

オリフィス下流における流れ加速腐食機構に関する数値的研究

-壁面近傍流れにおける数値解析-

Numerical research on flow accelerated corrosion mechanism behind the orifice

-Numerical simulation close to the wall-

名古屋大学大学院工学研究科

七條 慎太郎

Shintaro SHICHIJO

古谷 真伍

Shingo HURUYA

近藤 昌也

Masaya KONDO

辻 義之

Yoshiyuki TSUJI

Abstract

The accident to which the secondary system piping of the Mihama Power Station Unit-3 was damaged in August, 2004 happened. This is due to thinning of the pipe, and it is thought to be flow accelerated corrosion mechanism (FAC). The turbulence kinetic energy is considered as one of the flow factors in FAC. This is because the location where the amount of thinning is large and the parts where the turbulence kinetic energy is high are corresponding comparatively well. However, the causal relation between both parts is not clarified enough and the research advances now. Then, the flow field in the orifice downstream is calculated by the numerical simulation. The numerical simulation of LES in flow field ($Re=25000$) in the orifice downstream is performed. The distribution of the turbulence kinetic energy indicates the maximum value at the position that depended on β of the open area ratio of the orifice. In the rough side shape, the position in which the turbulence kinetic energy shows the maximum changes depending on the distance from the wall.

Key words: Orifice, flow accelerated corrosion, LES, and turbulence kinetic energy

1. 緒言

2004年8月美浜原子力発電所3号機の二次系配管が破損する事故が起きた。これは配管減肉によるものであり、流れ加速腐食機構(FAC)によるものと考えられている[1]。FACは水単相流や蒸気-水二相流のオリフィス下流やエルボなどの偏流部における流れの乱れによって、炭素鋼配管内表面に形成されるマグネタイトの溶解を加速し、減肉が進行するという考え方である。FACを予測する上で有用な流動要因の一つとして乱流エネルギーが考えられてい

る。これは減肉量の多い箇所と乱流エネルギーの高い箇所が比較的良く一致しているという過去の研究に基づいている[2]。しかし両者の因果関係は十分に明らかになっておらず、現在も研究が進められている。そこで、本研究では数値解析を用いてオリフィス下流の流動場を計算し、特に粗面形状の影響について考察する。

2. 解析条件・計算手法

本研究では STAR-CCM+を用いて三次元非圧縮粘性流れを取り扱い、オリフィス管径 d と円管径 D の比、すなわち開口率 $d/D=0.62$ のオリフィス下流(図 1)における乱流場を LES を用いて計算した。また開口率の異なる $d/D=0.7$, $d/D=0.8$ の場合も計算し比較した。流動実験装置寸法に合わせて円管の直径を $D=0.0453\text{m}$, オリフィスの直径を $d=0.0281\text{m}$ とした。計算領域は円管入口からオリフィスまでの助走距離を $45D$, オリフィス下流から円管出口までを $20D$ とし, Re 数は流動実験に一致させ $Re=2.5\times 10^4$ とした。流入条件は 0.5m/s の一様流, 作動流体は水(密度 997kg/m^3 , 粘性係数 $8.8\times 10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{s}$, 温度 298K) と設定した。壁は静止壁とし, 格子数は約 620 万点, 格子形状はポリヘドラルとして, 壁付近はプリズムレイヤーメッシュを用いて壁から 1 層目までの距離を $1.69\times 10^{-5}\text{m}$, 層数 8, 伸張係数 1.2 とした。サブグリッドスケールモデルには Wale Subgrid Scale を用いた。また, 図 2 に示すような粗面形状をオリフィス下流の配管に設置した。粗面形状は, オリフィス下流に同心円状のリブを設置することにより形成した。リブ高さは配管径の 2.5% とし, 幅は 5% とした。リブどうしの間隔は $0.05D$ とし, 下流 $x/D=3$ までリブを設けた。

3. 結果

図 3 に流れ方向平均速度の等値面を示す。オリフィス直下では噴流のような早い流れが形成され, 壁近くでは上流に向かう逆流が形成される。開口比 β が小さいほどオリフィス部で流れは大きく加速され, その影響の及ぶ範囲も開口比 β が小さいほど下流に及んでいる。壁近くではいずれの開口比においても逆流領域が形成され, 開口比 β が小さいほど大きな領域となっている。

図 4 に乱流エネルギー分布を示す。オリフィス先端で剥離した流れが, 乱流エネルギーの大きな領域を形成している。乱流エネルギーが最大となる位置は, 壁から $y/D\sim 0.2$ までほぼ一定である。開口比

β が小さいほど, 乱流エネルギーのピークは下流にできている。また, 開口比 $\beta=0.8$ の場合には, 中心部の流れはオリフィスの影響をほとんど受けていないことがわかった。

図 5 に開口比 $\beta=0.62$ における乱流エネルギーの分布を壁からの距離別に流れ方向に対してプロットした。流動実験では, $y/D=0.2$ においては $x/D\cong 1$ で乱流エネルギーは最大値を示した[3]。しかし, 数値計算の結果では, 同一開口比でも乱流エネルギーが最大となる位置は $x/D\cong 2$ となり, 流動実験と異なる結果となった。

また, 図 6 に示すように, 壁に近い $y/D=0.00038$ においても乱流エネルギーのピークは他の壁からの無次元距離と同様に $x/D\cong 2$ となった。

図 7 に粗面の場合の流れ方向平均速度の等値面を示した。滑面の場合と比較すると, 粗面の影響は壁近くの上流へ向かう逆流を弱める効果がうかがえた。そのため, 中心部の速い流速の領域が外壁側に広がっていることが観察された。

図 8 に粗面の場合の乱流エネルギー分布を示した。滑面に比べ, 逆流領域の流れが抑制されることから, オリフィスの下流部での乱流エネルギーは小さな値をとっていた。従って, オリフィス近くでは乱流エネルギーは小さくなり, その最大値も滑面に比べて約 18% 小さくなっている。

図 9 は, 粗面の場合の乱流エネルギーの分布を壁からの距離別に流れ方向に対してプロットした。粗面は乱流エネルギーのピークが滑面よりやや下流側に移っているが, 壁からの距離に依存せず乱流エネルギーのピークが $x/D=2$ 付近に存在している滑面と比べ, 粗面は壁に近づくとつれ, 乱流エネルギーのピークが下流側へ移っているという違いが見られた。

実機は滑面ではなく, 鱗片状粗面が形成されており, この結果を考慮すると乱流エネルギーの分布から物質伝達率の分布を予測することは困難であると考えられる。

4. まとめ

(1)乱流エネルギーの分布はオリフィス開口比 β に依存した位置でその最大値を示す. しかしその位置は滑面の場合, 壁近くではほとんど変わらない.

(2)粗面形状では, 乱流エネルギーが最大を示す位置は壁からの距離によって変化する. 従って粗面においては乱流エネルギーの分布のみから物質伝達率の分布を予測することは困難と考えられる.

謝辞

謝辞: 本研究は、原子力安全・保安院の高経年化対策強化基盤整備事業からの援助を受け、INSS からの受諾研究として実施しました.

5. 参考文献

- [1] 関西電力株式会社, 美浜発電所 3 号機「2 次系配管破断事故」発生原因の調査について (2004)
- [2] 稲田文夫, “軽水炉冷却材流れが構造に及ぼす影響に関する研究動向”, *ながれ* 27, (2008)
- [3] 米田公俊, 森田良, “流れ加速腐食に対する影響因子の定量的な評価(その 1)-流体力学因子と減肉率の相関”, *電力中央研究所報告*, 4-9 (2008)

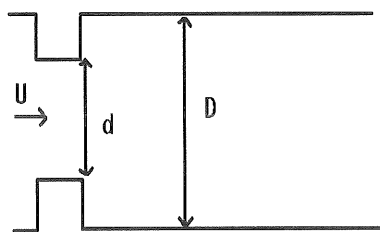


図 1. 流動場(滑面)

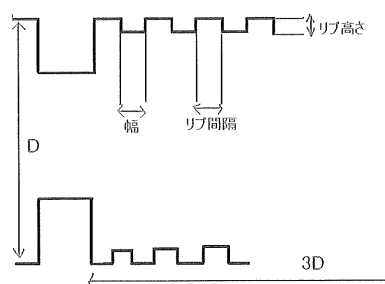


図 2. 流動場(粗面)

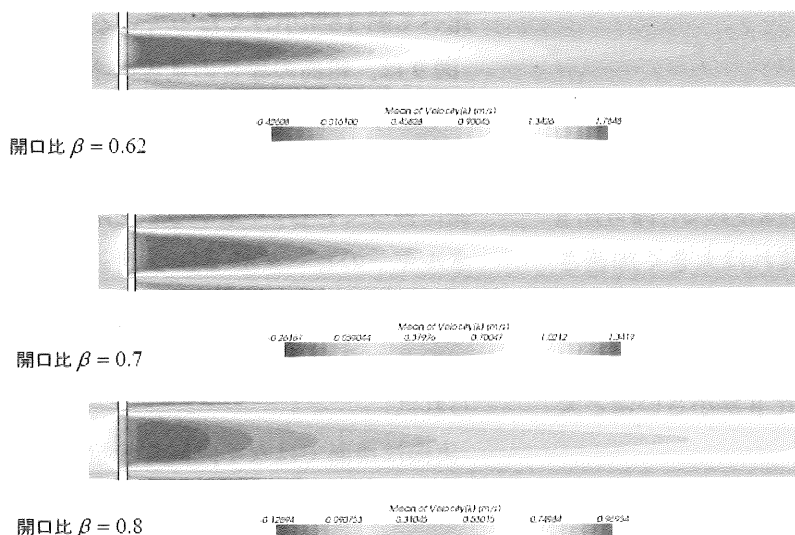


図 3. 流れ方向平均速度等値面

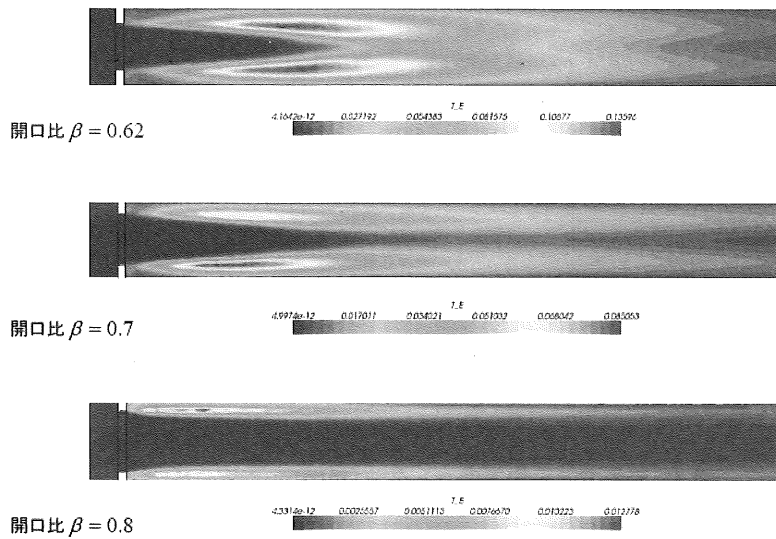


図 4. 乱流エネルギー等値面

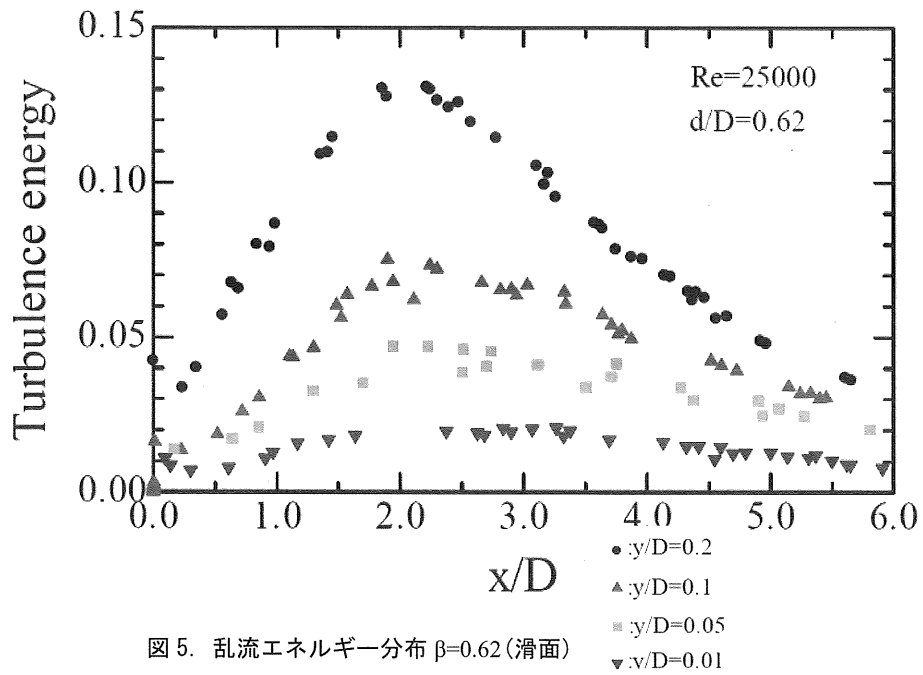


図 5. 乱流エネルギー分布 $\beta=0.62$ (滑面)

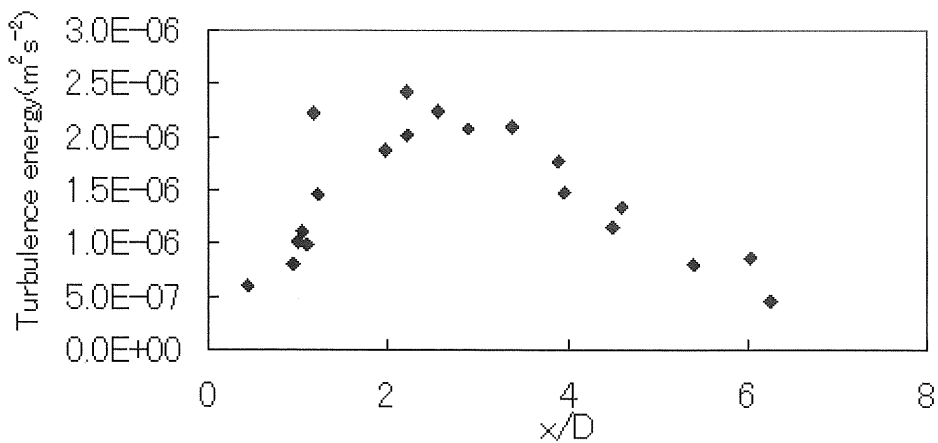
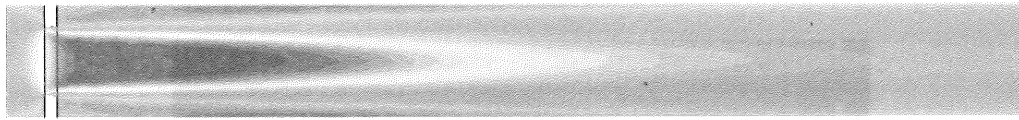
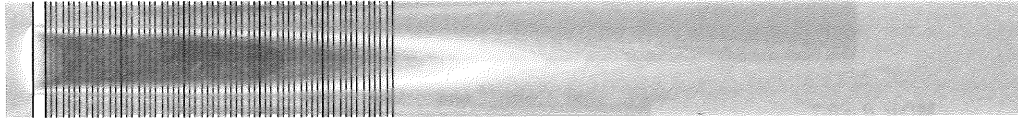


図 6. 壁面近傍 ($y/D=0.00038$) 乱流エネルギー分布



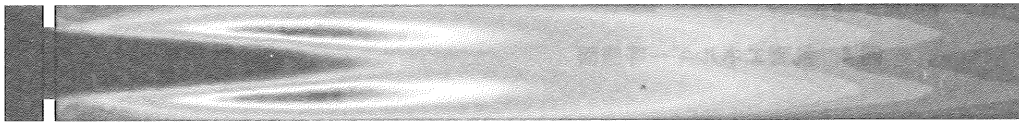
Mean of Velocity(k) (m/s)
 0.42009 0.016100 0.45828 0.90045 1.3405 1.7949

開口比 $\beta = 0.62$



Mean of Velocity(k) (m/s)
 -0.46275 -0.010773 0.44121 0.87319 1.3452 1.7971

図 7. 流れ方向平均速度コンター(粗面)



ϵ
 5.1642e-12 0.037192 0.054383 0.081976 0.10857 0.13596

開口比 $\beta = 0.62$



ϵ
 5.1133e-12 0.022269 0.044539 0.066808 0.089078 0.11135

図 8. 乱流エネルギーコンター(粗面)

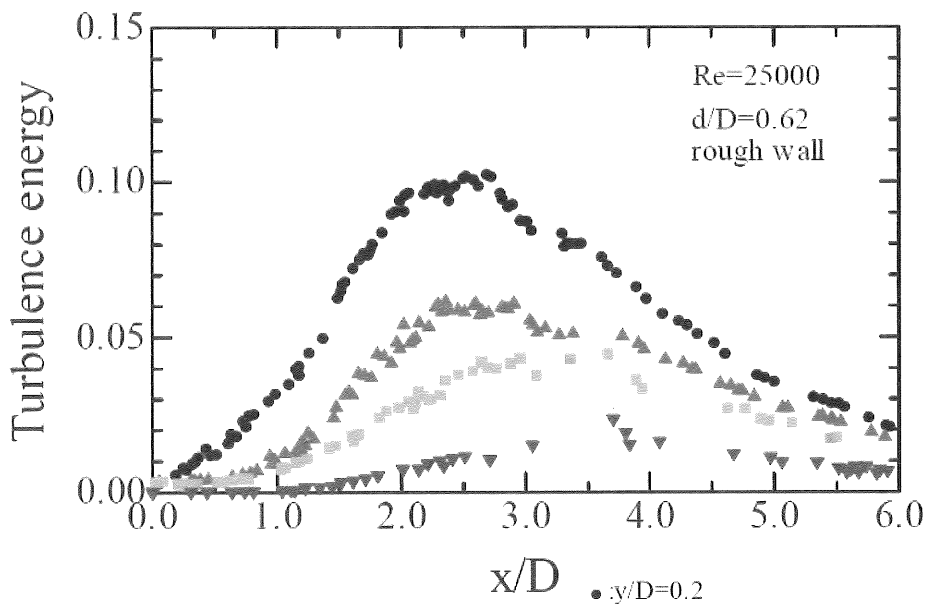


図 9. 乱流エネルギー分布
 (粗面, 開口比 $\beta=0.62$)

- $y/D=0.2$
- ▲ $y/D=0.1$
- $y/D=0.05$
- ▼ $y/D=0.01$