形状係数測定における壁面伝達境界条件が及ぼす影響に関する研究

恒吉 達矢^{*1}, 伊藤 高啓^{*1}, 歌野原 陽一^{*2}, 辻 義之^{*1}

Study on effects of wall mass transfer condition for measurement of geometry factor

Tatsuya TSUNEYOSHI^{*1}, Takahiro ITO^{*1}, Yoichi UTANO HARA^{*2} and Yoshiyuki TSUJI^{*1}^{*1}Department of Energy Engineering and Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

^{*2}Institute of Nuclear Safety System, Inc.

64 Sata, Mihama-cho, Mikata-Gun, Fukui 919-1205, Japan

Received: 8 September 2016; Revised: 25 October 2016; Accepted: 17 November 2016

Abstract

It is necessary to evaluate the geometry factor for predicting the flow accelerated corrosion (FAC) in the plant piping. Geometry factor is defined as the ratio of the wall mass transfer coefficient in the piping systems (such as orifices, elbows) to that in a straight pipe. In this study, the mass transfer coefficient is measured experimentally with electrochemical method for fully developed flow, downstream of orifice and 90-degree elbow. The experimental measurement is conducted with the pipe of the test section made of nickel, in which the whole pipe surface acts as electrode (in this paper, referred as 'overall electrode condition'). In order to clarify the effect of the area of the electrode, obtained results are compared with the other experiments with only point electrode working (referred as 'point electrode condition'). In addition, geometry factor is calculated with large eddy simulation (LES) and turbulent scalar transport is numerically analyzed. The values of geometry factor for the downstream of the orifice measured with overall electrode condition and point electrode condition are quantitatively different with each other, while those for elbow flow shows qualitative difference between them. Calculated values with LES are good agreement with measured values in overall electrode condition. Analysis of turbulent scalar transport reveals that, at the downstream of the orifice, the sweep component affects more strongly than the ejection component. Near the wall region in the elbow, the ejection component, on the contrary, is found to have a greater contribution than the sweep component.

Key words : Flow accelerated corrosion, LES, Electrochemical method, Mass transfer, Geometry factor

1. 緒 言

流れ加速型腐食 (Flow Accelerated Corrosion, 以下 FAC と略す) は炭素鋼配管における減肉事象の一因であり, 原子力発電プラントの配管安全管理上, 特に注意すべき現象である. FAC は配管内の流れが複雑な乱流となるオリフィスやエルボ等の配管要素において発生する (Dooley and Chexal, 2000, 日本機械学会, 2014). 長期間のプラントの運転に対する配管減肉予測が重要となるが, 減肉予測コードにおいて配管要素の影響は形状係数として評価される. 形状係数は, 配管要素と直円管における物質移行係数の比として定義される. 物質移行係数は壁面における鉄イオンの溶出速度を意味しており, 物質移行係数あるいは形状係数を定量的に精度よく評価することが求められている. オリフィス下流に関しては Utanohara ら (Utanohara et al., 2013), Yamagata ら (Yamagata et al., 2014) が減肉速度の測定を行なっている. エルボ管については釜堀ら (釜堀他, 2014), El-Gammal ら (El-Gammal et al., 2010) が減肉実験を行なっている. 米田らは数値計算により種々の配管要素における形状係数予測を行なっている (米田他, 2010).

著者らは電気化学的手法により物質移行係数の直接測定を実施してきた. 物質移行係数の測定は配管内に設置

した点電極により行われるが、試験部配管自体も伝導体を用いて作成し、点電極の周囲の壁面全面で点電極と同様の反応が生じるようにしている(恒吉他, 2015)。以降、作用極として点電極のみ電圧を印加した状態を点電極条件、試験部配管にも電圧を印加した状態を全面電極条件とよぶ。この全面電極条件と点電極条件では、物質移行係数だけではなく形状係数も異なった値になるということが数値計算により予想されている(恒吉他, 2016)。円管発達乱流およびオリフィス下流を対象に全面電極条件での測定を実施し、点電極条件との差異は確認することができた。しかし、全面電極条件の測定では、点電極の配置や点電極と配管の間の絶縁体の存在が測定に少なからず影響を及ぼすことがわかった(恒吉他, 2015)。

本研究では、点電極の配置を見直した新たな直円管試験部を作成し、円管発達乱流およびオリフィス下流を対象に物質移行係数の測定を行う。そして、全面電極条件における測定精度を確認し、オリフィス開口率によって変化するオリフィス下流の形状係数を明らかにすることを目的とする。また、これまでに点電極条件での測定のみ行っていたエルボ管を対象に、全面電極条件での測定を実施し、形状係数分布の違いを明らかにする。本実験により壁面の形状係数は求めることができるが、どのような流動に起因して形状係数が増加しているのかという知見は得られていない。そこで、実験に対応した Large Eddy Simulation (LES)による非定常計算を実施し、流動場と鉄イオンの濃度場を模擬した温度場の解析を行う。そして、オリフィス下流とエルボ管流れでそれぞれ特徴的な流動と乱流スカラー輸送のメカニズムを数値的に解明する。

2. 実験方法および数値計算方法

2・1 電気化学実験による物質移行係数の直接測定

2・1・1 対流ボルタンメトリーの概要

円管発達乱流、オリフィス下流、エルボ管流れを対象に、電気化学的手法である対流ボルタンメトリーにより物質移行係数 k_c の測定を行った。図1に実験ループおよび試験部の概要を示す。炭素鋼配管における壁面からの鉄イオンの溶出を、配管内面に露出させた電極表面におけるイオンの酸化還元反応で模擬している。本実験では鉄イオンと同程度の物質拡散係数 D_f を有するフェリシアン化鉄の溶液を用いた。物質拡散係数 D_f は溶液温度 T によって値が変わるため、層流条件における電気化学実験の測定値(Kojo et al., 2011)からアレニウスプロット式により値を求めている。

$$\log_{10} D_f = -865.5 \times \frac{1}{T} - 6.374 \quad (1)$$

本実験では溶液温度は293 Kで一定に保持しており、流体の動粘度 ν と物質拡散係数 D_f の比を表すシュミット数 $Sc(= \nu/D_f)$ は 2.13×10^3 である。図1に示した作用極の表面では還元反応($\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e^- \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$)、試験部下流に設置した対極では酸化反応($\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-} \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e^-$)が生じる。そして、イオンの酸化還元反応で生じた電流値から物質移行係数を算出する。対流ボルタンメトリーでは、印加電圧を変えても電流値が一定となる領域が表れる。これは、反応が対流拡散に律速されるために生じる現象であり、この時の電流は限界電流(Mizushina, 1971)と呼ばれる。実験では、対流拡散律速を満たす電圧を印加し、限界電流を測定する。限界電流と物質移行係数の間には次の関係が成り立つ。

$$\frac{i}{Sn_e F} = k_c(C_b - C_w) \quad (2)$$

ここで、 i は限界電流値、 S は電極の表面積、 n_e は価数、 F はファラデー定数、 C_b はバルクの鉄錯イオン濃度、 C_w は電極表面における鉄錯イオン濃度である。鉄錯イオン濃度は $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ を対象としている。バルクの濃度は実験条件として調整しており、電極表面における濃度は対流拡散律速のもとでは $C_w = 0$ とみなすことができる。反応電位は、試験部に接続した参照極を用いて制御している。物質移行係数を測定する作用極として直径 1.0×10^{-3} mのニッケル製の点電極を用いた。試験部も点電極と同じくニッケル製の配管で作成しており、通電することにより管壁全面での物質伝達を再現している。伝達境界条件の差異を明らかにするために、全面電極条件だけでなく点電極条件での測定も行なった。サンプリング周波数は1 kHz、1電極あたりの測定時間は60秒である。

2・1・2 直円管試験部を用いた円管発達乱流とオリフィス下流の測定

円管発達乱流とオリフィス下流の物質移行係数は、図 1(b)に示した直円管試験部を用いて測定した。試験部からオリフィスプレートを取り外し、試験部の上流側に十分に長い助走区間を設定して、発達乱流を対象とした測定を行なっている。発達乱流を対象とした測定では、断面平均流速 V_{z0} と管直径 D を用いて定義されるレイノルズ数 $Re(=V_{z0}D/\nu)$ を 25000 から 55000 までの範囲で変えている。オリフィス下流を対象とした測定は、オリフィス直径 d を用いて定義されるオリフィス開口率 $\beta(=d/D)$ を 0.41, 0.5, 0.62, 0.7, 0.8 の 5 条件で実施した。オリフィス厚さは 0.005 m である。オリフィス下流測定時のレイノルズ数は 25000 とした。全面電極条件での測定において、点電極と試験部配管を隔てる絶縁体はごくわずかであるが測定に誤差を及ぼす要因となる。測定点電極を流れ方向に短い間隔で同一直線状に設置すると、絶縁体の影響が下流側に累積する可能性がある。直円管試験部においては、測定用の点電極を流れ方向に螺旋状に配置することで、絶縁体の影響が下流側に伝播することを回避している。直円管試験部には測定点電極を 28 点設置した。

2・1・3 エルボ管試験部における測定

図 1(c)に示すようにエルボ管試験部も直円管試験部と同様に、試験部はニッケル製配管で作成し測定用の点電極を設置している。エルボ管試験部は図 3 に示す 3 種類の形状を設定した。曲り角 90 度、曲率 $R_c/D = 1$ のショートエルボ、曲率 $R_c/D = 1.5$ のロングエルボに加え、原子力安全システム研究所（以下 INSS と略す）が減肉実験(釜堀他, 2014)を行っているロングエルボの中央に直円管試験部が挿入された形状を INSS エルボと呼ぶ。流れ方向に測定用の点電極をショートエルボは 13 点、ロングエルボは 11 点、INSS エルボは 9 点設置している。周方向にはすべての形状で 8 点設置している。点電極の設置間隔は直円管試験部よりも広く設定している。レイノルズ数は 45000 とした。

Fig.1 Sketch of mass transfer measurement using point electrodes for overall electrode condition. Tubing of test section is made of nickel, in which the whole pipe surface acts as electrode. In the test section of straight pipe for fully developed flow and orifice flow (b), working point electrodes are arranged in a helical. From $0.4D$ to $2D$ downstream of the orifice plate, the streamwise distance between neighboring point electrodes is $0.1D$, whereas that in the region from $2D$ to $4.2D$ is $0.2D$, where D is the pipe inner diameter. Circumferential angle between electrodes is 10 degree. The ratio between the orifice diameter and the pipe diameter is defined as $\beta(=d/D)$, this parameter is varied as 0.41, 0.5, 0.62, 0.7 and 0.8. In the test section of elbow pipe (c), point electrodes are arranged regularly in streamwise and circumferential direction.

2・2 数値計算による形状係数予測

2・2・1 LES の計算条件

オリフィスならびにエルボ管流れを対象に、LES により流動場と温度場の非定常計算を実施した。計算手法は既報のエルボ管流れの計算(恒吉他, 2016)と同様である。LES の計算条件を表 1 に示す。計算には OpenFOAM(version 2.2.1)を用いた(OpenCFD, 2015)。本計算では、鉄イオンの濃度場を模擬したスカラー場として温度場の計算を行なう。そこで、OpenFOAM における単相非圧縮性流体の非定常計算ソルバである pimpleFoam をベースに、流動場計算に浮力項は含めず、パッシブスカラーとして温度場を計算するようにコードの追加および修正を行った。LES の乱流モデルは動的スマゴリンスキーモデル(Germano et al., 1991)を用いた。OpenFOAM 標準ライブラリのモデル(homogeneousDynSmagorinsky)に対して、壁乱流の計算で使用するための修正(OpenFOAM Foundation, 2015)を適用している。作動流体の物性値は、温度 300 K の水として動粘度 ν 、熱伝導率 λ 、温度拡散率 α を定数で与えている。このとき、プラントル数 $Pr(=\nu/\alpha)$ は約 5.8 である。サブグリッドスケールの乱流熱拡散は乱流プラントル数 Pr_t に基づく代数モデルで算出しており、乱流プラントル数の値は 0.9 とした。時間発展は 2 次精度後退差分を用いた陰解法である。移流項は制限関数に superbee (Roe, 1985)を用いた TVD スキームを適用した。拡散項は 2 次精度中心差分である。

2・2・2 オリフィス下流の計算条件

表 2 にオリフィス下流の計算条件、図 2 に計算領域とメッシュの概要を示す。レイノルズ数は電気化学実験と同じく 25000 とした。計算は 3.5 秒間行ない、乱流の初期発達を除いた 1 秒から 3.5 秒の 2.5 秒間の統計処理を行った。これは、計算領域を断面平均流速で 3 回程度流下するのに要する時間である。オリフィス開口率 β は、数値計算では 0.62 と 0.8 の 2 条件とした。計算領域はオリフィスの上流側に $6D$ 、下流側に $10D$ の長さを設定した。入口境界には mappedPatch という境界条件を適用し、下流方向長さ $4D$ の位置の断面における物理量を参照して入口の値を定めている。これにより、入口から下流方向長さ $4D$ の区間は発達乱流を生成するドライバーとして機能する。ポスト処理では円筒座標系を適用しており、流れ方向の座標としてオリフィス出口からの距離 z 、径方向の座標として管軸中心からの距離 r を定義する。オリフィス下流の統計処理については、時間平均だけでなく周方向の空間平均も行なっている。メッシュはマルチブロック法により全領域をヘキサメッシュ(6 面体セル)で切っている。オリフィスエッジの周辺はメッシュが密になるように設定した。壁面近傍のセルサイズ L は、円管発達乱流における摩擦速度 u_τ を用いた無次元数 $L^+(=u_\tau L/\nu)$ で表した場合に、 $0.2 \leq L_r^+ \leq 10$, $L_\theta^+ = 11$, $L_z^+ = 23$ である。下付き添え字の r , θ , z はそれぞれ径方向、周方向、流れ方向を表す。このセルサイズはオリフィス下流の熱伝達計算において十分な空間解像度を有している(恒吉他, 2015)。メッシュ数は、 $\beta = 0.62$ の場合が約 1499 万セル、 $\beta = 0.8$ の場合が約 1394 万セルある。メッシュは ANSYS 社の ICFM CFD を用いて作成し、OpenFOAM におけるメッシュ変換ユーティリティ fluent3DMeshToFoam によって OpenFOAM に読み込んでいる。

2・2・3 エルボ管流れの計算条件

表 3 にエルボ管流れの計算条件、図 3 に計算領域とメッシュの概要を示す。エルボ管の形状は実験と同じショートエルボ、ロングエルボ、INSS エルボの 3 種である。レイノルズ数は 45000 とし、0.75 秒から 3 秒までの 2.25 秒間の統計処理を行った。計算領域はエルボの上流側、下流側ともに $6D$ の長さを設定し、オリフィス下流の計算と同じく、入口から下流方向長さ $4D$ の区間は発達乱流を生成するドライバーである。図 3 にはポスト処理のために定義した座標系を示した。流れ方向の座標として管軸中心で定義したエルボ入口からの距離 z を用いる。円管断面の周方向の角度 θ はエルボ背側を 0° 、エルボ腹側を $\pm 180^\circ$ とする。壁面近傍のセルサイズは無次元数 L^+ で表した場合に、 $0.4 \leq L_r^+ \leq 33$, $L_\theta^+ = 25$, $L_z^+ = 75$ である。エルボ管流れの熱伝達現象を解析するのに十分なメッシュ解像度であることを確認している。メッシュ数はショートエルボが約 337 万セル、ロングエルボが約 356 万セル、INSS エルボが約 384 万セルである。

Fig.2 Mesh adopted for the calculation of orifice flow. Orifice diameter ratio $\beta (= d/D)$ is varied as 0.62 and 0.8.

Fig.3 Mesh adopted for the calculation of elbow flow.

Table 1 Numerical conditions of LES.

Software	OpenFOAM (2.2.1)	
Solver	Modified pimpleFoam (adding temperature field as a passive scalar)	
Turbulent model	Dynamic Smagorinsky model (Modified homogeneousDynSmagorinsky)	
Fluid	Water (300 K)	
	Kinematic viscosity	$\nu=8.5735 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
	Thermal conductivity	$\lambda=0.6104 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
	Thermal diffusivity	$\alpha=1.466 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
	Prandtl number	$Pr=\nu/\alpha=5.847$
	Turbulent Prandtl number	$Pr_t=0.9$
Time integration	Implicit unsteady	
Transient term	2nd-order backward difference scheme (ddtSchemes: backward)	
Convection term	2nd-order total variation diminishing scheme (divSchemes: Gauss SuperBee)	
Diffusion term	2nd-order central difference scheme (laplacianSchemes: Gauss linear corrected)	
Boundary conditions	Inlet	Fully developed
	Outlet	Constant total pressure
	Wall	Non slip

Table 2 Numerical conditions of LES for orifice flow.

Pipe diameter	$D=0.044 \text{ m}$
Orifice diameter ratio	$\beta=0.62, 0.8$
Calculation domain	Up $2D$ (+Driver $4D$) Down $10D$
Reynolds number	$Re=25000$

Table 3 Numerical conditions of LES for elbow flow.

Pipe diameter	$D=0.044 \text{ m}$
Curvature radius of elbow	$R_c/D=1, 1.5$
Calculation domain	Up $2D$ (+Driver $4D$) Down $6D$
Reynolds number	$Re=45000$

2・2・4 温度場計算による形状係数の算出方法

温度場の計算条件は、水の入口断面における平均温度が 300 K に対して、壁面は一様な 310 K の等温加熱条件である。ただし、オリフィス壁面については断熱条件としている。入口境界条件の mappedPatch において断面平均温度が 300 K になるように補正を行ない、ドライバー区間において発達した温度場を形成して、オリフィスあるいはエルボへ流入させている。温度場計算によって求めた壁面の温度勾配から熱伝達率 h を算出する。本計算では温度場をパッシブスカラーとして計算しており、熱伝達率 h が物質移行係数 k_c に相当する。よって、熱伝達率に基づく形状係数は次式となる。

$$\frac{k_c}{k_{c0}} = \frac{h}{h_0} \quad (3)$$

ここで、下付きのゼロは円管発達乱流における値を表す。

3. 結果および考察

3・1 円管発達乱流における物質移行係数の測定値

図 4 に直円管試験部において発達乱流を対象に測定した物質移行係数を示す。レイノルズ数は 25000 の結果である。横軸は図 1 に示した流れ方向の電極位置である。個別の点電極のみ電圧を印加した点電極条件での測定に対して、ニッケル製試験部配管にも通電した全面電極条件での測定では、物質移行係数の値が大きく減少する。点電極条件における物質移行係数の過大評価は、電極上流側の濃度境界層が未発達な領域で物質移行係数が非常に高くなるためであり、これは入口効果として知られている(Wang et al., 1996)。発達乱流を対象とした測定では、測定電極の位置によらず物質移行係数の値は同一となることが理想である。本実験では、点電極を流れ方向に螺旋状に配置することで、全面電極条件での測定時にそれぞれの点電極の前後で安定した濃度境界層が形成されるようにした。また、試験部配管と点電極間の絶縁体として耐摩耗性に優れるアクリルを採用し、試験部の研磨、洗浄時の劣化を抑えた。その結果、以前の測定と比較して、物質移行係数の測定値の電極間のばらつきを大幅に改善することができた。

図 5 にレイノルズ数を 25000, 35000, 45000, 55000 と変えて測定した物質移行係数を示す。エラーバーは 28 点の測定点電極の標準偏差を表す。全面電極条件と点電極条件では、物質移行係数の値だけでなく、物質移行係数のレイノルズ数依存性も異なる。伝達領域が直円管の周方向には一様で、流れ方向には限定されており、その伝達領域の下流方向長さ L_e が十分に小さいとき、物質移行係数 k_c は無次元化したシャーウッド数 $Sh (= kcD/f)$ として半理論的に次式で表される(Shaw et al., 1963)。

$$Sh = 0.276 Re^{7/12} Sc^{1/3} \left(\frac{D}{L_e} \right)^{1/3} \quad (4)$$

本実験において、点電極の直径 $D_e = 0.001$ m は無次元数 $De^+ (= u_\tau D_e / \nu)$ で表した場合に 10^2 以下と十分に小さいが、電極表面が円形であるため、円管の周方向に伝達領域の下流方向長さ L_e が変化する。 L_e の円管周方向への変化を考慮すると式(4)は次のように表すことができる。

$$Sh = 0.309 Re^{7/12} Sc^{1/3} \left(\frac{D}{D_e} \right)^{1/3} \quad (5)$$

点電極条件の測定値は図中に黒破線で示した式(5)と定量的によく一致している。図中の直線の傾きとして表れる物質移行係数のレイノルズ数依存性は、点電極条件では得られた値と式(5)の一致から $k_c \propto Re^{7/12}$ である。全面電極条件の測定値に対しては、熱伝達において一般的に用いられている Dittus and Boelter の経験式(Dittus and Boelter, 1930)を物質伝達に当てはめて比較した。

$$Sh = 0.023Re^{0.8}Sc^{0.4} \quad (6)$$

測定値は赤実線で示した経験式に対してわずかに大きな値を示している。これは点電極の周囲の絶縁体において、短い距離ではあるが一時的に濃度境界層の発達が中断される影響と思われる。ただし、物質移行係数のレイノルズ数依存性は経験式の $k_c \propto Re^{0.8}$ に近く、試験部全面で濃度境界層を発達させた効果は十分に表れていると考えられる。

Fig.4 Mass transfer coefficient for fully developed flow in straight pipe at $Re = 25000$. Symbols are measured values by each electrode and lines represent their averaged values. $\square$: overall electrode condition, $\circ$: point electrode condition.

Fig.5 Relation between mass transfer coefficient and Reynolds number. Error bars represent the standard deviation of multiple electrodes. $\square$: overall electrode condition, $\circ$: point electrode condition, —: eq.(6) (Dittus and Boelter, 1930), - - - -: eq.(5) based on eq.(4) (Shaw et al., 1963).

3・2 オリフィス下流の形状係数ならびに乱流スカラー輸送の解析

3・2・1 オリフィス下流の流動場

図 6 に数値計算によって求めたオリフィス下流の平均流動場の流線を示す。横軸はオリフィスからの距離 z 、縦軸は管軸中心からの距離 r である。オリフィス開口率 β は 0.62 と 0.8、レイノルズ数は 25000 である。オリフィス下流では、オリフィスエッジから剥離した流れが壁面に再付着するまで、剥離流れと壁面の間で大きな再循環領域が形成される。再付着点距離 z_R を壁面第 1 層セルの流れ方向平均流速から求めると、 $\beta = 0.62$ の場合が $z_R/D = 1.98$ 、 $\beta = 0.8$ の場合が $z_R/D = 0.95$ である。再付着点距離 z_R とオリフィスエッジの壁面高さ H の比をとると、 $\beta = 0.62$ の場合が $z_R/H = 10.4$ 、 $\beta = 0.8$ の場合が $z_R/H = 9.5$ であり、ともに 10 に近い値をとる。この値は実験による流動場測定によって求めた結果(Shan et al., 2014)と一致しており、LES の計算精度が十分に高いことを示している。

Fig.6 Streamlines of time-averaged orifice flow for $Re = 25000$ calculated with LES. Orifice diameter ratio is $\beta = 0.62$ (a) and $\beta = 0.8$ (b). Reattachment point is $z_R/D = 1.98$ for $\beta = 0.62$ and $z_R/D = 0.95$ for $\beta = 0.8$. As nondimensionalized by orifice step height H , $z_R/H = 10.4$ for $\beta = 0.62$ and $z_R/H = 9.5$ for $\beta = 0.8$.

図 7 に断面平均流速 V_{z0} を用いて無次元化した乱流エネルギーのコンターを示す。オリフィスからの噴流と再循環領域の境目において、急激に乱流エネルギーが大きくなっていることがわかる。乱流エネルギーの最大値は、オリフィス開口率 β が小さい方が高くなる。乱流エネルギーが高い領域は壁面近傍まで及んでいるが、壁面近傍

での乱流エネルギーのピーク位置は再付着点よりも上流側の $z/H = 5$ 付近に位置している。この壁面近傍まで及ぶ強い乱れは、壁面の伝達現象に大きく影響する。次節以降において、オリフィス下流の形状係数分布と形状係数を高める要因となる流動構造について詳しく述べる。

Fig.7 Contour of turbulent kinetic energy, for $\beta = 0.62$ (a) and $\beta = 0.8$ (b). Near the wall, turbulent kinetic energy increase around $z/H = 5$ in the upstream of the reattachment point.

3・2・2 全面電極条件と点電極条件におけるオリフィス下流の形状係数の比較

図8に電気化学実験により物質移行係数を直接測定して求めたオリフィス下流の形状係数分布を示す。レイノルズ数は25000である。点電極条件については、既報の塩化ビニル樹脂製配管に点電極を設置した試験部における測定結果(Kojo et al., 2011)をあわせて示す。本実験の点電極条件とKojoらの実験では、試験部の配管材料が異なるが、対流ボルタンメトリーとしての境界条件は同一であり、得られた形状係数は同様の傾向を示している。開口率が $\beta = 0.8$ の条件における形状係数分布について、本実験では試験部に設置した点電極のなかで最もオリフィスに近い $z/D = 0.4$ の位置で最大となっており、極大点が明確ではない。ただし、本実験結果はKojoらの結果と同様の分布傾向を示していることから、 $\beta = 0.8$ における形状係数の極大点は $z/D = 0.4$ の近傍に存在すると考えられる。

全面電極条件と点電極条件を比較すると、物質移行係数 k_c の測定値は点電極条件の方が高いが、形状係数 k_c/k_{c0} の場合には全面電極条件の方が高い値となる。点電極条件と全面電極条件の違いとして、点電極条件の場合のみ測定電極の端で入口効果が働く。この問題に対して、著者らは入口効果を補正する方法を提案した(恒吉他, 2013)。補正方法は、図5に示した円管発達乱流における物質移行係数のレイノルズ数依存性の違いから導出するものであり、点電極測定で求めた形状係数を1.5乗した値が入口効果の補正值となる。しかし、図8(b)に示した点電極条件の形状係数は、既に入入口効果の補正を適用した値であるが、全面電極条件の形状係数とは異なっている。よって、点電極条件と全面電極条件では入口効果の有無だけではなく、本質的に壁面の伝達現象に影響する差異が存在していると考えられる。点電極条件を再現したLES(恒吉他, 2016)を実施したところ、点電極条件では形成されるスカラー場の境界層が非常に薄いため、速度変動による乱流スカラー輸送がほとんど働かないという計算結果が得られた。そのため、点電極条件の形状係数と乱流スカラー輸送が強く影響する全面電極条件の形状係数は一致しないと予想された。本実験により点電極条件と全面電極条件では得られる形状係数が異なることが実際に確かめられた。

3・2・3 オリフィス下流の形状係数の開口率依存性

図9にオリフィスエッジの壁面高さ H を横軸に、形状係数が最大値となる位置 z_{max} を縦軸に示す。全面電極条件と点電極条件で形状係数の値は異なるが、最大となる位置についてはともに $z_{max} = 5H$ に近い値となる。これはおおよそ再付着点距離の半分の長さにあたり、再循環領域内に位置している。また、図7に示した乱流エネルギーの高い領域が壁面近傍まで及んでいる位置に一致する。

図10にオリフィス開口率を横軸にして、形状係数の最大値をまとめた。著者らはこれまでの点電極条件における測定結果から、オリフィス下流の形状係数の最大値は以下の関数形で表記できることを提示した(恒吉他, 2013)。

$$\frac{k_{c \max}}{k_{c0}} = \left(\frac{1}{\beta^2}\right)^{C_1} + C_2 \quad (7)$$

ただし、点電極条件の測定では、オリフィス直径を大きくして開口率 β を1に近付けた際に、形状係数の最大値も1に漸近する傾向があることから、定数 C_2 はゼロとしていた。また、 $\beta = 1$ をオリフィスを設置しない円管発達乱流と考えると形状係数は1となり、定数 C_2 をゼロとすることは妥当と思われた。改めて、本実験結果に基づく、全面電極条件では $C_1 = 0.58$, $C_2 = 1.4$, 点電極条件では $C_1 = 0.65$, $C_2 = 0.021$ となる。全面電極条件では開口率 β を1に近付けた際に、形状係数の最大値は1に漸近せず高い値を示すが、式を適用可能な β の範囲は明らかではなく、その点は注意を要する。

Fig.8 Geometry factor profile downstream of orifice for $Re = 25000$ at some orifice diameter ratio β . Δ : $\beta = 0.41$, $\square$: $\beta = 0.5$, $\circ$: $\beta = 0.62$, $\diamond$: $\beta = 0.7$, ∇ : $\beta = 0.8$. Open symbols are present results and filled symbols are previous experiments (Kojo et al., 2011). Geometry factor measured in overall electrode condition and point electrode condition are quantitatively different.

Fig.9 Relation between location of maximum geometry factor $z_{\max}$ and orifice step height H . $\square$: overall electrode condition, $\circ$: point electrode condition. Both of the results close to $z_{\max} = 5H$, which is approximately half length of the reattachment points.

Fig.10 Maximum geometry factor as a function of orifice diameter ratio β . $\square$: measurement in overall electrode condition (k_c/k_{c0}), with fitting line by eq.(7) with $C_1 = 0.58$ and $C_2 = 1.4$. $\bullet$: measurement in point electrode condition and corrected entrance effect $((k_c/k_{c0})^{1.5})$, with fitting line by $C_1 = 0.65$ and $C_2 = 0.021$.

3・2・4 オリフィス下流の形状係数の実験値と計算値の比較

図 11 にオリフィス開口率 β が 0.62 と 0.8 における形状係数の実験値と数値計算による予測値を示す。数値計算による予測値として、熱伝達率 h に基づく値だけでなく、摩擦速度 $u_{\tau\theta}$ に基づく値も示した。摩擦速度は流動場の複雑性を考慮して、流れ方向の流速 v_z だけでなく周方向の流速 v_θ も含めて次式により定義した。

$$u_{\tau z\theta} = \sqrt{-v \frac{\partial \sqrt{v_z^2 + v_\theta^2}}{\partial r}} \Big|_{\text{wall}} \quad (8)$$

ここで、上付きバーは時間平均を表す。実験値と計算値を比較すると、熱伝達率に基づく形状係数は全面電極条件の形状係数とよく一致している。温度場計算の無次元拡散係数であるプラントル数は電気化学実験の拡散係数であるシュミット数と同じではないが、複雑流動によるスカラー輸送の効果を形状係数として適切に評価できていると考えられる。摩擦速度に基づく形状係数は、入口効果の補正をした点電極条件の実験値に近い値を示し、全面電極条件の実験値や熱伝達率に基づく値に対して過小評価している。摩擦速度は壁面の近傍に存在する流動構造の影響を直接的に評価しているが、複雑流動場全体で生じるスカラー輸送の効果を反映することはできない。そのため、伝達現象が壁面近傍で完結してしまう点電極条件の実験値と同様に、全面電極条件における実験値や熱伝達率に基づく値とは差異が生じてしまう。Yamagata らはオリフィス開口率が $\beta = 0.6$ の条件において、安息香酸製の試験部を用いて配管減肉実験を行なっている(Yamagata et al., 2014)。その結果として報告されている減肉速度比の分布と、本研究の $\beta = 0.62$ における全面電極条件の形状係数や熱伝達率に基づく形状係数の分布は概ね一致している。Yamagata らが求めたレイノルズ数が 30000, 40000, 50000 における減肉速度比の最大値は約 3.3, 3.1, 3.1 であり、本実験の全面電極条件における最大値の 3.16 とよく一致している。減肉速度比あるいは形状係数が最大となる位置 $z_{\max}$ を比較すると、Yamagata らの結果はレイノルズ数が 30000, 40000, 50000 に対して $z_{\max}/D = 1.8, 1.8, 1.4$ ($z_{\max}/H = 9.0, 9.0, 7.0$) であり、図 9 に示した本実験の $z_{\max}/H = 5$ とは差異がある。最大値を示す位置が異なる原因としては、減肉実験では減肉の進行により配管表面の形状が変化するのであるに対して、本研究では実際の配管減肉の時間発展は考慮せず壁面が滑らかな直円管のまま不変としている点が考えられる。

Fig.11 Geometry factor profile downstream of orifice for $Re = 25000$ at $\beta = 0.62$ (a) and $\beta = 0.8$ (b). $\square$: measurement in overall electrode condition (k_c/k_{c0}), $\bullet$: measurement in point electrode condition and corrected entrance effect ($(k_c/k_{c0})^{1.5}$), —: heat transfer coefficient calculated with LES (h/h_0), - - -: friction velocity calculated with LES ($u_{\tau z\theta}/u_{\tau z\theta 0}$). Geometry factor predicted by the wall heat transfer coefficient are consistent with measured values in overall electrode condition. Calculated values from the friction velocity and measured values in point electrode condition are in good agreement, however, both of them underestimate to measured values in overall electrode condition.

3・2・5 オリフィス下流の渦構造と乱流スカラー輸送

オリフィス下流の瞬時流動場において最も特徴的な構造は、オリフィスエッジからの流れの剥離によって生じる渦である。図 12 に数値計算の結果から速度勾配テンソルの第 2 不変量 Q の等値面により可視化した渦構造を示す。オリフィスを通過した直後の渦はそのまま直進する傾向が強いが、下流に進むにつれて径方向に拡散する動きをみせる。強い渦が多く存在する範囲は、図 7 に示した乱流エネルギーが高い領域に一致する。再付着点よりも上流側の再循環領域内において、間欠的に渦が壁面近傍まで到達する様子が確認できた。この渦を含めた速度変動により強力なスカラー輸送が生じ、壁面の形状係数が増加していると考えられる。

Fig.12 Isosurface of the instantaneous Q criterion downstream of orifice for $\beta = 0.62$ (a) and $\beta = 0.8$ (b). Value of isosurface is $Q = 3 \times 10^5 \text{ s}^{-2}$ for $\beta = 0.62$ and $Q = 1 \times 10^5 \text{ s}^{-2}$ for $\beta = 0.8$. Some of the vortex structures in the separated flow from the orifice edge are intermittently going towards the wall.

オリフィス下流の乱流スカラー輸送について詳しく考察する. 図 13 に瞬時の温度 t と乱流熱流束 $-v_r' t'$ を示す. 温度は入口断面の管軸中心におけるバルク温度 T_b と壁面温度 T_w を用いて無次元化している. 乱流熱流束 $-v_r' t'$ は速度変動 v_r' と温度変動 t' の積であり, 図には壁面の熱伝達を促進する効果のある sweep ($v_r' > 0, t' < 0$) と ejection ($v_r' < 0, t' > 0$) の成分をそれぞれ寒色と暖色で示している. sweep と ejection は壁乱流におけるレイノルズ応力に対して用いられている用語であるが, ここでは現象の相似性から乱流熱流束に対して同様に適用する. 図 13 は特に強い sweep が生じている瞬間であるが, オリフィス下流においては sweep が時系列の中でも多く発生する様子が確認できた. この sweep は図 12 に示した渦が, 壁面方向に移動する際に, バルクの低温流体を引き込むことにより生じていると考えられる. 壁面近傍で乱流熱流束が強く働く場所は, 壁面の形状係数が高くなる位置と一致している. 開口率が $\beta = 0.8$ と比較的大きな場合にも, オリフィス下流の壁面近傍の温度場は強く乱され, 高い乱流熱流束が生じていることがわかる. その結果, 図 10 に示したように, 開口率 β を大きくした場合にも全面電極条件での形状係数の最大値は 1 に漸近せずに高い値を示すものと考えられる.

Fig.13 Contour of instantaneous temperature and turbulent heat flux of sweep and ejection component for $\beta = 0.62$ (a) and $\beta = 0.8$ (b). Turbulent heat flux $-v_r' t'$ is nondimensionalized by $V_{z0}(T_w - T_b)$. Turbulent heat flux of sweep ($v_r' > 0, t' < 0$) and ejection ($v_r' < 0, t' > 0$) contribute to the increase of the wall heat transfer. Downstream of orifice, sweep component affect strongly.

3・3 エルボ管の形状係数ならびに乱流スカラー輸送の解析

3・3・1 エルボ管の流動場

エルボ管流れの数値計算の結果として、図 14 に管軸を含むエルボ管断面における時間平均した流れ方向流速の分布を示す。レイノルズ数は 45000 である。いずれのエルボ形状においても、エルボ内の腹側において流れの剥離が生じ、その下流側に逆流を含む低速の領域が形成される。ショートエルボでは最も強い個所で断面平均流速の 0.3 倍程度の逆流が生じている。ロングエルボでは平均流動に関して逆流はみとめられない。INSS エルボでは、2 つに分かれた曲がり部において 2 回流れの剥離が起こっており、一つ目の曲がり部においてわずかに逆流が生じている。

乱流エネルギーの分布を図 15 に示す。エルボ内では管壁に沿って背側から腹側に向かう 2 次流れが生じており、腹側で流れの剥離が生じた下流側に 2 次流れが左右から流れ込む。この 2 次流れは非定常性が強いいため、エルボの腹側出口周辺の乱流エネルギーの値が高くなる。曲率の小さなショートエルボは特に乱流エネルギーの値が高い。オリフィス下流の数値計算で明らかにしたように、このような乱れの強い領域では、乱流によるスカラー輸送が大きく働く。

Fig.14 Contour of time-averaged streamwise velocity in a mid-plane of the elbow for $Re = 45000$.

Fig.15 Contour of turbulent kinetic energy in a mid-plane of the elbow for $Re = 45000$.

3・3・2 エルボ管の形状係数分布

図 16 にショートエルボ、図 17 にロングエルボ、図 18 に INSS エルボにおける形状係数のコンターを示す。レイノルズ数は 45000 である。実験による測定値として全面電極条件と点電極条件の形状係数、数値計算による予測値として熱伝達率および式(8)に定義した摩擦速度に基づく形状係数を示している。図中の左側はエルボ管の表面上に描画したコンター、右側は壁面を展開図で表した場合のコンターである。実験値に関しては測定用の点電極の設置位置を展開図上にプラスのマーカーで示した。実験値のコンターは空間補間をかけたうえで描画している。また、点電極条件の形状係数は入口効果の補正を行っている。オリフィス下流において全面電極条件と点電極条件の形状係数の差異は定量的なもので、分布形状や最大値を示す位置に関しては大きな差異は生じていなかった。しかし、エルボ管に関しては、図 16 から 18 に示す通り全面電極条件と点電極条件で形状係数の分布傾向が大きく異なっている。また、数値計算の熱伝達率に基づく形状係数は全面電極条件の測定値、摩擦速度に基づく形状係数は点電極条件の測定値とそれぞれ一致していることがわかる。点電極を再現した数値計算(恒吉他, 2016)により、全面電極条件と点電極条件では反映される主要なスカラー輸送のメカニズムの違いから、得られる形状係数が本質的に異なると予想されていたが、本実験により形状係数分布が一致しないことが確認できた。

全面電極条件の形状係数と熱伝達率に基づく形状係数をみると、腹側のエルボ出口周辺で顕著に値が大きくなっている。形状係数の値が小さな領域については、数値計算の結果が明瞭であり、背側の形状係数が大きな領域と腹側の値が大きな領域の境が確認できる。実験結果については、測定点を増やして空間解像度を向上させることで、数値計算と同様の形状係数分布を得ることが可能と期待される。また、エルボ背側において、熱伝達率に基づく形状係数分布では、エルボ入口で一旦値が下がった後に鋭く増加し、エルボ出口で極大がみとめられるように、エルボの流出入時に形状係数が大きく変化している。一方、全面電極条件での測定値は、エルボ入口のや

や上流から値の増加がはじまっており、エルボ内での値も計算値と比べると低く、エルボ入口と出口での値の変化も緩やかである。数値計算においてはメッシュ形状から直円管部とエルボ管部の境目が明確に定義されており、エルボ入口や出口における流動や熱伝達現象の変化が強く表れた結果と考えられる。

ショートエルボとロングエルボを比較すると、ショートエルボの方が腹側出口の形状係数の大きな領域が広く分布している。これは、腹側出口周辺の非定常流動の強さに起因するものと考えられる。INSS エルボについては、一つ目の曲り部出口、追加した直円管部の腹側において形状係数は最大となっている。この点は、ショートエルボやロングエルボと異なっている。El-Gammal らは、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)で作成したロングエルボ試験体を用いてレイノルズ数が 40000 の条件において減肉実験を行っている(El-Gammal et al., 2010)。本研究で明らかにした全面電極条件の形状係数や熱伝達率に基づく形状係数の分布と、El-Gammal らの実験における減肉速度の分布は同じ傾向を示している。

Fig.16 Contour of geometry factor in short elbow for $Re = 45000$. Geometry factor measured in overall electrode condition is qualitatively different from that in point electrode condition. Geometry factor predicted by the heat transfer coefficient are consistent with measured values in overall electrode condition, and predicted values by the friction velocity are consistent with measured values in point electrode condition.

Fig.17 Contour of geometry factor in long elbow. Geometry factor in long elbow are lower than that in short elbow, however the tendency of the distribution is the same.

Fig.18 Contour of geometry factor in INSS elbow. Added straight pipe section exhibits a characteristic of downstream of elbow rather than that of midstream.

Fig.19 Geometry factor profile in short elbow. $\square$: measurement in overall electrode condition (k_c/k_{c0}), $\bullet$: measurement in point electrode condition and corrected entrance effect ($(k_c/k_{c0})^{1.5}$), —: heat transfer coefficient calculated with LES (h/h_0), - - - : friction velocity calculated with LES ($u_{\tau\theta}/u_{\tau\theta0}$). Geometry factor measured in overall condition and that obtained from heat transfer coefficient are significantly increased at elbow outlet of inner side ($\theta = 180^\circ$).

Fig.20 Geometry factor profile in long elbow. The legend is the same as in fig.18. Geometry factor in long elbow are generally lower than that in short elbow. However, that measured in overall condition and that obtained from heat transfer coefficient indicate high value at elbow outlet of inner side.

Fig.21 Geometry factor profile in INSS elbow. The legend is the same as in fig.18. Maximum value measured in overall condition and that obtained from heat transfer coefficient are located in the added straight pipe section.

図 19 から 21 にエルボ背側 ($\theta = 0^\circ$) と腹側 ($\theta = 180^\circ$) の線上における形状係数分布を示す. 全面電極条件の実験値は熱伝達率に基づく計算値と, 点電極条件の実験値は摩擦速度に基づく計算値と定量的に一致していることがわかる. ただし, 腹側出口のような非定常性が特に強い流動条件に対しては, 点電極条件における物質移行係数の測定値は摩擦速度の時間変動を完全には追従できず, 形状係数の値に差異が生じることがわかっている(恒吉他, 2016). 全面電極条件の実験値と熱伝達率に基づく計算値の腹側における分布に注目すると, エルボ入口から流れの剥離点に向けて値が減少し, 剥離点の下流で急激に大きくなることを確認できる. ショートエルボとロングエルボを比較すると, 曲率の増加に対して形状係数は概ね減少する傾向にあるが, 腹側出口では変わらず高い値を示している. 腹側における形状係数の最大値については, 実験値の方が数値計算の値よりも高い値を示しているが, その差はわずかで温度場計算によって乱流スカラー輸送の効果を適切に反映した形状係数を得ることができていると考えられる.

3・3・3 エルボ管流れにおける渦構造と乱流スカラー輸送

複雑流動場における渦構造は, 熱伝達の増加に深く関与している. オリフィス下流においては, オリフィスエッジからの剥離渦が低温のバルク流体を壁面方向に運ぶ働きをしていた. 流動場中の特徴的な渦構造を把握することは, 熱輸送の過程を解き明かす上で有用であると考えられる. 図 22 にショートエルボとロングエルボにおける Q 値の等値面により可視化した渦構造を示す. 可視化した渦は比較的強度の高い渦であるが, 主にエルボの腹側で生じていることがわかる. エルボの入口から曲がり部の前半では, 壁面近傍において下流方向に長く伸びた渦が密集している. エルボ腹側出口では流れ方向に伸びていた渦が湾曲し, 下流に進むにつれて壁面近傍から主流部へと離脱していく. エルボ曲率の小さなショートエルボでは, エルボ腹側出口における渦の湾曲が大きく, 馬蹄形の渦が確認できる.

Fig.22 Isosurface of the instantaneous Q criterion ($Q = 3 \times 10^4 \text{ s}^{-2}$). Vortex structures are detached from the wall toward the bulk at the elbow outlet of inner side.

図 23 に瞬時の温度 t と乱流熱流束 $-v_r' t'$ を示す. 乱流熱流束は sweep ($v_r' > 0, t' < 0$) と ejection ($v_r' < 0, t' > 0$) の成分をそれぞれ寒色と暖色で示している. オリフィス下流においては壁面方向へ拡散する渦による sweep が多く確認された. エルボ管流れにおいては, 剥離流れに沿った低温流体と高温流体の境目では, sweep と ejection の両方がみとめられる. ただし, 壁面から離れた位置の乱流熱流束は, 壁面の熱伝達には直接的には影響を及ぼさない. 熱伝達に強く働くのは壁面近傍で生じる乱流熱流束である. 腹側出口の壁面近傍では, 図 23 に示したような ejection による乱流熱流束が頻繁に発生する. この ejection を主とする乱流熱流束は, 図 22 に示した壁面から主流部方向へと離脱していく渦によりもたらされていると考えられる. この ejection による熱輸送が強く働くために, 腹側出口は壁面近傍が比較的高温になるのにも関わらず, 壁面の形状係数が高い値を示すものと考えられる.

Fig.23 Contour of instantaneous temperature and turbulent heat flux of sweep and ejection component near the elbow outlet of inner side. Turbulent heat flux $-v_r' t'$ is nondimensionalized by $V_{z0}(T_w - T_b)$. Turbulent heat flux of sweep ($v_r' > 0, t' < 0$) and ejection ($v_r' < 0, t' > 0$) contribute to the increase of the wall heat transfer. Near wall region, the ejection component has a greater contribution than the sweep component.

4. 結 論

円管発達乱流, オリフィス下流, エルボ管流れにおける壁面の物質移行係数を電気化学的手法により測定した. 測定用の点電極のみ電圧を印加した点電極条件と試験部配管の内壁全面も通電した全面電極条件での測定を行った. 円管発達乱流においては, 測定点電極を流れ方向に螺旋状に配置することで, 測定精度が改善され理論式や経験式と一致した値を示すことを確認した. オリフィス下流では, 全面電極条件の形状係数が点電極条件よりも高い値となることを明らかにした. オリフィス下流の形状係数の最大値をオリフィス開口率の関数として整理し, オリフィス開口率が比較的大きな場合にも全面電極条件の形状係数は高い値を示すこと明らかにした. ただし, 開口率が 0.8 を超える範囲への外挿には注意を要する. エルボ管に関しては, ショートエルボ, ロングエルボ, INSS エルボの 3 種を対象に形状係数を求めた. 全面電極条件と点電極条件ではエルボ管の形状係数分布が定性的に一致しないことを確認した. 実験値と数値計算による予測値を比較すると, 全面電極条件の実験値と熱伝達率に基づく計算値が一致し, 点電極条件の実験値と摩擦速度に基づく計算値が一致する. FAC は配管内壁全面で生じる物質伝達現象であり, 実機に対する形状係数予測としては, 全面電極条件での実験値あるいは熱伝達率に基づく計算値が適切であると考えられる. また, 形状係数が最大となる位置について, オリフィス下流のように形状係数の評価手法によらずに一致する配管要素と, エルボ管のように評価手法によって位置が異なる配管要素が存在する点は留意すべきである. 壁面の形状係数が増加する要因については数値計算の結果をもとに考察した. 乱流スカラー輸送には流動場で生じる渦が深く関与しており, オリフィス下流においては sweep の成分, エルボ腹側出口においては ejection の成分が壁面近傍で強く働き, 形状係数の増加に寄与することを明らかにした.

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 名古屋大学大学院工学研究科大学院生の神谷一彰氏に貴重な実験データを提供して頂いた. ここに記し, 謝意を表す.

文 献

- Dittus, F. W. and Boelter, L. M. K., Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, University of California Publications in Engineering, Vol.2, No.13 (1930), pp.443-461.
- Dooley, R. B. and Chexal, V. K., Flow-accelerated corrosion of pressure vessels in fossil plants, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.77, No.2-3 (2000), pp.85-90.
- El-Gammal, M., Mazhar, H., Cotton, J. S., Shefski, C., Pietralik, J. and Ching, C. Y., The hydrodynamic effects of single-phase flow on flow accelerated corrosion in a 90-degree elbow, Nuclear Engineering and Design, Vol.240, No.6 (2010), pp.1589-1598.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H., A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, Physics of Fluids A,

Vol.3, No.7 (1991), pp.1760-1765.

- 釜堀孝一, 歌野原陽一, 中村晶, 村瀬道雄, 流れ加速型腐食に及ぼす局所流動状況の影響ーエルボ管における減肉速度の計測ー, INSS JOURNAL, Vol.21 (2014), pp.99-107.
- Kojo, R., Kuroda, Y., Kondo, M. and Tsuji, Y., Flow accelerated corrosion and mass transfer rate in orifice downstream flow, Proceedings of 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14) (2011), Paper No. NURETH14-542.
- Mizushima, T., The electrochemical method in transport phenomena, advances in heat transfer, Vol.7 (1971), pp.87-160.
- OpenCFD, OpenFOAM: The open source computational fluid dynamics(CFD) toolbox, available from <<http://www.openfoam.com>>, (accessed on 26 May, 2015).
- OpenFOAM Foundation, Bug Reporting (issue #99): Dynamic Smagorinsky model with local coefficient values, available from <<http://www.openfoam.org>>, (accessed on 26 May, 2015).
- Roe, P. L., Some contributions to the modeling of discontinuous flows, Lectures in Applied Mathematics, Vol.22 (1985), pp.163-193.
- Shan, F., Fujishiro, A., Tsuneyoshi, T. and Tsuji, Y., Effects of flow field on the wall mass transfer rate behind a circular orifice in a round pipe, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.73 (2014), pp.542-550.
- Shaw, P. V., Reiss, L. P. and Hanratty, T. J., Rates of turbulent transfer to a pipe wall in the mass transfer entry region, AIChE Journal, Vol.9, No.3 (1963), pp.362-364.
- 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).
- 恒吉達矢, Feng SHAN, 田中鉄平, 近藤昌也, 伊藤高啓, 辻義之, 点電極測定に基づく形状係数の理解と一般化(オリフィス下流における形状係数の開口率依存性), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.79, No.808 (2013), pp.2612-2615.
- 恒吉達矢, 神谷一彰, 伊藤高啓, 辻義之, オリフィス下流における物質移行係数の直接測定およびLESによる乱流スカラー輸送の解析, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.828 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00162.
- 恒吉達矢, 伊藤高啓, 辻義之, 90度エルボ管流れにおける物質移行係数の点電極測定および異なる伝達条件におけるスカラー輸送のLES解析, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.834 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00600.
- Utanohara, Y., Nagaya, Y., Nakamura, A., Murase, M. and Kamahori, K., Correlation between flow accelerated corrosion and wall shear stress downstream from an orifice, Journal of Power and Energy Systems, Vol.7, No.3 (2013), pp.138-147.
- Wang, Y., Postlethwaite, J. and Bergstrom, D. J., Modelling mass transfer entrance lengths in turbulent pipe-flow with applications to small cathodes for measuring local mass transfer rates, Journal of Applied Electrochemistry, Vol.26, No.5 (1996), pp.471-479.
- Yamagata, T., Ito, A., Sato, Y. and Fujisawa, N., Experimental and numerical studies on mass transfer characteristics behind an orifice in a circular pipe for application to pipe-wall thinning, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.52 (2014), pp.239-247.
- 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).

References

- Dittus, F. W. and Boelter, L. M. K., Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, University of California Publications in Engineering, Vol.2, No.13 (1930), pp.443-461.
- Dooley, R. B. and Chexal, V. K., Flow-accelerated corrosion of pressure vessels in fossil plants, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.77, No.2-3 (2000), pp.85-90.
- El-Gammal, M., Mazhar, H., Cotton, J. S., Shefski, C., Pietralik, J. and Ching, C. Y., The hydrodynamic effects of single-phase flow on flow accelerated corrosion in a 90-degree elbow, Nuclear Engineering and Design, Vol.240, No.6 (2010), pp.1589-1598.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H., A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, Physics of Fluids A, Vol.3, No.7 (1991), pp.1760-1765.
- Kamahori, K., Utanohara, Y., Nakamura, A. and Murase, M., Effects of local flow field on flow accelerated corrosion -wall thinning rate at elbow pipe-, INSS JOURNAL, Vol.21 (2014), pp.99-107 (in Japanese).
- Kojo, R., Kuroda, Y., Kondo, M. and Tsuji, Y., Flow accelerated corrosion and mass transfer rate in orifice downstream flow,

- Proceedings of 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14) (2011), Paper No.NURETH14-542.
- Mizushima, T., The electrochemical method in transport phenomena, advances in heat transfer, Vol.7 (1971), pp.87-160.
- OpenCFD, OpenFOAM: The open source computational fluid dynamics(CFD) toolbox, available from <<http://www.openfoam.com>>, (accessed on 26 May, 2015).
- OpenFOAM Foundation, Bug Reporting (issue #99): Dynamic Smagorinsky model with local coefficient values, available from <<http://www.openfoam.org>>, (accessed on 26 May, 2015).
- Roe, P. L., Some contributions to the modeling of discontinuous flows, Lectures in Applied Mathematics, Vol.22 (1985), pp.163-193.
- Shan, F., Fujishiro, A., Tsuneyoshi, T. and Tsuji, Y., Effects of flow field on the wall mass transfer rate behind a circular orifice in a round pipe, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.73 (2014), pp.542-550.
- Shaw, P. V., Reiss, L. P. and Hanratty, T. J., Rates of turbulent transfer to a pipe wall in the mass transfer entry region, AIChE Journal, Vol.9, No.3 (1963), pp.362-364.
- The Japan Society of Mechanical Engineers, Research Committee on Improvement and Practical Use of Pipe-Wall-Thinning Management, P-SCCII-4 (2014) (in Japanese).
- Tsuneyoshi, T., Shan, F., Tanaka, T., Kondo, M., Ito, T. and Tsuji, Y., Understanding and generalization of geometric factor based on measurements with point electrode (Dependence of geometric factor behind orifice on orifice-to-pipe diameter ratio), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.79, No.808 (2013), pp.2612-2615 (in Japanese).
- Tsuneyoshi, T., Kamiya, K., Ito, T. and Tsuji, Y., Measurement of mass transfer coefficients and analyses of turbulent scalar transport with LES behind the orifice in a circular pipe, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.828 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00162.
- Tsuneyoshi, T., Ito, T. and Tsuji, Y., Measurement of mass transfer coefficients with point electrode and LES analysis of scalar transport between different wall transfer conditions in 90-degree elbow, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.82, No.834 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00600.
- Utanohara, Y., Nagaya, Y., Nakamura, A., Murase, M. and Kamahori, K., Correlation between flow accelerated corrosion and wall shear stress downstream from an orifice, Journal of Power and Energy Systems, Vol.7, No.3 (2013), pp.138-147.
- Wang, Y., Postlethwaite, J. and Bergstrom, D. J., Modelling mass transfer entrance lengths in turbulent pipe-flow with applications to small cathodes for measuring local mass transfer rates, Journal of Applied Electrochemistry, Vol.26, No.5 (1996), pp.471-479.
- Yamagata, T., Ito, A., Sato, Y. and Fujisawa, N., Experimental and numerical studies on mass transfer characteristics behind an orifice in a circular pipe for application to pipe-wall thinning, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.52 (2014), pp.239-247.
- Yoneda, K., Morita, R. and Fujiwara, K., Quantitative evaluation of effective factors on flow accelerated corrosion (part 4) - Evaluation of wall thinning profile in piping elements -, CRIERI Report, L09006 (2010) (in Japanese).