

枝配管に起こる熱成層変動現象の実験と数値解析

Experiments and Numerical Simulations of Fluctuating Thermal Stratification in a Branch Pipe

中村 晶 (Akira Nakamura)*

竹中 信幸 (Nobuyuki Takenaka)† 濱谷 大輔 (Daisuke Hamatani)#

村瀬 道雄 (Michio Murase)* 佐々木 亨 (Toru Sasaki)*

要約 プラントの主配管からは多くの枝配管が分岐する。主配管内の主流が枝配管より高温で枝配管が下方に分岐する場合には、主流により励起されるキャビティーフローにより主流の温水は枝配管内に侵入して熱成層を作る。閉塞した枝配管でこの成層界面が変動すると配管に熱疲労が起こる場合がある。本研究はこの熱成層界面変動のメカニズムの解明を目的として実験と数値解析を行った。実験により枝配管が直管と曲がり管の場合で渦構造を観察した。主流を加熱した場合に熱成層界面が枝配管のエルボ部に到達すると、界面に大きな温度変化を伴うバースト現象が起こった。キャビティーフローによる温水の侵入深さに対し配管形状が与える影響を実験から明らかにして、数値解析条件に反映した。数値解析により実験結果と定性的に一致する渦構造とエルボ部の熱成層界面変動が再現された。

キーワード キャビティーフロー, 熱成層, 渦構造, 枝配管, 数値解析

Abstract Many pipes branch off from the main pipe in plants. When the main flow in the main pipe is hotter than a branch pipe that branches off downward, the hot water penetrates into the branch pipe with the cavity flow that is induced by the main flow and causes thermal stratification. If the interface of the stratification fluctuates in an occluded branch pipe, thermal fatigue may occur in pipe wall. Some experiments and numerical simulations were conducted to elucidate the mechanism of this fluctuating thermal stratification. The vortex structures were observed in the experiments of straight or bent branch pipes. When the main flow was heated and the thermal stratification interface was at the elbow, a “burst” phenomenon occurred in the interface in connection with large heat fluctuation. The effects of pipe shape on the length of penetration were investigated in order to modify simulation conditions. The vortex structures and the fluctuating thermal stratification at elbow in the numerical simulation showed good agreement with experiments.

Keywords cavity flow, thermal stratification, vortex structures, branch pipe, numerical simulation

1. 緒言

上端が主配管に接続され末端が閉塞された枝配管には主配管の流れにより誘起されるキャビティーフローが発生する。主配管から見て枝配管はへこみであり、そのへこみに発生する流れをキャビティーフローと称する。主配管と枝配管の間に温度差があるときに、このキャビティーフローが主配管の温水を枝配管へと輸送するため、枝配管内に急峻な温度勾配をもつ熱成層界面が発生する。閉塞枝配管内のキャビティーフローの変動に伴い熱成層界面が変動する場合があり、その温度変動により配管に疲労が生

じる場合がある。

日本機械学会ではこのような温度変動現象による構造物への影響評価を確立するため、「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針基準策定委員会」を設置した。ここで検討されている指針は、水を内包する配管の高低温水の合流・混合、枝配管の熱成層により生じる熱疲労を評価するものである。指針の基となるデータを蓄積するため電力会社・メカにより実験が行われ、指針に反映される予定である。

合流部の流れについては高速増殖炉を対象とした研究が多く、実験⁽¹⁾⁽²⁾により流動現象の理解が進んでいる。それに対してキャビティーフローについ

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

† 神戸大学工学部

神戸大学大学院自然科学研究科 (現在 サンデン株式会社)

ては文献が少なく、深さが直径以下のくぼみ⁽³⁾について研究されているが枝配管内の3次元的な渦構造については研究例が少ない。Kimら⁽⁴⁾は閉塞枝配管内の流速を測定し、乱れ速度で定義したレイノルズ数と侵入深さの関係を求めた。中森ら⁽⁵⁾は主流に熱水を流して枝配管外壁温度を計測し、主流流速と侵入深さの関係を求めた。しかし前述の熱成層界面変動現象がなぜ起こるのかについては不明である。

そこで本研究は枝配管に起こる熱成層、特に温度変動の原因である界面変動現象の解明を研究目的とした。枝配管に熱を輸送するキャビティーフローが持つ渦構造と特性を明らかにすることで、現象が明らかになると考えられた。現象の理解、メカニズム、影響因子を明らかにすることで、熱成層界面の発生場所の予測評価がより妥当なものとなる。そのため本研究では可視化実験を行い、配管形状等のパラメータがキャビティーフローに及ぼす影響の定性的傾向を明らかにした。一方で数値解析により現象を再現できれば実験と違って理想的な条件を与えて多くの情報が得られるため、可視化実験結果から得た知見を反映して数値解析を行った。ある程度現象が再現できたので、これまでに得られた実験・数値解析による研究成果を報告する。

主な記号

- D_{in} : 枝配管内径 [m]
- f : 周波数 [Hz]
- g : 重力加速度 [m^2/s]
- H : 総エンタルピー [J/kg]
- L : 管軸で定義される枝配管分岐部からの距離 [m]
- p : 圧力 [Pa]
- R : 主配管内側半径 [m]
- T : 温度 [$^{\circ}C$]
- t : 時間 [s]
- U : 主配管平均流速 [m/s]
- u : 流速ベクトル [m/s]
- x : 座標 [m]
- β : 体膨張係数 [$1/^{\circ}C$]
- λ : 熱伝導率 [W/mK]
- ν : 動粘性係数 [m^2/s]
- ρ : 密度 [kg/m^3]
- θ : 角度 [$^{\circ}$]

添字

i, j : 座標方向

r : 基準状態

2. 実験方法

実験装置は図1に示す神戸大学工学部の熱流動実験ループを用いた。作動流体には脱気した水を用い、ポンプ入熱による流体温度上昇を冷却水流量により制御した。ポンプから送り出された水はバルブを通り試験部を流れ、流量計を用いて試験部流速を平均流速として計測した。

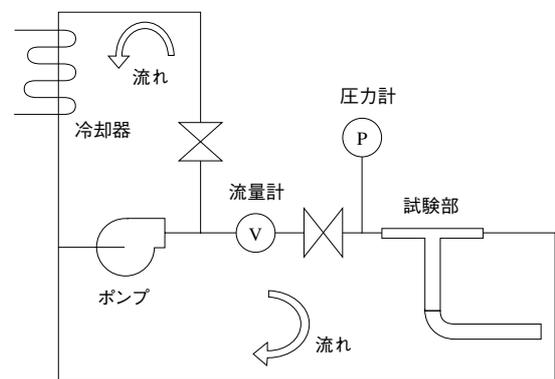


図1 実験ループ

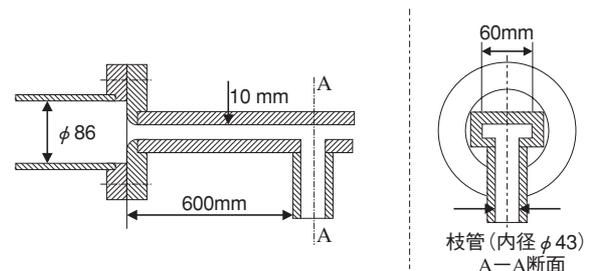


図2 試験部入り口形状

流速を稼ぐため試験部の主配管形状は図2に示すようにダクト状に絞っている。主配管内の流れが十分に発達するように、ダクト入り口から枝配管分岐部までの距離は600mmとし、水力等価直径の約35倍を取った。ダクトの断面は矩形と扇形の2種類を用意し、主配管断面形状による枝配管内の流れの差を調べた。さらに主配管断面形状が扇形のものに対して枝配管分岐部に面取りを施したものと直角に近いものの2種類を用意し、分岐部形状の影響を調べた。

プラントでは配管内流体温度が雰囲気温度よりも高い場合が多く、下方に分岐する枝配管に発生する

熱成層は成層界面が安定して温度勾配が急峻になる。上方に分岐する場合には主流はキャビティーフローだけでなく浮力により枝配管に侵入するため、枝配管内流体温度は主流温度に近くなる。そこで本研究では主配管に対する枝配管の分岐方向は鉛直下方とし、主配管は水平に設置した。

枝配管は図3に示すように直管と曲がり管の2種類を用意し、枝配管形状による流れの差を調べた。枝配管の材質はアクリルを用い、内径はプラントで用いられる2インチ配管と同じにした。直管は中森ら⁽⁵⁾の結果を参考に、試験装置で主配管流速を最大にした場合でもキャビティーフローの侵入深さより十分な長さがあるように設定した。曲がり管の場合はプラントで実際に用いられている配管形状を参考としてエルボ曲率、分岐部からエルボまでの距離を決めた。

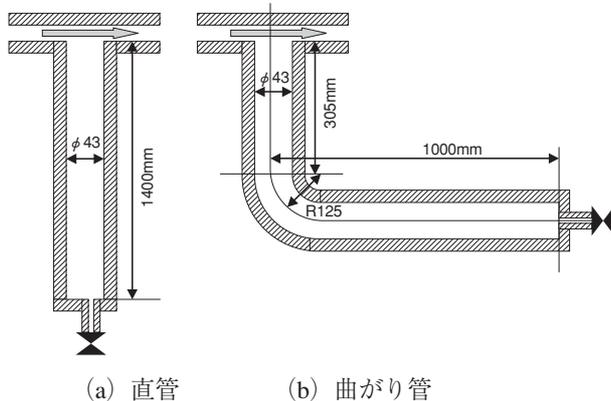


図3 試験体形状

それぞれの試験において主配管流速を1 m/s～12 m/sの範囲で1 m/sずつ増加させ、枝配管へキャビティーフローが潜り込む深さの測定と流動状態の観察、領域分類、変動温度測定を行った。流動状態の観察には濡れ性をアルコールで改善し、密度が常温水とほぼ等しくなった発泡スチロール粉末を用いた。さらに温度により発色する感温液晶を併用した。

実験では主配管と枝配管の水温に温度差がない等温場での流動状態を調べ、次に主配管を約65℃に加熱した非等温場での流動状態を調べた。今回の実験ではこれまでの知見が無いためキャビティーフローの観察と分類、配管形状・流れ等の条件が侵入深さに及ぼす定性的傾向を把握することに努めた。

3. 実験結果

3.1 等温での渦構造と侵入深さ

主配管形状等のパラメータが侵入深さに及ぼす定性的な傾向を調べた。主配管内部の水温を一定に保ちながら流速を上げていき、キャビティーフロー侵入深さを目視により計測した。

3.1.1 主配管形状が矩形で枝配管が直管の基本ケース

最も基本的なケースとして、主配管断面形状が矩形で枝配管が直管で等温の場合に枝配管内で観察されたキャビティーフローの構造を図4に示す。

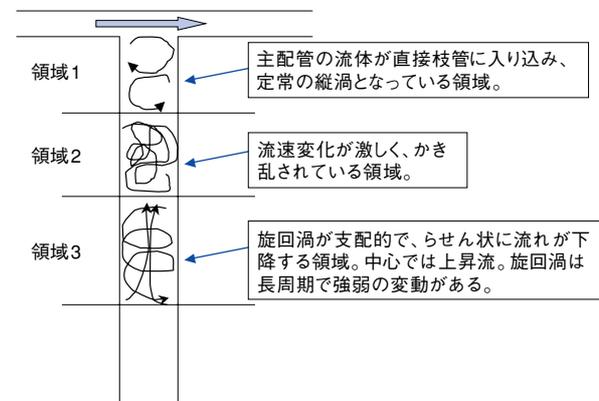


図4 等温場で主配管断面が矩形・枝配管が直管の場合のキャビティーフローの構造

枝配管分岐部直下には縦に回転する渦が発生し、ほぼ一定の大きさを保っている範囲を領域1として定義した。この領域には2～3個の縦渦が観察される。その下には乱れが激しく、準定常的な渦構造を観察できない領域2がある。領域2の下には旋回渦が支配的になる領域3があり、管壁近傍では流れは旋回しながら下方に運ばれ、管中心では竜巻のように流体が鉛直上方に吸い上げられるような流れを形成している。この領域では数十秒の長周期で旋回流が強くなる現象が見られる。領域3より下方では水は静止している。

このような流動状態を観察しながら主配管流速を上げて侵入深さを測定した結果を図5に示す。横軸は主配管ダクト内平均流速で、縦軸は分岐部から各領域の下端までの侵入深さ L を目視により計測し、枝配管内径 D で無次元化して表示している。流速を上げ

ると領域2, 3は緩やかな指数関数的に侵入深さが増加するが, 領域1は変化しない。

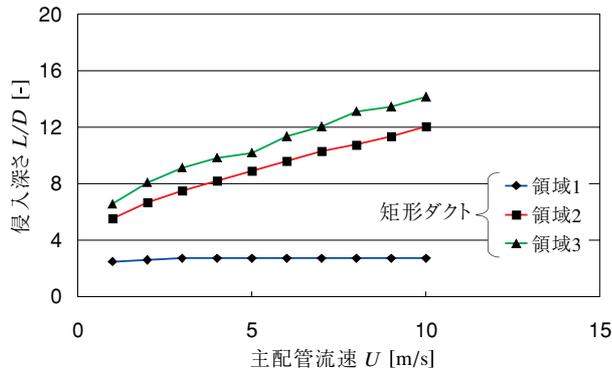


図5 等温場で主配管断面が矩形・分岐部に面取りなし・枝配管が直管の場合の侵入深さ

3.1.2 主配管形状を扇形にした場合

次に図6のように主配管を扇形のダクトとした。矩形の場合と違って主配管と枝配管の接合部形状が曲がり, 主配管の曲率が侵入深さに及ぼす影響を調べた。このときの侵入深さの変化を図7に示す。

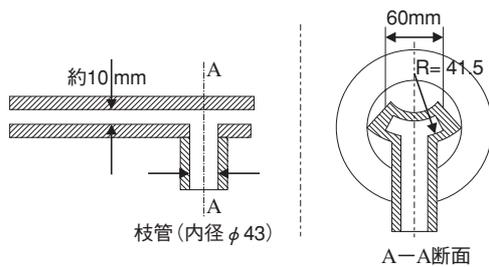


図6 扇形の主配管形状を持つ試験部

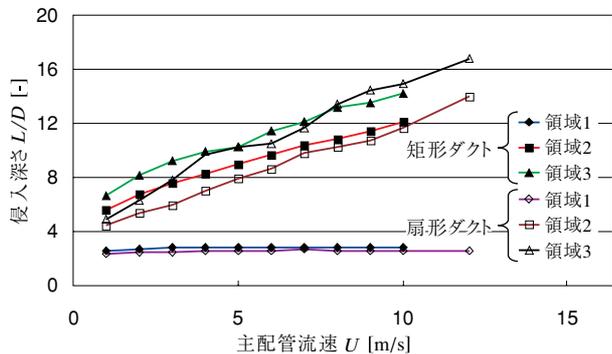


図7 等温場で主配管断面が扇形・分岐部に面取りなし・枝配管が直管の場合の侵入深さ

主配管が矩形の場合と扇形の場合に大きな差は無く, 各領域ともよい一致を示している。特に領域1の大きさは流速に対してほとんど変化が無く, 主配管形状にも影響されない。枝配管と主配管が交差する所の形状が2次元の円から縁の盛り上がった3次元楕円形状へと変わることにより主流が直接枝配管に流れ込む割合が増えることが予想されたが, 実験結果からはほとんど差がないことが分かった。

3.1.3 枝配管分岐部に面取りを施した場合

さらに主配管形状が扇形で枝配管分岐部に面取りを施した場合の侵入深さに及ぼす影響を調べた。定性的傾向を調べるため半径5mmの面取りを分岐部に施した。このときの侵入深さの変化を面取りなしの結果と合わせて図8に示す。

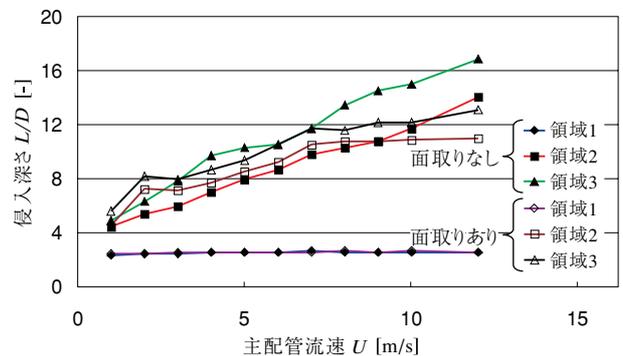


図8 等温場で主配管断面が扇形・分岐部に面取りあり・枝配管が直管の場合の侵入深さ

面取りを施した場合の領域1については面取りを施していない場合とよい一致を示しているが, 領域2, 3は流速が7m/s以下ではよく一致しているが, それ以上の流速では侵入深さが小さくなる傾向を示している。分岐部に面取りを施すと主流が枝配管に接する面積が増える効果があり, 侵入深さが増えると予想されたが, 実験結果からは逆の傾向が見られた。図4の領域1において観察された定常的な縦渦においては, 渦が主流のせん断力により回転するだけでなく, 主流が枝配管に流れ込む動きも観察される。この流れ込みの量が面取りにより変化すると予想されるが, 詳細検討は今後の課題である。

3.1.4 枝配管形状を曲がり管にした場合

主配管は基本ケースの矩形ダクトで枝配管を曲がり管とした場合に渦構造と侵入深さの変化を調べた。枝配管の曲がり部よりも先端側にキャビティーフローが侵入したときの渦構造を図9に示す。

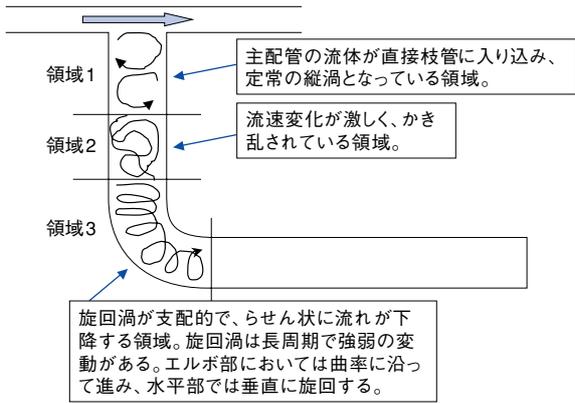


図9 等温場で主配管断面が矩形・枝配管が曲がり管の場合のキャビティーフローの構造

領域1, 2の渦構造は直管で観察された結果と同じであるが、領域3がエルボ部に達すると管の曲率に沿って渦が曲がり、エルボ出口から水平管では鉛直方向に旋回する。この旋回が鉛直方向になることは、主流と枝配管滞留水との間に温度差がある非等温の場合を考えると重要である。実験結果の考察である3.3.2において後述する。

このような流動状態を観察しながら主配管流速を上げて侵入深さを測定した結果を図10に示す。

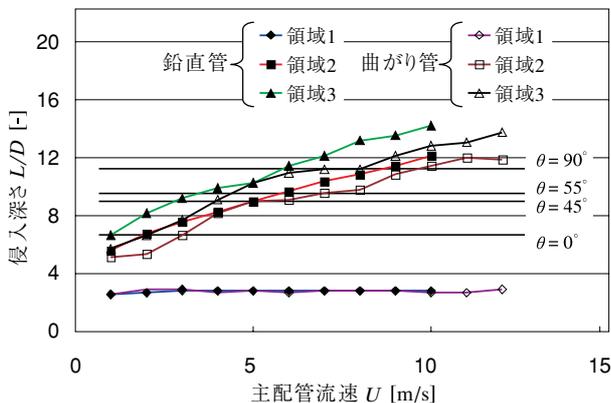


図10 等温場で主配管断面が矩形・分岐部に面取りなし・枝配管が曲がり管の場合の侵入深さ

枝配管のエルボ部は $L/D=7.1$ から 11.6 の間にあり、角度 θ をエルボ入り口で 0° 、出口で 90° と定義して

図中に示している。エルボ背側 45° の位置は水平部上面の高さとほぼ同じである。領域3の旋回渦はエルボ部により運動方向を 90° 曲げられるため、運動量の低下により侵入深さが小さくなると想像された。この曲がり管のエルボ部までの距離においては $U=6 \sim 8$ m/sで領域2, 3がエルボ部に到達し、領域2, 3の侵入深さの増加がいったん小さくなりその後大きくなる傾向を示している。これが曲がり管の影響と考えられ、直管の領域3の侵入深さに比べて流速 $U=8$ m/sの時に最大で L/D は約2の差がある。

3.1.5 領域3の侵入深さ

主配管形状は扇形のダクト・分岐部は面取りあり・枝配管は曲がり管とした場合に領域3の侵入深さを他のケースと比較して図11に示す。

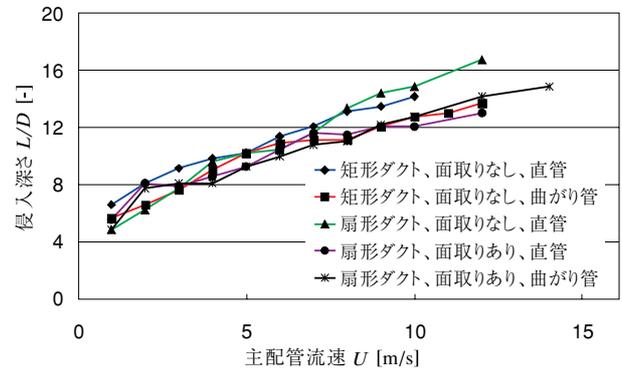


図11 等温場で主配管断面が矩形・分岐部に面取りあり・枝配管が曲がり管の場合の領域3の侵入深さ

全体的な傾向としては、 $U \leq 7$ m/sの範囲ではどのケースの侵入深さも大きな差はなく、これより高い流速条件では $U=10$ m/sにおいて L/D で平均値の $\pm 10\%$ の差がある。主配管形状が矩形のダクト・分岐部が面取りなし・枝配管が直管とした基本ケース(◆)に比べて、侵入深さが小さくなる共通条件は分岐部の面取りと枝配管が曲がり管であることである。そこで面取りの影響を図11で再検討する。枝配管が曲がり管の条件で比較すると、主配管が矩形で面取りなしのケース(■)と、主配管が扇形で面取りありのケース(*)ではほとんど侵入深さに差がない。3.1.2の検討で主配管形状が侵入深さにあまり影響しないことから考えると、曲がり管では分岐部の面取りはあまり影響がないと考えられる。

さらに面取りの影響と枝配管が曲がり管である影

響が重なった場合を検討する。主配管が扇形・面取りあり・直管のケース（●）と、主配管が扇形・面取りあり・曲がり管のケース（*）ではほとんど侵入深さに差がない。従って分岐部の面取りに加えて枝配管が曲がり管の条件が重なることによる影響はないと考えられる。

以上の検討から、図11の $U \geq 8 \text{ m/s}$ 以上の高流速条件では、分岐部が面取りありの場合と枝配管が曲がり管の場合に侵入深さが小さくなる傾向を示している。 $U = 10 \text{ m/s}$ において侵入深さは、主配管形状・分岐部の面取り・枝配管形状により L/D で $\pm 10\%$ のばらつきを示す。ただし侵入深さを支配する旋回渦が非定常であることから、計測する時間によるばらつき、目視計測による誤差も要因に挙げられる。また、面取りの大きさ、曲がり部の曲率の影響は今後の課題である。

3.2 温度差が渦構造と侵入深さに及ぼす影響

主流と枝配管滞留水との間に温度差を与えることにより渦構造と侵入深さの変化を調べた。実験装置の制限から主流温度は 65°C とし、枝配管滞留水は約 15°C の常温とした。

初期状態として実験装置全体を常温とし、主流流速を 4 m/s で保持してポンプからの入熱により主流を加熱する。主流温度、枝配管内流体温度を監視して定常状態になった後に主流流速を増加させた。流速を増加後は約30分以上、一定流速・温度に保持し、枝配管内流体温度が準定常に落ち着いてから目視による侵入深さ、熱電対による温度変動等を計測した。

3.2.1 主配管形状が矩形で枝配管が直管の場合

3.1.1の基本ケースと同様に主配管が矩形ダクトで枝配管が直管の場合に、温度差が侵入深さに与える影響を調べた。観察された渦構造を図12に示す。

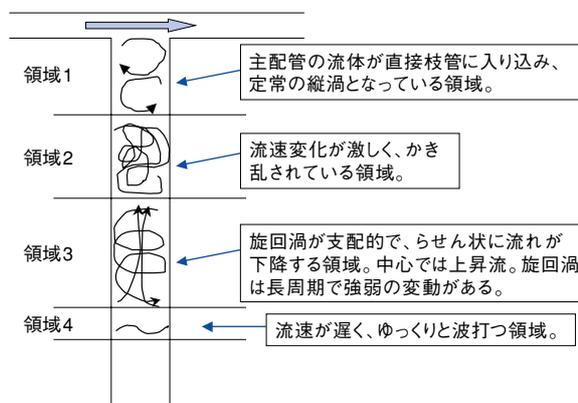


図12 非等温場で主配管断面が矩形・枝配管が直管の場合のキャビティーフローの構造

等温場での結果である図4と比較すると、領域4が新たに生じていることが分かる。この部分ではゆっくりとした波打ち状の運動が観察された。領域3下端まで主流が輸送され、温度勾配が生じて領域4が生じたと考えられる。これらの領域の下端までの侵入深さを図13に示す。図中の等温の結果は図5と同じである。

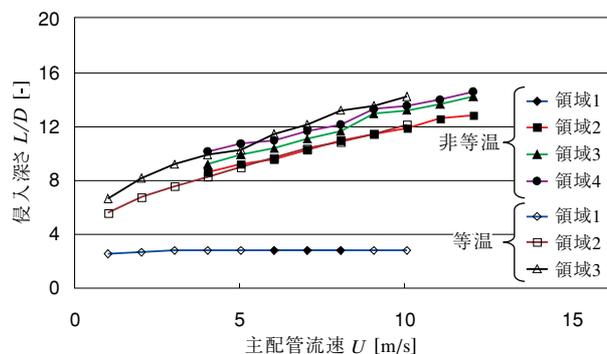


図13 非等温場で主配管断面が矩形・枝配管が直管の場合の侵入深さ

領域1は流速、主配管断面形状、分岐部形状、枝配管形状に影響されないため、3点だけ確認のために計測した。その結果、領域2,3も等温の場合とよい一致を示している。等温の結果に較べて浮力の影響により侵入深さが小さくなると予想された。領域3を較べると $L/D = 1$ 程度侵入深さが小さくなっていて、今回実験した主流と滞留水の温度差が侵入深さに対する影響は小さい。新たに観察された領域4は他の領域に較べると薄く、 $L/D = 0.4$ 程度である。

枝配管外面に多数の熱電対を設置し、主流流速が 7 m/s で $t = 4650 \text{ sec}$ における軸方向温度分布と図12の渦構造との関係を調べた結果を図14に示す。計測され

た温度 T を次式により無次元温度 T_n として示している。

$$T_n = (T - T_c) / (T_h - T_c) \quad (1)$$

ここで T : 温度, T_h : 主流温度, T_c : 枝配管滞留水温度である。

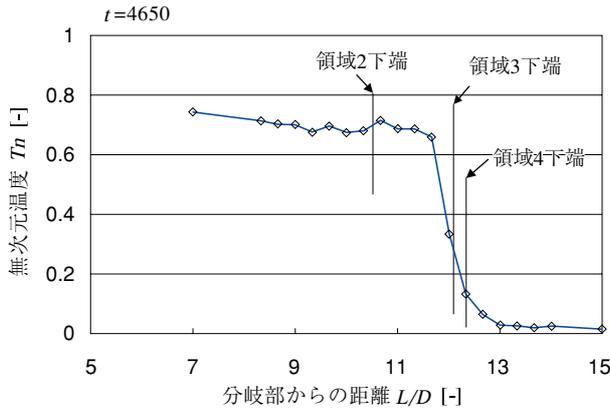


図14 非等温場で主配管断面が矩形・枝配管が直管の場合のある時刻の管外面温度 (流速 7 m/s)

図から分かるように管外面温度が急変化を示す所に領域3下端が位置し、領域2下端は $T_n=0.7$ と主流温度に近く、領域4下端は $T_n=0.1$ と滞留水温度に近い。従って主流の温水は領域1, 2, 3を經由して渦により輸送され、領域3下端において滞留している冷水の間で熱成層界面を生じると考えられる。領域4は熱成層界面の下側境界を観察しているものと思われる。

分岐部からの距離が $L/D = 11, 12$ の点で流体温度を計測するため、配管内面から1 mm内側に突きだした位置に熱電対を設置した。 $U = 7 \text{ m/s}$ の時に流体温度の時刻歴を計測した結果を図15に示す。

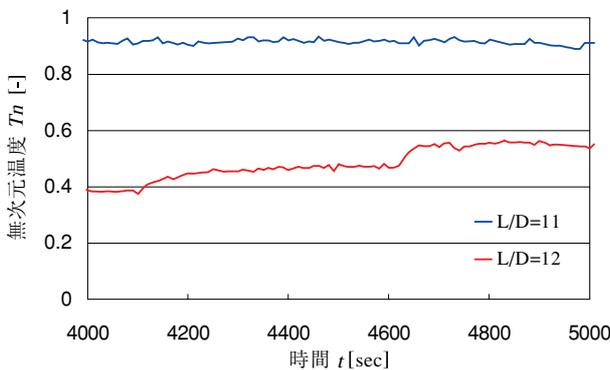


図15 非等温場で主配管断面が矩形・枝配管が直管の場合の流体温度 (流速 7 m/s)

図14で $L/D=11\sim 12$ の間で温度が急変するため、平均温度は熱成層界面の上方である $L/D=11$ の計測点では主流温度に近く $T_n=0.9$ であり、熱成層界面の下方である $L/D=12$ の計測点では $T_n=0.5$ である。図14の配管外面温度よりはどちらの点も平均温度は高く、温度変動はほとんど見られずに安定している。温度測定と同時に目視では旋回渦の長周期変動が領域3で観察されるが、温度変動には現れていない。

3.2.2 主配管形状が矩形で枝配管が曲がり管の場合

主配管が矩形ダクトで枝配管が曲がり管の場合に、温度差が侵入深さに与える影響を調べた。観察された渦構造を図16に示す。

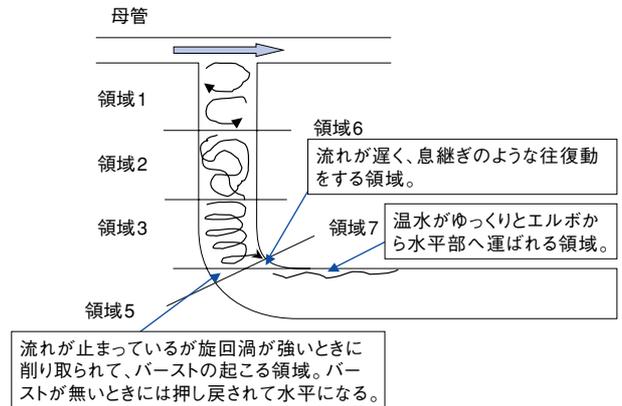


図16 非等温場で主配管断面が矩形・枝配管が曲がり管の場合のキャビティーフローの構造

等温場での結果の図9にある領域4が観察されなくなり、領域5～7が新たに生じていることが分かる。領域5では長周期で変動する旋回渦により、渦が強い時に冷水が削り取られる。これを以後バースト現象と呼ぶことにする。バーストの発生していない時は枝配管水平部の冷水が浮力により戻り、この領域での温度の時間変動が大きいと予想できる。領域6ではゆっくりとした息継ぎのような上下運動が観察される。この領域は水平部よりは上方にあるので旋回渦が弱いときに冷水が戻ってくることはなく、温度変動幅は領域5に比べると小さいと予想される。領域7は領域6から温水がゆっくりと波打ちながら運ばれてくる領域であり、浮力によって水平部上面に薄い層状になっている。

これらの領域のうち、領域2, 3の境界は目視では明瞭でない。領域3では旋回渦の変動に伴って侵入

深さが変動する．侵入深さが大きいときの領域3の侵入深さを図17に示す．図中の等温の結果は図10の曲がり管の結果と同じである．

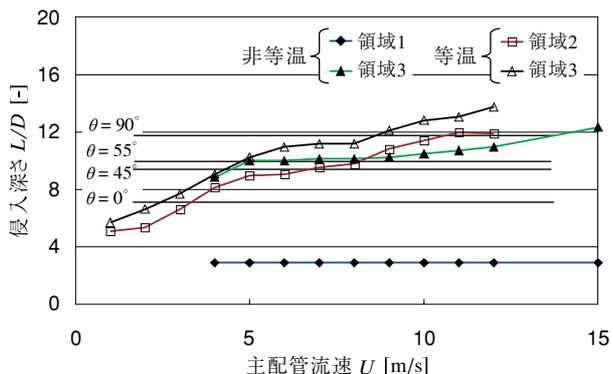


図17 非等温場で支配管断面が矩形・枝配管が曲がり管の場合の侵入深さ

非等温の場合の領域3は流速 U が5 m/sになるまでは等温の場合の領域3と一致している．枝配管のエルボ部において角度 θ をエルボ入り口で 0° ，出口で 90° と定義し，図中に示している． $U=5$ m/sより流速が大きくなると，領域3の下端がエルボ部 45° を過ぎて侵入深さの増加が止まる．その理由は，水平部の冷水が浮力の影響のため旋回渦によって持ち上げられにくくなり，旋回渦の侵入が阻害されるためと考えられる．その後 $U=9$ m/sから侵入深さは増加するが，その傾きは等温の場合に比べると緩やかになっている．

渦構造の観察から図16の領域5はエルボ部 45° から下方にあり，領域3の下端がエルボ部 45° に到達した流速から生じると思われる．エルボ背側 45° の鉛直方向の高さは水平部上面，すなわちエルボ内側 90° の高さとほぼ同じである．このエルボ背側 45° に特異な領域が発生する理由は，この高さから水平部滞留水とキャビティーフローの干渉が起こるためである．

エルボ部を中心に流体温度を計測するため，配管内面から1 mm内側に熱電対をいくつか設置した．エルボ背側の時間平均温度の軸方向分布を図18に示す．図10, 17と同様，枝配管のエルボ部は $L/D=7.1$ から11.6の間にあり，角度 θ をエルボ入り口で 0° ，出口で 90° と定義して図中に示している．

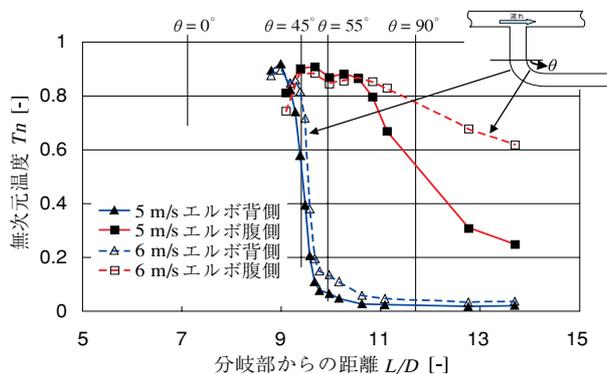


図18 非等温場で支配管断面が矩形・枝配管が曲がり管の場合のエルボ部の時間平均流体温度

エルボ背側は腹側に較べて角度 45° 近傍で温度勾配が急であり，ここに熱成層界面がある．図17で領域3の侵入深さが $U=5, 6$ m/sでほとんど変化しておらず，図18においても温度勾配の急なところが重なっていることと一致する．エルボ腹側では 67° まで $T_n \approx 0.9$ であり，図16の領域5に温水が入り込んでいることを意味する．図16の領域6ではエルボ側から水平部端部へと温水がゆっくりと輸送されるため，図18のエルボ腹側すなわち水平部上面において温度はエルボから離れるにつれて低下している． $U=6$ m/sでこの低下率が小さくなっているのは，領域6における温水の輸送が増えているためと考えられる．

$U=7$ m/sの時にエルボ部 47° から 53° の間で計測された温度時刻歴を図19に示す．温度は5秒間隔で計測した．

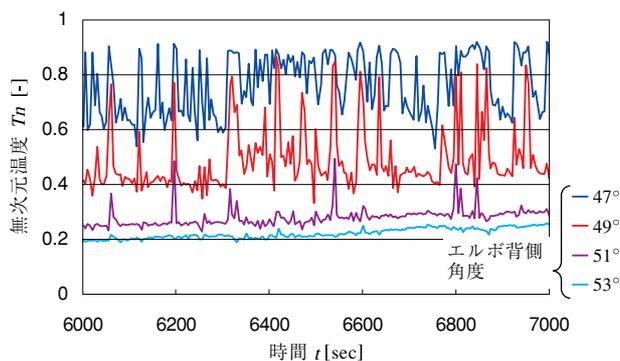


図19 非等温場で支配管断面が矩形・枝配管が曲がり管の場合のエルボ背側流体温度 (流速7 m/s)

平均的には下方になるほどエルボ背側流体温度は低下し， 47° の測定点における最大温度は主流温度に近く， 53° の最低温度は滞留水温度に近くなる．変動幅は 49° が大きく， 53° では変動がほとんど見られな

い。49°の温度変動に着目すると、高温側に変動する時には47°、51°の温度も同期して高温側に変動している。このことはバースト現象により47°から51°の間の冷水が掻き出され、ほぼ同時に低温から高温へと変化していると考えられる。バースト現象がゆっくりしたものであれば上方から順番に高温へと変化するはずであり、旋回渦の変動は長周期であるがバースト現象は短時間で起こることを示している。53°の位置にはバーストが到達していない。

変動周期を調べるため、変動幅の大きい49°のデータに高速フーリエ変換をかけた結果を図20に示す。

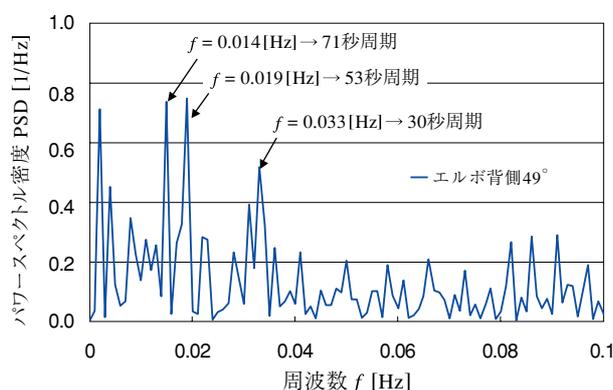


図20 エルボ背側流体温度の時刻歴の周波数解析結果（位置:49°、1000秒間のデータ、サンプリング周期5秒）

これを見ると、約50～70秒周期で長周期の変動が見られ、約30秒周期の成分もある。図19を見るとある程度一定周期の基本成分と、ランダムに発生する成分とが重畳しているように思われる。

3.3 実験結果の考察

3.3.1 侵入深さに影響を及ぼすパラメータについて

これまで述べてきた実験結果から、等温実験により以下のことが分かった。

- (1) 主配管に矩形ダクトを用いた場合と扇形ダクトを用いた場合に侵入深さに及ぼす影響を調べ、これらの主配管形状ではあまり差がなく影響が少ないことが分かった。
- (2) 主配管が扇形ダクトで分岐部に面取りを施した場合と施さない場合に侵入深さに及ぼす影響を調べ、主配管流速が8 m/s以上では面取りを施した場合の侵入深さが小さくなる傾向があるものの、影響は

少ないことが分かった。

- (3) 枝配管に直管と曲がり管を用いた場合に侵入深さに及ぼす影響を調べ、曲がり管の場合には領域2、3がエルボ部に位置する時に侵入深さの増加が小さくなる傾向があった。しかし直管の侵入深さに比べて最大で $L/D=2$ 程度と影響は少ないことが分かった。

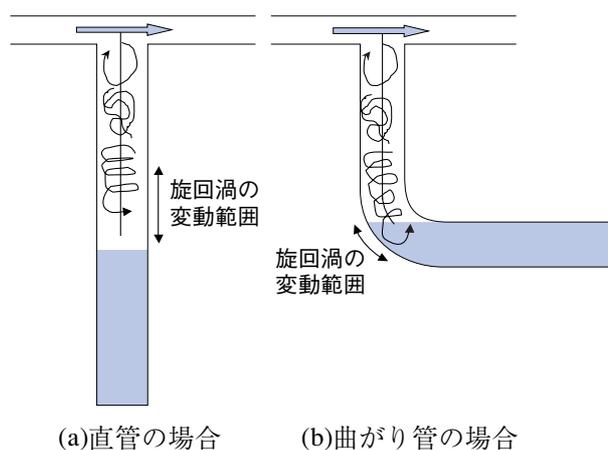
さらに主配管を加熱した非等温実験により以下のことが分かった。

- (4) 等温の場合と主流温度と枝配管滞留水の間温度差を付けた場合とを調べ、枝配管が直管の場合には侵入深さには影響が少ないが、曲がり管の場合にはエルボ部に熱成層界面が到達すると侵入深さの増加が停滞することが分かった。

3.3.2 熱成層界面変動現象のメカニズムについて

枝配管が直管の場合には旋回渦の変動が発生しても温度変動としてはあまり観測されなかった。それに対し枝配管が曲がり管の場合には、温度差を付けた実験では数十秒間隔の長周期の温度変動が観測され、バーストと呼ぶ特異な現象が見られた。これらのメカニズムを考察する。

直管の実験において可視化結果から、旋回渦の変動が観察された。温度差のある場合において旋回渦の変動と温度分布がどのような関係にあるかを図21に示す。



(a)直管の場合 (b)曲がり管の場合
図21 旋回渦の変動範囲と滞留水的位置関係

直管では熱成層界面から上方では流体温度が主流温度に近くなり、乱れによって十分に混合されてしまうために温度が均一になると考えられる。すなわち旋回渦の到達範囲では主流温水が輸送されて滞留

水が無くなるため、旋回渦と滞留水は明確に分離されてしまう。

それに対して曲がり管ではエルボ部に旋回渦の変動範囲が到達すると、水平部の滞留水と干渉を生じる。旋回渦は等温実験により観察されたようにエルボ部では曲率に沿って曲がる性質を持つ。そのため旋回渦が強い時にエルボ背側の冷水が巻き上げられ、弱い時には巻き上げが無くなるため水平部滞留水が巻き上げられた領域に流れ込むことになる。これがバースト現象となり、急激な温度変動が発生する。

このバースト現象が起こるのは図16の領域5である。それが図19のエルボ背側49°付近であり、温度変動幅はpeak-peakで主流温度と水平部滞留水温度の差の50%にも達する。その周期については旋回渦の変動周期と一致しているものと考えられるが、なぜこのように長周期で旋回渦が変動するのかは今後の検討が必要である。

3.3.3 数値解析への反映事項について

実験により検討してきた枝配管のキャビティフローと熱成層界面の変動現象を数値計算により再現することを考える。当面の目的は現象の再現にあり、定量的な評価に使えるかどうかは計算結果を詳細に見る必要がある。実験結果の検討から次のような内容を計算条件に反映することとする。

- (1) 非定常な旋回渦の再現のためには、3次元の解析格子を用いた非定常計算が必要である。
- (2) 主配管形状は侵入深さにあまり影響しないので、扇形ダクトとする。
- (3) 分岐部形状は侵入深さにあまり影響しないが、侵入深さが大きくなる傾向のある面取りなしとする。
- (4) 枝配管形状は熱成層界面の変動現象が起こる曲がり管とする。

4. 数値解析方法

数値解析によりキャビティフローの再現を行い、そのメカニズム解明に寄与することを考える。このような数値解析事例は見あたらなことから、まず現象の再現を目標として解析条件を設定することとし、これまで述べた実験結果を条件に反映する。計算対象は温度差のある枝配管が曲がり管の場合に起こる熱成層界面と変動現象であり、汎用の熱流体解析コードを用いる。本研究では英国AEA Technology

社で開発されたコードCFX 4を用いた。

4.1 数値解析手法

CFX 4は有限体積法を用い、計算アルゴリズムはSIMPLEC法である。コードの基礎式は一般的な熱流体解析で用いられるものであり、非圧縮性流体における連続の式、ナビエ・ストークス方程式、エネルギー方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - g\beta (T - T_r)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(u_j H - \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (4)$$

ここで u は流速ベクトル、 p は圧力、 g は重力加速度、 β は体膨張係数、 λ は熱伝導率、 ρ は密度、 H は総エンタルピー、 T は温度、添字 i, j は空間座標、添字 r は基準状態である。(3)式の右辺第3項で浮力にBoussinesq近似を用いる。

4.2 計算条件

熱成層の温度差を大きくして界面変動現象を再現しやすくするため、主流温度は実機と同じ290℃、枝配管滞留水温度は100℃とする。この温度範囲では水の粘性係数の変化が大きいため温度に従って変える。計算時間が長くなることを見込まれるため、手始めとして流体部分のみをモデル化し、配管内面で断熱とした。枝配管垂直部を273mm、枝配管水平部を700mmとした。計算に用いた格子を図22に示す。境界適合格子によりできる限り格子の直交性が良いように分割し、壁面近傍と枝配管分岐部近傍は細かくして総格子数は約5万とした。枝配管半径方向の最小格子間距離は0.5mmとした。枝配管水平部端部に100℃の境界を与え、十分に長い配管で一定温度になっていることを模擬した。

主流流速は5 m/sとし、計算の安定化のため時間積分は完全陰解法を用いた。熱伝導、浮力が影響するため時間刻み幅 Δt を十分に小さく取ることによって計算の安定化を図り、 $\Delta t=0.001\text{sec}$ とした。非定常性が強い問題に乱流モデルを適用すると現象が再現できないため、擬似的な直接数値解析 (Quasi-DNS) を用いる。

ナビエ・ストークス方程式の移流項の差分には QUICKスキームを用いた。

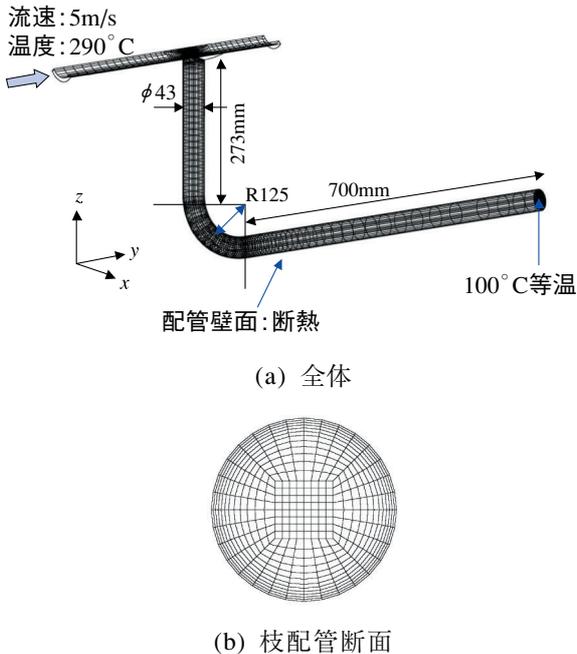


図22 曲がり管のキャビティーフローの数値解析に用いた計算格子

5. 数値解析結果

5.1 非等温場での曲がり管の数値解析結果

計算時間を短縮するため、まず定常解析を行いある程度枝配管内に主流が侵入した結果をもって非定常計算の初期値とした。

非定常解析を始めて163秒後の配管断面温度を図23に示す。

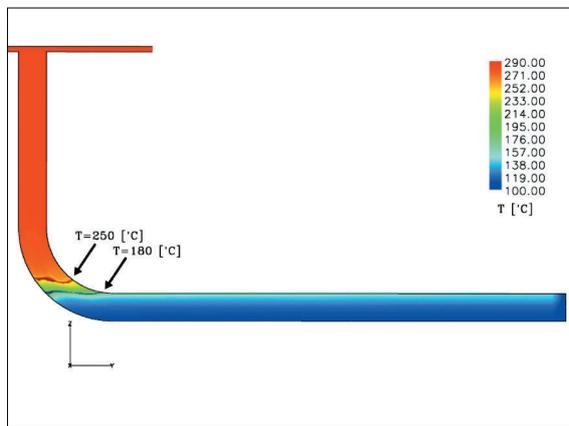


図23 非等温場で枝配管が曲がり管のキャビティーフローの数値解析結果 (163秒後)

枝配管の垂直部は主流温度に近くなり、水平部は水平部端部に与えた温度条件に近づいている。エルボ部において温度勾配が生じており、空間的温度分布を示すため図23では180, 250°Cの等温面を描いている。平均的には水平にこれらの等温面がある。エルボ部の渦構造を調べるため、計算結果を用いて描いた $t=163\text{sec}$ の流線 (stream line) を図24に示す。

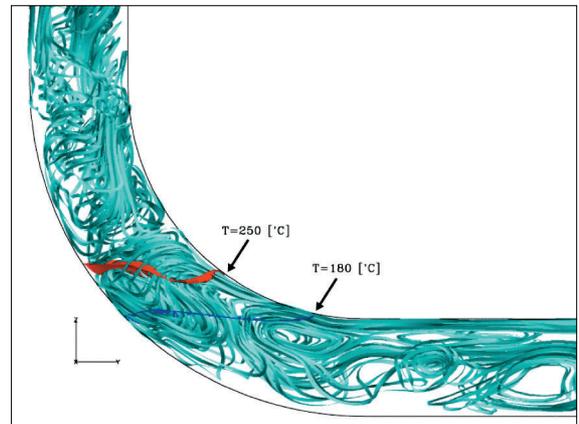


図24 計算結果によるエルボ部の流線 (163秒後)

250°Cの等温面より上では流線は旋回渦を示しており、180°Cの等温面より下では配管軸方向に流れている。これらの渦構造は可視化実験により観察された結果である図16と一致する。主流により励起されたキャビティーフローを数値解析により定性的には再現できている。

壁面に最も近い格子の流体温度を用いて、 $t=163\text{sec}$ におけるエルボ部の軸方向温度分布を図25に示す。

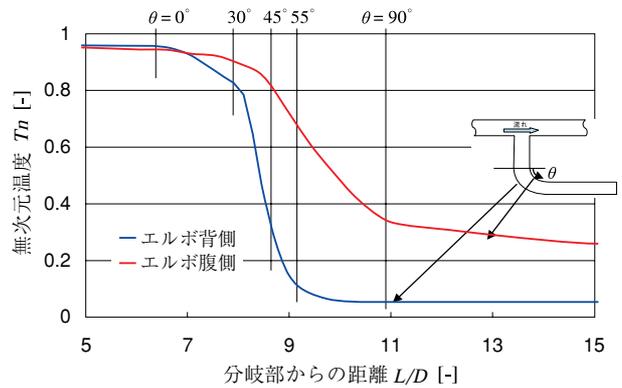


図25 非等温場で枝配管が曲がり管の数値計算結果によるエルボ部の軸方向流体温度

図18を見ると実験結果では角度45°にエルボ背側の温度勾配が急であるが、計算結果では勾配は実験より緩やかで約30~55°の範囲で変化している。エルボ

腹側の温度変化は $U=5\text{ m/s}$ の実験結果と似ている。

時間的な変動を見るため、エルボ背側の 30° 、 60° 、エルボ腹側 60° の流体温度時刻歴を図26に示す。

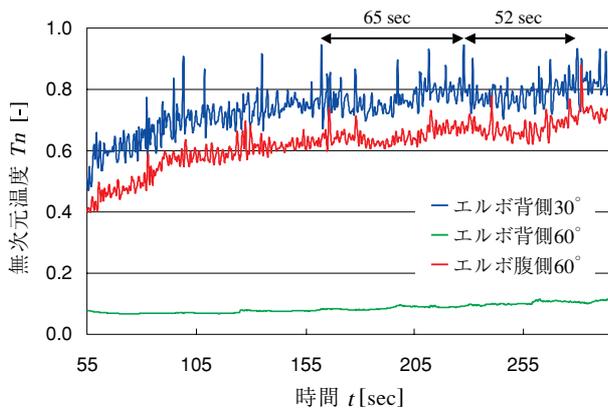


図26 非等温場で枝配管が曲がり管の数値計算結果によるエルボ部の流体温度時刻歴

温度は変動しながら平均的には上昇傾向にあり侵入深さが大きくなる途中であるが、200秒以降は上昇率が小さくなり準定常的な状態になっている。これまでの計算結果では、数十秒の長周期の温度変動と、より短い数秒周期の温度変動が重なっている。温度変動幅は実験に較べて小さいが、図25で見られたように計算結果は温度勾配が緩やかになっていることと関連する。空間的な勾配が緩やかになると旋回渦による流れ場の変動が温度変化となって現れにくくなるためと考えられる。

長周期の変動を調べるためにエルボ背側 30° のデータから平均温度の上昇分を除いて高速フーリエ変換をかけた結果を図27に示す。

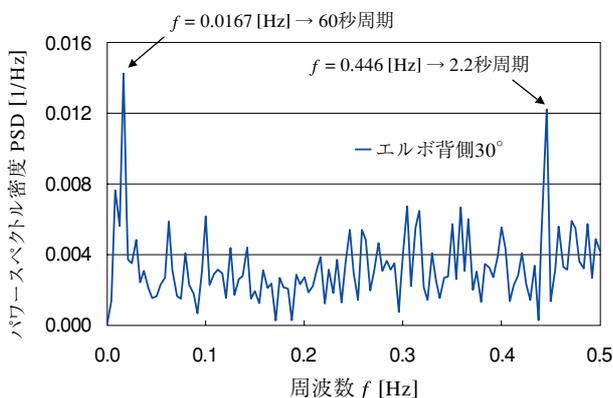
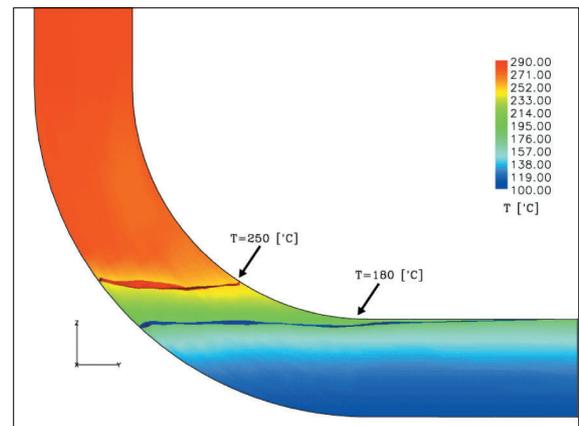


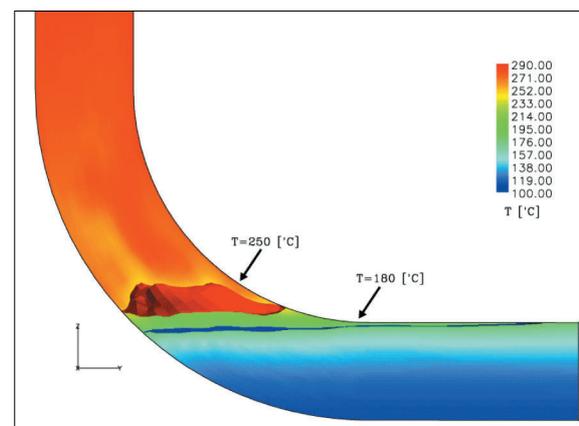
図27 エルボ背側流体温度の時刻歴の周波数解析結果 (位置： 30° 、5秒間のデータ、サンプリング周期0.1秒)

これを見ると、約60秒周期の長周期変動と2.2秒周期の短周期変動が重畳して観察される。図26を見ると十数秒周期の変動とランダムに発生する成分もあるように思われる。図20から分かるように実験結果において見られた約50～70秒周期の長周期変動が数値計算によって再現できている。

温度変動の大きな $t = 281\text{sec}$ における配管断面流体温度を図28に示す。



(a) 280 秒後



(b) 281 秒後

図28 曲がり管のエルボ近傍の配管断面流体温度

温度変動が大きくなる前の280秒では 180 、 250°C の等温面はほぼ水平になっているが、変動した瞬間の281秒では 250°C の等温面は中心が盛り上がった帽子のような形状となっている。これは配管壁面近傍では旋回渦が強くなり、配管中心近傍では滞留水を巻き上げているからである。

5.2 解析結果の考察

数値計算結果において図24のように実験結果と同様の渦構造が得られ、エルボ部に温度勾配の急な熱成層界面が生じていることから数値解析の目標である現象の再現を行うことができた。数値解析のように基礎方程式と厳密な境界条件から図26のような温度変動が解として得られることから、枝配管に発生するキャビティーフロー自体が何らかの不安定性を持ち、長周期で変動することが確かめられた。

旋回渦の変動周期は実験結果において50秒以上の長周期成分があるが、計算結果においても同様な長周期の変動が現れている。温度変動幅は計算結果においては実験より小さくなっているが、これは計算格子の分割数が影響していると考えられる。

計算結果においても旋回渦の変動が温度変動の原因であることが分かったが、旋回渦の変動原因について、今後考察を加える必要がある。また、配管壁面のモデル化は今後の課題である。

6. 結論

本研究では熱成層界面変動現象の解明のための可視化実験と数値解析を行い、キャビティーフローの渦構造、侵入深さおよび変動現象について検討した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 熱流動実験により枝配管に生じるキャビティーフローを調べ、渦構造によりいくつかの領域に分かれることが分かった。枝配管分岐部の直下では縦渦となる領域があり、乱れの強い領域を経て旋回渦が支配的な領域へと変化した。
- (2) 熱流動実験により曲がり管に起こる熱成層界面の変動現象のメカニズムを検討し、枝配管垂直部で生じた旋回渦が長周期で変動することにより、エルボ部背側に大きな温度変動を発生させることが分かった。
- (3) 熱流動実験により熱成層界面が枝配管のエルボ部に到達する流速で、界面に大きな温度変化を伴うバースト現象が起こった。バースト現象は旋回渦の変動と枝配管水平部の滞留水との干渉によって生じることが分かった。
- (4) 熱流動実験により配管形状などのパラメータがキャビティーフロー侵入深さに及ぼす影響を調べた。主配管形状・枝配管形状・分岐部形状を変えた結果、分岐部が面取りありの場合と枝配管が曲がり

管の場合には侵入深さが小さくなる傾向がある。

- (5) 熱流動実験結果から得られた配管形状などのパラメータがキャビティーフロー侵入深さに及ぼす影響を数値解析条件に反映して計算を行った結果、旋回渦などキャビティーフローの渦構造、エルボ部での熱成層界面に長周期変動現象を再現することができた。

今後は旋回渦の長周期変動現象のメカニズムを実験・数値解析から調べることで、数値解析手法の改良などが課題として挙げられる。

文献

- (1) 高橋志郎, 椎名孝次, “高温水と低温水が混合するT字形合流配管の流体温度変動特性”, 日本機械学会論文集 (B編), 66巻651号, 論文No.00-0148, pp.2905-2911, 2000-11.
- (2) 田中正暁, 五十嵐実, 林謙二, 上出英樹, “サーマルストライピングの熱流動に関する実験研究(3)―T字管体系での混合現象と予測解析―”, 日本原子力学会2001年春の年会要旨集, 第II分冊, I16, p.427, 2001-3.
- (3) 岡本史紀, 川村昌生, 水谷靖之, “三次元矩形くぼみまわりの流れ”, 日本機械学会論文集 (B編), 66巻650号, 論文No.00-0317, pp.2627-2634, 2000-10.
- (4) J. H. Kim, R. M. Roidt and A. F. Deardorff, “Thermal stratification and reactor piping integrity”, Nuclear Engineering and Design, Vol.139 No. 1, pp.83-95, 1993-1.
- (5) 中森信夫, 鈴田忠彦ほか, “枝管内における熱成層現象”, 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集II, D252, pp.646-648, 1993-5.
- (6) 濱谷大輔, 佐々木真一, 竹中信幸, 中村晶, 村瀬道雄, “主配管の枝管におけるキャビティーフローに関する基礎研究”, 日本機械学会関西支部総会講演会講演論文集, pp.10-1~2, 2002-3.