

燃料集合体内局所閉塞事象における

4 サブチャンネル体系水試験

—閉塞物周辺の流況可視化—

(研究報告)

1999年11月

核燃料サイクル開発機構

大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Sections,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49,Muramatsu, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, 319-1194,

Japan

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

1999

1999年11月

燃料集合体内局所閉塞事象における
4サブチャンネル体系水試験
—閉塞物周辺の流況可視化—
(研究報告書)

田中 正暁*, 小林 順**
上出 英樹*

要 旨

ポーラス状閉塞物内の熱流動特性を調べる基礎研究として、燃料集合体内の4つのサブチャンネルを模擬し、3本のヒータピンに囲まれた中心サブチャンネルに閉塞物を設置した基礎水流動試験を実施している。温度分布測定試験および解析結果から閉塞物内部には水平方向の流れが存在し、この流れが閉塞物内部の温度分布に大きな影響を及ぼしていることが明かとなっている。そこで、ポーラス状閉塞物周りの流動場を把握するために、トレーサ法により可視化実験を行った。

その結果、(1)閉塞物側面に循環渦が生じ、閉塞物下端から流入した冷却材が閉塞物内部を通り健全サブチャンネルへ流出すること、(2)閉塞物側面の循環流領域は流量の増加と共に下流側へ延び、循環渦内部では対流拡散が支配的であることが分かった。また、後流領域においては、(1)閉塞チャンネルを囲む健全チャンネルからの3方向の流れ込みにより、流れが周期的に変動しており不安定性をもつこと、(2)閉塞物上端からの浸み出しあるいは巻き込みによって、冷却材が後流域に常に供給されることが分かった。

さらに、大型炉条件($Re=5.9\times10^4$)での流動場について、可視化試験結果を外挿して予測した。本結果は解析手法の検証に用いられると共に大型炉でのポーラス状閉塞事象評価に反映される。

*大洗工学センター ナトリウム・安全工学部 原子炉工学グループ

** " システム技術開発部 FBRシステムグループ

**Fundamental Water Experiment on Subassembly Porous Blockage
Studies in 4 Sub-channel Geometry (III)
— Flow Visualization around the Porous Blockage —**

Masa-aki Tanaka*, Jun Kobayashi**, Hideki Kamide*

Abstract

The phenomena on a thermal-hydraulic field inside/outside the porous blockage has been investigated by the experiment employed the 4-subchannel geometry water test facility. From existing experimental and numerical studies, it was shown that the flow field around the blockage had significant effect on the temperature distribution inside the blockage. Therefore, We conducted the experiment of flow visualization with 4-subchannel geometry water test facility.

The flow visualization showed that the recirculation flow and a lateral flow existed at the side of the porous blockage. The region of recirculation flow extended to the downstream side with increasing of the flow rate. The mixing due to the convection was dominant in the region of recirculation flow, and was getting effective as increasing of the flow rate.

In the wake region, the flow was unstable due to the interaction between the flows in the unplugged and plugged subchannels. The coolant was provided from the unplugged subchannels and also through the inside of porous blockage.

These results obtained from the flow visualization gathering with the numerical simulation will be reflect to the evaluation of the local blockage issue of large scale Fast Breeder Reactor.

* Reactor Engineering Group, Sodium and Safety Engineering Division,
O-arai Engineering Center, JNC

** FBR System Group, System Engineering Technology Division,
O-arai Engineering Center, JNC

目 次

1.はじめに	1
2.試験装置概要	3
2.1 試験ループ	3
2.2 試験体概要	3
2.3 ポーラス状閉塞物	3
2.4 可視化計測システム	7
3.可視化試験	11
3.1 試験条件	11
3.2 試験方法	15
3.3 可視化観測	17
3.3.1 閉塞物側面の流況	17
3.3.2 閉塞物後流域の流況	29
4.考察	41
4.1 閉塞物側面の循環流領域	41
4.1.1 循環流領域の範囲	41
4.1.2 循環流領域内の拡散	46
4.2 閉塞物下流の後流領域	52
4.2.1 後流領域の範囲	52
4.2.2 後流領域内の拡散	55
5.大型炉条件での予測	59
6.まとめ	62
謝辞	63
参考文献	64
付録	
付録1 特性時間の定義	66
付録2 試験データ一覧	68
付録3 試験体圧力損失	70

図表リスト

Table 1 Experimental Condition

Table 2 Comparison of Decay Time in the Region of Recirculation

Table 3 Comparison of Decay Time in Wake Region

Table 4 Characteristic of Large Scale Fast Breeder Reactor

Fig.1-1 Configuration of the Porous Blockage in a Fuel Subassembly.

Fig.1-2 Measurement Area around the Porous Blockage.

Fig.2-1 Flow Diagram of Experimental Facility.

Fig.2-2 Schematic of 4 Sub-channel Geometry Test Section.

Fig.2-3 Schematic view and Picture of the Employed Porous Blockage.

Fig.2-4 Picture of the Employed Porous Blockage and Solid Blockages.

Fig.2-5 Schematic View of Picture Aquisium system.

Fig.2-6 Dye Injection Pipe and Acrylic Window
for Flow Visualization.

Fig.2-7 Test Section for Flow Visualization

Fig.2-8 A Front View Picture of the Liquid-side Flow very near the
Porous Blockage.

Fig.3-1 Dye Injection Point.

Fig.3-2 Schematic showing the Position of Camera, Laser sheet,
Blockage, Subchannels and Tracer Injection Point.

Fig.3-3 Front View of the Liquid-side Flow very near the Surface
of the Blockage.

Fig.3-4 Schematic showing the Position of Camera, Laser sheet,
Blockage, Subchannels and Tracer Injection Point.

Fig.3-5 Front View of the Liquid-side Flow above the Blockage.

Fig.3-6 Dye Injection System.

Fig.3-7(1) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=0.4[m^3/h]$, $Re=1.7\times10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-7(2) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=0.4[m^3/h]$, $Re=1.7\times10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-8(1) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=0.8[m^3/h]$, $Re=3.5\times10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-8(2) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=0.8[m^3/h]$, $Re=3.5\times10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-9(1) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.

($Q_L=1.2[m^3/h]$, $Re=5.2\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-9(2) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.

($Q_L=1.2[m^3/h]$, $Re=5.2\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-10(1) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.

($Q_L=1.6[m^3/h]$, $Re=6.9\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-10(2) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.

($Q_L=1.6[m^3/h]$, $Re=6.9\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-11(1) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.

($Q_L=2.0[m^3/h]$, $Re=8.6\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-11(2) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.

($Q_L=2.0[m^3/h]$, $Re=8.6\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-12(1) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.

($Q_L=0.4[m^3/h]$, $Re=1.7\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-12(2) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.

($Q_L=0.4[m^3/h]$, $Re=1.7\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-13(1) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.

($Q_L=0.8[m^3/h]$, $Re=3.5\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-13(2) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.

($Q_L=0.8[m^3/h]$, $Re=3.5\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-14(1) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.

($Q_L=1.2[m^3/h]$, $Re=5.2\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-14(2) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.

($Q_L=1.2[m^3/h]$, $Re=5.2\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-15(1) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.

($Q_L=1.6[m^3/h]$, $Re=6.9\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-15(2) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.

($Q_L=1.6[m^3/h]$, $Re=6.9\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-16(1) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.

($Q_L=2.0[m^3/h]$, $Re=8.6\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-16(2) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.

($Q_L=2.0[m^3/h]$, $Re=8.6\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

Fig.3-17 Characteristic Length of Wake Region.

Fig.4-1 Pictures for Image Analysis.

Fig.4-2 Maximum Point of Luminescence and Threshold Point.

Fig.4-3 Time Series of Threshold Point.

Fig.4-4 Frequency of Threthold Point.

- Fig.4-5 Reration between Normalized hight and Reynolds Number.
Fig.4-6 Time series of Normalized Luminescence.
Fig.4-7 Relation between Decay Time and Reynolds Number.
Fig.4-8 Definition of Time window from Peak to Noise Level.
Fig.4-9 Apploximation of Diffusion of Dye.
Fig.4-10(1) Relation between Decay Ratio and Reynolds Number.
Fig.4-10(2) Normalized Decay Ratio in the Region of Recirculation
Fig.4-11 Time sequence of spacial average luminance.
Fig.4-12 Definition of Flow Separate Point.
Fig.4-13 Relation between Characteristic length of wake
and Reynolds Number
Fig.4-14 Time series of Normalized Luminescence.
Fig.4-15 Relation between Decay Time and Reynolds Number.
Fig.4-16(1) Relation between Decay Ratio and Reynolds Number.
Fig.4-16(2) Normalized Decay Ratio in Wake Region.

1. はじめに

高速炉では中性子スペクトルを硬く保ち、冷却材による中性子の減速を小さくするため、燃料ピンは密に配列されている。このような高速炉の特長に対する安全評価上の事象として、燃料ピンバンドル内に異物が混入し、燃料ピン間のサブチャンネルに堆積して流路を閉塞させ、冷却が阻害されることを想定する冷却材流路閉塞事故がある。このとき、閉塞は外部からの混入物（製作時の切り粉など）、あるいは1次系または炉心で生成された異物（ポンプで粉碎されたルースパーティや離脱したスペーサワイヤなど）によって生じると想定されている。比較的大きな異物が1次系バウンダリ内部に存在して、燃料集合体内のピンバンドル部に到達することは、燃料集合体入口部（エントランスノズル）の形状やピンバンドル構造等からみて考え難い。また、あまりに小さな異物は流れに乗ってピンバンドルを通り抜けてしまうと考えられる。従って、燃料集合体内で生じる閉塞は、ワイヤ径（1.1[mm]）からワイヤのないサブチャンネルを通過できる最大直径（2.6[mm]程度）までの $10^{-3}m$ オーダーの微細な異物の集積によるものと考えられている^[1,2,3]。ワイヤースペーサ型のバンドルでは、まずワイヤに沿って異物が蓄積し、その部分を中心で異物が集積すると考えられる。Fig.1-1に示すように、閉塞形態は平板状ではなく流れ方向に厚みのあるポーラス状閉塞となることが水流動試験に基づいて予測されている^[1,2,3]。本研究は、このようなワイヤースペーサ型集合体におけるポーラス状閉塞を対象としている。

原子炉工学グループでは、ポーラス状閉塞物内外の熱流動特性を調べるために基礎試験を行っている。この一環として、燃料集合体局所閉塞4サブチャンネル基礎水流動試験（以下、4サブチャンネル水流動試験）^[4]を実施し、閉塞物内部および周辺サブチャンネル内の温度分布へ及ぼす閉塞物内部流れの影響を調べている。また、4サブチャンネル水流動試験を対象として、多次元コード CASCADE による詳細解析を行い、閉塞物内部の流動場と温度分布との関係を調べている^[5]。温度分布測定試験および解析結果から閉塞物内部には水平方向の流れが存在し、この流れが閉塞物内部の温度分布に大きな影響を及ぼしていることが判明した。また、この水平方向流れが閉塞物側面に生じる循環渦と密接に関係していることが明らかになった。

平板閉塞を対象とした燃料集合体内局所流路閉塞の研究においては、平板閉塞下流側に生じる循環流領域（後流域）で冷却材温度が上昇する可能性があるため、後流域での冷却材の挙動が注目されてきた^[6,7]。ポーラス状閉塞においても後流域は形成され得るため、後流域における冷却材の挙動についても把握しておかなければならない。

そこで、Fig.1-2 に示すように閉塞物周辺の流動場における流況を把握するため、(1)閉塞物側面における水平方向流れの有無の確認、(2)閉塞物側面の循環流れの存在確認と再付着点の評価、(3)閉塞物下流側(後流域)での流況把握、これらの項目に着目した可視化実験を行った。

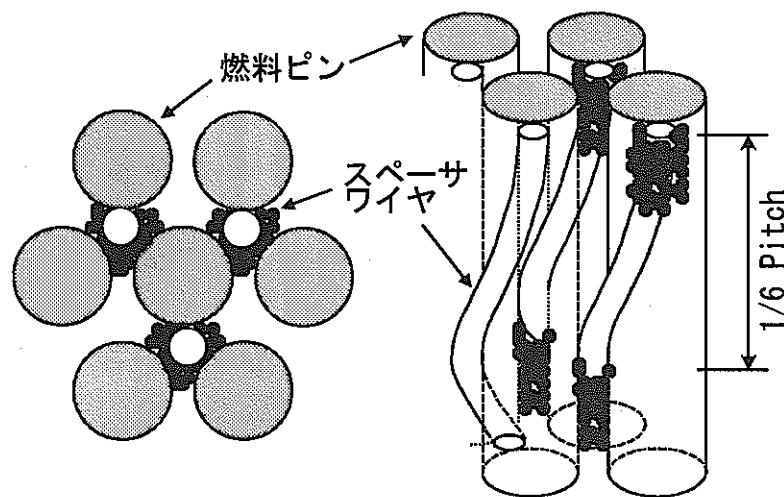


Fig.1-1 Configuration of the Porous Blockage in a Fuel Subassembly

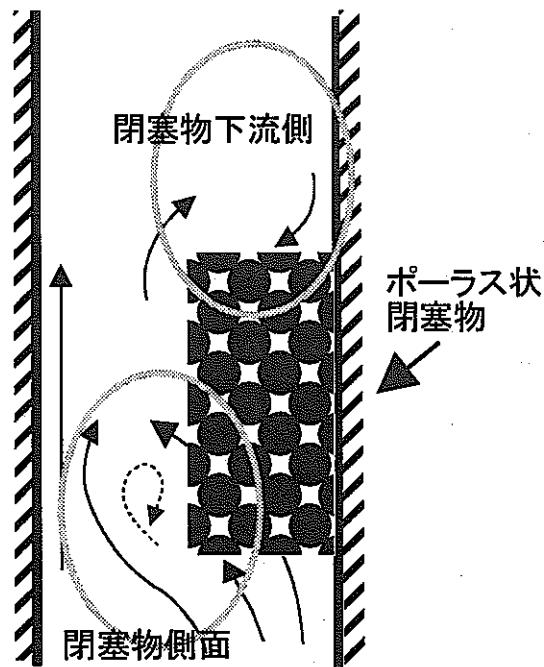


Fig.1-2 Measurement Area around the Porous Blockage

2. 試験装置概要

2. 1 試験ループ

本試験で使用した試験ループの概略図を Fig.2-1 に示す。試験ループの作動流体は水であり、主な構成機器は、ポンプ、冷却装置、電磁流量計、流速計測用粒子混入装置、フィルター、サージタンク等である。試験体流入温度が一定となるようポンプ下流に冷却装置を設置してポンプによる入熱を除去した。また、試験部流量は電磁流量計で計測した。

2. 2 試験体概要

試験体は FBR 大型炉（以下、大型炉）の燃料集合体ピンバンドルの内、4つのサブチャンネルを抽出している。試験体の模式図を Fig.2-2 に示す。燃料ピン径およびギャップ幅については計測性の観点から5倍に拡大し、ピン径 $D=42.5[\text{mm}]$ 、ピンピッチ $P=48.2[\text{mm}]$ とした。試験体の流路断面積は $S=1.187 \times 10^{-3} [\text{m}^2]$ であり、水力等価直径は $De=15.8[\text{mm}]$ である。大型炉燃料ピンバンドルはワイヤースペーサタイプであるが、本試験体では4サブチャンネル形状という制限からワイヤースペーサを模擬していない。模擬燃料ピンには電気ヒータが組み込まれ、燃料による発熱を模擬することができる。ただし、本可視化試験においては等温状態での試験としヒータは使用していない。

2. 3 ポーラス状閉塞物

Fig.2-3 にポーラス状閉塞物の製作寸法を示す。また、Fig.2-4 に実験に用いたポーラス状閉塞物（Fig.2-4 中の右側）と同一寸法の無垢材閉塞物（Fig.2-4 中の左側）を示す。ポーラス状閉塞物は、SUS304 製の球状粒子（粒子径 $d_p=1.01 \pm 0.07[\text{mm}]$ ）を用い、粒子形状を保つために分子拡散法により焼結して製作した。ポーラス状閉塞物の空隙率は 40[%] であり、ポーラス状閉塞物と同一寸法の無垢材閉塞物との重量比較により求めた。閉塞物は4サブチャンネルの中心サブチャンネルに配置され、軸方向長さは 60[mm] である。閉塞物は Fig.2-2 に示すようにヒータ表面に取り付けられたピンにより閉塞物の上下端が固定されており、ヒータによって水平3方向から押さえられているため、閉塞物が試験中に移動することはない。

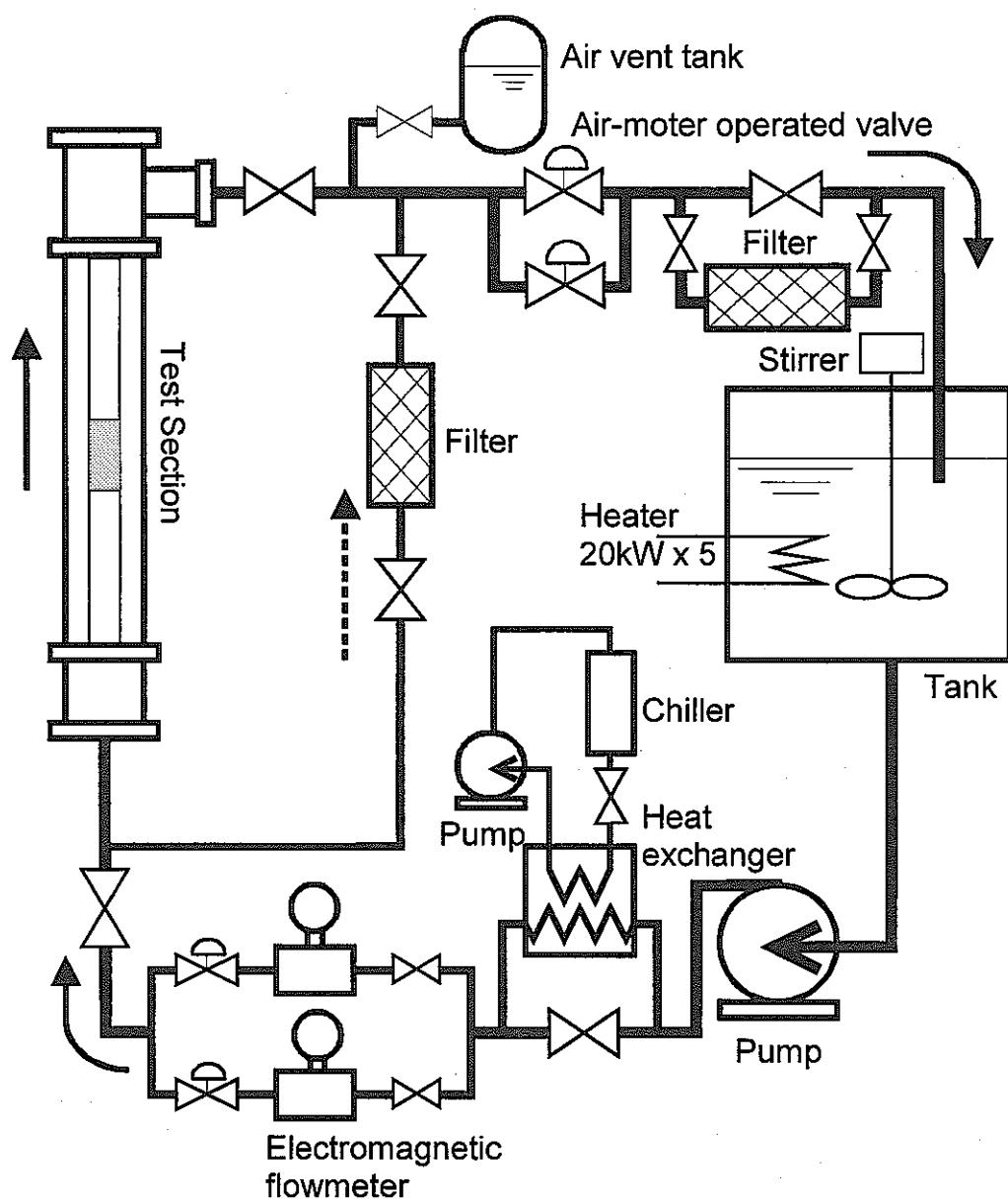


Fig.2-1 Flow Diagram of Experimental Facility

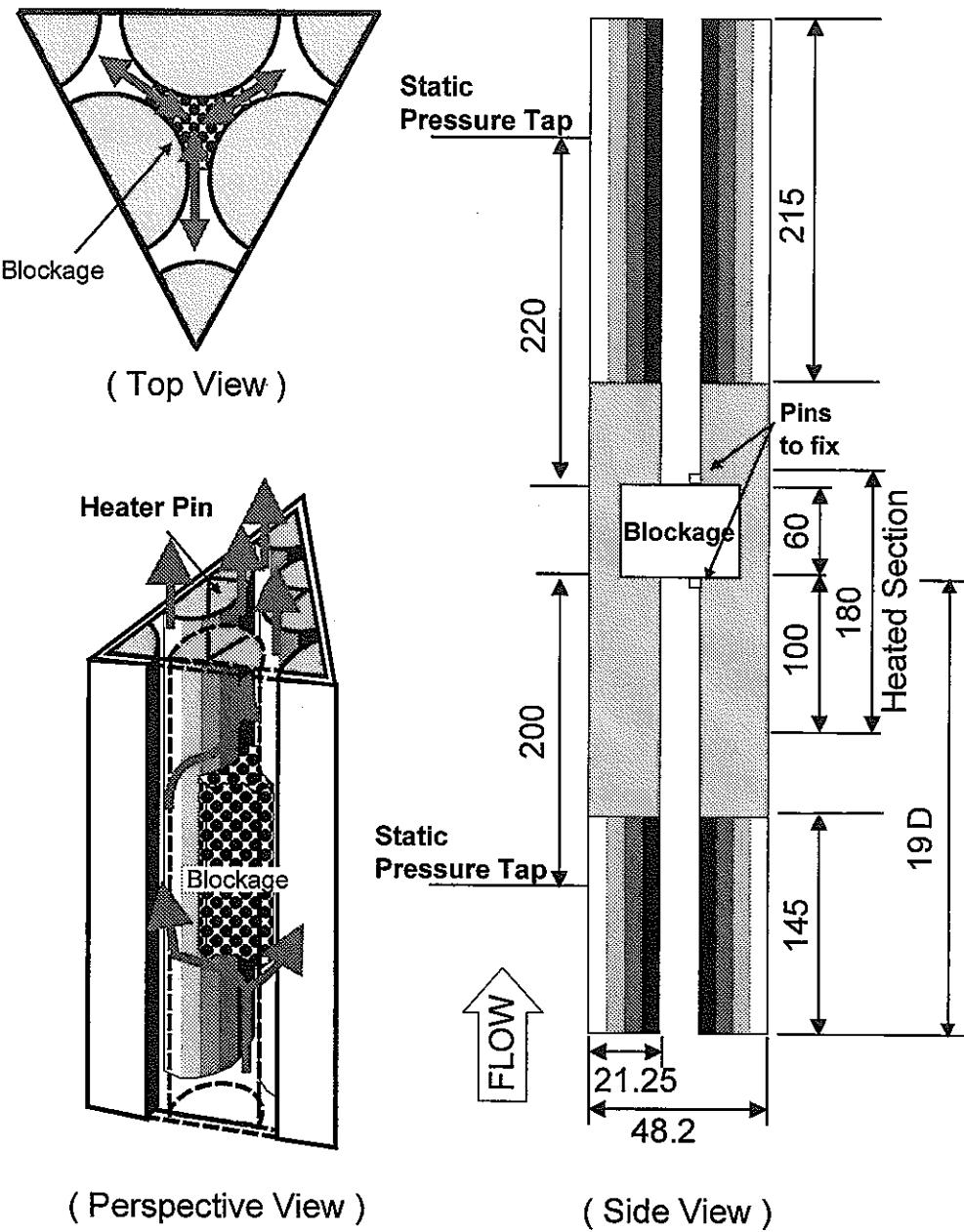


Fig.2-2 Schematic of 4 Sub-channel Geometry Test Section

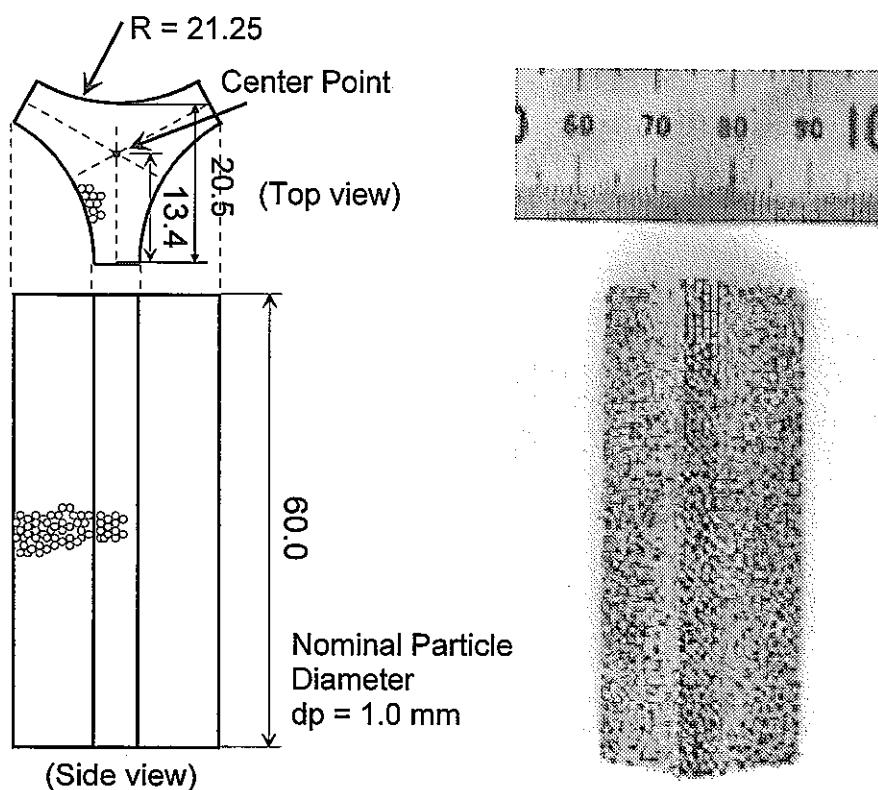


Fig.2-3 Schematic view and Picture of the Employed Porous Blockage

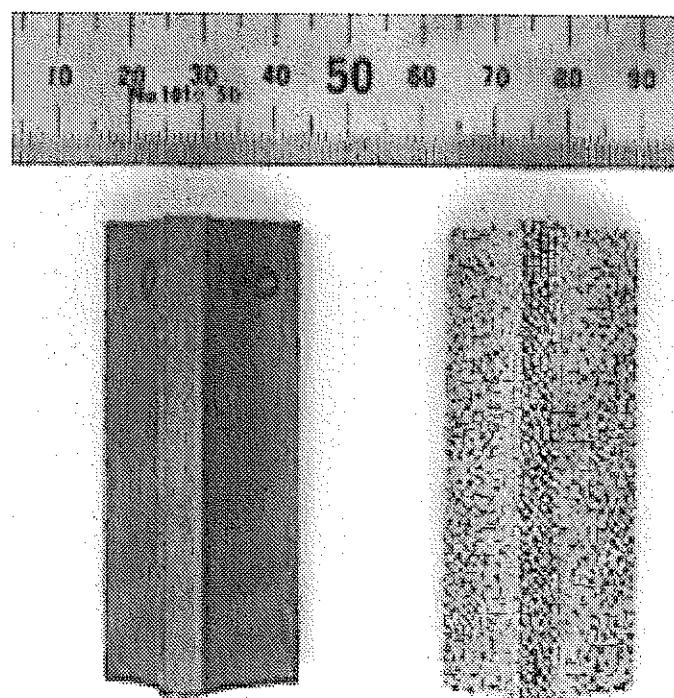


Fig.2-4 Picture of the Employed Porous Blockage and Solid Blockages

2. 4 可視化計測システム

可視化方法は、蛍光染料を流れ場に注入して、その蛍光輝度分布を写真等に撮影する注入トレーサ法である^[8]。染料にはウラニン粉末（フルオレセインナトリウム, $C_{20}H_{10}Na_2O_5=376.28$ ）を水に溶解させた水溶液を用いた。

可視化システムの概略を Fig.2-5 に示す。試験体上部から厚さ約 5[mm] の Ar レーザシートを入射して照明とした。閉塞物の側面を NTSC 8mm ビデオカメラ (Sony CCD-VX1) により、シャッタースピードを 1/500[s] に固定して撮影した。ビデオカメラによりビデオテープに録画されたアナログ画像は、ビデオキャプチャボード (CANOPUS Power Capture PCI VE5.0) を介して動画ファイル (Motion JPEG AVI 形式) としてコンピュータに保存される。AVI 形式の動画ファイルを各フレームごとビットマップ形式の静止画像データに変換して解析を行った。

Fig.2-6 に可視化観測用アクリル窓および染料注入管を示す。観測用アクリル窓は、Fig.2-7 に示すように 4 サブチャンネル試験体断面の頂角に位置しているヒータとの交換が可能であり、閉塞物側面方向から試験体内部の流れを観測することが出来る。閉塞物（高さ 60[mm]）は観測窓のおよそ中央部に位置する。閉塞物上下端面それぞれの上下流方向 200[mm] の位置から染料注入管を挿入する。染料注入管は、流力振動を防止するため先端部を除き外径 4[mm], 内径 1[mm] の厚肉細管を用いた。先端部（長さ 70[mm]）は注入管を挿入することによる流れ場への影響を低減するため、外径 1[mm], 内径 0.5[mm] の薄肉細管とした。

Fig.2-8 に試験体外側に設置されている蛍光灯を照明として撮影した画像（上）と撮影画像の一例（下）を示す。Fig.2-5 および Fig.2-7 に示す試験体側面の可視化観測用窓を通しての画像が得られる。また、閉塞サブチャンネル手前の健全サブチャンネル内には冷却材温度を測定するため、閉塞物側面下部に熱電対、閉塞物上部に熱電対と固定用のスペーサが取り付けられており、これらの箇所が画像上で陰となっている。

ウラニン水溶液はレーザ光を照射すると蛍光を発する^[9]。励起光（レーザ光）が蛍光分子（ウラニン分子）に吸収され、蛍光分子の外殻電子が基底状態から励起状態に移り再び基底状態に戻るときに蛍光が生じる。それ故、蛍光の波長は、吸収波長よりも長波長となる。ウラニンの場合、Ar レーザ光の青緑色 (488[nm] および 514.5[nm] の混合光) を吸収し、黄緑色の蛍光を示す。Fig.2-8 の画像中央下に緑色の雲のように見えるのがトレーサのウラニン水溶液の蛍光である。

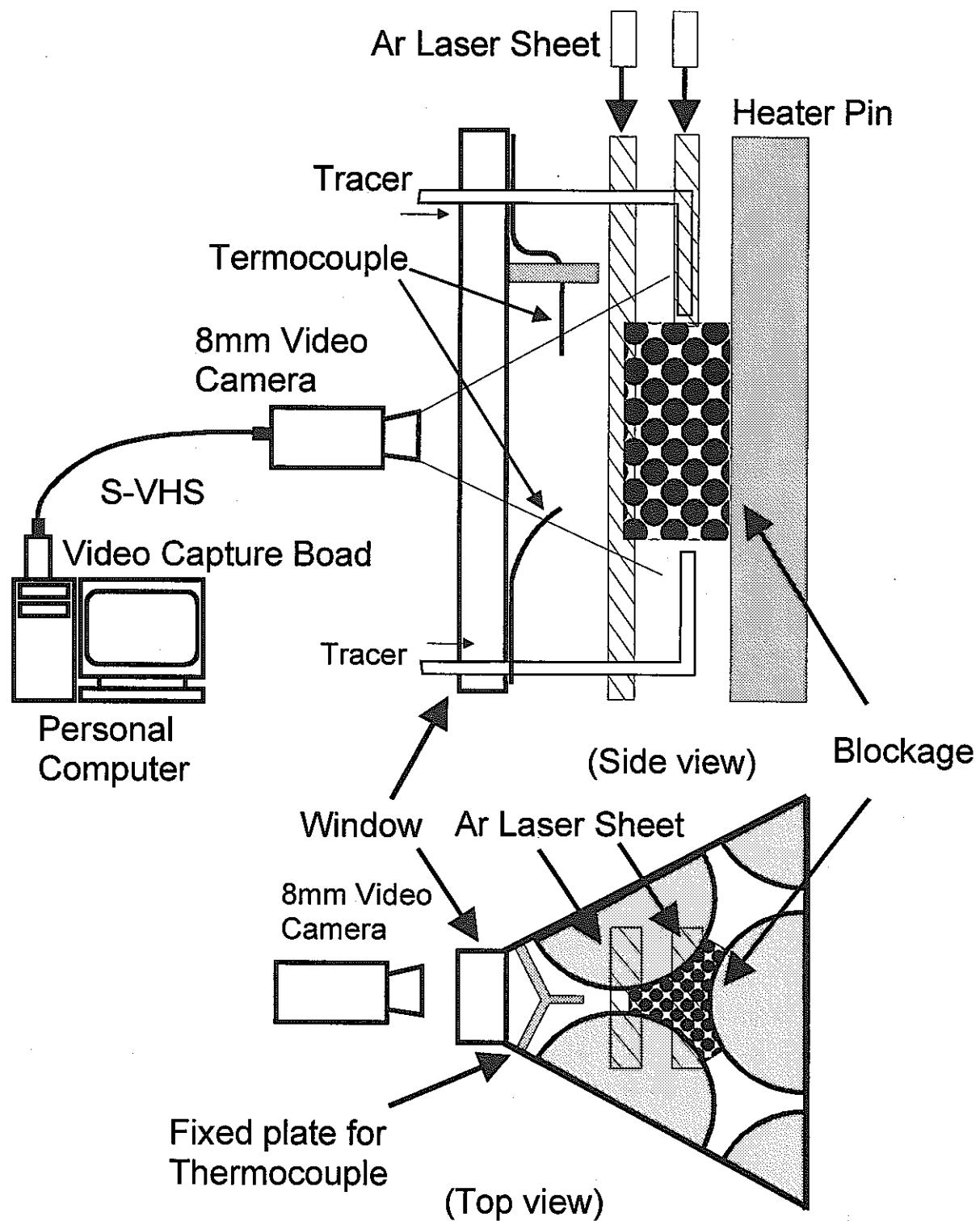


Fig.2-5 Schematic View of Picture Aquisium System

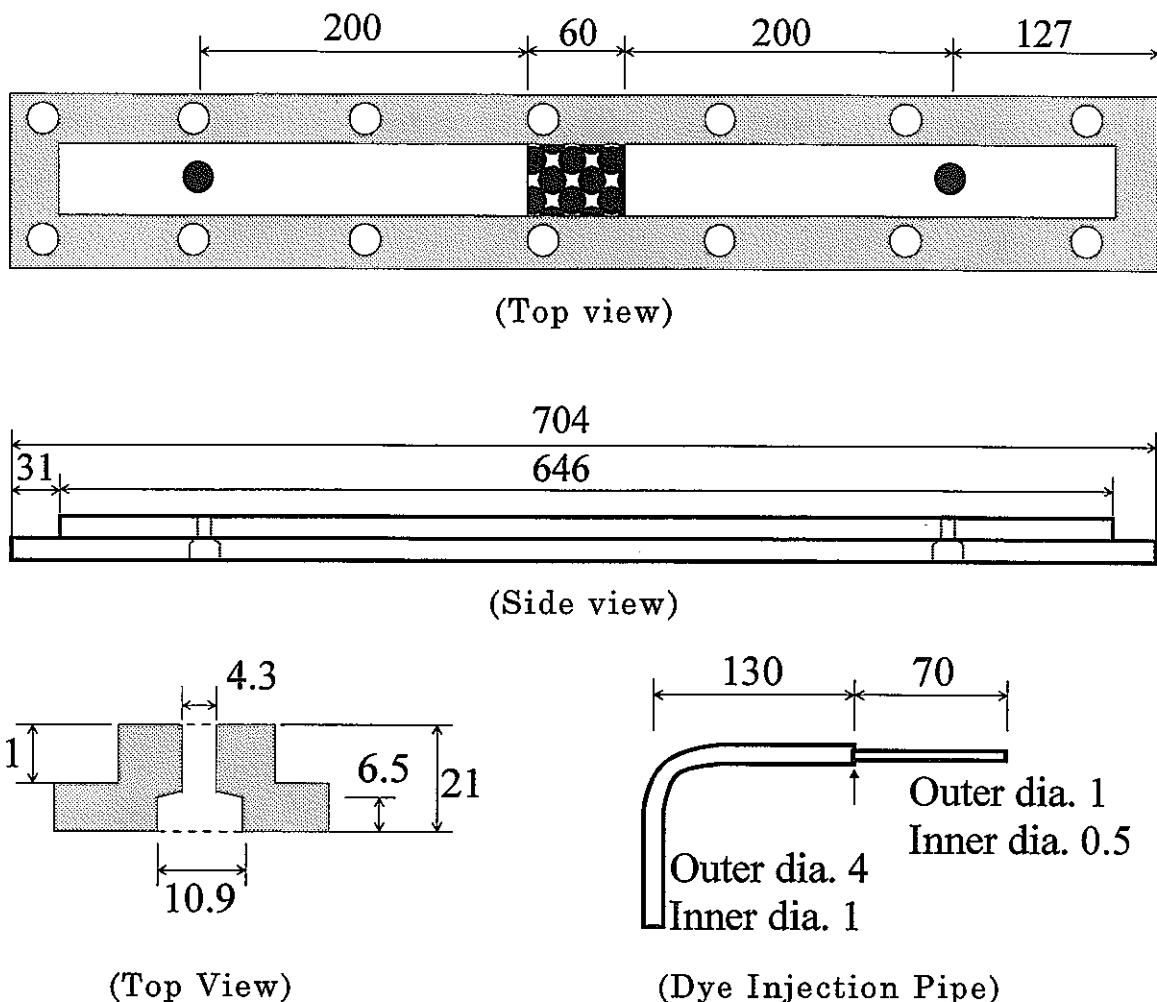


Fig.2-6 Dye Injection Pipe and Acrylic Window
for Flow Visualization

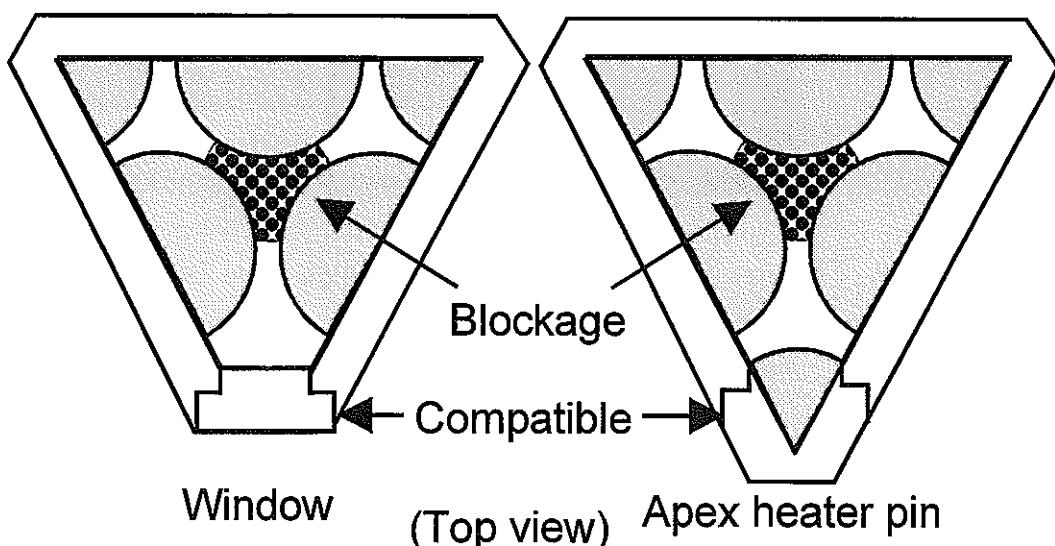


Fig.2-7 Test Section for Flow Visualization

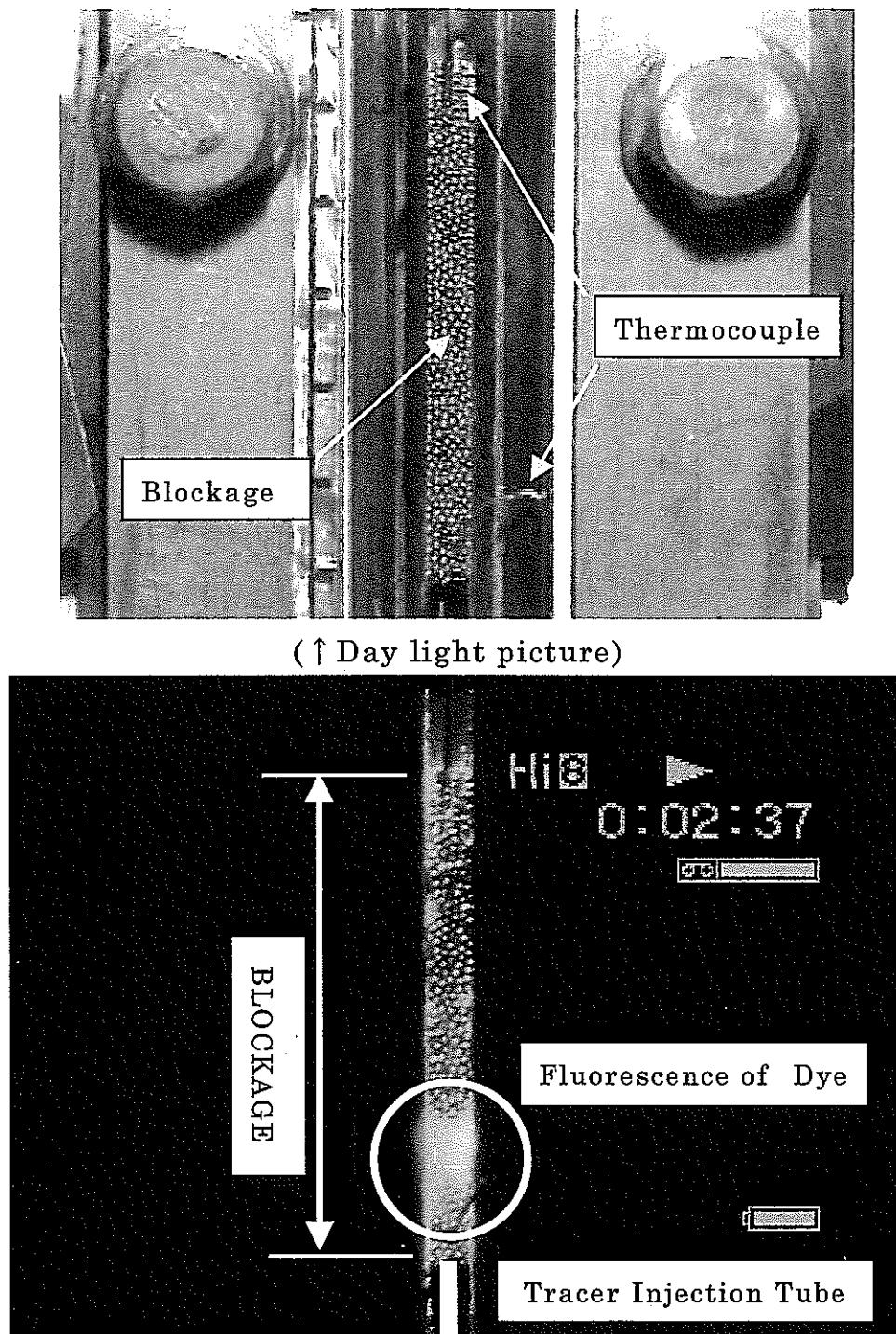


Fig.2-8 Front View Picture of the Liquid-side Flow
very near the Porous Blockage
(Fluorescence Region of Fluorescein Sodium
is Green-Yellow Part like clouds)

3. 可視化試験

3. 1 試験条件

閉塞物周辺の流動場を把握するため、Fig.1-2 に示すように可視化領域を閉塞物側面と閉塞物下流側の後流領域とした。試験パラメータは試験体流入流量である。試験体流入流量は、別途行われる数値解析結果との比較のため 4 サブチャンネル水流動試験装置を用いて行った温度分布測定試験と同じ条件 $0.4 \sim 2.0 [\text{m}^3/\text{h}]$ とした。ただし、本可視化試験においては、ヒータによる加熱は行わず等温条件とした。トーサ注入位置は閉塞物下端あるいは上端の高さで、Fig.3-1 に示すように閉塞物側面から $14[\text{mm}]$ 内部の位置（閉塞物断面重心）である。Table 1 に試験条件の一覧を示す。Re 数は試験体流入流量から求めた閉塞物のない断面での平均流速 (Q_t/S) と水力等価直径 D_e により定義される。

閉塞物側面の流況を観察する場合は、Fig.3-2 に示すようにレーザシートをテスト部上部から閉塞物側面に入射し、閉塞物の上流側（画面下方）から染料を注入した。Fig.3-3 に試験体流入流量 $0.4 [\text{m}^3/\text{h}]$ ($\text{Re}=1.7 \times 10^3$) での閉塞物側面の流況を撮影した画像の一例を示す。以下の解析は Fig.3-3 中の中央部に写っている閉塞物側面領域（白枠で示した領域）についてのみ行った。

閉塞物後流域を撮影する場合は、Fig.3-4 に示すように染料注入管と同じ位置（閉塞物断面重心）にレーザシートを入射し、閉塞物の下流側（画面上方）からトーサを注入した。Fig.3-5 に試験体流入流量 $0.4 [\text{m}^3/\text{h}]$ ($\text{Re}=1.7 \times 10^3$) での閉塞物側面の流況を撮影した画像の一例を示す。以下の解析は、Fig.3-5 中の中央部に写っている閉塞物側面領域（白枠で示した領域）についてのみ行った。

切り取った画像のサイズは、閉塞物側面の様子を捕らえている範囲 $640[\text{Pixel}] \times 30[\text{Pixel}]$ とした。閉塞物の高さを画像から判断すると $360[\text{Pixel}]$ であり、実際の高さは $60[\text{mm}]$ である。よって、本可視化実験での空間分解能は $60/360=0.1667[\text{mm}]/[\text{Pixel}]$ である。

Injection point

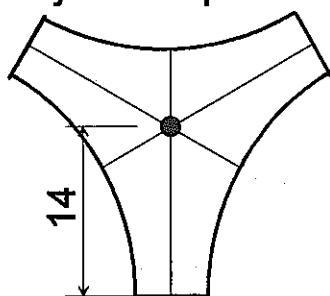


Fig.3-1 Dye Injection Point.

Table 1 Experimental condition

Flow-rate Q_L [m ³ /h]	Mean Velocity U [m/s]	Reynolds Number, Re	Direction	File No.
0.4	0.094	1.7×10^3	BOTTOM	F04B
			TOP	F04T
0.8	0.187	3.5×10^3	BOTTOM	F08B
			TOP	F08T
1.2	0.281	5.2×10^3	BOTTOM	F12B
			TOP	F12T
1.6	0.374	6.9×10^3	BOTTOM	F16B
			TOP	F16T
2.0	0.468	8.6×10^3	BOTTOM	F20B
			TOP	F20T

$$Re = \frac{De \cdot U}{\nu} = \frac{De \cdot (Q_L / S / (60 \cdot 60))}{\nu}$$

ν : Kinetic viscosity

$$De = 15.8 \text{ [mm]}$$

$$S = 1.187 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$$

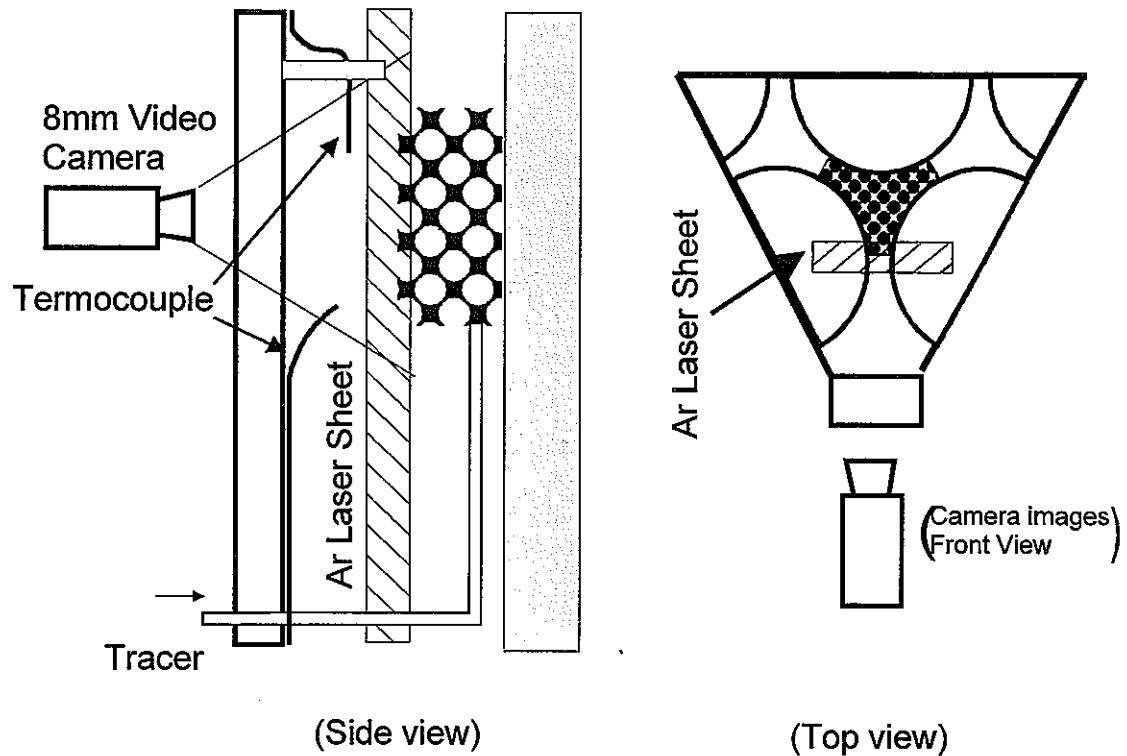


Fig.3-2 Schematic showing the Position of Camera, Laser sheet, Blockage, Subchannels and Tracer Injection Point

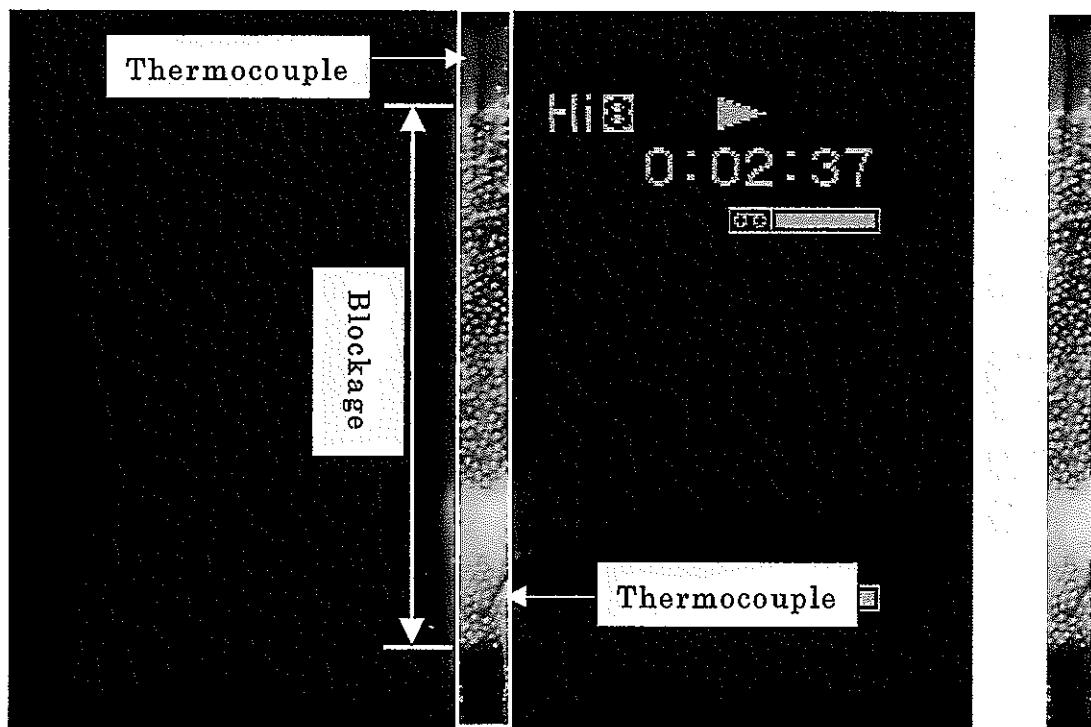


Fig.3-3 Front View of the Liquid-side Flow very near the Surface of the Blockage.

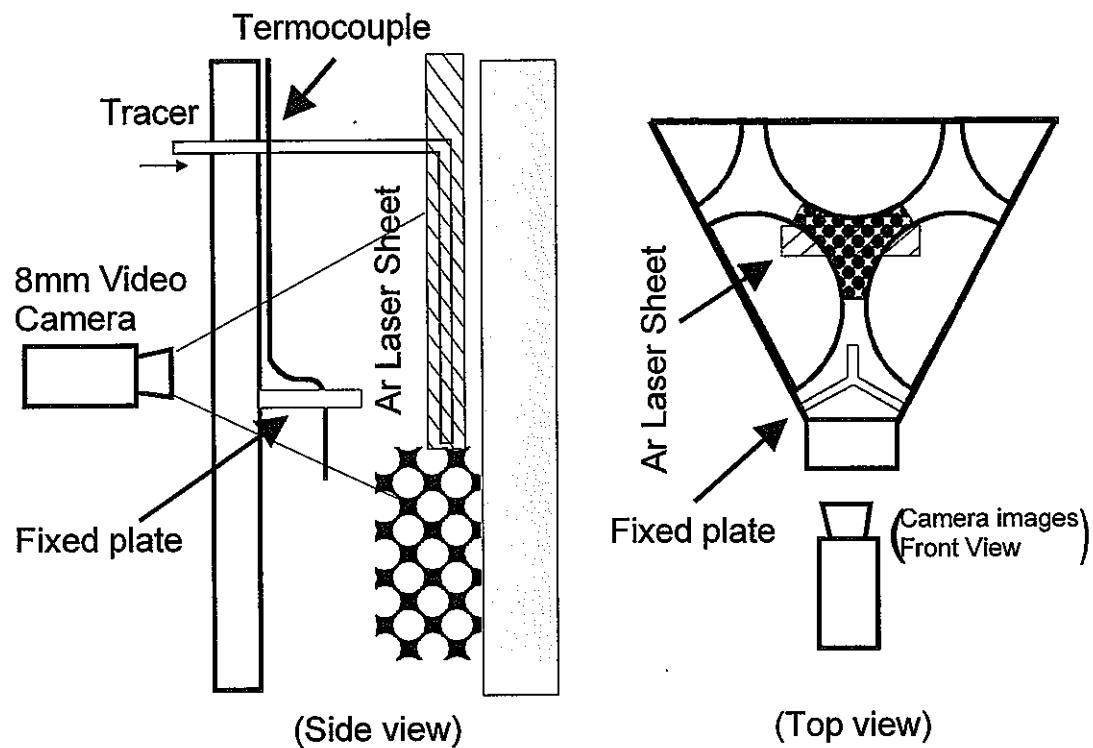


Fig.3-4 Schematic showing the Position of Camera, Laser sheet, Blockage, Subchannels and Tracer Injection Point.

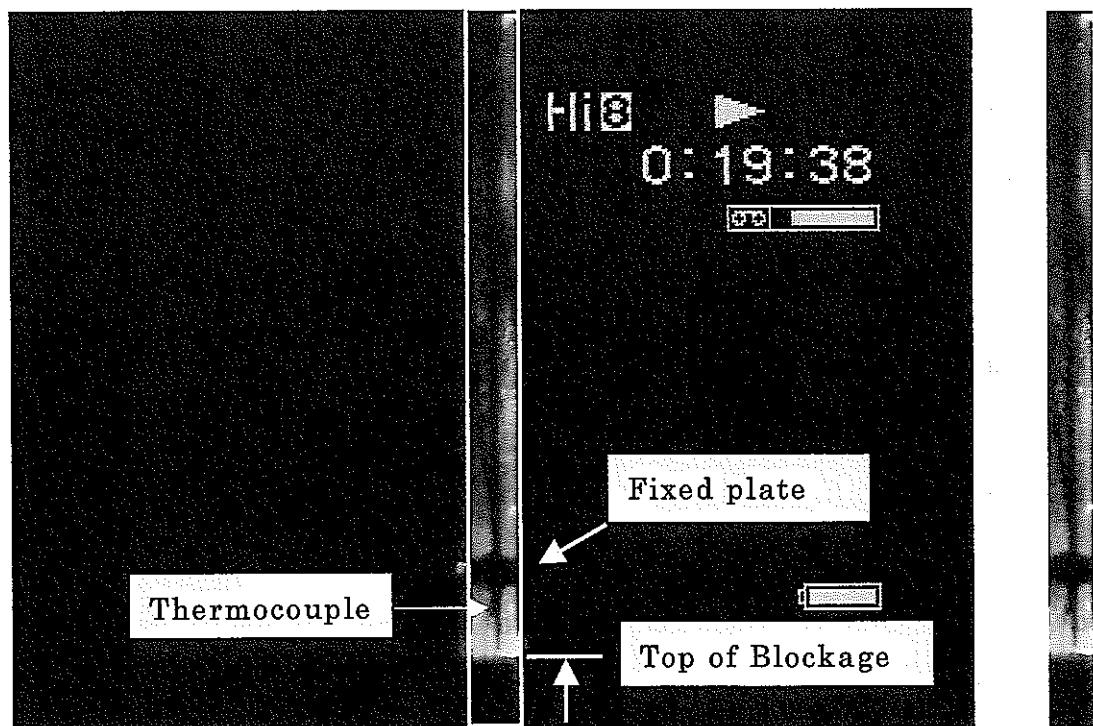


Fig.3-5 Front View of the Liquid-side Flow above the Blockage at the position shown.

3. 2 試験方法

染料の注入は、Fig.3-6 に示す連続式分注器（ウルトラアセプト）を用いて1回ごと定量2[ml]を注入した。試験手順を以下に示す。

- (1) レーザシートを入射する。
- (2) 染料を注入管内に充てんする。
- (3) 注入準備が整ったことを確認し、ビデオ撮影を開始する。
- (4) 一度に全量2[ml]を注入する。
- (5) 染料が閉塞物周辺に残っていないことを目視により確認する。
- (6) (2) に戻りこれを5回繰り返す。

この一連の作業を各流量条件ごとに行う。

試験では、2[ml]を1秒以内に全量注入する。ただし、閉塞物内部には染料が全て注入されず、一部は流れに乗って閉塞物下流へ拡散する（3.3.1節および3.3.2節参照）。注入は手動によって行われるため、厳密には一回ごと注入条件が変化する。そこで、注入条件の安定を確保するために、1) 一定量を取り分けることの出来る連続式分注器の採用、2) 特定の作業員による注入操作、3) 試験前に注入操作に習熟する、4) 5回の注入試験の実施と個別評価等の工夫を行った。これにより、閉塞物に注入される染料の量は計測されていないが、全流量条件にわたって毎回一定量の染料が同条件で閉塞物内部に注入されているものとした。

染料注入により流動場を乱さないように注入管を細くし、流れが対称であると期待できるサブチャンネル中心に注入管を設置した。また、染料注入によって局所的に流量が増加し、注入しない場合と若干流況が異なることが予想される。しかし、注入に要する時間は1秒以内と短い上に、閉塞物内に入りきらない染料が閉塞物下流に流れ去るまでの時間が流れの安定に要する時間と考えれば、最も低流量条件($Q_L=0.4[m^3/h]$)で1.5秒であることが予備試験から分かっている。第4章の考察で評価の対象とする範囲は染料が閉塞物下流に流れ去った後であり、染料注入によって流れ場が乱され、評価結果に影響することはないと考える。すなわち、染料が閉塞物下流に流れ去るまでの画像は、流れ場に染料注入の影響が残っていると考えられるため第4章で行う画像解析の対象から除外する。

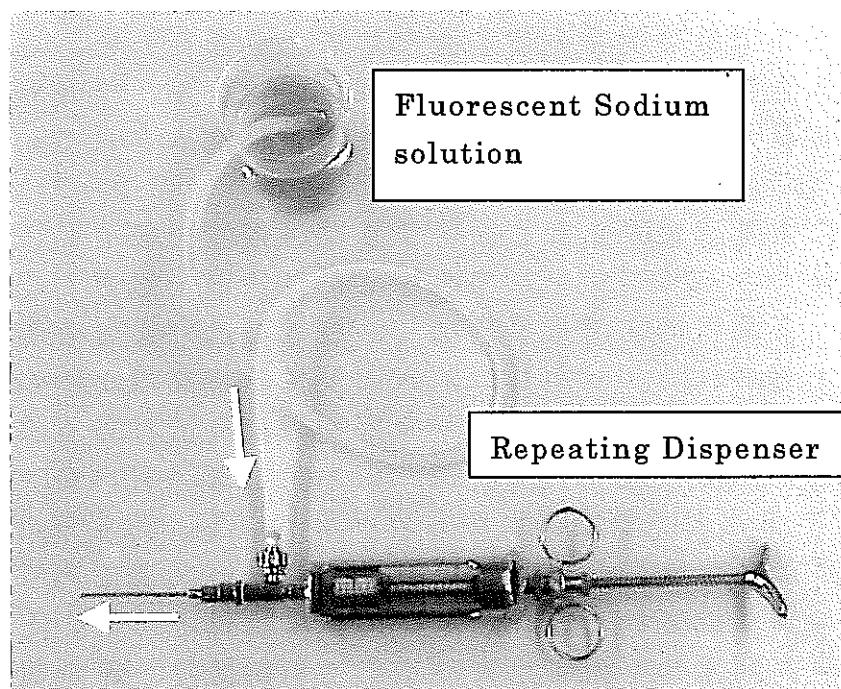
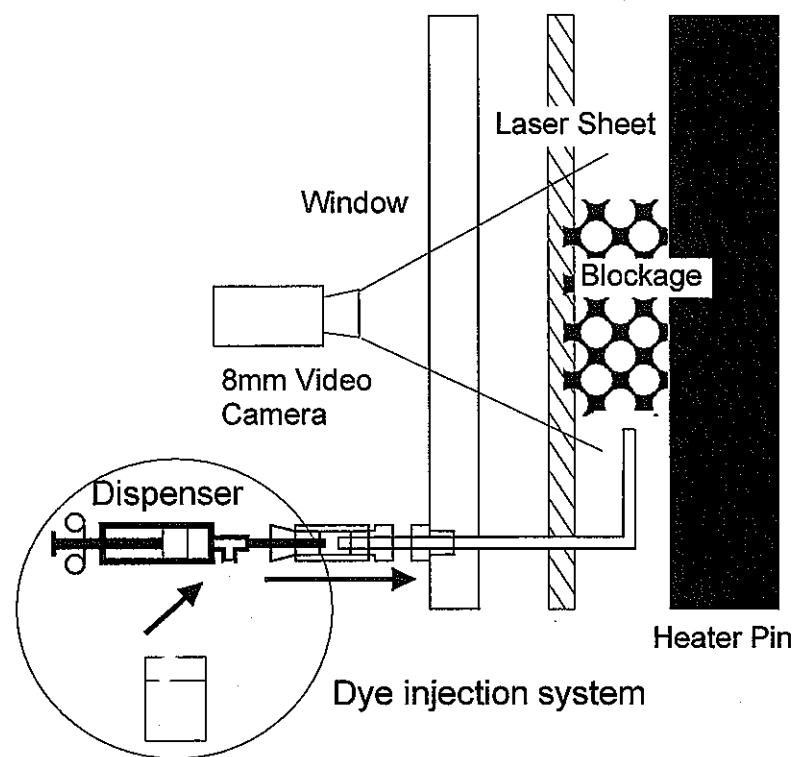


Fig.3-6 Dye Injection System

3. 3 可視化観測

3. 3. 1 閉塞物側面の流況

Fig.3-7(1)および(2)に閉塞物下端から染料を注入したケースについて試験体流入流量 $0.4[m^3/h]$ ($Re=1.7\times10^3$) での閉塞物側面の流況を示す。Fig.3-7は、各画像間の時間間隔が $0.1[s]$ である。時刻 $0[s]$ は染料を注入する直前を示す。

染料は注入管から閉塞物下端に一気に押し込まれるが、閉塞物内部に入りきらない染料は、閉塞物下端から側面を通過し下流へ流れて行く (Fig.3-7(1)の白枠参照)。この流れが時刻 $0.6[s]$ から $1.5[s]$ まで観測できる。Fig.3-7(1)に白矢印①で示すように時間の進行 (左から右) と共に染料が下向きに流れしていく。つまり、染料の余剰分は、大部分が閉塞物周辺の速い流れに沿って下流へ流されるが ($0[s]$ から $0.6[s]$ まで)、一部は閉塞物側面に生じる循環渦に捕らえられ下降流となっている ($0.6[s]$ から $1.5[s]$ まで)。さらに、Fig.3-7(1)に白矢印②で示すように、閉塞物下端から内部へ流入した染料が閉塞物側面から流出し、この流出している領域が時間の進行に伴って上昇している。また、閉塞物側面では循環渦が生じ閉塞物側面に沿って下降流が生じているため、染料は閉塞物上方に拡散せずに、閉塞物側面の染料が流出している箇所から閉塞物下方へ拡散している (Fig.3-7(2)中の白矢印③参照)。染料の流出位置は時刻 $3[s]$ 程度までは上昇するが、その後ある高さを基準に上下に数秒間隔で変化している (Fig.3-7(2)中の白矢印④参照)。つまり、閉塞物内部では流れ場が不安定であることを示している。

Fig.3-8 から Fig.3-11 に試験体流入流量 $0.8[m^3/h]$ ($Re=3.5\times10^3$)、 $1.2[m^3/h]$ ($Re=5.2\times10^3$)、 $1.6[m^3/h]$ ($Re=6.9\times10^3$)、 $2.0[m^3/h]$ ($Re=8.6\times10^3$) での閉塞物側面の流況をそれぞれ示す。各図の(1)、(2)は、各画像間の時間間隔が $0.1[s]$ である。

Fig.3-8 から Fig.3-11 の各(1)図において、Fig.3-7(1)同様に、閉塞物内部に入りきらない染料は閉塞物外側の流れに乗って流れ、一部が閉塞物側面に生じる循環渦に捕らえられ下降流となっている (Fig.3-7(1)白矢印①および Fig.3-8(1)白矢印⑤参照)。試験体流入流量 $0.4[m^3/h]$ ($Re=1.7\times10^3$) の場合、この流れが時刻 $1.5[s]$ まで続いているのに対し、流量の増加と共に時間が短くなり Fig.6-10(1)の $2.0[m^3/h]$ ($Re=8.6\times10^3$) では時刻 $0.5[s]$ までとなっている。このように、閉塞物を避ける流れは流量の増加と共に速くなり、閉塞物側面での流体の拡散を促進していることが分かる。また、可視化画像 (Fig.3-7(1)の時刻 $0.6[s]$) によると、

塞物中央部で染料が流出していることから、閉塞物側面の循環渦の範囲は閉塞物中央部から閉塞物下端までと考えられる。他の流量条件での可視化画像 (Fig.3-8(1)の時刻 0.6[s], Fig.3-9(1)の時刻 0.3[s], Fig.3-10(1)の時刻 0.3[s], Fig.3-11(1)の時刻 0.3[s]) でもほぼ閉塞物中央部から染料が流出している。

いずれの流量条件においても流出部上端の高さは一定ではなく、ある高さを基準に上下に変化している (Fig.3-7(2)白矢印④参照)。これは、閉塞物側面の循環渦領域の流れ場が変動して不安定であるあると共に、閉塞物側面で空隙率が不均一であり、冷却材が流動場の変動の影響を受けて、閉塞物内部の抵抗のより少ない流路（空隙）を絶えず選択しながら流れているためと考えられる。これから、閉塞物内部では粘性支配のゆっくりとした流れではなく、周囲の流動場の影響を受け圧力勾配支配の比較的速い流れであり空間的な流速分布を持って冷却材が流れていると考えられる。

染料流出位置は、流量の増加に伴い早い時間で準安定状態に達する (Fig.3-7(1)白矢印②および Fig.3-8(1)白矢印⑥参照)。上昇が落ち着く時間は試験体流入流量 $0.8[m^3/h]$ ($Re=3.5\times10^3$) の場合は時刻 1.6[s], $1.2[m^3/h]$ ($Re=5.2\times10^3$) の場合は時刻 1.3[s], $1.6[m^3/h]$ ($Re=6.9\times10^3$) の場合は時刻 0.8[s], $2.0[m^3/h]$ ($Re=8.6\times10^3$) の場合は時刻 0.8[s]となり、試験体流入流量の増加に伴い準安定状態に達するまでの時間は短くなる。このことから、流量の増加と共に閉塞物内部を上昇する流れも速くなり、閉塞物内部で流体の混合・拡散が促進されると考えられる。

全ての流量条件において、閉塞物側面から出した染料は閉塞物上方へは拡散せずに、閉塞物下方に拡散している様子が観察できる (Fig.3-7(2)白矢印③参照)。閉塞物下部の側面近傍では、循環流による下降流が生じていると考えられ、循環渦の再付着点は少なくとも染料の流出する位置よりも上部（閉塞物中央部付近）に存在するものと考えられる。

閉塞物側面からの流出は、解析結果^[5]からも明かとなっており、この循環渦の形成によって閉塞物側面の圧力が低下し、圧力の高い閉塞物下端との圧力差が駆動力となり、閉塞物下端から閉塞物内部へ流入した冷却材が閉塞物側面へ流出すると考えられる。

染料は分子拡散のように空間的に徐々に拡散せずに、染料塊（クラスター）が流出位置から離脱して下方へ流され (Fig.3-8(2)白枠内参照)，渦の下端で循環渦の外側にある上方への強い流れに引っ張られて上方（下流側）へ拡散していくのが観察できる。これにより、閉塞物側面の循環渦内部では比較的大きなスケールの乱れが生じ、流体の混合に寄与していることが分かる。

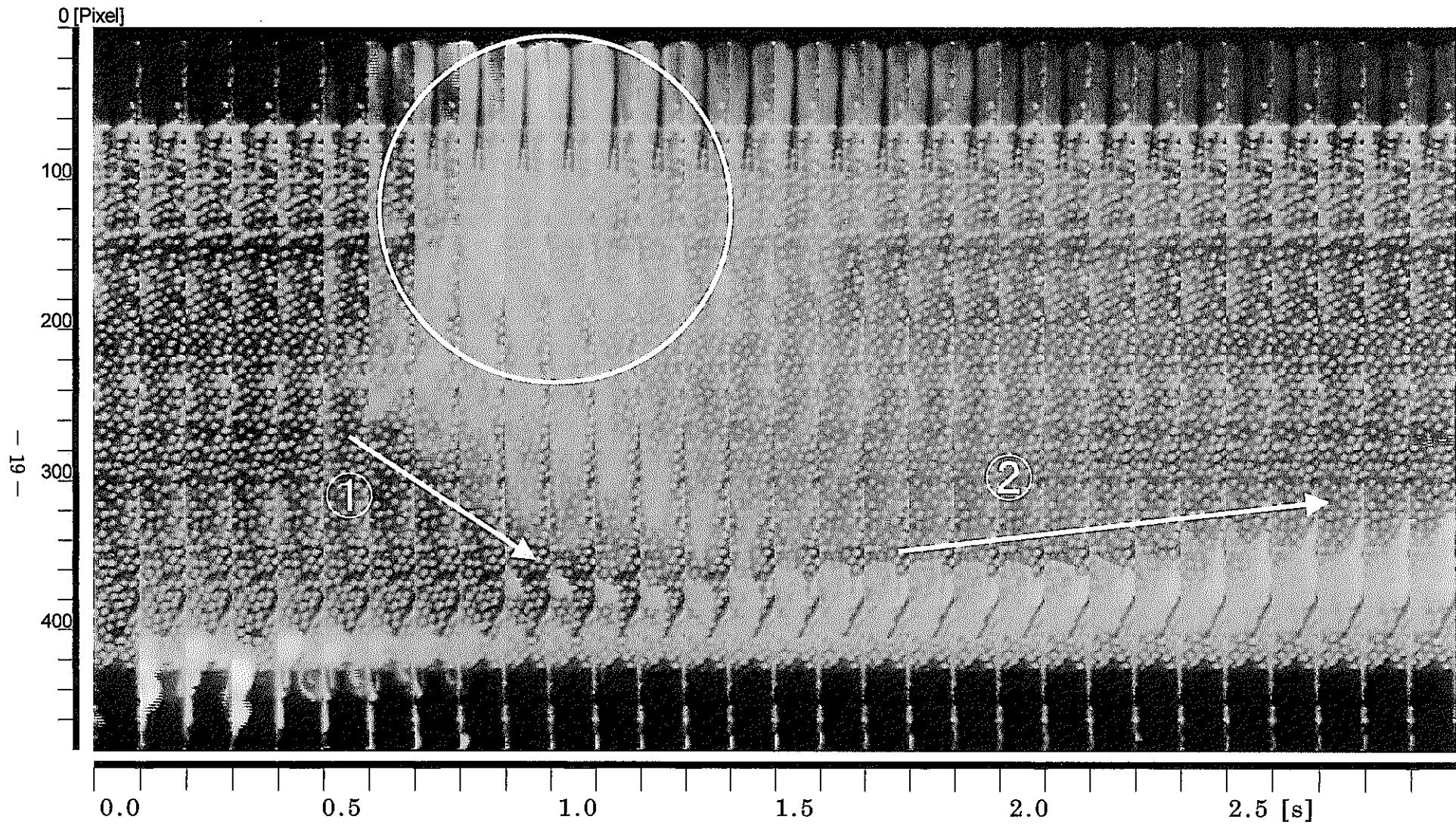


Fig.3-7(1) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=0.4[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=1.7\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

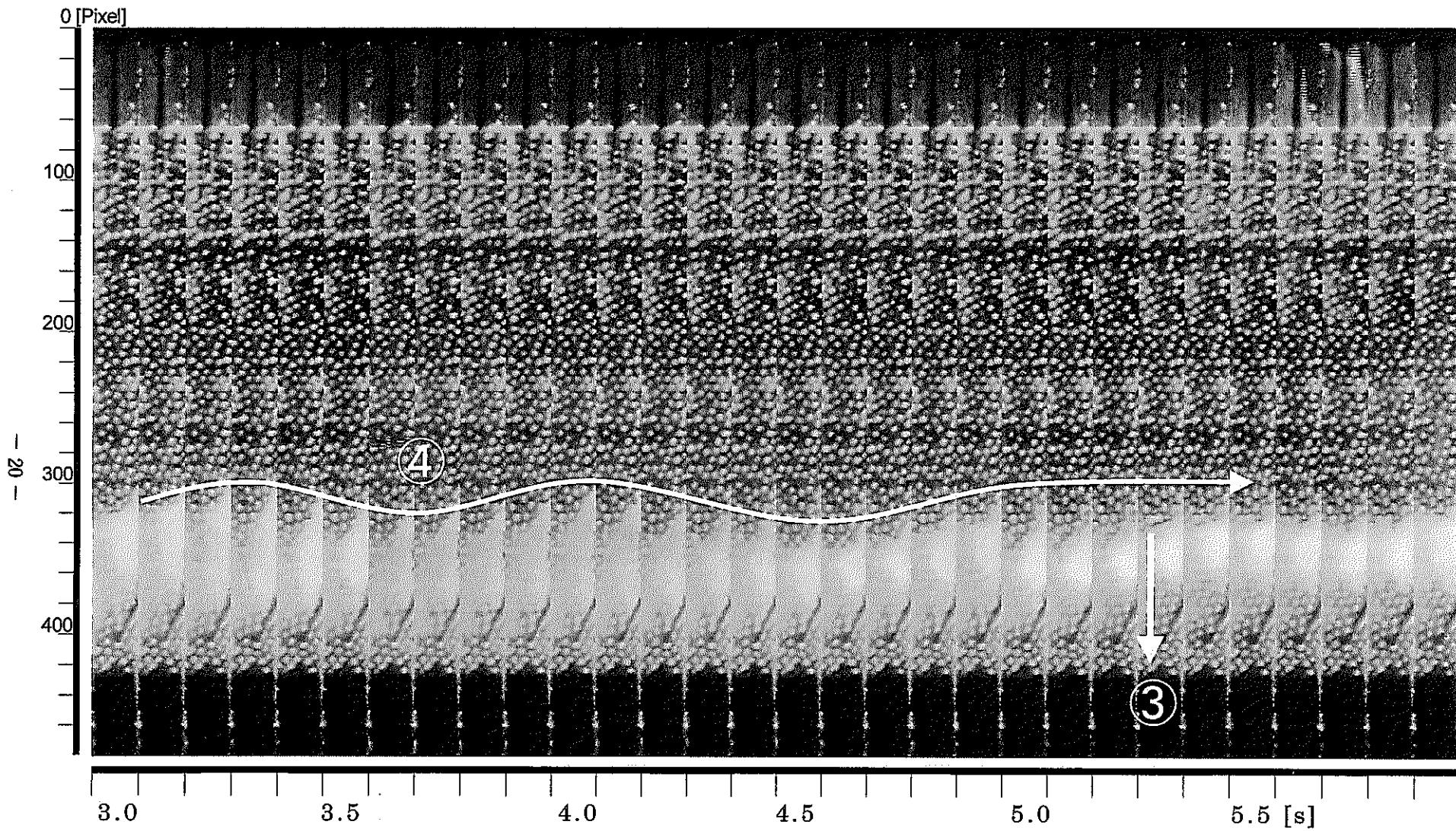


Fig.3-7(2) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=0.4[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=1.7\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

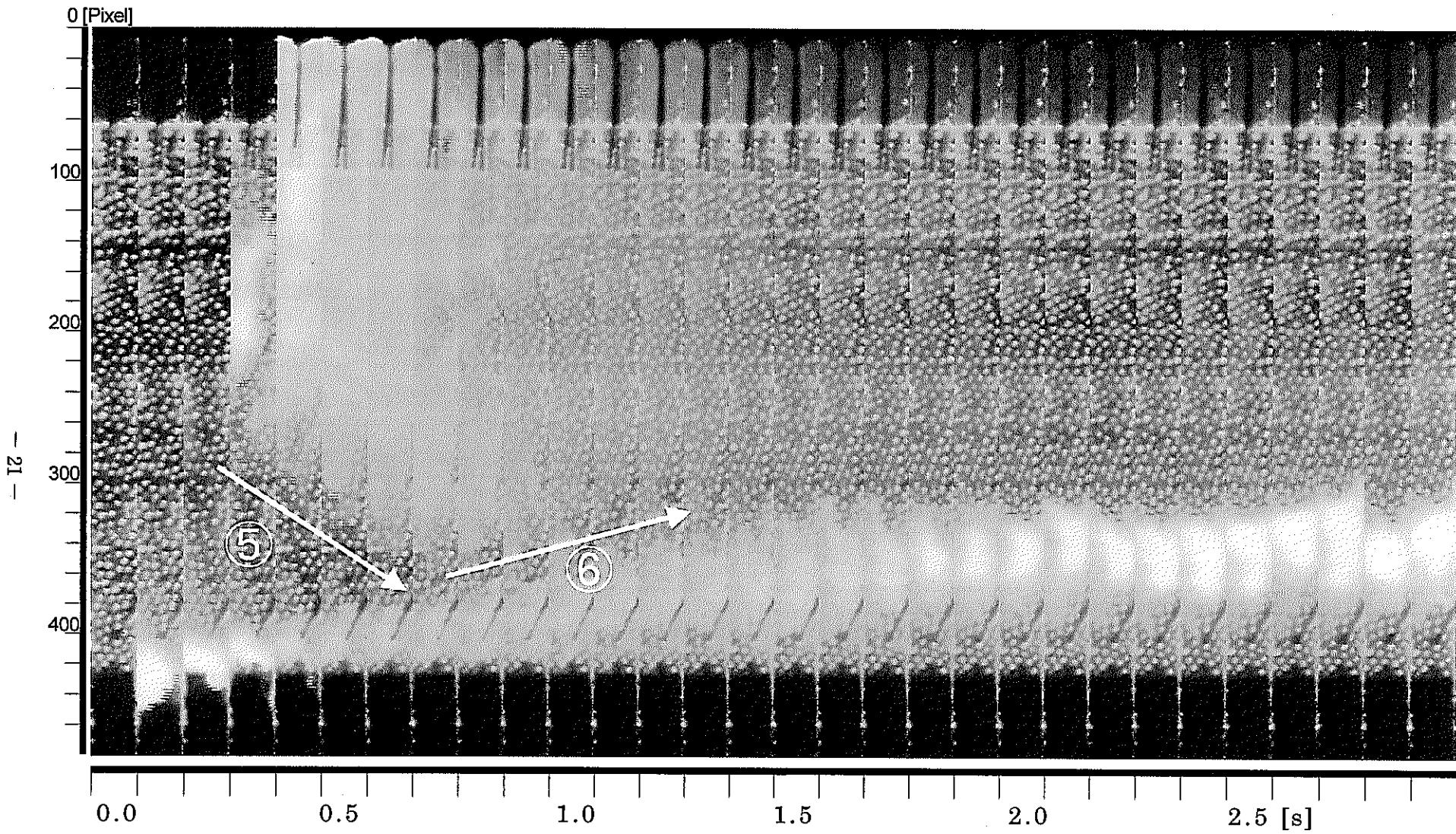


Fig.3-8(1) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=0.8[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=3.5 \times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

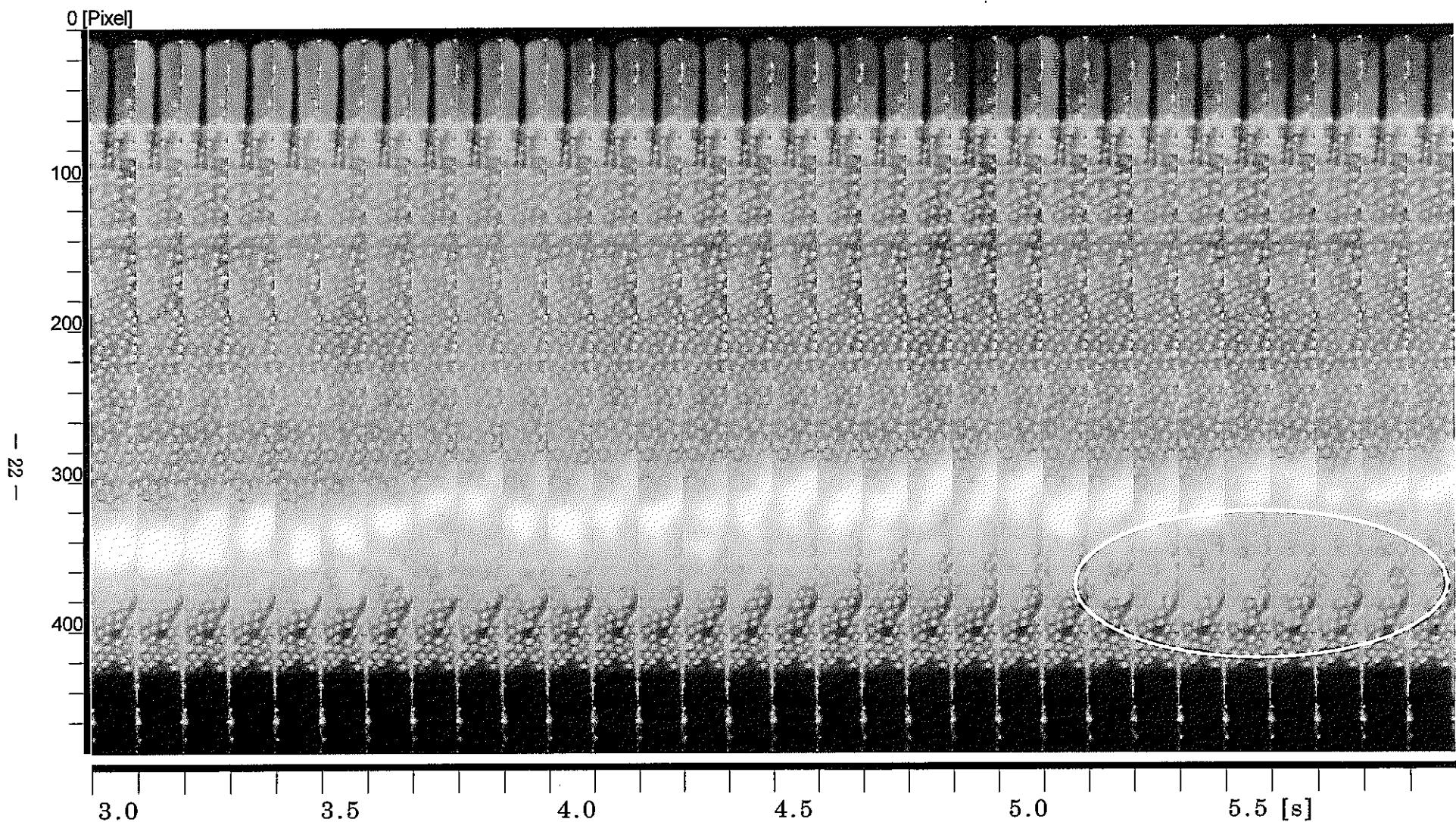


Fig.3-8(2) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=0.8 \text{ [m}^3/\text{h}\text{]}$, $Re=3.5 \times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

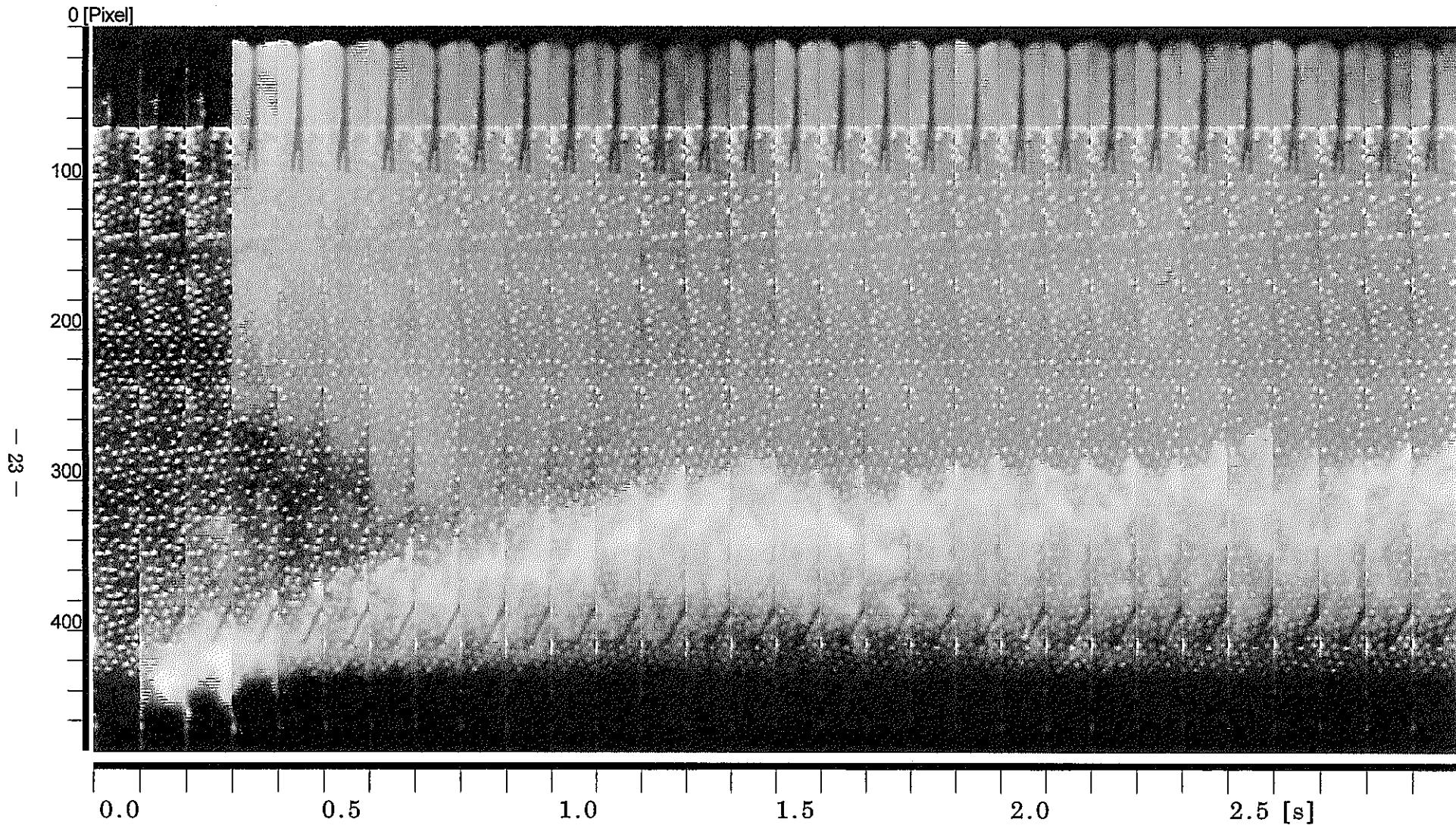


Fig.3-9(1) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=1.2[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=5.2\times 10^8$, Time interval = 0.1 [s])

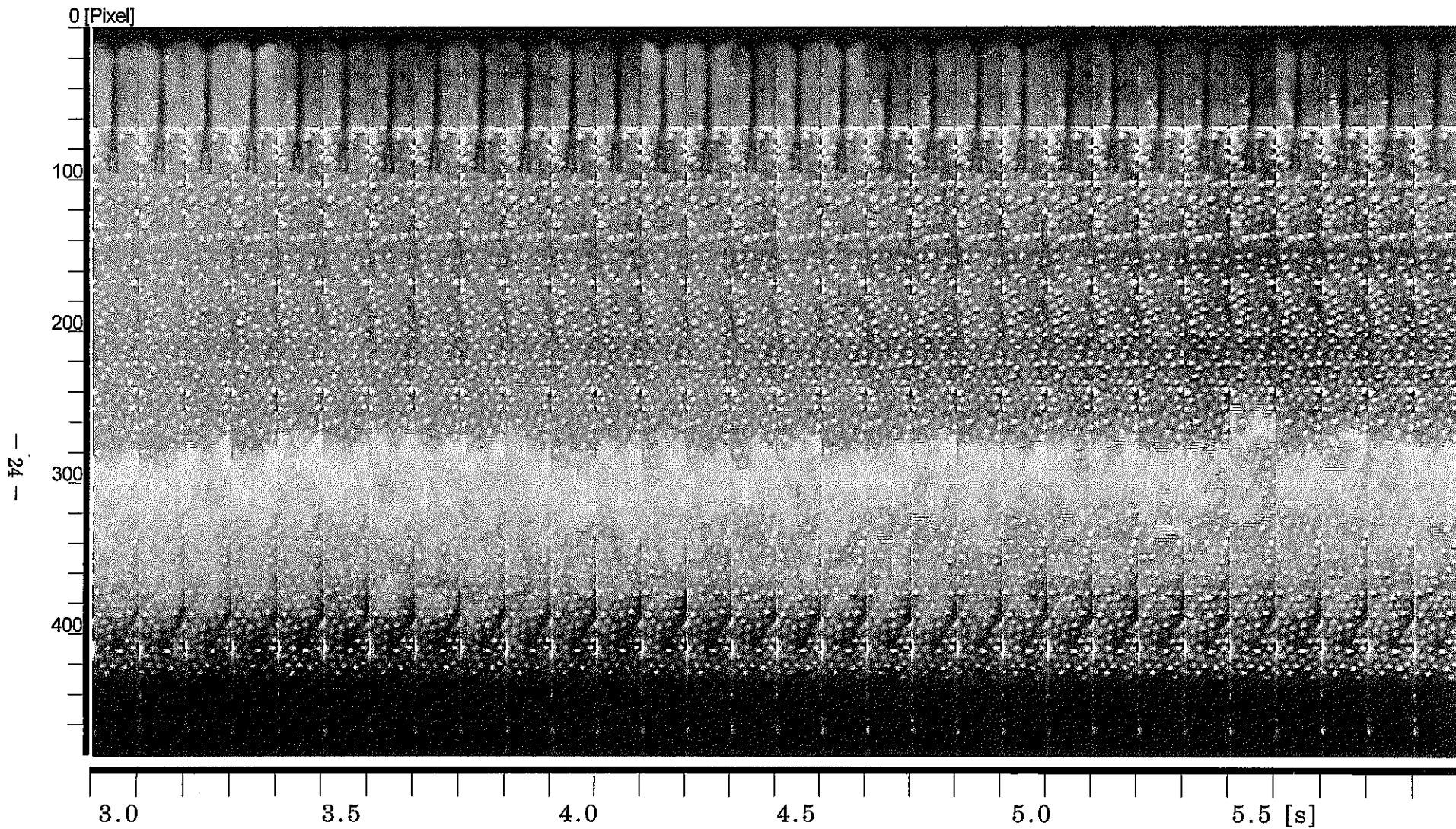


Fig.3-9(2) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=1.2 \text{ [m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=5.2 \times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

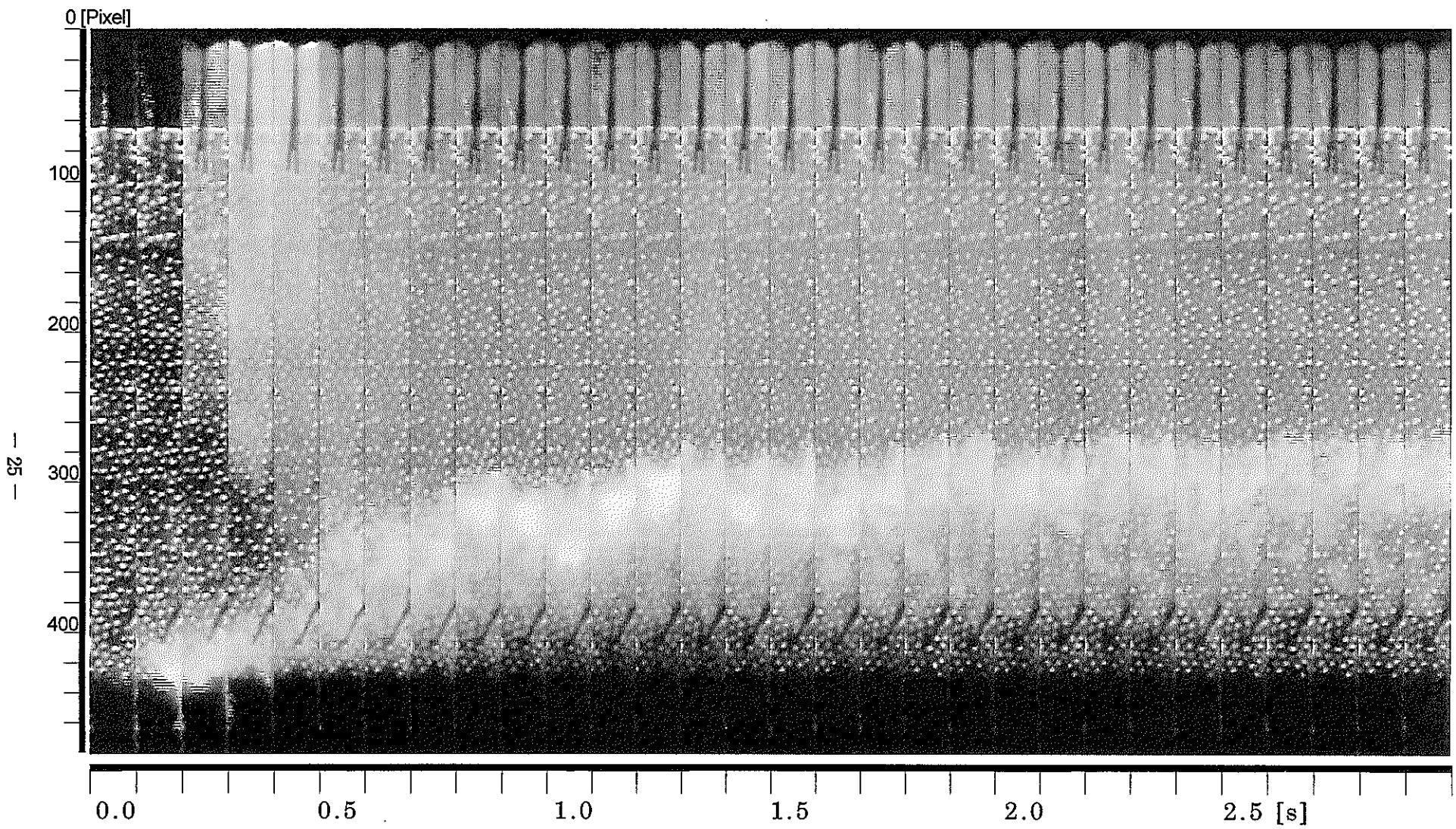


Fig.3-10(1) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=1.6[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=6.9\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

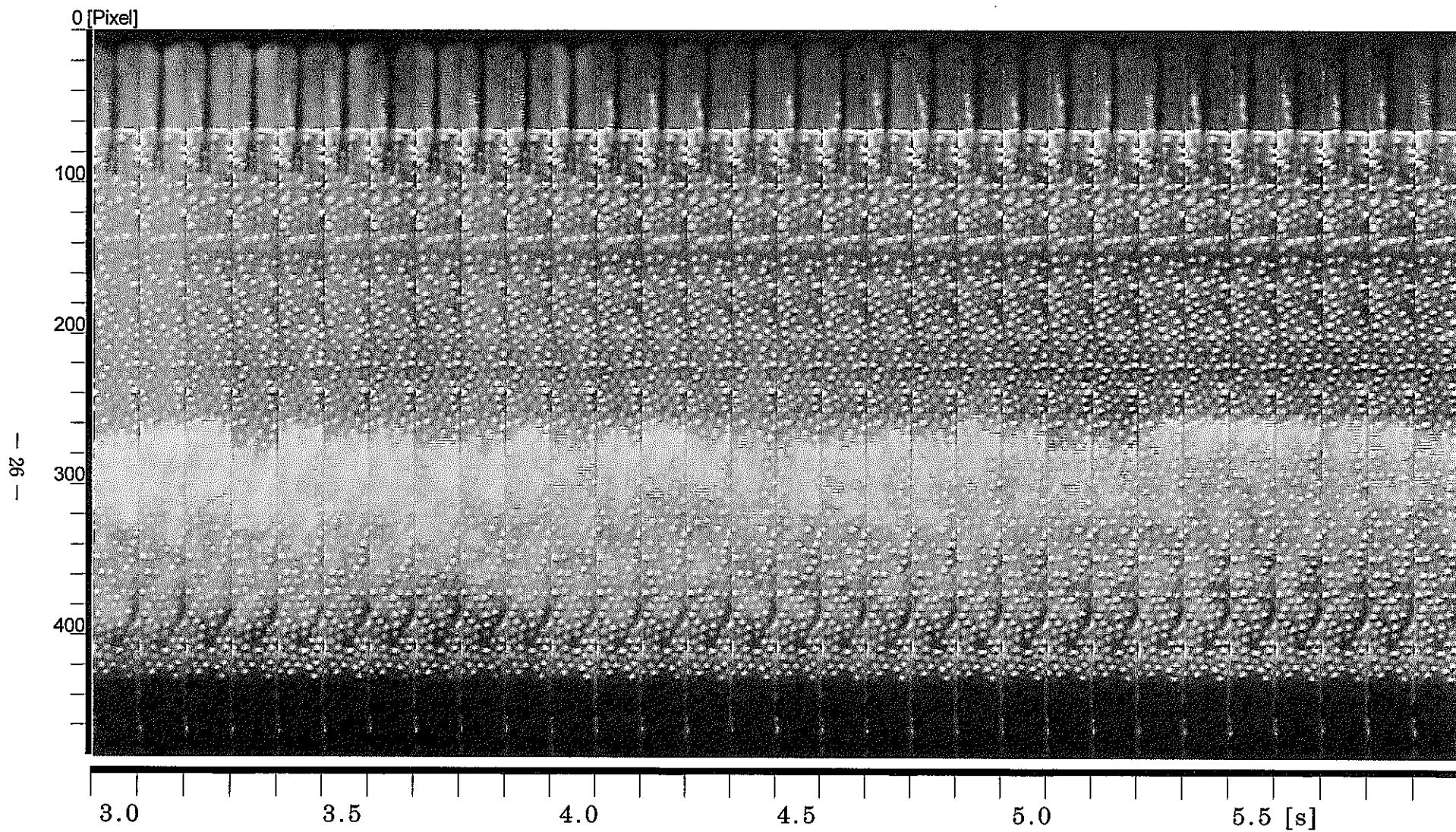


Fig.3-10(2) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=1.6 \text{ [m}^3/\text{h}]$, $Re=6.9 \times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

- 27 -

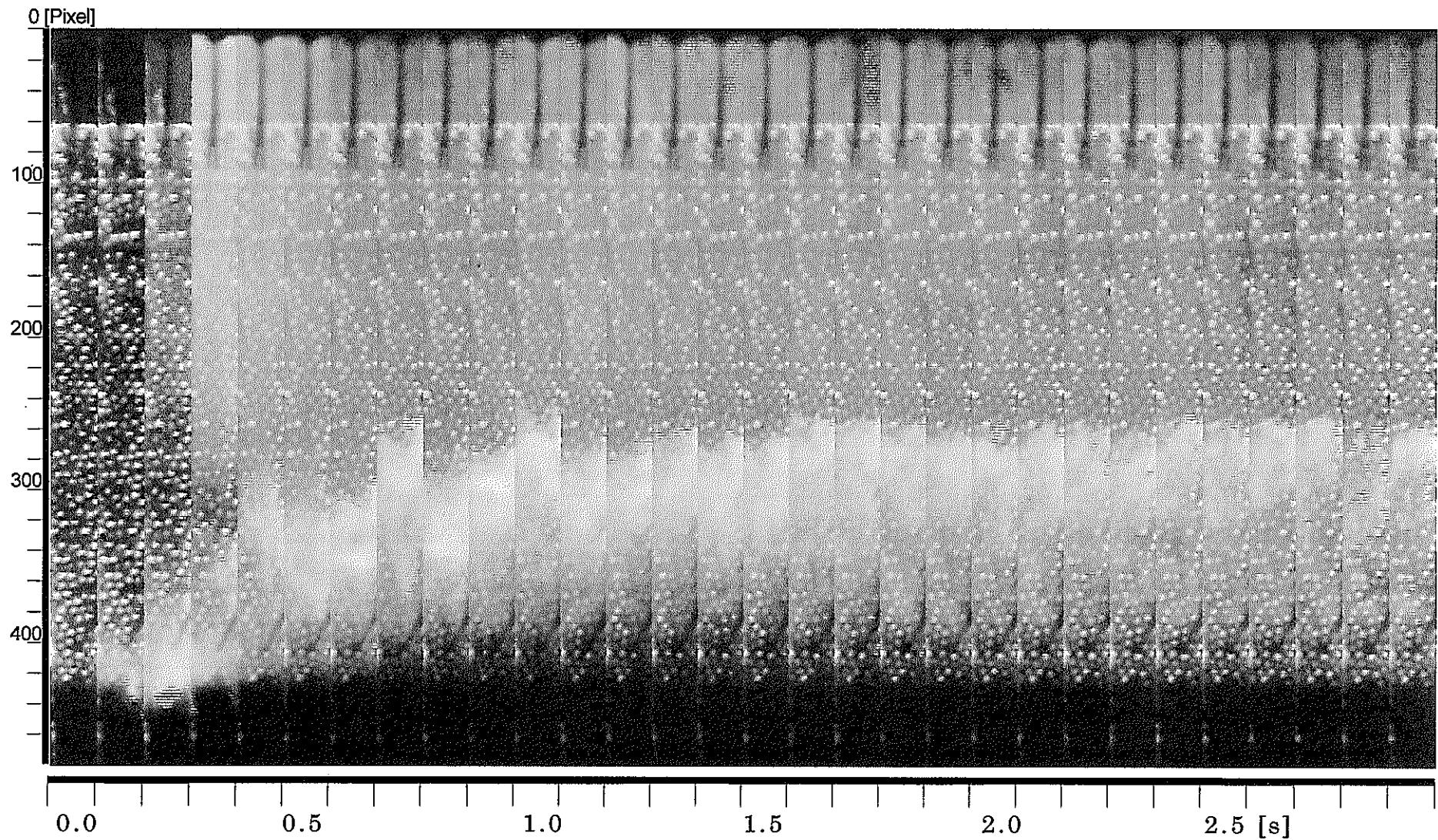


Fig.3-11(1) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=2.0[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=8.6\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

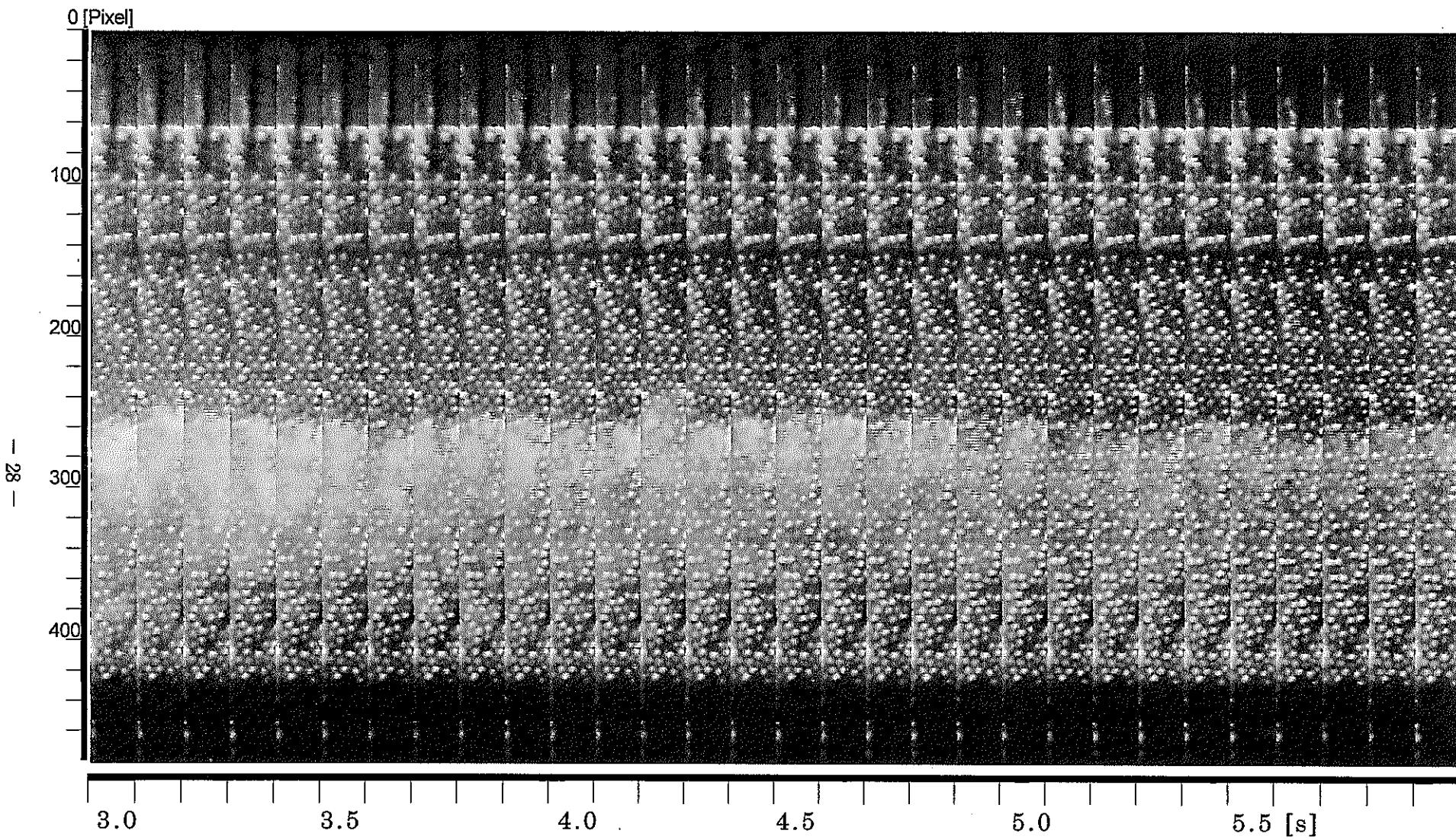


Fig.3-11(2) Time Series of Flow Pattern in the Region of Recirculation.
($Q_L=2.0[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=8.6\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

3. 3. 2 閉塞物後流域の流況

Fig.3-12(1)および(2)に、閉塞物上端から染料を注入して閉塞物後流域を観察した場合について、試験体流入流量 $0.4[\text{m}^3/\text{h}]$ ($\text{Re}=1.7 \times 10^3$) での閉塞物側面の流況を示す。各画像間の時間間隔は $0.1[\text{s}]$ であり、時刻 $0[\text{s}]$ は染料を注入する直前の時刻を示す。また、同様に Fig.3-13 から Fig.3-16 に試験体流入流量 $0.8[\text{m}^3/\text{h}]$ ($\text{Re}=3.5 \times 10^3$) , $1.2[\text{m}^3/\text{h}]$ ($\text{Re}=5.2 \times 10^3$) , $1.6[\text{m}^3/\text{h}]$ ($\text{Re}=6.9 \times 10^3$) , $2.0[\text{m}^3/\text{h}]$ ($\text{Re}=8.6 \times 10^3$) での閉塞物側面の流況をそれぞれ示す。各図の(1), (2)は、各画像間の時間間隔が $0.1[\text{s}]$ である。

染料は注入管から閉塞物上端に一気に押し込まれる。染料は一部が閉塞物内部に押し込まれ、一部は閉塞物上端から側面へ流れ閉塞物下流に生じる後流の外側にある速い流れに乗って下流へ拡散していく (Fig.3-12(1)白矢印⑦参照)。ところで、Fig.3-17 に示すように閉塞物の周辺においては、閉塞されていない流路（健全流路）を流れる冷却材が閉塞されている側の壁面に引きつけられ、流れの一部が壁面に付着する箇所が存在する（再付着点）。中心閉塞や本試験体系のように閉塞サブチャンネルが健全サブチャンネルに囲まれ、周辺からの流れ込みがある場合には周囲からの流れが合流する箇所が再付着点に相当する。本試験体系は中心閉塞であるから閉塞物上方（下流）には合流点が存在し、後流外側の速い流れに乗って流れてきた染料の一部が、後流渦に捕らえられて合流点から下方（閉塞物上端）へ向かって逆流しているのが観測できる (Fig.3-12(1)白矢印⑧参照)。

染料が滞留している閉塞物上端近傍においては、染料塊（クラスター）が上方へゆっくりと流れていることから、閉塞物上端面からの冷却材の浸み出しがあることが分かる (Fig.3-13(2)白円⑨参照)。ただし、ある時刻では逆にクラスターが下方へ流れていることからこの浸み出しは強い流れではない (Fig.3-13(2)白円⑩参照)。閉塞物上端からの浸み出しと後流渦がバランスし、後流渦下端位置は閉塞物上端から上方に存在し、その高さは不安定であると考えられる。試験体流入流量の増加と共に、染料の拡散時間（染料の蛍光が時刻 $0[\text{s}]$ のバックグラウンドレベルまで低下する時間）が短くなる。つまり、流量の増加に伴って、閉塞物上端からの冷却材の浸み出しあるいは健全側から後流への冷却材の巻き込みによる冷却材の供給・置換が促進されることが分かる。

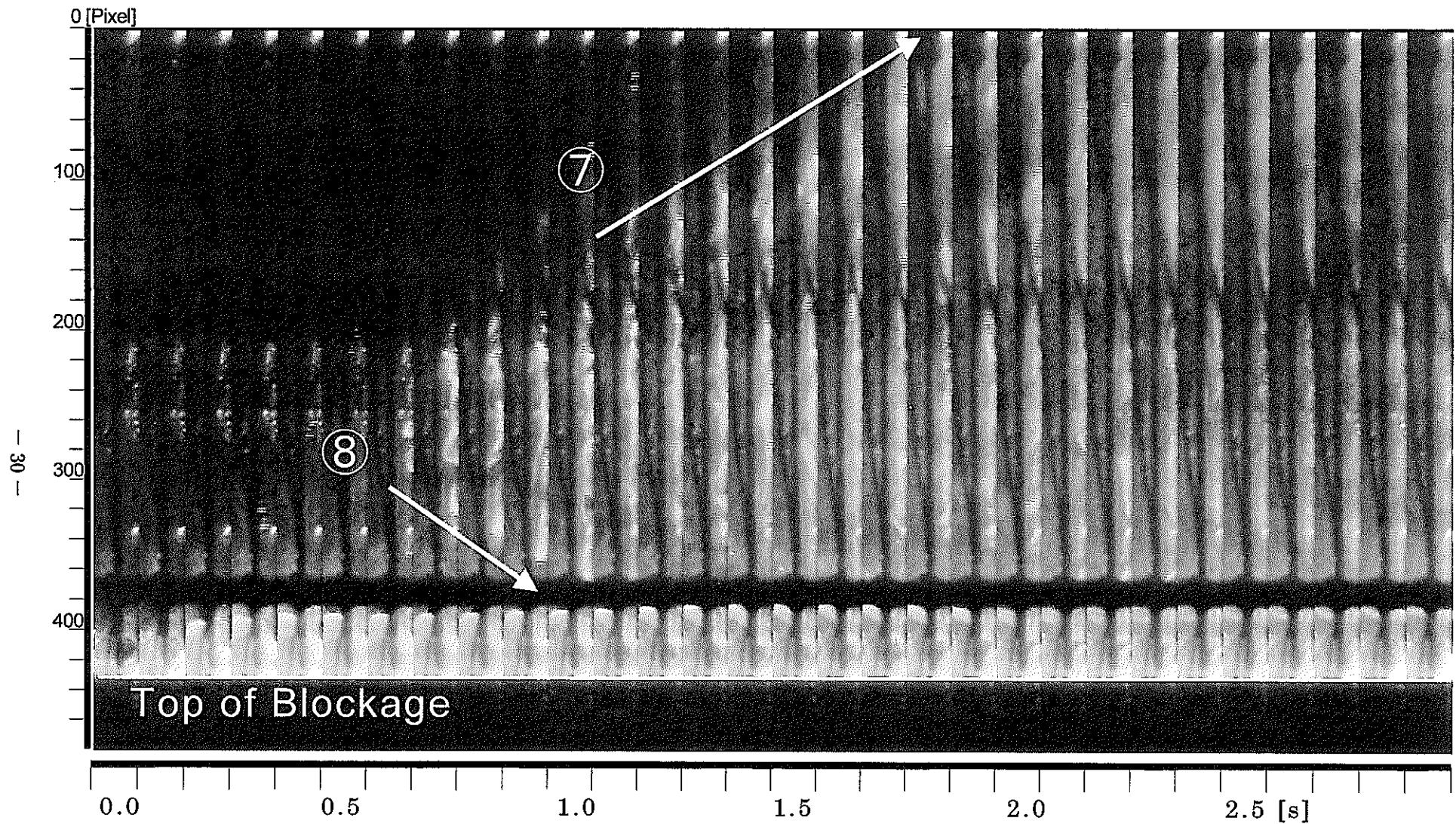


Fig.3-12(1) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.
($Q_L=0.4[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=1.7\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

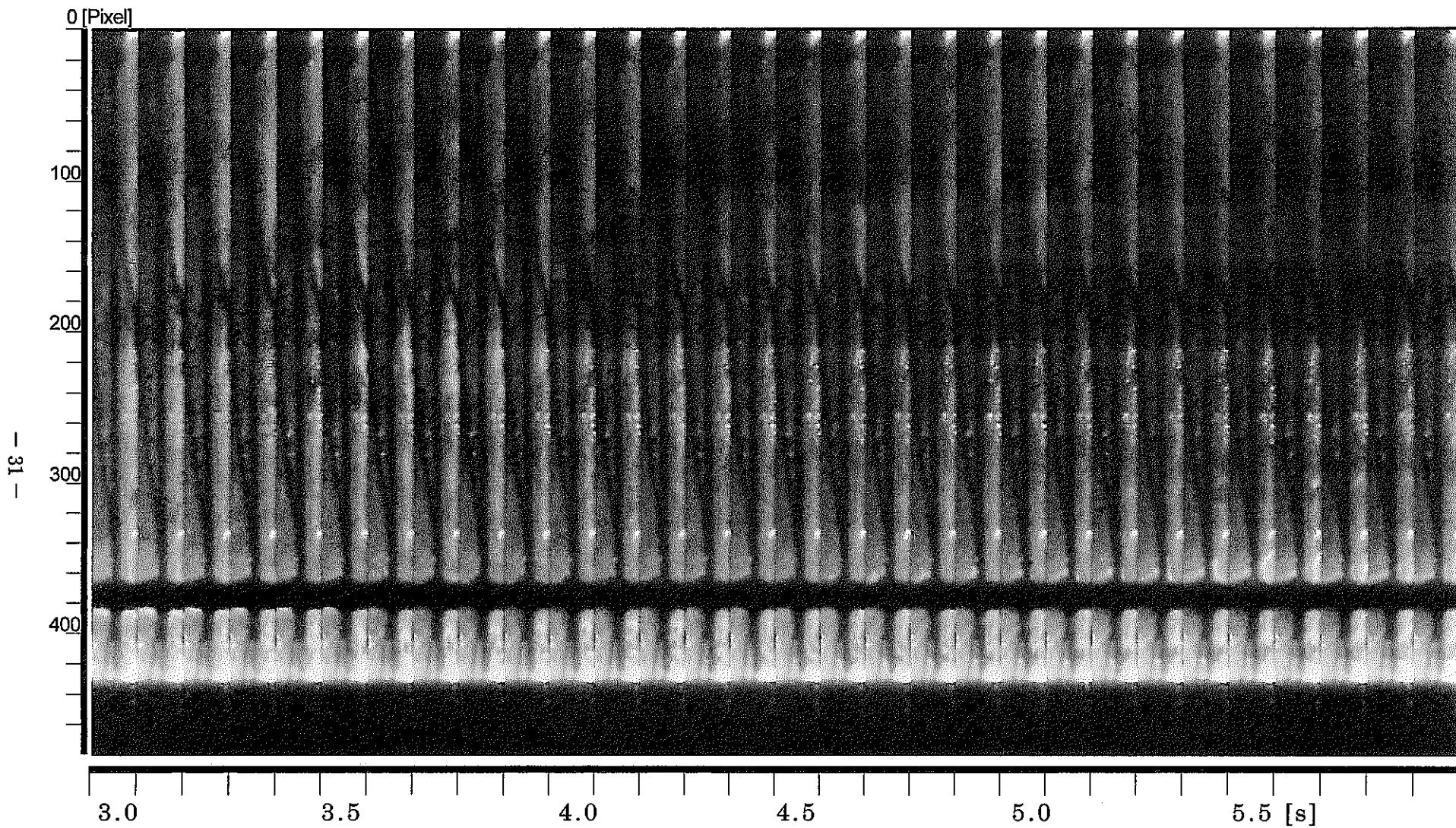


Fig.3-12(2) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.
($Q_L=0.4 \text{ [m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=1.7 \times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

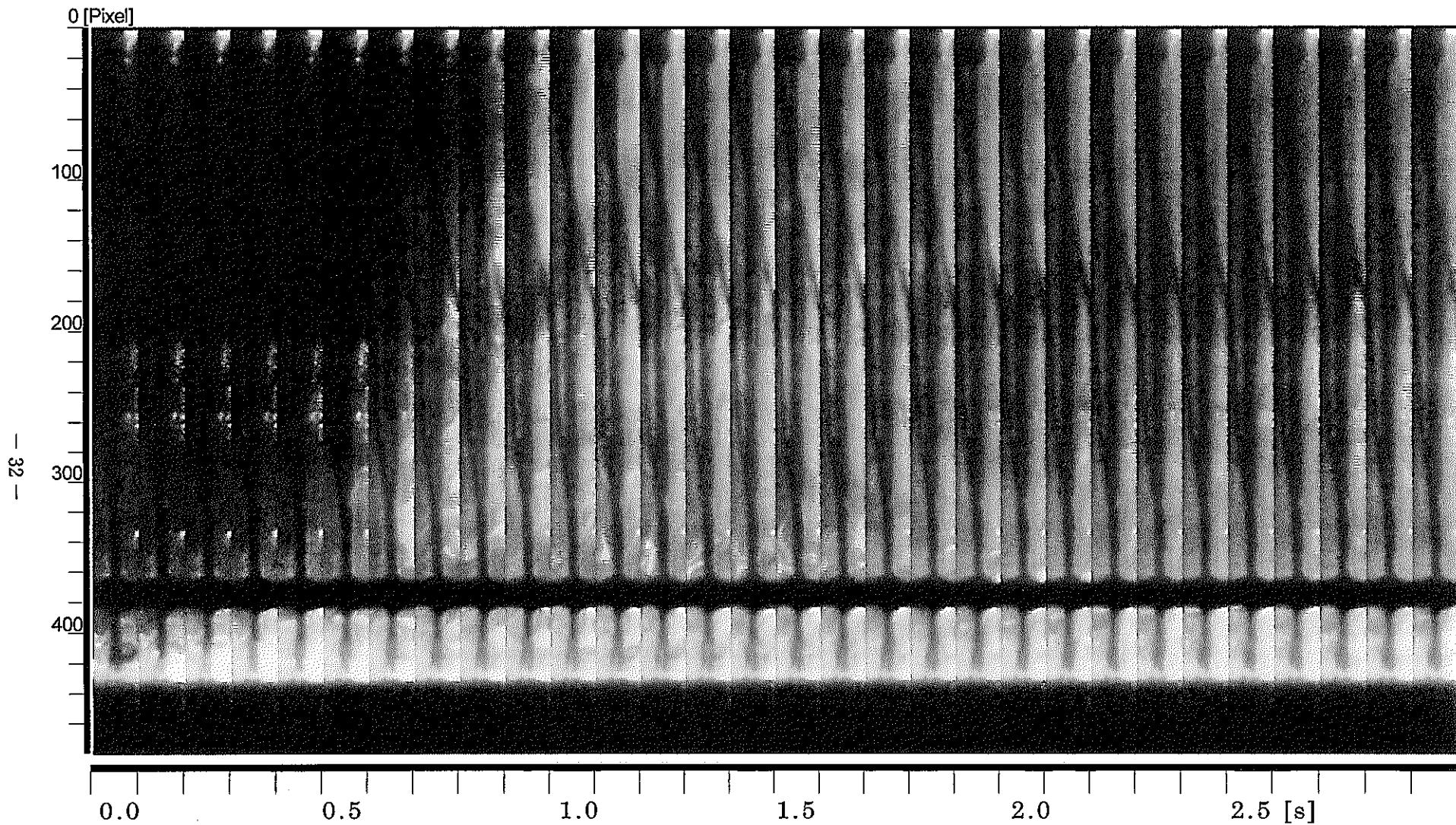


Fig.3-13(1) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.
($Q_L=0.8[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=3.5 \times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

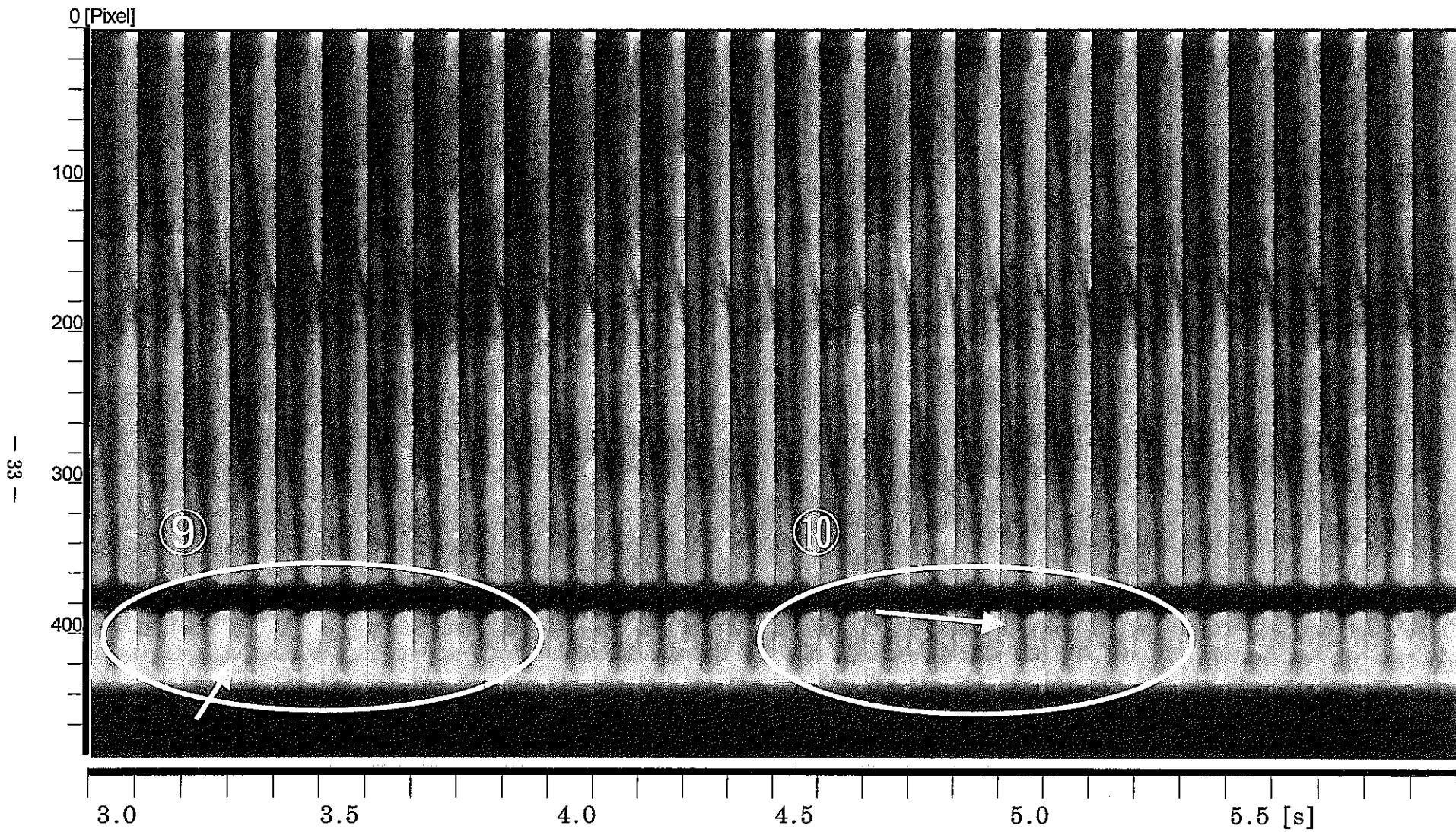


Fig.3-13(2) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.
($Q_L=0.8[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=3.5 \times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

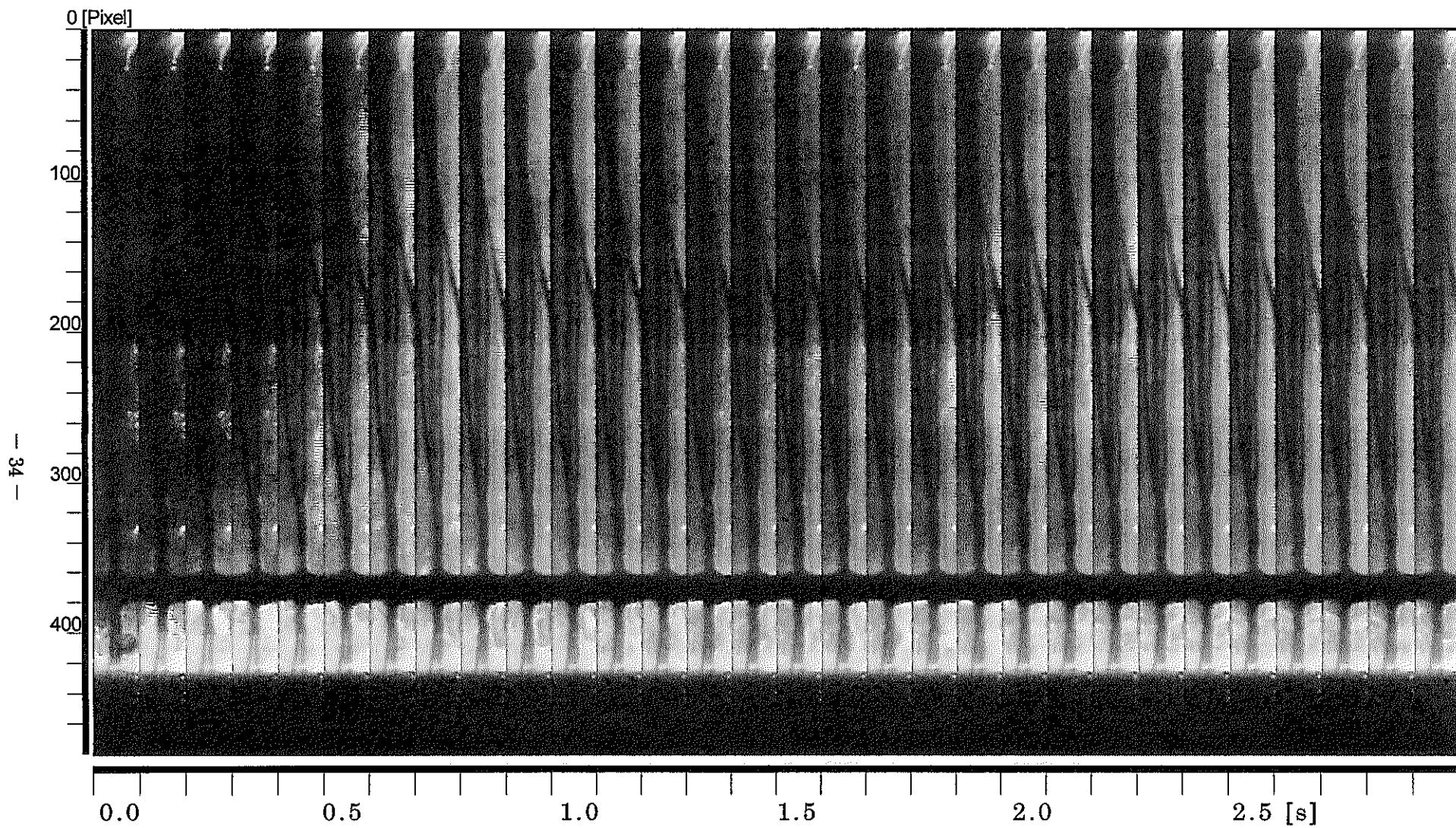


Fig.3-14(1) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.
($Q_L=1.2 \text{ [m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=5.2 \times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

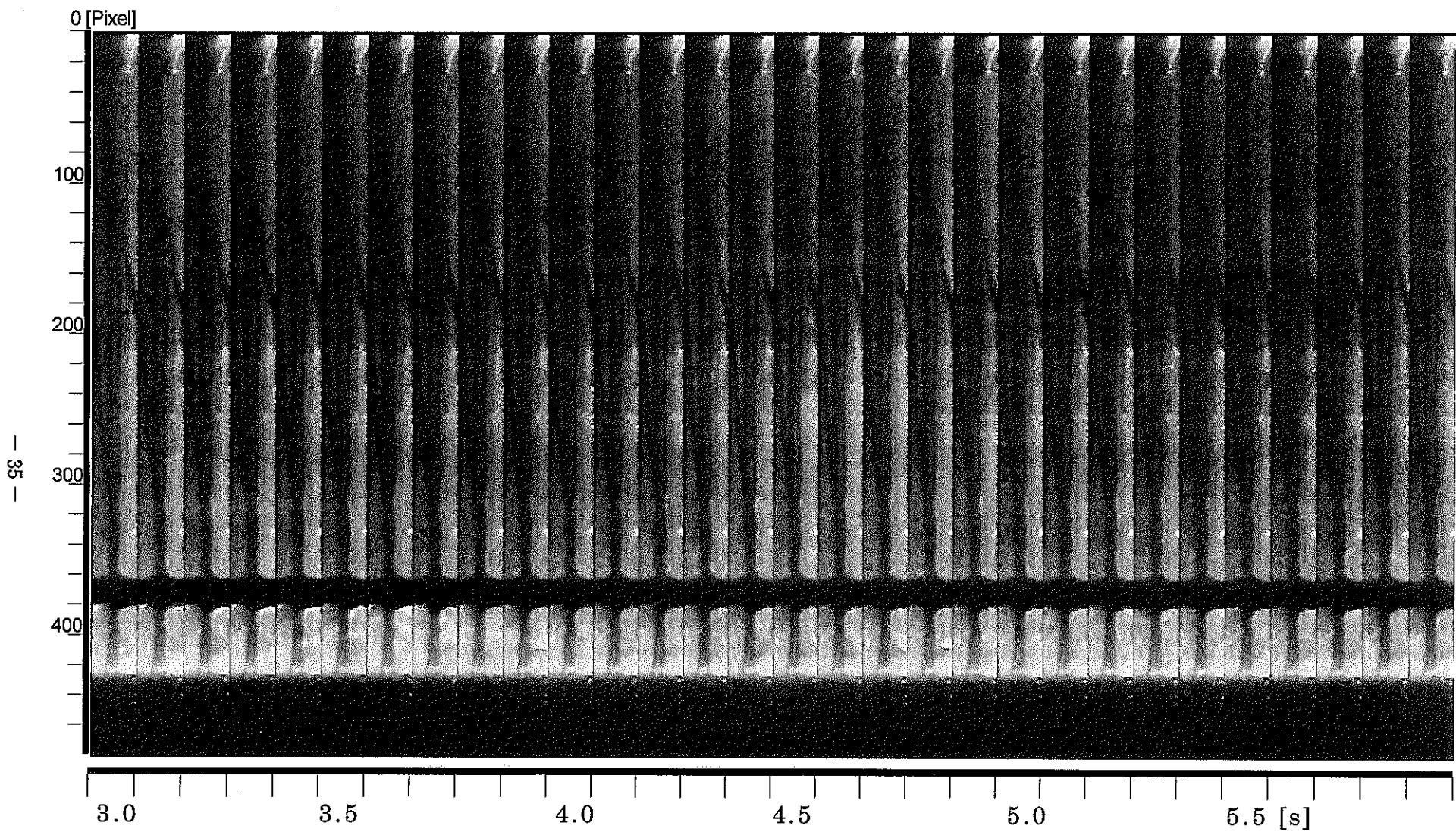


Fig.3-14(2) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.
($Q_L=1.2[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=5.2\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

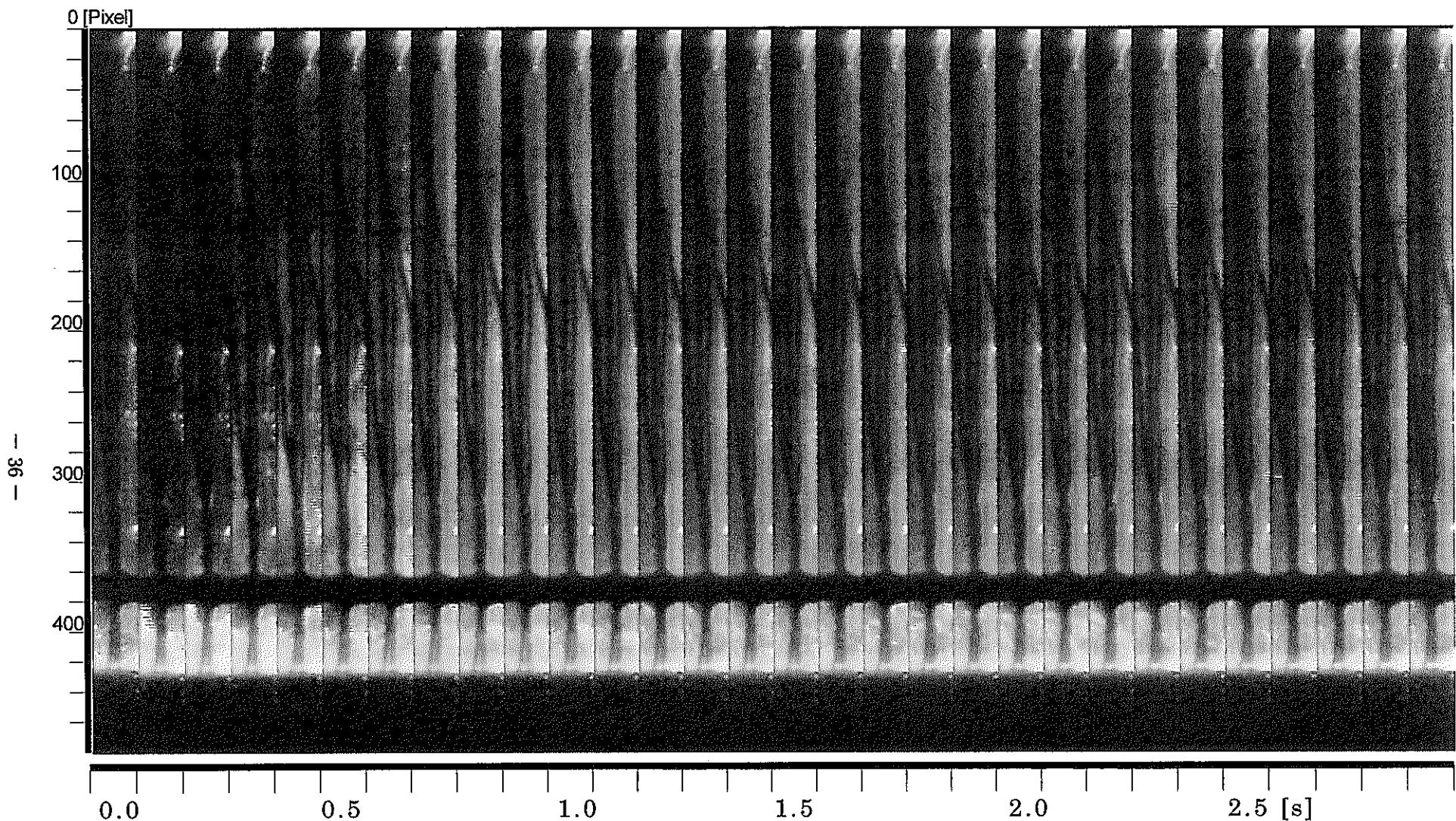


Fig.3-15(1) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.
($Q_L=1.6[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=6.9\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

- 37 -

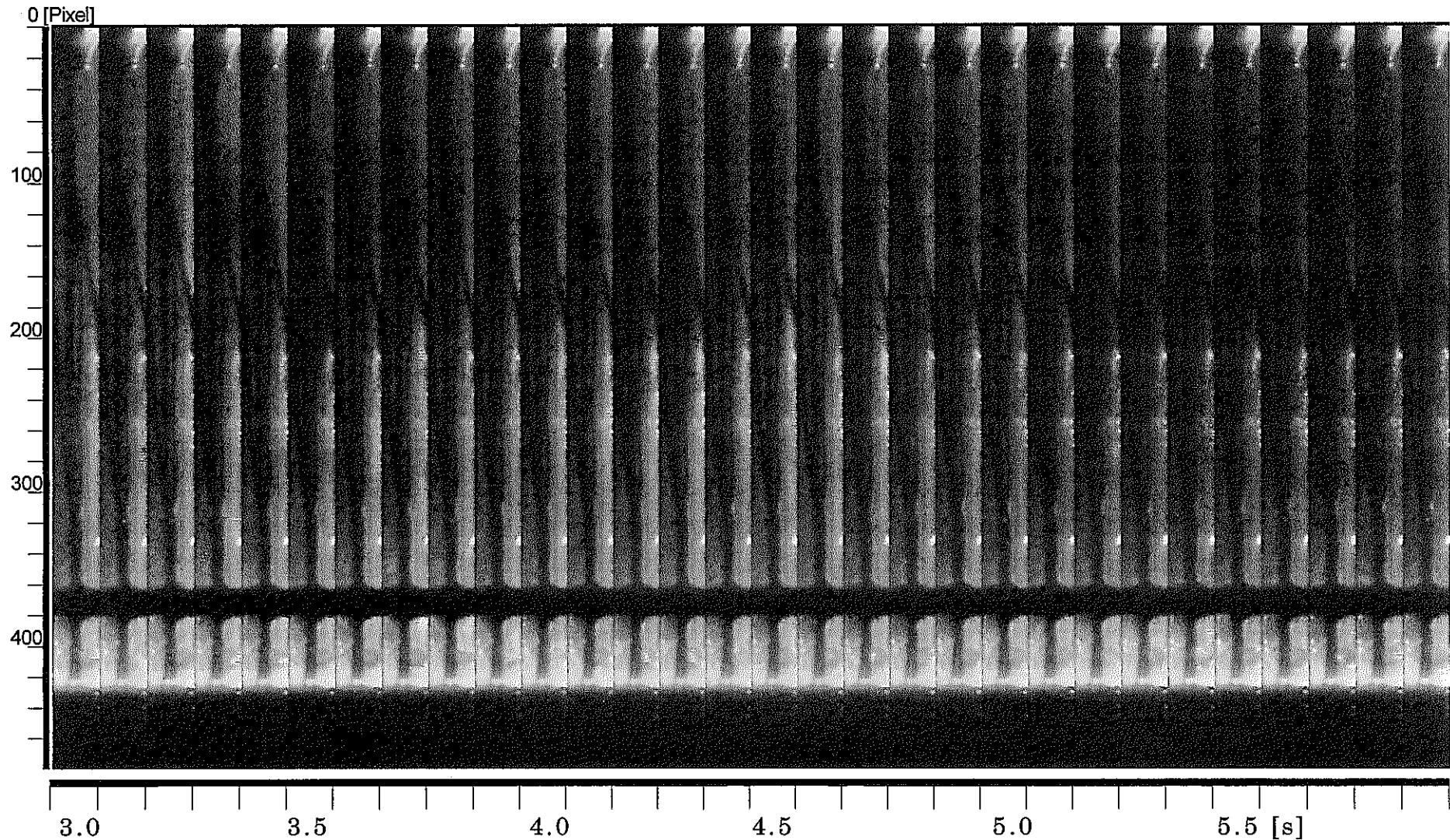


Fig.3-15(2) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.
($Q_L=1.6[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=6.9 \times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

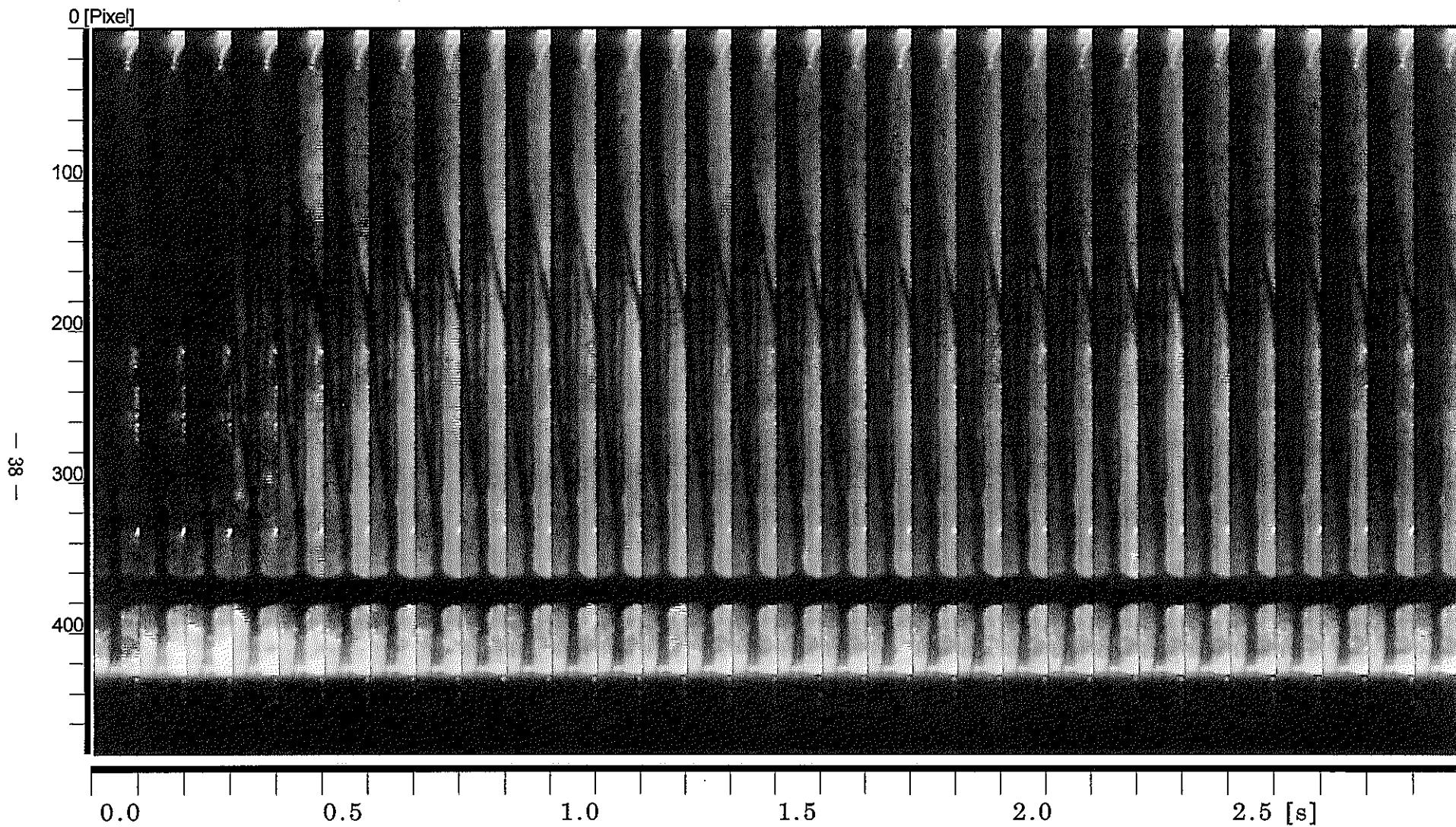


Fig.3-16(1) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.
($Q_L=2.0[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=8.6\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])

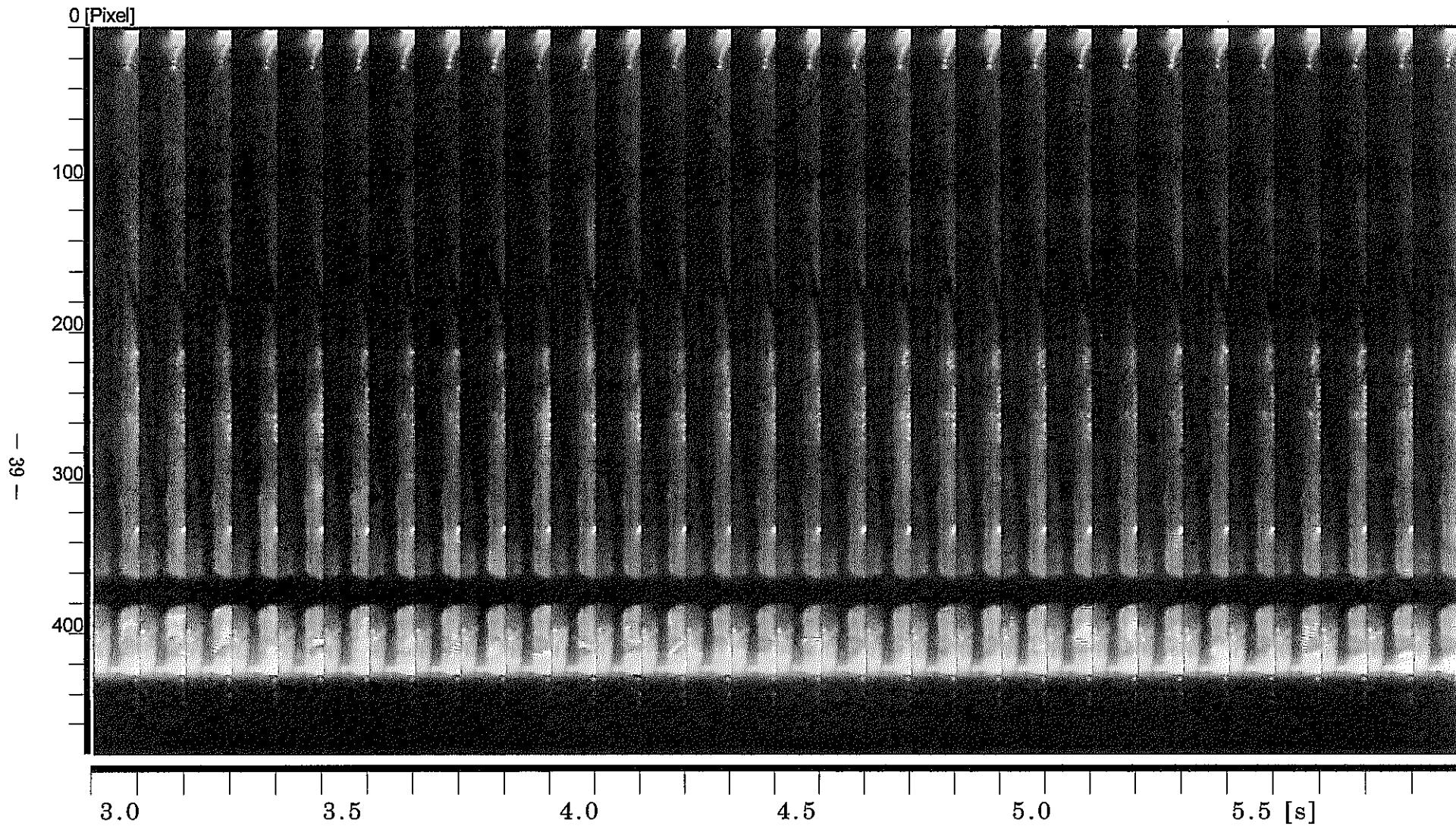
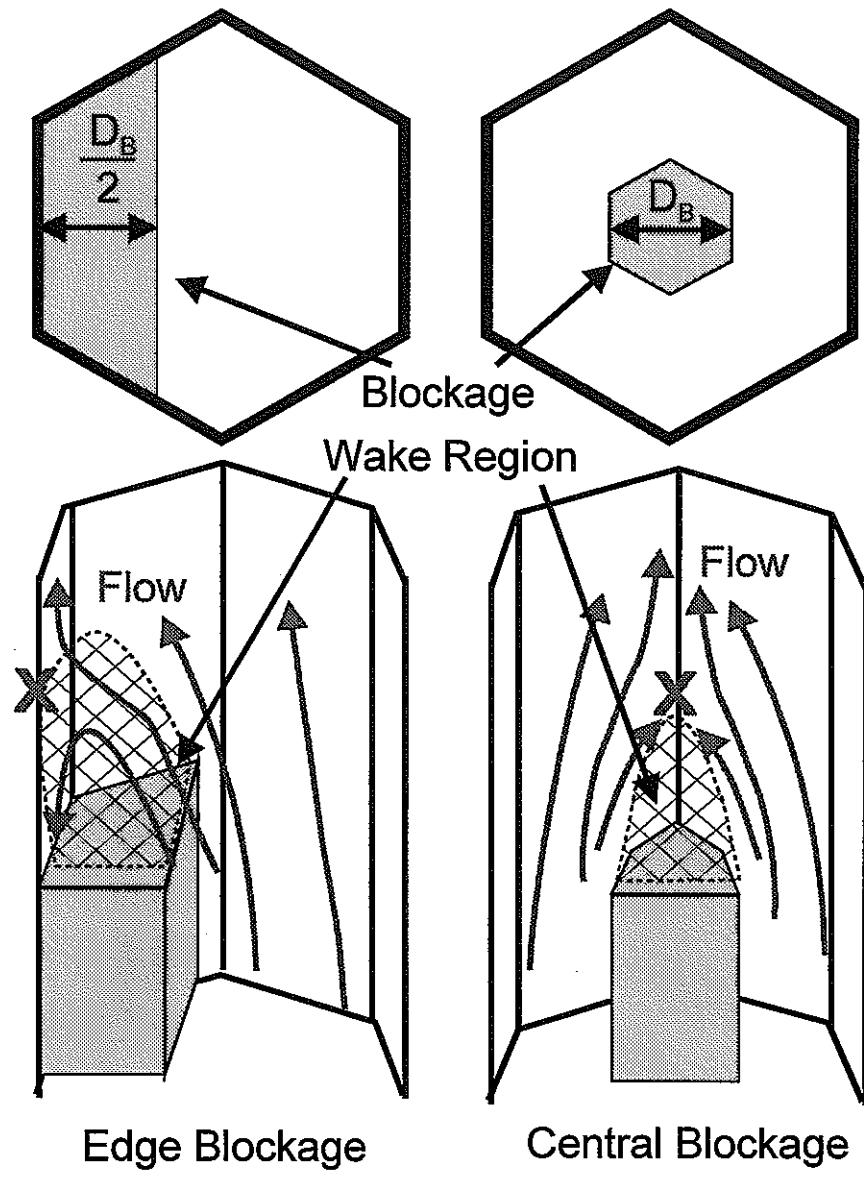


Fig.3-16(2) Time Series of Flow Pattern in Wake Region.
($Q_L=2.0[\text{m}^3/\text{h}]$, $\text{Re}=8.6\times 10^3$, Time interval = 0.1 [s])



X: Re-attachment Point (Edge Blockage)
Junction of the flows (Central Blockage)

Fig.3-17 Characteristic Length of Wake Region

4. 考 察

第3章において、閉塞物側面の循環渦の存在、後流領域の存在が明かとなつた。以下では、可視化試験で得られた画像を解析し、循環渦領域および後流領域内の流动場について調べる。

平板閉塞を対象とした研究では、代表長さとして閉塞物の大きさに起因する量が定義されている^[7]。ただし、閉塞物を含む燃料集合体においては、集合体体系に起因する代表長さ（水力等価直径、対辺間距離等）と、閉塞物の規模（大きさ）に起因する代表長さ（閉塞物の幅、厚さ、高さ等）が一つの体系内に存在する。本研究では、集合体体系に起因する代表長さとして水力等価直径 D_e を定義し、閉塞物の大きさに起因する代表長さとして、水平方向の閉塞物厚さ D_B を定義して評価に用いる（Fig.3-17 参照）。以下では、閉塞物の流れ方向の長さを閉塞物高さ H と定義し、水平方向の代表長さを閉塞物厚さ D_B と定義する。集合体内の境界条件（流量条件）を評価する際には水力等価直径 D_e により定義される Re 数で示し、閉塞物の大きさに起因した量（循環流量域の大きさ、拡散時間等）を評価する際には閉塞物厚さ D_B を用いて無次元化し評価する。Fig.3-17 に示すように、閉塞物厚さ D_B として、後流における合流点あるいは再付着点を通る垂線と閉塞物側面との距離の 2 倍を考える。周辺閉塞の場合の閉塞物厚さは閉塞物側面から閉塞物と接している壁までの距離の 2 倍であり、複数サブチャンネルに及ぶ中心閉塞の場合には、閉塞物側面間の対辺距離となる。閉塞物厚さは後流の影響する範囲を代表する長さとして有効と考えられる。本試験体系の場合、閉塞物重心位置で流れが対称となり、その上方に合流点が存在すると考えられるから、閉塞物厚さ D_B を閉塞物側面から断面重心位置（染料注入位置）までの 2 倍の距離（=28[mm]=2×14[mm]）と定義する（Fig.3-1 および Fig.3-17 参照）。

本試験は等温状態であり、作動流体は水のみを使用した。よって、温度場の影響および流体の熱物性値（プラントル数等）の影響は考慮されていない。現在、これらをパラメータとした試験データがなく評価が出来ない。よって、これらの影響評価については今後の課題とする。以下（第4章および第5章）では等温状態での評価および予測であることに注意を要する。

4. 1 閉塞物側面の循環流領域

4. 1. 1 循環流領域の範囲

第3章の可視化実験から閉塞物側面では、閉塞物下端から流入した冷却材が閉塞物内部を通り健全サブチャンネルへ流出しているのが確認できた。この流出は、閉塞物側面に生じる循環渦領域によると考えられ、閉塞物内部の冷却に寄与していることは容易に推測できる。よって、この流出範囲を特定することは重要であり、可視化実験で得られた画像を解析することにより閉塞物側面から流出する冷却材の範囲を求める。

Fig.4-1 に示す閉塞物側面のカラー画像(a-1, b-1)を白黒画像(a-2, b-2)

に変換する。Fig.4-1(b-2)に示す可視化画像から Fig.4-1(a-2)に示すバックグランド画像（背景画像）を減算して Fig.4-1(c)に示す解析画像を求める。Fig.4-2 に解析画像（Fig.4-1(c)）について水平方向に平均した輝度の高さ方向の分布と、最大輝度の 50 %をしきい値として 2 値化処理（最大輝度の 50%以上の輝度を有する場合は輝度を白色 256 とし、50%以下の場合は輝度を黒色 0）した結果を示す。本試験では最大輝度が低い上に背景の輝度（ノイズ）が高い（Fig.4-1 参照）。さらに、染料注入開始からの時間経過と共に染料が拡散し、最大輝度がノイズレベル程度まで小さくなり、染料の蛍光による輝度変化をノイズと判別するのが難しい。そこで、しきい値をパラメータとして画像解析を行ったところ、最大輝度の 50 %をしきい値としたときに解析結果が可視化画像から判断できる流れ場を最も良く再現した。この 2 値化データをもとに、最大輝度を示す位置の下流側にあるグラフの立ち上がり位置を求め閉塞物側面からの流出高さ（閉塞物下端から内部へ流入した染料が閉塞物側面から流出している領域の上限）とした。

Fig.4-3 に画像解析により求めた閉塞物側面からの流出高さの時間変化を示す。染料注入開始（時刻 0[s]）から徐々に流出位置は上昇し、ある高さ付近で落ち着く。第 3 章で示したように（Fig.3-12 から Fig.3-16）注入開始から充分時間が経過し、染料が拡散した後はバックグラウンドレベル（時刻 0[s]の画像レベル）と同様な輝度分布となる。Fig.4.4 に示すように流出位置の時系列データについて、確率密度分布を求め確率頻度の最も高い位置をその流量条件での流出位置とした。可視化試験は、それぞれの流量条件に対して 5 回行っており、各回ごとに画像解析を行った。図には同一条件で行った 5 回の解析結果について示す。

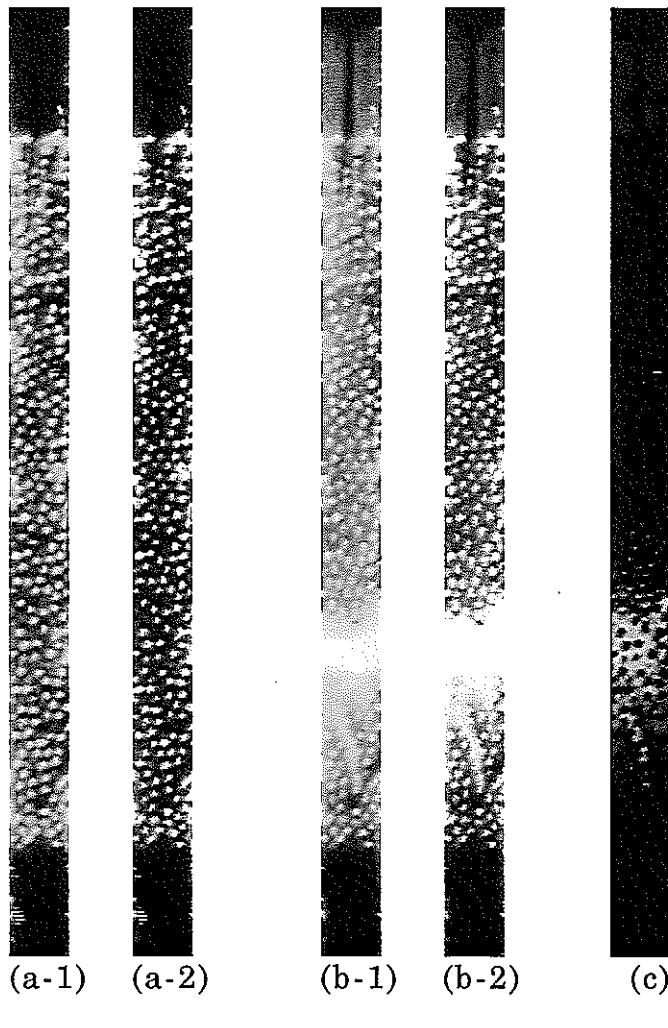
Fig.4.5 に画像解析から得られた流出位置について、閉塞物厚さ D_B ($=28[\text{mm}]$) で無次元化して示す（第 3. 2 節参照）。閉塞物側面の循環流領域において、循環渦の大きさは閉塞物周辺の流れ場によって変化し、閉塞物側面からの湧き出しが存在するため、閉塞物内部の流れ場を考慮して循環渦の影響する範囲を評価しなくてはならない。閉塞物周辺の流れ場（閉塞物前面における流量条件）と、湧き出し（閉塞物側面からの流出）を伴う循環渦の大きさとの関係については今後の検討が必要となる。閉塞物厚さは、上流からの流れが閉塞物下面に衝突する面積と関係しており閉塞物流入流量に影響する。よって、閉塞物厚さが循環渦の大きさ決める際の重要なパラメータであると考えられる。暫定的ではあるが後流領域同様に、閉塞物の大きさを規定する量として閉塞物厚さを用いて無次元化し評価を行うこととする。無次元高さ z/D_B と流量条件 Re 数の関係を直線近似すると（1）式となり、本試験条件では、 $z \approx D_B$ 程度の高さに閉塞物側面からの流出が生じることが分かる。

$$z/D_B = 1.4 \times 10^{-5} \cdot Re + 7.9 \times 10^{-1} \quad (1a)$$

無次元高さを閉塞物厚さ D_B の代わりに閉塞物高さ H ($=60[\text{mm}]$) で無次元化し（1a）式を再評価すると（1b）式になる。

$$z/H = 6.7 \times 10^{-6} \cdot Re + 3.7 \times 10^{-1} \quad (1b)$$

$z/H=0$ は閉塞物下端, $z/H=1$ は閉塞物上端を示す。流出最大高さは流量 (Re 数) の増加に伴って上昇し, その高さは閉塞物長さのおよそ半分 ($z/H < 0.5$) となる。つまり, 本試験体系においては閉塞物の半分の高さまで, この下端から流入した流れによる冷却が期待できる。



- (a-1) Background color picture
- (a-2) Background gray-scale picture
- (b-1) Flow visualizing color picture
- (b-2) Flow visualizing gray-scale picture
- (c) Gray-scale Picture of Fluorescence of Dye
(b-2) - (a-2)

Fig.4-1 Pictures for Image Analysis

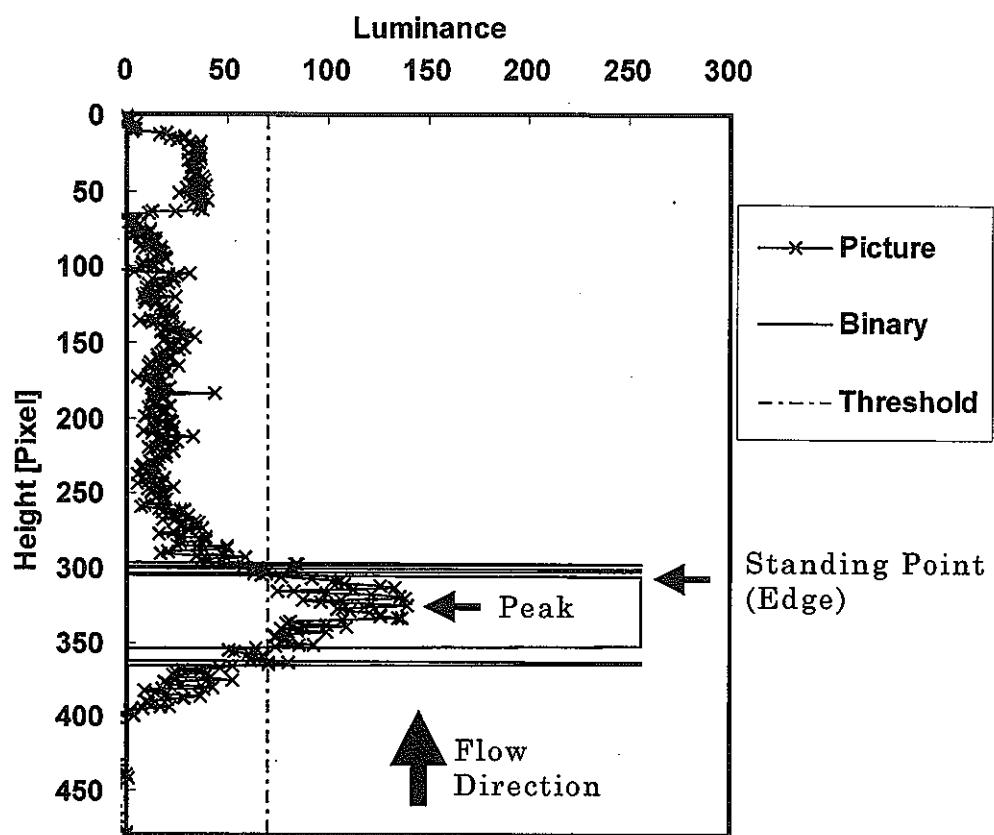


Fig. 4-2 Maximum Point of Luminescence and Threshold Point

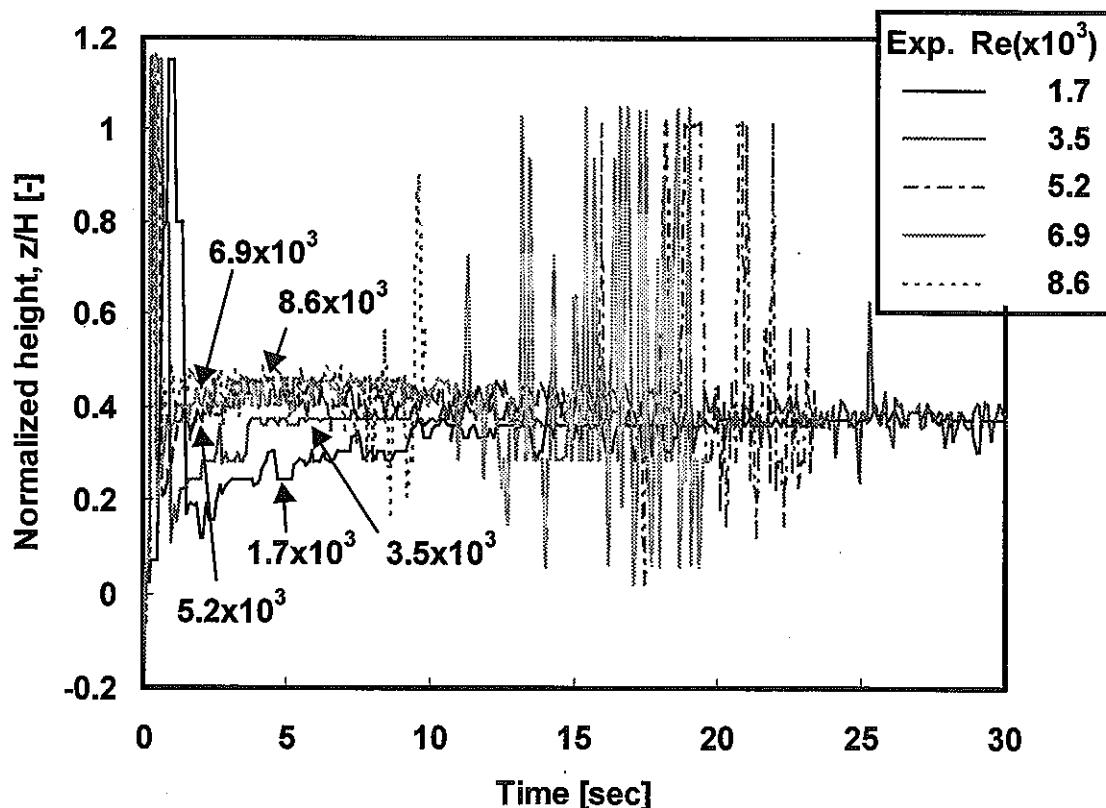


Fig. 4-3 Time Series of Threshold Point

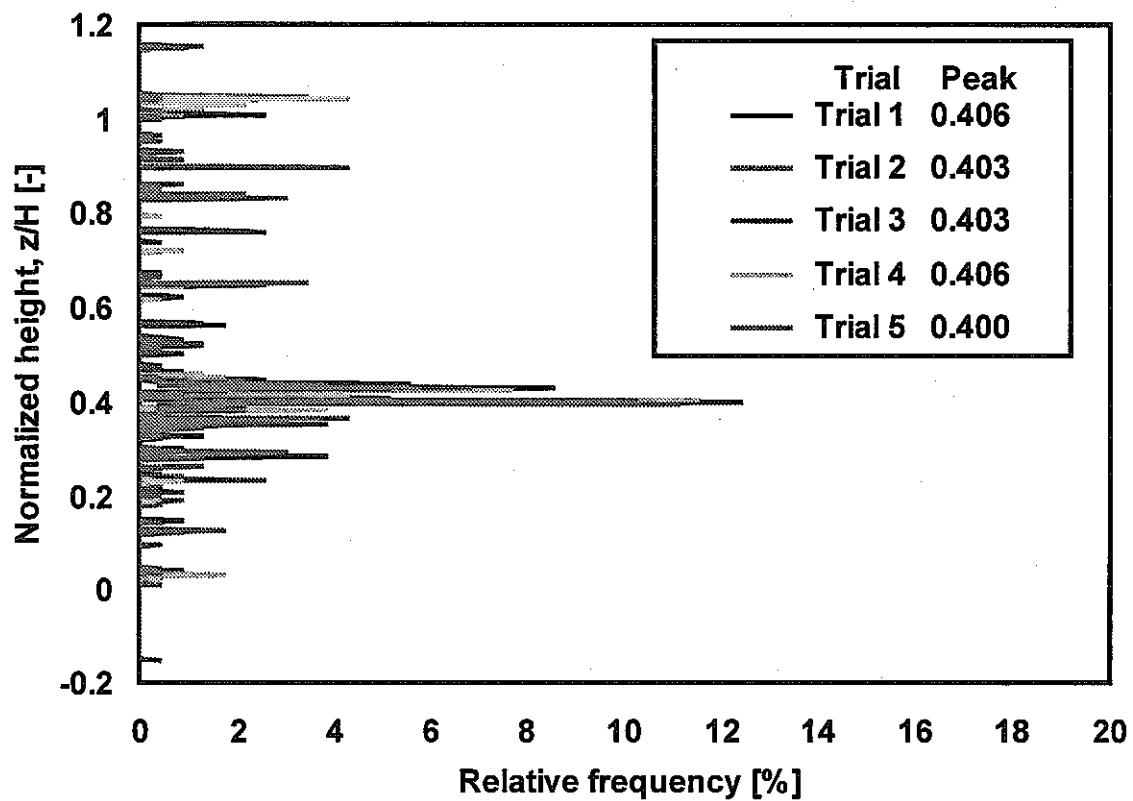


Fig.4-4 Frequency of Threhold Point

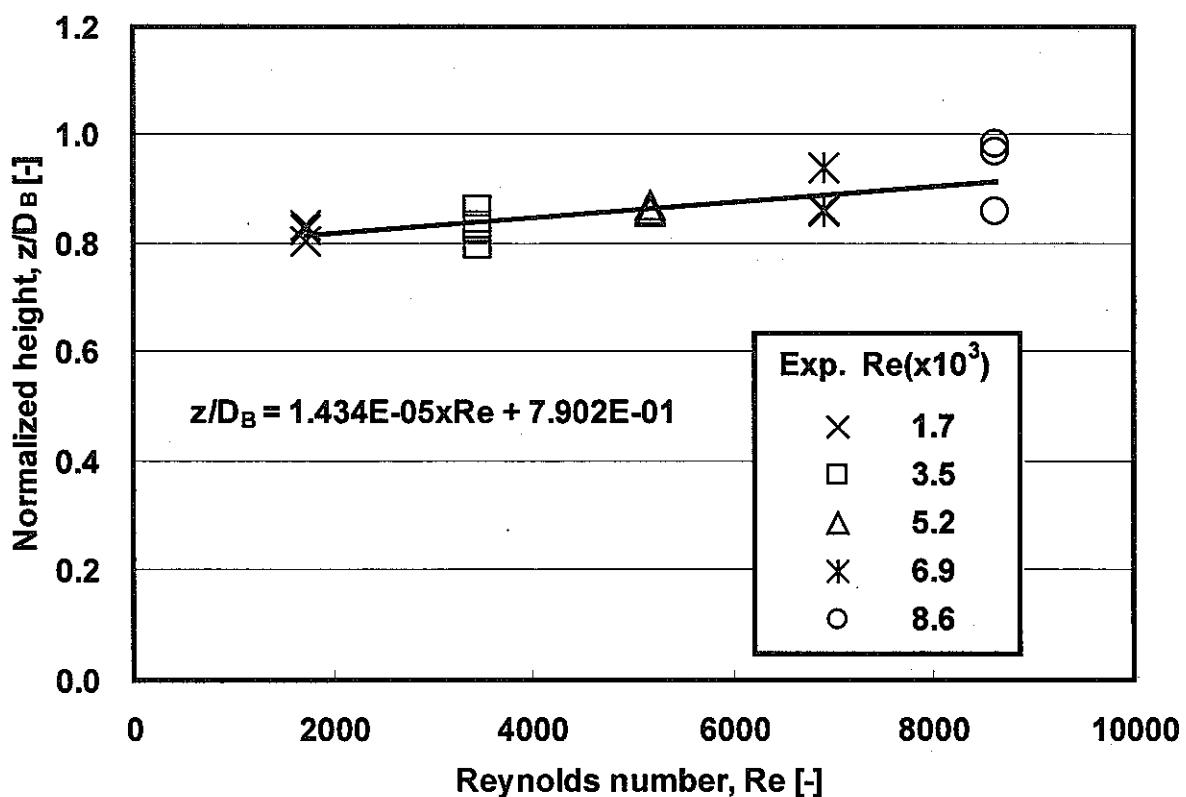


Fig.4-5 Reration between Normalized hight and Reynolds Number

4. 1. 2 循環流領域内の拡散

Fig.4-6 に閉塞物側面に生じる循環流量域の空間平均輝度の時間変化を示す。循環流領域は、閉塞物下端から 4.1.1 節で求めた流出位置までの領域である。染料注入開始（時刻 0[s]）から輝度は急激に増加しピークに達する。ピークに達した後、輝度は指數関数的に減少しノイズレベルまで低下する。流量条件の増加に伴い、輝度値がピークからノイズレベルに達するまでの時間が短縮される。循環流領域内には閉塞物内部を通過して加熱された冷却材が流入し、循環領域内で流れが停滞し冷却材温度が上昇する可能性がある。そこで、循環流領域における拡散時間を見積もることとする。

Fig.4-7 に循環流領域における拡散時間 dT と流量条件（Re 数）との関係を示す。拡散時間は輝度値がピークをとつてから、ピーク値の 5% に低下するまでの時間とした。拡散時間 dT は流量条件の増加に伴つて減少し、 $Re > 5.2 \times 10^3$ の前後で傾向が大きく変化していることが分かる。

塩水濃度減衰法を利用した平板閉塞についての研究から、閉塞物後流における塩水濃度の時間変化は、指數関数的に減少することが分かっている^[10]。ここでは、蛍光輝度が蛍光染料濃度に比例することを応用して、循環領域内で空間平均した染料の蛍光による純粹な輝度値($L - L_0$)を用い、閉塞物側面における拡散過程について調べる。ここで輝度値 L_0 はバックグランドノイズである。染料の蛍光発光強度 $L(x)$ は次式で表せる^[9]。

$$L(x) = I_0(x) \cdot A \cdot \phi \cdot \varepsilon \cdot \delta \cdot C(x) \quad (2)$$

x は光路に沿つた位置、 A は受光系による蛍光の受光率、 ϕ は蛍光の量子収率、 ε は蛍光染料の消光係数、 δ は測定部の長さを示す。今回の実験では、ウラニン溶液の濃度が入射光の減衰が無視できる程度に薄いと仮定する。つまり、入射光強度が光路上で一定 I_0 であるとする。また、出力 200[mW] のレーザビームをファイバーで取り込み（取り込み効率 10%程度）、さらにシート状に広げているため励起光強度は末端では非常に低く、蛍光の飽和は生じないと仮定する。よって、蛍光強度は染料の濃度 C に比例し、観察領域内の輝度を調べることにより拡散の様子を調べることができる。

観察面での輝度はレーザシートの厚さ方向（2～3[mm]）に積分された値である。循環流量域の全体の体積を V_0 、単位時間あたりに輸送される量を \dot{V} とする。循環流領域内における染料の体積平均濃度を C として、単位時間あたりの濃度変化は以下のようになる。

$$\hat{L} = (L - L_0) \propto C \quad (3)$$

$$V_0 \frac{dC}{dt} = -K(\dot{V}C) \quad (4)$$

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = -K \left(\frac{\dot{V}}{V_0} \hat{L} \right) \quad (5)$$

ここで、 V_0 、 \dot{V} は以下の関係がある。 K は比例定数である。

$$\begin{aligned} V_0 &= L_S S_S = (nD_B) S_S, \quad \dot{v} = U_1 S_S \\ \frac{\dot{v}}{V_0} &= \frac{U_1 S_S}{(nD_B) S_S} = \frac{U_1}{nD_B} = \frac{U}{nD_B(1-\beta)} \end{aligned} \quad (6)$$

L_s は 4.1.1 節で求めた流出位置であり閉塞物厚さ D_B に比例する。 n は比例定数であり Re 数の関数となる。 S_s は循環流領域の軸方向から見た投影面積である。 β は閉塞物のない流路断面積と閉塞物の断面積の比であり、 $\beta=0$ は閉塞物なしを示し、 $\beta=1$ は流路全面に渡って閉塞物が存在する状態を示す。本試験では、4つのサブチャンネルの内、1つのサブチャンネルに閉塞物が存在するため $\beta=0.25 (=1/4)$ である。 U は閉塞物がない体系（閉塞物前面）での断面平均流速である（Table 1 参照）。 $U_t = U / (1 - \beta)$ は閉塞物を含む流路断面における健全サブチャンネル内の断面平均流速を示している。

(6) 式を (5) 式に代入して、

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = -K \left(\frac{v}{V_0} \right) \hat{L} = -K \left(\frac{U}{nD_B(1-\beta)} \right) \hat{L}$$

ここで、定数 K/n をあらためて定数 K (Re 数の関数) と書き直し、特性時間 $\tau_s = D_B \cdot (1 - \beta) / U$ を導入する。特性時間 τ_s は循環流領域内で冷却材が置換されるまでの時間と考えられる（付録 1 参照）。

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = -K \left(\frac{U}{D_B(1-\beta)} \right) \hat{L} = -\left(\frac{K}{\tau_s} \right) \hat{L} \quad (7)$$

この一般解は $t=0$ で $\hat{L} = (L_{MAX} - L_0)$ であるから、

$$\frac{(L - L_0)}{(L_{MAX} - L_0)} = \exp \left(-\frac{K}{\tau_s} t \right) \quad (8)$$

と求められる。よって、

$$L^* = A \exp(-Bt) \quad (9)$$

$$L^* = \frac{(L - L_0)}{(L_{MAX} - L_0)} \quad (10)$$

$$A = 1.0, \quad B = \frac{K}{\tau_s}, \quad B \cdot \tau_s = K$$

ここで、係数 B を滞留時間係数（次元 [1/sec]）と呼ぶ。

Fig.4-9 に示すように輝度値がピークをとつてからノイズレベルに低下するまでの範囲について輝度値の減衰を指數関数で近似し、定数 B を求めた。Fig.4-10(1)に滞留時間係数 B と流量 (Re 数) との関係を示す。滞留時間係数は流量の増加に従つてほぼ直線的に増加する。また、Fig.4-10(2)に滞留時間係数 B を特性時間 $\tau_s (= D_B \cdot (1 - \beta) / U)$ で無次元化して示す。 $Re > 5.2 \times 10^3$ の前後で傾向が変化していることが分かる。この原因の一つとして、流れが層流から乱流に遷移したためと推測される（付録 3 参照）。

無次元滞留時間係数と流量（Re 数）の関係は、 $Re > 5.2 \times 10^3$ の範囲について以下の（11）式で近似できる。

$$B \cdot \tau_s = B \cdot \frac{D_B \cdot (1 - \beta)}{U} = 2.2 \times 10^{-3} \cdot Re^{0.22} \quad (Re > 5.2 \times 10^3) \quad (11)$$

Table 2 に Fig.4-7 に示した拡散時間 dT （付録 2 参照）と（11）式を用いて（9）式から求められる拡散時間を比較して示す。（9）式においては、 $L^*=0.05$ （ピーク値の 5%）となる時刻を拡散時間とする。Fig.4-7 に示す拡散時間と（9）式から求めた拡散時間はほぼ一致しており、（9）式による拡散時間の見積もりが妥当であると確認できる。

よって、第 5 章の大型炉条件の予測では、濃度拡散から求めた（9）式および（11）式による拡散時間で評価する。

Table 2 Comparison of Decay Time in the Region of Recirculation

Re	τ_s	$B \tau_s$, Eq.(11)	$t(L^*=0.05)$, Eq.(9)	dT , (Average)
5.2×10^3	0.075	0.015	14.8	13.0
6.9×10^3	0.056	0.016	10.4	8.9
8.6×10^3	0.045	0.017	7.9	6.4

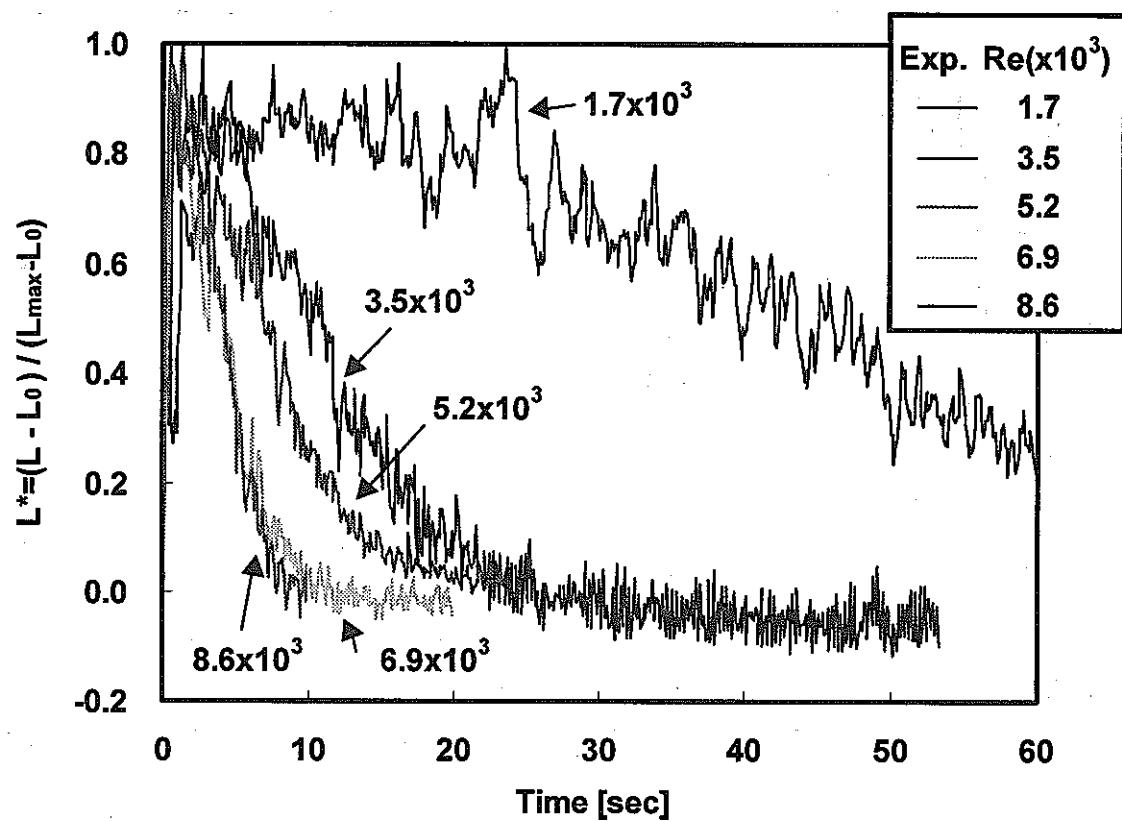


Fig.4-6 Time series of Normalized Luminescence

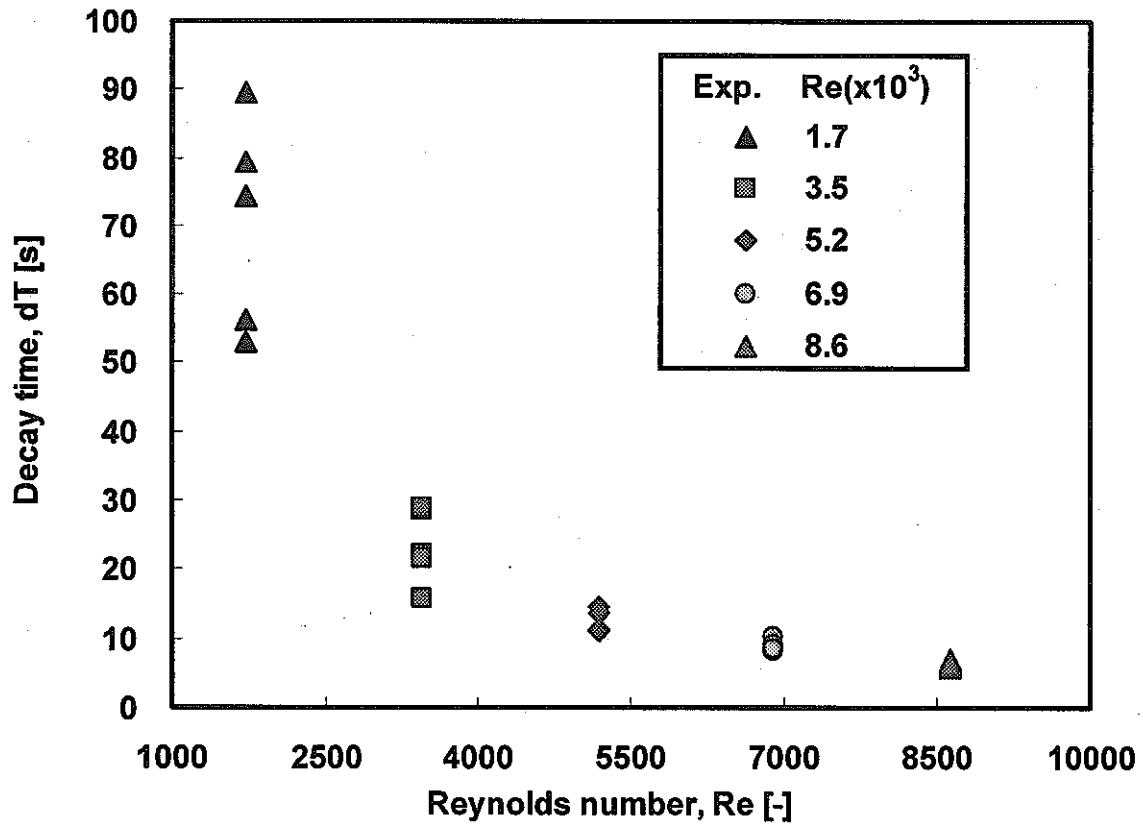


Fig.4-7 Relation between Decay Time and Reynolds Number

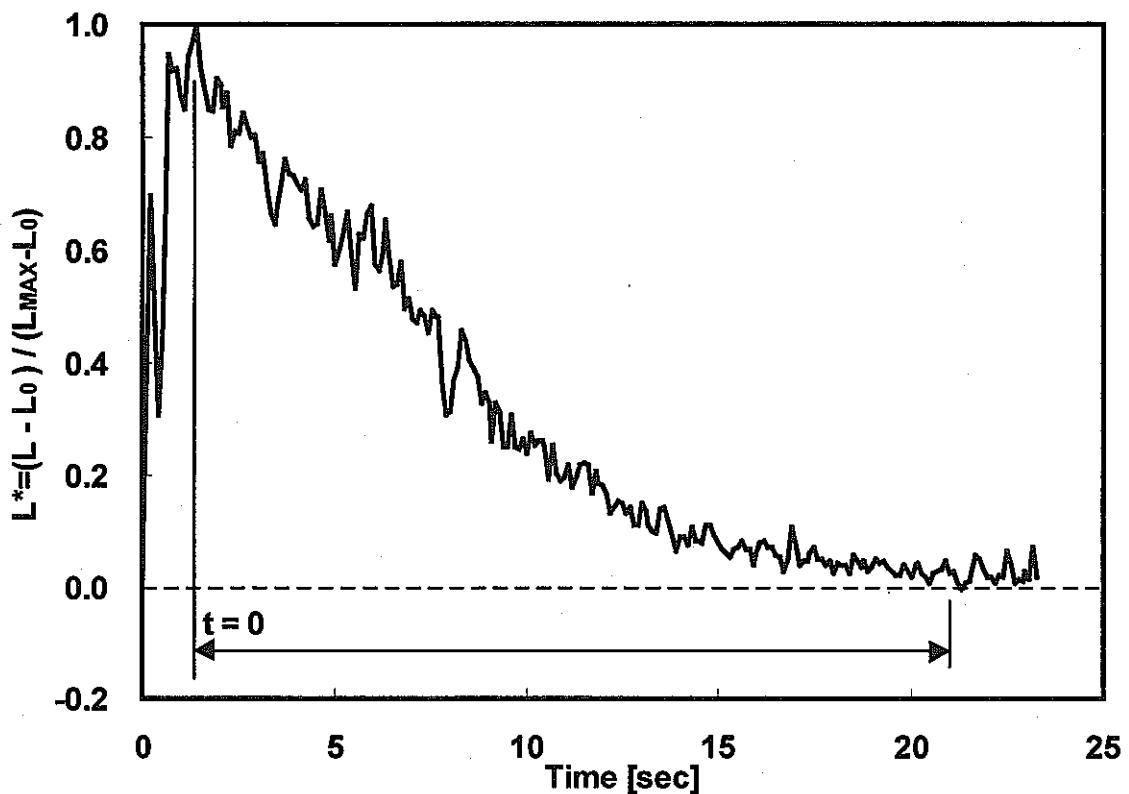


Fig.4-8 Definition of Time window from Peak to Noise Level

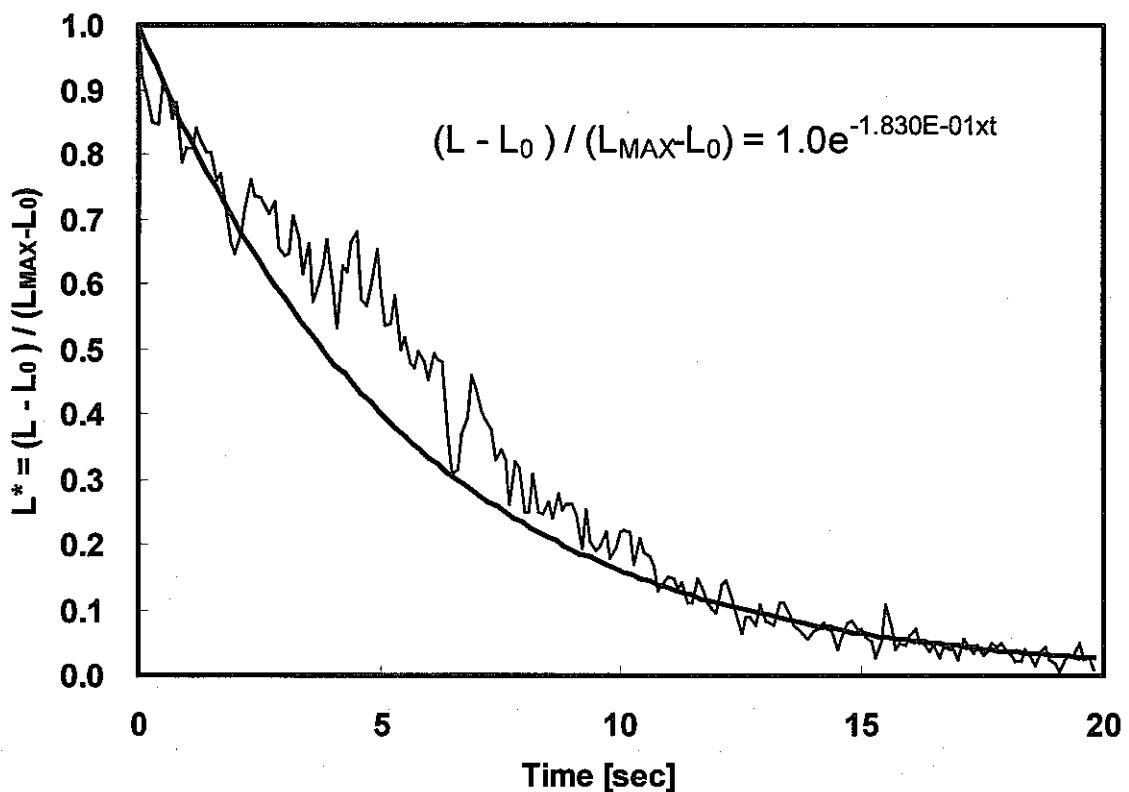


Fig.4-9 Apploximation of Diffusion of Dye

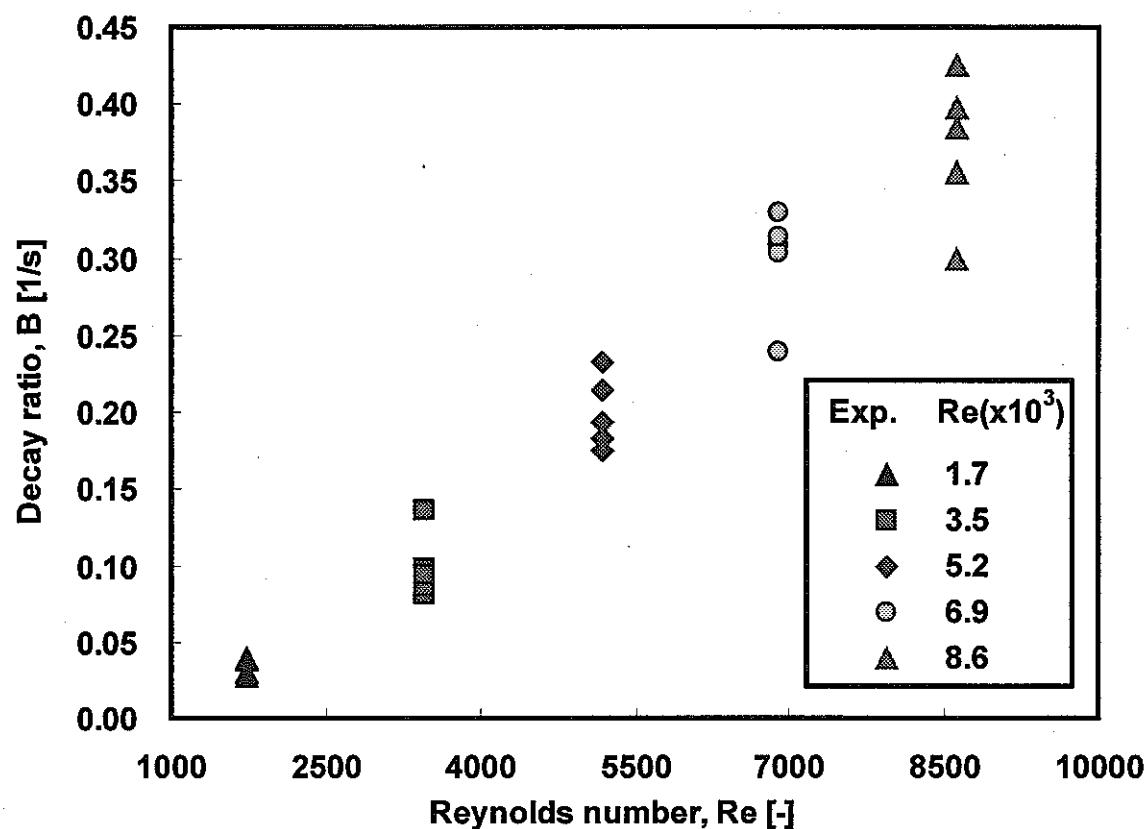


Fig.4-10(1) Relation between Decay Ratio and Reynolds Number

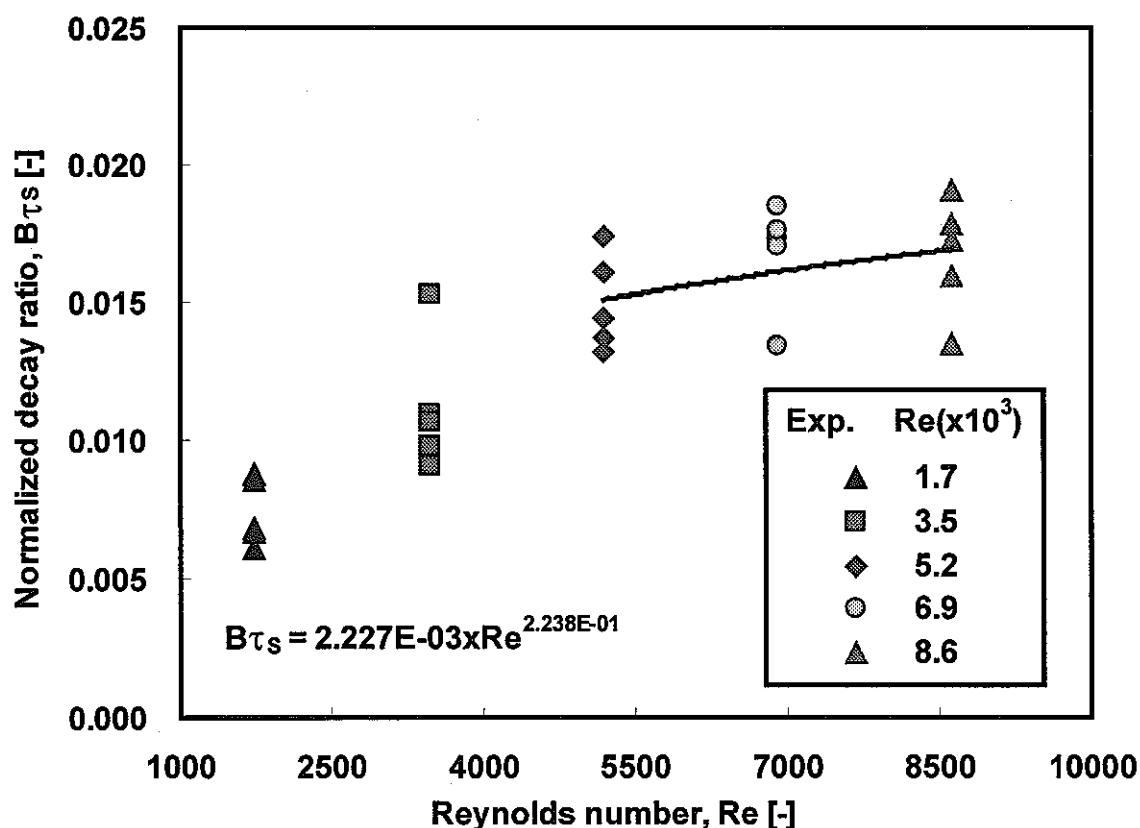


Fig.4-10(2) Normalized Decay Ratio in the Region of Recirculation

4. 2 閉塞物下流の後流領域

4. 2. 1 後流領域の範囲

3.2 節で示したように、閉塞物下流側では、下降流と上昇流とに分岐する箇所がある。この分岐点は、後流が消滅する箇所であり後流の上端である。3.2 節で示した各画像の輝度をそれぞれの高さで水平方向に平均し、時間経過に従って示すと Fig.4-11 によくなる。Fig.4-11 で時間の進行（右方向）と共に右上りの稜線（白矢印①）は上昇流を示し、逆に右下がりの稜線（白矢印②）は下降流を示す。よって、これら稜線の交点を探すことにより、下降流と上昇流の分岐点、つまり後流域の合流点（閉塞物周辺の閉塞されていない3つのサブチャンネルからの流れが合流する点、再付着点に相当する）を評価することができる。

Fig.4-12 に示すプロット図を利用して後流域の合流点（Fig.4-12 中では 314[Pixel]）を求める。まず、Fig.4-11 の輝度データについて2値化する。ある高さに着目して、時間変化を追うと黒または白色が並ぶ時系列が得られる。この時系列で黒色から白色に変わった時刻を抽出し、そのうち最も早い時刻を探す。着目する高さを縦軸にとり、この最も早い時刻を横軸にとりプロットしたものが Fig.4-12 である。このような操作をすることにより、上昇流を示す稜線（白矢印①）と、後流に巻き込まれる下降流を示す稜線（白矢印②）を抽出し合流点を探すことができる。

Fig.4-13 に再付着点の位置を水平方向の閉塞物厚さ D_B (=28[mm]) で無次元化して示す (Fig.3-17 参照)。閉塞物厚さは閉塞物側面から断面重心位置（染料注入位置）の2倍の距離である。合流点の位置は、 $Re=5.2\times 10^3$ ($Q_L=1.2[m^3/h]$) で極小となり、その後 Re 数の増加とともに上昇する。これは、 $Re < 5.2 \times 10^3$ で流れが層流から乱流へ遷移する過程ではないかと推測される（付録3 参照）。本実験においては閉塞物後流の合流点の位置は閉塞物厚さ D_B (=28[mm]) の 1.5 倍以内であった。

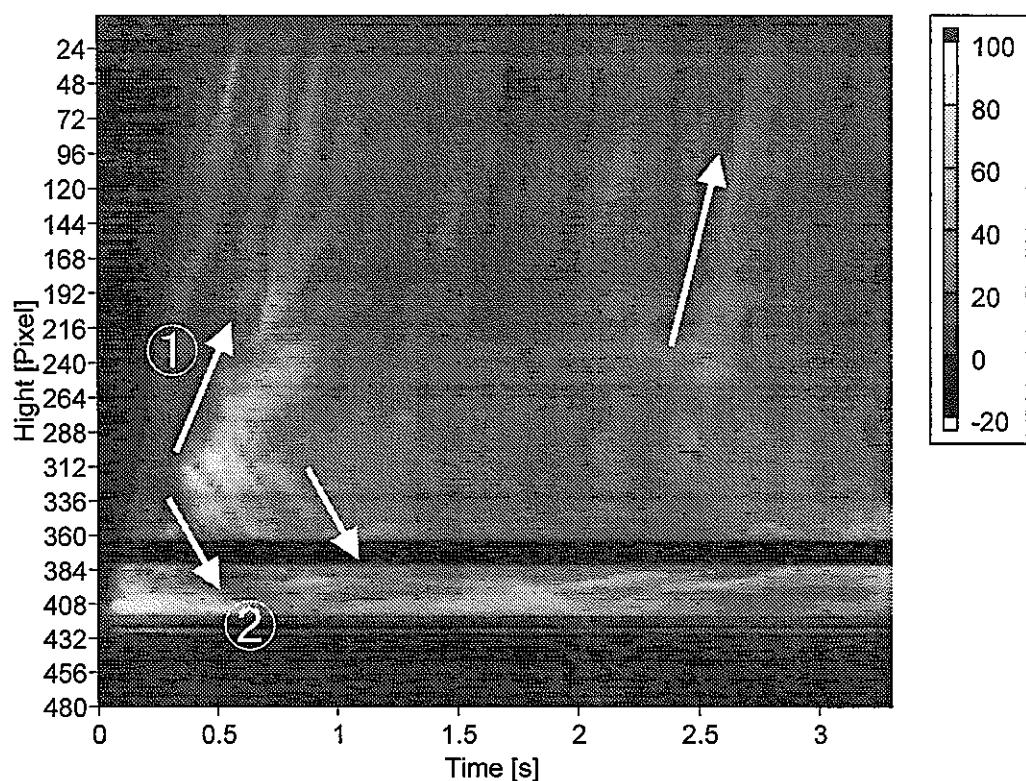


Fig.4-11 Time sequence of spacial average luminance

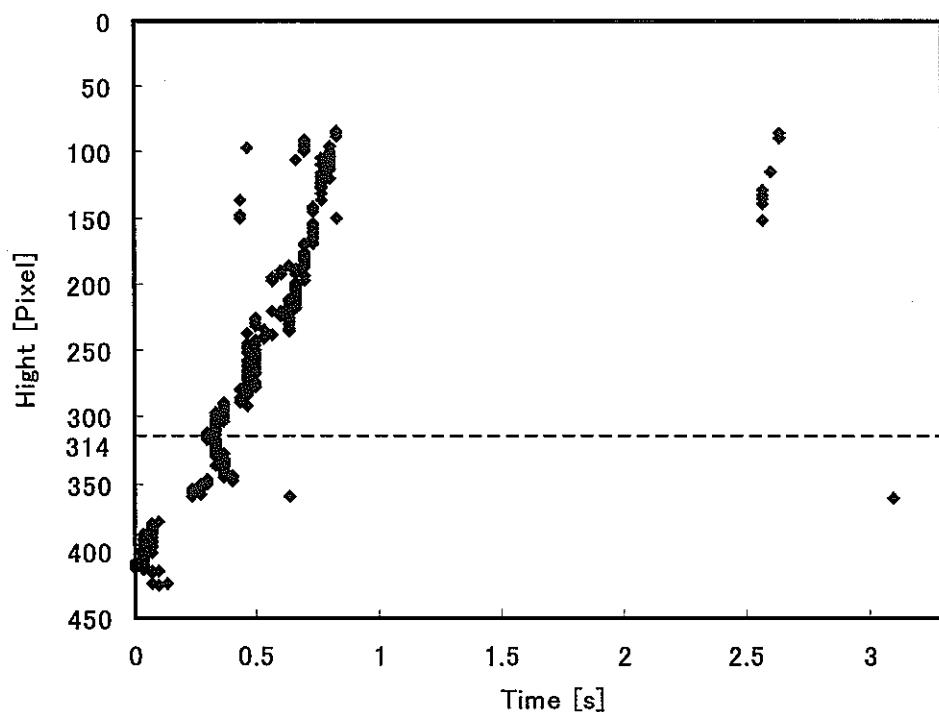


Fig.4-12 Definition of Flow Separate Point

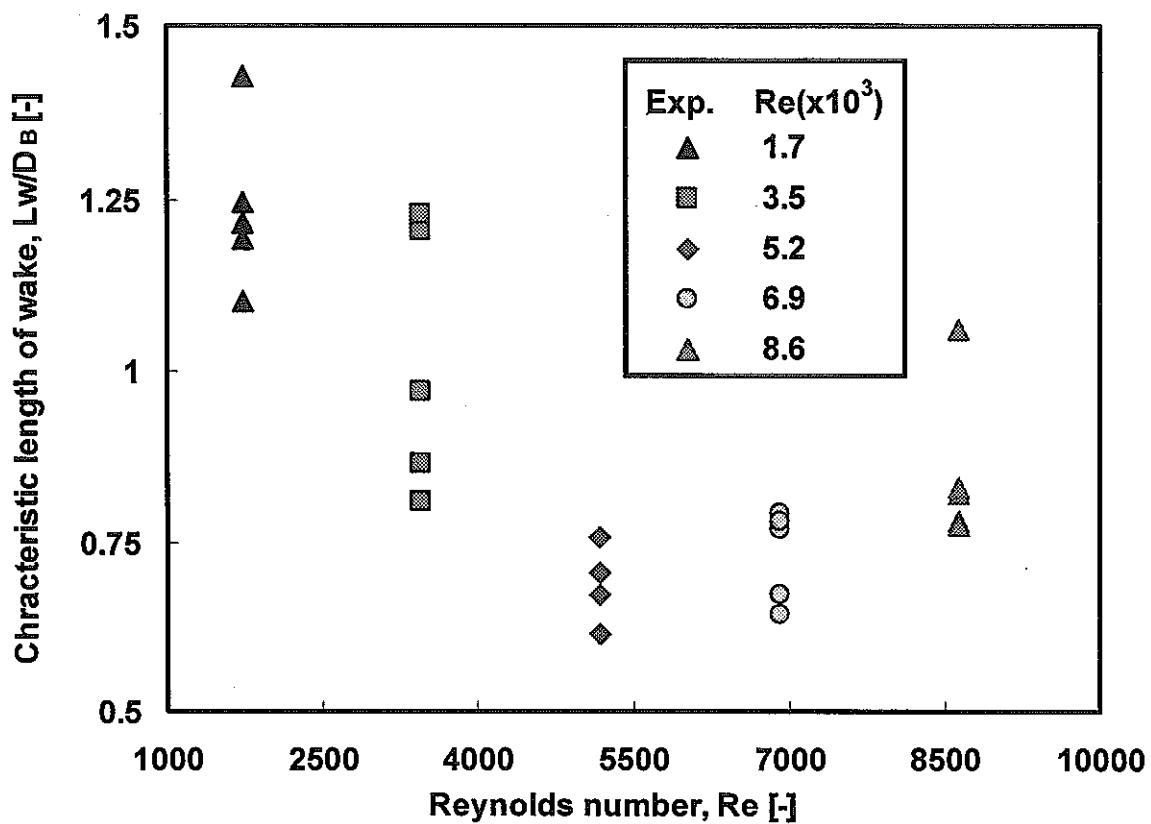


Fig.4-13 Relation between Characteristic length of wake and Reynolds Number

4. 2. 2 後流領域内の拡散

Fig.4-14 に 4.2.1 節で求めた後流領域内の各ピクセルの輝度を空間平均し、その空間平均輝度の時系列分布を示す。染料注入開始（時刻 0[s]）から輝度は急激に増加しピークに達する。輝度は指数関数的に減少し、流量の増加に伴いピークからノイズレベルに達するまでの時間が短縮している。以上の特徴は 4.1.2 節の閉塞物側面での循環流量域と同様である。ただし、後流域の場合、輝度の減衰はなだらかでなく周期性をもつて減少している。閉塞物後流域では閉塞チャンネルを囲む健全チャンネルからの 3 方向の流れ込みが生じ相互に干渉するため、周期性を持つ不安定な流れ場となっていると考えられる。

後流領域はヒータピンによって 3 方向から過熱され、閉塞物内部で加熱された冷却材が存在している。よって、後流領域内部では流れが停滞し、冷却材温度が周囲に比べて大幅に上昇する可能性がある。そこで、後流領域についても循環流領域同様に拡散時間を見積もることとする。

Fig.4-15 に後流領域における拡散時間 dT と流量条件 Re 数の関係を示す。拡散時間は、輝度値がピークをとつてから、ピーク値の 5%まで低下する時間とした。流量の増加に伴つて拡散時間は減少するが、 $Re=1.7 \times 10^3$ ($Q_L=0.4 [m^3/h]$) から $Re=3.5 \times 10^3$ ($Q_L=0.8 [m^3/h]$) までの変化が大きい。

4.1.2 節と同様に輝度値がピークをとつてからノイズレベルに低下するまでの範囲について輝度値の減衰を指数関数で近似し、滞留時間係数 B を求めた。Fig.4-16(1)に滞留時間係数 B と流量 (Re 数)との関係を示す。滞留時間係数は流量の増加に従つて増加する。また、Fig.4-16(2)に滞留時間係数 B を特性時間 $\tau_w (=D_B/U)$ で無次元化して示す。 U は閉塞物がない体系（閉塞物前面）での断面平均流速である（Table 1 参照）。後流域での特性時間 τ_w は、閉塞物側面の循環流領域での特性時間 τ_s と同様に、後流領域内で冷却材が置換されるまでの時間と考えられ、 τ_w と τ_s との関係は $\tau_s = \tau_w \cdot (1 - \beta)$ である（付録 1 参照）。ここで、 β は閉塞物のない流路断面積と閉塞物の断面積の比である。

Fig.4-16(2)に示す無次元滞留時間係数から $Re > 5.2 \times 10^3$ の前後で傾向が変化していることが分かる。この原因の一つとして流れが層流から乱流に遷移していると推測される（付録 3 参照）。また、無次元滞留時間係数と流量 (Re 数)の関係は、 $Re > 5.2 \times 10^3$ の範囲について以下の（12）式で近似できる。

$$B \cdot \tau_w = B \cdot \frac{D_B}{U} = 1.0 \times 10^1 \cdot Re^{-0.74} \quad (Re > 5.2 \times 10^3) \quad (12)$$

Table 3 に Fig.4-15 に示す拡散時間 dT (付録 2 参照) と (12) 式を用いて (9) 式から求められる拡散時間を比較して示す。(9) 式においては、 $L^*=0.05$ (ピーク値の 5%, バックグラウンドレベル) となる時刻を拡散時間とする。Fig.4-15 に示す拡散時間と (9) 式から求めた拡散時間はほぼ一致している。よって、循環流領域同様に後流領域についても、濃度拡散から求めた (9) 式および (12) 式による拡散時間で大型炉条件の予測を行う。

Table 3 Comparison of Decay Time in Wake Region

Re	τ_w	$B\tau_w$, Eq.(12)	$t(L^*=0.05)$, Eq.(9)	dT , (Average)
5.2×10^3	0.10	0.019	15.5	13.8
6.9×10^3	0.075	0.016	14.3	12.5
8.6×10^3	0.060	0.013	13.5	11.6

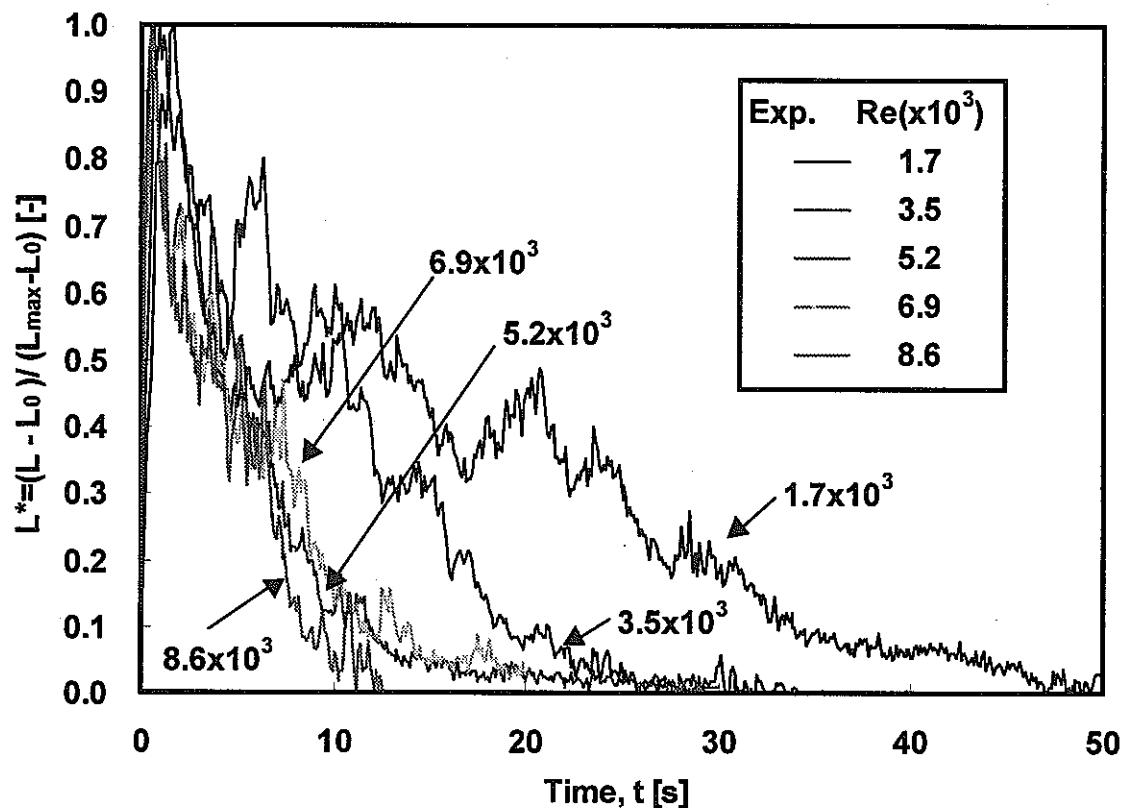


Fig.4-14 Time series of Normalized Luminescence

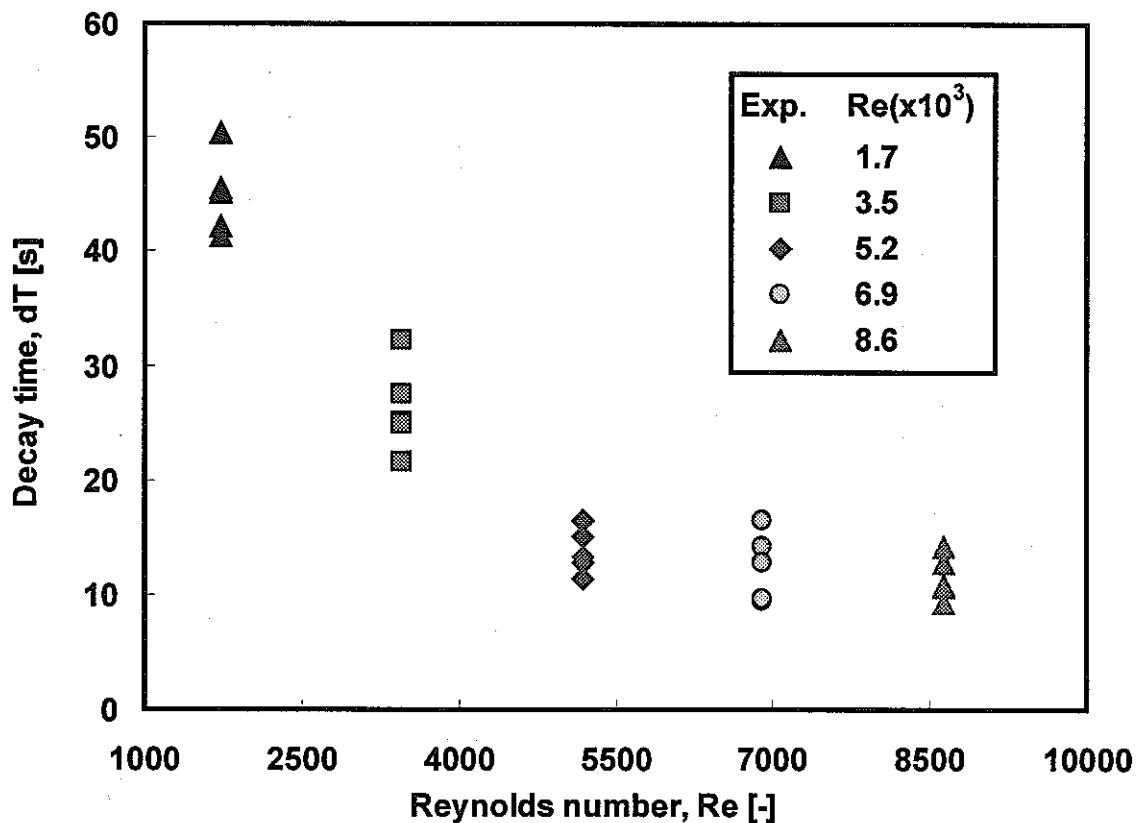


Fig.4-15 Relation between Decay Time and Reynolds Number

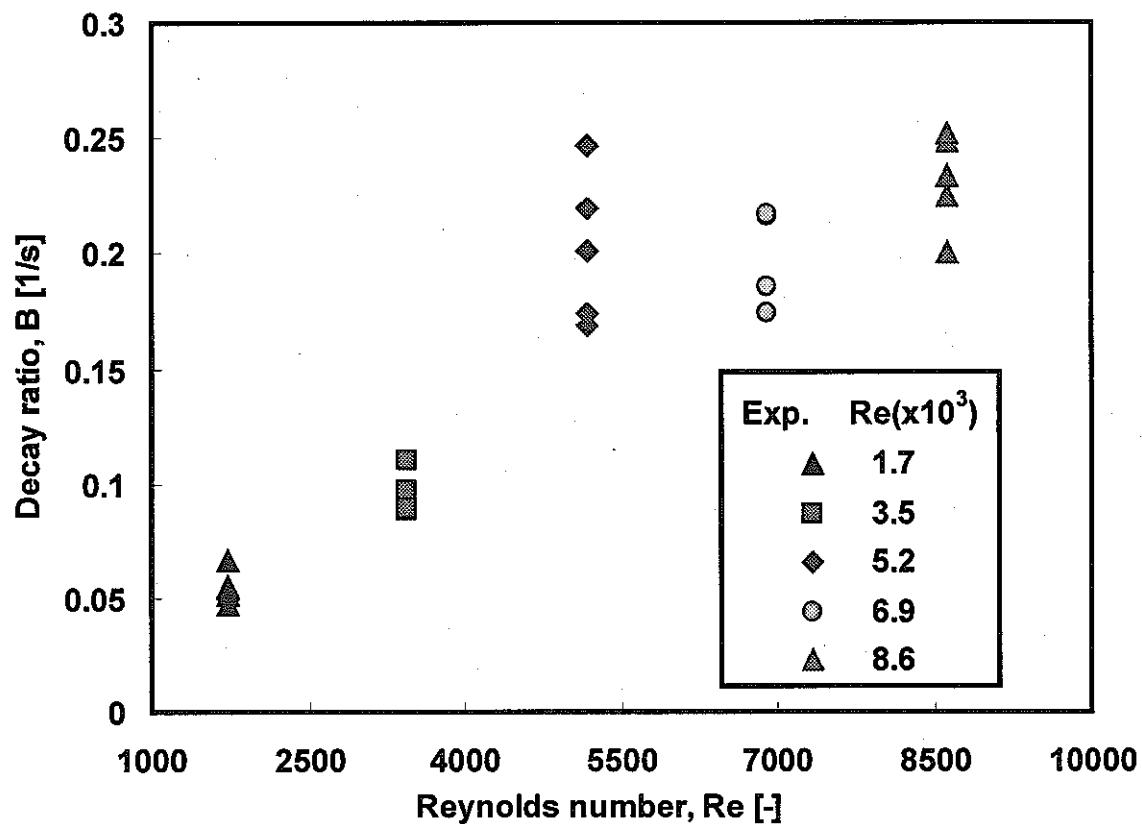


Fig.4-16(1) Relation between Decay Ratio and Reynolds Number

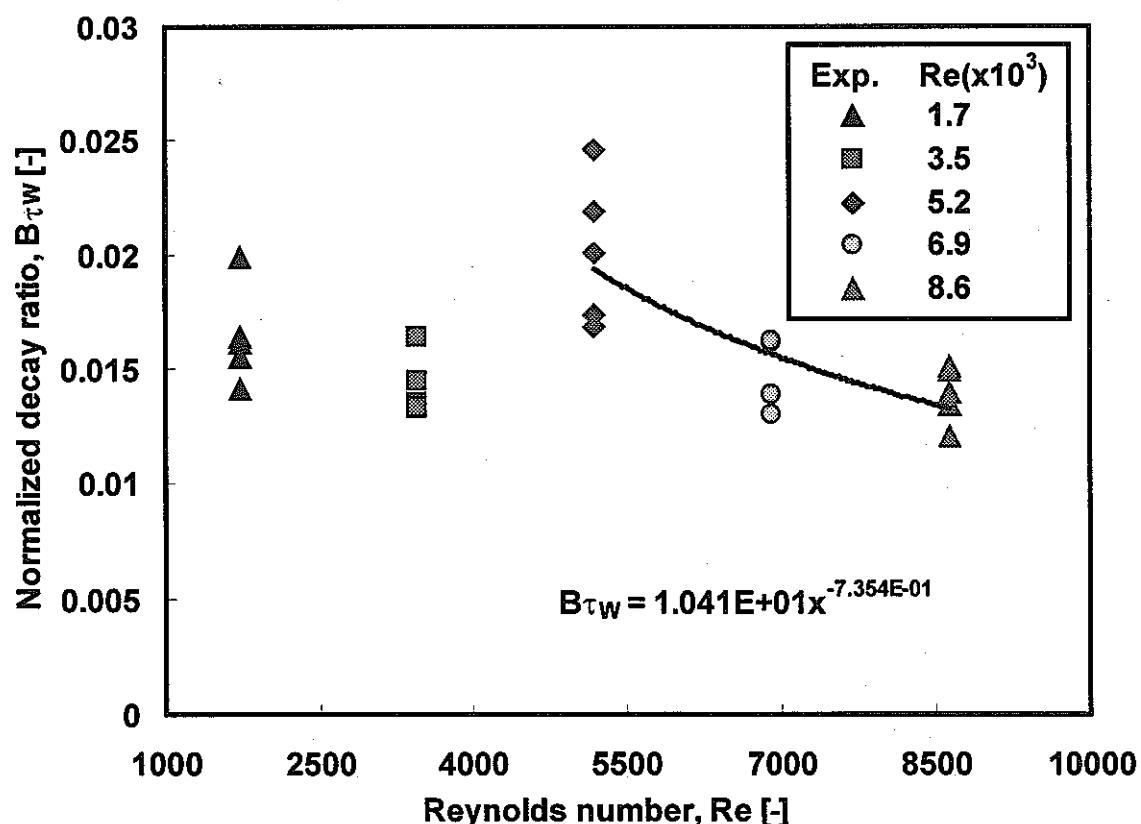


Fig.4-16(2) Normalized Decay Ratio in Wake Region

5. 大型炉条件での予測

第4章において、循環流領域および後流領域について流動場の境界条件を Re 数、閉塞物厚さ D_B を代表長さとして閉塞物の大きさをそれぞれ評価した。本試験体系は、Fig.2-2 に示すように4つのサブチャンネルを抽出し、5倍に拡大したモデルとなっている。また、ワイヤスペーサは模擬されていない。ポーラス状閉塞物については、粒子径 1[mm]の球状粒子で構成され、空隙率は 40[%]、軸方向長さは 60[mm]である。大型炉においては 1～3[mm]程度の粒子が水力等価直径 3[mm]程度のサブチャンネルに詰まっていることが想定されているが、サブチャンネル断面では数個の粒子しか存在しないことから、その場合の空隙率は 40[%]よりも疎であることは容易に推測でき、本試験での閉塞条件は保守側であると考えられる。

本試験と大型炉では体系が大きく異なり、流量条件も異なる（大型炉では Re のオーダーが 10^4 の発達した乱流領域、本試験は Re のオーダーが 10^3 の未発達の乱流領域である）ため、流動場の境界条件を無次元数で評価したとしても直接外挿することは難しい。しかし、大型炉で閉塞が生じ循環流領域および後流領域が形成された場合における、閉塞物周辺の流動場の特徴について、本試験結果を外挿して概略予測を行うことは意味のあることと考える。以下の予測では、Table4 に示す大型炉体系を対象とする。

また、拡散時間から大型炉での温度上昇を考えることは可能であるが、本試験体系と大型炉では体系が大きく違うこと、水とナトリウムの熱特性の違いについて評価がなされていないことから、温度場については今後の課題とする。また、本試験（4サブチャンネル）体系での温度場の評価についても、比較の対象となる温度計測点がないため、別途行われる検証解析結果と比較して行う。

Table 4 Characteristic of Large Scale Fast Breeder Reactor

	4-subchannel test section	Large scale FBR
Pin number	6 (4 subchannels)	217
Pin diameter [mm]	42.5	8.5
Gap width [mm]	5.7	1.15
Equivalent Hydraulic Diameter, D_e [mm]	15.8	3.15
Plugged subchannel number	1	1
Characteristic blockage length, D_B [mm]	28.0	5.57
β [-]	0.25	0.002
Coolant	Water	Sodium
Mean velocity, U [m/s]	0.096～0.46	7
Reynolds Number	8.6×10^3	5.9×10^4

1) 循環流領域の範囲

閉塞物側面から流出する冷却材の範囲は、無次元高さ z/D_B と流量条件 Re 数との関数は（1a）式で表せる。

$$z/D_B = 1.4 \times 10^{-5} \cdot Re + 7.9 \times 10^{-1} \quad (1a)$$

ここで、 $Re=5.9 \times 10^4$ を代入すると、 $z/D_B=1.6$ となる。よって、閉塞物高さが閉塞物厚さ D_B の 1.6 倍（閉塞物高さが 9[mm]=1.6×5.57[mm]）以内であれば、閉塞物内部を通過、あるいは閉塞物側面からの水平方向流れのある領域（循環流領域）となり冷却効果が期待できる。

2) 循環流領域内の拡散

循環流領域における輝度値の減衰は以下のように評価できる。

$$L^* = \frac{L - L_0}{L_{MAX} - L_0} = A \exp(-Bt) \quad (9)$$

$$L^* = \frac{(L - L_0)}{(L_{MAX} - L_0)} \quad (10)$$

$$A = 1.0, \quad B = \frac{K}{\tau_S}, \quad B \cdot \tau_S = K$$

無次元滞留時間係数は Re 数の関数として（11）式で近似できる。

$$B \cdot \tau_S = B \cdot \frac{D_B \cdot (1-\beta)}{U} = 2.2 \times 10^{-3} \cdot Re^{0.22} \quad (Re > 5.2 \times 10^3) \quad (11)$$

ここで、（11）式に大型炉での条件 $Re=5.9 \times 10^4$ を代入すると、 $B \cdot \tau_s=0.026$ となる。Table4 に示す大型炉では $\tau_s=0.000794$ となるから、 $B=32.8$ である。このとき（9）式の $L^*=0.05$ （ピーク値の 5%，バックグラウンドレベル）となる時刻は、

$$\begin{aligned} 0.05 &= \exp(-Bt) \\ t &= \ln(0.05)/(-32.8) \\ &= 0.09 \end{aligned}$$

$t=0.09[\text{s}]$ となる。

以上の結果から、概略予測すると循環流領域の流体は 0.1 秒以内に外部流体と全て交換されることになる。

3) 後流領域内の拡散

後流領域における輝度値の減衰を指數関数で近似し、無次元滞留時間係数 B/τ_w を Re 数の関数として評価すると、（12）式となる。

$$B \cdot \tau_w = B \cdot \frac{D_B}{U} = 1.0 \times 10^1 \cdot Re^{-0.74} \quad (Re > 5.2 \times 10^3) \quad (12)$$

（12）式に大型炉での条件 $Re=5.9 \times 10^4$ を代入すると、 $B \cdot \tau_w=0.00323$ となる。Table2 に示す大型炉では $\tau_w=0.000796$ となるから、 $B=4.06$ となる。このとき（9）式の $L^*=0.05$ となる時刻は、

$$0.05 = \exp(-4.06 \cdot t)$$

$$t = \ln(0.05) / -4.06$$

$$= 0.738$$

$t=0.738$ となる。

以上の結果から、概略予測すると後流域の流体が外部流体と全て交換されるまで 1 秒以内に外部流体と全て交換されることになる。

6. まとめ

ポーラス状閉塞物周辺の流動場における流況を把握するため、(1)閉塞物側面における水平方向流れの有無の確認、(2)閉塞物側面の循環流れの存在確認と再付着点の評価、(3)閉塞物下流側での流況把握に注目した可視化実験を行った。その結果、ポーラス状閉塞物周辺の流動場の特徴を把握することができた。

1) 閉塞物側面における循環流領域

- ①閉塞物側面では循環渦が生じ、閉塞物下端から流入した冷却材が閉塞物内部を通り健全サブチャンネルへ流出している。閉塞物内部では、冷却材が閉塞物内部の抵抗のより少ない流路（空隙）を選択的に、空間的な分布を持って流れ、不安定な流動場であると考えられる。
- ②閉塞物側面の循環流領域は、本試験条件では閉塞物中央部付近から閉塞物下端の範囲に存在し、流量の増加と共に下流側へ延びる。循環渦内部では比較的大きなスケールの乱れが生じ、循環渦内部では対流拡散が支配的である。
- ③大型炉での条件（217本ピンバンドル、1サブチャンネル閉塞、 $Re=5.9\times10^4$ ）を代入して循環流領域の範囲を予測すると、 $z/D_B=1.64$ となり、閉塞物高さが閉塞物厚さ D_B の 1.6 倍以内であれば、閉塞物内部を通過、あるいは閉塞物側面からの水平方向流れのある領域（循環流領域）となりその冷却効果が期待できる。
- ④染料による蛍光輝度がノイズ（バックグラウンド）レベルに拡散するまでにかかる時間（拡散時間 dT ）と流量の関係は指數関数で表現でき、大型炉での条件（217本ピンバンドル、1サブチャンネル閉塞、 $Re=5.9\times10^4$ ）を代入して予測すると、約 0.1 秒以内で循環流領域の流体が外部流体と全て交換されることになる。

2) 後流域

- ①本実験条件においては、閉塞物後流の合流点（閉塞物周辺の閉塞されていない 3 つのサブチャンネルからの流れが合流する点、平板閉塞での再付着点に相当する）の位置は、閉塞物厚さ D_B ($=28[\text{mm}]$) の 1.5 倍以内であった。
- ②閉塞物後流域では閉塞チャンネルを囲む健全チャンネルからの 3 方向の流れ込みが生じるため、後流域では流れが周期性を持っており不安定である。
- ③閉塞物上端からの浸み出しあるいは巻き込みによって冷却材が後流域に常に供給・置換され、流量の増加と共に促進される。大型炉での条件（217本ピンバンドル、1サブチャンネル閉塞、 $Re=5.9\times10^4$ ）を代入して拡散時間 dT を予測すると、1秒以内に後流域の流体が外部流体と全て交換されることになる。

謝 辞

本報告書で報告した試験の遂行に際し、常陽産業株式会社 伊藤 真美氏、小沼 英良氏には、燃料集合体試験ループの運転および可視化実験の実施に関して協力して頂きました。新型炉開発株式会社（当時 原子炉工学室）大木 義久氏には可視化試験装置製作および試験方法に関して、ご指導およびご助言を頂きました。また、原子炉工学グループ 西村 元彦 副主任研究員（現 川崎重工業株式会社）にはデータ解析においてご指導およびご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 板東 文夫, 他,「異物流入閉塞模擬試験による燃料局所閉塞の研究」, 日本原子力学会「1990 秋の大会」予稿集, F45, (1990) .
- [2] 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) .
- [3] K. Haga, et al."Review and Future Needs of Experimental Studies on Local Faults" , Proc. of Int. Conf. on Science and Technology of Fast Reactor Safety, Guernsey, No.90, Vol.1, p.513-518, (1986) .
- [4] 田中 正暁, 他,「燃料集合体局所閉塞冷却限界 4 サブチャンネル基礎水流動試験 一閉塞物内温度分布への冷却材内部流れの影響ー」, PNC TN9410 98-024, (1998) .
- [5] 田中 正暁, 他,「高速炉燃料集合体ポーラス状局所閉塞事象の研究 一多次元熱流動解 析手法の検討ー」, PNC ZN9410 97-048, (1997) .
- [6] 魚谷 正樹, 他,「局所流路閉塞試験 - 4 19 本ピンバンドルにおける片側 50% 流路閉塞の場合」, PNC ZN941 77-200, (1977) .
- [7] 中村 寿, 他,「燃料集合体局所流路閉塞水流動試験（第 3 報）61 本ピンバンドルにおける閉塞物後流状況の把握」, PNC ZN941 78-77, (1978) .
- [8] 流れの可視化学会編, 「新版流れの可視化ハンドブック」, 第 5 章, 朝倉書店, (1986) .
- [9] 同 [8], 第 8.12 節.
- [10] 中島 健, 他, 「LDV—蛍光法を用いた水の速度と温度の同時測定」 日本機会学会論文集 (B 編) , 55-546, pp.554-560, (1992).
- [11] 日野 幹雄, 「流体力学」, 第 1 5 章, 朝倉書店, (1992)
- [12] 日本機械学会, 「技術資料 管路・ダクトの流体抵抗」, 第 3 章, (1979)

付 錄

付録 1 特性時間の定義

付録 2 試験データ一覧

付録 3 試験体圧力損失

付録 1 特性時間の定義

本文中第4章で述べたように、閉塞物を含む燃料集合体においては、集合体体系に起因する代表長さ（水力等価直径 D_e ）と、閉塞物の規模（大きさ）に起因する代表長さ（閉塞物厚さ D_B ）が一つの体系内に存在する。本研究では、集合体内の境界条件（流量条件）を評価する際には水力等価直径 D_e により定義される Re 数で示し、閉塞物の大きさに起因した量（循環流量域の大きさ、拡散時間等）を評価する際には閉塞物厚さ D_B を用いて無次元化し評価する。

閉塞物厚さの定義については、周辺閉塞の場合の閉塞物厚さは閉塞物側面から閉塞物と接している壁までの距離の2倍、複数サブチャンネルに及ぶ中心閉塞の場合には、閉塞物側面間の対辺距離となる（Fig.3-17 および第4章参照）。閉塞物側面から $D_B/2$ 内側の上方に合流点あるいは再付着点が存在することになるから、本試験体系の場合は閉塞物重心位置で流れが対称となり、その上方に合流点が存在すると考えられるから、閉塞物厚さ D_B を閉塞物側面から断面重心位置（染料注入位置）までの距離の2倍 ($=28[\text{mm}]=2\times14[\text{mm}]$) と定義する（Fig.3-1 および Fig.3-17 参照）。

循環流領域内および後流領域内の特性時間を定義する場合、これら領域内の流体が、外部流体と入れ替わる時間で定義する。奥行き方向を単位長さとして、Fig.A1 に示すような1次元の流れ場を考える。

<循環流領域>

閉塞物前面では断面平均流速 U_0 で流入する。閉塞物下端から閉塞物内部に流入する流量を無視すると、閉塞物を含む断面での断面平均流速 U_1 は次のようになる。 β は断面閉塞率を示す。

$$Q_L = U_0 \cdot S_0 = U_1 \cdot S_1$$

$$S_1 = S_0 \cdot (1 - \beta)$$

$$U_1 = \frac{Q_L}{S_1} = \frac{U_0 \cdot S_0}{S_0 \cdot (1 - \beta)} = \frac{U_0}{1 - \beta}$$

軸方向流速のみ考えて、閉塞物側面の循環流量域（右図中のグレー領域）に供給される流量と、循環流量域内の流体が外部流体と入れ替わるのに要する時間 τ との関係は以下のように表せる。

$$(W_s \cdot L_s) = U_1 \cdot W_s \cdot \tau$$

$$\tau = \frac{L_s}{U_1} = \frac{n D_B \cdot (1 - \beta)}{U_0} \propto \frac{D_B \cdot (1 - \beta)}{U_0}$$

よって、循環流量域における特性時間 τ_s を $\tau_s = D_B \cdot (1 - \beta) / U$ で定義する。

<後流領域>

閉塞物上端断面では断面平均流速 U_1 で流入し、閉塞物下流では閉塞

物のない断面における平均流速 U_0 に回復する。循環流量域同様に、軸方向流速のみ考えて、閉塞物下流の後流域（右図中の斜線領域）に供給される流量と、循環流量域内の流体が外部流体と入れ替わるのに要する時間 τ との関係は以下のように表せる。ただし、閉塞物内部から後流域に流入する流量は無視する。

$$\begin{aligned}
 L_W \cdot (\beta \cdot S_0) &= (U_1 \cdot S_1 - U_0 \cdot S_1) \cdot \tau \\
 \tau &= \frac{L_W \cdot (\beta \cdot S_0)}{(U_1 - U_0) \cdot S_1} = \frac{L_W \cdot (\beta \cdot S_0)}{(U_1 - U_0) \cdot S_1} = \frac{L_W \cdot (\beta \cdot S_0)}{(U_1 - U_0) \cdot (1 - \beta) \cdot S_0} \\
 &= \frac{\beta \cdot L_W}{\left(\frac{U_0}{1 - \beta} - U_0\right) \cdot (1 - \beta) \cdot S_0} = \frac{\beta \cdot L_W}{U_0 - (1 - \beta) \cdot U_0} = \frac{L_W}{U_0} \\
 &= \frac{n D_B}{U_0} \propto \frac{D_B}{U_0}
 \end{aligned}$$

よって、後流域における特性時間 τ_w を $\tau_w = D_B / U$ で定義する。

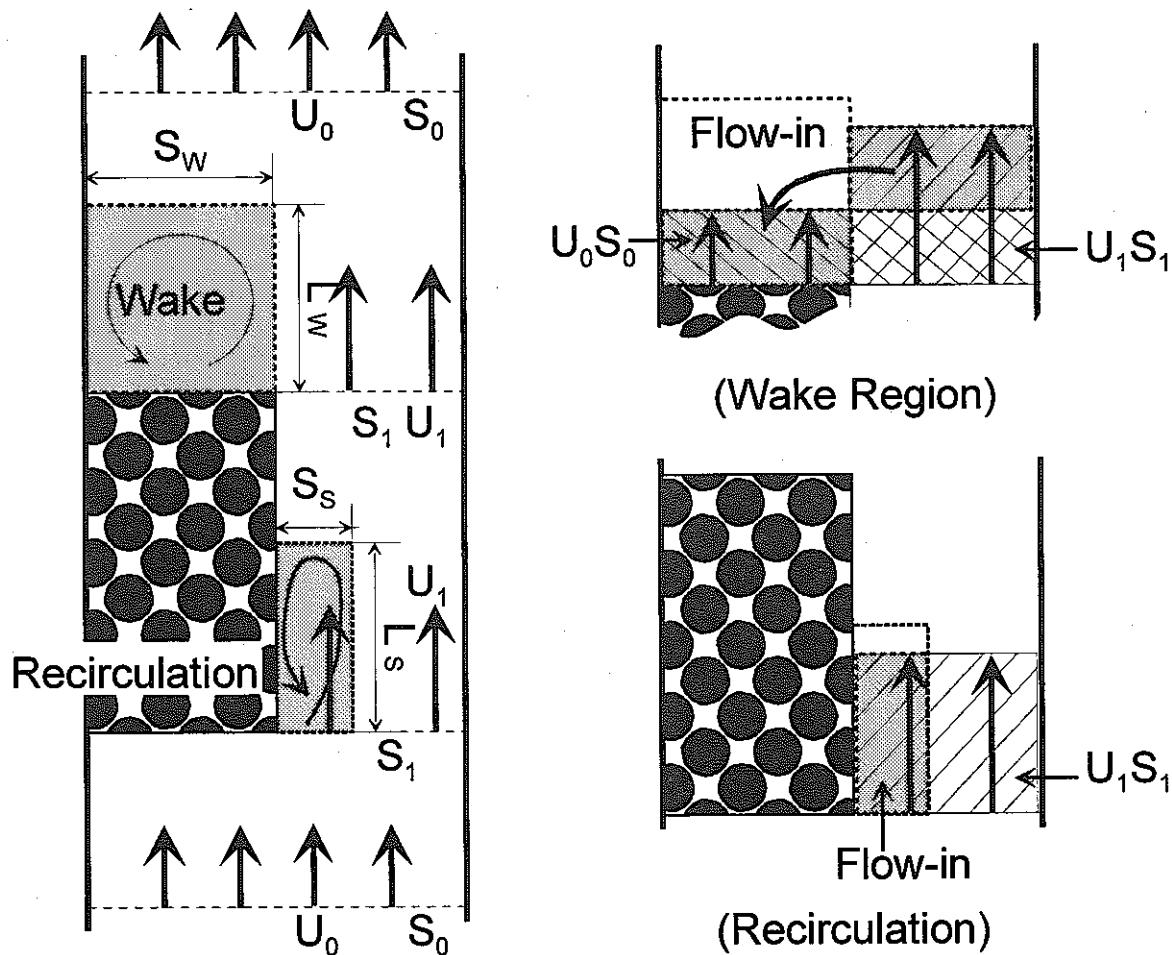


Fig. A1 Characteristic Time in Wake and Recirculation

付録 2 試験データ一覧

以下に第4章で述べた画像解析結果を示す。

1) 循環流領域の範囲

閉塞物側面から流出する冷却材の範囲 $z/D_B(z/H)$

Re	1	2	3	4	5	Average X	Standard deviation σ	σ/X
1.7×10^3	0.804 (0.375)	0.833 (0.389)	0.833 (0.389)	0.833 (0.389)	0.827 (0.386)	0.826 (0.386)	0.013 (0.006)	0.016
3.5×10^3	0.833 (0.372)	0.863 (0.389)	0.863 (0.403)	0.827 (0.386)	0.827 (0.386)	0.830 (0.387)	0.023 (0.011)	0.028
5.2×10^3	0.863 (0.406)	0.863 (0.403)	0.863 (0.403)	0.869 (0.406)	0.857 (0.400)	0.864 (0.403)	0.005 (0.002)	0.006
6.9×10^3	0.940 (0.403)	0.857 (0.439)	0.857 (0.400)	0.857 (0.400)	0.857 (0.400)	0.875 (0.408)	0.037 (0.017)	0.042
8.6×10^3	0.970 (0.458)	0.970 (0.453)	0.970 (0.453)	0.857 (0.400)	0.857 (0.400)	0.927 (0.433)	0.064 (0.030)	0.069

2) 循環流領域内の拡散

循環流領域における拡散時間 dT

Re	1	2	3	4	5	Average X	Standard deviation σ	σ/X
1.7×10^3	89.5	79.2	53.0	74.3	56.3	70.5	15.5	0.220
3.5×10^3	15.6	28.5	29.0	22.1	21.5	23.3	5.6	0.238
5.2×10^3	14.5	13.7	11.0	11.3	14.5	13.0	1.7	0.133
6.9×10^3	8.5	10.1	8.2	8.9	8.6	8.9	0.7	0.083
8.6×10^3	6.7	6.9	5.7	6.1	6.5	6.4	0.5	0.075

循環流領域における係数 B (滞留時間係数)

Re	1	2	3	4	5	Average X	Standard deviation σ	σ/X
1.7×10^3	0.030	0.027	0.038	0.030	0.039	0.033	0.005	0.167
3.5×10^3	0.137	0.081	0.087	0.098	0.095	0.099	0.022	0.220
5.2×10^3	0.183	0.193	0.215	0.233	0.176	0.200	0.023	0.117
6.9×10^3	0.310	0.289	0.304	0.329	0.314	0.299	0.035	0.116
8.6×10^3	0.300	0.356	0.425	0.397	0.384	0.372	0.048	0.128

3) 後流領域内の拡散

閉塞物後流の合流点の位置 L_w/D_B

Re	1	2	3	4	5	Average X	Standard deviation σ	σ/X
1.7×10^3	1.247	1.217	1.103	1.193	1.425	1.237	0.118	0.095
3.5×10^3	0.811	0.972	0.865	1.205	1.229	1.016	0.192	0.189
5.2×10^3	0.614	0.757	0.704	0.757	0.674	0.701	0.060	0.086
6.9×10^3	0.769	0.644	0.793	0.781	0.674	0.732	0.068	0.093
8.6×10^3	0.781	0.823	1.062	0.829	0.775	0.854	0.118	0.139

閉塞物後流における拡散時間 dT

Re	1	2	3	4	5	Average X	Standard deviation σ	σ/X
1.7×10^3	41.3	45.1	45.5	50.3	42.2	44.9	3.53	0.079
3.5×10^3	21.5	27.5	32.2	25.0	24.8	26.2	3.97	0.152
5.2×10^3	12.7	13.3	15.1	11.4	16.4	13.8	1.98	0.144
6.9×10^3	14.2	9.5	12.7	9.7	16.4	12.5	2.96	0.237
8.6×10^3	9.3	14.2	10.7	12.8	10.8	11.6	1.93	0.167

閉塞物後流における係数 B (滞留時間係数)

Re	1	2	3	4	5	Average X	Standard deviation σ	σ/X
1.7×10^3	0.066	0.055	0.054	0.052	0.047	0.055	0.007	0.130
3.5×10^3	0.110	0.091	0.088	0.097	0.089	0.095	0.009	0.094
5.2×10^3	0.201	0.220	0.169	0.247	0.174	0.202	0.033	0.161
6.9×10^3	0.186	0.216	0.185	0.217	0.174	0.195	0.020	0.100
8.6×10^3	0.249	0.201	0.252	0.225	0.234	0.232	0.021	0.089

付録3 試験体圧力損失

本可視化試験とは個別に同じ試験体を用いて、閉塞部上下流間の圧力損失を測定している^[4]。閉塞物を設置しない条件での圧力損失係数をFig.A3に示す。これによると、 $Re=1.7\times10^3$ （流量条件 $0.4 \text{ [m}^3/\text{h}]$ ）および $Re=3.5\times10^3$ （ $0.8[\text{m}^3/\text{h}]$ ）は層流から乱流への遷移域にあたり、 $Re=1.7\times10^3$ （流量条件 $0.4 \text{ [m}^3/\text{h}]$ ）では層流域から遷移域の境界域と推測される。閉塞物なし条件での圧力損失係数はブラジウスの式よりも大きな値となっている。試験体内部には、熱電対の取り出し部や熱電対固定用部品等が存在している上に、模擬ヒータは3分割されたヒータブロックから構成されており各ブロック間には多少の凹凸が存在する。試験体内部にはこれらの摩擦要素があり滑らかではないのが原因と考えられる。そこで、次式で与えられる粗管の摩擦抵抗公式を用いて、実験結果を評価する^[11]。

$$\frac{1}{\sqrt{\zeta}} = -2 \log_{10} \left(\frac{ks}{D} \right) + 1.14$$

ここで、 $ks[\text{m}]$ は粗度、 $D[\text{m}]$ は管半径を示す。Fig.A3に示すように、 $ks=0.9[\text{mm}]$ とすると実験結果とよく一致する。本実験装置の場合、粗度は $0.9[\text{mm}]$ 、等価相対粗さ $ks/D=0.057$ と評価できる。ムーディー線図を見ると、 $ks/D=0.057$ のとき $Re=1.0\times10^4$ まで過渡領域と判断できる^[12]。Fig.A3において実験結果が $Re=3.5\times10^3$ ($0.8[\text{m}^3/\text{h}]$) より高い Re 数で、圧力損失係数 ζ が層流時の圧力損失 ($64/Re$) よりも大きく、一定値をとなっていることから乱流への遷移域と見なすことができ、ムーディー線図からの推察と一致する。よって、 $Re>5.2\times10^3$ では層流から乱流への過渡領域であり、流れは乱流領域の入口であると考えられる。

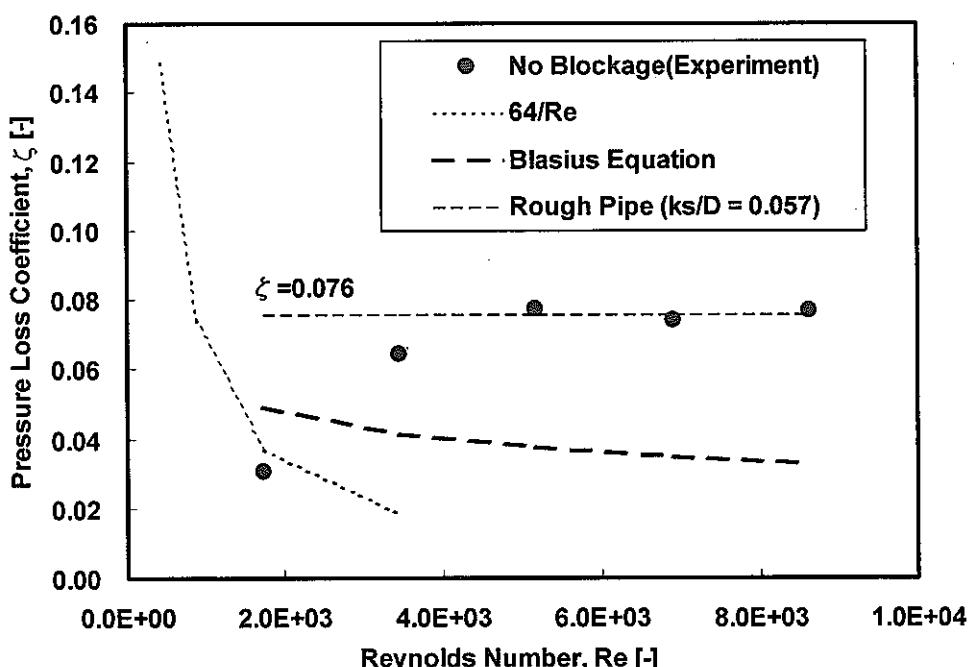


Fig.A3 Pressure Loss Coefficient in 4 Sub-channel Geometry Test Section