

# T字配管における衝突型逆流現象の 数値シミュレーション

Numerical simulation of impinged penetration into T-junction branch lines

歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara)\*<sup>1</sup> 三好 弘二 (Koji Miyoshi)\*<sup>1</sup> 釜谷 昌幸 (Masayuki Kamaya)\*<sup>1</sup>

**要約** T字配管にて温度差のある流体が混合する場合、温度変動に伴う熱疲労が生じることがある。著者らはこれまでにT字配管における流れ場の可視化実験を実施し、主管と分岐管の運動量比に応じて主管流体が間欠的に分岐管内に逆流する現象を確認している。観察された流動様式は、逆流なし、巻き込み型逆流、衝突型逆流の3種類に分類される。本研究では可視化実験で観察された衝突型逆流現象を数値計算で再現し、高温・高圧条件下での侵入深さの推定を行った。乱流モデルにはラージェディシミュレーション(動的スマゴリンスキーモデル)を用いた。主管内径60 mm、分岐管内径20mmである。主管・分岐管の流入流体をともに室温20°Cとした等温条件では、分岐管への侵入深さの計算結果は実験結果と定量的に一致した。主管・分岐管の流体温度を等温320°Cまで上昇させると、等温20°Cの場合より分岐管への侵入が深くなる計算結果となった。粘性係数の低下による壁面摩擦の低下が影響していると考えられる。実機条件を想定し、分岐管の流体温度を室温のまま主管流体の温度を上げ150°Cの温度差を付けた場合、等温20°Cの場合より約1.4倍侵入が深くなった。温度差の増加に伴い、壁面摩擦の低下に加えて浮力が増加したことが影響していると考えられる。

**キーワード** 熱疲労, T字配管, 分岐管逆流, 数値シミュレーション

**Abstract** Thermal fatigue cracks may be initiated at T-junction pipes where high- and low-temperature fluids flow in and mix. The authors previously conducted visualization studies of flow fields in a T-junction pipe. As a result, flows from the main pipe penetrated into the branch line intermittently depending on the momentum ratio between main and branch lines. Observed flow patterns were classified into three patterns: no reverse flow, entrained penetration and impinged penetration. In the present study, numerical simulations were carried out to reproduce the impinged penetration and estimate the penetration depth for actual power plant conditions. The large eddy simulation (Dynamic Smagorinsky) was carried out. Inner diameters were  $D_m = 60$  mm (main) and  $D_b = 20$  mm (branch). The simulation results of the maximum penetration depth for room temperature condition (20°C) were agreed well with experimental data quantitatively. As inlet temperatures of main and branch lines isothermally rose to 320°C, the penetration depth became deeper, because wall friction decreased with the decrease of viscosity. When inlet temperature of main line was raised while maintaining the branch line at 20°C and the temperature difference was set to 150°C, which is similar to actual operating condition, the maximum penetration depth became about 1.4 times as deep as that of the isothermal room temperature condition because of the buoyancy effect as well as the decrease of the wall friction.

**Keywords** Thermal fatigue, T-junction, Penetration flow, Numerical simulation

## 1. はじめに

T字配管は原子力発電プラントや火力発電プラントにおいて一般的に用いられる配管要素である。T字配管にて高温水と低温水が混合する際、高サイクル熱疲労が生じる可能性があることが知られている。例えば、1998年フランスCivaux発電所でのき裂発生に伴う冷

却水漏洩事象<sup>(1)</sup>や近年の米国の原子力発電所でのき裂発生事例<sup>(2)</sup>などはT字配管下流で発生している。

日本機械学会では発電プラントでの熱疲労による配管損傷を防止すべく、配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針<sup>(3)</sup>を発行している。この指針は実験データベースに基づいて作成されており、高低温水合流による温度差の低減効果を考慮した温度ゆらぎ幅や熱

\*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

応力評価式を用いて熱疲労発生の可能性が判定される。

熱疲労のメカニズムの更なる理解と評価方法の高度化のため、これまで数多くの研究が行われてきた。例えば、OECD/NEAによるT字配管の流れ場および温度場に対する国際的なベンチマーク<sup>(4)(5)</sup>や、実機プラントと同様の高温条件で流体温度と配管壁面温度を計測したFATHER実験<sup>(6)</sup>、日本原子力研究開発機構によるT字配管を対象とした一連のWATLON実験<sup>(7)</sup>などである。そして、これらのT字配管に関する実験に対し、数値流体計算による実験結果の再現方法を確立すべく、これまで様々な取り組みが実施されてきた。

従来のT字配管の熱疲労研究は、主に合流部下流の主管壁面の熱疲労を対象に行われてきた。しかし近年、図1に示すように、合流部から分岐管上流部にも熱疲労によると思われるき裂が米国発電所で発見された<sup>(2)</sup>。熱疲労き裂発生の原因として考えられるものに、分岐管への逆流現象が挙げられる。このような逆流は“Turbulent penetration”（乱流による侵入）と呼ばれ、これまでいくつかの研究が行われてきた<sup>(8)-(11)</sup>。既存のTurbulent penetrationに関する研究では、分岐管上流側が弁で閉止されているかもしくは、弁リークが発生し主管流量よりずっと低い分岐管流量が発生している場合が想定されている。

著者らは、T字配管の熱疲労を対象とした研究を実験<sup>(12)(13)</sup>、数値計算<sup>(14)(15)</sup>の両面から行ってきたが、これらは主に合流部下流を対象としたものだった。そこで、分岐管上流側での熱疲労の可能性を調べるために、分岐管への逆流現象を可視化実験で観察した<sup>(16)</sup>。その結果、主管と分岐管の運動量に応じて「巻き込み型逆流」と「衝突型逆流」の2つの逆流パターンがあることが明らかになった。しかし、実験は室温の水で行っており、高温による影響（浮力など）は検討されていない。実験により明らかになった分岐管への逆流に関する知見を補足・拡張するには、数値計算の適用が望ましい。数値計算に関しては、これまで巻き込み型逆流を対象に実施しており、流動場を定性的に再現できている<sup>(17)</sup>。本研究では、衝突型逆流を対象に数値計算を行い、可視化実験で観察された流動場の再現性について検討を行った。そして、実機を想定した高温条件での数値計算を行い、温度上昇による逆流現象への影響を検討した。

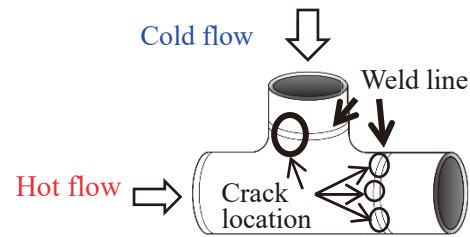


図1. 米国原子力発電所でみられた熱疲労亀裂箇所

## 2. 観察された流動様式の概要

T字配管における分岐管への逆流現象は可視化実験<sup>(16)</sup>により観察されており、図2のような流動様式に整理されている。

- (1) 逆流無し
- (2) 巻き込み型逆流 (Entrained penetration)
- (3) 衝突型逆流 (Impinged penetration)

上記(3)の流動様式はキャビティフローの一種で、これまでの文献では“turbulent penetration”として報告されている<sup>(8)-(11)</sup>。上記(2)および(3)の流動様式の名称はそれぞれ「巻き込み型逆流」、「衝突型逆流」としている。

図3は流動様式線図を示したもので、次式によって定義される主管流れの運動量 $M_m$ および分岐管流れの運動量 $M_b$ の比 $M_R$ を用いて分類した。

$$M_R = M_m/M_b \quad (1)$$

$$M_m = \rho D_m D_b U_m^2 \quad (2)$$

$$M_b = 1/4\pi\rho D_b^2 U_b^2 \quad (3)$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $U_m$ と $U_b$ は主管および分岐管内の流速である。図3に示すように、逆流に関する流動様式は次の3通りに分類できた。

- |                     |         |
|---------------------|---------|
| $M_R < 1.0$ :       | 逆流無し    |
| $1.0 < M_R < 500$ : | 巻き込み型逆流 |
| $500 < M_R$ :       | 衝突型逆流   |

本研究では運動量比を $M_R > 500$ とし衝突型逆流の再現を行った。

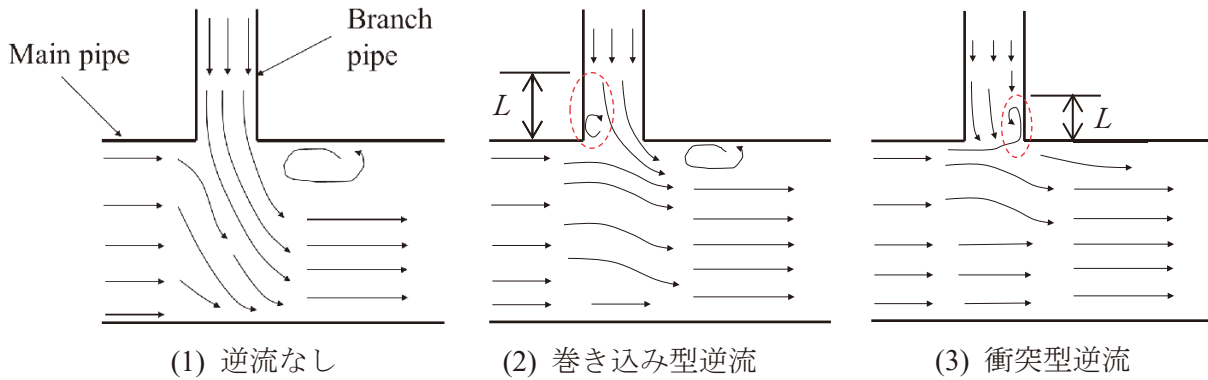


図2. 分岐管への逆流の流動様式<sup>(16)</sup>

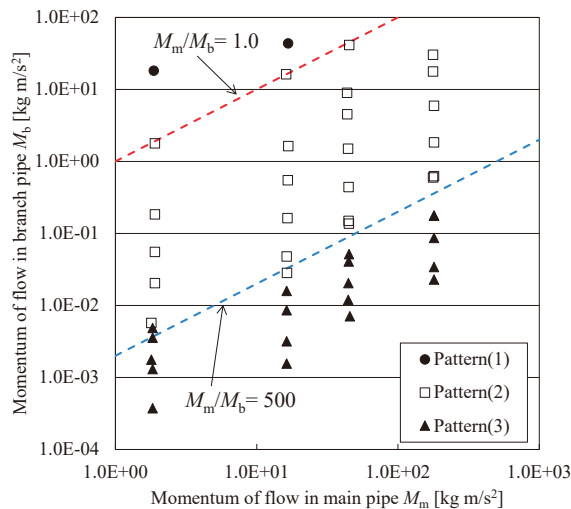


図3. 流動様式線図（主管運動量 $M_m$ および分岐管運動量 $M_b$ による分類）<sup>(16)</sup>

### 3. 数値シミュレーション

図4(a)に数値計算領域を示す。主管内径 $D_m = 60 \text{ mm}$ 、分岐管内径 $D_b = 20 \text{ mm}$ である。合流部から主管方向の上流、下流に $5D_m$ 、分岐管方向に $15D_b$ の長さを確保した。座標系は主管流れ方向に $x$ 、分岐管の流れ逆流方向に $z$ とした。また、主管と分岐管の管中心の交点を座標原点とした。重力が働く方向は $z$ 方向負方向である。本研究では管内の流路だけを模擬し、配管金属は計算領域から除外した。本来、配管熱疲労は配管金属部で発生する現象なので、配管金属も計算対象とすることが望ましいが、本研究ではまずは可視化実験で観察された流れ場を再現することを目的とした。可視化実験で

はアクリル試験体を用いていることから、管壁内面を断熱境界とした。

図4(b)に計算メッシュを示す。メッシュは6面体メッシュを用い、円管内面に沿うように作成した。また、合流部近傍や壁面近傍などにメッシュを寄せ、空間解像度を高めた。メッシュのセル数は約33万(329,616)セルである。また、壁面第1層のメッシュ厚さが壁面 $y^+$ では $y^+ < 5$ となることを確認している。

表1に計算設定と境界条件を示す。計算にはANSYS FLUENT 2019を用いた。水の物性値は温度依存とした。浮力はブシネスク近似で計算せず、密度に温度依存性を持たせることで考慮した。乱流はラージエディシミュレーション (LES) Dynamic Smagorinskyモデルで考慮している。水温と流入速度をパラメータとして、表2に示すような9ケースの計算を行った。いずれのケースも $M_R > 500$ であり、可視化実験<sup>(16)</sup>では衝突型逆流が観察された条件である。Case 1~5は主管および分岐管の流入速度を固定し、それぞれの温度をパラメータに等温条件、非等温条件でケース分けしている。流体温度の絶対値の影響の加え、合流する流体の温度差の影響も調べた。Case 6~9は分岐管流入速度を増加させ、実機プラントで一般的な運動量比 $M_R = 2500 \sim 6000$ 程度に低下させた場合である。また、温度による侵入深さの違いを比較検討するため、等温条件と実機温度に近い条件(高温側 $170^\circ\text{C}$ 、低温側 $20^\circ\text{C}$ )の2通りを設定した。時間刻みは $\Delta t = 0.2 \text{ ms}$ として、定常RANS収束解を初期条件として計算を開始し、準定常となった3秒~13秒で統計量(時間平均値、RMS値)を取得した。

主管流体の侵入の有無を判断するため、等温条件の

場合は主管流体と分岐管の流体を、同じ物性値を持つ成分の異なる流体として取り扱った。こうすることで、主管と分岐管で等温であっても、分岐管への主管流体の侵入深さを判断することができる。非等温の場合は、温度分布から分岐管への侵入深さを判断できるため、このような取り扱いは行っていない。

侵入深さを定量的に評価するために、図5に示すようにモニターポイントを設置し、1タイムステップ(0.2 ms)ごとの $z$ 方向速度、主管流体濃度もしくは温度を記録した。モニターポイントは壁面から1 mm離れた地点で、分岐管深さ方向 $9.75D_b$  (195 mm) までの範囲で $0.25D_b$  (5 mm) ごとに40点、各断面内に $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 15^\circ$ ,  $0^\circ$ の計200点設置した。侵入深さ $L$ は、主管流体と分岐管流体が接する境界を起点とし、分岐管を遡る方向を正とした。

表1 数値計算条件

ソフトウェア		ANSYS FLUENT 2019 R1
流体		水 (物性値は温度依存)
乱流モデル		Large eddy simulation (Dynamic Smagorinsky)
流入境界条件	速度	表2参照
	速度変動	Vortex法
出口境界条件		圧力流出境界条件 (Pressure-outlet)
壁面境界条件		粘着条件, 断熱
時間	時間刻み	0.2 ms
	初期条件	標準 $k$ - $\epsilon$ 定常解
	統計量	3~13秒 (10秒間)

表2 計算ケース

Case	温度		圧力 [MPa]	速度 (運動量)		$M_R$
	主管 $T_m$ [°C]	分岐管 $T_b$ [°C]		主管 $U_m$ [m/s] ( $M_m$ )	分岐管 $U_b$ [m/s] ( $M_b$ )	
1	20	20	0.1	10 (1.20E+02)	0.1 (3.14E-03)	38200
2	55	55	0.1	10 (1.18E+02)	0.1 (3.10E-03)	38200
3	320	320	15.4	10 (8.41E+01)	0.1 (2.20E-03)	38200
4	55	25	0.1	10 (1.18E+02)	0.1 (3.13E-03)	37800
5	320	20	15.4	10 (8.41E+01)	0.1 (3.15E-03)	26700
6	20	20	0.1	10 (1.20E+02)	0.256 (2.06E-02)	5830
7	20	20	0.1	10 (1.20E+02)	0.39 (4.77E-02)	2510
8	170	20	3	10 (1.08E+02)	0.256 (2.07E-02)	5220
9	170	20	3	10 (1.08E+02)	0.37 (4.29E-02)	2510

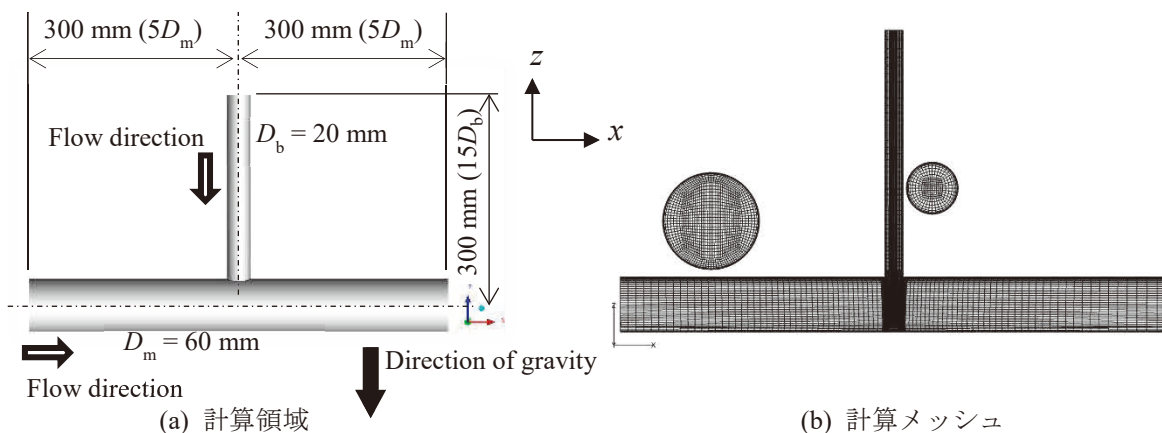


図4. 計算領域および計算メッシュ

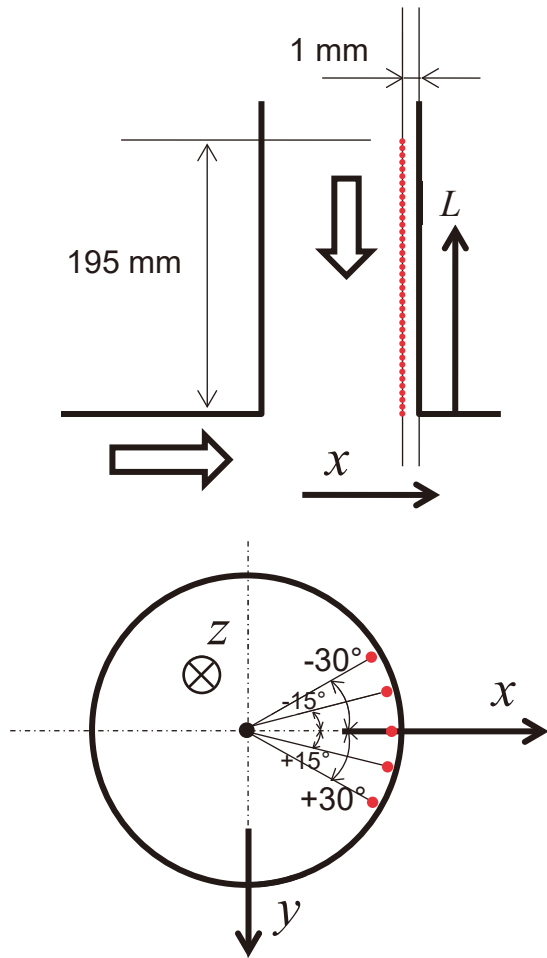


図5. 分岐管内のモニターポイント, 壁面近傍200点

#### 4. 計算結果

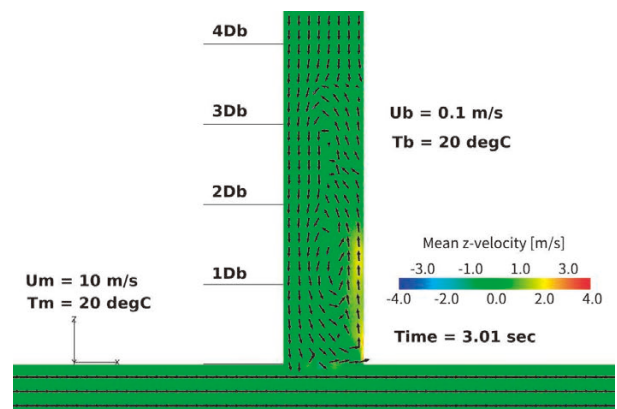
##### 4.1 主管流体の濃度分布, もしくは温度分布

図6にCase 1および8における時刻3秒時における速度ベクトル分布を示す. どちらの場合でも衝突型逆流による分岐管への主管流体の侵入が発生している. 侵入深さは時々刻々変動するが, 運動量比 $M_R$ の大きいCase 1の方がCase 8の場合よりも深くなる. 侵入深さを速度ベクトルの反転位置と定義した場合, 時刻3秒時ではそれぞれおよそ $L = 3.5D_b$ および $L = 2.0D_b$ である.

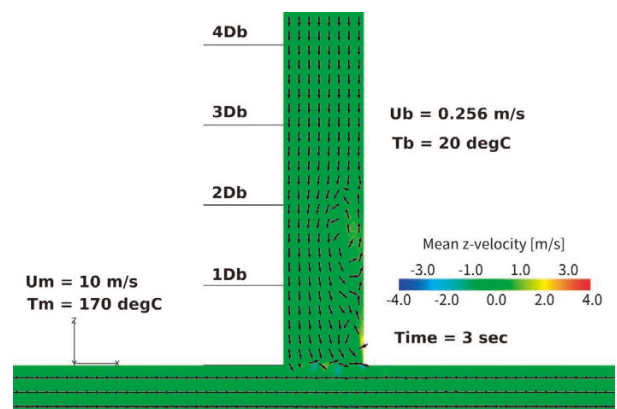
図7に時刻3秒時における主管流体の質量分率分布 (Case1, 6, 7) もしくは温度分布 (Case 8, 9) を示す. 質量分率と温度は異なる物理量であるが, 分岐管流体の温度は主管流体の侵入により上昇すると考えてほ

ぼ差支えないので, ここではともに主管流体の分布を表す指標として区別せず取り扱っている. 主管流体濃度はCase 1では $3.5D_b$ 程度の侵入となった. 分岐管流速を増加させたCase 6, 7では, 侵入が浅くなった. 分岐管内の混合はCase 1のような分岐管断面内で比較的一様に主管流体が分布する状態とは異なり, Case 6, 7では分岐管の主管流れ方向に向かって奥側の壁面近傍にのみ分布した. 分岐管流速の増加に伴い, 侵入した主管流体が押し戻され混合が弱まったものと考えられる.

150°Cの温度差を付けた場合, 同じ運動量比のCase 6とCase 8を比較すると, Case 8の方が侵入は深い. Case 7とCase 9でもCase 9の方が若干深く潜り込んでいる. 温度差増加により浮力の効果が加わり, より侵入が深くなったと考えられる.



(a) Case 1



(b) Case 8

図6. 瞬時の速度ベクトル分布



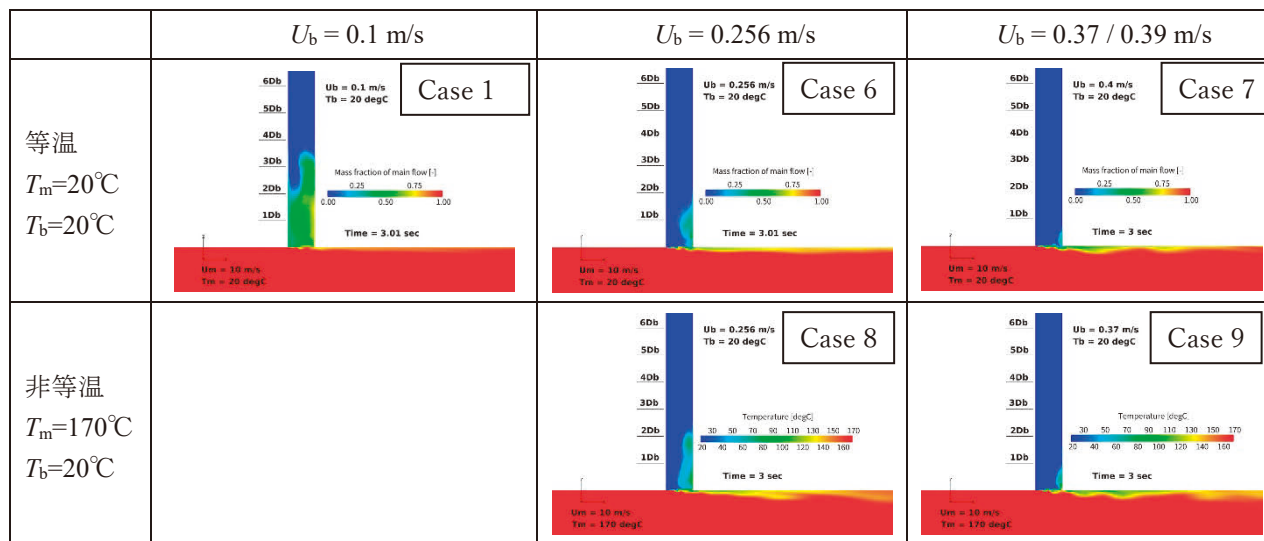


図7. 主流質量分率分布 (Case1, 6, 7) および温度分布 (Case8, 9)

## 4.2 主管流体の侵入深さ

モニターポイントにおける $z$ 方向速度の履歴から、侵入深さを定量的に評価した。図8は3～13秒間での各点での記録結果から、逆流流速 ( $z$ 方向負方向に向かう速度) の発生の有無をもって主管流体が侵入したと判定し、最大侵入深さの周方向分布を示したものである。どのCaseも $0 \sim 30^\circ$  の範囲では周方向角度に依存せず、ほぼ同じ侵入深さとなっている。最も深く侵入したのはCase 5であり、 $6D_b$ の侵入深さとなった。続いてCase 3で、 $5.25D_b$ の侵入深さとなった。Case3とCase 5は主管流体が $320^\circ\text{C}$ の場合である。次にCase 2およびCase 4で $4.5D_b$ の侵入深さとなり、どちらも主管流体が $55^\circ\text{C}$ の場合である。このことから、主管流体の温度は侵入深さに大きく影響を与えていることが示唆される。分岐管流速を増加させたCase 6～9は侵入が浅くなった。

以上のように、最大侵入深さは流体温度と運動量比に依存している。これらの関係をよりわかりやすく把握できるように、図9に最大侵入深さを運動量比で整理したものを示す。図中には実験データも併せて示した。まず、主管と分岐管温度が等温 $20^\circ\text{C}$ の場合 (Case 1, 6, 7) は運動量比の増加とともに最大侵入深さが増加した。侵入深さは実験結果とも定量的に一致した。等温 $55^\circ\text{C}$  (Case 2) の場合は等温 $20^\circ\text{C}$ の場合と差がないが、等温 $320^\circ\text{C}$  (Case 3) では侵入がより深くなった。

この原因として、図10に示すように、温度の上昇とともに粘性係数が低下し、壁面摩擦が低下することが考えられる。粘性係数は $20^\circ\text{C}$ で $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$ 、 $55^\circ\text{C}$ で $4.9 \times 10^{-4} \text{ Pa s}$ 、 $320^\circ\text{C}$ で $7.8 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ であり、 $20^\circ\text{C}$ から $55^\circ\text{C}$ では半減程度だが、 $55^\circ\text{C}$ から $320^\circ\text{C}$ では1桁値が低下している。

温度差を付けた場合、 $\Delta T = 30^\circ\text{C}$  (Case 4) では等温 $20^\circ\text{C}$ の場合とほとんど差がなかったが、 $\Delta T = 300^\circ\text{C}$  (Case 5) では侵入が深くなった。上述の粘性係数低下の影響に加え、浮力影響が顕著に表れたことが影響していると考えられる。実機プラント条件に近い運動量比と $\Delta T = 150^\circ\text{C}$ の温度差を付けたCase 8, 9では、それぞれ同程度の運動量比の等温条件Case 6, 7に比べて約1.4倍侵入が深くなった。図9において、等温条件の場合の勾配 (Case 6と7) と $\Delta T = 150^\circ\text{C}$ の場合の勾配 (Case 8と9) はほぼ同程度である。このことから、等温条件で得られた侵入深さの関係 (Case1, 6, 7の直線) を約1.4倍深くすれば、実機で想定される温度差 ( $\Delta T = 150^\circ\text{C}$ ) での侵入深さを推定できる可能性がある。

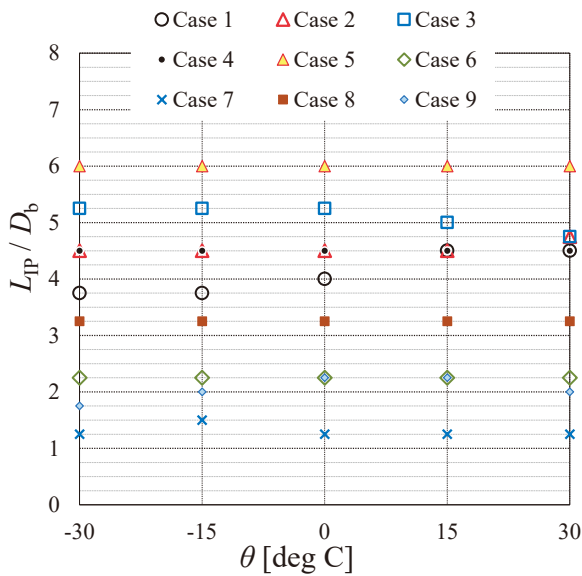


図8. 主管流体の最大侵入位置 (3~13秒間)

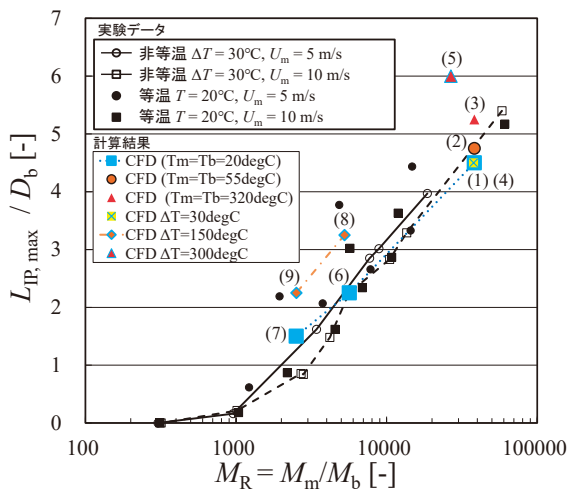


図9. 最大侵入深さの実験データと計算結果の比較 (括弧内の数字はCase番号)

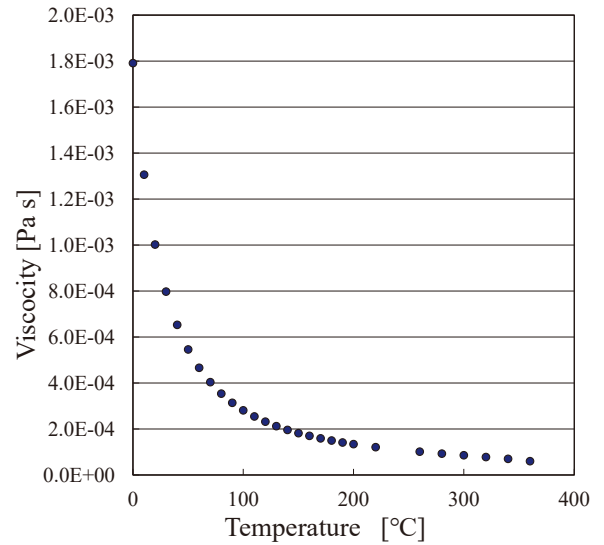


図10. 粘性係数の温度依存性 (伝熱工学資料改訂第5版より) (18)

### 5. 結論

T字配管における分岐管内への主管流体の侵入について数値流体シミュレーションを行い、侵入深さの再現精度を確認し、温度差が侵入深さに及ぼす影響について検討した。これまでの可視化実験では、2つの逆流に関する流動様式 (巻き込み型逆流, 衝突型逆流) が観察された。ここでは、衝突型逆流を対象に数値シミュレーションを実施した。

(1) 主管・分岐管ともに室温20°Cの等温条件では、分岐管への侵入深さの計算結果は実験結果と定量的に一致した。

(2) 主管・分岐管の温度を等温320°Cとすると、等温20°Cの場合より分岐管への侵入深さが深くなった。粘性係数の低下による壁面摩擦の低下が影響していると考えられる。

(3) 主管・分岐管で150°C程度の温度差を付けることで、等温の場合より約1.4倍侵入が深くなった。温度差の増加に伴い、浮力が増加したことが影響していると考えられる。

### 引用文献

(1) S. Chapuliot, C. Gourdin, T. Payen, J. P. Magnaud and A. Monavon, "Hydro-Thermal-Mechanical Analysis of

- Thermal Fatigue in a Mixing Tee,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 235, Issue 5 , pp. 575-596, (2005).
- (2) M. McDevitt, M. Hoehn, T. Childress and R. McGill, “Analysis and Impact of Recent U.S. Thermal Fatigue Operating Experience,” Fourth International Conference on Fatigue of Nuclear Reactor Components, Sevilla, Spain, Sep. 28– Oct. 1, Paper No. 27 (2015).
- (3) 日本機械学会, “配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針”, JSME S 017, (2003).
- (4) OECD/NEA, “OECD/NEA-Vattenfall T-Junction Benchmark Specifications,” Final version, (2009).
- (5) OECD/NEA, “Report of the OECD/NEA-Vattenfall T-Junction Benchmark Exercise,” Report No. NEA/CSNI/R(2011)5, (2011).
- (6) O. Braillard, R. Howard, K. Angele, A. Shams and N. Edh, “Thermal Mixing in a T-Junction: Novel CFD-Grade Measurements of the Fluctuating Temperature in the Solid Wall,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 330, pp. 377-390, (2018).
- (7) H. Kamide, M. Igarashi, S. Kawashima, N. Kimura and K. Hayashi, “Study on Mixing Behavior in a Tee Piping and Numerical Analyses for Evaluation of Thermal Striping,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 239, pp. 58-67, (2009).
- (8) J.H. Kim, R.M. Roidt and A.F. Deardorff, “Thermal Stratification and Reactor Piping Integrity,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 139, pp. 83-95, (1993).
- (9) E. Deutsch, P. Montanari and C. Mallez, “Isothermal Study of the Flow at the Junction between an Auxiliary Line and Primary Circuit of Pressurised Water Reactor,” Journal of Hydraulic Research, Vol. 35, No. 6, pp. 799-812, (1997).
- (10) R. Zboray and H.-M. Prasser, “On the Relevance of Low Side Flows for Thermal Loads in T-junctions,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, pp. 2881-2888, (2011).
- (11) J. Kickhofel, V. Valori and H.-M. Prasser, “Turbulent Penetration in T-junction Branch Lines with Leakage Flow,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 276, pp. 43-53, (2014).
- (12) K. Miyoshi, A. Nakamura and Y. Utanohara, “An Investigation of Wall Temperature Characteristics to Evaluate Thermal Fatigue at a T-Junction Pipe,” Mechanical Engineering Journal, Vol. 1, No. 5, pp. tep0050, (2014).
- (13) K. Miyoshi, M. Kamaya, A. Nakamura and Y. Utanohara, “An Investigation of Thermal Stress Characteristics by Wall Temperature Measurements at a Mixing Tee,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 298, pp. 109-120, (2016).
- (14) Y. Utanohara, A. Nakamura, K. Miyoshi and N. Kasahara, “Numerical Simulation of Long-Period Fluid Temperature Fluctuation at a Mixing Tee for the Thermal Fatigue Problem,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 305, pp. 639-652, (2016).
- (15) Y. Utanohara, K. Miyoshi and A. Nakamura, “Conjugate Numerical Simulation of Wall Temperature Fluctuation at a T-Junction Pipe,” Mechanical Engineering Journal, Vol. 5, No. 3, pp. 18-00044, (2018).
- (16) Miyoshi, K., Utanohara, Y., and Kamaya, M., “Penetration Flow into a Branch Pipe Causing Thermal Fatigue at a Mixing Tee”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 360, 110496, (2020).
- (17) Y. Utanohara, K. Miyoshi and M. Kamaya, “Numerical Simulation of Penetration Flow into T-Junction Branch Lines,” The 18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-18), Portland, OR, USA, August 18-22, Paper No. 27613 (2019).
- (18) 日本機械学会, “伝熱工学資料”, 改訂第 5 版, (2009).