

高速炉配管合流部における
サーマルストライピング条件の解析的検討 (VII)
—乱流プロモータによる混合促進効果—
(研究報告)

2004年6月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

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

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

2004

2100

(K0)

高速炉配管合流部における
サーマルストライピング条件の解析的検討（VII）
—乱流プロモータによる混合促進効果—
(研究報告)

田中 正暁¹、村上 諭²、
村松 壽晴³

要 目

温度の異なる流体が混合することにより生じる温度変動により、構造材内部に熱疲労が発生する現象（サーマルストライピング現象）を評価することは重要な課題である。特に、振幅の大きな温度変動が高い繰り返し数で構造材に作用すること（高サイクル熱疲労）に対して十分考慮する必要がある。また、比較的低い周波数の流体温度ゆらぎは、構造材に対する影響が大きいため、T配管合流部の設計を行う際には、これら高振幅成分と低周波成分の発生条件に対して十分考慮する必要がある。

そこで核燃料サイクル開発機構では、T字配管合流部設計の自由度を広げる観点より、流体温度ゆらぎの高振幅成分と低周波成分を積極的に低減させることができ可能な流体混合促進機構（乱流プロモータ）に関する基礎研究を行っている。本報では、当該基礎実験を対象とした実験解析結果について報告する。本研究では、乱流プロモータによる混合促進効果の有効性の確認と特性の一般化を図ることを目的とし、さらに、高速炉プラント設計の合理化に資することを目的としている。本報告では、準直接シミュレーションコード（DINUS-3）を用い、この基礎実験を対象とした実験解析を実施し、数値シミュレーションにより流れ場を再現できることを確認すると共に、乱流プロモータの混合促進効果の有効性について検討を行った。得られた結果は以下通りである。

- (1) 可視化実験で観測された流動パターンのうち3種類を対象とした実験解析を実施した。衝突流（Pattern-C）、偏向流（Pattern-B1 および Pattern-B2）の流れ場を数値シミュレーションにより再現できることを確認した。
- (2) 乱流プロモータを設置することによって流路断面積が狭められ、主配管流が乱流プロモータ斜面上を加速されて流れることにより、枝配管流の乱流プロモータへの衝突を妨げ、衝突流となる枝配管流速条件が緩和される。
- (3) 乱流プロモータの後縁では、流れが剥離することによって、その下流側で渦を生じており、流体混合を促進している。ただし、枝配管の反対側にある上側の乱流プロモータ背後では、温度の異なる主配管流と枝配管流とが混合しながら主配管表面に付着するため、振幅の大きな温度変動を生じる可能性がある。

*1 サイクル機構大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究G r

*2 カストマシステム株式会社

*3 サイクル機構 F B Rシステム推進部

**Numerical Investigation on Thermal Striping Conditions
for a Tee Junction of LMFBR Coolant Pipes (VII)**
—Effect of the “Turbulence Promoter” on the Fluid Mixing—
(Research report)

Masa-aki TANAKA*, Satoshi MURAKAMI**,
 Toshiharu MURAMATSU***

Abstract

It is important to evaluate thermal-striping phenomena, which is the thermal fatigue issue in the structure generated by the temperature fluctuation due to the fluid mixing. Especially, the high amplitude and the high number of repetitions of the temperature fluctuation are needed to take into consideration. Moreover, it is necessary to consider the comparatively low frequency components of fluid temperature fluctuation, since the influence to structure material is large. Therefore, it is required to know the generating mechanism and conditions of the high amplitude and the low frequency component of fluid temperature fluctuation.

In Japan Nuclear Cycle Development Institute, basic research on the promote system for fluid mixing is conducted, which system (“Turbulence promoter”) is expected to reduce the large amplitude and low frequency components of fluid temperature fluctuation in T-junction pipe. In this investigation, it is aimed to validate the effect and to generalize the mixing characteristics of “Turbulence promoter” on the fluid mixing in T-junction pipe, and to contribute the knowledge to the rational design of LMFBR. In this report, numerical simulation for the existing experiment was conducted using a quasi-direct simulation code (DINUS-3). From the numerical simulation, the following results are obtained.

- (1) Numerical calculations could simulate well the flow patterns observed in the visualization experiment, in impinging jet case (Pattern-C) and deflecting jet cases (Pattern-B1 and Pattern-B).
- (2) By installing “Turbulence promoter”, cross-section area of main pipe after the mixing point is narrowed, and the fluid of main pipe is accelerated and flows along the slope of the promoter on the opposite side of branch pipe. This accelerated flow acts to prevent the collision of the branch pipe flow to the promoter. Therefore, the branch pipe flow conditions in deflecting jet category are extended.
- (3) At the throat of the main pipe, the flow was separated from the edge of the “Turbulence promoter” and eddies were generated in downstream side of the promoter. And also the wake region was formed behind the promoter. By these eddies, fluid mixing is promoted. However, in the downstream side of the promoter, temperature fluctuation with large amplitude will be produced, since the flow attached to the main pipe wall as the main piping flow and the branch piping flow are mixed.

* Thermal-Hydraulic Research Group, Advanced Technology Division, OEC, JNC.

** Customer System Co. Ltd.

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

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験の概要	6
2. 1 実験装置	6
2. 2 可視化実験結果	6
3. 乱流プロモータの数値解析	14
4. 流動パターンの模擬性	17
4. 1 解析結果	17
4. 2 アーチ状渦の通過周波数	17
5. 乱流プロモータの混合効果	23
5. 1 軸方向流速変動特性	23
5. 2 瞬時のスワール強度分布	24
5. 3 瞬時 CFV 等值面空間分布の時間推移	25
5. 4 瞬時渦度空間分布の時間推移	26
6. 結 言	36
謝 辞	37
参考文献	38
付 錄 スワール強度の定義	40

図表目次

表 1 乱流プロモータなしの場合の可視化実験条件	9
表 2 乱流プロモータありの場合の可視化実験条件	9
表 3 解析の対象とした実験条件	14
表 4 解析時の境界条件	14
図 1.1 サーマルストライピングに対する解析的評価システムの構成	3
図 1.2 DINUS-3 コードによる主配管内壁近傍の瞬時ナトリウム温度分布	4
図 1.3 配管切り出し後の合流部下流側観察写真（仏国・フェニックス炉）	5
図 2.1 実験装置の概略	10
図 2.2 乱流プロモータの形状	10
図 2.3 乱流プロモータなしの場合の流動パターン ($Re = 1000$)	11
図 2.4 乱流プロモータありの場合の流動パターン ($Re = 1000$)	12
図 2.5 流動パターンマップ（枝配管径 12[mm]、配管口径比 $\alpha = 3.33$ ）	13
図 3.1 解析体系図	15
図 3.2 主配管入口流速分布（主配管中心軸からの距離）	15
図 3.3 計算メッシュ図	16
図 4.1 衝突流 (Pattern-C) の流動パターンの再現性	19
図 4.2 偏向流 (Pattern-B2) の流動パターンの再現性	20
図 4.3 偏向流 (Pattern-B1) の流動パターンの再現性	21
図 4.4 偏向流 (Pattern-B1) におけるアーチ状渦の通過周波数特性	22
図 5.1 軸方向流速変動の軸方向断面分布	28
図 5.2 瞬時のスワール強度等値面分布の投影図	29
図 5.3(1) 衝突流 (Pattern-C) における瞬時 CFV 等値面 ($0.03[m/s]$) の空間分布の時間推移	30
図 5.3(2) 偏向流 (Pattern-B2) における瞬時 CFV 等値面 ($0.02[m/s]$) の空間分布の時間推移	31
図 5.3(3) 偏向流 (Pattern-B1) における瞬時 CFV 等値面 ($0.02[m/s]$) の空間分布の時間推移	32
図 5.4(1) 衝突流 (Pattern-C) における瞬時渦度の空間分布の時間推移	33
図 5.4(2) 偏向流 (Pattern-B2) における瞬時渦度の空間分布の時間推移	34
図 5.4(3) 偏向流 (Pattern-B1) における瞬時渦度の空間分布の時間推移	35

1. 緒 言

高速炉プラントにおいて温度が異なる冷却材が混合する配管合流部では、流れが混合して冷却材中に温度ゆらぎが生じるため、熱応力による配管構造材の高サイクル疲労破損に注意する必要がある（サーマルストライピング現象）。

サーマルストライピング現象は、不規則的に変動する乱流挙動に支配されるとともに、流れと構造の熱応力が複雑に関連し合うことから、これまで対象部位毎に模型実験を行って現象を解明し、評価することが主であった。しかし、実験的アプローチは、体系を単純化した要素試験結果を内外挿して実体系の現象を評価するか、実体系を模擬した大型の試験装置により直接的に評価している。要素試験では、詳細なデータが得られるものの、他の体系（実際の体系）へ知見を反映する際に不確かさを伴う。また、開発段階において、個々の体系に対して大型試験装置を作成し試験を行うことは開発コストの面から容易ではない。そこで、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）では、サーマルストライピング評価を数値解析により評価できるよう、種々の解析コードを開発している。図1.1に、サーマルストライピング評価のために開発した解析コード群のシステム構成を示す^[1]。図1.1に示す解析コード群は、差分法による乱流現象の準直接シミュレーションコード（DINUS-3）^[2]と境界要素法による構造物の熱的応答評価コード（BEMSET）^[3]を中心として、その熱的連成現象を評価するために開発されたものである。DINUS-3コードは、不規則に変動する熱流動現象を乱流モデルなど一切の工学モデルを用いずに、高次風上差分法を導入して直接的に評価すると同時に構造物内表面での温度ゆらぎ不規則挙動を規定するもので、高速炉で用いる液体金属ナトリウムの熱流動現象はもちろんのこと、水や空気を流体とした場合の模擬性も実験検証により確認されている。一方、BEMSETコードは、DINUS-3コードで計算された構造物内表面の温度ゆらぎ挙動に基づいて、構造物内部の温度ゆらぎ挙動を評価する境界要素法コードである。

これまでに開発した解析評価システムにより、フランス高速原型炉「フェニックス」の二次主冷却系配管合流部に生じた熱疲労事象を題材とした国際ベンチマークに参加した。この熱疲労事象は、340[°C]の低温ナトリウムが流れる内径494[mm]の主配管中に、内径68[mm]の枝配管からの430[°C]の高温ナトリウムが合流・混合し、この下流側に位置する主配管周方向溶接部に貫通き裂が生じたものである。図1-2は、DINUS-3コードとBEMSETコードによる熱的連成解析結果^[4,5,6]の一例で、枝配管から流出した高温ナトリウムの流れが、主配管壁に沿って左右に振動しながら下流側に押し流されている様子を観察することができる。これは、枝配管からの高温ナトリウムの流れが、主配管内の流れに対して障害物の役割を果たしたことから生じた一種の後流渦（約8[Hz]周期）に相当するものである。さらに、枝配管から流出した高温ナトリウムの両側面から、概ね左右対称に下流側に広がる高温領域も確認することができる。これは枝配管からの高温ナトリウム流が、主配管内の流れによって間欠的（約0.1[Hz]周期）に剥離することに起因したものであることが確認されている。なお、フェニックス炉での貫通き裂は、図1-3に見られるように、間欠的剥離挙動領域と主配管周方向溶接線とが交差する周方向2ヶ所で発生していたことが配管切り出し後の目視検査で確認された。同位置における0.1[Hz]近傍の比較的ゆっくりとした温度ゆらぎは、その他の領域での高周波変動に比べて構造物の熱的な追従性が高くなる結果、より大きな熱応力が発生したこと、また目視検査による損傷位置と一致したことにより、サーマルストライピングに対する同評価システムの妥当性が確認された。

サイクル機構では、このような背景から、構造物の熱的追従性が支配的となる比較的ゆっくりとした温度ゆらぎ挙動を発生させる乱流混合メカニズムを定量的に把握することを目的とした解析研究を行っている^[7-12]。実験研究では、フェニックス炉と同じく上流側に90度の曲がり管（エルボ）を有する体系とエルボが存在しない直管体系でのT字配管合流部における流体混合特性に関する水流動試験（試験名「WATLON」）が行われている^[13-15]。また、WATLONでの可視化試験結果により、主配管内における枝配管噴流の挙動は、上流での各配管の運動量により、大きく3つの流動パターン、(1)壁面噴流（本解析では「付着流」という）、(2)偏向噴流および(3)衝突噴流に分類できることを見出した。しかしながら、WATLONでの流動条件は主配管Re数が 10×10^5 程度の非常に速い流れを対象としており、流れ場の測定に困難さがあるため、必ずしも合流部に発生する流体温度ゆらぎの発生メカニズムおよび混合過程の基本構造の解明には適していない^[13]。そこで、流体混合の基本的なメカニズムを調べるために、広島大学との共同研究として、主配管Re数が5,000以下の非常に遅い条件で可視化実験を行い、主配管流中における枝配管流の流動パターンが(1)付着流（「WATLON」で言う「壁面噴流」に相当）、(2)偏向流および(3)衝突流の大きく3つに分類されることを明らかにした^[16]。特に、偏向流の場合、枝配管流は主配管流と混合する過程で、アーチ状の渦列が形成されることが分かり、このアーチ状渦の放出周波数は、ストローハル（Strouhal）数（St数）によって整理され、St数は口径比に依らず流速比との間に強い相関関係があることが分かった。

これまでに流動の制御あるいは流体温度ゆらぎの緩和に主眼をおいた研究はなされていない。そこで、熱疲労破損の原因となる流体温度ゆらぎの高振幅成分と低周波数成分を積極的に低減させる方策を見出すことを目的として、愛媛大学との間で平成14年から3年計画で共同研究を実施している^[17]。この共同研究は、T字配管合流部設計の自由度を広げる観点より、流体温度ゆらぎの高振幅成分と低周波成分を積極的に低減させることができ可能な流体混合促進機構（以下、「乱流プロモータ」と呼ぶ）を配管合流部に設置し、合流部における流れの様子を観察・測定し、乱流プロモータによる管縫手部の流体混合効果の確認と、そのメカニズムの解明を目的としている。

本報では、まず、数値解析により実験により確認された流体混合パターンが再現できることを確認し、次に、乱流プロモータを設置した場合の混合メカニズムの解明を目的として数値解析を行った。

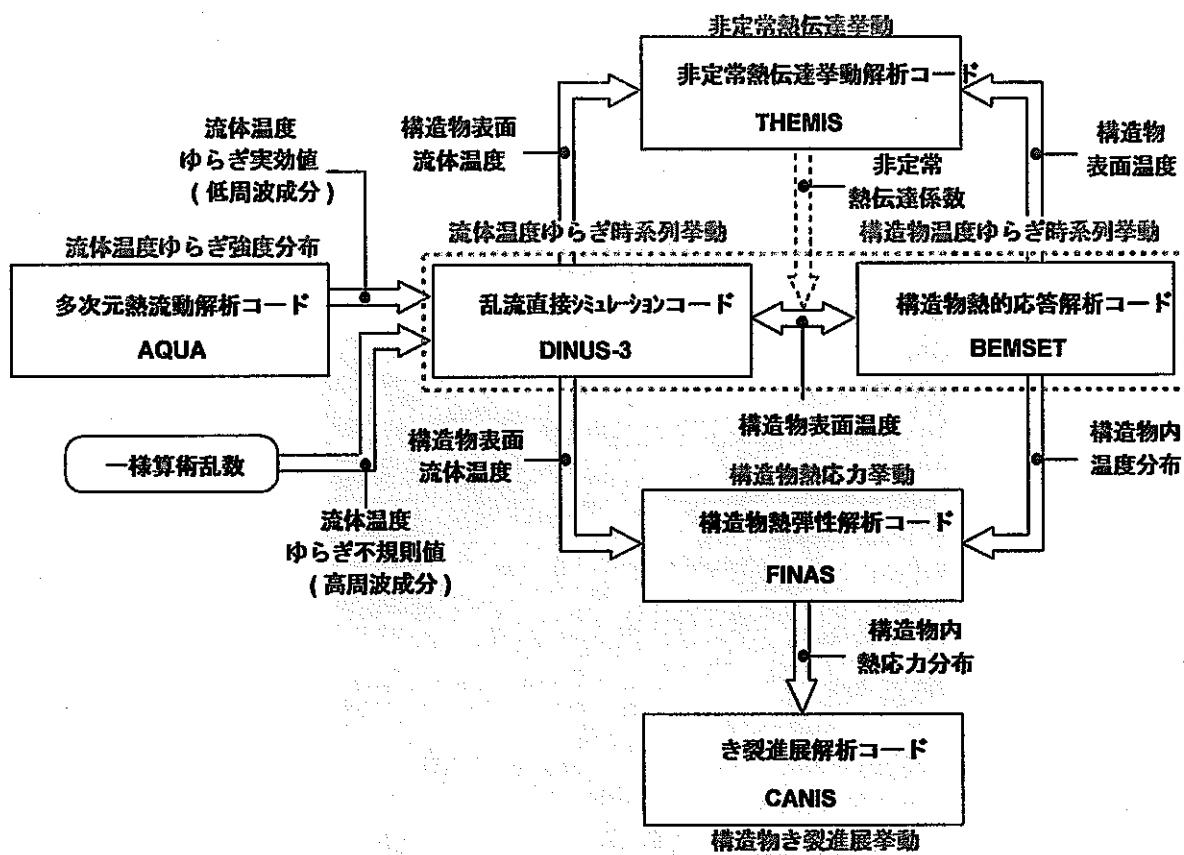


図 1.1 サーマルストライピングに対する解析的評価システムの構成

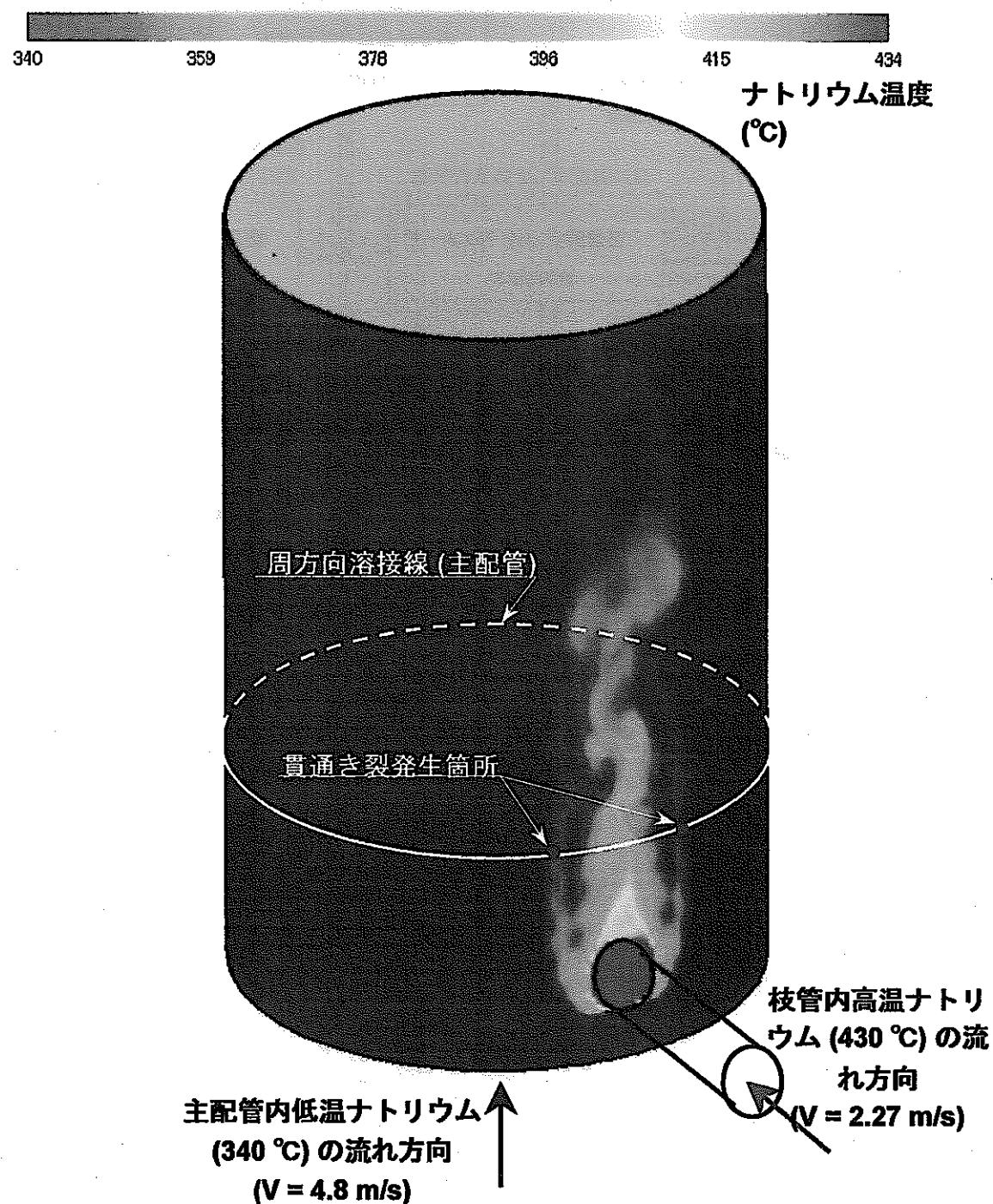


図 1.2 DINUS-3 コードによる主配管内壁近傍の瞬時ナトリウム温度分布
(配管内内表面より 0.1 [mm]内側)
(解析対象は、仏国・フェニックス炉 2 次主冷却系配管合流部)

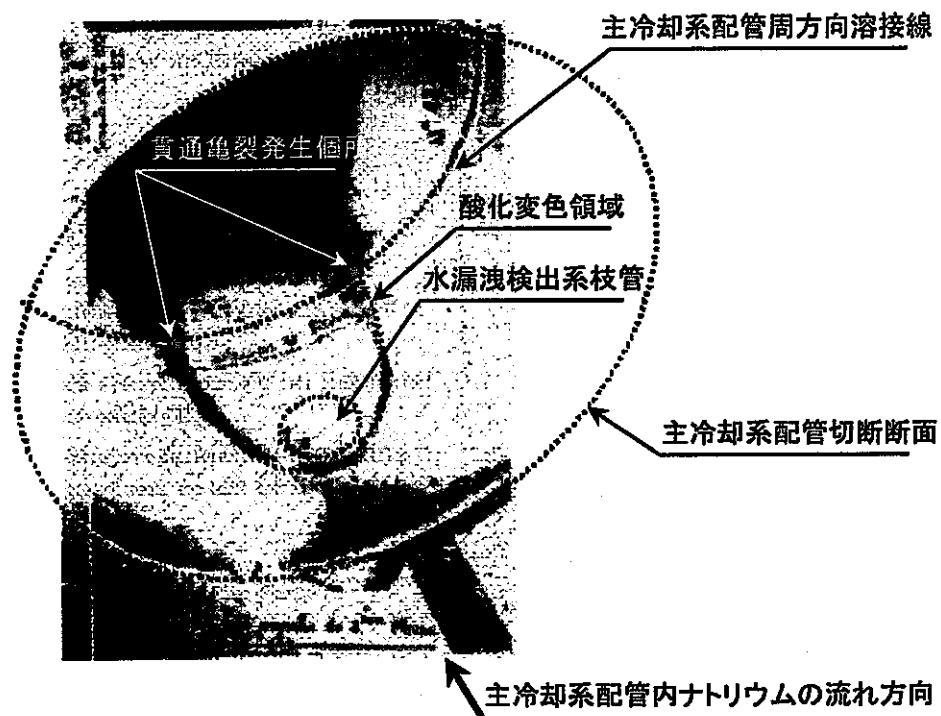


図 1.3 配管切り出し後の合流部下流側観察写真
(仏国・フェニックス炉)

2. 実験の概要

2. 1 実験装置

図 2.1 に乱流プロモータ（流体混合促進機構）を有する配管合流部の実験装置を示す。本実験装置では、水を作動流体として用い、等温条件で実験が行われている。配管部は可視化観測が容易となるように透明アクリルで製作されており、色素流脈法による流れ場の可視化観測およびレーザー・ドップラーレーザー流速計による速度場計測が可能である。テスト部は、1辺 40 [mm] の正方形断面を有する矩形配管を主配管とし、枝配管として口径 12[mm]（配管口径比 $\alpha = 3.33$ ）の円管を設置している。

図 2.2 に乱流プロモータの形状を示す。乱流プロモータの形状パラメータは、高さ H および主流方向長さ L である。乱流プロモータの高さは、 $H=5.0, 7.5, 10.0[\text{mm}]$ であり、矩形流路の代表長さ 40[mm]（水力等価直径）に対する乱流プロモータの高さ H の比 (γ) は、8.00、5.33、4.0 の 3 種類である。

2. 2 可視化実験結果

可視化実験は、主配管流のレイノルズ数 Re および主配管の断面平均流速と枝配管の断面平均流速との比で定義する流速比 (β) を実験パラメータとしている。表 1 に、乱流プロモータのない体系で行われた可視化実験条件を示す。また、表 2 に乱流プロモータを設置した場合の可視化実験条件を示す。

図 2.3 (a)から(c)に乱流プロモータがない場合の枝配管流の流動パターンを示す。流速比 ($\beta = (\text{主配管流速 } U_m) / (\text{枝配管流速 } W_b)$) が減少するに従って、(a) 付着流 (Pattern-A)、(b) 偏向噴流 (Pattern-B)、(c) 衝突噴流 (Pattern-C) の 3 つの流動形態に分類される。

付着流である Pattern-A の場合、温度差の大きな枝配管流と主配管流とが混合することなく主配管壁面に沿って流れるため、これら流体の境界では大きな温度勾配が生じる。枝配管流と主配管流との境界が空間的に変動した場合（本実験のような層流条件では観察されないが、高 Re 数条件では生じ得る）、振幅の大きな温度変動となり、サーマルストライピングの評価上極めて重要な流動パターンとなる。

偏向流である Pattern-B の場合、主配管の中心部にアーチ状の周期的な渦列を形成しながら流れて行く。アーチ状渦内では枝配管流が主として存在し、その周辺には主配管流が存在するため、振幅の大きな温度変動が周期的に存在することになる。この渦列が主配管内表面に付着した場合、このアーチ状渦列が高サイクル熱疲労の発生原因となり得る。この渦列は T 字配管合流部における流体混合の主要なメカニズムの一つであると考えられるが、サイクル機構にて高 Re 数（数万から数十万）の範囲で実施した T 字配管合流部の水流動可視化試験結果から、偏向流で発生する主配管中心部の渦列は混合の早い段階で細分化され、温度変動振幅は減衰して主配管壁面に付着する。逆に言えば、このような大きな温度変動を持つ渦列が、衝突後すぐに温度差が大きい状況で主配管内表面に付着する場合は、サーマルストライピング評価上で極めて重要なとなる。

衝突流である Pattern-C の場合、枝配管流と主配管流との混合後は、流体の拡散が

激しく、乱流プロモータ下流側での流体混合は他の流動パターンに比べて優っている。しかしながら、枝配管流が衝突する主配管内表面では、温度の異なる枝配管流と周辺の主配管流とが混合するため、温度振幅の大きな温度変動が生じると考えられ、サーマルストライピングの評価上、極めて重要な流動パターンであると言える。

このように、温度の異なる流体の混合が主配管の中心部で盛んに行われ、主配管内表面に付着することなく流れる（あるいは温度振幅が充分減衰した状態で主配管内表面に付着する）偏向流は、サーマルストライピングの観点から、好都合な流動パターンとなる。その両端にある付着流および衝突流は、温度振幅の大きな流体温度ゆらぎが主配管内表面に存在する可能性があり、偏向流から付着流あるいは衝突流への遷移境界近傍の温度変動も含めた熱流動場の変化を把握することは重要である。また、偏向流で生じる高振幅の温度変動を伴うアーチ状渦列は、T字配管合流部における流体混合過程において重要な役割を担うため、その構造および発生メカニズムを把握することは重要である。

ここに、乱流プロモータの設置によって、流動場を制御し、温度変動の高振幅成分を低減させる効果が期待される。

図2.4(a)から(f)に、乱流プロモータを設置した場合の流動パターンを示す。乱流プロモータを設置しない場合と同様、大きく3種類、すなわち、付着流(Pattern-A)、偏向流(Pattern-B)、衝突流(Pattern-C)に分類されるが、乱流プロモータを設置することによって、さらに細かく分類できる。

図2.3(a)に示した付着流(Pattern-A)は、乱流プロモータ背後の逆流の有無により、さらに2種類(Pattern-A1およびA2)に分類できる。

図2.4(a)は、Pattern-A1($Re = 1000$ 、 $\beta = 2.60$ 、 $\gamma = 8.00$ 、 $L = 26[\text{mm}]$)の場合であり、枝配管からの流れは合流後壁面に沿って流れ、主配管流れと枝配管の流れが層状に分離する。

図2.4(b)は、Pattern-A2($Re = 1000$ 、 $\beta = 1.168$ 、 $\gamma = 4.00$ 、 $L = 26[\text{mm}]$)の場合であり、枝配管からの流れは乱流プロモータ背後にできる渦により一部逆流し、乱流プロモータ背後で滞留する。

図2.3(b)に示した偏向流(Pattern-B)は、枝配管と反対側の乱流プロモータ背後に逆流が存在するか否かによる2パターン(Pattern-B1およびB2)、および流れが分岐する場合(Pattern-B3)の3つのパターンに細分化される。

図2.4(c)は、Pattern-B3($Re = 1000$ 、 $\beta = 0.855$ 、 $\gamma = 5.33$ 、 $L = 26[\text{mm}]$)の場合であり、枝配管より出た流れが二つの乱流プロモータ間を通過後二本に分岐し、このうち枝配管とは反対側を流下する流れが渦を形成する。

図2.4(d)は、Pattern-B1($Re = 1000$ 、 $\beta = 0.71$ 、 $\gamma = 8.00$ 、 $L = 26[\text{mm}]$)の場合であり、枝配管より出た流れが主配管流中に偏向噴流の形で噴出し、周期的な渦列を形成しながら流下する。

図2.4(e)は、Pattern-B2($Re = 1000$ 、 $\beta = 0.497$ 、 $\gamma = 4.00$ 、 $L = 26[\text{mm}]$)の場合であり、枝配管より出た流れが枝配管とは反対側の側面に設置した乱流プロモータ背後にできる渦により逆流し、一部滞留する。

図2.3(c)に示した衝突流は、細分化されることなく、枝配管より出た流れが枝配管と反対側の乱流プロモータに衝突した後、主流と急速に混合しながら流下する。

図 2.4 (f)は、Pattern-C ($Re = 2000$, $\beta = 0.262$, $\gamma = 5.33$, $L = 26[\text{mm}]$) の場合の流動パターンを示す。

図 2.5 (1)から図 2.5 (4)に、乱流プロモータの形状 (アスペクト比 γ) 每に、主配管 Re 数に対する流動パターンの変化の様子を示す。図 2.5 (1)は乱流プロモータを設置しない場合、図 2.5 (2)は乱流プロモータの高さ $H=5[\text{mm}]$ の場合、図 2.5 (3)は乱流プロモータの高さ $H=7.5[\text{mm}]$ の場合、図 2.5 (4)は乱流プロモータの高さ $H=10[\text{mm}]$ の場合である。流速比は、枝配管流速に対する主配管流速の比であるから、主配管流速 (Re 数) が一定の場合、流速比の減少は枝配管流速の増加を意味する。

流動パターンは流速比によって変化し、流速比が大きくなる (主配管流速の増加、あるいは主配管 Re 数を一定とした場合の枝配管流速の減少) に従って混合パターンは、衝突流 (Pattern-C) → 偏向流 (Pattern-B1→Pattern-B2) → 付着流 (Pattern-A2→Pattern-A1) へと遷移する。特に、 Re 数が 1000 および 2000 の場合、混合パターン (Pattern-B3) が観察される。

乱流プロモータを設置することにより、衝突流と偏向流との境界流速比 (Pattern-C と Pattern-B2 との境界) は、乱流プロモータを設置しない場合 (Pattern-C と Pattern-B との境界) よりも小さな値となる。また、乱流プロモータの形状依存性は小さく、乱流プロモータを設置しない場合の境界流速比は 0.5 から 0.6 程度であるが、乱流プロモータを設置した場合には約 0.3 程度となる。つまり、主配管流速 (Re 数) が一定の場合、乱流プロモータを設置しない場合に比べて、乱流プロモータを設置することにより、枝配管流速 (約 1.7 倍) が早い場合であっても衝突流とはならずに偏向流を維持することができる。壁面に付着せずに混合しながら流れる偏向流はサーマルストライピングの影響が最も小さい。従って、乱流プロモータの設置によって、偏向流となる枝配管流速の範囲が拡大されるため、サーマルストライピングの影響低減方策として有効であることが分かる。ここで、同じ偏向流の場合、Pattern-B3 は主配管中央部での混合の様子は異なるものの壁面に枝配管流が付着していないという点では、Pattern-B1 と同分類として整理することが可能であると考えられる。一方で、Pattern-B2 の場合は、可視化画像から分かるように乱流プロモータ背後の流動場について詳細に調べる必要があると思われる。

乱流プロモータを設置しない場合の付着流と偏向流との境界流速比 (Pattern-A と Pattern-B との境界) は、 Re 数の増加に伴って増加する傾向を示しているが、乱流プロモータを設置 (Pattern-A2 と Pattern-B1 との境界) することによってほぼ一定の流速比、あるいは高 Re 数側において流速比が減少していることが分かる。つまり、主配管流速 (Re 数) が一定の場合、乱流プロモータがない場合には偏向流となる枝配管流速の場合であっても、乱流プロモータを設置することによって付着流に移行することを示している。これは、乱流プロモータを設置することによって混合後の流路断面積が減少するため、結果として主配管流速が相対的に増加したためと考えられる。また、高 Re 数領域では乱流遷移による流動場の変化が考えられる。図 2.4 (b)に示すように乱流プロモータを設置した Pattern-A2 の場合は、乱流プロモータを設置していない Pattern-A の様子とは異なり、層状の流れとはなっておらず、乱流プロモータ背後の混合渦の存在が考えられる。従って、Pattern-A、Pattern-A2 および Pattern-B1 の場合について、流れ場を詳細に調べる必要があると考えられる。

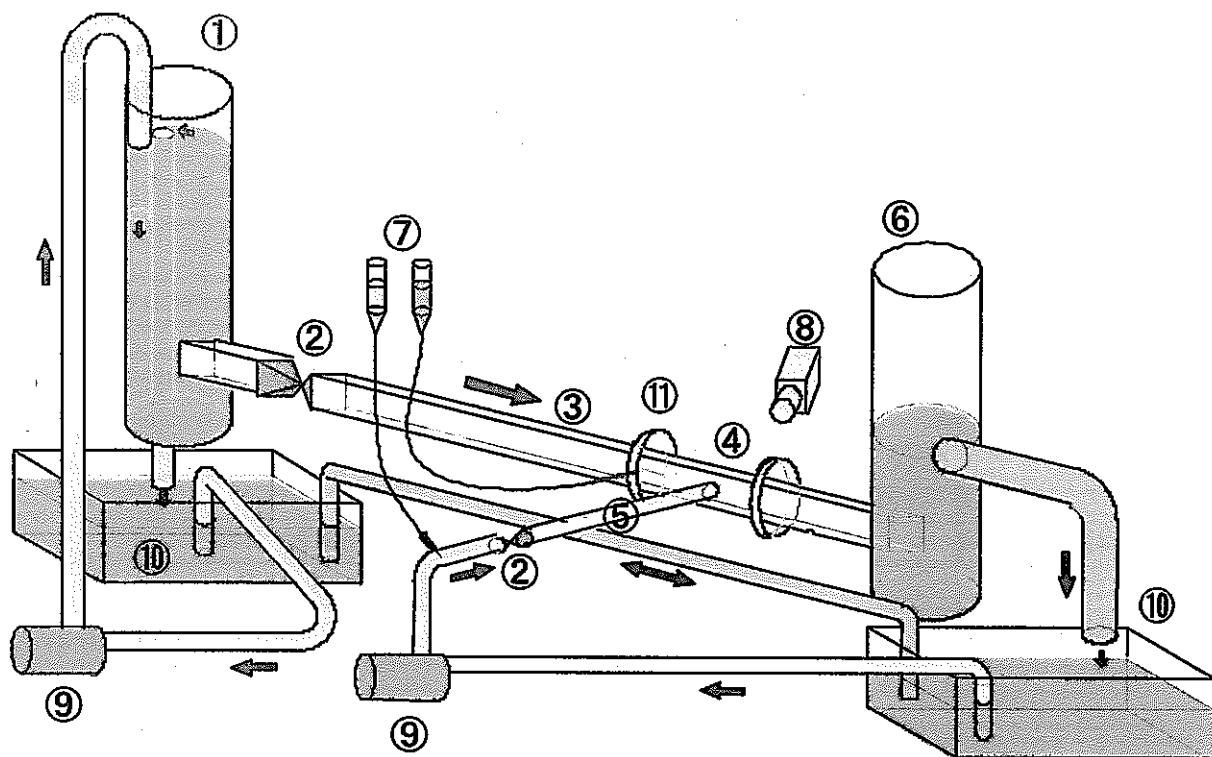
また、乱流プロモータの高さを $H=10[\text{mm}]$ とした場合には、他の形状 ($H=5[\text{mm}]$ および $7.5[\text{mm}]$) に比べて、サーマルストライピングの影響が最も小さい偏向流 (Pattern-B1) の範囲が極端に減少しており、乱流プロモータ形状と流体混合効果との間には、最適値（最適形状）が存在することが分かる。

表1 乱流プロモータなしの場合の可視化実験条件
(水流動試験のみ)

主配管 Re 数	Re	500 ~ 5,000
主配管等価直径	$D_m [\text{m}]$	0.04
主配管断面平均流速	U [m/s]	0.0125 ~ 0.125
枝配管口径	$D_b [\text{m}]$	0.008、0.012、0.02
口径比	$\alpha (=D_m/D_b)$	2.0、3.33、5.0
流速比	$\beta (=U/W)$	0.1 ~ 10

表2 乱流プロモータありの場合の可視化実験条件

主配管 Re 数	Re	1,000 ~ 5,000
主配管等価直径	$D_m [\text{m}]$	0.04
主配管断面平均流速	U [m/s]	0.025 ~ 0.125
枝配管口径	$D_b [\text{m}]$	0.012
乱流プロモータ高さ	H [m]	10、7.5、5 [mm]
乱流プロモータ長さ	L [m]	26、33 [mm]
口径比	$\alpha (=D_m / D_b)$	3.33
流速比	$\beta (=U / W)$	0.1 ~ 10
アスペクト比	$\gamma (=D_m / H)$	4.00、5.33、8.00



- | | |
|---|-----------------------|
| 1. Overflow Tank | 6. Back Pressure Tank |
| 2. Valve | 7. Dye-injection Tank |
| 3. Main Duct ($40 \times 40 \times 3000$) | 8. Camera and VTR |
| 4. T-junction | 9. Pump |
| 5. Branch Pipe ($\square 12 \times 600$) | 10. Tank |
| | 11. Flange |

図 2.1 実験装置の概略

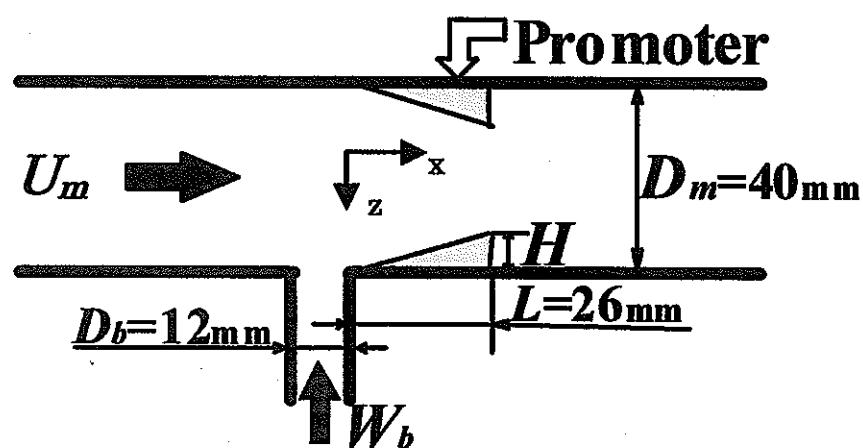


図 2.2 乱流プロモータの形状

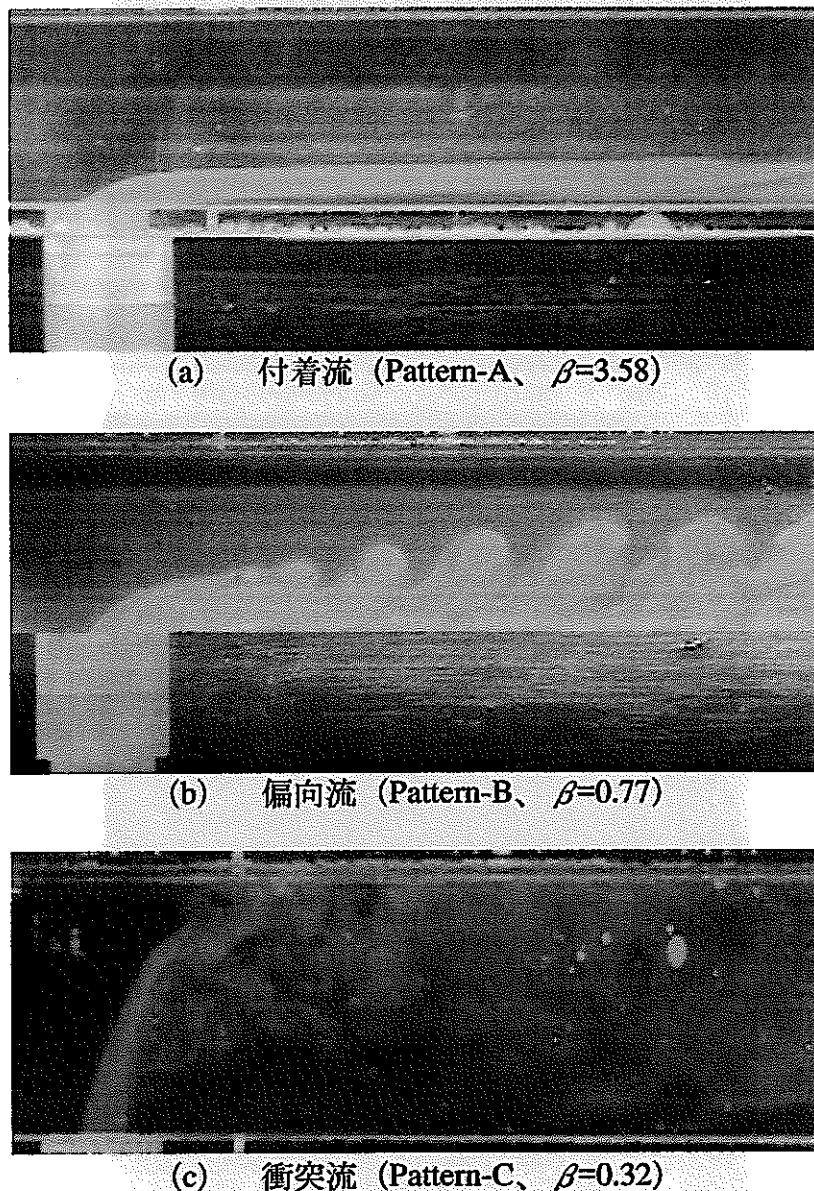


図 2.3 亂流プロモータ無しの場合の流動パターン ($Re = 1000$)

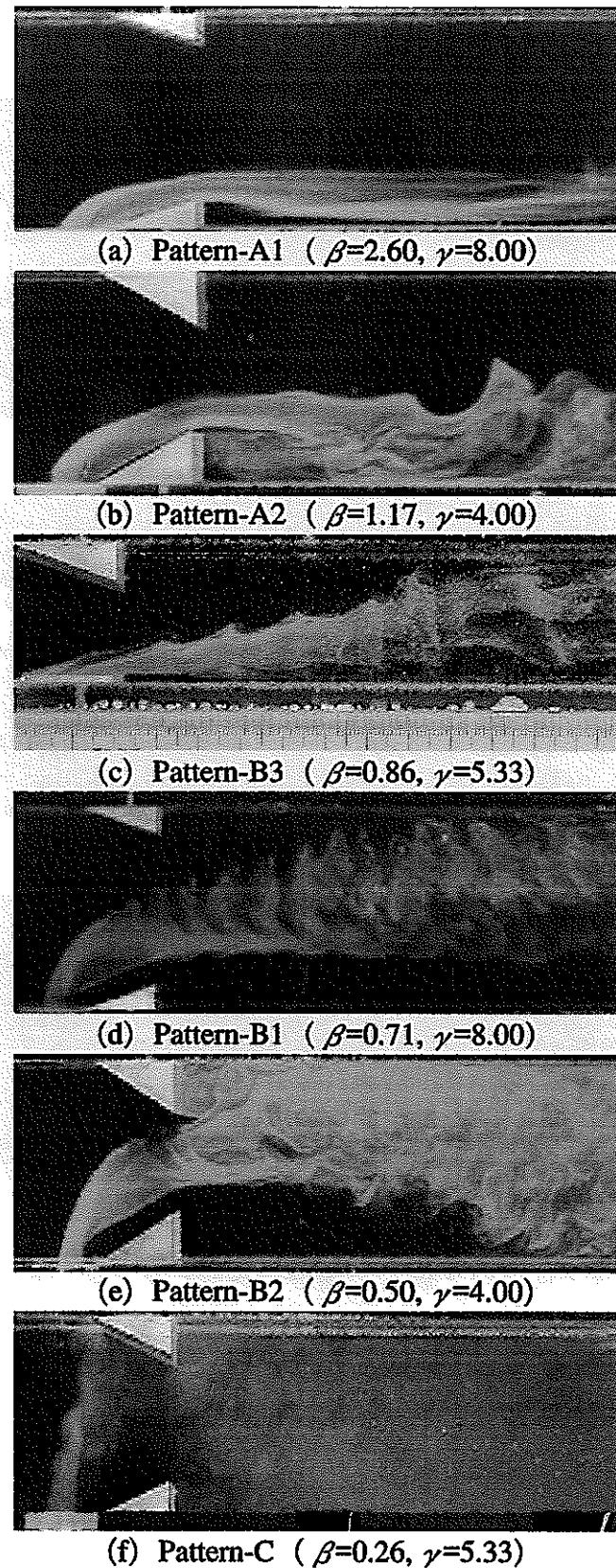


図 2.4 乱流プロモータを設置した場合の流動パターン ($Re = 1000$)

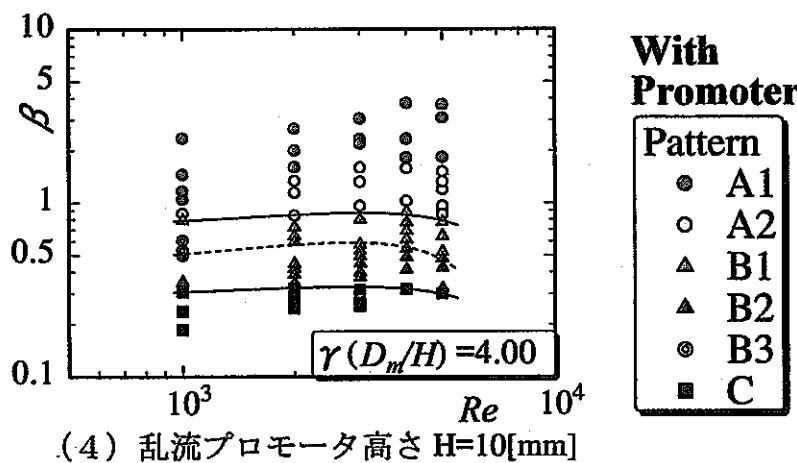
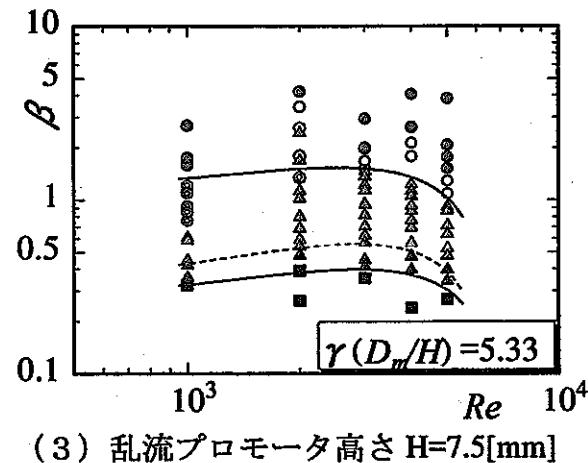
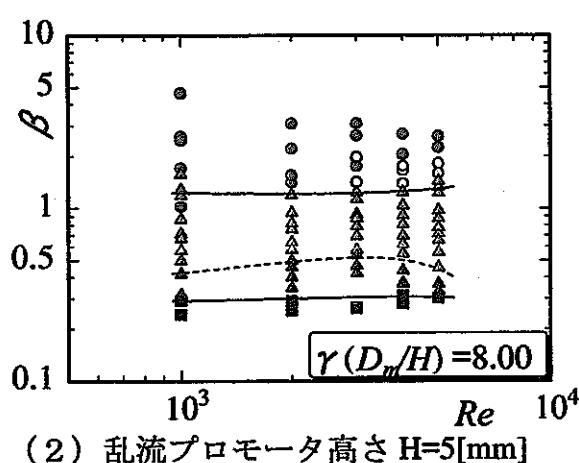
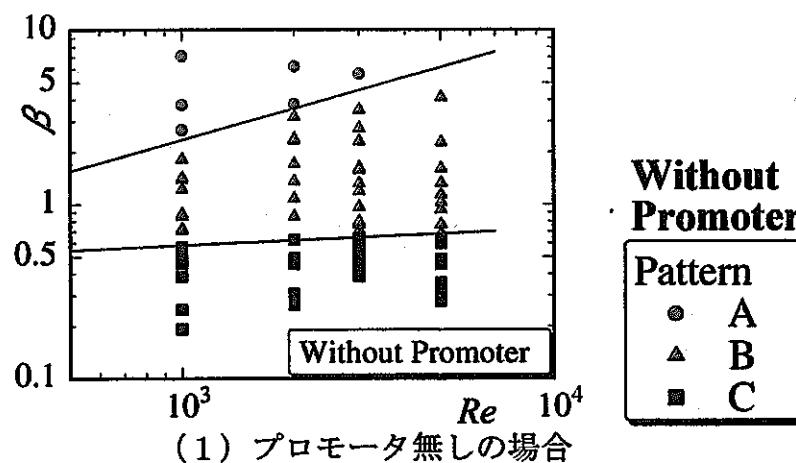


図 2.5 流動パターンマップ
(枝配管径 12[mm]、配管口径比 $\alpha=3.33$)

3. 乱流プロモータの数値解析

解析対象とした実験条件は、偏向流 (Pattern-B1 および B2) と衝突流 (Pattern-C) である。まずは、数値解析によるそれぞれの流動パターンの再現性について検討し、流体混合メカニズムについて解明することを目的とした。表 3 に解析条件とした実験条件を示す。

本研究で使用した解析コードは、サイクル機構で開発した有限差分法に基づく準直接シミュレーションコード (DINUS-3) である^[2]。DINUS-3 コードは、瞬時のナビエーストクス方程式を解き、対流項に 3 次精度の風上差分法を導入している準直接シミュレーションコードである。

図 3.1 に解析対象としたテスト部の範囲を示す。主流方向長さが全長 195[mm]、枝配管の前縁から 1.0D (D は主配管等価直径 40[mm]) 上流側に主配管の入口境界がある。入口流速分布は、主配管 Re 数が 2000 であり、層流と乱流との遷移領域と考えられることから、図 3.2 に示すように主配管については Laufer の実験から得られた発達した円管内乱流の流速分布^[18]を矩形断面に拡張して与え、枝配管については対数則から求められる流速分布を与えた。図 3.3 に解析に用いたメッシュ図を示す。境界条件をまとめて表 4 に示す。

流速値および圧力値は 50[Hz] でサンプリングを行い、700 点のデータを取得している。これらデータを用いて、時間平均統計量を算出した。

表 3 解析の対象とした実験条件

	主配管 Re 数 (主配管断面 平均流速)	流速比 β (枝配管断面 平均流速)	混合パターン	プロモータ形状
Case-F1	2,000 (0.05[m/s])	0.262 (0.191[m/s])	衝突流 (C)	$L = 26[\text{mm}]$ $H = 7.5[\text{mm}]$ ($\gamma = 5.33$)
Case-F2		0.481 (0.104[m/s])	偏向流 (B2)	
Case-F3		0.591 (0.0846[m/s])	偏向流 (B1)	

表 4 解析時の境界条件

項目	内容	
座標系	$x - y - z$ 直交座標系	
メッシュ分割	$117^i \times 40^j \times 80^k$	
メッシュ幅	i 方向	1.0 [mm] ~ 2.0 [mm]
	j 方向	1.0 [mm]
	k 方向	1.0 [mm]
速度境界条件	入口	主配管: Laufer の実験から得られた流速分布 枝配管: 対数分布
	出口	運動量保存
	壁	滑り無し

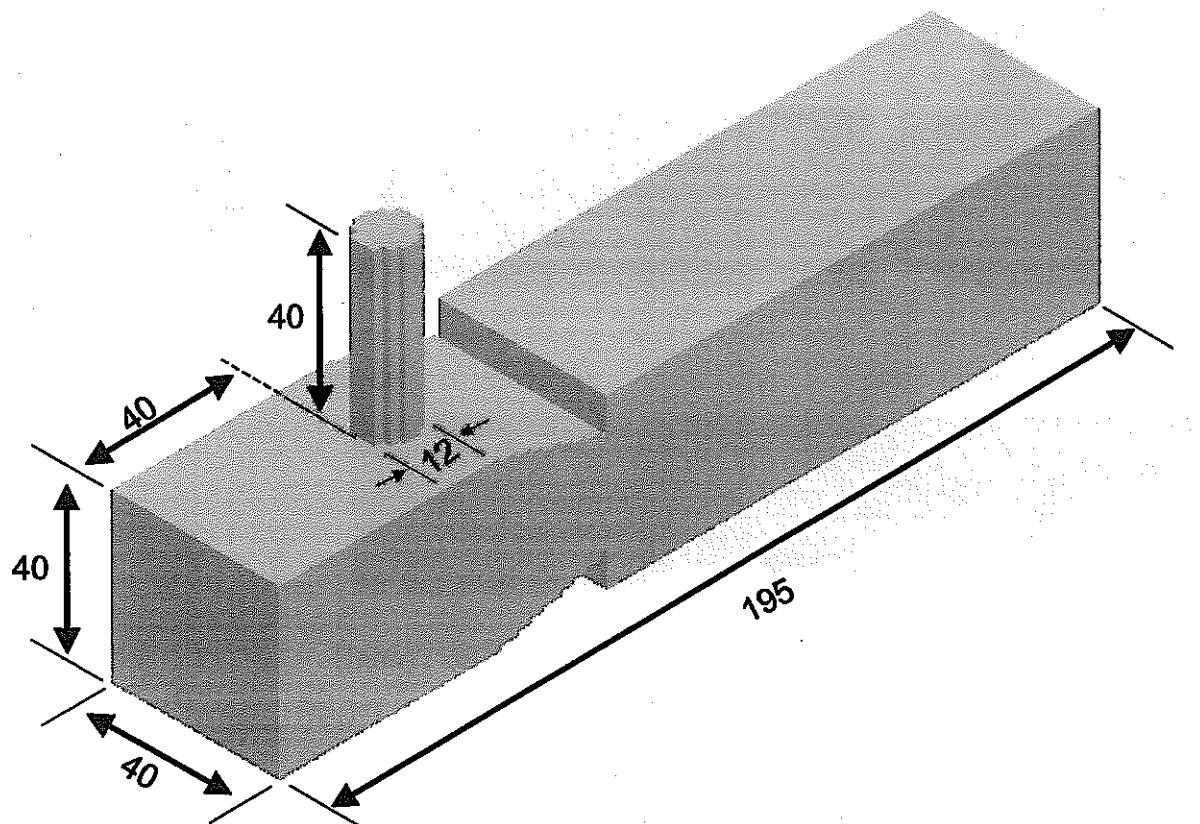


図 3.1 解析体系図

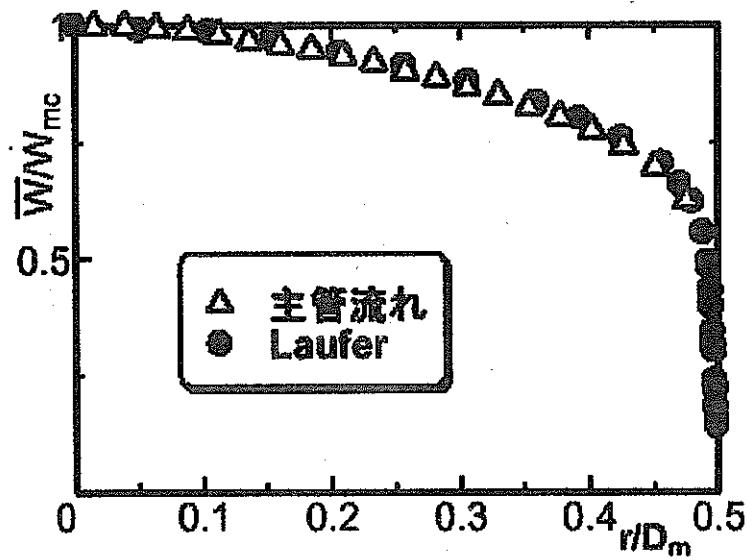
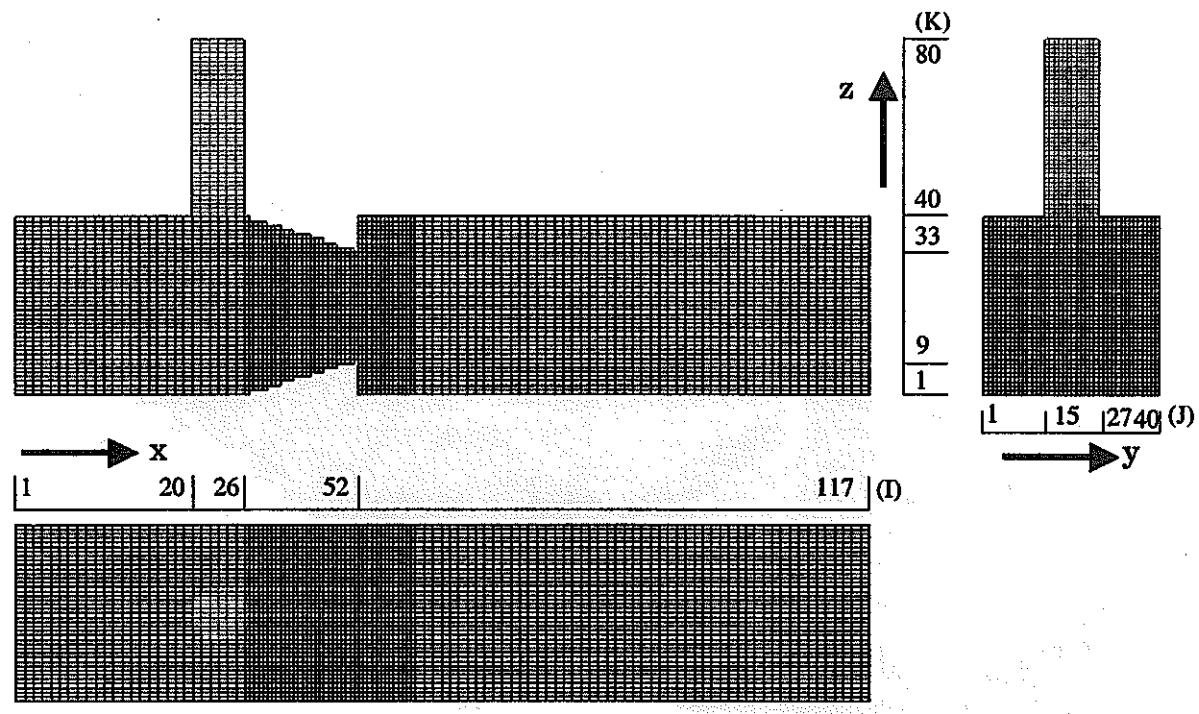


図 3.2 主配管入口流速分布（主配管中心軸からの距離）



(メッシュ幅) $\Delta x = 2 \text{ [mm]}$ (プロモータ領域 1[mm])
 $\Delta y = 1 \text{ [mm]}$
 $\Delta z = 1 \text{ [mm]}$

図 3.3 計算メッシュ図

4. 流動パターンの再現性

4. 1 流動パターンの様子

(1) 衝突流 (Case-F1, Pattern-C) の場合

図4.1(1)に可視化実験で得られた可視化画像、図4.1(2)に時間平均流速ベクトル分布、図4.1(3)に枝配管流の時間平均流線を示す。図4.1(2)および図4.1(3)から、枝配管流は主配管の中心軸を通過して、枝配管と反対側の乱流プロモータの斜面上に衝突している様子が分かる。図4.1(2)から、乱流プロモータの背後では循環流領域を生じており後流域が形成されている。また、図4.1(3)から時間平均流線が上側（枝配管と逆方向）の乱流プロモータの背後の後流域で主配管内表面に付着している。このことは、図4.1(1)の可視化画像で、枝配管から流出する流体が上側の乱流プロモータの背後に到達し、滞留していることと一致している。さらに、図4.1(2)の流速ベクトル図と図4.1(1)の可視化画像との比較から、枝配管流が乱流プロモータの斜面に衝突後、上側の乱流プロモータの前縁から上流側にかけて、逆流を起こしている様子が一致している。

(2) 偏向流 (Case-F2, Pattern-B2) の場合

図4.2(1)に可視化実験で得られた可視化画像、図4.2(2)に時間平均流速ベクトル分布、図4.2(3)に枝配管流の時間平均流線を示す。図4.2(2)および図4.2(3)から、解析結果は、上側（枝配管と反対側）の乱流プロモータに衝突せず、乱流プロモータによって絞られたスロートの上部を流れていく様子が分かる。図4.2(1)の可視化画像に比べて、解析結果の方が枝配管噴流の主流方向への曲がり方が若干大きい。また、図4.2(3)に示す時間平均流線は上側（枝配管と逆方向）の乱流プロモータの背後の後流域で主配管面に付着している。このことは、図4.2(1)の可視化画像で、枝配管から流出する流体が上側の乱流プロモータの背後に到達し、滞留していることと一致している。

(3) 偏向流 (Case-F3, Pattern-B1) の場合

図4.3(1)に可視化実験で得られた可視化画像、図4.3(2)に時間平均流速ベクトル分布、図4.3(3)に枝配管流の時間平均流線を示す。図4.3(2)および図4.3(3)から、同じ偏向流であっても、Pattern-B2の場合より主配管流速が大きく（流速比が大きい）、枝配管流は強く下流側に曲げられ、乱流プロモータに衝突せずに、スロートの中央部を流れていく様子が分かる。また、図4.3(3)から時間平均流線が上側（枝配管と逆方向）の乱流プロモータから離れたところで主配管の上側内表面に付着しており、図4.3(1)の可視化画像で枝配管から流出する流体が乱流プロモータから離れたところで主配管の上側内表面に付着することと一致している。

このように数値解析結果は、可視化実験による流れ場の様子を定性的かつ直感的に再現できており、実験結果と併せて、あるいは数値解析単独でも流動パターンの判別が可能であることが期待される。今後、定量的な評価も含めて流れ場の再現性について調べていくこととする。

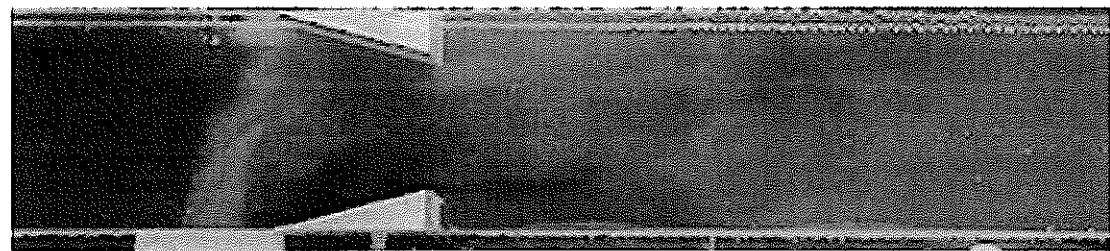
4. 2 アーチ状渦の通過周波数

Pattern-B1 の流れでは、図 4.3 (1)に示すように、枝配管流と主配管流との衝突界面において、アーチ状の渦が実験結果および解析結果において観察される。数値解析におけるアーチ状渦の再現性について確認する。図 4.4 にアーチ状渦の通過周波数を実験結果と比較する。ただし、図 4.4(2)に示した実験条件は、 $Re=1000$ の場合と併せて示している。ここで、数値解析と比較した $Re=2000$ の実験結果は、可視化映像（動画ファイル）より 20 個の渦の通過時間を求め算出したものである。また、数値解析から得られた渦の放出状況を図 4.4(1)に示す。解析結果から算出される渦の周波数は約 3.5[Hz] ($St=0.84$) であり、実験結果から算出された通過周波数は約 4[Hz] ($St=0.96$) である。ここで、 St は Strouhal 数であり、以下の定義による。

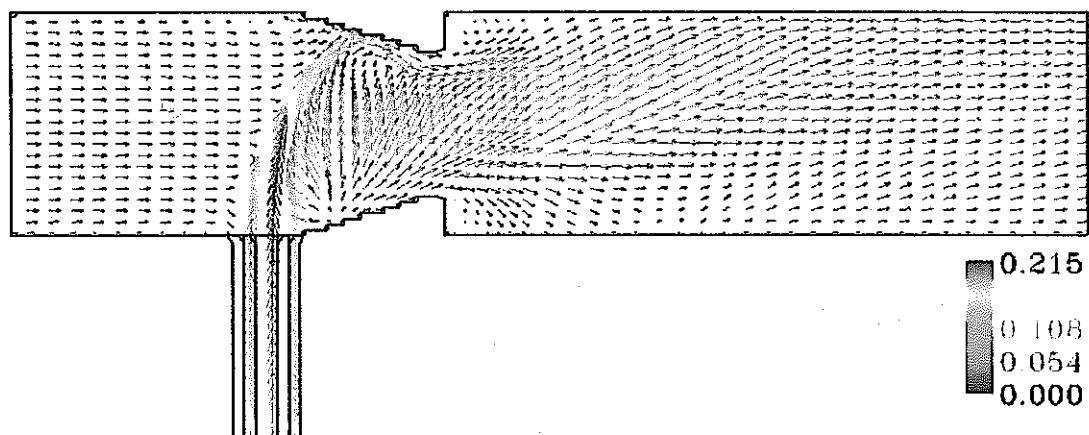
$$St = \frac{fD_b}{U}$$

ここで、 D_b は枝配管の直径であり、0.012[m]である。 U は主配管の断面平均流速 (0.05[m/s]) を示す。

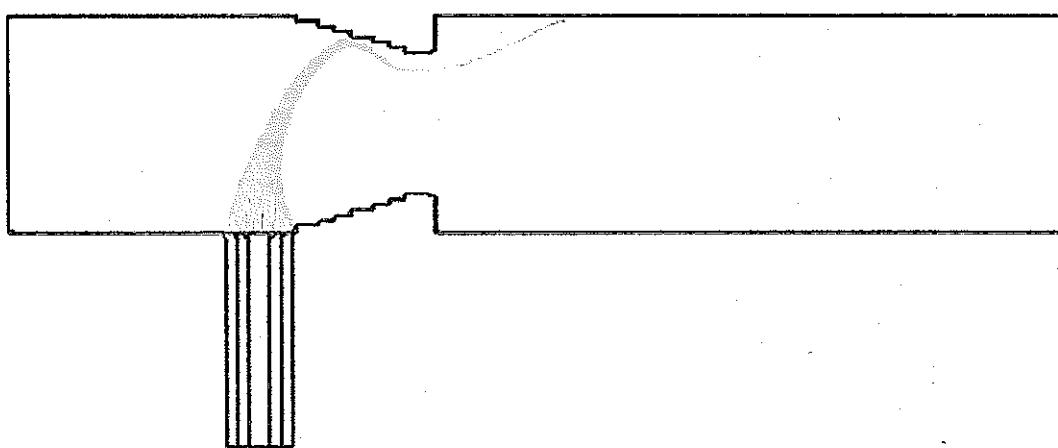
解析結果は実験結果に比べて、渦の通過周波数を少し低めに評価するが、ほぼ一致している。このことにより、本解析によって流体合流部における低周波ゆらぎを伴う周波数特性を再現することが可能であると判断される。また、前節において、解析結果から判断される流動パターンは、実験結果により判断される流動パターンを概ね再現できることが分かっており、数値解析によても流動パターンは推測可能であるとの見通しが得られている。そこで、可視化実験結果と任意の条件下での流れ場を数値解析によって再現することにより、温度変動特性を評価する上で重要な流体温度ゆらぎの周波数特性をより緻密な流動条件において評価することができると判断できる。



(1) 可視化画像

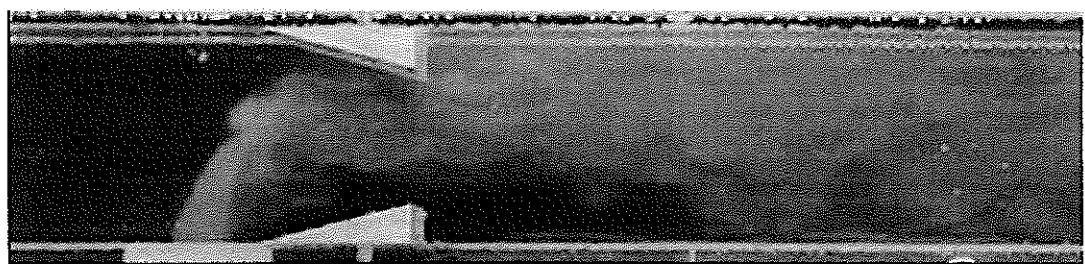


(2) 時間平均速度ベクトル図

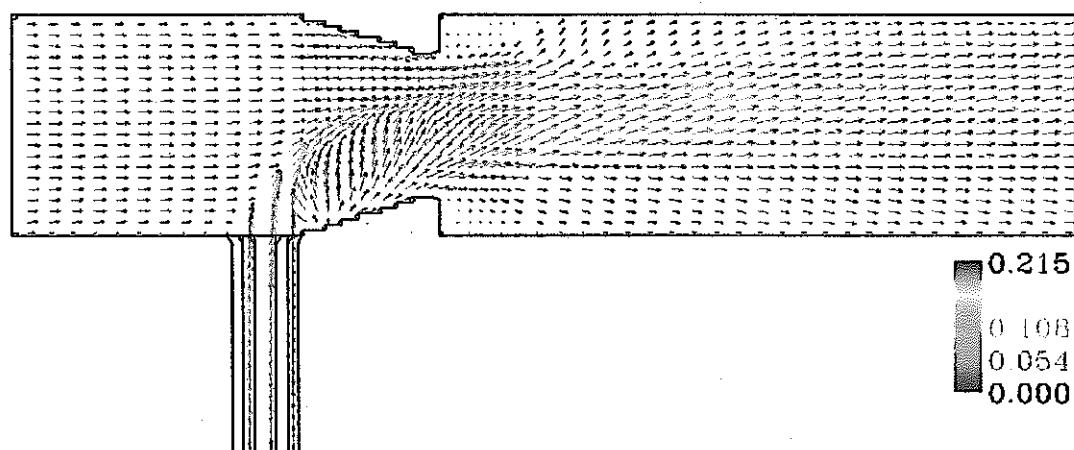


(3) 時間平均流線図

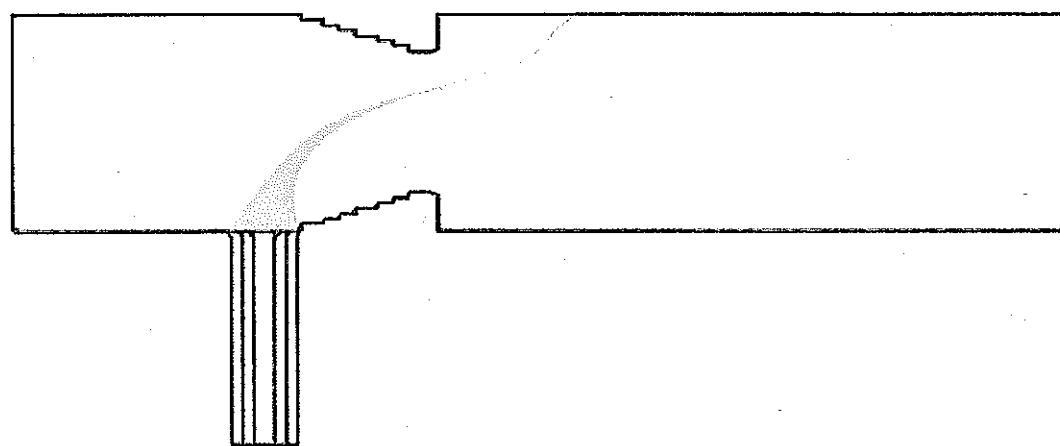
図 4.1 衝突流 (Pattern-C) の流動パターンの再現性
(Case-F1、 $Re=2000$ 、 $\gamma=5.33$ 、 $\beta=0.262$)



(1) 可視化画像



(2) 時間平均速度ベクトル図

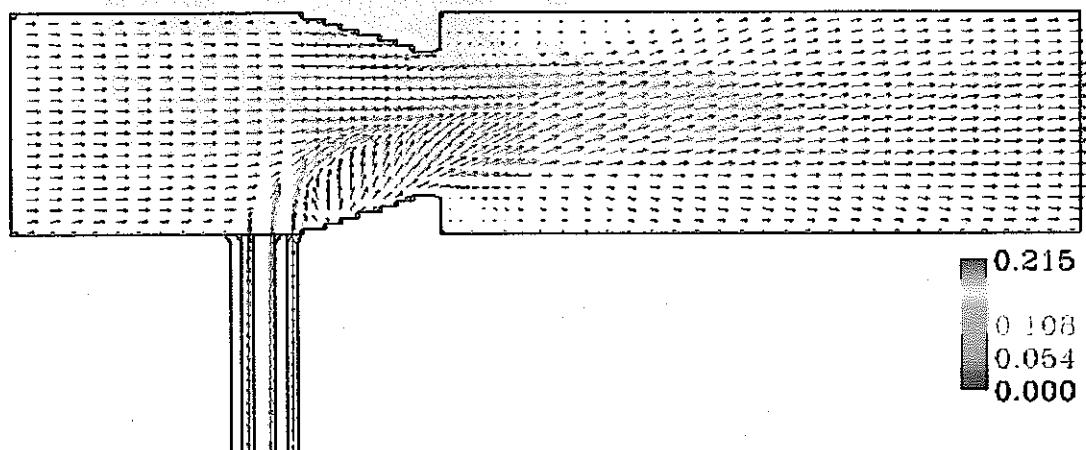


(3) 時間平均流線図

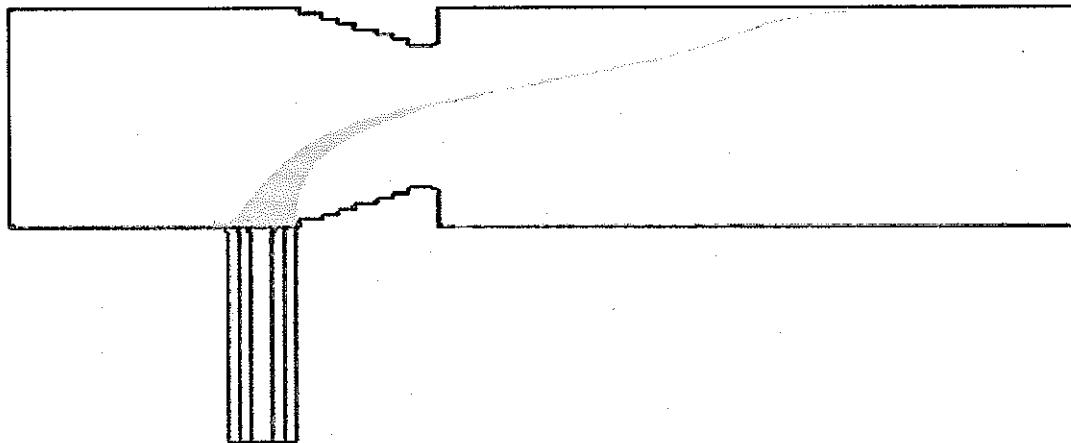
図 4.2 偏向流 (Pattern-B2) の流动パターンの再现性
(Case-F2、 $Re=2000$ 、 $\gamma=5.33$ 、 $\beta=0.481$)



(1) 可視化画像

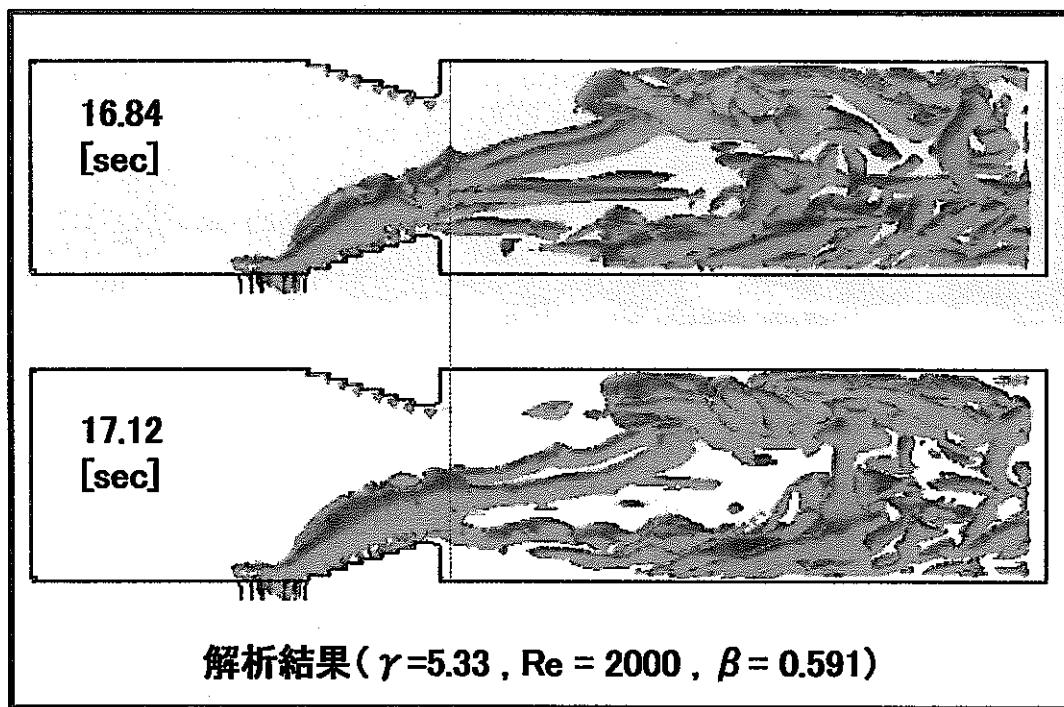


(2) 時間平均速度ベクトル図

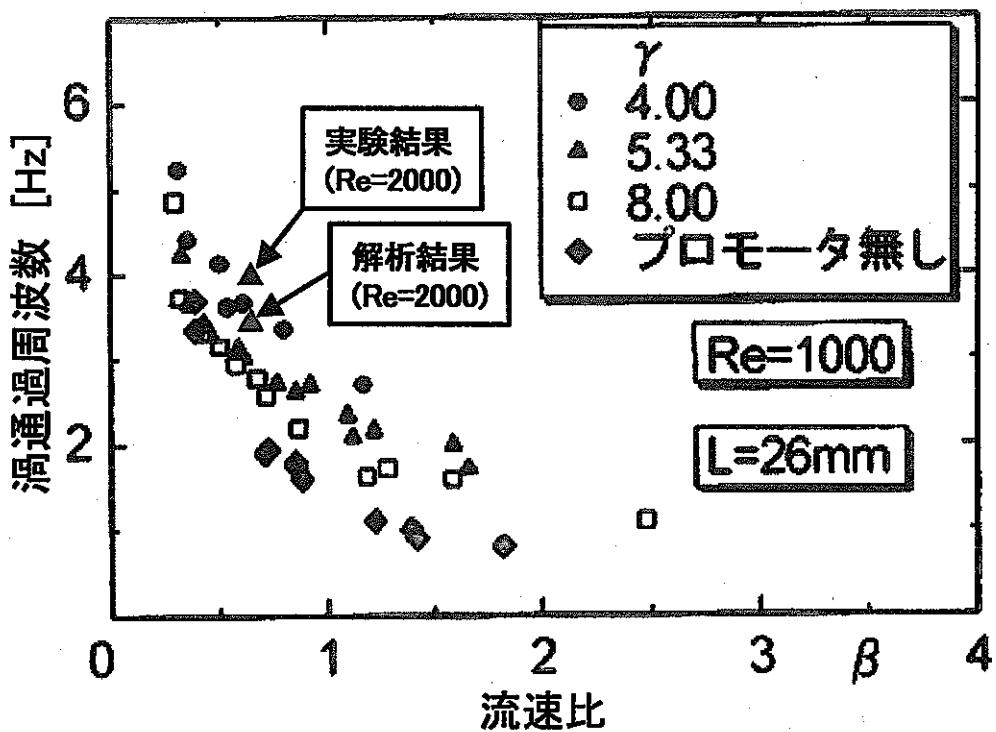


(3) 時間平均流線図

図 4.3 偏向流 (Pattern-B1) の流動パターンの再現性
(Case-F3、 $Re=2000$ 、 $\gamma=5.33$ 、 $\beta=0.591$)



(1) 解析結果の例



(2) 実験結果との比較

図 4.4 偏向流 (Pattern-B1) におけるアーチ状渦の通過周波数特性
(Case-F3, $Re=2000$, $\gamma = 5.33$, $\beta = 0.591$)

5. 乱流プロモータの混合効果

5. 1 軸方向流速変動特性

図 5.1 (1)から(3)に軸方向流速変動 (U') の軸方向断面分布を示す。図 5.1 (1)に付着流 (Pattern-C) の場合、図 5.1 (2)に偏向流 (Pattern-B2) の場合、図 5.1 (3)に偏向流 (Pattern-B1) の場合を示す。軸方向流速の変動強度 U' は以下の式に従って評価した。

$$U' = \sqrt{\frac{\sum (u - U)^2}{N}}, \quad N=700$$

ここで、 U は時間平均軸方向流速、 u は瞬時の軸方向流速を示す。

(1) 衝突流 (Case-F1, Pattern-C) の場合

図 5.1 (1)から、枝配管流の中心部（噴流コア）が乱流プロモータに衝突する箇所では流速変動は小さいが、枝配管流の噴流コアの周辺では流速変動が大きくなっている。また、上側の乱流プロモータの背後で速度変動が強くなっていることから、乱流プロモータの後縁では、主配管流れ（枝配管流との混合流）が剥離するために乱れを生じ、乱流プロモータ背後の後流域との境界で流速変動が強くなると考えられる。また、主配管内表面近傍でも強い流速変動が観察される。上側の乱流プロモータ背後で流速変動の強い箇所は、枝配管流と主配管流との混合が促進されていると考えられる。従って、非等温条件では、この領域で強い温度変動が生じる可能性がある。また、下側の乱流プロモータ後流域においても速度変動は強くなっているが、図 4.1(1)の可視化画像から分かるように、下側の乱流プロモータ後流域には主配管流と枝配管流が混合して存在するため、非等温条件では温度変動が生じる可能性がある。一方で、乱流プロモータの下流側では枝配管からの染料が拡散しており、ほぼ均一な模様を呈している。このことは、乱流プロモータの下流側では流体の混合が効率的に行われており、ここでの温度変動の振幅は小さいと考えられる。つまり、この流動パターンで注視すべきは、上側の乱流プロモータの斜面上での温度変動と、乱流プロモータ背後での温度変動である。

(2) 偏向流 (Case-F2, Pattern-B2) の場合

図 5.1 (2)から、図 4.2(3)に示した時間平均流線に沿って軸方向流速変動が強くなっていることが分かる。この領域は、枝配管流と主配管流とが衝突する界面であり、また、図 4.2 (1)の可視化画像で衝突界面上に大きな渦構造が見られることからも、この衝突界面で流体混合が活発であることが分かる。枝配管流前面の衝突界面で生じた軸方向流速変動が下流に輸送される際に、上側の乱流プロモータの後縁で流れが剥離して、プロモータ背後の後流域と干渉するため、乱流プロモータの背後（後流域と主配管流との境界）で強い速度変動が生じていると考えられる。さらに、上側の乱流プロモータ下流側の主配管壁面近傍でも流速変動の強い領域が観察される。これらの領域は、主配管流と枝配管流とが混合しながら存在するため、非等温条件の場合には、上側の乱流プロモータの背後および主配管内表面において強い温度変動が生じる可能性がある。一方、下側（枝配管側）の乱流プロモータの背後でも流速変動の強い領域が存在するが、図 4.2 (1)の可視化画像から分かるように、下側の乱流プロモータの後流域には枝配管流（緑色の流体）が存在していない。この下側で生じる流速変動は、主配管流が、枝配管流と乱流プロモータを通過する際に生じる主配管流の速度変動であったと考えられる。従って、この領域は主として主配管流が占めており、非等温条

件における主配管下面の温度変動強度は小さいと考えられる。この流動パターンで注視すべきは、上側の乱流プロモータの後縁から背後および下流側の主配管内表面での温度変動である。

(3) 偏向流 (Case-F3、Pattern-B1) の場合

図 5.1(3)から、枝配管流と主配管流との衝突界面での流速変動は大きく、この流速変動の大きな衝突界面は、図 4.3 (2)の時間平均流線の傾きとほぼ一致する。また、図 4.3 (1)から枝配管流と主配管流は、乱流プロモータと衝突することなく、主配管の中心部を混合しながら流れていく様子が分かる。上下の乱流プロモータの後縁では、剥離した主配管流（枝配管との混合流）と後流域の流れとが干渉するため、その境界近傍で大きな流速変動が生じていると考えられるが、図 4.3(1)の可視化画像から分かるように上下の乱流プロモータの背後には、枝配管流は存在せず（緑色でない）、主として主配管流が流れている。従って、乱流プロモータの背後では流速変動は強いが、非等温条件での温度変動は小さいと予想される。また、枝配管流は、上側の乱流プロモータの下流側で主配管内表面に接しているが、図 4.2 および図 4.3 の比較から、Pattern-B1 の方が、Pattern-B2 の場合に比べて乱流プロモータ後縁から付着点までの距離は長く、混合が十分に進んだ後に内表面に付着すると考えられる。従って、この付着点で生じる温度変動の振幅は比較的小さいことが予想される。Pattern-B1 と Pattern-B2 とで温度変動強度分布は類似しているが、温度変動強度の絶対値で見ると Pattern-B2 の方が流速変動は大きいことが分かる。

5. 2 瞬時のスワール強度分布

スワール強度 s とは、以下に示すように、速度勾配テンソルの固有値のうち、共役複素解 λ_c の虚数部 c を指す^[19]。

$$\lambda_c = b \pm ic$$

$$s = |c|$$

速度勾配テンソル A_{ij} は、歪み速度テンソル S_{ij} と回転テンソル Ω_{ij} の和として表すことができる。

$$A_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = S_{ij} + \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

速度勾配テンソル A_{ij} の固有値 λ は、以下のように表せる。

$$A_{ij} r_i = \lambda r_i$$

ここで、 r_i は A_{ij} の固有ベクトルである。固有値 λ は、以下の固有方程式を解いて得られる。

$$|A_{ij} - \lambda \delta_{ij}| = 0$$

詳細については、付録を参照のこと。

スワール強度 s とは、観測対象とする流れ場が回転流れの成分を持つ場合に、その回転流れの強さを示している。つまり、スワール強度の等値面を見ることによって、立体的な渦構造を見ることができる。渦度によつても回転流れを見ることは可能であるが、渦度はベクトル量であるため、面方向の渦構造しか捉えられない。スワール強度の場合は、スカラー量であるため、3次元的な渦構造を捉えることができるという

利点がある。

図 5.2(1)から(3)に、可視化画像結果と解析より求めたスワール強度分布の可視化画像を比較して、流動パターン毎に示す。

(1) 衝突流 (Case-F1、Pattern-C) の場合

図 5.2(1)に衝突流 (Pattern-C) の場合について示す。可視化実験では、枝管からの流れが枝管と反対側の上側の乱流プロモータに衝突した後、主流と急速に混合しながら流下してゆく様子が観察されている。枝配管の出口から乱流プロモータに衝突するまでの枝配管流の広がりなど、スワール強度分布を見ることによって、可視化実験と同様な流れの構造を見ることができる。乱流プロモータの下流側では、主配管流路内全体に複雑な渦構造を見ることができ、この複雑な渦流れによって流体の混合が促進されていることが分かる。また、流れ方向に垂直な水平方向の渦だけでなく、主配管流れに平行な縦渦が数多く存在している。図 5.2 に示す他の流動パターンと比較すると、衝突流の場合、比較的小規模の渦が数多く存在していることが分かる。

(2) 偏向流 (Case-F2、Pattern-B2) の場合

図 5.2(1)に偏向流 (Pattern-B2) の場合について示す。枝配管流から縦渦が下流側に伸びているのが分かる。90 度の曲がり管内を流体が流れる場合、遠心力の作用により断面内には双子の渦が生じる。T 字配管合流部の場合、枝配管流が主配管流と衝突して進行方向を 90 度曲げられる際に、エルボ流れと同様なメカニズムで枝配管流軸に垂直な断面内に双子渦が形成される。この流れ方向に渦軸をもつ双子渦が、2 本の縦渦として見えているものと考えられる。この縦渦は、図 2.3 (b)で観察されたアーチ状渦の足にあたる。乱流プロモータ下流側の上側の主配管表面近傍に流れ方向に垂直な渦（アーチ状の渦）が見られるが、これは乱流プロモータ後縁から離れたせん断層が壁面に付着して発達したものであると考えられる。また、下側の乱流プロモータの下流では顕著な渦構造は見られない。このことからも、上側の乱流プロモータ背後での温度変動について調べる必要がある。

(3) 偏向流 (Case-F3、Pattern-B1) の場合

図 5.2(3)は偏向流 (Pattern-B1) の場合について示す。枝配管流から縦渦が下流側に伸びているのが分かる。これは、図 5.2(2)に示した Pattern-B2 の場合と同様に、枝配管流軸に生じる双子渦が、2 本の縦渦として見えているものと考えられる。さらに、図 2.3(b)で見られたアーチ状渦と考えられる渦構造が、乱流プロモータで挟まれたスロート部の下流側に見ることができる。また、乱流プロモータの下流側では、Pattern-B2 の場合に比べて複雑な渦構造を主配管内全体に見ることができる。

5. 3 瞬時 CFV 等値面空間分布の時間推移

クロスフロー流速 (CFV) は以下の式によって定義される。

$$CFV = \sqrt{v^2 + w^2}$$

ここで、v および w は主流方向に垂直な方向（断面内）の流速成分である。この指標によって、軸方向に垂直な断面内での 2 次流れの強さを把握することができる。

(1) 衝突流 (Case-F1、Pattern-C) の場合

図 5.3(1)に衝突流 (Pattern-C) の場合の瞬時 CFV 等値面空間分布の時間推移を示す。図 5.3(1)および図 5.2(1)から、主配管流に対して垂直に流入した枝配管流が乱流プロモータの壁面に衝突し、この衝突領域で強い2次流れ（渦）が定常に発生していることが分かる。合流部下流側の流路拡大部では、さきの衝突領域で発生した渦が主配管の壁面に広く分布しており、噴流と周囲流体と混合してゆく様子が把握できる。

(2) 偏向流 (Case-F2、Pattern-B2) の場合

図 5.3(2)に偏向流 (Pattern-B2) の場合の瞬時 CFV 等値面空間分布の時間推移を示す。主配管流に対して垂直に流入した枝配管流が、次第に主流方向に向きを変え、下流に流れゆく様子が分かる。枝配管流の上側と、下側乱流プロモータの斜面に沿った領域で、CFV の強い領域が観察される。上側の領域は主配管流と枝配管流の衝突によって、枝配管流が曲げられた際に生じる2次流れによるものであり、下側の乱流プロモータの斜面に沿った領域は、主配管流が、枝配管流および乱流プロモータを通過する際に、枝配管流背後に巻き込まれながら流れることによって生じたと考えられる。また、乱流プロモータ後縁部（スロート部）と出口境界（解析体系）との中間位置付近で断面方向に渦が広く分布する。つまり、乱流プロモータに挟まれるスロート部の下流側で枝配管流と周囲流体である主配管流との混合が顕著になっていることが分かる。

(3) 偏向流 (Case-F2、Pattern-B1) の場合

図 5.3(3)に偏向流 (Pattern-B1) の場合の瞬時 CFV 等値面空間分布の時間推移を示す。図 5.3(2)の場合 (Pattern-B2) に類似しており、枝配管流の上側と、下側乱流プロモータの斜面に沿った領域で、CFV の強い領域が観察される。また、乱流プロモータ後縁部（スロート部）と出口境界（解析体系）との中間位置付近で断面方向に渦が広く分布することから、この位置から下流側では枝配管流と周囲流体である主配管流との混合が顕著になっていることが分かる。

5. 4 瞬時渦度空間分布の時間推移

(1) 衝突流 (Case-F1、Pattern-C) の場合

図 5.4(1)に衝突流 (Case-F1、Pattern-C) の場合について、主流方向に垂直な断面における瞬時の渦度 ω_j （法線方向は紙面に対して垂直であり、紙面に向かって右回転が赤、左回転が青を示す）の空間分布の時間推移を示す。

主配管流との衝突によって枝配管流の両側で、回転の向きが互いに異なる混合層が形成され、途切れることなく、乱流プロモータの斜面近くまで達している。また、枝配管流の衝突地点の下流側では、枝配管流の背後で小さな渦が継続的に生成され、乱流プロモータの背後で上側の主配管表面に付着している様子が分かる。この時生じる渦は、枝配管から分離したものと考えられ、枝配管流周辺の主配管流中に存在するため、渦の中心部と周辺では大きな温度差が生じていることが予想される。従って、上側の乱流プロモータ背後の主配管表面では振幅の大きな温度変動が発生する可能性がある。また、枝配管側の下側の乱流プロモータ斜面に沿っても強い渦度が観察され、乱流プロモータ後縁で剥離した渦が主流方向に引き延ばされつつ分断されて流れしていく様子が分かる。これは、主配管流によって引き起こされると考えられる。この渦

は、乱流プロモータの下流側での流体混合を促進させる効果があると考えられる。

(2) 偏向流 (Case-F2、Pattern-B2) の場合

図 5.4(2)に偏向流 (Case-F2、Pattern-B2) の場合について、主流方向に垂直な断面における瞬時の渦度 ω_j (法線方向は紙面に対して垂直であり、紙面に向かって右回転が赤、左回転が青を示す) の空間分布の時間推移を示す。

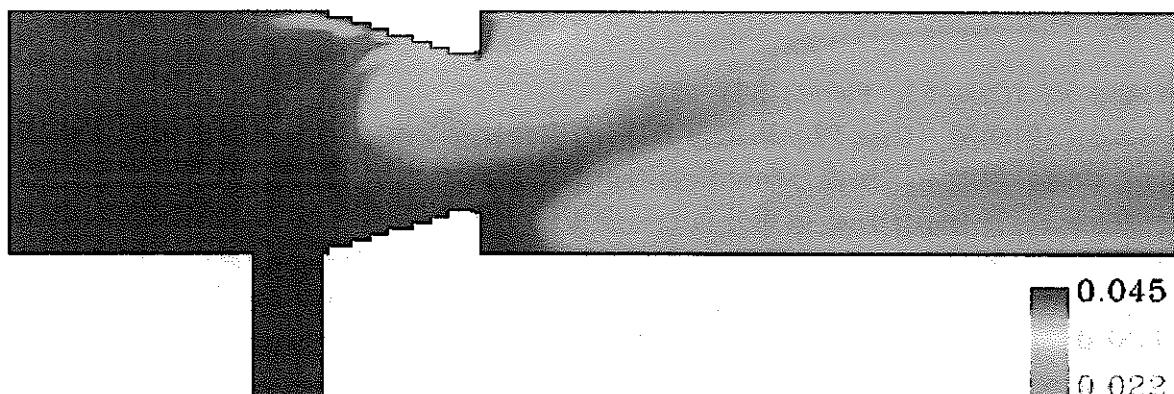
主配管流との衝突によって、枝配管流の両側に回転の向きが互いに異なる混合層が形成されている様子が分かる。ただし、枝配管流の前面の混合層（負（青色）の渦度を持つ領域）は、主配管中央部で途切れている。これは、偏向流の場合、枝配管と反対側の上側の乱流プロモータに衝突することではなく、乱流プロモータに挟まれたスロート部を流れて行くことによるもので、枝配管流の上端と上側の乱流プロモータの間を強い主配管流が流れるためである。つまり、乱流プロモータを設置することによって、流路が狭められて上側の乱流プロモータ斜面を主配管流が加速して流れることによって、枝配管流が乱流プロモータ斜面に衝突することを妨げていると考えられる。従って、上側の乱流プロモータの斜面近傍に主配管流が主として存在するため、温度変動の振幅は小さいことが予想される。また、上側の乱流プロモータの後縁からせん断層がはく離している様子が観察できる。この剥離したせん断層はその下流側において周期的な渦列を形成している。このせん断層には、温度の異なる枝配管流と主配管流とが混合して存在していると考えられ、乱流プロモータ背後での温度変動は大きいことが予想される。一方、下側の乱流プロモータから剥離したせん断層は、主配管流が乱流プロモータを通過する際に生じるものであり温度変動は小さいと考えられる。この剥離したせん断層は、その下流側で渦を生じており、乱流プロモータの下流側における流体混合を促進していることが分かる。

(3) 偏向流 (Case-F3、Pattern-B1) の場合

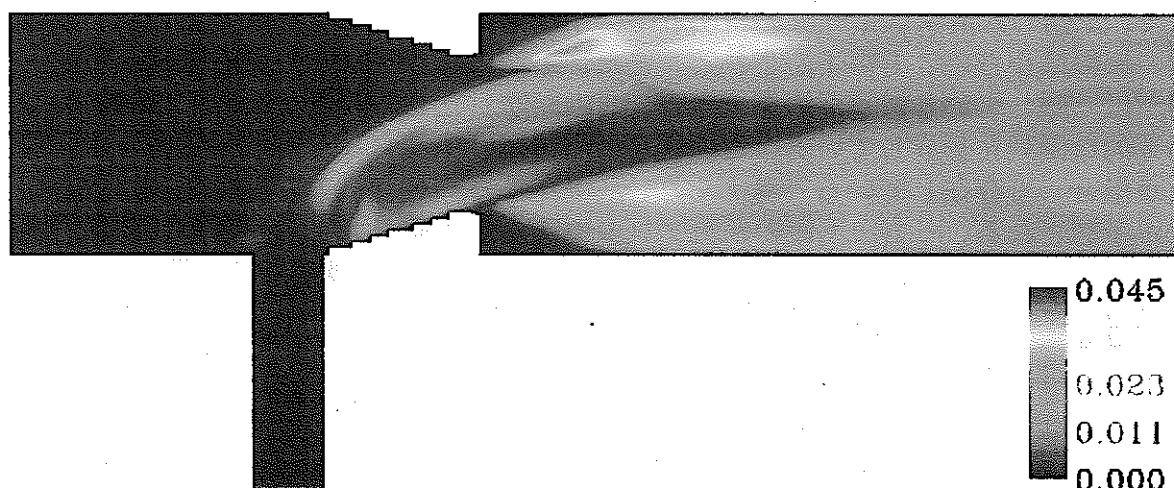
図 5.4(3)に偏向流 (Case-F3、Pattern-B1) の場合について、主流方向に垂直な断面における瞬時の渦度 ω_j (渦度ベクトルは紙面に対して垂直) の空間分布の時間推移を示す。

渦度分布の傾向は、同じく偏向流に分類される Pattern-B2 の場合と類似している。主配管流との衝突によって、枝配管流の両側に回転の向きが互いに異なる混合層が形成されている様子が分かる。また、Pattern-B2 と同様に前面の混合層は途中で消え、枝配管背後の混合層のみが残っていることが分かる。この混合層はスロートを越えた下流まで伸び、その先端で渦を放出している。また、上下側の乱流プロモータの後縁から剥離したせん断層は、乱流プロモータの下流側で渦を形成していることが分かる。さらに、枝配管流が主配管流中で柔らかな障害物となるために、枝配管背後には後流が形成され、渦が形成されている様子が確認できる。

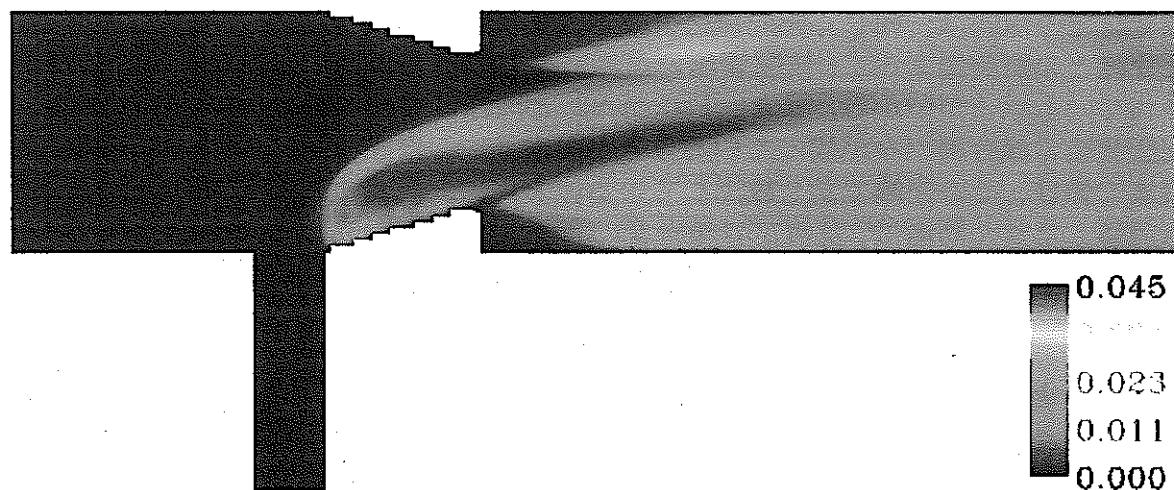
以上のことから、乱流プロモータを設置することによって流路断面積が狭められ、主配管流が乱流プロモータ斜面上を加速して流れることにより、枝配管流が乱流プロモータに衝突することを妨げている。また、乱流プロモータの後縁では、流れが剥離することによって、その下流側で渦を生じており、流体混合に重要な役割を持っていると言える。ただし、枝配管の反対側にある上側の乱流プロモータ背後では、温度の異なる主配管流と枝配管流とが混合しながら主配管表面に付着するため、振幅の大きな温度変動を生じる可能性がある。



(1) 衝突流 (Pattern-C) (Case-F1、Re=2000、H=75[mm]、 $\beta=0.262$)



(2) 偏向流 (Pattern-B2) (Case-F2、Re=2000、H=75[mm]、 $\beta=0.481$)



(3) 偏向流 (Pattern-B1) (Case-F3、Re=2000、H=75[mm]、 $\beta=0.591$)

図 5.1 軸方向流速変動の軸方向断面分布

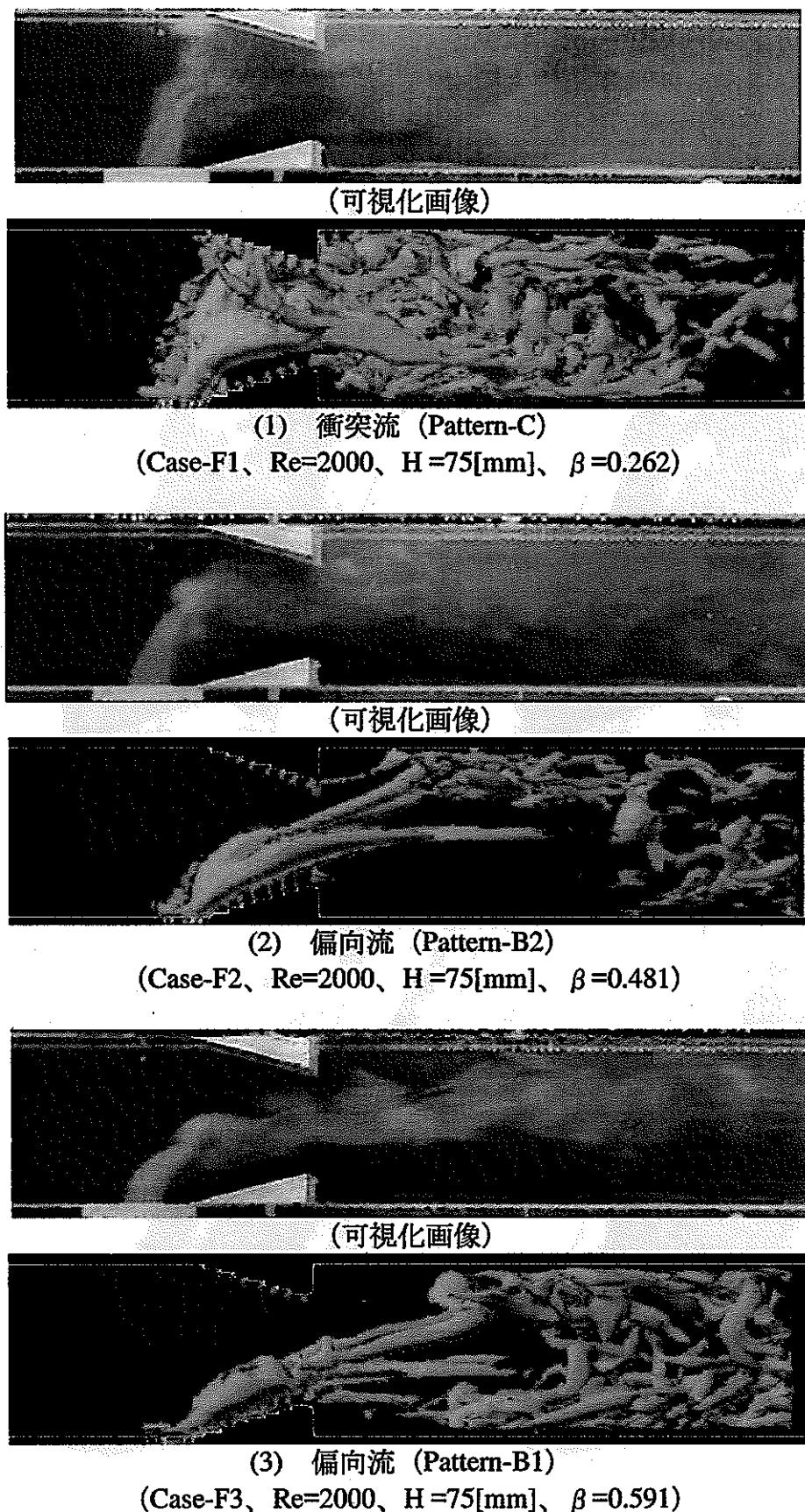


図 5.2 瞬時のスワール強度等値面分布の投影図

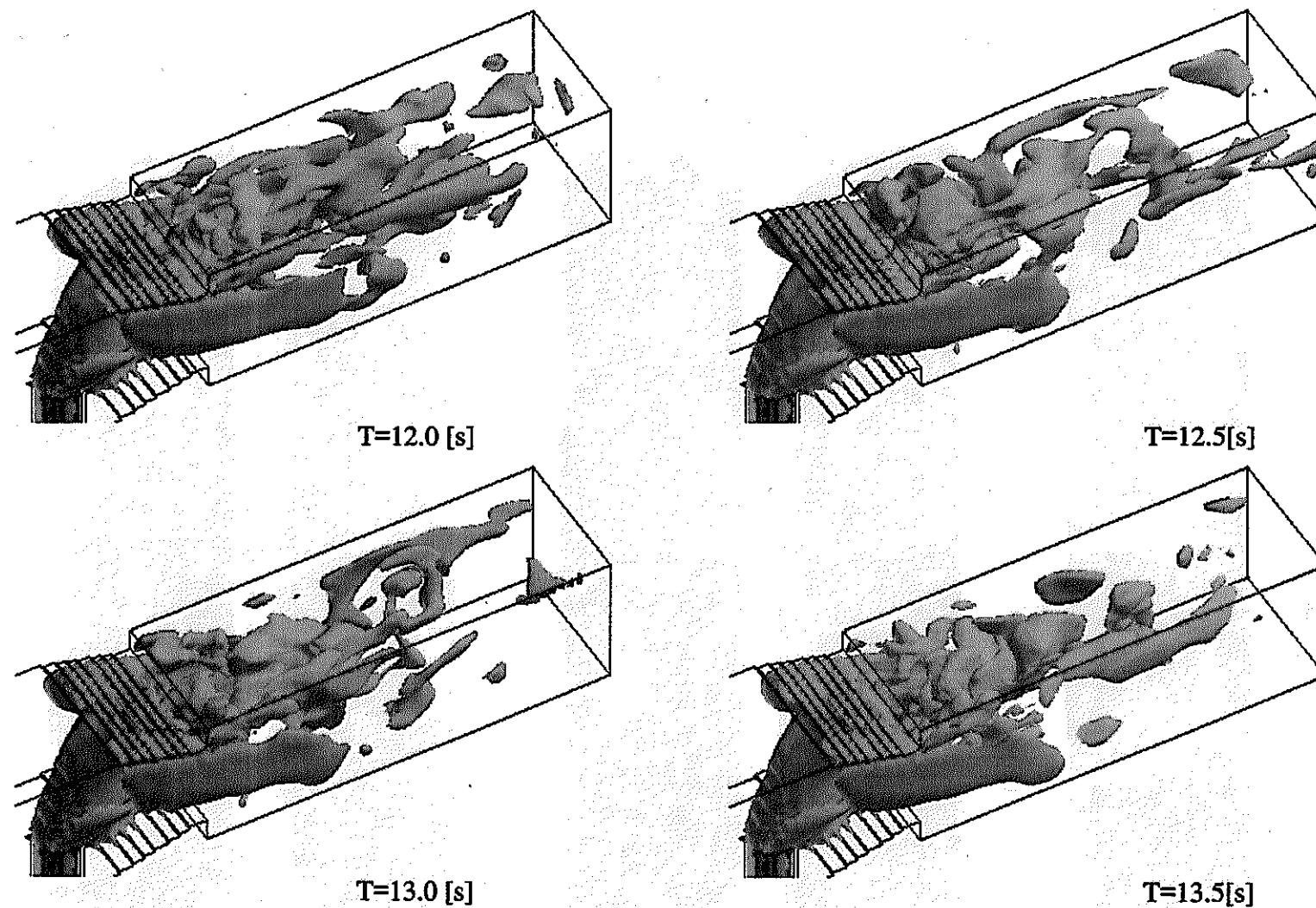


図 5.3(1) 衝突流 (Pattern-C) における瞬時 CFV 等値面 ($0.03[\text{m/s}]$) の空間分布の時間推移
(Case-F1、 $\text{Re}=2000$ 、 $H=75[\text{mm}]$ 、 $\beta=0.262$)

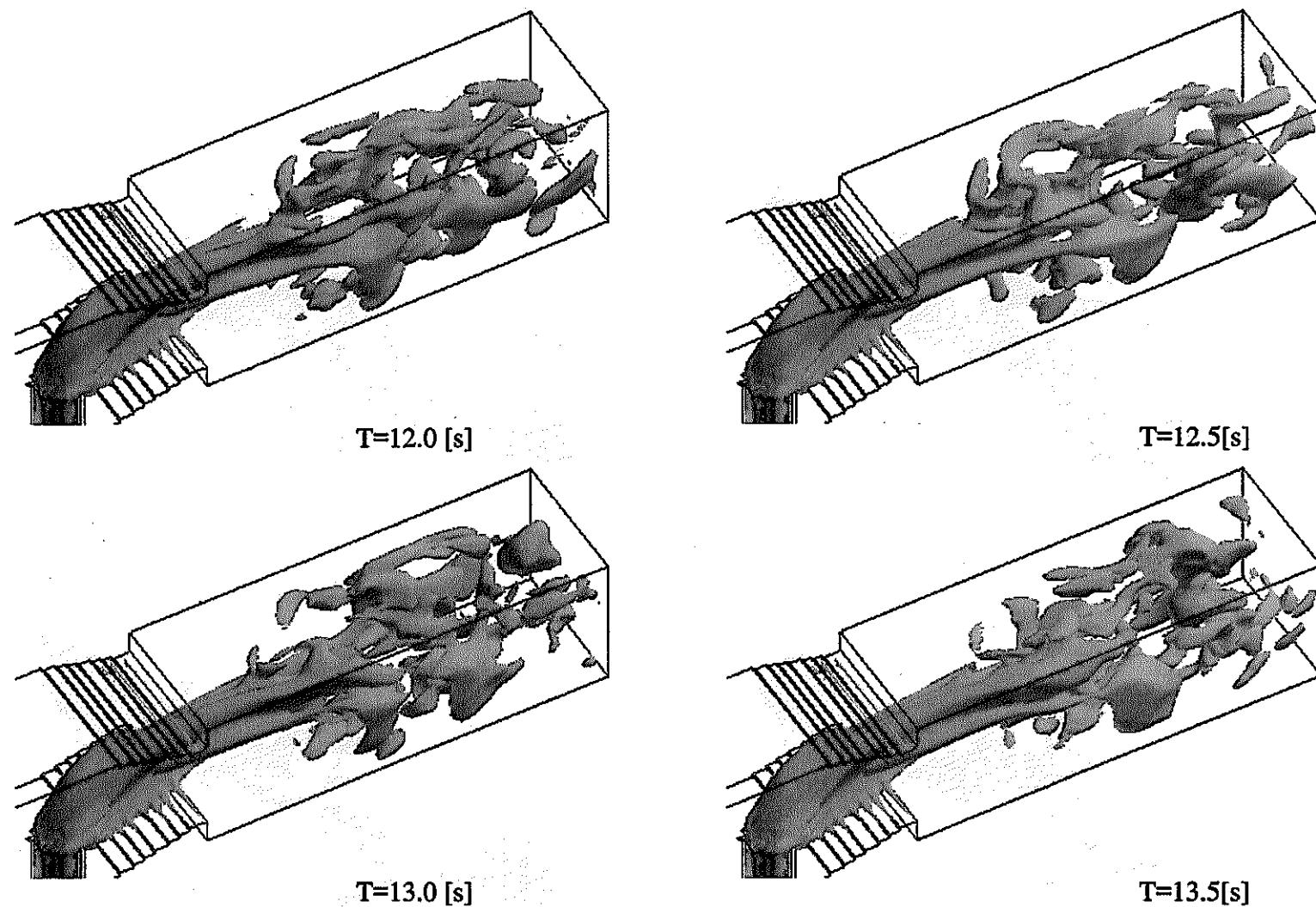


図 5.3(2) 偏向流 (Pattern-B2) における瞬時 CFV 等値面 ($0.02[\text{m/s}]$) の空間分布の時間推移
(Case-F2、 $\text{Re}=2000$ 、 $H=75[\text{mm}]$ 、 $\beta=0.481$)

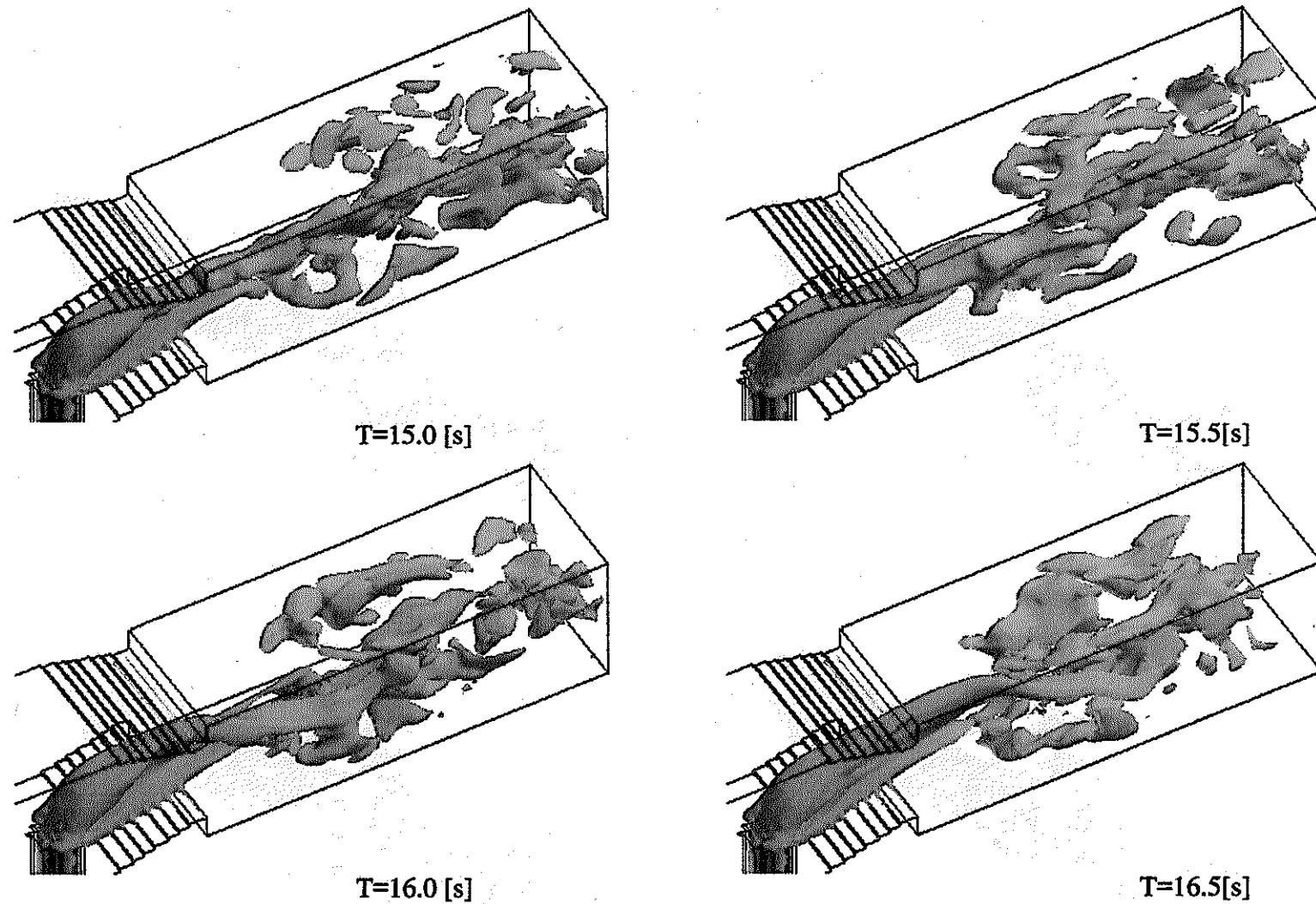


図 5.3(3) 偏向流 (Pattern-B1) における瞬時 CFV 等値面 ($0.02[\text{m/s}]$) の空間分布の時間推移
(Case-F3、 $\text{Re}=2000$ 、 $H=75[\text{mm}]$ 、 $\beta=0.591$)

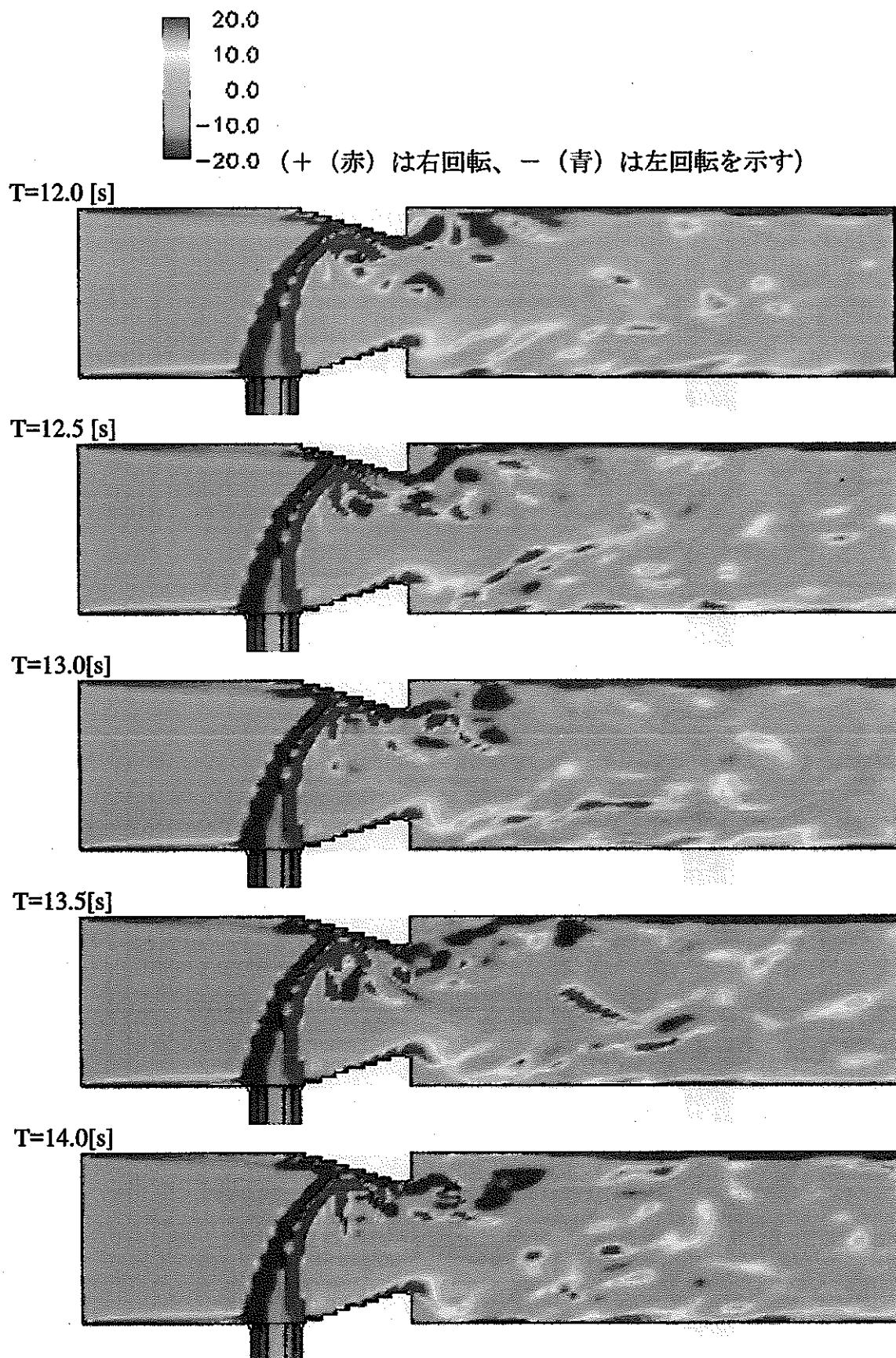


図 5.4(1) 衝突流 (Pattern-C) における瞬時渦度の空間分布の時間推移
(Case-F1、Re=2000、H=75[mm]、 $\beta=0.262$)

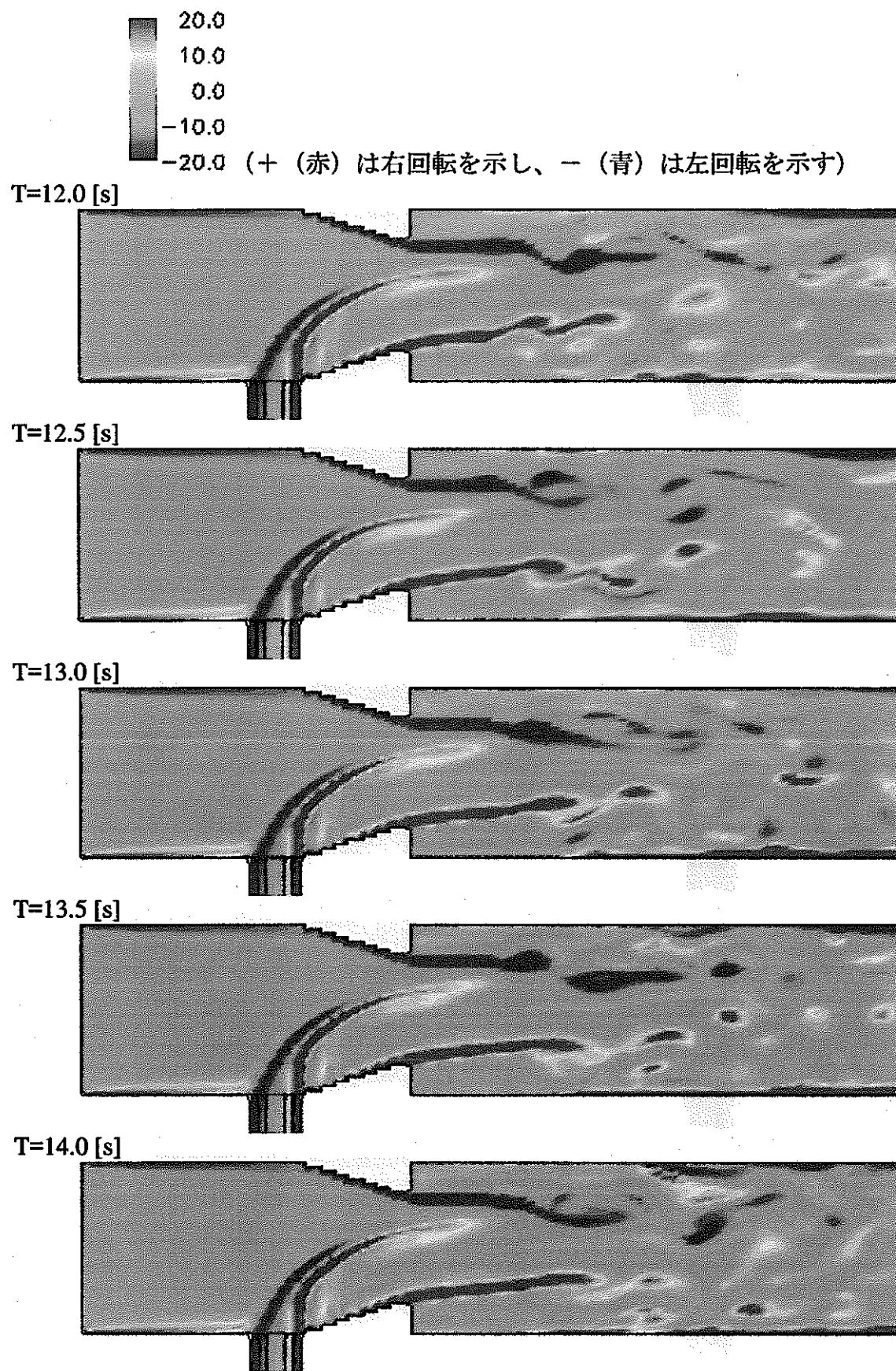


図 5.4(2) 偏向流 (Pattern-B2) における瞬時渦度の空間分布の時間推移
(Case-F2、 $Re=2000$ 、 $H=75[\text{mm}]$ 、 $\beta=0.481$)

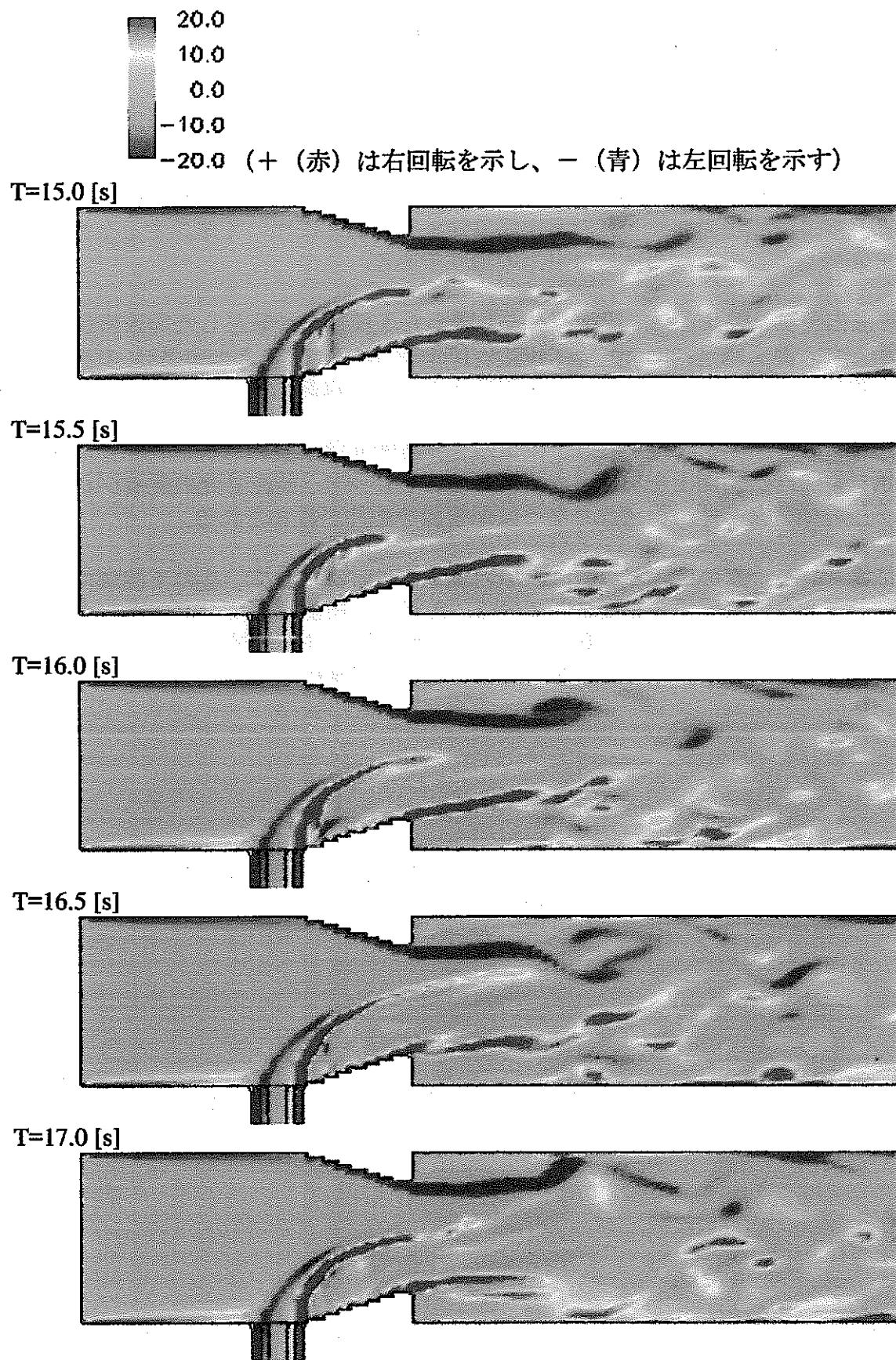


図 5.4(3) 偏向流 (Pattern-B1) における瞬時渦度の空間分布の時間推移
(Case-F3、 $Re=2000$ 、 $H=75[\text{mm}]$ 、 $\beta=0.591$)

6. 結 言

準直接シミュレーションコード (DINUS-3) を用いて、流体温度ゆらぎの高振幅成分と低周波成分を積極的に低減させることができ可能な流体混合促進機構 (乱流プロモータ) を有する T 字配管合流部において、数値シミュレーションにより流れ場を再現できること、および乱流プロモータの混合促進効果の有効性について確認するため、実験解析を実施した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 可視化実験で観測された流動パターンのうち 3 種類を対象とした実験解析を実施した。衝突流 (Pattern-C)、偏向流 (Pattern-B1 および Pattern-B2) の流れ場を数値シミュレーションにより再現できることを確認した。
- (2) 乱流プロモータを設置することによって流路断面積が狭められ、主配管流が乱流プロモータ斜面上を加速されて流れることにより、枝配管流の乱流プロモータへの衝突を妨げ、衝突流となる枝配管流速条件が緩和される。
- (3) 乱流プロモータの後縁では、流れが剥離することによって、その下流側で渦を生じており、流体混合を促進している。ただし、枝配管の反対側にある上側の乱流プロモータ背後では、温度の異なる主配管流と枝配管流とが混合しながら主配管表面に付着するため、振幅の大きな温度変動を生じる可能性がある。

謝 辞

本報告書の作成にあたり、有益な助言およびコメントを頂いた大洗工学センター要素技術開発部 次世代機器研究グループ 平林 勝 副主任研究員に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T. Muramatsu : "Numerical Analysis of Nonstationary Thermal Response Characteristics for a Fluid - Structure Interaction System", Journal of Pressure Technology, Vol. 121, pp. 276-282 (1999)
- [2] T. Muramatsu : "Frequency Evaluation of Temperature Fluctuations Related to Thermal Striping Phenomena Using the DINUS-3 Code", Proc. ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 253, pp. 111-121 (1993)
- [3] T. Muramatsu : "Thermal Response Evaluation of Austenitic Stainless Steels Due to Random Sodium Temperature Fluctuations Using DINUS -3 and BEMSET Codes", Proc. ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 337, pp. 215-223 (1996)
- [4] T. Muramatsu : "Evaluation of Thermal Striping Phenomena at a Tee Junction of LMFR Piping Systems with Numerical Methods (I)", Proc. 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15), Vol. IV, pp. 217-224 (1999)
- [5] 村松 壽晴 : "国際原子力機関主催「実炉データを用いた熱構造力学・熱流動解析コードの検証」研究プログラム (I) - 仏国高速炉フェニックスでの高サイクル熱疲労事象に関わる熱流動ベンチマーク解析 - ", PNC TN9410 97-058, (1997)
- [6] 笠原 直人 : "国際原子力機関主催「実炉データを用いた熱構造力学・熱流動解析コードの検証」研究プログラム (2) - 仏国高速炉フェニックスでの高サイクル熱疲労事象に関わる構造ベンチマーク解析 - ", PNC TN9410 97-082, (1997)
- [7] 村松 壽晴 : "高速炉配管合流部におけるサーマルストライピング条件の解析的検討 (I) - 配管合流部における流速比に関する検討 - ", PNC TN9410 98-007, (1998)
- [8] 村松 壽晴 : "高速炉配管合流部におけるサーマルストライピング条件の解析的検討 (II) - 高速原型炉「もんじゅ」炉外燃料貯蔵槽配管合流部に対する検討 - ", PNC TN9410 98-044, (1998)
- [9] 村松 壽晴 : "高速炉配管合流部におけるサーマルストライピング条件の解析的検討 (III) - 配管合流部における口径比に関する検討 - ", JNC TN9400 99-032, (1999)
- [10] 村松 壽晴 : "高速炉配管合流部におけるサーマルストライピング条件の解析的検討 (IV) - 配管合流部下流領域における乱流 2 次モーメントに関する検討 - ", JNC TN9400 2000-008, (2000)
- [11] 村上 諭、村松 壽晴 : "高速炉配管合流部におけるサーマルストライピング条件の解析的検討 (V) - アーチ渦発生に関する流動条件の検討 - ", JNC TN9400 2001-067, (2001)
- [12] 村上 諭、村松 壽晴 : "高速炉配管合流部におけるサーマルストライピング条件の解析的検討 (VI) - 非等温場におけるアーチ渦構造の数値解析的検討 - ", JNC TN9400 2002-011, (2002)
- [13] M. Igarashi, et al. : "Experimental Study on Fluid Mixing For Evaluation of Thermal Striping in T-pipe Junction", Proc. of 10th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE10), USA, April 14-18, (2002).
- [14] M. Igarashi, et al. : "Study on Fluid Mixing Phenomena for Evaluation of thermal Striping in a Mixing Tee", The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor

- Thermal Hydraulics (NURETH-10), Korea, October 5-9, (2003).
- [15] M. Igarashi, et al. : "Study on Fluid Temperature Fluctuation and Transfer to Wall in a Mixing Tee" , Proc. of 11th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE11), JAPAN, April 20-23, (2003).
- [16] 須藤 浩三、他：“配管系における複雑乱流場の流動特性に関する研究”、JNC TY9400 2002-001、(2002)
- [17] 先行基礎工学研究に関する平成14年研究概要報告、JNC TN1400 2003-007、(2003)
- [18] J. Laufer, The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow, J., NACA Rept.1174 (1954).
- [19] I. Marusic, et al. : "Detection and Tracking of Coherent Features in a Mach 4 Turbulent Boundary Layer" , AIAA 2000-2414.

付 錄 スワール強度の定義

A 1. スワール強度

スワール強度 s とは、以下に示すように、速度勾配テンソルの固有値のうち、共役複素解 λ_c の虚数部 c を指す^[19]。

$$\begin{aligned}\lambda_c &= b \pm ic \\ s &= |c|\end{aligned}\quad (1)$$

速度勾配テンソル A_{ij} は、歪み速度テンソル S_{ij} と回転テンソル Ω_{ij} の和として表すことができる。

$$A_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = S_{ij} + \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

まずは、簡単のために2次元の速度場を考える。

$$\begin{aligned}A_{ij} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 2 \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_{xy} \\ \omega_{yx} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau \\ \tau & \sigma_{yy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau \quad (4)$$

$$\omega_{xy} = -\omega_{yx} = \omega$$

である。また、連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

により、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} = 0 \quad (6)$$

従って、

$$\sigma_{xx} = -\sigma_{yy} = \sigma \quad (7)$$

となり、最終的に速度勾配テンソルは、

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma & \tau + \omega \\ \tau - \omega & -\sigma \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる。

次に、速度勾配テンソル A_{ij} の固有値 λ ($A_{ij}r_i = \lambda r_i$) を考える。 r_i は固有ベクトル。固有方程式は、以下の通りである。

$$\begin{aligned}|A_{ij} - \lambda \delta_{ij}| &= \begin{bmatrix} \sigma - \lambda & \tau + \omega \\ \tau - \omega & -\sigma - \lambda \end{bmatrix} \\ &= \lambda^2 - \{(\tau^2 + \sigma^2) - \omega^2\} \\ &= 0\end{aligned}\quad (9)$$

このとき固有値 λ の解は、実数解を持つ場合（ゼロも含める）と、虚数解を持つ場合がある。固有値 λ の解については、以下の判別式を用いて判別できる。

$$D = 4\{(\tau^2 + \sigma^2) - \omega^2\} \quad (10)$$

あるいは

$$\Delta = (\tau^2 + \sigma^2) - \omega^2 \quad (11)$$

ここで、実数解を持つ場合（ゼロも含める）には $D > 0$ 、 $\Delta > 0$ でなければならない。また、虚数解を持つ場合には $D < 0$ 、 $\Delta < 0$ である。 Δ に注目すると、右辺第1項と第2項目は併せて伸縮・専断変形の強さを表しており、第3項は回転運動の強さを表している。また、両者ともに正の値をとる。よって、 Δ の符号を考えることによって、流れ場が伸縮・専断変形が優勢であるか、回転運動が優勢であるかについて判別することができる。回転運動が支配的である場合には、 $\Delta < 0$ であるため固有値 λ は以下のように表される。

$$\lambda = \pm \sqrt{(\tau^2 + \sigma^2) - \omega^2} i \quad (12)$$

つまり、解である固有値 λ の絶対値によって、回転運動の強さの程度を調べることができる。

次に、3次元の流れ場を考える。3次元についても多少複雑になるが、2次元と同様である。

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 2 \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & 2 \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} & 0 & \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_{xy} & \omega_{xz} \\ \omega_{yx} & 0 & \omega_{yz} \\ \omega_{zx} & \omega_{zy} & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} + \omega_{xy} & \tau_{xz} + \omega_{xz} \\ \tau_{xy} - \omega_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} + \omega_{yz} \\ \tau_{xz} - \omega_{xz} & \tau_{yz} - \omega_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} & \tau_{xz} &= \tau_{zx} & \tau_{yz} &= \tau_{zy} \\ \omega_{xy} &= -\omega_{yx} & \omega_{xz} &= -\omega_{zx} & \omega_{yz} &= -\omega_{zy} \end{aligned} \quad (14)$$

である。また、連続の式から、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = 0 \quad (15)$$

次に、速度勾配テンソル A_{ij} の固有値 λ ($A_{ij}r_i = \lambda r_i$) を考える。固有方程式は、以下の通りである。

$$\begin{aligned} |A_{ij} - \lambda \delta_{ij}| &= \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - \lambda & \tau_{xy} + \omega_{xy} & \tau_{xz} + \omega_{xz} \\ \tau_{xy} - \omega_{xy} & \sigma_{yy} - \lambda & \tau_{yz} + \omega_{yz} \\ \tau_{xz} - \omega_{xz} & \tau_{yz} - \omega_{yz} & \sigma_{zz} - \lambda \end{bmatrix} \\ &= -(\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

つまり、固有値は、次の3次方程式の解となる。

$$\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R = 0 \quad (17)$$

ここで、

$$P = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = 0, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} Q &= \left| \begin{array}{cc} \sigma_{xx} & \tau_{xy} + \omega_{xy} \\ \tau_{xy} - \omega_{xy} & \sigma_{yy} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} \sigma_{yy} & \tau_{yz} + \omega_{yz} \\ \tau_{xz} - \omega_{xz} & \sigma_{zz} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} \sigma_{xx} & \tau_{xz} + \omega_{xz} \\ \tau_{xz} - \omega_{xz} & \sigma_{zz} \end{array} \right| \\ &= \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx} - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 + \omega_{xy}^2 + \omega_{yz}^2 + \omega_{xz}^2 \\ &= \frac{1}{2}(-S_y S_{ji} - \Omega_y \Omega_{ji}) \\ &= E - \frac{1}{2}S_y S_{ji} \end{aligned} \quad (19)$$

ただし、

$$P^2 = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})^2 = \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + 2(\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx}) = 0 \quad (20)$$

$$\begin{aligned} S_y S_{ji} &= \tau_{xx}^2 + \tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yx}^2 + \tau_{yy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{zy}^2 + \tau_{xz}^2 \\ &= \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + 2(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \\ &= -2(\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx} - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Omega_y \Omega_{ji} &= -\Omega_y \Omega_{ji} \\ &= -(\omega_{xx}^2 + \omega_{xy}^2 + \omega_{xz}^2 + \omega_{yx}^2 + \omega_{yy}^2 + \omega_{yz}^2 + \omega_{zx}^2 + \omega_{zy}^2 + \omega_{xz}^2) \\ &= -2(\omega_{xy}^2 + \omega_{yz}^2 + \omega_{xz}^2) \end{aligned} \quad (22)$$

$$E = -\frac{1}{2}\Omega_y \Omega_{ji} \quad (23)$$

ここで、 E はエンストロフィーと呼ばれ、渦の強さを示している。また、

$$R = \det(A_y)$$

$$= \left| \begin{array}{ccc} \sigma_{xx} & \tau_{xy} + \omega_{xy} & \tau_{xz} + \omega_{xz} \\ \tau_{xy} - \omega_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} + \omega_{yz} \\ \tau_{xz} - \omega_{xz} & \tau_{yz} - \omega_{yz} & \sigma_{zz} \end{array} \right| \quad (24)$$

以上のことから最終的な固有方程式は以下のようになる。

$$\lambda^3 + Q\lambda^2 + R = 0 \quad (25)$$

今、この解が一つの実数解と2つの共役複素数解を持つと仮定する。つまり、実数解 a と共役複素数解の実数部 b と虚数部 c を導入すると、固有方程式は以下のようにもかける。

$$\begin{aligned} (\lambda - a)(\lambda - (b + ci))(\lambda - (b - ci)) &= (\lambda - a)(\lambda^2 - 2b\lambda + (b^2 + c^2)) \\ &= \lambda^3 - (a + 2b)\lambda^2 + (2ab + b^2 + c^2)\lambda - a(b^2 + c^2) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

この展開式（式(26)）と固有方程式（式(25)）を比較すると以下の関係式を得る。

$$P = -(a + 2b) = 0 \quad (27a)$$

$$Q = 2ab + b^2 + c^2 \quad (27b)$$

$$R = -a(b^2 + c^2) \quad (27c)$$

これらを用いて、 Q について解くと、

$$Q = -\frac{3}{4}a^2 + c^2 \quad (28a)$$

$$b = -\frac{1}{2}a \quad (28b)$$

$$R = -a\left(\frac{1}{4}a^2 + c^2\right) \quad (28c)$$

従って、

$$-\frac{3}{4}a^2 + c^2 = E - \frac{1}{2}S_y S_\mu \quad (29)$$

となり、左辺の値の符号を調べることによって、2次元の場合と同じく、流れ場が伸縮・専断変形が優勢であるか、回転運動が優勢であるかについて判別することができる。ここで c が、いわゆる "Swirl Strength" と呼ばれる指標である。

先に、固有方程式が一つの実数解と2つの共役複素数解を持つと仮定したが、これが成り立つためには、以下の条件が成立しなければならない。

$$D = -4Q^3 - 27R^2 = -108\left(\frac{Q^3}{27} + \frac{R^2}{4}\right) < 0 \quad (30)$$

あるいは

$$\Delta = \frac{Q^3}{27} + \frac{R^2}{4} > 0 \quad (31)$$

ここで、 D および Δ は、2次元の場合と同じく固有方程式の判別式である。

このように、スワール強度とは、観測対象とする流れ場が回転流れの成分を持つ場合に、その回転流れの強さを示している。つまり、スワール強度の等値面を見ることによって、立体的な渦構造を見ることができる。渦度によっても回転流れを見ることは可能であるが、渦度はベクトル量であるため、面方向の渦構造しか捉えられない。スワール強度の場合は、スカラー量であるため、3次元的な渦構造を捉えることができるという利点がある。