

# 流れ加速型腐食に及ぼす局所的流況の影響 － 研究の背景とオリフィス下流の腐食速度の計測 －

The Effect of Local Flow Field on Flow Accelerated Corrosion  
－ The Background of the Research and Measurements of Corrosion Rate after an Orifice －

中村 晶 (Akira Nakamura)\*      村瀬 道雄 (Michio Murase)\*  
歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara)\*      長屋 行則 (Yukinori Nagaya)\*

**要約** 流れ加速型腐食 (flow accelerated corrosion: FAC) は、プラントの経年劣化事象の課題の一つである。この研究では、FACによる配管の腐食速度に対する流れ場の影響を求めため、オリフィス下流を対象に、数値解析による流れ場の計算、実験による流れ場と腐食速度の測定を行った。数値解析は汎用の熱流体解析コードのCFXを用い、実験には配管内径  $L = 50\text{mm}$  の高温実験ループを用いた。実験では流速場はレーザードップラー流速計 (laser Doppler velocimetry: LDV) を用い、壁面のせん断応力は直径  $10\text{mm}$  の円形ディスクのセンサを管内面に設置し、室温にて計測した。腐食速度は電気抵抗法を用いて  $423\text{K}$  ( $150^\circ\text{C}$ ) と管断面平均流速  $5\text{m/s}$  の高温実験で計測した。最大の減肉速度はオリフィスからの距離が  $1L$  から  $2L$  の範囲に見られた。標準  $k-\varepsilon$  モデルを用いた数値解析による流速分布は、実験による計測結果に良く一致した。壁面でのせん断応力はオリフィスからの距離が  $1L$  の点で最大値をとり、下流／上流の比の最大値は腐食速度の比の最大値と良い一致を示した。しかし、 $2L$  を越える下流では一致しなかった。この結果は、数値解析による壁面でのせん断応力を用いて、FACによる腐食速度に対する流れ場の影響を評価できる可能性を示した。

**キーワード** 流れ加速型腐食, せん断応力, オリフィス, 数値計算, 乱流モデル

**Abstract** Flow accelerated corrosion (FAC) is one of important issues for aging of power plants. In this study, in order to evaluate the effects of flow field on corrosion rate due to FAC, numerical analyses of flow field and measurements of flow field and corrosion rate in the downstream of an orifice were conducted using a thermal-hydraulic analysis code CFX and a high-temperature water loop with the inner diameter  $L$  of  $50\text{ mm}$ , respectively. In the experiments at room temperature, velocity field was measured using laser Doppler velocimetry (LDV), and wall shear stress was directly measured using a shear stress sensor which has a circular disk with the diameter of  $10\text{ mm}$ . The corrosion rate was measured using the electric resistance method at the temperature of  $423\text{ K}$  and average velocity of  $5\text{ m/s}$ . The maximum corrosion rate was observed from  $1L$  to  $2L$  after the orifice. The calculated velocity distributions with standard  $k-\varepsilon$  model agreed well with the measured profiles obtained by experiments. The wall shear stress had the maximum at  $1L$  from the orifice and the maximum value of the ratio of downstream / upstream showed good agreement with that of corrosion rate, but did not agree in the region of downstream over  $2L$ . The results indicate possibility to evaluate the effects of flow field on the corrosion rate of FAC using the calculated wall shear stress.

**Keywords** flow accelerated corrosion, shear stress, orifice, numerical simulation, turbulence model

## 1. 研究の背景

### 1.1 序論

流れ加速型腐食 (flow accelerated corrosion: FAC) は、火力・原子力・化学プラントにおいて配管の減肉の一要因として知られてきた。加圧水型原

子力発電所では従来、「原子力設備 2 次系配管肉厚の管理指針」<sup>(1)</sup> を元に、これまで定期的な配管肉厚の実測により管理されてきた。FAC による減肉速度は、環境 (温度, pH・溶存酸素量などの水質), 材料 (炭素鋼のクロムなどの含有量), 流れ (配管形状, 流速) などの種々な因子によって影響される<sup>(2)</sup>。蒸気発生器の性能管理のため、配管からの鉄溶

\* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

出抑制として給水の pH を高くする方法がとられた(3)。日本機械学会は 2005 年に「発電用設備規格配管減肉管理に関する規格」(2)を制定し、FAC と液滴衝撃エロージョンによる配管減肉に対して、民間規格として統一した管理方法を定めた。

FAC のメカニズムは、金属表面に形成された酸化皮膜の溶解と、流れによる鉄イオンの拡散によるという説が一般的である(2)。これまで、FAC の腐食速度に対する、温度(4)(5)、pH(6)、溶存酸素量(7)(8)、流速(5)などの影響が報告されている。Keller(4)は、弁などの配管要素が及ぼす影響について報告した。腐食メカニズムのモデルと評価式(9)~(12)がいくつか提案され、EPRI で開発された CHECWORKS(13)、EDF で開発された BRT-CICERO(14)などが海外で評価に用いられている。

プラントの系統の中で減肉の起こりやすい部位としては、配管の流路断面積を変化させるような弁・オリフィス、レデューサ・デフューザが挙げられ、また流れの方向を変化させるようなエルボ・バンド、分岐・合流管が挙げられる(2)。これらの配管要素による流れの変化は、その下流にある直管や同様の部位における減肉速度にも影響を与えると考えられる。しかし、この影響度合いを定量化することを試みた文献は、Keller(4)以外はほとんど見当たらない。一方、2004 年の関西電力美浜発電所 3 号機の配管破損事故で上流のヘッドで生じた旋回流の影響が指摘された(15)ように、上流の配管要素によって生じた偏流が減肉の偏りや系ごとのばらつきを生じさせる要因になっている可能性がある。

## 1.2 研究の目標

PWR プラントでは、日本機械学会の規格(2)に基づいて、実測を主体とした配管減肉管理が行われている。減肉部位の予測や偏流の影響を評価するためには、Keller(4)が示したような、配管要素が引き起こす減肉の増加程度(形状係数)を定量化して、表で与えることが必要となる。しかし、実機で計測できるパラメータは限られており、局所的な量を測ること自体が困難である。また、どのような流体力学的な量が減肉に影響しているのかわかり、明らかになっていない。そこで図 1 のように配管減肉管理に対して局所的な流れの因子を考慮する高度化を、本研究では目標に置いた。

実機で、局所的な減肉を評価するためには、数値

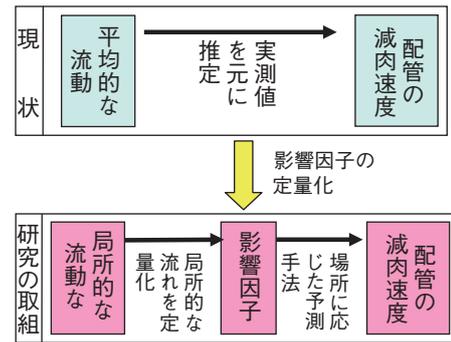


図 1 研究の目標

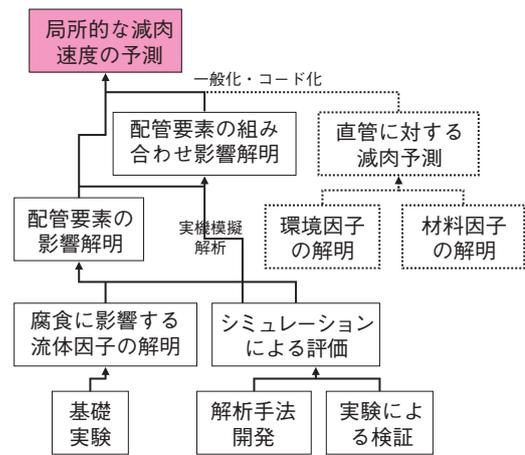


図 2 研究目標に対する実施ステップ

解析によるアプローチが不可欠である。実測できないパラメータであっても、数値解析であれば配管形状、平均流速等の既知の条件を用いて、局所的な量を求めることができる。ただし、求められた量が定量的に妥当かどうかは、別の方法で調べておく必要がある。そのステップを図 2 に示す。実線部が本研究の対象範囲である。

実機評価を念頭に置くと、数値シミュレーションは乱流モデルと壁関数を用いた 3 次元定常解析とすることが現実的である。表面からの鉄イオンの拡散を解くような詳細なシミュレーションは、複雑な配管形状である実機に対して実用的でない。同様に、乱れや偏流の変動を再現するような非定常のシミュレーションも実用的ではない。こう考えると、実機をモデル化して実用的な時間で解析できるようなパラメータで、かつ腐食に影響する因子を選び出すことが必要である。

まず、局所的な腐食速度を計測する基礎実験を行い、同じ形状での数値解析を実施し、得られた腐食速度と関係の深い流体力学的なパラメータを探る。

この流れが腐食に影響するメカニズムが解明された後は、数値解析によって配管要素、その組み合わせといった影響を、実機条件で数値化する。この時、直管に対する比を考えることで、数値の相対化を行う。例えば、直管に対して、オリフィスにより腐食速度が何倍になるかを求める。それを様々な配管要素、その組み合わせに対して表や関数に置き換えることで、実機評価に用いることができるようにする。直管に生じる腐食速度については、既知のデータを活用する。

### 1.3 本論文の目的

本研究を始めるに当たり、どのような点に注力すべきかをまず考えた。前項に述べたように、腐食に影響する局所的な因子の相対化が目的であるから、水化学・材料の因子の影響を調べる点については出来る限り省力する。一方、配管形状を模擬することは、本研究においては非常に重要である。このように割り切って考えた点と注力した点を表1に示す。

表1 本研究の注力点	
割り切り	注力
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ pH は中性近く</li> <li>・ 浄化系はとりあえず設けない (鉄濃度はある程度上がる)</li> <li>・ 運転時間は短い</li> <li>・ 炭素鋼の成分については一般的な条件とする</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ DO, 温度は FAC が生じる条件</li> <li>・ 配管形状で実験する (円管, オリフィス, エルボ, 弁)</li> <li>・ 局所の腐食速度を測る</li> <li>・ 腐食に影響する局所の流れ因子を計測, 解析する</li> </ul>

まず、模擬する配管要素として、オリフィスを選択した。オリフィスは軸対象であり比較的単純な形状であること、流れ方向に腐食量の分布が生じると考えられることが理由である。本論文では、このオリフィス下流を対象として、減肉速度の分布、オリフィスからの噴流など流れ場、腐食に影響すると予想されるパラメータとして壁面でのせん断応力分布について調べた結果を述べる。

## 2. 評価手法

減肉に影響すると考えられるパラメータとして、今回は壁面でのせん断応力  $\tau_w$  に着目した。せん断

応力は流れによって壁面上で直接的に定義できるパラメータであり、物質輸送と熱輸送のアナロジー<sup>(16)</sup>を考えると式(1)のように表される。

$$J = -D \left( \frac{dC}{dy} \right)_{y=0} \propto q = -\lambda \left( \frac{dT}{dy} \right)_{y=0} \quad (1)$$

$$\propto \tau_w = \mu \left( \frac{dU}{dy} \right)_{y=0}$$

ここで、 $J$ は拡散速度(物質流速、ここでは鉄の溶出速度に相当)、 $D$ は拡散係数、 $C$ は濃度、 $q$ は熱流束、 $\lambda$ は熱伝導率、 $T$ は温度、 $\mu$ は粘度、 $U$ は流速、 $y$ は壁面からの距離である。しかし、具体的な配管要素の下流で上記のアナロジーが成り立つかどうかを確認する必要がある。また、具体的な条件での腐食速度を推定するための係数は、実験的に調べておく必要がある。

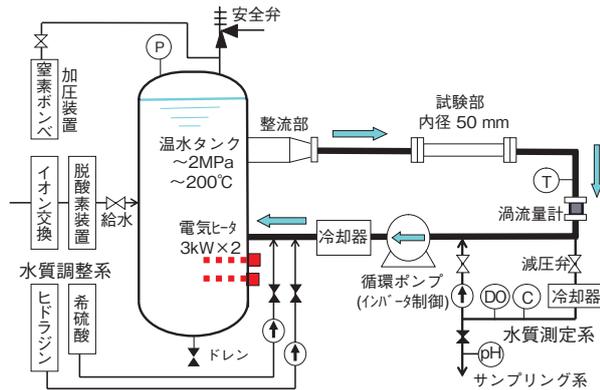
今回は、オリフィス下流で減肉速度分布とせん断応力の関係を調べるための実験を行った。せん断応力については数値解析で予測するため、流速分布について実験結果に対する解析精度を検討した。

## 2.1 実験方法

### 2.1.1 実験装置

図3(a)に実験装置の概要を示す。実験装置は高温水タンク・試験体・循環ポンプで構成されるループと、窒素加圧装置、水質調整系、イオン交換・脱酸素装置の給水系、水質測定系で構成される。温水タンクは2MPa、200℃まで使用可能であり、循環ポンプは最大48m<sup>3</sup>/hを流すことができる。タンク・配管・ポンプはステンレス製で、FACが起こる条件での腐食を防止している。ポンプ入熱は冷却器により排熱し、ループ水の温度 $T$ は温水タンク内のヒータにより制御を行い、150 ± 1℃の範囲で一定に保つ。

溶存酸素濃度 $DO$ は日機装(株)製7115型溶存酸素分析計、導電率 $\sigma$ は日機装(株)製9792型電気伝導度計、サンプリング水からpHは(株)堀場製作所製D-51pHメータ、全鉄濃度はHACH社製Pocket Colorimeter IIにより計測した。これまでの運転では、脱酸素装置による低温時ループ水の循環・脱気により、ヒドラジンを追加することなく、 $DO$ を150℃運転時で1ppb以下に下げることができている。

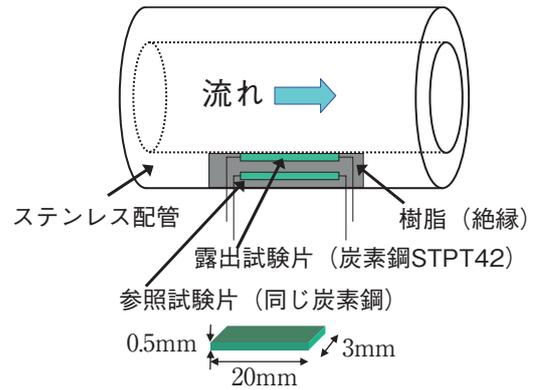


(a) 系統の概要



(b) 外観

図3 実験装置



(a) 試験片設置方法



(b) センサ外観

図4 腐食速度センサ

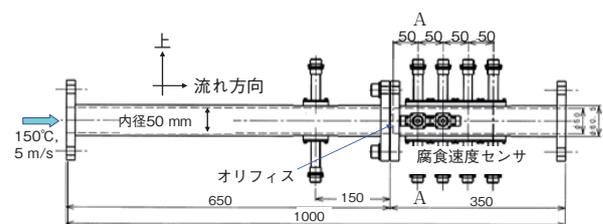
### 2.1.2 腐食速度の計測

腐食速度の測定には、図4(a)に示すように炭素鋼STPT42 (Ni : 0.02%, Cr : 0.04%, Mo : 0.01%) の露出試験片 (幅 3mm・長さ 20mm・初期厚み 500 $\mu$ m) を絶縁材の樹脂で試験体配管に埋め込み、配管・樹脂・試験片を一体でわずかに切削し、内面を整えた。同じロットの母材から作成した同形状の参照試験片を樹脂内部に埋め込み、試験片の電気抵抗  $R_{exp}$  と参照試験片の電気抵抗  $R_{ref}$  から式(2)より厚みを推定した。電気抵抗の計測には CorrOcean 社製 CorrLog を用いた。

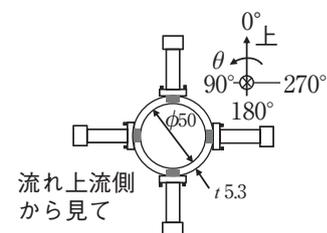
$$\Delta t = t_{ref} (R_{exp} - R_{ref}) / R_{exp} \quad (2)$$

ここで  $\Delta t$  は参照試験片の厚み変化 (減肉量),  $t_{ref}$  は標準抵抗の厚み 500 $\mu$ m である。

このセンサを図5のようにオリフィス上流に2箇所、下流に12箇所設置して、オリフィス下流での減肉速度の分布を計測した。試験体内径  $L$  は 50mm で、オリフィス内径  $l$  は 24.3mm である。上流側の

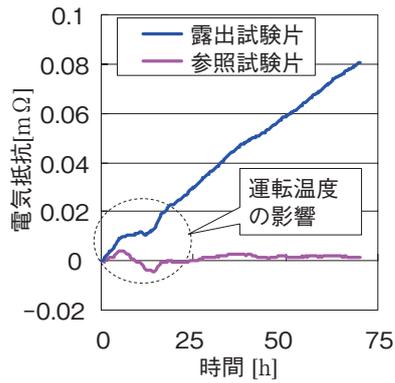


(a) 全体

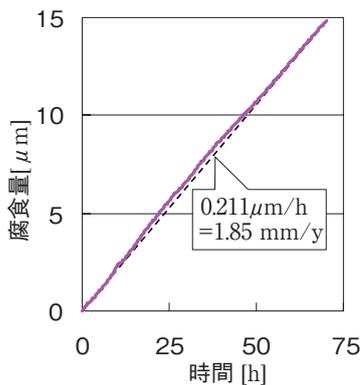


(b) A-A 断面

図5 腐食測定用試験体



(a) 電気抵抗の変化



腐食量の変化

図6 腐食速度の計測結果例<sup>(17)(18)</sup>

腐食速度センサはオリフィスより150mm (3L) の位置に、下流側は50mm (1L) 毎に設置した。試験中は腐食速度センサへの温度影響を緩和するため、試験部に保温を施した。

試験には常温 (約 20℃) の水道水をイオン交換し、脱酸素装置による循環運転にて約 20ppb 程度まで溶存酸素量を低下させて用いた。試験は、流量を  $Q = 35\text{m}^3/\text{h}$  (管断面平均流速  $U_{ave} = 5.0\text{m/s}$ , レイノルズ数  $Re = 1.3 \times 10^6$ ) に設定し、1.5MPa に窒素で加圧してから水温を 150℃ まで上昇させて、オリフィス下流でのキャビテーション発生を防いだ。腐食速度の計測例<sup>(17)(18)</sup>を図6に示す。

常温から実験条件までループの昇温する間は、温度変化により電気抵抗が大きく変化するので、この間のデータは除いた。試験条件である 150℃ に到達後の約 70 時間の計測で、初期の約 15 時間はわずかに温度変化があり、図6(a)のように電気抵抗変化が観測された。しかしこの程度の温度変化は、式(2)を用いて露出試験片と参照試験片の電気抵抗の比を用いることにより、キャンセルすることができた。20分間隔で計測された図6(a)の電気抵抗から式(2)を

用いて、図6(b)の腐食量の変化を求めた。ほぼ直線的に変化していることを確認し、最小二乗法により近似直線の傾きを求め、その条件での腐食速度を算出した。

### 2.1.3 流速の計測

流速分布測定には、図7に示すアクリル樹脂で作られた流速測定用試験体を用いた。管内径  $L = 50\text{mm}$ , オリフィス径  $l = 24.3\text{mm}$  であり、周囲にウォータージャケットを付け、流速分布測定時のレーザの屈折を和らげている。試験には常温 (約 20℃) の水を用いて、流量を  $Q = 17\text{m}^3/\text{h}$  (管断面平均流速  $U_{ave} = 2.4\text{m/s}$ , レイノルズ数  $Re = 1.2 \times 10^5$ ) に設定し、0.2MPa に加圧することでオリフィス下流でのキャビテーション発生を防いだ。流速分布測定にはレーザードップラー流速計 (laser Doppler velocimetry: LDV) として、日本カノマックス (株) 製 Smart-LDV を用いた。今回の LDV 測定ではサンプル数は約 5000 である。

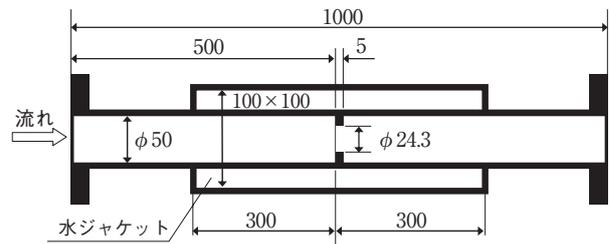


図7 流速測定用試験体

### 2.1.4 セン断応力の計測

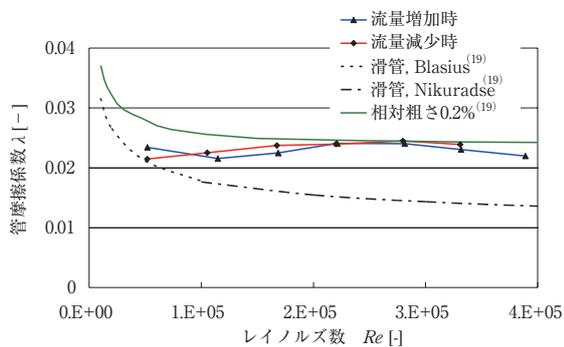
せん断応力の計測には、図8に示す (株) SSK 製 S10W せん断力計を用いた。センサの接液部を管内面に沿うよう加工し、図9に示すせん断応力測定用試験体に設置した。センサ位置は固定して、オリフィスを移動させることにより、オリフィスからの距離を変えた。外側の円筒 (スライド管) とオリフィスを接合し、センサの設置された円筒に対して、外側の円筒を移動させることができるようになっている。内径  $l = 24.3\text{mm}$  のオリフィスを設置した。試験には常温 (約 20℃) の水を用いて、流量を  $Q = 17\text{m}^3/\text{h}$  (管断面平均流速  $U_{ave} = 2.4\text{m/s}$ , レイノルズ数  $Re = 1.2 \times 10^5$ ) に設定し、0.2MPa に加圧す



図8 セン断応力センサ



図9 セン断応力測定用試験体

図10 流速を変化させた時のせん断応力の計測結果<sup>(18)</sup>  
(増速時：流速を増加させて計測，減速時：流速を減少させて計測)

ることでオリフィス下流でのキャビテーション発生を防いだ。

予備試験としてオリフィス下流ではなく、直管を用いてせん断応力を測定した結果<sup>(18)</sup>を図10に示す。流速を増加させて計測した場合と、減少させて計測した場合で若干のヒステリシスがあるが、管摩擦係数 $\lambda$ は相対粗度 $\varepsilon/L$ が0.2%の場合の粗い円管内乱流の既知のデータ<sup>(19)</sup>とよく一致した。

## 2.2 数値解析方法

数値解析により壁面でのせん断応力の推定を行うため、基本的な流れ場の評価精度の確認を行った。

### 2.2.1 流体解析方法

#### 1) 流体条件

2.1.3で示した流速測定試験と同じ条件で数値解析を行い、結果を比較することにした。具体的な条件は、表2に示す通り。

表2 可視化条件での数値解析条件

流体	水 (25℃)		
	密度	997kg/m <sup>3</sup>	
	粘度	8.899 × 10 <sup>-4</sup> Pa・s	
乱流モデル	標準 k-ε		
境界条件	流入	Q = 17m <sup>3</sup> /h ( $U_{ave} = 2.4$ m/s)	
	流出	圧力境界, P = 0	
	壁	壁関数 (一般化対数則)	
メッシュ	総ノード数 1,020,307 y <sup>+</sup> < 100		

数値解析には ANSYS 社の汎用の流体解析コード CFX-11 を用いた。入り口境界は一樣流で、管断面平均流速  $U_{ave} = 2.4$ m/s を設定した。

#### 2) 乱流モデル

乱流モデルはオリフィスからの噴流の流れに影響すると考えられる。最も広く用いられるレイノルズ平均 (RANS) モデルである標準 k-ε モデル<sup>(20)</sup>を用いて計算した。移流項の空間差分には2次精度上流差分を用いて、定常解析を行った。

### 2.2.2 解析格子

計算範囲は、オリフィスから上流には23L、下流には31Lとした。オリフィス周囲の解析格子を図11に示す。管断面ではO型の格子トポロジーとして、解析格子全てを6面体で作成した。壁面からの第一格子位置は、無次元距離  $y^+$  が100以下になるように設定した。ここで、 $y^+$  は次の式(3)で定義される<sup>(20)</sup>。

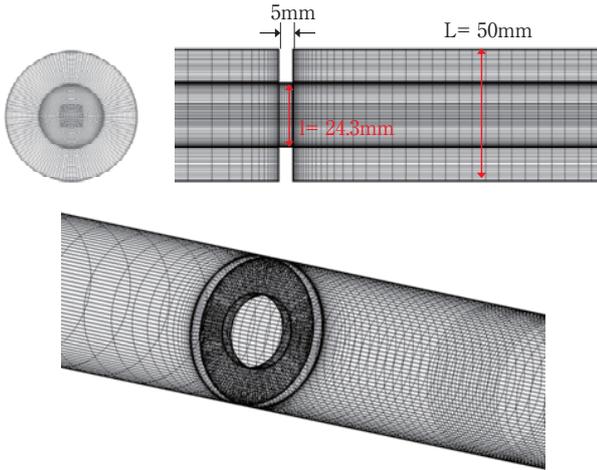


図11 解析格子

$$\begin{aligned}
 y^+ &= \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \Delta y / \nu \\
 \tau_w &= \rho u^* u_\tau \\
 u^* &= C_\mu^{1/4} k^{1/2} \\
 u_\tau &= \frac{U_t}{\frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C} \\
 y^* &= (\rho u^* \Delta y) / \mu
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

ここで、 $\rho$ は密度、 $\mu$ は粘度、 $\nu$ は動粘度、 $\Delta y$ は壁からの距離、 $C_\mu$ は乱流モデルの定数、 $k$ は乱流エネルギー、 $U_t$ は壁面方向に鉛直な速度、 $\kappa$ はカルマン定数、 $C$ は切片である。この $\tau_w$ は壁面でのせん断応力である。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 腐食速度分布

試験部温度  $T = 150^\circ\text{C}$ 、常温時の水の  $\text{pH} = 6.1$ 、管断面平均流速  $U_{ave} = 5.0\text{m/s}$ 、溶存酸素濃度  $DO = 0.1\text{ppb}$  (計器表示値) の条件で、図5の試験体を用いて計測したFACによる腐食速度の分布<sup>(17)(18)</sup>を図12に示す。腐食速度の算出には、2.1.2で示した方法を用いた。図中の角度は、図5(b)に示したセンサ位置である。

図12を見ると、周方向での腐食速度の差はそれほど顕著ではなく、周方向平均値はオリフィスからの距離によって腐食速度が減少している。最大の腐食速度は、オリフィスより  $1L$  もしくは  $2L$  下流で生じていて、 $1.5\text{mm/y}$  という腐食速度は実プラントより大きい。これは  $\text{pH} \cdot \text{流速}$  が、実プラントより

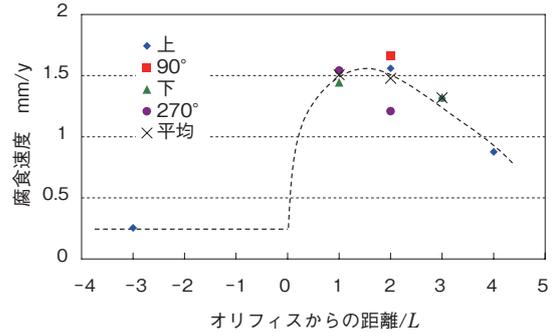


図12 オリフィス下流の腐食速度分布<sup>(17)(18)</sup>  
( $T = 150^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH} = 6.1$ ,  $U_{ave} = 5.0$ ,  $DO = 0.1\text{ppb}$ )

FACの加速条件となっているためである。図6に示したように、腐食量は時間に対してほぼ一定で生じていて、腐食速度の時間依存性はあまり見られない。

#### 3.2 流速分布

2.1.3で説明した流速測定実験の結果<sup>(21)(22)</sup>を、2.2で説明した数値解析の結果<sup>(21)(22)</sup>と合わせて図13に示す。オリフィスで縮流した流れが噴流を形成し、オリフィスからの距離によって拡散する様子が分かる。LDVの計測値を用いて管断面で積分した流量は、ほぼ実験条件である  $Q = 17\text{m}^3/\text{h}$  となり、精度のよい実験ができていることが確認できた<sup>(22)</sup>。

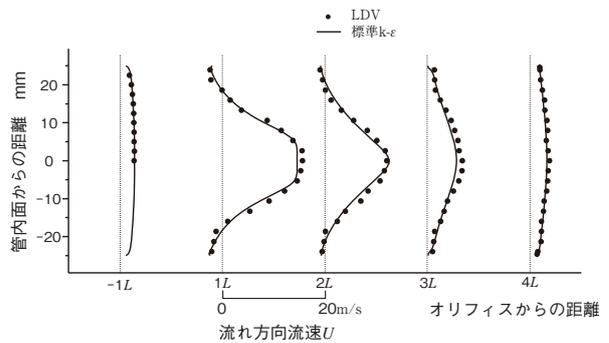


図13 オリフィスからの距離による流れ方向流速の分布の変化 (LDVによる実測値、標準  $k-\epsilon$  による数値解析結果)<sup>(21)(22)</sup>

数値解析結果については、標準  $k-\epsilon$  モデルによる流速分布はLDVによる測定結果とよく一致し、オリフィス下流の流れ場の再現性がよいと考えられる。流れ場の例として、流線と流速分布<sup>(22)</sup>を図14に示す。色は流速を示し、オリフィスからの噴流と、オリフィス下流での再循環域が再現されていることが分かる。オリフィスからの噴流が壁面へ付着する点

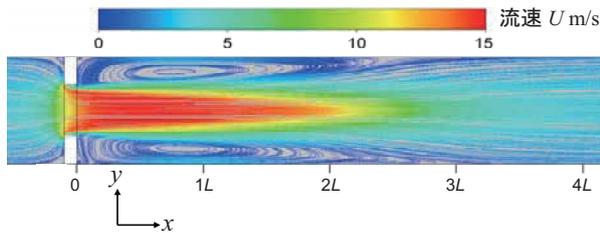


図14 管断面の流線と流速分布  
(標準  $k-\epsilon$  モデル)<sup>(22)</sup>

を再付着点と呼び、管断面平均流の方向への流れと、オリフィス下流の再循環域内部の逆流とが分かれる位置になる。流線から判断して、再付着点はオリフィスからおよそ  $3L$  下流である。

### 3.3 せん断応力分布

3.2 で得られた標準  $k-\epsilon$  モデルを用いた  $Q = 17\text{m}^3/\text{h}$  の数値解析結果から壁面でのせん断応力を求め、3.1 で得られた  $Q = 35\text{m}^3/\text{h}$  の時の腐食速度の周方向平均値<sup>(17)</sup>と比較して図15に示す。せん断応力の定義は、先の式(3)で示した。縦軸の比率は、せん断応力と腐食速度をとともに上流  $3L$  の位置での値で割った比である。これにより、次元の違う両者の値の傾向を比較した。また、上流(直管)との比にすることで、1.2 で述べたように、オリフィスにより腐食速度などの局所的な諸量が増加する割合(増倍率)として整理した。

なお、数値解析と腐食速度実験ではそれぞれ  $Re = 1.2 \times 10^5$ ,  $1.3 \times 10^6$  となり約 10 倍の差があるが、レイノルズ数に対する流出係数の依存性を JIS Z 8762<sup>(23)</sup>で見ると、今回用いた絞り比 0.5 のオリフィスでは  $Re = 10^5$ ,  $10^6$  での差は 0.4% とわずかである。

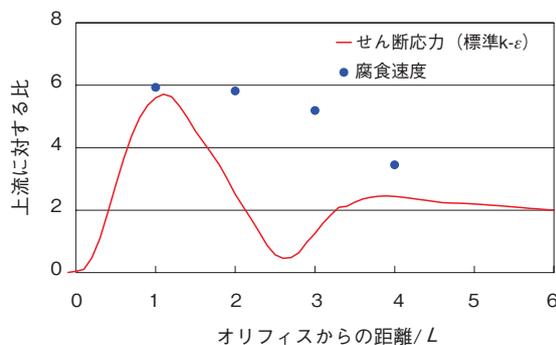


図15 壁面でのせん断応力と腐食速度の上流に対する比(せん断応力:標準  $k-\epsilon$  モデルによる数値解析結果, 腐食速度:実験結果)<sup>(17)(18)</sup>

る。そこでオリフィス後流の流れ場は、このレイノルズ数範囲では相似であるとみなした。

図15を見ると、上流に対するオリフィス下流の腐食速度の比の最大値と、同じくせん断応力の比の最大値はよく一致している。すなわち、数値解析によるせん断応力の最大値を用いることにより、オリフィスによって腐食速度が増加する割合を予測できる可能性がある。しかし、腐食速度はオリフィスからの距離が  $1L$  と  $2L$  の位置でほぼ同じ値で、かつ数値解析結果での再付着点である  $3L$  を越えて下流まで分布していることに対し、せん断応力はオリフィスから  $1L$  の位置で極大値、再付着点直前で極小値となっていて、腐食速度より狭い範囲でしか分布していない。すなわち、腐食範囲については数値解析によるせん断応力を用いた予測では過小評価になる可能性がある。

著者らは、この分布の差異がせん断応力の時間変動によって生じるものと考えている。噴流周りの再循環域は、時間平均的には図14のような大きな循環と再付着点を持つが、実際の流動は非定常な状態であり、再付着点近傍は流れが正負を変動していると考えられる。つまり、正負を変動して時間平均的に流速が0となっている再付着点近傍では、定常解析による評価ではせん断応力が0に近くなるが、腐食現象が流れの方向には依存しないと考えると、腐食速度は再付着点近傍で極小値とはならないと考えられる。この点については今後の研究で明らかにしたい。

## 4. 結論

本研究では以下のことが分かった。

- (1) オリフィス下流の腐食速度の分布を測定し、オリフィスから管直径の1~2倍の範囲で極大値を持ち、管直径の4倍の範囲では、直管よりも腐食速度が増加することが分かった。
- (2) オリフィスからの噴流の流速分布を実験的に測定し、数値解析を用いて流速分布を再現したところ、乱流モデルに標準  $k-\epsilon$  を用いた場合が良い一致を示した。
- (3) 標準  $k-\epsilon$  モデルを用いた数値解析による壁面でのせん断応力と、実験により求めた腐食速度を、直管に対する比で整理した。その結果、両者の最大値は良く一致した。

## 文献

- (1) 原子力安全・保安院, 美浜発電所3号機2次系配管破損事故調査委員会(第3回)について, 資料3-1-3別紙2(2004).
- (2) 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(2005年版)(増訂版)(2006).
- (3) 福村卓也, 有岡孝司, 加圧水型原子力発電所における流れ加速型腐食速度に及ぼすエタノールアミン注入の影響, INSS JOURNAL, Vol. 14, p. 266(2007).
- (4) H. Keller, Erosionskorrosion an Nassdampfturbinen, VGB-Kraftwerkstechnik 54, 5, p. 292(1974).
- (5) G. J. Bignold, K. Garbett and I. S. Woolsey, in Ph. Berge and F. Kahn, eds., Corrosion-Erosion of Steels in High Temperature Water and Wet Steam (Electricite de France, Les Renardieres, 1982), Paper No. 12.
- (6) H. G. Heitmann and P. Schub, Initial experience gained with a high pH value in the secondary system of PWRs, Proc. of the Third Meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors, BNES, London, p.243(1983).
- (7) 日本原子力学会, 原子炉水化学ハンドブック, コロナ社(2000).
- (8) O. de Bouvier, M. Bouchacourt and K. Fruzzetti, "Redox Condition Effect on Flow Accelerated Corrosion: Influence of Hydrazine and Oxygen," Proc. of International Conference Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems, 117, Avignon, France(2002).
- (9) P. Berge, J. Ducreux and P. Saint-Paul, "Effects of chemistry on corrosion-erosion of steels in water and wet steam," Proc. of the Second Meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors, British Nuclear Engineering Society, London, 5(1980).
- (10) L. E. Sanchez-Caldera, The Mechanism of Corrosion - Erosion in Steam Extract Lines of Power Stations, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts(1984).
- (11) W. Kastner, R. Riedle, Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtagen durch Erosionkorrosion, VGB-Kraftwerkstechnik, 66, 12, p.1171(1986).
- (12) V. K. Chexal, H. Horowitz, R. Jones, et al., Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants, EPRI TR-106611, Electric Power Research Institute, Palo Alto(1996).
- (13) H. M. Crockett and J. S. Horowitz, U. S. Approach to Flow-Accelerated Corrosion, International Conference on Flow Accelerated Corrosion, Lyon-France(2008).
- (14) S. Trevin, M. Persoz and I. Chapuis, Making FAC calculations with BRT-CICERO<sup>TM</sup> and updating to version 3.0, International Conference on Flow Accelerated Corrosion, Lyon-France(2008).
- (15) 原子力安全・保安院, 関西電力株式会社美浜発電所3号機2次系配管破損事故について(最終報告), p.14(2005).
- (16) 浅野 康一, 物質移動の基礎と応用, 丸善(2004).
- (17) 長屋行則, 歌野原陽一, 中村晶, 村瀬道雄, オリフィス下流における流れ加速型腐食の評価(2. 腐食速度の測定と流れ場の影響評価), 日本機械学会 第13回動力・エネルギー技術シンポジウム, A109(2008).
- (18) Y. Utanohara, A. Nakamura, M. Murase and Y. Nagaya, Measurements of Flow Field and Flow Accelerated Corrosion in the Downstream of an Orifice, The 7th International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-7)(2008), submitted.
- (19) 日本機械学会, JSME テキストシリーズ 流体力学, 丸善(2005).
- (20) Turbulence and Near-Wall Modelling, ANSYS CFX-Solver Release 11.0 Online Manual(2007).
- (21) 歌野原 陽一, 長屋 行則, 中村 晶, 村瀬道雄, オリフィス下流における流れ加速型腐食の評価(1. 流れ場の計測と数値解析), 日本機械学会 第13回動力・エネルギー技術シンポジウム, A108(2008).
- (22) Y. Utanohara and A. Nakamura, RANS Prediction of Orifice Flow and Comparison with Measurements and LES, International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows

- (2008).
- (23) 絞り機構による流量測定方法, JIS Z 8762  
(2006).