

エルボ下流の T 字配管合流部における主配管内 2 次流れと 枝配管流れとの相互作用について

田中 正暁 (Masa-aki TANAKA)¹
村松 壽晴 (Toshiharu MURAMATSU)
サイクル機構 (JNC)

1. はじめに

温度の異なる流体が流れる配管が垂直 (T 字状) に接続する配管合流部 (以下、T 字配管合流部) では、流体の混合現象に伴って配管内の流体に温度変動が生じ、その温度変動が配管材 (構造材) に伝わると、構造材内部に引っ張り・圧縮応力が発生し、場合によっては熱疲労により破損に至る可能性がある (サーマルストライピング現象)。冷却材に液体金属ナトリウムを使用する高速炉においては、水に比べてナトリウムの熱伝導率が高いため、流体の温度変動が構造材に伝わり易く極めて重要な現象である。

核燃料サイクル開発機構 (サイクル機構) では、高速炉のサーマルストライピング評価基準の具体的な検討として、高低温流体の代表的な合流形状である T 字配管合流部を対象とした水流動試験および解析評価を実施している。水平に設置された主配管の下部壁面に枝配管を垂直に設置した T 字配管合流部での、構造健全性に影響を及ぼす可能性がある流体中および壁面での温度変動を把握するため、水を作動流体とした長周期温度変動水流動試験 (WATLON: Water Experiment of Fluid Mixing in T-pipe with Long Cycle Fluctuation) を実施し、併せてその体系を対象とした実験解析を行い、T 字配管合流部における流体混合のメカニズムについて調べている^[1,2]。WATLON で行われた可視化試験結果から、図 1 に示すように主配管流中の枝配管噴流の流動形態は、衝突前の断面平均流速を用いた運動量にて整理され 4 つの流動形態に分類できることが示されている。また、T 字配管合流部におけるサーマルストライピングの原因解明に必要となる合流領域での流れの挙動を調べるため、配管系における複雑乱流場の流動特性に関する研究として広島大学 (現在は愛媛大学) との間で共同研究^[3,4]を実施している。さらに、フランスの高速原型炉「フェニックス」の 2 次冷却系にある T 字配管合流部を模擬した体系で、T 字配管合流部の上流側に設置されたエルボで発生する 2 次流れが T 字配管合流部での流体混合に及ぼす影響について調べる水流動試験を東北大学との間で実施している^[5]。解析評価では、サイクル機構にて「フェニックス」炉の配管系および流動条件を対象とした数値計算を行い、配管合流部での乱流混合に関する知見が得られている^[6]。

本報では、東北大学との共同研究として行われているエルボを有する T 字配管合流部を対象として実験解析を実施し、エルボで発生する 2 次流れが T 字配管合流部の流体混合に及ぼす影響を調べることを目的とした。上流側にエルボを有する場合、エルボで発生する 2 次流れにより T 字配管合流部での混合の様子および温度変動特性が変化すると予想される。また、エルボで生じる 2 次流れ (断面内で発生する対称渦および主流方向流速分布) は断面内の分布に方向性を持っているため、エルボの流れ方

¹ tmasaaki@oec.jnc.go.jp

向と枝配管内の流れ方向の関係によっても、混合の様子および温度変動特性が変化することが予想される。

そこで、上流側にエルボを有する T 字配管合流部における解析評価の第 1 段階として、合流部での温度変動特性を決定する重要なパラメータである枝配管噴流の流動形態について、枝配管の設置角度をパラメータとして数値計算を行い、2 次流れ（エルボ出口での軸方向流速分布および双子渦）が、枝配管噴流の挙動および合流後の温度変動の空間特性に及ぼす影響について数値解析により調べた。

2. 解析方法の概要

2. 1 解析対象

図 2 に本研究で解析対象とした、エルボを有する T 字配管合流部を示す。本体系は、サイクル機構との共同研究として東北大学にて実施された水流動試験の試験部であり、エルボ入口から T 字配管合流部出口までを解析対象とした。

エルボおよび T 字配管合流部の主配管内径 (D_m) は共に 108[mm] であり、本解析で対象とした枝配管の内径 (D_b) は 21[mm] (配管口径比 $D_m/D_b=5.14$) である。以下では、主配管の中心軸と枝配管の中心軸との交点を「合流点」と呼び、高さ方向の基準位置とする。エルボの曲率半径 (R_c) は 152.4[mm] であり、曲率半径比 ($=R_c/D_m$) は 1.41 である。エルボ出口と合流点までの距離は 200[mm] である。ちなみに、図 2 に示す体系で、枝配管内径を 15[mm] (配管口径比 7.2) とした場合、エルボを含めて「フェニックス」の縮尺モデルとなる。エルボ出口と合流点までの距離は、2 次流れの減衰に関係する助走距離として、エルボ流れの影響を把握する上で重要なパラメータであるが、ここでは、実験体系のまま 200[mm] とした。この助走距離 (200[mm]=約 2.0 D_m) では、2 次流れの影響は減衰せずに残っている。助走距離に関する影響については、枝配管のない体系で、エルボで生じる 2 次流れの減衰過程を調べる実験が別途行われており、この実験結果から助走区間と 2 次流れの減衰に関する知見を得て、T 字配管合流部の研究に反映していく。本解析では、エルボと枝配管の流れ方向を変化させ、エルボ出口断面で生じる軸方向流速分布と双子渦の回転方向の違いによる合流部における流体混合の様子を調べるため、図 2 に示すようにエルボへの流入方向と枝配管の流入方向が同じ場合 (設置角度 0[°]) を Case-A とし、流入方向が反対の場合 (設置角度 180[°]) を Case-B として 2 つの体系を解析対象とした。

2. 2 解析条件

表 1 に解析対象とした実験条件を示す。東北大学にて Case-A の条件 (設置角 0[°]) について可視化試験が行われており、この条件では再付着噴流 (図 1(c) 参照) の形態となることが確認されている。幅広い範囲で行われた実験条件から解析条件を選択するに際しては、枝配管噴流が主配管の中心部近くを通過する再付着噴流となる表 1 の条件を選択した。再付着噴流は壁面噴流と偏向噴流との移行段階にあり、2 次流れによって壁面噴流あるいは偏向噴流に移行でき、2 次流れの影響を直感的にも容易に知ることができる。

2.3 解析手順

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¹⁶⁾。DINUS-3 コードの概要を表2に示す。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に本解析で用いたT字配管合流部の格子配置図を示し、図4にエルボの格子配置図を示す。T字配管合流部とエルボの解析は個別に行っている。エルボの解析から得られる3方向成分の流速分布をT字配管合流部の入口境界条件として与え、エルボで発生する2次流れの様子を再現した。既存の実験結果を用いてT字配管合流部の入口境界条件とすることも検討したが、解析条件に合致した体系および流量条件での実験結果が存在しない。また、解析条件に近い条件での実験結果を使用した場合、そもそも流動条件が異なること、計測点と格子配置とが一致しておらず、エルボ断面では特異な流速分布をもっていることから、類似条件での実験結果を内外挿した流速分布は、所望する条件での流れ場を適切に再現できない可能性があると判断し、エルボ流れを個別に解析することとした。

図3に示すT字配管合流部は、デカルト座標系 ($x-y-z$) で、矩形格子を積み重ねて形状を模擬した。枝配管および主配管の断面積に関して、解析モデルと実験装置と等しくなるように格子幅を調整した。エルボ断面とT字配管合流部断面の格子配置は共通しており、エルボ出口での流速値をT字配管合流部の入口境界条件として与える際には何ら補間等を必要としない。T字配管合流部での解析に用いた格子数は総数で1,378,944 ($133 \times 144 \times 72$) であるが、そのうち計算に使用される格子は606,016である。また、エルボの計算で使用される格子数は375,284である。

図4に示すエルボは、曲面図状を出きる限り正確に再現するため円筒座標系 ($r-\theta-z$) で格子を生成し、円筒状 (ドーナッツ状) の1/4の領域を計算した。エルボの断面は矩形格子で模擬しており、下流側に接続するT字配管合流部と同じ格子配置とした。エルボ出口の下流側に3層分の格子をダミーとして配置し、出口境界 (自由流出条件) 条件による影響を軽減するよう工夫した。

T字配管合流部の入口境界条件には、あらかじめ計算したエルボ出口での3方向流速成分の時間平均値を与えている。T字配管合流部での混合の様子を正しく把握するには、T字配管合流部入口境界条件で乱流量を考慮する必要がある。しかし、本解析では、解析評価の第一段階として平均流による影響に着目したため、境界条件に時間変動を考慮しない時間平均値を与えた。エルボの入口境界条件およびT字配管合流部の枝配管入口境界条件には、1/7乗則で仮定した主流方向流速分布を入力した。主配管流体および枝配管流体の温度は入口境界条件で与え、配管壁面は断熱条件とした。入口境界の流速値および流体温度は、計算中、一定の値を与えており、乱流成分などによる速度揺らぎおよび温度揺らぎは考慮していない。壁面条件は、全てノンスリップ条件である。T字配管出口は自由流出条件とした。

T字配管合流部の入口条件に用いたエルボの計算結果は、約0.5秒間の定常計算後の0.05秒間 (時間ステップは 1.0×10^{-6} [s]) の過渡計算結果を時間平均したものである。T字配管合流部の計算は、1.4秒間の定常計算を行った後、過渡計算を実施している。過渡計算では、時間ステップを 1.0×10^{-4} [s] で計算しており、流速値 (3方向成

分)、流体温度等を 0.02 秒間隔 (50[Hz]) でサンプリングしている。現在までに取得されているデータ数は 210 点 (50[Hz]で 4.2 秒間) である。

3. 解析結果

3. 1 エルボ流れの解析結果

図 5 (a) にエルボ流れの解析結果について、エルボ出口での時間平均流速分布を示す。ベクトルは断面内の 2 次流れの様子を示し、カラーコンターは主流方向流速分布を示す。図に示す 3 方向流速成分を T 字配管合流部の入口境界条件として与えている。軸方向の最大流速は 1.35[m/s]であり、断面平均流速の約 1.4 倍であった。また、2 次流れ強度 $((u^2+w^2)^{1/2})$ は断面平均流速の約 47[%]であった。

図 5 (b) に解析条件に近い条件で行われたエルボ流れの実験結果を示してしる。作動流体は空気であり、流速分布は熱線流速計で計測されている。配管内径 (D_m) は 104[mm]、曲率半径比 (D_m/R_c) は 1.5 である。ただし、入口 Re 数は 60,000 であり、解析条件 (約 10^5) と比べて約 1/2 となっている。

実験結果および解析結果とを比較すると、2 次流れの特徴である主流方向流れの非一様な分布と断面内に発生する対称な渦流れが観察され、解析結果は定性的に正しい流れとなっている。しかし、対称渦の位置や主流方向流速分布図状に違いが見られる。エルボ流れを解く際、特にエルボ内で剥離が生じるような場合には、エルボ下流まで一貫して計算し、エルボ下流側の流れの状態 (圧力分布など) を考慮する必要がある。本報での解析はエルボを切り出して計算しているため、エルボの下流側の状態が考慮されず上流支配の流れとなっていることが原因していると考えられる。今後、エルボ下流まで一貫体系での解析を実施する予定である。

3. 2 T 字配管合流部の解析結果

3. 2. 1 枝配管噴流の混合特性

図 6 は、解析結果から得られる主配管および枝配管の中心軸 (合流点) を通る軸方向断面での瞬時の流体温度分布を示す。図 6(a) は枝配管設置角を $0[^\circ]$ とした Case-A の場合であり、図 6 (b) は枝配管設置角を $180[^\circ]$ とした Case-B の場合を示す。赤色は高温側 (主配管入口流体温度 $60[^\circ\text{C}]$) で、青色は低温側 (枝配管入口流体温度 $20[^\circ\text{C}]$) を示している。エルボ内の主流方向流れは、図の右側から流入し上方へ流出し、各 Case の図の下に白抜き矢印で模式的に示している。Case-A の場合、枝配管流れは図の右側から流入し、Case-B の場合は図の左側から流入する。

図 7 は、図 6 と同じ軸方向断面における温度変動強度をカラーコンターで示し、時間平均した流れの様子をベクトルで示している。赤色の濃淡は、主配管と枝配管の入口温度差 ($dT=40[^\circ\text{C}]$) で無次元化した温度変動強度を示している。

Case-A (設置角度 $0[^\circ]$) の場合、合流前の断面平均流速を用いて運動量を評価すると、主配管側は 3.26、枝配管側は 0.123 となり、エルボのない体系における図 1 の分類に従うと壁面噴流に分類されるが、結城らによる可視化試験結果[3]では再付着噴流に分類されることが確認されている。このように、上流側にエルボが存在することによって 2 次流れが発生し、その 2 次流れによって T 字配管合流部での流体混合の様子は変化する。さらに、図 6 に示す瞬時の温度分布および図 7 に示す時間平均流速分

布から、入口での流動条件が同じであっても、枝配管の設置角度によって枝配管噴流の流動形態は異なり、Case-A（設置角度 $0[^\circ]$ ）では再付着噴流から偏向噴流に近い流動形態となる。一方、Case-B（設置角度 $180[^\circ]$ ）の場合は壁面噴流に分類される。実験では、エルボ流れが非定常性を持っていることが確認されているが、解析では時間平均値として与え非定常性を考慮していないことが、解析結果（偏向噴流）と実験結果（再付着噴流）とで流れの様子に若干の違いが生じた原因の一つとして考えられる。

一般にエルボ出口では、エルボ内で働く遠心力によって、軸方向流速がエルボ外側に偏った流速分布となる。また、流動条件によってはエルボ内側に剥離を生じることもある。図7に示すベクトル図から Case-A では、その軸方向流速分布のため、エルボと枝配管との間に循環流れが存在し、枝配管の直前で主配管流れが枝配管側の主配管壁面に付着している。この循環流れによって、枝配管側の主配管流速は局所的に小さな値となり、枝配管噴流が壁面近くを通過して主配管の中央部分にまで流入することができたと考えられる。主配管中心部まで流入した後は、主配管流れが枝配管の反対側で強いために、向きを変えて下流に流されている。

Case-B では、エルボで発生する2次流れの影響により、主配管断面内で枝配管側の軸方向流速が強く（断面平均軸方向流速の約1.4倍）なっており、枝配管噴流は主配管中央部に流入することができず、枝配管噴流の流動形態は壁面噴流であったと考えられる。

エルボの影響に関して、以下の知見が得られる。図1に示したエルボが存在しない場合には、混合直前での主配管流れは断面内でほぼ一様であるため断面平均量によって運動量は評価可能であるが、エルボが存在することにより、主配管断面内で分布を生じ局所的に速度（運動量）が異なるため断面平均値では運動量を評価できず、図1に示した流動形態に従わなかったことが考えられる。従って、局所流速（運動量）を用いて評価することにより、エルボの有無による流速分布の歪みを修正し、一つの流動形態マップで整理できると予想される。

3. 2. 2 衝突界面での混合特性

Case-A では、主配管流れと枝配管噴流との衝突界面における混合の様子に関し、以下の3つの特徴がある。1) 大きいスケールの渦構造が存在し、枝配管からの熱い流体塊が離脱して下流に輸送されること。2) 枝配管噴流の下流側に後流領域が形成されること。そして、3) 枝配管噴流の上流側に生じる循環流により、下方への逆流が生じている。枝配管噴流に衝突した主配管流れのほとんどは、枝配管噴流の側面を回り込んで流れるか、枝配管を乗り越えるようにして流れていくが、図6の瞬時の温度分布から、主配管流れのうち一部は枝配管噴流の前面（上流側）で生じる循環流の影響により、枝配管噴流に衝突した後、高温の枝配管流の一部を掻き取るようにして上流側に逆流していく様子が見られる。

Case-B では、図6に示すように、比較的明確な衝突界面が観察され、枝配管噴流の後流領域では周囲（主配管側）と比べて高温の領域が形成され、枝配管からの流体が壁面に沿って流れていく様子が分かる。Case-B の後流領域の占める範囲は、Case-A の場合と比べて、薄い領域となっており、衝突界面で大きな温度勾配が存在している。さらに、Case-A とは異なり、主配管に流入する際には、枝配管噴流は円柱状の噴流とはならず、枝配管出口の前縁ではなく、枝配管の中央部付近から主配管内に流入し

ていることが分かる。図7から、衝突界面の前縁では、温度変動強度が小さく、後流域の頂部付近で温度変動強度が大きくなっていることが分かる。図6の瞬時の温度分布から分かるように衝突界面の前縁では滑らかな界面が形成されているが、温度変動の大きな領域では衝突界面が波打っており、流体混合が行われていることが分かる。

Case-A および Case-B とともに、衝突界面の混合領域で大きなスケールの渦構造が存在していることが分かる。図8に、以下の式に従い、"Swirl Strength"と呼ばれる指標^[7]によって渦構造の様子を示す。図8は"Swirl Strength"の渦構造が最もよく表現されるような適当な等値面で表示している。

$$A_{ij} = \text{grad}(\vec{u}) \quad (1)$$

$$A_{ij} p_i = \lambda p_j \quad (2)$$

$$s = \text{Im}(\lambda_r \pm i\lambda_i) \quad (3)$$

ここで、s は"Swirl Strength"であり、速度勾配テンソル (A_{ij}) の固有値の虚数部の絶対値をとったものである。 p_i は固有ベクトルである。

図8から、馬蹄状の大きなスケールの渦構造が存在することが分かる。Case-A で生じる馬蹄渦の寿命は短く、発生からすぐに分解され、縦渦や小さな渦構造になるが、Case-B で生じる馬蹄渦の寿命は Case-A の渦とは異なって比較的長く、形状を保ったまま下流まで流されていく。Case-A で生じる馬蹄渦では、3次元的な小さな渦構造に細分化されることから、流体混合の促進に寄与しており、Case-B の流動形態では混合促進への寄与は小さいことが分かる。また、T字配管合流部における主配管中央部での混合促進という観点からは、Case-A の流動形態が好ましいと言える。

3. 2. 3 T字配管合流部での温度分布特性

図9は、合流点 $H=0.0D_m$ ($D_m=0.108[\text{mm}]$) から、下流の $H=3.0D_m$ までの各断面における時間平均温度分布を示す。赤色は体系内で最も高温の枝配管の流体温度 $60[^\circ\text{C}]$ を示し、青色は最も低温の主配管流体温度 $20[^\circ\text{C}]$ を示している。

図10は、合流点 $H=0.0D_m$ ($D_m=0.108[\text{mm}]$) から、下流の $H=3.0D_m$ までの各断面における温度変動強度を示す。主配管と枝配管の入口温度差 (dT) で無次元化した温度変動強度を示しており、赤色は入口温度差 dT の0.4倍、青色はゼロを示している。

Case-A では、図9に示す時間平均温度分布から、枝配管の高温流体が占める領域が下流に行くにつれて主配管中央部に移動していることが分かる。また、図10に示す温度変動強度分布から、温度変動の大きな領域についても下流に行くにつれて主配管中央部に移動しており、偏向噴流の特徴として、主配管中央部での混合が活発であることが分かる。Case-A および Case-B とともに、温度変動の大きな領域がアーチ状に分布している。このアーチ状の頂部領域で温度変動が強くなっており、この領域が枝配管噴流と主配管流れとの境界領域であると言える。Case-A では、温度変動の強いアーチ状の領域が Case-B の場合よりも断面方向に幅があり広い範囲で混合が行われているが、Case-B では枝配管からの高温流体が壁近くの領域を占めて流れており、衝突境界の非常に狭い領域で混合が行われていることが分かる。また、Case-B の場合、低温の主配管流れと枝配管噴流との境界は比較的明確であり、その境界で大きな温度勾配が存在することが分かる。

混合領域内で最も温度変動が大きな断面は、合流点を除いて、Case-A では

$H=0.25D_m$ の高さ、Case-B では $0.5D_m$ に現れている。Case-A の方が流れ方向に短い距離で混合されることから、Case-A の方が流体の混合という観点からは効率的であると言える。

図 1 1 は、主配管内壁から $2.5[\text{mm}]$ 内側における時間平均流体温度の周方向断面分布を示している。赤色は体系内で最も高温の枝配管の流体温度 $60[^\circ\text{C}]$ を示し、青色は最も低温の主配管流体温度 $20[^\circ\text{C}]$ を示している。図 1 2 は、同じく主配管内壁から $2.5[\text{mm}]$ 内側での流体の温度変動強度の周方向断面分布を示す。カラーコンターは、主配管と枝配管の入口温度差 (dT) で無次元化した温度変動強度を示しており、赤色は入口温度差 (dT) の 0.4 倍、青色はゼロを示している。

図 1 1 から、Case-A では周方向に特徴的な温度分布は見られない。一方、Case-B では温度の高いまとまった領域が、枝配管下流に存在しており、そのまとまった領域の境界では低温の主配管流との間に大きな温度勾配が存在することが分かる。

図 1 2 から、Case-A の場合、枝配管の上流側で温度変動の大きな領域が見られ、枝配管の直後ではなく両端近傍で大きな温度変動が見られる。また、枝配管直後の後流領域内でも温度変動が見られ、淀んだ流れではないことが分かる。Case-B では、枝配管直後の後流領域内では温度変動は小さく、同程度の温度の流体で占められる、まとまった後流領域が形成されている。また、その下流では比較的大きな温度変動が見られる。図では表示されていないが、瞬時の温度分布を観察すると、Case-A および Case-B ともに、後流領域内においても流体の混合が行われており、円柱下流側に発生する Karman 渦に似た渦構造が存在していた。図 1 1 および図 1 2、および図 9 および図 1 0 から、流体混合によって発生する温度変動に関して構造物への熱疲労の観点から重要な領域は、流れ方向に関して、Case-A では枝配管の上流側から下流側 $1.0D_m$ 程度であり、Case-B では合流点から $1.5D_m$ 程度であることが分かる。また、流れと垂直な断面方向に関しては、Case-A の場合は枝配管の両端近傍の下流側、Case-B の場合、特に枝配管背後の後流領域の境界部で周囲流体との間に大きな温度勾配が存在していることから、構造物の熱疲労評価上、重要な領域であることが分かる。

図 1 3 は、合流点 ($0.0D_m$) から下流の $H=2.5D_m$ までの各水平断面内における温度変動強度を赤色の濃淡によって示し、時間平均速度場をベクトルによって示す。Case-A では、主配管断面内に主配管内壁に沿って枝配管側に向かう流れが存在している。この流れは、エルボで発生する 2 次流れによるものであり、枝配管噴流と主配管流れとの衝突によって生じる後流部を枝配管側から主配管中央部に巻き上げる方向に作用している。一方、Case-B では、Case-A とは逆に、主配管中央部から枝配管側に後流部を押さえつける方向に作用していることが分かる。

これまでの結果から、2 次流れによって主配管の軸方向の局所速度（運動量）が変化することによって、枝配管噴流の流動形態が変化し、後流部および壁の近くの混合特性は主配管断面内で生じる渦流れの影響を強く受けることが分かる。

4. おわりに

エルボで発生する 2 次流れが、エルボ下流の T 字配管合流部での乱流混合に及ぼす

影響について調べるために、東北大学で行われた実験条件を対象とした数値解析を行った。エルボへの流入方向と枝配管への流入方向をパラメータとした数値解析結果から、以下の知識を得た。

T字配管合流部の上流側にエルボを設置することによって、主配管流中における枝配管噴流の流動形態は2次流れの影響を受け変化する。さらに、エルボへの流入方向と枝配管噴流の方向の関係によって、主配管および枝配管の流動条件が同じであっても、枝配管噴流の流動形態は変化する。

エルボへの流入方向と枝配管噴流の方向が同じ場合、2次流れの影響によって枝配管噴流との衝突直前の主配管流速が局所的に減少したため、枝配管噴流は主配管中央部にまで到達することができ、枝配管噴流は偏向噴流に近い流動形態となった。また、主配管の断面内で2次流れにより生じる渦流れは、枝配管噴流の後流領域を主配管中央部に押し上げる方向に作用し、後流領域に影響を及ぼしている。流体混合によって生じる温度変動を評価する上で重要な領域は、流れ方向には枝配管の直前の領域から合流点の下流 $1.0D_m$ 程度の範囲であり、流れと直角方向には枝配管直径の両端近傍の領域が重要である。

エルボへの流入方向と枝配管噴流の方向が逆向きの場合、2次流れの影響により主配管流れが枝配管側で強いために枝配管噴流は主配管中央部に流入することができずに壁面噴流の流動形態となる。また、主配管の断面内で2次流れにより生じる渦流れは、枝配管噴流の後流領域を壁面に押さえつける方向に作用する。流体混合によって生じる温度変動を評価する上で重要な領域は、合流点から下流 $1.5D_m$ 程度であり、流れと直角方向には枝配管背後に形成される、温度の低いまとまった領域の境界部である。

枝配管の接続方向に関係なく、衝突界面での混合過程について以下の3つの特徴があげられる。

- (1) 主配管と枝配管との衝突界面では、馬蹄状の渦構造が見られること。
- (2) 枝配管噴流の下流側には後流域が形成され、後流領域内では弱い Karman 渦のような乱れが観察される。
- (3) 温度変動強度の大きな領域が主配管の断面内でアーチ状に分布し、その頂点部分で最も変動が強くなること。

今後の予定として、温度変動特性を定量的に評価する場合には、2次流れで発生する乱れ（流れの非定常成分）を考慮する必要がある、エルボ上流側からT字配管合流部出口までを一貫した体系で解き、エルボ出口での2次流れ（非定常性）を下流のT字配管合流部の計算に反映させなければならない。今後、エルボ入口での乱れ強さや一体体系にて2次流れの非定常性を考慮した解析を実施する予定である。

5. 謝辞

本報内で示した実験は、広島大学（現在は愛媛大学）および東北大学とサイクル機構との共同研究として実施しました。関係各位のご協力とご尽力により多大なる成果が得られました。ここに感謝の意を表します。

6. 参考文献

- [1] M. Igarashi, M. Tanaka, S. Kawashima and H. Kamide, Experimental Study on Fluid Mixing for Evaluation of Thermal Striping in T-Pipe Junction, Proc. of ICONE10-22255, Arlington, USA, April 14-18, 2002.
- [2] M. Igarashi, M. Tanaka, N. Kimura and H. Kamide, Study on Fluid Mixing Phenomena for Evaluation of Thermal Striping in a Mixing Tee, Proc. of The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, October 5-9, 2003.
- [3] 須藤 浩三, 檜原 英樹, 村松 壽晴, 「配管系の複雑暗流場の流動特性に関する研究」, 先行基礎工学研究に関する共同研究報告書, JNC TY9400 2002-001, 2002 年 3 月。
- [4] 一色 操, 「90° ベンド内流れの及ぼす曲率半径比の影響」, 平成 13 年度広島大学修士論文, 2002 年 3 月。
- [5] K. Yuki, K. Okuyama, S. Toda, H. Hashizume and T. Muramatsu, Investigation of Non-isothermal fluid mixing and wall temperature fluctuation in a T-junction Which has a 90-degree bend in the upstream area, The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, October 5-9, 2003.
- [6] T. Muramatsu, Numerical Analysis of Nonstationary Thermal Response Characteristics for a Fluid-Structure Interaction System, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.121, pp.276-282, 1999.
- [7] I. Marusic, G. V. Candler, V. Interrante, M. P. Martin, P. K. Subbareddy and A. Moss, Detection and Tracking of Coherent Features in a Mach 4 Turbulent Boundary Layer, AIAA 2000-2414.

Table 1 Flow Condition

	Main pipe	Branch Pipe
Diameter [m]	0.108	0.021
Maximum Velocity [m/s] (Converted mean velocity)	1.2 (0.99)	0.6 (0.48)
Re (Max. velocity)	1.05×10^5	2.08×10^4
Temperature [°C]	20	60
Bulk Momentum	3.26	0.123

Table 2 Main Specification of DINUS-3

Basic Formulation	
Instantaneous Navier-Stokes Equation	
Numerical Method	
Discretization	Finite Differential Method
Matrix Solver	ICCG
Discretization Scheme	
Convection Term	3rd-order Upwind
Diffusion Term	2nd-order Central Differential
Time Integration	2nd-order Euler

- ◆ Impinging jet
- ◇ Impinging /Deflecting jet
- Deflecting jet
- Deflecting /Re-attachment jet
- ▲ Re-attachment jet
- △ Re-attachment /Wall jet
- Wall jet

$$M_m = \rho_m \times (D_m \times D_b) \times V_m^2$$

$$M_b = \rho_b \times (D_b/2)^2 \times V_b^2$$

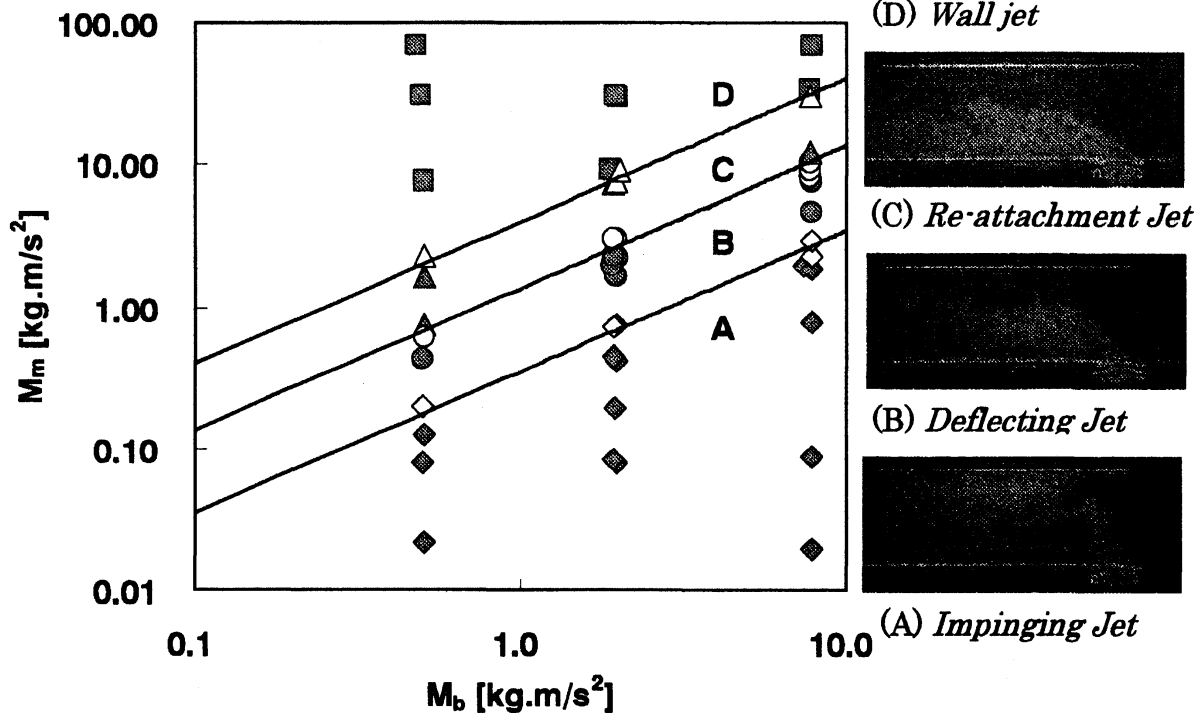
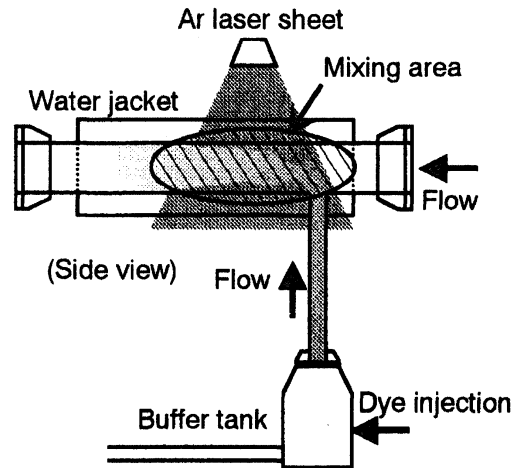
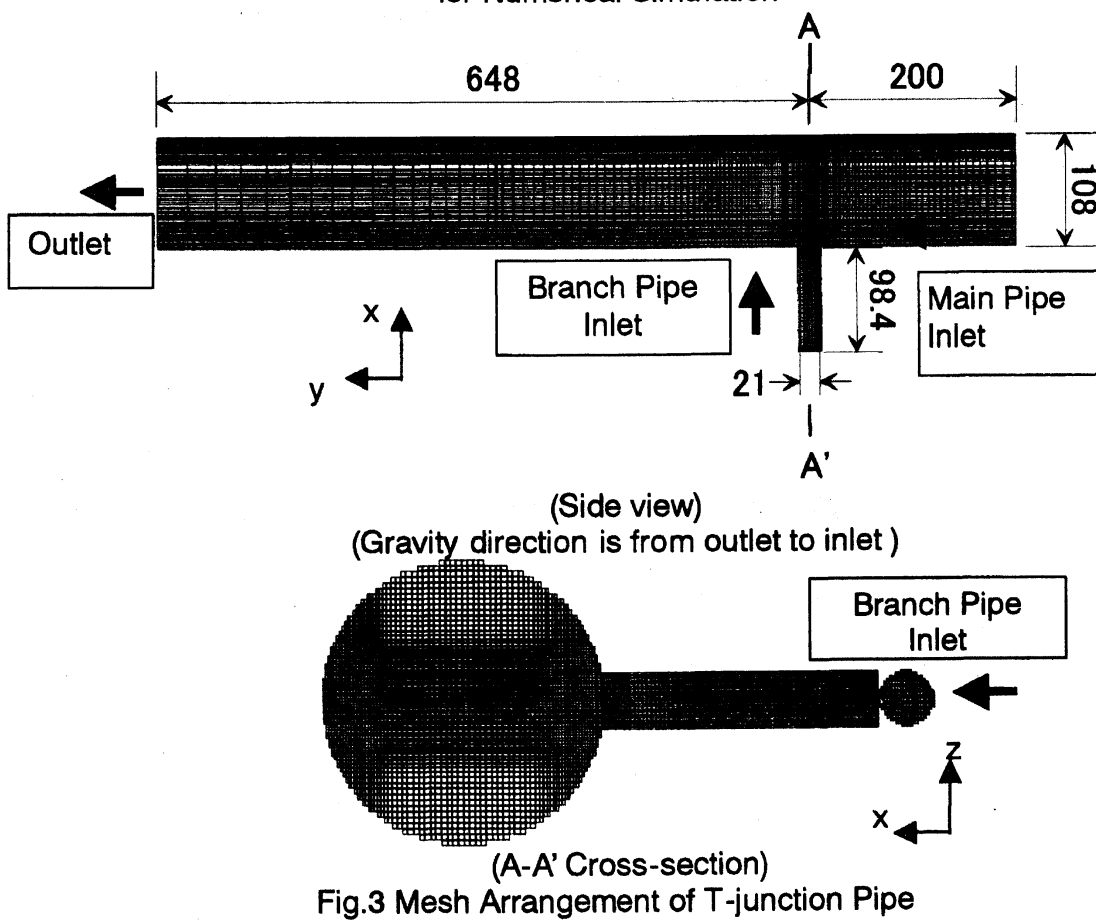
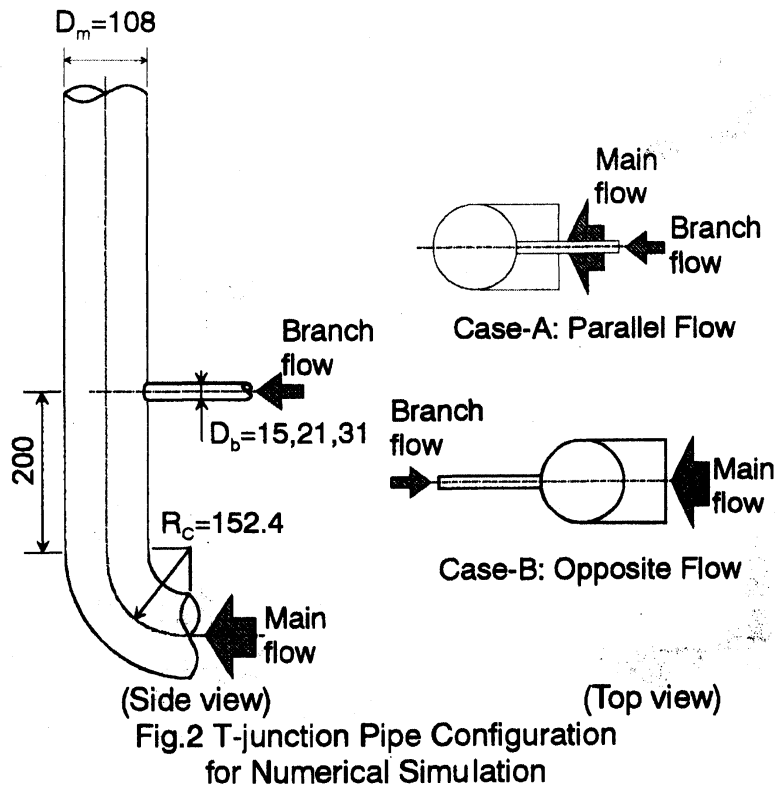
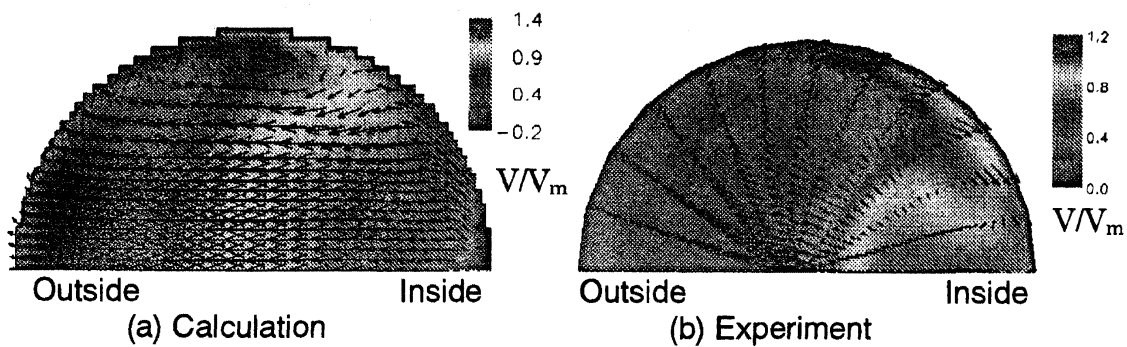
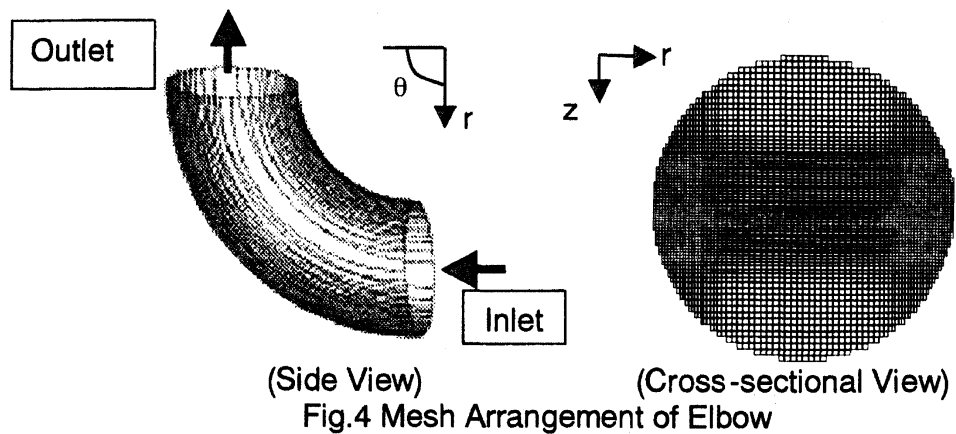


Fig.1 Flow Pattern Map of Branch Pipe Jet without Elbow

- (A) *Impinging jet*: Branch pipe jet impinges on the opposite wall over the center axis of the main pipe.
- (B) *Deflecting jet*: Branch pipe jet mainly flows through the central part in the main pipe.
- (C) *Re-attachment jet*: Branch jet comes to the center part of main pipe and attaches the lower surface at the downstream.
- (D) *Wall jet*: Branch pipe jet flows along the lower surface of the main pipe.





Calculation: $Re=105,000$, $D_m=108[\text{mm}]$, $R_c/D_m=1.41$, Water
 Experiment: $Re=60,000$, $D_m=104[\text{mm}]$, $R_c/D_m=1.5$, Air

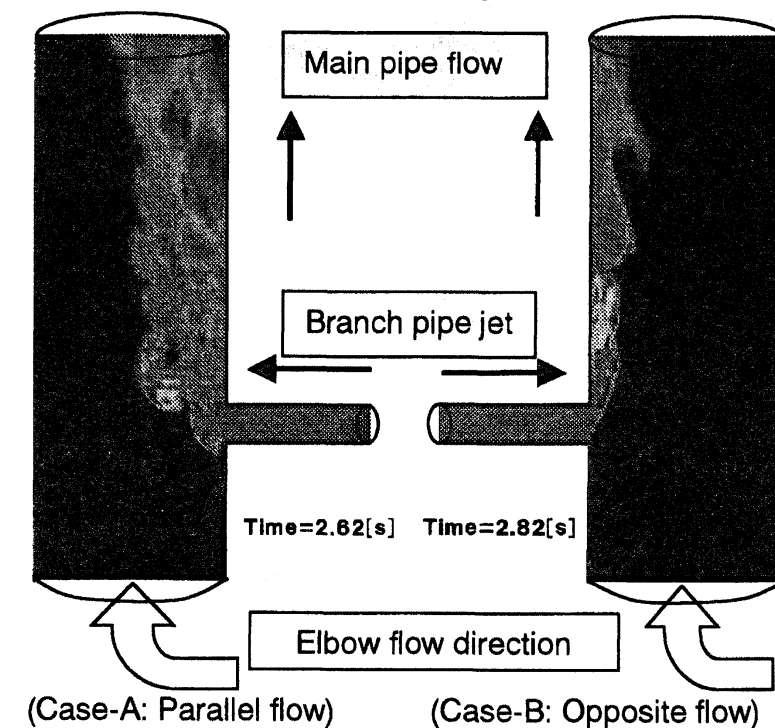
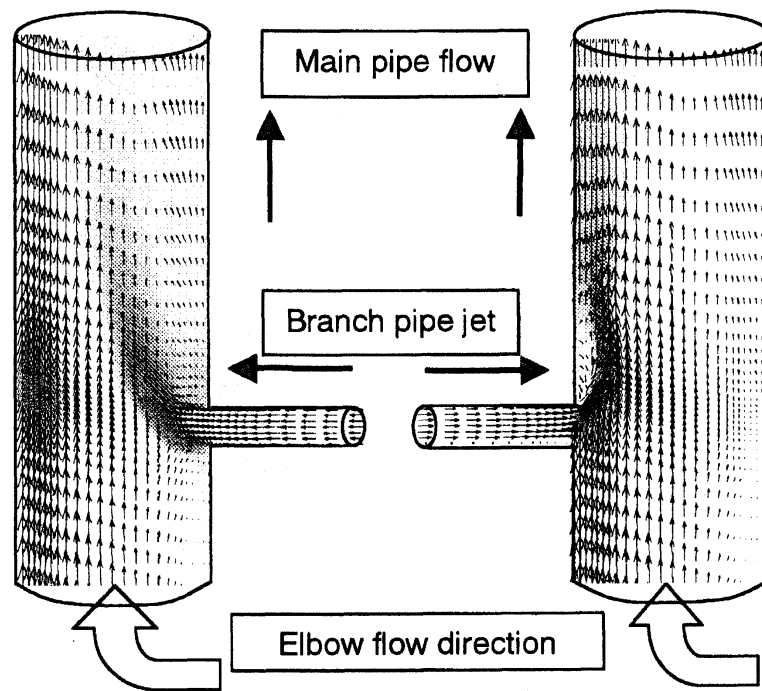


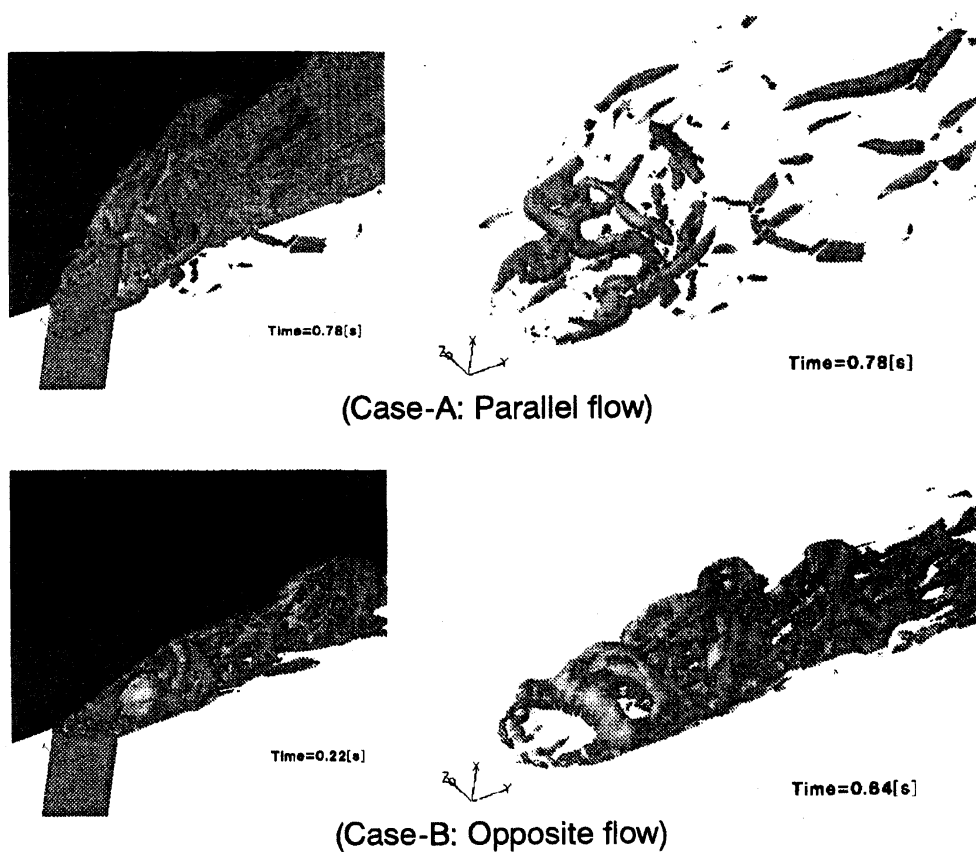
Fig.6 Instantaneous Temperature Distribution in Vertical Cross-section along the Center of Main Pipe.



(Case-A: Parallel flow)

(Case-B: Opposite flow)

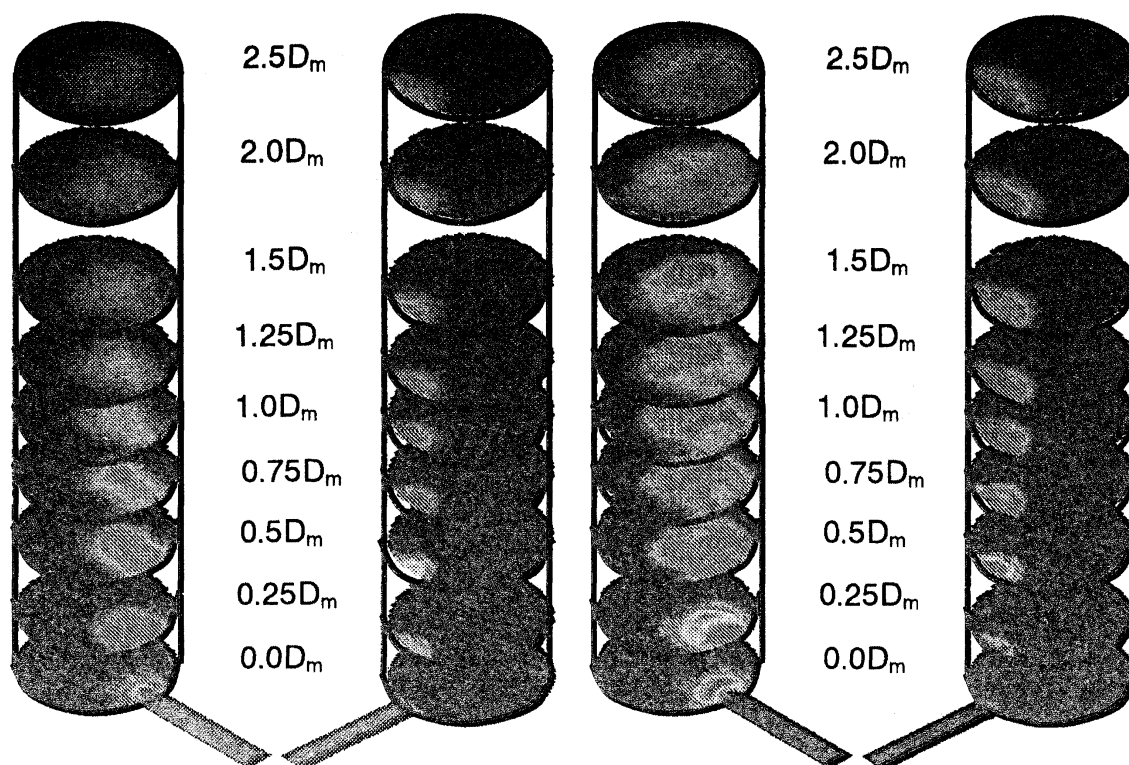
Fig.7 Fluid Temperature Fluctuation and Time Averaged Velocity Field on the Vertical Cross-section along the Center of Main Pipe.



(Case-A: Parallel flow)

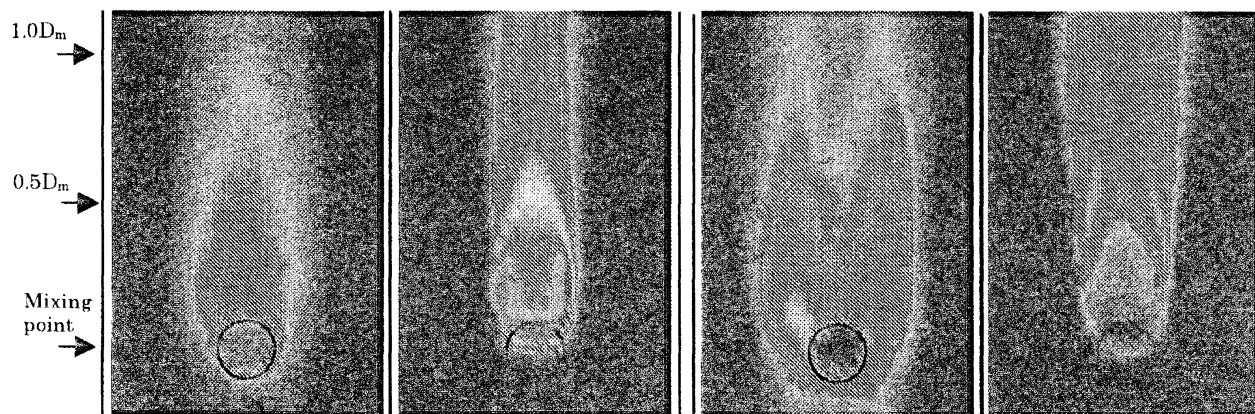
(Case-B: Opposite flow)

Fig.8 Horseshoe Eddy Structure in T-junction pipe at Instantaneous Result.
(Left side view shows a half side of the eddy structures with temperature distribution)



(Case-A) (Case-B)
Fig.9 Time averaged Fluid Temperature
on the Horizontal Cross-section
in Various Heights.

(Case-A) (Case-B)
Fig.10 Fluid Temperature Fluctuation
on the Horizontal Cross-section
in Various Heights.



(Case-A) (Case-B)
(Projective view from outside of main pipe
and "O" shows the branch pipe location)
Fig.11 Time averaged fluid temperature
At the near surface to the wall (2.5[mm] inside from the wall surface)

(Case-A) (Case-B)
(Projective view from outside of main pipe
and "O" shows the branch pipe location)
Fig.12 Fluid Temperature Fluctuation
At the near surface to the wall (2.5[mm] inside from the wall surface)

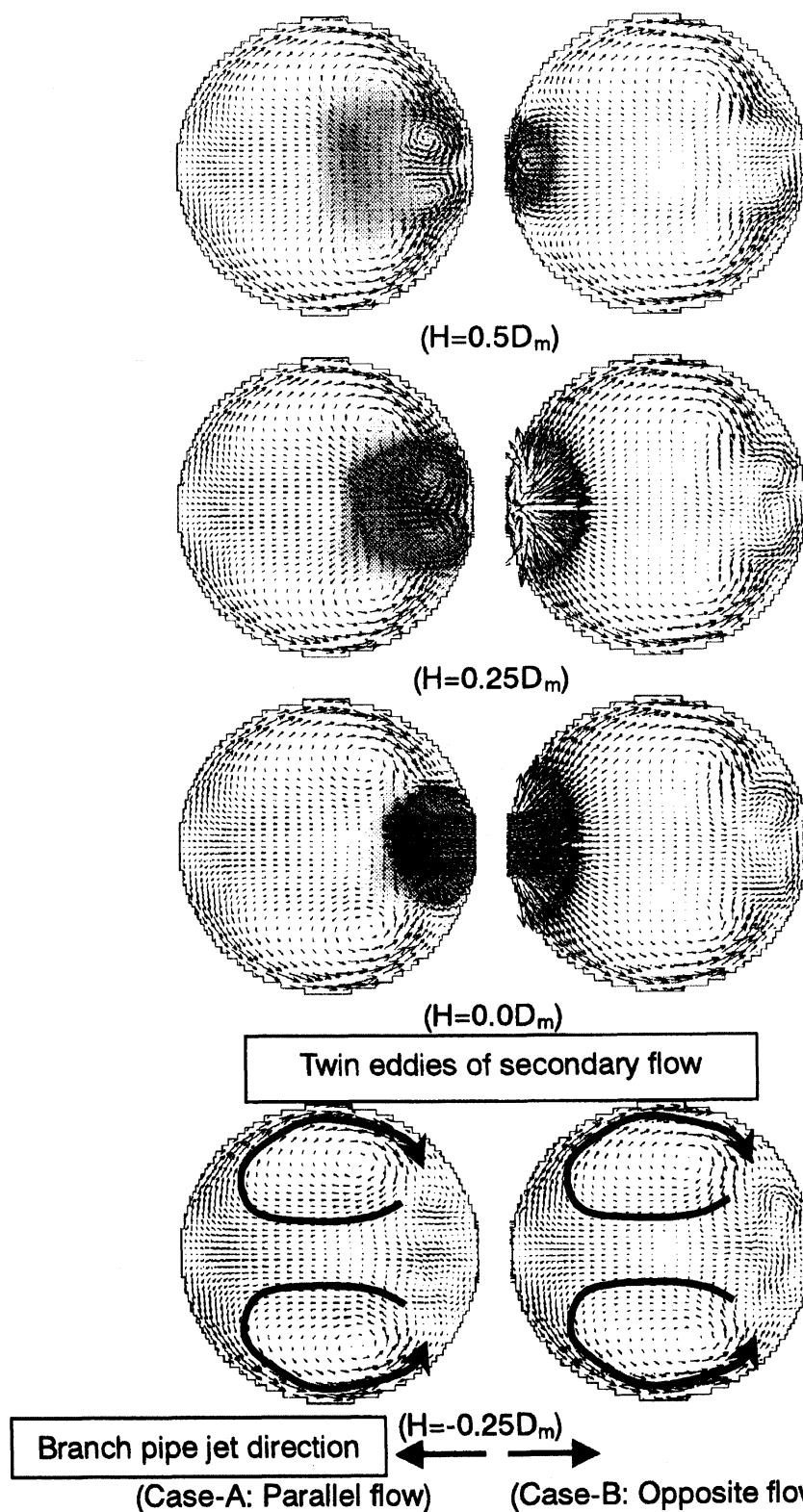


Fig.13 Temperature Fluctuation and Time averaged Velocity Field of Secondary Flow.