

OpenFOAM を用いた乱流スカラー輸送の大規模数値計算

恒吉達矢

名古屋大学 工学研究科

1. はじめに

火力・原子力発電プラントの炭素鋼配管における減肉事象の一因として、流れ加速型腐食が挙げられる(Dooley and Chexal, 2000)。流れ加速型腐食は基本的には腐食による減肉 (corrosion) であり、気液二相流条件下で生じる液滴や気泡の配管内壁への衝突による機械的な作用による減肉 (erosion) とは区別される。流れ加速型腐食の本質は、配管内壁から流体中への鉄イオンの物質伝達現象であり、流体力学因子として壁面の物質移行係数 k_c を正確に算出することが求められている。著者を含む研究グループでは、電気化学的手法による物質移行係数の直接的な測定実験とともに、数値計算により物質移行係数の算出と乱流スカラー輸送の解析を行ってきた。流れ加速型腐食が発生する個所は、オリフィスやエルボのように、流れが剥離や再循環、旋回といった3次元的に複雑なパターンであるとともに、非定常性が強い場合が多い。そのため、数値計算においては、Large Eddy Simulation (LES) による解析が有効である。LES で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を可能としている。

著者らは、LES を用いた流動場計算とともに、鉄イオンの濃度場を模擬したパッシブスカラーとして温度場を計算し、壁面の物質移行係数 k_c に相当する熱伝達率 h を求めた(恒吉他, 2017)。浮力や密度変化を考慮しないパッシブスカラーとして温度場を計算する限り、温度場と濃度場の支配方程式の差異はない。ただし、計算条件として、水の熱伝達における無次元拡散係数であるプラントル数 Pr は 5.847 であり、流れ加速型腐食の物質伝達における無次元拡散係数であるシュミット数 Sc (100~1000)とは値が異なっている。流動場中の最小渦スケールであるコルモゴロフ・スケール η に対して、熱や物質のスカラー輸送では $Pr > 1$ あるいは $Sc > 1$ の条件において、変動の最小スケールはバチェラー・スケール $\eta_s = \eta/\sqrt{Pr}$ 、 $\eta_s = \eta/\sqrt{Sc}$ となる。LES では必ずしも、最小スケールまで直接的に計算するわけではないが、高プラントル数条件において計算精度を維持するためには相応にメッシュ数を増加させた大規模計算が必要となる。

本研究では、数億セルのメッシュを設定し、レイノルズ数が 15000 のエルボ管流れを対象に、プラントル数が 1、5.847、25、64 の 4 条件における温度場計算を行い、プラントル数の違いが温度場の形成や壁面の熱伝達に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 数値計算方法

計算にはオープンソースコードである OpenFOAM(version 2.2.1)を用いた(OpenCFD, 2015)。計算条件を表 1 に示す。鉄イオンの濃度場を模擬したスカラー場として温度場の計算を行うため、OpenFOAM の標準ソルバのひとつである pimpleFoam をベースとしてコードの追加および修正を行った。ひとつの流動場計算に対して、異なるプラントル数条件の温度場計算を同時に行うようにしている。これにより、実験的測定では不可能な、完全に同一な流動場における、異なる条件のスカラー場の解析を可能としている。

表 1 LES の計算条件

Software	OpenFOAM (2.2.1)	
Solver	Modified pimpleFoam	
Turbulent model	Dynamic Smagorinsky model	
Fluid	Kinematic viscosity	$\nu=8.5735\times 10^{-7}$ m ² /s
	Prandtl number	$Pr=1, 5.847, 25, 64$
	Turbulent Prandtl number	$Pr_t=0.9$
Time integration	Implicit unsteady	
Transient term	2nd-order backward difference scheme	
Convection term	2nd-order total variation diminishing scheme	
Diffusion term	2nd-order central difference scheme	
Boundary conditions	Inlet	Fully developed
	Outlet	Constant total pressure
	Wall	Non slip
Reynolds number	$Re=V_{z0}D/\nu=1.5\times 10^4$ (V_{z0} : Cross sectional mean streamwise velocity)	

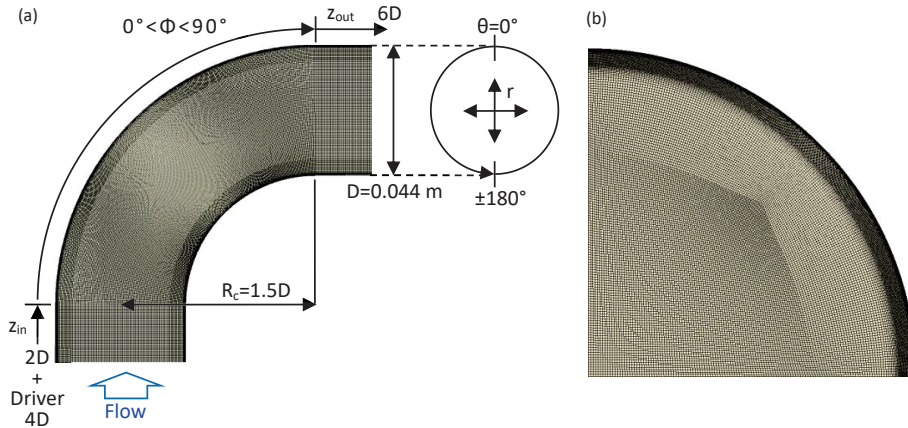


図 1 (a)計算領域とメッシュの概要図、(b)円管断面におけるメッシュ概要。

LES の乱流モデルは動的スマゴリンスキーモデル(Germano et al., 1991)を用いた。OpenFOAM の標準ライブラリにおける動的スマゴリンスキーモデル(homogeneousDyn Smagorinsky)は計算対象として一様乱流を想定している。そこで、壁乱流の計算で使用するための修正(OpenFOAM Foundation, 2015)を行った。サブグリッドスケールの乱流熱拡散の算出に用いる乱流プラントル数 Pr_t は 0.9 とした。管直径 D および断面平均流速 V_{z0} を用いて定義されるレイノルズ数 Re は 15000 とした。時間発展は 2 次精度後退差分を用いた陰解法である。移流項は制限関数に superbee を用いた TVD スキームを適用した。拡散項は 2 次精度中心差分である。

図 1 に計算領域の概要を示す。エルボ管の形状は、曲り中心から管軸中心までの距離で定義される曲率半径が $R_c = 1.5D$ の 90 度エルボである。計算領域は、エルボの上流側および下流側に $6D$ の長さを設定した。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。温度場計算の境界条件は、プラントル数の違いによらず、入り口での断面平均温度を 300 K、壁面を 310 K の等温加熱条件とした。統計処理時間 t は、乱流の初期発達を除いた 2 秒から 12 秒までの 10 秒間とした。これは、 $V_{z0}t/D = 66$ であり、計算領域を断面平均流速で 5 回程度流下するのに要する時間である。

メッシュはヘキサメッシュ(6面体セル)を用いた。セルサイズ L は円管発達乱流における摩擦速度 u_τ を用いた無次元数 $L^+(=u_\tau L/\nu)$ で表した場合に、壁垂直方向が 0.12 から 1.1、周方向が 1.2、流れ方向が 3.7 である。これは、プラントル数が最も大きな $Pr = 64$ の温度場計算において、相対的なセルサイズ $L^{++}(=\sqrt{Pr}L^+)$ で表した場合に、壁垂直方向が 1.0 から 8.8、周方向が 10、流れ方向が 30 となるようにしている。メッシュ数は、円管断面において約 14 万セル、計算領域全体で約 4.7 億セルである。

本計算には東京大学の Oakforest-PACS を用いた。64 ノードを使用し、4096 並列での計算を実施した。Xeon Phi の物理 68 コアのうち、OS ジッタを避けるため最初の 2 コア (0, 1) 以外から 64 コアを使用し、Hyper-Threading は使用しなかった。プリポスト処理の一部には、名古屋大学の大規模共有メモリシステムである SGI UV2000 を用いた。

3. 結果および考察

3.1 エルボ管の流動場

図 2 (a)に管軸を含む垂直断面における瞬時の流れ方向流速のコンター、図 2 (b)にエルボ出口の円管断面における瞬時の 2 次流れをコンターとベクトルで示す。垂直断面のコンターをみると、エルボの腹側から流れの剥離が生じていることが確認できる。本計算条件の $Re = 15000$ では、エルボの曲がり角がおよそ $\phi = 45^\circ$ において、流れの剥離が生じている。エルボへの流入時には、主流部の高速領域は腹側に偏っている。エルボ内腹側からの流れの剥離とともに、高速領域は管軸中心へ移り、さらにエルボを通過した後は背側への偏流となる。剥離流れの後流の腹側出口周辺では、流れ方向の流速が小さくなっている。瞬時場で見るとわずかに逆流も生じている。ただし、平均流速において逆流は生じていない。エルボ出口の円管断面でもわかるとおり、円管中心の主流部は、定常的に背側へ向かっている。壁面に近い領域では、管壁に沿って背側から腹側へ回り込む旋回流が発生している。この旋回流は非定常性が強く、旋回流が左右から流れ込むエルボ出口周辺の腹側では、細かな擾乱が生じており、流れ方向成分と 2 次流れ成分ともに流速変動が大きい。

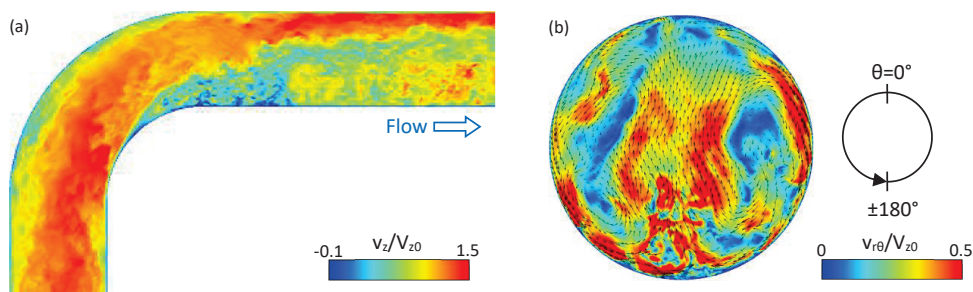


図 2 (a)垂直断面における瞬時の流れ方向流速、(b)エルボ出口における瞬時の 2 次流れ。

3.2 異なるプラントル数条件における温度場

図3に垂直断面における瞬時の温度場を示す。時刻は図2に示した流動場と同一である。瞬時温度 θ_t は時間平均したバルク温度 θ_{tb} との差を取り、壁面とバルクの温度差($\theta_{tw} - \theta_{tb}$)により無次元化している。プラントル数の違いにより、温度の変化量が大きく異なることがわかる。 $Pr = 1$ の場合は、エルボ腹側の剥離流れの後流において、温度が大きく上昇している。また、エルボ出口から下流にかけて腹側の広い範囲で温度の上昇が確認できる。 $Pr = 5.847$ の場合は、 $Pr = 1$ の場合と比較して、エルボ腹側における温度の上昇が抑えられていることがわかる。エルボ出口における温度分布をみても、腹側の温度変化は $Pr = 1$ の場合の半分程度まで減少している。プラントル数の増加により、エルボ腹側の温度変化はさらに小さくなっていく。 $Pr = 25$ と $Pr = 64$ の場合は、コンターにおいて、剥離点の下流側の比較的剥離点に近い範囲では温度の上昇が確認できるが、エルボ出口周辺の温度変化はわずかである。ただし、プラントル数の増加により温度上昇は減少するが、流速変動によって生じた高温と低温の温度変動の分布傾向はほとんど同一である。剥離せん断層や剥離の後流の流速変動が大きな領域で顕著であるが、図2に示した流動場の擾乱に対応した温度変動が確認できる。温度の変化量はプラントル数に依存するが、温度の分布傾向は流動場によって一意に定まっている。

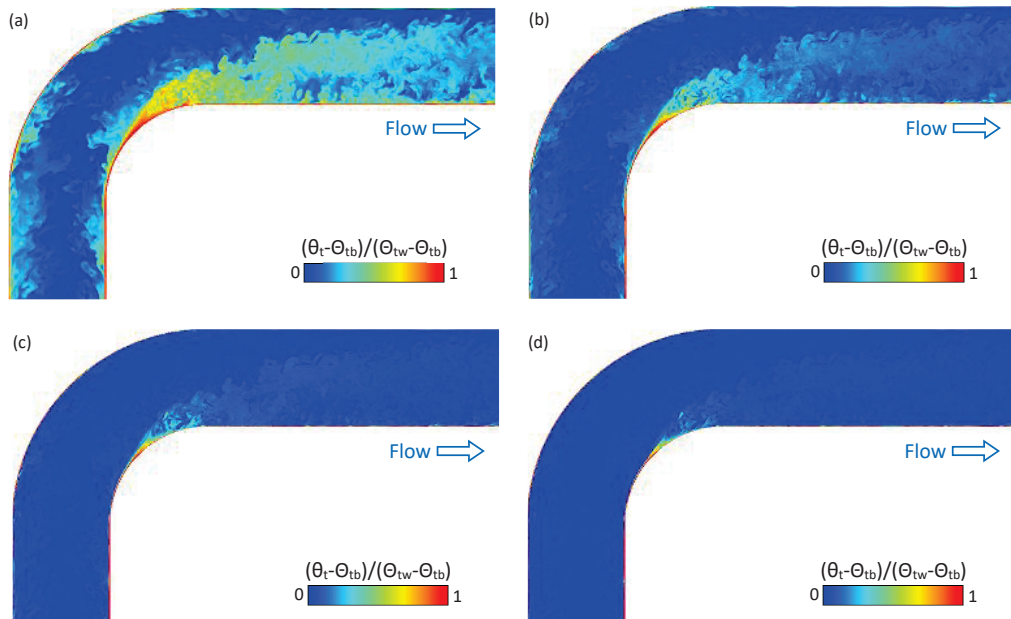


図3 垂直断面における瞬時の温度分布。(a) $Pr=1$, (b) $Pr=5.847$, (c) $Pr=25$, (d) $Pr=64$ 。

3.3 エルボ管壁面におけるヌセルト数のプラントル数依存性

図4に壁面の熱伝達率 h を無次元化したヌセルト数 Nu として示す。壁面は展開図で示しており、横軸が流れ方向位置、縦軸が周方向位置である。流れ方向位置は、エルボ入り口を $z = 0$ としており、 $z/D = 2.36$ がエルボ出口である。プラントル数を大きくすると、ヌセルト数の値はおおよそプラントル数の0.4乗に比例して大きくなる。異なるプラントル数において、エルボ管壁面のヌセルト数の分布傾向は概ね一致している。エルボ入口のわずかに下流側からエルボ出口にか

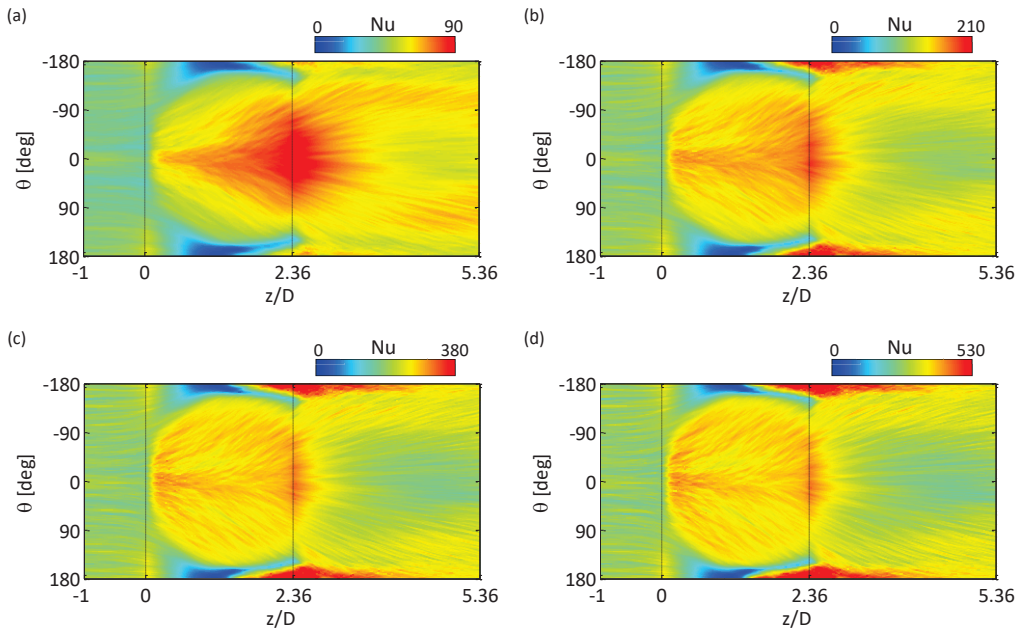


図 4 壁面展開図におけるヌセルト数の分布。(a) $Pr=1$, (b) $Pr=5.847$, (c) $Pr=25$, (d) $Pr=64$ 。

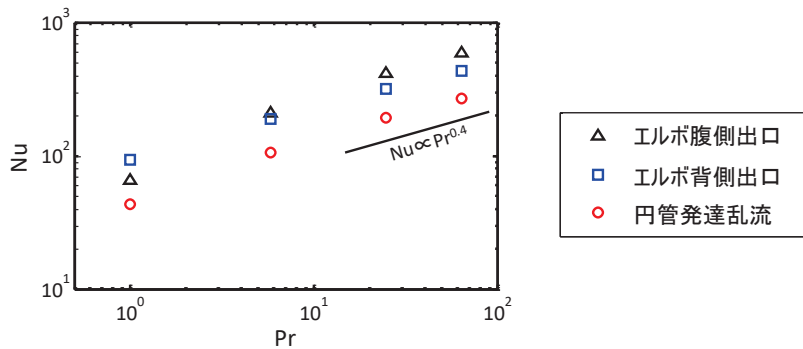


図 5 エルボ管流れにおけるヌセルト数のプラントル数依存性。

けて、背側を中心に広く値の高い領域が分布している。また、腹側のエルボ出口周辺においてもヌセルト数が鋭く増加している。ただし、プラントル数が高い $Pr = 25$ と $Pr = 64$ のヌセルト数分布が定性的によく一致しているのに対して、 $Pr = 1$ の場合のヌセルト数分布はやや異なっている。他の条件と異なり、 $Pr = 1$ の場合は、エルボ出口において腹側よりも背側の方がヌセルト数の値が大きい。図 5 にエルボ出口の背側と腹側におけるヌセルト数のプラントル数依存性を示す。また、ドライバー部の円管発達乱流における値もあわせて示す。円管発達乱流では、熱伝達の経験式として Dittus-Boelter の式 (Dittus and Boelter, 1930) が広く用いられており、ヌセルト数のプラントル数依存性としては $Nu \propto Pr^{0.4}$ とされている。本計算においても、円管発達乱流におけるヌセルト数は $Nu \propto Pr^{0.4}$ に近い依存性を示している。しかし、エルボ出口におけるヌセルト数は腹側と背側でそれぞれ異なるプラントル数依存性を示している。特に、プラントル数が低い領域ではその差異が顕著である。エルボ背側出口は、主流部の偏流が強く、壁面近傍の流速変動

は比較的小さい。一方、エルボ腹側出口は、平均流速は小さいが、非定常性の強い旋回流の影響により、壁面近傍においても流速変動が大きい。この複雑流動との複合的な効果により、円管発達乱流とは異なるヌセルト数のプラントル数依存性が表れたものと考えられる。

4. まとめ

OpenFOAM を用いて、レイノルズ数が 15000 のエルボ管流れを対象に流動場および温度場の LES 計算を実施した。同一のエルボ管流動場に対して、温度場の無次元拡散係数であるプラントル数が 1、5.847、25、64 の 4 条件において温度場計算を行い、プラントル数の違いが温度場の形成や壁面の熱伝達に及ぼす影響について考察した。

エルボ管において形成される流動場は、曲がりの背側と腹側で大きく異なる。背側は管壁への偏流が強く、時間的な擾乱は少ない。腹側では、背側から管壁に沿って回り込む旋回流の影響により、非定常性が強い流れ場となっている。本計算の結果、このエルボ管流動場における熱伝達現象において、プラントル数の違いによる複雑な効果があらわれることを明らかにした。円管発達乱流におけるヌセルト数はプラントル数 Pr の 0.4 乗に比例することが知られているが、エルボ管の壁面のヌセルト数は必ずしも $Nu \propto Pr^{0.4}$ とはならない。特に、プラントル数が低い領域ではその差異が顕著である。この流動場の状況による異なるプラントル数効果について、今後より詳細な解析を行う予定である。

謝 辞

本研究は東京大学情報基盤センター「若手・女性利用者推薦」平成 29 年度（前期）の課題として行われたものである。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- Dittus, F. W. and Boelter, L. M. K., Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, University of California Publications in Engineering, Vol.2, No.13 (1930), pp.443-461.
- Dooley, R. B. and Chexal, V. K., Flow-accelerated corrosion of pressure vessels in fossil plants, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.77, No.2-3 (2000), pp.85-90.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H., A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, Physics of Fluids A, Vol.3, No.7 (1991), pp.1760-1765.
- OpenCFD, OpenFOAM: The open source computational fluid dynamics(CFD) toolbox, available from <<http://www.openfoam.com>>, (accessed on 26 May, 2015).
- OpenFOAM Foundation, Bug Reporting (issue #99): Dynamic Smagorinsky model with local coefficient values, available from <<http://www.openfoam.org>>, (accessed on 26 May, 2015).
- 恒吉達矢, 伊藤高啓, 歌野原陽一, 辻義之, 形状係数測定における壁面伝達境界条件が及ぼす影響に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.847 (2017), DOI:10.1299/transjsme.16-00417.