遠心羽根車の羽根先端すきまに基づく二次流れ*
(続報, 二次流れとすべり係数の関係)石田 正弘*¹, 妹尾 泰利*², 植木 弘信*¹Secondary Flow due to the Tip Clearance at the Exit
of Centrifugal Impellers
(2nd Report, Relationship between secondary flow and slip coefficient)

Masahiro ISHIDA, Yasutoshi SENOO, and Hironobu UEKI

The velocity distributions measured at the exit of two different types of unshrouded centrifugal impellers respectively under four different tip clearance conditions were reexamined with respect to the shroud wall surface. By increasing the tip clearance, the hub-to-shroud velocity distribution was hardly changed at the exit of the radial blade impeller, by contrast, the relative flow angle was reduced significantly and monotonously in the backward-leaning blade impeller. The change in input power due to the tip clearance was clearly related to the change of flow pattern at the exit of the impeller due to the secondary flow, which must be induced by the component, normal to the blade, of the shear force to support the fluid in the clearance space against the pressure gradient in the meridional plane without blades.

Key Words: Fluid Machine, Centrifugal Impeller, Tip Clearance, Leakage, Secondary Flow, Slip Coefficient

1. ま え が き

ターボ過給機, ガスタービンなどに用いられる遠心圧縮機では一段当たりの圧力比の増大および高速化に伴う小形化によって, 羽根車出口付近の羽根高さが低くなり, 羽根先端すきまと羽根高さとの比が大きくなるためにすきまによる性能低下が無視できない。羽根車性能の予測精度を向上させるためにはもちろんのこと, 下流の翼列の設計を適正化して段性能を向上させるためにも, 羽根先端すきまに基づく羽根車出口の流動状態の変化を予測することが必要となってきた。

前報⁽¹⁾において, 著者らは径向き羽根および後傾羽根を有する2種の開放形遠心羽根車について羽根先端すきまを変化させたときの羽根車出口速度分布の変化を詳細に計測し, すきまに基づく羽根車出口断面内の二次流れの様子を羽根に相対的な流れの変化として示したが, それは Eckardt⁽²⁾あるいは Farge, Johnson-Maksoud ら⁽³⁾が示したものと類似の二次流れパターンであった。その二次流れは極めて複雑であるため, すきまに基づく羽根車入力の変化と二次流れの変化と

の関係を明確にできていない。すなわち, 径向き羽根羽根車の場合入力すきまによってほとんど変化しないのに対し, 後傾羽根羽根車の場合すきまの増加によって入力が増加するという現象が, 二次流れの立場から明瞭にされていない。

本報においては, 前報で示した羽根車出口断面の速度分布を異なった視点, すなわちシュラウド壁面を基準にした座標系から再検討し, すきまによって二次流れが誘起される原因を追求することにより, すきまに基づく二次流れの変化と入力の変化の関係を明確にしている。

記 号

b : 羽根高さ
 c : 羽根先端すきま
 k : すべり係数
 m : シュラウドに沿う子午面方向距離
 p : 圧力
 r : 半径
 R : 半径比 $= r/r_2$
 U : 羽根車出口周速度
 V_u : U で無次元化した周分速度
 W : U で無次元化した相対速度

* 平成元年4月4日 第66期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年10月24日。

*¹ 正員, 長崎大学工学部(〒852 長崎市文教町1-14)。

*² 正員, 三浦工業(株)(〒799-26 松山市堀江町7)。

- W_s : U で無次元化した相対速度の羽根に沿う成分
 W_n : U で無次元化した相対速度の羽根に垂直な成分
 y : シュラウド壁面からの羽根高さ方向距離
 Z : 羽根枚数
 β : 周方向からの相対流れ角
 β_0 : 羽根角
 λ_2 : 羽根車出口すきま比 $= b_2/c_2$
 ρ : 流体の密度
 τ : 式(1)で定義されるせん断力
 ϕ : 流量係数
 ϕ_n : 二次流れの流量係数
 添 字
 1: 羽根車入口
 2: 羽根車出口
 3: ディフューザ入口

2. シュラウド壁面を基準にした速度分布の変化

前報で用いられた羽根出口角の異なる2種の開放形遠心羽根車の主要諸元を表1に示す。R羽根車は、20枚の径向き羽根を有するインデューサ付き遠心羽根車であり、B'羽根車は、羽根出口角45度の後傾羽根16枚を有する汎用遠心羽根車のシュラウドを削除したものである。

前報では、多くの研究において見られるように、羽根車の羽根を基準にした形ですきまに基づく二次流れが示された。ここでは、すきま部を含む流路幅全体の速度分布をシュラウド壁面を基準にした座標系から再検討することにより、2種の羽根車のすきまに基づく二次流れの違いを明らかにする。

図1および図2はそれぞれR羽根車およびB'羽根車の出口直後($R=1.05$; R羽根車, $R=1.02$; B'羽根車)において計測された相対流れ角および相対速度のハブ・シュラウド間分布を示す。それぞれの図の横軸はシュラウド壁面からの羽根高さ方向距離 y をディフューザ入口幅 $b_3 (= b_2 + c_2)$ で無次元化した値である。なお図中のハッチングの右端はそれぞれのすきま設定状態における羽根先端位置である。この表示方法によれば、R羽根車の場合、すきまを増加してもまた流量を変化しても相対流出角 β はハブ・シュラウド間でほとんど変化しない。一方、B'羽根車の場合はすきまの増加とともにいずれの流量においてもハブ側の一部を除く断面全体で顕著にかつ単調に相対流出角が減少している。両羽根車における相対流出角の変化の相

違は羽根車入力の変化と直接関連しているように見える。なお、相対速度分布はいずれの羽根車においてもすきまの増加によってほとんど変化しないし、また、図1に示される程度のすきまに基づくわずかな変化は、R羽根車のインデューサが部分的に後傾羽根を有することに起因しているものと考えられる。

羽根が仕事をしている限り羽根前後面には圧力差があつて、羽根圧力面側から負圧面側へすきまを通って漏れ流れを生じ、すきま部の流れは周方向にねてくるはずであるにもかかわらず、R羽根車の場合すきまが増加しても環状すきま部の相対流出角がほとんど変化しないことは、環状すきま部の流体が羽根がなくてもなんらかの作用によって支えられているためであり、このことは図1のハッチングで示すように羽根先端においてすきまの増加とともに相対流出角が増加して、羽根先端付近がより多くの仕事をするることによって達成されるのであろう。ただし、羽根車入力がほとんど変化しないから羽根全体がなす仕事は変わっていない。したがって、この事実から判断すると、B'羽根車の場合に相対流出角が顕著に減少することは、すきまを通る漏れ流れに基づくものではなく、別の原因によるものと考えられる。

3. 羽根に垂直方向の二次流れ

著者らが前に提案した理論モデル⁽⁴⁾によれば、すきま損失は主として次の二つの損失の和として評価される。ひとつは、すきまを通る漏れ流れによって主流にかかる抗力に基づく損失であり、いまひとつは羽根車側面とシュラウドケーシングとの環状部における流体に作用している羽根車出入口間圧力差を羽根なしで支えるためのエネルギー損失である。第一のいわゆるすきま漏れ損失に関しては、羽根が仕事をしている限り羽根前後面には圧力差があつて、羽根圧力両側からすきまを通って羽根負圧面側へ漏れが生じるため、径向き羽根羽根車でも後傾羽根羽根車でも状況は同様である。しかしながら、第二の損失に関しては、両羽根車でそれぞれ状況が異なる。すなわち、すきま環状部の流

表1 供試羽根車諸元

	R-impeller	B'-impeller
Exit diameter(mm)	210.8	510
Exit blade height(mm)	15	17
Exit blade angle(deg)	90	45
Inlet blade angle(deg)	34	28
Number of blades	20	16
Design flow coefficient	0.36	0.27
Specific speed	0.58	0.43

体に作用している羽根車出入口間の子午面方向圧力上昇を羽根なしで支えるためのせん断力は、後傾羽根の場合、羽根に垂直な成分を持つのにに対し、径向き羽根ではこの成分が存在しない。この点が両羽根車における唯一の相違である。すなわち、B' 羽根車の羽根に垂直な流路断面において、このせん断力の羽根に垂直な成分によってすきまの増加に伴う二次流れが誘起されるはずである。

文献(4)によれば、回転流面に沿う子午面方向せん断力は次式により推定される。

$$\tau = c\{dp/dm - (dp/dm)_c\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 dp/dm は羽根車により生じたシュラウドに沿う子午面方向圧力こう配であり、 $(dp/dm)_c$ は環状すきま部の流体の遠心力によって生じる子午面方向圧力

こう配である。ここでは、環状すきま部の流体は羽根車内の流体と同じ周分速度を有すると仮定して $(dp/dm)_c$ を推定する。このせん断力の羽根に垂直な成分を次に示す式(2)に従って羽根車入口から出口まで積分し、その値 F_n と式(3)で算定される羽根車出口での羽根に垂直な二次流れの流量 ϕ_n を対比する。

$$F_n = \frac{\int_{m_1}^{m_2} 2\pi r \tau \cos \beta_s dm}{2\pi r_2 b_2 (\rho/2) U^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi_n = \frac{2\pi r_2 \int_0^{b_3} W_n dy}{2\pi r_2 b_2} \dots\dots\dots (3)$$

図3および図4は、羽根車出口での羽根に沿う方向の速度成分 W_θ と羽根に垂直な方向の速度成分 W_n のハブ・シュラウド間分布を、R 羽根車およびB' 羽根車

図1 羽根車出口直後の相対速度分布(R 羽根車； $R=1.05$)

図2 羽根車出口直後の相対速度分布(B' 羽根車； $R=1.02$)

図3 羽根車出口での相対速度の羽根に沿う方向および羽根に垂直方向成分(R羽根車)

図4 羽根車出口での相対速度の羽根に沿う方向および羽根に垂直方向成分(B'羽根車)

についてそれぞれ示す。ここに示した各速度成分は、それぞれの羽根車出口直後の下流において計測された値を、連続の条件および角運動量保存則を適用して羽根車出口状態に換算した値である。図からわかるように、すきまの増加とともに垂直速度成分がR羽根車の場合ほとんど変化しないのにB'羽根車の場合は著しく増加している。なお、最小すきま状態の垂直速度成分は主として羽根車出口付近において生じるすべりに基づいている。

図5は二次流れの流量係数 ϕ_n と子午面方向圧力こう配に基づくせん断力の羽根に垂直な成分の積分値 F_n の相関を示す。両羽根車ともそれぞれ両者の良い相関を示しており、二次流れが F_n に比例して増加している。しかも、その増加割合が両羽根車でほとんど同じであることは注目に値する。なお、 $F_n=0$ における ϕ_n の値の相違は、両羽根車のすべり係数の違いに基づくものである。したがって、後傾羽根羽根車の場合せん断力の羽根に垂直な成分 F_n がすきまにほぼ比例して大きく増加するので、羽根に垂直な二次流れが顕著に誘起されるものと判断される。一方、インデューサ付き後向き羽根羽根車の場合には、インデューサの後向き羽根部分でのみわずかにせん断力の羽根に垂直成分が発生するので、それに基づく二次流れはわずかである。

図6はすべり係数と二次流れの流量係数との相関をB'羽根車の場合について示す。実験値のすべり係数は

図5 二次流れ流量に及ぼすすきまの影響

次式によって求めた。

$$k = 1 - \phi \cot \beta_{b2} - V_{u2} \quad (4)$$

ここで V_{u2} には、実測の速度分布から式(5)によって算定される流量平均周分速度を用いた。

$$V_{u2} = \frac{\int_0^{b_3} R^2 V_u W \sin \beta dy}{\int_0^{b_3} R W \sin \beta dy} \quad (5)$$

両者には良い相関関係が存在しており、実験点を直線で近似した延長線によって定まる $\phi_n=0$ のときのすべり係数の値はWiesner⁽⁵⁾の経験式 $k=$

図 6 二次流れ流量係数とすべり係数の関係

$\sqrt{\sin \beta_{b2}}/Z^{0.7}$ による値に極めて近い。また B' 羽根車の場合、 F_n の値が流量によって大きく変化しないので、羽根車入力すきまに基づく減少率が流量によってあまり変化しないものと考えられる。なお、R 羽根車の場合は、すきまに基づくすべり係数の変化が小さく計測精度の範囲内ではばらつくため両者の相関は明確でない。

4. 結 論

羽根車出口における速度分布および羽根車入力に及ぼすすきまの影響を、2 種の全く異なる形式の開放形遠心羽根車を用いて実験的に調べ、以下の結果を得

た。

(1) シュラウド壁面を基準にした速度分布は、すきまの増加に伴い径向き羽根羽根車の場合すきま部を含む流路幅全体でほとんど変化しないのに対し、後傾羽根羽根車の場合相対速度の大きさは変わらずに相対流れ角が顕著にしかも単調に減少した。すきまに基づくこれらの速度成分の変化は、それぞれの羽根車の入力変化と明確に対応しており、入力変化は羽根に垂直な断面内の二次流れと直接関連していることが示された。

(2) 羽根に垂直な面内のすきまに基づく二次流れは、環状すきま部の流体を羽根車出入口間の子午面方向圧力こう配に抗して支えるためのせん断力の羽根に垂直な成分によって誘起されるため、インデューサを有する径向き羽根羽根車では小さく、後傾羽根羽根車では顕著になることが示された。

文 献

- (1) 石田・ほか 3 名, 機論, 55-509, B (1989), 165.
- (2) Eckardt, D., *Trans. ASME, Fluid Eng.*, 98-3 (1976), 390-402.
- (3) Farge, T. Z., Johnson, M. W. and Maksoud, M. A., *ASME Paper*, No. 88-GT-210 (1988-6), 1-7
- (4) Senoo, Y. and Ishida, M., *Trans. ASME, Eng. Gas Turbine Power*, 108 (1986), 32-37.
- (5) Wiesner, F. J., *Trans. ASME, Ser. A*, 89-4 (1967-10), 558.