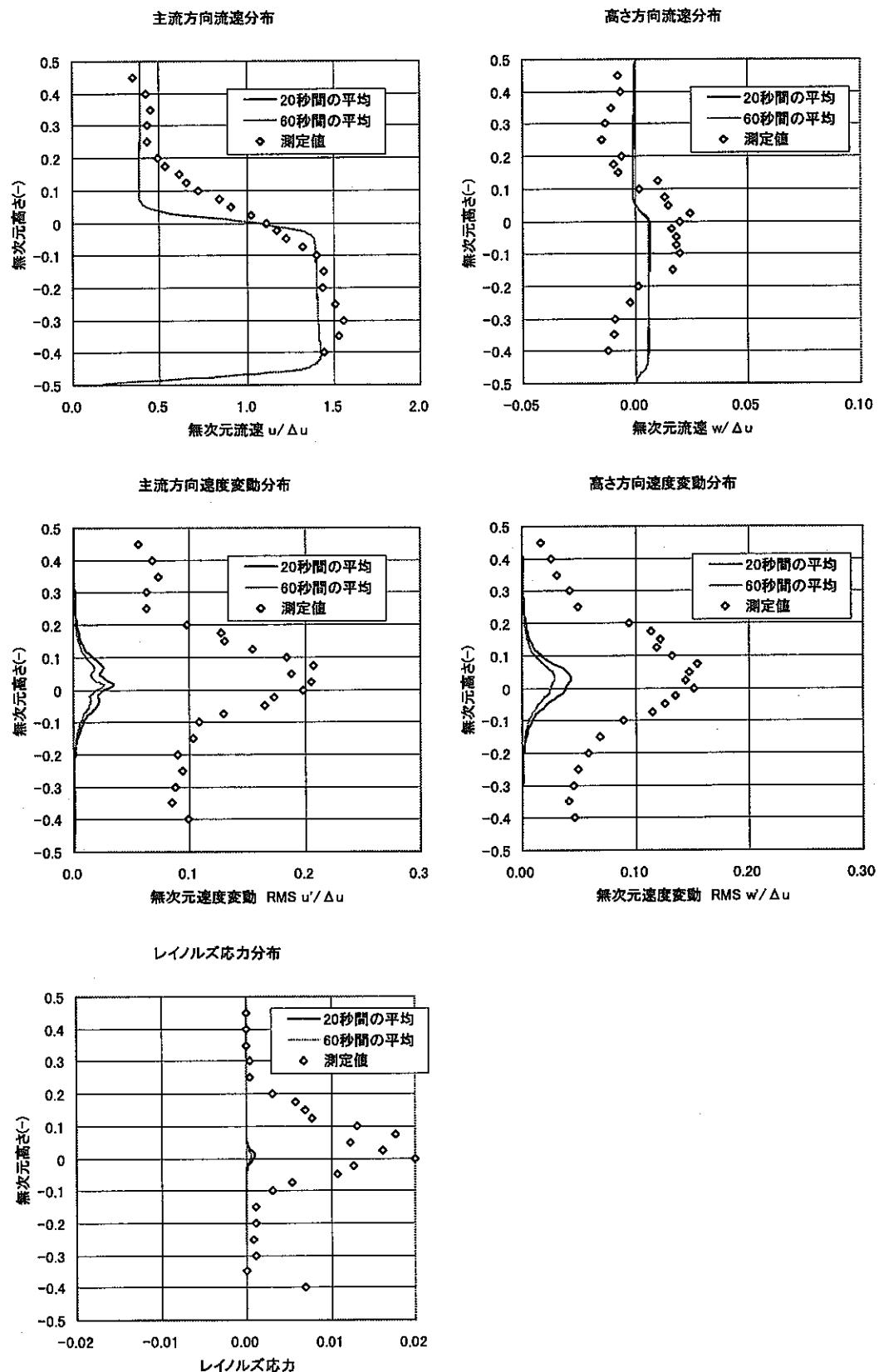


図 4.1 サンプリング時間による結果の相違 ($x=0.45 \text{ m}$)

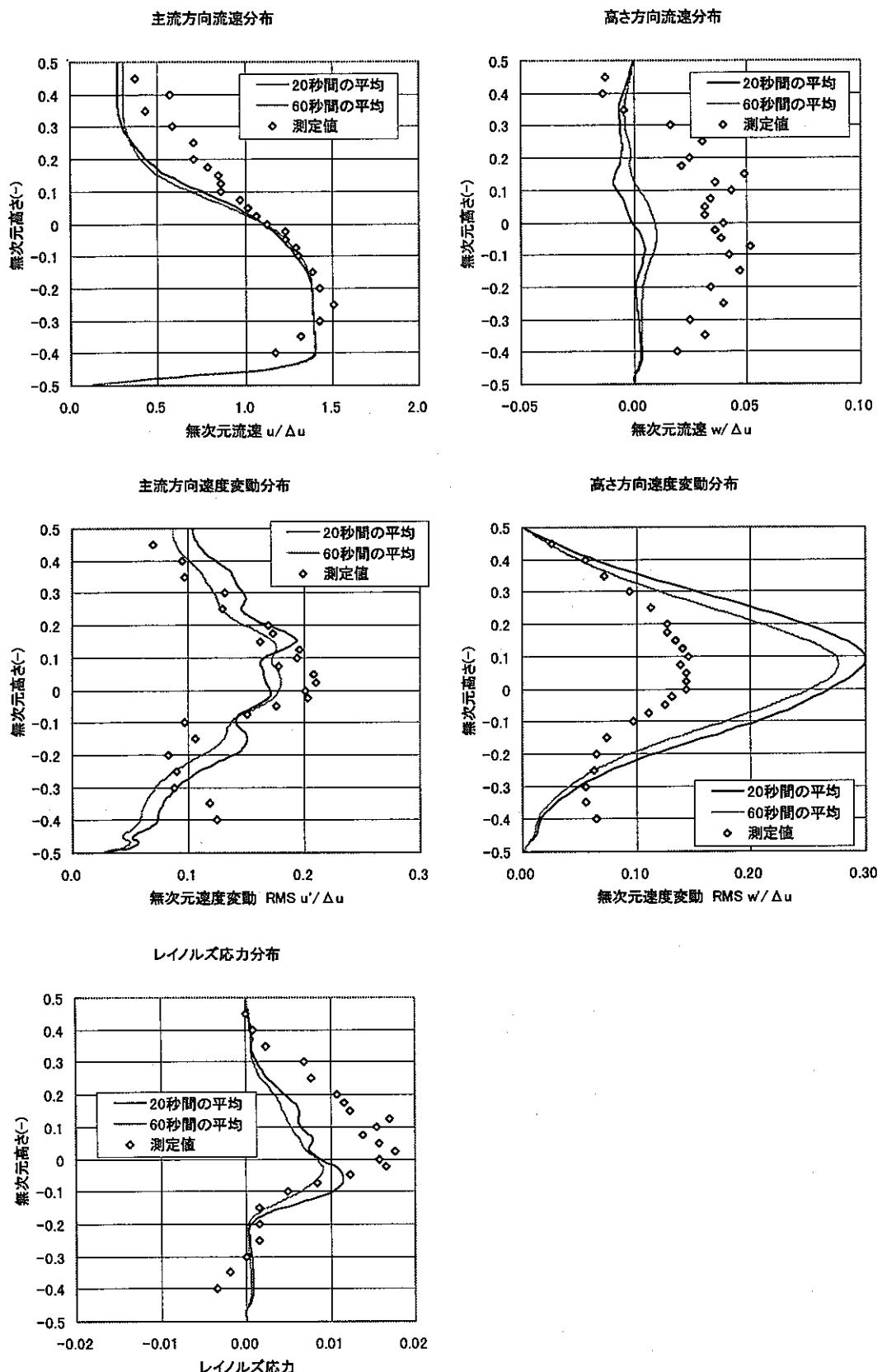


図 4.2 サンプリング時間による結果の相違 ($x=0.9 \text{ m}$)

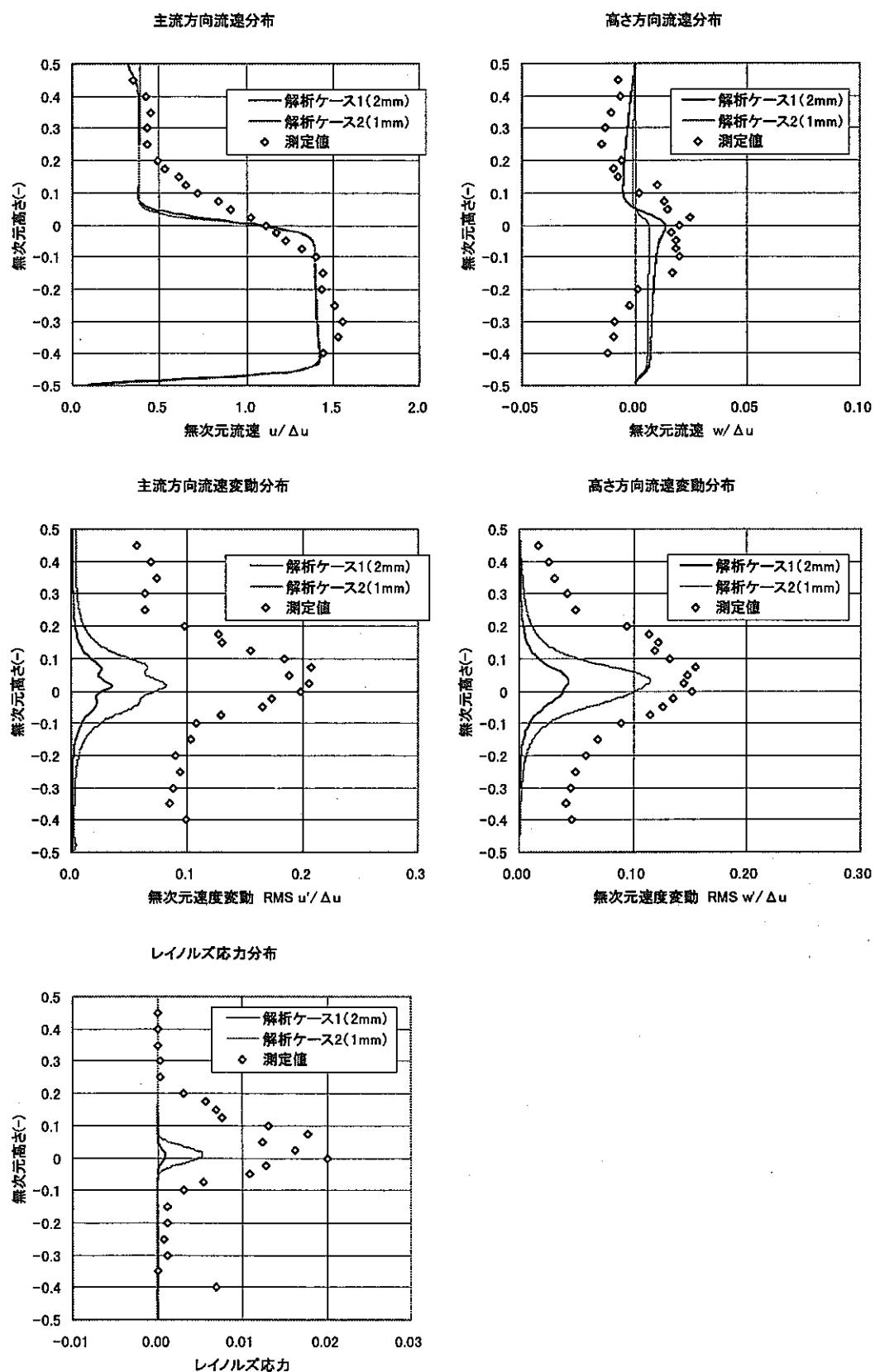


図 4.3 解析メッシュ幅による結果の相違 ($x=0.45$ m)

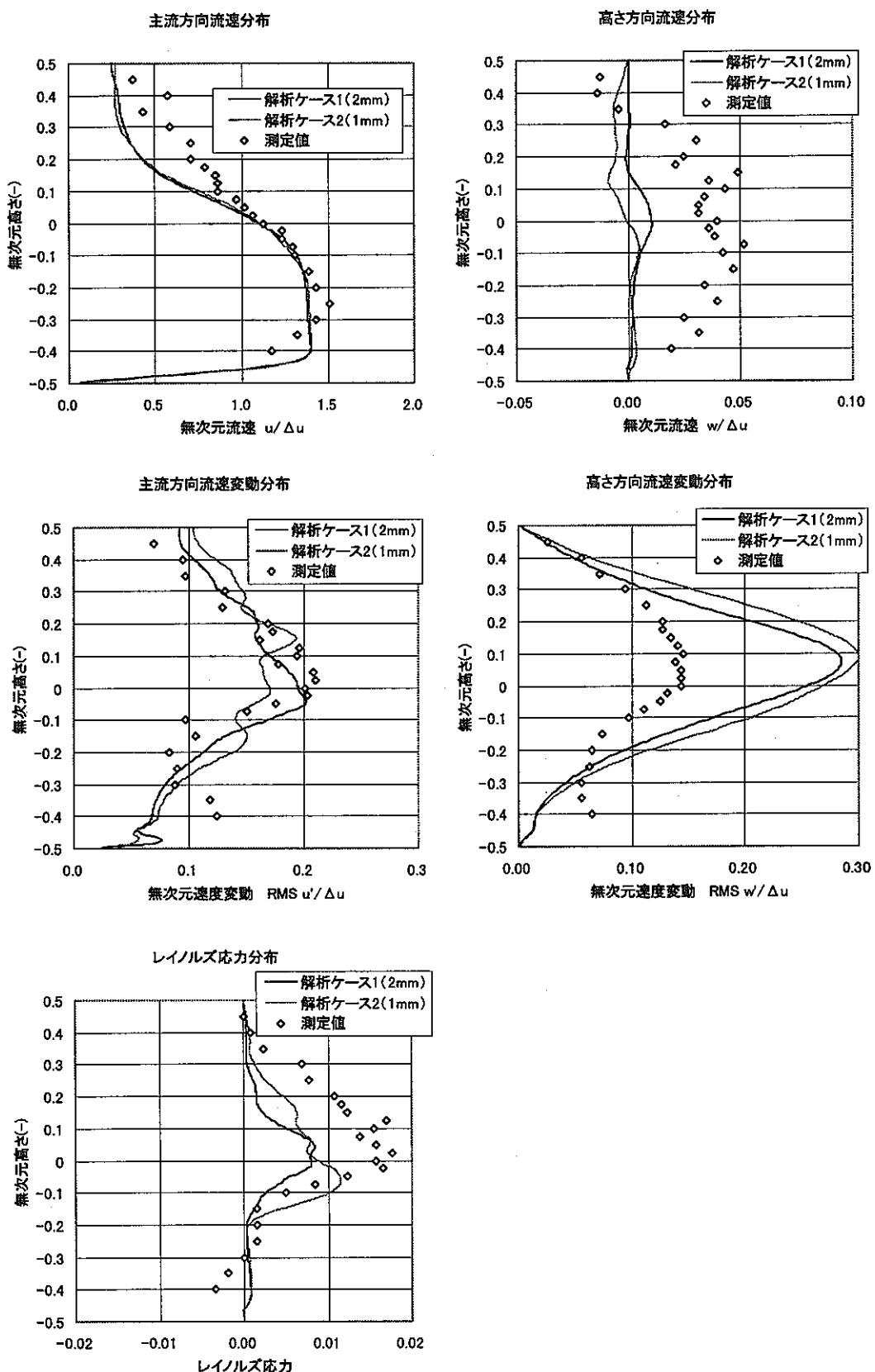


図 4.4 解析メッシュ幅による結果の相違 ($x=0.9\text{ m}$)

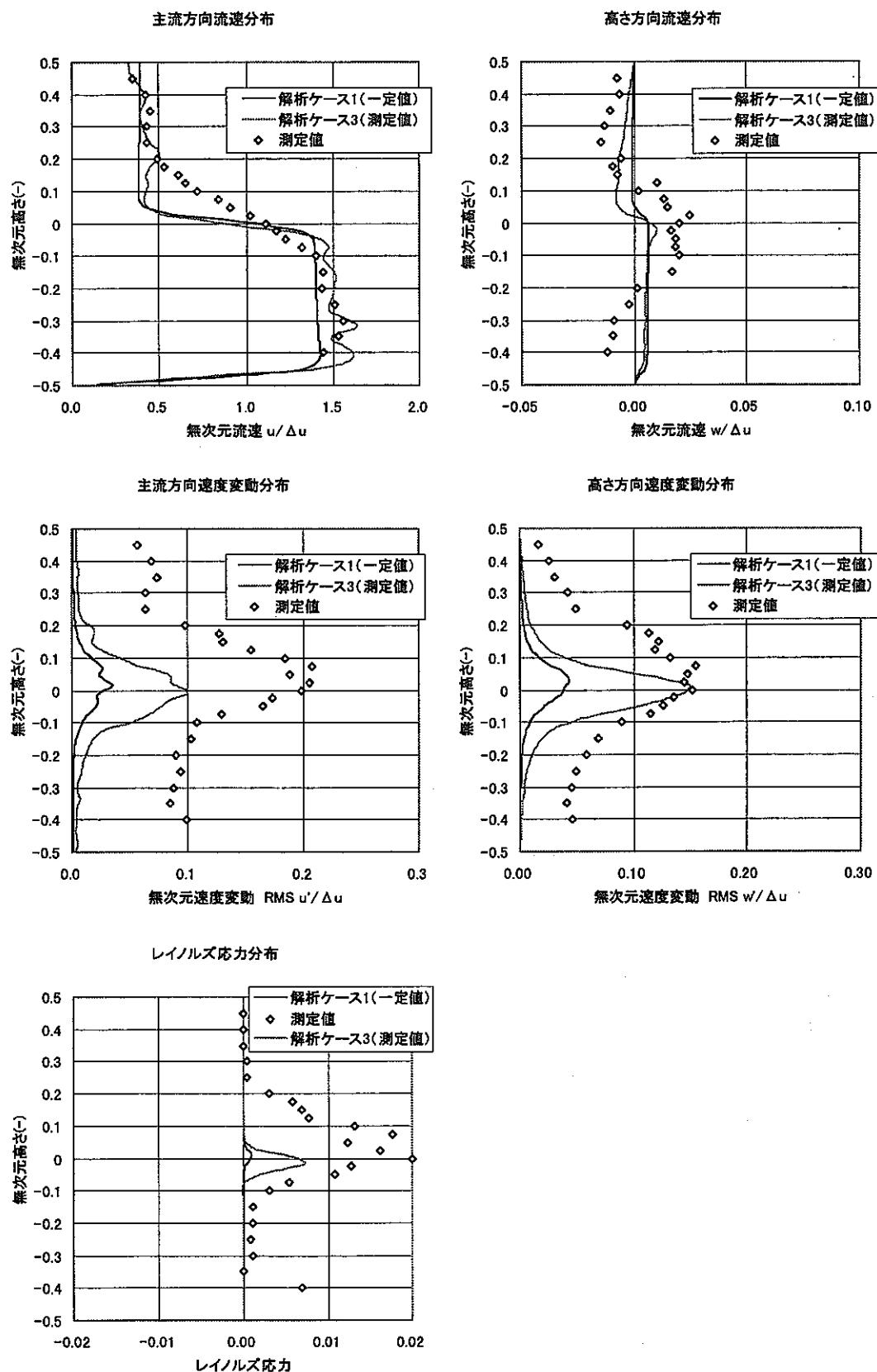


図 4.5 流入流速分布による結果の相違 ($x=0.45 \text{ m}$)

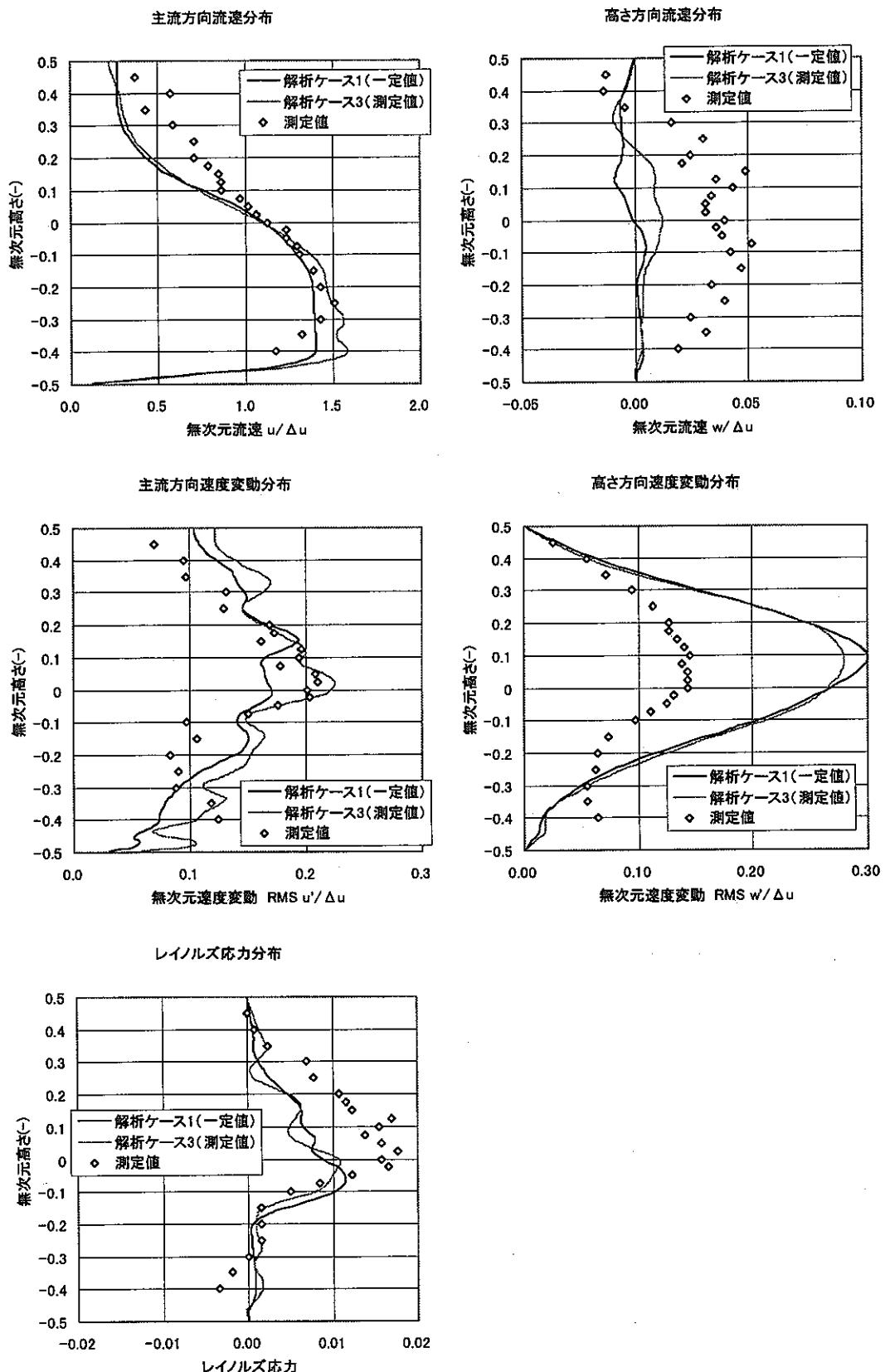


図 4.6 流入流速分布による結果の相違 ($x=0.9$ m)

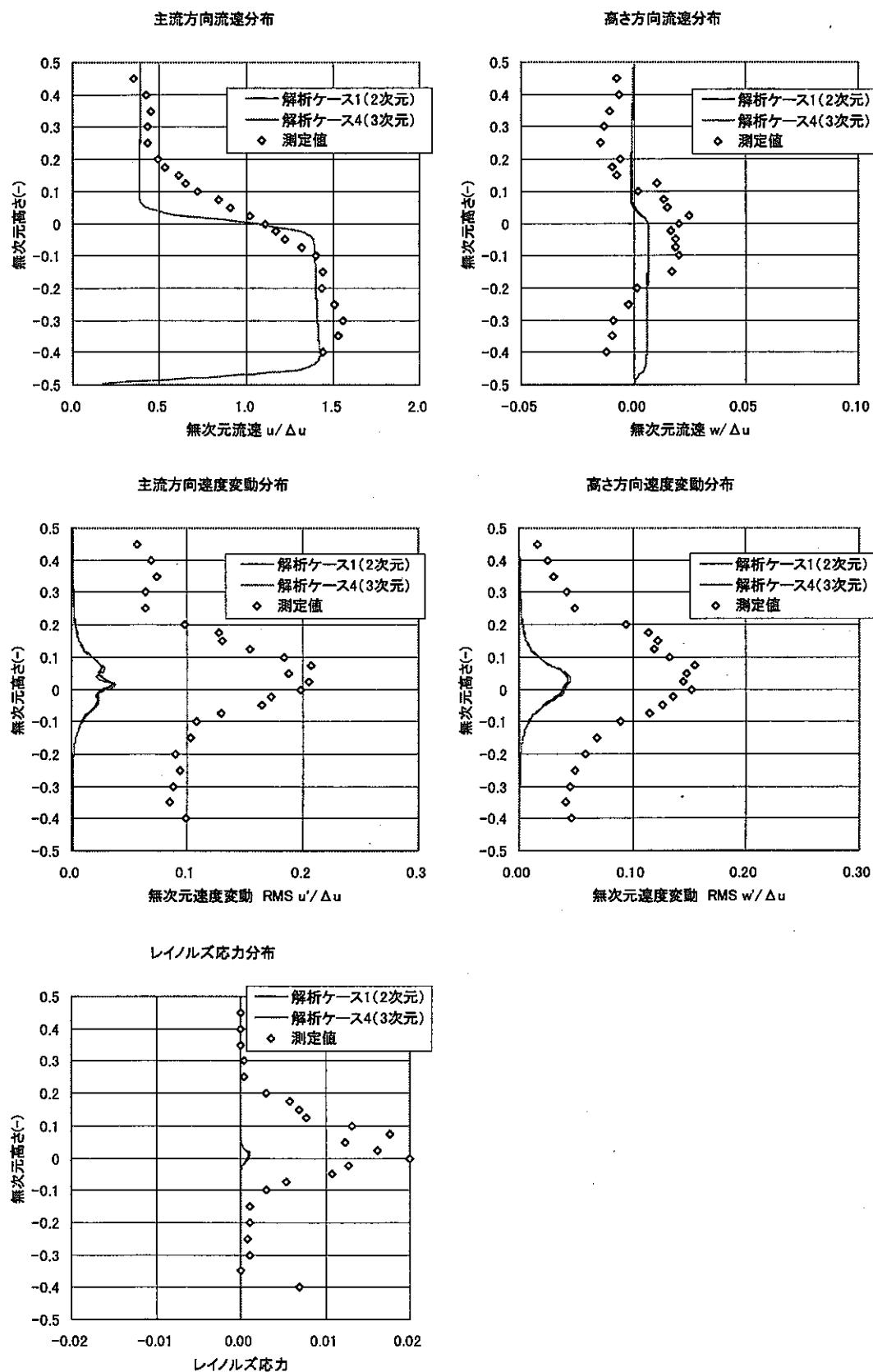


図 4.7 2 次元解析と 3 次元解析による結果の相違 ($x=0.45 \text{ m}$)

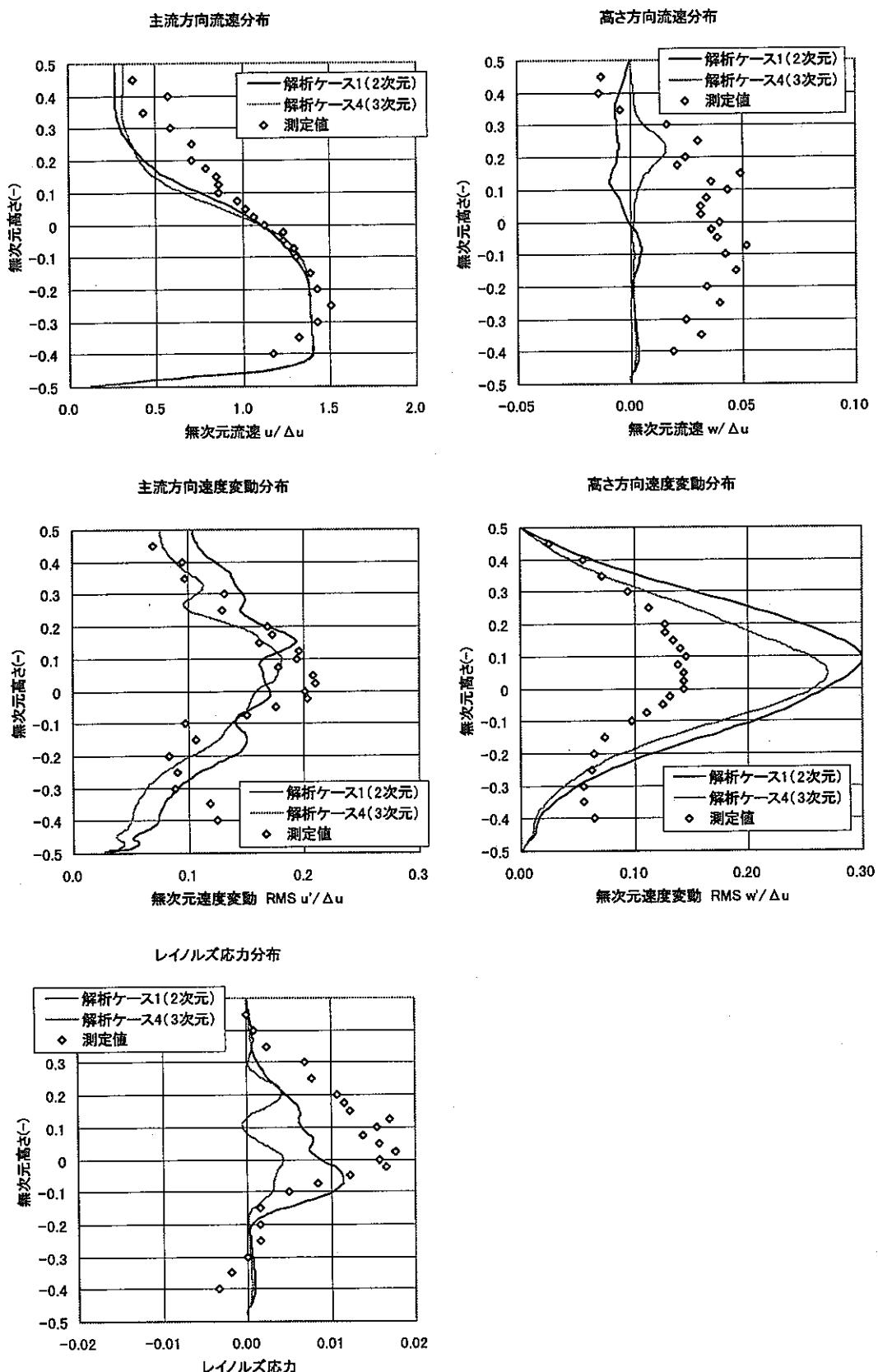


図 4.8 2 次元解析と 3 次元解析による結果の相違 ($x=0.9 \text{ m}$)