

バタフライ弁まわりに発生するキャビテーションの立体観察

岩崎 正博*

Stereo-Observations of Cavitating Flow Around a Butterfly Valve

Masahiro Iwasaki

To clarify more precisely the mechanism of the cavitation erosion as well as vibration, we carefully observed stereoscopically the flow pattern and the multitudinous constitution of cavitation in a typical bounded flow around a butterfly valve by using a technique of high-speed, under a prescribed nuclei distribution for various hydrodynamic quantities. With the rolling-up of high speed flows resulting in "orifice flow" from the orifice side, a large number of singular vortex cavitation take place predominantly within a limited pipe inner surface downstream from the valve plate on the orifice side. The limited surface corresponds well to the region where actual erosion occurs. There are several types of cavitation with their own aspects and behavior as well as occurrence zones on each constructional parts of the valve.

1. 緒言

バタフライ弁は、近年、簡単な構造で優れた制御特性を持つことと低コストとの二点が見直されて、上水道用などの大口径の多くの管路からなる巨大管路網中の流量制御弁として多用されてきている^{1),2)}。バルブまたは管路網が大型化すると、壊食、振動、騒音および性能劣化などのキャビテーション障害の危険性が増大するから、バルブ等の要素の信頼性を十分に高めるためにも、該障害の除去あるいは安全作動条件等の解明が切望されている。そして、この種の解明は、その障害の根源たるキャビテーションの様相あるいは流れパターンの解明から始めるべきであろう。

周知のように、キャビテーションは、発生場所、発生源、様相および初生キャビテーション係数等が異なる各種タイプのキャビテーション気泡（以下単に気泡という）により多角的に構成されている^{3),4)}から、障害性の強いもの、普通のもの、そして微弱なものが存在する^{5),6)}。また、壊食性気泡はごく特殊なタイプのものに限定されてお

り、さらに、その発生領域も全気泡発生領域のごく一部に限られている^{5)~7)}。したがって、今後のバルブ等の障害研究においては、壊食性気泡を特定した議論は不可欠と言えよう。しかしながら、これまでのこの種の研究^{8)~12)}において、気泡の類別化は行われていないし、バルブまわりの流れパターンについても必ずしも明らかではない。

よって本報では、バタフライ弁におけるキャビテーション障害の克服を目的として、まず、実用バタフライ弁の1/4模型まわりに発生するキャビテーションの様相と流れパターンを、種々の弁開度 α_v 、キャビテーション係数 σ 、流量係数 C_d およびレイノルズ数 Re において、瞬間写真による組織的な立体観察を試みる。

2. 実験装置

2.1 試験水槽

実験には既報¹³⁾の超高速回流実験装置を一部改造したものを使用した。図1には、供試バタフライ弁が取り付けられ、水平に置かれた測定部付近の断面の概要を示す。像のゆがみを小さくして、各種気泡のより詳細な観察のために、直径 $D_v =$

*バルブ事業部バルブ設計部

垂直弁棒を固定するための凸状の台座が上下、表裏に計4個設けられ、そして、弁体の全表面は流体力学的に滑らかに仕上げられている。また、弁棒の先端にはその軸方向振動加速度モニタ用のセンサー⑥が固定され、さらに、供試弁開閉用の手動式減速装置⑦も設けられている。

3. 実験方法

ここで取り上げたような三次元流れにおいては、気泡の三次元的様相が顕著で、観察方向の選択によって著しく異なる結論に達する危険性がある¹⁵⁾ので、このような危険性を避けるために、ここでは、せん光時間 $1\mu\text{s}$ のクセノン・ランプを用いて、上方、側方の2方向から同時撮影・観察することとした。

弁体の2D上流の⑧点と10D下流の⑨点の静圧 P_1 、 P_2 および平均流速 U_1 、 U_2 、水の飽和蒸気圧 P_v 、密度 ρ により、キャビテーション係数 σ と流量係数 C_d は次のように定義した。

$$\sigma = (P_2 - P_v) / \Delta P,$$

$$C_d = U_1 / \sqrt{2\Delta P / \rho + U_1^2}$$

ここでは、弁開度 α_v は弁体面と流れに平行な垂直面とのなす角度で定義した(図6参照)から、全閉時に $\alpha_v = 0 \text{ deg}$ 、全開時に $\alpha_v = 90 \text{ deg}$ となる。差圧 $\Delta P = P_1 - P_2$ 。

また、流速の n べき則として知られているが、いまだに十分解明が進んでいない流速差の影響を

なるべく避けるために、流速一定の実験をすることにした。そこで、マイクロコンピュータを用いて U_1 、 P_1 、 σ 、レイノルズ数 $Re = U_1 D_v / \nu$ (ν は水の動粘度)を常時モニタし、極めて煩雑な流れの調整の簡易化を図った。なお、試験水槽の回流開始直後に起こる核分布の不安定性を考慮して、30分経過の後に所定の α_v 、 U_1 の状態に流れを設定してから10分後に測定を開始した。

本試験の範囲は、キャビテーション係数 $\sigma = 0.16 \sim 36.3$ (キャビテーション未発生状態より十分発達した状態)、レイノルズ数 $Re(0.27 \sim 1.03) \times 10^6$ 、上流側平均流速 $U_1 = 2.0 \sim 7.8 \text{ m/s}$ 、上・下流壁面静圧 $P_1 = 109 \sim 136 \text{ kPa}$ 、 $P_2 = 19 \sim 136 \text{ kPa}$ 、試料水中の空気含有度 $a/a_s \cong 1.08$ 、水温 $t_w = 286 \sim 289 \text{ K}$ である。

4. 実験結果

4.1 キャビテーション特性

まず、本バタフライ弁のキャビテーション特性を、流量係数 C_d 、初生キャビテーション係数 σ_1 、チョーキング・キャビテーション係数 σ_{ch} を介して明らかにしよう。

図3には、 C_d の σ による変化の様相を種々の α_v について示す。図中のIncep.はキャビテーションの初生^{*2}を、Chokingは C_d が低下し始めるいわゆるチョーキング開始状態を示す。ここで、周知のように、このチョーキング状態はサブキャ

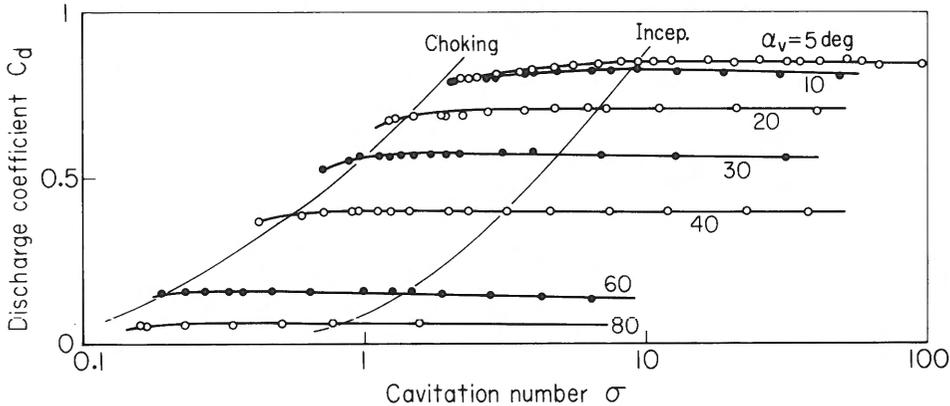


図3 流量係数 C_d とキャビテーション係数 σ の関係

Fig. 3 Relation between the flow coefficient C_d and the cavitation number σ

*2 ここでは、加速度計でとらえたキャビテーション・イベントの直接的反響である衝撃パルス数が1秒間に2~3個となる時間平均的 σ をもって初生キャビテーション係数 σ_1 を定義している。

ピテーション (以下 Sub.C という) とスーパーキャビテーション (SC) の中間の遷移領域内にあるとみられる。明らかに、図より、「Sub.C 領域および遷移領域においては、Cd は σ にほとんど依らず、ほぼ一定に保たれており、さらに、SC 領域における変化も小さい」という実用上興味ある事実が見て取れる。この事実は、「この種の流れは、元来、はく離流れだから、Sub.C のような微弱なキャビテーションの発生によっては流れパターンはほとんど変化しない」という多くの事実と良く符合しているが、そのことがこの種の流れでは SC 領域においても近似的に言えることが新事実として注目されよう。

詳細にみれば、 $\alpha_v < 20 \text{ deg}$ の小開度側で、初生またはそれ以前からわずかながら Cd が σ の減少とともにゆるやかに低下する傾向がある。このような傾向は、オリフィスの C_d または翼形の揚力係数 C_L においてもしばしば認められているが、分岐管¹⁶⁾において解明されたように、キャビテーションではなく粘性の影響によるものと推定される。

図 4 には、初生キャビテーション係数 σ_i チョーキングキャビテーション係数 σ_{ch} とを種々の α_v について示す。明らかに、 σ_i 、 σ_{ch} のいずれもが α_v の減少とともに全く同傾向のもとに増大する。すなわち、 $\sigma_i = 14 \exp(-0.04 \alpha_v)$ 、 $\sigma_{ch} = 3 \exp(-0.04 \alpha_v)$ 。故に $\sigma_{ch}/\sigma_i \cong 0.2$ の関係が成立するから、この種のパタフライ弁においては、 σ_i 、

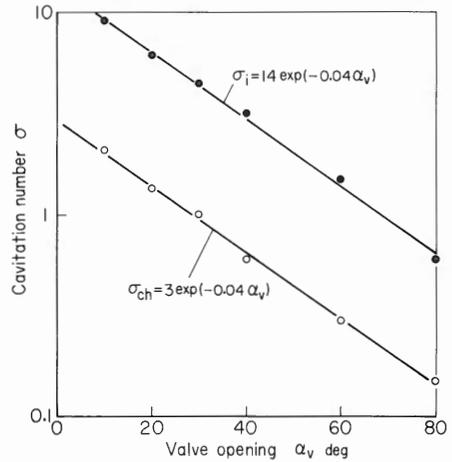


図 4 初生キャビテーション係数 σ_i とチョーキングキャビテーション係数 σ_{ch} の α_v による変化
Fig. 4 Incipient cavitation number σ_i and the choking cavitation number σ_{ch} for various valve openings α_v

σ_{ch} のいずれか一方が既知なら、もう一方の推定はある程度可能となろう。

4.2 弁体まわりの三次元流れの可視化

上述のように、このパタフライ弁まわりの流れパターンは、十分発達した SC 状態においてもあまり変わらない。このことを利用し、以下に述べるキャビテーションの様相の理解の一助となることも期待して、弁体まわりの複雑な三次元流れを可視化してみよう。

図 5 には、流速 $U_1 = 4.0 \text{ m/s}$ の場合を例に取り、垂直上方 (Top.v) と管軸および弁棒軸に垂

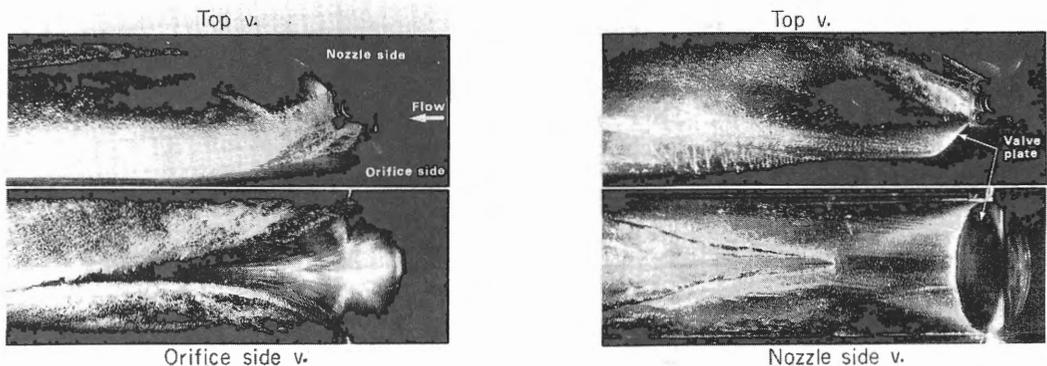


図 5 スーパーキャビテーション流れの様相
Fig. 5 Stereo moment photographs of the three dimensional SC flow

直な二つの側方 (Side v.) から見た代表的な SC 流れの瞬間写真を示す。ここで、Top v. 中に示すように、上方より見て管壁面と弁体のなす幾何形状より便宜的にそれぞれオリフィス側 (Orifice side)、ノズル側 (Nozzle side) と呼び、それらの Side v. をそれぞれ (a) Orifice Side v.、(b) Nozzle Side v. で示す。なお、上部の弁棒の位置に四角状に見える軸受部は管外壁にあって、流れには全く無関係である。また、図 6 では、SC 流れパターンの特徴をスケッチしてみた。図より、オリフィス側の弁体前縁からはく離れた流れは、周囲の流れを巻き込み、激しいじょう乱を伴う高速噴流 (以下オリフィス噴流という) となって、弁棒軸中心より 1.2D 以上下流のノズル側管壁面に激突し、この激突箇所には、「多数の気泡あるいは渦糸の射出」、「微細飛沫気泡群 (一種の気泡雲) および激しいじょう乱」が認められる。また、はね返り噴流がノズル側空洞界面に衝突して互いにエネルギーを消失する結果、弁棒軸中心より 1.3D 下流付近よりノズル側空洞界面にくさび状の模様が見れている。この事実、オリフィス噴流がいかに強烈であるかを如実に示している。また、このオリフィス噴流の存在により、全

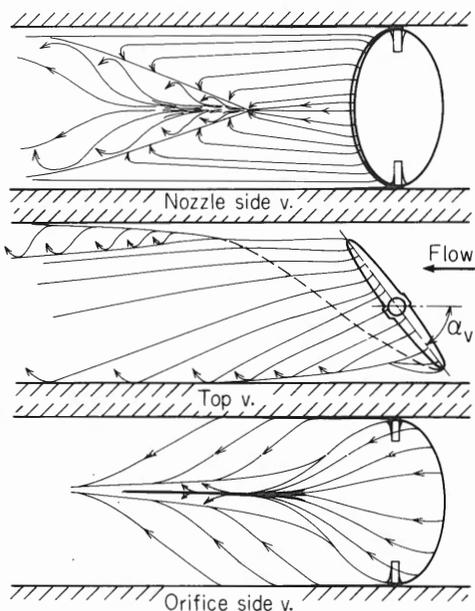


図 6 スーパーキャビテーション流れパターンのスケッチ

Fig. 6 Characteristic flow pattern of the SC Flow

体の流れはオリフィス側の流れにかなり支配されたものとなっている。

4.3 キャビテーションの様相

典型的確率事象であるキャビテーションを一義的に規定するには平均的発生領域に主としてかかる σ のほかに少なくとも発生様相 aspects の明示は不可欠であろう。また、壊食などとの関連で、上述のキャビテーション特性がいかなる発生様相に対応したものかも興味があろう。

まず、明らかに、弁体の後流中においてもキャビテーションが発生していない場合 ($\sigma=23.4$) の写真を図 7 に示す。これより、弁体表面および弁棒軸受部の有機ガラス面に細かい気泡のように見えるものは、実は弁体の表面模様で気泡ではないことがわかる。

図 8、9 には、流速^{*3} U_1 に常用値に近い 2.0 m/s のほかに高速の 4.0/s および 7.8 m/s をとり、初生近傍から遷移領域に至る種々の σ と α_v におけるキャビテーションの様相の立体写真 (Top v. および Side v.) の代表的な一例ずつを対比してみた。

4.3.1 限界キャビテーション

いずれの α_v においても、初生近傍の限界キャビテーション (図 8(a)、(b)参照) は、予想されたように、弁体オリフィス側後流中に発生する。 α_v

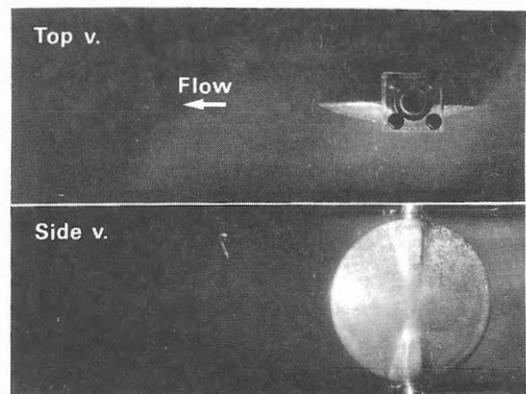


図 7 キャビテーション未発生状態

Fig. 7 Pictures around the plate without any cavitation

*3 この U_1 の範囲では、チョーキングのために全閉付近のデータは残念ながら取れなかった。

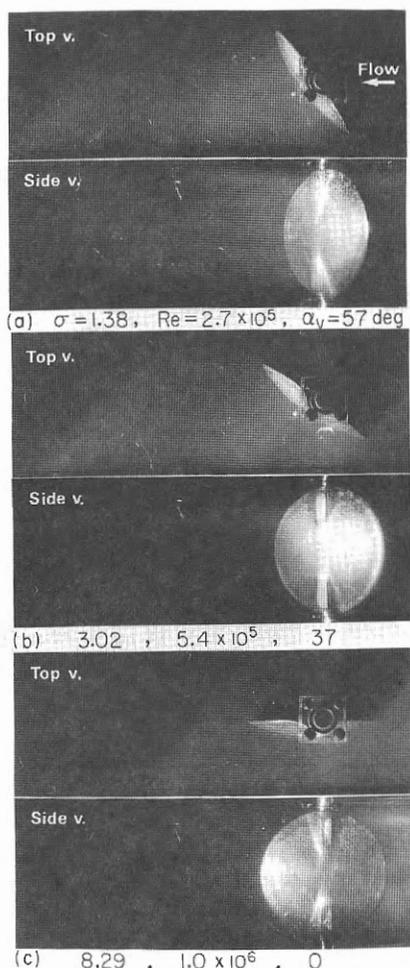


図8 キャビテーションの様相

Fig. 8 Cavitation aspects for various α_v and σ

$= 0 \text{ deg}$ においてすでに初生する高速の $U_1 = 7.8 \text{ m/s}$ の場合には、凸状の台座の前縁付近に付着キャビテーション (図8(c)参照) が、さらに、その下流に塊状キャビテーションおよび渦キャビテーションが発生し、初生はかなり早まる。

4.3.2 サブキャビテーション

上記の種々のキャビテーションが互いに干渉しあって急速に成長している。まず、通常流速近傍の $U_1 = 2.0 \sim 4.0 \text{ m/s}$ の場合には、 $\alpha_v > 30 \text{ deg}$ とやや α_v が大きいためか、オリフィス噴流が激突する領域に、壁面に向かって垂直に発達する特異な形状を持つ渦キャビテーション (以下特異渦キャビテーションという) が発生し、注目される。これは、渦キャビテーションとしては異常に大径

のもので、直接壁面に達し (図9(a), (b)の Top v. 参照) ており、しかも、激しい衝撃圧の発生を暗示する複雑な突起の多い表面を持ち、既報^{(6), (16)}で高壊食性渦キャビテーションと認めたものと酷似している。このキャビテーションの挙動と、それが発生する衝撃圧については次報で明らかにする。そのほかにも、 α_v が大きいので、凸部の台座まわりのキャビテーションは発生しないが、代わりに、上記の特異渦キャビテーションよりやや遅れて弁体のオリフィス側前縁付近から通常の渦キャビテーションと安定な気泡雲が内在する付着キャビテーションとが、さらに、弁体と軸受の接合部からチップキャビテーションも発生している。

特異渦キャビテーションは、上流で発生したキャビテーションにより渦核内へ気泡核が供給されて急成長し、激しく壁面 (位置は通常実用弁で壊食を認める位置にほぼ一致) に衝突している。そして、この衝突位置の範囲は、 σ の低下とともに下流側に拡大していくが、特異渦キャビテーションの衝突が特に顕著な範囲の $(1.2 \sim 1.7) D_v^{*4}$ にほぼ収まっており、上記のオリフィス噴流の衝突範囲と良く符合している。

α_v がやや大となり、 σ が低下すると、ノズル側にも細ひも状の通常の渦キャビテーションおよび塊状キャビテーション等が発生するが、オリフィス側におけるような大径の特異渦キャビテーションはあまり発生せず、また、壁面に直接衝突するものも少ない。

弁体表面上において、 θ (図1参照) により高さ方向の気泡発生位置を定めるとすれば、 $\theta \cong 50 \sim 60 \text{ deg}$ および $120 \sim 130 \text{ deg}$ の付近で集中的に発生している。この事実は、実機においてもこの付近に壊食が集中していることと良く符合している。しかし、 $\theta \cong 50 \sim 60 \text{ deg}$ の位置より $\theta \cong 120 \sim 130 \text{ deg}$ の位置の方が気泡がやや激しく発生している理由は今のところ不明である。

なお、オリフィス噴流を生ずる弁体と軸受の接合部付近に発生するチップキャビテーションが太

*4 下限 $1.5D$ の存在は、オリフィス噴流のエネルギーが下流に向かい減衰するので当然のことである。

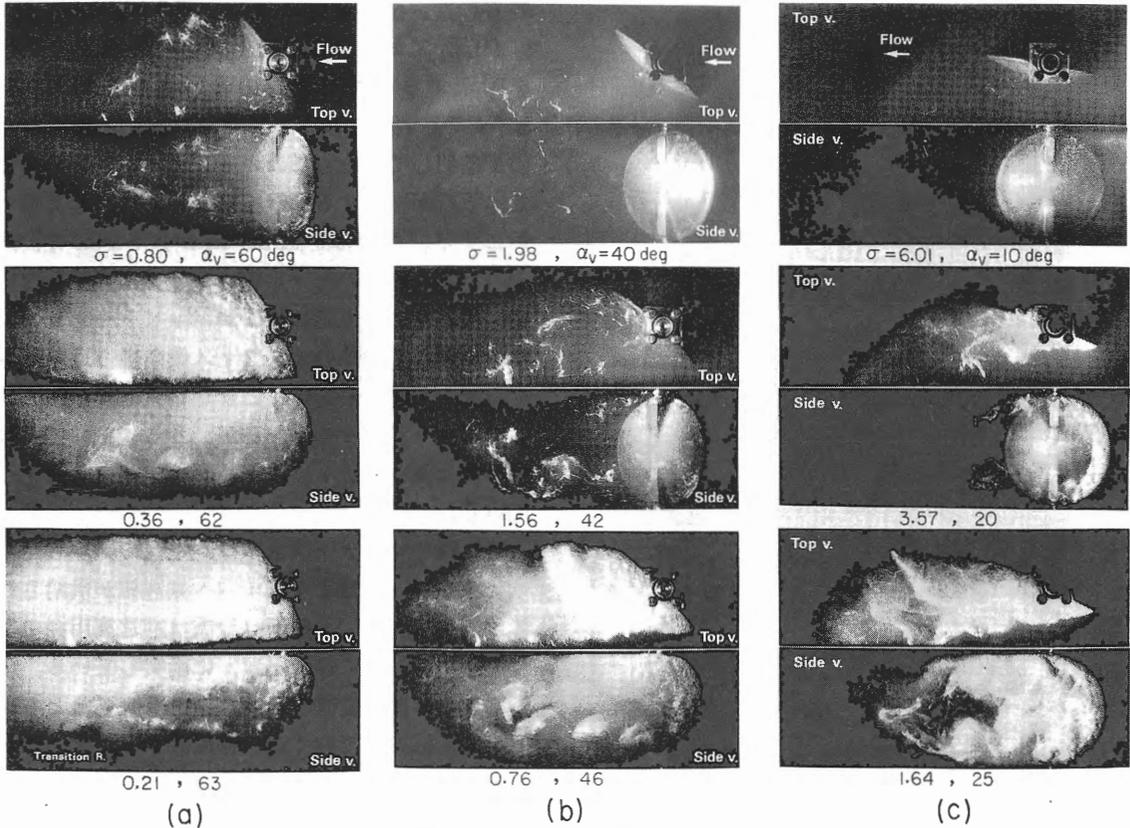


図9 キャピテーションの様相

Fig. 9 Cavitation aspects for various α_v and σ

い渦キャピテーションに成長して弁体中心より0.1D下流の管壁に衝突する場合もあるから、かなり弁体近くの管壁面の壊食の可能性もあろう。

4.3.3 遷移領域の様相

遷移領域において (図9(a)の Transition R. 参照) は、弁体の後流領域が微細気泡群で完全に満たされ、一見安定した流れのように見えるが、しかし、既報⁶⁾の平板翼形等で認めたような気泡の大脱落 (後流中の気泡群が団塊となって周期的に後流に放出し、結果的に、SC状態とSub.C状態が交替的に現れるもの) に類似した現象も認められる。なお、 $U_1=4.0\text{ m/s}$ 、 $\alpha_v=46\text{ deg}$ 、 $\sigma=0.76$ の場合には、オリフィス噴流の速度が、 $U_j=U_1/(1-\alpha_v)\cong 13.2\text{ m/s}$ と代表できれば、放出される塊状気泡群の発生周波数は $f\cong 200\text{ Hz}$ となる。

また、後流領域内には、十分発達した特異渦キャピテーション、通常の渦キャピテーション、塊

状キャピテーションが存在している。

5. 結論

バタフライ弁におけるキャピテーション障害の克服を目的として、実用バタフライ弁の1/4縮尺模型弁まわりに発生するキャピテーションの様相と流れパターンを、瞬間写真を用いた立体観察により種々の弁開度 α_v 、キャピテーション係数 σ 、流量係数 C_d およびレイノズル数 R_e において解明した。得たる結果を要約すると次のようになる。

- (1) キャピテーション、特にSC状態における立体観察より、弁体後流中の複雑な三次元流れパターンの様相を明らかにした。その中で、弁体下流管壁面の壊食にかかわる特異な形状を持つ渦キャピテーションの発生を促す強烈なオリフィス噴流およびこの噴流とノズル噴流との衝突等の存在を明示した。

- (2) バタフライ弁まわりに、オリフィス側後流管壁面の垂直方向に軸を持つ特異渦キャビテーション、渦キャビテーション、弁体あるいは台座前縁付近からはく離泡内に発生する付着キャビテーション、さらに、弁体と軸受けの接合部に発生するチップキャビテーションを確認した。
- (3) オリフィス側後流中2D以内の管壁面上の限られた領域には特異渦キャビテーションが集中的に発生する。しかし、ノズル側には、ほとんど発生していない。この発生領域は実機で壊食を認めたそれと一致している。
- (4) この種のはく離流れにおいては、流量係数 C_d は σ に依らずほぼ一定に保たれ、さらに、このことはSC近傍領域においても近似的にあてはまる。
- 終わりに臨み、本研究に対して御指導いただきました東北大学高速力学研究所大場利三郎先生と伊藤幸雄先生に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 大西、水道協会雑誌、53-3 (昭59-3)、58.
- 2) 大島、日本機械学会講演論文集、No. 159 (昭41-10)、61.
- 3) Holl, J.W., and Carroll, J.A., Trans. ASME, J. Fluid Eng., 103-3(1981), 415.
- 4) Johnsson, C.A., Proc. 12th Int. Towing Tank Conf., Rome,(1969-9), 381.
- 5) Selim, S.M.A. and Hutton, S.P., 2nd Int. Conf. on Cavi., I.Mech.E., Edinburgh. (1983-8), 41.
- 6) 伊藤・ほか6名、キャビテーションに関するシンポジウム(第5回)、日本学術会議、東京、(昭62-2)、63.
- 7) 大場・ほか7名、日本機械学会論文集、53-487、B (昭62)、671.
- 8) Ball, J. W. and Tullis, J.P., Trans. Am. Soc. Civ. Eng., J. Hydr. Div., 99-HY9(1973).1303.
- 9) Tullis, J.P. and Ball, J.W., Proc. Conf. on Cavi., I. Mech. E., Edinburgh, (1974-9),55.
- 10) Sarpkaya, T., Trans.ASME, J.Appl.Mech.,

28-4(1961),511.

- 11) 木村・小川、日本機械学会論文集、52-474,B (昭61)、501.
- 12) Kitamura, M.,ほか2名、Proc. 3rd Int. Symp. on Flow Visualization, Michigan, (1983-9),537.
- 13) 大場・ほか3名、日本機械学会論文集、43-376、(昭52)、4519.
- 19) 奈良坂・ほか2名、日本機械学会論文集、53-491、B (昭62)、1887.
- 15) 伊藤・ほか3名、日本機械学会論文集、54-500、B (昭63)、763.
- 16) 池田・ほか2名、日本機械学会論文集、53-493、(昭62)、2703.

執筆者

岩 崎 正 博

Masahiro Iwasaki

昭和52年入社

バルブ等の流体機器の設計に従事

