ヘリカルインデューサの特性と流動状態*

喜多義範^{*1}, 古庄和宏^{*2}, 吉田貴弘^{*3}
広瀬幸治^{*4}, 山本恭二^{*1}

Overall Performance of Flat Plate Helical Inducers

Yoshinori KITA, Kazuhiro FURUSHO, Takahiro YOSHIDA,
Kôji HIROSE and Kyôji YAMAMOTO

This paper presents the results of experiments on flat-plate helical inducers. In order to offer sufficient data for designing helical inducers, various inducers were fabricated and tested. The number of blades, the blade length and the blade angle were varied systematically, and the overall performance and exit flow condition of each inducer were measured. The results obtained can be summarized as follows. (1) The number of blades and blade length have optimum values. (2) The ratio of axial velocity at outlet to that at inlet is about 1.3, and turning angle and pressure loss depend only on attack angle, in spite of the differences in inducers and flow rate. Consequently, head rise can be easily estimated using these results.

Key Words: Inducer, Pump, Cascade, Fluid Machinery, Velocity Distribution, Turning Angle

1. 緒 言

ヘリカルインデューサは、軸流ポンプの一種で、ポンプの吸込性能を向上させるために、主ポンプ羽根車の直前に装備される。このインデューサは当初ロケットエンジンに用いられた⁽¹⁾。最近では産業用ポンプにも使用され、また、粘性の高い流体を移送するために単独でも用いられる。このインデューサの特徴は大きな弦節比と、大きなスタガ角を持っていることである。そのために、ヘリカルインデューサを設計する際には、軸流ポンプの設計に使用されているカーベット線図などを直接用いることはできない。また、公表されているデータ量も設計に十分とはいえない⁽²⁾。

本報では、キャビテーションのない状態で、羽根枚数、羽根長さ、羽根角度を系統的に変化させた場合の、インデューサの揚程や効率および羽根車出口の流動状態について調べた。そして、その結果を設計にすぐ役立つような形式にまとめた。

2. 実験方法と供試インデューサ

本実験装置の試験部を図1に示す。羽根車上流における全圧や動圧は、ピトー管①を用いて②の位置で測定される。羽根車出口の流動状態については、供試インデューサ羽根車④の羽根後縁から6mm下流の位置⑤で、三孔式コブラ形ピトー管を用いて、種々の半径位置で流れの方向、全圧、動圧を測定した。

本実験に用いた羽根車の名称は、羽根枚数 Z 、羽根先端での弦節比 $1/t$ 、羽根先端での羽根角度 β_{bt} (周方向から計測) の値を順に並べて、 $Z(1/t)\beta_{bt}$ で表され

図1 試験部概略図

* 平成4年3月10日 中国四国支部第30期総会講演会において講演、原稿受付 平成4年4月1日。

^{*1} 正員、岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

^{*2} 准員、ダイキン工業(株) (〒591 堺市金岡町1304)。

^{*3} 岡山大学大学院。

^{*4} 正員、岡山理科大学工学部 (〒700 岡山市理大町1-1)。

表 1 供試インデューサ諸元

Inducer	$Z(1/t)\beta_{bt}$	1(1)20	2(2)20	3(3)20	4(4)20	3(1)20	3(2)20	3(6)20	3(9)20	2(2)10	2(2)12.5	2(2)15
Blade angle (Tip)	β_{bt} , deg	20								10	12.5	15
Blade angle ($r=23\text{mm}$)	β_b , deg	25.4								13.0	16.1	19.3
Blade number	Z	1	2	3	4	3				2		
Blade length	l mm	200.6				66.9	133.7	401.2	601.8	191.2	193.1	195.1
Solidity(Tip)	l/t	1.06	2.12	3.18	4.24	1.06	2.12	6.36	9.54	2.03	2.05	2.07
Tip diameter	D_t mm	59.0										
Hub diameter	D_h mm	30.0										

る。このように表した供試インデューサの諸元を表 1 に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 羽根枚数を変化させた場合 この節では、羽根角度を($\beta_{bt}=20^\circ$)と羽根長さ 1 を一定に保ち、羽根枚数 Z を 1~4 枚と変化させた場合の羽根車の諸性能について述べる。

揚程および効率の流量特性を図 2 に示す。縦軸は揚程係数 $\psi(\equiv gH/U^2)$ と全効率 $\eta(\equiv \gamma QH/L)$ であり、横軸は流量係数 $\phi(\equiv Q/AU_t)$ である。ここで揚程 H は種々の半径位置(14 点測定)での揚程を流量加重平均したものであり、 A は羽根車流路断面積である。図 2 によれば羽根枚数にかかわらず、どの羽根車も ψ - ϕ の関係は直線的で、その直線のこう配も羽根車によらず同程度である。しかし、羽根枚数 3 枚のものが最も高い揚程を示している。また効率に関しては、羽根枚数 3 枚のものが、他の羽根車よりも高い効率を示している。

これらの羽根車の出口での流動状態を $\phi=0.15$ について図 3 に示す。図 3 でのすべての縦軸は無次元半径 r/r_t であり、ここで、 r_t は羽根先端の半径である。図 3(a)は、揚程係数 $\psi(\equiv gH/U^2)$ と理論揚程係数 $\psi_{th}(\equiv UVu_2/U^2)$ の半径方向分布を示している。羽根枚数によらず揚程はハブ側で低く先端側で高いが、羽根枚数 3 枚のものは、羽根先端側でより高い揚程を示しているのがわかる。そして、その■印の $\psi_{th}/(\psi_{th})_{tip}$ は、非粘性流で予旋回がないとの仮定から導かれる $(r/r_t)^2$ にほぼ沿った分布となっている。図 3(b)は、インペラ効率 $\eta_i(\equiv \psi/\psi_{th})$ の半径方向分布である。いずれの羽根車も、ハブ側では 90% 以上の高い値を示しているが、羽根先端側では 60% 程度に低下している。これは、ハブ近くの羽根表面の境界層が遠心力のために羽根先端方向に流されるためと推測される。図 3(c)は、無次元軸方向速度成分 V_{a2}/U_t の分布であり、また図 3(c)中の破線は $\phi(\equiv Q/AU_t)$ である。ハブ側では軸方向速度は小さいが、羽根先端になるほど大きくなってい

図 2 羽根枚数を変えた場合の ψ - ϕ , η - ϕ

図 3 羽根枚数を変えた場合の羽根車出口の流動状態

る。図 3(d)は、相対流出角 β_2 (周方向から測定)の分布である。図 3(d)中の実線は羽根角度 $\beta_b[\equiv \tan^{-1}\{(r_t/r) \cdot \tan \beta_{bt}\}]$ 、破線は相対流入角 $\beta_1[\equiv \tan^{-1}\{(r_t/r) \cdot \phi\}]$ を示している。この図 3(d)によれば、羽根先端側では流れは羽根に沿って流出しているが、ハブ側では流れは羽根に沿わなくなっている。

次に、羽根車 3(3)20 における、流量変化に対する

図4 羽根車3(3)20における種々の流量での羽根車出口の流動状態

羽根車出口での流動状態の変化を図4に示す。図4(a)は、揚程係数 ψ の半径方向分布である。流量が小さくなるにしたがい、揚程はすべての半径位置で増大し、特に先端側で揚程は大きくなっている。図4(b)は、理論揚程係数 ψ_{th} であり、これも、揚程係数の場合と同様の变化を示す。図4(c)は、インペラ効率 η_i で、羽根先端側では、どの流量においても同程度の値を示しているが、しかしハブ側では、低流量の場合において、低い値となっている。図4(d)は、無次元軸方向速度成分 V_{a2}/U_t の半径方向分布である。流量が大きな場合には、ハブ側から羽根先端側まで、同程度の軸方向速度成分の値をもって流出している。しかし、流量が小さくなるにしたがいハブ側で流れにくくなり、その分連続の条件より、他の部分で軸方向速度成分が大きくなっている。この傾向は、流量が小さいほど強くなっている。図4(e)は、相対流出角 β_2 の半径方向分布であり、図4(e)中の線は羽根角度 β_b を示す。流量が大きな場合には、ハブ側から羽根先端側まで、ほぼ羽根に沿って流出していることがわかる。しかし、流量が小さくなるにしたがい、ハブ側で流れは羽根に沿わなくなっている。

3・2 羽根長さを变化させた場合 本節では、羽根角度($\beta_b = 20^\circ$)と羽根枚数($Z=3$)を一定に保ち、羽根長さを变化させた場合の羽根車の諸性能について述べる。

3・2・1 弦節比 $1/t > 3$ の場合 羽根車3(3)20を、2個、3個と軸方向に連結して、羽根長さを2倍、3倍と变化させる。このようにすると、羽根長さを变化させることで弦節比 $1/t$ は3~9と变化する。図示していないが、この場合の揚程は、どの羽根車も同程度の値を示した。しかし効率に関しては、羽根長さが長いほど低下していた。そしてこれらの羽根車出口での流

図5 羽根長さを変えた場合の ψ - ϕ 、 η - ϕ

動状態は、羽根長さを变化させても大きな変化はないことがわかった。このことは、羽根長さが弦節比で $1/t=3$ 程度までで、流れは羽根車によって十分变化させられていて、弦節比 $1/t$ が3以上になると、もはや羽根表面積増加により粘性力が大きくなって効率が下がるだけで、羽根車出口での流動状態には大きな変化はないと判断される。

3・2・2 弦節比 $1/t < 3$ の場合 次に、羽根車3(3)20の軸方向長さを $1/3$ や $2/3$ に切って、羽根長さを短くした羽根車について調べた。このようにすると、弦節比 $1/t$ はそれぞれ1, 2となる。そのときの揚程と効率の流量特性を図5に示す。図5によればどの羽根車も ψ - ϕ の関係は直線的に変化しているが、し

図 6 羽根長を変えた場合の羽根車出口の流動状態

かし羽根長さが長いほど揚程は高くなっている。効率に関しては、どの羽根車も同程度の値を示している。

これらの羽根車の出口での流動状態を図 6 に示す。流量係数 ϕ は 0.15 である。図 6(a) は、揚程係数 ψ の半径方向分布を示している。揚程の羽根長さによる差異は、ハブ側ではどの羽根車も同程度の値を示しているが、羽根先端側では羽根長さが長いほど高いことがわかる。図 6(b) の理論揚程係数 ψ_{th} についても、揚程係数 ψ について述べたことと同様のことがいえる。図 6(c) はインペラ効率 η_i で、このインペラ効率はどの羽根車も同じ傾向を示し、同程度の値を示している。図 6(d) は、無次元軸方向速度成分 V_{a2}/U_t の半径方向分布である。羽根長さが短いと(□印)、軸方向速度はハブ側からチップ側までほぼ一様に分布しており、その値は当然ながら Q/AU_t で示される ϕ の値に近い。しかしながら、羽根が長くなるにつれてハブ側の軸方向速度が小さくなり、その分チップ側で大きな軸方向速度成分を持つようになっている。図 6(e) は、相対流出角 β_2 の分布である。羽根長さが短いと、いずれの半径位置においても、 β_2 は実線で示されている羽根角度 β_0 よりも少し小さく分布しており、流れにすべりがあることがわかる。しかし羽根が長くなると、ハブ側では β_2 が β_0 よりもずいぶん小さくなるが、それにつれてチップ側では β_2 が β_0 にほぼ近い値で分布しており、流れはほぼ羽根に沿って流出していることがわかる。

3.3 弦節比 $1/t$ と揚程の関係 図 7 に揚程と弦節比の関係を示す。縦軸は揚程係数 ψ であり、横軸は弦節比 $1/t$ である。白印は、羽根長さを変化させることで、弦節比 $1/t$ を種々に変化させたものである。また、黒印は、羽根枚数を変化させることで、弦節比 $1/t$ を種々に変化させたものである。図 7 より弦節比 $1/t$

図 7 揚程と弦節比の関係

が 3 より小さな領域においては、羽根枚数を変化させた場合も、羽根長さを変化させた場合もともに、弦節比 $1/t$ が大きくなるにつれて揚程は増加する。しかし弦節比 $1/t$ が 3 より大きな領域においては、羽根長さ変化の場合は、弦節比 $1/t$ が大きくなっても揚程はあまり変わらないが、羽根枚数変化の場合には、弦節比 $1/t$ が大きくなるにつれて揚程は減少する。このように、ヘリカルインデューサの場合、揚程は弦節比 $1/t$ のみで整理できないことがわかる。すなわち弦節比 $1/t$ が 3 より大きな羽根車においては、 $1/t$ の値を支配する羽根枚数および羽根長さは、それぞれ揚程に影響を与える別個の因子として考えたほうがよいと判断される。

3.4 羽根角度を種々に変化させた場合 本節で種々の羽根角度の羽根車の $H-Q$ 特性を調べるが、今までどおり揚程を流量加重平均して求めると多大な労力が必要となる。これを簡素化するために、羽根車出口の流れの代表値が得られる半径を、前述の種々の羽根車について以下のように調べた。まず揚程の半径方向分布において、流量加重平均した揚程が、どの半径

位置で得られるかを調べた。その結果を図8に示す。縦軸は無次元半径 r/r_i で、横軸は流量加重平均した揚程係数 ψ である。いずれの羽根車でも、またいずれの揚程においても、流量加重平均値が得られる半径位置はほぼ変わらず、平均的には $r=22.2\text{ mm}$ ($r/r_i=0.75$) となった。次に、 rVu_2 についても同様に調べた結果を図9に示す。この図9より $r=23.3\text{ mm}$ が得られた。そして面積平均半径が $r=23.7\text{ mm}$ であることも考慮して、以下では $r=23\text{ mm}$ ($r/r_i=0.77$) を羽根車出口流れ計測の代表半径とした。それゆえ本節では、そこでの計測値をもって、羽根車出口の流れの方向、全圧、動圧の代表値としている。また用いた羽根車の羽根枚数は2枚とした。本来なら揚程、効率ともに高い値を示した羽根枚数3枚で実験すべきであるが、羽根角度が小さい羽根車においては、羽根枚数が多いと羽根と羽根との間隔が狭くなり、その製作が極端に困難となるために、羽根枚数を2枚(弦節比 $1/t \approx 2$) に統一して実験した。

図10は、羽根角度 β_{b1} を $10 \sim 20^\circ$ と変化させた場合の揚程係数 ψ や全効率 η と流量係数 ϕ の関係を示している。図10中の実線は揚程の推測値を示しているが、これについてはこの節の後半で述べる。図10によれば羽根角度の大きい羽根車ほど高い揚程を示しており、そして最高効率が得られる流量係数の値も、羽根角度が大きくなるほど大きくなる。しかし、最高効率の値は、羽根車によらずあまり変わらないようである。

図8 流量加重平均 ψ 値が得られる半径位置 図9 流量加重平均 rVu 値が得られる半径位置

図11は、代表半径位置における羽根車出口での軸方向速度成分 V_{a2} と入口での $V_{a1}(=Q/A)$ の比⁽³⁾を示したものであり、横軸は流入迎え角 $\alpha_1(=\beta_b - \beta_{b1})$ である。羽根車の種類および迎え角によらず、 V_{a2}/V_{a1} の値はほぼ1.3となっている。

$$V_{a2} = 1.3 V_{a1} \dots\dots\dots (1)$$

$V_{a2} > V_{a1}$ となるのは、ハブ側で軸方向速度が非常に

図10 羽根角度を変えた場合の ψ - ϕ , η - ϕ

図11 軸流速度比と流入迎え角の関係

図12 転向角と流入迎え角の関係

図 13 損失係数と流入迎え角の関係

小さく流れにくくなっており、その分だけ他の所で多く流れなければならず、代表半径の位置では $V_{a2} > V_{a1}$ となったと推測される。

図 12 は代表半径位置における、転向角 $\Delta\beta (= \beta_2 - \beta_1)$ と流入迎え角 α_1 の関係を示している。各羽根車において、低流量域で流れが羽根からはく離している領域を除くと、 $\Delta\beta$ と α_1 の関係はほぼ直線となり次式で表される(図 12 中の直線)。

$$\Delta\beta (= \beta_2 - \beta_1) = 1.2\alpha_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで $\Delta\beta > \alpha_1$ となっているのは⁽⁴⁾、前に述べたように V_{a2}/V_{a1} が 1 より大きくなるためや、全圧が半径方向に一樣でなく大きな分布があったことなどによるためと思われる。

図 13 は、損失係数 $\zeta [= (H_{th} - H)/(W_1^2/2g)]$ と流入迎え角 α_1 との関係を表している。ここで W_1 は入口での相対速度である。図 13 中の破線は妹尾の定義する衝突損失⁽⁵⁾である。損失は、迎え角が大きい所では破線に沿っており、迎え角の小さな流量の大きい所では粘性の影響も大きくなるため破線より大きくなっている。

以上、種々の羽根車について調べたところ、 V_{a2}/V_{a1} , $\Delta\beta$, ζ は羽根車の違いによる差異はあまりなく、ほぼ流入迎え角 α_1 のみによって変化することがわかった。それゆえ、もしこれらの関係がこれから設計しようとするインデューサでも成立するとすれ

ば、式(1)と式(2)より出口の速度三角形が定まり、 H_{th} が求まる。そして図 13 の水力損失を差引くと揚程を推測できる。そこで、このように式(1), (2)と図 13 の実線をもとにして揚程を推測したのが、図 10 中の実線である。この推測値は、低流量域を除いて、実測値とほぼ一致するので、本方法はある程度設計に役立つものと思われる。

4. 結 言

キャピテーションのない状態で、インデューサの羽根枚数、羽根長さ、羽根角度を系統的に変化させ実験し、その結果次のことが明らかとなった。

(1) $\beta_{bt} = 20^\circ$ の羽根車では、羽根枚数は 3 枚で、弦節比は 3 の羽根車が、高い揚程と効率を示した。

(2) 出口の流動状態はほぼ二つの領域に分けられる。すなわち、チップ側($r/r_t > 0.7$)での軸方向速度が早く、羽根に沿って流出する揚程の高い流れの領域と、ハブ側($0.5 < r/r_t < 0.7$)での軸方向速度が遅く、羽根に沿わない揚程の低い流れの領域。

(3) 弦節比 $1/t$ が 3 よりも大きな羽根車においては、揚程は弦節比のみで整理できない。それゆえ、弦節比を支配する羽根枚数および羽根長さそれぞれを、揚程に影響を与える別個の因子と考えたほうがよい。

(4) 式(1)と式(2)および図 13 中の実線を用いれば、低流量域をのぞいてインデューサ羽根車の揚程をほぼ予測できる。

文 献

- (1) 上条・鈴木, 航空宇宙技術研究所報告, 345(1973), 1.
- (2) 高松・ほか 3 名, 機論, 44-379(1978), 950.
- (3) 生井・井上, ターボ送風機と圧縮機, (1988), 424, コロナ社.
- (4) Soltis, R. F., ほか 2 名, NASA Tech. Note, D-1170 (1962).
- (5) 妹尾, ターボ機械, 12-4(1984), 24.