

詳細乱流解析手法を用いたT字配管合流部の温度揺らぎ現象評価

Evaluation of Fluid Temperature Fluctuations in a Tee Pipe by Detailed Turbulence Simulations

(株) 東芝	堺 紀夫	Norio SAKAI	Non-Member
(株) 東芝	池田 浩	Hiroshi IKEDA	Non-Member
(株) 東芝	清水 武司	Takeshi SHIMIZU	Non-Member
(株) 東芝	瀧川 幸夫	Yukio TAKIGAWA	Non-Member
北海道大学	大島 伸行	Nobuyuki OHSIMA	Non-Member

Abstract: Temperature fluctuations, arising when fluids with different temperature are mixed, cause high cycle thermal fatigue to materials of plant components. Thus analyzing the characteristics of these temperature fluctuations is important for plant maintenance. In this study, a large eddy simulation, one of the detailed turbulence simulation methods, was applied to the analysis of two typical flow patterns with temperature fluctuations in a tee pipe. Results were compared with the experimental data. The simulation data showed good agreements with the experimental data for the shape of the average temperature distributions. The simulation accuracy of the temperature histograms at experimental probe points was improved by using finer computational grids.

Keywords: Temperature Fluctuation, High Cycle Thermal Fatigue, Large Eddy Simulation

1. 緒言

配管等において高温と低温の流体がまじり合う場所では、時間的な温度変動（温度揺らぎ現象）が発生する。それが構造材に伝わり高サイクル熱疲労が生じる可能性があるため、温度揺らぎ現象の評価は経年変化する機器・配管等の健全性を確保するうえで重要な課題の一つになっている。

他方、より詳細に乱流の渦構造を解析することができるシミュレーション手法の一つとして、近年 LES(Large Eddy Simulation)が注目されており、温度揺らぎ現象の解明や、それに伴う配管の熱疲労の予測に対してもシミュレーション技術の適用が期待されている。

本研究では、異径 T 字配管合流部における温度揺らぎ現象を対象として、解析による温度揺らぎ現象の評価手法の確立を目的として LES による熱流動解析を行い、試験結果との比較により手法の妥当性を検証した。

2. 解析条件

Fig. 1 に本研究で用いた解析体系を示す。本体系は五十嵐ら [1-4] が用いた試験装置を模擬

連絡先：〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8、(株) 東芝電力社会システム技術開発センター、電話：045-770-2352
e-mail: norio1.sakai@toshiba.co.jp

したものであり、直径 $D=0.15[\text{m}]$ の主配管と直径 $d=0.05[\text{m}]$ の枝配管から構成される。配管内の作動流体は水であり、密度、粘性係数は温度によらずそれぞれ $989.83[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 $6.59 \times 10^{-4}[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ で一定と仮定した。主配管から流入する流体温度は $318.15[\text{K}]$ 、枝配管からは $303.15[\text{K}]$ である。解析体系における主配管、枝配管の流入部分にはドライバー領域を設けている。ドライバー領域では入口・出口境界を周期境界条件とし、そこで独立に計算した結果から得られる周期境界の速度分布を T 字管側の流入境界条件とすることにより、発達した乱流が T 字管内へ流入するようにした。

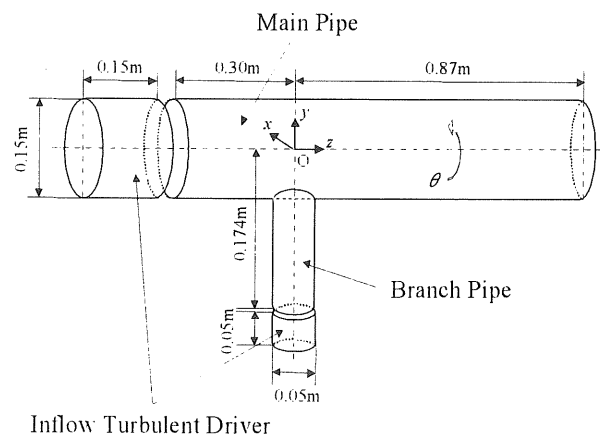


Fig. 1 Schematic Diagram of a Tee Pipe

T字配管の合流部に形成されるいくつかの噴流形態のうち、本研究では配管熱疲労への影響が特に大きいと考えられる衝突噴流と壁面噴流の2ケースを解析対象とするため、流入条件として主配管の最大平均流速は0.23[m/s]（衝突噴流）もしくは1.46[m/s]（壁面噴流）とし、枝配管の最大平均流速は1.0[m/s]で固定した。

計算格子は約38万要素数の粗い格子(Mesh1)と、約92万要素数の細かい格子(Mesh2)の2種類を用いた。壁面の温度境界は断熱条件、速度境界はSpalding則を適用した。LES解析の乱流モデルは標準Smagorinskyモデルであり、モデル定数は0.10とした。なお、本研究では文部科学省ITプログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクトで開発されたFrontFlow/RedをLES解析コードとして用いた[5]。

3. 解析結果

Fig. 2に衝突噴流の試験[2]における中心軸断面の平均温度分布、およびZ=0.5D, 1.0Dにおける軸に垂直な断面の時間平均温度分布を示す。ここで時間平均温度 T^* は、温度の瞬時値 T を主配管、枝配管の流入時の温度差(15°C)で

$$T^* = \frac{T - T_b}{T_m - T_b} \quad (1)$$

と規格化したものである。ただし、 T_m :主配管流体温度、 T_b :枝配管流体温度である。

衝突噴流のケースでは枝配管からの噴流が主配管の上部壁面にぶつかった後、主配管からの高温流体と混合し、その混合領域が徐々に広がりながら下流に進んでいることがわかる。

これに対し、Fig. 3,4はそれぞれMesh1,2による衝突噴流のLES解析を試験結果と同様に中心軸断面とZ=0.5D, 1.0Dの垂直断面の時間平均温度分布で示したものである。Mesh1ではZ=0.5Dの断面図で高温流体の領域が試験のようなU字状でなく左右に分かれてしまっているが、Mesh2では試験と同様なU字形状を示しており、格子分割を細かくすることにより温度場の再現性が向上していることがわかる。

Fig. 5.6は、試験[1]においてZ=0.5Dで配管内壁から1mm流体側に入った位置で取得した温

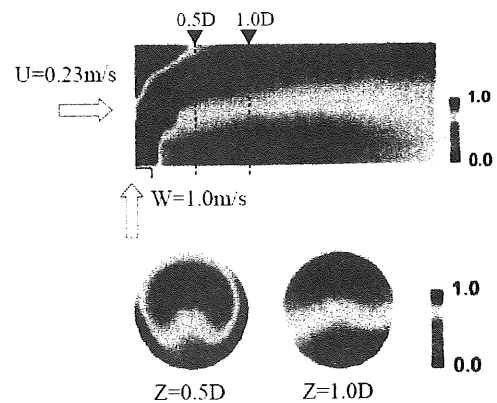


Fig.2 Average Temperature Distribution of Impinging Jet (Experimental Data Extracted from Ref.[2])

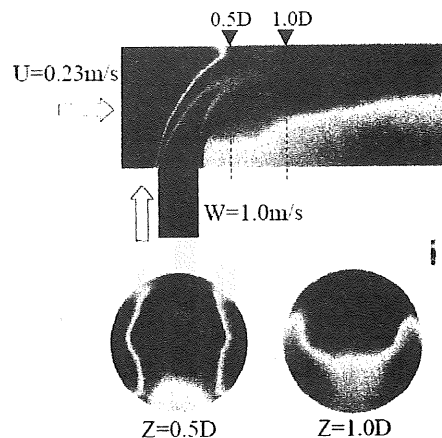


Fig.3 Average Temperature Distribution of Impinging Jet (Simulation Data, Mesh1)

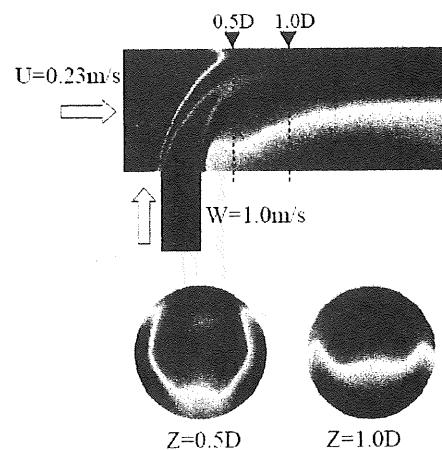


Fig.4 Average Temperature Distribution of Impinging Jet (Simulation Data, Mesh2)

度時系列データをヒストグラムで表示し、局所的な温度変動について試験結果と解析結果の温度頻度分布の比較を行ったものである。ただし、データの取得時間は試験が 120[sec]、解析が 10[sec]である。ヒストグラムの区分は規格化された温度で 0.10 (1.5°C) とし、温度データ取得位置の周方向の位置 (回転方向は Fig. 1 を参照) は主配管の上部に相当する $\theta=180^\circ$ である。

Mesh1 では頻度分布の中央値が試験結果よりも大きくずれているが、Mesh2 へと格子数を増加させることにより解析できる渦のスケールが小さくなり、温度頻度分布が試験結果に近づいていることがわかる。また、衝突噴流の壁面への付着地点の予測精度が向上したことも要因と考えられる。

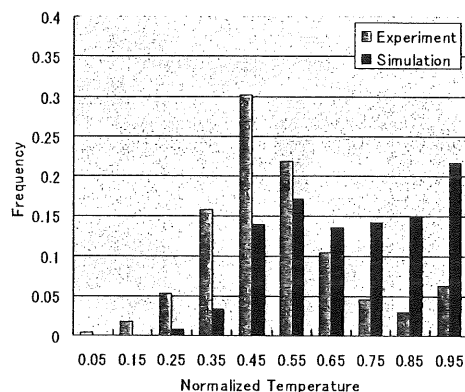


Fig. 5 Histogram of Normalized Temperature of Impinging Jet (Experiment: Ref. [1], Simulation: Mesh 1)

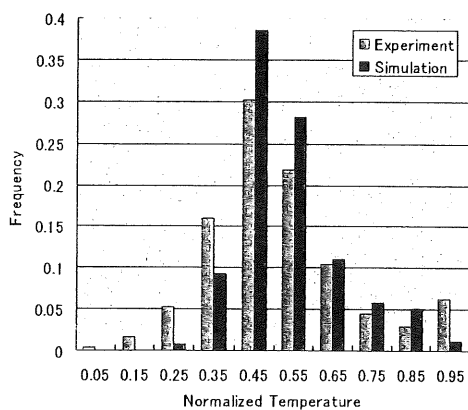


Fig. 6 Histogram of Normalized Temperature of Impinging Jet (Experiment: Ref. [1], Simulation: Mesh 2)

次に、壁面噴流の中心軸断面の平均温度分布、 $Z=0.5D$, $Z=1.0D$ の軸に垂直な断面の平均温度分布について試験結果を Fig. 7 に示す。壁面噴流では主配管からの流入量が多くなるため、合流部から下流域において高温流体の領域が衝突噴流に比べると大きく、低温流体と混合している領域と混合していない領域とがはっきり区別できる流況になっていることがわかる。Fig. 8,9 はそれぞれ Mesh1, 2 による壁面噴流の時間平均温度分布の LES 解析結果であるが、どちらの格子も分布の概形は試験とよく一致しており、壁面噴流においても平均温度場の再現性は良好であることがわかる。

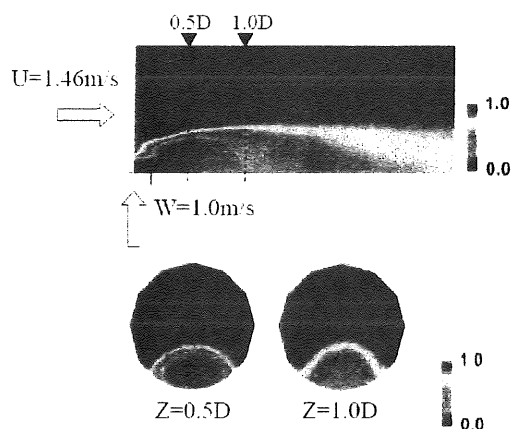


Fig. 7 Average Temperature Distribution of Wall Jet (Experimental Data Extracted from Ref.[2])

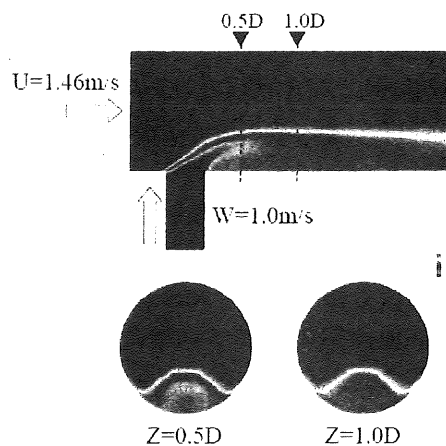


Fig. 8 Average Temperature Distribution of Wall Jet (Simulation Data, Mesh1)

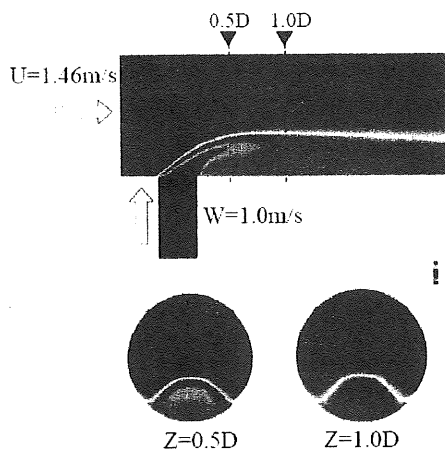


Fig. 9 Average Temperature Distribution of Wall Jet (Simulation Data, Mesh2)

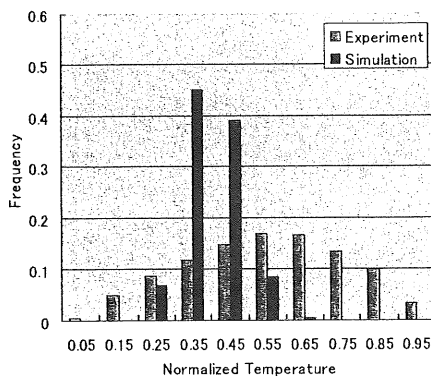


Fig. 10 Histogram of Normalized Temperature of Wall Jet (Experiment: Ref. [1], Simulation: Mesh 1)

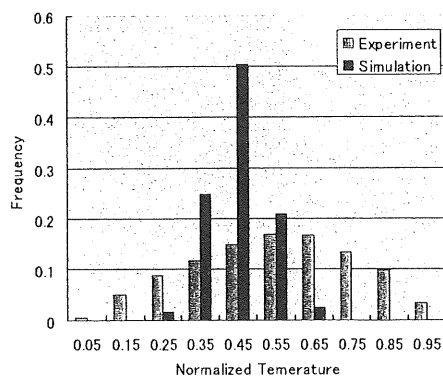


Fig. 11 Histogram of Normalized Temperature of Wall Jet (Experiment: Ref. [1], Simulation: Mesh 2)

壁面噴流のケースでは周方向位置が高温流体と低温流体の境界面近傍である $\theta = 30^\circ$ において、試験と解析の温度頻度分布を比較した。例として $Z=0.5D$ での比較結果を Mesh1 について Fig. 10 に、Mesh2 について Fig. 11 に示す。格子の増大によって分布の中央値は試験結果に近づいているが、温度揺らぎの程度を示す温度変動強度についてはあまり変化がみられなかった。解析における温度揺らぎが試験に比べ少ない原因として、周方向や半径方向の格子間隔が粗いことがあげられる。

4. 結語

本研究では、異径 T 字配管合流部における温度揺らぎ現象を、詳細に乱流の渦構造を解析できる LES 手法を用いて解析した。格子数の異なる 2 種類の計算格子を用いて LES 解析を行ったところ、主配管と枝配管の運動量比によって決まる合流部での噴流形態は試験結果と同様の傾向を示した。このとき試験の温度時系列データ取得位置における温度頻度分布を比較したところ、格子を細かくすることによって試験と解析の誤差が低減した。一方、温度変動強度については、解析結果は試験結果を小さく見積もる結果となった。

謝辞

本研究の遂行にあたり、(株)アドバンスソフトの畝村毅様には計算格子の作成および LES 解析において多大なるご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 五十嵐実他、「配管合流部の混合現象に関する研究—流体内部温度測定試験報告—」、JNCTN9400 2002-026、2002
- [2] 五十嵐実他、「配管合流部の混合現象に関する研究」、JNCTN9400 2003-092、2003
- [3] M.Igarashi, *et al.*, Study on Fluid Temperature Fluctuation and Transfer to Wall in a Mixing Tee, ICONE11-36299, the 11th International Conference on Nuclear Engineering, 2003.
- [4] 五十嵐実他、「高サイクル熱疲労に関する T 字合流管内温度変動特性の研究」、日本機械学会論文集 (B 編)、70 巻 700 号、pp.126-133、2004
- [5] 畝村毅他、「文部科学省 IT プログラム 次世代流体解析ソフトウェア FrontFlow/Red の開発」、第 17 回数値流体力学シンポジウム A7-1、2003