

T 字形合流管下流域に発生するアーチ状渦列の数値解析

核燃料サイクル開発機構 村松 壽晴 (Toshiharu Muramatsu)

Japan Nuclear Cycle Development Institute

1. 結 論

高低温流体の混合により発生した温度ゆらぎが構造物表面に到達し、その材料に高サイクルの熱疲労負荷を与える現象はサーマルストライピング (Thermal Striping) と呼称され、原子炉プラントの長期構造成健全性を担保する観点から重要な研究テーマの一つになっている。

この重要性を裏付ける事実として、1992 年 11 月に発生した仏国・高速原型炉「フェニックス」における高サイクル熱疲労^{(1), (2)} や、1999 年 7 月に発生した日本原子力発電 (株) ・敦賀 2 号炉における高サイクル熱疲労⁽³⁾ などの実プラントでのトラブルがあげられるとともに、従来では余り着目されていなかった微視的観点からの流体—構造熱的連成現象が、その発生と進展に大きな影響を及ぼしたことがこれまでの事後評価から明らかにされている⁽⁴⁾。

以上を受け日本機械学会では、旧通産省・資源エネルギー省による通達⁽⁵⁾ に基づき、高サイクル熱疲労に対する評価指針の構築作業を進めている状況にある。

一方、フェニックス炉での高サイクル熱疲労を対象とした数値解析結果⁽⁴⁾ では、合流部下流領域に 2 種類の渦列の発生が確認されている (図 1 参照)。すなわち、枝管からの噴流が主管流中で障害物の役割を果たしたことにより発生する後流渦 (約 8 Hz の流動振動を伴う横渦) および枝管噴流の両外縁からの剥離渦 (1 Hz 以下の長周期で間欠的に剥離する縦渦) である (図 2 参照)。なお、フェニックス炉での配管切出し後の目視検査結果では、高サイクル熱疲労による貫通き裂が、上記剥離渦が主管周方向溶接線と交差する周方向 2 箇所が発生したことが確認された。

しかしながら、配管合流部における圧力損失特性や高温流体と低温流体の混合による温度変動特性を実験的あるいは数値解析的に検討した研究^{(6)~(10)} は数多く公開されているものの、上記挙動の詳細を説明することが可能な情報を有する研究、あるいは配管合流域での流れ挙動を系統的に調査・検討した研究などは、見当たらない。

上記を背景とし、T 字形合流管領域での流動特性を解明・一般化するため、主管流のレイノルズ数、流速比 (主管流と枝管流の断面平均流速の比) および口径比 (主管と枝管の口径比) をパラメータとした基礎実験 (水および空気) が系統的に実施され、特定のパラメータ条件において周期的な渦放出現象が発生することが確認された⁽¹¹⁾。

本研究では、3 次精度風上差分法による準直接シミュレーションコードを用いて基礎実験の数値解析を行い、実験において確認されたアーチ渦の基本特性を詳細に検討するとともに、パラメ

ータの組合せにより分類される合流パターン（成層分離流、偏向噴流、衝突噴流）の模擬性を確認する。

2. おもな記号

D_b	: 枝管径	U_m	: 合流部上流の主管断面平均流速
D_m	: 主管径	α	: 口径比 ($= D_m / D_b$)
f	: 渦の放出周波数 (卓越周波数)	β	: 流速比 ($= U_m / U_b$)
Re	: 主流のレイノルズ数 ($= U_m D_m / \nu$)	ρ	: 流体の密度
St	: ストローハル数 ($= f D_b / U_m$)	μ	: 流体の粘性係数
U_b	: 枝管流の断面平均流速	ν	: 流体の動粘性係数

3. 数値解析

3. 1 準直接シミュレーションコード

本研究では、サーマルストライピング評価用に開発した準直接シミュレーションコード DINUS-3⁽¹²⁾を使用した。同コードでは、局所・瞬時ナビエーストークス方程式を基礎式として用い、対流項を修正 3 次風上差分法⁽¹³⁾により評価することで擬似直接シミュレーションを実現する。なお同コードには、数値振動と物理振動とを分離するため、ファジィ概念を導入した定性推論器が導入されている⁽¹⁴⁾。

3. 2 数値計算体系

使用した計算体系を図 3 に示す。数値解析では、水を作動流体とした基礎実験での試験部 (40 mm x 40 mm x 3000 mm) の内、主管部主流方向 96 mm を評価の対象とした。なお当該形状での口径比 α は、5.0 ($= 40 \text{ mm} / 8 \text{ mm}$) に相当する。解析モデルの規定では、同計算体系を x-y-z 直交座標でモデル化し、各方向 0.5 mm の等メッシュで分割した。

3. 3 解析ケースおよび境界条件

数値解析は、実験結果に基づき、流速比とレイノルズ数を変化させた以下の 5 ケースを選定して行った。

- (a) $\beta = 0.2$, $Re = 600$: 衝突噴流
- (b) $\beta = 1.0$, $Re = 600$: 偏向噴流
- (c) $\beta = 1.0$, $Re = 1050$: 偏向噴流
- (d) $\beta = 3.0$, $Re = 5000$: 偏向噴流
- (e) $\beta = 2.6$, $Re = 600$: 成層分離流

矩形主管路および円形枝管路の入口流速分布は、それぞれ Melling ら⁽¹⁵⁾ による矩形流路内発達乱流条件および Laufer⁽¹⁶⁾ による円管流路内発達乱流条件での結果を、レイノルズ数を用いて内挿することにより規定した。一方、矩形主管路の上下左右の固体壁については、完全粘着条件を課した。

4. 結果と考察

4. 1 流れ場の概略

流速比とレイノルズ数を変化させた場合の渦度および流線の瞬時分布を図 4 に示す。

- (1) 衝突噴流 (図 4 (a)) 枝管流の速度が主管流の速度に比べて大きい場合、枝管からの流れは枝管と反対側の主管壁面に衝突した後、急速に主流と混合しながら流下する。なお、枝管からの流れの両脇には、回転の向きが異なる剪断渦層が形成される。
- (2) 偏向噴流 (図 6 (b) ~ (d)) 衝突噴流よりも流速比 β が大きい場合、枝管からの流れは主管内に流入後、緩やかに主管流れ方向に偏向する噴流形態 (偏向噴流) を示す。この過程で枝管からの流れはアーチ状の大規模な渦を形成し、その渦は下流側に周期的に放出されて渦列となる。
- (3) 成層分離流 (図 4 (e)) 流速比が大きい場合、すなわち枝管流速が主管流速に比べて遅い場合、枝管からの流れは主管内に流入後、急激に主管流れ方向に偏向し、枝管側の壁面に沿って流下する。この間、主流と枝管流は層状に分離し、比較的下流まで混合しない状態を保つ。

図 5 に、流動パターンマップを実験結果と比較する。実験⁽¹¹⁾ では、枝管流に衝突する主管流と枝管流の受ける慣性抵抗⁽¹⁷⁾ の比の関係を、枝管流を主管内に設置した円柱と見立てるとともに、枝管および主管の運動量を実験パラメータ α 、 β およびレイノルズ数 Re と関連づけることによって流動パターンを整理している。すなわち、 G_1 および G_2 をそれぞれ、

$$G_1(\alpha, \beta, Re) = 20.8 \alpha \beta^{1.26} Re^{-0.7373} \quad (1)$$

$$G_2(\alpha, \beta, Re) = 2.01 \alpha \beta^{1.86} Re^{-0.7138} \quad (2)$$

と規定することにより、合流後の流れを、主管レイノルズ数 $Re = 500 \sim 5000$ 、口径比 $\alpha = 2 \sim 5$ 、流速比 $\beta = 0.1 \sim 10$ の範囲について、

$$G_1(\alpha, \beta, Re) \geq 1 \quad : \text{成層分離流}$$

$$G_1(\alpha, \beta, Re) < 1 \text{ かつ } G_2(\alpha, \beta, Re) \geq 1 \quad : \text{偏向噴流}$$

$$G_2(\alpha, \beta, Re) \leq 1 \quad : \text{衝突噴流}$$

と分類している。

本研究での解析 5 ケースの結果は、実験による流動パターン中に良好に分類され、解析結果に基づく以降の検討が妥当性を持って行えると判断できる。

4. 2 アーチ渦

上記の通り、配管合流部での流れパターンが偏向噴流の場合、枝管からの流れはアーチ状の大規模な渦を形成し、その渦は下流側に周期的に放出されて渦列となることが示された。ここでは流速比 $\beta = 1.0$ 、 $Re = 600$ の条件におけるアーチ渦の構造を詳細に検討する。

4. 2. 1 アーチ渦列の生成過程

アーチ渦の生成過程を可視化するため、枝管流下流位置から粒子を連続放出した。結果を図 6 に示す。図に示したアーチ渦列の生成過程は、境界層中におけるヘアピン渦^{(18), (19)}のそれに酷似し、以下の過程を辿る。

- ① 枝管噴流のポテンシャルコアに沿って、粒子が流下を始める (図 6 (a), (b))。
- ② 枝管噴流の背後に生じる低圧の死水領域に、主流が枝管噴流を迂回しながら吸込まれるため、枝管噴流背後に循環渦が形成される (図 6 (c), (d))。
- ③ 循環渦による回転によって、大規模渦塊が枝管噴流端から離脱し、アーチ渦形状を保って流下する ((図 6 (e) ~ (f))。
- ④ 上記 ① ~ ③ の過程が繰返され、渦列を形成する ((図 6 (g))。

4. 2. 2 アーチ渦列の輸送特性

主管流れ方向に直交する流速 2 成分合成値の等値面 (0.001 m/s) の過渡挙動を図 7 に示す。枝管噴流端から離脱する大規模渦塊 (図 7 (a) ~ (b)) は、急速にアーチ渦形状を整えた後、主流により下流側に輸送される。なお、枝管噴流端から離脱した後のアーチ渦は、図 8 (流速 2 成分合成値の等値面および流線の瞬時分布) に見られるように、アーチ渦頭部および両脚部での回転を伴いながら流下する。

ここでアーチ渦の輸送時間を、他 2 ケース ($(\beta, Re) : (1.0, 1050)$ および $(3.0, 5000)$) の結果も含め、流速 2 成分合成値の等値面の移行時間から算出し、ストローハル数 St に換算して実験結果と比較すると図 9 のようになる。なお実験結果は、統計処理上の母集団が大きく、比較的測定精度の良い高レイノルズ数 ($5000 < Re < 50000$ での流速測定値を対象とした FFT 処理) データに基づいてまとめられたものである。星印で示した数値解析による結果 3 点は、多くの実験結果による近似式、すなわち、

$$St = 1.06 (\alpha^{0.1} \beta Re^{0.2})^{-0.353} \quad (3)$$

と良好な一致を示す。以上より、口径比 α 、流速比 β およびレイノルズ数 Re に依存するストローハル数 St をここで用いた数値解析手法によって再現できることが確認された。

4. 2. 3 アーチ渦の構造

アーチ渦の詳細構造を把握するため、アーチ渦が枝管噴流端から離脱し、主流によって下流側に輸送されている過程での流速 2 成分合成値の瞬時等値面分布 (0.001 m/s) に対し、床面からの軸方向距離を変化させてその内部構造を観察した。結果を図 10 に示す。

アーチ渦は、頭部およびこれに繋がる二本の脚部から構成され、アーチ渦頭部から両脚部にかけては枝管噴流背後に生じた循環流の影響により、空洞領域が形成されている(図 10 (a))。二本のアーチ渦脚部は、床面から 5 mm 程度の軸方向位置まで伸び(図 10 (b) ~ (f))、枝管噴流の両脇から下流側に広がる非常に微弱なたなびき渦に酷似した循環渦中に取り込まれる(図 10 (g) ~ (h))。

4.2.4 アーチ渦構造とサーマルストライピング

アーチ渦構造とサーマルストライピングとの関連性を把握するため、主管流と枝管流との間に浮力の影響が現れない程度の温度差(0.01 °C)を与え、それぞれの流体をマーキングすることによりアーチ渦構造の可視化を行った。図 11 は、アーチ渦が枝管噴流端から離脱し、主流によって下流側に輸送されている過程での流速 2 成分合成値の瞬時等値面分布(0.001 m/s)に、流体温度を重ね合わせた結果である。

結果に見られるように、アーチ渦頭部の表層上部領域(Ⓐ部)は、高温流体でマーキングされた主管流の影響を受け、同頭部の内部に向かうに従って主管流の影響が減少する。なお、アーチ渦頭部の表層下部領域(Ⓑ部)については、低温流体でマーキングされた枝管流の影響を受ける部位が確認できる。両脚部についても同様に、表層両脇(Ⓒ部)から内部に向かうに従って、主管流の影響が徐々に低下する。

図 12 に、床面から 0.25 mm 位置における温度分布過渡挙動を示す。凡例にも示す通り、赤が主管内の高温流体を、青が枝管からの低温流体を示す。 $t = t_0$ 時点で流れ方向中央領域に見られるアーチ渦脚部の青色領域(図 12 (a))は、時間の進行とともに主管流によって下流側に移動する(図 12 (b) ~ (g))。この間に、新たなアーチ渦脚部が流れ方向中央領域に現れ(図 12 (f))、同様に下流方向に移動する。なお、流れ方向中央領域に現れるアーチ渦脚部は、より上流側で発生した脚部が、流れ方向中央領域で床面近傍に達することによって現れたものである。

この条件での脚部移動周期は約 4 秒であり、床面は約 0.25 Hz の低周波温度過渡に常時晒されることになる。サーマルストライピングに係る熱荷重評価の一般的観点からは、低周波温度ゆらぎは比較的熱過渡感度の高い場合が多いため、T 字形合流管の設計においては、アーチ渦の発生とその影響に十分な注意を払うことが必要になる⁽²⁰⁾。

5. 結 論

T 字形配管合流領域において発生する各種の流体混合パターンおよび特定の条件下で発生するアーチ渦列を、準直接シミュレーションコードを用いて数値解析し、現象の模擬性およびアーチ渦の基本特性に関して、以下の結果を得た。

- (1) 口径比 α 、流速比 β およびレイノルズ数 Re の組合せによって分類される流体混合パターン、すなわち成層分離流、偏向噴流および衝突噴流は、準直接シミュレーションコードにより良好に模擬・分類することができる。
- (2) 偏向噴流時に発生するアーチ渦列の諸特性、すなわちその構造および輸送時間は実験結果と良好な一致を示し、口径比 α 、流速比 β およびレイノルズ数 Re に依存するアーチ渦発生に係るストローハル数 St を準直接シミュレーションコードにより模擬することができる。

- (3) アーチ渦頭部の表層上部領域および表層下部領域は、それぞれ主管流および枝管流の影響を大きく受ける。一方、アーチ渦脚部は、枝管流の影響を大きく受ける。
- (4) アーチ渦脚部が接する床面近傍領域は、アーチ渦の輸送に伴う低周波温度過渡挙動の影響を受ける可能性があるため、T 字形合流管の設計においては高サイクル熱疲労防止の観点からアーチ渦挙動に十分な注意を払う必要がある。

参 考 文 献

- (1) Muramatsu, T., Proc. the 15th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15), Vol. IV, pp. 217-224 (1999).
- (2) Kasahara, N., Proc. the 15th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15), Vol. IV, pp. 209-216 (1999).
- (3) 通産省・資源エネルギー庁、No. H11-法-07 (1999).
- (4) 村松 壽晴、本会 2000 年度年次大会、Vol. V, pp. 229-231 (2000).
- (5) 通産省・資源エネルギー庁、高サイクル熱疲労に関する技術基準運用ガイドライン (1999).
- (6) Nishiyama, H., 他 3 名、Exp. Thermal Fluid Sci, Vol. 6, pp. 252 (1993).
- (7) 高橋 志郎、椎名 孝次、機論 (B 編)、Vol. 66, No. 651, pp. 2905 (2000).
- (8) 高橋 志郎、他 5 名、機論 (B 編)、Vol. 63, No. 613, pp. 2970 (1997).
- (9) Benhamadouche, S., Sakiz, M., Peniguel, C. and Stephan, J., Proc. the 17th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-17), CD-ROM, C04-4 (2003).
- (10) Peniguel, C., Sakiz, M., Benhamadouche, S., Stephan, J. and Vindelrinho, C., Proc. ASME PVP-C, Vol. 468, pp. 125 (2003).
- (11) Hibara, H., Muramatsu, T. and Sudo, K., Proc. the 10th Int. Sympo. on Flow Visualization, CD-ROM, F0181 (2003).
- (12) Muramatsu, T., J. Pressure Vessel Technology, Vol. 121, pp. 276-282 (1999).
- (13) Kawamura, T. and Kuwahara, K., AIAA paper, 84-034 (1984).
- (14) 村松 壽晴、本会 第 3 回設計工学・システム部門講演会 (1993).
- (15) Melling, A. and Whitelaw, J. H., J. Fluid Mechanics, Vol. 78, pp. 289 (1976).
- (16) Laufer, J., NACA Tech. Rep., 1174 (1954).
- (17) 松信 八十男、変形と流れの力学、pp. 115、朝倉書店 (1981).
- (18) Acarlar, M. S. and Smith, C. R., J. Fluid Mech., Vol. 175, pp. 1 (1987).
- (19) Acarlar, M. S. and Smith, C. R., J. Fluid Mech., Vol. 175, pp. 43 (1987).
- (20) 班目 春樹、高サイクル熱疲労基準作成準備状況、本会、材料力学講演会、pp. 809 (2000).

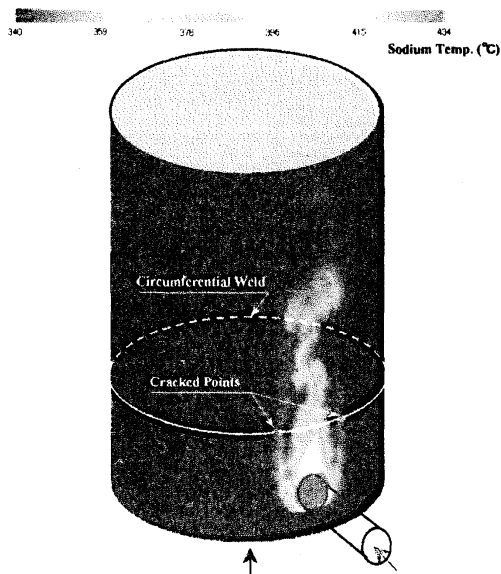


Fig. 1 Calculated instantaneous sodium temperature distribution at 0.1 mm from the main pipe surface

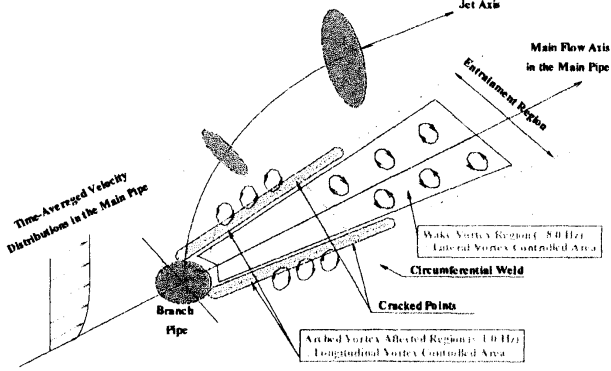


Fig. 2 Estimated turbulence mixing mechanism at a T-junction piping area

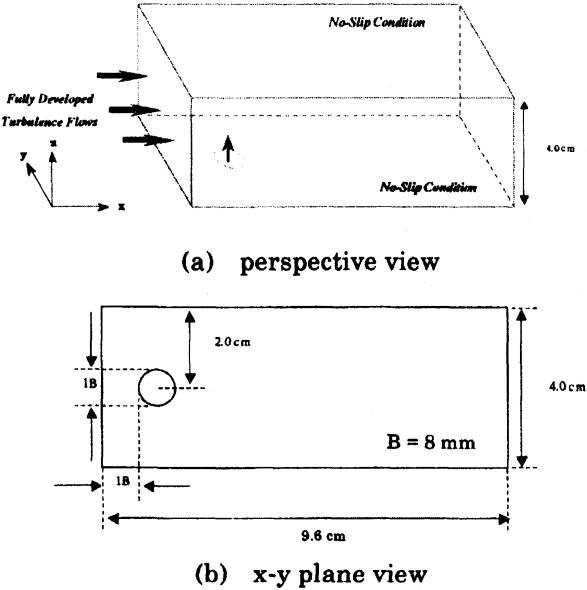


Fig. 3 Computational domain for DINUS-3 analyses

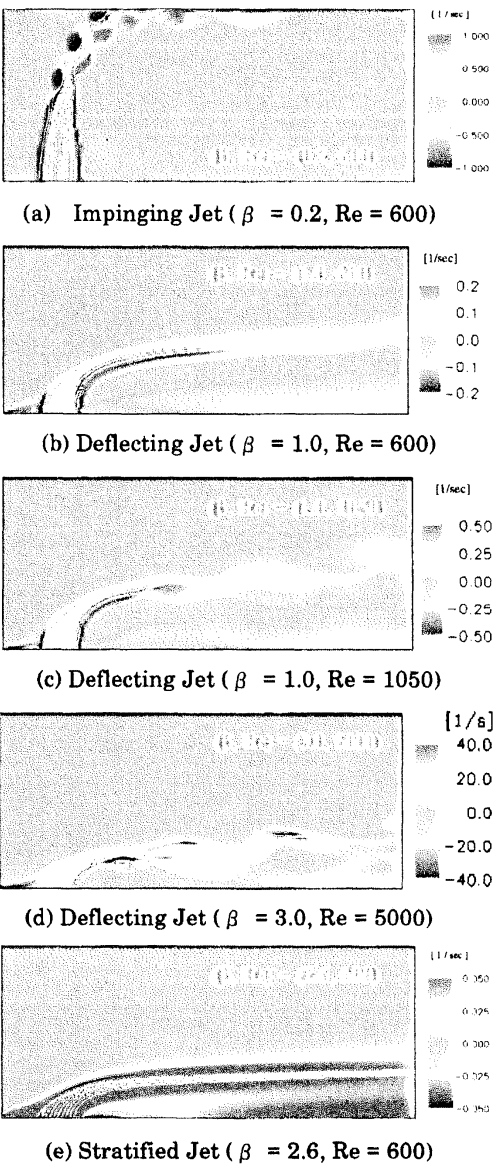


Fig. 4 Instantaneous distributions of vortices and stream lines

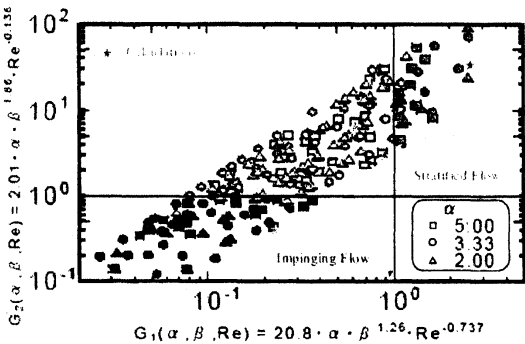


Fig. 5 Comparison of flow pattern map

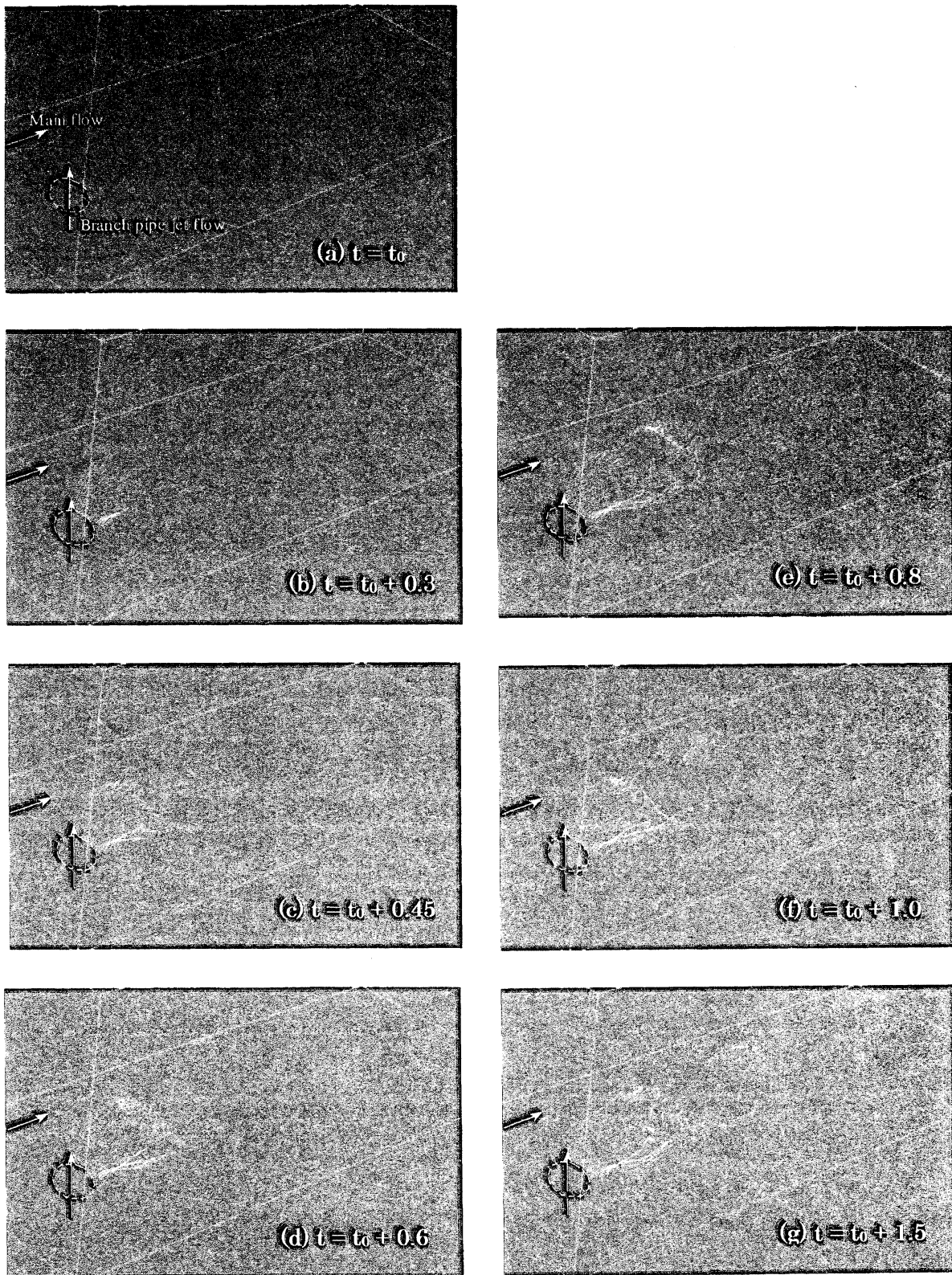


Fig. 6 Particle tracking result for arched vortex flows ($\beta = 1.0$, $Re = 600$)

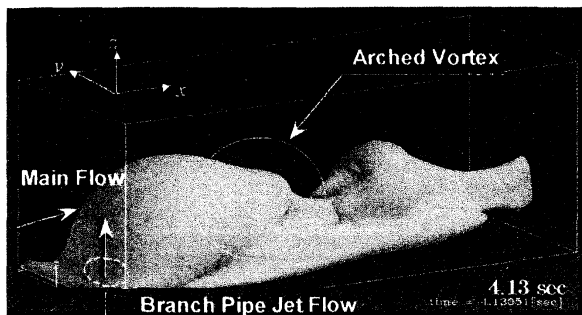
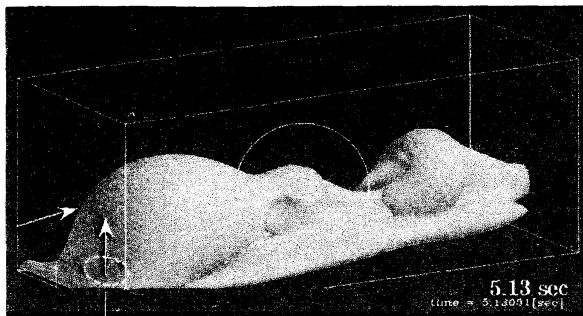
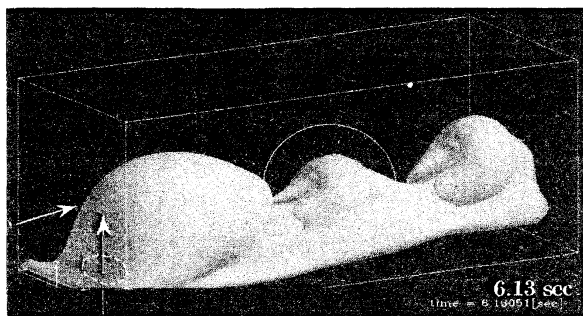
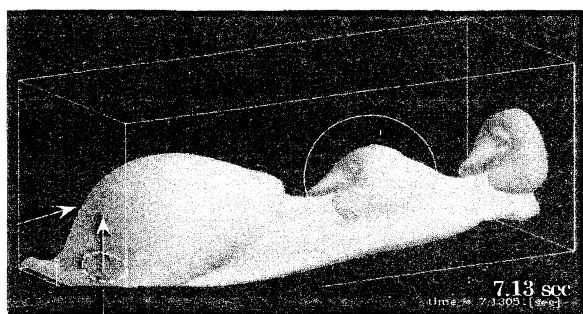
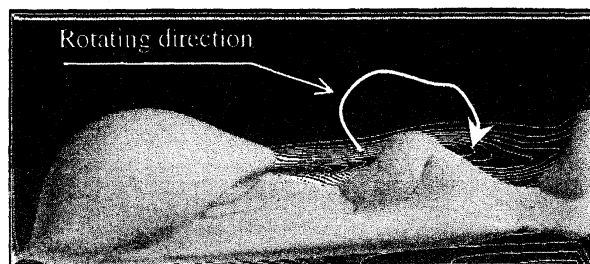
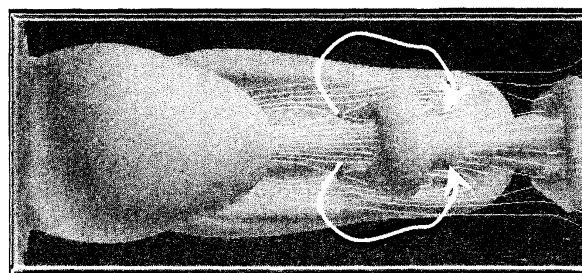
(a) $t = 4.13$ [sec.](b) $t = 5.13$ [sec.](c) $t = 6.13$ [sec.](d) $t = 7.13$ [sec.]

Fig. 7 Iso-surface transients of cross flow velocity ($\beta = 1.0$, $Re = 600$) components



(a) Side view



(b) Top view

Fig. 8 Instantaneous distributions of iso-surface of cross flow velocity and stream line ($\beta = 1.0$, $Re = 600$)

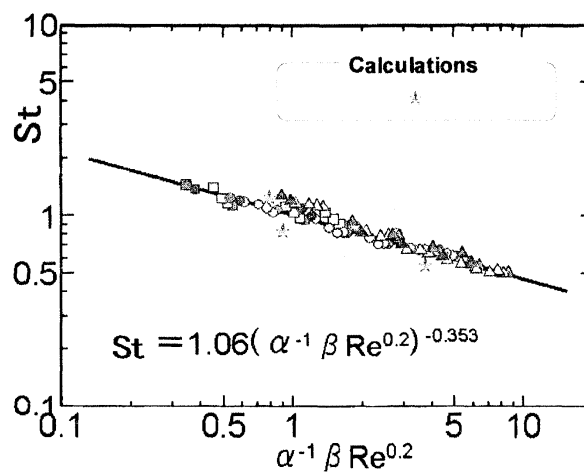


Fig. 9 Comparison of relationship for Stouhal number vs. experimental parameters between experiments and

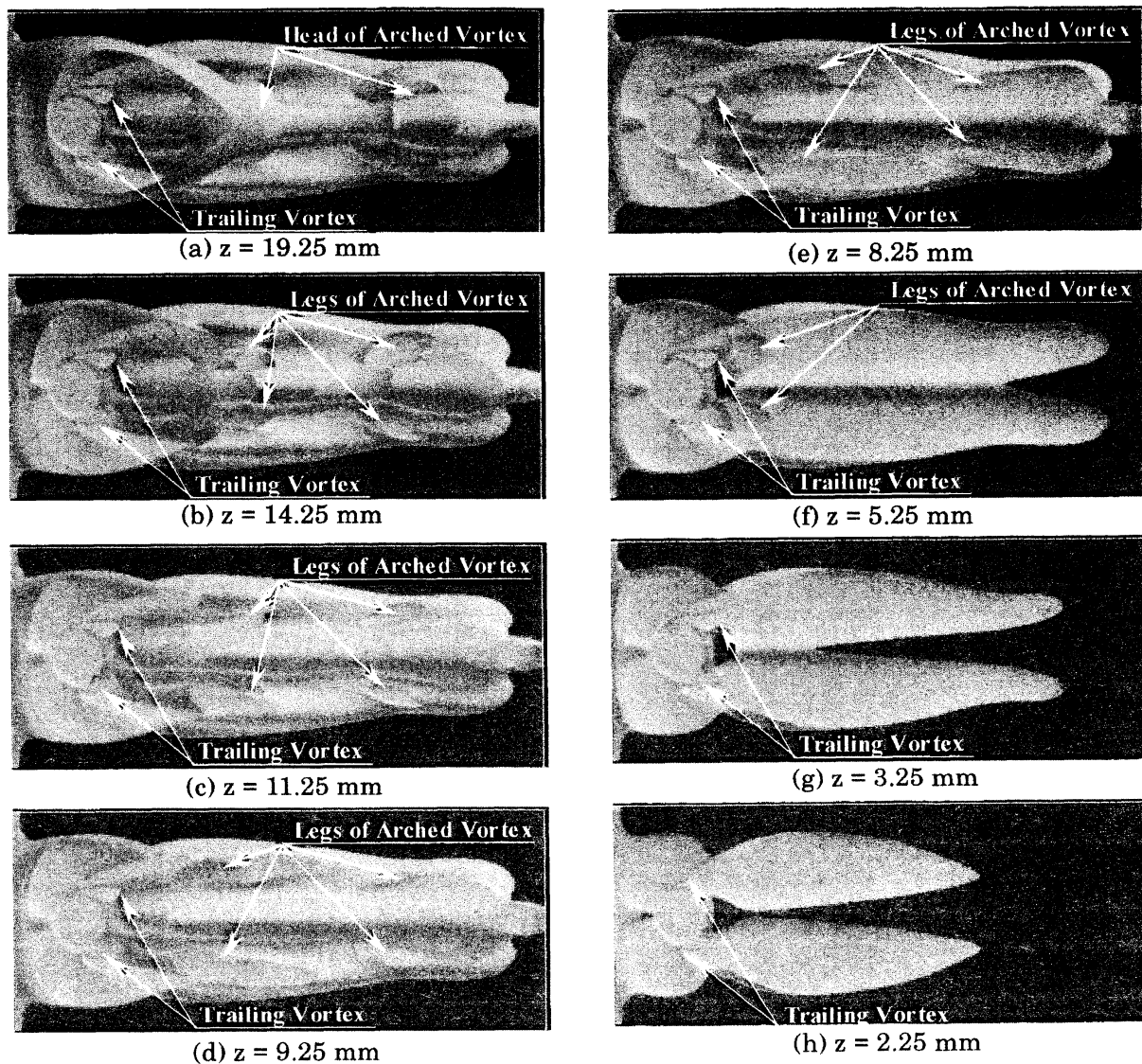


Fig. 10 Detailed structure of arched vortex ($\beta = 1.0$, $Re = 600$)

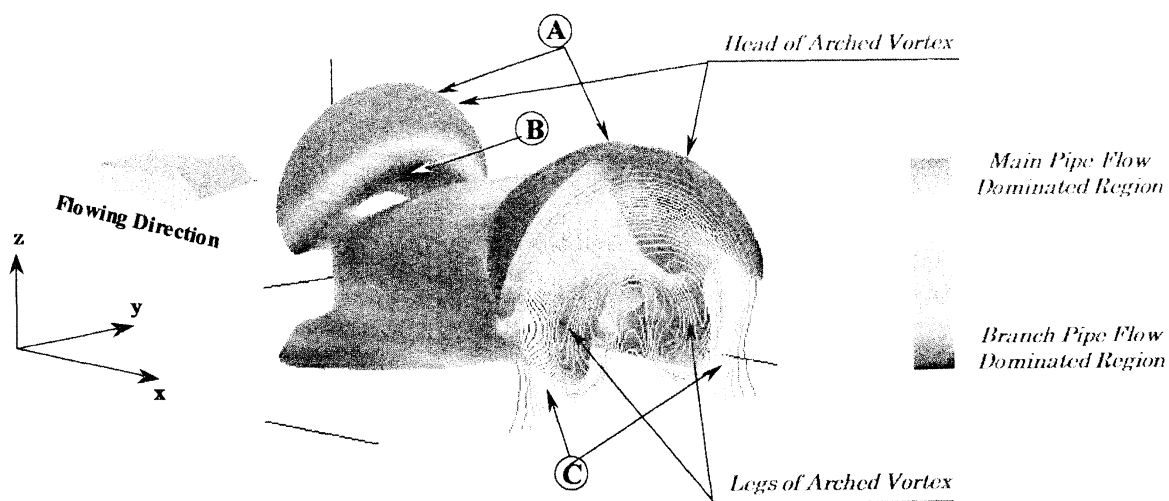


Fig. 11 Relationship between arched vortex structure and flow fields ($\beta = 1.0$, $Re = 600$)

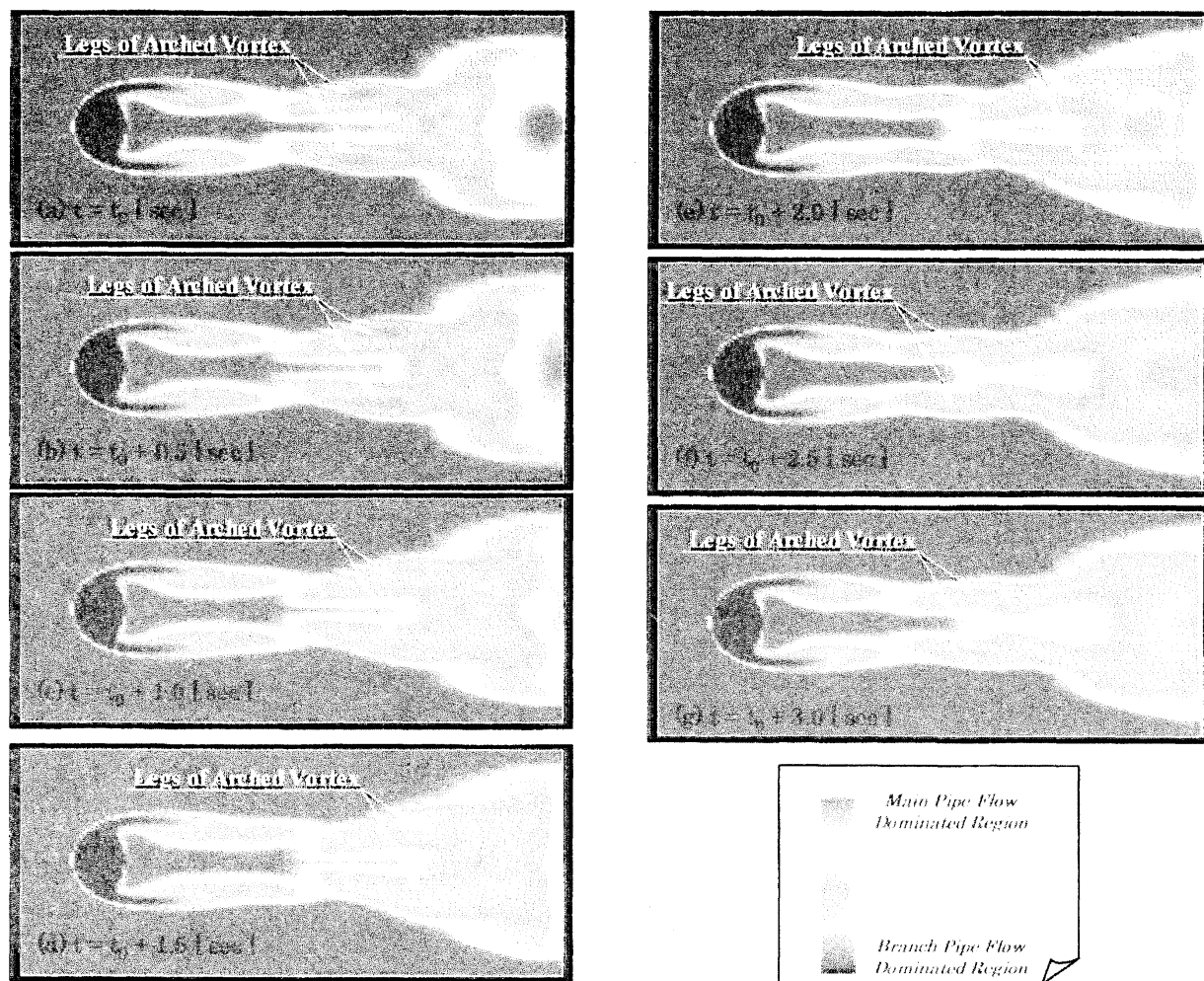


Fig. 12 Transients of water temperature distribution on bottom plate ($\beta = 1.0$, $Re = 600$)