研究論文

超高速キャビテーション噴流による壊食*

清水 誠 二**, 谷 岡 邦 宏***, 池 上 範 章****

Erosion Due to Ultra-High-Speed Cavitating Jet

Seiji SHIMIZU, Kunihiro TANIOKA, Noriaki IKEGAMI

Experimental studies are carried out to clarify the effects of ambient pressure on the structure and erosive property of an ultra-high-speed cavitating jet. Tap water is pressurized up to 118 MPa and injected into a test cell at specified constant pressure. Specimens of aluminum alloy are used for erosion tests. The structure of the ultra-high-speed cavitating jet is observed by instantaneous photographs and high-speed photography. The damaged surface of the specimens are examined by using a scanning electron microscope and mechanism of the erosion by impingement of the ultra-high-speed cavitating jet is investigated.

Key words: Cavitation, Erosion, Water, Jet, Ambient Pressure, Jet Structure

1. 結 言

容積式ポンプ・モータの閉込み区間においては作動流体が狭い流路を流れるため、一般にキャビテーション噴流を発生し、それが衝突することによって部材に壊食を生ずる。これはポンプ吸込み側に発生するキャビテーションと比べ対応が困難である場合が多く、ポンプ高压化の限界をもたらす⁽¹⁾。また、近年の環境汚染防止などの観点から「水」を作動流体とする液圧システムが注目されている⁽²⁾が、水道水や高含水作動液などの水系作動液では石油系作動油と比較して激しい壊食を生ずることが知られており⁽³⁾、その対策が水系作動液を実用化する上で肝要である。

キャビテーション噴流の衝突による壊食に関しては、油圧機器におけるキャビテーション壊食の機構を解明しそれを軽減する観点からの研究⁽³⁻⁶⁾や、材料の耐キャビテーション壊食性を評価する試験方法としての観点からの研究⁽⁷⁾が行われてきた。また、近年ではキャビテーション噴流による壊食を洗浄やピーニング、あるいは材料の切断やせん孔に有効利用しようとする研究が行われている⁽⁸⁻¹⁰⁾。これらの研究は、噴射圧力が数10MPaと比較的低い場合か、高噴射圧力においては周

囲圧力が大気圧程度である場合がほとんどであり、噴射圧力が100MPa程度、あるいはそれを超えるような超高速キャビテーション噴流の壊食特性、およびそれが周囲圧力によってどのような影響を受けるかについては十分解明されているとはいえない。

本報告は、噴射圧力49～118MPaの範囲における超高速キャビテーション噴流の流動構造観察およびアルミニウム合金製試験片を用いた壊食実験によって、周囲圧力が超高速キャビテーション噴流の流動構造および壊食特性に及ぼす影響を明らかにし、その壊食機構を解明しようとするものである。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。増圧機タイプの高圧ポンプ(最高使用圧力150MPa)で加圧された清水をノズルから試験室に噴出させ、試験片に垂直に衝突させる。以下では、噴射時間を所定の噴射圧力の持続時間と定義する。本装置では弁操作によって所定の噴射圧力に達するまで約3s、圧力がほぼ0に回復するまで約7sを要する。試験室内の圧力および水温を一定に保つため、低圧ポンプ(最高使用圧力3MPa)を用いて清水を約10L/min試験室に供給している。清水は試験室底部から供給するが、清水供給孔には供給した清水が噴流に直接影響を与えないようにじゃま板が取付られている。試験室圧力は、低圧ポンプの圧力調整弁および試験室に取付けたリリーフ弁によって、所定の値に設定することができる。キャビテーション係数 σ は次式で定義する。

*平成9年4月11日原稿受付

**広島工業大学工学部機械工学科

(所在地 〒731-51 広島市佐伯区三宅2-1-1)

***日本基礎技術㈱

****日本圧着端子製造㈱

$$\sigma = (p_a - p_v) / (p_i - p_a) \quad (1)$$

ここで、 p_i 、 p_a 、 p_v は、それぞれ噴射圧力、試験室圧力、水の蒸気圧である。

供試流体は水道水であり、試験室水温18～25℃の範囲で実験を行った。空気含有量はバン・スライクの方法⁽¹¹⁾で測定したが、標準状態の空気含有量は飽和空気量に対して111～117%であった。

実験に使用したノズルは図2に示す直径0.5mmのダイヤモンドノズルであり、流量係数は0.72である。ノズルおよびノズル押さえの形状はこれまでの実験^(9,10)に用いたものと同一である。スタンドオフ距離 x はダイヤモンドノズルの出口から試験片までの距離と定義する。ノズル形状およびノズル押さえの寸法のため、 $x=10\text{mm}$ 以上での実験が可能である。キャビテーション噴流の場合、ノズル形状の微妙な差異がその壊食特性に影響するので、予備的な壊食実験を行い、壊食特性がほぼ一致するノズルのみを以下の実験では用いた。

実験に用いた試験片はアルミニウム合金 (JIS A 2011 BDS) 製であり、引張り強さは409N/mm²、耐力は311N/mm²である。壊食実験前後の試験片質量は読み取り限度0.1mgの電子てんびんを用いて測定した。また、損傷面の様相は金属顕微鏡および走査形電子顕微鏡を用いて観察した。

キャビテーション噴流の様相は、露光時間1.5μsの瞬間写真および高速映画によって観察した。

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Configuration of test nozzle

3. 実験結果および考察

3.1 キャビテーション噴流の様相

図3に噴射圧力69MPaにおける噴流の瞬間写真の例を示す。低噴射圧力の場合にこれまで報告されているものと同様、ノズル出口近傍の連続的な気泡雲は、下流では破断して気泡塊を形成する。キャビテーション係数 σ が増加すると、気泡雲の噴流軸方向および半径方向への広がり小さくなる。また、らせん状渦のコアに発生したと考えられるひも状キャビテーション⁽⁷⁾も観察される。

噴射圧力98MPa、 $\sigma=0.006$ のキャビテーション噴流を10万コマ/s(コマ間隔、10μs)で撮影した高速映画の

Fig. 3 Cavitrating jet

Fig. 4 High-speed observation of ultra-high speed cavitating jet at $p_i=98\text{ MPa}$ and $\sigma=0.006$.

例を図4に示す。フレーム4から6でノズル押さえから伸びる連続的気泡雲は、フレーム7で3つに分裂する。その後、ノズル押さえからのびる気泡雲と下流側の比較的大きな気泡塊とに挟まれた気泡塊はしだいに縮小、フレーム12で消滅する。キャピテーション噴流における気泡雲は、ノズル出口近傍の連続的気泡雲→気泡塊→気泡塊消滅のように単純に変化するのではなく、気泡塊の分裂や合体、成長、消滅を伴って複雑な挙動を示すことが分かる。

キャピテーション気泡雲の移動速度を高速映画の画像から求めた。図5に $\sigma=0.010$ の場合について、気泡雲の移動速度 V_{cavi} とスタンドオフ距離の関係を示す。 V_{cavi} はノズル前後の圧力をもとにベルヌーイの定理から計算される噴流速度 V_{th} （例えば噴射圧力49MPaの場合、 $V_{th}=313\text{m/s}$ ）で無次元化している。 V_{cavi} の計測結果にはばらつきが大きいが、大気中に噴出する空気噴流についてよどみ点圧力⁽¹²⁾から求めた噴流速度と比較して大きな値をとる。キャピテーション噴流においては、せん断層に発生するキャピテーションによって噴流の速度減衰が抑制されることが指摘されており⁽¹³⁾、本計測結果はこのことに対応するものと考えられる。

3.2 壊食特性

図6に $\sigma=0.010$ の場合について壊食量（質量減）とスタンドオフ距離の関係を示す。噴流時間は60および300sである。低噴射圧力のキャピテーション噴流についてこれまで報告されているものと同様に⁽³⁾、壊食量は一般にノズル出口近傍（第1ピーク）とノズルから離れた位置（第2ピーク）で極大値をとる。本実験の

噴射圧力の範囲では、 σ が同一であれば第2ピーク位置は噴射圧力に依存しない。ノズル出口近傍における壊食量は噴射圧力が低い場合小さいが、噴射圧力98MPa以上になると噴射時間の増加とともに急増する。

噴射圧力98MPa、噴射時間300sの場合について、壊食量、損傷領域直径 D 、および平均壊食深さとスタンドオフ距離の関係に及ぼす σ の影響を図7、8、9にそれぞれ示す。ここで損傷領域直径は、損傷を受けて梨地状に変化した領域の外径と定義している。壊食量の第2ピーク位置は、 σ が増加すると上流側へ移動する。壊食量は第2ピーク位置で最大となるが、第2ピークにおける壊食量は図7に示した噴射圧力98MPaにおいては $\sigma=0.014$ で最大となる。噴射圧力49～118MPaの

Fig. 6 Mass loss versus x/d at $\sigma=0.010$

Fig. 5 Traveling velocity of cavity cloud versus x/d at $\sigma=0.010$

Fig. 7 Mass loss versus x/d

Fig. 8 Damaged region diameter versus x/d Fig. 9 Mean erosion depth versus x/d

本実験範囲において、第2ピークの壊食量は $\sigma=0.010 \sim 0.014$ で最大となった。これは、低噴射圧力の場合の実験結果⁽¹⁴⁾と一致する。また、 $x/d=20$ における壊食量は σ に依存せずほぼ一定であり、せき止め圧による破壊が支配的であることを示唆している。図8に示した D は壊食量の第2ピーク位置で最大値をとる。 D がスタンドオフ距離 x とともに増加する領域における増加率は $0.6 \sim 0.7$ 程度と σ にかかわらずほぼ一定であり、 D の増加するスタンドオフ距離範囲は σ が小さいほど x/d の大きな領域まで広がる。図9に示した平均壊食深さは壊食量から求めた体積減少量を損傷領域面積で除して求めたものである。平均壊食深さは $x/d=20$ で最大となり、壊食量の第2ピーク位置付近で極大値をとる傾向がある。噴射圧力98MPa、噴射時間300sの場

Fig. 10 Eroded specimens at $p_i=118$ MPa and $\sigma=0.014$

合、ノズル出口直下流においては深さ方向への壊食が支配的であるが、壊食量の第2ピーク位置付近では損傷領域広さが最大であると同時に深さ方向へも壊食が進行している。

図10に噴射圧力118MPa、 $\sigma=0.014$ 、 $x/d=20$ および44の場合について、噴射時間15, 60, 300sの試験片を示す。 $x/d=20$ と44とでは、損傷面の様相が全く異なる。すなわち、 $x/d=20$ では初期段階において衝突中心が最も激しい壊食を受ける。その後、衝突中心部における壊食が深さ方向へ進行すると同時に初期段階で梨地状になった衝突中心周囲の部分でも半径方向外側へ壊食が進み、円筒状の壊食孔が形成される。一方、 $x/d=44$ の場合、初期段階においては衝突中心部と外周のリング状領域が梨地状に変化し、その間には損傷を受けない領域が存在する。時間経過とともに外周のリング状領域の壊食は深さ方向と半径方向内側へ向かって進行するが、衝突中心部の壊食はあまり進まない。

$x/d=20$ および44における壊食量および損傷領域直径と噴射時間との関係を図11, 12に示す。図11に示す壊食量とスタンドオフ距離をみると、 $x/d=20$ においては潜伏期間が存在するが、 $x/d=44$ では潜伏期間が認められず噴射時間のごく短い期間内に質量減少が始まる。図12に示す壊食領域直径の時間的変化をみると、 $x/d=44$ では噴射時間30s程度まで増加傾向が認められるが、それ以降はほぼ一定である。一方、 $x/d=20$ では180s付近までわずかながら増加する。

σ 一定の条件下における最大壊食率 PER は噴射圧力の n 乗に比例して増加することが知られている⁽⁷⁾。 $\sigma=0.014$ の場合について、第2ピークにおける PER と噴射圧力の関係を図13に示す。本実験範囲において PER は噴射圧力の約2.5乗に比例し、低噴射圧力の場合の実

Fig. 11 Mass loss versus jetting duration

Fig. 12 Damaged region diameter versus jetting duration

験結果と指数が異なる。同様な傾向はLichtarowicz⁽¹³⁾も指摘しており、高噴射圧力における損傷はキャビテーション壊食だけに起因するのではなく、ピットやクラックなどに高速の水噴流が進入して破壊を拡大する水くさび効果などが加わり、噴射圧力自体も損傷過程に影響を与えるためであると考えられる。

3.3 壊食機構に関する考察

噴射圧力96Mpa, 噴射時間60s, $\sigma=0.018$, $x/d=20$ における損傷面の様相を図14に示す。走査形電子顕微鏡を用いて試験片を斜め上から撮影したものである。キャビテーション係数が0.002程度と小さくスタンドオフ距離が短い場合、衝突中心部では連続的に液柱が衝突するため損傷を受けず、キャビテーションを伴う

Fig. 13 PER versus p_i Fig. 14 Damaged surface at $p_i=69$ MPa, $\sigma=0.018$, $x/d=20$, and jetting duration of 60s

せん断層が衝突する部分から損傷が開始されるため、初期段階においてはリング状の壊食痕が形成される⁽¹⁰⁾。しかし、キャビテーション係数が本実験程度の範囲になると、噴流中心部の連続的なコアとそれを取り巻くキャビテーションという二重構造⁽¹⁵⁾はみられなくなる。そのため、キャビテーション気泡の崩壊あるいは液滴や液塊の衝突によって形成されたピットやクラックにせき止め圧が作用することで比較的大きな粒子欠落を生じ、図14に示したように衝突中心部から壊食が開始する。その後、図10に示したように衝突中心部において深さ方向に壊食が進行すると同時に半径方向外側へも壊食が進み、円筒状の壊食孔が形成される。この段階においては、上述の水くさび効果のほか、壊食孔底部や側壁の凹凸によって生じた低圧部に発生する二次的キャビテーションによる壊食が加わり、損傷が進行するものと考えられる。

スタンドオフ距離が比較的大きな領域では、図10に

Fig. 15 Damaged surface at $p_i=69$ MPa, $\sigma=0.018$, $x/d=50$, and jetting duration of 60s

示したように衝突中心部でわずかな壊食を受け、その外側はほとんど壊食を受けず、さらに外側のリング状領域が激しく壊食を受ける。図15に、噴射圧力69MPa、噴射時間60s、 $\sigma=0.018$ 、 $x/d=50$ における壊食面の電子顕微鏡写真を示す。衝突中心部の凹凸の規模と激しく損傷を受けているリング状壊食部分のそれを比較すると、リング状部分損傷の凹凸の規模がはるかに大きいことが分かる。衝突領域における流れはその方向を90度変える。したがって噴流の軸から外れて存在する気泡には衝突面から遠ざかる方向への力が作用するので⁽⁴⁾、試験片表面の衝突中心部に接近して崩壊するのは少数の微細なキャビテーション気泡だけである。このため、衝突中心部での壊食は軽微でその凹凸の規模は小さい。ただし衝突中心部での圧力は周囲と比較して高いので気泡崩壊による衝撃圧は大きく、特に噴射圧力が高い場合はスタンドオフ距離がある程度離れていても衝突中心部で壊食を生ずる。しかし最も激しく壊食を生じるのはキャビテーション気泡が多数崩壊するリング状領域である。噴射圧力が高くキャビテーション係数が小さい場合、スタンドオフ距離がある程度離れていても噴流の速度はあまり減速しないまま保たれているので、この領域においても水くさび効果などの噴射圧力自体が損傷に与える効果が加わるものと考えられる。この理由によって壊食量の第2ピーク位置におけるPERの噴射圧力に対する依存性は低噴射圧力の場合と異なる。

4. 結 言

噴射圧力が49～118MPaの範囲における超高速キャビテーション噴流の流動構造観察およびアルミニウム合金製試験片を用いた壊食実験を行い、周囲圧力が超高速キャビテーション噴流の流動構造および壊食特性に及ぼす影響を明らかにし、その壊食機構を検討した。得られた主要な結論は次の通りである。

(1) 低噴射圧力の場合と同様、ノズル出口に近い領域

(第1ピーク)とある程度離れた領域(第2ピーク)で壊食量は極大となる。スタンドオフ距離が長い領域ではリング状の壊食痕が形成されるのに対して、ノズル出口近傍では噴射時間が長くなると円筒状壊食孔が形成される。

- (2) 第2ピークでの壊食量は $\sigma=0.010\sim0.014$ で最大となる。 $\sigma=0.014$ で行った本実験の場合、第2ピークにおける最大壊食率PERの噴射圧力に対する依存性は低噴射圧力に対する既存実験結果と異なる。
- (3) スタンドオフ距離が短い領域における壊食は、キャビテーション気泡の崩壊あるいは液滴や液塊の衝突によって形成されたピットやクラックにせき止め圧が作用し破壊を拡大する効果が、スタンドオフ距離が長い領域における壊食はキャビテーション気泡の崩壊が主な要因であると考えられる。高噴射圧力の場合は、噴射圧力自体も壊食過程に大きな影響を及ぼす。

参 考 文 献

- 1) 山口, 高圧化とトライボロジー, 油圧と空気圧, 27-7(1996), 827/834
- 2) 宮川, 山科, 水圧サーボシステムの開発, 油圧と空気圧, 25-7(1994), 793/798
- 3) 清水, 山口, 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(1988), 68/75
- 4) 清水, 山口, 風間, 同上(第2報), 油圧と空気圧, 22-1(1991), 57/62
- 5) Kleinbreuer, W., Untersuchung der erkstoffzerstörung durch Kavitation in olhydraulischen Systemen, Dissertation in TH. Aachen, 1979
- 6) 山口, 風間, キャビテーション壊食に関する研究(第3報), 油圧と空気圧, 24-4(1993), 490/497
- 7) Lichtarowicz, A., Erosion testing with cavitating jet, Fluids Eng. Conf. Cavitation Erosion in Fluid systems ASME (1981), 153/161
- 8) 山内, 祖山, 安達, 佐藤, 進藤, 大場, 山部, 大島, 高速水中水噴流のカッティング領域とピーニング領域, 機論B, 59-557(1993), 16/22
- 9) Murai, H., Shimizu, S., Wu Z-L., and Noguchi, H., Structure of submerged water jet and erosion of materials, ASME FED-Vol. 190 (1994), 169/174
- 10) 清水, 釜井, 谷岡, 村井, 高速水中水噴流の流動構造と損傷特性に及ぼすポリマ添加の影響, 機論

- B, 62-595(1996), 952/958
- 11) 沼知, 椎名, キャビテーション発生機構に関する一寄与 (第1報), 機論, 3-11(1937), 177/181
 - 12) Donaldson, C.D., Snedeker, R.S., and Margolis, D.P., A study of free jet impingement, Part 2. Free jet turbulent structure and impingement heat transfer, J. Fluid Mech., 45-3(1971), 477/513
 - 13) Lichtarowicz, A., Cavitating jets, Some experiments and correlation, Jet Cutting Technology, Mechanical Engineering Pub., 1994, 105/114ix
 - 14) 祖山, リヒタロビッチ, キャビテーション噴流における有用な相関関係, 日本ウオータージェット学会第11回研究発表講演会論文集 (1996), 25/32
 - 15) 山内, 浅海, 祖山, 佐藤, 井小萩, 大場, 高速水中水噴流の壊食挙動に及ぼす周囲圧力の顕著な影響, 機論B, 61-583(1995), 785/792