

管路入口部のはく離流れの制御と流動抵抗の低減

平成 18 年 度

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻

山 本 寛 之

平成 18 年度 修士論文

管路入口部のはく離流れの制御と流動抵抗の低減

Flow control of separated flow from pipe inlet and drag reduction

平成 19 年 2 月 6 日提出

指導教員

社河内 敏 彦 教 授
辻 本 公 一 助教授
安 藤 俊 剛 助 教

三重大学大学院 工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
流動現象学研究室

山本 寛之



学 位 論 文 要 旨						
学位論文提出者	氏名	山本 寛之	専攻	機械工学	講座	流動現象学
学 位 論 文 題 目	管路入口部のはく離流れの制御と流動抵抗の低減					
論 文 審 査 委 員	主査	社河内 敏彦	副査	辻本 公一	副査	安藤 俊剛
<p>タンクなどの十分に大きな空間から管路へと流入する流れは、流れのはく離、再付着、渦領域の形成などを伴う複雑な流動形態を示し、流体力学的に興味深い事象の一つである。また、この流路形状は、各種流体装置、配管系、燃焼炉などで見られる基本的なものであり、その流動特性を明らかにし、流動抵抗（以下、入口損失）を低減させることは工学上・工業上重要である。</p> <p>管路へと流入する流れは、入口角部で流れがはく離し、管路壁面に再付着することで渦領域が形成される。この渦領域は時間平均的には停滞して存在しているが、実際には時間経過とともに渦領域の形成と放出が繰り返される非定常な特性をもつ。このはく離渦の存在に伴う縮流のために流れの有効断面積が小さくなるほど入口損失は増大する。そのためこのような流路形状による流体輸送において、はく離渦の生起を抑制することで、入口損失を低減することは非常に興味深い事象である。</p> <p>本研究では、このような入口損失の原因となる渦領域の生起を比較的簡単に抑制して入口損失を低減することを目的とした。入口損失を低減させる方法として、水槽壁面に管直径より僅かに大きい直径と矩形断面を持つリング状小物体の設置を提案する。小物体からはく離した流れを管内壁に沿う方向で管路内へ流入することで渦領域の形成を抑制する。本研究では、小物体の高さ H、設置位置 L、幅 W を変化させ、最適値を実験と汎用流体解析ソフトによる数値計算で明らかにした。また、オフセット平板を設置することによる入口損失への影響を調べ、この場合においても、小物体の設置による入口損失の低減を明らかにした。</p> <p>主な結果は以下のようである。</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 小物体を設置することで、流入後のはく離渦の生起を抑制・制御できる。 (2) 今回試した範囲での最適形状、設置位置は、$H/D = 0.2$, W/D, $L/D = 0.1$ で、入口損失が約 90 % 低減できる。 (3) 小物体の設置による流動特性の変化を、実験的解析及び数値的解析から明らかにした。 (4) オフセット平板の設置によって入口損失が増大するが、小物体設置により低減できる。 						
論 文 目 録						
<ol style="list-style-type: none"> (1) 安藤俊剛・社河内敏彦・山本寛之・辻本公一，急拡大管内のはく離せん断流れとその制御，日本機械学会 第 83 期流体力学部門講演会 講演概要集，No.06-21, (2005-10)，pp.726. (2) 安藤俊剛・社河内敏彦・山本寛之・辻本公一，急拡大円管内のはく離流れの制御および流動抵抗低減に関する研究，日本機械学会 講演論文集 (B 編)，72-717, (2006-5)，pp.1125-1130. (3) T.Ando, T.Shakouchi, H.Yamamoto and K.Tsujimoto, Drag Reduction of Abrupt Expansion Pipe Flow, Proc. of Int. Symp. on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics (2006-11), CD-ROM. (4) 安藤俊剛・山本寛之・社河内敏彦・岡本悠佑・辻本公一，管路入口部のはく離流れの制御と流動抵抗の低減，日本機械学会 東海支部第 56 期総会講演会 講演論文集，(2007-3). 						

管路入口部のはく離流れの制御と流動抵抗の低減

目 次

第 1 章 緒論	1
主な記号	3
第 2 章 実験装置及び方法	4
2.1 実験装置	4
2.1.1 実験装置の概要	4
2.1.2 測定部詳細と座標系	5
2.1.3 レイノルズ数	5
2.1.4 小物体の詳細	5
2.2 実験方法	6
2.2.1 圧力分布および入口損失の測定	6
(a) 流れ方向の圧力分布の測定	6
(b) 入口損失係数の定義	6
(c) 管摩擦損失	7
2.2.2 LDA による速度場の測定	8
2.2.3 流れの可視化	8
第 3 章 数値解析	15
3.1 支配方程式	15
3.2 一般系保存式	17
3.3 支配方程式の離散化	18
3.4 離散化方程式の解法	18
3.5 計算領域と境界条件	19
第 4 章 結果と考察	22
4.1 小物体なしの場合	22
4.1.1 圧力分布及び入口損失	22
4.1.2 流れの対象性	22

4.1.3	流れ場の時間平均特性	23
	(a) 速度分布	23
	(b) 乱れ分布	23
4.1.4	流れ場の可視化観察	23
4.2	小物体を設置した場合	29
4.2.1	圧力分布及入口損失	29
	(a) 小物体高さ $h/H = 0.2$ の場合	29
	(b) 小物体高さ $h/H = 0.1$ の場合	29
4.2.2	入口損失の減少	30
4.2.3	小物体幅 W/D の影響	30
4.2.4	流れ場の時間平均特性	31
	(a) 速度分布	31
	(b) 乱れ分布	31
4.2.5	流れ場の可視化観察	31
4.2.6	数値解析結果	32
	(a) 圧力分布及び入口損失	32
	(b) 速度分布及び乱れ分布	32
	速度分布	32
	乱れ分布	33
	(c) 速度ベクトル	33
4.3	オフセット平板の影響	46
4.3.1	オフセット平板が 1 枚の場合	46
	(a) 圧力分布及び入口損失	46
	(b) 入口損失の減少	47
	(c) 流れ場の時間平均特性	47
	速度分布	48
	乱れ分布	48
	(d) 流れ場の可視化観察	48
4.3.2	オフセット平板が 2 枚の場合	49
	(a) 圧力分布及び入口損失	49

(b) 入口損失の減少	50
(c) 流れ場の時間平均特性	50
速度分布	50
乱れ分布	51
(d) 流れ場の可視化観察	51
 第 5 章 結論	 68
 付 録 A	 70
 参 考 文 献	 83
 謝 辞	 85

第1章 緒論

タンクなどの十分に大きな空間から管路へと流入する流れは、流れのはく離、再付着、渦領域の形成などを伴う複雑な流動形態を示し、流体力学的に興味深い事象の一つである。また、この流路形状は、各種流体装置、配管系、燃烧炉などで見られる基本的なものであり、その流動特性を明らかにし、流動抵抗（以下、入口損失）を低減させることは工学上・工業上重要である。

図 1.1 (a) に管路入口部のフローモデルを示す。管路へ流入する流れは、入口角部 (A) ではなく離し、円管壁面 (AB) 上に再付着し、渦領域が形成される。この渦領域は時間平均的には停滞して存在しているが、実際には時間経過とともに渦領域の形成と放出が繰り返さる非定常な特性をもつ。このはく離渦の存在に伴う縮流のために流れの有効断面積が小さくなるほど入口損失は増大する。そのため、はく離渦の生起を抑制することで、入口損失を低減することができると考えられる。

これまでに二次元的に断面積が急縮小する流路については、Tropea^[1] らや、Taulbee^[2] らが、ステップ後の定常な流動特性について明らかにしている。安藤^[3] らは、ステップ後に生起するはく離渦の非定常特性やステップ前に小物体を設置することによる流動抵抗の低減を明らかにした。急縮小円管においても同様な成果をあげた^[4]。そして、急縮小円管とは前後逆である急拡大円管においても、急拡大後の管内壁上に小物体を設置することで流動抵抗を低減できることを明らかにした^[5]。

入口損失については、様々な入口形状によって異なり、それらの損失係数が^{[6][7]}に掲載されているが、そのなかで、入口損失を低減させる代表的な方法として、入口角部をベルマウス形状にすることなどが挙げられているが、これは特殊な加工もしくは大きな部品の追加が必要であり、既設の配管などに適応させる場合には設置する空間や経済的な問題がある。

そこで本研究では、このような入口損失の原因となる渦領域の生起を比較的簡単に制御して入口損失を低減することを目的とした。入口損失を低減させる方法として、図 1.1(b) に示すよう水槽壁面に管直径より僅かに大きい直径と矩形断面を持つリング状小物体の設置を提案する。この小物体からはく離した流れを管内壁に沿う方向で管路内へ流入することで渦領域の形成を抑制する。本研究では、小物体の高さ H 、設置位置 L 、幅 W を変化させ、最適値を実験と汎用流体解析ソフト (CFD2000) による数値計算で明らかにした。また、オフセット平板を設置

することで、管路の設置位置の入口損失への影響と小物体の設置による入口損失の低減を明らかにした。

その結果、小物体を設置することで、どの設置場所においても管路へ流入後のはく離渦を制御でき、今回試した範囲での最適形状、設置位置では流動抵抗が最大で約 90 %低減できることがわかった。また、小物体設置による流動特性の変化も明らかにした。

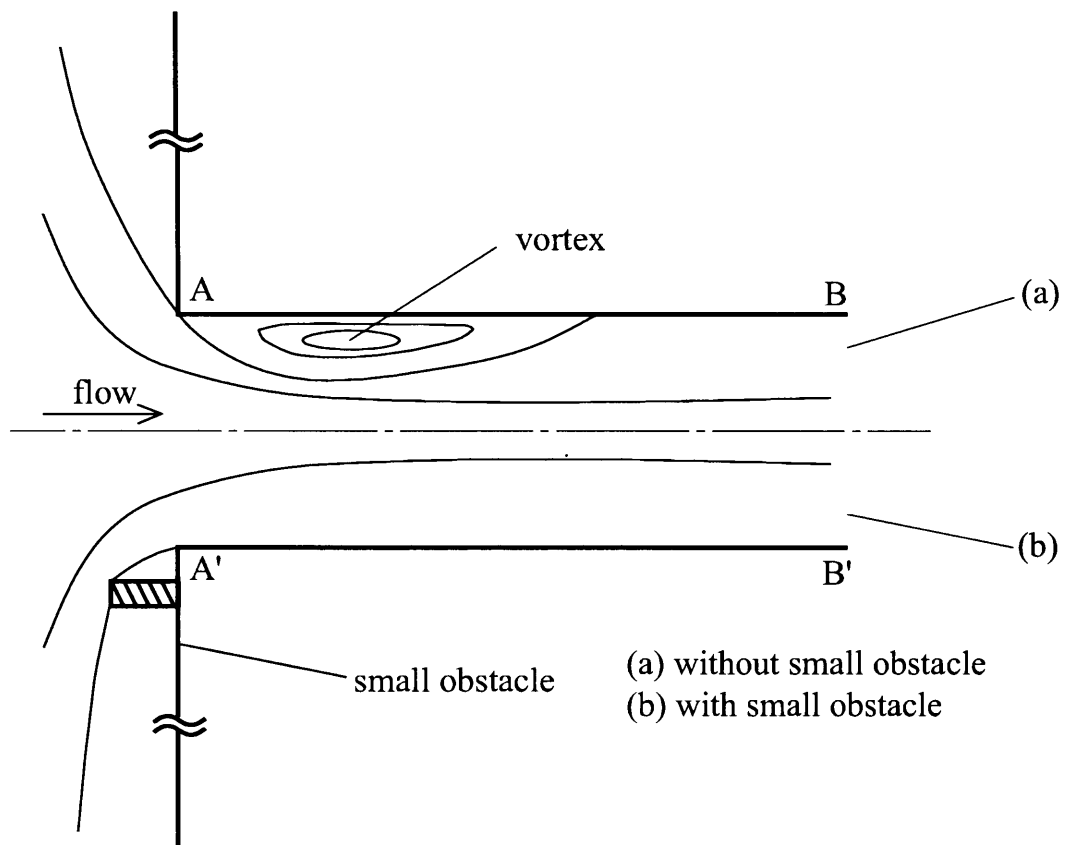


Fig. 1.1 Flow model

主な記号

A	:	円管断面積
C_p	:	圧力係数 $(= \frac{2p}{\rho U_m^2})$
D	:	円管内径 (代表長さ)
E	:	エネルギーの総和
H	:	小物体高さ (図 2.3)
L	:	入口角部から小物体までの距離 (図 2.3)
p	:	圧力
p_f	:	管摩擦損
Re	:	レイノルズ数 $(= \frac{DU_m}{\nu})$
r	:	半径方向座標
S_1	:	円管中心からオフセット平板Ⅰまでの距離 [図 2.2 (a)]
S_2	:	円管中心からオフセット平板Ⅱまでの距離 [図 2.2 (b)]
U_m	:	円管内の平均流速 (代表速度)
u	:	x 軸方向の速度成分
\bar{u}'	:	x 軸方向の乱れ強さ (r.m.s. 値)
x	:	主流方向座標
W	:	小物体幅 (図 2.3)
ζ	:	入口損失係数
θ	:	周方向の角度 (図 2.3)
λ	:	管摩擦係数
ν	:	水の動粘度
ρ	:	水の密度

第2章 実験装置及び方法

まず円管に流入後の圧力分布を測定することにより入口損失を求め、小物体設置による流動抵抗の低減を試み、入口損失への影響を調べ、入口損失が最小になる条件（小物体の形状・位置）を明らかにした。また、LDA (Laser Doppler Anemometer) によって流れ場の速度成分 u , 乱れ強さ \bar{u}' の分布を測定し、レーザーライトシート法による流れ場の可視化をおこなうことによって、はく離流線の挙動を観察し、管路入口に流入する流れの特性を明らかにした。さらに管路に平行なオフセット平板を設置し、その影響を調べた。

2.1 実験装置

2.1.1 実験装置の概要

図 2.1 に、実験装置の概略図を示す。直径 6 mm の多孔板 ⑧ が設置された貯水槽 ① 内の水は、ポンプ ⑤ により誘引され、水平に設置された内径 $D = 30[\text{mm}]$ の試験流路 ② に導入される。流量調節バルブ ③, 浮遊式流量計 ④, ポンプ ⑤ を経て再び水槽へと戻され、以上の経路を循環する。

試験流路 ② は多数の圧力孔（直径 0.6 mm）をもち、入口から十分離れた水槽内壁面と円管内壁面上の圧力のヘッド差を逆 U 字管マノメータ ⑩ 用いて測定し、2.2 節で説明する方法で入口損失を求めた。また、LDA ⑪ を用いて、流れ場の速度成分 u と、その乱れ成分 \bar{u}' の測定を行なった。LDA のレーザー ⑫ は水平方向に照射した。水を内部に含んだ円管は、それそのものがレンズとして光に作用するので可視化の際にフローパターンが半径方向に歪んで見える。この影響を最小限にするために、ウォータージャケット ⑬ を設置した。染料タンク ⑮ から蛍光染料（フレオレセインナトリウム水溶液）を $r = 55[\text{mm}](\theta = \pm 90[^\circ])$ の位置の水槽壁面上の直径 0.6 mm の穴からテストセクションに流入させ、レーザーライトシート ⑭ を鉛直方向に照射して流れ場を光切断することにより可視化観察を行なった。撮影はデジタルビデオカメラ ⑯ を用いた。

図 2.2 (a) に、底面にオフセット平板を設置した実験装置を示す。円管中心から設置したオフセット平板までの距離を S_1 とし、この値を変化させ底面が円管に近づくにつれ入口損失がどの

ように変わるのか明らかにした。また、図 2.2 (b) に示すように、 $S_1/D = 0.5$ で固定し、側面にも同様なアクリル板を設置し、円管中心から設置したオフセット平板までの距離 S_2 を変化させ側面による影響も明らかにした。

2.1.2 測定部詳細と座標系

図 2.3 に、本実験で使用した流入後の円管テストセクションの詳細と座標系を二次元的に示す。図中の A 点を入口角部と呼ぶ。水槽の大きさは $720 \times 1000 \times 785$ mm、流入後の円管内径 $D = 30$ [mm] であり、水槽の断面積は円管断面積 A に比べて十分大きい。

座標原点を、入口角部の流路中心にとり、主流方向に x 軸、半径方向に r 軸をとった。また、管中心の水平面から測った角度を上下方向に $\pm \theta$ とした。

2.1.3 レイノルズ数

本実験のレイノルズ数は、代表速度を円管内の平均流速 U_m 、代表長さを円管内径 D とし、以下の式で定義した。

$$\text{Re} = \frac{U_m D}{\nu} \quad (2.1)$$

入口損失を求めるための圧力測定は、 $\text{Re} = 1.0 \times 10^4 \sim 9.0 \times 10^4$ で、LDA における速度場分布の測定は、 $\text{Re} = 5.0 \times 10^4, 7.0 \times 10^4$ で、可視化実験は、 $\text{Re} = 3,000$ でおこなった。また、実験の時期によって水温が変化するので、レイノルズ数を一定に保つために、事前に水温にあわせた流量の値を算出しておき、バルブ、インバータ、バイパス (Fig.2.1 中の ③, ⑥, ⑦) で流量を調整し、実験をおこなった。

なお、円管内の流れが層流から乱流への遷移するレイノルズ数は、一般的な値として、 $\text{Re} \simeq 2300$ とされている。

2.1.4 小物体の詳細

入口角部において流れがはく離し、渦領域を形成することでエネルギー損失が生じる。そこで、本研究ではこの渦領域を抑制・制御するために簡単かつ経済的な方法として、入口部の水槽壁面に、内径が円管よりわずかに大きいリング状の小物体 (small obstacle) を設置することで、入口損失の低減を試みた。

図 2.4 (a) に、小物体の詳細を示す。小物体の形状は、流れ方向の長さ H の矩形断面を有するリング状の突起である。この形状は以前、急拡大円管流路の実験をおこなった際に流動抵抗の低減が可能となった小物体の形状や、正方形角柱のエッジに小さな切落としを入れることによって物体周りの抗力低減を明らかにした倉田^[8]らの形状を参考にした。小物体の高さ (H/D) を 0.1, 0.2, とし、それぞれの高さに対して入口角部から小物体のまでの距離 L を変化させその最適な設置位置を検討するため、小物体の設置位置 (L/D) を、0, 0.05, 0.10, 0.20 と変化させて最も拡大損失が低減できる形状を実験的に求めた。そして、本実験で最も流動抵抗を低減できた $H/D = 0.2$, $L/D = 0.10$ については、小物体の幅 W を 3, 6, 12 mm と変化させ実験をおこなった。

また、壁面を設置した場合の特殊小物体として設置位置が $S_1/D = 0.5$ の場合を図 2.4 (b) に、 $S_1/D = 0.5$, $S_2/D = 0.5$ の位置に設置した場合を図 2.4 (c) に示す。

2.2 実験方法

2.2.1 圧力分布および入口損失の測定

(a) 流れ方向の圧力分布の測定

入口部での流動抵抗を求めるために、流路壁面上の圧力を測定した。流路中心の管壁に沿って原点から $x = 22[\text{mm}]$ の位置と、 $30 \leq x < 160[\text{mm}]$ は 10 mm, $160 \leq r < 480[\text{mm}]$ は 30mm, $480 \leq r \leq 930[\text{mm}]$ は 50 mm 間隔の位置に直径 0.6 mm の静圧孔を設けた。圧力は、逆 U 字管マノメータを使って、図 2.3 の静圧口 ($r = 190[\text{mm}]$, $\theta = 0[^\circ]$) を基準とし、それぞれの位置における圧力 p を測定し、円管内の平均速度による運動エネルギー $\rho U_m^2/2$ で無次元化したものを圧力係数 C_p とし、次式に定義する。

$$C_p(x) = \frac{2p(x)}{\rho U_m^2} \quad (2.2)$$

(b) 入口損失係数の定義

図 2.5 (a) に円管へと流入する流れに沿ったエネルギー分布の模式図を示す。縦軸はエネルギーを、横軸は主流方向の位置を表している。水槽内と円管内断面における速度を U_1 , $U_2 (= U_m)$, 圧力を p_0 , $p(x)$ とする。水槽内の断面積は十分に大きいので、 $U_1 = 0$ と仮定でき、運動エネルギーは $\rho U_1^2/2 = 0$ となる。よって水槽内の圧力エネルギー p_0 は、入口部における流路断面積の急激な変化によりエネルギーが減少した後、管摩擦損失によって一定の勾配で減少し、円管内の速度エネル

ギ $\rho U_m^2/2$ と圧力エネルギー $p(x)$ となる. この断面積が急変したことにより減少したエネルギーを入口損失 $\zeta \rho U_m^2/2$ と定義した.

この図から水槽と円管内の断面で, 損失があるときのベルヌーイ式よりエネルギー保存を考えると次式であらわされる.

$$p_0 = p(x) + \frac{\rho U_m^2}{2} + \lambda \frac{x}{D} \frac{\rho U_m^2}{2} + \zeta \frac{\rho U_m^2}{2} \quad (2.3)$$

これを無次元化し入口損失係数 ζ について整理すると

$$\zeta = -1 - C_p(x) - \lambda \frac{x}{D} \quad (2.4)$$

ここで,

$$\begin{aligned} C_p(x) &: \text{圧力係数} = 2[p(x) - p_0]/(\rho U_m^2) \\ \zeta &: \text{入口損失係数} \\ \lambda &: \text{管摩擦係数} \end{aligned}$$

$C_p(x)$ は本実験で得られる圧力係数である. 図 2.5 (b) は本実験で求めた圧力分布のグラフを模式的に示しており, $x = 0$ を入口部としている. 本研究では, 円管内の線形の圧力分布 $C_p(x)$ を最小二乗近似し, 得られた直線の縦軸の切片を C_{p0} と定義した. よって本研究における入口損失係数は次式であらわされる.

$$\zeta = -(1 + C_{p0}) \quad (2.5)$$

(c) 管摩擦損失

完全発達後の円管の長さ δx についての管摩擦による圧力損失 δp_f は定義式より

$$\delta p_f = \lambda \frac{\delta x}{D} \frac{\rho U_m^2}{2} \quad (2.6)$$

よって 2 点間の平均圧力勾配は

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\delta p_f}{\delta x} = -\frac{\lambda}{D} \frac{\rho U_m^2}{2} \quad (2.7)$$

これを無次元化すると

$$\frac{\partial C_p}{\partial (x/D)} = \frac{2D}{\rho U_m^2} \frac{\partial p}{\partial x} = -\lambda \quad (2.8)$$

ここでブラジウスの式より

$$\lambda = 0.3164 \text{Re}^{-\frac{1}{4}} \quad (3.0 \times 10^3 \lesssim \text{Re} \lesssim 1.0 \times 10^5) \quad (2.9)$$

これに本実験の代表的なレイノルズ数 ($\text{Re} = 3.0 \times 10^4, 5.0 \times 10^4, 7.0 \times 10^4$) を代入すると、それぞれ

$$\frac{\partial C_p}{\partial(x/D)} \simeq -0.0240, -0.0212, -0.0195 \quad (2.10)$$

となる。

2.2.2 LDA による速度場の測定

レーザー・ドップラー流速計 (Laser Doppler Anemometer : LDA) を用いて流れ場の時間平均速度 u と乱れ強さ \bar{u}' の分布の測定を $\text{Re} = 5.0 \times 10^4, 7.0 \times 10^4$ についておこなった。測定は水平方向にレーザー光を入射し、流路中心高さの水平面内で、 $x/D = 2.5, 3.5, 4.5, 10.0, 20.0$ の 5 断面についておこなった。

測定点は、それぞれの断面において $0 \leq r < 10[\text{mm}]$, $10 \leq r < 15[\text{mm}]$ の範囲でそれぞれ 1.0, 0.5 mm 間隔とし、流路中心から壁面までの領域を測定した。また、それぞれの断面において 180° 反対方向の $r = 1, 2, 4, 6, 8, 10 [\text{mm}]$ について測定をおこない流れの対称性を確認した。

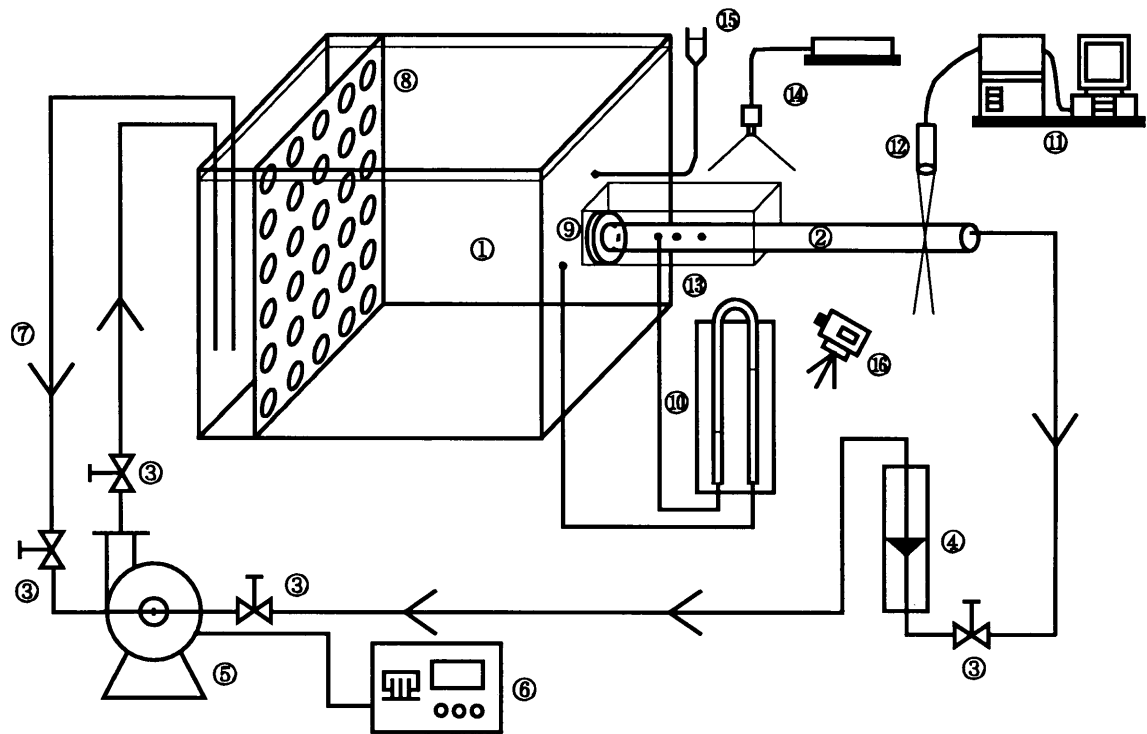
オフセット平板を水槽底面と平行に設置した場合については、管路水平断面における速度分布に変化はないと考え、管路の鉛直下側からレーザー光を入射し、流路中心の鉛直面内で、 $x/D = 2.5, 3.5$ の 2 断面についておこなった。オフセット平板を水槽側面と平行に設置した場合は、オフセット平板なしの場合と同様にしておこなった。測定点は $0 \leq r \leq 1[\text{mm}]$, $1 \leq r \leq 9[\text{mm}]$, $9 \leq r \leq 10[\text{mm}]$, $10 \leq r < 15[\text{mm}]$ の範囲でそれぞれ、1.0, 2.0, 1.0, 0.5 mm 間隔とした。これらは非対称な流れになると予測し、同じ測定点の数を 180° 反対方向でも測定した。

どの場合も測定条件は、サンプル数 3,000 個もしくは測定時間 2,000 sec である。

2.2.3 流れの可視化

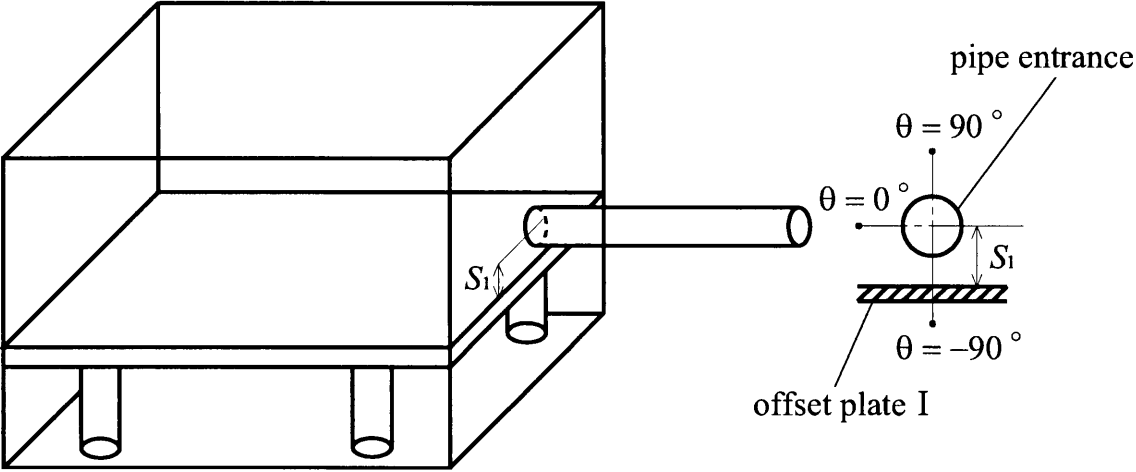
円管へと流入する流れにおいて、入口角部からのはく離流線の挙動を明らかにするため、流れ場の可視化実験をおこなった。可視化方法は、作動流体に水を用い染料タンク (図 2.1 中の⑩) に蓄えられた蛍光色の染料 [フレオレセインナトリウム (ウラニン, $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{Na}_2$)] を、水槽壁面上の $r = 55[\text{mm}]$, $\theta = \pm 90[^\circ]$ の位置に設けた直径 0.6 mm の穴に注入した。そして、レー

ザーライトシート (Spectra - Physics 2017 - 04S, Argon Laser Light Sheet Optics, 4W) をテストセクションの鉛直方向から流路中心線を通るように入射し, 水平方向 (レーザーライトシートに垂直) からデジタルビデオカメラを用いて撮影した. なお, 可視化にあたってはレイノルズ数を $Re = 3,000$ とした.

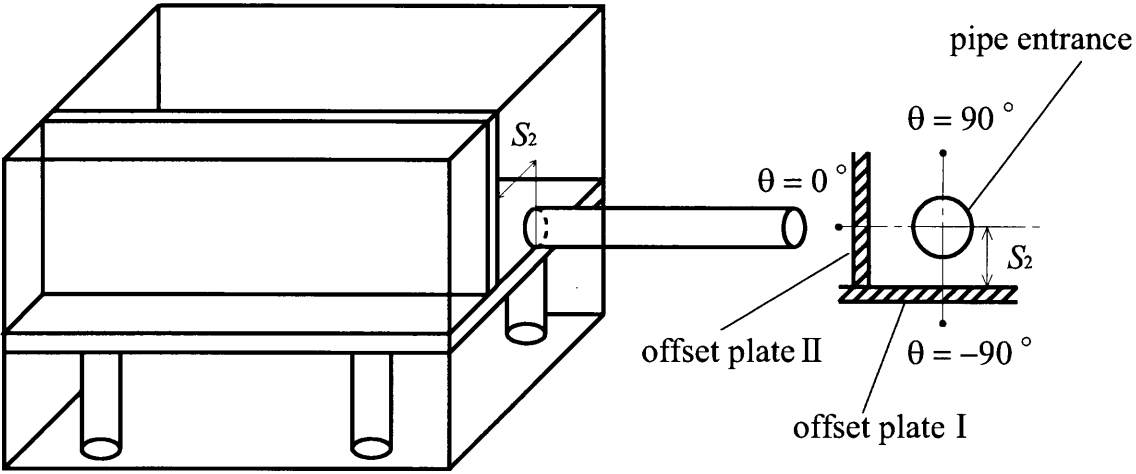


- | | |
|-----------------|------------------------|
| ① tank | ⑨ small obstacle |
| ② circular tube | ⑩ manometer |
| ③ valve | ⑪ LDA |
| ④ flow meter | ⑫ LDA probe |
| ⑤ pump | ⑬ water jacket |
| ⑥ inverter | ⑭ LASER (Ar) |
| ⑦ bypass | ⑮ dye tank |
| ⑧ straightener | ⑯ digital video camera |

Fig. 2.1 Experimental setup



(a) with bottom surface



(b) with bottom and side surface

Fig. 2.2 Offset plate

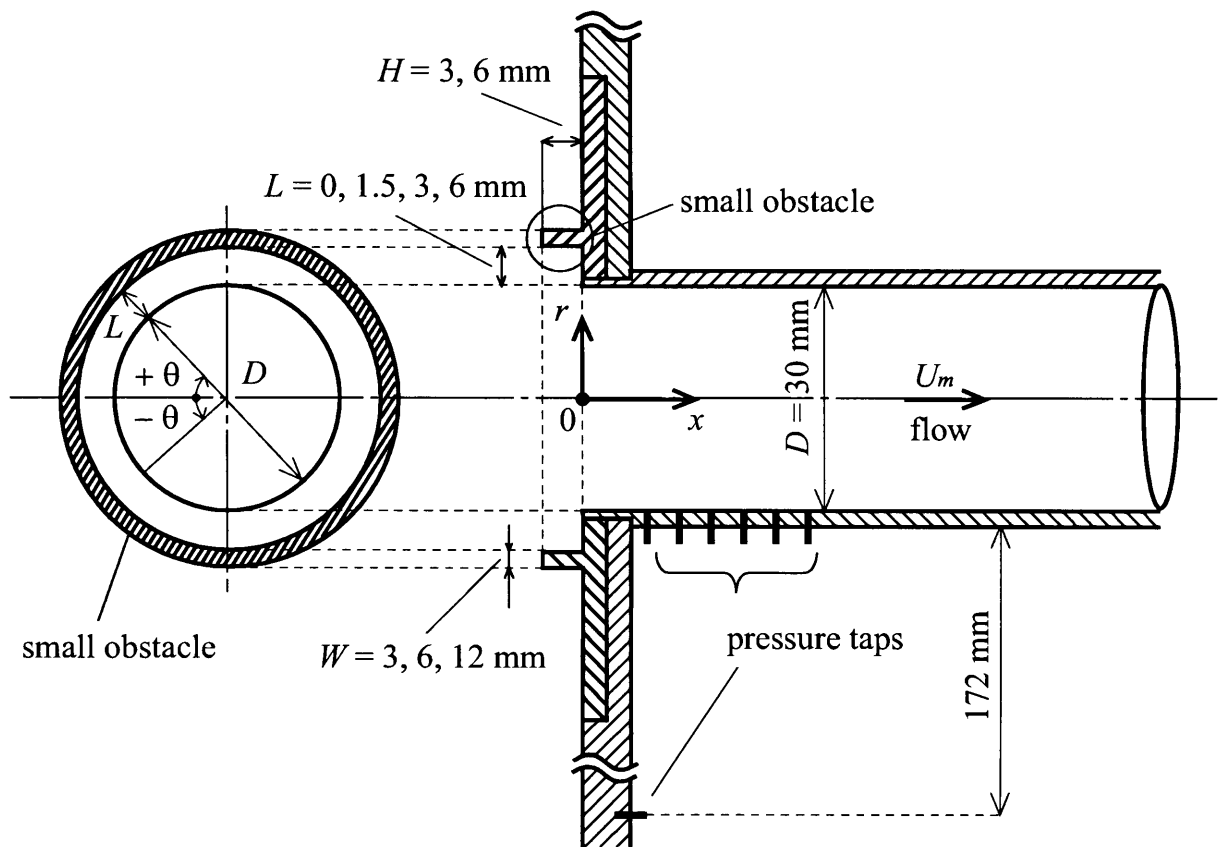
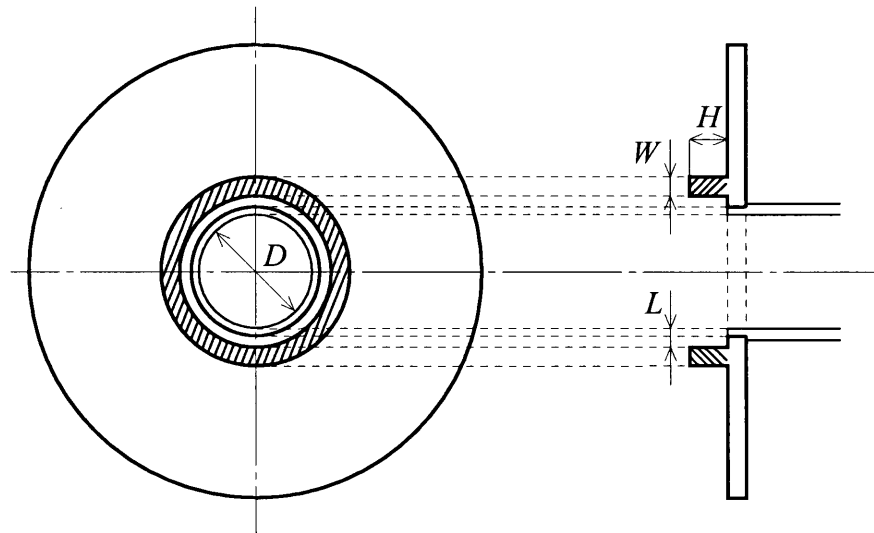
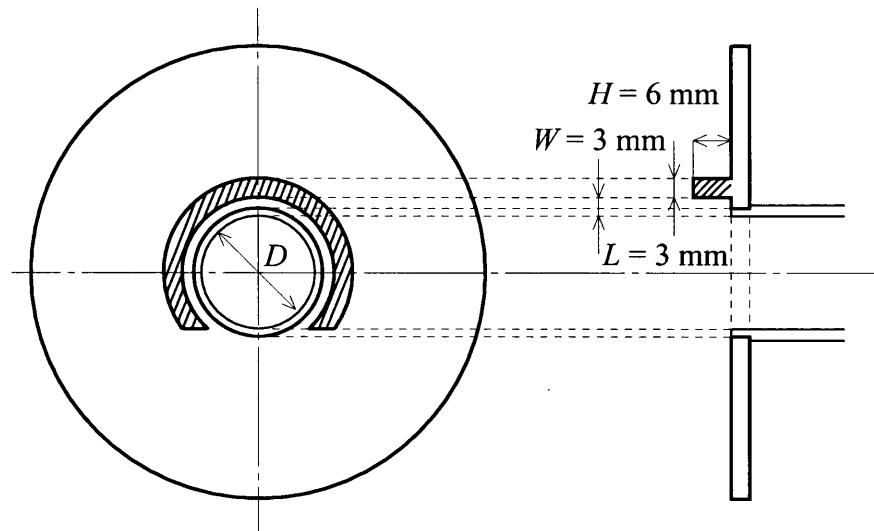


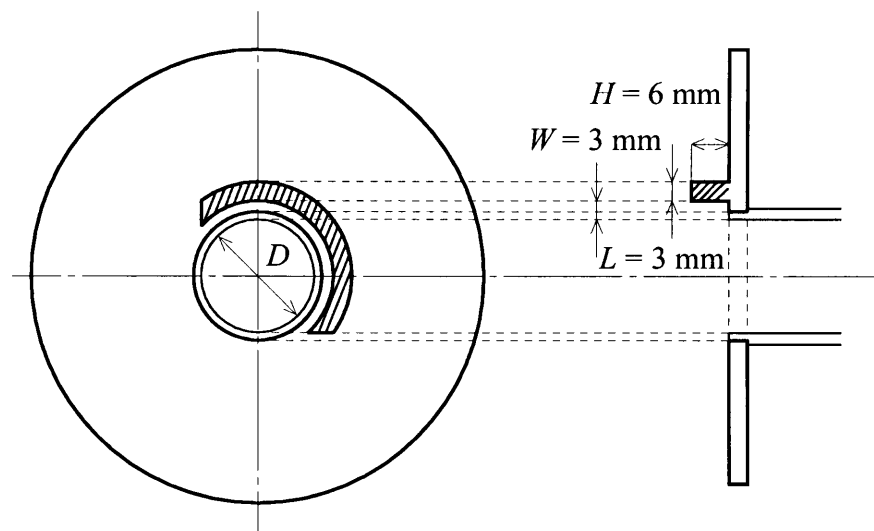
Fig. 2.3 Details of test section



(a) small obstacle



(b) small obstacle for bottom surface



(c) small obstacle for bottom and side surface

Fig. 2.4 Small obstacle

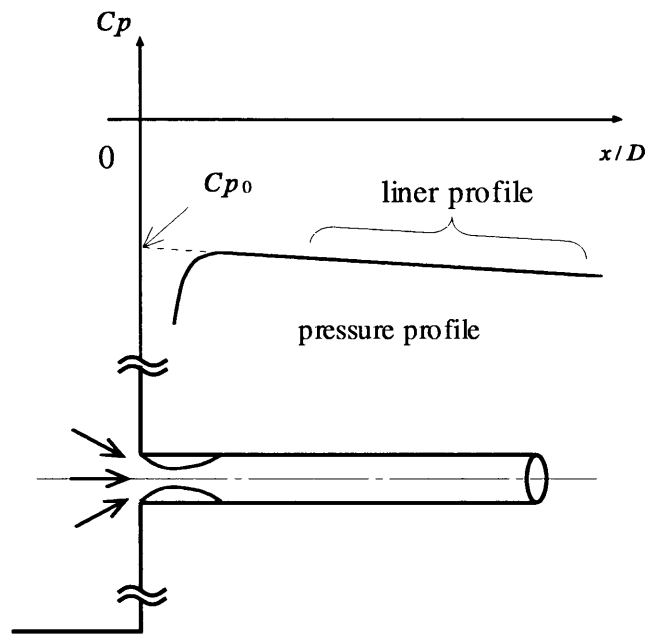
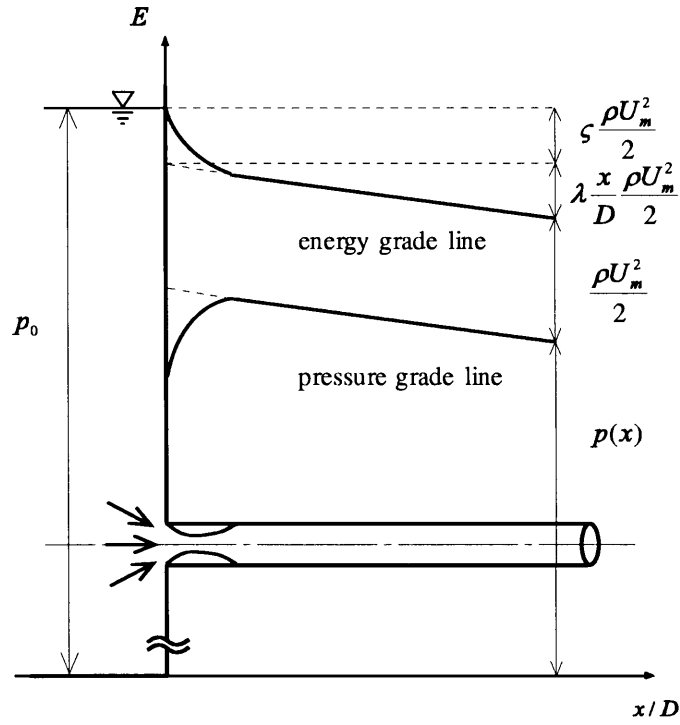


Fig. 2.5 Definition of entrance loss

第3章 数値解析

本研究では、質量保存則および運動量保存則から構成されている連続式、ナビエ・ストークス方程式を数値的に解くための汎用コンピュータプログラム、流体解析ソフト CFD2000 を用い、管路へ流入する流れの流動特性について数値解析をおこなった。

今回、実験では観測することができない管路流入直後の流動特性を調査する手段として数値計算を用いた。

3.1 支配方程式

液体の運動に対して数値解析の基礎となる物理現象の数学的記述について考える。流体の現象を考えると我々の知った物理量は、速度や圧力などであり、これらを得るには支配方程式として、連続式とナビエ・ストークス方程式を考える必要がある。これら微分方程式を代数方程式で近似し、直接解くことで、対象としている流れ場の諸量を求めることができる。

固定された微小体積内の連続式とナビエ・ストークス方程式は、テンソル表示を用いて表すと、それぞれ以下の式のように表せる。

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_j \bar{u}_i) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right\} + \bar{S} \quad (3.2)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 p は圧力、 ν は流体の動粘性係数、 S は運動量の生成・吸収項を示し、それぞれの変数の $\bar{\quad}$ は時間平均値、 \prime は変動値を示している。

平均流に対する粘性応力 τ_{ij} とレイノルズ応力の働きの間に類似点が存在すると仮定すると、両応力はナビエ・ストークス方程式の右辺に現れ、ニュートンの粘性法則において粘性応力は流体要素の変形量 e_{ij} に比例すると考えられる。

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.3)$$

等方性乱流を仮定すると、レイノルズ応力は平均の変形量を結びつけることができると 1877 年にブジネスク (Boussinesq) によって提案され、次式が得られる。

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \rho \overline{u'_k u'_k} \quad (3.4)$$

ここで μ_t は乱流粘性もしくは渦粘性係数, δ_{ij} はクロネッカーデルタを示し, $i = j$ の場合 $\delta_{ij} = 1$, $i \neq j$ の場合 $\delta_{ij} = 0$ を表す。

式 (3.4) を式 (3.2) に代入すると次式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{u}_i) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \bar{S} \quad (3.5)$$

乱流拡散の動粘性係数 ν_t は以下のように定義される。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

式 (3.5) は層流拡散の動粘性係数に乱流拡散の動粘性係数 ν_t が付加されたものであるため, $\nu_t = 0$ とすれば層流の流れに対しても適用できる。また, 式 (3.5) において, 圧力 p の時間平均値に $\frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{\rho u'_k u'_k}$ を加えたものを再度 \bar{p} と定義する。

乱流運動エネルギー k と乱流散逸率 ε は, 微小体積要素に分割された流れ場の各位置で次の輸送方程式を用いる。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu + \nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon + \bar{S}_k \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu + \nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + \bar{S}_\varepsilon \quad (3.8)$$

ここで, \bar{S}_k , \bar{S}_ε は乱流運動エネルギーと乱流散逸率の生成・吸収項を表し, 以下の式で表される

$$\begin{cases} \bar{S}_k &= \nu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \\ \bar{S}_\varepsilon &= C_{1\varepsilon} \nu_t \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \end{cases}$$

また 5 つの補正無次元定数, C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ を含んでおり, 標準 $k - \varepsilon$ モデルでは広い範囲な乱流に対して妥当な次の値を利用する。

$$C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.00; \sigma_\varepsilon = 1.30; C_{1\varepsilon} = 1.44; C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad (3.9)$$

図 2.4 (a) に、小物体の詳細を示す。小物体の形状は、流れ方向の長さ H の矩形断面を有するリング状の突起である。この形状は以前、急拡大円管流路の実験をおこなった際に流動抵抗の低減が可能となった小物体の形状や、正方形角柱のエッジに小さな切落としを入れることによって物体周りの抗力低減を明らかにした倉田^[8]らの形状を参考にした。小物体の高さ (H/D) を 0.1, 0.2, とし、それぞれの高さに対して入口角部から小物体のまでの距離 L を変化させその最適な設置位置を検討するため、小物体の設置位置 (L/D) を、0, 0.05, 0.10, 0.20 と変化させて最も拡大損失が低減できる形状を実験的に求めた。そして、本実験で最も流動抵抗を低減できた $H/D = 0.2$, $L/D = 0.10$ については、小物体の幅 W を 3, 6, 12 mm と変化させ実験をおこなった。

また、壁面を設置した場合の特殊小物体として設置位置が $S_1/D = 0.5$ の場合を図 2.4 (b) に、 $S_1/D = 0.5$, $S_2/D = 0.5$ の位置に設置した場合を図 2.4 (c) に示す。

2.2 実験方法

2.2.1 圧力分布および入口損失の測定

(a) 流れ方向の圧力分布の測定

入口部での流動抵抗を求めるために、流路壁面上の圧力を測定した。流路中心の管壁に沿って原点から $x = 22[\text{mm}]$ の位置と、 $30 \leq x < 160[\text{mm}]$ は 10 mm, $160 \leq r < 480[\text{mm}]$ は 30mm, $480 \leq r \leq 930[\text{mm}]$ は 50 mm 間隔の位置に直径 0.6 mm の静圧孔を設けた。圧力は、逆 U 字管マノメータを使って、図 2.3 の静圧口 ($r = 190[\text{mm}]$, $\theta = 0[^\circ]$) を基準とし、それぞれの位置における圧力 p を測定し、円管内の平均速度による運動エネルギー $\rho U_m^2/2$ で無次元化したものを圧力係数 C_p とし、次式に定義する。

$$C_p(x) = \frac{2p(x)}{\rho U_m^2} \quad (2.2)$$

(b) 入口損失係数の定義

図 2.5 (a) に円管へと流入する流れに沿ったエネルギー分布の模式図を示す。縦軸はエネルギーを、横軸は主流方向の位置を表している。水槽内と円管内断面における速度を U_1 , $U_2 (= U_m)$, 圧力を p_0 , $p(x)$ とする。水槽内の断面積は十分に大きいので、 $U_1 = 0$ と仮定でき、運動エネルギーは $\rho U_1^2/2 = 0$ となる。よって水槽内の圧力エネルギー p_0 は、入口部における流路断面積の急激な変化によりエネルギーが減少した後、管摩擦損失によって一定の勾配で減少し、円管内の速度エネル

3.3 支配方程式の離散化

一般系保存式 (3.10) を個々のセルの体積 V にわたる積分にガウスの定理を適用すると, 個々の項の積分式は次のように表される.

非定常項 (左辺第 1 項) :

$$T = \iiint_V \frac{\partial \phi}{\partial t} dV = V(\phi^{\text{new}} - \phi^{\text{old}})/\Delta t \quad (3.12)$$

対流項 (左辺第 2 項) :

$$C = \iiint_V [\nabla(\bar{u}\phi)] dV = \iint_S (\bar{u}\phi) dA = \sum_{\text{allface}} \rho \bar{u}\phi \cdot A \quad (3.13)$$

拡散項 (右辺第 1 項) :

$$D = \iiint_V [\nabla(\Gamma \nabla \phi)] dV = \iint_A (\Gamma \nabla \phi) dA = \sum_{\text{allface}} \Gamma \nabla \phi \cdot A \quad (3.14)$$

生成項 (右辺第 2 項) :

$$S = \iiint_V S_\phi dV = V C_\phi (\phi_0 - \phi) \quad (3.15)$$

ここで, ϕ^{old} , ϕ^{new} は 2 つの時刻における任意の物理量の値を, dA はセル面の微小面積要素を示している. また, C_ϕ は生成項の線形化係数を, ϕ_0 は定数を示している.

3.4 離散化方程式の解法

有限体積法に基づいて支配方程式を離散化すると一組の連立一次方程式が得られるが, 2 次元で考慮しても, そのサイズは極めて大きくなる. しかし, 計算には隣り合うセル間の関係だけが必要になるため大部分の係数はゼロとなり優対角な疎行列になる. そこで, 各方面に三重対角な方程式について非常に効率よく解くことのできる ADI (Alternsting Matrix Algorithm) 法でおこなった. ADI 法は, 半繰返し法の 1 つで, 各時刻において 1 つの座標軸についてのみ TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) と呼ばれる 3 重対角行列解法を使用し, 他の方向についてはその要求を緩和して方程式を解く. また, CFD2000 ではすべての速度成分の計算をセルの中心点に定義するコロケート格子を採用している. コロケート格子はスタガード格子に比べ, メモリーが大幅に節約できることに特徴があるが, 欠点として隣接するコントロール・ボリュームの速度場のカップリングが弱くなることなどが挙げられる.

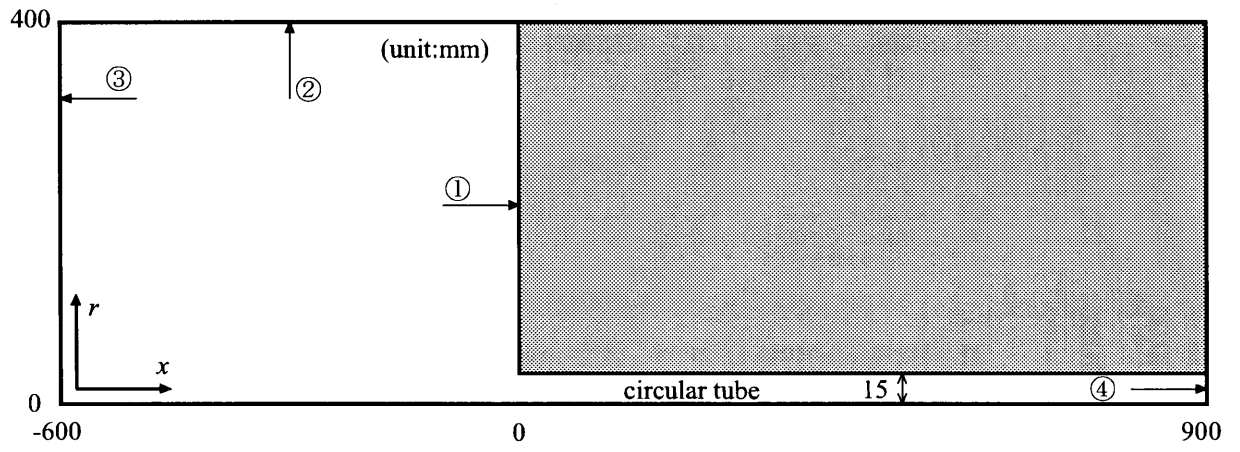
圧力場の解法としては PISO アルゴリズムを用いた。この方法は陰的圧力帰着解法の一つで、離散化した運動量保存式と圧力帰着連続式とに予測子・修正子法を交互に適用して各時間ステップごとの解を求める。これは SIMPLE 法^[10] と比べ、繰り返し法やブロック法に頼らずに、各時間ステップごとに数回のステップで質力と運動量のバランスを保ちながら時間について精度の高い解を得ることができるという確かな利点をもっている。

3.5 計算領域と境界条件

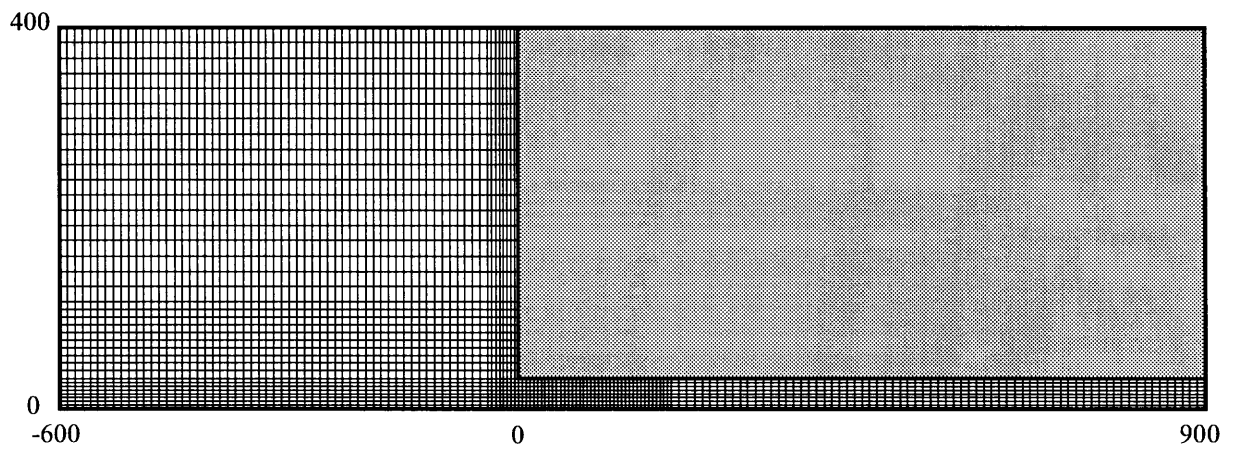
本研究では、計算時間短縮のため、二次元物体適合座標で格子形成をおこない、軸対称幾何モデルを用いて計算をおこなった。水槽内の管直径を 800 mm、縮小後の管直径 $D = 30[\text{mm}]$ とし十分に広い空間から管路へと流入する流れを再現した。小物体なしの場合と実験で最も効果を得た、高さ $H = 6[\text{mm}]$ 、幅 $W = 3[\text{mm}]$ の小物体を $L = 3[\text{mm}]$ に設置した場合との比較をおこなった。それぞれの場合において格子数は $200 \times 100 \times 1$ と一定である。ただし、計算格子は、興味のある領域で密となるような不等間隔格子である。(図 3.1, 3.2)

以下の境界条件で計算をおこなった。

- ① 障害物条件：小物体と管路の上部を障害物とした。
- ② 壁面条件：水槽内上部を壁面とした。
- ③ 流入条件：水槽入口において、管路流入後の $\text{Re} = 5.0 \times 10^4$ から連続の式より求めた一様な質量流束と、一様な静圧 $p = 0$ を与えた。
- ④ 流出条件：管路出口において、管路流入後の $\text{Re} = 5.0 \times 10^4$ から求めた一様な質量流束を与えた。

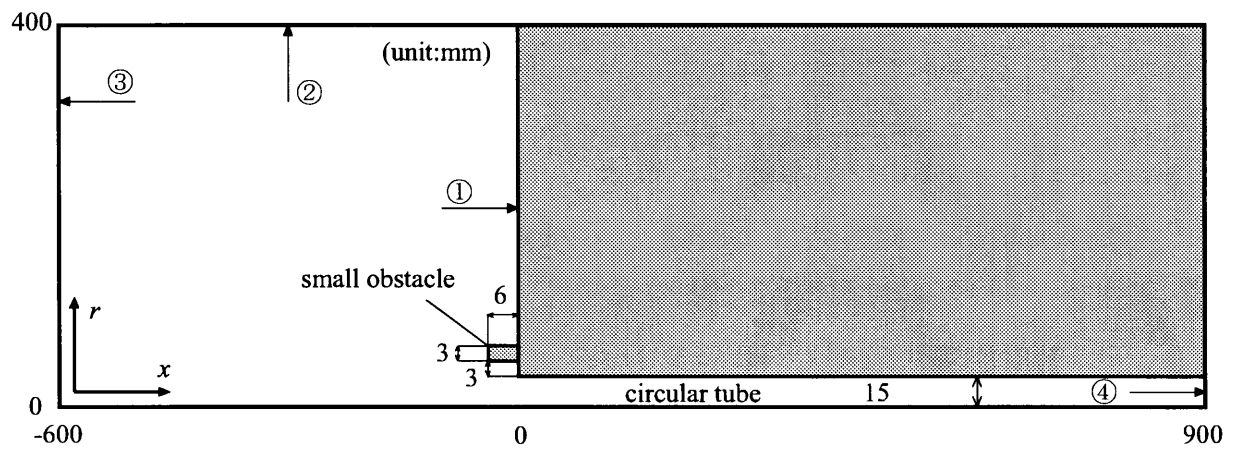


(a) Computational region

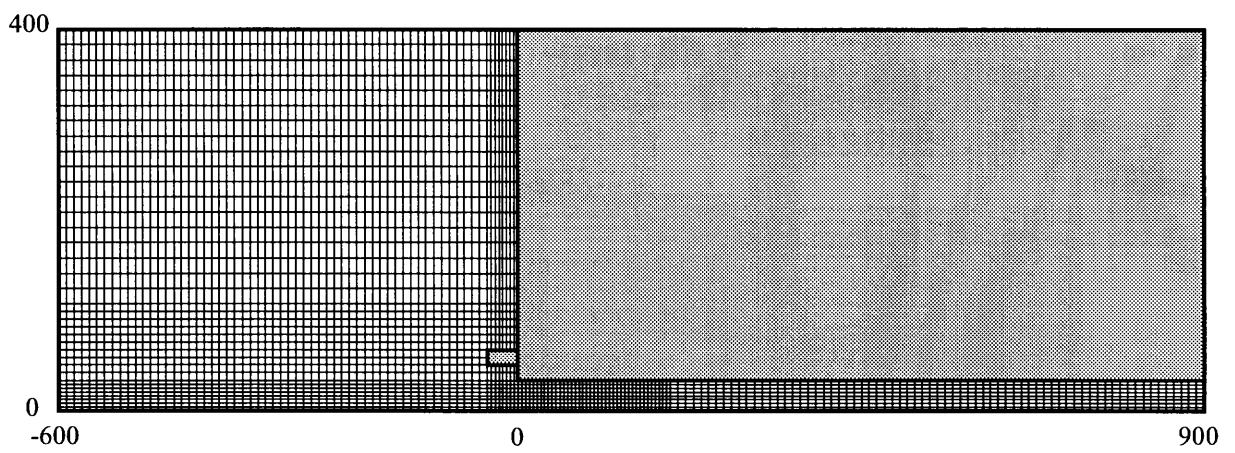


(b) Computational grid

Fig. 3.1 Computational region and grid (without small obstacle)



(a) Computational region



(b) Computational grid

Fig. 3.2 Computational region and grid (with small obstacle)

第4章 結果と考察

4.1 小物体なしの場合

本節では、小物体なしの場合の管路へ流入する流れの流動特性を実験と CFD2000 を用いた数値計算によって明らかにした。逆 U 字管マノメータによる圧力測定から入口損失を算出し、LDA を用いた流れ場の時間平均特性、Laser light sheet 法による流れの可視化観察から管路へ流入する流れの流動特性を明らかにした。

4.1.1 圧力分布及び入口損失

図 4.1.1 に小物体なしの場合の流れ方向 (x 方向) の圧力分布を示す。レイノルズ数は、 $Re = 3.0, 5.0, 7.0 \times 10^5$ の 3 パターンでおこなった。

いずれの Re 数に対しても、流入後のはく離渦の存在に対応して圧力は低い値をとり、その後急激に増大し、 $x/D \simeq 2$ で極大値をとる。その後管摩擦損失のみによって一定の勾配でゆるやかに減少する。下流の一定の勾配は、表 4.1.1 となり、式 2.10 のブラジウスの式による圧力勾配とよく一致している。これより $x/D \simeq 25$ 付近で流れはかなり発達していると考えられる。また $Re = 5.0 \times 10^5$ の場合、他の条件に比べ高い圧力を示した。このことから Re 数を変化させたことで流動特性になにかしらの変化が生じたと考えられる。

図 4.1.2 に Re 数を変化させた場合の入口損失係数 ζ を示す。入口損失係数は圧力分布から 2.5 を用いて算出した。一般的に入口損失係数は $\zeta = 0.5$ であらわされ、 Re 数を上げていくと入口損失係数は減少していく (参考文献^[6])。しかし本実験では入口損失係数は $Re = 4.5 \times 10^4$ まで減少していくが、その後また $\zeta = 0.5$ 付近に戻る。 Re 数の変化にともない入口損失は極小値をもつことがわかった。

4.1.2 流れの対象性

図 4.1.3 (a) は、横軸に管中心からの距離 r/D 、縦軸に流れ方向速度 u/U_m 、乱れ \bar{u}'/U_m を示している。破線は管中心を表す。

分布形から小物体なしの場合の流れ方向速度・乱れは管軸に対称であることが確認できた。

よって、他の断面についての速度・乱れ分布については半径方向に半分の領域のみを示す。

4.1.3 流れ場の時間平均特性

Re 数を変化させた場合の流動特性の違いを確かめるため、入口損失係数が減少した $Re = 5.0 \times 10^4$ と 7.0×10^4 の速度・乱れ分布を比較した。

(a) 速度分布

図 4.1.4 には、 $Re = 5.0, 7.0 \times 10^4$ について、半径方向に半分の領域のみの速度 u の分布を示す。横軸は流れ方向速度 u/U_m 、縦軸は管中心からの距離 r/D である。

いずれの分布系も下流に比べ上流の断面では、壁面近傍で速度が減衰している。逆流領域は存在していないが、これは管路に流入直後に渦領域が存在していると予測できる。さらに上流において、渦領域に伴って逆流領域が存在すると予測できるが、測定 LDA のプローブと水槽壁面が干渉するため不可能であった。また、速度分布からは Re 数の違いによる流動特性の変化を確認することができなかった。

(b) 乱れ分布

図 4.1.5 に $Re = 5.0, 7.0 \times 10^4$ について、半径方向に半分の領域のみの乱れ強さ \bar{u}' の分布を示す。座標軸は速度分布と同じである。

いずれの分布形も上流の断面において壁面近傍で大きな乱れを示す。その後下流にいくにつれ壁面近傍の乱れは小さくなっていく。これより乱れが大きい渦領域もしくはその上流にはく離渦が存在していると推測される。上流の断面において、 $Re = 5.0 \times 10^4$ の場合 $Re = 7.0 \times 10^4$ の場合僅かに乱れが大きくなっているのがわかる。したがって、乱れの減少から渦領域の大きさが抑制され、入口損失を減少できると予測できる。

4.1.4 流れ場の可視化観察

図 4.1.6 に、 $Re = 3,000$ 、小物体なしの場合の流れ場の可視化写真を示す。左図は水槽内から入口部を、右図は入口直後の管内を示しており、 $1/10$ [sec] の時間間隔である。

水槽壁面から注入した染料は入口角部ではなく離し管路へと流入し、管壁面上に渦領域 V_1 を形成する ($t = 0$)。その後渦領域は拡散されながら下流へと流れていく。また時間経過とともに、渦が次々と放出されている様子がわかる ($t = 1/10$)。

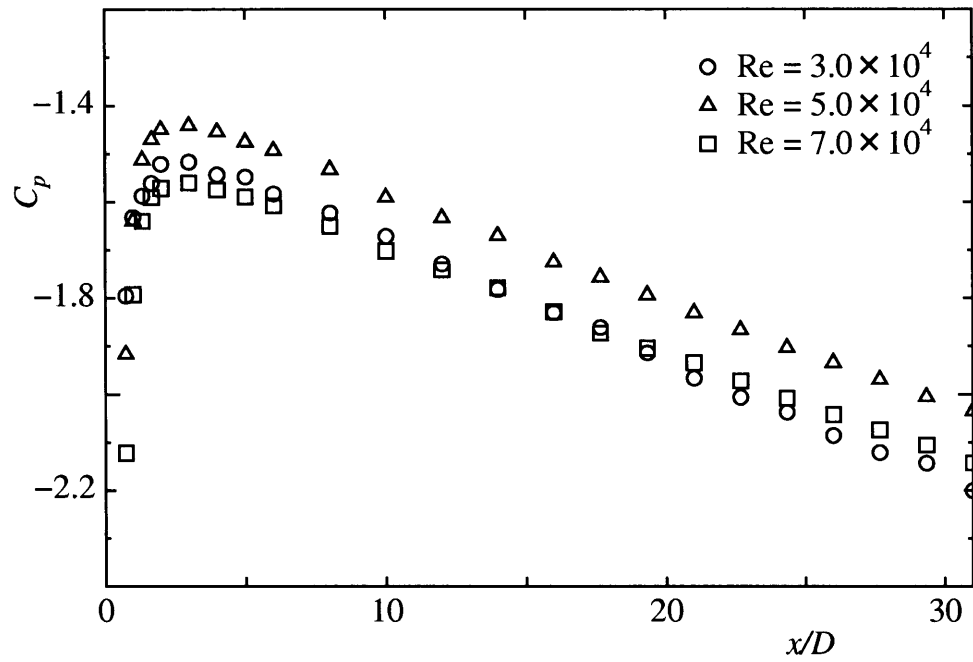


Fig. 4.1.1 Pressure distribution (without small obstacle)

Table 4.1.1 Pressure gradient $\partial C_p / \partial(x/D)$ in straight pipe

Re	pressure gradient	
	Brasius	Exp.
3.0×10^4	- 0.0240	- 0.0243
5.0×10^4	- 0.0212	- 0.0210
7.0×10^4	- 0.0195	- 0.0204

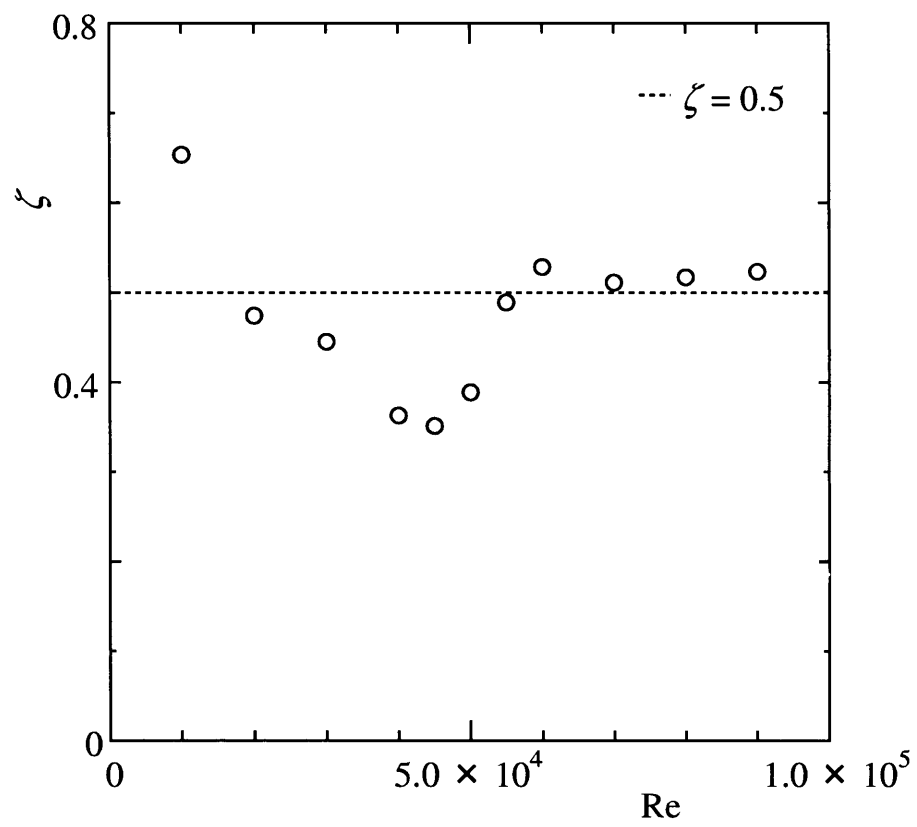
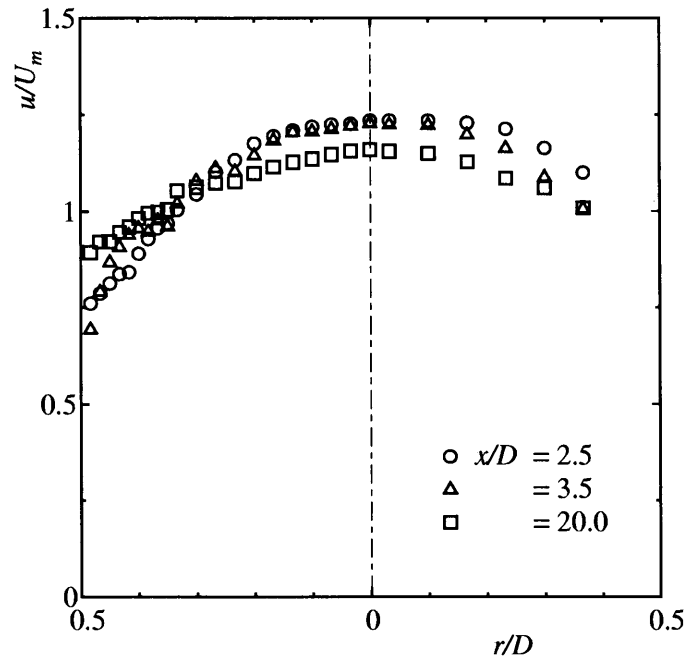
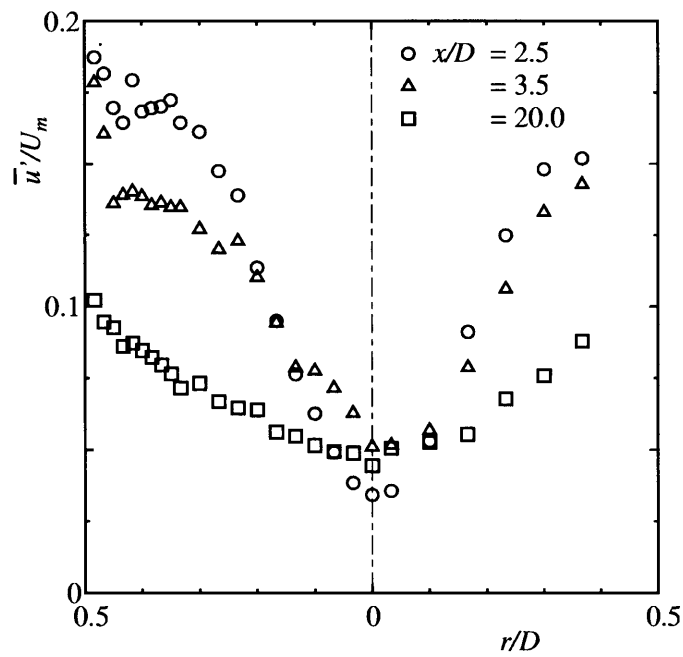


Fig. 4.1.2 Entrance loss (without small obstacle)



(a) Velocity profile



(b) Turbulent intensity profile

Fig. 4.1.3 Symmetry of flow ($Re = 5.0 \times 10^4$)

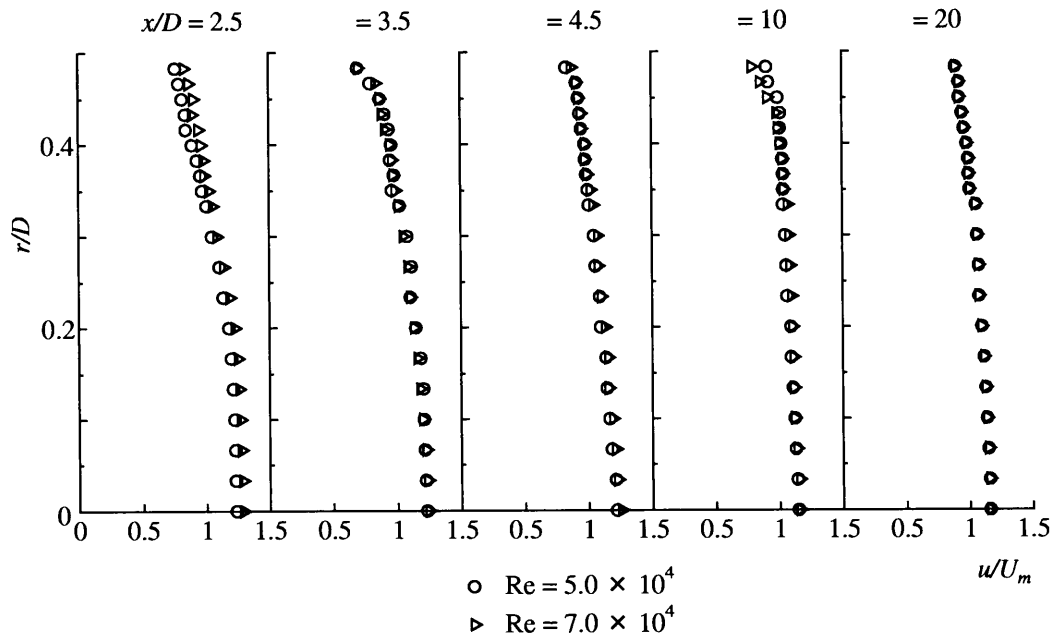


Fig. 4.1.4 Velocity profile (without small obstacle)

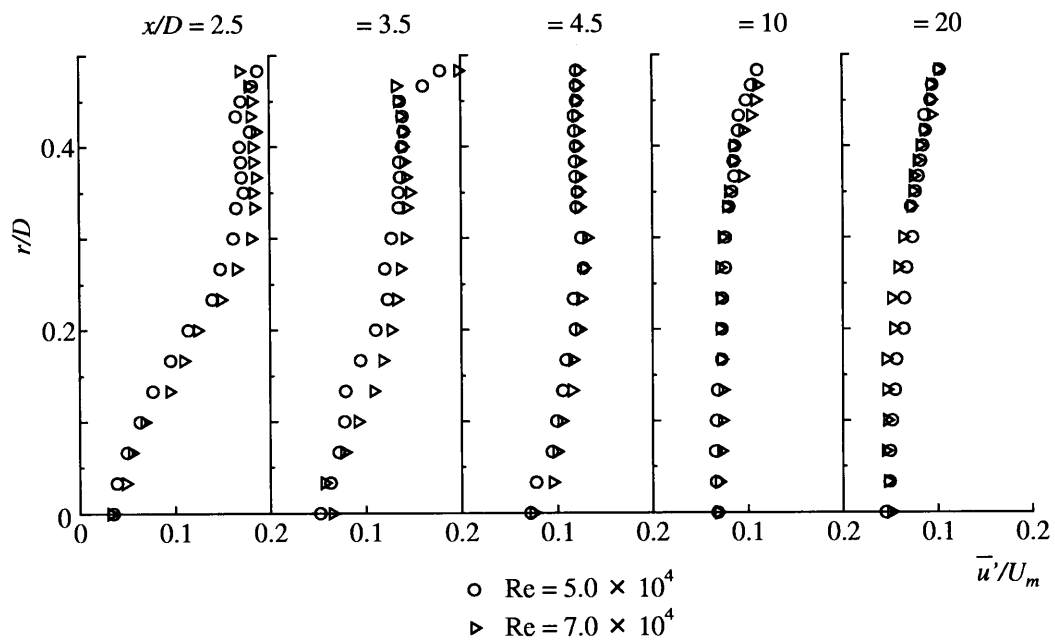


Fig. 4.1.5 Turbulent intensity profile (without small obstacle)

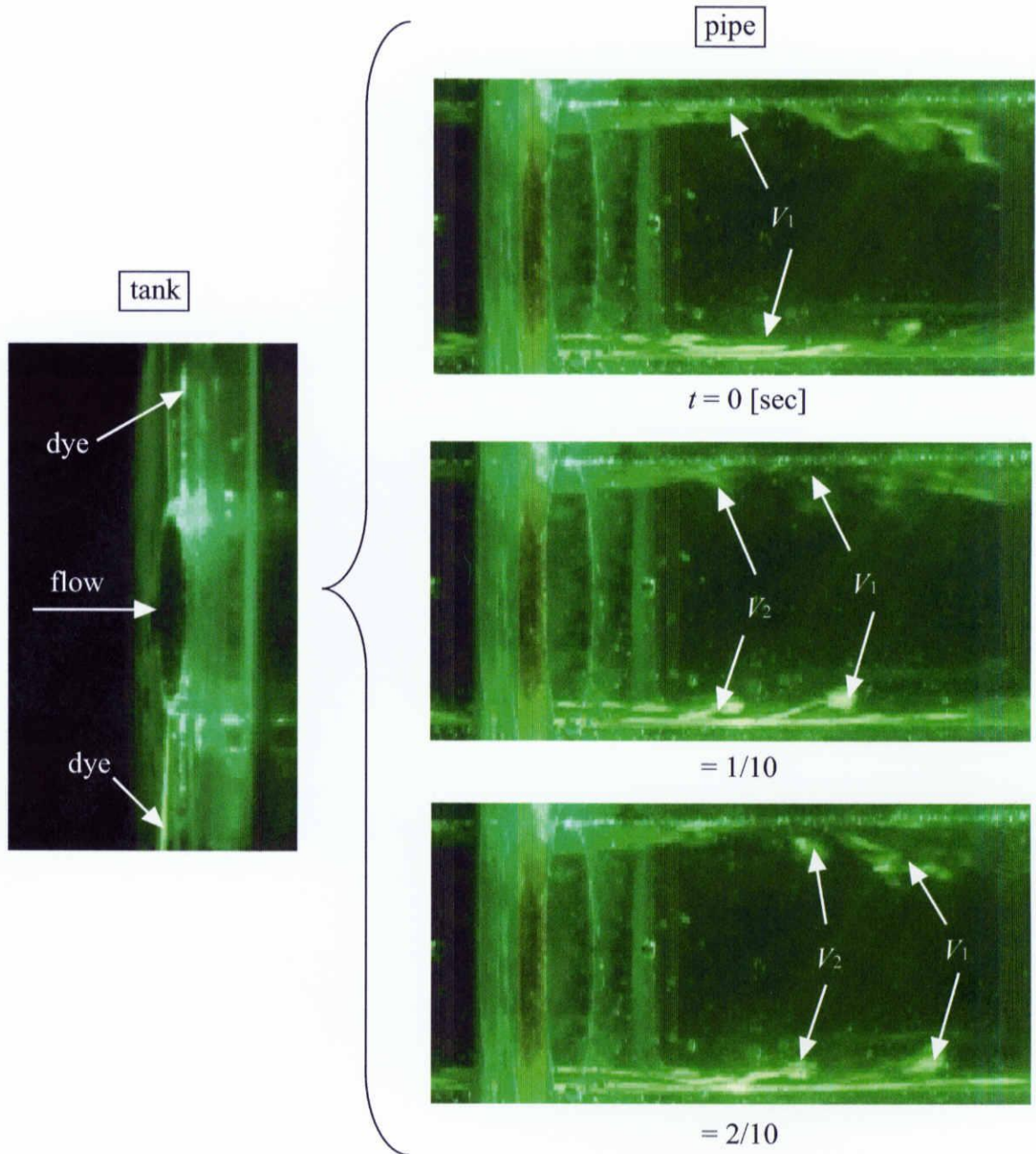


Fig. 4.1.6 Visualized flow pattern (without small obstacle, $Re = 3,000$)

4.2 小物体を設置した場合

水槽壁面上に、管直径より僅かに大きな径を持つリング状の小物体を設置して、はく離流れの抑制・制御を試みた。小物体の高さ $H/D = 0.2, 0.1$ それぞれに対して設置位置を変化させ、最も入口損失を減少できる小物体形状を調査した。

また効果が最大であった小物体の幅 W を変化させ、その影響についても調査した。そして今回の実験における最適形状と小物体なしの場合を比較することで流動特性の変化を明らかにした。

この節のグラフは、すべて $Re = 5.0 \times 10^4$ の実験結果であり、同様な条件において $Re = 3.0 \times 10^4, 7.0 \times 10^4$ のグラフは第 6 章に掲載している。また、圧力分布の下流の圧力勾配は、すべての条件においてブラジウスの圧力勾配 (式 2.10) の値に $\pm 5\%$ 以内の値であり、これは実験誤差範囲内といえる (表 4.1.1 ~ 4.2.3 参照)。

4.2.1 圧力分布及入口損失

(a) 小物体高さ $h/H = 0.2$ の場合

図 4.2.1 高さ $H/D = 0.2$ の小物体を $L/D = 0.00, 0.05, 0.10, 0.20$ の位置に設置した場合の流れ方向の圧力分布を示す。比較のため小物体なしの場合の分布も同時に示す。

小物体を設置した場合 ($L/D = 0.00$ 以外)、流入直後から $x/D \simeq 2.0$ の圧力が低い値を示さなくなる。負圧が小さくなったことから渦領域が減少・消滅したと考えられる。管路が水槽内に突き出している場合 ($L/D = 0.00$) には圧力の回復は見られなかった。今回、 $L/D = 0.10$ の場合に最も大きく圧力が回復した。この場合の入口損失係数は $\zeta = 0.0364$ で、小物体設置によりかなりの効果が得られたことを示している。また Re 数が大きくなると $L/D = 0.05$ の場合でも同様な圧力回復が見られる (図 A.1, A.2 参照)。

(b) 小物体高さ $h/H = 0.1$ の場合

(a) と同様の条件において、高さ $H/D = 0.1$ の小物体を設置した場合の流れ方向の圧力分布を、図 4.2.2 に示す。

小物体の高さを低くすると最も圧力回復が見られる設置位置が $L/D = 0.05$ となり、入口角部に近づく。この場合の入口損失係数は $\zeta = 0.0560$ で、であり高さを変化させた場合でも十分な効果が得られた。しかし、高さ $H/D = 0.2$ の場合と異なり、 Re 数の大小にかかわらず、設置位置と圧力回復の様子は変わらなかった (図 A.3, A.4 参照)。

(a), (b) の結果よりさらに小物体の高さを低くし, 設置位置を入口に近づけることでより小さな小物体による制御ができると予測できるが, これ以上の入口損失係数の減少は望めないと考えた.

4.2.2 入口損失の減少

図 4.2.3 に前節の圧力分布から式 (2.5) を用いて求めた入口損失係数 ζ を, また図 4.2.4 に小物体を設置した場合の ζ の以下で表す減少率を示す.

$$\frac{\zeta(\text{without small obstacle}) - \zeta(\text{with small obstacle})}{\zeta(\text{without small obstacle})} \quad (4.1)$$

比較のため, 小物体なしの場合の値 $\zeta = 0.3887$ を点線で示す. どちらの高さにおいても ζ は極小値を持つ分布を示すが, その時の小物体位置は小物体の高さの増加とともに増加する. 小物体高さ $H/D = 0.2, 0.1$ に対する入口損失の最小値はそれぞれ, 0.0346, 0.0560 である. 本実験の範囲では最も入口損失を小さくする小物体の高さと位置はそれぞれ, $H/D = 0.2, L/D = 0.10$ で小物体なしの場合に比べ入口損失係数は約 90 % 減少する.

$H/D = 0.2, L/D = 0.1$ の場合の入口損失係数は, 入口部ベルマウスにした時の入口損失係数 $\zeta = 0.060 \sim 0.005$ に相当する^{[6][7]}. したがって, 本研究で提案する入口損失の簡便な減少法は, ベルマウスとほぼ同じ効果が得られることがわかった. また, 突き出し管 ($L/D = 0.00$) の場合は小物体なしの場合と入口損失があまり変わらないという結果は参考文献^{[6][7]} とよく一致した.

$Re = 3.0 \times 10^4$ に関しては, 5.0×10^4 の場合と同じ結果になったが, 7.0×10^4 の場合, 最も入口損失を小さくする小物体の高さと位置はそれぞれ, $H/D = 0.1, L/D = 0.05$ であった (図 A.5, A.7 参照). 減少率に関しては, 小物体なしの場合の入口損失係数が低ければ低いほど, 小物体設置による入口損失の減少率が高くなることがわかった (図 A.6, A.8 参照).

4.2.3 小物体幅 W/D の影響

図 4.2.6 に前節で最も入口損失を減少できた小物体 ($H/D = 0.2, L/D = 0.10$) について, 幅 W/D を 0.1 から 0.2 と 0.4 に変化させた場合の流れ方向の圧力分布を示す.

小物体の幅を変化させても圧力回復の割合に変化は見られなかった. 入口損失係数は $W/D = 0.1, 0.2, 0.4$ それぞれに対して, $\zeta = 0.0364, 0.0334, 0.0153$, 減少率は 91, 91, 96 % となりどれもほぼ同様な効果が得られた (図 4.2.6, 4.2.7). また, Re 数を変化させた場合も同様に幅を変えることによる変化はほとんど見られなかった (図 A.9 ~ A.14 参照).

$W/D = 0.4$ の場合の形状は、外部流であるが円柱に切り欠きを入れることで円柱後方の抗力が最も低減できた形状と非常によく似ている^[8]。今回、より簡単な制御方法ということで最適な小物体は $H/D = 0.2$, L/D , $W/D = 0.1$ である。

4.2.4 流れ場の時間平均特性

前節で得られた最適な小物体の高さ位置と幅の組み合わせ ($H/D = 0.2$, L/D , $W/D = 0.1$) の場合と小物体なしの場合の 2 条件について LDA による速度場の測定をおこない、小物体の設置が入口部流入後のはく離流れの特性に及ぼす影響を検討し入口損失が減少する原因について考える。また、小物体なしの場合と同様に、設置した場合の流れ方向速度・乱れも管軸に对称であることが確認できた (図 4.2.8 参照)。

(a) 速度分布

図 4.2.9 には、小物体なしと設置した場合について、半径方向に半分の領域のみの速度 u の分布を示す。

小物体を設置した場合、 $x/D = 2.5, 3.5$ の断面において管壁近傍の速度が増大し、より平坦な分布になる。時間平均した速度が小物体設置により増大するとういことは、なしの場合は、瞬間的に管壁近傍速度が逆流で存在すると考えられる。これより小物体を設置したことで、逆流領域が消滅し、渦領域が抑制されたと考えられる。また、 $x/D = 10$ 以降の下流の速度分布は同じ分布形になっており、本来管内流が完全発達領域に達するのは $50D$ 必要といわれているが、圧力の結果と合わせて $x/D = 25$ 以降においてほぼ完全発達領域に達したといえる。

(b) 乱れ分布

図 4.2.10 に小物体なしと設置した場合について半径方向に半分の領域のみの乱れ強さ \bar{u}' の分布を示す。

小物体を設置した場合、入口流入直後の渦領域の存在に対応した乱れが減少しているのがわかる。これより小物体なしの場合に予測した、乱れが減少すれば渦領域の大きさが抑制されている、という考えが証明された。また、 $x/D = 10$ 以降では分布の相違はほぼなくなった。

4.2.5 流れ場の可視化観察

図 4.2.11 に、 $Re = 3,000$, $H/D = 0.2$, $W/D = 0.1$ の小物体を $L/D = 0.1$ に設置した場合の流れ場の可視化写真を示す。左図は水槽内から入口部を、右図は入口直後の管内を示しており、

1/10 [sec] の時間間隔である。

水槽壁面から注入した染料は小物体に衝突し、小物体を沿って流れ、はく離する。その後入口角部へ接触することなく管路へと流入している。そのため小物体なしの場合において、流入後存在していた渦領域が消滅し、管壁に沿って染料が拡散することなく流れている様子が観察できる。また時間経過とともに、渦が放出されている様子もなく非常に流れが安定している。

これより、小物体の設置により渦領域が消滅し、流路の有効断面積が増加した。したがって渦領域を抑制・制御し有効断面積を増加させることで入口損失係数を減少できる。

4.2.6 数値解析結果

前節で得られた最適な小物体の高さ位置と幅の組み合わせ ($H/D = 0.2$, L/D , $W/D = 0.1$) の場合と小物体なしの場合の 2 条件について CFD 2000 による数値計算をおこない、実験では観測できなかった入口部流入直後のはく離流れの特性を検討し入口損失が減少する原因について考える。Re 数は実験と同じ 5.0×10^4 でおこなった。

(a) 圧力分布及び入口損失

図 4.2.12 に、数値計算より得た、流れ方向の圧力分布を示す。比較のため小物体のなしと小物体を設置した場合の実験結果をそれぞれ ○, △ 印で示す。

実験結果と比較すると、圧力は低い値を示す傾向にあった。しかし、小物体を設置した場合の圧力回復は計算結果からも得ることができた。入口損失係数に関しては、計算結果から小物体なしの場合 $\zeta = 0.5331$, 小物体を設置した場合 $\zeta = 0.1672$ となり、実験より高い値を示した。減少率は、約 69 % であった。このように、値が異なった原因として、計算結果の下流における圧力勾配が、小物体なしの場合 -0.0262 , 設置した場合 -0.0249 となり、ブラジウスの圧旅行勾配と約 20 % の違いがあったためと考えられる。よって数値計算においては、より下流の圧力勾配を解析する必要がある。

(b) 速度分布及び乱れ分布

実験では得ることができなかった入口流入直後の速度・乱れ分布を示すとともに、実験結果と同じ断面において、計算結果との比較をおこなった。

速度分布 図 4.2.13 には、小物体なしと設置した場合について、半径方向に半分の領域のみの速度 u の分布を示す。

$x/D = 2.5$ において、小物体なしの場合に逆流領域が存在している。小物体を設置することで、この逆流領域が消滅し、入口直後から見られる壁面近傍速度の大きな減衰がなくなっている様子がわかる。これらより、小物体設置により流入直後からはく離渦が制御されている。

$x/D = 3.5$ 以降の断面において、小物体を設置した場合の分布は、実験結果とほぼ一致した結果となっている。また、最も下流の断面 $x/D = 20$ においては、なし、設置した場合の両方においてよく一致している結果となった。この理由として、今回計算に用いている $k-\varepsilon$ モデルは、等方性乱流に用いられるモデルであるため、断面の急変などによって逆流領域が存在する流れ場を明確に再現できなかったと考える。

乱れ分布 計算結果より得られた乱流運動エネルギー k から以下の式を用いて乱れ強さ \bar{u}' を求めた。

$$\bar{u}' = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (4.2)$$

図 4.2.14 には、小物体なしと設置した場合について、半径方向に半分の領域のみの速度 \bar{u}' の分布を示す。

入口流入直後の壁面近傍でもっとも大きな乱れを示した。この結果からも乱れが大きな部分に渦領域が存在しているといえる。下流にいくにつれ、壁面近傍の乱れが減少し、やがて平坦な分布へと移行していく。速度分布の場合と同様に小物体を設置した場合において、ほぼ一致した結果となる。これらより小物体を設置した場合は、直管の管内流の状態に非常に近い状態となるということがわかった。

(c) 速度ベクトル

図 4.2.15 (a) (b) に、小物体なしと設置した場合の速度ベクトルの写真を示す。

計算結果によって渦が入口角部ではなく離し、放出されるという非定常な特性を再現することはできなかった。しかし、時間平均的に渦領域が存在している様子を再現することはできた [4.2.15 (a)]。小物体を設置した場合、小物体と入口角部に小さな渦領域が存在している。しかしこの渦領域は流れの抵抗になるとは考えにくく、壁 (ベルマウス) のような役割をはたしていると推測できる。このため、入口角部で流れがはく離することなく管路へ流入している [4.2.15 (b)]。

以上の結果より、CFD 2000 による数値計算より、管路へ流入する流れを定性的に再現することができた。これより、パラメータを変化させ、他の条件に対しても数値計算を用いて現象を予測できると考える。

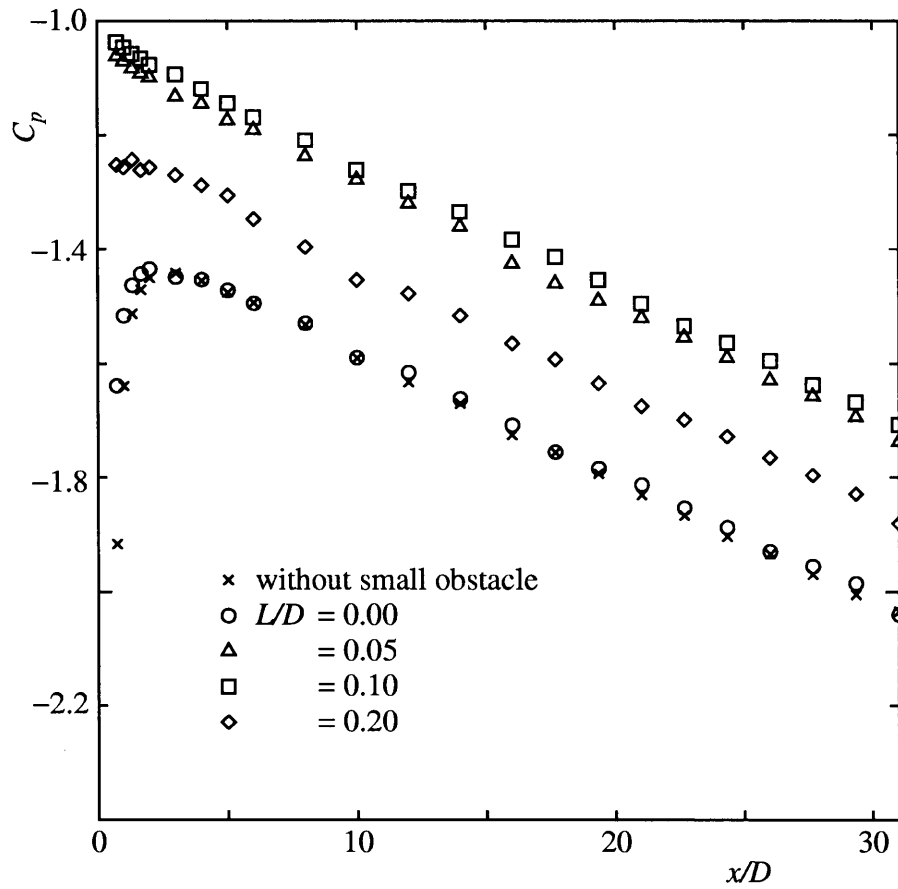


Fig. 4.2.1 Pressure distribution ($H/D = 0.2$, $Re = 5.0 \times 10^4$)

Table 4.2.1 Pressure gradient $\partial C_p / \partial(x/D)$ in straight pipe ($H/D = 0.2$, $Re = 5.0 \times 10^4$)

			pressure gradient
Brasius			-0.0212
Exp.	L/D	0.00	-0.0211
		0.05	-0.0207
		0.10	-0.0216
		0.20	-0.0204

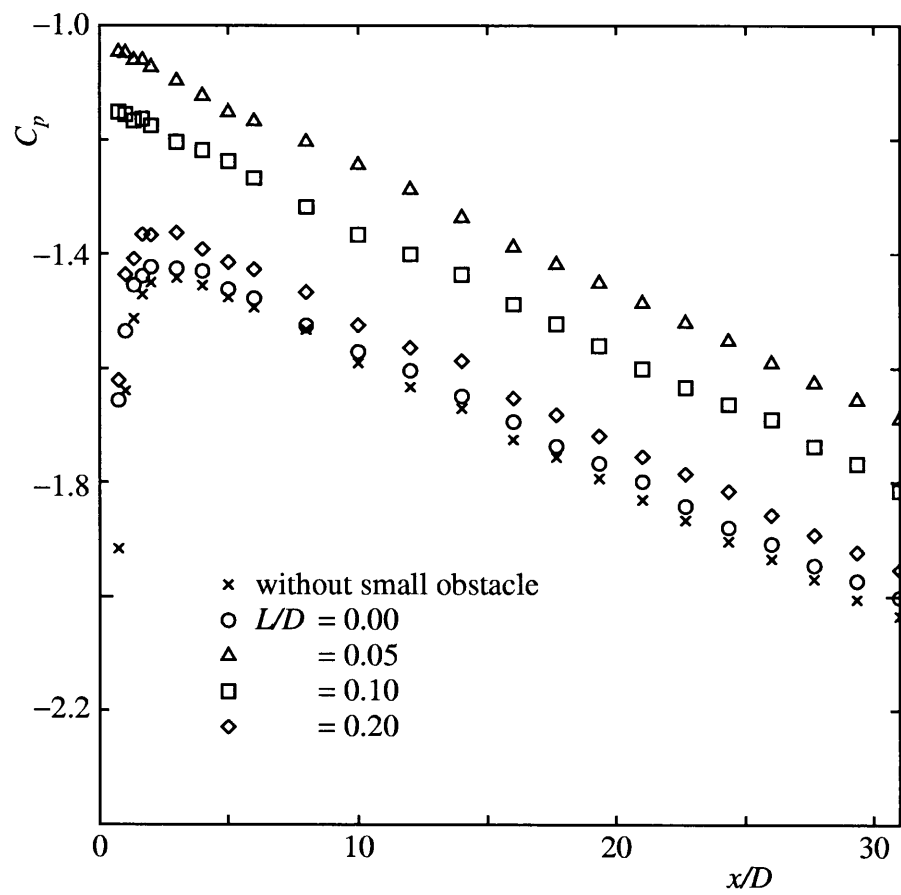


Fig. 4.2.2 Pressure distribution ($H/D = 0.1$, $Re = 5.0 \times 10^4$)

Table 4.2.2 Pressure gradient $\partial C_p/\partial(x/D)$ in straight pipe ($H/D = 0.2$, $Re = 5.0 \times 10^4$)

			pressure gradient
Brasius			-0.0212
Exp.	L/D	0.00	-0.0204
		0.05	-0.0205
		0.10	-0.0213
		0.20	-0.0205

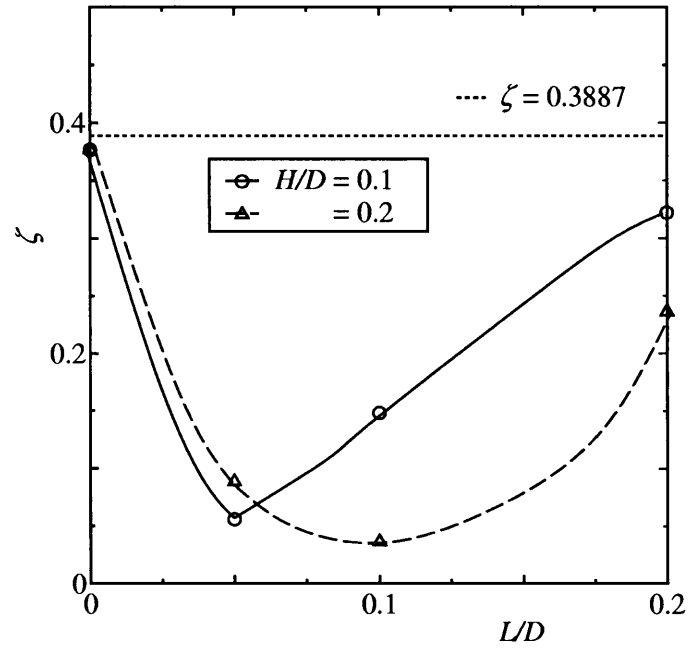


Fig. 4.2.3 Entrance loss ($\text{Re} = 5.0 \times 10^4$)

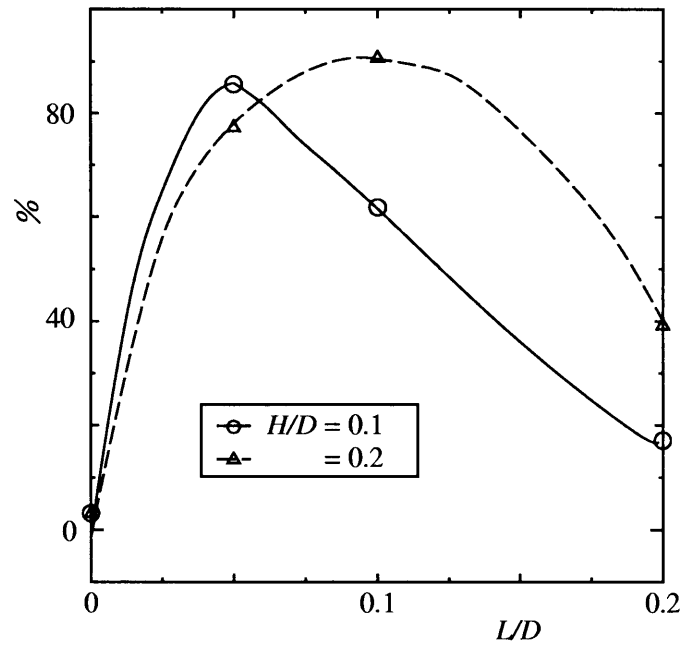


Fig. 4.2.4 Reduction ratio of entrance loss ($\text{Re} = 5.0 \times 10^4$)

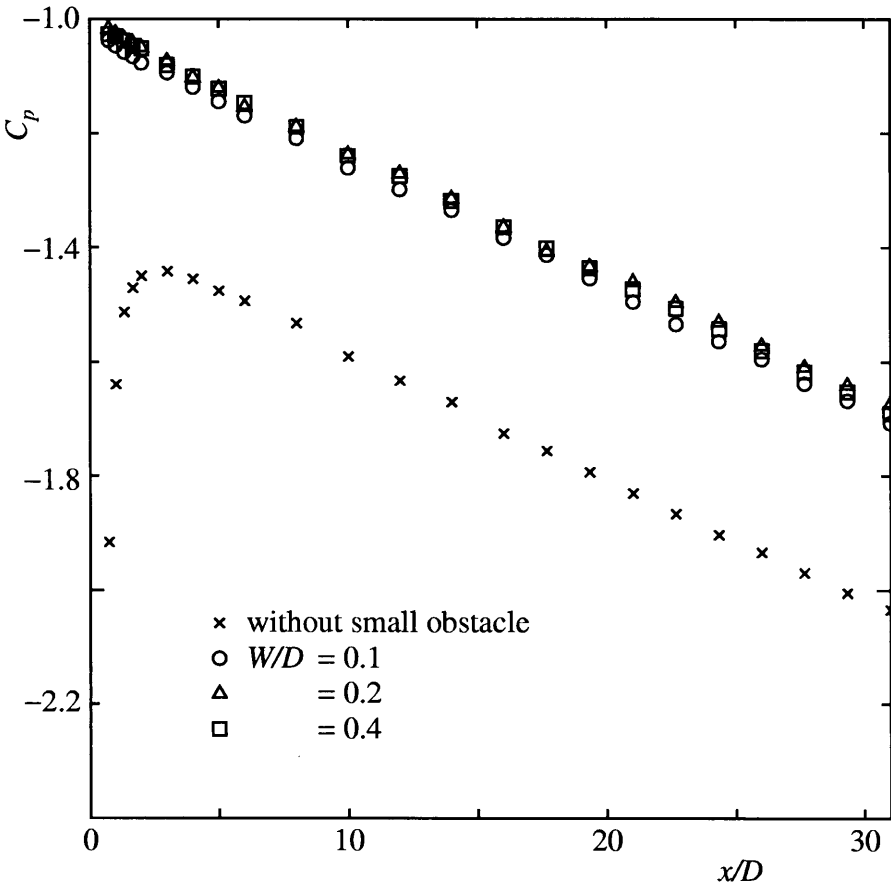


Fig. 4.2.5 Pressure distribution ($H/D = 0.2, L/D = 0.1, Re = 5.0 \times 10^4$)

Table 4.2.3 Pressure gradient $\partial C_p/\partial(x/D)$ in straight pipe
($H/D = 0.2, L/D = 0.10, Re = 5.0 \times 10^4$)

			pressure gradient
Brasius			-0.0212
Exp.	W/D	0.1	-0.0216
		0.2	-0.0207
		0.4	-0.0217

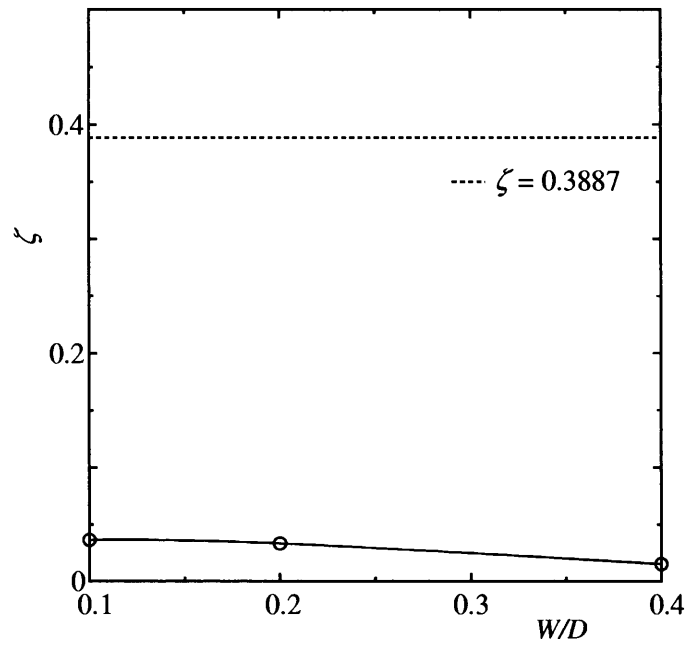


Fig. 4.2.6 Entrance loss ($H/D = 0.2$, $L/D = 0.1$, $Re = 5.0 \times 10^4$)

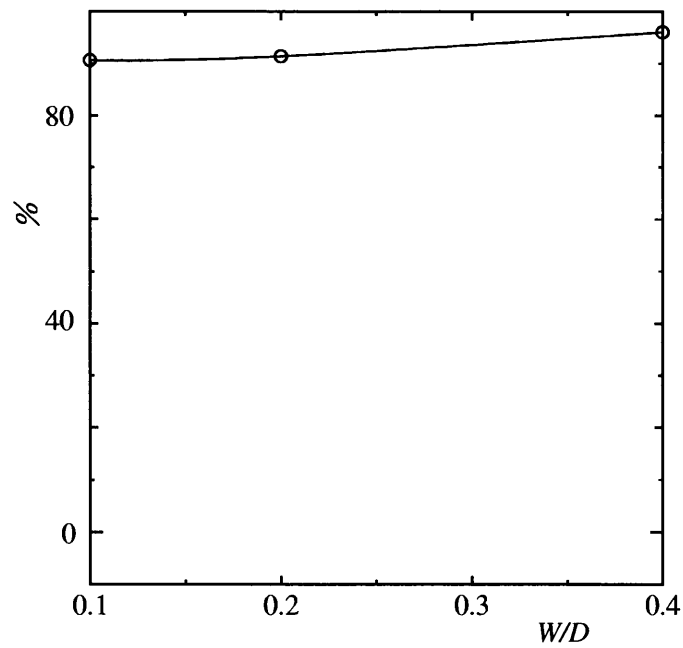
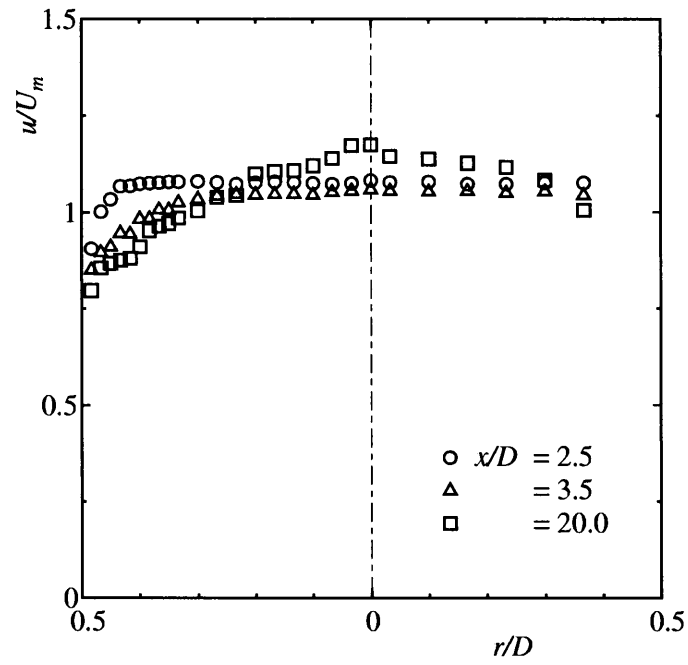
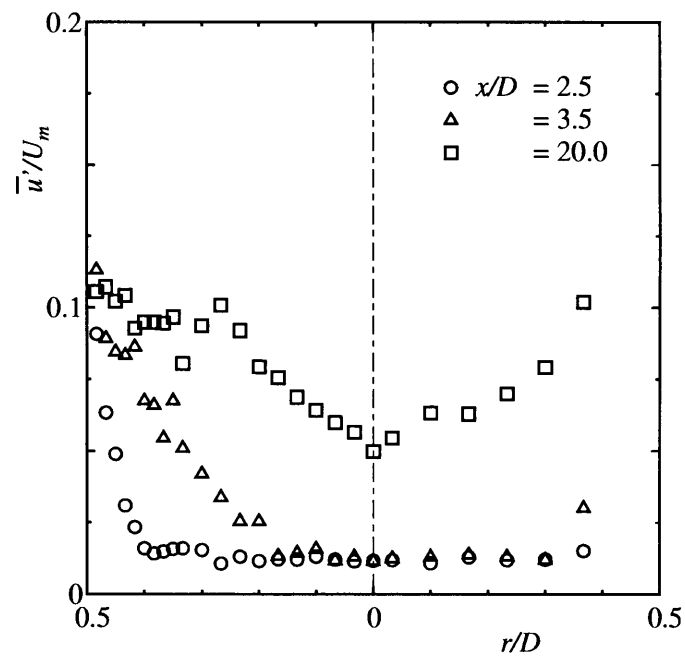


Fig. 4.2.7 Reduction ratio of entrance loss ($H/D = 0.2$, $L/D = 0.1$, $Re = 5.0 \times 10^4$)



(a) Velocity profile



(b) Turbulent intensity profile

Fig. 4.2.8 Symmetry of flow (with small obstacle, $Re = 5.0 \times 10^4$)

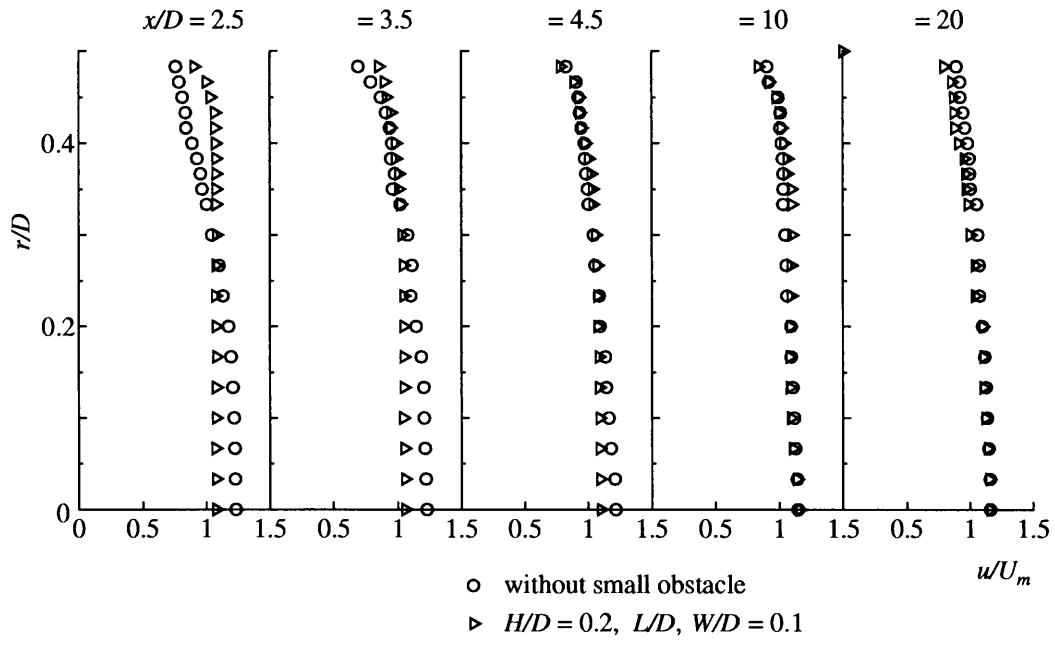


Fig. 4.2.9 Velocity profile ($\text{Re} = 5.0 \times 10^4$)

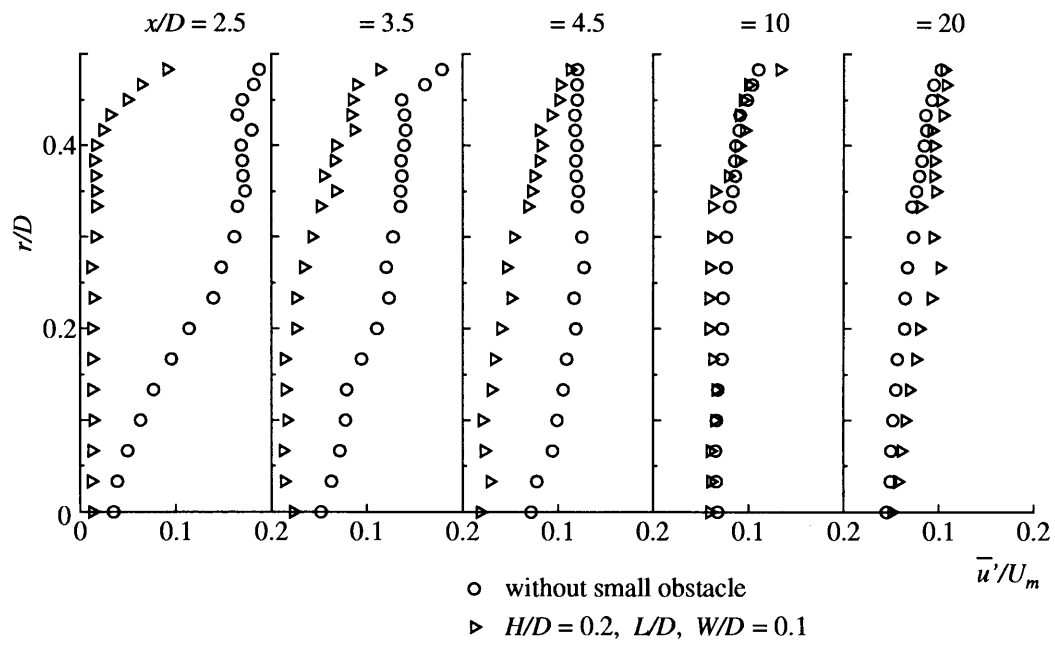


Fig. 4.2.10 Turbulent intensity profile ($\text{Re} = 5.0 \times 10^4$)

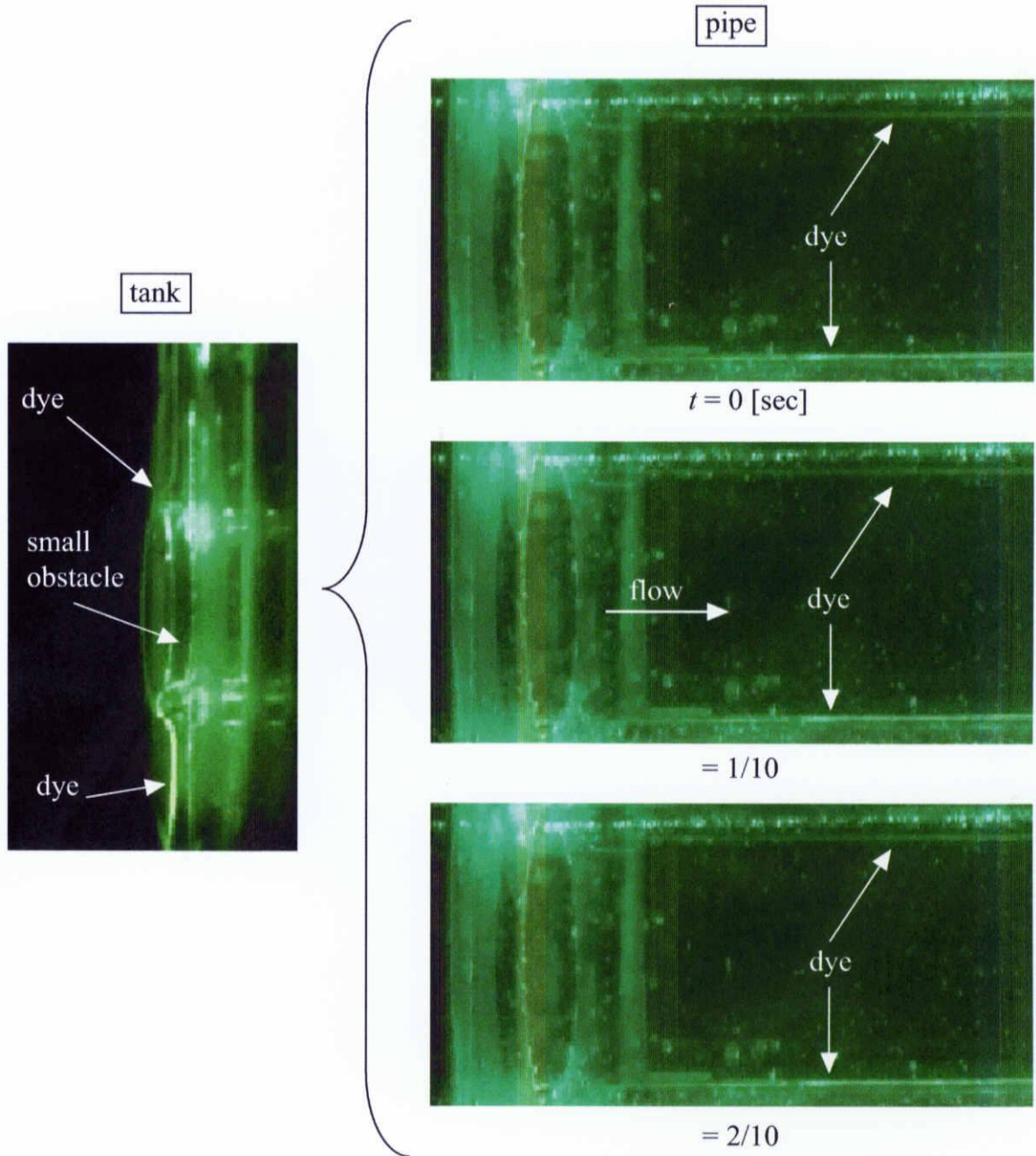


Fig. 4.2.11 Visualized flow pattern ($H/D = 0.2$, L/D , $W/D = 0.1$, $Re = 3,000$)

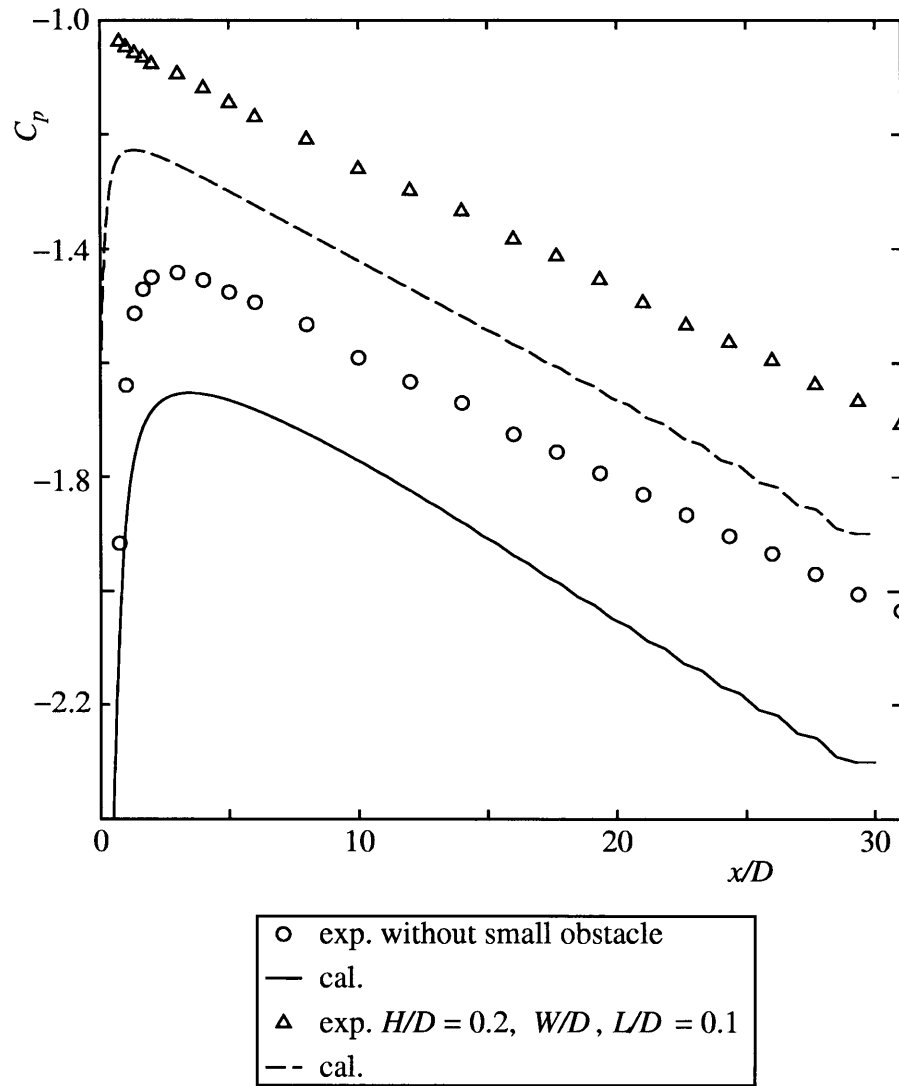


Fig. 4.2.12 Pressure distribution ($Re = 5.0 \times 10^4$)

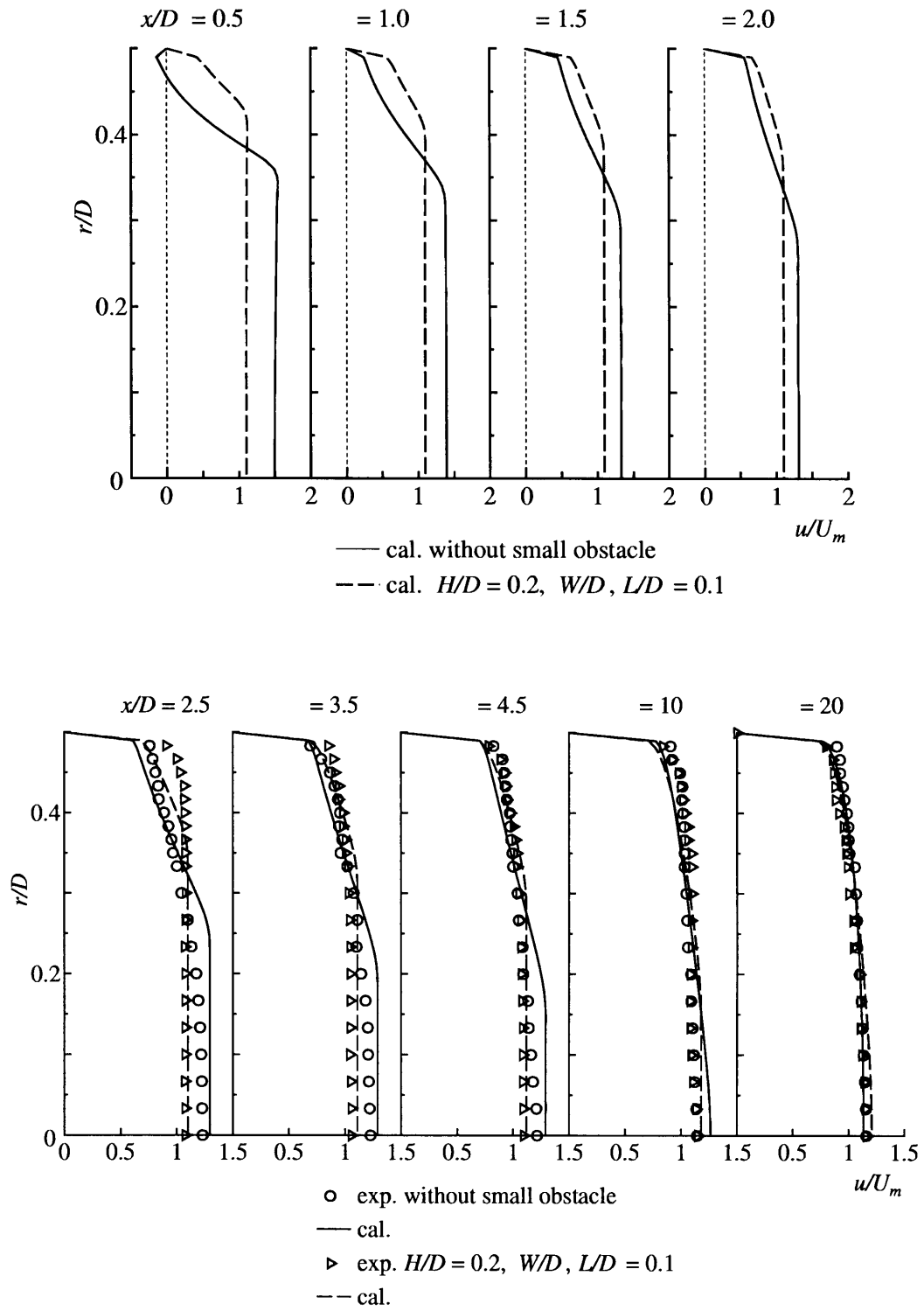


Fig. 4.2.13 Velocity profile ($Re = 5.0 \times 10^4$)

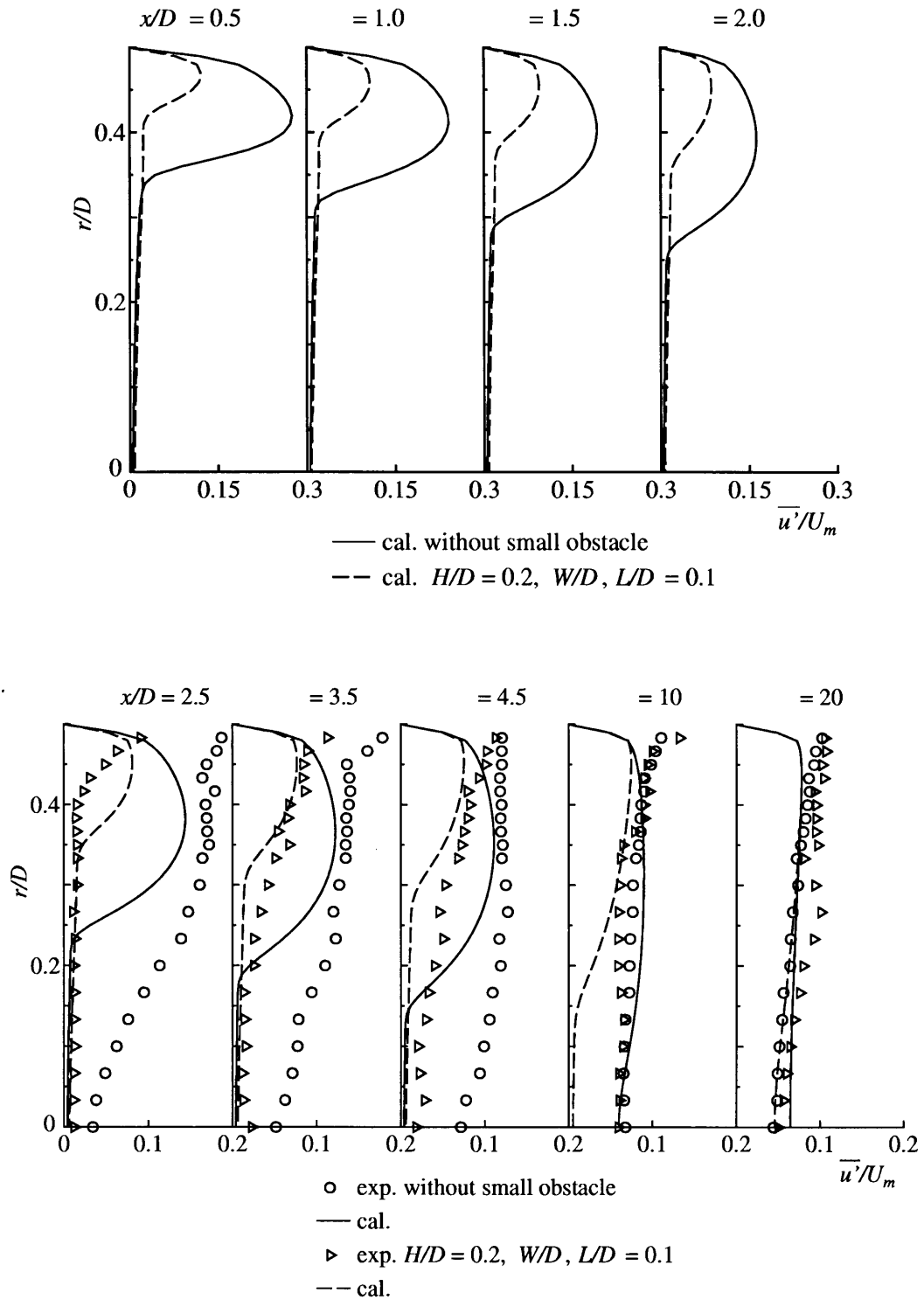
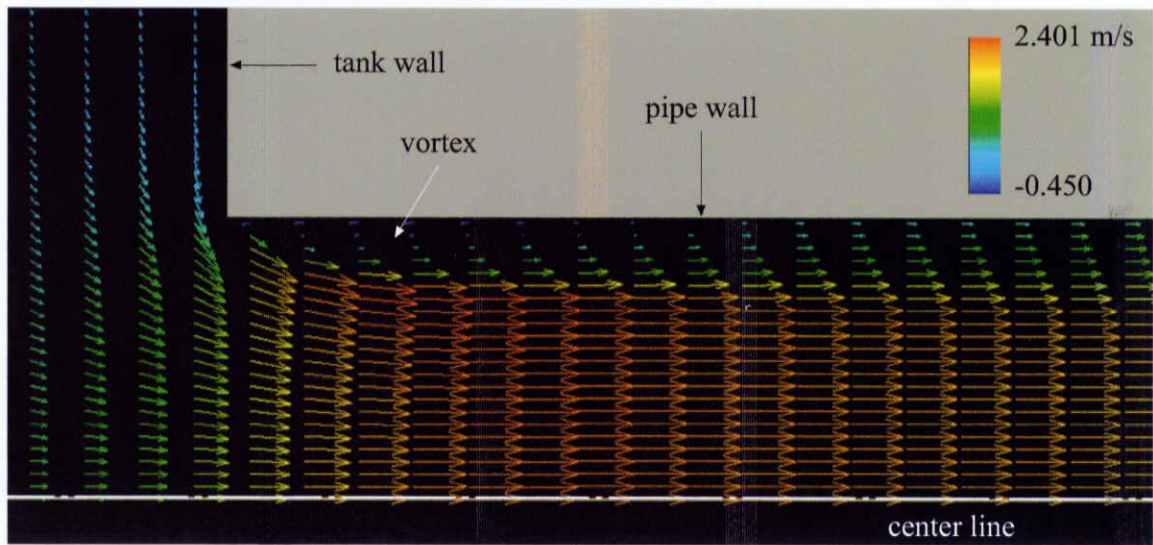
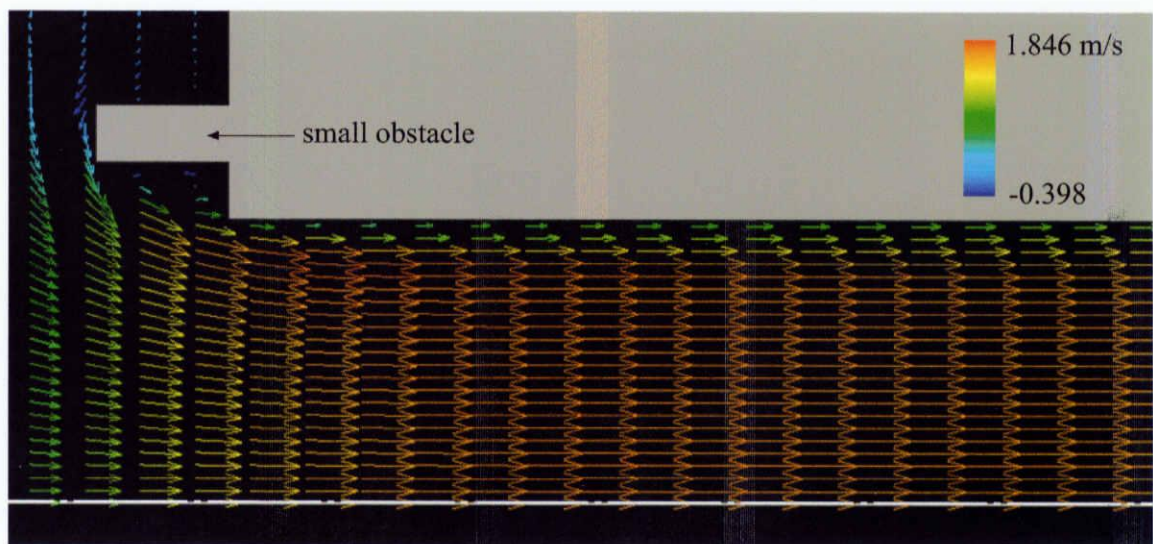


Fig. 4.2.14 Turbulent intensity profile ($Re = 5.0 \times 10^4$)



(a) without small obstacle

(b) $H/D = 0.2$, W/D , $L/D = 0.1$ Fig. 4.2.15 Velocity vector ($Re = 5.0 \times 10^4$)

4.3 オフセット平板の影響

前節では、小物体の設置という比較的簡便な方法で入口損失を約 90% 減少でき、入口直後に生起する渦領域の生起を抑制・制御できることが明らかになった。

しかし、実際に各種流体装置の場合、管路入口は底面、側面から十分離れた位置にあるとは限らず、様々な位置に設置されている。そこで水槽内に、管路と平行に、オフセット平板を 1 枚ないし 2 枚設置し [図 2.2 (a) (b) 参照]、管路中心からの距離 (オフセット距離 S_1, S_2) を変化させることで入口損失への影響を調査した。オフセット平板が 1 枚の場合は、オフセット距離 $S_1/D = 0.5, 1.0, 3.0$ の 3 パターンについて圧力測定をおこなった。ここで、 $S_1/D = 0.5$ の場合は管路入口角部とオフセット平板が接している。オフセット平板が 2 枚の場合は、1 枚目のオフセット距離 $S_1/D = 0.5$ で 2 枚目の S_2/D を 0.5, 1.0, 3.0, と変化させた。

また、それぞれに対して前節で最も効果が得られた $H/D = 0.2, W/D = 0.1$ の小物体を $L/D = 0.10$ 設置し、管路入口が底面、側面から十分離れた位置にない場合でも、入口損失を低減できるか調査した。圧力、速度・乱れの実験は、すべての条件に対して $Re = 5.0 \times 10^4$ でおこなった。

尚、圧力分布における下流の圧力勾配は、ブラジウスの圧力勾配によく一致していた。この章における圧力勾配を付録 A の表 A.7, A.8 にまとめて示す。

4.3.1 オフセット平板が 1 枚の場合

(a) 圧力分布及び入口損失

オフセット平板の設置により管路へ流入する流れが非対称になると考え、圧力孔の位置を $\theta = 90, 0, -90[^\circ]$ と変化させた場合について、軸方向の圧力分布を調査した。図 4.3.1 (a) (b) に、小物体なしの場合の結果を示す。

図 (a) は $S_1/D = 0.5$ の場合を示しており、発達領域においては角度による変化はほとんど見られなかった。図 (b) の $S_1/D = 1.0$ の場合でも同様であり、入口損失係数の値も、設置位置による影響がないということがわかった。しかし、 $S_1 = 0.5, 1.0$ の場合流入直後において、オフセット平板から遠い角度になるほど圧力が低くなった。

小物体を設置した場合の結果を図 4.3.2 (a) (b) に示す。(a) の $S_1/D = 0.5$ の場合、流入直後で多少の変化が見られ、入口損失係数の値に約 20 % の違いがでた。よってオフセット平板の影響は $x/D = 30$ までおよんでおり、 ζ の値を正確に求めるためにはもっと下流の分布が必要であると考えられる。(b) の $S_1/D = 1.0$ になると、流入直後の違いもなくなり、オフセット平板の影

響はないといえる。

オフセット平板を設置ことにより、流れは非対称になり管路内壁のオフセット平板側に生起する渦領域が小さくなり、管路上面のそれは大きくなるなると推測される。このことが、少しの変化ではあるが、 $\theta = 90[^\circ]$ で流入直後の負圧が大きくなる原因ではないかと考える。

続いて、図 4.3.3 (a) (b) に オフセット距離 S_1/D を 0.5, 1.0, 3.0 と変化させた場合の圧力分布を示す。(a) は小物体なしの場合で、(b) は小物体を設置した場合である。今回、 $\theta = 0[^\circ]$ の結果を示す。また比較のため、オフセット平板を設置しなかった場合の圧力分布を × 印で示す。

まず図 (a) の小物体なしの場合から $S_1/D = 0.5$ の場合に圧力の減少が見られ、入口損失も増大する。この原因として、流れが非対称になることで流路の有効断面積が減少したと考えられる。 S_1/D が大きくなるにつれ、オフセット平板を設置しない場合の分布に近づく。よって $S_1/D \geq 3.0$ においては壁面の影響はなくなるといえる。

また、図 (b) の小物体を設置した場合においても同様なこといえる。しかし、どのオフセット距離においても、小物体を設置すると圧力は回復しており、その効果は得られた。なお、 $S_1/D = 0.5$ の場合はリング状の小物体とオフセット平板が干渉するため、変形した小物体を使用している[図 2.4 (b) 参照]。形状は変わるがこの場合においても十分な効果が得られたといえる。

(b) 入口損失の減少

図 4.3.4 に前節の圧力分布から式 (2.5) を用いて求めた入口損失係数 ζ を、また図 4.3.5 にそれぞれのオフセット距離における、小物体を設置した場合の ζ の減少率 (式 4.1) を示す。比較のため、オフセット平板を設置していない場合の小物体なしの場合の値 $\zeta = 0.3887$ を点線で、と最適な小物体を設置した場合の値 $\zeta = 0.0346$ を破線で示す。

入口損失係数は、 $S_1/D = 0.5$, 以外は平板を設置していない場合と比べて多少増加するもののほぼ同じ値である。これは小物体を設置した場合に同様なことがいえる。そして、減少率を見ると、オフセット距離が小さい順に、約 68, 85, 82 % となっており、小物体を設置した効果が十分に得られた。この結果から、 $S_1/D = 0.5$ の場合のみ、流れの特性に大きな変化があると考えられる。

(c) 流れ場の時間平均特性

前節に変化が見られた $S_1/D = 0.5$ の場合において、入口損失が増大した原因を調査するため、流れ方向の速度 u および乱れ強さ \bar{u}' の測定をおこなった。今回、オフセット平板は水槽底面に平行に設置しているため、管路水平断面における速度分布に変化はないと考え、流路中心の鉛直面内で測定をおこなった。

速度分布 図 4.3.6 (a) (b) に流れ方向の速度 u/U_m 分布を示す. 図 (a) は $x/D = 2.5$, (b) は $x/D = 3.5$ の断面で, それぞれ小物体なしの場合と設置した場合について示している.

図 (a) の $x/D = 2.5$ の場合, 小物体なしの場合流れが非対称である様子がわかる. オフセット平板を設置した側の管壁付近において速度の最大値がみられ, そこから逆の管壁に向かって速度は減衰していく. この様子から平板を設置していない側に大きな渦領域が生起されていると考えられる. 小物体を設置した場合, 速度の最大値は管中心移動し, 分布もほぼ対称になる. しかし平板を設置していない場合 (図 4.2.9 参照) に比べ, 平板を設置した側の管壁において速度の急な減衰が見られる. このことから, 小物体を設置による生起される渦領域の制御が, 十分にできていないということがわかる.

図 (b) の $x/D = 3.5$ の場合は, $x/D = 2.5$ に比べ速度の最大値が管中心に移動しており, 平板を設置していない側の速度が全体的に増大している. このことから, 下流になるにつれ最大速度管中心へと移動し, 対称な分布になると予測できる.

乱れ分布 図 4.3.7 (a) (b) に速度分布と同条件における流れ方向の乱れ強さ \bar{u}'/U_m 分布を示す.

図 (a) の $x/D = 2.5$ の場合, 速度の最大値が存在した点から, 平板を設置していない側に向かって速度の減衰とは逆に乱れは増大している. また, 小物体を設置した場合において平板を設置した側としていない側を比べると, 設置していない側の乱れが大きくなっている. また小物体なしの場合の乱れの値は, 平板を設置しない場合, 管壁付近が最大値を示し, 約 0.2 である (図 4.2.10 参照). これに対し平板を設置していない側において乱れの値が増大していることからより大きな渦領域が存在していることがわかる.

図 (b) の $x/D = 3.5$ の場合から, 速度と同様に乱れも下流になるにつれ, 管中心付近から平板を設置していない側の乱れが減少していき, 対称な分布になると予測できる.

以上より, 入口損失増大の原因として, 流れが非対称になり平板を設置していない側に生起される渦領域が大きくなるためといえる. これにより平板を設置していない場合より流路の有効断面積が減少していると考えられる.

(d) 流れ場の可視化観察

図 4.3.8 (a) に小物体なし, (b) に設置した場合の流れ場の可視化写真を示す. 前節までの写真と同様に左図は水槽内から入口部を, 右図は入口直後の管内を示しており, 1/10 sec の時間間隔である. 今回オフセット平板が $S_1/D = 0.5$ に設置してあるため染料は水槽壁面と管中心上の平板から注入した.

図 (a) の小物体なしの場合、水槽壁面から注入した染料は入口角部ではく離し、管路へ流入していく。一方で平板から注入した染料は平板を沿って流れ管路へそのまま流入していく。流入後、平板を設置していない側では、渦領域の生起が見られる (V_1)。平板がない場合 (図 4.1.6 参照) に比べて生起される渦領域が大きくなっているのがわかる。また、時間経過とともに大きく拡散されている様子がわかる。平板を設置した側については、流れがはく離することなく管壁に沿って安定して流れている。

図 (b) の小物体を設置した場合、前節の可視化の場合と同様に小物体を設置することではく離渦が抑制・制御された。圧力や速度・乱れの結果から、平板を設置していない側で、小さな渦領域が存在すると考えたが、実際には見られなかった。

4.3.2 オフセット平板が 2 枚の場合

(a) 圧力分布及び入口損失

前節でオフセット平板を設置しても、角度 θ によって発達領域の圧力分布が大きく変化することはなかった。しかし、オフセット平板を 2 枚にした場合さらに流れの特性は変化すると考えられるので、前節同様圧力の対称性を確認した。

図 4.3.9 (a) (b) に小物体なしの場合、管内壁上の $\theta = 90, 0, -90[^\circ]$ の角度の位置の主流方向の圧力分布を示す。

図 (a) は $S_2/D = 0.5$ の場合を示しており、角度による変化はほとんど見られなかった。図 (b) は $S_2/D = 1.0$ の場合で、 $S_2/D = 0.5$ と同様にほとんど変化が見られなかった。入口損失係数の値はほぼ同じで、設置位置による影響がないということがわかった。

小物体を設置した場合も、同様な実験をおこなった [図 4.3.10 (a) (b)]。図 (a) の $x/D = 2.5$ の場合、オフセット平板が 1 枚の場合より変化が見られ、入口損失係数の値に約 30 % 違いがあった。図 (b) の $x/D = 3.5$ の場合でも入口損失係数の違いが約 25 % の違いがあり、オフセット平板を 2 枚設置することで圧力の周方向に対する影響が増加したといえる。

続いて、図 4.3.11 (a) (b) に オフセット距離 S_2/D を 0.5, 1.0, 3.0 と変化させた場合の圧力分布を示す。(a) は小物体なしの場合で、(b) は小物体を設置した場合である。今回、 $\theta = 0[^\circ]$ の結果を示す。また比較のため、オフセット平板を $S_1/D = 0.5$ の位置に 1 枚設置した場合の圧力分布を × 印で示す。

まず小物体なしの場合、 $S_2/D = 0.5$ で圧力の減少が見られ、入口損失も増大する。しかし、オフセット平板を 1 枚設置した場合と平板を設置しない場合ほどの減少はなかった。 S_2/D が大

きくなるにつれ、オフセット平板を設置しない場合の分布に近づく。よって 1 枚の場合と同様 $S_2/D \geq 3.0$ においては壁面の影響はなくなるといえる。

また、小物体を設置した場合においても同様なこといえる。しかし、どの場合においても圧力は回復しており、小物体設置による効果は得られた。なお、 $S_2/D = 0.5$ の場合はリング状の小物体とオフセット平板が干渉するため、変形した小物体を使用している [図 2.4 (c) 参照]。形状は変わるがこの場合においても効果が得られたといえる。

(b) 入口損失の減少

図 4.3.12 に前節の圧力分布から式 (2.5) を用いて求めた入口損失係数 ζ を、また図 4.3.13 にそれぞれのオフセット距離における、小物体を設置した場合の ζ の減少率 (式 4.1) を示す。比較のため、オフセット平板を 1 枚設置した場合の小物体なしの場合の値 $\zeta = 0.4437$ を点線で、と最適な小物体を設置した場合の値 $\zeta = 0.1397$ を破線で示す。

入口損失係数は、 $S_2/D = 0.5$, 以外は平板が 1 枚の場合と比べて多少増加するもののほぼ同じ値である。これは小物体を設置した場合に同様なことがいえる。そして、減少率を見ると、オフセット距離が小さい順に、約 60, 63, 64 % となっており、全体的に小物体を設置した効果が減少した。このことより、2 枚目の平板を設置したことにより流れがより複雑になったことを表していると言測できる。

(c) 流れ場の時間平均特性

前節で最も流れの特性に変化があると考えられる、 $S_2/D = 0.5$ の場合において、流れ方向の速度 u および乱れ強さ \bar{u}' の測定をおこなった。今回、オフセット平板を 2 枚設置しているため、管路水平断面におての分布、流路中心の鉛直面内における分布どちらを測定しても結果はおなじである。したがって測定のおこないやすい管路水平断面におての分布を測定した。

速度分布 図 4.3.14 (a) (b) に流れ方向の速度 u/U_m 分布を示す。図 (a) は $x/D = 2.5$, (b) は $x/D = 3.5$ の断面で、それぞれ小物体なしの場合と設置した場合について示している。

$x/D = 2.5$ の場合、小物体なしの場合において流れが非対称である様子がわかる。オフセット平板を設置した側の管壁付近において速度の最大値が見られるのは、この最大値は平板を 1 枚設置した場合 (図 4.3.6 (a) 参照) とほぼ同じだが、 $r/D = 2.5$ 以降から壁面までの速度の減衰がなくなっている。平板を 2 枚設置することで、流れが $\theta = -45[^\circ]$ の軸を中心として流れが対称になると考えられるので、この断面における平板が設置していない側に最も大きな渦領域

が生起されると推測できる。このため 2 枚目のオフセット平板を設置している側と反対側の渦領域が小さくなり速度の減衰がなくなったと考える。

$x/D = 3.5$ の場合は, $x/D = 2.5$ の場合に比べ速度の最小値が管中心に移動している。下流になるにつれ管中心への速度が上昇し, 平板を設置した側の速度が減衰していき, 対称な分布になると予測できる。

乱れ分布 図 4.3.15 (a) (b) に速度分布と同条件における流れ方向の乱れ強さ \bar{u}'/U_m 分布を示す。

図 (a) の $x/D = 2.5$ の場合, 乱れの値は, 管中心で高い値を示し, その後大きな乱れを持ち緩やかに減衰していく。図 4.3.7 と比較すると, 全体的にも乱れが増加している。速度の結果と合わせると, オフセット平板を 1 枚設置した場合に比べ, 大きな渦領域はより管中心付近に存在し, 入口損失増大の原因となっている。

図 (a) の $x/D = 3.5$ の場合, 管中心付近の乱れが減少しているのがわかる。下流になるにつれ, 平板を設置している側から乱れが減少していき対称な分布になると予測できる。

以上より, 入口損失増大の原因として, 流れが非対称になり平板を設置していない側に生起される渦領域が大きくなるためといえる。これにより平板を設置していない場合より流路の有効断面積が減少していると考えられる。

(d) 流れ場の可視化観察

図 4.3.16 (a) に小物体なし, (b) に設置した場合の流れ場の可視化写真を示す。前節までの写真と同様に左図は水槽内から入口部を, 右図は入口直後の管内を示しており, $1/10$ [sec] の時間間隔である。今回オフセット平板を $S_1/D, S_2/D = 0.5$ に設置している。

図 (a) より小物体なしの場合水槽壁面から注入した染料は入口角部ではなく離し, 管路へ流入していく。一方で平板から注入した染料は平板を沿って流れ管路へそのまま流入していく。流入後, 管路上部に生起される渦領域 V_1 は, 平板を 1 枚設置した場合 [4.3.8 (a) 参照] と比べて, 管中心付近に存在する。これは, 速度や乱れから渦領域が大きくなっているという予測を証明している。平板を設置した側については, 流れがはく離することなく管壁に沿って安定して流れている。

図 (b) の小物体を設置した場合, 前節までとは違い管路上部の流れは安定しておらず, 渦領域の形成は見られないが, 染料が緩やかに拡散している。これよりはく離流れが完全に制御されておらず, 入口損失が今までと同様に減少できなかったことを表している。

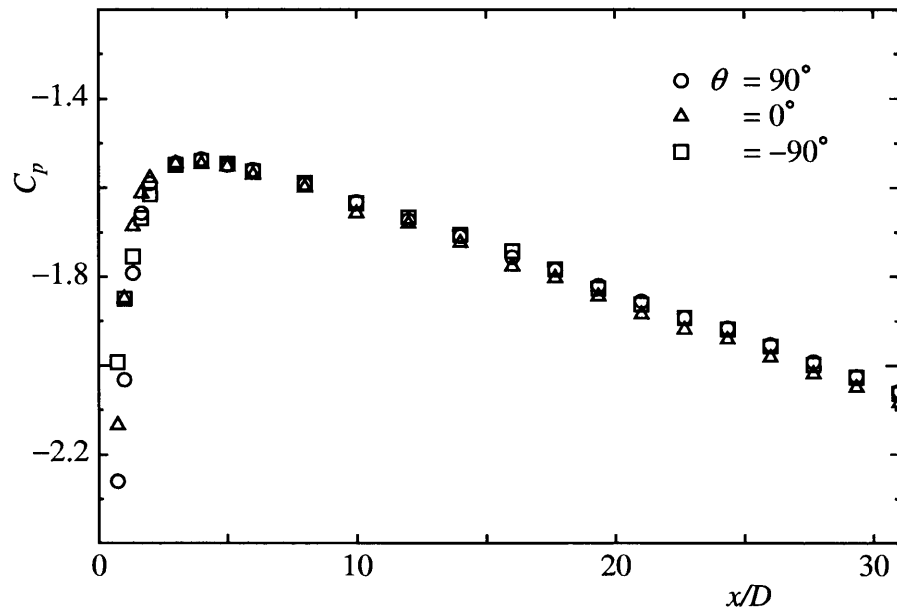
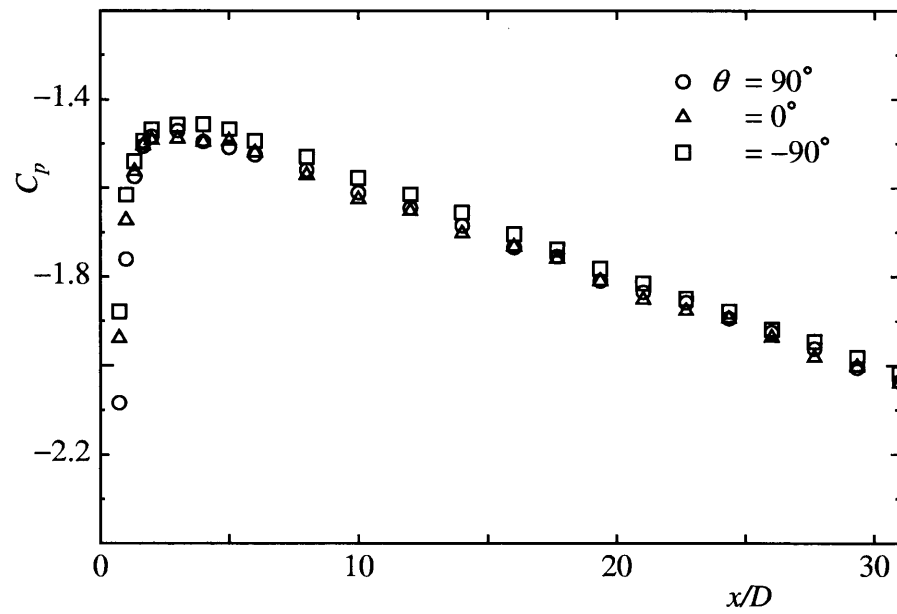
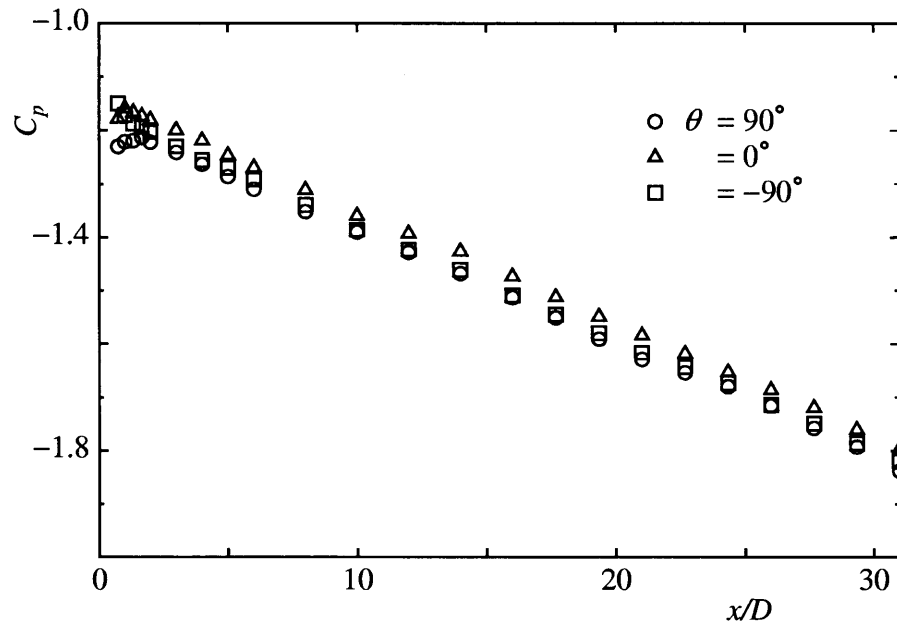
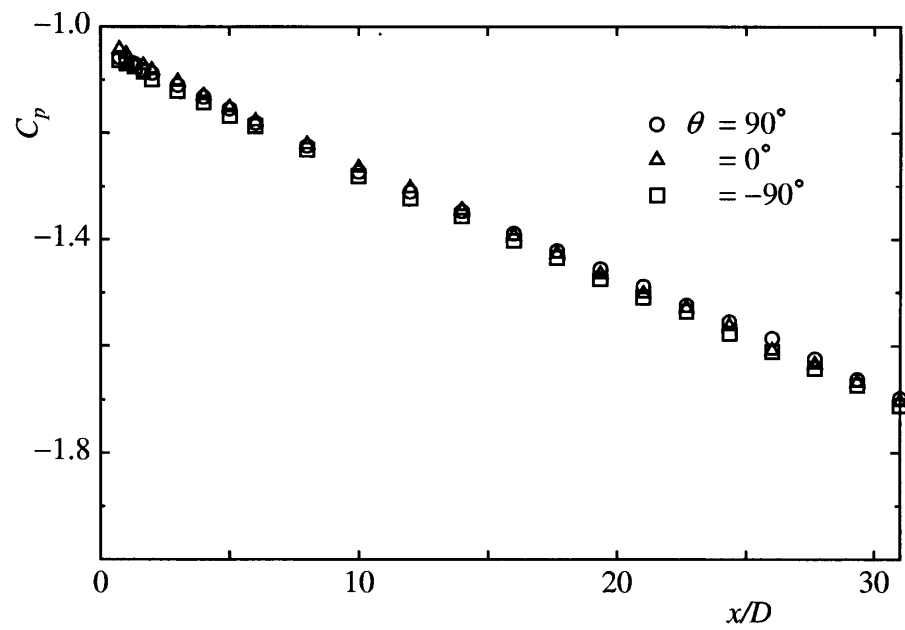
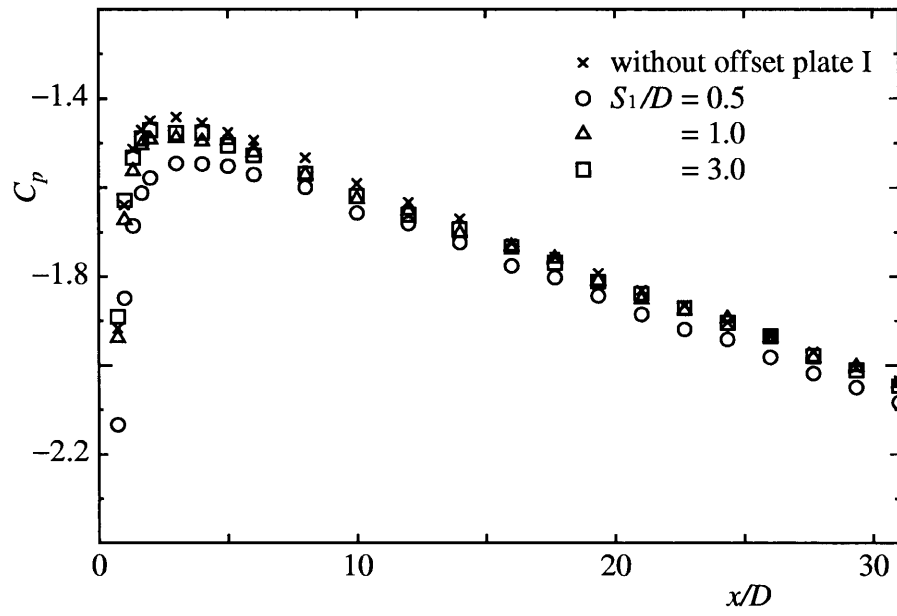
(a) $S_1/D = 0.5$ (b) $S_1/D = 1.0$

Fig. 4.3.1 Symmetry of pressure distribution (without small obstacle)

(a) $S_1/D = 0.5$ (b) $S_1/D = 1.0$ Fig. 4.3.2 Symmetry of pressure distribution ($H/D = 0.2$, L/D , $W/D = 0.1$)



(a) without small obstacle

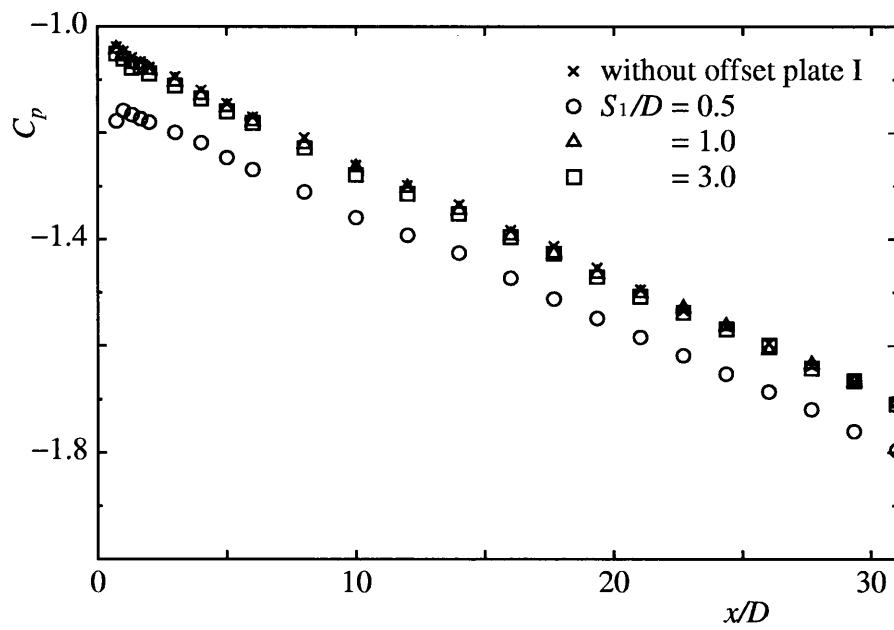
(b) $H/D = 0.2, L/D, W/D = 0.1$

Fig. 4.3.3 Pressure distribution (effect of one offset plate)

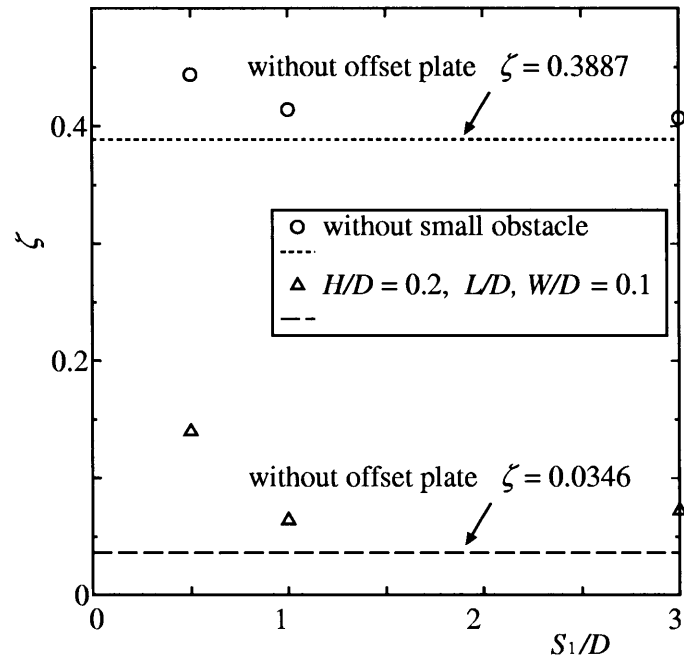


Fig. 4.3.4 Entrance loss

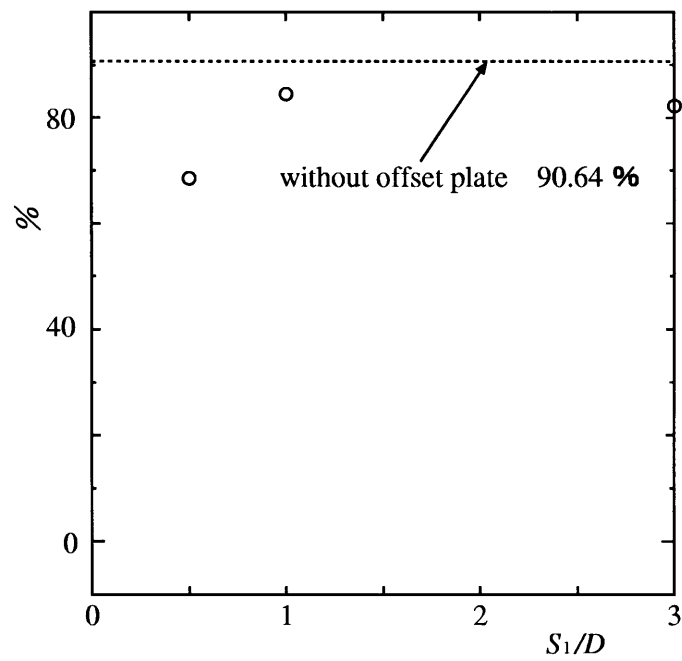
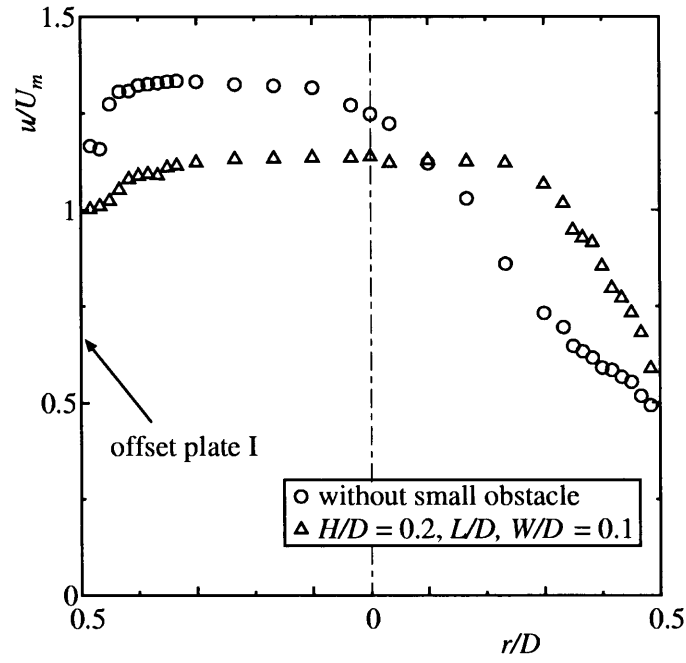
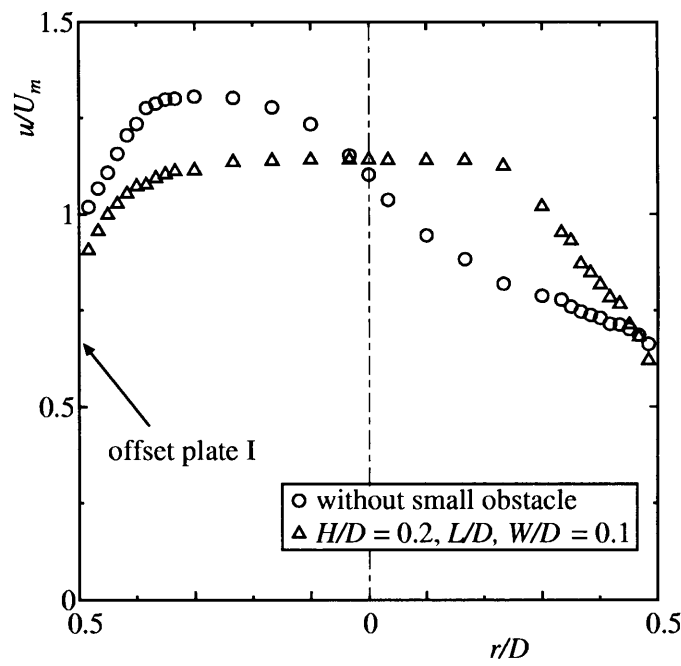
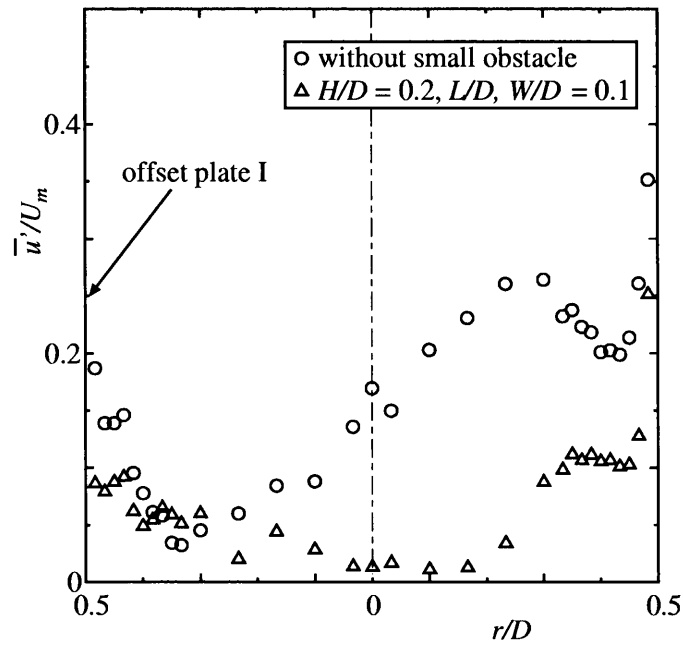
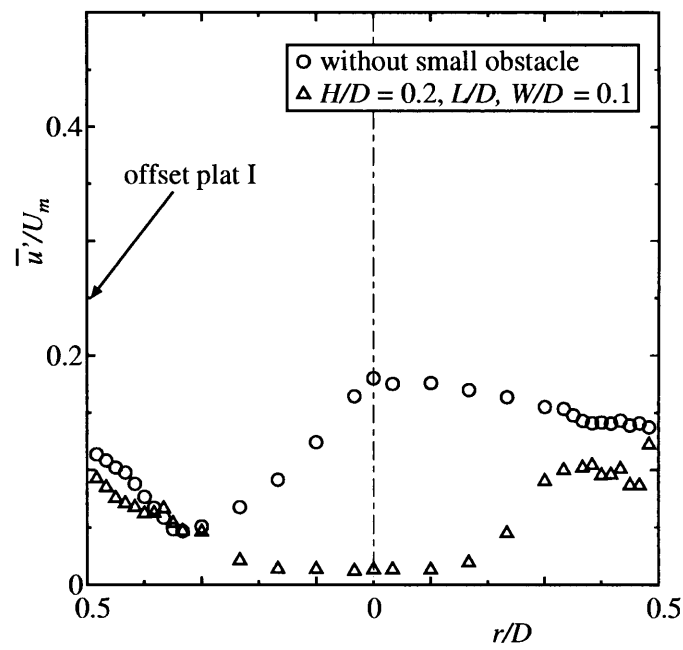
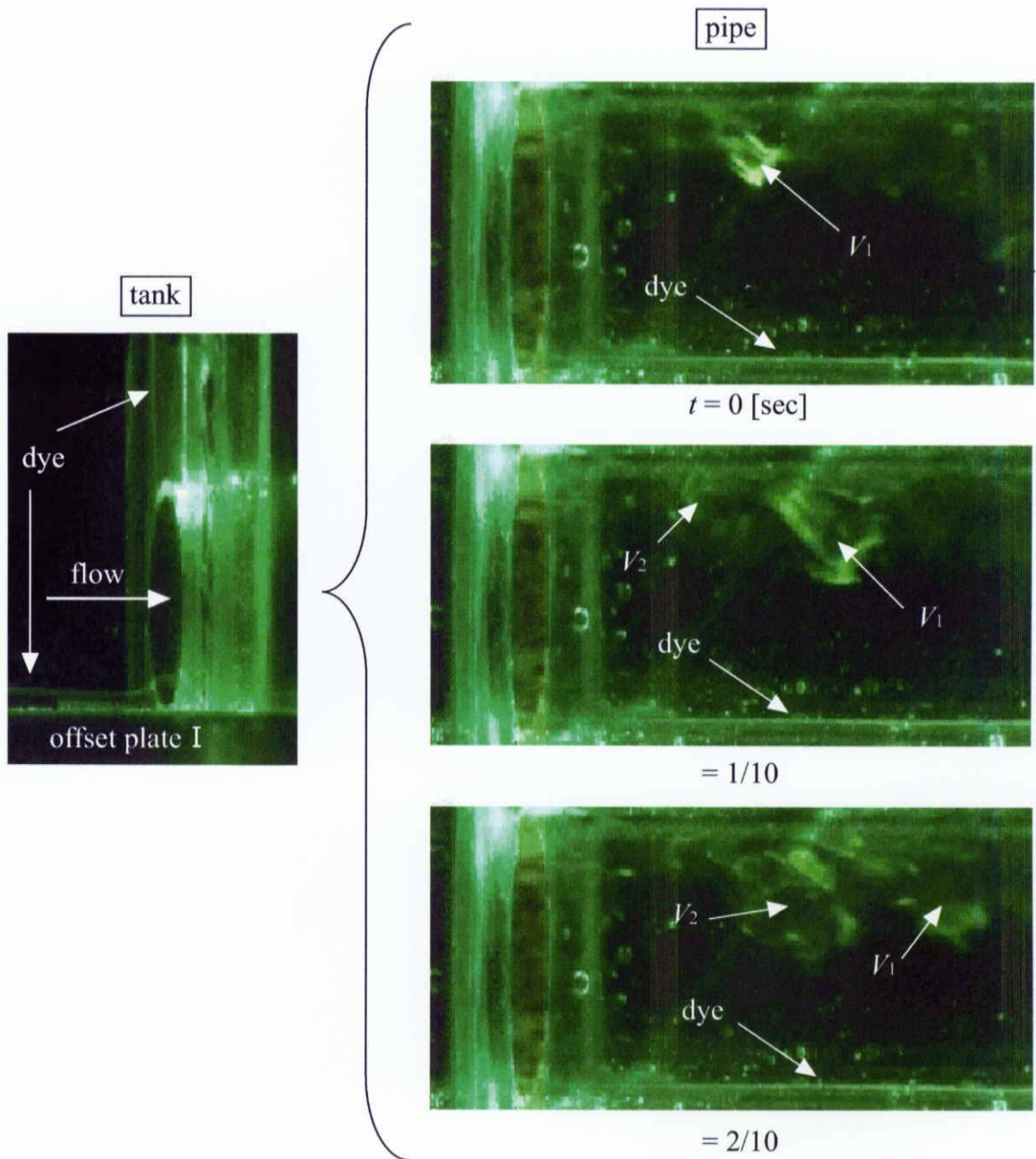


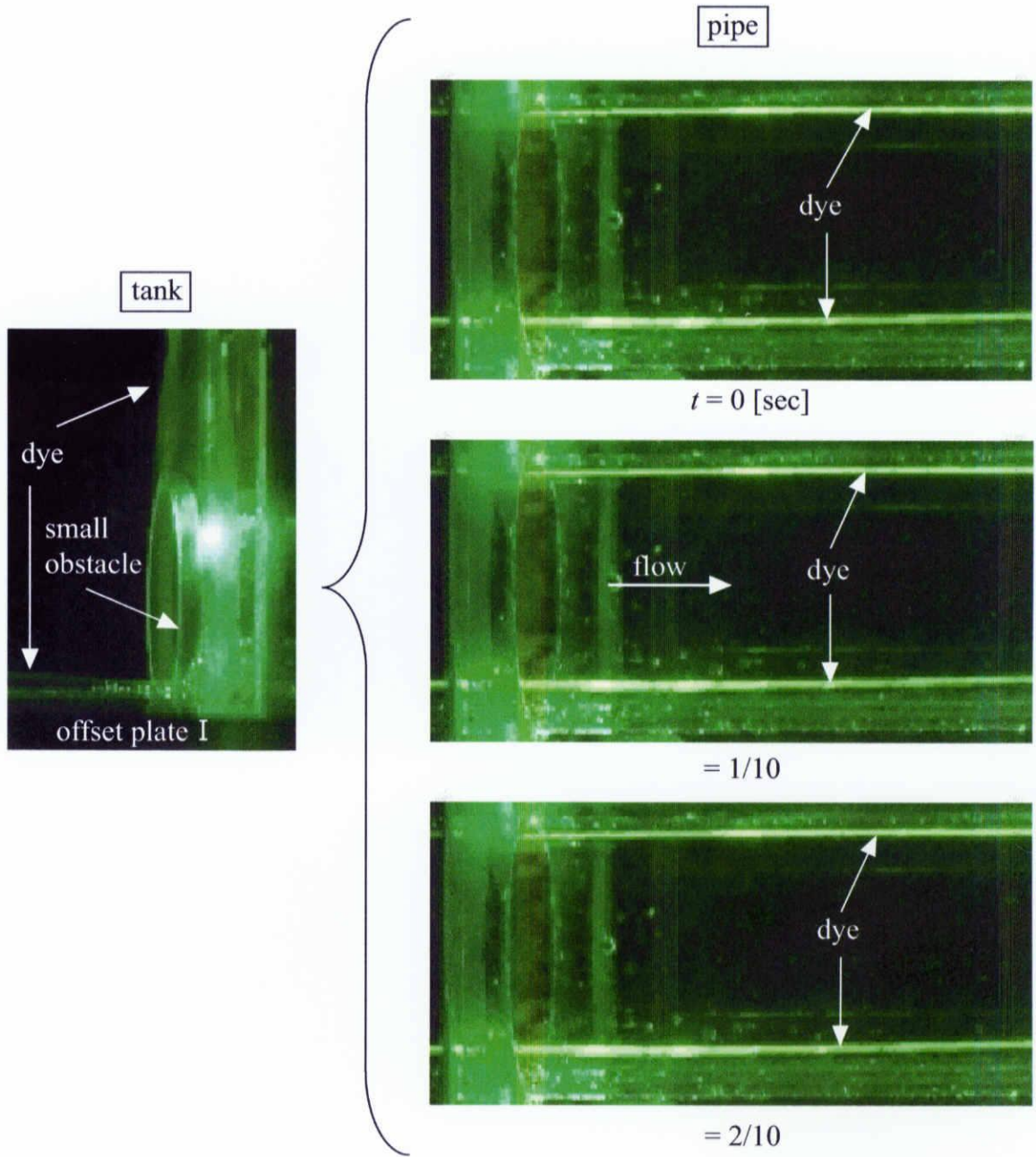
Fig. 4.3.5 Reduction ratio of entrance loss

(a) $x/D = 2.5$ (b) $x/D = 3.5$ Fig. 4.3.6 Velocity profile ($S_1/D = 0.5$)

(a) $x/D = 2.5$ (b) $x/D = 3.5$ Fig. 4.3.7 Turbulent intencity profile ($S_1/D = 0.5$)



(a) without small obstacle



(b) $H/D = 0.2$, L/D , $W/D = 0.1$

Fig. 4.3.8 Visualized flow pattern ($S_1/D = 0.5$, $Re = 3,000$)

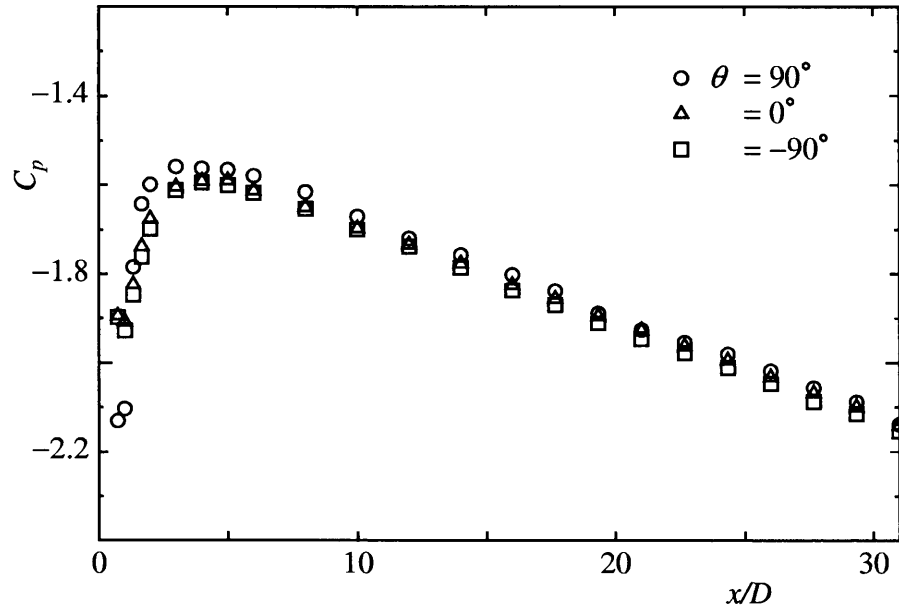
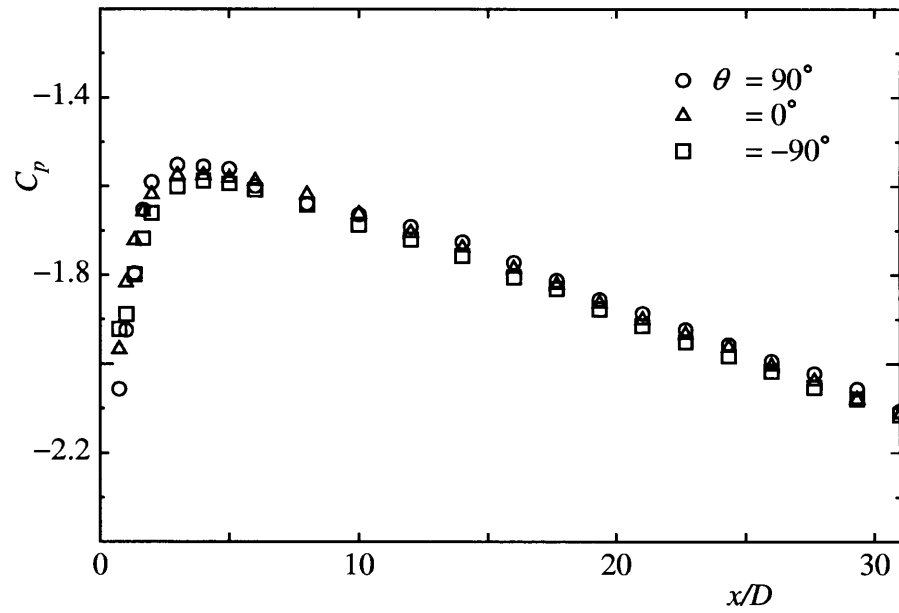
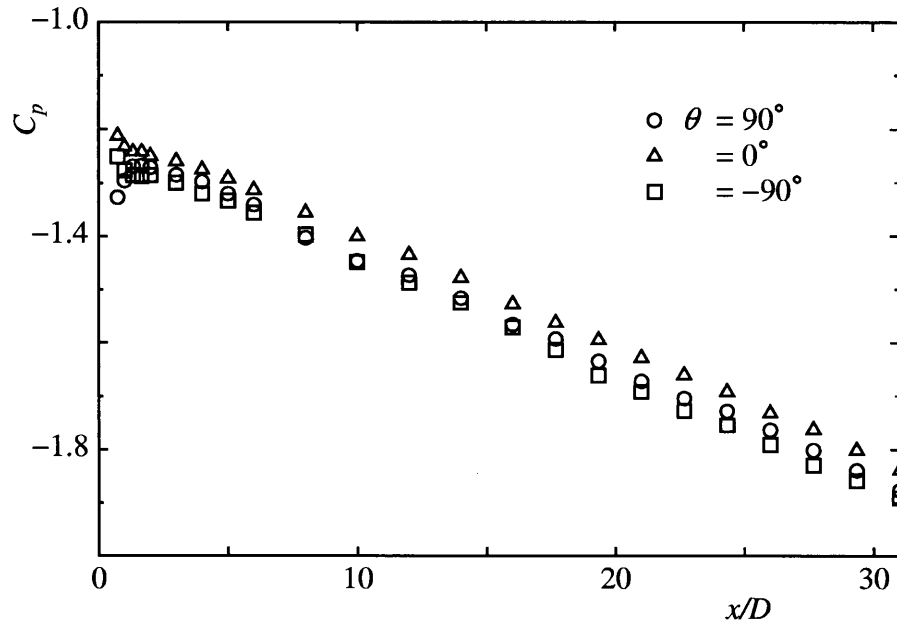
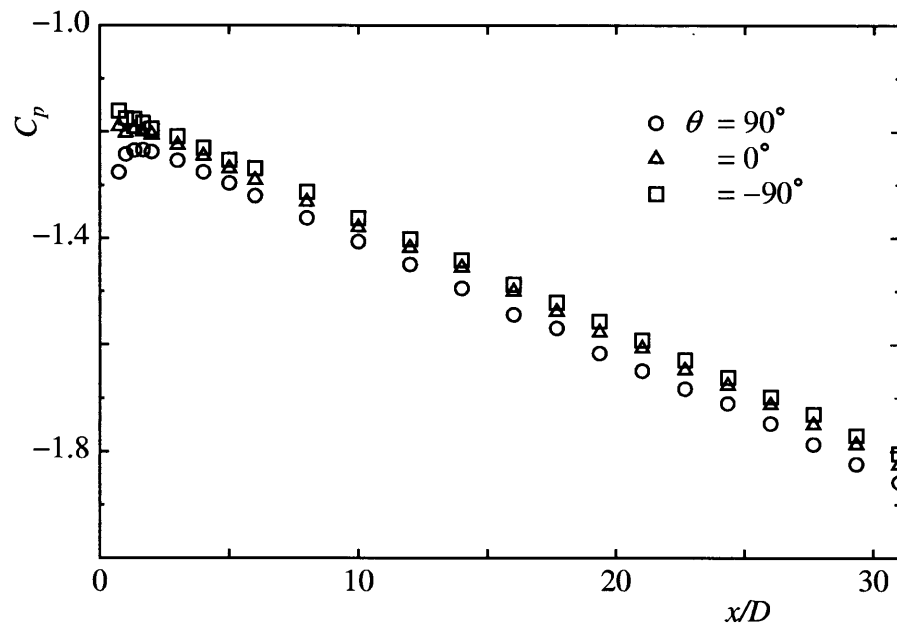
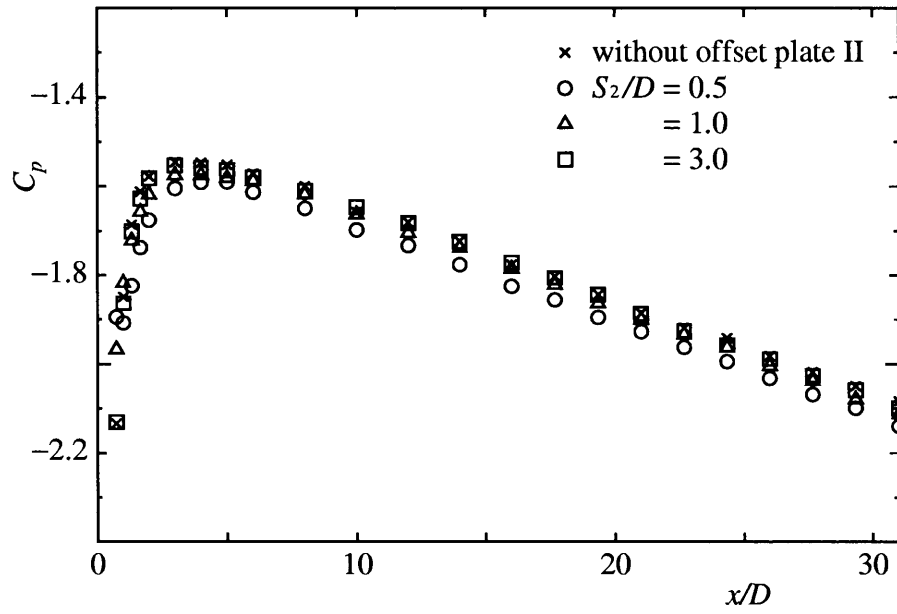
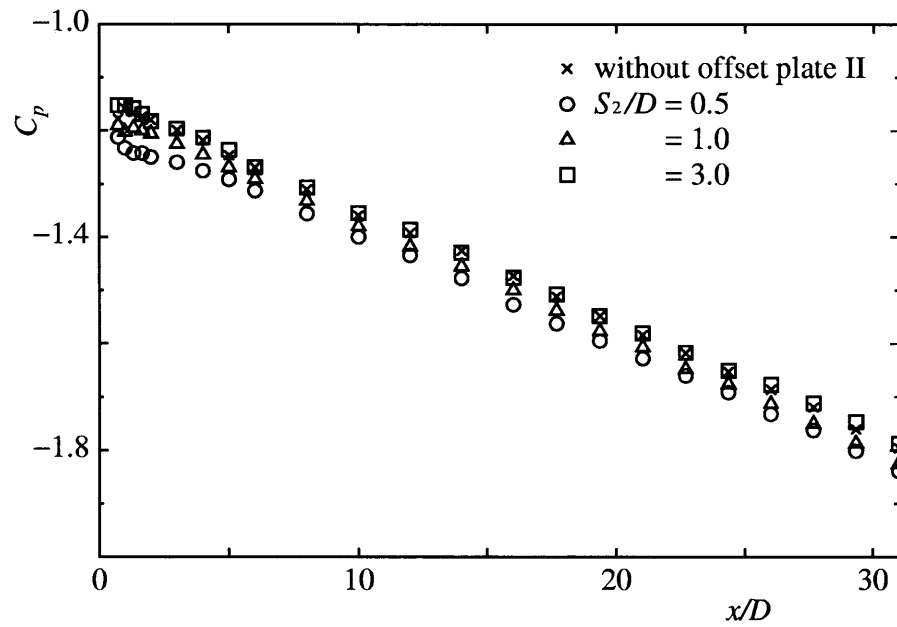
(a) $S_1/D, S_2/D = 0.5$ (b) $S_1/D = 0.5, S_2/D = 1.0$

Fig. 4.3.9 Symmetry of pressure distribution (without small obstacle)

(a) $S_1/D, S_2/D = 0.5$ (b) $S_1/D = 0.5, S_2/D = 1.0$ Fig. 4.3.10 Symmetry of pressure distribution ($H/D = 0.2, L/D, W/D = 0.1$)



(a) without small obstacle

(b) $H/D = 0.2$, $L/D, W/D = 0.1$ Fig. 4.3.11 Pressure distribution (effect of two offset plates, $S_1/D = 0.5$)

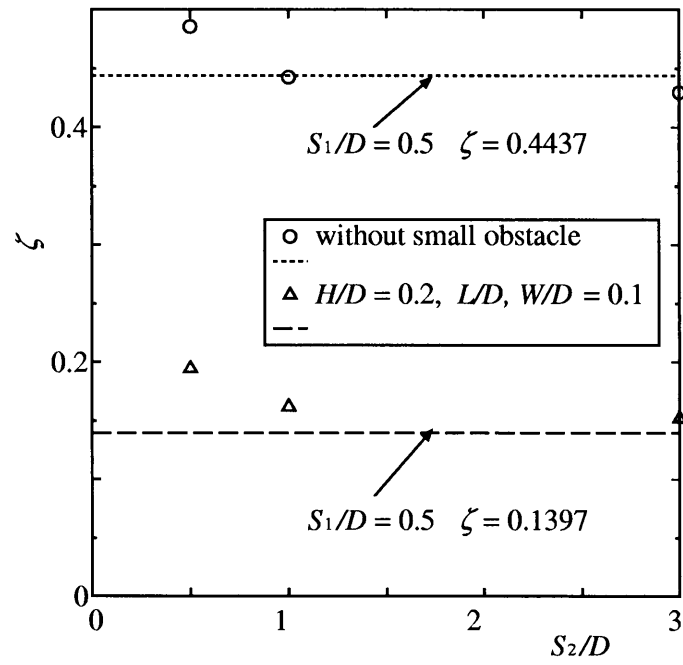


Fig. 4.3.12 Entrance loss ($S_1/D = 0.5$)

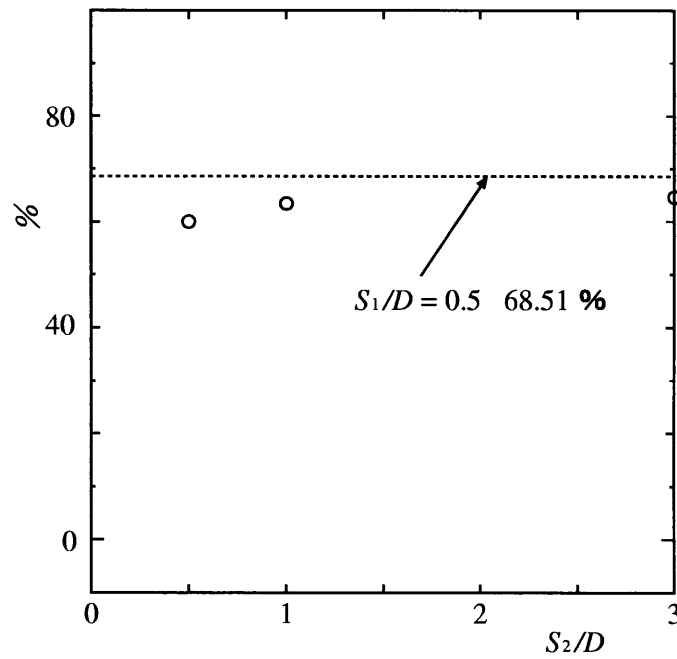
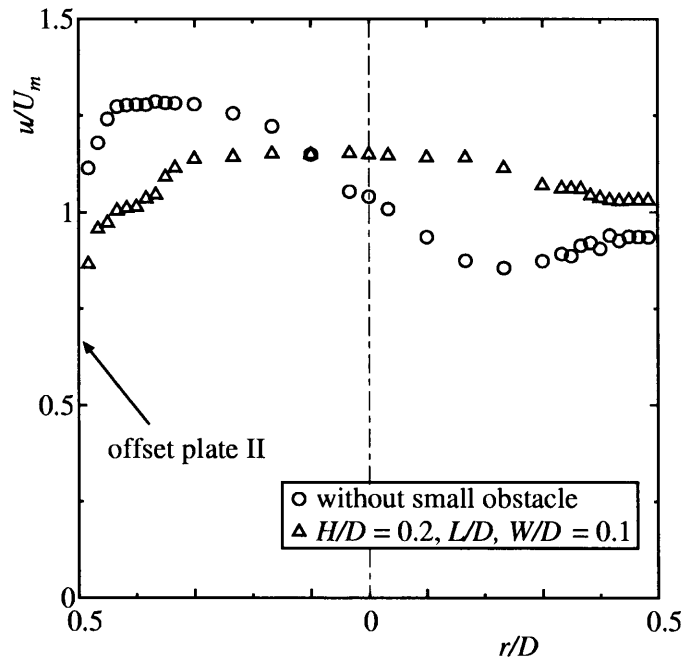
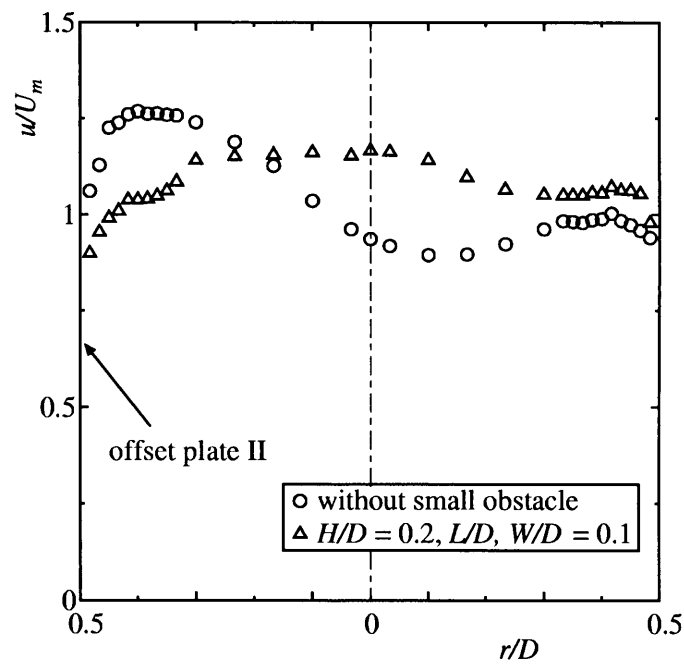
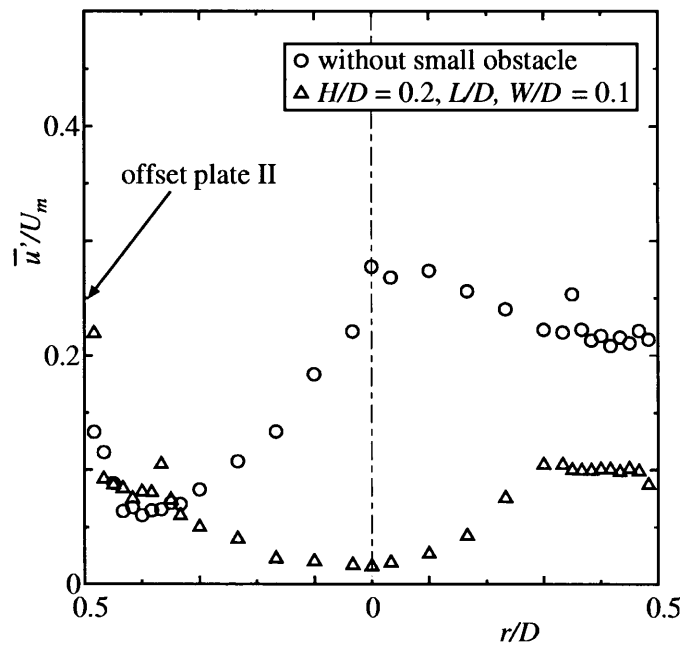
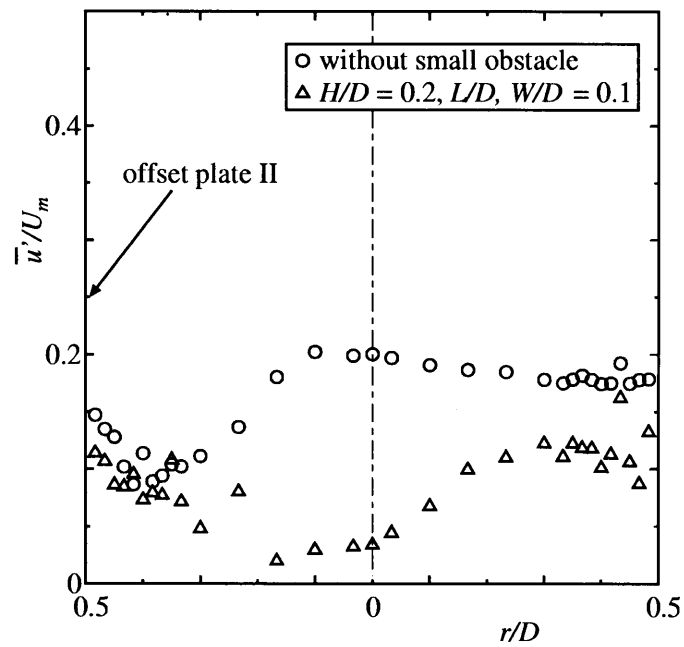
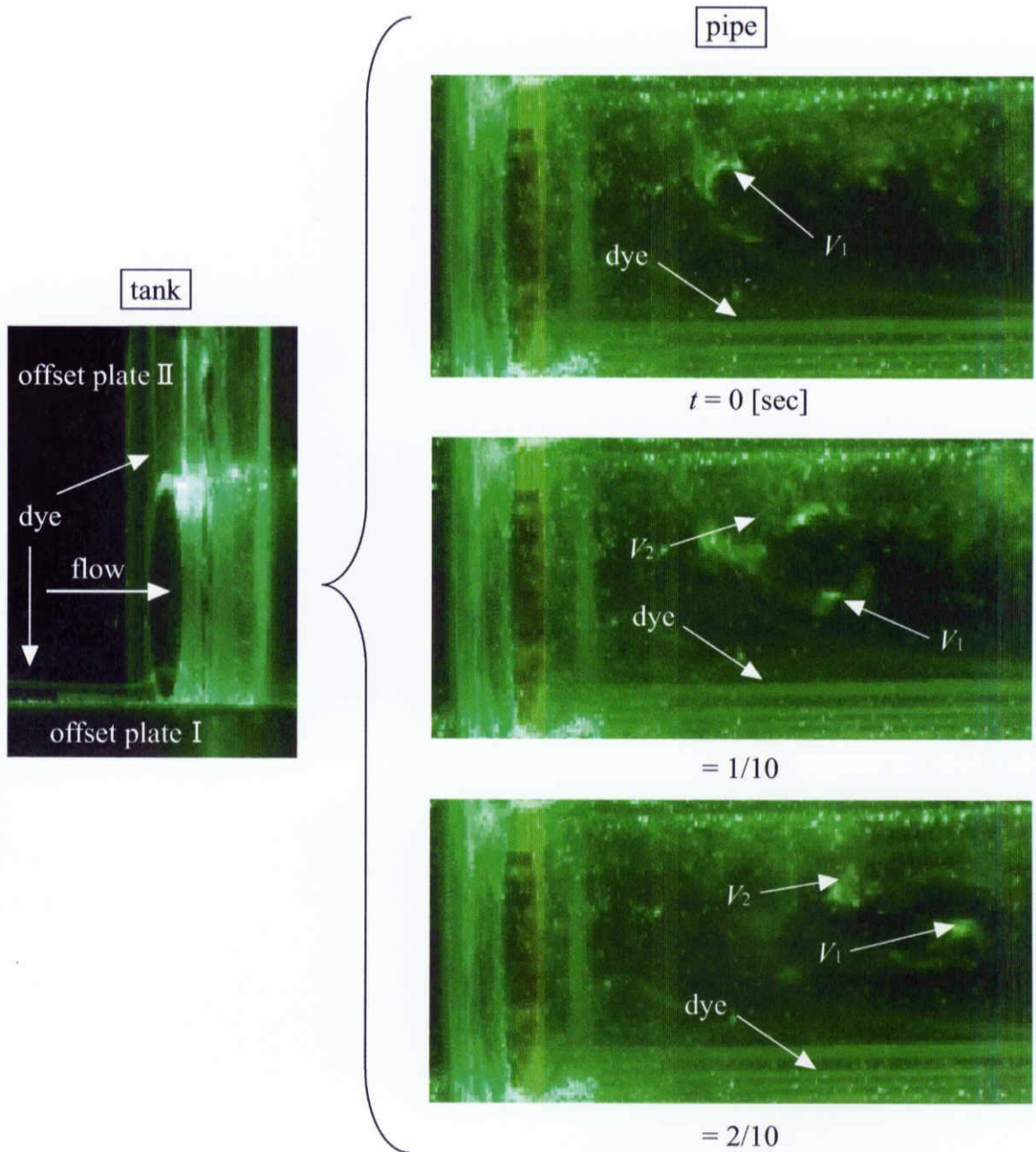


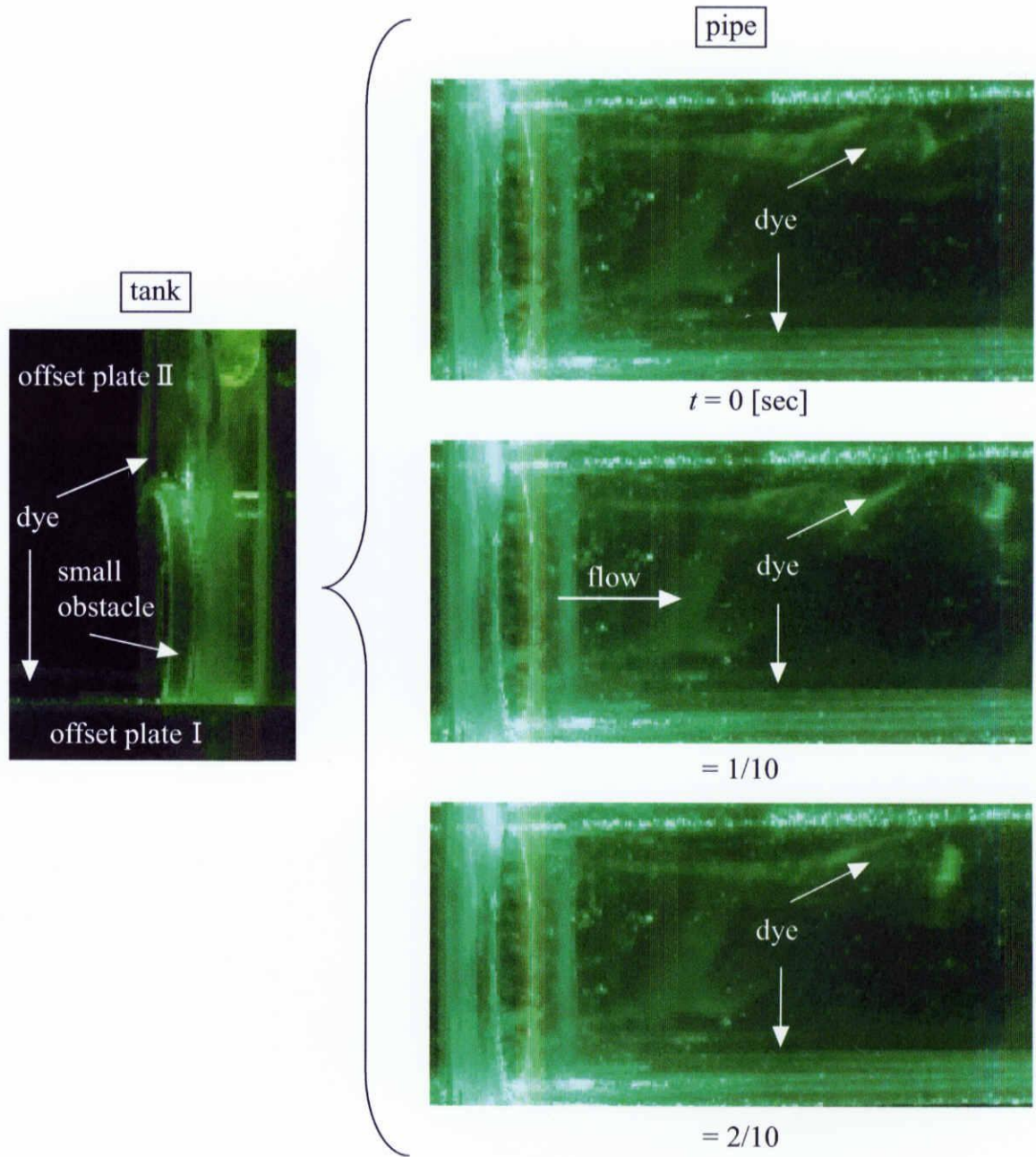
Fig. 4.3.13 Reduction ratio of entrance loss ($S_1/D = 0.5$)

(a) $x/D = 2.5$ (b) $x/D = 3.5$ Fig. 4.3.14 Velocity profile ($S_1/D, S_2/D = 0.5$)

(a) $x/D = 2.5$ (b) $x/D = 3.5$ Fig. 4.3.15 Turbulent intensity profile ($S_1/D, S_2/D = 0.5$)



(a) without small obstacle



(b) $H/D = 0.2$, L/D , $W/D = 0.1$

Fig. 4.3.16 Visualized flow pattern (S_1/D , $S_2/D = 0.5$, $Re = 3,000$)

第5章 結論

広い空間から管路へと流入する流れにおいて、水槽壁面にリング状の小物体を設置することで、管路入口部で生起されるはく離渦を抑制・制御でき、入口損失を減少することができた。また、小物体設置の流動特性への影響を明らかにした。さらに、オフセット平板の設置による入口損失への影響、小物体設置の効果を明らかにした。

主な結果は、以下のように要約される。

・小物体設置による効果

- (1) 圧力分布の測定から、小物体を設置することで、入口損失を減少することができる。小物体の高さにより最適設置位置は異なっており、 $H/D = 0.2, 0.1$ の場合 $L/H = 0.10, 0.05$ であり、高さが減少すると最適設置位置は入口角部に近づく。そして、これらの条件でそれぞれ約 90, 86 % 入口損失は減少する。
- (2) Re 数を変化させても、同様な小物体の効果が得られるが、小物体なしの場合の入口損失係数が低ければ、小物体設置による入口損失の減少率が高くなる。
- (3) 今回の実験における小物体の最適形状は、 $H/D = 0.2, W/D = 0.1$ の小物体を $L/D = 0.10$ に設置した場合であった。これは、入口部をベルマウスにした場合とほぼ同じ効果がある。
- (4) 速度場の測定や可視化観察により、小物体設置することで渦領域が減少・消滅する。結果、速度の減衰が大きく、乱れが増大する場合に渦領域は存在する。
- (5) CFD 2000 によって、小物体の設置による効果を定性的に評価できる。

・オフセット平板 I の影響

- (1) オフセット距離 $S_1/D \geq 1.0$ において、オフセット平板 I の設置による影響はほとんど受けず、小物体に設置による効果も十分に得られる。
- (2) オフセット距離 $S_1/D = 0.5$ の場合、入口損失は約 10 % 増大する。この場合、小物体の設置により入口損失は 69 % 減少する。

- (3) オフセット距離 $S_1/D = 0.5$ の場合, 流れが非対称になり渦領域が拡大する. その結果, 流路の有効断面積は減少し, 入口損失が増大する.

・オフセット平板 I, II の影響

- (1) オフセット距離 $S_2/D \geq 1.0$ において, オフセット平板 II の影響はほとんど受けず, オフセット平板が 1 枚の場合と同様な小物体に設置による効果が得られる.
- (2) オフセット距離 $S_2/D = 0.5$ の場合, オフセット平板 1 枚の場合に比べ, 入口損失は約 9 % 増大する. この場合, 小物体の設置により入口損失は 60 % 減少する.
- (3) オフセット距離 $S_2/D = 0.5$ の場合, 渦領域がさらに拡大し, 流路の有効断面積は減少し, 入口損失が増大する.

付 録 A

ここでは付録として本編中で省略した図と表を掲載する．図と表の内容は以下に示した通りである．

- ・ $H/D = 0.2$ の圧力分布 ($Re = 3.0, 7.0 \times 10^4$) [図 A.1, A.2, 表 A.1, A.2]
- ・ $H/D = 0.1$ の圧力分布 ($Re = 3.0, 7.0 \times 10^4$) [図 A.3, A.4, 表 A.3, A.4]
- ・ H/D を変化させた場合の入口損失と減少率 ($Re = 3.0, 7.0 \times 10^4$) [図 A.5 ~ A.8]
- ・ W/D を変化させた場合の圧力分布 ($Re = 3.0, 7.0 \times 10^4$) [図 A.9, A.10, 表 A.5, A.6]
- ・ W/D を変化させた場合の入口損失と減少率 ($Re = 3.0, 7.0 \times 10^4$) [図 A.11 ~ A.14]
- ・ 4.3 節の圧力分布における圧力勾配の一覧表 [表 A.7, A.8]

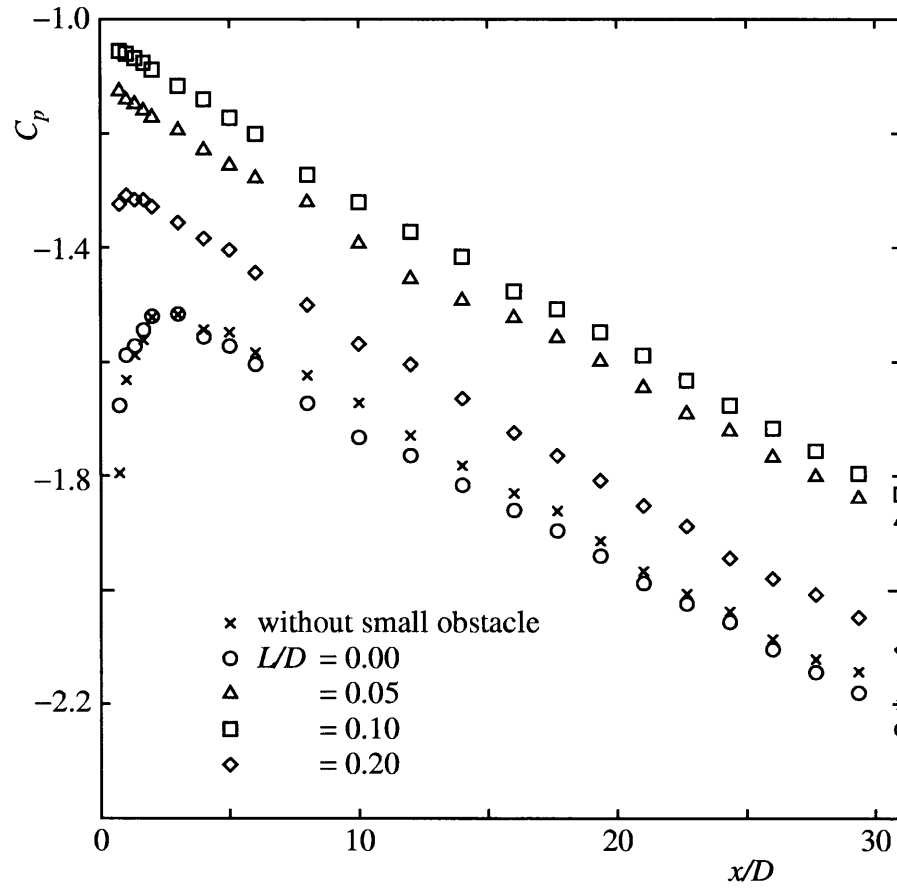


Fig. A.1 Pressure distribution ($H/D = 0.2$, $Re = 3.0 \times 10^4$)

Table A.1 Pressure gradient $\partial C_p / \partial(x/D)$ in straight pipe ($H/D = 0.2$, $Re = 3.0 \times 10^4$)

			pressure gradient
Brasius			-0.0240
Exp.	L/D	0.00	-0.0250
		0.05	-0.0239
		0.10	-0.0246
		0.20	-0.0248

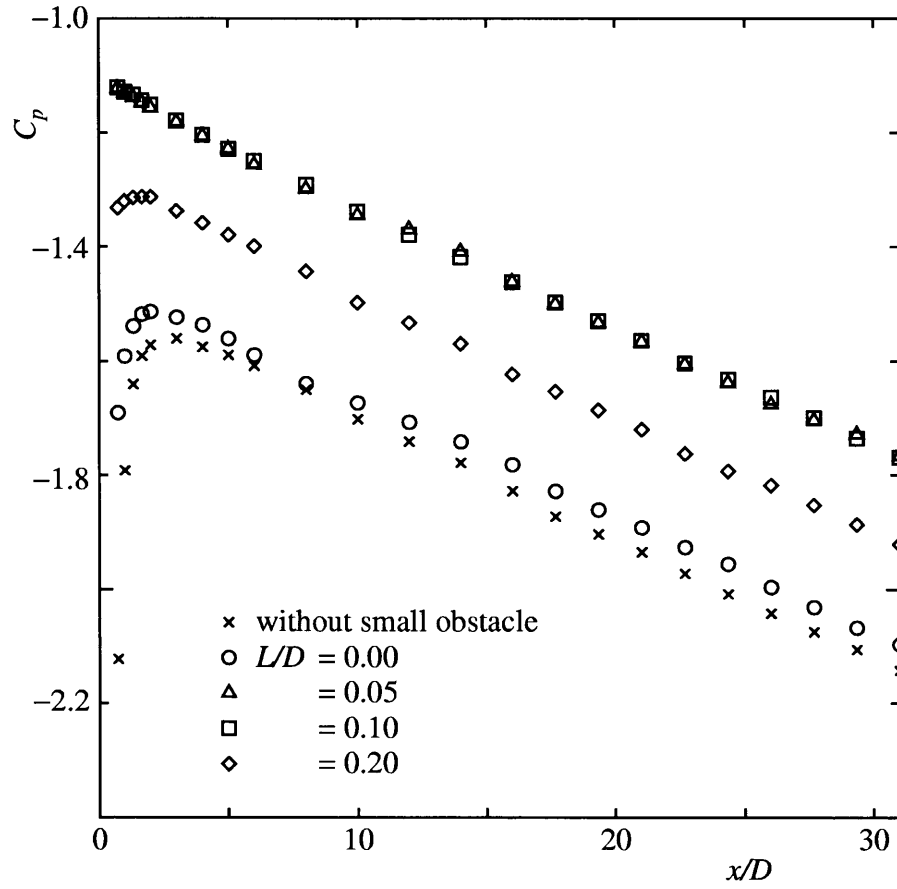


Fig. A.2 Pressure distribution ($H/D = 0.2$, $Re = 7.0 \times 10^4$)

Table A.2 Pressure gradient $\partial C_p / \partial (x/D)$ in straight pipe ($H/D = 0.2$, $Re = 7.0 \times 10^4$)

			pressure gradient
Brasius			-0.0195
Exp.	L/D	0.00	-0.0204
		0.05	-0.0199
		0.10	-0.0203
		0.20	-0.0200

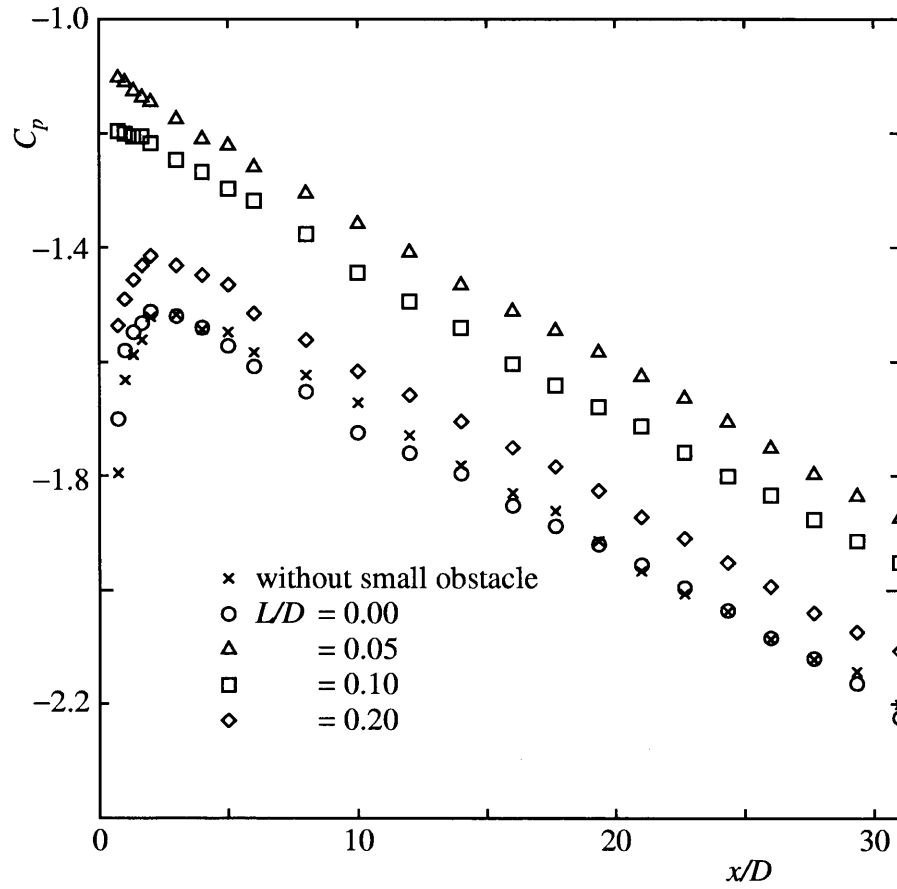


Fig. A.3 Pressure distribution ($H/D = 0.1$, $Re = 3.0 \times 10^4$)

Table A.3 Pressure gradient $\partial C_p / \partial(x/D)$ in straight pipe ($H/D = 0.1$, $Re = 3.0 \times 10^4$)

			pressure gradient
Brasius			-0.0240
Exp.	L/D	0.00	-0.0249
		0.05	-0.0250
		0.10	-0.0235
		0.20	-0.0246

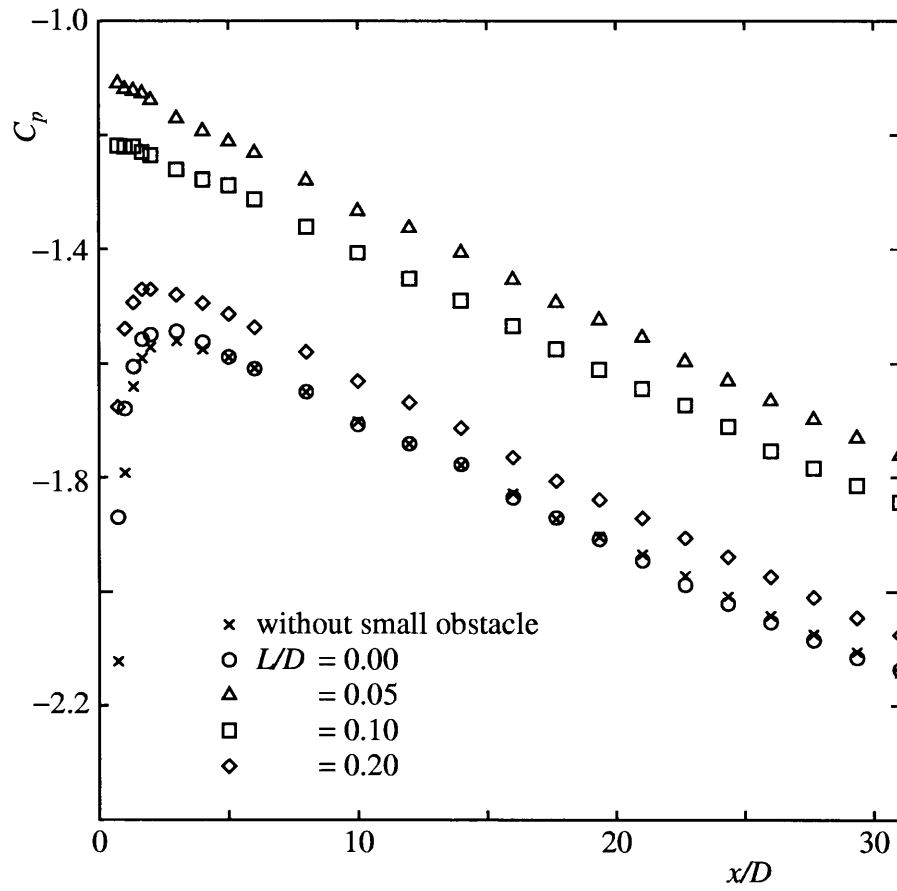


Fig. A.4 Pressure distribution ($H/D = 0.1$, $Re = 7.0 \times 10^4$)

Table A.4 Pressure gradient $\partial C_p / \partial(x/D)$ in straight pipe ($H/D = 0.1$, $Re = 7.0 \times 10^4$)

			pressure gradient
Brasius			-0.0195
Exp.	L/D	0.00	-0.0203
		0.05	-0.0204
		0.10	-0.0204
		0.20	-0.0204

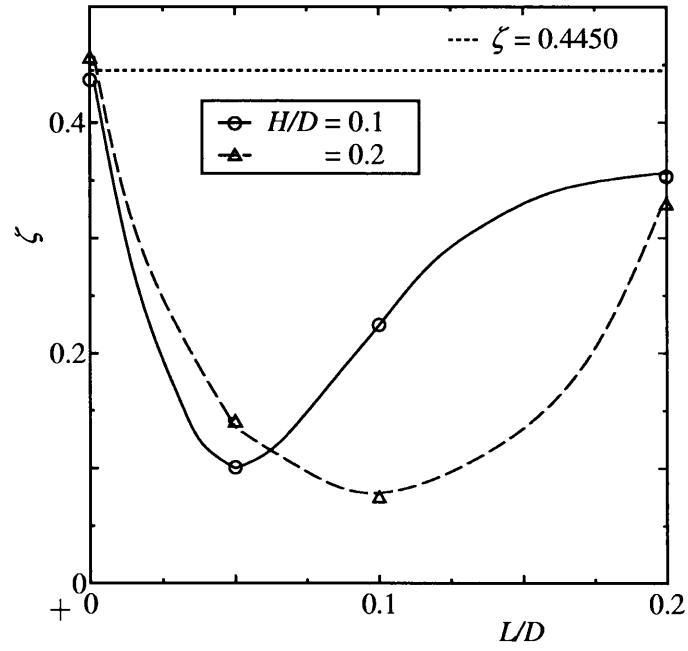


Fig. A.5 Entrance loss ($\text{Re} = 3.0 \times 10^4$)

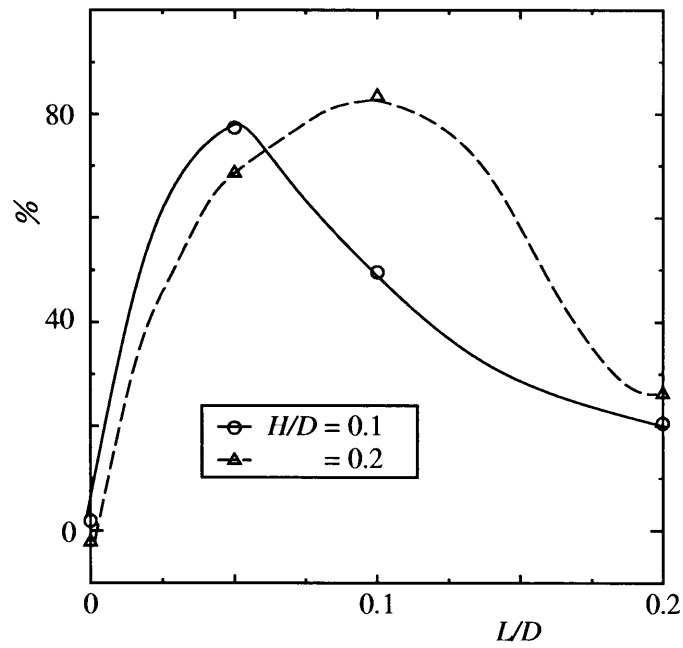


Fig. A.6 Reduction ratio of entrance loss ($\text{Re} = 3.0 \times 10^4$)

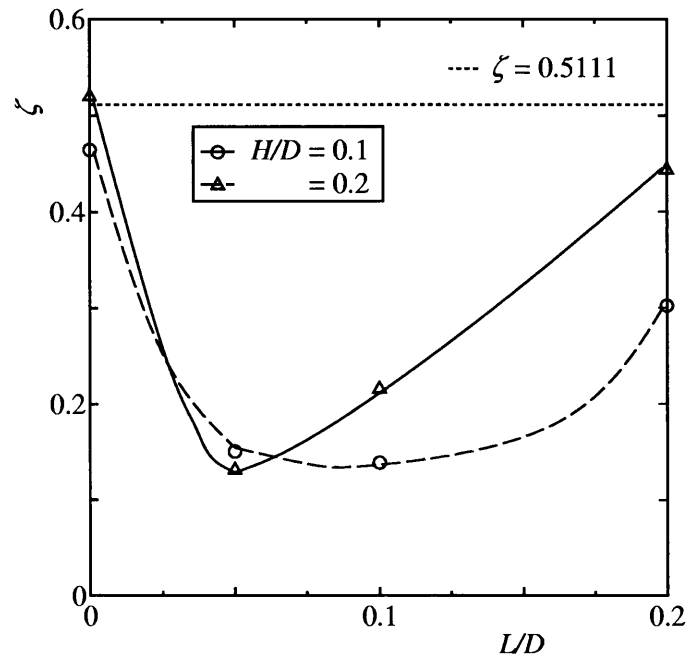


Fig. A.7 Entrance loss ($\text{Re} = 7.0 \times 10^4$)

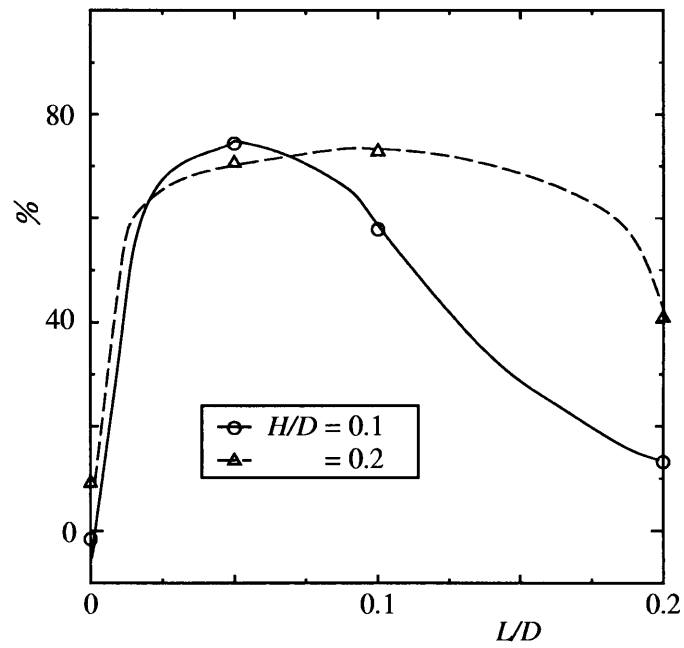


Fig. A.8 Reduction ratio of entrance loss ($\text{Re} = 7.0 \times 10^4$)

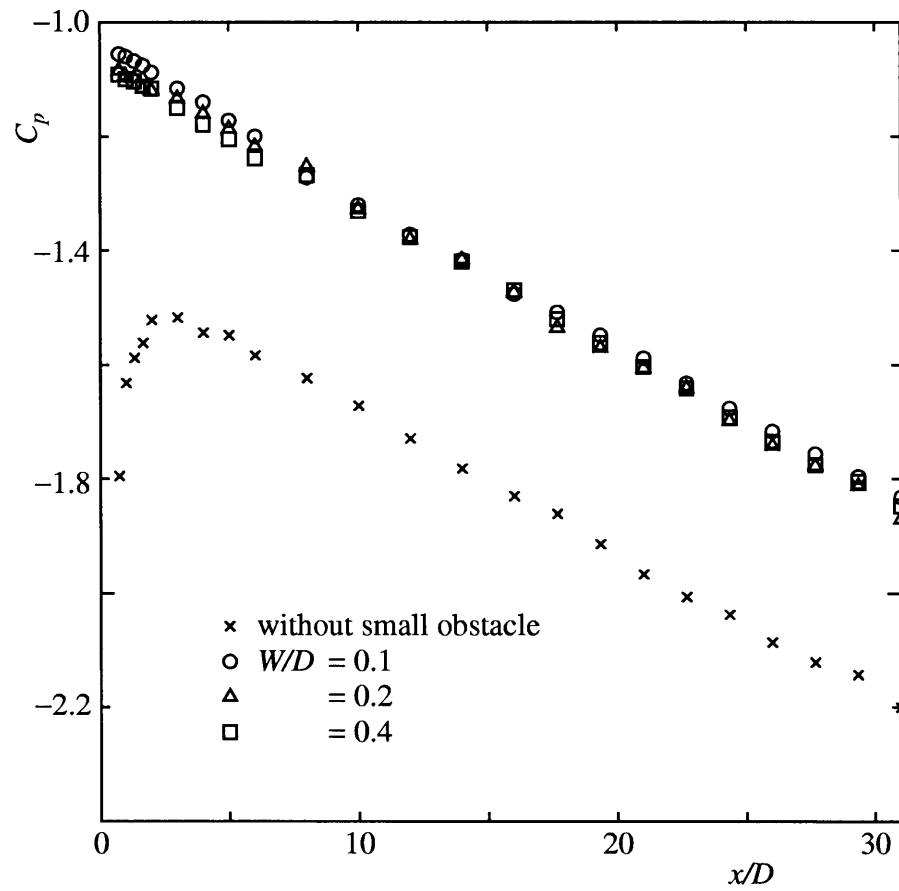


Fig. A.9 Pressure distribution ($H/D = 0.2$, $L/D = 0.1$, $\text{Re} = 3.0 \times 10^4$)

Table A.5 Pressure gradient $\partial C_p / \partial (x/D)$ in straight pipe

($H/D = 0.2$, $L/D = 0.1$, $\text{Re} = 3.0 \times 10^4$)

			pressure gradient
Brasius			-0.0240
Exp.	W/D	0.1	-0.0246
		0.2	-0.0251
		0.4	-0.0248

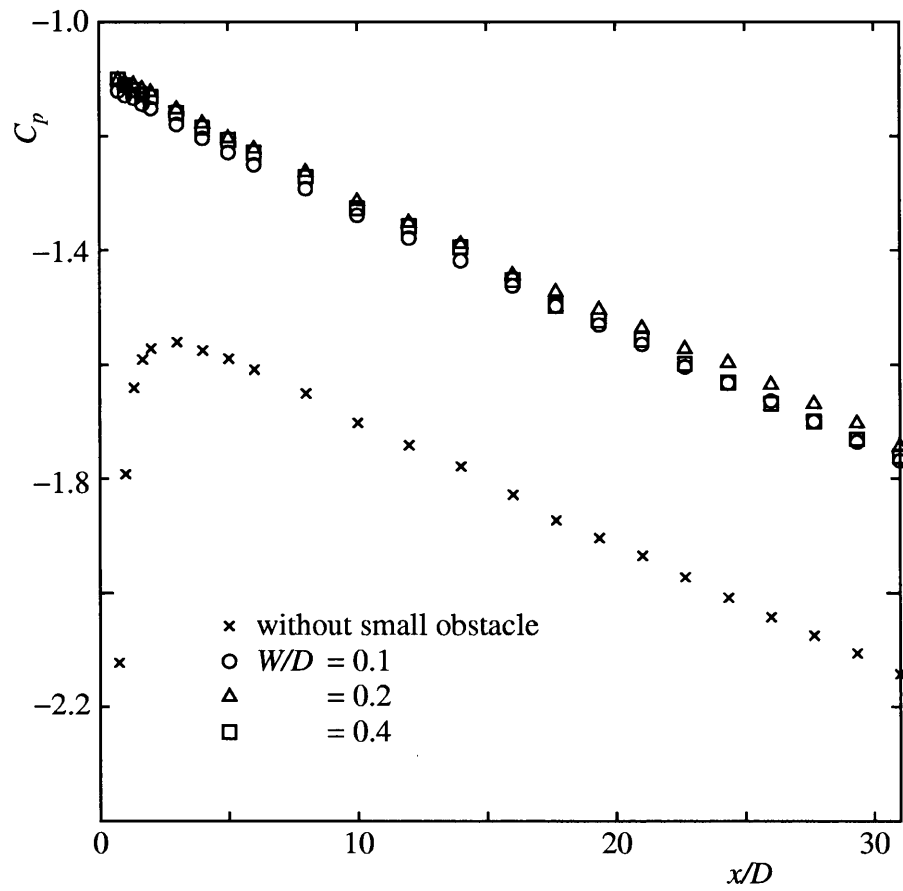


Fig. A.10 Pressure distribution ($H/D = 0.2$, $L/D = 0.1$, $Re = 7.0 \times 10^4$)

Table A.6 Pressure gradient $\partial C_p / \partial (x/D)$ in straight pipe

($H/D = 0.2$, $L/D = 0.1$, $Re = 7.0 \times 10^4$)

			pressure gradient
Brasius			-0.0195
Exp.	W/D	0.1	-0.0203
		0.2	-0.0201
		0.4	-0.0204

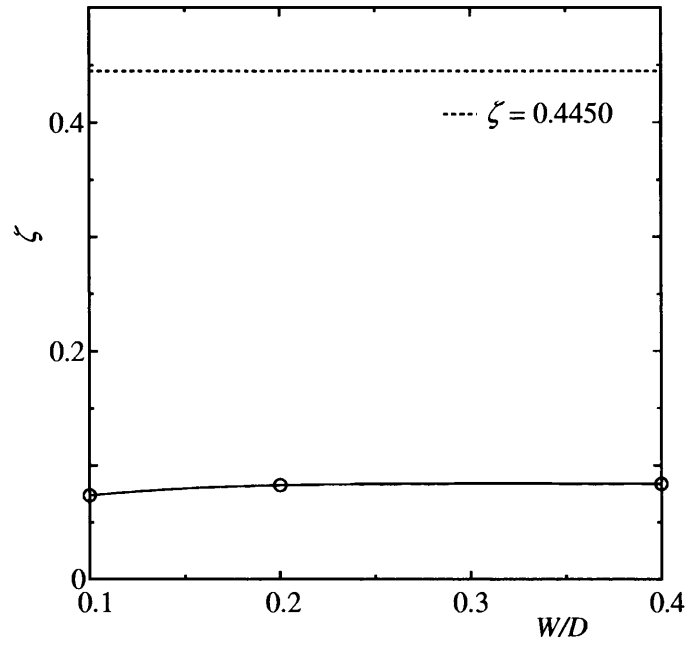


Fig. A.11 Entrance loss ($H/D = 0.2$, $L/D = 0.1$, $\text{Re} = 3.0 \times 10^4$)

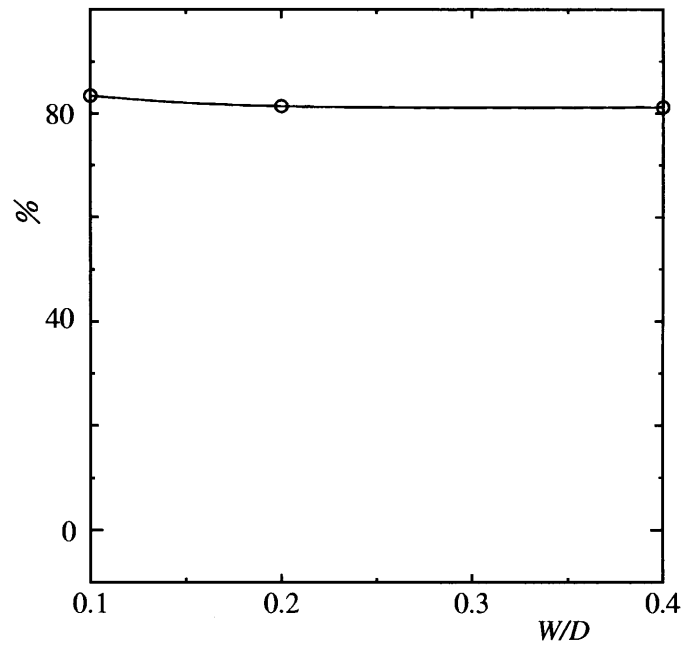


Fig. A.12 Reduction ratio of entrance loss ($H/D = 0.2$, $L/D = 0.1$, $\text{Re} = 3.0 \times 10^4$)

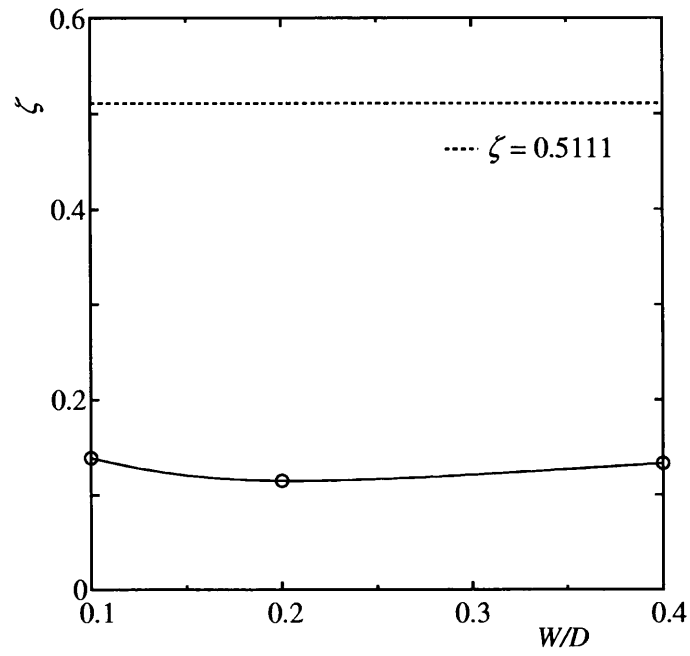


Fig. A.13 Entrance loss ($H/D = 0.2$, $L/D = 0.1$, $\text{Re} = 7.0 \times 10^4$)

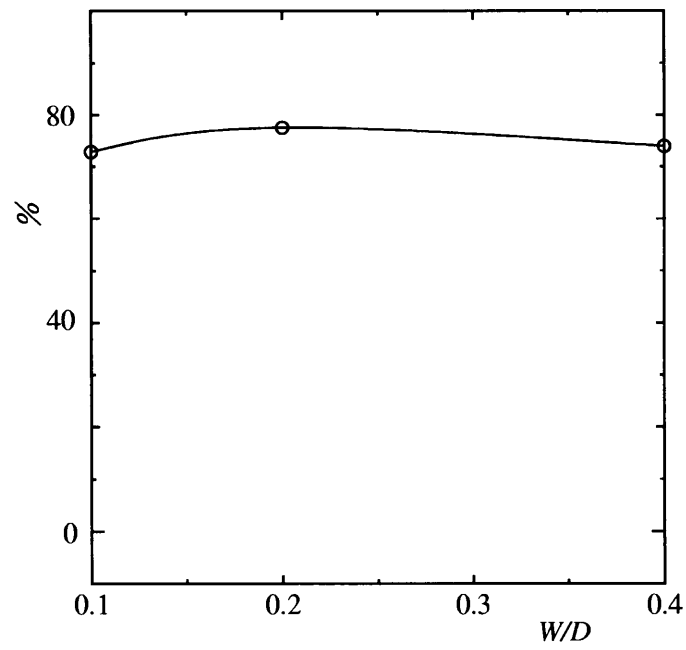


Fig. A.14 Reduction ratio of entrance loss ($H/D = 0.2$, $L/D = 0.1$, $\text{Re} = 7.0 \times 10^4$)

Table A.7 Pressure gradient $\partial C_p / \partial(x/D)$ in straight pipe ($\text{Re} = 5.0 \times 10^4$)

(a) without small obstacle

			pressure gradient
Brasius			-0.0212
Exp.	$S_1/D = 0.5$	$\theta = 90[^\circ]$	-0.0204
		0	-0.0207
		-90	-0.0205
	1.0	90	-0.0203
		0	-0.0202
		-90	-0.0205
	3.0	0	-0.0206

(b) $H/D = 0.2, L/D, W/D = 0.1$

			pressure gradient
Brasius			-0.0212
Exp.	$S_1/D = 0.5$	$\theta = 90[^\circ]$	-0.0207
		0	-0.0211
		-90	-0.0206
	1.0	90	-0.0207
		0	-0.0206
		-90	-0.0205
	3.0	0	-0.0204

Table A.8 Pressure gradient $\partial C_p / \partial(x/D)$ in straight pipe ($\text{Re} = 5.0 \times 10^4$)(a) without small obstacle ($S_1/D = 0.5$)

			pressure gradient
Brasius			-0.0212
Exp.	$S_2/D = 0.5$	$\theta = 90[^\circ]$	-0.0212
		0	-0.0210
		-90	-0.0210
	1.0	90	-0.0212
		0	-0.0216
		-90	-0.0208
	3.0	0	-0.0216

(b) $H/D = 0.2, L/D, W/D = 0.1$ ($S_1/D = 0.5$)

			pressure gradient
Brasius			-0.0212
Exp.	$S_2/D = 0.5$	$\theta = 90[^\circ]$	-0.0207
		0	-0.0207
		-90	-0.0204
	1.0	90	-0.0212
		0	-0.0213
		-90	-0.0212
	3.0	0	-0.0204

参考文献

- [1] Tropea, C.D. and Gackstatter, R., The Flow Over Two-dimensional Surface-Mounted Obstacle at Low Reynolds Numbers, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, 107-4 (1989), 489-494.
- [2] K. Isomoto and S. Honami, The Effect of Inlet Turbulence Intensity on the Reattachment Process Over a Backward-Facing, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, March, Vol. 111, (1989), 87-92.
- [3] 社河内敏彦・安藤俊剛・中野公, 前向きステップ面上の流動特性とはく離流れの抑制・制御, 日本機械学会論文集 (B 編), 65 巻 637 号, (1999-9), 72 - 78.
- [4] 安藤俊剛・社河内敏彦・宮田啓吾, 急縮小円管の流動抵抗低減に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編), 70 巻 691 号, (2004-3), 88 - 94.
- [5] 安藤俊剛・社河内敏彦・山本寛之・辻本公一, 急拡大円管内のはく離流れの制御および流動抵抗低減に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編), 79 巻 600 号, (2006-7), 68 - 90
- [6] 日本機械学会編, 機械工学便覧 (基礎編 流体力学), 丸善, (2001).
- [7] ROBERT D. BLEVINS, APPLIED FLUID DYNAMICS HANDBOOK, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY, (1984),
- [8] 倉田光雄・森澤卓矢・平河浩司・安富善三郎・木田輝彦, エッジの小さな切落としによる物体の抵抗の低減, 日本機械学会論文集 (B 編), 64 巻 618 号, (1998-2), pp.397 - 404.
- [9] 香月正司・中山顕, 熱流動の数値シミュレーション, 森北出版, (1994)
- [10] 越塚誠一, 数値流体力学, 培風館, (2002)
- [11] 宮井善弘・木田輝彦・中谷仁志, 水力学, 森北出版, (2002).

- [12] 伊藤恵介, 急縮小流路内角部からのはく離流れ (非定常特性), 三重大学大学院工学研究科 平成 11 年度修士論文.
- [13] 宮田啓吾, 急縮小円管流路の流動抵抗減少に関する研究, 三重大学大学院工学研究科 平成 13 年度修士論文.
- [14] 山本寛之, 急拡大管内の流れと制御, 三重大学工学部機械工学科 平成 16 年度卒業論文

謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始懇切丁寧な御指導、御助言を賜りました社河内敏彦教授、辻本公一助教授、ならびに安藤俊剛助教に深く感謝の意をあらわすとともに厚く御礼申し上げます。

実験装置を制作するにあたりご尽力下さった実習工場の皆様に感謝致します。また、本論文作成にあたり多大な御協力をいただいた安藤俊剛助教、本研究遂行にあたり日々実験を共に協力していただいた平成 18 年度 学部生 岡本悠佑君に重ねて御礼申し上げますと共に、流動現象学研究室の皆様に深く感謝いたします。

最後に、本論文作成にあたり、多大なる御協力をいただきました社河内敏彦教授に重ねて御礼申し上げます。