

## 壁効果の著しい噴流キャビテーション

### における壊食の速度依存性\*

望月敬美\*\*・横田源弘\*\*\*・伊藤幸雄\*\*\*\*

#### Velocity dependence on cavitation erosion around bounded jet\*

Hiromi MOCHIZUKI\*\*, Motohiro YOKOTA\*\*\* and Yukio ITO\*\*\*\*

**Abstract:** In order to clear velocity dependence of cavitation erosion around bounded jet flows, the highly eroded area  $A$ , the maximum erosion depth  $E_{max}$  and the emitted noise were measured in the velocity range of  $V=44-109$  m/s at a cavitation number  $\sigma=0.25$ , by means of pure aluminum plates and a hydrophone. As  $V$  is increased, the eroded area  $A$  and the maximum erosion depth  $E_{max}$  are increased with  $n$ -the power of  $V$  i.e.  $A \propto V^{n1}$  and  $E_{max} \propto V^{n2}$ , and the exponent  $n1$  and  $n2$  are about 4 and 2 respectively. The adjoining walls is due to the ununiformity of the erosion pattern. On the other hand, the sound pressure level SPL of noise has two peaks with respect to  $\sigma$  and the higher peak takes at  $\sigma=0.25$ , corresponding to hard erosion state.

#### 1. 緒言

流体の流れ場で発生するキャビテーションは、管路、弁および流体機械のおもな損傷原因となる。例えば、ディーゼル機関用燃料噴射系および比較的小形の油圧機器では流体が高速であるため、非常に激しいキャビテーション・エロージョン（以下、単に壊食という）の発生が予想され、故障の原因となる。そのため、このような壊食の予測・軽減法の確立が緊要であると言われている（日本機械学会, 1982; 渡辺ら, 1989）。

従来、壊食の研究は発生原因の違いにより2種類に大別できる。即ち、噴流キャビテーションが固体壁に衝突

して生ずる場合と、固体壁へ接近して発生する場合である。前者では、衝突距離による影響（BERGER, 1982）、噴口の長さとの比による影響（LICHTAROWICZ, and KAY, 1983）および作動油と水との違いによる影響（清水・山口, 1989）など、種々な面から調べられている。一方、後者では燃料ポンプより燃料噴射弁に連結している高圧管内における壊食の発生位置が推定可能なこと、また、管内壁の壊食量は噴射特性のうち圧力とは相関するが流速の影響は無いことが明らかにされている（渡辺ら, 1989）。しかし、渡辺らが行った実験では流れが非定常流であるため、定常流の場合の壊食機構とは大いに異なると考えられる。また、この分野の研究は数少ない。

本報では、定常流の噴流キャビテーションが固体壁に接近し、壁効果が著しい流れ場における壁面壊食の速度依存性およびキャビテーション・ノイズによる発達過程の予測について検討する。

#### 2. 実験装置および方法

Fig. 1 に実験装置を示す。タンク①の水道水は、高圧ポンプ④で加圧され、高圧ホースにより測定部⑧に導かれる。測定部の入口圧力  $P_1$  (⑩) はリリーフ弁⑤により、また、出口圧力  $P_2$  (⑪) はリリーフ弁⑫とポペット弁⑬により変えられる。入口側水温  $T_1$  (⑨) はヒータ⑭および三方コック⑮で一定に保たれる。キャビテー

\*1995年5月1日受理 Received June 1, 1995

\*\*東京水産大学練習船海鷹丸Ⅲ, 〒108東京都港区港南4-5-7

T/V Umitaka-maru Ⅲ, Tokyo University of Fisheries, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo, 108 Japan

\*\*\*水産大学校機関学科, 〒759-65下関市永田本町2-7-1 Department of Marine Engineering, National Fisheries University, 2-7-1 Nagatahonmachi, Shimonoseki, 759-65 Japan

\*\*\*\*八戸工業大学エネルギー工学科, 〒031八戸市大字妙88-1

Department of Energy Engineering, Hachinohe Institute of Technology,

88-1 Ooaza-myō, Hachinohe, 031 Japan

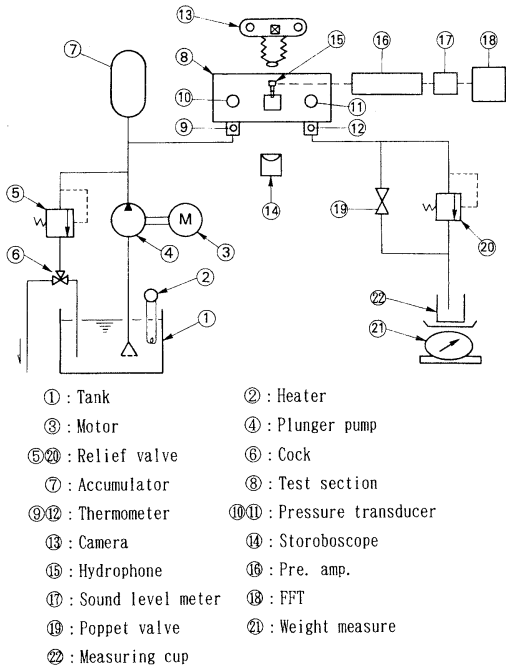


Fig. 1. Experimental apparatus.

シオン係数  $\sigma \cong P_2 / (P_1 - P_2)$  は  $P_1$  を固定し,  $P_2$  を変えることにより変化させた。

キャビテーション・ノイズは, 水を満たした容器内に置かれた水中マイクロホン<sup>15</sup> (沖電気製ハイドホン ST-1001) により測定し, 水中音圧計<sup>17</sup> (沖電気製 SW-1007) で音圧に変換した。音圧のスペクトルは FFT アナライザ<sup>18</sup> (小野測器製 CF-360) で解析した。

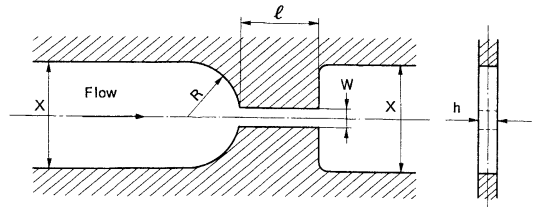
キャビテーションの様相は, せん光時間  $1 \mu s$  のキセノンランプ<sup>14</sup> を用いて瞬間撮影<sup>13</sup> した写真で観察した。

Fig. 2 は, ステンレス製供試ノズル (のど部流路幅  $W = 0.47 \text{ mm}$ , 流路高さ  $h = 0.39 \text{ mm}$ , 流路長さ  $l = 1.60 \text{ mm}$ ) と測定部の概略を示す。のど部入口開始箇所は流れのはく離箇所が固定するように鋭角を持つ凹面形をしており, あらさの影響を少なくするために, 内壁面は十分平滑 (あらさ  $0.8 \mu \text{ m Ra}$ ) に仕上げられている。流れの観察を可能にする透明アクリル樹脂板<sup>6</sup> および試験片 (写真観察時には取り外す) のアルミニウム板<sup>5</sup> (材質 A1050, 表面あらさ  $R_{\text{max}} = 1.4 \mu \text{ m}$ ) は, 高圧に十分耐え, かつ微小な変形が生じないように両側壁に高張力ステンレス鋼板<sup>7</sup> をはさんでボルト<sup>10</sup> 止めた。

キャビテーション係数  $\sigma$  および流量係数  $C_d$  は次のように定義した。

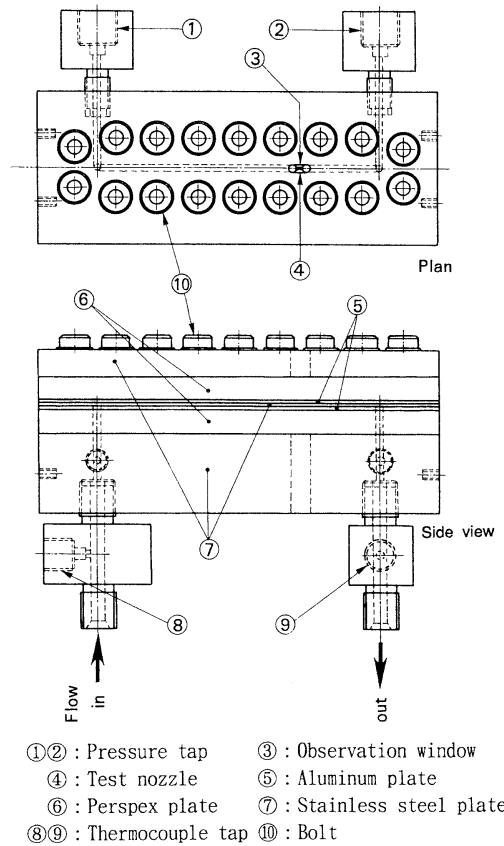
$$\sigma = (P_2 - P_v) / \Delta P \cong P_2 / \Delta P$$

$$C_d = M / S \sqrt{2 \rho_1 \Delta P}$$



W : Nozzle width (0.47mm) h : Nozzle height (0.39mm)  
 $l$  : Nozzle length (1.60mm) R : Radius of nozzle inlet (0.96mm)  
 X : Channel width (2.06mm)

(a) Test nozzle



①② : Pressure tap ③ : Observation window  
 ④ : Test nozzle ⑤ : Aluminum plate  
 ⑥ : Perspex plate ⑦ : Stainless steel plate  
 ⑧⑨ : Thermocouple tap ⑩ : Bolt

(b) Test section

Fig. 2. Test nozzle and test section.

ここで,  $\Delta P = P_1 - P_2$ ,  $S = Wh$  および  $M$  はそれぞれ静圧差, 流路面積および質量流量,  $W, h$  はそれぞれのど部の幅, 奥行きである。また,  $P_v, \rho_1$  はそれぞれ水の飽和蒸気圧, 密度である。添字 1, 2 はのど部の入口, 出口側を表す。実験条件は,  $P_1 = 3.0 \sim 14.8 \text{ MPa}$ ,  $\sigma = 0.009 \sim 3.02$ , のど部平均流速  $V = 44 \sim 109 \text{ m/s}$ ,  $T_1 = 290 \sim 293 \text{ K}$  である。

3. 実験結果および考察

3.1 壊食の様相

Fig. 3は、静圧  $P_1=14.8\text{MPa}$ 、実験時間  $t=120$  分後のキャビテーションの発達段階における壊食された面積  $A$ 、最大壊食深さ  $E_{max}$  およびノイズの音圧レベル  $SPL$  の  $\sigma$  との関係を示す。ここで、壊食の程度を表すものとして壊食面積を導入したのは、壊食質量が著しく少ない(2時間の壊食で1mg以下)ためである。参考のために、流量係数  $C_d$  の変化も示す。はく離泡形キャビテーションの発達段階(横田・伊藤, 1992)をサブキャビテーション(以下 Sub.C と示す)領域 (I), Sub.C 領域 (II), 遷移領域 (III) およびスーパーキャビテーション (SC) 領域 (IV) で、また、この消滅キャビテーション

係数を  $\sigma_d$ 、臨界キャビテーション係数を  $\sigma_{cr}$  で表す。これより、 $A$  および  $E_{max}$  は特定の  $\sigma$  でピークを示し、この領域は  $\sigma$  が低下して  $C_d$  が  $\sigma$  と関係なくほぼ一定となる  $\sigma \leq 0.2$  の上限付近であることがわかる。ノイズの音圧レベル  $SPL$  は大略2つのピークを示す。第1ピーク(図中ⓐ点)はSub.C領域IIと遷移領域IIIの境界で現れ、はく離泡形キャビテーションの発生領域が大幅に変動する状態であり、また、第2ピーク(ⓐ~ⓕ付近)はSC領域IVで現れ、十分発達した噴流キャビテーション状態に対応している。すなわち、壊食が激しくなる状態は  $SPL$  値が大きい第2ピーク付近に相当し、壊食とノイズとの関係を明示している。なお、遷移領域IIIとSC領域IVの境界 ( $\sigma = \sigma_{cr}$ ) 付近で  $SPL$  は極小となる。

Fig. 4は、Fig. 3中の特徴的な点ⓐ~ⓕにおけるキャ

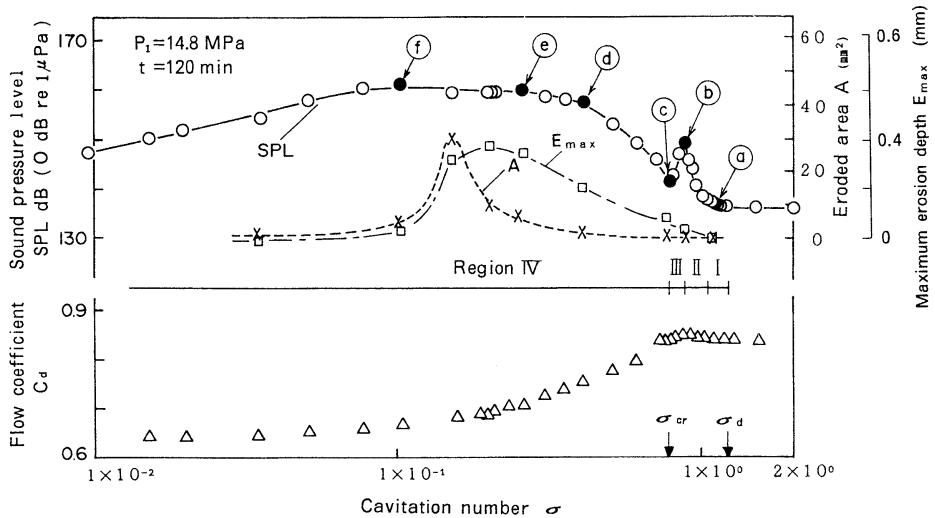


Fig. 3 Relationships between cavitation number  $\sigma$  and cavitation noise  $SPL$ , eroded area  $A$ , maximum erosion depth  $E_{max}$  and flow coefficient  $C_d$ . I: Sub.C-region. II: Sub.C-region. III: Transient-region. IV: SC-region.

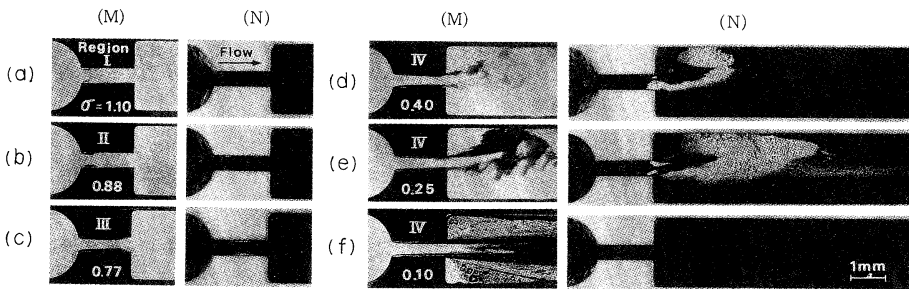


Fig. 4. Cavitation aspects(M) and erosion patterns (N) for Sub. C-region I ( $\sigma = 1.10$ ), Sub. C-region II ( $\sigma = 0.88$ ), Transient-region III ( $\sigma = 0.77$ ) and SC-region IV ( $\sigma = 0.40, 0.25$  and  $0.10$ ) in the case of  $t = 120\text{min}$ .

ピテーションの様相 (M) および120分後の壊食の様相 (N) をそれぞれ (a) ~ (f) に示す。これより、噴流の偏向の影響が壊食にそのまま現れており、噴流が衝突する壁面付近は特に著しい質量欠損がある。すなわち、噴流のごく近傍に壁があると、壁付近の壊食は著しく偏った形で増大する。なお、写真 (e) の壊食の様相をみると、遠心ポンプで機械の寿命を左右する激しい壊食 (祖山ら, 1990) と同じように、噴流方向に直角に整列した凹凸認められ、激しい壊食の存在を示している。図中 Sub.C 領域 I (a)・II (b) においては、のど部内ではく離泡形キャピテーションは発生しているが、壊食はほとんどみられない。しかし、遷移領域 III (c) になると、キャピテーションの発生領域が (1.3~3) W の範囲で大きく変動するため、壊食を認める。したがって、のど部内の壊食に限定すると、ノイズの第1ピーク付近においても壊食はピークを示す。次に、疑似 SC 領域 IV (d)・(e) においては、SC 空洞の後端より間欠的に放出される塊状気泡の崩壊によって壊食の発生が一層促進される。なお、SC 空洞内部には壊食は認められないが、空洞後端の再付着領域には認められる。十分発達した SC 領域 IV (f) においては、ノズル出口端より約65W 付近に僅かに壊食が認められ、噴流の再付着領域と考えられる。

なお、 $\sigma = 0.15$  の場合には、実験時間の経過に伴ってノイズは急激に増大し、その時、噴流後端付近から上流側へ壊食の発達する過程が認められた。この原因は、経時的に再付着領域で壊食が生じ、それによりキャピテーションの発生・発達に有効な気泡核の発生が助長され、この核が死水領域内を上流へ回流し、上流側でのキャピテーションの発生が促進させられるためと考えられる。

### 3.2 壊食の速度依存性

壊食の速度依存性を調べるため、Fig. 5 には、 $t=60$  分後の壊食領域とのど部平均流速  $V$  による壊食の様相の変動を示す。これより、 $\sigma$  が一定であっても、流速が異なると壊食面積、壊食深さ、形状などは大幅に異なる。すなわち、壊食量の速度依存性が認められる。

Fig. 6 は、壊食面積  $A$ 、最大壊食深さ  $E_{max}$  および音圧レベル SPL と  $V$  の関係を示す。これより、 $A$  および  $E_{max}$  は  $V$  とともに大幅に増大している。ここで壊食面積  $A$  および最大壊食深さ  $E_{max}$  の速度依存式  $A \propto V^{n1}$  および  $E_{max} \propto V^{n2}$  を導入し  $n1, n2$  の値を求めると、 $A \propto V^4$  および  $E_{max} \propto V^2$  の関係がある。ここで、最大壊食深さが平均壊食深さ (=壊食容積/壊食面積) に比例

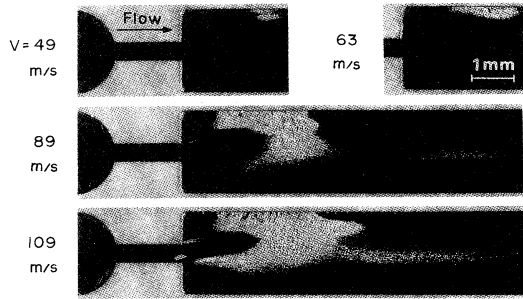


Fig. 5. Progression of erosion with velocity  $V$  in case of  $\sigma = 0.25$  and  $t = 60$  min.

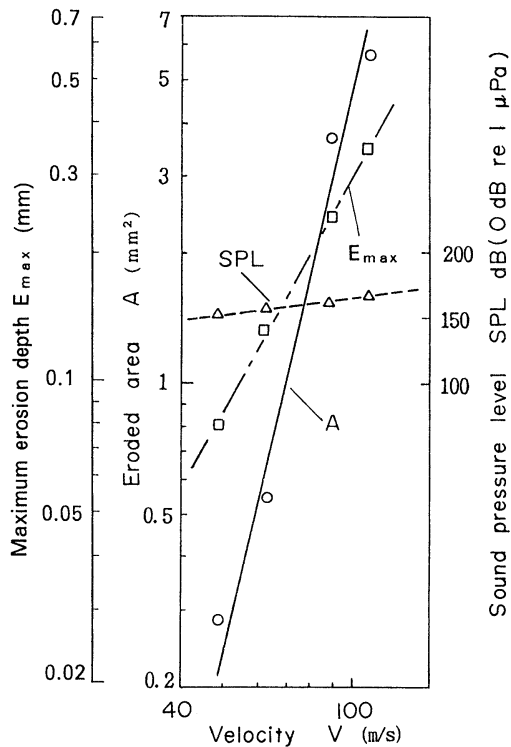


Fig. 6. Correlations of maximum erosion depth  $E_{max}$  eroded area  $A$  and cavitation noise SPL with velocity  $V$  in case of  $\sigma = 0.25, t = 60$  min.

すると、壊食質量  $G$  は  $G \propto V^6$  となるから、よく知られている壊食質量  $G$  の速度依存式  $G \propto V^m$  ( $m = 3 \sim 7$ ) の範囲にある。次に、ノイズをみると速度依存性は顕著でなく、壊食のノイズによるモニタ法は未だ不明である。ここで、 $t=60$ 分後とした理由は、 $A$  および  $E_{max}$  が  $t=60$ 分までは急激に拡大し、その後、 $A$  および  $E_{max}$  の経時変化が少なくなるためである (Fig. 7 および Fig. 8 参照)。なお、Fig. 8 を見ると、種々の  $\sigma$  に対して  $A$  およ

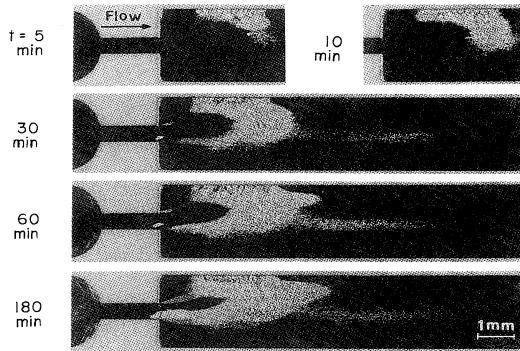


Fig. 7. Progression of erosion with time in case of  $\sigma = 0.25$ ,  $V = 109$  m/s and  $P_1 = 14.8$  MPa.

び  $E_{max}$  は類似の傾向を示していることが分かる。

#### 4. 結 言

壁効果の大きい流れ場に着目し、噴流キャビテーションまわりの壊食の速度依存性をキャビテーションの様相、ノイズとの関連において調べた。結果を要約すると次のようになる。

- (1) 壊食面積  $A$  および最大壊食深さ  $E_{max}$  には  $A \propto V^{n1}$  および  $E_{max} \propto V^{n2}$  の関係があり明りょうな速度  $V$  依存性が認められる。本実験においては  $n1 = 4$ ,  $n2 = 2$ 。
- (2) 噴流のごく近傍に壁があると、壁付近の壊食は著しく偏った形で増大する。
- (3) ノイズの音圧レベル SPL は大略 2 つのピークがあり、壊食が激しくなる状態は SPL 値が大きい第 2 ピーク付近に相当する。

#### 文 献

BERGER, J. (1982): Untersuchung der Auswirkung von Kavitation beim Einsatz von HFA-Flussigkeiten, *Olhydraulik und Pneumatik*, 26 (6), pp. 441-451.  
 KLEINBREUER, W. (1980): Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Kavitationserosion in Hydraulischen Systemen, *Olhydraulik und Pneumatik*, 24(6), pp. 455-460.

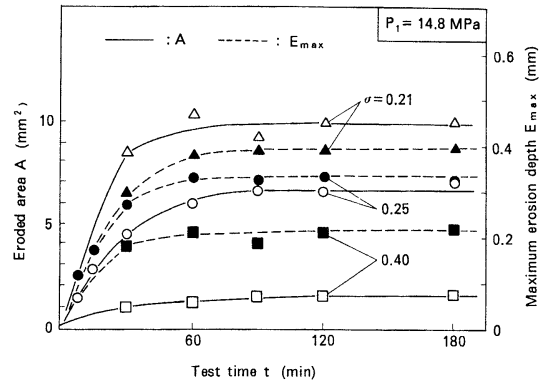


Fig. 8. Variation of eroded area  $A$  and maximum erosion depth  $E_{max}$  with test time  $t$ .

LICHTAROWICZ, A. and P. KAY (1983): Erosion Testing with Cavitating Jets, Proc. 6th Int. Conf. on Erosion by Solid and Liquid Impact, Cambridge, pp. 15-1 to 15-4.

日本機械学会 (1982): 第106回講習会キャビテーションの基礎と実際, 日本機械学会編, 東京, pp. 93-100.  
 清水誠二・山口惇 (1988): キャビテーションを伴う噴流の衝突による壊食, 油圧と空気圧, 19(1), pp. 68-75.

祖山均・伊藤幸雄・市岡文彦・浦西和夫・加藤洋治・大場利三郎 (1990): 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, ターボ機械, 18(1), pp. 691-698.

渡辺久志・山田正俊・今井健二・石井美也・佐々木忍 (1989): ディーゼル機関燃料噴射系におけるキャビテーションの研究, 日本機械学会論文集 (B編), 55 (512), pp. 1-6.

横田源弘・伊藤幸雄 (1992): 細絞りを通る高速噴流中のキャビテーション特性, ウォータージェット, 9(1), pp. 3-13.