

T字合流配管の管壁温度特性の検討（上流エルボの影響）

Study on Characteristics of Wall Temperature Fluctuation at a Mixing Tee
(Effect of Upstream Elbow)

三好 弘二 (Koji Miyoshi) *1 中村 晶 (Akira Nakamura) *1

要約 T字配管部では高低温水が合流する場合、熱疲労が発生する可能性がある。本研究では、合流部の上流位置に存在する90°エルボが、管壁温度変動に与える影響を熱流動実験にて調べた。実験では、熱電対を埋め込んだステンレス製試験体を用い、管内面の温度分布を測定した。その結果、温度変動強度および最大温度変動幅は、上流エルボの存在により小さくなることがわかった。また、上流エルボが温度変動の分布形状や周波数特性に与える影響は少なかった。上流エルボが存在する場合でも、分岐管からの高温噴流により主管内面に形成されたホットスポットが主管の周方向に移動することで大きな温度変動が発生していた。

キーワード 熱疲労, T字配管, 温度変動, 上流エルボ

Abstract Thermal fatigue cracking may initiate at a tee pipe where high and low temperature fluids flow in from different directions and mix. The wall temperature characteristics at the tee pipe with upstream 90° elbow were investigated by experiments. The temperature distribution at the pipe inner surface was measured with thermocouples using a test section made of stainless steel. The upstream elbow decreased the temperature fluctuation intensity and the temperature fluctuation range at the inner surface. It also did not affect the distribution profile of the temperature fluctuation and the dominant frequencies. The large temperature fluctuation was caused by the movement of a hot spot in the circumferential direction.

Keywords thermal fatigue, mixing tee, wall temperature fluctuation, upstream elbow

1. 序論

プラントの配管合流部では、温度の異なる流体が混合することで発生する温度変動により、配管材料内部に熱疲労が発生する可能性がある。1998年に生じたフランスのシボー発電所の余熱除去冷却器出口の高低温水合流配管からの漏洩事象は、この流体温度ゆらぎに起因する熱疲労が損傷の要因の一つであった⁽¹⁾。損傷箇所を示した模式図を図1に示す。図に示すとおり余熱除去冷却器で冷却された水と冷却器をバイパスした高温水がT字配管で合流した後、その下流域で損傷が確認された。

この事象等を契機に国内外では、流体温度ゆらぎによる熱疲労に関して数多くの流動実験や数値シミュレーションによる研究が行われている。Chapuliotら⁽¹⁾は、シボー発電所における損傷箇所

を対象に、数値シミュレーションを行い、温度変動の再現を試みている。その中で、高低温水合流箇所の上流に存在するエルボの配置により、合流部の温度変動が増加する可能性があることを指摘している。国内でもT字部の高低温水合流現象に与える上流外乱の影響はいくつかの研究が報告されている。河村ら⁽²⁾は同径T字合流配管を対象に、合流下流域における壁近傍の流体温度変動に与える分岐管側の上流に存在するエルボの影響を実験にて調べており、その影響はほとんどないことを示している。ここで、合流後の流体が流れる管側を主管側、もう一方を分岐管側とした。また、Ogawaら⁽³⁾は異径のT字合流配管を対象に、合流下流域における壁近傍の流体温度変動を実験にて調べており、主管の上流側に存在するエルボによりその温度変動は大きくなることを示している。このように、口径比等の配管

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

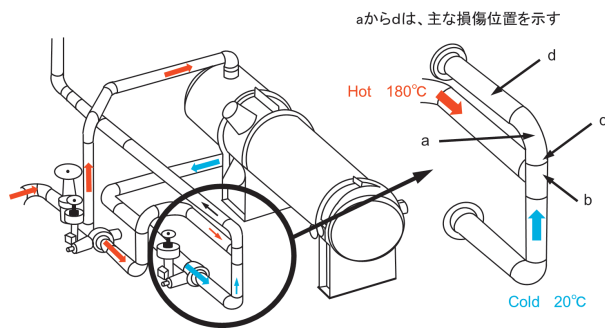


図1 余熱除去系統の熱疲労による損傷事例の模式図

形状により、T字配管の壁近傍の流体温度変動が大きくなる場合があることから、その影響を調べることは、熱疲労評価の観点から重要である。

流体温度ゆらぎによる熱疲労は、壁近傍の流体温度変動が、管内面に熱伝達し、壁の温度変動を引き起こし、熱応力変動が生じることで発生することが知られている。一般に、配管内面の熱伝達率は、流速等の流れ場の状態に依存することから、高低温水合流部のような複雑な流れ場においては、壁近傍の流体温度変動特性と、管内面に生じる温度変動特性が一致するとは限らない。そのため、熱疲労の発生を評価するには、壁近傍の流体温度変動だけでなく、管内面の温度変動に与える上流エルボの影響を調べるのが適切である。著者らは、これまでT字管の高低温水合流部を対象にT-Cubic実験装置を用いた流動実験を行うことで、管壁温度変動特性を調べてきた⁽⁴⁾。実験では、管内面に多数の熱電対を埋め込んだ試験体を用いることで、管内表面の温度分布を捉えてきた。

本研究では、これまで使用してきた実験装置の試験部上流に90°エルボを取り付けることで、上流エルボが管壁温度変動特性に与える影響を調べた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験ループ

図2に実験ループ(T-Cubic)の概要図を示す。実験ループは、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、タンク容量は各々7 m³、8 m³、20 m³、ポンプの定格容量はともに20 m³/hである。試験流体は水を使用する。高温水タンク内には電熱ヒータが設けられており約90℃までの高温水が生成可能である。低温水タンクには15℃まで冷却可能な熱交換

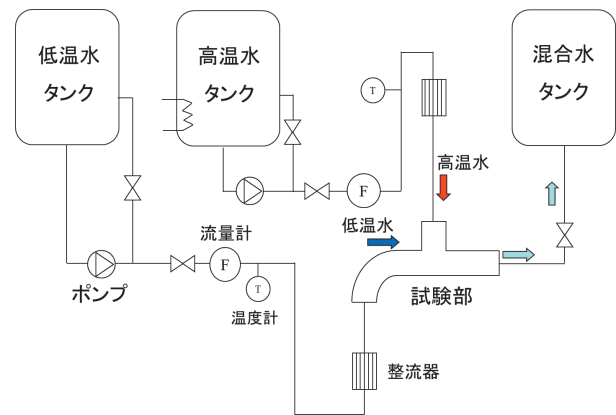


図2 実験ループ(T-Cubic)

器で温度調節した低温水が生成可能である。鉛直上方から流れてくる高温水と水平横方向から流れてくる低温水が試験部で合流した後、混合水タンクで受け入れるワンズ・スルー方式となっている。

T字合流部の水平配管側(主管側)の上流位置には90°エルボを取り付けた。また、そのエルボ上流位置には、整流器を設置した。鉛直管側(分岐管側)の上流位置にも整流器を設置した。整流器は多孔板と細管の束を組み合わせて製作した。各々の整流装置の効果については、レーザードップラー流速計を用いた流速分布測定にて確認した⁽⁴⁾。また、入口流体温度は整流器上流側に挿入した、非接地K型JISクラス1シース熱電対を用い測定した。

2.2 試験部

図3に試験部の概要を示す。試験部はステンレス

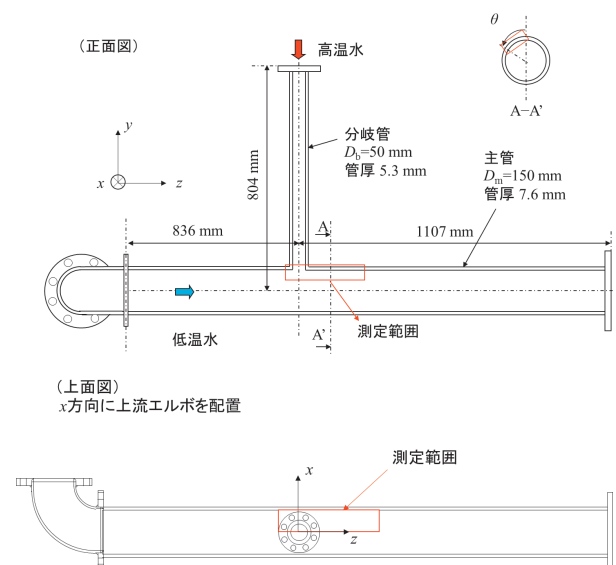


図3 試験部

製であり、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 $D_m = 150 \text{ mm}$, $D_b = 50 \text{ mm}$ である。主管側の合流部から上流836 mm(= $5.6D_m$)の位置に90°エルボを取り付けた。エルボの曲率半径はJIS 150Aのショートエルボと同じ152.4 mmとした。また、エルボの内径は主管と同じ150 mmとし、エルボ部で内径が一定となるような特殊加工をした。エルボの向きはT字管が形成する面に垂直な方向(x方向)とした。ここで、図に示すとおりz軸は主管の中心軸、y軸は分岐管の中心軸、x軸はそれらに垂直な軸である。原点は、分岐管軸と主管軸の交点とした。また、管外面には断熱材を取り付けた。

管壁温度の測定には、シース直径0.5 mmの非接地K型熱電対JISクラス1を使用した。熱電対は図4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、高さ0.7 mmの矩形溝に沿わせて後、金属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。大気中のロウ付けではロウ材が矩形溝コーナー部に十分流れ込まず、空隙が発生することが確認されたことから、高温真空炉でロウ付けを行い、空隙を排除する施工法を採用した⁽⁵⁾。図5に管壁温度測

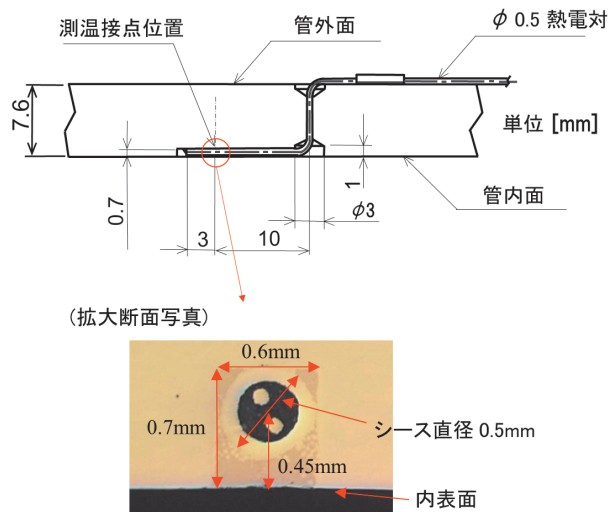


図4 熱電対取り付け概略図

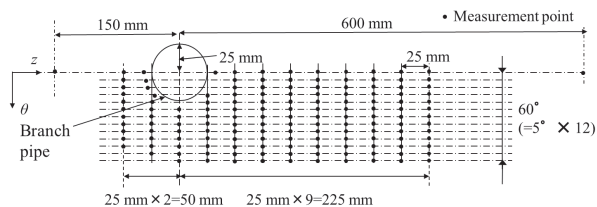


図5 管壁温度測定箇所

定箇所を示す。測定箇所は、図中に示す黒丸箇所であり、 $z = -50 \text{ mm} \sim 225 \text{ mm}$ の範囲に25 mm間隔、 $\theta = 0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲に5°間隔、 $z = -150 \text{ mm}, 600 \text{ mm}$ では $\theta = 0^\circ$ の位置である。測定総箇所数は148箇所である。ここで θ は鉛直上向きを0°とする主管上流側からみて反時計周りの周方向角度である。

2.3 温度データの処理方法

熱電対からの測定データは、各チャンネル毎にA/D変換を備えた多チャンネルデータロガー（共和電業製、USB-500A, UCAM-500B）で記録した。チャンネル間の最大時間遅れは12.4 μsec であり、サンプリング周波数は50 Hzである。

測定した温度は、予め作成した校正式を用い、校正した。校正式は、白金測温抵抗体タイプの基準温度計を挿入し、静水状態で作成した。校正後の誤差は、流体温度で $\pm 0.12 \text{ }^\circ\text{C}$ で、管壁温度で $\pm 0.42 \text{ }^\circ\text{C}$ である。

温度データの測定は、入口温度および流量が安定した後に開始し、採取したデータから安定した範囲を抽出し統計処理等の評価を行った。

図4の熱電対取り付け断面写真に示したとおり熱電対の測定点は管内表面より0.45 mm離れており厳密には管内表面温度データではない。よって、以下の手法で測定データから管内表面温度を算出することにした。

- ① 熱電対で温度データを測定。
- ② ①で得られたデータをFFT（高速フーリエ変換）解析し周波数領域に変換。
- ③ あらかじめ用意した配管内表面温度と熱電対測温点位置の温度に関する伝達関数を熱伝導解析で作成。
- ④ ③で作成した伝達関数の逆関数を用い②の結果に対し振幅・位相を処理。
- ⑤ ④で処理した温度変動値を逆FFT解析し時間領域に変換。

別途FEMによる熱伝導解析で作成した伝達関数⁽⁵⁾を以下に示す。伝達関数は、正弦波状の温度変動を付与することで求めた。

$$\alpha = \exp(-0.236f^{0.628}) \quad (1)$$

$$\theta = 0.355f^{0.602} \quad (2)$$

ここで、 a は振幅比 (=測定点の温度/管内表面

の温度), θ は測定点の温度と管内表面の温度との間に発生する位相遅れ, f は周波数である. その導出過程は既報⁽⁵⁾を参照されたい. 以降記載する実験結果の管内表面温度は, 上記手法で計測データを処理した結果である.

3. 実験条件

実験条件を表1, 2に示す. 表1は前報⁽⁴⁾で報告済みである上流にエルボなしの場合の実験条件を, 表2は, 上流 ($z = -5.6 D_m$ 位置)に90°エルボを設置した場合の実験条件を示す.

Kamideらは⁽⁶⁾次式で定義される運動量比 M_R により合流下流域における流動様式を分類しており, $M_R > 1.35$ の範囲では, 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状態になることを示している.

$$M_R = \frac{M_m}{M_b} \tag{3}$$

$$M_m = D_m D_b \rho_m V_m^2 \tag{4}$$

$$M_b = \frac{\pi}{4} D_b^2 \rho_b V_b^2 \tag{5}$$

ρ_m は主管側流体密度, ρ_b は分岐管側流体密度, V_m は主管側管断面平均流速, V_b は分岐管側管断面平均流速である. また, その状態では他の流動様式に比べ管壁温度変動が大きいことを示している. 本研究では, 熱疲労評価の観点から厳しいと考えられる壁面噴流状態を試験条件に選定した. 加えて, これまでINSSで行ってきたエルボなしの場合の実験

表1 実験条件 (上流エルボなし)

case	主流流速 [m/s]	分岐管流速 [m/s]	主管側入口流体温度 [°C]	分岐管側入口流体温度 [°C]	入口流体温度差 [K]	M_R (運動量比)
0-1	0.99	0.66	25.7	59.8	34.1	8.7
0-2	0.99	0.67	26.9	59.3	32.4	8.5
0-3	0.98	0.67	26.7	58.6	31.9	8.3
0-4	1.02	0.66	25.5	60.6	35.1	9.3
0-5	1.01	0.65	23.4	57.9	34.5	9.3
0-6	1.00	0.66	23.2	59.7	36.5	8.9
0-7	1.05	0.65	23.3	58.8	35.5	10.1
0-8	1.07	0.66	18.3	58.6	40.3	10.2

表2 実験条件 (上流エルボあり)

case	主流流速 [m/s]	分岐管流速 [m/s]	主管側入口流体温度 [°C]	分岐管側入口流体温度 [°C]	入口流体温度差 [K]	M_R (運動量比)
1-1	1.01	0.67	18.3	54.3	36.0	8.8
1-2	1.01	0.66	18.4	54.2	35.8	9.1
1-3	1.00	0.67	18.5	54.4	35.9	8.6
1-4	1.00	0.66	18.3	53.5	35.1	8.9
1-5	1.00	0.67	18.1	53.5	35.3	8.6
1-6	1.00	0.67	18.0	52.0	34.0	8.6
1-7	1.01	0.68	17.4	52.3	34.9	8.5
1-8	1.01	0.67	17.1	53.2	36.1	8.8
1-9	1.00	0.67	15.2	50.8	35.6	8.6
1-10	1.01	0.67	15.5	51.2	35.7	8.8

条件である入口流体温度差約35 °C, $M_R = 8.7$ に近い値で実施することにした. また, 測定結果のばらつきも把握するため, 同様の条件で計10回実験を行った.

4. 実験結果および考察

4.1 時間平均温度分布

図6にcase1-1の主管内表面の時間平均温度分布を示す. 時間平均温度は, 次式に示すとおり160秒間の時系列データの時間平均値 T_{ave} を無次元化した値である.

$$T^*_{ave} = \frac{T_{ave} - T_m}{T_b - T_m} \tag{6}$$

ここで, T_m は, 主管側入口流体温度, T_b は分岐管側入口流体温度である. 分布図は, 測温点の値か

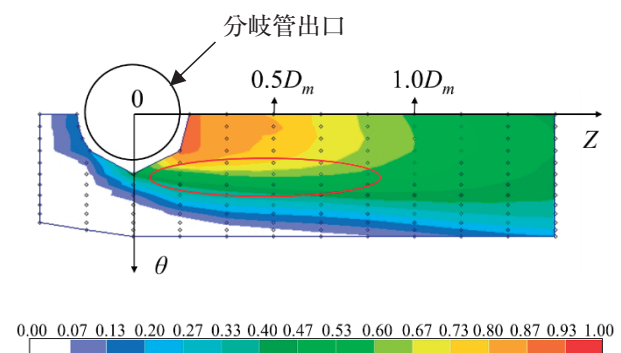


図6 管内面の時間平均温度分布 (case1-1)

ら2.3節に示した方法から管内表面温度を求め、その値を一次補間し作成した。温度分布より分岐管出口部（原点を中心とした円）からの高温の噴流が壁に沿い下流域に流れていることが確認できる。その値は $z = 1D_m (= 150 \text{ mm})$ でおよそ $T^*_{ave} = 0.6$ になっていることがわかる。また、図中の赤丸範囲で温度勾配が大きくなっていることがわかる。

図7に $z = 0.5D_m (= 75 \text{ mm})$ における周方向の時間平均温度分布を示す。図に示すとおり、平均温度は、 θ が増加するにともない減少しており、また、 $\theta = 30^\circ$ 付近で温度勾配が最大となっていることがわかる。

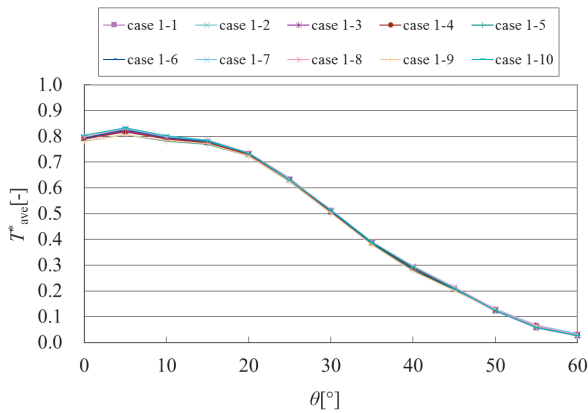


図7 管内面の周方向時間平均温度分布 ($z = 0.5D_m$, case 1)

4.2 温度変動強度分布

図8にcase1-1の主管内表面の温度変動強度分布を示す。温度変動強度は、次式で定義した無次元化した値である。

$$T^*_{std} = \frac{T_{std}}{T_b - T_m} \quad (7)$$

$$T_{std} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - T_{ave})^2}{N}} \quad (8)$$

ここで、 T_{ave} は160秒間の時間平均温度である。サンプリング周期は0.02秒としたことから $N = 8000$ である。いずれのケースも変動強度は分岐管出口部から $z = 1.0D_m$ までの局所的な範囲で大きくなっていることがわかる。

図9に $z = 0.5D_m$ における周方向の温度変動強度分布を示す。 $\theta = 25^\circ$ から 30° 付近にピークがある

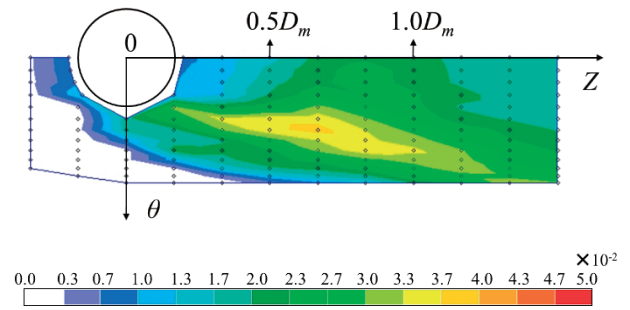


図8 管内面の温度変動強度分布 (case 1-1)

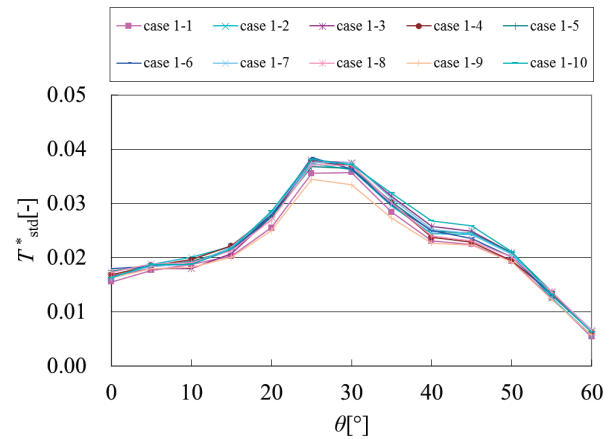


図9 管内面の周方向温度変動強度分布 ($z = 0.5D_m$, case 1)

ことがわかる。この位置は前節で示した時間平均温度分布で温度勾配が大きい位置と一致しており、温度勾配が大きな箇所が変動することで、変動強度が大きくなっていると考えられる。

4.3 最大温度変動幅の分布

図10にcase1-1の主管内表面の最大温度変動幅の分布を示す。最大温度変動幅は、次式で定義した無次元化した値である。

$$T^*_{max-min} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_b - T_m} \quad (9)$$

ここで、 T_{max} 、 T_{min} は各々160秒間の温度の最大値および最小値である。熱疲労評価の観点から応力変動幅の最大値が重要であることから、温度変動強度に加え、最大温度変動幅の評価も行った。図より、いずれの場合も最大温度変動幅は、分岐管出口部から $z = 1.0D_m$ までの範囲で大きくなっていることがわかる。また、その分布形状は前節で示した変動強度の分布形状と類似していることがわかる。

図11に $z = 0.5D_m$ における周方向の最大温度変動

幅の分布を示す。θ = 25° から30° 付近にピークがあることがわかる。この特徴は、前節で示した温度変動強度と同様であった。

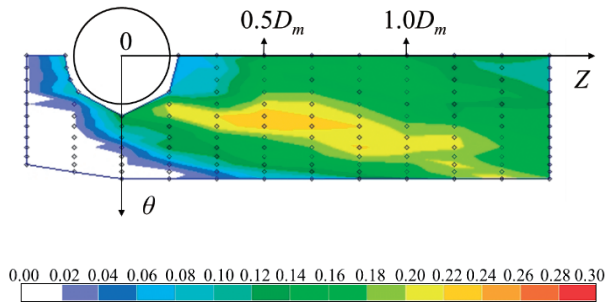


図10 管内面の最大温度変動幅分布 (case 1-1)

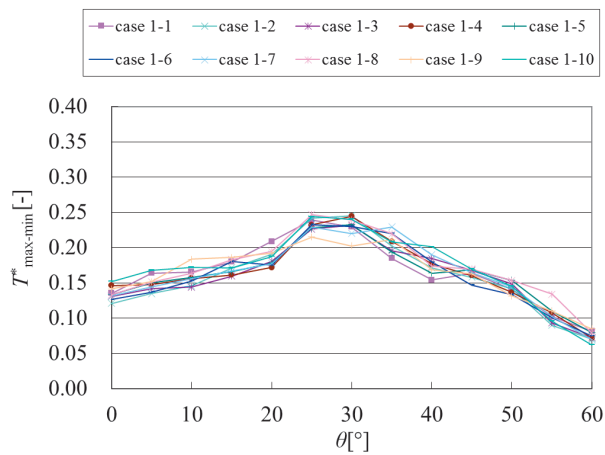


図11 管内面の周方向最大温度変動幅分布 (z = 0.5Dm, case 1)

4.4 温度変動要因の考察

case1-1の最大温度変動幅が測定された箇所における温度変化を図12に示す。温度は、次式で無次元化した値を示す。

$$T^* = \frac{T - T_m}{T_b - T_m} \quad (11)$$

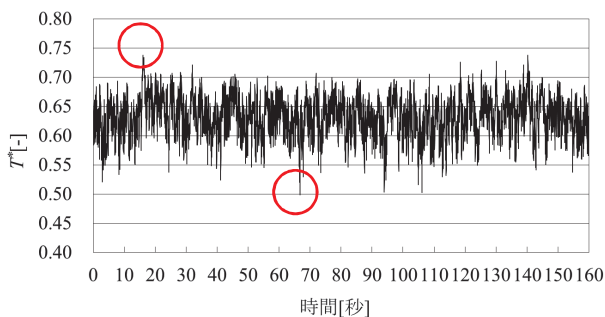


図12 最大温度変動幅測定箇所の温度変化 (case1-1)

温度は、10秒程度の周期で大きく変動している波形に短周期の変動が重畳しているように見える。次に、各波形の周波数の特徴を把握するためパワースペクトル密度 (PSD) を算出した。その結果を図13に示す。PSDは、全収録データから40.96秒 (2048個) のデータを1秒 (50点分) ずつずらして120回取り出し、各40.96秒分のデータにFFTを施した後に平均化処理を行った。PSDでは4Hz付近と0.3Hz付近にピークが観察された。約4Hzのピークは、ストローハル数換算で0.2に相当する周波数であることから噴流背後に形成された渦列による変動と考えられる。ストローハル数は以下の式から算出した。

$$St = \frac{f \cdot D_b}{V_m} \quad (10)$$

ここで、fは周波数である。

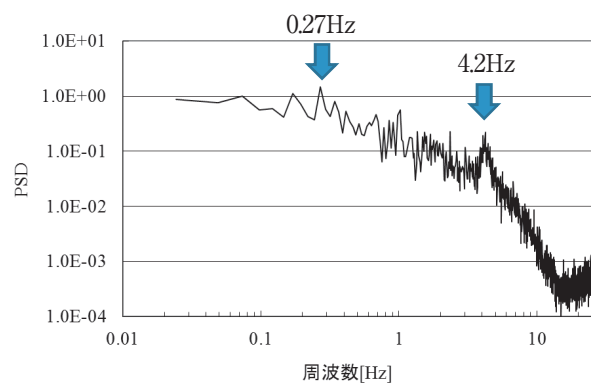


図13 最大温度変動幅測定箇所の温度のパワースペクトル密度分布 (case1)

一方、0.3Hz付近の長周期の温度変動の要因を調べるため、瞬時の主管内面の温度分布を確認した。図14にcase1-1の瞬時の温度分布の時間変化を示す。時間は図12の赤丸で示した最大温度変動幅が測定された箇所における温度が最大、最小となった時間である。図中の×印は、最大温度変動幅が測定された箇所を示す。図が示すとおり最大温度変動幅が測定された箇所 (図中の×印) では、主管内面に形成されたホットスポットが周方向に移動することで、大きな温度変動が発生していることがわかる。

4.5 上流エルボの効果

上流にエルボがないcase0-1の主管内面の時間平均温度分布、温度変動強度分布、最大温度変動幅分布を図15に示す。分布形状は、いずれの分布も4.1

から4.3節で示した上流エルボありの場合と類似していた。

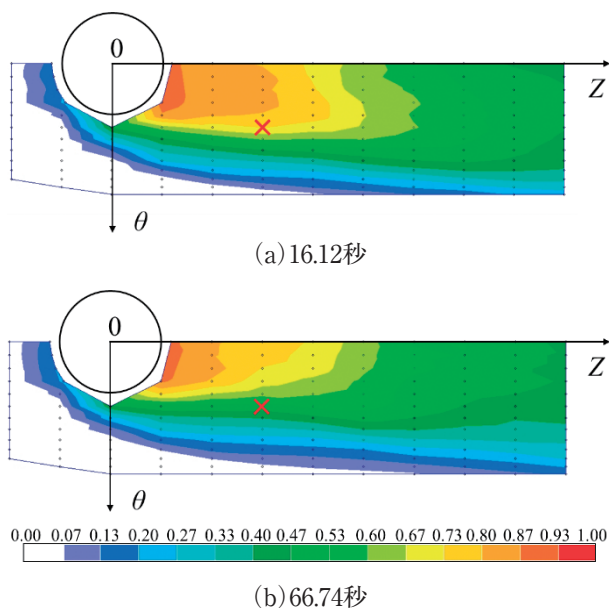


図14 主管内面温度分布の時間変化 (case1-1)

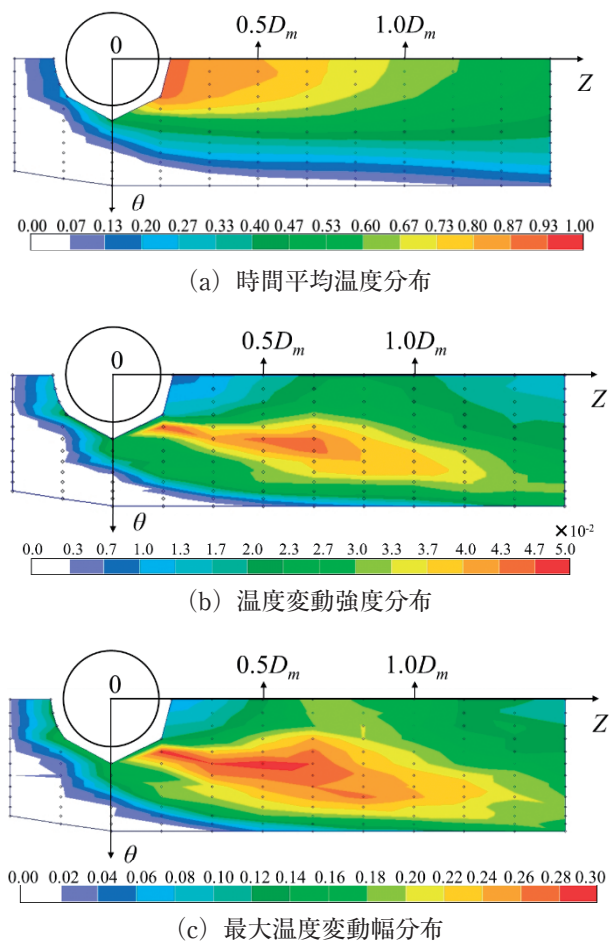
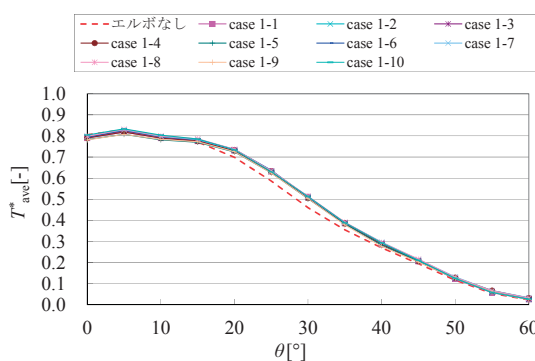


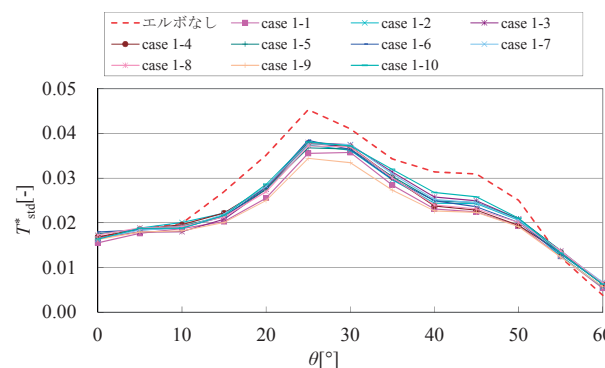
図15 主管内面温度分布 (case0-1)

図16に $z = 0.5D_m$ における周方向の温度分布を示す。図中の赤点線はエルボなし (case0-1) の場合を示す。上流エルボ有りの場合と比較するため、図中にはcase1の結果も示した。温度変動強度および最大温度変動幅のピーク位置は、エルボの有無に関係なく同じであり、分布形状も類似していることがわかる。一方、そのピーク値は、エルボなしの場合が大きいことがわかった。

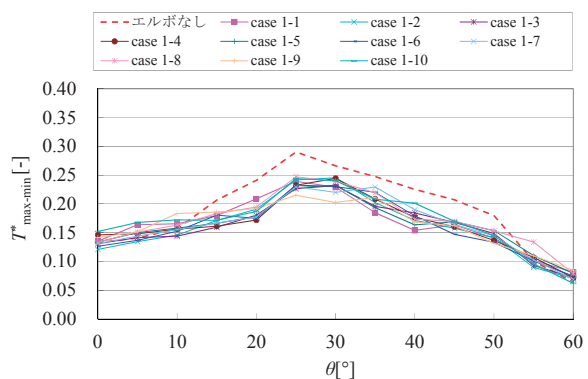
図17に各条件における温度変動強度および最大温度変動幅の最大値を示す。最大値とは、148の測定箇所のうち最大の値である。図中の黒点線は、エ



(a) 時間平均温度



(b) 温度変動強度



(c) 最大温度変動幅

図16 管内面温度の周方向分布 ($z = 0.5D_m$)

エルボ有無の各々の場合の平均値を示す。エルボがない場合と比較して温度変動強度および最大温度変動幅の最大値は上流に設置したエルボの存在により小さくなるのがわかる。温度変動強度の平均値はエルボの存在により21%、最大温度変動幅の平均値は18%小さくなった。

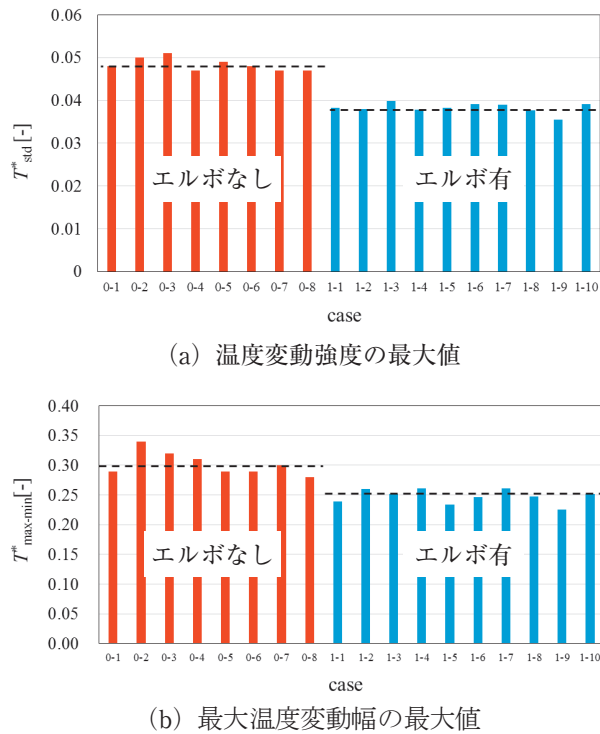


図17 主管内面温度の実験条件ごとの比較結果

図18にエルボなしの場合 (case 0-1) の最大温度変動幅が測定された箇所における温度のPSDを示す。PSDの算出方法は前節と同じである。4Hz付近と0.1Hz付近にピークが観察されており、その特徴は、図13に示したエルボ有りの場合と同じである。エルボの存在は温度変動の周波数特性にあまり影響を与えないといえる。

上流エルボが存在する場合の温度変動は、前節で示したとおり、高温の噴流により主管内面に形成されたホットスポットが周方向に移動することで発生している。この結果は、既報⁽⁴⁾で示した上流エルボなしの場合と同様であった。上流エルボが存在する場合は、このホットスポットの移動量が減少することにより、温度変動が抑制されたと考えられる。

前田ら⁽⁷⁾は、本実験条件と同じ入口運動量比 M_R で上流エルボなしの場合に対し、トレーサ法により、合流下流域において可視化実験を行っている。その

結果、分岐管からの噴流が、10秒程度の長周期で大きく揺動していることを示しており、その周期は、ホットスポットが大きく揺れる周期と一致していることを示している。上流エルボの存在により、分岐管からの噴流の揺動が抑制されて、管内面の温度変動が減少したと推定されるが、その要因については今後検討を要す。

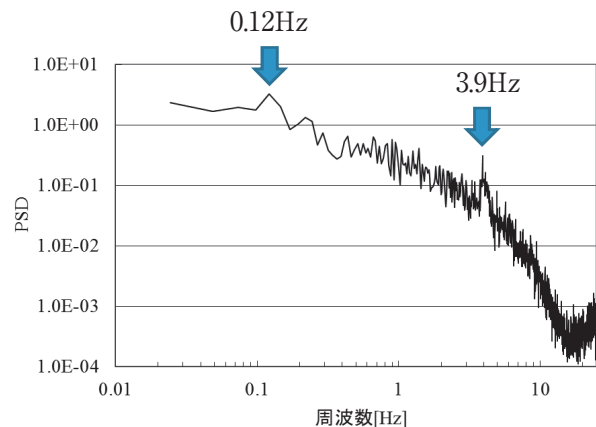


図18 最大温度変動幅測定箇所の温度のパワースペクトル密度分布(case0-1)

5. 結論

上流部 (主管内径の5.7倍上流の位置) に90°エルボを設置したT字管にて高低温水合流実験を行い、上流外乱が管壁温度特性に与える影響を調べた。試験条件は、前報⁽⁴⁾と同じ、分岐管/主管の口径比0.33 (= 50/150)、流速比は、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状態で実施した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 主管内面の温度変動強度および最大温度変動幅の最大値は、上流エルボが存在することで小さくなる。その低下率は、変動強度で21%、最大温度変動幅で18%である。
- (2) 温度変動強度および最大温度変動幅の分布形状に与える上流エルボの影響は少ない。
- (3) 上流エルボが温度変動の周波数特性に与える影響は少なく、ストローハル数0.2に相当する周波数と0.3Hz付近にピークが存在する。
- (4) 上流エルボが存在する場合でも、分岐管からの高温噴流により主管内面に形成されたホットスポットが主管の周方向に移動することで大きな温度変動が発生している。

本実験の試験体では、管壁温度測定範囲が片側 ($\theta = 0^\circ$ から 60°) であることから、もう一方の側 ($\theta = 0^\circ$ から -60°) の範囲に形成され则认为られる温度変動については、評価できなかった。上流エルボの設置向きを反転させた実験を行い、今後、報告する予定である。

pp.58-67.

- (7) 前田章吾, 久保田浩貴, 三好弘二, 杉本勝美, 竹中信幸, プラント配管のT字合流部の流動現象に関する研究, 第21回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 日本機械学会 (2016), D124

文献

- (1) 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*, 235 (2005) , pp.575-596.
- (2) 河村勉, 椎名孝次, 大塚雅哉, 水野正, 黒崎通明, 小倉健志, 谷本浩一, 福田俊彦, 南安彦, 守屋祥一, 斑目春樹, 同径T字合流配管におけるサーマルストライピング試験 (第1報, 流れの可視化と流体温度揺らぎ特性), 日本機械学会論文集 (B編), Vol.69, No.682 (2003) , pp.1445-1452.
- (3) Ogawa, H., Igarashi, M., Kimura, N., and Kamide, H., Experimental study on fluid mixing phenomena in T-pipe junction with upstream elbow, *The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal - Hydraulics (NURETH - 11)* , No.448 (2005) , pp.1-14.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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*, 239 (2009) ,