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 解析恒吉 達矢^{*1}, 伊藤 高啓^{*1}, 辻 義之^{*1}Measurement of mass transfer coefficients with point electrode and LES analysis of
scalar transport between different wall transfer conditions in 90-degree elbowTatsuya TSUNEYOSHI^{*1}, Takahiro ITO^{*1} and Yoshiyuki TSUJI^{*1}^{*1} Department of Energy Engineering and Science, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

Received 4 November 2015

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 elbow to that in a straight pipe. In this study, the mass transfer coefficient in 90-degree elbow with curvature radius of 1.5 times the pipe diameter is computed by using large eddy simulation (LES) and is also measured with electrochemical method. Numerical simulations and experimental measurements were conducted at Reynolds number of 15000. In order to simulate the mass transfer coefficient, we adopt the analogy between mass transfer and heat transfer, and calculate the unsteady temperature field using the numerical data of LES. The experimental measurement is conducted with point electrode. However, concentration boundary layer developed over the surface of point electrode is different from that developed for whole surface of pipe wall such as FAC in the plant piping. To cope with this problem, we calculated the temperature field in the two different boundary conditions. As a typical case, whole pipe wall is heated uniformly (in this paper, referred as 'overall heat condition'). In addition, localized area is heated to simulate working point electrode (referred as 'point heat condition'). Geometry factor obtained from the heat transfer rate in point heat condition agrees well with that measured with point electrode, however, both of them are qualitatively different from that obtained from the heat transfer rate in overall heat condition. Analysis of heat transport revealed that heat conduction is dominant form of the wall heat transfer in point heat condition, in contrast, turbulent heat flux affects strongly the wall heat transfer in overall heat condition.

Key words : Flow accelerated corrosion, Mass transfer, Geometry factor, Elbow, Numerical simulation

1. 緒 言

原子力発電プラントの高経年化対策として、流れ加速型腐食 (Flow Accelerated Corrosion, 以下 FAC と略す) による系統配管の減肉事象には十分な注意が必要である。FAC とは炭素鋼配管内壁からの鉄イオンの溶解および拡散に流動が何らかの影響を与え、腐食が促進され減肉が進行する現象である (Dooley and Chexal, 2000)。長期にわたるプラントの運転において、配管内壁の局所的な減肉が想定される。FAC は時に重大事故に発展し、人災を伴う事故としては、国内では 2004 年 8 月に美浜原子力発電所 3 号機の 2 次系復水系統における配管破断事故 (NISA, 2005)、国外では 1986 年 12 月に米国の Surry 原子力発電所 2 号機の 2 次系給水系統における配管破断事故 (Virginia Electric and Power Co., 1987) が発生している。FAC は流れが複雑な乱流となる個所で生じ、美浜発電所の事故は復水流量を計測するオリフィスの下流、Surry 発電所の事故は低圧給水加熱機と給水ポンプ間のエルボ部において発生している。上記の事故以外にも、種々の配管要素において FAC による減肉が報告されており (日本機械学会, 2014)、プラント配管の安全管理のために減肉予測の精度向上が強く求められている。FAC における本質的な流体

力学因子は、壁面からの鉄イオンの溶出速度を表す物質移行係数とされている。減肉予測の観点からは、対象とする配管要素における物質移行係数と直円管における物質移行係数の比として定義される形状係数として評価することが有用である。減肉予測の高精度化のためには、配管要素における形状係数分布も含めて、定量的に正確な値を導出する必要がある。

著者らは、オリフィス下流を対象として、数値計算ならびに電気化学実験により形状係数を算出した(恒吉他, 2015)。数値計算では、LES(Large Eddy Simulation)により流動場および鉄イオンの濃度場を模擬した温度場の計算を行い、アナロジーを介して熱伝達率から物質移行係数を算出した。実験では、作用極として点電極を用いた対流ボルタンメトリーにより物質移行係数を直接測定した。実機における FAC と同様な壁面全体における伝達現象を再現するために、試験部配管を伝導体を用いて作成し、全面に通電した状態で測定を行った。その結果、点電極を単独で作用させた場合よりも、壁面全面に通電した場合の形状係数は大きな値を示すことを明らかにした。また、全面伝達条件で測定した形状係数は、全面加熱条件の温度場計算から求めた形状係数とよく一致した。一方、数値計算による評価手法として有力視されてきた摩擦速度に基づく形状係数は、摩擦速度が壁面近傍の局所的な流動を反映した物理量であることから、点電極測定で得られる形状係数と同様に過小評価することがわかった。オリフィス下流の場合には、境界条件による形状係数の差異は定量的なもので、形状係数が最大値をとる位置に関しては一致していた。これは、オリフィスエッジからの剥離渦という単一の流動構造が、物質移行係数あるいは熱伝達率を増加させる要因であるためと考えられる。よって、オリフィス下流よりもさらに複雑な流動場が形成される配管要素の場合に、点電極測定で得られる形状係数や摩擦速度に基づく形状係数が、全面伝達条件における値と比較して最大値をとる位置や形状係数分布が定性的に一致するという保証はない。

そこで、本研究では3次元的な複雑性を有し、剥離や2次流れを伴う非定常性の強い流れが生じるエルボ管を研究対象とする。エルボ管の流れ場は、エルボの曲率とレイノルズ数により変化することが知られている。河村らはLDV(Laser Doppler Velocimetry)を用いて、異なるエルボ曲率およびレイノルズ数に対して流速の測定を行っている(河村他, 1996, 2002)。OnoらはPIV(Particle Image Velocimetry)により、エルボ曲率とレイノルズ数がそれぞれ2条件の組み合わせに対して流動場の可視化を行っている(Ono et al., 2011)。数値計算では、Eguchiらがレイノルズ数 $Re = 1.2 \times 10^6$ の条件において、LESを用いた流動場の非定常計算を行っている(Eguchi et al., 2011)。FACに関する研究としては、米田らが複数のエルボ曲率とレイノルズ数においてRANSによる流動場の数値計算を行い、摩擦速度に基づく形状係数の予測を行っている(米田他, 2010)。実験では、釜堀らがエルボ管に炭素鋼の試験片を設置して減肉速度の測定(釜堀他, 2014)、El-Gammalらが石膏でエルボ試験体を作成して減肉量の測定(El-Gammal et al., 2010)を行っている。これらのエルボ管における形状係数予測と測定された減肉速度を比較すると、分布傾向が異なる場所がみとめられる。ただし、その差異が上述した境界条件の違いから生じた結果か、エルボ管形状やレイノルズ数の違いに起因するものかは不明である。そこで本研究では、局所的な境界条件と全面的な境界条件において導出される形状係数の違いを明らかにすることを目的として、数値計算ならびに電気化学実験を実施する。電気化学実験では、エルボ管に点電極を設置して、物質移行係数を直接測定する。数値計算では、LESにより流動場と温度場の非定常計算を行い、算出された熱伝達率から形状係数を予測する。異なる境界条件における伝達現象の比較を行うために、温度場計算の境界条件として全面加熱条件だけでなく、電気化学実験における点電極を再現した加熱条件についても計算を実施する。そして、流動場中のスカラー輸送の解析をもとに、それぞれの境界条件において壁面の伝達現象に強く影響を及ぼす輸送メカニズムを明らかにし、正確な形状係数の導出方法についてまとめる。

2. 数値計算方法および実験方法

2・1 数値計算

2・1・1 LESの計算条件

エルボ管流れを対象として、LESにより流動場ならびに温度場の非定常計算を実施した。計算条件を表1に示す。計算にはオープンソースコードである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っている。そこで、OpenFOAMの標準ソルバのひとつであるpimpleFoamをベースとして、流動場計算に浮力項は含めずに、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の標準ライブラリにおける動的スマゴリンスキーモデル(homogeneousDyn Smagorinsky)は計算対象として一様乱流を想定している。そこで、壁乱流の計算で使用するための修正(OpenFOAM Foundation, 2015)を行った。作動流体は非圧縮性を仮定し、物性値は温度 300 K の水として密度 ρ [kg/m³], 動粘度 ν [m²/s], 温度拡散率 α [m²/s], 比熱 C_p [J/(kg·K)] 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の算出に用いる乱流プラントル数 Pr_t は 0.9 とした。管直径 D [m] および断面平均流速 V_{z0} [m/s] を用いて定義されるレイノルズ数 $Re(= V_{z0}D/\nu)$ は 15000 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。乱流の初期発達を除いた 2 秒から 8 秒までの 6 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。図 1 に計算領域の概要を示す。エルボ管の形状は、曲り中心から管軸中心までの距離で定義される曲率半径が $R_c = 1.5D$ の 90 度エルボである。計算領域は、エルボの上流側および下流側に $6D$ の長さを設定した。入口には mappedPatch という境界条件を用いて、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境界の値を定めている。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。

2・1・2 座標系の定義

図 1 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、エルボ上流ではエルボまでの距離 z_{in} [m], エルボ部では曲り角 ϕ [°], エルボ下流ではエルボからの距離 z_{out} [m] を用いる。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。管軸を含む中央断面において、エルボ腹側壁面をゼロとしたエルボ背側方向への位置 y [m] を定義する。流れ方向、周方向、径方向を表す下付き添え字として z, θ, r をそれぞれ用いる。

Fig.1 Mesh adopted for the calculation of elbow flow. Hexahedral meshes are generated with ICEM CFD, and polyhedral meshes with STAR-CCM+.

Table 1 LES conditions in elbow flow.

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)	
	Density	$\rho=996.555 \text{ kg/m}^3$
	Kinematic viscosity	$\nu=8.5735 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
	Thermal diffusivity	$\alpha=1.466 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
	Specific heat	$C_p=4177 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
	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)	
Geometry	Pipe diameter	$D=0.044 \text{ m}$
	Curvature radius of elbow	$R_c=1.5D$
	Calculation domain	Up $2D$ (+Driver $4D$), Down $6D$
Boundary conditions	Inlet	Fully developed
	Outlet	Constant total pressure
	Wall	Non slip
Reynolds number	$Re=V_{z0}D/\nu=15000$ (V_{z0} : Cross sectional mean streamwise velocity)	

Table 2 Conditions of temperature field calculation.

	Case 1	Case 2	Case 3
Mesh type	Hexahedral	Polyhedral	
Number of cells	8.85×10^6	7.96×10^6	
Number of faces	2.665×10^7	4.494×10^7	
Inlet	Developed profile of the average temperature 300 K	Developed profile of the average temperature 300 K	Constant temperature 300 K
Wall	Constant temperature 310 K	Constant temperature 310 K	Heat area simulating point electrode: constant temperature 310 K Other: adiabatic
Sampling	0.4 kHz	1 kHz	1 kHz

2・1・3 ヘキサメッシュを用いた全面加熱条件の温度場計算

本研究では表 2 に示す温度場計算の境界条件の違い、ならびに図 1 に示したメッシュの違いにより 3 つのケースの計算を行った。ケース 1 はヘキサメッシュ(6 面体セル)を用いた全面加熱条件の計算である。ドライバーにおいて、平均温度 300 K の発達した温度場を形成し、エルボへ流入させている。壁面は 310 K の等温加熱条件である。データのサンプリングは 0.4 kHz で 6 秒間行った。ヘキサメッシュはセルのゆがみが小さく、隣接するセルの中心を結んだ線とセル間の面との直交性を保ちやすい。また、任意のセルサイズで均一なメッシュを作成することが可能である。ヘキサメッシュのセルサイズ L [m] は円管発達乱流における摩擦速度 u_τ [m/s] を用いた無次元数 $L^+ (= u_\tau L/\nu)$ で表した場合に、おおよそ $L_z^+ = 18$, $L_\theta^+ = 11$, $0.2 \leq L_r^+ \leq 10$ である。メッシュ数は、流れ方向に 720 セル、円管断面において 12288 セルであり、計算領域全体で約 885 万セルである。メッシュの解像度は、Eguchi らのエルボ管における LES 計算(Eguchi et al., 2011)を参考に設定した。本計算においても Eguchi らの計算と同様に、エルボ管の形状に起因する剥離や 2 次流れ等の大規模な複雑流動を適切に捉えることができると考え

られる。また、本計算はレイノルズ数が低いことから、相対的なセルサイズ L^+ が小さく、壁面近傍の微細な流動構造の計算精度が重要な壁乱流の LES(森西他, 2000)に照らし合わせても、十分な解像度を有していると言える。ヘキサメッシュは ANSYS 社の ICEM CFD を用いて作成し、OpenFOAM 形式へメッシュを変換するユーティリティ fluent3DMeshToFoam によって読み込んでいる。

2・1・4 ポリヘドラルメッシュを用いた全面加熱条件および点電極加熱条件の温度場計算

表 2 のケース 2 とケース 3 においては、電気化学実験における点電極表面を再現するために、局所的なメッシュの密度制御が容易なポリヘドラルメッシュ(多面体セル)を用いてメッシュを作成した。電極の位置は後述する電気化学実験の試験部と一致させている。メッシュ数は 796 万セルとヘキサメッシュの場合よりも少なくなっているが、多面体セルであることから面の数は増加している。主流部のセルのベースサイズは $L = 7.36 \times 10^{-4} \text{ m}$ としており、無次元数で $L^+ = 15$ である。これは、ヘキサメッシュの場合と同程度のセル幅である。点電極再現部の近傍はメッシュの密度制御を行い、電極表面の直径 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ に対して 10 個のセルが配置される程度にメッシュの細分化を行っている。壁面近傍では、壁垂直方向に規則正しく並んだ層状のメッシュを用いており、壁面第 1 層セルの壁垂直方向のセル幅は $L^+ = 0.2$ である。ポリヘドラルメッシュは CD-adapco 社の STAR-CCM+で作成し、ccm26ToFoam により OpenFOAM に読み込んでいる。

ケース 2 ではケース 1 と同様の温度場の計算条件としている。ケース 3 は点電極を使用した電気化学実験を再現した温度場の計算条件であり、一様な温度 300 K の水の流入に対して、電極再現部の壁面のみを 310 K の等温加熱条件とし、その他の壁面を断熱条件としている。電気化学実験では複数設置した点電極の中で、物質移行係数を測定する 1 つの点電極のみ通電し、その他の点電極は作用させない。この実験条件を数値計算において模擬するためには、点電極再現部の境界条件において、加熱または断熱の条件を変えて複数回の計算を実行する必要がある。本計算では、温度場をパッシブスカラーとして計算するため、温度場は流動場の計算に影響を与えない。そのため、温度場として複数の変数を定義して同時に計算することが許容される。そこで、1 回の流動場計算に対して、加熱する点電極再現部を変えた場合の温度を同時に計算できるようにコードを修正した。温度場の計算条件のみが異なるケース 2 とケース 3 についても、1 回の計算で同時に解いている。これにより、境界条件の違いが伝達現象に及ぼす影響について、時間平均した統計量だけでなく、時間変動の直接的な比較が可能となる。また、この方法は計算負荷の高い流動場計算が 1 回で済むため、計算コストを大幅に抑えることができる。データのサンプリングは 1 kHz で 6 秒間行った。このサンプリング周波数は実験条件にあわせている。

2・1・5 アナロジーを介した物質移行係数ならびに形状係数の算出

温度場計算の結果から、次式により壁面の熱伝達率 $h [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ を求める。

$$h = \frac{q_w}{T_w - T_b} \quad (1)$$

ここで、 $q_w [\text{W}/\text{m}^2]$ は加熱壁面における熱流束であり、熱伝導率 $\lambda [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ と壁面の温度勾配から算出される。 $T_w [\text{K}]$ は加熱壁面の温度、 $T_b [\text{K}]$ は流体のバルク温度である。本計算では入口管軸中心の温度を T_b として熱伝達率を求めている。物質移行係数 $k_c [\text{m}/\text{s}]$ は、熱伝達率 h からアナロジー(Chilton and Colburn, 1934)を介して算出する。

$$k_c = h \frac{D_f}{\lambda} \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{1/3} \quad (2)$$

ここで物質拡散係数 $D_f [\text{m}^2/\text{s}]$ およびシュミット数 $Sc (= \nu/D_f)$ は、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当てはめ、温度 $T [\text{K}]$ の関数として求めた。

$$\log_{10} D_f = -865.5 \times \frac{1}{T} - 6.374 \quad (3)$$

式(2)から物質移行係数と熱伝達率は比例関係にあるので、熱伝達率に基づく形状係数は次式となる。

$$\frac{k_c}{k_{c0}} = \frac{h}{h_0} \quad (4)$$

ここで、下付きのゼロは円管発達乱流における値を表す。物質輸送および熱輸送は流動に付随する輸送現象であるが、流動場自身にも運動量を輸送するメカニズムが働いている。壁乱流において速度境界層とともに濃度境界層が十分に発達した状態にあるとき、物質移行係数と摩擦速度の比例関係が成り立つ(Shaw and Hanratty, 1977)。よって、摩擦速度に基づく形状係数は次式となる。

$$\frac{k_c}{k_{c0}} = \frac{u_\tau}{u_{\tau 0}} \quad (5)$$

流動場の解析において一般的に定義される摩擦速度は、時間平均した流れ方向のせん断応力 τ_w から与えられる。

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{-\nu \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} \Big|_{wall}} \quad (6)$$

ここで、 v_z は流れ方向の流速の瞬時値であり、上付きバーは時間平均を表す。円管発達乱流では周方向の流速 v_θ に対して流れ方向の流速 v_z が卓越しているが、エルボ管流れでは3次的に複雑な流動が生じるため、周方向の流速の影響も無視できないと考えられる。そこで周方向の流速も含めて式(7)により摩擦速度を定義し、この値を用いて形状係数を算出する。

$$u_{\tau z\theta} = \sqrt{-\nu \frac{\partial \sqrt{v_z^2 + v_\theta^2}}{\partial r} \Big|_{wall}} \quad (7)$$

2・2 電気化学実験による物質移行係数の測定

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の測定を行った。図2にエルボ管流れを対象として行った電気化学実験の試験部の概要を示す。この手法は実機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。実験では鉄イオンと同程度の拡散係数を有するフェリシアン化鉄の溶液を用いており、図2に示した作用極の表面では還元反応($\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e^- \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$)が生じ、試験部下流に設置した対極では酸化反応($\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-} \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e^-$)が起こる。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変わらない領域が表れる。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、この時の電流を限界電流(Mizushima, 1971)と呼ぶ。実験では、対流拡散律速となる一定の電圧を印加し、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。

$$\frac{i}{Sn_e F} = k_c (C_b - C_w) \quad (8)$$

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、試験部の近傍に接続した参照極を用いて制御している。溶液温度は20℃で一定に保持した。本実験では、

塩化ビニル樹脂製のエルボ管に、作用極として直径 1.0×10^{-3} mの金製の点電極をエルボ背側と腹側の線上に挿入している。エルボ管の形状は図 1 に示した数値計算と同様である。点電極の設置位置は、エルボ上流側が $z_{in} = -0.6D$ から $z_{in} = 0$ まで $0.2D$ 間隔、エルボ内が $\phi = 0^\circ$ から $\phi = 90^\circ$ まで 18° 間隔、エルボ下流側が $z_{out} = 0$ から $z_{out} = 3D$ まで $0.2D$ 間隔である。直円管における物質移行係数 k_{c0} を測定するために、エルボ上流 $z_{in} = -8D$ の位置にも点電極を設置している。数値計算(ケース 3)においては、流動場が発達乱流となるドライバー内の $z_{in} = -5D$ の位置において点電極を再現し、 k_{c0} を算出している。本実験の測定周波数は 1 kHz、1 電極あたりの測定時間は 60 秒である。レイノルズ数は数値計算と同じく 15000 とした。

Fig.2 Sketch of mass transfer measurement using point electrodes.

3. 結果および考察

3・1 エルボ管の平均流動場

はじめに、計算結果として時間平均したエルボ管の流動場を示す。ここでは、ヘキサメッシュを用いたケース 1 の結果を示す。図 3 は、管軸を含むエルボ管中央断面における平均圧力のコンターである。圧力は出口境界においてゼロとしている。圧力は密度 ρ および断面平均流速 V_{z0} を用いて無次元化している。エルボ内では背側で高圧、腹側で低圧の分布が形成される。このエルボ背側から腹側への圧力勾配を受けて、エルボ管では 3 次元的に複雑な流動が生じる。図 4 は中央断面における、流れ方向平均流速のコンターである。エルボの入口においては、高速領域は腹側に偏っている。エルボ内腹側からの流れの剥離とともに、高速領域は管軸中心へ移り、さらにエルボを通過した後は背側への偏流となる。剥離した流れと壁面に挟まれた腹側出口周辺では、流れ方向の平均流速が小さくなっている。ただし、平均流速において逆流は生じていない。これらの流速分布は、同じエルボ曲率 $R_c/D = 1.5$ を対象とした Ono らの PIV 測定結果(Ono et al., 2011)と同様の傾向である。Ono らの測定結果と比較すると、本計算結果における腹側出口周辺の低速領域は空間的な広がりが大きい。これは本計算のレイノルズ数が 10 の 4 乗のオーダーと低いためであり、Ono らが示したエルボ管流れのレイノルズ数依存性を考慮すると妥当な結果である。図 5 はエルボの入口において、黒色の輪で示した壁面からの高さが $0.1D$ 以内の領域を通過する平均流れを、流線で可視化したものである。壁面の近くを通過した流れは、エルボ内で壁面に沿って背側から腹側に回り込む 2 次流れを形成する。エルボ出口の腹側において、時計回り、反時計回りの両方向からの 2 次流れが合流し、エルボ下流に向けて壁面近傍から離脱する流れとなる様子がみてとれる。図 6 は中央断面における乱流エネルギー分布を示したコンターであり、2 次流れが合流するエルボ出口の腹側で顕著に値が大きくなっている。出口腹側は流れ方向の平均流速が小さいこととは対照的に、流速の変動値は大きい。乱流エネルギーのコンターでは、出口腹側における 2 次流れによる値の大きな領域の他にも、エルボ内腹側からの流れの剥離に沿って、筋状に値の増加が確認できる。また、エルボ内の背側もわずかではあるが乱れが大きくなっていることがわかる。

以上のようにエルボ管流れでは3次元的な複雑流動が形成されるが、偏流によるせん断速度の増大および、壁面近傍の乱れの増加は壁面の伝達現象に特に強い影響を及ぼすと考えられる。

Fig.3 Contour of mean pressure in a mid-plane of the elbow for $Re=15000$ with $R_e/D=1.5$. $P=0$ at the outlet boundary. Pressure gradient causes the three-dimensional complex flow.

Fig.4 Contour of mean streamwise velocity. High velocity region at the inner side of elbow inlet and outer side of elbow outlet affect the wall heat or mass transfer.

Fig.5 Mean streamlines originated at the pipe wall in the elbow inlet. In the elbow pipe, swirling flows are generated along the wall surface.

Fig.6 Contour of turbulent kinetic energy. By swirling flows, turbulent kinetic energy is increased at the inner side of elbow outlet, and that affect turbulent scalar transport.

3・2 ヘキサメッシュとポリヘドラルメッシュの比較

同程度の空間解像度のヘキサメッシュとポリヘドラルメッシュを比較すると、ヘキサメッシュの方がセル品質が良く、計算精度も高い。全面加熱条件の計算だけを行うのであれば、ヘキサメッシュを用いた計算で十分である。本研究では、電気化学実験の点電極を再現するためにポリヘドラルメッシュを用いた計算も行っている。そこで、これらのメッシュの違いが計算に及ぼす影響について考察する。図7、8は管軸を含む中央断面における流れ方向平均流速ならびに乱流エネルギーの壁垂直方向分布である。エルボ内からエルボ下流にかけてのそれぞれの位置における分布を左から順にプロットしている。縦軸は壁垂直方向の位置であり、 $y/D = 0$ が腹側壁面、 $y/D = 0.5$ が管軸中心、 $y/D = 1$ が背側壁面である。流れ方向の平均流速分布を比較すると、メッシュによる違いはほとんどない。図に示した高速領域の偏りが下流に進むにつれて腹側から背側に移っていく過程が確認できる。 $\phi = 60^\circ$ より下流側の分布では、流れの剥離により中央の高速領域と腹側の低速領域の間で急激に流速が変化するが、ポリヘドラルメッシュを用いた結果は、ヘキサメッシュの結果とよく一致している。乱流エネルギーの分布を比較すると、両メッシュの結果は概ね一致している。ただし、エルボ通過後の腹側の分布にわずかな差異がみとめられる。しかし、この領域は壁面に沿って2次流れが左右から流入する位置にあたり、流れの非定常性が特に強い。両メッシュの計算結果の違いは時間平均の短さに起因するもので、より長い統計処理時間の計算を実行出来れば両者の差は縮まると期待される。

パンプスカラーとしての温度場計算の結果についてもメッシュによる比較を行う。図9はケース1の場合の管中央断面における平均温度のコンター、図10は流れ方向のそれぞれの位置におけるケース1とケース2の場合の平均温度をプロットしたグラフである。ケース1とケース2はともに全面加熱条件における温度場計算である。

平均温度は入口管軸中心で求めたバルク温度 T_b との温度差をとり、壁面とバルクの温度差($T_w - T_b$)により無次元化している。平均温度はおおよそ流れ方向の平均流速と対称な分布となる。すなわち、高速領域の流体は比較的低温であり、壁面近傍の低速領域は高温となる。エルボ腹側における剥離流れ後方の低速領域において、温度が高くなっていることがわかる。ケース 1 とケース 2 の平均温度分布を比較すると、流れ方向平均流速の場合と同様に、メッシュの違いによらずよく一致している。また、壁面の熱伝達率を算出し、大きな差異が表れない事を確認している。よって、エルボ管流れを対象とした LES では、ポリヘドラルメッシュを用いた場合にもヘキサメッシュを用いた計算と同程度の精度で壁面の伝達現象を解析可能であると言える。

Fig.7 Profiles of mean streamwise velocity at several streamwise positions for $Re=15000$ with $R_e/D=1.5$. Calculation result using hexahedral mesh in Case 1 (—) is good agreement with polyhedral mesh in Case 2,3 (---).

Fig.8 Profiles of turbulent kinetic energy. —: Hexahedral, ---: Polyhedral. Downstream of the elbow, inner side profiles are slightly different,

Fig.9 Contour of mean temperature in a mid-plane of the elbow.

Fig.10 Profiles of mean temperature. Case 1 (—) and Case 2 (---) are both overall heat condition. Calculation accuracy of polyhedral mesh is almost the same as that of hexahedral mesh.

3・3 エルボ管の形状係数

3・3・1 エルボ管における形状係数の分布

図 11 は LES 計算によって求めたエルボ管における形状係数のコンターで、壁面を展開図で示している。横軸は流れ方向の位置であり、左側からエルボ上流部、エルボ部、エルボ下流部の順に表示している。縦軸は周方向の位置で、図の上下の端がエルボの腹側、中央が背側である。左図は式(7)で定義した摩擦速度に基づく形状係数、右図は熱伝達率に基づく形状係数である。摩擦速度に基づく形状係数の値が高い領域は、入口の腹側、曲がり部内の左右の側壁、出口の背側である。入口の腹側および出口の背側の形状係数の増加は、図 4 に示した流れ方向流速の偏りによるものと考えられる。曲がり部内の側壁に対しては、図 5 に示した壁面に沿う 2 次流れが強く影響していると考えられる。熱伝達率に基づく形状係数の場合は、エルボ入口のわずかに下流側からエルボ出口にかけて、背側を中心に広く値の高い領域が分布している。また、腹側のエルボ出口周辺においても形状係数の値が鋭く増加している。摩擦速度に基づく形状係数と熱伝達率に基づく形状係数を比較すると、背側の出口を中心に分布が似通っている部分も認められるが、分布傾向は本質的に異なっている。

Fig.11 Contour of geometry factor obtained from the wall friction velocity and from the wall heat transfer rate (Case 1). Friction velocity $u_{tz\theta}$ is expressed by Eq.(7). Geometry factor obtained from the wall heat transfer rate in overall heat condition is qualitatively different from that from the wall friction velocity.

3・3・2 数値計算ならびに電気化学実験に基づく形状係数の比較

図 12 に背側と腹側の線上における形状係数の分布を示す。青実線(—)はケース 1, 青破線(---)はケース 2 およびケース 3 の摩擦速度に基づく形状係数である。赤実線(—)はケース 1, 赤破線(---)はケース 2 の全面加熱条件における熱伝達率に基づく形状係数である。ヘキサメッシュとポリヘドラルメッシュの違いによる形状係数の差異はわずかである。赤線の丸(○)は、ケース 3 の点電極加熱条件における熱伝達率から算出した値に、恒吉ら(恒吉他, 2013)によって提案された入口効果の補正を行って得られた形状係数である。ケース 3 における熱伝達率は、点電極再現部ごとに面平均した値を用いている。黒色の丸(●)は、点電極を用いた物質移行係数の実験的測定および同様の補正によって求めた形状係数である。用いた補正方法は、円管発達乱流における異なる境界条件に対す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、点電極測定の形状係数を 1.5 乗した値が入口効果の補正值となる。点電極を再現して求めた形状係数と実験値は定量的に一致しており、局所的な境界条件における伝達現象を精度よく計算出来ているといえる。そして、点電極測定の値および点電極を再現した計算値は、エルボ腹側出口を除いて、摩擦速度に基づく形状係数とよく一致している。しかし、全面加熱条件の熱伝達率に基づく形状係数は異なる値を示している。ここで、数値計算における流動場と温度場の壁面境界条件について考察する。流動場計算の壁面で速度をゼロとする滑りなし条件は、温度場計算の等温加熱条件と数学的に相似とみなすことができるが、壁面での温度勾配をゼロとする断熱条件は滑りなし条件とは非相似である。点電極加熱条件においては、加熱領域の周囲が断熱条件である影響が、加熱領域端の入口効果として表れる。そのため、形状係数の評価において先述した補正を要する。補正した値は流動場計算の結果である摩擦速度に基づく形状係数と高い一致を示す。一方、全面加熱条件は流動場計算の壁面境界条件との数学的な相似性は強いと考えられるが、エルボ管流れという複雑流動場を対象とした場合に、結果として得られる熱伝達率と摩擦速度による評価は大きく乖離する。

局所的な境界条件で求めた形状係数と摩擦速度に基づく形状係数が一致し、それらと全面的な境界条件で求めた形状係数が異なるというのは、オリフィス下流の結果と同様の傾向である。ただし、オリフィス下流の場合は、形状係数分布が境界条件により定量的には異なるものの定性的な一致がみられたのに対して、エルボ流れの場合は形状係数の分布傾向自体が異なっている。ここで、本研究で求めた形状係数を既往の研究結果と比較する。米田らは偏流と変動流速の効果を加味した実効摩擦速度を定義し、RANS による流動場計算をもとに形状係数を予測している(米田他, 2010)。本研究の式(7)で示した摩擦速度に基づく形状係数の分布は、米田らが算出した実効摩擦速度に基づく形状係数の分布と概ね一致している。El-Gammal らは、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)で作成したエルボ試験体を用いて減肉実験を行っている(El-Gammal et al., 2010)。本研究における全面加熱条件の熱伝達率に基づく形状係数予測と同様に、El-Gammal らの実験ではエルボ腹側出口においても減肉が進行することが報告されている。エルボ腹側出口における相対的な物質伝達(熱伝達)の増大は、全面的な境界条件を満たした場合にのみ確認できる現象であると言える。次節において、ひとつの流動場計算に対して同時に異なる境界条件でスカラー輸送の計

算を行ったケース 2 とケース 3 の結果を解析し、境界条件の違いによるスカラー輸送の定性的な相違について考察する。

Fig.12 Geometry factor profile. —: $u_{rz\theta}/u_{rz\theta 0}$ (Case 1), ---: $u_{rz\theta}/u_{rz\theta 0}$ (Case 2 and 3), —: h/h_0 (Case 1), ---: h/h_0 (Case 2), ○: $(h/h_0)^{1.5}$ (Case 3, corrected entrance effect), ●: $(k_c/k_{c0})^{1.5}$ (experimental result corrected entrance effect). Geometry factor obtained in point transfer condition (○ and ●) are consistent with that from friction velocity, however, disagree with that from heat transfer rate in overall heat condition.

3・4 全面加熱条件と点電極加熱条件における熱伝達現象の解析

3・4・1 下流方向へのバルク温度上昇に関する考察

全面加熱条件と点電極加熱条件では、流体に印加される熱量が大きく異なる。点電極加熱条件(ケース 3)では温度 300 K の水の流入に対して、局所的に 310 K の等温加熱条件としている。加熱条件とした点電極再現部の位置によって異なるが、出口境界における断面平均温度の上昇は最大でも 4.0×10^{-4} K であり、流体のバルク温度はほとんど変化していない。一方、全面加熱条件(ケース 2)においては、入口における断面平均温度 300 K に対して、出口では断面平均温度は 0.56 K 上昇していた。点電極加熱条件と比べると温度上昇のオーダーが大きく異なるものの、加熱壁面とバルクの温度差($T_w - T_b$)と比較すると数パーセントの温度上昇である。本計算では、式(1)に示した熱伝達率の算出において、バルク温度 T_b は入口管軸中心の温度を用いている。そのため、全面加熱条件の場合には、下流方向へのバルク温度上昇の影響として、下流に進むほど熱伝達率を過小評価することになる。しかし、その差異は最大で数パーセント程度であり、図 12 に示した全面加熱条件と点電極加熱条件における形状係数の定性的な不一致の主な原因とは言えない。よって、境界条件による形状係数の差異は、計算領域全体における熱収支の違いから生じたのではなく、物理的に働いている主要な熱輸送のメカニズムが異なるためと言える。以降、本節 2, 3 項において異なる境界条件における瞬時温度場ならびに時間変動の比較を行い、本節 4, 5 項において熱輸送メカニズムの違いについて詳述する。

3・4・2 異なる境界条件における瞬時温度場の比較

図 13 に全面加熱条件(ケース 2)と点電極加熱条件(ケース 3)における、瞬時の温度場の中央断面コンターを示す。いずれも入口管軸中心で求めたバルク温度 T_b との温度差をとり、壁面とバルクの温度差($T_w - T_b$)により無次元化している。ケース 2 のコンターは、カラースケールで 0 から 1 の範囲を示している。全面加熱条件においては、壁面から管軸中心まで流路全体にわたって温度の移流拡散が生じていることがわかる。ケース 3 のコンターは、温度境界層を判別しやすくするために、0.01 を上限としたグレイスケールを用いている。ケース 3 は矢印で示したエルボ入口および出口の電極再現部をそれぞれ加熱した場合の温度を同時に示している。点電極加熱条件では、局所的に温度境界層が形成されるため、境界層は薄く、壁面近傍のみで温度変化が完結している。壁面近傍の流れが一方向に強い場所では温度境界層が下流側に伸びており、時間変化として加熱領域近傍の流れのせん断が強くなると、同時に温度境界層も薄くなる。短い時間間隔で壁面近傍の流れの向きが変化するエルボ腹側出口では、温度境界層が発達する向きも流動にあわせて変わるため、温度境界層が一方向に安定して伸びることはない。

Fig.13 Contour of instantaneous temperature in a mid-plane of the elbow. Turbulent flow affects the whole temperature field in overall heat condition, at the same time, affects near wall region in point heat condition because the thermal boundary layer is very thin.

3・4・3 摩擦速度および熱伝達率の時間変動

図 14 に背側出口，腹側入口，腹側出口における摩擦速度および熱伝達率の時間変動を示す．青の実線(——)は式(7)で定義した摩擦速度であり，ケース 2 およびケース 3 の計算では同一の値である．赤の破線(---)はケース 2 の全面加熱条件における熱伝達率であり，黒の点線(.....)はケース 3 の点電極加熱条件における熱伝達率である．横軸に時間を取り，縦軸は瞬時値から平均値を除いた変動値をそれぞれの RMS 値で規格化している．エルボ背側の出口は，摩擦速度，全面加熱条件の熱伝達率，点電極加熱条件の熱伝達率からそれぞれ求めた形状係数が同程度の値を示した位置にあたる．時間変動をみると，点電極加熱条件の熱伝達率は摩擦速度とよく一致している．点電極加熱条件で形成される温度境界層は薄いため，壁面近傍のせん断速度の大きさが熱伝達に対して直接的に影響しているといえる．全面加熱条件の熱伝達率は，摩擦速度に対して時間遅れをもって追従するかなのような時間変動をしている．しかし，その熱伝達率の変動は必ずしも摩擦速度の変動とは一致しておらず，まれに正負逆の変動もみとめられる．これは，全面加熱条件においては，壁面近傍の流れの強さのみが熱伝達の強さを決める要因ではないことを示唆している．エルボ腹側の入口は，摩擦速度および点電極加熱条件の熱伝達率に基づく形状係数が，全面加熱条件の熱伝達率に基づく形状係数よりも高い値を示した場所である．腹側入口における時間変動も，背側出口における変動と同様に，摩擦速度と点電極加熱条件の熱伝達率がよく一致し，全面加熱条件の熱伝達率のみ異なる結果となっている．エルボ腹側の出口では，摩擦速度，全面加熱条件の熱伝達率，点電極加熱条件の熱伝達率からそれぞれ求めた形状係数が全て異なる値を示した．摩擦速度と熱伝達率の時間変動をみると，他の場所とは異なり，摩擦速度と全面加熱条件の熱伝達率だけでなく，摩擦速度と点電極加熱条件の熱伝達率の変動も一致していないことがわかる．腹側出口は，エルボ内で生じた壁面に沿う 2 次流れが左右から合流する位置にあたり，壁面近傍の流れの方向と強さが時間的に激しく変化する．非定常性の強い流れ場においては，点電極のような局所的な境界条件であっても，せん断流れ以外に壁垂直方向の速度変動も熱伝達に関与してくると思われる．

3・4・4 全面加熱条件における温度変動と乱流による熱輸送

全面加熱条件における熱輸送のメカニズムについて考察する．図 15 に全面加熱条件における中央断面の瞬時の温度変動を示す．瞬時値から平均値を除いた変動値 t' を，壁面とバルクの温度差($T_w - T_b$)により無次元化している．エルボ腹側の出口周辺を除いて，エルボ流れの壁面近傍には下流方向に伸びた低温あるいは高温の構造がみられる．これは発達乱流における，壁面近傍のストリーク構造(猿渡，山本，2013)に類似している．腹側出口周辺では，エルボ内の剥離流れと腹側壁面に挟まれた空間に，2 次流れが左右から流れ込むことにより，変動値は大きい空間的に微小な温度変動が多数発生する．図 15(a)において点線で囲った腹側出口周辺の温度変動を，中央断面における流速のベクトルとともに図 15(b)に示す．図 15 は，腹側出口における熱伝達率が最大値をとった瞬間(4.103 s)である．低温の流体が腹側出口の壁面に吹きつけていることがわかる．時系列データの可視化により，腹側出口の熱伝達率が極大値をとる瞬間には，低温流体の吹きつけが生じている割合が高いことを確認した．腹

側出口周辺では、多数の微小な渦構造によって形成されたと考えられる複雑な流動が生じている。この流動構造により、壁面と主流部の間で連続的に熱が輸送されていると考えられる。

Fig.14 Fluctuations of the wall heat transfer rate and the wall friction velocity. - - -: heat transfer rate in overall heat condition (Case 2),: heat transfer rate in point heat condition (Case 3), —: friction velocity expressed by Eq.(7) (common in Case 2 and Case 3). Fluctuations are normalized by own RMS value. Heat transfer rate in point heat condition is good agreement with friction velocity in (a) and (b), however, slightly different in (c). Heat transfer rate in overall heat condition roughly traced friction velocity with time delay.

Fig.15 Contour of instantaneous temperature fluctuation in a mid-plane of the elbow. Near the elbow outlet of inner side, temperature fluctuations occurred strongly. At the time (4.103 s), the wall heat transfer rate at the elbow outlet of inner side increased to a maximum value by sweep with low temperature fluid.

3・4・5 異なる境界条件における熱輸送のメカニズムの違い

図 16 に、エルボ背側出口、腹側入口、腹側出口および円管発達乱流における壁垂直方向の熱流束を示す。線の色は境界条件の違いを表し、赤がケース 2 の全面加熱条件における結果、黒がケース 3 の点電極加熱条件における結果である。実線は熱伝導による熱流束、破線は乱流による熱流束をそれぞれ表す。熱伝導による壁垂直方向の熱流束 $\alpha(dT/dr)$ は温度拡散率 α と平均温度勾配の積であり、乱流熱流束 $-\overline{v_r' t'}$ は速度変動 v_r' と温度変動 t' の積

の時間平均値である。縦軸の熱流束は、断面平均流速 V_{z0} および壁面とバルクの温度差($T_w - T_b$)を用いて無次元化している。横軸は壁面からの距離を対数でプロットしており、グラフの左側が壁面、右端が管軸中心である。

点電極加熱条件の場合、背側出口と腹側入口では、熱伝導のみによって熱輸送が行われていることがわかる。これは、円管発達乱流における熱流束と定性的に一致している。壁面近傍では、壁面と平行な方向の速度変動と比較して、壁垂直方向の速度変動は選択的に大きく減衰される。壁面近傍において、壁垂直方向の速度変動 v_r' は減衰して温度変動 t' に効かないため、壁面近傍で乱流熱流束 $-\overline{v_r' t'}$ はほとんど生じない。また、壁面から離れた粘性底層の上部では速度変動 v_r' が存在するが、点電極加熱条件で形成される温度境界層は薄く、速度変動が働く領域において温度が一様で温度変動 t' がないため、壁面上方においても乱流熱流束 $-\overline{v_r' t'}$ は生じない。よって、点電極加熱条件における熱伝達率は、壁面近傍のせん断速度の大きさのみを反映していると結論付けられる。ただし、エルボ腹側出口のような、非定常性の強い流れ場においては、わずかながら壁垂直方向の乱流熱流束が伝達現象に関与することから、形状係数の評価において摩擦速度に基づく値と点電極加熱条件の熱伝達率に基づく値は完全には一致しない。

全面加熱条件の場合、壁面近傍には熱伝導が支配的な伝導底層が存在するが、伝導底層の上部からバルクにかけては主に乱流熱流束によって熱が輸送される。よって、全面加熱条件においては、壁面近傍のせん断速度の大きさと、壁垂直方向速度の変動が複合的に熱伝達に影響を及ぼす。エルボ背側出口においては、円管発達乱流と比較して、壁面近傍で乱流熱流束の値が大きく、さらに偏流によりせん断速度も大きいことから、熱伝達が大きく増加する。腹側入口は、背側出口と同じく偏流による流れのせん断は強いが、伝導底層上部の乱流熱流束が比較的小さいため、熱伝達の増加はわずかである。一方、腹側出口では、壁面近傍の流れのせん断は決して強くはないが、壁垂直方向の乱流熱流束が壁面近傍まで非常に大きいため、相応に熱伝導による熱流束も大きくなり、熱伝達が顕著に増加する。全面加熱条件においては、流れのせん断が特に強い腹側入口の熱伝達の増加がそれほど大きくなく、壁面近傍の乱流熱流束が大きな腹側出口の熱伝達が顕著に増加することから、壁面との界面で働く熱伝導よりも伝導底層上部に接続する乱流熱輸送が熱伝達の増減を決定する主要因と結論付けられる。

Fig.16 Distributions of the wall normal heat flux. —: heat conduction in Case 2, - - - - : turbulent heat flux in Case 2, —: heat conduction in Case 3, - - - - : turbulent heat flux in Case 3. Heat conduction $\alpha(dT/dr)$ and turbulent heat flux $-\overline{v_r' t'}$ are nondimensionalized by $V_{z0}(T_w - T_b)$. In Case 2 (overall heat condition), turbulent heat flux affect strongly on the wall heat transfer. In Case 3 (point heat condition), heat conduction is the dominant for heat transfer.

3・5 配管減肉予測への課題

本研究結果を実際の炭素鋼配管の減肉予測に適用する際に考慮すべき事項について述べる。FACによる実配管における物質伝達は、配管全面で生じる現象であることから、形状係数予測としては全面加熱条件の熱伝達率に基づく値の信頼性が高い。ただし、本計算で用いた温度場の拡散係数はプラント数で約 5.8 であるが、実配管内における鉄イオンの拡散係数はシュミット数で 10 の 2 乗のオーダーと推定されており、拡散係数に大きな開きがある。式(4)で示したアナロジーを用いると、形状係数の評価においては拡散係数の違いは無視できると考えられるが、式(4)は単純な流動場を想定したものであり、複雑流動場においても適用可能かどうかは今後検証が必要である。また、本計算とプラントの実配管ではレイノルズ数のオーダーが異なる。エルボ管流れにおいては、流れ場にレイノルズ数依存性があることから、形状係数の分布も変わることが予想される。ただし、エルボ管の流れ場はエルボ曲率によって規定される部分が多く、レイノルズ数による形状係数の変化は小さいと期待される。そして、これらの課題を解決してエルボ管形状係数の正確な値を算出するとともに、炭素鋼配管における配管要素と直円管部の減肉速度比との関係性についても研究を進める必要がある。オリフィス下流を対象に実験および数値計算により求めた形状係数(恒吉他, 2015, Yamagata et al., 2014)よりも、炭素鋼配管における減肉速度比(Utanohara et al., 2013)は大きな値をとる。炭素鋼のエルボ管を対象とした実験としては、釜堀らが曲がり部の中央に試験部を挟んだ変則的な形状ではあるが、炭素鋼の試験片を用いて減肉速度の測定を行っている(釜堀他, 2014)。エルボ背側において最大減肉速度比が約 3.4 と報告されており、本計算で求めた形状係数よりも値が大きくなっている。炭素鋼配管における腐食現象では、内壁に酸化被膜が形成される(Dooley and Chexal, 2000)。この酸化被膜の保護効果により、純粋に流体力学的観点から導出した形状係数と材料因子を含む減肉速度比が一致なくなるものと考えられる。本研究では、伝達境界条件の違いにより形状係数に定性的な差異が生じること、そして、伝達現象を正確に評価するためには乱流輸送の効果を反映する全面伝達条件を再現することが重要であることを示した。今後、精度の高い形状係数予測と実際の炭素鋼における減肉速度の比較を通して、減肉予測の高精度化が進むことが期待される。

4. 結 論

90 度エルボ管を対象に、流れ加速型腐食に対する形状係数の導出を目的として、数値計算ならびに電気化学実験を行った。電気化学実験では、エルボの背側と腹側の線上に点電極を設置して、物質移行係数を直接測定した。LES 計算では、鉄イオンの濃度場を模擬したパッシブスカラーとして温度場計算を行い、アナロジーを介して熱伝達率から物質移行係数を算出した。実機配管における腐食条件を模擬した全面加熱条件、ならびに、電気化学実験における点電極を再現した局所的な加熱条件を設定して温度場計算を行った。数値計算、実験ともにエルボの曲率半径は $R_c/D = 1.5$ であり、レイノルズ数は 15000 とした。求めた形状係数を比較すると、点電極加熱条件の熱伝達率に基づく値は、点電極測定によって得られた値とよく一致した。また、点電極条件の形状係数は、摩擦速度に基づく形状係数とエルボ腹側出口を除いて定量的に一致することを確認した。全面加熱条件の熱伝達率に基づく形状係数は、点電極条件の値あるいは摩擦速度に基づく値とは定性的にも異なることを明らかにした。ひとつの流動場計算に対して異なる境界条件で同時に実施した温度場計算の結果を解析し、境界条件の違いによる伝達現象の定性的な相違について以下の知見を得た。点電極加熱条件においては、形成される温度境界層が薄く、熱輸送の大半は熱伝導によってなされる。一方、全面加熱条件においては、全面的に温度境界層が形成されるため、伝導底層上部における壁垂直方向の乱流熱流束が熱伝達の増減に対して支配的となる。そのため、エルボ腹側出口のように、流れのせん断力が強くない場所であっても、非定常流動の効果により伝達現象が顕著に促進される場合がある。よって、正確な形状係数を導出するためには、流動場全体でスカラー場を発達させ、壁面の伝達現象に乱流スカラー輸送の効果を反映させる必要があり、摩擦速度あるいは局所的な境界条件において測定された物質移行係数をもとに全面伝達条件における形状係数を精度よく推定することは困難であるといえる。

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猪飼太郎氏ならびに田中铁平氏に貴重な実験データを提供して頂いた。また、本研究の一部は原子力安全システム研究所(INSS)との共同研究により行われた。ここに記し、謝意を表す。

文 献

- Chilton, T. H. and Colburn, A. P., Mass transfer (absorption) coefficients - Prediction from data on heat transfer and fluid friction, *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.26, No.11 (1934), pp.1183-1187.
- 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.
- Eguchi, Y., Murakami, T., Tanaka, M. and Yamano, H., A finite element LES for high-Re flow in a short-elbow pipe with undisturbed inlet velocity, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.241, No.11 (2011), pp.4368-4378.
- 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 - エルボ管における減肉速度の計測 -, *INSS JOURNAL*, Vol.21 (2014), pp.99-107.
- 河村勉, 中尾俊次, 村瀬道雄, エルボ下流の乱流計測, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.62, No.593 (1996), pp.230-233.
- 河村勉, 中尾俊次, 高橋正典, エルボ下流の乱れに及ぼすレイノルズ数の影響, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.68, No.667 (2002), pp.645-651.
- 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.
- 森西洋平, 市川明洋, 奥村隆, 中林功一, 壁乱流の LES における差分精度と格子解像度の影響, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.66, No.647 (2000), pp.1750-1757.
- NISA, Secondary piping rupture accident at Mihama power station, unit 3, of the Kansai Electric Power Co., Inc. (final report) (2005).
- Ono, A., Kimura, N., Kamide, H. and Tobita, A., Influence of elbow curvature on flow structure at elbow outlet under high Reynolds number condition, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.241, No.11 (2011), pp.4409-4419.
- OpenCFD, OpenFOAM: The open source computational fluid dynamics(CFD) toolbox, available from <<http://www.openfoam.com>>, (参照日 2015 年 5 月 26 日).
- OpenFOAM Foundation, Bug Reporting (issue #99): Dynamic Smagorinsky model with local coefficient values, available from <<http://www.openfoam.org>>, (参照日 2015 年 5 月 26 日).
- Roe, P. L., Some contributions to the modeling of discontinuous flows, *Lectures in Applied Mathematics*, Vol.22 (1985), pp.163-193.
- 猿渡祥悟, 山本義暢, 高レイノルズ数チャンネル乱流場における高プラントル数乱流熱輸送に関する四象限・結合確率密度関数解析, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.79, No.803 (2013), pp.1281-1296.
- Shaw, D. A. and Hanratty, T. J., Turbulent mass transfer rates to a wall for large Schmidt numbers, *AIChE Journal*, Vol.23, No.1 (1977), pp.28-37.
- 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, 田中铁平, 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.
- 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.

Virginia Electric and Power Co., Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report (1987).

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

- Chilton, T. H. and Colburn, A. P., Mass transfer (absorption) coefficients - Prediction from data on heat transfer and fluid friction, Industrial and Engineering Chemistry, Vol.26, No.11 (1934), pp.1183-1187.
- 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.
- Eguchi, Y., Murakami, T., Tanaka, M. and Yamano, H., A finite element LES for high-Re flow in a short-elbow pipe with undisturbed inlet velocity, Nuclear Engineering and Design, Vol.241, No.11 (2011), pp.4368-4378.
- 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).
- Kawamura, T., Nakao, T. and Murase, M., Measurements of Turbulent Flow Downstream from Elbow Pipe, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.62, No.593 (1996), pp.230-233 (in Japanese).
- Kawamura, T., Nakao, T. and Takahashi, M., Reynolds Number Effect on Turbulence downstream from Elbow Pipe, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.68, No.667 (2002), pp.645-651 (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.
- Morinishi, Y., Ichikawa, A., Okumura, T. and Nakabayashi, K., Effects of the Order of Accuracy of Finite-Difference Method and Grid Resolution on LFS of Wall Turbulence, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.66, No.647 (2000), pp.1750-1757 (in Japanese).
- NISA, Secondary piping rupture accident at Mihama power station, unit 3, of the Kansai Electric Power Co., Inc. (final report) (2005).
- Ono, A., Kimura, N., Kamide, H. and Tobita, A., Influence of elbow curvature on flow structure at elbow outlet under high Reynolds number condition, Nuclear Engineering and Design, Vol.241, No.11 (2011), pp.4409-4419.
- 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.
- Saruwatari, S. and Yamamoto, Y., Quadrant and joint probability density function analyses of high-Prandtl number turbulent heat transfer in high-Reynolds number channel flows, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.79, No.803 (2013), pp.1281-1296 (in Japanese).
- Shaw, D. A. and Hanratty, T. J., Turbulent mass transfer rates to a wall for large Schmidt numbers, AIChE Journal, Vol.23, No.1 (1977), pp.28-37.
- 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.
- 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.
- Virginia Electric and Power Co., Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report (1987).
- 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).