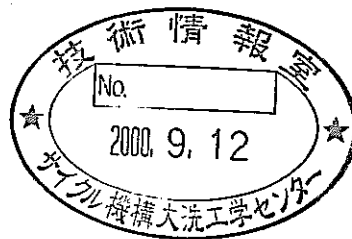


多孔質体内における熱流動現象に関する研究  
(平成11年度共同研究報告書)

2000年3月



核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター  
筑波大学 機能工学系

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
筑波大学 (University of Tsukuba)  
2000

共同研究報告書  
多孔質体内における熱流動現象に関する研究  
(平成11年度)

松井 剛一<sup>\*1</sup>, 文字 秀明<sup>\*1</sup>, 榊原 潤<sup>\*1</sup>  
田中 正暁<sup>\*2</sup>, 上出 英樹<sup>\*2</sup>

要 旨

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として実施している首題研究の3カ年のまとめである。本研究では、高速炉の局所閉塞事故を対象として、ポーラス状閉塞物内部の熱流動場に関する基礎実験研究を行った。実験では、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、粒子画像流速測定法 (PIV) による多孔質状閉塞内部の流動場の可視化手法を確立することを目的としている。Nd-YAG レーザーを光源とし、濃度 56.9 [wt%] の NaI 水溶液を用いてパイレックスガラス球の屈折率と一致させ、燃料集合体内の1つのサブチャンネルを模擬した簡易ループ試験装置および2つのサブチャンネルを模擬した試験装置の設計・製作を行い、閉塞物内部および周辺の流速測定実験を行った。撮影画像からノイズを除去する手法を適用し、粒子画像流速測定法によって定量的に正しい流速ベクトル分布を得ることができた。さらに、2サブチャンネル体系での試験では、球体を正方格子状に充填して模擬した閉塞物内部および周辺の流動場についての知見を得た。レーザー誘起蛍光法 (LIF) により閉塞物内部の温度分布を2次元的に計測する手法について検討し、NaI 水溶液中での適用性を確認した。簡易ループ試験装置を改造して非等温場の実験を行い、閉塞物内部の熱流動場に関する知見を得ることが出来た。また、解析手法の開発を目的として実験解析を実施した。その結果、PIV および LIF による実験結果と整合性のある解析結果を得ると共に、閉塞物内外の流動場の特性について把握することができた。現在、サイクル機構で行っているポーラスボディモデルを使用した閉塞部を含む流路内の詳細解析手法に適用しているメッシュ分割手法が有効であることが分かった。

---

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 ナトリウム・安全工学試験部 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 ナトリウム・安全工学試験部 原子炉工学グループ

## Study on thermal-hydraulic phenomena in porous media ( Summarized report from 1997 Apr. to 2000 Mar. )

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

### Abstract

This study deals with thermal-hydraulic phenomena in a porous blockage of a Fast Breeder Reactor. When foreign substances flow into the fuel subassembly with wire spacer, they would choke up the sub-channel and form a porous blockage. The objective of this study is to clarify the thermal-hydraulic phenomena in porous media and to develop the analytical method to predict the thermal-hydraulic field, deciding the maximum temperature on the fuel pin surface.

This study is performed in cooperation with University of Tsukuba and Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) from November 1997 to March 2000. This report describes the results for three years from April 1997 to March 2000.

The visualization method using NaI solution as working fluid and Pyrex glass as structure was applicable to the porous media flow. When the concentration of NaI is 56.9 [wt%] in the solution, the refraction-rate corresponds to that of the Pyrex glass. The experiments to measure the velocity field inside and outside the blockage with Particle Image Velocimetry (PIV) analysis and Laser Doppler Velocimetry (LDV) were conducted. Moreover, we tried to measure the fluid temperature inside the blockage in the NaI solution, using Laser Induced Fluorescence (LIF) method. We checked the relation between the brightness of the fluorescence and solution temperature. And then, we revealed that the LIF method could be used even in the NaI solution. We also conducted the numerical analysis for the experiments. We confirmed that the calculation using the porous body model is applicable to the analysis of the flow behavior around the porous blockage.

---

\* Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba.

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

## 目 次

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1. はじめに                | 1  |
| 2. 試験体概要               | 4  |
| 2. 1 テスト部              | 4  |
| 2. 2 多孔質状閉塞物           | 4  |
| 2. 3 2チャンネル体系試験ループ     | 5  |
| 2. 4 簡易ループ             | 5  |
| 3. 屈折率調整実験             | 11 |
| 3. 1 水溶液濃度と屈折率         | 11 |
| 3. 2 実験方法              | 11 |
| 3. 3 実験結果              | 11 |
| 4. 簡易ループによる予備実験        | 17 |
| 4. 1 流速分布測定試験          | 17 |
| 4. 2 流況可視化実験           | 17 |
| 4. 2. 1 システム構成         | 17 |
| 4. 2. 2 実験方法           | 17 |
| 4. 2. 3 トレーサ粒子         | 18 |
| 4. 3 実験結果              | 18 |
| 4. 3. 1 ノイズ除去          | 18 |
| 4. 3. 2 解析結果の比較        | 18 |
| 4. 3. 3 空隙内部の流動場       | 20 |
| 5. 閉塞物を含むチャンネル内流れ      | 32 |
| 5. 1 実験条件              | 32 |
| 5. 2 閉塞物内部の流動場         | 32 |
| 5. 2. 1 時間平均流速ベクトル分布   | 32 |
| 5. 2. 2 流速ベクトルの流れ方向の変動 | 33 |
| 5. 2. 3 時間平均渦度分布       | 33 |
| 5. 3 閉塞物周辺の流動場         | 34 |
| 6. 閉塞物内部の温度場計測         | 49 |
| 6. 1 レーザ誘起蛍光法          | 49 |
| 6. 2 温度校正実験            | 50 |
| 6. 3 温度計測に伴う不確かさ       | 51 |
| 6. 4 温度場計測実験           | 52 |
| 7. 解析手法の開発             | 65 |
| 7. 1 解析コード概要           | 65 |
| 7. 2 簡易ループを対象とした実験解析   | 65 |
| 7. 2. 1 等温条件での解析       | 65 |
| 7. 2. 2 非等温条件での解析      | 66 |

|         |                    |    |
|---------|--------------------|----|
| 7. 3    | 2チャンネル体系を対象とした実験解析 | 67 |
| 7. 3. 1 | 解析条件               | 67 |
| 7. 3. 2 | 解析結果               | 67 |
| 8.      | まとめ                | 81 |
|         | 謝 辞                | 83 |
|         | 参考文献               | 84 |

図表リスト

- 表 2.1 実機条件との比較 (炉心燃料集合体内中心サブチャンネル)
- 表 2.2 実験パラメータ
- 表 3.1 従来の研究および実験条件
- 表 3.2 図 3.3 中の近似曲線の各係数
- 表 3.3 NaI 水溶液の屈折率変化
- 表 4.1 撮影条件および PIV 条件
- 表 5.1 実験条件 (PIV)
- 表 6.1 カメラ仕様
- 表 6.2 光学フィルター仕様
- 表 6.3 温度計測における各要素数, 精密度, 感度係数
- 表 7.1 濃度 56.9wt% の NaI 物性値

- 図 1 実機で想定される閉塞形態
- 図 2.1 2チャンネル体系テスト部概略図
- 図 2.2 縦置き重力落下式ループ概念図
- 図 2.3 実験装置ループ構成図
- 図 2.4 簡易ループ概略図
- 図 2.5 テスト部概略図
- 図 3.1 実験装置概略図
- 図 3.2 レーザ入射位置とずれ位置との関係
- 図 3.3 ずれ位置と NaI 水溶液濃度との関係
- 図 3.4 パイレックスガラスの入射光波長と屈折率との関係
- 図 3.5 NaI 水溶液濃度と屈折率との関係
- 図 4.1 LDV 測定位置
- 図 4.2 テスト部内流速分布
- 図 4.3 測定系概略図
- 図 4.4 レーザパルスと画像撮影のタイミング
- 図 4.5 画像撮影位置
- 図 4.6 測定部断面図
- 図 4.7 最小輝度によるノイズ除去手法の例
- 図 4.8 時間平均ベクトル分布に対するノイズ除去の効果
- 図 4.9 時間平均主流方向流速分布
- 図 4.10 時間平均ベクトル分布
- 図 4.11 時間平均渦度分布
- 図 4.12 時間平均せん断
- 図 5.1 撮影条件図
- 図 5.2-1 閉塞部の撮影図
- 図 5.2-2 健全流路の撮影図
- 図 5.3-1 時間平均ベクトル分布 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )
- 図 5.3-2 時間平均ベクトル分布 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )
- 図 5.3-3 時間平均ベクトル分布 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )
- 図 5.4-1 合成ベクトルの流れ方向変動 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )
- 図 5.4-2 合成ベクトルの流れ方向変動 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )

- 図 5.4-3 合成ベクトルの流れ方向変動 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )
- 図 5.5 時間平均渦度分布 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )
- 図 5.6 時間平均ベクトル分布 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )
- 図 5.7 PIV による健全側平均速度分布
- 図 6.1 ローダミン B の吸収および発光スペクトル
- 図 6.2 LIF 予備実験装置
- 図 6.3 実験の模式図
- 図 6.4 ローダミン B の蛍光による画像
- 図 6.5 温度を変化させたときの蛍光発光強度の例
- 図 6.6 水溶液温度  $25[^\circ C]$ での輝度値
- 図 6.7 水溶液温度  $25[^\circ C]$ を参照温度とした場合の温度と輝度比の関係
- 図 6.8 温度校正曲線
- 図 6.9 感度係数 (校正曲線の不確かさ)
- 図 6.10 簡易ループ用ヒータ設置試験部の概略
- 図 6.11 オフセット画像
- 図 6.12 レファレンス画像 (水温一定)
- 図 6.13 瞬時の計測画像
- 図 6.14 時間平均温度分布
- 図 7.1 CASCADE による実験解析結果
- 図 7.2 LDV, PIV, CASCADE 解析結果の比較
- 図 7.3 解析結果と実験結果での温度分布の比較
- 図 7.4-1 2チャンネル体系計算格子配置 (詳細メッシュ)
- 図 7.4-2 2チャンネル体系計算格子配置 (単純矩形メッシュ)
- 図 7.5-1 2チャンネル体系での等温場解析
- 図 7.5-2 2チャンネル体系での等温場解析
- 図 7.6 格子配置による計算結果の比較 (白枠が閉塞領域)
- 図 7.7 健全流路内の鉛直方向流速分布



## 1. はじめに

高速炉の特徴である炉心燃料集合体内の稠密なピンバンドル形状と高い出力密度に着目した安全評価のための事故想定として、局所閉塞事故と呼ばれる事象がある<sup>[1]</sup>。これは、集合体内に異物が混入し、流路を閉塞して冷却性が阻害され、燃料ピンの健全性に影響を及ぼすことを想定するものである。図 1 に示すようにワイヤスペース型燃料集合体において最も可能性の高い閉塞形態は、直径 1~3mm 程度の微少な異物の集積による多孔質状閉塞物であると考えられている。

本研究は、核燃料サイクル開発機構（以下「サイクル機構」という）と筑波大学との共同研究であり、本報告書は平成 9 年度から 3 年間の計画で実施している首題研究のうち、平成 11 年度の成果と 3 カ年のまとめである。

本研究では、多孔質状閉塞物内の熱流動現象に着目し、燃料ピン表面温度を決定づける閉塞物内の熱輸送現象の解明と、その評価手法の構築を目的とした基礎的研究を行ってきた<sup>[2,3]</sup>。多孔質状閉塞物を構成する粒子をガラス球でモデル化し、可視化により閉塞物内部および周辺の流動場の計測を行った。

平成 10 年度までに、濃度を調整して屈折率をパイレックスガラス球に一致させたヨウ化ナトリウム水溶液（以下、NaI 水溶液）を作動流体とすれば、多孔質体内の流れの可視化計測が可能であることを確認した。また、実験条件を規定する上で重要な物性値となる NaI 水溶液の密度、粘度および熱伝導率について測定を行った。文献値および従来からの知見から、NaI 水溶液の屈折率、水溶液温度および濃度の関係を検討し、本実験環境におけるトレーサ粒子の実際の位置と画像上での位置の誤差を評価した。予備実験として矩形流路にパイレックスガラス球を詰めた体系で、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry: PIV)<sup>[4]</sup>により、球充填層内空隙部の流速分布測定を行った。次に、炉心燃料集合体内の流動場をモデル化するに当たり、多孔質状閉塞物によって閉塞したサブチャンネルと、それに隣接する閉塞物のない健全サブチャンネルの 2 つの流路を矩形流路で模擬した 2 チャンネル体系試験装置を製作した。予備試験と同様にパイレックスガラス球を充填することにより多孔質状閉塞物を模擬し、NaI 水溶液を作動流体とする可視化手法を適用して PIV により閉塞物内部および周辺の流速分布を測定した。また、水を作動流体として、レーザ・ドップラ流速計 (Laser Doppler Velocimetry: LDV) により閉塞物周辺およびテスト部入口周辺の流速を測定した。

平成 11 年度は、可視化画像に写り込んだ構造物（固定物）からの反射光をノイズとして除去する方法を予備実験および 2 チャンネル体系での試験に適用し、ノイズ除去方法の有効性について検討すると共に、LDV を用いて測定した流速と PIV による結果とを比較して定量的な評価を行った。また、ノイズ除去を行った画像を用いて PIV を実施し、閉塞物内部の流速場を求め、閉塞物内部の流動場について考察を行った。また、非等温場での可視化手法について検討するため、閉塞物を含む流動場へのレーザ誘起蛍光法<sup>[5]</sup> (Laser Induced Fluorescence: LIF) による 2 次元温度計測手法の適用性を検討し、温度計測の不確かさ解析を実施した。蛍光染料ローダミン B の NaI 中での温度—蛍光輝度特性を調べ、予備実験で使用した矩形流路にパイレックスガラス球を詰めた体系で、流路側面にヒータを取り付け、LIF により閉塞物内部の流体の温度分布を計測した。

PIV による流速場測定および LIF による温度測定結果の妥当性を確認すると共に物理現象の把握を目的として実験解析を実施した。計算にはサイクル機構所有の解析

コード CASCADE<sup>[16]</sup>を用いて行った。さらに、サイクル機構では、閉塞物を含む燃料集合体内の熱流動場を詳細に解く手法を開発しており<sup>[6]</sup>、閉塞物内部および周辺の流速分布を知ることができる2チャンネル体系の本試験結果を対象として解析を行うことにより、解析手法の妥当性について検討した。

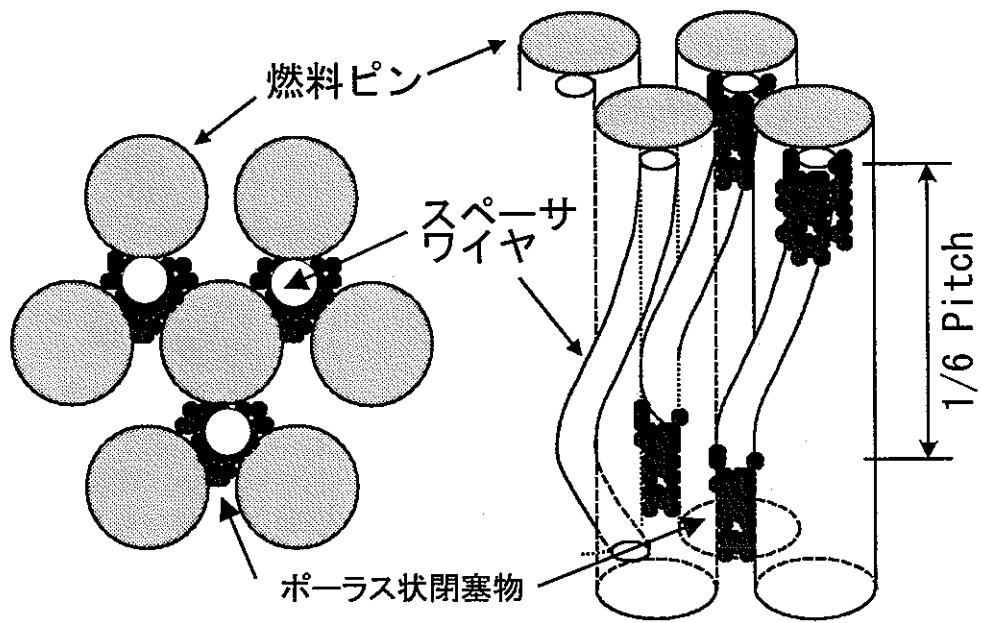


図 1 実機で想定される閉塞形態

## 2. 試験体概要

### 2. 1 テスト部

実験装置は、大型高速炉（以下、実機）における定格時のレイノルズ（Re）数を保存するという考えに基づき設計を行った。ここでは、実機の炉心燃料集合体における定格条件時の Re 数を基準としている。表 2.1 に縮尺比を決定する根拠となった境界条件について実機と試験体とを比較して示す。

本実験では基礎研究という立場から、炉心燃料集合体内の多孔質状閉塞物によって閉塞したサブチャンネルと、それに隣接する閉塞物のない健全サブチャンネルの 2 つのみを単純な矩形断面を持つ鉛直流路で模擬している。図 2.1 にテスト部の概略図を示す。テスト部は短辺 61[mm]、長辺 122[mm]の長方形断面となっており、高さは 2[m]である。比較的高価な薬品である NaI 水溶液の使用量を出来るだけ少なくし、取り扱い易くするためには、小さなガラス球を用意して閉塞物をモデル化（低縮尺率）しなければならない。しかし、球間の空隙を小さくすると、直径の揃った小さなガラス球の製作および画像解析による計測（空間分解能の問題など）が難しくなる。そこで、ガラス球の製作と計測の容易さを考慮し、閉塞部を構成する球直径を実機で想定されている閉塞物構成粒子の大きさ（直径 1~3[mm]程度）の 20 倍（直径 20[mm]）とした。また、テスト部の流路についても実機サブチャンネルの水力等価直径の 20 倍となるように形状を定めた。可視化計測を行うため、テスト部は流路内部の流体が観測できるように透明アクリル樹脂で製作した。閉塞物を模擬した球充填部は、中央のブロックに設置され、ガラス球が試験部から取り外せるように、テスト部側面の一部分を脱着可能な構造とした。

### 2. 2 多孔質状閉塞物

閉塞物の構成粒子として球状粒子を選択し、閉塞物内部の流況を可視化観測するため、第 3 章で示すように透明なパイレックスガラス球を用いた。球径 20[mm]のパイレックスガラス球を、一段あたり 3×3 個の正方格子状に並べて積み重ね、多孔質状閉塞を模擬した（図 2.1 参照）。ガラス球間をエポキシ系接着剤で結合し固定した。この場合の空隙率  $\varepsilon$  は 47.64%（粗充填）である。実機で想定されている閉塞物の軸方向の高さは、同一サブチャンネル内にスペーサワイヤが存在する軸長として、図 1 に示すようにワイヤ巻きピッチの 1/6 の長さ 33[mm]（=200/6 [mm]）となるが、試験装置の制約から軸方向には実機想定（33[mm]）の約 10 倍の 300[mm]とした。この場合の高さは、ガラス球で 15 段に相当し、多孔質閉塞物内部の流れを十分模擬できると判断した。模擬閉塞物は、テスト部入口より 600[mm]から 900[mm]の位置に設置し、図 2.1 に示すようにステンレス製の針金（ $\phi$ 3[mm]）を用いて閉塞物が下流へ流されないように固定した。針金は流れ方向およびそれと垂直な水平方向に格子状に組まれ、ガラス球の頂点で接するように配置されている（図 2.1 参照）。ワイヤの存在する箇所は閉塞物下端から 30[mm]（2 段目）、90[mm]（5 段目）、150[mm]（8 段目）、210[mm]（11 段目）、270[mm]（29 段目）に配置されている（図 5.8 のベクトル図の縦軸で 0 となる箇所にワイヤが存在）。

## 2. 3 2チャンネル体系試験ループ

図 2.2 に示すように、2チャンネル体系試験で用いる実験装置は、ポンプ脈動の影響を避けるため、縦置き重力落下式ループとした。実験装置は高さ 3.5[m]、幅 1.5[m]、奥行き 1.0[m]の架台中に設置されている。図 2.3 に実験装置の概略図を示す。実験ループは、①オーバーフローライン、②汲み上げライン、③テストライン、④ヘッドタンク、⑤流量計、⑥整流部、⑦入口ノズル、⑧試験体、⑨出口ノズル、⑩ダンプタンク、⑪汲み上げポンプ、⑫ストレージタンク等から構成される。可視化実験の際に、NaI 水溶液を使用するため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、各バルブは大口径（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。

ポンプによって汲み上げられた作動流体は、ヘッドタンクでオーバーフローし、常に液位を一定に保ちながら重力落下によって試験部に流れ込む。流量制御はポンプ吐出側と試験部出口側のバルブを用いて行い、電磁流量計⑤で流量が測定される。試験部最上部（逆U字管部）には空気抜き用のゴムチューブのラインと仕切弁が設けてあり、実験中はこのライン内も NaI 水溶液で満たされダンプタンクへの戻りラインとして利用できる。このラインについているバルブを利用して流量の微調整が可能となる。

## 2. 4 簡易ループ

2チャンネル体系での本試験の他に、計測手法の確立を目的とした予備実験を行うため、図 2.4 に示す簡易ループを製作した。作動流体である NaI 水溶液は、ポンプ①にてタンク⑧から汲み上げ、流量調節弁③、⑤、電磁流量計⑥を経てテスト部⑦へ流入する。図 2.5 にテスト部⑦の概略図を示す。テスト部はアクリル製で、流路内の流れの可視化が容易な構造となっている。閉塞物は本試験（2チャンネル体系）で使用するパイレックスガラス球と同一寸法の直径 20[mm]のガラス球 27 個を、正方格子状（3×3×3）に充填して模擬した。作動流体は円形断面の配管から矩形断面（61[mm]×61[mm]）のテスト部に流れ込むため、テスト部入口において拡流が生じる。球充填層突入時の流速分布を一様流に近い状態にするため、LDV により流速分布を測定して確認し、球充填層中心部をテスト部入口より 300[mm]下流側に配置した。球は接着剤でそれぞれの球間を点接着して固定した。

表 2.1 実機条件との比較 (炉心燃料集合体内中心サブチャンネル)

|         | 実機 (700[K])  | 実験装置 (300 [K])  |
|---------|--|---|
| 流体      | ナトリウム  | 水   |
| 水力等価直径  | 3.039[mm]  | 61.0[mm] (20 倍モデル)  |
| 流入流量    | 0.0329[m <sup>3</sup> /s]<br>=27.9[kg/s] / 849[kg/m <sup>3</sup> ] | 5.88×10 <sup>-3</sup> [m <sup>3</sup> /s]<br>=353[L/min]= 21.2[m <sup>3</sup> /h] |
| 断面平均流速  | 5.92[m/s]  | 0.79[m/s]   |
| 動粘性係数   | 0.323×10 <sup>-6</sup> (Na) [m <sup>2</sup> /s]                    | 0.857×10 <sup>-6</sup> (水) [m <sup>2</sup> /s]                                    |
| レイノルズ数  | 5.6×10 <sup>4</sup>  | 5.6×10 <sup>4</sup>   |
| 燃料ピン径   | 8.5[mm]  | —   |
| ピンピッチ   | 9.65[mm]   | —   |
| 燃料ピン間距離 | 1.15[mm]   | —   |
| 流路断面積   | 5.56×10 <sup>-3</sup> [m <sup>2</sup> ]<br>(集合体内)                  | 7.442×10 <sup>-3</sup> [m <sup>2</sup> ]<br>(2 サブチャンネル)                           |

表 2.2 実験パラメータ

| 項目             | 条件                                |
|----------------|-----------------------------------|
| 試験体流入流量        | ~21.2m <sup>3</sup> /h (~0.79m/s) |
| ポロシティー         | 47.64% (粗充填)<br>25.95% (最密充填)     |
| 閉塞物構成粒子形状      | 等大球形粒子                            |
| ” 直径           | 20 [mm]                           |
| ” 材質<br>(熱伝導率) | パイレックスガラス<br>(1.474[W/m·K])       |

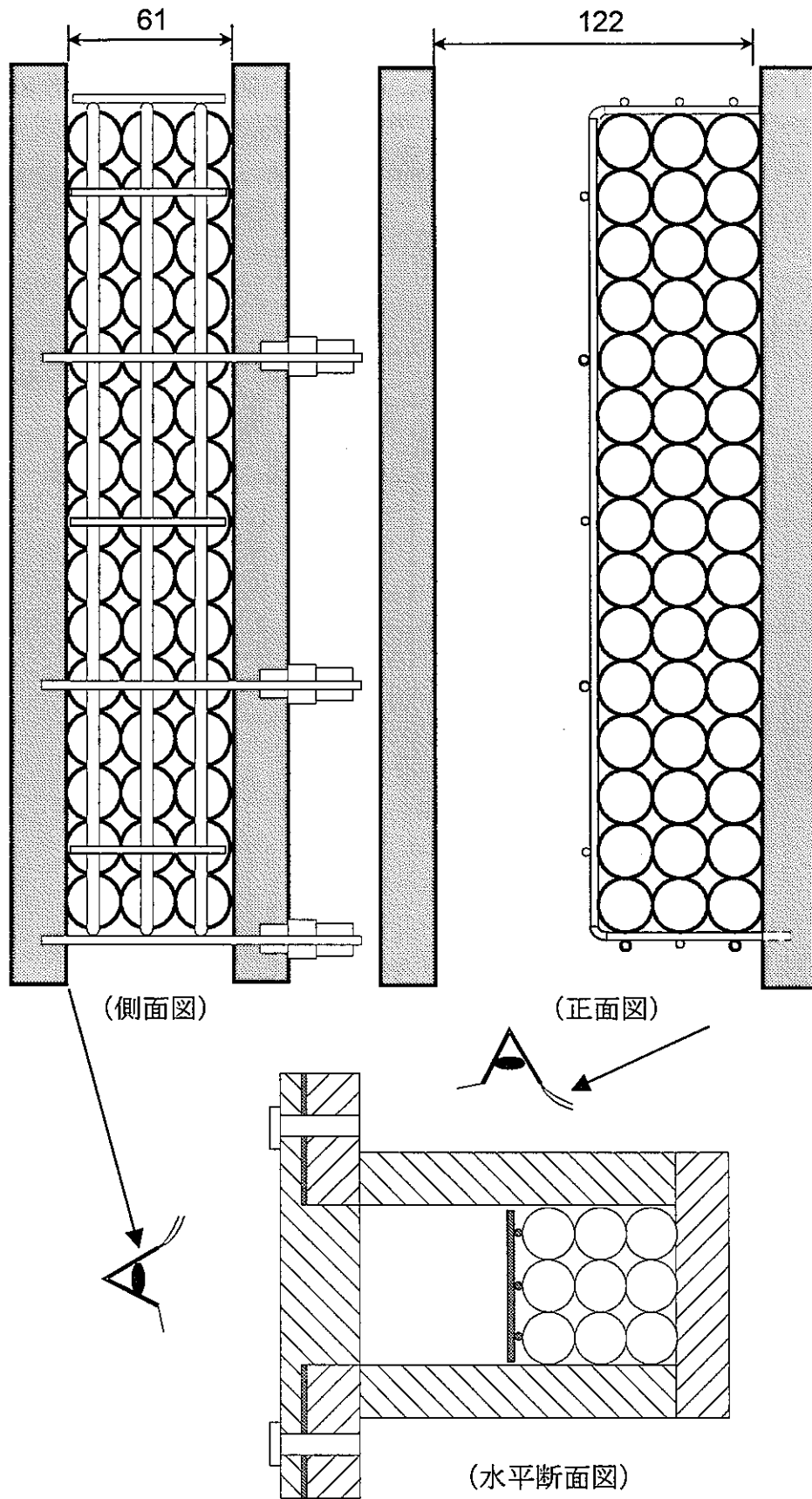


図 2.1 2チャンネル体系テスト部概略図

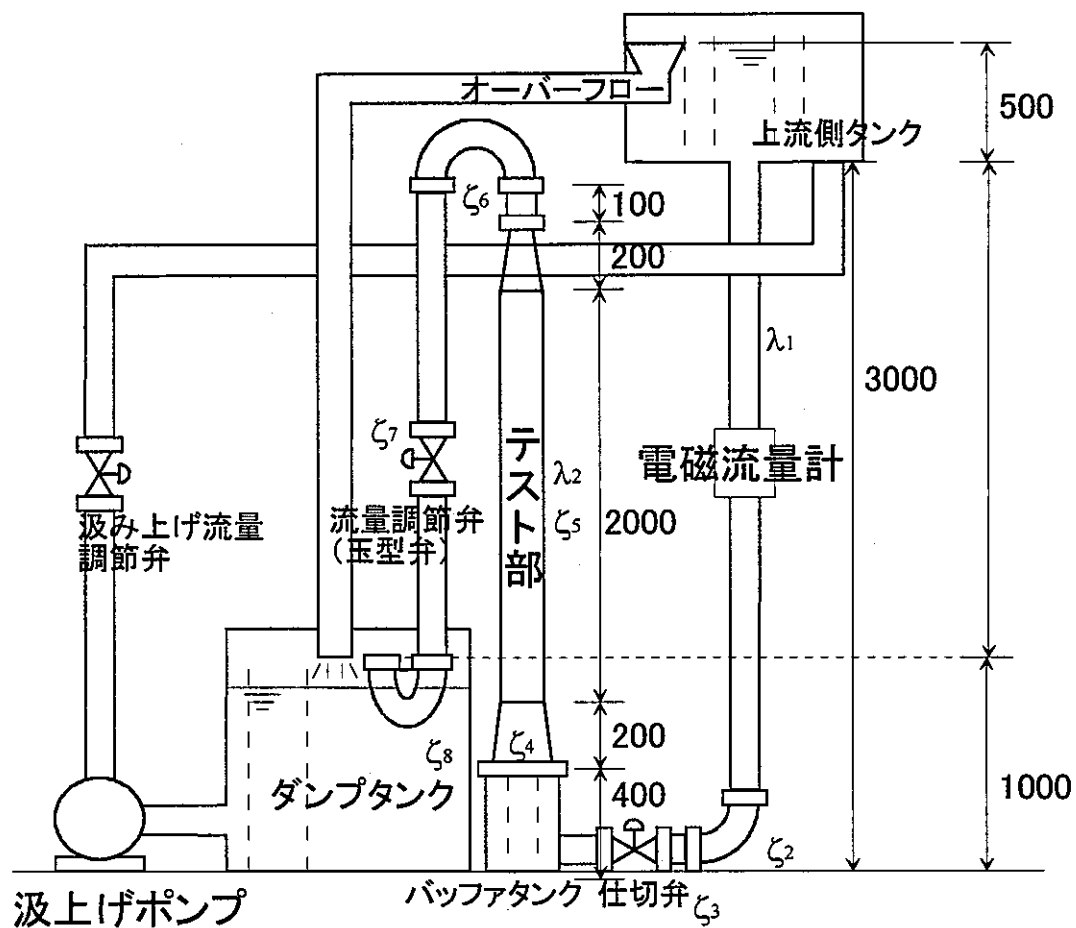
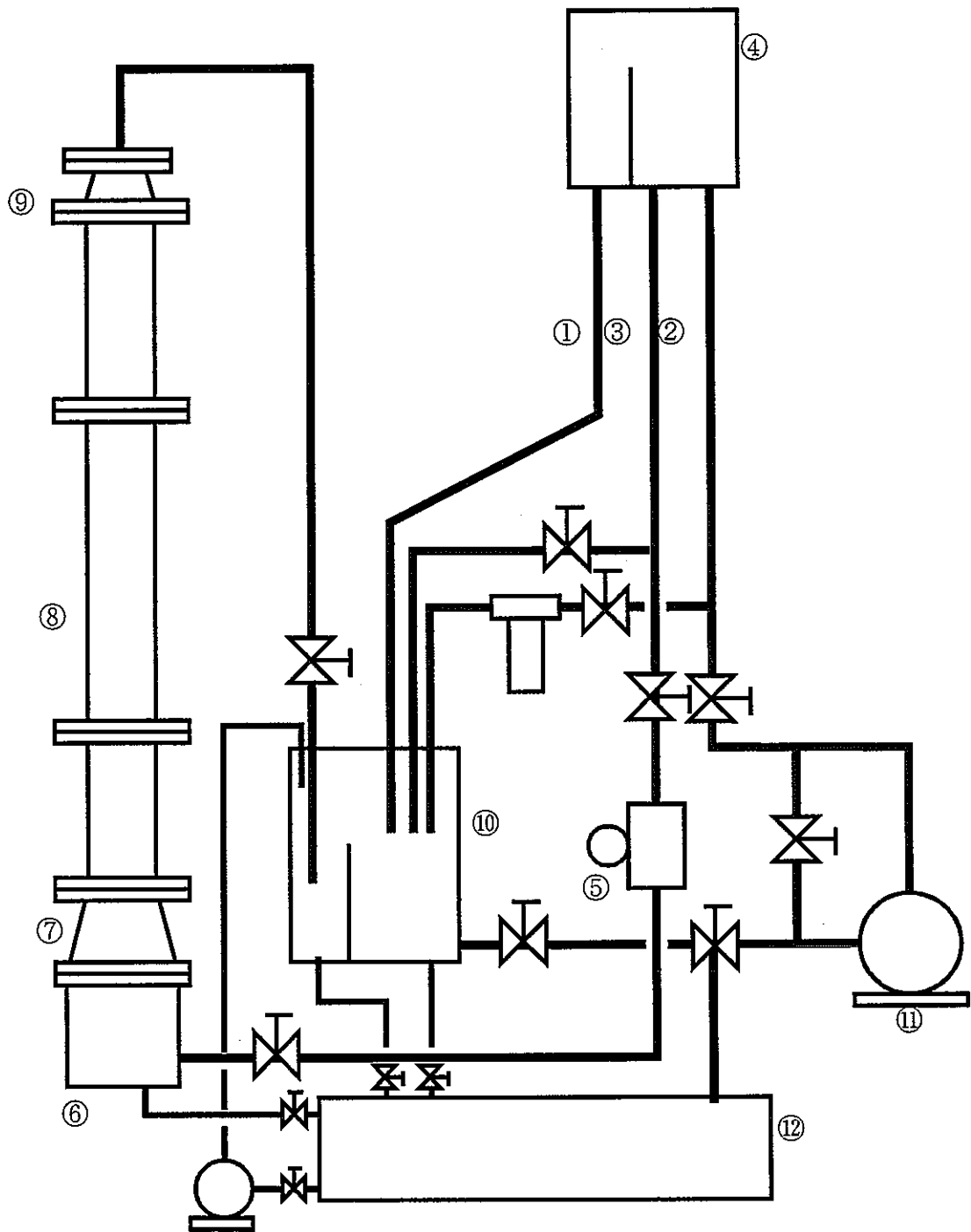


図 2.2 縦置き重力落下式ループ概念図





- |             |          |           |
|-------------|----------|-----------|
| ①オーバーフローライン | ②汲み上げライン | ③テストライン   |
| ④ヘッドタンク     | ⑤流量計     | ⑥整流部      |
| ⑦入口ノズル      | ⑧試験体     | ⑨出口ノズル    |
| ⑩ダンプタンク     | ⑪汲み上げポンプ | ⑫ストレージタンク |

図 2.3 実験装置ループ構成図

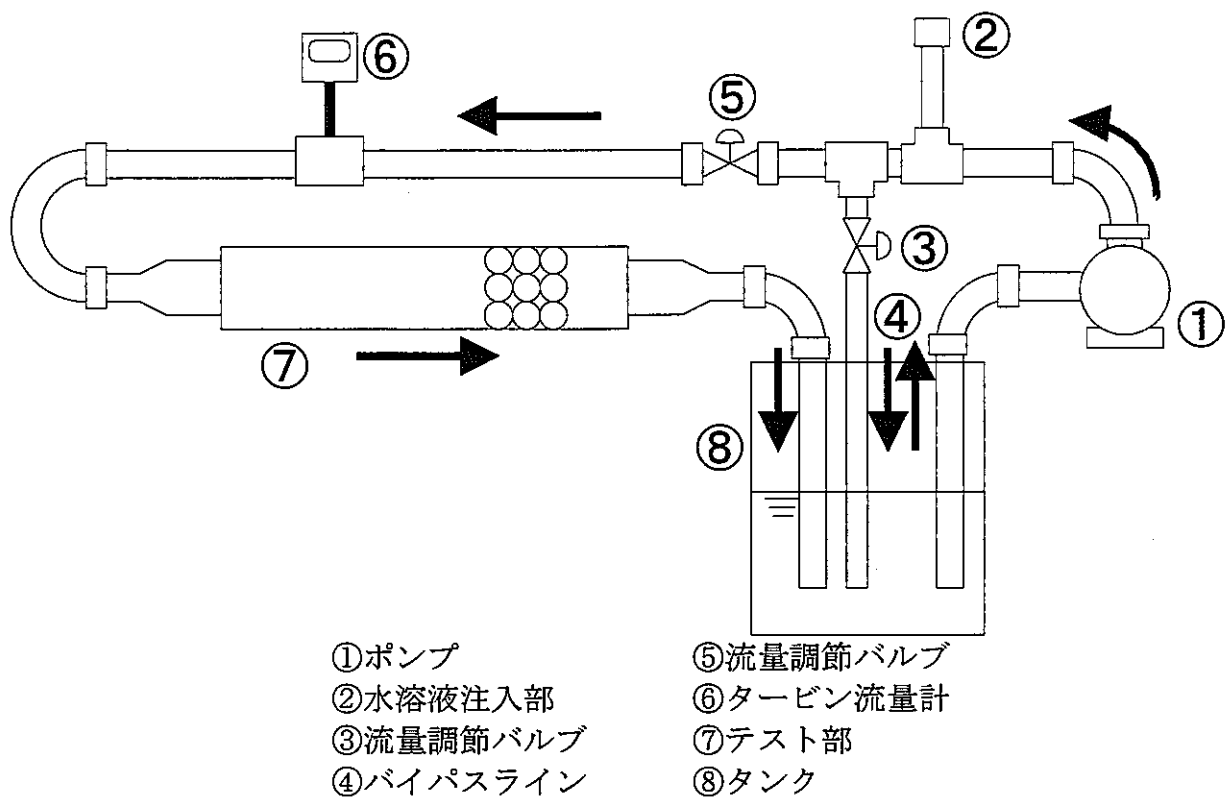


図 2.4 簡易ループ概略図

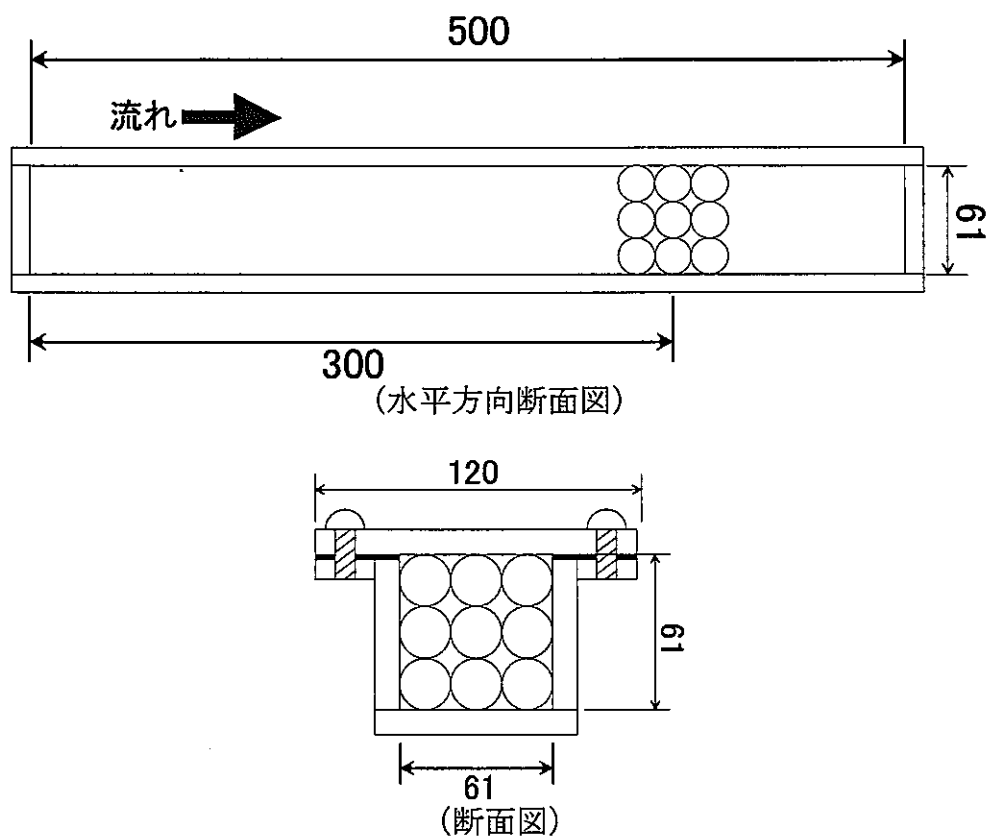


図 2.5 テスト部概略図

### 3. 屈折率調整実験

#### 3. 1 水溶液濃度と屈折率

ポーラス状閉塞物を構成する粒子をガラス球で模擬し、閉塞物内部の流れを画像解析により測定する。水（屈折率 $\lambda_w=1.33$ ）とパイレックスガラス（屈折率 $\lambda_g=1.474$ ）とでは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歪んでしまい、PIV等の光学計測による画像解析が困難となる。そこで、水に薬剤を添加して流体側の屈折率をガラス球の屈折率に一致させることを検討した。屈折率を一致させればガラス球を画像上から消去することができるため、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。この問題を解決するために、NaI水溶液あるいはオイルの混合液等を用いた実験が従来から行われている<sup>[7,8,9,10,11]</sup>。NaI水溶液は、飽和濃度付近で比較的高い屈折率（ $n<1.5$ ）を達成できる。表3.1にNaI水溶液を用いた実験の例を示す。安全性および入手の容易さ等の観点からNaI水溶液を用いた。

文献[12]によれば、パイレックスガラス（ほうけい酸ガラス）の屈折率として、1.47の他に1.43というデータがある。また、図3.4に示すように入射光波長によってパイレックスガラスの屈折率は変化する。一般に、入射光波長、ガラス組成比が異なれば、当然屈折率も異なるため、実験で使用する光源に対する屈折率を調べておくことが必要である。本研究では後述するように、Nd-YAGレーザを光源として用いたPIVによる流速測定を行っている。この場合のNd-YAGレーザを光源とした場合のパイレックスガラス球と一致するNaI水溶液の濃度を以下のように求めた。

#### 3. 2 実験方法

実験装置の概略を図3.1に示す。縦横100[mm]四方、深さ120[mm]の透明アクリル製の矩形容器をモータ駆動のステージに固定し、容器底面のほぼ中心にパイレックスガラス球をエポキシ系接着剤で固定してNaI水溶液中に浸した。球の中心を通る水平断面に沿って1[mm]間隔でレーザビームを入射しガラス球後方のスクリーン上のビーム中心位置と、ビームが屈折せずに直進する位置（原点）との差を測定し、屈折率のずれを判断した。パイレックスガラス球は、本実験で使用するものと同じのものであり、直径20[mm]である。また、YAGレーザビームは、波長 $\lambda=532$ [nm]、ビーム径 $d_0=2.5$ [mm]である。溶液は、実験開始前まで約1時間ほど放置しており、水溶液温度は室温（25[°C]）と同じである。

#### 3. 3 実験結果

NaI水溶液濃度をパラメータとしたときの、Nd-YAGレーザの入射位置と屈折光のずれ距離 $\Delta X$ を図3.2に示す。縦軸は、ずれ距離 $\Delta X$  [mm]をガラス球の中心からスクリーンまでの距離 $L$ で無次元化した。横軸は球の中心からの距離 $r$ を球の半径 $R$ で除した無次元半径である。スクリーン上の輝点は、広がりを持っているため、中心部の最も輝度の高い点を中心位置とした。図3.3に示すように各入射位置での屈折光の

ずれ距離  $\Delta X$  と濃度の関係式を求め、その定数項から必要とされる水溶液濃度を求めた。各定数項の値を表 3.2 に示す。この結果から Nd-YAG レーザーを光源とした実験の場合、パイレックスガラス球と屈折率が一致する NaI 水溶液の濃度は、56.9[wt%]であることがわかった。

西田ら<sup>[10]</sup>は、水溶液温度 25[°C]での NaI 水溶液の濃度と屈折率との関係を示した。屈折率計測はアッペ屈折計（ナトリウム D 線 589.3[nm]）により行われている。このときの水溶液濃度と屈折率の関係を図 3.5 に示す。ここで、C は濃度[wt%]である。

$$n_D = 1.2369 + 0.0040486 \cdot C \quad (1)$$

ある一定の光源（本実験では Nd-YAG レーザ）を使用する場合、NaI 水溶液の屈折率を決定する要因は水溶液温度と濃度であり、これら 3 者の関係を明らかにする必要がある。中島ら<sup>[7]</sup>は、59[wt%]の NaI 水溶液濃度について屈折率と温度の関係を調べ、5[°C]の水溶液温度変化に対して、屈折率の変化が 0.001 であることを明らかにした。西田らの研究（図 3.5）によれば NaI 水溶液の屈折率変化 0.001 は、NaI 水溶液濃度が約 0.25[wt%]変化したことに相当する。NaI 水溶液濃度 56.9[wt%]の場合に注目し濃度変化 0.5[wt%]を考えた場合、屈折光のずれは球表面近傍 ( $r/R=0.9$ ) で  $x/L=0.015$ 、球半径の中央 ( $r/R=0.5$ ) で  $x/L=0.005$  となる。実験ではカメラと計測断面との距離が 10[cm]程度であるから、0.5[wt%]の濃度変化によりトレーサ粒子の輝点は画像上で撮影倍率によって変化するが、1.5[mm]から 0.5[mm]の誤差が生じることになる。以下の実験では、この程度の誤差を含んでいるものと考えなければならない。また、このように水溶液の温度変化は  $\pm 5$ [°C]以内が限界と考え、実験中には水溶液温度がこの温度範囲に収まるように注意して行った。以上を表 3.3 にまとめて示す。

表 3.1 従来の研究および実験条件

|                    | NaI 濃度<br>[wt%] | 構造物模擬材質<br>(屈折率)           | 光源レーザ<br>(波長)     |
|--------------------|-----------------|----------------------------|-------------------|
| 本研究                | 56.9            | パイレックス (1.48)              | Nd-YAG (532 [nm]) |
| 中島 <sup>[7]</sup>  | 59              | パイレックス (1.47)              | He-Ne (632.8[nm]) |
| 土方 <sup>[9]</sup>  | 60              | パイレックス (1.48)              | Ar (514[nm])      |
| 西田 <sup>[10]</sup> | 64              | メタクリル酸メチル<br>アクリル樹脂 (1.49) | Ar (514,488[nm])  |
| 江藤 <sup>[8]</sup>  | 飽和濃度            |                            |                   |

表 3.2 図 3.3 中の近似曲線の各係数

| $C_0 = a \cdot (dx/L)^3 + b \cdot (dx/L)^2 + c \cdot (dx/L) + d$ |           |           |           |          |
|--|-----------|-----------|-----------|----------|
| r/R  | a         | b         | c         | d        |
| 0.9  | 0.0       | 0.0       | 5.75E+01  | 5.71E+01 |
| 0.8  | -1.11E+03 | -2.31E+01 | 1.06E+02  | 5.71E+01 |
| 0.7  | 7.77E+03  | 8.76E+02  | 1.59E+02  | 5.70E+01 |
| 0.6  | 1.33E+04  | 6.78E+02  | 1.66E+02  | 5.65E+01 |
| 0.5  | 1.03E+04  | 6.42E+01  | 2.39E+02  | 5.70E+01 |
| 0.4  | 1.58E+04  | 1.13E+03  | 2.54E+02  | 5.63E+01 |
| 0.3  | 6.70E+04  | 1.69E+03  | 4.74E+02  | 5.71E+01 |
| 0.2  | 1.08E+05  | 8.66E+03  | 4.50E+02  | 5.61E+01 |
| 0.1  | 0.0       | -6.57E+04 | 8.30E+02  | 5.59E+01 |
| -0.1   | 0.0       | -2.95E+04 | -1.75E+02 | 5.89E+01 |
| -0.2   | -6.31E+04 | -1.12E+02 | -4.50E+02 | 5.60E+01 |
| -0.3   | -5.35E+04 | 6.71E+02  | -4.97E+02 | 5.70E+01 |
| -0.4   | -2.03E+04 | -1.34E+02 | -3.33E+02 | 5.65E+01 |
| -0.5   | -1.21E+04 | 7.86E+02  | -3.01E+02 | 5.71E+01 |
| -0.6   | -6.02E+03 | 3.43E+02  | -2.11E+02 | 5.67E+01 |
| -0.7   | 2.21E+03  | 4.89E+02  | 1.52E+02  | 5.70E+01 |
| -0.8   | 1.52E+03  | 3.46E+02  | 1.16E+02  | 5.69E+01 |
| -0.9   | 4.00E+03  | 6.09E+02  | 8.71E+01  | 5.72E+01 |
| 平均値  |           |           |           | 5.69E+01 |

表 3.3 NaI 水溶液の屈折率変化

| 変化要因<br>(変化量)    | NaI 水溶液<br>屈折率変化 | NaI 水溶液<br>濃度変化 | 輝点のズレ<br>(無次元距離) | 相対変化<br>(1.474) |
|------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 水溶液温度<br>(5[°C]) | 0.001            | 0.25 [wt%]      | < 0.015          | 0.07 [%]        |

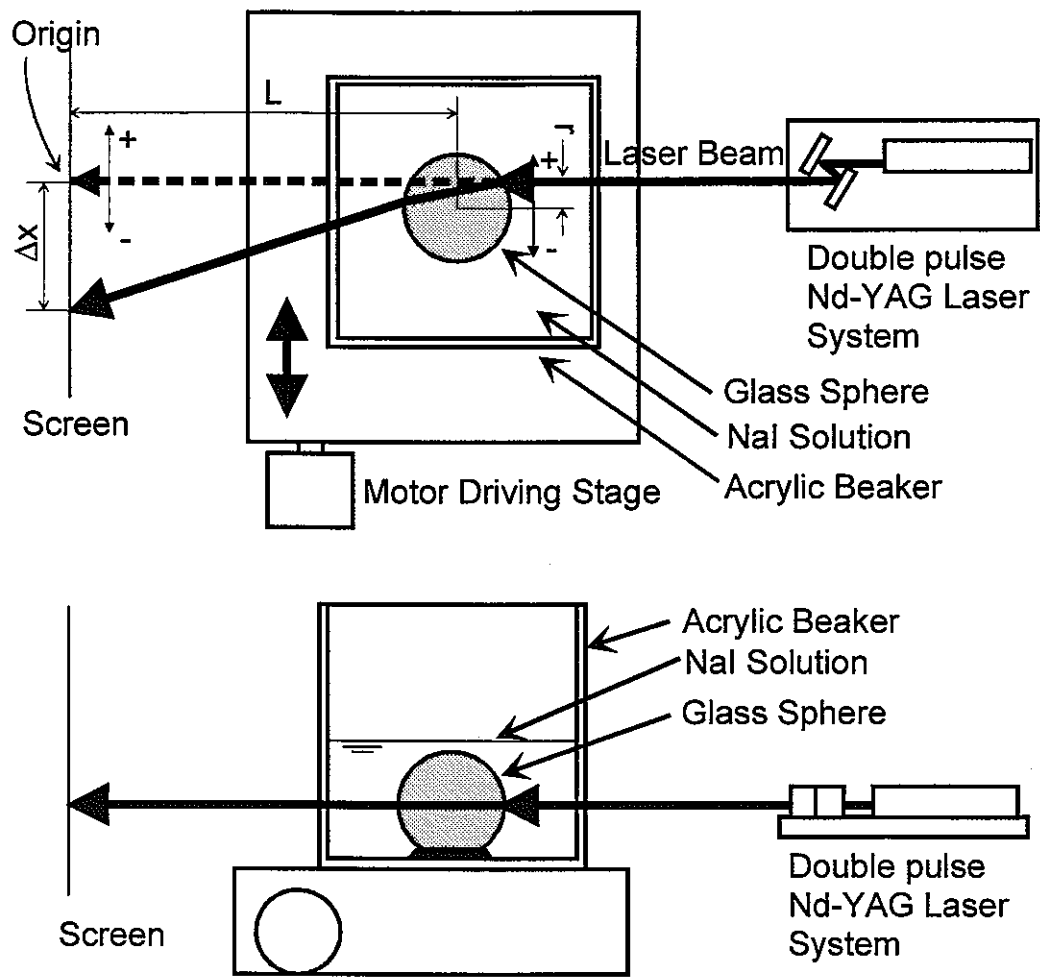


图 3.1 实验装置概略图

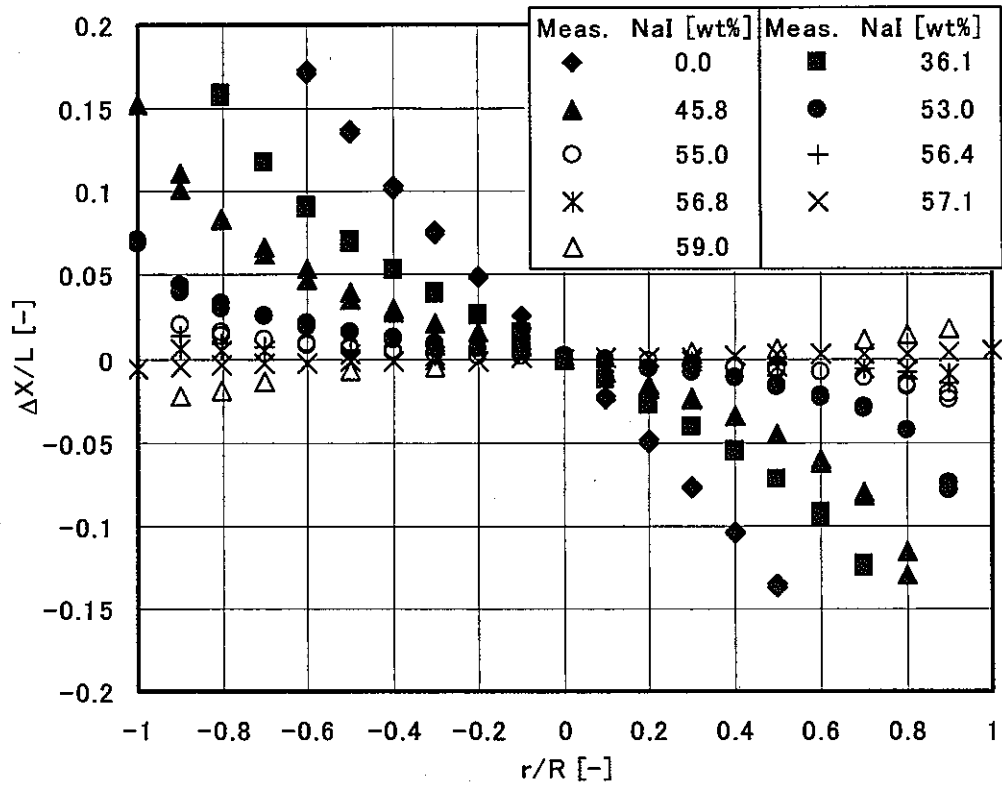


図 3.2 レーザ入射位置とずれ位置との関係

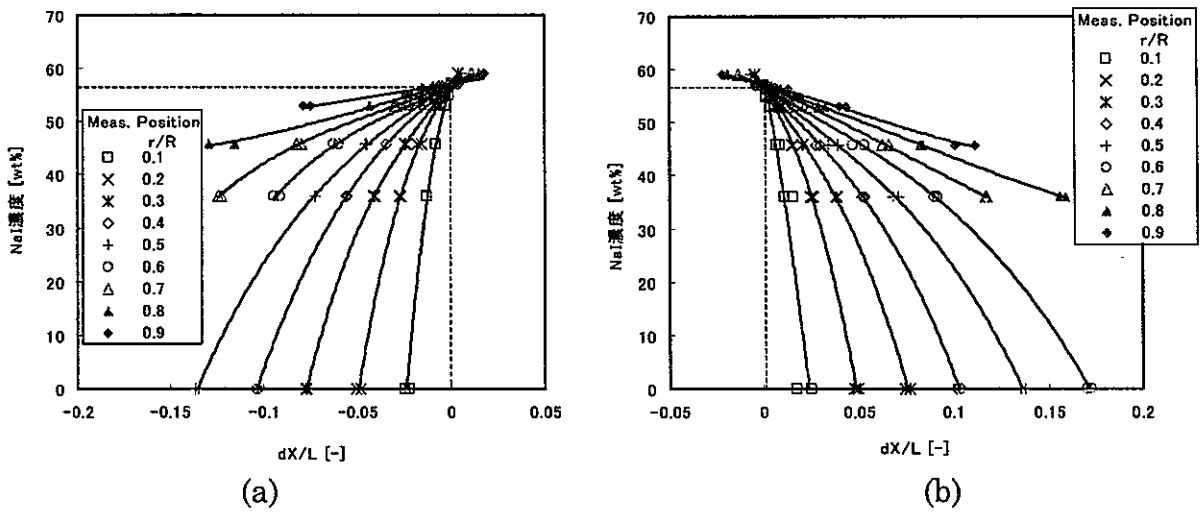


図 3.3 ずれ位置と NaI 水溶液濃度との関係

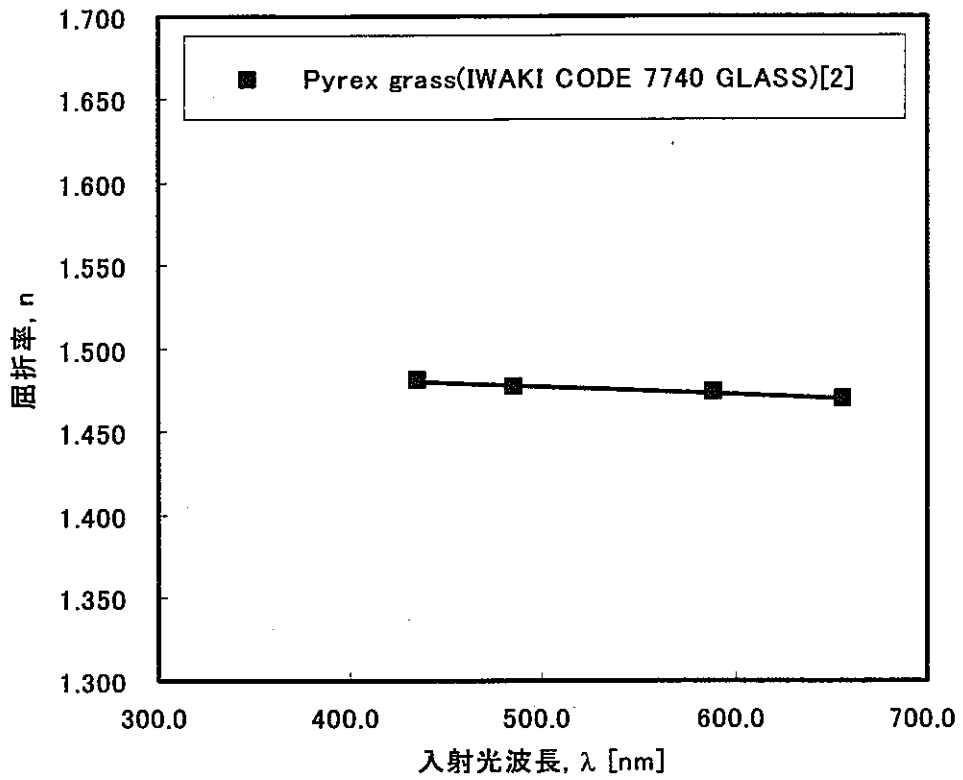


図 3.4 パイレックスガラスの入射光波長と屈折率との関係

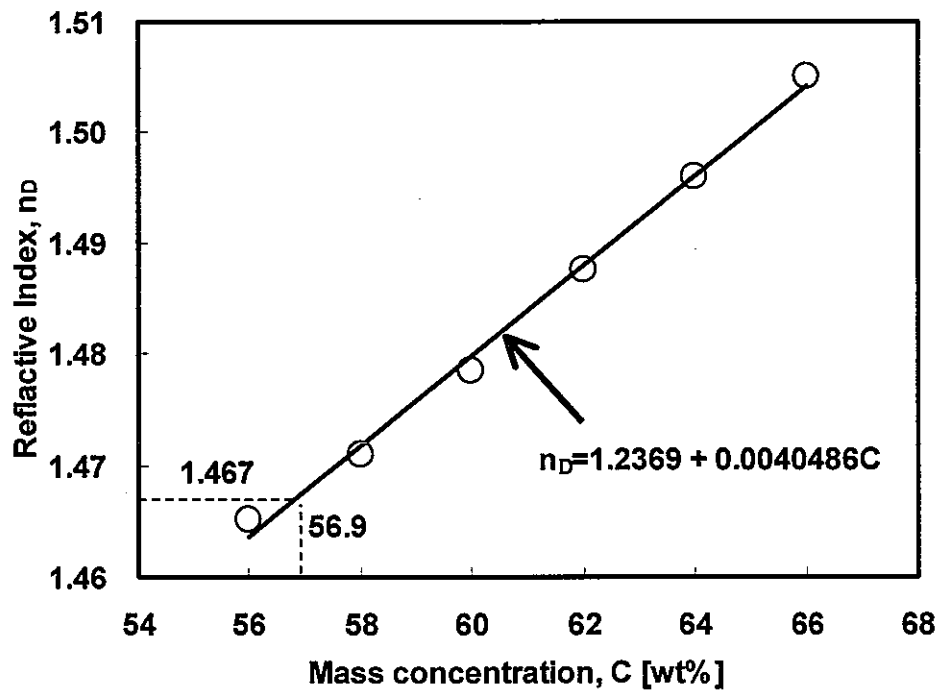


図 3.5 NaI 水溶液濃度と屈折率との関係  
(文献[10]より抜粋)



## 4. 簡易ループによる予備実験

第3章により、56.9[wt%]のNaI水溶液を用いれば、パイレックスガラス球の屈折率に一致することが分かった。よって、この水溶液を作動流体とし、多孔質状の閉塞を、パイレックスガラス球を流路に充填することで模擬し、閉塞内部の流動場の可視化手法確立を目的とした予備実験を行った。

### 4. 1 流速分布測定試験

パイレックスガラス球を十分に発達した流れの中に固定して測定を行うことが望ましいため、水を作動流体としてレーザドップラ流速計(Laser Doppler Velocimetry: LDV)を用いてテスト部での流速分布を測定した。図4.1に測定位置を示す。図4.2に示す結果から、管入口から200[mm]では流れの発達域であり、300[mm]以降では発達した流れとなっていると判断した。また、テスト部の出口部では矩形流路から円管へ変化することから、流路断面積減少に伴う縮流の影響を考慮すると出口から離れた場所に球を配置する必要がある。これらを考慮して、球の固定位置を入口から300[mm]の位置に決定した。

### 4. 2 流況可視化実験

#### 4. 2. 1 システム構成

図4.3に簡易ループ試験に適用したシステムの概略を示す。粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry: PIV)<sup>[4]</sup>はダブルパルスレーザーによりトレーサ粒子の移動距離を計測し、速度を計算する速度場計測法である。レーザーパルスシート状にして流れ場に照射し、レーザシート面内のトレーサ粒子の位置をビデオカメラ等を用いてCCD等に露光する。次に微小な時間をおいて2回目のレーザーパルスを同一面内に照射し、2番目の画像をCCDに露光する。1回の発光時間(パルス幅)は5~6[ns]と短い。パルスの時間間隔はタイミングパルスジェネレータによりコントロールすることができる。本実験では1[ms]に設定し、2枚一組の画像を30[ms]間隔で高速度ビデオカメラ(毎秒200フレーム)で撮影した。これは、サンプリング周波数33.3[Hz]で流速測定を行ったことに相当する。図4.4にレーザパルスと画像撮影のタイミングチャートを示す。このように撮影した2枚一組の画像を、画像取り込み用ボード(ひまわり60(ライブラリー社製))を介してコンピュータに取り込み画像解析を行う。こうして微小時間差で記録された2つの画像の差、つまり、微小なトレーサ粒子の移動量を画像輝度分布の相互相関法による方法<sup>[4]</sup>により求め、ピクセル単位の移動量を速度に変換してベクトルマップを作成した。

#### 4. 2. 2 実験方法

等温場での計測とし、計測手法の確立という目的から流量を30[l/min]に固定して実験を行った。このとき、閉塞物前面での断面平均流速は0.13[m/s]であり、Re数は

6600 である。

図 4.5 に画像撮影位置を示す。カメラはテスト部の下方に設置されており、レーザシートは底面と平行（水平方向）に入射させている。レーザシートの位置を底面から 10[mm]（撮影位置①）、15[mm]（撮影位置②）、20[mm]（撮影位置③）と変えて各断面について撮影（計測）した。

図 4.6 に撮影断面を示す。尚、図 4.6 左側の全体像のうち白枠領域を拡大して撮影し（図 4.6 右側）、各領域に対して PIV を実施して流速分布を求めた。表 4.1 に撮影条件および PIV を行う際の解析条件を示す。Case-A は図 4.6 の位置③（Height = 20 [mm]）の高さの上流側領域、Case-B1 および Case-B2 は図 4.6 の位置③（Height = 20 [mm]）の高さの下流側領域である。Case-C および Case-D は図 4.6 の下流側領域について、それぞれ位置②（Height = 15 [mm]）、位置①（Height = 10 [mm]）での領域である。

画面上での大きさと実座標系との対応付けは、図 4.7 のノイズ画像（ガラス球の輪郭などの構造物が写っている）を参照して行った。撮影画像中にはレーザシートを照射した面より手前側にあるガラス球の輪郭が僅かではあるが写っている。装置に組み込む以前にガラス球の直径を調べておき、画像に映し出されているガラス球の輪郭から球の中心位置を求め、中心間距離により実座標系での 1 画素あたりの長さを求めた。

### 4. 2. 3 トレーサ粒子

使用する流体の種類、流速、比重、注入制御法、撮影条件などを考慮した結果、トレーサ粒子として NaI 水溶液の比重に近い、着色真球微粒子（積水化成工業“テクポリマー-MBX-20 ホワイト”）を採用した。本粒子は比重 1.85、球径 20[mm]であり、水 1[m<sup>3</sup>]あたり約 0.01[kg]の割合で混入した。濃度 56.9[wt%]の NaI 水溶液の密度は 1.73[kg/m<sup>3</sup>]（25[°C]）である。トレーサ粒子の応答性については、平成 10 年度の研究報告書において適用性を確認している<sup>[9]</sup>。

## 4. 3 実験結果

### 4. 3. 1 ノイズ除去

実験では、レーザシートを照射した際に、パイレックスガラス球によるレーザ光の反射が強く、球の輪郭あるいは球同士の接着点が白く画像ノイズとして写り込んでしまった（図 4.6 参照）。そこで、ノイズを除去するために各ピクセルに対して最小輝度による方法<sup>[19]</sup>を適用した。最小輝度によるノイズ除去法とは、撮影画像中の各ピクセルに対して、輝度の時系列で最小輝度をノイズとして減算する方法である。図 4.7 に(a)撮影画像、(b)抽出したノイズ画像、および(c)ノイズ除去を行った後の解析画像を示す。

### 4. 3. 2 解析結果の比較

図 4.8 にノイズ除去を行う前の撮影画像を PIV によりベクトル分布を求めた場合（図 4.8 左側）と、ノイズ除去を行ったあとに PIV によりベクトル分布を求めた場合（図 4.8 右側）について比較して示す。x/dp<±0.3 の画像中心部（空隙部）では、ガ

(図 4.8 右側) について比較して示す。 $x/dp < \pm 0.3$  の画像中心部 (空隙部) では、ガラス球の存在しない軸方向流れが支配的な領域であるから、ノイズ除去を行わない場合のように各画像の上流側 (左側) と下流側 (右側) で流速が遅くなることは考えられない。よって、最小輝度値によるノイズ除去を行った場合、誤ベクトルの少ない、定性的に正しい流れ場が解析されていることが分かる。

図 4.9 に PIV と LDV による流速値を比較して示す。ノイズ除去を行った場合、空隙部での流れ方向 (左から右) に沿った一様な流れが解析できており、LDV と一致していることが分かる。しかしながら流れと垂直な方向 (y 方向) の分布では、ノイズ除去を行った効果が現れていない。これは、流れの速い領域と、よどみあるいは 2 次流れのような遅い領域を同一画面で撮影し、主流流れに合わせてパラメータを設定し解析を行ったためである。つまり、測定対象とする流速値によって表 4.1 に示した撮影条件および PIV を行う際のパラメータを変更しなければならないが、本測定においては、主流を対象として条件を設定している。よどみあるいは 2 次流れの領域を対象とする場合、この領域のみを拡大して撮影し、解析パラメータ等を決めなければならない。また、LDV の結果と比較すると PIV の結果は 20% 程度大きな値になっている。平成 10 年度において、今回採用したパターンマッチング方法 (画像輝度分布の相互相関法<sup>[4]</sup>) と輝度差の絶対値を使ってパターンマッチングをする方法<sup>[14]</sup> の 2 種類の画像解析ソフトを使用し、測定結果のクロスチェックを行っている。その結果、単位時間あたりのピクセル移動量は双方の結果とも良く一致し、PIV の結果は物理現象を再現することを確認している。つまり、この LDV との比較で結果が一致しないのは、ピクセル量を物理量 (長さ) に換算する際の換算係数に問題がある。現在、画像中に写り込んでいるガラス球の輪郭から換算係数を求めている。まず、写り込んでいる 4 つの球の輪郭上にある任意の 3 点を選び、その 3 点を通る円周の中心点をガラス球の中心点とする。4 つのガラス球の中心座標から、それぞれの中心点間の距離を求め、その平均値 (ピクセル単位) がガラス球の直径 (20[mm]) に等しいとして換算係数を求めている。しかし、輪郭上にある点座標の読みとり誤差 ( $\pm 2$  ピクセル程度) およびガラス球の歪みや直径の不揃い等の問題があると考えられる。本実験での換算係数の不確かさは最大 5% となった。例えば、換算係数 0.055[mm/pixel], PIV によって求めた粒子の平均移動量が 10 ピクセル、画像間隔 1[ms] であるとき、時間平均流速は  $0.55 \pm 0.03$ [m/s] と評価される。さらに大きな要因としてガラス球の直径の不揃いに原因がある。平均直径はガラス球を無作為に幾つか抜き出して平均直径を求めているが、全数チェックは行っていない。また、真球度にも問題がありガラス球の配置によっては直径がずれる可能性は大いに考えられる。今後は、精密な指標 (例えば、ガラス球充填層を固定するための針金、流路幅など) を用いて、換算係数を求めなければならない。

同じ領域 (位置③, Height = 20 [mm] の高さの下流側領域) についてレーザシートの厚さを変えて (Case-B1=5[mm], Case-B2=2[mm]) 撮影し、シート厚さによる影響を調べた。Case-B1 の結果を図 4.8(a) および図 4.9(a), Case-B2 の結果を図 4.8(b) および図 4.9(b) に示す。レーザシート厚さが薄い Case-B2 の方が PIV により得られるベクトルの数は多いことが分かる。しかし、ノイズ除去を行うことにより、ベクトル分布 (図 4.8(a) と (b)) および LDV との流速値の比較 (図 4.9(a) と (b)) において、レーザシート厚さの影響は小さくなることが分かり、ノイズ除去手法の有効性が確認できた。

### 4. 3. 3 空隙内部の流動場

図 4.10 に、図 4.6 に示した底面から 10[mm], 15[mm], 20[mm]および上流側, 下流側領域の各領域での解析結果を示す。ベクトル図の縦軸と横軸は、ガラス球の直径 20[mm]で規格化して示す。実験では4つのガラス球接点で囲まれる範囲 ( $x/dp < 0.5$ ) を覆うように、もう少し広い範囲を撮影しているが、PIVを行う場合、画像周囲の端の部分では正確な解析を行うことができない。よって、以降のベクトル図では  $x/dp < 0.5$  の範囲に限って示すこととする。

図 4.10(a)および図 4.10(b)はレーザシートを底面から 20[mm]の位置に照射し、撮影した画像の解析結果である。図 4.6 に示すように(a)は上流側領域、(b)は下流側領域である。この領域はガラス球の接点を除いて全面が流路となっている。それ故、図の中央部はガラス球の存在しない空隙部となっており、主流方向の速い流れがある。図 4.10(a)および図 4.10(b)の上流側 (各画像の左側) のガラス球の背後 (図の上下部) では、後流の形成と遅い流れではあるが隣接する領域への横方向流れが観察できる。主流方向流れの流速はベクトル図 (図 4.10(a), (b)) および図 4.9 からおよそ 0.6 [m/s] である。閉塞前面での平均流速は 0.13 [m/s]であるから、閉塞前面の流路断面積と球の中心を通る断面における閉塞内部の投影流路面積を考慮すると、

$$V_e = \frac{A}{A_p} \times V_b = \frac{3.721 \times 10^{-6}}{0.894 \times 10^{-6}} \times 0.13 = 0.54 \quad (2)$$

閉塞部での平均流速  $V_e$  は 0.54[m/s]となり、LDV および PIV から得られた流速値とほぼ一致する。

図 4.10(c)はレーザシートを底面から 15[mm]の位置に照射し、撮影した画像の解析結果である。この領域は四方をガラス球によって囲まれる領域 ( $z=10$ [mm]) と領域全面が流路である領域 ( $z=20$ [mm]) の中間であり、ベクトル図 (図 4.10(b)) 中央部の空隙部では主流方向の流れが存在し、上流側 (画像の左側) のガラス球背後 (ベクトル図上下部) では後流が形成されている。

図 4.10(d)はレーザシートを底面から 10[mm]の位置に照射し、撮影した画像の解析結果である。この領域は四方をガラス球によって囲まれており流れは停滞している。しかし、画像に対して垂直な方向には流路が存在するため、この垂直方向の流れによる2次的な乱れが生じていると考えられる。

また、図 4.11 および図 4.12 に、図 4.6 に示した下流側領域における底面から 10[mm], 15[mm], 20[mm]の各領域での渦度の時間平均分布とせん断変形の時間平均分布を示す。渦度およびせん断変形は式(3)より算出し、図の右側に、渦度の強さの尺度を示している。Case-B2 で生じた渦度およびせん断変形の最大値を用いて、各 Case の値を規格化して示している。

$$\omega = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad \gamma_{xy} = \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3)$$

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

$$\left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{i,j} = \frac{1}{12 \cdot \Delta y} (u_{j-2} - 8u_{j-1} + 8u_{j+1} - u_{j+2}) \quad (4.b)$$

図 4.11(a) (撮影位置③, Case-B2) および図 4.11(b) (撮影位置②Case-C) において、速い主流方向流れの存在する空隙部 (図の中央部) とガラス球背後に形成される後流域 (図の上下部) との境界に、回転方向の異なる渦度が生じている。また、図 4.12 から、この境界ではせん断変形も大きいことが分かる。このように、速い主流方向流れとガラス球背後の後流のせん断によって渦度が形成されているのが分かる。

以上の実験結果 (ベクトル図, 渦度分布, せん断変形分布) から、球を正方格子状に配列させて閉塞部を形成した場合の閉塞部内部の流動場に関する以下の知見を得ることができた。

- 1) 図 4.6 の撮影位置③に示す球の空隙部分では、主流方向の速い流れが存在し、球の背後では後流が形成され流速は低下する。
- 2) ガラス球背後では流体の混合が行われており、混合した流体は主流方向の速い流れに乗って下流へと流されていく。
- 3) 隣接する空隙との流体の交換は僅かであり、主流方向流れが支配的である。
- 4) 図 4.6 の撮影位置①に示すガラス球の中心を通る断面内では、流れがよどんでおり、主流方向と垂直な断面を貫く流れによる 2 次流れのような弱い渦が生じている。

表 4.1 撮影条件および PIV 条件

|               | Case-A                    | Case-B1    | Case-B2 | Case-C                  | Case-D            |
|---------------|---------------------------|------------|---------|-------------------------|-------------------|
| 撮影領域          | Upstream                  | Downstream |         |                         |                   |
| 撮影位置          | ③P-3 (Height=20 [mm])     |            |         | ②P-2<br>(15 [mm])       | ①P-1<br>(10 [mm]) |
| レーザーシート<br>厚さ | 5 [mm]                    |            | 2 [mm]  |                         |                   |
| レーザーパルス<br>間隔 | 1 [ms]                    |            |         |                         |                   |
| 画像取得間隔        | 30 [ms]                   |            |         |                         |                   |
| 画像サイズ         | 512 [pixel] x 512 [pixel] |            |         |                         |                   |
| 参照領域          | 16 [pixel] x 16 [pixel]   |            |         | 12 x 12                 | 10 x 10           |
| 探索領域          | 48 [pixel] x 48 [pixel]   |            |         | 36 x 36                 | 30 x 30           |
| ベクトル間隔        | 12 [pixel]                |            |         |                         |                   |
| 撮影画像組数        | 20 sets<br>(40 pictures)  |            |         | 5 sets<br>(10 pictures) |                   |

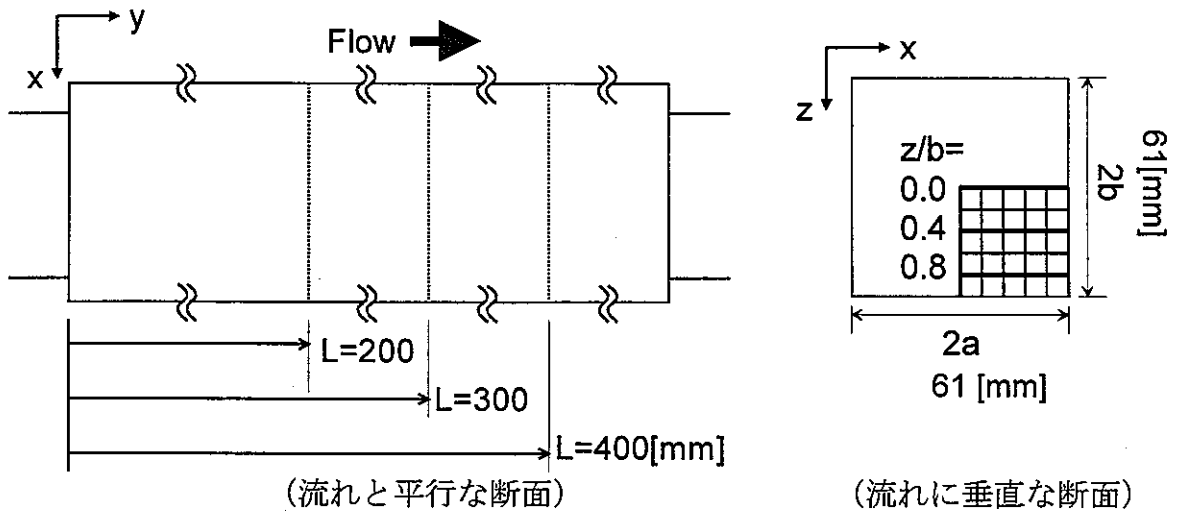


図 4.1 LDV 測定位置

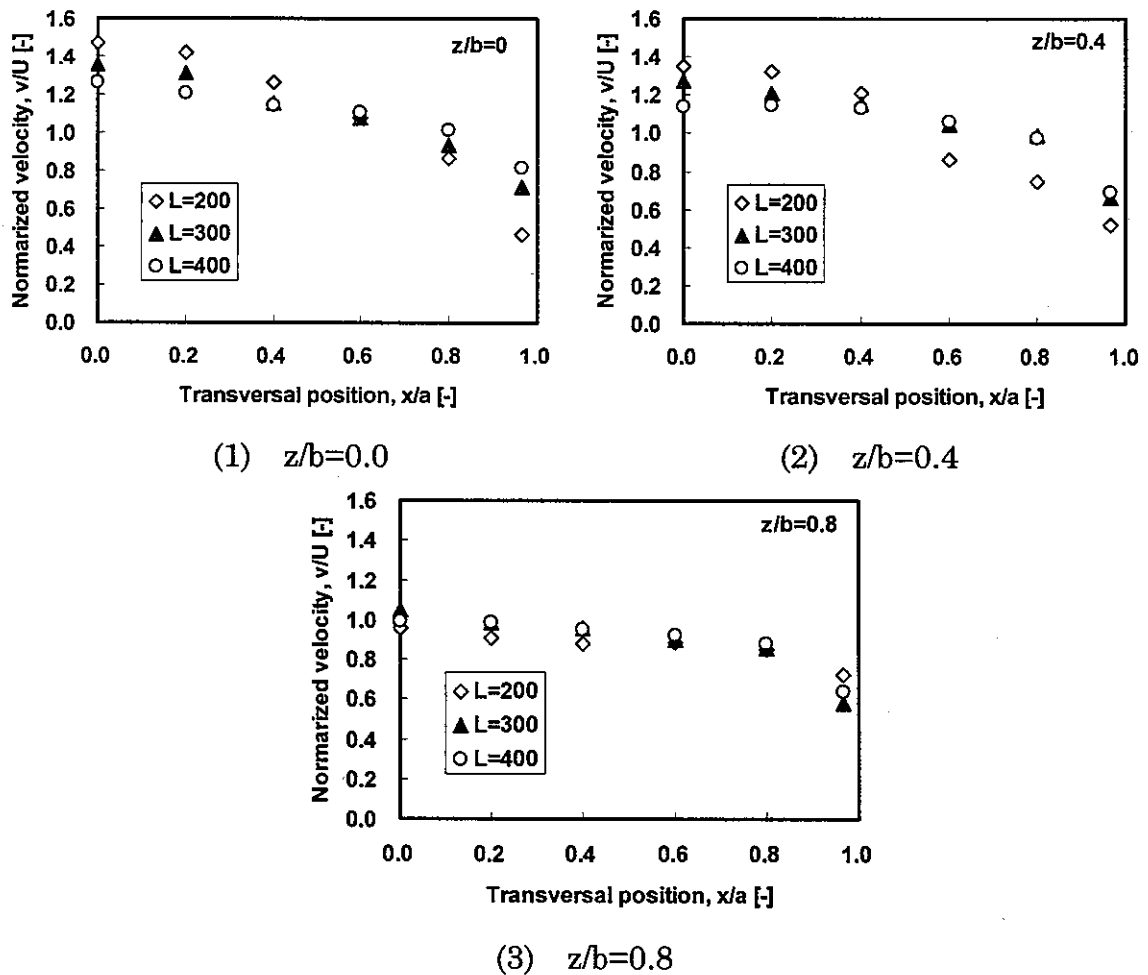
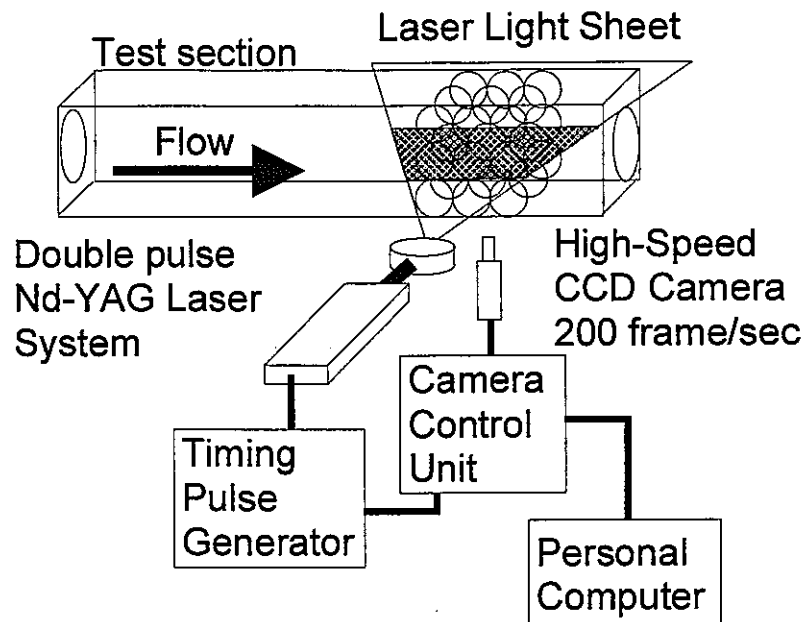


図 4.2 テスト部内流速分布



高速度ビデオカメラ (nac 社製 DRP-S)

|           |                          |
|-----------|--------------------------|
| 使用レンズ     | 焦点距離 12 [mm]             |
| フレームレート   | 200 [frame / s] (フルフレーム) |
| シャッタースピード | 1/ 50000 [s]             |
| メモリ容量     | 256 [Mbyte]              |
| 録画時間      | 5.1 [s] (200 [コマ/ s])    |

画像処理ボード ([株]ライブラリー ひまわり 60)

|           |                 |
|-----------|-----------------|
| 入力信号      | RGB ビデオ信号       |
| 出力信号      | RGB ビデオ信号       |
| ディスプレイメモリ | 512×512×8 ビット×3 |

図 4.3 測定系概略図

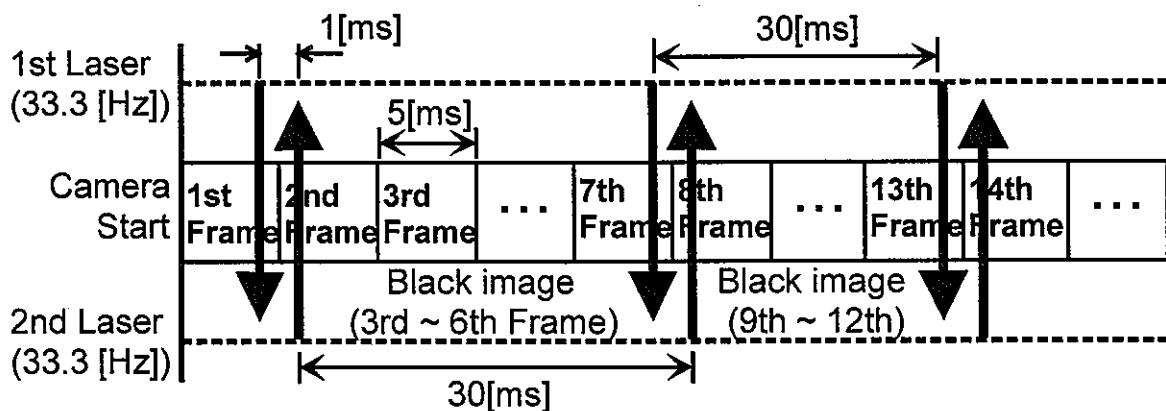


図 4.4 レーザパルスと画像撮影のタイミング



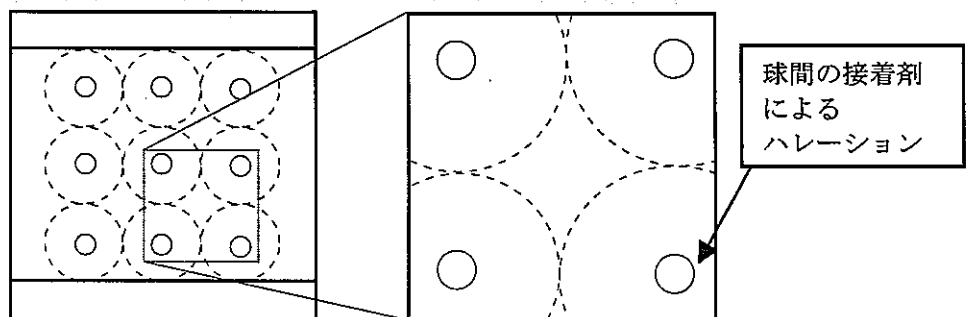
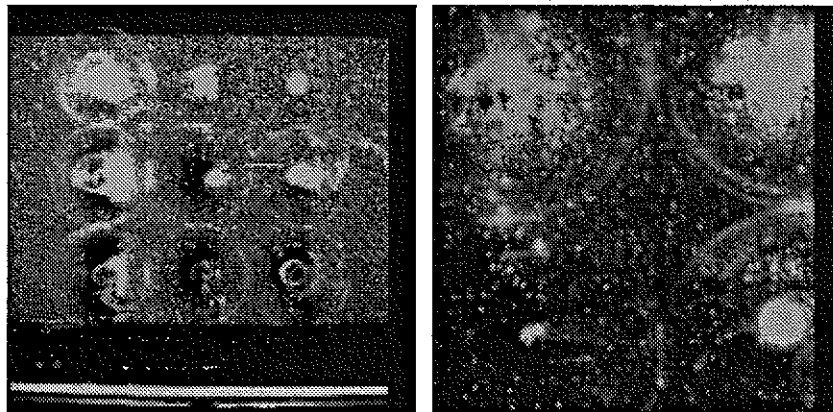
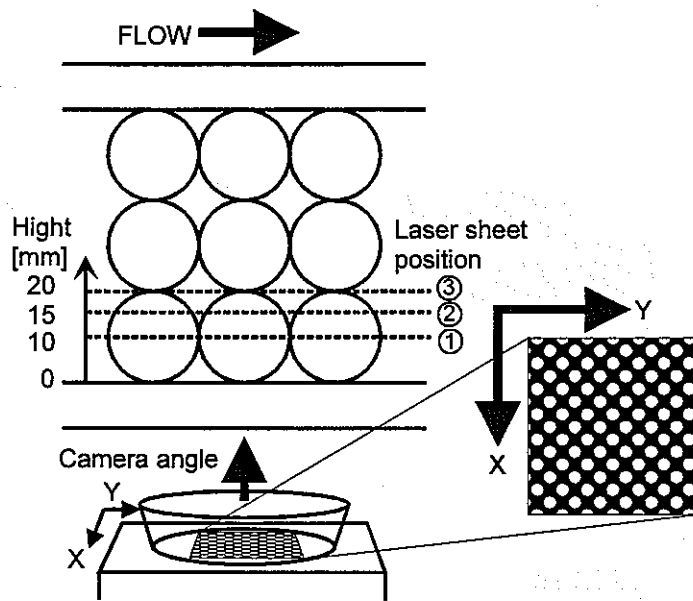
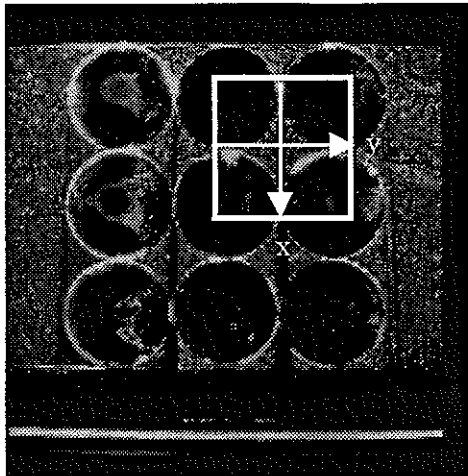
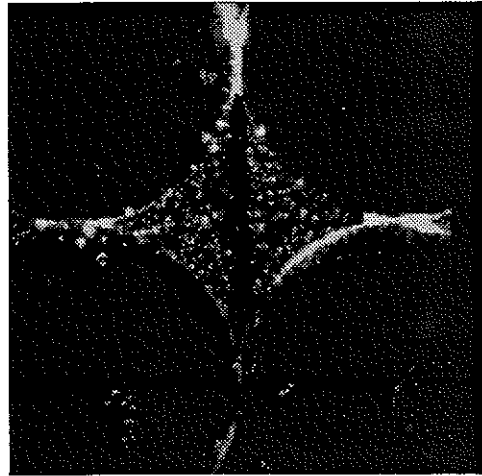


図 4.5 画像撮影位置

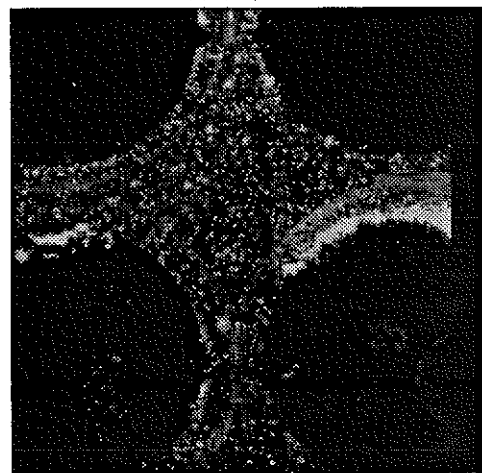
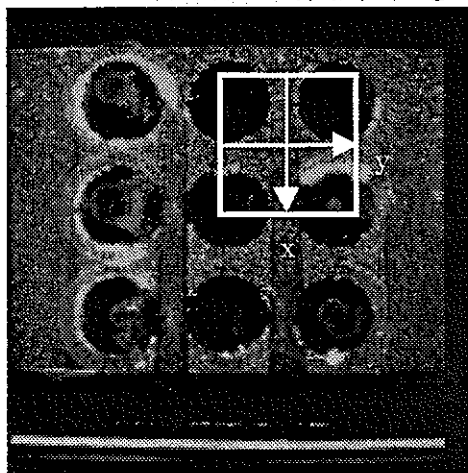
球充填部全体



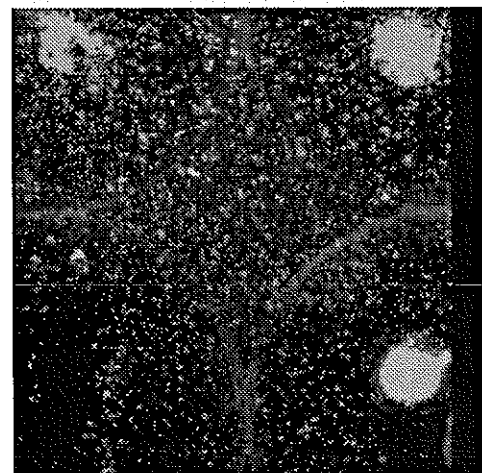
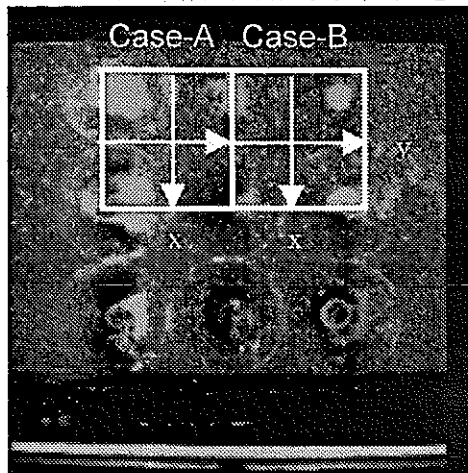
球充填層局所内部



撮影位置① (10mm) : Case-D

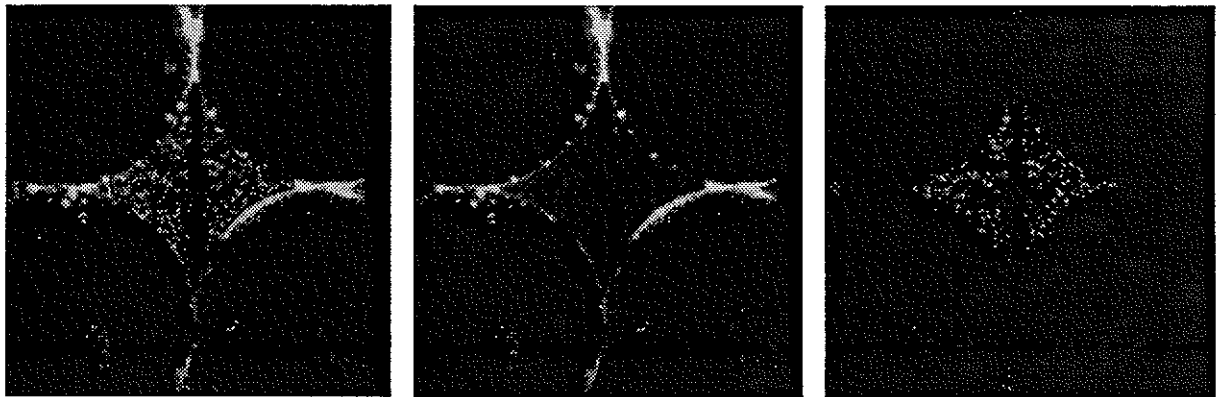


撮影位置② (15mm) : Case-C

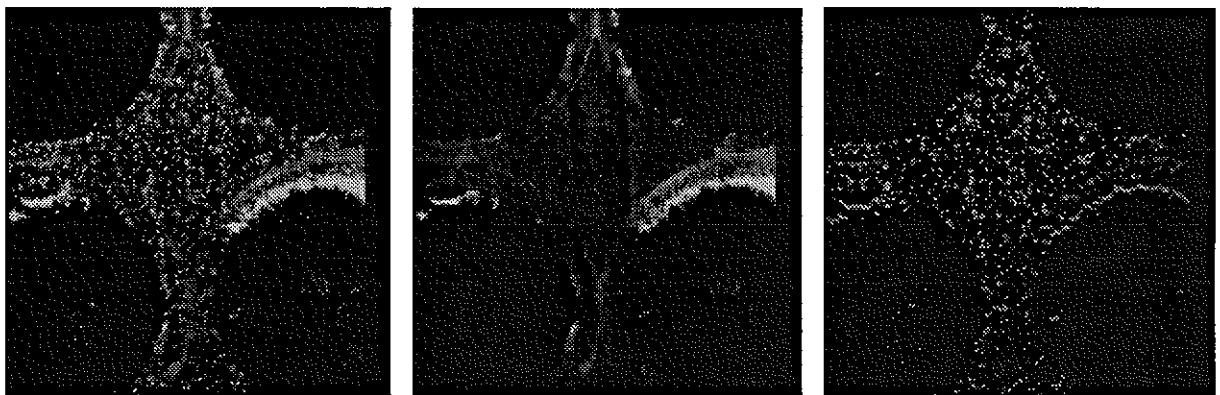


撮影位置③ (20mm) : Case-A, Case-B

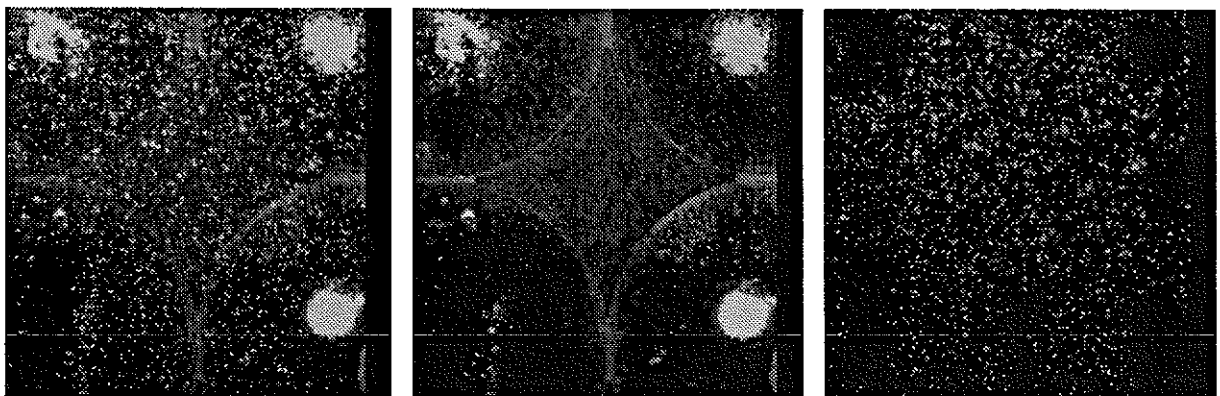
図 4.6 測定部断面図 (流れは左から右へ)



Case-D (撮影位置① P-1 (10mm) )



Case-C (撮影位置② P-2 (15mm) )



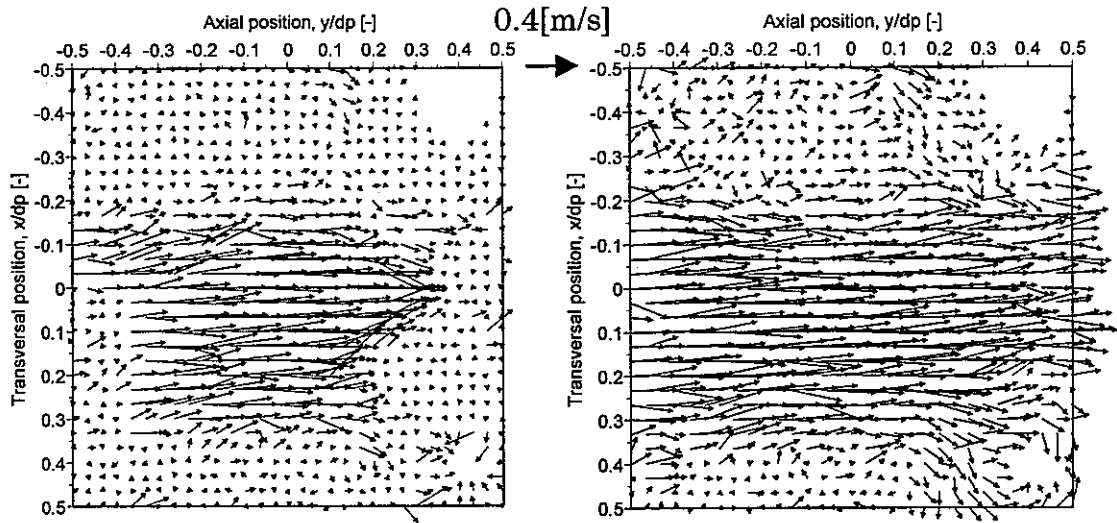
Case-B2 (撮影位置③ P-3 (20mm) )

(a)撮影画像

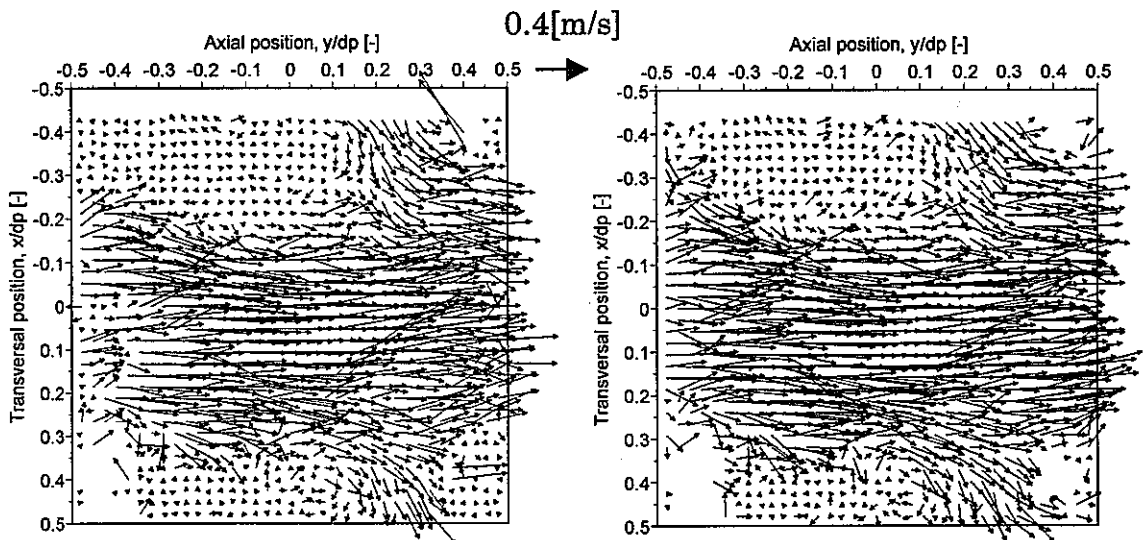
(b)ノイズ画像 (最小輝度)

(c)解析画像

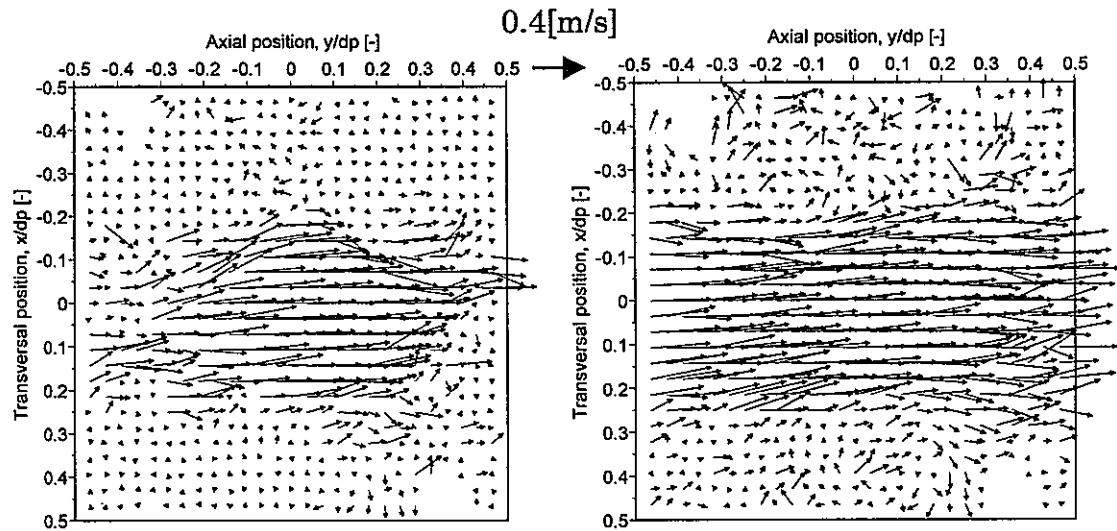
図 4.7 最小輝度によるノイズ除去手法の例



(a) Case-B1 (下流側領域, レーザシート厚さ 5 [mm])

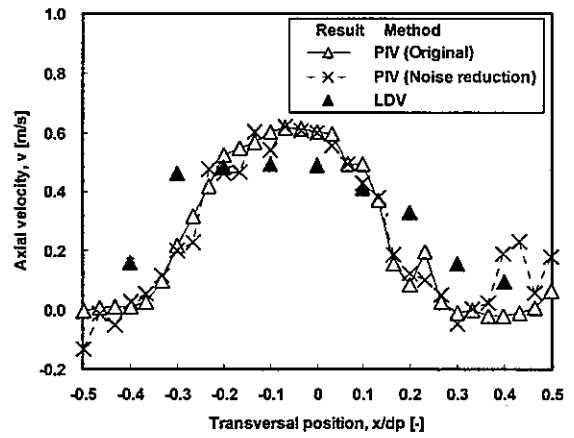
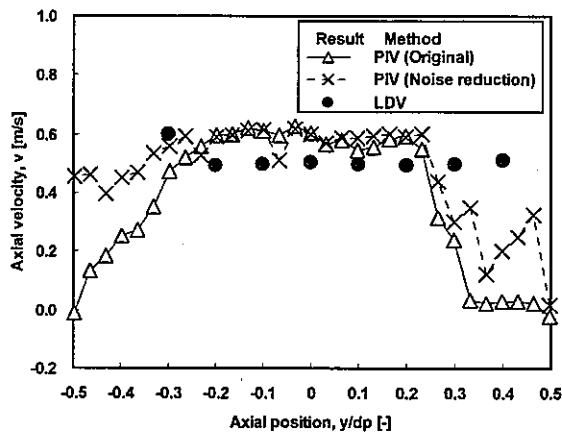


(b) Case-B2 (下流側領域, レーザシート厚さ 2 [mm])

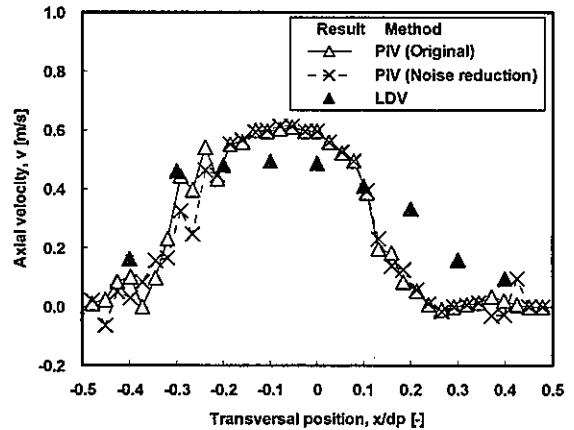
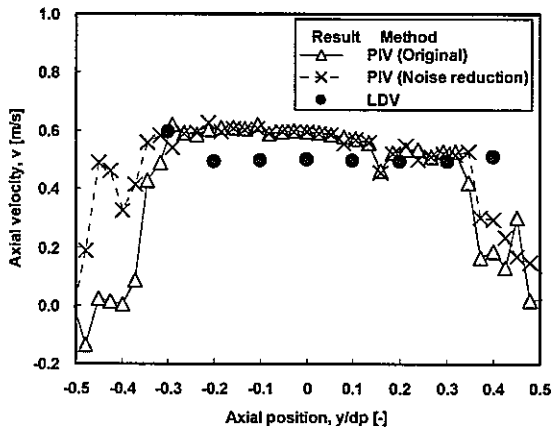


(c) Case-A (上流側領域, レーザシート厚さ 5 [mm])

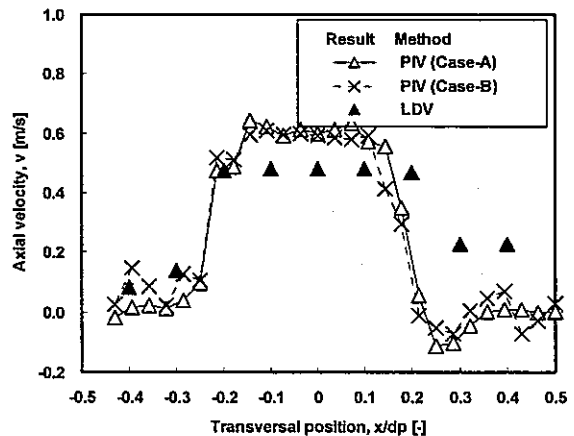
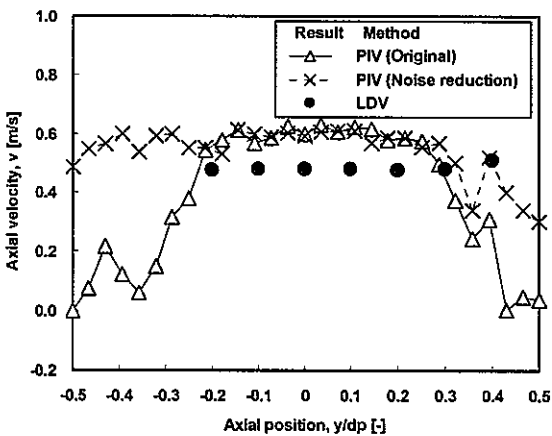
(1)ノイズ除去なし (撮影画像を解析) (2) 最小輝度によるノイズ除去  
 図 4.8 時間平均ベクトル分布に対するノイズ除去の効果  
 撮影位置③ P-3 (20[mm])



(a) Case-B1 (下流側領域)



(b) Case-B2 (下流側領域)



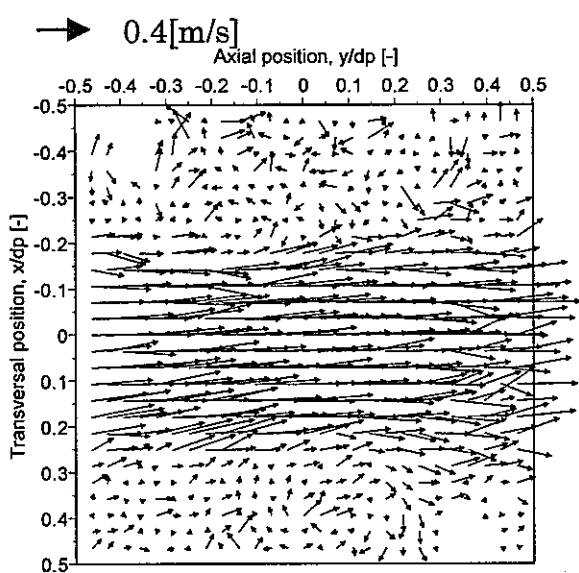
(c) Case-A (上流側領域)

(1) 主流方向分布

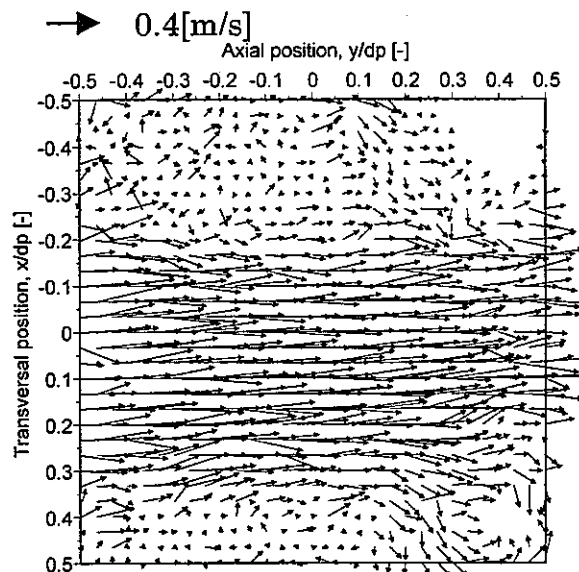
(2) 横方向分布

図 4.9 時間平均主流方向流速分布

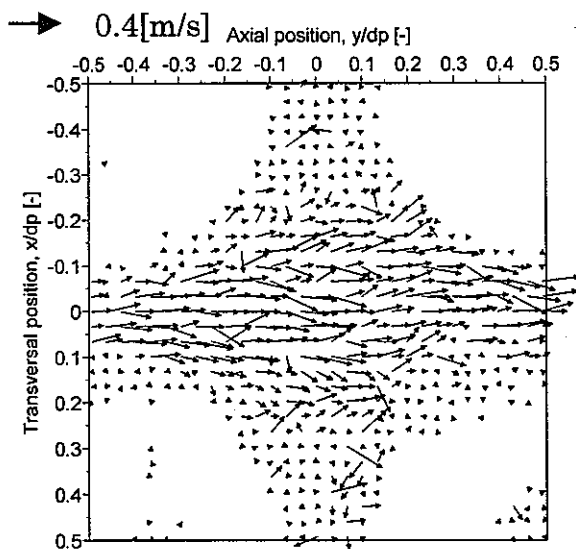
撮影位置③ P-3 (20[mm])



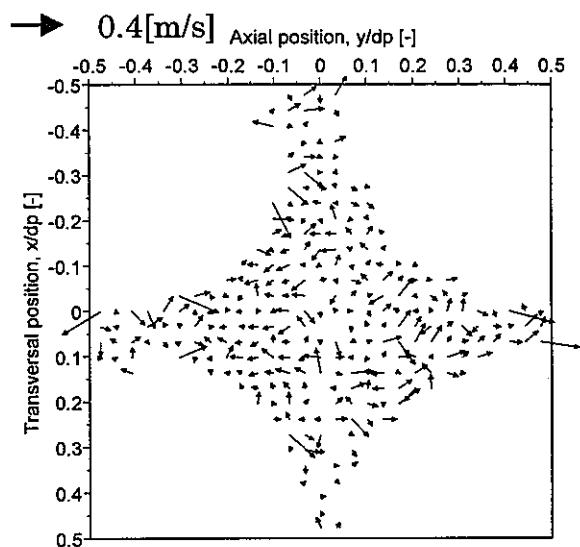
(a) Case-A  
(上流側領域, Height=20[mm])



(b) Case-B1  
(下流側領域, Height=20[mm])

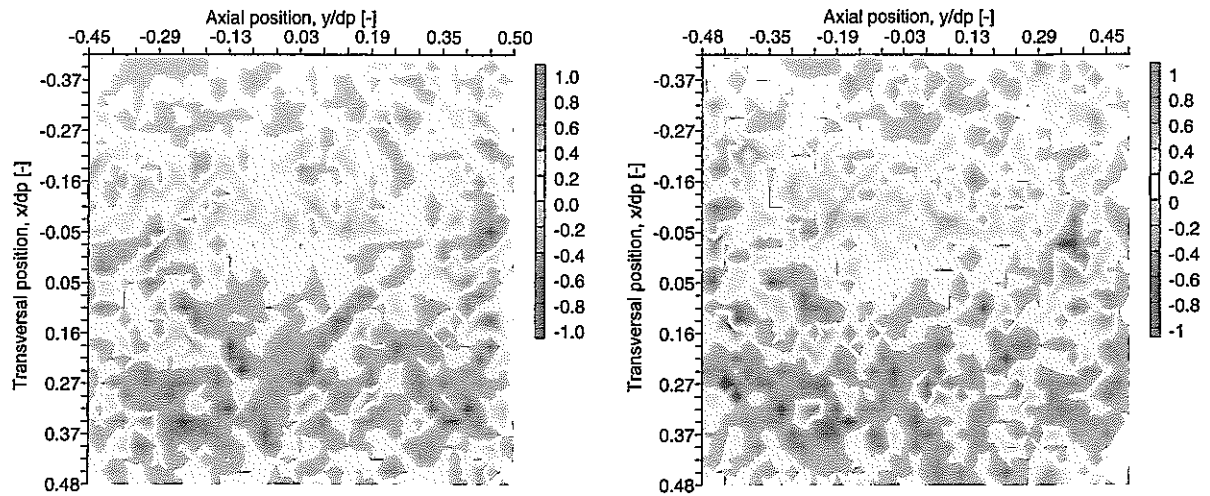


(c) Case-C  
(下流側領域, Height=15[mm])

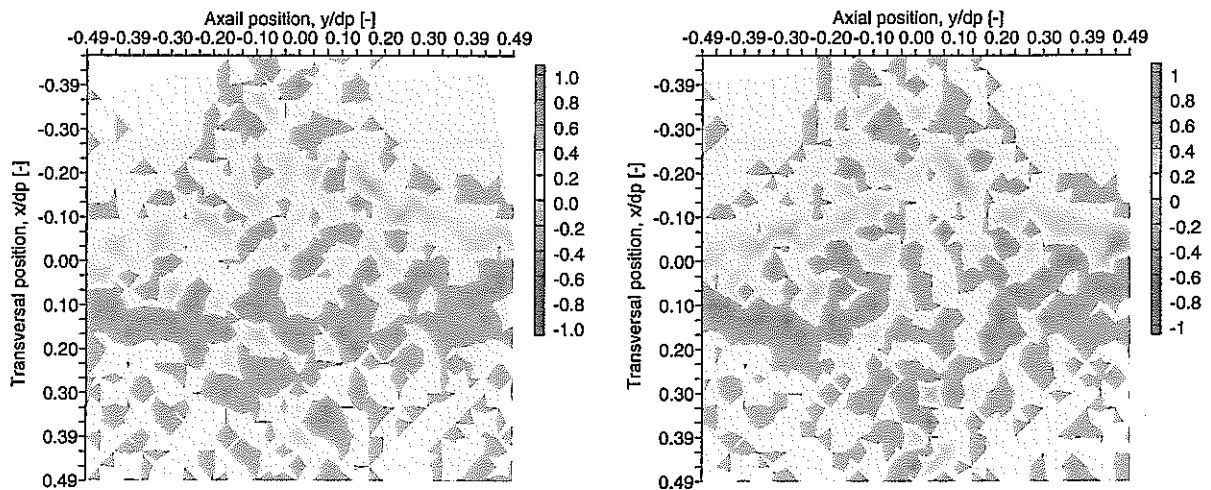


(d) Case-D  
(下流側領域, Height=10[mm])

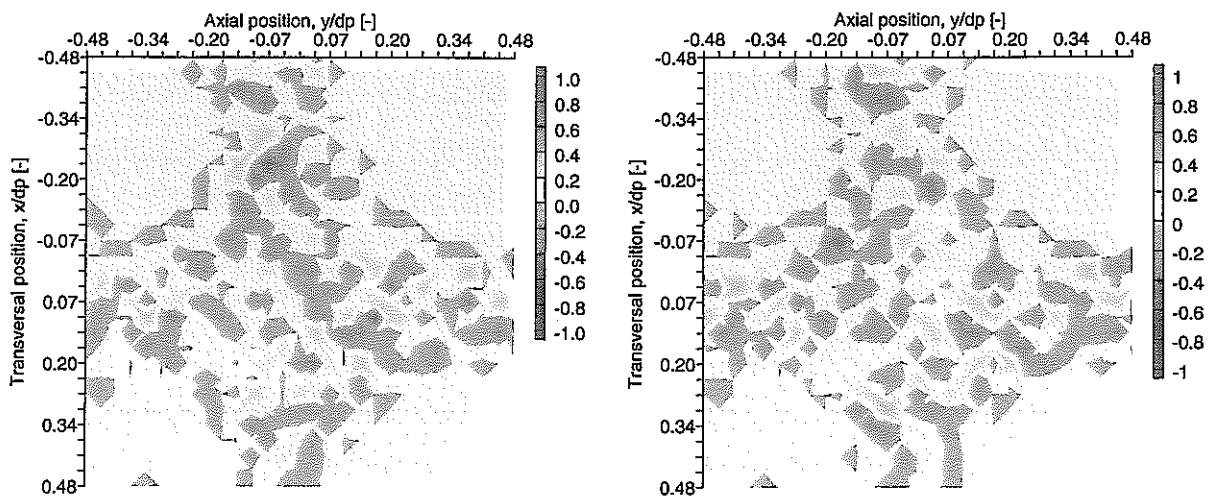
図 4.10 時間平均ベクトル分布



(a) Case-B2 (Height=20[mm])



(b) Case-C (Height=15[mm])



(c) Case-D (Height=10[mm])

図 4.11 時間平均渦度分布  
Case-B2 の最大値で各 Case を規格化

図 4.12 時間平均せん断の強さ  
Case-B2 の最大値で各 Case を規格化

## 5. 閉塞物を含むチャネル内流れ

### 5. 1 実験条件

第2.1節および第2.2節で示したように、多孔質状閉塞物によって閉塞したサブチャンネルと、それに隣接する閉塞物のない健全サブチャンネルの2つの流路を矩形流路で模擬した2チャンネル体系の試験体を用いて、閉塞物内部および健全流路内の流れ場の把握を目的とした試験を行った。閉塞部は流れ方向（鉛直方向）に15段、1段は3個×3個のガラス球からなる。

表5.1に実験条件と解析条件について示す。表中の撮影領域の記号は図5.1の撮影条件図に示してある。また、レイノルズ数の代表長さは閉塞物のないテスト部断面の水力等価直径である。実験は流量をパラメータとして、 $2.83[\text{m}^3/\text{h}]$  ( $\text{Re}=5400$ )、 $1.83[\text{m}^3/\text{h}]$  ( $\text{Re}=3500$ )、 $1.05[\text{m}^3/\text{h}]$  ( $\text{Re}=2000$ )の3ケースを平成10年度に行っており、これら流量条件では流れ場に大きな差異はないことが確認されている。そこで、 $2.83[\text{m}^3/\text{h}]$  ( $\text{Re}=5400$ )を代表例として選択し、ノイズ除去手法を適用して閉塞物内部および周辺の流れ場について調べることにする。

図5.2-1および図5.2-2に閉塞部および健全流路内の流れを撮影した画像例を示す。撮影位置は、上流から一段目、壁面より3層分(B-1~3)である。レーザシートはある程度の厚さ(3~5[mm])を持っており、シートが厚いとガラス球の反射が強くなり、また、計測対象とする断面以外の流速をも一緒に計測することになる。平成10年度の試験で、レーザシート厚さを薄くした方が、精度よく断面内の流速分布を計測できることが分かっている。そこで、シリンドリカルレンズだけを用いてシートにした場合、シート厚は2.5[mm]程度あるので、シート照射位置にアルミテープを2枚張ることにより、厚さ1[mm]の薄いレーザシートをつくりテスト部に照射した。画像枚数は、閉塞物内部で50組100枚撮影し、健全流路では20組40枚撮影した。PIVを行う際には、第4章で行った最小輝度によるノイズ除去法を適用し、撮影画像からノイズを除去した画像を用いて解析を行った(図5.2参照)。

## 5. 2 閉塞物内部の流動場

### 5. 2. 1 時間平均流速ベクトル分布

図5.3に、流量 $2.83[\text{m}^3/\text{h}]$ 、 $\text{Re}$ 数5400の場合について、撮影画像にノイズ除去を施しPIVによって得られた時間平均ベクトル分布を示す(表5.1参照)。各領域を代表する高さごと、図5.3-1に閉塞下端部(B-1, 2, 3およびC-1, 2, 3)、図5.3-2に閉塞中央部(H-1, 2, 3およびI-1, 2, 3)、図5.3-3に閉塞上端部(N-1, 2, 3およびO-1, 2, 3)での測定結果を示す。

図5.3-1の閉塞下端部(B-1, 2, 3およびC-1, 2, 3)では流路形状の急激な変化により、閉塞部上流の断面平均流速( $0.105[\text{m}/\text{s}]$ )に比べ流速が増大して(球間の空隙部で1.6~1.8倍程度)閉塞部に流れ込んでいることがわかる(B-1,2下)。壁から1層目と2層目の間(B-1, C-1)では、壁面と第1層目の球との空隙からの横方向流れによる流れ込みはほとんどなく、ガラス球背後(各ベクトル図の左下)では、後流が形成され流速が低下している。一方、図中右上のガラス球接点の手前では、横方向



流れが観測でき隣接する流路に流れ込んでいる様子が分かる。2 層目と 3 層目の間 (B-2, C-2) では、左側の流路 (B-1, C-1) からの流れ込みにより、各図中央部の主流方向流れと横方向流れが合流し、球の前縁に沿って鉛直方向ではなく図の右側へ傾いて流れている。健全流路に最も近い領域 (B-3, C-3) でも、球の前縁に沿った横方向流れによる健全流路への流出が見られる。閉塞下端部の健全流路に最も近い領域 (B-3) の中央部下では、閉塞部を避ける横向きの流れが生じている。健全流路 (B-3, C-3 の右側) では、流速が断面平均流速から増大している。この鉛直方向流速の増加は、閉塞物が存在するために流路形状が大きく変わり、流路断面積が減少したことによる効果と閉塞物内部からの流体の流出による流量の増加によるものである。

図 5.3-2 の閉塞中央部 (H-1, 2, 3 および I-1, 2, 3) では下端部 (B および C) に比べて全体的に流速が減少している。これは、閉塞下端部において閉塞内部の流体が健全流路 (B-3, I-3, O-3) へ流出したために、閉塞部内部の通過流量が減少し鉛直方向流速が減少したものと考えられる。

図 5.3-3 に示す閉塞上端部 (N-1, 2, 3 および O-1, 2, 3) での流速は、閉塞中央部 (I-1, I-2) に比べてさらに遅くなっている様子がわかる。閉塞部全領域について、ガラス球の背後になる領域では、ほとんど流れがなく後流域が形成されている。

上記のように、格子状に球を積み重ねて (立方系充填して) 模擬した多孔質状閉塞物では、閉塞物内部の健全側に近い領域では冷却材が健全流路へ流出し横方向流れが生じ、閉塞下端部 (B-3 および C-3) で顕著となることが分かった。閉塞下端部で閉塞部が流路を遮るため、閉塞内部の圧力と健全流路内の圧力バランスが崩れて、閉塞部から健全流路へ流出し、閉塞内部を通過する流量が減少して、鉛直方向流れは下流に行くに従って減少すると考えられる。また、球の背後では後流域を形成することが分かる。図 5.3-1 から図 5.3-3 に示したベクトル図からガラス球の後流域では流速が遅く、主流側との流体交換が緩やかで、ホットスポットになりやすい領域であると考えられる。

## 5. 2. 2 流速ベクトルの流れ方向の変動

図 5.4 に PIV により求めた流速ベクトルの偏位角の時間変動強度 (RMS 値)  $\theta'$  を示す。偏位角は流速ベクトルの主流方向 (鉛直上向き) からの傾き角であり、主流方向 (12 時の方向) から時計回りに  $90^\circ$  傾いている場合 (3 時の方向) は  $\theta=+0.5$ 、反時計回りに  $90^\circ$  傾いている場合 (9 時の方向) は  $\theta=-0.5$  として変動強度を求めた。また、図 5.4 では、それぞれの領域について最大値で規格化し、変動の大きな箇所を赤で示す。図 5.4-1 に閉塞下端部 (B-1, 2, 3 および C-1, 2, 3) , 図 5.4-2 に閉塞中央部 (H-1, 2, 3 および I-1, 2, 3) , 図 5.4-3 に閉塞上端部 (N-1, 2, 3 および O-1, 2, 3) での結果を示す。ガラス球の背後 (後流) では流れ方向の変動が大きく、球の前縁では流れ方向の変動は小さいことが分かる。

## 5. 2. 3 時間平均渦度分布

図 5.5 に流量  $2.83[\text{m}^3/\text{h}]$  , Re 数 5400 の場合の時間平均速度場から得られた平均渦度を示す。ただし閉塞物内部の健全側 (B-3, I-3, O-3) については、ガラス球を支

持するための針金があるので求めていない。また、渦度は領域 B-2 の最大値で各領域の値を規格化して示している。渦度は式 (3) と同様に式 (5) から求めている。微分の項はラグランジュの 5 点補間公式 (4.a) および (4.b) を用いている。なお、平均渦度を示した図の右側に、渦度の強さの尺度を示している。渦度の強さを色の濃淡で示し、右回りを青色、左回りを赤色で示している。

$$\omega = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5)$$

いずれの図においても、図中央の軸方向流れが大きい領域の両側に大きな渦度が生じている。主流部の速い鉛直方向流れと、その両側（ガラス球背後）の遅い流れとの境界で強いせん断変形が生じて大きな渦度が発生している。閉塞上端部 (O-1,O-2) では、下端部 (B-1,B-2) ほどの明確な渦度分布は表れておらず、閉塞下部において主流部と後流部での流速の差が大きいことが分かる。

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）は閉塞物下端で、閉塞流路と健全流路に配分される。閉塞物による抵抗（圧力損失）のため閉塞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、閉塞部から健全流路への流量再配分が起こり、閉塞部から健全流路への横方向の流出があると考えられる。閉塞中央部の高さになると、閉塞下部で生じた横方向流れによる流量再配分によって閉塞内部と健全流路で圧力がバランスし、健全流路では鉛直方向流れが支配的となる。閉塞内部では閉塞中央部 (I-1,I-2) から上端部 (O-1,O-2) で、閉塞内部の通過流量と圧力損失に応じた流速分布となる。閉塞上部で明確な渦度分布が生じないのは、鉛直方向流れの流速が閉塞下端部に比べて低下したためと考えられる。

### 5. 3 閉塞物周辺の流動場

図 5.6 に流量 2.83[m<sup>3</sup>/h] (Re=5400) の場合について健全流路を撮影した画像から、PIV によって得られた時間平均速度分布を示す。撮影した図の高さ方向 (z 軸) の位置は (BC-4) で z=0~60[mm], (HI-4) で z=120~180[mm], (NO-4) で z=240~300[mm] である。

閉塞側でも述べたとおり、健全流路の下端では流路形状の急激な変化のために閉塞物をまわりこむ流れが生じていることがわかる (BC-4 の左下)。また、閉塞部の側面から健全流路への水平方向成分を持つ流れがみられる。平成 10 年度に行った流量 (Re 数) をパラメータとした試験結果<sup>[9]</sup>から、この傾向はレイノルズ数が小さいほど大きいことが明らかになっている。

図 5.7 に PIV の結果から求めた健全流路内の鉛直方向流速分布を示す。図 5.7(a), 図 5.7(b) および図 5.7(c) はそれぞれ流量 2.83, 1.83, 1.05 [m<sup>3</sup>/h] に対応しており、閉塞部の高さ L=300[mm] で無次元化した z=20, 60, 140, 160, 260, 280 [mm] の位置における水平方向分布を示してある。これらの位置はガラス球の接点に対応しており、z/L=0 は閉塞部下端、z/L=1 は閉塞部上端を示す。閉塞下端部の高さ付近 (z/L=0.067~0.133) において、平坦な分布 (z/L=0.067) から閉塞部に近い領域 (y/b~0.4) で流速が低下し分布 (z/L=0.133) がついている。これは、先に述べた閉塞部から健全流路への横方向流れによるものと考えられる。また、閉塞中央部の高さ

付近 ( $z/L=0.533$ ,  $z=160[\text{mm}]$ ) から下流側 ( $z/L=0.953$ ,  $z=280[\text{mm}]$ まで) においては, 閉塞部の側面から健全流路への流出がなく, 流速分布の変化が小さいと考えられる。

表 5.1 実験条件 (PIV)  
 (作動流体は, 濃度 56.9[wt%]の NaI 水溶液)

|   | 撮影領域   |                              |
|---|--|------------------------------|
|   | 閉塞側  | 健全側                          |
| 流量[m <sup>3</sup> /h]<br>(レイノルズ数)         | 2.83 (5400)  |                              |
| 断面平均流速 V <sub>0</sub> [cm/s]<br>(閉塞物前面流速) | 10.5   |                              |
| 撮影領域<br><br>記号は<br>図 5.1 に対応              | B-1~3<br>C-1~3<br>H-1~3<br>I-1~3<br>N-1~3<br>O-1~3 | BC-4<br><br>HI-4<br><br>NO-4 |
| レーザーシート位置                                 | x = 10 [mm]  |                              |
| 画像サイズ                                     | 512 [pixel] × 512 [pixel]                          |                              |
| 画像間隔                                      | 30 [ms]  |                              |
| レーザーシート厚                                  | 1 [mm]   |                              |
| レーザーパルス間隔                                 | 2 [ms]   | 3 [ms]                       |
| 参照領域サイズ                                   | 24 [pixel] × 24 [pixel]                            |                              |
| 探索領域サイズ                                   | 48 [pixel] × 48 [pixel]                            |                              |
| ベクトル間隔                                    | 16 [pixel]   |                              |
| データ数                                      | 50 [sets]<br>(100 [pictures])                      | 20[sets]<br>(40[pictures])   |

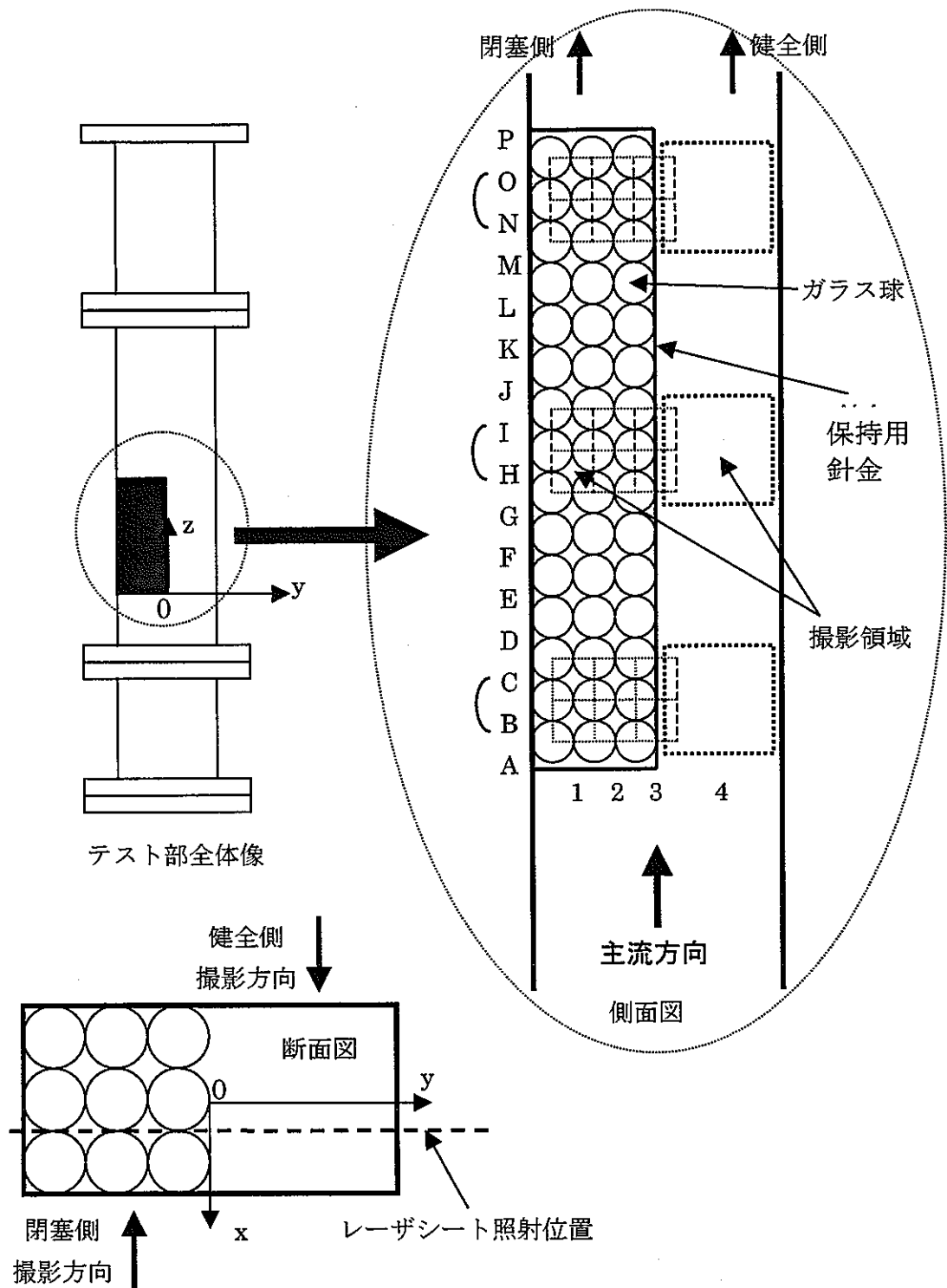


図 5.1 撮影条件図

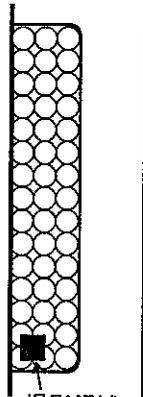
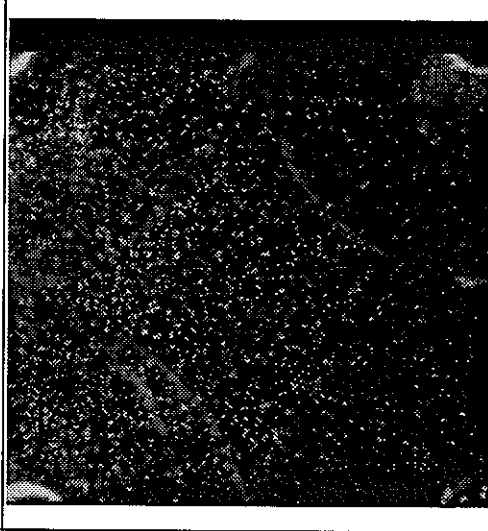
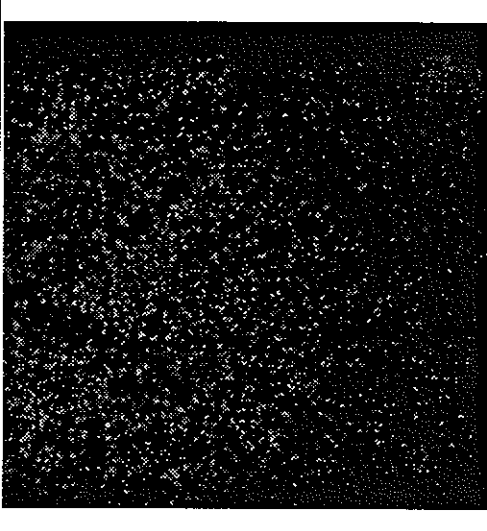
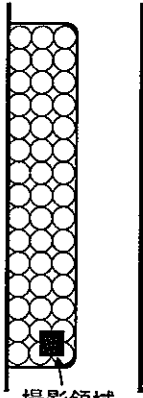
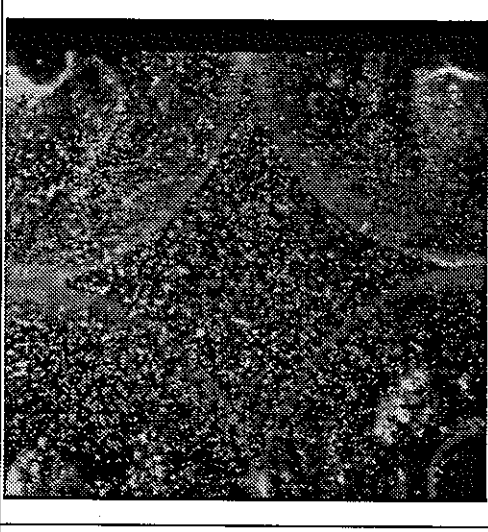
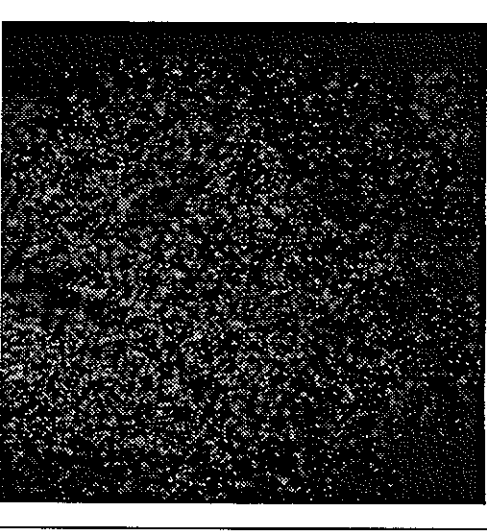
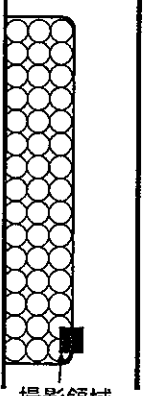
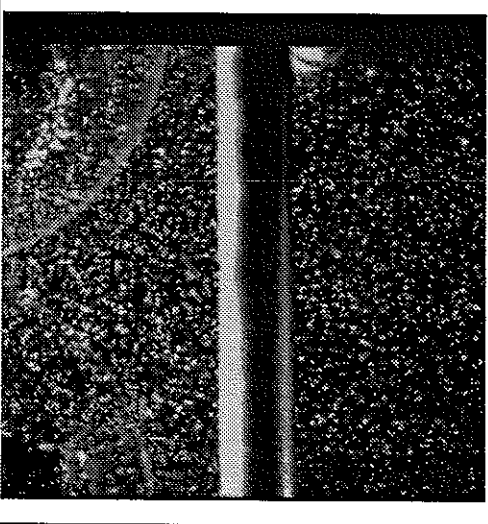
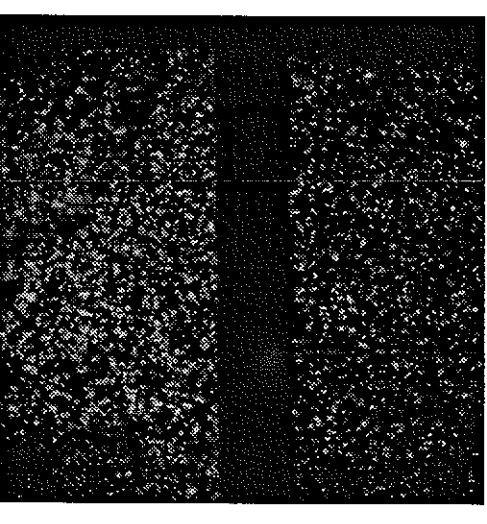
| 撮影位置  | 撮影画像  | 解析画像 (ノイズ除去後)  |
|---|---|--|
|  <p>撮影領域 (B-1)</p> <p>Position B-1</p>   |    |    |
|  <p>撮影領域 (B-2)</p> <p>Position B-2</p>  |   |   |
|  <p>撮影領域 (B-3)</p> <p>Position B-3</p> |  |  |

図 5.2-1 閉塞部の撮影図

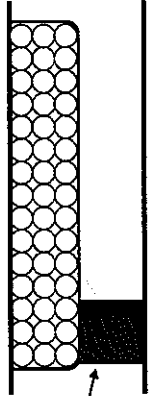
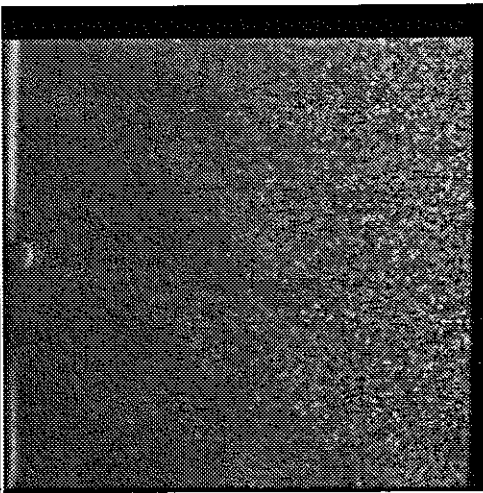
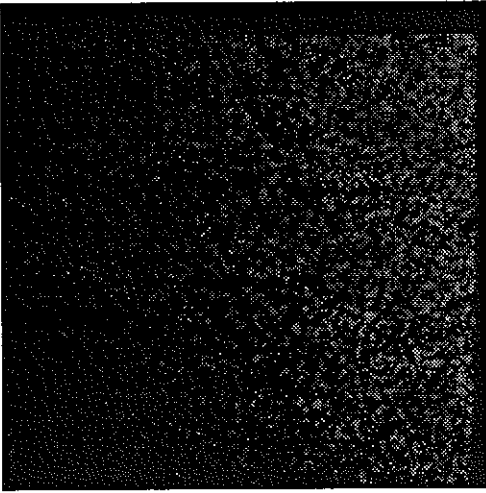
| 撮影位置  | 撮影画像  | 解析画像（ノイズ除去後）   |
|---|---|--|
|  <p data-bbox="283 689 382 741">撮影領域<br/>(健全側)</p> |  |  |

図 5.2-2 健全流路の撮影図

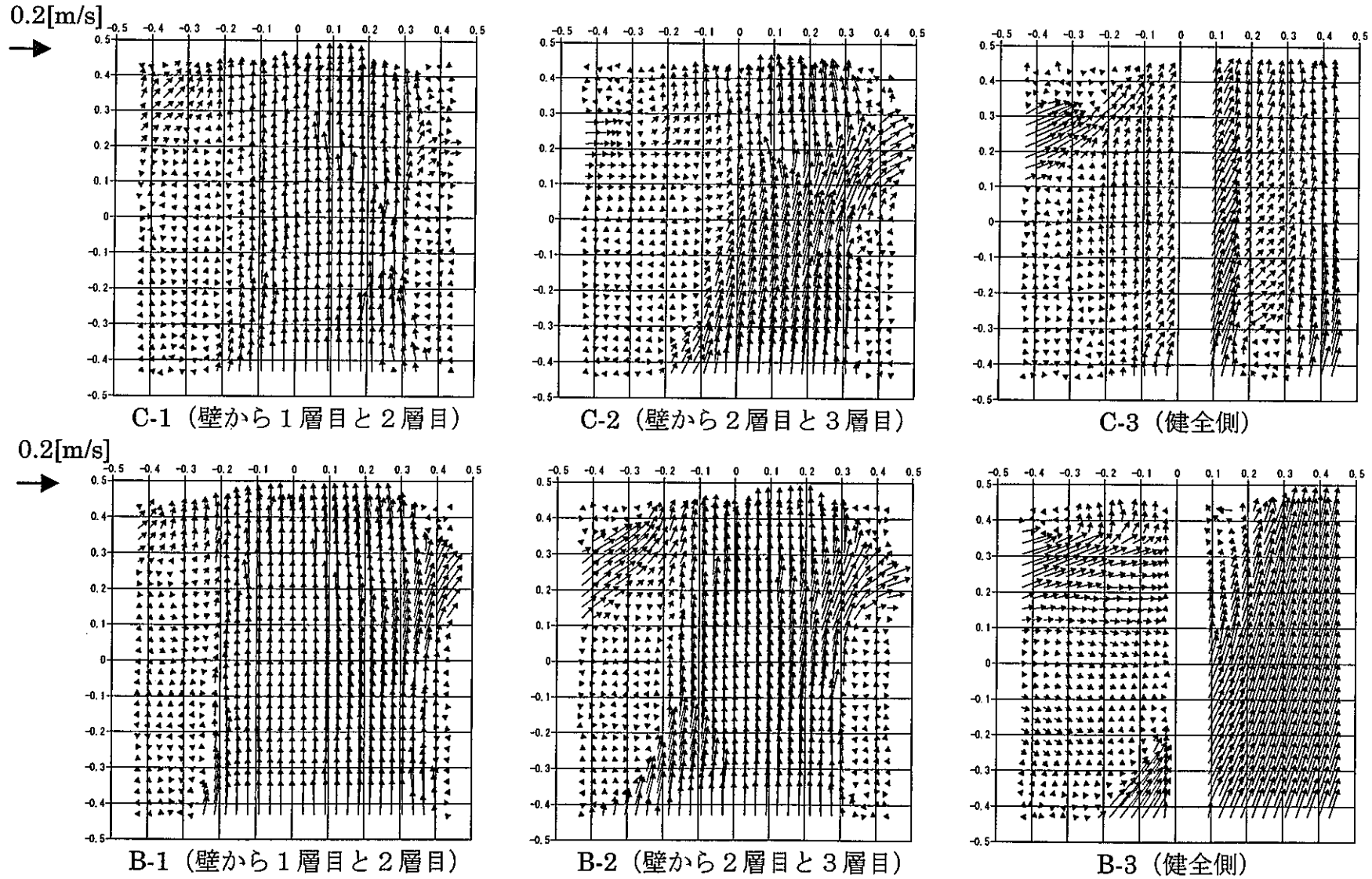
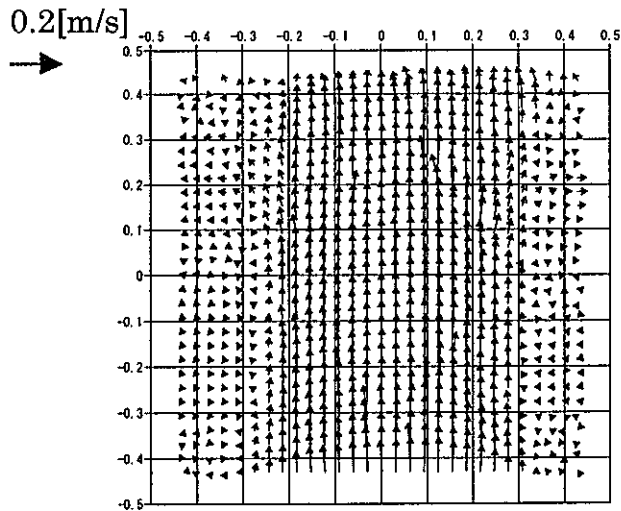
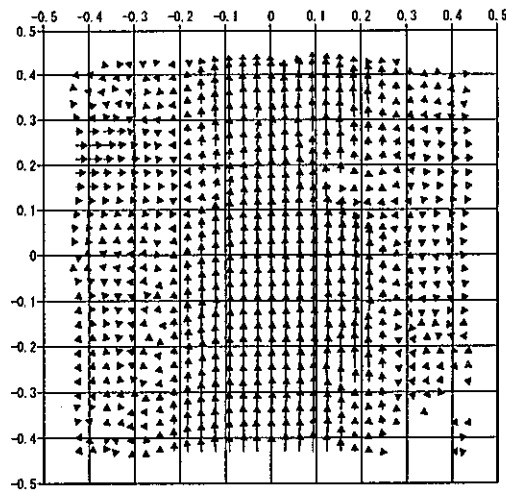


図 5.3-1 時間平均ベクトル分布 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )  
(閉塞下端部, 第1段目から第3段目)

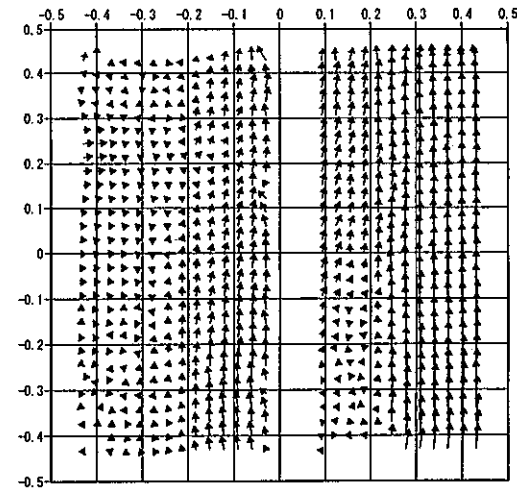




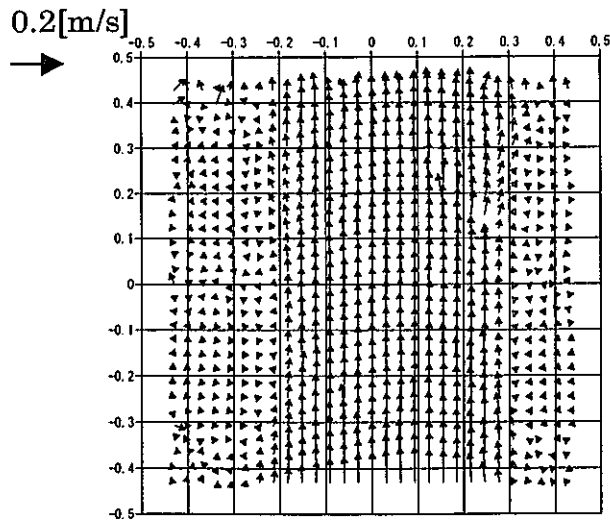
I-1 (壁から1層目と2層目)



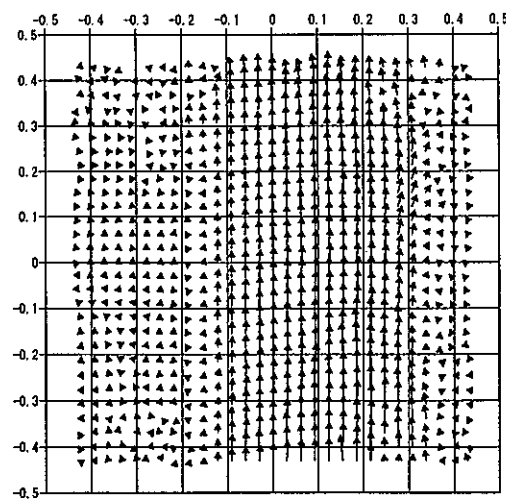
I-2 (壁から2層目と3層目)



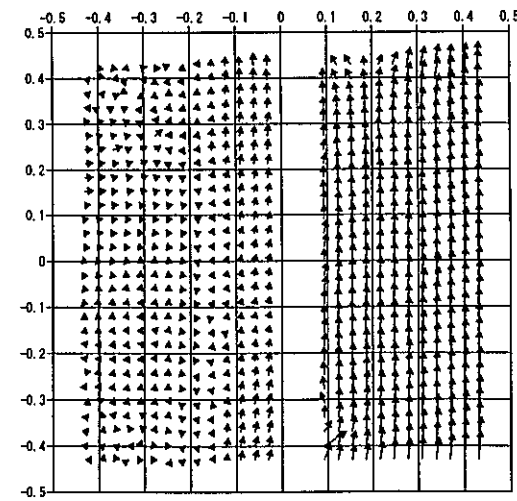
I-3 (健全側)



H-1 (壁から1層目と2層目)

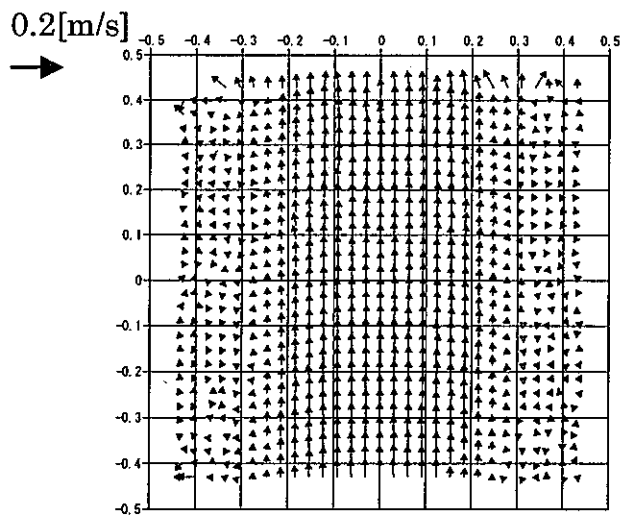


H-2 (壁から2層目と3層目)

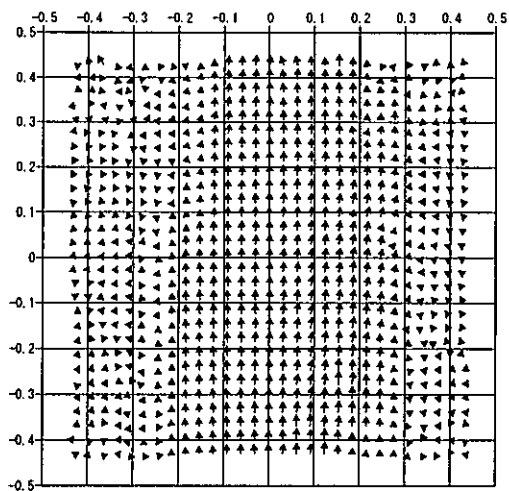


H-3 (健全側)

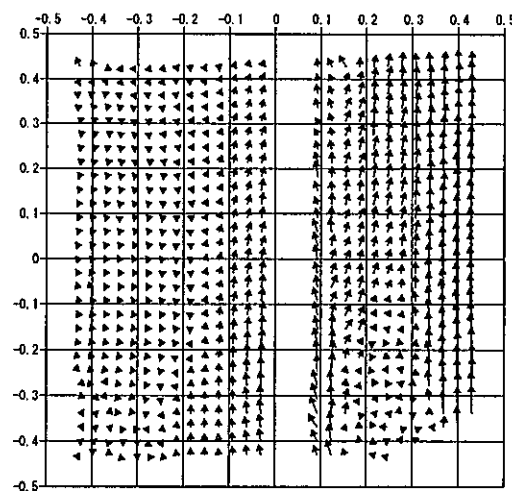
図 5.3-2 時間平均ベクトル分布 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )  
(閉塞中央部, 第7段目から第9段目)



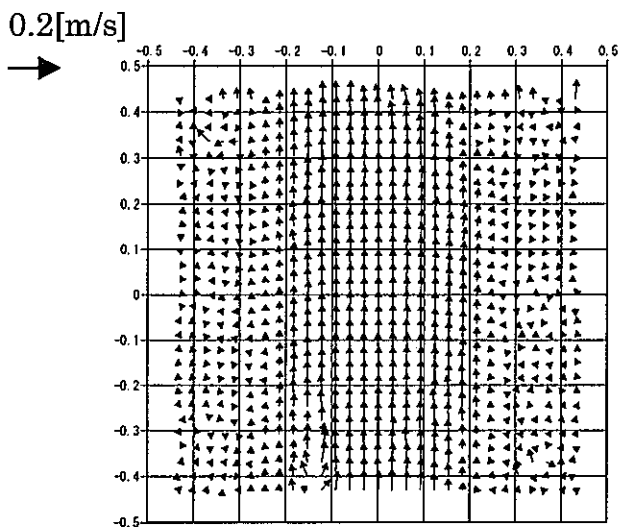
O-1 (壁から1層目と2層目)



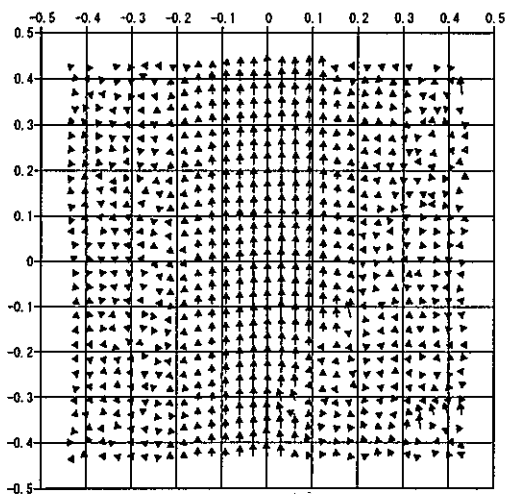
O-2 (壁から2層目と3層目)



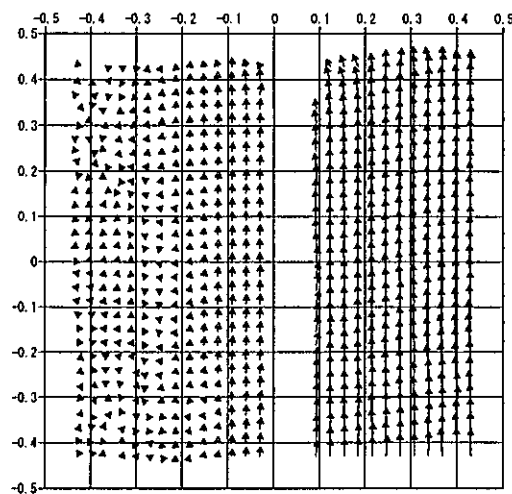
O-3 (健全側)



N-1 (壁から1層目と2層目)



N-2 (壁から2層目と3層目)



N-3 (健全側)

図 5.3-3 時間平均ベクトル分布 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )  
(閉塞上端部, 第13段目から第15段目)

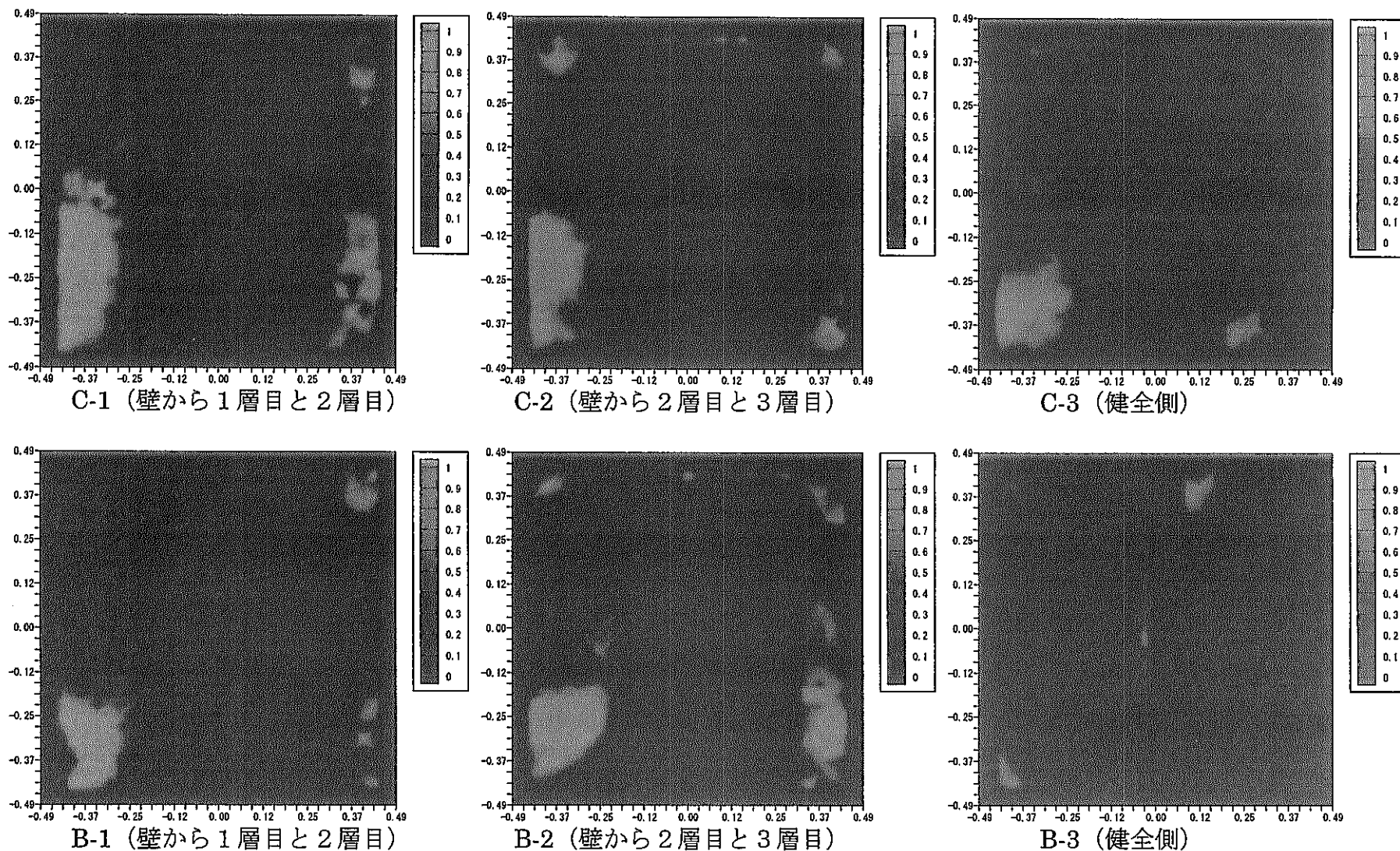


図 5.4-1 合成ベクトルの流れ方向変動 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )  
(閉塞下端部, 第1段目から第3段目)

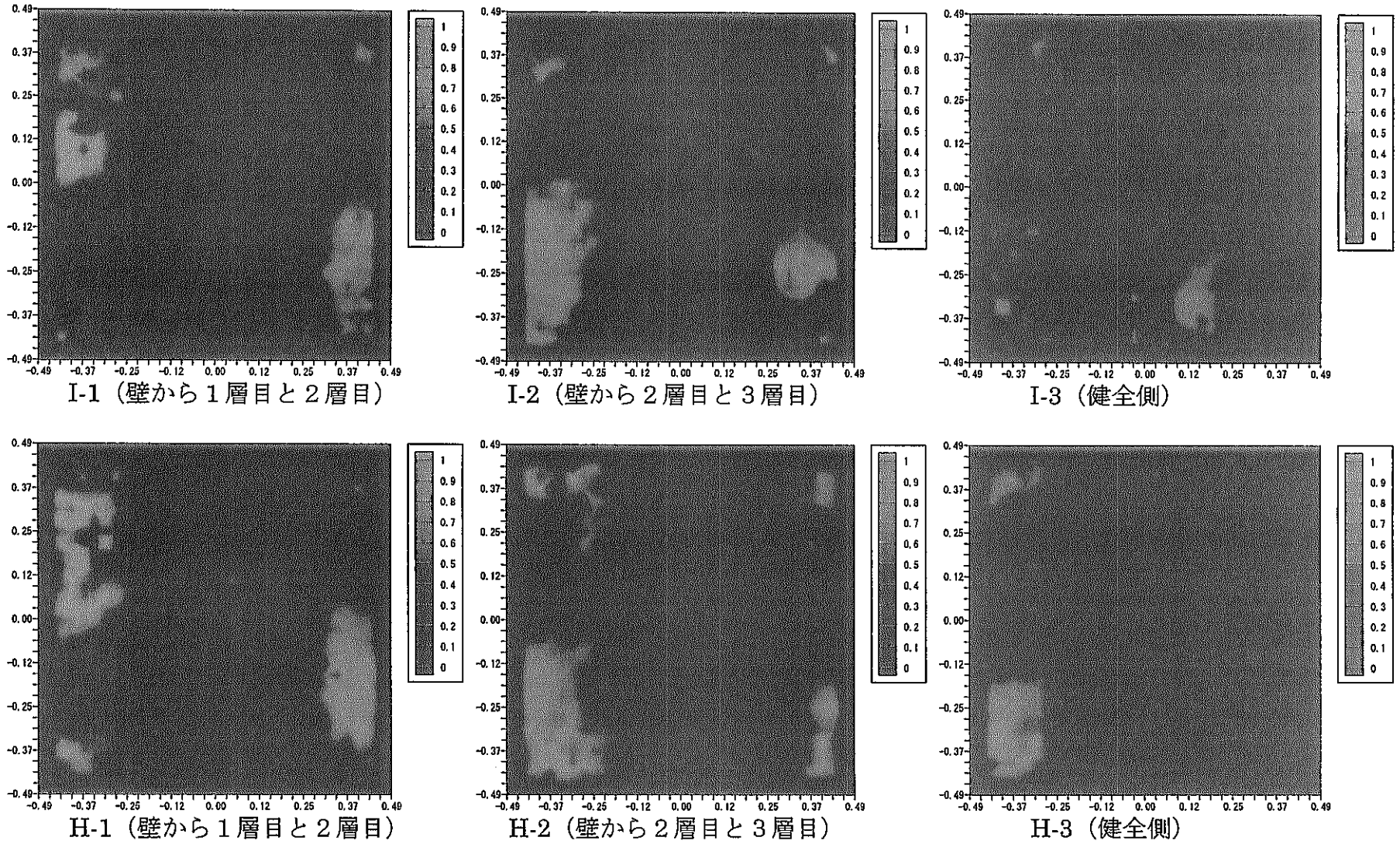


図 5.4-2 合成ベクトルの流れ方向変動 (Re=5,400, Q=2.83[m<sup>3</sup>/h])  
 (閉塞中央部, 第7段目から第9段目)



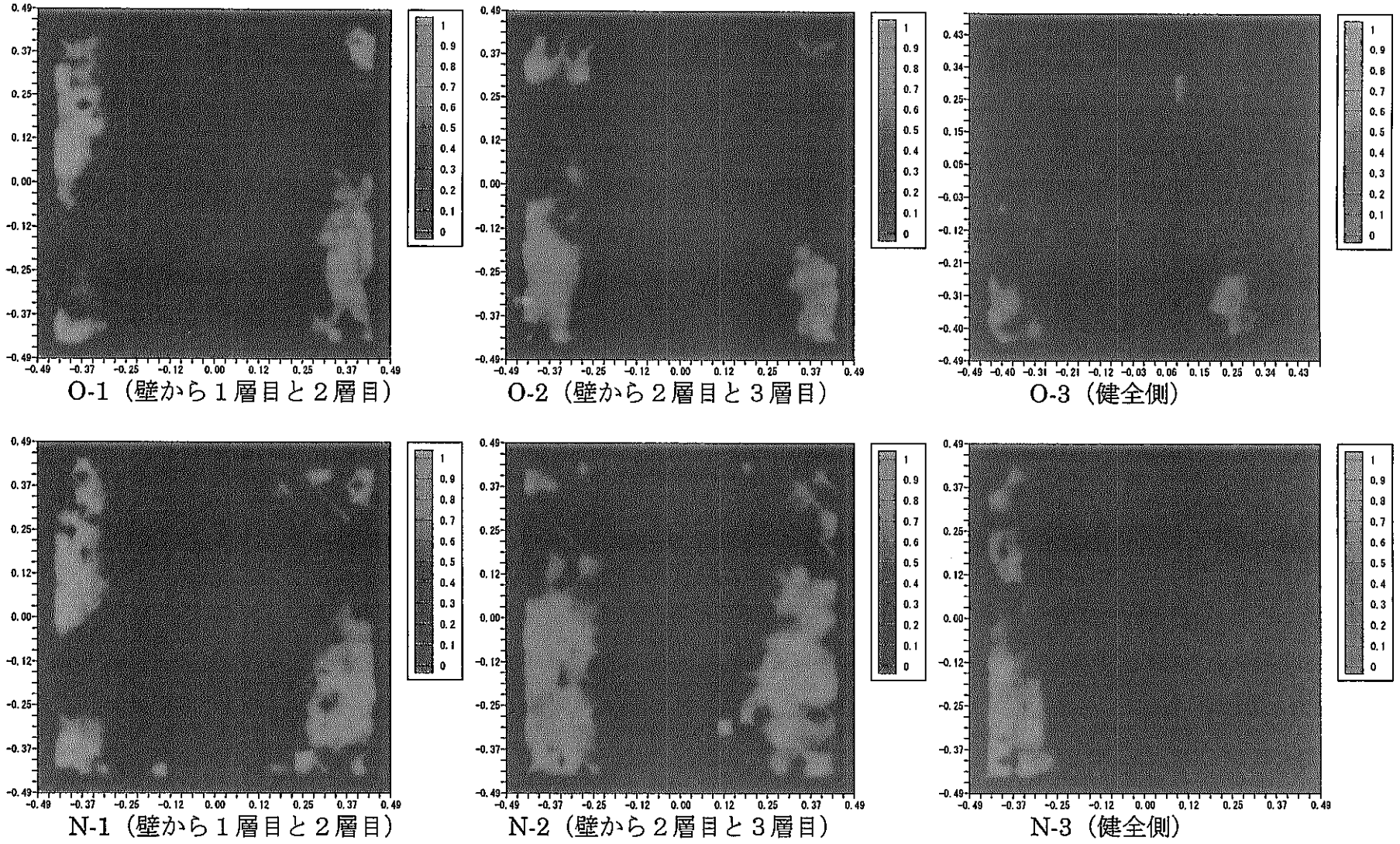
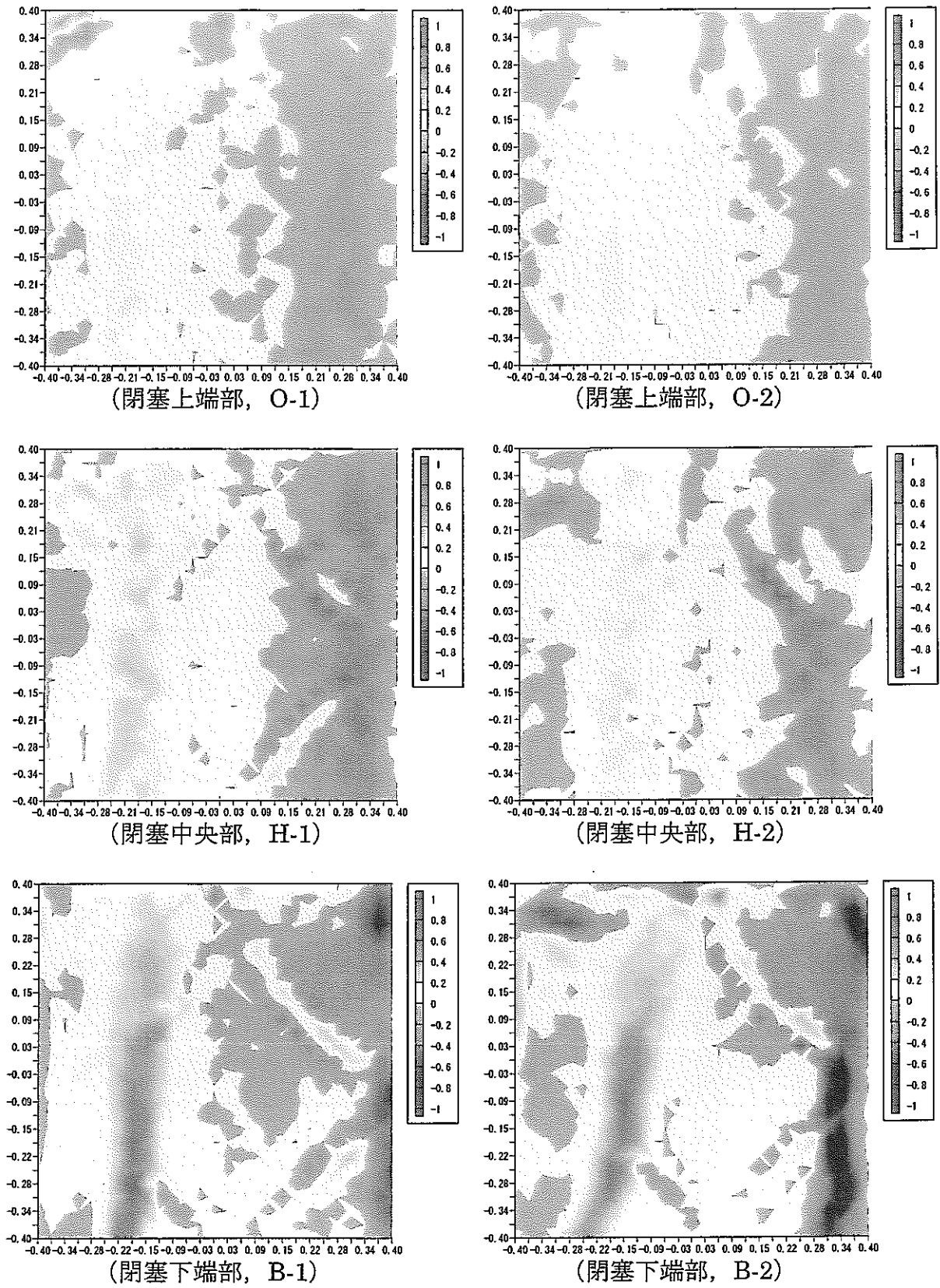


図 5.4-3 合成ベクトルの流れ方向変動 (Re=5,400, Q=2.83[m<sup>3</sup>/h])  
 (閉塞上端部, 第1 3 段目から第1 5 段目)



(a) 壁から一層目と二層目の間

(b) 壁から二層目と三層目の間

図 5.5 時間平均渦度分布 ( $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$ )

(領域 B-2 の最大値で各領域の値を規格化)

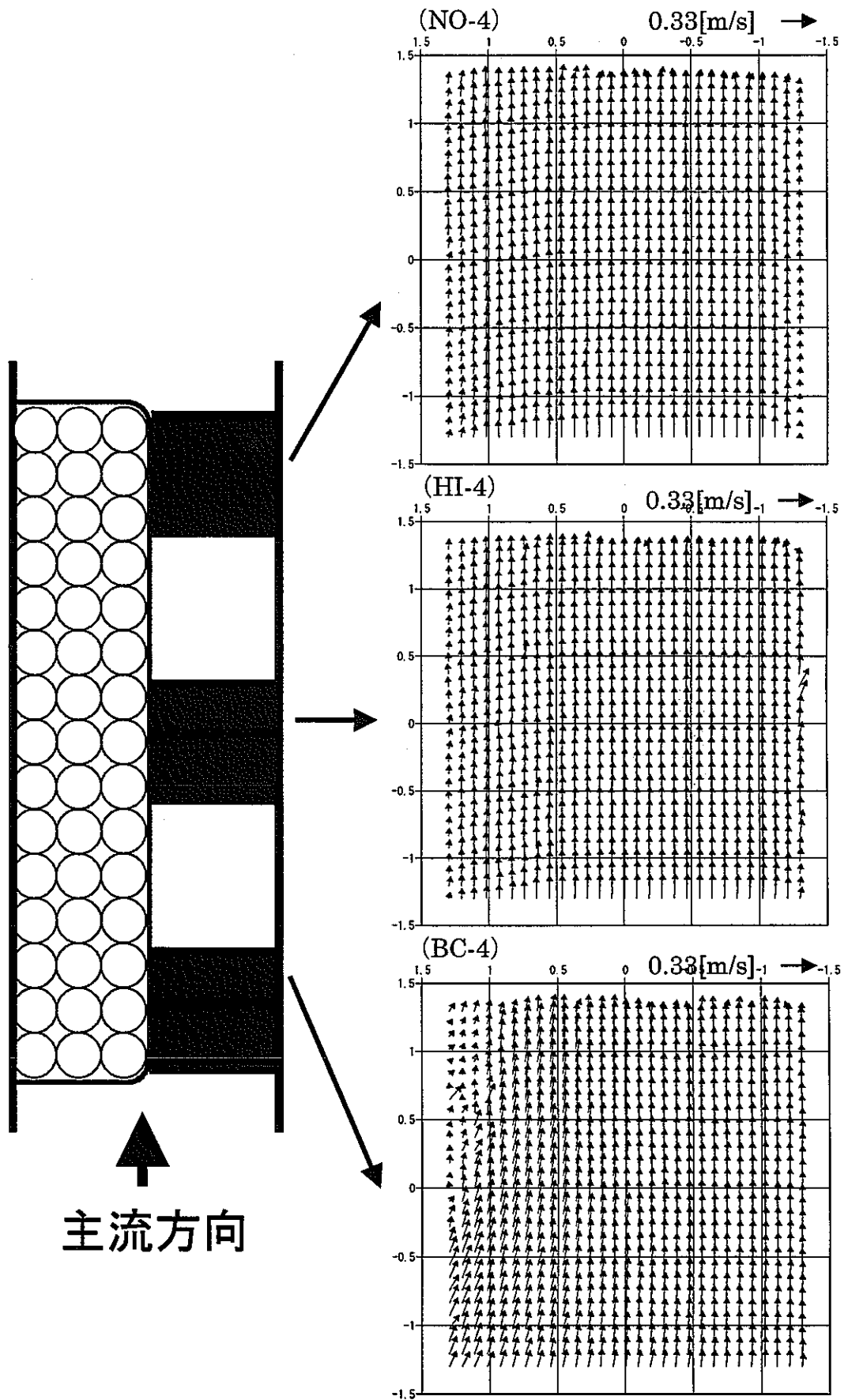
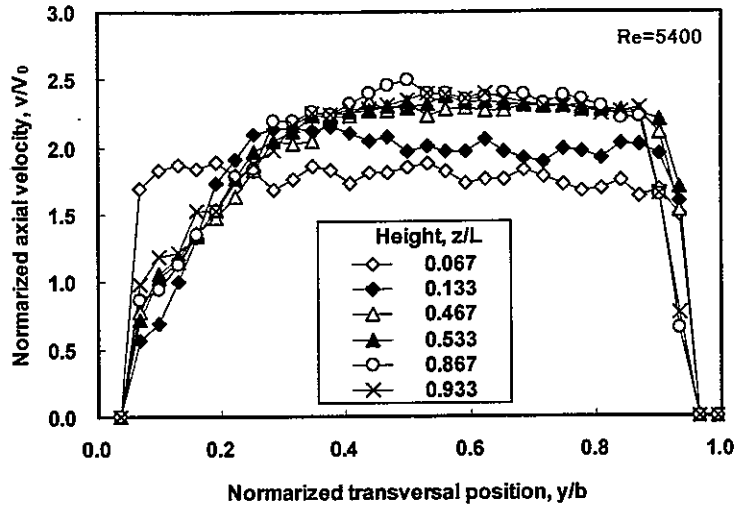
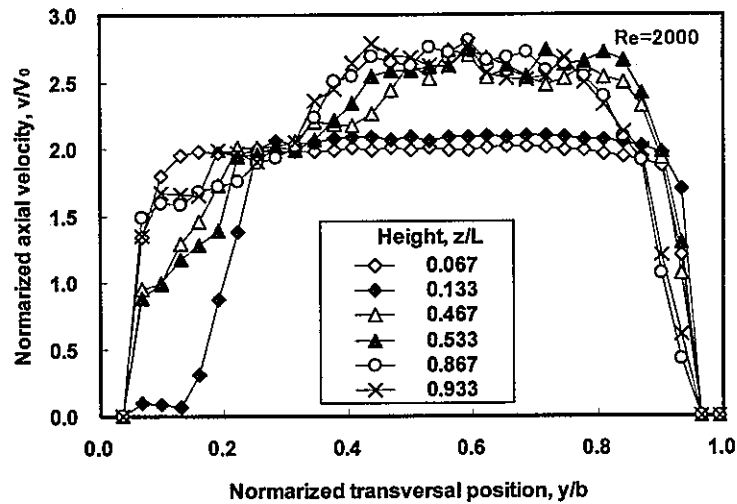


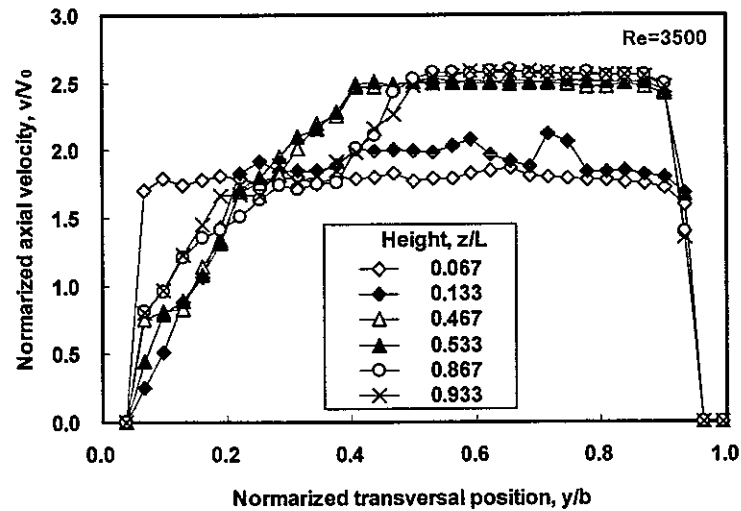
図 5.6 時間平均ベクトル分布 (Re=5,400, Q=2.83[m<sup>3</sup>/h])



(a)  $Re=5,400$ ,  $Q=2.83[m^3/h]$



(b)  $Re=3,500$ ,  $Q=1.83[m^3/h]$



(c)  $Re=2,000$ ,  $Q=1.05[m^3/h]$

図 5.7 PIV による健全側平均速度分布

閉塞部高さ  $L=300[mm]$  で規格化,  $z/L=0$  は閉塞部下端,  $z/L=1$  は閉塞部上端を示す。



## 6. 閉塞物内部の温度場計測

### 6. 1 レーザ誘起蛍光法

閉塞物周りの温度分布を2次元的に測定するために、レーザ誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence, LIF) の採用を検討する。熱電対を用いる場合は点計測となるため空間的な温度分布を計測するには、計測断面内に相当数の熱電対を設置するか、定常状態を構築した上で熱電対の位置を変化させて計測する他にない。熱電対の設置は、少なからず流れ場を乱すため設置数、設置個所等には制限が生じる。

中島ら<sup>[9]</sup> (1992) は水を作動流体として、レーザ誘起蛍光法 (LIF) と LDV による水の温度と速度の一点同時計測法を考案した。これは、誘起蛍光剤の蛍光発光強度の温度依存性を利用したものであり、アルゴンイオンレーザを光源とする LDV の測定体積内を通過するトレーサ粒子の散乱光を捉える受光器 (フォトマル) と、測定体積内の温度変化による蛍光発光強度を捉える受光器の2つを用い、それぞれを個別に観測する。これにより、作動流体に蛍光染料とトレーサ粒子を混合させておき、測定体積内を通過するトレーサ粒子の速度 (流速) と、同一測定体積内の蛍光染料の蛍光発光強度 (温度) を同時に測定することが可能である。蛍光波長は励起光であるアルゴンイオンレーザの波長よりも長いいため、光学フィルターによってトレーサ粒子の散乱光と蛍光とを分離することが可能となる。蛍光剤をカプセルに入れるのではなく水に溶解させるため、時間的応答性は極めて高く、測定温度範囲も感温液晶に比べて広い。このような特性から、閉塞物周りの温度分布を一度に測定する手法として、LIF の適用が期待できる。以下に述べる LIF の手法は、榊原らが開発した手法<sup>[9]</sup>を基本としている。

蛍光物質として、(1) 温度消光能が高い、(2) 量子収率が大きい、(3) 溶媒に水が使える、(4) 残光時間が極めて短い ( $10^{-6}$ [sec]未満)、(5) 手に入りやすく比較的安全である、等の理由により有機蛍光物質ローダミン B (Rhodamine B,  $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ ) を用いた。ローダミン B は分子量 479.02 のキサンテン系塩基性染料で、金属光沢のある緑色微粉末であり、水やエタノールに可溶で赤色の溶液になる。色素系増感剤、レーキ顔料、紙や布の染色などの工業的な用途に幅広く用いられており、染色能力が高く、安価である<sup>[9]</sup>。ローダミン B の吸収、および発光スペクトル (Krasovitskii & Bolotin(1998)からの引用) を図 6.1 に示す。発光 (蛍光) 波長は前述の通り吸収波長に比べて長く、散乱光を長波長フィルタで遮断することができるため、蛍光と散乱光を分離することができる。

従来は、媒体として水を用いた研究が多くなされており、NaI 水溶液を媒体とした研究はない。そこで、濃度 56.9[wt%] の NaI 水溶液中での予備実験を行い、ローダミン B の水溶液中での溶解性および温度特性を調べる。

蛍光発光強度は励起光波長、励起光強度、温度、PH などによって変化する。強度  $I_e$  の励起光により励起された蛍光体の発光強度  $I_f$  は、

$$I_f = A \cdot C \cdot I_e \cdot \varepsilon_f \cdot \phi_q(T) \quad (6)$$

で表される。ここで、 $A$  は集光率、 $C$  は濃度、 $\varepsilon_f$  は吸光係数、 $\phi_q$  は量子収率である。この中で  $\phi_q$  は温度や後述する PH やハロゲンイオンなどの濃度によって変化する。 $I_e$  と  $C$  が一定のとき、蛍光発光強度  $I_f$  は  $\phi_q$  のみの関数、つまり温度の関数となる。

## 6. 2 温度校正実験

図 6.2 に蛍光発光強度と温度の関係を求めるために用いた実験装置を示す。2つの小型ガラス容器 (50x50x100[mm<sup>3</sup>]) に NaI 溶液 (56.9[wt%]) を注いでローダミン B を溶解する。図 6.3 に示すようにレーザ側の容器内の溶液は温度一定とするが、もう一方の容器内の溶液は底面を加熱あるいは冷却して水溶液温度を制御する。容器内の温度分布を一様にするためにスターラーで常時攪拌しながら、温度を標準温度計と熱電対で計測した。YAG レーザビームをシリンドリカルレンズでシート状に広げて照射し2つのガラス容器の蛍光発光を CCD カメラで計測した。図 6.3 および図 6.4 に示すように、ガラス容器手前にスリットを設置し、平行光線で入射させレーザシートの強度が一定になるよう工夫した。CCD カメラのレンズの前には長波長透過フィルターが取り付けられており、ローダミン B の蛍光発光のみカメラに入る。表 6.1 および表 6.2 に CCD カメラおよび光学フィルタの仕様を示す。撮影した画像の例を図 6.4 に示す。右の容器の発光面に見えるのは熱電対、左の容器の発光面に見えるのは標準温度計である。2つの容器を用いたのは、2つの発光強度の比を取ることでパルスレーザである YAG レーザの強度の変動を相殺し、発光強度を温度のみの関数として求めるためである。具体的には図 6.4 のようにレーザ手前側の溶液を温度一定とし、もう一方の溶液の温度を変化させて、それぞれの蛍光発光領域の輝度比をとると、その値はレーザ強度変動に影響されない温度のみの関数となる。温度一定 ( $T=T_c$ ) でのローダミン B の蛍光発光強度  $I_c$  と、もう一方の温度 ( $T=T_i$ ) のローダミン B 溶液の蛍光発光強度  $I_i$  との比  $I_r$  は式 (6) より

$$I_r = I_i / I_c = \phi_q(T_i) / \phi_q(T_c) = f(T) \quad (7)$$

となり、温度のみの関数となる。

文献[3]によれば、使用する水の水質によって蛍光強度が変化することが分かっている。そこで、本試験においても NaI 水溶液の溶媒として純水を用いた。図 6.5(a) および図 6.5(b) に温度 - 蛍光発光強度の関係を示す。ここで示す蛍光発光強度は、図 6.3 で示した温度を変化させた領域 B の蛍光輝度と、温度一定の領域 A (参照領域) での蛍光輝度との比であり、図 6.5 では、領域 B の水溶液温度 25[°C]における蛍光輝度比を示している。

ローダミン B の温度に対する蛍光発光強度の関係を標準的な校正関数として求めるために溶液を数回交換し、温度条件を変化させて計測した。しかし、同じ濃度の NaI 水溶液であってもヒステリシスが存在する場合 (図 6.5(a)) と存在しない場合 (図 6.5(b)) があった。図 6.6 は各試験ごとの、領域 A (参照領域) に対する領域 B の水溶液温度 25[°C]における輝度比をプロットしたものである。図 6.5(b) に示したようにヒステリシスが存在する試験の場合、この値が平均値から大きく外れた。ここで求める輝度が校正時の基準となるため、ヒステリシスの存在する試験データの排除と、偏りの大きい試験データを排除するために許容範囲外 ( $> \pm 2\sigma$ ) の試験データを異常値として排除した。グラフから目視でヒステリシスを判断すると、主観が入り込んでしまい判断基準が曖昧になる。そこで、このような方法により基準を定め、異常値排除を行った。実際の計測時において、ある程度のヒステリシスを含んでおり、校正曲線にはこれら誤差を含んでいるものと考えなければならない。図 6.7 に許容範囲内 ( $< \pm 2\sigma$ ) にある全試験データの温度と相対蛍光輝度と関係を示す。図 6.7 中の実線は最

小二乗法で求めた近似曲線であり、この特性曲線の推定標準誤差 (SEE) は、 $\pm 0.0217$  (2.17%) である。また、図中の点線はそれぞれ SEE 値の 2 倍の値を示しており、この範囲の中に全データ数 570 点の 92.5% が入る。ここで求めた特性曲線の逆関数が最終的な相対蛍光輝度-温度校正曲線であり、相対蛍光輝度を横軸、温度を縦軸に取るにより相対蛍光輝度-温度校正曲線が求められる。図 6.8 に最終的な相対蛍光輝度-温度校正曲線を示す。

$$T_i = f^{-1}(T_i) = g(I_r) = 26.76 \times I_r^2 - 129.9 \times I_r + 128.4 \quad (8)$$

この校正曲線を適用して、等温場での蛍光輝度と温度を参照温度  $T_{ref}$ 、参照輝度  $I_{ref}$  とすることで瞬時の温度分布を求めることが出来る。

$$I_r = I_i / I_{ref} \quad (9)$$

$$T_i = g(I_r) = g(I_i(T) / I_{ref}) \quad (10)$$

### 6. 3 温度計測に伴う不確かさ

温度計測における不確かさを評価するために、不確かさ解析を行った<sup>[15]</sup>。測定誤差は測定値から真の値を引いた値として定義される。ある測定における全誤差は、測定値の平均値から真の値を差し引いたかたより誤差と、各測定値のばらつきである偶然誤差にわけられる。かたより誤差はその上限値である正確度  $E^B$  で、偶然誤差はランダム誤差とも呼ばれ、測定値の標準偏差である精密度  $E^S$  で表される。 $E^S$  は次式で推定される。

$$E^S = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N X_k^2 - (\sum_{k=1}^N X_k)^2 / N}{N-1}} \quad (11)$$

ここで  $N$  は測定回数、 $X_k$  は各測定値、 $\bar{X}$  は測定値  $X_k$  の平均値である。通常、測定に含まれる誤差は校正、データ収集、データ処理などの複数の測定要素に含まれる誤差が伝播したものと考えられ、それらの誤差  $E_i^S$ 、 $E_i^B$  は次式の誤差伝播法則により伝播する。

$$E_m^S = \sqrt{\sum_{i=1}^k (\theta_i E_i^S)^2} \quad (12)$$

$$E_m^B = \sqrt{\sum_{i=1}^k (\theta_i E_i^B)^2} \quad (13)$$

$E_m^S$ 、 $E_m^B$  は  $k$  個の測定要素の誤差が総括された精密度および正確度である。 $\theta_i$  は感度係数と呼ばれ、各要素の単位量の変化に対する結果の変化量を表すものである。結果を  $r$ 、各要素を  $P_i$  とすれば

$$\theta_i = \frac{\partial r}{\partial P_i} \quad (14)$$

で定義される。誤差を評価する際に、かたより誤差と偶然誤差と一つにまとめて簡潔に記述するために不確かさ  $U_{rs}$  を定義する。

95% 包括度不確かさは、

$$U_{rss} = \sqrt{E_m^B + (t_{st} E_m^S)^2} \quad (15)$$

99%包括度不確かさは、

$$U_{add} = E_m^B + (t_{st} E_m^S) \quad (16)$$

で定義される。 $t_{st}$ はスチューデント  $t$  値で、データ数が少ない場合には標準偏差が少なく見積もられるのを補正するために乗ぜられるものであり、データ数が 30 以上であれば  $t_{st}=2$  としてよい。

LIF による温度計測の不確かさの主な原因としては、

- 1) 校正曲線の不確かさ
- 2) 初期温度  $T_{ref}$  の計測に伴う不確かさ
- 3) 輝度値の変動に伴う不確かさ

が考えられる。

ここで、1) の校正曲線の不確かさに対しては、図 6.9 に示すように各試験データをプロットして、相対蛍光輝度の温度変化率から感度係数を求めた。次に、図 6.7 に示すように各試験データのプロットから温度-相対蛍光輝度特性曲線を最小二乗法によりもとめ、精密度については推定標準誤差 (SEE) により求めた。2) は実験に用いた標準温度計の精度により求めた。3) は温度一定に保たれたローダミン B 溶液を LIF で実測し、その短期 (10 秒以内) 変動の標準偏差から精密度、長期変動 (10 秒以上) の最大変動幅から正確度を見積もった。感度係数は 1) に同じく校正曲線の傾きから導出した。総括された不確かさを表 6.3 に示す。

輝度値の不確かさの正確度は、レーザ輝度のゆらぎによって主に生じる。例えば、校正実験のように温度一定の参照領域と温度変化する測定対象とを同一画像上で計測 (撮影) する場合、このレーザ輝度のゆらぎによる不確かさは輝度の比をとることで排除される。しかし、第 6. 4 節で示す本試験においては、同一画像上に参照領域および計測領域を含めることはできないため、このレーザ輝度のゆらぎが不確かさの要因となり得る。

Nd-YAG レーザの場合、パルス状にレーザが発振され、連続光であるガスレーザ (Ar レーザ) に比べて 1 パルスごとの輝度変動は大きい。第 6. 5 節で述べる実験の際に、YAG レーザの輝度変動 (シート面内の輝度分布の時間変動) が問題となり、Ar レーザに変更した。図 6.4 で求めた校正曲線は、ローダミン B の蛍光波長での輝度をもとに求めており、入射光は光学フィルタで除去されるため入射光波長の影響を受けない。よって、Ar ガスレーザを光源とした場合にも適用することは可能である。速度場計測 (PIV) と温度場計測 (LIF) を同時に行わない場合には、不確かさを小さくするため、連続光であるガスレーザ (Ar レーザ) の使用が有効である。

## 6. 4 温度場計測実験

図 6.10 に温度計測用に改造した簡易ループ試験装置を示す。矩形流路の片側側面に、ガラス球で模擬した閉塞領域 (60[mm]) とその上流側 (120[mm]) に電気ヒータを設置した。電気ヒータは、アルミブロックにシース型ヒータを挿入して製作し、入力電圧 100[V]、最大出力 400[W] である。スライダックにて電圧を調整してヒータ

出力を制御した。螺旋状に巻いたアルミ製パイプをテスト部下流にあるダンプタンク内に設置してパイプ中に水道水を流すことにより、ヒータによる入熱を除熱したタンク内の水溶液温度を一定に保った。

実験手順は、まずポンプを停止し流れを止め、レーザ光を遮断して背景（オフセット）輝度を計測（撮影）する。次に、流量を設定しヒータを止めて等温状態（参照温度）での蛍光輝度分布を計測（撮影）し参照輝度とする。ヒータ出力を設定し、定常状態になったことを確認して温度分布（蛍光輝度分布）を計測（撮影）する。水溶液の入口温度は  $25[^\circ\text{C}]$ 、流量は  $6.6[\text{l}/\text{min}]$ 、球充填層手前での断面平均流速は  $0.03[\text{m}/\text{s}]$  である。このとき閉塞部前面での  $\text{Re}$  数は、約  $1.5 \times 10^3$  である。レーザは画像上面から照射され、流れ方向は画像の左から右側へ流れている。

図 6.11 に参照輝度分布画像を示す。計測対象である蛍光輝度は参照輝度との比として評価するため、入射レーザ光の輝度強度分布は参照輝度を計測した時点から時間的に変動しなければ一様でなくともよい。当初、YAG レーザでの計測を試みたが、レーザ強度分布が時間的、空間的に変動（輝度ムラが時間的に変化）した。つまり、レーザ強度分布が参照輝度計測時と温度計測時で異なり、温度計測時でも各撮影画像によって異なるという状況が生じた。この場合、レーザ強度ムラが温度変動として計測されてしまい、実際には生じない温度変動が観測されてしまう。そこで、図 6.1 に示したローダミン B の吸収スペクトル分布から考えて、YAG レーザに近い波長をもつ Ar レーザを用いて計測を行った。カメラで捕らえているのは、図 6.1 に示した蛍光波長（ $600[\text{nm}]$  付近）であり、それ以下の短波長光はカラーフィルタで除去されるため、入射光波長に結果は依存しない。

図 6.12 に瞬時の計測画像を示し、図 6.13 に時間平均温度分布を示す。各計測画像について、計測輝度からオフセット（背景輝度）を差し引いた輝度と、参照輝度からオフセットを差し引いた輝度との比を用いて、校正曲線（式(8)）により蛍光輝度の比を温度に変換して温度分布を求めた。さらに、一定時間間隔で撮影した 300 枚の画像を平均することにより時間平均温度分布を求めた。

ヒータ近傍（図の下側）に温度境界層が発達して、閉塞部に流れ込んでいるのが分かる。また、ヒータに接する閉塞部壁側（図下側）の空隙で温度が高くなっている。また、閉塞部下流では、矢印で示すように真中のガラス球の接点から温度の高い流れが観測でき、閉塞部下流の壁近傍では流路中央部へ向かう温度の高い流れが観測される。このように、閉塞部内部および下流側では局所的な温度分布が生じることが分かる。遅い流れ（ $\text{Re}=1.5 \times 10^3$ ）ではあるが、閉塞部内の空隙部での熱流動場に関する知見を得ることができた。

しかしながら、第 6.4 節で評価したように温度計測の不確かさが  $\pm 5[^\circ\text{C}]$  と、測定温度（温度範囲  $25[^\circ\text{C}] \sim 35[^\circ\text{C}]$ ）に対して大きいと定量的な評価、例えば熱伝達率の評価などは今回の測定ではできない。今後、不確かさを小さくするような工夫が求められる。ただし、第 3.3 節で評価したように、NaI 水溶液を用いた可視化計測は、水溶液温度を一定に保つことが重要であり、非等温場での可視化実験は、屈折率調整と相反する。よって、本試験のような粒子層の体系でガラス球間の空隙部などに対しては適用できるが、ガラス球等を透過して計測（撮影）する場合、屈折率調整が許容され得る温度範囲のなかで、精度良く測定しなければならない。

表 6.1 カメラ仕様

|             |   |
|-------------|---|
| CCD カメラ     | 浜松ホトニクス C4880-80                              |
| 撮影素子        | 全画素読み出し方式インターライン<br>CCD 固体撮影素子                |
| 有効画素[pixel] | 656 (H) x 494 (V)                             |
| 画素サイズ       | 9.9 [ $\mu\text{m}$ ] x 9.9 [ $\mu\text{m}$ ] |
| 受光面サイズ      | 6.52 [mm] x 4.89 [mm]                         |
| フレームレート     |   |
| 高精度読み出しモード  | 1~309 [Hz]                                    |
| 高速度読み出しモード  | 28~508 [Hz]                                   |
| AD コンバータ分解能 |   |
| 高精度読み出しモード  | 12 / 14 [bit]                                 |
| 高速度読み出しモード  | 10 [bit]                                      |
| IC-PCI ボード  | IMAGING Technology                            |

表 6.2 光学フィルター仕様

|             |                                  |
|-------------|----------------------------------|
| シャープカットフィルタ | シグマ光機 SCF-50S-560<br>(長波長透過フィルタ) |
| 透過限界波長      | 560 nm (Nd-YAG:532nm)            |
| 大きさ (厚さ)    | 50 x 50 mm, (2.5mm)              |

表 6.3 温度計測における各要素数, 精密度, 感度係数

|                               | 正確度 $E_i^B$   | 精密度 $E_i^S$ | 感度係数 $\theta_i$ |
|-------------------------------|---------------|-------------|-----------------|
| 校正曲線の不確かさ                     | -             | 2.2[%]      | 0.82[K/%]       |
| 初期温度 $T_{ref}$ の計測に伴う<br>不確かさ | 0.1 [K]       | -           | 1.0             |
| 輝度値 $V_c^{-1}(V)/I_c$ の不確かさ   | $\pm 2.4$ [%] | 0.6 [%]     | 0.82[K/%]       |
| 95%包括度不確かさ $U_{rss}$          | $\pm 5.0$ [K] |             |                 |

$$\begin{aligned}
 U_{rss} &= \sqrt{(2.4 \times 0.82 + 0.1)^2 + \{2 \times (2.2 \times 0.82 + 0.6 \times 0.82)\}^2} \\
 &= \pm 4.99 \\
 U_{add} &= (2.4 \times 0.82 + 0.1) + \{2 \times (2.2 \times 0.82 + 0.6 \times 0.82)\} \\
 &= \pm 6.59
 \end{aligned}$$

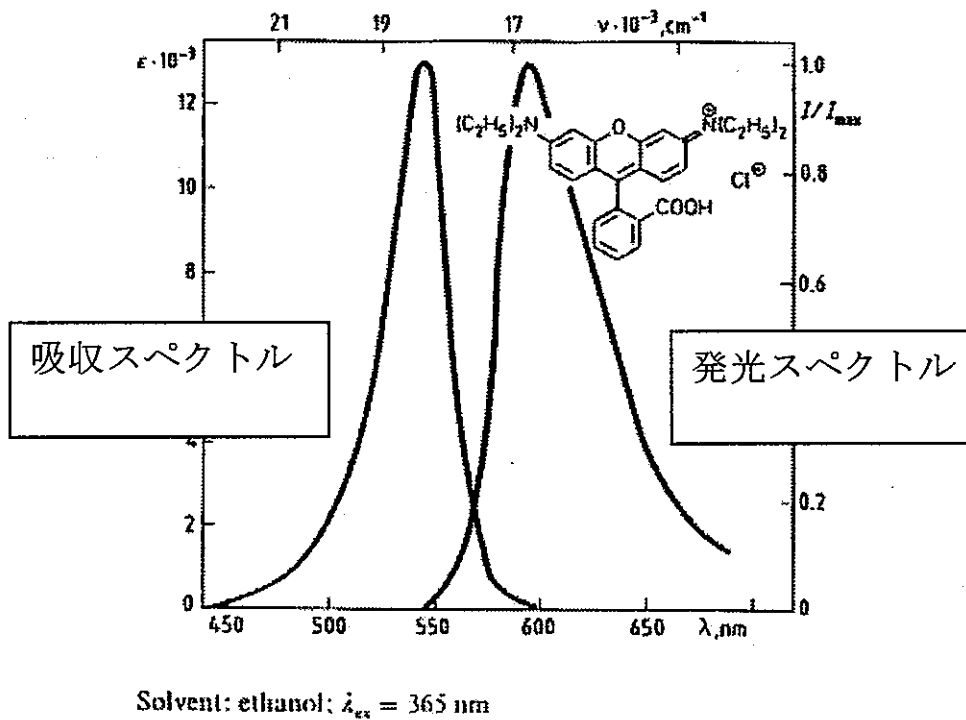


図 6.1 ローダミン B の吸収および発光スペクトル  
(文献[4]から引用)



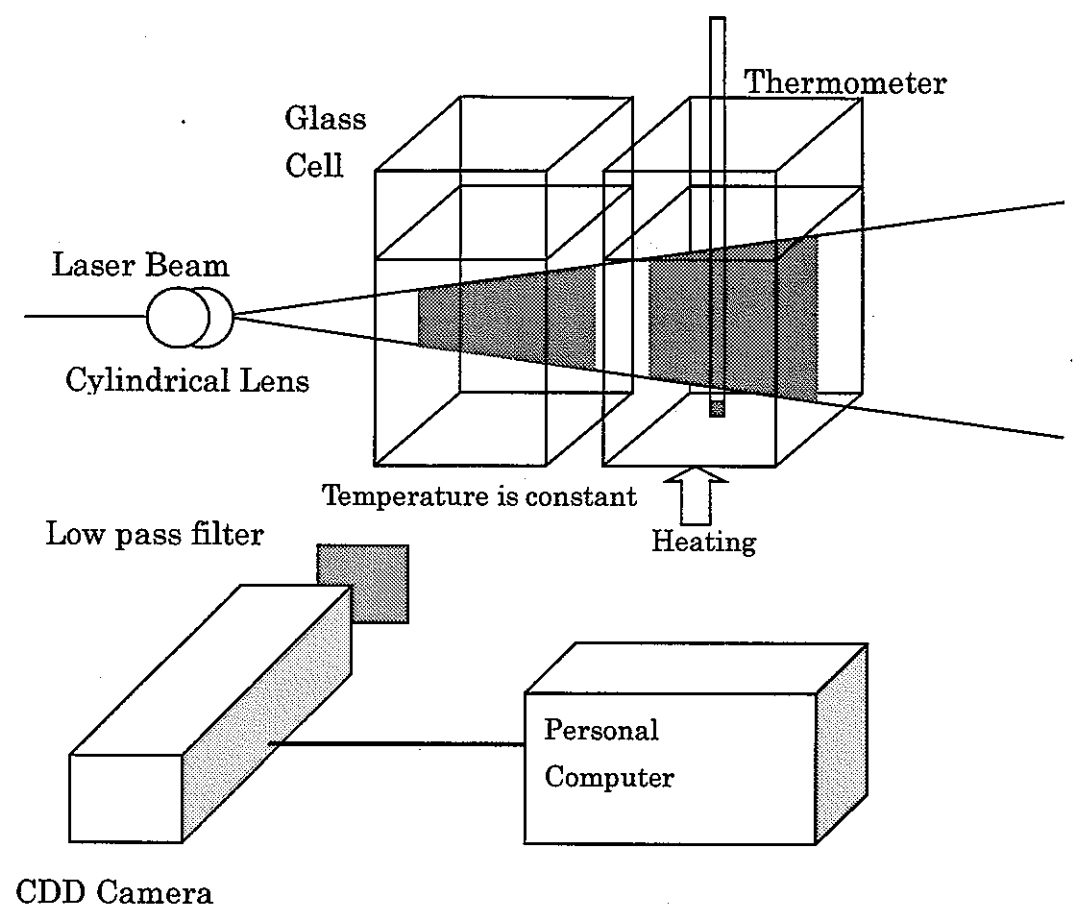


図 6.2 LIF 予備実験装置

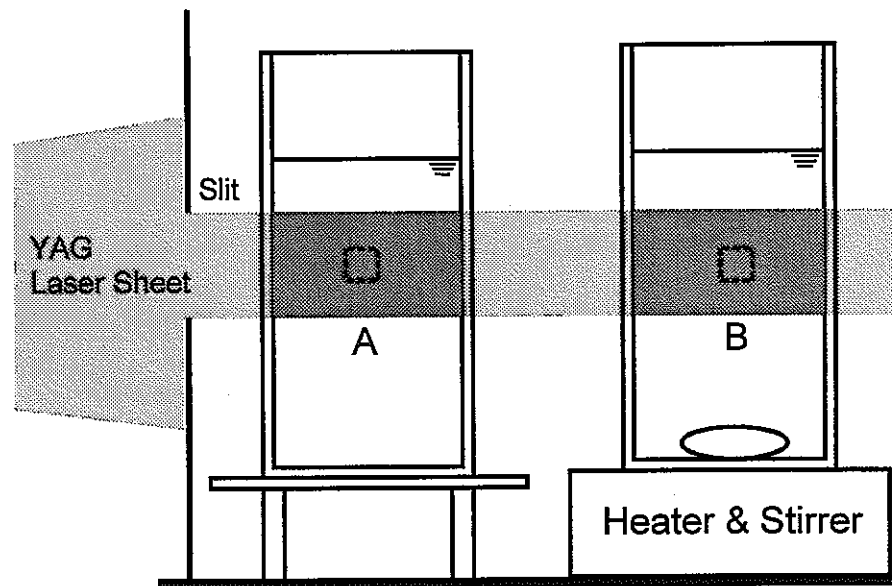


図 6.3 実験の模式図

(レーザ強度変動を相殺するために、領域 A と領域 B の輝度の比をとる)

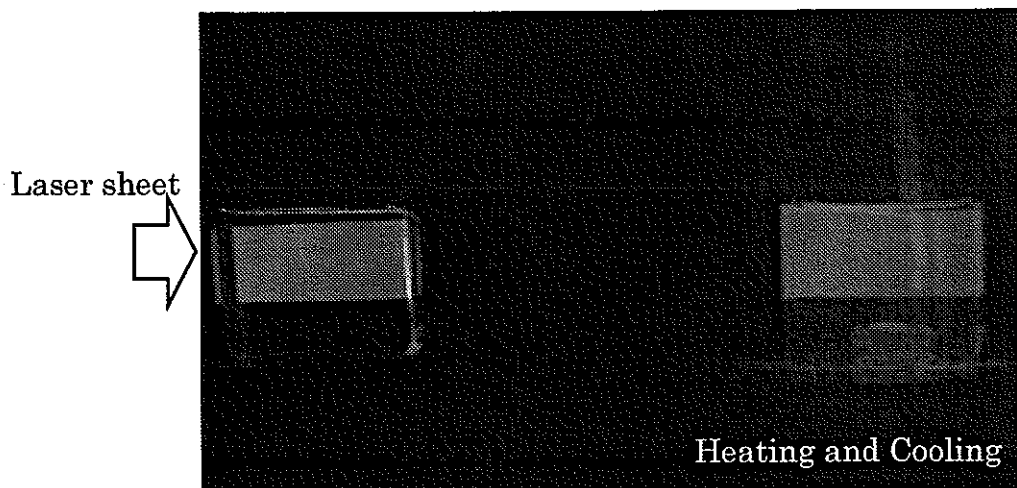
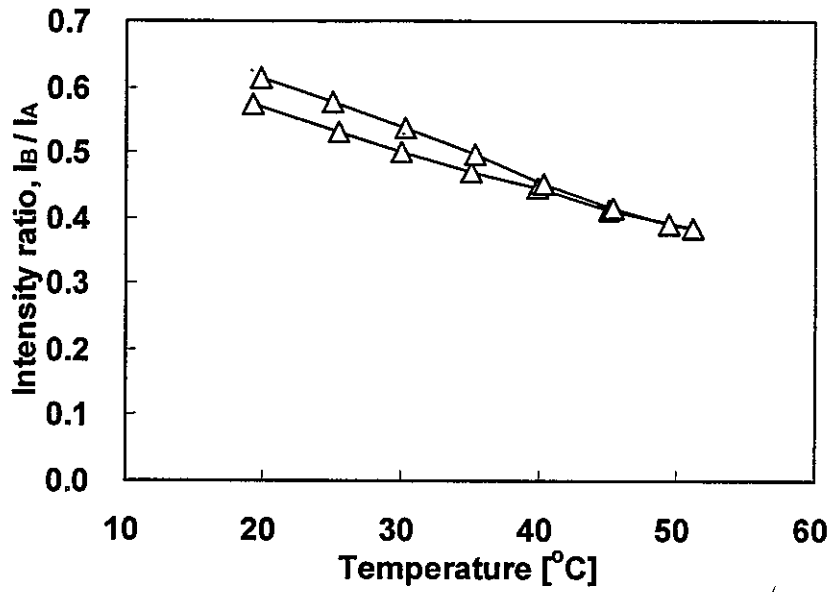
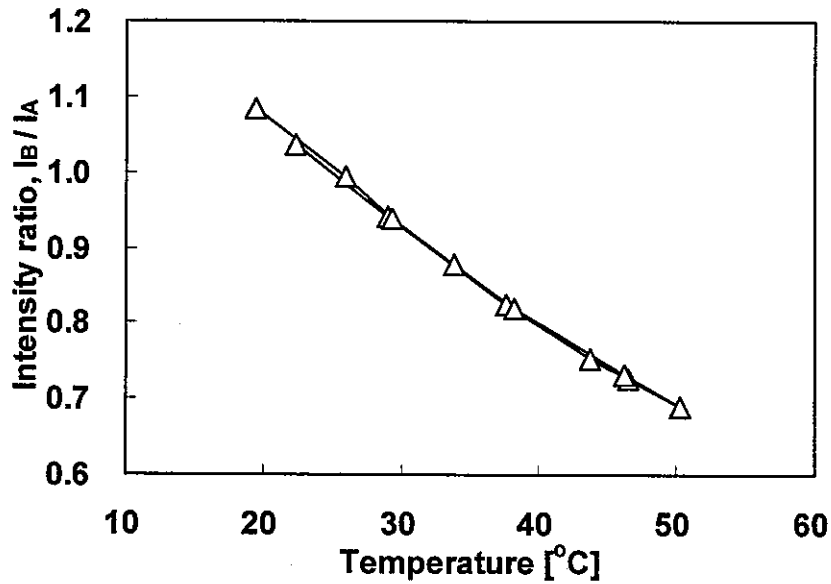


図 6.4 ローダミン B の蛍光による画像



(a) ヒステリシスが存在する場合  
(Data No.6)



(b) ヒステリシスが存在しない場合  
(Data No.27)

図 6.5 温度を変化させたときの蛍光発光強度の例  
(濃度 56.9[wt%]NaI 水溶液, ただし, 溶媒は純水)

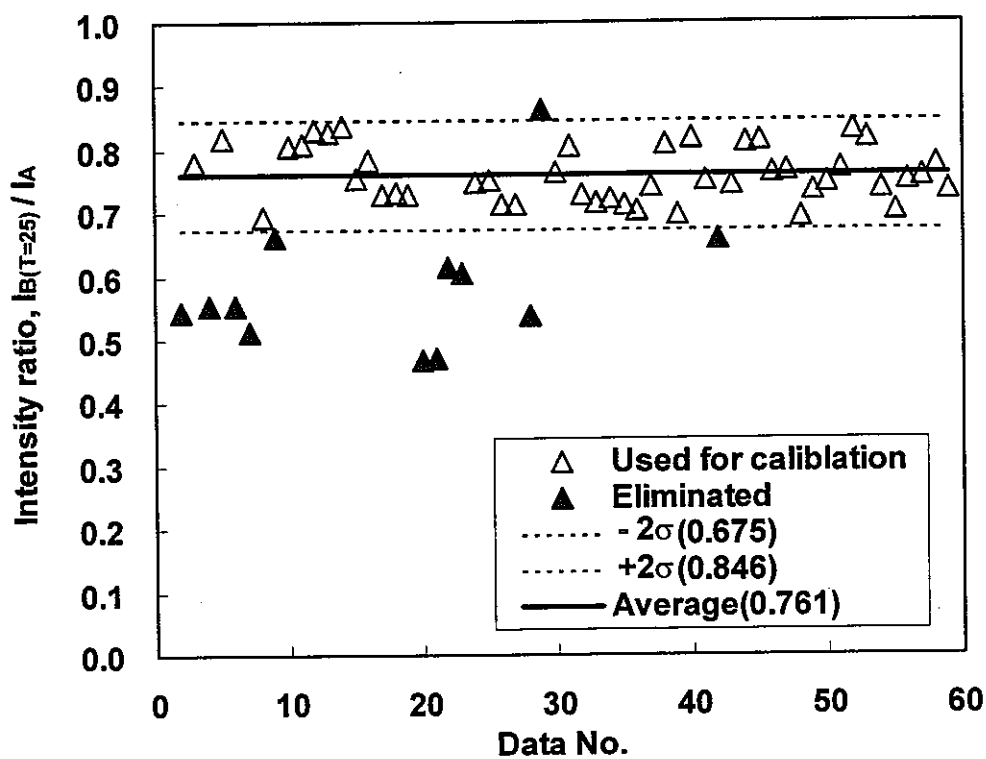


図 6.6 水溶液温度 25[°C]での輝度比

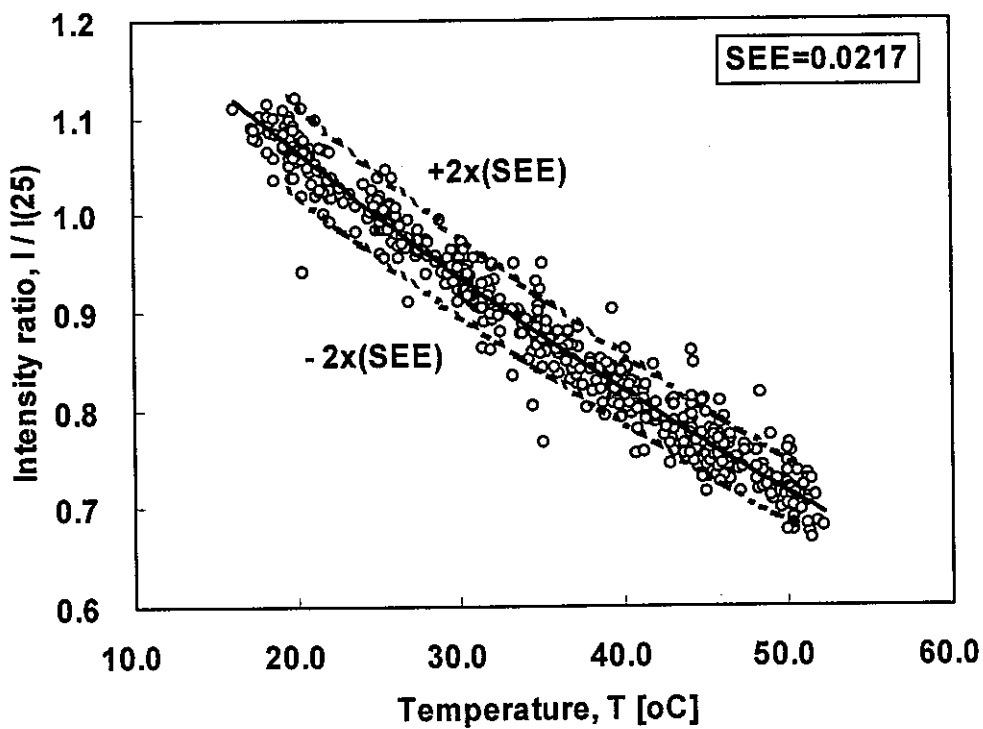


図 6.7 水溶液温度 25[°C]を参照温度とした場合の温度と輝度比の関係

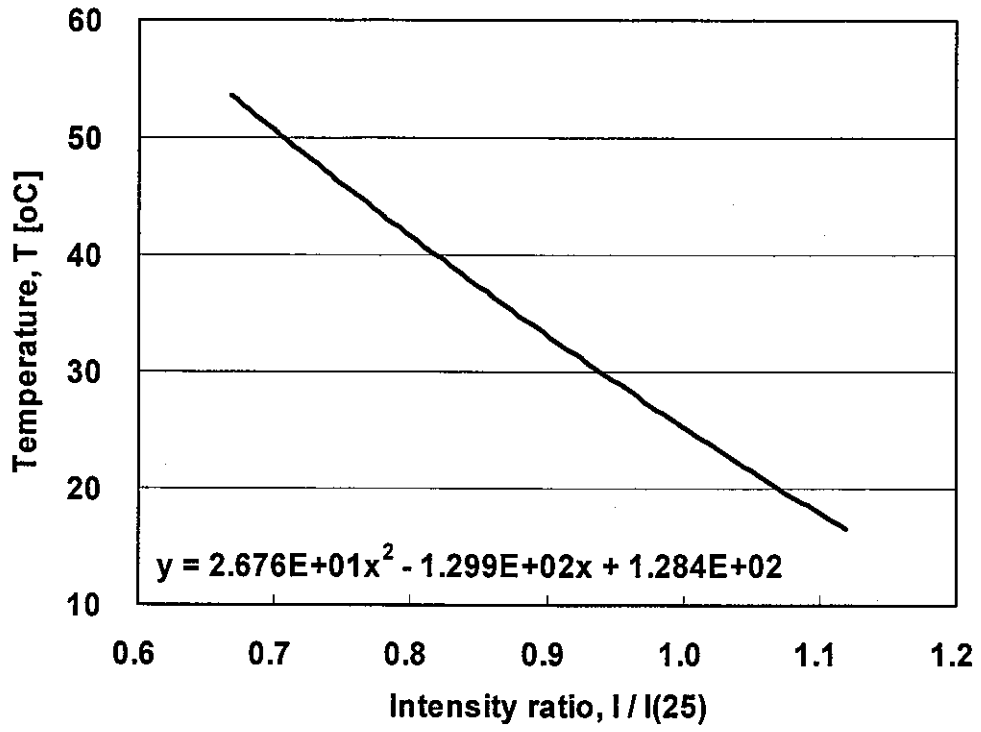


図 6.8 温度校正曲線

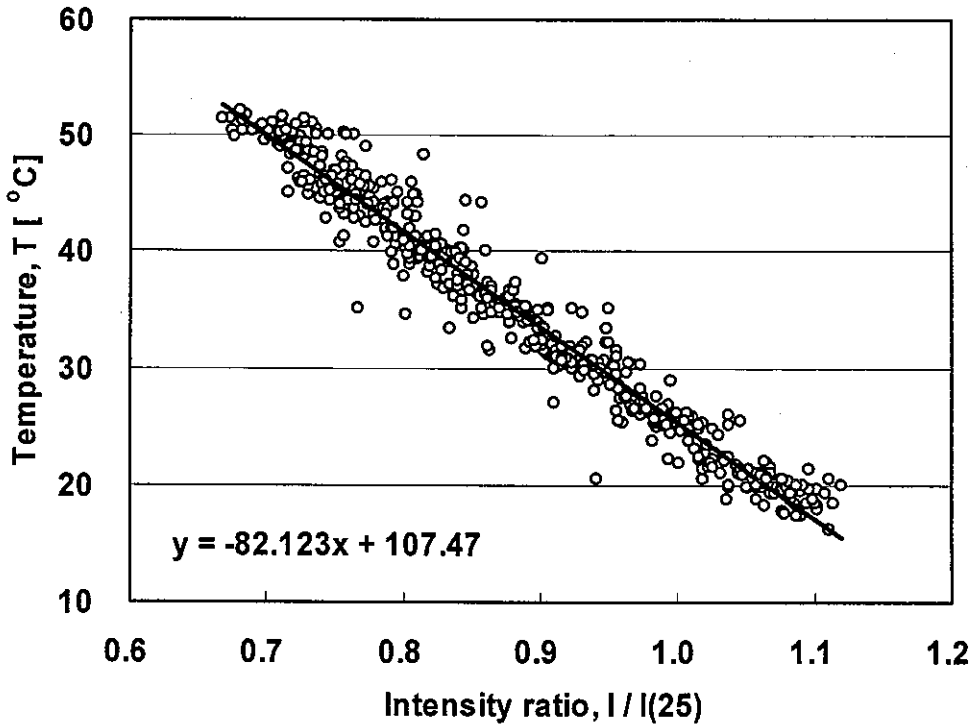


図 6.9 感度係数 (校正曲線の不確かさ)

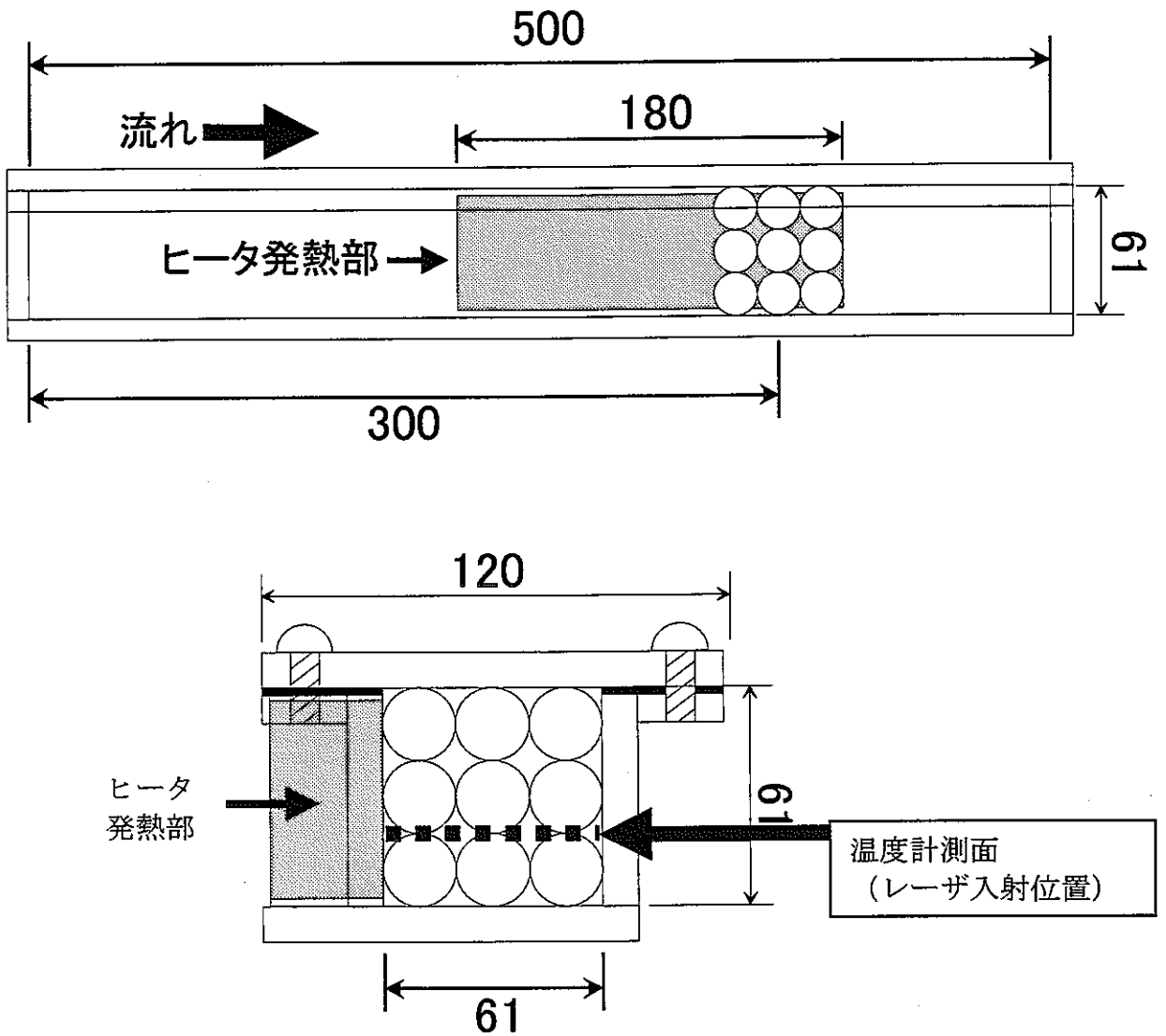


図 6.10 簡易ループ用ヒータ設置試験部の概略

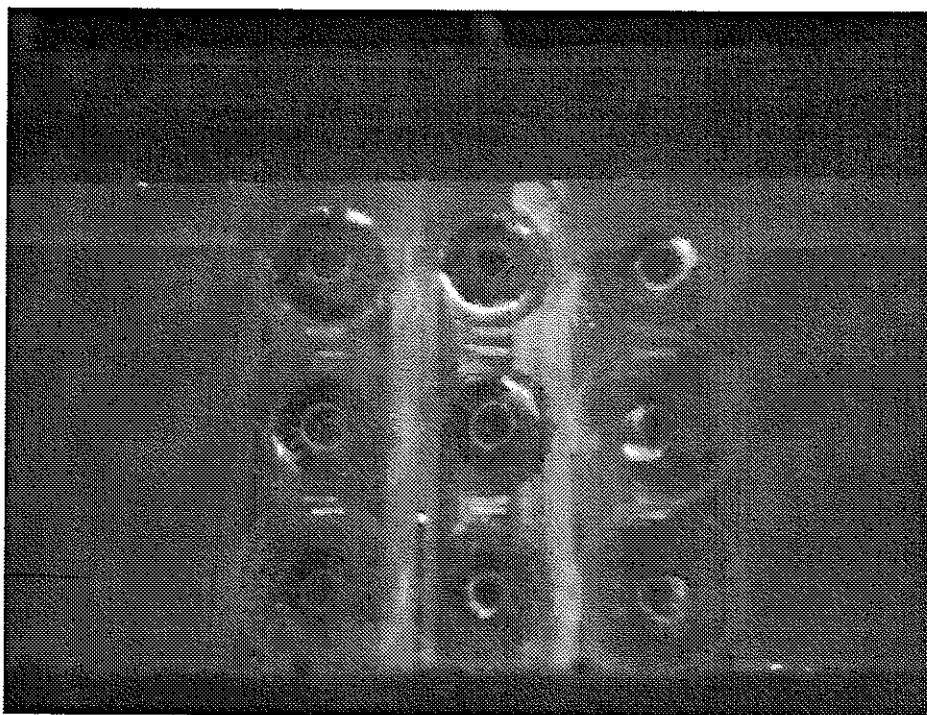


図 6.11 レファレンス画像 (水温一定)  
( $Q=6.6$ [l/min],  $z=20$ mm, 水温  $25$ [oC])

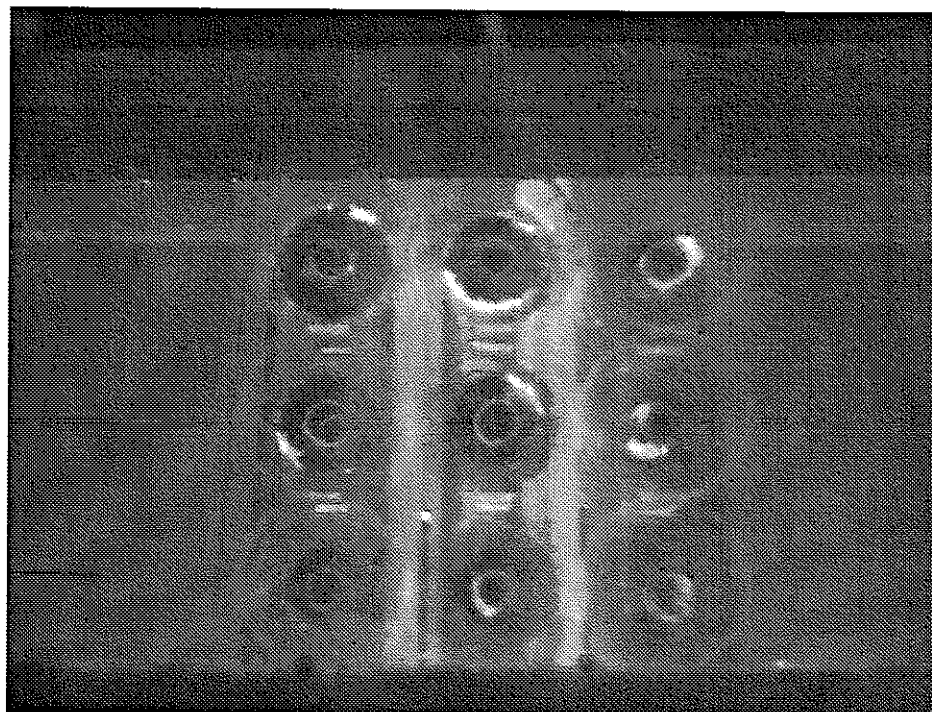


図 6.12 瞬時の計測画像  
( $Q=6.6$ [l/min],  $z=20$ mm, ヒータ出力  $120$ [W])

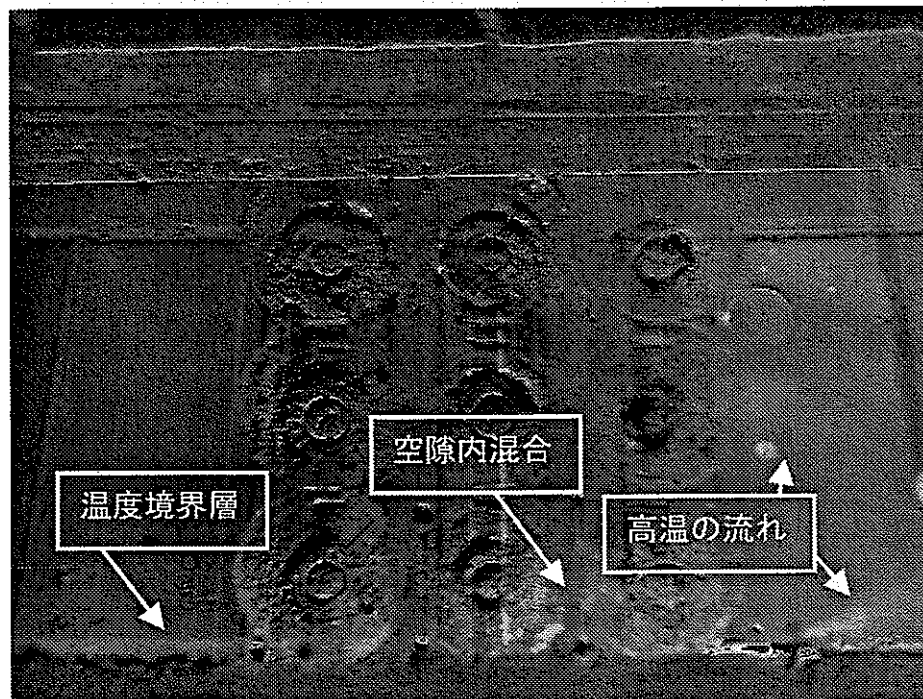


図 6.13 時間平均温度分布  
黒 (0) : 20[oC]~白 (256) : 35[oC]  
( $Q=6.6$ [l/min],  $z=20$ mm, ヒータ出力 120[W])



## 7. 解析手法の開発

### 7. 1 解析コード概要

サイクル機構所有の多次元熱流動解析コード CASCADE<sup>[6]</sup>を用いて実験解析を行い、現在、サイクル機構で実施している CASCADE コードによる閉塞物を含む体系での解析手法の構築へ反映する<sup>[6]</sup>。

CASCADE コードは、構造格子・有限差分法による解析コードであり、多次元の定常および非定常の熱流動現象を取り扱うと同時に、流体領域に含まれる構造物を模擬し、構造物～流体間の熱交換が考慮できる。CASCADE コードは構造格子を採用しているため、曲線境界は階段状に近似する。ただし、ポーラスボディモデルを採用しており、物体と流体との境界セルに空隙率（セル内に含まれる流体の体積の比）を設定することにより、流路断面積あるいは流路体積を保存することができる。作動流体は、水、空気、ナトリウム、およびユーザが物性値を入力する任意の非圧縮性 Newton 流体が取り扱い可能である。流体領域については、強制・共存・自然対流における流速、温度、2成分拡散の濃度（本解析では対象外）、および乱流量の分布を計算できる。

### 7. 2 簡易ループを対象とした実験解析

#### 7. 2. 1 等温条件での解析

流量条件 30[l/min]で行った実験を対象として解析を行う。このときの断面平均流速から求めた Re 数は 6600 であり、流れは乱流であるとして標準的な  $k-\epsilon$  モデルを採用して計算を行った。断面平均流速を入口境界面に設定して境界条件とした。CASCADE コードで計算を行う際に、比熱（NaI のデータがないため水のデータを採用）、密度、動粘性係数、熱伝導率等の物性値を温度の関数として指定し、濃度 56.9[wt%]の NaI 水溶液を対象とした計算を行った。表 7.1 に入力データ作成時に使用した物性値評価式の係数を示す。実験解析に用いた格子配置を図 7.1 に示す。図 7.1 の鳥瞰図に球周りの格子配置を示す。一つ一つのガラス球について、直方体を積み重ねるようにして球体を模擬し、ガラス球表面を階段状に模擬している（詳細メッシュ）。グレーの領域は固体セルを示し、他のセルは流体セルを示している。固体セルに接している流体セルには空隙率（各セル体積内でガラス球が占める体積割合）を与え、セル境界には透過率（各セル境界面でガラス球が占める面積割合）を各面に与えている。壁面は全面滑り条件として計算を行った。

図 7.1 に底面からの高さ 20[mm]（図 4.6 の撮影位置③に該当する）での CASCADE による解析結果を示す。カラーコンターは圧力分布を示し、ベクトルは流れの方向と速度を示す。また、ベクトル分布中の○はガラス球の接点を示し、図中の白点線の円はガラス球の輪郭を示している。CASCADE による解析結果と、第 4. 3. 3 節で示した PIV による解析結果（図 4.10(b)参照）を比較すると、ガラス球接点の上下流では流路断面積が減少から拡大に変化し、断面積変化に応じた流速変化（流速の増加から減少）となっている。また、閉塞部内部の空隙では軸方向流れが支配的となっている。CASCADE による解析結果と、PIV による解析結果では、空隙では軸方向流れが強く、ガラス球の背後となる領域では流速が低下しており流況は一致している。

また、解析結果から、閉塞部上流と閉塞部下流では大きな圧力損失が生じており、

閉塞部が大きな流動抵抗になっている。このことは、実験で確認されており、テスト部出口からタンクまでの間をバルブ等で絞らずに流すと、閉塞部上流側は流体で満たされるが、閉塞部が大きな流動抵抗となるために下流側ではテスト部の半分程度までしか流体で満たされないという状況が発生した。閉塞物内部では、上流側にある一層目のガラス球の前後と、下流側にある三層目のガラス球の前後で圧力変化が大きいことが分かる。

図 7.2 に PIV, LDV, CASCADE による解析結果とを比較して示す。解析はセル境界での平均値を示しており、局所量でないことに注意が必要である。結果は3者とも良く傾向が一致していることが分かる。PIV から得られる流速が LDV および解析結果よりも速いのは、第 4. 3. 3 節で述べたようにピクセルから長さへの変換係数の精度が得られていないからである。以上のことから、本研究で行った NaI を用いた可視化手法の有用性が確認できるとともに、境界を階段近似する解析手法が有効であることが分かる。

## 7. 2. 2 非等温条件での解析

流量条件 6.6[l/min] (断面平均流速 0.03[m/s], Re 数  $1.5 \times 10^3$ ) で行った実験を対象として解析を行った。流れは層流であるとし、断面平均流速を入口境界面に設定して境界条件とした。また、表 7.1 に示すように濃度 56.9[wt%]の NaI 水溶液の物性評価式を入力して計算した。実験解析に用いた格子配置は図 7.1 と同じであるが、下流方向の数セルについてメッシュ幅を長くとしている。壁面は全面滑り条件として計算を行った。ただし、本解析においては、ガラス球の熱伝導は考慮しておらず、ガラス球を介してのヒータから流体への熱移行は計算していない。

図 7.3 に、底面からの高さ 20[mm]のガラス球が接する断面 (図 4.5 および図 4.6 の撮影位置③に該当する) における、CASCADE による解析結果を示す。解析および実験結果ともに、ヒータ近傍 (図の下側) で温度境界層が発達して閉塞部に流れ込んでいる。また、実験で見られた閉塞部内部の空隙内での温度上昇は、解析でははっきりと確認することはできない。これは、解析ではガラス球下流の後流域に発生する渦が計算できず、弱い主流方向流れとなるため高温の流れは壁面に沿って流れていると考えられる。また、解析結果からヒータ壁面近傍では、ヒータ表面に沿った鉛直上向きの流れがあり、浮力支配の流れ場であることが分かる。図 6.14 で観察された閉塞部下流の壁近傍で発生する温度の高い部分は、浮力により底面から上端面へ流体が押し上げられているために発生していることが解析結果から予測される。

### 7. 3 2チャンネル体系を対象とした実験解析

#### 7. 3. 1 解析条件

流量条件 28.3[m<sup>3</sup>/h](Re=5400)で行った実験を対象として解析を行った。流れは乱流であるとして標準的な  $k-\varepsilon$ モデルを採用し、簡易ループを対象とした実験解析と同様、表 7.1 に示した濃度 56.9[wt%]の NaI 水溶液の物性値を用いて計算を行った。解析に用いた格子配置を図 7.4-1 および図 7.4-2 に示す。図 7.4-1 は、図 7.1 に示した簡易ループを対象とした実験解析で使用した格子配置を応用して、2チャンネル体系に拡張したものである。図 7.4-2 は平成9年度に行った予備解析<sup>[2]</sup>で使用したメッシュ配置（セル幅 10[mm]の矩形メッシュ）であり、サイクル機構で実施している閉塞物を含む体系での解析手法<sup>[6]</sup>と同様の格子配置手法である。本試験体系のようにガラス球の球径が大きく、配置が既知である場合には、図 7.1 および図 7.4-1 のような配置が可能ではあるが、粒子を多数詰めた充填層のような場合、一つ一つの粒子をモデル化する事は不可能である。そこで、本手法では閉塞領域内のセルに空隙率（コントロールボリューム内に存在する流体の体積比）と透過率を与え、閉塞物をモデル化して解く方法を用いている（以下、単純矩形メッシュと呼ぶ）。今回は、これら2つの格子配置手法による解析結果への影響について比較検討を行った。なお、単純矩形メッシュによる解析では、閉塞部は粒子径（ $D_p=20$ [mm]）、空隙率および透過率（ $\varepsilon=\gamma=0.4764$ ）が一様に分布するものとして各セルおよびセル境界に与え、閉塞内部の圧力損失を Ergun の式<sup>[17]</sup>により評価している。

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right) = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot W}{D_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho \cdot |W|W}{D_p} \quad (17)$$

ただし、この評価式は一次元流れに対して得られた評価式であり、 $W$ は見かけ流速（閉塞物前面の平均流速）であることから、CASCADE に反映する際には、閉塞物内部のセル断面平均流速  $U$ との関係、 $W = \varepsilon \cdot U$ から以下の式にて係数を求め入力した。

$$\zeta = \left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right) / \left(\frac{\rho \cdot U^2}{2}\right) = \frac{300}{D_p} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \cdot \frac{1}{Re_D} + \frac{3.5}{D_p} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \quad (18)$$

$$\zeta = 362.4 \frac{1}{Re_D} + 3.847 \quad (19)$$

$$Re_D = \frac{\rho \cdot D_p \cdot U}{\mu} \quad (20)$$

#### 7. 3. 2 解析結果

図 7.5-1 および図 7.5-2 に PIV による流速ベクトル分布と、詳細メッシュを採用した場合の流速ベクトル分布を比較し、閉塞物上流側（B-1~2, C-1~2）および閉塞物下流側（N-1~2, O-1~2）の各領域について示す。解析結果(b)の中の四角い枠は PIV 結果 (a) の各領域に対応している。

図 7.5-1 の閉塞部下端において、第1層目と第2層目の間の領域では鉛直方向流れが支配的であり、第2層目と第3層目の間の領域では健全流路 (b)図右側の流速の速

い領域)へ流出する流れがあることが分かる。

図 7.5-2 の閉塞部下流側の解析結果では、鈍頭物体の後流やバックステップ流れで見られるような後流域での循環渦は形成されていない。実験においてもそのような渦は観察されなかった。また、PIV の結果に比べて解析結果の流速値は遅く、鉛直方向から球充填層内部(図の左側)に傾いて流れている。

図 7.6 に 2 種類の格子配置による計算結果の比較を示す。白枠内が閉塞物領域を示している。また、ベクトルの長さおよび色は流速の大きさを示す。背景の色の分布は圧力分布を示している。基準圧力 ( $P=0$ [Pa]) の位置を出口境界にとっており、計算結果は基準点からの相対値で出力される。圧力分布は水頭圧を差し引いた圧力分布として表示されている。閉塞物下端では流れが閉塞部に衝突するため圧力が局所的に高く、閉塞物下部では閉塞物内部の流体が健全流路へ流出している。閉塞物下端での圧力分布をメッシュ別に比較すると詳細メッシュの方が圧力が高く、閉塞物上流側での健全流路への横方向流れが強いことが分かる。また、閉塞物上端では圧力が低下し、単純矩形メッシュで計算した場合には閉塞物上端の後流域に明確な循環渦が生じているのに対し、詳細メッシュを用いた解析および実験 (PIV) においてはこのような循環渦の形成は観察できなかった。

図 7.7 に PIV および CASCADE 解析により求められた健全流路内の鉛直方向流速成分の水平方向分布を示す。メッシュ別の比較では、単純矩形メッシュを採用した計算の方が PIV の結果と比較的一致している。詳細メッシュでは閉塞物側の流速が遅く、閉塞物と反対側の壁近傍で流速が早くなっている。これは、詳細メッシュの方が、単純矩形メッシュによる解析や実験結果に比べて、多くの流体が閉塞物内部に流入できずに健全流路を流れるため流速が早くなっていると考えられる。

図 7.8 に閉塞物内部の空隙中央部(ガラス球間の最も鉛直方向流れが強いと思われる箇所)での鉛直方向流速について各層別に示す。PIV による結果は、空隙中央部での平均値を示している(図 7.8 参照)。詳細メッシュではガラス球の配置を考慮し空隙部に数メッシュの流体セルが存在している。そのため、解析で求められる流速は実験で計測した局所量に近い値である。しかし、単純矩形メッシュでは、コントロールボリューム内で一様な空隙率および透過率を与えているため、実験で得られる局所量に比べて、広い範囲の空間平均量となっており、PIV の結果と比較する場合には注意が必要である。実験では、断面平均流速に相当する流速一様分布で閉塞部に突入した後、ガラス球の存在により流路断面積が減少し流速が速くなり、断面平均流速の 1.6~1.8 倍で流れていく。その後、下流に行くにつれ流速は低下していくのが分かる。単純矩形メッシュによる解析では、平均流速の約 0.8 倍で閉塞部に突入する。詳細メッシュによる解析では、突入流速は更に遅く平均流速の約 0.02 倍(およそ 2[mm/s])となっている。単純矩形メッシュの場合、閉塞物全面が流路となっており、上流側からの流れが閉塞物下端に衝突したとき圧力が局所的に高くなることはない。一方、詳細メッシュではガラス球の形状を階段状に模擬し、閉塞物下端面の一部が平板状の固体壁となるため、閉塞物下端面で淀み点となる領域が生じ局所的に圧力が高くなってしまふと考えられる。つまり、球の形状の模擬性が低い点に問題があると考えられる。そのため、単純矩形メッシュの方が詳細メッシュに比べて、上流側からの流れが、閉塞物内部に流入しやすい状況にあると考えられる。

単純矩形メッシュによる解析では閉塞物上端の下流側に明確な循環渦が生じ後流域が形成されるのに対し、実験 (PIV) および詳細メッシュによる解析ではこのような循環渦の形成は観察できなかった。また、閉塞物内部の流速が PIV 結果と解析結

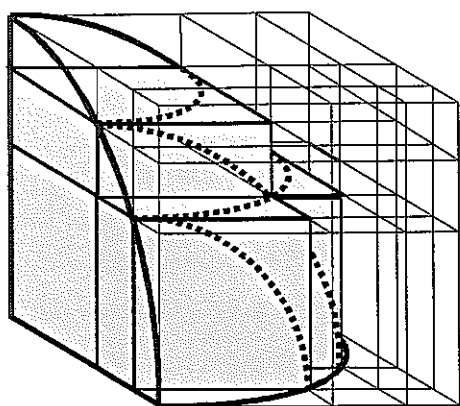
果では大きく異なり、解析結果の方が流速を過小評価している。

現在サイクル機構で開発している閉塞物を含む燃料集合体内の流れ場を対象とした CASCADE による解析手法においては、個々の粒子をモデル化し格子配置を決定するのではなく、単純矩形メッシュのようにセル内に空隙率および透過率を壁面近傍のセルと閉塞物内部のセルで空間的に分布をつけてモデル化している。局所閉塞を対象とする閉塞物は、本実験よりも小さな粒子 (1[mm]程度) で密に詰まっている上に、それら粒子の配置は全くランダムである。個々の粒子をモデル化する方法よりも単純矩形メッシュによる方法の方が計算資源上、現実的であると共に、今回の解析から閉塞物周りの流れ場に対して再現性がよいことが明かとなった。ただし、閉塞物内部を通過する流量を実験結果に比べて大幅に過小評価していること。また、閉塞物下流側において実験では観測されなかった、比較的広範囲におよぶ後流域の形成など検討すべき課題も残る。式 (17) および式 (18) に示すように閉塞物内部の圧力損失には、粒子径  $d$  および空隙率 $\epsilon$ が関係している。よって、ガラス球径を小さくしたり、球の配置を変更して密に配置して実験を行い、実験解析を実施し比較検討する必要がある。

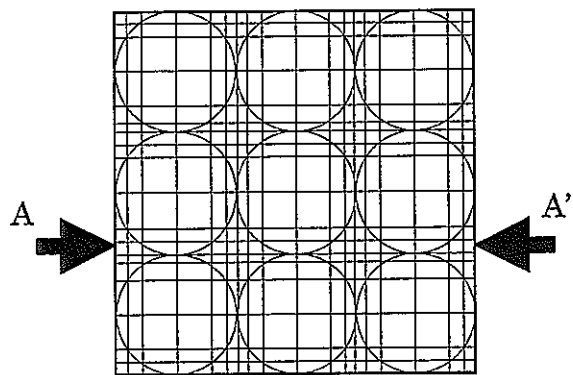
表 7.1 濃度 56.9wt% の NaI 物性値

| Property                                 | CASCADE                 |                         |                        |
|--|-------------------------|-------------------------|------------------------|
|  | A                       | B                       | C                      |
| Specific Heat<br>[J/kgK]                 | $9.643 \times 10^{-3}$  | $-7.141 \times 10^{-1}$ | $4.192 \times 10^3$    |
| Density<br>[kg/m <sup>3</sup> ]          | $-9.346 \times 10^{-4}$ | $-9.292 \times 10^{-1}$ | $1.755 \times 10^3$    |
| Kinetic viscosity<br>[m <sup>2</sup> /s] | $3.092 \times 10^{-10}$ | $-3.853 \times 10^{-8}$ | $1.962 \times 10^{-6}$ |
| Thermal conductivity<br>[W/mK]           | $2.116 \times 10^{-5}$  | $-2.786 \times 10^{-4}$ | $4.174 \times 10^{-1}$ |
| Enthalpy ratio (水)<br>QI[J/kg]           | $-8.605 \times 10^{-4}$ | $4.185 \times 10^3$     | $1.938 \times 10^2$    |

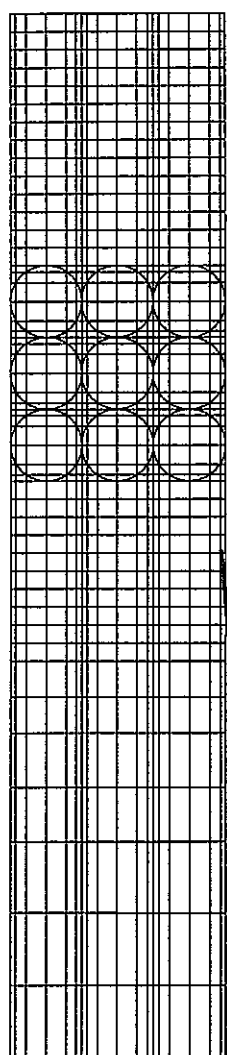
$$Y = A \times T^2 + B \times T + C$$



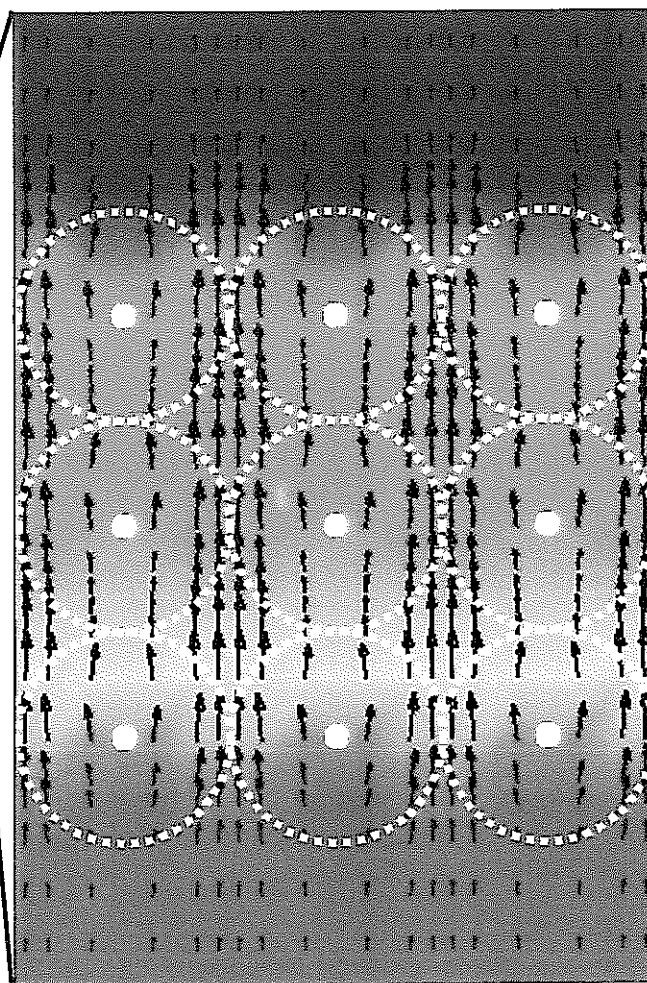
(格子配置鳥瞰図)  
グレー領域は固体セル



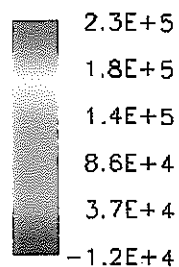
(断面格子配置図)



(主流方向格子配置図)

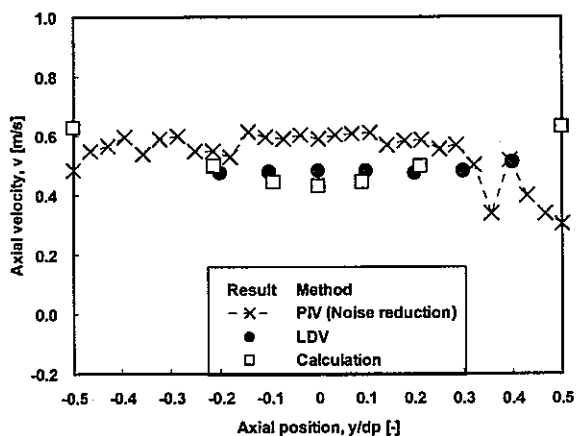


(主流方向流速分布, A-A' 断面)

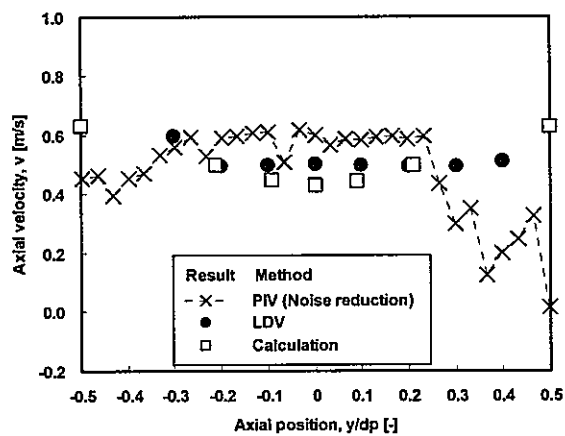


Pressure [Pa]

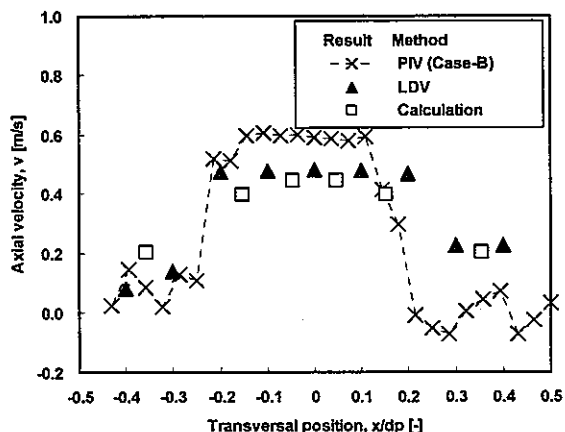
図 7.1 CASCADE による実験解析結果



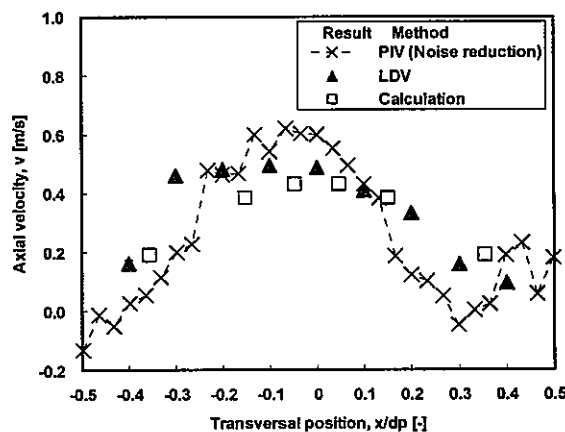
(a) 上流側領域 (流れ方向分布)



(b) 下流側領域 (流れ方向分布)



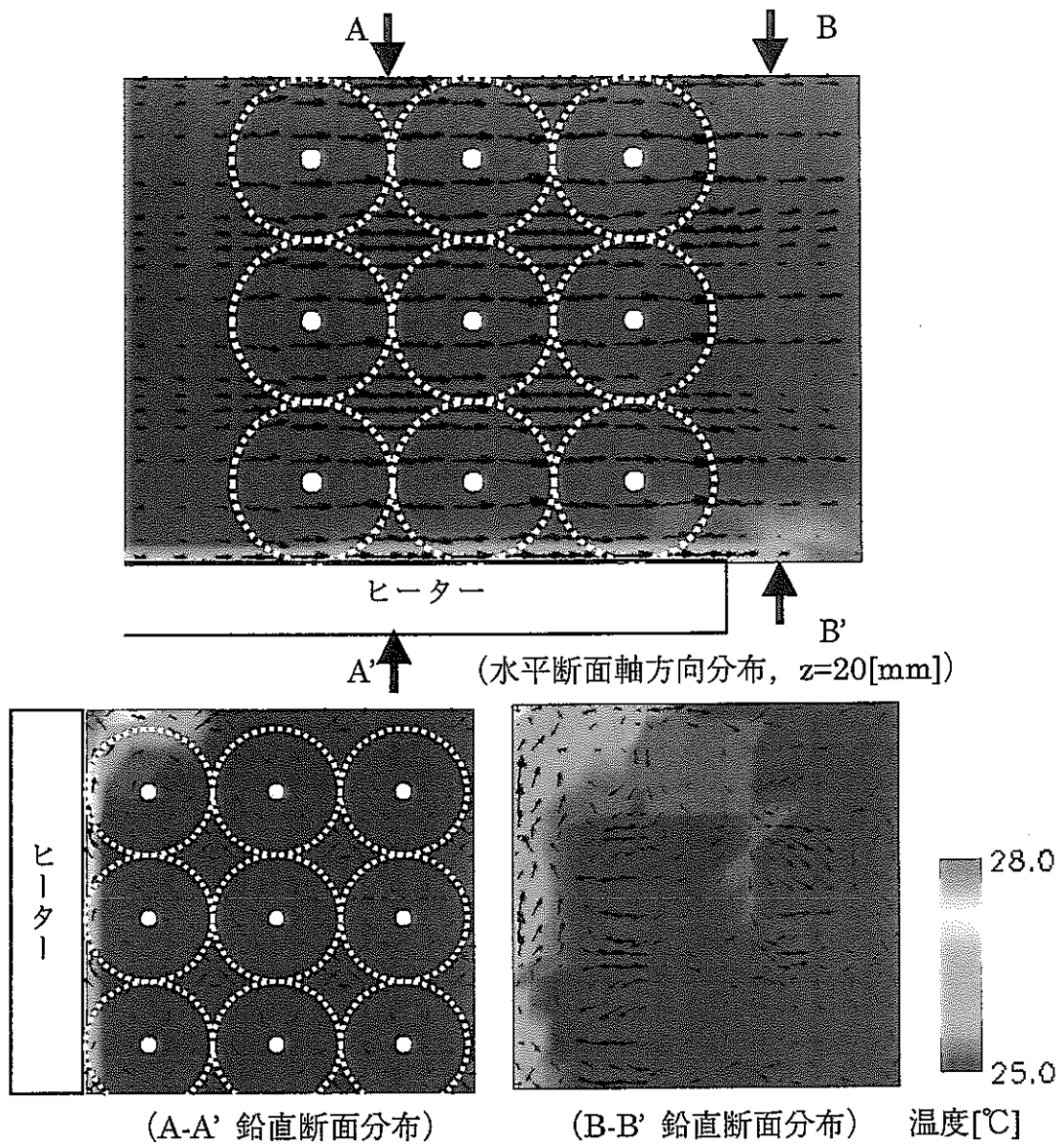
(a) 上流側領域 (垂直方向分布)



(b) 下流側領域 (垂直方向分布)

図 7.2 LDV, PIV, CASCADE 解析結果の比較  
(上流側領域 : Case-A, 下流側領域 : Case-B1)





(a) 解析結果 (ベクトルの長さの倍率は各断面で異なる)



(b) LIF による実験結果 (白色は温度が高い)

図 7.3 解析結果と実験結果での温度分布の比較  
( $Q=6.6[\text{l}/\text{min}]$ ,  $z=20\text{mm}$ )

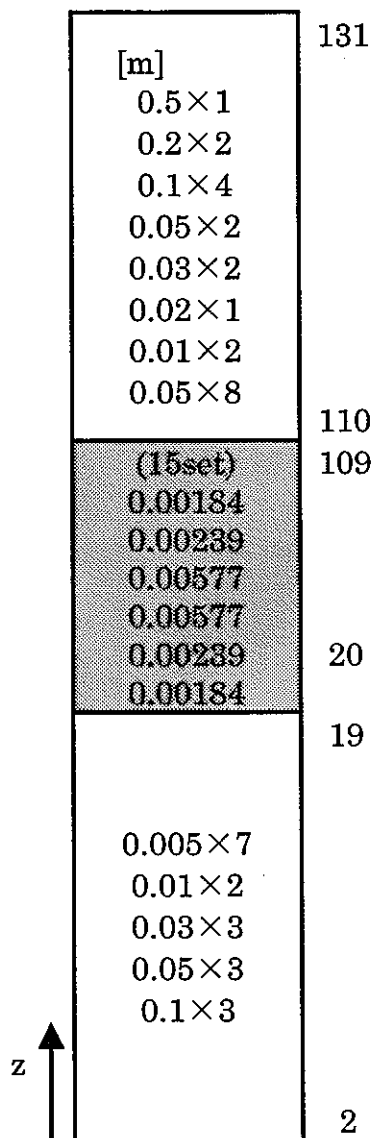
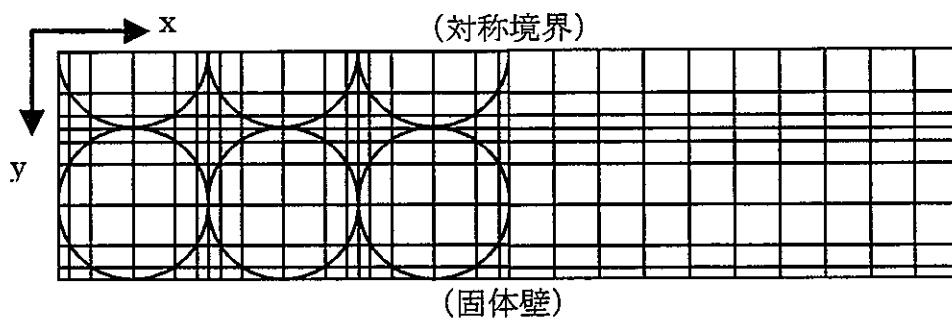


図 7.4-1 2チャンネル体系計算格子配置 (詳細メッシュ)

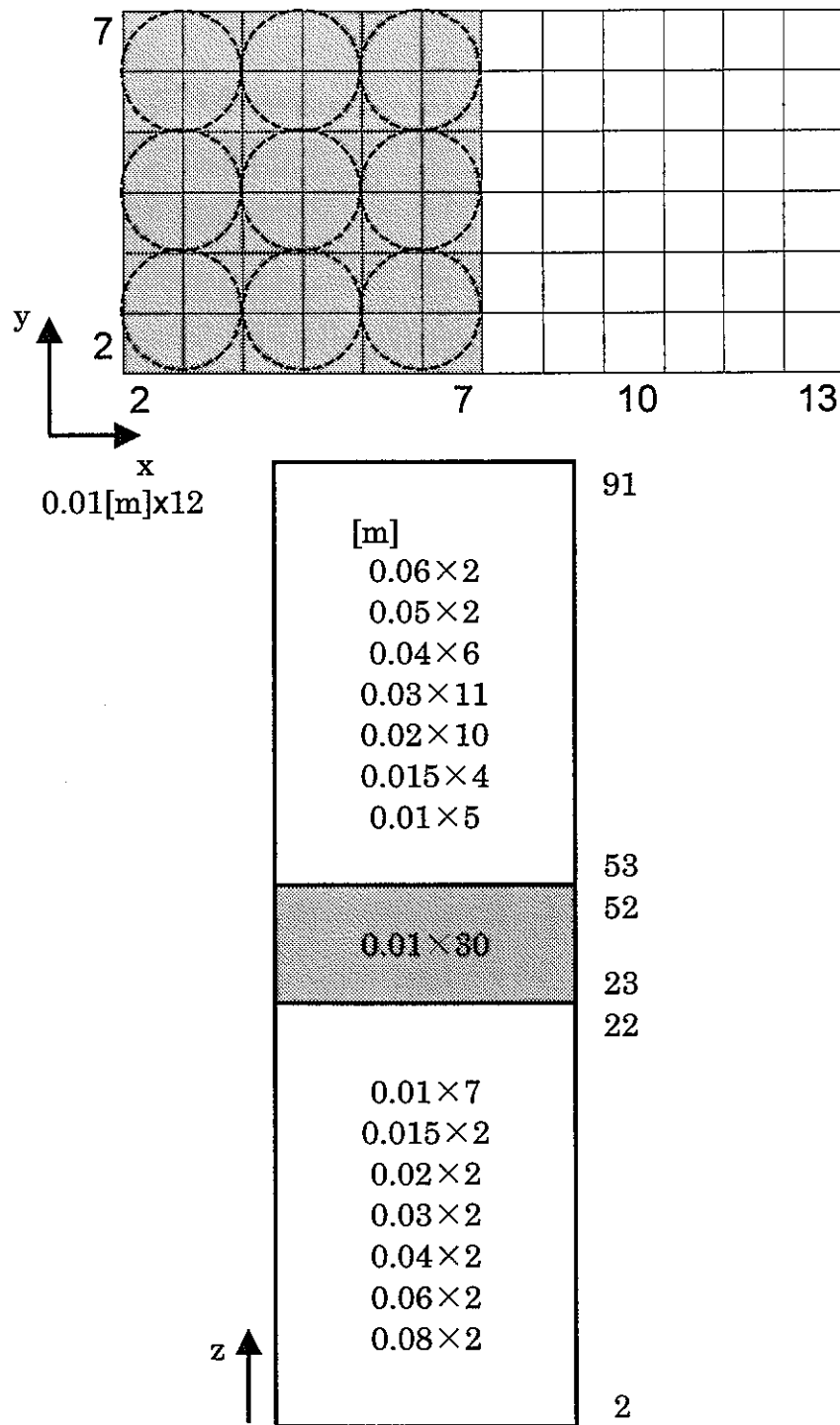
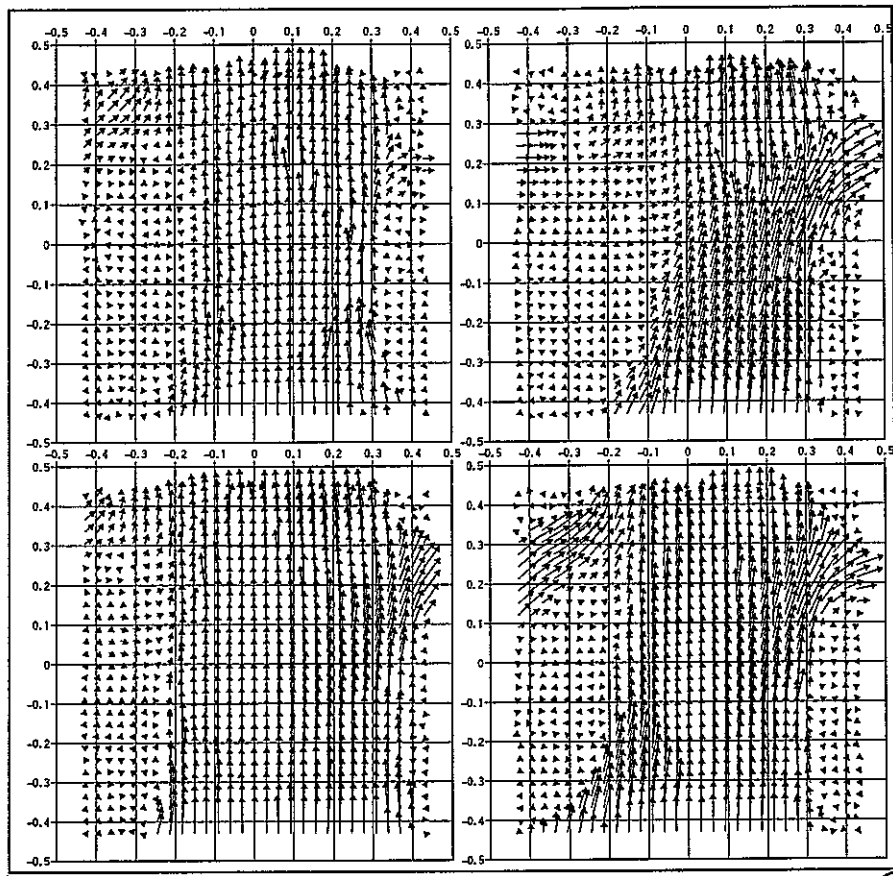
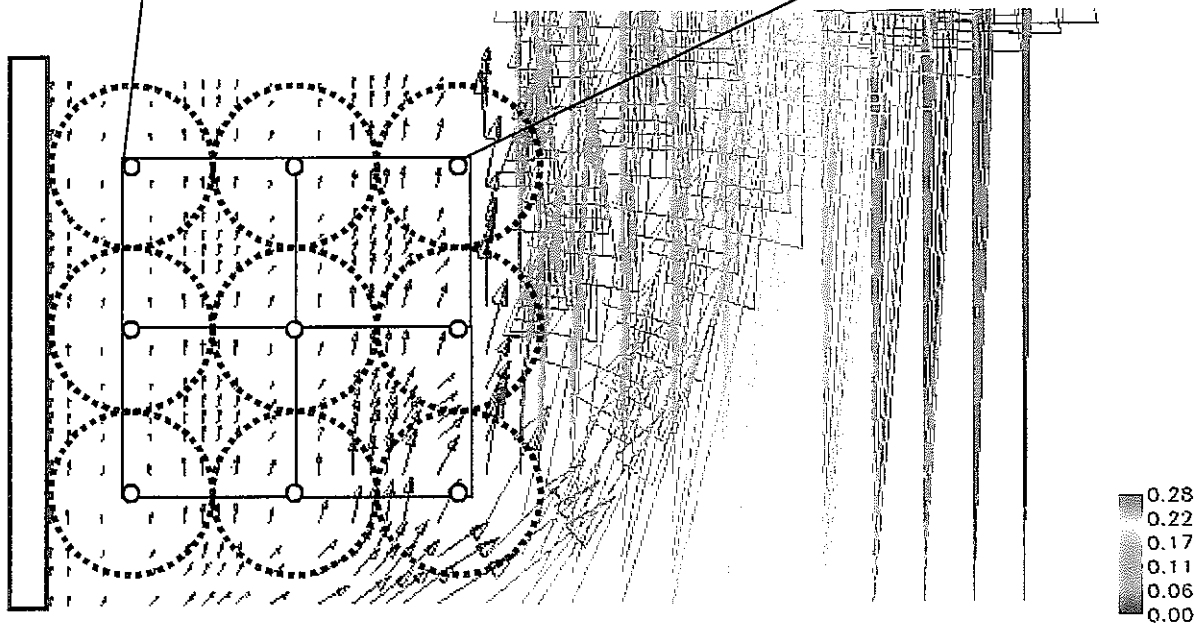


図 7.4-2 2チャンネル体系計算格子配置 (単純矩形メッシュ)  
(グレー領域が閉塞部を模擬)

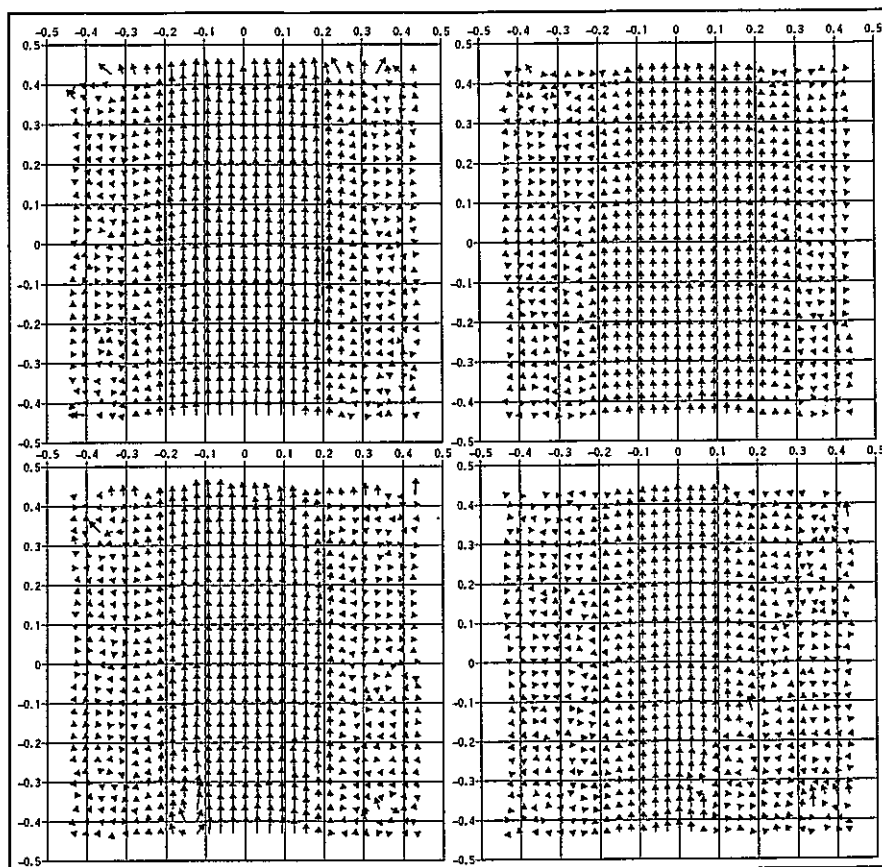


(第1層目と第2層目の間) (第2層目と第3層目の間)  
 (a) 実験 (PIV) による流速ベクトル分布

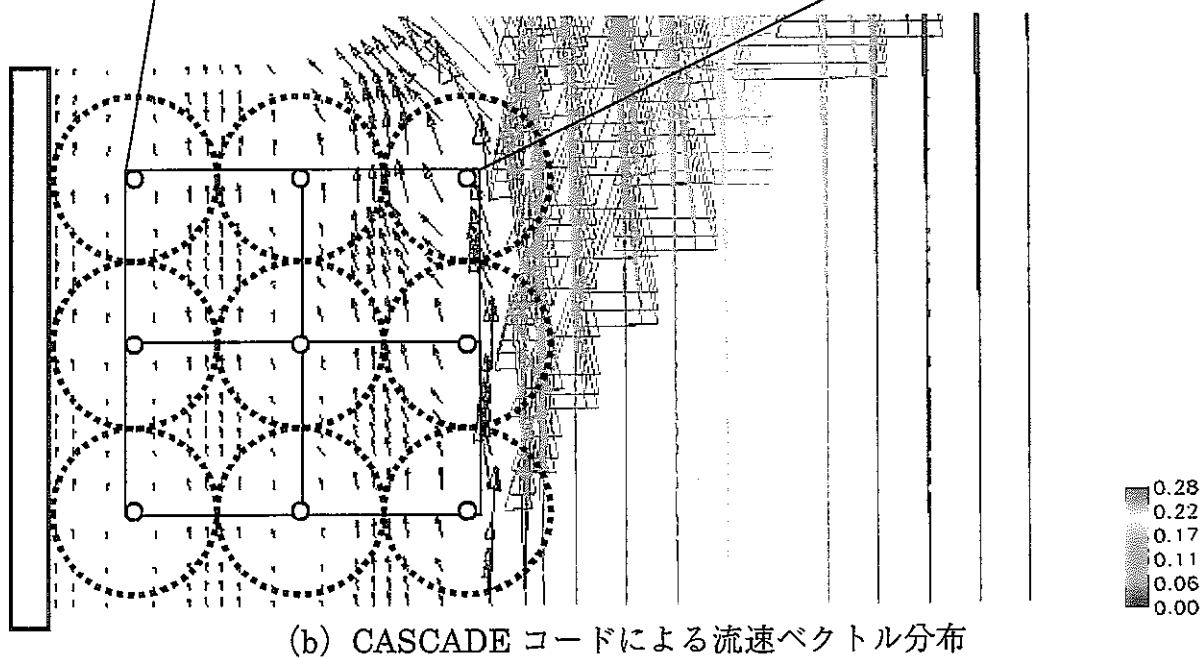


(b) 詳細メッシュを採用した場合の流速ベクトル分布

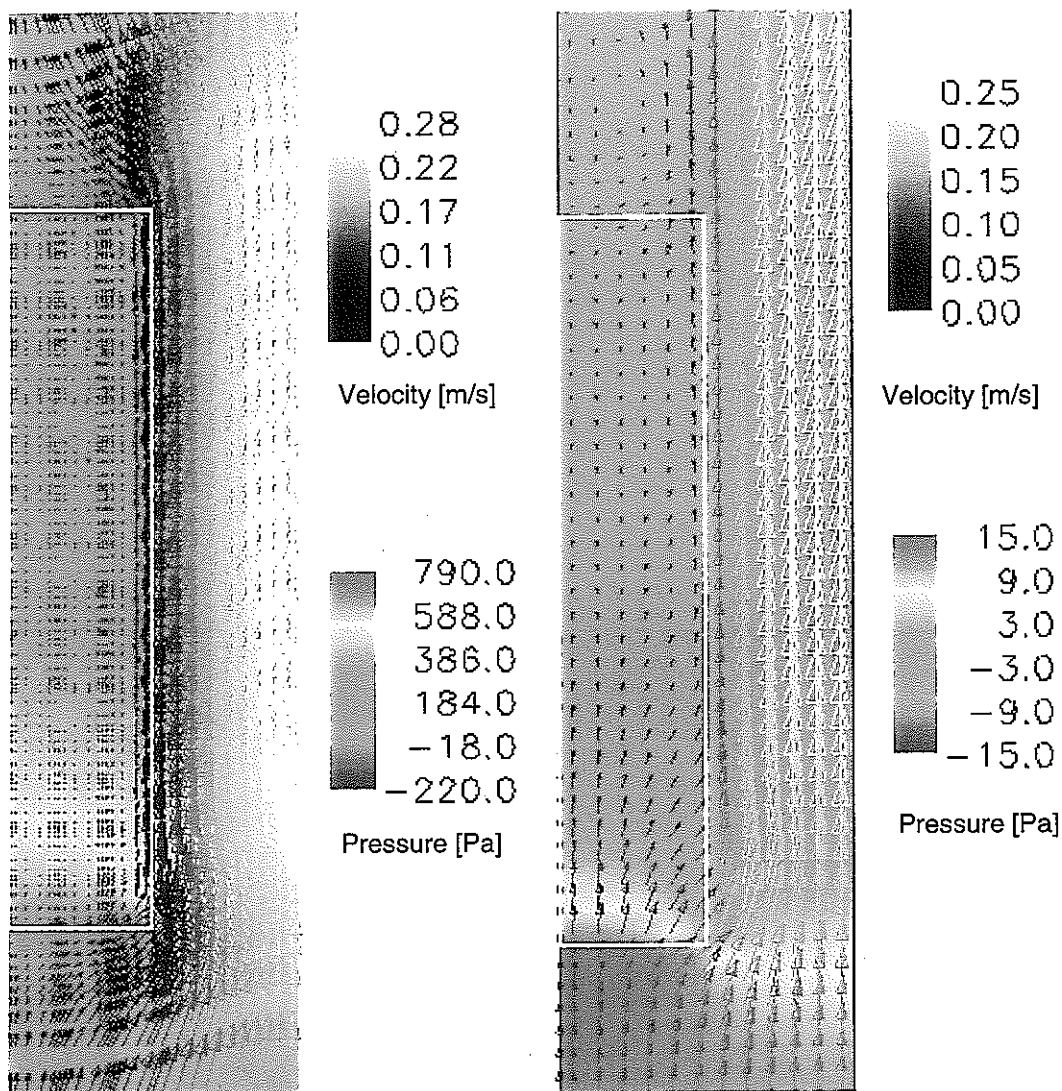
図 7.5-1 2チャンネル体系での等温場解析  
 (閉塞下端部, ベクトルの長さは実験と解析とで異なる)



(第1層目と第2層目の間) (第2層目と第3層目の間)  
 (a) 実験 (PIV) による流速ベクトル分布



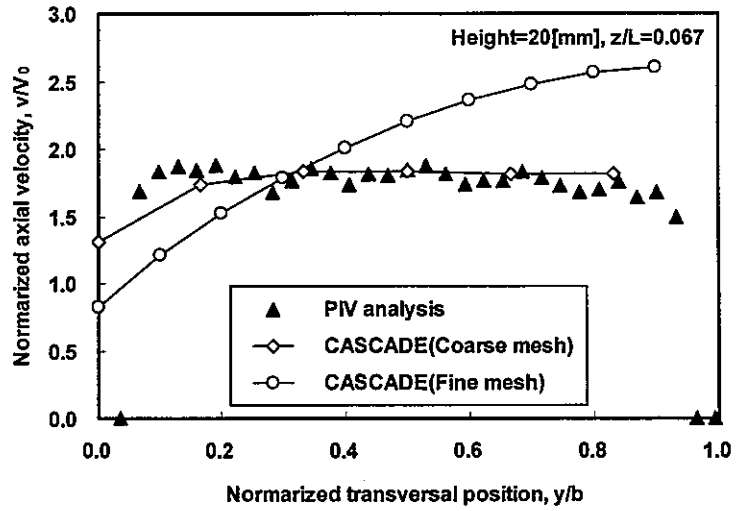
(b) CASCADE コードによる流速ベクトル分布  
 図 7.5-2 2チャンネル体系での等温場解析  
 (閉塞上端部, ベクトルの長さは実験と解析とで異なる)



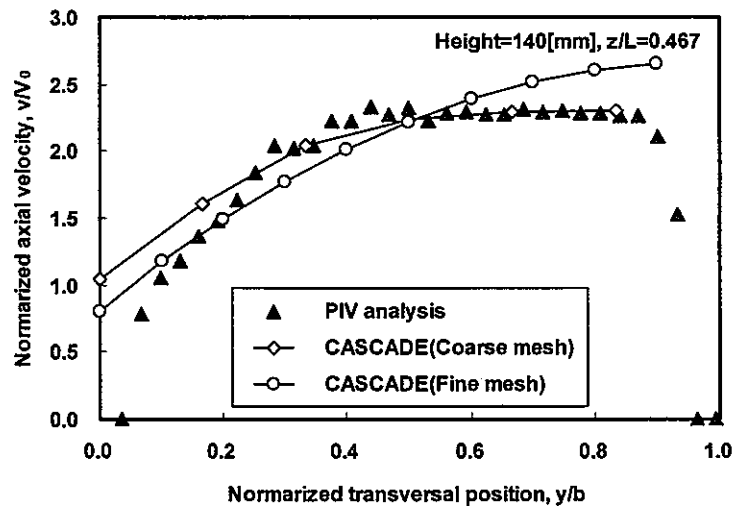
(a) 詳細メッシュ

(b) 単純矩形メッシュ

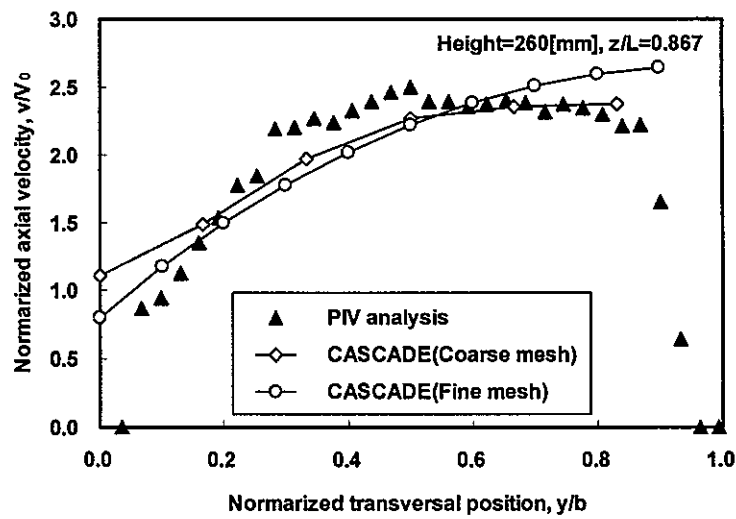
図 7.6 格子配置による計算結果の比較 (白枠内が閉塞領域)  
 ベクトルの長さおよび色： 流速値  
 背景のカラー色の分布： 圧力分布 (水頭圧を除く)



(a) 閉塞下端部

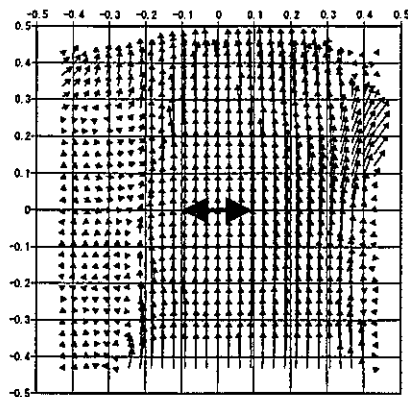


(b) 閉塞中央部

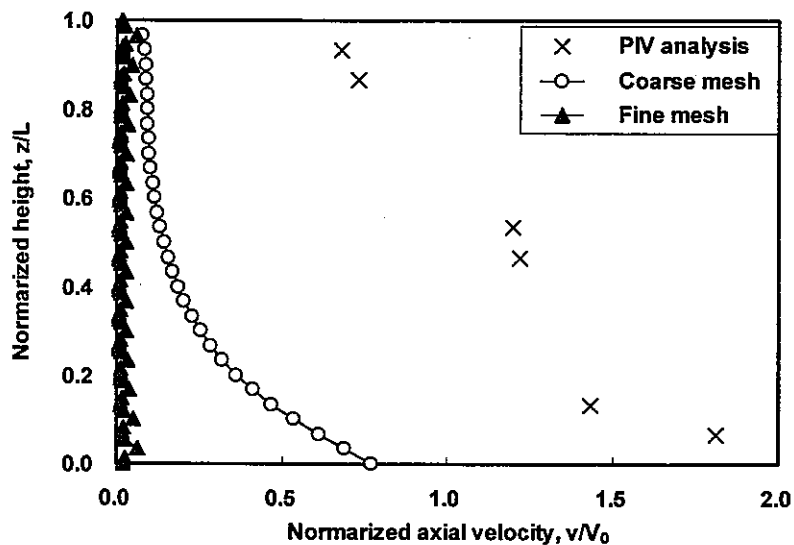


(c) 閉塞上端部

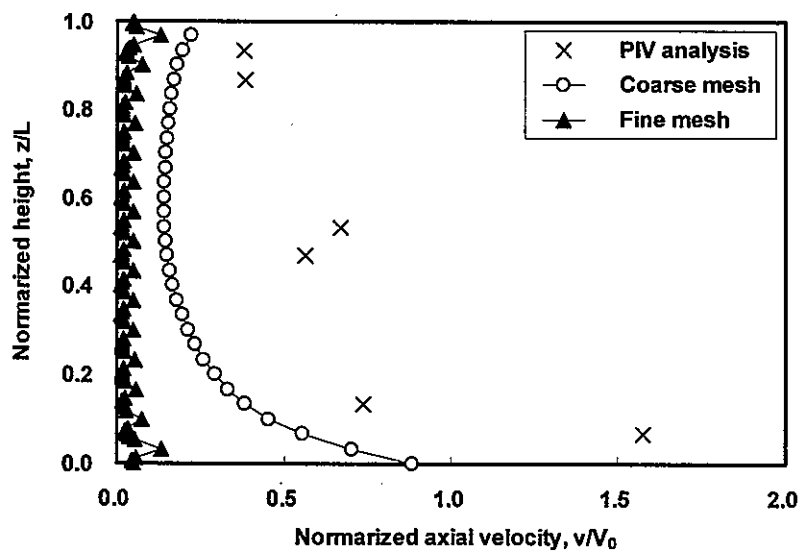
図 7.7 健全流路内の鉛直方向流速分布



PIVの結果は矢印 (-0.1~0.1) 範囲での平均値



(a) 第1層目と第2層目の間 (壁側)



(b) 第2層目と第3層目の間 (健全側)

図 7.8 閉塞部内部の軸方向流速分布



## 8. まとめ

本研究では、多孔質状閉塞物をパイレックスガラス球を充填することによって模擬し、ガラス球の屈折率と等しい溶液を作動流体として用いることにより閉塞物内部の流動を可視化し、多孔質状閉塞を含む流路内の速度場を調べることを目的とした実験研究を行った。

粒子画像流速測定法 (PIV) による閉塞物内外の流れ場の計測手法を確立し、その有効性を確認した。流路断面の全面に球を配置した予備試験体と、閉塞領域と健全流路の2つのサブチャンネル模擬した試験体を用いて、閉塞物内外の速度場の計測を行った。また、閉塞物内の温度分布を測定するためにレーザ誘起蛍光法 (LIF) の適用性を検討し、温度分布計測を行った。さらに、実験結果の妥当性の確認と、閉塞物を含む体系での詳細解析手法の構築へ反映するために多次元熱流動解析コードを用いた実験解析を行った。

### 1) NaI 水溶液屈折率調整追加実験

Nd-YAG レーザーを光源としパイレックスガラス球を用いた場合、屈折率を一致させるには濃度 56.9[wt%]の NaI 水溶液を用いるとよい。NaI 水溶液の屈折率、水溶液温度および濃度の関係を検討し、5[°C]の水溶液温度変化に対して屈折光のズレは無次元距離で約 0.008 となり、実際のトレーサ粒子の位置と画像とでは、本実験環境において撮影画像上で 2 ピクセル以下の誤差となる。

### 2) 簡易ループを用いた予備試験

球間の空隙部で流れは直進し、球の背後では流速が低下し、球の前面では球面に沿った流れが観察でき、定性的に妥当と考えられる流速ベクトル分布を得ることができた。また、撮影画像にノイズ除去を行うことにより、計測不可能であった球接点付近の流速ベクトルを求めることができた。LDV を用いた測定値とは 20%程度の差が認められるが、この原因はピクセル単位から物理量 (長さ) に変換する際の換算係数による影響が大きい。

### 3) 閉塞部内部および周辺の流速測定実験 (2チャンネル試験)

閉塞下端部の健全流路に近い流路では冷却材が健全流路へ流出し、横方向流れが生じている。この横方向流れは閉塞下端部で顕著であった。また、閉塞部中央部から出口部にかけては、鉛直方向流れが支配的であり閉塞部内を通過する流量は徐々に減少し、鉛直方向流速もそれに応じて減少する。閉塞下端部の健全流路では、閉塞部からの流出に伴い鉛直方向流速分布は変化するが、閉塞中央部より下流では閉塞部からの流出の影響は小さく、健全流路内の流速分布は流れ方向に変化しない。球の背後では後流を形成し、流れはよどんでいる。閉塞物下端で閉塞部からの流出のみ観測され、閉塞上端部での健全流路から閉塞部への流れ込みは確認されなかった。

### 4) LIF による NaI 水溶液中での適用性

NaI 水溶液中における蛍光染料ローダミン B の温度—蛍光輝度特性は、水中での傾向と類似しており、NaI 水溶液中でも LIF による温度分布測定が可能であることを確認し、実験により校正曲線を得た。その際、不確かさ解析を実施したところ、95%包括度不確かさは±5.0[°C]であった。改善の一つの方法として、レーザ光源には出力の不安定な YAG レーザより、出力の安定している Ar ガスレーザの使用が望ましい。

## 5) 温度場計測実験

LIFによる閉塞部内の温度分布測定を実施し、空隙部での熱流動場に関する知見を得ることができた。しかしながら、温度計測の不確かさが $\pm 5[\text{K}]$ と、測定温度(25 $^{\circ}\text{C}$ )から35 $^{\circ}\text{C}$ )に対して大きいため、定量的な評価、例えば熱伝達率の評価などは不可能であり、今後、不確かさを小さくする工夫が求められる。

## 6) 解析手法の検討

閉塞部を構成する個々のガラス球をモデル化するメッシュ分割手法(詳細メッシュ)と、サイクル機構で別途行っている閉塞部を含む燃料集合体内の解析手法として適用しているメッシュ分割手法(単純矩形メッシュ)のメッシュ分割の異なる2種類の解析方法により実験条件を対象とした解析を実施した。簡易ループを対象とした実験結果と解析結果とを比較することで、PIVおよびLIFによる実験結果の妥当性を確認し、流動場の特性について把握することができた。また、2チャンネル体系の解析により、解析では閉塞下端部での突入流量を少なく計算することが分かった。解析メッシュによる比較では、単純矩形メッシュによる分割手法も有効であることが分かった。ただし、閉塞内部の流速低下や閉塞部下流側において実験では観測されない後流域の形成など検討すべき課題も多い。閉塞部内部の圧力損失には、粒子径 $d$ および空隙率 $\epsilon$ が関係しているため、ガラス球径を小さくしたり、球の配置を密にするなどして実験を行い、解析と比較検討する必要がある。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり筑波大学構造工学系技官 山田 文彦氏には、試験体の設計から部品調達、製作にあたり多大なお力添えを頂くとともに、屈折率調整実験および簡易ループ実験装置の設計から製作にあたってご協力を頂きました。ここに感謝の意を表し厚く御礼申し上げます。また、実験の遂行にあたり筑波大学機能工学系混相流研究室の皆様には多大な御協力を頂きました。ここに感謝の意を表し厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] K. Koyama, K. Sato, F. Bando, Y. Tsukui, S. Kuroki, H. Endo, F. Kasahara, Y. Hashiguti, and K. Kumasaka, "Study on Local Blockage in FBR Fuel Subassembly", Proc. of Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Vol. III, p3.5-1~p3.5-10, (1991)
- [2] 松井, 文字, 榊原, 田中, 小林, 上出, "共同研究報告書 多孔質体内における熱流動現象に関する研究(平成9年度)", PNC TY9610 98-001, (1998)
- [3] 松井, 文字, 榊原, 齊藤, 田中, 小林, 上出, "共同研究報告書 多孔質体内における熱流動現象に関する研究(平成10年度)", PNC TY9400 99-005, (1999)
- [4] 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", 平成8年度, 慶應義塾大学理工学部機械工学科博士論文
- [5] 中島, 池田, 宇都宮, "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, (1992-2)
- [6] 田中, 西村, 小林, 磯崎, 上出, "高速炉燃料集合体ポーラス状局所閉塞事象の研究", PNC ZN9410 97-048, (1996)
- [7] 桜井, 中島, 松本, "LDVによるバンドル内の流れの計測", 日本機械学会講演論文集, No 814-5, p.62~p.64, (1981)
- [8] 江藤, 竹原, 横山, 井田 "水流の可視化に必要な関連技術の開発", 土木学会論文集, 第533号 II-34, p.87-p.106, (1996)
- [9] 土方, 森, 石黒, "鉛管内壁になめらかな突起列を有する流れ場の乱流構造と熱伝達", 日本機械学会論文集(B編), 第50巻458号, p.2555-p.2562, (1984)
- [10] 西田, 山根, 池田 "定量化のための可視化実験における問題点", 日本機械学会第74期通常総会講演論文集1, p.266-p.267, (1997)
- [11] W. Merzkirch, "Flow Visualization (2nd Edition)", ACADEMIC PRESS, INC., p.55~p.57, (1987)
- [12] 幡野 編, "工学材料便覧", 日刊工業新聞社, 第10章, (1981)
- [13] 木村, 三宅, 西村, 上出, 菱田, "可視化画像による流速測定技術の開発 -ノイズ処理手法を用いた計測精度の向上-", JNC TN9400 99-078, (1999)
- [14] T.Uemura, M.Iguchi, M.Yoshimoto, and M.Tatumi, "An Efficient calculation technique for PTV and PIV", 7th Intl. Symp. Flow Visualization, p.641~p.646, (1995)
- [15] 日本機械学会, "計測の不確かさ", 丸善株式会社, (1985)
- [16] M. Nishimura, A. Tokuhiko, N. Kimura and H. Kamide, "Computational Study on Quasi-planar Jets Mixing with Low Reynolds Number Turbulent Stress and Flux Equation Models", 9th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9), San Francisco, C.A., October 3 - 8, 1999.
- [17] S. Ergun, "Fluid Flow Through Packed Columns", Chemical Engineering Progress, Vol. 48, No.2, p.89-p.94, (1952)