

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)

1998年3月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

筑波大学 構造工学系

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1311 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-1311, Japan.

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

# 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)

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>, 小林 順<sup>\*2</sup>, 上出 英樹<sup>\*2</sup>

### 要 旨

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。

本年度は全体計画3カ年の初年度にあたり、試験装置の概念構築および設計・製作・据付を行った。また、予備解析を行い、装置の設計に反映した。これらと並行して、可視化手法の確立を目的とした屈折率調整実験、簡易ループの設計・製作および実験を実施した。

試験装置の概念構築および設計・製作では、試験体として大型高速炉とのレイノルズ数一致の考え方を基本に、中心集合体のうち向かい合う2つの内部サブチャンネルを抽出した20倍の拡大モデルを選択し、試験パラメータについて検討した。試験装置は筑波大学混相流実験室に設置した。

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、その内部の流動場の可視化手法の確立を目的とした基礎実験を行った。光学測定（粒子画像流速測定法）を行う際に問題となる、測定部とその周りの物質との屈折率の違いを解決するため、作動流体としてヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液を用いた。パイレックスガラスと屈折率が一致する NaI 水溶液の濃度を調べ、 $56.4 \pm 0.7 \text{wt}\%$ であることが分かった。

次に、1サブチャンネルに相当する透明アクリル製の簡易ループ試験装置を製作し、流速分布測定試験および流況可視化試験を行い、本可視化手法の有用性について調べた。その結果、球充填層局所内部の画像からは、定性的に妥当と考えられる閉塞部内部の流速ベクトル分布を得ることが出来た。NaI 水溶液を作動流体とした本可視化手法は、球充填層内部の流況可視化に有効であることが確認された。

---

本報告書は、筑波大学と動力炉・核燃料開発事業団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：094F044

事業団担当部課室及び担当者：大洗工学センター安全工学部原子炉工学室  
仲井 悟

\*1 筑波大学 構造工学系

\*2 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 安全工学部 原子炉工学室

## Study on thermal-hydraulic phenomena in porous media

(Semiannual report 1997. Nov. to 1998. Mar. )

Goichi Matui\*\*, Hideaki Monji\*\*,  
Jun Sakakibara\*\*  
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 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 Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC) from November, 1997 to March, 2000. This report describes the results for the first period from November, 1997 to March, 1998.

FY 1998 is the first year of the 3 years plan. In this year period, based on the correspondence of Reynolds number between experimental facility and FBR, the design and construction of the test rig and experimental parameter examination were performed. The test section has rectangle two sub-channel geometry and is twenty times large-scale model.

In this study, we use the Particle Image Velocimetry(PIV) analysis method to visualize the flow field in the porous media. The Pyrex glass spheres were used to construct the porous blockage. The refraction-rate matching between obstacle and fluid is important to measure the velocity field with the optical analysis method. As the working fluid, NaI solution was used. When the concentration of NaI is 56.4wt% in the solution, the refraction-rate is correspond to that of the Pyrex glass. The simple test loop was constructed and the experiment was performed to measure the velocity field with Laser Doppler Anemometer and PIV. The purpose of this experiment using the simple test loop is to develop the experimental method of flow visualization in the porous media used NaI solution as working fluid.

As the result of experiment with the simple test loop, the vector field in the porous media was obtained and it is shown that the flow pattern with PIV analysis is qualitatively correct. This visualization method using the NaI solution is applicable to measure the flow field in the porous media.

---

\* Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba.

\*\* Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC, PNC.

## 目 次

1. はじめに	1
2. 試験体の設計・製作・据付 <sup>*1</sup>	2
2.1 試験体の概念構築 <sup>*1</sup>	2
2.1.1 テスト部	2
2.1.2 多孔質状閉塞物	2
2.1.3 実験パラメータ	2
2.2 ループ構成の検討 <sup>*1</sup>	7
2.3 予備解析 <sup>*2</sup>	12
2.4 実験装置 <sup>*1</sup>	15
3. 屈折率調整実験 <sup>*1</sup>	19
3.1 目的	19
3.2 実験装置	19
3.3 実験方法	23
3.4 実験結果	28
4. 簡易ループによる予備実験 <sup>*1</sup>	28
4.1 簡易ループの設計・製作 <sup>*1</sup>	30
4.2 流速分布測定試験 <sup>*1</sup>	30
4.2.1 目的	30
4.2.2 測定原理	31
4.2.3 システム構成	34
4.2.4 実験方法	34
4.2.5 実験結果	36
4.3 流況可視化実験 <sup>*1</sup>	36
4.3.1 測定原理	36
4.3.2 PIVの利点	36
4.3.3 トレーサ粒子	36
4.3.4 測定方法	36
4.3.5 実験結果	37
5. まとめ	47
6. 今後の課題	48
謝 辞	49
参考文献	50
付録1 入射波長とパイレックスガラスの屈折率	
付録2 ヨウ化ナトリウム使用の注意点	

\*1 筑波大学・動燃共同実施

\*2 動燃担当分

## 図表リスト

- 表 2.1 実機条件との比較（中心集合体内中心サブチャンネル）  
表 2.2 実験パラメータ  
表 2.3 玉型弁の形状損失係数  
表 2.4 各ループ構成の比較  
表 2.5 解析条件  
表 4.1 LDA 計測システム
- 図 2.1 試験体概略図  
図 2.2 ギャップ幅  
図 2.4 横置き重力落下式ループ概略図  
図 2.5 ポンプ駆動式ループ概略図  
図 2.6 実験装置ループ概略図  
図 2.7 予備解析格子配置図  
図 2.8 解析結果  
図 2.9 試験装置全体図  
図 2.10 試験体組立図  
図 3.1 実験計装概略図  
図 3.2 計測方法  
図 3.3 入射位置とスクリーン上輝点の位置との関係  
図 3.4 入射位置とスクリーン上輝点の無次元位置との関係  
図 3.5 スクリーン上輝点の位置と NaI 水溶液の濃度との関係  
図 3.6 屈折光のビームの鉛直方向への広がり  
図 4.1 実験装置概略図  
図 4.2 テスト部概略図  
図 4.3 干渉フリンジ  
図 4.5 計測系システム構成  
図 4.6 LDA 測定位置  
図 4.7 矩形管内流速分布  
図 5.1 計測系概略図  
図 5.2 PIV 測定位置  
図 5.3 測定部断面図  
図 5.4 各断面での PIV 画像の例  
図 5.5 球充填部全体画像およびベクトル分布  
図 5.6 球充填層局所内部画像およびベクトル分布

## 1. はじめに

高速炉の特性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<sup>[1]</sup>。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、その基礎的研究を行う。

本研究は、動力炉・核燃料開発事業団（以下「動燃」という）と筑波大学との共同研究として実施しており、本報告書は、平成9年度から平成11年度までの実施予定の首題研究のうち、平成9年度の成果に関するものである。本年度は、第2章で述べる試験装置の概念構築および設計・製作・据付に関する作業と、第3章以下で述べる多孔質体内の流れの可視化手法の確立を目的とする基礎実験を実施した。

多孔質状閉塞物内の熱流動現象を明らかにする上で、閉塞物内部の流況を知ることが重要であるが、これまでにそのような知見は得られていない。多孔質状閉塞物は矩形管に球を充填することで模擬し、閉塞物内部の流況を可視化するために、テスト部にはアクリル性の矩形管とパイレックスガラス球を使用した。作動流体としては、パイレックスガラス球と屈折率を一致させるため、NaI水溶液を用いた。この詳細については第3章に記す。

第4章では、球を充填する位置を決定するため、レーザドップラ流速計（LDA）を用いて矩形管内の流速分布を調べ、流れが安定する位置を求めた。そして、第5章では、球を矩形管に充填し接着剤で固定した後、粒子画像流速測定法（PIV）を用いて、球充填層内部の流況の可視化を行った。

NaIなどを用いて試験体との屈折率を調整した光学測定は今までにいくつか研究が行われている<sup>[2],[3],[4]</sup>。しかし、本研究のように大量の水溶液を用いて、ループを循環させる実験はあまり例がなかった。そこで、第6章において本実験で明らかになった課題を述べる。

## 2. 試験体の設計・製作・据付

### 2.1 試験体の概念構築

#### 2.1.1 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数（ $Re$ ）を一致させるという考え方に基づき設計した。ここでの  $Re$  は、実機炉心の炉心燃料集合体内の中心サブチャンネルにおける定格条件時の  $Re$  である。試験体通過流速は、試験体縮尺比によって一意的に決定される。試験体は閉塞サブチャンネルとそれに隣接する健全サブチャンネルを模擬し、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（短辺 61mm，長辺 122mm）とした。このとき、試験体入口での平均流速は 0.79m/s となり、この流速を装置の最大流速とする。図 2.1 に試験体概略図を、表 2.1 に縮尺比を決定する根拠となった実機との境界条件の比較を示す。また、閉塞物上端（下流側）から出口までの距離は、2.2 節に示す予備解析により、出口において循環渦による逆流が生じない距離を求め、閉塞物上端から 1100mm とした。チャンネルを仕切るために設けたスリットの幅  $W$  の基準値は、図 2.2 に示す実機(添字 S)と実験装置(添字 E)での水力等価直径  $De$  とスリット幅  $W$  の比を一致させた。よって、スリット基準開口率は 37.8% ( $23.06/61=0.378$ )とした。

#### 2.1.2 多孔質状閉塞物

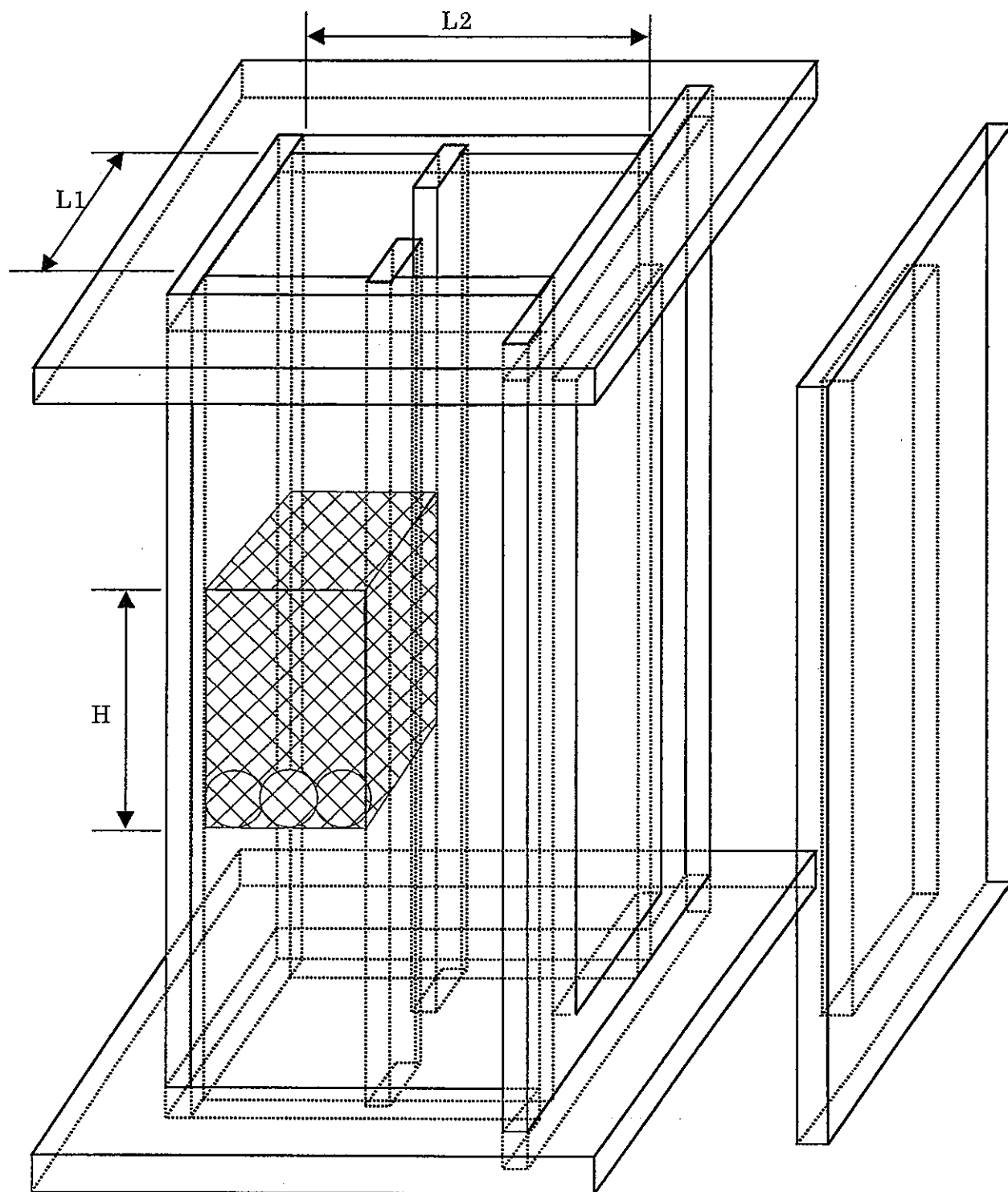
閉塞物構成粒子の形状は単純な球状粒子とした。多孔質状閉塞物は球状粒子を積み重ねて模擬し、充填形態は正方系充填とする。この場合、空隙率  $\epsilon$  は 47.64%（粗充填）および 25.95%（最密充填）である。図 2.3 に球粒子配列の模式図と空隙率を示す。粒子径として、10, 15, 20 mm を選択した。閉塞物の軸方向の高さは、実機ワイヤ巻きピッチの 1/6 の長さ 33mm (=200/6 mm) を参考とするが、20 倍の縮尺では高さが 667mm と非常に長いものとなる。そこで、試験装置のバランスを考え実用的な長さとして軸方向にはおよそ半分の 300mm とした。

閉塞物内部の流況を観測するため、第 3 章で示す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、光学計測法などによる計測の場合、粒子位置の特定や粒子の背面の流れの観測が困難となる。そこで、NaI（ヨウ化ナトリウム）を水に添加してガラス球との屈折率を合わせることを検討した。

#### 2.1.3 実験パラメータ

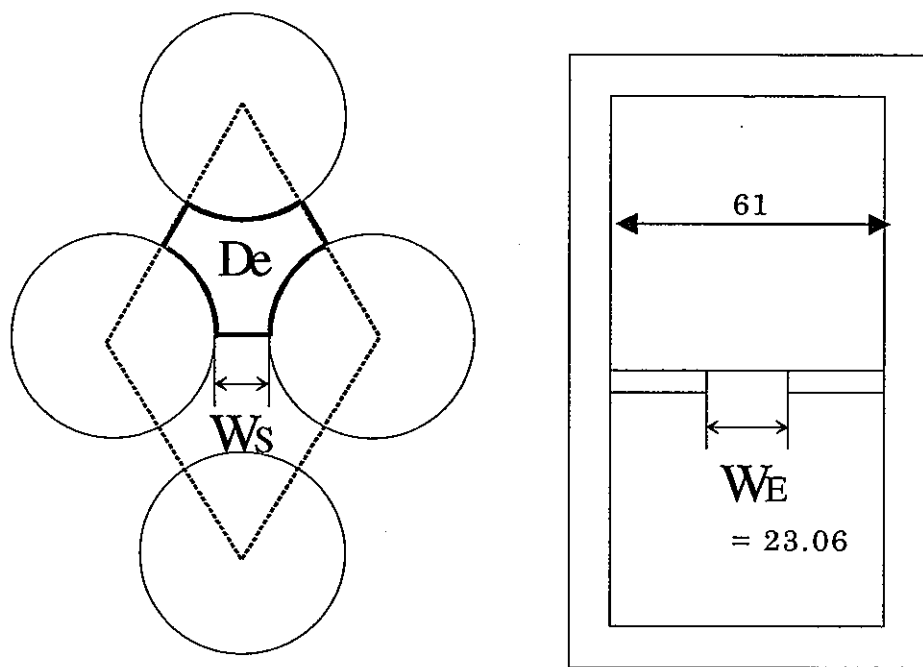
2.1.1 および 2.1.2 節の検討から抽出される試験パラメータを表 2.2 にまとめる。





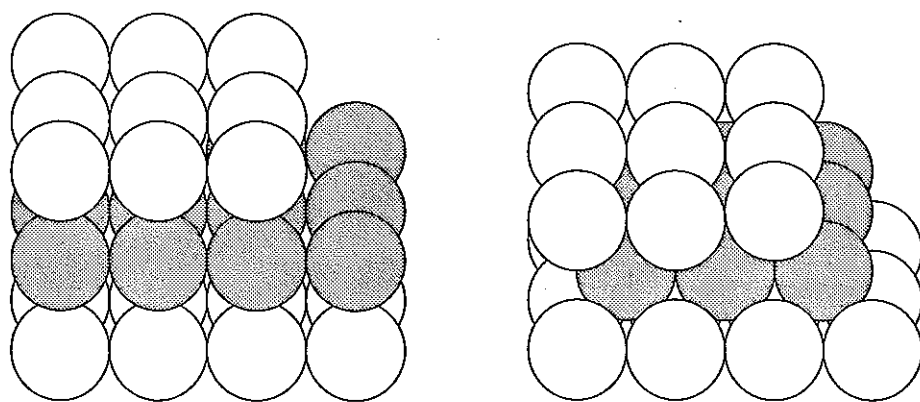
$L1 = 61 \text{ mm}$ ,  $L2 = 122 \text{ mm}$ ,  $H = 300 \text{ mm}$

图 2.1 試驗体概略图



(a) 実機サブチャンネル (b) 試験体断面 (2サブチャンネル)

図 2.2 ギャップ幅



(a) 正方系粗充填

(b) 正方系最密充填

図 2.3 充填形態

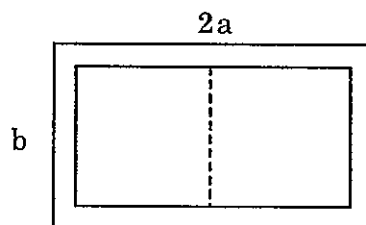
表 2.1 実機条件との比較 (中心集合体内中心サブチャンネル)

	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×20.1)
流入流量	0.0329[m <sup>3</sup> /s] =27.9[kg/s] / 849[kg/m <sup>3</sup> ]	5.88×10 <sup>-3</sup> [m <sup>3</sup> /s] =353[L/min]=21.2[m <sup>3</sup> /h]
集合体内 平均流速	5.92[m/s] =0.0329[m <sup>3</sup> /s] / 5.56×10 <sup>-3</sup> [m <sup>2</sup> ]	0.79[m/s] =0.0595[m <sup>3</sup> /s] / 7.442×10 <sup>-3</sup> [m <sup>2</sup> ]
動粘性係数	0.323×10 <sup>-6</sup> (Na)	0.857×10 <sup>-6</sup> (水)
レイノルズ数	5.57×10 <sup>4</sup>	5.62×10 <sup>4</sup>
開口率	0.378 = 1.15 / 3.039	0.378 = 23.06 / 61.0
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> ] (集合体内)	7.442×10 <sup>-3</sup> [m <sup>2</sup> ] (2サブチャンネル)

(参考)

中心サブチャンネル流路断面積：  $F = 1.147 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]}$   
 濡れ縁長さ：  $U = 1.510 \times 10^{-2} \text{ [m]}$   
 $M = F/U = 7.596 \times 10^{-4}$   
 $= d/4 = ab/[2(a+b)]$   
 中心サブチャンネル水力等価直径：  $d = 4 \cdot M = 3.039 \text{ [m]}$

倍率 矩形流路長辺 a, 短辺 b  
 ×20 a=b=60.78



試験体断面

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)
ヒータ発熱量	冷却材(水)が沸騰しない程度 (予備解析により発熱量を決定する)
ポロシティー	47.64% (粗充填) 25.95% (最密充填)
粒子形状	等大球形粒子
粒子径	10, 15, 20 mm
閉塞形状(上下端面)	平面配置, 球形配置, 斜面状配置
粒子材質(熱伝導率)	SUS304 (20.75), ガラス (1.38), シリコン (0.15~0.17), テフロン (0.24) 等
熱伝導率比 (SUS304) / (Na) = 20.75 / 70.8 = 0.293	$\lambda_p = (\text{水}=0.61) \times 0.293 = 0.179$
ギャップ幅 (開口率)	100%, 75.6%, 37.8% (基準), 18.9%, 0%
健全チャンネル流路断面積	100%, 75%, 50%, 25%, 0% (断面開口率)

## 2.2 ループ構成の検討

2.1項の検討により、試験体は縮尺比20倍の矩形チャンネル（短辺61mm、長辺122mm）とした。このとき、試験体入口での最大平均流速は0.79m/sとなる。この流量を確保できる実験装置のループ構成について、重力落下式とするか、ポンプによる強制循環にするかの検討を行う。検討を行う際の目標となる条件は、最大流量の353 L/min（試験体平均流速0.79m/s）の場合である。

### (1) 横置き重力落下ループ

ループの概略図を図2.4に示す。上流側タンクからエルボを通り方向を90度曲げられ、整流板を通して試験体に流入する。試験体流出後、流量調節弁（玉型弁）を通過しダンプタンクへ流れ込む。流量測定は試験体上流部に設置した電磁流量計を用いる。高低差はエルボ部と玉型弁での形状圧損で決まり、管壁面摩擦による損失はレイノルズ数が大きいため無視できる。閉塞物を設定した条件（閉塞物内部には流体が入らず流路断面積の変化として考慮）で、メイン配管径40mm、流量条件353 L/min（試験体平均流速0.79m/s）としたときの高低差は4.9mとなる。このときの玉型弁は表2.3に示すケース2の場合である。ただし、下流側エルボを取り外し、玉型弁にケース3を用いた場合、高低差は2.0mとなる。

### (2) 縦置きポンプ駆動ループ

ループの概略図を図2.5に示す。ダンプタンクからポンプにより圧送された流体はT字配管でバイパス配管およびメイン配管に分岐されて電磁流量計を通過後試験体に流入する。流量調節はバイパスライン側の流量調節弁（玉型弁）および主系統側の弁により行う。試験体から上流タンクへ流れ込みオーバーフロー配管を通過してダンプタンクへ流れ込む。ポンプをインバータ制御すればバイパスラインは不要となる。

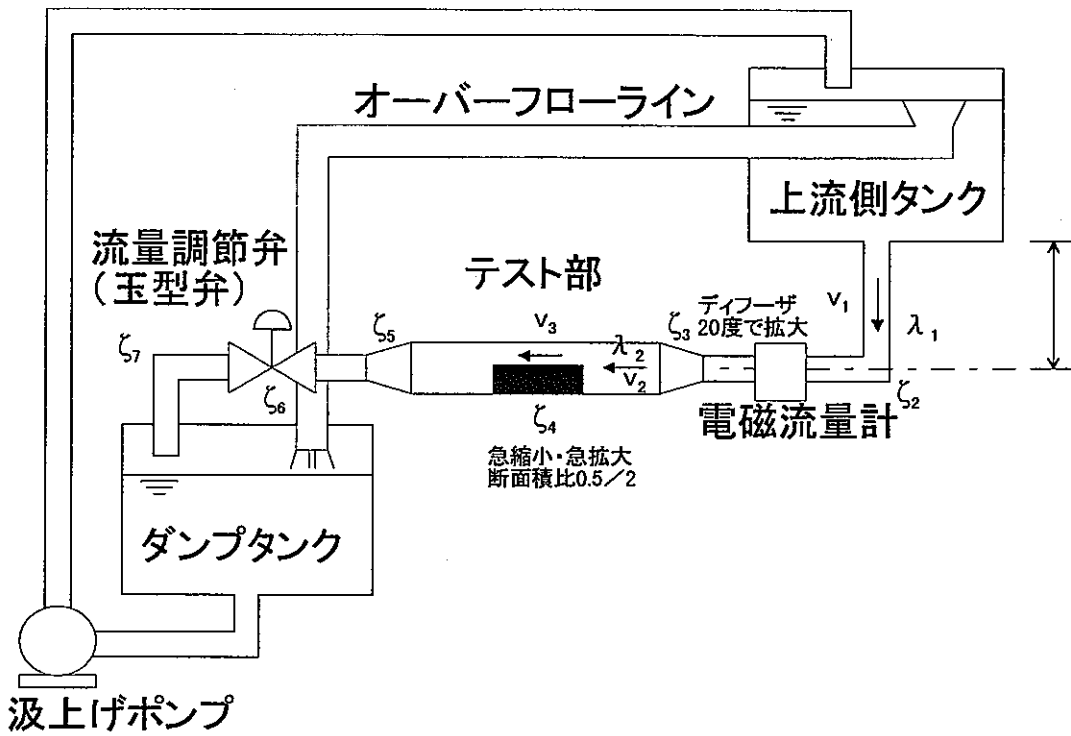
### (3) 比較検討

表2.4に各ループでの長所・短所をまとめる。設備費に関しては、使用するポンプのスペックの差で決まり、双方ともに大きな差は生じないと考える。架台に関しても、上流側タンクおよび上部タンクを同様な高さに固定するため大きな差は生じない。

配管径を40mmから50mmに変更する、エルボ部に圧力損失を抑えるために曲率を大きくする、流量調節弁にケース3を用いる等の改善を施すことにより重力落下式ループでも所定の流量条件に到達することが可能である。よって、選択基準は流量調節の制御性にある。重力落下式の場合、流れに脈動は生じず、外乱の影響は小さい。ポンプ駆動の場合には流量の脈動を考慮すべきである。ただし、インバータ制御を行うことによりこれは改善される。尚、電磁流量計は圧損を抑えるために内径40mmまたは50mmを使用する。

#### (4) 縦置き重力落下式ループ

(3)での比較検討の結果、重力落下式の方がポンプによる脈動が少なく外乱の影響は小さい。よって、以上の結果、次年度のヒータ加熱時の浮力の向きを考慮して、試験部は縦置きとし重力落下式ループとする。ただし、エルボおよび弁等の圧力損失が大きく所望の流量が出せない場合には、ポンプ駆動への変更を考慮する。また、汲み上げポンプに対してもこのような変更を考慮し、脈動の小さいものを使用する。実験装置はループ構成変更の容易な構造として、図 2.6 に示す縦置き重力落下式ループとする。



$$\begin{aligned}
 H &= \frac{1}{2g} \zeta_2 v_1^2 + \frac{1}{2g} \zeta_3 v_1^2 + \frac{1}{2g} \zeta_4 v_3^2 + \frac{1}{2g} \zeta_5 v_3^2 + \frac{1}{2g} \zeta_6 v_1^2 + \frac{1}{2g} \zeta_7 v_1^2 \\
 &\approx \frac{1}{2g} \{ (1.3 + 0.5 + 1.46 + 1.3) v_1^2 + 0.5 v_3^2 \} \\
 &= \frac{1}{2g} \{ 4.56 v_1^2 + 0.5 v_3^2 \} \\
 \lambda_1 &= \frac{0.3164}{Re_1} = \frac{0.3164}{230000} = 1.4 \times 10^{-6}, \quad \zeta_2 = 1.3, \quad \zeta_3 = 0.5, \quad \lambda_2 = \frac{0.3164}{59250} = 5.3 \times 10^{-6}, \\
 \zeta_5 &\approx 0.0, \quad \zeta_6 = 1.46, \quad \zeta_7 = 1.3, \quad D_1 = 0.04m, \quad D_2 = 0.06m \\
 v_1 &= 4.6m/s, \quad v_2 = 0.79m/s, \quad v_3 = 2 \cdot v_2, \quad L_1 = 3.0m, \quad L_2 = 2.0m,
 \end{aligned}$$

図 2.4 横置き重力落下式ループ概略図

表 2.3 玉型弁の形状損失係数

ケース	形状損失係数 $\zeta_6$
ケース 1 (内径 24.5mm UMZ)	10.66
ケース 2 (内径 32.0mm UMU)	1.46
ケース 3 (内径 38.0mm UMO)	~0.0

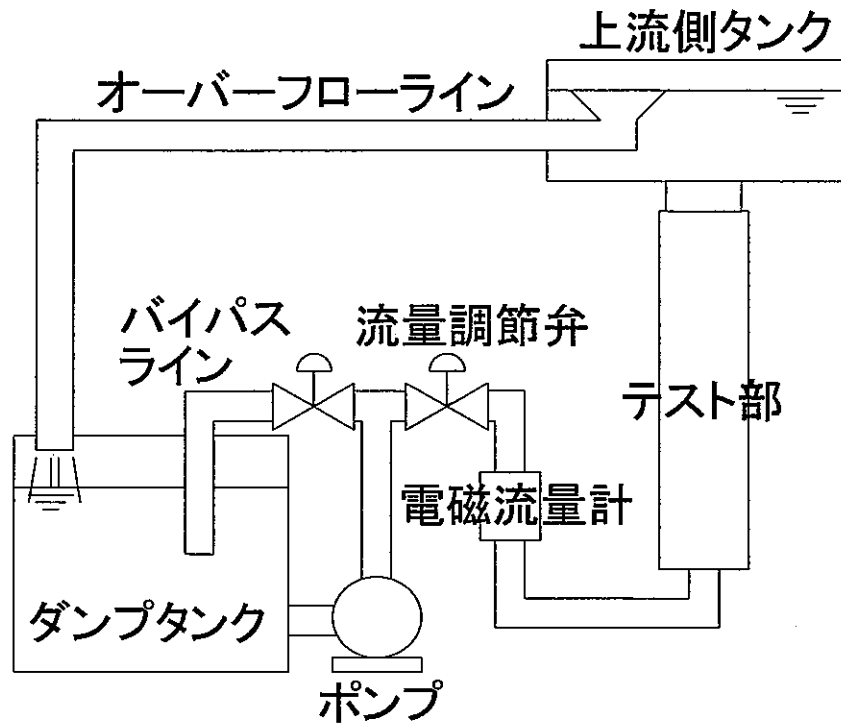
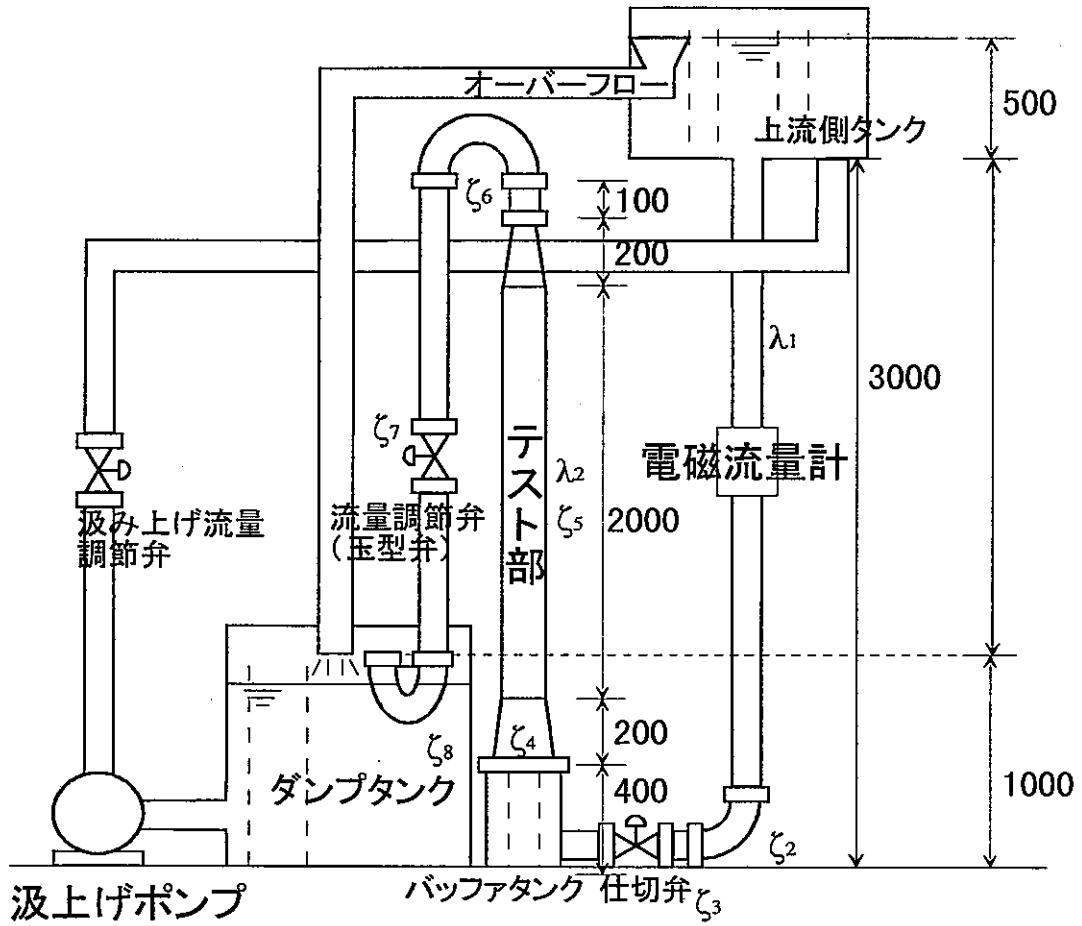


図 2.5 ポンプ駆動式ループ概略図

表 2.4 各ループ構成の比較

ループ構成	流量調節	脈動	設備費	その他 (改善点)
重力落下 (横置き)	難しい	なし	ポンプの スペック による	配管径 50mm に変更, エルボ部の曲率を大き く取る等
ポンプ駆動 (縦置き)	容易	あり		インバータ制御





$$\begin{aligned}
 H &= \frac{1}{2g} \zeta_2 v_1^2 + \frac{1}{2g} \zeta_6 v_1^2 + \frac{1}{2g} \zeta_7 v_1^2 + \frac{1}{2g} \zeta_8 v_1^2 + \frac{1}{2g} \zeta_4 v_2^2 + \frac{1}{2g} \zeta_5 v_3^2 \\
 &\approx \frac{1}{2g} \left\{ (0.105 + 0.21 + 1.46 + 0.21) v_1^2 + 0.13 v_2^2 + 0.5 v_3^2 \right\} \\
 &= \frac{1}{2g} \left\{ 1.985 v_1^2 + 0.13 v_2^2 + 0.5 v_3^2 \right\} = 2.1
 \end{aligned}$$

$$\lambda_1 = \frac{0.3164}{Re_1} = \frac{0.3164}{230000} = 1.4 \times 10^{-6}, \quad \lambda_2 = \frac{0.3164}{59250} = 5.3 \times 10^{-6},$$

$$\zeta_2 = 0.00705 \cdot \alpha \cdot \theta^{1.1} \cdot Re^\beta, \quad \theta = 90^\circ, \quad \beta = -0.235, \quad \alpha = 0.48r/d = 0.48 \cdot 200/40 = 1.92,$$

$$\zeta_2 = 0.105, \quad \zeta_3 = 0.0, \quad \zeta_4 = 0.13, \quad \zeta_5 = 0.25 + 0.25 = 0.5,$$

$$\zeta_6 = 2 \times \zeta_2 = 0.21, \quad \zeta_7 = 1.46, \quad \zeta_8 = 0.21 \quad D_1 = 0.04m, \quad D_2 = 0.06m,$$

$$v_1 = 4.6m/s, \quad v_2 = 0.79m/s, \quad v_3 = 2 \cdot v_2,$$

ただし、摩擦による損失は無視する。

図 2.6 実験装置ループ概略図

### 2.3 予備解析

予備解析により，閉塞物背後の循環流領域を予測し，試験部高さ決定のための情報を得る。

#### (1) 予備解析条件

- 入口流速 : 0.79m/s
- 空隙率 : 粗配列 (47.64%) および密配列 (25.95%)
- 流動様式模擬 : 層流 (乱流混合を無視)  
および乱流 (k-ε2 方程式モデル)
- 入口条件 : 一様流入
- 壁面条件 : 全面ノンスリップ (層流) , 壁関数 (乱流)
- 出口条件 : 自由流出
- 試験体向き : 鉛直方向 (重力考慮)

表 2.5 解析条件

解析ケース	入口流速	空隙率	流動様式
LFCOL_1L	0.79m/s	47.64%	層流
LFCOL_1T			乱流
LFCOL_2L		25.95%	層流
LFCOL_2T			乱流

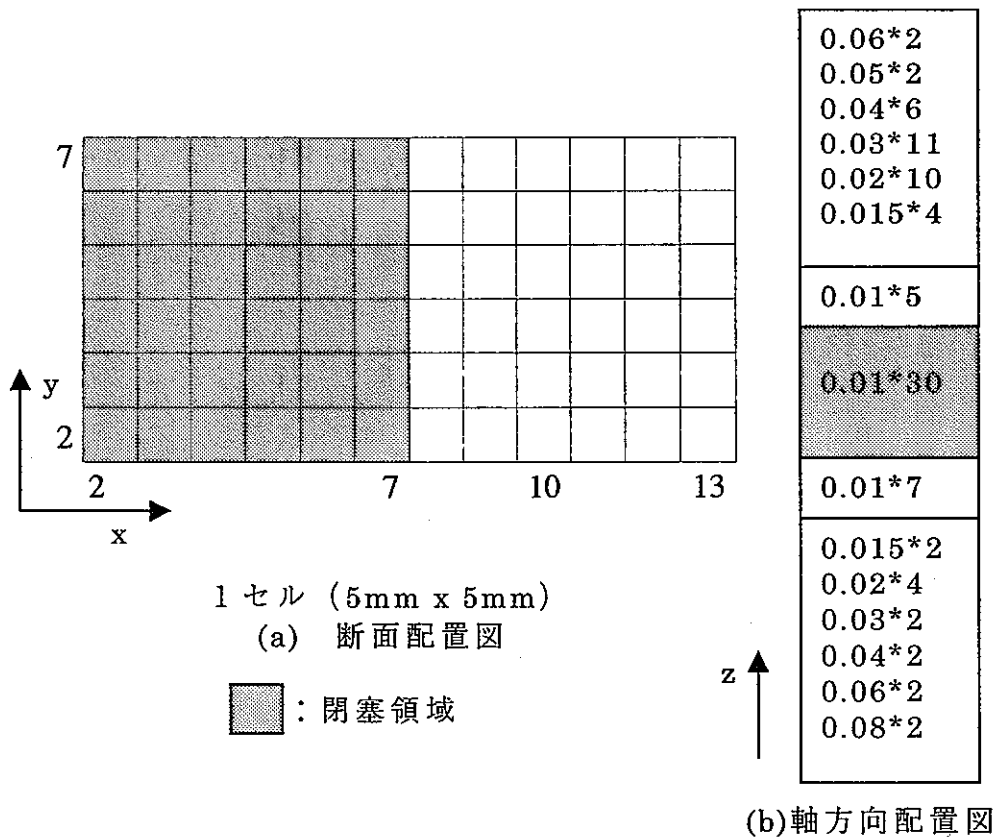


図 2.7 予備解析格子配置図

## (2) 予備解析結果

解析結果を図 2.8 に示す。軸方向断面は y 方向の中心 (J=5) である。解析結果から、試験体全長 (テスト部入口からの長さ) を 2.0m として計算を行った。閉塞物背後の循環流領域は、一般に閉塞物厚さの数倍であるとされているが、層流計算の結果、循環流領域は十数倍の長さに及んだ。層流計算では、閉塞物背後の循環流領域を過大に評価するため、乱流計算を行った。その結果、循環流領域は閉塞物厚さと同程度の高さとなり、閉塞物上端から 1100mm 上方の出口境界では一様な流れとなった。また、解析では試験体下流の出口ノズルの影響は考慮していないが、実際には、出口ノズルへの流入の際に偏流が生じ、上流側にも伝播すると考えられる。閉塞領域に影響のない距離と、閉塞物の高さを拡張する場合等も考慮し、閉塞物下流側には余裕をもって、閉塞物上端から 1.1m の距離をとる。

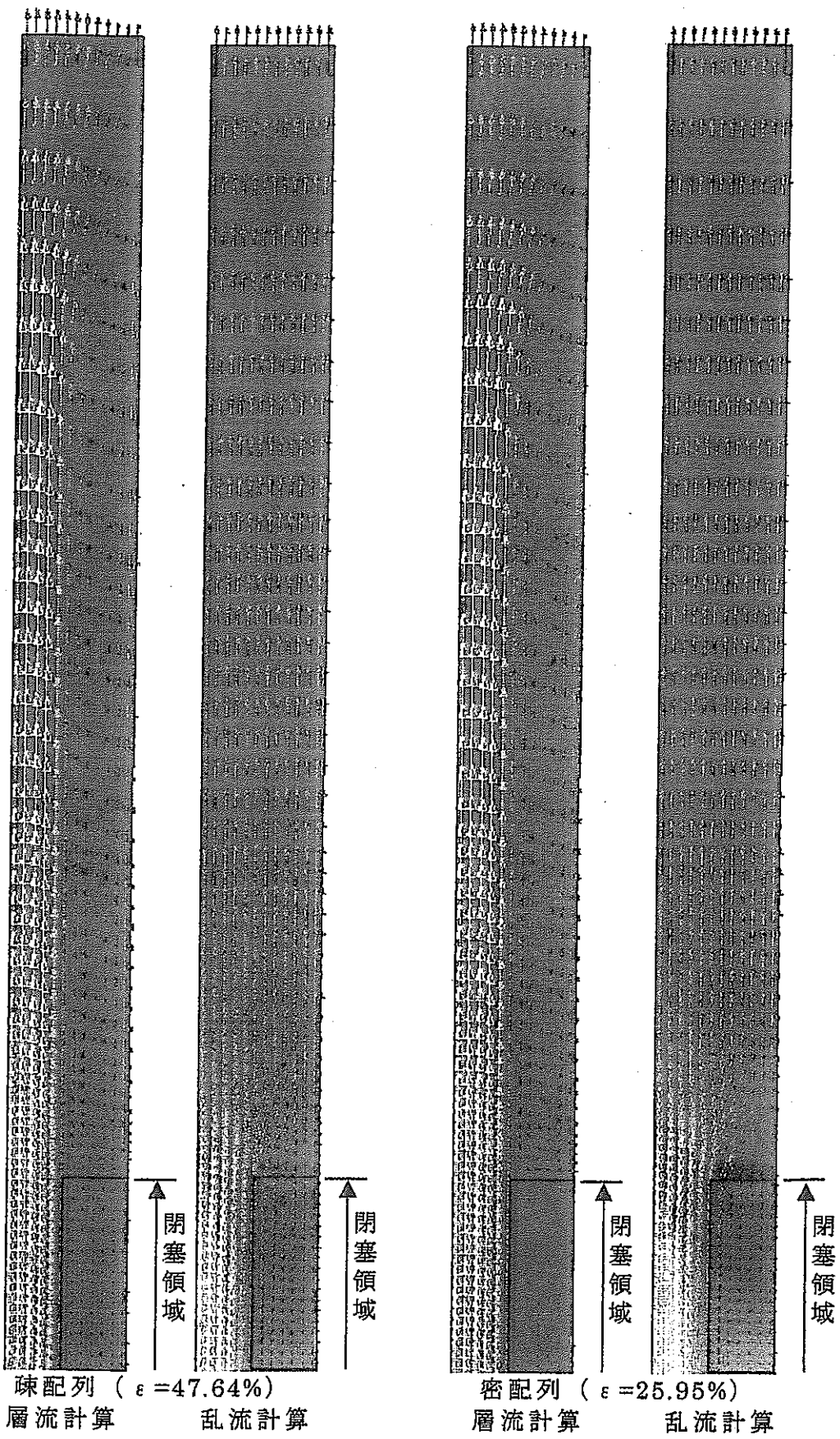


图 2.8 解析結果

## 2.4 実験装置

実験装置は高さ 3.5m、幅 1.5m、奥行き 1m の架台の中に設置されている。図 2.9 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。以下に、それぞれの構成部品について説明する。

### (1) ライン構成(①, ②, ③)

本試験装置は重力落下式ループであり、ダンプタンクからポンプを通過してヘッドタンクへの汲み上げライン、ヘッドタンクからダンプタンクへのオーバーフローライン、ヘッドタンクからテスト部を通過してダンプタンクへのテストラインの 3 系統を有する。これらは、ヘッドタンク下部で分離されている。汲み上げライン、テストラインは呼び径 40mm の塩ビパイプであり、オーバーフローラインは配管の摩擦損失を低減するため呼び径 50mm の塩ビパイプを使用した。

### (2) ヘッドタンク(④)

ヘッドタンクは、幅 494mm、奥行き 194mm、高さ 497mm で、内容量 48L の矩形タンクである。タンク内には、汲み上げラインからのポンプで圧送されてくる作動流体の軸方向流速を抑止し、ヘッドタンク液面の揺動を防止するための多孔板 2 枚と、液位を一定に保つための隔壁（タンク底部から 30mm の高さ）が設置されている。実験時には、常時 20L の液が貯留され、隔壁を越流した流体はオーバーフローラインによりダンプタンクへ戻る。

### (3) 流量計(⑤)

ループ構成が重力落下式であり、配管部の圧力損失を抑えるという観点から、電磁流量計を選択した。また、実験パラメータの流量条件を広く抑えられる口径として直径 40mm のものを選択した。

### (4) 整流部(⑥)

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

### (5) 入口ノズル(⑦)

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

### (6) 試験体(⑧)

試験体は、幅 122mm、奥行き 61mm、高さ 2000mm の矩形流路 (内容量 15L) である。

試験体は可視化を行うため透明アクリルで製作した。図 2.10 に試験体組立図を示す。試験体は軸方向に 2m と長いので 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。断面の位置合わせが容易となるようにフランジには位置合わせのためのピンを取り付けた。また、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、フタ構造とした。

### (7) 出口ノズル(⑨)

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

### (8) ダンプタンク(⑩)

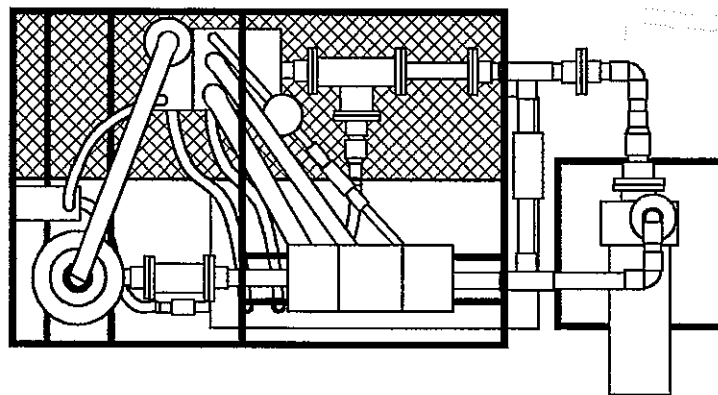
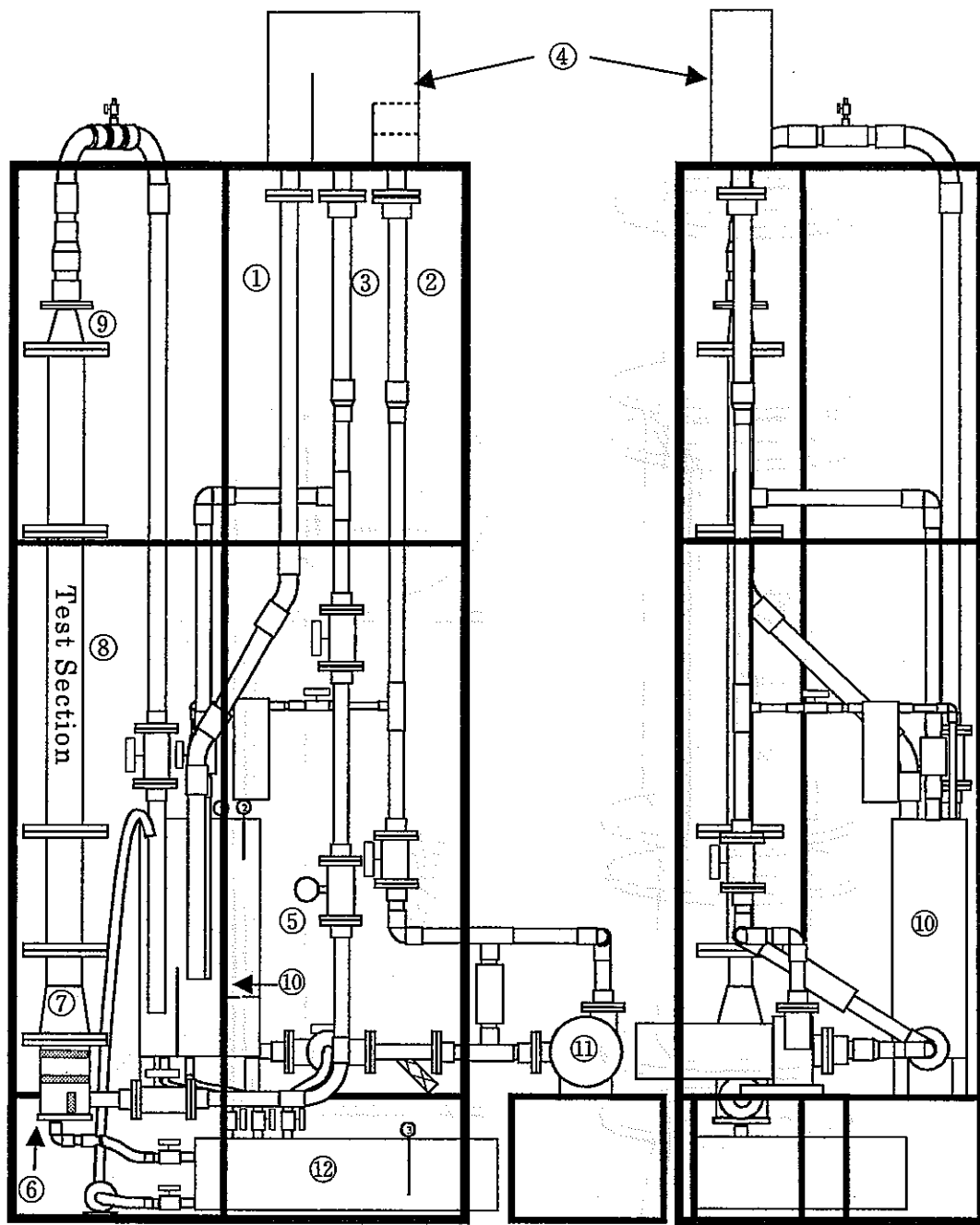
このタンクは、幅 394mm、奥行き 244mm、高さ 797mm の内容量 77L である。実験時には、高さ 300mm まで流体が入っている。また、実験時以外はヘッドタンク内に流体を貯留しないため、ヘッドタンク内の流体はすべてダンプタンク内に貯留する。

### (9) 汲み上げポンプ(⑪)

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

### (10) ストレージタンク(⑫)

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



- 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 2.9 試験装置全体図

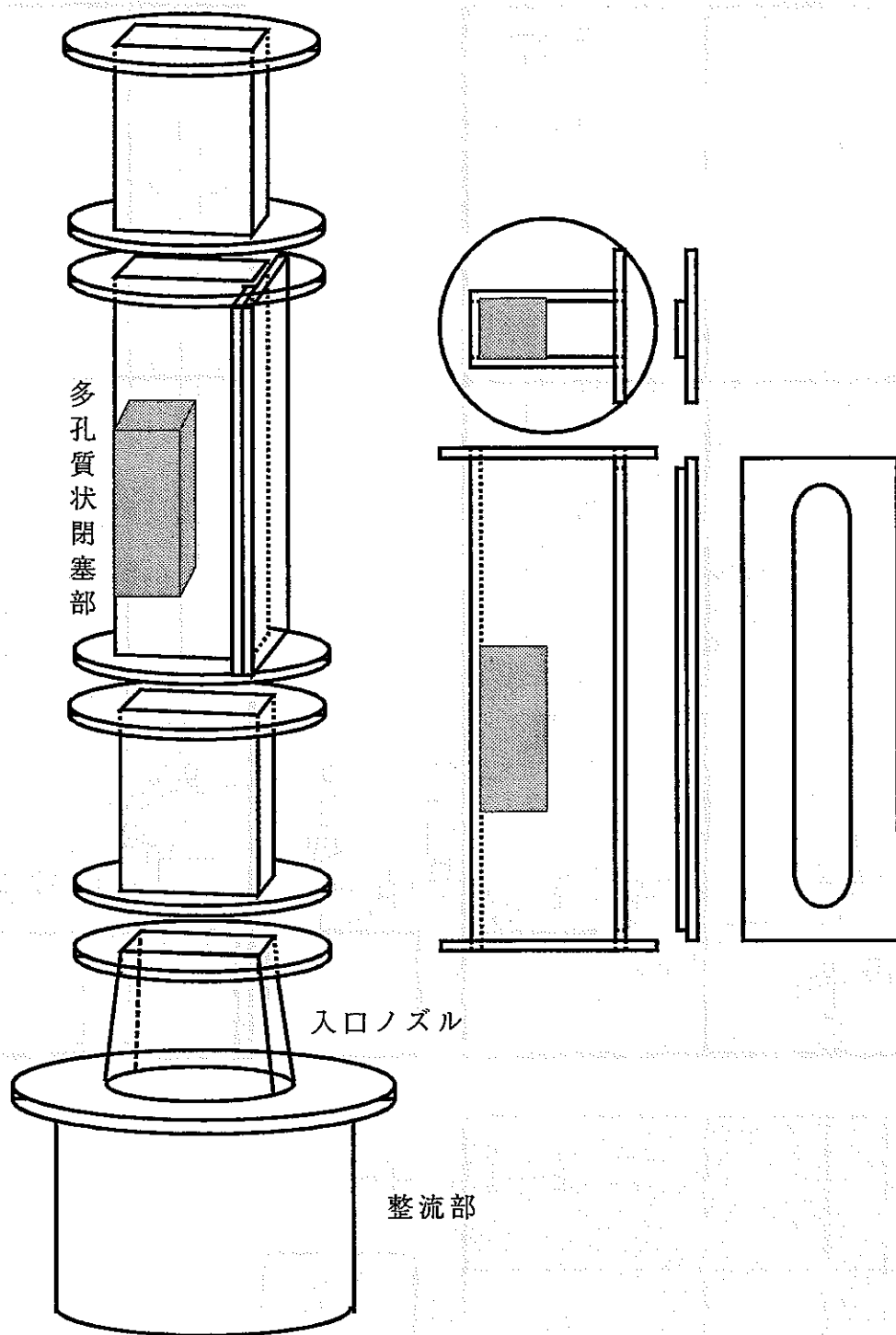


図 2.10 試験体組立図



### 3. 屈折率調整実験

#### 3.1 目的

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を行うにあたり、流体として水を用いた場合、ガラス球と水で屈折率が異なるため、可視化に必要なスリット光やガラス球の背面にあたる画像は屈折のため歪んでしまう。このような歪んだ画像では、PIV等の光学計測による画像解析が困難となる。そこで、ヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液を用いて流体側の屈折率をパイレックスガラスの屈折率に一致させる。屈折率を一致させればガラス球は見かけ上、画像から消去することができガラス球を通して得られる画像は歪まず、画像解析によって流動場を明らかにすることができる。NaI 水溶液は、飽和濃度付近で、比較的高い屈折率 ( $n=1.496$ ) を達成できる。屈折率調整の観点から、それ以下の屈折率を持つ材質の球を用いる必要がある。 $n=1.496$  以下の材質としては、石英ガラス (1.458)、パイレックスガラス (1.474)、シリコンゴム (1.41) などがあるが、球形成形可能で、かつ透明で、比較的手取りが容易なものとして、パイレックスガラスを用いることにした。

屈折率は入射光の波長によって変化するため、使用する光源に応じて必要とされる NaI 水溶液の濃度も変化する。よって、本試験で使用する YaG レーザおよびパイレックスガラス球を用いて屈折率調整実験を行った。

#### 3.2 実験装置

実験装置の概略を図 3.1 に示す。縦横 10cm 四方、深さ 12cm 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、ヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液中に浸す。球の中心を通る水平方向に 1mm 間隔でレーザー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。ガラス球中心からスクリーンまでの距離  $L$  は  $L=717.3\text{mm}$  である。

YaG レーザビームは、波長  $\lambda=532\text{nm}$ 、ビーム径  $d_0=2.5\text{mm}$  である。実験ではレーザーを固定しレーザー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、本実験で使用するものと同じのものであり、粒子径 20mm、公差  $\pm 0.3\text{mm}$  である。

#### 3.3 実験方法

実験手順の概略を図 3.2 に示す。水溶液を入れる前にレーザー光をアクリル容器の面に対して垂直に入射させる必要がある。そこで、アクリル容器の側面のうちレーザービームに平行な面を基準にとり、ビームに垂直な 2 面上に、底面と平行に基準面から 20mm の位置 A, A', 80mm の位置 B, B' に各面 2 カ所の合計 4 カ所にマークを付ける。ステージを平行移動してレーザービームが同一位置のマークを同時に通過する、つまり、A-A' と B-B' が平行となるようにレーザービームの入射角を調整する。このようにしてレーザービームがアクリル面に対して垂直に入射するように調整した。

次にガラス球の中心位置を決定する。ステージを上下させて、おおよそ中心を通る位置にステージの高さを合わせる。次にステージを水平移動させて

ビームが球に接する位置 C, C' の座標を記録して水平方向の中心を割り出した。垂直方向は底面からビーム中心までの高さがガラス球を通過する前後で同じとなる位置を中心位置とした。最終的には、ステージを水平移動させガラス球中心に入射させた時のスクリーン上の輝点と、ガラス球を通過させない位置でのスクリーン上の輝点が一致していることを確認した。

ガラス球中心にレーザービームを入射し、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、1mm 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 1mm ずつずらし、半径分 10mm ずらした時点で折り返し中心に向かって再度測定する。中心を通過しさらに半径分ずらし折り返して中心に戻る。つまり直径方向に 2 点ずつ計測することになる。

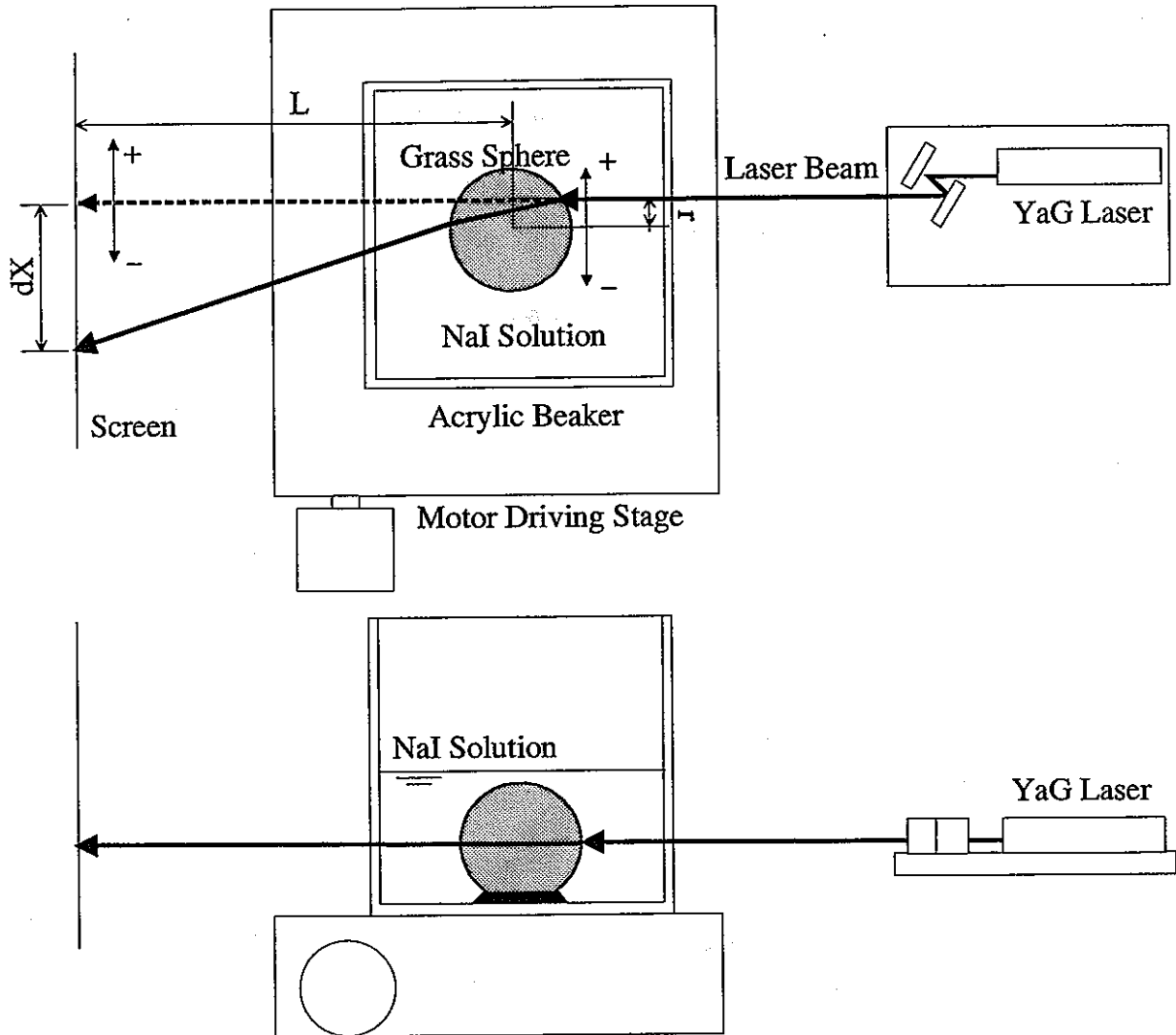
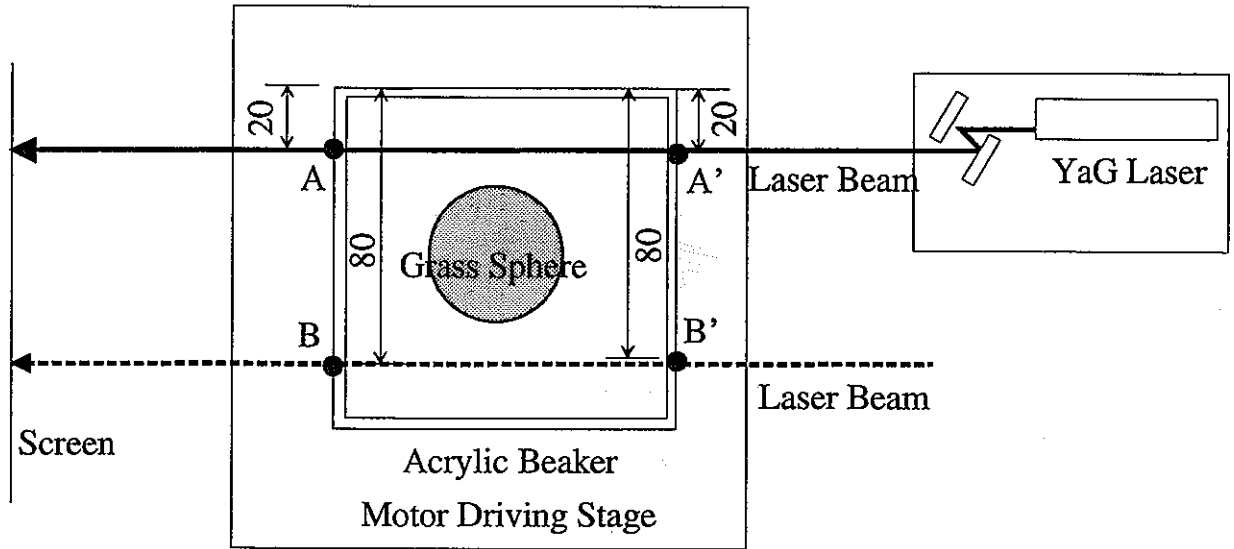
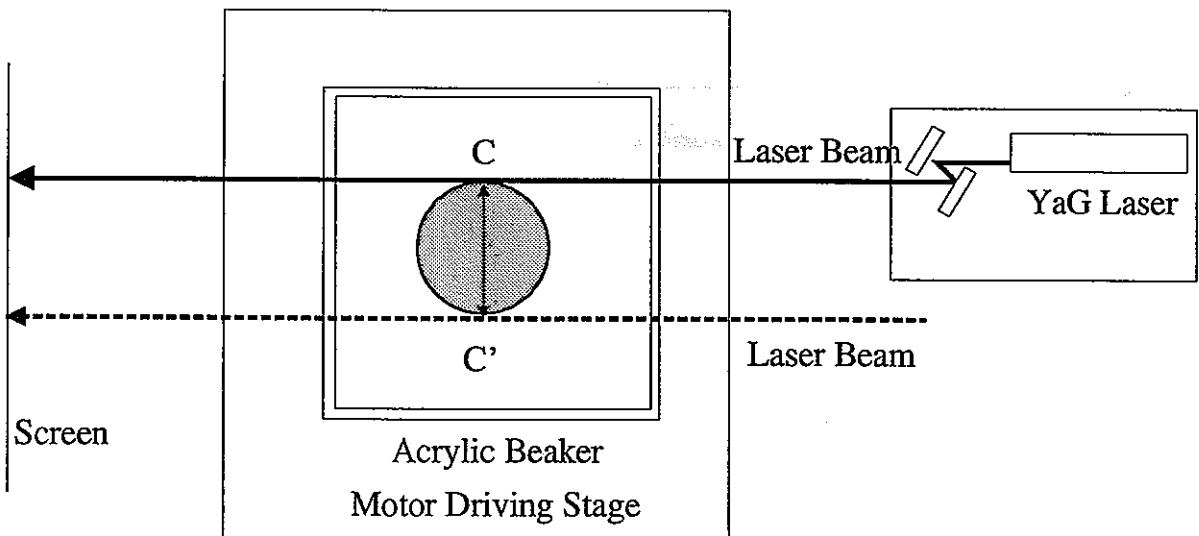


图 3.1 实验装置概略图



(入射角度の調整)



(球中心位置の調整)

図 3.2 計測方法

### 3.4 実験結果

図 3.3 にスクリーン上における，屈折光の輝点と原点との距離  $dX$  を各半径位置に対して示す。また，図 3.4 に  $dX$  をガラス球中心からスクリーンまでの距離  $L$  で無次元化して示す。スクリーン上の輝点は，はっきりとした点として現れるのではなく，中心が明るく周囲に広がりを持って現れる。そこで，ビームの広がりから中心部を決定し，最も輝度の高い点を中心位置とした。

NaI を混入しない水の場合，中心から半径方向  $r=5\text{mm}$  の位置に入射したところ，スクリーン上では  $100\text{mm}$  のずれが生じ，画像解析が出来ない状況である。NaI を徐々に混入していくと，スクリーン上の輝点のずれは減少していく。濃度  $57.1\text{ wt\%}$  の場合，球中心 ( $\pm 2/R$ ) の範囲では最大  $1.6\text{mm}$  の誤差，曲率の大きい球側面付近では  $3\text{mm}$  程度の誤差であった。このとき球中心から  $1\text{m}$  離れて撮影すると， $4\text{mm}$  程度の誤差となる。実際には，焦点距離  $10\sim 20\text{cm}$  程度の近接撮影であることを考慮すれば，誤差が最大となる球側面付近の画像上での誤差は  $1\text{mm}$  以下となり，粒子径  $20\text{mm}$  の場合，誤差は粒子径の  $5\%$  以下となる。屈折率が一致する濃度 ( $56.4\text{wt\%}$ ) に調整すれば，当然この誤差はさらに小さくなる。

図 3.5 に各半径位置における NaI 水溶液の濃度とスクリーン上の輝点の位置との関係を示す。実験点を 2 次式で近似すると近似式の切片が，屈折率が一致する場合の NaI 濃度となる。実験結果から，YAG レーザを光源とした場合  $56.4\pm 0.7\text{wt\%}$  であることが分かる。ここで， $\pm 0.7$  は近似曲線に対する実測値のばらつきである。ちなみに，He-Ne レーザを光源として行った実験では，NaI 濃度が  $58.5\text{wt\%}$  であった。

スクリーン上には屈折光は水平方向に長い広がりを持った楕円となって映し出される。図 3.6 にこの楕円について鉛直方向の短径の長さを示す。ただし，長さは定規を用いて目視により計測を行い，輝度のしきい値等を定めていないためばらつきを持った値であることを注意する必要がある。屈折率が一致するに従い広がり，つまり，レーザービームの拡散が小さくなる傾向がある。濃度  $55.0\text{wt\%}$  の場合，ほぼ入射ビーム径と同程度の広がりとなった。

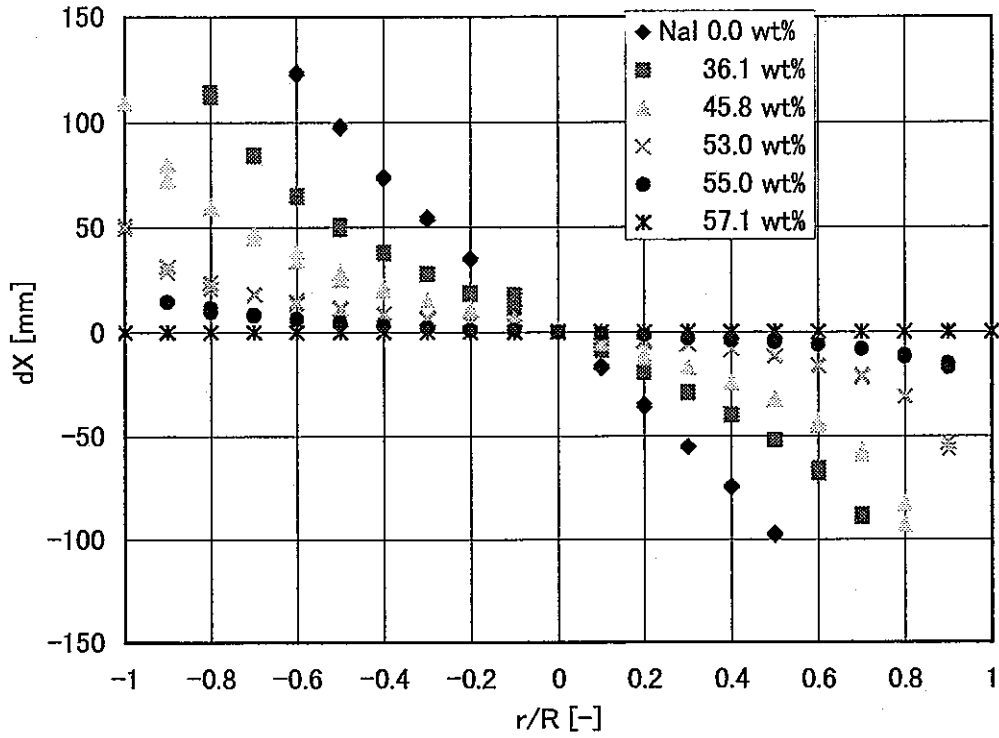


図 3.3 入射位置とスクリーン上輝点の位置との関係

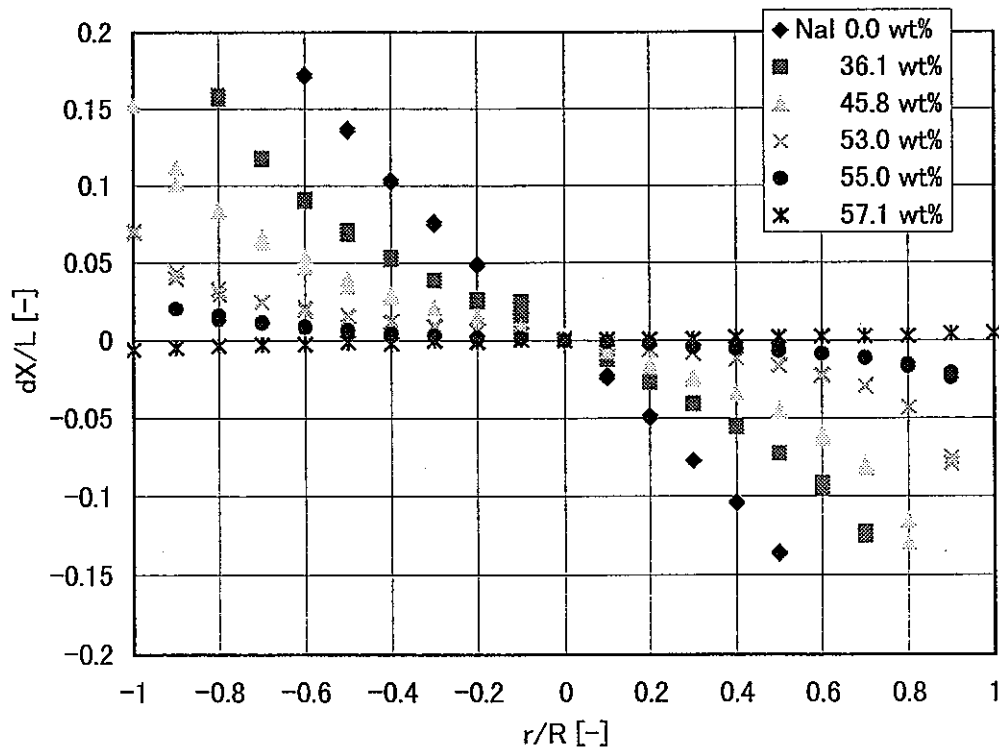
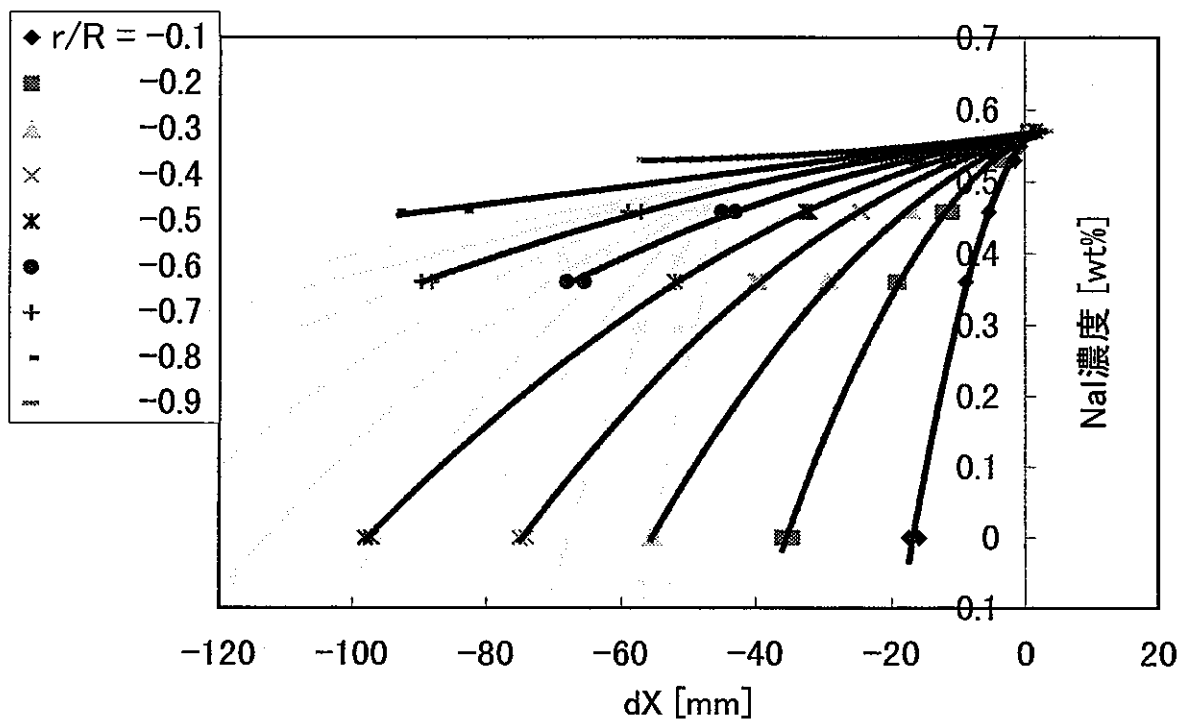


図 3.4 入射位置とスクリーン上輝点の無次元位置との関係



$$y = -0.00128 x^2 + 0.01162 x + 0.55997$$

$$y = -0.00032 x^2 + 0.00447 x + 0.55880$$

$$y = -0.00012 x^2 + 0.00362 x + 0.56102$$

$$y = -0.00007 x^2 + 0.00239 x + 0.55996$$

$$y = -0.00004 x^2 + 0.00181 x + 0.56036$$

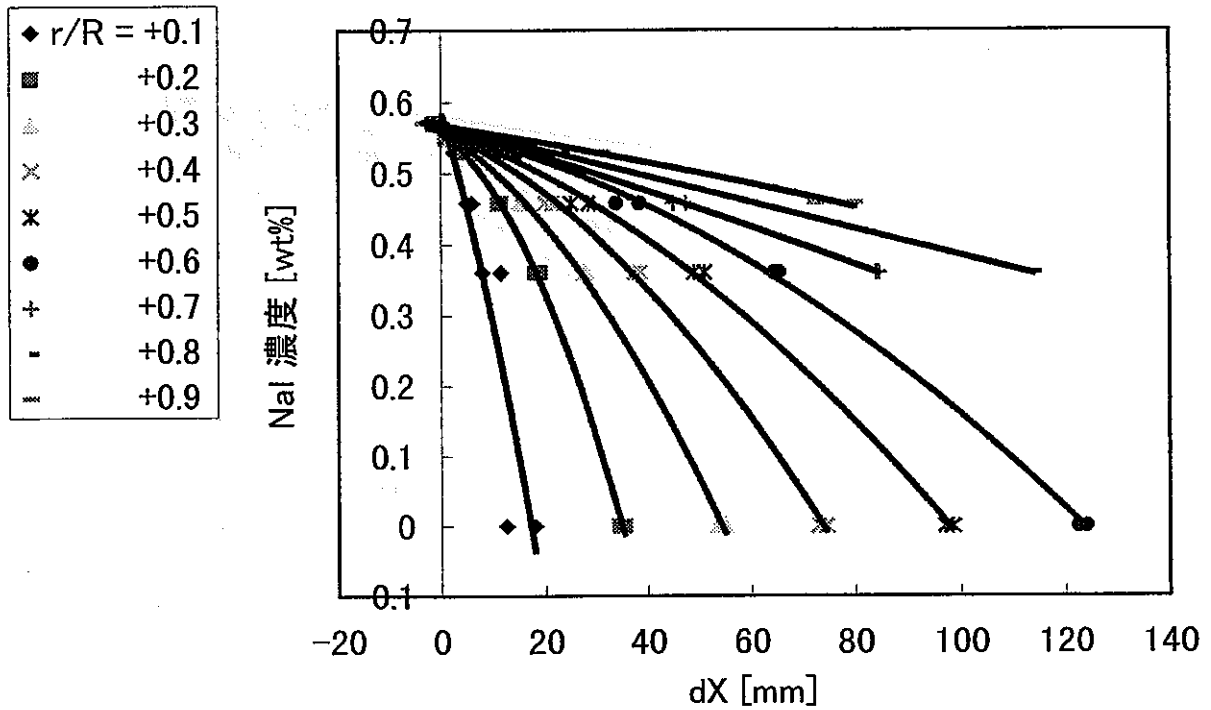
$$y = -0.00002 x^2 + 0.00141 x + 0.56211$$

$$y = -0.00001 x^2 + 0.00111 x + 0.56223$$

$$y = 0.00000 x^2 + 0.00130 x + 0.56709$$

$$y = 0.00001 x^2 + 0.00120 x + 0.56677$$

図 3.5-1 スクリーン上輝点の位置と NaI 水溶液の濃度との関係



$$y = -0.00057 x^2 - 0.02443 x + 0.58922$$

$$y = -0.00030 x^2 - 0.00532 x + 0.55936$$

$$y = -0.00010 x^2 - 0.00468 x + 0.56215$$

$$y = -0.00006 x^2 - 0.00325 x + 0.56110$$

$$y = -0.00003 x^2 - 0.00259 x + 0.56204$$

$$y = -0.00002 x^2 - 0.00173 x + 0.56080$$

$$y = -0.00000 x^2 - 0.00219 x + 0.56830$$

$$y = -0.00000 x^2 - 0.00179 x + 0.56838$$

$$y = -0.00000 x^2 - 0.00118 x + 0.56759$$

図 3.5-2 スクリーン上輝点の位置と NaI 水溶液の濃度との関係



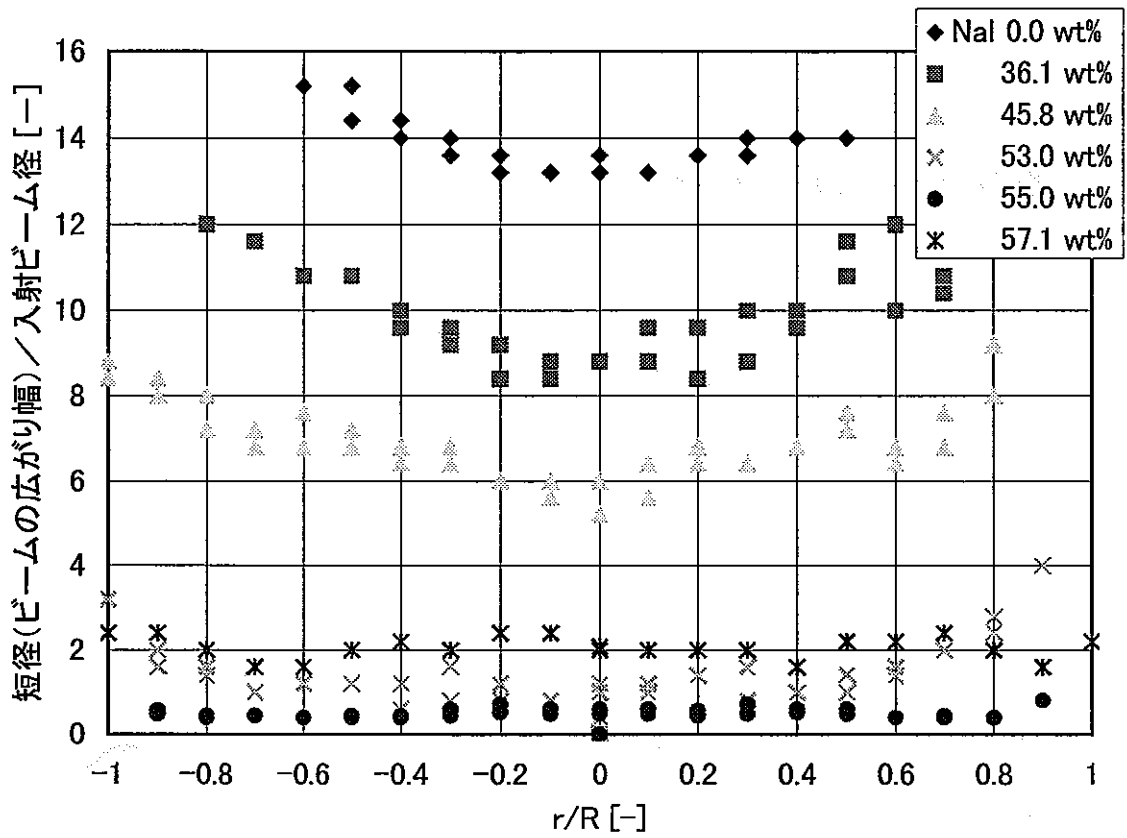


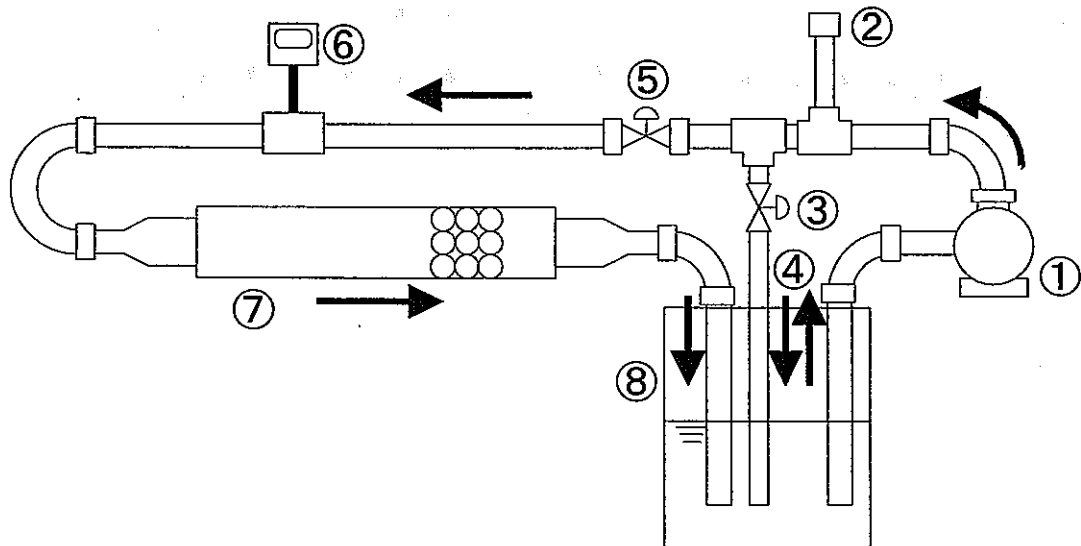
図 3.6 屈折光のビームの鉛直方向への広がり

#### 4. 簡易ループによる予備実験

第3章により、 $56.4 \pm 0.7 \text{wt}\%$ 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、その内部の流動場の可視化手法の確立を目的とした基礎実験を行う。具体的には、流速分布測定試験および流況可視化試験を行い、NaI水溶液を用いた本可視化手法の有用性について調べた。

##### 4.1 簡易ループの設計・製作

実験装置の概略を図4.1に示す。テスト部はアクリル製で、入口から300mmの位置に、直径約20mmのパイレックスガラス球を27個正方系粗充填させた球充填層流路となっている。ループは、ポンプ駆動とし、バイパスラインと、流量調節バルブを2個用いたことによりテスト部への流入流量を調整しやすくさせた。球どうしの固定方法は、エポキシ系2液式接着剤を用いて点接着した。

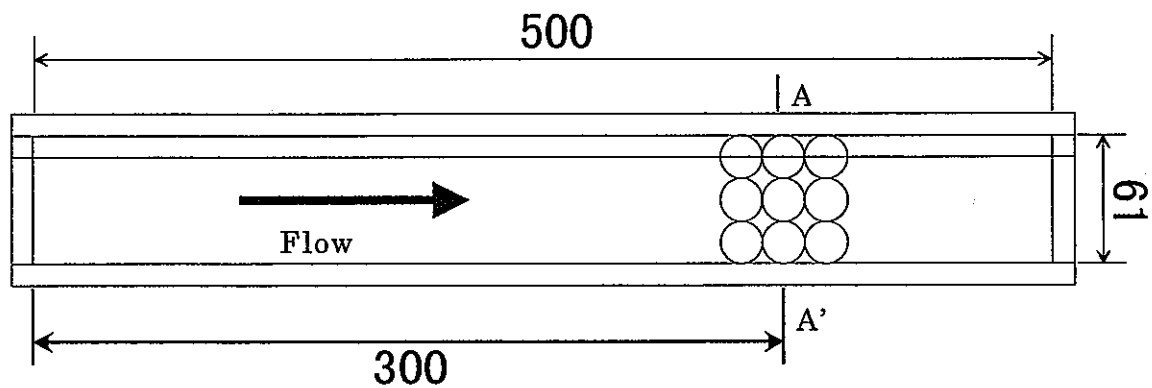


- ①ポンプ
- ②水溶液注入部
- ③流量調節バルブ
- ④バイパスライン
- ⑤流量調節バルブ
- ⑥タービン流量計
- ⑦テスト部
- ⑧タンク

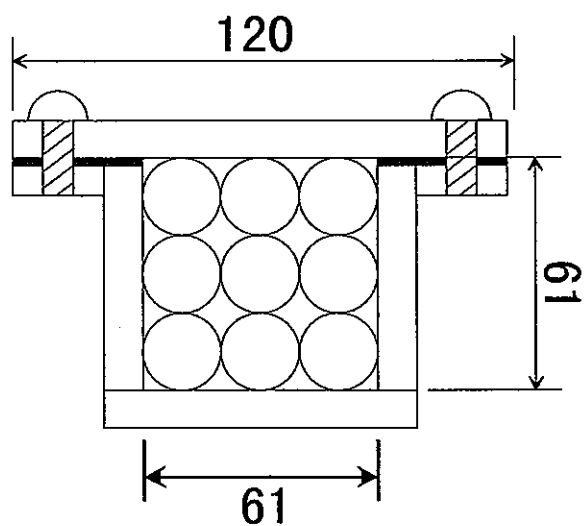
ポンプ：NIKKISO SEVEN POMP 100v\_272w(60Hz)

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

図 4.1 実験装置概略図



(水平方向断面図)



(A-A' 断面図)

図 4.2 テスト部概略図

## 4.2 流速分布測定試験

### 4.2.1 目的

パイレックスガラス球は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。そこで、テスト部での流速分布を把握し、球の充填位置を決めるために、レーザードップラー流速計を用いて測定をおこなった。作動流体としては、水を用いて測定を行った。

### 4.2.2 測定原理

レーザードップラ流速計 (Laser Doppler Anemometer; LDA) は、レーザ光の干渉性、単一性に優れているという特徴を生かし液体中に含まれている微粒子からの散乱光を利用して、流体速度を測定する装置である。その主な特徴として次の事があげられる。

- 液体中にセンサを挿入しないで測定できるため、測定対象を乱さない。
- レーザビームをレンズで収束させるため、測定点が非常に小さくなる。
- 既知の干渉フリンジを通過した時間から求められる。
- 指定した時刻における流速は求められない。

以下に実際に使用した計測系の説明を記す。

(光学系)

表 4.1 LDA 計測システム

使用レーザ	He-Ne レーザ
波長 [nm]	632.8
レンズ	55X51
焦点距離[mm]	310
ウエスト長さ[mm]	0.90
フリンジ間隔[mm]	3.28

(LDA カウンタープロセッサ)

DANTEC 社製 55L90a

Low-pass filter : 256[kHz]~100[MHz]

High-pass filter : 2[kHz]~64[MHz]

Fixed reset time : 1[ms]

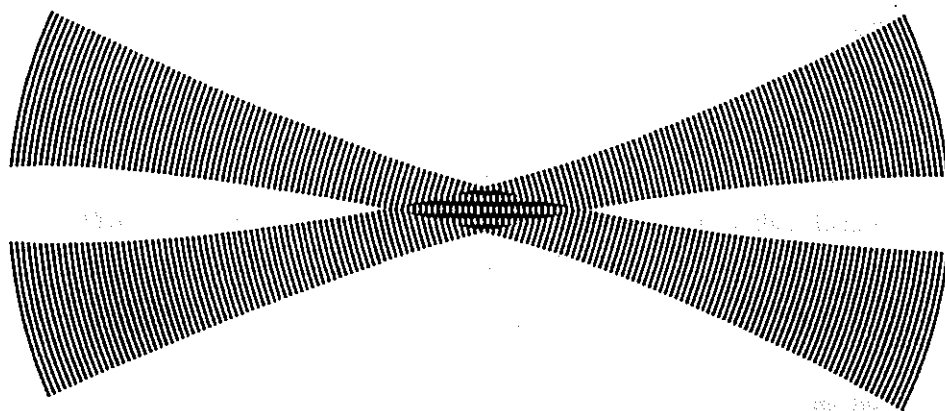


図 4.3 干渉フリンジ

原理としては、光源より発振された 1 本のレーザービームをビームスプリッタにより 2 本の平行なビームに分け、レンズで 1 点に収束させると、図 4.3 に示すようにビームの交差部に干渉フリンジが生じる。このフリンジの間隔  $\Delta f$  は、次式で与えられる。

$$\Delta f = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)}$$

ここで、 $\lambda$  はレーザーの波長、 $\theta$  はレーザーの交差角である。そして、流体中の微小な散乱粒子がフリンジを通過するときに出る散乱光の周波数  $f_D$  (ドップラ周波数) をカウントすることによりフリンジに直交する方向の散乱粒子の速度  $U$  を、次式より求めることができる。

$$U = f_D \cdot \Delta f \quad (1)$$

ただし、散乱粒子と流体速度は同一と仮定する。

### 4. 2. 3 システム構成

図 4.5 に計測系システム構成図を示し、以下にそれぞれの説明を記す。

#### (1) 光学系

He-Ne レーザにより発振された 1 本のビームは、ビームスプリッタによって 2 本の強度の等しい光線に分けられる。この 2 本の光線は、焦点距離 310[mm] のフロントレンズにより 1 点で交差し、測定体積を形成する。この測定体積内を液相中に含まれる微小粒子が通ったときに生じる散乱光は、前方にある受光系に入り、干渉フィルタにより不要な光が取り除かれた後、フォトマルチプライヤによって電気信号に変換され、カウンタープロセッサに送られる。

#### (2) 信号処理器(カウンタープロセッサ)

フォトマルチプライヤで検出された信号はプリアンプで増幅された後バンドパスフィルターで高・低周波数部分が除去される。その後 200[mV] のシュミットトリガレベルによっ

てドップラ周波数と同じ周波数で矩形波となり、ロジカル 0 と 1 のデジタル信号に変換される。ロジックパルスがくると、ハイカウンターレジスターが同時にスタートし、500[MHz]のクロックパルスでそれぞれの時間が測定される。また粒子が測定体積内を通過している時間も測定される。ここでは、ハイカウントは、8 フリンジ分の通過時間、ローカウントは 5 フリンジ分の通過時間である。これらの時間は、コンパレータにより比較され、(ハイカウント) $\times 5/8$  とローカウントの差がある範囲内であれば有効データとして取り扱う。本研究ではコンパレータの精度を 1.5[%]とした。

### (3) データ処理

カウンタープロセッサから出力される信号をもとに式 (1) の関係から個々の粒子の速度を計測した。

さらに異常値を排除するために、以下に示す修正トンプソン- $\tau$ 法を使用した<sup>[7]</sup>。それはまず平均値 $\bar{u}$ と精密度 S を計算する式 (2) ,(3)

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k \quad (2)$$

$$S = \left[ \frac{\sum_{k=1}^N (u_k - \bar{u})^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (3)$$

そして、j 番目のデータが疑わしいとすると、 $u_j$  と平均値の差は、次式になる。

$$\delta = |u_j - \bar{u}| \quad (4)$$

この値と、試料数に依存する 95%の信頼度の  $\tau$  (=2.0) 値に S を掛けたものを比較して異常値を判断する。判断基準は以下の通りである。

- $\delta \geq \tau S$  のとき  $u_j$  は異常値である。
- $\delta < \tau S$  のとき  $u_j$  は異常値ではない。

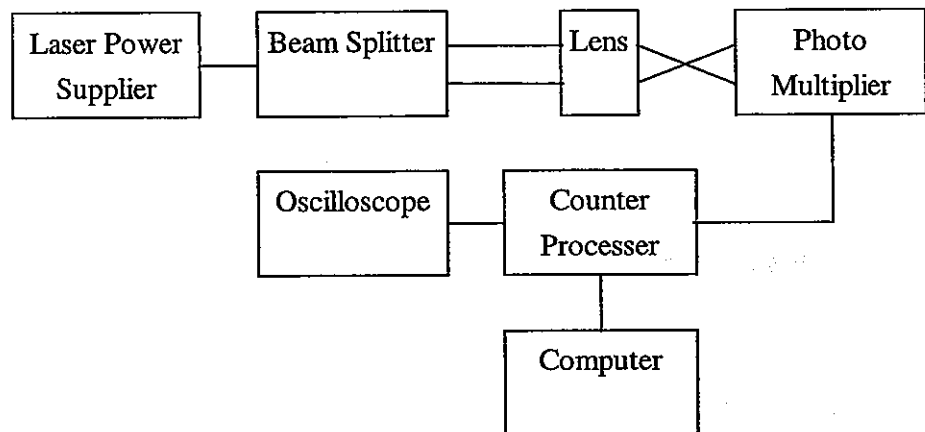
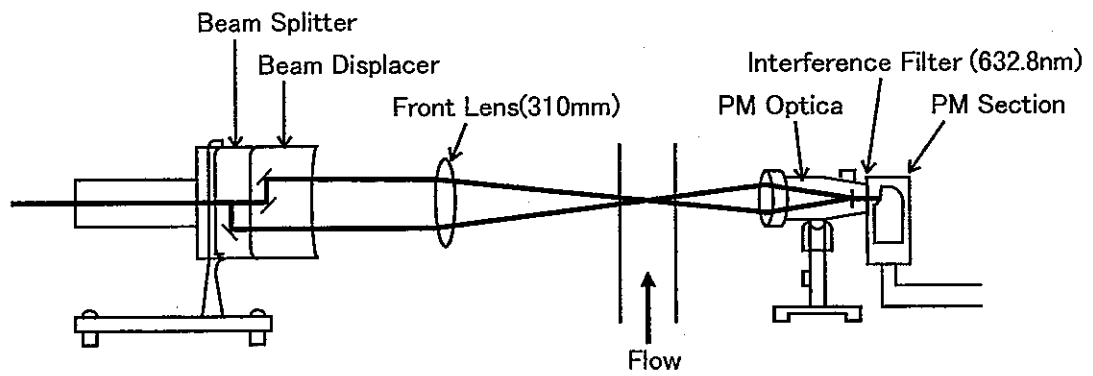
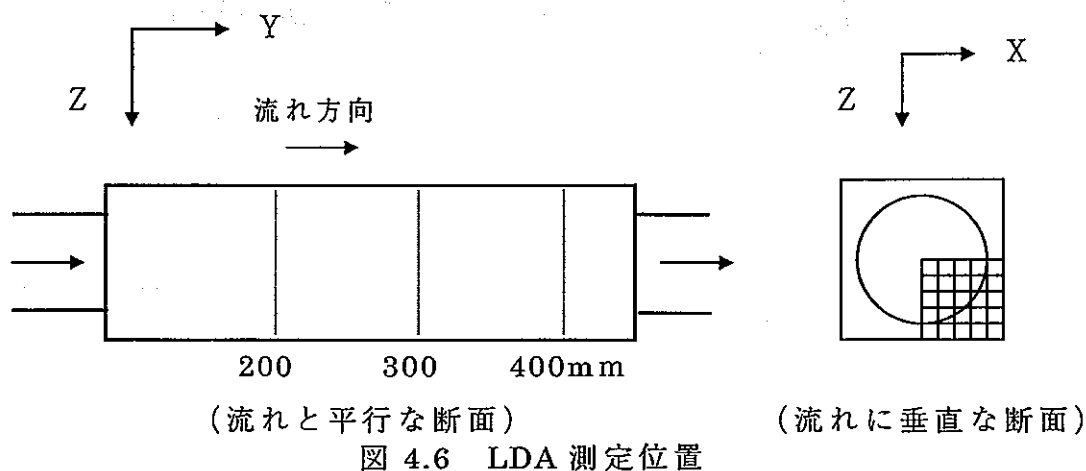


図 4.5 計測系システム構成

#### 4.2.4 実験方法

図 4.6 に測定位置を示す。流量条件は、 $30 \text{ L/min}$  とする。このとき試験部断面平均流速は  $0.134 \text{ m/s}$  である。測定箇所は、矩形管入り口から  $y = 200, 300, 400 \text{ mm}$  の位置で行った。1 つの断面について、 $x$  方向に 6 点、 $z$  方向に 6 点、合計 36 点測定した。



#### 4.2.5 実験結果

作動流体として水を用いたときの測定結果を図 4.7 に示す。鉛直方向の ( $Z$  方向) 各断面での平均流速分布を矩形管入り口から  $200 \text{ mm}, 300 \text{ mm}, 400 \text{ mm}$  の位置について比較する。 $300 \text{ mm}$  と  $400 \text{ mm}$  の位置での流速分布に大きな違いは見られず、流路中心部 ( $x=0 \sim 0.4$ , 鉛直方向  $0, 6, 12 \text{ mm}$ ) で平坦な分布となっている。一方、 $200 \text{ mm}$  の位置では流路中心部 ( $x=0 \sim 0.4$ , 鉛直方向  $0, 6, 12 \text{ mm}$ ) であっても平坦とはならず、流路中心で流速が大きい凸型分布となっている。このことから、管入口から  $200 \text{ mm}$  では流れの発達域であり、 $300 \text{ mm}$  以降では発達した流れとなっていることがわかる。テスト部の下流側での矩形管から配管への流路断面積の急縮流の影響を考慮し、球の固定位置を入口から  $300 \text{ mm}$  の位置に決定した。



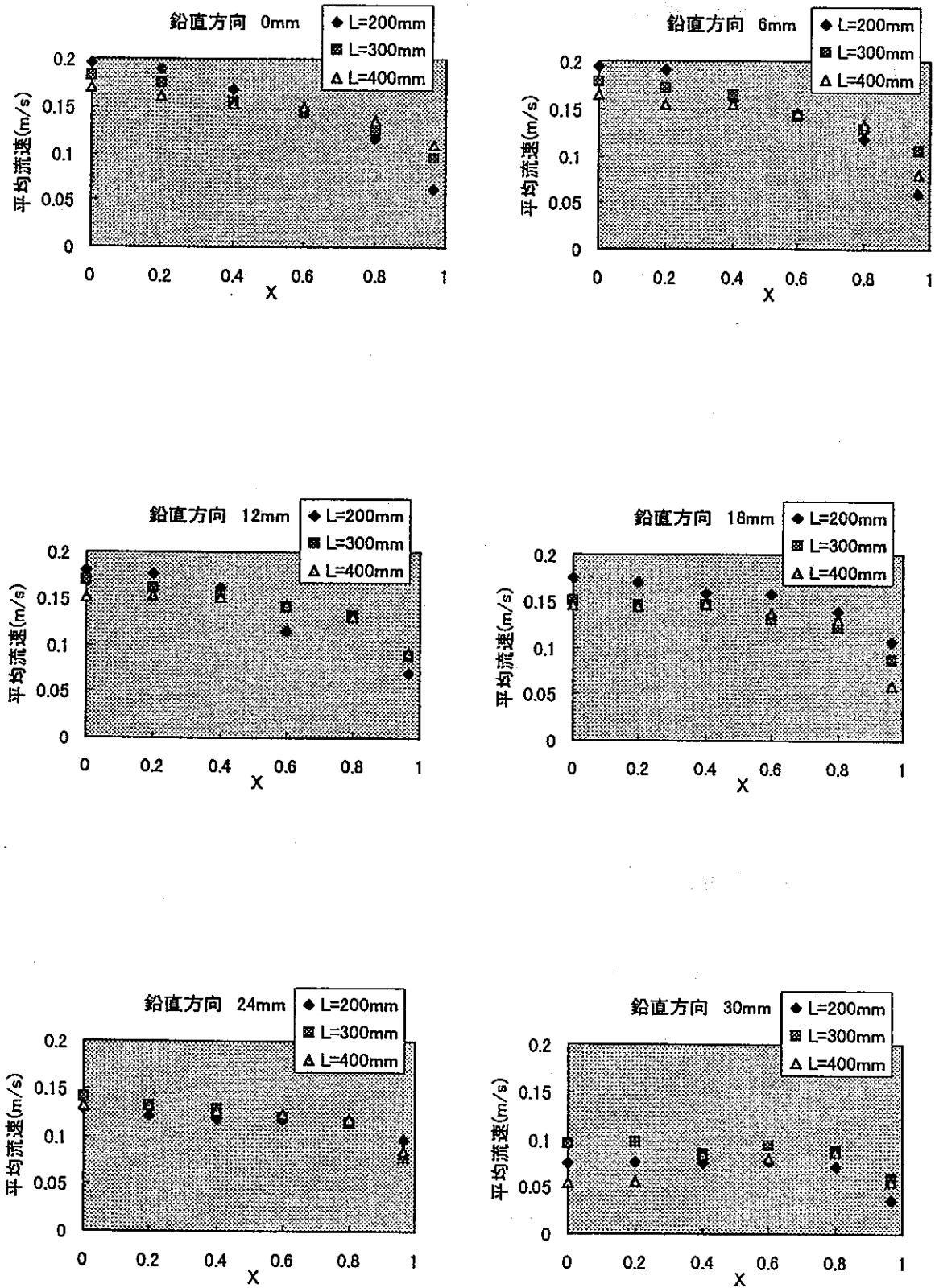


图 4.7 矩形管内流速分布  
 作动流体：水，流量：30L/min  
 全断面平均流速：0.134m/s

## 4.3 流況可視化実験

### 4.3.1 測定原理

図 5.1 に本実験で、球充填層内の流動の可視化に用いる PIV のシステムの概略図を示す。粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry: PIV) はダブルパルスレーザーにより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。レーザーパルスライトシートにして流れ場に照射し、ライト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<sup>[5]</sup>。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、それぞれの粒子の 2 番目の画像を露光する。こうして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。

露光方法の違いにより画像解析手法は自己相関法と相互相関法に分類される。自己相関法は 2 度のパルス光で照射された粒子像を 1 枚のフィルムや CCD の 1 フレーム内に 2 度露光させる。この画像に対して微小な検査領域の輝度分布の自己相関関数を求め、相関係数の 2 番目に高いピーク位置を粒子群の移動位置に対応するものとして移動距離を算出する。この方法は、解像度が非常に高い写真フィルムに露光する事が可能なため、空間的密度の高い速度分布を得ることができる。しかし、二重露光写真からは流れの向きが判別できないという欠点があり、逆流のある流れでは問題になる。

相互相関法では最初の露光と後の露光を別々のフィルムや、CCD の異なるフレームに露光させる。そして、2 画像間の局所的な相互相関関数を求めることでそのピーク位置から移動距離を求める。この場合、2 つの画像の時間的な前後関係が既知であれば、流れ方向の判別の容易に行える。

本実験の球充填層内では、複雑で局所的に逆流が予想されるため、相互相関法を用いた。

### 4.3.2 PIV の利点

PIV を用いる利点として、次の 2 点が挙げられる。

- ① 目的とする領域の全域計測が可能で、ベクトルマップにより、流れの様子を直感的に捉えることができる。
- ② 平均的な速度を求めようとするときに、LDV のような点計測よりも短い時間と少ない手間で計測が行える。

### 4.3.3 トレーサ粒子

6) 流体の流れに追従するには、水溶液と密度が近似している必要がある。本実験では NaI 水溶液 (6.5 wt%) 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", 比重 1.85, 平均粒子系  $2.0 \mu\text{m}$ ) を使用し、2.0 L の水溶液に対し、約 0.18 g 混入した。

### 4.3.4 測定方法

測定位置を図 5.2 に示す。各測定位置での球充填層の断面図を図 5.3 および図 5.4 に示す。測定は、球充填部全体の流れと、充填層内部および局所的流れの測定を行った。

### 4. 3. 5 実験結果

図 5.5-1 から図 5.5-3 に、図 5.2 に示す測定位置ごとの球充填部全体画像およびベクトル分布について示す。作動流体は重量濃度 56.4wt% の NaI 水溶液であり、流量は 30L/min、このとき全断面平均流速は 0.134m/s である。

画像から分かるように球充填部全体像については、球充填部への流入部の解析はできるが、内部の解析はできていない。球の隙間では、流路断面積が小さくなるので、流速が速くなると考えられる。よって、レーザー照射時間間隔を短くすれば、流速の速い球の隙間も解析できるのではと考え、装置の可能な限り時間間隔を短くした (0.1ms) が、解析結果はあまり変わらなかった。球の隙間の解析が難しい理由としては次のことが考えられる。すなわち、球充填層内では、主流方向流れの他に球の背後に回り込む様な主流方向に垂直な流れが存在し、非常に複雑な流れが予想される。このため、レーザーシートに垂直な方向の流れが多く発生しており、使用したレーザーシートの厚さでは、それらを捕らえきれなかったことが考えられる。また、解析する検査領域についても、可能な限り小さくしたが、図 5.5 のような全体画像では単位検査面積あたりの粒子濃度が低下するため解析が不可能となると考えられる。

図 5.6-1 から図 5.6-3 に球充填層局所内部の画像およびベクトル分布について示す。図 5.6-1 に示す球が接触し空隙面積 (流路面積) が最小となる箇所では、ベクトル分布が得られなかった。この原因として 2 つ考えられる。1 つには、画像中 (512×512 画素) に球があるため画像解析対象領域 (すなわち流体部分) の画素数が、画像解析の検査マトリクス (32×32 画素) に対して小さいことが考えられる。2 つ目として、球同士が接する部分では流れが遮られるため、流れが上下方向すなわち画像の垂直方向に逃れてしまい、今回用いたレーザーシートの厚さではトレーサを追跡できなかったものと考えられる。今回の計測システムではレーザーシートの厚さが一定で変更できないものであったため、垂直方向の流れの効果については確認できなかった。よって、今後、レーザーシートの厚みを調整できるように改造する。あるいは、主流方向と垂直な断面内での画像解析と併せた 3 次元画像解析を行う必要がある。一方、図 5.6-3 に示す流路面積が最大となる箇所ではベクトル分布が得られ、球の配置が疎となる画像の中心部では主流方向と平行な流れが存在し、配置が密となる両端部では、流速が遅く主流に巻き込まれる流れが観測された。流路形状の変化を勘案すれば、本画像解析結果は定性的に正しいと判断される。この結果は、作動流体とガラス球の屈折率を一致させた場合、球背面の空隙内であっても、LDA による流速測定が可能であることを示している。今後は、LDA と PIV の測定結果の比較により定量的な評価が必要である。

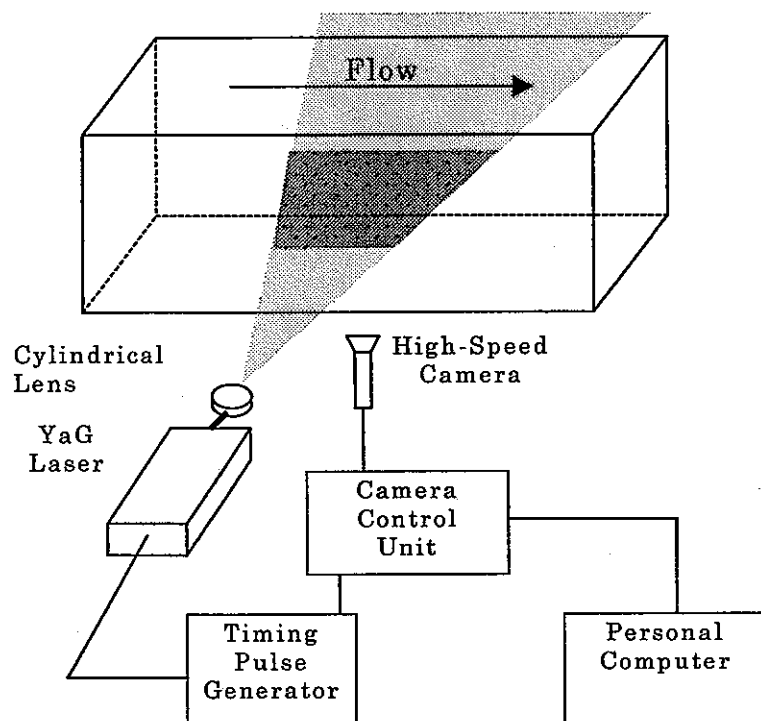


図 5.1 計測系概略図

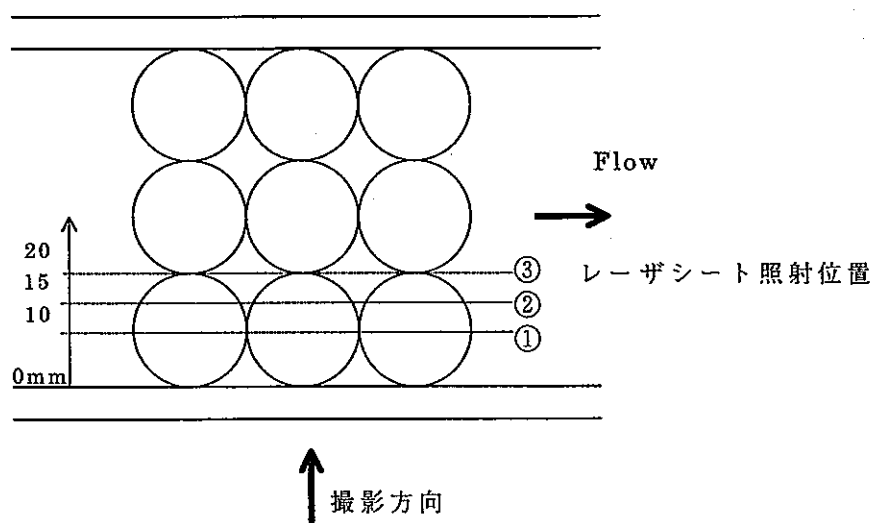


図 5.2 PIV 測定位置

球充填部全体

球充填層局所内部

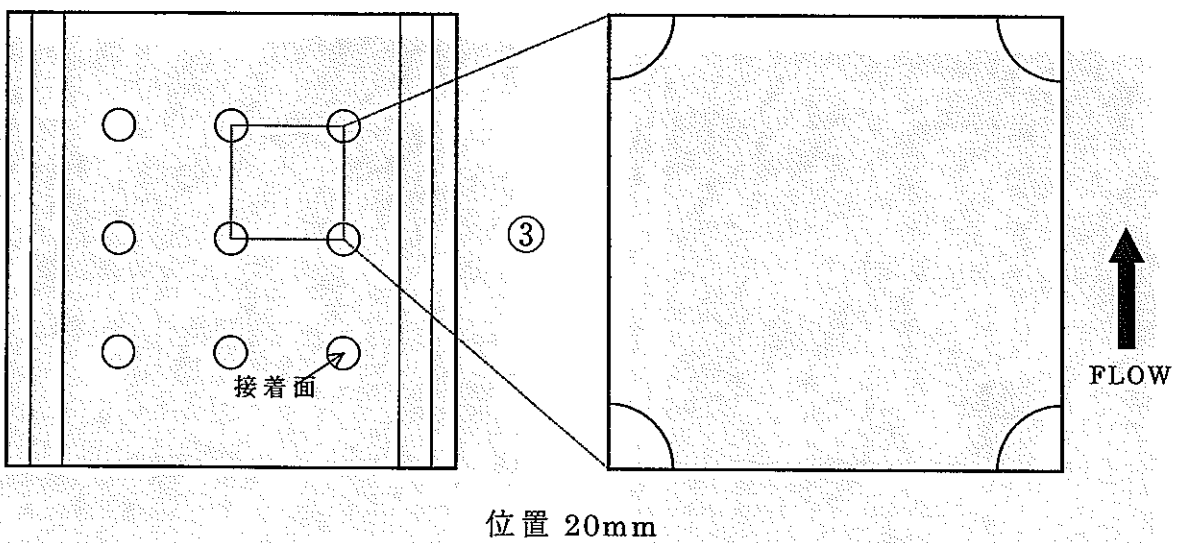
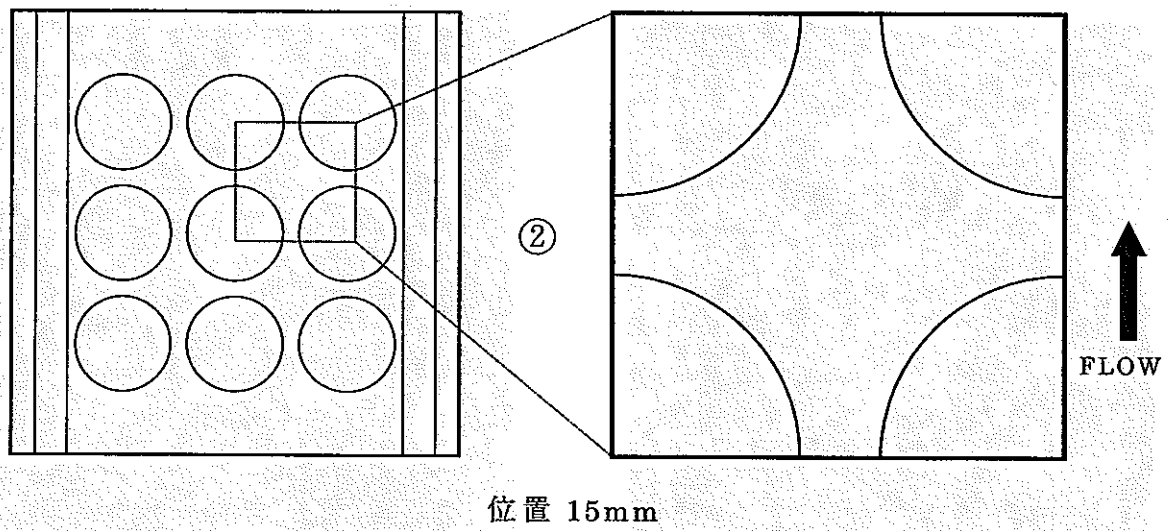
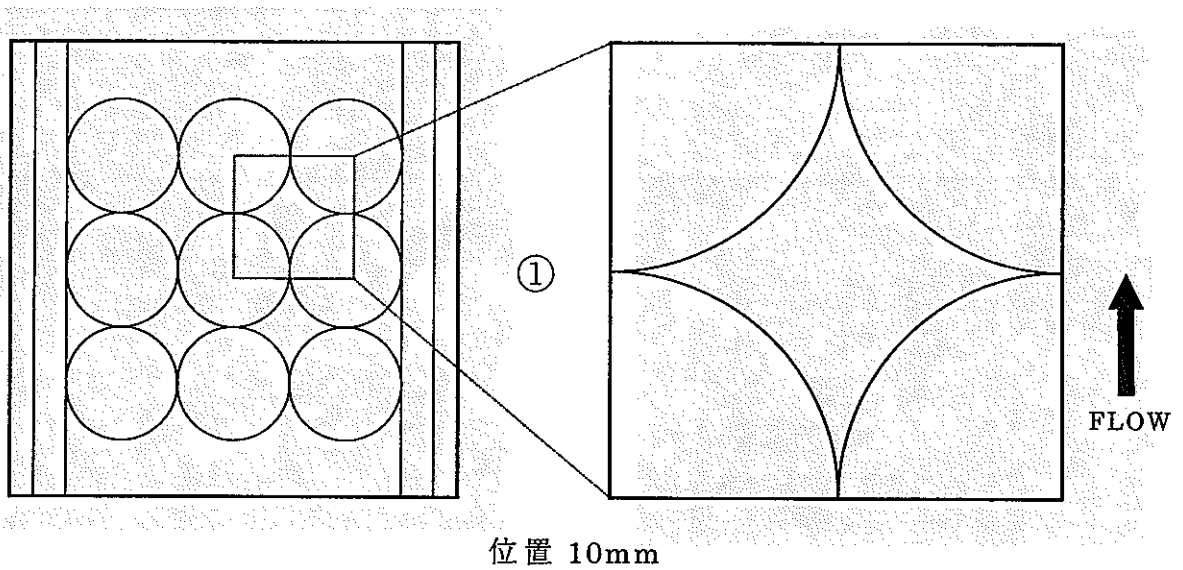
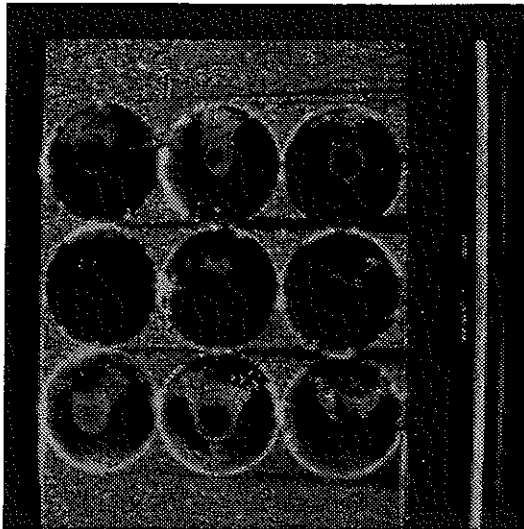
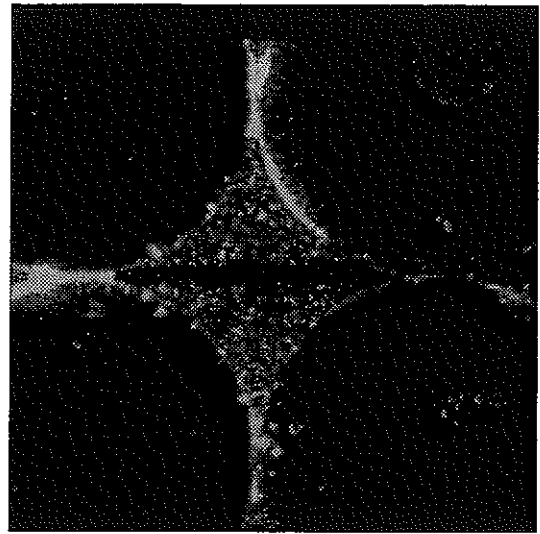


图 5.3 测定部断面图

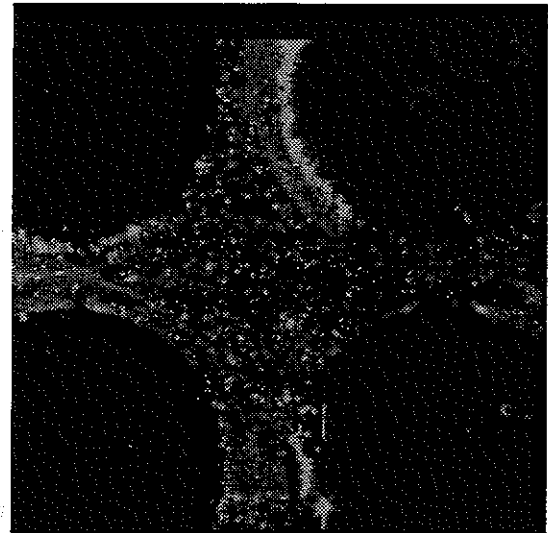
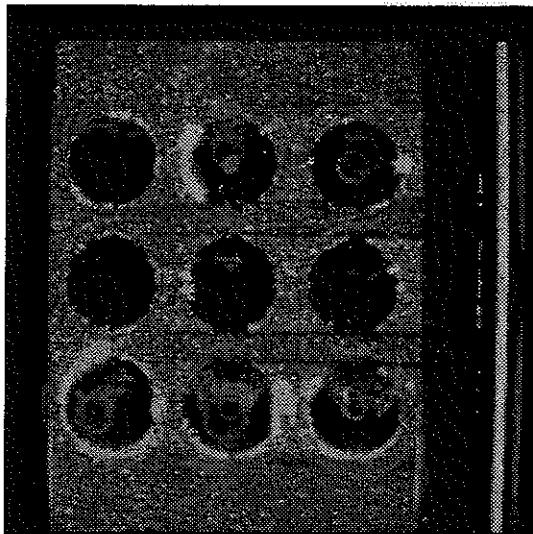
球充填部全体



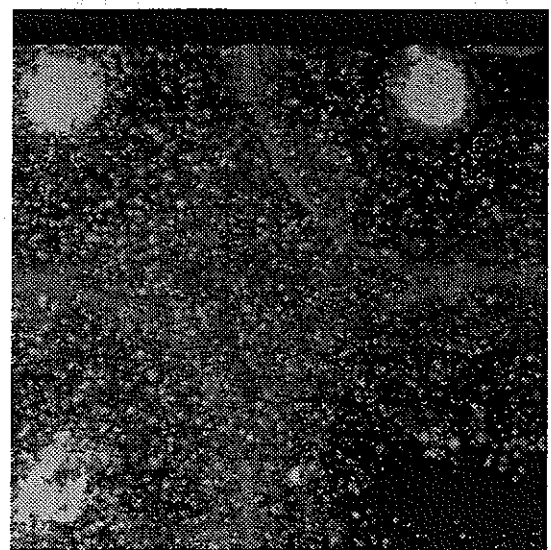
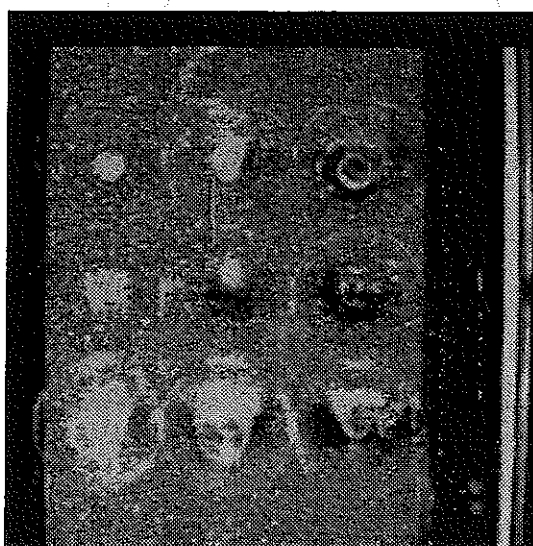
球充填層局所内部



位置 10mm



位置 15mm



位置 20mm

図 5.4 各断面での PIV 画像の例

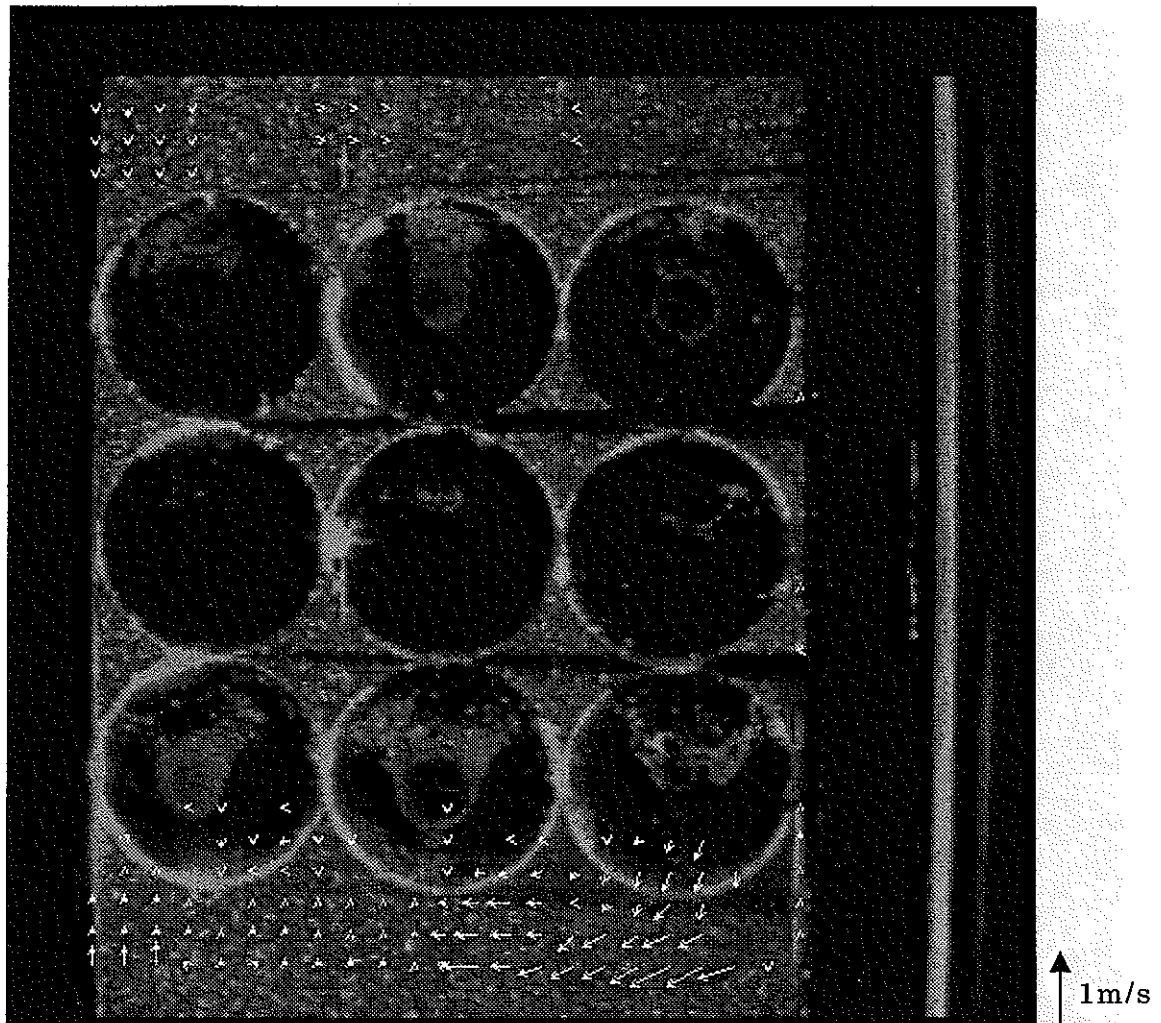


図 5.5-1 球充填部全体画像およびベクトル分布  
作動流体：NaI 水溶液 (56.4wt%)，全断面平均流速：0.134m/s，  
高さ位置：底面から 10mm

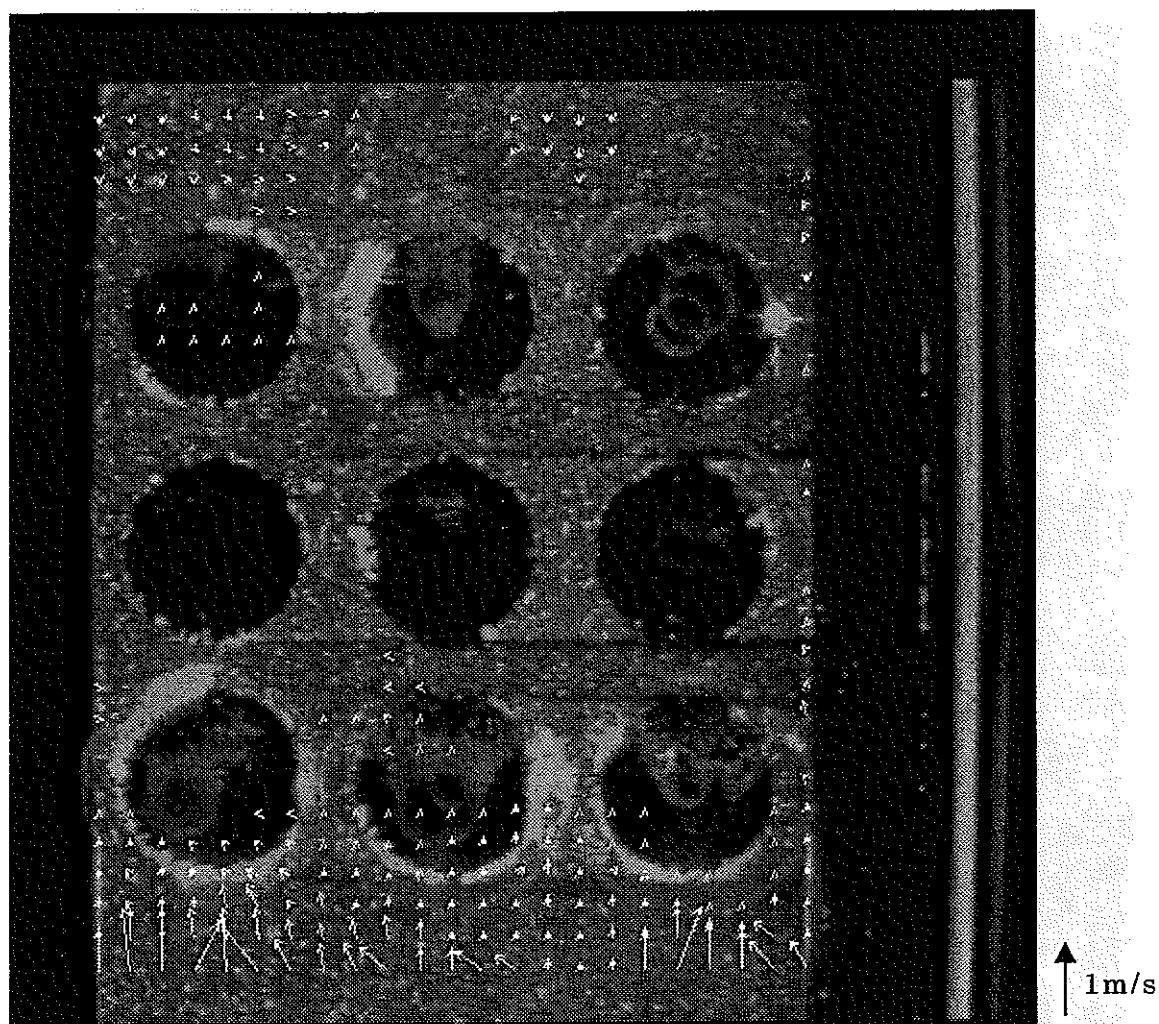


図 5.5-2 球充填部全体画像およびベクトル分布  
作動流体：NaI 水溶液（56.4wt%），全断面平均流速：0.134m/s  
高さ位置：底面から 15mm



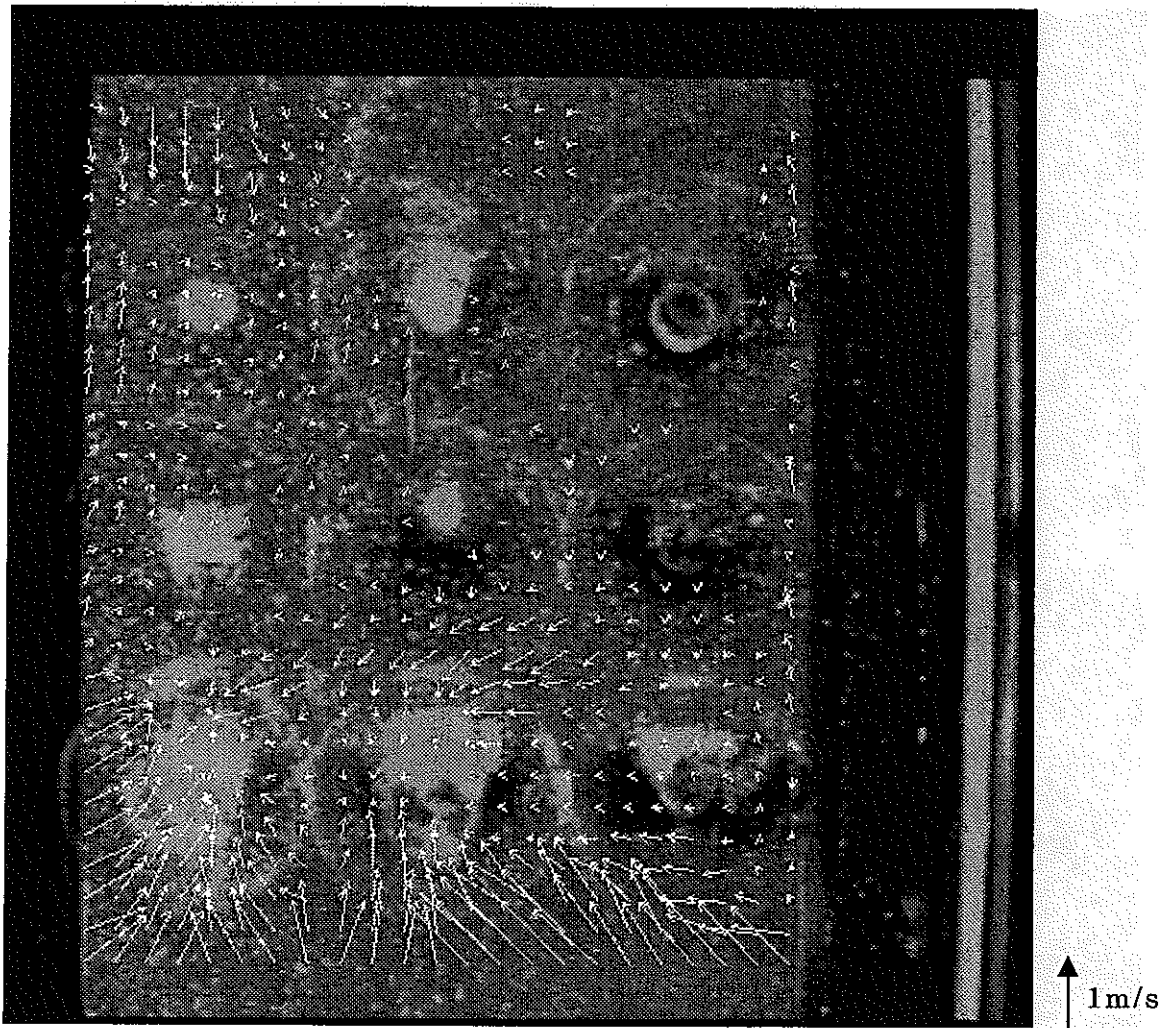


図 5.5-3 球充填部全体画像およびベクトル分布  
作動流体：NaI 水溶液（56.4wt%），全断面平均流速：0.134m/s  
高さ位置：底面から 20mm

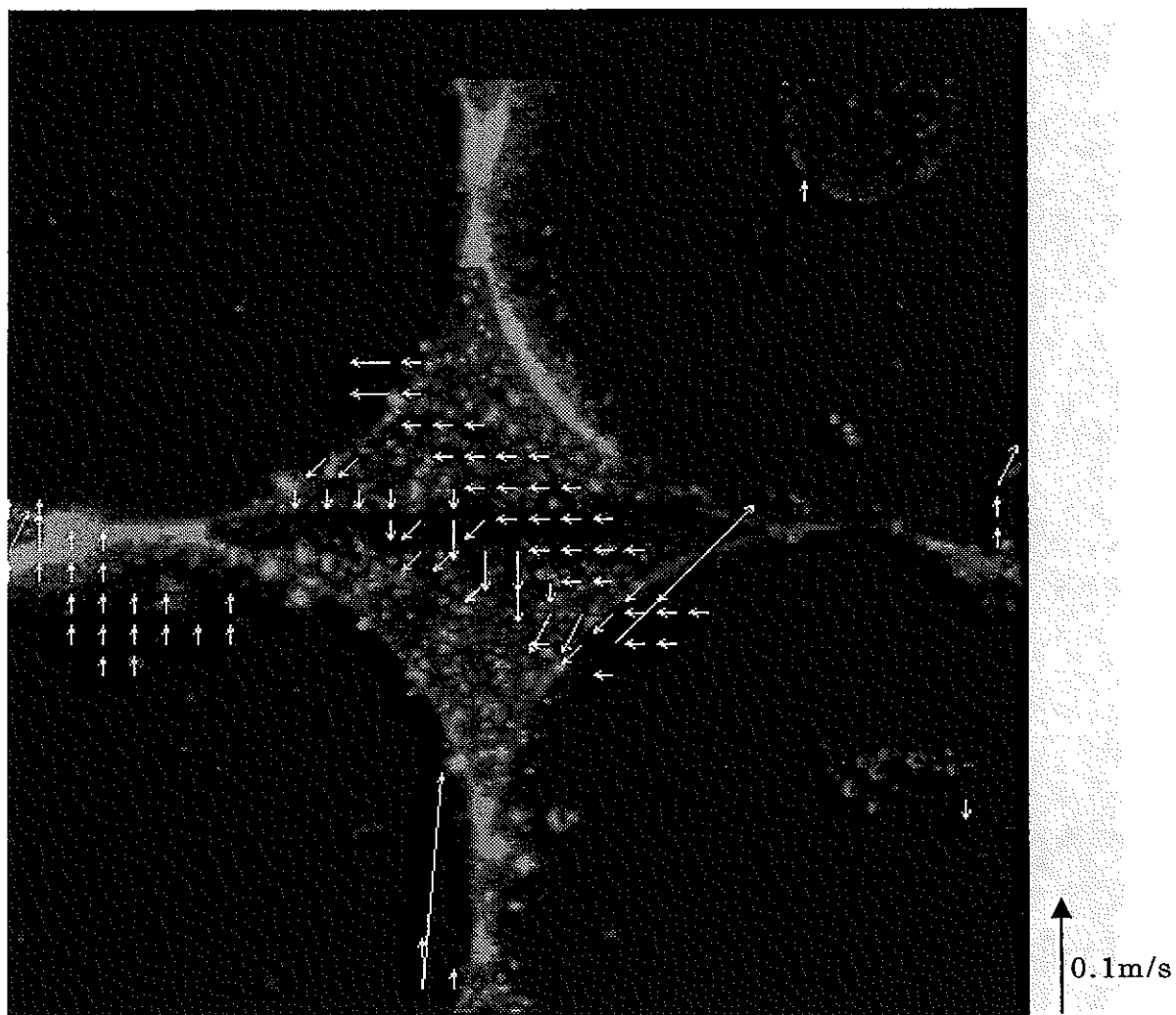


図 5.6-1 球充填層局所内部画像およびベクトル分布  
作動流体：NaI 水溶液（56.4wt%），全断面平均流速：0.134m/s  
高さ位置：底面から 10mm

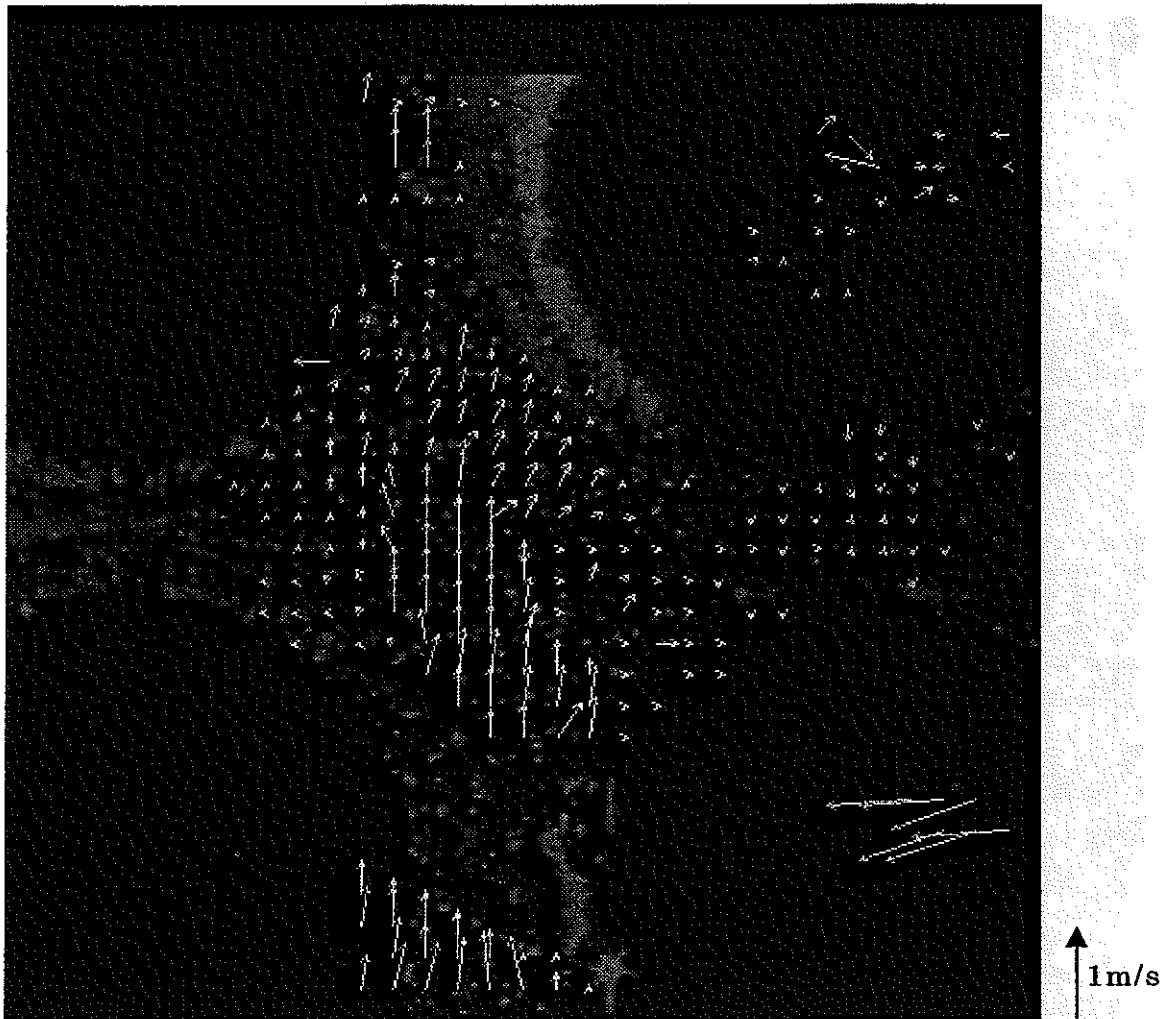


図 5.6-2 球充填層局所内部画像およびベクトル分布  
作動流体：NaI 水溶液 (56.4wt%)，全断面平均流速：0.134m/s  
高さ位置：底面から 15mm

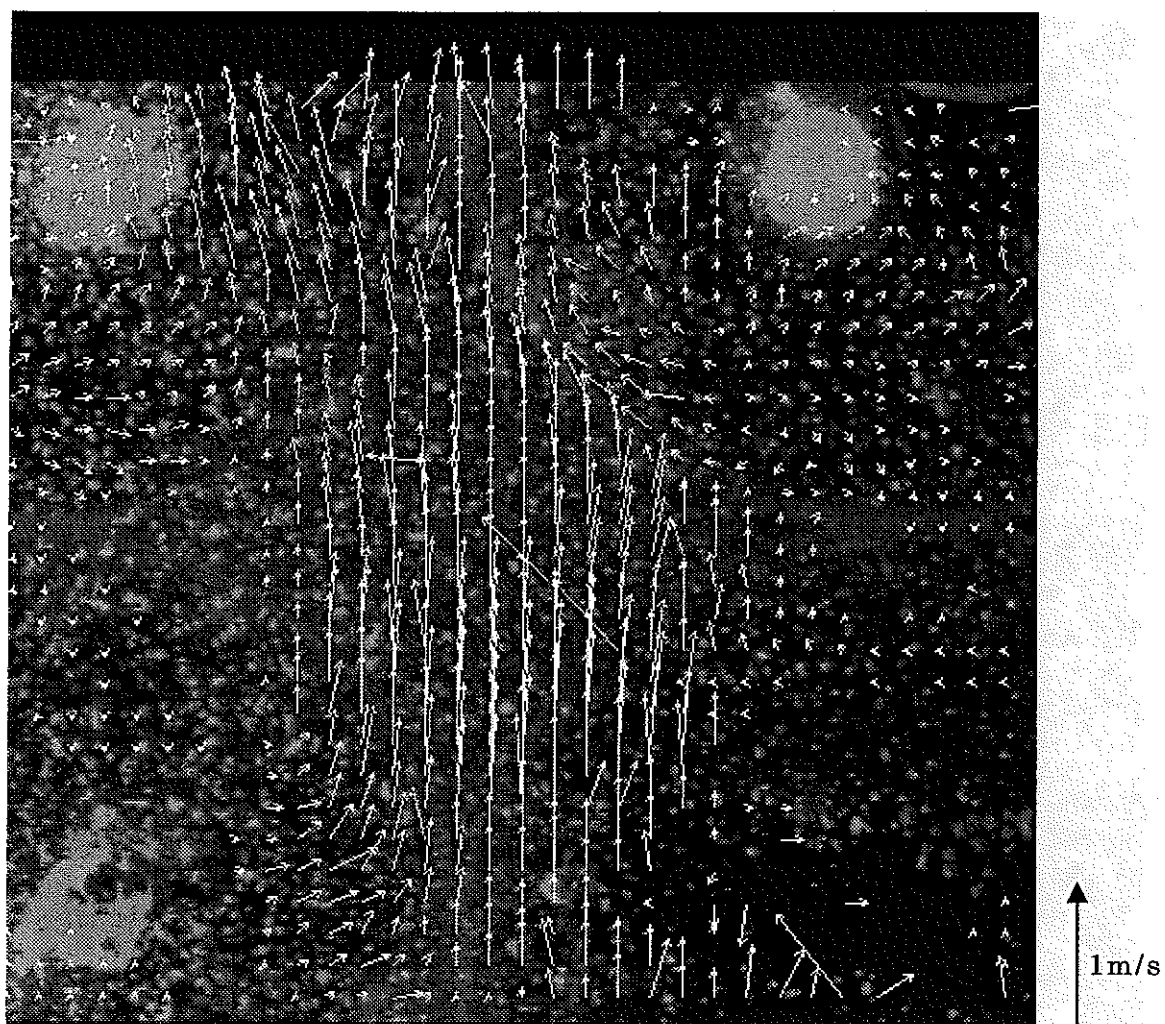


図 5.6-3 球充填層局所内部画像およびベクトル分布  
作動流体：NaI 水溶液（56.4wt%），全断面平均流速：0.134m/s  
高さ位置：底面から 20mm

## 5. まとめ

本研究では、閉塞物内部の流況の可視化を目的に、実験装置の設計、製作から行き最終的に球充填層内部の可視化が可能であることが確かめられた。

第2章の試験体の設計・製作では、試験装置の概念構築を行い、試験体として大型高速炉とのレイノルズ数一致の考え方を基本に、中心集合体のうち向かい合う2つの内部サブチャンネルを抽出した20倍の拡大モデルを選択した。さらに、試験パラメータについて検討した。また、試験装置の設計・製作では、概念構築の検討結果から、試験体の断面形状は幅122mm、奥行き61mmの2サブチャンネルとし、予備解析による検討結果から試験体の高さを全長2mとした。また、試験ループの構成について検討し、重力落下式のループを選択した。試験装置は筑波大学混相流実験室に設置した。

第3章の屈折率調整実験において、YAGレーザを光源とした場合、ヨウ化ナトリウム水溶液の濃度を $56.4 \pm 0.7 \text{wt}\%$ とすれば、パイレックスガラスの屈折率(1.476)と一致することを確かめた。その状態では、曲率の大きい球の縁付近では、若干の影響が残るものの、今回の実験条件では問題にならない程度のものであった。

第4章では簡易ループを用いた流速測定実験および可視化実験について示した。流速測定実験において、テスト部矩形管内で発達した流れとなる入口からの位置を調べるため管内の流速分布を調べ、発達した流れとなる位置に球を充填固定した。可視化実験では、第3章および流速測定実験の結果を基に、PIVを用いて球充填層内部の可視化を行い、得られた画像を相互相関法により解析し、水平断面内のベクトル分布を得ることが出来た。球充填部全体像からは閉塞部内部のベクトル分布は得られなかったが、球充填層局所内部の画像からは、定性的に正しい閉塞部内部のベクトル分布を得ることが出来た。しかしながら、球の接着面に囲まれている水平断面で十分なベクトルが得られなかった。この原因については今後の課題であるが、主流方向(レーザシート光平面)と垂直な方向の流れが支配的であったことが主な原因と考えられる。この点を解決するには、球充填層内では、多方向からの撮影等、3次元計測が必要であると考えられる。

## 6. 今後の課題

今後の課題および注意点について以下に述べる。

### (流速測定結果)

PIVによる画像解析で得られた結果とLDAによる結果との比較を行い、定量的な評価を行う必要がある。

### (測定系)

流速測定の際に重要なものが、画像上での1ピクセルが実際の測定部のどれだけの長さにあたるかということである。本実験ではモニターに映った管壁や、球の中心間の長さをもとに、1ピクセルの表す実寸の長さを決定したが、精度のよい解析を行うためには、あらかじめ、画面上で基準となるスケールを測定部に設定しておく必要がある。

さらに、球の接着にエポキシ系接着剤を使用したため、レーザーシートが接着部分で遮られ陰となり、トレーサーを感光することが出来ていない。そこで、球接着部の影響を除去するため、レーザーシートを多方向から入射させる、あるいは鏡などを用いて双方向から入射させるなどの工夫によって回避可能である。

また、一般的な注意として、同一画像上で局所的に流速が大きく異なる場合の流速ベクトル分布を精度よく求めるためには、測定部の流速および画像面積に合わせてレーザー照射時間間隔や検査領域を調節する等の工夫が必要である。

## 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も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、屈折率調整実験および簡易ループによる実験の遂行にあたり筑波大学基礎工学類 松崎 智之氏、筑波大学工学研究科 齊藤 克弘氏をはじめ、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, et al, “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] 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)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] 日本機械学会, 「計測の不確かさ」, 丸善, (1985)
- [6] 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
- [7] 日本機械学会, 「計測の不確かさ」, 丸善, (1985)



付録 1

入射波長とパイレックスガラスの屈折率

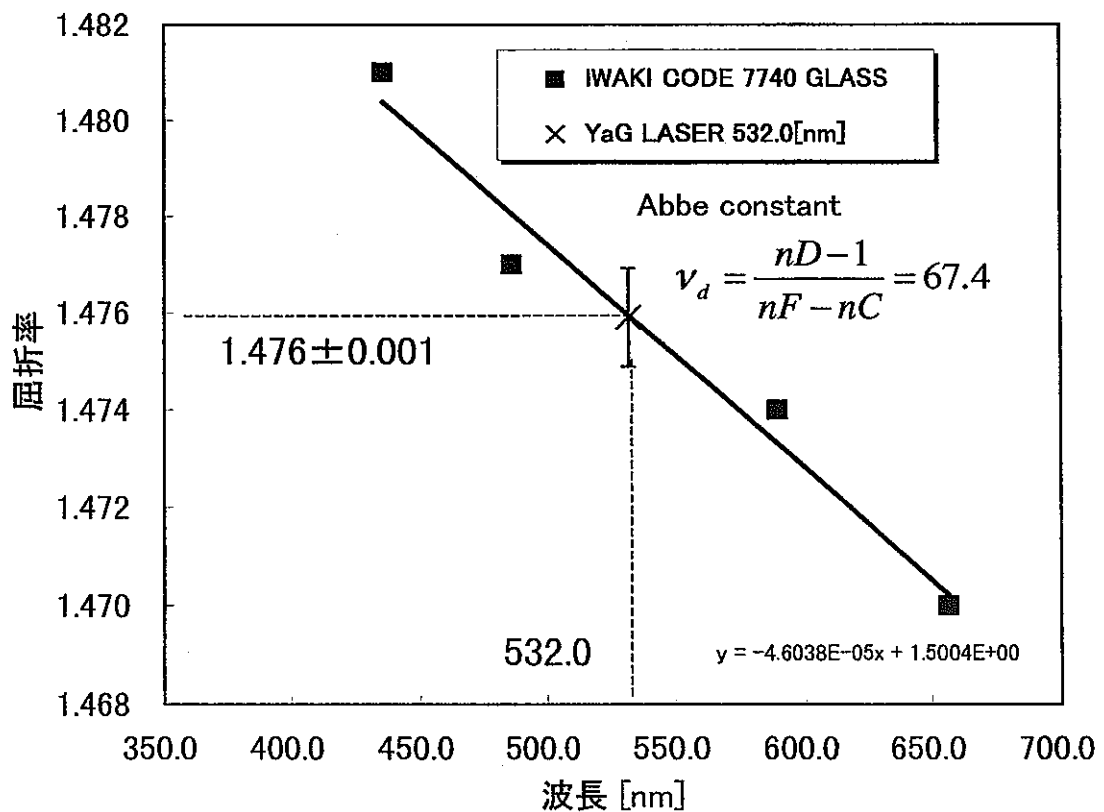
物体の屈折率は入射波長によって変化するため、使用するレーザー光の波長におけるパイレックスガラスの屈折率を知る必要がある。

	波長 [nm]	屈折率	推定値	SEE
nC(水素の輝線スペクトルC線)	656.3	1.470	1.4702	3.43E-08
nD(ヘリウムの輝線スペクトルD線)	589.3	1.474	1.4733	5.33E-07
nF(水素の輝線スペクトルF線)	486.1	1.477	1.4780	1.04E-06
NG	435.8	1.481	1.4803	4.40E-07
YaGレーザー	532.0	—	1.4759	1.01E-03

Abbe condtant,  $\nu_d$

$$\nu_d = \frac{nD-1}{nF-nC} = 67.4$$

$$\sigma_{SEE} = \left[ \frac{\sum (y - y_{LS})^2}{N-2} \right]^{1/2}$$



岩城硝子株式会社，技術資料 ” IWAKI CODE 7740 GLASS の特性 ” による。

## 付録 2

### ヨウ化ナトリウム使用の注意点

本研究では、PIV 等の光学計測による画像解析を行うにあたり、閉塞物内部の良好な画像を得るため、流体側の屈折率をパイレックスガラスの屈折率に一致させるために、ヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液を作動流体として選択した。以下にヨウ化ナトリウム水溶液に関する注意点を述べる。

#### (1) ヨウ化ナトリウム

ヨウ化ナトリウムは無色から微黄色の結晶性粉末であり、61.3wt% (0℃の水) で飽和となる。法令上の規制はないが、吸入または経口摂取した場合には有害である。応急処置としては多量の水で希釈する方法をとる。

#### (2) チオ硫酸ナトリウム

チオ硫酸ナトリウムは結晶で存在する。水溶液の製造時には、NaI の分離を防止するためにチオ硫酸ナトリウムを安定剤として 0.1wt% 添加する。チオ硫酸ナトリウムは法令上の規制はない。

(3) 水溶液の屈折率はその濃度に依存し、本実験中も、水溶液を調合してから数日で淡黄色に変色し、屈折率に若干の変化が見られた (視覚で、水溶液中の球が見えやすくなった)。原因として完全には密閉されていなかったタンクからの水の蒸発による濃度の変化と、ヨウ素の分離が考えられる。分離については、後日チオ硫酸ナトリウムをごく少量加えたため、いくらか透明性を取り戻した。実験中は比重計量による濃度管理を行う必要がある。

#### (3) NaI 水溶液の排水

つくば市 (筑南地方広域筑波研究学園都市下水事務所, TEL 0 2 9 8 - 3 7 - 0 2 5 1) では NaI としての基準はなく, Na についてもない。ただし, ヨウ素については, 濃度を 220mg/L にして排水することとされている。また, データシートにも多量の水希釈して排水することと明記されている。

筑波大学 (施設部環境保全課 実験廃棄物分析担当) では, 少量であれば十分希釈した上で実験排水として処理し, 濃度の高い多量の水溶液の場合は, 直接持ち込んでほしいとのことであった。

#### <参考文献>

- ・和光純薬工業株式会社, “製品安全データシート ヨウ化ナトリウム (MSDS No.16-0397)”,
- ・和光純薬工業株式会社, “製品安全データシート チオ硫酸ナトリウム五水和物 (MSDS No.19-0358)”,
- ・和光純薬工業株式会社, “製品安全データシート チオ硫酸ナトリウム無水 (MSDS No.19-0360)”,