

配管要素の組み合わせにより発生する 旋回流の物質移動係数評価

Evaluation of mass transfer coefficient under swirl flow
generated by the combination of pipe elements

| | | | |
|---------|-------|------------------|------------|
| 大阪大学 | 鈴木 翔太 | Shota Suzuki | Non Member |
| 大阪大学 | 中村 隆夫 | Takao Nakamura | Member |
| 電力中央研究所 | 米田 公俊 | Kimitoshi Yoneda | Non Member |

Flow accelerated corrosion (FAC) is the major pipe wall thinning phenomena in power plants. The management of pipe wall thinning has been carried out to pipe elements such as elbow, orifice, etc. of the piping system in power plants. In piping system, it is known that several pipe elements which are connected in series may generate swirl flow. Therefore the arrangement of pipe elements is considered to affect thinning phenomena seriously. So the behavior of this swirl flow is one of the major research targets to improve the accuracy of simulation codes. In Mihama Unit3 pipe failure accident in 2004, it was pointed out the swirl flow caused by the piping layout might influence the thinning rate behind orifice. This paper focuses on the conditions and parameters that affect the generation of swirl flow and analyzes the effect of parameters in mass transfer coefficient behind pipe elements. The results of this research will reflect to the evaluation of fluid-dynamic factor of FAC taking account of swirl flow.

Keywords: flow accelerated corrosion, mass transfer coefficient, swirl flow, combination of pipe elements

1. 序論

火力・原子力発電所の高経年化対策の一つとして配管減肉管理が掲げられている。配管減肉の主要な原因は流れ加速型腐食によるものである。美浜原子力発電所三号機における配管破断事故も流れ加速型腐食により発生したと考えられている。事故発生時、二次系配管の同じ系統のA系統・B系統に存在するオリフィス下流部において、減肉傾向に大きな差が発生していた。調査の結果、この原因はA系統とB系統で配管レイアウトが異なるため、旋回流による影響を受けてオリフィス下流部の偏流が異なる分布を示し、壁面近傍での流れが乱れて腐食が促進されたためであると推定されている^[1]。

そこで本研究では、旋回流の影響の定量評価に向けた検討をおこなった。酸化物や溶解物の輸送に関する物質移動係数に着目し、旋回流が発生する条件で配管の要素の組み合わせ(エルボ-エルボ体系、エルボ-分岐体系)、配管要素間の距離やエルボの曲率半径を変更し、下流部に発生する旋回流の壁面近傍における物質移動係数をそれぞれ計算した。ここで得た物質移動係数と直管部の比を

取ることで形状係数を求め、配管レイアウトによって生じる旋回流が減肉に与える影響を評価することとした^[2]。

2. 記号説明

| |
|-------------------------|
| A : 乱流感度係数 |
| D : 直径 |
| D_f : 拡散係数 |
| f : 壁面摩擦係数 |
| K : 物質移動係数 |
| K_c : 偏流発生部における物質移動係数 |
| K' : 直管部における物質移動係数 |
| R : 曲率半径 |
| Re : レイノルズ数 |
| Sc : シュミット数 |
| Sh : シャーウッド数 |
| T : 形状係数 |
| U : 流速 |
| U_f : 摩擦速度 |
| U_w : 実効摩擦速度 |
| U_m : 平均流速 |
| u' : 乱流速度 |
| y^+ : 無次元距離 |
| ν : 動粘性係数 |
| ρ : 密度 |

連絡先: 鈴木翔太
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2番1号
大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー専攻
E-mail:s-suzuki@ne.sec.eng.osaka-u.co.jp

3. 旋回流の評価手法

流れ加速型腐食は流れが乱れることにより発生し、様々な因子の影響が重なり合う現象である^[3]。今回の研究では配管の壁面近傍における酸化物や溶解物の輸送による物質移動について取り上げた。壁面近傍の流動特性を無次元化する場合に使用される摩擦速度に着目し、流体力学因子から物質移動係数を算出した。また物質移動係数を偏流発生部位と直管の比を取り、形状係数とした。この形状係数から旋回流の配管レイアウトによる影響を評価した。

最初に物質移動係数の算出方法について述べる。壁面摩擦係数と摩擦速度との関係および、Chilton-Colburnの物質移動アナロジーを元にした壁面摩擦係数とシュミット数、シャーウッド数、レイノルズ数との関係は式(1)のように表わされる。

$$\frac{f}{2} = \frac{\rho U_\tau^2}{\rho U_m^2} = \left(\frac{U_\tau}{U_m} \right)^2 = \frac{Sh}{\text{Re} \times \text{Sc}^{\frac{1}{3}}} \dots \dots (1)$$

次に、直管での流速分布が1/7乗則に従うと仮定し、平均速度 U_m と摩擦速度の関係を導出し、式(2)とした。ここで N は最大流速と平均流速の比を示し、 C は定数である。

$$U_m = N C U_\tau \left(\frac{0.5 U_\tau D}{\nu} \right)^{\frac{1}{7}} \propto U_\tau^{(1+\frac{1}{7})} \dots \dots (2)$$

また、物質移動係数は式(3)として表される。

$$k = Sh \frac{D_f}{D} \dots \dots (3)$$

式(1)から式(3)までを用いることにより、物質移動係数はシャーウッド数と比例関係にあることが示される。またシャーウッド数は摩擦速度と平均流速の比の二乗に比例しているため式(4)となり、物質移動係数を表すことが出来る。

$$k \propto Sh \propto \left(\frac{U_\tau}{U_m} \right)^2 \times \text{Re} \propto U_\tau^{(1-\frac{1}{7})} \dots \dots (4)$$

更に、式(5)で示す通り直管部と偏流発生部位の物質移動係数の比を取ることで、偏流発生部位の減肉を定量的に評価する形状係数として定義した。

$$T = \frac{k_c}{k'} = \left(\frac{U_{\tau e}}{U_\tau} \right)^{(1-\frac{1}{7})} \dots \dots (5)$$

しかし摩擦速度を用いた式(6)の場合、偏流や剥離領域に対する乱流の効果が考慮されていない。そこで、局所的な物質移動を評価するために、乱流エネルギーを考慮に入れた実効摩擦速度が式(7)として考案された^[4]。

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\nu \left| \frac{dU}{dy} \right|_{wall}} \dots \dots (6)$$

$$U_{\tau e} = \sqrt{\nu \left| \frac{d(U + Au')}{dy} \right|_{wall}} \dots \dots (7)$$

式(7)で表される乱流感度係数は、今回は暫定的に1として扱った。

次章に示す流動の数値解析結果としては粘性底層である壁面第一層の値を用いる。粘性底層では流速と同様に乱流速度が壁面距離に比例していると考えられるため、壁面第一層で壁面に平行な流速 dU 、 du' 、 dy を求め、式(7)の実効摩擦速度を用いることで物質移動係数を算出する。これと直管部分の値との比を取ることで偏流発生部位における形状係数を求めて、流れ加速型腐食の影響を評価した。

4. 配管要素による旋回流の評価

4.1 数値解析手法

配管体系における旋回流に対し、汎用流体解析プログラム STAR-CCM+[®]5.06 を用いて数値解析を行った。STAR-CCM+は有限体積法にて離散化し、対流項に対しては二次精度風上差分の差分化を行った。連続の式、ナビエーストックス方程式、乱流エネルギー k の輸送方程式、 k の散逸率 ϵ の輸送方程式をそれぞれ解き、乱流モデルとして、Realizable k - ϵ 2層モデルを用いた。

4.2 体系とメッシュの区切り方

旋回流が発生すると考えられる体系として、ねじれの位置にある2つの連続する配管要素を考える。計算体系の一例を Fig.1 に示す。流入口から10Dの距離を取り、最初の配管要素であるエルボを設けた。最初の配管要素から距離を取り、ねじれの位置方向にエルボもしくは分岐を配置した。そして二つ目の配管要素から25D離れた位置に流出口を圧力境界として設けた。

この時に設定した計算条件と変化させたパラメータを Table 1、Table 2 に示す。配管内部を通る流体は水単相流、配管径は0.5 m、流体温度は423K、圧力は1MPa、壁面は断熱およびノンスリップ条件として計算を行った。流入

条件は一樣流速とし、流速はそれぞれ2,4,6(m/s)、エルボの曲率半径(R/D)をそれぞれ1,2,3として設定し、配管要素間の距離はエルボ-エルボの体系ではそれぞれ0D,2D,4D、エルボ-分岐の体系ではそれぞれ1D,3D,5Dとした。エルボと分岐組み合わせに対し、それぞれ流速、曲率半径、配管要素間距離をパラメータとして振って、全54ケースについて解析した。

Table1 Computational conditions

| | |
|-----------------|--------------------------------------|
| Diameter(m) | 0.5 |
| Flow | single phase flow |
| Temperature(K) | 423 |
| Atmosphere(Mpa) | 1 |
| Inlet | uniform velocity |
| Outlet | pressure boundary |
| Wall Surface | heat insulation nonslip condition |

Table2 Variable parameters

| | |
|-------------------------|----------|
| Velocity(m/s) | 2,4,6 |
| Distance(elbow,elbow) | 0D,2D,4D |
| Distance(elbow,eT-tube) | 1D,3D,5D |
| Curvature radius | 1D,2D,3D |

体系全体におけるメッシュ分割数の合計は2百万から3百万である。今回の解析では、壁面近傍での物質移動のやりとりが重要であるために壁面の第一層を細かく設定する必要がある。第3節に述べた様に、実効摩擦速度を評価する位置は、流速および乱流速度が壁面からの距離と比例関係にある状態、すなわち粘性底層でなければならない。そのため、壁面近傍に対して無次元高さ $y^+ < 1$ となるような範囲に第一層目を設けた。

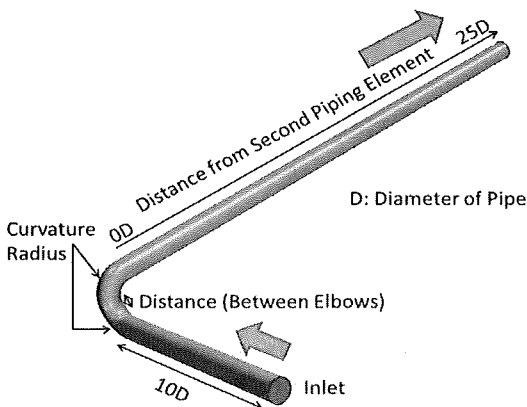


Fig. 1 Example of Piping Layout

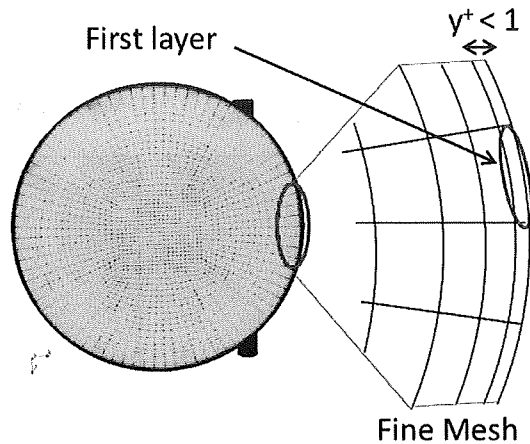


Fig. 2 Calculation mesh in cross section of piping

5. 旋回流の解析結果

5.1. 配管要素の組み合わせによる旋回流の発生

解析結果の一例を Fig.3 に示す。解析条件が曲率半径1D、流速4m/s、配管要素間距離0Dの時の配管要素下流部における流速分布を示す。この図から流速の低い部分である緑色の箇所が旋回していることが確認できる。同様のことが今回解析した全54ケースについて確認された。

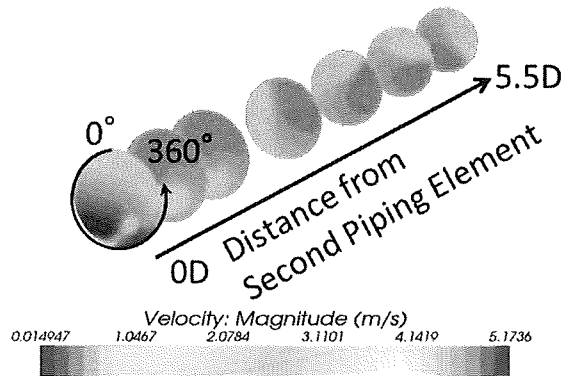


Fig.3 Distribution of Velocity

Fig.4 に配管要素下流部における壁面第一層での流速、乱流エネルギー、形状係数の分布を示す。この図からも壁面近傍において旋回流が発生していることが確認された。いずれの値も同様の分布になっている。このため、流速または乱流エネルギーの分布を求めることにより、それぞれの値の傾向を把握することができる。また、旋回流は25Dまで発生していることが確認できた。このことから、旋回流は一度発生した場合には長い距離にわたり持続する可能性があり、事故を起こした美浜三号機の

配管体系において旋回流が残って影響を与えた可能性が示された。

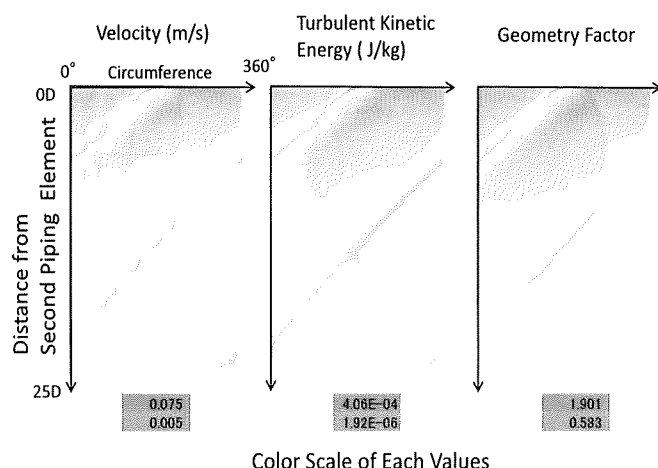


Figure 4 Distributions of velocity, turbulent kinetic energy and geometry factor

5.2 配管要素間距離と曲率半径による影響 エルボ-エルボ体系

配管のレイアウトや流速を変更したことによる影響を確認するため、連続する配管要素の組み合わせをエルボのみや分岐管のみの場合と比較することにより、発生した旋回流による下流部への影響を分析した。Fig.5 に、エルボ-エルボ体系において、エルボの曲率半径を 1D、流速を 6m/s に設定し、配管要素間距離を変更した時の旋回流による形状係数への影響を示す。

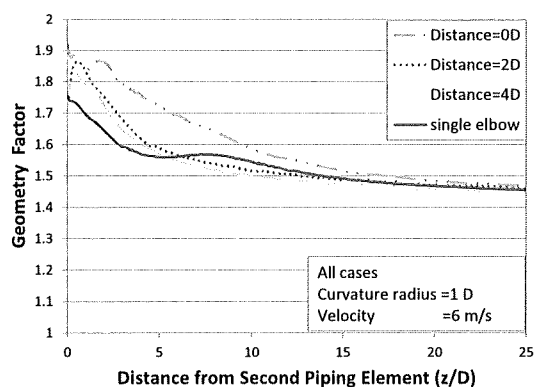


Fig.5 Effect of distance between elbows

この場合、下流部にいくにつれて形状係数はそれぞれのケースで一定の値へと収束していった。収束値はエルボ単体の場合と同様の値であり旋回流による差は現れなかった。また、配管要素間距離による影響は 0D の時に顕著に現れ、2D と 4D においては、有意な影響が見られな

かった。しかし、エルボ単体よりは高い値を示しており、同様の傾向は曲率半径を変更した時にも確認された。曲率半径の場合は 1D、2D、3D の順で下流部上端にて高い値を示した。

5.3 配管要素間距離と曲率半径による影響 エルボ-分岐体系

Fig.6 にエルボ-分岐体系において配管要素間距離を変化させた場合の形状係数への影響を示す。エルボ-エルボ体系と異なり、エルボ-分岐体系では配管要素間距離の影響は表れなかった。同様の傾向は曲率半径を変化させた場合にも見られた。分岐管下流部では旋回流の影響を受けていないことが明らかとなった。

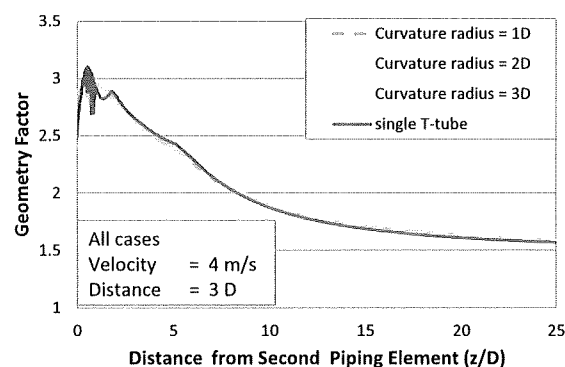


Fig.6 Effect of distance between elbow and T-tube

5.4 流速による影響

流速による影響はエルボ-エルボ体系とエルボ分岐体系では同じ傾向を示す結果となった。ここでは代表としてエルボ-エルボ体系における配管要素間距離 2D、曲率半径 2D とし、流速を変化させた場合の影響を Fig.7 に示す。

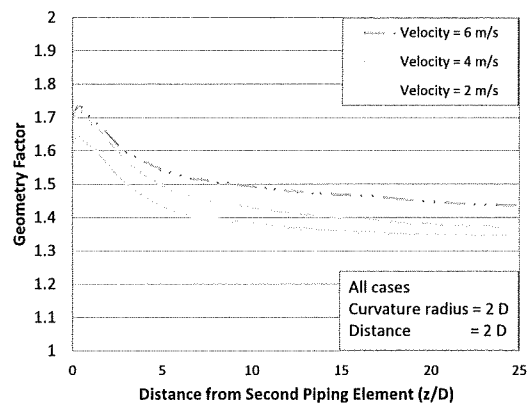


Fig.7 Effect of flow velocity

いずれのケースにおいても、下流端で収束する値が流速により異なる結果を示した。また、下流部上端部にお

いて、流速 6m/s と 4m/s の値は同等の値を示した。このことから、下流部上端で現れる形状係数には上限値が存在する可能性が示された。

5.5 解析結果の考察

これまでの比較結果を考察し、以下の4点にまとめた。

- 下流端での形状係数の収束値が流速によって異なることが、Fig.7で示された。この理由として、物質移動係数の比を直管部と偏流発生部から導出する際に実効摩擦速度における乱流速度の効果の取り扱い方が異なることが考えられる。
- エルボ-分岐体系では、流速による影響を受ける一方で、Fig.6に示すように配管要素間距離による影響はほとんど受けていない。曲率半径による影響についても同じことが起きており、この理由として、エルボ-分岐体系では分岐管への流入時の偏流分布が影響しないことが考えられる。
- 直管部と偏流発生部の物質移動係数の比が1に収束しないことが示されている。この理由として、下流部に広い範囲で偏流が残り続けることが考えられる。
- 10D 以降の下流部でも有意な減衰を確認された。Kastner の評価手法では 10D で十分に減衰しており、今後検討が必要である^[5]。またエルボ-エルボ体系とエルボ単体の場合を比較すると、最終的に収束する値では旋回流の影響はないと考えられるため、美浜3号機の配管系では、オリフィスと組み合わせることによって旋回流の影響を受けたと考えられる。

6. 相関式の導入

今回得られた解析結果を元に、組み合わせた配管要素と配管要素からの距離によって、その位置での形状係数を与える相関式を検討した。エルボ-分岐体系では上流側の配管要素による影響をほとんど受けていないため、エルボ-エルボ体系について、発生した旋回流の影響を相関式にまとめ、それぞれのパラメータの影響について評価した。

最初に、下流部で発生した形状係数の最大値を配管レイアウトの条件(曲率半径、配管要素間距離)、流速に対して二次式による回帰曲線により相関式を算出した。

続いて、同様に下流端における収束値に対しても同様の計算を行い、距離による減衰を考慮した相関式を算出した。

6.1 下流部最大値と収束値の予測

配管要素下流部における最大値の予測精度をFig.8に示す。この結果から、相関式の精度が良いことが示された。Table 4に、二次関数の近似を行った際の各項の係数をまとめ、それぞれのT検定値を示した。二次関数を用いた理由は、曲率半径が大きくなると配管の形状が緩やかになることで、形状係数への影響が小さくなると考えたためである。この表から曲率半径による影響が大きく、配管要素間距離による影響は小さいことが分かる。Fig.9では、一例として曲率半径による影響の大きさを定量評価した。ここで示されるようにエルボ単体の場合の曲率半径の変化の影響は、連続する配管要素の場合と同じ傾向を示している。流速の場合にも同様の傾向が確認された。この理由は連続する配管要素の組み合わせによる形状係数の増加によると考えられ、旋回流による影響は確認できなかった。

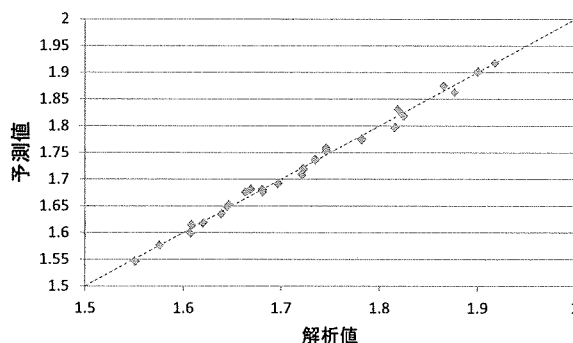


Fig.8 The accuracy of geometry factor estimation (Maximum value in downstream)

Table 4 Coefficient value and T-verification value

| 説明変数 | 各項係数 | T検定値 |
|-------|-----------|-----------|
| 定数項 | 1.94E+00 | 7.77E+01 |
| V1 | -2.74E-01 | -1.55E+01 |
| V2 | -1.47E-02 | -2.49E+00 |
| V3 | 7.31E-02 | 8.26E+00 |
| V1*V1 | 3.82E-02 | 9.35E+00 |
| V1*V2 | 2.44E-03 | 1.69E+00 |
| V1*V3 | 2.72E-03 | 1.88E+00 |
| V2*V2 | -8.28E-04 | -8.12E-01 |
| V2*V3 | -1.27E-03 | -1.77E+00 |
| V3*V3 | -6.74E-03 | -6.61E+00 |

| | |
|----|---------|
| V1 | 曲率半径 |
| V2 | 配管要素間距離 |
| V3 | 流速 |

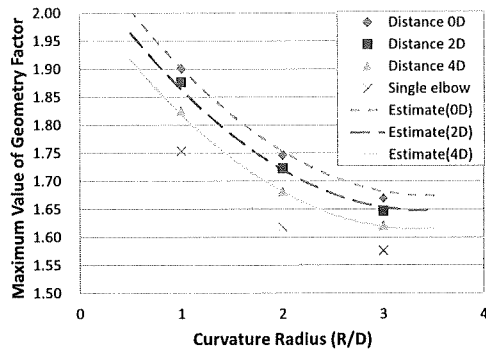


Fig.9 Influence of curvature radius and distance

6.2 配管要素からの距離による減衰の評価

配管下流端での形状係数の収束値についても前章と同様の手順で予測を行った。

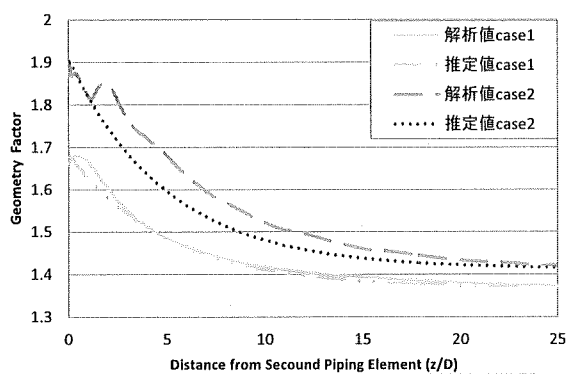
下流端の値に収束させるように切片を与え、かつ配管要素の出口で最大値を持つよう下記の式の形に表した。

$$K = (A - B) \exp(-0.2 \times z) + B$$

A : 下流部における最大 値の予測値

B : 下流端における収束 値の予測値

ここで得られた減衰傾向は、Kastner が提案した減衰傾向と同様の式で考えた。その結果、距離に依存する指数の係数もほぼ同程度のものとなった。Fig.10 に関連式から得られた値と解析値の比較を示す。



Case1(曲率半径 2D、配管要素間距離 2D、流速 4m/s)
Case2(曲率半径 1D、配管要素間距離 0D、流速 4m/s)

Fig.10 Comparison between analytical results and estimation value

Fig.10 に示すように曲率半径 1D かつ配管要素間距離 0D 時の 3 ケースにおいて大きな差が見られた。その他のケースについての予測は概ね一致した。Case2 の場合においては一時的に増加する部分が見られ、その影響が考慮できていない。しかしながら、今回の解析結果は Kastner

の減衰傾向と良く一致していることから旋回流の減衰は通常の配管要素の減衰と変わらないと考えられる。しかし、曲率半径が短く配管要素間距離がない流れの変化が激しいケースにおいては異なる傾向を示している。

7. 結論

- 連続する配管要素をねじれの位置に設置することにより、旋回流が発生することが確認された。
- エルボ-エルボ体系においては連続する配管要素の影響が見られたが、エルボ-分岐体系では連続する配管要素の影響は見られなかった。
- 流速を変化させることで、下流端における形状係数の収束値は異なる値となった。この時得られた収束値は 1 に収束することはなく、偏流が長く続くことが確認された。
- 下流部における形状係数の最大値について相関式に取りまとめた。この結果、曲率半径が旋回流による形状係数の変化に大きな影響を与えることがわかった。しかし、エルボの単体と比べ旋回流による形状係数に与える効果は少なく、曲率半径が短く、配管要素間距離が短い場合のみ旋回流の効果を考える必要があることが示された。

参考文献

- [1] Nuclear and Industrial Safety Agency, Draft report of Secondary pipe failure accident(Flow analyses) in Mihama Unit 3, Dec. 13, 2005, in Japanese
- [2] S. Suzuki, T. Nakamura “Evaluation of mass transfer coefficient under swirl flow generated by the combination of pipe elements” PVP-2012, Toronto, Canada, PVP2012-78108
- [3] S. Uchida, et al. “Evaluation Methods for Corrosion Damage of Components in Cooling Systems of Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics (II), J. Nuclear Science and Technology, Vol. 45, No. 12 (2008) 1275-1286
- [4] K. Yoneda, R. Morita “Evaluation of Hydraulic Factors Affecting Flow Accelerated Corrosion”, NURETH-13, N13P1272 (2009)
- [5] W. Kastner, M. Erve, N. Henzel and B. Stellwag “Calculation Code for Erosion Corrosion Induced Wall Thinning in Piping Systems” Nuclear Engineering and Design 119(1990)431-438