

数値流体解析による流れ場の再現(第1報)

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 小川口深雪
(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 杉本 健二

キーワード : 流れ加速型腐食
数値流体力学
バックステップ
再付着
RANS
SST k- ω

Key Words : FAC
CFD
backward-facing step
reattachment
RANS
SST k- ω

Reproduction of flow field by computational fluid dynamics (the first report)

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department
Miyuki Ogawaguchi, Kenji Sugimoto

Abstract

The pipe wall thinning phenomenon due to flow-accelerated corrosion (FAC) sometimes occurs in carbon steel piping in power plants. In accordance with the pipe wall thinning management rules established by the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), the wall thinning is conservatively controlled by measuring wall thickness using ultrasonic waves. However, for locations where wall thickness measurement is difficult, such as under reinforcement plates, it is desirable to predict the distribution of wall thinning. In this paper, we report on a case study of backward-facing step flow simulation using computational fluid dynamics (CFD), which was conducted prior to the prediction of wall thinning by FAC.

The CFD simulation reproduced qualitative flow fields such as the recirculation region that occurs between the separation and reattachment points and the velocity recovery downstream. The reattachment length, mean velocity distribution, and turbulent kinetic energy distribution were compared with experimental data. The reattachment length in the analysis was within the range of the experimental values. The mean velocity and turbulent kinetic energy distributions were found to be in good agreement with the experimental data, both quantitatively and qualitatively.

1. はじめに

原子力や火力の発電プラントの給水・復水系統などの炭素鋼配管では、流れ加速型腐食（FAC：Flow-Accelerated Corrosion）などによる配管減肉が生じることがあり、仮に配管破損に至った場合には高エネルギー流体が噴出し、人や設備に対して大きな影響を与える可能性があるため、適切な管理が求められている。現在では、日本機械学会の規格^{1),2)}に従って、超音波による肉厚測定により保守的な管理がなされているが、補強板下などの肉厚測定が難しい箇所に対しては、減肉分布予測が望まれている。

FACのメカニズムについては一部未解明の点が残されているものの、配管内面における鉄イオンの溶出が、流れ場の局所的な乱れにより加速される一種の腐食現象と考えられている。FACの発生・進展傾向は、環境（温度、溶存酸素濃度、pH等の水質）、配管材料（クロム等の含有量）、流れ場（流速、配管形状）により大きな影響を受けることが知られている³⁾。FACの発生しやすい配管形状としては、流路断面積が変化するオリフィスや流れ方向が曲げられるエルボ等があり、実際にFACが発生している部位の例として、PWRでは主給水ポンプ吸込配管、ヒータードレン・給水加熱器抽気配管が挙げられる¹⁾。

本稿では、FACによる減肉予測に先立って実施した、バックステップ流れを対象とした数値流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics）解析による再現事例を報告する。

2. 流れ場の再現解析

2.1 バックステップ流れ

バックステップ流れは、図1のようにステップ（段差）で流路が急拡大する流れであり、最も基本的な流れ場のひとつとして、これまでに多くの実験的および解析的研究が行われている。上流からの流れは、ステップ直後で壁面から離れ（剥離）、下流側で再度壁面に沿って流れる（再付着）。さらに下流側においては、徐々に発達した流れ場に回復していく。剥離点と再付着点の間では再循環領域が存在し、壁面付近において主流とは逆方向の流れが発生する。また、ステップで剥離した流れは剥離せん断層と呼ばれ、図1のようなせん断層が存在することが知られている⁴⁾。

流路の形状は2次元で単純な構造となるが、流れの剥離、再循環、再付着や速度回復など複雑な乱流現象を伴う流れ場として知られている。

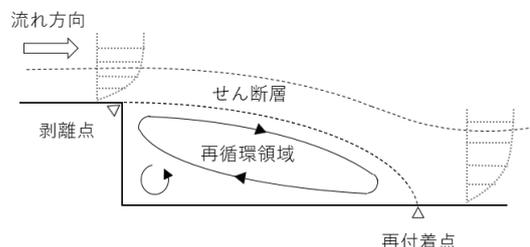


図1 バックステップ流れのパターン⁴⁾

2.2 実験体系

バックステップ流れの再現解析として、伊藤らの実験⁵⁾を対象とした。伊藤らは、表2に示すようなバックステップ（ステップ高さ40mm、流路拡大率1.5）を持つ流れ場に対し、三次元画像処理流速計を用いてステップ後方の剥離再付着流の乱流測定を行った。作動流体である水に投入されたトレーサ粒子を3台のCCDカメラによって撮影、三次元画像処理することで、流速および乱流運動エネルギーなどを算出している。測定領域は、流れ方向をステップ位置上流8mmからステップ位置下流480mmとし、奥行き方向を40mmとしている。

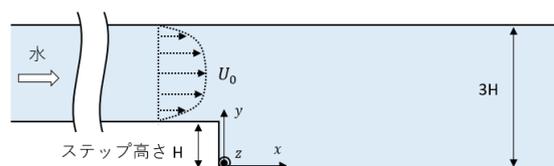


図2 実験の模式図⁵⁾

表1 実験条件⁵⁾

流路拡大率	1.5
ステップ高さ	H = 40mm
ステップのレイノルズ数	$(U_0 H) / \nu = 5400$
測定領域	$-0.2 < x/H < 12.0$
	$0.0 < y/H < 3.0$
	$-0.5 < z/H < 0.5$

3. 解析方法

3.1 基礎方程式と乱流モデル

数値流体力学の基礎方程式は、流体の運動方程

式である Navier-Stokes 方程式と質量保存則である連続の式がある。しかし、非線型偏微分方程式である Navier-Stokes 方程式をコンピュータで解くには、膨大な計算時間およびメモリが必要となる。そのため、時間的および空間的に平均化を行うことで計算コストを削減している。

平均化手法のひとつとして、流速を時間平均成分と変動成分に分解(レイノルズ分解)して平均化操作を施した乱流モデルをレイノルズ平均モデル(RANS : Reynolds Averaged Navier Stokes)と呼ぶ。レイノルズ平均化した基礎方程式である Navier-Stokes 方程式と連続の式を以下に示す⁶⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

ここで、 ρ : 流体の密度、 u_i : 平均速度成分、 u_i' : 変動速度成分、 p : 平均化された圧力、 μ : 粘性係数とする。

レイノルズ平均化することで、乱流の影響を表す付加的な項が(1)式右辺の第3項に現れる。(1)式を閉じるため、このレイノルズ応力($\rho \overline{u_i' u_j'}$)をモデル化する必要があり、工学的には $k-\varepsilon$ モデルに代表される乱流モデルが使用される。ここでは、SST $k-\varepsilon$ 乱流モデルの基礎方程式として、乱流運動エネルギー k と比散逸率 ω の輸送方程式(3)(4)を示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 G_k , G_ω : 平均速度勾配による乱流運動エネルギー k および比散逸率 ω の発生、 Γ_k , Γ_ω : k および ω の有効拡散係数、 Y_k , Y_ω : 乱流による k および ω の散逸、 D_ω : クロス拡散項、 S_k , S_ω : 補正項とする。

本稿では、事前に複数の乱流モデルを試し、再付着点位置の再現性が最も高かった SST $k-\varepsilon$ 乱流モデルを選定する。SST $k-\varepsilon$ 乱流モデルは、壁面近傍の乱流挙動をモデル化し易く、剥離を伴う流れ場の再現性に定評がある。

3.2 解析モデル

解析モデルを図3に、解析条件を表2に示す。作動流体は水であり、実験でのレイノルズ数(Re=5400)を再現する流速を流入境界に設定した。ここで、上流部の助走区間を長め(150H)に設定し、ステップ上流の速度分布の再現精度を高めた。実験における測定領域をモデル化するため、高さ方向(y方向)やステップの壁面にはNo Slip条件を与えた。ここで、再付着点位置を評価するにあたり、壁面近傍の再現精度を確保するために5層の境界層を設定した。さらに、奥行き方向(z方向)の境界面には鏡面境界としてSlip条件を、流出境界には基準圧力0Paを与えた。

解析には汎用数値流体解析ソフトウェアANSYS Fluent 2022 R2 (Ver. 22.2)を使用した。

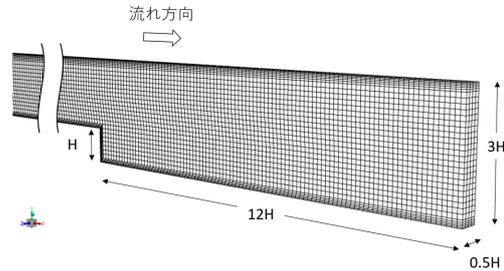


図3 解析モデル

表2 解析条件

乱流モデル	SST $k-\varepsilon$
流体密度	998.2 kg/m ³
流体粘性係数	1.003×10 ⁻³ Pa·s
境界条件	流入境界 : 0.136 m/s 流出境界 : 0 Pa 壁面境界 : No Slip 条件 鏡面境界 : Slip 条件
計算領域	-150 < x/H < 12.0 0.0 < y/H < 3.0 0.0 < z/H < 0.5
メッシュ数	127,648 cells

4. 解析結果

4.1 流れのパターンおよび再付着点

バックステップ流れのパターンを見るため、流跡線を確認した(図4)。赤色部分は流速が速く、青色部分は流速が遅いことを示す。ステップ直後の剥離点から再付着点の間に、流速が遅い再循環領域が発生していることが確認できる。また、下流に向かうにつれて速度分布の回復傾向がみられる。以上のことは、一般的に知られている挙動と一致しており、定性的な流れを再現できていると考えられる。

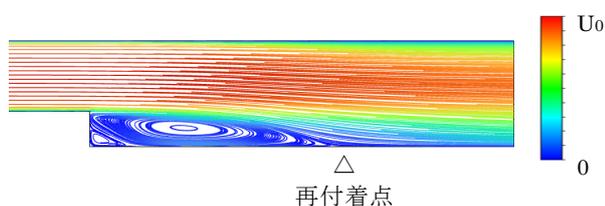


図4 流跡線

次に、再付着点の位置の比較を行う。再付着点付近では流れの方向が変化するため、壁面せん断応力が小さくなる(図5)。そのため、解析における再付着点は、壁面せん断応力によって評価した。

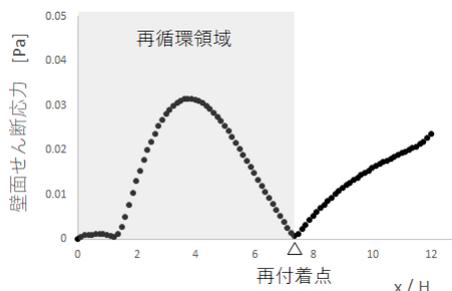


図5 壁面せん断応力と再付着点の関係

再付着点位置の実験値と解析値の比較を表3に示す。図5から求めた解析値は、実験値の範囲内となっており、良好に再付着点位置を再現できたと考えられる。参考までに、伊藤らの実験のレイノルズ数に該当するAdamsら⁴⁾によって整理された実験データを表3に付記する。今回の解析値はこれら類似実験の結果とも整合する。

表3 再付着点の位置の比較

実験値 ⁵⁾	6.5H~7.5H
解析値	7.4H
(参考)Adamsらの整理 ⁴⁾	6H~8H

4.2 流速分布

流れ方向(x方向)平均速度分布および乱流運動エネルギー分布に対して実験値と解析値の比較を行う。図6は、代表断面における流れ方向の平均速度分布に対する、実験値と解析値の比較を示している。x/H=1.44断面における逆流方向のピーク位置など一部異なるものの、解析値と実験値は、定性的にも定量的にもおおむね一致していることがわかる。

今回、ステップ上流部の流速分布を実験値と一致させるために助走領域を長めに設定した。これにより、ステップ下流側の流れ場の再現精度が向上したと考える。

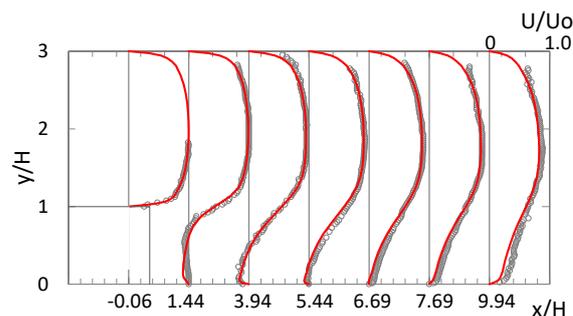


図6 流れ方向平均速度分布の実験値⁵⁾と解析値の比較(○:実験値, -:解析値)

4.3 乱流エネルギー分布

FAC減肉評価において重要なパラメータのひとつと考えられている乱流運動エネルギー分布を確認する。代表断面における乱流運動エネルギー分布に対する、実験値と解析値の比較を図7に示す。乱流運動エネルギーはせん断層境界に沿って大きな値を示しており、定性的な挙動は実験値とよく一致している。

乱流運動エネルギーの最大値が、x/H=1.44断面において過小評価、x/H=5.44断面において過大評価となるのを除けば、おおむね定量的にも一致していると考えられる。なお、x/H=1.44断面における過小評価は、その上流部であるx/H=-0.06断面の壁面近傍における乱流運動エネルギーが、実験より小さくなっているためと考え

られる。今後、壁面近傍の乱流運動エネルギーの再現に課題が残る。

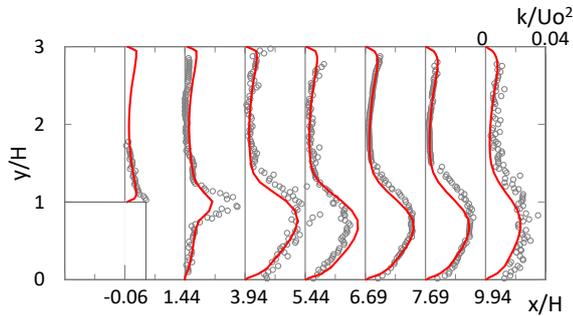


図7 乱流運動エネルギー分布の実験⁵⁾と解析の比較 (○：実験値，－：解析値)

- 4) A. W. Adams and J. P. Johnston: “Effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure. Part 2: Reattachment length and wall shear stress”, *Exp. Fluids* 6, pp.493-499, 1988
- 5) 伊藤信明, 笠木伸英: 「三次元画像処理流速計によるステップ後方剥離再付着乱流の計測」, *流れの可視化*, Vol.9, No.34, pp.245-248, 1989
- 6) Ansys Inc.: “Ansys Fluent Theory Guide 2022R2”, 2022

5. まとめ

バックステップ流れ実験を対象に、流れの再現解析を行った。再循環領域および速度回復など、定性的な流れ場を再現できた。

実験値との比較を行った結果、再付着点の位置は良好に再現できており、また、流れ方向平均速度分布および乱流運動エネルギー分布は、一部を除き定量的、定性的に実験とおおむね一致していることが確認された。

今後は、他の流れ場の再現解析を試みるとともに、実験や実機の減肉データと流体力学パラメータの関連性調査等を予定している。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)原子力本部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 日本機械学会: 「発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格 (2016年版)」, JSME S CA1-2016
- 2) 日本機械学会: 「発電用原子力設備規格 加圧水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格 (2016年版)」, JSME S NG1-2016
- 3) 歌野原陽一, 村瀬道雄, 中村晶: 「炭素鋼配管での流れ加速型腐食に関する研究」, 日本機械学会 流体工学部門ホームページ, 2016 https://www.jsme-fed.org/papertech/2016_01/001.html