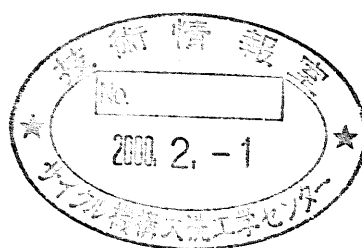


分置

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)

1999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 構造工学系

本資料の全部または一部を複写・複製・転記する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

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 319-1194, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Nuclear Cycle Development Institute)
1999

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)

松井 剛一^{*1}, 文字 秀明^{*1}, 榊原 潤^{*1}, 斉藤 克弘^{*1}
田中 正暁^{*2}, 小林 順^{*2}, 上出 英樹^{*2}

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うち、平成10年度の成果に関するものである。本研究では、高速炉の局所閉塞事故に関して、燃料ピン表面温度を決定づける閉塞物内の熱輸送現象を解明し、その評価手法を構築するため、ポーラス状閉塞物内部の熱流動場に関する実験研究を行う。

平成9年度は、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ための基礎実験を行った。濃度を調整して NaI 水溶液の屈折率とパイレックスガラス球の屈折率を一致させた。1サブチャンネルに相当する簡易ループ試験装置を製作し、NaI 水溶液を作動流体とした本可視化手法の有用性を確認した。燃料集合体内の2つのサブチャンネルを模擬した試験装置の設計・製作を行った。

平成10年度は、平成9年度の成果を踏まえ2サブチャンネル体系での閉塞物内部および周辺の流速測定実験を主として行った。Nd-YAG レーザーを光源とし、NaI 水溶液濃度を調整し屈折率を調べる実験を再度行い、濃度 56.9 [wt%]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。簡易ループを用いた試験では、ノイズ除去を行うことにより可視化によって得られる流速ベクトル分布はレーザドップラ流速計による測定結果と定量的に一致した。実験条件を策定する上で重要な NaI 水溶液の密度、粘度および熱伝導率について測定した。燃料集合体内の2つのサブチャンネルを模擬したテスト部を用いて、閉塞内部および健全流路内の流速分布について測定し、閉塞内部および健全側流路の流動場についての知見を得た。さらに、レーザ誘起蛍光法により閉塞物内部の温度分布を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。

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。

契約番号： 104F008

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 筑波大学構造工学系、

*2 大洗工学センター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**
(Semiannual report 1998. Apr. to 1999. Mar.)

**Goichi Matui*, Hideaki Monji*, Jun Sakakibara*, Katsuhiro Saito*
Masa-aki Tanaka**, Jun Kobayashi**, Hideki Kamide****

Abstract

This study deals with thermal-hydraulic phenomena in a porous media. When the foreign substances flow into the fuel subassembly with wire spacer, they would choke up the subchannel 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 the second period from April 1998 to March 1999.

In the last year, we confirmed that the visualization method used NaI solution as working fluid was applicable to flow visualization in the porous media.

In this year period, we conducted the experiment to measure the velocity field inside and outside the blockage used Particle Image Velocimetry (PIV) analysis and Laser Doppler Velocimetry (LDV). The test section was simplified and 20 times enlarged the two subchannel of the fuel subassembly in the reactor, included the porous blockage consisted of the Pyrex glass spheres. NaI solution was used as the working fluid. When the concentration of NaI is 56.9wt% in the solution, the refraction-rate is correspond to that of the Pyrex glass. Before the experiment, we measured the density, viscosity, and thermal conductivity of 56.9wt% NaI solution. The velocity profile inside and outside the blockage was measured in detail. The knowledge was acquired of the relation of the flow in between the blockage and the unplugged channel. Moreover, we tried to measure the fluid temperature inside the blockage in the NaI solution, used Laser Induced Fluorescence (LIF) method. At the fist, 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.

* Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba.

** Reactor Engineering Group, Sodium Safety Engineering Division, OEC, JNC.

目 次

1. はじめに	1
2. 屈折率調整追加実験	2
2.1 入射光波長と屈折率の関係	2
2.2 実験方法	5
2.3 実験結果	6
2.4 NaI 水溶液の物性値	10
3. 簡易ループによる流速測定実験	13
3.1 実験装置	13
3.2 PIVによる測定	16
3.3 LDVによる測定	19
3.4 実験結果	20
3.4.1 ノイズ除去	20
3.4.2 解析結果の比較	23
4. 閉塞物を含むチャンネル内流れ	31
4.1 実験装置	31
4.1.1 テスト部	32
4.1.2 多孔質状閉塞物	32
4.2 実験方法	35
4.3 実験条件	37
4.4 閉塞物内部の流動場	42
4.4.1 時間平均流速分布	42
4.4.2 時間平均渦度分布	50
4.5 閉塞物周辺の流動場	54
4.5.1 PIVによる速度場測定	54
4.5.2 LDVによる流速測定	58
4.6 閉塞部全体の流動場	61
5. 発熱実験	64
5.1 レーザ誘起蛍光法	64
5.2 実験方法	66
5.3 実験結果	68
6. まとめ	69
謝 辞	70
参考文献	71

付録1 ヨウ化ナトリウム水溶液の物性値測定

付録2 トレーサ粒子の選定

以上 筑波大学・サイクル機構共同実施

図表リスト

- 表 1 従来の研究および実験条件
 表 2 図 5 中の近似曲線の各係数
 表 3 パイレックスガラスおよび NaI 水溶液の変化
 表 4 ノイズ画像の抽出例
 表 5 実験条件 (PIV)
 表 6-1 カメラ仕様
 表 6-2 カラーフィルター仕様
- 図 1 入射光波長と NaI 水溶液濃度との関係
 図 2 入射光波長と屈折率との関係
 図 3 実験装置概略図
 図 4 パイレックスガラス球を用いた場合のずれ位置と水溶液濃度の関係
 図 5 パイレックスガラス球を用いた場合のずれ位置と水溶液濃度の関係
 図 6 実験装置内の様子
 図 7 パイレックスガラス管を用いた場合のずれ位置と水溶液濃度の関係
 図 8 密度と粘度の温度依存性
 図 9 熱伝導率の温度依存性
 図 10 ヨウ化ナトリウム水溶液濃度と屈折率との関係
 図 11 簡易ループ概略図
 図 12 テスト部概略図
 図 13 測定系概略図
 図 14 撮影条件
 図 15 LDV 測定系
 図 16 各ピクセルにおける輝度
 図 17 ノイズ除去手法の例
 図 18-1 ベクトル分布 ノイズ除去なし (原画像を解析)
 図 18-2 LDV との比較 ノイズ除去なし (原画像を解析)
 図 19-1 ベクトル分布 相乗平均によるノイズ除去
 図 19-2 LDV との比較 相乗平均によるノイズ除去
 図 20-1 ベクトル分布 相加平均によるノイズ除去
 図 20-2 LDV との比較 相加平均によるノイズ除去
 図 21-1 ベクトル分布 最小輝度によるノイズ除去
 図 21-2 LDV との比較 最小輝度によるノイズ除去
 図 22 レーザシート厚の違いによる撮影画像の例
 図 23-1 ベクトル分布 (レーザシート厚 2[mm])
 図 23-2 LDV との比較 (レーザシート厚 2[mm])
 図 24 データレートと閉塞物内平均軸方向流速との関係

- 図 2 5 実験装置ループ構成図
- 図 2 6 テスト部概略図
- 図 2 7 P I V測定系概念図
- 図 2 8 撮影条件図
- 図 2 9 閉塞側の撮影図
- 図 3 0 健全側の撮影図
- 図 3 1 - 1 時間平均速度分布 1 ($Q=2.83[m^3/h]$)
- 図 3 1 - 2 時間平均速度分布 2 ($Q=2.83[m^3/h]$)
- 図 3 2 - 1 時間平均速度分布 1 ($Q=1.84[m^3/h]$)
- 図 3 2 - 2 時間平均速度分布 2 ($Q=1.84[m^3/h]$)
- 図 3 3 - 1 時間平均速度分布 1 ($Q=1.05[m^3/h]$)
- 図 3 3 - 2 時間平均速度分布 2 ($Q=1.05[m^3/h]$)
- 図 3 4 時間平均渦度分布 ($Q=2.83[m^3/h]$)
- 図 3 5 時間平均渦度分布 ($Q=1.84[m^3/h]$)
- 図 3 6 時間平均渦度分布 ($Q=1.05[m^3/h]$)
- 図 3 7 時間平均速度分布 ($Q=2.83[m^3/h]$)
- 図 3 8 時間平均速度分布 ($Q=1.84[m^3/h]$)
- 図 3 9 時間平均速度分布 ($Q=1.05[m^3/h]$)
- 図 4 0 平均速度分布 ($Q=5.66m^3/h$)
- 図 4 1 平均速度分布 ($Q=3.77m^3/h$)
- 図 4 2 閉塞側主流方向最大流速分布
- 図 4 3 健全側平均速度分布
- 図 4 4 ローダミン B の吸収および発光スペクトル
- 図 4 5 LIF 予備実験装置
- 図 4 6 ローダミン B の蛍光による画像 (輝度を加工)
- 図 4 7 蛍光輝度と温度との関係
- 図 4 8 正規化した蛍光輝度と温度との関係

1. はじめに

高速炉の特徴である炉心燃料集合体内の緊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¹⁾。すなわち、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。

本研究は、ワイヤースペーサー型燃料集合体での閉塞形態として最も可能性の高い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を解明し、その評価手法を構築することを目的とした基礎的研究を行う。

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10年度の成果に関するものである。

平成9年度（平成9年度共同研究報告書²⁾）は、パイレックスガラス球で多孔質状閉塞物を模擬し、濃度を調整し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）を作動流体とすることで、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、炉心燃料集合体内において、多孔質状閉塞物によって閉塞したサブチャンネルと閉塞物のない健全サブチャンネルの2つを矩形流路で模擬した試験装置を製作した。

平成10年度は、平成9年度に実施したNaI水溶液屈折率調整実験について既存の研究結果と一部整合しない面が見られたことから、濃度条件を追加した屈折率調整追加実験を行った。実験条件を規定する上で重要な物性値となるヨウ化ナトリウム水溶液の密度、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³⁾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について見積もった。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を用いて、粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry: PIV）から得られた流速分布とレーザ・ドップラ流速計（Laser Doppler Velocimetry: LDV）により測定した流速とを比較し、定量的な評価を行った。また、可視化画像から構造物（固定物）による反射をノイズとして除去する方法を検討した。

以上の結果を受け、燃料集合体内の2つのサブチャンネルを模擬した矩形チャンネル内に、ガラス球で多孔質状閉塞物を模擬したテスト部に対して、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。比較のため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。

発熱条件での可視化手法の確立を目的とした予備実験を行った。閉塞物内部の温度分布を2次元分布として同時計測するために、レーザ誘起蛍光法⁴⁾（Laser Induce Fluorescence: LIF）による温度計測の適用を検討した。まず、その初期段階として、蛍光染料ローダミンBのヨウ化ナトリウム中での温度—蛍光輝度特性を調べた。

2. 屈折率調整追加実験

2. 1 入射光波長と屈折率の関係

構造物を含む流路内の流れを可視化する場合、透明な材質を用いて流路内の構造物を模擬する必要がある上に、作動流体との屈折率の違いが問題となる。この問題を解決するために、以下に述べる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。中島ら¹⁴⁾は濃度 59wt%の NaI 水溶液を用い、原子炉炉心燃料集合体を7本のパイレックスガラスロッドで模擬し、LDV によりサブチャンネル内の流速測定を行っている。このときの光源は He-Ne レーザ(波長 632.8[nm])である。江藤ら¹⁵⁾は、水を作動流体とした場合の流れの可視化技術についてまとめている。その中で、屈折率整合 (Refractive-matching) の手法について検討を加えている。さらに適用例として NaI 水溶液を作動流体とし、メタクリル酸メチルを固化成形したテトラポット周辺の流れ場の計測について報告している。土方ら¹⁶⁾は、濃度約 60[wt%]の NaI 水溶液を作動流体とし、パイレックスガラスで作られた突起列を有する流れ場の乱流構造の測定を行っている。西田ら¹⁷⁾は、濃度 64[wt%]の NaI 水溶液を用い、人工心臓用ターボポンプの模型をアクリル樹脂で製作し、ポンプ内流れの可視化を行っている。この他、透明な構造物としてパイレックスガラスを用い、流体としてオイルを使用して屈折率を適合させた実験が文献[8]にまとめられている。表1に上記研究の主著者と実験条件を示し、図1に入射光波長とパイレックスガラスを用いた実験について、NaI 水溶液濃度との関係を示す。

平成9年度に行った屈折率調整実験において、パイレックスガラス球と屈折率が一致するのは、NaI 水溶液の濃度が 56.4[wt%]であるとの結果を得た¹²⁾。図2に示すように入射光波長が短くなると、パイレックスガラスの屈折率は増加する。また、水溶液中の NaI 濃度が増加すれば、水溶液の屈折率は増加する。よって、同一のパイレックスガラスを用いた場合、He-Ne レーザ (632.8nm) を光源とした場合よりも、Nd-YAG(532nm)を光源とした場合の方がレーザ光の波長が短いため、パイレックスガラスの屈折率が大きくなり、より高濃度の NaI 水溶液を必要とする。しかし、文献[4] (59[wt%]) と本研究 56.4[wt%]の結果を比較すると、これとは逆の傾向を示した。よって、平成9年度の実験結果の妥当性を確認すべく、NaI 水溶液の濃度条件を追加して屈折率調整実験を再度実施した。

表1 従来の研究および実験条件

	NaI濃度 [wt%]	構造物模擬材質 (屈折率)	光源レーザ (波長)
本研究 (H9年度 ^[2])	56.4	パイレックス (1.48*)	Nd-YAG (532 [nm])
本研究 (図4参照)	56.9		
本研究 (図7参照)	58.1	パイレックス (1.47*)	He-Ne (632.8[nm])
中島 ^[4]	59		
土方 ^[6]	60	パイレックス (1.48*)	Ar (514[nm])
西田 ^[7]	64	メタクリル酸メチル アクリル樹脂 (1.49**)	Ar (514,488[nm])
江藤 ^[5]	飽和濃度		

*図2中の評価式による。 **出展「JIS K 6718-1993 解説」

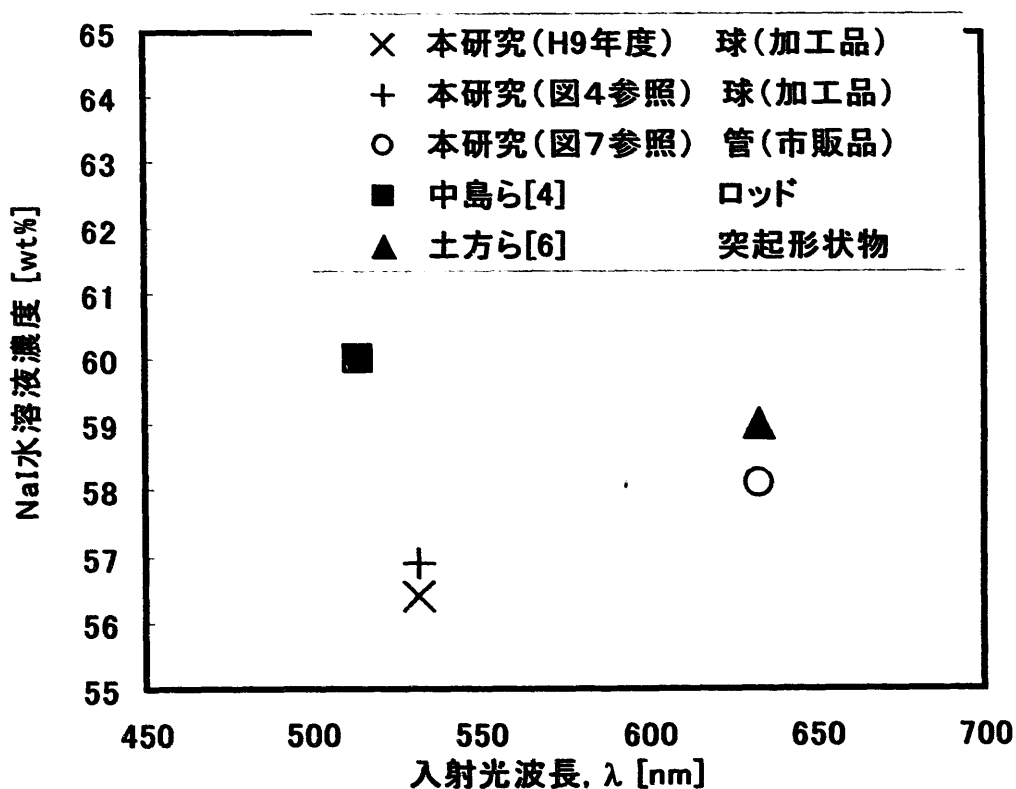


図1 入射光波長と NaI 水溶液濃度との関係

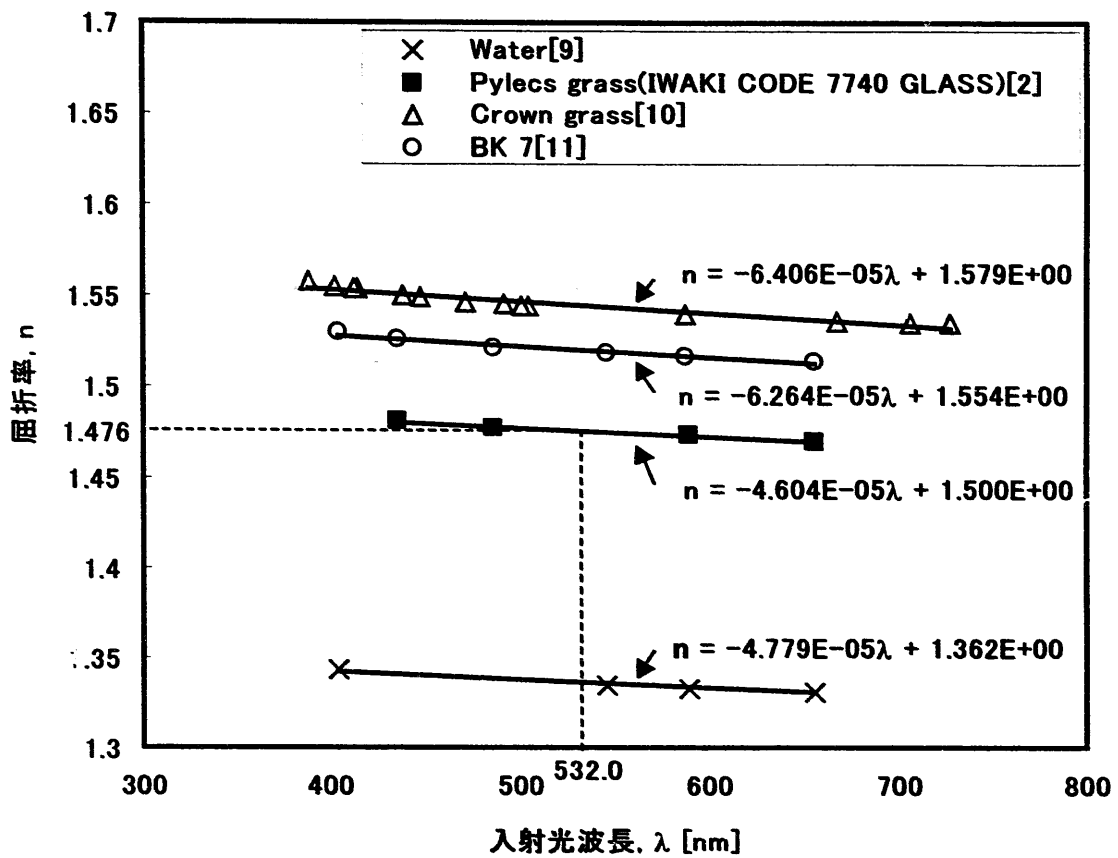


図2 入射光波長と屈折率との関係

2. 2 実験方法

実験装置の概略を図3に示す。縦横 10[cm]四方、深さ 12[cm]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する。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、NaI 水溶液中に浸す。球の中心を通る水平方向に 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）との差を測定する。スクリーンはガラス球中心から約 0.7[m]離れた位置にある。実験では Nd-YAG レーザ発信装置を固定しレーザビームの位置は変えず、ステージ上の粒子を水平方向に移動させた。パイレックスガラス球は、簡易ループおよび本実験で使用するものと同一のものであり、粒子径は 20[mm]である。ガラス球中心にレーザビームを入射し、スクリーン上の輝点を原点とする。次にガラス球中心を通る水平面に沿って、1[mm]半径方向にずらした位置でビームを入射させ、スクリーン上の輝点の原点からのずれを測定する。これを順次 1[mm]づつずらし、半径分 10[mm]ずらした時点で折り返し中心に向かって再度測定する。本屈折率調整追加実験は平成 9 年度に実施した実験手順と同一であるので、実験手順の詳細については文献[2]を参照して頂きたい。

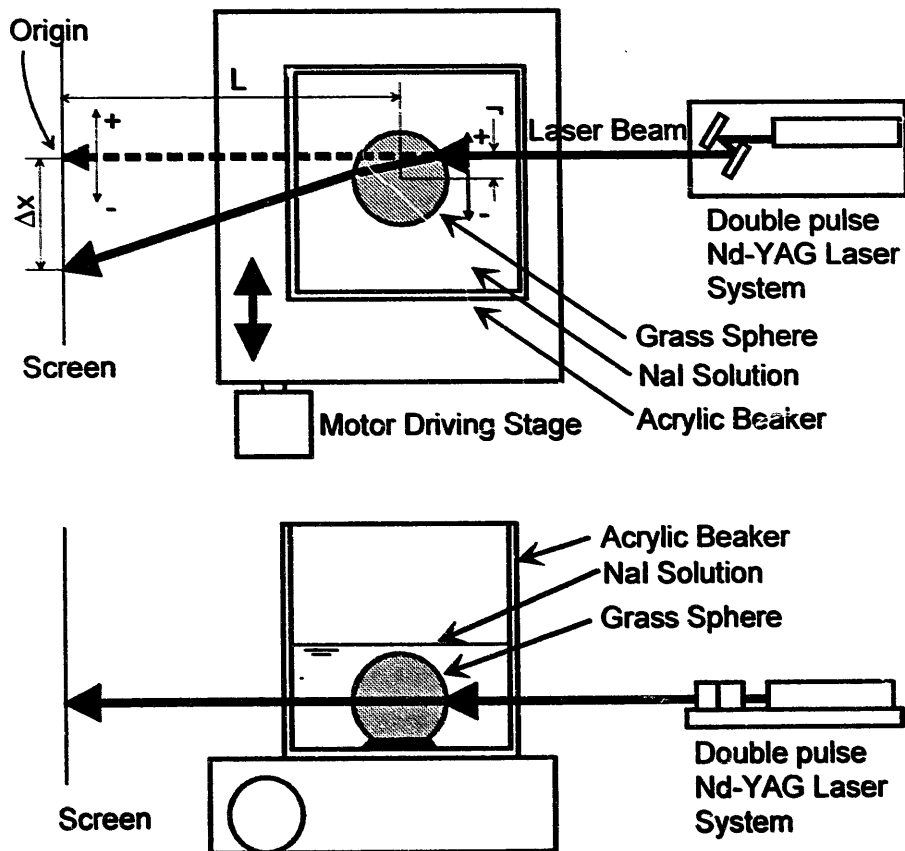


図3 実験装置概略図

2. 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 ΔX を図 4 に示す。縦軸はずれ距離 ΔX [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。

NaI を混入していない段階の純水 (0.0 [wt%]) では、ガラス球との屈折率が大きく異なるため、ずれ距離 ΔX は大きくなっている。特にレーザ光入射角度がガラス球表面に対して大きい点、すなわち無次元半径が大きい点ではずれ距離 ΔX が非常に大きく、設定したスクリーンの範囲に輝点が収まらない点もあった。NaI を溶解させ次第に濃度を上げていくと、徐々にずれ距離 ΔX は小さくなりガラス球と NaI 溶液の屈折率が一致していくことが分かる。NaI 水溶液濃度が 56.8[wt%] の場合と 57.1[wt%] の場合では、半径方向の全入射位置 ($-1 < (r/R) < +1$) において、屈折光のずれ距離 ΔX の符号が逆転している。このことから、これらの中間の水溶液濃度が実験で求めるべき (屈折率が一致する) 濃度である。また、全入射位置で符号が逆転していることから、球表面形状の凹凸 (真球度) の影響はないことが分かる。

図 5 に示すように各入射位置での屈折光のずれ距離 ΔX 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 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、NaI 水溶液の濃度は 56.9[wt%] であることがわかった。

図 6 は簡易ループに設置したテスト部内閉塞部の様子を撮影したものである。(a) は濃度 56.9[wt%] の NaI 水溶液を流した場合であり、(b) は NaI 水溶液を流していない場合である。(b) の場合では、ガラス球と流体との屈折率が大きく異なるために、背後にあるマジックで書かれた直線は全く見えていない。ここに水溶液を流し入れると若干球の輪郭が見えてはいるが、直線がはっきりと識別でき、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。

図 7 に参考データとして、パイレックスガラス球を用いた屈折率調整実験と比較のために、市販のパイレックスガラス管を用いて行った結果について示す。

図 2 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。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。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、実験の前には何らかの方法で、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。

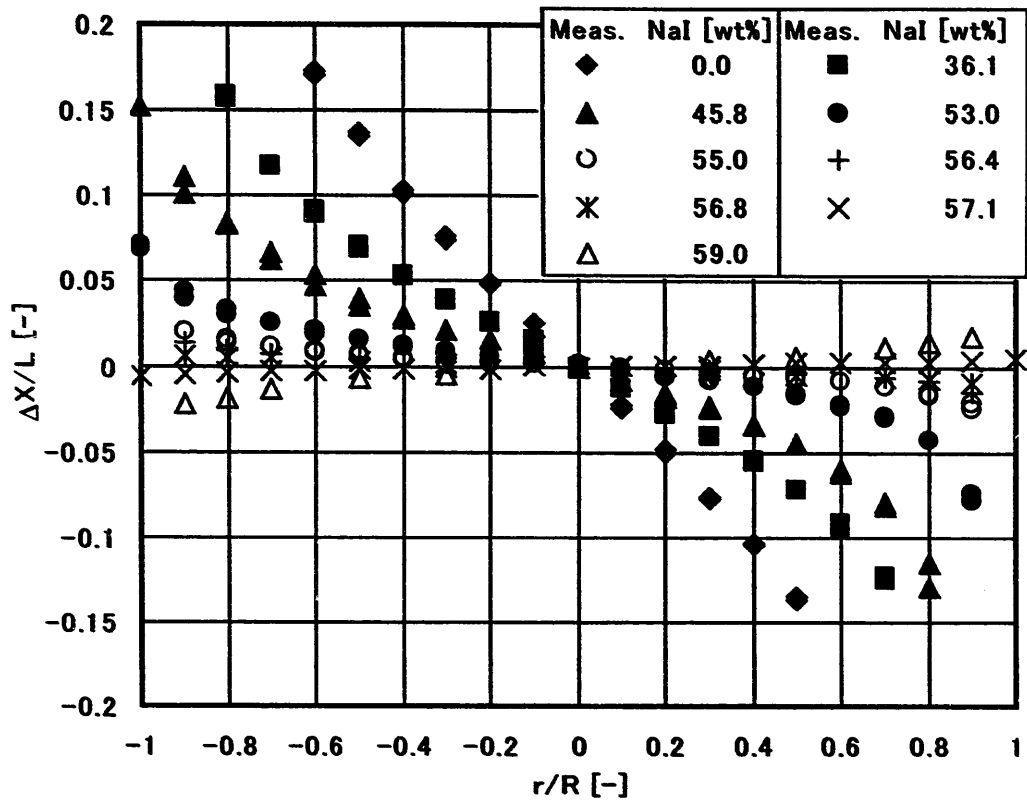


図4 パイレックスガラス球を用いた場合の
ずれ位置と水溶液濃度の関係

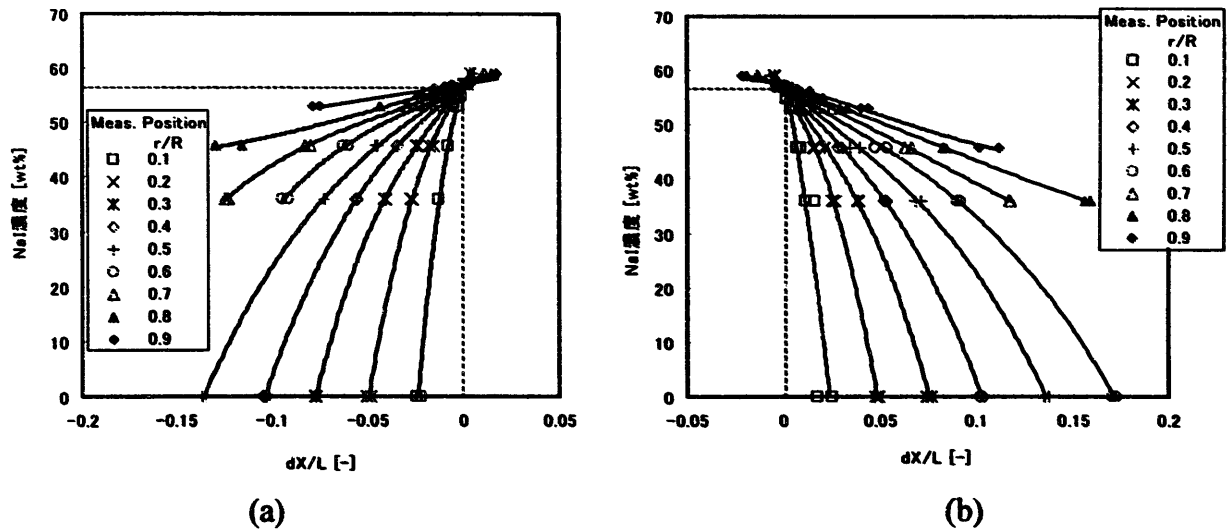
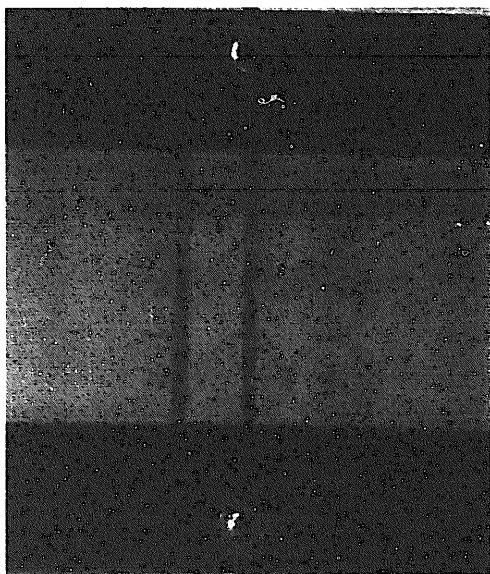


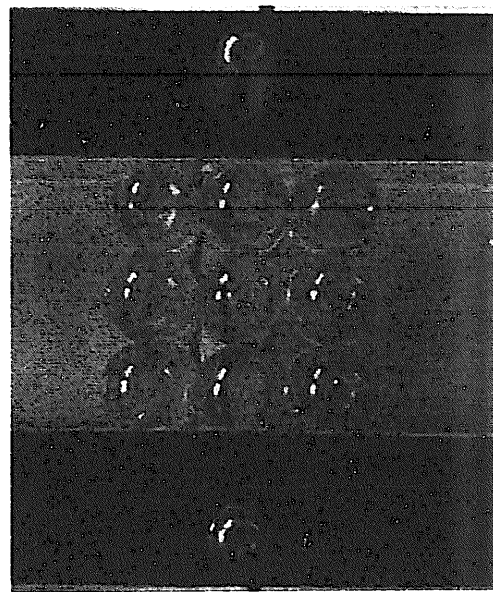
図5 パイレックスガラス球を用いた場合の
ずれ位置と水溶液濃度の関係

表2 図5中の近似曲線の各係数

$C_0 = a \cdot (dx/L)^3 + b \cdot (dx/L)^2 + c \cdot (dx/L) + d$				
係数	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



(a)



(b)

図6 実験装置内の様子

(a) : 溶液あり (b) : 溶液なし

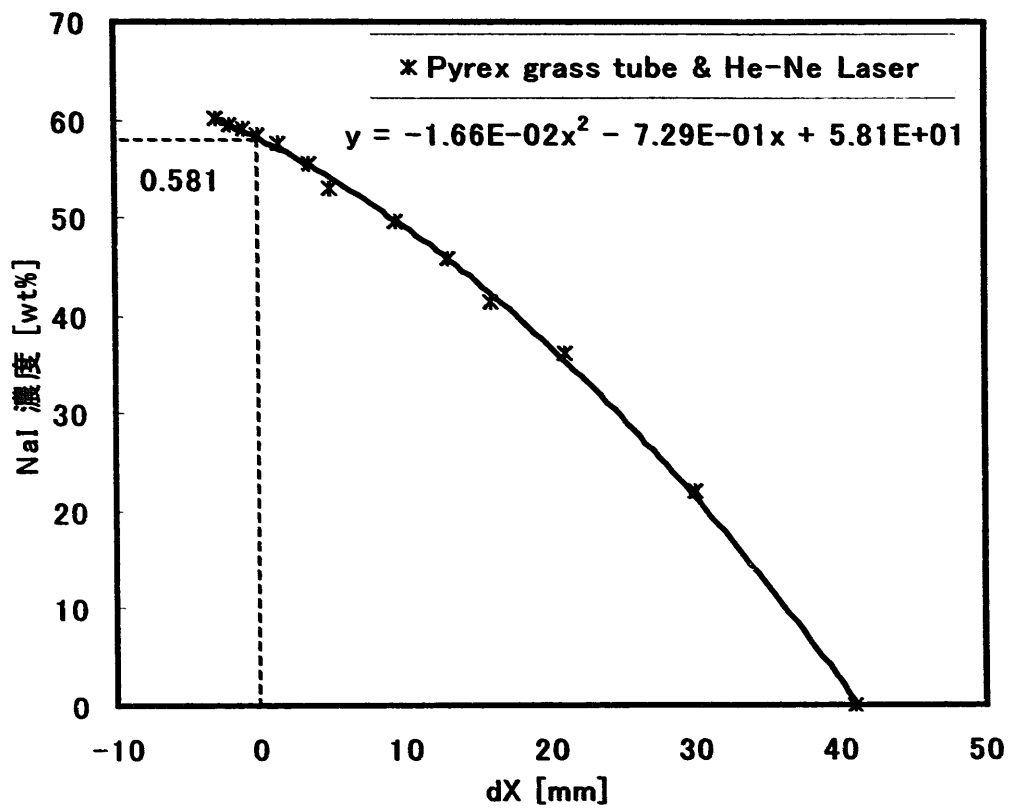


図7 パイレックスガラス管を用いた場合の
ずれ位置と水溶液濃度の関係

2. 4 NaI 水溶液の物性値

化学便覧等のハンドブック^{9,13)}に、NaI 水溶液に関する物性値が幾つか掲載されている。ただし、本試験で使用する NaI 水溶液中のヨウ素の分離を抑制するための安定剤としてチオ硫酸ナトリウムを 0.1[wt%]含んだ状態での所定の濃度に対するヨウ化ナトリウム水溶液のデータは、便覧等に掲載されているチオ硫酸ナトリウムを含まない NaI 水溶液の値から補間して求める以外にない。熱流動に関する実験時に必要な物性値として密度、粘度、熱伝導率等がある。つまり、密度は NaI 水溶液の濃度を管理するために重要であり、粘度は流量条件（レイノルズ数）の設定のため必要である。また、熱伝導率は非等温場の実験および解析を行う際に重要なパラメータとなる。そこで、チオ硫酸ナトリウムを 0.1[wt%]含んだ濃度 56.9[wt%]の NaI 水溶液の密度、粘度および熱伝導率について温度依存性を調べた。密度および粘度の結果を図 8 に示す。熱伝導率については図 9 に示す。測定の詳細については付録 1 に示す。ここで、 μ_{NaI} は粘度[mPas]、 ρ_{NaI} は密度[kg/m³]、 λ は熱伝導率[W/(mK)]、 T は温度[°C]である。

$$\mu_{\text{NaI}} = 2.40 \times 10^{-6} \cdot T^3 + 3.58 \times 10^{-4} \cdot T^2 - 6.37 \times 10^{-2} \cdot T + 3.40$$

$$\rho_{\text{NaI}} = 1.897 \times 10^{-5} \cdot T^3 - 2.643 \times 10^{-3} \times T^2 - 8.795 \times 10^{-1} \times T + 1.755 \times 10^3$$

西田ら¹⁷⁾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、および濃度 64[wt%]の NaI 水溶液の動粘度の温度評価式を示した。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 10 に示す。ただし、 C は濃度[wt%]、 ν_{NaI64} は動粘度[x10⁻⁶ m²/s]、 T は温度[°C]である。

$$n_D = 1.2369 + 0.0040486 \cdot C$$

$$\nu_{\text{NaI64}} = 9.96 \times 10^{-6} \cdot T^3 + 0.00160 \times T^2 - 0.0955 \times T + 3.18$$

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。液体の場合、圧力による屈折率への影響はきわめて小さく、固体に対しても圧力および温度による影響は無視できる¹⁹⁾。

中島ら¹⁴⁾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 10）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。図 4 に示す本実験結果のうち水溶液濃度

56.4[wt%]の場合に注目し 56.9[wt%]からの濃度変化 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 $x/L=0.015$, 球の中心部 ($r/R=0.5$) 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 1.5[mm]から 0.5[mm]の誤差が生じる。この誤差は撮影倍率によって変化するが、本実験では画像ファイル (Bitmap 形式) 上で 1 から 3 ピクセル程度のずれに相当している。つまり、5°Cの水溶液温度の変化に対しては、画像ファイル (Bitmap 形式) 上で 3 ピクセル以内のズレが生じることが分かる。ただし、このズレは球投影円の輪郭付近での値であり、投影円の内部では 1 ピクセル以下のズレであることが分かる。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。以上を表 3 にまとめて示す。

表 3 NaI 水溶液の屈折率変化

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

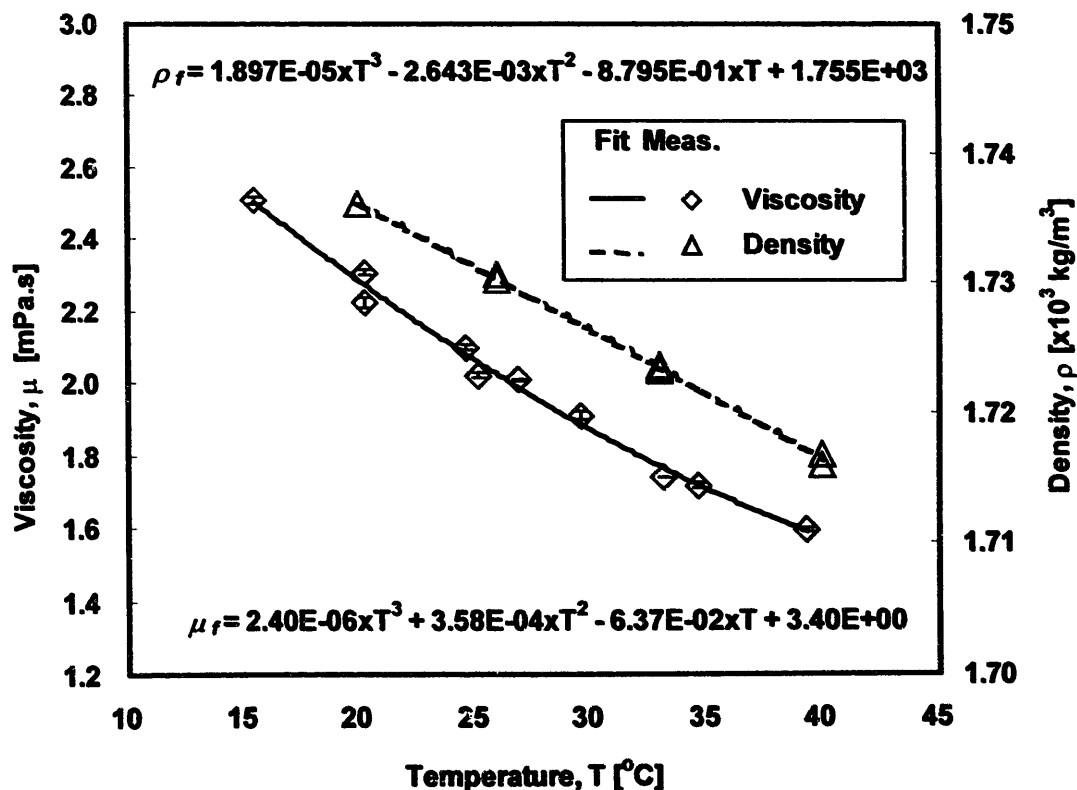


図 8 密度と粘度の温度依存性

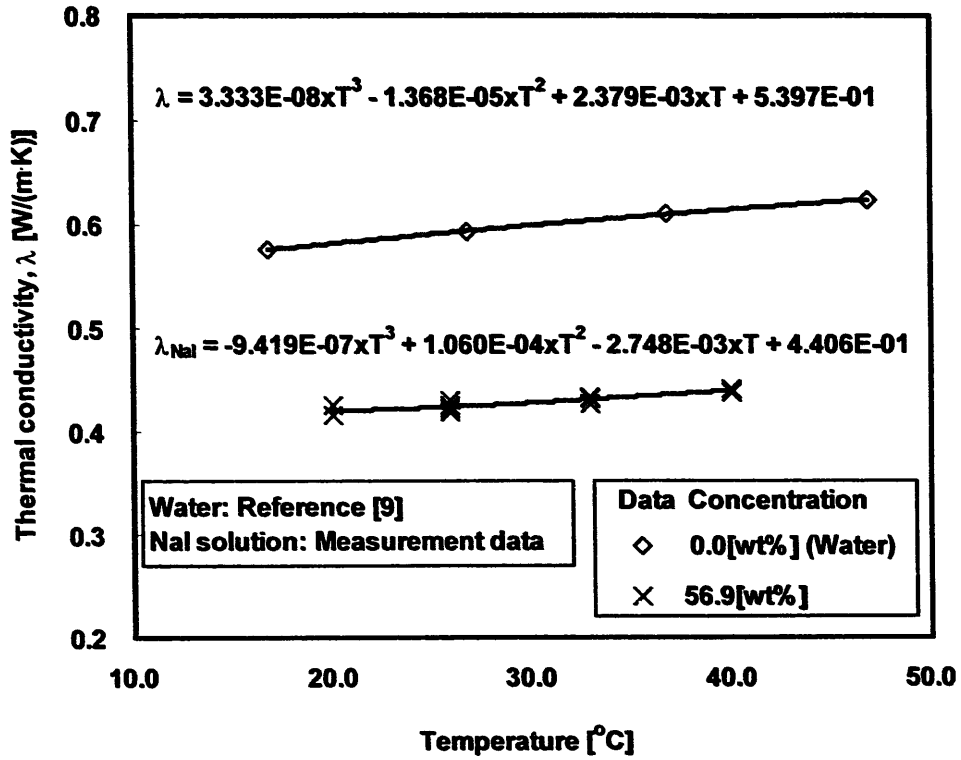


図9 熱伝導率の温度依存性

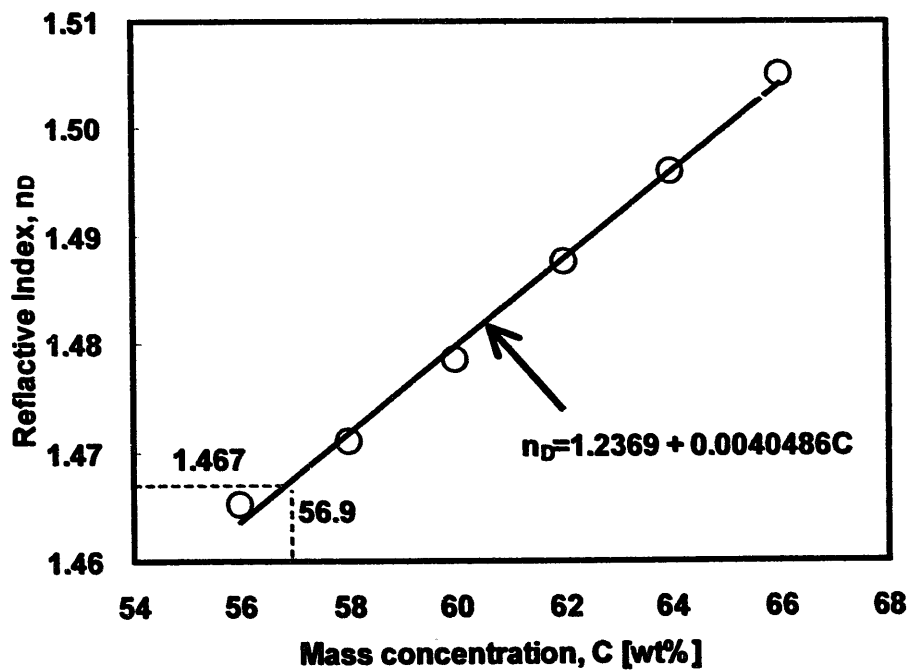


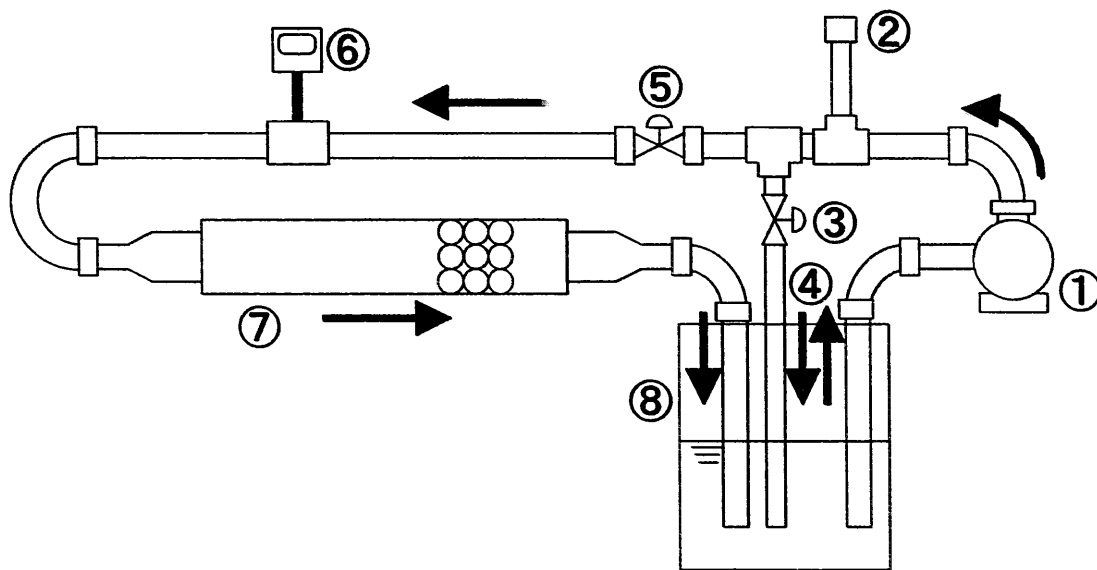
図10 ヨウ化ナトリウム水溶液濃度と屈折率との関係 (文献[7]より抜粋)

3. 簡易ループによる流速測定実験

3. 1 実験装置

前章では、56.9[wt%]の NaI 水溶液を用いるとパイレックスガラス球の屈折率に一致することを明らかにした。また、平成9年度の実験により閉塞物内部の可視化が可能であることを確認した。以下では、本可視化手法を用いたPIVから得られる流速分布とレーザドップラ流速計による流速測定結果とを比較し、定量的な評価を行う。

図11に予備実験に使用した簡易ループの概略を示す。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12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。閉塞物は平均粒子径 20.3[mm]、公差 0.3[mm]のパイレックスガラス球 27 個を、格子状に立方配列(3×3×3)の充填層で模擬した。作動流体は円形断面の配管から矩形断面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。この流速分布の影響を低減し、テスト部内の流れを一様流に近い状態にするため、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。LDV によりこの位置(300[mm]下流側)での流速分布を測定し、一様流に近い流速分布であることを確認した。球の固定方法はエポキシ系 2 液式接着剤でそれぞれの球間を点接着した。作動流体は濃度 56.9[wt%]の NaI 水溶液であり、流量は 30[L/min]、このとき閉塞物のない全断面平均流速は 0.134[m/s]である。

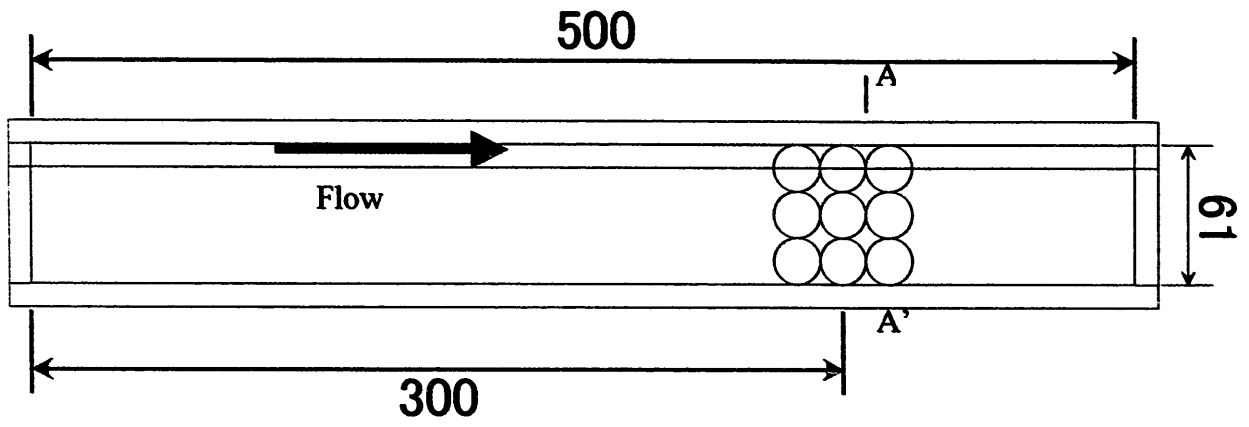


- ①ポンプ
- ②水溶液注入部
- ③流量調節バルブ
- ④バイパスライン
- ⑤流量調節バルブ
- ⑥タービン流量計
- ⑦テスト部
- ⑧タンク

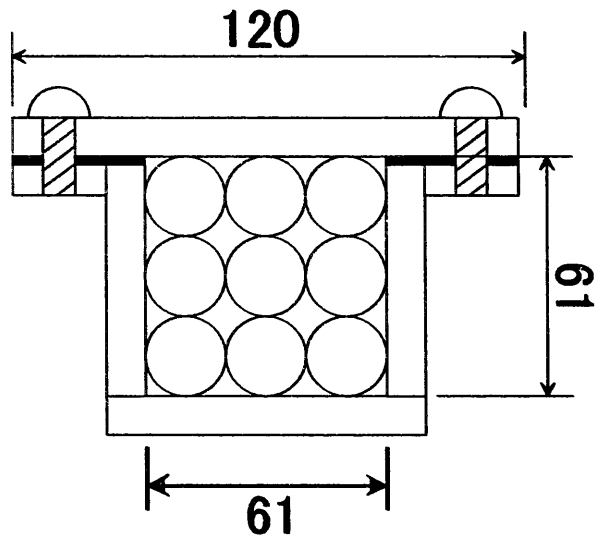
ポンプ : NIKKISO SEVEN POMP 100v_272w(60Hz)

Max Head	7[m]	10[m]
Max Flow	95[l/min]	72[l/min]

図 1 1 簡易ループ概略図



(水平方向断面図)



(A-A' 断面図)

図12 テスト部概略図

3. 2 P I Vによる測定

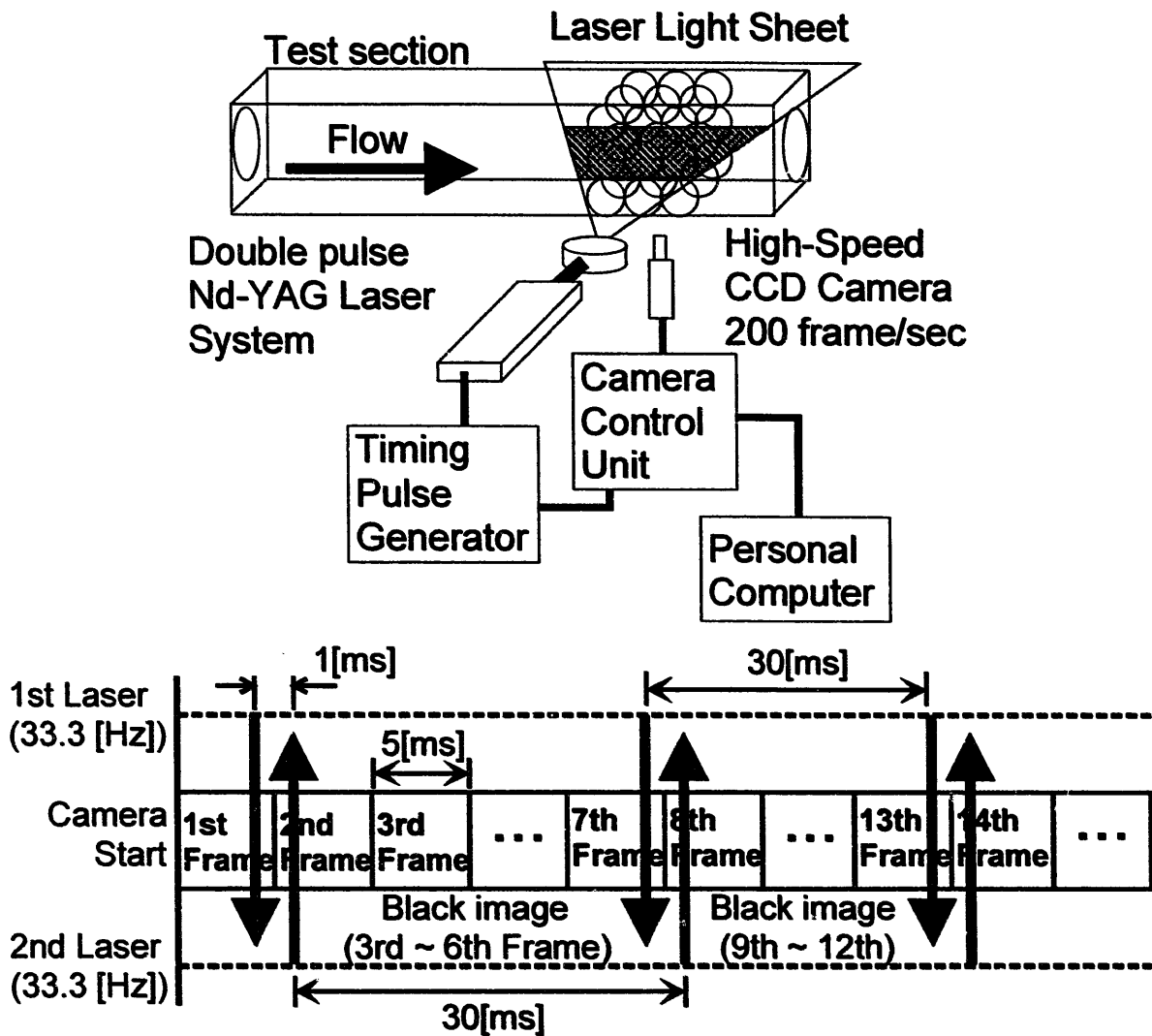
図13に本実験で用いた球充填層内の流動の可視化に用いる粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry: PIV) システムの概略図を示す。また、高速度ビデオカメラと画像処理ボードの規格も併せて示す。

計測系は、パーソナルコンピュータ、カメラコントロールユニット、タイミングパルスジェネレータ、ハイスピードカメラ、Double pulse Nd-YAG レーザシステムからなる。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”) を使用した。本粒子は比重 1.85, 平均粒子径 20[μm]であり、水 1[m^3]あたり約 0.01[kg]の割合で混入した。トレーサ粒子の応答性について調べたところ、トレーサとして適用性が確認できた。この詳細については付録2に記す。

PIV では、レーザービームをシート状にして流れ場に照射し、レーザーシート面内のトレーサ粒子の位置をビデオカメラ等により CCD 等に露光する¹⁾。Nd-YAG レーザは微小時間隔で2回発光 (Double pulse) する。1回の発光時間 (パルス幅) は 5~6 [ns]と短い。図13の中段に示すように、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本実験では 1[ms]で行った。1回目の発光によりある時刻でのレーザーシート面内のトレーサ粒子画像を露光する。次に微小時間 (1[ms]) 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番目の粒子画像を露光する。2枚一組の画像が 30[ms]間隔で得られることになり、これは、サンプリング周期 33.3[Hz]で流速測定を行ったことに相当する。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。

画像解析は、微小時間差を持って記録された2つの画像の差、つまり、微小な粒子の移動量から、ベクトルマップを作る。解析方法には、個々の粒子や粒子群 (パターン) の移動量を求める方法など種々提案されているが、ここでは、画像輝度分布の相互相関法によるパターンマッチング方法 (Case-A) ¹⁾および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 (Case-B) ¹⁴⁾の2種類の画像解析ソフトを使用し解析結果の妥当性について比較した。

本実験では図14に示すように、Nd-YAG レーザシートをテスト部に入射し球充填層内部の断面図を高速ビデオカメラ(nac 社製 DRP-S)で1断面につき、1[ms]間隔で撮影された2枚一組の画像 20 組を用い、それぞれの画像を解析することによって行った。球充填層の一番下の層から、20[mm]の位置 (断面③) で撮影し、充填層内部の下流側の空隙について局所流れの測定を行った。



レーザパルスと撮影のタイミング

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 1 3 測定系概略図

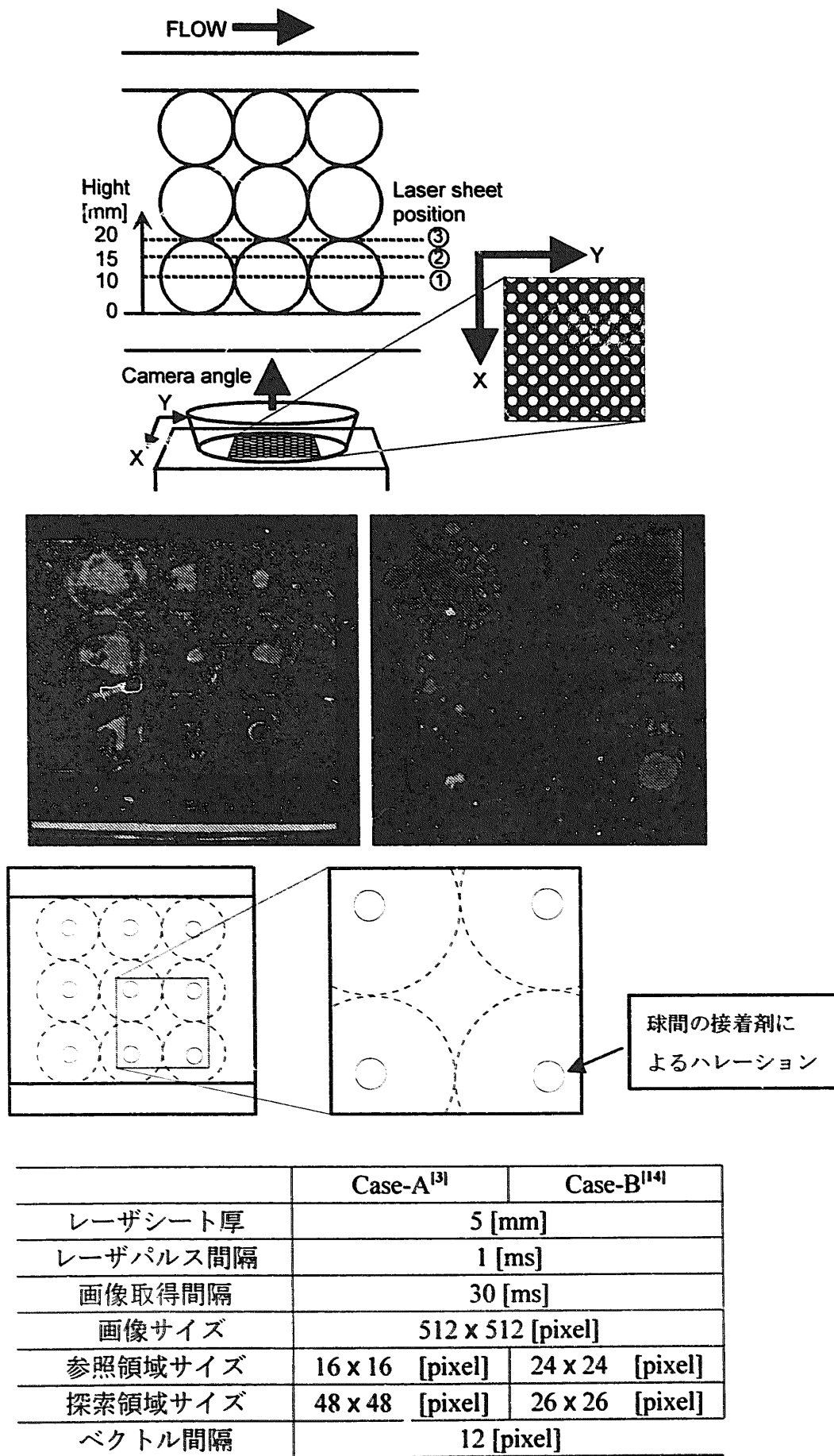
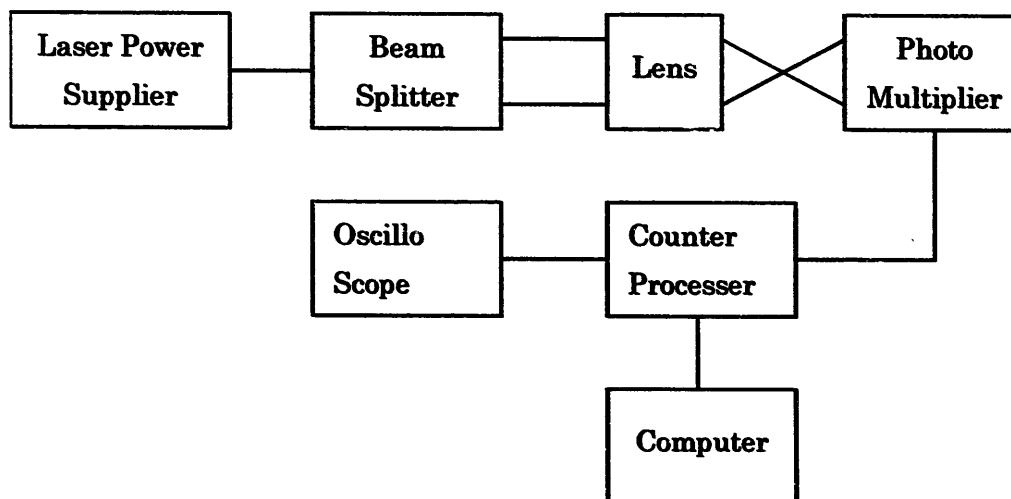


図 1 4 撮影条件

3. 3 LDVによる測定

LDV システムの概略を図 1 5 に示す。システムは、He-Ne レーザー、ビームスプリッター、フロントレンズ（焦点距離 310 [mm]）、フォトマルチプライヤ（光電子倍増管）、および信号処理器（カウンタプロセッサ）からなる。

LDV による流速測定は PIV と同様に（図 1 4 参照）断面③のみで行い、流れ方向を X、流れに垂直な方向を Y とした。異常値の排除には、修正トンプソン- τ 法^[15]を使用した。



LDV カウンタプロセッサ (DANTEC 社製 55L90a)

Low-pass filter	256[kHz]~100[MHz]
High-pass filter	2[kHz]~64[MHz]
Fixed reset time	1[μ s]

図 1 5 LDV 測定系

3. 4 実験結果

3.4.1 ノイズ除去

今回のレーザシートの厚さはおよそ 5mm ほどあったため、パイレックスガラス球によるレーザ光反射が強く、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 1 4 参照）。ノイズを除去するために各ピクセルに対して求めた相乗平均輝度をノイズとして除去する方法、相加平均を求める方法、最小輝度を求める方法^[18]を比較検討した。

以下に相乗平均を求めノイズを除去する方法を説明する。図 1 6 に示すように、ある画像上の座標 (i, j) にあるピクセルの輝度を L_{ij} とする。これを、最大輝度 256 で除することによって 0~1 の値に変換する。

$$p_{ij} = L_{ij} / 256 \quad (0 \leq L_{ij} \leq 256, 0 \leq p_{ij} \leq 1)$$

これを、参照画像枚数 (k 枚) 分の相乗平均をとる。

$$q_{ij} = (p_{ij})_1 \times (p_{ij})_2 \times \dots \times (p_{ij})_k$$

$$M_{ij} = q_{ij} \times 256$$

ここで求めた M_{ij} によりノイズ画像が構成される。

各ピクセルの最小輝度を求めてノイズ画像を構成する方法は、バックグラウンドの輝度レベルと同程度の粒子画像であっても、バイアス成分のみ除去されるため、粒子情報は残されるという利点がある。

表 4 に 5 枚の参照画像を仮定し座標 (i, j) にあるピクセルについて求めた相加平均値、相乗平均値および最小値を示す。ノイズと考えられるピクセルは輝度が常にある値 (バイアス) を持ち輝度 0 とはならない。つまり、あるピクセルの輝度が 0 と 256 の間を時間的に変化していればノイズではない。よって、表 4 に示されるように相乗平均値および最小値による方法は、輝度 0 のピクセルに対して敏感であるため効率よくノイズ画像 (バイアス) が抽出できると考えられる。

図 1 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。

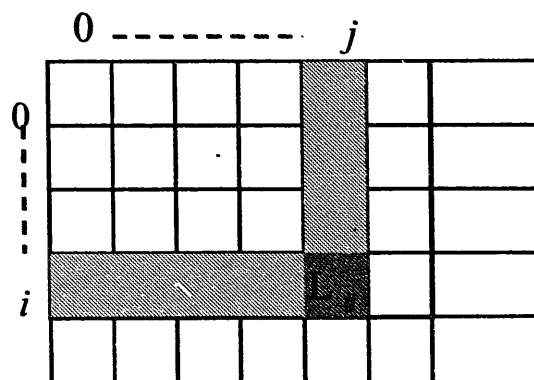
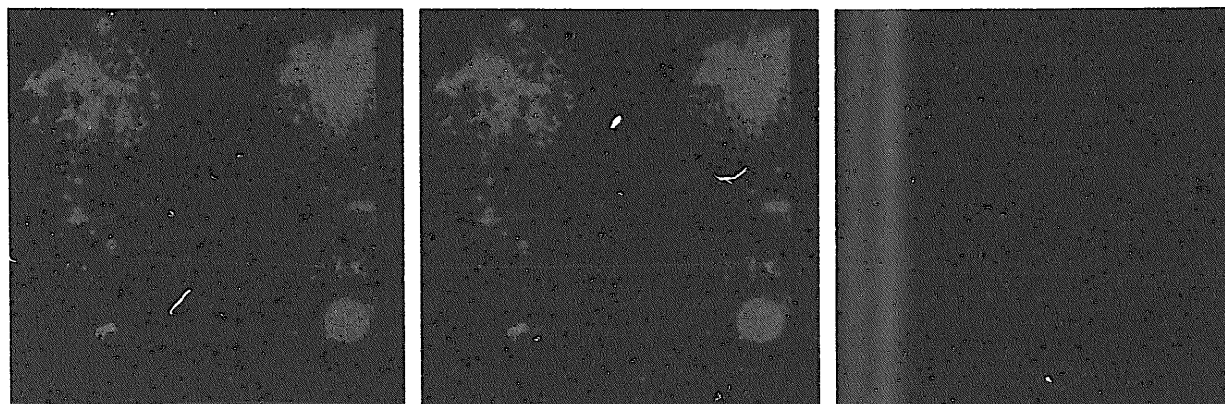


図 1 6 各ピクセルにおける輝度

表 4 ノイズ画像の抽出例

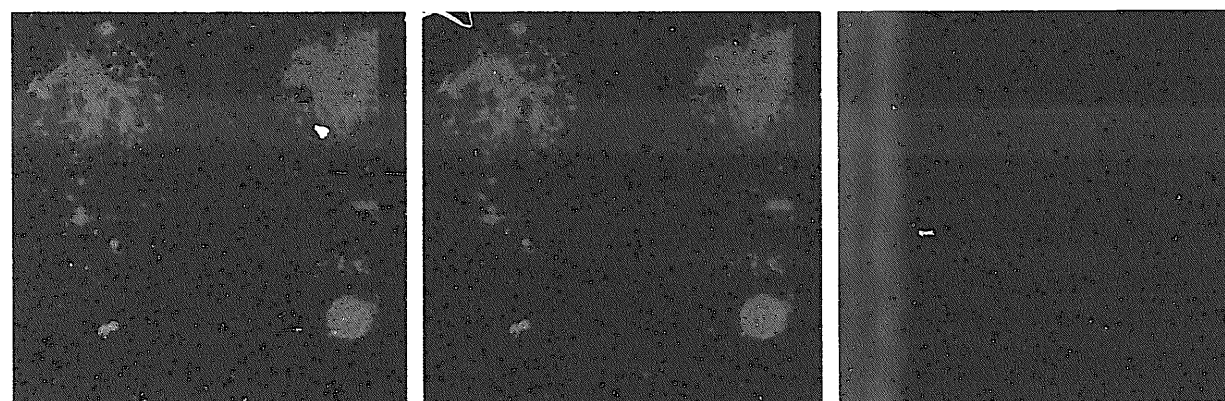
		参照画像					バイアス (ノイズ) 輝度		
		1	2	3	4	5	相加平均	相乗平均 Mij	最小値
座標 (ij) での輝度 Lij	例 1	256	128	256	128	256	204.8	194.0	128
	例 2	256	0	256	0	256	51.2	0	0
	例 3	128	128	256	128	128	153.6	147.0	128



(a)撮影画像

(b)ノイズ画像 (平均値画像)
(1) 相乗平均による方法

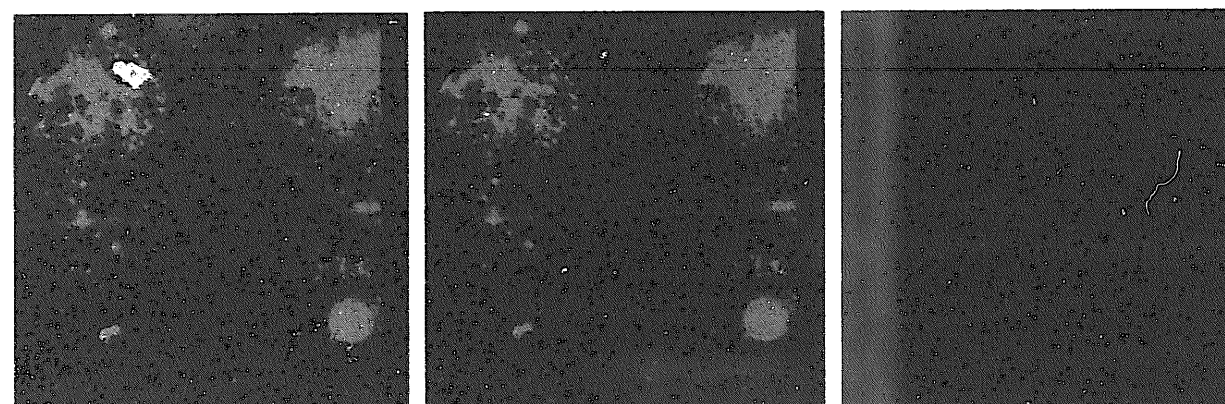
(c)解析画像



(a)撮影画像

(b)ノイズ画像 (平均値画像)
(2) 相加平均による方法

(c)解析画像



(a)撮影画像

(b)ノイズ画像 (最小輝度)
(3) 最小輝度による方法

(c)解析画像

図17 ノイズ除去手法の例

3.4.2 解析結果の比較

図14に示す底面から20mm上方の断面③での領域に対して、撮影画像からノイズを差し引いた修正画像に対して解析を行った。以下に各ノイズ除去手法ごとに結果を示す。

図18-1に、3.4.1節で述べたノイズ除去を行わない（撮影画像を解析した）場合のベクトル分布を示し、図18-2に、主流方向流速の空間分布についてLDVとPIVの測定結果を比較して示す。ベクトル分布を比較すると双方とも画像の中心部（空隙部）で流速が速く、球接合部（ベクトル図の上下中央部）ではよどみあるいは2次流れが見て取れる。図18-1のy方向分布は、Case-A, B共に流速分布の傾向は一致している。図18-2のx方向分布において、Case-Aの解析結果では $(y/dp < \pm 0.3)$ の範囲で、PIVとLDVの傾向は一致しているが、流速値はPIVの方が高い値を示している。Case-BによるPIVの結果では、空隙部で流れ方向（左から右）に沿った一様な流れが $y/dp < -0.2$ の位置で解析できていない。

図19-1に、相乗平均によるノイズ除去を行った場合のベクトル分布を示し、図19-2に、LDVとPIVの測定結果を比較して示す。ノイズ除去を行わない場合のベクトル分布と比較すると、空隙部で流れ方向（左から右）に沿った一様な流速が観察でき、球接合部ではよどみあるいは2次流れが見て取れる。閉塞球の配置から考えて、これは、LDVとの比較で定性的に正しい流れを表していると考えられる。LDVとの比較では、輝度差による解析（Case-B）がよい一致を示している。

図20-1に、相加平均によるノイズ除去を行った場合のベクトル分布を示し、図20-2に、LDVとPIVの測定結果を比較して示す。相加平均および相乗平均によるノイズ除去を行った場合で比較すると、ベクトル分布およびLDVとの結果に大きな差は見られないが、相乗平均による方法の方がベクトルの数が多いことが分かる。つまり、本画像のように各ピクセルの輝度（粒子情報）が小さい場合、相乗平均に比べて相加平均の方がノイズを大きく見積もるため、有効なデータであってもノイズとして除去され、粒子情報がないために流速ゼロと判断されたと考えられる。

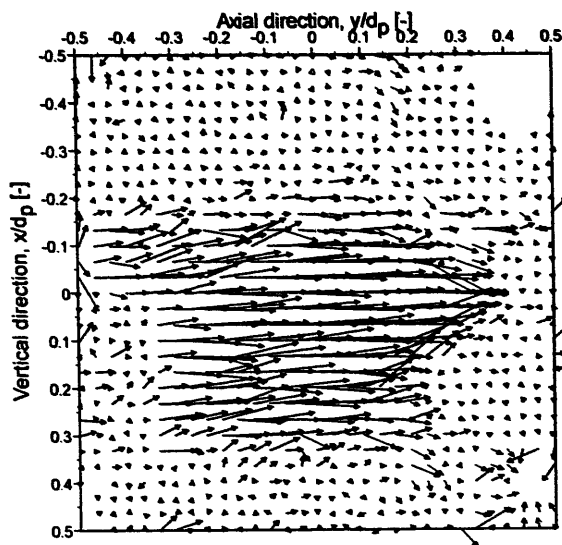
図21-1に、最小値によるノイズ除去を行った場合のベクトル分布を示し、図21-2に、LDVとPIVの測定結果を比較して示す。ベクトル分布は、図18-1に示すノイズ除去を行わない場合に比べて、誤ベクトルの少ない分布が得られている。また、流況も定性的に正しく解析されている。Case-A, Bの解析手法に関わらず $y/dp < \pm 0.3$ の範囲でPIVとLDVとは一致している。

ノイズ除去を行わない場合、相互相関法による解析（Case-A）の方が、LDVによる結果と一致した。一方、ノイズを除去した場合は、逆に輝度差の絶対値による解析（Case-B）の方がLDVの結果と一致した。本解析においては、3.4節で述べたように、撮影画像のクオリティが低くノイズ除去を行う必要があった（図22参照）。ただし、図23-1および図23-2に示すようにレーザシート厚を2[mm]と薄くした場合、解析方法に関わらず $(y/dp < \pm 0.3)$ の範囲でLDVの結果と一致している。つまり、解析結果は撮影画像のクオリティに大きく依存することが分かる。本研究

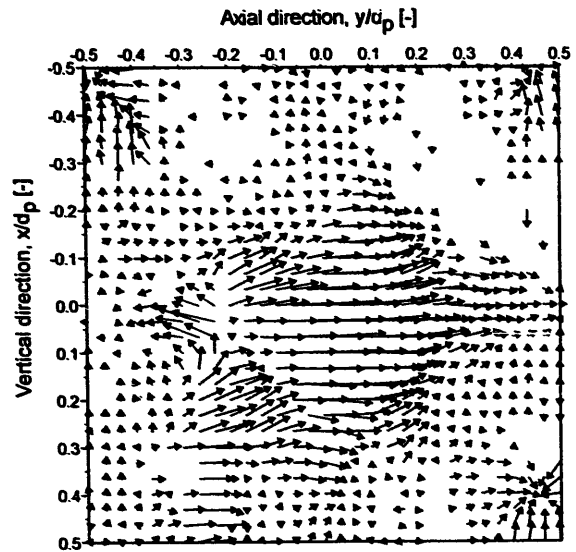
のような閉塞物周りの流動場解析の場合、ハレーションの影響を小さくしクオリティの高い画像を得るためには、レーザシート厚を薄くしなければならない。よって、第4章以降の実験ではレーザシート厚を1[mm]とした。その結果、クオリティの高い画像が得られたため、ノイズ除去は行わず相互相関法による解析 (Case-A) を行った。

以上の結果から断面③での流況についてまとめると、ベクトル分布図の中心部分 (正方格子状に配列させた球の空隙部分) で流れは直進し、その流速は0.5 m/s 程度である。図18から図21に示すLDVによる流速値を、軸方向に平均して閉塞物内平均軸方向流速と定義して求めたところ、0.51[m/s]であった。よって、PIVの結果とLDVの結果はよく一致していることが分かる。球間が接着されている部分では流れが遮られ、流速が遅くなっていることがわかる。ただその分布が上下対称でないのは、球の大きさに多少のばらつきがあるために生じていると考えられる。球の周辺では球表面に沿う流れや、巻き込まれる流れの様子が分かり、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。

図24にデータレートと閉塞物内平均軸方向流速からのズレとの関係を示す。ここでいうデータレートとは、3.3節のLDVによる測定と同様に修正トンプソン- τ 法¹⁵⁾により判別した有効データの数であり、LDVと比較したトラバース位置におけるPIVの結果のみ示してある。本実験ではデータレートが0.5付近に集中しており、20組の撮影画像から10個程度の有効な流速データが得られていることを示している。また、データレートの増加に伴って閉塞物内平均軸方向流速からのズレが小さくなる傾向を示している。つまり、定量的に正しいデータを得るためには、解析画像数を増加させる必要がある。また、図24において、データレートが1.0付近であるにも関わらず、ズレが大きいのは誤ベクトルと考えられる。

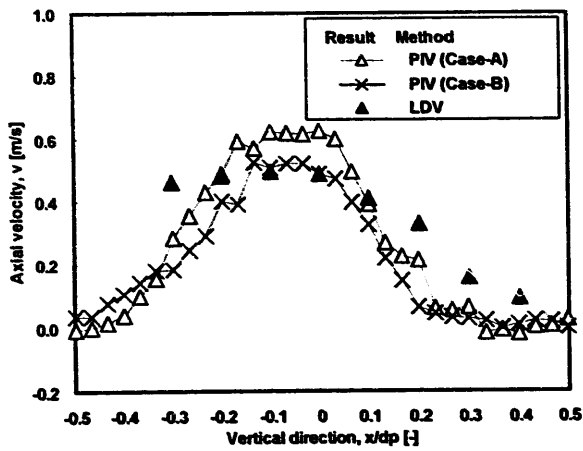


(1) 相互相関法 (Case-A)

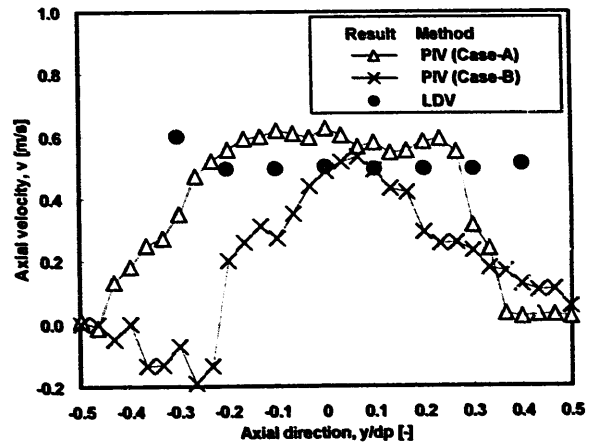


(2) 輝度差法 (Case-B)

図 18-1 ベクトル分布
ノイズ除去なし (撮影画像を解析)

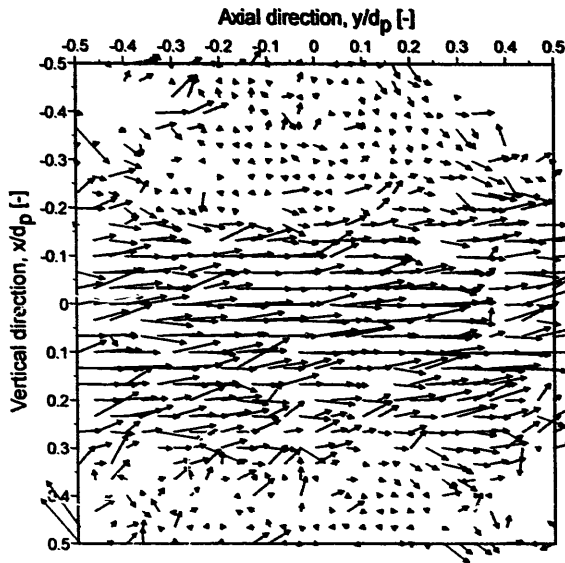


(1) 主流方向流速の横方向分布

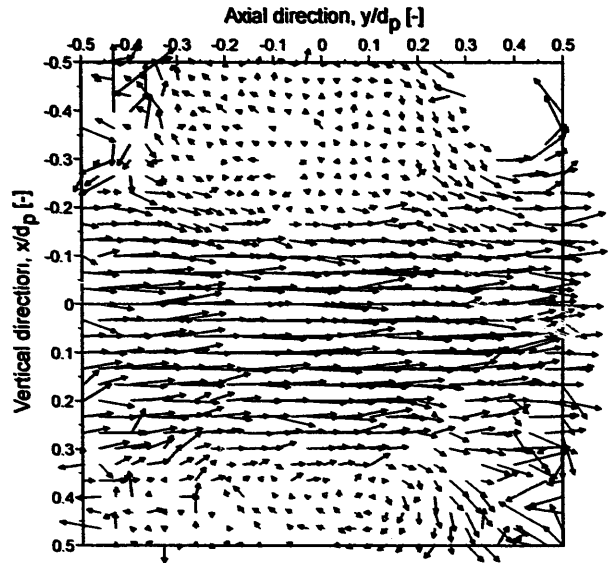


(2) 主流方向流速の軸方向分布

図 18-2 LDV との比較
ノイズ除去なし (撮影画像を解析)

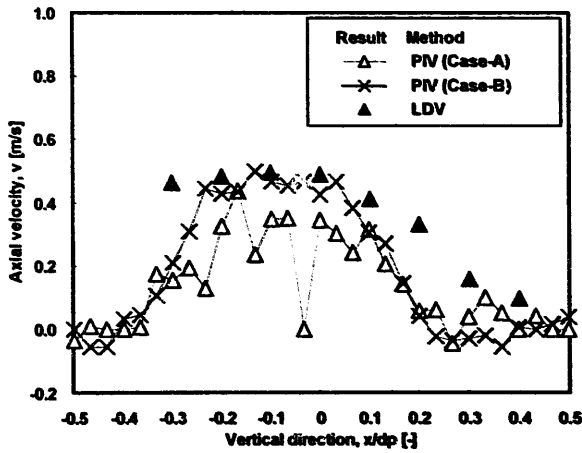


(1) 相互相関法 (Case-A)

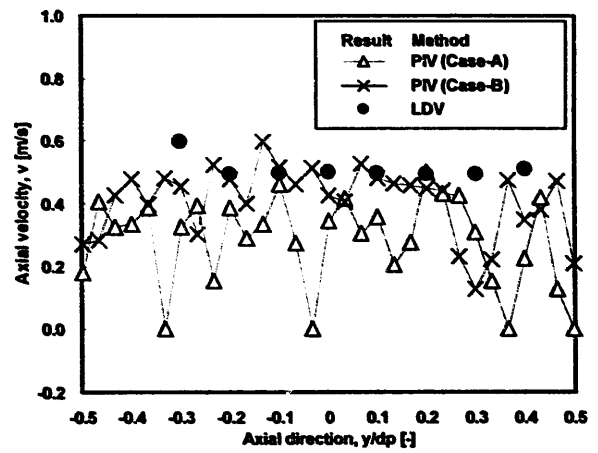


(2) 輝度差法 (Case-B)

図19-1 ベクトル分布
相乗平均によるノイズ除去

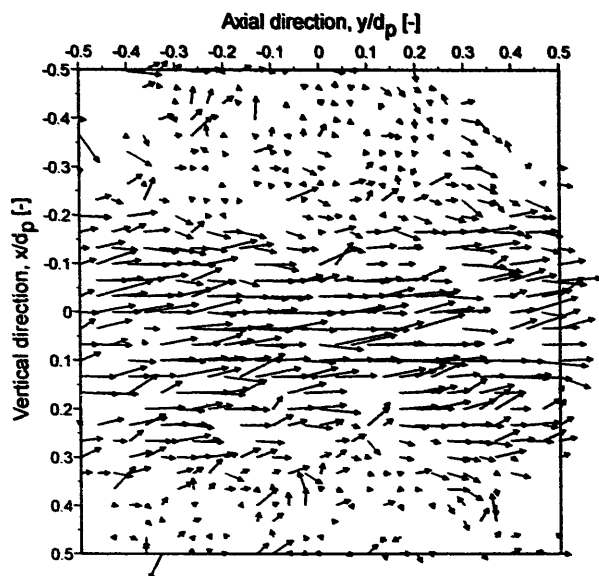


(1) 主流方向流速の横方向分布

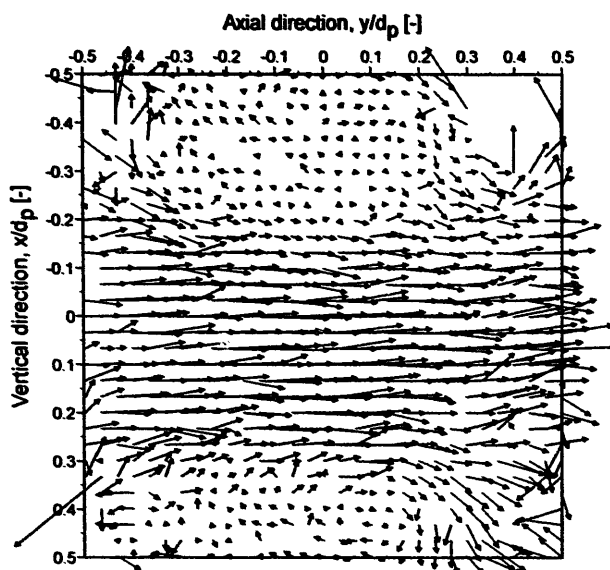


(2) 主流方向流速の軸方向分布

図19-2 LDVとの比較
相乗平均によるノイズ除去

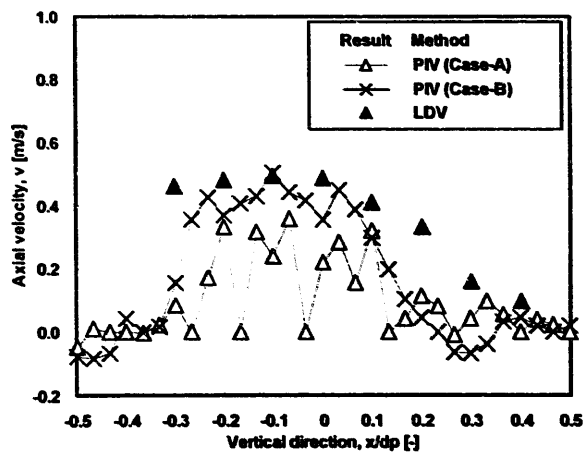


(1) 相互相関法 (Case-A)

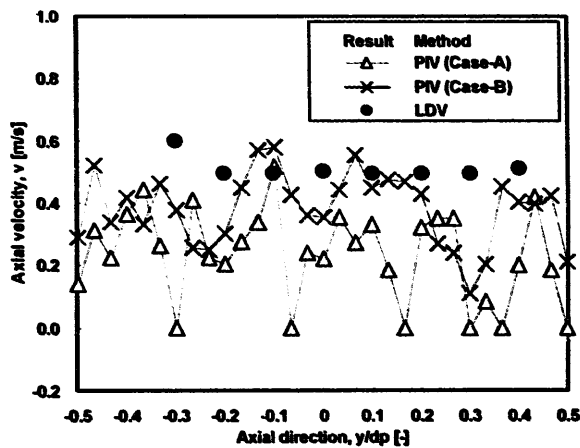


(2) 輝度差法 (Case-B)

図 20-1 ベクトル分布
相加平均によるノイズ除去

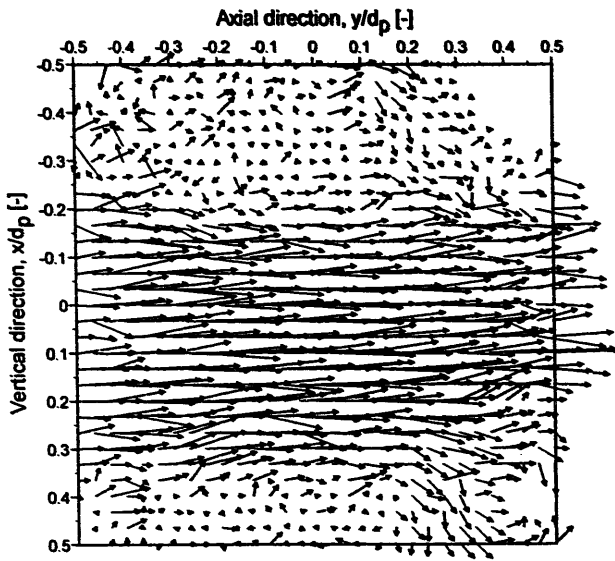


(1) 主流方向流速の横方向分布

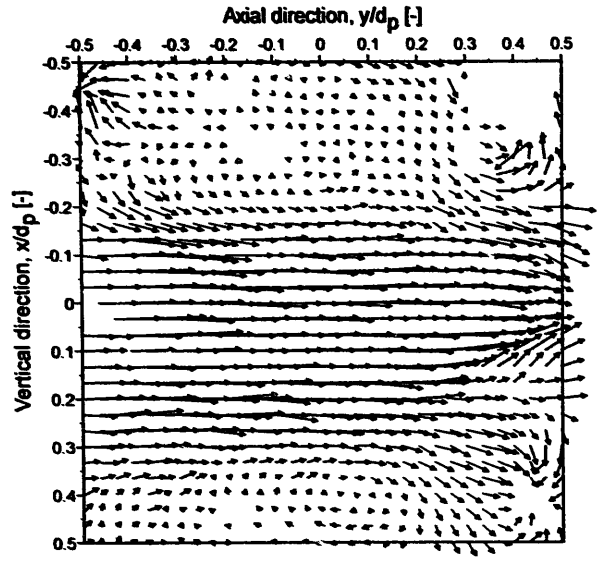


(2) 主流方向流速の軸方向分布

図 20-2 LDV との比較
相加平均によるノイズ除去

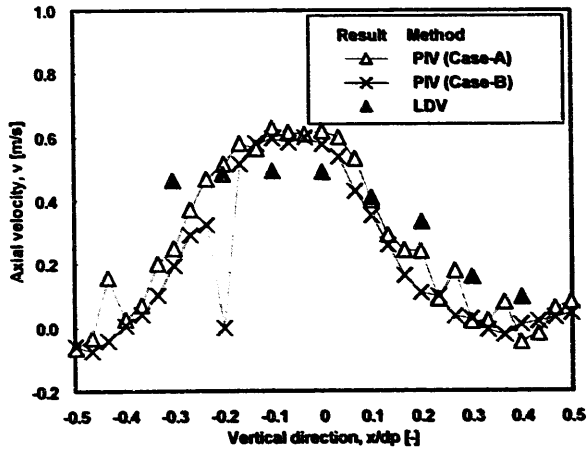


(1) 相互相関法 (Case-A)

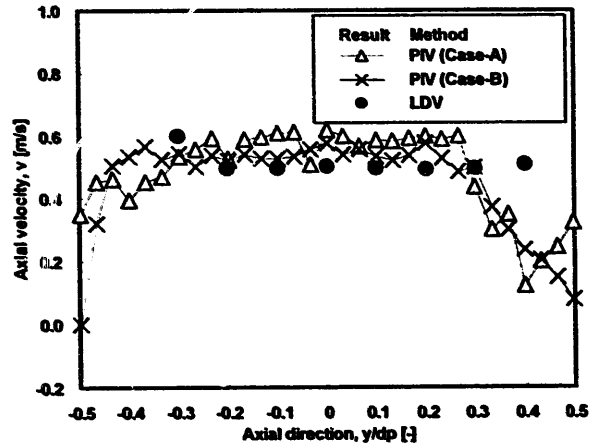


(2) 輝度差法 (Case-B)

図 2 1 - 1 ベクトル分布
最小輝度によるノイズ除去

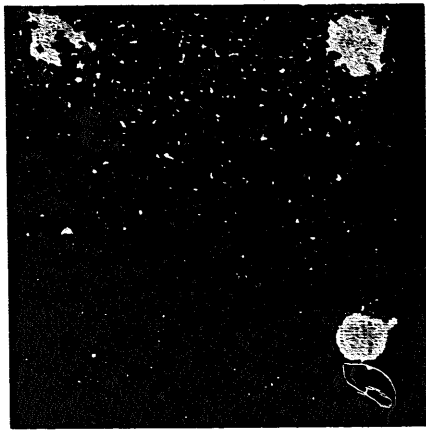


(1) 主流方向流速の横方向分布

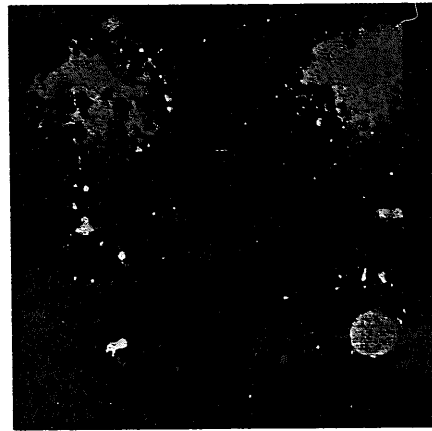


(2) 主流方向流速の軸方向分布

図 2 1 - 2 LDV との比較
最小輝度によるノイズ除去

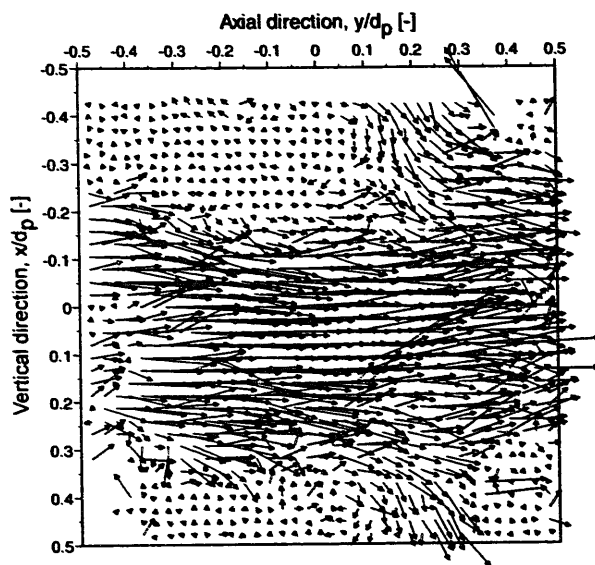


(1) レーザシート厚 2[mm]

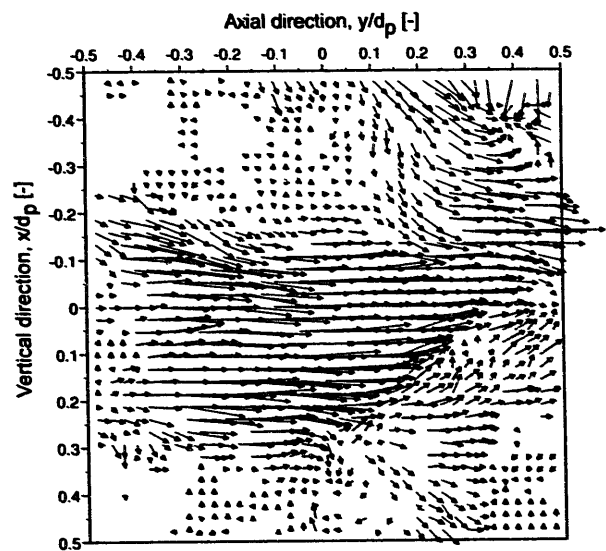


(2) レーザシート厚 5[mm]

図 2 2 レーザシート厚の違いによる撮影画像の例

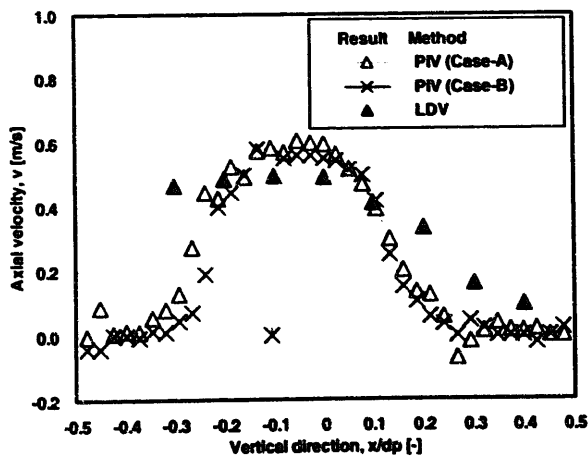


(1) 相互相関法 (Case-A)

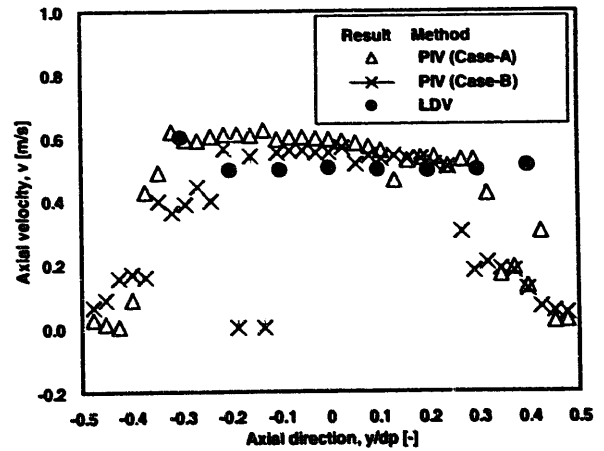


(2) 輝度差法 (Case-B)

図 2 3 - 1 ベクトル分布
(レーザシート厚 2[mm])



(1) 主流方向流速の横方向分布



(2) 主流方向流速の軸方向分布

図 2 3 - 2 LDV との比較 (レーザシート厚 2[mm])

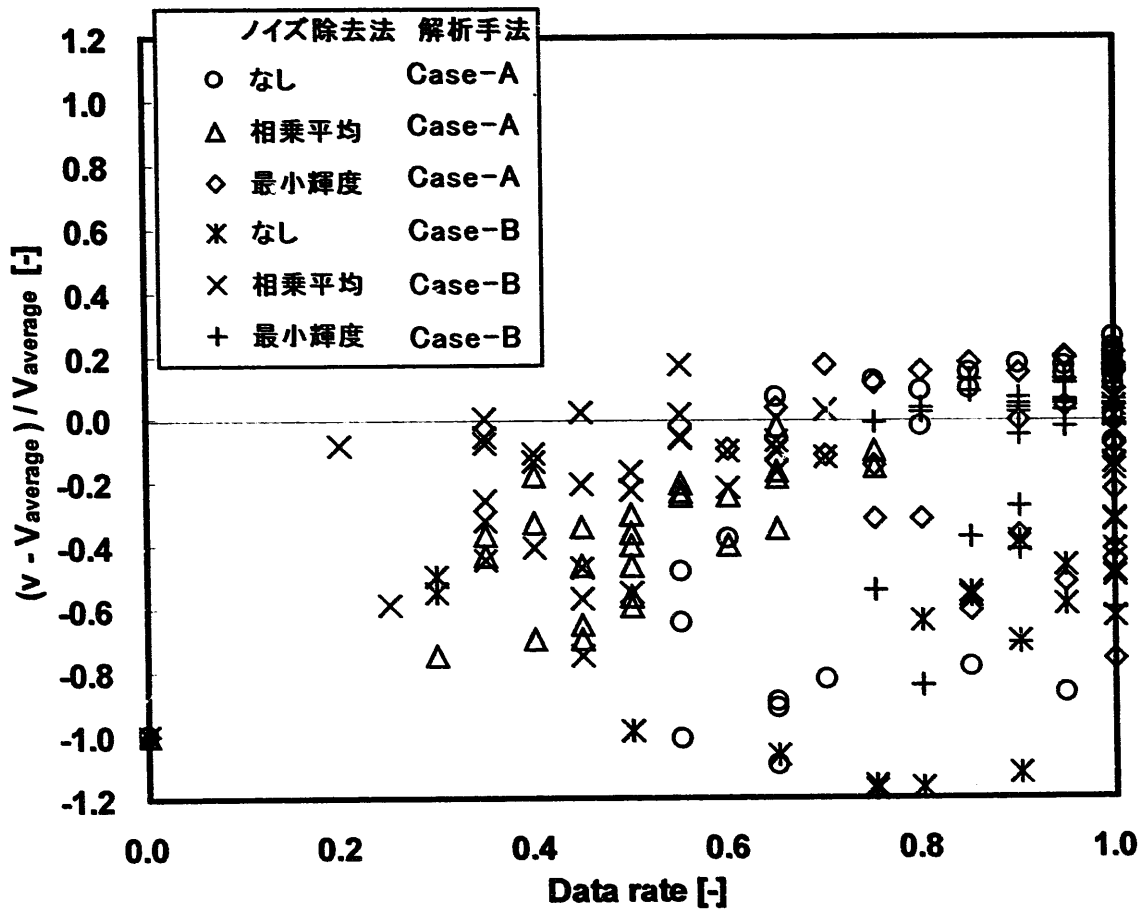


図 2 4 データレートと閉塞物内平均軸方向流速との関係
Case-A : 相互相関法, Case-B : 輝度差法

4. 閉塞物を含むチャネル内流れ

4. 1 実験装置

図25に本研究に使用した実験装置ループ構成図を示す。実験装置設計に関する詳細については、平成9年度共同研究報告書^[2]に書かれているので簡単に説明する。実験装置は高さ3.5[m]、幅1.5[m]、奥行き1[m]の架台の中に設置されている。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ダンクタンク、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。

- ①オーバーフローライン： 呼び径 50[mm] 塩化ビニールパイプ
- ②汲み上げラインおよび③テストライン：
呼び径 40[mm] 塩化ビニールパイプ
- ④ヘッドタンク： 幅 494[mm]、奥行き 194[mm]、高さ 497[mm]
(内容量 48[L])
- ⑤電磁流量計：一体型電磁流量計（横河電機株式会社製 AE204SG）

口径	40 [mm]
出力信号	電流出力 4~20[mA]DC
測定スパン設定	0~20 [m ³ /h]

- ⑥整流部： 呼び径 150[mm] (内径 146[mm])
円筒タンク (内容量 3 L)
流れの方向転換による旋回流除去および速度成分修正のため、内部に2枚の明石式多孔板 (JIS Z 8762-1995) が設置されている。
- ⑦入口ノズル：
整流部の呼び径 150[mm] の円形断面から、テスト部 (61[mm]×122[mm]) の矩形断面へ変換する。
- ⑧テスト部 (4.1.1 節参照)：
短辺 61[mm]、長辺 122[mm]の長方形断面をもつ矩形チャンネルであり、透明アクリル樹脂で製作されている。
- ⑨出口ノズル： テスト部から出口側配管へ接続する
- ⑩ダンクタンク： 幅 394[mm]、奥行き 244[mm]、高さ 797[mm]
(内容量 77[L])

⑪汲み上げポンプ：マグネットポンプ（イワキポンプ MDF-L425CFVW-D）

吸込側口径	50A
吐出側口径	40A
標準性能 [m] - [l/min]	11 - 400

NaI 水溶液の漏洩を防ぐためマグネットポンプを採用し、ポンプケーシング内は腐食防止のためライニング加工されている。

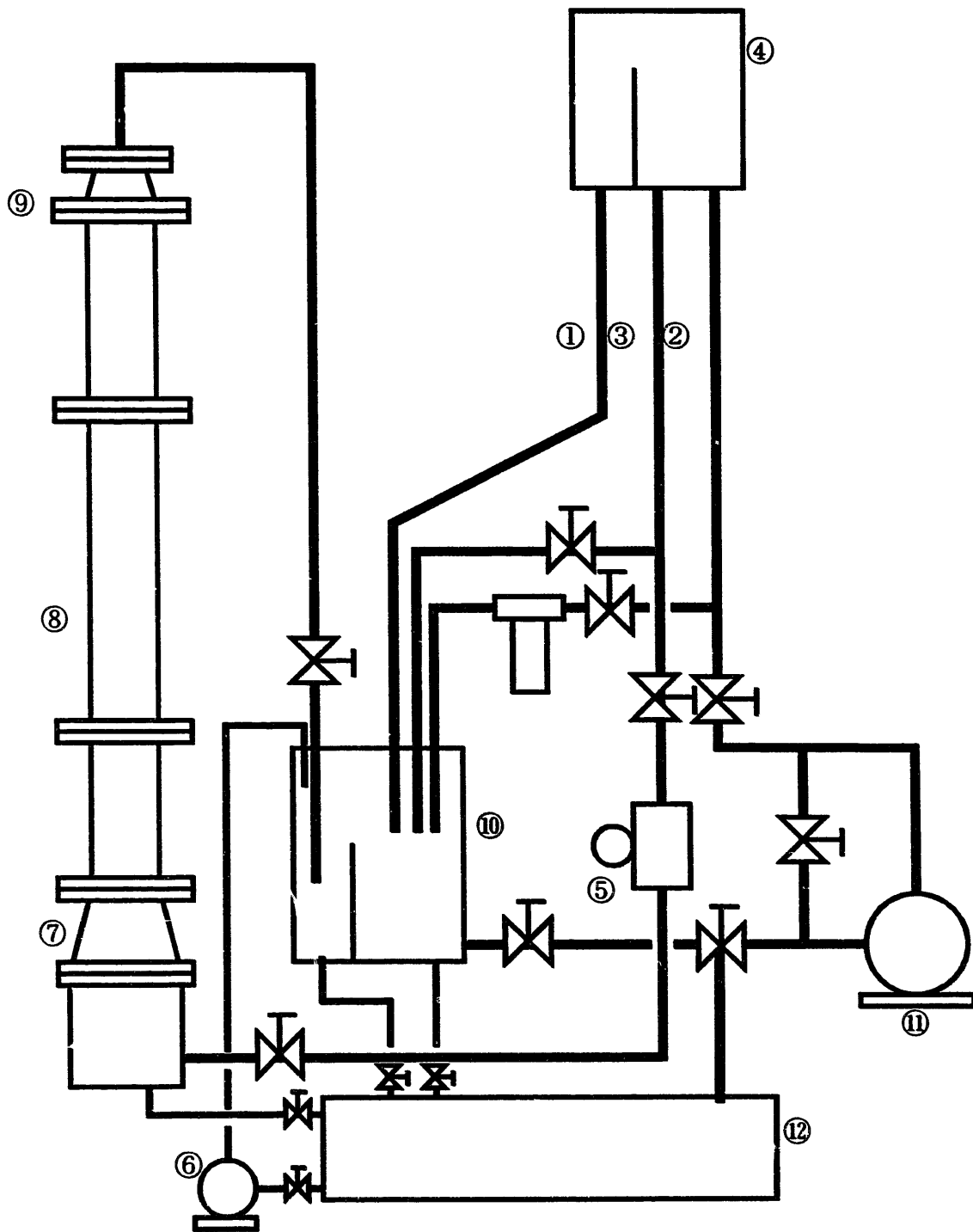
⑫ストレージタンク：幅 994[mm]，奥行き 664[mm]，高さ 244[mm]
(内容量 161[L])

4.1.1 テスト部

テスト部は、ワイヤスペーサー型燃料集合体での閉塞形態として最も可能性の高い多孔質状閉塞を単純化して模擬している。ただし、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つを単純な矩形断面流路で模擬したテスト部を用いた。図 2 6 にテスト部の概略図を示す。テスト部は製作性および可視化計測の容易さから考えて、縮尺比 20 倍の矩形チャンネルとした。短辺 61[mm]，長辺 122[mm]の長方形断面となっており，長さは 2[m]である。試験体は軸方向に長いため 3 ブロックに分割する。各ブロックはフランジにて接続される。また，可視化計測を行うため，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出来ている。閉塞物を模擬した粒子部は，中央のブロックに設置され，粒子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。

4.1.2 多孔質状閉塞物

閉塞物構成粒子の形状は単純な球状粒子とした。多孔質状閉塞物は球状粒子を積み重ねて模擬し，充填形態は格子状に正方系充填した。この場合，空隙率 ε は 47.64%（粗充填）である。閉塞物内部の流況を観測するため，第 3 章で示したように球状粒子には透明なパイレックスガラス球を用いた。多孔質状閉塞は直径 20[mm]のパイレックスガラス球を $3 \times 3 \times 15$ の 135 個用い，球間をエポキシ系接着剤で結合し正方形粗充填に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]位置までに図 2 6 に示すように，ステンレス製の針金（ $\phi 3$ [mm]）を用いて固定した。



- | | | |
|-------------|----------|-----------|
| 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 5 実験装置ループ構成図

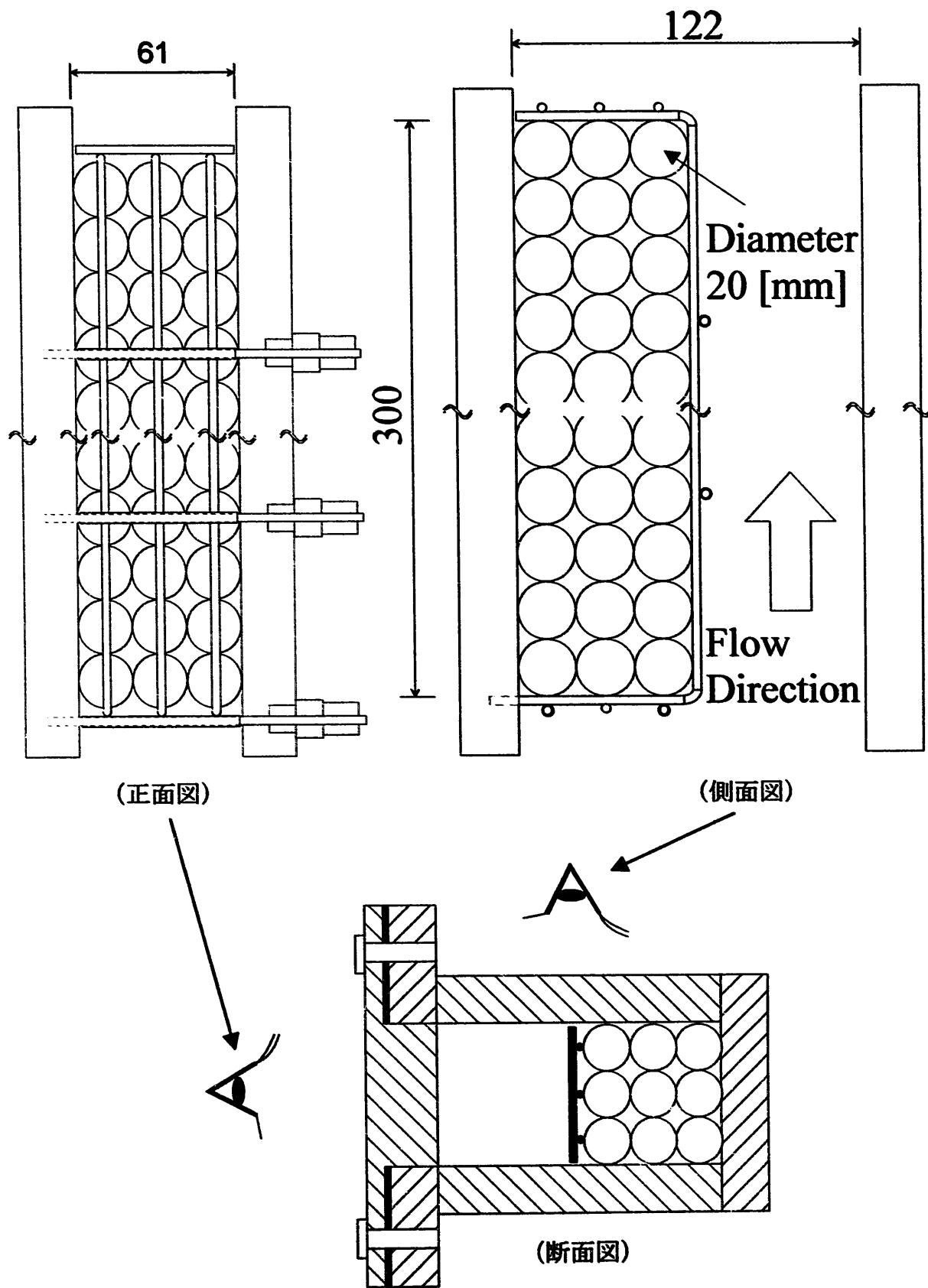


図 26 テスト部概略図

4. 2 実験方法

実験では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。

測定において最も重要なのが、屈折率が変化しないよう NaI 溶液の濃度を常に一定に保っておくことである。他の文献等では温度一定になるまで数時間試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ているが、本実験装置を 3 時間ほど動かしても温度一定にならず、また測定前にこれ以上の時間をかけて動かすことは現実的でない。そこで本実験では、実験室温がエアコン等で常に 20~25[°C]に保たれていることから基準温度を 25[°C]として、その時の比重で濃度調整をした。濃度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。今回の測定は主に画像処理法であるので、測定に要する時間はごく短いので、1 条件取るごとに装置を停止して、極力温度上昇による屈折率の変化を押さえることにした。実際には、この濃度付近の NaI 溶液屈折率の温度変化に対する変化は、5°Cにつき 0.001 ほどである（第 2 章参照）。本試験装置を流体温度 25[°C]で動かすと 1 時間で 4[°C]ほど温度上昇があるが、測定に要する時間は一回につき長くても数分であるので、温度変化による屈折率の変化はほぼ無視できるとし、溶液温度も 25~28°Cの範囲であるように実験を行った。

実験はまず健全サブチャンネル部分の流れ場を知るために、作動流体に水を用いてレーザドップラ流速計で流速測定を行った。この測定には He-Ne レーザを使った。

充填層内の速度場を調べるために、作動流体として NaI 溶液を用い、高速度カメラを用いた撮影を行った。カメラは撮影が容易になるようレーザを固定したステージと連動するアームに取り付けてある。図 2 7 に高速度ビデオカメラを用いた撮影方法の概略を示す。

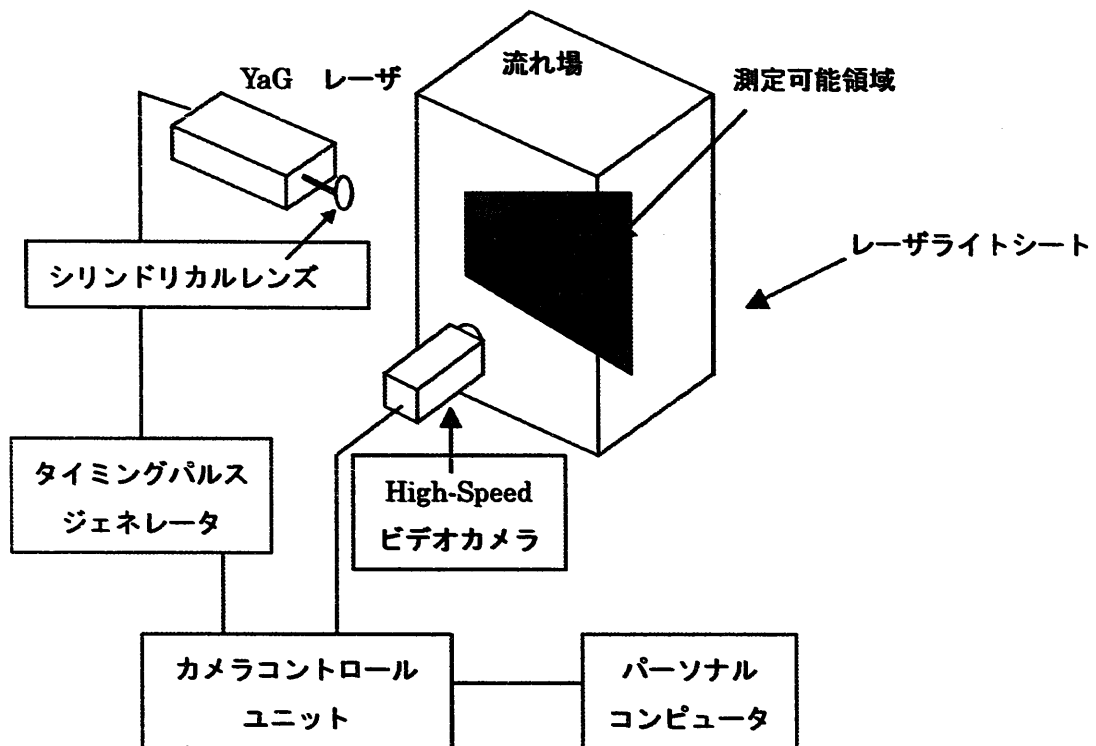


図 2 7 P I V測定系概念図

4. 3 実験条件

表5は今回行った PIV による測定に対する実験条件を示したものである。表中の撮影領域の記号は図28の撮影条件図に示している。実機で想定されるレイノルズ数は50000程度であるが、NaI水溶液を作動流体に用いた場合、本試験装置では高レイノルズ数条件下においてテスト部に多くの気泡が混入してしまった。そのため、今回は流量2.83[m³/h]、レイノルズ数5400を最大とした。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。

LDVによる測定は健全側のみ、作動流体には水を用いてNaI溶液より高レイノルズ数で実験を行った。本実験は等温条件で行われ、作動流体として水を用いた場合とNaI水溶液を用いた場合の違いはRe数によって考慮される。よって、NaI水溶液を用いた場合には測定出来ない、高レイノルズ数領域での流動場を把握することができる。測定は閉塞部入口(z=0[mm])より上流(z=-100[mm])から出口(z=300[mm])より後流(z=1200[mm])までのy-z平面について測定した。

図29および図30に閉塞部および健全側を撮影した画像例を示す。条件は流量2.83[m³/h]で、上流から一層目、壁面より3層分(B-1~3)である。いずれの画像においてもレーザシートを照射した面のトレーサ粒子を捕らえた画像を得ることができている。また、PIVでは基本的に断面内の流速分布を求めるものであるが、レーザシートにはある程度の厚があるために奥行き成分の精度を確保する必要がある。レンズを用いた場合シート厚は2.5[mm]程度あるので、今回は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、健全側流路では20組40枚撮影した。

最も健全側(B-3)では、閉塞物を模擬したガラス球を支えるためにテスト部内に設置した針金が写って、この部分の画像による解析をすることはできないためにこの部分のベクトルは排除している。

画面上での大きさと実座標系との対応付けは、図28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。ガラス球の大きさは装置に組み込む以前に平均粒子径を求めているので、撮影された画像に映し出されているガラス球の大きさが分かれば、実座標系での画素あたりの大きさが求められることになる。

撮影された画像はビットマップ形式で保存されているので、一般の画像閲覧ソフトで画像上任意の位置が、画面左上を原点とした座標として得ることができる。ここで左上のガラス球(ガラス球1)の輪郭に注目し、そこから任意の3点 $(x_{1,i}, y_{1,i})$ 、 $(x_{2,i}, y_{2,i})$ 、 $(x_{3,i}, y_{3,i})$ を抽出すると、ガラス球の画面での半径を $R_i[\text{pixel}]$ とし、中心を a_i, b_i とすると、

$$(x_{i,1} - a_i)^2 + (y_{i,1} - b_i)^2 = R_i^2 \quad i=1,2,3 \quad (4.1)$$

と表せる。よって任意の3点を代入した連立方程式を解くことにより、ガラス球1

の半径 R_i が求まる。同様に右上 (ガラス球 2), 左下 (ガラス球 3), 右下 (ガラス球 4) も式で表すと

$$(x_{i,2} - a_2)^2 + (y_{i,2} - b_2)^2 = R_2^2 \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.2)$$

$$(x_{i,3} - a_3)^2 + (y_{i,3} - b_3)^2 = R_3^2 \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.3)$$

$$(x_{i,4} - a_4)^2 + (y_{i,4} - b_4)^2 = R_4^2 \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.4)$$

以上の式から求めたそれぞれの半径の平均値と実際のガラス球の半径から、実座標上での大きさが求まることになる。

表 5 実験条件 (PIV)
(作動流体は、濃度 56.9[wt%]の NaI 水溶液)

	PIV	
	閉塞側	健全側
流量[m ³ /h] (レイノルズ数)	2.83 (5400), 1.83 (3500), 1.05 (2000)	
断面平均流速 V_0 [cm/s] (閉塞物前面流速)	10.5,	6.87, 3.92
撮影領域 記号は 図 2 8 に対応	(B-1), (B-2), (B-3) (C-1), (C-2), (C-3) (H-1), (H-2), (H-3) (I-1), (I-2), (I-3) (N-1), (N-2), (N-3) (O-1), (O-2), (O-3)	(BC-4) (HI-4) (NO-4)
レーザシート位置	x=10mm	
画像サイズ ([pixels]×[pixels])	512×512	
画像間隔[ms]	30	
データ数	50 組 (100 枚)	20 組 (40 枚)

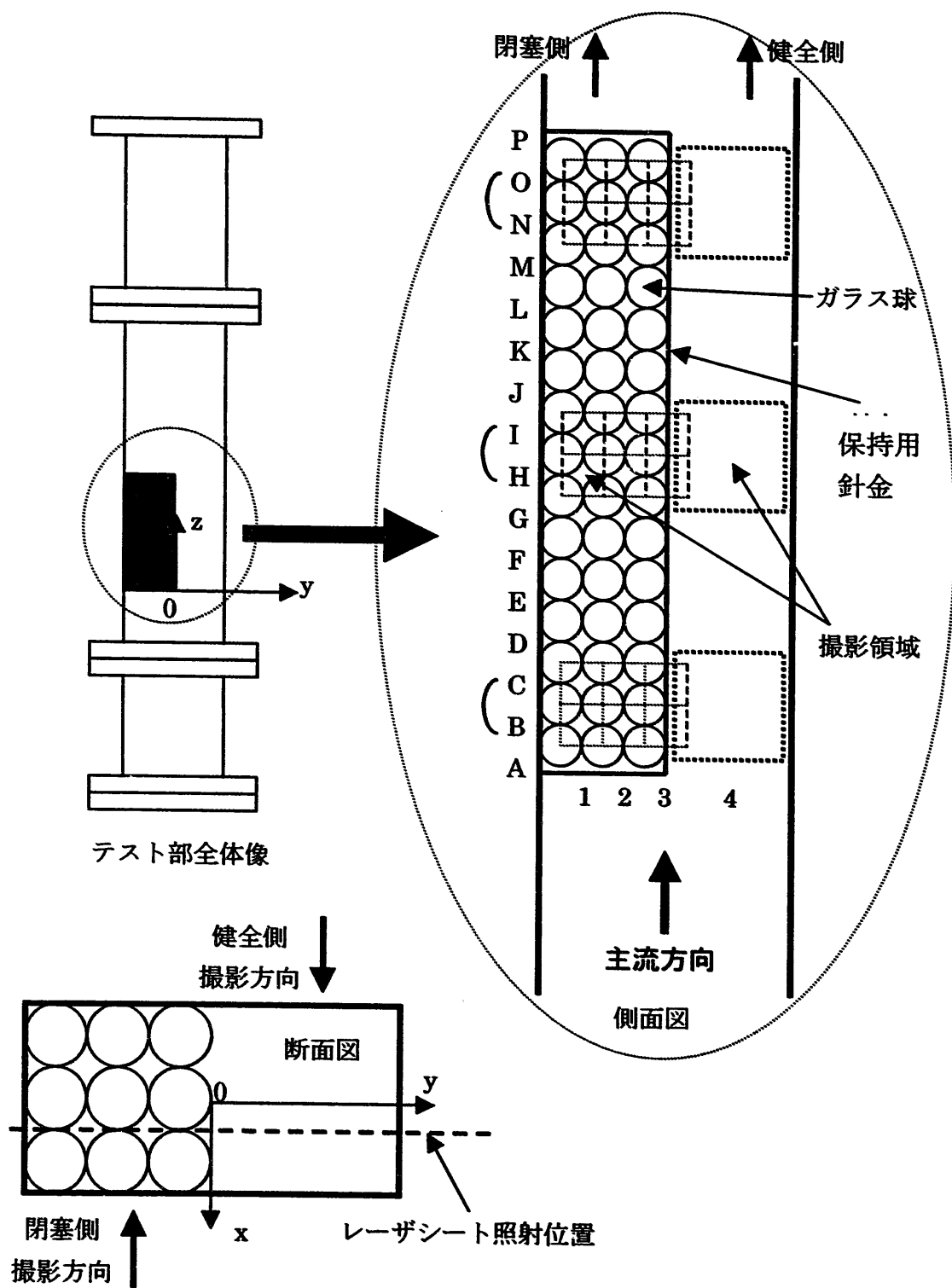
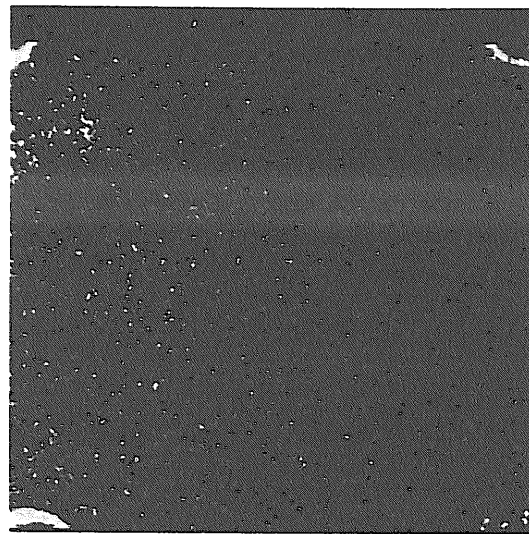
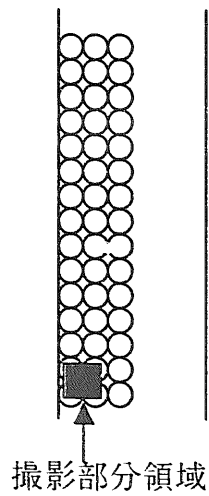
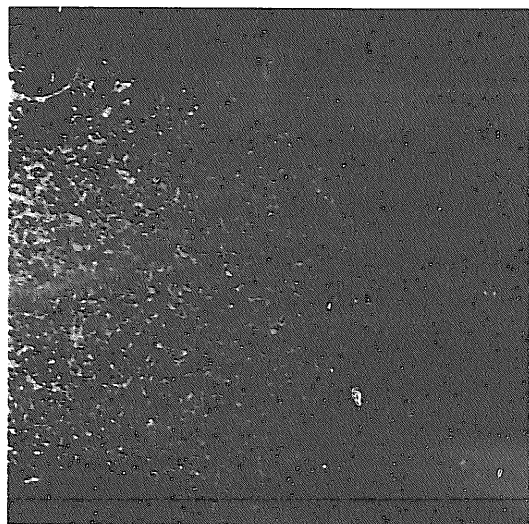
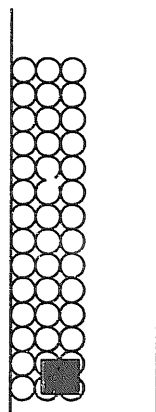


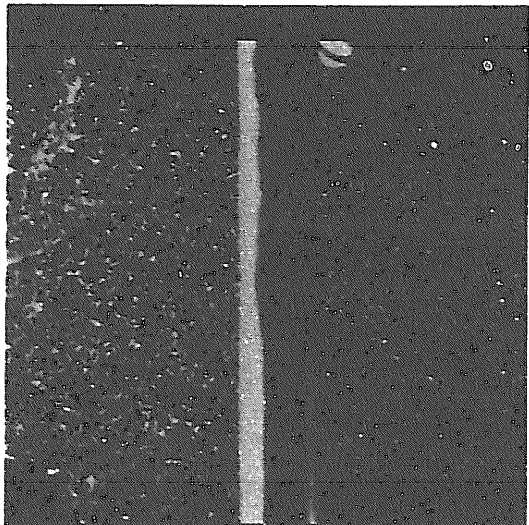
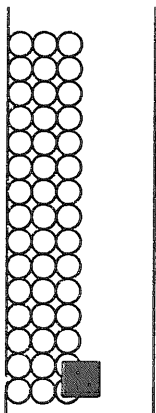
図 2 8 撮影条件図



(B-1)



(B-2)



(B-3)

図 2 9 閉塞側の撮影図

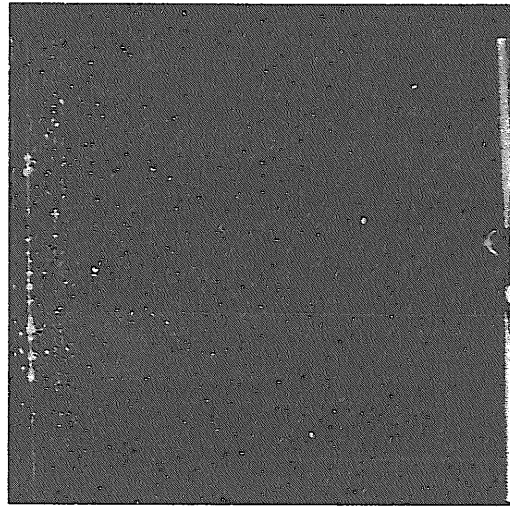
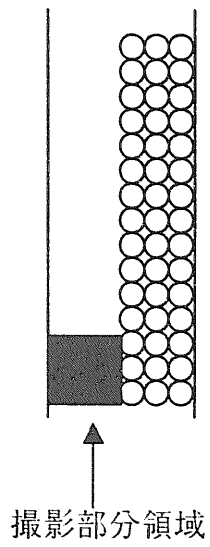


図 3 0 健全側の撮影図

4. 4 閉塞物内部の流動場

4.4.1 時間平均速度分布

図 3 1 から図 3 3 に、それぞれの条件で撮影した画像から得られた時間平均速度分布を示す。図の右下の線は図中のベクトルの長さに関連しており、ひと目盛りが閉塞物が存在していない場合の断面平均流速に対応している。

それぞれの流量条件における断面平均流速 V_0 は以下の式から求める。

$$V_0 = \frac{Q}{A_0} \quad (5.1)$$

ここで、 A_0 はテスト部の断面積、 Q は流量である。 V_0 は Q が $2.83[\text{m}^3/\text{h}]$ では $10.5[\text{cm}/\text{s}]$ 、 $1.84[\text{m}^3/\text{h}]$ では $6.87 \text{ cm}/\text{s}$ 、 $1.05[\text{m}^3/\text{h}]$ では $3.92 \text{ cm}/\text{s}$ である。図には閉塞物入口部、中央部、出口部での流速分布の変化が分かりやすいように、各領域を代表する高さ位置の測定結果 (B-1,2,3) , (I-1,2,3) , (O-1,2,3) を示した。

図 3 1-1 および図 3 1-2 は流量 $2.83[\text{m}^3/\text{h}]$ 、 Re 数 5400 の場合を示している。閉塞物入口部では流路形状の急激な変化により、断面平均流速に比べ流速がかなり増大して (球間の空隙部で 1.6 倍程度) 閉塞物に流れ込んでいることがわかる (B-1,2)。壁から一層目と二層目の間 (B-1) では、壁際からの流れ込みはほとんどなく循環渦が生じているが、図中右上のガラス球接点手前で横隣 (B-2) に流れ込んでいる。2 層目と 3 層目の間 (B-2) では、左側からの流れ込みが主流方向の流れと合流している。さらに (B-2) から横隣の健全側 (B-3) への流れ込みは、(B-1) から (B-2) への流れ込みよりも強い。(B-1) , (B-2) とともに左右下の部分、ちょうど球の裏側になる部分はほとんど流れがなくよどんでいる状態である。最も健全側 (B-3) では、流路形状が大きく変わるために、健全部での流速が増大すると同時に閉塞物を避けるような横方向の流れが生じていることが分かる。また横隣 (B-2) から健全側への横方向流れが観測できる。閉塞物内部での大きな特徴として、閉塞物中央部 (I-1,I-2) では入口部 (B-1,B-2) に比べて全体的に流速が減少している。これは、閉塞物を構成する球による抵抗に加えて、閉塞物内の流れが健全側 (B-3,I-3,O-3) 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、下流側の閉塞物出口部 (O-1,O-2) の流速は閉塞物中央部 (I-1,I-2) に比べさらに遅くなっている様子がわかる。

図 3 2-1 および図 3 2-2 は流量 $1.84[\text{m}^3/\text{h}]$ 、 Re 数 3500 の場合を示している。これも上述の $Q=2.83[\text{m}^3/\text{h}]$ の場合と同様、閉塞物入口部 (B-1,B-2) から出口部 (O-1,O-2) にかけて流速が減少する傾向がある。ここでは (B-3) で閉塞物に入る流れの多くの部分が健全側に流れ出ている。また (B-2) においても健全側の (B-3) への流れ込みが大きくなっている。

図 3 3-1 および図 3 3-2 は流量 $1.05[\text{m}^3/\text{h}]$ 、 Re 数 2000 の場合を示している。この流量での特徴も他条件とほぼ同じだが、この条件ではガラス球下部に付着した

細かい気泡をうまく取り除くことができなかつたために、レーザシートの光がそこで乱反射して、ガラス球の輪郭に沿うベクトルが出たり、球の裏側の流れがうまく捕らえることができなかつた。

本実験のような、格子状に球を積み重ねて（正方系充填して）模擬した多孔質状閉塞物の場合、閉塞物内部の健全側では冷却材が健全流路側へ流出し横方向流れが生じている。この横流れは閉塞物入口部（B-3）から閉塞物中央部（I-3）にかけて顕著である。また、閉塞物内部（B から O にかけての 1 と 2）では、軸方向流れが支配的であり閉塞物を構成する球の抵抗（圧力損失）と閉塞物内部を通過する流量の減少に応じて軸方向流れは減少する。球の背後では流れが淀んでおり、弱い 2 次流れを生じている。

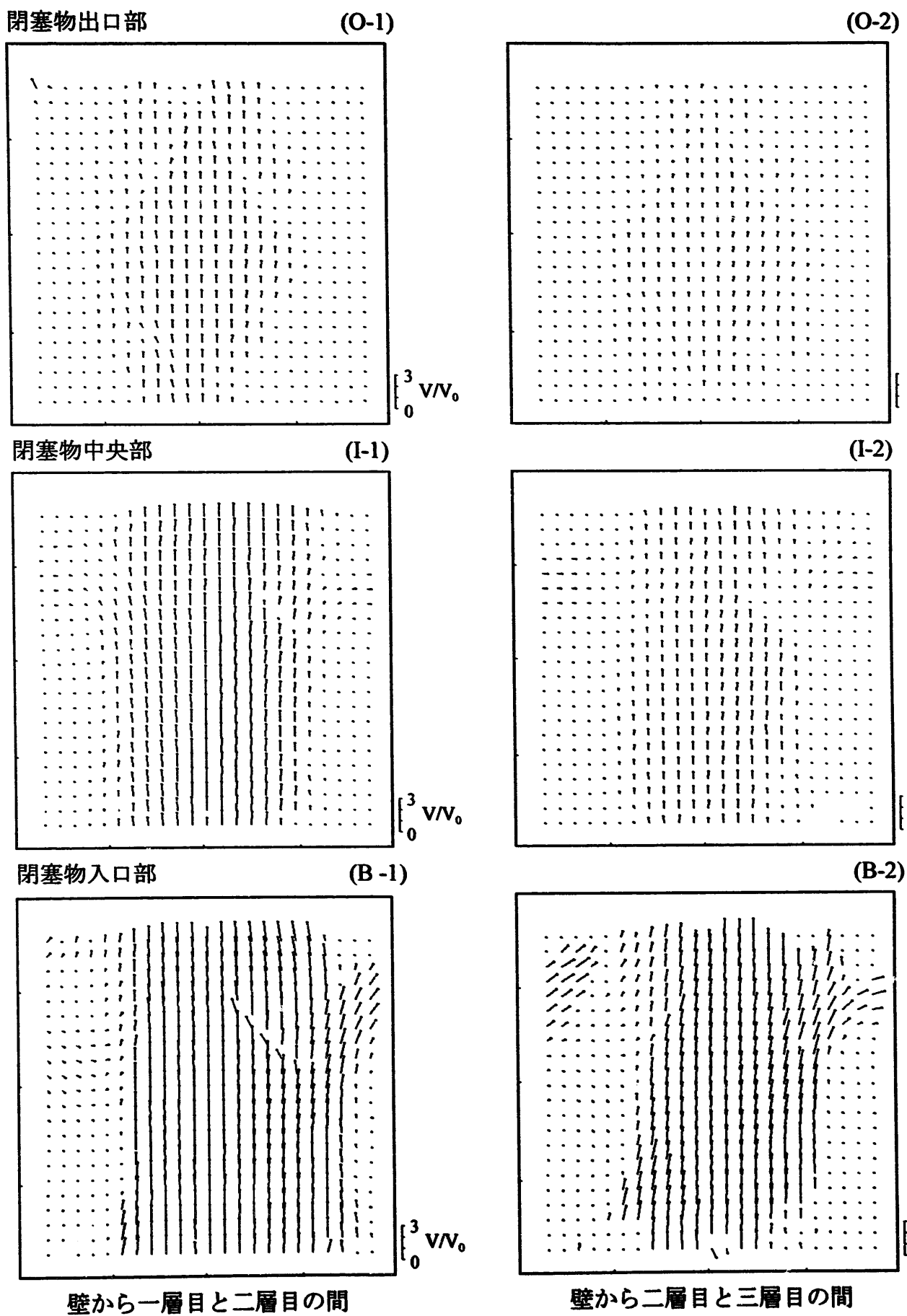
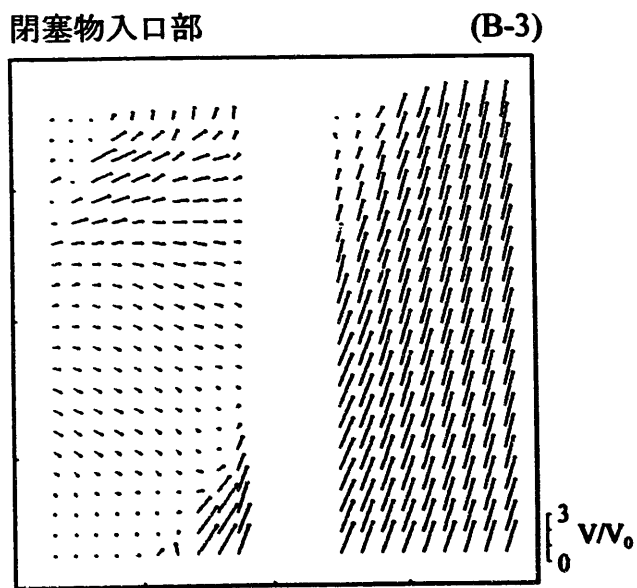
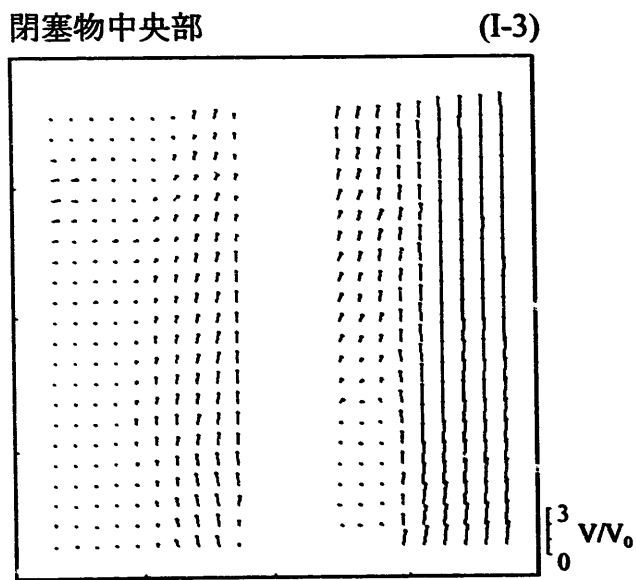
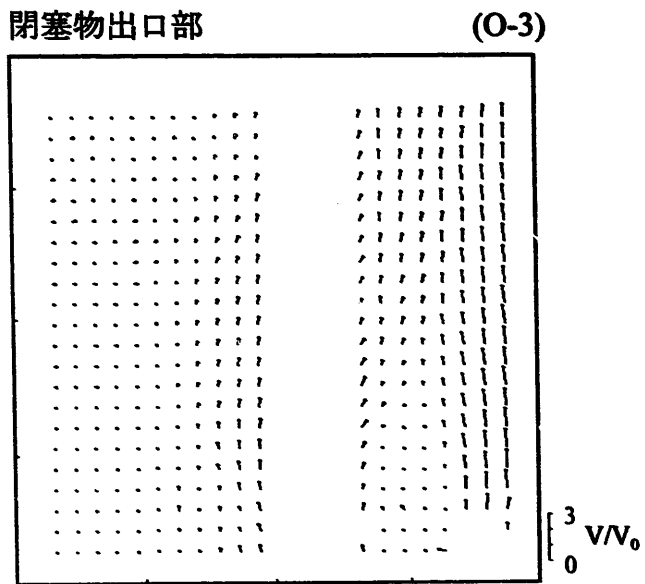


図 3 1 - 1 時間平均速度分布 1 ($Q=2.83[m^3/h]$)



壁から三層目と健全側の間

図 3 1 - 2 時間平均速度分布 2 ($Q=2.83[m^3/h]$)

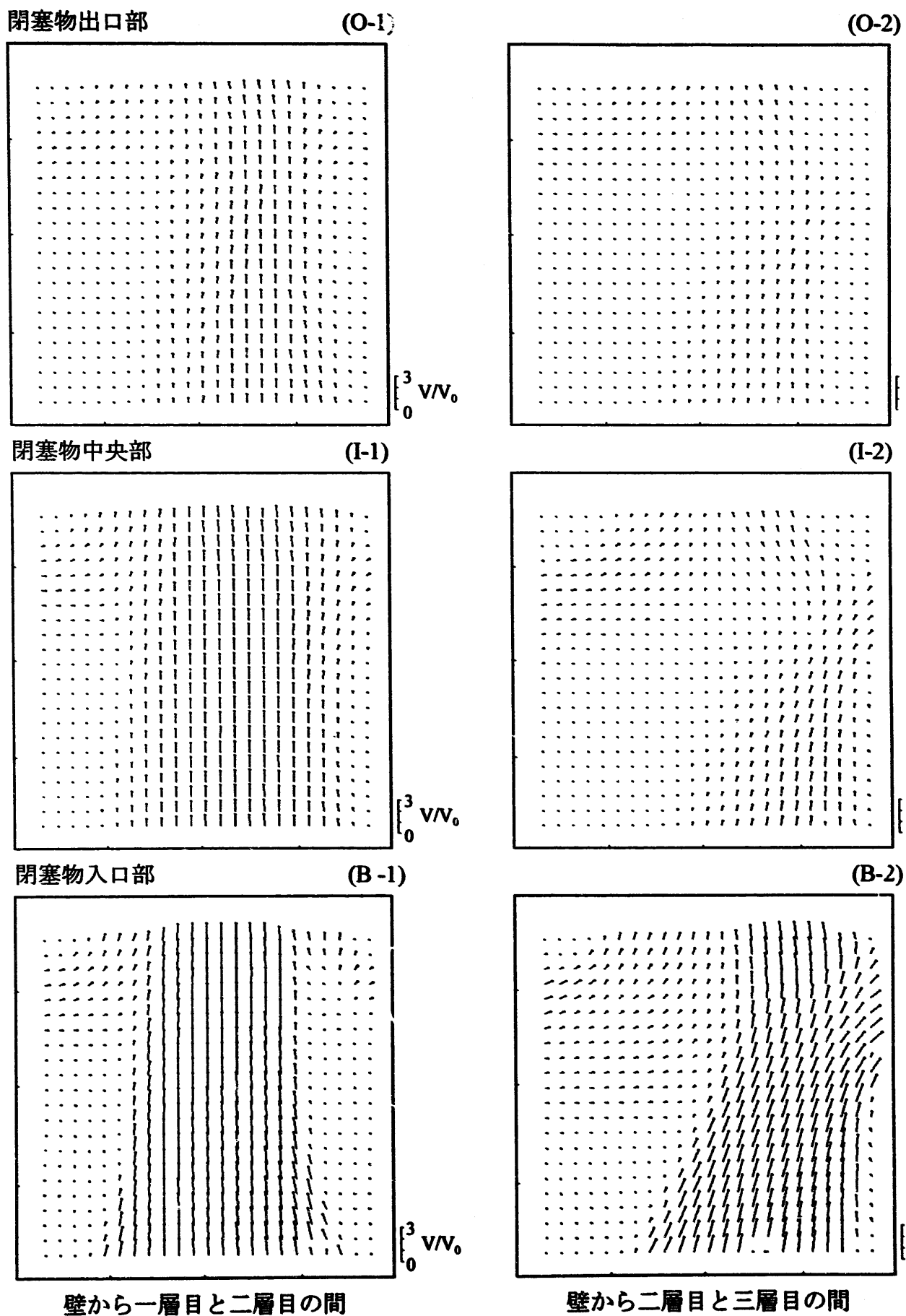
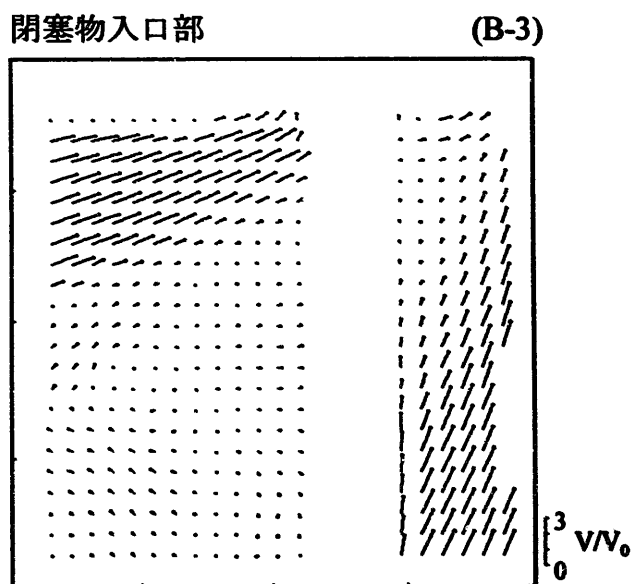
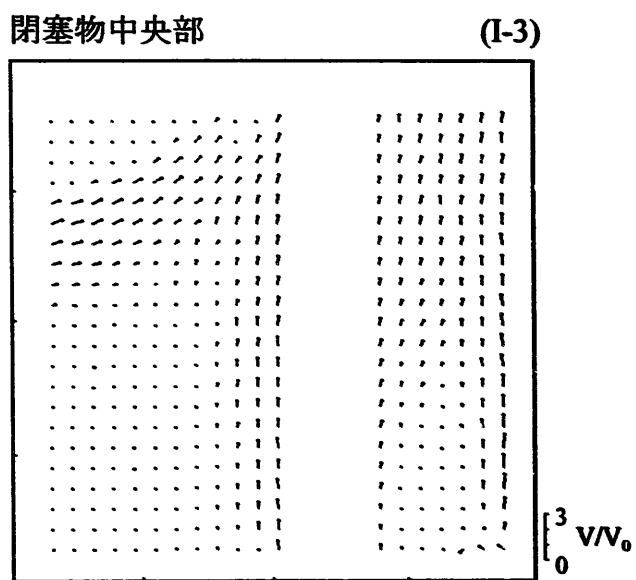
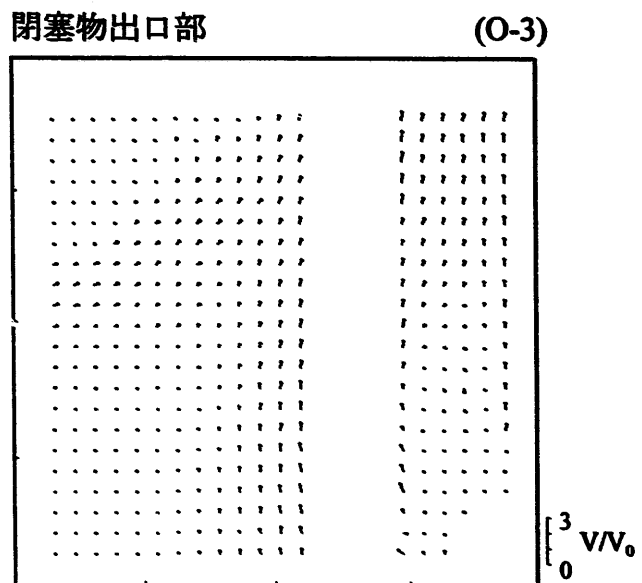


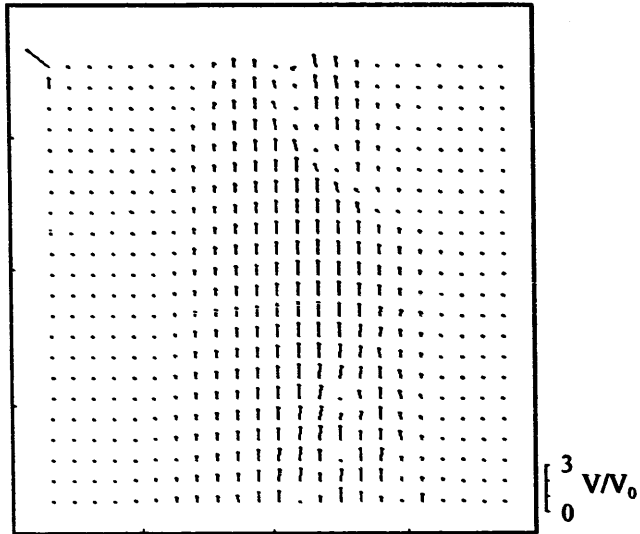
図 3 2 - 1 時間平均速度分布 1 ($Q=1.84[m^3/h]$)



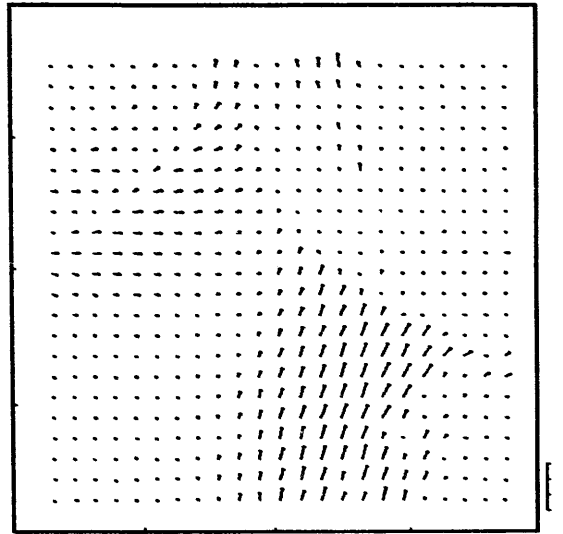
壁から三層目と健全側の間

図 3 2 - 2 時間平均速度分布 2 ($Q=1.84[m^3/h]$)

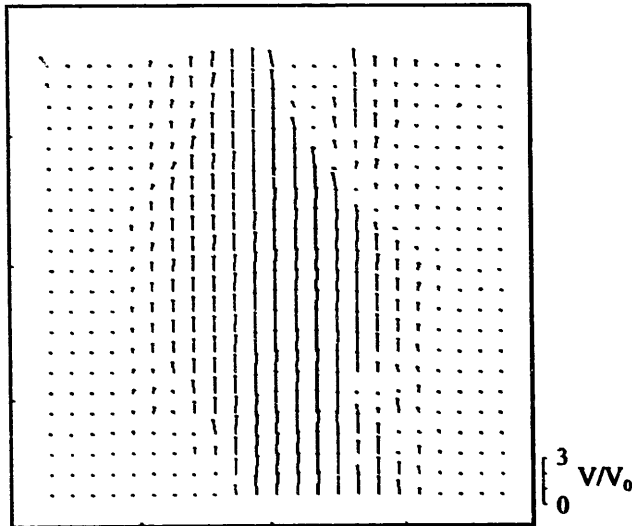
閉塞物出口部 (O-1)



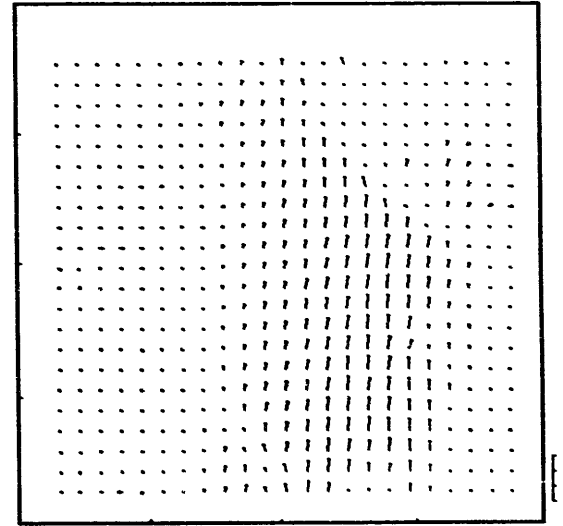
(O-2)



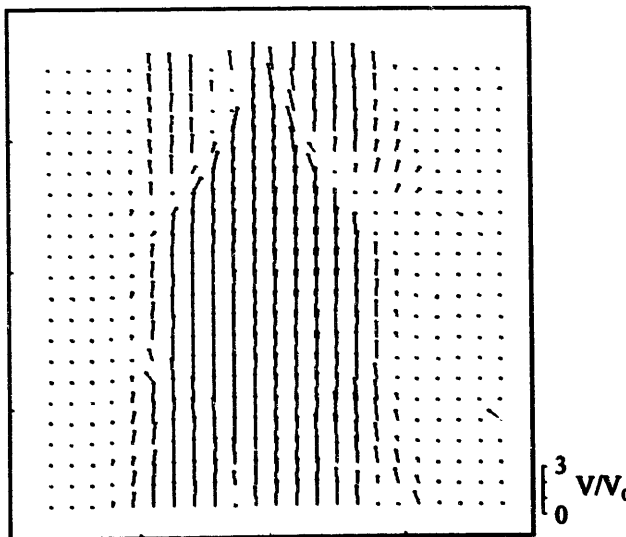
閉塞物中央部 (I-1)



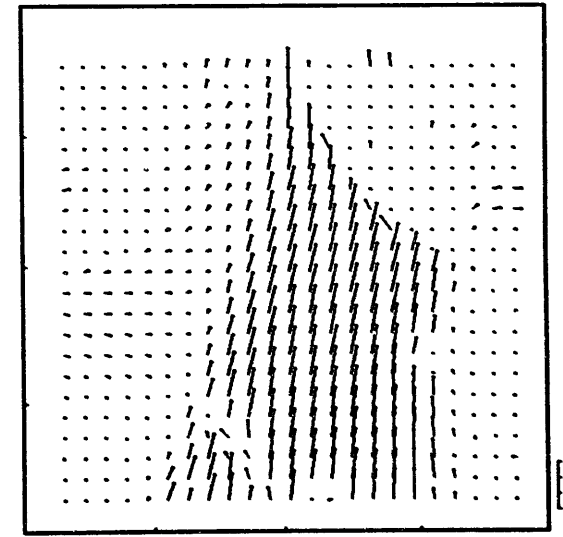
(I-2)



閉塞物入口部 (B-1)



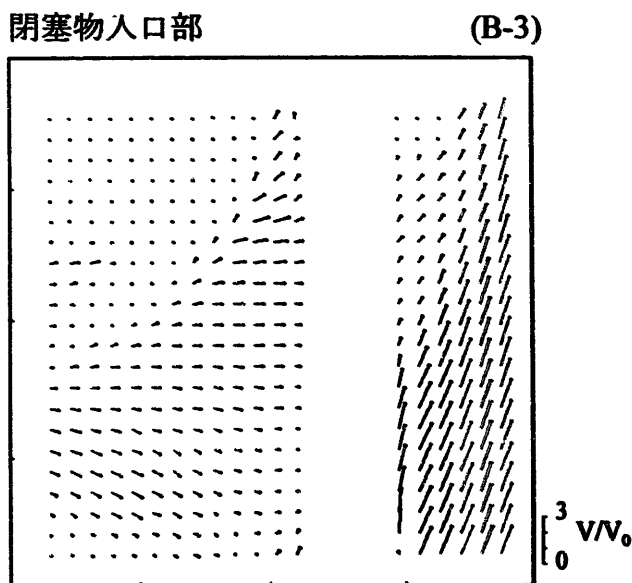
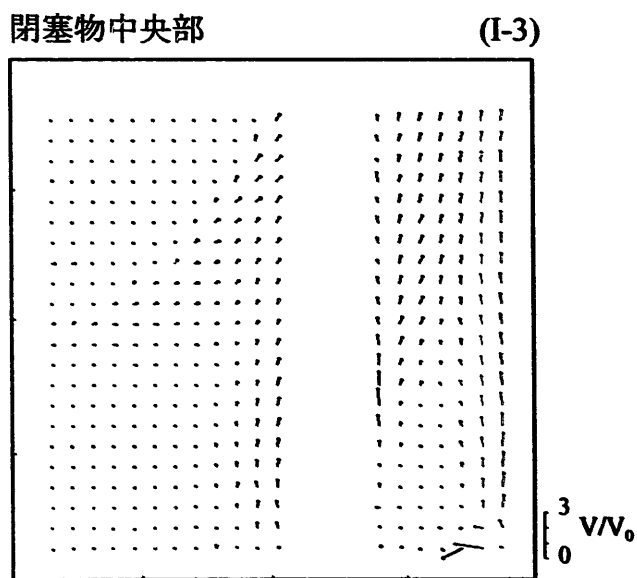
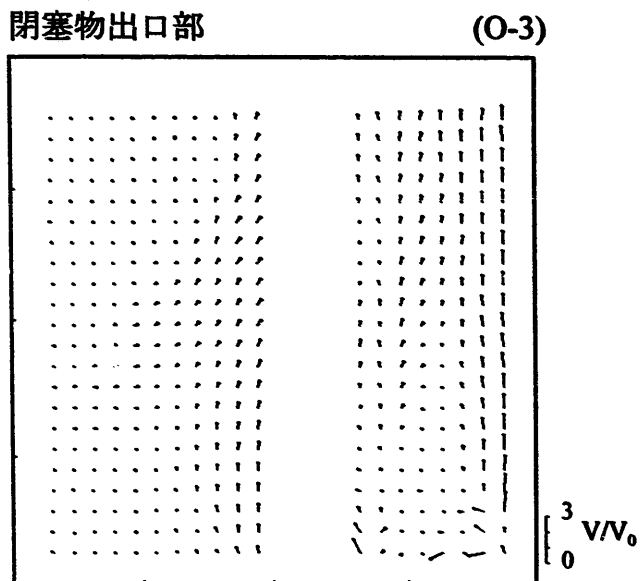
(B-2)



壁から一層目と二層目の間

壁から二層目と三層目の間

図 3 3 - 1 時間平均速度分布 1 ($Q=1.05[m^3/h]$)



壁から三層目と健全側の間

図 3 3 - 2 時間平均速度分布 2 ($Q=1.05[m^3/h]$)

4.4.2 時間平均渦度分布

図34から図36に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今回は求めていない。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。渦度は(5.2)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(5.3)、(5.4)式を用いている。実際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_{ij} , v_{ij} , 格子点距離を Δx , Δy とした。

$$\omega = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5.2)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i,j} = \frac{1}{12 \cdot \Delta x} (v_{i-2} - 8v_{i-1} + 8v_{i+1} - v_{i+2}) \quad (5.3)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{i,j} = \frac{1}{12 \cdot \Delta y} (u_{i-2} - 8u_{i-1} + 8u_{i+1} - u_{i+2}) \quad (5.4)$$

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。渦度の強さは色の濃淡で表され、右回りが強いほど色が濃く、左回りが強いほど薄くなっている。

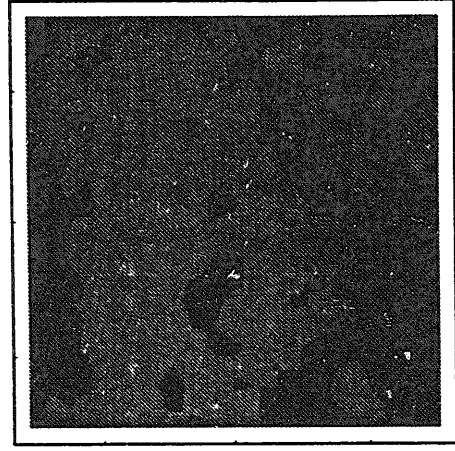
いずれの図においても軸方向の流れ成分が大きい位置、つまり閉塞物入口部 (B-1,B-2) での軸方向成分の両側に強い渦度が生じている。これらの渦の原因は軸方向の速い流れの成分と、その両側の遅い成分が存在していることによる。またこの遅い成分は、ガラス球の接点の後ろ側に存在する後流の影響と考えられる。閉塞物出口部 (O-1,O-2) では、入口部 (B-1,B-2) ほどの明確な渦度分布は表れていない。

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、閉塞物側から健全側への流量再配分が起こり、閉塞物側から健全側への流出がある。このため、閉塞物入口部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。閉塞物中央部 (I-1,I-2) から出口部 (O-1,O-2) では、閉塞物内部および健全側ともに通過流量と圧力損失に応じた流速をもつ軸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。

閉塞物出口部 (O-1)



(O-2)



閉塞物中央部 (I-1)



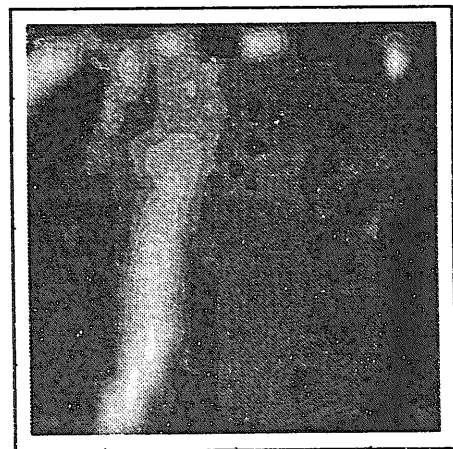
(I-2)



閉塞物入口部 (B-1)



(B-2)

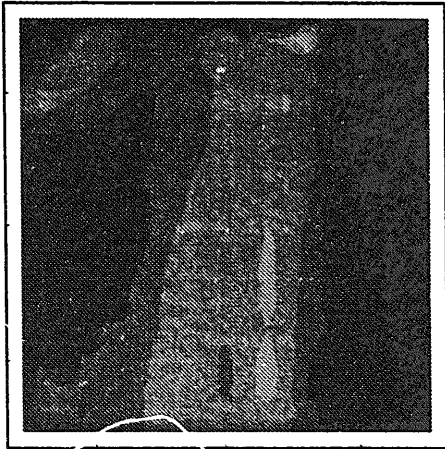


壁から一層目と二層目の間

壁から二層目と三層目の間

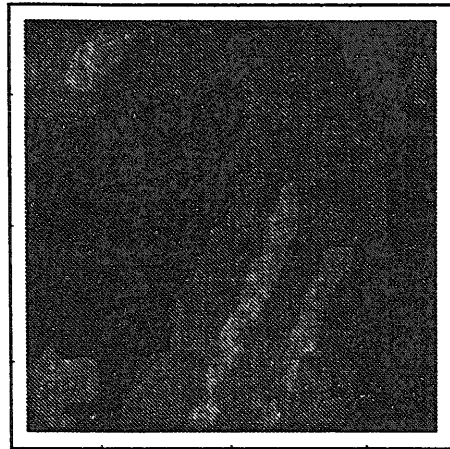
図 3 4 時間平均渦度分布 ($Q=2.83[m^3/h]$)

閉塞物出口部 (O-1)



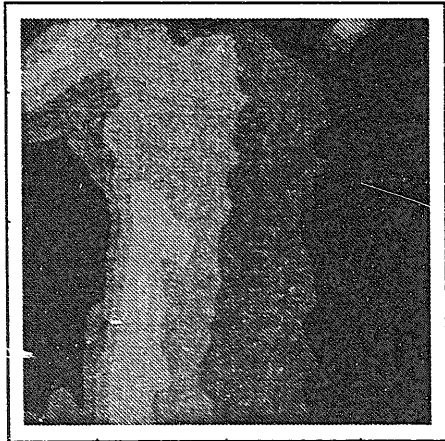
-1.0 1.0

(O-2)



-1.0 1.0

閉塞物中央部 (I-1)



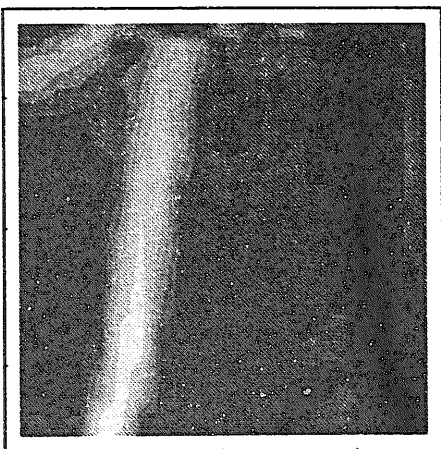
-1.0 1.0

(I-2)



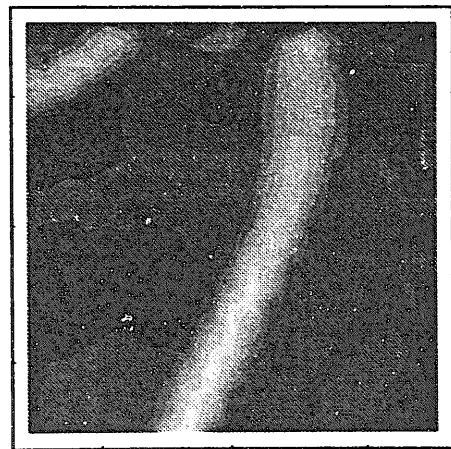
-1.0 1.0

閉塞物入口部 (B-1)



-1.0 1.0

(B-2)



-1.0 1.0

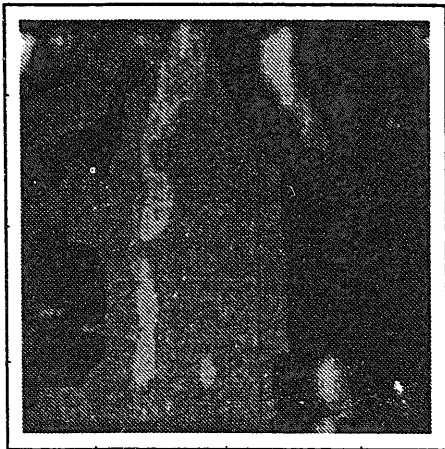
壁から一層目と二層目の間

壁から二層目と三層目の間

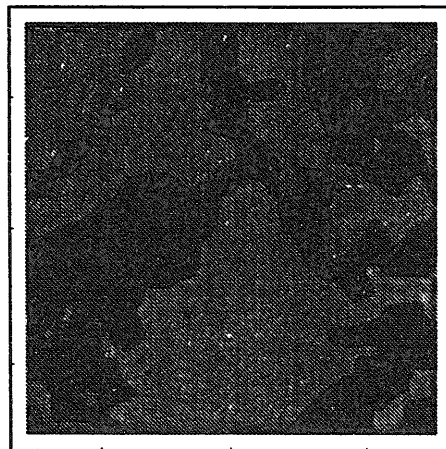
図 3 5 時間平均渦度分布 ($Q=1.84[m^3/h]$)

閉塞物出口部

(O-1)



(O-2)

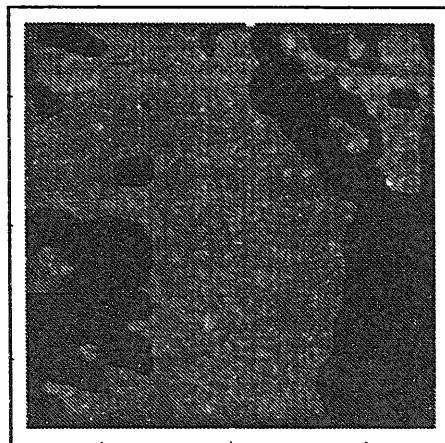


閉塞物中央部

(I-1)



(I-2)



閉塞物入口部

(B-1)



(B-2)



壁から一層目と二層目の間

壁から二層目と三層目の間

図 3 6 時間平均渦度分布 ($Q=1.05[m^3/h]$)

4. 5 閉塞物周辺の流動場

4.5.1 PIV による速度場測定

図37から図39までに健全側流路を撮影した画像から得られた時間平均速度分布を示す。撮影した図のz軸の位置は(BC-4)で $z=0\sim 60$ [mm], (HI-4)で $z=120\sim 180$ [mm], (NO-4)で $z=240\sim 300$ [mm]である。

図37は流量 2.83 [m^3/h]の場合である。閉塞側でも述べたとおり、健全側の入口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)。また同様の理由から入口部の閉塞側の側面から流れ込みがある。流れ込みは横向きに流れ込んでくるために、入口部の閉塞物近くでは健全側の流れが閉塞物から離れるような横向きの成分がある。この傾向はレイノルズ数が小さいほど大きい。

図38および図39はそれぞれ流量 1.84 , 1.05 [m^3/h]の場合である。流れの傾向は図37とあまり変わらない。

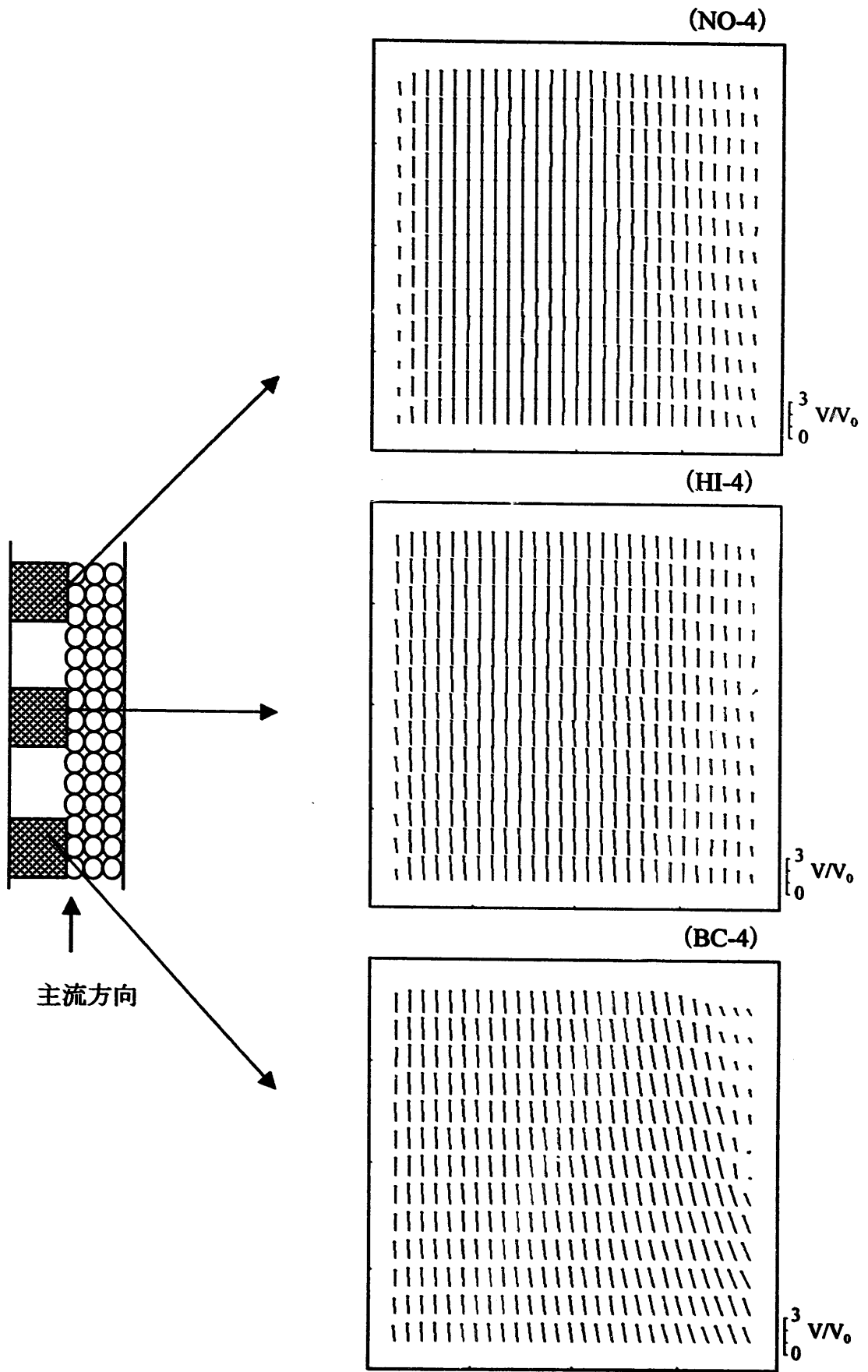


图 3 7 時間平均速度分布 ($Q=2.83[m^3/h]$)

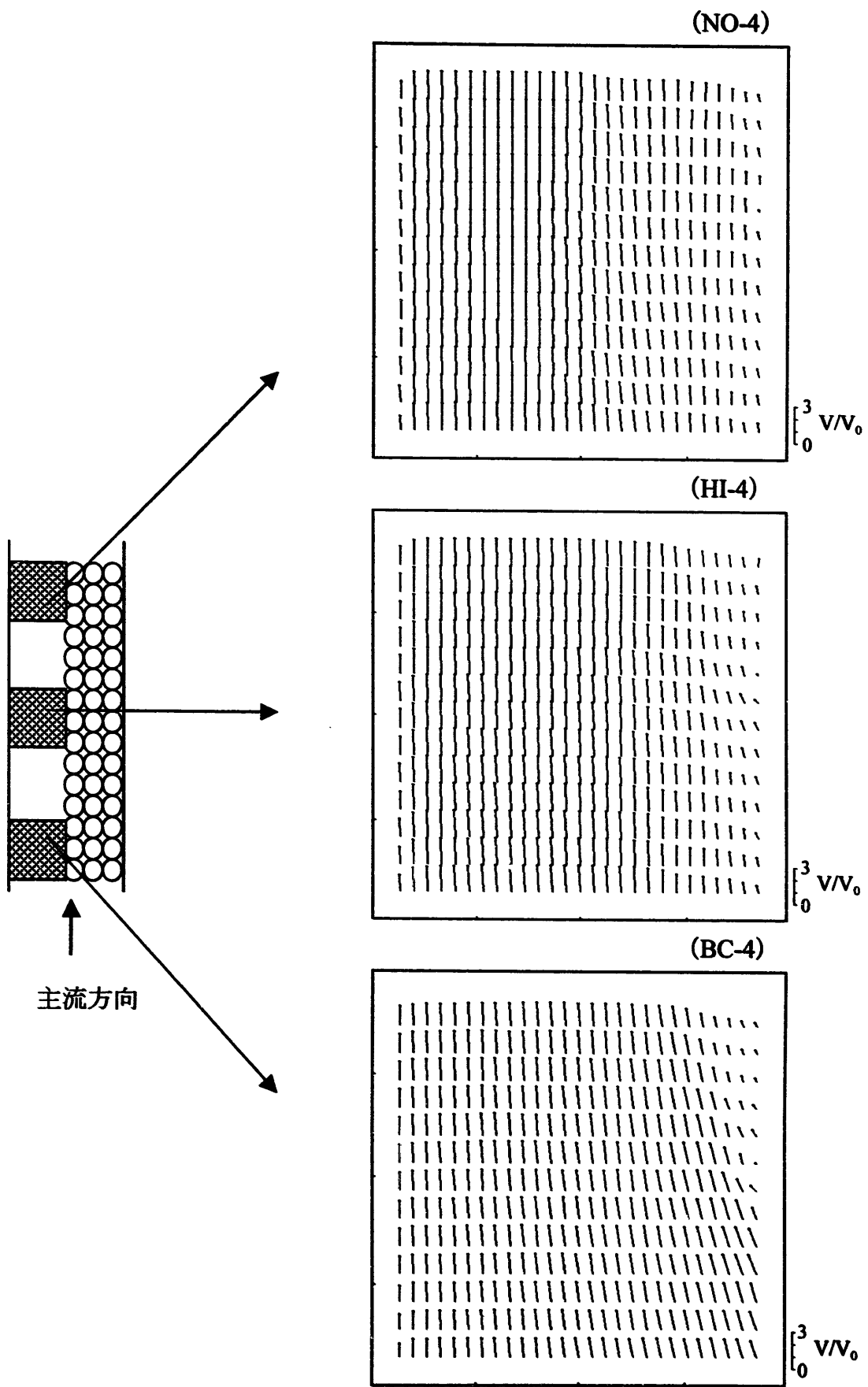


图 3 8 時間平均速度分布 ($Q=1.84[m^3/h]$)

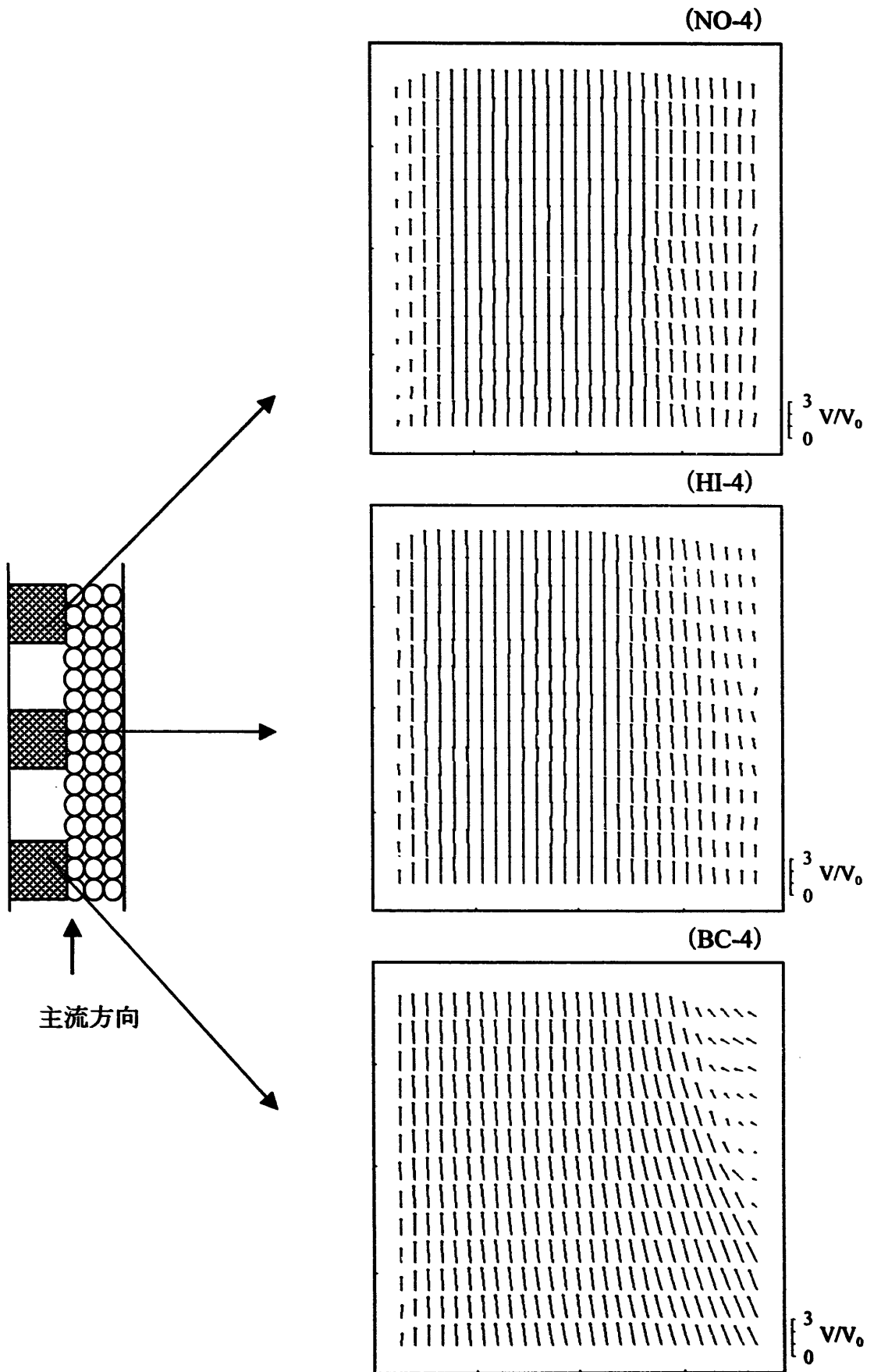


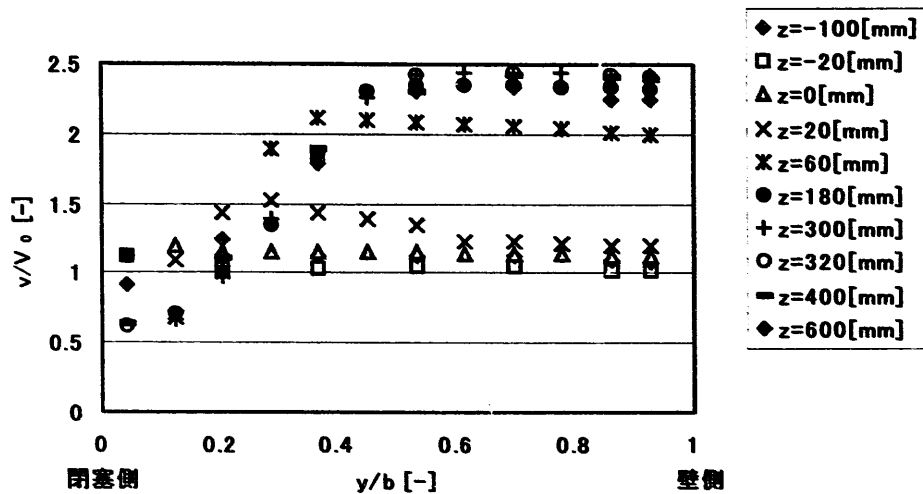
图 3 9 時間平均速度分布 ($Q=1.05[m^3/h]$)

4.5.2 LDV による流速測定

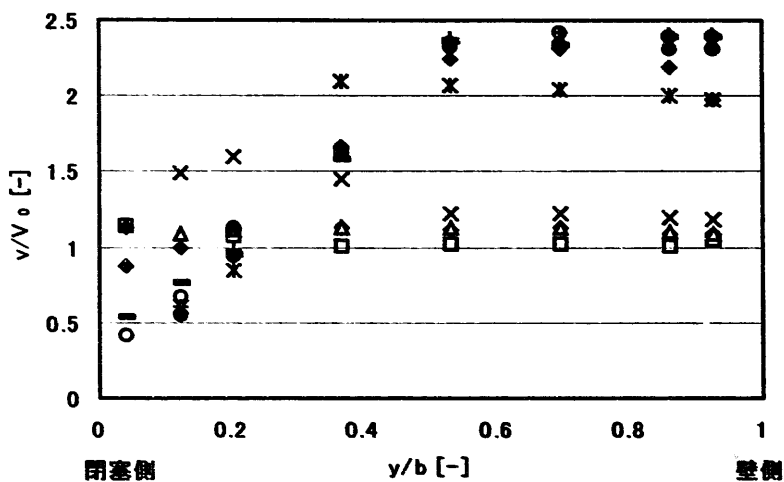
図40と図41に、作動流体として水を用いて健全側の流速分布を測定した結果を示す。流量条件は $Q=5.66[\text{m}^3/\text{h}]$ ($Re=14400$) , $3.77[\text{m}^3/\text{h}]$ ($Re=9600$) である。測定位置は図28に示す座標軸に従って、流路中心 ($x=0$) から壁側へ $10[\text{mm}]$ 間隔で、 $x=10$, $x=20[\text{mm}]$ の3断面について測定し、流動場に及ぼす壁面とガラス球の配置の影響を調べた。軸方向と垂直に $y=0[\text{mm}] \sim 61[\text{mm}]$ にトラバースして流速分布を調べた。軸方向には $z = -100[\text{mm}] \sim 600[\text{mm}]$ (閉塞物存在位置は $z = 0[\text{mm}] \sim 300[\text{mm}]$) の領域を測定し、閉塞物上流域および下流域について流速分布を調べた。横軸は y 方向無次元長さ、縦軸は主流方向流速 v を断面平均流速 V_0 で除した無次元流速である。

$x=0$, 10 , $20[\text{mm}]$ と x 方向 (図28参照) に測定位置を変えたが、軸方向流速の分布には大きな変化が見られないことから、壁面の影響はないといえる。ここでは特にそれぞれの図について、PIVでの測定位置と同じ $x=10[\text{mm}]$ で測定した (b) の位置に注目する。

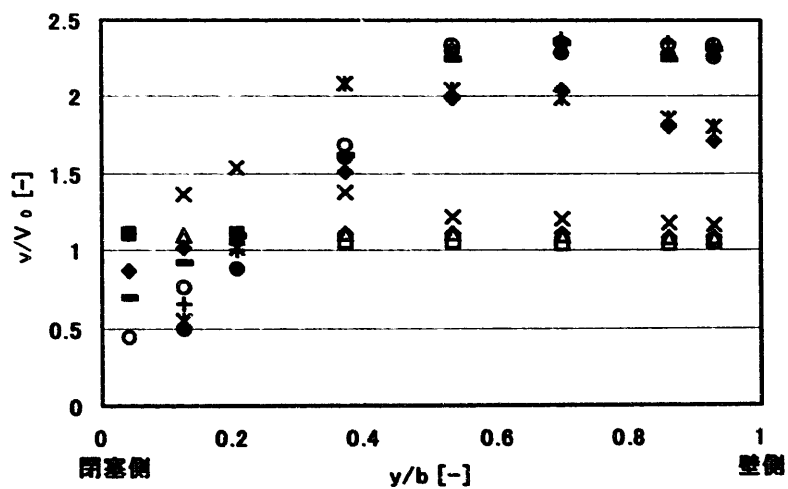
図40 (b) ($Re=14400$) では、閉塞物入口 ($z=0[\text{mm}]$) で平均断面流速とさほど変わらないのに、それより低い Re 数 ($Re=9600$) の図41 (b) では、平均流速の約1.5倍となり、入口上流において閉塞物の影響を受けている。水を用いた実験と同様に NaI 水溶液での実験でも、図37および図38の一番下の図 (BC-4) から分かるように、健全側での流速が v/V_0 の約2倍程度となっていることが分かる。閉塞物下端から下流の $z=20[\text{mm}]$ および $z=60[\text{mm}]$ の位置では、軸方向流速が平均流速の1.8倍程度まで増加し、閉塞物下端 $z=0[\text{mm}]$ での流速に比べて増加していることが分かる。これは、閉塞物側から健全側への流れ込みにより健全側流路を通過する流量が増加したためと考えられる。また、閉塞物中央部 ($z=180[\text{mm}]$) と出口部 ($z=300[\text{mm}]$) でその分布形状に大きな変化がないことから、閉塞物中央部より下流では、閉塞物側からの流出の影響は小さく、健全流路内の流れは安定していることを示している。



(a) $x=0$ [mm]

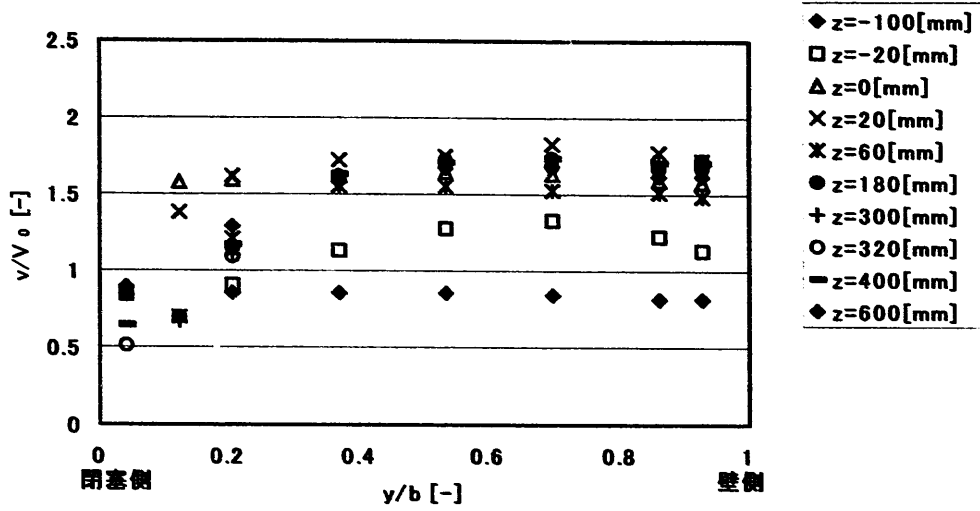


(b) $x=10$ [mm]

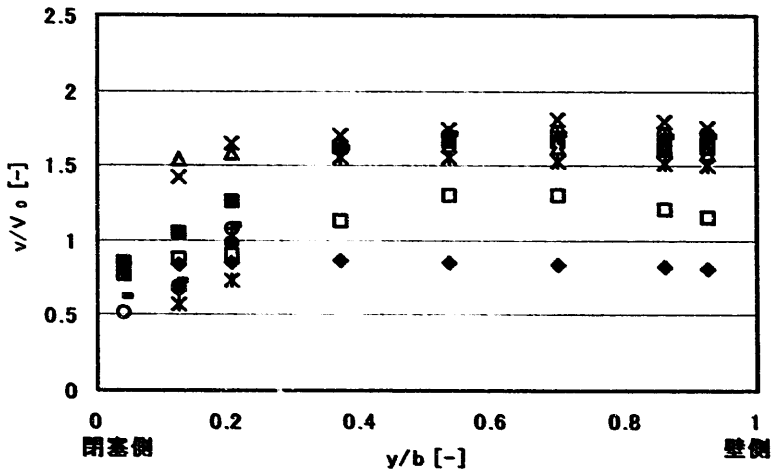


(c) $x=20$ [mm]

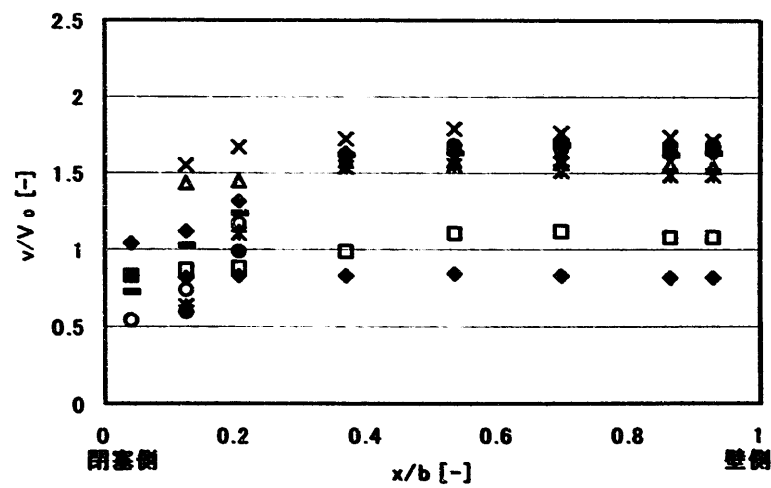
图 4 0 平均速度分布 ($Q=5.66\text{m}^3/\text{h}$)



(a) $x=0$ [mm]



(b) $x=10$ [mm]



(c) $x=20$ [mm]

図 4 1 平均速度分布 ($Q=3.77\text{m}^3/\text{h}$)

4. 6 閉塞部全体の流動場

図4 2にPIVの結果から求めた閉塞側主流方向最大流速を示す。図4 2 (a)は、壁から一層目と二層目の間であり、図4 2 (b)は二層目と三層目の間を示している。データは $z=20, 40, 140, 160, 260, 280$ [mm]の位置で求めた。

また図4 3にPIVの結果から求めた健全側流速分布を示す。図4 3 (a), 図4 3 (b) および図4 3 (c) はそれぞれ流量 2.83, 1.84, 1.05 [m³/h]に対応しており、主流方向には $z=20, 160, 280$ [mm]である。

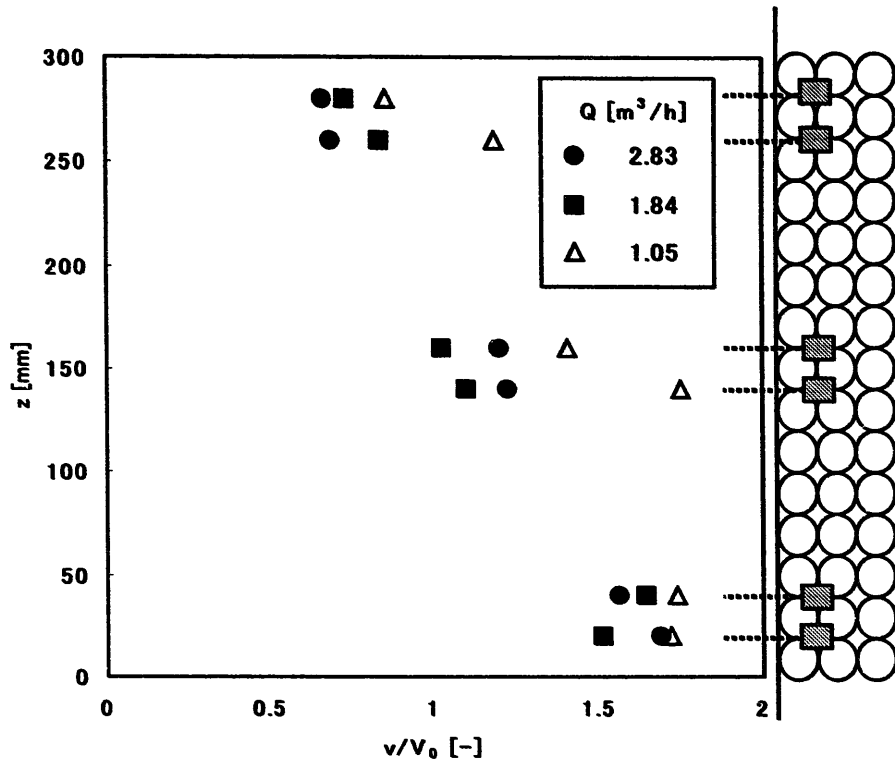
ここで閉塞物下端では流路形状が急激に変化していることから、その変化を考慮した閉塞物内部での無次元断面平均流速 \bar{v} を見積もると、以下ようになる。

$$\frac{\bar{v}}{V_0} = \frac{A}{A_p} = \frac{7.442 \times 10^{-3}}{4.674 \times 10^{-3}} = 1.59 \quad (5.5)$$

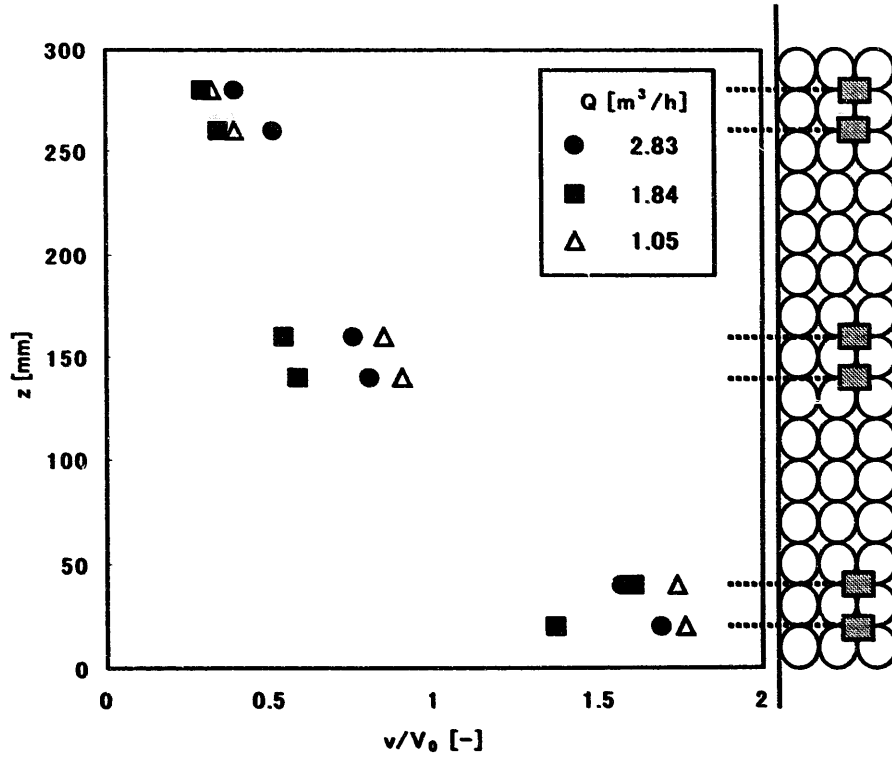
ここで、 A は2チャンネルの流路断面積、 A_p は閉塞部の流路断面積を示す。この値は図4 3の閉塞部入口 ($z=20$ [mm])での流速とほぼ同じになっていることが分かる。

閉塞側に注目すると、壁から一層目と二層目の間 (a) と二層目と三層目の間 (b) では、その流速は入口部でほぼ等しいが、出口部になるほどその分布に違いが出ていくことが分かる。一層目と二層目の間では出口部では無次元流速が断面平均流速の0.75倍であるのに対し、二層目と三層目では0.5倍程度にまで遅くなっている。これは図3 1-1から図3 3-2でわかるように、二層目と三層目の間 (B-2)では健全側に多く流出しているためである。

健全側では $z=160$ [mm]と $z=280$ [mm]でその分布形状にほとんど変化のないことから、閉塞側中央部付近と出口部付近では、閉塞側からの流出による影響は小さいことが分かる。



(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 4 2 閉塞側主流方向最大流速分布

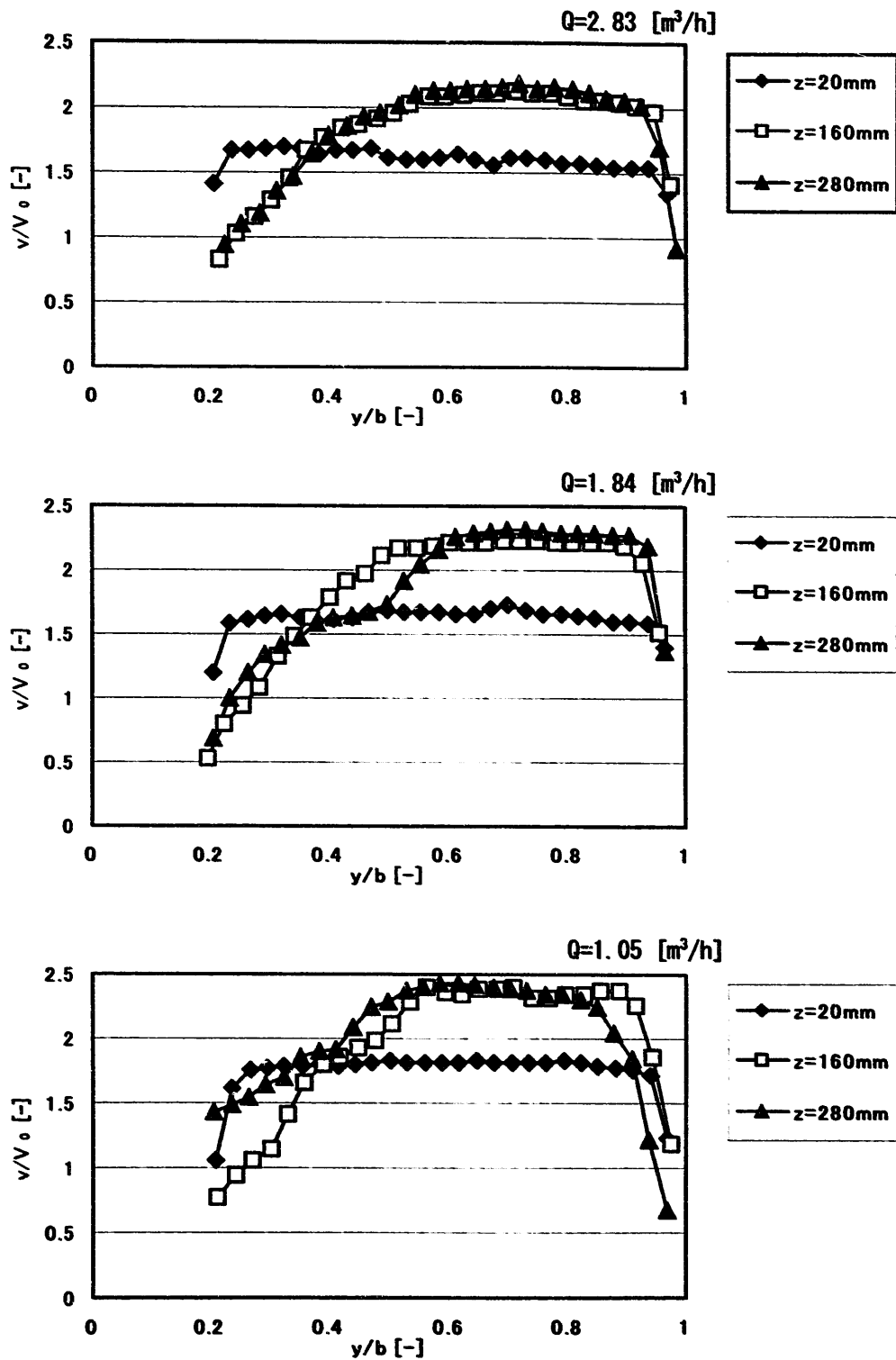


图 4 3 健全側平均速度分布

5. 発熱実験

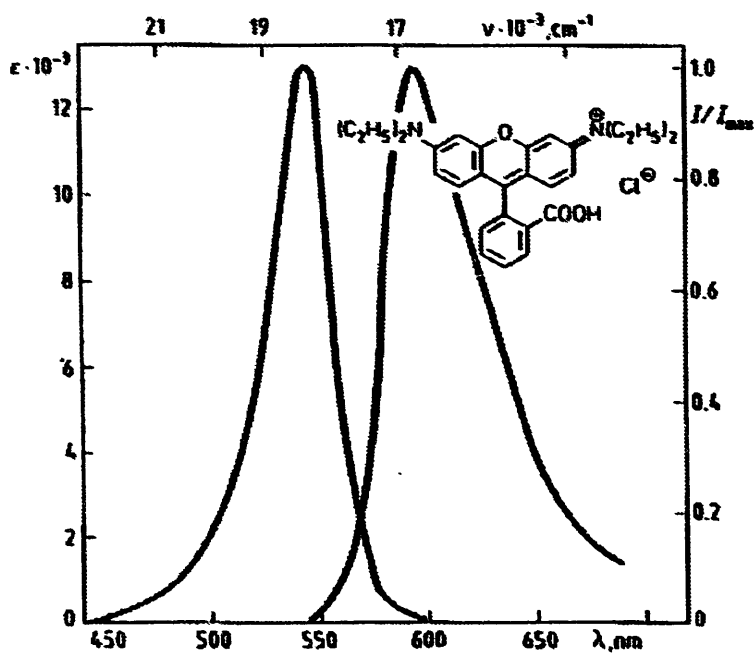
5. 1 レーザ誘起蛍光法

閉塞物周りの温度分布を測定するために、レーザ誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence, LIF) の採用を検討する。本手法は、榊原らが開発した手法^[3]を基本としている。

熱電対を用いる場合、点計測のため空間的な温度分布を一度に計測するには、計測する断面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配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。よって、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。LIF の原理については、文献[3]に書かれているため以下では簡単に説明する。原子あるいは分子は、外部から与えられる光エネルギーなどによって励起し、蛍光を発する。一般に蛍光物質は温度の上昇と共に蛍光発光強度が減少し、温度による蛍光の消光作用を受ける。温度消光した溶液を冷却すると蛍光強度は回復する。LIF による温度計測は、この原理を応用したものである。

文献[3]と同様に蛍光物質として誘起蛍光物質ローダミン B(Rhodamine B, $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$)を用いる。ローダミン B は金属光沢のある緑色粉末であり、水やエタノールに可溶で赤色の溶液になる。ローダミン B の吸収および発光スペクトルを図 4 4 (文献[3]から引用) に示す。発光 (蛍光) 波長は吸収波長に比べて長く、励起光 (分子を励起するための外部光) を長波長透過フィルタで遮断することができるため、蛍光と粒子の散乱による励起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、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。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ため、本実験で使用する溶媒の水には、イオン交換樹脂を通った精製水を使用した。



Solvent: ethanol; $\lambda_{ex} = 365 \text{ nm}$

図44 ローダミンBの吸収および発光スペクトル
(文献[3]から引用)

5. 2 実験方法

図 4 5 に蛍光発光強度と温度の関係を調べるための実験装置を示す。50[mm] x 50[mm] x 100[mm] (縦 x 横 x 高さ) のパイレックスガラス製の矩形ビーカーに、ローダミン B 適量を溶解させた濃度 56.9[wt%]の NaI 水溶液を入れ、ホットスターラの上に載せる。ホットスターラは、加熱しながらの攪拌が出来るためビーカー内の温度をほぼ一定に保つことができる。溶液の温度は温度計により測定した。設定温度になったところで、Nd-YAG レーザシートを照射する。CCD カメラのレンズ手前にはカラーフィルタが取り付けられてあり、ローダミン B の蛍光のみ CCD カメラに入る。画像は Bitmap 形式のファイルに変換して輝度情報を得る。表 6 に CCD カメラおよびカラーフィルタの仕様について示す。図 4 6 に示す Bitmap 画像から、蛍光部分 (白色部分) のみ切り取り、赤 (R) ・緑 (G) ・青 (B) それぞれの輝度から、以下の式により NTSC 方式の輝度信号 (Y) ・色差信号 (I ・ Q) に変換¹⁵⁾して、輝度信号 Y の空間平均を求め各温度の蛍光輝度とした。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

$$I = 0.596R - 0.274G - 0.322B$$

$$Q = 0.211R - 0.522G + 0.311B$$

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 CCD 固体撮影素子
有効画素[pixel]	656 (H) x 494 (V)
画素サイズ	9.9 [um] x 9.9 [um]
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 カラーフィルタ仕様

シャープカットフィルタ	シグマ光機 SCF-50S-560 (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)

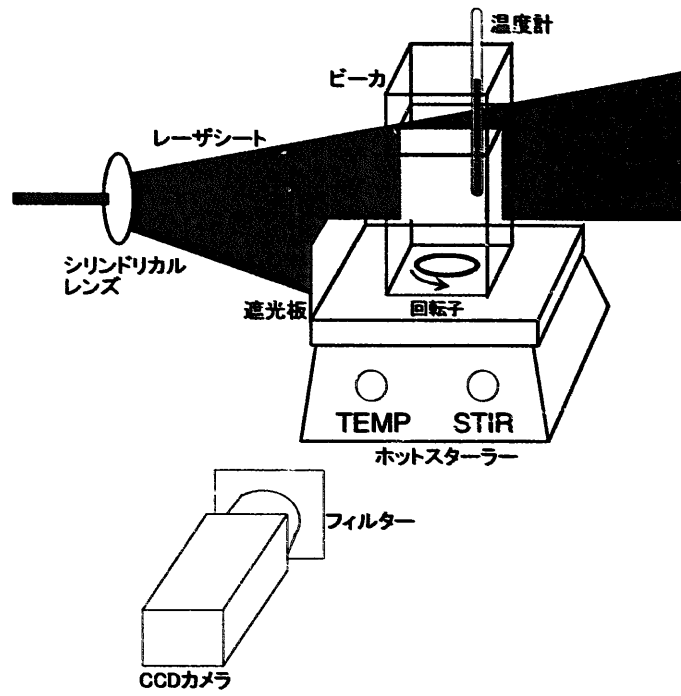


図 4 5 LIF 予備実験装置

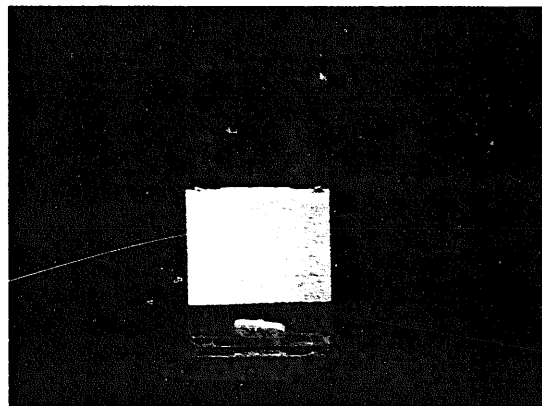


図 4 6 ローダミン B の蛍光による画像 (輝度を加工)

5. 3 実験結果

図47に実験結果を示す。また、図48に水溶液温度 25[°C]の場合の輝度を基準として正規化した結果を示す。水温の上昇下降に伴うヒステリシスは小さいことが分かる。また、輝度は温度の2次関数として近似できる。

以上により、ローダミン B を用いた温度計測手法が NaI 水溶液中でも使用可能であることが確認できた。

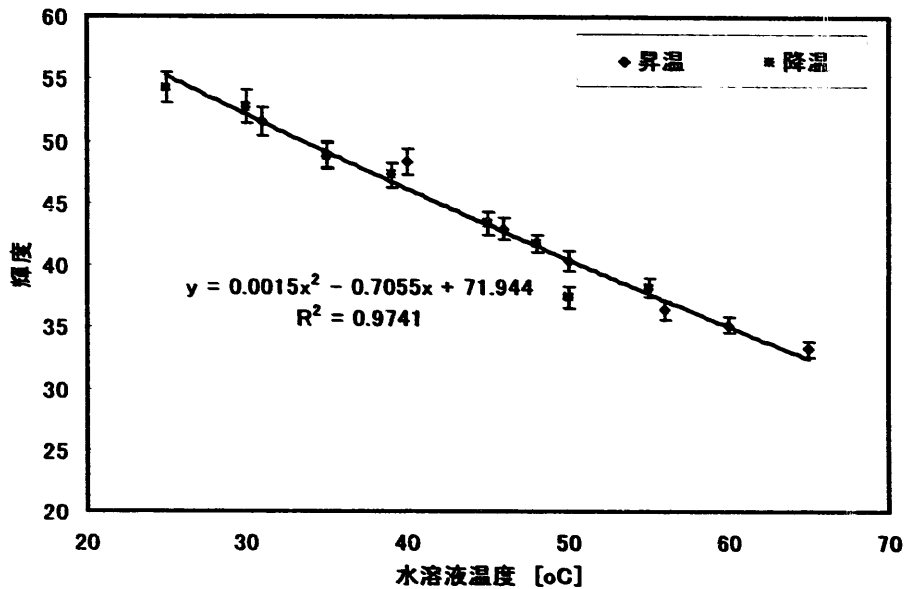


図47 蛍光輝度と温度との関係

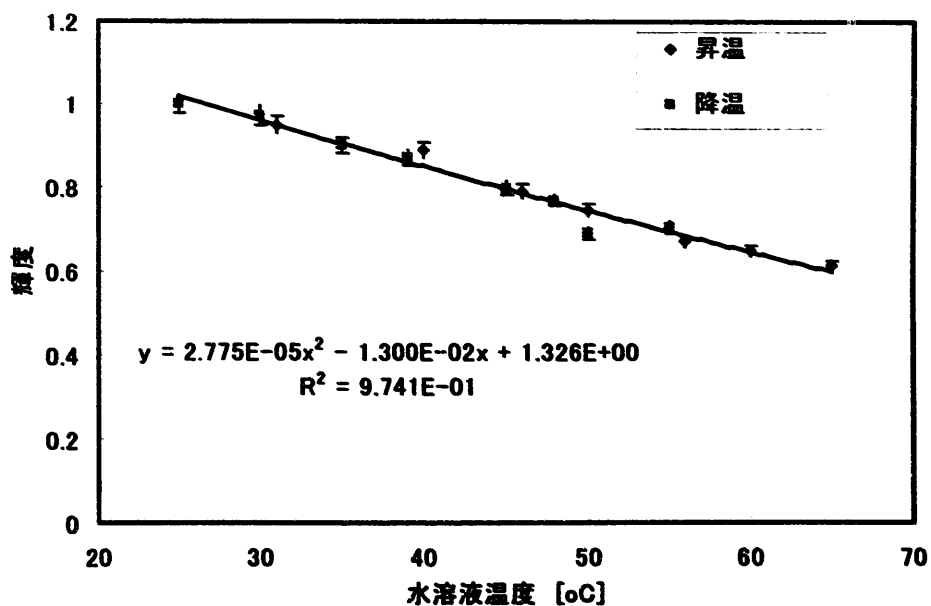


図48 正規化した蛍光輝度と温度との関係
(水溶液温度 25[°C]での蛍光輝度を基準とした)

6. まとめ

多孔質状閉塞物をパイレックスガラス球によって模擬し、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的研究を行った。

閉塞物内外の流れ場を粒子画像流速測定法（PIV）によって解析できるよう、可視化手法を確立し有効性を確認した。燃料集合体内の2つのサブチャンネルを単純化して20倍に拡大した試験体に対して、先に確立した可視化手法を用いて実験を行い、速度場の計測を行った。また、閉塞物内の温度分布を計測するための、レーザ誘起蛍光法（LIF）による計測手法を確立するための初期段階として、NaI 水溶液中でのローダミンBの温度—蛍光輝度特性について実験を行った。

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画像ファイル（Bitmap 形式）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試験

粒子間の空隙部で流れは直進し、球の周辺では流速が低下し球を避け外側へ向かう流れや、巻き込まれる流れの様子がとらえられ、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、PIV 解析手法を選択する、またはノイズ除去を行う等により定量的にも満足できる結果が得られることが確認できた。

3) 閉塞物内部および周辺の流速測定実験

閉塞物内部の健全側では冷却材が健全流路側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物入口部から中央部にかけて顕著である。また、閉塞物中央部から出口部にかけては、軸方向流れが支配的であり閉塞物を構成する球の抵抗と閉塞物内部を通過する流量の減少に応じて軸方向流れは減少する。閉塞物中央部より下流では、閉塞物側からの流出の影響は小さく、健全流路内の流れは安定している。閉塞物内部の球の背後で流れはよどんでおり、弱い2次流れが生じている。

流れ場としては、閉塞側からの流出のみ観測され、健全側から閉塞側への流れ込みは確認されなかった。

4) 発熱条件での可視化手法の確立を目的とした予備実験

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 水溶液中であっても LIF による温度分布測定が可能であることが確認できた。

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基礎工学類 三代 一寿氏をはじめ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(平成9年度)", PNC TY9610 98-001, (1998)
- [3] 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
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] W. Merzkirch, "Flow Visualization (2nd Edition)", ACADEMIC PRESS, INC., p.55~p.57, (1987)
- [9] 社団法人日本化学会, "化学便覧基礎編 改訂4版", 丸善株式会社, (1993)
- [10] E. Hecht, "OPTICS (3rd Edition)", Addison Wesley Longman, Inc., p.71, (1998)
- [11] 岸川, "光学入門", (株)オプトロニクス社, p 3, (1990)
- [12] 幡野 編, "工学材料便覧", 日刊工業新聞社, 第10章, (1981)
- [13] 田中 編, "実験化学便覧(新版)", 共立出版株式会社, p.336, (1969)
- [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] 川上, "画像入力とブラウザ", 工学図書株式会社, 第2章, (1997)
- [17] 流れの可視化学会編, "新版流れの可視化ハンドブック", 朝倉書店, 第5章, (1986)
- [18] 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)

**付録1 ヨウ化ナトリウム(NaI)水溶液
の物性値測定**

付録2 トレーサ粒子の選定

付録1 ヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液の物性値測定

A1-1) 目的

本研究では、試験体流入流量を実験条件パラメータとし、流れの特性を決める重要な無次元数であるレイノルズ数を定義する必要がある。しかし、過去の研究からは、本文第2章で求めた濃度 56.9[wt%]の NaI 水溶液の物性値に関するデータは得られない。そこで、レイノルズ数を定義するために必要な密度および粘性係数について測定を実施した。また、今年度一部実施した非等温試験において重要な物性値である熱伝導率についても併せて実施した。

A1-2) 測定対象

ヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液 (ただし、0.1wt%のチオ硫酸ナトリウムを含む)

A1-3) 測定条件

試験パラメータは、水溶液温度および水溶液の NaI 濃度である。

水溶液温度： 20～40 [°C]

水溶液濃度： 0.0～60.0 [wt%]

A1-4) 測定装置

各物性値測定方法および装置について表 A1-1～A1-3 に示す。また、各測定装置の仕様を以下に表にまとめて示す。

A1-5) その他

表 A1-1 に示す測定のうち、振動式密度測定法による密度測定および熱線法による熱伝導率測定に関しては、株式会社 化 研 (茨城県水戸市堀町 1044 番地) において実施した。粘度測定および密度測定の一部は、原子炉工学グループにおいて実施した。

表 A1-1 各物性値測定方法および装置

測定項目	方 法	装 置 名
密 度	アルキメデスの原理	AD-1653
	振動式密度測定法	PAAR DMA48
粘 度	振動式粘度測定法	CJV5000
熱伝導率	熱 線 法	ARC-TC-1000

表 A1-2 密度測定用装置仕様

装置名	アントンパール PAAR DMA48 *1	エー・アンド・ディ 電子天びん HM-202 比重測定キット AD-1653 *2
測定原理	振動式密度測定法 (JIS K 2249)	アルキメデスの原理
測定範囲	0~3 [g/cm ³]	(ひょう量) 210 / 42 [g]
精 度	± 1x10 ⁻⁴ [g/cm ³]	0.1 / 0.01 [mg]
再現性 (標準偏差)	± 1x10 ⁻⁵ [g/cm ³]	0.1 / 0.02 [mg]
測定温度範囲	-10 ~ 70 [oC]	5 ~ 40

*1 NaI 水溶液濃度 56.9 [wt%], *2 NaI 水溶液濃度 56.4[wt%]

表 A1-3 粘度測定用装置仕様

装置名	エー・アンド・ディ小型振動式粘度計 CJV5000
測定原理	振動式粘度測定法
測定範囲	0.3 ~ 10,000 [mPas] 0.3 ~ 6,000 [mPas]*3 0.3 ~ 3,000 [mPas]*3
分解能	0.1 [% F.S]
再現性	—
測定温度範囲	5 ~ 40 [°C]

*3 測定時使用レンジ

表 A1-4 熱伝導率測定用装置仕様

装置名	アグネ型熱伝導率測定装置 ARC-TC-1000
測定原理	熱線法 (参考 JIS R2618)
測定範囲	0.005 ~ 5 [W/(m·K)]
絶対値精度	± 5 [%]
再現性	± 5 [%]
測定温度範囲	-190 ~ 1300 [°C]

A 1 - 6) 密度測定結果

図 A1-1 に水溶液密度の測定結果を示す。また、図 A1-2 に各濃度に対する水溶液密度を示す。ただし、チオ硫酸ナトリウムは含まれない。チオ硫酸ナトリウムを含んだ場合と含まない場合とでは、水溶液密度の違いは 0.2%以下であり計測誤差に含まれる範囲である。

1) 水溶液密度 ([kg/m³]) と温度 (T[°C]) の関係

濃度 56.4wt%

$$\rho_{\text{NaI}56.4} = -3.376 \times 10^{-3} \cdot T^3 + 3.115 \times 10^{-1} \cdot T^2 - 1.040 \times 10^1 \cdot T + 1.834 \times 10^3 \quad (\text{A1-1})$$

濃度 56.9wt%

$$\rho_{\text{NaI}56.9} = 1.897 \times 10^{-5} \cdot T^3 - 2.643 \times 10^{-3} \cdot T^2 - 8.795 \times 10^{-3} \cdot T + 1.755 \times 10^3 \quad (\text{A1-2})$$

2) 水溶液密度 ([kg/m³]) と濃度 (C[wt%]) の関係 (水溶液温度 25[°C])

$$\rho_{\text{NaI}} = 1.161 \times 10^{-6} \cdot C^3 + 1.715 \times 10^{-5} \cdot C^2 + 8.174 \times 10^{-3} \cdot C + 9.960 \times 10^{-1} \quad (\text{A1-3})$$

A 1 - 7) 粘度測定結果

図 A1-3 に水溶液粘度の測定結果と、通産省工業技術院機械技術研究所 (MEL) にて、可視化流動実験の作動流体への適用を前提に計測された濃度 64[wt%]水溶液の粘度を併せて示す。

計測はまず水と濃度 64[wt%]の水溶液を用いて行い、測定精度を確認した。その結果、水の場合、水温 35[°C]以下では文献値と本計測結果との差は 5[%]以下であった。また、濃度 64[wt%]の水溶液の場合、MEL での計測結果との差は、4%以下であった。これらから、本計測は水溶液温度 35[°C]以下で、5%の誤差があることが確認できた。濃度 59.6[wt%]の水溶液の粘度は、温度に対する傾向が類似しており、粘度の値も水および MEL でのデータによる濃度の違いから推測できる範囲のものである。

また、図 A1-4 に各濃度に対する水溶液粘度を示す。近似曲線と、本計測結果との差は 0.7%以下であり計測誤差 (5%) に含まれる範囲である。

1) 水溶液粘度 ([mPa.s]) と温度 (T[°C]) の関係

濃度 56.9wt%

$$\nu_{\text{NaI}56.9} = 2.396 \times 10^{-6} \cdot T^3 + 3.580 \times 10^{-4} \cdot T^2 - 6.374 \times 10^{-2} \cdot T + 3.397 \quad (\text{A1-4})$$

2) 水溶液粘度 ([mPa.s]) と濃度 (C[wt%]) の関係 (水溶液温度 30[°C])

$$\begin{aligned} \nu_{\text{NaI}} = & 9.639 \times 10^{-9} \cdot T^5 - 1.005 \times 10^{-6} \cdot T^4 + 4.099 \times 10^{-5} \cdot T^3 \\ & - 6.334 \times 10^{-4} \cdot T^2 + 6.072 \times 10^{-3} \cdot T + 7.974 \end{aligned} \quad (\text{A1-5})$$

A 1 - 8) 熱伝導率測定結果

図 A1-5 に水溶液粘度の測定結果を示す。熱伝導率は水に比較して、70%程度となることが分かる。

1) 水溶液熱伝導率 ([W/(mK)]) と温度 (T[°C]) の関係
濃度 56.9wt%

$$\lambda_{\text{NaI}56.9} = -9.419 \times 10^{-7} \cdot T^3 + 1.060 \times 10^{-4} \cdot T^2 - 2.748 \times 10^{-3} \cdot T + 4.406 \times 10^{-1}$$

(A1-6)

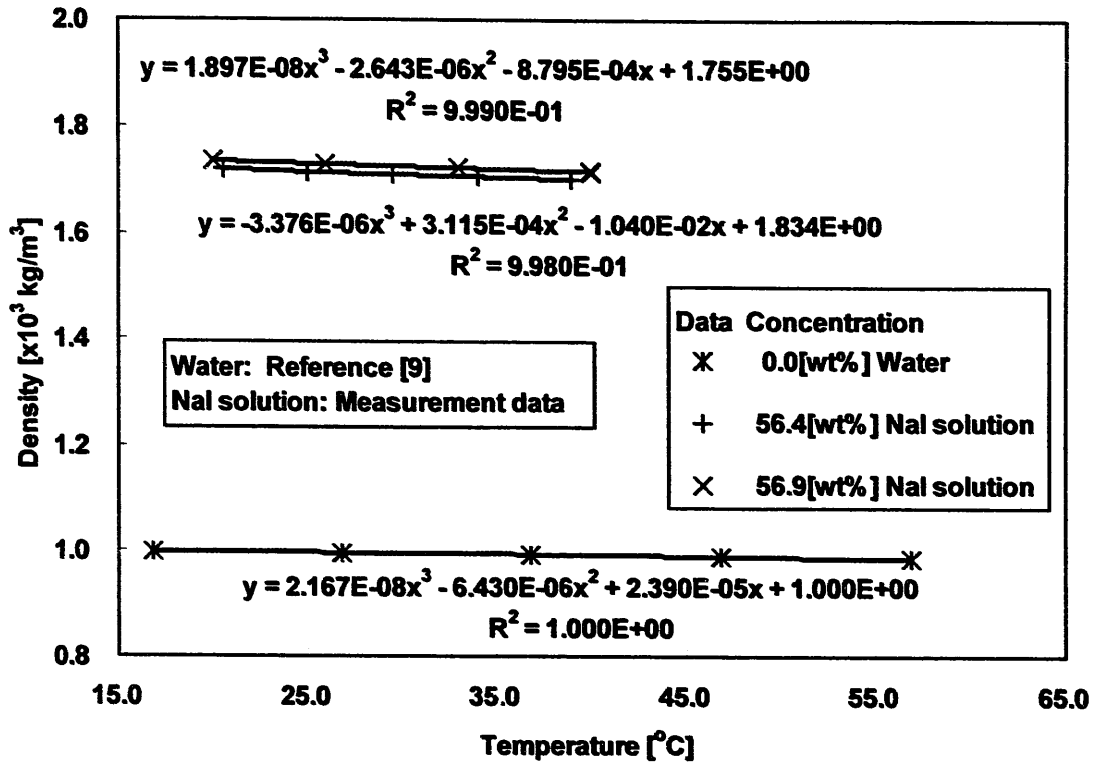


図 A1-1 NaI 水溶液温度と密度との関係

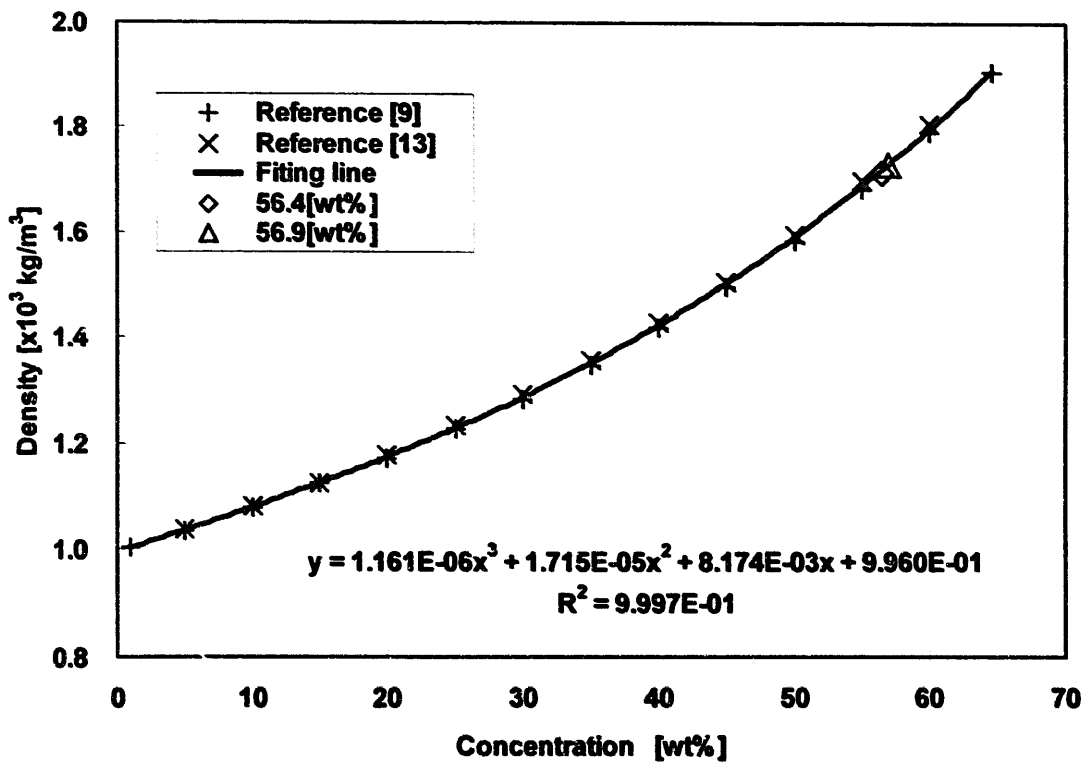


図 A1-2 NaI 水溶液濃度と密度の関係

表 A1-1 NaI 水溶液温度と密度との関係 (図 A1-1)

水溶液濃度[wt%]	0.0
水温度[°C]	水密度 ^[9] [$\times 10^3$ kg/m ³]
16.8	0.9989
26.8	0.9966
36.8	0.9934
46.8	0.9894
56.8	0.9848

出展：化学便覧基礎編 (改訂 4 版)

水溶液濃度[wt%]	56.4
水溶液温度[°C]	水溶液密度 [$\times 10^3$ kg/m ³]
20.5	1.7223
25.0	1.7152
29.5	1.7117
34.0	1.7070
39.0	1.7015

水溶液濃度[wt%]	56.9
水溶液温度[°C]	水溶液密度 [$\times 10^3$ kg/m ³]
20.0	1.7361
	1.7361
26.0	1.7302
	1.7305
33.0	1.7232
	1.7233
40.0	1.7168
	1.7160
33.0	1.7236
	1.7234
26.0	1.7302
	1.7302

表 A1-2 水溶液濃度と密度との関係 (図 A1-2)

水溶液温度[°C]	25
水溶液濃度[wt%]	水溶液密度 ^[9] [$\times 10^3$ kg/m ³]
1	1.0045
5	1.0367
10	1.0793
15	1.1247
20	1.1736
25	1.2267
30	1.2847
35	1.3485
40	1.4191
45	1.4977
50	1.5854
55	1.6835
60	1.7936
64.6	1.9066

出展：化学便覧基礎編 (改訂 4 版)

水溶液温度[°C]	25
水溶液濃度[wt%]	水溶液密度 ^[13] [$\times 10^3$ kg/m ³]
5	1.0388
10	1.0808
15	1.1267
20	1.1777
25	1.2326
30	1.2925
35	1.3585
40	1.4304
45	1.5083
50	1.5982
55	1.6981
60	1.8080

出展：実験化学便覧 (新版)

水溶液濃度[wt%]	水溶液密度*4 [$\times 10^3$ kg/m ³]
56.4	1.7159
56.9	1.7317

*4 測定結果からの近似値 (T=30[°C])

56.4[wt%]: 式 (A1-1), 56.9[wt%]: 式 (A1-2)

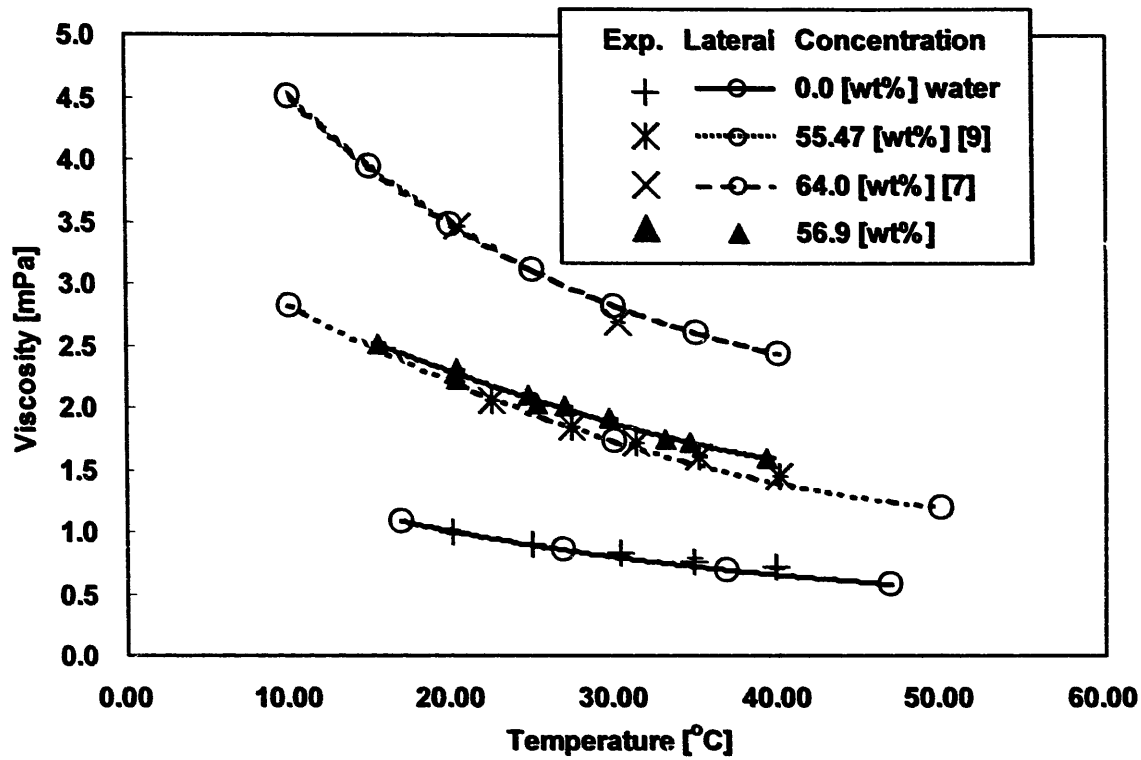


図 A1-3 NaI 水溶液温度と粘度との関係

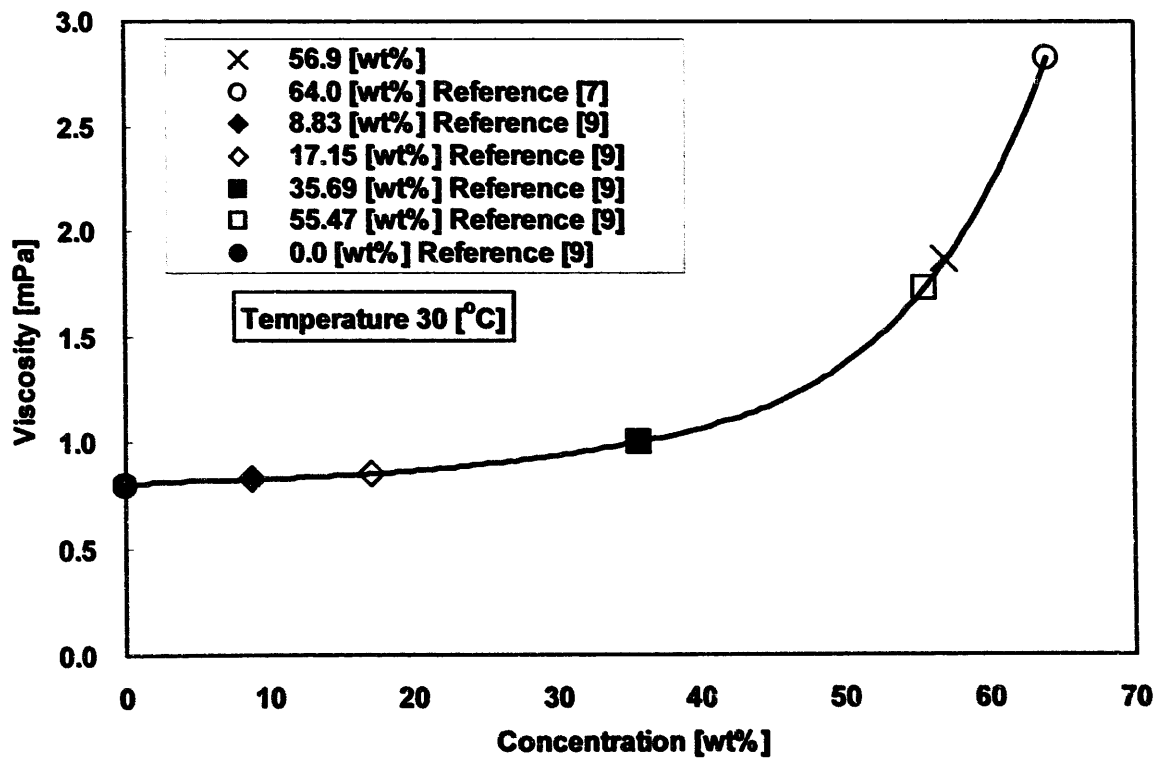


表 A1-4 NaI 水溶液温度と粘度との関係

表 A1-3 NaI 水溶液温度と粘度との関係 (測定結果)

水溶液濃度[wt%] 0.0	
水温度[°C]	水粘度 [mPa.s]
20.00	0.999
24.90	0.899
30.30	0.826
34.83	0.761
39.86	0.715

水溶液濃度[wt%] 55.47	
水溶液温度[°C]	水溶液粘度 [mPa.s]
22.40	2.058
27.32	1.848
31.25	1.715
35.13	1.612
35.17	1.605
40.08	1.453

水溶液濃度[wt%] 56.9	
水溶液温度[°C]	水溶液粘度 [mPa.s]
24.62	2.100
29.63	1.911
34.60	1.718
39.33	1.596
26.90	2.009
20.30	2.223
15.50	2.509
20.30	2.307
25.20	2.022
33.11	1.740

水溶液濃度[wt%] 60.0	
水溶液温度[°C]	水溶液粘度 [mPa.s]
20.40	3.465
30.25	2.689

表 A1-4 NaI 水溶液温度と粘度との関係 (文献値)

水溶液濃度[wt%] 0.0	
水 (溶液) 温度[°C]	水 (溶液) 粘度 [mPa.s]
16.84	1.0853
26.84	0.8544
36.84	0.6937
46.84	0.5772

出典：化学便覧基礎編 (改訂 4 版)

水溶液濃度[wt%] 64	
水溶液温度[°C]	水溶液粘度 [mPa.s]
10.0	4.513
15.0	3.940
20.0	3.478
25.0	3.110
30.0	2.824
35.0	2.604
40.0	2.437

出典：文献[7]

水 (溶液) 温度[°C]	水 (溶液) 粘度 [mPa.s]
(水溶液濃度) 8.83[wt%]	
10	1.3099
30	0.8243
50	0.5806
水 (溶液) 温度[°C] 17.15[wt%]	
10	1.3224
30	0.8494
50	0.6039
水 (溶液) 温度[°C] 35.69[wt%]	
10	1.5410
30	0.9981
50	0.7275
水 (溶液) 温度[°C] 55.47[wt%]	
10	2.8169
30	1.7274
50	1.1988

出典：化学便覧基礎編 (改訂 4 版)

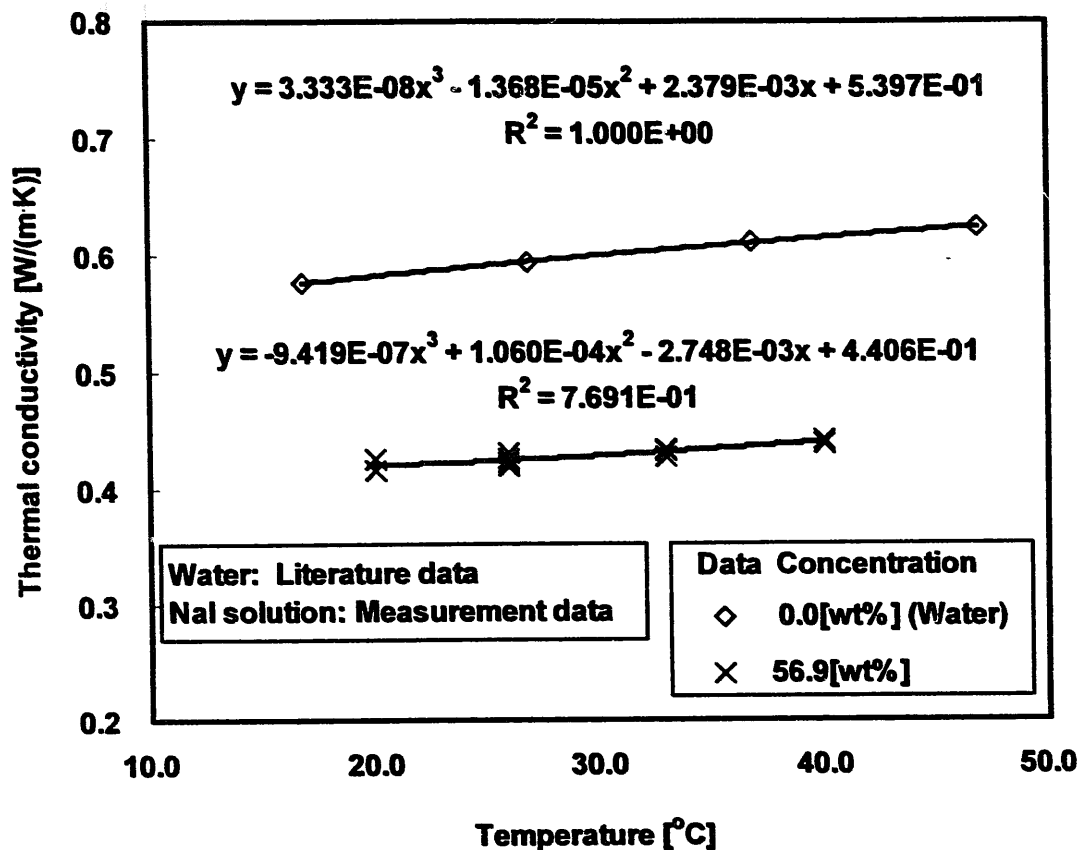


図 A1-5 NaI 水溶液温度と熱伝導率との関係

表 A1-5 NaI 水溶液温度と熱伝導率との関係

水溶液濃度[wt%]		0.0
水 (溶液) 温度[°C]	熱伝導率 ^[17] [W/(m·K)]	
16.8	0.5760	
26.8	0.5943	
36.8	0.6104	
46.8	0.6245	
56.8	0.6369	

出展：伝熱工学資料（第4版）

水溶液濃度[wt%]		56.9
水溶液温度[°C]	熱伝導率 [W/(m·K)]	
20.0	0.4160	
20.0	0.4250	
26.0	0.4300	
26.0	0.4260	
33.0	0.4340	
33.0	0.4340	
40.0	0.4380	
40.0	0.4420	
33.0	0.4310	
33.0	0.4270	
26.0	0.4190	
26.0	0.4220	

付録2 トレーサ粒子の選定

粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry: PIV)を用いて測定を行う場合、重要になってくるのが溶液に混入するトレーサ粒子の選定である。流れ場の全域計測を行うので、適切なトレーサ粒子を選定するには、使用する流体の種類と流速に応じて、比重、注入制御法、撮影条件などを考慮に入れ粒子の追従性について検討する必要がある¹¹⁸⁾。そこで耐溶剤性・耐熱性に優れた着色真球状微粒子ポリマーをトレーサ粒子として選んだ。平均粒子径は $20\mu\text{m}$ 、比重は1.85である。

定常流中に、速度零の粒子を突然おいた場合に粒子が液相流速の99%に達するまでの時間を求める。その間、粒子に作用する力として流体抵抗を考える、流体抵抗はストークスの法則に従うものとする、粒子が流体速度の99%に達するまでの時間 t_0 とその間の粒子の移動距離 x_0 は以下のように見積られる。

$$t_0 = 0.26 \frac{\rho_p d^2}{\mu_f} = 0.093 \times 10^{-3} [\text{s}] \quad (\text{A2-1})$$

$$x_0 = u_f \left[t_0 + \frac{\rho_p d^2}{18\mu_f} \left\{ \exp\left(-\frac{18\mu_f}{\rho_p d^2} t_0\right) - 1 \right\} \right] = 0.788 \cdot u_f \cdot t_0 \quad (\text{A2-2})$$

ここで、 $\rho_p = 1.85 \times 10^3 [\text{kg/m}^3]$ は粒子の密度、 $d = 20 \times 10^{-6} [\text{m}]$ は粒子径、 $\mu_f = 2.07 \times 10^{-3} [\text{Pa}\cdot\text{s}]$ は濃度56.9[wt%]のNaI水溶液の粘度である。 $u_f = 0.5$ はテスト部流入流量を投影断面積で除した平均流速である。このとき、移動時間 $x_0 = 0.036 [\text{mm}]$ 、加速時間 $t_0 = 0.093 [\text{ms}]$ となる。

実験では、1ピクセルが約 $0.05 [\text{mm}]$ であり、解析に使用する1組の画像間隔が $1[\text{ms}]$ であることから、この値は十分許容範囲内にあることが分かる。

固体粒子は重力の作用により静止流中を比重差により沈降する。直径 d の球状固体粒子が静止流中を沈降するとき、粒子の沈降速度 u_s は次式で与えられる。

$$10^{-4} \leq \text{Re}_p = \frac{du_s}{\nu_f} \leq 2, \quad u_s = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right) g \frac{d^2}{\nu_f} \quad (\text{A2-3})$$

$$2 \leq \text{Re}_p \leq 500, \quad u_s = \left\{ \frac{4}{225} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right)^2 g \frac{1}{\nu_f} \right\}^{1/3} d \quad (\text{A2-4})$$

$$500 \leq \text{Re}_p \leq 10^5, \quad u_s = \left\{ 3.03 \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right) g d \right\}^{1/2} \quad (\text{A2-5})$$

ここで、 g は重力加速度、 ρ_p 、 ρ_f は粒子および流体の密度、 ν_f は流体の動粘度係数である。

このとき、沈降速度 $u_s = 8.9 \times 10^{-5}$ 、式(A2-3)となり無視できる程度である。

以上により、この粒子は可視化用トレーサ粒子として妥当であると考えられる。