低比速度斜流ポンプの案内羽根間流路を通る流れ*

金 元 敏 明^{*1}, 赤 松 弘 隆^{*2}
松 永 茂 徳^{*3}, 塚 本 寛^{*1}

Flow through Guide Vanes of Low Specific Speed Mixed Flow Pumps

Toshiaki KANEMOTO, Hirotaka AKAMATSU,
Shigenori MATSUNAGA and Hiroshi TSUKAMOTO

Flow structure around a guide vane, installed in a diffuser of a mixed flow pump with low specific speed, was investigated experimentally. The secondary flow along the hub wall, which is caused by the vane camber and runs toward the suction side of the vane, changes to run upstream near the suction surface of the vane. Its flow unites with another secondary flow along the suction surface, which is caused by the meridian curvature and runs toward the hub wall, to form the strong vortex on the hub wall near the suction surface. This vortex induces the downstream flow along the suction surface to run toward the casing wall. This flow also unites with the flow from the leading edge along the suction surface to form another vortex on the suction surface near the casing wall. These vortices induce a circulating flow on the cross section in the downstream passage, and markedly affect the turning angle of the guide vane.

Key Words: Guide Vane, Vortex, Internal Flow, Secondary Flow, Diffuser, Mixed Flow Pump

1. 緒 言

原子力発電所や排水処理場などに多く用いられる斜流ポンプは高性能を示すようになってきた。これはおもにインペラに対する研究の成果と思われ、数値計算手法の開発⁽¹⁾と相まって、その好適な形状も明らかにされつつある。これに対し、ディフューザ部についての研究は少なく、比速度が比較的高い斜流ポンプの全体性能に関連して取扱われたものが若干みられる程度である⁽²⁾⁽³⁾。著者らの一人も同様に、高比速度斜流ポンプを対象としたディフューザの一設計指針を提案している⁽⁴⁾。ディフューザは子午面形状が曲率をもつ案内羽根間流路となるため、比速度の低下とともに二次流れやはく離によって内部流れは極めて複雑になるものと思われる。しかし、二次流れやはく離の挙動を詳細に調べた報告はみあたらず、ディフューザの性能をより向上させるためには、まず流れ機構の解明が望まれる。

このことを踏まえ、本研究では、低比速度斜流ポンプを対象とした案内羽根間流路について、二次流れの挙動に主眼を置き、無衝突流量付近における流れの状態を実験的に明らかにすることを目的とした。

2. 供試流路と実験方法

2・1 供試流路 比速度 350(rpm, m³/min, m)程度の斜流ポンプを対象としたディフューザモデルを図1に示す。子午面形状は一般的な設計法⁽⁵⁾とは異なり、案内羽根の反りのみで減速させることとし、平均メリディアン分速度が流れ方向にほぼ一定となるように決定された[図1(a)]。案内羽根(7枚等配)の前縁取付位置と入口角 β_1 [図1(b)]は想定されたインペラ⁽⁶⁾の出口直径と流出角に基づいて決められ、後縁取付位置も従来の方法⁽⁵⁾にならって決められた。図1(b)に示す案内羽根の反りおよび出口角超過 β_2 は、前縁から後縁にかけてできるだけ均一な羽根負荷となりかつ出口で軸方向流れとなるように、準三次元流れ解析⁽⁴⁾と簡単な二次流れ解析⁽⁶⁾⁽⁷⁾を併用して決められた。この場合、反り線については種々な形状が考えられるが、取扱いを容易にするため簡単な代数式で与えることとし、上述のように案内羽根の入口角と前後縁位置を定めても、最大反り位置と出口角が任意に選定できる三

* 原稿受付 平成5年4月26日。

^{*1} 正員, 九州工業大学工学部 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)。^{*2} (株)東芝 (〒230 横浜市鶴見区寛政町20-1)。^{*3} 正員, 九州共立大学工学部 (〒807 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)。

次曲線を採用した。前後縁の丸み半径は 1.5 mm, その付近を除く羽根厚は 10 mm, 最大反り位置は羽根弦長に対して前縁から 56% (ハブ面), 62% (二乗平均半径およびケーシング面) のところにある。また, 案内羽根間の流路断面形状は, 性能に最も影響するといわれている⁽³⁾ 子午面上の最大直径部付近を特に留意しながら, 全範囲でできるだけ形に近くなるように決められた [図 1(c)]。

2.2 入口流れと実験方法 遠心ポンプから送られた水は整流タンクを通過して, 前述の供試流路に流入する。供試流路にはインペラを設けず, 案内羽根の上流に設けた 2 段の固定整流羽根 [図 1(a)] によって旋回流を発生させた。本実験では, インペラ出口位置に相当する断面 M0 [図 1(a)] を供試ディフューザへの入口基準断面とした。なお, 実験に先立ち, 固定整流羽根の後流は同断面に至る間にほとんど消滅していることを確認した。

入口基準断面 M0 における流れを図 2 に示す。ここに, $\bar{v}_s, \bar{v}_\theta, \bar{\beta}$ はそれぞれ断面に垂直な速度成分 v_s , 旋回成分 v_θ , および v_s 方向から測った流れ角 β の周方向平均値 (添字 0 は断面 M0 上の断面平均値), y はハブ壁から測った距離, B_0 は断面 M0 における流路幅である [図 1(d)]。なお, $\bar{v}_\theta, \bar{\beta}$ の値については座標系と案内羽根の反りとの関係から [図 1(b), (d)] ここでは負となる。同断面上の流れはほぼ軸対称となるが, $\bar{v}_s$ はケーシング側にいくぶん偏っており主流部分の $\bar{v}_\theta$ は強制渦分布に近い。図 2 には案内羽根の入口角 β_1 (一点鎖線) も同時に示してある。 $\bar{v}_s$ 分布に対応して入射角も流路幅方向に変化しているが, 流量平均流れ角と二乗平均半径位置における β_1 から求まる入射角は

図 1 供試流路とおもな記号

図 2 入口基準断面 M0 上の流れ

約 1° となる。なお, 断面平均絶対速度と二乗平均半径上の羽根弦長から求まるレイノルズ数は 1.1×10^6 である。

上述した入口流れの場合について, 後方の断面 M1~M5 [図 1(a)] を通る流れを, 5 孔ピトー管を用いて定常的に測定した。なお, 案内羽根面近傍の流

れを測定する際には、受圧孔が案内羽根面と平行な3孔ピトー管を併用した。このような測定からえられた各測定断面間の流量誤差は8%以内であった。また、二次流れの挙動を定性的に明らかにするため、油膜法による可視化も行った。

3. 周方向平均流れ

案内羽根間流路を通る流れは周方向に大きく変化するが、まず大まかな流れの状態を把握するため、周方向に平均した流れについて調べることにした。

断面 M1～M5 を通過する流れを周方向に平均し図

3に示す。ここに、 β_c (一点鎖線) は断面に垂直な方向 (v_s の方向) と、案内羽根の反りの接線方向となす角度である。すなわち、 β_c は羽根数無限と考えた場合の流れ角 β に相当する。図 3(a) の β_c と実際の流れ角 $\bar{\beta}$ を比較してわかるように、案内羽根の入口付近ではいまだ十分な羽根作用がえられず、前縁により近いハブ側ほど流れの転向は少なくなる。また、曲率が大きいハブ壁面上境界層の発達が著しいためと思われる、入口基準断面 M0 でみられた $\bar{v}_s$ のケーシング側への偏りが増長されている。

子午面上の最大直径部を過ぎた断面 M2, 3 でも上述したような流れの偏りは依然みられるが、流れ角分布は大きく変化するようになる [図 3(b), (c)]。すなわち、断面 M2 では、流路幅中央付近の流れは羽根に沿うが、両壁面近くの流れは案内羽根の反りよりも過大に転向している。後方になるにつれて、このような過大な転向はハブ側で著しく増長されるが、一方ケーシング側では逆に転向不足となる [図 3(c), (d)]。流れ角 $\bar{\beta}$ や旋回成分 $\bar{v}_\theta$ は流路幅方向に大きく変化するのに対し、断面に垂直な速度成分 $\bar{v}_s$ の偏りは徐々に緩和され、案内羽根出口の断面 M4 では境界層領域を除き幅方向にほぼ一様となる [図 3(d)]。

案内羽根出口より十分後方の断面 M5 では、旋回成分の幅方向変化も緩和されるが、ハブ側における流れの過大な転向は依然残っている [図 3(e)]。

(a) 断面 M1

(b) 断面 M2

(c) 断面 M3

(d) 断面 M4

(e) 断面 M5

図 3 各測定断面上の周方向平均流れ

4. 二次流れの挙動

3章に示した流れの状態を詳しく検討するため、本章では、案内羽根間流路内に生じる二次流れの挙動を調べることにした。

4・1 案内羽根入口付近の流れ 油膜法によって可視化した案内羽根面、ハブ壁面およびケーシング壁面近くの流れの様子を図4に示す。なお、それぞれの図に対応する大まかな写真撮影方向を図1(a)に矢印で示した。案内羽根前縁から子午面上の最大直径部を過ぎる付近までは案内羽根の反りが小さいので、ハブおよびケーシング壁面上の二次流れはほとんどない。これに対し、子午面の曲率が大きいので羽根面に沿ってケーシング側からハブ側に向かう二次流れが生じる[図4(a), (b)]。最大直径部を過ぎたあたりから案内羽根の反りの影響が現れるようになり、ハブおよびケーシング壁面に沿って案内羽根負圧面側に向かう二次流れが徐々に強くなる。このため、図3(b)でみられたように両壁面近くの流れは過大な転向となる。

4・2 新たな渦の発生 ハブ壁に沿う二次流れは境界層の発達および主流の減速と相まって、より後方では案内羽根面に直交するまでになる[図4(c)]。特に案内羽根負圧面近傍での圧力上昇割合が著しいため(図5：図2に示した入口流れに対する準三次元流れ解析結果)、その付近では逆流するようになる。この逆流と前述した案内羽根負圧面に沿ってハブ側へ向かう二次流れが合流し、断面M2とM3の間のハブ壁面上角部にケーシング側からみて右回りの強い渦が新たに形成される[このような渦の存在は文献(3)でも確認されている]。この位置で巻き上がった渦の他端は主流によって後方へ流され、案内羽根間流路内に後方からみて右回りの循環流れを誘起する(後述)。このため、断面M3、M4の流れはハブ側で過大な転向となり、ケーシング側では逆に転向不足になるものと考えられる[図3(c), (d)]。

前述した渦による循環流れはハブ壁に沿う二次流れを増長させる。その二次流れは角部を曲がり案内羽根負圧面に沿ってケーシング側へ向かうが、後述するようにいくぶん逆流状態となる。この流れと羽根面に沿う上流からの流れが合流し、ハブ壁面上に生じる渦より後方の断面M3付近の羽根負圧面上に、さらにもう一つの渦が新たに発生する[図4(c), 案内羽根圧力面側からみて左回り]。なお、案内羽根負圧面に沿うハブ側からの流れと上流からの流れは、ハブ壁に生じる渦の位置から案内羽根後縁のケーシング壁位置を結んだ直線上付近で合流している。

(a) 流路前半の案内羽根圧力面

(b) 流路前半の案内羽根負圧面

(c) 子午面上の最大直径部を過ぎたハブ壁および案内羽根負圧面

(d) 案内羽根圧力面後縁付近

(e) 流路後半のケーシング壁

図4 案内羽根間流路壁面近くの流れの可視化

図 5 案内羽根根面上圧力分布
(C_p : 断面 M0 を基準とした圧力係数, L_0 : 案内羽根根面全周長さ, L : 案内羽根後縁を起点に圧力面から負圧面まわりに測った長さ)

4.3 案内羽根出口付近の流れ 一方, 案内羽根後半における圧力面近傍の流れは比較的単純で, ハブ側ではハブ壁に向かいケーシング側ではケーシング壁に向かう [図 4(d)]. これは, ハブおよびケーシング壁面に沿う二次流れの影響と考えることができる。ただし, ケーシング壁面上の流路渦に基づく二次流れは前述した循環流れに相殺されるため, 流れがケーシング壁に向かう範囲は狭い。このことは, ケーシング壁面に沿って案内羽根負圧面に向かう流れが圧力面近く限定されていることから確認できる [図 4(e)].

5. 羽根間断面上の流れ

4 章で調べた二次流れや新たに生じる渦の挙動を踏まえながら, 本章では, 案内羽根間流路断面を通る流れの様子を詳細に検討することにした。

5.1 新たな渦発生位置より前方の流れ 断面 M2 に垂直な速度成分 v_s の等速度分布および平行な速度成分 v_p のベクトル表示を図 6 に示す。周方向平均値でみたように [図 3(b)], ケーシング側の速度が早くなっている。また, 案内羽根まわりの循環により v_s は負圧面側のほうが早い, 全体的にみて比較的整然とした流れといえる。ただし, 案内羽根負圧面側のハブ壁近くで v_p 分布に若干ひずみが見られる(左から 2 番めのベクトル列)。この点を明らかにするため,

(a) 断面に垂直な速度成分

(b) 断面に平行な速度成分

図 6 断面 M2 上の流れ

図 7 断面 M2 上の断面に平行な速度成分から案内羽根の反りに基づく旋回成分を差引いた速度成分

図 6(b) に示した断面に平行な速度ベクトル $\vec{v}_p$ から, 断面に垂直な速度成分 v_s と案内羽根の反りの接線方向角度 β_c から求める周方向速度ベクトル $\vec{v}_{\theta\infty}$ (流れが反り線に沿うものとした場合の旋回成分に相当する) を差引き ($\vec{u}_p = \vec{v}_p - \vec{v}_{\theta\infty}$), 図 7 に示す。図 7 から大まかな二次流れの状態を知ることができるものと考えられる。4 章で調べたように, 案内羽根面近くではハブ側に向かう流れ, ハブおよびケーシング壁面近くでは案内羽根負圧面側に向かう流れが確認できる。しかし, v_p 分布がひずむ付近では案内羽根圧力面側に向かう流れとなっている。この流れは, 案内羽根負圧面に沿う二次流れの影響もあるが, 同断面より後方のハブ壁

(a) 断面に垂直な速度成分

(b) 断面に平行な速度成分から案内羽根の反りに基づく
旋回成分を差引いた速度成分

図 8 断面 M3 上の流れ

面上に新たに発生する渦によって誘起されたものと考えることができる。このような流れがハブ壁近くに限定されていることは、渦の他端が後方に流されていることを物語っている。

断面 M2 より前方の断面 M1 では渦の影響も受けず案内羽根の負荷も小さいので、流れの周方向変化は少なく断面 M2 以上に整然とした流れとなる(図略)。

5・2 新たな渦発生位置より後方の流れ 渦が発生する位置より後方の、断面 M3 における流れの様子を図 8 に示す。断面 M2 の場合と同様に、断面に垂直な速度成分 v_s はケーシング側で早い[図 8(a)]。しかし、断面 M2 の場合とは異なり、 v_s の比較的早い領域 ($v_s/\bar{v}_{s0}=1.2$) が案内羽根間中央よりいくぶん負圧面側で流路幅方向に拡大するとともに、ハブ壁近くではさらに早い領域 ($v_s/\bar{v}_{s0}\geq 1.4$) が生じる。一方、案内羽根負圧面近傍では逆流が生じている。図 8(b) は、図 7 の場合と同様に案内羽根の反りによる旋回成分を差引いた断面に平行な速度成分 u_p をベクトル表示したものである。案内羽根負圧面から若干離れたハブ壁近くに渦心をもつ右回りの大きな循環流れが生じている。これは前方のハブ壁面上に新たに生じた渦に基づくもので、渦ベクトルの方向は、渦発生点に近いこともあり断面に対してケーシング側に傾いているものと考えら

(a) 断面に垂直な速度成分

(b) 断面に平行な速度成分

図 9 断面 M4 上の流れ

れる。したがって、断面に平行な速度成分のみならず、垂直な速度成分 v_s にもこの渦による誘起速度の影響が現れ、図 8(a) でみたように渦心の右側の速度は早くなる。一方、渦心の左側はもともと速度が遅い案内羽根負圧面上境界層領域になるため v_s は負となる。断面 M3 では、ケーシング壁と案内羽根負圧面からなる角部にも左回りの弱い渦が生じている[図 8(b)]。これは、案内羽根負圧面上に生じたもう一つの渦に基づくものとみなすことができる。

案内羽根間流路内に生じた二つの渦は互いに干渉しながらせん運動をし、後方では渦の崩壊も伴っているものと考えるのが妥当であろう⁽⁸⁾。したがって、渦発生点に近い断面 M3 に比べ、後方の断面 M4 上の流れは非定常性が強くなっているものと思われる。本実験では流れを定常的に測定しているため、断面 M4 上の流れを詳細に議論することは避けるが、案内羽根負圧面側に後流速度欠損域が明確に現れているのが確認できる[図 9(a)]。また、案内羽根間中央付近のケーシング側にも別の低 v_s 領域がみられ、ハブ側まで

のかなり広い範囲で v_s が比較的早くなっている。さらに、断面 M3 の場合と同様に右回りの循環流れも確認できる [図 9(b)]。渦心の位置は確定できないが、ハブ側の v_p ベクトルと前述した断面 M3 における渦ベクトルの傾きから判断して、ケーシング側にあるものと思われる。その付近では、循環流れの方向とは逆に後流中心に向かう流れが生じており、また上述のように低 v_s 領域も存在している。

以上のように、案内羽根出口までの流れは極めて複雑となるが、十分後方の断面 M5 の流れは周方向にほぼ一様となる(図略)。なお、同断面上の流量平均流れ角は約 6° となり、案内羽根の設計の際に所望した流出角(軸方向流出)より大きい。これは前述したようにハブ側における過大な流れの転向のためであり、その付近の案内羽根出口角超過がもっと小さくてよいことを示唆している。

6. 結 言

二次流れの挙動に主眼を置き、低比速度斜流ポンプを対象とした案内羽根間流路を通る流れを調べ、おもに次のようなことを明らかにした。

(1) 案内羽根間流路の前半では、子午面の曲率に基づき案内羽根面に沿ってハブ側へ向かう二次流れが生じる。また、案内羽根の反りに基づきケーシングおよびハブ壁面に沿って案内羽根負圧面側へ向かう二次流れが生じる。

(2) 後方になるにつれてハブ壁に沿う二次流れが著しくなり、案内羽根負圧面近傍では逆流する。この逆流と案内羽根負圧面に沿う二次流れが合流し、負圧面近くのハブ壁上に新たな強い渦が形成される。

(3) この渦の他端は後方に流され流路断面内に強

い循環流れを誘起し、案内羽根出口の流れはハブ側で過大な転向、ケーシング側で転向不足となる。

(4) また、その循環流れの影響を受け、案内羽根負圧面に沿う流れはいくぶん逆流しながらケーシング側に向かう。その流れと案内羽根に沿った上流からの流れが合流し、案内羽根負圧面上のケーシング壁近くにもう一つ新たな渦が形成される。

なお、流入角や流路形状が相違する場合の流れおよび流れと性能の関係については後日報告する予定である。

最後に、本研究は前横浜国立大学(現湘南工科大学)豊倉富太郎教授の研究⁽⁴⁾からヒントをえたものであり、筆頭者が同大学在籍中ご指導を賜ったことも含め謝意を表す。また、研究の一部は昭和 63 年度および平成 2 年度財団法人原田記念財団研究助成金を受けて行われ、また実験装置などについては荏原総合研究所の北嶋宣光監査役、山本和義副所長にご援助いただいたことを付記し謝意を表す。

文 献

- (1) 例えば, Goto, A., *ASME Paper*, No. 90-GT-36(1990).
- (2) Horn, S. V. and Hanus, G. J., *ASME Paper*, No. 88-GT-111(1988).
- (3) Yoshida, Y., ほか 2 名, *Proc. 12th IAHR Symp.*, Trondheim, (1988), 541.
- (4) 豊倉・ほか 2 名, 機論, 53-496, B(1987), 3672.
- (5) ポンプ図集分科会編, 機械図集ポンプ, (1982), 20, 日本機械学会.
- (6) Toyokura, T. and Kanemoto, T., *Proc. 8th Conf. Fluid Mach.*, II(1987), 856.
- (7) 金元・ほか 5 名, 第 27 回ターボ機械協会講演論文集, (1991), 80.
- (8) 例えば, Faler, J. H. and Leibovich, S., *Phys. Fluids*, 20-9(1977), 1385.