研究論文

噴流キャビテーション壊食の低減* (絞り出口および噴流衝突面近傍形状による流れ場制御)

風 間 俊 治**, 三 浦 頼 仁***

Reduction in Submerged Jet Cavitation Erosion (Flow Control by Geometry Close to Nozzle Outlets and Impinging Surfaces)

Toshiharu KAZAMA, Yorihiro MIURA

An experiment related to cavitation erosion was conducted by utilizing submerged cavitating jet rigs. Using seven types of nozzle holders and six different height of cylindrical walls, the effects of geometry of the nozzle outlets and the impinging surfaces on erosion were examined. Tap water and ISO VG32 hydraulic oil were used as the test liquids. The time evolution of mass loss and cross-sectional profiles of the specimens were measured. At the same time, the cavity-clouds of the jets were recorded with a video camera and the pictures were processed with a personal computer. In conclusion, 1) The concave-type surface of the specimens gave a substantial reduction in erosion; 2) Mass loss of the specimens was decreased for a specific geometry of the nozzle outlets; 3) Erosion by use of tap water was markedly more severe than that of the mineral oil, and 4) Correlation between the erosion of the specimens and the processed pictures of the cavitating jets was partially shown.

Key Words : Water-Hydraulics, Oil-Hydraulics, Cavitation Erosion, Jet, Geometry, Nozzle Outlet, Impingement, Optimum Design, Visualization, Experiment

1. 緒 言

液圧システムで常に問題となる現象のひとつは、キャビテーション気泡を伴う噴流の衝突に起因する部材の壊食である。キャビテーション壊食は、機器やシステムの信頼性や寿命、安定作動域や性能を著しく損なう。高動力密度化を図る高圧化や環境適合性を狙った水圧対応は、作動条件と設計仕様の過酷化を伴う。

これらの課題を克服するためには、複雑に絡み合った物理的な現象をひとつひとつ解きほぐしながら、解決の糸口を探ることが肝要である。そこで、壊食実験を系統的に遂行してデータを継続的に蓄積し、壊食のメカニズムを基礎まで掘り下げて解明しつつ一般性の高い設計指針を呈示することが、きわめて重要な意味を持つ。そこで、山口ら¹⁻⁵⁾や著者らのグループは、液圧機器内部で生じる壊食現象との対応が採り易い噴流衝突式の試験装置⁶⁾を用いて、圧力、液体、材料、寸法などに着目して、このテーマに取り組んできた。

液圧ポンプ・モータやバルブで問題となる壊食は、高圧側圧力室と低圧側圧力室との間に形成される絞り状の狭い

流路において生成されるキャビテーション噴流が機器内壁へ衝突することに基づく。なお、実機では高圧側と低圧側の圧力は基本的に与条件となる。したがって、壊食の阻止あるいは抑制を考えると、材料開発や表面改質もさることながら、キャビテーション噴流の発生を前提として、流れ場あるいはキャビテーション噴流を制御する方法が本質的な対策となる。

制御の手法は、能動と受動に大別できる。噴流や流れ場の制御に関しては、噴流出口にマイクロアクチュエータを装着して流れを能動的に制御する方法⁷⁾や流路に渦発生体を設置して受動的に制御する方法⁸⁾などがある。しかしながら、これらの提案の多くは気体を対象としており、圧力も低い。よって、その成果を直接利用することはできない。また、液圧機器への適用を前提とすれば、高圧液体中における微小空間内への制御要素の組み込みを想定せざるを得ないので、受動的な噴流制御法を選択せざるを得ない。

本研究では、液圧機器内部で噴流を受動的に制御して壊食を低減させる方策を検討する。実機との対応に優れる噴流衝突式キャビテーション壊食試験装置を用いて、キャビテーション噴流の絞り出口近傍ならびにその噴流の部材衝突面近傍に工夫を凝らした形状を組み込んで壊食実験を実施し、壊食低減を狙った基本設計指針を提示する。並行して、キャビテーション噴流の簡易的な可視化およびコンピュータ画像処理を行い、壊食実験結果と比較検討することで、壊食予測法の可能性を探る。

* 平成19年5月7日 原稿受付。

** 室蘭工業大学工学部機械システム工学科
(所在地：北海道室蘭市水元町27-1)
(E-mail: kazama@mmm.muroran-it.ac.jp)

*** 室蘭工業大学大学院工学研究科

2. 主な記号

D	:	壊食リング直径
ER	:	壊食率 ($=\Delta M/\Delta t$)
L	:	スタンドオフ距離
M	:	壊食質量
p_d	:	下流圧力 (絶対圧)
p_u	:	上流圧力 (絶対圧)
t	:	試験時間
σ	:	キャビテーション係数 ($=p_d/p_u$)
添字		
max	:	最大値, 極大値
o	:	作動油
w	:	水道水

3. 実験装置および方法

実験装置¹⁻²⁾の主要部となるチャンバーの模式図を Fig. 1に示す。チャンバーは内径 80 mm のステンレス製であった。絞りは直径 1.0 mm, 長さ 4.0 mm のシャープエッジの円筒状絞りを準備した。供試液体には水道水ならびに鉱油系一般油圧作動油 (ISO VG32, 33 mm²/s at 40°C) を用いた。試験片は直径 15 mm, 厚さ 5 mm のアルミニウム合金製 (A5056, $H_v=81$) とした。なお, 水道水と作動油の液压回路は独立に製作した。ただし, 両液压回路は基本的に同一構成とし, 両液体で同じ絞りをを用いた。

キャビテーション噴流の受動的制御法として, 絞り出口部に対して Fig. 2 に示すような 7 通りの流路形状を呈するステンレス製絞り押え部品を用意した。その概要は, 流路直径 3 mm, 長さ 3 mm のストレート状流路 ($\phi 3S$), 直径 3 mm の流路部よりチャンバー内へ直径 1 mm の貫通穴 3 本を設けた流路 ($\phi 3S-B$), 直径 6 mm のストレート状流路 ($\phi 6S$), 開き角度 90° のテーパ状流路 ($\phi 3T$), 直径 3 mm の流路出口部の先端を 2 mm として絞り出口部に微小チャンバーを設けた流路 ($\phi 3S-C$), ねじ加工により流れ直角方向に近似的な凹凸を設けた流路 (M3), 流路長さを 6 mm としたストレート状流路 ($\phi 3S-6$) であった。

また, 噴流衝突面近傍の流れ場を制御するために, Fig. 2 の右下に示すような試験片の周囲に円筒壁 (外径 30 mm) あるいは試験片とマウント (直径 32 mm) の間に円板スペーサを設けた。円筒壁は噴流衝突面近傍を可視化するために透明なアクリル樹脂で製作し, 円板スペーサは試験片と同一直径とした。試験片の噴流衝突面から円筒壁までの高さを H と定義して, $H=-15 \sim 10$ mm (5 mm 刻みで 6 段階) で実験を行った (なお, 円筒壁や円板スペーサを装着しない場合, $H=-5$ mm)。

壊食実験では, ポンプで加圧した供試液体を円筒絞りに導き, 供試液体が満たされたチャンバー内でキャビテーションを伴う噴流を試験片に衝突させた。供試液体は, フィ

ルタ (絶対ろ過粒度 3 μ m) とクーラを備えた液压回路内を循環させた。なお, 水压回路において, 水道水は一晩汲み置きした。

主な実験パラメータは, 上流圧力 (絶対圧) $p_u=10.1$ MPa, キャビテーション係数 $\sigma (=p_d/p_u, p_d$: 下流圧力) $=0.02, 0.03$, 液温 $T=40 \pm 1$ °C とした。試験時間 t は, 水道水の場合 $t=4$ h, 作動油の場合 $t=8$ h を基準とした。一定時間毎に試験片の質量と表面粗さを測定し, 試験片表面をデジタルカメラで撮影した。

噴流可視化実験には, 市販のビデオカメラとメタルハライドライトを用いた。チャンバー側面に対向して設けられ

Fig. 1 Test chamber of the cavitating jet test rig

Fig. 2 Geometry of outlets of nozzle ($\phi 3S, \phi 3S-B, \phi 6S, \phi 3T, \phi 3S-C, M3, \phi 3S-6$) and wall around specimen

たガラス製観測窓（直径 36 mm）の一方から照明して、他方の観測窓から透過光で噴流側面像を撮影した。その際、試験片表面が壊食することによる噴流衝突面の形状変化が流れ場に及ぼす影響を抑えるために、適宜、ダミーとして用いた試験片を交換した。これらの方法で撮影したキャビテーション噴流の動画映像（毎秒30フレーム）を、パーソナルコンピュータを用いてフレーム毎に分解し、連続する300枚の静止画像を重ね合わせて簡易的な画像処理を施し、キャビティクラウドの存在確率を濃淡で表す画像を作成した。

4. 実験結果

絞り出口形状の影響を、スタンドオフ距離 L （絞り出口から試験片表面までの中心軸上距離、最小2.5 mm間隔で8～35 mm）に対する壊食量 M との関係でFig. 3に示す。供試液体は水道水、キャビテーション係数 $\sigma=0.02$ であった。形状に依らず、壊食量が最大となるスタンドオフ距離 $L_{\max}=23$ mmとなった。 $L_{\max}$ における壊食量 $M_{\max}$ で見ると、 $\phi 3S$ の $M_{\max}$ が一番多く、以下、M3、 $\phi 3S-B$ 、 $\phi 3S-6$ 、 $\phi 3S-C$ 、 $\phi 3T$ 、 $\phi 6S$ の順となった（ただし、下位4形状の $M_{\max}$ は微小であったため、順位の有意性は低い）。

Fig. 4には、 $\sigma=0.03$ とした場合の結果を示す（水道水）。 $M_{\max}$ は、 $\phi 3S$ 、 $\phi 3S-B$ 、M3、 $\phi 3S-C$ 、 $\phi 3S-6$ 、 $\phi 3T$ 、 $\phi 6S$ の順となった。 $\sigma=0.02$ としたFig. 3の結果と比較すると、いずれの形状においても、 $L_{\max}$ は短くなった（ $L_{\max}=20.5$ mm）。 $\phi 3S$ 、 $\phi 3S-B$ では $M_{\max}$ が増加すると同時に $M_{\max}$ となる距離 $L_{\max}$ に敏感となった。他の形状での $M_{\max}$ は、M3ではほぼ不変、 $\phi 3S-C$ 、 $\phi 3S-6$ 、 $\phi 3T$ 、 $\phi 6S$ で大幅に減少した。

石油系作動油に対する結果をFig. 5に示す。最大壊食量 $M_{\max}$ は、 $\phi 3S$ と $\phi 3T$ で大きく、 $\phi 6S$ 、 $\phi 3S-B$ 、M3、M3*（流路出口部に面取り有）、 $\phi 3S-6$ 、 $\phi 3S-C$ で小さかった。

Figs. 3, 5より、流体の差異による影響を考察する。絞り出口形状が壊食量 M に及ぼす影響の度合いは、液体の種類に依存した。たとえば、ストレート流路（ $\phi 3S$ ）を基準に取ると、テーパーを施すこと（ $\phi 3T$ ）による壊食低減効果は、水道水の場合に限り有効であった。さらに、 $L_{\max}$ は、水道水においては一定（ $L_{\max}=23$ mm）であったが、作動油においては形状に依存（ $L_{\max}=22.5 \sim 27.5$ mm）した。 M は、いずれの絞り出口形状においても、作動油（ $t=8$ h）よりも水道水（ $t=4$ h）の方が（ M の大きな条件において）ほぼ1桁のオーダーで大きかった。

以上の結果は、 L によって逆転する部分もあるが、機器内部で絞りを形成する部分の出口が細いストレート状流路（ $\phi 3S$ ）を呈する場合、水圧機器では $\phi 3T$ や $\phi 6S$ のように絞り出口近傍の穴径を大きくすることで、油圧機器では $\phi 3S-B$ 、 $\phi 3S-C$ 、M3のように流路に加工を施して流れ場を制御する、あるいは $\phi 3S-6$ のように流路を長くする

Fig. 3 Mass loss M vs. stand-off distance L (Water, $\sigma=0.02$, $H=-5$ mm, $t=4$ h)

Fig. 4 Mass loss M vs. stand-off distance L (Water, $\sigma=0.03$, $H=-5$ mm, $t=4$ h)

Fig. 5 Mass loss M vs. stand-off distance L (Oil, $\sigma=0.02$, $H=-5$ mm, $t=8$ h)

ことで、壊食量を大幅に低減させることができる可能性を示唆している。なお、絞り出口形状の差異による壊食量の増減の理由については、関与する因子が多く、すべての結果を簡潔に説明できるまでには至っていないが、絞り出口部における多段絞りの構成による圧力低下に基づく気泡成長の促進効果³⁾で、その一部を説明付けることができる。

Fig. 6には水道水の場合 ($t=4$ h) の、Fig. 7には作動油の場合 ($t=8$ h) の試験片表面の写真を載せる。両作動液体において、 $\phi 3S$ の損傷が著しかったことが確認できる。また、いずれの形状の場合に対しても壊食は同写真のようにリング状に生じ、水道水の方が試験片表面の損傷の度合いは激しかったといえる。なお、壊食リング径 D は、 $\phi 3S$, $M3$, $\phi 3S-6$, $\phi 3S-B$ に対して、水道水の場合、それぞれ、 $D=9.0, 8.6, 8.9, 9.7$ mmであった。

さて、壊食実験は、本実験のように耐壊食性に劣るアルミニウム合金製試験片⁹⁾を用いても、結果を得るまでに長い時間を要する。材料評価試験は別として、キャビテーション壊食を流れ場の制御により策を講じる場合、簡便な方法で得られるキャビテーション噴流の画像と壊食量との間に相関を見出すことができれば、短時間で壊食の予測ができることになるので、機器開発において有用といえる。そこで、ビデオ撮影したキャビテーション噴流を画像処理することで噴流の近似的な時間平均像を得て、これを検討した。

Fig. 8は、水道水を用いて、キャビテーション噴流を側面から撮影して画像処理を施した写真である。透過光で撮影した後、濃淡を反転させているために、白い部分がキャビテーション噴流あるいはキャビティクラウド（中央）、試験片（上部）、チャンバー（周囲）に対応する。キャビテーション係数 σ の大きい方が噴流が細く、その到達距離が短かった。これは試験片表面まで十分な気泡が到達していなかったことを示すものであり、 $M_{\max}$ が小さくなった壊食実験結果のひとつの説明となり得る。形状の影響を比較すると、 $\phi 3S$ に比して、 $\phi 3T$ や $\phi 6S$ では σ の影響が強く、Figs. 3, 4の結果を裏付ける。

円筒壁を用いてキャビテーション噴流衝突面近傍の形状を変化させた場合の試験時間 $t=8$ hでの試験片壊食面をFig. 9に載せる。試験片周囲の円筒壁高さ $H<0$ （凸面状）の場合に壊食が激しかった様相に比して、 $H>0$ （凹面状）の場合にほとんど壊食されなかった様相が確認できる。

Fig. 10は、Fig. 9に対応する条件下において、キャビテーション噴流の衝突面近傍の側面を透過光でビデオ撮影した映像の処理画像である。実験条件は、供試液体：作動油、 $\sigma=0.02$, $L=25$ mm, $T=40\pm 1$ °C, 絞り出口形状： $\phi 3S$ であった。 $H\geq 0$ の画像中のねじは、透明アクリル樹脂製円筒壁を試験片マウント固定するためのステンレス製皿ねじであった。壁高さ H が正の条件 ($H=5, 10$ mm) において円筒壁に囲まれた領域にキャビティクラウドが滞留している状態が観察できた。同画像では明瞭でないが、一部の条

件で軸対称渦も見られた。すなわち、多量気泡のクッション効果と壊食に寄与する気泡が壁面から隔てられたことが、凹面状の場合に壊食量が大幅に減少した要因と考えられる。

Fig. 11には、壁高さ H が壊食量 M に及ぼす影響を、スタンドオフ距離 L に対して示す。供試液体は作動油、絞り出口形状は $\phi 3S$ であった。 $H=0$ mm ($L_{\max}=27.5$ mm) を基準に採ると、 H が負 ($H=-15\sim-5$ mm, すなわち、噴流衝突面が凸面) の場合に M が大きかった。同時に、 M が最大 ($M_{\max}$) となる距離 $L_{\max}$ ($=25$ mm) は短くなった。ただし、 H の大小が $M_{\max}$ や $L_{\max}$ に及ぼす影響は小さかった。一方、 H を正に採ると、幅広い距離 L にわたって、 M は大幅に減少した。なお、 $H=5$ mmにおいても $L_{\max}=25$ mmとなった ($H=10$ mmでは、 M が小さく明確な $L_{\max}$ は現れなかった)。

Fig. 6 Eroded surfaces of specimen (Water, $\sigma=0.02$, $H=-5$ mm, $L=23$ mm, $t=4$ h)

Fig. 7 Eroded surfaces of specimen (Oil, $\sigma=0.02$, $H=-5$ mm, $L=25$ mm, $t=8$ h)

よって、キャビテーション噴流の発生が避けられない場合の噴流衝突面側の対策として、その噴流が衝突することが予測される表面を凹面状とすることで壊食を大幅に低下させることができるといえる。

なお、 $H=0$ mmの条件は、見掛け上、試験片直径が15 mm から30 mm へと拡大したことに相当する。これは、直径の大きい試験片の方が壊食量が小さくなった実験結果³⁾とも一致する。

以上、幅広い条件に対する形状と壊食量との定量的な説明や壊食量と可視化画像との一般性の高い関連づけについては検討の余地が残るが、キャビテーション壊食の低減効果を発揮する形状の基本設計指針ならびにキャビテーション噴流（キャビティクラウド）と壊食（質量減や損傷面）との関係の一部を実験的に整理することができたと考えられる。

5. 結 言

水圧および油圧機器への応用を念頭において、機器内部に生じるキャビテーション壊食を、流れ場の制御により効果的に低減させる方策を探った。噴流衝突型キャビテーション壊食試験装置を用いた一連の壊食実験ならびに可視化実験に基づき、キャビテーション噴流の出口ならびにその噴流が衝突する部材近傍の形状を工夫することで壊食量の大幅な減少を見込めることを示した。

本実験で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 噴流衝突面が凹面状を呈する場合に壊食量は大幅に減少した。一方で、凸面状を呈する場合に壊食量は大幅に増加した。
- 2) 絞り出口近傍の流路を拡大させる、流路部に微小凹凸をつける、微小チャンバーを設ける、あるいはその流路に周囲液体を吸込むポートを設けることにより壊食量

Fig. 8 Processed pictures of cavitating jets (Water, $H=-5$ mm)

は減少した。ただし、その減少量は液体の種類や作動条件により差異を生じた。

- 3) キャビテーション係数や噴流衝突面形状に対して、壊

Fig. 9 Eroded surface of specimens (Oil, $\phi 3S$, $\sigma=0.02$, $L=25$ mm, $t=8$ h)

Fig. 10 Processed pictures of cavitating jets with cylindrical wall (Oil, $\phi 3S$, $\sigma=0.02$)

Fig. 11 Effect of wall height H on mass loss M (Oil, $\phi 3S$, $\sigma=0.02$, $t=8$ h)

食量とコンピュータ画像処理を施したキャビテーション噴流画像との間には、限定的ではあるが、一部に相関が認められた。

本研究の一部には、(財)油空圧機器技術振興財団研究助成金の助成を受けた。本実験には、当時の本学卒研究生 熊谷賢人君の助力を得た。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Yamaguchi, A. and Shimizu, S.: Erosion due to Impingement of Cavitating Jet, *Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering*, **109**-4, 442/447 (1987)
- 2) 清水誠二, 山口惇: 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, 68/75 (1987)
- 3) 山口惇, 風間俊治: キャビテーション壊食に関する研究 (第3報: 絞り径および試験片形状の影響), 油圧と空気圧, **24**-4, 490/497 (1993)
- 4) 山口惇, 汪雄鷹, 風間俊治: キャビテーション壊食に関する研究 (第4報: 絞り形状および上流圧力変動の影響), 油圧と空気圧, **28**-3, 353/358 (1997)
- 5) 山口惇, 風間俊治, 汪雄鷹: キャビテーション壊食に関する研究 (第5報: プラスチックおよび金属材料の耐壊食特性), 日本油空圧学会論文集, **31**-7, 177/182 (2000)
- 6) ASTM: Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by a Cavitating Liquid Jet, G134-95, 529/540 (1995)
- 7) 栗本直規, 鈴木雄二, 笠木伸英: マイクロ・アクチュエータ群による同軸二重噴流混合の能動制御, 日本機械学会論文集B, **70**-694, 1417/1424 (2004)
- 8) Yanagihara, J.I. and Torri, K.: Enhancement of Laminar Boundary Layer Heat Transfer by a Vortex Generator, *JSME International Journal, Ser. B*, **35** II-3, 400/405 (1992)
- 9) 山口惇, 風間俊治, 井上康介, 尾上二郎: 振動法と噴流法によるキャビテーション壊食に関する研究, 油圧と空気圧, **23**-7, 830/838 (1992)