斜流ポンプの右上がり揚程特性と入口逆流*

青木正則^{*1}, 後藤彰^{*1}Positively Sloped Head-Flow Characteristics
and Inlet Recirculation of a Mixed-Flow Pump

Masanori AOKI and Akira GOTO

A flow mechanism that leads to the onset of positively sloped head-flow characteristics (referred to as stall onset) was investigated for a series of unshrouded mixed flow pump impellers having the nominal specific speed of 560 (rpm, m³/min, m). A criterion that indicates the stall onset was proposed using the critical value of a theoretical pump head. The stall onset was caused by the discontinuous reduction of the theoretical pump head due to the blockage effects of impeller inlet recirculation, which was induced by the extensive flow separation on the casing wall at the latter half of the impeller. The stall onset was prevented when the impeller inlet recirculation occurred before the theoretical pump head reached its critical value as the flow rate was reduced. The blockage effects of the impeller inlet recirculation, in this case, developed continuously and decreased the diffusion of the flow within the impeller flow passages, thus suppressing the onset of extensive flow separation on the casing wall.

Key Words: Turbomachinery, Mixed-Flow Pump, Internal Flow, Inlet Recirculation, Stall, Separation

1. ま え が き

斜流ポンプの揚程曲線は、小流量域で部分的に右上がり(以下、右上がり揚程特性と呼ぶ)となることが多い。右上がり揚程特性は、ポンプの運転を不安定にすることがあるので、実用上好ましくない。そのため、右上がり揚程特性の回避は実務上の大きな課題の一つであり、従来から多くの研究がある⁽¹⁾。比速度の大きなポンプの右上がり揚程特性は、一般に流れのはく離(失速)によって生じ、羽根車出入口の逆流とも関連し合っており、羽根車形状によりさまざまな様相を示す。したがって、本現象について、すべての羽根車にあてはまる一般的な結論を得ることは困難である。右上がり揚程特性は、羽根車の比速度が大きいほど著しく、回避が困難である。しかし、完全に回避することが困難であっても、その発生機構や発生限界を明らかにしておくことは重要である。

そこで本報告では、一連の比速度 560 (rpm, m³/min, m) のオープン羽根車に生じた不連続的な右上がり揚程特性について、内部流れを計測して考察を加える。

おもな記号

A: 羽根車流路面積

C: 無次元絶対速度 $= c/u_2$ C_p: 圧力係数 [式(2)]

i: 入射角

r₂: 羽根車の平均出口半径R: 無次元半径 $= r/r_2$ u₂: r₂ における羽根車周速U: 無次元周速 $= u/u_2$ W: 相対速度 $= w/u_2$

Z: 翼枚数

β_b: 翼角度ΔΨ_i: 羽根車水力損失

τ: 軸動力係数

τ_h: 軸動力から機械損失を除いた動力係数Φ: 流量係数 $= Q/(A_2 u_2)$ Ψ: 揚程係数 $= H/(u_2^2/g)$

添字

1: 羽根車入口

2: 羽根車出口

m: メリディアン方向

th: 理論

* 原稿受付 1995年7月19日。

*¹ 正員, (株)荏原総合研究所 (〒251 藤沢市本藤沢4-2-1)。

to: 全ヘッド

u: 周方向

2. 供試羽根車と実験方法

供試羽根車の子午断面形状と主要諸元を図1と表1に示す。供試羽根車は公称比速度560 (rpm, m³/min, m) のオープン羽根車である。羽根車平均出口径の翼角度 β_{b2} を15°から35°まで四とおりにかえ、翼出口角度25°については翼枚数 Z を3枚から7枚まで三とおりにかえた。翼端とケーシングとのすきまは、すべて0.5 mm である。供試羽根車の記号は、例えば「560-25-5」のように表し、各数字は前から順に比速度、翼出口角、翼枚数の値を示す。

羽根車入口の流れはアロー形三孔ピトー管で測定し、出口の流れを非定常二孔ピトー管⁽²⁾で測定した。なお、ピトー管の挿入位置は、羽根前後縁から10 mm 離れた位置である。ピトー管で測定した羽根車出入口のメリディアン方向速度成分の積分値とベンチュリ管で測定した流量との違いは、5%以下であった。

なお、参考用の羽根車として、公称比速度1120 (rpm, m³/min, m) のオープン羽根車についても、比速度560と同様の設計方針で、翼出口角と翼枚数 Z をかえて6種類試作し、性能を測定した。

3. ポンプ性能と失速限界

3.1 ポンプ性能 供試羽根車のポンプ性能を図2と図3に示す。図2, 3の ϕ - ψ 曲線からわかるよう

Table 1 Design parameters

No.	β_{b2}	β_{b1}	Z		
	(midspan)	deg	3	5	7
560-15-5	15	15		○	
560-25-3,5,7	25	18	○	○	○
560-30-5	30	19		○	
560-35-5	35	20		○

Fig. 1 Impeller geometry

に、翼出口角が小さい場合(560-15-5)と翼枚数が少ない場合(560-25-3)を除くと、すべての羽根車で右上がり揚程特性が生じている。

供試羽根車の右上がり揚程特性は、不連続的に生じ、右上がりの揚程曲線上での運転は不可能であった。右上がり揚程特性にはヒステリシスが生じるが、本報告では特に断わらないかぎり、流量を大流量側から減少させた場合の揚程曲線を示すことにする。

3.2 失速限界 斜流ポンプの右上がり揚程特性は、一般に流れのはく離(失速)によって生じる。失速の発生や発達の状態にはさまざまなタイプがあり、羽根車の失速限界を知るための指標も従来から数多くある⁽³⁾。三次元粘性流れ解析を用いて失速限界を求める方法もあるが、本報告では、一次元損失解析を用いた性能予測法への適用を考え、経験則を考慮した従来の

Fig. 2 Effects of blade exit angle β_{b2} on head-flow characteristic curves

Fig. 3 Effects of blade number Z on head-flow characteristic curves

失速限界指標と右上がり揚程特性との関係について検討する。

失速限界の指標には、拡散係数 $DF^{(4)}$ のように翼負圧面の境界層のはく離(blade stall)に関係する値と、Taylor⁽⁵⁾ が提唱する圧力係数 C_p のように上下壁面の境界層のはく離(wall stall)に関係する値とに大別することができる。一連の供試羽根車について、種々の指標と右上がり揚程特性との関係を調べてみた。その結果、本実験の右上がり揚程特性は、拡散係数 DF との相関は弱く、Taylor の圧力係数 C_p との相関が特に強いことがわかった。

Taylor は、ディフューザの境界層のはく離条件を翼列に適用して、次式の失速限界を示した⁽⁵⁾。

$$C_p = 1 - (C_2/C_1)^2 < 0.6 \quad \dots\dots\dots (1)$$

本指標は、出入口の速度だけから定まるもので、翼面上の境界層のはく離よりも、上下壁面におけるはく離に主眼をおいて設定されたものである。上式を、一次的に取扱った羽根車内の流れに適用すれば、

$$C_p = 1 - (W_2/W_1)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。羽根車の入口と出口の平均相対速度 W_1 と W_2 は、逆流が発生していない状態では、羽根車子午面形状と実測した性能曲線(軸動力、等)から、概略以下のように求まる。

$$W_1 = (Cm_1^2 + U_1^2)^{0.5} \\ = [(\phi A_2/A_1)^2 + (U_2 R_1/R_2)^2]^{0.5} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$W_2 = [Cm_2^2 + (U_2 - C u_2)^2]^{0.5} \\ = [\phi^2 + (U^2 - \psi_{th}/U_2)^2]^{0.5} \\ = [\phi^2 + (1 - \tau_h/\phi)^2]^{0.5} \quad \dots\dots\dots (4)$$

供試羽根車(Ns 560)と参考羽根車(Ns 1120)について、式(2)～(4)を用いて求めた右上がり揚程特性の発生流量における圧力係数 C_p を、図4に白丸印で示す。図4における黒丸印は、右上がり揚程特性が生じなかった羽根車の、入口逆流発生流量における圧力係数 C_p を参考を示したものである。図4の白丸印からわかるように、右上がり揚程特性の発生流量における

Fig. 4 Pressure rise coefficient C_p

圧力係数 C_p は、供試羽根車の諸元(比速度、翼出口角度、翼枚数)にかかわらず、すべて 0.65～0.70 の狭い範囲に分布している。Taylor の圧力係数 C_p が壁面の境界層のはく離に関係する値であることを考えると、一連の供試羽根車の右上がり揚程特性は、翼前縁からの流れのはく離(blade stall)によって生じるのではなく、羽根車後半のケーシング壁面付近で生じるはく離(wall stall)に関連して生じると考えることができる。

式(2)～(4)から、右上がり揚程特性が初生したときの理論揚程は、

$$\psi_{th,cr} = 1 - \sqrt{\left[(1 - C_p^*) \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 - 1 \right] \phi^2 + (1 - C_p^*) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $C_p^* = 0.68$

となる。理論揚程 ψ_{th} が上式の $\psi_{th,cr}$ 値を超えると流れがはく離すると考え得るので、 $\psi_{th,cr}$ を理論揚程失速限界と呼ぶことにする。なお、 C_p^* は羽根車の設計方針などによって変わり得る値である。

図2と図3には、理論揚程失速限界 $\psi_{th,cr}$ と軸動力なら求めた理論揚程 ψ_{th} も示してある。図2、3からわかるように、羽根車諸元にかかわらず、理論揚程 ψ_{th} と理論揚程失速限界 $\psi_{th,cr}$ とがほぼ交わった流量で、右上がり揚程特性が生じている。式(5)からわかるように、理論揚程失速限界 $\psi_{th,cr}$ の値は、流量 ϕ と羽根車子午断面形状に依存するが、流量 ϕ による変化は小さい(図2、3)。 R_1/R_2 の値が大きな子午断面形状(大きな比速度 N_s)であるほど、理論揚程失速限界 $\psi_{th,cr}$ の値は小さくなるので、理論揚程 ψ_{th} はより大きな流量 ϕ で $\psi_{th,cr}$ 曲線と交じわる。上記のことは、比速度 N_s が大きいほど右上がり揚程特性が生じやすいという、一般的に知られた経験的事実と一致する。

以上のように、理論揚程失速限界 $\psi_{th,cr}$ は、右上がり揚程特性の発生限界を揚程曲線図上で直感的に表現することができる。

4. 右上がり揚程特性と入口逆流

本章では、不連続的な右上がり揚程特性が生じる場合と生じない場合の代表的な例として、翼出口角 $\beta_{b2} = 25^\circ$ で翼枚数 $Z = 5$ の羽根車(560-25-5)と $Z = 3$ の羽根車(560-25-3)について考察する。

4.1 右上がり揚程特性の成り立ち 羽根車単独の性能を求めるために、羽根車の出口において測定した流れ状態から、羽根車全ヘッド差 ψ_{to} 、理論揚程 ψ_{th} および羽根車水力損失ヘッド $\Delta\psi_l$ を求め、図5に示す。

図5から、実線で示す羽根車 560-25-5 の全揚程 Ψ の右上がりとは、羽根車全ヘッド差 Ψ_0 の変化に起因しており、羽根車内部の現象であることがわかる。また、羽根車全ヘッド差 Ψ_0 の変化を理論揚程 Ψ_{th} と水力損失ヘッド $\Delta\Psi_l$ の変化とに分けて考えると、供試羽根車の右上がり揚程特性は、軸流羽根車などの場合⁽⁶⁾と異なり、水力損失ヘッド $\Delta\Psi_l$ の変化はほとんどなく、理論揚程 Ψ_{th} の変化に支配されていることがわかる。

理論揚程 Ψ_{th} の不連続的な変化の前後(図5の点Uと点D)で測定した、羽根車 560-25-5 の出口断面における周方向速度成分 C_{u2} の分布を図6に示す。また、図7は、同羽根車出口のメリディアン方向速度成分 C_{m2} と周方向速度成分 C_{u2} の周方向平均値の半径方向分布を示す。図6と図7からわかるように、理論揚程 Ψ_{th} の急低下に伴って(点U→点D)、羽根車出口の周方向速度成分 C_{u2} が、翼負圧面側チップ付近を除

く全域で大幅に低下している。しかし、メリディアン方向速度成分 C_{m2} はほとんど変化していない。

4.2 入口逆流の発生と通り抜け流れの減速 図5において、白三角印(翼枚数入り)は入口逆流の発生流量を示し、黒三角印は出口逆流の発生流量(翼枚数によって変わらず)を示す(以下、同様)。図5からわかるように、供試羽根車では出口逆流は入口逆流より小流量側で発生する。羽根車 560-25-5 の場合(実線、○印)、右上がり揚程特性の発生と同時に入口逆流が発生している。羽根車 560-25-3 の場合(破線、△印)は、理論揚程 Ψ_{th} が理論揚程失速限界 $\Psi_{th,cr}$ に達するよりも大流量側で入口逆流が初生している。

図8に示した R_{c1} は、羽根車入口で測定した通り抜

Fig. 5 Theoretical head and hydraulic loss

Fig. 6 Exit circumferential velocity distribution

Fig. 7 Meridional and circumferential velocity components

Fig. 8 Critical radius and typical peripheral blade speed of through flow

け流れと入口逆流との境界半径を表し、値が小さくなれば入口逆流の規模が大きくなっていることを意味する。図8から、流量 ϕ を減少した場合、羽根車 560-25-3(破線, $\triangle$ 印)ではある流量から入口逆流が徐々に発達するのに対して、羽根車 560-25-5(実線, $\circ$ 印)では比較的大規模な入口逆流が急激に生じていることがわかる。

図9は、通り抜け流れの羽根車入口と出口における平均相対速度 W_1 と W_2 の流量 ϕ に対する変化を示す。一般に、流量 ϕ の減少とともに、入口相対速度 W_1 と出口相対速度 W_2 との差(減速の程度)は徐々に大きくなり、式(2)の圧力係数 C_p は大きくなる。図9に実線($\circ$ 印)で示す羽根車 560-25-5の場合、流量を減少していくと、入口逆流が発生する $\phi=0.083$ で相対速度差は急激に小さくなっている。前述の大規模な入口逆流の閉そく効果のために、平均流入周速 U_1 が急減する(図8)ので入口相対速度 W_1 は急低下し、また出口の周方向速度成分 C_{u2} が低下する(図6, 7)ので出口相対速度 W_2 は増大する。そのため、入口逆流の発生によって、通り抜け流れの減速(W_1-W_2)は大幅に改善されている。

4.3 右上がり揚程特性の発生機構 以上の結果から、羽根車 560-25-5における不連続的な右上がり揚程特性の発生機構を考察すると、以下のように考える。

一般に、流量が減少して翼間流れの減速が著しくなると、ケーシング壁面や翼負圧面の境界層が厚くなり、翼間の二次流れが強くなる。二次流れによって、翼間の高損失流体が出口付近のケーシング壁面近傍の負圧面寄りに集積する⁽⁷⁾。羽根車 560-25-5の出口においても、不連続的な右上がり揚程特性の発生直前(図5の

点U)では、図10に示すように、羽根車出入口間の無次元相対全ヘッド差⁽²⁾すなわち損失がケーシング近傍で大きくなっている。そのため、ケーシング壁面付近から流れが大きくはく離して失速する。流れがはく離した領域では、相対速度が小さくなるため周方向速度成分 C_u が大きくなって、静圧が高くなる。そのため、ケーシング壁面近くのメリディアン方向の圧力こう配が大きくなり、流入流れの力のバランスが崩れて、羽根車入口のケーシング壁面近くで入口逆流が生じる⁽⁸⁾。前述のはく離は急激に一定以上の規模で生じ、それに対応して入口逆流も大規模なものが急激に生じる(図8)。入口逆流が生じると、通り抜け流れの減速割合は大幅に改善される(図9)。そのため、ケーシング壁面の大きなはく離は、入口逆流の発生と同時に解消していると考えられる。すなわち、図5の点Uから点Dへ、はく離の発生、大規模入口逆流の発生、およびはく離の解消の三つの現象が連続して瞬時に生じると考えられる。大きな入口逆流がチップ(ケーシング壁面)側に発生すると、その閉そく効果のため、通り抜け流れはより大きなメリディアン速度 C_{m1} でハブ寄りから羽根車に流入する。そのため、通り抜け流れの平均流入半径の周速 U_1 は急激に減少する(図8)。上

Fig. 10 Exit loss distribution

Fig. 9 Relative velocity of through-flow

Fig. 11 Incidence angle

記のメリディアン方向速度成分 C_{m1} の増大と平均流入周速 U_1 の減少は、通り抜け流れの翼に対する入射角を急減させる。図 11 は、右上がり揚程特性の発生前後(図 5 の点 U と点 D)において羽根車入口で測定した入射角 i の分布を示す。図 11 から、点 U と比較して点 D(図 11 中の黒丸)では、主流の流入するハブ側で入射角 i が大きく減少していることがわかる。そのため、翼の仕事(ψ_{th} , C_{u2})は急激に低下し、不連続的な右上がり揚程特性が発生する。

羽根車 560-25-3 の場合は、図 9 に破線(Δ 印)で示すように、流量の減少に伴う相対速度差($W_1 - W_2$)が過大になる(失速限界に達する)前に、入口逆流が初生している。一般に入口逆流は、はく離や失速とは無関係に生じ得る現象⁽⁸⁾であり、羽根枚数が少ないほど大流量側で生じやすい⁽⁹⁾。また、羽根枚数が少なければ、理論揚程 ψ_{th} が低いので、理論揚程曲線が理論揚程失速限界 $\psi_{th,cr}$ に達する流量はより小流量側となる(図 3)。そのため羽根枚数が少ない場合は、失速限界に達するまえに入口逆流が徐々に生じる。そして、徐々に発生する入口逆流の閉そく効果(4・2 節)によって、図 9 に破線(Δ 印)で示すように減速割合は次第に改善され、大規模なはく離の発生が未然に防止されている。そのため、羽根車 560-25-3 では、流量を減少させても不連続的な右上がり揚程特性は生じない(図 3)。

5. ま と め

斜流ポンプの性能と内部流れを検討して、比速度

560(rpm, m^3/min , m)のオープン羽根車に発生した不連続的な右上がり揚程特性に関して、以下の結果を得た。

(1) 一連の斜流羽根車に関して、不連続的な右上がり揚程特性の発生限界を表示する一つの方法として、理論揚程失速限界を示した。

(2) 供試羽根車の場合、不連続的な右上がり揚程特性は、理論揚程の急激な変化によって生じる。

(3) 不連続的な右上がり揚程特性は、失速(羽根車後半のケーシング壁面付近の大規模なはく離)に起因する大きな入口逆流の閉そく効果によって生じる。

(4) 入口逆流の発生は、羽根車の通り抜け流れの減速の程度を小さくする。したがって、流量を減少させても、失速限界に達する前に入口逆流が発生すれば、不連続的な右上がり揚程特性は生じない。

文 献

- (1) ターボ機械の低流量域特性に関する調査分科会, 機誌, **69**-568(1966), 566-579.
- (2) 後藤彰・勝俣辰善, ターボ機械, **15**-6(1987), 343-350.
- (3) 大橋秀雄, 機誌, **66**-537(1963), 1361-1367.
- (4) Lieblein, S. and Roudebush, W. H., NACA TN, 3662(1956).
- (5) Taylor, E. S., ガスタービン及びジェットエンジン, (1955), 日本航空工業会.
- (6) 豊倉富太郎, 機誌, **64**-507(1961), 602-610.
- (7) Goto, A., Trans. ASME, J. Turbomach., **114**(1992), 383-391.
- (8) 青木正則・山本和義, 機論, **56**-521(1990), 44-52.
- (9) 黄建徳・ほか2名, 機論, **57**-535, B(1991), 988-994.