# 数値流体解析による流れ場の再現(第2報)

㈱四国総合研究所 エネルギー技術部 小川口深雪㈱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 Key Words: FAC 数値流体力学 CFD T管 7ローパターン Flow pattern 壁面噴流 Wall jet 乱流運動エネルギー Turbulent kinetic energy

#### Reproduction of flow field by computational fluid dynamics (the second 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 T-junction flow simulation using computational fluid dynamics (CFD), which was conducted prior to the prediction of wall thinning by FAC.

CFD flow analysis was performed on a T-junction flow visualization experiment to understand the flow behavior at the T-junction confluence. It was confirmed that the CFD analysis was consistent with the relationship between the momentum ratio of the flow in the main pipe and the branch pipe and the flow pattern, that it reproduced well the complex flow field at the T-junction confluence, and that it was in good qualitative and quantitative agreement with the flow velocity distribution in the flow experiment.

The distribution of turbulent kinetic energy, which is one of the hydrodynamic parameters related to the evaluation of wall thinning in FAC, was confirmed at the inner wall of the pipe. As in previous studies on wall thinning, two peaks were found to occur in the wake of the confluence.

### 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<sup>1),2)</sup>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<sup>3)</sup>。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<sup>1)</sup>。

 第1報では、基本的な流れ場であるバックス
テップ流れを対象とした数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)による再現解析 を報告した。本報では、実機における偏流発生部 位であるT管流れを対象とした CFD による再現事 例を報告する。

#### 2. 流れ場の再現解析

プラントで多数使用されているT字形配管にお いて、主管の流れと枝管の流れが合流する部位で は流れに乱れが生じ、複雑な流れ場となる。ここ では、Kamide ら<sup>4)</sup>による熱流動現象に着目したT 管流れの可視化実験を対象に、合流部における流 れの挙動の把握を行う。

# 2.1 T管流れ

T管合流部におけるフローパターンは、枝管からの噴流の向きによって特徴づけられる(図 1)。 代表的なフローパターンとして、枝管噴流が主管 下部(枝管側)の内壁に押し付けられるような「壁 面噴流」、枝管噴流が主管の中央付近を通るような 「偏向噴流」、枝管噴流が主管上部(枝管と反対側) に衝突する「衝突噴流」がある。枝管の流速を一 定とした場合、主管の流速が小さくなるにつれ、 壁面噴流から衝突噴流へ移行する。

これらの3つのフローパターンは流入条件の違いにより分類でき、主管を流れる流体の運動量 $(M_m)$ と枝管を流れる流体の運動量 $(M_b)$ の比 $M_R(=M_m/M_b)$ により判別できる<sup>4)</sup>。



### 2.2 実験体系

Kamide ら<sup>4)</sup>は、熱流動現象に着目したT管流れ 場を対象に、詳細な温度分布ならびに速度分布を 確認する実験を行った。実験では図2のように、 内径 ( $D_n$ )150mmの水平に置かれた主管に、内径 ( $D_b$ ) 50mmの枝管が鉛直方向から合流するT字管体系 としている。作動流体は水である。主管流速 ( $V_n$ ) を 0.1~3m/s、枝管流速 ( $V_b$ )を 0.5~1.5m/s の範 囲で実験を行っている。



# 2.3 解析方法

解析モデルを図3に示す。モデル化範囲は図2 の実験模式図と同様に、主管上流側には入口整流 用バッファーを含め、合流部下流は実験の測定範 囲を含む6D<sub>m</sub>(900mm)とした。配管が軸対称である ため、1/2領域対称の3次元モデルとした。主管 と枝管の中心軸の交点を原点とし、奥行き方向を x、高さ方向をy、主管流れ方向をzとしている。



次に、解析条件を表1に示す。流入境界には流 速(主管:1.46m/s,0.46m/s,0.23m/s、枝管:1.0m/s) を、流出境界には基準圧力 0Pa を与えた。管壁面 にはNo Slip 条件を、対称面にはSlip 条件を与え た。ここで、壁面近傍における流れ場の再現精度 を確保するために管内面に5層の境界層メッシュ を設定した(図3下)。また、乱流モデルとして、 第1報においてバックステップ流れを精度良く再 現できていた SST k-  $\varepsilon$ を採用した。

解析には汎用数値流体解析ソフトウェア ANSYS Fluent 2023 R2 (Ver.23.2)を使用した。

流体密度	998.2 kg/m <sup>3</sup>
流体粘性係数	1.003×10⁻³ Pa⋅s
境界条件	枝管流入境界:1.0m/s 主管流入境界:3ケース 1.46 m/s(運動量比 M <sub>R</sub> =8.1) 0.46 m/s(運動量比 M <sub>R</sub> =0.81) 0.23 m/s(運動量比 M <sub>R</sub> =0.20) 流出境界:0 Pa 壁面境界:No Slip 条件 鏡面境界:Slip 条件
メッシュ数	82,373 cells
乱流モデル	SST k- e

表1 解析条件

# 3. 解析結果

## 3.1 フローパターン

フローパターンの確認のため、T管合流部近傍 の代表断面における主管流体の質量分率コンター を図4に示す。ここでは主管からの流れを赤色、 枝管からの流れを青色で表している。図1に示し た主管と枝管内流れの運動量比M<sub>R</sub>とフローパター ンの関係と整合が取れること、可視化実験結果<sup>4)</sup> とよく一致する挙動を示すことなど、各フローパ ターンを定性的に再現できることを確認した。

詳細な流れの挙動を把握するため、壁面噴流 (M<sub>R</sub>=8.1)におけるT管合流部近傍の代表断面に おける流速分布を図5に示す。図左側からの主管 流れは枝管噴流を避けるように偏流し、図下側か らの枝管噴流の下流側には流速の遅い逆流領域 (青色部分)の形成が確認できる。



(a)壁面噴流 (M<sub>R</sub>=8.1, V<sub>m</sub>=1.46m/s)



(b) 偏向噴流 (M<sub>R</sub>=0.81, V<sub>m</sub>=0.46m/s)



図4 合流部におけるフローパターン





壁面噴流(M<sub>R</sub>=8.1)における3次元的なフロー パターンの模式図と水平断面(y=-0.43D<sub>m</sub>)におけ る流線図を図6に示す。枝管噴流の背後に1対の 渦が形成されていることが確認できる。これは、 枝管噴流が主管の流れに対する障害物的な役割と なって、カルマン渦的な流れが発生しているため と考えられる。以上のことは実験でも確認されて おり、解析においても合流部の複雑な流れ場を良 好に再現できたと考えられる。



図 6 壁面噴流 (M<sub>R</sub>=8.1) におけるフロー模式図, 水平断面 (y=-0.43D<sub>m</sub>) 上の流線解析図

# 3.2 実験データとの比較

流れの定量的な評価のため、壁面噴流(M<sub>R</sub>=8.1) における流速分布について、実験と解析の比較を 行った。主管の上流側 z=-0.53D<sub>m</sub> および下流側 z=0.5D<sub>m</sub>, z=1.0D<sub>m</sub>の位置での、軸方向速度成分(V<sub>z</sub>) を主管平均流速V<sub>m</sub>=1.46m/sで規格化した規格化平 均流速(V<sub>z</sub>/V<sub>m</sub>)のy方向分布の比較を図7に示す。

主管上流位置 z=-0.53D<sub>m</sub>における流速分布(図7(a))に関して、実験値は主管の下方(y<0)で 流速が小さくなっている。実験装置と同様に主管 上流の入口整流用バッファーをモデル化すること で、解析においても同様の挙動となることを確認 した。







図 7 規格化流速分布 (○:実験値(Exp.)<sup>4</sup>, —:解析値(CFD))

主管下流位置 z=0.5Dm における流速分布(図7(b))に関して、実験値(Exp.)および解析値(CFD)は y<-0.3Dm の領域で負の値を示しており、これは枝管噴流の背後に逆流領域が発生していることを表している。</li>

主管下流位置 z=1.0Dm における流速分布(図7(c))に関して、解析値は y=-0.3Dm 近傍で若干低めの流速を示したものの、実験値と概ね整合がとれることを確認した。

各位置における流速分布について、実験値と解 析値は定性的に一致し、定量的にもおおむね一致 している。

### 4. 考察

FAC の減肉評価に関連する流体力学パラメータ のひとつと考えられる乱流運動エネルギーについ て、壁面噴流 (M<sub>R</sub>=8.1) における管内壁での分布を 図 8 に示す。合流部後流において、乱流運動エネ ルギーが高い領域が確認される。

枝管端部の垂直断面(z=0.5D<sub>b</sub>)における各フ ローパターンの壁面乱流運動エネルギー分布を図 9に示す。角度は合流部を0°とし、反時計回りを 正とする。また、乱流運動エネルギーは、主管流 速ごとの最大値で無次元化した値を示す。各フ ローパターンとも、約±15°合流部近傍の2つ ピークがあることが確認できる。

T管における減肉に関する既往の研究<sup>5),6)</sup>より、 FAC減肉評価として合流直後に2つのピークが見 られるとしており、図8および図9で示した結果 はこれらと整合する。



図8 壁面噴流(M<sub>R</sub>=8.1)における内壁上の 乱流運動エネルギー分布(1/2領域表示)



図 9 枝管端部垂直断面(z=0.5D<sub>b</sub>)における内壁の乱流運動エネルギー分布

# 5. まとめ

FAC 減肉予測に先立って、実機における偏流発 生部位であるT管合流部を対象に流れ解析を行っ た。その結果、主管と枝管内流れの運動量比 MR と 3 つのフローパターンの関係に対して整合が取れ ていること、T管合流部の複雑な流れ場(流線) を良好に再現すること、流動実験の流速分布と定 性的および定量的におおむね一致していること、 などが確認できた。

また、FAC の減肉評価に関連する流体力学パラ メータのひとつと考えられる乱流運動エネルギー について、管内壁面での分布を確認した。その結 果、減肉に関する既往の研究と同様に、合流部後 流において2つのピークが確認された。

今後は、実験や実機の FAC 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㈱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]

- 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
- 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
- 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, 2016, https://www.jsmefed.org/papertech/2016\_01/001.html
- H. Kamide, M. Igarashi, S. Kawashima, N. Kimura, K. Hayashi : Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping, Nuclear Engineering and Design 239 pp.58-67, 2009
- 5) 川口和貴,山縣貴幸,森田良:T字配管合流部 の物質移動に関する実験的研究,第 25 回動 力・エネルギー技術シンポジウム, 2021
- 6) 林健, Tong TONG, 恒吉達矢, 辻義之: T字 配管合流部での FAC における物質移動係数 の分布に関する研究, 日本機械学会東海支部 第 69 期総会・講演会講演論文集, No.203-1, 2020