遠心ポンプ羽根車入口の非定常圧力分布と
キャビテーションの発生限界*菊 山 功 嗣^{*1}, 峯 村 吉 泰^{*2}
長谷川 豊^{*1}, 村 上 光 清^{*3}Unsteadiness of Pressure Distribution and Cavitation Inception
on the Impeller Blades of a Centrifugal PumpKoji KIKUYAMA, Kiyoshi MINEMURA,
Yutaka HASEGAWA, and Mitsukiyo MURAKAMI

Pressure distribution and cavitation inception near the inlet region of an impeller passage of a centrifugal pump were examined experimentally. Both at flow rates lower and higher than normal, the pressures on the blade surface of the impeller fluctuated nearly periodically with its circumferential position due to the non-uniform pressure distribution in the volute and the presence of the dividing ridge of the volute. From the measured pressure distributions on the blade surface at a fixed circumferential position, the pressure fluctuations were also found to be caused, especially at low flow rates, by turbulent fluctuations including the separation of flow from the blade surfaces. The quasi-periodic changes in the pressure distribution caused circumferential non-uniformity of the cavitation occurrence near the cavitation inception and effects of the pressure fluctuations on desinentcavitation number were found to be noticeable at a low flow rate.

Key Words: Fluid Machine, Centrifugal Pump, Pressure Distribution, Cavitation Inception, Unsteadiness, Volute Casing

1. ま え が き

広い流量範囲におけるポンプの性能および吸込性能向上のためには、ポンプ羽根入口近傍の流動を明らかにすることが重要である。とくに、設計点から離れた運転状態においては、うず巻室内の圧力不均一が生じ、その不均一圧力場を個々の羽根が通過するため、羽根流路内の流れに非定常性が大きくなり、そこでのキャビテーションの発生は極めて複雑になることが予想される。しかし、遠心羽根車および斜流羽根車についてのこのような流れの非定常性の研究は比較的少なく、羽根付きディフューザを持つ遠心羽根車において、その羽根車上の圧力変動の振幅と位相の変化を調べた飯野らの研究⁽¹⁾があるにすぎない。一方、ポンプうず巻室内の圧力不均一のため一回転ごとに変動する羽根面圧力とキャビテーション発生との関係を実験的に調べた研究は著者らの知る限りほとんどない。

本研究は前報⁽²⁾の遠心ポンプを用いて羽根面圧力およびハブ面圧力を羽根車相対系から連続測定するこ

とにより、回転周方向への圧力の周期的変化を調べ、これとキャビテーション発生との関係を明らかにしたものである。

2. 記 号

- a : 羽根先端から羽根板中心に沿った距離
- A_1 : 羽根車入口面積
- A_s : 吸込管断面積
- p : 測定点における瞬時の静圧
- Q : ポンプ吐出し流量
- r : 測定点半径位置
- r_1 : 羽根車入口半径
- r_2 : 羽根車出口半径
- s : 羽根厚さ = 10 mm
- u : 測定点の羽根車周速度
- α : 使用水の空気含有量
- α_s : 飽和空気含有量
- θ : 羽根車周方向位置 (図3参照)
- c_p : 圧力係数 (4章参照)
- σ_d : 消滅キャビテーション係数 $= NPSH / (u^2 / 2g)$
- σ_i : 羽根面圧力に基づくキャビテーション係数 (4章, 式(9)参照)

* 昭和62年3月16日 東海支部第36期総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年4月17日。

^{*1} 正員、名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市中種区不老町)。

^{*2} 正員、名古屋大学教養部。

^{*3} 正員、愛知工業大学 (〒470-03 豊田市八草町)。

ϕ : 流量係数 $= Q/(A_1 u_1)$

ϕ_m : 最高効率点流量係数 $= 0.277$

添字

s: 吸込管内の状態

1: 羽根車入口直前

2: 羽根車出口直後

3. 実験装置と方法

実験装置は前報⁽²⁾で使用したものと同一で、供試ポンプは図1に示す羽根車をもち、口径が150 mm, 比速度 $n_s = 280 \text{ (min}^{-1}, \text{m}^3/\text{min}, \text{m})$ の半径形である。羽根車は、2円弧形状の7枚羽根車で、羽根入口角, 出口角はそれぞれ $\beta_1 = 22^\circ 20'$, $\beta_2 = 25^\circ$ である。

羽根車入口直後の羽根面上の圧力は図2に示すように羽根先端から種々の距離に直径1.0 mmの測定孔を設けて求めた。一方、羽根流路の圧力を測定するために、流路中央の種々の半径位置のハブ壁面にも1.0 mmの圧力測定孔を設けた。

測定孔内の指示圧力はハブ面に装着した半導体小形圧力変換器により電気信号に変換され、スリップリングを通して外部に取り出した。羽根車内の測定点とポンプケーシングとの相対位置の変化に伴い準周期的に変動する圧力を調べるため、外部に取り出された電気信号は直流増幅器、A-D変換器を経てマイクロコンピュータにより磁気ディスクにサンプリングした。

サンプリングを開始する基準位相角 ($\theta = 0^\circ$) は、図3に示すように測定対象となる羽根先端がポンプ最上

部に位置する状態(O-Y)とし、羽根車が1周する間に等間隔に14点サンプリングを行い、1150回転する間の圧力を測定した。圧力測定はポンプの相似則が成立し、かつキャビテーション未発生領域にある回転数 $n = 600 \text{ min}^{-1}$ にて行い、流量は最高効率点 $\phi_m = 0.277$ を基準に、 $\phi/\phi_m = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.00, 1.25, 1.45$ に変えた。

ポンプの吸込性能を調べるために、羽根面上もしくは羽根近傍において発生するキャビテーションの消滅点を測定した。キャビテーション消滅の確認は、ケーシングおよびシュラウドを透明にし、ストロボ照射により内部流れを観察することにより行い、ポンプ回転数 $n = 800 \text{ min}^{-1}$ において測定時間30秒内のキャビテーション発生頻度がストロボ照射の6 shoot 以下である状態、すなわち1.5%以下の発生状態を消滅として判定した。実験中は常に水中の空気含有度を大気圧下で $a/a_s = 0.5$ に保ち、水温は288~293 Kの範囲内に保った。

4. 実験結果を表す式

羽根車上の壁面圧力 p は羽根車の回転に伴い準周期的に変動する。すなわちサンプリングされる圧力 p

図1 羽根車形状

図2 測定点位置

図3 周方向位置

は、流量 ϕ 、位相角 θ ($0 \leq \theta \leq 2\pi$)、測定開始からの積算回転数 m ($1 \leq m \leq M$, M は全回転数) の関数として次式のごとく示される。

$$p(\phi, \theta, m) = P(\phi, \theta) + p'(\phi, \theta, m) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで P は圧力の位相平均であり、 p' は P を基準にした変動量である。この位相平均圧力は、

$$P(\phi, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M p(\phi, \theta, m) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表される。一方、圧力 p が準定常的に変化すると考えた場合の圧力の時間平均値は、

$$\bar{P}(\phi) = \int_0^{2\pi} P(\phi, \theta) d\theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。式(1)中の圧力変動 p' の大きさを評価するために、次式で定義される量 P' をとる。

$$P'(\phi, \theta) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \{p(\phi, \theta, m) - P(\phi, \theta)\}^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

この値は角度 θ における圧力変動の標準偏差である。

羽根面上の瞬時圧力 p は、吸込平均圧力 $\bar{P}_s$ とのヘッド差を羽根車出口周速度を用いて無次元し、次式で示される圧力係数 C_p で表す。

$$C_p = \frac{p - \bar{P}_s}{\rho u_2^2 / 2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(5)の圧力 p にさきに定義した時間平均 $\bar{P}$ 、位相平均 P 、標準偏差の圧力 P' を代入すると、時間平均、位相平均および標準偏差の圧力係数 $\bar{C}_p$ 、 C_p 、 C'_p が次式で定義される。

$$\bar{C}_p = \frac{\bar{P} - \bar{P}_s}{\rho u_2^2 / 2}, C_p = \frac{P - \bar{P}_s}{\rho u_2^2 / 2}, C'_p = \frac{P'}{\rho u_2^2 / 2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

一方、ハブ面圧力は位相平均圧力と時間平均圧力との差を無次元化して $C_{p \text{ Hub}}$ で表す。

$$C_{p \text{ Hub}} = C_p(\phi, \theta) - \bar{C}_p(\phi) \quad \dots\dots\dots (7)$$

羽根面上の瞬時の最低圧力 $p_{\min}$ が水の飽和蒸気圧 p_v に低下したときにキャビテーションが生じると仮定し、このときの吸込管内圧力を $\bar{P}_{si}$ とすると、最低圧力点における瞬時の圧力係数 $C_{p \min}$ は次のようになる。

$$C_{p \min} = \frac{p_{\min} - \bar{P}_{si}}{\rho u_1^2 / 2} = \frac{p_v - \bar{P}_{si}}{\rho u_1^2 / 2} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

キャビテーション消滅判定基準と対応させるために、 $C_{p \min}$ として各周方向位置に対してサンプリングした圧力データ 1150 点のうち低いほうから 1.5% すなわち 17 点目を採用し $C_{p1.5}(\phi, \theta)$ で表す。したがって、羽根面圧力に基づくキャビテーション係数 $\sigma_i(\phi, \theta)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_i(\phi, \theta) &= \frac{\bar{P}_{si} - p_v + \rho C_s^2 / 2}{\rho u_1^2 / 2} \\ &= -C_{p1.5} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 + \left(\frac{A_1}{A_s} \right)^2 \phi^2 \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

5. 実験結果と考察

5.1 流路中央のハブ面圧力 図4は、流量を変えたときの羽根流路中央におけるハブ面圧力の回転周方向変化を半径位置 $r/r_2 = 0.5, 0.9$ について示す。縦軸には時間平均圧力からの偏差 $C_{p \text{ Hub}}$ 、横軸には羽根流路入口中央点の周方向位置 θ がとられている。羽根車出口近傍の $r/r_2 = 0.9$ におけるハブ面圧力は、最高効率点 $\phi/\phi_m = 1.0$ ではほぼ一定となるが、流量比 $\phi/\phi_m = 0.5$ なる低流量および $\phi/\phi_m = 1.45$ なる過大流量では羽根車の回転に伴い周方向に大きく変化している。この低流量時と大流量時の $C_{p \text{ Hub}}$ の周方向変化は互いに逆の傾向を示しており、その変化は Stepanoff⁽³⁾、Worster⁽⁴⁾ らのうず巻室内の圧力と定性的に一致する。羽根流路入口 $r/r_2 = 0.5$ においても $C_{p \text{ Hub}}$ は周方向に変化しているが、出口近傍と比較してその変化量の絶対値は小さくなっている。しかし同一の傾向を示す。このことより、羽根入口近傍の流れはうず巻室の圧力不均一の影響を受けて周期的に変化すると考えられる。

5.2 羽根面平均圧力 図5は羽根入口先端近傍の羽根面上における時間平均圧力 $\bar{C}_p$ の分布を示す。低流量 $\phi/\phi_m = 0.25$ の場合には羽根低圧面で流れが大きくはく離し、またそれに伴い羽根車入口前で予旋回が生じるため相対流入速度は減少し、よどみ点圧力が小さくなり、羽根に加わる圧力負荷も小さくなっている。最高効率点 $\phi/\phi_m = 1.0$ では、圧力 $\bar{C}_p$ は羽根先端近傍のよどみ点から低圧面上の $a/s = 0.4$ 近傍の最低圧力まで急激に低下し、その下流においては速やかに上昇しており、流れは大きなはく離を起こすことなく羽根面に沿って流れている。流量比 $\phi/\phi_m = 1.45$ の大流量時には流れに対する羽根の迎え角はほぼ零になり、高圧面上においても圧力の低下が見られ、圧力負荷は急激に減少する。

図4 ハブ面圧力の周方向変化

図6(a), (b)は羽根車が一回転するときの羽根面圧力の変化を羽根先端($a/s=0.0$), 最低圧力点近傍($a/s=0.5$)および最下流測定点($a/s=4.1$)における位相平均圧力 C_p を用いて示す。いずれの測定位置においても $\phi/\phi_m=0.5$ および 1.0 では C_p の周方向変化は少ないが、大流量 $\phi/\phi_m=1.45$ および低流量 $\phi/\phi_m=0.25$ においては C_p の変化は増大する。流量比 $\phi/\phi_m=0.25$ の場合、高圧面上の圧力 C_p は羽根後端がうず巻室舌部を通過する $\theta=0\sim60^\circ$ (図3参照)で最低、 $\theta=180\sim270^\circ$ で最大値を取るが、この変化はさきに図4で示したハブ面上の圧力 $C_{p\text{Hub}}$ とはほぼ同じ周方向変化を示す。これに対して低圧面上では逆に $\theta=30^\circ$ 近傍で C_p は最大値を取る。流量比 $\phi/\phi_m=1.45$ の大流量の場合にも高圧面上の圧力はハブ面上の圧力と同じ変化の傾向を示し、低圧面上ではそれと逆の傾向を示している。羽根先端直後の $a/s=0.5$ で大きな圧力変化を生じるのは、羽根車が一回転する際の流入角度の変化が大きいためである。

図7(a), (b), (c)は羽根面上の位相平均圧力 C_p の分布形状をそれぞれ $\theta=51^\circ, 206^\circ, 309^\circ$ の羽根位置に対して示す。低流量の $\phi/\phi_m=0.25$ の場合、羽根後端が舌部を通過する位置 $\theta=51^\circ$ (図3参照)においては羽根前半での圧力は高圧面と低圧面でほぼ同じ分布をとり、この位置においては羽根に対する流れの相対流入速度は小さいことがわかる。羽根位置 θ が増すにつれ羽根先端近傍の圧力負荷は増大し、 $\theta=206^\circ$ 近傍で最大となる。図7(b)の最高効率点流量 $\phi/\phi_m=1.0$ においては、羽根位置 θ による圧力分布形状の大きな変化は見られず、羽根流路内の流れの一回転当たりの変化が少ないことを示している。 $\phi/\phi_m=1.45$ の大流量になると〔図7(c)〕、圧力分布形状は羽根車の回転に

伴い再び大きく変化する。羽根後端が舌部直前にある $\theta=309^\circ$ では、先端近くで高圧面の圧力が低圧面よりも低下し負の圧力負荷を生じているのがわかる。羽根車の回転によって羽根後端が舌部を通過すると圧力負荷は再び増大し、 $\theta=51^\circ$ 近傍で最大値をとる。

5.3 圧力変動 羽根面圧力は羽根車の回転に伴い周方向に変化するが、それ以外にも流れのはく離を含む乱流変動などの影響を受けるため、一周ごとに同一周方向位置で測定した圧力は一定でなく変動している。

(a) 低圧側

(b) 高圧側

図5 羽根面上の時間平均圧力分布

図6 羽根面圧力の周方向変化

図8(a), (b)は式(4)および(6)で定義される圧力変動の標準偏差 C_p の周方向変化を示す。流量および羽根面上の測定点位置は、位相平均圧力を示す図6(a), (b)と対応している。羽根面上の圧力変動 C_p はいずれの測定点位置においても低流量で大きい。流量が増すにつれて減少する。これは、低流量の場合、羽根面上ではなく離等により流れが不安定になるためである。またこの圧力変動は、羽根先端近傍の $a/s=0.25 \sim 0.5$ において最大となり、下流に行くにつれて減少していく。いずれの測定位置でも、低流量時には、周方向に C_p が大きく変化しており、 $\phi/\phi_m=0.25$ でとくに顕著である。いま羽根面上の位置 $a/s=0.5$ についてみると、高压面、低压面ともに位相平均 C_p [図6(a), (b)] が極大値を取る周方向位置 θ で圧力変動 C_p は極小値を取り、逆に C_p が極小値を取る位置で C_p は極大値を取っているのがわかる。

圧力変動をさらに詳しく調べるために、図9(a), (b)には異なる流量に対して $a/s=0.5$ で求めた圧力偏差 $[c_p(\phi, \theta, m) - C_p(\phi, \theta)]$ の確率密度分布を示す。図9(a)の $\phi/\phi_m=0.25$ においては、図8(a), (b)に見られるように、周方向位置 $\theta=45^\circ$ 近傍と $\theta=180^\circ$ 近傍では C_p , C_p の特性が大きく異なるため、 $-26^\circ < \theta < 77^\circ$ と $129^\circ < \theta < 231^\circ$ の領域に分け、それぞれの領域内での確率密度分布の平均値を区別して図中に示してある。横軸には各 θ における位相平均からの偏差を標準偏差 $C_p(\phi, \theta)$ で無次元化した値 $x=(c_p - C_p)/C_p$ を取り、縦軸には次式によって正規化された x の確率密度関数 (P. D. F.) $f(x)$ をとっている。

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad \dots\dots\dots (10)$$

図8(b)において高压面での C_p が極大値をとる $\theta=45^\circ$ 近傍では、その、圧力偏差の確率密度関数は $x=\pm 1.0$ に二つのピークを持ち、 C_p が極大値をとる $\theta=180^\circ$ 近傍においてはマイナス側にはピークがほとんど見られない。低压面においても同様に C_p が極大となる $\theta=180^\circ$ 近傍で $x=1.4$, $x=-1.0$ に二つのピークを持ち、 C_p が極小となる $\theta=45^\circ$ 近傍では $x>0$ の側に一つのピークを持つようになっている。

上述の確率密度分布の形状より、 $\phi/\phi_m=0.25$ の低流量時には羽根車入口近傍の流れは2種類の準安定状態の間を長い時間尺度で変動していることが知られる。これら二つの状態における羽根面圧力が大きく異なる場合には、確率密度分布は二つのピークを持ち C_p は大きな値を取るが、羽根面圧があまり大きく変わらない場合には、確率密度分布のピークは一つとなり圧力変動 C_p は小さくなる。

図9(b)は流量を増していったときの測定点 $a/s=0.5$ における圧力変動の確率密度分布の変化を示す。 $\phi/\phi_m \geq 0.50$ の流量に対しては、図8(a), (b)に見られるように θ に対する C_p の変化は小さいので $0 \leq \theta \leq 360^\circ$ に対する平均値をとっている。羽根面上ではなく離の発生および流量変動が予想される $\phi/\phi_m=0.50$ では、 $\phi/\phi_m=0.25$ と同様に確率密度分布のピークが平均値から大きくずれており、図中に破線で示した Gauss 分布と比較して著しくひずんでいる。しかし、流量の増大とともにこの分布のひずみは減少し、流れ

図7 位相平均圧力分布

に対する平均迎え角がほぼ零になる大流量 $\phi/\phi_m = 1.45$ では、高圧面、低圧面ともに Gauss 分布とほぼ一致するようになる。

5.4 キャビテーション発生限界 図10は羽根低圧側に生じるキャビテーションに対して、流量を変えた場合の消滅キャビテーション係数 σ_d の変化を示す。消滅係数 σ_d は $0.2 \leq \phi/\phi_m \leq 1.5$ の範囲においてほぼ一定値をとるが、 $\phi/\phi_m = 1.0$ 付近で若干の不連続が

見られる。この不連続はキャビテーション発生状況においても現れ、低流量側の $\phi/\phi_m < 1.0$ では低圧面上の $a/s = 0.5$ 近傍の最低圧力点付近より発生し流れとともに移動するトラベリングキャビテーション (C2 キャビテーションとする) が観察される。図11(a)は、 $\phi/\phi_m = 0.61$, キャビテーション係数 $\sigma = 2.4$ におけるこの C2 キャビテーションを示している。一方、大流量側の $\phi/\phi_m > 1.0$ では、図11(b) ($\phi/\phi_m = 1.50$, $\sigma = 2.1$) に示されたフィクストキャビテーション (C1 キャビテーションとする) が $a/s = 0.5$ よりも下流において羽根面に付着して発生する。油膜法により羽根面上のほぼ同

(a) 低圧側

(b) 高圧側

図8 圧力変動

(a) $\phi/\phi_m = 0.25$ (b) $0.50 \leq \phi/\phi_m \leq 1.45$

図9 確率密度分布

じ位置にはく離バブルが確認されていることから、これはく離バブル中にキャビテーションが発生していると考えられる。

さきに述べた羽根面圧力の測定結果から、キャビテーションの発生は羽根車周方向へ不均一性を持つことが考えられる。図 12 中には破線で、羽根低圧側に発生するキャビテーションについて、消滅点近くでの発生の周方向範囲 θ および発生状況の観察結果を流量 ϕ/ϕ_m に対して示してある。図より、 $\phi/\phi_m < 0.45$ の低流量域ではキャビテーションの発生範囲はおおよそ $90^\circ < \theta < 270^\circ$ すなわちポンプ羽根車の下半分 (図 3) に限定されるが、 $0.45 < \phi/\phi_m < 0.85$ では周方向にほぼ均一に発生する。 $\phi/\phi_m > 0.85$ になるとふたたびキャビテーションは周方向に不均一に分布し、その発生範囲はおおよそ $45^\circ < \theta < 180^\circ$ である。この流量域では主に C1 キャビテーションの発生が見られるが、流量がほぼ $\phi/\phi_m = 1.0$ においてはキャビティ崩壊直前の $\theta = 180^\circ$ でキャビティは羽根面からわずかに離れているのが観察された。

瞬時の羽根面圧力とキャビテーション発生限界との関連を調べるために、式 (9) (4 章) で定義された羽根面圧力に基づくキャビテーション係数 σ_i を導入する。キャビテーション消滅判定基準と対応させるために、瞬時の最低圧力として各周方向位置に対してサンプリングした圧力データのうち低いほうから 1.5 % の値に当たる $C_{p1.5}(\phi, \theta)$ を採用する。低圧面上でのこの最低圧力の発生位置は、 $\phi/\phi_m \leq 1.0$ では $a/s = 0.25$ 、 $\phi/\phi_m \geq 1.25$ では $a/s = 0.50$ であった。キャビテーション係数 σ_i の等値線を図 12 中に実線で示す。低流量の $\phi/\phi_m < 0.5$ と大流量の $\phi/\phi_m > 0.9$ では σ_i の θ 方向への変化は大きく、それぞれ $\theta = 180^\circ$ 、 $\theta = 75^\circ$ で最大値をとるが中間の流量域では σ_i は θ 方向にほぼ一定となっている。これは図中に破線で示したキャビテーション発生領域と定性的にほぼ一致している。

図 10 キャビテーション発生限界と σ_i の関係

図 12 において、各流量での $\sigma_i(\phi, \theta)$ の $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ における最大値 $\sigma_i(\phi)_{\max}$ をとり、その変化を図 10 に実線で示す。C2 キャビテーションが発生する $\phi/\phi_m < 1.0$ の領域では $\sigma_i \max$ と σ_d はほぼ一致するが、付着形の C1 キャビテーションが発生する $\phi/\phi_m > 1.0$ では $\sigma_d < \sigma_i \max$ となる。これは、付着形キャビテーションの場合、その発生原因が層流はく離もしくは層流から乱流への遷移⁽⁵⁾ によるものであり、キャビテーション発生限界 σ_d は最低圧力ではなく、はく離点や遷移点における圧力と対応するためである。キャビテーション発生限界に及ぼす圧力変動の影響を示すために、図 10 中には式 (9) の $C_{p1.5}(\phi, \theta)$ の代わりに位相平均 $C_p(\phi, \theta)$ の最小値を用いたキャビテーション係数 $\sigma_i \max$ の変化も破線で示す。圧力変動の大きな低流量域においては $\sigma_i \max$ と $\sigma_i \max'$ には大きな違いがみられ、キャビテーション発生限界 σ_d は位相平均の最低圧力より得られた $\sigma_i \max$ とはあまり一致しないのがわかる。

6. 結 論

うず巻室を持つ遠心ポンプの羽根面圧力およびハブ

(a) C2 キャビテーション ($\sigma = 2.4$)

(b) C1 キャビテーション ($\sigma = 2.1$)

図 11

図 12 キャビテーション発生時の周方向の不均一性

面圧力の回転周方向への圧力の周期的変化および圧力変動、キャビテーションの発生限界を測定し、以下のことがらを明らかにした。

(1) 羽根車内の流動はうず巻室内圧力の影響を受け、規定をはずれた低流量と大流量時には、羽根面圧力および流路中央ハブ面圧力は回転方向の位置により変化する。羽根車入口近傍の羽根面圧力とハブ面圧力はその変化がほぼ同位相であるが、低圧面圧力の変化は逆位相となる。ハブ面圧力の周方向変化量は出口近傍($r/r_2=0.90$)で最も大きく、羽根面圧力の変化量は高圧面、低圧面ともに羽根先端近くの $a/s=0.25\sim0.5$

で最大となる。

(2) 羽根面上における圧力偏差の確率密度分布の結果より、低流量時には羽根車内の流動は2種類の準定常な流れの間を変動する。そして羽根先端近傍 $a/s=0.25\sim0.5$ における圧力変動量は著しく大きくなる。

(3) 羽根車内のキャビテーションは羽根面圧力の周方向変化の影響を受け、低流量時および大流量時には、キャビテーション発生限界近くにおいて周方向に不均一に分布する。このキャビテーションの分布する周方向範囲は圧力変動を考慮した羽根面圧力に基づくキャビテーション係数 σ_i を用いることにより予測できる。キャビテーション発生限界 σ_d は比較的低流量時 ($\phi/\phi_m < 1.0$) に発生するトラベリングキャビテーションに対しては σ_i の周方向最大値 $\sigma_{i\max}$ と一致するが、大流量時 ($\phi/\phi_m > 1.0$) に発生するフィクストキャビテーションに対しては $\sigma_{i\max} < \sigma_d$ となる。

最後に、本研究に際し助言をいただいた本学水力実験室 朝倉栄次教務員、実験装置の製作にあたられた神田博邦、村上初男両技官ならびに実験に協力していただいた当時卒研 前田太佳夫君に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 飯野・笠井, 機論, 51-471, B (昭60), 3748.
- (2) 菊山・ほか3名, 機論, 51-472, B (昭60), 4286.
- (3) Stepanoff, A. J., *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, (1957), 122, John Wiley & Sons.
- (4) Worster, R. C., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 177-31, (1963), 845.
- (5) Arakeri, V. H. and Acosta, A. J., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, 95-4 (1973), 519.

討 論

〔質問〕 佐藤 恵一〔金沢工業大学〕

複雑な現象に対する詳細な研究に敬意を表す。下記の点についてご教示願いたい。

(1) 1.5%の発生状態を消滅点として選んだ根拠は何か。再現性の問題はいかがか。

(2) C_2 タイプのキャビテーションははく離せん断層上に生じていると考える。いかがか。

(3) 式(8)において $p_{\min}=p_v$ としているから、 σ_i において重要な変数は ϕ 一定の下では吸込管内圧力の $\overline{P_{si}}$ のみである。 $\overline{P_{si}}$ の測定位置、測定方法、定義をお教えいただきたい。

(4) 上記より、 σ_i がなぜ「羽根面圧力に基づくキャビテーション係数」といえるのか不明と考える。

〔回答〕 (1) キャビテーション発生限界として完全に消滅した状態を選ぶと、確率的に特異な事象の影響を受けやすいため測定された発生限界点に大きなばらつきが見られた。一方、測定はストロボ照射により直接、観察を行うため、キャビテーションの高い発生頻度の確認は困難であるので、本実験においては再現性を考慮して1.5%のわずかな発生状態を発生限界点と定め、便宜上消滅点とした。

測定結果は繰返し実験によりある程度の再現性が確認されており、測定値のばらつきが大きな低流量 $\phi/\phi_m < 0.4$ および $\phi/\phi_m \approx 1.0$ において $|\Delta\sigma_d|_{\max} < 0.2$ であった。

(2) ご指摘のように、 C_2 キャビテーションは図

11(a)に示したような発達した段階では羽根低圧側のはく離せん断層付近に気泡が存在しており、羽根表面に付着してはいない。しかし、これらの気泡群がせん断層上の渦中に羽根面から離れた位置において直接、発生しているのか、羽根面近傍より発生しせん断層上を流れているのかは、ストロボ照射による観察によって不明である。

(3) 羽根面圧力係数 $C_p(\phi, \theta)$ は、羽根面圧力と羽根車入口上流 $2D$ (D は吸込管径) における吸込圧力との圧力差から求めたもので、吸込圧力としては時間平均値 $\bar{P}_s(\phi)$ を用いている。一方 $\bar{P}_{si}$ は、流量 ϕ 、位置 θ において羽根面上に生じる瞬時の最低圧力 $p_{\min}$ に関して、対応する圧力係数 $C_{p\min}$ の値を保ちながら $p_{\min} = p_v$ とするための吸込圧力として定義している。したがって、 $\bar{P}_{si}$ は ϕ と θ の関数として p_v 、 $C_{p\min}$ から算出されるものであり、直接の実測値ではない。

(4) 上記の瞬時最低圧力係数 $C_{p\min}$ として $C_{p1.5}(\phi, \theta)$ を用いることにより得られる $\bar{P}_{si}(\phi, \theta)$ をキャビテーション係数

$$\sigma = \frac{p_s - p_v + \rho C_p^2 / 2}{\rho u^2 / 2} \dots\dots\dots (i)$$

の p_s に代入したものが、本文式(9)の σ_i であるので、この $\sigma_i(\phi, \theta)$ は羽根面圧力に基づくキャビテーション係数であると考えられる。

〔質問〕 山田 哲夫・竹本 洋介

〔久保田鉄工(株)枚方製造所〕

(1) 低流量時においては、確率密度分布より、羽根入口近傍の流れは2種類の準安定状態の間を長い時間尺度で変動しているとのことだが、この変動周期はどのぐらいか。

(2) 低流量域でのキャビテーション発生範囲はおよそ $90^\circ < \theta < 270^\circ$ に限定されるとのことだが、2種類の安定状態でその発生に違いが見られたか。

〔回答〕 (1) 低流量時における羽根近傍流れの2種類の準安定状態は、羽根低圧側での大きなはく離の有無に対応していると考えられる。羽根車1回転ごとの平均圧力は、ポンプ回転速度 $N = 600 \text{ min}^{-1}$ 、流量 $\phi/\phi_m = 0.25$ において、約9回転を一周期とする周期変動を示し、この周期は、羽根面上、ハブ面上の測定位置によらず一定である。

(2) 低流量 $\phi/\phi_m \approx 0.25$ の場合、羽根低圧側に生じる C_2 キャビテーションは、発達した状態においてはその気泡群後端の羽根面からの距離が周期的に変動しており、(1)での大きなはく離に関する推察を裏付けている。また、キャビテーション発生限界へ近付くと発生は間欠的になり、比較的羽根に沿った、すなわ

ち大きなはく離を伴わない状態でのキャビテーションのみが観察される。

〔質問〕 大嶋 政夫〔(株)荏原製作所〕

(1) 圧力測定孔は羽根幅上のどの位置に設けられたか。

(2) 図11(a)から、 C_2 キャビテーションは羽根入口吸込側のはく離域の外側の渦層に生じたもので、羽根表面に付着しているものではない、と解釈してよいか。

(3) C_1 および C_2 キャビテーションはともに渦層に発生したもので、一方は再付着するはく離で、他方は再付着しないはく離に生じたものと言えるように考えるが、にもかかわらず σ_d と $\sigma_{i\max}$ が一方では一致せず、他方では一致するのはなぜか。

〔回答〕 (1) 羽根面圧力の測定は、ハブ面から18 mmの高さの位置に設置した測定孔にて行った。

(2) 回答は佐藤氏の質問(2)に対する回答を参照いただきたい。

(3) C_1 および C_2 キャビテーションはいずれもはく離の存在する流れ場に発生する点では一致している。 C_1 キャビテーションに関しては、油膜法により確かめられた低圧面上におけるはく離バブルの位置とキャビテーション発生位置がほぼ対応することから、このキャビテーション発生限界は最低圧力点よりも下流のはく離点の圧力 $C_{p\text{sep}}$ に支配されると考えられる。一方、 C_2 キャビテーションの発生機構の詳細は不明だが、発生限界においては低圧面 $a/s = 0.43$ の最低圧力測定点近傍にのみ気泡発生が見られる。

しかし、羽根面圧力に基づくキャビテーション係数 $\sigma_{i\max}$ の計算には、キャビテーションのタイプ、発生位置にかかわらず羽根面上の最低圧力を用いたため、 C_2 キャビテーションに関しては $\sigma_{i\max} \approx \sigma_d$ となり、 C_1 キャビテーションに関しては $C_{p\text{sep}} > C_{p\min}$ であるので $\sigma_d < \sigma_{i\max}$ となったものと思われる。

〔質問〕 飯野 利喜

〔(株)日立製作所機械研究所〕

ポリュートケーシングにより羽根車内に引き起こされる圧力変動を詳細に計測され、キャビテーションの発生と結びつけられたことに敬意を表す。

(1) 測定系の周波数応答はどの程度か。また、測定した圧力変動を周波数分析した結果があれば示していただきたい。

(2) 図4の横軸の θ は羽根流路入口中央点の値と記されているが、図6以後の θ はどの値か。

(3) $a/s = 0.5$ のとき、 C_p が極大値をとる θ で C_p が極小値をとり、逆に C_p が極小値をとる位置で C_p

付図1 圧力波形のフーリエ係数

が極大値をとることは、物理的にどのように説明されるのか。

〔回答〕 (1) 変動圧測定孔の固有振動数は実験によって調べてはいないが、計算により以下のように推定できる。水を粘性非圧縮とし、圧力変換器の受圧膜がばね(固有振動数約 35 kHz)を有すると考えると、測定孔の共振周波数は $f_n \approx 4.1$ kHz となる。また、受圧膜における圧力利得が 1.10 すなわち測定誤差が

10%になる周波数は $f \approx 1.3$ kHz になる。

羽根面上 $a/s=0.5$ における変動圧力を約 2.5 kHz でサンプリングし、位相平均によって得られる回転中の波形に対してフーリエ分析を行った結果を種々の流量に對し付図 1 に示す。付図 1 中で、一次のフーリエ係数に対する j 次の係数の比 C_j/C_1 は、高圧面、低圧面ともにいずれの流量においても低次の成分が大きくなっている。また、羽根後端とうず巻室舌部との干渉により、羽根枚数に等しい七次成分 C_7/C_1 にピークが見られる。

(2) 図 6 以後の位相角 θ は、羽根先端の値を用いている。

(3) 低流量時において、羽根先端近傍 $a/s=0.5$ を含めた羽根流路内の流れは周方向の変化だけでなく、図 9 (a) に示されるように二つの準安定な状態の間でも変動する。したがって、確率密度曲線が二つのピーク値を持つ周方向範囲で C_p は増大することになる。一方、 C_p の変化は流路内に流動状態、とりわけ羽根面からのはく離の発生状況に大きく依存すると考えられるが、これら二つの準安定な流動状態に対する C_p の変化は不明である。 C_p と C_p' の関係を明らかにするには、さらに詳細に流路内での流動を調べる必要があり、今後明らかにしたいと考えている。