キャビテーション壊食領域の検出法の比較検討* (戸溝まわりに発生するキャビテーション)

伊藤 幸雄^{*1}, 石毛 忠志^{*2}, 村上 剛^{*3}
正路 良孝^{*4}, 池田 隆治^{*5}, 大場 利三郎^{*6}

Erosive Area Comparison by Means of Four Cavitation Detecting Methods

Yukio ITO, Tadashi ISHIGE, Tsuyoshi MURAKAMI,
Yoshitaka SHOUJI, Ryuji IKEDA and Risaburo OBA

To find a useful method for monitoring cavitation erosion arising in turbomachinery, several methods have been compared. There are mainly four typical methods: pure Al plate, soft Al foil, pressure-sensitive film and painting methods. However, the mutual relationship among them is yet unsettled. In this paper, therefore, the erosive area, where the erosion mainly takes place, was precisely detected by means of the four methods under the same flow conditions in typical separated flows around a slot. It was found that a large difference between the erosive areas is recognized, especially from the threshold levels, since each method inevitably has such an inherent characteristic threshold level against cavitation attacks.

Key Words: Cavitation, Erosion, Separation, Erosion Detecting Method, Erosive Area, Gate Slot

1. 緒 言

流体機械の高速・高信頼性化に関連して、キャビテーション壊食の防止法の確立が工業界において望まれている。それには、模型壊食試験結果により実機の壊食をいかに定量的に予測するか、また、壊食にかかわるキャビテーション強さをどのような検出法により定量的に測定するかが重要課題といえよう。

壊食率あるいは壊食領域の検出には、純アルミニウム板法（以下純Al板法という）、軟アルミニウムはく法⁽¹⁾（軟Alはく法）、感圧紙法⁽¹⁾⁽²⁾およびペイント法などがあるが、これら検出法相互間の関連性は明らかではない。たとえば、純Al製翼形による壊食量と感圧紙法による衝撃圧との間にはほとんど相関がない⁽²⁾とする一方、感圧紙法により測定した壊食が発生すると予想される壊食性領域と実際の壊食領域の間には良

好な一致もみられる⁽¹⁾。したがって、各検出法は壊食に直結する何を検出し得るかを明確にする必要がある。さらに、遠心ポンプの壊食試験⁽³⁾によると、同一試験状態でもキャビテーションのタイプの変化によって壊食値に100倍以上も大差があり、壊食強さの検出時には、このタイプを確認しつつ、種々の検出法を比較検討することが不可欠な条件といえよう。

よって本研究では、流体機械内の壊食の予測推定法の確立を目的として、仕切弁の扉体の支持・可動用戸溝まわりに発生する付着キャビテーションにより生じる戸溝下流壁面上の壊食領域を、純Al板法、軟Alはく法、感圧紙法およびペイント法により、同一のキャビテーションの発生状態において測定・対比する。

2. 実験装置と方法

使用した放流式試験水槽の詳細および試料水中の核分布の経時変化特性については前報⁽⁴⁾⁽⁵⁾を参照された。測定部は、一辺50mmのく形断面で、壁は透明アクリル樹脂製で、二方向よりキャビテーションの観察を可能にしている⁽⁵⁾。戸溝は、ステンレス製であり、スパン $B=50\text{ mm}$ で、図1に示すように、戸溝深さ D は12.5, 20, 25, 50mmである。測定部における平均流速 U は、検定済の四角せきにより測定し、また、戸

* 平成4年4月3日 第69期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成4年8月5日。

^{*1} 正員、八戸工業大学工学部（〒031 八戸市妙字大開88-1）。

^{*2} 正員、栗本鉄工所（株）（〒559 大阪市住之江区柴谷2-8-45）。

^{*3} 正員、豊田工機（株）（〒448 刈谷市朝日町1-1）。

^{*4} 正員、岩手大学工学部（〒020 盛岡市上田4-3-5）。

^{*5} 正員、元：岩手大学工学部。

^{*6} 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）。

溝上流の壁面静圧 P は戸溝角 C_1 より 100 mm 上流でマノメータにより測定している。

戸溝まわりで壊食が実際に問題となるのは、原点 O より下流の面上であるから、角 C_2 より始まる流路面上の壊食ピット、壊食発生領域を測定した。測定には、厚さ 0.5 mm の純 Al 薄板 (50 mm×50 mm, 純度 99.6%) による壊食ピット分布の測定、厚さ 20 μm の軟質 Al はく (両面テープで壁面に接着) による壊食へこみ分布の測定、感圧紙による衝撃圧分布の測定、および、青タック塗布法 (ペイント法) による青タックのはく落面積の測定の 4 種を採用した。純 Al 薄板および軟質 Al はくの固定の際には、それらの厚み分を面上より切り落とし、流路に段差が生じないようにした。また、キャビテーションにさらした時間は 60, 120 min である。壊食ピット分布は、2 mm 幅格子内のピット数と大きさを計数した。衝撃圧の測定に際しては、感圧紙 (高圧用、厚さ 250 μm) をポリプロピレン製の袋に真空包装⁽¹⁾ し、衝撃圧 P_{sc} 分布は感圧模様が現れている面上をやはり 2 mm 幅の格子に分割して測定し、ペイント法においては、最大経過時間 $t=120$ min まで 10 min ごとにペイントのはく落を写真に記録した。

キャビテーションの様相は、せん光時間 2 μs のクセノンランプにより瞬間写真撮影した。

キャビテーション係数 σ とレイノルズ数 Re はそれぞれ $\sigma=2(P-P_v)/\rho U^2$, $Re=BU/\nu$ と定義した。ここで、 P_v , ρ および ν はそれぞれ試料水の飽和蒸気圧、密度および動粘度である。

試験条件は、 $\sigma=0.4\sim 2.3$, $Re=(4.6\sim 8.5)\times 10^5$, $U=10\sim 20$ m/s, $P=42\sim 225$ kPa, および試料水の空気含有度 $\alpha/\alpha_s=1.03$ である。

3. 実験結果

3.1 キャビテーションの様相 この戸溝に発生するキャビテーションのタイプ、発生箇所および初生キャビテーション係数については前報⁽⁴⁾⁽⁵⁾を参照されたい。ここには、各検出法を対比した $W/D=4$, $\sigma=0.4$ における戸溝まわりのキャビテーションの様相を図 2 に示す。これより、角 C_1 から発達するはく離せん断層に発生する渦キャビテーション (Type-1)、角 C_2 から

図 1 供試試片

発生する付着キャビテーション (Type-3) が認められる。なお、 D が変わると戸溝内には定在渦の存在にかかわるキャビテーション (Type-2) も発生する⁽⁶⁾。そして、付着キャビテーションへは Type-1 が主たるキャビテータとなって十分な有効核を供給しており、上流キャビテータ作用がある。

3.2 各種検出法によって壊食領域 まず、各検出法で得られた壊食あるいは壊食の可能性が予想される壊食性領域とを比べてみよう。純 Al 板法において壊食ピットの直径 d と数 N_p を測定し、 $d\geq 10$ μm の比較的大きいピットが存在する領域を壊食領域と定めた。 N_p は単位面積、単位時間当たりのピット数である。軟 Al はく法も純 Al 板法とほぼ同様であるが、概して、より小さいキャビテーションアタックに対してより敏感である。感圧紙法とペイント法についてはすでに詳しい試験結果があるので、それ⁽⁷⁾を参考されたい。ただし、感圧紙法では壊食の可能性が認められる壊食性領域を $P_{sc}\geq 10$ MPa の領域と定めた⁽¹⁾。最後に、ペイント法では十分な経過時間後のペイントのはく落領域を壊食性領域と定めた。

図 3 には、純 Al 板法によるピット数 N_p [$\text{mm}^2\cdot\text{h}^{-1}$], 軟 Al はく法による壊食へこみ数 N_b [$\text{mm}^2\cdot\text{h}^{-1}$], 感圧紙法による衝撃圧 P_{sc} [MPa], および、ペイント法によるペイントのはく落面積 A [mm^2] が、下流角 C_2 (原点 O , 図 1) から流れ方向 X にどのように変化するかを対比している。ここで、キャビテーションにさらした時間は、ペイント法のみ 120 min で、そのほかの方法においては 60 min である。

これより、壊食 (性) 領域が戸溝下流のある領域に分布していること、最大壊食を示す位置 X がやや近いという定性的一致は認められるが、検出法により、壊食 (性) 領域の大きさおよび最大壊食 (性) 領域はかなり異なる。すなわち、検出法により壊食領域に大差

図 2 キャビテーションのタイプ

が生じる可能性を示している。まず、低壊食材に対しては最も忠実に壊食領域を示すと考えられる純 AI 板法によった結果を基準に比較してみると、ペイント法によったそれはほぼ一致しているが、感圧紙法および軟 AI はく法によったそれらは、純 AI 板法で壊食ピットが観察されなくなった付近からさらに 2 倍程度下流まで広がっている。このような大きな差異は、それぞれの方法で検出する衝撃圧のしきい値の差によると理解されよう。すなわち、最大壊食領域は、純 AI 法では、 $X=0.1W$ にあるが、ほかの 3 法では、ペイント法、軟 AI 法、感圧紙法 ($X=0.25W$) の順に下流側に移動している。しかし、これらのいずれの分布も対数正規分布形を呈しているため、上記のいずれの方法で定めた壊食領域も同一の法則で決定されていることを明示している。すなわち、上記の大差の主因は、キャビテーションアタックに対するしきい値の設定の差にあるといえる (純 AI 板法の壊食のしきい値は、感圧紙法、軟 AI はく法のそれらに比べて著しく大きい)。したがって、壊食の決定に際しては、しきい値の設定に十分配慮が必要である。また、最大壊食 (性) 領域あるいは位置の差の原因は、キャビテーションアタックによる衝撃パルスの振幅と数の関係⁽⁸⁾ が流れ方向 X に変わるためである。すなわち、純 AI 板法での最大壊食領域では比較的大振幅で少数の衝撃パルス (大 d に対応) が支配的に効いている。しかし、このような高衝撃パルスは X とともに急減し、代わって多数の小振幅衝撃パルスが多くなり、より下流側でも感圧紙と軟 AI が反応し、壊食性領域を拡大していると考えられる。

図 4 には、壊食ピット数 N_p 、壊食へこみ数 N_d 、衝撃圧 P_{sc} および壊食性面積 A の壊食面 (X - Y 面, Y はスパン方向を示す) 上での変化を示す。ここで、 A_0 は測定領域 $0 \leq X/W \leq 0.4$, $-0.3 \leq Y/B \leq 0.3$ の面積である。境界層近傍 ($Y/B = \pm 0.3$) においては、 X 渦キャビテーション⁽⁶⁾⁽⁷⁾ によるとみられる高 P_{sc} 領域、壊食ピットおよびへこみが測定されているが、ペイント

法では境界層の存在によりはく落面積 A の減少が認められる。

3.3 壊食 (性) 領域の経時変化 図 5 には、純 AI 板法によった壊食ピット数 N_p の経時変化を示す。直径 $10 \mu\text{m}$ 以上のピットは、 $t > 20 \text{ min}$ では N_p がほぼ直線的に増大している。そして、純 AI 板法によった結果より潜伏期內と思われる $t < 60 \text{ min}$ においてはそれほど急激なピット数の増加傾向はない。したがって、図 3 に示した壊食領域曲線の定性的傾向は経過時間によって変わらないといえる。

次に、図 6, 7 には、ペイントのはく落面積 A の経時変化、はく落の様相と分布の経時変化をそれぞれ示す。まず、面積 A は $t = 60 \text{ min}$ まではほぼ直線的に変化しているが、 $t > 60 \text{ min}$ になると加速的に増大する傾向がある。すなわち、 $t > 60 \text{ min}$ の状態は壊食の加速期にあると考えられるから、今回のペイント法によった面積の経時変化曲線はいわゆる壊食曲線に非常に近いものとなっているはずである。これも、ペイント法によった壊食領域が純 AI 板法によったそれとかなりよい一致を示した一因であろう。

なお、感圧紙と軟 AI はく法については改めて経時変化を求めなかったが、 P_{sc} は感圧模様が変化しなくなる時間を採用している。

図 4 壊食 (性) 領域が定義された壊食あるいは衝撃圧マップ

図 3 各種検出法によった壊食 (性) 領域の比較

図 5 壊食ピット数の経時変化

図 6 ペイントのはく落面積の経時変化

図 7 ペイントのはく落パターンの経時変化

4. 結 言

壊食の発生・発達過程の定量的予測法の確立を目的として、仕切弁戸溝まわりに発生する壊食領域を純 A1 板法, A1 はく法, 感圧紙法およびペイント法により検出した。そして、各検出法により測定した壊食領域間にいかなる差があり、その原因は何かについて検討した。得たる結果を要約すると次のようになる。

(1) 同一のキャビテーション発生状態において、壊食(性)領域を、壊食ピット、壊食へこみ、衝撃圧およびペイントのはく落により検出した。そして、しきい値の設定により壊食領域に大差が現れ、しきい値の設定には十分配慮が必要であることを明示した。

(2) 壊食ピット分布を測定する純 A1 板法は一応最適であるといえるが、その壊食(性)領域とほぼ一致するペイント法は簡便で有効な方法といえる。さらに、ペイント法はそのペイントのはく落面積の経時変化がいわゆる壊食曲線に似ているから、経時変化より現在の壊食状態が推測し得る可能性がある。

(3) 今回得られた壊食領域を示す分布は、いずれの検出法においても対数正規分布であり、同一壊食法則に支配されていることを示している。

文 献

- (1) 大場・ほか 6 名, 機論, 52-473, B(1986), 3.
- (2) 中島・ほか 2 名, 造船論, 149(1981), 73.
- (3) 祖山・ほか 2 名, ターボ機械, 18-12(1990), 29.
- (4) 池田・ほか 2 名, ターボ機械, 16-2(1988), 81.
- (5) 池田・ほか 5 名, 機論, 57-541, B(1991), 2899.
- (6) 石毛・ほか 3 名, 機講論, No. 920-68(1992-8), 213.
- (7) 石毛・ほか 4 名, 機講論, No. 920-68(1992-8), 210.
- (8) 伊藤・ほか 6 名, 機論, 54-506, B(1988), 2727.