

曲がり管で発生する二次流れの配管合流部における高サイクル熱疲労への影響

Effect of secondary flow generated in 90-degree bend upon high-cycle thermal fatigue in a mixing tee

東北大学工学研究科	小原 啓	Hiroshi OHARA	Non Member
東北大学工学研究科	結城 和久	Kazuhisa YUKI	Non Member
東北大学工学研究科	橋爪 秀利	Hidetoshi HASHIZUME	Member
東北大学工学研究科	S. M. Hosseini	S. M. Hosseini	Non Member

In nuclear power plants, there are many T-junctions at which different temperature fluids are mixed. When the fluids with different temperature are mixed, temperature fluctuation in fluids reaches wall and high-cycle heat fatigue occurs. Depending on amplitude and frequency of temperature fluctuation, it could lead to pipe rupture accident at worst. In addition, in case of the T-junction with 90-degree bend at upstream, there is higher risk for pipe rupture accident due to secondary flow which arises in the 90-degree bend. In this study, the effects of temperature fluctuation above the T-junction in case of different distance of 90-degree bend outlet to the T-junction are investigated.

Keyword: High-cycle thermal fatigue, 90-degree bend, T-junction, Secondary flow

1. 緒言

原子力、火力発電所、また工場などのプラントにおいて、異なる温度の二流体が合流する部位は多く存在する。二流体が合流する領域では非定常の不安定な温度揺らぎが生じるため、その揺らぎが壁面に伝播することで構造材は熱膨張・収縮を繰り返し、高サイクルの熱疲労を受ける。温度揺らぎの振幅、変動周期によっては構造材に亀裂が生じ、最悪の場合冷却水が漏洩する。高サイクル熱疲労が原因と考えられる事故例としては敦賀発電所2号機の一次冷却水漏洩事故、ベンチマーク問題として取り上げられたフランス高速原型炉フェニックスの二次冷却水漏洩事故などが上げられる。

以上のことと踏まえ、様々な研究機関においてT字配管合流部での流体混合に関する研究が実施されている。特に枝配管、主配管の口径比、枝流流速、主流流速の流速比をパラメーターとして、合流部下流領域での壁面温度ゆらぎ特性、PIVによる流動可視化、数値解析を用いた詳細な混合メカニズムの予測などが実施されている[1][2][3]。そして実際のプラントで多々見られる上流側に90度ベンドが設置されたT字配管合流体系でも、口径比や流速比をパラメーターとした実験や数値解析が実施されており、

連絡先: 小原啓、〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01-2、東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻、電話: 022-795-7906、e-mail:hoha@karma.qse.tohoku.ac.jp

ベンド内で発生する二次流れにより壁面近傍の温度変動が、90度ベンドを有さない場合に比べて激しくなることが確認されている。

しかしながら過去の研究では主に口径比、流速比をパラメーターとし、ほとんどの場合において90度ベンドからT字配管合流部までの距離が固定されている。ところが二次流れはベンド通過後もより下流域まで残存することが過去の研究により明らかにされており[4]、すなわちベンドからT字配管合流部までの距離が流体混合特性および合流部下流側の壁面温度特性に強く影響すると考えられる。

そこで本研究では曲率半径比 $C=1.41$ の90度ベンドを用いた体系下において、ベンド出口からT字配管合流部までの距離が配管合流部の壁面温度変動特性へ与える影響を評価することを目的とする。

2. 試験部および実験条件

2.1 試験部

本研究では90度ベンド出口から枝配管設置位置までの距離 L_b をパラメーターとする。枝配管が設置された全長324mm($=3D_m$)のT字試験部と、何も設置されていない全長108mm($=1D_m$)と324mm($=3D_m$)の2本のエクステンションパイプの並び替えにより90度ベンド出口から $L_d=108\text{mm} (=1D_m)$, $216\text{mm} (=2D_m)$, $432\text{mm} (=4D_m)$ の位置に枝配管を配置する。枝配管設置位置の様子をFig.1に示す。

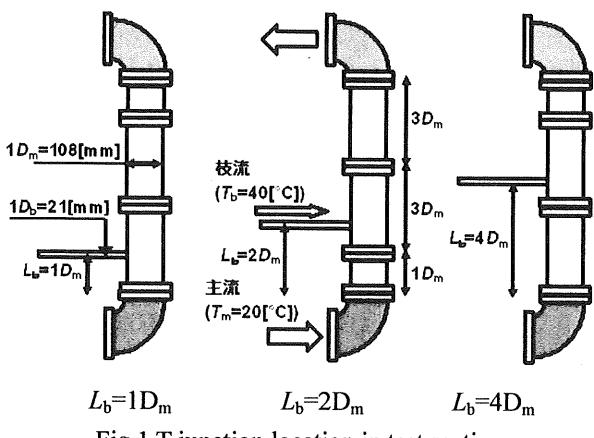


Fig.1 T-junction location in test section

熱電対は温度変動の応答性を考慮し直径0.1mmの非被服型K型熱電対を用い、サンプリング周波数60Hzで36000点(600sec)計測する。熱電対は配管壁面から1mmのところに設置する。これは壁面の温度を直接計測するのではなく、粘性低層よりも外側の温度を計測することで流体から壁面への熱輸送を評価するためである。熱電対設置位置の様子をFig.2に示す。枝配管内径上部を原点とし、周方向にx軸、主流下流方向にz軸を取る。x軸、z軸の座標は枝配管の内径 $D_b (= 21\text{mm})$ で規格化されており、x軸は $-2 \leq x \leq 2$ 、z軸は $0 \leq z \leq 4$ である。先行研究により $z \geq 4$ の下流領域の温度変動強度は減衰過程にあることが確認されているため、 $-2 \leq x \leq 2$ 、 $0 \leq z \leq 4$ の領域に78本の熱電対を配置する。 $-2 \leq x \leq 2$ 、 $0 \leq z \leq 0.5$ の領域を枝配管最近傍領域、また $-2 \leq x \leq 2$ 、 $0.5 \leq z \leq 4$ を枝配管下流領域とする。

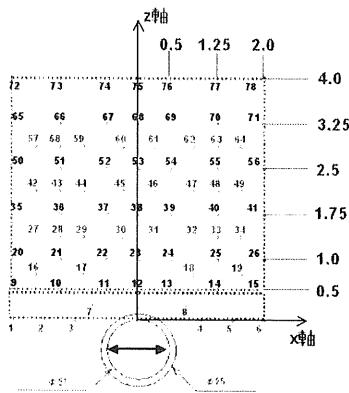


Fig.2 Locations for 78 thermocouples

主流流速を $U_m=0.48\text{m/s}$ ($Re_m=51501$)で固定し、枝流流速を $U_b=0.15, 0.23, 0.48\text{m/s}$ ($Re_b=4920, 7428, 15057$)と変化させる。これは過去の実験において枝配管設置

位置をバンド出口から約 $2D_m$ で固定した場合に得られた3種類の混合条件、成層噴流、再付着噴流、偏向噴流、に対応している[5]。主流の温度は $T_c=20^\circ\text{C}$ 、枝流の温度は $T_h=40^\circ\text{C}$ とする。

3. 実験結果および考察

本研究では温度変動の激しさを示す値として以下の温度変動強度 ΔT_{rms}^* を用いる。

$$\Delta T_{rms}^* = \sqrt{\frac{\sum_n (T_i - T_m)^2}{n}} \quad (1)$$

T_i は瞬時の計測温度、 T_m は時間平均温度、 n はサンプリング数、 T_h は枝流温度、 T_c は主流温度である。分子の値は標準偏差で温度のばらつき度を示す。それを枝流温度から主流温度を差し引いた値で無次元化をしている。

3.1 枝配管下流領域の温度変動強度 ΔT_{rms}^*

枝配管を $L_b=1D_m, 4D_m$ に設置した場合の $U_b=0.15, 0.48\text{m/s}$ における温度変動強度の分布図をFig.3に示す。

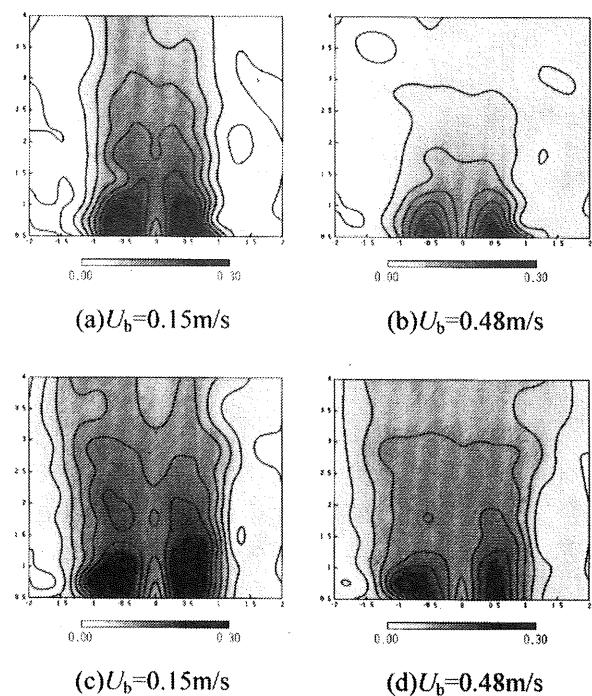


Fig.3 Temperature fluctuation intensity ΔT_{rms}^*
($U_m=0.48\text{m/s}$, (a);(b) $L_b=1D_m$, (c);(d) $L_b=4D_m$)

分布図は各熱電対で得られたデータを元にスライン補間により算出されている。Fig.3 より $x=0$ の軸を中心に左右対称に温度変動強度の高い領域が存在していることが分かる。これは $x=0$ を中心に存在している噴流が二次流れの非定常挙動により壁面近傍の周方向、径方向に揺らぐためである。枝流速の増大に伴い温度変動強度の低い領域が下流側に広がっているが、これは枝流速の増大に伴い噴流が主流内部まで及んでいるためである。 L_b の増加に伴い温度変動強度の高い領域が下流側に広がっている。そこで最も温度変動が高い枝管左右端 $x=0.5$ 軸上における温度変動強度の減衰特性を Fig. 4 に示す。

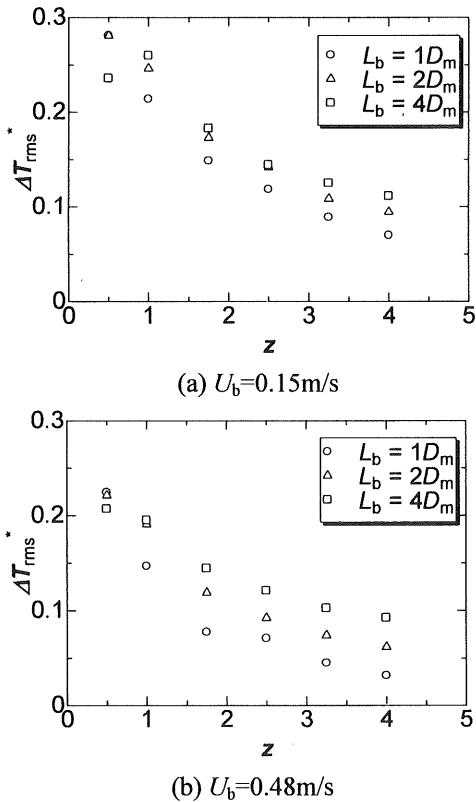


Fig.4 Damping characteristics of ΔT_{rms}^* , ($U_m=0.48 \text{m/s}$)

L_b が増大するにつれて $z \geq 1$ では温度変動強度が高くなる。また枝配管を 90 度ベンド出口付近に設置した場合、温度変動強度の減衰が速くなる。 L_b が小さいほど二次流れの非定常挙動は強くなることが知られている[4]。 $L_b=1D_m$ では噴流は二次流れに追従されるかたちで壁面近傍から主流内部まで侵入し、主流と噴流の混合が促進されることを示唆している。一方、 $L_b=4D_m$ では噴流は $L_b=1D_m$ の場合ほど主流内部まで侵入できないため温度変動強度の高い領域が下

流側まで広がったと考えられる。過去の研究では、90 度ベンド出口近傍では噴流は二次流れの影響を受けやすいため、配管材料の熱疲労を軽減するためには、どの混合条件でも 90 度ベンドから離れた位置に枝配管を設置した方がよいと考えられていた。しかしながら噴流が主流内部で混合する場合、枝配管を 90 度ベンド付近に設置することは熱疲労の軽減につながると考えられる。

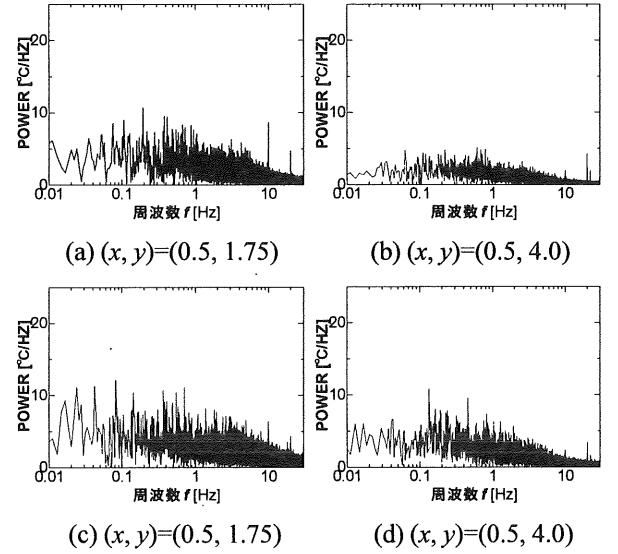


Fig.5 Frequency analyses

($U_b=0.15 \text{m/s}$, (a);(b) $L_b=1D_m$, (c);(d) $L_b=4D_m$)

枝流流速 $U_b=0.15 \text{m/s}$ で枝配管の設置位置 $L_b=1D_m$, $4D_m$ の $(x, z)=(0.5, 1.75)$, $(0.5, 4.0)$ に関して周波数解析を実施した(Fig.5)。周波数 $f=10, 20, 30 \text{Hz}$ に強い POWER が存在しているが、これはノイズであるため今回は議論の対象にしない。噴流は主流に対して障害物として作用するため、条件によっては噴流後方にカルマン渦列に似た後流渦列が発生すると考えられる。噴流を直徑 21mm の円柱と仮定した場合、カルマン渦列の放出周波数は $f=4.56 \text{Hz}$ となり、この帶域に卓越した成分が存在する場合は後流渦によつて誘起される温度変動が発生していると考えられる。また先行研究より、二次流れによって誘起される温度変動の周波数は $f=0.1 \sim 2.0 \text{Hz}$ に存在すると考えられている。

Fig.5 の全周波数帯域において、 $L_b=4D_m$ の POWER は $L_b=1D_m$ よりも強いことが分かる。特により下流側 $(x, z)=(0.5, 4.0)$ での $L_b=1D_m$ と $4D_m$ における POWER の差は顕著に現れた。二次流れによって誘起される

温度変動の周波数帯域($f=0.1\sim2.0\text{Hz}$)に着目すると、 $(x, z)=(0.5, 1.75)$ では枝配管の設置位置に関わらず共に強い POWER が存在する一方で、 $(x, z)=(0.5, 4.0)$ では $L_b=1D_m$ の POWER は弱く、下流側での POWER の減衰は早いのに対し、 $L_b=4D_m$ の場合は下流側においても依然強く、減衰は遅いことが分かる。また後流渦列によって誘起されると考えられる温度変動の周波数(4.56Hz)には卓越した成分は見られない。

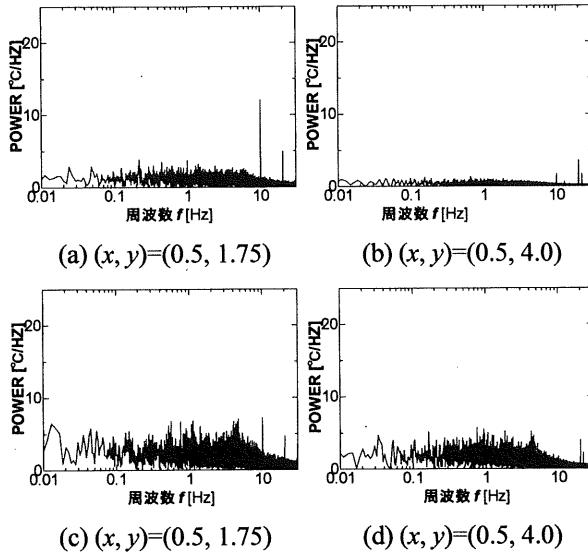


Fig.6 Frequency analyses

$(U_b=0.48\text{m/s}, \text{(a);(b)}L_b=1D_m, \text{(c);(d)}L_b=4D_m)$

Fig.6 に枝流流速が増大した $U_b=0.48\text{m/s}$ における周波数解析を示す。 $L_b=1D_m$ の場合と同様に、全周波数帯域で $L_b=4D_m$ の POWER の方が $L_b=1D_m$ の POWER より強いことが分かる。つまり枝配管を 90 度ベンド近傍に設置した場合、噴流は主流内部まで侵入し、壁面近傍に存在する二次流れの激しい非定常挙動により噴流と主流の混合が促進されると考えられる。 $L_b=4D_m$ における周波数解析で特徴的なのは、枝流流速を $U_b=0.48\text{m/s}$ に増加させた場合でも $f=0.1\sim2.0\text{Hz}$ に強い POWER が存在すること、また $f=4.56\text{Hz}$ に卓越した成分が存在することである。つまり $L_b=4D_m$ では二次流れと後渦列の相互作用により噴流と主流が混合していると考えられる。

$z\geq 1$ の領域では、90 度ベンド近傍に枝配管を設置した場合、主流と噴流の混合が促進され温度変動強度が低くなる。また全周波数域における POWER も弱いため、90 度ベンド付近に枝配管を設置した方が高サイクル熱疲労の危険性を回避できる可能性を示

唆している。

3.2 枝配管下流領域内の最大温度変動強度 $\Delta T_{\text{rms}}^{*,\text{max}}$

枝配管下流領域における温度変動強度の最大値 $\Delta T_{\text{rms}}^{*,\text{max}}$ に着目する。Fig.7 は最大温度変動強度と枝流流速の関係を示している。

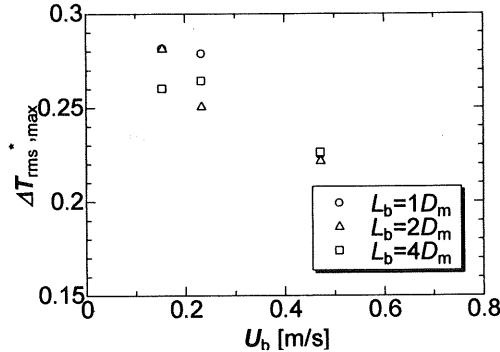


Fig.7 Effect of setting location of T-junction on $\Delta T_{\text{rms}}^{*,\text{max}}$
($0.5\leq z\leq 4.0$)

枝流流速が $U_b=0.15, 0.23\text{m/s}$ では枝配管の設置位置による最大温度変動強度の違いが顕著であるのに対し、枝流流速 $U_b=0.48\text{m/s}$ では顕著ではない。枝流流速が低く、90 度ベンド近傍に枝配管を設置した場合、最大温度変動強度は合流直後 $z=0.5$ に存在しており、その値は他の設置条件に比べて高いので注意が必要である。

3.3 枝配管最近傍領域内の最大温度変動強度 $\Delta T_{\text{rms}}^{*,\text{max}}$

枝配管最近傍領域において枝流流速 U_b に対する最大温度変動強度 $\Delta T_{\text{rms}}^{*,\text{max}}$ の変化を Fig.8 に示す。

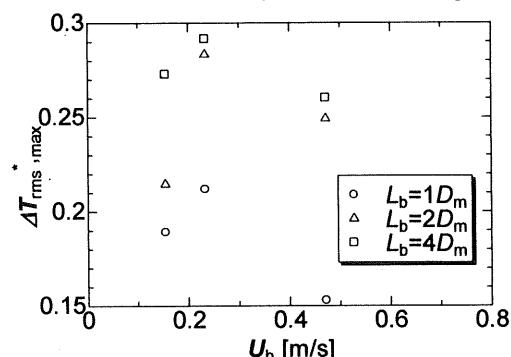


Fig.8 Effect of setting location of T-junction on $\Delta T_{\text{rms}}^{*,\text{max}}$
($0\leq z < 0.5$)

$L_d=2D_m, 4D_m$ における $\Delta T_{\text{rms}}^{*,\text{max}}$ が $L_d=1D_m$ の場合に比べて極端に高い値を示している。さらに、 $L_d=2D_m$,

$4D_m$ における枝流流速 $U_b=0.23, 0.48\text{m/s}$ の $\Delta T_{\text{rms},\text{max}}^*$ は枝配管下流領域の $\Delta T_{\text{rms},\text{max}}^*$ よりも高い。これは枝配管をベンド出口から遠ざける形で設置した場合、枝配管近傍で最も熱疲労を受けやすいことを示唆している。高い $\Delta T_{\text{rms},\text{max}}^*$ が得られた枝流流速 $U_b=0.23, 0.48\text{m/s}$ 、 $L_d=1D_m, 4D_m$ の $(x, z)=(-0.75, 0.25)$ における周波数解析をFig.9に示す。

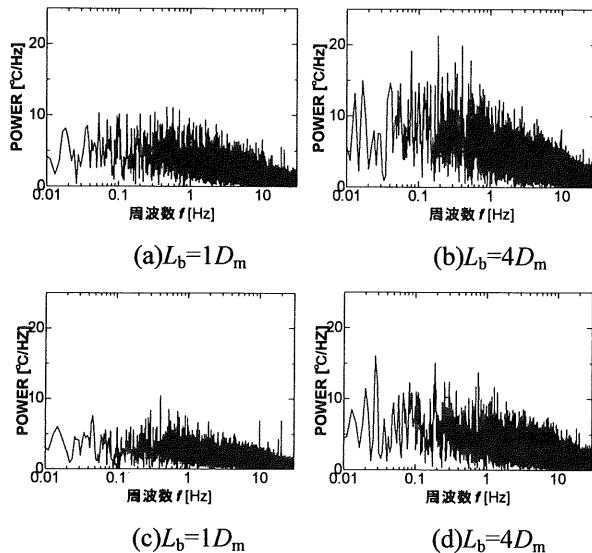


Fig.9 Frequency analyses

$((x, z)=(-0.75, 0.25), (a); (b) U_b=0.23\text{m/s}, (c); (d) U_b=0.48\text{m/s})$

周波数解析より $L_b=4D_m$ では $L_b=1D_m$ に比べて全周波数帯域に強い POWER が存在することが分かる。しかも低周波数領域に強い POWER が存在するので高サイクル熱疲労は枝配管下流側だけでなく枝配管最近傍領域においても起こる可能性を示唆している。また枝流速を $U_b=0.48\text{m/s}$ に増加させても $L_d=4D_m$ における $\Delta T_{\text{rms},\text{max}}^*$ は $L_d=1D_m$ の場合に比べて非常に高く、周波数解析でも $L_d=4D_m$ では低周波数領域に強い POWER が依然存在することが分かる。つまり枝配管を 90 度ベンドから遠ざける形で設置し、噴流を主流内部で混合させ、壁面での熱疲労を制御しようとしても、枝配管近傍で高サイクル熱疲労の恐れがあることが分かる。

4. 結言

3 パターンの枝配管設置において、主流流速を固定し枝流流速を変化させ、枝配管下流領域と枝配管最近傍領域での温度変動強度の測定と温度変動の周波数解析を実施した。

枝配管下流領域における温度変動強度から、枝配管の設置位置が 90 度ベンドから遠いほど、枝配管下流側に高い温度変動強度の領域が広がり、全周波数領域での POWER も強いことが分かった。枝流流速 $U_b=0.48\text{m/s}$ では、枝配管の設置位置の違いによる最大温度変動強度の差は明確には表れなかった。

枝配管最近傍領域において、枝配管の設置位置 $L_d=2D_m, 4D_m$ 、枝流流速 $U_b=0.23, 0.48\text{m/s}$ の場合の最大温度変動強度は計測領域において最大の値を取った。また全周波数領域の POWER も非常に強かつた。

以上より噴流を主流内部で混合させる条件下では、T 字配管合流部はベンド付近に設置した方が熱疲労の制御に結びつくと考えられる。

今後、各枝配管設置位置での主流流速を変化させた場合における壁面の温度特性を調べる。また各枝配管の設置位置における流体混合現象を解明するために PIV による流動可視化実験を行う。

5. 参考文献

- [1] 高橋志郎、椎名孝次、他 T 字形合流配管部における温度差を有する二流体の熱的混合特性(合流部混合特性と下流側の曲がり管による混合促進効果)(日本機械学会論文集(B 編)63巻 613号(1997-9)論文 No.96-1381)
- [2] 檜原秀樹、村松壽晴、他 T 字形合流管内の流れ(第1報、流れの特性と枝管からの流れが作る渦列)(日本機械学会論文集(B 面)70巻 693号(2004-5)論文 No.03-1214)
- [3] 五十嵐実、上出英樹、田中正暁、木村暢之、高サイクル熱疲労に関する T 字合流管内温度変動特性の研究(日本機械学会論文集(B 編)70巻 700号(2004-12)論文 No.04-0252)
- [4] 結城和久、熊野孝保、他 90 度ベンドで発生する二次流れの非定常挙動(日本機械学会論文集(B 編)70巻 693号(2004-5))
- [5] Kazuhisa Yuki, Yoshimasa Sugawara, Hoseini Sayed Mohammad, Prediction of the wall temperature fluctuation in a T-junction area with a 90-degree bend upstream, International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-6), Nara, Japan, October 4-8, 2004, paper ID. N6P082