

乱流プロモータによる管継ぎ手部 流体混合促進効果に関する基礎研究 (平成15年度)

(先行基礎工学研究に関する共同研究報告書)

2004年7月



愛媛大学 工学部
核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター

本資料は、先行基礎工学分野に関する研究として、愛媛大学と核燃料サイクル開発機構との共同研究として作成されたものです。

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

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

愛媛大学 (Ehime University)

2004

乱流プロモータによる管継ぎ手部
流体混合促進効果に関する基礎研究
(平成15年度)
(先行基礎工学研究報告)

長尾 昭宏^{*1}、檜原 秀樹^{*1}、
越智 順治^{*1}、村松 壽晴^{*2}

要 旨

T 字形合流管の管継手部に乱流プロモータを設置して、流れの可視化および LDV による流速測定を行い、合流部の流れの流体混合の特性に及ぼす乱流プロモータの効果について調べた結果、以下のような知見を得た。

- ①乱流プロモータを設置すると、プロモータを設置しない場合に比べて、アーチ渦はより上流側で形成され、高速で下流方向へ移送される。この傾向はプロモータの高さが高いほどより顕著となる。
- ②乱流プロモータを設置すると、断面内に強い二次流れが誘起されるため、運動量の拡散はより進む。この傾向はプロモータの高さが高いほどより顕著となる。
- ③乱流プロモータの設置により、合流部に流れは+x 側に大きく偏り、この偏りはかなり下流まで残る。この傾向はプロモータの高さが高く、かつ枝管の流速が速いほどより顕著となる。
- ④速度変動は合流部直後の渦が生成される付近で見られ始め、渦の中心付近で大きな値をとる。また、主管内への枝管の流入の際に、主管の枝管側で速度変動は大きくなるが、乱流プロモータを設置すると、この速度変動は抑えられる。
- ⑤速度変動は下流に流下するにつれて渦の成長とともに増大し、 $z/D_m=2$ 付近で最大値を示した後、さらに下流では渦の崩壊とともに小さくなる。また、速度変動は、乱流プロモータを設置しない場合には、下流方向に減衰するが、乱流プロモータを設置した場合には、かなり下流まで残る。

*1 愛媛大学 工学部

*2 核燃料サイクル開発機構

Study on Effects of Turbulence Promoter on Fluid Mixing in T-junction Piping System

Akihiro NAGAO*, Hideki HIBARA*,
Junji OCHI*, Toshiharu MURAMATSU**

Abstract

Flows in T-junction piping system with turbulence promoter have been investigated experimentally using flow visualization techniques (the dye injection method) and velocity measurement by LDV. Effects of turbulent promoter on characteristics of fluid mixing and thermal-stripping phenomena are examined. From the experiment, following results are obtained.

- (1) Arch vortex is formed further than the case without promoter in the upstream station and is rapidly transported to the downstream direction.
- (2) Secondary flow induced in the cross section become stronger and the diffusion of axial momentum is promoted, as the height of turbulence promoter is higher.
- (3) Main flow deflects towards to the opposite side of branch pipe at the T-junction, as the height of turbulence promoter is higher, and as velocity ratio becomes smaller, and the flow continues to deflect to a considerably downstream station.
- (4) Velocity fluctuation is observed in the position where the vortex is formed, and it becomes a maximum at $z/D_m=2$. In the further downstream, velocity fluctuation decreases with the vortex breakdown, and it considerably remains to the downstream.

* Department of Mechanical Engineering, Ehime University

** Planning and Co-ordination Group, FBR Cycle System Development Office,
Executive Office for the Policy Planning and Administration, JNC

目 次

第1章 緒 言	
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	1
第2章 実験装置および方法	
2.1 実験装置	2
2.1.1 水流装置	2
2.1.2 流速測定装置	7
2.1.3 乱流プロモータについて	15
2.2 実験方法	16
2.2.1 流れの可視化	16
2.2.2 速度計測	16
2.3 実験条件	20
第3章 実験結果および考察	
3.1 流れの概略	22
3.1.1 乱流プロモータを設置しない場合の流れ	22
3.1.2 乱流プロモータを設置した場合の流れ	26
3.2 流動パターンの分類	32
3.3 渦の生成機構	35
3.4 対称水平面内の流れ	38
3.4.1 乱流プロモータを設置しない場合	38
3.4.2 乱流プロモータを設置した場合	41
3.5 軸方向速度分布	43
3.5.1 乱流プロモータを設置しない場合	43
3.5.2 乱流プロモータを設置した場合	46
3.6 二次流れ図	51
3.6.1 乱流プロモータを設置しない場合	51
3.6.2 乱流プロモータを設置した場合	52
3.7 軸方向の速度変動の実効値	54
3.7.1 乱流プロモータを設置しない場合	54
3.7.2 乱流プロモータを設置した場合	57
3.8 渦度	60
3.8.1 乱流プロモータを設置しない場合	60
3.8.2 乱流プロモータを設置した場合	60
3.9 特性量	64
3.9.1 二次流れの強さ	64
3.9.2 水平方向の流れの偏り	64
3.9.3 軸方向速度の速度変動の断面平均値	65
第4章 検討	
4.1 配管系サーマルストライピングへの乱流プロモータの緩和効果	69
4.2 今後の課題	69

第5章	結 言	70
参考文献		71
謝 辞		72
付 録	(a)乱流プロモータの形状決定について	73

図表目次

Table2.1.1	ポンプの諸元	5
Table2.1.2	デジタルビデオカメラの諸元	5
Table2.1.3	電磁流量計の諸元	6
Table2.3.1	実験条件	20
Table2.3.2	プロモータ形状の条件	20
Fig.2.1.1	水流用装置の概略図	11
Fig.2.1.2	流速測定装置の概略図	12
Fig.2.1.3	T字形配管合流部	13
Fig.2.1.4	電磁流量計概略図	14
Fig.2.1.5	乱流プロモータ概略図	15
Fig.2.2.1	色素流脈法の概略図	18
Fig.2.2.2	座標系	19
Fig.2.2.3	測定面拡大図	19
Fig.2.3.1	乱流プロモータ設置位置	21
Fig.3.1.1(a)	パターン A(付着流)の可視化写真と流れの概略	24
Fig.3.1.1(b)	パターン B(偏向噴流)の可視化写真と流れの概略	24
Fig.3.1.1(c)	パターン C(衝突噴流)の可視化写真と流れの概略	25
Fig.3.1.2	流動パターン図	28
Fig.3.1.3(a)	パターン A1(付着流)の可視化写真と流れの概略	29
Fig.3.1.3(b)	パターン A2(付着流)の可視化写真と流れの概略	29
Fig.3.1.3(c)	パターン B1(偏向噴流)の可視化写真と流れの概略	30
Fig.3.1.3(d)	パターン B2(偏向噴流)の可視化写真と流れの概略	30
Fig.3.1.3(e)	パターン B3(偏向噴流)の可視化写真と流れの概略	31
Fig.3.1.3(f)	パターン C(衝突噴流)の可視化写真と流れの概略	31
Fig.3.2.1(a)	流動パターンマップ (L=26mm)	33
Fig.3.2.1(b)	流動パターンマップ (L=32mm)	34
Fig.3.3.1	アーチ渦概略図	36
Fig.3.3.2	乱流プロモータを設置した場合の渦の概略図	37
Fig.3.4.1(a)	対称水平面の流れ($\beta=0.71$)	40
Fig.3.4.1(b)	対称水平面の流れ($\beta=0.58$)	40
Fig.3.4.2(a)	乱流プロモータを設置した場合の対称水平面の流れ($\beta=0.71$)	42
Fig.3.4.2(b)	乱流プロモータを設置した場合の対称水平面の流れ($\beta=0.58$)	42
Fig.3.5.1(a)	各断面における軸方向速度の分布($\beta=0.71$)	44
Fig.3.5.1(b)	各断面における軸方向速度の分布($\beta=0.58$)	45
Fig.3.5.2(a)	乱流プロモータを設置した場合の軸方向速度の分布($\beta=0.71$)	48
Fig.3.5.2(b)	乱流プロモータを設置した場合の軸方向速度の分布($\beta=0.58$)	49
Fig.3.6.1(a)	各断面における二次流れ図($\beta=0.71$)	51
Fig.3.6.1(b)	各断面における二次流れ図($\beta=0.58$)	51
Fig.3.6.2(a)	乱流プロモータを設置した場合の二次流れ図($\beta=0.71$)	53
Fig.3.6.2(b)	乱流プロモータを設置した場合の二次流れ図($\beta=0.58$)	53
Fig.3.7.1(a)	各断面における速度変動分布($\beta=0.71$)	56
Fig.3.7.1(b)	各断面における速度変動分布($\beta=0.58$)	56

Fig.3.7.2(a)	乱流プロモータを設置した場合の速度変動分布($\beta=0.71$) . . .	59
Fig.3.7.2(b)	乱流プロモータを設置した場合の速度変動分布($\beta=0.58$) . . .	59
Fig.3.8.1(a)	各断面における渦度分布($\beta=0.71$)	62
Fig.3.8.1(b)	各断面における渦度分布($\beta=0.58$)	62
Fig.3.8.2(a)	乱流プロモータを設置した場合の渦度分布($\beta=0.71$)	63
Fig.3.8.2(b)	乱流プロモータを設置した場合の渦度分布($\beta=0.58$)	63
Fig.3.9.1	二次流れの強さ	67
Fig.3.9.2	水平方向の流れの偏り	67
Fig.3.9.3	軸方向速度の速度変動の実効値	67

主な記号

本実験で用いた主な記号を示す.

D_m	: 主管の一辺の長さ (水力直径)(=40mm)
D_b	: 枝管径 (=12mm)
H	: 乱流プロモータの高さ
I_s	: 断面内の二次流れの強さ
L	: 乱流プロモータの長さ
M_x	: x 方向の流れの偏り
Re	: レイノルズ数 ($= W_m \cdot D_m / \nu$)
W_m	: 合流前における主管流の断面平均流速
W_b	: 枝管流の断面平均流速
W	: x 方向の瞬時値の速度
$\tilde{W}$	: x 方向の速度変動の実効値($=\sqrt{(\overline{W^2} - \overline{W})^2}$)
(x, y, z)	: 直交座標系
$(\bar{U}, \bar{V}, \bar{W})$	: (x, y, z) に対する時間平均速度
ω_z	: 管軸方向に対する渦度
α	: 口径比 ($= D_m / D_b$)
β	: 流速比 ($= W_m / W_b$)
γ	: 主管直径と乱流プロモータの高さの比 (D_m / H)
ν	: 流体の動粘度
μ	: 流体の粘度
ρ	: 流体の密度

第 1 章 緒言

1.1 研究の背景

近年、各種プラントの配管系では、分岐・合流部が数多く用いられ、そこでは、複雑な流れとなっている。特に高速炉プラントでは、高温と低温のナトリウムが混合する T 字形配管合流部において、フランスの高速増殖炉「フェニックス」における配管溶接部の亀裂によるナトリウム漏洩にみられるように、サーマルストライピング⁽¹⁾⁽²⁾と称される流体温度ゆらぎに起因した熱疲労破損事故の評価が重要となっている。これらの事故の原因は、従来の知見のみでは十分に説明できない状況下であり、早急に合流部の流れの詳細な情報が求められている⁽³⁾⁽⁴⁾。

このような状況から、最近、T 字形配管合流部の流れに関する研究が開始され、合流部の流れは流動条件により大きく 3 つのパターン、すなわち付着流、偏向噴流、衝突噴流に分類できること⁽⁵⁾や偏向噴流の場合には周期的な渦放出により流体振動現象がみられること⁽⁶⁾⁽⁷⁾等が報告されている。この流体振動現象は流体温度ゆらぎの主原因の 1 つと考えられるため、その特性ならびに発生機構を調べ、早急に対策を講じる必要がある。しかしながら、合流部に発生する流体温度ゆらぎの発生機構の解明とその緩和に主眼をおいてなされた研究はほとんど行われていない状況下にある。

1.2 研究の目的

1.1 節で述べた背景から本研究では、熱疲労破損の原因となる流体温度ゆらぎの低周波数成分(渦放出現象により発生)と高振幅成分(衝突噴流により発生)を低減するために、合流部に乱流プロモータを設置し(Fig.2.1.3 参照)、合流部の流れの可視化および断面内の流速測定を行った。そして、その結果から、乱流プロモータの設置による配管系サーマルストライピングの緩和効果について評価、検討した。

第 2 章 実験装置および方法

2.1 実験装置

流れの状態を把握すべく、作動流体に常温の水を用いて流れの可視化、速度計測実験を行った。可視化に使用した装置の概略を Fig.2.1.1, 速度計測に使用した装置の概略を Fig.2.1.2 に示す。

2.1.1 水流装置

まず可視化に使用した装置について以下に説明する。

溶液タンクの水は、ポンプによりオーバーフロータンクに送られた後、そのヘッド差により主管内に供給される。一方、枝管流はポンプにより供給される。両管内に供給された水は T 字形合流部で合流した後、主管の下流端に設けた背圧調節装置を通り、再び溶液タンクへと戻る。なお、両管の流量は流路入口に設置した流量調節弁により調節した。

a) オーバーフロータンク(Overflow Tank)

ポンプにより溶液タンクから送られてきた水を主管内へ安定した状態で供給するために、高さ 1700mm(揚程 1600mm)、内径 250mm の円筒形状を有する塩化ビニル製のオーバーフロータンクを設けた。

b) 主管(Main Pipe)

主管路は 40mm×40mm の正方形断面を有する、長さ 2350mm、400mm、250mm の 3 本のアクリル製直管をフランジで接続した流路で、その内面は十分滑らかに仕上げられている。なお、流れは十分発達した状態で配管合流部へと流入する。

c) 枝管(Branch Pipe)

枝管は内径 12mm(配管口径比 $\alpha = 3.33$)、長さ 600mm のアクリル製直円管で、その表面は十分滑らかに仕上げられている。なお、口径比は高速増殖炉で汎用されている条件を採用した。

d) フランジ(Flange)

フランジは主管入口から 2350mmと 2750mmの位置に取り付けてあり、これにより各々管路を接続した。その形状は外径 105mmの円形で、水もれ防止のために径 90mmの O リングを用いた。

e) 乱流プロモータ(turbulent flow promoter)

乱流プロモータは高さ $H=5.0, 7.5, 10.0\text{mm}$ (γ はそれぞれ 8.00, 5.33, 4.00), 長さ $L=26, 32\text{mm}$ の計 6 種類のくさび形状のアルミニウム製品を使用した。その具体的な形状は Fig.2.1.5 に示すとおりである。

f) 配管合流部(T-Junction)

配管合流部の拡大図を Fig.2.1.3 に示す。配管合流部には主管の管軸に枝管の管軸が垂直に交わる T 字形配管合流部を用いた。なお、合流部は合流点が主管入口から 2500mmの位置となるように設置され、合流直後の主管の管壁に乱流プロモータが取り付け可能な構造となっている。流れの可視化は合流部から、その下流約 220mmの区間で行った。

g) 背圧調節装置(Back Pressure Tank)

主管から流出した水は、主管端に設置した内径 180mm, 高さ 500mmの円筒形状の背圧調節装置を通り、溶液タンクへと流入する。

h) 溶液タンク(Tank)

供試管路を通過した水は、一旦溶液タンクに貯められ、再び供試管路へ流入する。

i) ポンプ(Pump)

溶液タンクからオーバーフロータンクならびに枝管内への水の供給には、マグネットポンプ(IWAKI 製)を用いた。ポンプの仕様を以下の Table.2.1.1 に示す。

j) バルブ(Valve)

オーバーフロータンクから主管内に流入する水と、溶液タンクからポンプにより枝管内に供給される水の流量は、ゲート式バルブにより調節した。

k) 色素注入装置(Dye-injection system)

合流領域の流れの様子を可視化するために、合流上流側の主管路、枝管路にそれぞれ異なる色の色素を注入した。その装置として主管側には輸液システムを設けた。タンク内の色素はビニールチューブおよび主管路内に挿入した内径 1.0mm のステンレスパイプを通り主管路内に流入する。なお、流入した色素が流れ場を乱さないように輸液システムのヘッド(高さ)を調節した。枝管側には、ポンプとバルブの間に色素注入口を設け、容量 20ml の注射器を用いて色素注入口から色素を注入した。これにより、色素は合流部に到達するまでに枝管流全体を着色する。

l) ビデオカメラ(VTR)

撮影にはデジタルビデオカメラ(Panasonic 製 : NV-MX5000)を使用した。なお、撮影はカメラを種々の位置に設置して行った。デジタルカメラの仕様を以下の Table2.1.2 に示す。

m) 電磁流量計(Electromagnetic Flowmeter)

本研究では主管内を流れる水の流量を計測するために電磁流量計(日本フローセル製)を用いた。電磁流量計は上流のバルブより 2400mm 下流に設置した。電磁流量計の概略を Fig.2.1.4 に、仕様を以下の Table2.1.3 に示す。

Table.2.1.1 ポンプの諸元

ポンプ	IWAKI 製 プラスチック製マグネットポンプ	
型番	MR700-TEF(主管)	LP-15(枝管)
出力	210W	32W
回転数	2840rpm	2600rpm
最大圧力	6.7m Aq	2.7m Aq
最大流量	86 l/min	15 l/min

Table2.1.2 デジタルビデオカメラの諸元

信号方式	NTSC 日米標準信号方式
録画方式	Mini DV 方式((民生用デジタル VCR SD 仕様)
使用テープ	6.35 ミリ幅デジタルビデオテープ
映像記録方式	デジタルコンポーネント記録
撮像素子	1/6" CCD 固体撮像素子 (総画素 80 万×3、動画 64 万×3、静止画 70 万×3)
レンズ	自動絞り 10 倍電動ズーム F1.6(f=2.85~28.5mm) 35mm 換算:動画 43~430mm、静止画 41~410mm
ズーム	光学 10 倍/デジタル 25 倍/スーパーデジタル 100 倍
標準被写体照度	1400 ルクス
最低照度	15 ルクス
デジタルインターフェース	DV 入出力端子(IEEE1394、4 ピン)
記録画素数	VGA 記録: 640×480 MEGA 記録: 2048×1496
記録画素数	スーパーファイン: 320×240(QVGA) ファイン/ノーマル: 176×144(QCIF)

Table2.1.3 電磁流量計の諸元

配管接続方式	ウエハー形(呼び径 100mm 以下)
精度	流速 0.5~0.7m/s...±0.7%RD 流速 0.7~10m/s...±0.5%RD
許容使用温度	-10℃~+50℃
測定可能導電率	5 μ S/cm 以上
励磁方式	矩形波励磁方式
フルスケール設定範囲	流速 0.5~10m/s に対する流量
アナログ出力信号	0~10mA, 2~10mA, 0~20mA, 4~20mA, 0~10・10~20mA または 4~12・12~20mA (0/2~10mA...1200 Ω 以下, 0/4~20mA...600 Ω 以下)
積算パルス出力信号	24V DC 電圧パルス(100mA 以下, 4Hz 以下) またはオープンコレクタパルス(25V DC, 150mA 以下)
主な設定内容と設定範囲	・ ダンピング...1~99 秒 ・ 出力パルス幅...0.032~2000ms ・ 出力パルス倍数...0.001~1000 ・ 低流量カットオフ...0~10% ・ 密度...0.01~5.00

2.1.2 流速測定装置概略

次に流速測定に使用した LDV について述べる。

(1) LDV (Laser Doppler Velocimeter)

一般に、光源と観測器が相対運動をしている場合には、ドップラ効果により波長の変化、すなわち周波数の変化を受ける。LDV はこの原理を利用して、液体中に存在する散乱粒子に単波長性、平行性に優れたレーザ光を入射し、その散乱光のドップラ周波数によって流速を測定するものである。

LDV のすぐれた特徴としては、

- 固形の Probe (センサ) を流れに挿入することなく、非接触で測定でき、対象となる流れを乱さず正確な測定ができる。
- 速度とドップラ周波数との間に厳密な直線関係が成立しており、振幅の絶対値を測定する必要がない。
- 応答性にすぐれ、速度の瞬時値を連続的に測定できる。
- 空間分解能高く、微小部の測定が可能である。
- 広い測定範囲を有する。
- 混相流の速度測定ができる。
- 流れ方向の判別が可能である。
- 流体の屈折率以外の物性値や状態量にほとんど影響されない。
- 2, 3 次元流速測定が可能である。

などが挙げられる。

一方短所としては、

- 流体中の粒子速度の測定なので、粒子速度と流体粒子との差に注意が必要である。
 - 適当な大きさと量の散乱粒子を供給しなければならない。
 - 速度が間欠的に測定されるので変動速度の評価や乱流の測定精度に注意する必要がある。
 - 流体は透明で流体容器には測定用の観測窓が必要である。
- などがある。

(2) LDV 光学系

本研究で使用した LDV 光学系は、Spectra-Physics 社製水冷アルゴンイオンレーザシステムおよび Dantec 社製 60X シリーズ Fiber Flow である。

(a) Spectra-Physics 社製水冷アルゴンイオンレーザシステム

システムはレーザ発振装置 Laser Head(stabilite 2017) , Laser Head へ効率的に安定して電力を供給するための装置 Power Supply(Model 2550) , およびリモートコントローラ(Model 2670)で構成される。Laser Head は共振器により Argon Ion レーザ(波長 $\lambda=457.9\sim 514.5\text{nm}$)を安定して発振する。最大出力は 6.0W である。リモートコントローラは Laser Head および Power Supply の制御盤である。Laser head および Power Supply には、作動中の発生熱冷却のため、常時水道水が流量 $8.4\text{cm}^3/\text{min}$ 以上で供給される。

(b) Dantec 社製 60X シリーズ Fiber Flow

システムはトランミッタ(60X41) , 2次元計測プローブ(60X62)で構成される。トランミッタは周波数シフタ(Frequency shifter)とカラーセパレータ(Color separator)を結合させたものである。周波数シフタは、測定される速度成分の向き(正, 負)を判定する機能を持ち、カラーセパレータは複数の波長を含むレーザ光から特定の波長のレーザ光のみ選択的に抜き出す機能をもつ。

Argon Ion レーザ発振器によって発振されたレーザ光(波長 $\lambda=457.9\sim 514.5\text{nm}$)は、まずトランミッタ内ブラッグ・セル(Bragg cell)に入る。ブラッグ・セルは周波数シフタの主要な構成部品である。ブラッグ・セルでは、超音波によってガラス媒質中に移動回折格子がつくられている(ブラッグ回折)。このガラス媒質中にレーザ光を入射すると、レーザ光は回折を起こし等強度の 2 本のレーザ光に分割されるとともに、一方のレーザ光の周波数は $+40[\text{MHz}]$ シフトされる。

ブラッグ・セルを通過した 2 本のレーザ光はカラーセパレータに入る。カラーセパレータは、複数の波長 λ ($\lambda=457.9\sim 514.5\text{nm}$)を含む入射レーザ光から、最も高強度の 3 つの波長、 514.5nm (Green) , 488nm (Blue) , 476.5nm (Dark blue)のみを抜き出す。カラーセパレータを通過した 3 色 6 本のレーザ光はマニピュレータを経て、プローブにつながる光ファイバケーブルへと送り出される。2成分流速測定においては、このうち 2 色 4 本のレーザ光が使用される。

2次元計測プローブは 2 色 4 本のレーザ光を射出する。4 本のレーザ光はプローブの先端に取り付けられたフロントレンズによって集光され、その交差点が測定点となる。

測定体積の大きさ Δx , Δy , Δz , フリンジ間隔 b , ビームの交差角 2α は使用するフロントレンズの種類, すなわち焦点距離 f と測定に使用するレーザ光の波長 λ に依存する.

本光学系は後方散乱型であり, レーザ光を射出するプローブは同時に光検出器も兼ねている. 測定体積内を通過する粒子によって作られる散乱光はプローブのレンズによって集光, 観測され, 光ファイバケーブルを経て, フォトマルチプライヤ(Photo multiplier)へ送られる.

本光学系において使用される 2 次元計測プローブはトランスミッタと長さ 20m の光ファイバケーブルによって接続されており, レーザ発振器やトランスミッタ等の光学系本体から遠く離れた場所においても測定に困難が伴わない上, プローブの大きさ(全長 365mm, 直径 60mm)も小さいため実験装置の構造, 環境に対する適応性も高い.

(3) LDV 信号処理系

LDV 信号処理系は散乱光からのドップラ信号を電氣的に処理し, ドップラ周波数を検出する役割をもつ. 本研究においては LDV 信号処理系に, Dantec 社製 BSA(Burst Spectrum Analyzer)と Dantec 社製フォトマルチプライヤ(Photo multiplier)を使用した.

(a) Dantec 社製 BSA(Burst Spectrum Analyzer) 57N20, 57N35

BSA は散乱粒子のドップラ周波数を検出するために, フォトマルチプライヤから送られるドップラ信号のスペクトル解析を行う. BSA はバーストディテクタ(Burst detector)とスペクトラムアナライザ(Spectrum analyzer)の二つの信号経路をもっている. バーストディテクタはフォトマルチプライヤから入力されるドップラ信号を電氣的に処理することによって, 一個の散乱粒子によって作りだされた, 単一のドップラ信号(バースト信号とよばれる)を検出する処理系である. スペクトラムアナライザの主要な部分は FFT プロセッサ(Fast Fourier Transform Processor)である. FFT プロセッサはドップラ信号の離散フーリエ変換を行い, 算出されたパワースペクトルの周波数分布からドップラ周波数を検出する. なお, 単位時間に検出されるバースト信号の数をデータレートとして定義する.

(b) Dantec 社製フォトマルチプライヤ(Photo multiplier) 57X81

本実験では Dantec 社製フォトマルチプライヤ(57X81)を使用した. フォトマルチプライヤはプローブから入力される散乱信号を電気信号に変換する装

置である。電気信号に変換されたドップラ信号は信号処理装置へと送られる。

(4) 散乱粒子

本研究では、作動流体が水のため、白色水性ペンキ(ニッペホームプロダクツ社製)を水に溶かしたものを用いて散乱粒子を生成した。粒子の大きさは $2 \sim 5 \mu\text{m}$ である。その散乱粒子をオーバーフロータンク上部から試験流路内を流れる水の中に流入した。なお、混入量は試験部流体総量に比べて極めて微量であるため、作動流体の性質には影響を及ぼさない。

1.Overflow Tank

2.Valve

3.Main Duct(40 × 40 × 3000)

4.T-Junction

5.Branch Pipe(Φ 8,12,20 × 600)

6.Back Pressure Tank

7.Dye-injection Tank

8.Camera & VTR

9.Pump

10.Tank

11.Flange

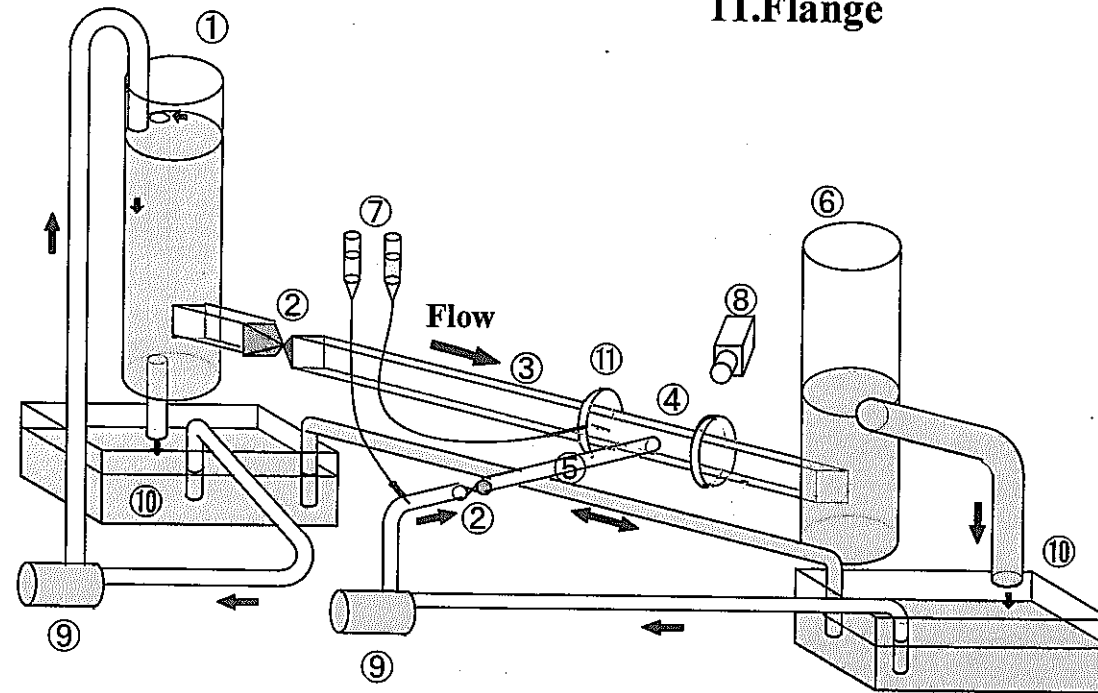


Fig2.1.1 水流用装置の概略図

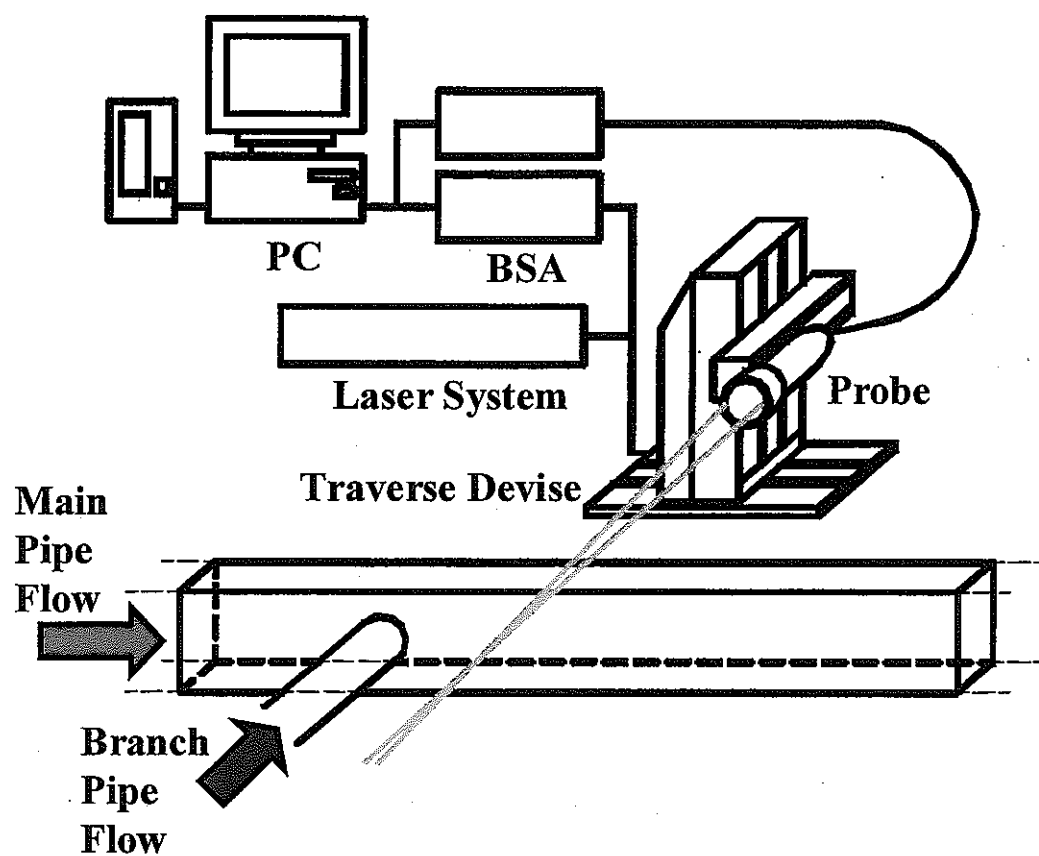


Fig.2.1.2 流速測定装置の概略図

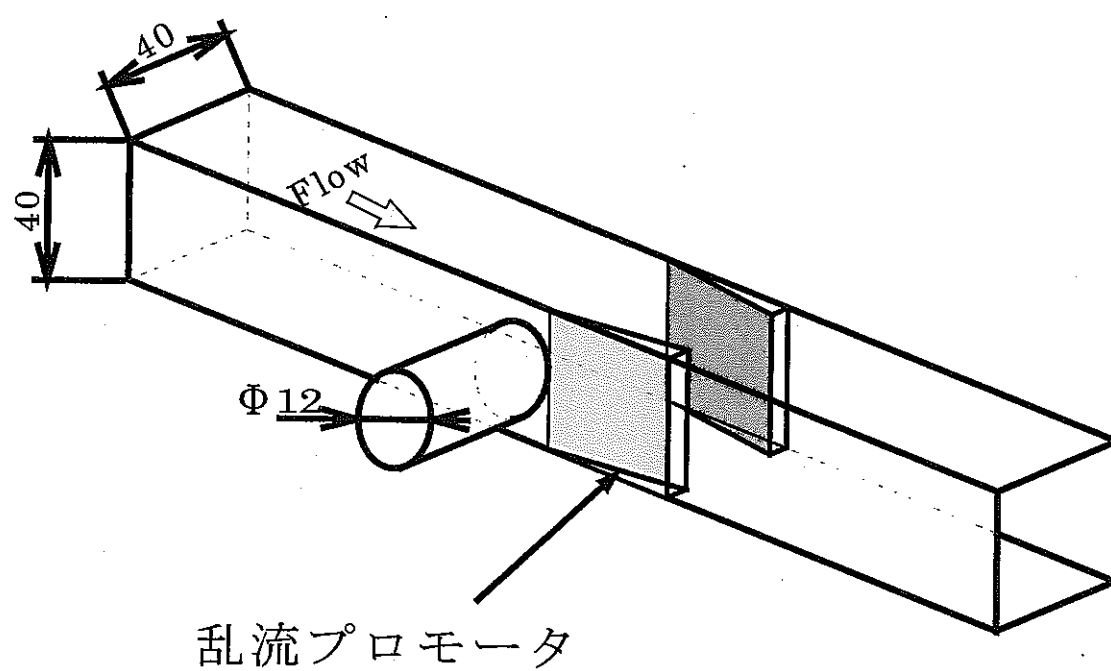


Fig.2.1.3 T字形配管合流部

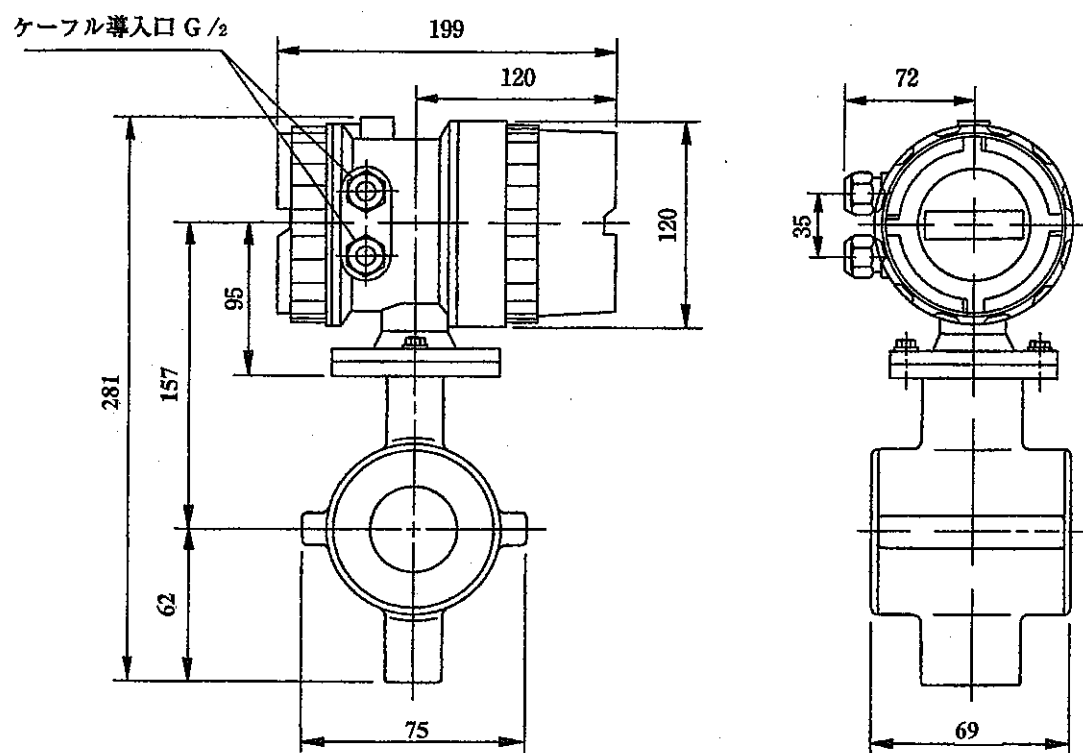


Fig.2.1.4 電磁流量計概略図

2.1.3 乱流プロモータについて

本研究では、管路の熱疲労破損の原因となる流体温度ゆらぎの低周波数成分（渦放出現象により発生）と高振幅成分（衝突噴流により発生）の発生を低減するために、合流部に乱流プロモータを設置した。実験に用いる乱流プロモータは、実機での適用を考慮して、T字形継手部を加工することにより比較的容易に実現可能な形状でなければならない。そこで本研究では、まず Fig.2.1.5 で示すくさび形状のプロモータを用いた。具体的には高さ $H=5, 7.5, 10\text{mm}$ ($\gamma=8.00, 5.33, 4.00$) の3種類、長さ $L=26, 32\text{mm}$ の2種類からなる、計6種類のくさび形の乱流プロモータを採用した。設置位置は、乱流プロモータの後端がT字管継手部の溶接線的位置と同じになる条件とした(Fig.2.3.1 参照)。なお、溶接線的位置はT字合流部のJIS規格より選定した(付録(1))。

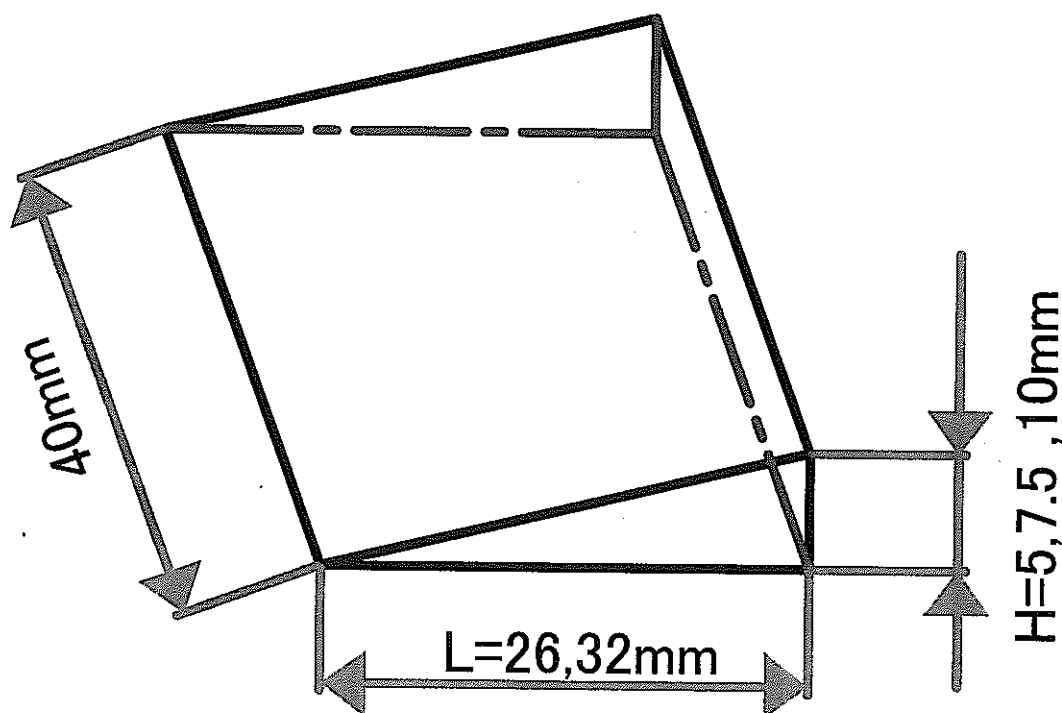


Fig.2.1.5 乱流プロモータ概略図

2.2 実験方法

2.2.1 流れの可視化

本研究では、流れの様子を把握するために、色素流脈法⁷⁾を用いて流れの可視化を行った。色素流脈法とは、水の流れを可視化するために流れに色素を注入して流脈を観察する方法である。Fig.2.2.1 に、本実験で行った色素流脈法における色素の流れの概略を示す。染料にはメチレンブルー(青： $C_{16}H_{18}N_3SCl$)とフルオレセイン(黄： $C_{20}H_{12}O_5$)を用いた。

まず、主管の流れを把握するために、主管内に挿入したステンレスパイプ(内径 1.0mm)からメチレンブルーを注入した。色素の注入によって主管の流れが乱されないように、色素の注入速度は輸液システムのヘッド(高さ)を変えることにより調節した。

次に、枝管の流れを把握するために枝管用のポンプとバルブの間に設けた色素注入口から容量 20ml の注射器を用いてフルオレセインを注入した。なお、バルブの上流側で色素を注入するため、色素の注入による枝管の流れへの影響は軽微である。また、フルオレセインは合流部に到達するまでに枝管流と完全に混合するため、合流後の枝管流の挙動を詳細に可視化できる。

2.2.2 速度計測

管路内の流動状態をより詳しく調べるために、LDV を用いて流れの流速測定を行った。実験で用いた座標系を Fig.2.2.2 に示す。主管軸と枝管軸の交わる点を原点 o とし、水平方向を x 、垂直方向を y 、主管の管軸方向を z とした。そして各方向に対応する時間平均速度をそれぞれ $\bar{U}$ 、 $\bar{V}$ 、 $\bar{W}$ とした。なお、昨年度の可視化実験の結果から、合流部の流れが偏向噴流あるいは衝突噴流の場合に温度ゆらぎの影響をうけていると推測される。そこでまず、偏向噴流を示す流速比 $\beta=0.584$ 、 0.7105 の 2 パターンについてそれぞれとプロモータを設置した場合と設置しない場合の計 4 パターンについて調べた。

測定は、まずレーザービームを管路の上側から入射し、管軸方向の 5 ヶ所 ($z/D_m = -1, 1, 2, 5, 7$) の位置において x 、 z 方向速度 $\bar{U}$ 、 $\bar{W}$ を測定した。なお、今回使用した LDV は二方向の速度成分しか同時計測できないので、この測定方法では垂直方向速度成分 $\bar{V}$ を測定することはできない。そこで、管軸方向の 2 ヶ所 ($z/D_m = 2, 5$) の位置においては、レーザービームを管路の水平方

向から入射し水平方向の速度 $\bar{V}$ を測定することで、三方向の速度成分の計測を行った。

次に管軸方向のそれぞれの位置における断面内の測定点を Fig.2.2.3 に示す。なお、測定は主管の上部半断面において、壁面から 2mm までの範囲においては 1mm 間隔、他の領域では 2mm 間隔の格子点の上で行った。

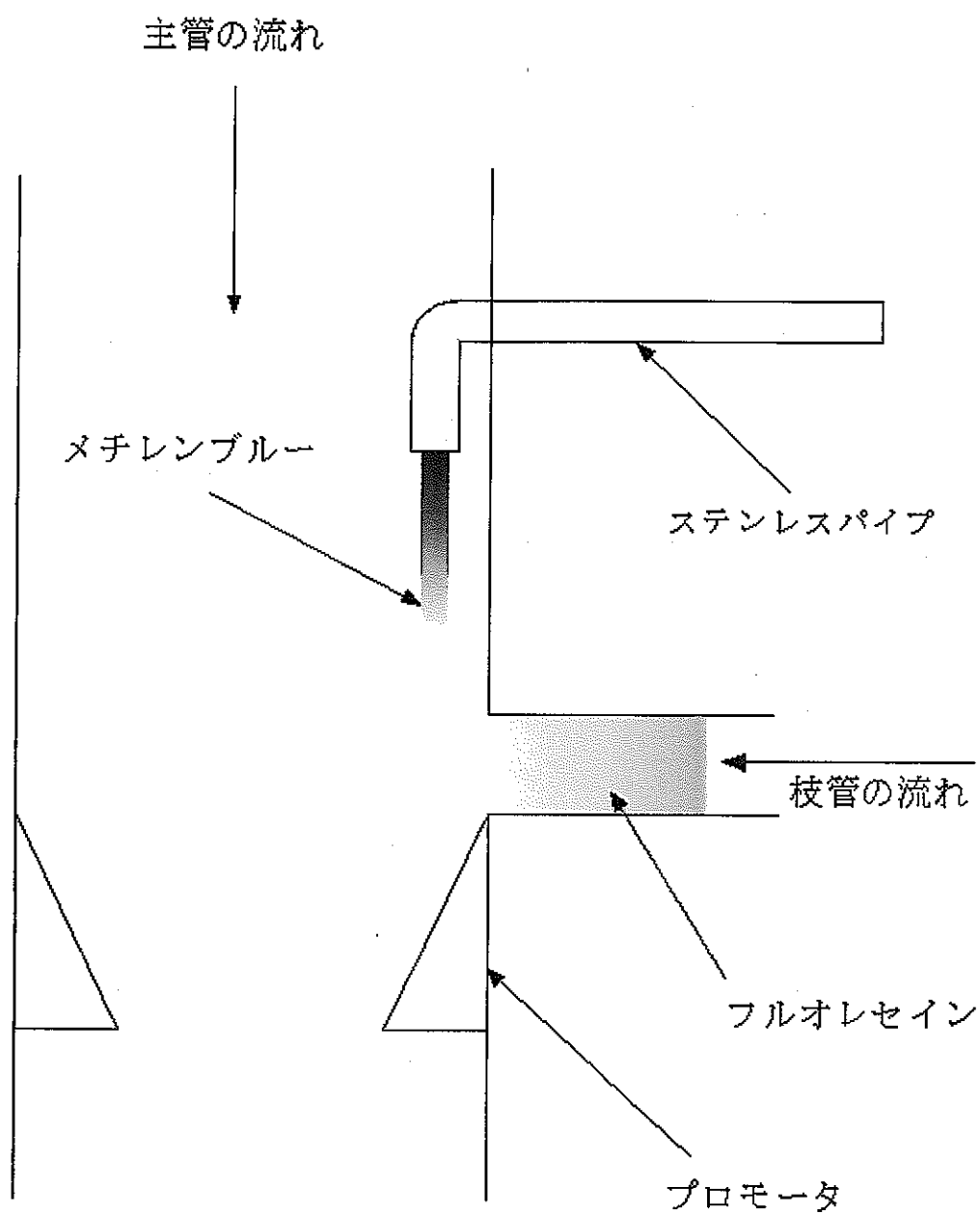


Fig.2.2.1 色素流脈法の概略図

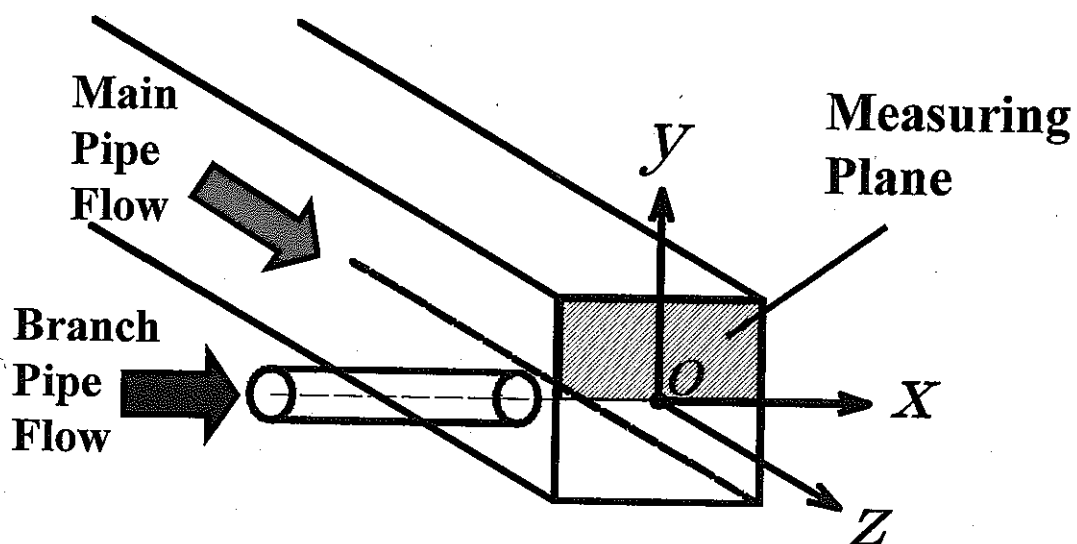


Fig.2.2.2 座標系

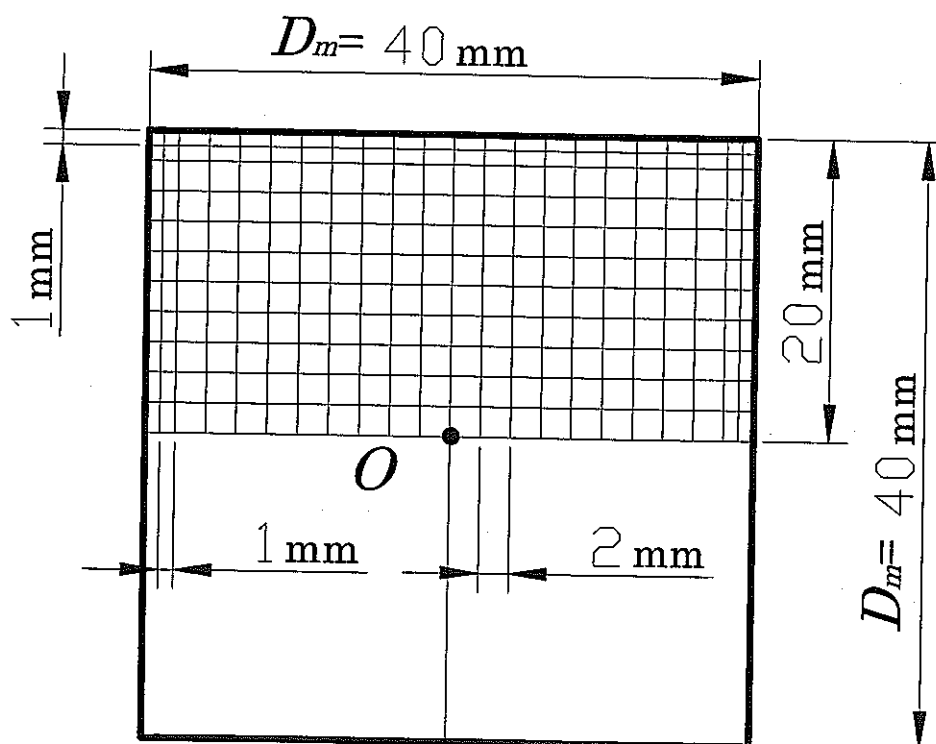


Fig.2.2.3 測定面拡大図

2.3 実験条件

実験は、口径比 $\alpha=3.33$ で、主管レイノルズ数 $Re=1000$ 、流速比 $\beta=0.2\sim 3.0$ の範囲において、長さ $L=26, 32\text{mm}$ の 2 種類と高さ $H=5, 7.5, 10\text{mm}$ ($\gamma=8.00, 5.33, 4.00$) の 3 種類、計 6 種類について乱流プロモータを設置した場合と乱流プロモータを設置しない場合について行った(Table2.3.1, 2.3.2 参照). 乱流プロモータの設置は、Fig.2.3.1 に示すとおり乱流プロモータの後端が溶接線と一致するようにした。したがって、乱流プロモータの先端は、長さ $L=32\text{mm}$ の場合には枝管の出口と接し、 $L=26\text{mm}$ の場合には出口より 6mm 下流側となる。主管、枝管のそれぞれを流れる流体の流速設定は以下の手順に従った。まず、枝管側のバルブを閉め、背圧調節装置から溶液タンクへ流入する流量を体積流量法で測定することにより主管流の流量および流速を求めた。次に、枝管側のバルブを開け、背圧調節装置から溶液タンクへ流入する水の流量を体積流量法で測定することにより主管流、枝管流の流量の合計量を求め、この合計量と先ほどの主管流の流量から枝管流の流量および流速を算出した。

Table2.3.1 実験条件

Re	1000
α	3.33
β	0.2~3.0
γ	5.33, 8.00

Table2.3.2 プロモータ形状の条件

プロモータ長さ(L)[mm]	プロモータ高さ(H)[mm]
26	5.0
	7.5
	10.0
32	5
	7.5
	10.0

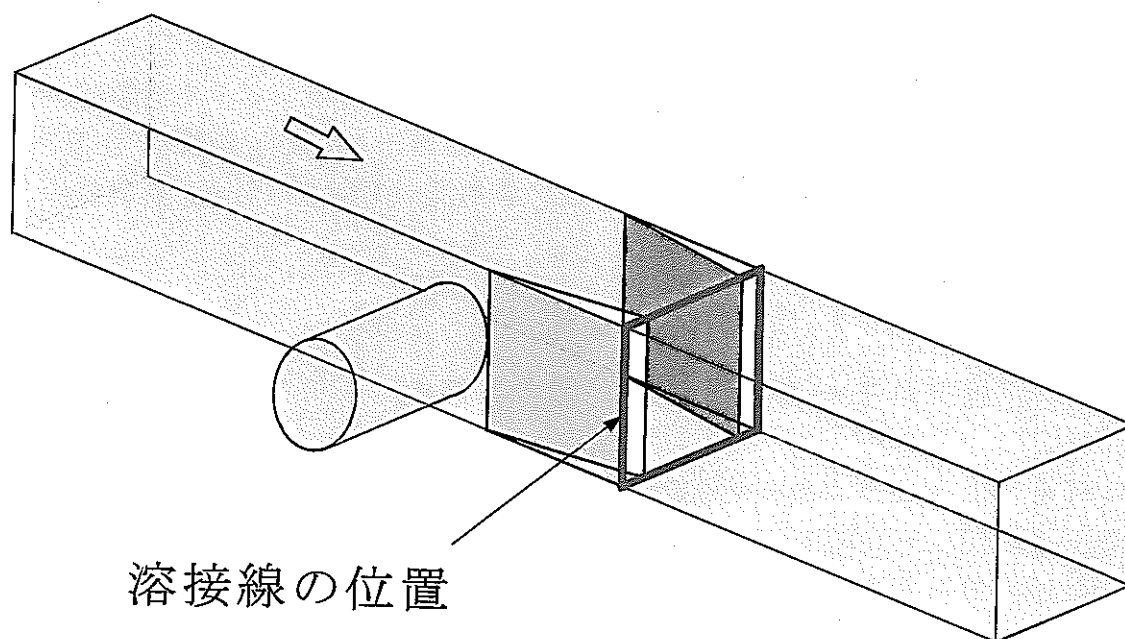


Fig.2.3.1 乱流プロモータ設置位置

第3章 実験結果および考察

3.1 流れの概略

配管合流部における流れの挙動を調べるために、まず正方形直管(主管)に円管(枝管)を接続した T 字形管路を用いて流れの可視化を行った。その結果を以下に示す。なお、可視化は口径比 $\alpha=3.33$ の場合について、主管レイノルズ数 $Re=1000\sim 5000$ 、流速比 $\beta=0.2\sim 3$ 範囲で行った。流速比 β が変化すると、主管内を流れる流体と枝管から噴出した流体の混合境界面が移動するため、合流部の流動形態は大きく変化する。

3.1.1 乱流プロモータ設置しない場合の流れ

本研究では、乱流プロモータを設置しない場合の合流部の流動形態を大きく 3 種類[Fig.3.1.1(a)~(c)]に分類し、それぞれの流動パターンを付着流(パターン A)、偏向噴流(パターン B)、衝突噴流(パターン C)と呼ぶことにする。

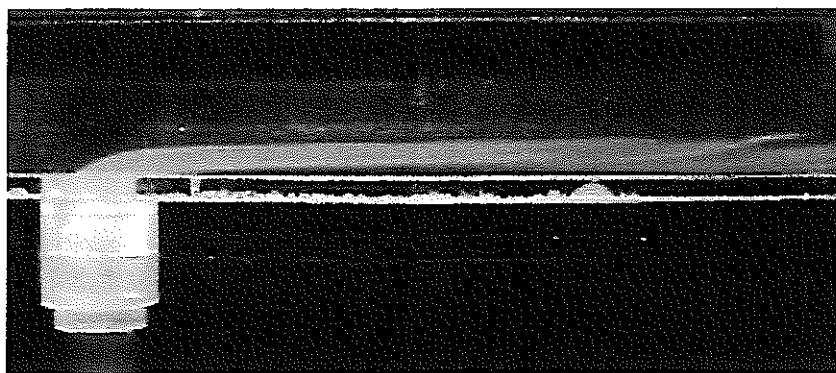
まず、付着流(パターン A)の可視化写真とその模式図を Fig.3.1.1(a)に示す。パターン A は流速比 β が大きい場合、すなわち枝管流速が主管流速に比べて遅い場合に見られる。なお、主流と枝管流は層状に分離しており、かなり下流まで流下しても主流と枝管流の混合がほとんどみられない。

次に偏向噴流(パターン B)の可視化写真とその模式図を Fig.3.1.1(b)に示す。パターン B はパターン A よりも流速比 β が小さい場合、すなわち枝管流速が主管流速と同程度かやや速い場合にみられる。このパターン B では、枝管流が主流流中に偏向噴流の形で噴出し、アーチ渦状の周期的な渦列を形成しながら流下する。この間、合流部で発生したアーチ渦はその形を保持したまま流下するため、主流と枝管流の混合はあまり進まない。

続いて衝突噴流(パターン C)の可視化写真とその模式図を Fig.3.1.1(c)に示す。パターン C は枝管流速が主管流速に比べてかなり速い場合に見られ、枝管流が枝管と反対側の主管壁面に衝突した後、主流と急速に混合しながら流下する流れである。また、衝突部の前後には渦が形成される。

緒言でも述べたように、近年 T 字形配管合流部において、サーマルスライピングと呼称される流体温度ゆらぎに起因した熱疲労破損事故が起こっている。上述の流動形態のうち、偏向噴流(パターン B)の場合にはみられるアーチ状の周期的な渦放出現象は低周波の温度ゆらぎの原因に、また、衝突噴流(パターン C)の場合にみられる枝

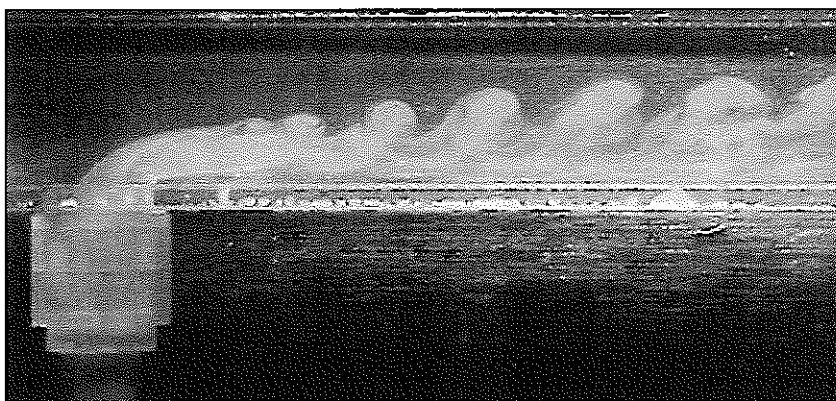
管流の壁面への衝突は高振幅の温度ゆらぎの原因となりえるため配管設計においては十分な注意が必要となる。



(流動条件 : $Re=1000$, $\alpha=3.33$, $\beta=3.58$)



Fig.3.1.1(a) パターン A(附着流)の可視化写真と流れの概略



(流動条件 : $Re=1000$, $\alpha=3.33$, $\beta=0.77$)

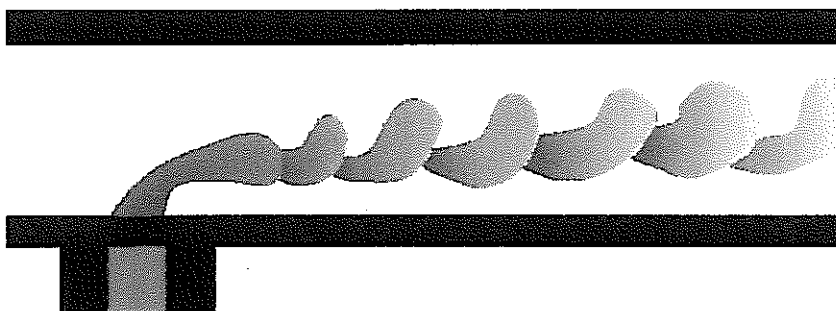
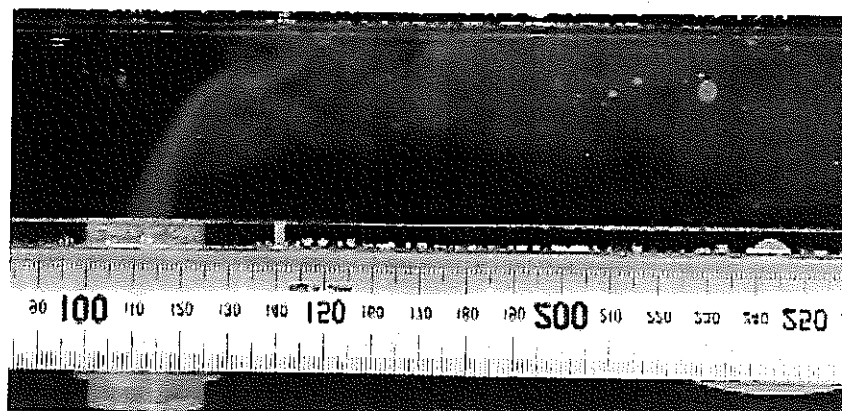


Fig.3.1.1(b) パターン B(偏向噴流)の可視化写真と流れの概略



(流動条件 : $Re=1000$, $\alpha=3.33$, $\beta=0.32$)

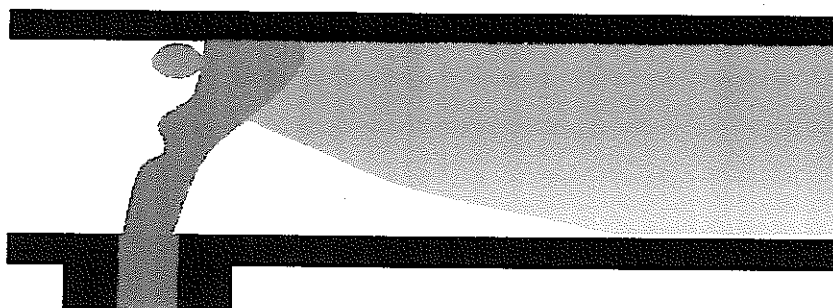


Fig.3.1.1(c) パターン C(衝突噴流)の可視化写真と流れの概略

3.1.2 乱流プロモータを設置した場合の流れ

次に乱流プロモータを設置した場合の配管合流部における流れの挙動を把握するために、上記の実験と同様の T 字形管路、実験範囲において合流部に乱流プロモータを設置して流れの可視化を行った。

乱流プロモータを設置した場合も流速比 β が変わると、合流部の流動形態は大きく変化する。本研究では、乱流プロモータを設置した場合の合流部の流動形態についても乱流プロモータを設置しない場合と同様に大きく 3 つの流動パターン、すなわち付着流、偏向噴流、衝突噴流(パターン C)に分類した。そして、付着流は乱流プロモータ背後の逆流の有無により 2 パターン(A1, A2)に、また、偏向噴流は枝管と反対側の乱流プロモータ背後の逆流の有無(B1, B2)と流れが二本に分岐する場合(B3)の 3 パターンに分類した。分類図を Fig. 3.1.2 に示す。

まず、付着流の 2 パターン(A1, A2)の可視化写真とその模式図を Fig.3.1.3(a), (b)に示す。パターン A1 は流速比 β が大きい場合、すなわち枝管流速が主管流速に比べて遅い場合に多く見られる。このパターンは主流と枝管流は層状に分離しており、枝管流は溶接部(プロモータ後端の側面)に接触することはない。パターン A2 は、パターン A1 がみられる流速比よりもやや小さい場合、すなわち枝管流速が主管流速に比べて比較的遅い場合に多く見られる。このパターン A2 は、パターン A1 とほぼ同様な流れではあるが、パターン A1 とやや異なり枝管流が乱流プロモータ背後にできる渦により逆流し、一部滞留する。これは、プロモータの設置により、プロモータ背後が上流側より低圧領域となるためだと考えられる。

次に偏向噴流の 3 パターン(B1, B2, B3)の可視化写真とその模式図を Fig.3.1.3(c), (d), (e)に示す。パターン B1 はパターン A1, A2 よりも流速比 β が小さい場合、すなわち枝管流速が主管流速と同程度かやや速い場合に多くみられる流れである。このパターン B1 では、枝管流が主管流中に偏向噴流の形で噴出し、周期的な渦列を形成しながら流下する。また、この間合流部で発生した渦はその形を保持したまま管中央部を流下するため、枝管流は溶接部には接触しない。パターン B2 はパターン B1 がみられる条件よりも流速比がやや小さい場合、すなわち枝管流速が主管流速に比べて速い場合に見られる。このパターン B2 では、枝管流は枝管とは反対側の側面に設置した乱流プロモータ背後にできる渦により逆流し、一部滞留する。これは、A2 と同じく、プロモータ背後が上流側より低圧となるためだと考えられる。パターン B3 は特異な流れで、レイノルズ数 $Re=1000, 2000$ の範囲において種々の流速比 β においてみられる。このパターン B3 では、枝管流は、二つの乱流プロモータ間を通過後二本に分岐

する。これは、コアンダー効果により枝管流が両管壁に引っ張られるためだと考えられる。そして、これら二本に分岐した流れの内、枝管とは逆側を流下する流れが渦を形成している。しかしながら、これらの流れは、管中央部を流下するため、溶接部と接触することはない。

続いて衝突噴流(パターンC)の可視化写真とその模式図を Fig.3.1.3(f)に示す。パターンCはパターンB2よりも流速比 β が小さい場合、すなわち枝管流速が主管流速に比べてかなり速い場合に見られる流れである。このパターンCでは、枝管流が枝管と反対側の乱流プロモータに衝突した後、主流と急速に混合しながら流下する流れである。

以上述べたように、乱流プロモータを設置することにより、合流部の流動パターンは増える結果となった。これらの流動パターンのうち、パターンA2、パターンB2の場合にみられる乱流プロモータ背後にできる渦による枝管流の逆流現象は溶接部に熱疲労などの悪影響を与える可能性があると考えられる。また、乱流プロモータを設置した場合にもみられた渦(パターンB1)や衝突噴流(パターンC)については、サーマルストライピングの原因となり得るので、やはり、配管設計においては十分な注意が必要である。

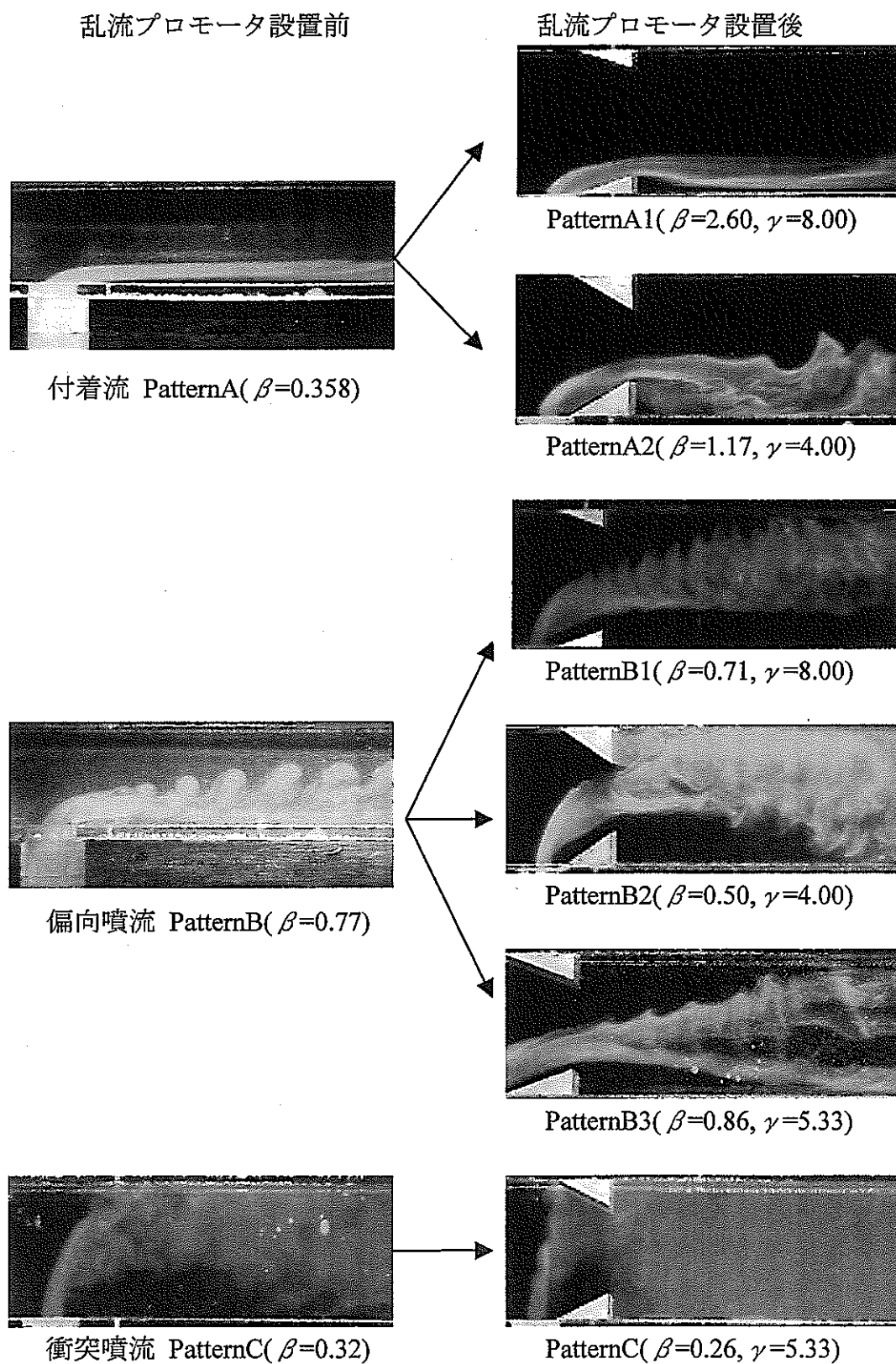
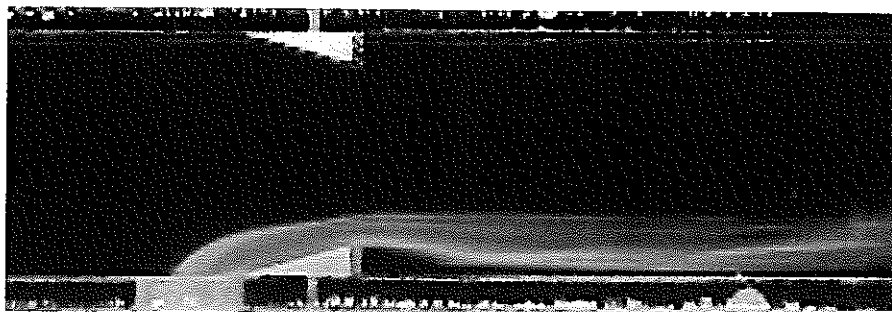


Fig.3.1.2 流動パターン図



(流動条件 : $Re=1000$, $\beta=2.60$, $\gamma=8.00$, $L=26\text{mm}$)

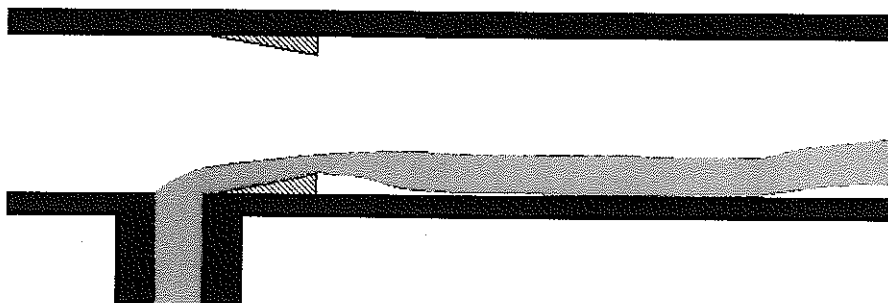
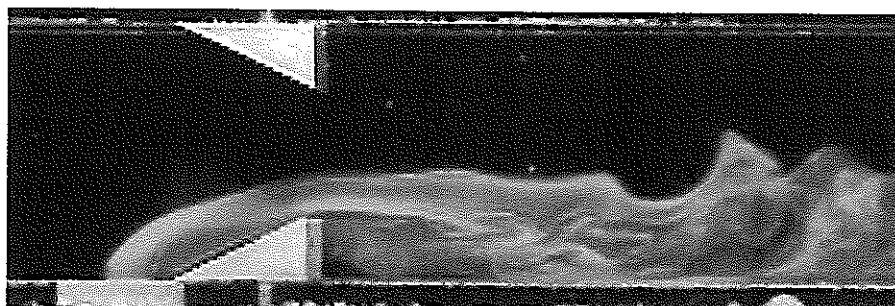


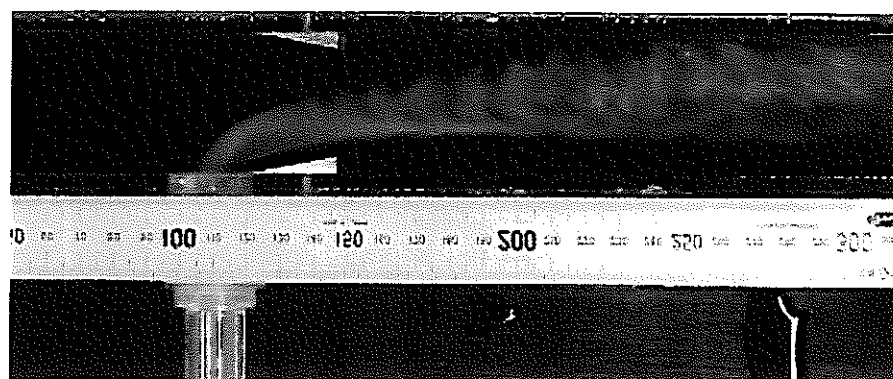
Fig.3.1.3(a) パターン A1(付着流)の可視化写真と流れの概略



(流動条件 : $Re=1000$, $\beta=1.168$, $\gamma=4.00$, $L=26\text{mm}$)



Fig.3.1.3(b) パターン A2(付着流)の可視化写真と流れの概略



(流動条件 : $Re=1000$, $\beta=0.71$, $\gamma=8.00$, $L=26\text{mm}$)

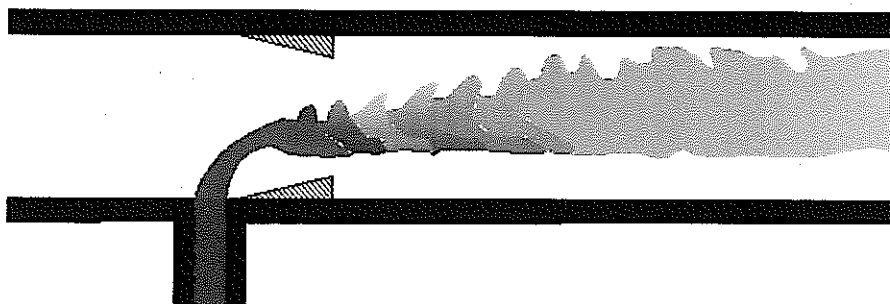
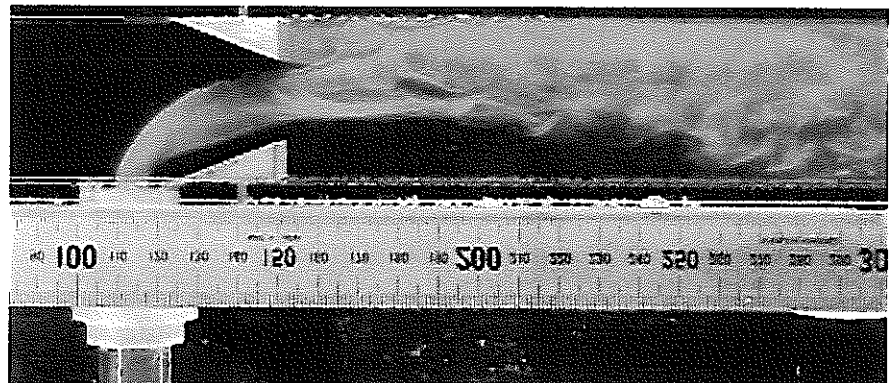


Fig.3.1.3(c) パターン B1(偏向噴流)の可視化写真と流れの概略



(流動条件 : $Re=1000$, $\beta=0.497$, $\gamma=4.00$, $L=26\text{mm}$)

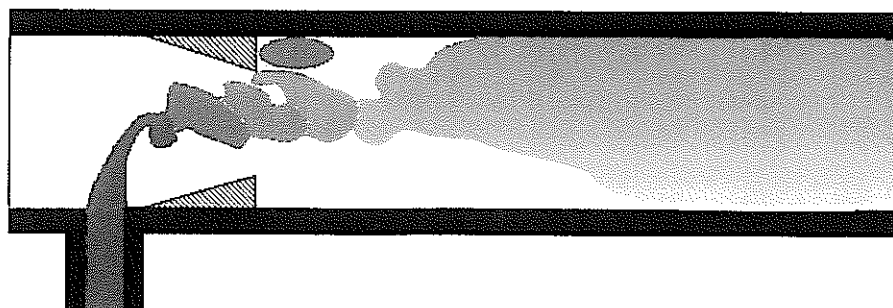
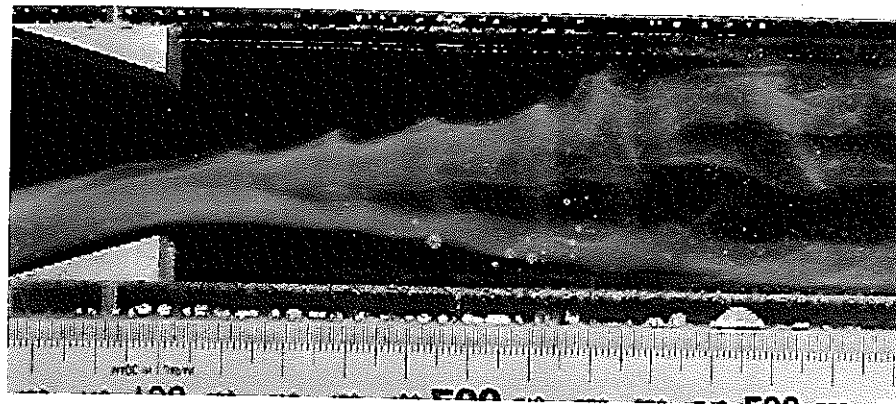


Fig.3.1.3(d) パターン B2(偏向噴流)の可視化写真と流れの概略



(流動条件 : $Re=1000$, $\beta=0.855$, $\gamma=5.33$, $L=26\text{mm}$)

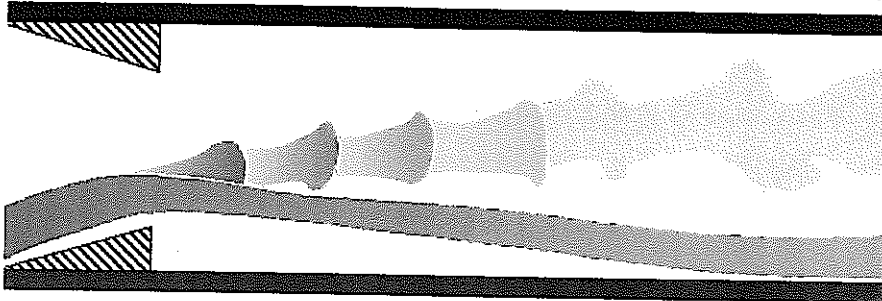
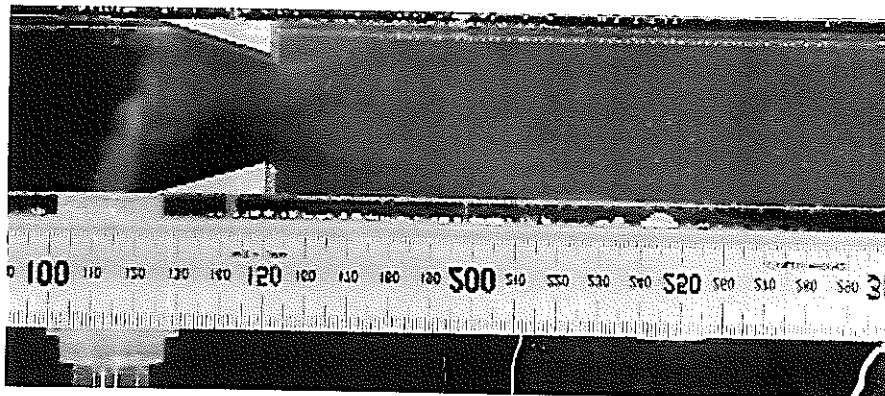


Fig.3.1.3(e) パターン B3(偏向噴流)の可視化写真と流れの概略



(流動条件 : $Re=2000$, $\beta=0.262$, $\gamma=5.33$, $L=26\text{mm}$)

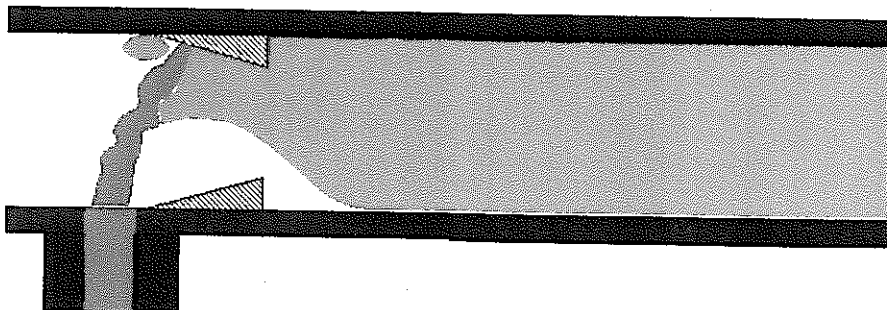


Fig.3.1.3(f) パターン C(衝突噴流)の可視化写真と流れの概略

3.2 流動パターンの分類と流動条件の関係

次に各流動パターンと流動条件の関係について述べる。Fig.3.2.1(a)(b)に各流動パターンとレイノルズ数 Re と流速比 β の関係をプロモータの高さを変えて調べた結果を示す。なお、Fig.3.2.1(a)はプロモータの長さ $L=26\text{mm}$ 、Fig.3.2.1(b)はプロモータの長さ $L=32\text{mm}$ の結果である。まず、乱流プロモータを設置しない場合には、流動パターンは流速比 β の減少とともにすなわち、枝管流速が主管流速に比べて速くなるにつれてパターン A→パターン B→パターン C の順に遷移する。またレイノルズ数が高くなるにつれて流れがパターン A からパターン B あるいはパターン B からパターン A へと遷移する流速比 β の値は大きくなり、パターン B の領域が拡大する傾向がある。

次に乱流プロモータを設置した場合について述べる。乱流プロモータを設置しない場合と同様に流動パターンは流速比 β の減少とともに、ほぼパターン A1→パターン A2→パターン B1→パターン B2→パターン C の順に遷移する。なお、レイノルズ数 $Re=1000\sim 2000$ の範囲では特異な流動パターンであるパターン B3 がみられる場合がある。また、プロモータを設置しない場合と異なり、レイノルズ数の増加によるパターン B の領域の拡大傾向はみられず、どのパターンもレイノルズ数による依存はみられない。また、乱流プロモータの高さにより傾向はほとんど変わらないが、乱流プロモータの長さ L が短く、そしてプロモータ先端がやや下流側に位置している場合($L=26$)の方が、パターン B からパターン C あるいはパターン C からパターン B へと遷移する流速比 β の値は小さくなる。

乱流プロモータの設置により合流部の流れが衝突噴流(流動パターン C)を示す領域は狭くなることがわかる。また乱流プロモータを設置しない場合と比較して、偏向噴流から衝突噴流へと遷移する流速比 β の値は減少する。これは枝管流背後の低圧な死水領域により、枝管から流入した流れが主管管軸方向へと偏向する割合が大きくなったためである。

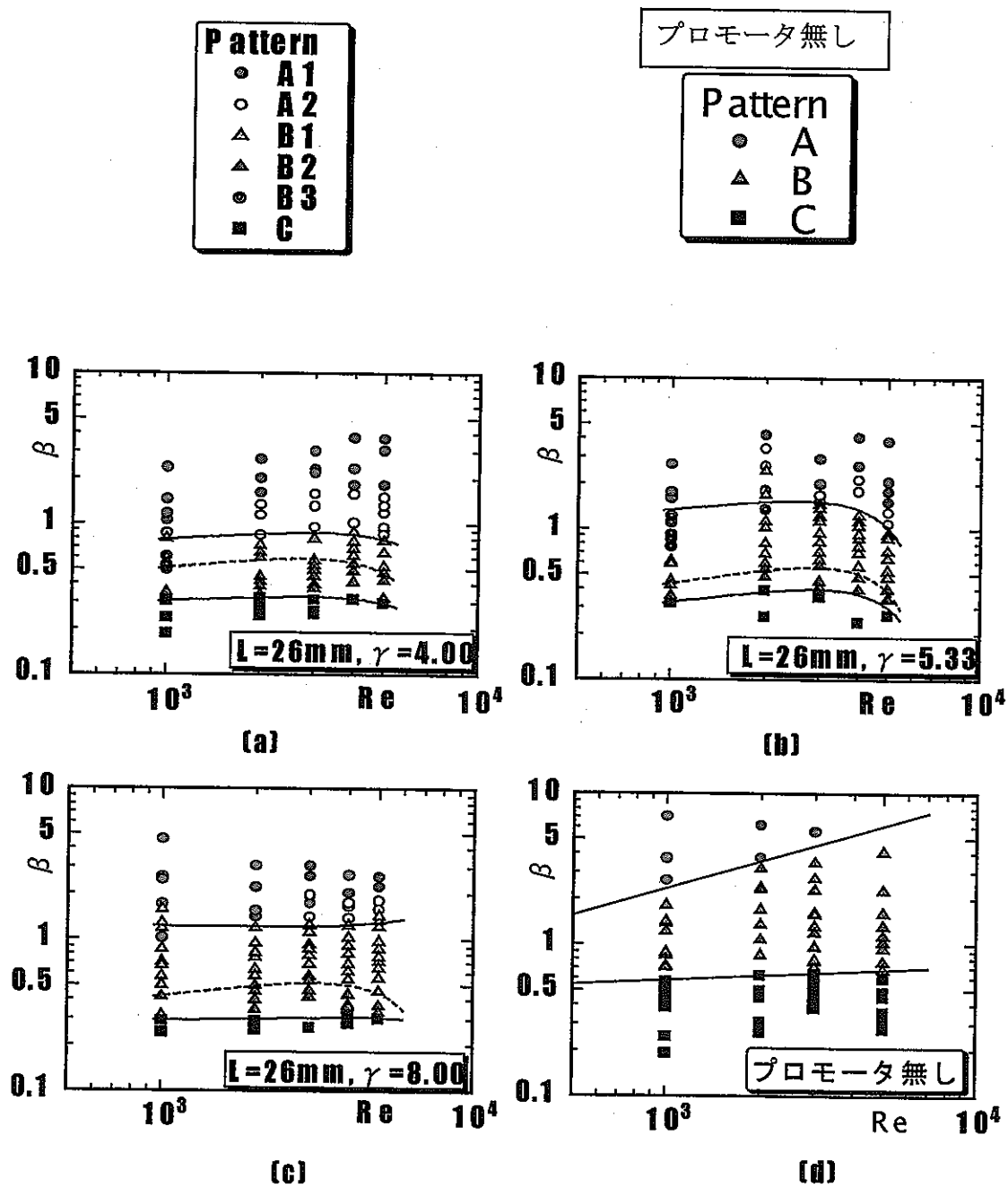


Fig.3.2.1(a) 流動パターンマップ ($L=26\text{mm}$)

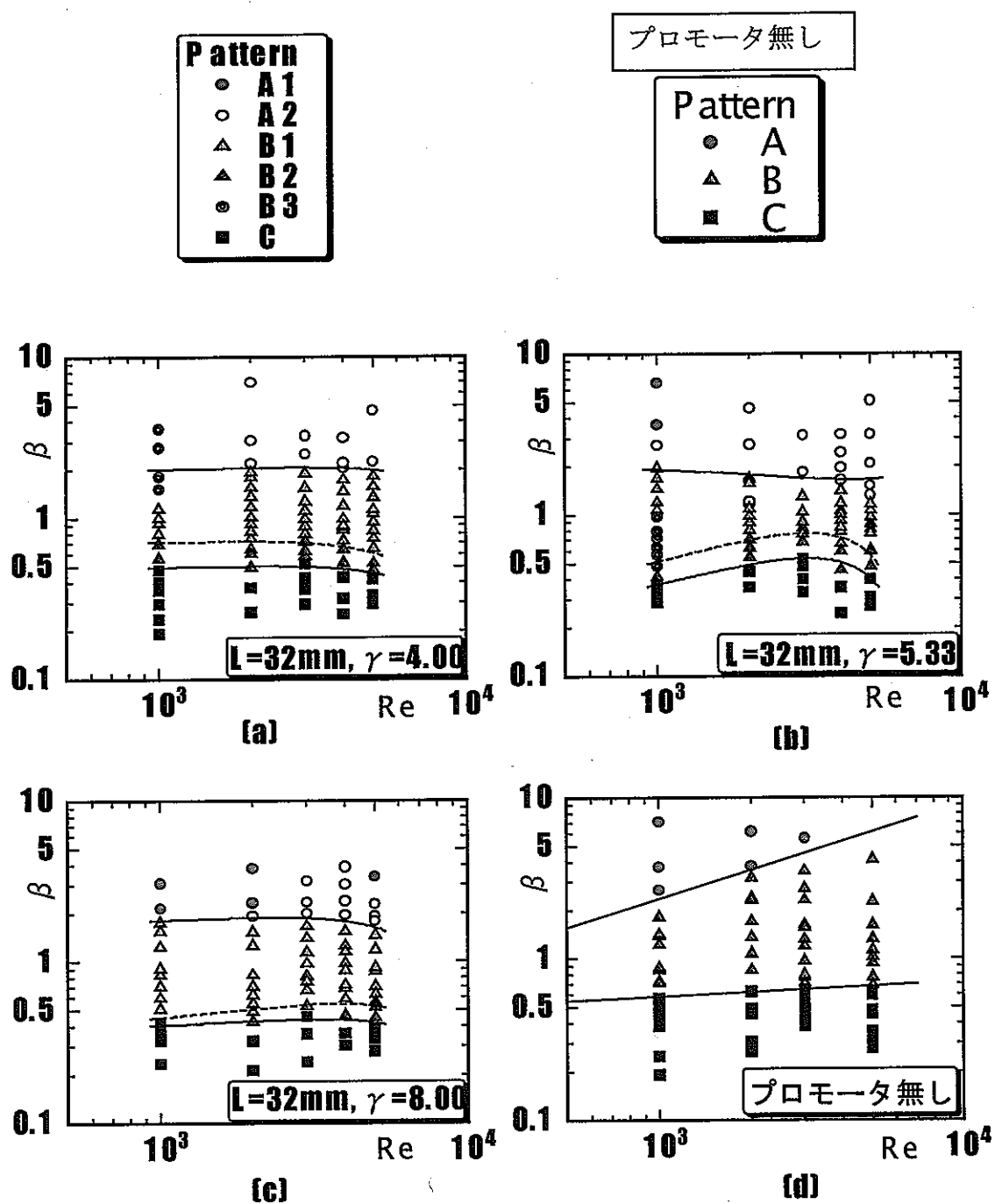


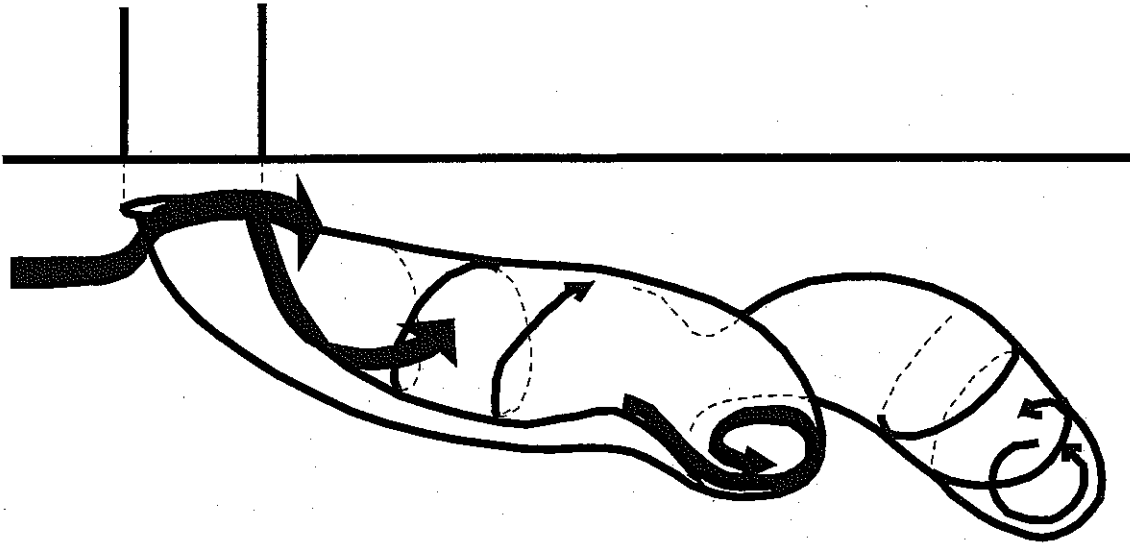
Fig.3.2.1(b) 流動パターンマップ ($L=32\text{mm}$)

3.3 渦の生成機構

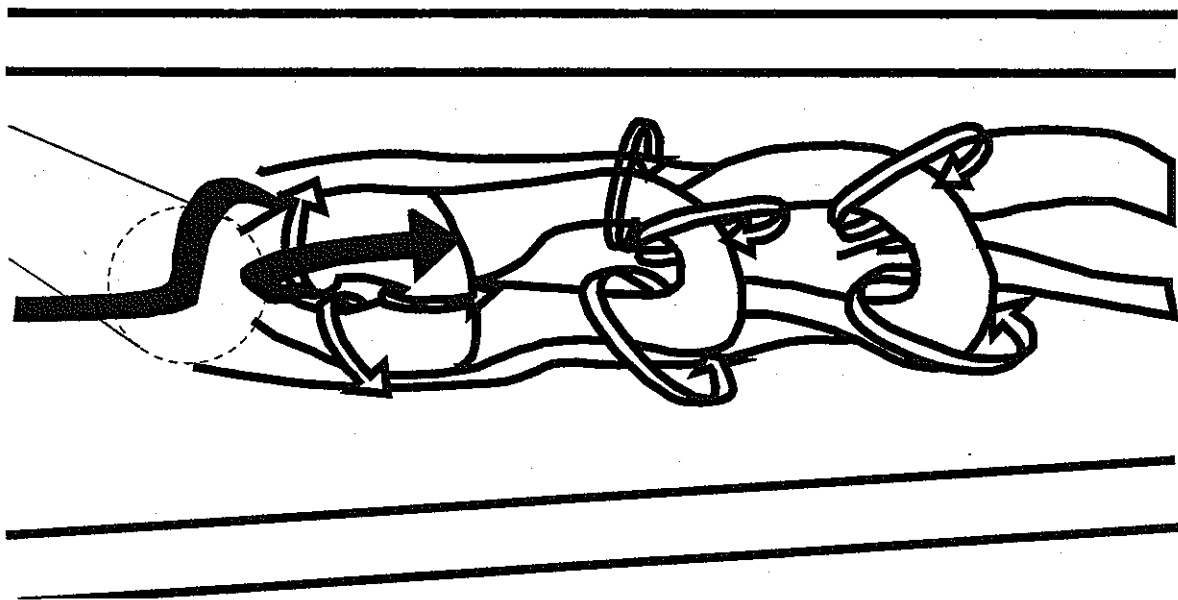
次に偏向噴流の場合に発生するアーチ渦状の渦列について述べる。乱流プロモータを設置した場合においても設置しない場合と同様に渦放出現象がみられた。本研究ではまず、プロモータを設置しない場合について渦発生 of 仕組みをくわしく調べた。アーチ渦の一例およびその模式図を Fig.3.3.1(a), (b)に示す。渦発生 of 仕組みは次のとおりである。

- 1) 枝管流の背後に発生する低圧の死水領域に、主流が枝管流を迂回しながら吸い込まれる。
- 2) 死水領域に主流は、死水領域中の低速流体とともに管中心側へと巻き上がり、枝管流の中央部(中央対称面付近)を突き抜けた後、その向きを下流方向に変える。
- 3) 一方、枝管流は、合流部に流入すると主流の衝突によりその向きを枝管軸方向から主管軸方向へと変える。この過程で枝管流には、遠心力の作用により曲がり管内流れと同様な二次流れが誘起される。
- 4) 1) 2) 3) により、合流後の枝管流は中央対称面に対してほぼ対称の一对の縦渦を形成する。
- 5) また、偏向後の枝管流には、流れの不安定性により管中心側の主管流との界面に振動現象がみられ、下流では薄い渦層となる。さらに下流では、界面付近にできたこの渦層は巻き上がり、横渦へと成長する。
- 6) この横渦に先ほどの縦渦がつながり、アーチ渦が形成される。

乱流プロモータを設置した場合についても渦発生 of 仕組みの基本構造は同様である。しかし、乱流プロモータを設置した場合にはきれいなアーチ状の渦はできず、アーチの一部きれたような状態の渦が発生した。その概略図を Fig.3.3.2に示す。これは、乱流プロモータの設置により枝管流背後の死水領域が狭くなったことなどが要因であると考えられる。

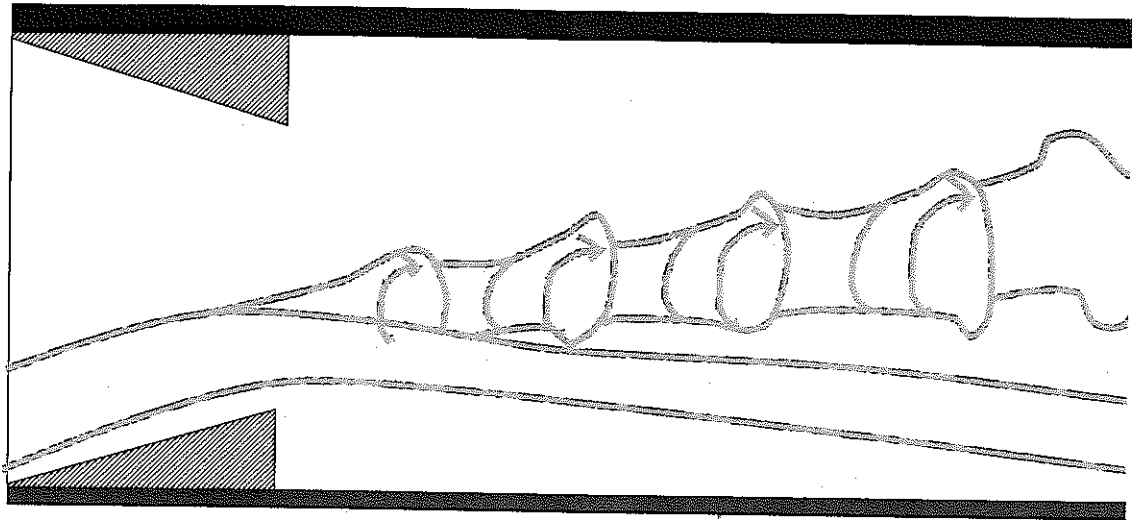


(a)

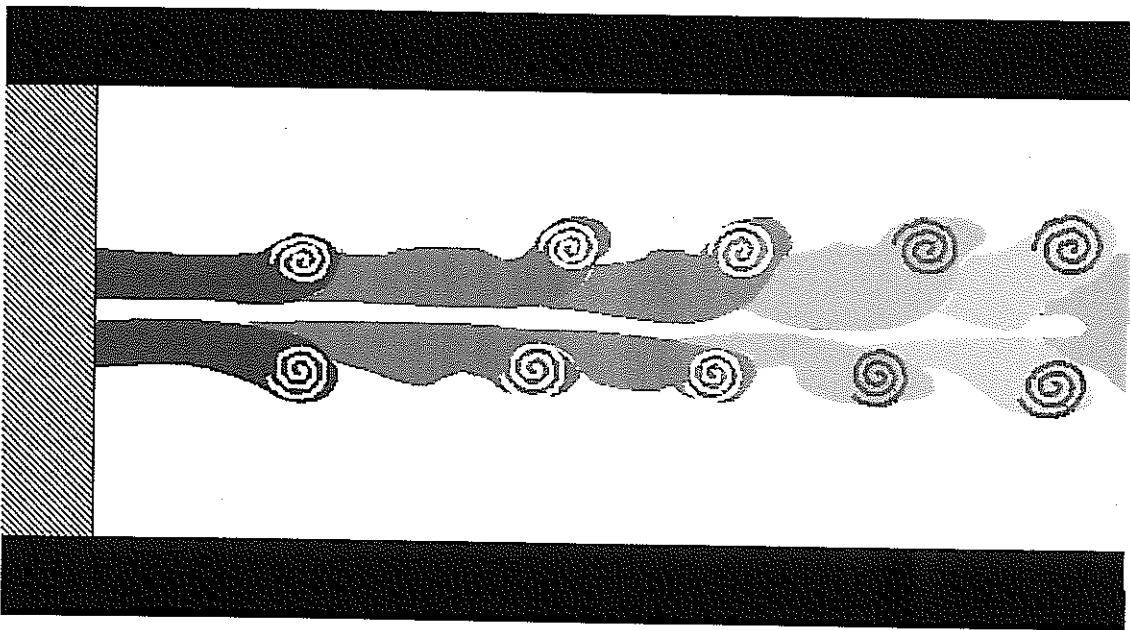


(b)

Fig.3.3.1 アーチ渦概略図



(a)



(b)

Fig.3.3.2 乱流プロモータを設置した場合の渦の概略図

3.4 対称水平面内の流れ

次に LDV による 3 方向の速度測定の結果を Fig.3.4.1(a)(b), Fig.3.4.2(a)(b) に示す。まず、対称水平面内の流れ($y=0$)、における軸方向速度分布を示す。図は $Re=1000$, $\alpha=3.33$, $\beta=0.71$, 0.58 の結果で、 β は偏向噴流、すなわちアーチ渦が発生する条件である。またプロモータの高さは $\beta=0.71$ の場合には $\gamma (=D_m/H)=8.00$, $\beta=0.58$ の場合には $\gamma (=D_m/H)=5.33$ とした。

3.4.1 乱流プロモータを設置しない場合

まず、乱流プロモータを設置しない場合の時間平均速度の軸方向速度分布を Fig.3.4.1(a), (b) に示す。

$\beta=0.71$ の場合(Fig.3.4.1(a))には、主管流と枝管流の合流前の $z/D_m=-1$ では、速度分布は層流の特徴であるポアズイユ流の分布となっている。主管流と枝管流が合流後の $z/D_m=1$ では、主管の枝管側に流速の遅い領域がみられる。これは主管内に流れ込んだ枝管流の背後に低圧な死水領域が形成されるためである。 $z/D_m=2$ では、速度分布は管中央部分に極小値、その両側に極大値をもつ屈曲した分布となる。これはアーチ渦の発生により、渦の中心である主管中央部分では低圧となり減速するためと、両側の流体が加速しているためと考えられる。 $z/D_m=2\sim 7$ と流下するにしたがい、主管中央部分の低速領域はみられなくなり、流下するにつれて渦が崩壊しているのが確認できる。しかし $z/D_m=7$ においても速度分布は一様になっておらず、流れは合流前の状態に回復していないことがわかる。

流速比がやや小さい $\beta=0.58$ の場合(Fig.3.4.1(b))には、つまり枝管流が速くなり、主管により進入する場合には、流動パターンは偏向噴流と衝突噴流との境付近となる。そのため、 $z/D_m=1$ では、枝管から流入した流れは主管の中央付近を流れる。Fig.3.4.1(b)において、主管中央付近の流れが偏向し、極端に流速が遅くなっている箇所が枝管からの流れである。この枝管からの流れにより主管が閉そくされるため、枝管側と反対側の流れは加速しているのがわかる。 $z/D_m=2$ においても、主管中央の流れは枝管からの流れで、 $+x$ 方向に偏向している。 $\beta=0.71$ の場合とは異なり、渦の中心である低速領域は枝管側と反対側に移動し、また流速も $\beta=0.71$ の場合と比べて極端には遅くなっていない。これらのことから流速比を小さく、つまり枝管流を速くすると、渦が枝管側と反対側に移動し、渦自体も速く崩れると考えられる。

さらに $z/D_m=5\sim7$ へと流下すると、流れは拡散し、速度分布は一様な乱流状態と同様な分布を示している。

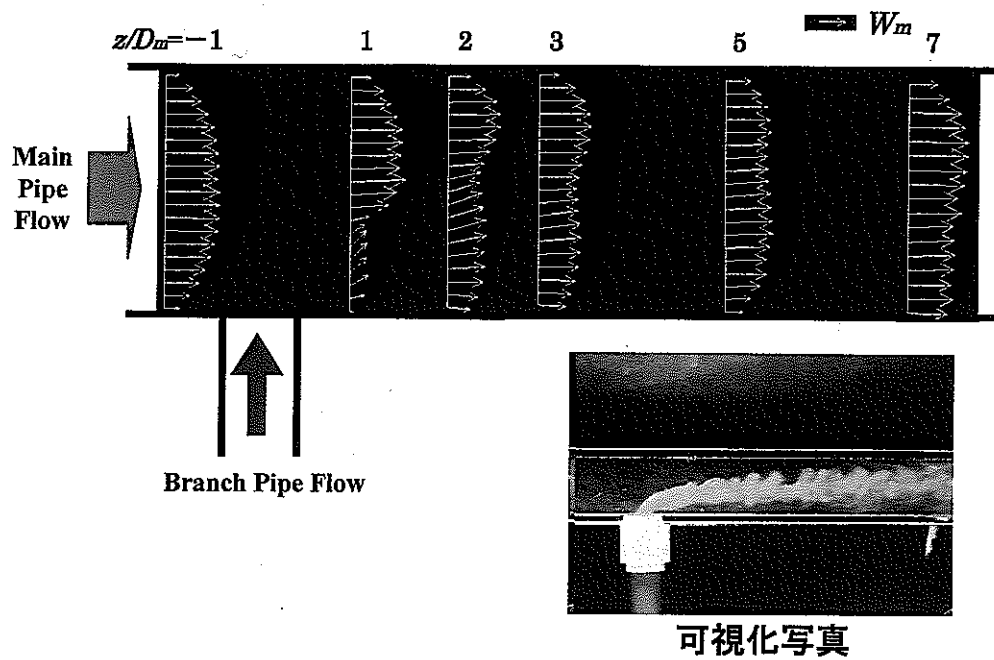


Fig.3.4.1(a) 対称水平面の流れ($\beta=0.71$)

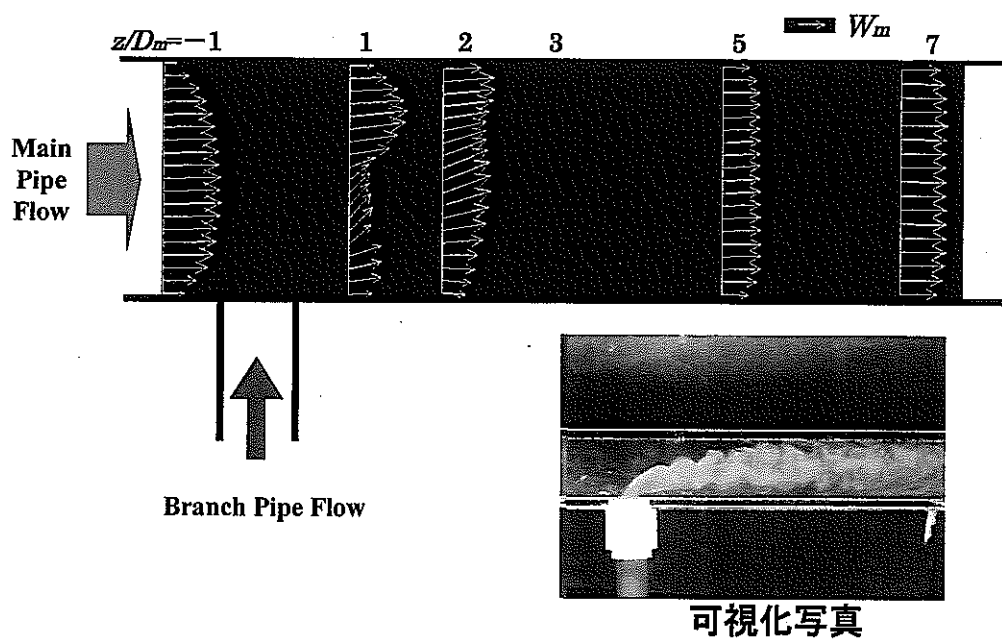


Fig.3.4.1(b) 対称水平面の流れ($\beta=0.58$)

3.4.2 乱流プロモータを設置した場合

次に $Re=1000$, $\alpha=3.33$, $\beta=0.71$, 0.58 でプロモータを設置した場合の対称水平面内の流れを Fig.3.4.2(a), (b)に示す. なお, プロモータの高さと水力直径の比 $\gamma(=D_m/H)$ は $\beta=0.71$ の場合には $\gamma=8.00(H=5.0)$, $\beta=0.58$ の場合には $\gamma=5.33(H=7.5)$ である.

$\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.4.2(a))には, $z/D_m=1$ のプロモータの背後の, 低圧な死水領域で流れははく離し, 流れは低速となり, そこでは若干の逆流もみられる. またプロモータ間ではプロモータの設置により主管流路の断面積が狭まるため, そこでは主管流が加速している. またプロモータを設置しない場合に比べて, 主管中央部の流れの向きが偏向する付近の速度も増速しているのがわかる.

$z/D_m=2$ では, プロモータを設置しない場合とほぼ同様な速度分布を示すが, 主管路の+x側の管壁付近での流れは+x側に偏向している. これはプロモータを通過後, はく離した流れが, コアンダー効果により壁面に再付着しようとするためである. またプロモータを設置しない場合と比べて流れは加速している.

$z/D_m=5\sim7$ と流下すると, プロモータを設置しない場合(Fig.3.4.1(a))に比べて, ほぼ一様な速度分布となっており, 流れは合流前の状態にかなり回復している. これは後述するように, プロモータの設置により強い二次流れが形成され, これにより流れの拡散が急速に進んだためである.

次に $\beta=0.58$, $\gamma=5.33$ の場合(Fig.3.4.2(b))には, すなわち先ほどの条件より β をやや小さくし, プロモータの高さを 5.0 から 7.5mm と高くした場合には, $z/D_m=1$ では, 枝管からの流れは速くなったため, 主流の速度成分はより偏向するようになる. また, 流れはさらに加速している. またプロモータの高さが高くなったため, プロモータの背後のはく離領域も大きくなっている.

$z/D_m=2$ では, 主管流の偏向の影響が残っており, 主管の枝管側に比べ, 枝管と反対側の流れが速くなっている. また流れの最も速い箇所は主管中央に位置し, 主管中央の流速が遅くなる $\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の結果とは異なっている. そのため, きれいなアーチ渦が発生していないと考えられる.

$z/D_m=5\sim7$ では, 主管の枝管とは反対側で流れはやや速くなっており, 流れはまだ偏っていることがわかる. これは合流部の影響が依存して残っているためである.

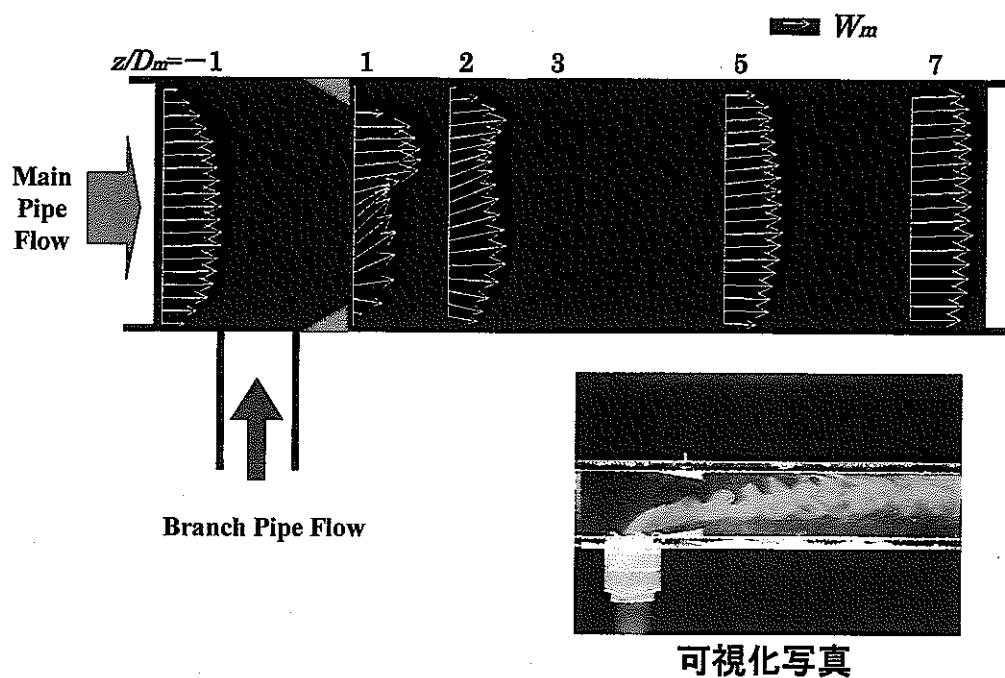


Fig.3.4.2(a) 乱流プロモータを設置した場合の対称水平面の流れ($\beta=0.71$)

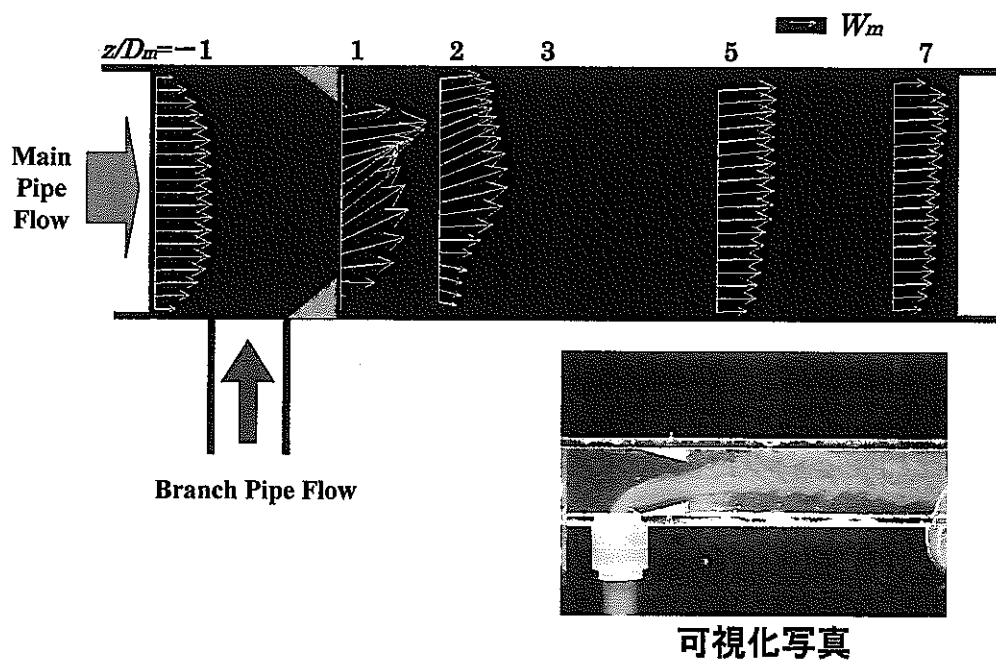


Fig.3.4.2(b) 乱流プロモータを設置した場合の対称水平面の流れ($\beta=0.58$)

3.5 軸方向速度分布

次に、主管各断面における、管軸方向の時間平均速度の分布を示す。なお、図は主管の上半断面図である。

3.5.1 乱流プロモータを設置しない場合

まず、乱流プロモータを設置しない場合における軸方向速度の分布を Fig.3.5.1(a), (b)に示す。図はそれぞれ $\beta=0.71$, 0.58 の場合である。

$\beta=0.71$ の場合(Fig.3.5.1(a))には、主管流と枝管流の合流前の $z/D_m=-1$ においては、主管中央で速く、管壁に向かうにしたがい低速となるポアズイユ流の分布となっている。主管と枝管の合流後の $z/D_m=1$ では、主管の枝管側に低速領域がみられる。これは主管に流れ込んだ枝管流の背後に低圧な死水領域が形成されるためである。 $z/D_m=2$ では、管中央部の低速領域のまわりに高速領域がひろがる。これはアーチ渦の発生により、主管中央部で低圧となり、そこでは低速に、そのまわりでは高速になるためと考えられる。

$z/D_m=3$ では、主管中央で $z/D_m=2$ と比べて高速となっている。また、管中央部の低速領域のまわりに分布する高速領域も一部分が切れたような分布となり、渦が崩れていく様子が確認できる。 $z/D_m=5\sim7$ へと流下すると、さらに渦が崩壊し、流れの一様化が進んでいる。また $z/D_m=3\sim7$ と流下するにつれて、流れの速い領域が下流方向に移動しながら流下する様子がわかる。これは主管流と枝管流の合流により発生する二次流れによって、高速な流体が管断面内において輸送されたためである。

次に $\beta=0.58$ の場合(Fig.3.5.1(b))の結果である。これは β がやや小さく、つまり枝管流が速くなり、主管内により深く進入するようになる条件である。そのため $z/D_m=1$ において、枝管流の背後にできる低圧領域は、 $\beta=0.71$ の場合(Fig.3.5.1(a))と比べて拡大している。 $z/D_m=2$ での分布は $\beta=0.71$ の場合と比べて、はっきりとした半円状の分布にはなっておらず、管中央部の流れもそれほど低速となっていないことが確認できる。このことから、きれいなアーチ渦が形成されていないことが推測できる。これは枝管流が速くなったことに対応して二次流れが強くなり、より多くの運動量が輸送され拡散が十分に進んだためと考えられる。この影響は $z/D_m=5\sim7$ へと流下しても確認することができ、 $z/D_m=5, 7$ の分布は $\beta=0.71$ の場合(Fig.3.5.1(a))と比べて、流れが急速に一様な分布となっていくことがわかる。

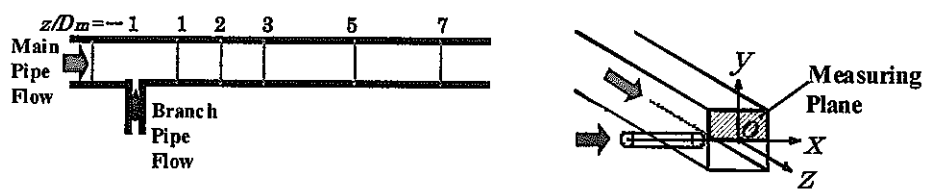
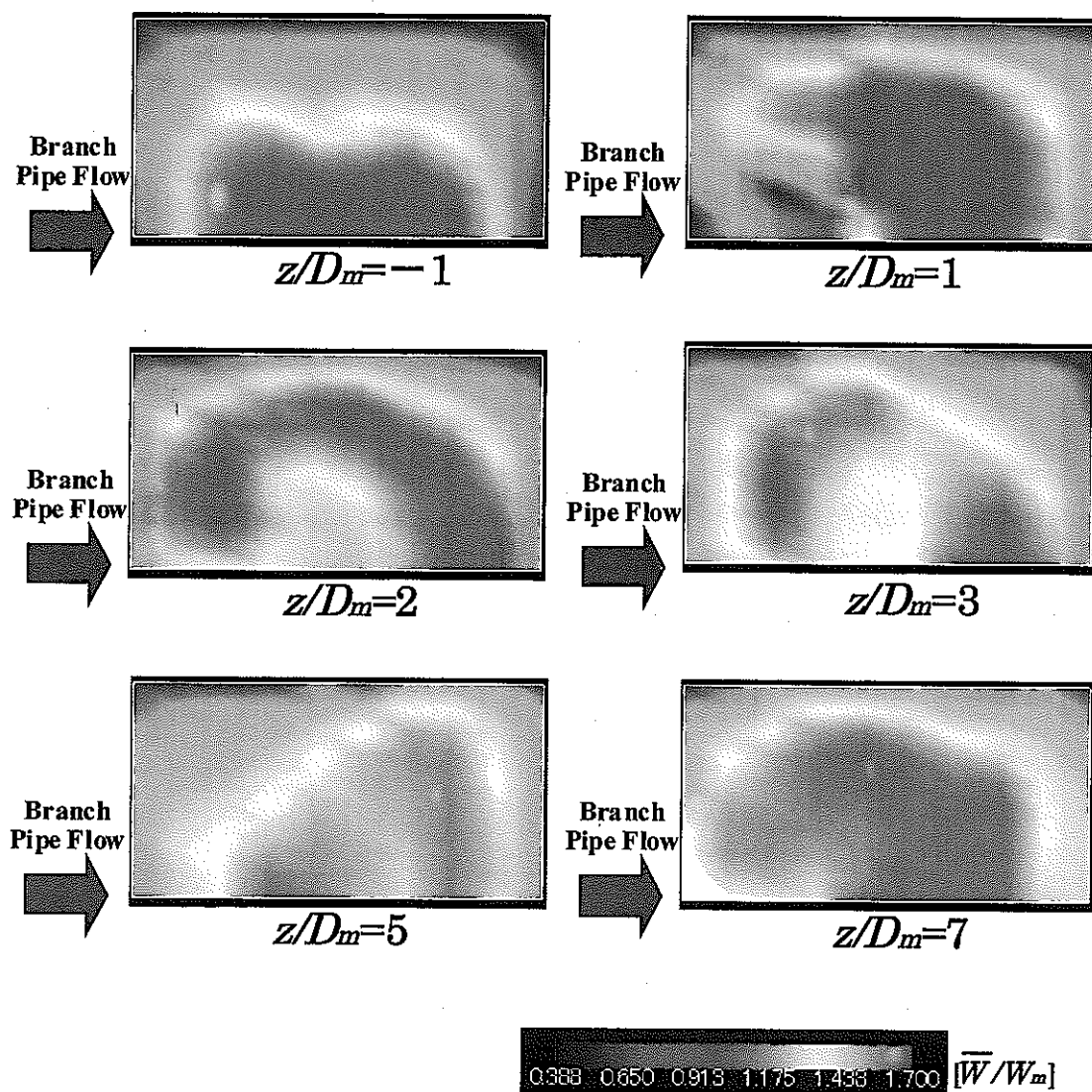


Fig.3.5.1(a) 各断面における軸方向速度の分布($\beta=0.71$)

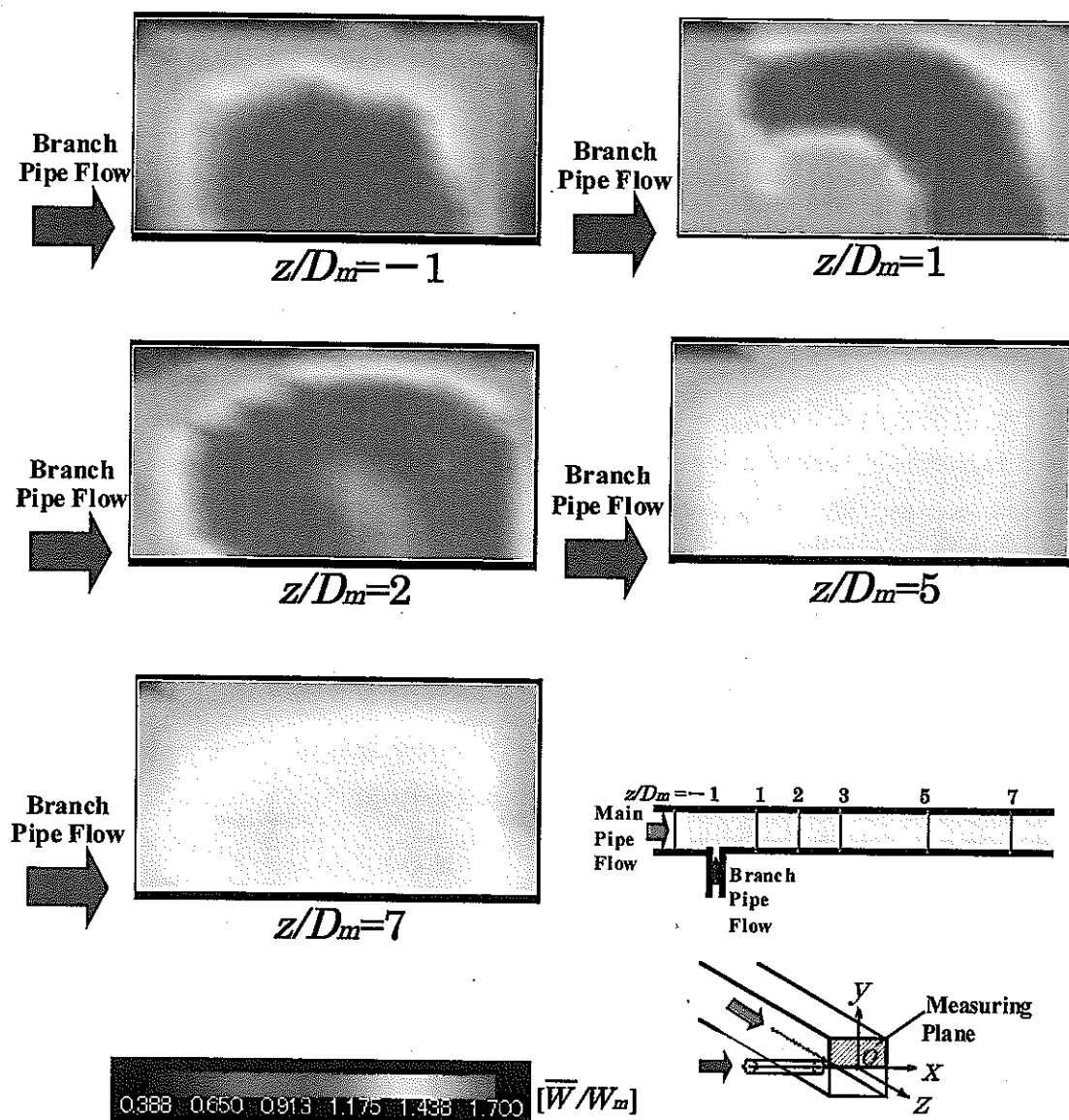


Fig.3.5.1(b) 各断面における軸方向速度の分布($\beta=0.58$)

3.5.2 乱流プロモータを設置した場合

次に $Re=1000$, $\alpha=3.33$, $\beta=0.71$, 0.58 でプロモータを設置した場合の軸方向速度の分布を Fig.3.5.2(a), (b)に示す. 図はそれぞれ $\beta=0.71$, $\gamma(=D_m/H)=8.00$ と $\beta=0.58$, $\gamma(=D_m/H)=5.33$ の場合である.

$\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.5.2(a)), $z/D_m=1$ では, プロモータの背後にあたる左右の管壁近傍で, 低圧な死水領域となっており, そこでは流れがよどんでいる. プロモータの間では, プロモータの設置により流路の断面積が狭まるため, そこでは流れが加速しているのがわかる. またプロモータを設置しない場合と比較して, 枝管流の背後の低圧領域は小さくなっている. そして管中央部の低速領域のまわりに, 高速領域が分布しており, 渦を形成し始めていることがわかる. これはプロモータの設置により, 流路の断面積が狭まり, 主流が加速するため, 渦がより上流側で形成された後に, 渦が下流に移送されるためと考えられる.

$z/D_m=2$ では, プロモータを設置しない場合と同様な速度分布がみられるが, 最も流れの速い領域は枝管側にみられる. これはプロモータの設置のために, より強い二次流れが誘起されるため, プロモータを設置しない場合よりも, 高速な流体がより速く輸送されたためである. また依然としてプロモータの背後には, はく離による低圧領域が存在するのが確認できる.

$z/D_m=5\sim7$ へと流下すると, プロモータを設置しない場合と比べて流れは一樣になっている. しかし $z/D_m=7$ においても速度分布は一部偏っており, 対称水平面内の図では流れは合流前の分布に回復しているように思えたが, 管路全体でみると流れは, まだ回復しているとは言えない.

次にプロモータの高さを 5.0 から 7.5mm と高く, β を 0.71 から 0.58 へと小さくした $\beta=0.58$, $\gamma=5.33$ の場合(Fig.3.5.2(b))の結果を述べる. $z/D_m=1$ では, 主管の管壁近傍に存在するプロモータによるはく離領域が大きくなっていることがわかる. またプロモータの間ではプロモータの高さが高くなり, 流路の断面積がより狭まったことにより, $\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.5.2(a))と比べて, 流れはさらに加速している. また主管中央の流速は遅く, その周囲に高速領域が分布しており, 渦がすでに形成されている様子がわかる. これはプロモータの高さが高くなったことにより, 合流部の流れがさらに加速したため, 渦の形成位置もさらに上流側に移動したためと考えられる.

$z/D_m=2$ ではプロモータを設置しない場合や, プロモータ高さ 5mm の場合にみられた速度分布とは異なり, 対称水平面内の図でも述べたように, きれいなアーチ渦が形成されていないことがわかる. また枝管からの流れはプロモータ

に沿って+x方向に偏向し、主管の枝管側とは反対側を流下するので、枝管側には依然として低圧な領域が存在している。

$z/D_m = 5 \sim 7$ に流下しても上流の影響は残っており、流速の最も速い領域は主管の枝管とは反対側に位置し、流れが偏っていることがわかる。しかしプロモータ高さ 5mm と比較して、断面内の流速は一樣になっている。これは高さの高いプロモータのため、二次流れがより強くなった結果、運動量の拡散が急速に進むためと考えられる。

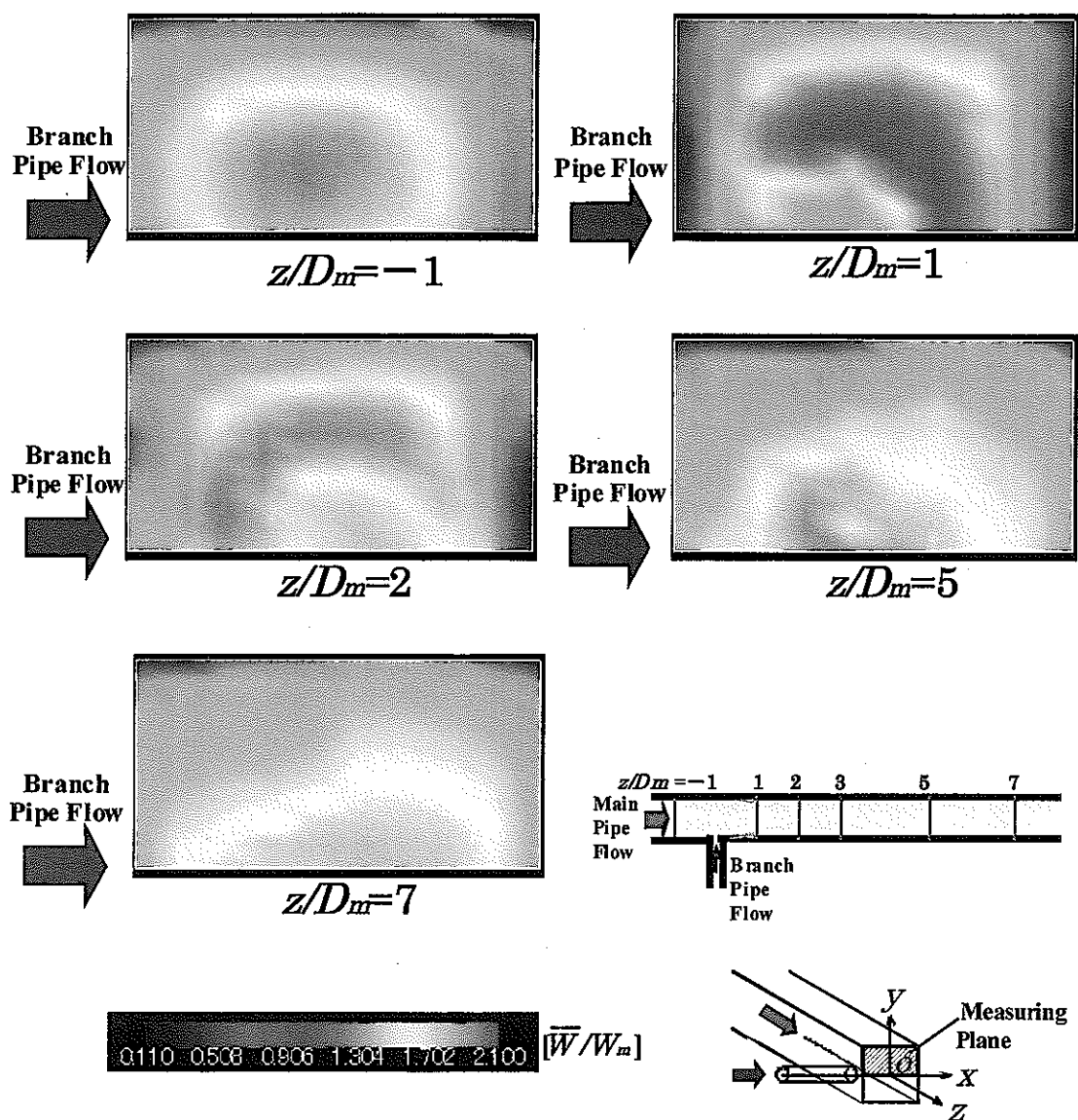


Fig.3.5.2(a) 乱流プロモータを設置した場合の軸方向速度の分布($\beta=0.71$)

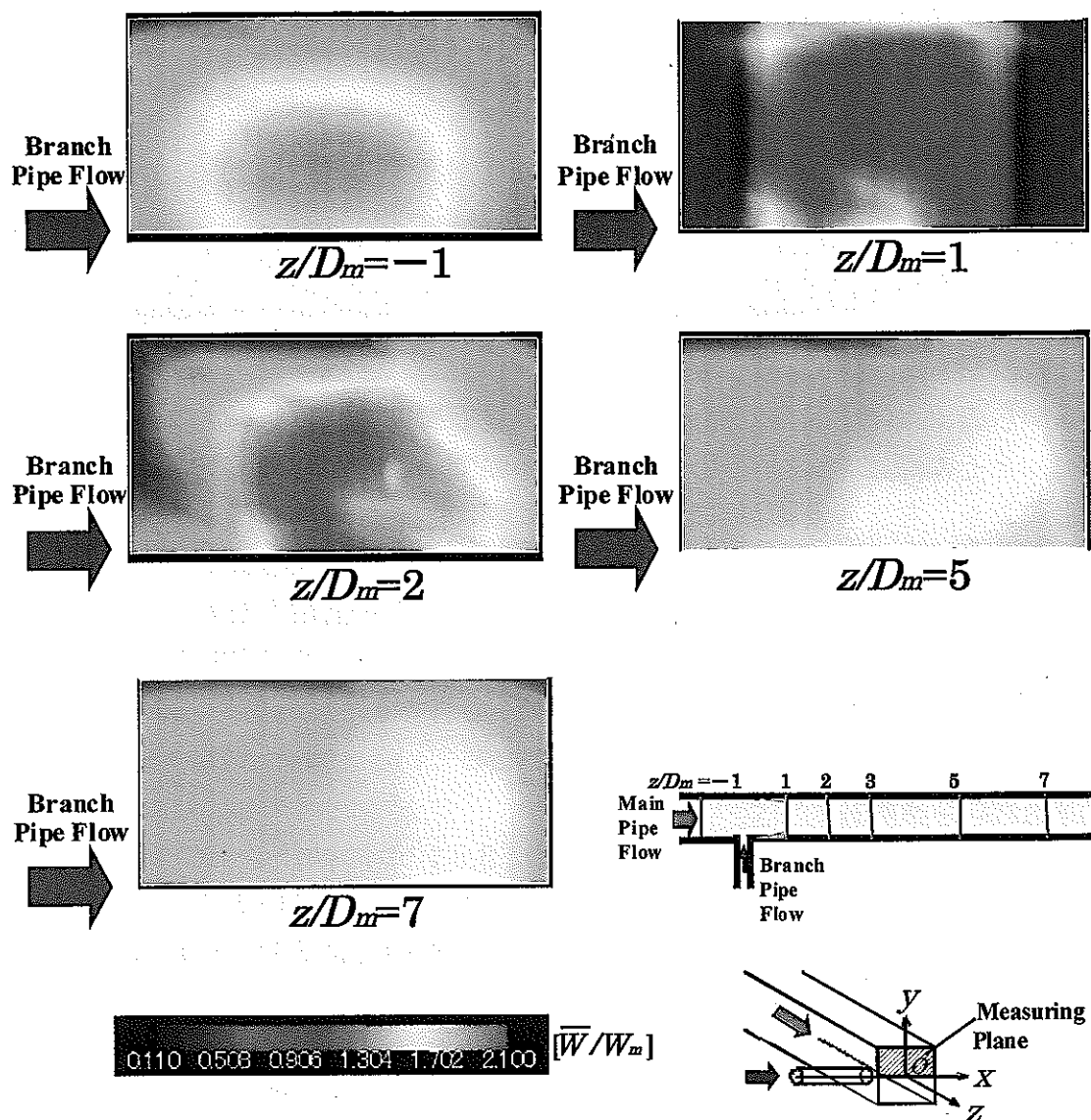


Fig.3.5.2(b) 乱流プロモータを設置した場合の軸方向速度の分布 ($\beta=0.58$)

3.6 二次流れ図

次に、 x , y 方向の、時間平均速度 $\bar{U}$, $\bar{V}$ の測定結果から得られる断面内の二次流れの分布を示す。

3.6.1 乱流プロモータを設置しない場合

まず乱流プロモータを設置しない場合の $\beta=0.71$, 0.58 における主管断面の二次流れの様子を Fig.3.6.1(a), (b)に示す。

枝管からの流れは主管内に流入すると主管流と衝突し、枝管軸方向から主管軸方向へとその向きを大きく変える。この過程で、枝管からの流れには遠心力の作用により、ちょうど曲がり管内流れと同様に、対称水平面付近において左から右へ、上下壁付近に右から左へと向かう二次流れが誘起される。さらに主管の枝管側は枝管からの流れの背後となり、低圧な死水領域となり、この低圧領域に上流から主管流が流れ込む。このため、 $\beta=0.71$ の場合(Fig.3.6.1(a))の $z/D_m=2$ では、反時計回りに回転する流れがみられるようになる。 $z/D_m=5$ でも反時計回りの渦がみられるが、渦は環状になっている。また $z/D_m=2$ と比べて、二次流れは減衰している。

枝管流速が速くなる $\beta=0.58$ の場合(Fig.3.6.1(b))には、 $\beta=0.71$ の場合(Fig.3.6.1(a))と比べて、二次流れの様子が非常に複雑になっていることがわかる。 $z/D_m=2$ では、対称水平面付近に枝管からの流れの偏向による左から右へと向かう二次流れが形成されている。 $\beta=0.71$ の場合(Fig.3.6.1(a))と比べて、 β が小さくなり枝管流速が速くなったため、二次流れはより強くなっている。その流れと対になるように管路上部では、右から左へと向かう流れが確認できる。また主管の枝管側付近においては、上から下へと流れる二次流れが推測できるが、図では下から上へと流れている。これは、流速比 $\beta=0.58$ の場合(Fig.3.6.1(b))には、流動パターンは偏向噴流と衝突噴流の境界にあたるため、二つの流動パターンをあわせもつ流れが存在していると考えられる。その結果、二次流れも複雑になったと考えられる。

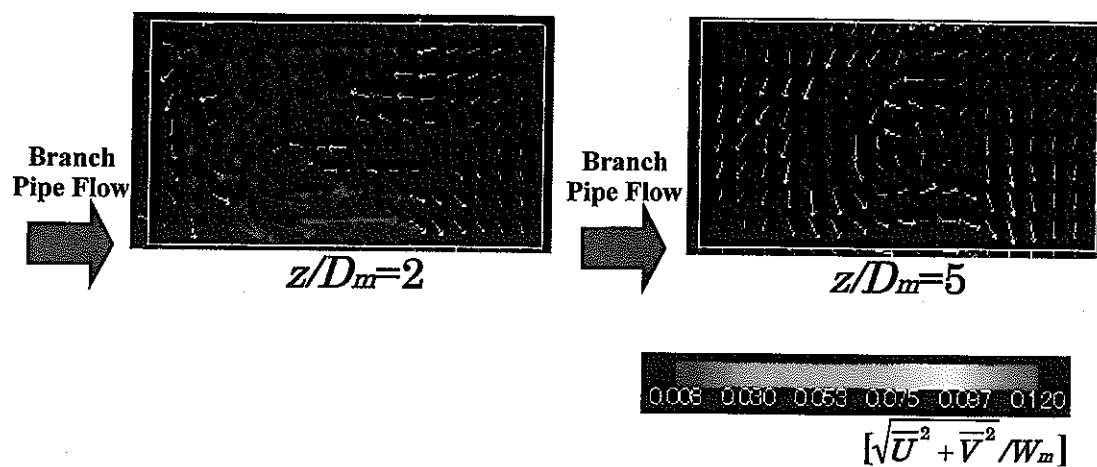


Fig.3.6.1(a) 各断面における二次流れ図($\beta=0.71$)

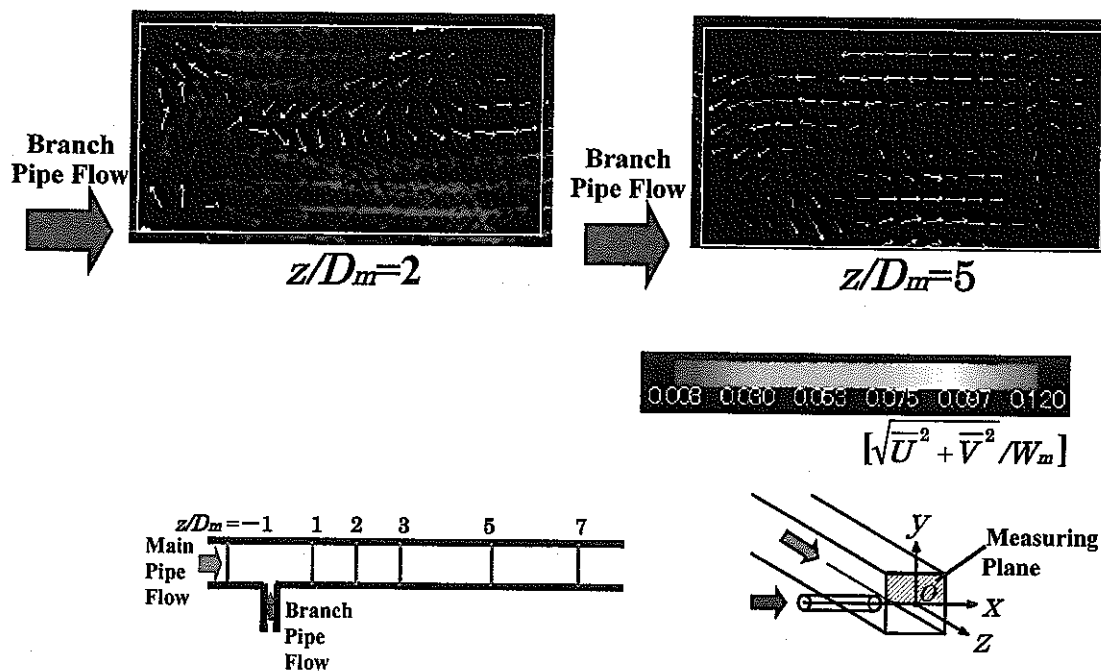


Fig.3.6.1(b) 各断面における二次流れ図($\beta=0.58$)

3.6.2 乱流プロモータを設置した場合

次に $Re=1000$, $\alpha=3.33$, $\beta=0.71$, 0.58 でプロモータを設置した場合の二次流れ図を Fig.3.6.2(a), (b)に示す. 図はそれぞれ $\beta=0.71$, $\gamma(=D_m/H)=8.00$ と $\beta=0.58$, $\gamma(=D_m/H)=5.33$ である.

$\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.6.2(a))には $z/D_m=2, 5$ ともプロモータの設置により, 二次流れが強くなっている様子が確認できる. また $z/D_m=2$ ではプロモータを設置しない場合と異なり, 渦が環状になっている様子が確認できる. これはプロモータの設置のために, より強くなった二次流れにより, 運動量の輸送が急速に行われたためである.

断面内には, 主管右側に反時計回りに回転する強い渦と, その渦と対になるように, 主管の枝管側の管壁付近に時計回りに回転する渦の, 二つの渦が確認できる. プロモータを設置しない場合では, みられなかった時計回りの渦が発生した原因としては二つの要因が考えられる. まず第一にはプロモータの設置により, 流れがプロモータ通過後, 管壁に再付着すること, 第二に, プロモータの設置により強い二次流れが誘起されるため, 時計回りの渦と逆回転の渦が誘起されやすい状態になったことが考えられる. 以上の事から時計回りに回転する渦が発生したと考えられる. また主管右側の反時計回りの渦の中心は, プロモータを設置しない場合と比べてやや右側に移動している. プロモータを設置しない場合には, 合流部において枝管流は主管流との衝突により急激に偏向する. しかしプロモータを設置した場合には, 枝管流はプロモータにより十分偏向できず, プロモータに沿って流れるため, 下流における枝管からの流れは主管の枝管側とは反対側を流れることになる. したがって生成される渦もプロモータを設置しない場合と比べて, 断面内のやや右側に移動すると考えられる. 枝管からの流れがプロモータに沿って流れる影響は $z/D_m=5$ に流下しても見られ, $z/D_m=5$ での反時計回りに回転する渦中心は $z/D_m=2$ と比較して, さらに右側に移動する. また二次流れは減衰している.

$\beta=0.58$, $\gamma=5.33$ の場合(Fig.3.6.2(b))には, 二次流れの様子は $\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.6.2(a))とほぼ同様である. しかし二次流れの強さはプロモータの高さが高くなったことで, より強くなっており, 主管の枝管側の時計回りの渦もよりはっきりと確認できる. また $z/D_m=5$ へと流下すると二次流れは減衰していることがわかる.

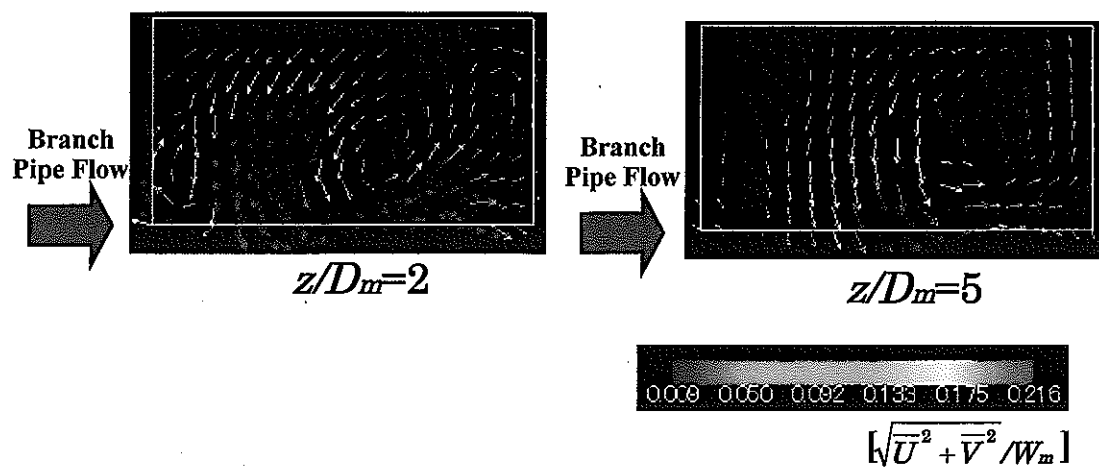


Fig.3.6.2(a) 乱流プロモータを設置した場合の二次流れ図($\beta=0.71$)

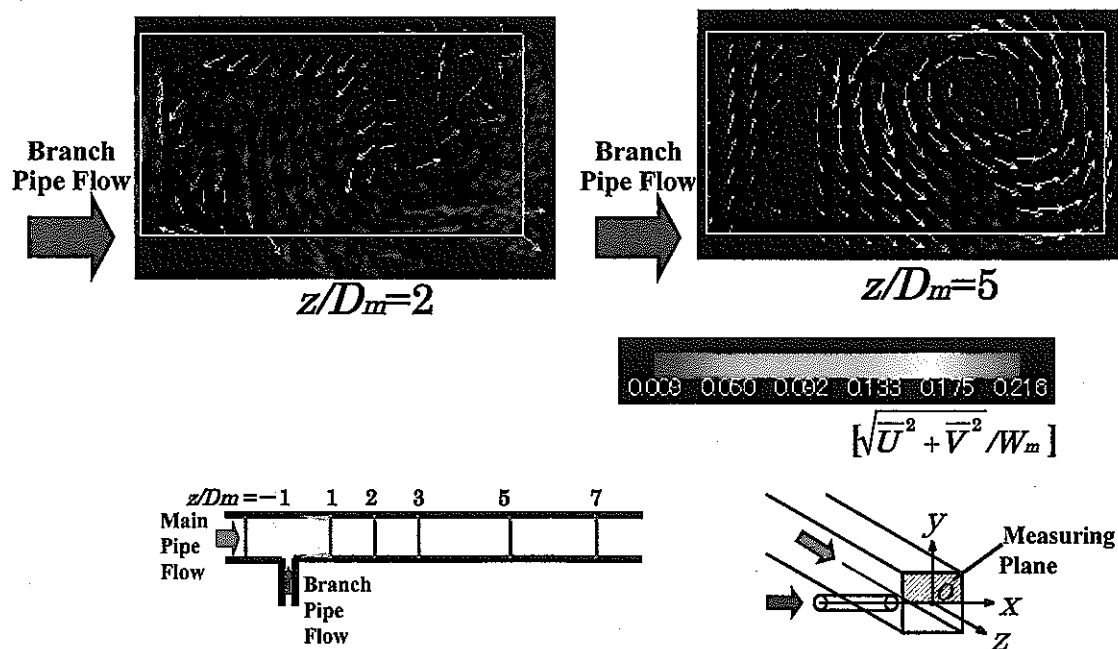


Fig.3.6.2(b) 乱流プロモータを設置した場合の二次流れ図($\beta=0.58$)

3.7 軸方向速度の速度変動の実効値

次に、軸方向流速の速度変動の実効値 $\tilde{w}$ の分布を示す。ここで $\tilde{w}$ は

$$\tilde{w} = \sqrt{(\overline{w^2} - \overline{w})^2}$$

で定義する。

3.7.1 乱流プロモータを設置しない場合

まず、乱流プロモータを設置しない場合における $\beta=0.71$, 0.58 の軸方向速度の速度変動の実効値の分布を Fig.3.7.1(a), (b)に示す。

いずれの場合(Fig.3.7.1(a), (b))ともに、 $z/D_m=1\sim 2$ にかけて変動値が大きく増加した後、さらに下流に流下すると減少する傾向がみられる。 $z/D_m=1\sim 2$ にかけての領域は、渦が発生し成長する領域に相当するため、流れに変動が生じ、速度変動値は大きく増加すると考えられる。また下流に流下するにつれて渦は急速に拡散するため、速度変動値も減少していると考えられる。

$\beta=0.71$ の場合(Fig.3.7.1(a))を詳しくみると、 $z/D_m=1$ では主管の中央から枝管側にかけて大きな速度の変動がみられる。ここでは枝管から流入した流れが、主管流と衝突し、渦を発生するため速度変動は大きくなっている。 $z/D_m=2$ では、 $z/D_m=1$ と比べてより大きな速度変動の領域は主管中央部から、やや右側に移動し、その領域も拡大していることがわかる。 $z/D_m=5, 7$ では、速度変動値は一様な分布となり、大きな変動はみられない。しかし下流の $z/D_m=7$ では、枝管とは反対側の領域において、速度変動値が減少している。このように $z/D_m=1\sim 7$ へと流下するにつれて、速度変動の大きい領域は断面内を左側から右側、また左側へと移動している様子が確認できる。これは先に述べた二次流れから説明できる。この条件での二次流れは、主管半断面の中央を中心とした半時計回りの流れとなっている。そのため、この二次流れによって速度変動の大きい領域は断面内を左側から右側、そしてまた左側へ輸送されたと考えられる。

$\beta=0.58$ の場合(Fig.3.7.1(b))には、速度変動値は $\beta=0.71$ の場合(Fig.3.7.1(a))と比べて、大きく増加しており $z/D_m=2$ での最大値は約 2.5 倍にもなっている。この原因には流速比 β が小さくなり、枝管流速が速くなったため、主管に流入する際に生じる速度変動が大きくなったこと、また生成される渦自体の変動も大きくなったことが考えられる。

$z/D_m=1$ では、速度変動の大きい領域は二箇所みられる。すなわち、枝管側の

管壁付近にみられる枝管流の流入によりできる速度変動と、主管の中央付近にみられる渦の生成による変動である． $z/D_m=1\sim7$ へと流下するにつれて， $\beta=0.71$ の場合(Fig.3.7.1(a))と同様に反時計回りに回転する二次流れによって，速度変動の領域が輸送されている様子が確認できる．しかし，より強い二次流れが誘起されているため，速度変動の領域もより速く輸送されている．また下流においても速度変動の分布は，一様な分布になっておらず，速度変動の大きい領域が枝管側に輸送されている様子が確認できる．

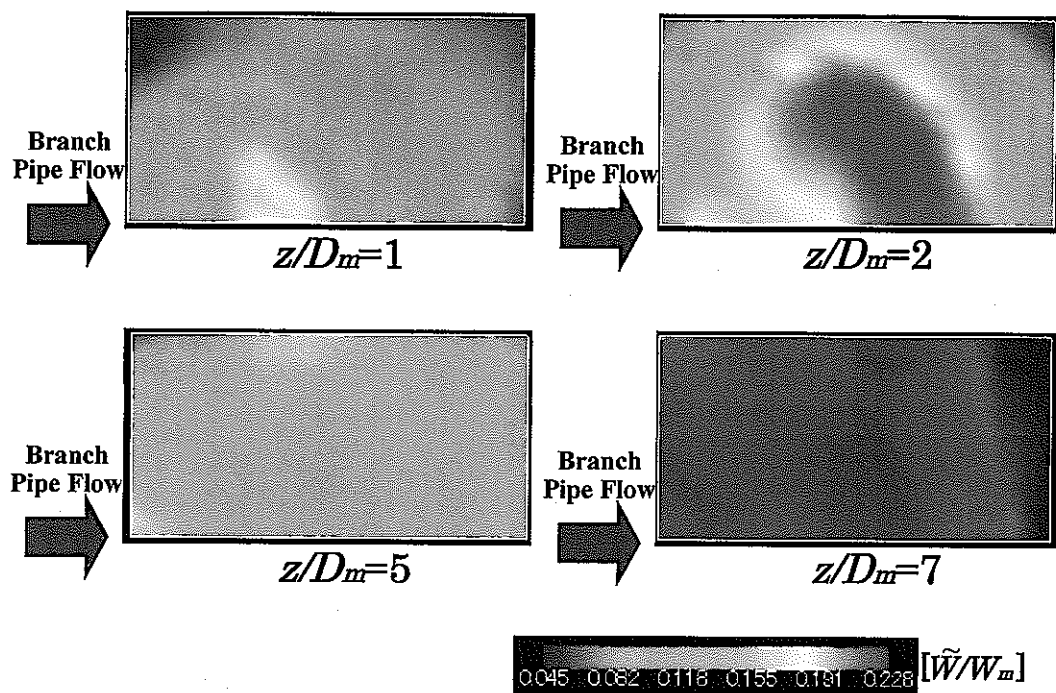


Fig.3.7.1(a) 各断面における速度変動分布($\beta=0.71$)

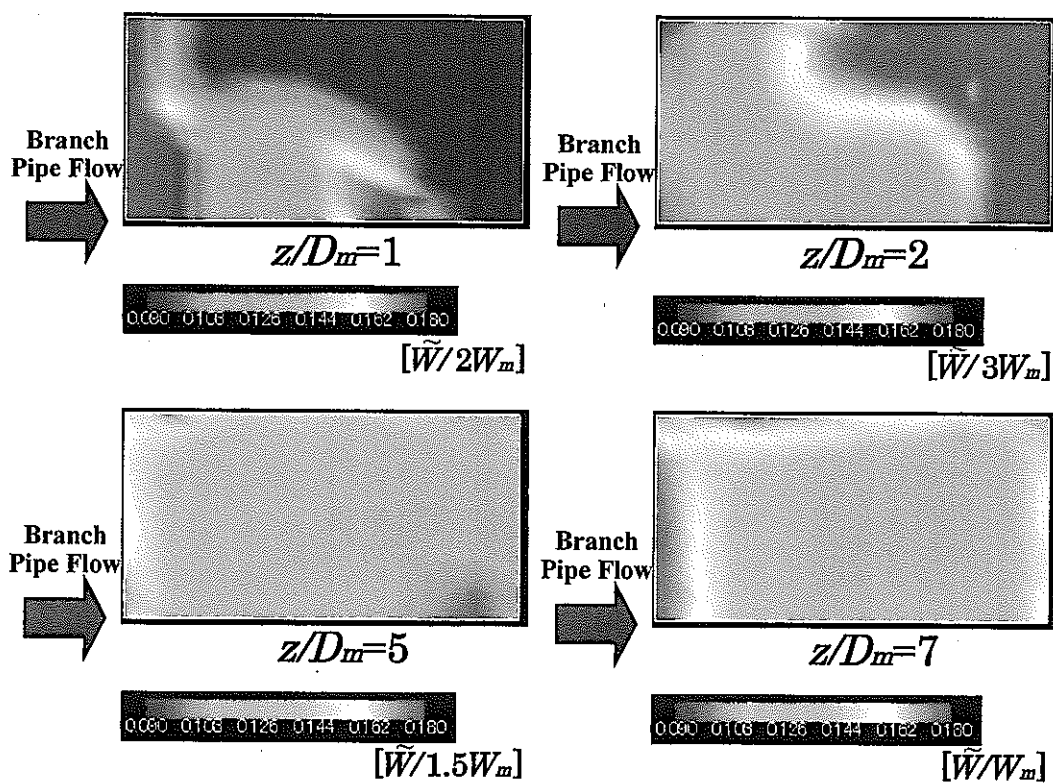


Fig.3.7.1(b) 各断面における速度変動分布($\beta=0.58$)

3.7.2 乱流プロモータを設置した場合

次に $Re=1000$, $\alpha=3.33$, $\beta=0.71$, 0.58 でプロモータを設置した場合の速度変動の実効値の分布を Fig.3.7.2(a), (b)に示す. 図はそれぞれ $\beta=0.71$, $\gamma(=D_m/H)=8.00$ と $\beta=0.58$, $\gamma(=D_m/H)=5.33$ である.

$\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.7.2(a))には, $z/D_m=1$ において主管の左右の管壁付近では, プロモータの背後の死水領域のために, 速度変動値が小さい. また, 主管中央部には渦の生成による速度変動がみられる. $z/D_m=2$ では, プロモータを設置しない場合と異なり, 速度変動の大きい領域が枝管側と主管中央部の2つの領域に移動している. プロモータを設置した場合の $z/D_m=2$ の二次流れの結果によると, 枝管側に時計回りに回転する渦, 主管中央に反時計回りに回転する渦が確認できる. 速度変動の大きい領域と渦の位置がほぼ一致するため, 速度変動の大きい領域は二次流れによる渦が原因であると言える. このことから速度変動は二次流れに大きく依存することがわかる.

$z/D_m=5, 7$ へと流下するにつれて, 枝管側の時計回りに回転する二次流れは弱いため, 急激に減衰し拡散する. そのため枝管側に大きな速度変動はみられなくなる. しかし, 主管中央部の反時計回りに回転する二次流れは依然として強いため, その二次流れによって速度変動が輸送されている様子がわかる.

次に, $\beta=0.58$, $\gamma=5.33$ の場合(Fig.3.7.2(b))の結果について述べる. $z/D_m=1$ では, プロモータを設置しない場合には枝管側に枝管流の流入による速度変動が確認されたが, プロモータを設置すると枝管側に変動はみられなくなる. これはプロモータを設置しない場合には, 枝管流の流入により, 枝管流の背後の領域に低圧の領域が生じるが, プロモータの設置により, この低圧領域への主流の流入が抑制されるため, 変動が抑えられたと考えられる. また速度変動の大きい領域はこれまでの結果と比較して, 主管の右側へと移動している. これは軸方向速度の分布でも述べたが, この条件では枝管からの流れはプロモータに沿って主管の枝管側とは反対側を流下する. そのため生成される渦も断面内の右側を流下するため, 速度変動の大きい領域も断面内の右側に位置している.

$z/D_m=2$ では, $\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.7.2(a))と同様に, 大きい変動の領域が主管の枝管側と主管中央部の右側にかけてみられる. これも $\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.7.2(a))の結果で述べたように, 二次流れの結果から説明できる. しかし $\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.7.2(a))と比べて, プロモータ高さを高くし, 流速比も小さくしたことにより, より強い二次流れが誘起されている. そのため, 速度変動値もより強くなっている.

また $z/D_m=5, 7$ へと流下すると, 速度変動の大きい領域は $\beta=0.71$, $\gamma=8.00$

の場合(Fig.3.7.2(a))とは異なり、主管の左右の管壁付近で狭まり、主管中央部で拡大している。これは $\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.7.2(a))には、枝管側の時計回りに回転する二次流れは減衰し、速度変動は主に主管右側の反時計回りに回転する流れにより輸送される。しかし $\beta=0.58$, $\gamma=5.33$ の場合(Fig.3.7.2(b))には二次流れが強いため、枝管側の二次流れもそれほど減衰しない。そのため速度変動は、反時計回りに回転する二次流れと時計回りに回転する二次流れによって、主管中央部に輸送される。

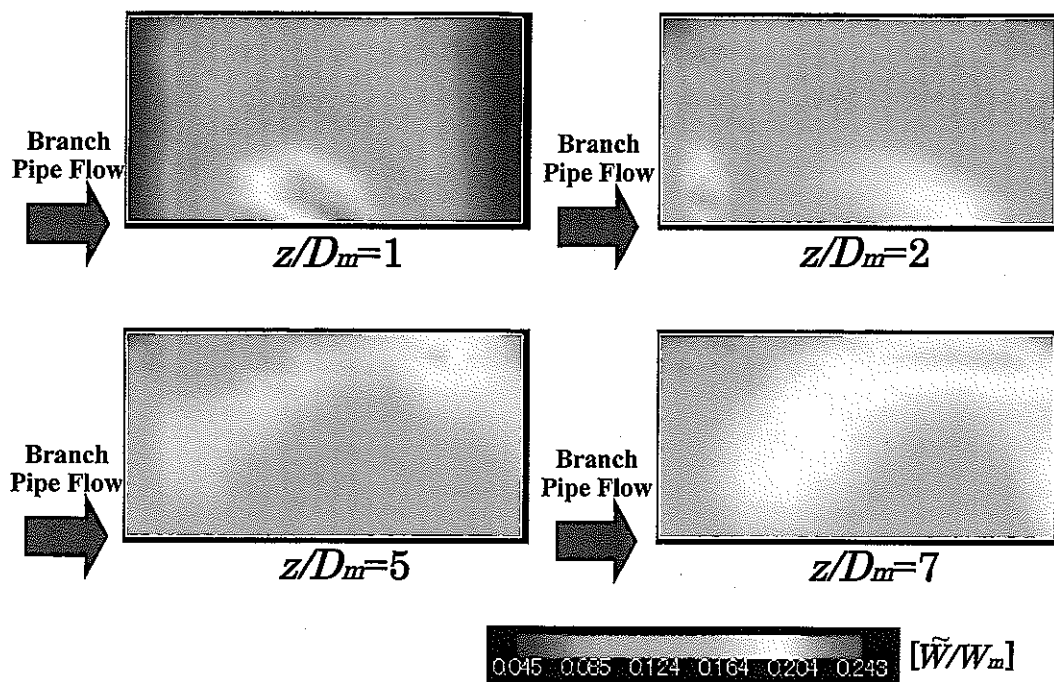


Fig.3.7.2(a) 乱流プロモータを設置した場合の速度変動分布($\beta=0.71$)

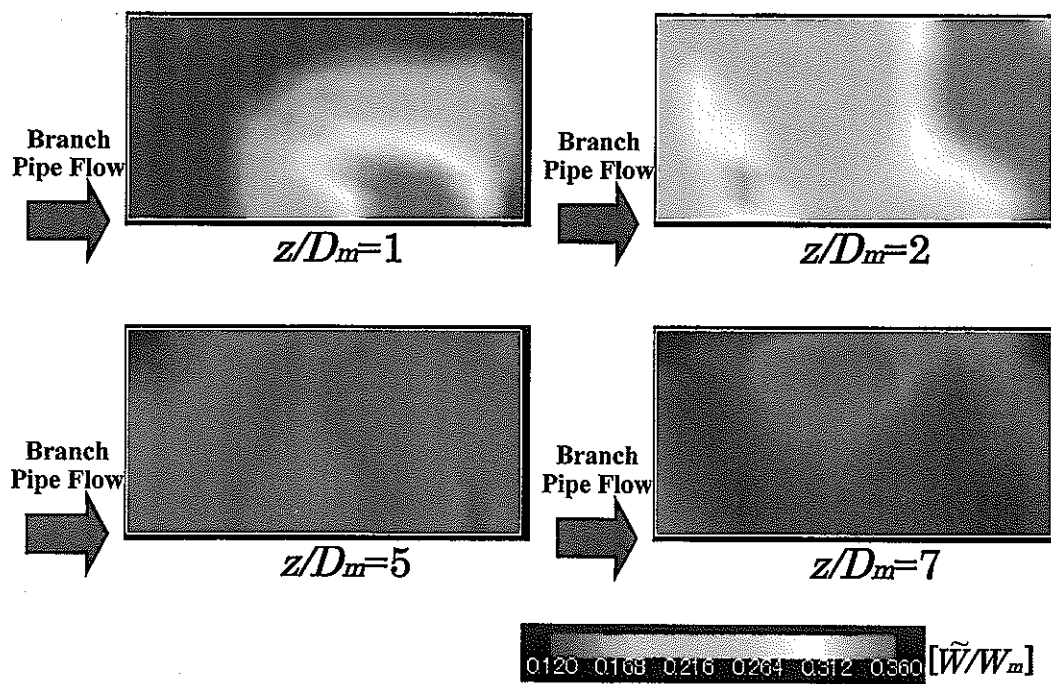


Fig.3.7.2(b) 乱流プロモータを設置した場合の速度変動分布($\beta=0.58$)

3.8 渦度

次に、断面内の、時間平均速度の渦度分布を示す。管軸方向に対する渦度は次式を用いて算出した。

$$\omega_z = \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{U}}{\partial y}$$

3.8.1 乱流プロモータを設置しない場合

まず乱流プロモータを設置しない場合の主管断面における渦度の分布を Fig.3.8.1(a), (b)に示す。図はそれぞれ $\beta=0.71$, 0.58 の結果である。

$\beta=0.71$ の場合(Fig.3.8.1(a))には、 $z/D_m=2$ において主管の左側に強い回転力をもった領域がみられる。枝管側の主管の管壁付近に時計回りに回転する渦がみられ、その右側に大きなスケールの反時計回りに回転する渦が確認できる。 $z/D_m=5$ に流下すると、反時計回りに回転する渦が $z/D_m=2$ と比較して、右側に移動しており流れが変化している様子がわかる。また $z/D_m=2$ と比べて、渦の回転の強さは弱くなっている。

$\beta=0.71$ と $\beta=0.58$ の図(Fig.3.8.1(b), Fig.3.8.1(a))を比較すると、二次流れの結果と同様に、渦の回転の様子も複雑になっている様子がわかる。 $z/D_m=5$ に流下すると、渦の回転の強さはさらに弱くなる。

3.8.2 乱流プロモータを設置した場合

次に $Re=1000$, $\alpha=3.33$, $\beta=0.71$, 0.58 でプロモータを設置した場合の渦度分布を Fig.3.8.2(a), (b)に示す。図はそれぞれ $\beta=0.71$, $\gamma(=D_m/H)=8.00$ と $\beta=0.58$, $\gamma(=D_m/H)=5.33$ である。

$\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.8.2(a))には、二次流れの結果と同様に、主管の枝管側に時計回りに回転する渦が、その右側に反時計回りに回転する渦が確認できる。またプロモータを設置しない場合と比べて、渦の回転の強さが非常に強くなっていることがわかる。 $z/D_m=5$ に流下すると反時計周りの渦は減衰している。

$\beta=0.58$, $\gamma=5.33$ の場合(Fig.3.8.2(b))にも二次流れの結果と同様に、主管の枝管側に時計回りに回転する渦が、その右側に反時計回りに回転するスケール

の大きな渦が確認できる。 $\beta=0.71$, $\gamma=8.00$ の場合(Fig.3.8.2(a))と比べて、プロモータの高さを高くすることで回転の強さが強くなっている様子がわかる。
 $z/D_m=5$ に流下すると回転の強さは弱くなる。

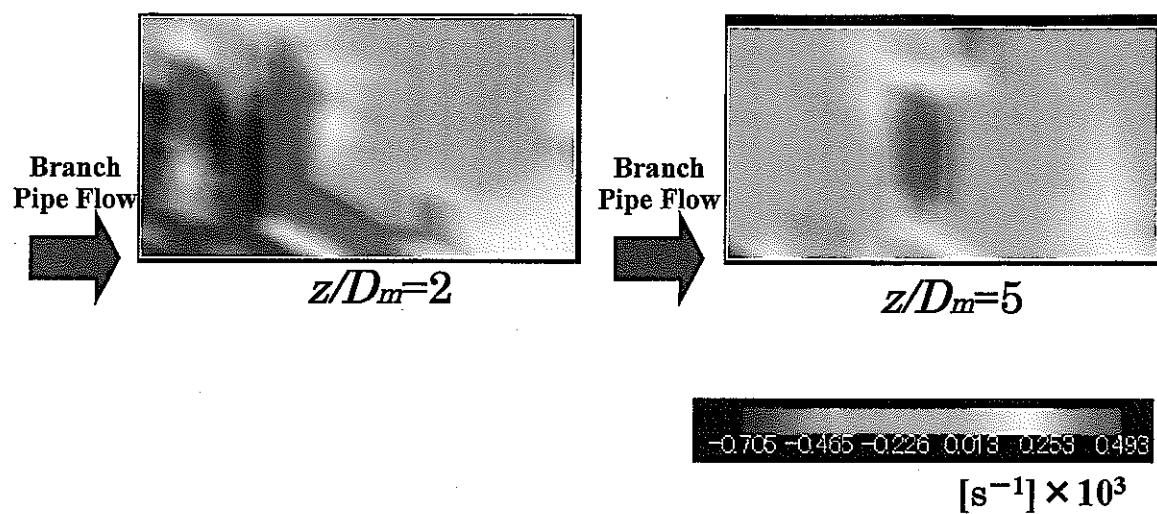


Fig.3.8.1(a) 各断面における渦度分布($\beta=0.71$)

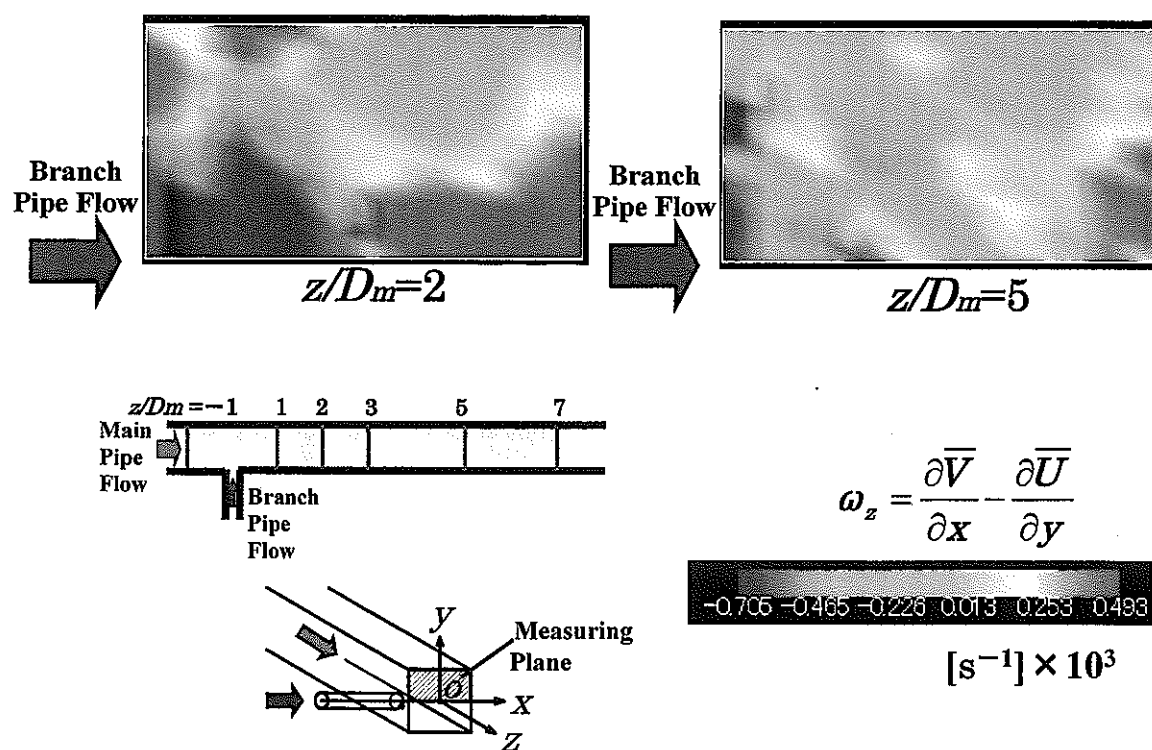


Fig.3.8.1(b) 各断面における渦度分布($\beta=0.58$)

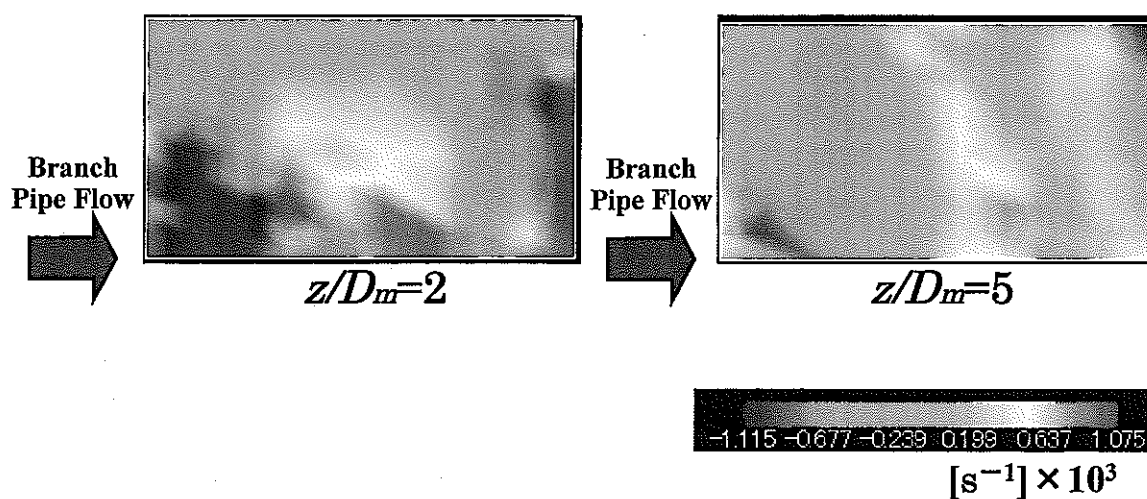


Fig.3.8.2(a) 乱流プロモータを設置した場合の渦度分布($\beta=0.71$)

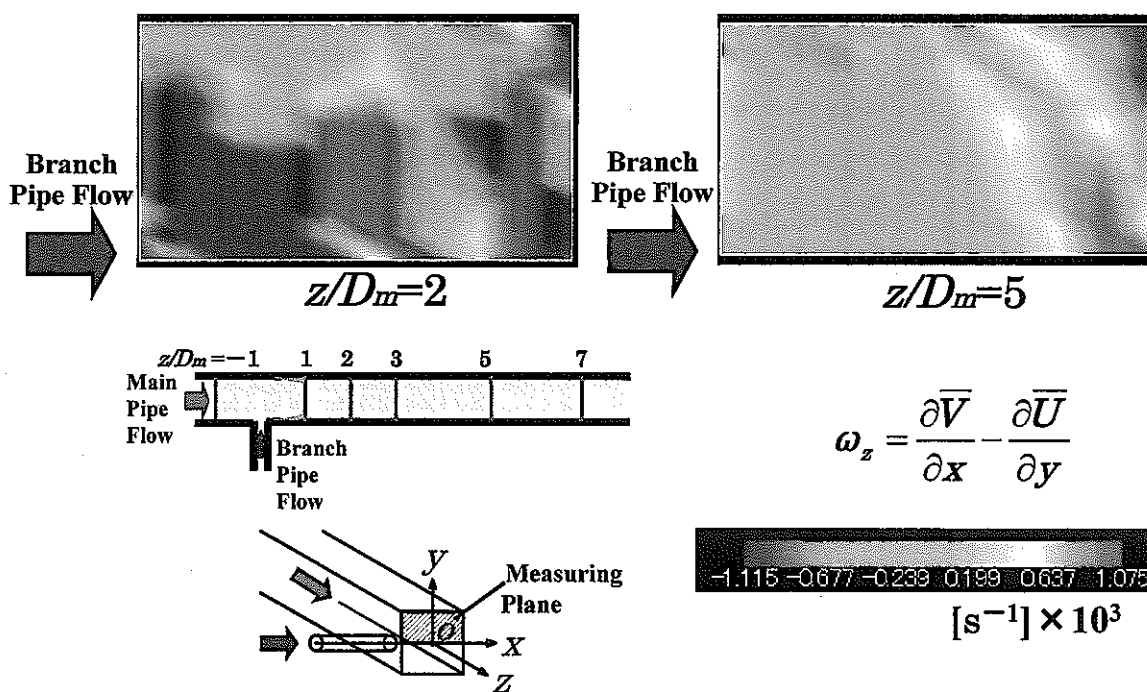


Fig.3.8.2(b) 乱流プロモータを設置した場合の渦度分布($\beta=0.58$)

3.9 特性量

本実験では、断面内流れが下流方向に変化していく様子を調べるために、以下の式で定義する流れの特性量を求めた。その結果を以下に述べる。

二次流れの強さ

$$Is = \frac{2}{D_m^2 W_m^2} \int_0^{D_m/2} \int_{-D_m/2}^{D_m/2} (\bar{U}^2 + \bar{V}^2) dx dy$$

水平方向の流れの偏り

$$Mx = \frac{4}{D_m^3 W_m} \int_0^{D_m/2} \int_{-D_m/2}^{D_m/2} x \bar{W} dx dy$$

軸方向速度の速度変動の実効値

$$\tilde{W}/W_m = \frac{2}{D_m^2 W_m} \int_0^{D_m/2} \int_{-D_m/2}^{D_m/2} \sqrt{(\bar{W} - \bar{W})^2} dx dy$$

3.9.1 二次流れの強さ

各断面における平均の二次流れの強さを Fig.3.9.1 に示す。プロモータを設置すると、二次流れは強くなり、その傾向はプロモータの高さが高いほどより顕著となる。また流速比を小さく、つまり枝管流を速くすると、二次流れは強くなる。これはプロモータを設置するとプロモータの背後に死水領域が発生し、この低圧の死水領域とその周囲の領域の圧力勾配により、強い二次流れが誘起されるためである。またプロモータの高さを高く、枝管流を速くすることで、死水領域はさらに拡大するためより強い二次流れが生じると考えられる。

$z/D_m=5$ に流下すると、二次流れは減衰するが、プロモータを設置することにより、その減衰の程度は小さくなっている。これもプロモータの設置により、強くなった二次流れの影響がより下流にまで存続しているためである。

3.9.2 水平方向の流れの偏り

各断面における水平方向の流れの偏りを Fig.3.9.2 に示す。ここで、 Mx の値が零より大きいということは流れが $+x$ 側に偏っていることを示す。

$z/D_m=1, 2$ ではプロモータを設置しない場合の方が偏りは大きい。これはプロモータを設置しない場合では $z/D_m=1, 2$ にかけて、枝管から流入した流れの背後に死水領域ができる。すなわち主管路の枝管側が低速領域となり、流れは $+x$ 側に偏る。プロモータを設置すると、二つのプロモータの背後にそれぞれ

死水領域ができる。そのため主管の両端ともに低速領域となるため、流れはそれほど偏らなくなる。

しかし $z/D_m=2$ の $\beta=0.58$ の場合には、流れが大きく偏っている。この場合、枝管からの流れが速くなるため、主管流は枝管から流入した流れをよけるように $+x$ 側に偏向する。そして合流後の主管流と枝管流は、主管路の枝管側とは逆側を流れるので枝管側が低速になる。そのため流れは大きく $+x$ 側に偏る。またプロモータを設置することで主管流はさらに $+x$ 側に偏向するので、流れもさらに $+x$ 側に偏ることになる。

$z/D_m=7$ まで流下すると、プロモータを設置しない場合には偏りはほとんどみられない。しかしプロモータ設置した場合には依然 $+x$ 側に偏っている。これはプロモータを設置した場合には、上流では主流の偏向により主管路の枝管側が低速領域になるが、その影響が依然として残っているためだと考えられる。この傾向は、プロモータの高さが高くなるほどより顕著となる。

3.9.3 軸方向速度の速度変動の実効値

各断面における軸方向速度の速度変動の実効値を Fig.3.9.3 に示す。いずれのパターンにおいても速度変動値は、 $z/D_m=1\sim2$ にかけて大きく増加した後、下流に流下するにつれて減少する傾向がみられる。 $z/D_m=1\sim2$ にかけての領域は、渦が発生し成長する領域に相当するため、速度変動値も増加していると考えられる。また下流に流下すると渦は崩壊し、急速に拡散するため、速度変動値も減少していると考えられる。

次にプロモータの設置による影響をみると、プロモータ通過直後の $z/D_m=1\sim2$ にかけて、プロモータを設置しない場合の方が速度変動値が大きくなるが、さらに下流に流下すると、プロモータを設置した場合の方が速度変動値は逆に大きくなることがわかる。これはプロモータ通過直後ではプロモータの設置により、きれいなアーチ状の渦ができず、速度変動値が減少すると考えられる。きれいなアーチ状の渦ができない原因には二つのことが考えられる。まず第一に、プロモータの設置によりプロモータの背後に死水領域が発生する。この低圧の死水領域とその周囲の領域の圧力勾配により、強い二次流れが誘起される。そのため渦が拡散し、きれいなアーチ状の渦ができないと考えられる。第二には、枝管流の背後にできる死水領域は、縦渦と横渦の複合により構成されるアーチ渦を生成する要因の一つであるが、プロモータの設置により、その死水領域が狭くなり、横渦の生成が特に抑制される。そのためきれいなアーチ

状の渦ができないと考えられる。以上のことから合流直後においては、プロモータを設置した場合の方が速度変動が抑えられると考えられる。

下流に流下すると、プロモータを設置しない場合には、二次流れは急速に減衰し、上流で生成された渦は下流まで移送されないと考えられる。それに対して、プロモータを設置した場合には、より強い二次流れが誘起されるため、下流においても渦は十分に形成されていると考えられる。また下流においても渦が形成されている原因には、プロモータを設置し、合流部の流れが加速したことで、渦の下流方向への移送速度が増速した影響も考えられる。以上のことから下流においては、プロモータを設置した場合のほうが速度変動が大きいと考えられる。

次に流速比 β による違いをみると、 $\beta=0.58$ の方が $\beta=0.71$ に比べて、すなわち枝管流速が速い場合の方が速度変動が大きいことがわかる。これは枝管流速が速くなったため、枝管から流れが主管に流入した際に生じる速度変動がより大きくなったためと考えられる。

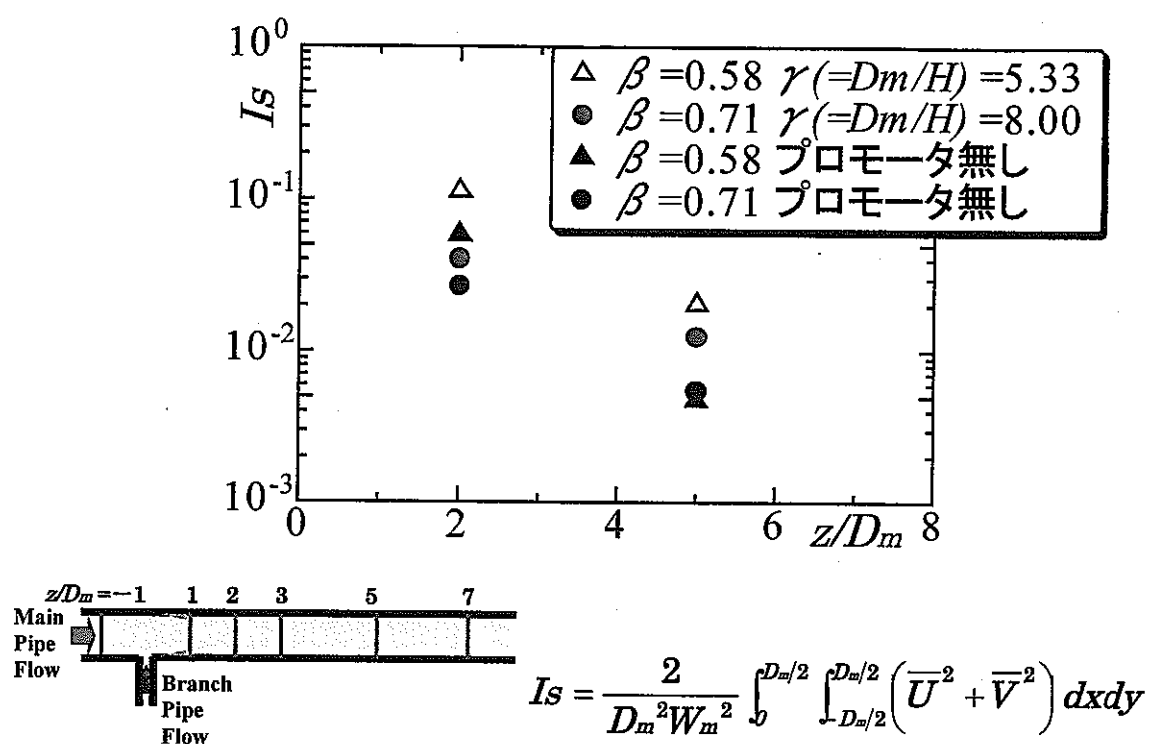


Fig.3.9.1 二次流れの強さ

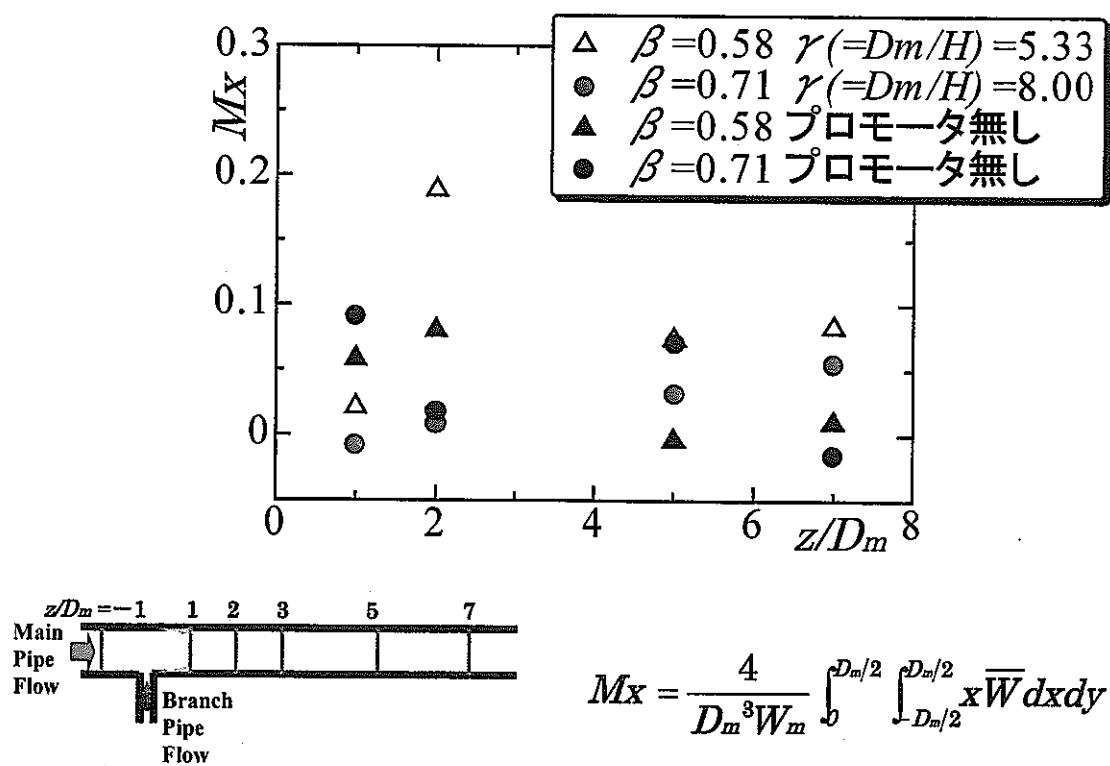


Fig.3.9.2 水平方向の流れの偏り

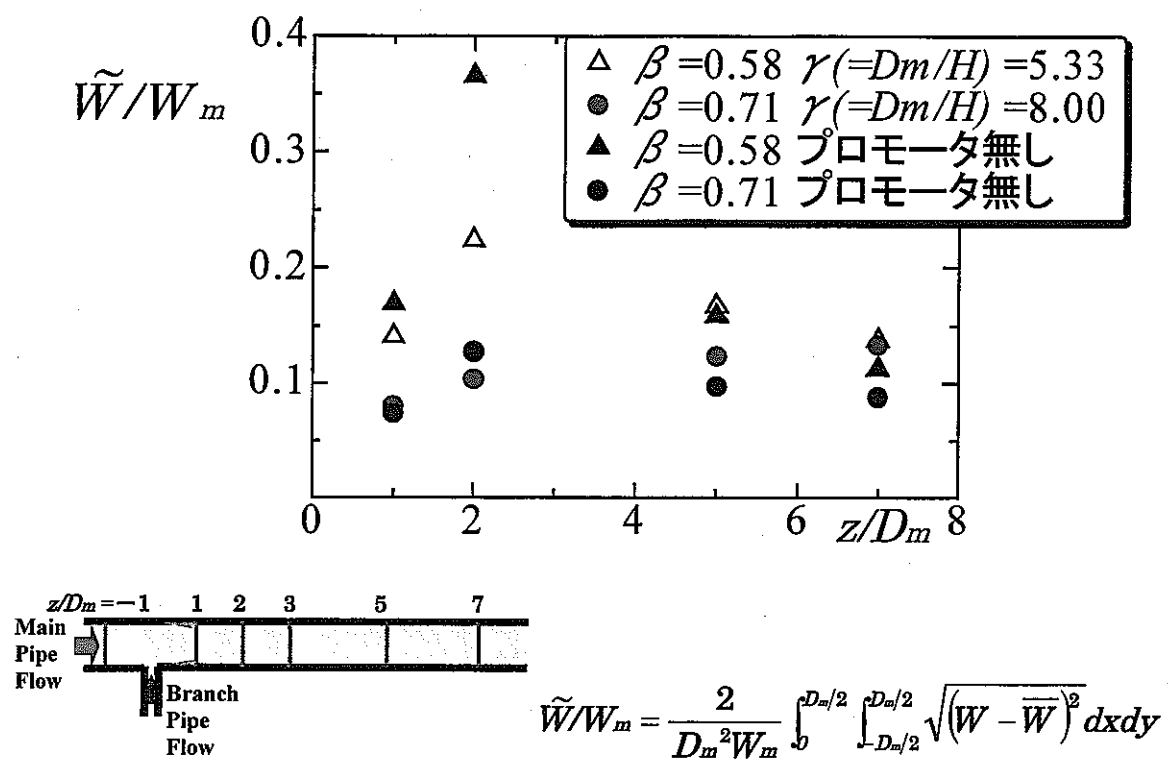


Fig.3.9.3 軸方向速度の速度変動の実効値

第4章 検討

4-1 配管系サーマルストライピングへの乱流プロモータの緩和効果

配管系サーマルストライピングへの乱流プロモータの設置による緩和方策についてまとめると以下ようになる。

- ①乱流プロモータの設置により、流路の断面積が狭まるため合流部の流速は加速する。そのため、渦はより上流で形成され、渦が下流に移送される速度も速くなる。またこの傾向はプロモータの高さが高くなるほどより顕著となる。このことから乱流プロモータを設置することで、温度ゆらぎの低周波数成分の緩和につながると考えられる。
- ②乱流プロモータの設置により、より強い二次流れが誘起され、より下流まで維持される。また流れの偏りも下流までみられる。このことからプロモータ通過直後は運動量が拡散し、流れの一様化につながるが、下流では流れの偏りのため、最終的な流れの回復は遅れると考えられる。

4-2 今後の課題

- ①今回は層流状態での流速測定しか行っておらず、そのため乱流状態においても流速測定および速度変動の周波数スペクトルの測定を行い、プロモータの効果を評価する必要がある。
- ②今回の実験結果は流れの時間平均量の結果である。そこで流れの位相平均処理を行い、各位相の流れ場の様子についても調べる必要がある。
- ③実験結果からだけではなく、数値計算結果の比較、検討からも最適なプロモータの形状を模索する必要がある。

第5章 結言

T 字形合流管の管継手部に乱流プロモータを設置して、流れの可視化および LDV による流速測定を行い、合流部の流れの流体混合の特性に及ぼす乱流プロモータの効果について調べた結果、以下のような知見を得た。

- ①乱流プロモータを設置すると、プロモータを設置しない場合に比べて、アーチ渦はより上流側で形成され、高速で下流方向へ移送される。この傾向はプロモータの高さが高いほどより顕著となる。
- ②乱流プロモータを設置すると、断面内に強い二次流れが誘起されるため、運動量の拡散はより進む。この傾向はプロモータの高さが高いほどより顕著となる。
- ③乱流プロモータの設置により、合流部に流れは+x 側に大きく偏り、この偏りはかなり下流まで残る。この傾向はプロモータの高さが高く、かつ枝管の流速が速いほどより顕著となる。
- ④速度変動は合流部直後の渦が生成される付近で見られ始め、渦の中心付近で大きな値をとる。また、主管内への枝管の流入の際に、主管の枝管側で速度変動は大きくなるが、乱流プロモータを設置すると、この速度変動は抑えられる。
- ⑤速度変動は下流に流下するにつれて渦の成長とともに増大し、 $z/D_m=2$ 付近で最大値を示した後、さらに下流では渦の崩壊とともに小さくなる。また、速度変動は、乱流プロモータを設置しない場合には、下流方向に減衰するが、乱流プロモータを設置した場合には、かなり下流まで残る。

参考文献

1. 資源エネルギー庁編：“高サイクル熱疲労に関する技術基準運用ガイドライン”，(1999)
2. T. Muramatsu：“Evaluation of Thermal Striping Phenomena at a Tee Junction of LMFR Piping Systems with Numerical Methods (I), Thermo-hydraulic Calculations”, Proc. The 15th Int. Conf. On Structural Mechanics in Reactor Technology(SmiRT-15), Vol. IV, pp.217-224 (1999).
3. 高橋 志郎、椎名 孝次：“高温と低温流体が混合するT字形合流配管の流体温度特性”，日本機械学会論文集(B編)，66巻，651号，2905，(2000)
4. 高橋 志郎，他 4 名，T字形合流配管における温度差を有する二流体の熱的混合特性，日本機械学会論文集(B編)，63巻，613号，(1997-9)
5. 須藤 浩三，他：“配管系における複雑乱流場および流動特性に関する研究”，JNC TN9400 2002-001，(2002)
6. 河野 憲二：“広島大学卒業論文 (T字形配管合流特性に及ぼす口径比および速度比影響)” (2002年3月)
7. 安倍 健太郎：“愛媛大学卒業論文 (T字形配管合流部の流れに及ぼす乱流プロモータの影響)”，(2003年3月)
8. 流れの可視化学会 編：“新版 流れの可視化ハンドブック”，朝倉書店 (1986)
9. 鮎川、他：“新版流れ学”，朝倉書店，(1995)

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切丁寧なご指導、御助言を頂きました岩本幸治助手、十河基介技官に謹んで感謝の意を表します。更に実験装置の製作に御協力頂きました実習工場の諸先生方に厚く御礼申し上げます。

また、愛媛大学大学院 高橋浩二氏に深く感謝の意を表します。

最後になりましたが、本研究を共に行った佐々泰副氏、中嶋尚広氏、並びに愛媛大学工学部流体工学研究室の各位に感謝の意を表します。

付 録

(a)乱流プロモータの形状決定について

本研究において採用した，乱流プロモータの長さ L の決定法について以下に述べる．

まず，異径配管 T 字合流部(主配管側)の JIS 規格の表において，T 字管の中心から溶接線までの長さと主管径の比 C/D_1 を決定した．表より D_1 の値により C/D_1 値も変わるが，実機の径を参考にして $D_1=100\text{mm}$ とし，ここでは，これより $C/D_1=0.95$ とした．本研究の場合には主管水力直径 $D_m=D_1=40\text{mm}$ ，枝管直径 $D_b=D_2=12\text{mm}$ となるので，

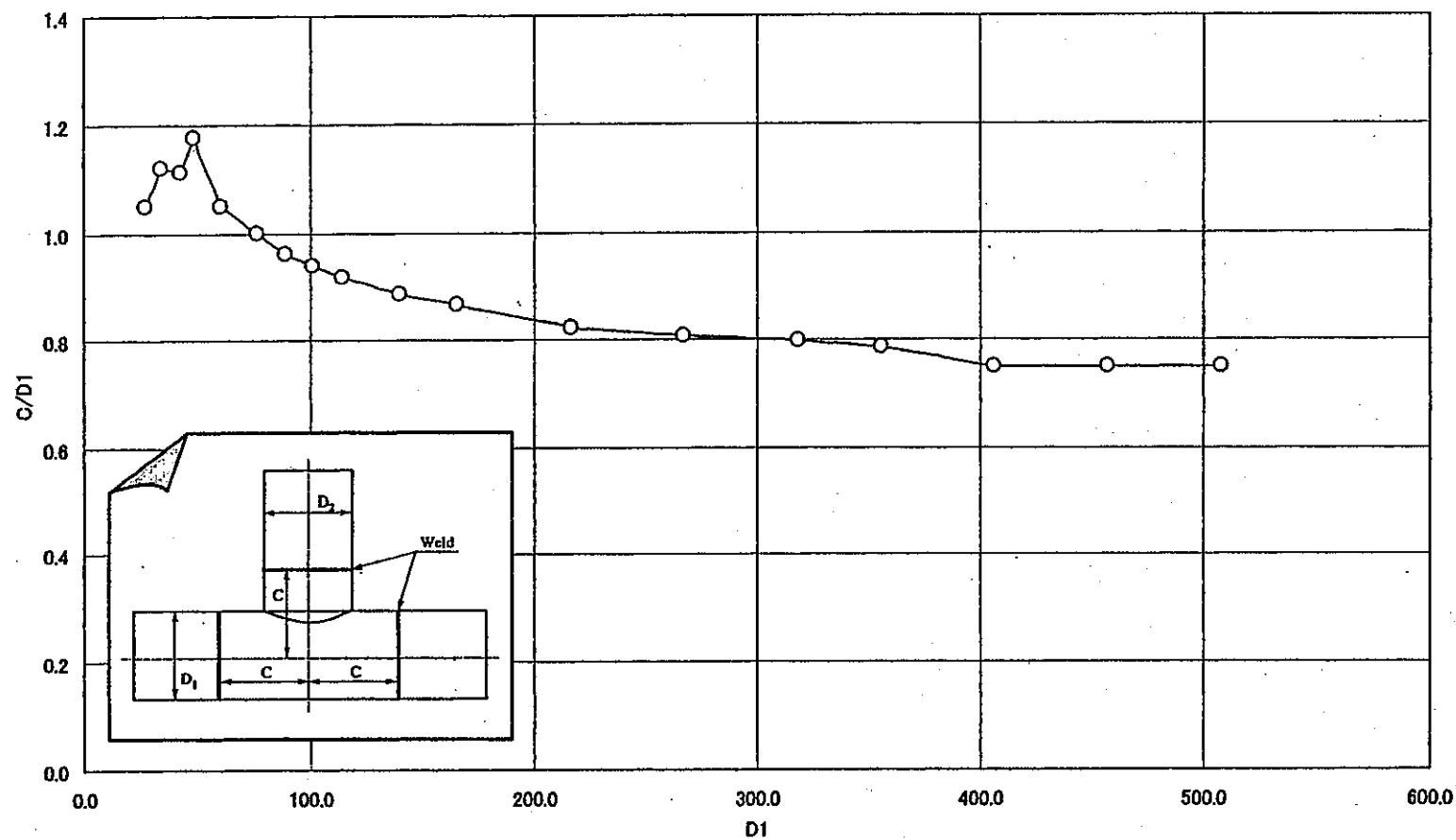
$$\begin{aligned} C/D_1 &= 0.95 \\ C &= 0.95 \times D_1 \\ &= 38\text{mm} \end{aligned}$$

となる．したがって，プロモータ長さ L は

$$\begin{aligned} L &= C - \frac{D_2}{2} \\ &= 38 - 6 \\ &= 32\text{mm} \end{aligned}$$

となる．

そして，さらに乱流プロモータの長さの影響を調べるために， $L=26\text{mm}$ の乱流プロモータを用意した．なお，プロモータは，いずれの場合においてもプロモータの後端が，溶接線の位置と同じになるように設定した．したがって，プロモータの先端は， $L=32\text{mm}$ の場合には枝管の出口と接し， $L=26\text{mm}$ の場合には出口より 6mm 下流側となる．



異径配管 T 字合流部 (主配管側) の JIS 規格