



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)

Investigation on Pipe-wall Thinning by Flow-accelerated Corrosion
(Mass Transfer Phenomenon by Combined Effect of Swirling Flow and Orifice Bias)

新潟大学	高野 剛	Tsuyoshi TAKANO	Non-Member
新潟大学	山縣 貴幸	Takayuki YAMAGATA	Member
新潟大学	伊藤 嘉人	Yoshito ITO	Non-Member
新潟大学	藤澤 延行	Nobuyuki FUJISAWA	Member

In this paper, pipe-wall thinning phenomenon behind an orifice in a circular pipe is studied by measuring the mass transfer coefficient along the pipe wall by naphthalene sublimation method. An attention is placed on the asymmetrical pipe-wall thinning phenomenon behind an orifice under the influence of swirling flow and allowable orifice bias. The present measurement indicates that the mass transfer coefficient becomes asymmetric about the pipe axis behind the orifice in certain combinations of swirling flow and orifice bias. It is found that enhanced mass transfer coefficient is observed on the positive bias side of the orifice (shorter orifice height) and the reduction is found on the opposite side. This phenomenon is consistent with the observation of flow-field measurement behind the orifice by PIV.

Keywords: Flow accelerated corrosion, Pipe-wall thinning, Mass transfer, Orifice, Swirling flow, Nuclear power generation

1. 緒言

原子力発電プラントの各種配管における配管減肉量の高精度予測は、高経年化プラントの長寿命化のために欠くことのできない重要な技術である。このような配管減肉の発生要因の一つとして、管内流による流動加速腐食が重要であると考えられている。しかしながら、流動加速腐食の発生メカニズムについては、配管レイアウトの影響もあり、十分に理解されているとは言い難い [1, 2]。

流動加速腐食による配管減肉は、オリフィス背後の流れ場に見られるように、実機配管の中でも乱流強度の大きい部位でしばしば発生する。この現象は、実機配管（炭素鋼管あるいはステンレス鋼管）に含まれる鉄イオンが作動流体中に溶出する乱流物質輸送現象と考えられているが、どのようなメカニズムで乱流によって減肉が促進されるかについては明らかにされていない。一方、流動加速腐食に関する過去の研究によると、オリフィス背後の速度場についての計測結果[3]と

配管減肉量の直接計測結果[4, 5]はわずかに報告されている。しかしながら、オリフィス背後の物質移動係数分布を直接計測した研究結果[6]は極めて少ない。

著者ら[7-9]は、先に、オリフィス背後の速度場を対象とした PIV 計測実験を行い、オリフィス背後の流れ場に及ぼす旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果について実験的に検討した。実験結果[9]によると、大きな旋回流強度では、実機配管の外径許容誤差 ($\pm 0.8\%$) よりわずかに小さいオリフィスの偏心 ($\pm 0.7\%$) においても、オリフィス下流側の流れに大きな非軸対称性が発生することが分かった。そのような非軸対称な流れ場は、オリフィス背後において減肉分布に偏りを引き起こす可能性があるため注意を払う必要がある。このことは、一見同心円状に見えるオリフィス背後の配管で、配管径の許容誤差内であっても僅かな偏心があれば、上流側の流動状況に応じて偏った減肉分布が発生する可能性があることを示唆する。しかしながら、この結果はあくまでも速度場に対する知見であり、流動加速腐食による配管減肉に直接関係する物質移動係数分布の評価による検証までは至っていない。

以上のことから、本研究では、旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果によって発生した偏流が、オリフィス背後の物質輸送現象にどのように影響するかについて、

ナフタリン昇華法を用いて物質移動係数分布を直接計測することで検討することを目的とする。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

Fig.1は、本実験に用いた風洞実験装置の概略を示す。実験装置は、送風機、スワラ、助走配管とオリフィス部を含む測定部からなる。なお、作動流体は空気である。風量はオリフィスから十分下流に設けられた流量計で読み取り、送風機回転数をインバータにより調整することで、一定風量の実験を行った。本実験のレイノルズ数は $Re (= UD/\nu) = 1.9 \times 10^4$ であり、既報[9]の速度場計測実験と同一レイノルズ数である。ここに、 U : 断面平均流速、 ν : 動粘度であり、断面平均流速は $U = 5.1 \text{ m/s}$ である。整流部の下流側には旋回流を発生させるためのスワラを取り付け、その下流側には、長さ1.1 mの助走円管、オリフィス部を有する測定部、そして下流側円管が取り付けられている。ただし、オリフィスならびに測定部円管はアルミニウム製とし、機械加工によって十分な真円度の配管構造とした。なお、測定部および上流側、下流側円管の内径はいずれも56 mmである。

本実験の旋回流は、助走配管の上流側に設けたスワラで発生させた。スワラは旋回流を再現するための装置であるが、その構造は、既報[9]の水流実験と同様に、アルミニウム製の直線羽根6枚を周方向に一定角度傾けて固定した構造である。本実験では、羽根角度を主流に対して 15° と 30° 傾けたスワラ2種を使用した。

本実験で使用したオリフィスは、実機配管[10]を模して絞り比0.6とした。ここでは、オリフィス偏心の影響を評価するため、オリフィスを配管に対して上下方向に $\pm 0.4 \text{ mm}$ 移動可能な構造とすることで、偏心なし

(Without bias)、正偏心 (Positive bias)、負偏心 (Negative bias) の3条件を実現した (Fig.1 参照)。ただし、このときのオリフィス偏心量は、日本工業規格における配管外径の許容誤差 $\pm 0.8\%$ (JIS 3456) よりわずかに小さい $\pm 0.7\%$ である。

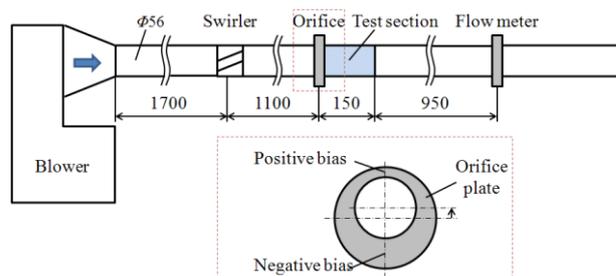


Fig. 1 Experimental apparatus for mass-transfer measurement (Unit in mm)

2.2 物質移動係数の評価

オリフィス背後の物質移動係数の評価には、ナフタリン昇華法[11]を用いた。この方法は、ナフタリンを空气中に晒したときの昇華量を計測することで、物質移動係数を評価する方法である。

Fig.2は、物質移動係数の計測装置の概略である。オリフィス背後の配管を半割り構造とし、その内表面に設けた下流方向の溝にナフタリンを流し込むことでオリフィス背後の物質移動係数の計測を行った。ただし、この溝の大きさは、幅10 mm、深さ2 mm、長さ140 mmである。ただし、この溝は半割り構造の円管の中央に設けた。実験では、この溝を装置の上下位置に配置することで、オリフィス背後の上下2断面の物質移動係数分布を計測した。なお、この位置は、オリフィス偏心の影響を最も強く受ける位置と考えられる[9]。

実験に用いたナフタリンは常温では固体であるが、 80°C 以上に加熱すると融解するため、溶融したナフタリンを円管の溝部に沿って給湯して成型した。ただし、円管も同時にヒーターで加熱することで、ナフタリンの給湯温度を均一化した。さらに、装置をゆっくりと自然冷却することでナフタリンを凝固させた。その後、固体化したナフタリン表面をエメリー紙によって十分滑らかに仕上げた。ただし、測定部は半割り構造とすることで、ナフタリン昇華量の計測を容易にした。ここに、ナフタリン表面の位置計測には、共焦点式レーザー変位計を用いた。この変位計はステッピングモータ駆動の自動トラバース装置に取り付け、溝の中央位置に沿って下流方向に移動することで、実験前後のナフタリン表面の位置変化を検出し、下流方向の物質輸送係数分布を算出した。焦点式レーザー変位計を用いた理由は、半透明なナフタリン表面の微細な形状の計測を高い精度で行うためである。なお、その計測精度は $\pm 0.1 \mu\text{m}$ である。実験時間は30分程度に

設定したが、そのときに得られる最大減肉は 50-60 μm であった。ナフタリン昇華法による物質移動係数 h は式 (1) で求めた。

$$h = \rho_s / \rho_v \cdot (\delta z / \delta t) \quad (1)$$

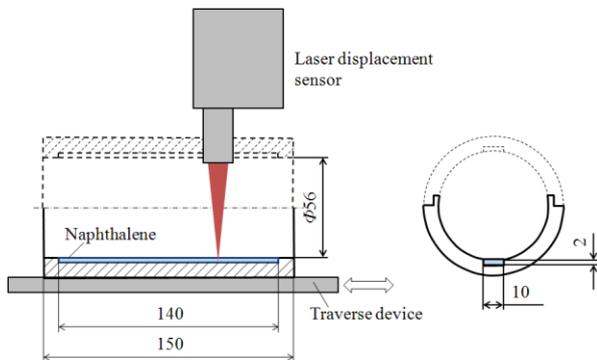


Fig. 2 Details of test section (Unit in mm)

ここに、 $\delta z / \delta t$: 単位時間当たりの昇華量、 ρ_s : 固体のナフタリン密度、 ρ_v : ナフタリンの飽和蒸気密度である。本研究では、ナフタリンの飽和蒸気圧は、管壁面温度を熱電対で計測し、Ambrose et al.の実験式[12]から求めた。また、拡散係数は、Goldstein-Chouの実験式[11]から算出し、単位時間当たりの昇華量分布の計測結果から物質移動係数を求め、シャーウッド数 $Sh (=hd/D_i)$ を評価した (D_i : 拡散係数)。また、ナフタリンは管壁では飽和濃度、バルク流中では濃度零を仮定している。なお、本実験のシュミット数 Sc は 2.29 である[11]。

3. 結果および考察

3.1 旋回流強度の計測

スワラによって生成される旋回流の強さは、周方向運動量と管軸方向運動量の比であるスワール数 S で定義される[13]。本実験のスワール数は、オリフィスなしの状態位置 $x/D=1$ に 5 孔ピトー管を挿入し、3 次元速度分布を計測することで評価した。ここに、5 孔ピトー管の校正は、開放型風洞測定部の一様流中において、各孔の圧力と風向風速の関係を計測することでを行った。なお、その校正方法としては、Wright[14]の方法を用いた。本実験結果によると、旋回流のスワール数は羽根角度 15° のスワラでは $S=0.09$ 、 30° のスワラでは $S=0.23$ であった。

3.2 円管の物質移動係数

旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果を実験的に評価する前に、予備実験として、オリフィスなしの直円管を用いた物質移動係数の計測を実施した。Fig. 3 は、円管におけるシャーウッド数 Sh とレイノルズ数 $Re (=UD/\nu)$ の関係である (U : 断面平均速度、 ν : 動粘度)。本実験結果によると、過去の相関式[15]とデータのばらつきの範囲で一致することがわかる。このことは、本実験結果の健全性を示す。なお、この相関式は、円管内乱流における熱伝達の数値計算に基づく結果であるが、熱輸送と物質輸送の相似性を利用して比較に用いた。

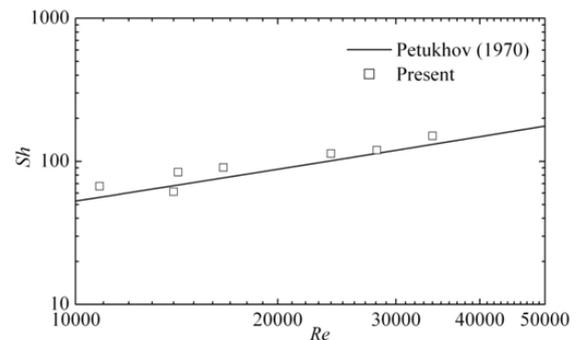


Fig. 3 Variations of Sherwood number in a circular pipe

3.3 オリフィス背後の物質輸送現象

Fig. 4 は、オリフィス背後におけるシャーウッド数の下流方向分布である。横軸はオリフィスからの無次元距離 (x/D) である。ただし、旋回流なしの条件において、オリフィス偏心なし、正偏心、負偏心の場合について実験を行った。ただし、いずれの実験においても、実験はレイノルズ数 $Re = 1.9 \times 10^4$ で行った。本実験結果によると、オリフィス直後のシャーウッド数は小さいが、オリフィス背後の位置 $x/D = 1 \sim 1.5$ で最大値を示し、さらに下流側では緩やかに減少する分布傾向が見られる。

このようなオリフィス背後におけるシャーウッド数の変化は、過去に報告された実機配管減肉分布[10]と定性的に一致する。このことは、配管減肉現象において物質輸送が支配的役割を演じていることを示唆する。また、本実験結果によると、オリフィス背後のシャーウッド数の最大値は 450 程度であるが、これは同一レイノルズ数の円管の結果と比較して 4-5 倍程度物質輸送が増大することを示す。なお、この値は、直円管に対するオリフィスの配管減肉量であるケラー係数 ($= 3.8$) とほぼ一致する[16]。一方、図には、オリフィスが上偏心ならびに下偏心の場合の実験結果も示したが、

これらの結果は、オリフィス偏心なしの結果と計測精度の範囲で一致している。したがって、旋回流なしの条件下では、オリフィス偏心の効果はほとんど現れないことを示唆しており、PIV による速度場計測結果とも定性的に一致する。

3.4 旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果

Fig. 5 (a)、(b) は、旋回流が存在する場合において、オリフィス背後のシャーウッド数分布を計測した結果である。ただし、旋回流強度の小さい場合 ($S=0.09$, Fig. 5 (a)) と大きい場合 ($S=0.23$, Fig. 5 (b)) についての実験結果を示した。

旋回流強度の小さい場合 (Fig. 5 (a)) の結果を見ると、オリフィス背後のシャーウッド数分布は旋回流のない場合と実験誤差の範囲でほぼ一致しており、オリフィス偏心の影響は見られないといえる。

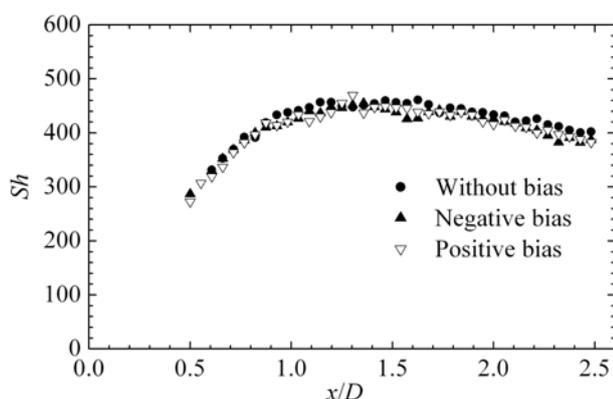
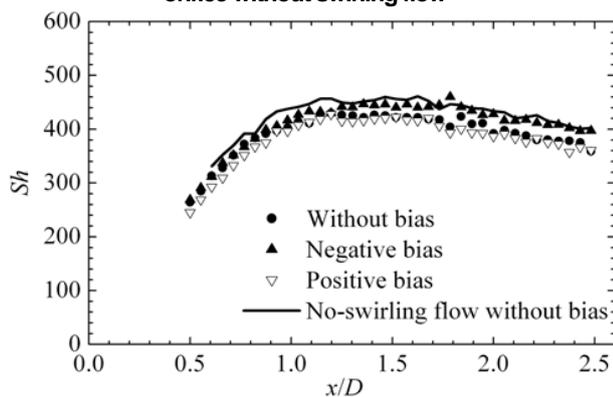
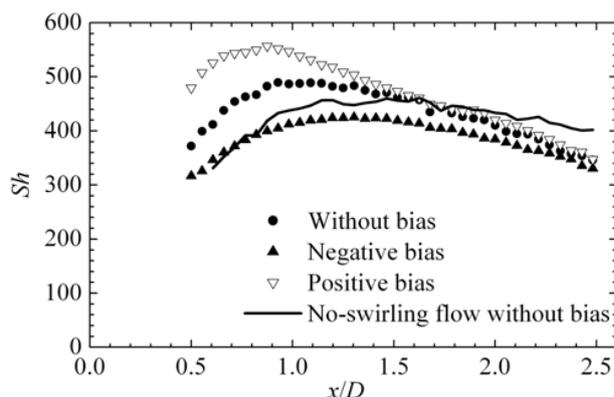


Fig. 4 Distribution of Sherwood number behind an orifice without swirling flow



(a) Weak swirling flow ($S=0.09$)



(b) Strong swirling flow ($S=0.23$)
Fig. 5 Distribution of Sherwood number behind an orifice with swirling flow

一方、旋回流強度の大きい場合の結果 (Fig. 5 (b)) を見ると、オリフィス偏心の影響によって、シャーウッド数分布がかなり大きく変化する様子が認められる。すなわち、正偏心側ではシャーウッド数は増加し、負偏心側では減少する様子が見られる。したがって、オリフィスの偏心によって、オリフィス高さの減少側壁面では物質輸送は増大し、反対に、増大側の壁面では物質輸送が減少することを示唆する。また、シャーウッド数分布形状に着目すると、オリフィス偏心の影響は $x/d=0.5\sim 1.5$ の領域において顕著に認められる。特に、オリフィス高さの減少側壁面では、シャーウッド数のピークは上流側 ($x/d=0.8$ 付近) に移動することが注目される。以上のように、強い旋回流が発生すると、旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果によって、オリフィスの正偏心側とその反対の負偏心側では物質輸送量にかなりの差が生じ、配管内には偏った減肉が発生することになる。

Fig. 5 (a)、(b) には、比較のため、旋回流なし (偏心なし) のシャーウッド数分布 (Fig. 4) を実線で示した。この結果と弱い旋回流 (偏心なし, Fig. 5 (a)) の結果はデータのばらつきの範囲で一致する。しかしながら、強い旋回流 (偏心なし, Fig. 5 (b)) ではオリフィス背後 ($x/D=1$ 付近) でシャーウッド数分布に増大効果が認められる。これは、強い旋回流の発生によって、オリフィス背後のはく離流領域が上流側へ移動し乱流強度が増大するため[8]、物質移動係数分布に同様の变化をもたらしたと考えられる。

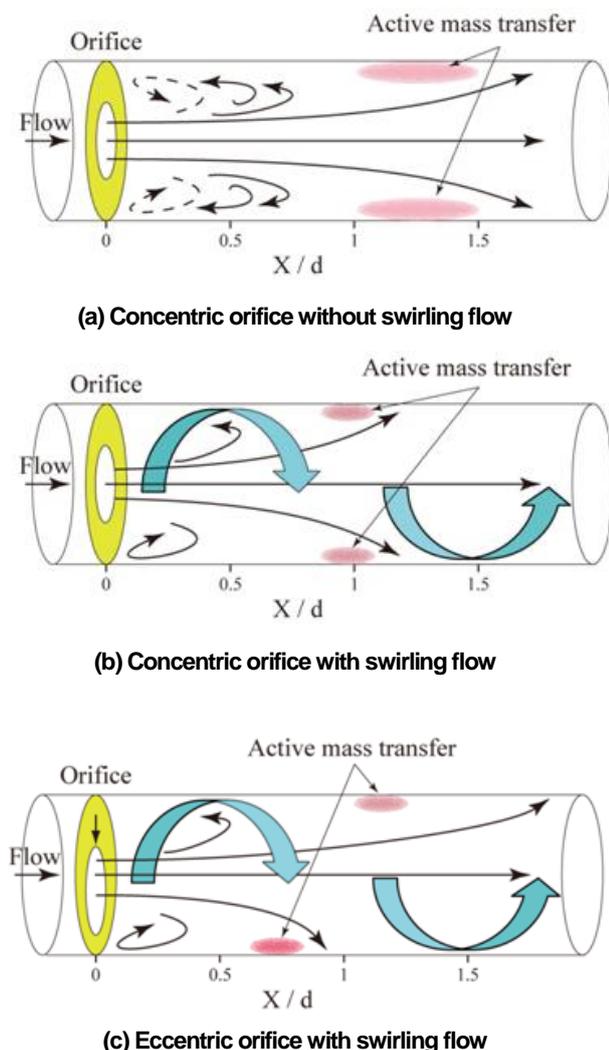


Fig. 6 Schematic illustration of flow and mass transfer behind an orifice with and without swirling flow

3.5 物質輸送現象と流れ場の相関

Fig. 6 (a)、(b)、(c) は、旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果によって発生する流れ場と物質輸送量の変化を模式的に示した結果である。旋回流とオリフィス偏心のいずれも存在しない場合 (Fig. 6 (a)) には、オリフィス背後に軸対称な流れが形成され、シャーウッド数分布は $x/d = 1 \sim 1.5$ 付近で最大となる。この位置は、オリフィス背後の再付着位置 ($x/d = 2 \sim 2.5$) より上流側になる。一方、旋回流が発生すると (Fig. 6 (b))、旋回流の効果によってオリフィス背後のはく離領域は縮小するため、流れ場の軸対称性は保たれたままで再付着点は上流側へ移動する。さらに、この旋回流にオリフィス偏心が加わると (Fig. 6 (c))、旋回流の効果によるはく離領域の縮小効果に加えてオリフィス偏心による効果が重なるため、流れ場に非軸対称性が発生する。すなわち、旋回流の効果によってオリフィスの正偏心

側であるオリフィス高さの減少側に向かう偏流が強く認められる。このとき、偏流の付着側の壁面では物質輸送現象は強まり、その最大となる位置は上流側 ($x/d = 0.8$ 付近) へ移動する。他方、オリフィスの負偏心側の壁面では、偏流は弱められるため再付着位置は下流側へ移動する。このため、上側壁面では物質輸送現象は弱まり、また、その最大となる位置はより下流側寄りに移動する。したがって、オリフィス背後の速度場と物質輸送現象の間には強い相関が認められるといえる。以上のように、オリフィス背後の配管部位では、強い旋回流が予期される場合には、オリフィス偏心との組み合わせ効果によって、偏流が発生するため、一方の壁面側に強い物質輸送現象が発生する可能性があるため、注意を要する。

4. 結言

オリフィス背後における配管減肉現象のメカニズムの解明を目的とし、ナフタリン昇華法を用いた風洞実験によって物質移動係数分布の評価を行った。ここでは、特に、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の変化について考察した。本研究で行った実験条件の範囲では、弱い旋回流 ($S=0.09$) では、オリフィス偏心の影響はあまり顕著に認められないが、強い旋回流 ($S=0.23$) では、わずかなオリフィス偏心によってもオリフィス背後の物質移動係数分布は弱く非対称性を示した。このとき、オリフィスの正偏心側の壁面では物質輸送が増大し、反対側では減少する。このような物質輸送の増大と減少は、PIVによる速度場の計測結果とも定性的に一致しており、旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果によって実機配管内に偏った減肉分布が発生する一つの可能性を示唆する。

謝辞

本研究は、平成 21 年度高経年化事業の一部として実施した。本事業の関係者ならびに東北・北海道クラスターの関係各位に感謝申し上げます。また、実験において協力をいただいた新潟大学工学部学生小俣光君に謝意を表す。

参考文献

- [1] 日本機会学会, 発電用設備規格, 配管減肉管理に関する規格(2005), JSME S CA1-2005, 13-47, 日本機会学会 (2005)
- [2] 日本機会学会, 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(2009), 6-12; 113-117, 日本機会学会 (2009)
- [3] 米田公俊, 森田良, “配管減肉現象に関わる流動特性の解明 (その1), 単相流中のオリフィス下流域の乱流特性,” 電力中央研究所報告, L05007 (2006).
- [4] 中村晶, 村瀬道雄, 歌野原陽一, 長屋行則, “流れ加速型腐食に及ぼす局所的流況の影響, 研究の背景とオリフィス下流の腐食速度の計測,” *INSS Journal*, 15, 78-87 (2008)
- [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, L08016 (2009)
- [6] T. Sydberger, and U. Lotz, “Relation between mass transfer and corrosion in a turbulent pipe flow,” *Journal of Electrochemical Society*, 129[2], 276-283 (1982)
- [7] N. Fujisawa, and H. Yamamoto, “Occurrence of asymmetric flow pattern behind a double orifice in a square pipe,” *J. Visualization*, 12, 93-94 (2009)
- [8] N. Fujisawa, H. Yamamoto, T. Syutoh, and T. Yamagata, “Investigation on flow accelerated corrosion behind an orifice in a duct through simultaneous temperature and velocity measurements using combined two-color LIF and PIV,” *Proc. 8th Int. Symp. PIV*, PIV09-0042 (2009)
- [9] 大久保雅一, 山縣貴幸, 菅野翔, 藤野延行, “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非対称流の発生),” *日本機械学会論文集 (B)*, 77, 386-394 (2011)
- [10] 経済産業省, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会美浜発電所3号機2次系配管破損事故調査委員会,
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/g40906aj.html>
- [11] R.J. Goldstein, and H.H. Cho, “A review of mass transfer measurements using naphthalene sublimation,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, 10, 416-434 (1995)
- [12] D. Ambrose, I.J. Lawrenson, and C.H.S Sparke, “The vapor pressure of naphthalene,” *Journal of Chemical Thermodynamics*, 7, 1173-1176 (1975)
- [13] 青木克己, 中山泰喜, 岩槻光昭和, “旋回流を伴う円筒形燃焼機内流れの研究 (第1報, スワール数に対する流動特性),” *日本機械学会論文集 (B)*, 51, 2759-2766 (1985)
- [14] M.A. Wright, “The evaluation of a simplified form of presentation for 5 hole spherical and hemispherical pitometer calibration data,” *Journal of Physics E, Scientific Instruments*, 3[5], 356-362 (1970)
- [15] B.S. Petukhov, “Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties,” *Advances in Heat Transfer*, 6, 503-564 (1970)
- [16] H. Keller, “Erosionscorrosion an Nassdampfturbien,” *VGB-Kraftwerkstechnik*, 54[5], 292 (1974)

(平成22年12月22日)