

流れ加速型腐食に及ぼす局所流動状況の影響
—オリフィス下流の壁面せん断応力と腐食速度の関係—

Effects of Local Flow Field on Flow Accelerated Corrosion

—Relation between the FAC Rate and the Wall Shear Stress Downstream from an Orifice—

歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara)

長屋 行則 (Yukinori Nagaya)

中村 晶 (Akira Nakamura)

村瀬 道雄 (Michio Murase)



株式会社 **原子力安全システム研究所**

Institute of Nuclear Safety System, Incorporated

〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田64号

Tel 0770-37-9100 Fax 0770-37-2008

URL <http://www.inss.co.jp>

流れ加速型腐食に及ぼす局所流動状況の影響 —オリフィス下流の壁面せん断応力と腐食速度の関係—

Effects of Local Flow Field on Flow Accelerated Corrosion
—Relation between the FAC Rate and the Wall Shear Stress Downstream from an Orifice—

歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara)*¹ 長屋 行則 (Yukinori Nagaya)*¹
中村 晶 (Akira Nakamura)*¹ 村瀬 道雄 (Michio Murase)*¹

要約 筆者らはこれまで、流れ加速型腐食に及ぼす流れ場の影響を評価するために、評価パラメータとして壁面せん断応力を採用し、オリフィス下流の腐食速度分布（測定値）と数値計算による壁面せん断応力分布とを比較してきた。しかし、定常 RANS による壁面せん断応力分布は、再附着点近傍で腐食速度分布を過小評価する結果となっていた。よって、本研究では Large Eddy Simulation (LES) を行い、流れ場を良好に再現することを確認した上で、腐食速度分布と壁面せん断応力の計算値を定量的に比較した。また、オリフィス下流の流れ場をより詳細に理解するため、詳細な LDV 計測を行った。管径は 50mm、オリフィス径は 24.3mm である。LDV 計測結果から、 $Re = 2.3 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$ の範囲で、流れ場の構造は流速に影響されないことが明らかになった。オリフィス下流の壁面近傍では、下流 1D で時間平均流速が最大値 $u / U_{ave} = 1.0$ となった。LES による壁面せん断応力分布を RMS 値で評価することにより、壁面せん断応力分布を腐食速度分布に近づけることができた。また、腐食速度（測定値）と LES による壁面せん断応力の RMS 値との間には正の相関関係があることがわかった。腐食速度は、オリフィス下流で発生した渦が壁面へ到達する領域で大きな値を示していた。

キーワード 流れ加速型腐食, オリフィス, 腐食速度, LDV, LES, 壁面せん断応力

Abstract To evaluate the effects of flow field on flow accelerated corrosion (FAC), the authors have been comparing the distribution of FAC rate downstream from an orifice with the distribution of predicted wall shear stress, which was selected as an evaluation parameter of FAC. However, the distribution of the wall shear stress predicted by steady RANS simulation was found to underestimate the distribution of FAC rate near the reattachment point. In the present study, the orifice flow was simulated by Large Eddy Simulation (LES) and the predicted wall shear stress was compared with the FAC rate quantitatively. Additionally, to understand the flow field of the orifice in detail, orifice flow was measured in detail using laser Doppler velocimetry (LDV). The pipe diameter was 50 mm and the orifice hole diameter was 24.3 mm, making their diameter ratio about 0.5. The LDV measurements showed that the flow structure downstream from the orifice did not depend on the flow velocity in the range of $Re = 2.3 \times 10^4$ to 1.2×10^5 . The reattachment point was around $2.5D$ downstream from the orifice. Near the wall in the separation region, the maximum velocity was $u / U_{ave} = 1.0$ at around $1D$ downstream from the orifice. The distribution of the wall shear stress by LES approached the distribution of the FAC rate obtained by evaluating the RMS of wall shear stress near the reattachment point. There was a relationship between FAC rate and the predicted RMS of wall shear stress by LES. FAC rate was high at the region where vortices generated downstream from the orifice reached the surface of the wall.

Keywords flow accelerated corrosion, orifice, FAC rate, LDV, LES, wall share stress

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

1. はじめに

原子力、火力等の発電所において、流れ加速型腐食（FAC: Flow accelerated corrosion）は高経年化対策上重要な検査対象の一つとなっている。FACは配管の減肉を引き起こし、時として配管破断を引き起こしうる。日本機械学会では2005年に「発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格」⁽¹⁾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、非破壊検査による配管厚さ測定と余寿命の評価に基づく配管減肉管理方法を定めている。

FACに対する影響因子はいくつか存在し、温度⁽²⁾、pH⁽³⁾、溶存酸素⁽⁴⁾、流速^{(2)~(5)}などの影響因子が腐食速度に与える影響について報告されている。また、Keller⁽⁶⁾は配管要素ごとの影響度を表す形状係数について報告している。腐食速度の予測モデルや評価式はいくつか提案されているが、現状では実機減肉データを精度よく再現できる段階には至っていない。

FACによる減肉量は配管要素近傍で顕著になり、局所的な減肉分布となることが多いが、これは局所的な流れ場の構造が影響していると考えられる。しかし、流速等の流れによる影響因子に関して、これまでは管断面平均流速で議論されることが多く、局所的な流れの影響についてはあまり評価されることがなかった。最近になり、特に国内においてFACと局所の流れ場との関係を扱った研究が行われるようになってきた^{(7)~(11)}。発電所における配管余寿命の評価は、配管肉厚の分布を測定することにより行われるため、配管要素近傍における局所的な腐食速度分布の予測・評価は、肉厚測定範囲の計画等、配管減肉管理において有用な情報になると考えられる。

流れ場の数値計算は、局所の流れ場と腐食速度の相関関係を検討する上で有用な手段である。数値計算によるFAC研究も多く行われているが、局所の流れ場と腐食速度の相関関係はまだまだ不明な点が多い。また、数値計算では腐食速度に直接繋がるような物理量が計算されないため、数値計算から得られる流れ場の物理量のうち、いずれかの量を腐食速度に相関を持つパラメータとして選定する必要がある。著者らは後述の理由から、FACに影響をおよぼす可能性のある流れ場のパラメータとして壁面せん断応力に注目して研究をおこなってきた。著者らはこれまで、局所の流れ場が腐食速度に及ぼす影響

を評価するために、オリフィス下流の腐食速度測定^{(12)~(14)}、数値計算、レーザドップラ流速計（LDV: laser Doppler velocimetry）や粒子画像流速測定法（PIV: particle image velocimetry）による数値計算の検証等を行っている^{(14)~(15)}。腐食速度を定常RANS計算により得られた壁面せん断応力と比較した際、下流/上流比で比較すると、オリフィスから下流1Dの箇所（Dは円管内径）では両者はよい一致を示したが、再付着点近傍（2.5D付近）に近づくにつれ、壁面せん断応力は大幅に減少し、腐食速度を過小評価するようになった⁽¹²⁾。この過小評価の原因を調べるために、Large Eddy Simulation（LES）を行い検証した結果⁽¹⁵⁾、壁面せん断応力を時間平均値で評価すると、作用方向が変動する壁面せん断応力が相殺されてしまうため、低い値として算出されることがわかった。定常RANS計算もまた時間平均的な値を算出する特性があるので、上述の過小評価を改善するには、時間平均値以外の方法で壁面せん断応力を評価する必要がある。そこで、LES計算結果から壁面せん断応力の二乗平均平方根（RMS: root mean square）を評価すると、再付着点近傍でも値が大幅に減少しなくなり、過小評価を改善することができた。ただ、LES計算結果はLDVで計測された流速分布と合っていなかったため、定性的な評価に留めざるを得なかった。この原因の1つとして、計算負荷を抑えるためにメッシュ解像度を粗くしたことや、計算領域を1/4断面に分割したことが挙げられる。そのため、オリフィス下流の軸非対称性は再現されなくなっていた。

よって、本研究では、オリフィス下流の流れ場を再現できるよう、完全な円管におけるLESを実施し、壁面せん断応力の計算値を腐食速度分布と定量的に比較することを目的とする。また、オリフィス下流の流れ場をより詳細に理解するため、詳細なLDV計測を合わせて行っている。

2. 実験方法および数値計算方法

2.1 FACに対する流れ場の評価パラメータ

FACは腐食現象の一種である。炭素鋼製の配管母材から壁面近傍の濃度境界層へ鉄イオンが溶出し、主流中へ輸送されるプロセスが、高い流速や局所的な乱れにより加速される現象である。壁面近傍における鉄イオンの輸送拡散流束 J は、壁面および

主流における鉄イオン濃度 C_w , C_∞ の差, および物質移動係数 k_e を用いて次式のように表される.

$$J = k_e (C_w - C_\infty) \quad (1)$$

J の増大は腐食速度の増大に繋がる. 上式では, 腐食速度に対する局所的な流れ場の影響は k_e に含まれる. 物質拡散は運動量や熱の拡散と類似する現象であり, 多くのアナロジーが提案されている. その1つに Chilton-Colburn のアナロジー⁽¹⁶⁾がある.

$$j_D = \frac{C_f}{2} \quad (2)$$

ここで, j_D は物質拡散における Colburn の J 因子, C_f は壁面摩擦係数でありそれぞれ次式で表される.

$$j_D = \frac{Sh}{ReSc^{1/3}} = \frac{k_e}{U_{ave}} Sc^{2/3} \quad (3)$$

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_{ave}^2} \quad (4)$$

U_{ave} は円管内流れの場合は管断面平均流速, τ_w は壁面せん断応力, ρ は密度である. Reynolds 数 Re , Schmidt 数 Sc , および Sherwood 数 Sh はそれぞれ次式のように表わされる.

$$Re = \frac{U_{ave} D}{\nu}, \quad Sc = \frac{\nu}{\Gamma}, \quad Sh = \frac{k_e D}{\Gamma} \quad (5)$$

D は管径, ν は動粘性係数, Γ は物質拡散係数である. 式(2)~(4)より, 物質移動係数 k_e は次のように導くことができる.

$$k_e = \frac{\tau_w}{\rho U_{ave}} Sc^{-2/3} \quad (6)$$

この関係から, 壁面せん断応力と物質移動係数, ひいては腐食速度との間には何らかの相関関係があるのではないかと考えられる. よって筆者らは, FAC に対する流れ場の評価パラメータとして壁面せん断応力に注目し研究を行っている.

2.2 実験装置

図1に実験装置の概要を示す. 実験装置は原子力安全システム研究所 (INSS) 所有の局所熱流動実験装置を使用した. 実験装置は温水タンク, 試験体,

循環ポンプ, および配管により構成される流動ループと, 窒素加圧装置, 水質調整系, 水質測定系により構成される. 実験装置の詳細は中村ら⁽¹²⁾, および長屋ら⁽¹³⁾によって報告されている.

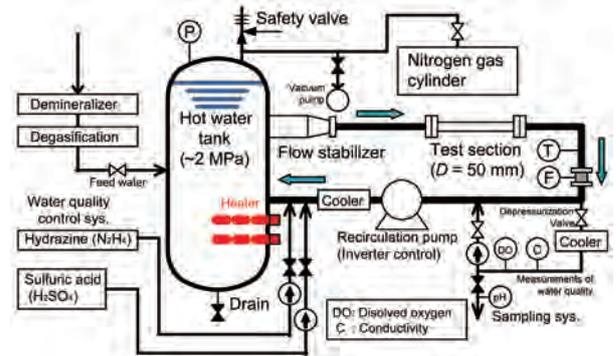


図1 実験装置の概要

2.3 流速分布測定方法

オリフィス下流の流速分布は LDV (カノマックス製 Smart LDV, Model 8739-S) を使用して計測した. 図2に LDV 計測で使用した試験体の模式図を示す. LDV により配管内流速を計測できるように試験体はアクリルで製作している. 管内径は $D = 50$ mm, オリフィス径は $d = 24.3$ mm で, 絞り直径比は $\beta \approx 0.5$ である. 試験体表面におけるレーザー光の屈折率による影響を緩和するために, 周囲をウォータージャケットで囲っている. 作動流体(水)の温度は室温(約 20°C)で, 表1に示す設定流速で計測を行った. Re 数で表すと $Re = 2.3 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$ の範囲になる. 粒子には平均粒径 $4.1 \mu\text{m}$, 密度 1020 kg/m^3 のナイロン粒子を用い, 計測サンプル数はおよそ 30,000 とした.

表1 LDV 計測における設定流速

流量 [m^3/h]	管断面平均流速 U_{ave} [m/s]	$Re = U_{ave} D/\nu$
3.3	0.47	2.3×10^4
11	1.6	7.8×10^4
17	2.4	1.2×10^5

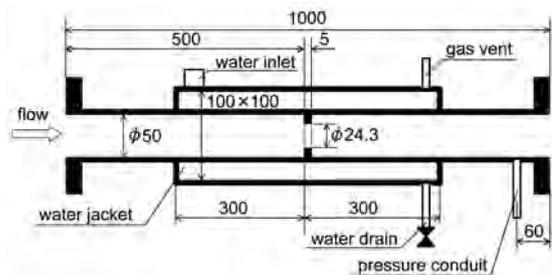


図2 アクリル製オリフィス試験体

2.4 腐食速度測定方法

腐食速度測定で使用する試験体を図3に示す。配管はSUS 304製で、図2と同様、管内径 $D = 50$ mm, オリフィス径 $d = 24.3$ mmである。オリフィスの上流および下流には腐食速度センサが取り付けられている。腐食速度センサでは、炭素鋼製の露出試験片を絶縁材の樹脂で固定し、配管内表面と段差がないよう露出させている。実験中は露出試験片の電気抵抗を測定しており、腐食による試験片厚さの減少により電気抵抗が増加することから、腐食速度に換算している。腐食速度測定原理の詳細は長屋ら⁽¹³⁾に記述されている。

腐食速度測定の実験条件を表2に示す。2度の実験（本稿ではRUN 1, RUN 2とする）を行っており⁽¹³⁾、腐食速度の流速依存性を調べるため、実験期間途中で管断面平均流速 U_{ave} をRUN 1では1.4 m/sから5.0 m/sへ、RUN 2では2.1 m/sから3.5 m/sへ変化させている。流速を変更した実験を新規に行わず実験期間途中で流速を変更したのは、新規に実験を行うとわずかでも水質が変化する可能性があるため、なるべく同じ水質で流速の影響を評価するためである。水の温度は150℃に維持し、キャビテーションが発生しないよう系統圧力を1.5 MPaまで加圧している。実験期間中の溶存酸素濃度は0.1 ppb以下、pHは約6近辺で推移していた。

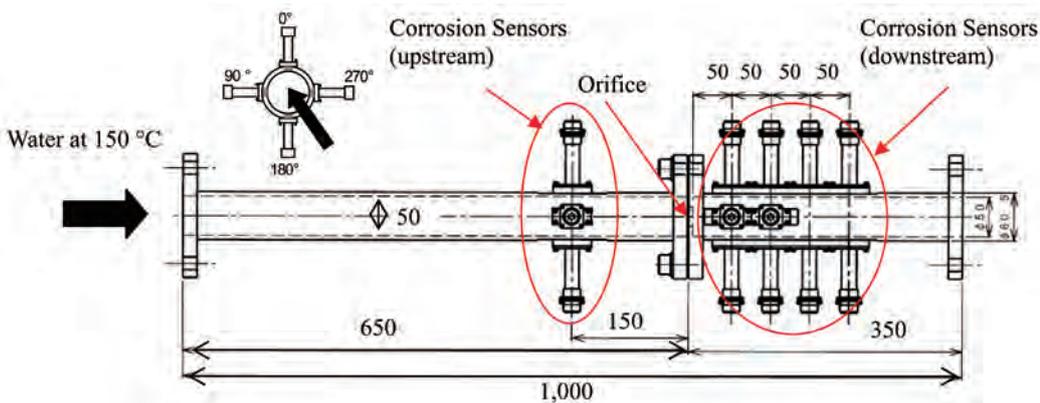


図3 腐食速度測定用試験体（単位：mm）

表2 腐食速度測定の実験条件

	Run 1		Run 2	
	管断面平均流速 U_{ave} [m/s]	1.4	5.0	2.1
Re数 (150°C, 1.5 MPa)	3.6×10^5	1.2×10^6	5.3×10^5	8.9×10^5
温度 [°C]	149.8			
溶存酸素濃度 [ppb]	0.1			
pH (室温)	5.8 - 6.3			

2.5 数値計算方法

数値計算にはANSYS社の汎用熱流体解析ソフトウェアFLUENT 6.3.26を使用した。計算条件の詳細を表3に示す。LESによる非定常計算の他に、低Re数型 $k-\epsilon$ (AKNモデル)による定常RANS計算も行っている。本稿ではLESの実施が主目的であるが、実機適用を考慮した際、計算負荷の観点からLESではなく定常RANS計算の選択が最終的に望ましいと考えられるため、低Re数型 $k-\epsilon$ の結果も合わせて示している。図4に計算領域と計算メッシュを示す。計算領域はオリフィス上流で $2D$ 、下流で $7D$ の長さである。計算領域全体でヘキサメッシュ（六面体メッシュ）であり、壁面およびオリフィスにメッシュが沿うようにO（オー）グリッド・トポロジーを二重に使用している。メッシュの解像度はEguchiら⁽¹⁷⁾を参考に決定した。径方向メッシュ幅は、壁面およびオリフィス内面に隣接するメッシュで0.02 mm、管中心付近で約0.4 mmである。周方向メッシュ幅は壁面近傍で約1.0 mmである。流れ方向（ x 軸方向）メッシュ幅は、オリフィス出口で0.1 mm、オリフィス下流 $1D$ 付近で約2.0 mm、 $2D$ 付近で約2.5 mmである。オリフィス下流の配管壁面において、メッシュの第1格子点が粘性底層（ $y^+ < 5$ ）に収まっていることは数値計算結果から確認しており、低Re数型 $k-\epsilon$ では $y^+ < 1$ 、

LESでは $y^+ < 3$ であった。タイムステップ Δt は、クーラン数 $C = u \Delta t / \Delta x$ が1以下になる条件をもとに、最も条件的に厳しいと推定されるオリフィス出口においてメッシュ幅が $\Delta x = 0.1$ mm、流速が $u = 3.0$ m/s程度まで増加すると仮定して、 $\Delta t = 3.33 \times 10^{-5}$ sと設定した。LESでは、流入境界条件における変動成分の考

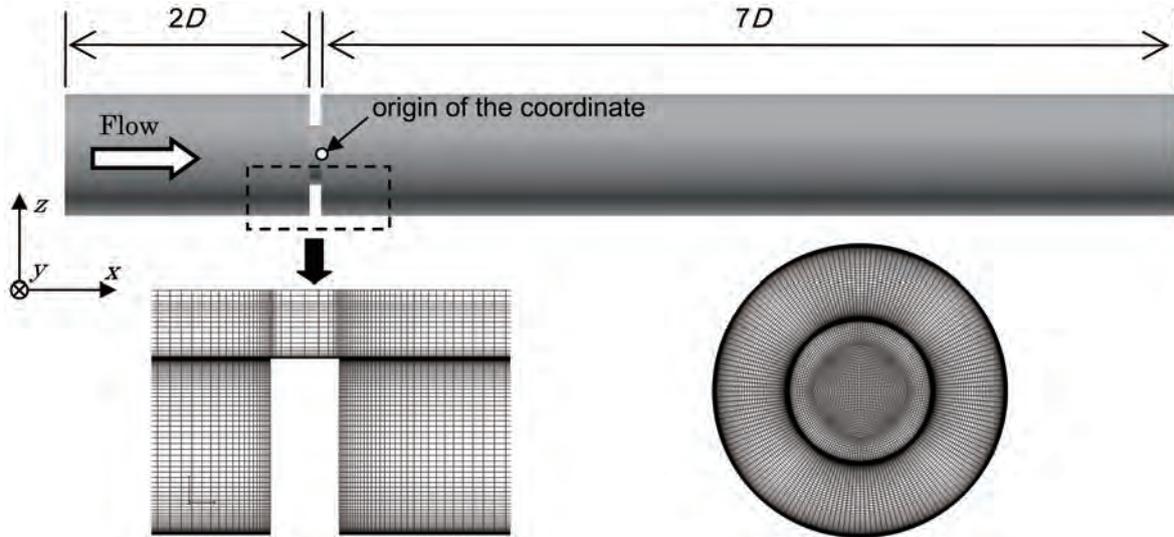


図4 計算領域と計算メッシュ

表3 数値計算条件

流体	水 (25°C)		
	密度	997 kg/m ³	
	粘性係数	8.899×10 ⁻⁴ Pa・s	
乱流モデル		低 Re 数型 $k-\epsilon$ (AKN モデル)	LES (標準 Smagorinsky モデル)
時間			2次精度後退オイラー $\Delta t = 3.33 \times 10^{-5}$ s
対流項差分		2次精度風上差分	Bounded central differencing
境界条件	流入境界	$U_{ave} = 0.453$ m/s ($Re = 2.25 \times 10^4$)	$U_{ave} = 0.453$ m/s ($Re = 2.25 \times 10^4$)
		乱れ強度: 5% 乱流粘性比: 10	1/7 乗則流速分布 Spectral synthesizer 法により速度変動を考慮
	流出境界	自由流出境界 $\partial/\partial x = 0$	圧力境界 (平均静圧 0 Pa)
	壁面境界	粘着条件	
計算領域		上流 2D, 下流 7D	
メッシュ数		4,096,800 (管断面: 15,840)	

慮が計算結果に大きく影響を与えているため、Spectral synthesizer 法により、流速の変動成分を考慮している。時間平均値などの統計量は、流れ場が十分発達した 15,000 タイムステップ後から 50,000 タイムステップの間で算出した。

3. 結果と考察

座標系は図4に示すように、流れ方向に x 軸、水平方向に y 軸、鉛直方向に z 軸とした。座標原点はオリフィス出口における管断面中心とした。

3.1 オリフィス下流の流れ場の構造

図5にLDVにより計測されたオリフィス下流 $1D \sim 4D$ 断面における流れ方向流速分布を示す。流速は管断面平均流速 U_{ave} で除することにより無次元化している。図5では2通りの流速 $U_{ave} = 0.47$ m/s および 2.4 m/s の計測結果を示しているが、無次元化することにより、それぞれの流速分布が一致することがわかる。図6はオリフィス下流の乱れ強度分布を示したものである。乱れ強度は、流速の変動成分 u' の RMS 値 u'_{RMS} を U_{ave} で除して定義している。流速分布と同様に乱れ強度分布も、 U_{ave} で除して無次

元化を行うと流速に依存することなくほぼ一致する分布となる。図7はオリフィス下流の管壁面近傍における流れ方向流速分布である。計測は管壁から1 mm離れた、流れ方向に沿う線で行っている。図7でも図5同様、流速分布が管断面平均流速 U_{ave} に依らず不変である。以上より、設定した流速の範囲内 ($Re = 2.3 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$) では流れ場の構造が不変であることがわかる。オリフィス下流、壁面近傍の流れ場の構造としては、オリフィス出口直後から $x = 2.5D$ 付近までは、剥離域により流れが逆流し、 $x = 1.0D$ 付近で最大流速 $u/U_{ave} = 1.0$ となる。また、再付着点は $x = 2.5D$ 付近であると考えられる。

図5～図7には数値計算結果も合わせて示している。低 Re 型 $k-\epsilon$ の計算結果に関しては、乱れ強度を x, y, z 方向ごとに計算しておらず比較できないため、参考値として乱流エネルギー k から $u'_{RMS} = (2k/3)^{1/2}$ を算出して示している。図5ではLESは $x = 2D$ より下流でLDV計測データをわずかに過小評価するものの、低 Re 型 $k-\epsilon$ およびLESともにLDV計測データとよい一致を示している。図6の乱れ強度分布に関しては、LESは $x = 1D$ ではLDV計測データとよい一致を示すものの、 $2D$ 以降はずれが生じてくる。図7の壁面近傍の流速分布では、LES、低 Re 型 $k-\epsilon$ ともにLDVデータから多少ずれてはいるが、定性的な傾向を再現している。以上のように、数値計算 (LESと低 Re 型 $k-\epsilon$) によりオリフィス下流の流れ場を再現することができた。よって、壁面せん断応力に関してもよい精度で再現するものと考えられる。図8はLESと低 Re 型 $k-\epsilon$ による時間平均流速分布を示したものである。両者ともおおそ軸対称な流れ場となっており、既報における標準 $k-\epsilon$ モデルによる計算結果⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾とほぼ同様な流速分布となっている。

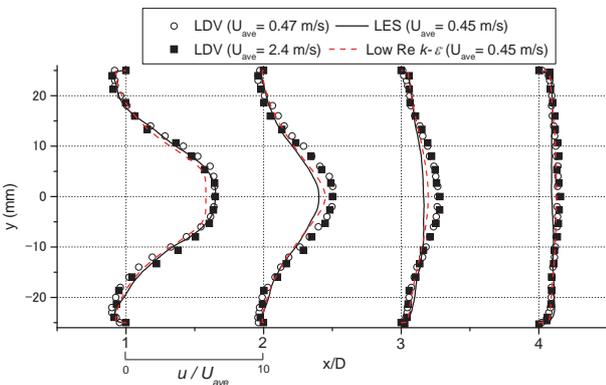


図5 時間平均流速分布, 流れ方向成分 (LDV計測および数値計算結果)

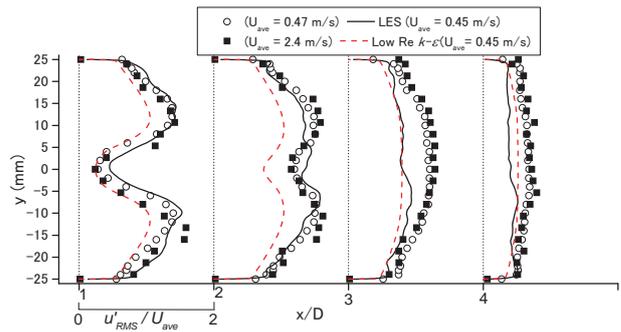


図6 乱れ強度分布, 流れ方向成分 (LDV計測および数値計算結果)

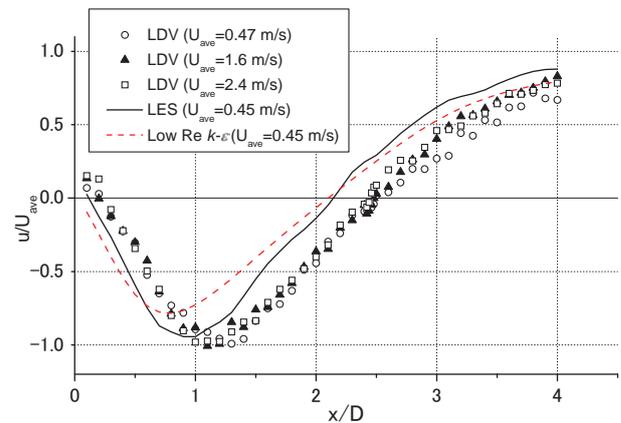


図7 壁面近傍 ($y = 1\text{mm}$) における時間平均流速分布, 流れ方向成分 (LDV計測および数値計算結果)

3.2 腐食速度分布

図9に表2のRUN 1における腐食量の時間履歴⁽¹³⁾を示す。図9(a), (b)はそれぞれ、オリフィス下流 $2D$ および上流 $3D$ における腐食量である。図9(a)の下流 $2D$ では、腐食量は時間とともに直線的に増加している。センサ位置 0° および 180° でほぼ分布は一致しており、周方向でのばらつきは見られない。RUN 1では実験開始後117時間後に流速を $U_{ave} = 1.4 \text{ m/s}$ から 5.0 m/s に切り替えているが、腐食量はその時点をも境に急激に増加している。一方、上流 $3D$ における腐食量の時間履歴は、下流 $2D$ とは異なり、徐々に減少傾向となっている。流速を切り替えてもわずかに影響があるだけで、腐食量の減少傾向はそのまま続いた。このように、オリフィスの上流と下流でFACによる腐食傾向は異なることがわかった。Bignoldら⁽⁵⁾による実験結果によると、炭素鋼の一種である軟鋼の腐食速度は時間とともに直線的に増加するが、Crを1%, Moを0.5%添加した場合、初期段階では腐食速度は大きいですが、すぐに腐食速度が低下する実験結果が得られている。初期

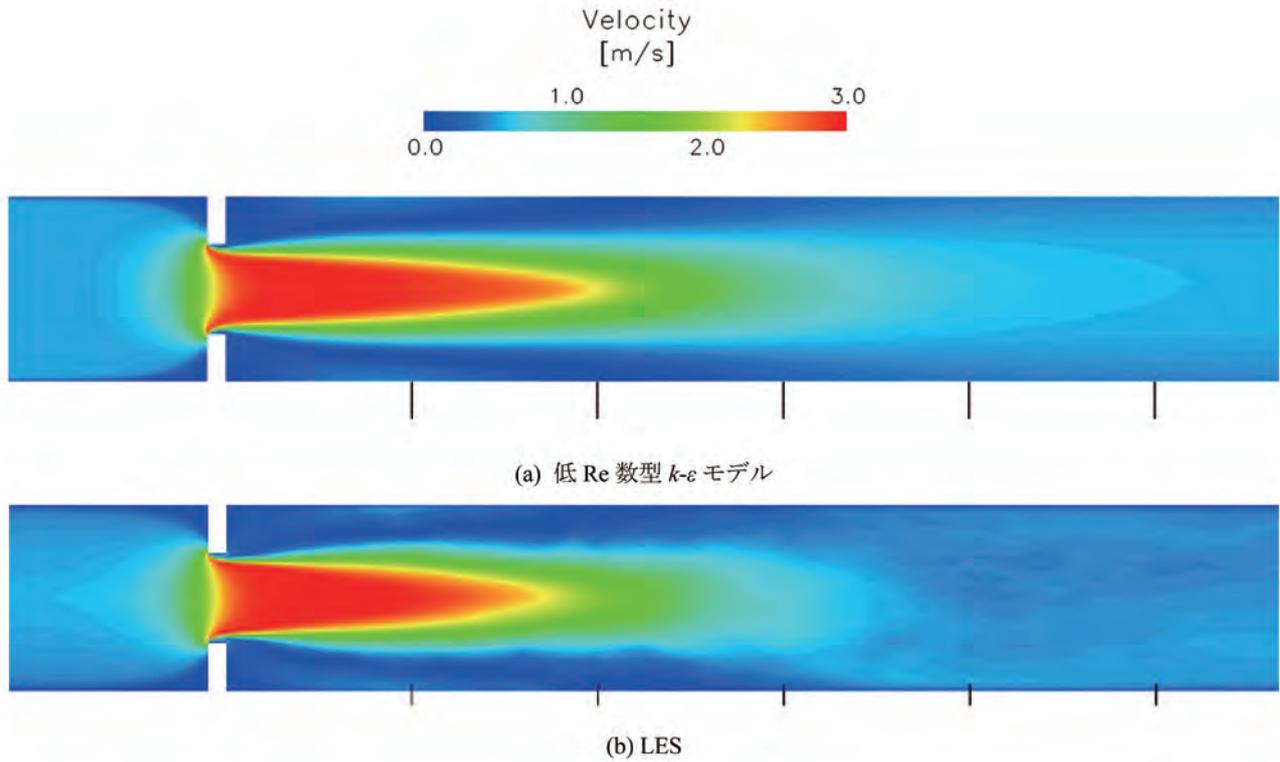
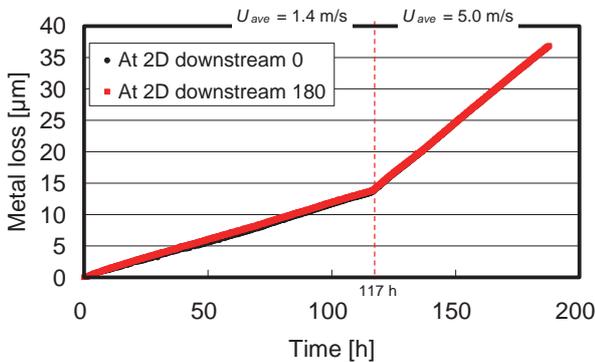


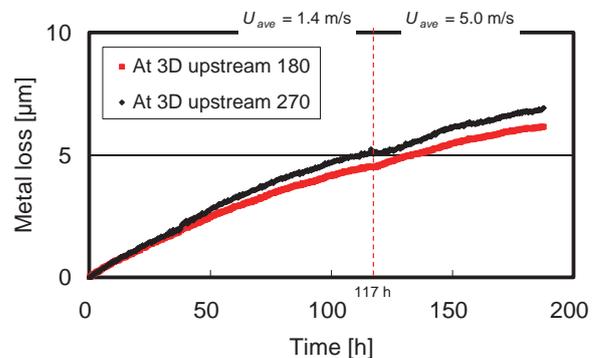
図8 数値計算による時間平均流速分布

段階は酸化被膜のない状態から酸化被膜が形成される過程に当たる。腐食速度の低下は酸化被膜の保護作用によるもので、Cr 添加により酸化被膜が安定化し腐食が抑制されたと考えられる。本研究で得られたオリフィス上流の腐食量の時間推移においても、同様な現象が生じている可能性がある。つまり、オリフィス上流のように流れがあまり乱れていない箇所では、配管表面近傍の物質移動および酸化被膜の溶解速度が小さいため、酸化被膜の成長速度が腐食速度を上回り、被膜が徐々に厚くなるとともに、腐食しにくくなることが考えられる。一般に、腐食

量の時間変化はいくつかのパターンがあり、酸化被膜の成長速度と配管母材・酸化被膜の溶解速度の大小関係で決まると考えられている⁽¹⁾。酸化被膜の成長速度が酸化被膜の溶解速度を上回る場合が上記のオリフィス上流の場合に当たり、放物線則と呼ばれる徐々に腐食速度が低下する時間変化となる。一方、オリフィス下流のように流れが乱れた箇所では、配管表面近傍の物質移動が大きいため、酸化被膜の成長が阻害され、酸化被膜の成長速度と溶解速度が早期にバランスし、時間に関して線形に腐食する直線則と呼ばれる時間変化となる。本研究でも図9(a)



(a) 下流 2D



(b) 上流 3D

図9 オリフィス下流および上流における腐食量の時間履歴⁽¹³⁾

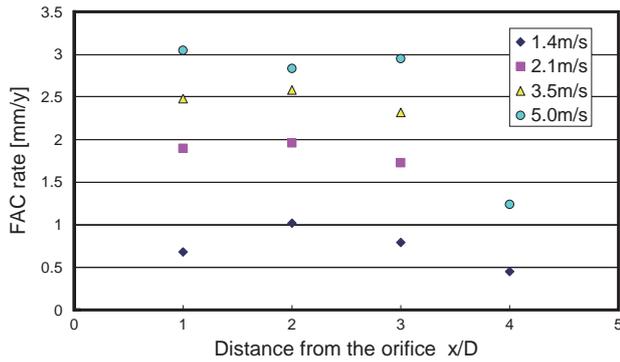


図10 オリフィス下流の腐食速度分布⁽¹³⁾

のように直線則となっている。ちなみに、オリフィス下流であっても、流速を下げて配管表面近傍の物質移動が低下した場合は、放物線則に従う可能性がある。

図10はオリフィス下流の腐食速度分布⁽¹³⁾を示したものである。定性的な分布は流速が変化しても同様であり、腐食速度が最大となるのはオリフィス下流1D～2D程度の箇所で、それより下流になると徐々に減少していく。また、流速が増加するに従い腐食速度も増加している。

3.3 数値計算により得られたオリフィス下流の壁面せん断応力

図11はLESおよび低Re型k-εにより得られたオリフィス下流の壁面せん断応力 τ_w 分布である。図11で示している値は、全て周方向で平均した値である。 τ_w の値は次式で示される壁面に平行な成分である。

$$\tau_w = \sqrt{\tau_{wx}^2 + \tau_{w\theta}^2} \quad (7)$$

ここで、 τ_{wx} は流れ方向成分を、 $\tau_{w\theta}$ は周方向成分を表す。図中のLESによる計算結果は、時間平均値 $\tau_{w,ave}$ とRMS値 $\tau_{w,RMS}$ を示している。RMS値 $\tau_{w,RMS}$ は次式で求められる。

$$\tau_{w,RMS} = \sqrt{\tau_w'^2} \quad (8)$$

本稿で示すRMS値は変動量の二乗平均平方根ではなく、瞬時値そのものの二乗平均平方根である。変動量を τ_w' とすると $\tau_{w,RMS}$ は

$$\tau_{w,RMS} = \sqrt{\tau_w'^2} = \sqrt{(\tau_{w,ave} + \tau_w')^2} = \sqrt{\tau_{w,ave}^2 + \tau_w'^2} \quad (9)$$

のように展開され、時間平均値と変動量とともに併せ持つ値である。よって、上式のRMS値を用いて腐食速度分布との比較を行うことは、平均的な流れ場と変動場とがともに腐食に影響を持つという立場に立った評価である。更に言えば、瞬時の腐食量は瞬時の流れ場で決まり、RMS値はその累積値を表す指標とも言える。

図11のLESによる時間平均値 $\tau_{w,ave}$ は1D付近で5 Pa程度で、再付着点($x = 2.5D$)近傍で0に近い値まで減少する。そして、さらに下流で2D程度までに上昇する。低Re型k-εによる τ_w の値も、LESの時間平均値 $\tau_{w,ave}$ と同様な分布になっている。これは、定常RANS計算は、準定常流れにおいては時間平均的な流れ場を算出することに起因する。一方、壁面せん断応力のRMS値 $\tau_{w,RMS}$ は再付着点近傍においても急激に低下することなく、なだらかに減少する分布となっている。

図12は図10の腐食速度分布、および図11の壁面せん断応力分布を比較したものである。それぞれの分布は、最大値で除して無次元化している。腐食速度分布は、2D, 3Dの値から判断して、再付着点

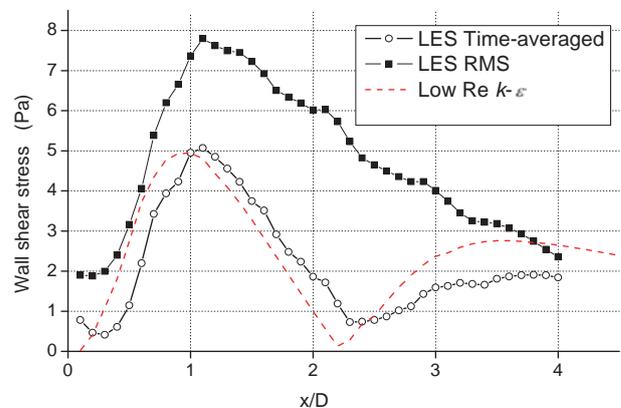


図11 数値計算によるオリフィス下流壁面せん断応力分布

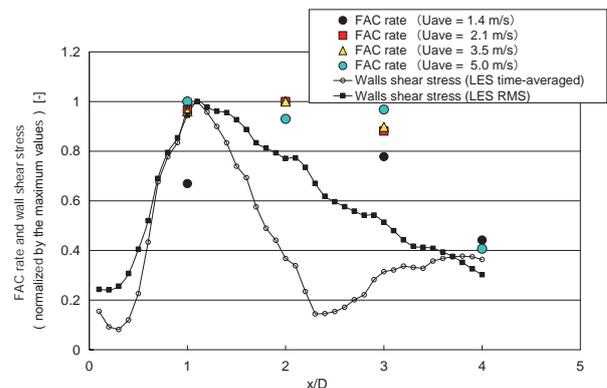


図12 腐食速度分布と壁面せん断応力分布の比較

近傍 $x = 2.5D$ においても極端に減少することはないと考えられる。腐食速度分布と壁面せん断応力分布を比較する上で、時間平均値 $\tau_{w,ave}$ を腐食速度と比較すると、再付着点近傍で過小評価することになるが、RMS 値 $\tau_{w,RMS}$ と比較すれば、比較的近い分布となっている。再付着点近傍において時間平均値 $\tau_{w,ave}$ と RMS 値 $\tau_{w,RMS}$ が異なる原因は、LES 計算結果の瞬時値を追跡することで明らかになる。つまり、再付着点近傍の壁面せん断応力は、値と作用する方向が時々刻々変動しているため、瞬時では絶対値としては大きな値が作用していても、時間平均値を算出すると相反する方向に働く値は相殺され、結果として低い値が算出されてしまう⁽¹⁵⁾。

以上のように、壁面せん断応力と腐食速度を比較するに当たり、時間平均値 $\tau_{w,ave}$ で評価すると再付着点近傍で腐食速度分布と合わなくなるため、RMS 値 $\tau_{w,RMS}$ を用いて評価することにした。実機適用を考えると、計算負荷の観点から LES よりも定常 RANS 計算による評価が望ましい。ただ、上述の通り、低 Re 型 $k-\varepsilon$ による壁面せん断応力は再付着点近傍で腐食速度と分布の形が合わなくなるため、现阶段では評価方法として適していない。よって、本稿では現象解明の手段として LES による評価を行った。LES により得られた流れ場と腐食速度との関係を、どのように定常 RANS 計算に反映するかは今後の課題である。

3.4 腐食速度と壁面せん断応力の計算値との比較

図 13 は腐食速度（測定値）と LES による壁面

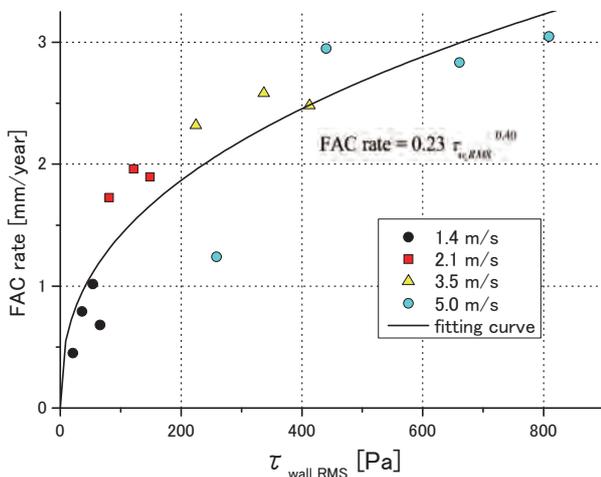


図 13 腐食速度と壁面せん断応力 RMS 値の相関関係

せん断応力の RMS 値 $\tau_{w,RMS}$ （計算値）の相関関係を示したものである。ここで、数値計算条件 ($U_{ave} = 0.45$ m/s, 室温, 大気圧) における $\tau_{w,RMS}$ の値から、腐食速度測定の実験条件 ($U_{ave} = 1.4 \sim 5.0$ m/s, 150°C , 1.5 MPa) における $\tau_{w,RMS}$ の値を求めるために、オリフィス下流の壁面摩擦係数 C_f は流速や密度に依存せず一定と仮定した。この仮定の下、 $\tau_{w,RMS}$ の計算値を式(4)の壁面摩擦係数に一度換算し、腐食速度測定実験での流速、密度を用いて再び壁面せん断応力に換算している。3.1 節において述べたように、流れ場の構造に流速依存性がないことから、この仮定は合理的と考えられる。

図 13 から、腐食速度と $\tau_{w,RMS}$ との間に正の相関関係があることがわかる。流速が高くなるほど、徐々に腐食速度がある値に漸近するような傾向があるが、実験装置の制限から流速が $U_{ave} = 5.0$ m/s 以上ではキャビテーションの抑制が困難となり、高流速域でのデータは取得できなかった。最小二乗法によりフィッティングカーブを求めると次式のような

$$FAC \text{ rate} = 0.23 \tau_{w,RMS}^{0.40} \quad (10)$$

ただし、単位は FAC_{rate} [mm/year], $\tau_{w,RMS}$ [Pa] である。このように、腐食速度は壁面せん断応力の関数として記述できる可能性がある。

3.5 腐食速度と流れ場の関係

腐食速度が高い箇所では、流れ場によって何らかの作用が壁面に及ぼされると考えられる。図 14 は瞬時における流れ場、特に渦構造を可視化したものである。図 14(a) および(b) は速度勾配テンソルの第 2 不変量 Q の等値面であり、渦構造を可視化するために用いられる物理量である。 Q は次式で与えられる。

$$Q = \frac{1}{2} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (11)$$

Q 値が正である等値面を用いると、渦構造を抽出することができる。図 14(a) はオリフィス近傍における $Q = 5.0 \times 10^5$ の等値面で、流れはオリフィス前縁から剥離し下流へ周期的に渦が渦輪として放出されていることがわかる。しかし、渦輪は $x = 0.5D$ も行かないうちに崩壊し、前後の渦と合体しつつ、

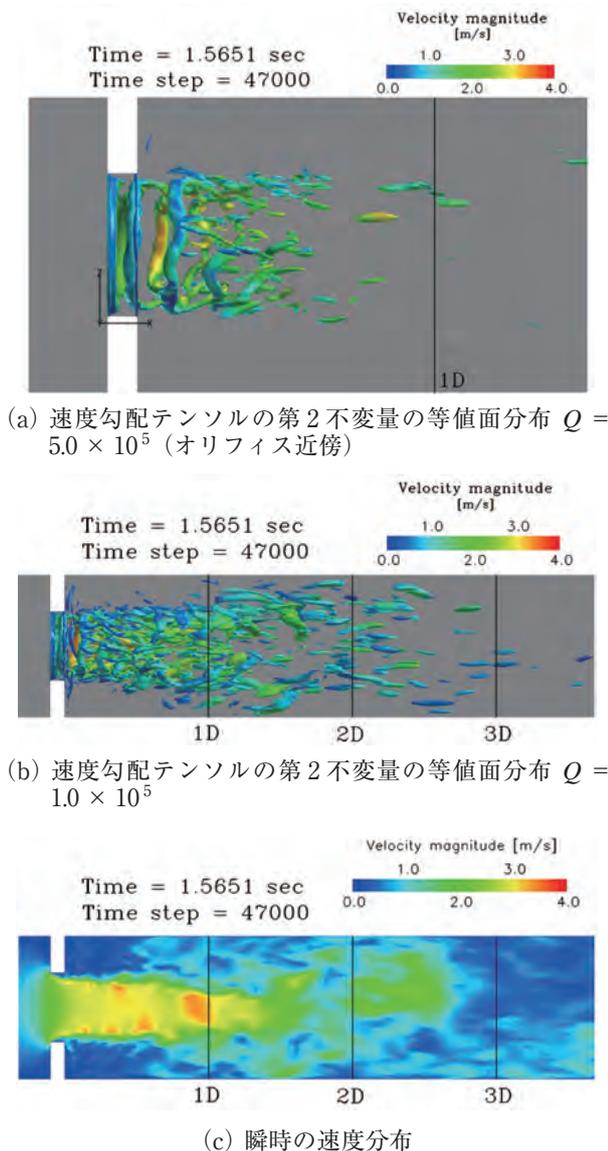


図14 LESによるオリフィス下流の渦構造

流れ方向に回転軸を持つ縦渦になっている。ただし、オリフィス下流の渦構造は非常に複雑であり、一概に縦渦ばかりとはなっておらず、3次元的な構造になっている。図14(b)はより広範囲の領域で Q 値分布($Q = 1.0 \times 10^5$)を示したものである。オリフィスから放出された渦は最終的に縦渦状になってオリフィス下流 $x = 1D \sim 3D$ 程度で壁面へと到達する。図14(c)の瞬時の速度分布と比較すると、渦が壁面へ到達した箇所では壁面近傍の流速も増加していることがわかる。これは、オリフィス噴流の外縁に分布する渦により、管中心付近の高流速の流れが巻き込まれ、壁面近傍へ輸送されるためと考えられる。図15はオリフィス下流の $x = 1.0D$, $1.5D$, $2.0D$ 各断面における瞬時の流速分布を示したものである。

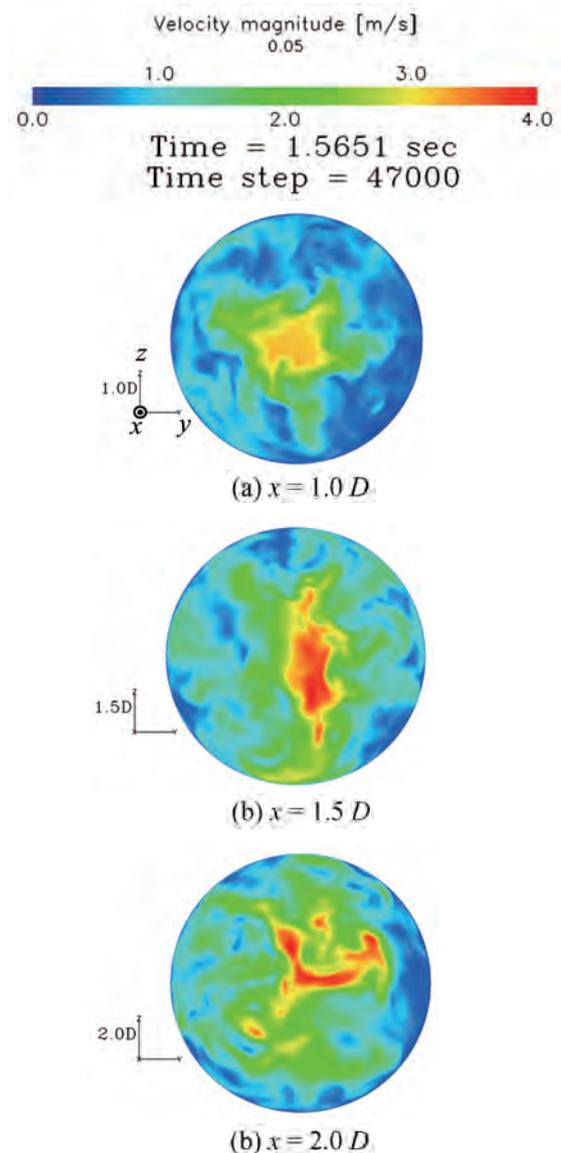


図15 LESによるオリフィス下流各断面の瞬時の速度分布

流速分布は軸対称とはなっておらず、管中央の噴流部からの高流速領域が腕のように管壁面へ伸びるような分布となっている。縦渦構造が影響してこのような分布となる考えられる。

渦が到達するオリフィス下流 $x = 1D \sim 3D$ は、図10でも示したように、腐食速度が高い領域でもある。また、筆者らは既報⁽¹⁵⁾でオリフィス下流の渦と壁面せん断応力の関係をLESにより調べており、渦が壁面に到達すると壁面せん断応力の瞬時値が増加するという知見を得ている。このように、オリフィス下流の渦が壁面に到達する領域では、腐食速度と壁面せん断応力が共に高い値を示していることから、腐食速度、壁面への渦の到達、および壁面せん断応力の3者に何らかの相関関係があることが

示唆される。

4. 結論

本研究では、FACに対する流れ場の影響を評価するため、オリフィス流れを対象に、LDV計測、数値計算、および腐食速度測定⁽¹³⁾を行った。そして、数値計算（LESおよび低Re型 $k-\epsilon$ ）による壁面せん断応力分布と、腐食速度分布の比較を行い、両者の相関関係について検討した。その結果以下のような知見が得られた。

- LDVによる流れ場の計測により、管断面平均流速 $U_{ave} = 0.47 \text{ m/s} \sim 2.4 \text{ m/s}$ ($Re = 2.3 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$) の範囲で、流れ場の構造は不変であることが明らかになった。
- 絞り直径比が約0.5のオリフィスにおいて、壁面近傍(壁面から1mm離れた地点)の流れ場の構造は、オリフィス下流 $1D$ で時間平均流速が最大値 $u / U_{ave} = 1.0$ となる。また、再付着点は $2.5D$ 付近であることが推測された。
- 数値計算結果をLDV計測結果と比較し、数値計算（LESおよび低Re型 $k-\epsilon$ ）で流れ場を良好に再現できていることを確認した。
- 腐食速度分布（測定値）と壁面せん断応力分布（LES計算値）とを、それぞれ最大値で除して無次元化し比較すると、壁面せん断応力の時間平均値は再付着点近傍で値が小さくなり腐食速度分布と合わなくなるが、RMS値で評価することにより腐食速度分布に近づけることができた。
- 腐食速度(測定値)と壁面せん断応力のRMS値(計算値)との間に正の相関関係があった。腐食速度は壁面せん断応力の関数として記述できる可能性がある。
- 腐食速度は、オリフィス下流で発生した渦が壁面へ到達する領域で大きな値を示した。

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 (2005年版) (増訂版), (2006)
- (2) Heitmann, H. G. and Schub, P., 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, British Nuclear Engineering Society, London, UK, October 10-14, pp. 243-252, (1983)
- (3) Heitmann, H. G. and Kastner, W., Erosionskorrosion in Wasser-Dampfkreisläufen - Ursachen und Gegenmassnahmen, VGB-Kraftwerkstechnik, 62 (3), pp. 211-219, (1982)
- (4) Bouvier, O. de, Bouchacourt, M. and Fruzzetti, K., Redox Condition Effect on Flow Accelerated Corrosion: Influence of Hydrazine and Oxygen, Proc. of International Conference on Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems, 117, Avignon, France, April 22-26, (2002)
- (5) Bignold, G. J., De Whalley, C. H., Garbett, K. and Woolsey, I. S., Mechanistic Aspects of Erosion-Corrosion under Boiler Feedwater Conditions, Proc. of the Third Meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors, British Nuclear Engineering Society, London, UK, October 10-14, pp. 219-226, (1983)
- (6) Keller, H., Erosionskorrosion an Nassdampfturbinen, VGB-Kraftwerkstechnik, 54 (5), pp. 292-295, (1974)
- (7) 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(6), pp. 445-452, (2008)
- (8) 米田公俊, 森田良, 藤原和俊, 流れ加速型腐食に対する影響因子の定量的な評価 (その4) - 主要配管要素の減肉傾向評価 -, 電力中央研究所報告, L09006, (2010)
- (9) Uchida, S., Naitoh M., Uehara Y., Okada H., Ohira T., Takiguchi H., Sugino W. and Koshizuka S., Evaluation Methods for Corrosion Damage of Components in Cooling Systems of Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics (IV), Comparison of Wall Thinning Rates Calculated with the Coupled Model of Static Electrochemical Analysis and Dynamic Double Oxide Layer Analysis and Their Values Measured at a PWR Plant, Journal of Nuclear Science and Technology, 47(2), pp. 184-196, (2010)
- (10) Kojo, R., Kuroda, Y., Kondo, M. and Tsuji, Y., Flow Accelerated Corrosion Mechanism behind

- the Orifice in Pipe Flow, Proc. of the Seventh Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS7), N7P0090, Chuncheon, Korea, November 14-17, (2010)
- (11) 大久保雅一, 山縣貴幸, 菅野翔, 藤澤延行, 流動加速腐食による配管減肉に関する研究(旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果による非対称流の発生), 日本機械学会論文集 (B編), 77 (744), pp. 386-394, (2011)
- (12) 中村晶, 村瀬道雄, 歌野原陽一, 長屋行則, 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 –, INSS JOURNAL, Vol. 15, p. 78, (2008)
- (13) 長屋行則, 中村晶, 村瀬道雄, 歌野原陽一, 流れ加速型腐食に及ぼす局所流動状況の影響 – 腐食速度の流速依存性 –, INSS JOURNAL, Vol. 17, p. 104, (2010)
- (14) Utanohara, Y., Nakamura, A., Murase, M. and Nagaya, Y., Measurement of Flow Field and Flow Accelerated Corrosion in the Down stream of an Orifice, Proc. of the 7th International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-7), Seoul, Korea, October 5-9, (2008)
- (15) Utanohara, Y. and Nakamura, A, RANS Prediction of Orifice Flow and Comparison with Measurements and LES, Proc. of International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF-2008), Berlin, Germany, September 16-19, (2008)
- (16) Chilton, T. H. and Colburn, A. P., Mass Transfer (Absorption) Coefficients: Prediction from Data on Heat Transfer and Fluid Friction, Industrial and Engineering Chemistry, 26, pp. 1183-1187, (1934)
- (17) Eguchi, Y., Murakami, T., Ohshima, H., Yamano, H., and Kotake, S., Study on Flow-Induced-Vibration Evaluation of Large-Diameter Pipings in a Sodium-Cooled Fast Reactor (2) A Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow in a Short-Elbow Pipe, Proc. of the sixth Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS6), N6P1003, Okinawa, Japan, November 24-27, (2008)