

jh210038-NAH

## 複雑流動場におけるスカラー輸送過程の解明を目指した大規模数値計算 : 実験計測データとの比較による数値モデルの構築

恒吉達矢 (名古屋大学)

**概要** OpenFOAM を用いて、T 字管合流部を対象に熱や物質のスカラー輸送を伴う配管流れの数値流体計算を実施した。高サイクル熱疲労を対象とした計算では、T 字管合流部で生じる低温流体と高温流体の温度混合と配管壁面への熱伝達および配管構造内の熱伝導を連成した計算を実施した。計算は Large Eddy Simulation により行い、流動場と温度場の計算結果は実験値とよく一致しており、高い精度で計算が実施できたことを確認した。流れ加速型腐食を対象とした計算では、壁面から流体中への鉄イオンの物質伝達をパッシブスカラーとして計算した。T 字管合流部のフローパターンの違いにより壁面の物質移行係数の分布が大きく異なることを明らかにした。3 次元流動場の可視化により、渦に代表される流体構造が物質伝達に大きく影響していることを明らかにした。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

名古屋大学

#### (2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

恒吉 達矢(名大)大規模計算と研究総括  
Ali Mehrez(名大)大規模データの統計量解析  
辻 義之(名大)実験データの統計量解析  
高橋 一郎(名大)大規模データの可視化

的影響は壁面の物質移行係数として評価することができる。一方、高サイクル熱疲労は流体中の温度変動が配管壁面に伝わることにより発生する。そのため、同じ配管要素における流動場が対象であっても、異なる境界条件のスカラー場において、どのようなスカラー輸送の違いが現れるかは明らかではない。

本研究では、異なるスカラー場におけるスカラー輸送の普遍性と特異性について考察する。複雑流動場におけるスカラー輸送の特性を明らかにすることは、配管安全管理の高度化だけでなく、乱流スカラー輸送の効率的な利用や制御といった工学応用に広く寄与するものと期待される。

### 研究の目的と意義

発電プラント(火力, 原子力)における熱や物質のスカラー輸送を伴う配管流れの数値流体計算を実施し、配管安全管理の高度化に資する知見を得ることを本研究の目的とする。

プラント配管の高経年化による配管疲労・損傷の要因として、高サイクル熱疲労および流れ加速型腐食があげられる。流れ加速型腐食と高サイクル熱疲労はともに配管壁面と流体間でのスカラー輸送の結果として生じる現象であるが、そのスカラー輸送の方向は異なっている。流れ加速型腐食は壁面から流体中への鉄イオンの物質伝達現象であり、流体力学

### 当拠点公募型研究として実施した意義

本研究では流体の数値計算に、オープンソースコードである OpenFOAM を用いる。商用コードはライセンスの制約から大規模計算の実施が容易ではなく、名古屋大学情報基盤センターは並列計算に対する障壁の少ない OpenFOAM の利用を推進しており、本研究の実施に適している。名古屋大学のシステムは 2020 年 7 月に新システムに更新されたが、新システムにおける type 1 (FUJITSU PRIMEHPC FX1000) type 2 (FUJITSU PRIMERGY CX2570 M5)の両サブシ

システムに対して、OpenFOAM のコンパイル情報が提供されており、計算環境の円滑な構築が可能である。名古屋大学のシステムは大規模データ処理系との連携も優れている。流体の数値計算ではプリポスト処理において、大容量のメモリを必要とする。また、3次元空間において種々のスケールからなる複雑な流動構造を理解するためには、適切な可視化が必要となる。大容量メモリを搭載した Type 3 サブシステム (HPE Superdome Flex)ならびに高精細 (8K 解像度) ディスプレイシステムを有し、高度な可視化技術をもつ名古屋大学情報基盤センターは本研究の実施に適する。

## 2. 前年度までに得られた研究成果の概要

(1) OpenFOAM を用いた並列計算 流体の数値計算にはオープンソースコードである OpenFOAM を用いた。流れ加速型 腐食の計算のために独自に作成したコードを継続使用するために、OpenFOAM のバージョンは v1712 を用いた。名古屋大学の type2 サブシステム、type3 サブシステム、クラウドシステムでの使用を前提に OpenFOAM のコンパイルを行った。並列計算のためのライブラリは Intel MPI 2020 を用いた。(2) paraview を用いた大規模可視化 ポスト処理における可視化の方法について検討した。要求される OpenGL が 3.3 以上の制約があるが、より詳細な描画設定が可能となったバージョン 5.5.0 以降の paraview を用いる。具体的には、type3 サブシステムに用意されている paraview-5.8.1 および OpenFOAM の ThirdParty-v2006に含まれる paraview-5.6.3 を用いた。OpenFOAM では計算領域のメッシュを領域分割したうえで並列計算を実施する。そのため、計算結果の時系列データは分割された領域ごとに出力される。計算結果を一つの領域に再結合して可視化する方法もあるが、分割されたままのデータを直接的に扱えることが望ましい。また、大規模な計算結果の可視化のためには、paraview を逐次処理ではなく並列処理で実行したほうがよい。並列版の paraview を実行するためには、あらかじめ

め並列数分の paraview サーバーを pvserver コマンドで立ち上げ、クライアントとして使用する paraview からサーバーに接続する必要がある。OpenFOAM に含まれるデータリーダーの PVFoamReader は、並列版のサーバーに接続した時点で使用できなくなる。そのため、データリーダーとしては paraview がもつ vtkOpenFOAMReader を使用する必要がある。vtkOpenFOAMReader は OpenFOAM からバイナリで書き出されたメッシュ情報のうち 64bit 整数の読み込みでエラーとなることがある。この問題に対しては、64bit 整数の部分のみアスキーで出力することで対処可能であることを確認した。

(3) 高サイクル熱疲労を対象とした計算 T字管合流部において、低温流体と高温流体の温度混合により発生する高サイクル熱疲労を対象とした Large Eddy Simulation (LES)を行った。LES はグリッドスケール以下の渦の影響のみをモデル化することにより、計算負荷を低減しつつ、流動場の特徴的な構造を高い精度で解析することが可能な流体力学計算の手法である。表 1 に計算条件、図 2 に計算領域の概要を示す。T字管合流部の熱流動だけでなく、配管構造内の熱伝導を連成解析するため、OpenFOAM のソルバのひとつである chtMultiRegionFoamを使用した。メッシュは6面体セルで作成しており、流体部と配管部を合わせて約 8500 万セルである。type2 サブシステムにおいて 728 並列で計算を実施した。T字管合流部における高サイクル熱疲労を対象とした計算では、主管から流入する温度 25 °C の低温流体と枝管から流入する温度 60 °C の高温流体の温度混合を計算した。流動場の条件として入口には mappedPatch という境界条件を用いて、下流方向長さ 4Dの位置の断面における物理量を参照して入口境界の値を定めている。これにより、入口から下流方向長さ 4Dの区間は発達乱流を生成するドライバーとして機能する。計算条件は、原子力安全システム研究所 (INSS) において実施された流体・管壁温度測定実験における実験条件

に合わせている。乱流の初期発達として 2 秒間の計算の後に、統計解析時間として 100 秒間の計算を実施した。

### 3. 今年度の研究成果の詳細

昨年度の JHPCN 共同研究課題 (jh200048) では、初めに、type II サブシステム、type III サブシステム、クラウドシステムでの使用を前提に、既往研究で使用実績のある OpenFOAM-v1712 のコンパイルを行った。並列計算のためのライブラリは Intel MPI 2020 を用いた。計算のプレ処理として、Type III サブシステム (HPE Superdome Flex) を用いてメッシュ生成および並列計算のための領域分割を行った。メッシュは 6 面体セルで作成しており、高サイクル熱疲労を対象とした計算で約 8500 万セル、流れ加速型腐食を対象とした計算で約 720 万セル～約 2600 万セルである。type II サブシステムおよびクラウドシステムを用いて時間発展の計算を進めている。

今年度課題では、主に高サイクル熱疲労を対象とした追加計算と解析を進めている。Large Eddy Simulation による計算において、統計解析時間として 100 秒間という比較的長い時間発展の計算を完了した。構築した時系列データを対象に、T 字管合流部における高温流体と低温流体の混合による温度の時間変動の解析を実施した。1kHz でサンプリングした 100 秒間で 10 万点の時系列データより温度変動のパワースペクトルを求めた。配管構造側のデータは界面に隣接するセルの値を用い、流体側は界面から  $y=3.5\text{mm}$  離れた位置のセルの値を用いた。合流部の混合層で発生する渦列が通過する位置において、周波数が約 4Hz の特徴的なピークが確認できた。ただし、高サイクル熱疲労で影響が強いのは、渦列による周波数よりも低い周波数での変動によるものとされている。低周波数の変動の様相を明らかにするために、3Hz 以下のローパスフィルターをかけた時系列データを作成し解析した。統計処理には Type III サブシステムを用いた。図 1 は壁面近傍 ( $y=3.5\text{mm}$ ) の位置に

おける流体の温度のコンター図である。(a) (b) の瞬時場では多数の渦構造による擾乱が見てとれるが、(a') (b') に示すようにローパスフィルターをかけることで枝管の後流の再循環領域が左右に大きく揺らいでいることが確認できる。このような低周波で大規模な温度変動が、壁面で高サイクル熱疲労が発生する要因と考えられる。

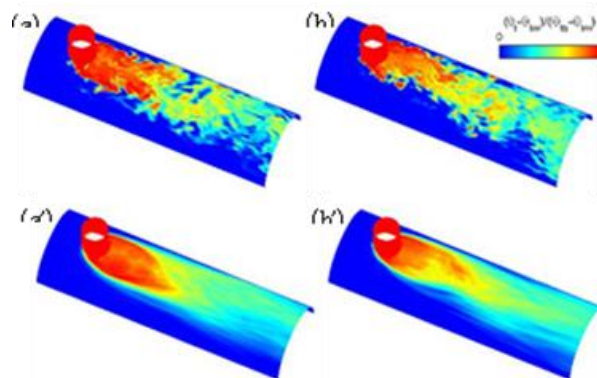


図 1 壁面近傍の温度場。(a) (b) は瞬時の温度場、(a') (b') はローパスフィルターをかけた温度場。

### 4. 今後の展望

ローパスフィルターをかけた時系列データを対象に可視化を行うことで、T 字管合流部における低周波で大きく揺らぐ温度変動の様相を明らかにした。今後は、流体側の温度変動が壁面構造物の温度変動に与える影響を定量的に評価するために、非定常熱伝達率の算出を実施する予定である。

非定常熱伝達率は次式で定義される。

$$|G|^2 = \frac{\exp(-cy)}{2e^2 + 2e + 1}$$

$$e = \frac{\sqrt{\pi\rho C_p k f}}{h}, \quad c = \sqrt{\frac{4\pi\rho C_p f}{k}}$$

$h$ : 非定常熱伝達率,  $y$ : 構造側壁面距離,  $\rho$ : 構造側密度,  $C_p$ : 構造側熱容量,  $k$ : 構造側熱伝導率

ここで、 $|G|^2$  は流体側と構造側の温度変動スペクトルの比として計算でき、求めたスペクトル比にカーブフィッティングすることで非定常熱伝達率

を算出する。非定常熱伝達率の空間的な分布は実験的にも求められておらず、本解析の結果は重要な知見になると期待される。さらに、温度場だけでなく、流動場についてもローパスフィルターをかけた時系列データを作成し、どのような流動構造が温度変動に寄与しているか明らかにすることを旨とする。

- (3) 国際会議発表 (査読なし)
- (4) 国内会議発表 (査読なし)
- (5) 公開したライブラリなど
- (6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)

## 5. 今年度の進捗状況と今後の展望

流れ加速型腐食を対象とした計算では、主管と枝管の流入運動量比を変え、主管の流れが強い壁面噴流条件と枝管の流れが強い衝突噴流条件の2条件を対象にLESによる計算を実施した。標準ソルバの `pimpleFoam` をベースとし、パッシブスカラーとして濃度場を計算するコードを追加して用いた。合流部のフローパターンの違いにより、壁面の物質伝達の強さを表す物質移行係数の分布が大きく異なることを明らかにした。type 3 サブシステムを用いた3次元流動場の可視化を実施し、合流部で発生する渦構造と壁面の物質伝達の関係について考察した。今後は、時系列データを構築した2条件の解析を進めるとともに、主管の流れと枝管の流れの強度が同程度の偏向噴流条件での計算を実施する予定である。また、壁面の物質移行係数を直接的に測定する実験も進めており、実験と数値計算の比較も行っていく予定である。

## 6. 研究業績一覧

(発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない)

- (1) 学術論文 (査読あり)
- (2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

Tatsuya Tsuneyoshi, Yoichi Utanohara, Koji Miyoshi, Yoshiyuki Tsuji, Numerical calculation of heat transport process in complex flow field and comparison with experimental measurement, The 13<sup>th</sup> International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS 13). Taichung, Taiwan, September 5-10, 2022.