インデューサの交互翼キャビテーション*

黄 建 徳^{*1}, 青 木 正 則^{*2}, 張 健 同^{*3}

Alternate Blade Cavitation on Inducer

Jian-De HUANG, Masanori AOKI and Jian-Tong ZHANG

Concerning a flat-helical inducer with two blades, examinations on suction performance, cavitation development and internal flow conditions of the impeller were performed. As the suction pressure is reduced, the balanced cavity development on both blades is destroyed. Alternate blade cavitation, in which cavity development evolves on one blade while weakens on the other, can occur. When the alternate blade cavitation occurs, the theoretical and actual pump heads can decrease quickly. The following investigations were conducted to determine how this phenomenon develops.

Key Words: Cavitation, Pump, Inducer, LDV, Blade

1. ま え が き

遠心ポンプの高吸込性能化のための有効な手段として、インデューサを用いる方法がある。インデューサに関する研究は従来から数多くある⁽¹⁾⁽²⁾が、キャビテーションによる揚程低下の機構は必ずしも明らかではなく、揚程低下量の予測技術も確立されていない。一般に、ポンプのキャビテーションによる揚程低下の予測は、実務上の大きな課題の一つであるが、現状では数値解析などによる普遍的な予測手法を確立することは困難なようである。キャビテーションに伴う個々の現象について、実験的な解明を重ねる必要がある。

本報告では、平板ヘリカルインデューサに発生した交互翼キャビテーション(定常非対称キャビテーション)に着目して実験を行った。交互翼キャビテーションの発達の様相を観察するとともに、それに伴う揚程低下の発生機構について考察する。

おもな記号

$$k_d: \text{キャビテーション係数} = \frac{H_{sv} - \frac{c_1^2}{2g}}{\frac{w_{1t}^2}{2g}}$$

H_{sv} : 有効吸込水頭 m

c_1 : 翼入口の絶対速度 m/s

w_{1t} : 翼チップ入口の相対速度 m/s

g : 重力の加速度 m/s²

L_t : チップにおける翼入口端から翼間のど部までの翼方向距離(図5参照) mm

W_t : 翼間のど部のチップにおける翼間距離(図5参照) mm

ϕ : 流量係数 $= q/(A_2 \cdot u_t)$

q : 吐出し水量 m³/s

A_2 : 羽根車出口面積 m²

u_t : 翼チップ周速 m/s

Ψ : 揚程係数 $= gH/u_t^2$

H : 全揚程 m

Ψ_{th} : 理論揚程係数 $= gH_{th}/u_t^2$

H_{th} : 理論揚程 m

* 原稿受付 1995年12月5日.

^{*1} 上海交通大学 (中華人民共和国).

^{*2} 正員, (株)荏原総合研究所 (〒251 藤沢市本藤沢4-2-1).

^{*3} 中国農業機械研究院 (中華人民共和国).

添 字

— : 翼間流量平均値

2. 実験の装置と方法

供試羽根車には、図1に示すような、外径158 mm、ハブ径50 mm、翼厚さ4 mmの平板形ヘリカルインデューサを用いた。チップにおける翼角度は 14° 、弦節比2.0、羽根枚数は2枚である。ケーシングは内径159.5 mmの透明アクリル樹脂製とし、内部のキャビテーションの様相の観察が可能となっている。インデューサの下流には、旋回成分を取り除くためのディフューザを設けてある。インデューサの性能は、キャビテーションが生じていない状態では、翼後縁の10 mm下流でアロー形三孔ピトー管を用いて求めた。キャビテーションが激しく生じている場合、ピトー管の使用が困難であるので、ディフューザ下流の全圧からディフューザ損失(既測定)を差引いてインデューサ出

Fig. 1 Impeller geometry

Fig. 2 Cavitation performance

口の全圧を求めた。

キャビテーションが発達する様相について、肉眼で観察するとともに、非定常三孔ピトー管⁽³⁾とレーザドップラー流速計⁽⁴⁾を用いて内部流れの計測を行った。

3. キャビテーションの発達と揚程低下

3.1 キャビテーションによる揚程低下 吸込圧力(キャビテーション係数 k_d)による揚程の変化を図2に示す。図2中の黒印では、低周波数のキャビテーション脈動⁽⁵⁾が発生した。図2からわかるように、キャビテーション係数 k_d の低下に伴って揚程 ψ は緩やかに低下しており、比速度の大きなポンプの一般的な

Fig. 3 Cavitation development ($\phi=0.10$)

傾向を示している。しかし、吐出し量 $\phi=0.10$ では、揚程 H が $k_d=0.13$ から $k_d=0.10$ にかけて大きく低下しており、他とは異なる不規則な揚程変化を示している。なお、吐出し量 $\phi=0.125$ でもわずかに同様な傾向を認めることができる。

3・2 キャビテーションの発達の様相 吸込圧力 k_d の低下に伴うキャビテーションの発達の様相を観察した。観察結果の一例を、スケッチ(展開図)にして図3に示す。また、キャビテーションの発達状態を定量的に把握するために、翼負圧面に生じるキャビティの大きさを、肉眼で観察し測定した。翼面に沿って測定したキャビティの最大長さを L とし、翼面に垂直な方向に測定したキャビティの最大幅を W とし、キャビテーション係数 k_d との関係を図4に示す。なお、キャビティの大きさが個々の翼によって著しく異なる場合があったので、それぞれの翼 a, b について別

個に観察測定した。図2~4の中の記号①~⑤は、それぞれ下記のような状態を示す。

- ①：翼負圧面前縁付近のキャビテーションの初生
- ②：翼端すきまからの漏れ流れによって生じるキャビテーションの初生
- ③：キャビティの大きさが翼によって異なるようになる直前
- ④：二つの翼のキャビティの大きさが極大となる
- ⑤：二つの翼のキャビティの大きさが解消

供試羽根車は平板翼を用いているので、キャビテーションは流量にかかわらずおもに翼負圧面側に生じる。吸込圧力 k_d を徐々に下げていくと、図3の①に示すように、翼負圧面上の前縁からシート状のキャビティが初生する。観察した流量($\phi=0.10$)では、入口逆流が生じているため、初生箇所は翼チップから少し内径側に寄っている。吸込圧力 k_d の低下に伴って、翼端すきまからの漏れ流れによって生じる速度せん断層の渦中心にもキャビテーションが発生し、図3の②に示すような多くの細い糸状のキャビティとして観察することができる。前記のシート状のキャビティと上記の糸状のキャビティとは次第に発達して、図3の③に示すような複合的な大きなキャビティとなる。図3では、入口逆流のために生じる渦キャビテーションを観察することができる。

さらにキャビテーションが発達すると、図4に示すように、当初は2枚の翼 a, b で同じように発達してきたキャビティの均衡が崩れ、一方の翼 a のキャビティの規模が急に縮小し、他方の翼 b のキャビティが大きくなる現象(以下、交互翼キャビテーションと呼ぶ)が生じる。本状態では、図3④の断面 A-A からわかるように、翼間 B ののど部では流路断面の半分近くが、キャビティによって占められている。

上記のキャビティは、羽根車に対して相対的に回転することはなく、供試羽根車の翼枚数を4枚にした場合にも発生した。以上のような交互翼キャビテーションについては、Acosta⁽¹⁾ が Stable alternate blade cavitation として指摘し、上條ら⁽⁶⁾ も観察しており

(b) Width of cavity ($\phi=0.10$)

Fig. 4

Fig. 5 Onset of alternate blade cavitation

Fig. 6 Relative velocity vector measured by LDV
(at mean radius, $\phi=0.10$, $k_d=0.10$)

(定常非対称キャビテーション)、供試羽根車に特有な現象ではない。

交互翼キャビテーションの発生機構の詳細は不明であるが、以下のように推察することができる。吸込圧力 k_d が低くなって、キャビティが翼間のど部(図5)近くまで発達すると、キャビティによって翼間の有効流路幅が狭くなる(閉そく効果)。図5において、なんらかの理由で翼bのキャビティが翼aのキャビティよりも若干でも大きくなれば、翼間Bの翼a寄りの流れのメリディアン方向速度成分はキャビティの閉そく効果のためより速くなり、翼aに対する流れの入射角が小さくなる(後述する図6の速度ベクトルを参照)。そのため、翼aのキャビティが小さくなり、翼a、bのキャビティの大きさの差はますます顕著になり、交互翼キャビテーションの状態となる。より大流量($\phi=0.175$)の場合には、キャビティが小さくなった翼aの圧力面側前縁に、それまで生じていなかったキャビティがわずかに生じるようになる(図省略)ことから、交互翼キャビテーションの発生に伴って、翼aに対する流れの入射角が変化していることがわかる。二つの翼のキャビティの大きさの相違のきっかけとしては、キャビティの変動や羽根車の製作誤差などが考えられる。なお、吐出し量 ϕ が締切流量に近い場合に交互翼キャビテーションが生じていない(図2)のは、メリディアン方向速度成分が小さく、キャビティの閉そく効果による入射角の変化も小さいためと推測することができる。

さらに吸込圧力 k_d が低下すると、キャビティは交互翼キャビテーション状態のまま発達するが、その過程で脈動が発生する(図4の黒印)。脈動が発生すると、羽根車の回転周波数の0.025~0.15倍の周波数で、各翼のキャビティが同時に翼長さ方向に大きく伸縮するのを観察することができた。キャビテーションがさら

(a) Exit relative velocity vector
($k_d=2.30$; non-cavitation)

(b) Exit relative velocity vector
($k_d=0.10$; alternate blade cavitation)

Fig. 7

に発達すると、図4に示すように、脈動現象は消滅し、やがてキャビティが翼後縁にまで達すれば、交互翼キャビテーション状態も解消する。

3.3 交互翼キャビテーションによる揚程低下の機構 前述の吐出し量 $\phi=0.10$ における不規則な揚程低下(図2)の原因を考察するために、内部流れを検討する。図2から、揚程 η が大きく低下した点($\phi=0.10$ における $k_d=0.10$)は、交互翼キャビテーションが著しく発達した④の状態であることがわかる。

Fig. 8 Pump head at each flow path

Acosta の報告⁽¹⁾でも, Stable alternate blade cavitation が発生すると揚程 Ψ が低下しているが, その原因については詳しく言及していない。

吐出し量 $\phi=0.10$ のキャビテーション係数 $k_d=0.10$ において, レーザドップラー流速計を用いて計測⁽⁴⁾した, 羽根車の二乗平均半径位置での翼間相対流れを図6に示す。図6中の空白部分は, キャビティのために計測が不能であった。図6からわかるように, キャビティの大きな翼間Bでは, キャビティの閉そく効果のために, 流入流れは翼間圧力面側に片寄り, 翼aに対する入射角が小さくなっている(前述)。一方, キャビティの小さな翼間Aでは, 流れは比較的均一に流れている。

供試羽根車の翼後縁から 10 mm 下流の流路断面で, 非定常三孔ピトー管⁽³⁾を用いて測定した, 吐出し量 $\phi=0.10$ における相対速度ベクトル分布を図7に示す。図7の横軸は流れの周方向速度成分の大きさと羽根車の周方向位置とを表し, 縦軸は流れの軸方向速度成分の大きさと羽根車の半径方向位置とを示す。速度ベクトルが上方に向いている場合は流れが下流側へ向かっていることを示し, 下方に向いている場合は逆流していることを示す。図7(a)のキャビテーションが発生していない $k_d=2.30$ では, 出口流れが周方向に一樣となっている。しかし, 交互翼キャビテーションが発達して揚程が大きく低下した $k_d=0.10$ [図7(b)] では, キャビティが増大した翼間Bの翼負圧側に大きな逆流域(破線)が生じている(図6の出口付近流れと対応)。一方, キャビティが縮小した翼間Aでは, 速度ベクトルは周方向に比較的均一で, キャビテーションが発生していない状態[図7(a)]と類似しているが, 軸方向速度成分は全体的に大きくなっている。

交互翼キャビテーションが発達した図7(b)($\phi=$

0.10, $k_d=0.10$)の羽根車出口の流れを, 翼間A,Bとでそれぞれ流量平均して, 各翼間の理論揚程 $\overline{\Psi_{th}}$ および全揚程 $\overline{\Psi}$ を求め, 図8に黒印で示す。図8の横軸は, 各翼間の通過する流量の無次元数 $\overline{\phi}$ を示す。キャビテーションが生じていない場合には, $\overline{\phi}$ はポンプ吐出し量の無次元数 ϕ の値に等しい。図8中の白印と実線は, キャビテーションが生じていない場合の各流量 ϕ におけるポンプ理論揚程 $\overline{\Psi_{th}}$ および全揚程 $\overline{\Psi}$ を示す。図8に黒印で示すように, 吐出し量 $\phi=0.10$ における交互翼キャビテーション状態では, 翼間Bの大きなキャビティの閉そく効果のために, 翼間Bの通過流量は小さく($\overline{\phi}=0.075$)なり, 翼間Aの通過流量は大きく($\overline{\phi}=0.132$)なっている。

図8からわかるように, 交互翼キャビテーション状態でキャビティが縮小した翼間Aの理論揚程 $\overline{\Psi_{th}}$ と全揚程 $\overline{\Psi}$ (黒印)は, キャビテーションがない状態(図8中の実線上)の同一翼間流量($\overline{\phi}=0.132$)における値とほぼ等しい。また, 交互翼キャビテーション状態の翼間Aの流れの様相は, 図6と図7からわかるように, キャビテーションが発生していない場合と類似している。したがって, 交互翼キャビテーションの発生に伴う翼間Aの理論揚程 $\overline{\Psi_{th}}$ と全揚程 $\overline{\Psi}$ の低下は, (出口速度三角形から明らかのように)翼間流量の増大に伴うメリディアン(軸)方向速度成分の増大に起因していると考えられる。

一方, 交互翼キャビテーション状態の翼間Bの理論揚程 $\overline{\Psi_{th}}$ と全揚程 $\overline{\Psi}$ は, 図8の黒印で示すように, キャビテーションなしの同一の翼間流量($\overline{\phi}=0.075$)の値(白印)よりもかなり低い。この原因を以下のように考える。図6の翼間Bにおいて, 空白部で示されるキャビティの内部は, 飽和蒸気圧状態で周囲よりも圧力が低い。そのために, キャビティが消滅した翼長中程から出口に向かう翼負圧面付近では, 圧力が飽和蒸気圧から出口静圧まで大きなこう配をもつと考えられ, 流れは大きく減速して逆流域[図7(b)の破線]を形成し, 出口の翼負圧面側からはほとんど流出していない(図6)。そのため, 同一翼間流量($\overline{\phi}=0.075$)のキャビテーションが生じていない場合と比較して, 有効な流出面積が狭くなるので, 流出流れのメリディアン方向速度成分がより大きくなり, 同一の相対流出角であっても, 交互翼キャビテーションが生じている場合のほうが流出流れの周方向絶対速度成分が小さくなる。したがって, 交互翼キャビテーション状態の翼間Bにおける理論揚程 $\overline{\Psi_{th}}$ (図8の $\phi=0.075$ における黒丸印)は, キャビテーションが生じていない場合の値(図8中白丸印)よりも低く, 全揚程 $\overline{\Psi}$ も小さい。

以上のような、交互翼キャビテーションに伴う翼間 A, B の流れの変化によって、吐出し量 $\phi=0.10$ では、羽根車全体の理論揚程 Ψ_{th} と全揚程 Ψ が大きく低下する。

しかし、同じように交互翼キャビテーションが発生しても、より大流量域では、全揚程 Ψ の不規則的な急低下は顕著ではない(図 2)。Acosta の報告⁽¹⁾でも、Stable alternate blade cavitation に伴う揚程 Ψ の低下の程度は、大流量になるほど小さくなっている。この原因は明らかではなく、さらに詳細な検討が必要であるが、以下のような推察も可能と考える。大流量になるほど羽根車出口の静圧は低いので、図 6 の翼間 B において、空白部で示されるキャビティの後端から翼後縁に向かう翼負圧面付近の圧力こう配は小さい。そのため、羽根車出口の負圧面側の流れの停滞は生じにくく、前述した流出流れのメリディアン方向速度成分の減速割合が小さいので、理論揚程の低下に伴う全揚程の低下は顕著ではないと考える。

4. ま と め

2 枚の翼をもつ平板ヘリカルインデューサについて、吸込性能、キャビテーション発達の様相および羽

根車内部流れを実験的に調べ、以下の結果を得た。

(1) 吸込圧力の低下に伴って、2 枚の翼で同じように発達してきたキャビティの均衡が崩れ、一方の翼のキャビティの規模が急激に縮小し、他方の翼のキャビティが大きくなる現象(交互翼キャビテーション)が生じる場合がある。

(2) 交互翼キャビテーションが発生すると、理論揚程と全揚程が急に減少する場合がある。本現象の揚程低下状態において、キャビティが縮小した翼間では通過流量が増大し、キャビティが増大した翼間の出口負圧面側では逆流域が発生していることを明らかにした。以上の結果に基づいて、揚程低下の発生機構について考察を加えた。

文 献

- (1) Acosta, A. J., An Experimental Study of Cavitation Inducer, *Proc. 2nd' Symp., Naval HydroDyn.*, (1958), 533-557.
- (2) 高松康生・ほか 3 名, 機論, 44-379 (1978), 950-969.
- (3) 黄建徳・ほか 2 名, 機論, 56-532, B (1990), 3779-3785.
- (4) 青木正則・山本和義, 機論, 56-521, B (1990), 44-52.
- (5) 山本和義, 機論, 56-523, B (1990), 644-649.
- (6) 上條謙二郎・ほか 3 名, NAL TR-598 (1980).