

論文題目	Study on CFD-based Evaluation Methods of Thermal Loading at Tee Junction for Thermal Fatigue Evaluation (配管合流部における熱疲労評価のための熱流体数値解析による熱荷重評価方法に関する研究)
氏 名	銭 紹祥

1. 序論

原子力プラントや（石油精製・石油化学・LNGなどの）プロセスプラントでは高低温流体の混合に使われる配管合流部では、高低温流体の混合に伴う温度変動により配管に熱疲労損傷が生じることが知られており、破損事例が多数報告されている（例えば、[1-3]）。これらを防止するため、日本機械学会が2003年に「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」（以下JSME評価指針と略す）[4]を制定した。配管合流部でのフローパターンによって熱疲労のリスクが異なるため、熱疲労評価の際にフローパターンの分類が必要となっている。従来のフローパターン分類方法は分岐角度90°の配管合流部（T字管）にしか適用できない[5]。一方、プロセスプラントでは90°以下の配管合流部（Y字管）も使われている。よって、T字管とY字管の両方に適用できるフローパターン分類方法の確立が望まれる。さらに、JSME評価指針は限られた実験データと簡易的な解析手法に基づくもので適用範囲に制限があり、評価結果の裕度にも大きなバラつきがある[6]。特に、流体温度変動が構造の熱応力に変換される際の周波数に依存した減衰特性が考慮されていないため、予測精度が不十分である。よって、より合理的な配管熱疲労評価法を確立することが望まれる。CFD/FEA連成解析手法がその評価ツールとして期待されている。

本研究の目的の一つはプロセスプラントで使われるY字管の熱疲労評価にも適用できる一般化したフローパターンの分類方法を提案することである。もう一つの主要な目的はCFD/FEA連成解析による熱疲労評価のために、CFDによる高精度な熱荷重の予測手法を確立することである。

2. 熱疲労荷重評価のための一般化したフローパターン分類方法の提案

JSME評価指針では熱疲労荷重を評価する際に、主管と枝管からの流入流体の運動量の比によって配管合流部でのフローパターン分類を行うことが必要になる。従来のフローパターン分類方法は90°のT字管にしか適用できない[5]。本研究では主管と枝管の流れが合流する際の運動量の相互作用するメカニズム(Fig. 1)を明らかにした上で、T字管とY字管の両方のフローパターン分類に適用できる一般化した式(1)~(3)を提案した。

$$M_m = D_m D_b \rho_m V_m^2 \quad (1)$$

$$M_b = 0.25\pi D_b^2 \rho_b V_b^2 \sin \alpha \quad (2)$$

$$M_R = M_m / M_b \quad (3)$$

ここで、 M_m と M_b は主管と枝管の相互作用する運動量で、 D_m と D_b は主管と枝管の内径で、 ρ_m と ρ_b は主管と枝管の流入流体の密度で、 V_m と V_b は主管と枝管の流入速度で、 α は配管合流部の分岐角度で、 M_R は主管と枝管の相互作用する運動量の比である。

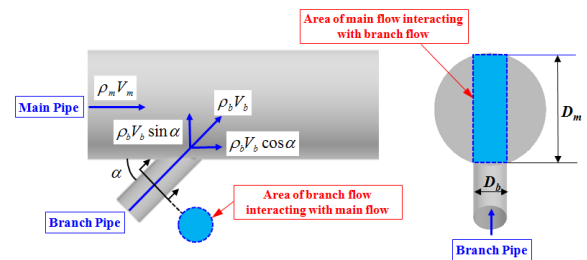


Fig. 1 Definition of momentum ratio at Y-junction

また、式(1)~(3)の有効性を検証するために、分岐角度30°、45°、60°と90°の4モデルに対して、それぞれ6つの運動量比（ $M_R=4.2, 3.8, 1.45, 1.25, 0.38, 0.33$ ）における合流部流れのCFD定常解析を実施し、フローパターン（FP）の確認を行った。過去の研究で確認されたT字管のFPがY字管のそれの比較ベースになる。CFD定常解析結果により、各運動量比において45°と60°のY字管のFPが熱疲労評価上でT字管と比べて似ているまたは安全側にあることが示された。一方、30°の場合、 $M_R=0.38$ と0.33でのFPがCFD定常解析結果だけでT字管と似ているまたは安全側にあるとは判断しきれないため、LES非定常解析による流体温度変動強度の比較と合わせて、30°のY字管のFPもT字管と比べて似ているまたは安全側にあることが示された。よって、提案式(1)~(3)の適用範囲は分岐角度30°~90°とする。プロセスプラントでは合流部の溶接強度確保などを考慮し45°より小さいY字管を使った実績がまだないため、この適用範囲では実用的に問題がない。

フローパターン (FP) の判定基準について、JSME評価指針で使われているCriteria 1(**Table 1**)ではT字管のFPを3種類に分類するが、Criteria 2(**Table 2**)ではDeflecting Jet相当の中間のFPをReattached JetとTurn Jetに二分し、それを4種類に分類する。 $M_R=1.45$ において、**Fig. 2**に示すCFD解析結果が明らかにDeflecting Jetである。Criteria 1はWall Jetと予測する。熱疲労評価ではDeflecting JetをWall Jetと扱うことが保守的になるが、安全側である。一方、Criteria 3はCFD解析結果のDeflecting Jetと相当のReattached Jetと予測し、合理的な分類法である。JSME評価指針による熱疲労荷重評価を行うため、T字管とY字管のフローパターンの判定基準として安全側のCriteria 1を採用し、**Table 3**に示すCriteria 3とする。式(1)~(3)とCriteria 3に基づいて作成したフローパターンマップを**Fig. 3**に示す。

Table 1 Criteria 1 for T-junction[5]

Wall jet	$1.35 \leq M_R$
Deflecting jet	$0.35 < M_R < 1.35$
Impinging jet	$M_R \leq 0.35$

Table 2 Criteria 2 for T-junction[7]

Wall jet	$4.0 \leq M_R$
Re-attached jet	$1.35 < M_R < 4.0$
Turn jet	$0.35 < M_R \leq 1.35$
Impinging jet	$M_R \leq 0.35$

Table 3 Criteria 3 Recommended for T- and Y-junctions of 30° ~ 90°

Wall jet	$1.35 \leq M_R$
Deflecting jet	$0.35 < M_R < 1.35$
Impinging jet	$M_R \leq 0.35$

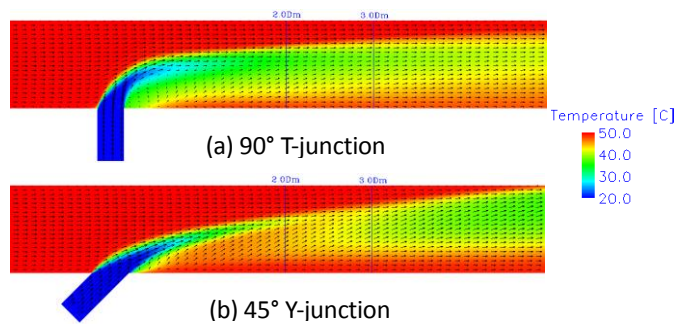


Fig. 2 Fluid temperature contour and velocity vectors at $M_R=1.45$

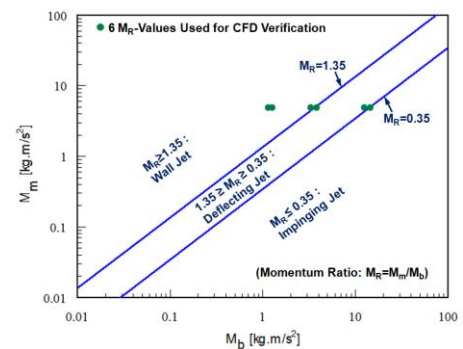


Fig. 3 Flow pattern map based on Criteria 3

3. CFDによる流体温度変動の高精度な予測方法

CFD/FEA連成解析手法による配管合流部の熱疲労を評価するには、評価プロセスの上流にある流体温度変動の評価精度が十分である必要がある。配管合流部の熱流動解析では熱荷重である非定常の温度変動を精度よく予測することが重要である。本研究では、乱流モデルによって過大評価される乱流渦粘性と差分スキームの数値拡散による流体温度変動の減衰効果に注目し、各LES乱流モデルと差分スキームの特性を分析した上で、**Table 4**に示すCFDベンチマーク解析のシナリオを提案した。CFDベンチマーク解析結果の精度を検証することにより、流体温度変動の高精度な予測手法を確立する。

Table 4 Scenario Proposed for LES Benchmark Analyses

Case No.	LES SGS Turbulence Model ^{*1}	Numerical Scheme ^{*2}		Sampling Period [sec]
		Momentum Equations	Energy Equation	
Case 1	SSM($C_s=0.1$)	HS($\alpha_{bf}=0.9$)	1UD	5.5
Case 2	SSM($C_s=0.14$)	HS($\alpha_{bf}=0.9$)	1UD	5.5
Case 3	SSM($C_s=0.14$)	HS($\alpha_{bf}=0.9$)	HS($\alpha_{bf}=0.6$)	5.5
Case 4	DSM	HS($\alpha_{bf}=0.9$)	1UD	5.5
Case 5	DSM	HS($\alpha_{bf}=0.9$)	HS($\alpha_{bf}=0.6$)	5.5
Case 6	DSM	HS($\alpha_{bf}=0.9$)	HS($\alpha_{bf}=0.8$)	5.5
Case 7	DSM	TVD	TVD	5.5

*1 SSM: 標準 Smagorinsky モデル; DSM: ダイナミック Smagorinsky モデル

*2 HS: Hybrid Scheme; 1UD: 1次風上差分スキーム; TVD: TVDスキーム

流体の温度変動強度について、壁面付近における周方向 (**Fig. 5**) のCFD解析結果と実験結果が**Fig. 4**に示され、乱流モデルと差分スキームがCFD解析結果に大きな影響を及ぼすことが分かる。具体的に、数値拡散の大きな一次風上差分に比べて、数値的安定で数値拡散も大きく抑えられる、大きなBlending Factor (α_{bf})を用いたHybrid Scheme(HB) またはTVDスキームが流体の温度変動を精度よく捉えられた。また、乱流渦粘性をより

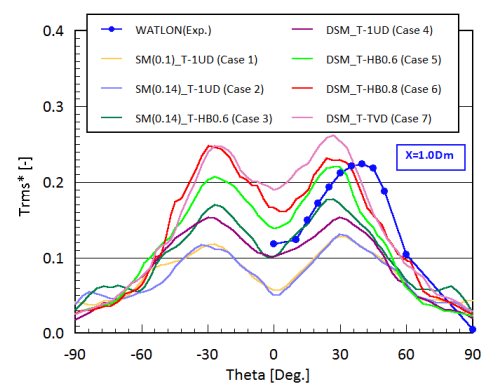


Fig. 4 Distribution of Fluid TFI along Circumferential Direction

正確に評価できるDSMモデルがそれを過大評価するSSMモデルより流体の温度変動をよく捉えられた。さらに、サンプリングポイント (Fig. 6) における流体温度のパワースペクトル密度(PSD)をFig. 7に示す。Fig. 7のPSDには周波数5.86Hzの顕著なピークが表れ、文献[5]の方法で推算された周波数とよく一致した。よって、(1). 乱流モデルにはDSMモデルを、(2). 差分スキームには大きな α_{bf} を用いたHybrid Scheme(HB)またはTVDスキームを適用したアプローチが流体温度の変動強度と周波数を精度よく予測できることが示された。

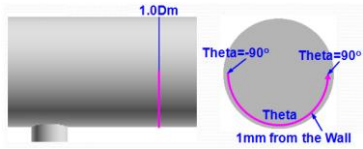


Fig. 5 Location and Direction of Plot Line in Fig. 4

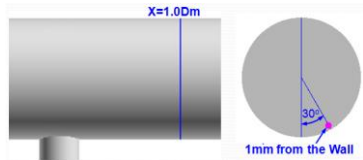


Fig. 6 Location of Sampling Point

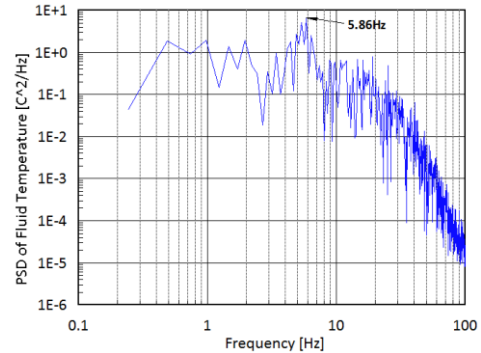


Fig. 7 PSD of Fluid Temperature at Sampling Point for Case 6

4. 流体・構造の熱連成解析による熱荷重の高精度な予測方法

熱疲労評価には流体の温度変動とそれに伴う構造内の温度変動 (熱荷重) を精度よく予測することが重要である。前章で合流部の流体温度変動の高精度なCFD予測手法が確立された。本章ではCFDによる流体・構造の熱連成解析手法を提案し構造内の温度変動の予測精度を検証することにより、熱荷重の高精度な予測方法を確立する。

構造内の温度変動を正確に予測するため、流体・構造の熱連成解析には下記の3手法を提案した：(3).流体・構造間の熱伝達を精度よく計算するために、熱伝達係数を使用せず、温度境界底層内に格子点を配置し流体・構造間の熱伝達を直接熱伝導で評価する手法；(4).構造温度の数値減衰を最小化するため、壁面近傍の構造メッシュも隣接する流体側のメッシュと同じように細分化する方法；(5).計算精度と数値的安定性を向上するために、壁面を通る熱フラックスを介して流体と構造のエネルギー方程式をカップリングして陰的に解く手法。なお、手法(3)のために温度境界底層厚みの一般化した予測方法を提案し、対象流体である水の $Pr=4.4$ における熱境界層の無次元化厚みを $y^+=3.5$ と予測した。

LES検証解析結果については実験結果[9]との比較を行った。サンプリングポイント (Fig. 8) における流体と構造の無次元化温度の時刻歴をFig. 9に示す。流体と構造の温度変動幅がともにFig. 9 (b)の実験結果に近い。さらに、流体と構造の温度時刻歴のFFTによって得られたパワースペクトル(PSD)の結果をFig. 10に示す。CFD解析で得られた流体と構造の温度PSDのピーク周波数が実験結果とよく一致した。よって、今回の流体・構造の熱連成解析で提案した数値解析方法は高精度な熱荷重評価手法であることが示された。

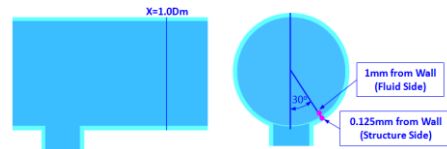


Fig. 8 Locations of Sampling Points

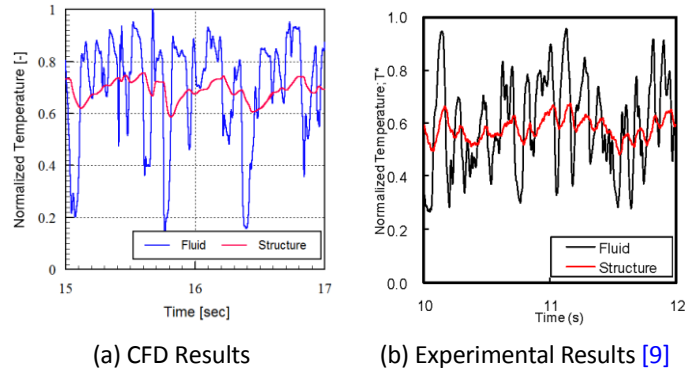


Fig. 9 Temporal Variation of Normalized Fluid and Structure Temperatures at Sampling Points

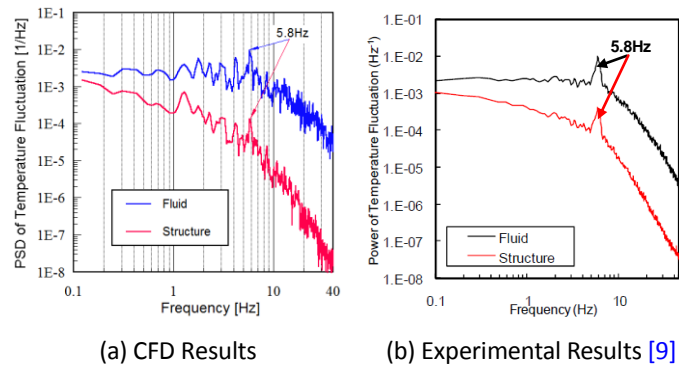


Fig. 10 PSD of Normalized Fluid and Structure Temperatures at Sampling Points

5. 研究成果の工学的応用への提案

2章ではT字管とY字管の両方のフローパターン分類のために一般化した分類方法を提案した。CFD解析により、それは(実用範囲をカバーできる)分岐角度 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の配管合流部のフローパターン分類に適用できることが示された。よって、この一般化したフローパターン分類方法を適用すれば、JSME評価指針の適用範囲が拡張され、T字管とY字管の両方に対して熱疲労評価ができることになる。

さらに、3章と4章ではCFDベンチマーク解析によって、熱疲労荷重である流体と構造の温度変動の高精度な数値予測手法を確立した。CFD解析で予測された構造の温度時刻歴を使って、FEA解析によって熱応力を計算し、さらに得られた熱応力を使って熱疲労評価を行うことができる。このようなCFD/FEA連成解析では、流体温度変動の周波数に依存した構造の熱応力の減衰が考慮されるため、高精度な熱疲労評価が期待できる。よって、CFD/FEA連成解析手法が従来のJSME評価指針の試験データに基づく部分を置き換わり、JSME評価指針の評価精度を大きく向上させることが期待できる。

6. 結論

熱疲労評価のため、T字管とY字管の両方に適用できる一般化したフローパターン分類方法を提案した。CFD解析により、それは分岐角度が $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の配管合流部のフローパターン分類に適用できることが示された。同時に、配管合流部における流体温度変動のCFDによる高精度な予測手法を確立するため、乱流モデルで評価される乱流渦粘性と差分スキームの数値拡散による流体温度変動の数値減衰に注目し、LES乱流モデルと差分スキームを対象にしたCFDベンチマーク解析により、

(1). LESの乱流モデルにはDSMモデル

(2). 差分スキームには大きなBlending Factorを用いたHybrid Scheme(HB)またはTVDスキームを用いた流体温度の変動強度と周波数を精度よく予測する方法を提案した。

さらに、配管合流部における熱荷重の高精度なCFD予測方法を確立するため、以下の3点を組み合わせた流体・構造の熱連成解析法提案した。

(3). 熱伝達係数を使用せず、温度境界底層内に格子点を配置し流体・構造間の熱伝達を直接熱伝導により評価

(4). 壁面近傍の構造メッシュも隣接する流体側のメッシュと同じように細分化

(5). 壁面を通る熱フラックスを介して流体と構造のエネルギー方程式をカップリングして陰的に解く

なお、上記(3)のために温度境界底層厚みの一般化した予測方法を提案し、水の $Pr=4.4$ における温度境界層の無次元化厚みを $y^+=3.5$ と予測した。上記(1)~(5)の解析手法を用いて実施した熱流動及び流体・構造の熱連成のCFD検証解析で得られた流体と構造の温度変動幅と周波数がともに実験結果とよく一致した。

参考文献

- [1] Faigy, C., et al., Int. Conf. on Fatigue of Reactor Components, Napa, CA (2000).
- [2] Okuda, Y., Nuclear Viewpoints, Vol.47, No.5, pp.60-64 (2001).
- [3] Maegawa, M., Proc. of 19th Symp. on the Maintenance of Equipments, Tokyo, Japan, pp.12-17 (2006).
- [4] JSME, "Guideline for Evaluation of High-Cycle Thermal Fatigue of a Pipe", JSME S017 (2003).
- [5] Igarashi M., et al., ICONE10, ICONE10-2225 (2002).
- [6] Suzuki, T. and Kasahara, N., ASME, PVP2012-78347 (2012).
- [7] Hosseini, S.M., et al., Int. J. of Heat and Mass Transfer, **51**, pp. 2444-2454 (2008).
- [8] Kamide, H., et al., Nucl. Eng. & Des., 239, pp.58-67 (2009).
- [9] Kimura, N., et al., NURETH-13, N13P1169 (2009).