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)

恒吉 達矢^{*1}, Feng SHAN^{*2}, 田中 鉄平^{*2}, 近藤 昌也^{*3}, 伊藤 高啓^{*3}, 辻 義之^{*3}

Understanding and Generalization of Geometric Factor Based on Measurements with Point Electrode (Dependence of Geometric Factor behind Orifice on Orifice-to-Pipe Diameter Ratio)

Tatsuya TSUNEYOSHI^{*1}, Feng SHAN, Teppei TANAKA,
Masaya KONDO, Takahiro ITO and Yoshiyuki TSUJI

^{*1} Nagoya Univ. Dept. of Energy Engineering and Science
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, Japan

In the prediction of Flow Accelerated Corrosion (FAC), quantitative prediction of wall mass transfer coefficient or the geometric factor defined as the ratio of wall mass transfer coefficient in the piping systems (such as orifices, T-junctions, elbows) to that in a straight pipe is very important. Because of the entrance effect, the geometric factor based on point electrode is smaller than that obtained from the case in which the whole area is active. We correct the mass transfer coefficients measured by point electrode downstream of an orifice, and the corrected values are compared with previous results. The maximum values of geometric factor downstream of an orifice are expressed as a function of orifice-to-pipe diameter ratio.

Key Words : Flow Accelerated Corrosion, Mass Transfer, Geometry Factor, Orifice Plate, Numerical Simulation

1. 緒 言

発電プラントにおける配管減肉の一因として流れ加速腐食(FAC)が挙げられる。FAC とは炭素鋼配管からの鉄イオンの溶解及び拡散に流動が何らかの影響を与え、腐食を促進するというものである。FAC の根本的な流体力学因子としては壁面における物質移行係数が挙げられる。減肉予測の高度化のために、配管要素における物質移行係数あるいは直円管における物質移行係数で規格化した形状係数の定量的な評価が求められている。著者らは実験により物質移行係数の直接測定⁽¹⁾を行ってきたが、点電極を用いた測定では入口効果（電極先端からの急激な濃度境界層の発達）の影響⁽²⁾が強く現れる。本論文では、数値計算との比較に基づいて実験データを補正する方法について述べる。補正法をオリフィス下流の測定値に対して適応し、数値計算及び既往研究との比較を行い、形状係数のオリフィス開口率依存性についてまとめる。

2. 数値計算及び物質伝達実験

2・1 数値計算

オリフィス下流を対象に平均流動場、温度場を求める定常計算を行った。乱流モデルは2層型 *realizable k-ε* モデルを用いた。オリフィスの形状は、管直径 $D = 0.044$ m に対してオリフィス径 d を用いて定義される開口率 $\beta = d/D$ を 0.41, 0.5, 0.62, 0.7, 0.8, オリフィス厚さを 0.005 m としている。計算領域はオリフィス上流に $3D$, 下流に $15D$ をとり、レイノルズ数は 25000 とした。入口境界条件は周期境界を用いたドライバー部を別に計算し、値

* 原稿受付 2013 年 8 月 30 日

^{*1} 学生員, 名古屋大学 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

^{*2} 名古屋大学

^{*3} 正員, 名古屋大学

E-mail: y-tsuji@nucl.nagoya-u.ac.jp

を受け渡している。メッシュはマルチブロック法により全領域を6面体セルで分割した。概要を図1に示す。壁面第1層セルの中心高さ y は、オリフィス下流において $y^+(=u_\tau y/\nu)$ の最大値が約0.1となるように設定している。 u_τ は摩擦速度、 ν は動粘性係数である。

Fig.1 Mesh adopted for the calculation of orifice flow.

温度場計算には乱流プラントル数に基づく代数モデルを用いた。乱流プラントル数の値は0.9で一定とした。バルク温度300 Kの水の流入に対して加熱領域の壁面を310 Kの境界条件として温度場を計算し、壁面における熱伝達率 h を求めている。Chilton-Colburnのアナロジー⁽³⁾を介して熱伝達率 h を式(1)により物質移行係数 k_c に換算する。ここで、プラントル数 Pr 及び熱伝導率 λ は計算条件の流体の物性値であり、シュミット数 Sc 及び物質拡散係数 D_f は比較対象の実験条件の物性値である。

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

2・2 物質伝達実験

物質移行係数の測定は電気化学的手法である対流ボルタンメトリー法により行った。この手法は実機配管における鉄イオンの流出を、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、電流値から物質移行係数を定量的に測定するものである。本実験では直径1 mmの点電極を用いた。直円管及びオリフィス下流において測定を行っている。詳細に関しては文献(Kojoら⁽¹⁾)を参照されたい。

2・3 点電極測定に基づく形状係数の一般化

Son and Hanratty⁽²⁾は直円管における伝達領域の下流方向長さ L と物質移行係数 k_c について、壁変数を用いた無次元数 $L^+(=u_\tau L/\nu)$ 、 $k_c^+(=k_c/u_\tau)$ によって関係を整理した。 L^+ が十分に小さい場合($L^+ < 10^2$)、Sonらは半理論式と実験から $k_c^+ \propto L^{+1/3}$ という関係を導いている。この関係式はブラジウスの式を用いることで次のように換算することが出来る。

$$k_c \propto Re^{7/12} \quad (2)$$

著者らが行っている点電極を用いた物質伝達実験は、対象としているレイノルズ数の範囲において電極の直径は十分に小さいとみなすことができ、 $k_c \propto Re^{7/12}$ に一致する物質移行係数のレイノルズ数依存性を示している。 L^+ が 10^2 よりも大きくなると、 L^+ の増加に対する k_c^+ の変化は小さくなっていく。 L^+ が十分に大きくなると k_c^+ は一定になると仮定でき次の関係式が得られる。

$$k_c \propto Re^{7/8} \quad (3)$$

オリフィス下流を対象に点電極を用いて物質移行係数 k_c を測定し、直円管での値 k_0 で規格化して形状係数 k_c/k_0 を求めることを考える。複雑流動場であっても定常性を仮定できる流れ場であれば、物質移行係数の流れ場に対

する依存性は直円管と同様の関係が成り立つと期待できる。式(2)と式(3)のべき指数に基づき、式(4)に示すように点電極測定の形状係数を壁面全体が伝達領域とした場合の形状係数に一般化することが出来る。

$$\left(\frac{k_c}{k_0}\right)_{\text{全面伝達}} = \left(\frac{k_c}{k_0}\right)_{\text{点電極}}^{1.5} \quad (4)$$

3. 結果及び考察

3・1 オリフィス下流の形状係数

図2に開口率 $\beta = 0.5$ におけるオリフィス下流の形状係数の分布を示す。オリフィス厚さが異なるが、同じ開口率の場合のSydbergerら⁽⁴⁾の結果も合わせて記す。レイノルズ数は著者らが25000に対してSydbergerらは21000であり、Sydbergerらは測定対象の電極の前後の電極も作用させて全面伝達に近い条件で実験を行っている。実験値を比較すると、著者らの点電極測定に基づく形状係数に式(4)で示した補正を適用することで、Sydbergerらの実験結果と同程度の値となっていることがわかる。ただし、定量的な一致が認められるのはレイノルズ数が低い場合に限られる。レイノルズ数を上げた場合に著者らの実験に基づく形状係数が僅かに小さくなるのに対して、Sydbergerらの形状係数はレイノルズ数の増加に対して大幅な減少傾向を示す。計算値と実験値を比較すると、計算値の方が最大値を示す位置が下流側に寄っており、値も僅かに実験値より大きくなっている。本計算で用いたrealizable k- ϵ モデルは、オリフィス流入の急縮小過程で乱流エネルギーの過剰生成を防止できる。そのため、オリフィス下流において壁垂直方向の乱流統計量の計算精度は向上するが、混合層の下流方向への発達距離に関しては過大評価する傾向にある。Xiongら⁽⁹⁾がSydbergerらの実験と同一のオリフィス形状、レイノルズ数において流動場と濃度場の計算を行い、物質移行係数の予測を行っている。著者らが温度場計算からアナロジーを介して求めた物質移行係数は、乱流モデルにより多少の差異は認められるがXiongらの計算結果に近い値となっている。

3・2 形状係数の開口率依存性

図3はオリフィス開口率を横軸に、形状係数の最大値を縦軸にプロットしたグラフである。著者らの結果とともに、Sydbergerらの実験結果及び米田ら⁽⁶⁾の計算結果を合わせて記す。米田らはプラント実機規模の高レイノルズ数において計算を行い、運動量輸送と物質輸送のアナロジーから壁面剪断応力を物質移行係数と関連する物理量とし、流速の変動成分の影響を考慮したうえで形状係数の評価を行っている。著者らがレイノルズ数を25000から55000の範囲で、米田らが600000から1800000の範囲で変えているが、形状係数に大きなレイノルズ数依存性はみられなかった。しかし、Sydbergerらの結果はレイノルズ数により形状係数の値が大きく異なっている。図3では著者らはレイノルズ数が25000、Sydbergerらは21000、米田らは1800000における結果を比較した。オリフィス下流における形状係数は広くKellerの形状係数⁽⁷⁾が用いられてきた。この値は、減肉データの調査から得られた経験値で、オリフィス開口率によらず $k_{max}/k_0 = 5$ が提案されている。Kellerの形状係数は減肉予測評価式において広く利用されているが、より高精度化するためには、形状係数をオリフィス開口率の関数として与えることが望ましい。著者らのこれまでの解析⁽⁸⁾から形状係数が以下の関数型として表記できることを明らかにした。

$$\frac{k_{max}}{k_0} = \left(\frac{1}{\beta^2}\right)^B \quad (5)$$

べき指数は電極補正した実験値に基づく $B = 0.71$ 、計算値に基づく $B = 0.84$ である。Kellerの形状係数は実験値、計算値に比べて過大評価していることがわかる。ただし、米田らは形状係数評価において、物質移行係数の閾値の存在を仮定した補正を提案している。図3に引用した値は物質移行係数の比として報告されている値である。

Fig.2 Geometry factor profile for $\beta = 0.5$. x is the distance from the orifice. —: realizable k - ϵ , ●: Kojo, et al.⁽¹⁾, ○: correction value (Kojo, et al.⁽¹⁾), +: Sydberger and Lotz⁽⁴⁾.

Fig.3 Maximum value of geometry factor against orifice parameter β . ◆: realizable k - ϵ , ○: correction value (Kojo, et al.⁽¹⁾), +: Sydberger and Lotz⁽⁴⁾, ▲: Yoneda, et al.⁽⁶⁾.

3・3 減肉速度と物質移行係数

オリフィス下流における減肉速度と物質移行係数の関係について考察する。東京電力の技術開発研究所がオリフィス下流における炭素鋼配管の減肉試験を実施している⁽⁹⁾。オリフィス開口率は $\beta = 0.41$ である。オリフィス下流の減肉速度の最大値 W_{max} と流速 U の間に $W_{max} \propto U^{0.91}$ という関係があることを報告している。同じ開口率のオリフィスを用いて著者らは物質伝達実験を行っており、物質移行係数の最大値と流速は $k_{max} \propto U^{0.55}$ という関係であった。形状係数と同様に電極補正をすると $k_{max} \propto U^{0.83}$ となる。 W_{max} と k_{max} に対する U のべき指数がほぼ等しいことから、オリフィス下流において W_{max} と k_{max} は比例関係にあると推測できる。

4. 結 論

オリフィス下流の点電極測定に基づく形状係数に電極補正を適用し、数値計算及び既往の実験結果との比較を行った。形状係数の最大値は概ね一致することを確認した。最大値を示す位置に関しては、数値計算は実験値よりも下流側に見積る傾向にある。補正を適用した実験値及び計算値に基づき、オリフィス開口率を形状パラメータとする形状係数を報告した。

文 献

- (1) Kojo, R., Kuroda, Y., Kondo, M., and Tsuji, Y., "Flow Accelerated Corrosion and Mass Transfer Rate in Orifice Downstream Flow", *Proceedings of Nureth14*, Toronto, Canada, September 25-30, (2011), paper no. NURETH14-542.
- (2) Son, J. S., and Hanratty, T. J., "Limiting Relation for the Eddy Diffusivity Close to a Wall", *AIChE Journal*, Vol. 13, No. 4 (1967), pp. 689-696.
- (3) 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 (1934), pp. 1183-1187.
- (4) Sydberger, T., and Lotz, U., "Relation between Mass Transfer and Corrosion in a Turbulent Pipe Flow", *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 129, No. 2 (1982), pp. 276-283.
- (5) Xiong, J., Koshizuka, S., and Sakai, M., "Turbulence Modeling for Mass Transfer Enhancement by Separation and Reattachment with Two-Equation Eddy-Viscosity Models", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241 (2011), pp. 3190-3200.
- (6) 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).
- (7) Keller, H., "Erosionskorrosion an Nassdampfturbinen", *VGB-Kraftwerkstechnik*, Vol. 54, No. 5 (1974), pp. 292-295.
- (8) 辻義之, 近藤昌也, "FAC 評価における流動場および物質移動の影響と課題", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 78, No. 787 (2012), pp. 455-459.
- (9) 平崎敏史, 黒崎裕一, 額賀佐知子, 吉田正志, 梅村文夫, 高森謙郎, 高木愛夫, "高温流水中における炭素鋼配管減肉試験と肉厚連続モニタリング法の性能確認", 日本機械学会, 配管減肉管理改善に向けた基盤技術研究分科会成果報告書 P-SCCII-2, A-1-7, (2009).