高比速度遠心ポンプに生じる激しい壊食性
キャビテーションの高速写真観察*祖山 均^{*1}, 李 受人^{*1}, 外崎 昌志^{*2}
浦西 和夫^{*3}, 加藤 洋治^{*4}, 大場 利三郎^{*1}High-Speed Observations of Severe Cavitation Erosion
in a High-Specific-Speed Centrifugal PumpHitoshi SOYAMA, Shou-Ren LI, Masashi TONOSAKI,
Kazuo URANISHI, Hiroharu KATO and Risaburo OBA

In order to clarify severe pump erosion practically, cavitation aspects are precisely measured at a specific speed $N_s=300$ (m, m³/min, rpm) under various test conditions, especially at low flow rates, through a clear-lucite front shroud of the test impeller and the lucite casing, by means of instantaneous photography and a high-speed video camera, the maximum framing rate of which is 40500 frames per second. Erosion tests are also carried out using three-dimensional impellers made of aluminum alloy. Severe erosion takes place on several parts of the test impeller, i. e., on the main shroud and on the suction side. At a low flow rate, severe erosion occurs on the pressure side near the leading edge. This results from a vortex cavitation arising in the reverse flow region near the pump inlet.

Key Words: Cavitation, Erosion, Pump, Eroded Surface, Leading Edge

1. 緒 言

ポンプなどの流体機械内に生じるキャビテーションは、しばしば機械の性能劣化、壊食、振動等の致命的障害を誘起するので、古くからその防止が切望されてきた。特に、機械の寿命を極端に短縮する壊食率が従来のものの2桁以上にも達する激しい壊食^(1~3)が見い出され、その防止法の確立が工業界から切望されている。

そもそも、キャビテーションは、壊食性の全く異なる種々のタイプのものから多元的に構成されているので、この激しい壊食の防止の見地からは、「いかなる比速度 N_s の流体機械に、いかなる試験条件下で、いかなるタイプの高壊食性キャビテーションが支配的に発生するか?」、「そのキャビテーションにより、どのような激しい壊食が、どこに生じるか?」の解明は不可欠なものと言えよう。

よって、既報^(3~6)では、この種の激しい壊食の解明の第一歩として、まず、比速度 $N_s=150$ (m, m³/min, rpm) の二次元羽根を持つ低比速度遠心ポンプに生じる激しい壊食性キャビテーションの挙動を解明し、さらに、別報^(7,8)では比速度 $N_s=300$ の羽根が著しく三次元的に捻れている典型的高比速度遠心ポンプを取り上げ、種々の流量 Q 、有効吸込ヘッド $NPSH$ において、激しい壊食の領域および壊食深さの経時変化等を組織的に観測した。明らかに、高比速度遠心ポンプでは、壊食領域および壊食深さは、 Q および $NPSH$ の低下とともに急速に増大する傾向があるが、特に、 $NPSH=12$ m では、設計流量から離れた $Q/Q_d=60\%$ 以下 (Q_d は設計流量) の低流量域で激しい壊食が生じ得ること等の興味ある事実を明らかにした。しかし、これらの激しい壊食が、いかなるタイプのキャビテーションによりもたらされているかは必ずしも明らかではなかった。

よって本報では、このような高比速度遠心ポンプに激しい壊食をもたらすキャビテーションの挙動の詳細な解明を目的として、やはり比速度 $N_s=300$ の三次元羽根を持つ遠心ポンプにおいて、種々の Q/Q_d 、 $NPSH$ 、特に激しい壊食が発生する $Q/Q_d=60\%$ 以下の低流量域に注目し、

* 原稿受付 1995年1月27日。

*¹ 正員、東北大学流体科学研究所 (〒980 仙台市青葉区片平2-1-1)。*² JR 東日本 (〒336 浦和市領家3-2-7)。*³ 正員、電業社機械製作所 (〒411 三島市緑町10-24)。*⁴ 正員、東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

キャビテーションの様相を高速ビデオカメラ等で組織的観察を試みる。

2. 実験装置および方法

実験には、別報^(7,8)と全く同じ $N_s=300$ の遠心ポンプを用いたが、激しい壊食性キャビテーションの基本的挙動の解明には不可欠な「キャビテーションの様相」の詳細な観察のために、特に羽根に透明アクリル樹脂製側板を直接ビス止めしたキャビテーション観察用羽根車を使用し、さらに、ポンプ吸込管およびケーシングの一部も透明アクリル樹脂製としている。

壊食試験は、別報^(7,8)と同様に、設計流量 $Q_d=3.50\text{m}^3/\text{min}$ 、 $N=6350\text{ rpm}$ 、アルミニウム合金 AC4A-F 製羽根車で行ったが、しかし、キャビテーション観察は、上記のアクリル樹脂製側板の強度上の制約から、ポンプ回転数 N を 3000 rpm に下げ、キャビテーション相似則に従って、設計流量を $Q_d=1.65\text{ m}^3/\text{min}$ とし、供試羽根車(別報⁽⁷⁾の図2参照)の材質も真鍮製として行った。

絶えず μs のオーダーの高速で変化しているキャビテーションの様相は、せん光時間 $1\text{ }\mu\text{s}$ のクセノンランプを用いて高速写真観察し、その経時変化の詳細は、高速ビデオカメラ(最高速度 40500 コマ/s 、最大画素数 $256\text{ 画素}\times 256\text{ 画素}$)でとらえた。また、観察用羽根車の表面には青タックを塗布して、そのはく脱状態より壊食領域の検出も試みた。

3. 実験結果

3.1 壊食面の様相 まず、別報⁽⁸⁾の壊食試験において採用した流量 Q と $NPSH$ の代表的6条件において、羽根車のどの位置に、どのような壊食が生じているのかを知るために、図1には、主板上(領域A)、負圧面(領域D)、正圧面(領域B、C)上の壊食個所と壊食の様相(それぞれの条件の最終壊食試験時間における様相)を示してみた。なお、特に激しい壊食の発生時には、試験時間 t をあまり大にすると、壊食領域があまり判然としなくなるので、最適と思われる時間を適宜選択している。

まず、主板上の激しい壊食(領域A)が、流量 Q が設計流量より低流量域にかけて変化するとどのように変化するかを調べるために、 $NPSH$ を 12 m 一定として、 Q/Q_d を $40\%\sim 100\%$ と変えた場合の写真を比べてみると、低流量域からの Q の増大とともに、後述の高壊食性渦キャビテーション領域とともに、激しい壊食の領域が下流側に移動し、ついには設計流量 $Q/Q_d=100\%$ において、激しい壊食はほとんど検出されなくなる。すなわち、低流量であるほど激しい壊食が起こり易い傾向が明らかに

図1 代表的4壊食領域とその壊食面の様相

見て取れる。既報⁽⁸⁾によると、 $Q/Q_d \leq 60\%$ の低流量では明らかに、壊食の発達段階は定常期に入っているが、 $Q/Q_d > 80\%$ の設計状態近傍では、いまだ質量欠損がない潜伏期に留まっている。次に、キャビテーションが十分に激しく発達している $NPSH=5\text{ m}$ 、 $Q/Q_d=40\%$ の場合には、壊食領域は上記の $NPSH=12\text{ m}$ におけるものより一層下流側に移行し、 $t=14\text{ h}$ という短時間試験(しかし、領域Cには既に激しい壊食が著しく生じている)では、言うまでもなく、体積欠損が生じていない潜伏期に留まっているが、主板上に点在する多数の点状の壊食ピット^(4,5)の大きさやその発生数からみて、 t がもう少し増加すると、十分に激しい壊食が発生するものと十分推定される。すなわち、「領域Aの激しい壊食は、 $NPSH$ が低いほど激しく、かつ、 Q/Q_d に極めて敏感である」という既報⁽⁴⁾のそれと全く同様の挙動を示し、「これが高壊食性渦キャビテーション⁽⁴⁾によるものである」ことを明示している。また、予想されるように、キャビテーション発生領域が十分狭い⁽⁸⁾と考えられる $NPSH=18\text{ m}$ 、 $Q/Q_d=80\%$ の場合には、領域Aには壊食は全く認められない。

次に、激振⁽⁹⁾に伴う特定の $NPSH$, Q/Q_d において生じるキャビテーションが主として係わる壊食(負圧面の領域 D)の様相を見てみよう。明らかに、激振領域に入っている $Q/Q_d=80\%$, $NPSH=18$ m の場合には、予想通り著しい体積欠損を伴う激しい壊食が生じている。また、別報⁽⁷⁾の等 I_{ACC} 線図および等 I_{AE} 線図から予想されるように、 $NPSH=12$ m の場合には、極めて弱い痕跡程度に壊食が発達している。すなわち、壊食の痕跡は、 $Q/Q_d=40\%$ では、わずかに認められる程度であるが、 $Q/Q_d=60\%$ では、前縁近傍から後方に伸びて、 $NPSH=12$ m の場合では最も広範囲にわたって発達している。そして、80%, 100%と設計流量に近づくに従って次第に縮小して、100%ではついにほとんど認められなくなる。そして、激振域より $NPSH$ が十分低い $Q/Q_d=40\%$, $NPSH=5$ m の場合には、当然のことながら、この種のキャビテーションによる壊食は全く認められない。

正圧面側板側の領域 B に発生する一種のすき間噴流キャビテーション^{*1}(別報⁽⁷⁾参照)による壊食は、 $NPSH=12$ m, $Q/Q_d=60\%\sim 100\%$ の場合に生じており、前縁付近に大きな逆流域が存在すると考えられる。 $Q/Q_d\leq 60\%$ では、羽根面に沿って流れないために、すき間噴流キャビテーションが著しく弱められるためか、全く発生しなくなる。明らかに、壊食面の様相は典型的なすき間噴流キャビテーションのそれを呈している。

正圧面の領域 C に発生する壊食は、 $NPSH=12$ m の場合には、 $Q/Q_d=40\%$ から 60%, 80%と流量の増大に伴い、領域 D の壊食と同様に、「渦キャビテーションが羽根正圧面の主板側から側板側へ移動し、設計流量に近づくに従い羽根面に沿って移動する」という周知の事実と良く符合している。また、A, C いずれの領域の壊食も、 $Q/Q_d=60\%$ の場合に最も激しく、「領域 A と C の壊食の間には深い相関がある」ことを示唆している。すなわち、A, C のいずれの領域の壊食も、 Q/Q_d が 80%, 100%と設計流量に近づくに従って微弱となり、表面をわずかに変色させる程度のものになる(体積欠損を伴う壊食ではない)。明らかに、 Q/Q_d が 60%から 80%と増大すると、壊食面の様相は一変し、異なった壊食パターンへと移行している。すなわち、別報^(7,8)で述べたように、「 $Q/Q_d=60\%\sim 80\%$ が異なった流れパターンに移行する遷移領域になっている」ことがここでも確認される。

そして、著しくキャビテーションが激しい $Q/Q_d=40\%$, $NPSH=5$ m の場合には、壊食の様相は $NPSH=12$ m の場合のそれとは全く異なったものとなり、全壊食試験中で最大の壊食率および体積欠損率を示している。明らか

に、このような壊食は、流れ方向を向く列状に発達しており、入口側二次流れ渦が主として発生する正圧面側板側に激しい壊食を生じている。これらの事実は、「上流から流下するキャビテーション気泡が強力な有効核となって生じる極めて高壊食性の二次的渦キャビテーションが支配的役割を果たしている」ことを明示している。なお、 $Q/Q_d=80\%$, $NPSH=18$ m の場合には、壊食は正圧面には全く認められなかった。

3.2 キャビテーションの様相 壊食試験時 $N=6350$ rpm の場合の有効吸込ヘッド $NPSH$ と、キャビテーション観察時の $N=3000$ rpm の場合の有効吸込ヘッド $NPSH_L$ の関係は、二つの N の時のキャビテーション係数 σ が同一とすると、 $NPSH_L=NPSH\times(3000/6350)^2$ となるから、上記の $NPSH=12$ m は $NPSH_L=2.7$ m に対応するが、 $NPSH=12$ m ($N=6350$ rpm) においては試験水槽を加圧し、 $NPSH_L=2.7$ m ($N=3000$ rpm) では減圧しているので、 $NPSH_L=2.7$ m の場合には試料水中のキャビテーション核が減少してキャビテーションが $NPSH=12$ m に比べて発達しないために、青タック法により壊食領域が $NPSH=12$ m と同じになる $NPSH_L=2.1$ m としている。

図 2 には、 $Q/Q_d=40\%$, $NPSH_L=2.1$ m の場合に特徴的な羽根前縁近傍の渦キャビテーションの様相(瞬間写真)を示す。図中の右中央に、透明アクリル樹脂製の側板側羽根には前縁付近の端面が見え、左斜め下側に隣の羽根の端面が見える。そして、上方と下方に円弧状にキャップ、窓わくがそれぞれ見える。羽根車は左方向に回転している。

まず、左方には羽根負圧面に発達したクラウド状キャビテーションが、そして、羽根前縁まわりには渦キャビテーションが明瞭に見て取れる。この渦キャビテーションは、低流量域において特に顕著になるとされている羽根車入口部の逆流域内の高せん断領域に生じる強い渦の内部にキャビテーション気泡が発達したものであろう。この渦キャビテーションの動的挙動をより詳細に知るために、図 3 には、羽根前縁近傍の渦キャビテーションの様相を、18000 コマ/s の高速度ビデオカメラで撮影したコマから 4 コマごとに抜き出した写真を示す。図中の $t=0$ ms の時に中央下部に見えるものが羽根の前縁であり、右上部には後の羽根前縁の一部が見えている。羽根車はこの場合にも左方向に回転している。さて、前縁まわりの渦キャビテーションの発生、崩壊は、周知のように、かなり確率的^(10,11)であるから、より定常的に発生する $NPSH_L=1.7$ m の場合を例示している。別報⁽⁸⁾の図 5, 6 に示されたように、 $Q/Q_d=40\%$ の場合には、キャビテーションによる振動加速度の強さ I_{ACC} 、振動加速度の実効値 L_d (高周波

*1 すき間噴流キャビテーションは、前縁正圧面ハブ側と側板のすき間に生じるキャビテーションである。

図2 羽根前縁近傍の渦キャビテーションの様相
($Q/Q_d=40\%$, $NPSH_L=2.1$ m)

成分) のいずれもが, $NPSH$ の低下とともに単調に増加しているので, $NPSH_L=1.7$ m の場合のキャビテーションの様相は, 定性的には $NPSH_L=2.1$ m のそれと一致していると言える。

さて, 図3の $t=0\sim 1.3$ ms においては, 渦コアが羽根前縁まわりにのびて, 渦キャビテーションが後方の羽根の正圧面の方向に向って次第に発達しており, $t=2.4\sim 3.3$ ms においては, この渦キャビテーションが羽根前縁により正圧面と負圧面へと二つに分断されている様相が良く見て取れる(図2(a)参照)。このように, 「二分断される時には, 渦コア付近の低圧部に多数のキャビテーション気泡を伴っている渦キャビテーションにおいては, 羽根の両面の十分高い正圧と十分低い負圧とが衝撃的にかかることになるから, この二分部(羽根表面近傍)では, 強い衝撃波を伴うかなり不安定な流れとなり, 高壊食性渦キャビテーションに発達する」と解すれば, 上記の領域Cの壊食痕の挙動が良く説明がつく。言うまでもなく, 正圧面で崩壊する渦キャビテーションは, 周囲圧が高いために, 崩壊速度が著しく大となる結果, 正圧面の壊食率が負圧面のそれより著しく大となることであろう。

図3 羽根前縁近傍の渦キャビテーションの経時変化
($Q/Q_d=40\%$, $NPSH_L=1.7$ m)

なお, $t=3.3$ ms 以降では, 渦キャビテーションは完全に二つに分断され, 正圧面のものは視角の関係上観察できなくなるが, 負圧面のものは後方の羽根に向って伸びつつ発達しながら $t=0$ ms の場合のそれに復帰していく。

次に, 別報⁽⁷⁾において, $NPSH=12$ m の時に壊食率が最大となる $Q/Q_d=60\%$ の場合のキャビテーションの様相を知るために, 図4には, $Q/Q_d=60\%$, $NPSH_L=2.1$ m の場合の特徴的な羽根前縁近傍の渦キャビテーションの瞬間写真を示してみた。上記の $Q/Q_d=40\%$ の場合と同様に, 上流の主板上に発達している渦キャビテーション気泡塊

が下流の羽根前縁によって二分断されている様相が良く見て取れる(図4(b)参照)。全体的に、 $Q/Q_d=40\%$ の場合のものよりも渦キャビテーション気泡塊は大きく発達しており(図4(a)参照)、明らかに、キャビテーションの壊食エネルギーは $Q/Q_d=60\%$ の方が大きいことを示唆している。この大きな気泡塊の二分断直後(図4(b)参照)には、バタフライ弁における高壊食性特異渦キャビテーション⁽¹²⁾と同様に、流れが非常に不安定になり、高壊食性渦キャビテーションが形成され、そして、これが正圧面における激しい壊食に主たる寄与をしていると考えられる。また、負圧面側の渦キャビテーションは、負圧面上の他のキャビテーションと干渉しながら、発達、合体を繰り返しつつ成長し、上記のように、領域Aに激しい壊食をもたらしている。

図5は、 $Q/Q_d=60\%$ 、 $NPSH_L=2.1$ mの図3と同じ場合の羽根前縁近傍の渦キャビテーションの経時変化を示したものである。この図の羽根等の位置関係は図3とほぼ同様である。まず、 $t=0$ msの時には、負圧面上に発達した渦キャビテーションが図の中央部に見える。 $t=0\sim 2.4$ msまでは、この渦キャビテーションはほとんど移動せず、吸込側(上流側)へ向って徐々に発達し、成長している。すなわち、 $Q/Q_d=40\%$ のそれと同様に、この場合の渦キャビテ

ーションも、逆流域の高せん断領域に生じる渦流れに深く関わっていると言える。 $t=3.3$ ms以降には、やはり前縁により渦塊が二つに分断されている様相が認められるが、分断後($t=4.2$ ms以降)に、明らかに正圧面に1本の壊食性渦キャビテーション塊が残っており、これが領域Cの壊食の原因であろう。なお、負圧面側に流出した渦キャビテーションは、 $t=3.7$ ms以降には、負圧面の渦キャビテーションと合体して、徐々に発達・成長していく様相が良く見て取れる。

結局、 $Q/Q_d=40\%$ と60%のいずれの場合にも、「発達

図4 羽根前縁近傍の渦キャビテーションの様相
($Q/Q_d=60\%$, $NPSH_L=2.1$ m)

図5 羽根前縁近傍の渦キャビテーションの経時変化
($Q/Q_d=60\%$, $NPSH_L=2.1$ m)

図6 羽根前縁近傍の渦キャビテーションの様相
($Q/Q_d=80\%$, $NPSH_L=2.1$ m)

図7 羽根前縁近傍の渦キャビテーションの様相
($Q/Q_d=100\%$, $NPSH_L=2.4$ m)

した渦キャビテーション塊が羽根前縁によって二分断されて、高壊食性渦キャビテーション⁽⁶⁾を生じている」と考えられる。なお、 Q/Q_d が40%と60%の場合の流れのパターンは類似してはいるが、流れがより不安定な $Q/Q_d=60\%$ の場合の渦キャビテーション塊の方が大きく、厚く、より大きな壊食率と良く符合している。

最後に、図6~7には、設計流量付近の $Q/Q_d=80\%$, $NPSH_L=2.1$ m, および、 $Q/Q_d=100\%$, $NPSH_L=2.4$ mの場合の前縁近傍の渦キャビテーションの様相をそれぞれ示す。上記の低流量域の $Q/Q_d=40\%$, 60%の場合とは異なり、キャビテーションの発生は定常的になり、主板上から前縁まで伸びている渦キャビテーションの前縁による分断はほとんど観測されない。すなわち、渦キャビテーションの分断時に発生する高壊食性渦キャビテーションは、設計流量付近の安定的流れではほとんど生じないと言える。また、 $Q/Q_d=80\%$ と100%の様相を比較すると、主板上に認められるキャビテーション塊の厚さは、設計流量に近づくほど薄くなり、流れが安定していることを暗示している。

4. 結 言

$N_s=300$ の三次元羽根を持つ高比速度遠心ポンプに生じる激しい壊食をもたらす渦キャビテーションの挙動を解明するために、種々の条件下で、壊食面の様相ならびに、キャビテーションの様相を壊食領域キャビテーションの差異を踏まえ詳細に観察した。得られた結果を要約すると、次のようになる。

- (1) 低流量域では、羽根前縁近傍の逆流域に渦キャビテーションが発達し、この渦キャビテーションが羽根前縁により正圧面と負圧面に二分断されて高壊食性渦キャビテーションに発達する。
- (2) 低流量域における流れパターンは Q/Q_d を変えても類似しているが、 $Q/Q_d=60\%$ の時の渦キャビテーション塊の方が、 $Q/Q_d=40\%$ の場合のそれより大きく発達しており、したがって、キャビテーションによる壊食エネルギーも大きいと考えられる。
- (3) 壊食面の様相および流れパターンは、 $Q/Q_d \leq 60\%$ の低流量域と、 $Q/Q_d \geq 80\%$ の設計流量付近では明らかに異なる。
- (4) $Q/Q_d=80\%$ と $Q/Q_d=100\%$ の様相を比較すると、設計流量に近づくほどキャビテーション塊の厚さは薄くなり、流れがより安定になっている。

文 献

- (1) F. G. Hammitt: Cavitation and Multiphase Flow Phenomena, McGraw Hill, N.Y., (1980).
 - (2) 加藤, キャビテーション, 槇書房, (1990).
 - (3) 大場, ターボ機械, 13-10 (1985), 600.
 - (4) 祖山・ほか 5 名, ターボ機械, 18-12 (1990), 691.
 - (5) 祖山・ほか 4 名, ターボ機械, 18-12 (1990), 699.
 - (6) 祖山・ほか 3 名, ターボ機械, 21-4 (1993), 215.
 - (7) 祖山・ほか 5 名, 高比速度遠心ポンプにおける激しいキャビテーション壊食の発達過程, 日本機械学会東北支部第 30 期総会・講演会に発表の予定.
 - (8) 祖山・ほか 5 名, 高比速度遠心ポンプに生じる激しい壊食挙動の振動とノイズによる解明, 日本機械学会東北支部第 30 期総会・講演会に発表の予定.
 - (9) 緒方・ほか 5 名, 機論, 56-530 (1990), 2966.
 - (10) 大場・伊藤, 機論, 45-398 (1979), 1428.
 - (11) R. Oba・ほか 4 名, J. Fluids Eng., Trans. ASME, 108-4 (1986), 438.
 - (12) 谷・ほか 3 名, 機論, 57-537 (1991), 1525.
-