

流れ加速型腐食による配管減肉の予測法に関する研究

Investigation on Pipe-wall Thinning Prediction by Flow Accelerated Corrosion

新潟大学	藤澤 延行	Nobuyuki FUJISAWA	Member
新潟大学	山縣 貴幸	Takayuki YAMAGATA	Member
新潟大学	五十嵐裕也	Yuya Ikarashi	Non-Member
電力中央研究所	藤原 和俊	Kazutoshi FUJIWARA	Non-Member
電力中央研究所	稲田 文夫	Fumio INADA	Non-Member

In this paper, a comparative study of the pipe-wall thinning prediction with existing experimental data is carried out for some typical cases of flow accelerated corrosion of carbon steel. The numerical model tested in this study is the pipe-wall thinning model based on the standard k- ϵ model of turbulence with the modification of high-Schmidt-number effect. The comparative study is carried out for the straight pipe flow, the pipe flow behind an orifice and the pipe flow behind a long elbow combined with swirl of Mihama case. The present study indicates that the experimental result of pipe-wall thinning is well reproduced in the numerical result more than a qualitative agreement, which suggests the applicability of mass transfer model for the pipe-wall thinning prediction.

Keywords: Flow accelerated corrosion, Pipe-wall thinning, Prediction

1. 緒言

発電プラントにおける配管減肉の要因の1つに流動加速腐食（以下 FAC という）[1] がある。これは、配管材料から作動流体中へ鉄イオンが溶出する拡散現象であるが、配管内の乱流によってその溶出過程が局所的に加速される物質輸送現象でもある。FAC による配管減肉は、配管内を流れる流体の流速、乱れ強さ、温度、pH、配管材質など多くのパラメータに支配されるため、過去よりしばしば研究の対象とされてきたにも関わらず、実機配管における減肉速度の正確な予測までは至っていないのが現状である[2-8]。

著者ら[9-12]は、配管減肉の予測法としてk- ϵ モデルに基づく方法について検討を進めてきた。この予測法では、高シュミット数の影響を考慮することで、オリフィス流の物質輸送現象を予測可能であることが確認されている。しかしながら、実機で用いられる炭素鋼配管においては、酸化皮膜形成の影響もあり、物質輸送モデルの配管減肉予測への適用性についてはいまだ明らかにされていない。

本研究は、k- ϵ モデルに基づく予測法を既存の炭素鋼配管の減肉結果に適用することで、予測モデルの健全性を明らかにし、直円管流ならびにオリフィス流における配管減肉結果、ならびにより複雑な実機配管結果と比較検討することを目的とする。

2. 配管減肉の予測モデル[10]

流れ加速型腐食に起因する配管減肉事象は、乱流物質輸送現象として捉えることができる。このとき、物質輸送現象は、以下のように、時間平均化したナビエ・ストークス方程式と濃度方程式によって表される。

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} C}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j' C'}) \quad (2)$$

ここで、レイノルズ応力と速度濃度相関項に渦動粘度を導入することで数学的取り扱いを簡単化できる。

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \nu_t (\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

$$-\overline{\rho u_j' C'} = \frac{\nu_t}{Sc_t} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \quad (4)$$

ただし、渦動粘度 $\nu_t = c_\mu k^2 / \epsilon$ 、乱流シュミット数 $Sc_t = 0.9$ である。

壁面近傍の境界条件としては、速度と濃度の対数法則を仮定する。

$$u_p^+ = \frac{1}{x} \ln y_p^+ + A \quad (5)$$

Table 1 Experimental conditions

	D [mm]	U [m/s]	T [°C]	pH	Re	Sc
Bouchacourt (1988)	8	0.35 - 3.63	180	8.6 - 9.6	$1.6 \times 10^4 - 1.7 \times 10^5$	8 - 23
Sydberger and Lotz (1982)	40	0.5 - 3.3	25		$2.1 \times 10^4 - 1.3 \times 10^5$	1460
Mihama plant (2004)	538.8	2.2	140	9.0 - 9.3	5.8×10^6	14

$$C_p^+ = \frac{(C_w - C_p)\rho c_p u_p^+}{j_w} \quad (6)$$

$$= \left(\frac{Sc_t}{0.4}\right) \ln y^+ + (3.85Sc^{1/3} - 1.3)^2 + 2.12 \ln Sc$$

ここで、 u_p : 壁面近傍境界における速度、 y_p : 壁面近傍境界の位置、 C_w : 壁面濃度、 C_p : 壁面近傍境界における濃度、定数 $\alpha=0.4$ 、 $A=5.5$ である。シャーウッド数 Sh は、式(6)

の壁面物質流束 j_w を式(7)に代入して求まる。

$$Sh = \frac{j_w}{\rho U (C_w - C_b)} Sc \cdot Re \quad (7)$$

物質輸送係数 K は次式から決定される。

$$K = ShD/d \quad (8)$$

ただし、 D :拡散係数、 d :管内径。

減肉速度は、式(9)で与えられる。

$$V_m = K(c_w - c_b)(1 - \theta) \quad (9)$$

ただし、 θ :クロム酸化物の面積比である。拡散係数 D ならびに壁面濃度 C_w については、過去の実験結果によって経験的に与えた[5]。

3. 対象とする配管系

本予測モデルの健全性を評価するため、既存の配管減肉実験結果ならびに実機配管系における減肉結果と本予測結果の比較検討を行った。ここでは、直円管の配管減肉に対するBouchacourtの実験[13]、オリフィス流に対するSydberger-Lotzの実験[2]、そして、実機配管系として美浜発電所1号機A系統配管の減肉結果[4]との比較検討を行った。これらの実験条件については、表1に示すとおりである。

4. 結果および考察

4-1 直円管における配管減肉

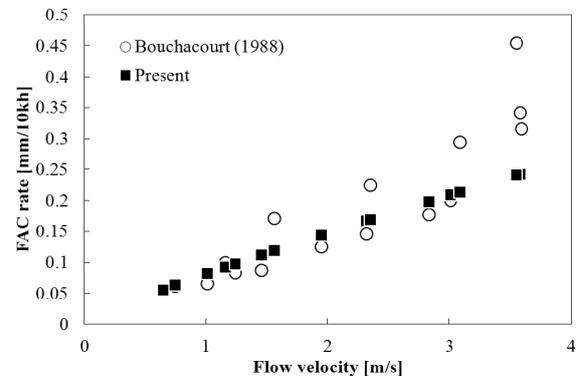
Fig.1(a),(b)は、円管に対するBouchacourtの実験[13]で得られた配管減肉速度に及ぼす流速(Fig.1(a))ならびにpH(Fig.1(b))の影響について比較して示した結果である。いずれの結果においても、予測結果は実験結果と定性的に一致しており、流速の増大と共に減肉速度が増大する

こと、pH増大とともに減肉速度は減少することがわかる。ただし、ここで得られたpHの影響については、主として、本予測において用いた拡散係数の実験値[5]に起因するものであり、今後さらなる拡散係数の実験評価について考察する必要がある。

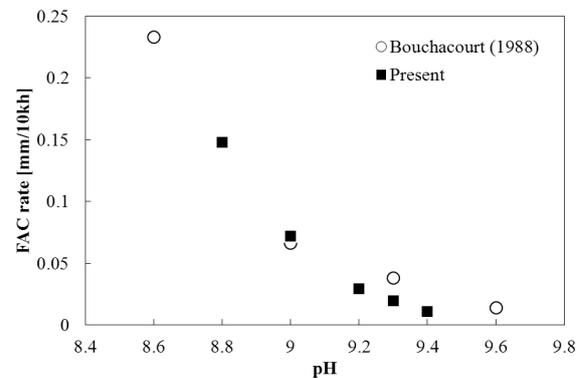
Fig.2は、同様に、Bouchacourtの実験[13]に対して、配管減肉速度の予測と実測値を比較した結果である。予測結果は実験結果を良く再現しているが、減肉速度が大きくなると、その差異が徐々に大きくなる傾向があることが分かる。これは、滑面を仮定した本予測モデルでは、減肉速度を過小評価することを示唆する。

4-2 オリフィス背後における配管減肉

Fig.3は、オリフィス背後における形状係数(=円管の物質移行係数に対する比)の実験値と予測値の比較結果である。ただし、シャーウッド数 Sh とオリフィス下流距



(a) Effect of flow velocity



(b) Effect of pH

Fig.1 Pipe-wall thinning in straight pipe

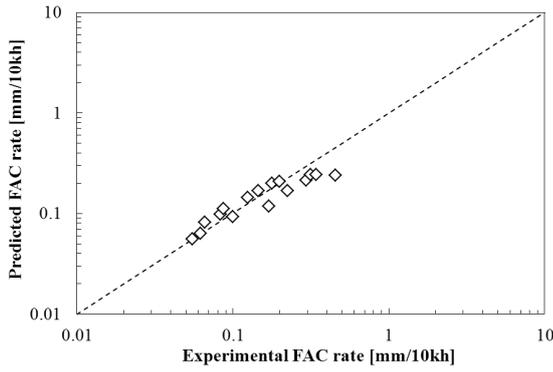


Fig. 2 Prediction versus experiment of straight pipe

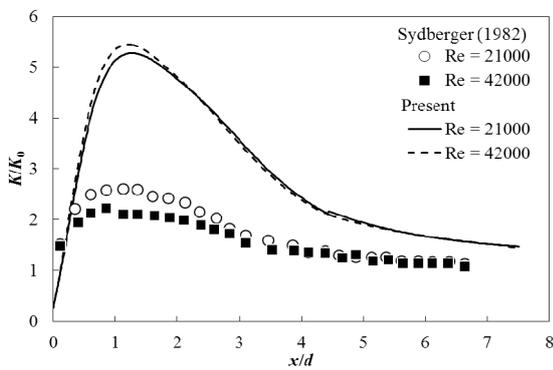


Fig. 3 Geometrical factor of orifice flow

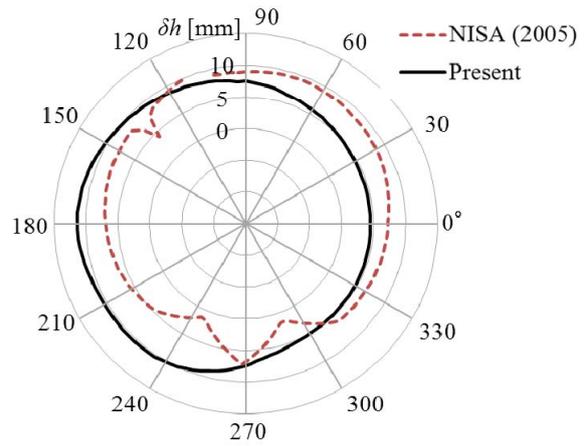
離 x/d の関係で示した。いずれのレイノルズ数においても予測結果は実験よりかなり大きな値を示しているが、両者の分布形状は定性的に一致する。

4-3 実機オリフィス背後における非軸対称配管減肉

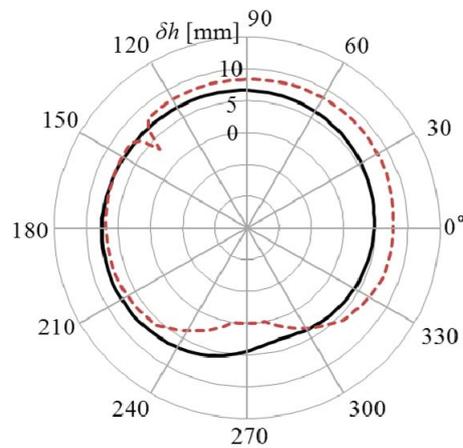
Fig. 4は、美浜発電所1号機A系統配管における減肉速度の予測と実測との比較結果である。ただし、予測計算においては、その上流側に存在するエルボの上流 $1d$ において旋回流を初期分布として与えて流れ場を計算し、オリフィス上流側 $3d$ の位置における速度場のスワール数が模型実験結果と一致する条件から上流側速度境界条件とした。

実験結果によると、オリフィス背後 $x/d=1$ (Fig. 4(a)) では、配管上部に大きな減肉が発生するが、配管下部では減肉は小さい。このため、オリフィス背後で強い非軸対称減肉が認められる。このことは、予測結果においても、同様に認められ、予測と実験の定性的一致が認められた。一方、 $x/d=2$ (Fig. 4(b)) では、実験、予測のいずれにおいても減肉量の減少が認められる。

Fig. 5は、配管上部における減肉量が管軸方向(x/d)へ変化する関係である。実測結果では、最大減肉位置がオリフィス下流 $x/d=1$ 付近で発生し、その下流側では減肉



(a) $x/d=1$



(b) $x/d=2$

Fig. 4 Pipe-wall thinning prediction and experiment of Mihama's case in cross section

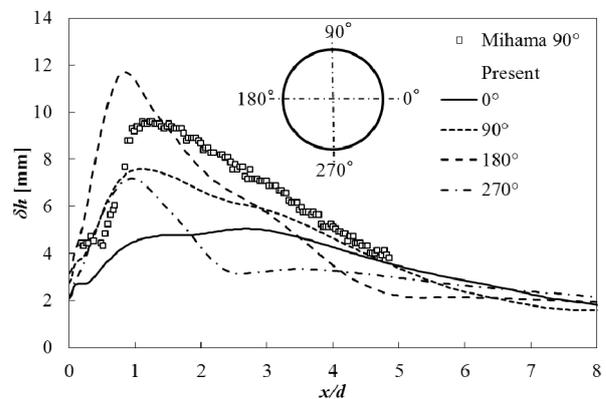


Fig. 5 Pipe-wall thinning prediction and experiment of Mihama's case in downstream

量は下流方向に減少するが、この関係は予測結果にも認められる。

5. 結言

流れ加速型腐食による配管減肉の高精度予測法の実機適用性を検証することを目的として、本予測モデルによる減肉速度の計算と既存の実験との比較検討を行った。本予測モデルから求まる配管減肉速度は、直円管、オリフィス流ならびに旋回を伴う実機オリフィス流における配管減肉結果を定性的以上に再現できることが分かった。

謝辞

本研究は、科研費基盤(B)No. 24360391の一部として行われたことを記して謝辞とする。

参考文献

- [1] H. Keller, "Erosions corrosion an Nassdampfturbien", VGB-Kraftwerkstechnik, 54, 1974, 292.
- [2] T. Sydberger and U. Lotz, "Relation between mass transfer and corrosion in a turbulent pipe flow", Journal of the Electrochemical Society, 129, 1982, pp. 276-283.
- [3] 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)", JSME S CA1-2005, 2005, pp. 13-47.
- [4] NISA. Secondary piping rupture accident at Mihama power station, unit 3, of the Kansai Electric Power Co. Inc., Final Report, 2005.
- [5] 米田公俊, 森田良, 佐竹正哲, 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3), 減肉予測モデルの提案", 電力中央研究所報告, 2009, L08016, pp. 1-42.
- [6] S. Uchida, M. Naitoh, Y. Uehara, H. Okada, T. Ohira, H. Takiguchi, W. Sugino, S. Koshizuka, "Evaluation methods for corrosion damage of components in cooling systems of nuclear power plants by coupling analysis of corrosion and flow dynamics (IV): Comparison of wall thinning rates calculated with the coupled model of static electrochemical analysis and dynamic double oxide layer analysis and their values measured at a PWR plant, J Nucl Sci Technol, 47, 2010, pp. 184-196.
- [7] J. Xiong, S. Koshizuka and M. Sakai, "Turbulence modeling for mass transfer enhancement by separation and reattachment with two-equation eddy-viscosity models", Nuclear Engineering and Design, 241, 2011, pp. 2190-3200.
- [8] M. El-Gammal, W.H. Ahmed, C.Y. Ching, "Investigation of wall mass transfer characteristics downstream of an orifice", Nucl Eng Des, 242, 2012, pp. 353-360.
- [9] 高野剛, 山縣貴幸, 伊藤嘉人, 藤澤延行, "流動加速腐食による配管減肉に関する研究(旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果による物質輸送現象)", 保全学, Vol. 10, No. 2, 2011, pp. 30-35.
- [10] 佐藤祐紀, 山縣貴幸, 伊藤晃宏, 藤澤延行, 高野剛, 円管内オリフィス背後の物質輸送現象に関する研究, シュミット数の影響, 保全学会, 第8回学術講演会要旨集, 2011, pp. 122-126.
- [11] N. Fujisawa, T. Yamagata, S. Kanno, A. Ito, T. Takano, The mechanism of asymmetric pipe-wall thinning behind an orifice by combined effect of swirling flow and orifice bias, Nucl Engng Design, 252, 2012, pp. 19-26.
- [12] T. Takano, T. Yamagata, Y. Sato, N. Fujisawa, "Non-axisymmetric mass transfer phenomenon behind an orifice in a curved swirling flow". J. Flow Control Meas. Vis. 1, 2013, pp. 1-5.
- [13] M. Bouchacourt, "Flow assisted corrosion of carbon steels in high temperature water: Influence of water chemistry and mass transfer, Proc. Corrosion, 1988.