

T字配管合流部における壁面温度変動の 数値シミュレーション^{*1}

Conjugate Numerical Simulation of Wall Temperature Fluctuation at a T-junction Pipe

歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara) ^{*2}

三好 弘二 (Koji Miyoshi) ^{*2}

中村 晶 (Akira Nakamura) ^{*2}

要約 T字合流配管にて温度差のある流体が混合する場合、合流部下流の配管で温度変動に伴う熱疲労が生じることがある。熱疲労評価手法の開発の一環として、筆者はこれまでT-Cubic実験装置でT字合流配管を対象とした熱流動実験を行ってきた。本研究では、T-Cubic実験を対象に配管金属まで計算領域に含めて流体構造熱連成計算を行い、流体温度や管内面温度変動の再現精度を検討した。時間平均速度分布および時間平均温度分布は計算領域全体でよい再現精度を示した。流体領域の速度変動強度に関しては、壁面から離れた箇所では過小評価の傾向はあったが、壁面近傍ではピーク値を含め実験データの傾向を再現できた。熱疲労評価において管内面の温度変動強度は最も重要な評価パラメータの1つであり実験データを20%程度過大評価したが、分布の傾向はある程度定性的に再現することができた。

キーワード 熱疲労, T字合流配管, 温度変動, 数値シミュレーション, ラージエディシミュレーション

Abstract Thermal fatigue cracks may occur in a T-junction pipe due to the mixing of hot and cold fluids. To develop an evaluation method for thermal fatigue, the authors previously performed a mixing tee experiment called the T-Cubic experiment. In this study, a fluid-structure coupled simulation for conjugate heat transfer was carried out to investigate the predictive performance of the flow and temperature fields and temperature fluctuation on the pipe inner surface at a mixing tee of the T-Cubic experiment. The computational domain included 304 type stainless steel pipe as well as the working fluid of water. Time-averaged velocity and temperature were reproduced well over the entire computational domain. Although velocity fluctuation intensity at a distance from the wall was relatively smaller than experimental data, the simulation could reproduce the trend of the experimental data, especially the velocity fluctuation intensity peak near the wall. The temperature fluctuation intensity was also larger than the experimental data, though the tendency could be reproduced by the simulation. The temperature fluctuation intensity on the pipe inner surface is the most important parameter for thermal fatigue and though it was 20% to 36% larger than the experimental data at its peak, the tendency was reproduced to a certain extent.

Keywords Thermal fatigue, T-junction pipe, Temperature fluctuation, Numerical simulation, Large eddy simulation

1. はじめに

T字合流配管は火力や原子力などの発電所においてなくてはならない配管要素である。配管合流部において高低温水が合流する場合、高サイクル熱疲労が発生することがある。熱疲労によるき裂はT字合流配管下流で度々発生している。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⁽²⁾や近年の米国の原子力発電所でのき裂発生事例⁽³⁾などはT字合流配管下流で発生している。熱疲労は発電所における主要な配管劣化メカニズムであり、プラント設計や保全において考慮しなければならない現象である。

日本機械学会では熱疲労に関する評価指針として、2003年に「配管の高サイクル熱疲労評価指針」(以後JSME指針)⁽⁴⁾を策定した。JSME指針での配

*1 本原稿はMechanical Engineering Journal (2018), Vol.5, No.3, Paper No.18-00044⁽¹⁾に対し一部加筆・省略したものである。

*2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

配管合流部評価フローは図1の通りで、実験データベースに基づき、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応力評価式を用いて熱疲労発生の可能性が判定される。JSME指針では、4つの評価ステップのうちいずれかのステップを満足すれば評価終了となる。いずれのステップも満足しなかった場合は、「詳細評価」というパスが残されており、適切な方法により評価を実施することが認められている。JSME指針は実験データに基づき作成されており、広範囲の実験条件（入口流速および主管と分岐管の管径比）をカバーしているが、全ての運転条件を詳細にカバーしているわけではない。また、実際の現象が不明な部分は、JSME指針では保守的に評価するように設計されている。例えば、配管内の熱応力振幅は流体温度変動に対して周波数依存性を持つが、JSME指針では周波数依存性を考慮せず、最大の熱応力振幅を計算している。よって、JSME指針で保守的に考慮している周波数依存性などの事象を、実験および数値シミュレーションによってより精緻に評価することが望ましく、保守性の低減も期待できる。

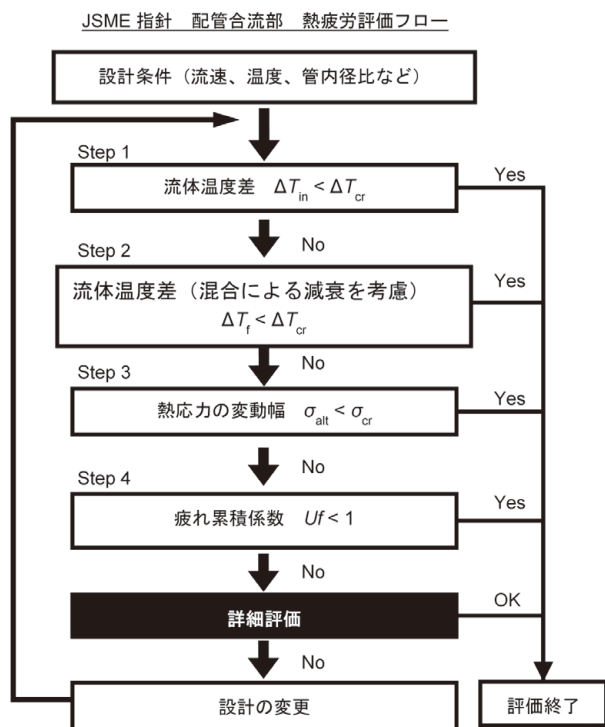


Fig. 1 JSME 指針による配管合流部熱疲労評価フロー⁽⁴⁾，図中 ΔT_{in} は合流前の流体温度差， ΔT_{cr} は判定温度差， ΔT_f は合流後の温度ゆらぎ幅（両振幅）， σ_{alt} は熱応力振幅， σ_{cr} は平均応力の効果を考慮した疲労限， Uf は疲れ累積係数である。

熱疲労のメカニズムを理解するために、これまで様々な実験が行われてきている。実機プラントでの温度条件（高温水200℃以上，低温水20～40℃）で配管合流部下流の流体温度，壁面温度を測定した実験が実施されている^{(5)~(7)}。日本原子力研究開発機構（Japan Atomic Energy Agency, JAEA）が実施したWATLON実験⁽⁸⁾では、透明なアクリル試験体を用いているため主管と分岐管温度差は15℃と低いが、合流部下流の流速分布と温度分布を計測することができている。そのため、WATLON実験を対象とした数値計算が多く実施されている^{(9)~(12)}。著者らもWATLON実験を対象とした数値計算を実施し^{(13)~(18)}，前述のJSME指針における「詳細評価」手法の開発を行ってきた。数値計算による「詳細評価」が取り扱う範囲は、数値流体計算（CFD）による局所流体の温度変動，流体から壁面への熱伝達，壁面内の熱伝導，そして構造解析による熱応力分布算出までを想定している。よって，壁面内の温度変動を数値計算で捉えるためには，流体と構造を連成させて計算を行う必要がある。また，数値計算の妥当性を検討するには，壁面温度の実験データが必要となる。これまで，配管合流部下流における壁面温度を計測した事例はあるが^{(5),(19)}，計測点数が数点程度と壁面温度の妥当性を検討するには十分でなかった。

そこで，著者らのグループでは実験ループ（T-Cubic, Transient Temperature measurement equipment at a T-junction pipe）を用いて^{(20)~(24)}，148点の熱電対で壁面表面の温度変動分布を計測した。計測データは数値計算で算出した壁面温度の妥当性検証用のデータとして使用可能である。また，実験で得られた壁面温度データをもとに構造解析を行い，熱応力分布の算出も可能である⁽²⁴⁾。

本研究の最終的な目標はJSME指針における熱疲労評価を一部もしくは全部を置きえ可能な「詳細評価」手法の開発であるが，そのために本稿では，T-Cubicの実験データとの比較を通して計算結果の妥当性検討を行う。特に，熱疲労評価で最も重要な点である壁面温度変動の再現精度について検討する。そして，流体から壁面への熱伝達による温度変動の減衰特性についても検討を行う。

2. 数値計算方法

2.1. 計算対象

数値計算はT-Cubic実験ループ^{(22)~(24)}を対象とする。装置の模式図を図2に示す。実験装置は主に高温水タンク、低温水タンク、混合水タンク、高温水ポンプ、低温水ポンプから構成されている。流れ場の乱れは試験体上流に設置された整流器で低減した。T字配管合流部の試験体形状を図3に示す。試験体はSUS304ステンレス鋼で作成している。主管内径 D_m および分岐管内径 D_b はそれぞれ150 mm, 50 mmである。試験体形状はJAEAのWATLON実験⁽⁸⁾とほぼ同様である。

実験条件を表1に示す。詳細は既報⁽²³⁾に示す通りである。流動様式は主管と分岐管の運動量比で決定されるが⁽⁸⁾, 合流部下流で最も壁面の温度変動が大きくなる壁面噴流となるように、主管と分岐管の

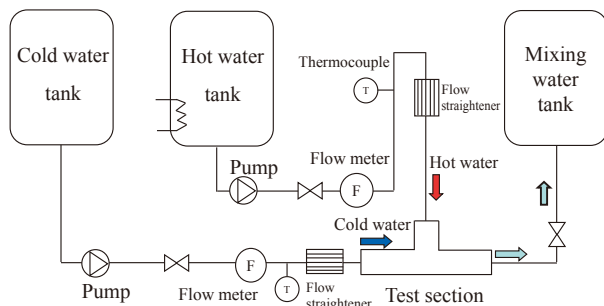


Fig. 2 T-Cubic実験装置

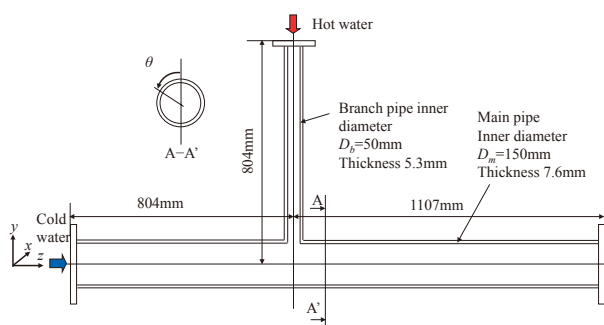


Fig. 3 T字配管合流形状の試験体 (SUS304で作成)

Table. 1 実験条件

項目 [単位]	主管	分岐管	備考
管断面平均速度 [m/s]	1.0	0.65	流動様式が壁面噴流となるよう設定
温度 [°C]	25.7	59.8	
管内径 [m]	0.15	0.05	
Reynolds数 [-]	1.7×10^5	7.1×10^4	

流入速度を設定した。

2.2. 温度測定

流体温度を測定するための熱電対ツリーを図4に示す。16本のシース付き熱電対を並べて設置し、主管中心軸に対して回転および平行移動して流体温度分布が計測できるようになっている。また、主管内面の温度分布は図5に示すように配管に埋め込んだ熱電対(148点)で計測した。計測に関する詳細は既報⁽²³⁾に示した通りである。

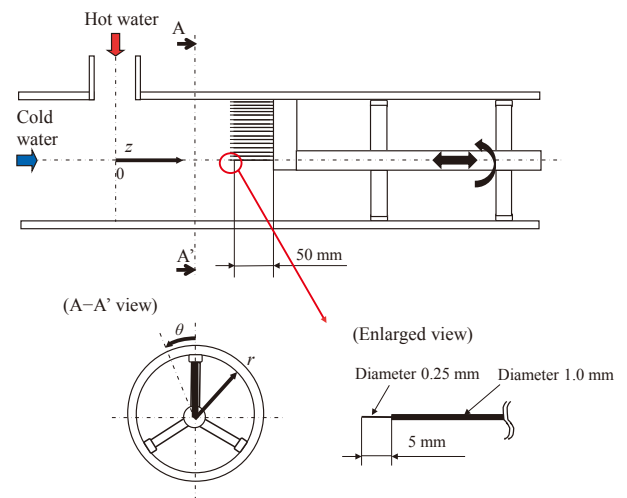
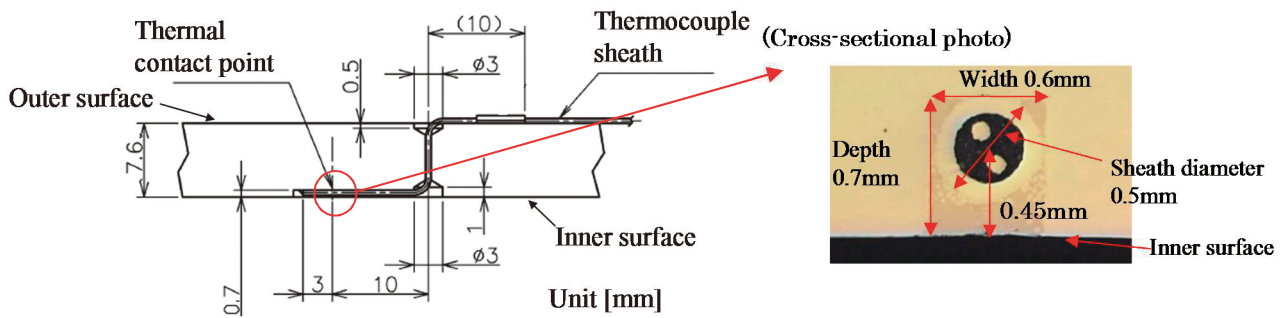


Fig. 4 流体温度測定用の熱電対ツリー

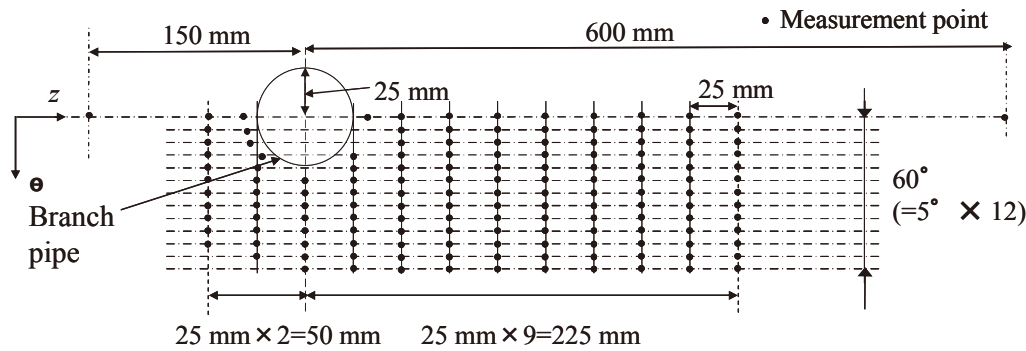
図4, 5の熱電対で計測した温度は、厳密に言えばシースや埋め込み金属の影響を受けており、流体温度もしくは管内面温度の変化に対して時間遅れが生じる。よって、温度は多少誤差を持つことになるので、誤差を補正するための伝達関数(振幅比, 位相遅れ)を作成し、計測データの誤差を補正した。伝達関数の作成は有限要素法による熱伝導解析を別途行い、温度変動周波数に応じた振幅比, 位相遅れの式を作成した⁽²³⁾。

2.3. 流速測定

流速測定は図6に示す専用の試験体を用いて温度測定とは別に行った⁽²⁰⁾。レーザドップラ流速計(LDV, KANOMAX, Model 8739-S)を用い、試験体はレーザ光を通すよう透明なアクリル製とした。管の周囲は壁面でレーザ光の屈折が和らぐよう水ジャケットで取り囲んでいる。トレーサ粒子には平均粒径 $4.1 \mu\text{m}$, 密度 1020 kg/m^3 のナイロン粒子を



(a) 内面から計測点までの深さ



(b) 温度測定点

Fig. 5 管内面温度測定用の熱電対の取付位置

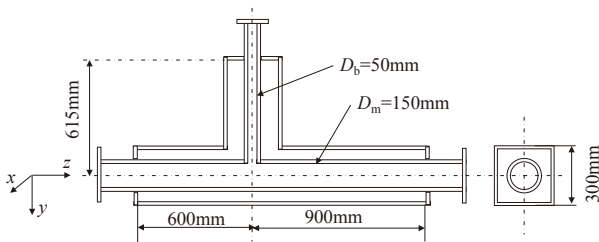


Fig. 6 流速測定用アクリル試験体

用いた。サンプル数は約3万である。流速の条件は表1に示す通りであるが、流体温度は室温とした。

3. 数値計算方法

数値計算領域を図7に示す。上流側長さは配管合流部から $2D_m$ (主管), $2D_b$ (分岐管), 下流側長さは $5D_m$ である。配管金属も計算領域に含めた流体構造熱連成計算とし、流体からの熱伝達、配管内の熱伝導も計算している。

計算条件を表2に示す。主な計算条件は既往の研究結果^{(14),(18)}に従い決定した。流入境界条件はT-Cubic実験の測定値を適用している。図8に流入境界における時間平均流速分布を示す。ここで、 w は速度の z 方向成分であり、 w_{ave} は時間平均値である。図では実験データ(白抜き丸)と計算値(実線)

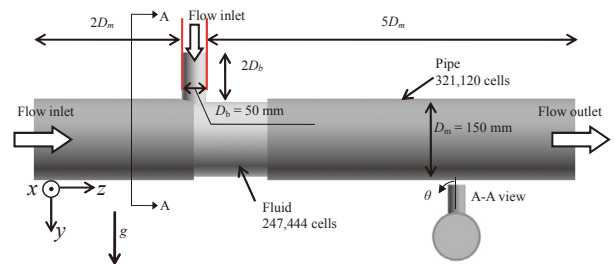


Fig. 7 数値計算領域 (流体および配管金属)

にずれが生じているが、入口流量で実験データと計算結果を比較して両者が一致することを確認している。流入境界での速度変動 u'_{rms} もVortex法⁽²⁵⁾で考慮している。 u'_{rms} の定義は次の通りである。

$$u'_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i - u_{ave})^2}{N}} \tag{1}$$

ここで、 u_i は瞬時の速度、 u_{ave} は時間平均速度、 N はサンプル数である。なお、T-Cubic実験で測定した速度変動 u'_{rms} の分布を流入境界で反映するために、 u'_{rms} の値からVortex法の中で指定可能な乱流エネルギー k とエネルギー消散率 ϵ に換算して指定している⁽¹⁾。図9に流入境界における速度変動強度分布を示す。計算値(実線)が実験データ(白抜き丸)

Table. 2 計算条件

ソフトウェア		FLUENT 15.0	
流体 (水)	密度	991.0 kg/m ³ (42.75℃) プシネスク近似使用	
	粘性係数	温度依存, 温度の多項式で計算	
	比熱		
	熱伝導率		
	体膨張係数	3.99 x 10 ⁻⁴ 1/K (42.75℃)	
構造 (SUS304)	密度	7916.3 kg/m ³ (42.75℃)	
	比熱	温度多項式	
	熱伝導率		
乱流モデル		LES dynamic (Smagorinsky-Lilly)	
境界条件	流入境界	主管入口	管断面平均値 $U_m = 1.0$ m/s, $T_m = 25.7$ °C
		分岐管入口	管断面平均値 $U_b = 0.65$ m/s, $T_b = 59.8$ °C
		流速分布	測定結果を使用
		速度変動	Vortex法で乱流強度分布を指定
	流出境界	圧力境界	
	管内面	運動量	粘着条件もしくは対数則 (壁面 y^+ の値に応じて切替)
		エネルギー	フーリエの法則もしくは温度対数則 (壁面 y^+ の値に応じて切替)
	管外面	断熱	
時間	時間刻み	0.0002 s	
	初期条件	標準 $k-\epsilon$ 計算結果	
	統計量 (時間平均および変動値)	10~101 sの値で算出	
計算メッシュ	流体	247,444セル	
	構造	321,120 セル	
	壁面 y^+	60以下	

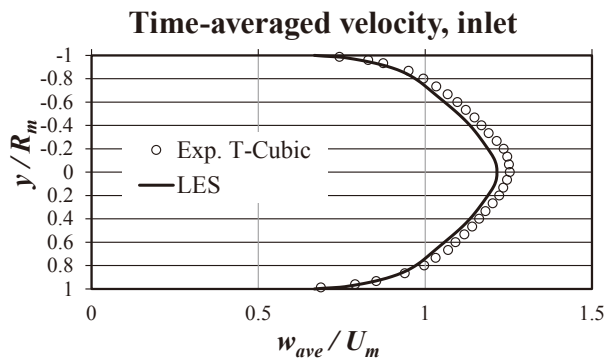


Fig. 8 流入境界における時間平均速度分布 (R_m は主管半径, w_{ave} は時間平均速度の z 方向成分)

を多少過小評価する箇所もあるが、実験データに沿うよう設定できており、速度変動強度を一定値で与えるよりは実験条件に近づけることができているものと考えられる。

なお、本計算では壁面境界条件として壁関数を使用している。配管合流部のように、大きく乱れた流れ場で壁関数を使用することには議論の余地があるが、本研究では壁面近傍の計算メッシュ数を低減させるため壁関数を用いた。これまでの研究^{(9),(16)}か

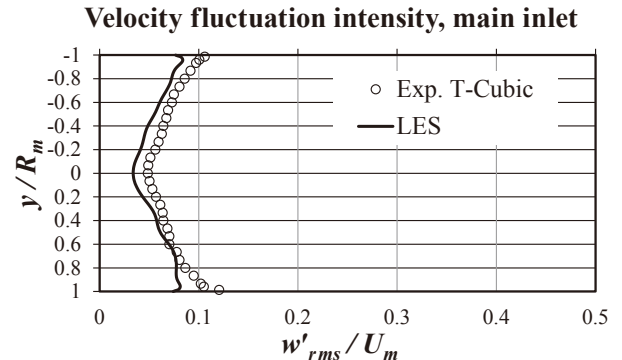


Fig. 9 流入境界における速度変動強度分布 (R_m は主管半径, w'_{rms} は速度変動強度の z 方向成分)

ら、壁関数を用いても、配管合流部下流の壁面近傍の流体温度変動は妥当に再現できることが確認されている。ただし、流体構造計算において、壁関数が壁面伝熱にどのような影響をおよぼすかは不明である。ちなみに、FLUENTでは y^+ の値(しきい値約10)に応じて粘着条件と壁関数の使用を切り替えている。本計算では合流部上流で小さくても約5、合流部下流で大きくても約60程度であった。

計算メッシュを図10に示す。メッシュ数は流体

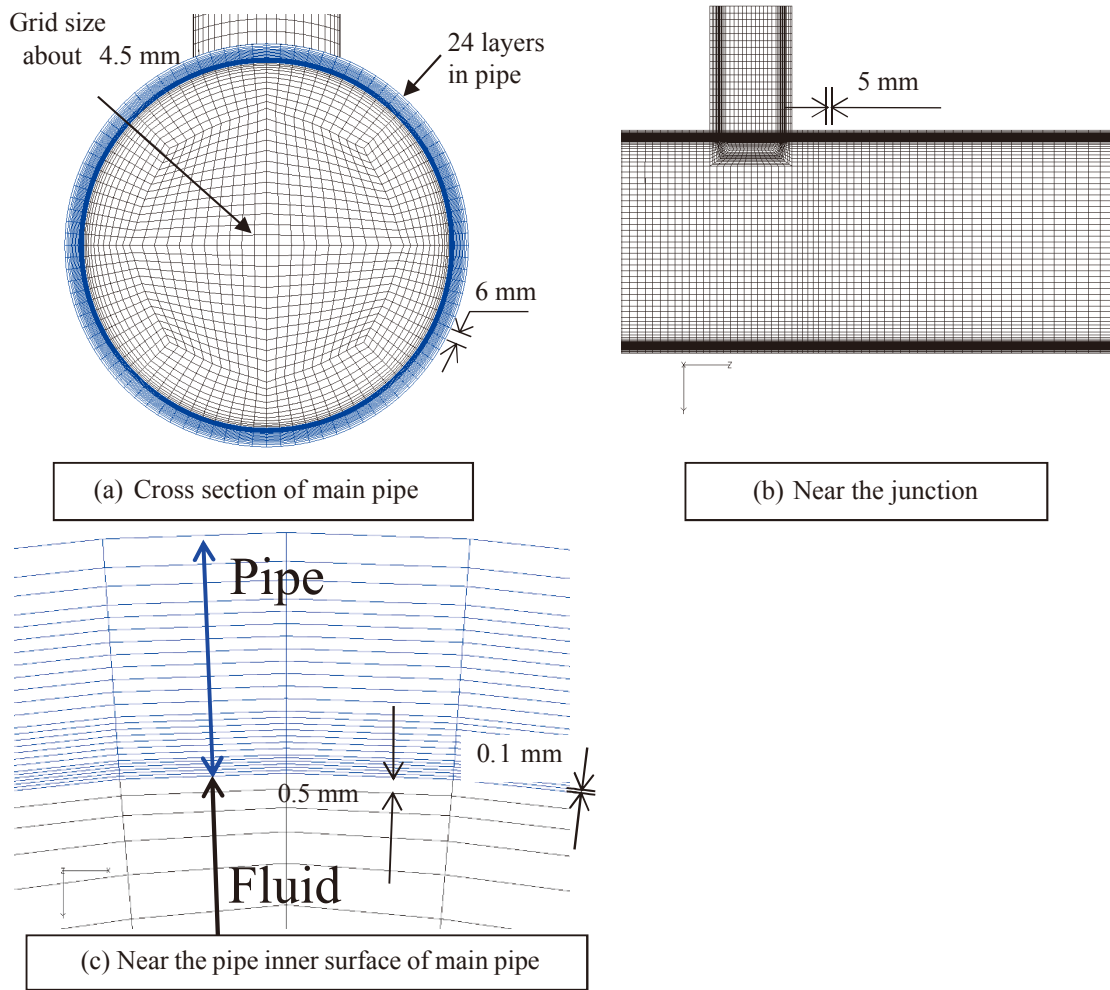


Fig. 10 計算格子

部で約25万セル，配管構造部で約32万セルである。メッシュは管内面に沿うようにし，壁から第1層の厚さは流体側で0.5 mm，構造側で0.1 mmである。なお，計算結果のメッシュ依存性を考慮して，WATLON実験を対象とした数値計算⁽¹⁸⁾の計算メッシュを流用している。T-Cubic実験は試験体形状，実験条件ともにWATLON実験と類似しており，流用可能と判断した。

4. 数値計算結果

以下で示す計算結果において， x ， y ， z 座標は水平方向，鉛直方向，流れ方向とした。座標原点は主管中心軸と分岐管中心軸の交差点とする。

4.1. 時間平均速度

時間平均速度分布の数値計算結果を図11に示す。

描画している値は速度の絶対値の時間平均値で，主管の流入境界速度 U_m で無次元化している。流れ場の傾向は既往研究⁽¹⁸⁾とほぼ同じであり，合流部下流の分岐管側壁面近傍には速度がよどむ領域が現れ，その領域を避けるように主管・分岐管の混合流が流れ，局所的に流速が増加している。

図12は時間平均速度分布（流れ方向成分 w_{ave} ）を実験データと計算結果で比較したものである。分布は合流部下流 $z = 0.5D_m$ での鉛直 y 方向に沿ったも

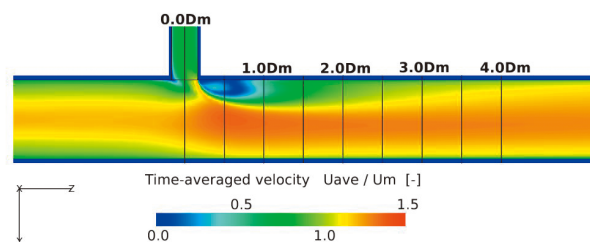


Fig. 11 時間平均速度分布の数値計算結果
(描画断面は管中心軸を通る鉛直断面)

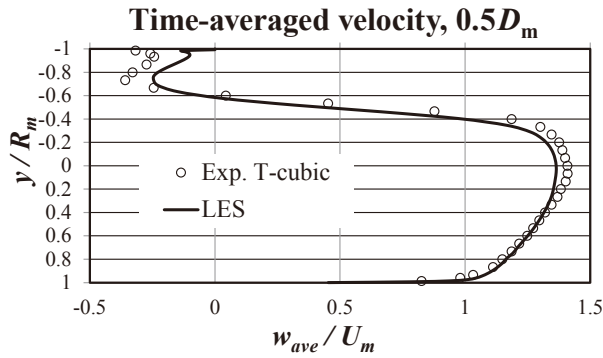


Fig. 12 時間平均速度分布の実験データと数値計算結果の比較 ($z = 0.5D_m$)

のである。逆流が壁面近傍付近 ($y / R_m < -0.6, R_m = D_m/2$) で現れており、管中央に近づくと流れ速度が増加している。計算結果は逆流領域も含め、実験データを精度よく再現している。

4.2. 速度変動強度

図13に速度変動強度の計算結果を示す。描画している値は流れ方向速度変動強度 w'_{rms} を U_m で無次元化したものである。速度変動はよどみ領域付近、特に主管流れと分岐管流れの境界で強くなっている。両者の境界で自由せん断層が形成されるためだと考えられる。図14は $z = 0.5D_m$ における速度変動強度 w'_{rms} を実験データと計算結果で比較したものである。計算結果は実験データの分布の傾向を定性的に再現しているが、ピーク値 ($y/R_m = -0.5$) で13.8%の過小評価となった。また、主流側 ($y/R_m > 0$) でも実験データよりも計算値が小さくなった。

著者らは既報⁽²⁶⁾にて流入境界条件がT字合流部の流れ場に与える影響について検討しており、合流部下流の速度変動の再現には、流入境界で速度変動を考慮する必要があることを確認している。本計算でも図9に示すように流入境界で速度変動を考慮しているので、図14の過小評価の原因は他に要因があると考えている。しかしいずれにせよ、合流部

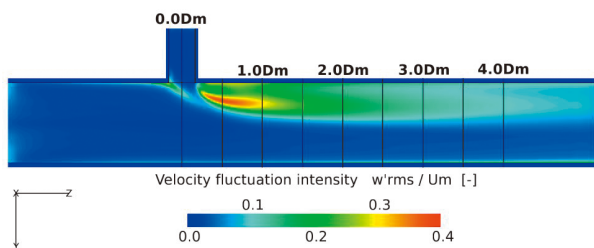


Fig. 13 速度変動強度の数値計算結果

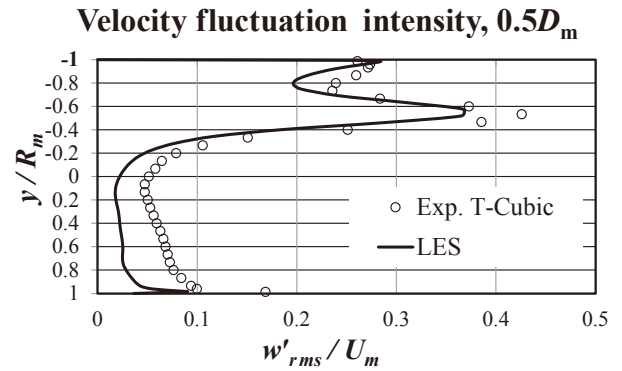


Fig. 14 速度変動強度の実験データと数値計算結果の比較 ($z = 0.5D_m$)

壁面近傍 ($y/R_m = -1$) の速度変動に関しては、十分実験データに見合う予測精度を示せたと考えている。

4.3. 流体温度分布

図15に管中心軸を通る鉛直断面における時間平均温度分布 T_{ave} を示す。温度は主管温度 T_m 、分岐管温度 T_b で、 $(T_{ave} - T_m) / (T_b - T_m)$ のように無次元表示している。分岐管から合流した高温水が主管の流れに押し流され分岐管側の壁面近傍に沿う、いわゆる壁面噴流の流動様式を形成している。高温水の領域は下流に進むに従い温度が低下し、周囲の低温水と混合していく様子がわかる。図16に合流部下流 $z = 0.5D_m$ の管断面における時間平均温度分布を

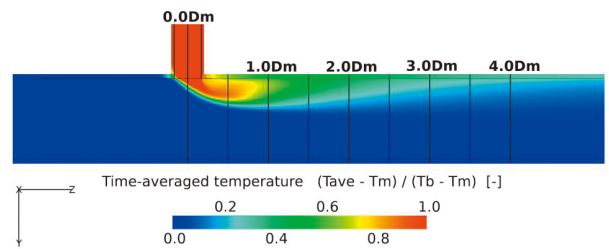
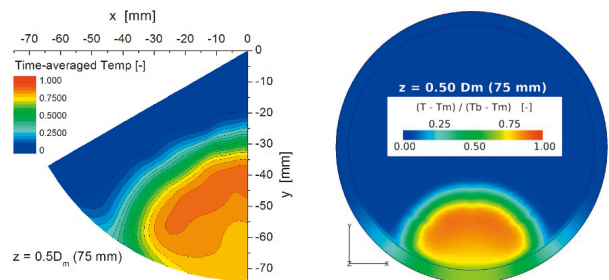


Fig. 15 時間平均温度分布



(a) 実験データ (b) 計算結果(配管も含む)

Fig. 16 時間平均温度分布 (描画断面は合流部から $z = 0.5D_m$ 下流の管断面)

示す。図16(a)は熱電対ツリーで計測した実験データで、 $0^\circ \sim 60^\circ$ を 5° ごとに計測し、208点の計測値をコンター表示している。分岐管からの高温水が壁面近傍に位置することが確認できるが、図16(b)の数値計算結果でも同様な温度分布を再現することができている。

図17に、より定量的な実験データと計算結果の比較を示した。温度分布は、鉛直y軸から 30° 傾いた半径方向に沿ったもので、高低温水の境界付近を通る線分上である。計算結果は実験データを精度よく再現できている。

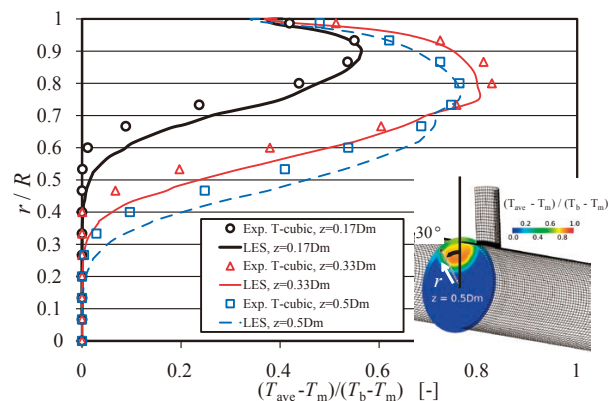


Fig. 17 時間平均流体温度の実験データと数値計算結果の比較 ($z = 0.17D_m, 0.33D_m, 0.5D_m$)

4.4. 流体温度変動強度

温度の変動強度を図18, 図19に示す。ここで示した温度変動強度 T_{rms}^* は次式で無次元化した量である。

$$T_{rms}^* = \frac{T_{rms}}{T_b - T_m} \quad (2)$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - T_{ave})^2}{N}} \quad (3)$$

ここで、 T_i は瞬時の温度、 N はサンプル数である。 T_{rms}^* が大きくなる領域は速度変動強度(図13)が大きくなる領域と類似しており、主管・分岐管流れの境界付近である。このことは図19をみるとよりはっきりわかる。 T_{rms}^* が大きな領域は分岐管からの流れを覆うように存在している。

図20は T_{rms}^* の分布を実験データと計算結果で比較したものである。数値計算では実験データの分布傾向を再現しているが全体的に過大評価であり、特

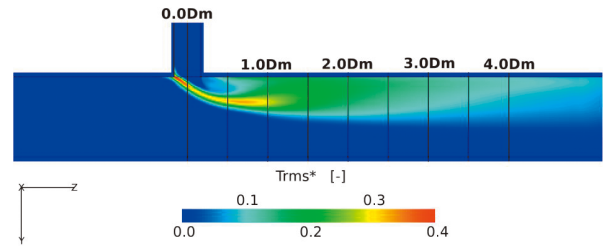
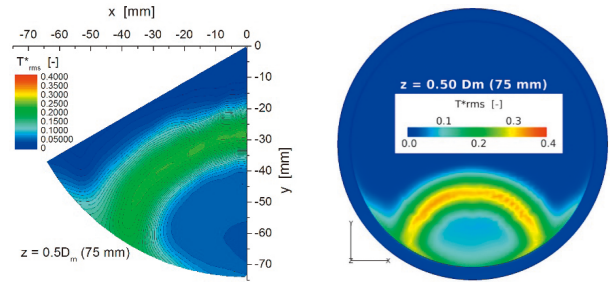


Fig. 18 温度変動強度分布
(描画断面は管中心軸を通る鉛直断面)



(a) 実験データ (b) 計算結果(配管も含む)

Fig. 19 温度変動強度分布
(描画断面は合流部から $z = 0.5D_m$ 下流の管断面)

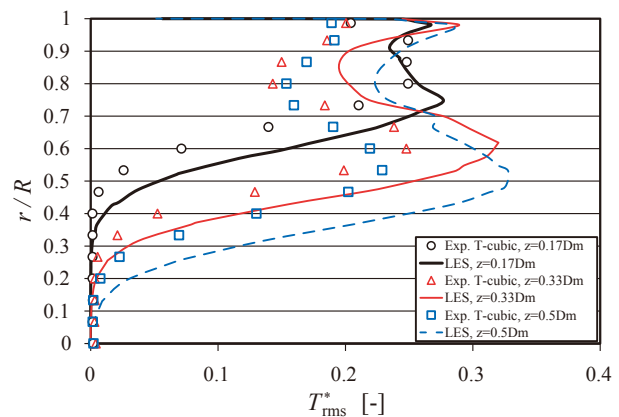
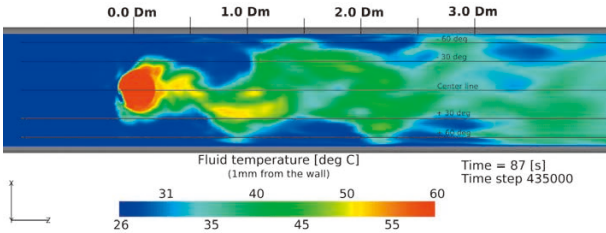


Fig. 20 流体の温度変動強度分布の実験データと数値計算結果の比較 ($z = 0.17D_m, 0.33D_m, 0.5D_m$)

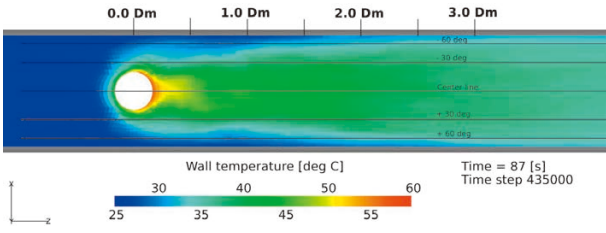
に、 $z = 0.5D_m$ の壁面近傍では50%の過大評価となった。この過大評価の理由は現在のところ不明であり、今後改善する必要がある。

4.5. 管内面における温度分布

壁面近傍における瞬時の温度分布を図21に示す。図は流体側から壁面を俯瞰した図である。図21(a)は管内面から1 mm離れた地点の流体温度分布、図21(b)は管内面上の温度分布である。図中の水平方向の線は 30° ごとに引いたもので、分岐管からの高温水領域の混合・拡散する範囲がわかるように示した。高温水領域は合流部下流 $1.0D_m$ 辺りまでは大体



(a) Fluid temperature (1 mm from the wall).



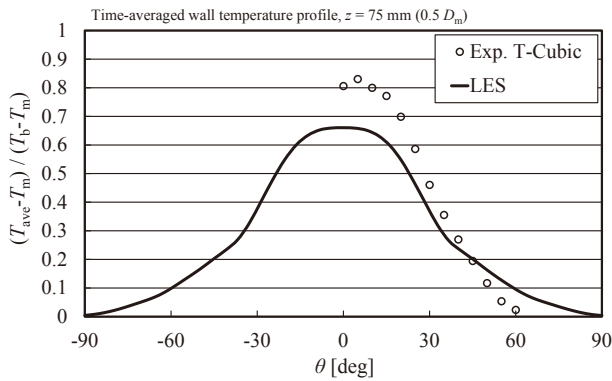
(b) Temperature on the pipe inner surface.

Fig. 21 壁面近傍における瞬時の温度分布

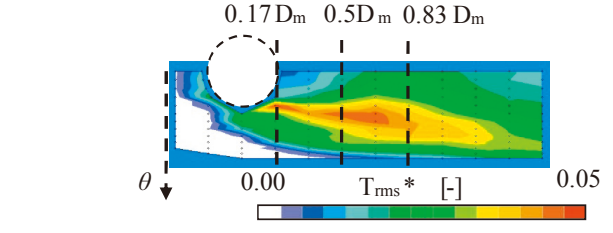
± 30° の範囲にあるが、徐々に範囲が広がり 3.0D_m 付近では ± 90° 程度まで達している。図 21 (a) の流体温度は図 21 (b) の管内面温度に比べ強く変動している。同様な流体温度の変動は、既往の研究^{(8), (9), (13)}でも観察されており、変動の主要因は馬蹄形の渦の周期的な揺動・放出によるもので、変動周波数もカルマン渦列の場合の St = 0.2 とほぼ同様であることがわかっている。ここで、St は変動周波数 *f* を無次元表示した Strouhal 数であり以下の式で与えられる。

$$St = \frac{fD_b}{U_m} \quad (4)$$

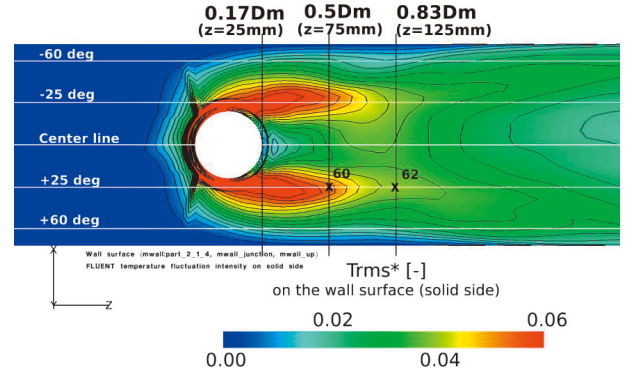
一方、図 21 (b) の管内面温度は流体温度と比べあまり変動しておらず、時間平均値のように分布している。このことから、比較的高周波な流体温度変動は壁面へ伝熱する際に減衰し、低周波な変動だけが



(a) 時間平均温度



(a) 実験データ (Miyoshi et al., 2014b)



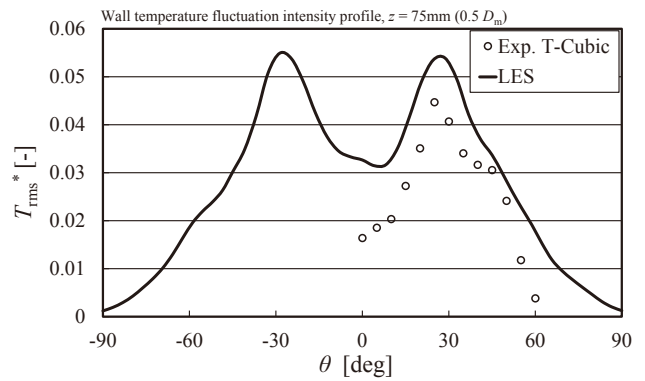
(b) 計算結果

Fig. 22 管内面における温度変動強度の比較

管内面上に伝わるのがわかる。

4.6. 管内面温度の再現精度

図 22 に管内面温度変動強度分布を示す。図 22 (a) は実験データ⁽²²⁾であり、図 22 (b) は数値計算結果である。実験では分岐管出口から下流 1.0D_m までの θ = 20° ~ 30° の範囲で大きな温度変動が現れた。数値計算でも定性的な傾向は再現されているが、大きな変動が現れる領域は実験データに比べ狭くなった。より定量的な比較を図 23 に示す。図 23 (a) は z = 0.5D_m における時間平均温度、図 23 (b) は温度変動強度で、水平軸は図 7 で定義した周方向角度である。時間平均温度は 0° で最も大きく、角度が大き



(b) 温度変動強度

Fig. 23 管内面の時間平均温度と温度変動強度 (z = 0.5D_m)

くなるとともに温度が低下する。数値計算結果は分布の傾向を再現しているが、 0° での最大値を18%過小評価した。図23(b)の温度変動強度についても、数値計算は約 30° にあるピーク値の出現を捉え、分布の傾向を再現できているが、 0° での値を2倍程度、 30° での値を20%過大評価した。

以上のように、数値計算は熱流動場をある程度再現できているが、定量的には実験データとの間に差が生じている。管内面での温度変動強度は、熱応力の変動に直接結びつくため、熱疲労評価において重要な物理量である。管内面の温度変動強度の過大評価は、流体の温度変動強度の過大評価と関連すると考えられる。図20では、 $z = 0.5D_m$ における壁面近傍の流体温度変動は50%程度過大評価であった。一方、 $z = 0.5D_m$ における管内面での温度変動強度(ピーク値)は20%の過大評価となる。流体に比べ壁面上では温度変動の過大評価の割合が低減しているが、壁面境界条件として壁関数を使用したことが原因の1つとして考えられる。そもそも、壁関数の使用は流れ場が完全に発達していること想定しているが、T字配管下流は混合やはく離の影響で壁面近傍が乱され、速度境界層、温度境界層も乱されると想定される。よって、壁面近傍の温度勾配は実際には局所的に急峻となり、壁面熱流束も増加するものと考えられる。しかし、壁関数ではそのような局所的な温度勾配の増加が表現できないため、壁面熱流束を過小評価し、壁内面での温度変動も小さくなるものと考えられる。

以上、壁内面における温度変動強度の計算結果には、流体温度変動の過大評価と壁関数適用による壁面熱流束の過小評価が影響すると考えられる。今後の課題としては、流体温度変動の予測精度向上と、壁内面における壁関数の適用性について検討の必要がある。

これまで、壁内面における温度分布の再現性は、実験データが存在しないため確認できなかった。しかし、T-Cubic実験により管内面の温度データが取得されたため、本研究において数値計算の再現精度を確認することができた。定量的な再現精度にはまだ課題が残るが、管内面の温度の定性的な傾向は数値計算により再現できていることが確認できた。これにより、流体の挙動から配管内の温度変動まで、数値計算を用いた熱疲労評価方法開発の見通しを得ることができた。管内面の温度分布は有限要素法による熱応力解析の入力条件として使用可能である。

よって、著者らは本計算結果を用いて応力解析を実施し、応力分布の再現精度を実験データ⁽²⁴⁾と比較する予定である。

5. 結論

T字合流配管における熱疲労研究の一環として、T-Cubic実験を対象とした数値計算を実施した。数値計算では配管金属まで計算領域に含めて流体構造熱連成計算を行い、管内面温度変動の再現精度を検討した。

流体領域では、時間平均速度分布と時間平均温度分布を精度よく再現できた。速度変動強度に関しては、壁面から離れた箇所では過小評価の傾向はあったが、壁面近傍ではピーク値を含め実験データの傾向を再現できた。温度変動強度は分布の傾向は再現したが、全体的に過大評価となった。

管内面においては、時間平均温度と温度変動強度をある程度の精度で再現することができた。ただし、合流部下流 $z = 0.5D_m$ で温度変動強度のピーク値を20%過大評価し、また、温度変動強度が大きくなる領域は実験データに比べ狭くなった。定量的な再現性に課題は残るが、管内面の温度の定性的な傾向は数値計算により再現できることが確認できた。これにより、熱疲労発生過程の一部である流体温度変動から管内面の温度変動までの一連の流れを、数値計算を用いて評価できる見通しを得ることができた。

6. 参考文献

- (1) Utanohara, Y., Miyoshi, K. and Nakamura, A., Conjugate numerical simulation of wall temperature fluctuation at a T-junction pipe, Mechanical Engineering Journal, Vol.5, No.3 (2018), Paper No.18-00044.
- (2) Chapuliot, S., Gourdin, C., Payen, T., Magnaud, J.P. and Monavon, A., Hydrothermal-mechanical analysis of thermal fatigue in a mixing tee, Nuclear Engineering and Design, Vol. 235, Issue 5 (2005), pp. 575-596.
- (3) McDevitt, M., Hoehn, M., Childress, T. and McGill, R., Analysis and impact of recent U.S. thermal fatigue operating experience, Fourth International Conference on Fatigue

- of Nuclear Reactor Components (2015) , No. 27.
- (4) 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).
 - (5) Braillard, O., Quemere, P. and Lorch, V., Thermal fatigue in mixing tees impacted by turbulent flows at large gap of temperature: the FATHER experiment and the numerical simulation, Proceedings of the 15th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 15) (2007) , Paper No. ICONE15-10805.
 - (6) Kuschewski, M., Kulenovic, R., Laurien, E., Experimental setup for the investigation of fluid-structure interactions in a T-junction, Nuclear Engineering and Design, Vol. 264 (2013) , pp. 223-230.
 - (7) Zhou, M., Kulenovic, R., Laurien, E., Kammerer, M. C., Schuler, X., Thermocouple measurements to investigate the thermal fatigue of a cyclic thermal mixing process near a dissimilar weld seam, Nuclear Engineering and Design, Vol. 320 (2017) , pp. 77-87.
 - (8) 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.
 - (9) Tanaka, M., Ohshima, H. and Monji, H., Thermal mixing in T-junction piping system concerned with high-cycle thermal fatigue in structure, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 47, No. 9 (2010) , pp.790-801.
 - (10) 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) , p. 15-00134.
 - (11) 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.
 - (12) 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.
 - (13) Nakamura, A., Oumaya, T. and Takenaka, N., Numerical investigation of thermal striping at a mixing tee using detached eddy simulation, Proceeding of the 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13) (2009) , Paper No. N13P1074.
 - (14) Nakamura, A., Ikeda, H., Qian, S., Tanaka, M. and Kasahara, N., Benchmark simulation of temperature fluctuation using CFD for the evaluation of the thermal load in a T-junction pipe, Proceeding of the Seventh Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS-7) (2010) , Paper No. N7P-0011.
 - (15) Nakamura, A., Utanohara, Y., Miyoshi, K. and Kasahara, N., Simulation of thermal striping at T-junction pipe using LES with Smagorinsky constants and temperature diffusion schemes, Proceeding of the Experimental Validation and Application of CFD and CMFD Codes in Nuclear Reactor Technology (CFD4NRS-4) (2012) , Paper No.PS2-P2#3.
 - (16) 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, No. 4 (2015) , pp.118-130.
 - (17) Kamaya, M., Utanohara, Y. and Nakamura, A., Thermal fatigue analysis at a mixing tee by a fluid-structural simulation, Proceeding of the ASME 2011 Pressure Vessels &

- Piping Division Conference (ASME-PVP) (2011) , Paper No. PVP2011-57585.
- (18) 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.
- (19) Kimura, N., Ono, A., Miyakoshi, H. and Kamide, H., Experimental study on high cycle thermal fatigue in T-junction - effect of local flow velocity on transfer of temperature fluctuation from fluid to structure -, Proceedings of the 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13) (2009) , Paper No. N13P1169.
- (20) 三好弘二, 中村晶, 歌野原陽一, T字配管部の熱疲労評価手法高度化に向けた管壁温度特性の解明, INSS JOURNAL (2013) , Vol. 20, pp. 45-55.
- (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 (2014a) , Vol. 1, No. 2, pp. tep0006.
- (22) Miyoshi, K., Nakamura, A. and Utanohara, Y., An investigation of wall temperature characteristics to evaluate thermal fatigue at a T-junction pipe, Mechanical Engineering Journal (2014b) , Vol. 1, No. 5, pp. tep0050.
- (23) 三好弘二, 中村晶, 歌野原陽一, T字配管部の流体温度ゆらぎによる熱応力特性の解明, INSS JOURNAL (2014) , Vol. 21, pp. 86-98.
- (24) 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 (2016) , Vol. 298, pp. 109-120.
- (25) ANSYS Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide, Release 15.0 (2013) , Chap. 4.14.2, Standard Wall Functions, ANSYS, Inc.
- (26) 歌野原陽一, 中村晶, 三好弘二, 笠原直人,

T字合流配管の温度ゆらぎ現象の数値解析－その3：上流境界条件が温度変動におよぼす影響－, INSS JOURNAL (2015) , Vol. 22, pp. 71-83.