

jh200048-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

小林 篤史(名大)数値計算の実施

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、流体力学的な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。

### 2. 研究の目的と意義共同

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・損傷の要因としてあげられる高サイクル熱疲労および流れ加速型腐食を本研究の対象とする。

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

### 3. 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) と type 2 (FUJITSU PRIMERGY CX2570 M5) の両サブシステムに対して、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している。

#### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

特記事項なし

#### 5. 今年度の研究成果の詳細

##### (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 (平成 30 年度課題 jh180062) 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。

図 1 にメッシュ数が約 2500 万セルの計算結果を対象に、流動場中の 3 次元的な渦構造を可視化した際の並列処理の台数効果を示す。台数効果は時系列データ 100 個の処理に要する時間により求めた。計算機は Type 3 サブシステムである。並列数が 16 を超えると速度向上に鈍化がみられたが、概ね良好な台数効果が得られている。逐次処理では困難であった大規模なメッシュの時系列データの可

視化が、並列処理により実施可能となった。

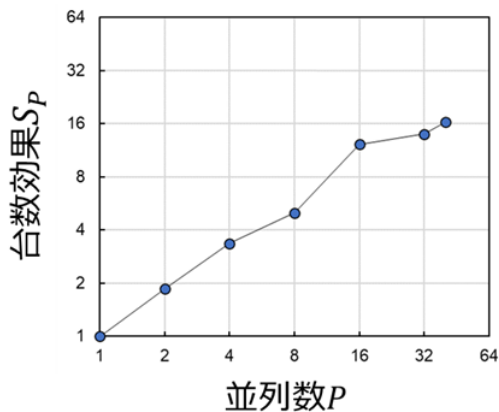


図 1 type3 サブシステムにおける並列版 paraview の台数効果

(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  $\theta_{tm} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  の低温流体と枝管から流入する温度  $\theta_{tb} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  の高温流体の温度混合を計算する。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。管直径  $D_m = 0.15\text{ m}$  の主管の断面平均流速は  $V_m = 1\text{ m/s}$ 、管直径  $D_b = 0.05\text{ m}$  の枝管の断面平均流速は  $V_b = 0.65\text{ m/s}$  であり、合流後のフローパターンは壁面噴流条件にあたる。これらの計算条件は、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。

表 1 高サイクル熱疲労を対象とした計算条件

Software	OpenFOAM-v1712
Solver	chtMultiRegionFoam
Turbulent model	WALE model
Time integration	Implicit unsteady
Transient term	2nd-order backward
Convection term	2nd-order TVD
Diffusion term	2nd-order central
Pipe diameter	$D_m = 0.15\text{ m}$ , $D_b = 0.05\text{ m}$
Cross-sectional average velocity	$V_m = 1\text{ m/s}$ , $V_b = 0.65\text{ m/s}$
Inlet temperature	$\theta_{tm} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\theta_{tb} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

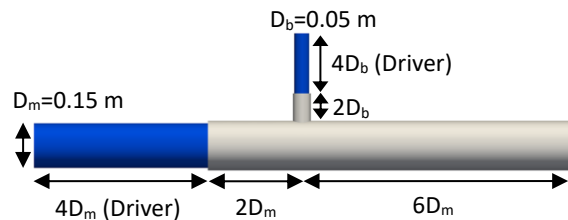


図 2 T 字管合流部における高サイクル熱疲労を対象とした計算領域の概要

図 3 に管軸を含む垂直断面における流れ方向の平均流速分布、図 4 に変動 RMS 値の分布を示す。値は合流後の断面平均流速  $V_{z0}$  を用いて無次元化している。主管の流れに枝管の流れが合わさり、合流後の管軸中心のあたりで流速が大きくなっている。また、枝管噴流の後流に逆流領域が形成されている。変動 RMS 値は合流部から続く混合層および枝管

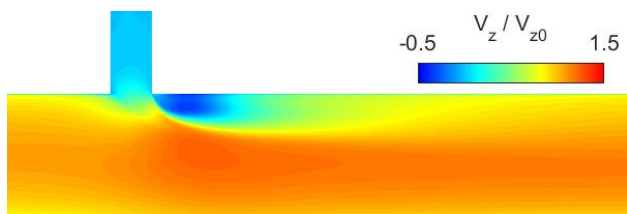


図 3 垂直断面における流れ方向平均流速分布

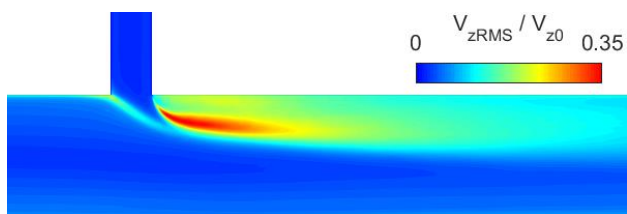


図 4 垂直断面における流れ方向流速の変動 RMS 値の分布

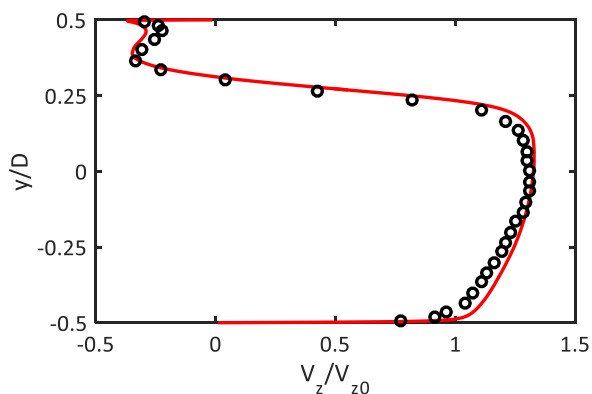


図 5  $z/D_m = 0.5$  における流れ方向流速分布. 赤実線: LES, 白丸: INSS 実験値(三好他(2018)).

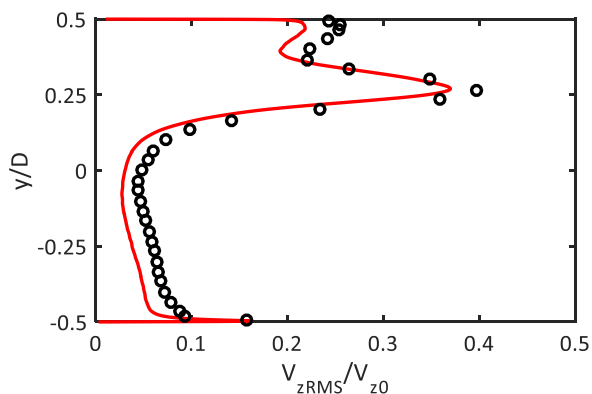


図 6  $z/D_m = 0.5$  における流れ方向流速の変動 RMS 値の分布. 赤実線: LES, 白丸: INSS 実験値(三好他(2018)).

噴流の後流で値が大きくなっている. 図 5 および図 6 に合流後の下流方向位置が  $z/D_m = 0.5$  における流れ方向流速と変動 RMS 値の分布を示す. 赤実線で示した本計算結果は白丸で示した三好らの INSS 実験値(三好他, INSS JOURNAL, 25 (2018)) とよく一致しており, T 字管合流部における流動を精度よく計算できていると判断できる.

図 7 に垂直断面における平均温度分布, 図 8 に温度変動 RMS 値を示す. 値は主管流入温度  $\theta_{tm}$  および枝管流入温度  $\theta_{tb}$  を用いて無次元化している. 枝管から流入した高温流体は, 壁面噴流条件というフローパターンにより主管の管軸中心までは到達せず枝管側にとどまっており, 主管の大部分は低温流体が通過している. 温度変動 RMS 値は合流部から続く混合層で特に大きな値をとっている.

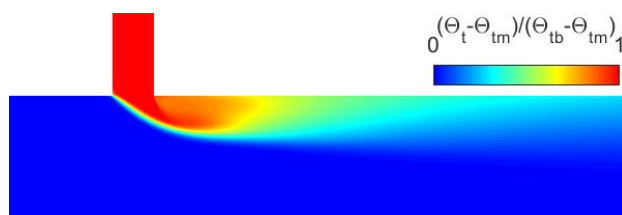


図 7 垂直断面における時間平均温度分布

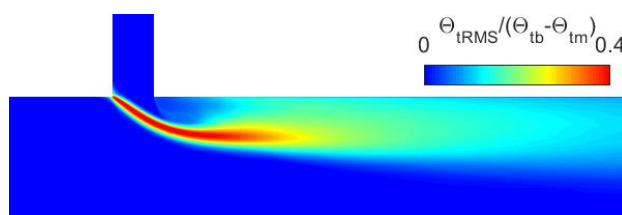


図 8 垂直断面における温度変動 RMS 値

図 9 に流体と接する配管壁面における平均温度分布, 図 10 に音頭変動 RMS 値の分布を示す. 図は壁面を展開図で示しており, 縦軸の周方向については, 枝管接続部を  $\theta = 0^\circ$  として  $-90^\circ$  から  $90^\circ$  の範囲としている. 枝管の後流に温度の高い領域が形成され, 高温な領域と低温な領域の境目で変動 RMS 値が高くなっている. 高サイクル熱疲労は, この温

度変動 RMS 値が高くなる箇所において発生すると考えられている。図 11 および図 12 に壁面の平均温度と温度変動 RMS 値の計算値と実験値の周方向分布の比較を示す。平均値と変動 RMS 値ともに本計算値は INSS の実験値とよく一致しており、流体中の温度混合の結果としての配管壁面温度を高い精度で計算できているといえる。

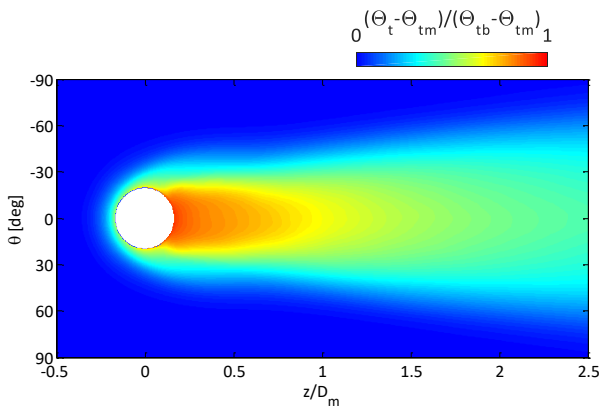


図 9 壁面の平均温度分布

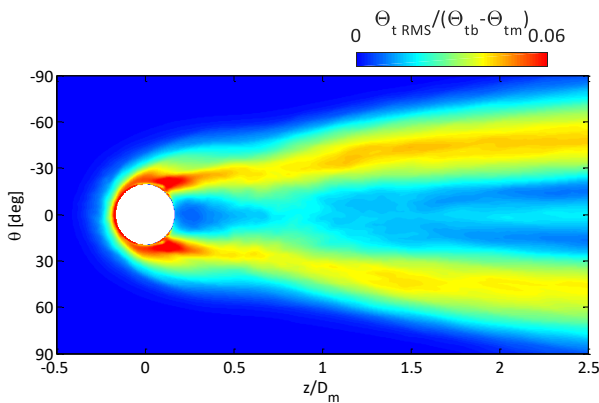


図 10 壁面の温度変動 RMS 値の分布

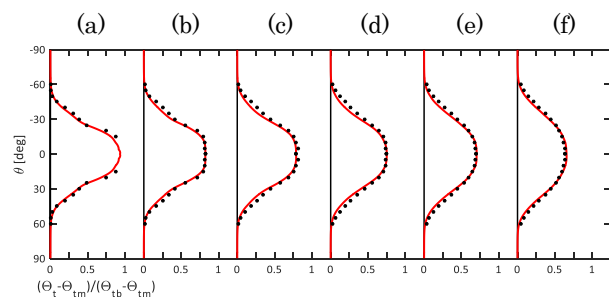


図 11 壁面の平均温度の周方向分布。流れ方向位置  $z/D_m$  は(a)0.167, (b)0.333, (c)0.5, (d)0.667, (e)0.833, (f)1. 赤実線: LES, 黒丸: INSS 実験値(三好他(2018)).

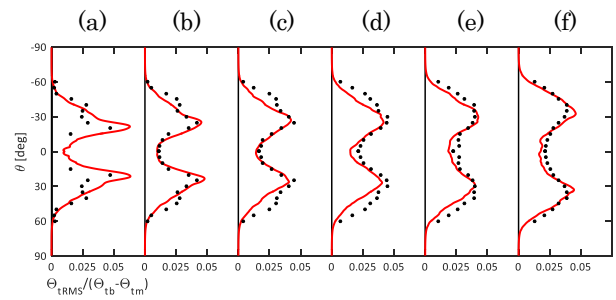


図 12 壁面の温度変動 RMS 値の周方向分布。流れ方向位置  $z/D_m$  は(a)0.167, (b)0.333, (c)0.5, (d)0.667, (e)0.833, (f)1. 赤実線: LES, 黒丸: INSS 実験値(三好他(2018)).

#### (4) 流れ加速型腐食を対象とした計算

T 字管合流部において、壁面から流体中への鉄イオンの物質伝達現象である流れ加速型腐食を対象とした LES を実施した。OpenFOAM の標準ソルバである pimpleFoam をベースとして、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いる。濃度場計算におけるサブグリッドスケールの渦拡散係数は、乱流シュミット数に基づく代数方程式モデルとした。

表 2 流れ加速型腐食を対象とした計算条件

Software	OpenFOAM-v1712
Solver	Modified pimpleFoam
Turbulent model	WALE model
Time integration	Implicit unsteady
Transient term	2nd-order backward
Convection term	2nd-order TVD
Diffusion term	2nd-order central
Pipe diameter	$D_m = 0.04$ m, $D_b = 0.013$ m
Cross-sectional average velocity	Case1: $V_m = 0.55$ m/s, $V_b = 0.846$ m/s Case2: $V_m = 0.2$ m/s, $V_b = 0.846$ m/s
Concentration of ferrous ions	Inlet: $C_0 = 0.6$ Wall: $C_w = 1$

表 2 に計算条件を示す。濃度場の計算条件は、主管と枝管の入り口において断面平均濃度が  $C_0 = 0.6$ 、壁面の濃度が一定の  $C_w = 1$  とした。流動場の条件として、主管の断面平均流速が  $V_m = 0.55$  m/s、枝管の断面平均流速が  $V_b = 0.846$  m/s であり合流後のフローパターンが壁面噴流となる条件と、 $V_m = 0.2$

m/s,  $V_b = 0.846$  m/s でフローパターンが衝突噴流となる条件の2つのケースで計算を行った。メッシュ数は約 2500 万セルである。乱流の初期発達を除き、統計解析時間として 8.8 秒間の計算を実施した。

図 13 に流れ方向の平均流速分布を示す。壁面噴流条件と比較して相対的に枝管の流れが強い衝突噴流条件では、枝管から流入した流れが主管の対壁に到達し強いせん断流れとなっている。主管の流れは枝管噴流の左右を回り込み、枝管噴流の後流に逆流領域が形成されるのは共通した流動構造である。

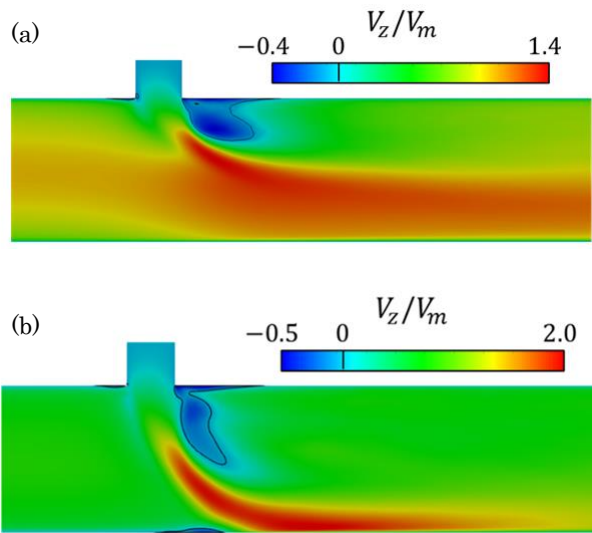


図 13 垂直断面における流れ方向平均流速分布。(a) Case1 壁面噴流条件, (b) Case2 衝突噴流条件。

図 14 に平均濃度分布を示す。値は入口の管軸中心でのバルク濃度  $C_{bulk}$  と壁面濃度  $C_w$  を用いて無次元化している。また、カラーバーの上限値を 1 ではなく 0.2 に設定し、流体中の濃度変化が把握できるようにしている。壁面噴流条件では壁面近傍の濃度境界層が大きく変化しないのに対して、衝突噴流条件では低濃度のバルク流体が枝管接続部の対壁に強く吹き付けて濃度境界層が薄くなっている様子が確認できる。

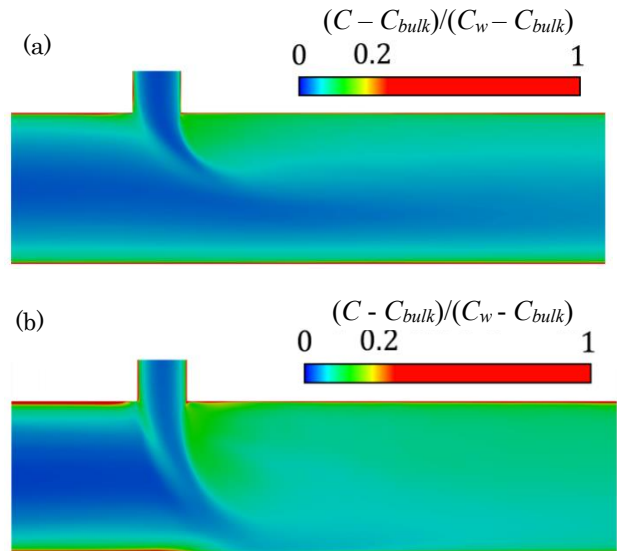


図 14 垂直断面における平均濃度分布。(a) Case1 壁面噴流条件, (b) Case2 衝突噴流条件。

図 15 に壁面における物質移行係数  $k$  の分布を示す。値は合流後の断面平均流速と同じ流速の円管発達乱流における物質移行係数  $k_0$  で無次元化している。壁面噴流条件の場合には、物質移行係数が増加するのは枝管接続部の近傍と、枝管接続部の後流領域のみである。枝管接続部の周辺以外では  $k/k_0$  は 1 に近い値を示している。衝突噴流条件では、枝管接続部の周囲以外にも枝管接続部の対壁で顕著に物質移行係数が高い値を示している。これは枝管噴流が強くあたっているためではあるが、直接的に流れがあたっている領域よりも広い範囲で物質移行係数の増加がみられた。これは、図 16 に示す枝管噴流と主管流れの間の混合層で発生した渦構造が、枝管接続部の対壁の広い範囲で濃度境界層を乱し、物質輸送を促進しているためだと考えられる。

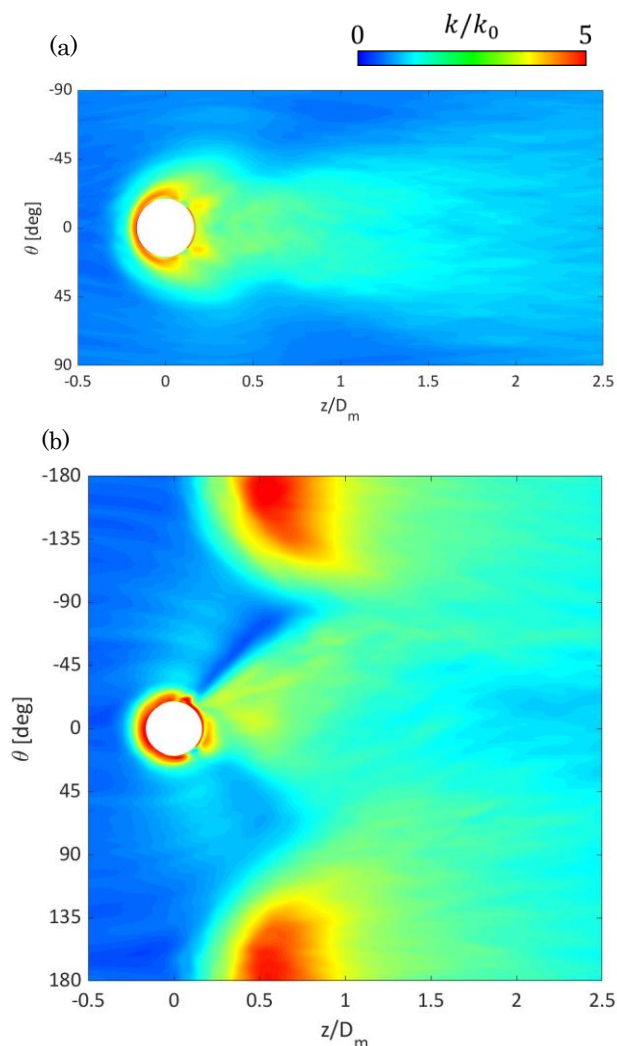


図 15 壁面における物質移行係数の分布。(a) Case1 壁面噴流条件, (b) Case2 衝突噴流条件。



図 16 衝突噴流条件において速度勾配テンソルの第 2 不変量  $Q$  の等値面により可視化した渦構造

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

2020 年 7 月に更新された名古屋大学の新システムにおいて OpenFOAM を用いた大規模な数値流体計算を実施した。本研究では以

前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 を使用したが、新しい v2006 でも計算が実施できることを確認した。OpenFOAM に合わせた並列計算のための intel MPI の情報等も情報基盤センターより提供されており、不具合なく計算環境を構築できた。本計算は主に type 2 サブシステムを用いて実施した。

高サイクル熱疲労を対象とした計算では、OpenFOAM の標準ソルバである chtMultiRegionFoam を使用し、T 字管合流部の熱流動と配管構造部の熱伝導を連成した計算を行った。本年度課題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。これは、INSS が実施した実験結果から流体中の長周期的な温度変動が高サイクル熱疲労に及ぼす影響が示唆されており、その解析を実施するためである。今後、構築した時系列データを対象として、温度の時間変動特性や流体と配管構造間の熱伝達特性の解析を進める予定である。

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。

7. 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）

小林篤史, 林健, 恒吉達矢, 辻義之, T字管合流部における流れ加速型腐食に関する物質輸送の数値流体解析, 日本機械学会東海支部第 69 期総会・講演会, (2020)

小林篤史, 恒吉達矢, 辻義之, T字管合流部における流れ加速型腐食に関する物質輸送の LES, 第 34 回数値流体力学シンポジウム, D11-4 (2020).