

# T字配管合流部に生じる温度変動の数値解析による評価 —LES Dynamicによる格子影響評価—

Numerical Simulation of Temperature Fluctuation Downstream from a T-Junction  
-Evaluation of Computational Grid Influence Using LES Dynamic Model-

INSS	歌野原 陽一	Yoichi UTANOHARA	
INSS	中村 晶	Akira NAKAMURA	
INSS	三好 弘二	Koji MIYOSHI	
東京大学	笠原 直人	Naoto KASAHARA	Member

## Abstract

Thermal fatigue crack may initiate at mixing tee where high and low temperature fluids flow in and mix. In order to prevent piping failure caused by thermal fatigue, an evaluation procedure of fluid temperature fluctuation at mixing tee using numerical simulation has been developed. This paper compared results of three computational grids of different resolution and discussed the effect of the grids resolution on predictions. The same simulation conditions were set same as WATLON experiments performed at Japan Atomic Energy Agency: wall jet condition that the jet from the branch pipe flowed along the main pipe wall. Time-averaged temperature distributions with different grids almost agreed well with the experimental results. Each grid overestimated fluctuation temperature than the experimental result, that is, all of the grids can be used to evaluate conservative result. Hence, the coarsest grid of them seems to be enough for practical use. Predicted results seem to be affected by not only overall but local grid resolution and it is preferable to optimize the grid resolution according to the target flow fields.

**Keywords:** Thermal fatigue, Mixing tee, Temperature fluctuation, Numerical simulation, Computational grid

## 1. はじめに

高温流体と低温流体が混合する T 字配管においては、サーマルストライピングと呼ばれる温度変動が生じることが知られている。合流前の温度差は運転条件から決まるために緩和できないことが多く、温度変動が配管に疲労を生じさせる場合があるため、温度差による熱疲労を予測して設計・運転・検査を行うことが求められる。

日本機械学会は T 字配管の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」[1] (以下、指針) を策定している。指針の評価フローにおいては、設計条件を用いたデータに基づいて疲れ累積係数を評価して不合格となった場合に、詳細評価を行うパスが残されている。この詳細評価では具体的な流動条件・配管形状に対して、数値解析を活用してより精緻な熱荷重を算出することが考えられる。このような熱疲労評価技術の開発は国内外の研究機関で進められており、3次元の熱流動

数値解析を用いた技術開発が継続的に行われている[2]-[5]。しかし、温度変動強度の再現などに一定の成果が得られているが、統一的な手法を見いだすまでには至っていない。

原子力安全・保安院による高経年化技術評価高度化事業では、熱疲労を対象とした熱流動数値解析のベンチマーク[6]が実施され、実験データを再現する数値解析手法について検討がなされた。ベンチマーク問題としては、日本原子力研究開発機構 (Japan Atomic Energy Agency, JAEA) が実施した T 字配管における長周期温度変動水試験 WATLON 試験[7]を取り上げ、LES および DES 等の乱流モデルの違いや、計算コードの依存性を比較した。その結果、Large Eddy Simulation (LES) の Dynamic Smagorinsky モデルが流体温度実験値を最も近く再現していた。

上述のベンチマークでは、主流部分での温度変動が再現できるよう計算格子が作成されている。しかし、計算結果の計算格子依存性の検討は行っていない。よって、本研究では T 字配管合流部を対象に、ベンチマークで使用した計算格子に加え、さらに粗くした格子、および詳細化した格子を用い計算結果の差違を検討した。

連絡先: 歌野原陽一、〒919-1205 福井県三方郡美浜町  
佐田 64 号、(株) 原子力安全システム研究所、  
E-mail: utanohara@inss.co.jp

## 2. 計算条件

### 2.1 計算条件

上述のベンチマーク[6]では、合流部後流に大きな温度変動が観察された壁面噴流条件（主流流速 1.46m/s）が選定されており、本研究もこの条件を対象とする。計算条件を表 1 に、計算領域と境界条件を図 1, 図 2 に示す。上流には管直径の 2 倍、下流には 5 倍の配管長さである。管内の流路だけを模擬し、管壁内面を断熱境界とした。乱流モデルはベンチマークにおいて最も実験データを再現していた、LES Dynamic とする。

Table 1 Simulation conditions

Software		FLUENT 12.1.2	
Fluid		Water, Fluid properties at 40.5 °C	
Turbulence model		LES Dynamic (Smagorinsky-Lilly)	
Boundary condition	Inlet	Main	1.46 m/s (1/9 power law), 48°C Fluctuation (Vortex method)
		Branch	1.0 m/s (1/8 power law), 33°C
	Outlet		Outflow
	Wall		Wall function, Adiabatic
Solution method	Coupling		SIMPLE
	Convection term	Momentum	Bounded central differencing
		Energy	Bounded central differencing
Time	Method, Time step		2nd order backward Euler, 0.002 s
	Initial condition	Coarse	Result of DES
		Fine, Bench	Result of coarse grid
	Sampling period	Coarse	5~10 s
		Fine, Bench	3~8 s

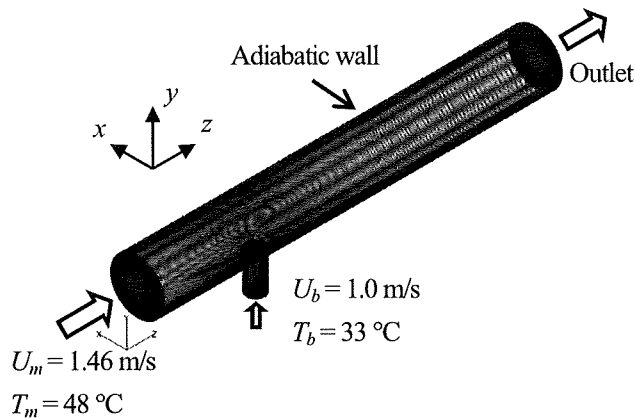


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

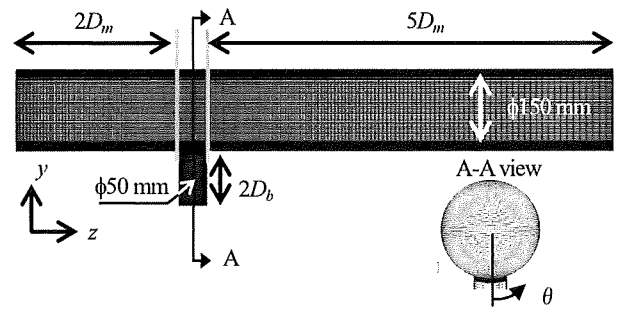


Fig. 2 Size of computational domain

### 2.2 計算格子

計算の格子依存性を調べるため、図 3、図 4 に示す 3 種類の格子（ベンチマークメッシュ、粗メッシュ、詳細メッシュ）を使用する。ベンチマークメッシュは NISA 事業のベンチマーク[6]で使用された計算格子である。粗メッシュおよび詳細メッシュはベンチマークメッシュよりも格子解像度が粗い、もしくは細かい計算格子である。ただ、ベンチマークメッシュと残りの 2 メッシュは作成方法が異なっており、解像度の高低だけでの議論はできない。粗メッシュおよび詳細メッシュは、図 4 の点線内のように、配管合流部近傍での解像度がベンチマークメッシュより詳細になっている。詳細メッシュは粗メッシュに比べ、 $x, y, z$  各方向で解像度を 1.3 倍程度に上げ、格子数を 2 倍程度にしている。どの計算格子も  $y^+$  が数十程度で、壁面境界条件は壁関数を使用した。

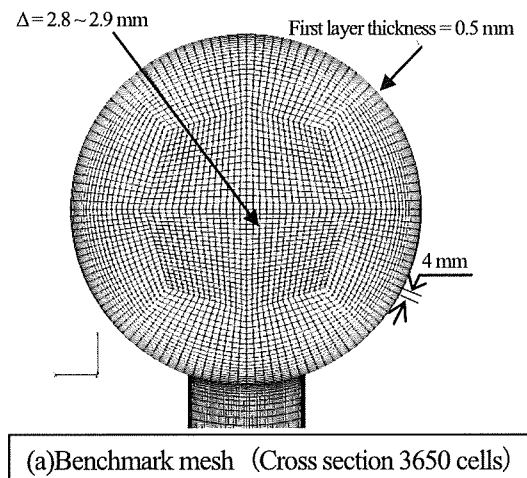


Fig. 3 Computational grids (cross-sectional view)

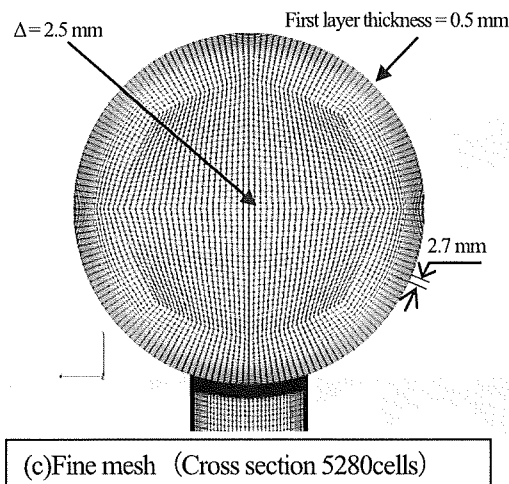
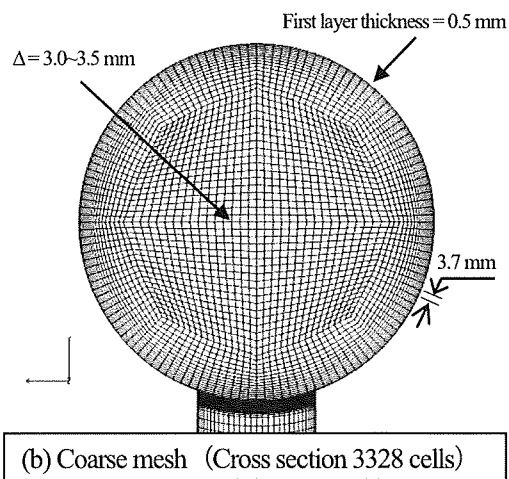


Fig. 3 Computational grids (cross-sectional view)

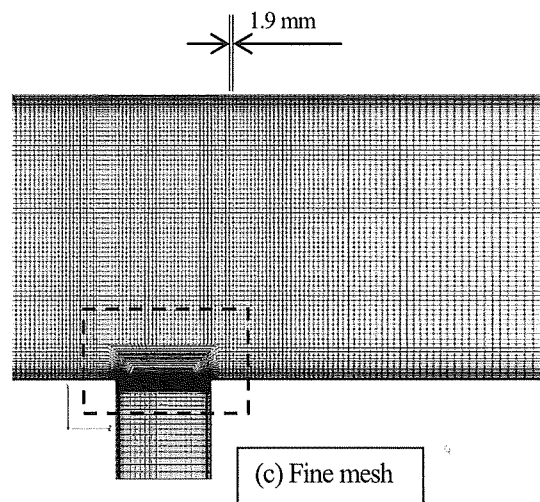
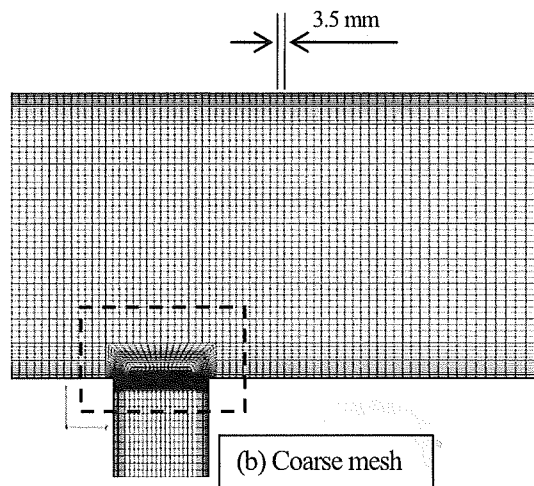
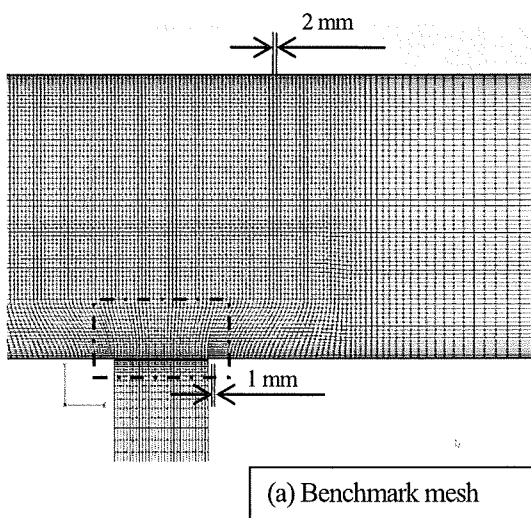


Fig. 4 Computational grids (lateral view)



### 3. 計算結果

#### 3.1 時間平均な温度分布

図5に時間平均温度分布を示す。既往の計算結果[4][6]とほぼ同様であり、壁面からの冷水が壁に付着した壁面噴流を形成していることが分かる。図6は合流部から $0.5D_m$ 下流における時間平均温度分布(垂直方向)である。主流部分において実験データとよい一致を示しているが、壁面近傍で高温側に評価する。粗メッシュと詳細メッシュとで計算結果に差はあまりなく、ベンチマークメッシュよりも多少実験データに近い。

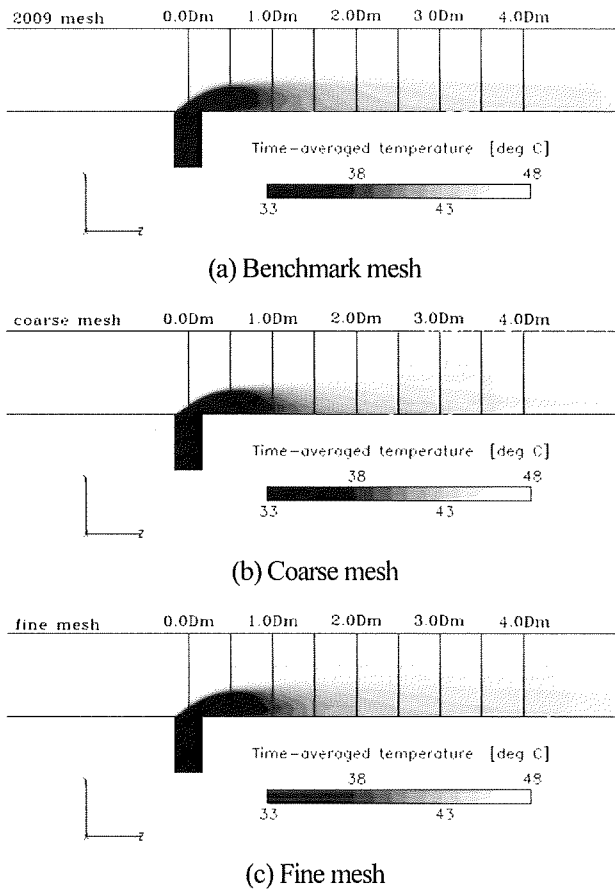


Fig. 5 Time-averaged temperature distributions

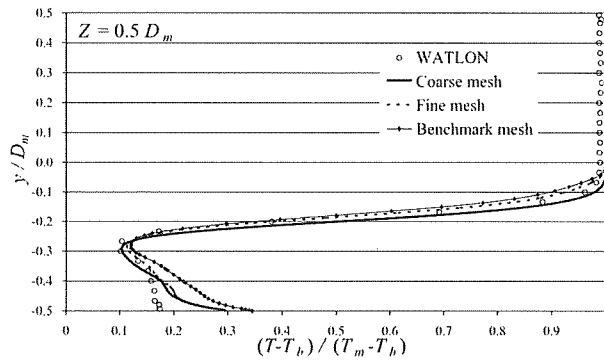


Fig. 6 Profile of time-averaged temperature at  $z = 0.5 D_m$

### 3.2 温度変動強度

表 1 で示した統計処理時間 (5 秒間) での温度変動強度  $T_{std}^*$  分布を図 7 に示す。 $T_{std}^*$  の定義は次式の通りである。

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

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

どの計算格子の結果も同様な分布であり、変動強度の大きい部分は主・枝管合流部の前縁から  $1D_m$  程度までの高低温水界面である。主配管と枝管からの高低温水が合流する境界で強い温度変動が発生していると考えられる。

図 8 は温度変動強度を実験値と比較したものである。どの格子でも  $0.5D_m$ 、 $1.0D_m$  とともに実験データよりも変動を大きく評価している。 $0.5D_m$  における配管付近ではベンチマークメッシュの方が粗メッシュ、詳細メッシュよりも大きな変動となった。

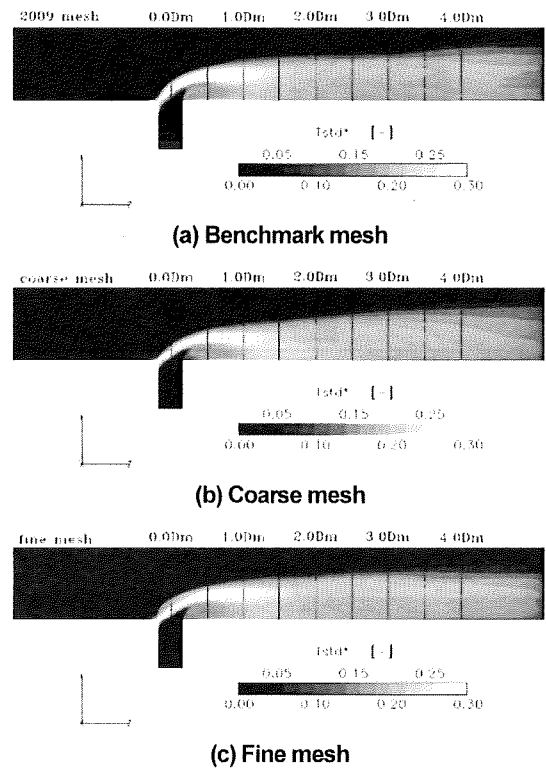
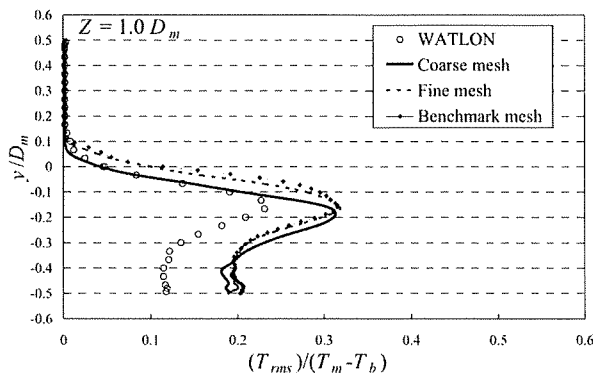
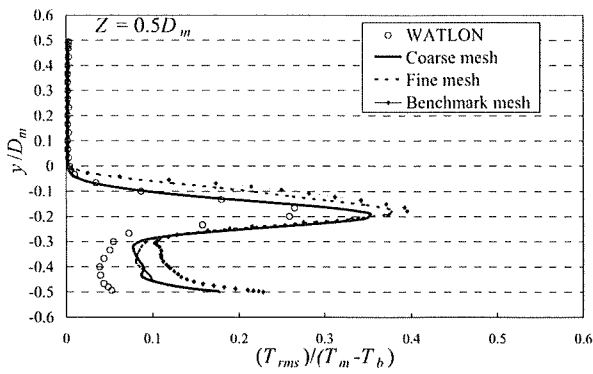


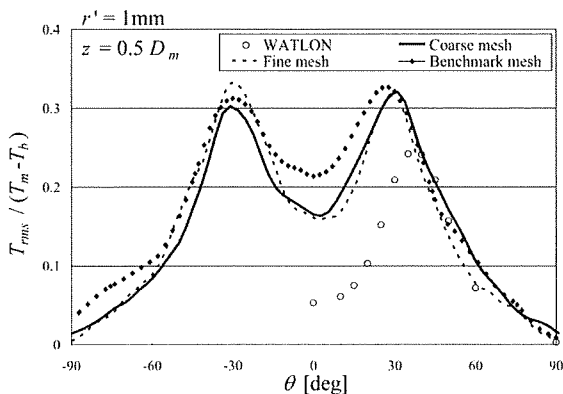
Fig. 7 Distributions of temperature fluctuation intensity



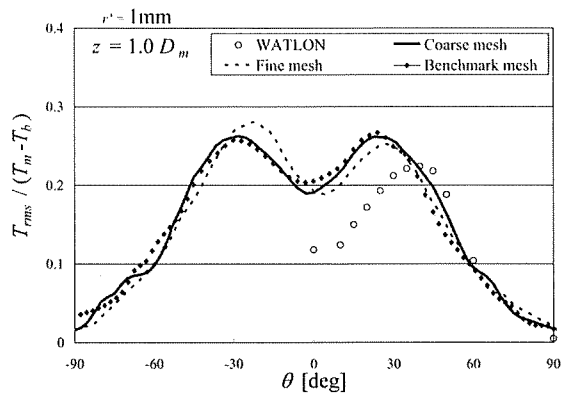
(b)  $z = 1.0 D_m$

Fig. 8 Profiles of temperature fluctuation intensity ( $z = 0.5 D_m$  and  $1.0 D_m$ , radial direction)

壁から 1mm の位置での周方向における温度変動強度分布を図 9 に示す。周方向角度の定義は図 2 に示す通りであり、流れ方向から見て反時計回りを正とし、枝管位置を  $0^\circ$  とする。計算結果は実験データよりも過大評価側となり、また  $30^\circ$  付近でピークを持つ。この傾向は従来の計算結果[6]と同様であるが、どのメッシュも過大評価側、つまり安全側評価となった。特に  $-30^\circ$  付近のピーク位置において詳細メッシュが最も過大評価となっている。



(a)  $z = 0.5 D_m$



(b)  $z = 1.0 D_m$

Fig. 9 Profiles of fluctuation temperature intensity ( $z = 0.5 D_m$  and  $1.0 D_m$ , circumferential direction)

### 3.3 計算結果のメッシュ依存性

図 9 の温度変動強度分布において、粗メッシュと詳細メッシュは、ピーク位置 ( $\theta = \pm 30^\circ$ ) で若干差があるが、それ以外の角度ではほぼ同様な値をとっている。一方、ベンチマークメッシュの計算結果と他の 2 つのメッシュの計算結果を比較すると、図 9(a) の  $z = 0.5 D_m$  の  $\theta = 0^\circ$  での極小値の差が大きい。ベンチマークメッシュは温度変動を過大側に評価している。これは、図 4 で示した、合流部付近の解像度が影響しているものと考えられる。

以上のように、計算格子は全体の格子数だけではなく、必要となる箇所での解像度、つまり流れ場に応じて適した計算格子を使用することが重要と考えられる。例えば、配管合流部近傍の速度・温度の勾配や変動が激しい箇所には詳細な解像度が必要と考えられる。ただし、最適な計算格子の作成は、格子の作成、および計算結果と実験データとの比較を何度か繰り返す必要があり容易ではない。流れ場ごとに最適な計算格子は異なるため、最適な計算格子を簡便に作成する方法については今後の課題である。

3 種類の計算格子による計算結果は、上述のように局所的に温度変動強度分布のずれはあるものの、その差はそれほど顕著ではない。特に、図 9 の温度変動強度ではどの格子を用いても、WATLON 試験の温度変動強度に対してほぼどの評価点でも過大評価、つまり安全側に評価する結果となった。よって、今回用いた粗メッシュおよびベンチマークメッシュ程度の解像度で実用には十分だと考えられる。

## 4 まとめ

本研究では T 字配管合流部の壁面噴流条件を対象に、解像度の異なる 3 種類の計算格子を用い計算結果の差違を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・時間平均温度はどの計算格子を用いても顕著な差は見られなかった、壁面近傍での過大評価を除き、WATLON 試験とほぼ一致した。

- ・3 種類の計算格子のどの計算結果でも安全側（温度変動強度が実験データよりも大きい）評価となった。また、温度変動強度の周方向ピーク値は詳細メッシュで最も過大評価となった。

- ・今回用いた粗メッシュ、および NISA 事業ベンチマークで用いた計算格子程度の解像度で実用には十分に足ると考えられる。

- ・計算格子の全体的な解像度だけではなく、必要となる箇所での解像度も計算結果に影響を与える可能性がある。流れ場に応じて局所的な解像度を検討する必要がある。

## 謝辞

本報告は原子力安全・保安院が実施した平成 23 年度高経年化技術評価高度化事業の成果の一部である。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] C. Peniguel, M. Sakiz and S. Benhamadouche,

“Presentation of a Numerical 3D Approach to Tackle Thermal Striping in a PWR Nuclear T-Junction”, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2003, PVP2003-2191.

- [3] R. Howard and T. Pasutto, “The effect of Adiabatic and Conducting Wall Boundary Conditions on LES of a Thermal Mixing Tee”, Proceeding of the 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), 2009, N13P1110.
- [4] 中村晶、“T 字合流配管の温度ゆらぎ現象の数値解析- 乱流モデルと解析格子の影響”、INSS ジャーナル、Vol. 14、2007、pp99-115.
- [5] M. Tanaka, H. Ohshima and H. Monji, “Thermal Mixing in T-junction Piping System Concerned with High-cycle Thermal Fatigue in Structure”, Proceeding of the Sixth Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS6), 2008, PN6P1039.
- [6] A. Nakamura, H. Ikeda, S. Qian, M. Tanaka and Naoto Kasahara, “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 (NTHAS7), 2010, No.N7P-0011.
- [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, 2009, pp.58-67.