

流れ加速型腐食に及ぼす局所流動状況の影響*¹ – エルボ管における減肉速度と 上流オリフィスによる組み合わせ効果 –

Effects of Local Flow Field on Flow Accelerated Corrosion

– Wall Thinning Rate at an Elbow Pipe and Combination Effect of an Upstream Orifice –

歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara) *²

釜堀 孝一 (Koichi Kamahori) *³

中村 晶 (Akira Nakamura) *²

村瀬 道雄 (Michio Murase) *²

要約 エルボ管における流れ加速型腐食 (FAC) を炭素鋼製の腐食センサを用いて計測した。さらに、エルボ上流にオリフィスを設置し、配管要素の組み合わせによるFAC増大効果についても調べた。配管内径 $D = 50$ mm, オリフィスの絞り直径比は0.5である。水温は150℃, 管断面平均流速は4.98 m/s, 溶存酸素濃度は0.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, pHは室温ではほぼ中性 (約7.0) とした。エルボ配管の減肉速度は上流の直管部よりも増加することを確認したが、エルボ腹側では周方向の他の部分よりも増加の程度が低くなり、腹側近傍の流速が低いことが原因と考えられる。最大減肉速度のエルボ部とエルボ上流の直管部との比は、エルボ単体の場合は約3.7, 上流にオリフィスがある場合は約15.4となった。オリフィスとエルボ間の距離は $2.65D$ と短いため、上流のオリフィスは下流エルボの減肉速度に大きな影響を与える結果となった。

キーワード 流れ加速型腐食, エルボ配管, 減肉速度, 電気抵抗法, オリフィス

Abstract Flow accelerated corrosion (FAC) rates at an elbow pipe with the diameter of $D = 50$ mm were measured by using corrosion sensors made of carbon steel. In addition, FAC rates at the elbow with an upstream orifice were measured to investigate the enhancement of FAC due to pipe geometries. The diameter ratio of the orifice was 0.5. The water temperature was 150 °C, the mean cross-sectional velocity was 4.98 m/s, the dissolved oxygen concentration was under 0.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, and pH was nearly neutral (about 7.0) at room temperature. The FAC rate was smaller at the intrados of the elbow pipe than at other circumferential locations due to low flow velocity near the inner surface. The ratio of the maximum FAC rate at the elbow pipe to the FAC rate in the straight pipe was about 3.7 without the upstream orifice and about 15.4 with the upstream orifice. This showed that the orifice significantly affected the FAC rate at the elbow pipe because of the short distance of $2.65D$ between the orifice and the elbow pipe.

Keywords Flow accelerated corrosion, Elbow pipe, Wall thinning rate, Electric resistance method, Orifice

1. はじめに

流れ加速型腐食 (FAC) は火力発電所や原子力発電所の高経年化対策にとって重要な課題である。FACはオリフィスやエルボのように、流れが強く乱される配管要素にて発生する。FACは配管を減肉させ、時として配管破断をもたらすこともある。従来、配管減肉は非破壊検査による肉厚測定と余寿

命評価により事業者ごとに独自のルールで管理されていたが、2005年に日本機械学会による「配管減肉管理に関する規格」⁽¹⁾ が制定され、日本の発電所における配管減肉管理方法が統一された。以後、原子力プラントでは、日本機械学会の規格に基づいて、実測を主体とした配管減肉管理が行われている。

一方、配管減肉管理の合理化に向け、減肉速度の予測に関する研究も進められている。減肉予測コー

* 1 E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.8 No.1, pp. 1-12 (2016) に対し一部加筆修正を加えたものである。

* 2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 3 元(株)原子力安全システム研究所 現関西電力(株)

ドの開発は各国で行われており、日本でも開発が進められてきた⁽²⁾。FACの影響因子は一般に、環境因子（温度、pH等の水質）、材料因子（クロム等の含有量）、流体力学因子に分類される⁽³⁾。各因子に関する詳細な研究はこれまで多く行われており、その知見は現象の解明や減肉予測コードの開発へと繋がっている⁽⁴⁾。各因子の中でも、流体力学因子、特に配管要素が減肉速度へ及ぼす影響は、最終的に配管要素ごとの形状係数として整理され、減肉予測コードへ反映される。

FACによる減肉速度予測手法の妥当性の検討や予測精度の向上のためには、配管の減肉速度データが必要である。これまでのデータの蓄積がある実機プラント肉厚測定データを利用すれば、各配管要素ごとの減肉傾向や配管要素の組み合わせ効果が分析でき、形状係数の精緻化も期待できる。よって著者らはPWR 2次系配管における肉厚測定データの分析に取り組んできた⁽⁵⁾。分析結果の一例を図1に示す。分析対象は2つのエルボが連続する配管であり、配管要素の組み合わせ効果を把握することを目的に、下流側のエルボの減肉速度をエルボ間距離で整理した。なお、図1の縦軸の減肉速度比とは上流側要素の影響がなくエルボ単体と見なせる要素間距離 ($L/D = 100$) での減肉速度によって、各減肉速度を規格化した値と定義している。つまり、配管要素組み合わせ効果の指標といえる。図1ではエルボ間距離の増加とともに、下流側エルボの減肉速度比が1に近づくような分布となっている。要素間距離が短い場合は減肉速度比が大きくなる傾向が確認されるため、実機管理においても重点的に点検される部位と考えられる。一般に、上流に配管要素が存在すると下流側の減肉速度は増加し、その影響は要素間距離に応じて指数関数的に減少することが指摘されていた⁽⁶⁾。しかし、実機データは一つの曲線に乗るような分布ではなく非常にばらつきが大きい。原因として、運転条件（温度、水質、流動状態など）がそれぞれ異なることや、配管要素ごとの減肉速度分布の偏りに起因する測定データの不確かさなどの可能性が考えられる。また、数点他のデータから大きく離れた点も存在するが、他の点に比べ偏流が発生しやすい箇所であるか、もしくは、定期検査時の配管保管方法に影響を受けたなどの可能性が考えられる。よって、ばらつきを抑えるためには、特に離れた点については個々に原因を調査する必要がある。運転時のみならず定期検査時の配管の保管状態等に

も検討範囲を広げ考える必要がある。その上で、なるべく運転条件（温度、水質、流速や流動状態、定検時の配管管理方法など）を揃えた分析が必要であるが、プラントの運転条件は全てにおいて記録されておらず、運転条件の不確かさを排除した上で配管要素のみの影響を実機データから抽出することは難しい。よって温度、水質や材質、流速条件等が管理された実験において配管要素単体の減肉傾向や配管要素の組み合わせ効果について調べることは重要である。

これまで著者らは、オリフィスを対象としたFAC実験を行い、十分に実験条件を管理した上で減肉速度測定を行ってきた^{(7)~(9)}。同時に、流れ場の数値シミュレーションを実施し、FACに及ぼす流れ場の影響を評価できるような方法を開発してきた。本研究では、エルボでの減肉速度に焦点を当てた。エルボは発電プラントに必要な不可欠な配管要素である。だが、エルボでの物質移動係数の測定例⁽¹⁰⁾や、発電プラントの減肉データの分析事例⁽¹¹⁾はあるものの、FAC実験において減肉速度を直接測定した例はまだほとんど報告されてない。よって、実験条件を管理した上でエルボでの減肉速度の測定を行った。また、配管形状の組み合わせ効果に関する検討も行うため、エルボ上流にオリフィスを設置し、エルボ単体の場合の減肉速度と比較した。

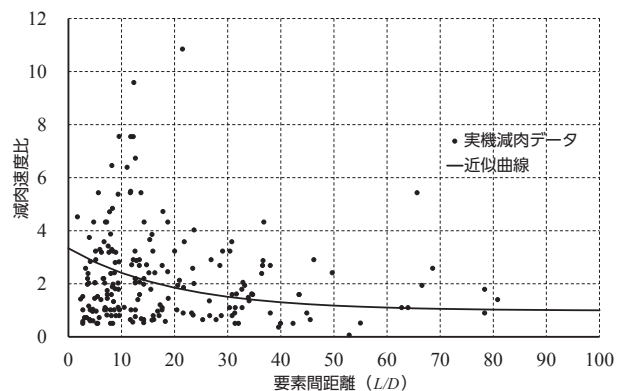


図1 実機減肉データ分析結果、要素（エルボ・エルボ）間距離 L/D に対する減肉速度比 ($L/D = 100$ での減肉速度により規格化)

2. 実験方法

2.1. 実験ループ

本研究で用いた実験ループの模式図を図2に示す。実験方法は既報のものとはほぼ同じである^{(7)~(9)}。

しかし、次節で述べるように、試験体は従来のものから変更した。循環ポンプは試験体の下流に設置し、試験部にポンプで発生する外乱の影響が及ばないようにした。給水中の溶存酸素濃度は脱気装置によりある程度低減させ、さらに室温から試験温度である150℃までの昇温過程で低減させ、0.2 μg / kg (ppb) 以下となるよう調整した。pHの調整は行っていないが、室温においてほぼ中性に保たれていることを確認した。鉄濃度は脱塩装置を用いて上昇を抑制し、上限0.03 μg / g (ppm) 程度で管理した。実験ループ水の温度はヒータと試験部下流に設けた冷却器により制御した。なお、実験定常状態において冷却器は循環ポンプによる発熱を除熱する目的で使用している。

実験中は温水タンク圧力、水温、流量を継続的に計測した。また、実験ループ水の溶存酸素濃度、導電率、pHは大気圧、室温において計測した。水質の計測装置は表1に示すものを用いた⁽⁹⁾。

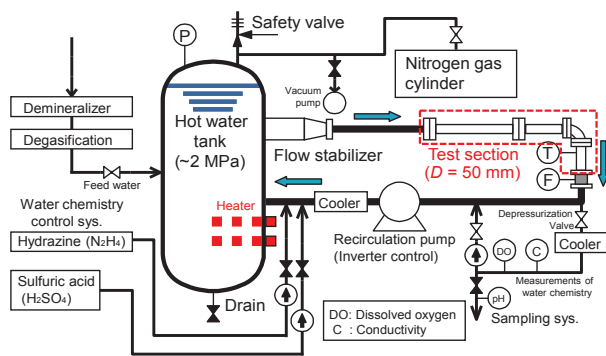


図2 局所熱流動実験装置の概要

表1 水質測定機器仕様

測定項目	製造者	形式	仕様
溶存酸素濃度	日機装	7115-22	隔膜型ポラログラフ式
導電率	日機装	9792	
pH	堀場製作所	D-51	ガラス電極法
鉄濃度	Hach	Pocket colorimeter II	TPTZ法

2.2. 試験体

減肉速度計測用の試験体を図3に示す。試験体の配管はステンレス (SUS304) で、内径 $D = 50$ mm である。腐食センサは炭素鋼 (STPT42: Ni, 0.02 wt. %; Cr, 0.04 wt. %; Mo, 0.01 wt. %) 製のプレートで、配管の内面に設置した。腐食センサ設置数は

合計20箇所、エルボ入口から9.25D上流の直管部に4箇所、エルボ管の中央に4箇所、エルボ出口から2.68D, 3.68D下流に4箇所ずつ、4.68D, 5.68D下流に2箇所ずつ設置した。なお、エルボの曲げ方向は水平面内、つまり、上流直管、エルボ管、下流直管は全て水平面内に設置されている。

図4に実験で使用したエルボ試験体の詳細形状を示す。通常のエルボ形状では管内面に腐食センサの設置が困難であったため、工業用に使用される一般的なエルボ形状とは異なる形状を採用した。これまで著者らが作成した試験体^{(7)~(9)}では管内面を滑らかにするために中ぐり加工を行い、腐食センサと管内面が面一になるようにしていた。しかし、そのような加工はエルボ管内面で行うことができない。従って54 mmの直管部を2つの45°エルボ (曲率半径 $R_c = 76.2$ mm) で挟み、直管部に腐食センサを取り付けた。作成したエルボ試験体の等価曲率半径は $R_{ep} = 114.4$ mm である。

オリフィスをエルボの上流に置いた実験では、エルボ入口から上流2.65Dの位置にオリフィスを設置した。オリフィスの詳細形状 (絞り直径比 $\beta = 0.5$) を図5に示す。これまで著者らが行ったオリフィス単体での減肉速度実験^{(7)~(9)}と同じオリフィスを用いており、オリフィス単体の場合とオリフィス・エルボの組み合わせの場合とで減肉速度が比較できるようにした。

上流側から下流を見た場合の腐食センサの位置関係を図6に示す。エルボ試験体中央には4つの腐食センサが周方向に取り付けられており、それぞれ upper (上), lower (下), extrados (背), intrados (腹) とする。腐食センサとステンレスパイプとは図7で示すように樹脂で絶縁しており、センサの炭素鋼プレート表面が温水に露出するようにした。

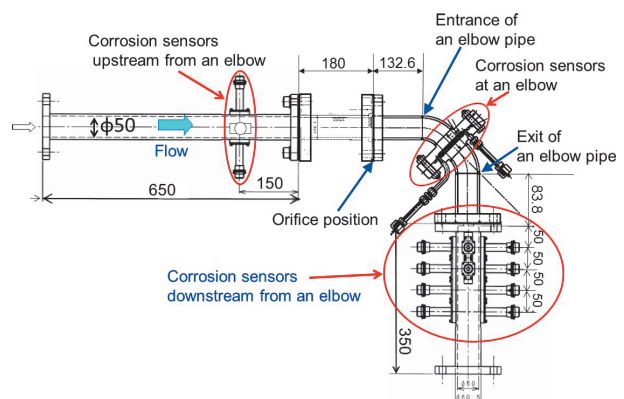


図3 減肉速度測定試験体、俯瞰図 (単位: mm)

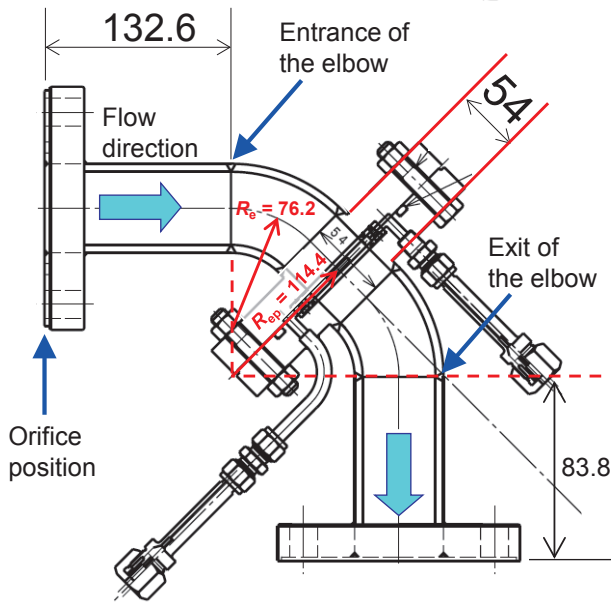


図4 エルボ試験体の形状詳細 (単位: mm)

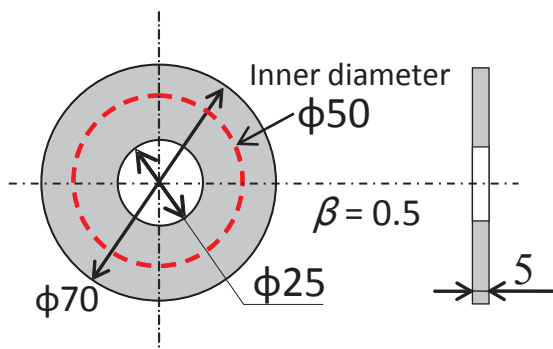


図5 オリフィス板 (単位: mm)

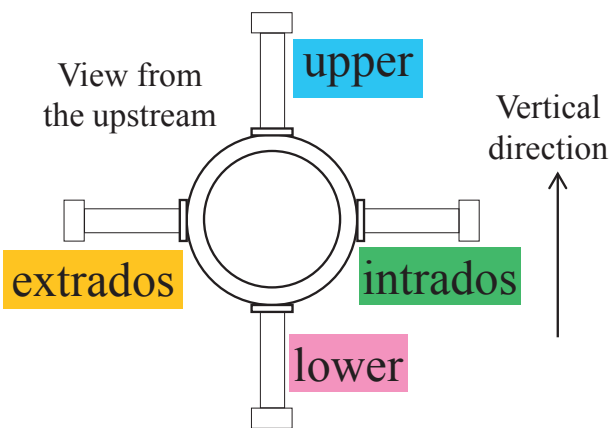


図6 腐食センサの配置

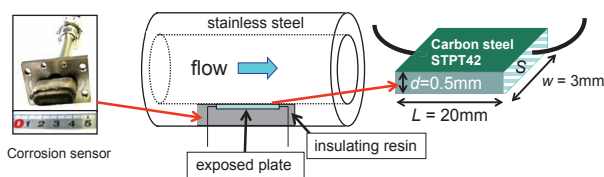


図7 腐食センサ

2.3. 減肉速度の測定方法

FACによる減肉速度は電気抵抗法で計測する。これまでの著者らの研究^{(7)~(9)}では、露出させた炭素鋼プレートと同材質、同サイズの参照試験片を用い、温度変化に伴う抵抗変化を補償していた。しかし、断線などによるセンサ故障が度々発生したため、今回は参照試験片を組み込まず腐食センサや電気回路の構造を単純化した。これによりセンサ故障頻度を抑えることが期待できる。電気抵抗 R と炭素鋼試験片厚さ d とは式(1)で関係付けられる。

$$R = \rho_e \frac{L}{S} = \rho_e \frac{L}{d \cdot w} \quad (1)$$

ここで ρ_e は電気抵抗率、 S 、 L 、 d 、 w はそれぞれ腐食センサの炭素鋼プレートの断面積、長さ、厚さ、幅である。簡素化した腐食センサは上述の利点があるが、 ρ_e は温度に依存するため、測定データは温度変動の影響をより強く受けることになる。しかし、2.4節で述べるように実験中は温度変化を $\pm 0.1^\circ\text{C}$ で管理できていることから、 ρ_e はほぼ一定として取り扱うことができる。従って、炭素鋼プレートの厚さ d は電気抵抗 R から計測することができ、炭素鋼プレートの減肉速度は3.1節で示す減肉量の時刻歴の勾配から算出することができる。

2.4. 電気抵抗の計測システム

電気抵抗の計測システムを図8に示す。計測システムは、腐食速度センサ、データ収集装置およびパソコンで構成されている。データ収集装置には11台のCorrOcean社製データロガー(製品名: CorrLog)が収納されており、腐食センサの抵抗を計測する。だが、今回の実験では図8に示すように腐食センサは20個で、データロガーの11台よりも多い。というのも、ある腐食センサが万が一故障を起こしても他の腐食センサに繋ぎ変えて計測を続行できるように、腐食センサの数をデータロガーの数よりも多くしている。よって、エルボでのFACの特徴を理解する上で重要な箇所を11箇所選んでデータロガーに接続した。パソコンには、CorrLog用計測ソフトMultiTrend(CorrOcean社)をインストールしており、計測データのログ管理、計測システムの監視およびオンラインでのモニタリングが可能である。

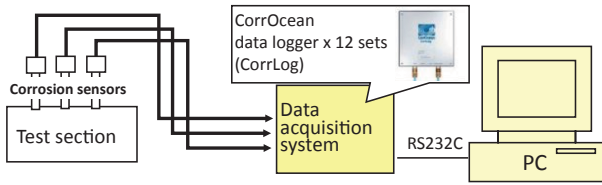


図8 電気抵抗計測システム

2.5. 実験条件

減肉速度測定実験の実験条件を表2に示す。Run 1はエルボ単体で、Run 2はエルボ上流にオリフィスを設置して実験した。Run 1の実験時間は561時間で、一方、Run2はRun 1に比べて減肉速度が大きいため、実験時間を100時間とした。管断面平均流速は5.0 m/sで、実験中の変化は±0.3%の範囲内だった。実験ループの水温は約149℃で、実験中の温度変化は±0.1%の範囲内だった。実験ループ中でのキャビテーションを防ぐため、水は1.5 MPa加圧した。溶存酸素濃度はおおよそ0.2 μg / kg (ppb) 以下であった。水のpHは調整していない。室温度下でのpH計測でほぼ中性であった。鉄濃度は実験初期には経過時間に比例してごくわずかに増加するが、その後は0.03 ± 0.01 μg / g (ppm) 程度の一定値を保った。

表2 減肉速度測定の実験条件

	Run 1	Run 2
オリフィス径 [mm]	-	25.0 ($\beta = 0.5$)
実験時間 [h]	561	100
管断面平均流速 [m/s]	4.98	4.98
温度 [°C]	149.2	149.3
溶存酸素濃度 [μg/kg]	0.1	0.2
pH*4	7.0 (6.2 to 7.5)	7.0 (6.9 to 7.2)
鉄濃度 [μg/g]	0.01 to 0.04	0.01 to 0.04
腐食センサ 材料	炭素鋼プレート (STPT42: Ni, 0.02 wt. %; Cr, 0.04 wt. %; Mo, 0.01 wt. %)	

3. 実験結果と考察

3.1. 減肉量の時間履歴

図9にRun 1とRun 2での腐食センサの減肉量の時間履歴を示す。凡例中の記述はエルボ入口距離を起点とした腐食センサ設置位置である。流れ方向の

原点はエルボ管入口である。減肉は時間とともに進み、ある一定時間を経過すると勾配は一定となる。Run 1では約50時間後に勾配が減少し始め、比較的一定となる。Run 2では初期の加熱期間ではほとんど減肉せず、10 - 20時間後に減肉量が増加し始め、およそ20 - 40時間後に時間に線形に減肉量が増加するようになる。Run 1の時間履歴はRun 2に比べわずかに変動しているが、これは主に室温の日変化に伴って引き起こされる変動である。Run 1の減肉速度はRun 2に比べて小さいため、変動が相対的に大きくなっている。定常状態に達した後の減肉速度を得るため、Run 1では449 - 561時間、Run 2では50 - 98時間での減肉量の勾配の時間平均し、減肉速度を算出した。Run 2ではエルボでの減肉量が大きかったため、上流直管部のエルボ入口から9.25Dの位置における減肉量が5 μmに達する前に実験を終了した。

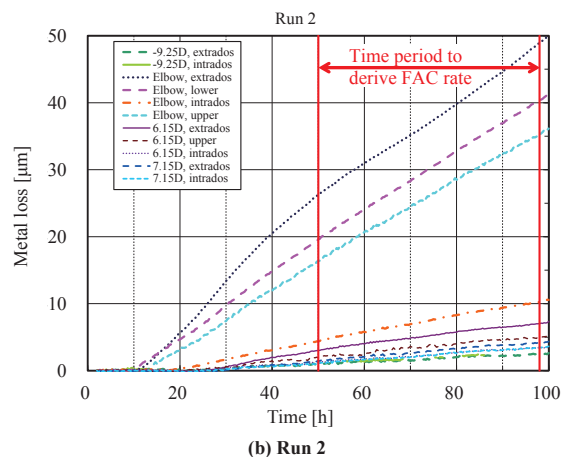
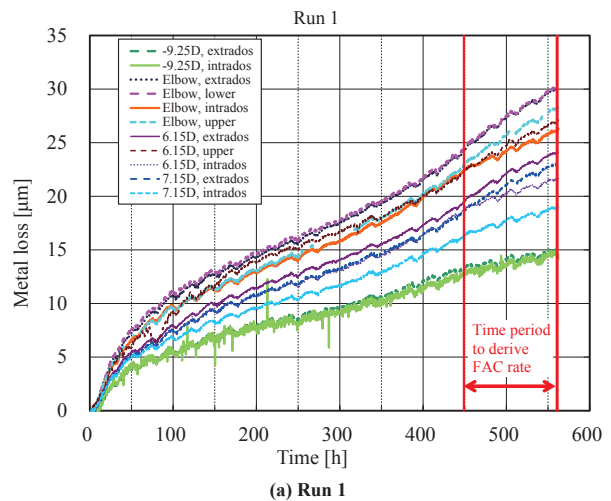


図9 腐食センサ減肉量の時間履歴

*4 測定期間における平均値を示す。括弧内の数字は最大値と最小値を示す。

3.2. エルボ単体での減肉速度

図10にRun 1 (エルボ単体)におけるエルボ試験体での減肉速度分布を示す。前節でも触れたが、図10には時間平均値を示している。図示はしていないが、変動により時間平均値からの標準偏差は0.3~0.5 mm/yで時間平均値と同程度の値だった。だが、時間平均処理により変動の影響を低減し傾向を抽出することができる。エルボ部では背側(extrados)や側面(upper, lower)がほぼ同程度の値であり、エルボ上流の値に比べ減肉速度が増加していた。エルボによって流れ場の乱れが生じ、エルボ中央では比較的広範囲で減肉速度が増加したことを示唆する。だが、それらに比べ腹側(intrados)の減肉速度が低くなった。これはエルボにおける流速分布が影響しているものと考えられる。一般に、エルボにおいてはエルボ通過時に生じる遠心力で高速な流れほど背側に偏り、管断面内で2次流れが形成される。よって、エルボ中央付近の腹側では速度が比較的遅くなる。よって、図10のエルボ腹側の低い減肉速度について、壁面近傍の比較的低い流速が影響している可能性が考えられる。エルボ部の減肉速度はエルボ上流や下流に比べ大きい。また、エルボ下流の減肉速度は下流に進むに従い減少している。腹側の減肉速度が低い傾向はエルボ下流でも続いている。これらのことから、腹側で低流速、背側で高流速といった流速分布はエルボ下流でも続いていることが示唆される。エルボ上流は直管部での減肉速度と見なせるので、エルボ部での減肉速度との比を取ると、直管に比べエルボ部で最大3.7倍、エルボ下流($x = 6.15D$)で最大2.8倍、エルボ下流($x = 7.15D$)で最大2.7倍となった。

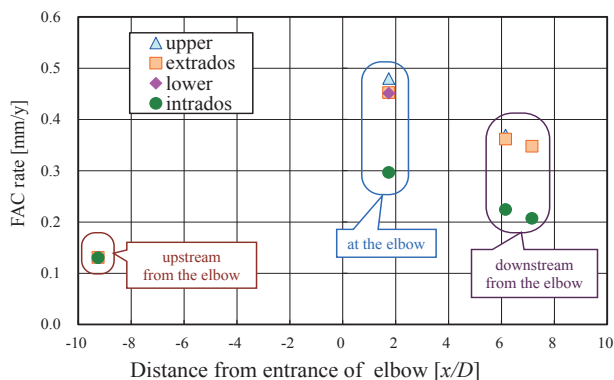


図10 エルボ配管単体での減肉速度 (Run 1)

3.3. オリフィス下流におけるエルボの減肉速度

図11にRun 2 (オリフィス下流のエルボの組み合わせ)での減肉量を示す。なお、図示はしていないが、時間平均値からの標準偏差は0.15~0.38 mm/yと時間平均値に比べ小さい値だった。減肉速度は全体的にRun 1のエルボ単体の場合に比べて増加した。エルボ部の腹側で周方向の他の箇所より減肉速度が低い傾向はRun 1の場合と同じであるが、エルボ下流では腹側と周方向の他の箇所の差はRun 1と比べて小さくなった。減肉速度の直管部(エルボ上流の値)との比は、エルボ部で最大15.4倍、エルボ下流($x = 6.15D$)で最大2.8倍、エルボ下流($x = 7.15D$)で最大1.9倍となった。エルボ部ではRun 1と比べての直管に対する減肉速度の比が大幅に増加し、上流のオリフィスの影響が大きい。一方、エルボ下流では減肉速度比はそれほど増加しておらず、オリフィスの影響はあまりなかった。

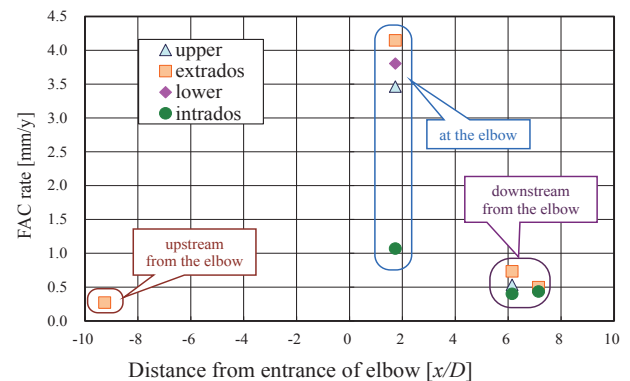


図11 オリフィス下流のエルボでの減肉速度 (Run 2)

4. 考察

図12にRun 2 (オリフィスとエルボの組み合わせ)での減肉速度分布を、以前計測したオリフィス単体の場合の減肉速度分布⁽⁸⁾と比較した。オリフィス単体での腐食センサ設置点はオリフィス出口から1D, 2D, 3D, 4D下流である。Run 2においてはオリフィス下流2.65Dにエルボ入口があるが、この付近のオリフィス単体での減肉速度は比較的大きい。よって、Run 2においてオリフィスの影響が大きく残ったままエルボ入口に流入していると考えられる。オリフィス単体の場合の最大減肉速度は3.0 mm/y、また、Run 2のオリフィスにエルボが

組み合わせさせた場合の最大減肉速度は4.2 mm/yで、エルボが追加されたことにより最大減肉速度は1.2 mm/y 増加している。また、Run 1のエルボ単体の場合、図10からわかるようにエルボ上流の直管部に対してエルボ部では最大 0.35 mm/y 減肉速度が増加する。このことから、エルボから上流2.65Dといった短い要素間距離でオリフィスが存在すると、エルボにおける減肉速度が大きく増加することがわかる。

上流のオリフィスの影響を理解するために、以前行ったオリフィス流れを対象とした流速計測データおよび数値シミュレーションで得られた流れ場⁽⁷⁾を図13と図14に示す。図13は壁面近傍の流速分布(壁から1mm地点)、図14は数値シミュレーションによる速度分布である。オリフィス単体の場合、オリフィス下流の再付着点は図13で示すように2.5D近傍であった。流速分布を管断面平均流速 U_{ave} で無次元化すると、 U_{ave} に依存せず同様な分布となった。また、図14で示すように、オリフィスからの噴流は約3Dまで継続している。これらのことから、Run 2におけるオリフィスとエルボ入口との距離2.65Dの場合、オリフィスの再付着点直後にエルボ入口があり、また、オリフィス噴流はエルボの背側に干渉していることが考えられる。この噴流がエルボでの減肉速度を増加させている可能性がある。エルボでの減肉速度は上流オリフィスとの距離を4D以上離すことで緩和することが期待できる。なぜなら、図12に示すようにオリフィス下流4Dでの減肉速度は1Dから3Dの減肉速度の約40%に低下し、また、オリフィス噴流は4D下流でほぼ消えている(図14)ためである。

以上の議論を踏まえると、今回の実験のRun 2ではオリフィスはエルボに対して最も干渉しやすい位置に配置されているものと考えられる。Kastnerら⁽⁶⁾は配管要素の組み合わせ効果を示す式を提案しており、上流要素A(形状係数 $k_{c,A}$)が下流要素B(形状係数 $k_{c,B}$)に与える影響を定式化している。下流要素の形状係数の増加分は次式で与えられる。

$$\Delta k_{c,A} = k_{c,A} \exp(-C \cdot z/D) \quad (2)$$

ここで、 z は要素AとBの要素間距離、 C は定数(=0.231)である。下流要素の総合的な形状係数は

$$k'_{c,B} = k_{c,B} + \Delta k_{c,A} \quad (3)$$

のように与えられる。上流要素の影響は $z/D = 0$

の時に最大となり、 $k'_{c,B}$ は $k_{c,A}$ と $k_{c,B}$ の和になる。今回の実験でも、オリフィス単体の減肉速度(約3.0 mm/y)とRun 1におけるエルボ単体の減肉速度(約0.5 mm/y)の和は、Run 2における下流エルボでの減肉速度(約4.0 mm/y)と同程度の値である。このように、今回の実験結果はKastnerらの式に見合う結果となった。

ここでの議論はオリフィス単体で行ったこれまでの研究⁽⁷⁾を基にしている。上流側オリフィスと下流側エルボの組み合わせ効果を理解するためには、流れ場のより詳細な理解が今後の課題であり、数値シミュレーションの利用が有効と考えられる。また、条件を十分管理した実験において、要素間距離をパラメータとした下流側配管要素への影響を確認することは重要であり、今後の課題である。

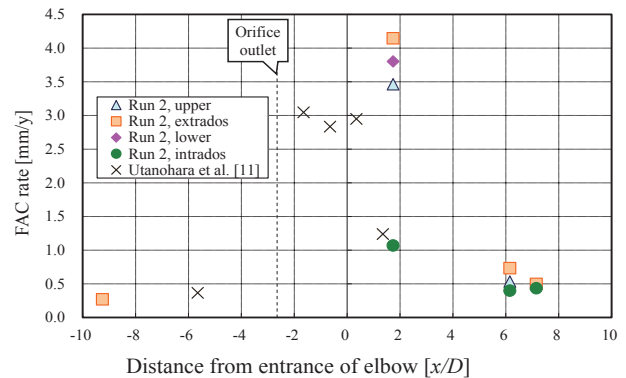


図12 Run 2における減肉速度とオリフィス単体での減肉速度との比較

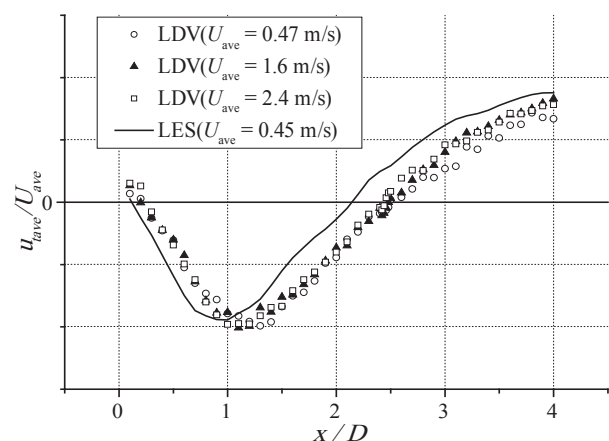


図13 オリフィス下流、壁面近傍(壁面から1 mm)における軸方向成分流速分布⁽⁷⁾

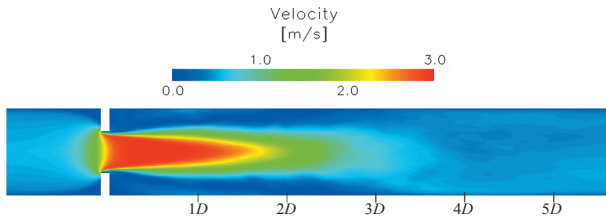


図14 オリフィス流れにおける時間平均流速分布 ($U_{ave} = 0.453$ m/s), LESによる計算結果⁽⁷⁾

5. 結論

本報告では、エルボ管を対象にFACによる減肉速度測定実験を行った。さらに、配管要素の組み合わせ効果による減肉速度の増大を確認するため、エルボ上流 $2.65D$ にオリフィスを付けた場合 (Run 2) でも実験を行い、オリフィスが無いエルボ単体の場合 (Run 1) と値を比較した。その結果、次の知見を得た。

- (1) Run 1とRun 2の双方において、エルボ部での減肉速度はエルボの上流や下流よりも大きくなった。エルボ部の腹側では周方向の他の部分よりも減肉速度は小さく、腹側近傍の流速が周方向の他の部分よりも低いことが原因と考えられる。エルボ下流に進むに従い、減肉速度は徐々に低下した。
- (2) Run 1において、エルボ部の最大減肉速度とエルボ上流の直管部との比は約3.7だった。
- (3) Run 2において、エルボ部の最大減肉速度とエルボ上流の直管部との比は約15.4だった。Run 1の比の3.7と比べて大幅に増加しており、上流側のオリフィスがエルボ部の減肉速度に大きく影響していることがわかる。
- (4) 本実験により、配管要素の組み合わせにより下流側のエルボの減肉速度が、エルボ単体の場合よりも増大することが確認された。組み合わせ効果を定量的に解明することは重要であり、今後も実機データ分析を行うとともに併せて実験において実機データ分析結果で示された傾向の確認を進める。
- (5) 本実験の場合、上流側のオリフィスと下流側のエルボが近接し、ほぼ最大限の影響を下流側エルボに及ぼしていた。要素間距離が $4D$ よりも近接する場合は下流側配管要素の減肉速度の増大を引き起こす可能性があるため、実機配管減肉管理においても重点的に点検さ

れるべき部位である。

6. 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 (2005年版) (増訂版) (2006).
- (2) 米田公俊, 森田良, 藤原和俊, 稲田文夫, 配管減肉予測ソフトウェアFALSETの開発, 電力中央研究所報告, L11007, (2012).
- (3) R. B. Dooley and V. K. Chexal, "Flow-Accelerated Corrosion of Pressure Vessels in Fossil Plants", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 77, No. 2-3, pp.85-90, (2000).
- (4) 日本機械学会, 配管減肉管理法の改良・実用化に向けた調査研究分科会 成果報告書, P-SCCII-4, (2014).
- (5) 釜堀孝一, 歌野原陽一, 村瀬道雄, 実機減肉データ分析に基づくFAC減肉速度と要素間距離の相関, 日本原子力学会2015年秋の大会, D06, 静岡 (2015).
- (6) W. Kastner, M. Erve, N. Henzel and B. Stellwag, "Calculation Code for Erosion Corrosion Induced Wall Thinning in Piping Systems", Nuclear Engineering and Design, Vol. 119, No. 2-3, pp. 431-438 (1990).
- (7) Y. Utanohara, Y. Nagaya, A. Nakamura and M. Murase, "Influence of Local Flow Field on Flow Accelerated Corrosion Downstream from an Orifice", JSME Journal of Power and Energy Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 18-33, (2012).
- (8) Y. Utanohara, Y. Nagaya, A. Nakamura, M. Murase and K. Kamahori, "Correlation between Flow Accelerated Corrosion and Wall Shear Stress Downstream from an Orifice", JSME Journal of Power and Energy Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 138-147, (2013).
- (9) K. Kamahori, Y. Utanohara, A. Nakamura, M. Murase and Y. Nagaya, "Flow Accelerated Corrosion Downstream from an Orifice (1.Measurement of Corrosion Rate)", Proceedings of the Conference on Flow Accerelated Corrosion (FAC2013), Avignon, France, May 21-24, No.1234,

(2013).

- (10) M. El-Gammal, H. Mazhar, J. S. Cotton, C. Schefski, J. Pietralik and C. Y. Ching: "The Hydrodynamic Effects of Single-phase Flow on Flow Accelerated Corrosion in a 90-degree elbow", Nuclear Engineering and Design, Vol. 240, pp.1589-1598, (2010).
- (11) M. J. Pietralik and S. C. Schefski, "Flow and Mass Transfer in Bends under Flow-Accelerated Corrosion Wall Thinning Conditions", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 133, pp.012902, (2011).