

# T字配管合流部における熱応力変動の数値シミュレーション<sup>\*1</sup>

## Numerical Simulation of Thermal Stress Fluctuation at a Mixing Tee for Thermal Fatigue Problems

三好 弘二 (Koji Miyoshi) <sup>\*2</sup>      中村 晶 (Akira Nakamura) <sup>\*2</sup>  
歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara) <sup>\*2</sup>      釜谷 昌幸 (Masayuki Kamaya) <sup>\*2</sup>

**要約** 原子力発電所の配管合流部では熱疲労が発生した事例がある。高低温水の合流は、管壁に温度・応力変動を引き起こし、疲労き裂を発生させる。筆者らは、流体・構造熱連成数値シミュレーションにより、流体・管壁の温度を予測してきた。本研究では、これまで得られた管壁温度の予測結果を用い、熱応力を算出した。得られた熱応力は、実験で測定した管内面温度から算出した応力と比較し、その妥当性を確認した。実験は、管内径150 mmの水平管と管内径50 mmの鉛直管からなるT字管を対象に行った。管内面における温度と応力の変動幅が比較的大きい箇所は、実験結果と比較して管軸方向に狭い範囲となった。一方、温度・応力変動幅ともに管周方向の分布形状は、うまく再現できていたが、その変動幅の最大値はいずれも過大評価となった。実験から得られた応力は、管軸と管周方向成分の値が比例関係となっていたが、その特徴は、数値シミュレーションにより、うまく再現できていた。次に、熱応力の時間変化とレインフロー法を用いることで、応力変動幅だけでなく応力振幅のサイクル数を調べた。その結果、応力振幅の頻度分布は、実験結果と類似していた。

**キーワード** 熱疲労, T字配管, 温度変動, 熱応力, 数値シミュレーション

**Abstract** Thermal fatigue cracks have been found at mixing tees in nuclear power plants. The mixing flow of high and low temperature fluids causes temperature and stress fluctuations in the pipe wall and these results in fatigue crack initiation. The authors have conducted a fluid-structure coupled simulation to estimate the fluid and pipe wall temperatures in a mixing tee in their previous study. In the present study, the authors simulated thermal stress using the previous simulation results of the pipe wall temperature. The simulated thermal stress was validated using the stress obtained from the temperature on the pipe inner surface measured by mock-up tests. The test section of the tee pipe was made of stainless steel and consisted of a horizontal main pipe with a diameter of 150 mm and a T-junction connected to a vertical pipe with a diameter of 50 mm. The ranges of the large temperature and stress fluctuation areas on the pipe inner surface calculated by the fluid-structure coupled simulation were narrower in the axial direction of main pipe compared with the results of test. On the other hand, the profiles of the circumferential direction were reproduced by the fluid-structure coupled simulation. The maximum values of the temperature and stress fluctuation ranges were overestimated. The stress fluctuation obtained from the measured temperature showed the equibiaxial behavior where the axial and circumferential stresses had a proportional relationship. Such characteristics of stress fluctuation were reproduced well by the numerical simulation. Not only the stress fluctuation range but also the number of cycles for the stress amplitude were estimated using the time history of the thermal stress and the rain-flow counting method. The distribution of the number of cycles for the stress amplitude estimated by the simulation was similar to that obtained from the measured temperatures.

**Keywords** thermal fatigue, mixing tee pipe, temperature fluctuation, thermal stress, numerical simulation

\*1 Mechanical Engineering Journal (2018), Vol.5, No.4, 18-00272 を和訳し転載

\*2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

## 1. はじめに

原子力発電所の配管合流部で熱疲労が発生した事例がある<sup>(1)(2)</sup>。温度差のある流体が混合することで局所的な温度変動が生じ、疲労き裂が発生する。疲労損傷の程度は合流前の温度差のみならず、配管形状や流動条件に依存することが知られている<sup>(3)~(5)</sup>。日本機械学会は、このような合流部における熱疲労を評価するため「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」<sup>(6)</sup>を策定している（以後、指針とよぶ）。指針では、疲労き裂発生の可能性を配管形状や流動条件に基づき評価しているものの、限られた条件の実験データに基づいた手法であるため、適用範囲に限りがある。その適用範囲を拡張するため、追加実験を行うことは、費用面から合理的ではない。よって、さまざまな条件に対する疲労寿命を予測することが可能な数値シミュレーション手法を開発することが望まれる。また、現状の指針では、流体から構造体への熱伝達過程の周波数依存性を簡易的に取り扱っており、過度に保守的な評価手法であることが知られている<sup>(7)</sup>。そのような指針の保守性を定量化するためにも、数値シミュレーションは活用できる。

T字配管の合流部における数値シミュレーションは、これまでいくつかの研究事例があり<sup>(8)~(16)</sup>、流体と配管の温度について実験結果による検証も行われている。しかしながら、混合現象の複雑さにより、特に配管の温度変動を正確に予測することは難しい。釜谷ら<sup>(17)</sup>は、中村ら<sup>(10)</sup>が行った流体・構造熱連成数値シミュレーションの結果を用い、熱応力分布を予測している。しかしながら、予測した熱応力については、実験データによる検証が実施されていない。

合流部の熱疲労現象を再現するためには、流れの境界条件から、配管の熱応力までを予測可能な一貫した数値シミュレーション手法の構築が求められる。しかし、実験結果による検証が行われたそのような手法は、見当たらない。検証が困難な理由として、信頼できる熱応力データが実験により得られていないことがあげられる。筆者らは、これまで管内面の温度分布を測定するため148本の熱電対を埋め込んだ試験体を開発してきた<sup>(18)</sup>。また、得られた温度分布から、疲労損傷を引き起こす熱応力の特徴について調べた<sup>(19)</sup>。本研究では、数値シミュレーションにより予測した熱応力と実験で測定した管壁

温度から明らかにした熱応力とを比較・検証した。まず、数値シミュレーションの検証用データとして、実験によって測定した管壁温度から配管の熱応力を計算した。次に、前報<sup>(20)</sup>で示した流体・構造熱連成数値シミュレーションによって得られた配管の温度データをもとに熱応力を算出した。最後に、数値シミュレーションによる熱応力変動の予測結果の妥当性について検証した。

## 2. 実験による熱応力の算出

### 2.1 実験ループおよび試験部

T字配管合流部における熱応力は、管壁温度から計算することができる。本研究では、T-Cubic (Transient Temperature measurement equipment at a T-junction pipe) 実験ループ<sup>(18)</sup>を用いて測定した管内面の温度から管壁温度を算出した。図1にその実験ループの概略図を示す。高温水は試験部で低温水と混合する。試験部の上流には、エルボや弁により生じる乱れを低減するため整流器を設置した。水平管側は合流部の上流 $18D_m$  ( $D_m$  = 主管内径)の位置に、鉛直管側は上流 $56D_b$  ( $D_b$  = 分岐管内径)の位置に整流器を取り付けた。試験部入口の速度分布は、十分発達した乱流分布になっていることを確認している<sup>(18)</sup>。

図2に温度測定用の試験体の概略図を示す。試験体はステンレス製で、低温水側を主管側、高温水側を分岐管側とし、各々の管内径は $D_m = 150$  mm,  $D_b = 50$  mmとした。管厚は、主管側7.6 mm, 分岐管側5.3 mmとした。また、管外面には断熱材を取り付けた。

管内面温度の測定には、直径0.5 mmの非接地型のシース熱電対を使用した。熱電対は図3に示すとおり管厚7.6 mmの配管に穴をあけ外面から挿入し、内表面に加工した幅0.6 mm, 深さ0.7 mmの矩形溝に沿わせた後、ロウ付けで固定した。ロウ付けした配管内表面は滑らかに仕上げた。図4に温度測定箇所を示す。測定箇所は、図中の赤丸で示した。 $z = -50$  mm ~ 225 mmの範囲に25 mm間隔,  $\theta = 0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲に $5^\circ$ 間隔,  $z = -150$  mm, 600 mmでは $\theta = 0^\circ$ の位置とした。測定総箇所数は148箇所である。ここで $z$ は主管軸で、 $\theta$ は分岐管の方向を $0^\circ$ とする主管上流側からみて反時計周りの周方向角度とする（図2参照）。原点は、主管軸と分岐管軸の

交点とした。求まる応力振幅の精度は、測温点の軸方向および周方向の間隔に依存するため、予め数値シミュレーションを行い最適な位置を求めた。詳細は前報<sup>(21)</sup>を参照されたい。

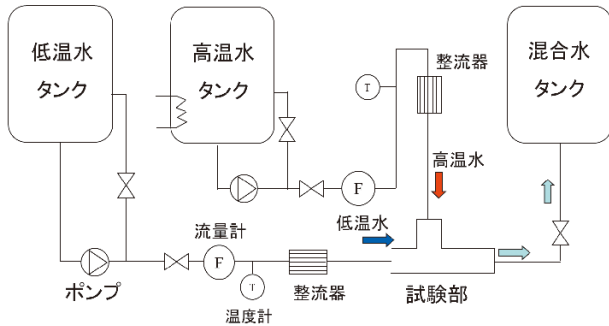


図1 実験ループ (T-Cubic)

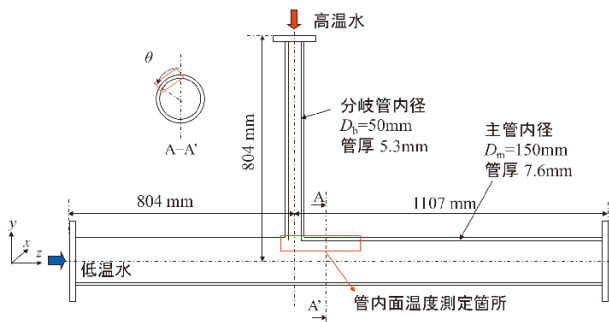
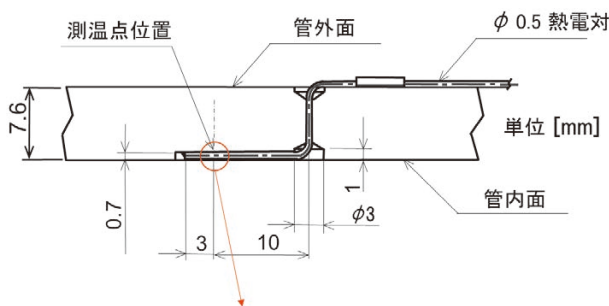


図2 温度測定用試験体



(拡大断面写真)

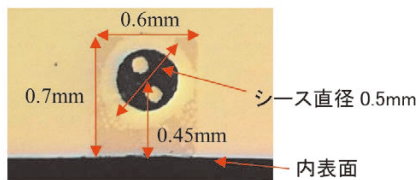


図3 熱電対取り付け概略図

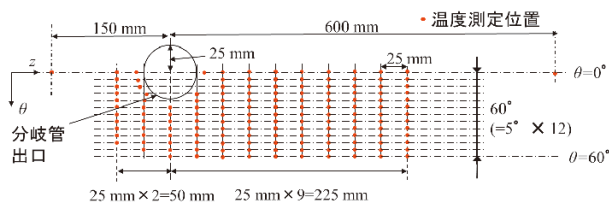


図4 管内面温度測定箇所

## 2.2 実験条件

実験条件を表1に示す。管断面平均流速は、流量を流路面積で除した値とした。また、入口流体温度は、整流装置の上流に設置した熱電対により測定した。上出ら<sup>(22)</sup>は、T字合流部の流動様式を合流前の流量比に基づき3つに分類しており、そのうち、分岐管からの噴流が主管の中心部まで到達せず主管壁に沿って流れる壁面噴流条件では、比較的管壁近傍の流体温度変動強度が大きいことを示している。本研究では、熱疲労の厳しい条件である壁面噴流条件となるように、入口流量比を設定した。

表1 実験条件

	主管側	分岐管側
入口流体温度 [°C]	25.7	59.8
管断面平均流速 [m/s]	0.99	0.66
レイノルズ数 [-]	$1.7 \times 10^5$	$6.9 \times 10^4$

## 2.3 熱応力算出方法

### 2.3.1 解析手順

熱応力の時間変化は、熱伝導および応力解析により求めた。解析には、商用コードAbaqus (ver.6.14)を用いた。使用した解析格子を図5に示す。解析範囲は主管軸を通るy-z平面で分割した2分の1の領域とした。要素は主に主管の軸方向は12.5 mm間隔、周方向は2.5°間隔で分割した。これらの間隔は、熱電対の測温点間隔よりは小さい。また、熱応力の過小評価を低減するため、管内面近傍の板厚方向

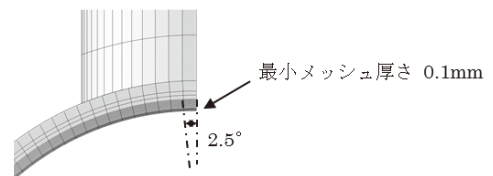
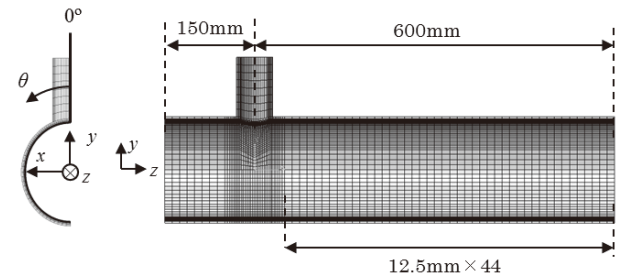


図5 解析格子 (実験結果に基づく熱伝導・応力解析に使用)

の厚みは0.1 mmとした。総要素数は81,856である。要素形状は、3次元8節点要素 (DC3D8, C3D8)<sup>(23)</sup>を使用した。熱伝導解析では、後退オイラー法<sup>(24)</sup>を、応力解析では、線形静的解析<sup>(25)</sup>を用いた。

### 2.3.2 熱伝導解析条件

配管の温度を求めるためには境界条件として管内表面の温度が必要となる。一方、実験では図3に示すとおり、熱電対による測定位置は、管内面から深さ0.45 mmの位置となる。そのため、逆解析を用いた手法により測定温度から管内面の温度を算出した。詳細は、前報<sup>(19)</sup>に示す。得られた160秒間の管内面温度を図4に示した測定位置の節点に付与した。その他の節点については、線形補間で得られた値を与えた。また、分岐管内面には、入口流体温度を一様に付与した。管外面は断熱条件とした。初期温度としては、全節点に、 $z = 150 \text{ mm}$ ,  $\theta = 0^\circ$ 位置の時間平均値を与えた。計算のステップ時間は、温度の測定時間間隔と同じ0.02 秒とした。解析に使用した物性値を表2に示す。

表2 解析に使用した物性値

密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	7920 (at 20°C)* 7910 (at 50°C)
熱伝導率 [W/(mK)]	16.0 (at 20°C)* 16.1 (at 50°C)
比熱 [J/(kgK)]	498 (at 20°C)* 502 (at 50°C)
ヤング率 [GPa]	195 (at 20°C)* 193 (at 50°C)
ポアソン比 [-]	0.30
線膨張係数 [1/K]	$1.52 \times 10^{-5}$ (at 20°C)* $1.55 \times 10^{-5}$ (at 50°C)

\*各温度の値に対し線形補間した値を用いた

### 2.3.3 応力解析条件

応力は熱伝導解析で求めた温度を境界条件として計算した。熱伝導解析では、60秒後に管外面の温度が準安定状態となっていたため、60秒から160秒までの配管温度のみを使用した。解析のステップ時間は熱伝導解析と同じ0.02秒とした。対称面の節点は、 $x$ 方向の並進と $z$ 軸周りの回転を拘束した。解析に使用した物性値を表2に示す。

## 3. 数値シミュレーションによる熱応力の算出

### 3.1 使用した管壁温度

図1, 2に示す試験体系で表1に示す実験条件を対象に流体・構造熱連成数値シミュレーションを行った。前報<sup>(20)</sup>では、その計算結果と実験結果との比較検証を行った。そのシミュレーションは商用コードFluent (ver.15.0)を用い、乱流モデルとしてLES dynamic Smagorinsky-Lillyモデル<sup>(26)</sup>を採用した。入口境界条件には、レーザードップラ流速計で測定した速度分布<sup>(18)</sup>を与えた。また、測定された変動強度を用い、vortex法<sup>(26)</sup>により速度変動強度も付与した。詳細な計算方法は、前報<sup>(20)</sup>のとおりである。本研究では、この数値シミュレーションで得られた配管温度から、熱応力を求めることにした。

### 3.2 応力解析手法

応力解析には、商用コードAbaqus (ver.6.14)を用いた。使用した解析格子を図6に示す。総要素数は321,120である。この解析格子は、前報<sup>(20)</sup>で示した流体・構造熱連成数値シミュレーションに使用したのと同じとした。境界条件として、前節に示した方法で求めた0.02秒毎の配管温度を使用した。また、準安定状態となった後半の91秒間(10秒から101秒)の温度のみを使用した。解析に使用した物性値を表2に示す。変形拘束はなしとした。要素形状と解析方法は、2.3.1節に述べた内容と同じである。

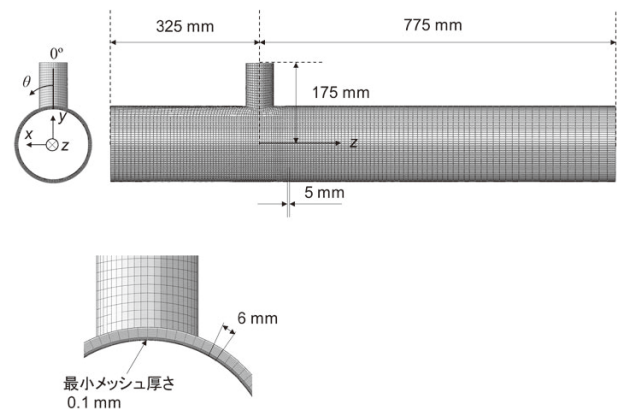


図6 解析格子 (流体・構造熱連成数値シミュレーションおよび応力解析に使用)

#### 4. 数値シミュレーション結果の検証

##### 4.1 管内面温度分布

図7(a),(b)に数値シミュレーションにより求めた主管内表面の温度分布を示す。これらの分布は図中の×印の位置 ( $z = 75 \text{ mm}$ ,  $\theta = 30^\circ$ ) における温度が最大 (74.44 s) と最小 (87.94 s) になった時刻における分布である。分岐管出口からの高温噴流が主管内面を加熱して、温度は、分岐管出口から  $\theta = 0^\circ$  に沿って比較的高くなっていった。また、高温噴流により加熱されたホットスポットの大きさが時間とともに変化していた。次に、実験により測定した主管内面の温度分布を図8に示す。これらの分布は図中の×印の位置 ( $z = 75 \text{ mm}$ ,  $\theta = 30^\circ$ ) における温度が最小 (86.28 s) と最大 (97.46 s) になった時刻における分布である。ホットスポットは、 $\theta = 0^\circ$  に沿って発生し、時間とともに変化していた。この特徴は、数値シミュレーションの結果と類似していた。

図9に数値シミュレーションにより求めた主管内面の温度変動範囲の分布を示す。ここで、温度変動範囲とは、91秒間での最大値と最小値の差である。前報<sup>(20)</sup>では、root mean squareの値を比較検証した。しかしながら、ここでは、疲労損傷の評価に

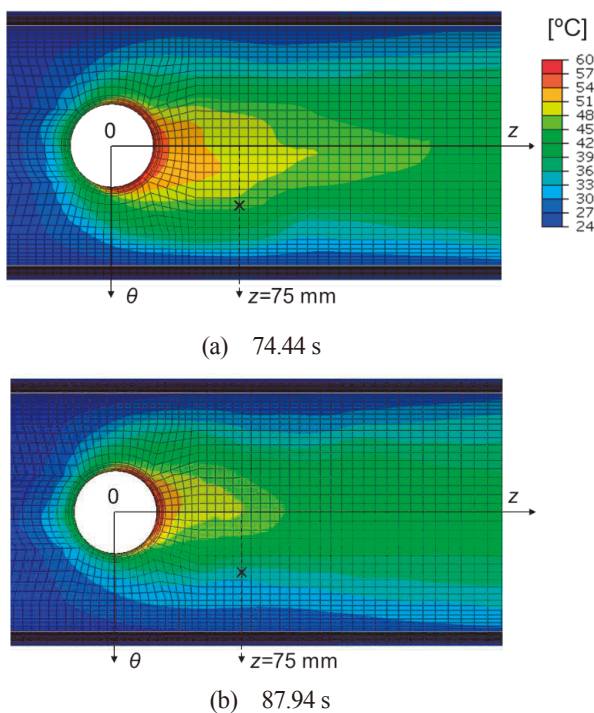


図7 主管内面の温度分布の時間変化 (数値シミュレーション)

とって、より重要な温度変動範囲を示した。温度変動範囲は、分岐管出口から  $z = 75 \text{ mm}$  までの範囲で、 $\theta = \pm 30^\circ$  の角度において大きくなっていった。図10に実験にて測定した100秒間の温度変動範囲の分布を示す。温度変動範囲は、分岐管出口から  $z = 150 \text{ mm}$  までの範囲で、 $\theta = 30^\circ$  の角度にて大きくなっていった。数値シミュレーションにより再現された温度変動範囲の値は全体的に実験結果と比較して大きくなっていった。また、その変動値が比較的大きな  $z$  方向の領域は、数値シミュレーション結果のほうが狭くなっていった。一方、 $\theta$  方向の分布は数値シミュ

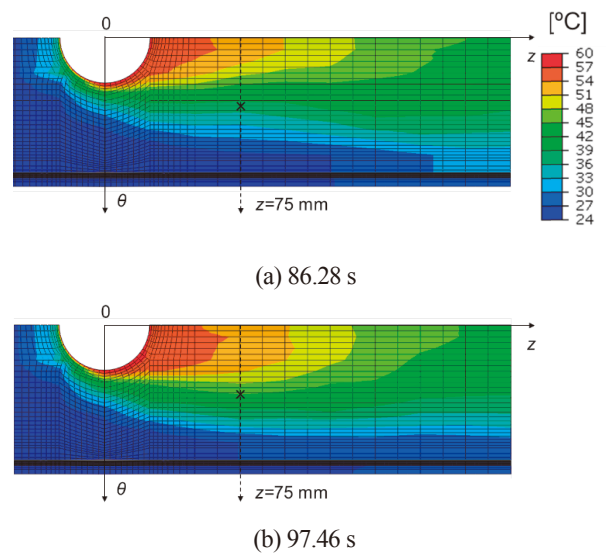


図8 主管内面の温度分布の時間変化 (実験)

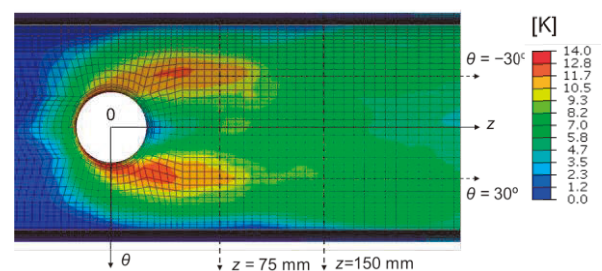


図9 主管内面の温度変動範囲の分布 (数値シミュレーション)

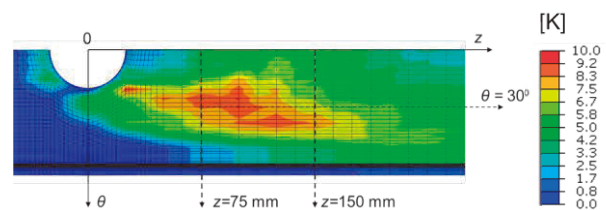
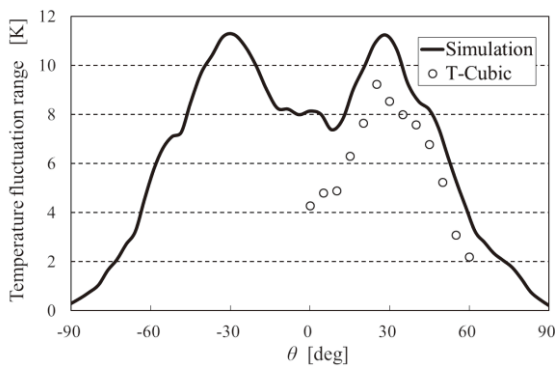


図10 主管内面の温度変動範囲の分布 (実験)

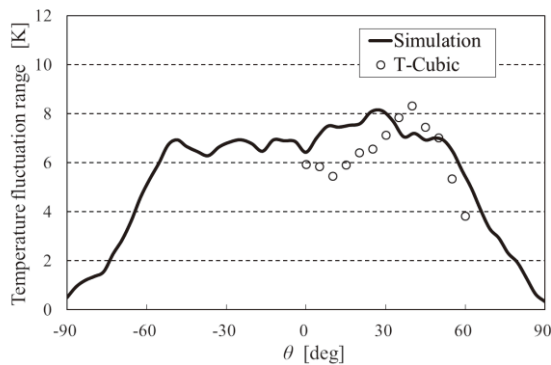
レーションにより再現されていた。

図11(a)に $z = 75$  mmにおける管内面の温度変動範囲の分布を示す。横軸は、図2および図6で定義した主管の周方向角度 $\theta$ を示す。実験で測定した温度変動範囲は、 $30^\circ$ 付近でピークを有しており、そのピークは、数値シミュレーションにてうまく再現できていた。しかし、その最大値は、実験結果と比較して22%過大評価となっていた。図11(b)に $z = 150$  mmにおける管内面の温度変動範囲の分布を示す。実験で得られた温度範囲は $40^\circ$ 付近でピークを有しているが、数値シミュレーションでは再現できなかった。一方、その最大値については、実験値に近かった。

以上のように、数値シミュレーションで予測した温度変動範囲は全体的に実験値と比較して過大評価となった。この傾向は、前報<sup>(20)</sup>で示したroot mean square基準の比較結果と同様であった。この原因として、前報<sup>(20)</sup>にて壁近傍の流体温度変動が過大評価されたことによるものと考察された。温度変動が大きくなった領域の $z$ 方向の範囲が狭く再現されたことから、数値シミュレーションでは、高低温水の混合が早く発生したと推測される。この理由



(a)  $z = 75$  mm



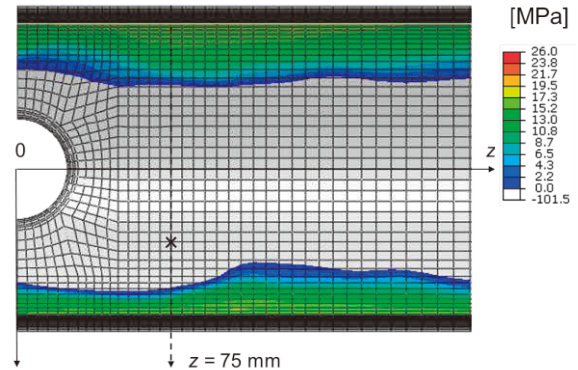
(b)  $z = 150$  mm

図11 主管内面の温度変動範囲の周方向分布

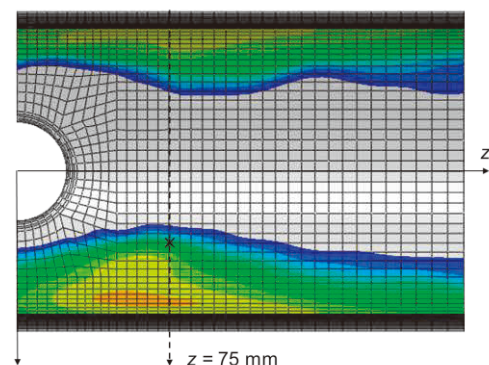
は、現時点で明らかではないが、LESで使用した温度拡散モデルがその理由の1つである可能性がある。壁近傍の流体温度変動の予測性能を改善する必要がある。

## 4.2 管内面の応力分布

図12に瞬時の管軸方向応力 $\sigma_z$ の分布の数値シミュレーション結果を示す。これらの分布は図中の×印の位置 ( $z = 75$  mm,  $\theta = 30^\circ$ )における $\sigma_z$ が最小 (74.44 s) と最大 (87.94 s) になった時刻における分布である。コンター図では、わかりやすくするため $\sigma_z \leq 0$ の範囲のみ表示した。ホットスポットが観察された領域では圧縮応力が発生し、その周辺では、引張応力が発生している。これらの図から $\sigma_z = 0$ となる線が周方向に時間とともに変化していることがわかる。次に、実験から得られた $\sigma_z$ の分布の時間変化を図13に示す。これらの分布は図中の×印の位置 ( $z = 75$  mm,  $\theta = 30^\circ$ )における $\sigma_z$ が最大 (86.28 s) と最大 (97.44 s) になった時刻における分布である。圧縮応力の領域がホットスポットの領域に発



(a) 74.44 s



(b) 87.94 s

図12 主管内面の管軸方向応力分布の時間変化 (数値シミュレーション)

生し、時間とともに周方向に移動していることがわかる。これらの特徴は数値シミュレーションにより求めた結果と同様であった。

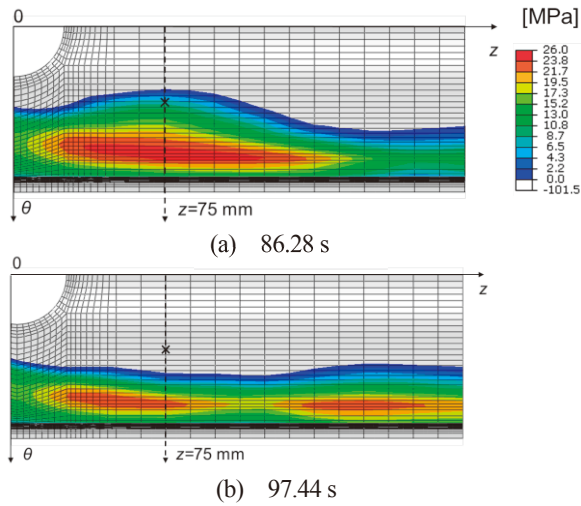


図13 主管内面の応力分布の時間変化 (実験)

### 4.3 管内面の応力変動範囲分布

図14に主管内面における応力変動範囲の数値シミュレーションによる予測結果を示す。管軸方向

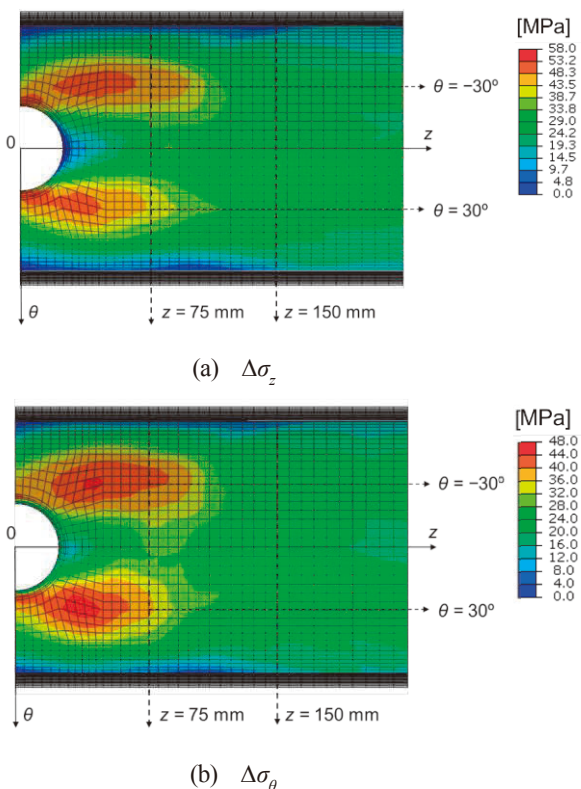


図14 主管内面の応力変動範囲の分布 (数値シミュレーション)

の応力変動範囲 $\Delta\sigma_z$ と周方向の応力変動範囲 $\Delta\sigma_\theta$ は、91秒間での最大値と最小値の差である。疲労評価では、応力振幅の最大値を材料の疲労限度と比較することから応力変動範囲 $\Delta\sigma$ の分布を明らかにすることは重要である。図に示す通り、その変動範囲は、分岐管出口から $z = 75$  mmまでの範囲で、 $\theta = \pm 30^\circ$ 付近で比較的大きくなっていた。また、 $\Delta\sigma_z$ の分布は $\Delta\sigma_\theta$ の分布と似ていることがわかる。さらに、これらの分布は、図9に示した温度変動範囲の分布と類似していた。

図15に実験から求めた応力変動範囲の分布を示す。変動範囲は100秒間の応力から算出した。その変動範囲は、分岐管出口から $z = 150$  mmまでの範囲で、 $\theta = 30^\circ$ 付近で比較的大きくなっていた。 $\Delta\sigma_z$ の分布は $\Delta\sigma_\theta$ の分布と類似していた。また、これらの分布は、図10に示した温度変動範囲の分布と似ていることがわかる。数値シミュレーションで予測された応力変動範囲の値は実験から求めた値と比べて全体的に高めとなっていた。加えて、その変動範囲が比較的大きい領域は、 $z$ 方向に狭くなっていた。一方、 $\theta$ 方向の分布は、数値シミュレーションで再現されていた。

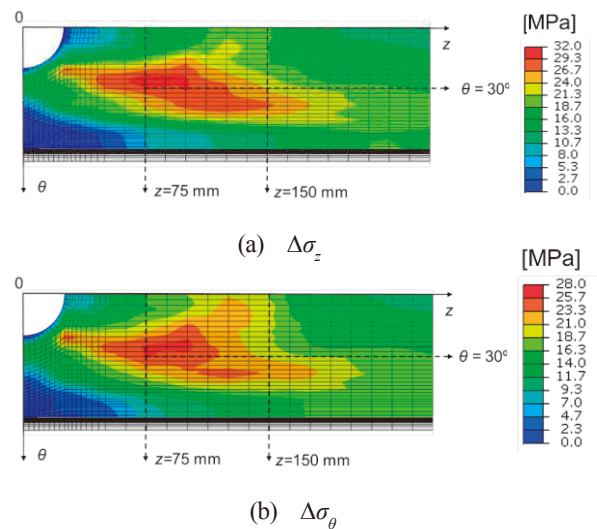
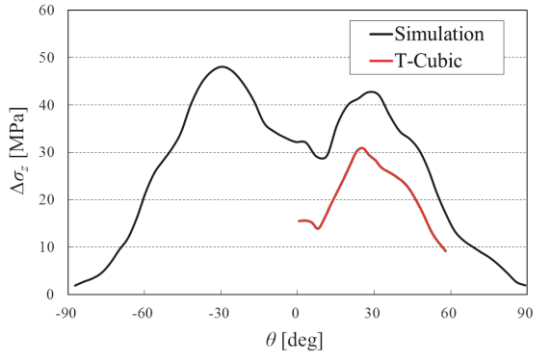
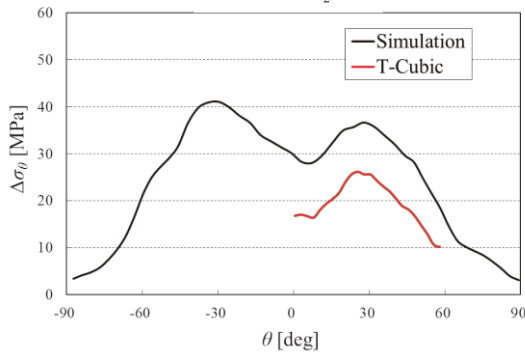


図15 主管内面の応力変動範囲の分布 (実験)

図16に主管内面の応力変動範囲の $z = 75$  mmにおける $\theta$ 方向分布を示す。実験から求めた $\Delta\sigma_z$ および $\Delta\sigma_\theta$ の分布は、 $30^\circ$ 付近にピークを有しており、数値シミュレーション結果でも、同じ位置付近にピークが再現されていることがわかる。しかしながら、その最大値は、 $\Delta\sigma_z$ は56%、 $\Delta\sigma_\theta$ は57%の過大評価となっていた。

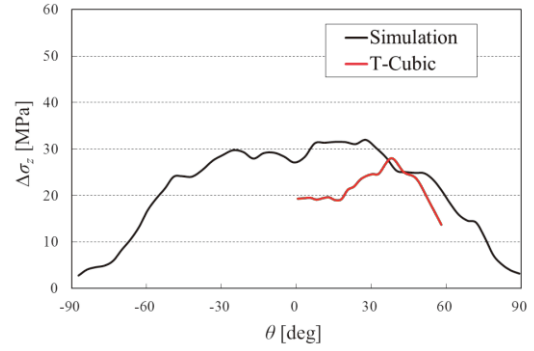


(a)  $\Delta\sigma_z$

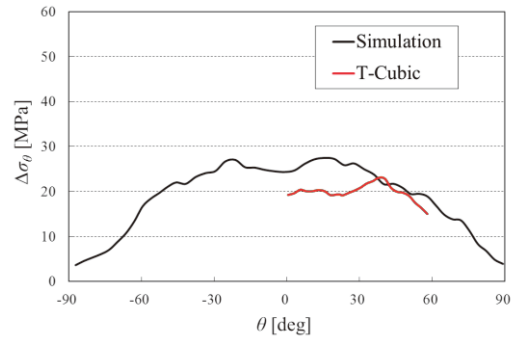


(b)  $\Delta\sigma_\theta$

図16 主管内面の応力変動範囲の周方向分布 ( $z = 75 \text{ mm}$ )



(a)  $\Delta\sigma_z$



(b)  $\Delta\sigma_\theta$

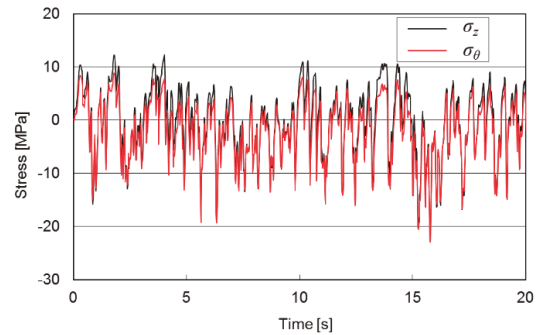
図17 主管内面の応力変動範囲の周方向分布 ( $z = 150 \text{ mm}$ )

図17に主管内面の応力変動範囲の $z = 150 \text{ mm}$ における $\theta$ 方向分布を示す. 実験から求めた $\Delta\sigma_z$ および $\Delta\sigma_\theta$ の分布では,  $40^\circ$ 付近にピークがあるものの, 数値シミュレーション結果では, 同様なピークは再現できなかった. また, その最大値は,  $\Delta\sigma_z$ では14%,  $\Delta\sigma_\theta$ では16%の過大評価となっていた.

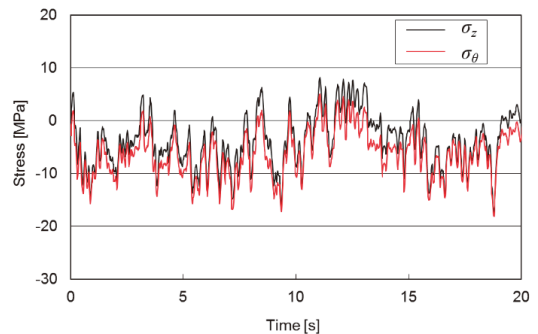
以上, 数値シミュレーションにより予測した応力変動範囲は, 過大評価となっていた. この結果は, 4.1節で示したとおり温度変動幅の過大評価により生じていると考えられる.

#### 4.4 管内面応力の時間変化

図18に主管内面の $z = 75 \text{ mm}$ ,  $\theta = 30^\circ$ 位置における応力 $\sigma_z$ および $\sigma_\theta$ の時間変化を示す. 図18(a)は数値シミュレーションによる予測結果を, 図18(b)は実験にて得られた結果を示す. 図に示す通り, 二軸応力が発生していることがわかる. 二軸応力下の疲労損傷は, 各々の応力成分の位相差に依存することが知られていることから,  $\sigma_z$ および $\sigma_\theta$ の関係を調べた. 図19に示す通り $\sigma_z$ と $\sigma_\theta$ の間には比例関係があることがわかる. つまり, 応力が, 等二軸の変動



(a) 数値シミュレーション



(b) 実験

図18 主管内面の応力の時間変化 ( $z = 75 \text{ mm}$ ,  $\theta = 30^\circ$ )



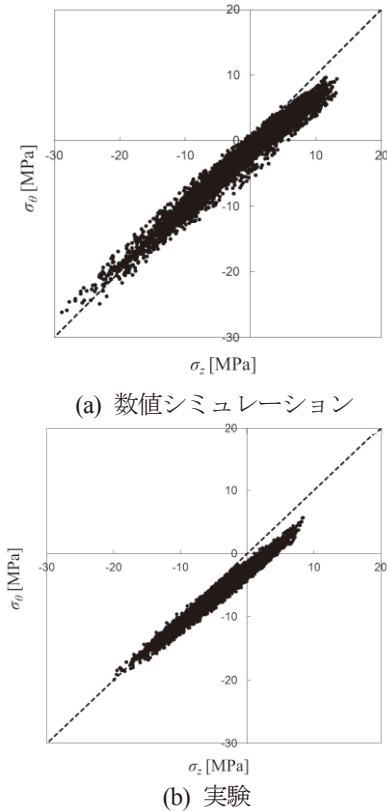


図19  $\sigma_z$ と $\sigma_\theta$ の関係 ( $z = 75 \text{ mm}, \theta = 30^\circ$ )

となっていた。そのため、図14および図15に示した通り、 $\Delta\sigma_z$ と $\Delta\sigma_\theta$ の分布は類似していた。このような等二軸の特徴は、数値シミュレーションにより再現されていた。

### 4.5 疲労損傷

熱疲労を適切に予測する観点から、応力の変動量だけでなく、疲労損傷量の再現についての検証が必要である。疲労損傷量として、指針<sup>(6)</sup>で利用されている線形累積損傷則により算出した疲れ累積損傷係数 $U_f$ を用いた。 $U_f$ は以下の式で計算される。

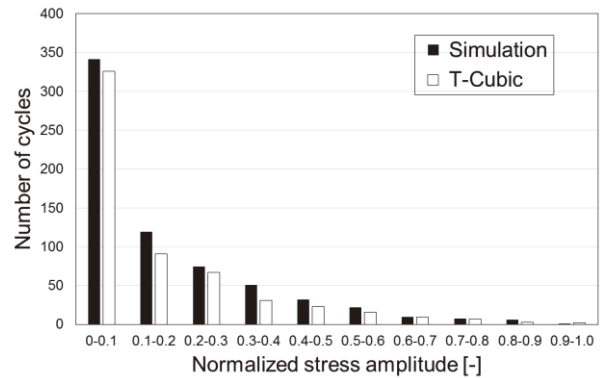
$$U_f = \sum_i \frac{N^i}{N_f^i} \quad (1)$$

ここで、 $N^i$ は*i*番目の応力振幅のサイクル数、 $N_f^i$ は*i*番目の応力振幅に対する疲労寿命である。応力振幅とそのサイクル数*N*は、求めた応力の時間変化にレインフロー法<sup>(27)</sup>を適用することで算出した。 $N_f$ は、その材料の疲労寿命曲線から求まる。

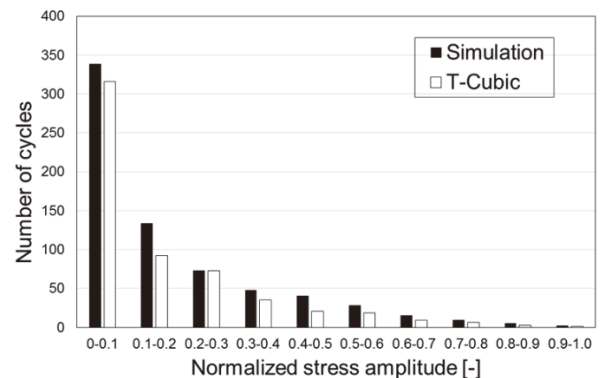
本研究での実験は、入口流体温度差が34.1Kであるため、発生する応力振幅は、ステンレス鋼の疲労

限度より小さくなる。その場合、式(1)の値は0となることから、ここでは、応力振幅のサイクル数 $N^i$ の分布のみ比較した。図20に $z = 75 \text{ mm}, \theta = 30^\circ$ 位置での応力振幅の頻度分布を示す。レインフロー法にて抽出した応力振幅は、応力変動範囲(最大振幅)で無次元化した。図に示す通り、数値シミュレーションにて予測した応力振幅の分布は、実験で得られた値の分布と類似していた。

無次元化した応力振幅に対するサイクル数を検証のために比較したが、疲労寿命 $N_f$ は、応力振幅の値によって変わる。応力振幅が過大に予測されると、 $N_f$ は小さくなり、疲れ累積損傷係数も過大に見積もられることになる。数値シミュレーションによって予測される疲労寿命の保守性を低減するには、応力変動幅を適切に再現することが必要である。



(a) Axial stress



(b) Circumferential stress

図20 無次元化した応力振幅の頻度分布 ( $z = 75 \text{ mm}, \theta = 30^\circ$ )

### 5. 結論

T字合流部における熱応力を流体・構造熱連成数値シミュレーションの結果<sup>(20)</sup>をもとに予測した。次に、予測した応力を管壁温度測定実験<sup>(18)</sup>から算

出した応力と比較しその妥当性を検証した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 数値シミュレーションにより予測した主管内面の温度変動範囲の分布は、その値が比較的大きい領域が実験結果と比較して、主管軸方向で狭くなっていた。一方、周方向の分布形状はうまく再現できていた。また、 $z = 75$  mm 位置におけるその最大値は、22%大きめの予測となった。
- (2) 数値シミュレーションにより再現した主管内面の応力変動範囲の分布は、その値が比較的大きい領域が実験結果と比較して、主管軸方向で狭くなっていた。一方、周方向の分布形状はうまく再現できていた。しかしながら、 $z = 75$  mm 位置におけるその最大値は、管軸方向応力で56%、管周方向応力で57%大きめの予測となった。
- (3) 主管内面の応力変動範囲が比較的大きな位置における管軸方向応力と管周方向応力の関係は比例関係となっていた。このような等二軸応力の特徴は数値シミュレーションによりうまく再現できていた。
- (4) 数値シミュレーションにより予測した応力からその振幅の頻度分布をレインフロー法により求めた。応力振幅の頻度分布は実験で得られた分布に類似していた。

## 文献

- (1) Chapuliot, S., Gourdin, C., Payen, T., Magnaud, J.P. and Monavon, A., Hydro-thermal-mechanical analysis of thermal fatigue in a mixing tee, Nuclear Engineering and Design, Vol.235 (2005), pp.575-596.
- (2) McDevitt, M., Hoehn, M., Childress, T., McGill, R., Analysis and impact of recent U.S. thermal fatigue operating experience, Fourth International Conference on Fatigue of Nuclear Reactor Components (2015), Paper No. 27.
- (3) Kawamura, T., Kurosaki, M., Wakamatsu, M., Tanimoto, K., Fukuda, T., Minami, Y., Moriya, S. and Madarame, H., Study on high-cycle fatigue evaluation for thermal striping in mixing tees with hot and cold water (2) (Type B; Characteristics of temperature fluctuations and heat transfer in mixing tees with same pipe diameters), Proceedings of the 11th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-11) (2003), Paper No. 36182.
- (4) Noguchi, H., Ogura, K., Shiina, K., Minami, Y., Fukuda, T., Moriya, S. and Madarame, H., Study on high-cycle fatigue evaluation for thermal striping in mixing tees with hot and cold water (3) (Type C; Characteristics of temperature fluctuations and heat transfer in mixing tees with different pipe diameters), Proceedings of the 11th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-11) (2003), Paper No. 36376.
- (5) Wakamatsu, M., Shiina, K., Tanimoto, K., Mizutani, J., Minami, Y., Moriya, S. and Madarame, H., Study on high-cycle fatigue evaluation for thermal striping in mixing tees with hot and cold water (1) (Type A: Characteristics of temperature fluctuations and heat transfer in collision-type mixing tees with same pipe diameters), Proceedings of the 11th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-11) (2003), Paper No. 36208.
- (6) 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).
- (7) Kasahara, N., Itoh, T., Okazaki, M., Okuda, Y., Kamaya, M., Nakamura, A., Nakamura, H., Machida, H., Matsumoto, M., Development of thermal fatigue evaluation methods of piping systems, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.6 (2014), pp.14-23.
- (8) Höhne, T., Scale resolved simulation of the OECD/NEA-Vattenfall T-junction benchmark, Nuclear Engineering and Design, Vol.269 (2014), pp.149-154.
- (9) Howard, R. and Pasutto, T., The effect of adiabatic and conducting wall boundary conditions on LES of a thermal mixing tee, Proceedings of 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal

- Hydraulics (NURETH-13) (2009), Paper No.N13P1110.
- (10) Nakamura, A., Oumaya, T. and Takenaka, N., Numerical investigation of thermal striping at a mixing tee using detached eddy simulation, Proceedings of 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13) (2009), Paper No.N13P1074.
- (11) Nakamura, A., Utanohara, Y., Miyoshi, K. and Kasahara, N., A Review of Evaluation Methods Developed for Numerical Simulation of the Temperature Fluctuation Contributing to Thermal Fatigue of a T-junction Pipe, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.6-4 (2015), pp.118-130.
- (12) Qian, S., Kanamaru, S. and Kasahara, N., High-accuracy analysis methods of fluid temperature fluctuations at T-junctions for thermal fatigue evaluation, Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Division Conference (ASME-PVP) (2012), Paper No. PVP2012-78159.
- (13) Qian, S., Kanamaru, S. and Kasahara, N., High-accuracy CFD prediction methods for fluid and structure temperature fluctuations at T-Junction for thermal fatigue evaluation, Nuclear Engineering and Design, Vol. 288 (2015), pp. 98-109.
- (14) Tanaka, M., Ohshima, H. and Monji, H., Thermal mixing in T-junction piping system related to high-cycle thermal fatigue in structure, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 47, No. 9 (2010), pp. 790-801.
- (15) Tanaka, M. and Miyake, Y., Numerical simulation of thermal striping phenomena in a T-junction piping system for fundamental validation and uncertainty quantification by GCI estimation, Mechanical Engineering Journal, Vol. 2, No. 5 (2015), DOI:10.1299/mej.15-00134.
- (16) Utanohara, Y., Nakamura, A., Miyoshi, K. and Kasahara, N., Numerical simulation of long-period fluid temperature fluctuation at a mixing tee for the thermal fatigue problem, Nuclear Engineering and Design, Vol.305 (2016), pp.639-652.
- (17) Kamaya, M., and Nakamura, A., Thermal stress analysis for fatigue damage evaluation at a mixing tee, Nuclear Engineering and Design, Vol.241 (2011), pp.2674-2687.
- (18) Miyoshi, K., Nakamura, A., Utanohara, Y. and Takenaka, N., An investigation of wall temperature characteristics to evaluate thermal fatigue at a T-junction pipe, Mechanical Engineering Journal, Vol.1, No.5 (2014), DOI:10.1299/mej.2014tep0050.
- (19) Miyoshi, K., Kamaya, M., Utanohara, Y. and Nakamura, A., An investigation of thermal stress characteristics by wall temperature measurements at a mixing tee, Nuclear Engineering and Design, Vol.298 (2016), pp.109-120.
- (20) Utanohara, Y., Miyoshi, K., Nakamura, A., Conjugate numerical simulation of wall temperature fluctuation at a T-junction pipe, Mechanical Engineering Journal, Vol.5, No.3 (2018), DOI:10.1299/mej.18-00044.
- (21) Miyoshi, K., Nakamura, A. and Takenaka, N., Numerical evaluation of wall temperature measurement method developed to estimate thermal stress at T-junction pipe, Mechanical Engineering Journal, Vol.1, No.2 (2014), DOI:10.1299/mej.2014tep0006.
- (22) Kamide, H., Igarashi, M., Kawashima, S., Kimura, N. and Hayashi, K., Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping, Nuclear Engineering and Design, Vol.239 (2009), pp.58-67.
- (23) Dassault systemes Inc., Abaqus analysis user's manual, v6.14ja, Chap. 28.1.4, 3D solid element library (2014), Dassault systemes Inc.
- (24) Dassault systemes Inc., Abaqus analysis user's manual, v6.14ja, Chap. 6.5.2, Heat transfer analysis (2014), Dassault systemes Inc.
- (25) Dassault systemes Inc., Abaqus analysis

user's manual, v6.14ja, Chap. 6.2.2, Static stress analysis (2014), Dassault systemes Inc.

- (26) ANSYS Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide, Release 15.0, Chap.4.12.2, ANSYS, Inc. (2009) .
- (27) ASTM International, Standard practices for cycle counting in fatigue analysis, Annual book of ASTM Standards 2002 Section III, Vol.03.01 (2002), pp.746-755.