

# 噴流中の大規模渦と縦渦の干渉

2004年3月

北海道工業大学大学院工学研究科  
機械システム工学専攻  
熱流体システム部門

森 隼 人

## 概要

噴流は工業分野で広く利用され、その利用例として燃料噴射、排気、空調機器、エアカーテンなどがある。燃料噴射においては、自動車などの低燃費・低公害化を推し進めるために、高度な空気・燃料混合制御が要求されている。さらに大量の燃料を消費する航空機などでは、低燃費化は重要な課題である。工場等からの排気においては、周囲環境への配慮から排気の拡散特性が重要な課題となっている。空調機器においては、室内温度分布などが問題となるが、これらの性能は冷暖気噴出口からの噴流特性に支配される。エアカーテンは、熱遮断のために建物や冷蔵室の出入口に設けられているが、その性能は噴流特性に強く依存している。以上の例では、噴流の混合・拡散特性が問題となるので、その特性を十分に理解して噴流を利用することにより、各種機器の性能を向上させることが期待できる。

また噴流では、上述の混合・拡散特性以外に、騒音が問題となる場合がある。具体例としては、航空機用ジェットエンジン、各種ノズル、各種弁などがある。これらの装置から発生する噴流騒音は、騒音公害や作業環境悪化につながることから、この低減化が強く望まれている。

噴流に関する近年の研究により、噴流中には組織的な大規模渦構造が存在し、この大規模渦構造が噴流の特性を支配していることが明らかになってきた。また、噴流には、大規模渦構造の発達に伴って流れ方向に軸をもつ縦渦が発生し、この縦渦も噴流特性に重要な影響を及ぼすことが指摘されている。したがって、これらの渦の挙動を解明し制御することができれば、噴流の利用効率は著しく向上することが期待できる。

実際に利用されている噴流の噴出口形状は円形とスリット（細長い長方形）の場合が多いので、本研究では円形噴流と二次元噴流を取り扱っている。円形噴流に関する従来の研究により、噴流中には周期的な渦輪列が発生することが知られている。この渦輪の形状は発生時は噴出口形状に対応しているが、下流では縦渦と干渉し三次元的

に変形する。この干渉・変形過程は混合促進や騒音低減に効果的であることが近年の研究により示唆され注目されているが、その詳細については不明な点が多い。二次元噴流についても、円形噴流の場合と類似した渦構造が存在することが実験および数値解析により示されているが、とくに縦渦と大規模渦の干渉・変形機構については全く不明である。

上述の渦構造を解明するために、様々な手法による研究が行われている。実験的研究では、速度場または圧力場を測定して渦度分布または圧力分布により渦構造を抽出する手法が用いられているが、従来の研究では流れ場の点測定が多く、渦構造の詳細をとらえることは困難である。とくに、空間的に様々な方向に渦度の軸を持った渦構造の把握は容易ではない。また、近年急速に発展している PIV（粒子画像流速計）により面測定が可能になってきたが、三次元渦構造を捕えることはまだ不可能である。近年活発に用いられている数値計算は、実験的解析では困難な物理量の情報が得やすいなどの利点もあるが、現実的な三次元流れ条件での詳細な解析を行う場合、計算機の計算速度・容量の観点から負担が大きく、多くの研究者は空間発展する現象を時間発展型に置き換えた解析や、流体支配方程式をモデル化して計算を行っているのが現状であり、現実的な解を得ることは現状では困難である。これらの手法に対し、視覚的に容易に構造を把握できる可視化法は渦挙動を解析する上で有用であり、とくに渦構造の三次元変形などの複雑な構造を把握するのに適した手法である。

本論文では、縦渦を含む三次元渦構造の詳細を明らかにするために、水噴流の可視化と空気噴流の速度測定により、実験的に渦構造の干渉・変形過程を検討した。また、可視化画像および速度場により噴流の混合状態も定量的に評価した。本論文は、4章からなっており、以下に各章、各節の内容を述べる。

第1章では、本研究の背景である乱流現象と渦構造について概観し、本研究の工学的意義および研究目的について述べている。

第2章では、軸対称噴流の実験に関して述べている。2章各節の内容を述べる。

2.1節では、2章の内容と目的を要約して述べている。

2.2 節では、軸対称噴流の可視化実験システムと速度計測システムの概要を述べている。

2.3 節では、軸対称噴流の実験条件を示した。

2.4 節では、Taylor の凍結仮説を用いた三次元渦構造の解析方法を説明した。混合特性評価に用いる噴流の境界面に関して説明した。画像処理工程中の二値化処理に関して主観を排除するため大津法を用いたが、その方法について説明した。渦構造の複雑さ評価するためのフラクタル次元算出アルゴリズムについて説明した。

2.5 節では、フラクタル次元を用いて渦構造の複雑さを評価し、噴出条件による複雑さの発達過程の違いを示した。Taylor の凍結仮説を適用した可視化画像から渦構造を明らかにし、軸対称渦と縦渦の干渉により特徴的な切繋ぎ現象が生ずることが明らかになった。切つなぎ現象に至る過程に関して渦力学に基づくモデルを提案した。可視化映像からの画像評価や、エントレメント率、速度・乱れ強さ分布による噴流の混合拡散特性を示し、渦構造との関連性を考察している。

2.6 節では、縦渦発生機構の 1 つと考えられている遠心力不安定性に関して、次元解析による検討を行い、縦渦誘起の起因する不安定性が、遠心力不安定性のみではないことを示唆した。

2.7 節では、2 章で明らかになった混合拡散特性や渦構造の干渉について要約し、それらの関連性を総括した。

第 3 章では、二次元噴流の実験に関して述べている。3 章各節の内容を述べる。

3.1 節では、3 章の内容と目的を要約して述べている。

3.2 節では、空気噴流の実験方法・計測装置について述べている。

3.3 節では、空気噴流の実験条件を示した。

3.4 節では、少ないプローブで空間構造を得るアンサンブル平均の処理方法について説明している。

3.5～3.7 節では、空気噴流での渦を定義する渦度・エンストロフィについて説明している。



3.8 節では、安定した流れ場を作り出すための実験条件を検討し、その条件の下で測定データを位相平均処理することにより、3 方向の渦度成分の時空間分布を求めた。渦度分布から算出されるエンストロフィの時空間画像からも縦渦間の距離の変化が確認され、また類似した切繋ぎ現象も確認された。

渦の干渉・変形挙動を詳細に検討し、第2章で提案した渦力学モデルが二次元噴流でも適用できることを立証した。縦渦により平均速度分布が大きく変化し、混合促進に有効であることを示した。

第4章は結論であり、本研究で明らかにされた噴流中の大規模渦と縦渦の干渉・変形機構、および渦挙動と混合機構との関連性を要約している。

本研究により、噴流中の三次元渦構造の詳細、特に従来不明であった大規模渦と縦渦の干渉・変形機構が渦力学モデルにより明らかになり、さらに噴流の混合・拡散を増大させる渦操作法についても、工学的および工業的に有用な基礎資料が得られた。このことにより噴流・混合層制御のための新たな知見が示され、今後の制御手法への応用が期待される。

# 目次

## 第1章 緒論

1.1	まえがき	2
1.2	噴流に関する従来の研究概要	3
1.2.1	乱流と渦構造	3
1.2.2	円形噴流	4
1.2.3	二次元噴流および二次元混合層	8
1.2.4	噴流・混合層の制御	12
1.3	本研究の目的	17

## 第2章 軸対称噴流の渦構造およびその変形過程

2.1	まえがき	19
2.2	水噴流実験装置	19
2.2.1	水槽	19
2.2.2	ノズル	21
2.2.3	可視化システム	22
2.2.4	定量計測システム	23
2.3	実験条件	24
2.4	画像処理方法	25
2.4.1	Taylor 仮説	25
2.4.2	二値化方法	27
2.4.3	画像評価法	28
2.5	実験結果	30
2.5.1	渦の自然発生周波数	30
2.5.2	可視化画像から見た混合特性	32
2.5.3	噴流可視化映像から推察される渦構造	39

2.5.4	渦の干渉機構	43
2.5.5	速度場と混合特性	46
2.6	遠心力不安定に関する考察	51
2.6.1	循環値の見積	51
2.6.2	考察	57
2.7	まとめ	58

### 第3章 二次元噴流の渦構造およびその変形過程

3.1	まえがき	60
3.2	空気噴流実験装置	60
3.2.1	風洞	60
3.2.2	ノズルおよび測定座標系	61
3.2.3	定量計測システム	62
3.3	空気噴流実験方法および条件	63
3.4	アンサンブル平均データ処理方法	63
3.5	渦度の定義	66
3.6	渦度場に対する Taylor の凍結仮説の適用	67
3.7	エンストロフィの定義	68
3.8	実験結果	69
3.8.1	風洞装置・励起装置の周波数特性	69
3.8.2	噴流せん断層の周波数特性	72
3.8.3	タブ無し二次元ノズル噴流の平均速度分布・乱れ強さ分布	75
3.8.4	タブ無し二次元ノズル噴流の渦度場	78
3.8.5	タブ付き二次元ノズル噴流の平均速度分布・乱れ強さ分布	88
3.8.6	タブ付き二次元ノズル噴流の渦度場	91
3.8.7	タブ付き二次元ノズル噴流のエンストロフィ場	98

3.9 まとめ	104
第4章 結言	105
参考文献	108
本研究に関連する発表論文	111
付録 A (二値化プログラム)	115
付録 B (フラクタル次元算出プログラム)	123
付録 C (循環算出プログラム)	136
付録 D (アンサンブル平均処理プログラム)	143
謝辞	155

## 目次

1.2.1	大規模渦構造	3
1.2.2	周期的渦輪列構造	4
1.2.3	渦列生成過程	4
1.2.4	Kelvin-Helmholz 不安定	5
1.2.5	コラム不安定	5
1.2.6	渦構造の三次元化	6
1.2.7	渦構造の三次元化	7
1.2.8	遠心力不安定	7
1.2.9	縦渦の三次元化	8
1.2.10	縦渦の三次元化	10
1.2.11	マイクロアクチュエータ	13
1.2.12	単一周波数励起	13
1.2.13	バイモーダル励起	14
1.2.14	非円形噴流	15
1.2.15	ボルテックスジェネレータの取付	16
1.2.16	傾斜回転切断面をもつ円管	16
2.2.1	水槽	20
2.2.2	噴流励起方法	20
2.2.3	ノズル	21
2.2.4	座標系	21
2.2.5	可視化システム	22
2.2.6	定量実験システム	23
2.4.1	Taylor の凍結仮説を援用した三次元表示方法	26
2.4.2	算出方法	28
2.5.1	噴流断面積の変動周波数 (円形ノズル,励起無, $x/D=0.5$ )	30

2.5.2	噴流断面積の変動周波数 (円形ノズル, 励起無, $x/D=0.5$ )	30
2.5.3	熱膜プローブの変動速度周波数 (円形ノズル, 励起無, $r/D=0.55$ )	31
2.5.4	噴流界面の三次元表示	32
2.5.5	三次元構造と境界線長さ	34
2.5.6	境界表面積	35
2.5.7	未混合面積	35
2.5.8	断面映像の複雑さ	36
2.5.9	構造とフラクタル次元	37
2.5.10	平均フラクタル次元	38
2.5.11	垂直断面図 (円形ノズル, 励起無)	41
2.5.12	三次元表示 (円形ノズル, 励起無)	41
2.5.13	噴流垂直断面図 (VG 付きノズル, 励起有)	42
2.5.14	三次元表示 (VG 付きノズル, 励起有, $x/D=0.5$ )	42
2.5.15	三次元表示 (VG 付きノズル, 励起有, $x/D=1.0$ )	42
2.5.16	縦渦と軸対称渦の干渉モデル	44
2.5.17	流れ方向断面映像 (VG 付きノズル, 励起有)	45
2.5.18	速度変動波形の周波数スペクトル ( $y/D=0.5$ , 励起有)	48
2.5.19	平均速度・乱れ強さ分布	49
2.5.20	エントレンメント	50
2.6.1	円形噴流の平均速度分布 (円形ノズル, 励起無, $x/D=2.0$ )	53
2.6.2	円形噴流の平均速度分布 (円形ノズル, 励起無, $x/D=2.5$ )	53
3.2.1	風洞	60
3.2.2	ノズルおよび測定座標系	61
3.2.3	定量計測システム	62
3.2.4	プローブ配置	65
3.2.5	参照信号と変動速度信号	65

3.8.1	速度変動周波数	出口中心	3m/s	70
3.8.2	速度変動周波数	出口中心	4m/s	70
3.8.3	速度変動周波数	出口中心	5m/s	70
3.8.4	速度変動周波数	出口中心	6m/s	71
3.8.5	速度変動周波数	出口中心	8m/s	71
3.8.6	スピーカーボックスの周波数特性			71
3.8.7	せん断層中の周波数 (6.4m/s,y/H=0.5)			73
3.8.8	せん断層中の周波数 (6.4m/s,x/H=0.5)			74
3.8.9	せん断層中の周波数 (6.4m/s,x/H=0.75)			74
3.8.10	せん断層中の周波数 (6.4m/s,x/H=1.25)			74
3.8.11	平均速度・乱れ強さ分布 (二次元ノズル, 励起無し)			76
3.8.12	平均速度・乱れ強さ分布 (二次元ノズル, 励起有り)			77
3.8.13	渦度			79
3.8.14	渦度集中領域			85
3.8.15	平均速度・乱れ強さ分布			89
3.8.16	渦度 (VG 付きノズル, VG 無しライン)			92
3.8.17	渦度 (VG 付きノズル, VG 付きライン)			95
3.8.18	エンストロフィ (VG 付きノズル,x/H=0.5)			99
3.8.19	エンストロフィ (VG 付きノズル,x/H=0.75)			100
3.8.20	エンストロフィ (VG 付きノズル,x/H=1.0)			101
3.8.21	エンストロフィ (VG 付きノズル,x/H=1.0)			102

# 第 1 章



# 第1章 緒論

## 1.1 まえがき

噴流は工業分野で広く利用され、その代表例として燃料噴射、排気、空調機器などがある。燃料噴射においては、自動車などの低燃費・低公害化を推し進めるために、高度な空気・燃料混合制御が要求されている。さらに大量の燃料を消費する航空機などでは、低燃費化は重要な課題である。また工場排気においては、周囲環境への配慮から排気の拡散特性がより一層重要になっている。そして空調機器においては、室内温度分布などが問題となるが、その性能を改善するためには噴流制御が有効である。噴流特性は、従来の研究によると、噴流中の渦構造に依存することが知られており、渦構造の操作による噴流制御が期待されている。

また噴流は、上述の混合・拡散特性以外に、騒音特性が問題となる場合がある。具体例としては、航空機用ジェットエンジン、各種ノズル、各種弁などがある。これらの噴流騒音は、騒音公害や作業環境悪化につながることから、この低減化が強く望まれている。この騒音特性に関しても噴流中の渦構造が大きく影響している。

このように、噴流を有効利用するためには、噴流中の渦構造を明らかにし、効率的に渦構造を操作することが求められている。従来の研究により、円形噴流中の渦は、周期的に発生し、軸対称な構造を持つことが知られている。生成直後の軸対称渦構造は噴出口形状を有しているが、下流側では流れ方向にも軸を持つ渦構造（縦渦）を伴って変形していく。この縦渦は混合促進や騒音低減に効果的であることが近年明らかになりつつあるが、この変形過程の詳細は未だ十分に解明されているとは言えない。

渦構造の解析方法として、様々な手法がある。近年活発に用いられている数値計算は、実験的解析では困難な物理量の情報が得やすいなど利点も大きいですが、実験的解析と同様の精度を求めた場合、非常に高性能な計算装置と多大な計算時間を費やしても現実的な解を得ることは不可能である。そこで、本研究では、可視化実験と速度計測による渦度場の検討を行った。視覚的に容易に構造を把握できる可視化法は乱流を解析する上で有用であり、特に渦構造の三次元変形など複雑な構造を把握する上で適し

ている。また噴流のような周期性のある流れ場では、アンサンブル位相平均法を用いる事で、平均的な瞬時速度分布を得て渦度場を検討する事ができる。よって、本研究では縦渦を含む三次元構造の詳細を明らかにするために可視化法と速度測定を併用し渦構造の変形過程の詳細を検討した。

## 1.2 従来の研究

### 1.2.1 乱流と渦構造

自然界における様々な流れは、層流と乱流に大別される。これらは、1880年頃のO.Reynoldsの実験<sup>(1)</sup>によって、無次元量であるレイノルズ数によって特徴付けられることが発見された。レイノルズ数（以下  $Re$  数）は流速  $U$ 、代表長さ  $L$  とした場合、 $Re = \rho UL / \mu$  で定義される。一般的にこの  $Re$  数が  $10^3$  程度でほとんどの場合が不安定になり層流から乱流へと遷移する。これは、 $Re$  数が慣性力と粘性力の比であることから  $Re$  数が大きくなると粘性による乱れの減衰が不十分になり乱れが発達するためである。我々の周囲の流れ場では、乱流が圧倒的に多く、多くの研究者によってこの乱流の研究がなされてきた。

従来の研究では、乱流は不規則な流れ場とされ統計的に扱われていた。しかし1970年代に入り、Brown と Roshko<sup>(2)</sup> が図 1.2.1 に示すように乱流混合層中に発達する渦構造を発見した。これにより乱流は単なる不規則運動ではなく、組織的な渦構造を持つことが明らかになってきた。この組織的構造は大規模渦構造と呼ばれ、乱流の特性を支配すると考えられることから、乱流現象解明の手がかりとして注目されている。

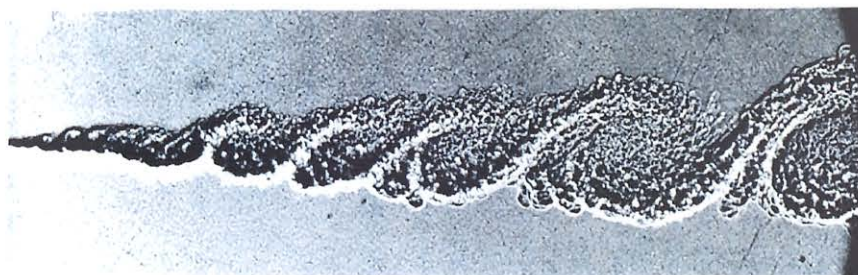


図 1.2.1 大規模渦構造<sup>(2)</sup>

### 1.2.2 円形噴流

噴流は、工学的にも広く応用されている流れ場であり、様々な手法で研究されている。それらの研究で使用されている流れ場の多くが乱流であり、噴流特性を支配すると考えられている渦構造に対し様々な検討がなされている。

これらの研究により、円形噴流中には、図 1.2.2 のような周期的渦輪構造<sup>(3)</sup>があることが示されている。またこの渦輪構造の生成過程<sup>(4)</sup>は、図 1.2.3 のようにオリフィス噴流とノズル噴流では異なることが示されている。前者の渦輪はせん断層の Kelvin-Helmholtz 不安定により、また後者の渦輪は噴流全体の速度分布によるコラム不安定性の増幅によって生ずる。これらの不安定性を図 1.2.4、図 1.2.5 に示す。

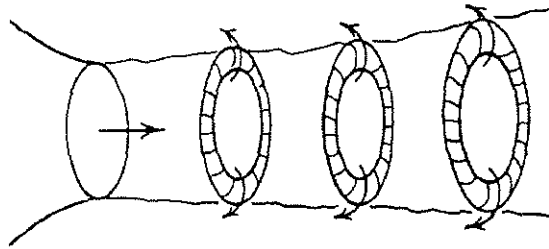


図 1.2.2 周期的渦輪列構造

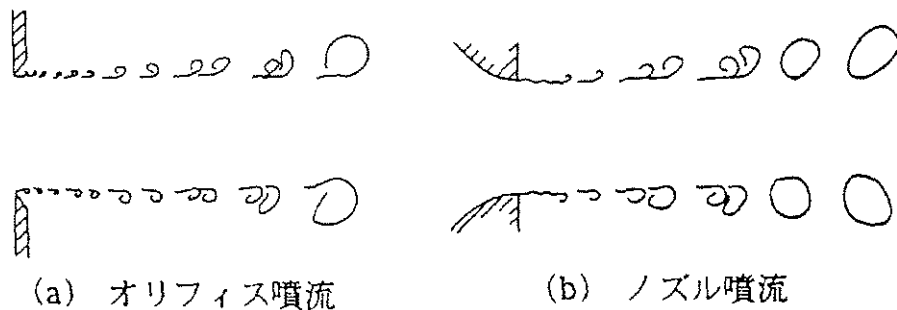


図 1.2.3 渦列生成過程

図 1.2.4 は Kelvin-Helmholtz 不安定<sup>(5)</sup> の概略である。せん断層において、速度差を持つ二つの界面が粘性の影響から微小な変形をする。これにより流線に疎・密の部分が生ずる。疎になった部分においては流速が低下し、密な部分においては流速が増加する。このためベルヌーイの定理より二つの界面の上下において圧力変化が生じ界面の変形が増幅され、速度差により巻き込まれ渦となる。図 1.2.5 は、コラム不安定性の概略で、図のような速度分布を持った流れ場においては、その変曲点で流れが不安定になり、渦へと成長するものである。

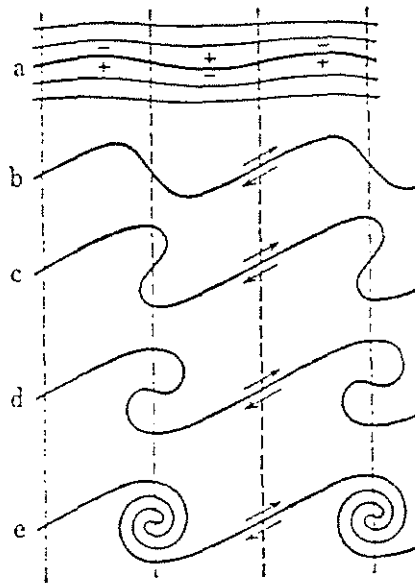


図 1.2.4 Kelvin-Helmholtz 不安定

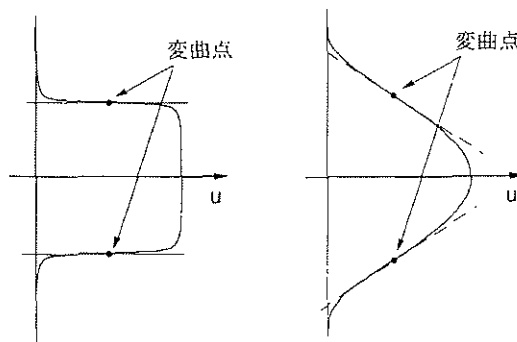


図 1.2.5 コラム不安定

また円形噴流中の渦構造は、生成直後に周期的渦輪列を生ずることが知られている。しかしこの構造は、下流側へ進行する間に、円周方向の三次元不安定性によって波状に変形する（図 1.2.6, 1.2.7 参照）。この不安定性を Widnal-Instability<sup>(6)</sup> と呼ぶ。

この三次元変形に関しては、数値計算<sup>(7)(8)</sup> や実験的解析<sup>(9)</sup> で多くの研究がなされている。また内藤らの最近の研究<sup>(10)</sup> では渦輪の波状変形の波数が下流に進むにつれ減少することが示され、単一渦輪の縦渦の誘起メカニズムとして奥出ら<sup>(11)(12)</sup> は遠心力不安定の影響などを示唆している。図 1.2.8 は回転円柱周囲流の遠心力不安定により縦渦が発生する例を示しており、回転円柱を渦核と考えると単一渦輪からも同様な縦渦が発生することが予想される。噴流中の三次元不安定の場合には、Shariff ら<sup>(13)</sup> のように噴流中の渦輪による流れ場の不安定性により縦渦が生ずるという説や Liepmann ら<sup>(14)(15)</sup> のように Braid 領域から不安定性が生ずるとする説もあり、詳細は不明な点が多い。また非円形噴流の場合においても非一様曲率の影響から渦構造が三次元的に変形し、その複雑な渦構造が明らかにされつつあるが、渦の干渉・変形機構の詳細は不明である。

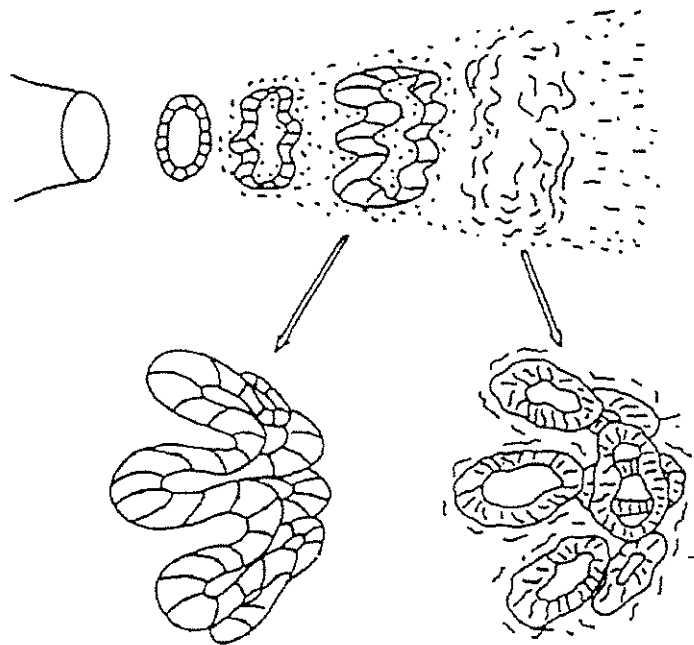
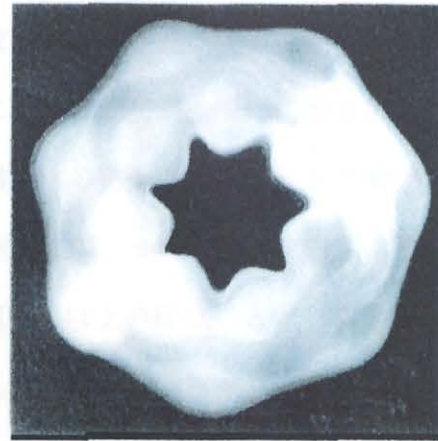


図 1.2.6 渦構造の三次元化



$h=400$  mm



$h=600$  mm

図 1.2.7 渦輪の三次元化

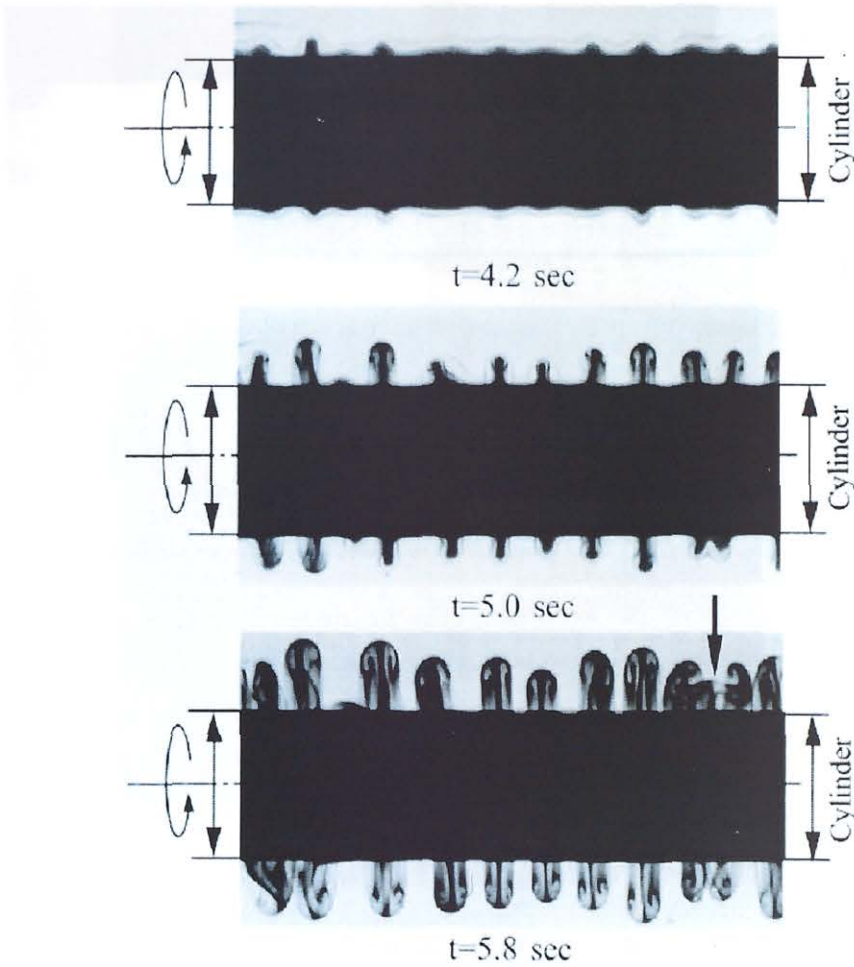


図 1.2.8 遠心力不安定



### 1.2.3 二次元噴流および二次元混合層

二次元噴流や二次元混合層中でも、軸対称噴流に見られるような縦渦の発生、三次元化挙動が多くの研究で示されている。とくに二次元噴流初期領域の二次元混合層に関しては、Lasheras らによってスパン方向渦（横渦）の発生に伴い成長する縦渦の発生機構と構造が実験<sup>(16)</sup><sup>(17)</sup>で報告されている（図 1.2.9）。また Ashurst らによる数値解析<sup>(18)</sup>でも縦渦の発生が示されている（図 1.2.10）。以上の研究により、混合層中のスパン方向渦と縦渦の発生とそれらの構造は明らかにされているが、渦干渉とそれに伴う渦変形の機構について示されていない。

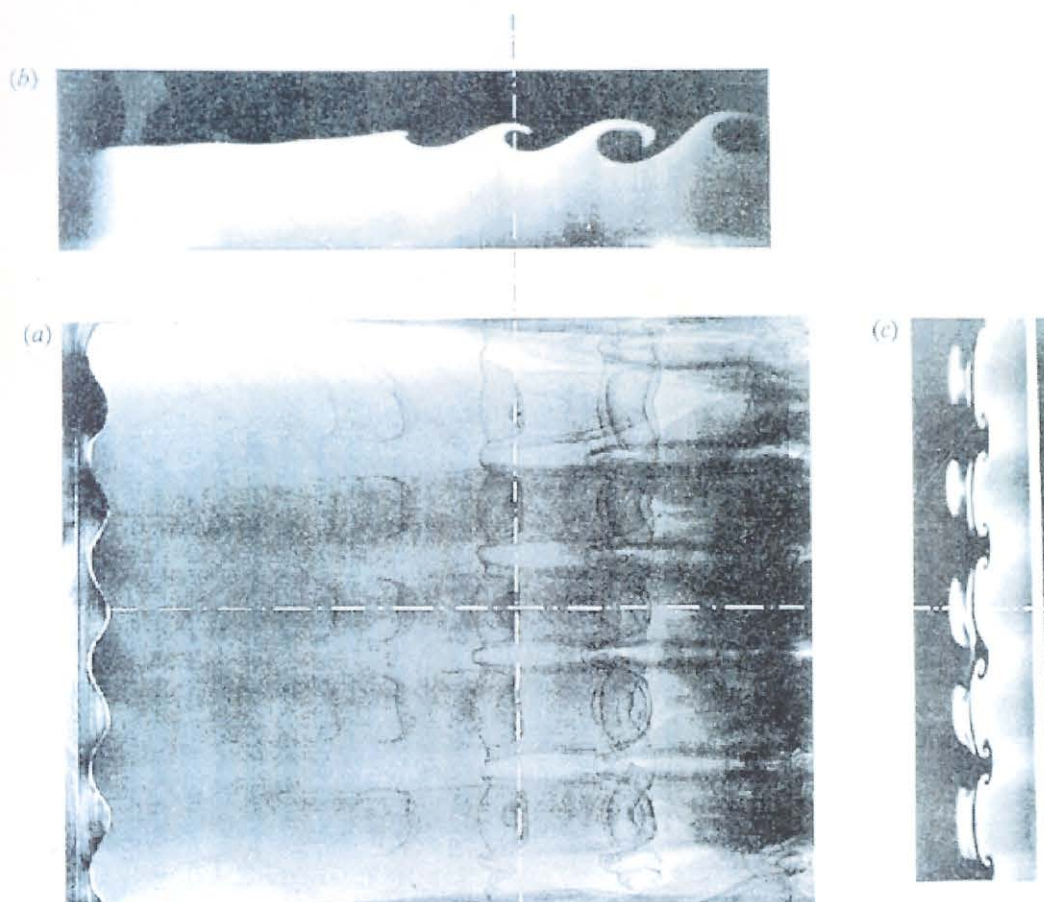


図 1.2.9 (a) 渦構造の三次元化

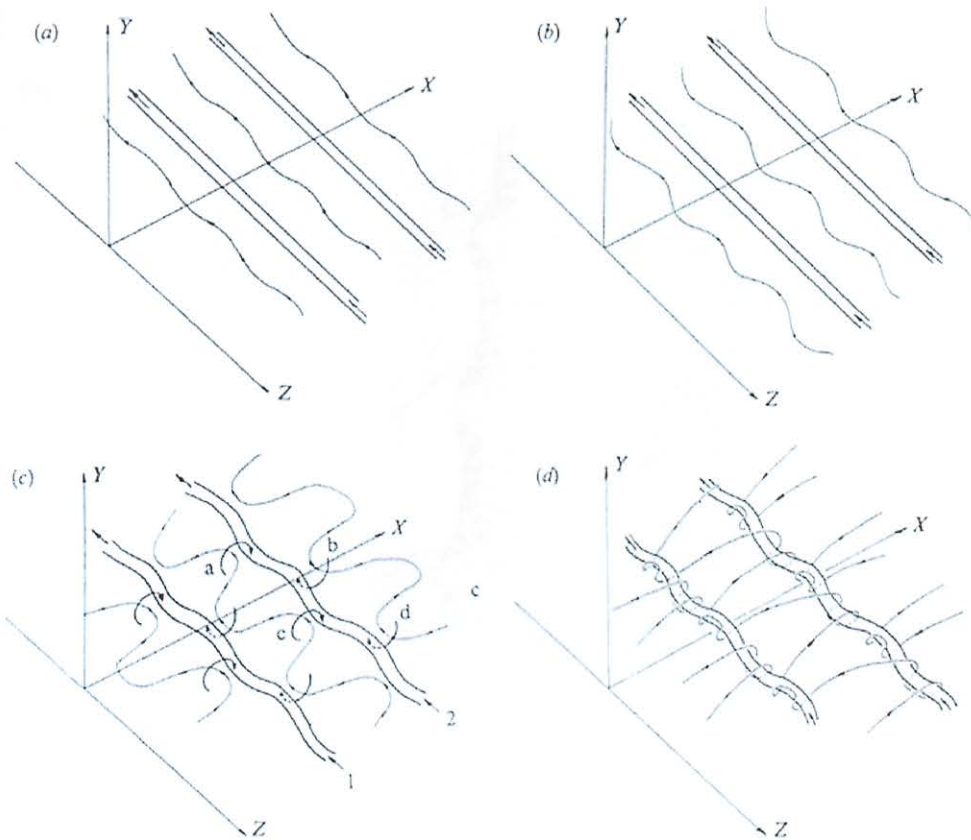
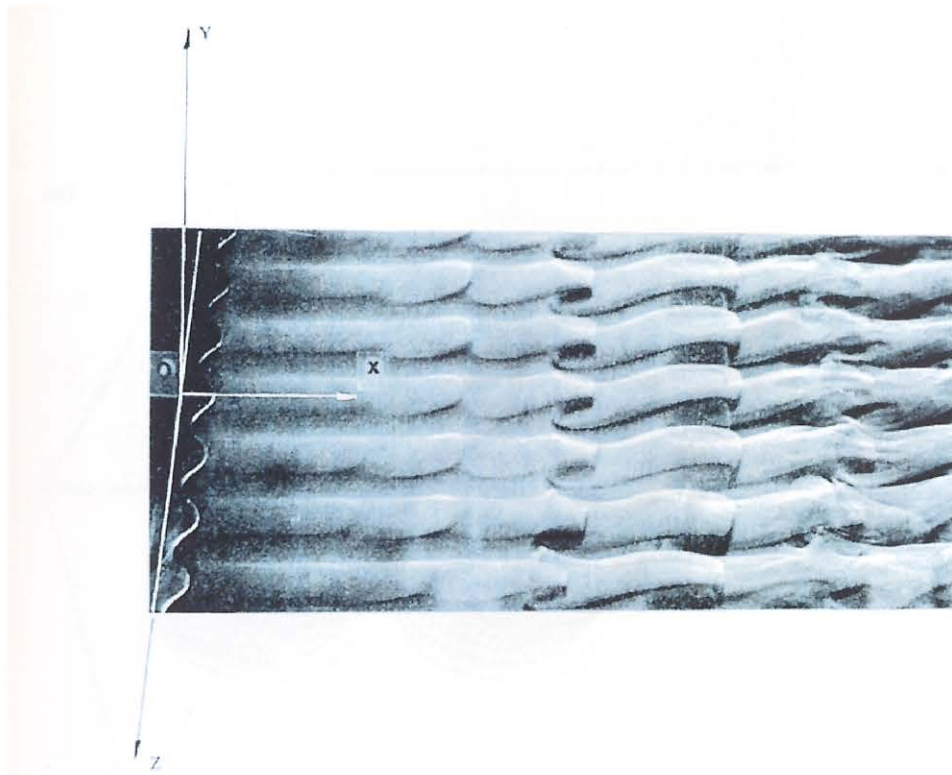
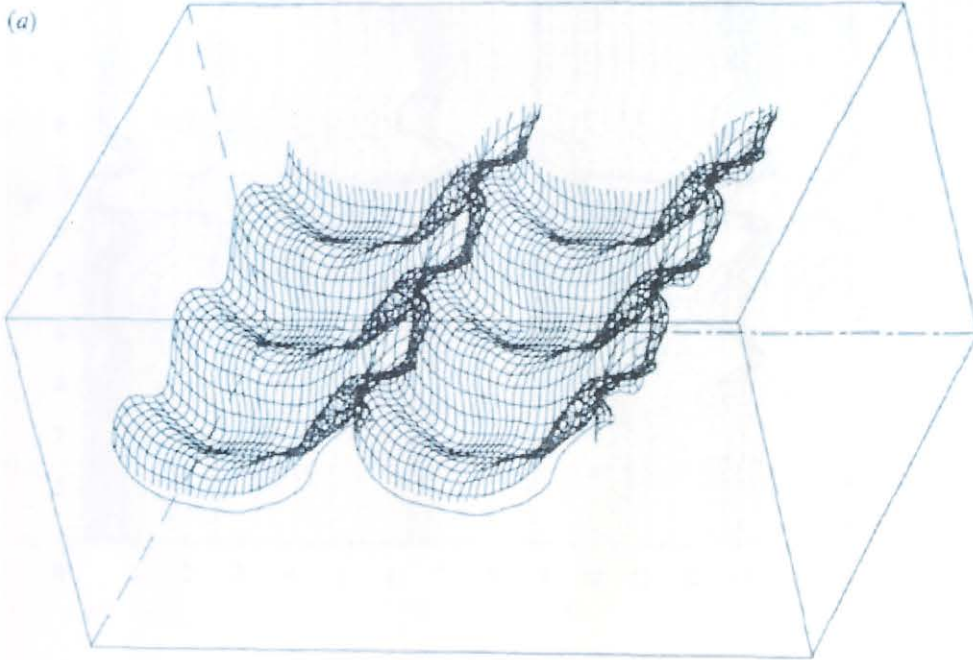


図 1.2.9 (b) 渦構造の三次元化



(a)



(b)

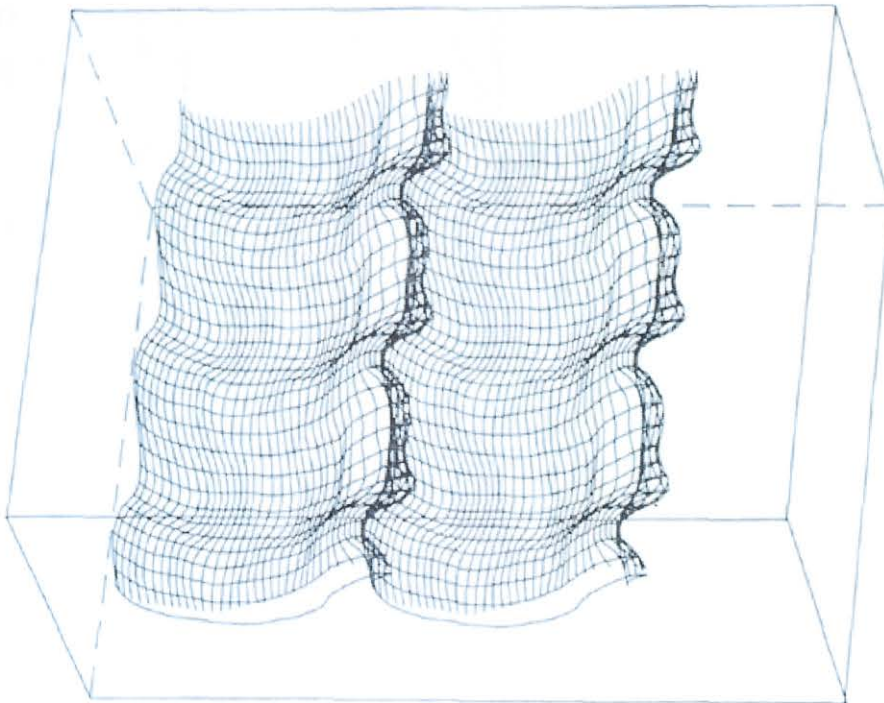


図 1.2.10 (a) 渦構造の三次元化

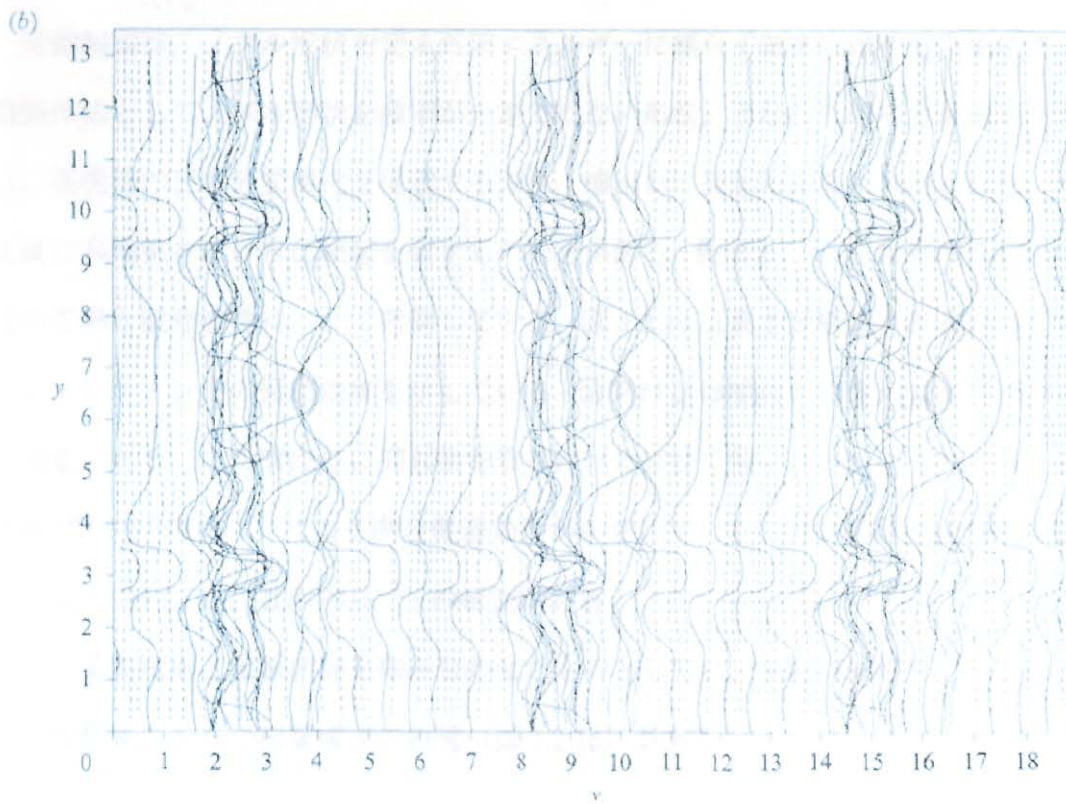
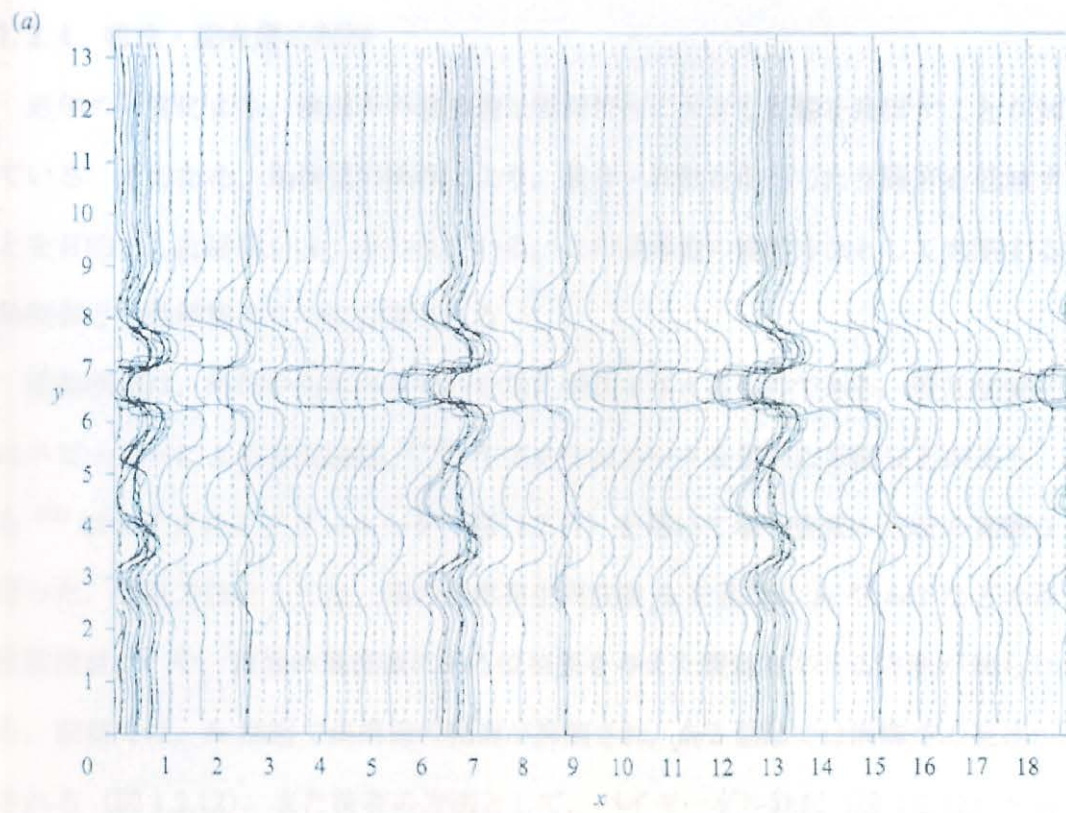


図 1.2.10 (b) 渦構造の三次元化

#### 1.2.4 噴流・混合層の制御

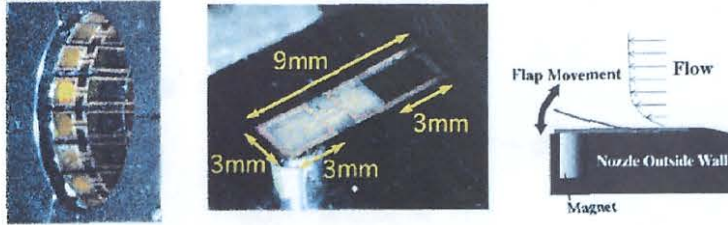
近年の研究により、噴流中の渦構造は噴流特性に大きな影響を及ぼすことが知られている。そのため、渦構造の操作により、混合・拡散を促進したり騒音を低減することを目的とした研究が多く行われている。この渦構造の操作方法として大別すると能動制御と受動制御の2つに分類される。

能動制御は、外部からエネルギーを加え攪乱を与えるものである。攪乱装置としてはスピーカーによる音波励起<sup>(19~21)</sup>やアクチュエータを用いた方法などがあり、鈴木ら<sup>(22)</sup>はマイクロアクチュエータ(図 1.2.11)を用いて単一噴流の分岐の実験などを行った。攪乱方法としては、渦の自然発生周波数  $fn$  を基準に  $fn$  や  $fn/2$  などの単一周波数攪乱<sup>(23)</sup>や、複数の周波数にある位相差を与えた攪乱を与える方法が知られている。前者では、 $fn$  励起で渦構造の発達抑制され、 $fn/2$  励起では渦構造の発達が促進される(図 1.2.12)。また後者の方法として、バイモーダル励起(図 1.2.13)があり、豊田による実験的な研究<sup>(24)</sup>や宮内らによる数値計算による研究<sup>(25)</sup>などがある。

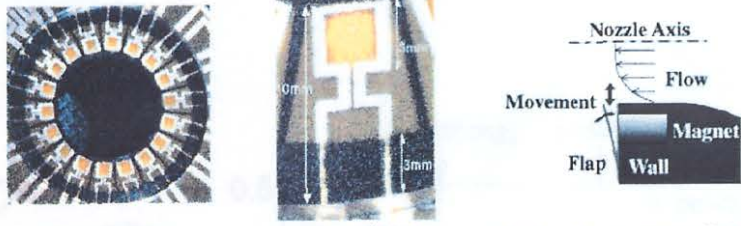
受動制御は、ノズル形状を変え外部エネルギーに頼らず渦を操作する方法である。渦操作法としてノズル形状を曲率が一定ではない形状、すなわち楕円や非円形形状にし、渦構造の三次元変形化を促進する方法、噴出口に突起物を取り付ける方法、出口直後に共鳴室を設け自己励起を促すものなどがある。豊田ら<sup>(26) (27)</sup>はその複雑な渦構造の変形と混合特性について考察している。図 1.2.14 は長方形噴流中の渦輪の変形とエントレンメントの促進効果を示している。図中の  $Q$  は噴流の流量、 $Q_0$  は噴出口の噴出流量である。また噴出口に突起物を取り付ける方法(図 1.2.15)については、定量測定<sup>(28)</sup>や可視化<sup>(29)</sup>により混合促進効果が示されている。出口直後に共鳴室を設ける方法については、社河内ら<sup>(30)</sup>の研究がある

また受動制御と能動制御を組み合わせたものとしては、中島・田畑<sup>(31) (32)</sup>らによる傾斜回転断面をもつ円管噴流の研究(図 1.2.16)がある。

Suzuki *et al.* 1998



Present nozzle



ノズル出口構造

フラップ形状

アクチュエーションの仕組み

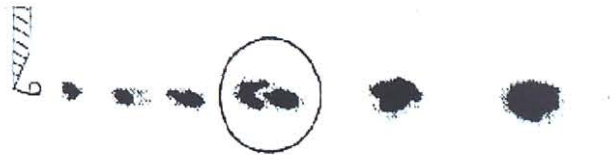
図 1.2.11 マイクロアクチュエータ

No Forcing



Forcing :  $f = f_n / N$  ( $N=1, 2, \dots$ )

$N = 1$



$N = 2$



$N = 3$

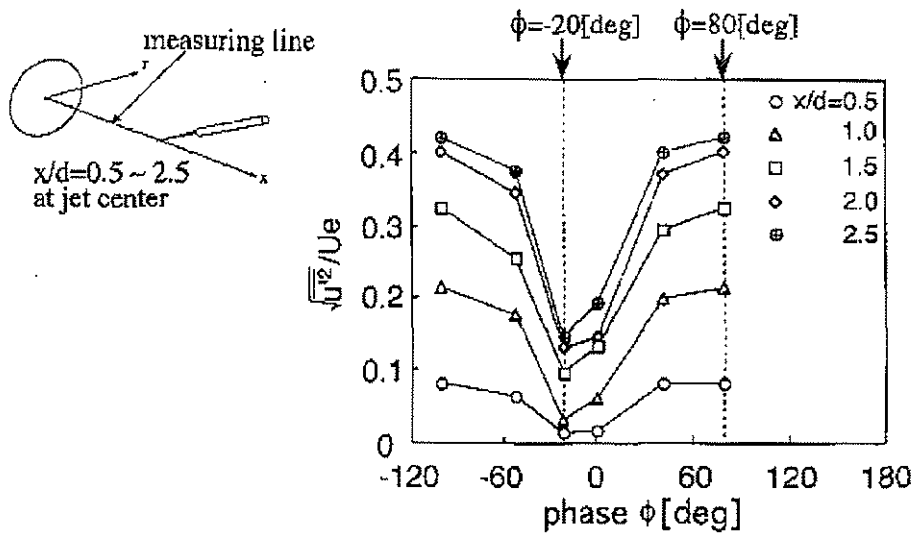
$N = 4$

.

図 1.2.12 単一周波数励起

$$u' = A \cos(2\pi f_n t) + B \cos\{2\pi(f_n/2)t + \phi\}$$

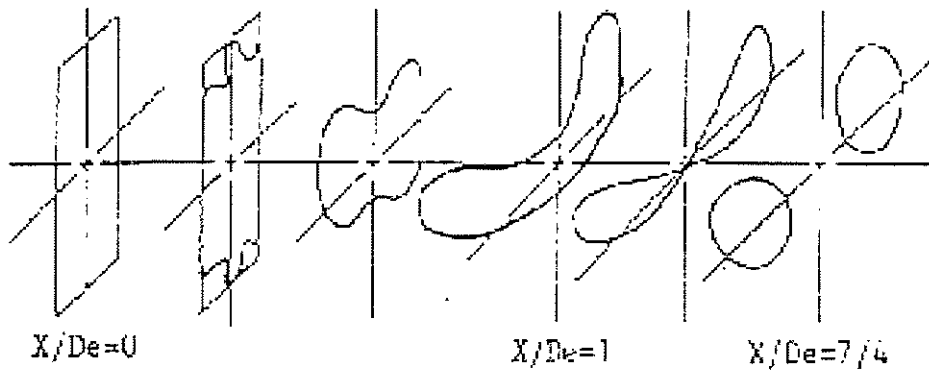
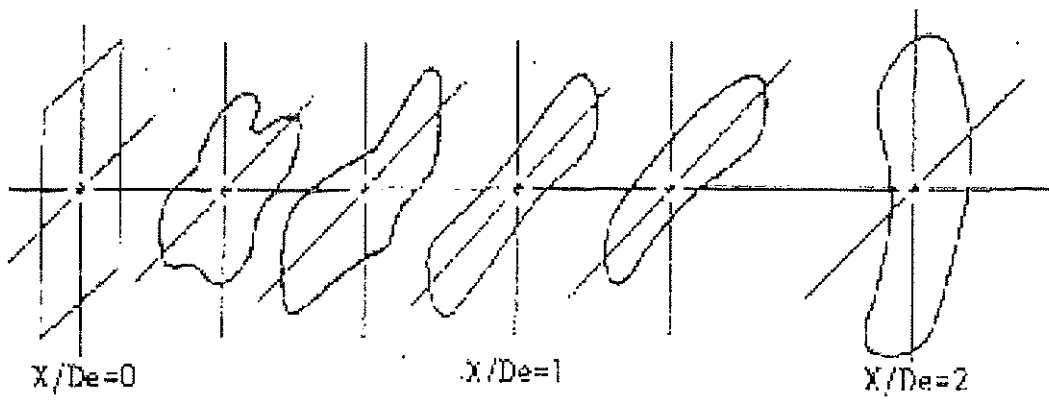
(a) 変動速度



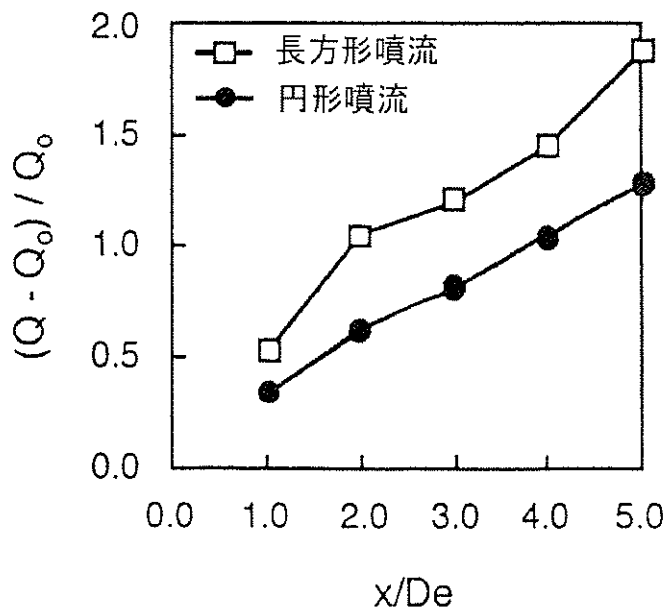
(b) 乱れ強さにおよぼす位相効果

図 1.2.13 パイモーダル励起





(a) 非円形渦の変形



(b) エントレインメント

図 1.2.14 非円形噴流

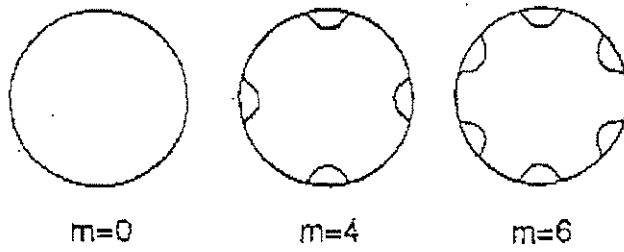
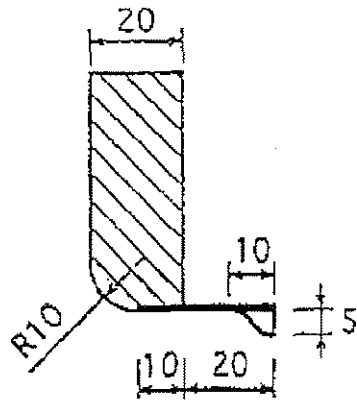


図 1.2.15 ボルテックスジェネレータの取付

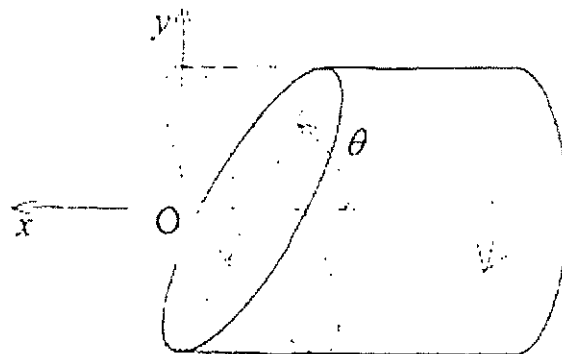


図 1.2.16 傾斜回転切断面をもつ円管

### 1.3 本研究の目的

本研究では、噴流の三次元渦構造を明らかにすることを目的とし、主に以下の点に焦点を当て検討する。

- (1) 噴流中の詳細な三次元渦構造を実験的に明らかにする。
- (2) 従来の研究では不明であった渦構造の干渉・変形挙動を明らかにする。
- (3) 渦構造の干渉・変形挙動のメカニズムを各種データから検討し、物理モデルを確立する。
- (4) 噴流の混合・拡散機構と渦挙動の関連性を明らかにする。



## 第 2 章

## 第2章 軸対称噴流の渦構造およびその変形過程

### 2.1 まえがき

本章では、水噴流の実験装置、計測システム、データ処理方法を示し、可視化実験と定量実験結果等により、縦渦構造と軸対称構造の干渉模様を詳細に検討しそして、さらに渦挙動と混合機構の関連性について考察する。

### 2.2 水噴流実験装置

#### 2.2.1 水槽

水槽実験は、同一  $Re$  数の風洞実験に比べ流速を低く抑えることが出来るため、可視化観察に適している。本研究の可視化実験では、図 2.2.1 に示す水槽を用いた。材質は厚さ 5mm の透明アクリルである。水槽の外寸は長さ 900mm×高さ 430mm×幅 450mm である。水槽は、上流側がオーバーフロータイプになっており、ヘッドを一定に保つ構造になっている。測定領域は、長さ 400mm×高さ 420mm×幅 440mm であり、可視化は、側方、下方、下流側正面の 3 方向から行うことが出来る。

噴流の励起は、水槽上流側に設置された加振器 (IMV CORPORATION 製 バイブレット PET-01) で行った。励起方法の概略を図 2.2.2 に示す。コンピュータで、励起信号を生成した後、ノイズフィルターで高周波ノイズを取り除く。ノイズを取り除いた信号はアンプで増幅した後、加振器に伝えられる。加振器の振動軸に取り付けられたプラスチック板を水中で振動させることにより、噴出口で流れ方向の変動流を与え噴流を励起した。

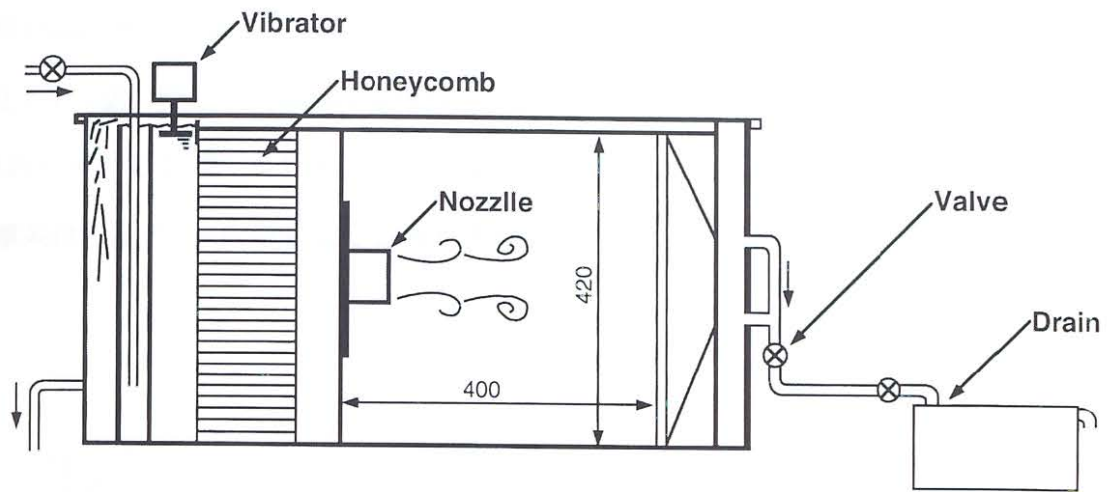


图 2.2.1 水槽

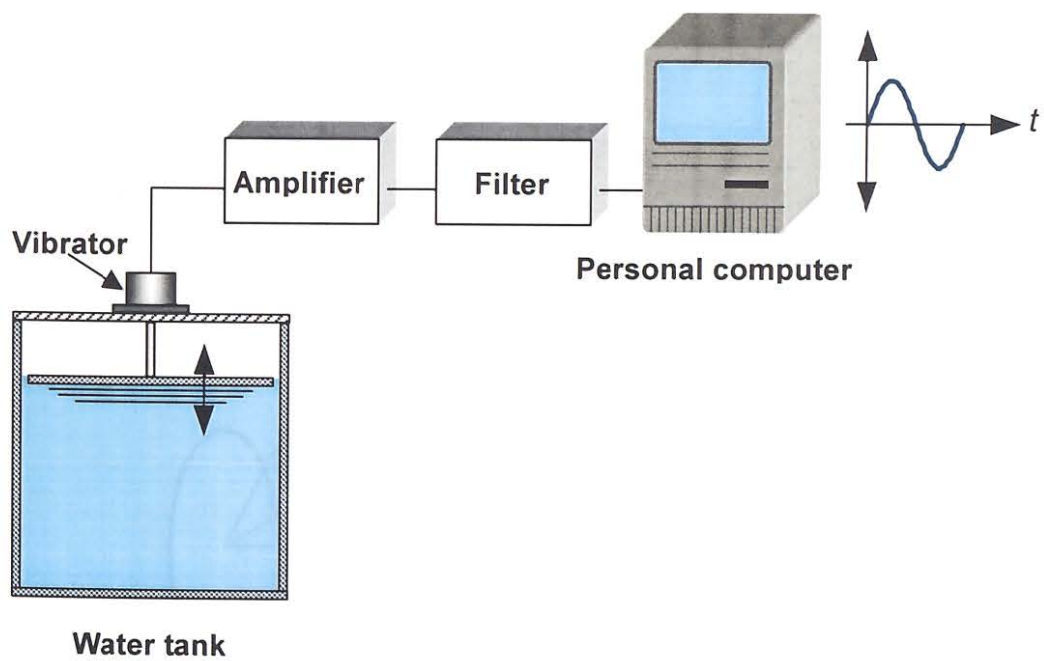


图 2.2.2 噴流励起方法

## 2.2.2 ノズル

図2.2.3にノズルを示す。水噴流実験では2種類のノズルを使用した。1つは、ノズル直径46mm 長さ30mmの円形ノズルであり、他は縦渦を強調するために円形ノズルの噴出口に6個の突起物 (Vortex generator : 以下VGとする)を取り付けたものである。VGの取り付け個数は、自然発生条件で生成される縦渦対の数により決定した。

座標系は、図 2.2.4 に示すように流れ方向を  $x$ 、半径方向を  $r$  とした。

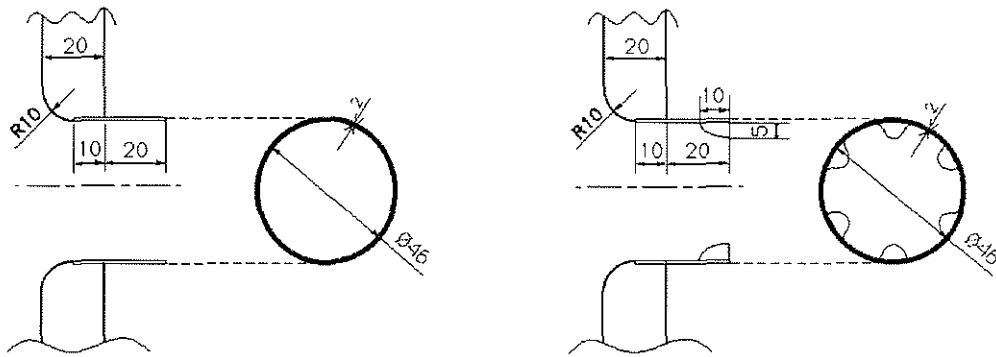


図 2.2.3 ノズル

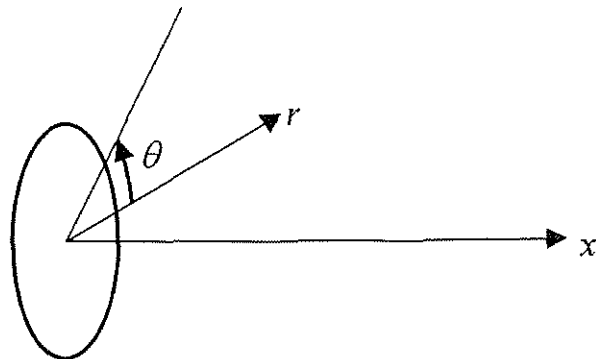


図 2.2.4 座標系

### 2.2.3 可視化システム

可視化システムを図 2.2.5 に示す。水槽は、前述のものを用い、可視化光源にはアルゴンイオンレーザーを用いた。光源から水槽への照射には、図に示すようにリフレクターを2枚使用し、一方は手動トラバース上に設置することで、レーザー光の平行移動を可能としている。トラバース上のリフレクターの後には、シリンダーレンズが設置されており、直径 5mm の光をシート状にしている。シート光は途中のスリットにより、2mm 厚にして水槽に照射した。

可視化染料はレーザーの波長を考慮しウラニンを用いた。最初にテストセクションをウラニン染料で染色し、そこに染料の入っていない水噴流を噴出することで鮮明な映像を得た。撮影には市販の家庭用ビデオカメラを用い、映像は主に水槽下流側より撮影した。ビデオカメラで記録した画像はコンピュータに取り込み画像処理した。

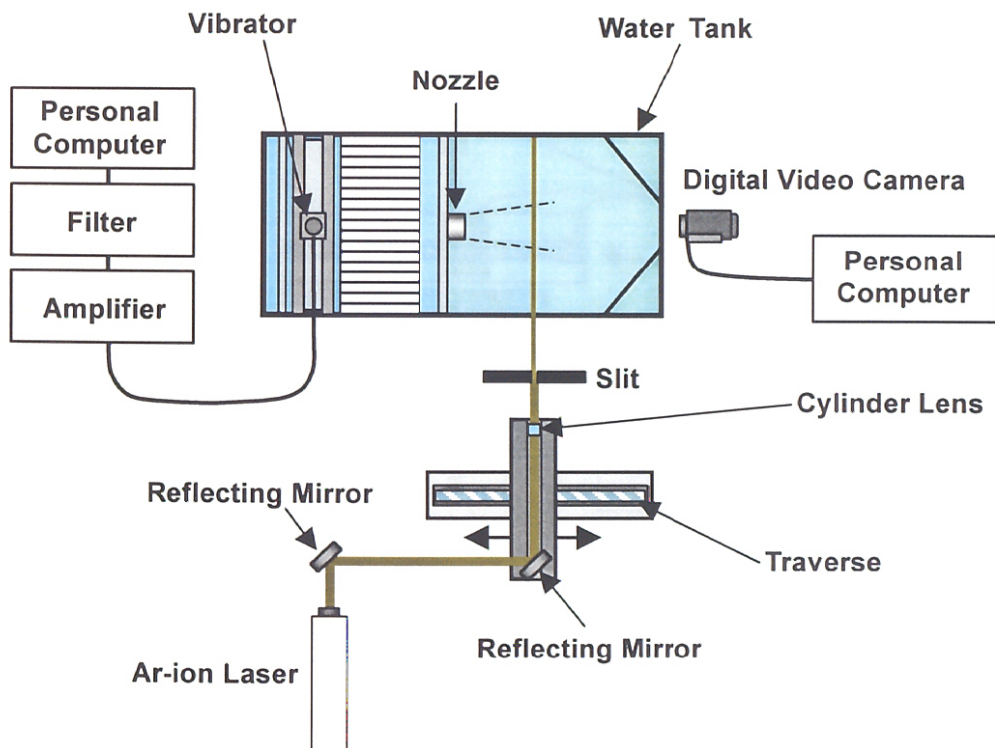


図 2.2.5 可視化システム

## 2.2.4 定量計測システム

本実験では、水噴流の速度・乱れ強さ分布、エントレメントを測定するために熱膜流速計による定量計測を行った。計測装置の概略図を図 2.2.6 に示す。測定には、カノマックス製 CTA (MODEL1011) とリニアライザ (MODEL1014)、TSI 製 I 型ホットフィルムプローブ (MODEL1210-60W) を用いた。プローブは PC 制御の 3 軸トラバースに取り付けられ、 $x-r$  平面で測定を行った。トラバースの各軸にはボールねじを使用しステッピングモーターで駆動した。トラバースの移動分解能は、0.1mm である。測定データは、トラバース制御兼用の PC にて A/D 変換され記録された。A/D 変換分解能は 0~10V 範囲で 12bit である。水中噴流を計測する際のサンプリング周波数は、速度変動周波数を考慮して 250Hz に設定し、サンプリング数は 16300 である。

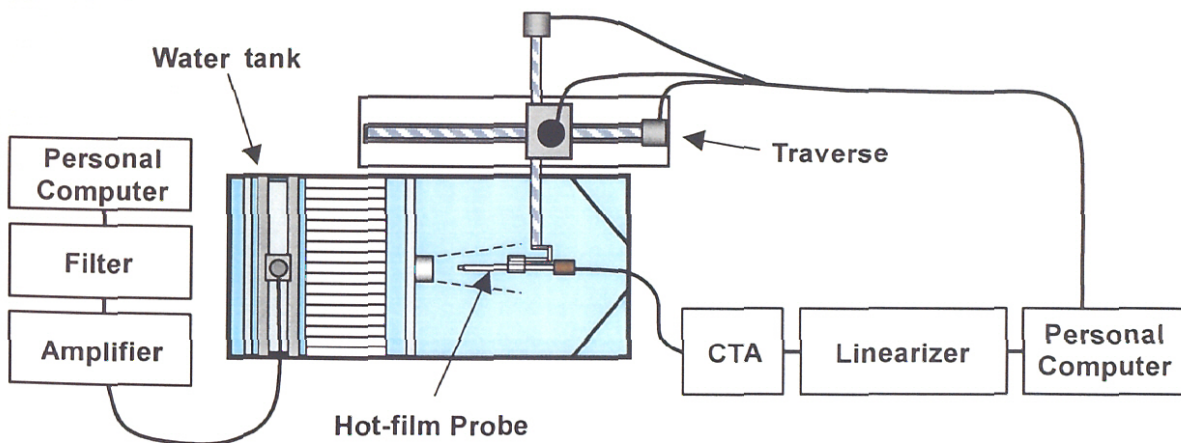


図 2.2.6 定量実験システム

### 2.3 水噴流実験条件

水噴流の実験条件を表 2.1 に示す.

表 2.1 実験条件

---

流速	: $U_0=0.12\text{m/s}$
ノズル形状	: 円形ノズル : VG 付きノズル (VG6 個)
ノズル直径	: $D=46\text{ mm}$
レイノルズ数	: $Re=U_0 \cdot D/\nu=3.8 \times 10^3$
励起条件	: (a) 励起無し : (b) 励起周波数 $f_c = f_n (=1.8\text{Hz})$ ( $f_n$ : 自然発生周波数), 励起強さ $u'/U_0 \approx 0.02$
ストラハル数	: $St=f_n \cdot D/U_0=0.69$
測定範囲	: $x/D=0 \sim 3.5$

---

## 2.4 画像処理方法

本研究では、初期渦の発生周波数の特定や、三次元的な流れ構造の可視化を行うための画像処理を行った。以下にそれらの処理方法を述べる。

### 2.4.1. Taylor の凍結仮説を用いた三次元表示

流れ構造を三次元で可視化するためには、空間上の各位置の同一時刻での情報が必要になるが、実験的にそれを得る事は非常に困難である。そこで、流れ情報が流れ方向に変化しない仮定する Taylor の凍結仮説を用いて、二次元断面の情報から三次元表示を行った。問題点としては Zaman<sup>(33)</sup>らによって渦の移動速度が極端に不均一な流れ場では渦度分布が歪められる場合があることが指摘されている。しかし、熱線測定における測定時間の大幅な短縮されるメリットや、可視化法に適用する事で非定常な流れ場の三次元構造が把握できるなどメリットも多く、高曾<sup>(34)</sup>や榊原<sup>(35)</sup>ら他の研究者も三次元構造に関するこの仮定を用いて新たな知見を得ている。

Taylor の凍結仮説により、(2-1) 式により、流れの時系列情報を空間情報に変換することができる。

$$\varphi(x_1, \tau + \Delta\tau) = \varphi(x_1 - U_c \Delta\tau, \tau) \quad (2-1)$$

ここで、 $\varphi$ は空間の位置  $x_1$  と時間  $\tau$  を変数とした物理量を表す関数で、 $U_c$  は流れの情報の移動速度を示している。流れ構造に適用する注目は、 $U_c$  としては流速でなく流れ構造の速度を使用することが望ましいが、これは主流速度のおよそ半分と見積もることができる。

以上の仮定を用いると、図 2.4.1 に示すように、二次元平面画像に対し、流れの移動速度を考慮して、適当な厚みを与えて積層して三次元画像を得ることができる。



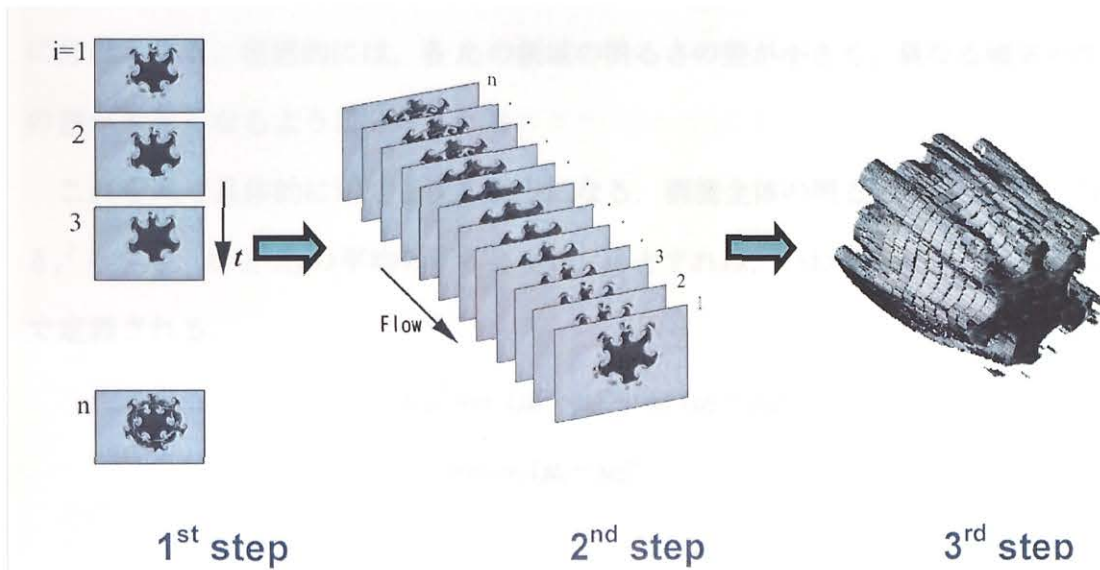


図 2.4.1 Taylor の凍結仮説を用いた三次元表示方法

## 2.4.2. 二値化方法（判別基準法）

本研究では、噴流の初期せん断層の不安定周波数を求めるため、噴流断面映像を二値化し、その断面積の時間履歴をFFT解析することにより、不安定周波数を得た。

二値化の方法にはモード法や $p$ -タイル法などがあるが、本研究では大津<sup>(36)</sup>が提案する判別基準法を用いた。この方法では、二値化される物体の面積が未知で、ヒストグラムが双峰性を示さない条件下でも適当な二値化が行えるメリットがある。

この方法の概念は、あるしきい値 $t$ の評価基準を決め、それが最大になる $t$ を選択することである。しきい値 $t$ が与えられれば、それにより画像が二つの領域 $R_1$ と $R_2$ に分けられる。理想的には、各 $R_i$ の領域の明るさの差が小さく、異なる領域の明るさの差が大きくなるように分けられる。

これを式で具体的に示すと次のようになる。画像全体の明るさの平均を $\mu_r$ 、分散を $\delta_r^2$ とする。 $R_1$ と $R_2$ の平均の明るさを $\mu_1$ 、 $\mu_2$ とすれば、いわゆるクラス間分散は次式で定義される。

$$\begin{aligned}\delta_B^2 &= \omega_1 (\mu_1 - \mu_r)^2 + \omega_2 (\mu_2 - \mu_r)^2 \\ &= \omega_1 \omega_2 (\mu_1 - \mu_2)^2\end{aligned}\quad (2-2)$$

$\delta_B^2$ はしきい値 $t$ によって変化するので $\delta_B^2(t)$ として表すとしきい値 $t$ に対する判別基準 $\eta(t)$ は

$$\eta(t) = \delta_B^2(t) / \delta_r^2 \quad (2-3)$$

で定義され画像の明るさの範囲を $k_1 \sim k_2$ とすると $\eta(k_1) = \eta(k_2) = 0$ となり $k_1 < t < k_2$ で必ず $\eta(t)$ は最大値をとる。

本研究では、この処理に自作のプログラムを用いた。言語はMATLAB 6.5を使用した。このプログラムを付録Aに添付する。

### 2.4.3. 画像評価法

本研究では、可視化結果から定量的な混合評価を行うため、噴流断面積、噴流界面面積を算出した。

これらの算出方法を図 2.4.2 に示す。オリジナル画像を二値化し、二値化した黒い部分（噴流内部流体部分）のピクセル数を算出し、噴流断面積とする。境界線長さは、二値化した画像の境界部分のピクセル数として算出した。

また、二値化された噴流断面積（暗部の面積）は、噴流内部流体の濃度が高い領域であり、噴流未混合領域ととらえることができる。これは、下流側の混合領域が大きいかほど減少することにより、混合の評価に用いた。また未混合面積は、噴流の拡散評価値としてこともできる。未混合面積算出方法は垂直断面図を二値化し、未混合領域のピクセル数を面積  $A$  として求めた。

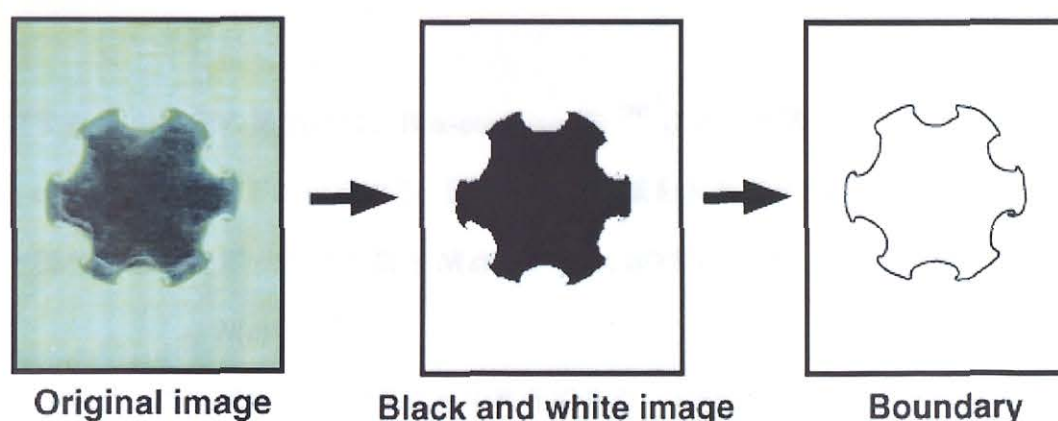


図 2.4.2 算出方法

境界線長さは、噴流と外部流体の境界線の長さを計測したものである。これは燃焼など化学反応を伴う流れの場合、反応面の大きさが非常に重要であり、このパラメータはその反応面の大きさととらえることができる。本研究では、噴流断面の境界線長さより、噴流境界面の表面積を求め、混合評価のパラメータとした。境界面積の算出式を式 (2-4) に示す。

$$S/S_0 = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{L_0 \cdot n} \quad (2-4)$$

境界線長さは垂直断面図を二値化し、境界部のピクセル数を境界線長さ  $L_i$  として求め、境界面積  $S$  を噴出直後の境界面積  $S_0$  で無次元化したものとして求めた。 $L_0$  は噴出出口の境界線長さ、 $n$  は画像数である。

また可視化結果より渦構造の複雑さを評価するため、画像の複雑さ<sup>(37)</sup> とフラクタル次元<sup>(38)</sup> を計算した。複雑さ  $e$  は、境界線長さ  $L$  と断面積  $A$  より式 (2-5) のように定義される。

$$e = L^2/A \quad (2-5)$$

フラクタル次元の算出には、Box-counting 法<sup>(39)</sup> による計算プログラムを用いた。Box-counting 法を以下に説明する。図形を含む領域を大きさ  $\varepsilon$  の正方形に等分割し図形を一部分でも含むボックスの数を  $N(\varepsilon)$  とすると、 $\varepsilon$  の変化に対してフラクタル図形では

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D} \quad (2-6)$$

が成り立つ。(2-6)式の  $D$  はフラクタル次元である。本研究ではフラクタル次元算出プログラムを Koch 曲線 (1.26 次元) で検定した。算出プログラムを付録 B に添付する。

## 2.5 水噴流の実験結果および考察

### 2.5.1 渦の自然発生周波数

可視化された映像と Taylor 仮説を適用した画像等から、噴流の渦構造について考察する。また噴流映像の断面積変化の時間履歴を FFT 処理したものと、熱膜プローブの波形を FFT 処理した結果から周波数特性について検討する。

最初に、噴流の自然発生周波数について検討する。図 2.5.1 に  $x/D=0.5$  での噴流断面積変化の時間履歴を示す。検討に用いた噴流断面積は、噴流垂直断面画像を大津法で二値化処理したものから算出した。図の時間履歴より周期性が見られる。図 2.5.2 にその噴流断面積変化の周波数スペクトルを示す。図の卓越周波数は、1.8Hz にピークを持つことが分かる。

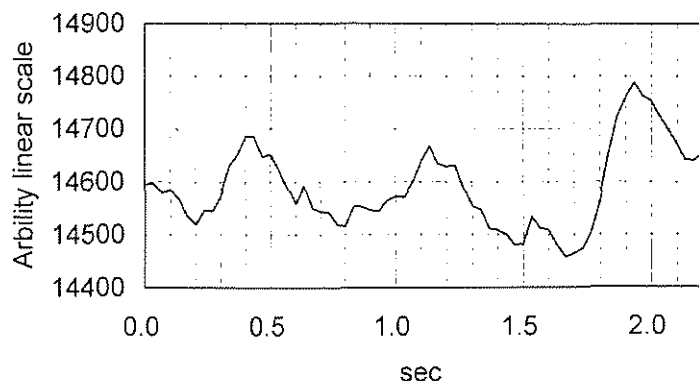


図 2.5.1 噴流断面積の時間履歴（円形ノズル励起無し  $x/D=0.5$ ）

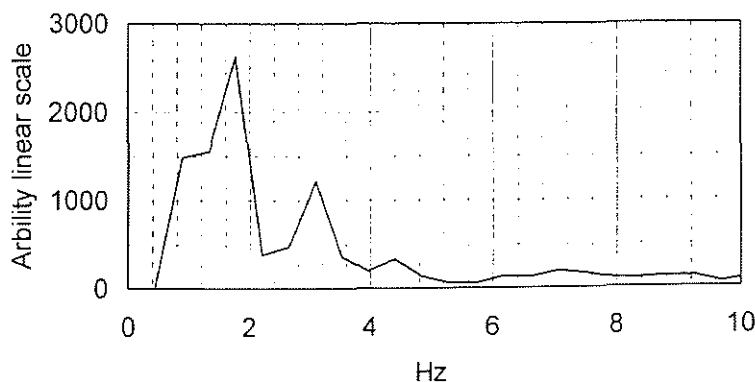


図 2.5.2 噴流断面積の変動周波数（円形ノズル励起無し  $x/D=0.5$ ）

また図 2.5.3 に熱膜プローブで得た速度波形の周波数スペクトルを示す。熱膜信号の取得位置は、噴流せん断層付近の  $r/D=0.55$  である。上流側  $x/D=0.5$  で 2Hz 付近にピークを持ち始め、 $x/D=1.0$  でそれが顕著になる。さらに下流側では渦構造の合体で卓越周波数は低周波側に移動する。これらより渦の自然発生周波数は、約 2Hz と考えられる。

また、一般に境界層の運動量厚さ  $\theta_m$ 、初期渦の発生数  $f$  としたとき  $S_r = f\theta_m/U$  で与えられるストラハル数が 0.012 となる<sup>(3)</sup>。よって、噴流出口での速度分布より算出した境界層運動量厚さ  $\theta_m=0.67$  mm と  $U=120$  mm/s から、ストラハル数を見積もると不安定周波数は、2.15Hz であり、上記の卓越周波数に近く、2Hz 付近の卓越周波数は、初期渦の自然発生周波数と判断した。

以上の結果により軸対称渦輪の発生を促進するための励起周波数  $f_e$  を 1.8Hz とした。

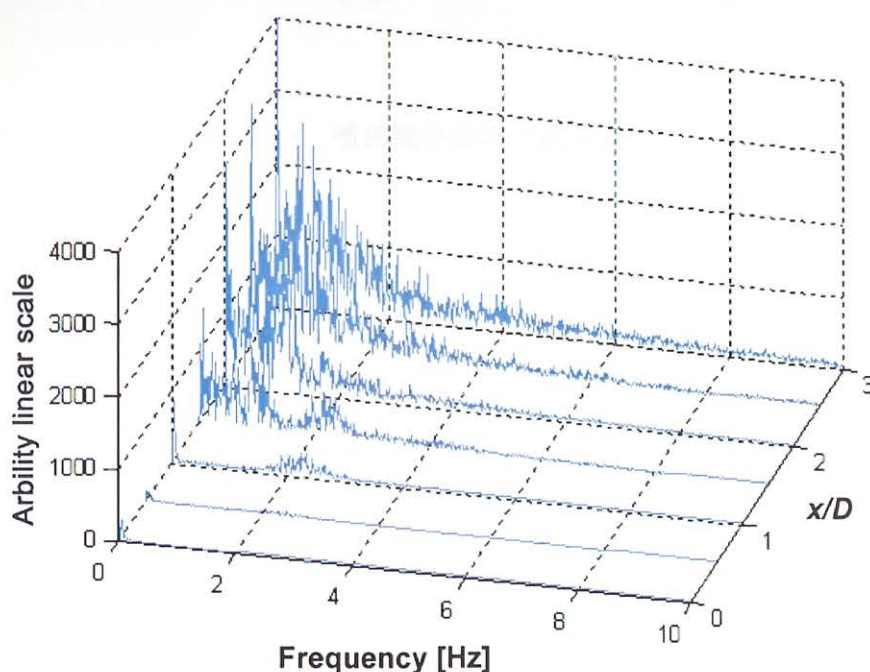


図 2.5.3 熱膜プローブの変動速度周波数（円形ノズル励起無し  $r/D=0.55$ ）

## 2.5.2 可視化映像から見た混合特性

### (a) 噴流境界面

励起と VG による攪乱により，軸対称渦構造と縦渦構造を安定的に生成した場合の三次元渦構造を図 2.5.4 に示す．図は Taylor の凍結仮説を適用した  $x/D=1.0$  の画像で，縦渦により噴流境界面積が増大し，さらに軸対称渦輪が変形し，外部流体の取り込みが大きくなり混合が促進されることが解る．

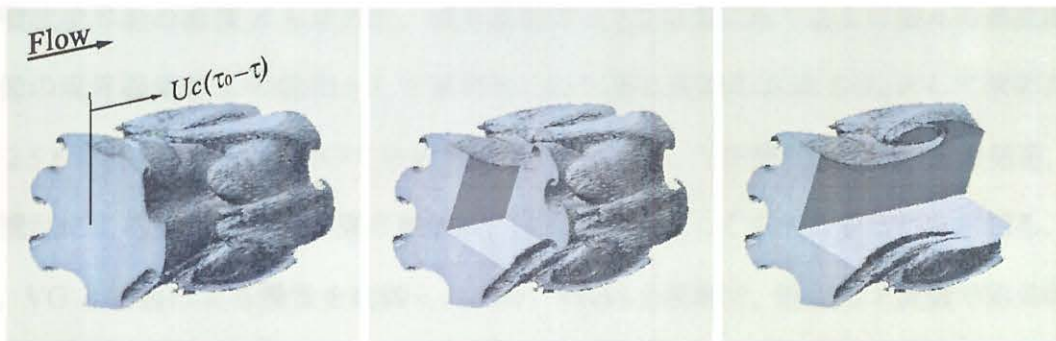


図 2.5.4 噴流境界面の三次元表示

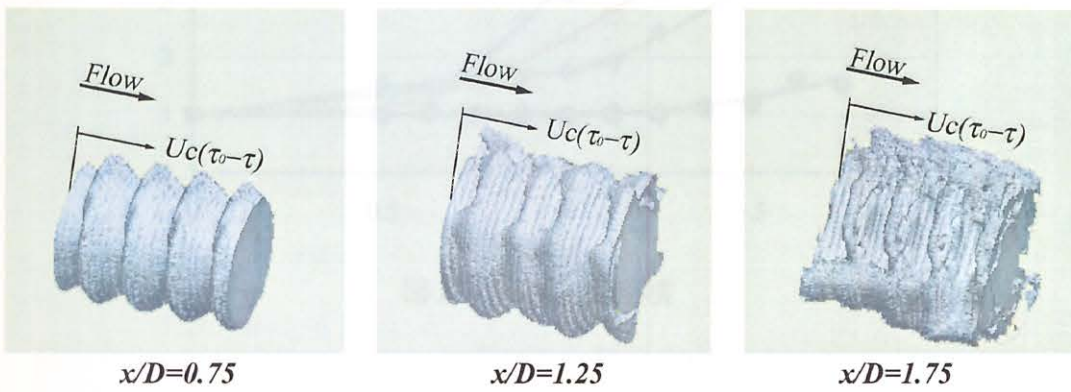
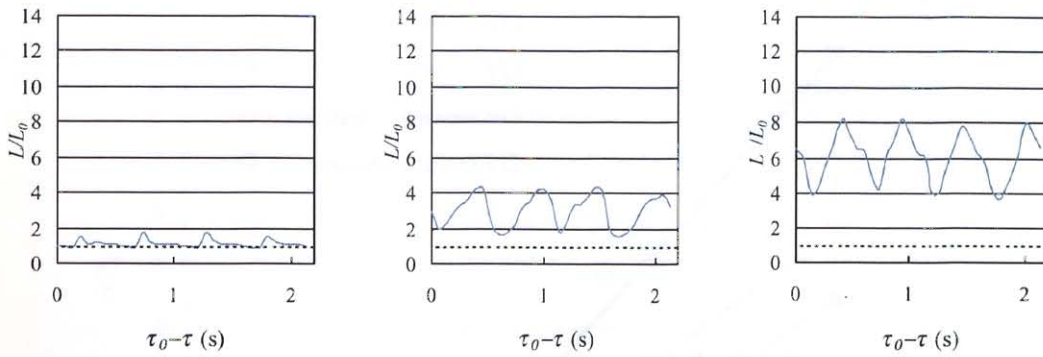
## (b) 混合・拡散特性

噴流の混合は噴流境界の長さに依存する。よって混合効果を評価するために、境界線長さを算出した。算出方法は 2.4.2, 2.4.3 節で示した通りである。図に示すように垂直断面図を二値化し、その境界線部分を抽出しピクセル数を境界線長さ  $L$  として求めた。図 2.5.5 は、 $x/D=0.75, 1.25, 1.75$  における三次元渦構造と、それに対応した境界線長さ  $L/L_0$  ( $L_0$  はノズル出口の境界線長さ) の時系列波形である。図中の点線は  $L_0$  を示している。図より渦構造と境界線長さの関連性が解る。境界線長さは、大規模軸対称渦部で最大値をとり、大規模軸対称渦間の鞍部において最小となる。図より軸対称渦と縦渦の生成により  $L$  が著しく増大することが解る。

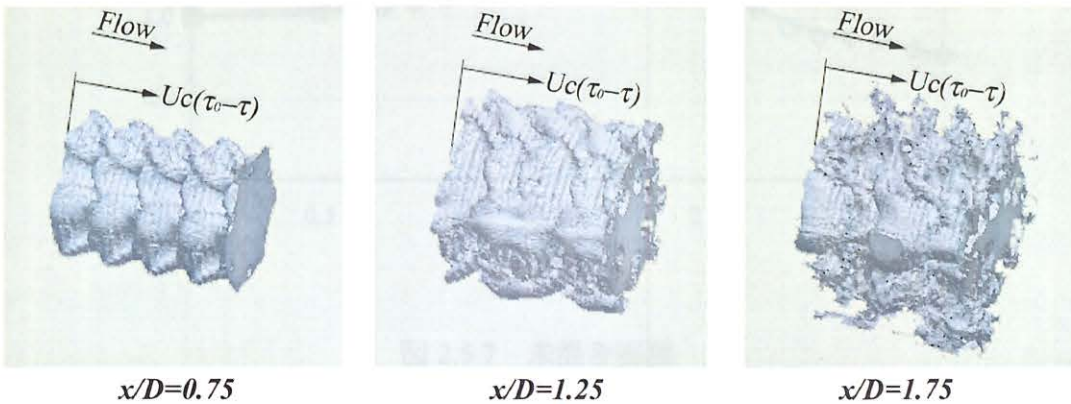
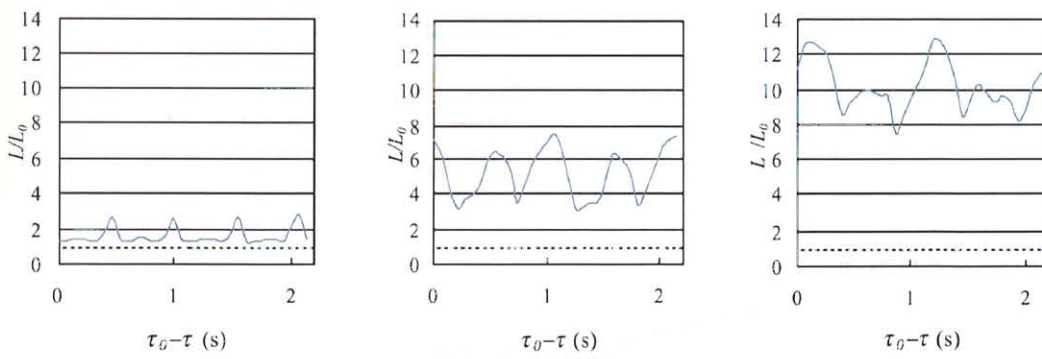
噴流境界面の面積  $S$  も求めた。境界面面積は 2.2 秒間に取り込んだ個々の垂直断面画像の境界線長さ  $L$  の総和として求めた。また、出口直後の  $S_0$  は  $L=L_0$  として求めた。図 2.5.6 に様々な条件についての結果を示す。図より、VG 攪乱による縦渦の発達、励起攪乱による大規模軸対称渦の発達が、境界面積を著しく増大させることが解る。また、VG と励起による攪乱を比較した場合、VG は上流側で、励起は下流側で効果的である。面積  $S$  は励起と VG による同時攪乱によって著しく増加し、軸対称渦輪と縦渦が混合促進に非常に効果的であることを示している。

噴流内部への混合進行状態を評価するため、本研究では未混合面積にも注目した。図 2.5.7 は、各種の攪乱を与えた場合の未混合面積  $A/A_0$  の流れ方向変化である。なお  $A_0$  は噴流口の断面積である。上流側  $x/D=1.5$  までは、励起を行ったものが励起なしよりも未混合領域の断面積増加が大きい。これは、励起により軸対称渦輪の発達が促進され、噴流が拡散するためである。しかし、これより下流側では、円形ノズルの場合にはいずれも未混合面積が増加するが、VG 付きノズルではいずれも未混合面積が減少傾向になる。これは、VG 付き噴流の場合は、縦渦によって混合が促進され、未混合面積が減少するためである。





(a) Excited without VG



(b) Excited with VG

図 2.5.5 三次元構造と境界線長さ

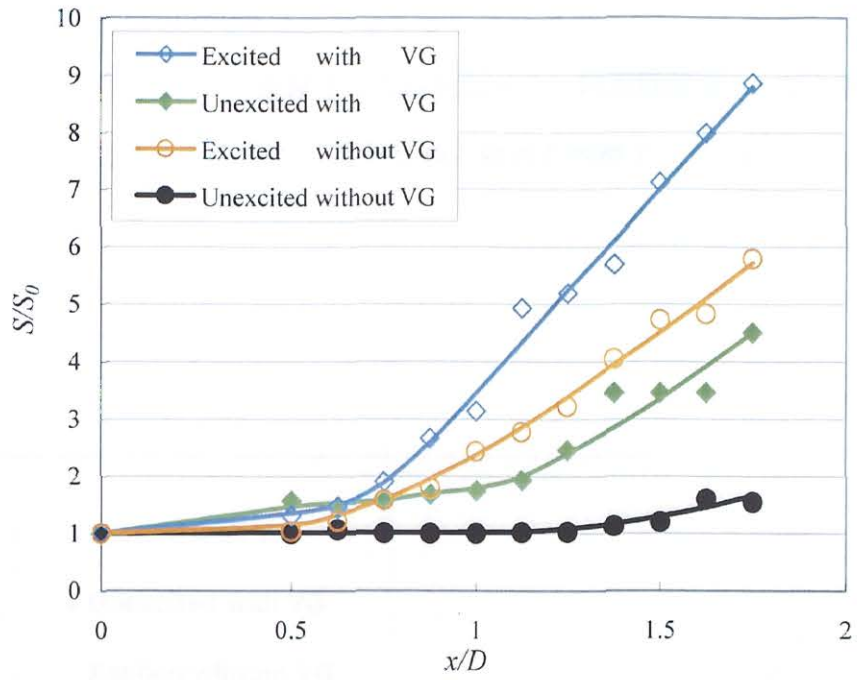


图 2.5.6 界面表面积

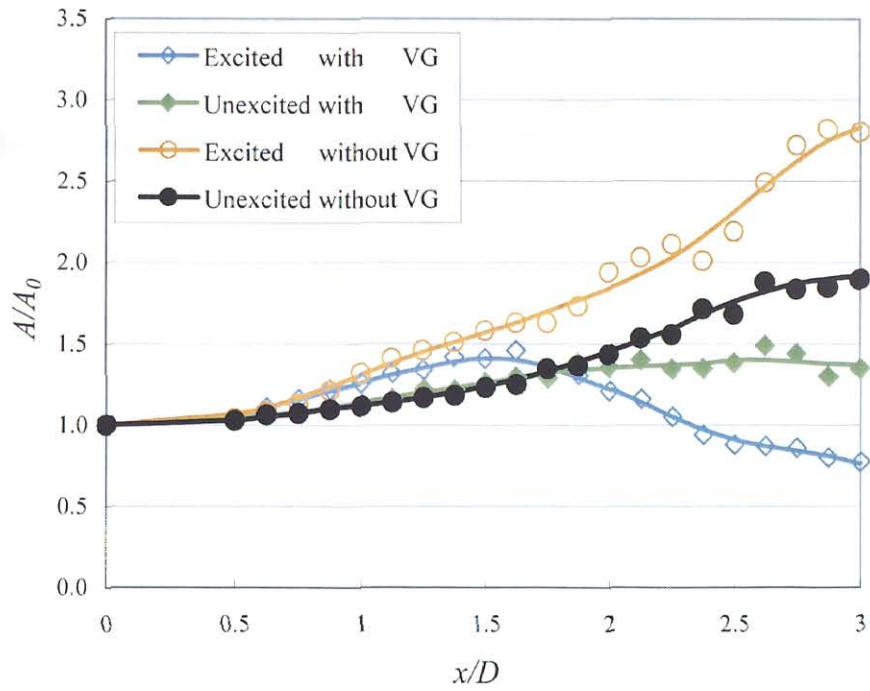


图 2.5.7 未混合面积

### (c) 複雑さとフラクタル次元

図 2.5.8 に複雑さを示す。複雑さは VG 励起有り，円形励起有り，VG 励起無し，円形励起無しの順に大きくなり，軸対称渦と縦渦を強調することによって，複雑さが増すことが解る。

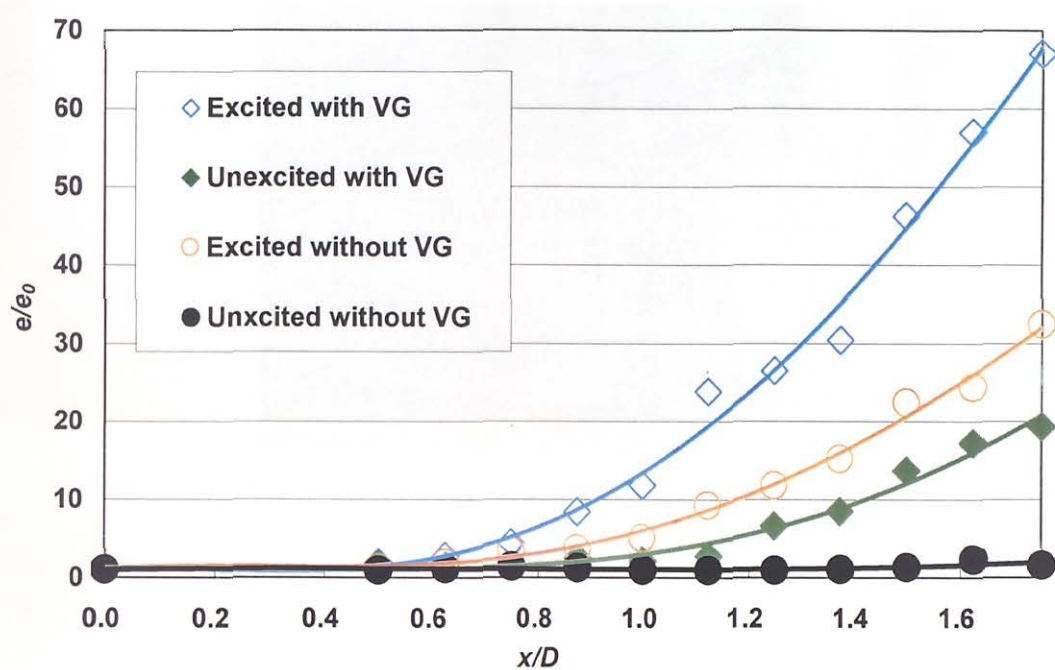
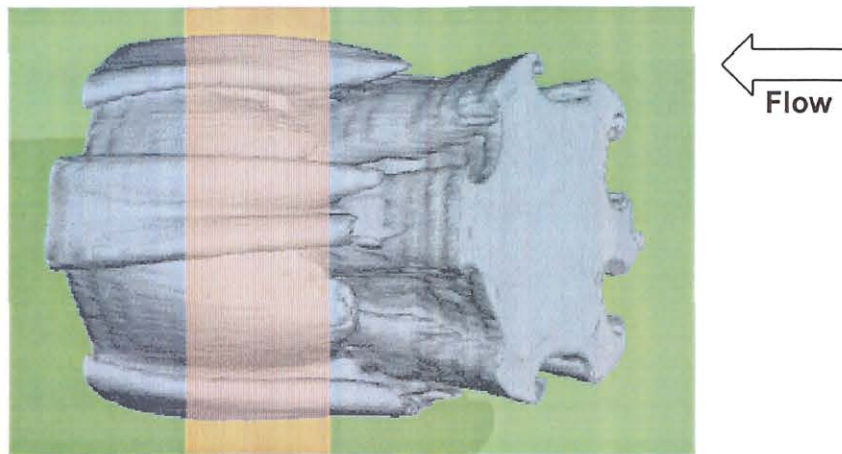
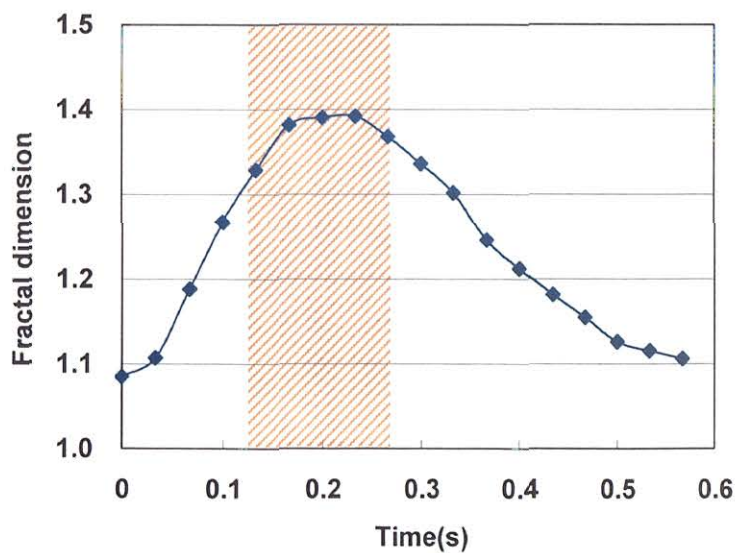


図 2.5.8 複雑さ

フラクタル次元の計算例を図 2.5.9 に示す。図(a)はフラクタル次元の計算対象映像で、VG 付で励起ありの場合の  $x/D=1.0$  における断面画像から構成された。図(b)は図(a)から計算されたフラクタル次元を示している。なお図(a)は、図(b)の時間軸に対応するように下流側から上流側に向けて表示した。フラクタル次元は、鞍部で小さく、渦輪部分で最大となることが解る。



(a) 三次元表示画像



(b) フラクタル次元

図 2.5.9 構造とフラクタル次元

流れ方向の各位置での平均化されたフラクタル次元を図 2.5.10 に示す。図より下流側に行くに従い、渦構造が複雑化しフラクタル次元が増加している様子が解る。

図に示す範囲では、ほぼ全域において励起有り・VG 付き噴流のフラクタル次元が最も大きい。励起有り・VG 無し噴流と励起無し・VG 付き噴流のフラクタル次元の推移は非常に類似しているが、 $x/D=1\sim 1.5$  では前者が、それより下流では後者の方がフラクタル次元が大きい。これは、前者の場合軸対称渦構造のペアリングによりフラクタル次元が増加したと考えられ、後者の場合は励起されていないことで、軸対称構造の発達がやや遅いが、下流で軸対称構造が発達し VG で誘起した縦渦が加わることにより、 $x/D=2.0$  以降でフラクタル次元が大きくなったと考えられる。

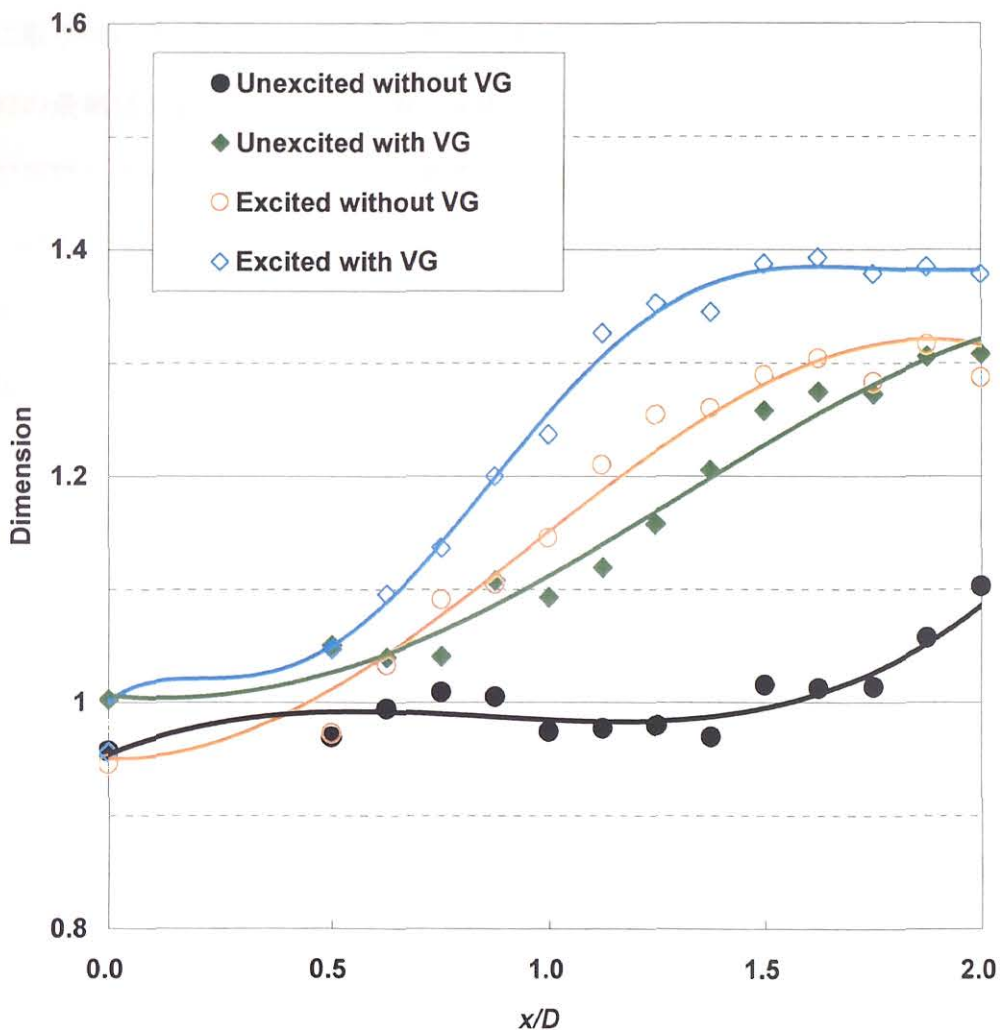


図 2.5.10 平均フラクタル次元



### 2.5.3 噴流可視化映像から推察される渦構造

励起無し of 円形噴流垂直断面画像を図 2.5.11 に示す。図は、上流側から下流側にレーザーシートを高速で移動させ、撮影したものである。レーザーシートの移動速度は、噴流出口速度の約 4 倍である。 $x/D=2.0$  付近より三次元変形が始まり、その下流で明瞭な縦渦が確認される。この映像を三次元化したものを図 2.5.12 に示す。図中の A 部分は明らかな三次元化が見られ始める部分で図 2.5.11 の  $x/D=2.0\sim 2.25$  に対応している、またこの図より三次元化は前後の渦輪間の Braid 領域で始まっている。これは Liepman ら<sup>(14)</sup>の結果と良く一致している。また本実験条件での縦渦対の個数は、5~8 個程度が確認されるが、最頻値は 6 個であった。よって、この最頻値の縦渦と軸対称渦の干渉模様を安定的に観察するため、軸対称渦を渦の自然発生周波数で励起し、縦渦をノズルに取り付けたボルテックスジェネレータ（以下 VG）で誘起する。VG の個数は、縦渦対の最頻値に合わせ、一定間隔で 6 個とした。VG の高さは、2.5mm と 5mm の 2 種類で実験した結果、より安定した縦渦構造が観察できる高さ 5mm のものを主に用いた。以下の VG 付き円形ノズルでの実験結果では、VG 高さ 5mm のものについてのみ示す。

励起を行った VG 付きノズル噴流の垂直断面映像を図 2.5.13 に示す。VG から発生した渦対が下流方向に成長している。 $x/D=0.5$  ではせん断層が周方向に巻き上がり縦渦が発生し始め、 $x/D=0.75$  ではさらに成長する。 $x/D=1.0$  の画像は軸対称渦輪の断面を示しており、発達した縦渦が渦輪の内部にも巻き込まれている。 $x/D=0.5, 1.0$  の噴流断面画像に Taylor 仮説を適用して構築した三次元画像を図 2.5.14, 図 2.5.15 に示す。図 2.5.14(a), 2.5.15(a) は噴流境界面の三次元画像で、軸対称渦輪と縦渦の効果により境界面が変形している。図 2.5.14(b), 2.5.15(b) は、噴流断面画像から抽出した縦渦画像を境界面に重ね合わせたものである。縦渦画像の濃い部分は、軸対称渦輪の内側にあることを示している。これらの図より、縦渦の変形模様が解る。軸対称渦輪が発生した直後の  $x/D=0.5$  では、縦渦は流れ方向とほぼ平行になっている。図中の  $S_2$  と  $S_3$  は 1 つの VG から発生した縦渦対、 $S_1$  と  $S_4$  は両隣の VG から発生した渦対の一部である。

$x/D = 1.0$  では、軸対称渦輪が成長し、渦輪に巻きついた縦渦は周方向に移動する。軸対称渦輪の外側では  $S_1$  と  $S_2$  は互いに接近し、図中の A 部で接続していることが推察される。軸対称渦輪の内側では  $S_2$  と  $S_3$  が接近し、図中の B 部で接続していることが推察される。以上の渦構造は、Ashurst ら<sup>(18)</sup>の数値シミュレーション結果と類似している。

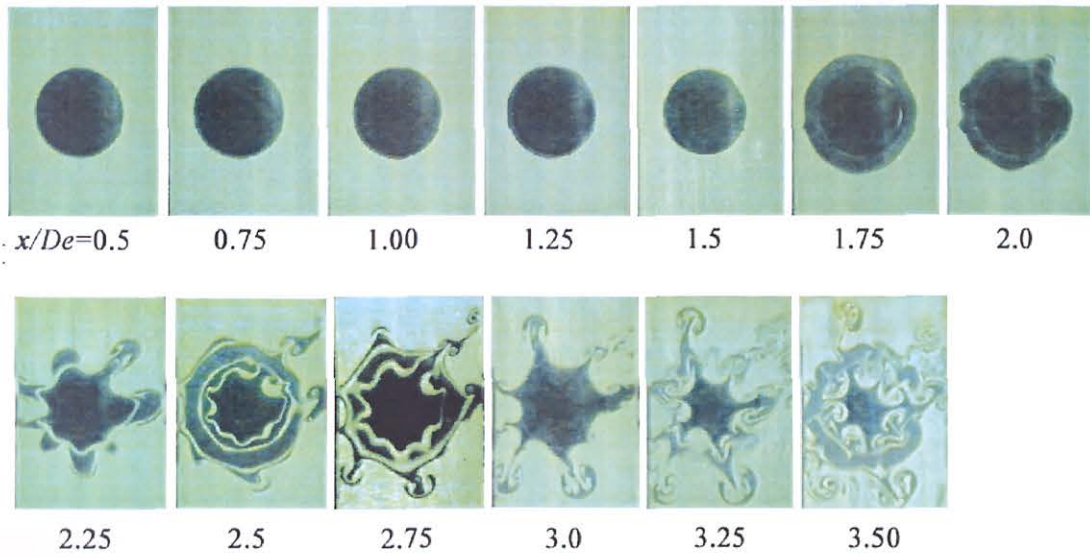


図 2.5.11 垂直断面映像（円形ノズル，励起無）

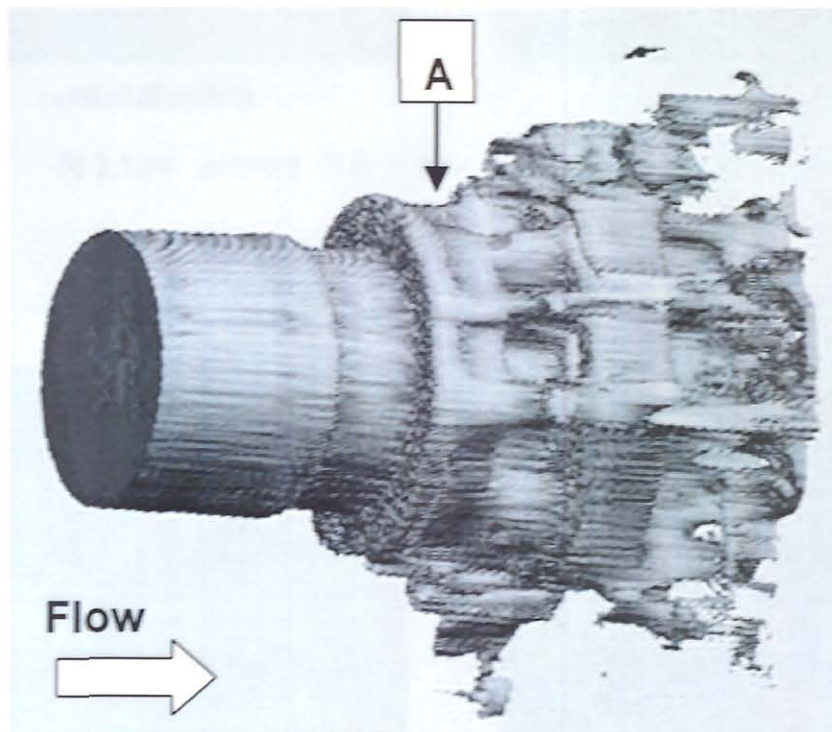


図 2.5.12 三次元表示（円形ノズル，励起無）



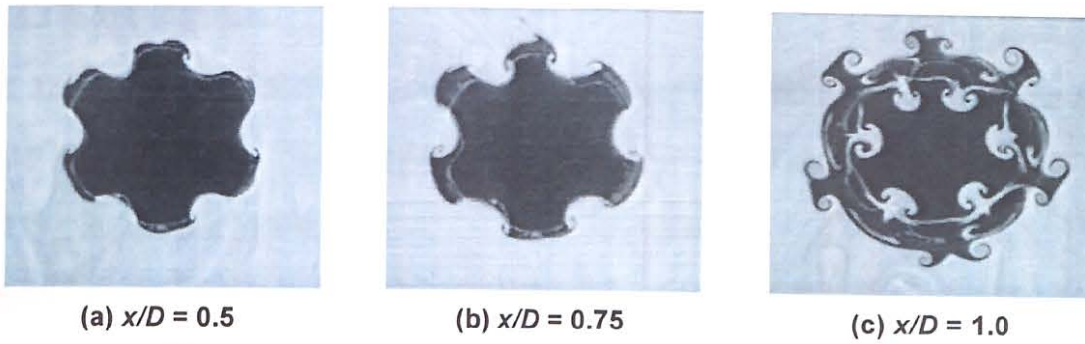
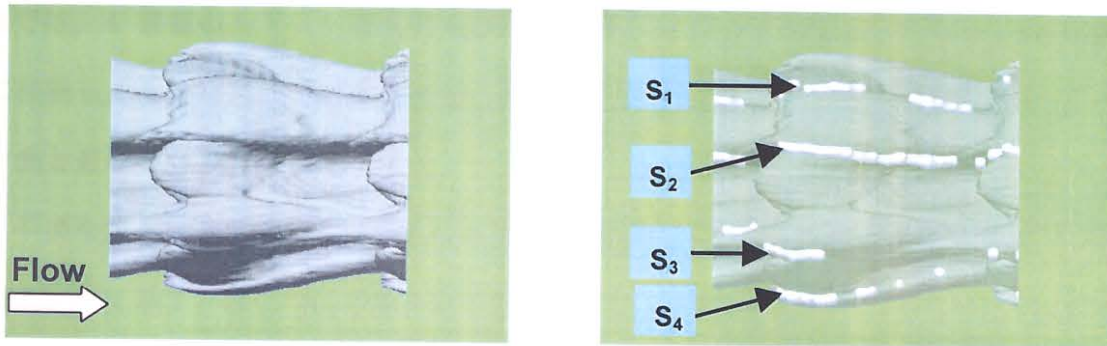


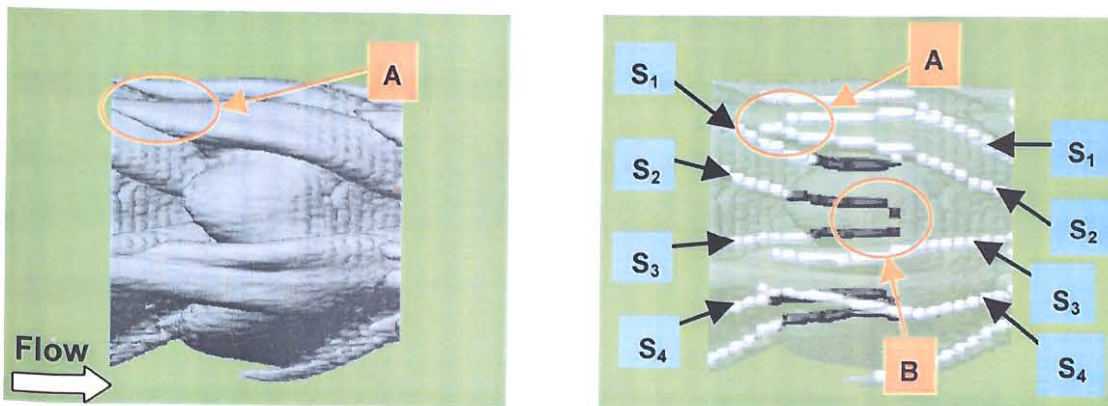
図 2.5.13 噴流垂直断面図 (VG 付きノズル, 励起有)



(a) 噴流界面画像

(b) 縦渦合成画像

図 2.5.14  $x/D=0.5$  三次元表示 (VG 付きノズル, 励起有)



(a) 噴流界面画像

(b) 縦渦合成画像

図 2.5.15  $x/D=1.0$  三次元表示 (VG 付きノズル, 励起有)

### 2.5.3 渦の干渉機構

図 2.5.14, 図 2.5.15 から推測した干渉モデルを図 2.5.16 に示す. Stage 1 では, VG により縦渦が生成され, Kelvin-Helmholz 不安定によって軸対称渦輪が発達する. Stage 2 では, 縦渦が軸対称渦輪に巻きつく. このとき縦渦は非一様曲率効果による自己誘起速度によって, 軸対称渦輪の外側の領域では  $S_1$  と  $S_2$  が接近し, 軸対称渦輪の内側の領域では  $S_2$  と  $S_3$  が接近する. Stage 3 では, 縦渦同士がさらに接近し, 軸対称渦輪は縦渦との干渉および自己誘起速度の効果により図に示すように変形する.

Stage 4~5 では, 接近した縦渦同士が接触し, 縦渦の切り繋ぎが生じ<sup>(40)</sup>, ヘアピン渦部が形成される. Stage 5 の領域 A, B は図 2.5.15 の領域 A, B に対応している. Stage 6 では, A 領域のヘアピン渦の先端部は自己誘起速度により噴流の外側 (低速領域) に移動し, その結果ヘアピン渦は流れ方向に引き伸ばされ, 先端部は上流側のヘアピン渦と重なり合う.

干渉モデル図 2.5.16 中の Stage 4~6 の渦構造を捉えた流れ方向断面の可視化画像を図 2.5.17 に示す. 図は VG が取り付けられていない断面の画像で, (a)~(c) は時間的変化を示している. (a) では軸対称渦輪が巻き上がり, (b) では軸対称渦輪の外側に縦渦対が巻きついて引き伸ばされている. これは, 図 2.5.16 中の stage 3~4 の A 領域に対応する. (c) では縦渦構造がさらに引き伸ばされ, 切り繋ぎが生じた様子を示している. 切り繋ぎ部分を拡大した画像を(c')に示す. (c')の A, A' 領域は Stage 6 の同領域に対応し, A 領域は引き伸ばされたヘアピン渦の先端部を示し, A' 領域 (Stage 5 の A 領域に対応) では縦渦の切り繋ぎにより形成された渦断面が確認される.

図 2.5.17 の Stage 5 の渦構造は, 二次元混合層におけるスパン方向渦とリブの干渉模様<sup>(16) (17)</sup> と類似している. したがって, 二次元混合層中でも上述の干渉モデルと同様の渦挙動が示唆される.

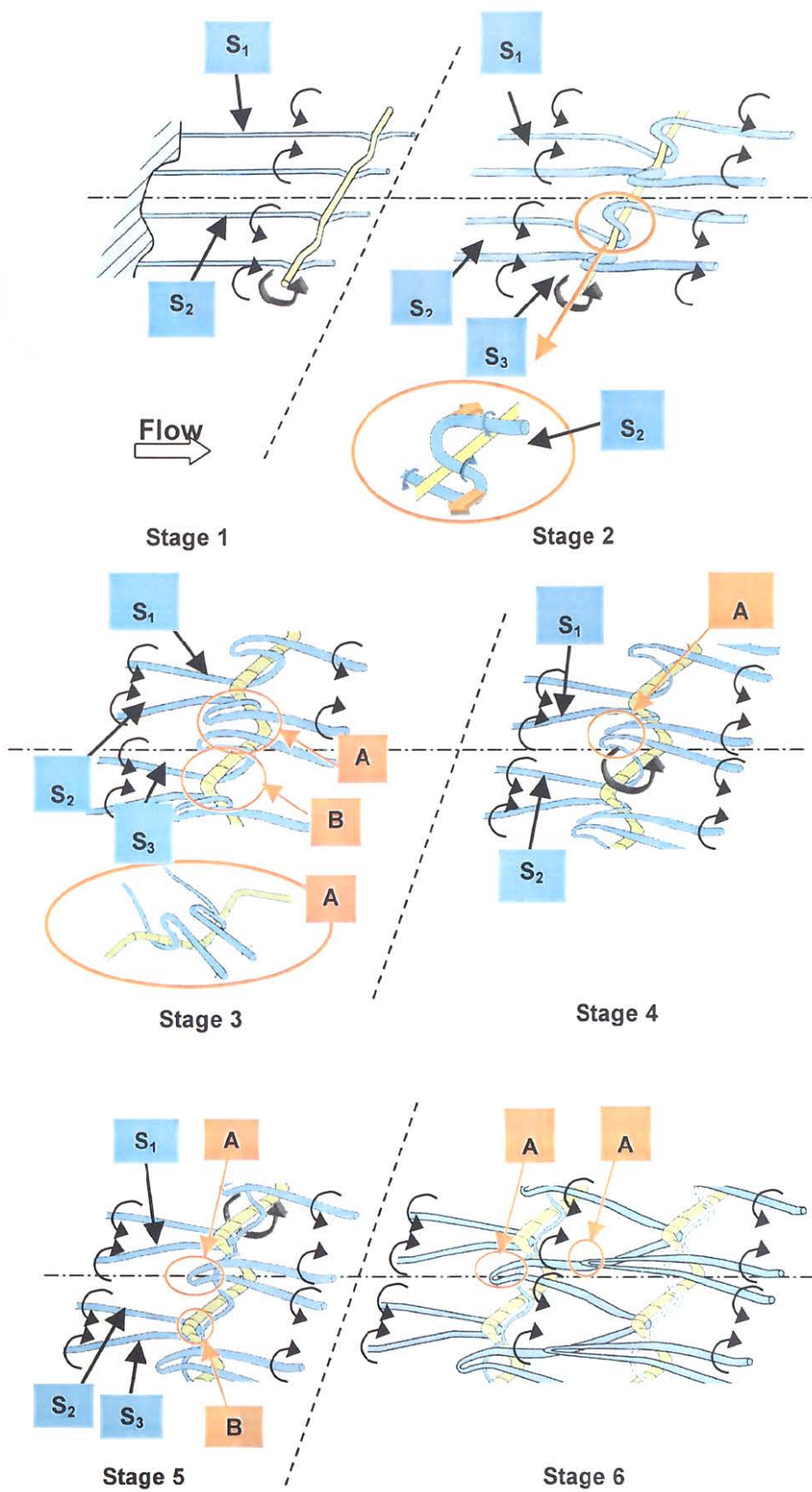


図 2.5.16 縦渦と軸対称渦の干渉モデル

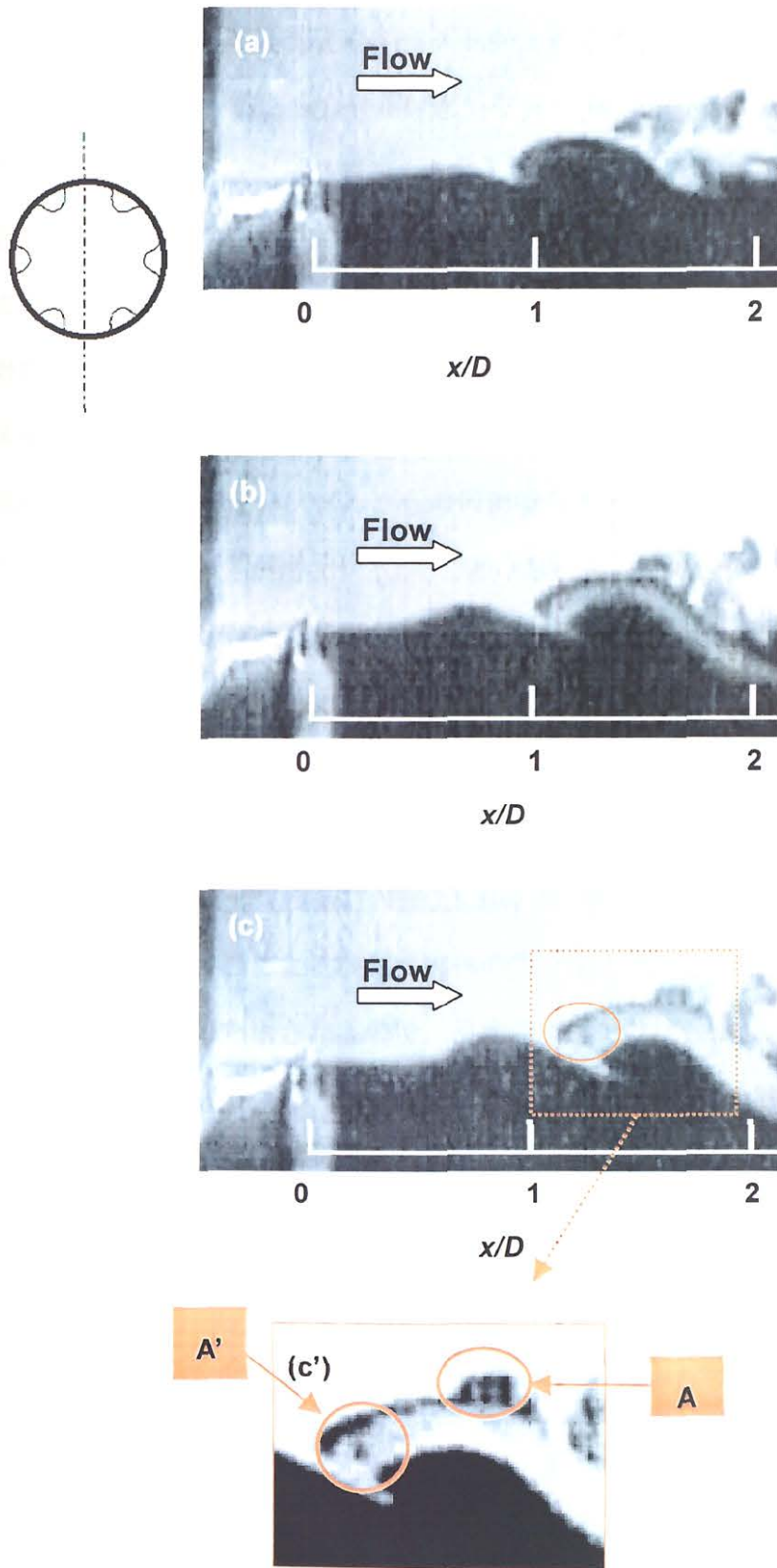


図 2.5.17 流れ方向断面映像 (VG 付きノズル, 励起有)

#### 2.5.4 速度場と混合特性

図 2.5.18 に、噴流中心の速度変動スペクトル分布の流れ方向変化を示す。VG がないノズルからの円形噴流では、 $x/D=1.0$  付近から  $fe/2$  Hz の周波数成分が成長し、軸対称渦輪の合体が生じていることが解る。一方、VG 付ノズルからの噴流では、 $fe/2$  Hz の周波数成分は見られず下流で高調波成分が増加し、軸対称渦輪は合体せずに縦渦との干渉により崩壊することを示している。これらの結果は可 Liepmann らの可視化結果<sup>(14)</sup>と対応している。

平均速度と乱れ強さの分布を図 2.5.19 に示す。図中の  $U$  は平均速度、 $u'$  は変動速度の実効値である。VG がないノズルからの円形噴流の場合(図 2.5.19(a))には、 $x/D=1.5$  の下流で噴流幅と乱れ強さが増大するが、これは軸対称渦輪の合体によるものである。

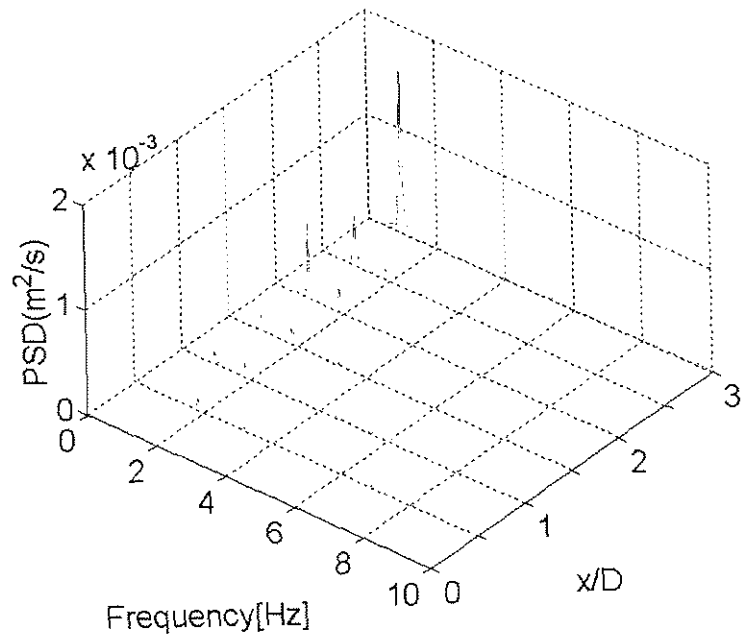
VG 付ノズルからの噴流の a-a 断面 (VG が取り付けられていない断面) (図 2.5.19(b)) では、 $x/D=1.0$  付近で噴流幅と乱れ強さが急激に増大する。この急激な増大は図 2.5.15 および図 2.5.16 で示した縦渦の繋ぎ替えにより形成されるヘアピン渦による吹き出し流れ発生効果によるものである。

噴流の b-b 断面 (VG を含む断面) (図 2.5.1(c)) でも軸対称渦輪の内部にヘアピン渦が形成されるが、この渦による噴流内部への吹き出し流れは軸対称渦輪の変形による誘起速度効果により打ち消されるので、平均速度場では吹き出し流れの影響は顕著ではない。 $x/D = 1.0 \sim 1.5$  に噴流内部領域に乱れ強さ分布の多少の拡大が見られるが、これはヘアピン渦によるものと考えられる。以上のように、軸対称渦輪との干渉による縦渦の変形は噴流幅を著しく増大する

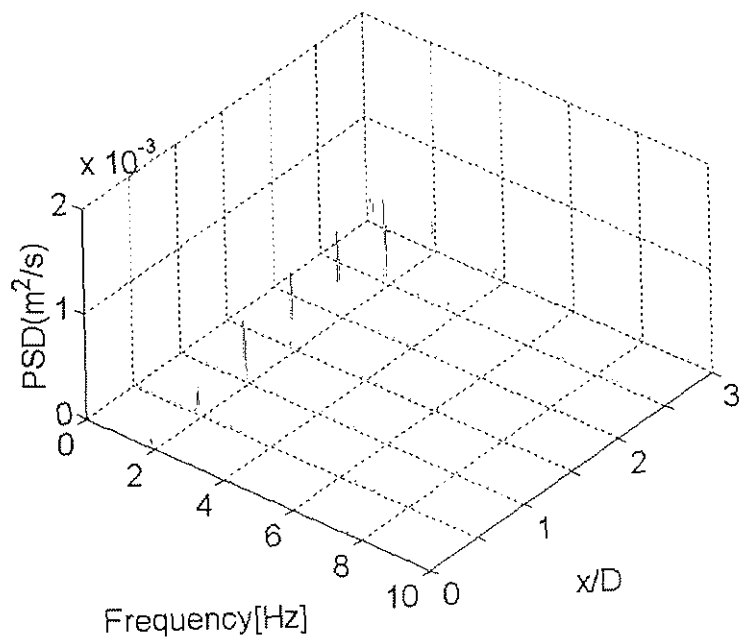
噴流の混合特性を検討するためには、流体のエントレンメント (連行) が重要な物理量である。エントレンメントの算出法を式(2-7)に示す。

$$Q = \int_{A_0} U dA \quad (2-7)$$

積分範囲  $A_{0.1}$  は、速度比  $U/U_0$  が 0.1 以上の領域である。図 2.5.20 に各種噴流のエントレメント特性を示す。図中の  $Q_0$  は噴出口の流量である。図では、励起された VG 付噴流の実験結果が、励起された円形噴流、励起されない円形噴流と比較されている。円形噴流を励起して軸対称渦輪の生成を促進した場合には、渦の合体作用により外部流体の巻き込み効果が増大する。さらに VG を取り付けられた場合には、縦渦による巻き込み作用が加わりエントレメントが著しく増大する。エントレメントの増大は混合の増大に繋がるので、縦渦と軸対称渦の発生、および相互の干渉は混合促進に寄与する。



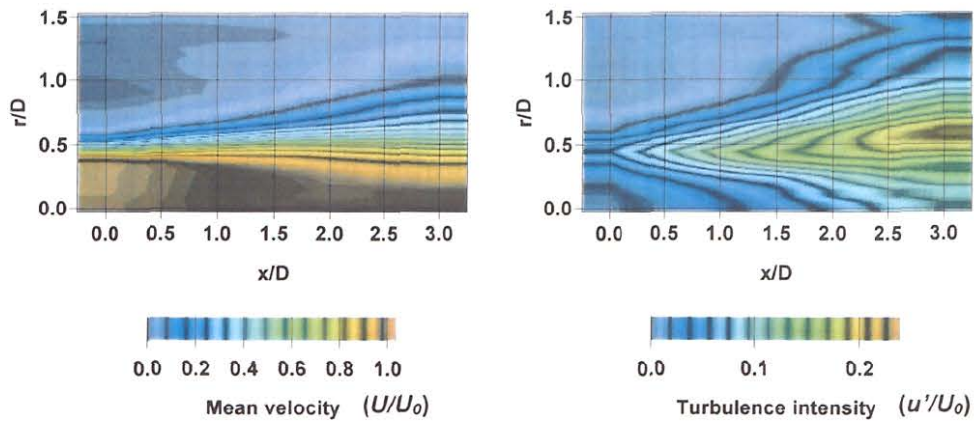
(a) Without VG



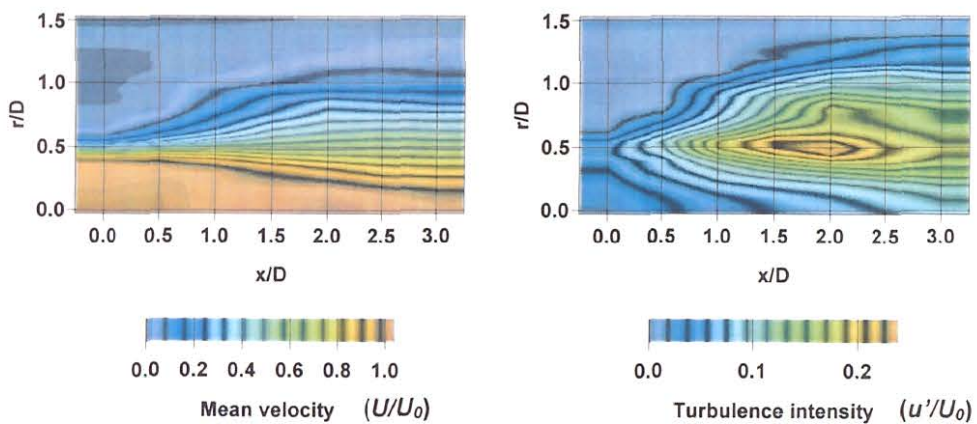
(b) With VG

図 2.5.18 速度変動波形の周波数スペクトル ( $r/D=0$ , 励起有)

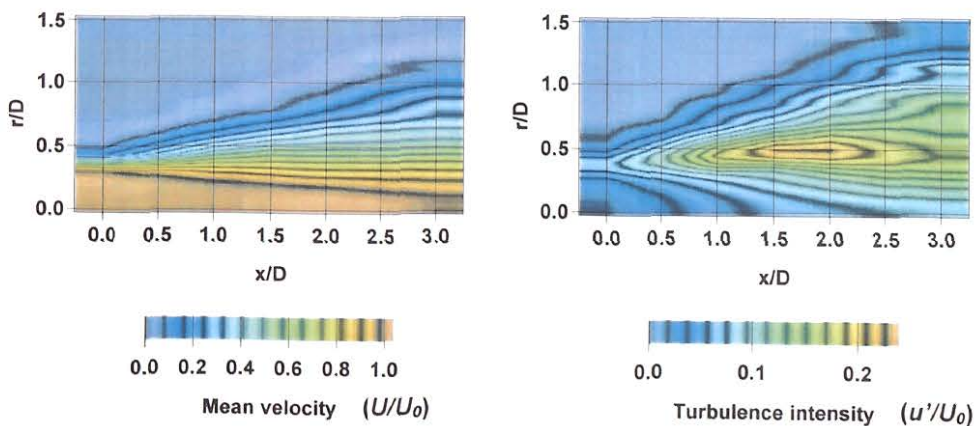
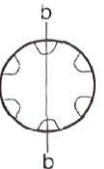




(a) Without VG



(b) With VG (a-a plane)



(c) With VG (b-b plane)

図 2.5.19 平均速度と乱れ強さ分布 (励起有)



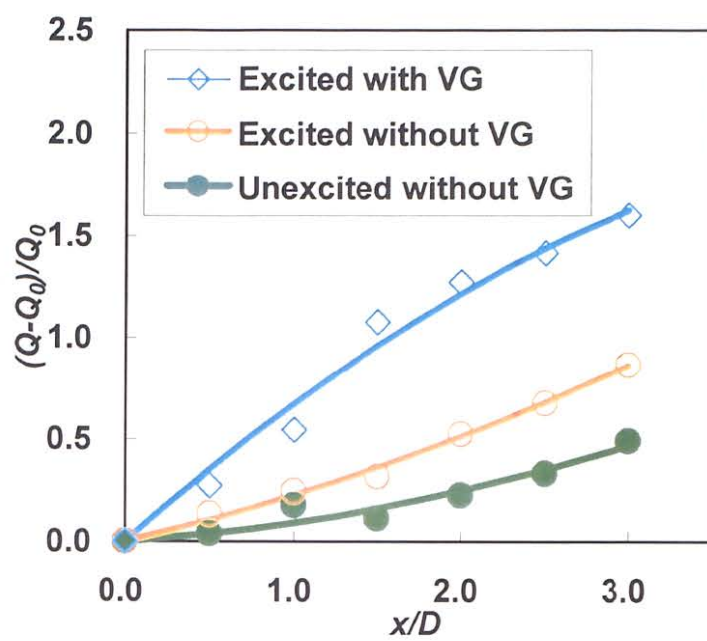


図 2.5.20 エントレンメント

## 2.6 遠心力不安定に関する考察

奥出らの研究<sup>(11)(12)</sup>によると、遠心力不安定によって渦輪に現れる縦渦構造のピッチ間隔は渦核直径と渦の循環値に依存している。そこで、奥出らの報告を基に縦渦ピッチ間隔から循環値を推測し、次元解析から求めた循環値と比較検討する。

### 2.6.1 循環値の見積

#### (a) 可視化映像による見積り

図 2.5.11 の可視化映像より、自然発生する縦渦の誘起位置と縦渦モードを確認する。可視化映像より、 $x/D=2.0\sim 2.5$  付近で縦渦誘起が見られる。また図の縦渦モードは、 $m=7$  であるので、仮に  $m=7$  とする。次に渦輪直径・渦核直径を見積もる。本来は、渦度分布から算出すべきだが、励起無の状態では位相平均測定も困難であり、また機材の関係上渦度を得るための 3 方向速度同時測定も困難であるため、平均速度分布から見積もる。平均速度分布より渦輪直径は、せん断層中心とし、渦核直径はせん断層厚さの半分として見積もることとする。検討に用いた  $x/D=2.0$  と  $2.5$  の速度分布を図 2.6.1, 2.6.2 に示す。速度分布図に示す斜線部分は、せん断層と判断した部分である。図 2.6.1 より、 $x/D=2.0$  での渦輪直径  $D_{ring}$  は 47.2 mm, 渦核直径  $d_{core}$  は 5.75 mm と見積もった。同様に図 2.6.2 より、 $x/D=2.5$  での渦輪直径  $D_{ring}$  は 46 mm, 渦核直径  $d_{core}$  は 9.2 mm と見積もった。

遠心力不安定によって生ずる縦対のピッチ間隔を  $p$ , 渦核直径を  $d$  とするとき、これらの関係は、次のように示せる。

$$p/d=64 \times Re_r^{-0.77} \dots\dots\dots (2-8)$$

ここで  $Re_r$  は、回転円柱の回転レイノルズ数であり、循環  $\Gamma$  を使って表現すると

$$Re_r = \Gamma / \pi \nu \dots\dots\dots (2-9)$$

と示せる. よって(2-8),(2-9)式より循環 $\Gamma$ について整理すると

$$\Gamma = \pi \nu (64d/p)^{100/77} \dots\dots\dots (2-10)$$

となる.

ここで,  $x/De=2.0$  の循環 $\Gamma$ を計算すると,  $d=5.75$  mm,  $p$  は渦輪直径 47.2 mm から計算した渦輪周長さと縦渦モード  $m=7$  より  $p=148.3/7=21.2$  mm. よって  $\Gamma=1.68$  cm<sup>2</sup>/s 同様に,  $x/D=2.5$  の循環  $\Gamma$  は,  $\Gamma=3.19$  cm<sup>2</sup>/s と見積もられた.

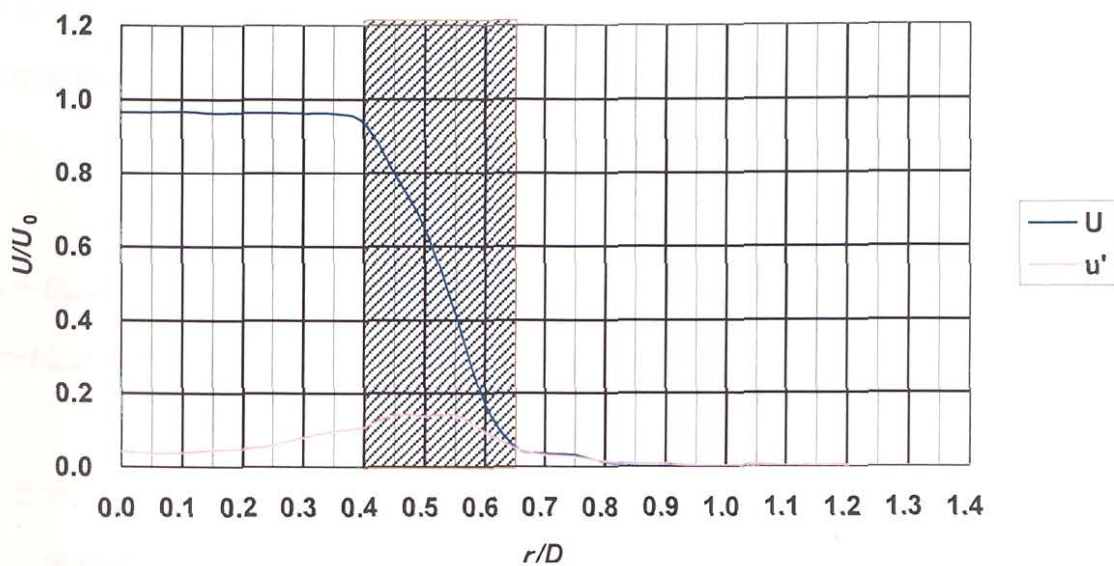


図 2.6.1 円形噴流の平均速度分布 (VG 無し, 励起無し,  $x/D=2.0$ )

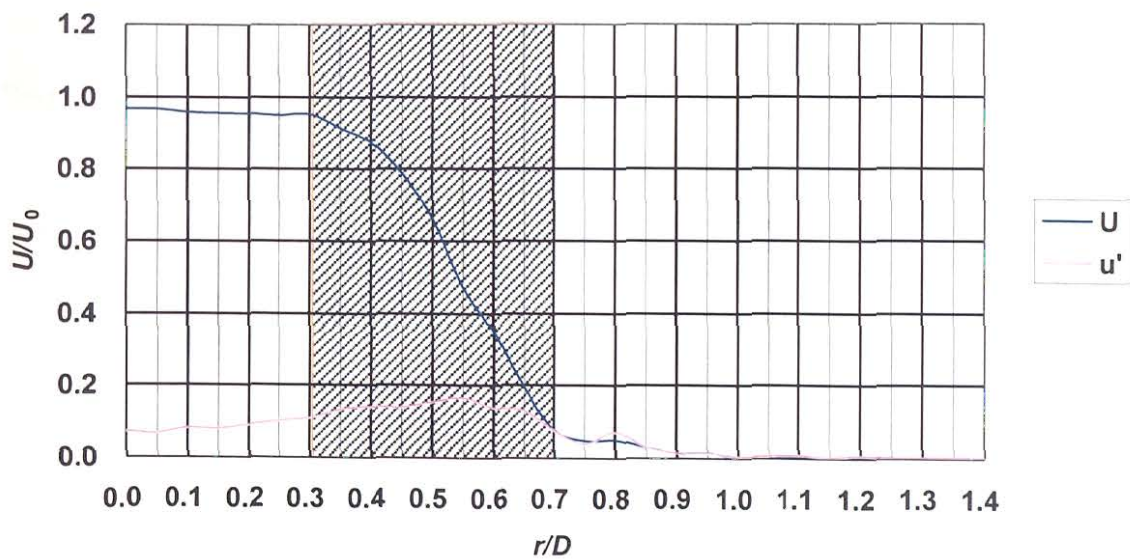


図 2.6.2 円形噴流の平均速度分布 (VG 無し, 励起無し,  $x/D=2.5$ )

## (b) 次元解析による見積り

前述のように循環 $\Gamma$ の直接測定は困難なため、次元解析から循環 $\Gamma$ を求める。このような次元解析としては山田ら<sup>(41)</sup>の研究がある。循環 $\Gamma$ は剛体渦を考えると渦度 $\omega$ と渦の断面積 $A$ より $\Gamma = \omega A$ と示される。そのため次元を考えると

(次元)

$$\omega \sim U_{max} / \delta \quad (\text{m/s}) / (\text{m}) \text{ より } (1/\text{s})$$

$$A \sim U_{max} \cdot \delta / f \quad (\text{m/s}) \cdot (\text{m}) / (1/\text{s}) \text{ より } (\text{m}^2)$$

ここで、

$\delta$  : 境界層厚さ

$f$  : 局所の大規模渦発生周波数

$U_{max}$  : 軸上の速度

である。よって

$$\Gamma \sim (U_{max})^2 / f$$

と考える。

ここで次元解析に基づく計算式

$$\Gamma \sim (U_{max})^2 / f$$

に係数 $k$ を与え

$$\Gamma = k \cdot (U_{max})^2 / f$$

とする。ここで適当な $k$ が求めれば、循環値の推測に用いることができる。

よって  $k$  を求めるため、これまでの実験データから算出した循環値とこの計算式の値を比較する。

**(b-1) 渡辺らの実験データ<sup>(42)</sup>より  $x/D=1.2$  付近を通過する渦の場合**

中心軸の速度  $U_{max}$  は 4.5(m/s)

その点での周波数は、 $68 \times 2$ (Hz)

と考える。

次元解析より仮に  $k$  という係数において

$$\Gamma = k \cdot (U_{max})^2 / f$$

とすると循環値は

$$\Gamma = 0.149k$$

となる。実験値では

$$\Gamma = 0.0409 \sim 0.0452$$

である。よって係数  $k$  を求めると

$$k = 0.27 \sim 0.30$$

**(b-2) 著者らの二次元噴流予備実験データ(66.2Hz 励起)より**

中心軸の速度  $U_{max}$  は 4.85(m/s)、 $x/H=1.4$  付近を通過する渦を対象とするとして、その点での周波数は、66.2(Hz)と考える。

次元解析より仮に  $k$  という係数において

$$\Gamma = k \cdot (U_{max})^2 / f$$

とすると循環値は

$$\Gamma = 0.355k$$

となる。実験値では

$$\Gamma = 0.0839 \sim 0.0852$$

である。よって係数  $k$  を求めると

$$k=0.24$$

**(b-3) 二次元噴流予備実験データ(42Hz 励起)より**

中心軸の速度  $U_{\max}$  は 4.85(m/s),  $x/H=1.1$  付近を通過する渦を対象とするとして, その点での周波数は,  $42 \times 2(\text{Hz})$  と考える.

次元解析より仮に  $k$  という係数をおいて

$$\Gamma = k \cdot (U_{\max})^2 / f$$

とすると循環値は

$$\Gamma = 0.28k$$

となる。実験値では

$$\Gamma = 0.0772 \sim 0.0788$$

である。よって係数  $k$  を求めると

$$k=0.28$$

よって上記3例より  $k=0.27$  程度として

$$\Gamma = 0.27 \cdot (U_{\max})^2 / f$$

と見積もるのが妥当のようである.

上記の次元解析で求めた計算式

$$\Gamma = 0.27 \cdot (U_{\max})^2 / f$$

と出口直後の  $U_{\max}=0.12(\text{m/s})$ ,  $f=3.6(\text{Hz})$  より

$$\Gamma = 1.08 \times 10^{-3} (\text{m}^2/\text{s})$$

となった.

## 2.6.2.次元解析による水中噴流の循環値と遠心力不安定より計算した循環値の比較

奥出ら<sup>(12)</sup>の論文を参考に遠心力不安定から見積もった値が  $\Gamma=0.168\sim 0.319\times 10^{-3}$  ( $m^2/s$ )程度であり、次元解析で求めた循環値のオーダーと1桁異なる。このことより、噴流中で生ずる縦渦のピッチ間隔は、複数の不安定性に依存し、遠心力不安定のみで決定されるものでないことが推察される。

また蒔田ら<sup>(43)</sup>は、二次元噴流の大規模構造三次元化の要因として遠心力不安定を考え、二次元噴流において著者と同様の比較検討を行っている。そこで、著者らの結果と関下らの結果をまとめて表 3.2 に示す。表より噴流の場合、循環値のオーダーは近いが値の違いは大きい。奥出らの単一渦輪では良い対応を見せているため、噴流の三次元変形には、遠心力不安定以外の不安定も寄与しているものと考えられる。

表 3.2 循環値・縦渦ピッチ

	循環値 $\Gamma$ ( $m^2/s$ )			渦核直径 $d$ (mm)		縦渦対 (スパン方向波) の間隔 $p_v$ (mm)	
	位相平均処理 した実験値	遠心力不安定性に 基づく推定値	次元解析に 基づく推定値	実験値	推定値	実験値	推定値
森, 円形ノズル $x/D=2.0$		$0.168\times 10^{-3}$	$1.08\times 10^{-3}$		5.75	21.2	5.05(※1)
森, 円形ノズル $x/D=2.5$		$0.319\times 10^{-3}$	$1.08\times 10^{-3}$		9.2	20.6	8.08(※1)
蒔田ら	$1.0\times 10^{-3}$			11		24~30	67.4

※1：次元解析から求められた循環値



## 2.7 まとめ

本章では、軸対称噴流中の軸対称渦輪と縦渦の干渉機構を可視化画像により解析し、さらに速度場の測定により噴流特性と渦挙動の関連性を検討した。得られた成果を以下に要約する。

- (1) 噴流の断面積の時間履歴を FFT 処理することにより、初期渦の不安定周波数の特定や渦構造の合体挙動などを容易に、かつ客観的に示せることを示した。
- (2) 噴流断面積やその界面の表面積を検討する事により、混合・拡散特性を把握できることを示した。
- (3) 軸対称渦輪と縦渦の干渉機構を渦力学的モデルにより説明した。すなわち、縦渦は軸対称輪に巻き込まれる際に生ずる非一様曲率効果により変形し、渦の切り繋ぎが生じ、ヘアピン渦が形成されることを示した。
- (4) 平均速度と乱れ強さの拡大と渦挙動の関連性を明らかにした。すなわち、縦渦の変形により形成されるヘアピン渦が噴流幅を著しく増大させることを示した。
- (5) 噴流のエントレンメントは、軸対称渦輪と縦渦の生成を促進することにより著しく増大する。とくに、縦渦はエントレンメントと混合の増大に寄与することを実験結果により示した。

## 第 3 章

## 第3章 二次元噴流の渦構造およびその変形過程

### 3.1 まえがき

本章では，二次元空気噴流の実験装置，計測システムとデータ処理方法を示した後，定量実験データから得た縦渦とスパン方向渦の干渉模様を軸対称水噴流と比較検討する。

### 3.2 空気噴流実験装置

#### 3.2.1 風洞

実験に用いた風洞を図 3.2.1 に示す。また風洞の仕様を表 3.1 に示す。

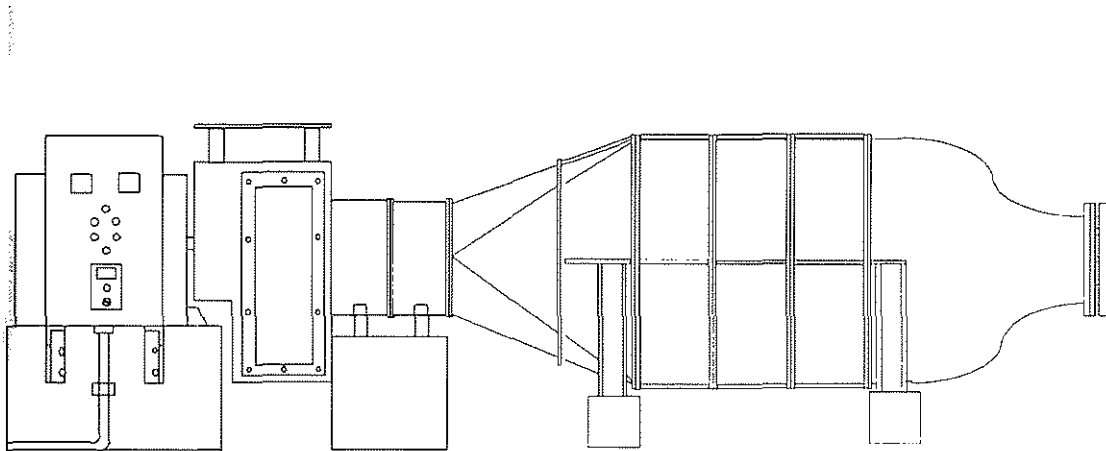


図 3.2.1 風洞

表 3.1 風洞の仕様

風洞制御方式	: 可変速電動機による制御
送風機	: 電動機出力 7.5[kW]の軸送風機
集合胴	: 3 ブロックに分割されており，各ブロック間に整流網 (20 メッシュ 2 枚, 30 メッシュ, 40 メッシュ) が取り付けられている。
絞り部	: 縮流比 12.5
出口面積	: 200mm×400mm

### 3.2.2 ノズルおよび測定座標系

ノズルおよび測定座標系を図 3.2.2 に示す。ノズルは二次元的に絞られたもので、風洞との接続部の関係で、ノズル長手方向が風洞の垂直方向になるように接続した。ノズル出口寸法は、スパン方向幅  $L=400$  mm、ノズル高さ  $H=49$  mm であり、ノズル部の縮流比は、4.08 である。また VG 付噴流の実験では、図に示すような位置に VG を設置した。VG は、水噴流の実験に用いたものと同一である。VG 中心間の距離は 26mm とした。

測定座標系は、図に示すに流れ方向に  $x$ 、ノズル高さ方向に  $y$ 、スパン方向に  $z$  とした。

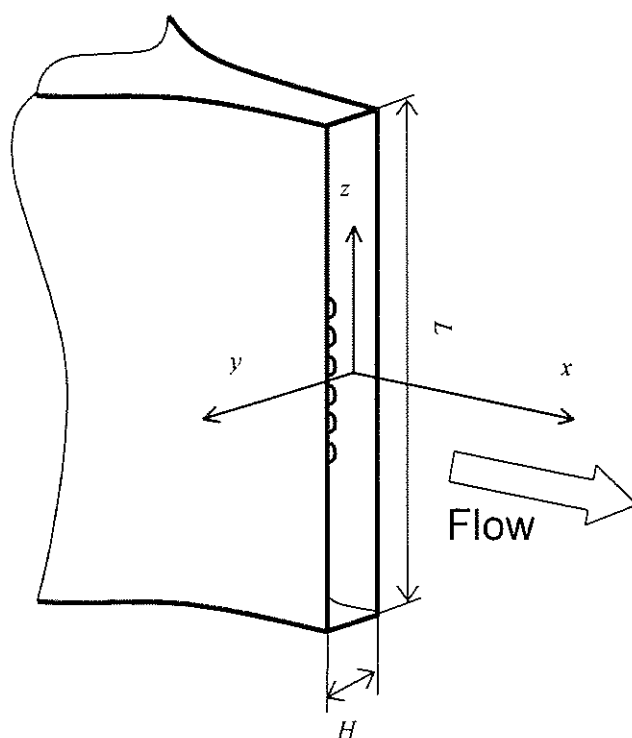


図 3.2.2 ノズルおよび測定座標系

### 3.2.3 速度計測システム

本研究では、噴流の速度・乱れ強さ分布、渦度を得るため熱線流速計による速度計測を行った。測定システムの概略を図 3.2.3 に示す。速度計測装置としては、CTA (KANOMAX 製 MODEL1011&1010) とリニアライザ (KANOMAX 製 MODEL1013) を用いた。熱線プローブは、アンサンブル位相平均処理の参照信号用に I 型熱線プローブ (KANOMAX 製 MODEL0251R-T5)、流れ場の三方向速度成分測定には X 型熱線プローブ (KANOMAX 製 MODEL0252R-T5) を用いた。なお X 型熱線プローブで三方向速度を計測するために、計測は  $u-v$ 、 $u-w$  成分に分けて測定した。プローブは、PC 制御の 3 軸トラバースに取り付けられ、平面内測定を行った。トラバースの移動分解能は、0.05mm で、測定データはトラバース制御用の PC にて A/D 変換され記録された。速度計測のサンプリング周波数は 5000Hz、サンプリング数は 10000 である。

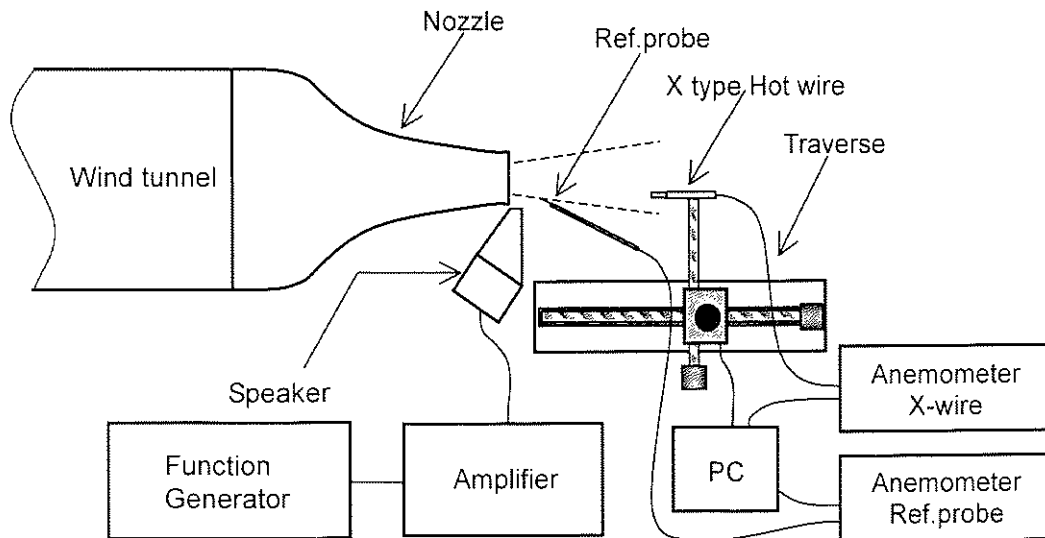


図 3.2.3 定量計測システム

### 3.3 空気噴流実験条件

実験条件を表 3.3 に示す。噴流を励起する場合には図 3.2.3 に示すように、噴出口近傍のスピーカーからの音波によりせん断層に攪乱を与えた。励起周波数は、後述のように、風洞の共振特性と噴流の不安定性を考慮して決定した。

表 3.3 実験条件

---

噴出速度	: $U_0=6.4\text{m/s}$
ノズル形状	: VG 無し二次元ノズル : VG 付き二次元ノズル
ノズル幅	: $H=49\text{mm}$
レイノルズ数	: $U_0 \cdot H/\nu=2.2 \times 10^4$
励起条件	: (a) 励起無し : (b) 励起周波数 $f_e = f_n/4$ ( $=66.1\text{Hz}$ ) ( $f_n$ : 自然発生周波数), 励起強さ $v'/U_0 \approx 0.02$ ( $v'$ : 噴出口中心の $y$ 方向速度)
ストラハル数	: $S_t=f_e \cdot D/U_0=0.50$
測定範囲	: $x/H=0.5 \sim 3.5$

---

### 3.4 アンサンブル平均データ処理方法

本研究では、噴流の空間構造を明らかにするため、測定データにアンサンブル平均処理を行った。アンサンブル平均処理は、噴流が周期性を持つ特性を利用し、噴流混合層の変動データの波形をある周期分を測定した後、各周期の同一位相に対応する平均値を、その測定点における、一周期中の各位相の値とするものである。

実験装置では、図 3.2.4 に示すように、物理量を測定する移動プローブと、周期的情報の位相を合わせるための基準信号を取得する参照プローブが必要となる。参照プローブは、安定な信号が取得できる位置で固定する。

図 3.2.5 にそれぞれのプローブで測定されるデータの例を示す。参照信号は物理量測定プローブ（熱線プローブ等）の信号と同周期もしくは長周期で、なおかつ同期している必要がある。これにより、物理量測定プローブで得られる空間上の各点のデータを参照信号を元に位相を合わせ、各位相ごとに平均化する事で、物理量の空間分布を知ることができる。

一般に、変動する物理量の瞬時値  $f$  は次式 (3-1) で示される

$$f(r,t) = F(r) + f'_c(r,t) + f'_r(r,t) \cdots \cdots \cdots (3-1)$$

ここで、 $r$  は位置ベクトル、 $F$  は平均値、 $f'_c$  は周期的な変動値、 $f'_r$  は不規則な変動値を示す。よって、参照信号で決められる各位相の位相平均値  $\langle f \rangle$  は、次式によって計算される。

$$\langle f(r, \varphi_0) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(r, \varphi) \cdots \cdots \cdots (3-2)$$

$$\varphi = \varphi_0 + 2(n-1)\pi, n=1, 2, \cdots, N$$

この処理により不規則成分は排除される。本研究では、このアンサンブル平均処理された各位相の速度場より瞬時の渦度を計算し、その渦構造を検討した。

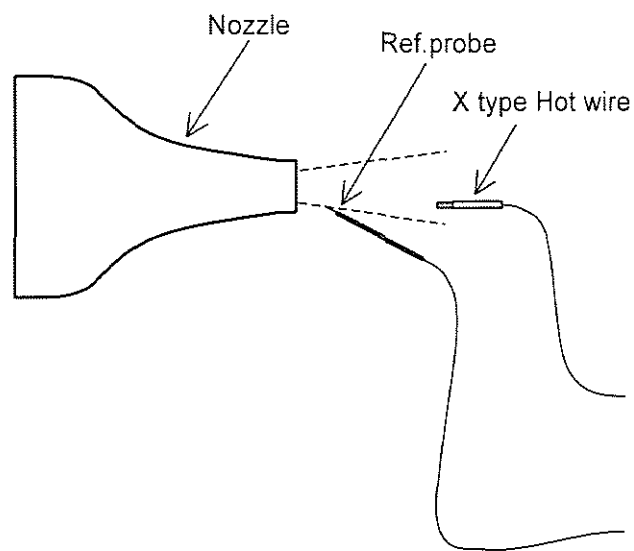


図 3.2.4 プローブ配置

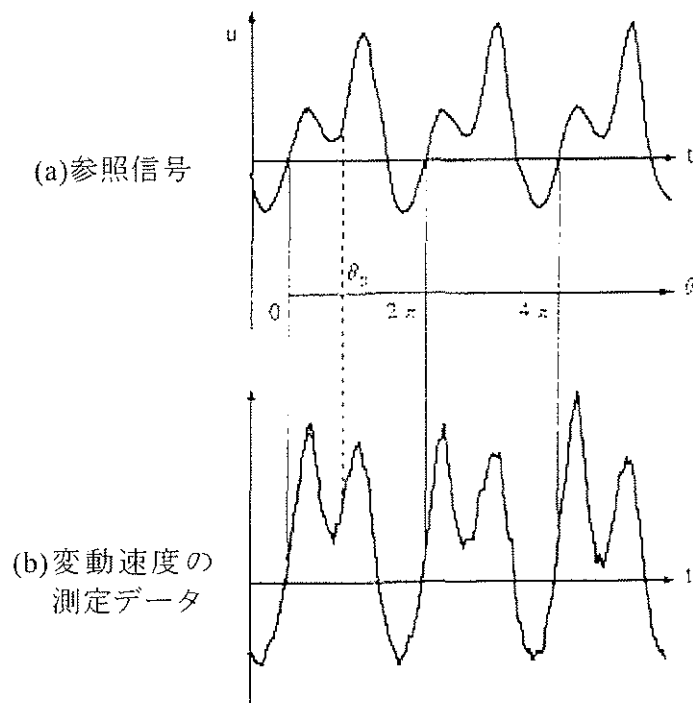


図 3.2.5 参照信号と変動速度信号



### 3.5 渦度の定義

渦が流体挙動と深く関わっていることは 1.2.1 節で述べたが、渦を定義する際に最も良く使われる物理量に渦度がある。渦度は微小領域での回転運動の角速度を示すパラメータであり、以下の式で記述される。

$$\omega = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) i + \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) j + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) k$$

式中の  $i, j, k$  は、それぞれ  $x, y, z$  軸方向の単位ベクトルであり、各軸のまわりの渦度は

$$\omega_x = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\omega_y = \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

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

となる。

### 3.6 渦度場に対する Taylor の凍結仮説の適用

三次元空間測定を行うと、測定時間が非常に大きくなるため、本研究では、Taylor の凍結仮説（2.4.1 節参照）を用い、二次元平面の測定データから三次元構造を得た。渦度は、流れ方向に対して Taylor の凍結仮説を適用すると、次式で表される。

$$\omega = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) i + \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x^*} \right) j + \left( \frac{\partial v}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x^*} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) k$$

ここで、式中の  $i, j, k$  は、それぞれ  $x, y, z$  軸方向の単位ベクトルであり、 $x^*$  は下記の式で示される。

$$x^* = -tU_c$$

$U_c$  は渦構造の移動速度であり、渦の変形や干渉の無い領域では、 $U_c = \text{一定}$  でこの凍結仮説がよく成り立つことが知られている。しかし、せん断層付近でペアリングが起きる場合などでは、双方の渦の移動速度が異なるために適切な  $U_c$  を決定する事が困難であることが、Zaman ら<sup>(26)</sup> によって報告されている。また同時に Zaman ら<sup>(26)</sup> は、 $U_c = \text{一定}$  と仮定した場合でも有用な情報を得ることができると報告している。本研究では、従来の研究結果を考慮して

$$U_c = 0.5U_0$$

と仮定した。

### 3.7 エンストロフィの定義

エンストロフィは各軸方向に渦度を持つ複雑な渦構造の全体像を示すのに適した物理量あり、エンストロフィ  $En$  は次式で表される。

$$En = \frac{1}{2} |\omega|^2$$

ここで  $\omega$  は次式で求められる。

$$\frac{1}{2} |\omega|^2 = \frac{1}{2} (\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2)$$

## 3.8 実験結果

風洞実験では、水槽実験では得られなかった三方向速度成分を計測し、その速度成分をアンサンブル位相平均処理し渦度を求めた。本節では、この渦度を中心に渦構造を検討する。

### 3.8.1 風洞装置、励起装置の周波数特性

本実験では、噴流の流れ場をアンサンブル位相平均処理するために周期的な流れ場を作る必要がある。このために、流れ場の不安定周波数、風洞装置と励起装置の周波数特性を検討し、安定した流れ場の実験条件を決定した。

最初に、風洞の周波数特性を検討する。検討方法は、風洞出口中心の速度を I 型熱線プローブで 40 秒間測定し、速度変動波形を FFT 処理し周波数特性を求めた。設定速度は 3m/s～8m/s である。図 3.8.1～3.8.5 に風洞中心での速度変動周波数を、各速度毎に示す。これらの図より、風洞の不安定周波数は、速度にほとんど依存せず 15Hz 付近にピークを持つことが解る。これは、風洞のヘルムホルツ共振と考えられる。

次に励起装置の周波数特性を検討する。励起装置はスピーカーとその音圧を伝えるスリット付きのボックスからなり、使用時にはこのボックスにスピーカーを収めて使用する。スピーカー単体の周波数特性は一般的にフラットな周波数特性であるが、スリット付きボックスと組み合わせた場合、各種の共振により周波数特性が変化することが予測されるため、この周波数特性について検討した。検討方法は、スピーカーをスリット付きのボックスに収め、スピーカーにホワイトノイズを加えた。このときの音圧変動を、本研究室で開発された変動静圧プローブ<sup>(44)</sup>で測定した。測定位置は、スリットの中心である。図 3.8.6 にその周波数特性を示す。67Hz 付近と 153Hz 付近に大きなピークを持つ事が解る。よって、励起周波数が 67Hz もしくは 153Hz 付近で最も渦の励起効果が著しくなる噴出速度で実験することが望ましいことが解る。

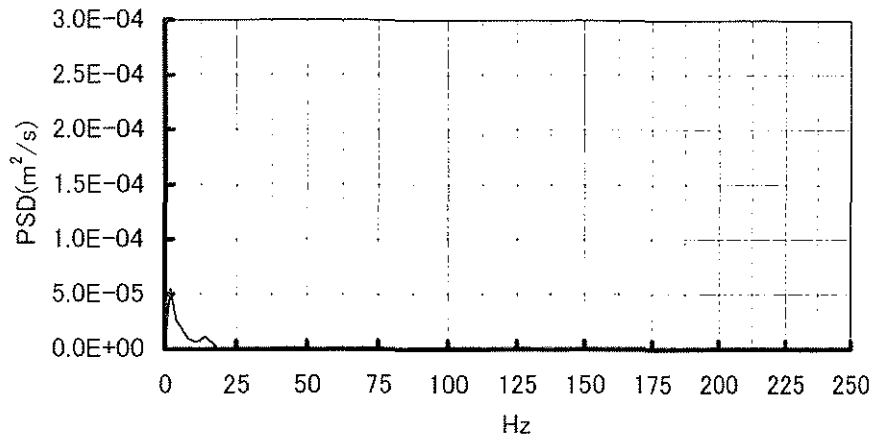


図 3.8.1 速度変動周波数 出口中心 3 m/s

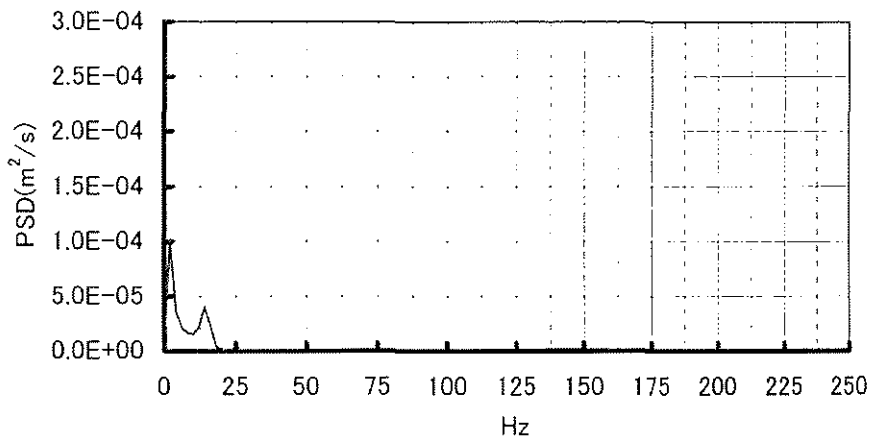


図 3.8.2 速度変動周波数 出口中心 4 m/s

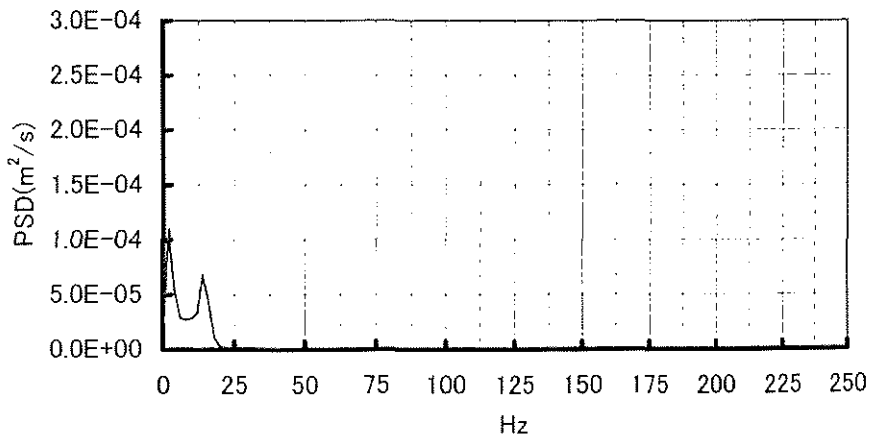


図 3.8.3 速度変動周波数 出口中心 5 m/s

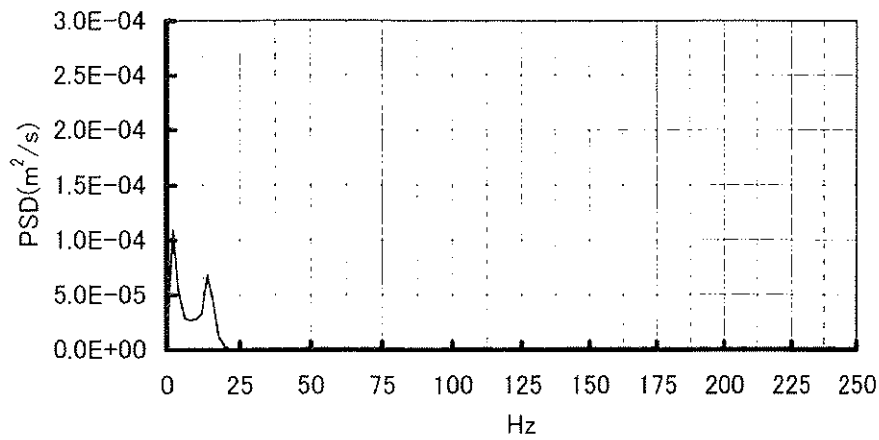


図 3.8.4 速度変動周波数 出口中心 6 m/s

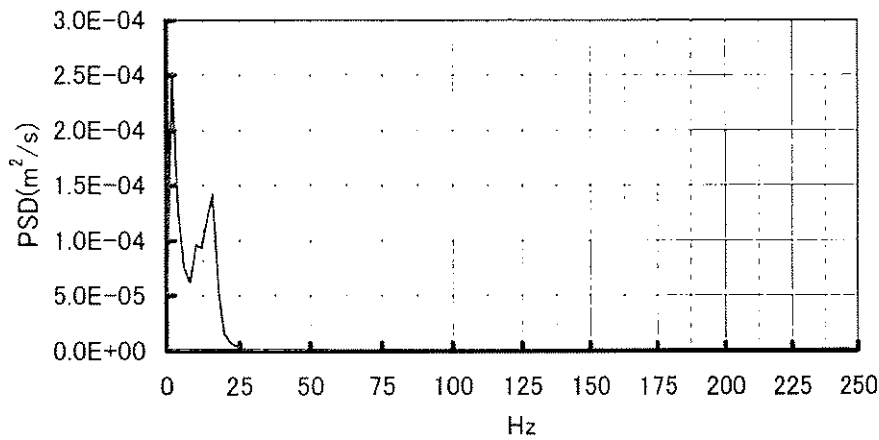


図 3.8.5 速度変動周波数 出口中心 8 m/s

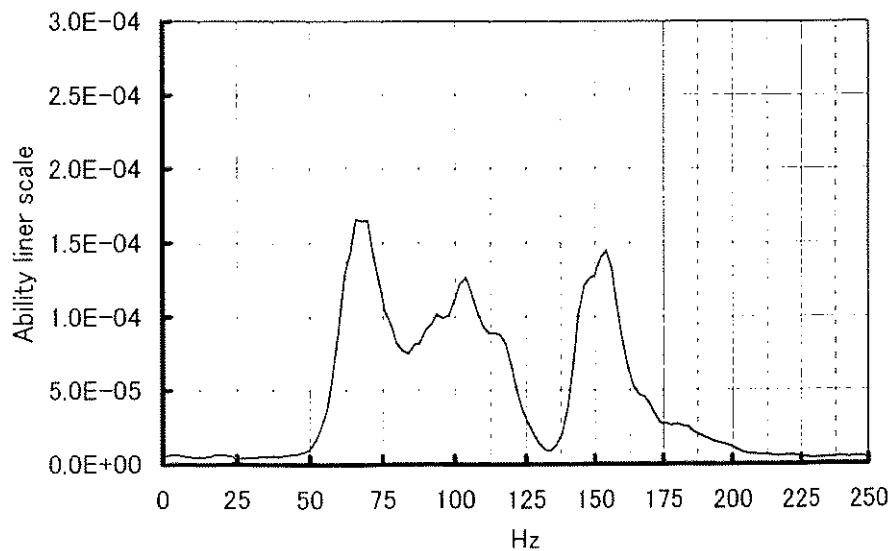


図 3.8.6 スピーカーボックスの周波数特性

### 3.8.2 噴流せん断層の周波数特性

本節では噴流せん断層中の速度変動の卓越周波数を検討する。この情報は、風洞装置等の周波数特性と共に励起周波数の決定に必要な情報である。本研究では、せん断層中の速度変動の卓越周波数が励起装置の卓越周波数の整数倍となる噴流速度を検討した。その結果、噴流出口中心速度が 6.4 m/s の場合、この条件を満たすことが解った。

図 3.8.7 に噴流出口中心速度が 6.4 m/s のせん断層 ( $y/H=0.5$ ) での速度変動波形の周波数スペクトルを示す。スペクトル算出に用いた時間波形は、各点につき 150 秒の波形を用い、短時間 FFT を反復し平均化した。周波数分解能は 1Hz である。上流側では、270Hz 付近に最初の卓越周波数が表れ、流れ方向下流に行くに従い卓越周波数が低周波側に移動している。この図の  $x/H=0.5, 0.75, 1.25$  の詳細をそれぞれ図 3.8.8~3.8.10 に示す。

図 3.8.8 ( $x/H=0.5, y/H=0.5$ ) では、270Hz 付近に卓越周波数が確認される他、様々な卓越周波数が確認され、この段階では渦の自然発生周波数  $f_n$  は明かではない。次に図 3.8.9 ( $x/H=0.75, y/H=0.5$ ) では、前述の 270Hz 付近の卓越周波数の他に、その約半分の 134Hz のところに大きな卓越周波数が確認できる。さらに図 3.8.10 ( $x/H=1.25, y/H=0.5$ ) では 134Hz の半分 67Hz に卓越周波数が確認される。

このことから、初期渦の自然発生周波数  $f_n$  は、268Hz と考えられ、その後下流側で渦がペアリングをし、順に上流側の半分の周波数の卓越周波数が表れていると考えられる。またこの初期渦の発生周波数は、励起装置の卓越周波数 67Hz の 4 倍であるので、実験では噴流中心速度 6.4m/s で  $f_n/4$  励起を行い、安定的な渦構造を生成した。

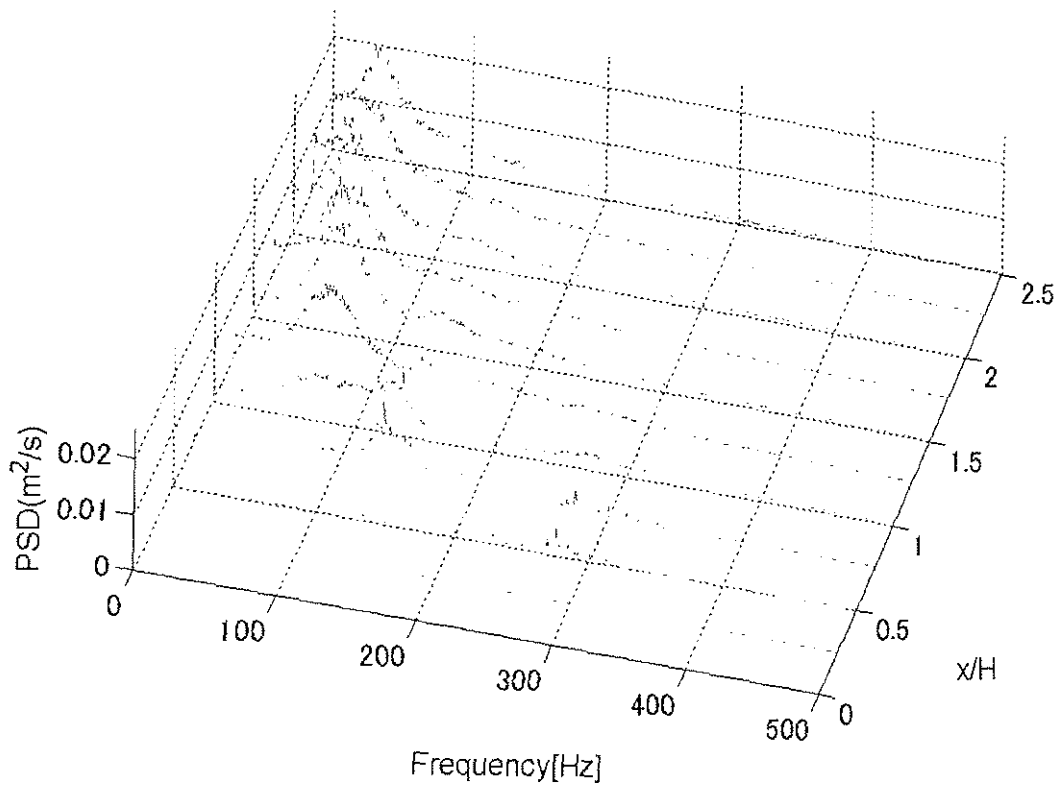


図 3.8.7 せん断層中の周波数 (噴流速度 6.4 m/s,  $y/H = 0.5$ )



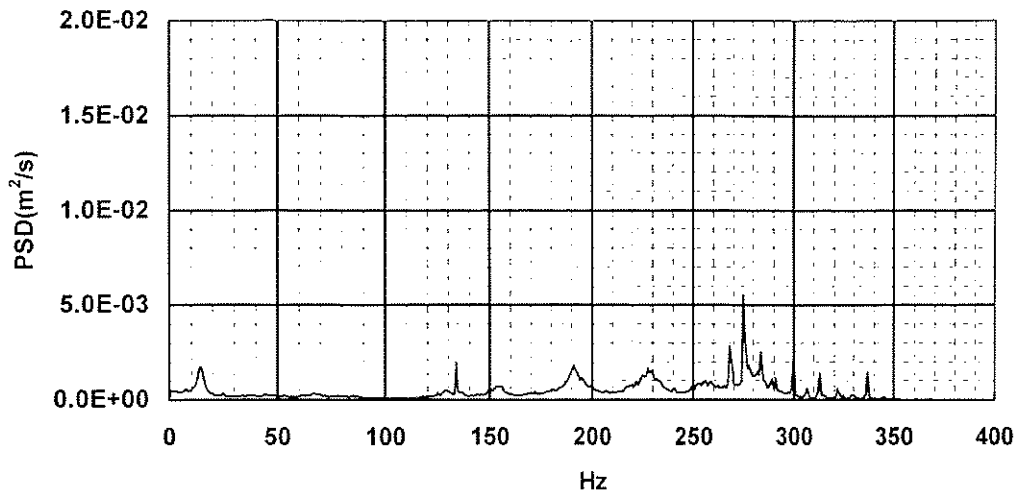


図 3.8.8 せん断層中の周波数  $x/H = 0.5$

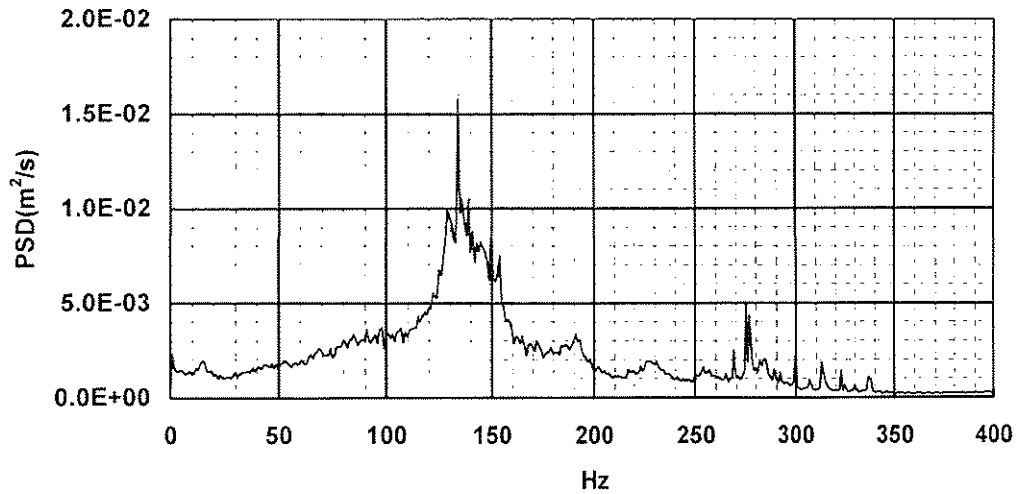


図 3.8.9 せん断層中の周波数  $x/H = 0.75$

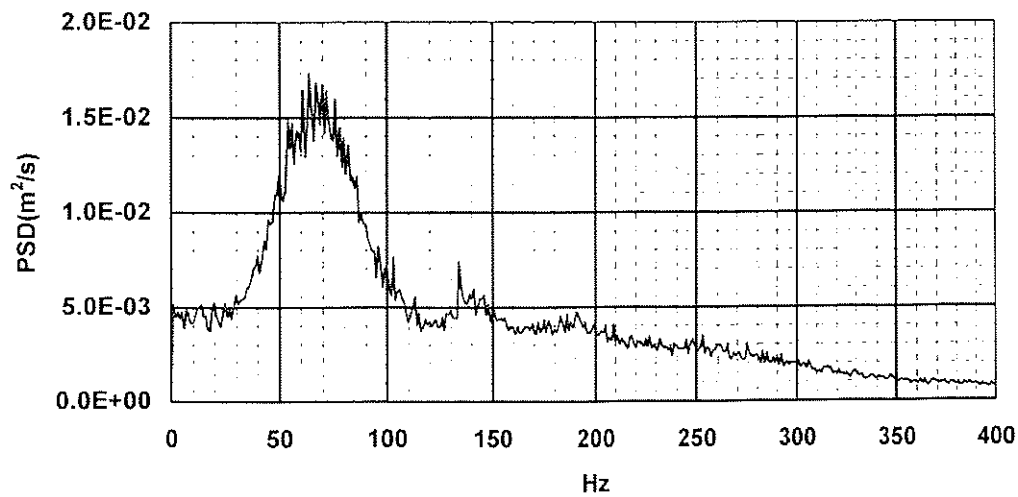


図 3.8.10 せん断層中の周波数  $x/H = 1.25$

### 3.8.3 タブ無し二次元ノズル噴流の平均速度分布と乱れ強さ分布

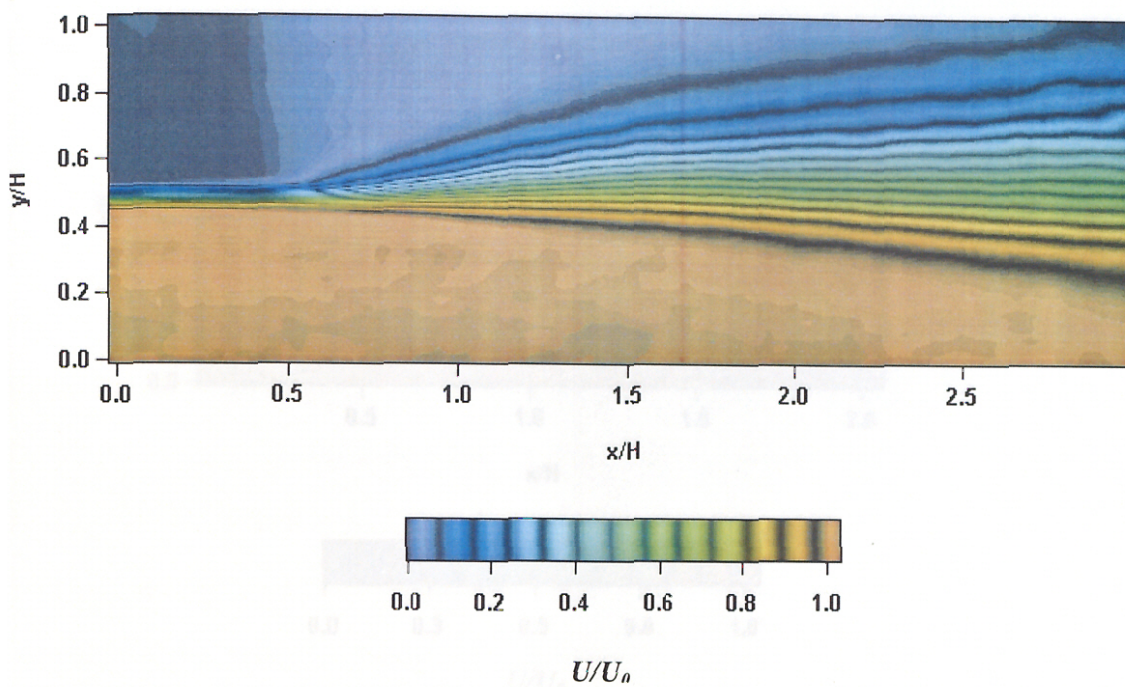
速度分布測定では、三次元空間で測定を行うと測定時間が膨大なものとなるため、 $x$ - $y$  平面測定と  $y$ - $z$  平面の測定を行った。

#### (a) 励起無し

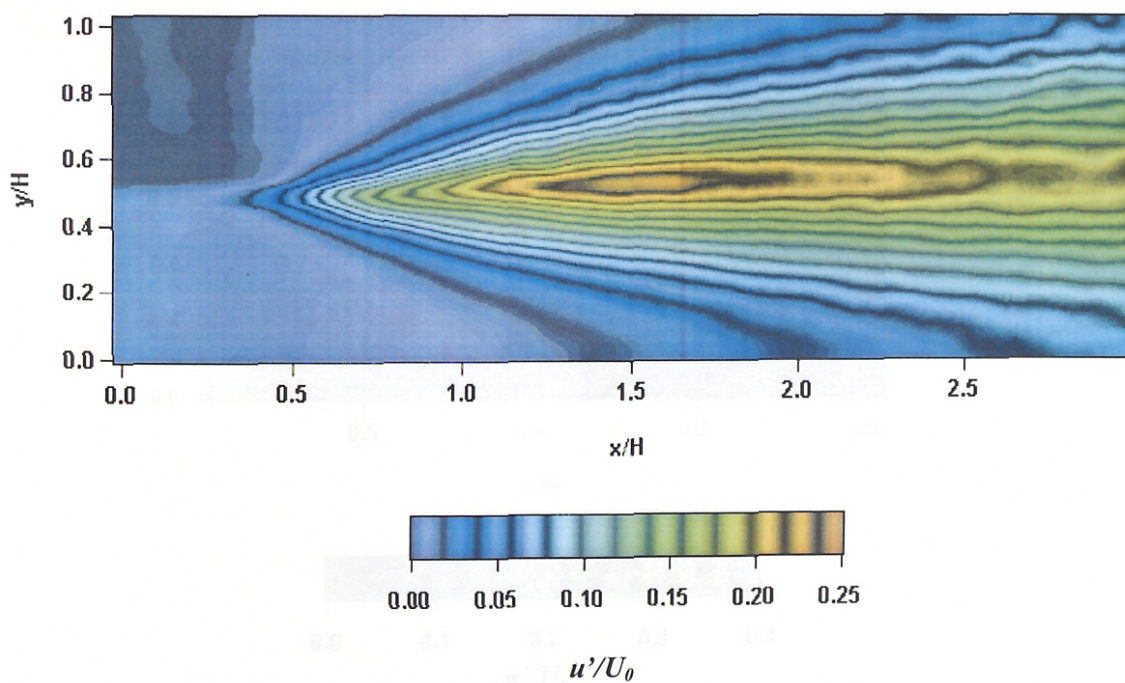
図 3.8.11 に VG が無いノズルで励起無しの場合の平均速度分布と乱れ強さ分布を示す。測定範囲は、 $x/H=0\sim 3.0$ ,  $y/H=0\sim 1.0$ ,  $z/H=0$  である。噴出口中心での乱れ強さ  $u'/U_0$  は 0.70% である。図の速度分布より、 $x/H=0.5$  付近よりせん断層が発達し始めることが解る。また乱れ強さ分布より、 $x/H=1.5$  付近のせん断層中で乱れ強さが最大となっている。また、 $x/H=1.5$  を通過する渦の周波数は、図 3.8.7, 図 3.8.10 より 67Hz である。

#### (b) 励起有り

図 3.8.12 に VG が無いノズルで 66.1Hz 励起での平均速度分布と乱れ強さ分布を示す。この実験では、励起周波数はファンクションジェネレータにより微調整し、励起効果が最大となる周波数とした。測定範囲は、 $x/H=0\sim 2.0$ ,  $y/H=0\sim 1.0$ ,  $z/H=0$  である。出口中心での乱れ強さ  $u'/U_0$  は 0.72% である。励起は  $fn/4$  付近であり、これは励起されない噴流の  $x/H=1.5$  付近に自然発生する渦の周波数に相当する。図 3.8.11 と比べ早い段階からせん断層が発達している様子が確認できる。しかし、せん断層の発達は  $x/H=0.75$  より下流では抑制されている。これは、発生初期の渦周波数が強制励起の周波数で合体し巻き上がった後に合体渦が崩れ、その後の渦のペアリングが抑制された状態で下流側に進行しているためと考えられる。

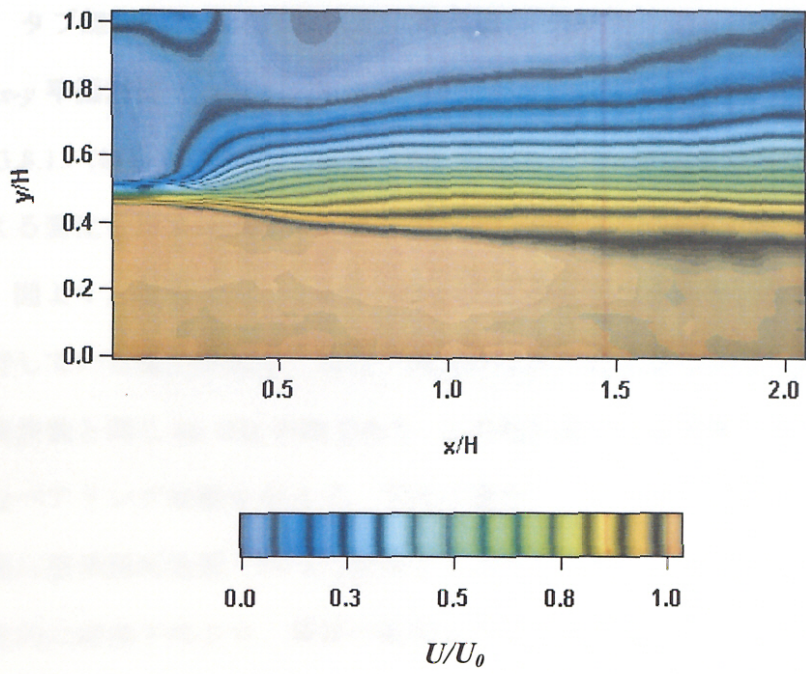


(a) 平均速度分布

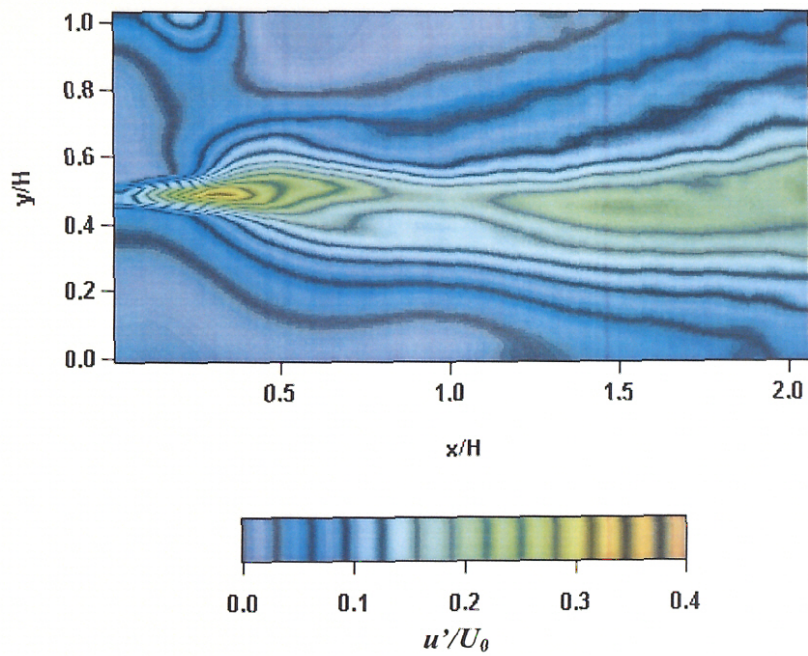


(b) 乱れ強さ分布

図 3.8.11 速度・乱れ強さ分布 (二次元ノズル, 励起無し)



(a) 平均速度分布



(b) 乱れ強さ分布

図 3.8.12 速度・乱れ強さ分布 (二次元ノズル, 励起有)



### 3.8.4 タブ無し二次元ノズル噴流の渦度場

#### (a) $x$ - $y$ 平面計測

図 3.8.13 (a)-(e) に励起した流れ場をアンサンブル位相平均した際の渦度 $\langle \omega_z \rangle$ の位相による変化を示す。渦度は、噴流出口中心速度  $U_0$  とノズル幅  $H$  で無次元化されている。図より、位相 $\phi=0^\circ$  の  $x/H=0.5$  付近で渦が巻き上がり、位相が進むにつれ下流に進行している様子が解る。また下流  $x/H=2.0$  付近で見られる大規模渦の周波数は、励起周波数と同じ 66.1Hz の渦であり、この流れ場では上流側で巻き上がった渦構造が明確なペアリング挙動を示さず、下流に進行している様子が解る。これにより、この流れ場に縦渦誘起装置で作った縦渦を干渉させる事で、横渦同士の干渉の少ない状態で安定的に縦渦干渉させ、現象の観察を行うことができる。

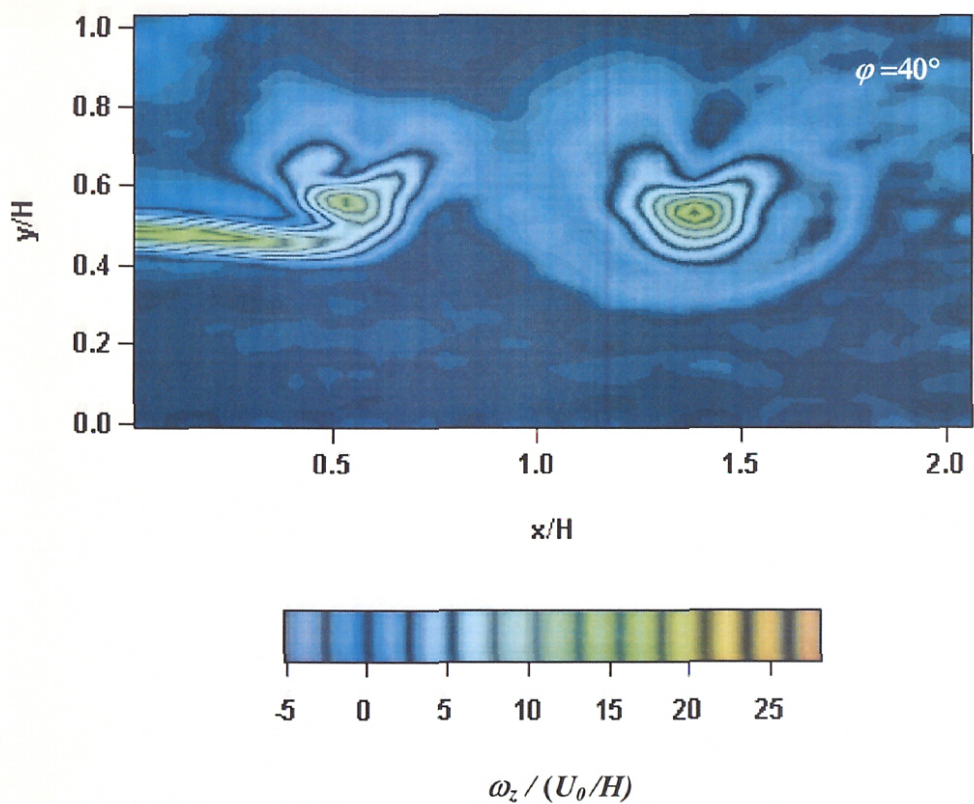
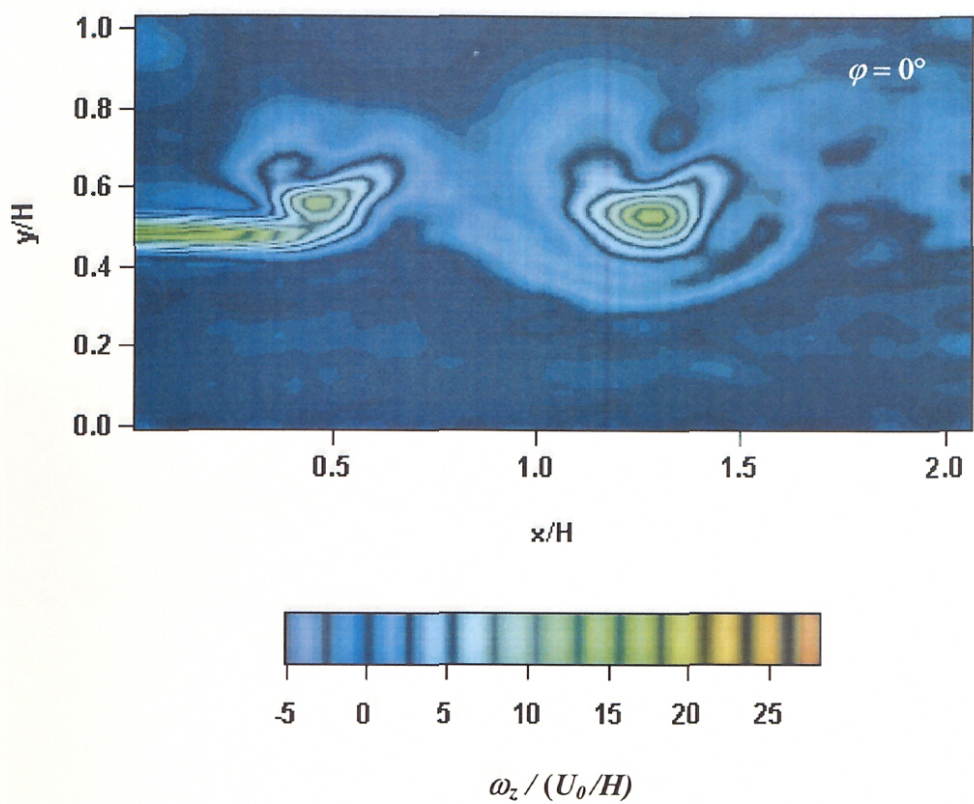


図 3.8.13 (a) 渦度 VG 無し二次元ノズル ( $\varphi=0^\circ, 40^\circ$ )

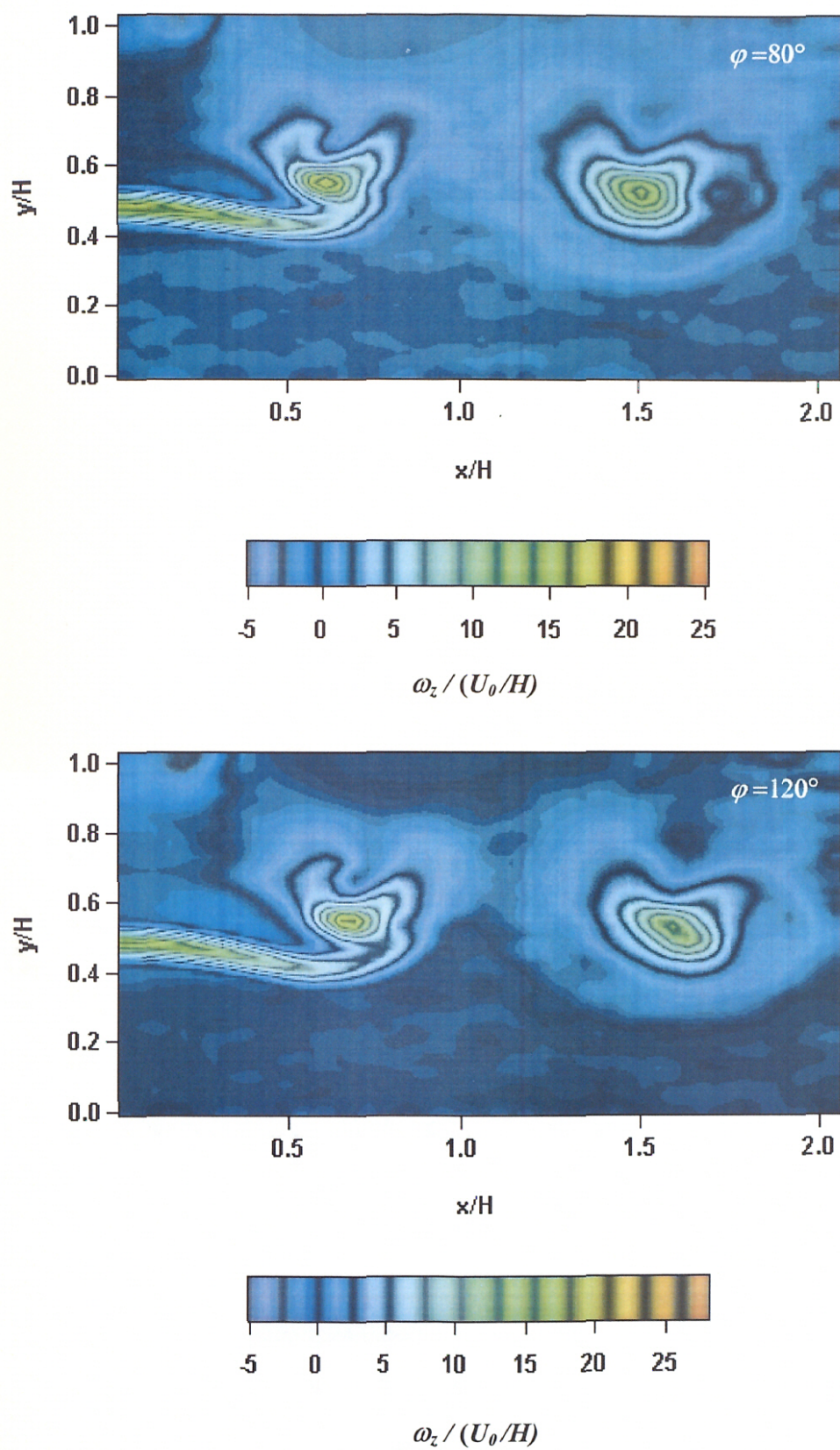


図 3.8.13 (b) 渦度 VG 無し二次元ノズル( $\phi=80^\circ, 120^\circ$ )



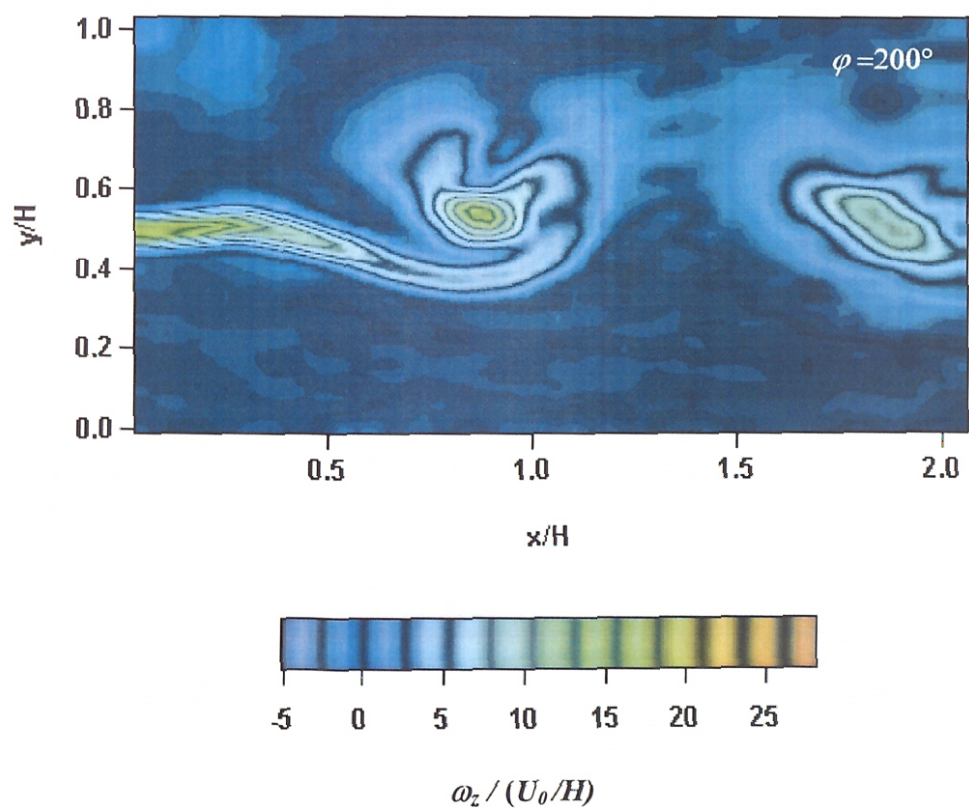
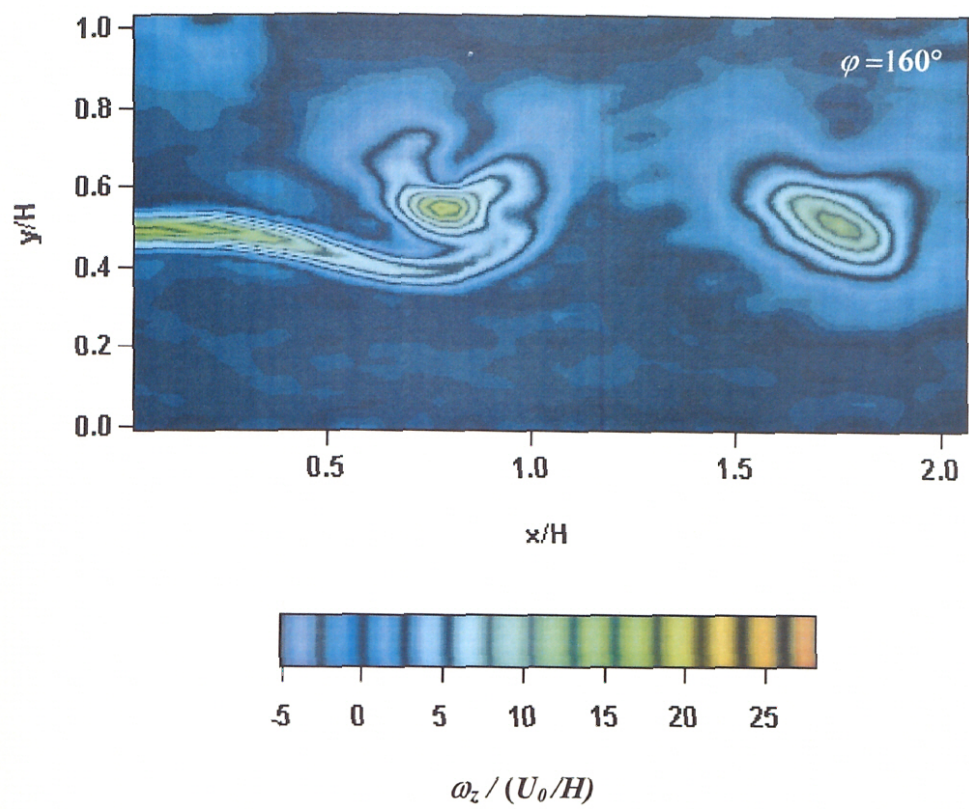


図 3.8.13 (c) 渦度 VG 無し二次元ノズル( $\varphi=160^\circ, 200^\circ$ )



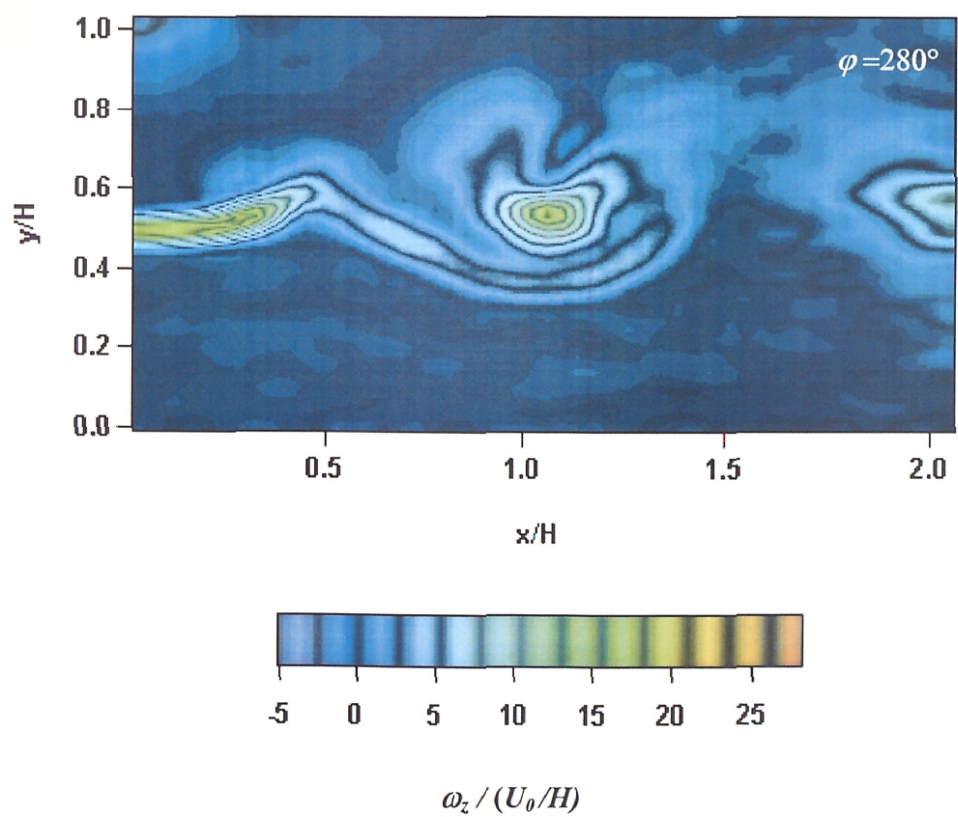
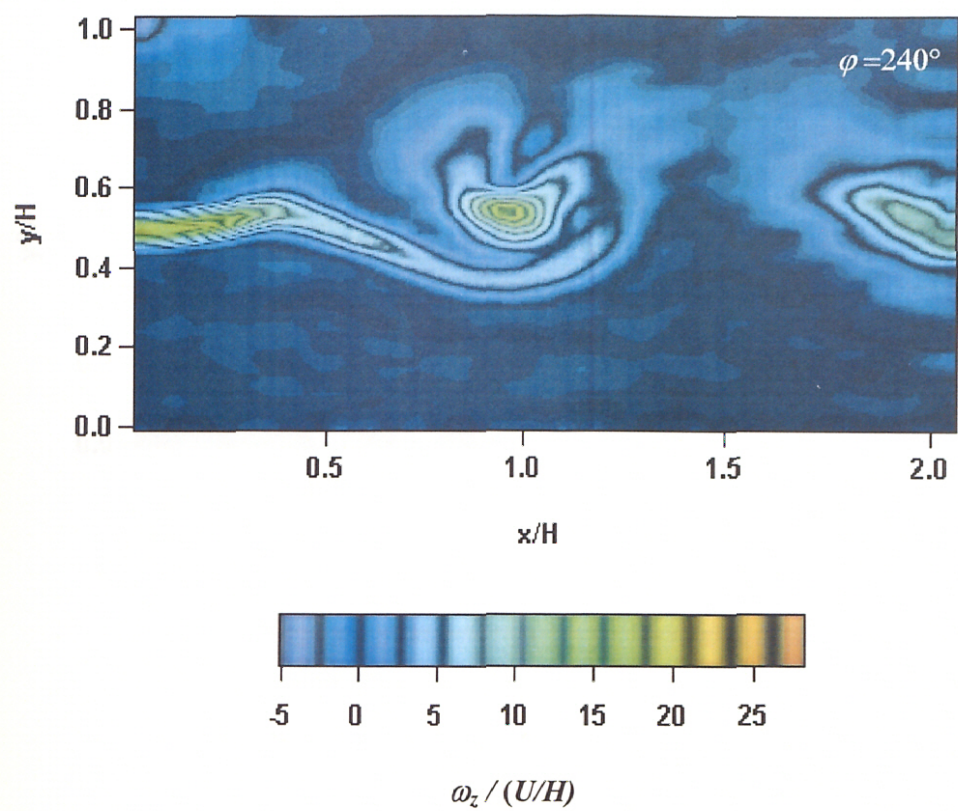


図 3.8.13 (d) 渦度 VG 無し二次元ノズル( $\phi=240^\circ, 280^\circ$ )

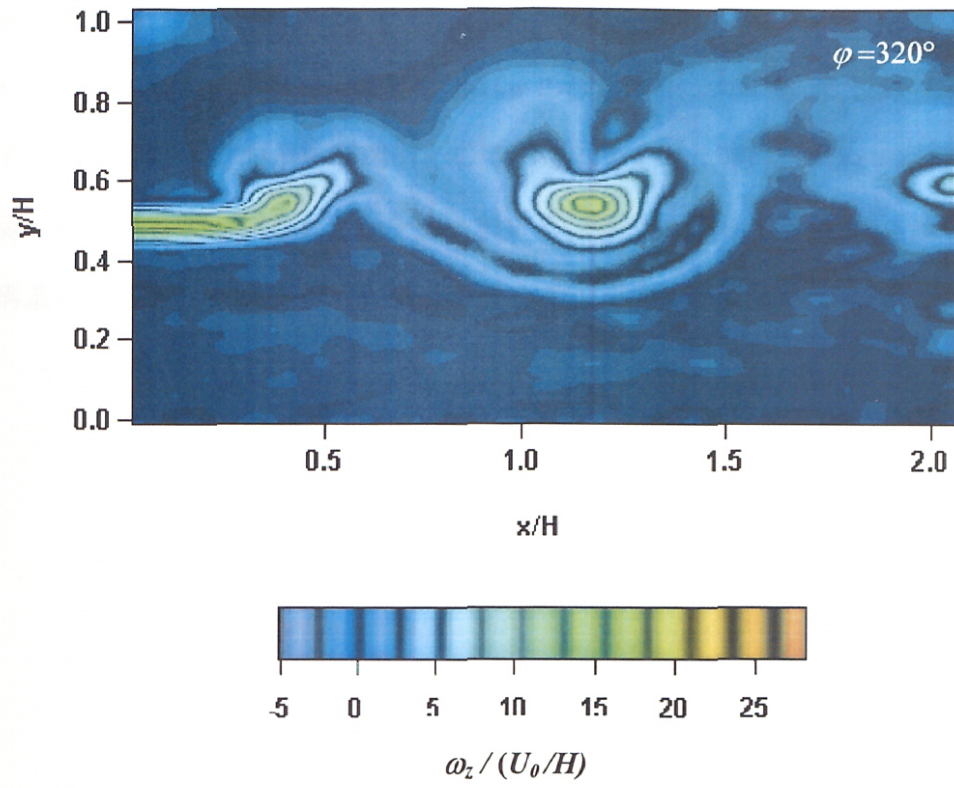


図 3.8.13 (e) 渦度 VG 無し二次元ノズル( $\phi=320^\circ$ )

(b)  $y$ - $z$  平面計測

図 3.8.14 (a)-(c) に  $y$ - $z$  平面測定結果に Taylor の仮説を適用して作成した三次元渦構造を示す。渦構造は 3 方向からの画像として示されている。図 3.8.14(a)の  $x/H=0.5$  は、渦層から渦が巻き上がった直後を捉えている。図 3.8.14(b), (c)では、渦度が集積して渦構造が生成された状態を示し横渦構造は二次元的であることが確認できる。

Flow

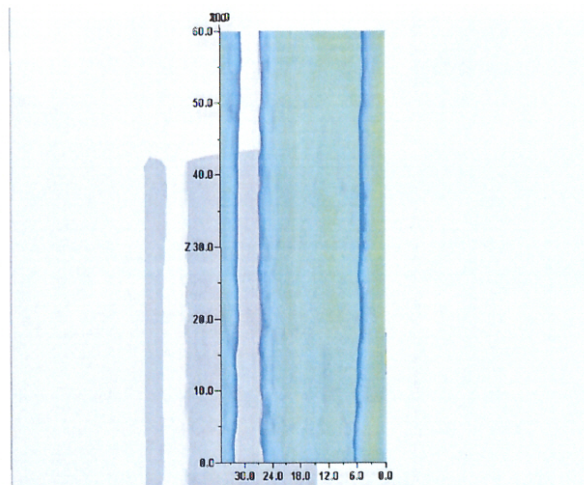
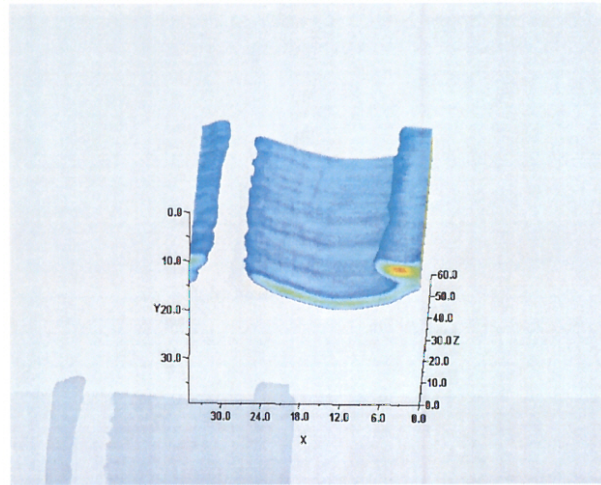
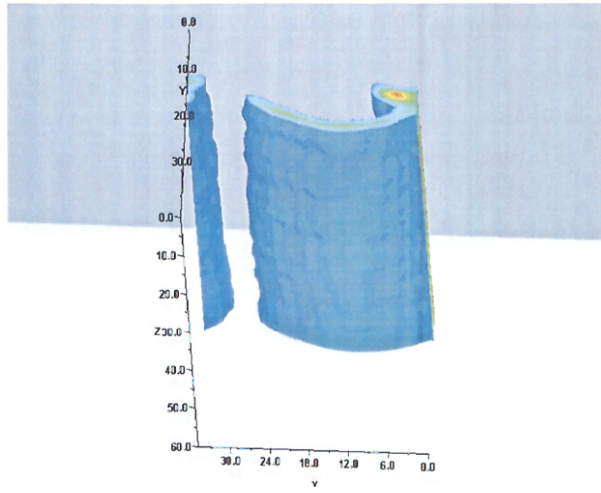


図 3.8.14 (a) 渦度集中領域 VG 無し二次元ノズル,  $x/H=0.5$



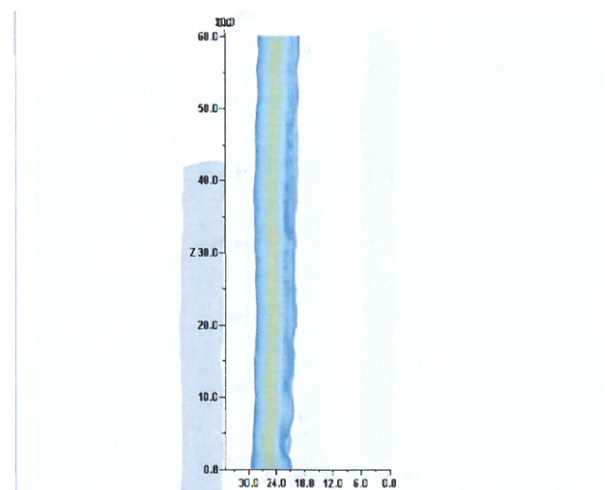
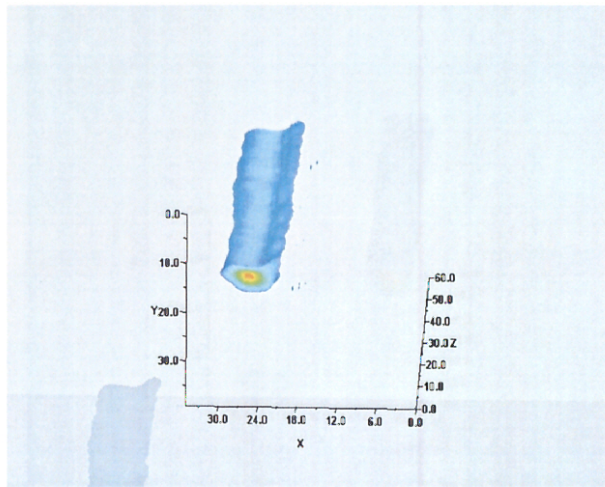
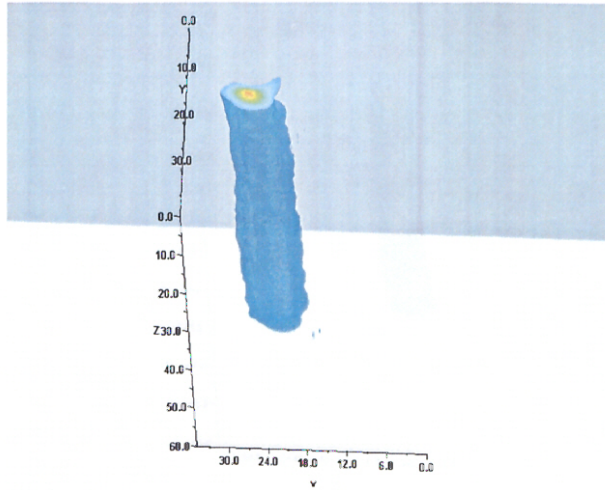
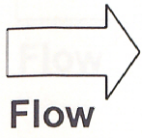


図 3.8.14 (b) 渦度集中領域 VG 無し二次元ノズル,  $x/H=1.0$

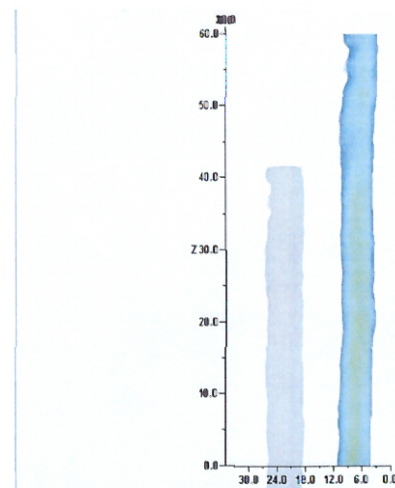
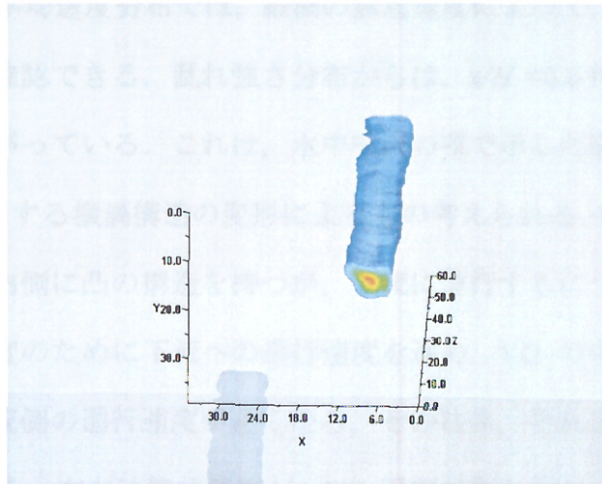
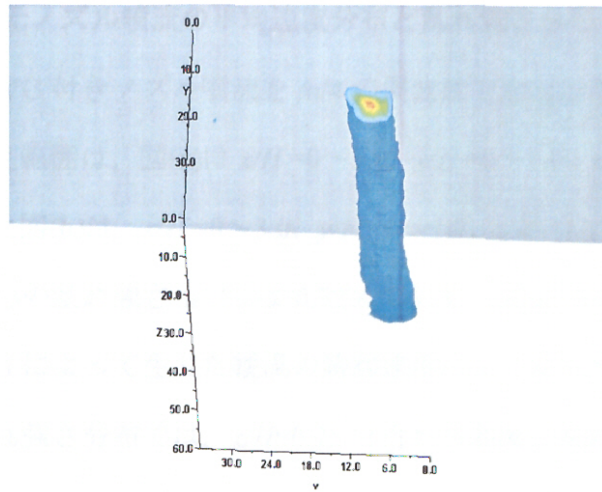
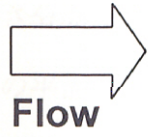
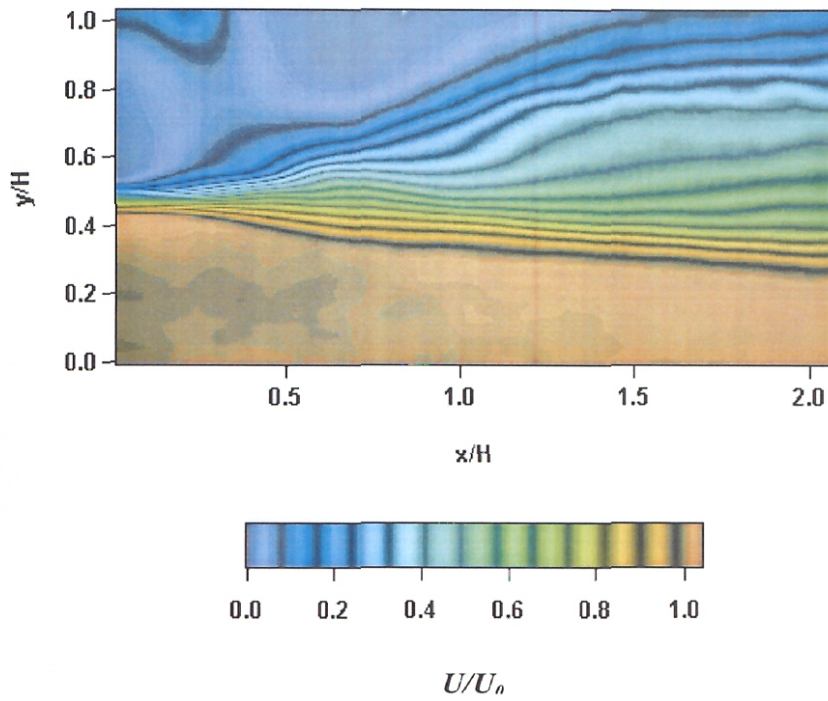


図 3.8.14 (c) 渦度集中領域 VG 無し二次元ノズル,  $x/H=1.5$

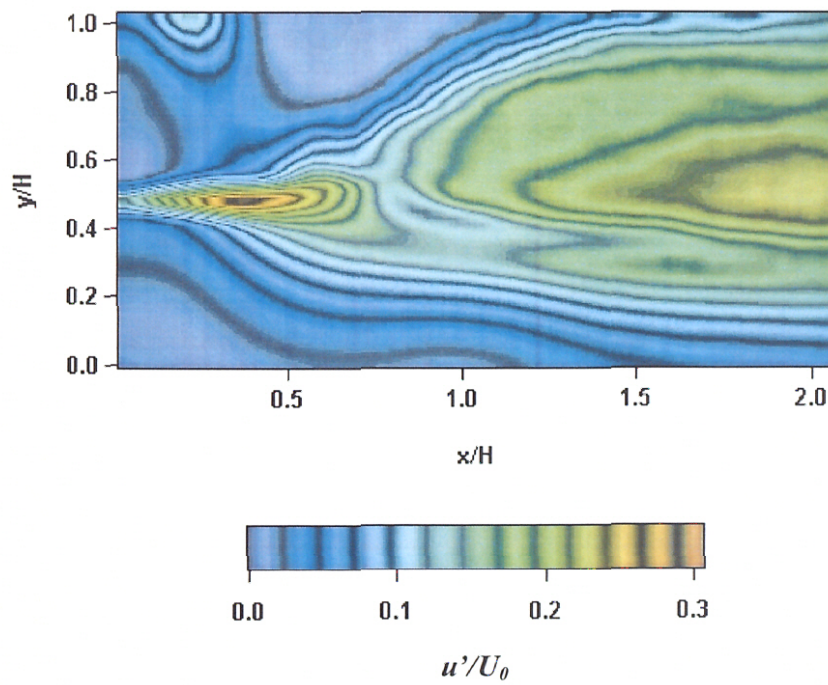
### 3.8.5 タブ付き二次元ノズル噴流の平均速度分布と乱れ強さ分布

図 3.8.15 (a),(b) に VG 付きノズル噴流を  $fn/4$  の周波数で励起の平均速度分布と乱れ強さ分布を示す。測定範囲は、図(a)は  $x/H=0\sim 3.0$ ,  $y/H=0\sim 1.0$ ,  $z/H=0$  で VG 間の谷間の平面である。また図(b)は、 $x/H=0\sim 3.0$ ,  $y/H=0\sim 1.0$ ,  $z/H=0.27$  で VG の頂点の平面である。噴出口中心の乱れ強さ  $u'/U_0$  は 0.72% である。図(a)の平均速度分布より、VG 間の領域では、VG によって生じた縦渦の誘起速度によりせん断層が外側に発達する様子がわかる。乱れ強さ分布では、 $x/H=0.75$  付近から急激に乱れ領域が外側に広がっている。

図(b)の VG 部分の平均速度分布では、縦渦の誘起速度によって、せん断層が内側方向に発達する様子が確認できる。乱れ強さ分布からは、 $x/H=0.6$  付近で乱れ領域が噴流外側  $y/H=0.5$  に広がっている。これは、水中噴流の項で示した図 2.5.16 の渦干渉モデル Stage2~3 に相当する横渦構造の変形によるものと考えられる。VG 部分で生じた横渦構造が発生直後は内側に凸の構造を持つが、下流に進行するにつれて VG 両端の曲率部分がその誘起速度のために下流への進行速度を速め、VG の中心部分の曲率部分の誘起速度により下流側の進行速度が遅くなる。その結果、それまで  $y$  方向に波状になっていた横渦構造が  $x$  方向に波状変形し、VG 両端で巻き上がった横渦の軌跡を追うように、 $y/H=0.5$  に移動すると考えられる。



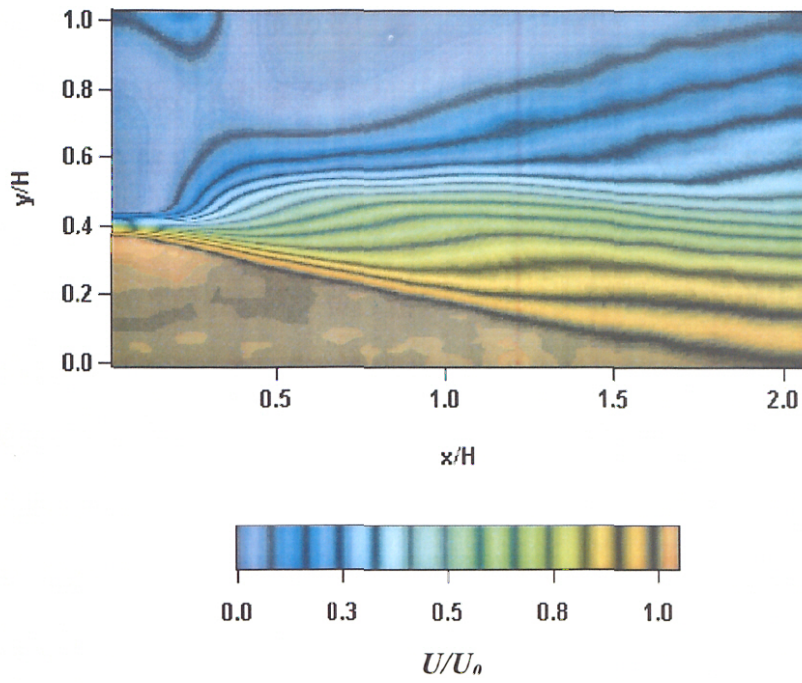
(a) 平均速度分布



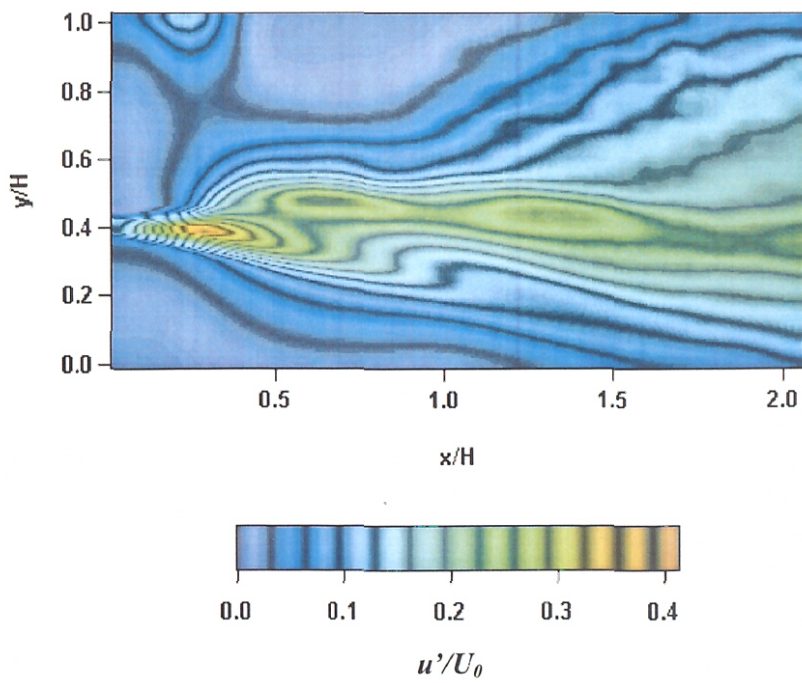
(b) 乱れ強さ分布

図 3.8.15 (a) VG 付きノズル, VG 無しライン 励起有り





(a) 平均速度分布



(b) 乱れ強さ分布

(c)

図 3.8.15 (b) VG 付きノズル, VG 有ライン 励起有り

### 3.8.6 タブ付き二次元ノズル噴流の渦度場

$fn/4$  の周波数で励起した流れ場をアンサンブル位相平均した際の渦度 $\langle \omega_z \rangle$ を検討する。図 3.8.16 に VG 無し平面での渦度分布を、図 3.8.17 に VG 付き平面での渦度分布を示す。渦度は、噴流出口中心速度  $U_0$  とノズル幅  $H$  で無次元化されている。

図 3.8.16 では  $x/H=0.5$  付近で渦が巻き上がり始め、 $\varphi=60^\circ, 120^\circ$  で比較的大規模な渦と小規模な渦が表れるが、それらの渦が  $x/H=1.0$  に達した  $\varphi=180^\circ$  では小規模な渦が比較的大規模なものに取り込まれている。その後位相が進むにつれ、その周波数を保ちながら下流に進行している様子が解る。また下流  $x/H=2.0$  付近で見られる大規模渦の周波数は、励起周波数と同じ 66.1Hz の渦である。

図 3.8.17 (a)-(c) では、位相  $\varphi=0^\circ$   $x/H=0.4$  付近で渦が巻き上がり始める。位相  $\varphi=60^\circ$   $x/H=0.5$  では、巻き上がった渦の内側に渦層が生成されている。その後、位相  $\varphi=240^\circ$  で渦の内側にあった渦層から、独立した渦が多数確認され、位相  $\varphi=0^\circ$  では、渦層から生成された多数の渦が大規模な渦に取り込まれている。VG 付き平面と VG 無し平面で上流側の渦周波数に違いが見られるのは、VG 部を通過する流れの速度勾配が他の領域より大きいため、より高周波の不安定性が表れていると考えられる。水噴流ではこのような高周波成分はほとんど見られなかったが、この高周波成分のスケールは小さいためと思われる。

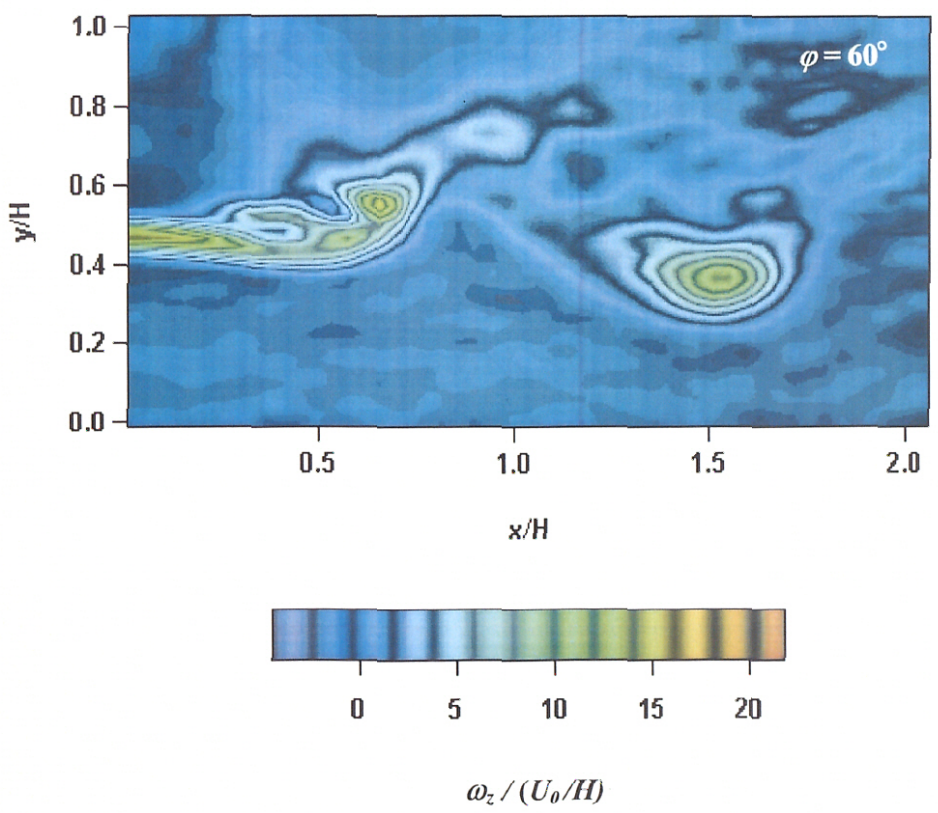
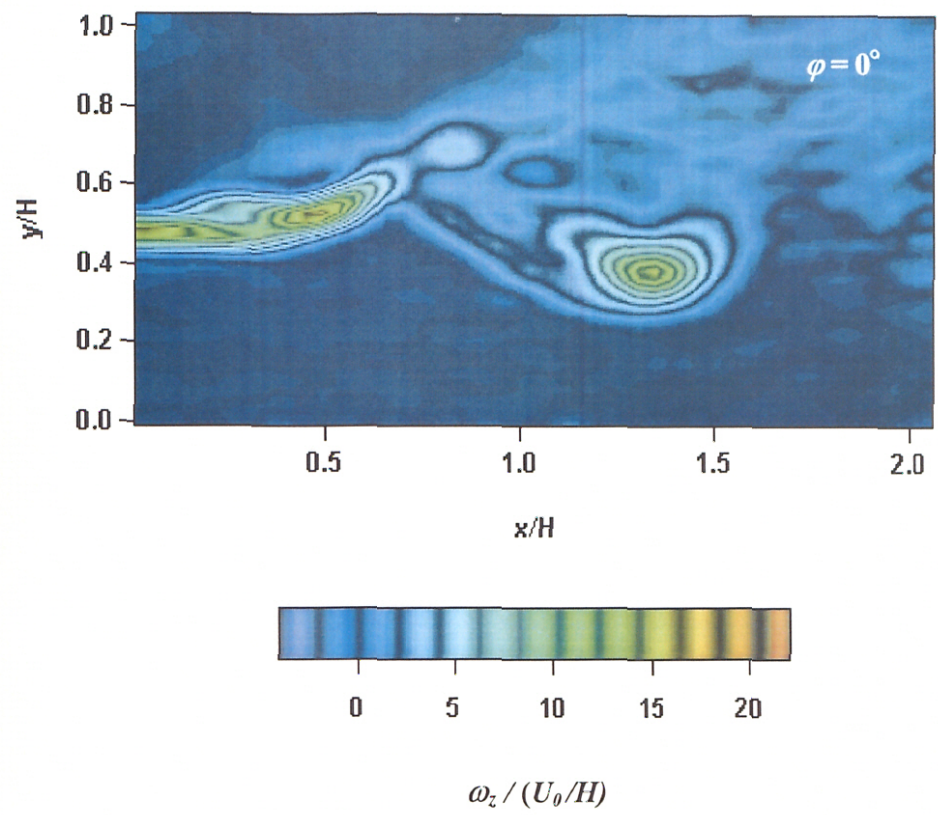


図 3.8.16 (a) 渦度 VG 付きノズル, VG 無しライン 励起有り



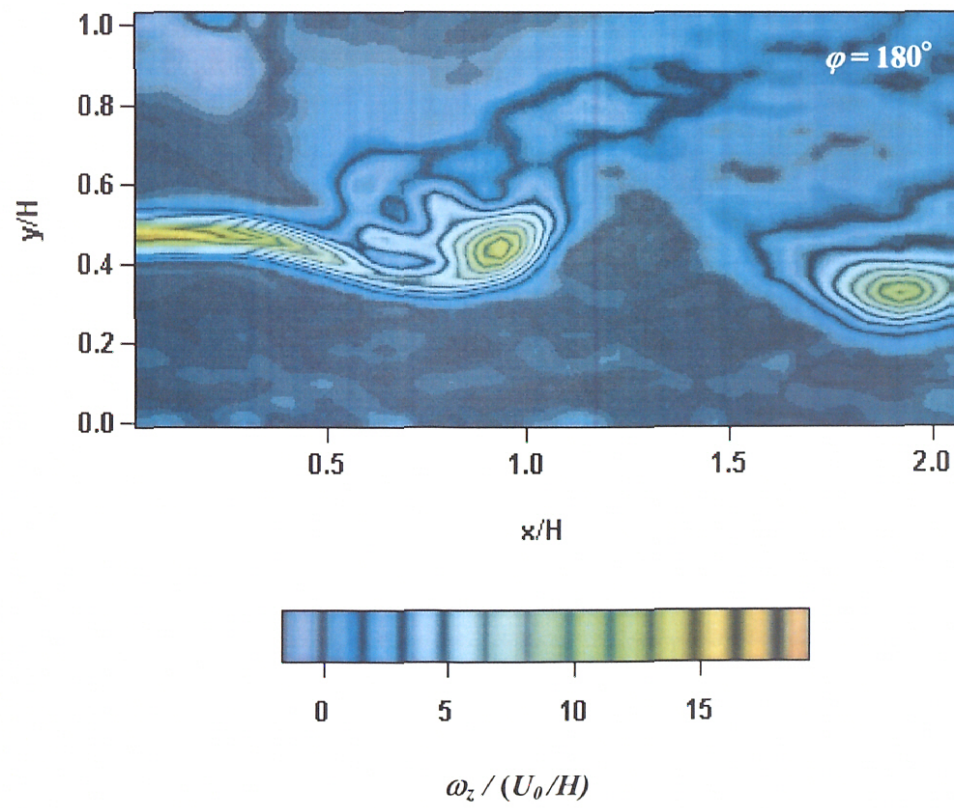
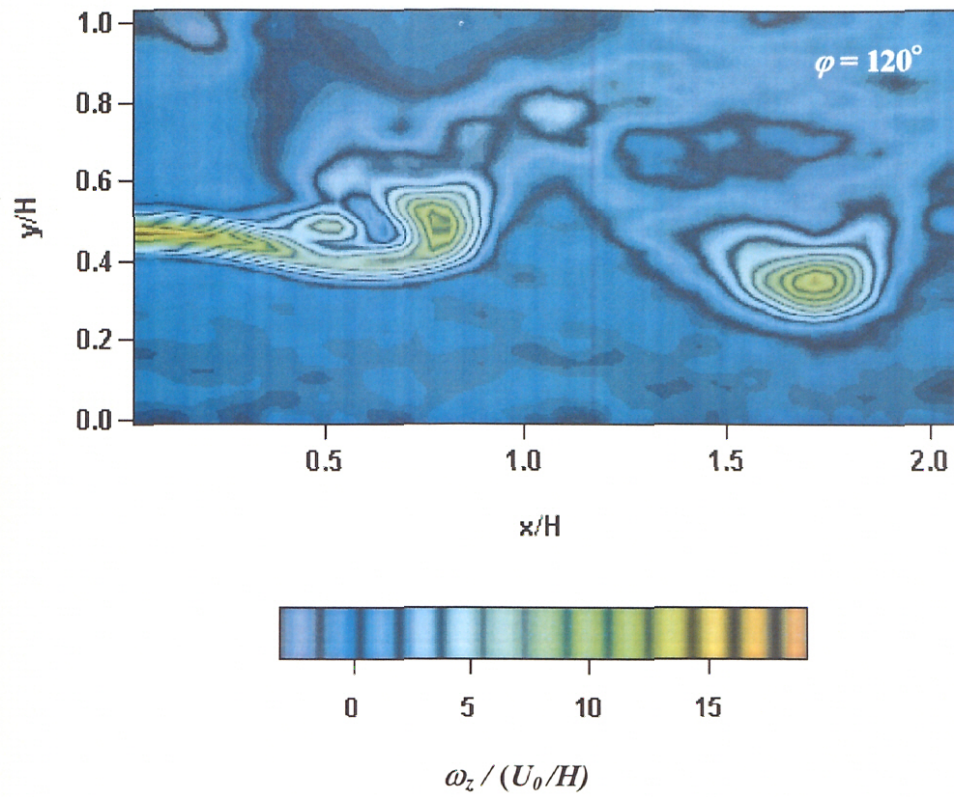


図 3.8.16 (b) 渦度 VG 付きノズル, VG 無しライン 励起有り

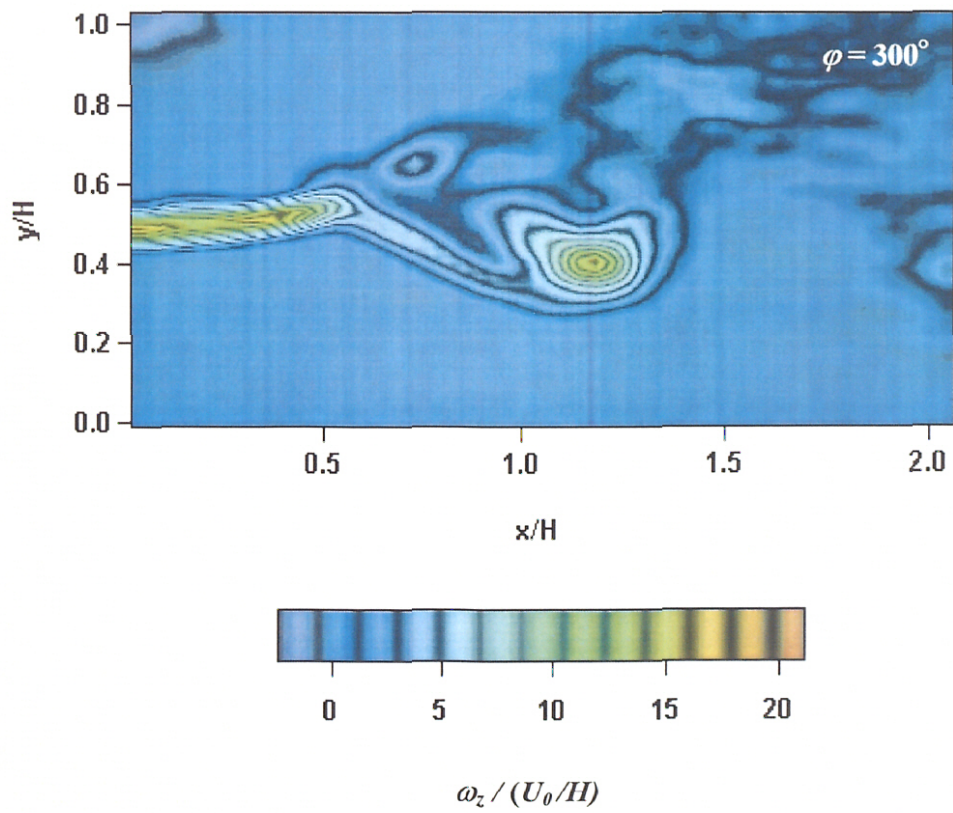
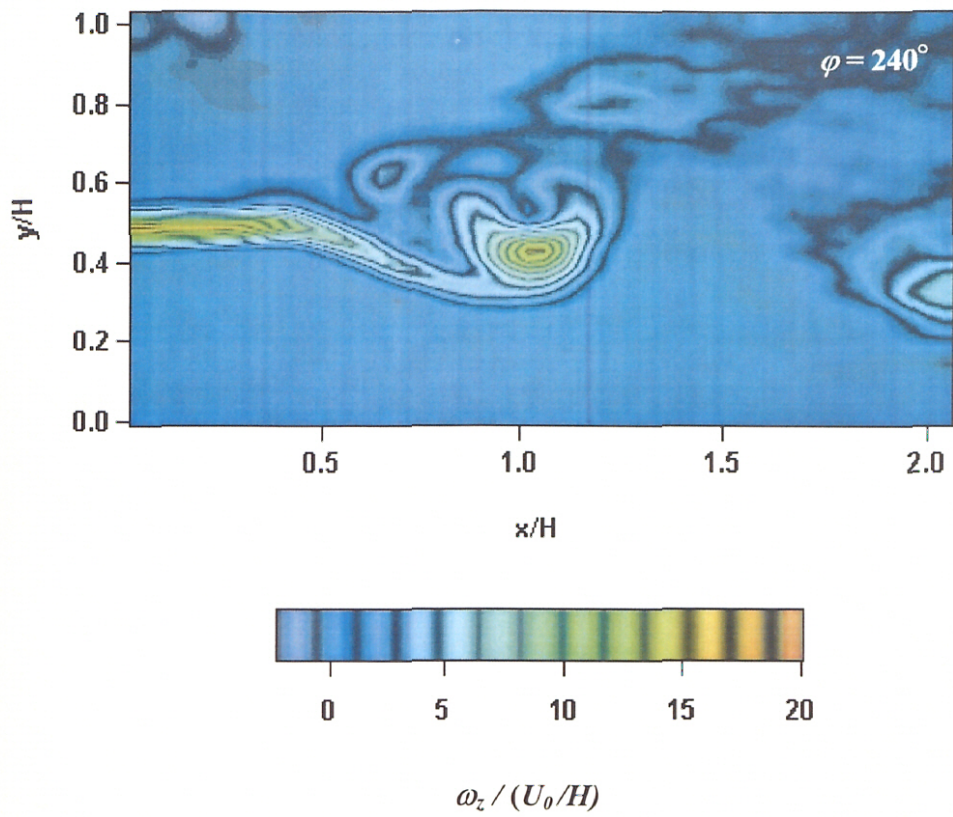


図 3.8.16 (c) 渦度 VG 付きノズル, VG 無しライン 励起有り



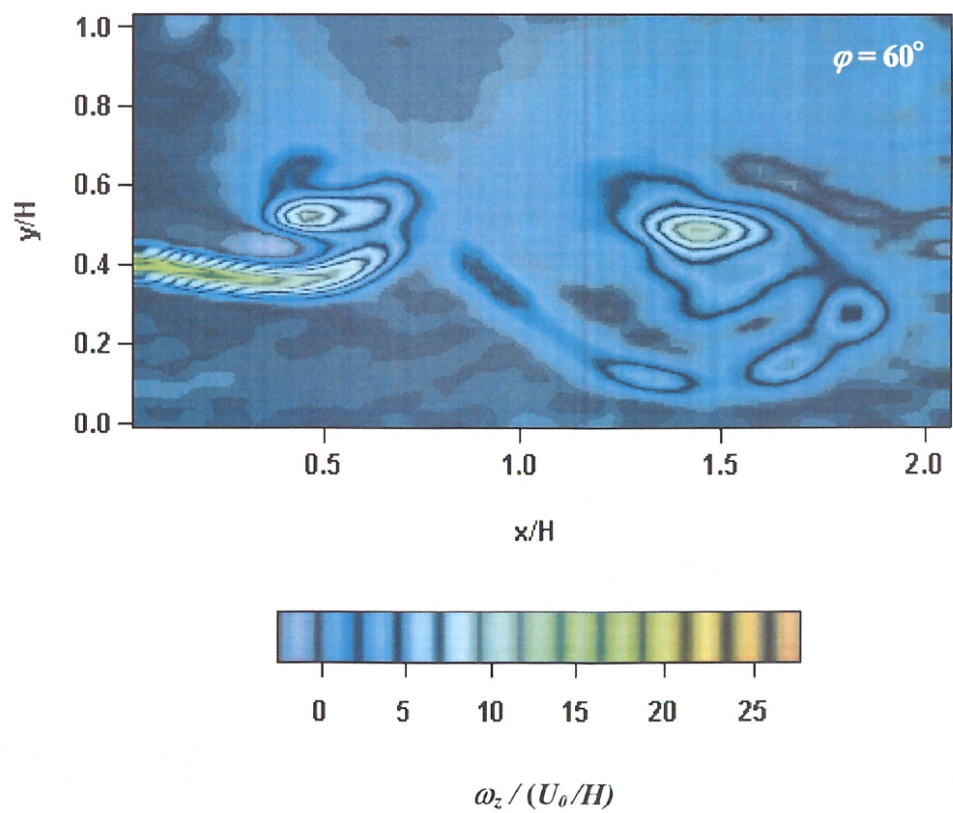
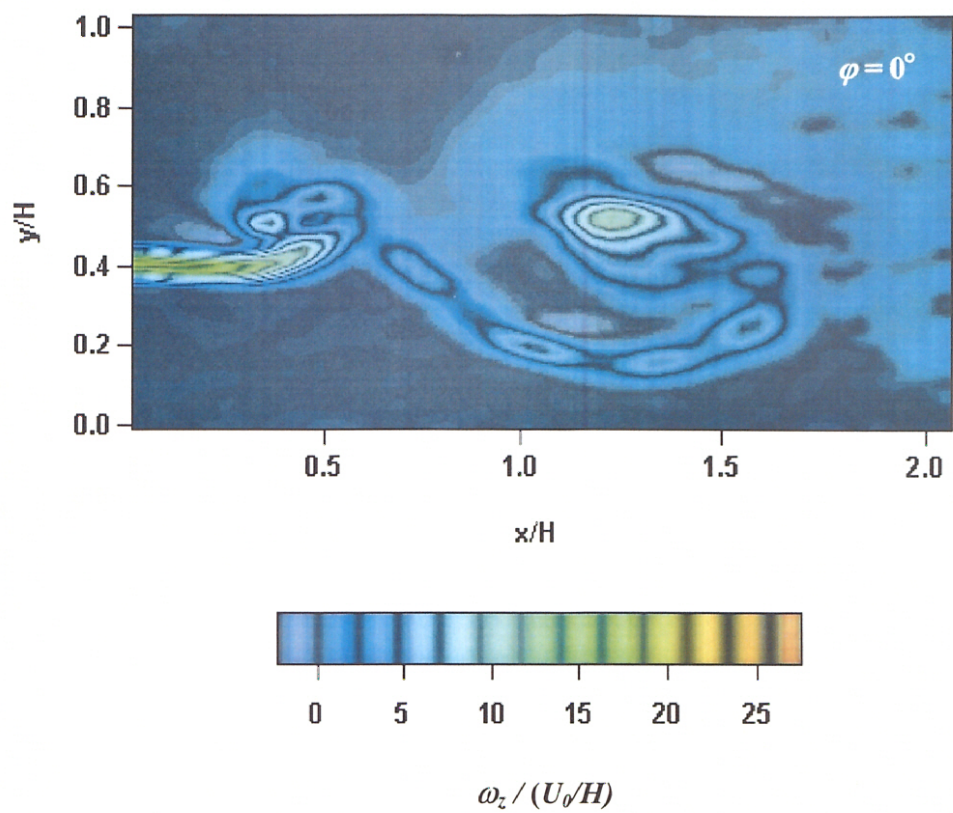


図 3.8.17 (a) 渦度 VG 付きノズル, VG 付きライン 励起有り

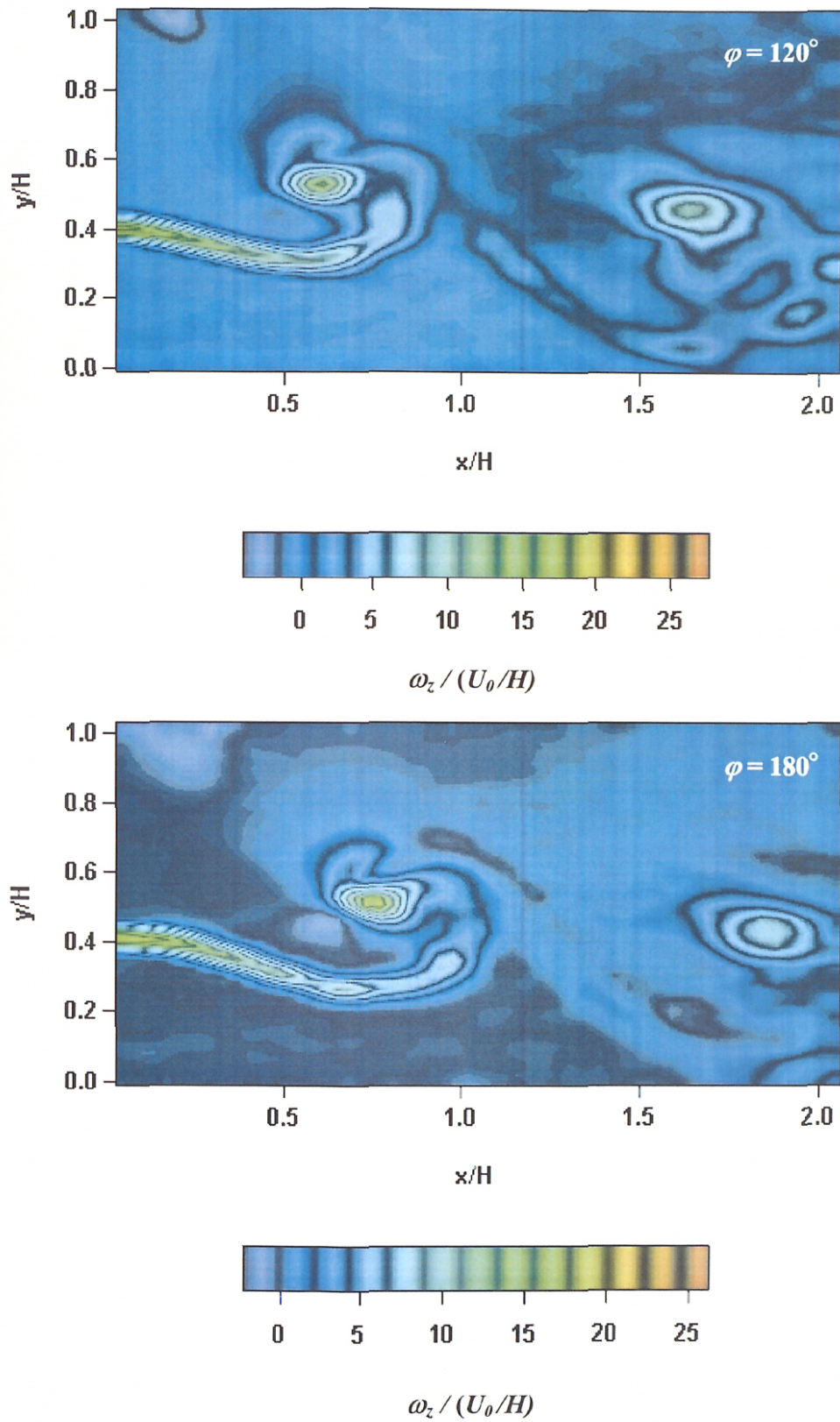
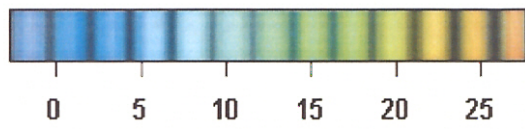
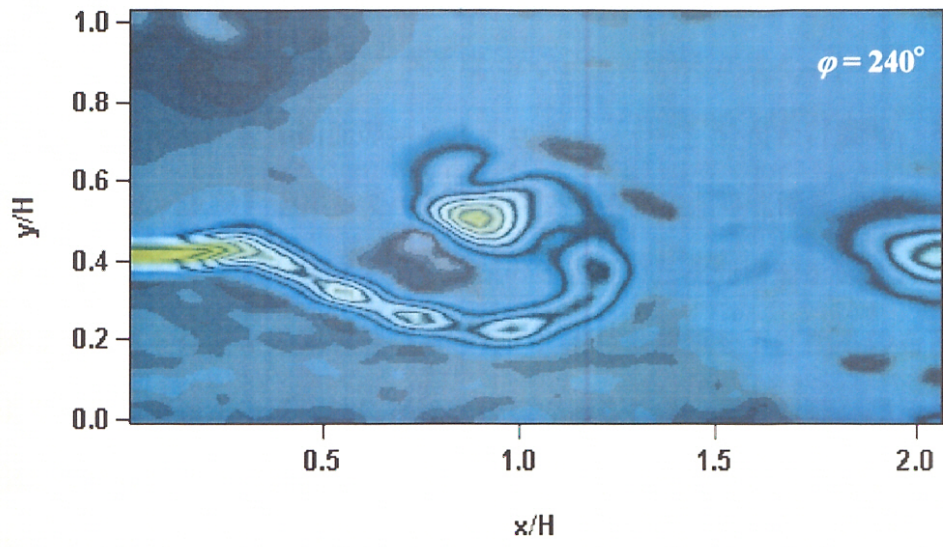
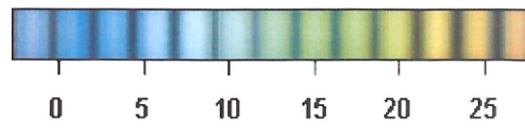
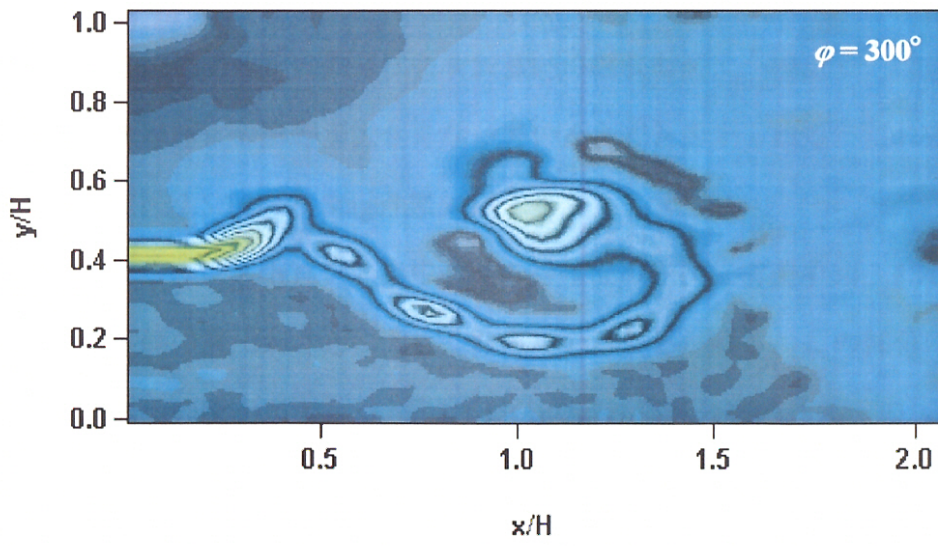


図 3.8.17 (b) 渦度 VG 付きノズル, VG 付きライン 励起有り





$\omega_z / (U_0/H)$



$\omega_z / (U_0/H)$

図 3.8.17 (c) 渦度 VG 付きノズル, VG 付きライン 励起有り



### 3.8.7 タブ付き二次元ノズル噴流のエンストロフィ場

位相平均処理により得られた三方向速度 $\langle u \rangle, \langle v \rangle, \langle w \rangle$ から渦度 $\langle \omega_x \rangle, \langle \omega_y \rangle, \langle \omega_z \rangle$ を求め、各位相に対して位相断面のエンストロフィ ( $\frac{1}{2}|\omega|^2$ ) 分布を計算し、それらの分布に対して Taylor 仮説を適用してエンストロフィの三次元等値面を描いた。

$x/H=0.5$  におけるエンストロフィ集中領域の等値面の三次元構造を図 3.8.18 に示す。図の左側はエンストロフィの敷居値が高いもの、右は敷居値を下げたものを示している。図より、縦渦構造がほぼ流れに平行な状態であること、縦渦構造が噴流外側に大きく突出していないことが確認できる。また VG 部分の横渦が噴流内側に凸ではなく、流れ方向に波状変形している様子が確認され、軸対称混合層の場合 (図 2.5.16) の Stage2 から 3 への過渡的な状態に対応すると考えられる。

$x/H=0.75$  におけるエンストロフィ集中領域の等値面の三次元構造を図 3.8.19 に示す。図 3.8.18 の渦層領域が縦渦部分に渦度を集中し、縦渦構造と横渦の干渉模様が顕著になっている。また縦渦構造の噴流外側の突出も大きくなっている。これは、横渦に縦渦が巻き付き、その曲率の効果によりお互いの縦渦同士が接近し、接近した部分でさらに自己誘起速度の影響が大きくなっているためと考えられる。これは、軸対称混合層の場合 (図 2.5.16) の Stage3 に対応する。

$x/H=1.0$  におけるエンストロフィ集中領域の等値面の三次元構造を図 3.8.20 に示す。縦渦構造の噴流外側の突出がさらに大きくなっていることが解る。この部分は渦の誘起速度により外側への噴出が大きく、図 3.8.15(a)の乱れ強さ分布の外側への広がり、この部分に対応していることが解る。また、このような構造が噴流の混合・拡散に効果的であることも解る。

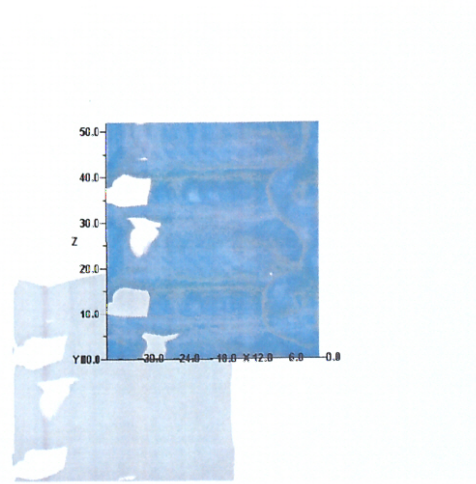
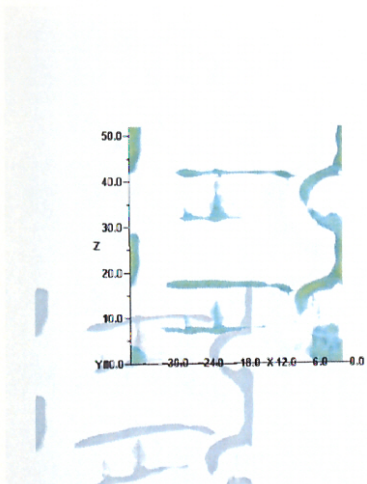
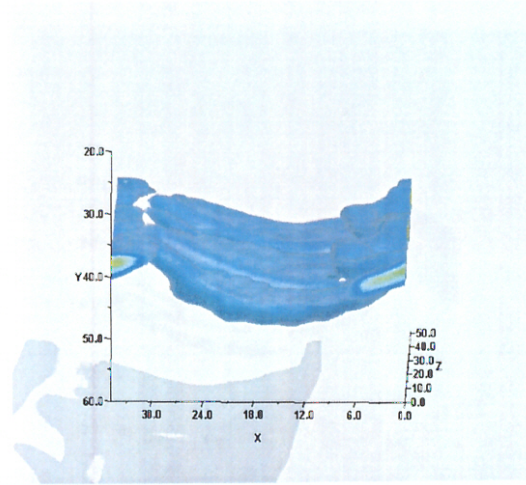
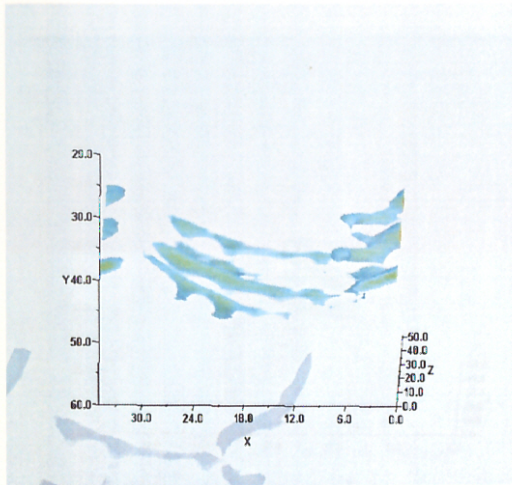
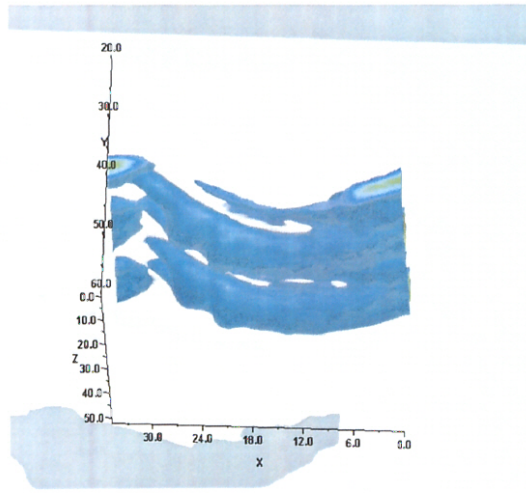
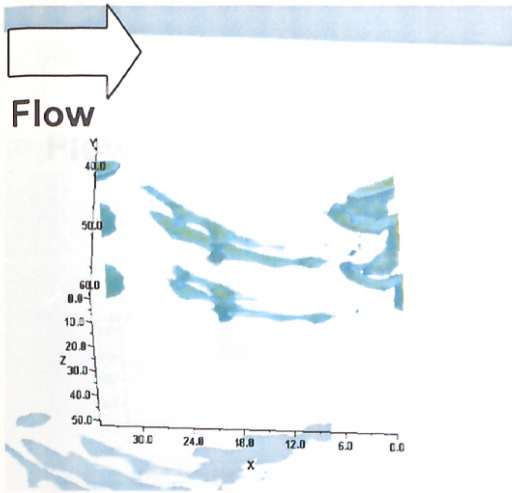


図 3.8.18 エンストロフィ VG 付き二次元ノズル,  $x/H=0.5$

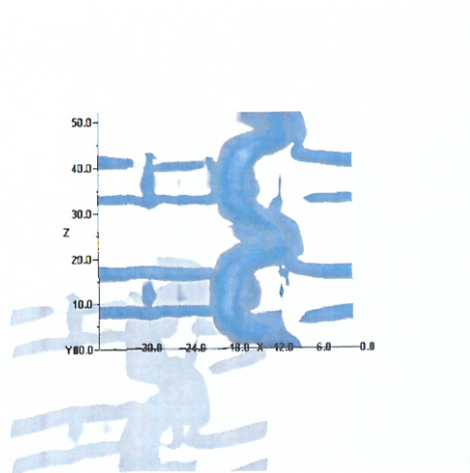
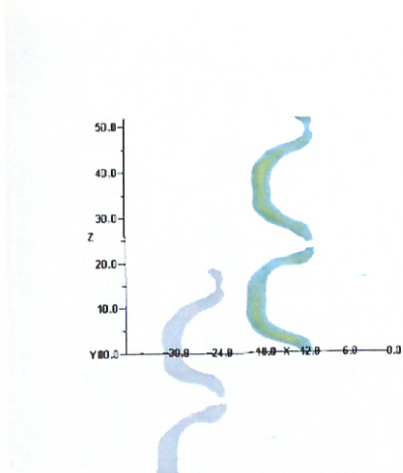
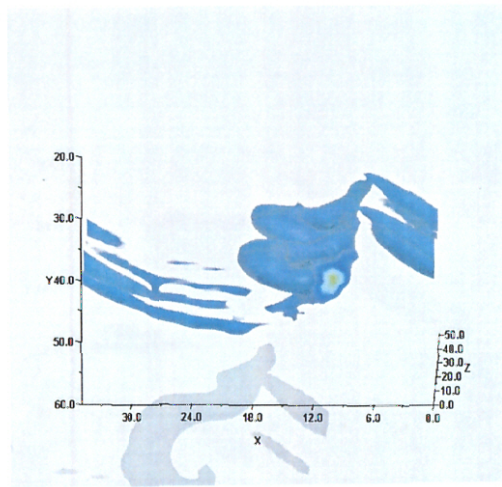
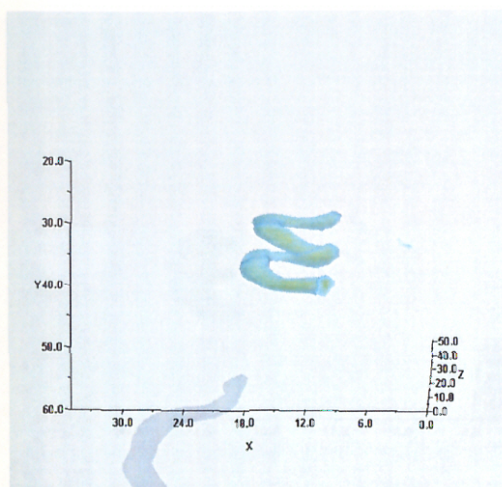
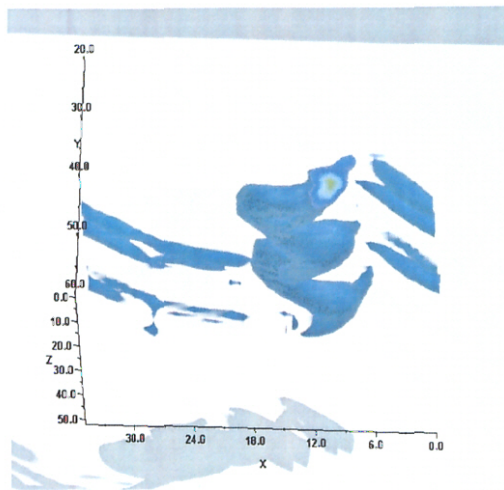
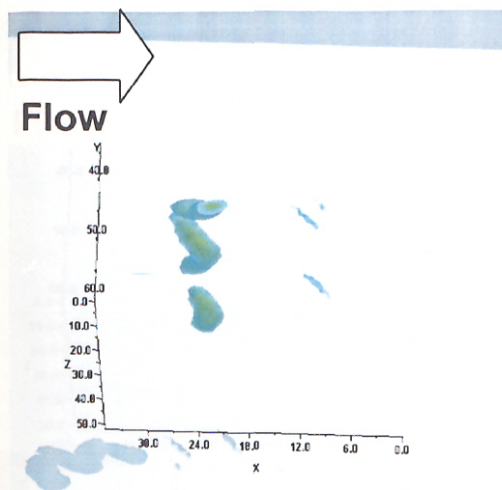


図 3.8.19 エンストロフィ VG 付き二次元ノズル,  $x/H=0.75$



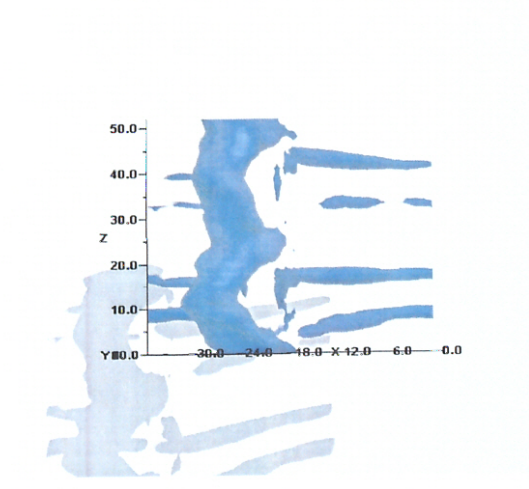
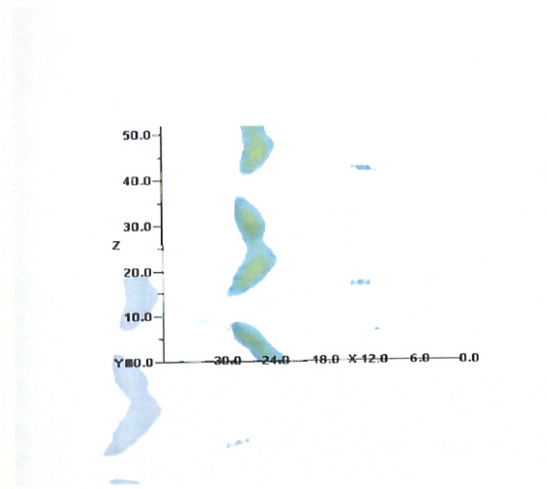
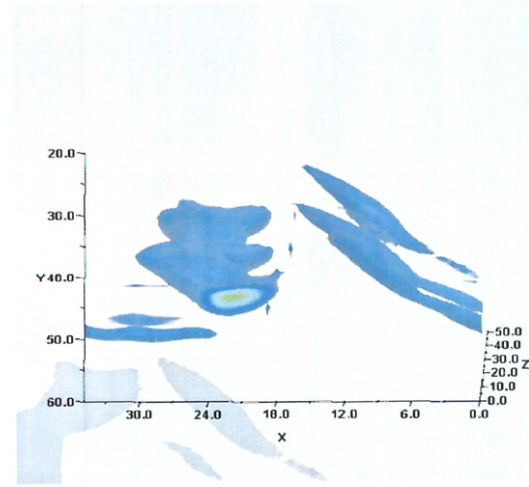
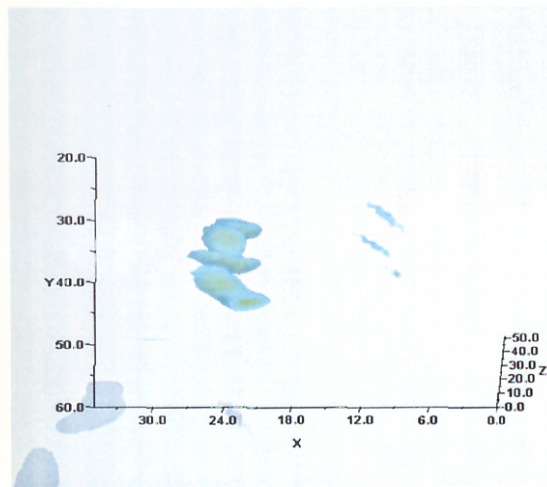
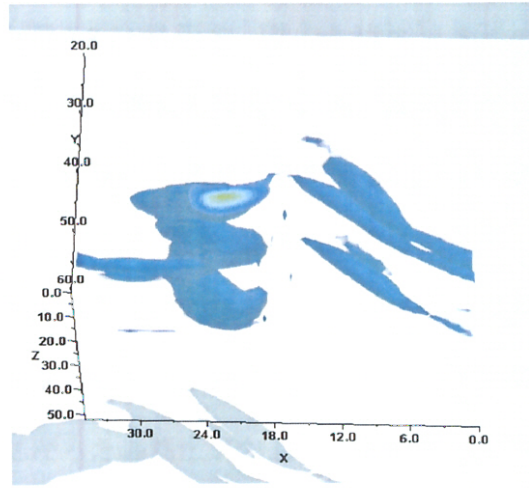
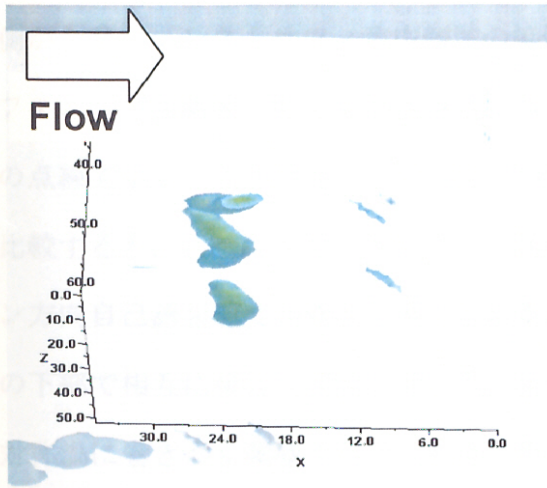
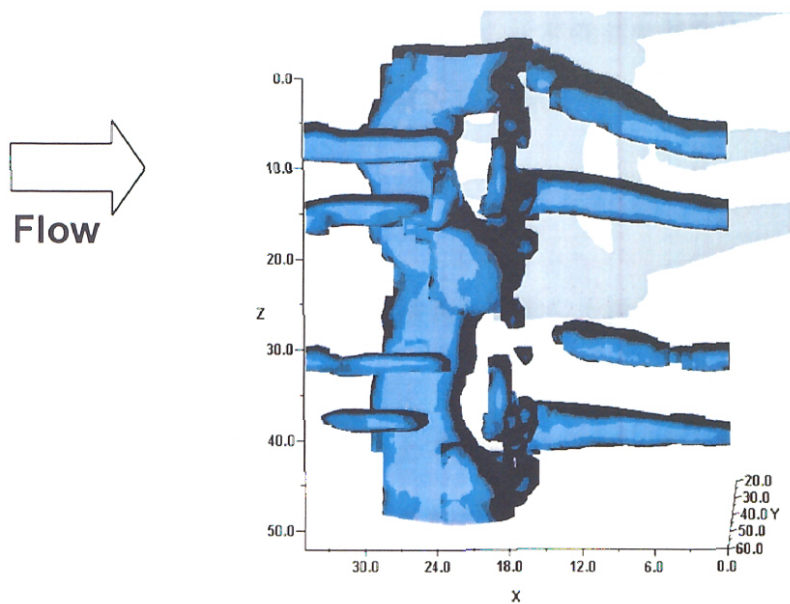
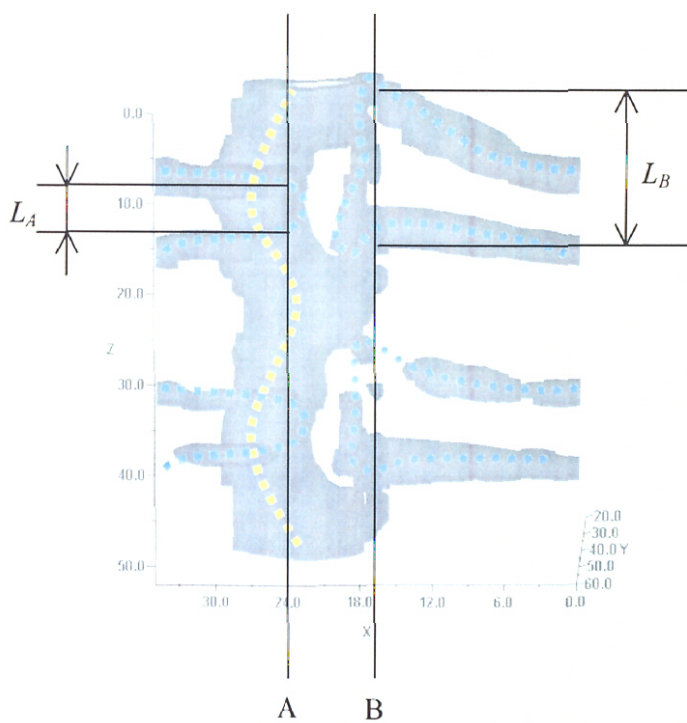


図 3.8.20 エンストロフィ VG 付き二次元ノズル,  $x/H=1.0$

$x/H=1.0$  における渦構造と図 2.5.16 のモデルとの類似性を検討するために、噴流内側から見たエンストロフィ集中領域の等値面を図 3.8.21 に示す。図 (a) はエンストロフィの等値面画像、図 (b) はエンストロフィ画像上に横渦を黄色の点線、縦渦を水色の点線で示したものである。図 (b) 中 A 断面と B 断面の渦対の渦間隔 ( $L_A, L_B$ ) を比較すると、 $L_A < L_B$  となっている。これは、図 2.5.16 で示した縦渦の曲率によるスパン方向自己誘起速度の効果と考えられる。A 断面近傍で対になった 2 つの渦は、横渦の下部で相互に接近し結合している。また B 断面近傍では、対になった 2 つの渦が軸対称渦に巻きつく領域で曲げられるため、対になった渦同士がお互いに離れて行く様子が見られる。これは、軸対称混合層の場合 (図 2.5.16) の Stage4 に対応する。



(a) エンストロフィ



(b) 渦構造と渦対間隔

図 3.8.21 エンストロフィ VG 付き二次元ノズル,  $x/H=1.0$

### 3.9 まとめ

本章では，二次元噴流中の横渦と縦渦の干渉機構を速度場と速度場から算出された渦度場・エンストロフィ場により解析し，噴流特性と渦挙動の関連性を検討した．得られた成果を以下に要約する．

- (1) 水噴流と非常に類似した横渦と縦渦の干渉状態が観察された．
- (2) 縦渦間の距離が  $x$ - $z$  断面上で時間的に変化していることが定量的に明らかになり，切繋ぎ挙動が確認された．
- (3) 上記の現象は，水噴流の実験から提案した渦干渉モデルで説明できることを示し，渦の干渉・変形挙動が渦の誘起速度に強く影響されることを明らかにした．
- (4) 縦渦の誘起速度により，平均速度分布が大きく変化し，混合促進に有効性を示唆した．

## 第 4 章



## 第4章 結言

噴流中の大規模渦と縦渦の干渉について検討した結果を以下に総括する。

第1章「緒論」では、研究の背景と工学的意義を述べ、従来の研究を概観するとともに、本論文の目的を示した。

第2章「軸対称形噴流の渦構造およびその変形過程」では、軸対称形水噴流の実験・計測装置、データ処理方法を説明し、実験データを検討した。軸対称噴流中の軸対称渦輪と縦渦の干渉機構を可視化画像により解析し、さらに速度場の測定により噴流特性と渦挙動の関連性を検討した。得られた成果を以下に要約する。

- (1) 噴流の断面積の時間履歴をFFT処理することにより、初期渦の不安定周波数の特定や渦構造の合体挙動などを容易に、尚且つ客観的に示せることを示した。
- (2) 噴流断面積やその界面の表面積を検討する事により、混合・拡散特性を把握できることを示した。
- (3) 軸対称渦輪と縦渦の干渉機構を渦力学的モデルにより説明した。すなわち、縦渦は軸対称輪に巻き込まれる際に生ずる非一様曲率効果により変形し、渦の切り繋がりが生じ、ヘアピン渦が形成されることを示した。
- (4) 平均速度と乱れ強さの拡大と渦挙動の関連性を明らかにした。すなわち、縦渦の変形により形成されるヘアピン渦が噴流幅を著しく増大させることを示した。
- (5) 噴流のエントレンメントは、軸対称渦輪と縦渦の生成を促進することにより著しく増大する。とくに、縦渦はエントレンメントと混合の増大に寄与することを実験結果により示した。

第3章「二次元噴流の渦構造およびその変形過程」では、二次元空気噴流の実験・計測装置、データ処理方法を説明し、実験データを検討した。二次元噴流中の横渦と縦渦の干渉機構を渦度場より解析し、第2章で示した渦干渉モデルと比較検討した。その結果、得られた成果を以下に要約する。

- (1) 水噴流と非常に類似した横渦と縦渦の干渉状態が観察された。
- (2) 縦渦間の距離が  $x$ - $z$  断面上で時間的に変化していることが定量的に明らかになり、切繋ぎ挙動が確認された。
- (3) 上記の現象は、水噴流の実験から提案した渦干渉モデルで説明できることを示し、渦の干渉・変形挙動が渦の誘起速度に強く影響されることを明らかにした。
- (4) 縦渦の誘起速度により、平均速度分布が大きく変化し、混合促進に有効性があることを示唆した。

以上のように、VG 付き軸対称噴流と VG 付き二次元噴流で極めて類似した渦構造が確認され、その詳細が不明であった渦構造の干渉・変形機構が、著者の提案する渦誘起速度に基づく渦干渉モデルによって説明できることを明らかにした。また、渦干渉モデルと平均速度分布の関連性を検討し、混合・拡散機構についても工学的に有用な新たな知見が得られた。

## 参考文献

1. 中山泰喜, 流体の力学, 養賢堂, 42-45
2. G.L. Brown and A.Roshko, *J. Fluid Mech.* **64**(1974), 775-816.
3. A.K.M.F.Hussain, Coherent structures and turbulence, *J. Fluid Mech.*,  
173(1986),303-356
4. 木谷勝 井上良紀, 乱れと波の非線形現象, 朝倉書店 (1993), 161-163.
5. 日野幹雄, 流体力学, 朝倉書店, 356-357
6. Widnall, S. E., Bliss, D. B. and Tsai, C. Y., *J. Fluid Mech.*, **66** (1974),35-47.
7. Martin, J. E. and Meiburg, E., *J. Fluid Mech.*, 230 (1991), 271-318
8. 竹内, 機論, **68**-665, B (2002) ,30-37.
9. 奥出・大蔵・早藤, ながれ, **19** (2000), 374-384.
10. 内藤隆、今井伸治、後藤俊幸、山田日出夫、ながれ **15**,(1996),401-408
11. 奥出・大蔵・早藤, ながれ, **19** (2000), 119-128.
12. 奥出・大蔵・早藤, ながれ, **21** (2002), 78-88.
13. Shariff, K., Verzicco, R. and Orlandi, P. *J. Fluid Mech.*, **279** (1994), 351-375.
14. D.Liepmann and M.Gharib, *J. Fluid Mech.* **245**, (1992), 643-668.
15. Grinstein, F. F., Gutmark, E. J., Hanson-Parr, D. M. and Obeysekare, U., *Phys. Fluid*, **8**  
(1996), 1515-1524..
16. Lasheras, J. C. and Choi, H., *J. Fluid Mech.*, **189**(1988), 53-8
17. J.C.Lashras et al., Proceeding of the international symposium on pulsating combustion  
Volume 2, (1991)
18. Ashurst, W. T. and Meiburg, E. , *J. Fluid Mech.*, **189**(1988), 87-116.
19. Crow, S. and Champagne, F. H., *J. Fluid Mech.*, 48(1971), 547
20. 蒔田秀治, 大谷秀雄, 石角勝利, 音波による噴流の制御 (第1報), 機論 B54-504,  
(1988), 1938-1945
21. 蒔田秀治, 大谷秀雄, 石角勝利, 音波による噴流の制御 (第2報), 機論 B54-504,

- (1988), 1946-1952
22. 鈴木宏明、笠木伸英、鈴木雄二、フラップ型マイクロアクチュエータ群による軸対称噴流の能動制御, 日本機械学会論文集 B 編 65-639, (1999), 3644-3651
  23. 栗間諄二 他 3 名, 軸対称噴流に対する周期的じょう乱の効果, 日本機械学会論文集 B 編 60-574, (1994), 2007-2013
  24. 豊田国昭, 白浜芳朗, バイモーダル励起による円形噴流の制御, 第 23 回乱流シンポジウム講演論文集, (1991), 370-374
  25. 宮内敏雄 他 3 名, 空間的に発達する混合層の大規模渦構造とその制御, 日本機械学会論文集 B 編 61-589, (1995), 3243-3250
  26. 豊田国昭・Hussain, F., 非円形噴流の渦構造に関する研究, 機論, 55-514, B(1985), 1542-1545
  27. Kuniaki TOYODA, and Riho HIRAMOTO, Proceeding of the 3<sup>rd</sup> ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, (1999), FEDSM99-6946
  28. 桜井久高, 北海道工業大学大学院, 修士論文,(1994)
  29. 森隼人, 豊田国昭, 日本可視化情報学会全国講演会論文集,(2000), 11-14
  30. 社河内俊彦 他 3 名, 共鳴噴流の流動とかく乱の増幅・制御, 機論 B66-642, (2000), 38-44
  31. 田畑・李・中島・野崎・中村, 傾斜回転切断面をもつ円管から流出する噴流, 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集(Ⅱ),(2003), 141-142
  32. M., Nakashima, T., Tabata, H., Li, T., Nozaki., Study on Jet Flow Issuing From Pipe With Rotating Inclined Section, Proc. FEDSM'03 4TH ASME\_JSME Joint Fluids Engineering Conference, (2003), FEDSM2003-45193, CD-ROM
  33. Zaman, K.B.M.Q and Hussain, A.K.M.F., Taylor Hypothesis and Large-Scale Coherent Structures, J. Fluid Mech., 112(1981), 379-396
  34. 高曾徹 他 3 名, 三次元壁面噴流中の縦渦構造の三次元表示, 可視化情報, vol.11-2, (1991), 169-174

35. Sakakibara, J., Anzai, T., Stereo-PIV Study of Three-Dimensional Vortical Structures in a Forced Plane Jet, The 10<sup>th</sup> International Symposium on Flow Visualization, 2002, CD-ROM, F0376
36. 判別及び最小 2 乗規準に基づく自動式位置選定法 大津 電子通信学会論文誌 J63-D(4), (1980), 349-356
37. 長谷川・輿水・中山・横井, 画像処理の基本技法, 株式会社技術評論社, (1986), 特に 59
38. 三井秀樹, フラクタル科学入門, 日本実業出版社, 1990
39. 伊東・国吉, 可視化情報, Vol.19 No.2, 45-46
40. Kida, S., Takaoka, M. and Hussain, F., *Phys. Fluids*, **A1**, 4(1989), 630-632.
41. 山田日出夫 他 3 名, 渦輪列に関する基本的諸問題, ながれ 5, (1986), 45-53
42. 豊田国昭, 渡辺礼規, 平元理峰, 森隼人, 円形噴流における乱流エネルギー収支の計測, 日本機械学会流体工学部門講演会概要集, (2000), CD-ROM
43. 蒔田秀治 他 3 名, 二次元噴流中における渦構造の三次元変形と乱流遷移の解明, 日本機械学会流体部門講演会論文集, (2003), CD-ROM
44. 白浜芳朗, 豊田国昭, 岡本忠士, 変動圧力測定プローブの開発, 日本機械学会論文集 B 編 59-567, (1993), 3381-3387

## 本研究に関連する発表論文

### 学術論文

- (1) Kuniaki TOYODA and Hayato MORI, Three-dimensional Vortical Structure and Mixing Mechanism of A Circular Jet, Proc. 9<sup>TH</sup> International Symposium on Flow Visualization, 302.1-302.6, (2000)
- (2) 森 隼人, 豊田国昭, 三次元画像解析による円形噴流の渦構造と混合機構に関する研究, 可視化情報, Vol.20 Suppl.No2, 11-14, (2000)
- (3) Kuniaki TOYODA and Hayato MORI, Three-Dimensional Vortical Structure of a Circular Jet Exicted by Axial and Azimuthal Perturbations, Proc. 4<sup>th</sup> Japan-China Workshop on Turbulent Flows, 47-49, (2000)
- (4) Kuniaki TOYODA and Hayato MORI, Three-dimensional Vortical Structure and Mixing Mechanism of a Circular Jet, J. Visualization, Vol.4, No.3, 239-244, (2001)
- (5) 森 隼人, 豊田国昭, 平元理峰, 画像解析による軸対称噴流の混合・拡散評価, 可視化情報, Vol.21 Suppl.No2, 109-110, (2001)
- (6) Hayato MORI, Kuniaki TOYODA and Riho HIRAMOTO, Interaction of Axisymmetric and Streamwise Vortices in a Circular Jet, Proc. 10<sup>TH</sup> International Symposium on Flow Visualization, F0280.CD-ROM, (2002)
- (7) 豊田国昭, 森隼人, 平元理峰, 円形噴流中の軸対称渦と縦渦の干渉,

航空宇宙技術研究所特別資料 SP-56, 77-78, (2002)

- (8) Riho HIRAMOTO, Kuniaki TOYODA and Hayato MORI, Study on Areodynamic Sound Generation by Vortex Motions in a Circular Jet, Proc. Third International Symposium on Turbulent Shear Flow Phenomena, Vol.2,723-728, (2003)
- (9) Hayato MORI, Kuniaki TOYODA and Riho HIRAMOTO, DYNAMICS OF THE STREAMWISE VORTICES IN AN AXISYMMETRIC MIXING LAYER, Proc. FEDSM'03 4TH ASME\_JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM2003-45229, CD-ROM, (2003)
- (10) Riho HIRAMOTO, Kuniaki TOYODA and Hayato MORI, Simultaneous Measurements of Velocity and Fluctuating Static Pressure in a Circular Jet, Proc. FEDSM'03 4TH ASME\_JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM2003-45612, CD-ROM, (2003)
- (11) 森 隼人, 豊田国昭, 平元理峰, 白濱芳朗, 軸対称噴流中の渦輪と縦渦の干渉, 日本機械学会論文集 B 編, (2004 投稿)

## 講演論文

- (1) 森隼人, 豊田国昭, 円形噴流の三次元渦構造の可視化, 日本機械学会 2000 年度年次大会講演論文集(VI), pp101-102, (2000)
- (2) 豊田国昭, 渡辺礼規, 平元理峰, 森隼人, 円形噴流における乱流エネルギー収支の計測, 日本機械学会流体工学部門講演会概要集, CD-ROM, (2000)
- (3) 豊田国昭, 森隼人, 平元理峰, 噴流混合におよぼす渦操作の効果, 日本機械学会年会 2001 講演論文集, 463-464, (2001)
- (4) 森隼人, 豊田国昭, 軸対称噴流の三次元渦構造と混合特性に関する研究, 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集(Ⅱ), 111-112, (2001)
- (5) 豊田国昭, 平元理峰, 森隼人, 変動圧力測定による噴流騒音源探査, 日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集, CD-ROM, (2001)
- (6) 菅原知行, 豊田国昭, 平元理峰, 森隼人, 河原孝司, 軸対称混合層における乱流エネルギー収支と乱流モデルの考察, 日本機械学会道支部第 41 回講演会講演概要集, 176-177, (2001)
- (7) 森隼人, 豊田国昭, 平元理峰, 円形噴流の混合・拡散制御におよぼす渦操作の効果, 日本流体力学会年会 2002, 154-155, (2002)
- (8) 森隼人, 豊田国昭, 平元理峰, 河原孝司, 噴流中の大規模渦構造による攔流エネルギー輸送に関する考察, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集, No.02-1(Ⅲ), 237-238, (2002)



- (9) 河原孝司, 森隼人, 平元理峰, 豊田国昭, 噴流中の渦挙動と乱流エネルギー輸送の関連性に関する研究, 日本機械学会北海道支部会第 42 回講演会講演概要集, No. 022-1, 26-27, (2002)
- (10) 森隼人, 豊田国昭, 赤澤潤, 平元理峰, ボルテックスジェネレータ付二次元ノズル噴流における渦挙動, 日本流体力学会年会 2003 講演論文集, 32-33, (2003)
- (11) 平元理峰, 豊田国昭, 河原孝司, 森隼人, 噴流における乱流エネルギーの圧力輸送に関する考察, 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集, No.03-1(II), 179-180, (2003)
- (12) 森隼人, 赤澤潤, 豊田国昭, 混合層に発達するスパン方向渦と縦渦の干渉, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, CD-ROM, (2003)

## 付録 A 二値化処理プログラム

本研究に用いた画像二値化プログラムを以下に示す。プログラムはメインプログラムと2つのサブプログラムからなる。

### 二値化画像出力プログラム (メインプログラム)

```
%BMP カラー画像→グレースケール&二値化画像 出力プログラム
%-----
clear
close all
fprintf(' Grayscaleing & Threshold program Ver1.1¥n')
pwd
% -- Check all sub directory name ----
fd=dir('*.*');

fd_no=length(fd);
dummy1=0
!md dummy
%不適切なフォルダ名を dummy に置き換えていく
for m=1:fd_no,
    m;
    switch fd(m,1).name
    case '...'
        fd(m).name=' dummy' ;
    case '.'
        fd(m).name=' dummy' ;
```

```

    otherwise

        dummy1=dummy1+1;

    end

end

end

% ----- Move to sub directory -----

for L=1:fd_no, %全フォルダを順々に処理していく.

foldername=fd(L).name;

cd(foldername)

fprintf('change directory%n')

pwd

% ----- Open files -----

FL=dir('*.bmp');

FL_length=length(FL);

for k=1:FL_length, %全ファイルを順々に処理していく.

    k

    FL_length

    pwd

    tic;

    file_name = FL(k).name

    A=imread(file_name,'bmp');

% ----- Output gray scale image -----

B=grayscale(A);

C=uint8(B);

[M1, N1]=size(file_name);

```

```

    outputtif = [ 'gray_' file_name(1:N1-4) '.tif'];
    outputbmp = [ 'T8_' file_name(1:N1-4) '.bmp'];
    imwrite(C,outputtif,'Compression','none');
[X, Y]=size(B);

% ----- Threshold -----
    B2=threshold7(A, C);

% ----- Output threshold image -----
disp('Output');
F=prebmp2(X, Y, B2);
imwrite(F,outputbmp);
staus = fclose('all')
toc
end
cd ..
end
!rmdir dummy
fprintf(' finish!\n')
exit

```

二値化画像出力プログラム (サブプログラム : 二値化計算)

```
function B2=threshold7(A,B)

% Threshold of gray scale matrix.

[X, Y]=size(B);

% ----- Count each color pixel -----

disp('Count each color pixel')

CLR=zeros(256, 1);
RED=zeros(256, 1);
GREEN=zeros(256, 1);
BLUE=zeros(256, 1);
L=zeros(256, 1);
P=zeros(256, 1);
H=zeros(256, 1);
HP=zeros(256, 1);
LAV=zeros(256, 1);
HAV=zeros(256, 1);
T=zeros(X, Y);
D=zeros(X, Y);
Dmax=0;
Nmax=0;
N=0;
for c=1:256,
    %CLR(c)=sum(B(:)==c-1);
    RED(c)=sum(sum(A(:, :, 1)==c-1));
```

```

GREEN(c)=sum(sum(A(:, :, 2)==c-1));
BLUE(c)=sum(sum(A(:, :, 3)==c-1));
end
BR=RED+BLUE+GREEN;
%subplot(5, 1, 1)
% plot(0:255, RED)
%subplot(5, 1, 2)
% plot(0:255, GREEN)
%subplot(5, 1, 3)
%plot(0:255, BLUE)
%subplot(5, 1, 4)
%plot(0:255, CLR(:, 1))
%subplot(5, 1, 5)
%plot(0:255, BR)

% ---- Calculation of threshold ----
disp(' Calculation of threshold ')
for c=1:256,
    for c2=1:c,
        L(c)=L(c)+BR(c2)*c2;
        P(c)=P(c)+BR(c2);
    end

    for c3=c:256,
        H(c)=H(c)+BR(c3)*c3;
        HP(c)=HP(c)+BR(c3);
    end
end

```

```

end

if P(c)==0
    LAV(c)=0;
else
    LAV(c)=L(c)/P(c);
end

if HP(c)==0
    HAV(c)=0;
else
    HAV(c)=H(c)/HP(c);
end

D=P(c)*HP(c)*(LAV(c)-HAV(c))^2;

if Dmax<D
    Nmax=c;
    Dmax=D;
end

end

Nmax

% ----- Threshold -----
disp(' Threshold ')

o=find (A>=Nmax-1);
z=find(A<Nmax-1);

```



```
A(o)=1;
```

```
A(z)=0;
```

```
B2=grayscale(A);
```

```
BW=find (B2>=0.3);
```

```
BB=find (B2<0.3);
```

```
B2(BW)=255;
```

```
B2(BB)=0;
```

```
% ----- Output threshold image -----
```

二値化画像出力プログラム (サブプログラム: グレースケール化)

```
function B=grayscale(A)
```

```
% ----- Output gray scale image -----
```

```
B=(double(A(:, :, 1))+double(A(:, :, 2))+double(A(:, :, 3)))/3;
```

二値化画像出力プログラム (サブプログラム: 画像出力)

```
function F=prebmp2(X, Y, T)
```

```
% ----- merge for making bmp -----
```

```
E=zeros(X, Y, 3);
```

```
E(:, :, 1)=T;
```

```
E(:, :, 2)=T;
```

```
E(:, :, 3)=T;
```

```
F=uint8(E);
```

## 付録 B. フラクタル次元算出プログラム

%境界線フラクタル次元算出プログラム (bmp 版) by H. Mori

%Boxcounting ver

clear

close all

clc

ct=1:sss=1;

fprintf('-----\n')

fprintf(' Calculation of fractal dimension program Ver1.26 H.Mori 2001/07/26\n')

fprintf(' (Box-counting Ver)\n')

fprintf('-----\n')

sss = input('Input number.\n 1. Sequentail files\n 2. Each filename length is  
difference\n');

fprintf('\n-----\n')

% -- Check all sub directory name ----

fd=dir('\*.\*');

fd\_no=length(fd);

% $\epsilon$  (物差し長さ) を定義

```

ep=[2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 16, 20, 24, 30, 40, 48, 60, 80, 120, 240];

% ----- Move to sub directory -----
for md=1:fd_no, %全フォルダを順々に処理していく.
%md
folder=fd(md).name;
switch fd(md,1).name
    case '...'
        %fprintf(' Dummy¥n')
    case '.'
        %fprintf(' Dummy¥n')
    otherwise,
        cd(folder);
        !del *.txt
        !del *.fft
end

fprintf(' Folder=%s¥n-----¥n', pwd)

% ----- Open files -----

F=dir('*.bmp');
FL_length=length(F);

switch sss

```

```

case 1

    switch isempty(F)

        case 1

            %dummy

        otherwise

            clear fname

            for fff=1:FL_length, %全ファイルを順に並べる.
                fname(fff, :)=F(fff).name;
            end

            fname=sortrows(fname);

        end

    otherwise

        %dummy

    end

for k=1:FL_length, %全ファイルを順々に処理していく.

    tic

    if sss==1

        file_name = fname(k, :);

    else

        file_name = F(k).name;

    end

    fprintf('File_no=%g/%g, File=%s\n\n', k, FL_length, file_name)

    C=imread(file_name, 'bmp');

```

```

[X, Y, Z]=size(C);

%--- 画像のビット数 (8bit or 1bit) を統一する ---
P0=max(max(C(:)));
if P0 == 1;
    chb=(C==1);
    chw=(C==0);
    C(chw)=255;
    C(chb)=0 ;
end

%1bit-white:0, black:1, photoshop
%8bit-white:255, black:0, Matlab

B=zeros(X+2, Y+2);
B(1:X+2, 1:Y+2)=255;
for i=1:X,
    for j=1:Y,
        B(i+1, j+1)=C(i, j, 1);
    end
end

%convert

B2=zeros(X, Y);
B2(1:X, 1:Y)=255;

```

```
disp('Convert boundary pixel')
```

```
for i=2:X+1,
```

```
    for j=2:Y+1,
```

```
        %
```

```
        if B(i, j) == 0
```

```
            if B(i-1, j) == 255%for 1bit count
```

```
                B2(i-1, j-1)=1;
```

```
            end
```

```
            if B(i+1, j) == 255
```

```
                B2(i-1, j-1)=1;
```

```
            end
```

```
            if B(i, j+1) == 255
```

```
                B2(i-1, j-1)=1;
```

```
            end
```

```
            if B(i, j-1) == 255
```

```
                B2(i-1, j-1)=1;
```



```

        end

    end

end

end

```

```

%----- 解像度変換 -----

```

```

for epn=1:19 ;

```

```

    % [X, Y, Z]=size(B2);

```

```

    %変換座標の定義

```

```

    XT=1:(X/ep(epn));

```

```

    YT=1:(Y/ep(epn));

```

```

    XT=XT*ep(epn);

```

```

    YT=YT*ep(epn);

```

```

    A=zeros(X/ep(epn), Y/ep(epn));

```

```

        for i=1:X/ep(epn),

```

```

            for j=1:Y/ep(epn),

```

```

                A(i, j)=mean(reshape(B2(XT(i)-ep(epn)+1:XT(i), YT(j)-ep(epn)+1:YT(j))), 1, prod(size(B2(
                XT(i)-ep(epn)+1:XT(i), YT(j)-ep(epn)+1:YT(j))))));
            end
        end
    end
end

```

```

end

end

% ----- Count boundary pixel -----
NE(ep(epn))=sum(A(:)~=255);%count black box

% ----- Output -----

[M1, N1]=size(file_name);
output = [ file_name(1:N1-4)];
outputbl1 =[ file_name(1:N1-4), '_output.txt'];
outputfft1 =[ file_name(1:N1-4), '_data.FFT'];

switch (NE(ep(epn)))
    case 0
        fprintf(' ep=%3.0f,          NE=%6.0f,          logNE/logep=          -Inf,
time=%6.2f¥n', ep(epn), NE(ep(epn)), toc)

        fid=fopen(outputbl1, 'at'); %計算された結果を収めるファイルを開いている (作
っている).
        fprintf(fid, '%s. %u, %u, %s, ¥n', output, NE(ep(epn)), ep(epn), ' -Inf');
        staus = fclose('all');
        fid=fopen(outputfft1, 'at'); %FFT プログラム用のデータを収めるファイルを開い
ている (作っている).
        fprintf(fid, '%u, %u, %u, %s, ¥n', k, NE(ep(epn)), ep(epn), ' -Inf');

```

```

    staus = fclose('all');

    otherwise

    fprintf(' ep=%3.0f,           NE=%6.0f,           logNE/logep=%7.3f,
time=%6.2f\n', ep(epn), NE(ep(epn)), log(NE(ep(epn)))/log(ep(epn)), toc)

    fid=fopen(outputbl1,'at'); %計算された結果を収めるファイルを開いている（作
っている）。

    fprintf(fid,' %s, %u, %u, %u, %n', output, NE(ep(epn)), ep(epn), log(NE(ep(epn)))/log(ep(
epn)));

    staus = fclose('all');

    fid=fopen(outputfft1,'at'); %FFT プログラム用のデータを収めるファイルを開い
ている（作っている）。

    fprintf(fid,' %u, %u, %u, %u, %n', k, NE(ep(epn)), ep(epn), log(NE(ep(epn)))/log(ep(epn)
));

    staus = fclose('all');

end

end

%----- Calculation of fractal dimension -----

FDD=dlmread(outputfft1);

FDD2=FDD;

FDD2(any(isinf(FDD2)'),:)=[];

FDD3=zeros(19,2);

```

```

if isempty(FDD2)==1
    FD=0;
else
    FDD3(:,1)=log(FDD2(:,3));
    FDD3(:,2)=log(FDD2(:,2));

    FDD3(any(isinf(FDD3)'),:)=[];
    FDD4=polyfit(FDD3(:,1),FDD3(:,2),1);
    FD=-FDD4(1,1);
end

fid=fopen('Fractal_D_out.csv','at');
fprintf(fid,'%s, %u\n',file_name,FD);
staus = fclose('all');

fid=fopen('Fractal_D_out.avc','at');
fprintf(fid,'%u, %u\n',ct,FD);
staus = fclose('all');

fprintf(' %n D= %4.3f, time= %g\n-----%n',FD,toc)

fid=fopen('c:\Timelog.txt','at'); %計算時間のログを取めるファイルを開いている
(作っている).

fprintf(fid,'%u, %s, %6.2f\n',ct,output,toc);
staus = fclose('all');
ct=ct+1;

```

```
end
```

```
%-- フォルダ内のファイルを全部計算した後の処理 --
```

```
switch fd(md,1).name
```

```
    case '...'
```

```
        %Dummy
```

```
    case '.'
```

```
        %Dummy
```

```
    otherwise,
```

```
        cd ..
```

```
end
```

```
end
```

```
% ----- Calculation of average dimension at station -----
```

```
cd
```

```
fd2=dir('*.*');
```

```
fd_no2=length(fd2);
```

```
% ----- Move to sub directory -----
```

```
for md2=1:fd_no2, %全フォルダを順々に処理していく.
```

```
    folder2=fd2(md2).name;
```

```
        switch fd2(md2,1).name
```

```

    case '...'
        fprintf(' Dummy¥n' )
    case '.'
        fprintf(' Dummy¥n' )
    otherwise,
        cd(folder2);
end

fprintf(' Folder2=%s¥n-----¥n' , pwd)

% ----- Open files -----

F2=dir('*.avc');
FL_length2=length(F2);

for k2=1:FL_length2, %全ファイルを順々に処理していく.

    %tic

    file_name2 = F2(k2).name;

    C=dlmread(file_name2);

    %C=C'

    DAV=mean(C(:,2))

    [M2, N2]=size(file_name2);

    output2 = [ file_name2(1:N2-4)];

    outputavd2 =[ folder, output2, '_data.avd'];

```

```

fid=fopen(outputavd2,'at');
fprintf(fid,'%u\n',DAV);
staus = fclose('all');

cd ..

fid=fopen('avdlist.csv','at');
fprintf(fid,'%s,%u\n',outputavd2,DAV);
staus = fclose('all');

cd(folder2);

end

%-- フォルダー内のファイルを全部計算した後の処理 --
switch fd2(md2,1).name
    case '...'
        %Dummy
    case '.'
        %Dummy
    otherwise,
        cd ..
end

end

```

```
% ----- End -----
```

```
fprintf(' finish!\n')
```

```
%exit
```



## 付録 C. 循環算出プログラム

```
clc
close all
clear
Ue=6.4;H=0.049;clv=128;
[file_name,pathname]=uigetfile('*.*.csv','');
cd(pathname)
fd = fopen(file_name);%ファイル
D = fscanf(fd,'%f,%f,%f,%f,%f,%f,%f',[7 inf]);
fclose(fd);
X=D(1,:);
Y=D(2,:);
Z=D(3,:);
P=D(4,:);
U=D(5,:);
V=D(6,:);
W=D(7,:)*(Ue/H);
loop=size(D(7,:),2);
%-- Measurment Point Mesh Distinction --
Fxi=0:Fyi=0:Fzi=0;%zero_clear
for l2=1:loop-1

    dumdx=X(l2+1)-X(l2);
    if Fxi<=dumdx
        Fxi=dumdx;
    end

    dumdy=abs(Y(l2+1)-Y(l2));
    if Fyi<=dumdy
        Fyi=dumdy;
    end

    dumdz=abs(Z(l2+1)-Z(l2));
    if Fzi<=dumdy
        Fzi=dumdy;
    end
end
```

```

    end
clear !2 dumdx dumdy dumdy;
%-----

%-- Calc Point Mesh Distinction --
sx=max(size(X));
sy=max(size(Y));
sz=max(size(Z));

mxx=max(X);
mxy=max(Y);
mxz=max(Z);

mnx=min(X);
mny=min(Y);
mnz=min(Z);

if Fxi==0
    elemx=36;
else
    elemx=round((mxx-mnx)/Fxi+1);
end

elemy=round((mxy-mny)/Fyi+1);
elemz=round((mxz-mnz)/Fzi+1);

%-----

%-- Calc Point Mesh Distinction --
Wcalc    =zeros(elemx,elemy,elemz);

Xcalc=(X-mnx)/Fxi+1;
Ycalc=round((Y-mny)/Fyi+1);
Zcalc=round((Z-mnz)/Fzi+1);

```

```

for i=1:loop
    Wcalc(round(Xcalc(i)), round(Ycalc(i)))=W(i);
end

```

```

for i=1:elemx
XD(i)=mxx+Fx*(i-1);
end

```

```

for i=1:elemy
YD(i)=mny+Fy*(i-1);
end

```

```

lv=2;
elemx2=2^lv*(elemx-1)+1;
elemy2=2^lv*(elemy-1)+1;

```

```

for i=1:elemx2
XD2(i)=mxx+(mxx-mxx)/(elemx2-1)*(i-1);
end

```

```

for i=1:elemy2
YD2(i)=mny+(mny-mny)/(elemy2-1)*(i-1);
end

```

```

figure(1)
set(1, 'PaperType', 'a4letter')
set(1, 'PaperUnits', 'centimeters')
set(1, 'PaperPosition', [1 3 20 25])
%set(1, 'InvertHardCopy', 'off')

```

```

subplot(3, 1, 1)
contourf(XD, YD, Wcalc, clv): shading flat;
xlabel('X/H')
ylabel('Y/H')
colorbar('horiz');

```

```

subplot(3, 1, 2)

```

```

pcolor(Wcalc')
xlabel(' i')
ylabel(' j')
colorbar(' horiz');

[xx yy]=ginput(2);
xx=round(xx);
yy=round(yy);

mnxx=min(xx);
mxxx=max(xx);
mnyy=min(yy);
mxyy=max(yy);
fprintf(' x: %.2f-%.2f (i: %d-%d) \nny: %.2f-%.2f
(j: %d-%d) \n', XD(mnxx), XD(mxxx), mnxx, mxxx, YD(mnyy), YD(mxyy), mnyy, mxyy)
fprintf(' x: %.2f-%.2f (mm) \nny: %.2f-%.2f
(mm) \n', XD(mnxx)*H*1000, XD(mxxx)*H*1000, YD(mnyy)*H*1000, YD(mxyy)*H*1000)
fprintf(' area (BOX) : %.2f (mm^2) \n', abs((XD(mnxx)*H*1000)-(XD(mxxx)*H*1000))*abs((YD(mnyy)*H*1000)-(YD(mxyy)*H*1000)))

gx=max(xx)-min(xx)+1;
gy=max(yy)-min(yy)+1;

kk=zeros(gx,gy);

for j=1:gy
    for i=1:gx

        if (i==1)|(i==gx)
            kk(i,j)=1;
        end

        if (j==1)|(j==gy)
            kk(i,j)=1;
        end
    end
end

```

```

if (i~=1)&(i~=gx)

kk(i, j)=2;
end

if (j~=1)&(j~=gy)

kk(i, j)=2;
end

if (i>=2)&(i<=gx-1)
    if (j>=2)&(j<=gy-1)
        kk(i, j)=4;
    end
end

end

end

subplot(3, 1, 2)
contourf(XD(mnxx:mxxx), YD(mnyy:mxyy), Wcalc(mnxx:mxxx, mnyy:mxyy)', c|v);
xlabel('X/H')
ylabel('Y/H')
shading flat;
hold on:maxw=max(max(Wcalc(mnxx:mxxx, mnyy:mxyy)));
caxis([0 maxw]);
colorbar('horiz');
[C, h2]=contour(XD(mnxx:mxxx), YD(mnyy:mxyy), Wcalc(mnxx:mxxx, mnyy:mxyy)', 1, 'k');
clabel(C, h2);
hold off

subplot(3, 1, 3)

text(0.1, 0.9, ['Max  $\forall\omega$ =' , num2str(maxw)])
text(0.1, 0.7, ['Max  $\forall\omega/2$ =' , num2str(maxw/2)])

```

```

maxdm= max(size(C));
fprintf(' MaxDIM:%d\n', maxdm)

Area=polyarea(C(1, 2:maxdm)*H, C(2, 2:maxdm)*H);
fprintf(' Area (mm^2) :%. 2f\n', Area*1000*1000)
text(0.1, 0.5, [' Area=', num2str(Area*1e3*1e3), ' (mm^2)'])

ED=sqrt(Area/pi)*2*1000;
fprintf(' E-Diameter (mm) :%. 2f\n', ED)
fprintf(' E-Diameter*1. 2 (mm) :%. 2f\n', ED*1. 2)
text(0.1, 0.3, [' Diameter of vortex core=', num2str(ED*1. 2), ' (mm)'])

k2=kk';
pro=k2.*Wcalc(mnxx:mxxx, mnyy:mxyy)';
gamma=(Fxi*Fyi*H^2)/4*sum(pro(:));
fprintf(' \nGamma=%. 3f (cm^2)\n', gamma*1e4)
gamma3=maxw*(ED/(10^3)*1. 2)^2*pi/4;
fprintf(' Gamma3=%. 3f (cm^2)\n', gamma3*1e4)

text(0.6, 0.9, [' \nGamma=', num2str(gamma*1e4), ' (cm^2/s)'])
text(0.6, 0.7, [' \nGamma3=', num2str(gamma3*1e4), ' (cm^2/s)'])

axis off
v_viscosity=(15.12+16.04)/2*10^-6: %25deg (実験毎に変更)
%14.21-10deg
%15.12-20deg
%16.04-30deg

%p1=64*(pi*v_viscosity/gamma2)^(0.77)*(ED/10^3*1.2);
%p2=64*(pi*v_viscosity/gamma3)^(0.77)*(ED/10^3*1.2);

p1=64*(gamma./(pi*v_viscosity)).^(-0.77).*(ED*1.2);%mm
p2=64*(gamma3./(pi*v_viscosity)).^(-0.77).*(ED*1.2);%mm

fprintf(' Pitch (Gamma) (mm)=%. 3f\n', p1)

```

```

fprintf(' Pitch(Gamma3) (mm)=%. 3f\n', p2)
text(0.6,0.5,[' Pitch(\%Gamma)=', num2str(p1), '(mm)'])
text(0.6,0.3,[' Pitch(\%Gamma3)=', num2str(p2), '(mm)'])
text(0.1,0.05,[' File:', file_name], ' fontsize', 14)

chkprt = menu('Do you need printing?', 'Print out', 'EXIT');

if chkprt==1:
%set(1, 'PaperType', 'a4letter')
%set(1, 'PaperUnits', 'centimeters')
%set(1, 'PaperPosition', [1 3 20 25])
print -painter
end

%close

```

## 付録D アンサンブル平均プログラム

アンサンブル平均プログラム (メインプログラム)

%Phase lock average processing program V0.99 by H.Mori

```
%-----  
clear %clear all parameter  
clc %clear screen  
close all  
OLDT=0;  
%-----  
fprintf('Phase lock average processing program V0.99f2 by H.Mori\n')  
  
[filename,pathname] = uigetfile('*.lin', 'ファイルリストの選択');  
[filename2,pathname2] = uigetfile('*.csv:*.DTA:*.txt', '座標リストの選択');  
fprintf('Path is %s\n\n',pathname)  
cd(pathname)  
  
path1='Phase-data099f2';  
status=mkdir(path1);  
if status==2  
    cd(path1)  
    delete *.*  
    cd ..  
end  
CH = input('Input ch.\n>>');  
  
F2=input('Input high pass freq[Hz].\n>>');  
F1=input('Input low pass freq[Hz].\n>>');  
SL=input('Input smp rate.\n>>');% Smp rate  
  
if CH~=3  
    fprintf('Input AMP product.\n')  
    AMPmaker = input('1.ACO or 2.BK\n>>');  
    PSRMS = input('Input pistonphone RMS[V]\n>>');  
    FS = input('Input full scale range when you read RMS.\n>>');  
    FS = 1/FS;
```



```
K=PSRMS/31.69/FS:
```

```
fprintf('%5.3f[mv/Pa]¥n,K*1000')
```

```
AMP = input('Input full scale range when you started measurement.¥n>>');
```

```
AMP = 1/AMP;
```

```
AMP2 = input('AMP ratio¥n>>');
```

```
AMP = AMP*AMP2;
```

```
fprintf('AMP GAIN= X%.2f¥n', AMP)
```

```
end
```

```
tic;
```

```
%----- Load File List -----
```

```
cd(pathname2)
```

```
fd = fopen(filename2);%座標ファイルの読み込み
```

```
D = fscanf(fd, '%f, %f, %f', [3 inf]);
```

```
fclose(fd);
```

```
chk=sum(size(D));
```

```
switch chk
```

```
case 2
```

```
    fd = fopen(FIL2.name);%座標ファイルの読み込み
```

```
    D = fscanf(fd, '%f %f %f', [3 inf]);
```

```
    fprintf('space¥n')
```

```
    fclose(fd);
```

```
otherwise
```

```
    fprintf('dot¥n')
```

```
end
```

```
D=D';
```

```
cd(pathname)
```

```
%-----
```

```
fd = fopen(filename);%ファイルリストの読み込み
```

```
str = fscanf(fd, '%c', [inf]);
```

```
fclose(fd);
```

```
return=findstr(str, setstr(13));%読み込んだ文字列の改行コードを検索 Labview data
```

```

rs=size(retum);
rs=rs';

FILE(15001, 40)='M':%文字配列確保用のダミー
%↑15000までのファイル数に対応

k=1;
for k2=1:retum(k)-1
FILE(k, k2)=[str(k2)];
end

for k=2:rs(2)
for k2=retum(k-1)+1:retum(k)-1
FILE(k, k2-retum(k-1))=[str(k2)];
end
end

%----- Load Data File -----
i=1;%順にファイルをまわす変数
inter=1;
while i~=rs(2)+1
inter=20;
if inter==interset
CalcT=toc-OLDT;
fprintf(' i=%6.0u/%6.0u, %.0fsec, Remaining time
is %.2fmin\n', i, rs(2), toc, CalcT*(rs(2)-i)/60/interset)
OLDT=toc;
inter=0;
end

prefile=FILE(i, :);
fend=min(findstr(prefile, prefile(38)))-1;
filename3=prefile(1:fend);

C=readdata5(filename3, CH);
xx=D(i, 1);

```

```

yy=D(i, 2);
zz=D(i, 3);

%-Bandpass
[CH2, XA]=size(C);

FY=fft(C(1, :));

index1=round(F1/SL*XA);
index2=round(XA-F1/SL*XA);
lowpass=ones(size(FY));
lowpass(index1+1:index2-1)=zeros(size(lowpass(index1+1:index2-1)));

index1=round(F2/SL*XA);
index2=round(XA-F2/SL*XA);
highpass=zeros(size(FY));
highpass(index1:index2)=ones(size(highpass(index1:index2)));

fy = real(ifft(lowpass.*highpass.*FY));

C(1, :)=fy;
%--

%----- Read Data & Data Convert -----
cd(path1)
if CH~=3
switch AMPmaker
    case 2
        C(2, :)=C(2, :)*(-1);
end
C(2, :)=C(2, :)/K/AMP;%アンプの値を物理量に変換
end

if i==1
    plot(C(1, 1:750))
    THLV = input('Input threshold level. %n>>');

```

```
fd0=fopen(' 00.csv', 'at');
fd1=fopen(' 01.csv', 'at');
fd2=fopen(' 02.csv', 'at');
fd3=fopen(' 03.csv', 'at');
fd4=fopen(' 04.csv', 'at');
fd5=fopen(' 05.csv', 'at');
fd6=fopen(' 06.csv', 'at');
fd7=fopen(' 07.csv', 'at');
fd8=fopen(' 08.csv', 'at');
fd9=fopen(' 09.csv', 'at');
```

```
fd10=fopen(' 10.csv', 'at');
fd11=fopen(' 11.csv', 'at');
fd12=fopen(' 12.csv', 'at');
fd13=fopen(' 13.csv', 'at');
fd14=fopen(' 14.csv', 'at');
fd15=fopen(' 15.csv', 'at');
fd16=fopen(' 16.csv', 'at');
fd17=fopen(' 17.csv', 'at');
fd18=fopen(' 18.csv', 'at');
fd19=fopen(' 19.csv', 'at');
```

```
fd20=fopen(' 20.csv', 'at');
fd21=fopen(' 21.csv', 'at');
fd22=fopen(' 22.csv', 'at');
fd23=fopen(' 23.csv', 'at');
fd24=fopen(' 24.csv', 'at');
fd25=fopen(' 25.csv', 'at');
fd26=fopen(' 26.csv', 'at');
fd27=fopen(' 27.csv', 'at');
fd28=fopen(' 28.csv', 'at');
fd29=fopen(' 29.csv', 'at');
```

```
fd30=fopen(' 30.csv', 'at');
fd31=fopen(' 31.csv', 'at');
fd32=fopen(' 32.csv', 'at');
fd33=fopen(' 33.csv', 'at');
```

```

        fd34=fopen('34.csv','at');
        fd35=fopen('35.csv','at');
end

%-----
CHP=CHPOINT(C(1,:),THLV);%CHPOINT is org function

%判定周期の確認
CHPEND=size(CHP,1);

%

T=size(CHP,1);
Ind=zeros(36*(T-1),1);
%1周期を36分割したデータをT-1周期分作成
TiP=zeros(T-1,1);

for Ti=1:T-1
    TiP(Ti)=(CHP(Ti+1)-CHP(Ti))/36;%TiPで各周期の長さを算出
    if Ti==1
        Ind(((36*(Ti-1))+1):(36*Ti))=[1:36]*TiP(Ti);%TiPは各周期の長さを位相で割ったもの
    else
        Ind(((36*(Ti-1))+1):(36*Ti))=[1:36]*TiP(Ti)+Ind((36*(Ti-1)));
    end
end

Ind=Ind+CHP(1);%CHP(1)はy切片
Ind2=round(Ind);%Indを整数化
Ind3=Ind-Ind2;%IndをInd2間の勾配を求めInd2の補償計算を行うのに使う

%-----

Phdata=zeros(3,36*(T-1));
refdata=zeros(1,36*(T-1));

Phdata2=zeros(3,36);
refdata2=zeros(1,36);

```

```

for i2=1:(36*(T-1))
    if Ind3(i2)==0
        refdata(1, i2)= C(1, Ind2(i2));
        Phdata(1:3, i2)= C(2:4, Ind2(i2));
    elseif Ind3(i2)<0
        refdata(1, i2)= ((1+Ind3(i2))*C(1, Ind2(i2)))+((-Ind3(i2))*C(1, Ind2(i2)-1));
        Phdata(1:3, i2)= ((1+Ind3(i2))*C(2:4, Ind2(i2)))+((-Ind3(i2))*C(2:4, Ind2(i2)-1));
    elseif Ind3(i2)>0
        refdata(1, i2)= ((1-Ind3(i2))*C(1, Ind2(i2)))+((Ind3(i2))*C(1, Ind2(i2)+1));
        Phdata(1:3, i2)= ((1-Ind3(i2))*C(2:4, Ind2(i2)))+((Ind3(i2))*C(2:4, Ind2(i2)+1));
    end
end
end

```

```

for i2=1:(T-1)
    refdata2(1, 1:36) = refdata2(1, 1:36)+ refdata(1, (36*(i2-1))+1:(36*i2));
    Phdata2(1:3, 1:36) = Phdata2(1:3, 1:36)+ Phdata(1:3, (36*(i2-1))+1:(36*i2));
end

```

```

Phdata2 = Phdata2/(T-1);
refdata2 = refdata2/(T-1);

```

```

clear Phdata refdata Ind Ind2 Ind3

```

```

%-----
fprintf(fd0, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 1));
fprintf(fd1, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 2));
fprintf(fd2, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 3));
fprintf(fd3, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 4));
fprintf(fd4, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 5));
fprintf(fd5, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 6));
fprintf(fd6, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 7));
fprintf(fd7, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 8));
fprintf(fd8, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 9));
fprintf(fd9, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 10));

fprintf(fd10, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 11));

```

```

fprintf(fd11, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 12));
fprintf(fd12, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 13));
fprintf(fd13, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 14));
fprintf(fd14, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 15));
fprintf(fd15, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 16));
fprintf(fd16, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 17));
fprintf(fd17, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 18));
fprintf(fd18, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 19));
fprintf(fd19, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 20));

fprintf(fd20, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 21));
fprintf(fd21, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 22));
fprintf(fd22, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 23));
fprintf(fd23, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 24));
fprintf(fd24, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 25));
fprintf(fd25, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 26));
fprintf(fd26, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 27));
fprintf(fd27, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 28));
fprintf(fd28, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 29));
fprintf(fd29, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 30));

fprintf(fd30, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 31));
fprintf(fd31, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 32));
fprintf(fd32, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 33));
fprintf(fd33, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 34));
fprintf(fd34, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 35));
fprintf(fd35, '%f, %f, %f, %f, %f, %f\n', xx, yy, zz, Phdata2(:, 36));

clear xx yy zz Phdata2

cd ..
i=i+1;inter=inter+1;
end

cd(path1)
staus = fclose('all');
cd ..

```

%-----

```
plot([0:35], refdata2(1, :))
```

```
fprintf(' finish %ni=%6.0u/%6.0u, %ntime is %7.1fmin\n', i-1, rs(2), toc/60)
```



## アンサンブル平均プログラム (周期判定ファンクション)

```
function CHP=CHPOINT(A, THLV)
```

```
MX=max(size(A));
```

```
CHK=zeros(MX, 1);
```

```
for ii=1:MX-1
```

```
    if A(ii) < THLV;
```

```
        if A(ii+1) >= THLV;
```

```
            CHK(ii+1)=1;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
CHP=find(CHK);
```

## アンサンブル平均プログラム (データ読み込みファンクション)

```
function C=readdata5(filename, CH)

%1~4ch 対応

%1~2ch の場合, 単純読込
%3ch の場合, l, X 型対応
%4ch の場合, l, 圧力, X 型対応

fid=fopen(filename);
switch CH
case 1
    A = fscanf(fid, '%f', [inf]) ;
case 2
    A = fscanf(fid, '%f, %f', [inf]) ;
case 3
    A = fscanf(fid, '%f, %f, %f', [inf]) ;
case 4
    A = fscanf(fid, '%f, %f, %f, %f', [inf]) ;
end
fclose(fid);

%----- Read Data & Data Convert -----

AS=size(A);          %AS は A のヘッダー+データ数
AD=A;
clear A;
%98 では%AD=A(5:AS(1));%AD は A のデータ部分のみ
CS=AS(1)/CH;
%98 では%CS=A(4)-1;      %CS は AD のデータ数
C1=AD;  %C1 は A のデータ部分のみ
clear AD;
XA=CS;

MX=CS;%[MY, MX]=size(C1);%MX=CS(1)/CH;
```

```

C=zeros(4,MX);
C1=reshape(C1,CH,MX);

for ch=1:CH
C(ch,:)=C1(ch,:);
end
clear C1;

%C=C/2048*10;

if CH >= 5
fprintf('Error too much ch number¥n')
end

switch CH
case 3
%2ch,3ch に X 型のデータがくると仮定している
%リニアライズ微調整
%C(2,:)=C(2, :)*0.9903;
%C(3,:)=C(3, :)*1.0168*0.9903;
%
u=(C(2, :)+C(3, :)) : %/(2*cos(45/360*2*pi));
v=(C(2, :)-C(3, :)) : %/(2*sin(45/360*2*pi));
C(2, :)=0;
C(3, :)=u;
C(4, :)=v;

case 4
%3ch,4ch に X 型のデータがくると仮定している
u=(C(3, :)+C(4, :)) : %/(2*cos(45/360*2*pi));
v=(C(3, :)-C(4, :)) : %/(2*sin(45/360*2*pi));
C(3, :)=u;
C(4, :)=v;
end

```

## 謝辞

本論文は、北海道工業大学大学院 工学研究科 機械システム工学専攻 熱流体研究室 において著者が行った研究をまとめたものです。研究を進めるにあたり、豊田国昭教授より丁寧なご指導を頂き、謹んで感謝の意を表します。またご多忙中、論文作成のための御校閲と貴重なご助言を賜りました藤原康博教授、登坂茂ならびに白濱芳郎教授に謹んで感謝の意を表します。そして研究を進める上で多くのご助言を頂きました平元理峰講師、そして、辛苦を共にした両坂光君、赤澤潤君、中村秀隆君ら複合科学研究室・エネルギービークル研究室の学生諸君に深くお礼を申し上げ謝辞と致します。

平成 16 年 3 月 森 隼人