V溝から流出する高含水流体によるエロージョン*

浦田 暎 三^{*1}, 中 尾 陽 一^{*1}

Erosion by High-Water-Content Fluid Flowing out from a V-Notch

Eizo URATA and Yoichi NAKAO

Among the problems in the application of the high-water-content fluid, erosion induced by a cavitating jet is an important and complex one. A high-velocity jet accompanying cavitation can be observed in hydraulic valves and hydraulic pumps. This paper treats erosion induced by a cavitating jet flowing out from a triangular notch. A pair of test pieces is used in each experiment. The first test piece has a triangular notch from which the fluid flows out, forming a jet. The jet impinges to the second test piece. A nondimensional parameter defined by the ratio of the eroded mass and the impinging fluid mass is used to express the strength of the erosion. The relation between the eroded mass of each test piece and the mass of the expelled fluid is studied by statistical method. The influences of the shape of the notch and the distance between the notch and the wall upon the erosion are also discussed.

Key Words: Erosion, Jet, Cavitation Erosion, Fluid Power Systems, High-Water-Content Fluid, V-Notch

1. は し が き

液圧システムの作動流体として使用が始まった高含水流体においては、エロージョンが油の場合よりも激しく、これまではあまり注意を向けなかった場所にも、設計上の考慮を必要とする場合が出てきた。高速の噴流に伴ってキャビテーションが発生し、機器に損傷を与えることは、水でも油でも経験されている。液圧駆動の機器内部において生じる噴流は、しばしば10 m/s以上、ときには200 m/sを超える高速となり、これに伴ってエロージョンが発生する。高速の噴流はキャビテーションを伴わない場合でもエロージョンを生じさせる(いわゆるジェットエロージョン)。本論文で扱う噴流では、上流と下流の圧力条件がキャビテーションを生じるように設定されているが、エロージョンはキャビテーションに起因するもののみとは断じられない。本論文ではキャビテーション以外の影響も考えられる場合には、単にエロージョンと記述してある。

キャビテーションエロージョンの強さは、材料、流体の種類、機器の寸法などの幾何学的条件、圧力、流

速、温度などの流体力学的条件によって異なることが知られている。高含水流体によるキャビテーションエロージョンに関してもいろいろな物理、化学的な条件のもとで、調査を行う必要がある。水力機械に生じるキャビテーションエロージョンに関する研究は、歴史も長く、データも豊富に集積されている^{(1)~(3)}。それに比べて、油圧駆動装置や機器においては、エロージョン量が少ないためか、これに関する報告は少ない。油圧技術から派生した高含水流体では、顕著なエロージョンが観察されるが、歴史が浅いために、研究はわずかし行われていない。

機器の材料や流体の種類を変えて、キャビテーションエロージョンを調べる方法としては、超音波振動を用いるものと^{(4)~(7)}、高速の直噴流を用いるもの⁽⁸⁾とがある。高含水流体によるキャビテーションエロージョンの研究においても、振動式⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と噴流式^{(11)~(13)}が使用されている。これらは主に流体の種類を変えてエロージョンを比較したものである。液圧駆動機器においては、形状や運転条件の影響を調べることも重要である。最も顕著にエロージョンが現れるのは、弁の下流と、ポンプの弁板のV溝周辺である。形状の影響を調べる場合には、上流および下流の圧力など運転条件を固定しておく必要がある。Berger⁽¹⁴⁾は高含水流体の

* 原稿受付 平成3年4月10日。

*¹ 正員、神奈川大学工学部 (〒221 横浜市神奈川区六角橋3-27-1)。

噴流に伴うエロージョンについて広範な研究を行い、その中で、高压に保たれた上流からの噴流では、上流圧力のべき乗（約 3.5 乗）に比例してエロージョンが増加すること、また噴流の下流側圧力が 90~160 kPa でエロージョンがゆるやかな最大を示すことを実験的に求めている。V 溝から流出する噴流によるエロージョンに関する Berger の実験研究⁽¹⁴⁾でも、形状をあまり変えていないので、実用上必要な形状に対して、さらに詳しく調べ、データの集積を行う必要がある。

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置と装置運転方法 考察対象とする流路（V 溝）は切欠試験片〔試験片 A、図 1（a）〕と丸穴試験片〔試験片 B、図 1（b）〕を、図 1（c）のように重ねて形成する。これを図 2 の試験装置内に装着する。図 2 において流体は上部から流入し、V 溝を通して下部に流出する。図 2 中の上部カバーは、試験片交換のために着脱可能となっている。上流側圧力 p_1 および、下流側圧力 p_2 は試験装置ボディに設けた測圧孔で測定する。図 2 の試験装置は、図 3 の流体循環装置内に組み込む。図 3 においてポンプは斜板式ピストンポンプで、 $p_1=14$ MPa(gage) として実験を行った。下流側圧力 p_2 は絞り弁で調節して、160 kPa(gage) となるように調節しながら実験を行った。上流および下流側圧力の変動はエロージョン量に影響を与えるので、圧力を監視しながら装置の運転を行った。使用した流体は市販の高含水流体〔モレスコアクアドル ETP：（株）松村石油研究所〕である。装置の下流側およびポンプドレイン管路にフィルタを入れてある。フィルタエレメントは含水系作動流体用の樹脂を含浸した紙エレメントで、メーカーが 10 μ m と呼称するものである。ポンプ入口のストレーナは、150 メッシュのステンレス金

網製である。実験にさきだってポンプを運転し、流体を採取して顕微鏡検査を行い、3 μ m 以上の粒子が観測されない状態で実験を行った。流体温度はタンク内のサーミスタ温度計で測定し、温度制御装置（水冷却）を用いて、実験中の液温度を $50 \pm 1.5^\circ\text{C}$ とした。装置内の流体の体積は約 60 L である。流体の濃度はメーカーの原液 1 に対し水道水を 19 の体積比で加えて 5% とした。運転中は濃度および PH を監視し、PH = 8.1~8.6 となるように、流体メーカー指定の PH 調整剤を適時添加した。

2・2 試験片 (1) 材質と寸法 試験片はアルミニウム合金（JIS H 4040 記載の A 5056）を用いて製作した。試験片の硬さは HRB 35~40、密度は $2.64 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。材質にアルミニウム合金を用いたのは、鉄などに比べてエロージョンが早く、短時間では感度良く、実験・測定が行えるからである。

図 1 に示した試験片において、溝の露出部の長さは、丸穴試験片の穴の中心偏心量 L で決定し、 $10-L$ [mm] である。 L は 3, 5, 8 mm の 3 種類、溝の頂角 α は 60° および 90° の 2 種類とする。溝のこう配 β は、2, 3, 4, 5, 6° を製作目標値とした。試験片は旋盤加工した。切欠試験片面粗さは半径方向に測定して 2 S-

図 2 試験装置

図 1 試験片

図 3 試験用液压回路

4 S, 丸穴試験片は母線方向で0.8 S-2.0 Sである。

(2) β の測定 β には相対的に大きな加工誤差が生じやすい。たとえば、顕微鏡で調べると縁線がわずかに曲がっている。このような場合の等価な β を幾何学的に決定する根拠がない。そこで次の手順により流量特性に基づく等価な β の決定を行った。まず工具顕微鏡による測定をし、次に溝のレプリカをとって断面を検査する。これらの測定で定めた値を観測値 β_M とする。次に各試験片における実験の際の、初期の流量測定の結果により、再度、有効なこう配を推定しなおして、それを真のこう配とした。すなわち、差圧 α および L が同じならば、流量は絞りの面積に比例するはずであり、絞り面積は β^2 に比例する。そこで横軸に β_M をとり、縦軸に流量 Q の平方根に適当な定数を乗じた値 β^* をとってプロットする。このプロット点群に対して、最小二乗法によって原点を通る直線を求める。プロット点と直線との横軸方向の差を、実測値の誤差 $\Delta\beta$ とみなし、 $\beta = \beta_M + \Delta\beta$ を真値の推定値とした。

2.3 実験および測定 試験片装着前に流体温度を50°Cに高めておく。試験片装着後、上流圧力を約14 MPaとしておき、流体を試験装置に流して、下流圧力が160 kPaとなるように、流量の微調整を行い、連続運転に入る。3 h おきにポンプを止めて、試験片の質量測定を行う。通過流量は適時に測定（重量法）しておく。

試験片の質量測定は次のように行った。

試験前の試験片は水でよく洗った後、アセトンに浸して超音波洗浄機で15 min 間洗浄し、質量測定を行う。エロージョンを生じた試験片もこれと同様洗浄および質量測定を行う。質量は精密電子てんびんを用いて、0.1 mg まで測定する。

3. 実験結果および考察

3.1 エロージョンの経時変化 図4は切欠試験

図4 エロージョン時間経過

片、丸穴試験片におけるエロージョンおよび通過流量の経時変化の測定例を示す。材料、表面の性質などいろいろな条件がエロージョンに影響を与えるので、データのばらつきが大きい。流量が増えればエロージョンは増加するが、エロージョンによってV溝が拡大され、エロージョン量は横軸の時間に対して直線よりは、やや下に凸の傾向を持つと予測される。しかし噴流の方向がそれたり、乱れたりすれば、エロージョン割合が変化するであろう。際、エロージョン測定曲線の中には、上に凸になるものもある。そこで、運転開始後の経過時間を t [h]、経過時間 t におけるエロージョンを $M(t)$ [mg] として、

$$M(t) = At^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

と近似した場合、 n がどうなるか調べる。図5は横軸を対数とした正規確率紙上のプロットで、これから n が対数正規分布をしていることがわかる。式(1)以外の関数形を仮定しても差し支えないが、この形には3・4節で述べるような根拠がある。 n に関する統計値を表1に示す。切欠試験片と丸穴試験片の分散の比は1.006である。危険率1%で検定するとき、 F 分布の自由度69/69の値は1.53程度である。したがって両試験片において母分散は等しいとみなせる。次に「母平均は丸穴試験片と切欠試験片で等しい」を仮説として、これを検定する。 t 分布の自由度138で危険率を5%とすると、 $t_{95}=1.98$ である。表1に示した値で t を計算すると、

$$t_0 = (69/2)^{1/2} (\text{平均値の差})/S = 1.66$$

である。したがって仮説は棄却されない。

図5 $\log_{10} n$ の累積分布

表 1 n に関する統計値

Item		Notch test piece	Hole test piece
Sample size: N		70	70
Mean value: $\bar{X}$		0.0838	0.128
Variation: S^2		0.0250	0.0248
Sample st. dev.: S		0.158	0.157
Estimated n		1.21	1.34
St_c	90%	0.0317	0.0315
$\sqrt{N-1}$	95%	0.0380	0.0378
◆Conf. intv.	90%	(0.052, 0.116)	(0.112, 0.159)
of $\log_{10} n$	95%	(0.046, 0.122)	(0.090, 0.166)
◆Conf. intv.	90%	$1.13 < n < 1.31$	$1.39 < n < 1.44$
of n	95%	$1.11 < n < 1.32$	$1.23 < n < 1.46$
◆Estimation of parameter of $\log_{10} n$ (Use t -distribution by Student: $t_{90}=1.67$, $t_{95}=1.99$ when $N=70$)			
◆No significance by 5% ($t_{95}=1.99$) level in difference of means of $\log_{10} n$ for notch and hole test pieces: $t_0 = (70/2)^{1/2} (0.128 - 0.0838) / 0.158 = 1.66$			
◆F-test (deg. of freedom; 69, 69) with 5% significance level on hypothesis "Variation is the same.": Critical value = 1.47 > $S_M^2 / S_K^2 = 1.01$. : Hypothesis is not rejected.			

3・2 無次元パラメータ 超音波振動子を用いるキャピテーションエロージョン実験においては、エロージョンで失われた質量の時間微分すなわち dM/dt が、一般性のある表示方法として用いられてきた⁽⁵⁾。

Berger⁽¹¹⁾ は V 溝のエロージョン特性の表示においても、経時曲線の最大こう配のみを示している。

ところで長時間のエロージョンの場合には、流路の形状変化の影響が現れると考えなければならない。すなわち、表面が深くえぐられて、変形してしまう。これに伴い流量が変化し、エロージョンの変化率にも影響を与える。

ある時刻までのエロージョンには、それにかかわった流体、つまり通過流体体積が影響を与えている。そこでこの報告では、幾何学的形状に応じて変化するエロージョン量の表示として、ある時刻にまでに試験片が失った質量を、通過した流体の質量で割った無次元量で表示する。この無次元パラメータは類似のエロージョン表示に用いられているが⁽¹⁵⁾、切欠からの噴流によるエロージョンの表示にも適用できることを、統計的に検証する。時刻 t における流量を $Q(t)[m^3/s]$ 、流体密度を $\rho[kg/m^3]$ とし、エロージョンの激しさを表す無次元量 U を、

$$U(t) = M(t) / \int_0^t \rho Q(t) dt \quad (2)$$

とする。微分的な無次元量としては、

$$V(t) = \frac{1}{\rho Q} \frac{dM}{dt} \quad (3)$$

を考えるのが適当であろう。 Q があまり変化しない場合には、 $V(t)$ は dM/dt の定数倍とみなせる。 $t=3, 6,$

図 6 U_K, V_K の散布図

9, 12, 15 h において求めた $U(t), V(t)$ の散布図を、切欠試験片について示すと、図 6 となる。丸穴試験片についても類似の図となる。散布図を見ると、 $U(t)$ と $V(t)$ の相関は明らかであるが、相関係数を計算すると、切欠試験片では 0.961、丸穴試験片では 0.795 である。

3・3 U と V の比例関係 U と V がどんな関係にあるかを調べる。まず散布図の各点に関する回帰直線

$$V = a_1 U + b_1 \quad (4)$$

が考えられるが、この場合、回帰直線は物理的関係を表しているとはいえない。 U および V の定義から、 $U=0$ のときに $V=0$ でなければならないからである。そこで、 a を統計的に求める定数として、

$$V = aU \quad (5)$$

の関係を仮定できるか検討する。データは切欠試験片と丸穴試験片について、 $t=3, 6, 9, 12, 15$ h において求めてあるから、データを行列

$U_K[i, j]$: i 番切欠試験片の $t=3j$ (時間) における U の観測値

$V_K[i, j]$: i 番試験片の $t=3j$ (時間) における V の観測値

$$R_K[i, j] = V_K[i, j] / U_K[i, j]$$

$U_M[i, j]$: i 番切欠試験片の $t=3j$ (時間) における U の観測値

$V_M[i, j]$: i 番試験片の $t=3j$ における V の観測値

$$R_M[i, j] = V_M[i, j] / U_M[i, j]$$

で表す。以下において両試験片に共通する説明では、添字を付けず単に U, V と書く。データ処理の対象とした実験では、実験回数 $N=42$ である。 a を推定するにはいくつかの方法が考えられる。すなわち

図 7 $\log_{10} a$ の累積分布

(1) 散布点から式(6)の直線までの、距離の平方和が最少となる a を求める

(2) 標本点について、 $V[i, j]/U[i, j]$ を求めて平均する。

(3) 散布点の偏角平均をとる。

(4) 標本点について、 $V[i, j]/U[i, j]$ の対数を平均する。

などである。以上四つの平均の求め方を比較すると、次のようになる。(1)では R が同じときに、原点から遠い標本点のほうが重視されることになるという欠点がある。(2)では、 V と U の数式上の取扱いが対称でないため、散布図の上下の点が対称に扱われないという欠点がある。 V と U はいずれも確率変数なので、この方法を採用するのは適当でない。(3)と(4)とも U 、 V の取扱いについて対称性があるが、 R の大きさの評価をする上では、(4)のほうが直接的である。そこで

$$\log_{10} R[i, j] = \log_{10} V[i, j] - \log_{10} U[i, j] \quad \dots\dots\dots (6)$$

として、切欠試験片および丸穴試験片について累積度数をプロットすると、図7を得る。図7から、 R が対数正規分布に従うことが観察される。 a に関する統計値をまとめて表2に示す。

R の母数(= a)の推定値は、切欠試験片について、 $\text{Prob}(1.05 < a < 1.15) = 0.95$ 、丸穴試験片について、 $\text{Prob}(1.20 < a < 1.34) = 0.95$ 、と要約できる。

3・4 エロージョンと流量 3・3節の議論により、式(5)の関係を仮定することができる。そこで流量の積分(通過体積)を v とすると、

表 2 a に関する統計値

Item	Notch test piece	Hole test piece
Correlation coef. on scatter diagram	0.961	0.795
Sample size: N	210	210
Mean value: $\bar{X}$	0.0435	0.1034
Variation: S^2	0.0209	0.0305
Sample st. dev.: S	0.145	0.174
Estimated a	1.11	1.27
$S t_c$	90%	0.0166
$\sqrt{N-1}$	95%	0.0201
◆Conf. intv. 90% of $\log_{10} a$	(0.027, 0.062)	(0.084, 0.123)
◆Conf. intv. 95% of $\log_{10} a$	(0.024, 0.063)	(0.080, 0.127)
◆Conf. intv. 90% of a	$1.064 < a < 1.15$	$1.21 < a < 1.33$
◆Conf. intv. 95% of a	$1.057 < a < 1.16$	$1.20 < a < 1.34$
◆Estimation of $\log_{10} a$: From t -distribution table, $t_{90} = 1.65$, $t_{95} = 1.98$ when $N=210$.		
◆Significance of difference of means of $\log_{10} a$ for notch and test pieces by 5% significance level: $t_0 = (210)^{1/2} (0.1034 - 0.0435) / (0.0209 + 0.0305)^{1/2} = 3.78$ Hence the difference is significant ($t_0 > t_{95} = 1.98$).		
◆F-test(deg. of freedom; 209, 209) with 1% significance level on hypothesis "Variation is the same.": Critical value $F_c = 1.39 < S_M^2 / S_A^2 = 1.46$. Hypothesis is rejected.		

$$\frac{dM}{dt} / (\rho Q) = \frac{aM}{\rho v}, \quad v = \int_0^t Q dt$$

すなわち

$$\frac{1}{M} \cdot \frac{dM}{dt} = \frac{a}{v} \cdot \frac{dv}{dt} \quad \dots\dots\dots (7)$$

である。 Q の時間的変化は少なく、 Q_0 を初期流量とすると

$$Q = Q_0(1 + 2\epsilon t) \quad \dots\dots\dots (8)$$

と近似できる。これを式(7)に代入して積分すると

$$\log M = a \left[\int_0^t \frac{1 + 2\epsilon t}{t(1 + \epsilon t)} dt \right] + A'$$

である。これより

$$M = A t^a (1 + \epsilon t)^a \quad \dots\dots\dots (9)$$

である。 $\epsilon = 0$ とおけば、観測された質量変化に対して導入した近似式(1)と同形となる。これが式(1)の形を採用した理由の一つである。標本値による結果では、 n は a よりもわずかに大きい。が、 $a = n$ の仮説も危険率5%で棄却されない。しかし式(1)と式(9)を比較すると ϵ の影響と考えられる。

次に式(7)の両辺を直接積分して

$$\log M = a \log v + C$$

を得る。すなわち C' を定数として

$$M = C' v^a \quad \dots\dots\dots (10)$$

であり、 a と C' によってエロージョンの大きさが表せることがわかる。 a はすでに統計値として求めてあるが、 C' は材料や形状に応じて実験的に求める必要がある。

Berger⁽¹⁴⁾が行った鋼材の試験片では、この切欠からの噴流によるエロージョンにも潜伏期と一様増加期が見られる。キャビテーションエロージョンの時間経過については、多くの材料について潜伏期間があることは、よく知られている。それを考慮した数学モデルも提案されている⁽¹⁶⁾。本実験では試験片は柔らかく、しかもキャビテーションが強烈なので、実験時間に比べて潜伏期間はごく短時間となるため、潜伏期は無視される。また試験片の表面加工はキャビテーションエロージョンの潜伏期に影響を与えることも知られているが⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、同じ理由で本実験には、その影響は現れない(試験片表面粗さの異なる試験片で有意差が現れない)。式(10)は定常的なエロージョンの進行を表すもので、潜伏期など初期の短い時間の現象に対しては適用できないであろう。

3.5 形状パラメータがエロージョンに与える影響

3.4節で求めた a は1に近い値である。このことの意味は次のように解釈される。 $a=1$ のときは、 $U=V=$ 定数となる。 a は1に近い値であるから、 V, U, R の時間的な変化は小さい。またエロージョンは流量のべき乗に比例し、それも、ほぼ比例に近い。

(1) 分散分析 U, V, U と V の比 R (R は確率変数で a がその母数)は各試験片によっても異なるし、時間によっても異なっているように見える。しかし実は時間的な変化は少なく、形状による違いが顕著である。このことは次のように確かめられる。 $\log_{10} R[i, j]$ が正規分布しているので、この量に関する分

散分析を行う。

$$q[i, j] = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \log_{10} R[i, j] \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$q^* = \frac{1}{5N} \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^N \log_{10} R[i, j] \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$S_R[i]^2 = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \{\log_{10} R[i, j] - q[i]\}^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$S^2 = \frac{1}{5N} \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^N \{\log_{10} R[i, j] - q^*\}^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

分散分析のための統計値を表3にまとめて示した。

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_R[i]^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{q[i] - q^*\}^2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

であるが、表3を参照すると、式(15)右辺第1項は第2項に比べて微小である。したがって標本全体の分散 S^2 は試験片による違いが要因であり、各試験片における、時間による R の変化は無視できる。

以上のことから、形状パラメータの影響を調べる際には、 U, V などの時間平均を用いることで、特徴がより明確になることがわかる。また3.4節の結果で a が定数とみなせるから、形状の影響については、 U または V のいずれかについて論じればよい。そこで、以下では U について整理した結果を記述する。

(2) β の影響 多くの場合、 β が増加すると U_R は減少する傾向にあるが直線関係といえない。 β と U_R の関数に多項式近似で最少二乗法を適用してみる。多項式の次数を上げれば、残差は当然減るが、それは誤差を表現する式を作っている場合でも同じことが起こる。本実験のデータでは次数増加に伴い、残差が徐々に減るが、ある次数で急に残差が減るわけではない。したがって多項式以外で、決定すべきパラメータが少ない関数を選ばなければならない。ここではデータ分布の状況から推察し、 $U_R[i_r]$ に対して

$$U_R(\beta) = A\beta + B + C/\beta \quad \dots\dots\dots (16)$$

の形を仮定して、最小二乗法により、 A, B および C を推定した。関数は線形でないがパラメータは線形なので、容易に計算される。すなわち N 組の試験片に対

表3 $\log_{10} a$ の分散分析 ($5N=210$)

Sample variation	Notch t.p.	Hole t.p.
$\frac{1}{5N} \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^N \{\log_{10} R[i, j] - q^*\}^2$	0.0209	0.0305
$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_R[i]^2$	1.8×10^{-4}	3.07×10^{-4}
$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{q[i] - q^*\}^2$	0.0207	0.0302

表4 U_K (切欠き) $= A\beta + B + C/\beta$ の最小二乗法近似

Item\Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α (°)	60	90	*	60	90	*	60	90	*
L (mm)	3	3	3	5	5	5	8	8	8
Sample size N	11	9	20	4	8	12	8	2	10
Mean: U_K	.317	.541	.418	.665	.982	.877	1.88	*	1.64
Total var./ N	.0308	.187	.113	.0612	.289	.236	2.06	*	1.95
Explained var./ N	.0271	.182	.107	.0601	.243	.198	1.79	*	1.71
$I_K \times 10^3$	.365	.422	.672	.110	4.61	3.73	26.3	*	24.7
r	.939	.989	.970	.991	.917	.917	.934	*	.935
A	.212	.283	.161	-.523	.301	.134	.780	*	.576
B	-2.20	-2.38	-1.57	4.90	-2.68	-1.48	-7.77	*	-6.37
C	6.82	6.10	5.02	-6.99	9.17	7.20	24.6	*	22.4

表5 U_M (丸穴) $= A\beta + B + C/\beta$ の最小二乗法近似

Item\Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α (°)	60	90	*	60	90	*	60	90	*
L (mm)	3	3	3	5	5	5	8	8	8
Sample size N	11	9	20	4	8	12	8	2	10
Mean: U_M	.267	.538	.389	.694	1.07	.947	.849	*	1.05
Total var./ N	.0384	.0817	.0762	.0987	.0836	.121	.306	*	.979
Explained var./ N	.0338	.0591	.0151	.0979	.0441	.0530	.249	*	.819
$I_M \times 10^3$	.460	2.23	6.11	.0856	3.95	6.77	5.65	*	16.1
r	.938	.853	.455	.996	.727	.663	.904	*	.914
A	.314	.587	.0449	1.16	.242	.458	.382	*	.964
B	-3.22	-3.43	-2.25	-9.60	-1.32	-3.15	-3.44	*	-7.37
C	8.98	5.81	1.72	20.9	5.24	8.33	10.3	*	16.4

して

$$I_k = \frac{1}{N} \sum_r \{U_k[i_r] - A\beta_r - B - C/\beta_r\}^2 \quad \dots\dots (17)$$

を最小にするように求めた A, B, C は表 4, 5 に示してある。以下は両試験片に共通するので、添字 k, m を省略する。非線形回帰の評価を一般化相関係数 r :

$$r^2 = \frac{\text{説明変動}}{\text{全変動}} = \frac{\sum \{U^*(\beta_r) - U_{\text{mean}}\}^2}{\sum \{U[i_r] - U_{\text{mean}}\}^2} \quad \dots\dots (18)$$

で行う。これもあわせて表 4, 5 に示してある。 β も誤差を含むので、厳密には式(18)は好ましくないが、これ以外では計算が非常に複雑になるので、一応この定義を利用する。表 4, 5 の数値には、 $r < 0.5$ の場合もあるが、全般的に 1 に近く、ここで採用した近似関数は、少ないパラメータで標本点を良く説明している。

(3) α の影響 まず同じ L の値で、 α の効果を含める関数

$$U^{**}(\beta, \alpha) = U^*(\beta) + D\alpha \quad \dots\dots (19)$$

を作り、次にこれによる残差平方和

$$J = \sum \{U[i_r] - U^{**}(\beta_r, \alpha_r)\}^2 / N \quad \dots\dots (20)$$

を求める (このとき U^* 中の係数は 3・3 節で求めた値とは異なる)。 α の影響を含めるべきかどうかは

$$F_0 = (N-4)(I-J)/J \quad \dots\dots (21)$$

を求め、これを自由度 (1, $N-4$) の F 分布で検定する⁽¹⁹⁾。丸穴試験片についても同様である。計算および検定結果は表 6 に示す。 $L=5 \text{ mm}$ の丸穴試験片では有意差ありとなるが、 F は限界値に近い。他はすべて有意差がない。総合的には切欠、丸穴試験片いずれも α の違いがエロージョンに与える影響は無視できると判定すべきである。 β の関数として各試験片についての実験点と近似曲線を示すと、図 8 (a)~(f) のようになる。これらの図によって、 α の影響が少なくなることが直感的にもわかる。図 8 中の曲線は、 90° と 60° を共通に扱ったときの最小二乗近似関数 $U^*(\beta)$ である。

(4) L の影響 高速噴流に伴うエロージョンでは、噴口からの距離によってエロージョンの強さが

表 6 α の影響の分析

Test Piece	L (mm)	N	I	J	F_0	$F_{0.05}(1, N-4)$	Significance
Notch	3	20	0.1344	0.1066	1.09	4.49	Negative
Hole	3	20	1.221	1.041	2.77	4.49	Negative
Notch	5	12	0.448	0.445	0.046	5.23	Negative
Hole	5	12	0.811	0.468	5.88	5.23	Positive
Notch	8	10	2.71	2.05	1.95	5.99	Negative
Hole	8	10	0.594	0.469	1.60	5.99	Negative

図 8 β と U_k, U_m の関係

図9 切欠試験片エロージョンの概観

図10 丸穴試験片エロージョンの概観

異なる。また噴流の速度によっても、噴流周囲のキャビテーション発生具合が異なる。異なる L の値について、近似曲線の係数 (A, B, C) は表4, 5に示してあるが、これらの係数の L による有意差は明瞭である。近似関数全体の評価として、

$$U = s_0 + s_1 L + s_2 L^2 \quad \dots\dots\dots (22)$$

のように表現する。切欠試験片においては L の増加により、 U が単調に増加する。切欠試験片での β に対する最小二乗近似関数を示すと図9、これに対して丸穴試験片では、図10のようになって L による変化は単調ではない。この結果は円筒ノズルを用いた直噴射のデータ⁽¹¹⁾と対応する。直噴射ではエロージョン最大となる距離がある。それはキャビテーション気泡の消滅位置と関係がある現象で、本研究で扱った丸穴試験片でも、同じ効果が現れていると考えられる。切欠試験片では、 L が多少変わっても、試験片表面上で気泡消滅が同じように起こり、エロージョンの集積値が測定されるので、それが U などの単調増加となって現れる。このことから考えると、直噴射を受ける試験片よりも、この実験の切欠試験片のほうが、距離の影響の受け方が単純である。

4. 結 言

V溝から高含水流体が、キャビテーションを伴った噴流となって液中に流出するときの、エロージョンの大きさを、溝の形状を変えて調べた。この現象ではデータのばらつきが大きく、再現性に乏しいので、統計的处理を行って、次の結果を得た。

- (1) エロージョンは統計的にばらつきを伴うが、この研究で扱った現象は、基本的には正規分布(変数の取り方によっては対数正規分布)に従う。
- (2) エロージョンの強さを表す量として、エロー

ジョンで失った質量を、通過した流体の質量で割った無次元量を使うことができる。

- (3) 本研究におけるエロージョンによる減失質量は、通過した流体質量のべき乗に比例し、べきの値は1よりもやや大きい。

- (4) エロージョンによる減失質量は、溝の頂角が60°の場合と90°の場合でほとんど変わらない。

- (5) 本研究で扱ったエロージョンでは、通過流体質量あたりの減失質量は、 β と L の関数で表される。この減失質量は、切欠試験片では、 $\beta = 2 \sim 7^\circ$ の範囲で減少関数となるが、丸穴試験片では、ある β で極小を示すこともある。

- (6) 切欠試験片では L が最小のときに通過流体体積あたりのエロージョンは最少、 L が最大のときエロージョンも最大である。これに対し丸穴試験片では、 β との組合せにより、 L が大きいときに、エロージョンが少ないという場合もある。

終わりに多数の実験に協力した本学大学院生 竹田良徳君、学部学生 高橋規久夫君、秋山博司君らに感謝の意を表する。

文 献

- (1) 加藤, キャビテーション, (1979), 165, 槇書店。
- (2) 山崎, キャビテーション工学, (1979), 127, 日刊工業新聞社。
- (3) 腐食防食協会編, エロージョンとコロージョン, (1987), 120, 裳華房。
- (4) Hobbs, J. M., *ASTM Step. Tech. Publ.*, 408 (1967), 159.
- (5) Plesset, M. S. and Devine, R. E., *Trans. ASME*, Ser. D, 88-4 (1966), 691.
- (6) Schulmeister, R. *ASTM Step. Tech. Publ.*, 474 (1970), 109.
- (7) ASTM D 32-77 (1977).
- (8) Lichitarowicz, A., *ASTM Step. Tech. Publ.*, 664 (1979), 530.

- (9) 岩井・ほか3名, 潤滑, 33-12 (1988), 907.
(10) 辻野・島・及川, 機論, 53-496, B (1987), 3493.
(11) Berger, J., *Ölhydraul. Pneum.*, 26-6 (1982), 441-451.
(12) Backé, W., Berger, J., *Ölhydraul. Pneuma.*, 28-5 (1984), 288.
(13) 清水・山口, 油圧と空気圧, 19-1 (1988), 68.
(14) Berger, J. Dissertation TH Aachen, (1983).
(15) Heymann, F. J., *ASTM Step. Tech. Publ.*, 474 (1970), 212.
(16) Stinik, L., *Ölhydraul. Pneum.*, 29-4 (1984), 639.
(17) Berger, J., Pohl, M. and Stinik, L., *Ölhydraul. Pneum.* 27-10 (1983), 714.
(18) Ahmed, S. M., ほか3名, 機論, 56-527, B (1990), 1876.
(19) 例えば, 奥野・ほか3名, 多変量解析法, (1989), 128, 日科
技連.
-