

# オリフィス背後の物質輸送現象に及ぼす曲り旋回流の影響 (ステレオ PIV を用いた速度場計測)

Influence of Curved Swirling Flow on Mass Transfer Phenomenon behind an Orifice  
(Velocity Field Measurement by Stereo PIV)

新潟大学	金谷 信明	Nobuaki KANATANI	Non-Member
新潟大学	山縣 貴幸	Takayuki YAMAGATA	Member
新潟大学	藤澤 延行	Nobuyuki FUJISAWA	Member

**Abstract** The velocity field behind an orifice in a circular pipe is studied by PIV measurement under the influence of curved swirling flow to elucidate the asymmetric pipe-wall thinning phenomenon behind an orifice. The experiment is carried out in a closed water tunnel at Reynolds number  $Re = 19,000$ . The stereo PIV measurement of the cross-sectional velocity field in a pipe flow indicates that the flow reattachment occurs on one side of the pipe flow irrespective of the orifice bias. This is due to the influence of the twisted vortex core of the swirling flow through the orifice. This flow pattern is expected to promote the mass transfer rate on one side of the pipe, which is closely related to the higher thinning rate of the pipe wall behind the orifice.

**Keywords:** Flow Accelerated Erosion, Orifice, Pipe-wall Thinning, Mass Transfer, Swirling Flow, Curved Flow, Stereo PIV, Nuclear Power Plant

## 1. 緒言

発電プラントの各種配管における配管減肉の発生メカニズムの解明と高精度予測技術の確立は、プラントの危機管理や安全運転において重要な課題である。配管減肉の発生原因の一つに流動加速腐食がある。これは配管材料の鉄イオンが作動流体中に溶解する拡散現象が流動によって加速される現象であり、一般に物質輸送現象として捉えられている。

流動加速腐食による配管減肉が原因とされる代表的な事例として2004年に起きた美浜原子力発電所の配管破損事故がある。事故後の調査によると、破損した配管ではオリフィス下流に非軸対称な配管減肉が発生し、局所的に配管減肉が進行したため、配管破断に至ったと考えられている[1]。最近の研究によると、このような非軸対称な減肉現象のメカニズムは、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非軸対称流に関係していると考えられている。すなわち、JIS規格内での僅かなオリフィスの偏心（配管外径の $\pm 0.8\%$ ）においても、旋回流を伴う場合には、オリフィス流の不安定現象の発生に伴って非軸対称流となることが知られている[2-4]。しかしながら、実機配管では、オリフィス上流側にエルボなどの曲り部が設置されており、上流側で発生した旋回流は曲りの影響を受けるため、オリフィス背後の流れ場はより複雑な流れの様相を呈することが予期される。

本研究では、上流側で発生した旋回流が曲りを通過した後オリフィス部に至る場合について模型実験によって検討することで、オリフィス背後に見られる非軸対称配管減肉の発生原因について考察する。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 実験装置

実験装置は、ポンプ、整流部、測定部から構成される回流水槽であり、作動流体は水である。Fig. 1は整流部及び測定部の模式図である。整流部の背後に旋回流を発生するためのスワラ、その下流側に曲率半径が管内径の1.5倍であるロングエルボが設置されている。その下流側に10D (D: 管内径)の直管部を介して、オリフィスならびに測定部が接続されている。管内径は $D = 56$  mm、オリフィス絞り比は0.6 (内径33.6 mm)である。

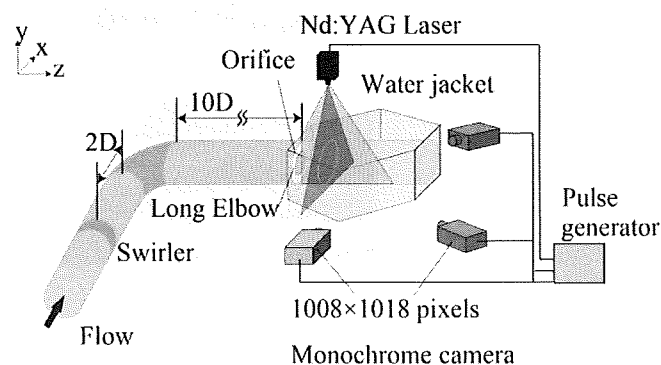


Fig.1 Layout of test section

なお、エルボとオリフィス間の距離は、管内径を基準として美浜原子発電所の実機配管と同様に設定した。ここに、実験レイノルズ数は  $Re = 1.9 \times 10^4$  である。測定部は、アクリル製円管の周囲に水ジャケットを取り付けることで、屈折率の影響を極力小さくした。また、スワローは、主流方向に対して一定角度傾けたステンレス製の直線羽を周方向に6枚固定した構造である。種々の羽根角度のスワローを製作し、測定部における旋回強度を計測した。なお、旋回強度は、以下の式を用いてスワール数により評価した。

$$S_w = \frac{\int_0^R w v_{\theta} r^2 dr}{R \int_0^R w^2 r dr} \quad (1)$$

ただし、 $R$ : 管半径、 $r$ : 管中心からの距離、 $w$ : 管軸方向速度、 $v_{\theta}$ : 周方向速度である。測定の結果、スワローの羽根角度  $45^\circ$  の場合に、旋回流強度は  $S_w = 0.36$  であった。この値は、実機配管の再現実験で得られた旋回流強度 0.3 [3] とほぼ一致する。このため、以下の実験では、羽根角度  $45^\circ$  のスワローを曲り上流に配置して実験を行った。

本実験では、曲りを伴う旋回流とオリフィス偏心の組み合わせ効果を見るため、

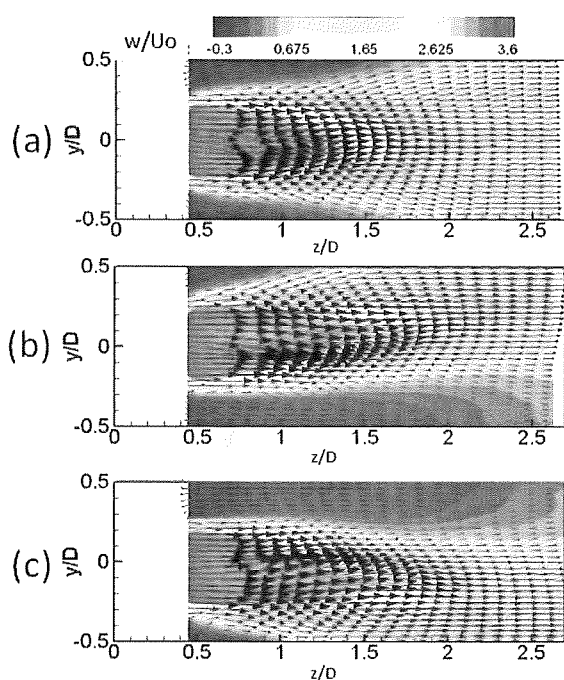


Fig.2 Comparison of streamwise mean velocity fields with a straight pipe: (a) without bias; (b) positive bias; (c) negative bias.

オリフィス中心軸が上下に管直径の  $\pm 0.8\%$  ずれている偏心オリフィスを用いた実験も行った。オリフィス偏心は、高温配管規格 (JIS G3456) で定められている、配管外径の許容誤差  $0.8\%$  により生じる管軸のずれを模擬したものである。

## 2.2 PIV 計測

本実験で用いた PIV システムは、Nd:YAG パルスレーザー (波長  $\lambda = 523 \text{ nm}$ ,  $50 \text{ mJ/pulse}$ )、モノクロ CCD カメラ ( $1008 \times 1018 \text{ pixels}$ ,  $8 \text{ bits}$ )、パルスジェネレータで構成される。流れの可視化には、直径  $40 \mu\text{m}$  のナイロン粒子 (比重 1.02) を適量作動流体である水に加えた。ただし、照明として用いたレーザーシート光の厚さは約  $1 \text{ mm}$  である。粒子の移動量計算のアルゴリズムには、直接相互相関法にサブピクセル解析を組み合わせて用いた。

本実験では、管軸に平行な垂直断面に対して 2 次元 PIV 計測を、管軸に垂直な断面 ( $x$ - $y$  断面) に対してステレオ PIV 計測を適用した。ステレオ PIV 計測では、Fig. 1 に示すように、2 台のカメラを管軸に対してそれぞれ  $45^\circ$  傾斜させて計測を行った。ただし、カメラレンズはシャインプルーフ条件を満足するように配置した。また、レーザーシート光は、管上方から照射した。

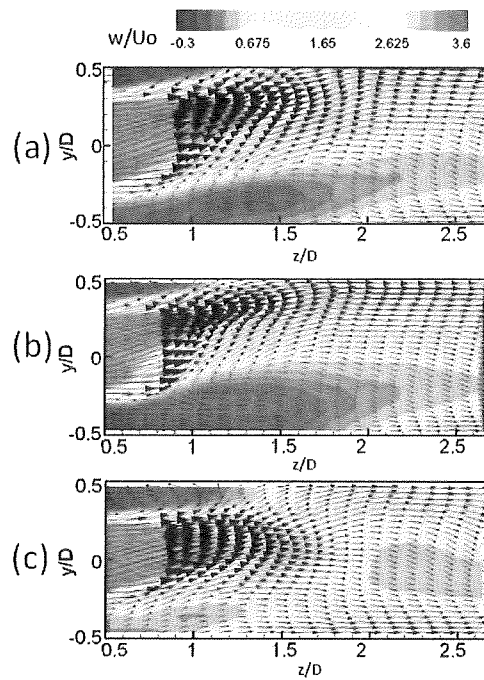


Fig.3 Comparison of streamwise mean velocity fields with a curved pipe: (a) without bias; (b) positive bias; (c) negative bias.

一方、本ステレオ PIV 計測においては、校正板を測定部下流側から挿入することで、2台のカメラの校正を行った。ここに、校正板は、5 mm 間隔で正方格子を描いたものである。この格子板は精度 10  $\mu\text{m}$  のトラバース装置を用いて 1 mm ごとに 5 断面移動し、撮影した格子点画像を 3 次スプライン近似することで、位置座標の校正を行った。

### 3. 実験結果および考察

Fig. 2 は、曲りなし旋回流 ( $S_w=0.36$ ) の条件下におけるオリフィス背後の時間平均速度場の計測結果である。本実験結果ではオリフィスの位置を  $x/D=0.0$  としている。それぞれ、偏心なし(a)、上偏心(b)、下偏心(c)の3条件の結果を示している。ただし、レイノルズ数は、 $Re=1.9 \times 10^4$  である。実験結果によると、オリフィス偏心なしでは、ほぼ上下対称な速度場が形成されているが、オリフィスの上偏心では上側寄りの流れパターンが形成されるのに対し、オリフィスの下偏心では下側寄りの流れ場が見られる。このようなオリフィス偏心による流れパターンの変化は、元来不安定なオリフィス背後の流れ場が僅かなオリフィス偏心によって制御されることを示唆する。

Fig. 3 は、曲りを伴う旋回流 ( $S_w=0.36$ ) がオリフィスに流入した場合の管軸に平行な垂直断面の速度場を 2 次元 PIV を用いて計測した結果である。実験結果は、Fig. 2 と同様に 3 種のオリフィス条件 (偏心なし(a)、上偏心(b)、下偏心(c)) について示している。オリフィス偏心無し(a)の場合において、上側に偏った流れが生じていることが確認される。このような速度場の上側への偏りは、オリフィス偏心の上下に関わらず認められるが、上偏心(b)ではより強い上偏心が現われること、下偏心(c)では速度場の上偏心の程度が弱められる。したがって、曲りを伴う旋回流の場合には、旋回流の効果によって測定部には上側向きの偏流が発生すること、ならびに、オリフィス偏心を伴う場合には、これにオリフィス偏心効果が重畳した速度場が形成されることがわかる。また、直管の旋回流ではオリフィス背後においても管中心に渦軸が存在するが、曲がりを伴う旋回流では渦軸は大きく変動し、管壁面に沿ってうねることがわかる。以上のことから、曲がりを伴う旋回流では、オリフィス背後で非軸対称な流れ構造が発生するため、非軸対称な物質輸送現象である配管減肉が発生することが予期される。

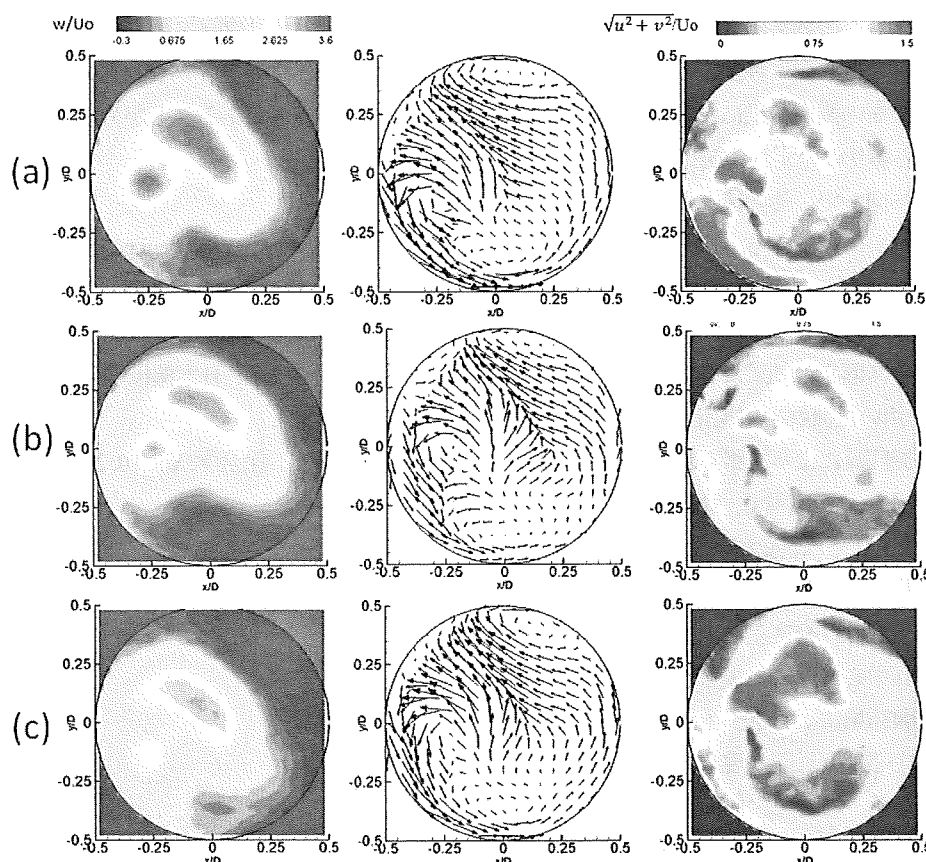


Fig.4 Comparison of mean velocity fields: Left: streamwise velocity; middle: velocity vectors; right: velocity magnitude in-plane components: (a) without bias; (b) positive bias; (c) negative bias.

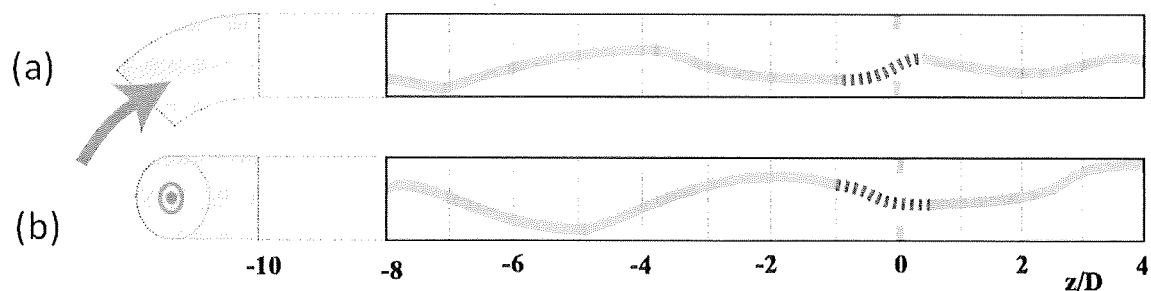


Fig.5 Schematic diagram of the curved swirling flow through an orifice:(a) Top view ;(b) Side view

Fig. 4 は、曲がりを伴う旋回流 ( $S_w=0.32$ ) がオリフィスに流入したときの管断面速度場の計測結果の一例として、オリフィス背後  $x/D=1$  の位置におけるステレオ PIV による速度場計測結果を示した。ただし、オリフィス偏心無し(a)、上偏心(b)、下偏心(c)の3条件における速度場計測の結果である。左から主流方向速度分布、断面内速度ベクトル分布、断面内速度の大きさを示している。主流方向速度分布から、速度が最大となる位置は、管中心から左上方へ移動していることが確認できる。これに対し、オリフィス上偏心(b)では最大速度はやや上方に、またオリフィス下偏心(c)ではやや下方に位置する。したがって、オリフィス偏心の効果によって、管軸方向速度の最大値はオリフィス偏心側に移動することがわかる。一方、断面内速度分布の測定結果によると、オリフィス偏心無し、上下偏心ありのいずれの結果においても、管中心付近から左上方へ向かい、その後左側壁面に沿って下方に流れる二次流れが確認できる。また、これらの速度ベクトルならびに速度大きさの図から、オリフィス偏心の影響が認められる。しかしながら、曲がりを伴う旋回流の影響はオリフィス偏心の効果より大きい。

Fig. 5(a),(b)は、気泡を用いた流れの可視化実験結果に基づいて、曲がりを伴う旋回流によって得られたオリフィス付近の流れの観察結果を、上面図(a)、側面図(b)によって表した結果である。ただし、気泡は曲がり管の上流側に設置した細管から適量供給した。予備的考察によると、旋回流中に供給された気泡は、密度差によって旋回流中では求心力を受け、旋回中心付近に集まることになる。したがって、可視化実験結果によると、上流側曲がりによって発生した旋回流中心は振れ回り現象を示し、オリフィスに至ることがわかる。ここに、側面図によると管軸に対してほど上下対称な流脈線を示すが、上面図では曲がりの影響を強く受け曲がり側に偏った流脈線となる。一方、このような旋回流中心の振れ回り現象は、オリフィス背後でも見られるが、この領域では、強い増速流と

なるため流脈線はオリフィス直後 2D 付近までは直線性を示す。しかしながら、この領域では、Figs.3,4 に示したように再循環領域を含む複雑な流況を呈するため、流脈線に大きな変動が観測された。なお、オリフィス背後の側面図に見られた流脈線の上昇は、PIV 計測結果に見られた速度場とも定性的に一致する。

#### 4. 結言

本研究では、曲がりを伴う旋回流がオリフィスに流入した場合の流れ場の変化を 2 次元ならびにステレオ PIV を用いて実験的に検討した。実験結果によると、曲がりを伴う旋回流はオリフィス背後において偏流を形成すること、この偏流はオリフィス偏心効果より強い 2 次流れ効果を示すため、オリフィス背後の非軸対称減肉により強く寄与する可能性があることが分かった。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省, <http://www.meti.go.jp/committee/materials/g41213aj.html>, 資料 7-1-1, (2004)
- [2] M. Ohkubo et al., J. Vis., Vol. 14, 2011, pp. 15-17.
- [3] 大久保雅一, 他 3 名, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 77, 2011, pp. 386-394.
- [4] 高野剛, 他 3 名, 保全学, Vol. 10, 2011, pp. 30-35.