曲がり円管内に取り付けられた案内羽根周りの流動状態*

富松重行^{*1}, 米内山弥生^{*2}, 浦西和夫^{*3}Study on Flow Condition around a Guide Vane Set
in a Curved Circular PipeShigeyuki TOMIMATSU^{*4}, Yayoi YONAYAMA and Kazuo URANISHI^{*4} Research and Development Center, DMW Corporation,
3-27 Miyoshi-cho, Mishima-shi, Shizuoka, 411-8560 Japan

With respect to vibration problems of a guide vane, this vibration phenomenon seems to be generated by the fluid exciting force, which works on the guide vane in unsteady flow field. Thus, in order to understand the vibration mechanism of the guide vane, it is important to reveal unsteady flow field in the curved pipe with the guide vane. In this study, the difference of flow condition between a curved circular pipe and an elbow pipe fitting was investigated by Computational Fluid Dynamics (CFD) using Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation (RANS). As a result of this study, there is no big difference between both flow conditions. Moreover, unsteady flow field in the curved circular pipe was investigated by Particle Image Velocimetry (PIV) measurements. This experiment was mainly carried out with focusing on unsteady flow field around the trailing edge of the guide vane. The results show that the vortex street is sometimes generated from the trailing edge of the guide vane.

Key Words: Vortex Street, Guide Vane, Curved Pipe, PIV, CFD

1. 緒 言

曲がり円管内に案内羽根を取り付けてはく離や二次流れを抑制すれば、流体損失が低減できることはよく知られている。このような理由から案内羽根入り曲がり円管は、ポンプ吸込部や吐出し部に従来から用いられてきた。しかしながら、近年、ポンプの高効率化、高速・小形化の要求が高くなってきており、従来の設計指針では剛性不足となる場合が生じてきている。例えば、案内羽根入り曲がり管をポンプ吸込部や吐出し部に用いた場合、案内羽根が振動し、場合によっては損傷するといった事例が報告されている。このような振動・損傷現象は流体関連振動の一種で、非定常流れ場に設置された案内羽根に流体励振力が作用して、振動を発生していると考えられる。したがって、これらの振動現象の発生メカニズムを把握するには、案内羽根に振動を励起する非定常流れ場の把握が必要となる。

流体関連振動を引き起こす励振源としてはカルマン

渦が知られており、多くの研究が行われてきた。しかしながら、カルマン渦のような強い励振源が無くても、水車ステーションの後縁から発生する弱い渦が引き金となってベーンに自励振動を引き起こす場合があるということが Miyagawa らによって実験的に明らかにされ、カルマン渦、弱い渦による自励振動、フラッタ、ランダム振動のメカニズムの違いが分類されている^①。

曲がり円管内に取り付けられた案内羽根の振動・損傷事例は、Miyagawa らによって実験的に検証された弱い渦による自励振動が原因であると考えられる。しかしながら、案内羽根が振動するような条件下で、羽根周りの流動状態について定量的に調べた報告はほとんどない。

本研究では、曲がり円管内に取り付けられた案内羽根周りおよび後縁の流れ場について調べている。実験および CFD 解析は、実機立軸ポンプ用の案内羽根付き吐出し曲がり管の 1/9 スケールモデルを用いて行った。ここで、モデル実験は実機と流速一致の条件で行っており、実機とモデルの間でレイノルズ数相似則が成り立たないので、CFD 解析に用いたモデルも 1/9 スケールとした。近年、コスト縮減を目的として図 1 に示すような溶接構造の連続エルボがしばしば用いられている。案内羽根の損傷事例として取り上げられる管の構

* 原稿受付 2005 年 8 月 24 日。

^{*1} 正員、(株)電業社機械製作所技術研究所(☎ 411-8560 三島市三好町 3-27)。^{*2} 元：(株)電業社機械製作所。^{*3} 正員、八戸工業高等専門学校機械工学科(☎ 039-1192 八戸市田面木字上野平 16-1)。

E-mail: tomimatsu3817@dmw.co.jp

Fig. 1 Elbow pipe fitting geometry

Fig. 2 Computational model

造は、バンドのみでなく、このような連続エルボの場合もある。そこで、Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation (以下、RANSと記す) モデルを用いたCFD解析では、曲がり円管の形状の違いが案内羽根周りの流動状態に与える影響について調べた。CFDによる解析結果の信頼性の評価を実験結果と比較して行う場合、本研究で対象とする弱い渦の発生する流れ場を接触式の計測法で計測すると、計測器から発生する乱れが流れ場に著しく影響を与えられと考えられる。そこで本報では、RANSモデルが時間平均乱流モデルに基づいていることを考慮して、非接触式の数値計測法であるParticle Image Velocimetry (以下、PIVと記す) により計測した瞬時の速度データを平均して得た平均速度分布と比較、検討することにより解析結果の信頼性を評価した。また、流量を変えて実験を行い、流量の違いが流れ場に対して与える影響を調べた。さらに、案内羽根後縁周りの拡大撮影を行い、PIV計測により後縁周りの非定常流れ場の流動状態を調べた。

2 おもな記号

a : 管内半径 (=102.4 mm)

De : デイン数 ($= 2aU_0/\nu \sqrt{a/R_c}$)

r : 管中心からの距離 (mm)

R_c : 管中心軸の曲率半径 (=170 mm)

Re : レイノルズ数 ($= t_g U_0/\nu$)

t_g : 案内羽根の板厚 (=3 mm)

U_0 : 入口平均流速

u, v : 各軸方向の速度成分

u_{aes}, v_{aes} : 各軸方向の平均速度成分

u_{ms}, v_{ms} : 各軸方向の速度変動成分

x, y : 座標軸

ζ : 渦度 ($= t_g/U_0 (\partial v/\partial x - \partial u/\partial y)$)

ν : 水の動粘度

3. 解析および実験方法

3.1 CFDによる解析方法 図2に案内羽根入りバンドのCFD解析モデルを示す。解析には、(株)ソフトウェアクレイドルのSCRUYU/Tetra for Windows Version 6を用いた。解析を行うにあたってバンド、連続エルボともに曲がり円管の上流部に $20a$ の直管を設け十分発達した流れが流入するようにしている。また、下流部にも助走管路として $8a$ の直管を設けている。ここで、本研究で対象とする案内羽根付き曲がり円管は、前述のように立軸ポンプの吐出し部に用いられるものをスケールダウンしたもので、案内羽根は曲がり円管の流体損失を最も低減できる位置よりも内周側に位置している⁹⁾。図3に解析に使用したバンドのメッシュモデルを示す。メッシュモデルは四面体メッシュで構成されており、全体の要素数は約235万とした。流入条件は流量を実機の仕様点の吐出し量(以下、100%流量と表現する)に相当する $5.56 \text{ m}^3/\text{min}$ (流速: 2.95 m/s)で、流出条件は静圧一定、壁面の境界条件は静止壁とした。

バンド内の流れをCFD解析する場合、乱流モデルとして標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いた場合の解析結果は実験計測結果とあまり一致しないという報告がある⁹⁾。このため、バンド内流れ場の解析を行うにあたって、須藤らのレイノルズ応力モデル⁹⁾、青山らの代数応力モデルを併用した $k-\varepsilon$ モデル¹⁰⁾、杉山らの乱流モデルとして対流、拡散項を代数式で置き換えた代数応力モデル⁹⁾等が提案されている。これらのモデルが提案された理由の一つとして、標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いて解析した

Fig. 3 Computational mesh

場合、はく離領域の解析精度が良好でないことがあげられる。そこで解析を行うにあたって、実験結果と解析結果を比較することにより、乱流モデルの選定を行った。また、式の離散化には有限体積法を用いた。

CFD 解析は、バンドと連続エルボの形状の違いが案内羽根周りの流動状態にどのような影響を及ぼすかについて調べることを目的として行った。バンドと連続エルボの管中心軸の局率半径はともに同じで、ディーン数 De は 5.1×10^5 である。

3.2 実験装置および方法 図 4 に実験装置の全体図を示す。実験は試験部、ポンプ、バルブ、電磁流量計、タンクからなる大きさが 2.5×4.2 m の回流型循環水槽を用いて行った。実験に用いた作動流体は水で、試験ループを反時計回り方向、すなわち図中の矢印の方向に流れる。この試験ループを用いることによりバンド入口で十分発達した管内流れになることは別途計測して確認済みである。

図 5 にアクリル製の案内羽根入りバンドのテストセクションおよび PIV 計測システムの概略を示す。このバンドを低ひずみで撮影するために、試験部はバンドの外側に水槽を設けた二重構造となっている。

実験では、試験部側面より照明として Nd:YAG レー

Fig. 4 Experimental apparatus

ザ（出力：30 mJ、波長 532 nm）を管中央断面に照射し、テストセクション上方に設置した相互相関型 CCD カメラ（TSI PIVCAM 13-8, 12 bit, 8 fps）により撮影している。レーザシート光の厚さは 2 mm で、使用したカメラレンズは Nikon AF Nikkor 50 mm F1.4D で F 値を 1.4 に設定した。さらに、レーザ光による反射の影響を低減するために、カメラレンズにバンドパスフィルタ（中心波長：532 nm、半値幅：10 nm）を取り付けて撮影を行った。カメラとレーザの同期はシンクロナイザによって行い、撮影した画像はデジタルデータとしてパソコン内に取り付けたフレームグラバを介してハードディスク内に保存される。バンド内全体の撮影は、入口直管部、曲がり部、出口直管部の 3 個所に分けて行い、それぞれの較正值は 0.22 mm/pixel, 0.29 mm/pixel, 0.21 mm/pixel であり、2 画像間のパルス間隔はトレーサ粒子の移動量にあわせて $145 \mu\text{s} \sim 315 \mu\text{s}$ の間で変化させた。また、案内羽根後縁周りの拡大撮影では、較正值は 0.13 mm/pixel で、2 画像間のパルス間隔は $90 \mu\text{s} \sim 140 \mu\text{s}$ の間で変化させた。

今回の実験での作動流体は水であり、使用したトレーサは平均粒径 $80 \mu\text{m}$ のナイロン粒子（密度： 1.02 g/cm^3 ）で、粒子の流れに対する追従性は良好であった。撮影した画像を別途確認したところ、光の散乱によりトレーサは、バンド全体の撮影では 2~3 pixels 程度、案内羽根後縁の拡大撮影では 3~4 pixels 程度に写っていた。したがって、PIV 解析におけるサブピクセル解析時のピークロッキングの影響は低減できていると考えられる⁹⁾。

解析に使用した PIV は直接相互相関法に基づくもので、サブピクセル解析時のピーク値の探索にはガウス分布を用いた。また、解析時の相関領域の大きさは 31×31 pixels とした。統計量の算出には 600 枚の粒子画像（300 セットの速度データ）を用いた。ここで、本計測における速度に対する不確かさは約 4% と推定される。

Fig. 5 PIV measurement system

Table 1 Experimental conditions

	Flow rate Q_0 (m ³ /min)	Velocity U_0 (m/s)	Reynolds number	Dean number
(a)	4.44 (80%Q)	2.36	8.0×10^3	4.2×10^5
(b)	5.56 (100%Q)	2.95	9.9×10^3	5.3×10^5
(c)	6.67 (120%Q)	3.54	1.2×10^4	6.3×10^5

表 1 に実験条件を示す。通常、ポンプの性能は 80%～120%流量程度で保証される。そこで、本実験もこの範囲内で条件を設定することとした。条件(b)が 100%流量に相当し、条件(a)、(c)が 80%流量、120%流量にそれぞれ相当する。

なお、今後案内羽根を基準に管内周側を案内羽根腹面側、外周側を背面側と表す。

4. 結果および考察

4.1 管形状の違いが流動状態に及ぼす影響 図 6 に CFD 解析より得た速度分布と PIV 計測より得た速度分布を示す。図中の横軸において $r/2a=0.5$ は管内周壁の位置を、 $r/2a=0$ は管外周壁の位置をそれぞれ表す。縦軸は各軸方向の平均速度成分を入口平均流速で割った無次元値を表す。図(a)は案内羽根前縁から $1/2a$ 上流の位置の速度分布を、図(b)は案内羽根後縁から $1/2a$ 下流の位置の速度分布をそれぞれ表す。 $k-\varepsilon$ モデルの解析

結果と *Realizable k-ε* モデルの解析結果を比較すると、図(a)に示した案内羽根前縁から $1/2a$ 上流の位置の速度分布にその差は見られない。しかしながら、図(b)に示した案内羽根後縁から $1/2a$ 下流の位置の速度分布では、 $r/2a=0.5$ の付近で、PIV 計測結果と *Realizable k-ε* モデルの解析結果が示す v_{ave}/U_0 が 0 より小さくなっているのに対して、 $k-\varepsilon$ モデルの結果は 0 より大きくなっている。すなわち、 $k-\varepsilon$ モデルでは離領域を捉えることができていないのに対して、*Realizable k-ε* モデルでは離領域を捉えることができていていることがわかる。さらに、*Realizable k-ε* モデルを用いた解析結果と PIV 計測結果とでは、速度の無次元値に差が見られるが、速度分布のグラフが示す傾向を捉えることはできている。また、 $k-\varepsilon$ モデル、*Realizable k-ε* モデル以外にも数種の乱流モデルを用いて解析を試行したが、*Realizable k-ε* モデルにより解析した結果が最も良好であった。そこで、解析は *Realizable k-ε* モデルを用いて行った。

図 7 は PIV 計測および CFD 解析によって得られたバンド、連続エルボの管中央断面における平均速度分布図を表す。各平均速度分布図は、100%流量の場合の結果である。

Fig. 6 Experimental and computational results of mean velocity distributions (Bend)

図 7(a)は実験により得られたバンド内の平均速度分布図を示す。白色で表した案内羽根周りの黒色領域は、案内羽根をアクリル円管に固定するのに用いた接着剤が画像に写りこんだ影響および被写界深度が原因で案内羽根と円管の接合部にピントが合わずに画像に写りこんだ影響で計測できなかった領域である。前述のように、この図は別々に計測した入口直管部、曲がり円管部、出口直管部の平均速度分布図を組み合わせで作成したものである。

入口直管部の主流方向の速度分布は、図 6(a)にも示されるように曲がり円管部に近づくにしたがってわずかに管内周側に偏った分布をとることがわかる。この主流方向の速度分布がわずかに管内周側に偏る傾向は、案内羽根が無い場合のバンド内流れ場における入口直管部の主流方向速度分布の傾向と類似している⁹⁾。

曲がり円管部では、案内羽根背面近傍および管内周壁近傍で速度が速くなっていることがわかる。さらに、案内羽根背面側近傍の領域のほうが、管内周壁近傍の領域よりも速度が速い傾向を示している。また、曲がり円管部外周側に向かうにつれて流速は遅くなることがわかる。

出口直管部では、案内羽根背面側からの流れは減速しながら直管部外周側に向かう。これに対して、案内羽根腹面側からの流れはほとんど直管部内周壁に沿って流れる。この結果、案内羽根後方に黄緑色で示された放射状の速度領域が形成されることがわかる。さらに、図 6(b)にも示されるように直管部内周壁近傍にはく離領域が形成されることがわかる。

図 7(b)に CFD 解析によって求めたバンド内の平均速度分布の解析結果を示す。入口直管部では PIV による計測結果ほど顕著ではないが、主流方向速度成分はわずかに管内周側に偏ることがわかった。

曲がり円管部では、案内羽根背面近傍の領域および管内周壁近傍に速度の速い領域が形成されることがわかる。この速度の速い領域の形成位置は実験結果とほぼ同じであったが、その値は実験結果と異なり、案内羽根背面側近傍の領域の速度と管内周壁近傍の領域の速度はほぼ同じであった。

出口直管部では、図 6(b)にも示するように管内周壁近傍にはく離領域が形成されており、その位置は PIV 計測結果から求めた平均速度分布とほぼ同じである。しかしながら、はく離領域の大きさは PIV 計測結果よりもわずかに小さいことがわかる。また、案内羽根腹面側を通過してきた流れが管内周壁とほぼ平行に流れる傾向は、PIV 計測結果の傾向とほぼ同じである。しかしながら、案内羽根背面側を通過してきた流れは、PIV 計

測によって得られた平均速度分布ほど管外周側に向かって流れないことがわかる。

図 7(c)に連続エルボ内流れ場の CFD 解析結果を示す。(b)に示すバンドの場合と比較すると、曲がり円管部では管形状の違いに関わらず案内羽根背面近傍に速度の速い領域が形成されることがわかる。また、同様に管内周壁近傍にも、案内羽根背面近傍の領域ほどではないが、速度の速い領域が形成されることがわかる。さらに、これら速度の速い領域の形成位置は管形状の違いに関わらずほぼ同じである。

出口直管部では、バンド、連続エルボいずれの場合も管内周壁近傍に青色で示される低速領域が形成されており、その位置はほぼ同じであるが、大きさは連続エルボの場合のほうが大きい。また、いずれの場合も案内羽根後縁部から下流方向にかけて黄緑色で示された放射状の速度領域が形成されることがわかる。

図 8 に CFD 解析により得られたバンドと連続エルボの速度分布を示す。図中の横軸が示す距離の無次元値および縦軸が示す速度の無次元値は図 6 の場合と同様である。図(a)は案内羽根前縁から $1/2a$ 上流の位置を、図(b)は案内羽根後縁から $1/2a$ 下流の位置の速度分布をそれぞれ表す。図(a)より入口部では、バンド、連続エルボという形状の違いに関わらず、速度分布は同じような形となっている。また、図(b)に示すように出口部でははく離領域の大きさに違いが見られるが、速度分布の特徴は似たようなものとなっている。したがって、速度分布の特徴は管形状の違いに関わらず、ほぼ同じであることがわかる。

4.2 案内羽根後縁周りの流動状態

図 9 に PIV により計測した瞬時の速度データから求めた案内羽根後縁周りの管中央断面における平均速度分布図を示す。図中の黒色の外形線は管中央断面における案内羽根と管壁の位置を表す。また、その周りの白色領域は、レンズの焦点を管中央断面に合わせているので、管壁に固定された案内羽根端面が焦点のボケた状態で PIV 計測用画像に写りこんだためにできた計測不能領域を示す。後述の図 10、図 11 にも同様の計測不能領域がある。

図 9 より、いずれの流量の場合も出口直管部内周壁近傍および案内羽根後縁付近から下流にかけて青色で示される低速領域が見られる。

また、図 10 に PIV により計測した瞬時の速度データから求めた案内羽根後縁周りの管中央断面における速度変動分布図を示す。図より、いずれの流量の場合も出口直管部の内周壁近傍および案内羽根後縁付近から下流にかけて速度変動の大きい領域が形成されており、この領域は図 9 に示した平均速度分布図の高せん断値

Fig. 7 Mean velocity vectors and contours (100%Q)

Fig. 8 Computational results of mean velocity distributions (Bend and elbow pipe fitting)

Fig. 9 Mean velocity vectors and contours around trailing edge of guide vane (PIV)

域と形成位置がほぼ一致する。特に、案内羽根後縁付近の腹面側では速度変動の値が最も大きくなることがわかる。

したがって、平均速度分布、速度変動分布の結果より、実験を行った流量の範囲内では、案内羽根後縁周りの流動状態はあまり変わらないことがわかる。

図 11 に PIV 計測により得られた案内羽根後縁周りの瞬時の速度ベクトルおよび渦度分布を示す。これは 100%流量の条件で行った実験より算出した結果である。各図の時間は、任意の時間 $t=0$ s を基準とした経過時間を表す。

Fig. 10 Velocity fluctuation contours around trailing edge of guide vane (PIV)

Fig. 11 Instantaneous velocity vectors and vorticity contours around trailing edge of guide vane (100%Q) (PIV)

図より、 $t=0$ s の時、負の渦度分布を持つ領域が案内羽根後縁腹面側から下流方向に線状に伸びていることがわかる。 $t=0.25$ s、 $t=0.5$ s の時、この領域は多少分裂した形となり、 $t=0.75$ s の時は、図中の丸印の領域に、案内羽根後縁から下流方向にかけて渦列が形成されている。さらに、 $t=1.0$ s の時は再び線状の領域が下流方向に伸びている。ここで、この負の渦度分布を持つ領域の発生位置は、図 10 で示した案内羽根後縁付近の腹

面側に見られた速度変動の値が最も大きくなる位置とほぼ一致する。

これら、案内羽根後縁から形成される負の渦度分布の領域はせん断層からの渦の放出と考えられる。 $t=0.75$ s の時のように、せん断層から放出された渦が下流に進むにしたがって渦列を形成する場合があるが、常に形成されるわけではないことから、この渦列は不安定で弱いものであると考えられる。

5. 結 論

本研究では、PIV 計測および RANS モデルに基づいた CFD 解析を行って曲がり円管内に取り付けられた案内羽根周りの流動状態について調べた。以下に主な結論を示す。

1. 案内羽根入りバンド内流れ場の PIV 計測結果と *Realizable k-ε* モデルを使った CFD 解析結果は、はく離領域の大きさなどに若干の違いが見られた。
2. 案内羽根入りバンド、連続エルボを *Realizable k-ε* モデルを用いて解析した結果、出口直管部内周側に形成されるはく離領域の大きさに違いが見られた。
3. 案内羽根後縁周りを拡大撮影した画像を用いて PIV 計測を行った結果、羽根後縁腹面側よりせん断層からの渦の放出によるものと考えられる渦列が形成されることがわかった。この渦列は常に形成されるわけではないことから、不安定で弱いものであると考えられる。
4. 羽根後縁腹面側の渦の放出位置で速度変動の値が最も大きくなった。

謝 辞

CFD 解析を行うにあたって(株)ソフトウェアクレイドルの糸数佳子氏にご指導いただきました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- (1) Miyagawa, K. Kawata, Y. and Iwasaki, Y., Study on the Vibration Mechanism of Hydraulic Turbine Stay Vanes, *Proceedings of The 7th Asian International Conference on Fluid Machinery*, (2003-10), #40026.
- (2) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., JSME Data Book: Hydraulic Losses in Pipes and Ducts, (1979), p. 81, The Japan Society of Mechanical Engineers.
- (3) Sudou, K. and Takami, T., Numerical Analysis of Turbulent Flow in a Curved Circular Pipe by a Reynolds Stress Model, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 54, No.506 (1988), pp. 33-39.
- (4) Aoyama, Y. et al., Numerical Analysis of Turbulent Flow in a Curved Tube by a Combination of the *k-ε* Model and the Algebraic Turbulent Stress Model, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 56, No.528 (1990), pp. 156-164.
- (5) Sugiyama, H. et al., Numerical Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flow in a 90° Bent Tube by Algebraic Reynolds Stress Model, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 63, No.610 (1997), pp. 36-43.
- (6) The Visualization Society of Japan ed., Handbook of Particle Image Velocimetry, (2002), p. 73, Morikita Shuppan Co., Ltd.
- (7) Sugiyama, H., Flow in Curved Pipes, *Nagare*, Vol. 22, No. 1, (2003), pp. 41-50.