

複雑形状流路に対する可視化画像を用いた 熱流動特性計測に関する研究

(平成12年度共同研究報告書)

(研究報告)



2001年3月

筑波大学 機能工学系
核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料は筑波大学と核燃料サイクル開発機構との共同研究の成果として作成されたものです。本資料の一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 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

Inquires 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 319-1184, Japan

©筑波大学 (University of Tsukuba)

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2001

複雑形状流路に対する可視化画像を用いた
熱流動特性計測に関する研究
(平成12年度共同研究報告書)
(研究報告)

松井 剛一*1, 文字 秀明*1,
田中 正暁*2, 上出 英樹*2

要旨

高速炉の実用化に向け経済性の向上を計る上で炉心の高燃焼度化が求められている。燃焼度が上がると燃料ピンバンドルは変形することが知られており、その熱流動特性を評価する手法が高燃焼炉心の達成に必須である。このような解析評価手法の開発・検証のためには複雑な形状をした流路の温度、速度場の実験データが必要となる。

本研究は先行基礎工学研究として、平成12年度から2年間の計画で実施している。変形ピンバンドルを含めて原子炉内に多く存在する複雑形状流路に対する実験計測手法を確立するとともに、複雑流路として粒子充填層内の流れをとりあげその特性を明らかにするものである。複雑な曲面からなる流路をもち、工学的応用が比較的多いシンプルな体系として粒子充填層を取り上げ、この中の熱流動場に対して屈折率調整と画像処理を組み合わせた計測手法を適用し、その熱流動特性を明らかにする。

ヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液とパイレックスガラス球を用い、Nd-YAG レーザを光源とし、NaI 水溶液を調整し濃度 56.9[wt%] (25℃) とすれば、NaI 水溶液とパイレックスガラス球の屈折率が一致することを確認し、球充填層内の流動場を粒子画像流速測定法により把握する手法を確立した。本手法を用い、直径 20mm および直径 10mm のガラス球を正方格子状に粗充填した場合と直径 20mm のガラス球を千鳥状に密充填した場合の 3 種類の充填形態について充填層内部の流れの発達の様子や充填層の周辺を含めた流動構造を明らかにした。

本報告書は、筑波大学と核燃料サイクル開発機構との共同研究契約により実施した研究の成果である。
機構担当部課室：大洗工学センター 要素技術開発部 原子炉工学グループ

*1 筑波大学機能工学系、

*2 大洗工学センター 要素技術開発部 原子炉工学グループ

Study on thermal-hydraulic phenomena in complicated boundary with flow visualization technique.

(Summarized report from 2000 Aug. to 2001 Mar.)

Goichi Matui*, Hideaki Monji*,
Masa-aki Tanaka**, Hideki Kamide**

Abstract

This study is performed in cooperation with University of Tsukuba and Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) from August 2000 to March 2001.

This report presents the experimental results of the thermal flow field of liquid in a rectangular channel with the porous media consisted of the spheres. The test section of the rectangular channel was locally packed with spherical glass beads to realize the porous media. The NaI solution was used as the working fluid to match the refractive index of glass sphere in order to visualize the flow field. The two-dimensional velocity distribution was measured by the particle image velocimetry; the motion of the tracer particles illuminated by a laser light sheet was evaluated by imaging system.

The experiment revealed the detailed structure of flow inside and outside of porous blockage in the channel. The experimental results showed that in the inlet part of blockage side, the fluid in the gap between glass spheres was a unsymmetrical convergent-divergent jet with higher velocity than the cross-sectional mean velocity and also the fluid flowed in transverse direction going to the unblocked channel. Therefore, there appeared straight flow, one-sided and inclined flow, branched flow, and confluence of flow. In the central and outlet parts, the flow velocity was slower than that in the inlet part. However, the flow in the first and the second gaps from the wall in the blockage kept high velocity. In the inlet part of unblocked channel, the larger vertical component than the mean velocity and the large transverse component were observed. In the outlet of blockage, the flow had high velocity in unblocked channel but extremely low in the blockage. The separation line of flow was observed upstream from the center of glass sphere. The open turbulent wake was observed along every glass sphere and the superposition of wakes in downstream region. The wake was strong in the inlet part but weak downstream. The results suggest that the wake would be dominant in the flow in the blockage and the flow is three dimensional.

* Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba.

** Reactor Engineering Group, Sodium and Safty Engineering Division,
OEC, JNC.

目 次

第1章 序 論	1
第2章 実験手法の確立	3
2.1 可視化計測のための屈折率整合	3
2.2 実験装置	3
2.2.1 実験装置の構造	3
2.2.2 試験部	4
2.2.3 球充填層	4
第3章 実験方法	5
3.1 可視化方法	5
3.2 実験条件	5
第4章 実験結果と考察	7
4.1 20mm 球粗充填	7
4.1.1 時間平均速度	7
4.1.2 時間平均渦度	10
4.2 20mm 球密充填	11
4.3 10mm 球粗充填	13
第5章 数値シミュレーション	14
5.1 概 要	14
5.2 解析条件	14
5.3 解析結果	14
第6章 まとめ	16
参考文献	18

図表リスト

表 1 実験条件および撮影条件

- 図 1 試験流路内の様子
- 図 2-1 実験装置概略図
- 図 2-2 テスト部概略図
- 図 3-1 P I V測定系概念図
- 図 3-2 試験部撮影領域 (20mm 球・粗充填)
- 図 3-3 撮影領域 (20mm 球・密充填)
- 図 3-4 撮影領域 (10mm 球・粗充填)
- 図 4-1.1 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.0$ 断面) (充填層入口部)
- 図 4-1.2 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層入口～中央部)
- 図 4-1.3 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層中央～出口部)
- 図 4-1.4 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層出口部)
- 図 4-2 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.0$ 断面)
- 図 4-3 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=0.85$ 断面)
(充填層入口部)
- 図 4-4 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.15$ 断面)
(充填層入口部)
- 図 4-5 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=0.85$ 断面)
- 図 4-6 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.15$ 断面)
- 図 4-7 20mm 球・粗充填の場合の健全流路内における時間平均速度ベクトル分布
($y^*=1.0$ 断面)
- 図 4-8 20mm 球・粗充填の場合の健全流路内における流速分布
- 図 4-9 20mm 球・粗充填の場合の健全流路内における流速分布
- 図 4-10 20mm 球・粗充填の場合の時間平均渦度分布 ($y^*=1.0$ 断面)
- 図 4-11.1 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層入口部)
- 図 4-11.2 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層入口～中央部)
- 図 4-11.3 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層中央～出口部)
- 図 4-11.4 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層出口部)
- 図 4-12 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.0$ 断面)
- 図 4-13 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=0.5$ 断面)
(充填層入口部)
- 図 4-14 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=0.75$ 断面)
(充填層入口部)
- 図 4-15 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.25$ 断面)

- (充填層入口部)
- 図 4-16 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.5$ 断面)
(充填層入口部)
- 図 4-17 20mm 球・最密充填の場合の時間平均渦度分布 ($y^*=1.0$ 断面)
- 図 4-18.1 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層入口部)
- 図 4-18.2 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層入口～中央部)
- 図 4-18.3 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層中央～出口部)
- 図 4-18.4 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層出口部)
- 図 4-19 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.0$ 断面)
- 図 4-20 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=2.0$ 断面)
- 図 4-21 10mm 球・粗充填の場合の時間平均渦度分布 ($y^*=1.0$ 断面)
- 図 5-1 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層上流側～入口部)
- 図 5-2 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層中央部)
- 図 5-3 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層出口部～下流側)
- 図 5-4 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層上流側～中央部)
- 図 5-5 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.0$ 断面)
- 図 5-6 時間平均速度分布の解析結果と実験結果との比較 ($y^*=1.0$ 断面)
(20mm 球・粗充填の場合)
- 図 5-7 時間平均速度分布の解析結果と実験結果との比較 ($y^*=1.0$ 断面)
(20mm 球・粗充填の場合)

第1章 序 論

高速炉の実用化に向け、経済性の向上を計る上で炉心の高燃焼度化が求められている。燃焼度の上昇により燃料ピンが高温の状態に長時間曝されることにより生じるクリープ現象によって非弾性特性を示し、燃料ピン内の核分裂生成ガスの増加に伴いピン内ガス圧力が増加するため燃料ピンバンドルは変形（スエリング）することが知られている。燃料集合体内の燃料ピンに囲まれる流路（サブチャンネル）は、燃料ピンの変形により局所的に狭くなり冷却材の流動を妨げ、冷却効率に悪影響を及ぼす可能性がある。また、燃料ピンの変形が進み燃料ピン同士が接触する状態になると、局所的に燃料ピン温度は上昇し、燃料ピン内部の燃料の挙動にも影響を及ぼすことが考えられる。燃焼度の増加により変形した燃料集合体内においては、燃料ピンの健全性に対して厳しい熱的条件が課せられることになる。そこで、高燃焼炉心の達成には変形燃料集合体内の熱流動特性を評価する手法が必要であり、このような解析評価手法の開発・検証のためには、燃料ピンおよびスペーサワイヤが存在する燃料集合体内のサブチャンネルに代表されるような、複雑な形状をした流路内の温度、速度場の実験データが必要となる。

本研究は先行基礎工学研究として、変形した燃料集合体内の熱流動を含めて原子炉内に多く存在する複雑形状流路内の熱流動現象に対する実験計測手法を確立することを目的としている。構造物によって複雑な流路が形成されている代表的な例として、複数の粒子によって形成される流路、すなわち粒子充填層内流れをとりあげ、構造物背後の流れ場あるいは狭隘部の流れ場に対して実験計測手法を確立し、その特性を明らかにする。また、粒子充填層内の流れ場に関する知見は、高速炉の安全評価事象として想定されている局所流路閉塞事象に反映することができる。局所流路閉塞事象とは、異物の混入などによってサブチャンネルが閉塞され局所的に冷却材流量が低下し、燃料棒および冷却材が局所的に過熱されることを想定する事象である。ワイヤースペーサ型のバンドルでは、まずワイヤに沿って異物が蓄積し、その部分を中心に異物が集積し始め、閉塞形態は平板状ではなく厚みのある多孔質状閉塞が最も可能性が高いと予想されている^[1-2]。健全ピンバンドルに比べて変形ピンバンドル内では、流路（サブチャンネル）断面積が局所的に狭くなり、異物が滞留し易い状況にあり、粒子の混入による多孔質状閉塞の形成が考えられる。

これまでに、ポーラス状閉塞物を含む燃料集合体内の熱流動場についての試験研究および解析手法の開発が行われてきた^[10-12]。一連の試験により、ポーラス状閉塞物内部の温度場に関する知見が得られている。また、閉塞物内部の空隙率分布および熱移行を詳細にモデル化し、3次元的な温度分布を再現する解析手法の開発が行われており、水流動試験結果との比較による検証が行われてきた。しかし、実験では、熱電対による温度場測定が主体であり、水流動試験で閉塞物周辺の速度場について計測されているが、解析手法の検証データとしては不十分である。

このような、複雑流路形状流路内の熱流動場を測定する手法として、透明材料で流路および構造物を形成し、化学薬品を溶かし込んだ水溶液を作動流体として光学的な計測を行う手法がある。中島らはヨウ化ナトリウム水溶液とアクリル製のラップ管とパイレックスガラス製の模擬燃料棒を用いて模擬燃料集合体を構成し、集合体内の流速分布をレーザドップラ流速計により計測を行っている^[9]。しかし、レーザドップラ流速計による計測では、連続した点での同時計測を行うことができず、断面内の2次元的な流速分布を

瞬時に得ることは困難である。

そこで、本研究では高速炉内に多く存在する複雑形状流路内の熱流動現象の評価に必要な基盤技術構築を目標とし、濃度を調整した水溶液と構造物を構成する透明材料とを用いて画像計測手法を適用し、球を充填した複雑かつ狭い流路内における液体の流動と熱移動現象を実験的に解明する。具体的には、ガラス球を充填した充填層内部および周辺流路内の流れ場の特性を把握した。画像処理流速測定システムとしてレーザーライトシートと CCD カメラを用いて、流れに乗ったトレーサ粒子がごく短い間に移動する様子を捉え、流速分布を可視化計測する手法により流動場の特性を明らかにした。また、数値解析により実験では得ることが難しい、流れの 3 次元的な構造について調べた

最初に、充填層内部の流れを可視化するための計測手法を確立するために、屈折率整合の条件について調べた。次いで、得られた条件での速度場可視化計測の適用性を確認した。矩形流路のうち片側半分の領域に球充填層を設置した試験部に対して、本画像処理計測手法により球充填層内およびその外側の流路（以下では、健全流路という）内の速度場を測定した。得られた球充填層内外の流動の内部構造に関する結果を第 4 章に述べる。また、数値解析によって求められた流動場の結果について第 5 章に述べる。

第2章 実験手法の確立

2. 1 可視化計測のための屈折率整合

ガラス球で構成される球充填層内の流れ場を可視化して画像解析するにあたり、流体として水を用いた場合、ガラス球と水との屈折率が異なるため、可視化に必要なスリット光やガラス球の背面にあたる画像は屈折のため歪んでしまう。このような歪んだ画像では、粒子画像流速測定法 (PIV, Particle Image Velocimetry) 等の光学計測による画像解析が困難となる。そこで、ヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液を用いて流体側の屈折率をガラスの屈折率に一致させることにする^[4-6]。屈折率を一致させればガラス球は光学上、画像から消去することができガラス球を通して得られる画像は歪まず、画像解析によって流動場を明らかにすることができる。NaI 水溶液を用いると、飽和濃度付近で、比較的高い屈折率 ($n=1.496$) を達成できる特徴があり、屈折率整合の観点から、それ以下の屈折率を持つ材質の球を採用することになる。 $n=1.496$ 以下の材質としては、石英ガラス (1.458)、パイレックスガラス (1.474)、シリコンゴム (1.41) などがあるが、球形成形可能で、かつ透明で、比較的入手が容易なものとして、パイレックスガラスを用いることにした。

屈折率は入射光の波長によって変化するため、使用する光源に応じて必要とされる NaI 水溶液の濃度も変えなければならない。よって、本試験で使用する Nd - Yag レーザ (波長 $\lambda=532[\text{nm}]$ 、ビーム径 $d_0=2.5[\text{mm}]$) およびパイレックスガラス球 (粒子径 $20[\text{mm}]$ 、公差 $\pm 0.3[\text{mm}]$) に対する屈折率整合 (屈折率に合った NaI 水溶液の濃度) について調べた。ガラス球と屈折率が一致する溶液の濃度を求めるために行った屈折率適合実験から、濃度 $56.9[\text{wt}\%]$ の NaI 溶液 ($25[\text{C}]$) で一致することを確認した^[7]。図 1 は簡易ループに設置したテスト部内の球充填層 ($3 \times 3 \times 3$ 個を正方格子状に充填) の様子を撮影したものである。(a) は NaI 水溶液がない場合であり、(b) は濃度 $56.9[\text{wt}\%]$ の NaI 水溶液を流した場合である。(a) の場合ではガラス球の背後に書かれた直線は全く見えないが、(b) の場合では NaI 水溶液を流しているため直線ははっきりと識別でき、少し球の輪郭が見えてはいるがガラス球と周辺流体との屈折率が一致している様子が見て取れる。

画像解析 (PIV) により速度場を求めるには、流体中にトレーサ粒子を混入する必要がある。そこで、流れに対するトレーサ粒子の追従性を検討し、平均粒子径 $20[\mu\text{m}]$ 、比重 1.85 の真球状微粒子ポリマーをトレーサとして流体中に微量加えることにした。

2. 2 実験装置

2. 2. 1 実験装置の構造

本研究で用いた実験装置の概略を図 2-1 に示す。実験ループは、①ポンプ (マグネットポンプ: イワキポンプ MDF-L425CFVW-D)、②電磁流量計 (一体型: 横河電機(株)製 AE204SG)、③整流部、④入口ノズル、⑤試験体、⑥出口ノズル、⑦ダンプタンク、⑧ストレージタンク等から構成される。可視化実験を行うため、作動流体として NaI 水溶液を使用している。腐食防止の観点から、タンク類およびノズルはステンレス製であり、配管部は塩化ビニール製パイプ、ドレンラインはビニールパイプ、各バルブは大口徑 (1B 以上) のものは塩ビバルブ、小口径のものはステンレスバルブとした。

ポンプ①は NaI 水溶液の漏洩を防ぐため、軸受けを冷却するために冷却材を漏洩させる必要のないマグネットポンプを採用した。また、ポンプケーシング内は腐食防止のため

めライニング加工されているものを選択した。

流量計②には、NaI 水溶液による腐食を防ぐため、内部にメカニカル部がない電磁流量計を採用した。

整流部③は呼び径 150[mm] (内径 146[mm]) の塩ビパイプを利用して製作した。これにより、水平方向流れを垂直方向流れに変換し、かつ、テスト部入口において流速分布が修正されるように、2枚の多孔板が設置されている。多孔板は、旋回除去および速度成分修正に効果がある明石式多孔板 (JIS Z 8762-1995) と呼ばれるものを採用した。圧力損失は動圧の 1.7 倍である。また、整流部下部において水平配管からの流れを抑止し、効率よく垂直流れに変換するために水平流れに垂直にあて板を設置した。

試験部入口ノズル④により、整流部の呼び径 150[mm] (内径 146[mm]) の円形断面から、テスト部断面 (61[mm]×122[mm]) の矩形断面へ変換する。整流部で一様化された流速分布が、このノズルで乱されないように円形断面から矩形断面に徐々に変化する構造とし、変換後 120[mm] の矩形断面の助走区間を設けた。

試験部出口ノズル⑥は入口ノズルと異なり、入口および出口断面は矩形である。出口には呼び径 65[mm] のフランジにより塩ビ配管 (呼び径 65[mm]) と接続する。

ダンプタンク⑦およびストレージタンク⑧はステンレス製タンクであり、ストレージタンク⑧は幅 994[mm]、奥行き 664[mm]、高さ 244[mm] の内容量 161[L] である。このタンクは実験休止中に NaI 水溶液を保存しておくため、ドレンラインとの接続箇所に仕切バルブを設け、ループ側と切り離せる構造とした。尚、タンク上部には 4 系統のドレンラインを設け、そのうち 1 つをタンクのエア抜きとして利用する。側面にも 2 系統ドレンラインが設置されており、上部は整流タンクからのドレンライン、下部はダンプタンクへの汲み上げおよびストレージタンクからの液のドレンに利用する。

2. 2. 2 試験部

試験部 (図 2-1 中の⑤) の概略図を図 2-2 に示す。試験部は、可視化計測を行うため透明アクリル製で、幅 122[mm]、奥行き 61[mm]、高さ 2000[mm] の鉛直縦置き矩形流路 (内容量 15[L]) となっている。軸方向に 2[m] と長い場合 3 ブロックに分割され、各ブロックはフランジにて接続される。断面の位置合わせが容易となるようにフランジには位置合わせのためのピンを取り付けた。また、ガラス球を用いた球充填層 (試験部) は中央のブロックに設置し、流路断面の片側半分の領域を占める形状とした。また、試験体から容易に交換可能な構造とした。

2. 2. 3 球充填層

球充填層はガラス球を積み重ねて構成し、ガラス球の充填形態は正方格子状の場合とやや密に充填した体心立方状の場合の 2 通りとした (第 3.2 節参照)。この場合、空隙率 ε は 47.6[%] (粗充填) と 32[%] (密充填) である。球充填層内の流況を観測するため、球状粒子には透明なパイレックスガラス球を用いた。ガラス球には直径 20[mm] と 10[mm] のパイレックスガラス球を用い、球間をエポキシ系接着剤で結合したものをテスト部入口より 600[mm] の位置から上方に 900[mm] 位置までにステンレス製の針金 (ϕ 3[mm]) を用いて固定した。

第3章 実験方法

3.1 可視化方法

球充填層内の速度場を計測するために、作動流体として濃度 56.9[wt%]の NaI 溶液を用い、CCD ビデオカメラ（コダックメガプラス ES1.0）を用いて撮影を行った。カメラは撮影が容易になるようレーザを固定した 3 次元精密ステージと連動するアームに取り付けた。

球充填層の速度場を計測する際に最も重要なことは、NaI 水溶液の屈折率が変化しないようにその濃度を常に一定に保っておくことである。本研究では装置を動かし始めた直後に混入する気泡の除去と、水溶液温度を一定にすることを考慮して、数時間実験装置を動かした後、その温度での比重を測定し、所望する濃度となるように調整した。比重は電子比重計を用いることで小数点以下 4 桁まで測定が可能である。実際には、温度変化に対する 56.9[wt%]付近の NaI 水溶液の屈折率の変化は 5[°C]につき 0.001 ほどであるので、水溶液温度を 25~27[°C]の範囲で実験を行い、温度変化による屈折率の変化を抑えた。水溶液温度が安定したところでトレーサ粒子を混入し、計測領域にレーザを照射して撮影領域の大きさ、ビデオカメラのピント等の設定を行った。前述の通りカメラはレーザを固定した 3 次元精密ステージと連動するアームに取り付けてあるので、ステージを移動させてもレーザシートとビデオカメラの相対的な位置は変わらず、ピント等の設定をし直す必要はない。またそのことから、実験終了後にレーザシートと同位置に幅 2[mm]間隔の正方格子板を置き、それをビデオカメラで撮影した画像から画像座標と実座標との対応付けを行い較正した。また、レーザシートの幅は 1[mm]に設定した。PIV による速度測定解析には相互相関法を用いた^[8]。PIV 測定概念図を図 3-1 に示す。

3.2 実験条件

球充填層の実験パラメータとしてガラス球の直径と充填形態（密充填および粗充填）とした。ガラス球の直径を変化させることにより空隙の大きさ（流路面積）および球充填層内の流動抵抗が変化する。よって、同じ充填形態（粗充填）の場合に、ガラス球の直径が充填層内流れに及ぼす影響について調べた。また、充填層内では壁面近傍の空隙率が中心部に比べて大きくなることが知られており、壁面近傍では中心部よりも流体は流れ易くなると考えられる。球径を小さくすることにより、この壁面近傍の空隙は小さくなるため、この壁面近傍の流れの特性について調べた。

粗充填と密充填では、空隙によって形成される流路の形状が異なり、粗充填の場合は充填層内で下端から上端にかけて貫通した流路が形成される。一方、密充填の場合は壁面近傍を除き貫通した流路が形成されることはない。このため、充填形態を変化させることによる球充填層内流れの特性について調べた。

充填条件としてガラス球の直径とパイレックスガラス球の大きさと充填方法の違いにより次の 3 種類とした。

- ① 直径 20[mm]のガラス球 $3 \times 3 \times 15 = 135$ 個を正方格子状に粗充填（図 3-2 参照）
- ② 直径 20[mm]のガラス球 3×3 を 10 組と 2×2 を 9 組の計 126 個を体心立方格子（千鳥型）状に密充填（図 3-3 参照）
- ③ 直径 10[mm]のガラス球 $6 \times 6 \times 29 = 1044$ 個を正方格子状に粗充填（図 3-4 参照）

表 1 に実験条件と撮影条件について示す。撮影領域、撮影断面についてはそれぞれの充填形態について図 3-2 から図 3-4 に示す。各充填形態とも、充填層の全領域 A1~P3 (20[mm]密充填、10[mm]粗充填は A1~J3) と充填層側の上流、下流および健全流路側の領域①~⑨について撮影した。なお、レイノルズ数の代表長さは充填層前面での試験部断面の水力等価直径である。

充填層の上・下流部および充填層と障害物がない流路 (健全流路) との境界では、球充填層を支えている籠 (針金) が写っている。この針金の部分では、画像解析をすることはできないためにこの部分の流速ベクトルは排除した。

第4章 実験結果と考察

球充填層が設置されている充填層全体にわたって測定した $Re=8700$ の場合の結果について述べる。他の Re 数の場合の結果も基本的特性は同じである。充填形態として、20[mm]球の正方格子状粗充填、体心立方格子状（千鳥型）密充填、10[mm]球の正方格子状粗充填の3種類の充填形態について測定した。実験では、球充填層と隣接する健全流路が一つの画面上に写り込むように、 y 方向（流路断面短辺方向）の位置での鉛直方向断面（ $x-z$ 面）の流動場が得られている。 y 方向はカメラ（撮影画像上）からみた奥行き方向である（図3-2参照）。

流速は、流量を流路全面の断面積で除した断面平均流速 W_0 で無次元化している。測定位置を分かりやすくするため、 x 方向は流路断面の短辺長さ（61[mm]）で無次元化し、 y 方向は充填層に接する側の壁面を基点としてガラス球の直径で無次元化し、 z 方向は充填層下端を基点としてガラス球の直径で無次元化して表示している。

4.1 20mm 球粗充填

4.1.1 時間平均速度

A. 充填層内流れ

$Re=8700$ の流量条件の場合の $y^*=0.85$ （カメラ側の壁面から $y=17$ [mm]）、 $y^*=1.0$ （カメラ側の壁面から $y=20$ [mm]）、 $y^*=1.15$ （カメラ側の壁面から $y=23$ [mm]）における（ $x-z$ ）面の流動場を示す。

図4-1.1から図4-1.4に、撮影画像と平行なカメラ側の手前の壁面から1層目と2層目のガラス球の接点（ $y^*=1$ ）における（ $x-z$ ）面（ガラス球の接点面）における無次元化された時間平均速度場を示す（撮影位置については、図3-2参照）。充填層入口部は $z^*=0$ で充填層出口は $z^*=15$ である。図中の矢印は速度ベクトルを示し、各図の枠外に断面平均流速の大きさ（ $W_0=10.6$ [cm/s]）を示す。色は流路全面の断面積で除した断面平均流速 W_0 で規格化した流速の大きさを表わす。ガラス球の配置が分かるように輪郭が参考のために書きこまれている。ただし、各図は部分的にオーバーラップしている。白色の部分はガラス球を保持している針金の籠がある部分で、画像解析結果から排除（消去）されている。

図4-2は、 $y^*=1.0$ における鉛直方向断面の球充填層入口部（ $z^*=2.0$ 、2層目と3層目との間）、中心部（ $z^*=8$ 、8層目と9層目との間）、出口部（ $z^*=14$ 、14層目と15層目との間）における時間平均流速の水平方向成分（ U ）と鉛直方向成分（ W ）の分布を示す。横軸は、流路断面の短辺長さ（61[mm]）で規格化した球充填層側の壁からの無次元距離である。 $x=0$ は充填層に接する壁面を示し、 $x=1$ は充填層と健全流路との境界、 $x=2$ は健全流路に接する壁面を示している。

縦軸は充填層上流側の断面平均流速 W_0 で無次元化された流速である。水平方向流速（ x 方向）は健全流路側に向かう場合が正、充填層に向かう場合が負である。

これらの実験結果は、局所的に充填層が存在する流路内の流れの特有な構造を詳細に示している。図4-1.1に示すように入口部では、水平方向に並んだガラス球間の空隙部では断面平均流速よりも速い噴流を形成し、最大速度は平均流速の約2倍である。噴流は、ガラス球の表面に沿って球の接触点で狭まり、それ以外の領域で広がり、球間の空隙域

では収束 - 拡散流れが生じている。しかし、充填層は壁面（図左側）と健全流路とに接しており図の左右で非対称な境界であるため単純な一次元流路となっていない。このため、充填層内の流れは健全流路側の空隙部と壁面側の空隙部では流れの様子が異なっていることが分かる。

図 4-1.1 から図 4-1.2 に示すように充填層入口部から中央部にかけて球充填層内に流入した鉛直方向流れは、健全流路側の空隙部では水平方向流れとなり健全流路へ向かう流れとなっている。しかし、充填層入口部では壁に接する球の周りで、一部の流体が健全流路とは反対の壁側の空隙部へ流れている。それ故に、この壁面に接する 1 番目の空隙部での流速は、壁近くに障害物のない通常の流れとは異なり境界層が薄くなり空隙中心部で断面平均速度より大きくなることが分かる。壁に接しているガラス球とその横のガラス球との間（2 番目）の空隙では、健全流路への流れも存在するが、壁側の空隙からの流入もあり、充填層内の空隙のうち最大流速を示した。下流に行くに従い、流速は減少するが、2 番目の空隙域内の流速は、充填層内の同一断面で最も大きい。壁面（図左側）から 1 番目と 2 番目の空隙では主流方向流れが支配的であり、充填層を構成する球の抵抗（圧力損失）と充填層内部を通過する流量の減少に応じて主流方向流れは減少する。壁から 2 番目のガラス球とその隣の 3 番目のガラス球との間の空隙域では、絶対速度は 2 番目の空隙域と同程度の大きさを示すが、健全流路への傾斜流が大きいため主流方向の流速は減少している。健全流路との境界における流れは、健全流路への流入により、大きな横方向成分から垂直成分の増加となる。この横流れは球充填層入口から球充填層中央にかけて顕著である。

図 4-1.3 から図 4-1.4 に示すように充填層中央部から出口部にかけて、下流に行くに従い健全流路への流出により充填層内部の流速は減少し、空隙部のコア領域の流速は流路全面の断面平均速度より低く、ほとんど鉛直方向に直進する流れとなっている。

図 4-3 および図 4-4 に、撮影画像と平行なカメラ側の壁面から 1 層目と 2 層目のガラス球の接点からカメラ寄り 3[mm]の断面 $y^*=0.85$ 、カメラと反対側へ奥寄り 3[mm]の断面 $y^*=1.15$ の位置における無次元化された時間平均速度ベクトルを示す（撮影位置については、図 3-2 参照）。ただし、中央部から出口部にかけては、流速が小さく断面ごとの流速分布の違いは小さいため充填層全領域ではなく、入口部のみについて示す。色は無次元化された流速の大きさを表わす。ガラス球の配置が分かるように輪郭が参考のために書きこまれており、白色の部分はガラス球を保持している針金の部分で、画像解析結果から排除（消去）されている。

図 4-5 および図 4-6 は、それぞれ $y^*=0.85$ および $y^*=1.15$ での球充填層の入口部 ($z^*=2.0$ 、1 層目と 2 層目との間)、中心部 ($z^*=8$ 、8 層目と 9 層目との間)、出口部 ($z^*=14$ 、14 層目と 15 層目との間)における時間平均流速の水平方向成分 (U) と鉛直方向成分 (W) の水平方向分布を示す。横軸は球充填側の壁からの無次元距離である。縦軸は充填層上流側の断面平均流速 W_0 で無次元化された流速である。水平方向流速 (x 方向) は健全流路側に向かう場合が正、充填層に向かう場合が負である。

ガラス球の接点を通る断面からはずれた断面では、主流速はやや低い傾向にあり、流体は球の表面に沿って健全流路側に流出する傾向が見られる。カメラ側の側壁に近い $y^*=0.85$ の面では、流速は入口部の 1 層目の空隙域でかなり低いが、壁の影響で増減しながら下流へと流れ、出口では減少すると見られる。球表面に沿う分岐流が測定面の鉛直方向 (z 方向) にも存在すると考えられ、特に、 $z^*=2$ の下から 2 層目の空隙域の壁寄りにおいて、 $y^*=0.85$ での充填層内の流れは下向きかつ壁の方向を向いているが、 $y^*=1.15$

における流れは下向きかつ健全流路の方向を向いていることは特徴的である。

これらの結果から、流れは 3 次元적であり、壁境界と健全流路との境界による非対称性の効果が大きく表れていることが分かる。

B. 健全流路内流れ

健全流路内の $y^*=1$ 断面における時間平均速度ベクトルを図 4-7 に示す。図中の色は流速の大きさを表している。実験ではレーザー光をシート状に広げたものを撮影時の光源として使用しており、このレーザー光を充填層側の壁面から入射させている。また、充填層は直径 3mm のステンレス棒で製作した籠状の枠で支えられている。この枠により、レーザー光が所々遮られてしまい、PIV 解析では流速を求めることが出来なかったために、図中では青色（流速が遅い）の横縞となっている。

図 4-8 に球充填層入口部（充填層下端 $z^*=0$ 、1 層目と 2 層目の間の $z^*=1$ 、2 層目と 3 層目の間の $z^*=2$ ）および出口部（8 層目と 9 層目の間の $z^*=8$ 、14 層目と 15 層目の間の $z^*=15$ ）について健全流路内の流速分布を充填層上流側の断面平均流速 W_0 で無次元化して示す。図 4-9 には、充填層下端から 30mm 上流側（ $z^*=-1.5$ ）および球充填層上端から 30mm 下流側（ $y^*=16.5$ ）における鉛直方向および水平方向速度分布を充填層上流側の断面平均流速 W_0 で無次元化して示す。図 4-8 および図 4-9 の横軸で無次元位置 0 は球充填層側の壁、1 は球充填層と健全流路との境界、2 は健全流路側の壁の位置を示す。これらの結果は健全流路における流れの遷移の特徴を示している。

球充填層の上流では障害物を避けて健全流路へ流れるため、健全流路内では平均速度より大きな垂直方向流速成分が観測された。健全流路内においては、垂直成分の速度分布はほとんど平坦である。下流に行くにつれて、健全流路への流入が増加して垂直成分の速度は増加したが、充填層が存在する領域の中心から下流では、流入による速度増加はほとんど見られない。主流方向の流速は無次元位置 1.7 で最大を示し、平均速度の約 2.6 倍であった。球充填層側の境界近傍の速度勾配は壁近傍の速度勾配よりなだらかになる。球充填層の下流では、健全流路側の流速は大きい、球充填層側の流速は極端に低い。充填層からの流れも健全流路側の流れも直進で上向きであり、球充填層の下流の直下における流体の混合は観測されない。

C. 全体の流動場

球充填層内の下端部では流路形状が急激に変化することから、その球が存在することによる断面積変化を考慮した球充填内部での無次元断面平均流速を見積もると 1.59 を得る。この値は図 4-2 の球充填層入口 ($z^*=1$) での流速とほぼ同じになっていることが分かる。

球充填層に注目すると、入口部においては図左側の壁から 2 番目と 3 番目の空隙での流速はほぼ等しいが、下流に行くほどその分布に違いが出ていることが分かる。2 番目の空隙での出口部では、無次元流速が断面平均流速の 0.8 倍程度であるのに対し、3 番目の空隙域では 0.5 倍程度にまで遅くなっている。これは図 4-2 からわかるように、3 番目の空隙域では健全流路に多く流出しているためである。このように、球充填層内部での大きな特徴として、球充填層中央部では入口に比べて全体的に流速が減少している。これは、球充填層を構成する球による抵抗に加えて、充填層内の流れが健全流路へ次第に流出しているために通過流量が減少したことによるものと考えられる。その結果、下流側の球充

充填層出口の流速は球充填層中央に比べさらに遅くなっている様子がわかる。また、球充填層空隙域からの下流への流出はジェット状となっている。

図 4-8 に示す健全流路では $z^*=8$ と $z^*=14$ でその分布形状にほとんど変化のないことから、球充填層中央付近と出口付近では、球充填層から健全流路への流出による影響は小さいことが分かる。図 4-9 で示したように充填層入口の健全流路側では、流路形状の急激な変化のために充填層をまわりこむ流れが生じている。充填層側から健全流路側へ横向きに流れ込むため水平方向流速がある。

4. 1. 2 時間平均渦度

図 4-10 に時間平均速度場から得られた時間平均の渦度を示す。それぞれの渦度は各条件の絶対値の最大で除したものを示している。渦度 ω は (2-3) 式から求めることができる。微分の項はラグランジュの 5 点補間公式 (2-4)、(2-5) 式を用いている。実際の速度算出位置は格子状であるため、着目点における渦度はその隣接点の速度を $u_{i,j}$, $w_{i,j}$ 格子点距離を Δx , Δz とした。

$$\omega = \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2-3)$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_{i,j} = \frac{1}{12 \cdot \Delta x} (w_{i-2} - 8w_{i-1} + 8w_{i+1} - w_{i+2}) \quad (2-4)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{i,j} = \frac{1}{12 \cdot \Delta z} (u_{j-2} - 8u_{j-1} + 8u_{j+1} - u_{j+2}) \quad (2-5)$$

なお、平均渦度を示した図の下部に、渦度の強さの尺度を示している。渦度の強さは色で表され、右回りが強いほど赤色で、左回りが強いほど青色で表わされている。いずれの図においても軸方向の流れ成分が大きい位置、つまり球充填層入口での軸方向成分の両側に強い渦度が生じている。これらの渦の原因は軸方向の速い流れの成分と、その両側の遅い成分が存在していることによる。またこの遅い成分は、ガラス球の接点の下流側に存在する後流の影響と考えられる。流れのはがれ点は球の中心より上流側で観測され、後流はオープンで下流でも閉じない。むしろ後続の球により後流は多重構造になっていると見られる。また、渦度は流速の速い方向に引きずられ、壁近傍では上方に、充填層と健全流路との境界近傍では健全流路側へ斜めに引きずられる傾向を示す。球充填層出口では、入口部ほどの明確な渦度分布は表れていない。

以上の結果をまとめると、上流側から流れてくる作動流体（冷却材）は球充填層下端で、球充填層流路と健全流路に配分される。充填層による抵抗（圧力損失）のため球充填層流路と健全流路では断面内で不均一な圧力分布となる。これを解消するために、球充填層側から健全流路側への流量再配分が起こり、球充填層から健全流路への流出がある。このため、球充填層入口では軸方向および横方向に速度変化が生じ明確な渦度分布がつく。球充填層中央から出口では、球充填内部および健全流路ともに通過流量と圧力損失に応じた流速をもつ主流方向流れが支配的となり明確な渦度分布が生じないと考えられる。

4. 2 20mm 球密充填

図 4-11.1 から図 4-11.4 に、直径 20[mm] のガラス球を体心立方格子（千鳥型）状に積み上げ密充填した場合について、撮影画像と平行なカメラ側の壁面から 1 層目と 2 層目のガラス球の接点 ($y^*=1$) における断面内の無次元化された時間平均速度場を示す（撮影位置については、図 3-3 参照）。図中に示されたアルファベットで撮影領域を示す。A は入口 ($z^*=0$) で P は出口 ($z^*=15$) である。図中の矢印は速度ベクトルを示し、各図の枠外に断面平均流速の大きさ ($W_0=10.6[\text{cm/s}]$) を示す。色は無次元化された流速の大きさを表わす。ガラス球の配置が分かるように輪郭が参考のために書きこまれている。ただし、各図は部分的にオーバーラップしている。白色の部分はガラス球を保持している針金の籠がある部分で、画像解析結果から排除（消去）されている。

図 4-12 は、 $y^*=1.0$ における断面の球充填層の入口部 ($z^*=2.0$ 、2 層目と 3 層目との間)、中心部 ($z^*=8$ 、8 層目と 9 層目との間)、出口部 ($z^*=14$ 、14 層目と 15 層目との間) における時間平均流速の水平方向成分 (U) と鉛直方向成分 (W) の分布を示す。横軸は球充填側の壁からの無次元距離である。縦軸は充填層上流側の断面平均流速 (W_0) で無次元化された流速である。水平方向流速 (x 方向) は健全流路側に向かう場合が正、充填層側に向かう場合が負である。

図 4-13 に撮影画像と平行なカメラ側の壁面から 1 層目のガラス球の中心を通る断面 ($y^*=0.5$)、図 4-14 に 1 層目のガラス球の中心から 5[mm] 内側（壁面から 15[mm] 内側）の断面 ($y^*=0.75$)、図 4-15 に 1 層目と 2 層目のガラス球の接点から 5[mm] 内側（壁面から 25[mm] 内側）の断面 ($y^*=1.25$)、図 4-16 に 2 層目のガラス球の中心（壁面から 30[mm] 内側）の断面 ($y^*=1.5$) における断面内の無次元化された時間平均速度場を示す。ただし、中央部から出口部にかけては、流速が小さく断面ごとの流速分布の違いは小さいため充填層全領域ではなく、入口部のみについて示す。

ガラス球を体心立方格子（千鳥型）状に積み上げ密充填したことにより、粗充填の場合に比べてガラス球の抵抗効果が顕著に現れている。粗充填の場合にはガラス球間の空隙で、強い鉛直方向の流れが生じていたが、密充填ではガラス球が千鳥状に交互に重なり合っているためにガラス球の下面に衝突して、斜め上の横方向流れとなって下流側の空隙に流れ込んでいる。鉛直方向流れが存在するのは、球充填層と壁との間の空隙部（ガラス球の半径程度）に限られる。壁近傍の鉛直方向流れでは、充填層内の空隙から流れ込む流れと、充填層内部へ向かう流れが存在している。これは入口部で顕著に現れている。出口部では主流速度は減少し、空隙間を移動する横方向流れも減少する。充填層入口部（ガラス球の 1 層目と 2 層目付近）では充填層内部から健全流路への横方向流れが、粗充填の場合より強く、球充填層の一層目からの流出は顕著である。

図 4-17 に撮影画像と平行なカメラ側の壁面から 1 層目と 2 層目のガラス球の接点 ($y^*=1$) における断面内の時間平均のベクトルから得られた時間平均渦度を示す。また、それぞれの渦度は各条件の絶対値の最大で除したものを示している。渦度の算出方法および図中の色づけ等は 20[mm] 球を正方格子状に粗充填した場合と同様である。

20[mm] 球を正方格子状に粗充填した場合と同様に、流速の大きい閉塞部入口で強い渦度が見られる。しかし閉塞形態が異なるために、粗充填の場合のような下流の渦度と連続するような分布は見られない。また、球に沿って渦が閉じる傾向が見られる。

また、ガラス球の接点や流路を閉塞しているガラス球に沿って渦度が出ていることから、

その部分で剪断力が大きくなっていることがわかる。乱れは入口部と壁付近、充填層と健全流路との境界付近で強い傾向があり、粗充填の場合より弱い。球充填層入口で強い渦度が見られるが、充填形態の異なる粗充填の場合のような下流の渦との多重構造は見られない。

4. 3 10mm 球粗充填の場合

図 4-18.1 から図 4-18.4 に、直径 10[mm] のガラス球を正方向格子状に粗充填した場合について、撮影画像と平行なカメラ側の壁面から 1 層目と 2 層目のガラス球の接点 ($y^*=1$) における断面内の無次元化された時間平均速度場を示す (撮影位置については、図 3-2 参照)。図中に示されたアルファベットで撮影領域を示す。A は入口 ($z^*=0$) で P は出口 ($z^*=15$) である。図中の矢印は速度ベクトルを示し、各図の枠外に断面平均流速の大きさ ($W_0=10.6[\text{cm/s}]$) を示す。色は無次元化された流速の大きさを表わす。ガラス球の配置が分かるように輪郭が参考のために書きこまれている。ただし、各図は部分的にオーバーラップしている。白色の部分はガラス球を保持している針金の籠がある部分で、画像解析結果から排除 (消去) されている。

図 4-19 は、 $y^*=1$ における断面の球充填層の入口部 ($z^*=2.0$ 、2 層目と 3 層目との間)、中心部 ($z^*=8$ 、8 層目と 9 層目との間)、出口部 ($z^*=14$ 、14 層目と 15 層目との間) における時間平均流速の水平方向成分 (U) と鉛直方向成分 (W) の分布を示す。横軸は球充填側の壁からの無次元距離である。縦軸は充填層上流側の断面平均流速 (W_0) で無次元化された流速である。水平方向流速 (x 方向) は健全流路側に向かう場合が正、充填層に向かう場合が負である。また、図 4-20 には、 $y^*=1$ における断面の球充填層の入口部 ($z^*=2.0$)、中心部 ($z^*=8$)、出口部 ($z^*=14$) における時間平均流速の水平方向成分 (U) と鉛直方向成分 (W) の分布を示す。

図 4-21 に断面内の時間平均のベクトルから得られた時間平均渦度を示す。また、それぞれの渦度は各条件の絶対値の最大で除したものを示している。渦度の算出方法および図中の色づけ等は 20[mm] 球を正方格子状に粗充填した場合と同様である。

直径 20[mm] 球粗充填の場合と比べて基本的な傾向は類似しているがガラス球に囲まれる空隙域が狭くなっており、充填層内の主流速度は入口部で直径 20[mm] の場合と同程度であるが、下流部では遅くなっている。図 4-2 に示した 20[mm] 球の場合と図 4-19 に示した 10[mm] 球の場合とを比較すると、流速の絶対値は充填層内の空隙部で全体に低下している。球径が小さく空隙部の流路が狭くなったことにより流動抵抗が増加し、充填層入口部では最大流速が 20[mm] 球の場合の約 50[%]、中央部では 50[%]、出口部では 10~20[%] 程度に低下した。また、充填層内の流れは、充填層 6 層のうち 3 層ずつ流れの様子が異なっている。すなわち、壁側から 3 層では鉛直方向流れが支配的であり、健全流路側の 3 層では 20[mm] 球の場合と同様に傾斜流で健全流路方向への流れとなっている。

渦度分布は、流速の大きい閉塞部入口では渦度が強く、下流にいくにしたがって弱くなっている。また、速度分布でも示したように、壁に近い領域では主流方向、健全流路に近い領域では健全流路への方向というように渦度も分離して存在している。また壁に近い領域では、20[mm] 球を正方格子状に粗充填した場合と同様に、渦度はガラス球の接点またはガラス球面付近から下流に連続して放出されている。乱れの傾向も類似であるがその強度は弱い。

第5章 数値シミュレーション

5.1 概要

球充填層を有する流路内の流動特性を調べるため、熱流体解析ソフト”STAR-CD”により数値シミュレーションを行った。STAR-CDは解析対象物の境界に沿ったメッシュを作成することが可能である。また、解析結果の速度ベクトル、各種コンター表示、数値データの表示などの処理も容易に行うことが出来る。STAR-CDを使用することで、様々な物理モデルを用いた数値シミュレーションを行うことが出来る。

5.2 解析条件

数値シミュレーションでは、球の直径、流路寸法、境界条件、作動流体の物性値（濃度56.9[wt%]のNaI水溶液）について実験と同条件で計算を行った。解析条件は、表1に示す直径20[mm]および10[mm]のガラス球を粗充填した場合である。10[mm]のガラス球を粗充填した場合は、鉛直方向には実験よりも少ない10層として解析を行い、球充填層入口付近の結果を示す。

5.3 シミュレーション結果

図5-1から図5-3に20[mm]ガラス球を粗充填した場合の撮影方向手前から1層目と2層目の球間の鉛直方向断面におけるの流速ベクトル分布を示す。図5-4には10[mm]ガラス球を粗充填した場合の撮影方向手前から2層目と3層目の球間の鉛直方向断面におけるの流速ベクトル分布を示す。また、図5-5には20[mm]ガラス球を正方格子状に粗充填した場合の充填層入口部 ($z^*=2$)、充填層中央部 ($z^*=8$)、充填層出口部 ($z^*=14$) における鉛直方向流速および水平方向流速の充填層側の壁面 (0.0) から健全流路側の壁面 (1.0) までの水平方向分布を示す。

図5-1に示す充填層入口部では、充填層下端から流入した流体がガラス球の接点で、斜め上方の空隙部に分離されて流れている。充填層内の健全流路側では、健全流路側への横方向流れが生じている。ガラス球の接点の背後では流れがよどんでおり、空隙部の強い鉛直方向流れとの境界で大きな速度勾配が生じている。図5-2に示す中央部では入口部に比べて健全流路への横方向流れは弱く、下流方向に向けて流れは徐々に弱くなっていく。図5-3に示す出口部では鉛直方向流れが支配的であり、全体的に流れは遅くなっている。

図5-4に示す10[mm]ガラス球を充填した場合、充填層の上流での球充填層を避ける健全流路側への流れ込みは20[mm]ガラス球の場合よりも強い。実験で得られた速度ベクトル分布と同様に、球充填層内の健全流路に近い領域では健全流路への横方向流れが生じており空隙部での鉛直方向流れは比較的弱い、一方、充填層側の壁近傍では横方向流れが弱く鉛直方向流れが支配的となっており、実験結果を再現している。また、健全流路内では、下流に行くにつれて流れは徐々に発達し、充填層との境界付近で流速が遅く壁面近傍で流速が大きくなっている。

図5-6に20[mm]ガラス球を正方格子状に粗充填した場合の充填層入口部 ($z^*=2$)、充

充填層中央部 ($z^*=8$)、充填層出口部 ($z^*=14$) における鉛直方向流速および水平方向流速の水平方向分布について、実験結果と解析結果を比較して示す。解析結果では、ガラス球間の空隙部 (横軸: $x^*=0.33, 0.67$) では鉛直方向流速が大きく、ガラス球の背後になる箇所 (横軸: $x^*=0.167, 0.5, 0.833$) では流速が小さく流れがよどんでいる様子が再現されており実験結果と定性的に一致している。充填層内の最大鉛直方向流速 (横軸: $x^*=0.7$) について流速の絶対値を比較すると、計算結果は実験結果の約 70%になっている。壁面 ($x^*=0$) に近い空隙部での流速は、計算結果と実験結果とで比較的良好に合っている。また、水平方向流速については、計算結果の方が最大流速を若干小さく評価しているが、実験結果をほぼ再現できていると言える。この最大流速が一致しない原因については明らかではないが、実験結果 (実現現象) の方が解析結果よりも流速分布が急峻であり、計算では空間を有限の長さのメッシュで分割しているために、この急峻な分布を正確に再現出来なかったことが予想される。また、実験結果についても、PIV 解析による流速値の不確かさについて考慮しなければならない。健全流路内の鉛直方向および水平方向流速に関しては、充填層入口部を除いて実験結果とほぼ一致している。

図 5-7 に充填層上流側と下流側での鉛直方向流速の水平方向分布を示す。解析結果と実験結果はほぼ一致しているといえる。ただし、実験結果の方が、充填層が存在することによる流れ場への影響 ($0.0\sim 0.5$ の範囲) が強く現れている。

第6章 まとめ

NaI 水溶液を作動流体として、球形ガラス粒子を用いて構成した球充填層内の複雑かつ狭い流路および周辺流路における流れ場を屈折率調整と PIV 可視化—画像処理の方法により明らかにし、次の知見を得た。

球充填層内の流動場の可視化計測手法を確立した。ヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液とパイレックスガラス球を用い、Nd-YAG レーザを光源とし、NaI 水溶液を調整し、濃度 56.9[wt%] (25°C) とすれば、パイレックスガラス球の屈折率と一致することを確認した。この体系に PIV 解析を適用することにより、構造物の背後の流れや曲面により構成されている複雑形状流路内流れについて定量的に速度場を計測出来ることを明らかにした。

鉛直矩形流路 (61[mm]×122[mm]) の片側半分には長さ 300[mm]にわたって、直径 20[mm]のガラス球および直径 10[mm]のガラス球をそれぞれ正方格子状に粗充填した場合と、直径 20[mm]のガラス球を千鳥格子状に密充填した場合の 3 種類の充填条件における充填層内および充填層周辺の流動構造について明らかにした。

(1) 20mm 球粗充填

上流側から流れてくる流体は充填層下端で球充填層流路と健全流路に配分され、球充填層の上流では充填層 (障害物) を避けて健全流路へ流れるため、健全流路内では充填層上流の断面平均速度より大きな鉛直方向流速成分が生じる。充填層による抵抗 (圧力損失) のため球充填層流路と健全流路では断面内で不均一な圧力分布となる。これを解消するために球充填層から健全流路への流量再配分が起こり、球充填層下端から流入した流体が球充填層から健全流路へ流出する。

充填層入口部では、水平方向に並んだガラス球間の空隙部において充填層上流の断面平均流速よりも速い噴流を形成する。壁面に接する空隙部での流速は、壁近くに障害物のない通常の流れとは異なり壁の影響が小さく、空隙中心部で断面平均速度より大きくなる。壁から 2 番目の空隙部 (充填層内部) では空隙内の流速のうち最大流速を示し、その値は断面平均流速の約 2 倍になる。また、健全流路側の空隙部では、充填層入口部から中央部にかけて球充填層内に流入した鉛直方向流れが、健全流路へ向かう水平方向流れとなる。

充填層中央部から出口部にかけて、下流に行くに従い充填層内部の流速は減少し、空隙部のコア領域の流速は流路全面の断面平均速度より小さく、鉛直方向流れとなっている。これは、球充填層を構成する球の流動抵抗により、充填層内の流れが健全流路へ次第に流出しているために通過流量が減少したことによるものと考えられる。

充填層は壁面と健全流路とに接し、非対称境界となっている。この非対称性のため充填層内の流れは一様ではなく 3 次元적であり、健全流路側の空隙部と壁面側の空隙部で流れの様子が異なる。さらに、空隙部では流速が速く、ガラス球の背後では流速が小さくよどんだ状態にある。よって、空隙部内の速い鉛直方向流れの両側では流れの遅い領域が存在し大きな速度勾配が生じている。

球充填層の下流では、充填層からの流れも健全流路の流れも鉛直方向に直進し、球充填層の下流における渦の形成などによる流体の混合は観測されない。

(2) 10mm 球粗充填の場合

ガラス球径を小さくした場合でも充填層内外での流れ場に関する傾向は、大きな球

(20[mm])の場合と大きな差異はない。球径が小さく空隙部の流路が狭くなったことにより流動抵抗が増加するため充填層内で流速の絶対値は低下し、充填層入口部では最大流速が20[mm]球の場合の約50[%]、中央部では50[%]、出口部では10~20[%]程度になった。また、壁側の空隙部では鉛直方向流れが支配的であり、健全流路側の空隙部では20[mm]球の場合と同様に傾斜流で健全流路方向への流れが生じた。このように、球径を小さくすることにより、充填層内の流れ場が壁面境界側と健全流路側で2分されることが分かった。

(3) 20mm 球密充填

粗充填の場合にはガラス球間の空隙で、強い鉛直方向の流れが生じていたが、密充填ではガラス球が千鳥状に交互に重なり合っているために、流れがガラス球の下面に衝突して斜め上向きの横方向流れとなって下流側の空隙に流れ込むことが分かった。充填層入口部ではこのガラス球への衝突による横方向流れが強く、充填層内部から健全流路への横方向流れが粗充填の場合より強くなることが分かった。この横方向流れは球充填層の一層目において顕著であることが分かった。鉛直方向流れが存在するのは、球充填層と壁との間の空隙部(ガラス球の半径程度)に限られることが分かった。本試験のように規則的な球の配置ではなく、ランダムに球を配置した場合はこの密充填に近い流れ場が形成され、壁面に沿った狭い領域を流れるものと考えられる。

20[mm]球を粗充填した体系を対象に、STAR-CD コードを用いた数値シミュレーションを実施した。

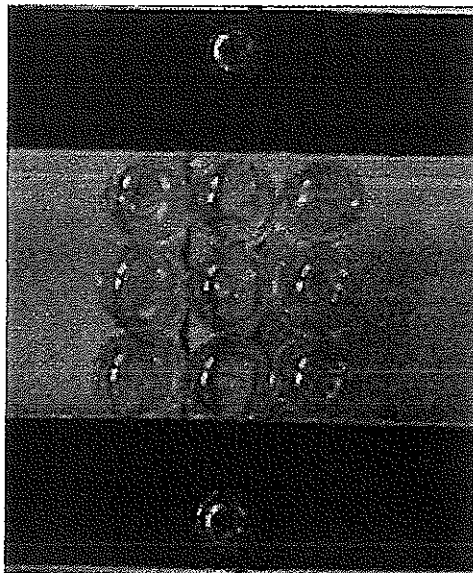
解析結果から得られた充填層内の流れ場は、実験結果から類推される流れ場と定性的に一致し、壁面に近い空隙部での流速は、計算結果と実験結果とで一致している。ただし、充填層内の最大鉛直方向流速について流速の絶対値を実験結果と解析結果とを比較すると、計算結果は実験結果の約70%になっている。また、水平方向流速については、計算結果の方が最大流速を若干小さく評価しているが、実験結果をほぼ再現できている。空隙部内の最大流速が一致しない原因は、実験結果の方が解析結果よりも流速分布が急峻であることが考えられる。健全流路内の鉛直方向および水平方向流速に関しては、充填層入口部を除いて実験結果とほぼ一致している。STAR-CD を用いた詳細解析により、球充填層内の流れ場が定性的に再現できることが分かった。

参考文献

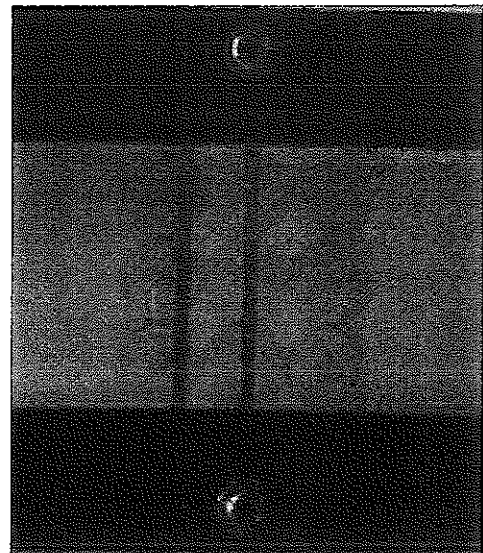
- [1] 坂東文夫他, 日本原子力学会予稿集, F45 (1990)
- [2] K.Koyama, et al, Proc. of Int. Conf. on Fast Reactor and Related Fuel Cycles, Vol. III, P3.5-1~3.5-10, (1991)
- [3] K.Haga, K.Yamaguchi, F.Namekawa, Proc. of Int. Conf. on Science and Technology of FBR Safety, Guernsey, No.90, Vol.1, pp513-518,(1986)
- [4] T.Etoh,K.Takehara,Y.Yokoyama,Y.Ida, J.JSCE.533, II-34, 126-145, (1996)
- [5] K.Hijikata,Y.Mori,H.Ishiguro, Trans. JSME.50, B-458, 2555-2563, (1984)
- [6] T.Yamane, H.Clarke, B.Asztalos, M.Nishida, T.Kabayashi, Proc. Int. Conf. Optical Technology and Image Processing in Fluid, Thermal and combustion Flow, Yokohama, AB064, (1998)
- [7] M.Tanaka, J.Kobayashi H.Kamide, K.Saito, H.Monji, J.Sakakibara, G.Matsui, Proc. NURETH-9, (1999)
- [8] 榊原、画像計測による衝突噴流の渦構造と熱輸送機構の解明、慶応義塾大学理工学部機械工学科博士論文、(1996).
- [9] 中島 ほか、LDV-蛍光法を用いた水の速度と温度の同時測定、日本機械学会論文集 B編、58巻546号、(1992).
- [10] M.Tanaka, et. al., "An Experimental Investigation on Heat Transfer in a Subchannel with a Porous Blockage", Proc. of 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference, San Diego, California, AJTE99-6434, (1999)
- [11] 田中正暁 他、高速炉燃料集合体ポーラス状局所閉塞事象の研究、日本原子力学会予稿集、H46 (1998)
- [12] 小林順 他、燃料集合体ポーラス状周辺閉塞ナトリウム試験、日本原子力学会予稿集、F12 (1998)

表 1 実験条件および撮影条件

	ガラス球直径・充填方法		
	20mm・粗充填	20mm・密充填	10mm・粗充填
流量	2.83 [m ³ /h]		
レイノルズ数	8700		
撮影領域	図 3-2 参照	図 3-3 参照	図 3-4 参照
撮影断面	3 断面	5 断面	4 断面
画像サイズ	1008 [pixels] × 1018 [pixels]		
撮影枚数	各領域 200 枚 (100 組)		
画像間隔	70 [ms]		



(a) NaI 水溶液なし



(b) NaI 水溶液あり

図 1: 試験流路内の様子

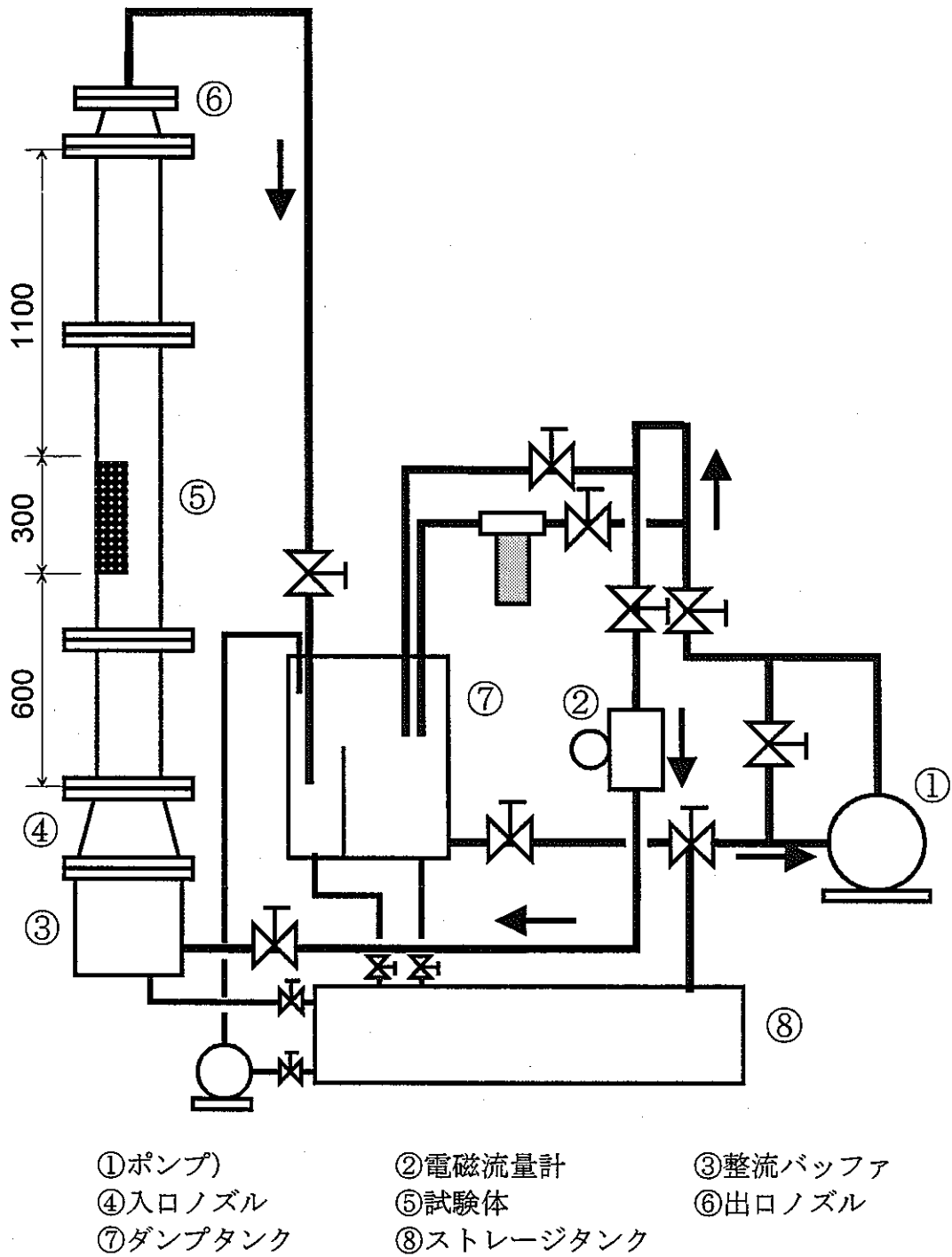


図 2-1 実験装置概略図

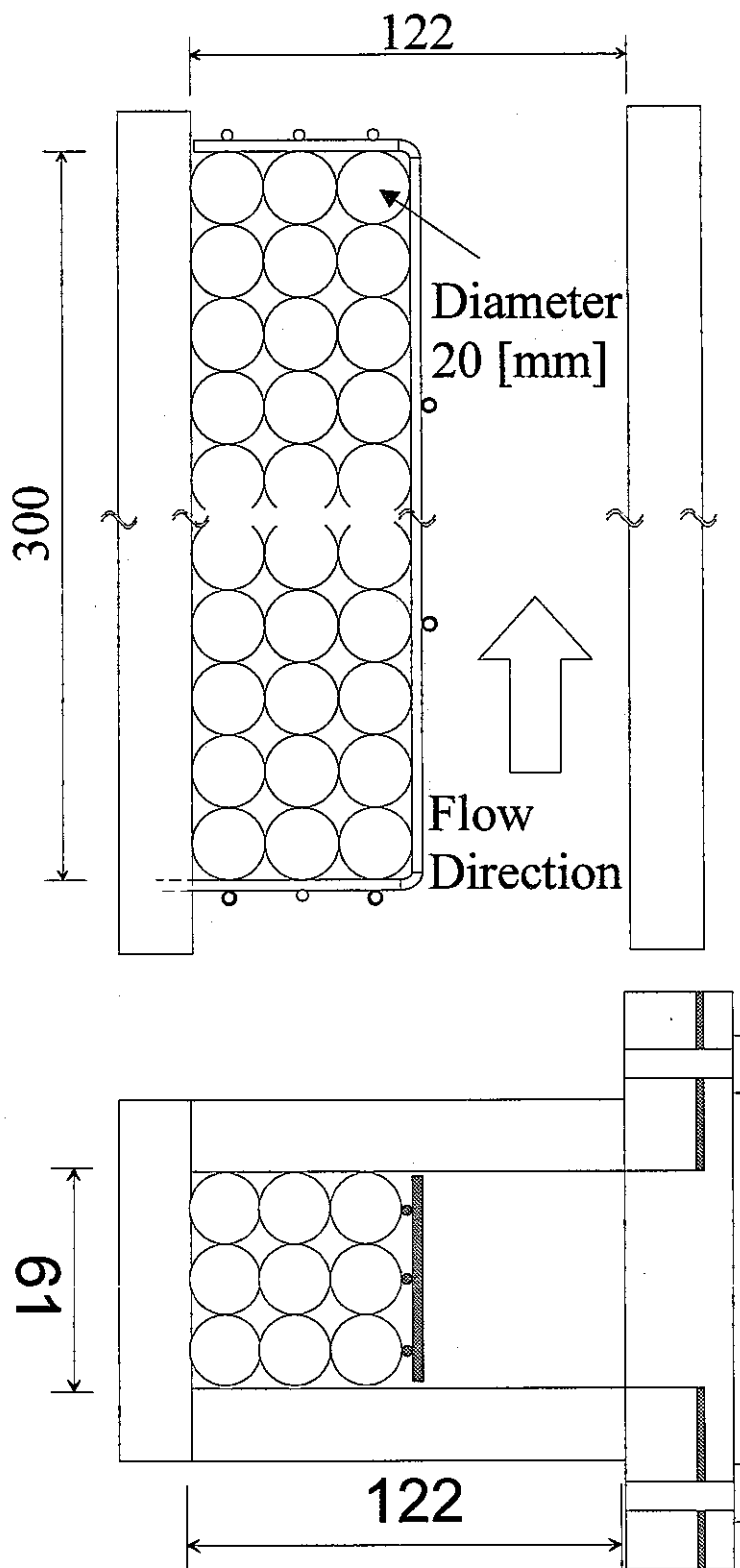


図 2-2 テスト部概略図

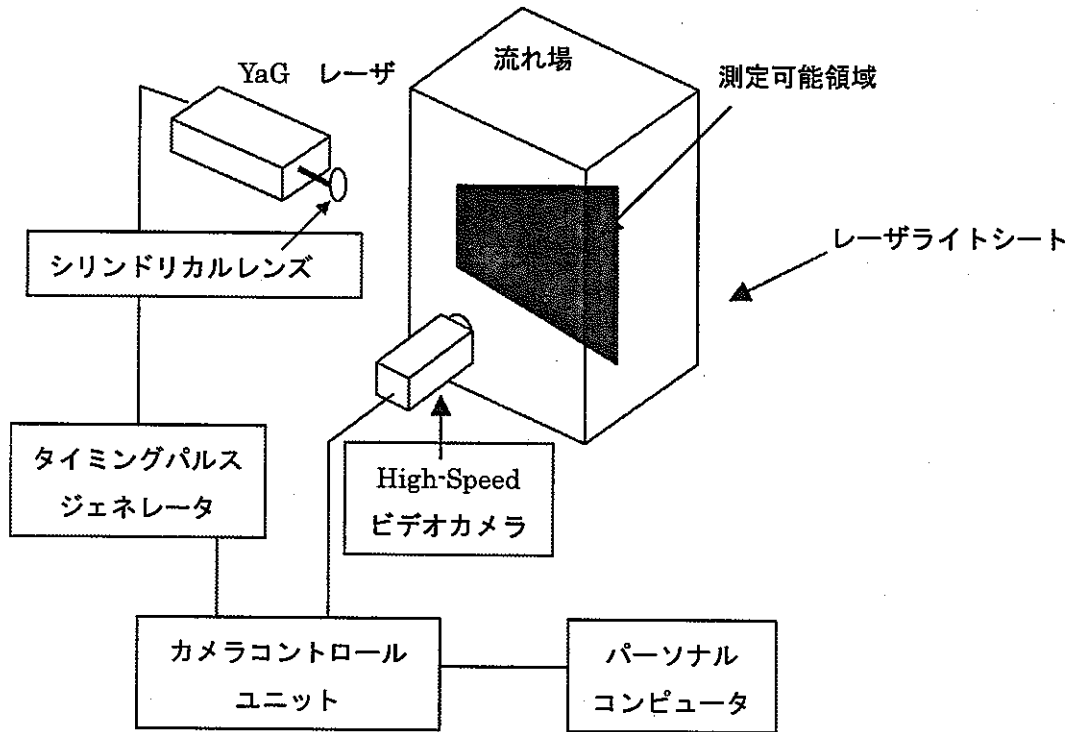


図 3-1 P I V測定系概念図

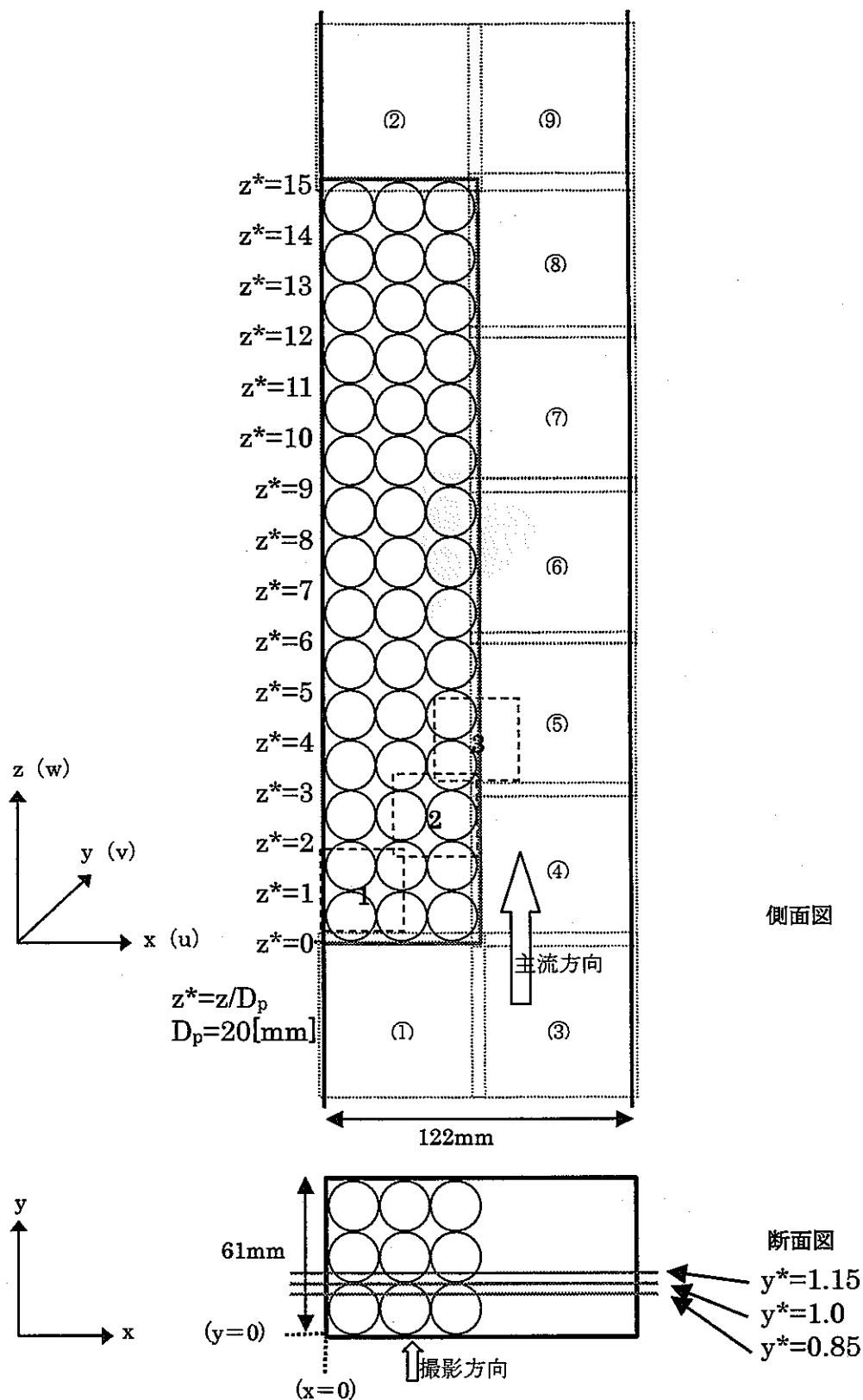


図 3-2 試験部撮影領域 (20mm 球・粗充填)

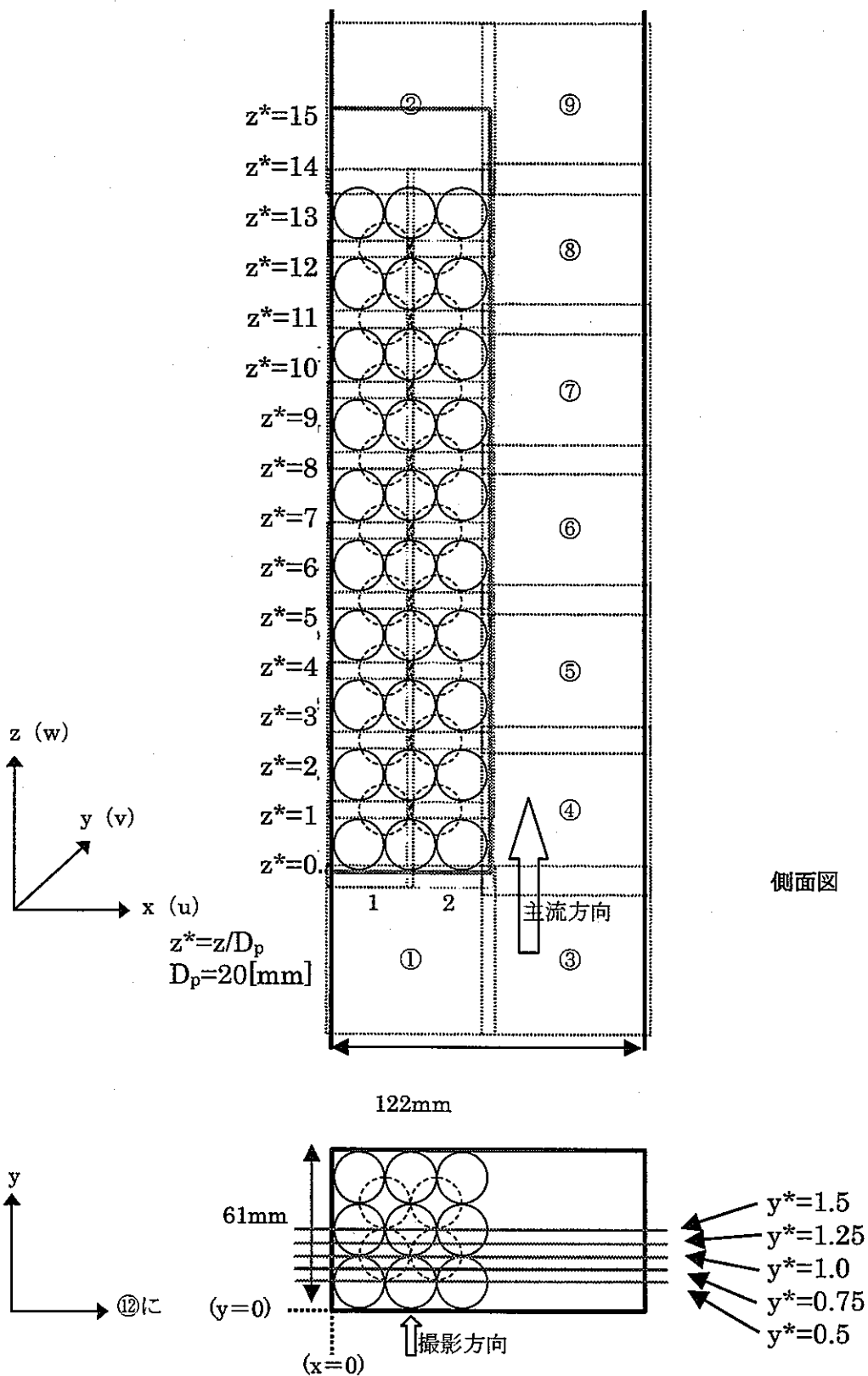


図 3-3 撮影領域 (20mm 球・密充填)

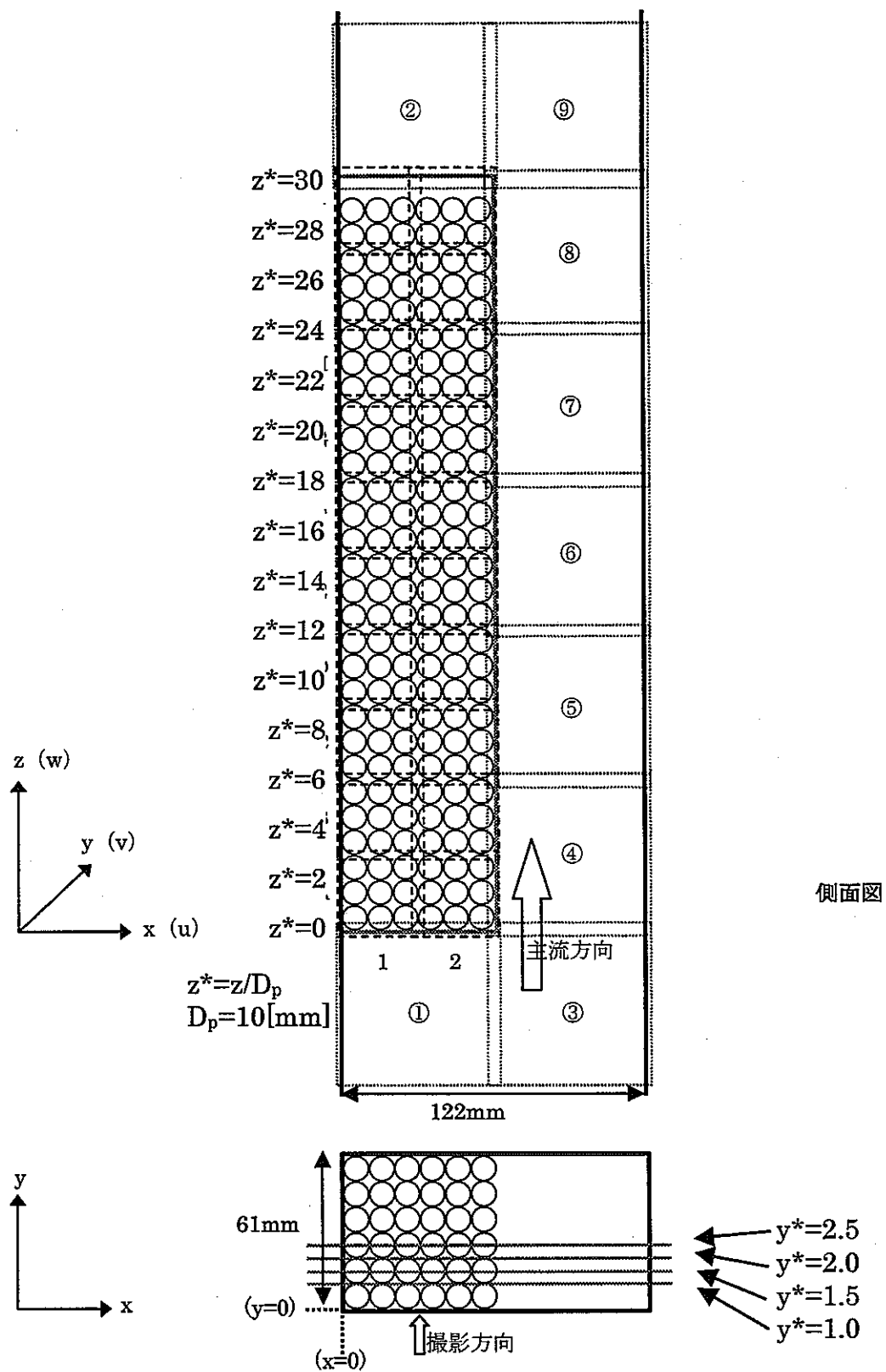


图 3-4 摄影领域 (10mm 球 · 粗充填)

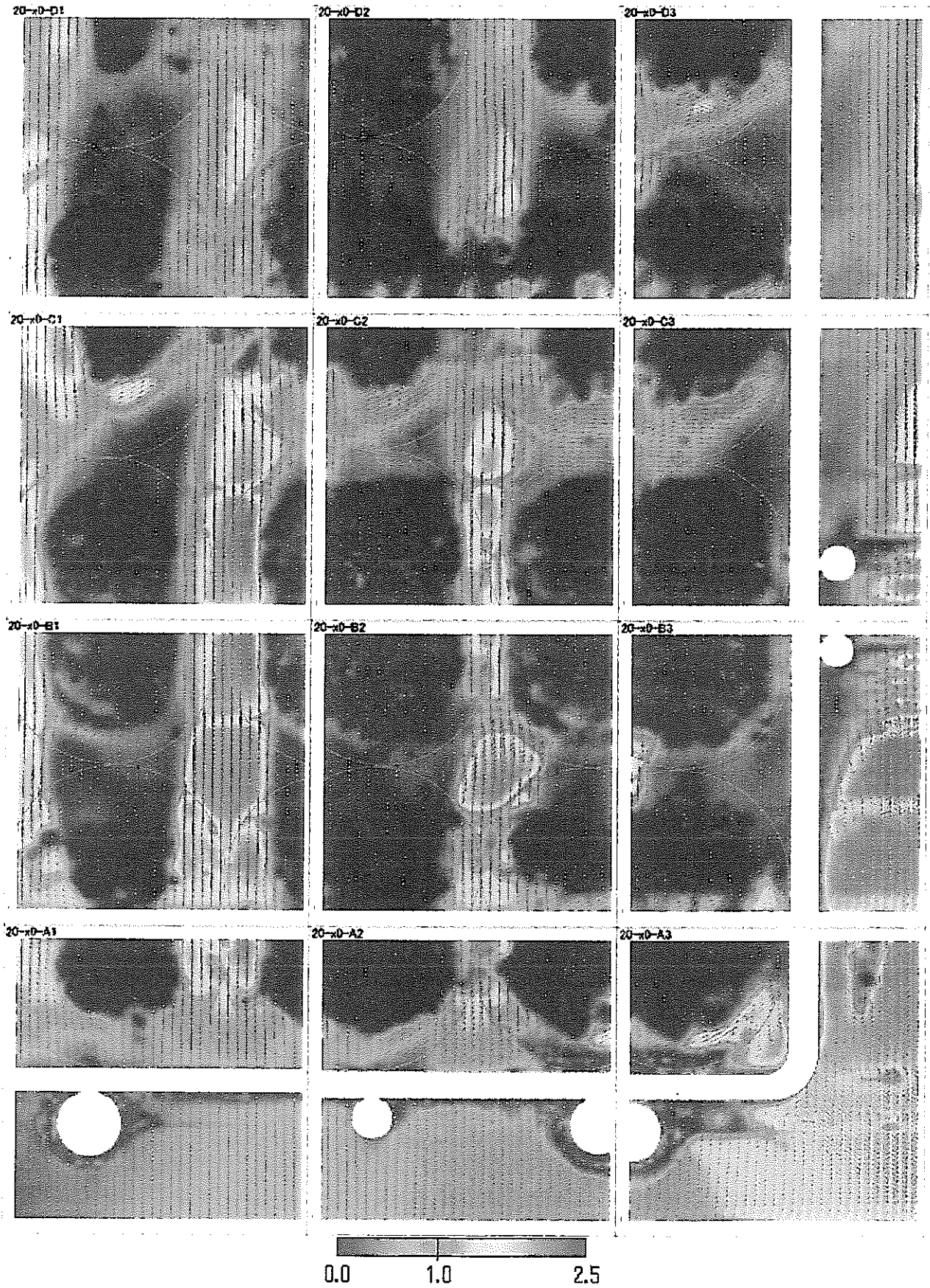


図 4-1.1 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層入口部)

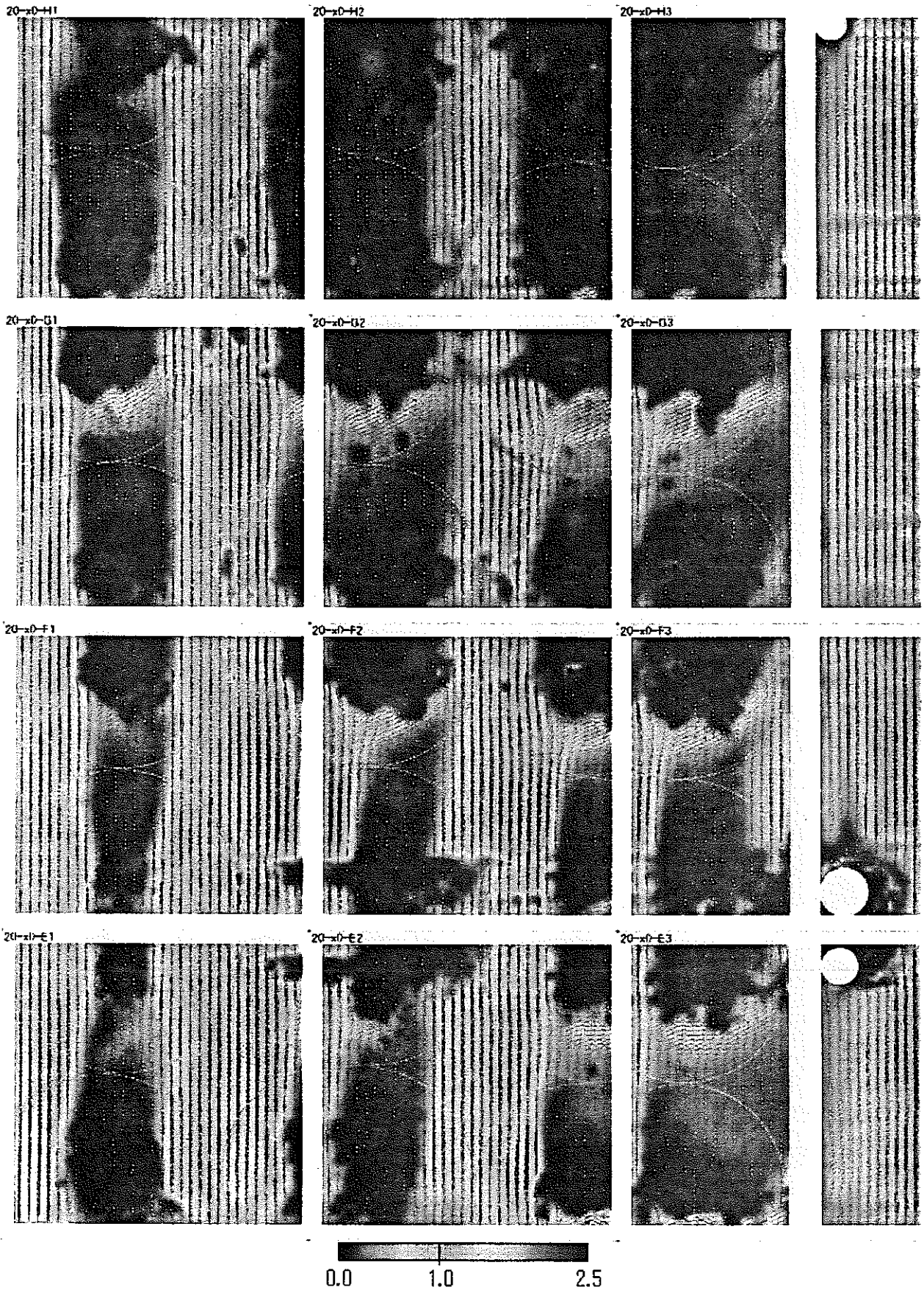


図 4-1.2 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層入口～中央部)

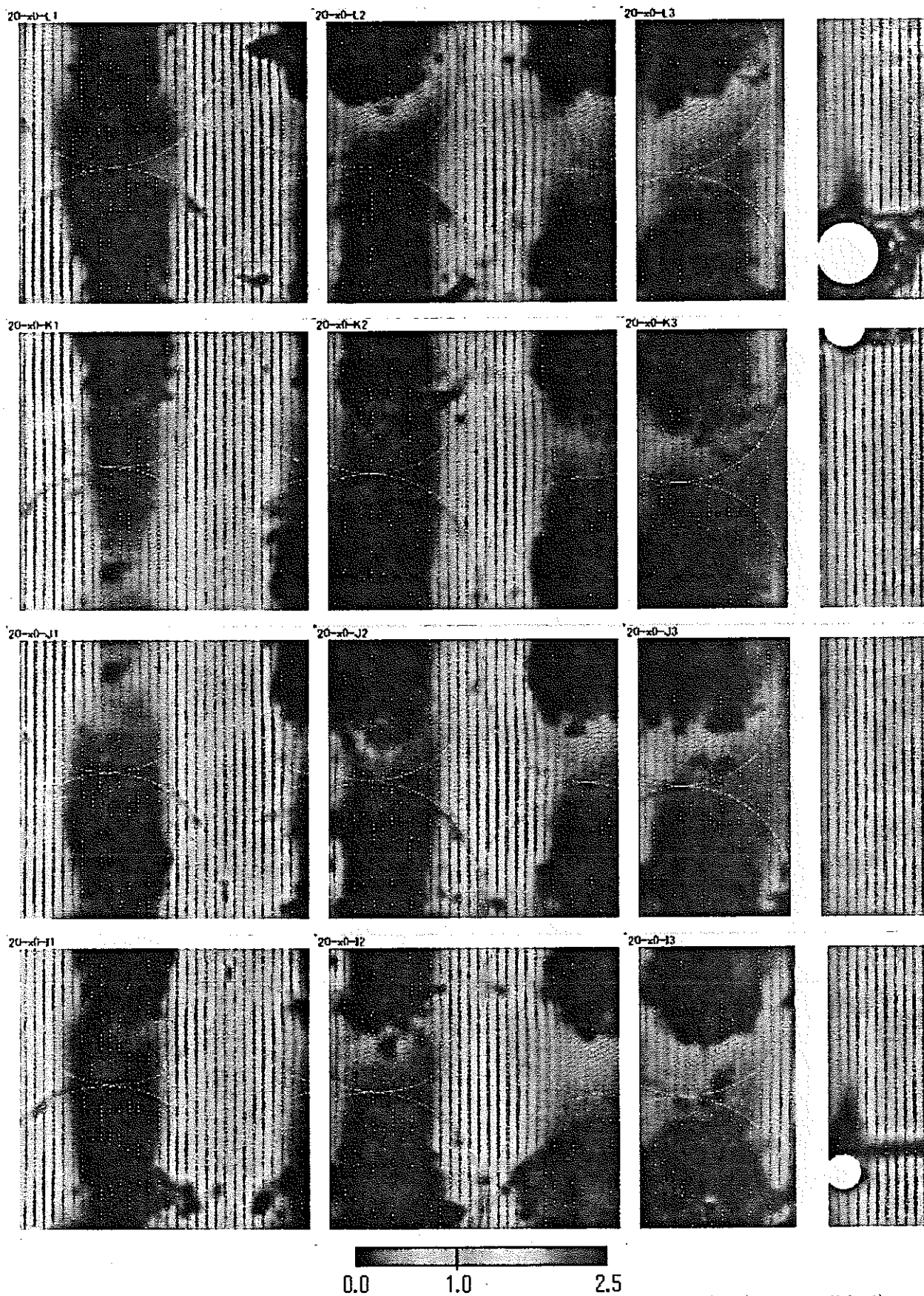


図 4-1.3 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層中央～出口部)

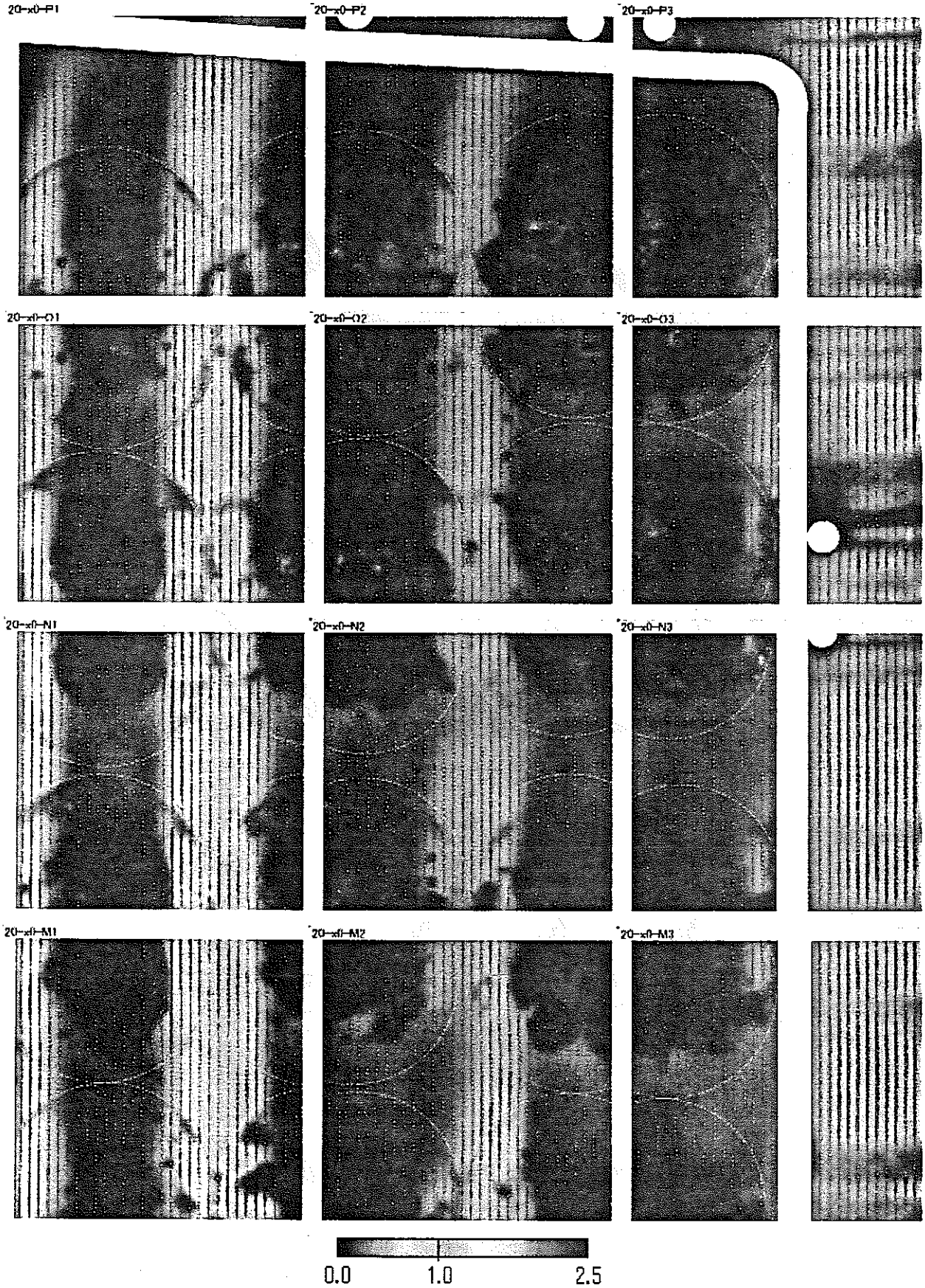
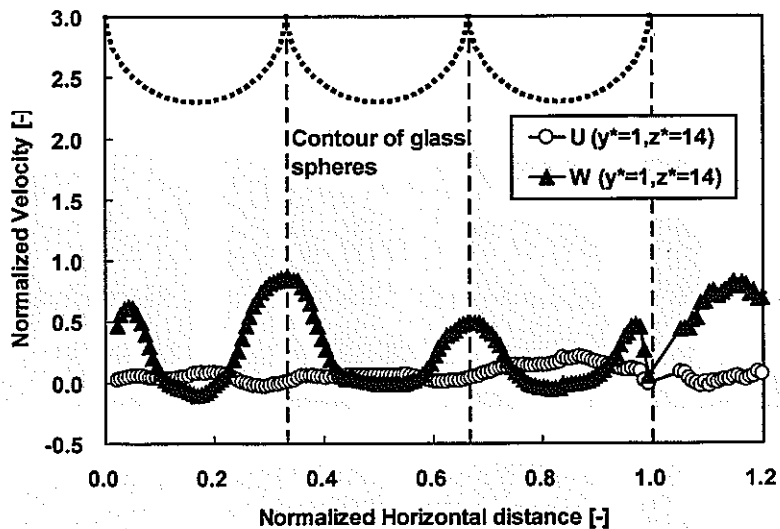
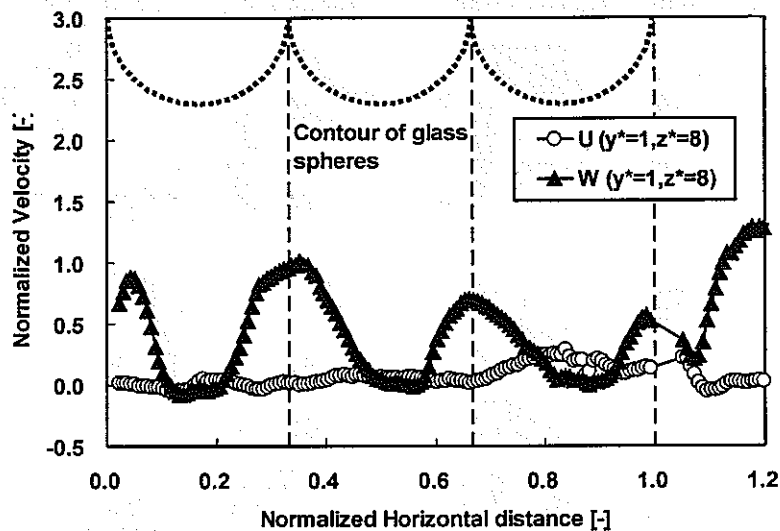


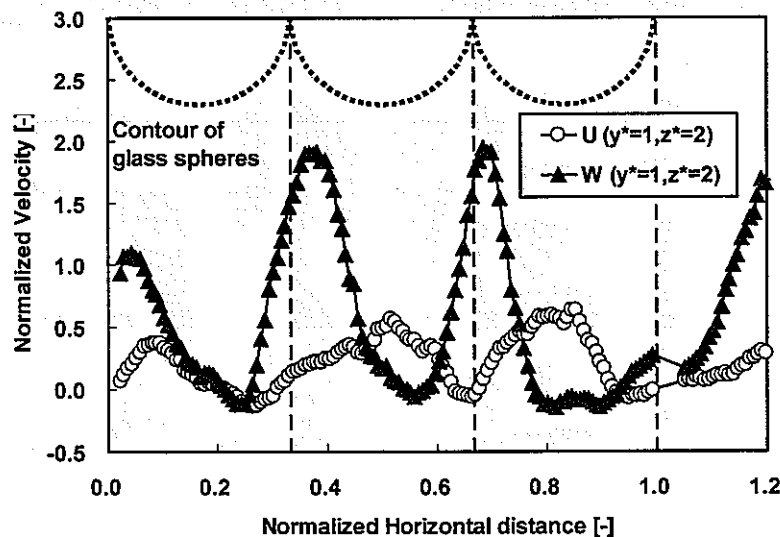
図 4-1.4 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層出口部)



(充填層出口部)



(充填層中央部)



(充填層入口部)

図 4-2 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.0$ 断面)

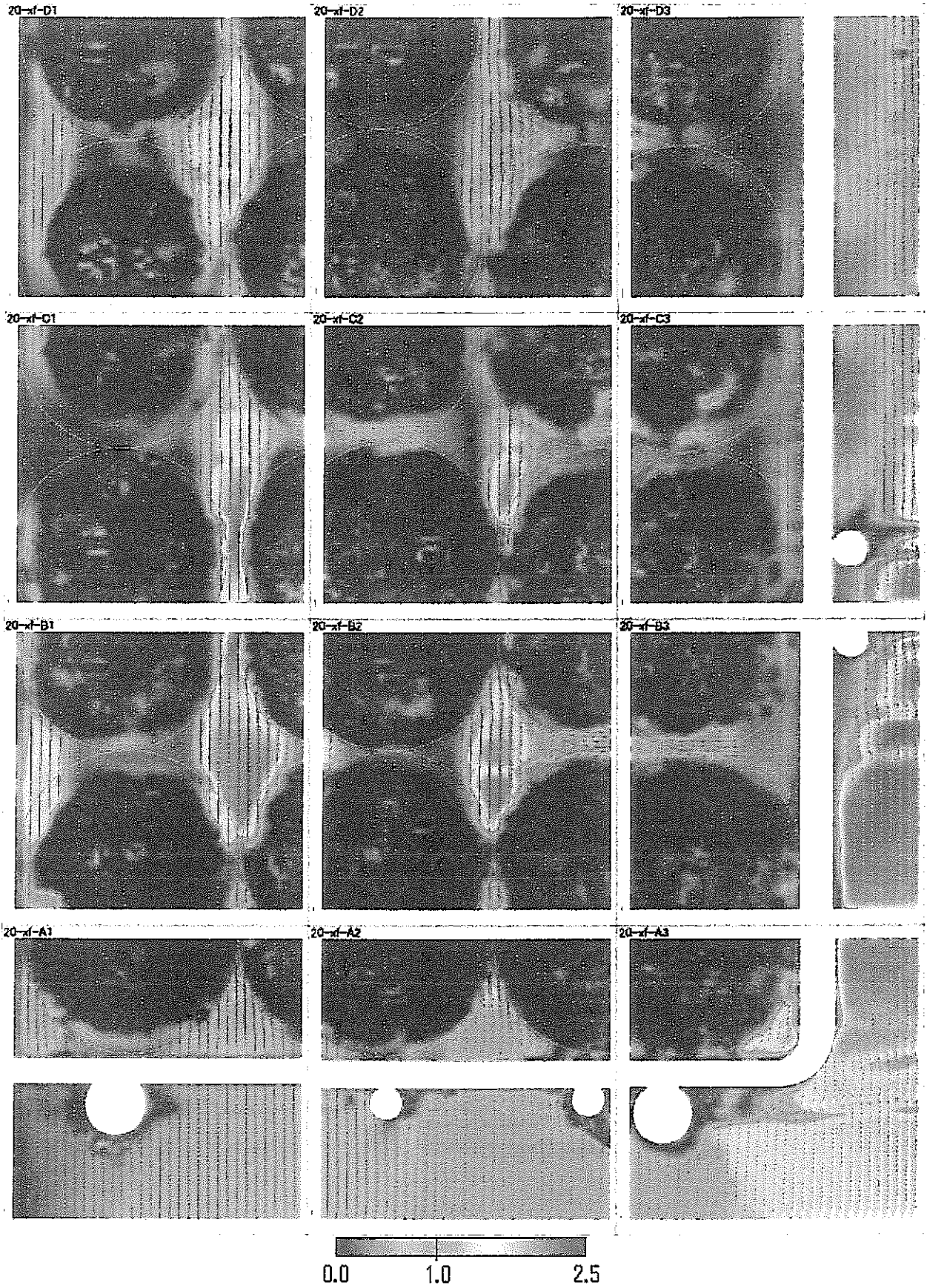


図 4-3 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=0.85$ 断面)
(充填層入口部)

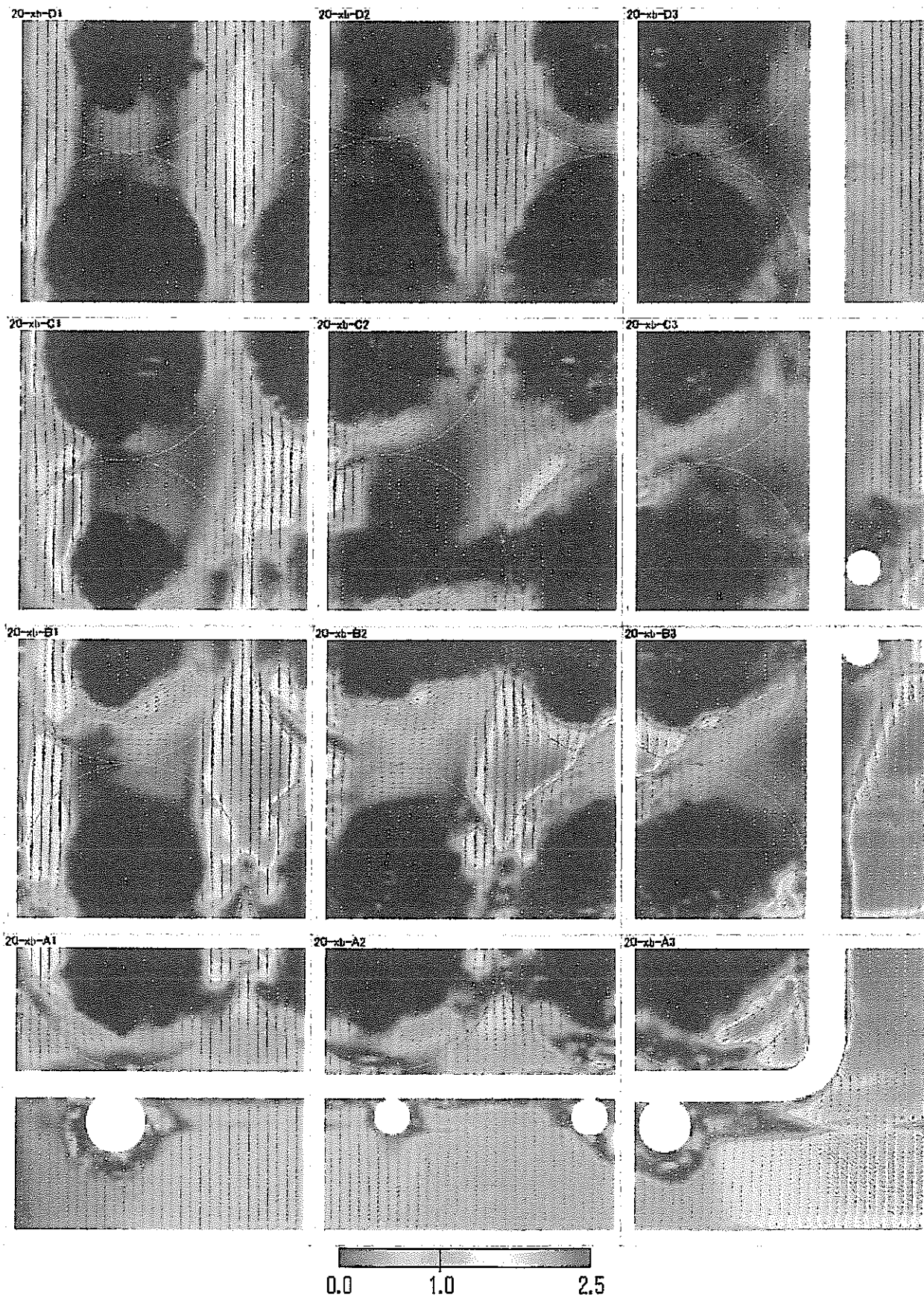
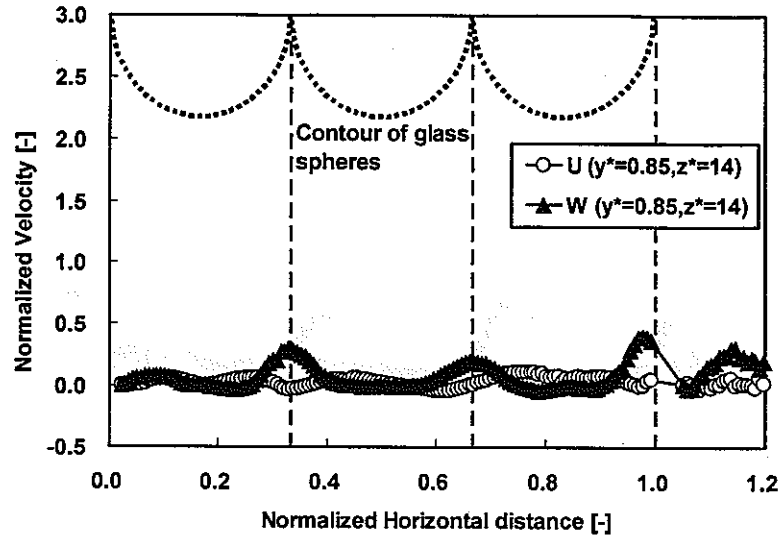
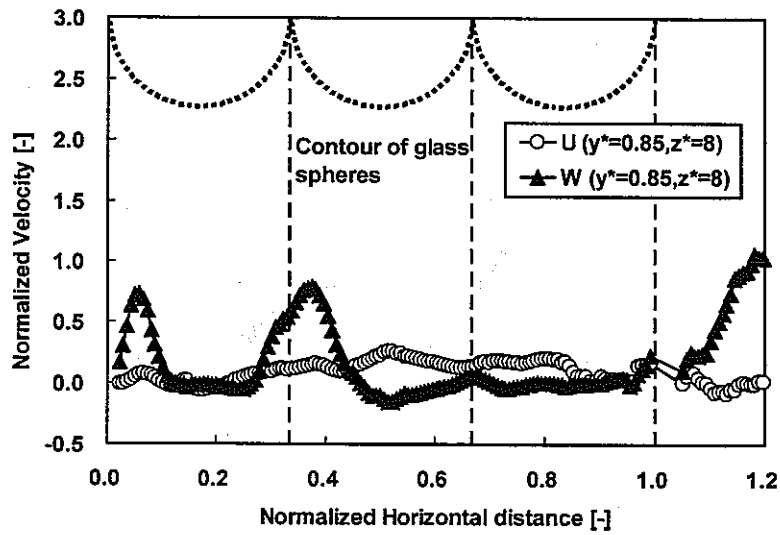


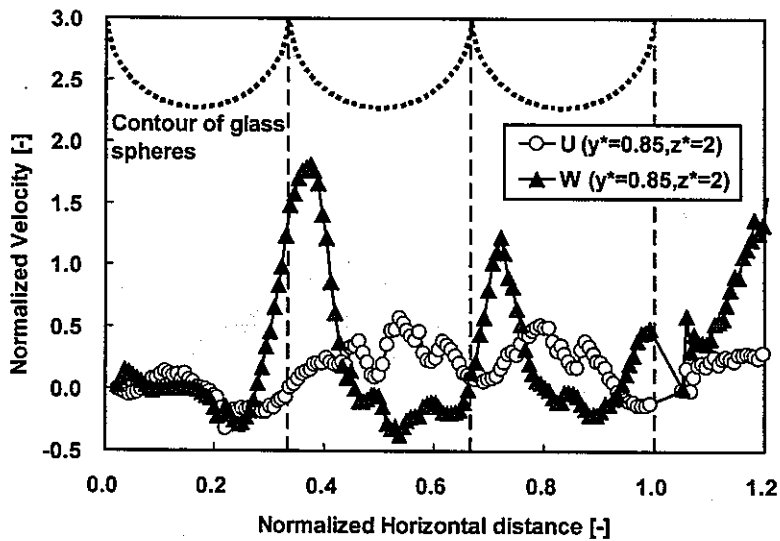
図 4-4 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.15$ 断面)
(充填層入口部)



(充填層出口部)

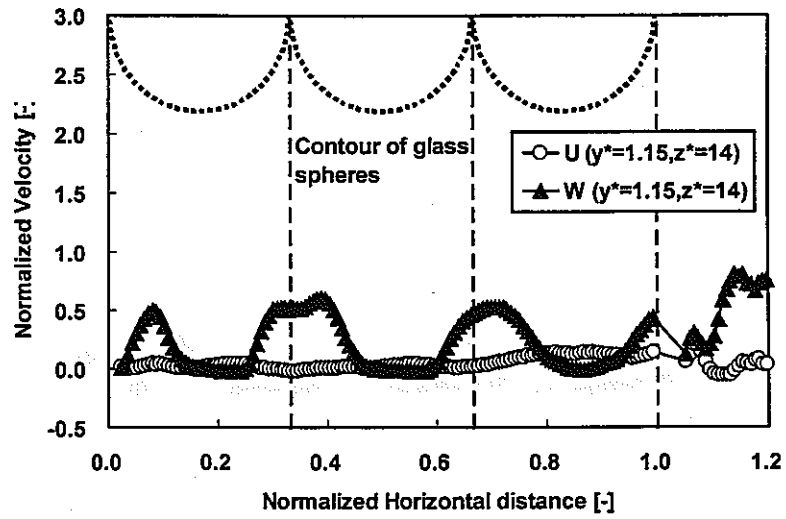


(充填層中央部)

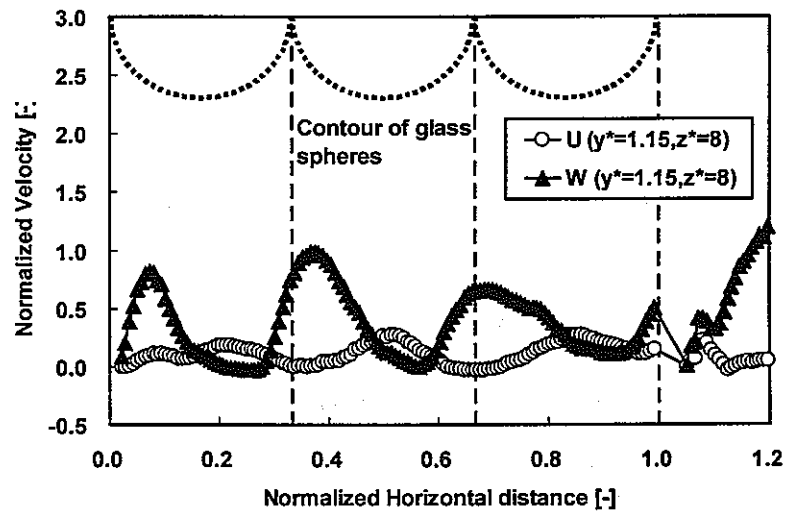


(充填層入口部)

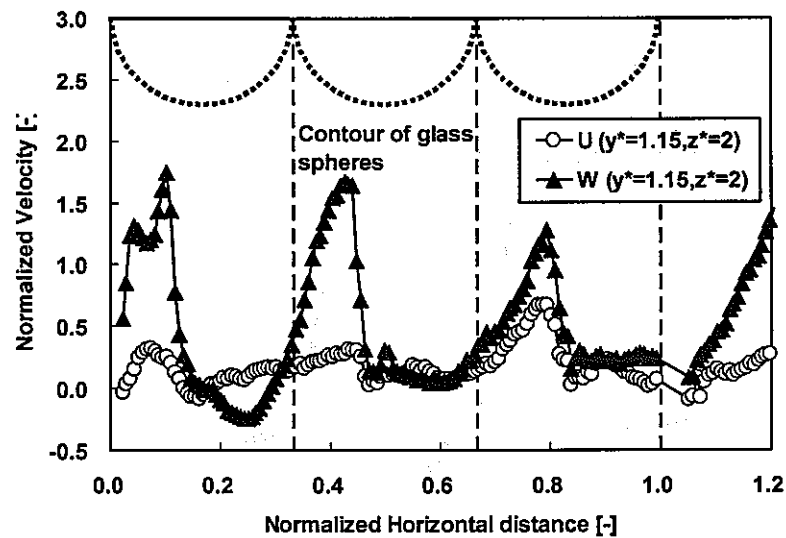
図 4-5 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=0.85$ 断面)



(充填層出口部)



(充填層中央部)



(充填層入口部)

図 4-6 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.15$ 断面)

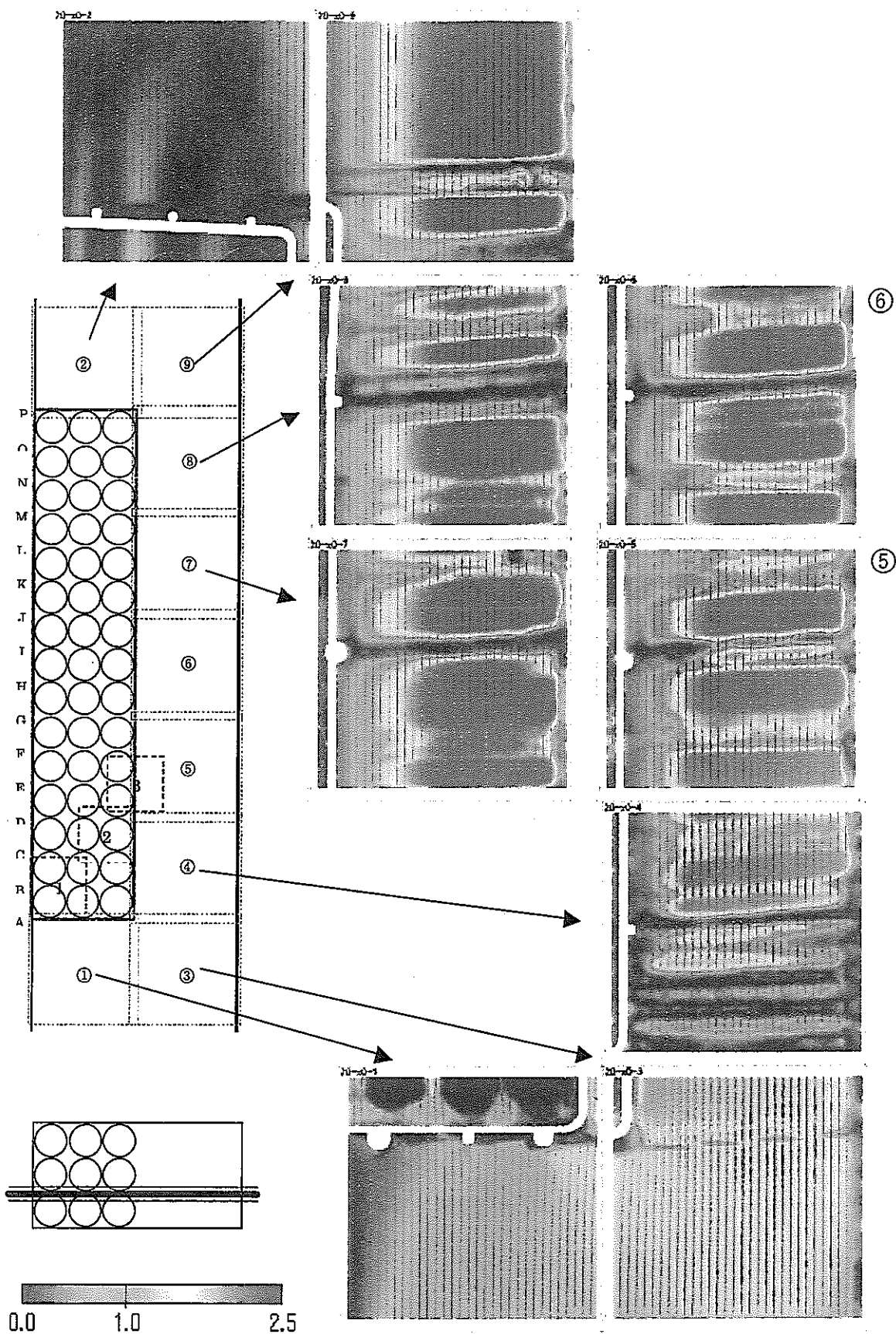


図 4-7 20mm 球・粗充填の場合の健全流路内における
時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)

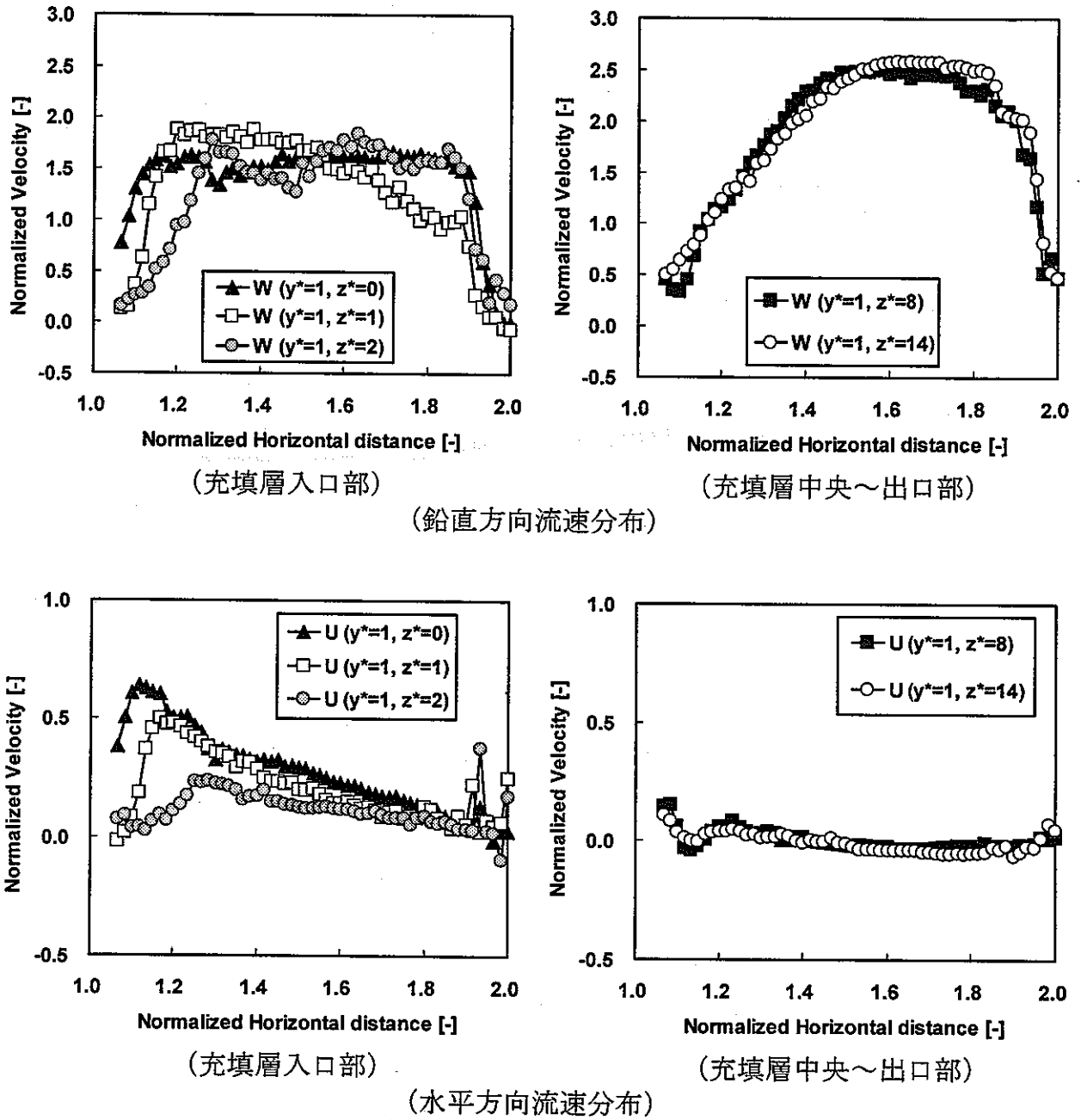
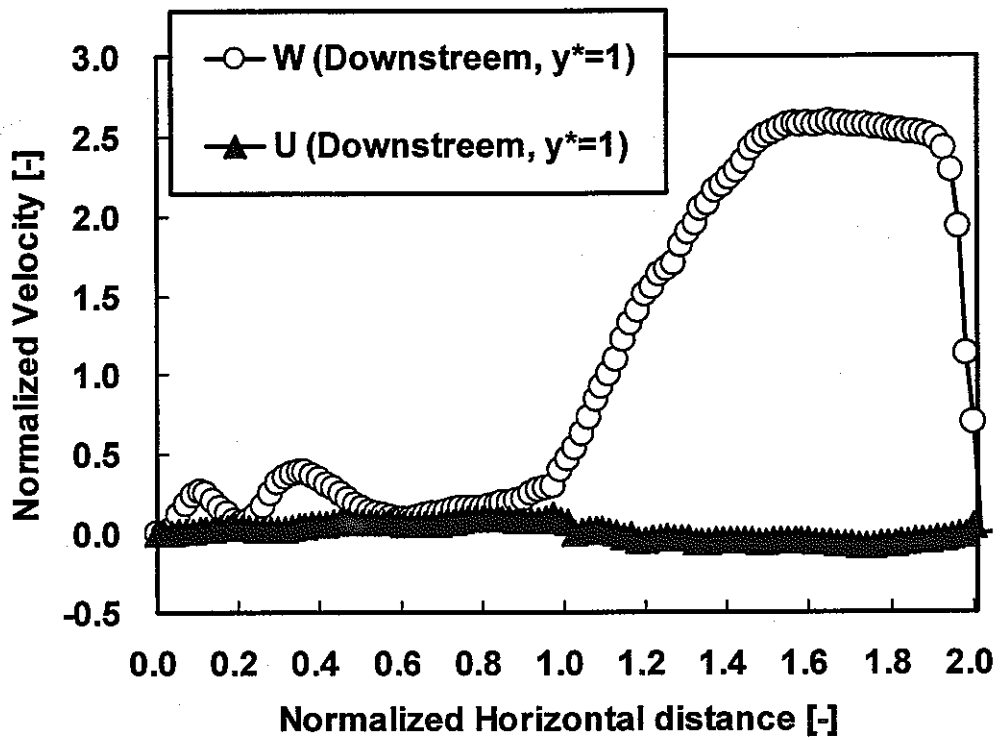
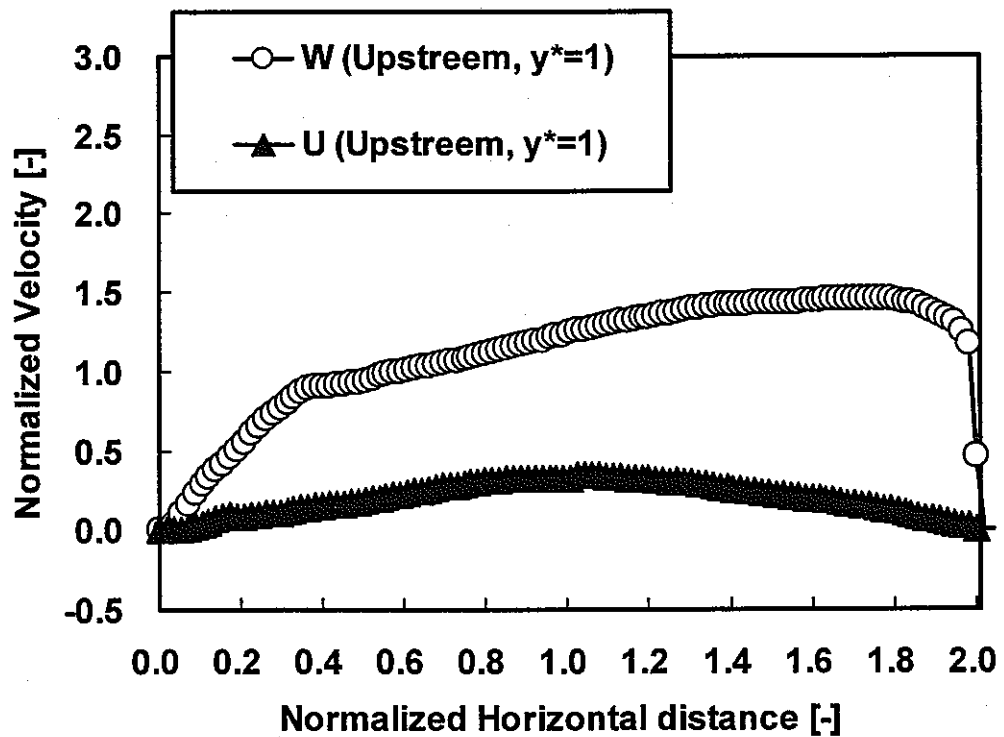


図 4-8 20mm 球・粗充填の場合の健全流路内における流速分布

- 充填層入口部 (下端) : $z^*=0$
- 充填層入口部 (1 層目) : $z^*=1$
- 充填層入口部 (2 層目) : $z^*=2$
- 充填層中央部 (8 層目) : $z^*=8$
- 充填層出口部 (14 層目) : $z^*=14$



(充填層下流側)



(充填層上流側)

図 4-9 20mm 球・粗充填の場合の健全流路内における流速分布

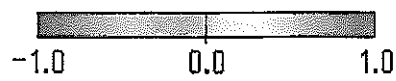
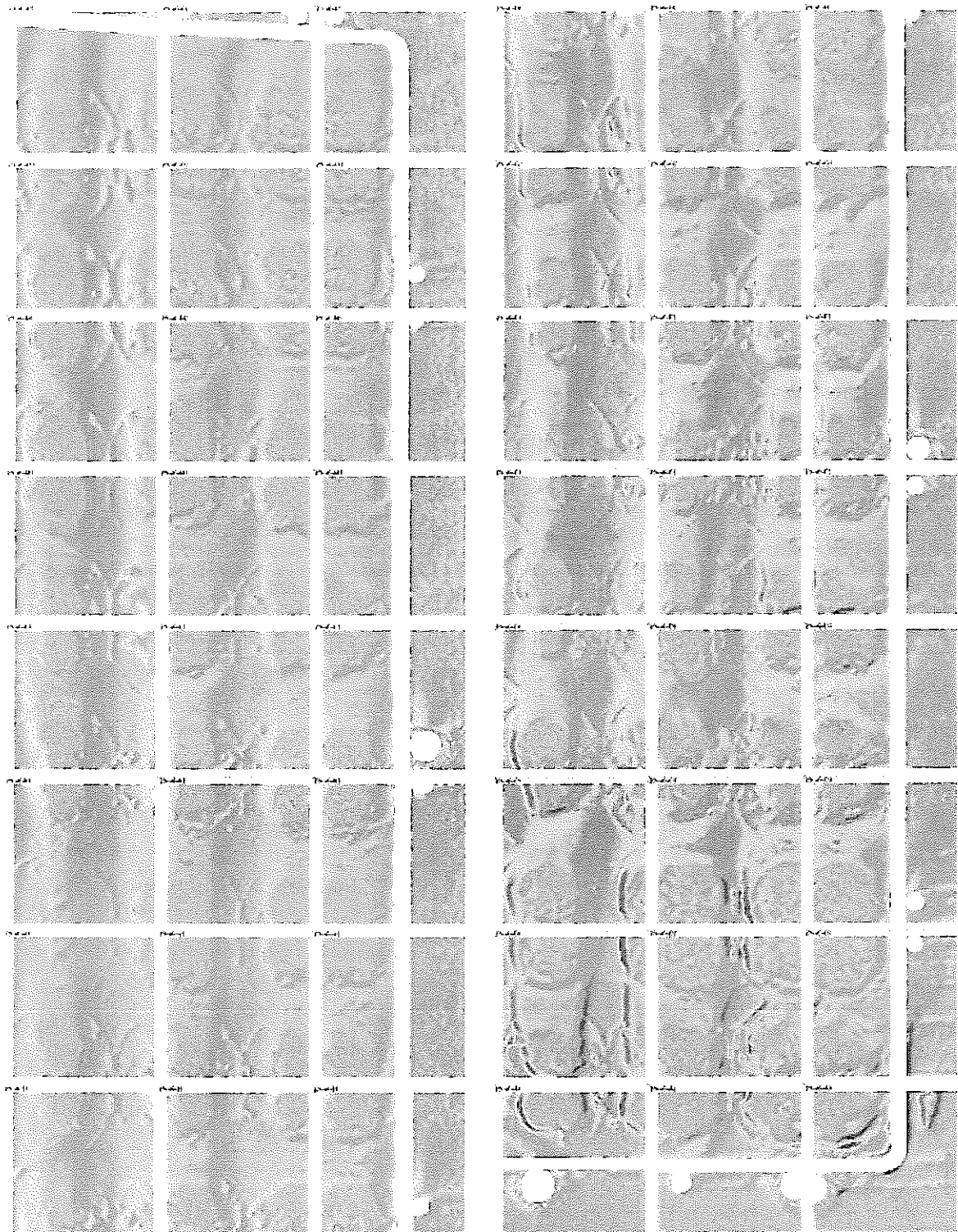


図 4-10 20mm 球・粗充填の場合の時間平均渦度分布 ($y^*=1.0$ 断面)

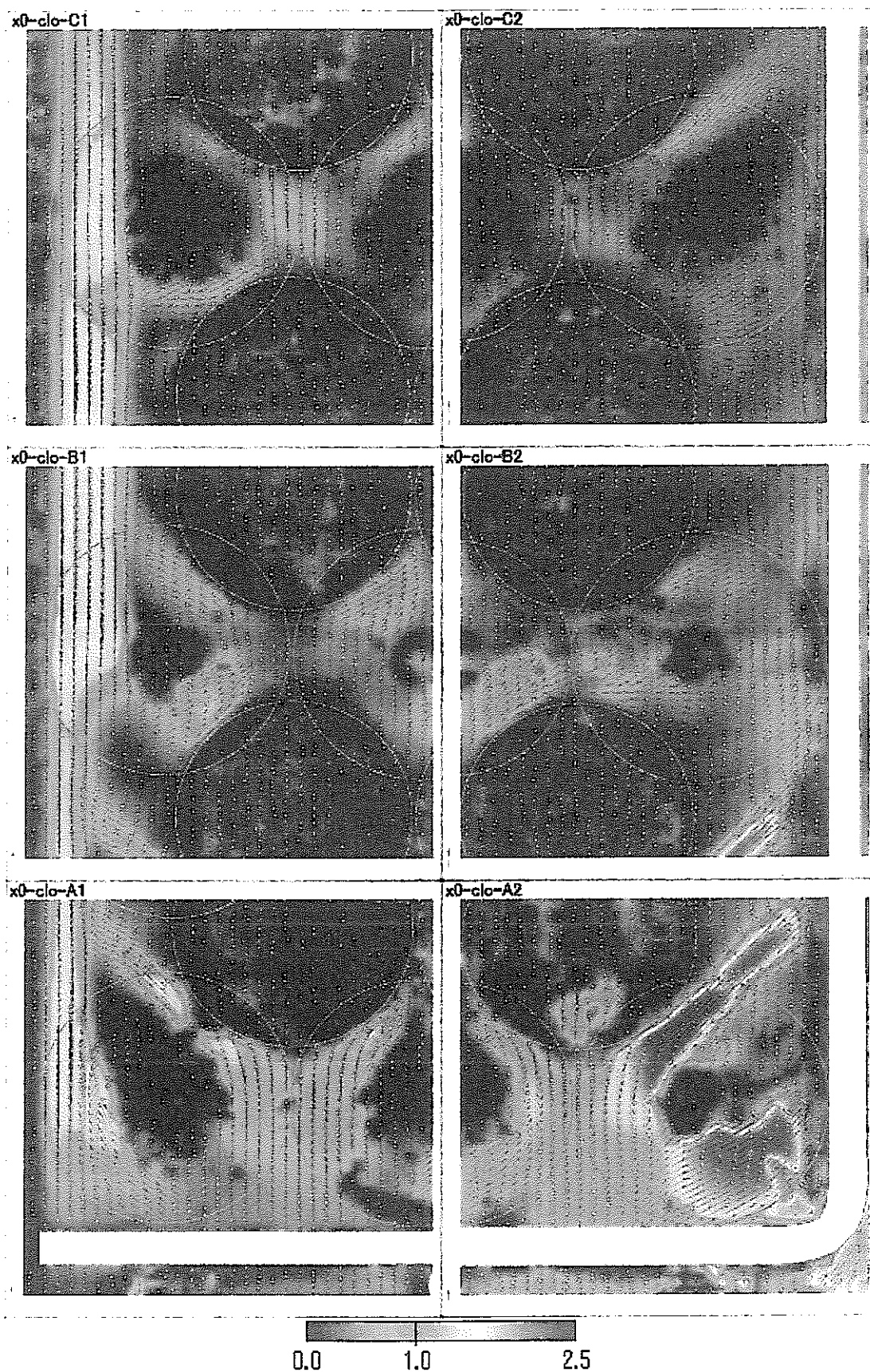


図 4-11.1 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層入口部)

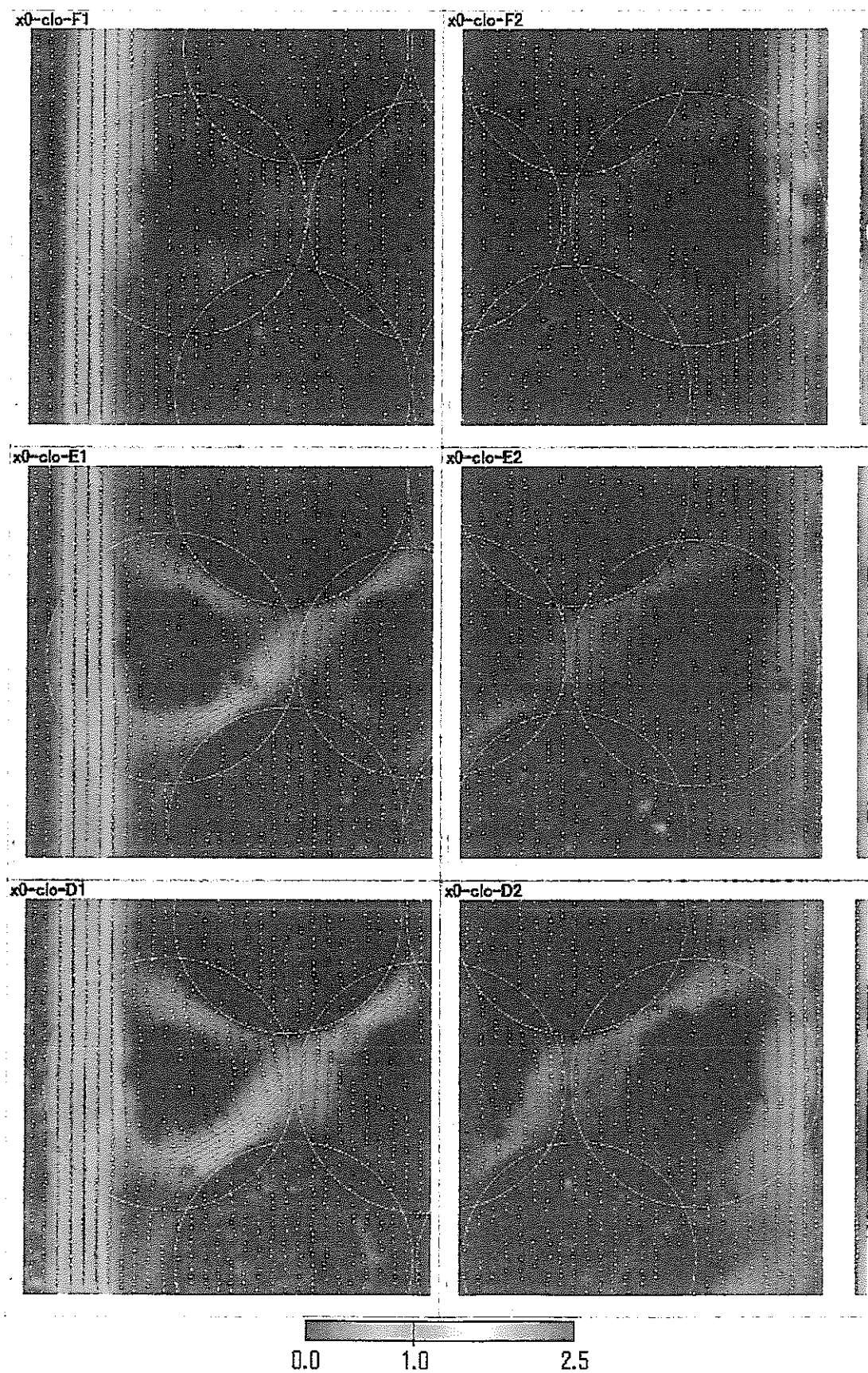


図 4-11.2 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層入口～中央部)

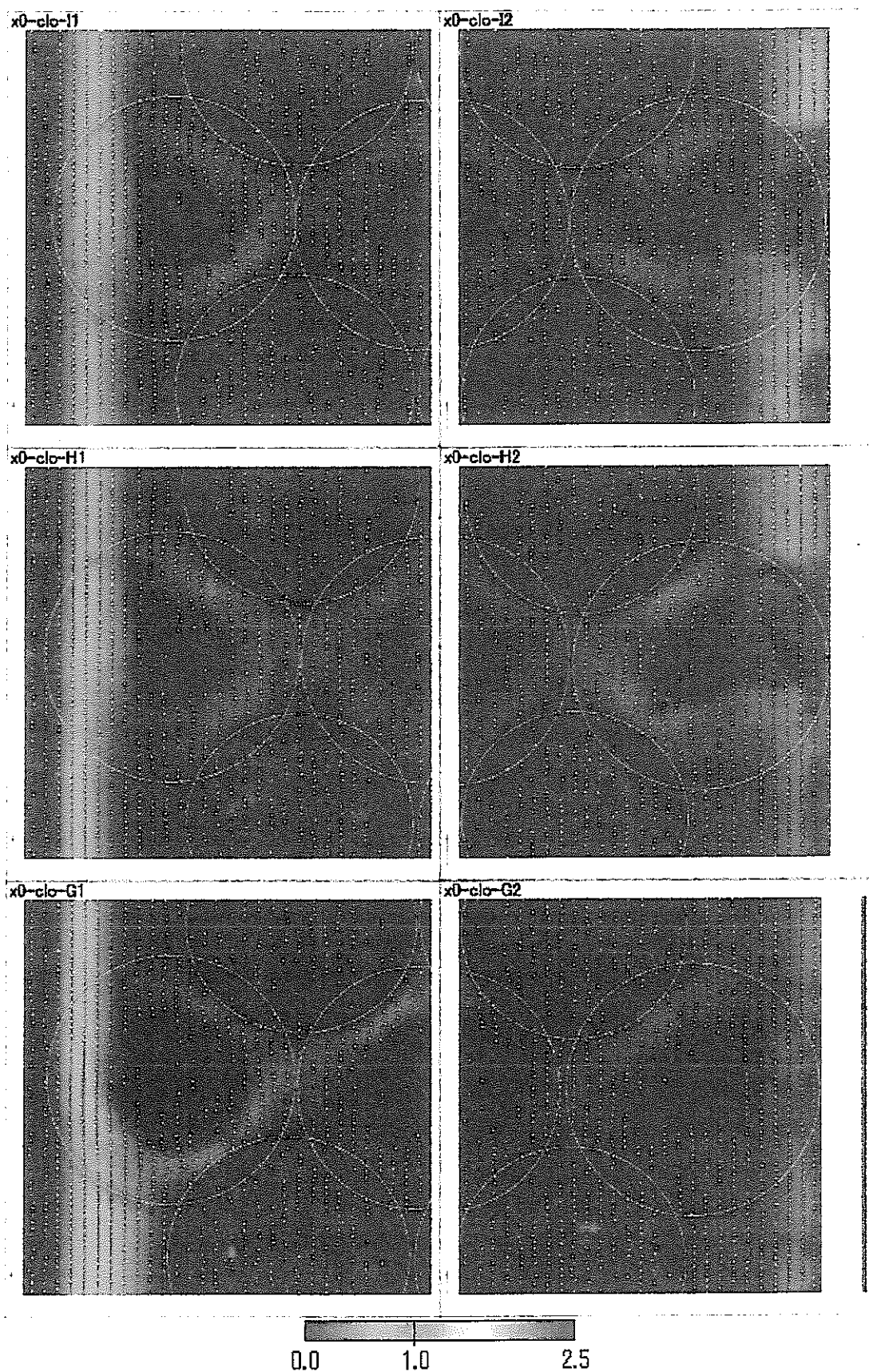


図 4-11.3 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層中央～出口部)

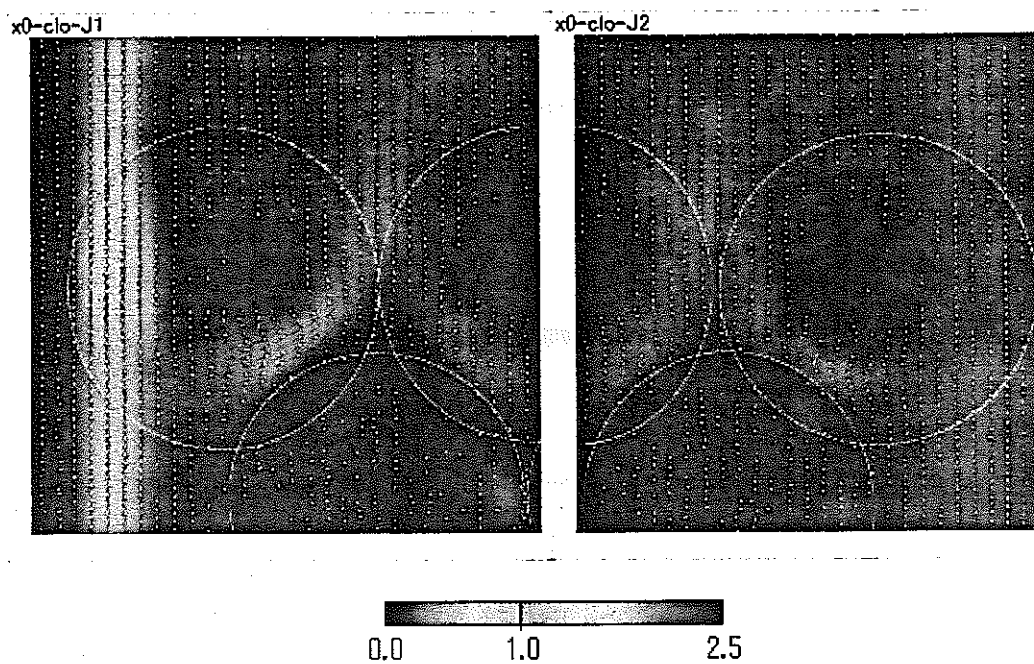
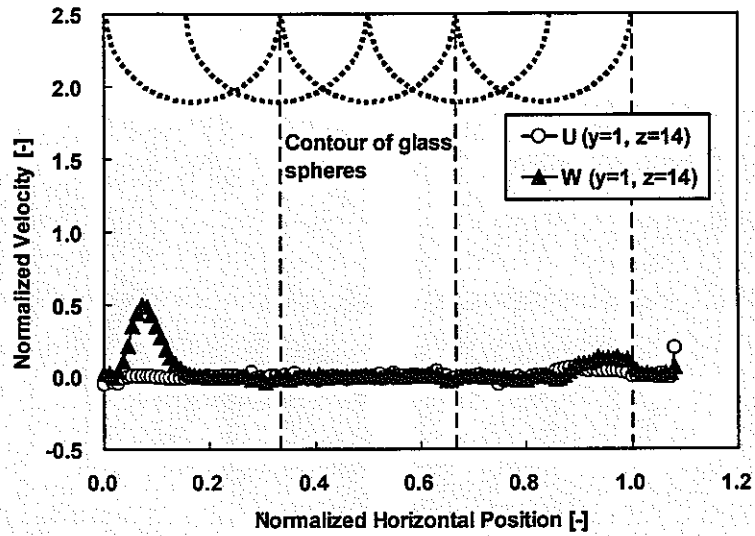
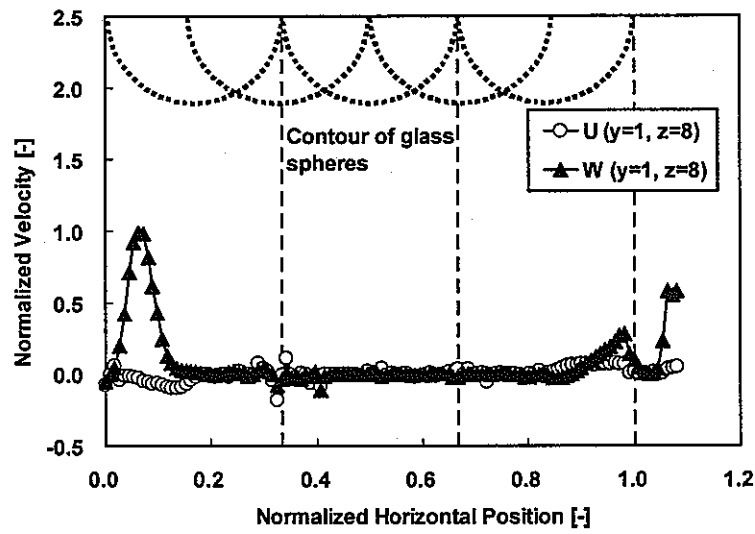


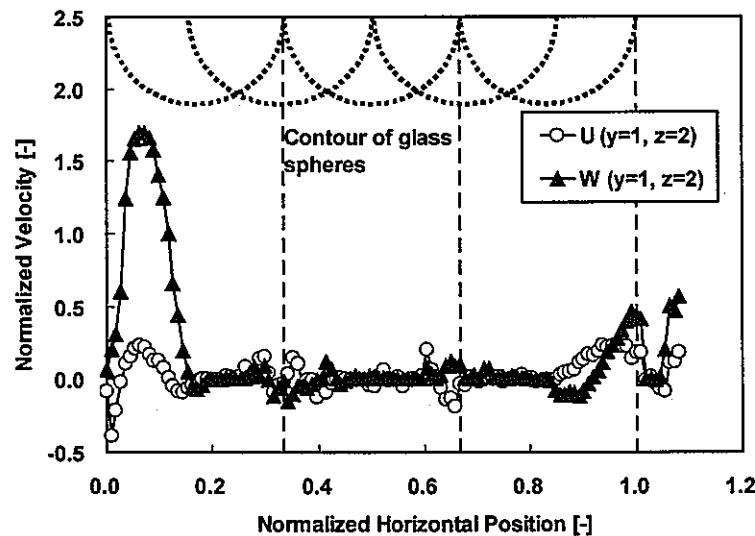
図 4-11.4 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層出口部)



(充填層出口部)



(充填層中央部)



(充填層入口部)

図 4-12 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.0$ 断面)

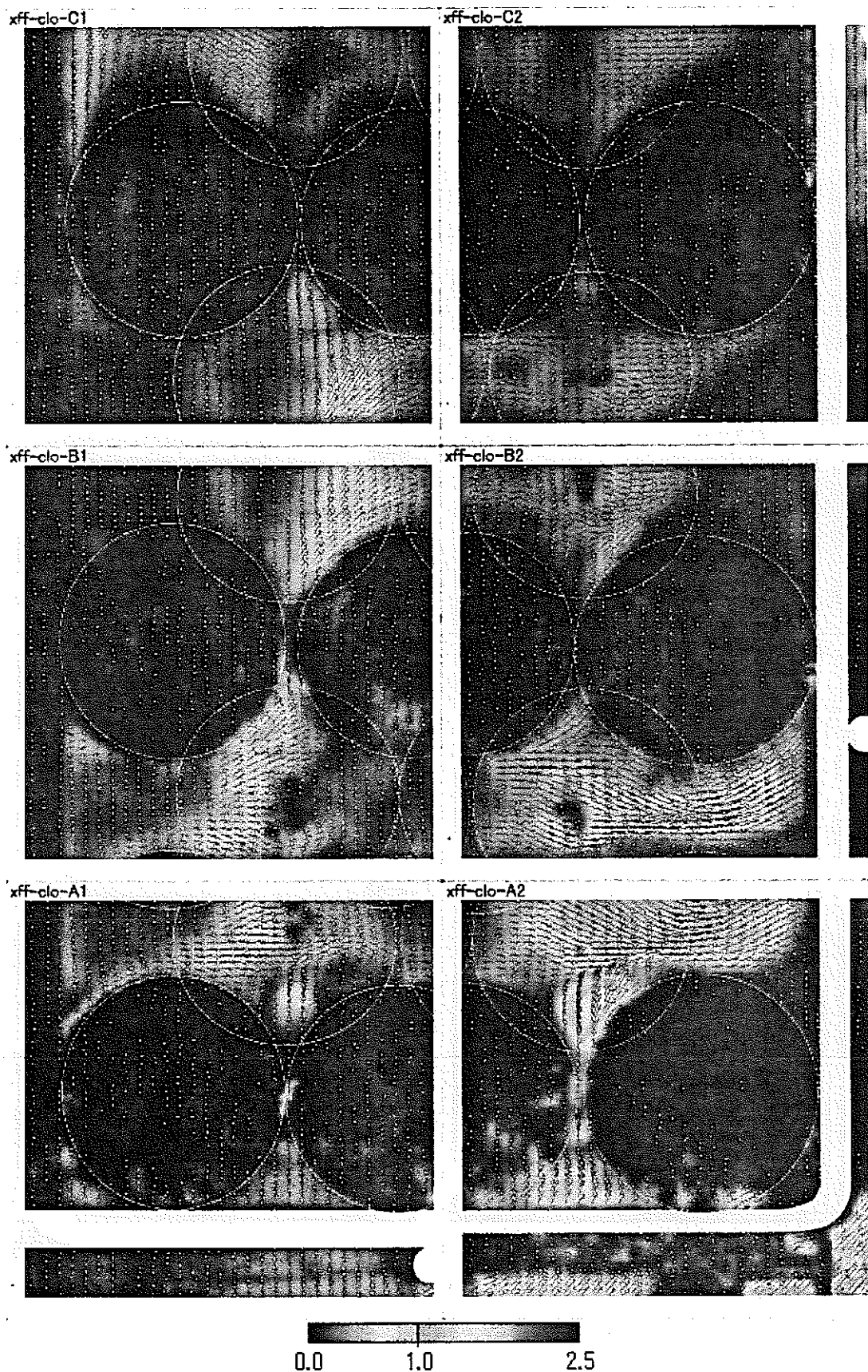


図 4-13 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=0.5$ 断面)
(充填層入口部)

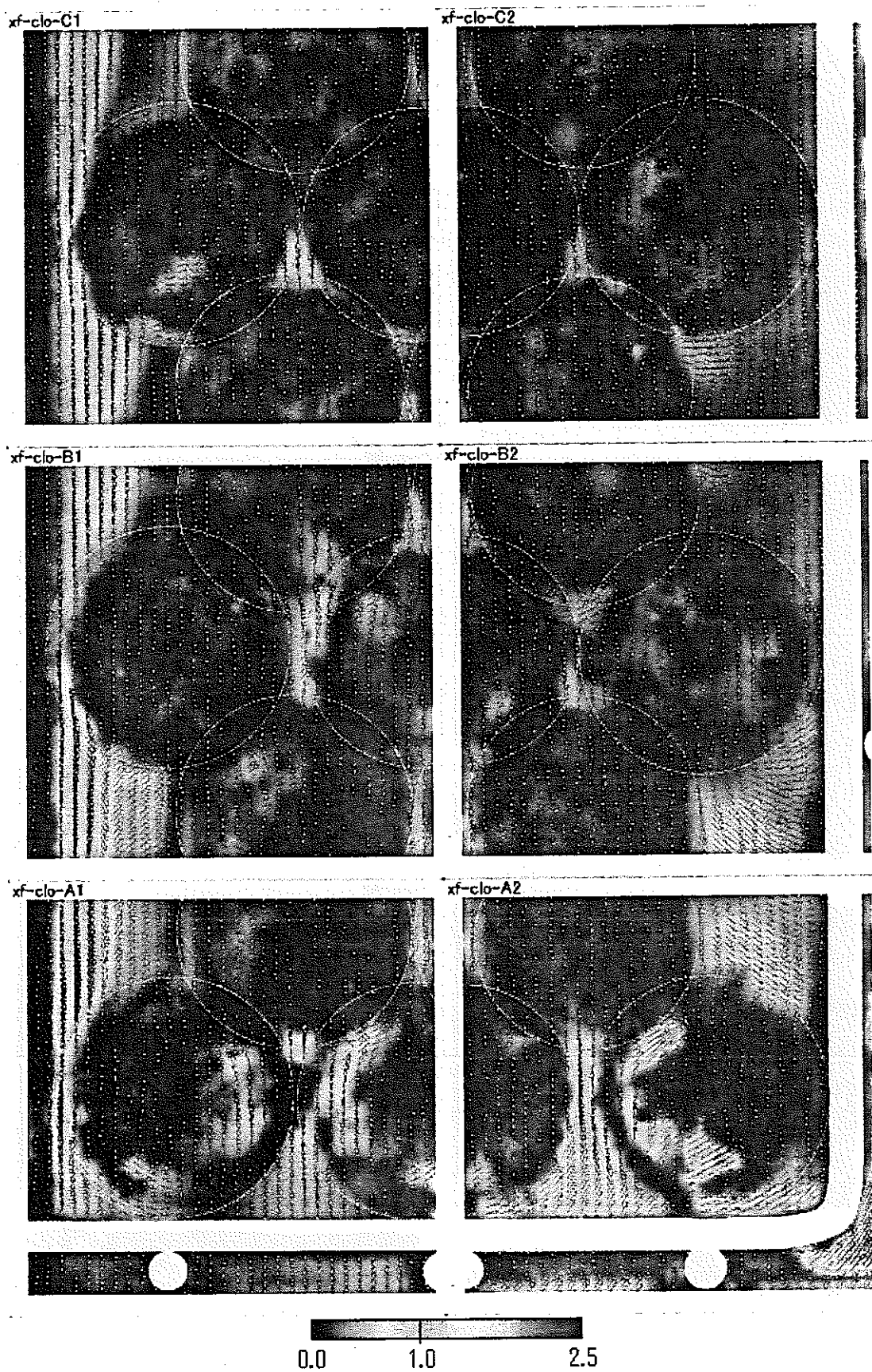


図 4-14 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=0.75$ 断面)
(充填層入口部)

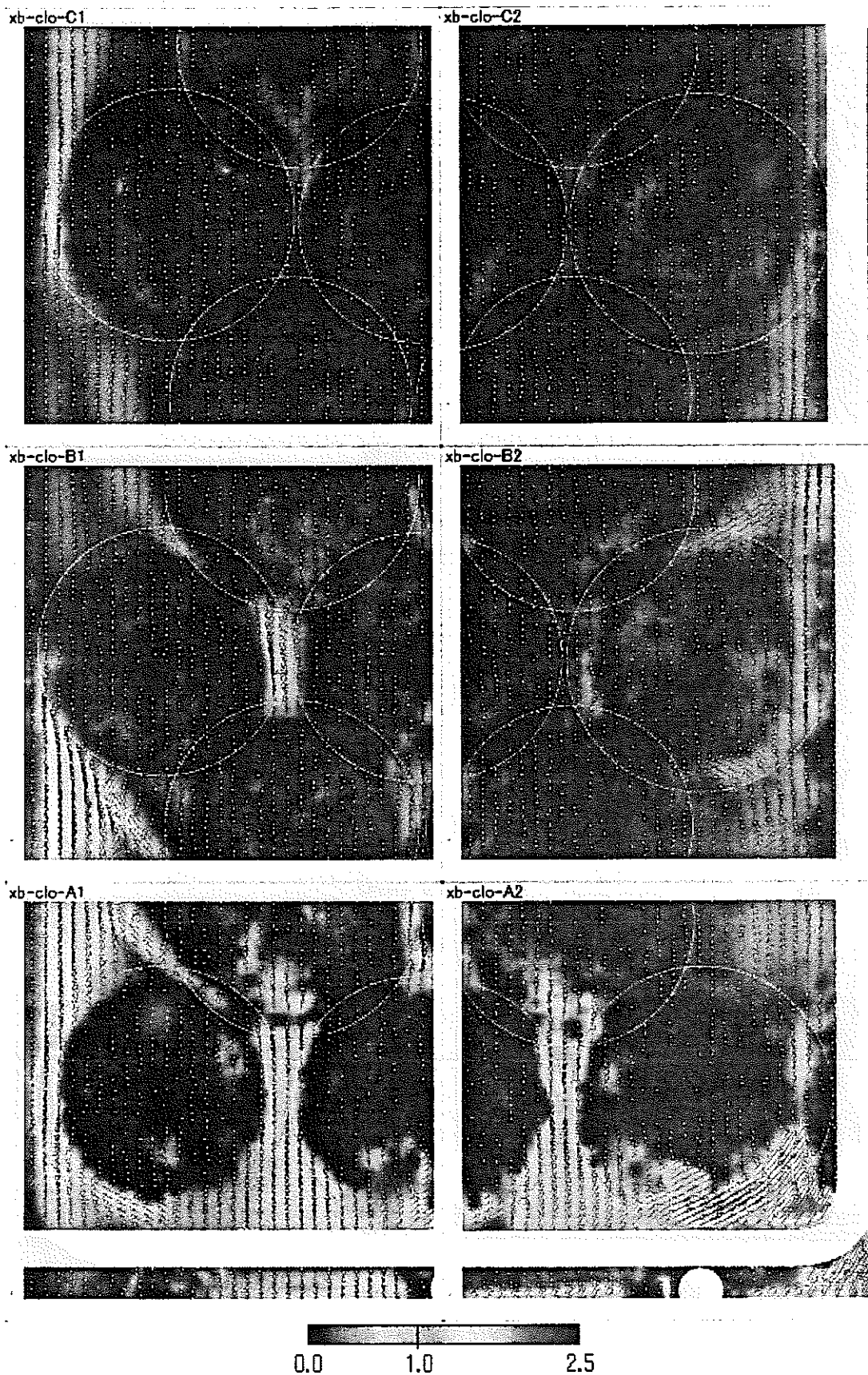


図 4-15 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.25$ 断面)
(充填層入口部)

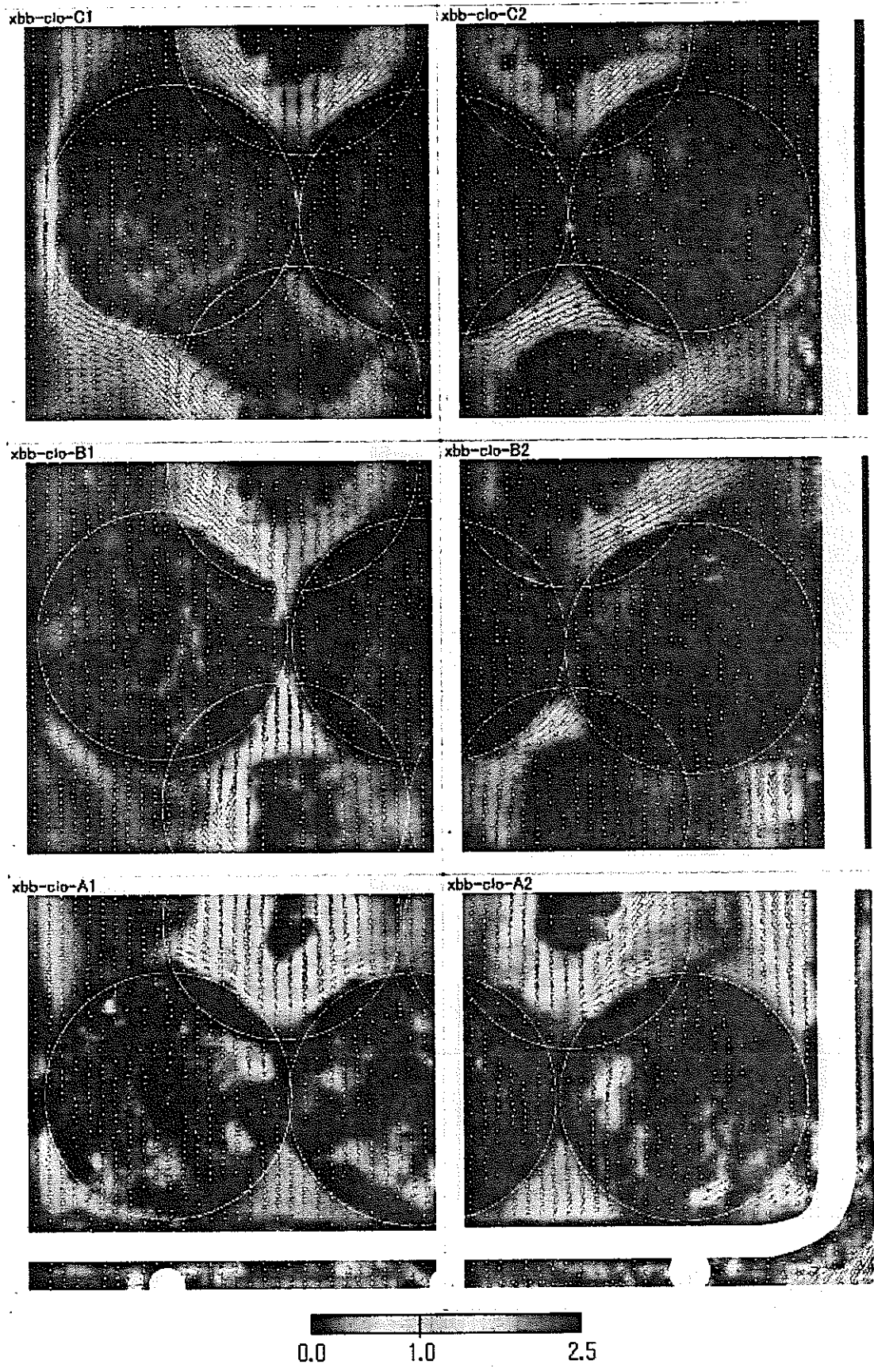


図 4-16 20mm 球・最密充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.5$ 断面)
(充填層入口部)

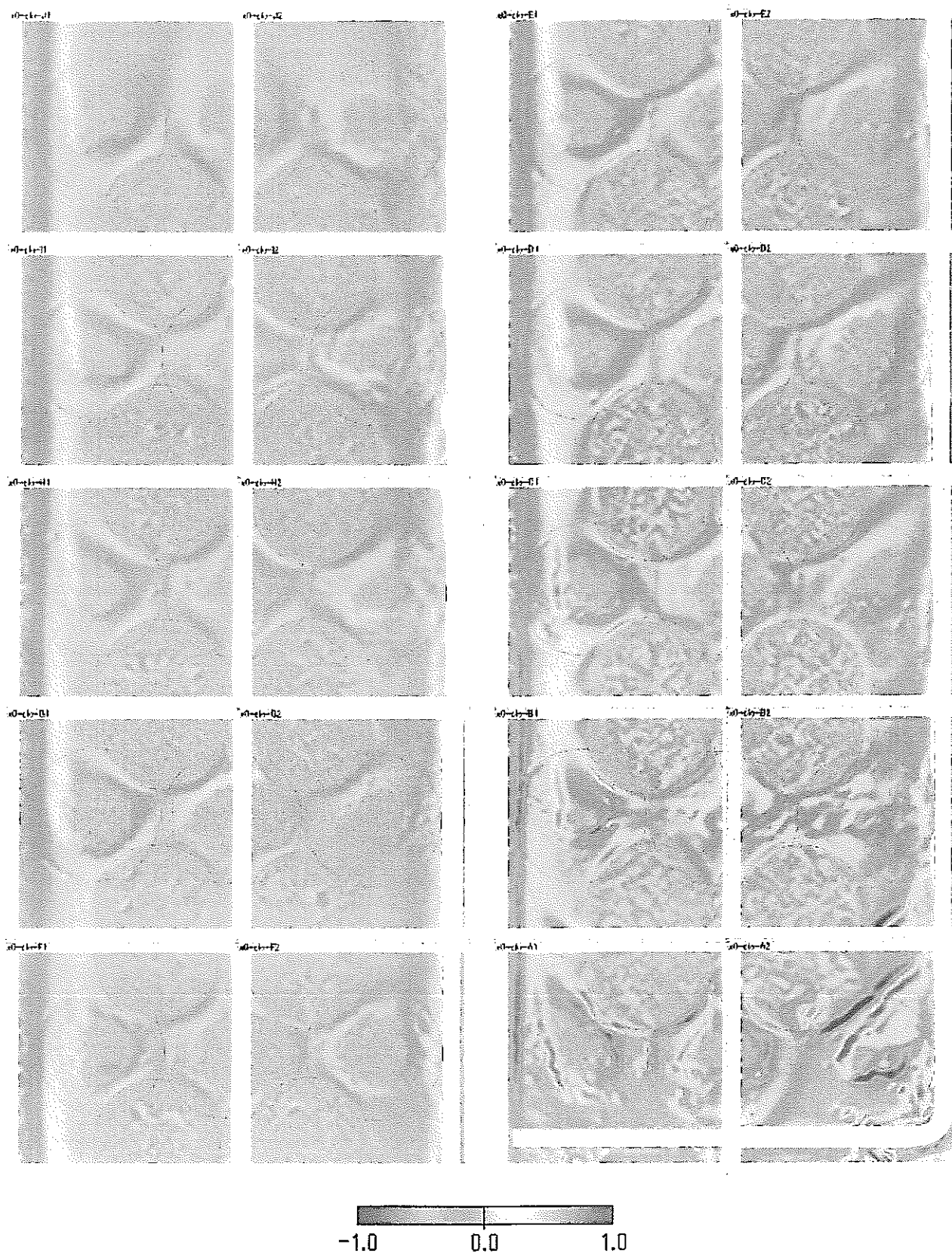


図 4-17 20mm 球・最密充填の場合の時間平均渦度分布 ($y^*=1.0$ 断面)

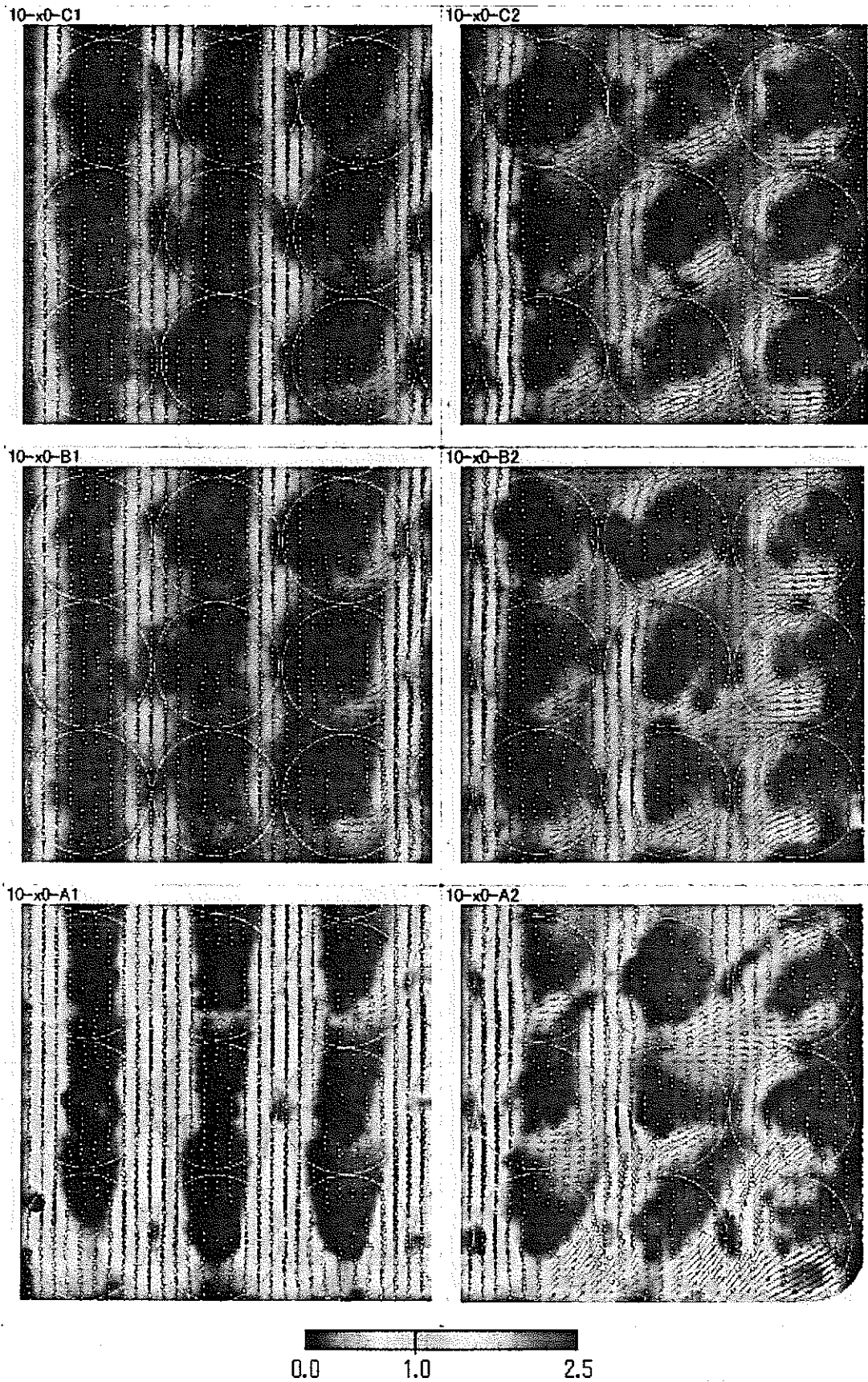


図 4-18.1 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層入口部)

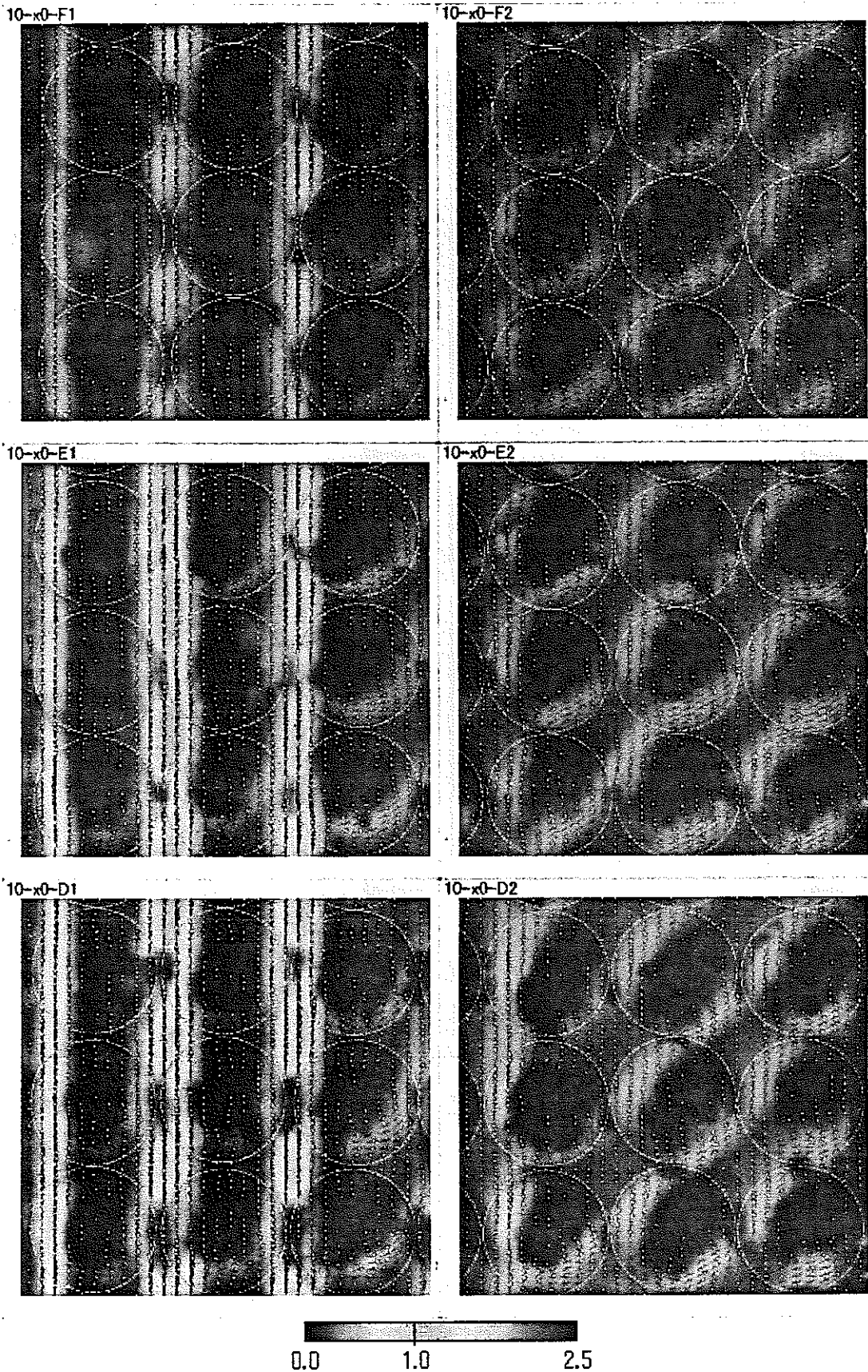


図 4-18.2 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層入口～中央部)

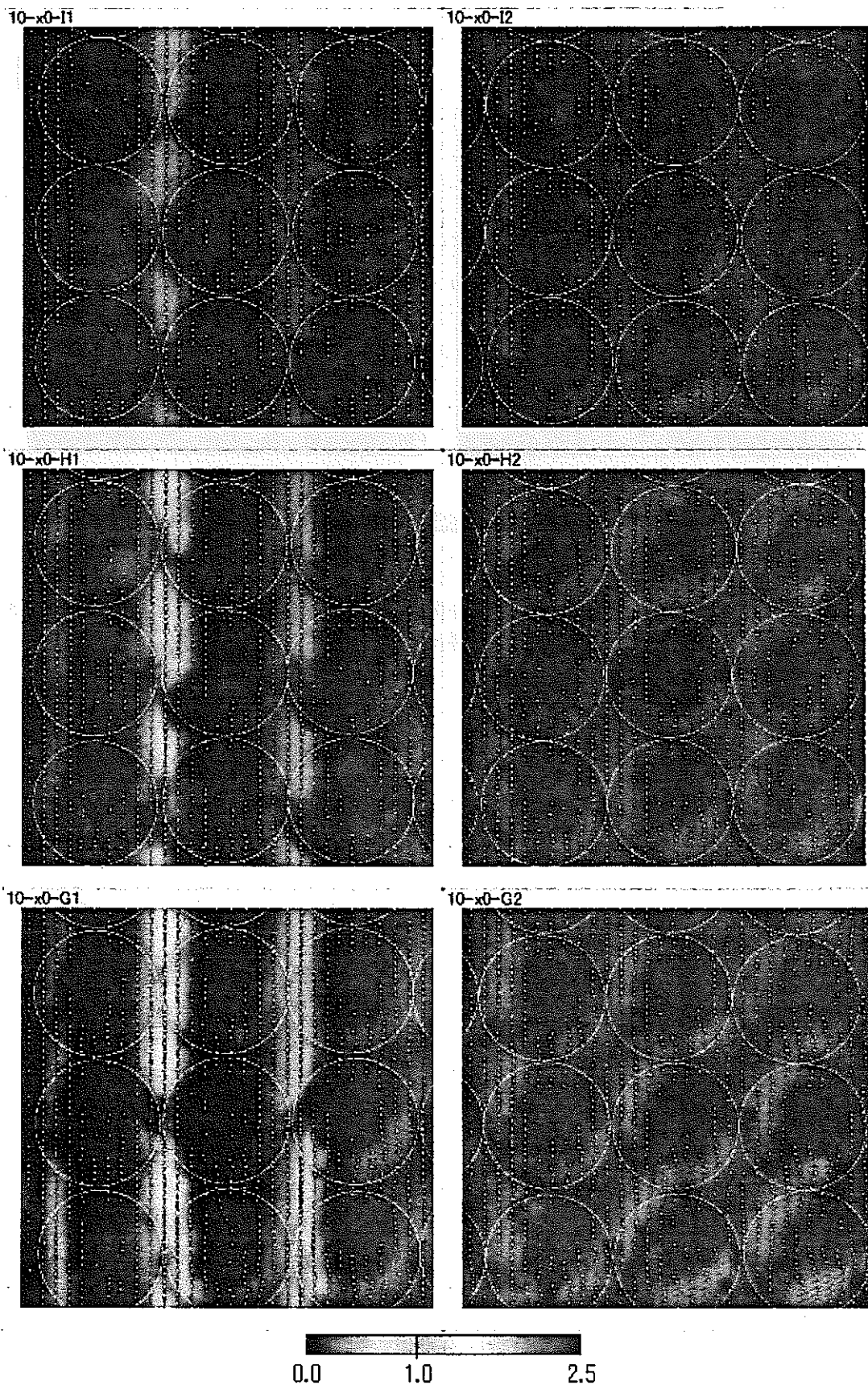


図 4-18.3 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層中央～出口部)

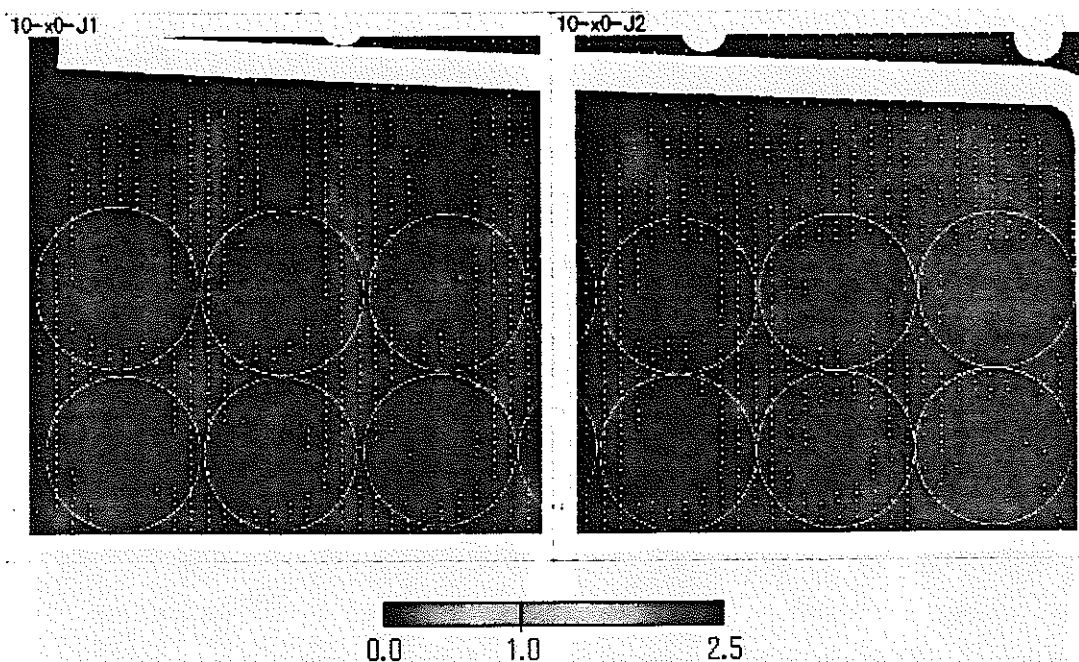
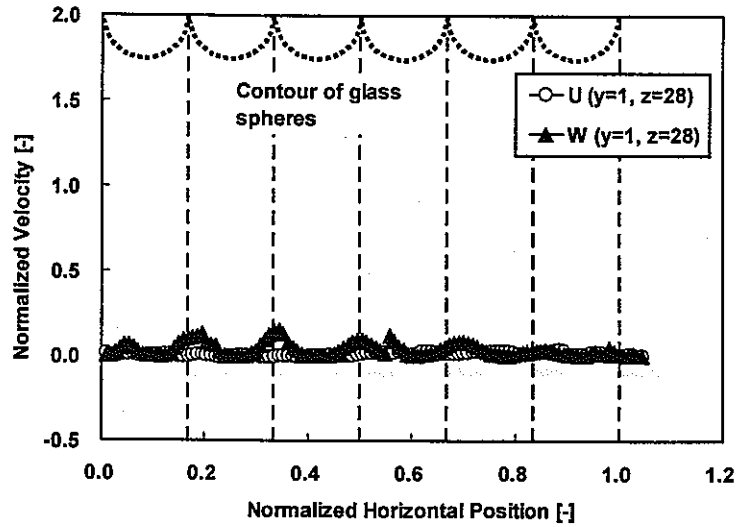
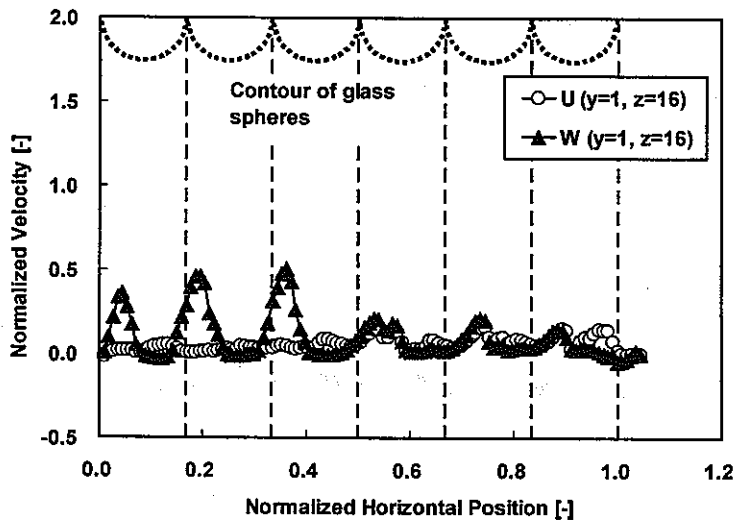


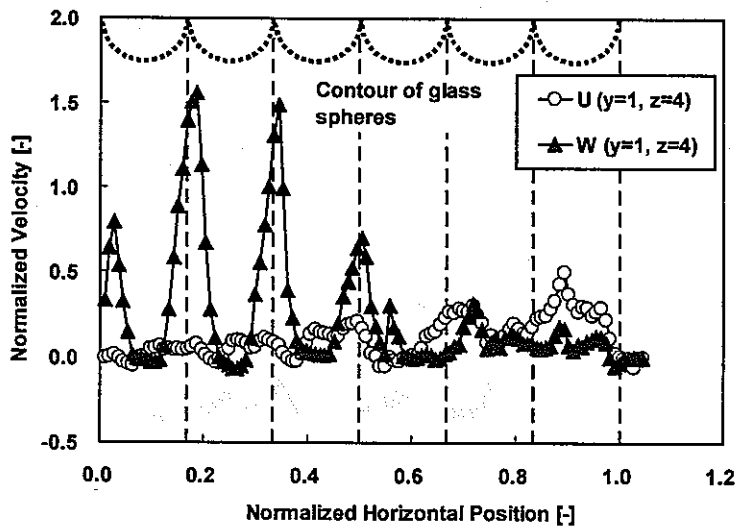
図 4-18.4 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層出口部)



(充填層出口部)

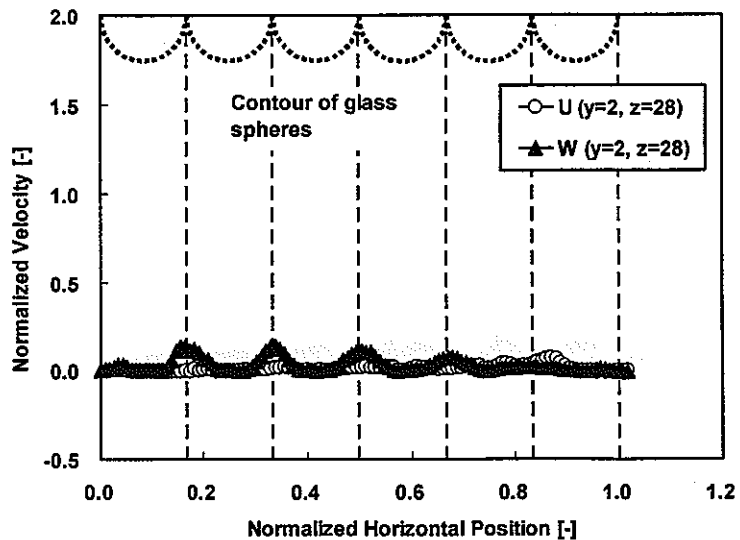


(充填層中央部)

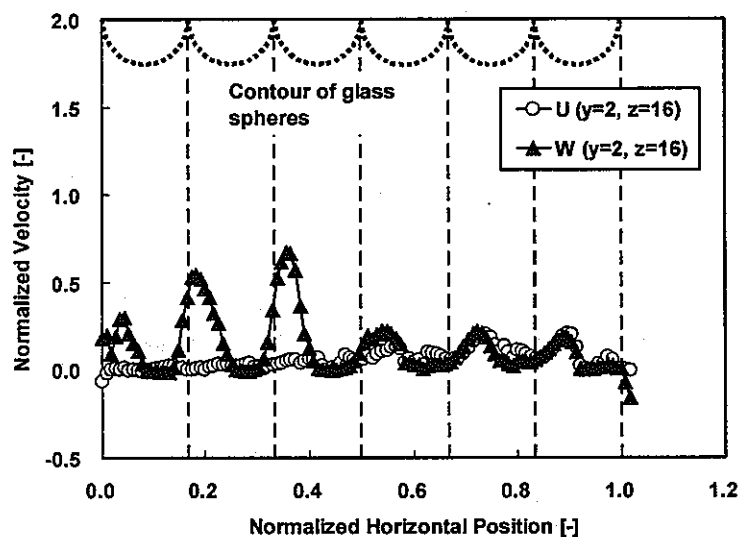


(充填層入口部)

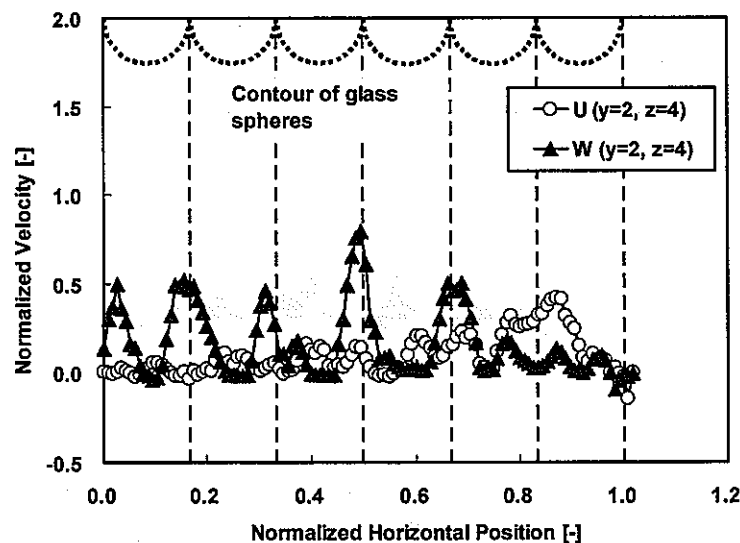
図 4-19 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.0$ 断面)



(充填層出口部)



(充填層中央部)



(充填層入口部)

図 4-20 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=2.0$ 断面)

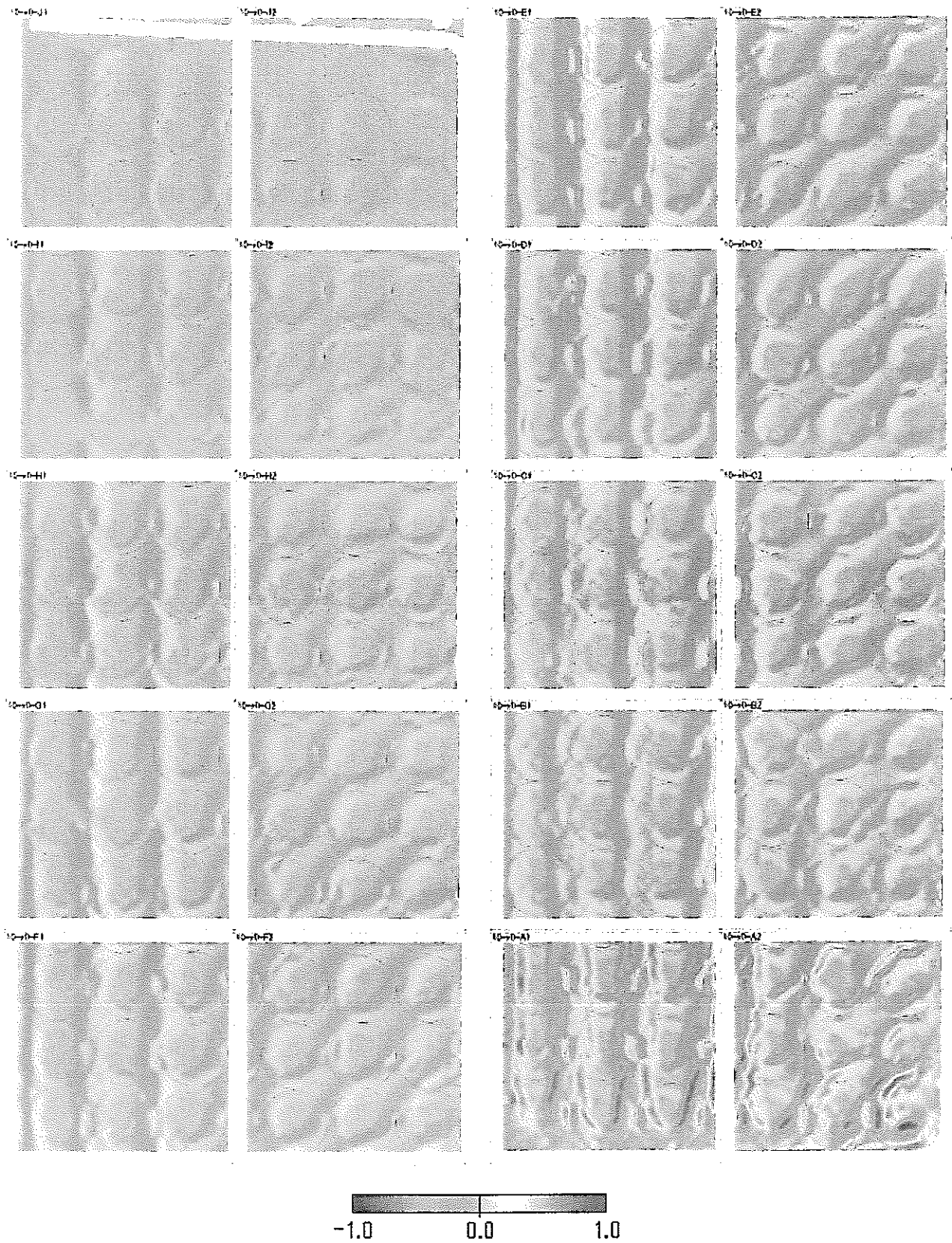


図 4-21 10mm 球・粗充填の場合の時間平均渦度分布 ($y^*=1.0$ 断面)

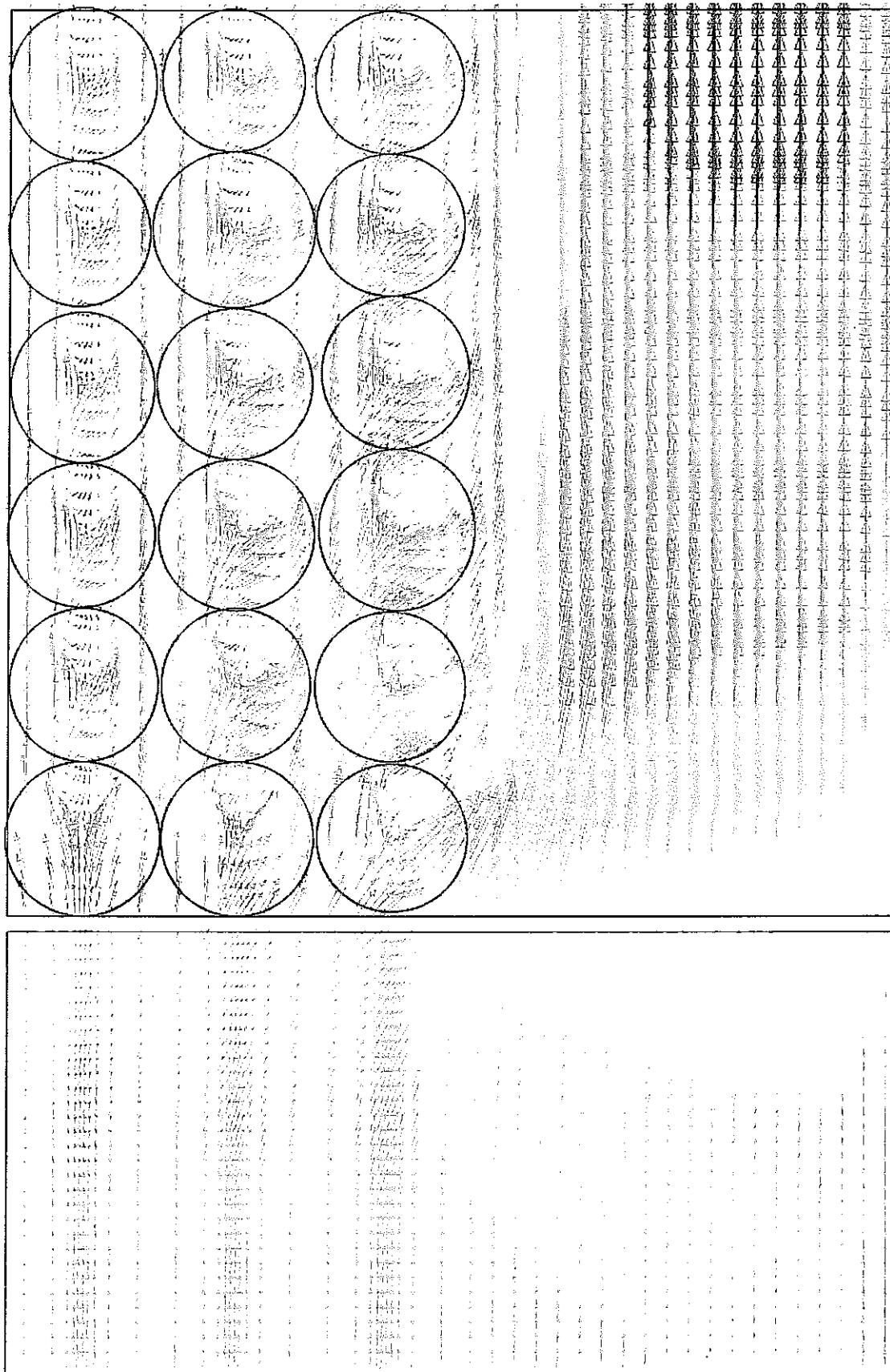


図 5-1 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層上流側～入口部)

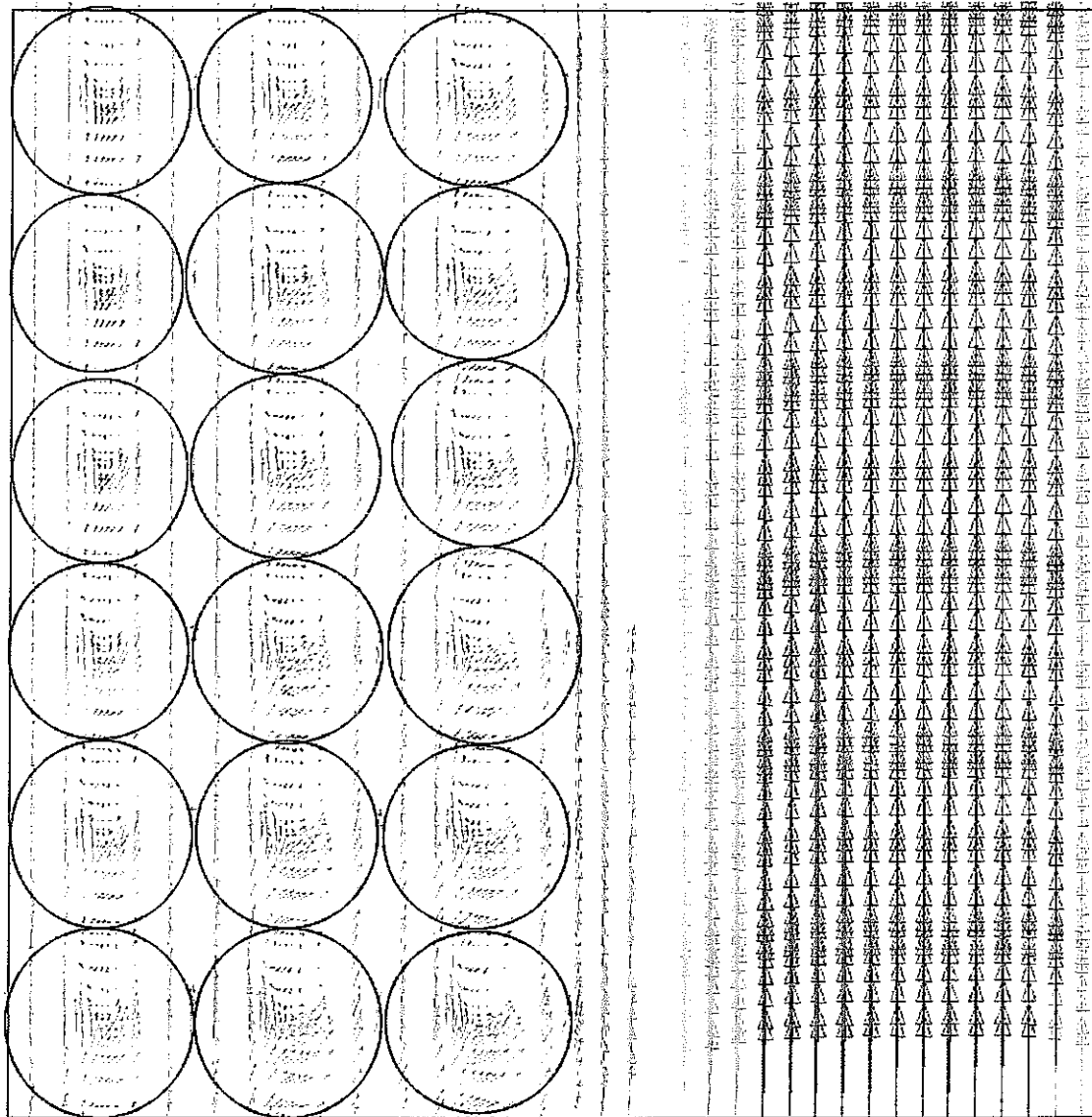


図 5-2 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層中央部)

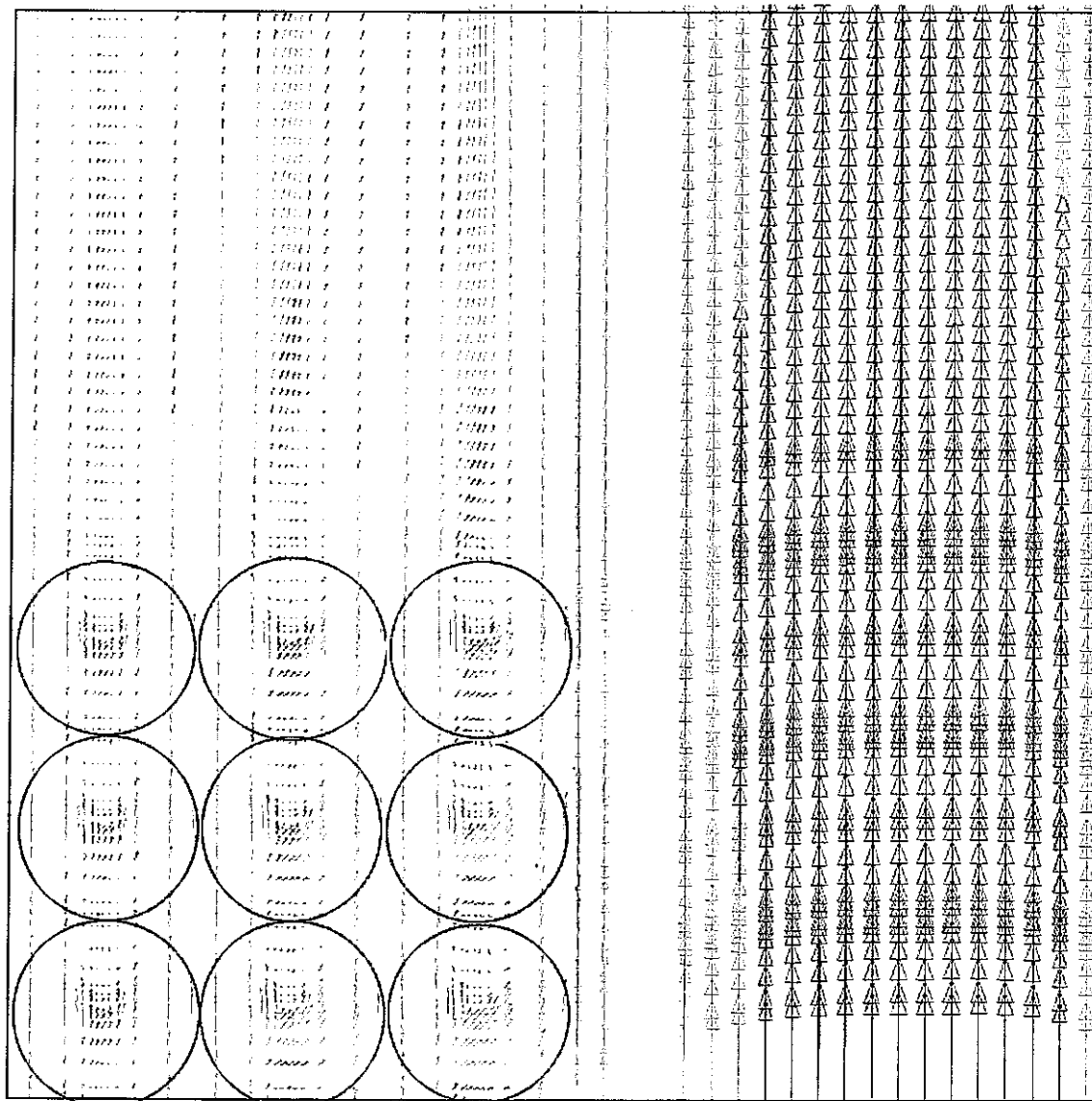


図 5-3 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層出口部～下流側)

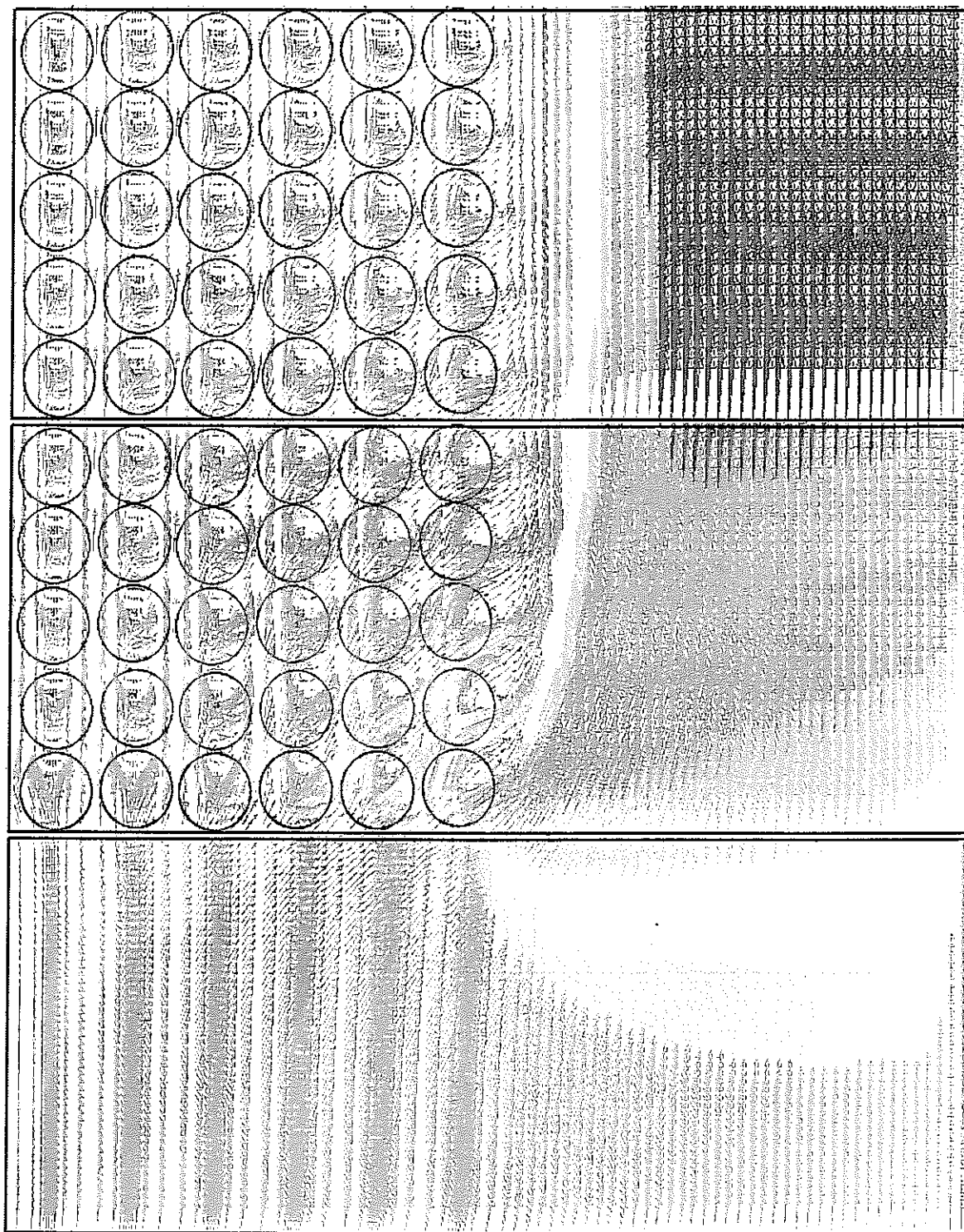
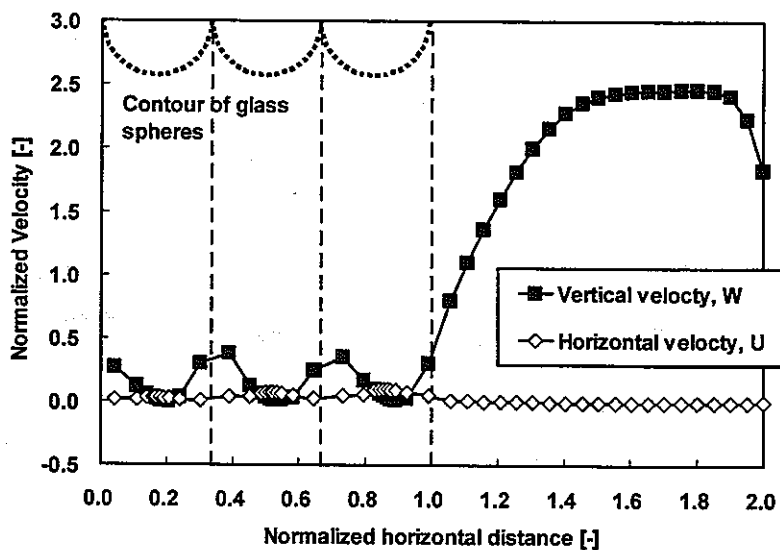
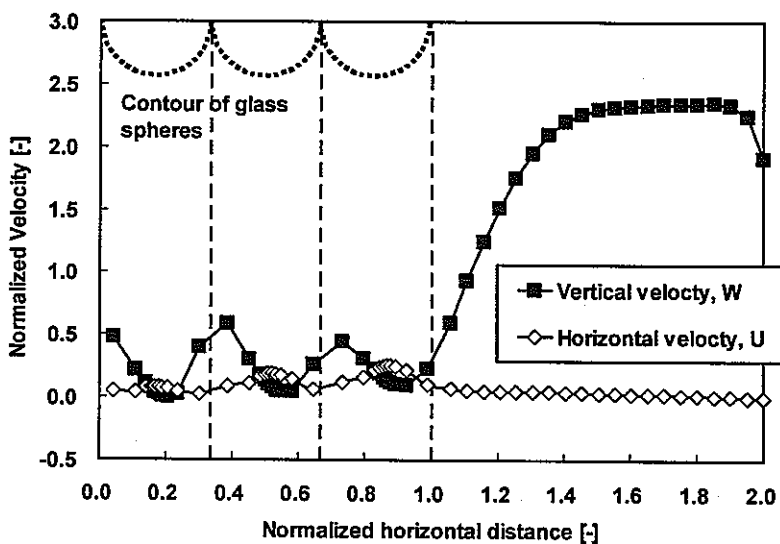


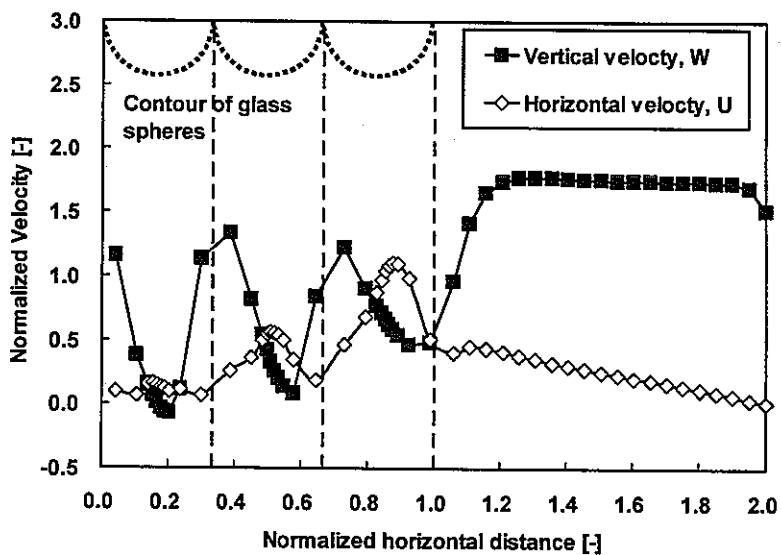
図 5-4 10mm 球・粗充填の場合の時間平均速度ベクトル分布 ($y^*=1.0$ 断面)
(充填層上流側～中央部)



(充填層出口部)



(充填層中央部)



(充填層入口部)

図 5-5 20mm 球・粗充填の場合の時間平均速度分布 ($y^*=1.0$ 断面)

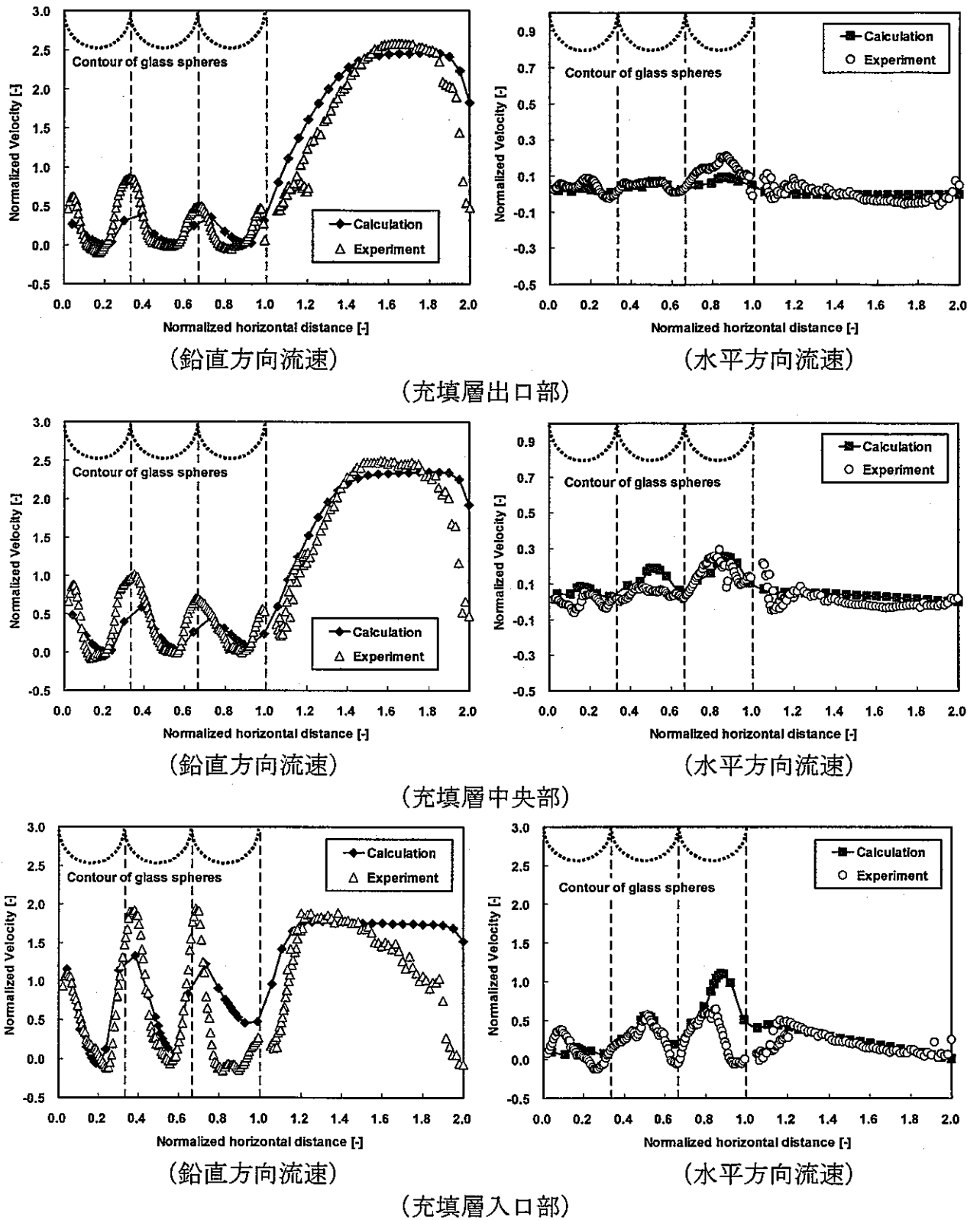


図 5-6 時間平均速度分布の解析結果と実験結果との比較
20mm 球・粗充填の場合 ($y^*=1.0$ 断面)

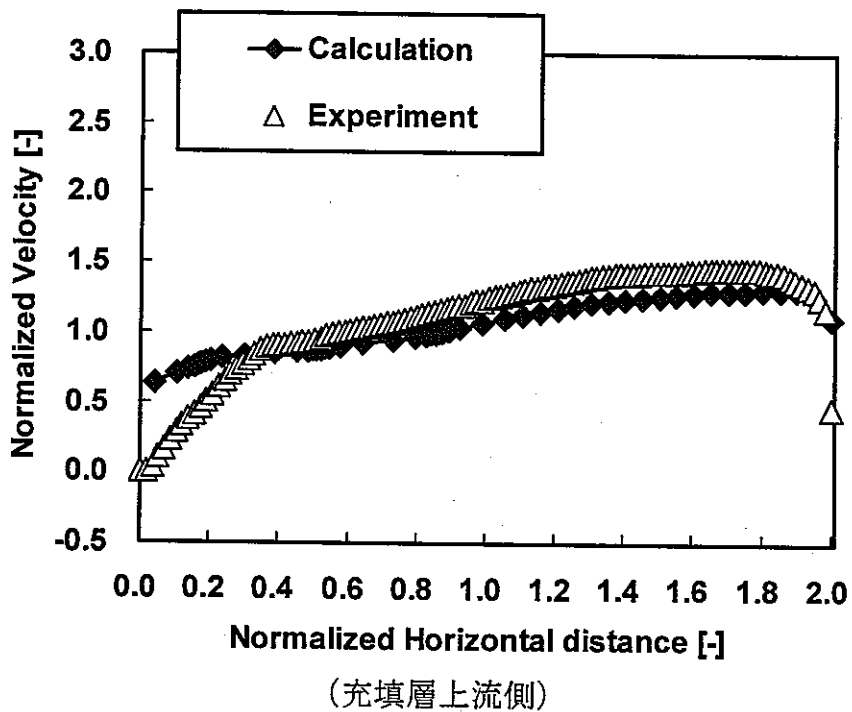
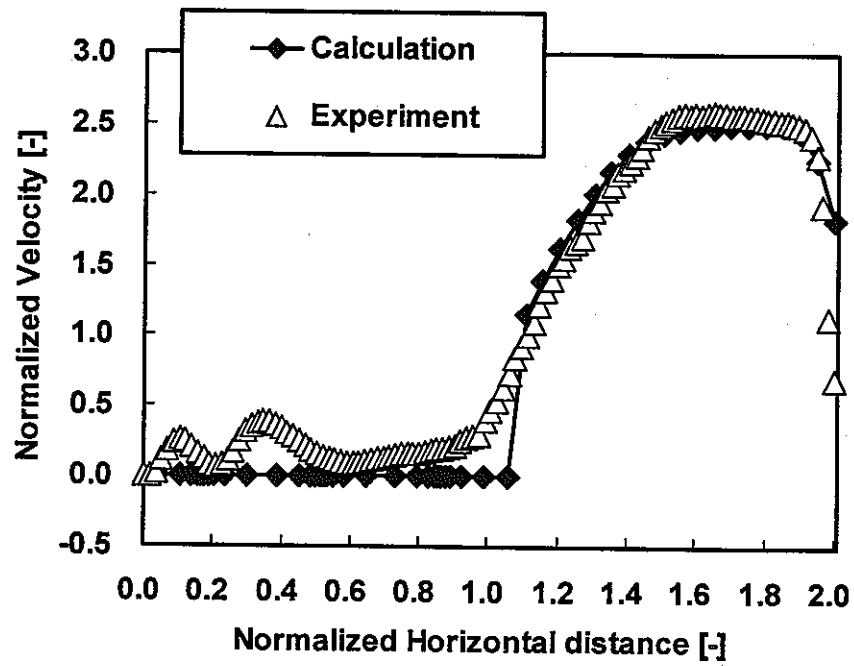


図 5-7 時間平均速度分布の解析結果と実験結果との比較
20mm 球・粗充填の場合 ($y^*=1.0$ 断面)