

# 閉じられた直管の分岐配管に生じる流れ場の構造と温度変動

## Investigation of Flow Structure and Temperature Fluctuations in a Straight Branch Pipe with Closed End

中村 晶 (Akira Nakamura)\*<sup>1</sup> 竹中 信幸 (Nobuyuki Takenaka)\*<sup>2</sup>

**要約** 原子力発電所では主配管のドレン系や安全注入系のように通常運転中は弁で閉じられた分岐配管が存在する。主配管の流れは分岐配管にキャビティーフローを誘起し、主配管の熱水が分岐配管内に侵入する。熱水が到達すると分岐配管の曲げ部には長周期で温度変動が生じ、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、基本的な分岐配管形状である直管に対して実験と数値解析を行った。フローパターンと渦構造はトレーサー粒子により実験で可視化すると共に数値解析で調べた。流体温度を熱電対による計測と感温液晶による可視化により実験的に調べ、数値解析結果と比較した。数値解析による渦構造とフローパターンは実験結果と定性的によく一致した。数値解析結果から熱成層界面近傍では温度変動と流速変動が同時に起こることが分かった。すなわち、主たる渦構造である旋回渦の流速変動が熱成層界面を変動させ、配管近傍の流体温度を急変させていることが分かった。

**キーワード** キャビティーフロー、熱成層、渦構造、分岐配管、数値解析

**Abstract** Normally closed branch pipes are connected to main flow pipes in a nuclear reactor for coolant drain or safety injection. The main flow initiates a cavity flow in a branch pipe and the hot water penetrates into it. It has been reported that large temperature fluctuations with long periods occur when the penetration reach to a bend and causes thermal fatigue. The purpose of this study is to clarify the mechanism of the large temperature fluctuations by experiments and numerical simulations with a vertical straight pipe that is a typical branch pipe structure. Flow pattern and vortex structures were visualized by tracer method in experiments and by numerical simulations. Liquid temperature was measured by thermocouples and visualized by liquid crystal for the uniform and non-uniform temperature conditions to compare with numerical simulations. The vortex structures and flow patterns of numerical simulations are qualitatively similar to that of experiments. The temperature fluctuation and velocity variation occurs synchronously near thermal stratification layer in the results of numerical simulation. This velocity variation of swirl vortex fluctuates, therefore, the thermal stratification layer and temperature of water near pipe wall.

**Keywords** Cavity flow, thermal stratification, vortex structures, branch pipe, numerical simulation

## 1. 序論

上端が主配管に接続され末端が閉止された配管(以下、閉塞分岐配管と呼ぶ)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。主配管から見て分岐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。主配管と分岐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水を分岐配管へと輸送するため、管内に急峻な温度勾配をもつ熱成層界面が発生する<sup>(1)(2)(3)</sup>。このキャビティーフローの強さが時間的に変動することに伴い熱成層界面が移動し、そ

の温度変動により配管に疲労が生じる場合がある。

この閉塞分岐配管に主配管の流体が輸送される現象は過去に米国で研究されてきた。当初は分岐部に生じる流れが乱れを輸送するという乱流貫入<sup>(1)(4)</sup>(turbulence penetration)と呼ばれ、Kimら<sup>(4)</sup>は閉塞分岐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。近年はキャビティーフローが特有の旋回渦を形成することから、渦貫入<sup>(5)</sup>(vortex penetration, swirl penetration)と呼ばれている。Kellerら<sup>(5)</sup>はこの熱成層による疲労に対して原子力発電所の主冷却材配管の分岐配管をスクリーニングする方法を提案した。

\* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\* 2 神戸大学工学部

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」<sup>(3)</sup>を策定した。指針は、水を内包する配管の高低温水の合流・混合、閉塞分岐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。電力会社・メーカーにより行われた実験による基礎データを元に指針が策定された<sup>(6)</sup>。この中で重要なことは、温度変動の生じる位置の同定とその変動幅の見積もりである。温度変動の大きな範囲に配管の溶接部があればき裂を生じる可能性が高くなり、損傷を生じる時間は温度変動幅と周期に依存するからである。

閉塞分岐配管内の3次元なキャビティーフローについては研究例が少ない。中森ら<sup>(2)</sup>は主流に熱水を流して分岐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った。

これまで筆者ら<sup>(7)~(13)</sup>は閉塞分岐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目的として研究を行ってきた。分岐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、可視化実験により渦構造と温度変動の関係を調べ、分岐配管が曲管の場合に長周期で温度変動が生じること、そして旋回渦の流速変動が温度変動に関連していることを明らかにしてきた。

本研究では、閉塞分岐配管が直管の場合に、流速上昇後に過渡的に生じる温度変動と旋回渦との関係を調べた。直管は曲管に比べて形状が単純であり、また時間の経過と共に熱成層界面の位置が変化する。これまでの可視化実験結果より時間により旋回渦の位置が変わることが分かっている。そこでこの旋回渦の時間的な変動をより詳細に調べ、熱成層界面位置と温度変動との関連を調べた。そのため数値解析を行い、得られた渦構造と流速変動を実験結果と比較した。

## 2. おもな記号

- $D$ : 分岐配管内径 [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]
- $L$ : 管軸で定義される分岐配管分岐部からの距離 [m]
- $p$ : 圧力 [Pa]
- $T$ : 温度 [K]
- $t$ : 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]
- $\beta$ : 体膨張係数 [1/K]
- $\lambda$ : 熱伝導率 [W/mK]
- $\nu$ : 動粘性係数 [ $m^2/s$ ]
- $\rho$ : 密度 [ $kg/m^3$ ]
- $\theta$ : 角度 [ $^\circ$ ]

## 添字

- $h$ : 主配管
- $c$ : 分岐配管
- $i, j$ : 座標方向
- $n$ : 無次元化
- $r$ : 基準状態

## 3. 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。試験部の主配管形状は図2に示すようにダクト状に絞り、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分岐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。分岐配管は図3に示すようなアクリル製の

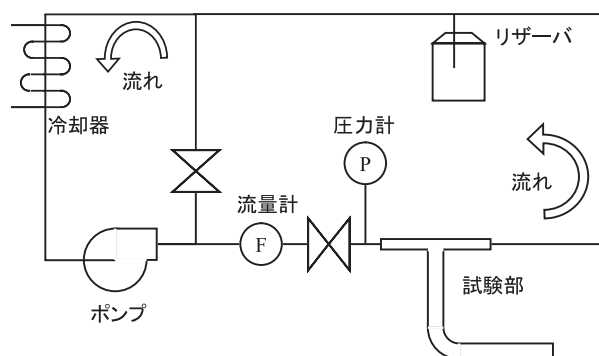


図1 実験ループ

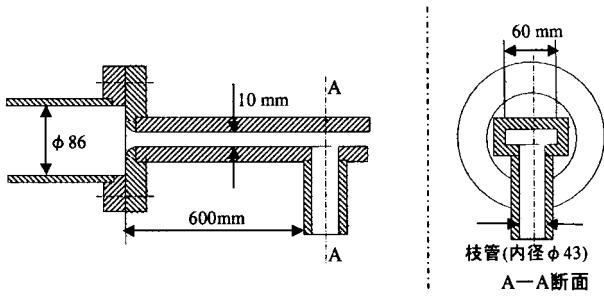


図2 試験部入り口形状

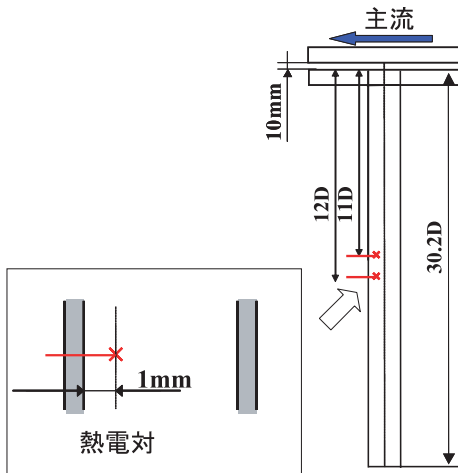


図3 直管の分岐配管の試験体形状と熱電対設置位置

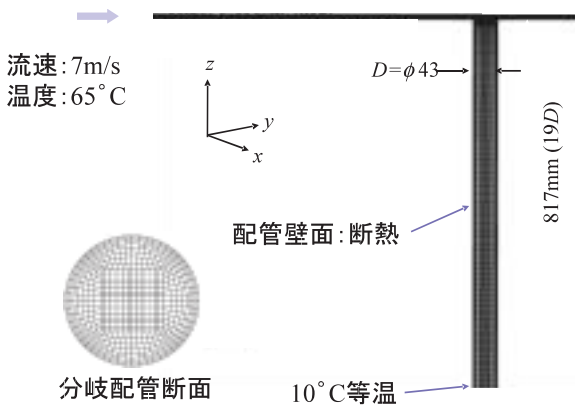


図4 非等温場での数値解析に用いた計算格子

直管を用い、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。

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、分岐配管へキャピタリーフローが潜り込む深さの測定、渦構造の観察および変動温度測定を行った。渦構造の観察には、濡れ性をアルコールで改善して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トレーサー粒子として用いた。CCDカメラでシャッタースピードを遅くしてトレーサー粒子の流脈線を調べた。主配管と分岐配管の水温に温度差がない等温場での流動状態を調べ、次に主流温度は65°C、分岐配管滞留水は約15°Cの常温とした非等温場での流動状態を調べた。非等温場では、温度により発色する感温液晶粒子（日本カプセルプロダクツ製、液晶の感温範囲は60°C±1°C）を用いて温度分布を可視化した。

#### 4. 数値解析方法

実験と同じ条件での数値解析を行い、実験では得られない情報を補足した。非等温場での直管の閉塞分岐配管が計算対象であり、分岐配管内に生じる熱成層界面の変動現象と流況を調べる。

##### 4.1 数値解析手法

実験による観察結果から、数値解析は3次元の非定常で行う必要がある。浮力を考慮することから、以下に示す非圧縮性流体における連続の式、Navier-Stokes方程式、エネルギー方程式を解く。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - g\beta (T - T_r) \tag{3}$$

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

ここで(3)式の右辺第3項で浮力に Boussinesq 近似を用いる。本研究では ANSYS 社の汎用熱流動解析コードCFX5を用いて計算を行った。CFX5は有限体積法を用い、計算アルゴリズムはCoupled Solverと呼ばれる流速・圧力場を同時に解くものである。

##### 4.2 計算条件

3.で述べた実験方法と同じ主流温度65°C、分岐配管滞留水温度10°C、主流流速7mで数値解析を行った。水の粘性係数は温度依存性を考慮した。流体部分のみをモデル化し、配管内面で断熱とした。計算に用い

た格子を図4に示す。CFX5は完全非構造格子を扱えるが、図4のように格子の直交性が良いように分割し、壁面近傍と分岐配管分岐部近傍は細かくして総格子数は約10万とした。分岐配管半径方向の最小格子間距離は0.5mmとした。分岐配管下端部に10℃の等温条件を与え、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。

時間積分は2次の陰解法を用いた。熱伝導、浮力が影響するため時間刻み幅 $\Delta t$ を小さく取ることによって計算の安定化を図り、 $\Delta t = 0.01\text{sec}$ とした。非定常性が強い問題に時間平均の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)を用いた。Navier-stokes方程式の移流項の差分には2次の風上差分を用い、その精度は別途調べ、SIMPLE法でQUICKを用いた場合と同程度であることを確認した。

## 5. 実験と数値解析の結果および考察

### 5.1 渦構造と侵入深さ

可視化による時間平均的な渦構造と侵入深さについては前報<sup>(7)</sup>で詳しく報告したので、ここでは典型的な形態について概説する。

#### 5.1.1 渦構造と流れパターン

トレーサー粒子により可視化した流れパターンのスケッチを図5に示す。分岐部直下には2~3個の縦渦が発生し、ほぼ一定の大きさを保っている。こ

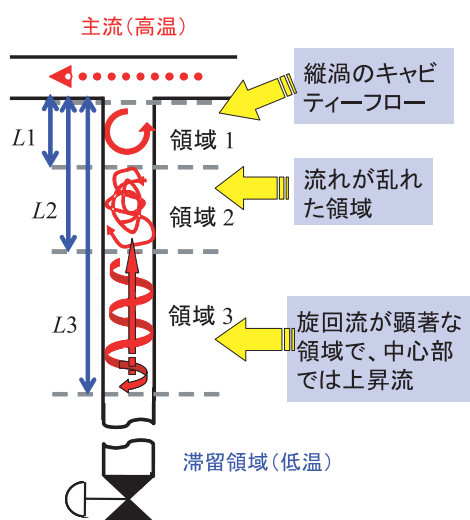


図5 分岐配管内のフローパターンと渦構造

れを領域1として定義し、その進入深さ $L1$ は分岐部から領域の下端までの距離で定義する。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。これらの渦構造と流れパターンは数値解析でも同様の結果が得られた。

#### 5.1.2 進入深さ

主流流速を変化させて領域3の長さ $L3$ を計測した結果を図6に示す。直管では等温の場合も非等温の場合も主流流速に対する進入深さの増加の傾向はほぼ同じで単調に増加している。すなわち温度差による浮力が進入深さに影響する度合いは小さく、わずかに等温の場合にくらべて非等温の場合は進入深さが小さくなる。図中には主流流速を5 m/sと7 m/sにした場合の非等温場で直管を用いた数値解析結果も示している。5 m/sの場合には実験値に対して進入深さに差があるが、7 m/sの場合には良く一致する。

### 5.2 温度変動と流速の変化

旋回渦が閉塞分岐配管内に発達することにより、熱成層界面が進入する。この熱成層界面位置が時間的に安定であれば配管壁面に対して温度変動は生じないが、分岐配管が曲管であれば数10秒から数100秒の非常に長い周期で変動が生じることがこれまでの

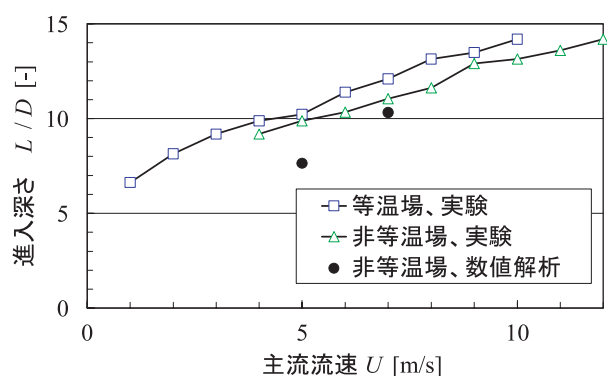


図6 主流流速に対する進入深さ (等温・非等温での実験、非等温での数値解析)

研究<sup>(8)(10)(12)</sup>で分かっている。

渦構造が熱成層界面を変動させる過程について、配管内部に設置した熱電対により計測した温度変動と温度変動を引き起こす流体現象との関係に着目して調べた。

### 5.2.1 直管に生じる温度変動

分岐配管内面に図3に示すように熱電対を設置し、主流流速が6 m/sで熱成層界面位置が安定するまで待った後、主流流速を7 m/sに増加させた後の温度変動を図7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。

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

流速を増加後、1000秒ぐらいの間でステップ状に温度が上昇し、数100秒程度の間隔でパルス状の大きな変動が見られる。この温度変動は目視で確認すると、流速が上昇して旋回渦が強くなり、熱成層界面に間欠的に到達して熱電対位置よりも界面を押し下げた時に生じた。時間平均での熱成層界面位置が温度計位置を通過してしまうと、温度変動幅は小さくなる。

### 5.2.2 温度変動と流速の変動

流速の時間的な変化が実験で生じているかどうかを確かめるため、露出を長くして流跡線をトレーサー粒子により可視化した実験結果を図8、9に示す。図8は等温場での結果であり、図9は非等温場での結果である。15秒間隔で露光時間が1秒間である。図9の非等温場では領域3の下端には熱成層界面が生じているが、観察される流れ場は等温、非等温の場合とも非常に似通っている。つまり旋回渦が到達する $L3$ より下方では流れがないためトレーサー粒子が止まっているが、旋回渦のある領域3の中ではトレーサー粒子が弧を描いて配管壁面に沿って旋回する。このことは、図5で観察された渦構造が等温、非等温にかかわらず生じていることを示しており、流速の変動が温度条件に依らずに生じることを意味している。

このことは重要な事実なので改めて述べると、図7の様な温度変動は、旋回渦が熱成層界面に到達することにより生じると解釈できる。等温度場で図6に示したような領域3の長さが主流流速に依存して生じることから、主流流速が増加した後は、 $L3$ は

それによって増加しようとする。その過程において $L3$ が連続的に増加すれば図7の温度変動は、熱電対を熱成層界面が通り過ぎる時の1回しか生じないはずである。ところが実際には図8のように温度に無関係な流速変動が旋回渦に生じているため、 $L3$ の増加も時間的に変動する。その結果、図7のようなステップ状の温度変動が熱成層界面近傍に生じる。十分に時間が経って新しい主流流速に対応する $L3$ にまで旋回渦が成長すると、熱成層界面位置が旋回渦の到達範囲の下端に位置することになり、温度変動幅が減少する。

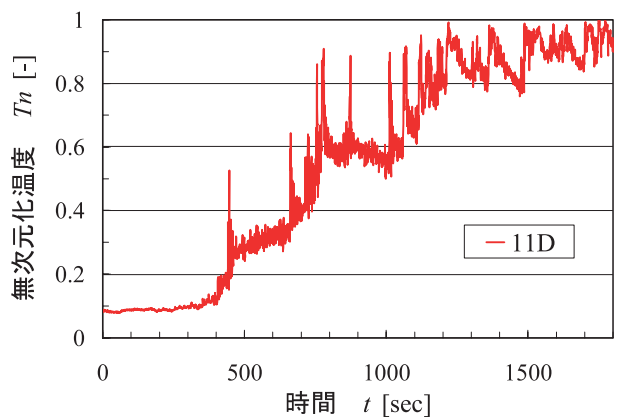
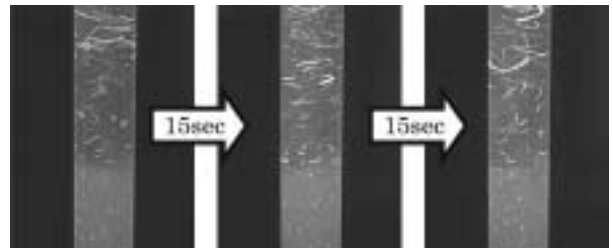
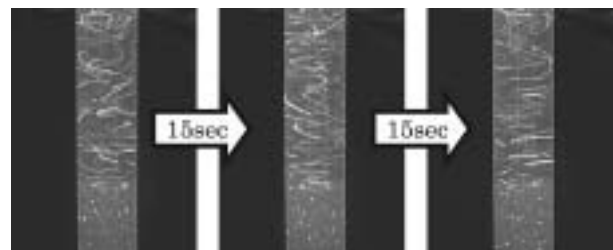


図7 非等温場で流速増加後の流体温度の変化 ( $L/D = 11$ の位置, 実験)



旋回流速が遅い 旋回流速が速い 旋回流速が遅い

図8 等温場での流速の時間変動 (実験, トレーサー粒子による流線の長さの変化)



旋回流速が遅い 旋回流速が速い 旋回流速が遅い

図9 非等温場での流速の時間変動 (実験, トレーサー粒子による流線の長さの変化)

この旋回渦の持つ流速変動を詳しく調べるため、数値解析により、初期条件を  $T = 10^{\circ}\text{C}$  で静止流体として時刻  $t = 0$  で主流流速  $U = 7\text{m/s}$  にした後の、位置  $L/D = 10$  での流体温度および流速の変化の時刻歴を図10に示す。温度変化は図7の実験結果と定性的に良く一致し、温度がステップ状に上昇する。 $t = 3200 \sim 3800\text{sec}$ の間では、温度が約100秒程度の周期でのこぎりの歯のように急上昇することが見られる。このとき、図10で同時に示した局所流速  $u$  (周方向)、 $w$  (下方向) は、温度変動と同時に変化していることが注目される。

$t = 3200 \sim 3600\text{sec}$ の間で、位置  $L/D = 4, 7, 10$  での流速の変化を図11に示す。無次元化温度  $T_n$  は  $L/D = 10$  での値である。このように各位置での流速変化を同時に示すと、上方にある  $L/D = 4$  での流速変化は  $T_n$  よりも早い時刻において変化している。すなわち、旋回渦が強くなる時は、周方向流速が上方から下方へと順に上昇することを示している。旋回渦が強くなり周方向流速が上昇すると図10のように下向き流れを輸送する  $w$  流速も上昇し、竜巻のように中心部分での上昇流も増えるために冷水の巻き上げが強くなる。最終的に旋回渦が熱成層界面へと到達すると、界面下の冷水が削り取られて界面は下方へ押し下げられ、図10の  $T_n$  のような急激な温度上昇と

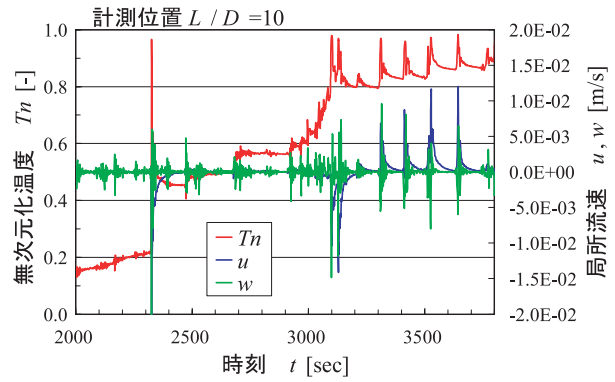


図10 非等温場での流速増加後の流体温度の変化と局所流速の関係 ( $L/D = 10$  の位置、数値解析)

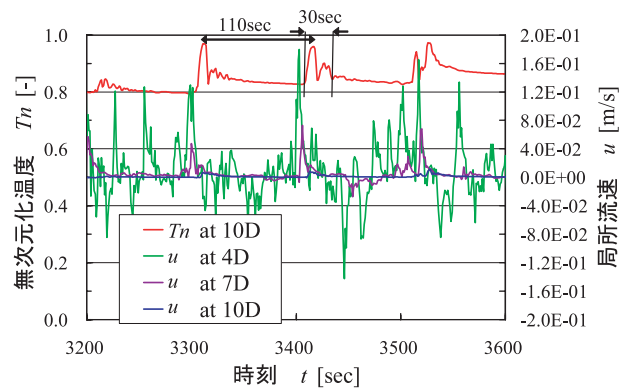
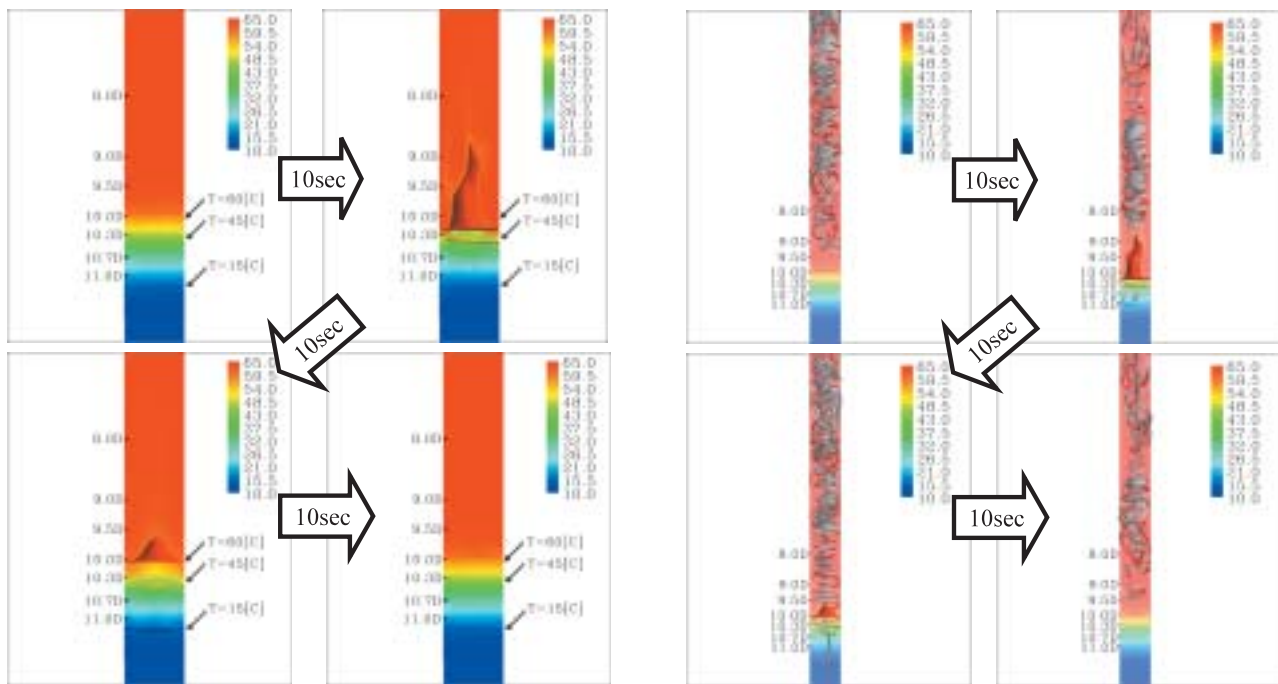


図11 非等温場での各位置における流速の変化 ( $L/D = 4, 7, 10$  の位置、数値解析)



(a) 等温度面

(b) 流線 (灰色)

図12 非等温場での熱成層界面の変動 (数値解析、十分な時間経過後)

なる。

図11では位置  $L/D = 4$  における流速変化の方が  $L/D = 10$  における流速変化よりも変化が激しく、また長周期と短周期の変動が重畳している。流速の絶対値も位置が上方であれば大きい。図中に示したように、熱成層界面を揺らす流速変動は30秒程度の時間で持続している。この揺動が約100秒程度の長周期で繰り返される。

数値解析による熱成層界面近傍の流れを等温度面と流線により可視化した結果を図12に示す。図12(a)では旋回渦中心の上昇流により冷水が巻き上げられ、配管中心で等温度面が盛り上がっている。同じ時刻における流線を同時に示した図12(b)では、等温度面が盛り上がる時に流線が熱成層界面に到達していることが分かる。図中で8Dと記してある位置は、分岐部から直径の8倍の位置であり、これより上方では流線が常に旋回している。つまり、熱成層界面が揺動していない時間に置いても旋回渦は常に生じていて、図11で4Dの位置の流速  $u$  のように変動している。

### 5.2.3 位置による流速変動の周期

図11の  $L/D = 4$  における旋回流速  $u$  が示すように、配管上方では旋回渦の流速変動は短周期のほぼ同じ最大流速で繰り返しており、熱成層界面近傍の  $L/D = 10$  における変化とは違っている。このことから、旋回渦の変動は次のような要因で生じていると推測される。

- ①領域1と2の中に領域3を長周期で生じさせる不安定性がある
- ②旋回渦が分岐配管内を下方へと伝播する間に、長周期変動が選択的に選ばれる
- ③旋回渦自体が長周期の不安定性を持っている

ここで注目した長周期変動の発生原因については今後の研究課題である。

## 6. 結論

直管の閉塞分岐配管を対象にキャビティーフローの渦構造、侵入深さおよび熱成層界面の変動現象について実験と数値解析により検討した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 数値解析により分岐配管に生じるキャビティーフローを再現し、熱成層界面の進入深さは実験結果と一致した。一方、渦構造、熱成層界面近

傍の等温度面の形状などのフローパターンも良く一致した。

- (2) 直管の分岐配管に生じる、流速を増加させた後のステップ状の温度変動は、実験による可視化結果より旋回渦が熱成層界面に到達して冷水を巻き上げるときに生じることが分かった。
- (3) 熱成層界面近傍では流速変動と温度変動が同時に起こることが数値解析により得られたため、旋回渦の流速の時間的な変動が温度変動を生じる原因であることが分かった。
- (4) 数値解析による流速変動を分岐配管の長手方向に調べた結果から、旋回渦の流速変動は分岐部に近い側では短い周期で生じるが、分岐部から離れて熱成層界面へ近づくにつれて長周期となることが分かった。

## 文献

- (1) NRC, NRC Assessment of Pressurized Water Reactor Primary System Leaks, NUREG / CR-6582 (1999).
- (2) 中森信夫, 鈴木忠彦ほか, 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, p.646 (1993).
- (3) 日本機械学会, JSME S 017 配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針 (2003).
- (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, p.83, (1993).
- (5) J. D. Keller, A. J. Bilanin, A. E. Kaufman and J. Carey, Thermal Cycling Screening and Evaluation Methodology and Application to Pressurized Water Reactor Branch Line Piping, Third International Conference Fatigue of Reactor Components (2004).
- (6) 椎名孝次, 河村勉, 大塚雅哉, 水野正, 久恒眞一, 小倉健志, 谷本浩一, 福田俊彦, 南安彦, 守屋祥一, 班目春樹, 閉塞分岐管滞留部の熱成層化による水平管内渦侵入深さ予測 (温度変動特性に及ぼす放熱条件の影響), 日本機械学会論文集 (B編), 71巻703号, p.954 (2005).
- (7) 中村晶, 竹中信幸, 濱谷大輔, 村瀬道雄, 佐々木亨, 分岐配管に起こる熱成層変動現象の実

- 験と数値解析, INSS Journal, Vol.9, p.67 (2002).
- (8) 中村晶, 竹中信幸, 枝配管に起こる熱成層変動現象の実験と数値解析, 日本機械学会熱工学講演会講演論文集, No.02-22, p.487 (2002).
  - (9) 中村晶, 竹中信幸, 長谷正紹, 閉塞分岐配管に生じる旋回渦による過渡的温度変動, 日本機械学会 年次大会講演論文集, No.03-1, Vol. VII, p.251 (2003).
  - (10) 竹中信幸, 長谷正紹, 中村 晶, 閉塞分岐配管のエルボ部における熱成層の挙動, 日本機械学会 年次大会講演論文集, No.03-1, Vol. III, p.171 (2003).
  - (11) 長谷正紹, 竹中信幸, 中村 晶, 枝管内潜り込み現象における温度変動の可視化, 日本伝熱学会 第40回伝熱シンポジウム講演論文集, E233 (2003).
  - (12) Nakamura, A. and Takenaka, N., Investigation of Flow Structure and Temperature Fluctuation in a Closed Branch Pipe Connected to Main Pipe, Third International Conference Fatigue of Reactor Components, Session No.2b-5 (2004).
  - (13) Takenaka N., Hosokawa S., Hase M., Onojima D., Nakamura A. and Oumaya T., Investigation of Flow Structure and Temperature Fluctuation in a Closed Branch Pipe Connected to High Velocity and High Temperature Flow in a Main Pipe, Fourth Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS4), No.000002 (2004).