アブレシブサスペンションジェットによる水中切断*

清水誠二^{*1}, 佐久間正仁^{*2}, 人見孔太^{*2}, 秋山健太^{*2}, 彭國義^{*1}

Submerged Cutting by Abrasive Suspension Jets

Seiji SHIMIZU^{*1}, Masahito SAKUMA, Kota HITOMI, Kenta AKIYAMA and Guoyi PENG^{*1}Nihon University, College of Engineering, Department of Mechanical Engineering
Tamura-machi, Koriyama, Fukushima, 963-8642 Japan

A sheathed nozzle with ventilation for abrasive suspension jets (ASJs) is developed as a means of extending the effective standoff distance in submerged environments. Submerged cutting tests are conducted with aluminum specimens at the jetting pressure of 30 MPa and the water depth of 100 mm. The nozzle used in the cutting tests is a conical convergent nozzle followed by a straight passage designated focusing section. The diameter of the nozzle and the inner diameter of the sheath are 1 mm and 3 mm, respectively. Air is sucked into the sheath via a plastic tube with an inner diameter of 6 mm. The air flow rate is measured by a float type area flow meter attached to the end of the tube. The abrasive is garnet having a mesh designation of #100. It is showed that the submerged cutting depth of the sheathed nozzle with ventilation is comparable to the cutting depth of the ordinary nozzle in air. The sheathed ASJ nozzle with ventilation is useful for extending the effective standoff distance between the nozzle and the work-piece.

Key Words : Water Jet Technology, Abrasive Suspension Jet, Submerged Cutting, Ventilation, Sheathed Nozzle

1. 緒 言

高経年化した原子力発電プラントの予防保全, あるいは廃止原子炉の解体技術確立することは急務である。放射化された原子炉本体や生体遮蔽体の切断にアブレシブジェットを用いる方法が検討されており, 我国においても 1980 年代に行われた JPDR 解体の際にはアブレシブジェットによる生体遮蔽体切断の実証実験が行われた⁽¹⁾。ところで, 研磨材が水にけん濁したスラリーを加圧・噴射することで形成されるアブレシブサスペンションジェット(以下, ASJ と略記)は, 研磨材をアブレシブノズルヘッド部で高速水噴流に添加して形成するアブレシブインジェクションジェット(以下, AIJ と略記)と比べて大きな加工能力を有する。同一消費動力および研磨材流量条件下における ASJ の切断深さは, AIJ のその数倍になることが指摘されている⁽²⁾。大きな切断能力を持ち二次的な廃棄物量を減らすことが可能な ASJ は, 原子炉解体に用いる場合には AIJ と比べて優位であると考えられる。ところで, 炉内構造物の切断は水中で行うことが想定されているので, ASJ による水中切断手法を確立することは必須の課題である。水中 ASJ の加工特性に関しては, ノズルと加工物間の距離(スタンドオフ距離)が増大すると ASJ の加工能力は急激に減少することが指摘されている^{(3),(4)}。著者らは, 水中 ASJ の加工域を拡大させることが可能なノズルシステムとして ASJ 用鞘付きノズルを提案し, 通気しない場合について ASJ のせん孔特性を実験的に解明した⁽⁵⁾。さらに鞘付きノズルに通気することで, 加工に有効なスタンドオフ距離範囲を飛躍的に拡大できる可能性があることを予備的な実験から明らかにした⁽⁶⁾。

本研究では, 通気鞘付きノズルから噴出する ASJ による水中切断実験を行い, 気中 ASJ 切断や水中 ASJ 切断結果と比較検討する。その結果, 水中切断に通気鞘付きノズルを使用することで, 通常の ASJ 水中切断と比べて切断深さは大幅に向上し, 加工に有効なスタンドオフ距離範囲も気中 ASJ 切断と同程度になることを示す。さらに通気鞘付きノズルの吸引空気流量が切断深さに及ぼす影響や, 好適な鞘部長さについても検討を行う。

* 原稿受付 2010 年 7 月 12 日

*1 正員, 日本大学工学部(〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

*2 日本大学大学院 工学研究科

E-mail: sshimizu@mech.ce.nihon-u.ac.jp

2. 実験装置および方法

2・1 ASJ システムおよび切断実験用水槽

実験に用いた ASJ システムの回路図を図 1 に示す．本システムは，高圧水供給源，研磨材充填容器，ノズルヘッドから構成されている．研磨材充填容器の容積は約 10 L で，システムの最高使用圧力は 35 MPa である．高圧水供給源としては，最高使用圧力 35 MPa で吐水量 15 L/min の高圧ポンプを用いた．バルブ 1 および 2 を開としてホッパーから研磨材充填容器内に研磨材を充填する．容器内で研磨材は沈殿するが，バルブ 6 あるいはバルブ 4 および 5 を開として容器下部に設けた混合部に清水を供給することでスラリーが形成され，ノズルからスラリーを噴射させることが可能になる．本システムにおいては，バルブ 6 を全開としバルブ 4 および 5 を閉とした場合に噴射されるスラリーの研磨材濃度が最大となり，バルブ 6 を閉としてバルブ 4 および 5 が全開とした場合には研磨材濃度が最小となる．本 ASJ システムの詳細については文献 7 を参照されたい．ただし文献 7 で述べた実験後に流量計をバルブ 4 の下流側に取り付けたので，この部分の回路が文献 7 とは異なる．研磨材としては，入手しやすく切断性に優れたガーネット #100 を用いた．

Fig. 1 Circuit of ASJ system

Fig. 2 Water tank and robot arm for submerged cutting tests

水中切断実験はノズルヘッドを垂直多関節ロボット(Motoman HP 20)のアームに把持させ，所定のトラバース速度で水中を移動させることで行った．試験片としては，アルミニウム合金板(JIS A5052P)を用いた．水中切断実験時の写真を図 2 に示す．水中切断実験用水槽はスギノマシン社製アプレシブジェット加工システムのキャッチャー用水槽を転用したものである．水槽内で ASJ を水平方向に噴射して水中切断実験を行っている．水槽は辺の長さが約 1200 mm の立方体で，噴流の軸は水深約 100 mm とした．水面の波うちを防ぎ，水面から空気を吸引する

ことがないように、ノズルから試験片に至るまでの水面を金属板のカバーで覆っている。切断実験はすべて噴射圧力 $p_i = 30 \text{ MPa}$ で行った。水中切断の場合、次式で定義されるキャピテーション数 σ は約 0.003 である。

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

ここで、 p_a および p_v はそれぞれ、噴流の周囲圧力、水の蒸気圧である。

この他、本システムを用いて形成される ASJ の研磨材濃度測定、高速ビデオによる気中 ASJ の流動構造観察、および気中における切断実験を行った。形成される ASJ の研磨材濃度測定は、形成された ASJ を気中でステンレス鋼管製のキャッチャーに向けて噴射、採取したスラリーの質量と体積を測定することで行った。気中 ASJ の流動構造観察は、ノズルとステンレス鋼管製キャッチャー間の噴流を高速ビデオカメラ (Phantom Ver.7.2) で撮影することにより行った。ASJ の研磨材濃度測定と高速ビデオによる観察については、文献 7 を参照されたい。ただし、文献 7 の結果はノズル A4⁽⁸⁾を用いた場合の結果であり、本報告の切断実験はノズル A10⁽⁸⁾を用いて行っている。

2・2 ASJ ノズルおよび鞘付きノズル

実験に用いたノズルを図 3 に示す。本実験の場合、気中で集束した ASJ を形成できるノズル A10⁽⁸⁾を用いた。参考までに図 3 には前回の実験⁽⁷⁾で用いたノズル A4 も示す。いずれのノズルもノズル直径 d は 1 mm であり、A の後の数字はフォーカス部長さとノズル直径の比の概数を表している。ノズル収縮部出口とフォーカス部は焼結ダイヤモンド製である。

鞘付きノズルの場合のノズルヘッド部を図 4 に示す。鞘は内径 3 mm、外径 5 mm のステンレス鋼管を用いて製作した。図 4 に示すように、直径 1 mm のノズル出口から測定した内径 3 mm 部分の長さを鞘部長さと定義し、それを 32.4 mm および 52.4 mm の 2 種類とした。鞘取り付けキャップの基部には通気用のポートが設けてある。鞘への通気は内径 6 mm のビニールチューブを用いて大気圧の空気を自然吸引させた。空気流量は面積式流量計を用いて測定した。また、以下で用いるノズル出口からの距離 X および鞘出口からの距離 X' は図 4 のように定義している。

Fig. 3 Test nozzles

Fig. 4 Sheathed ASJ nozzle with ventilation for submerged cutting and definitions of X and X'

3. 実験結果および考察

3・1 気中 ASJ の高速ビデオ観察

ASJ による気中せん孔実験によれば、気中 ASJ の加工特性は噴流の流動構造と密接な関係を有する⁽⁸⁾。鞘付きノズルに関するこれまでの研究^(5,6,9)によれば、通気鞘付きノズルを用いた水中切断作業時の鞘内部および空気噴流に被覆された領域における ASJ は、気中における流動の様相に近い状態が維持されるものと考えられる。このため、本システムを用いて形成される気中 ASJ の高速ビデオ観察を行った。撮影速度は 53333 frames/s、露光時間は $2\mu\text{s}$ とした。ノズル A10 を用い、噴射圧力 30 MPa、研磨材濃度約 28wt% の場合の高速ビデオ連続画像を図 5 に示す。画像間の時間間隔は約 $19\mu\text{s}$ であり、 X/d はノズル出口からの無次元距離を表す。噴流は比較的集束しており、 $X/d = 80$ 付近までは連続的な構造が保たれている。 $X/d = 50$ から 80 の範囲で、気液界面の凹凸の移動速度を計測した。移動速度はベルヌーイの定理で計算される理論噴出速度 V_{th} の 0.80 から 0.95 程度であり、既発表の結果⁽⁸⁾とほぼ一致している。

Fig. 5 Time series of photographs of ASJ issuing from nozzle A10 ($p_i = 30\text{ MPa}$)

Fig. 6 Instantaneous photograph of ASJ issuing from nozzle A4⁽⁷⁾ ($p_i = 30\text{ MPa}$)

図6にノズルA4を用いて形成されたASJの瞬間画像の例⁽⁷⁾を示す。ノズルA4を用いて形成されたASJは $X/d = 60$ 付近で連続的な構造が失われて液塊状に分裂している。噴流の半径方向広がりも図5に示したノズルA10の場合と比較して大きい。ノズルA10とA4はフォーカス部（ノズル出口部の直径一定部分）長さが異なるだけである。より長いフォーカス部を有するノズルを用いることで集束したASJを形成することが可能である⁽⁸⁾。

3・2 ASJの切断特性

以下においては、噴射圧力 $p_i = 30$ MPa、ノズル移動速度 $V_T = 2$ mm/sの条件下で切断実験を行った。無次元切断深さ h/d とノズル押さえ出口又は鞘出口・試験片間の無次元距離 X'/d の関係を図7に示す。試験片はアルミニウム合金板(JIS A5052P)で、切断実験中の研磨材濃度は 33 ± 5 wt%である。鞘付きノズルの場合の無次元鞘部長さ L_{sheath}/d は52.4であり、吸引空気流量 Q_{air} は44 L/minあるいは0 L/minである。また通常ノズルの場合については、気中と水中での切断結果を示している。通常ノズルの場合、ノズル構造の関係で長さ2.4 mmの鞘部に相当する部分をもつ。通常ノズルから噴出するASJの場合、気中および水中いずれにおいても、 X'/d の増加とともに h/d は直線的に減少する。ただし、水中における h/d は気中におけるそれよりも著しく小さく、 X'/d の増加に伴う h/d の減少はより急激である。 $Q_{air} = 44$ L/minの鞘付きノズルの場合、 $X'/d < 20$ 以下の領域における h/d は X'/d に無関係にほぼ一定であるが、 $X'/d > 20$ における h/d は X'/d の増加とともに直線的に減少する。同一 X'/d における通気鞘付きノズルの h/d を通常ノズルによるそれを比較すると、通気鞘付きノズルの h/d は気中における通常ノズルのそれよりも小さい。しかし $X'/d > 20$ の領域における通気鞘付きノズルの h/d は水中における通常ノズルのそれよりも大きく、 X'/d の増加に伴う h/d の減少も緩やかである。 $Q_{air} = 0$ L/minにおける鞘付きノズルでは、 $Q_{air} = 44$ L/minにおける鞘付きノズルの場合と類似の傾向はあるが h/d は大幅に小さく、 X'/d の増加に伴って h/d が減少する領域において、 h/d の減少はより急激である。 $Q_{air} = 0$ L/minの鞘付きノズルによる h/d は、同一 X'/d で水中における通常ノズルによる h/d よりも小さい。これは、鞘付きノズルの場合にはノズル出口からの距離 X/d が鞘の分だけ長く、鞘出口付近には気泡雲領域^(5,9)が形成されることも加わり、鞘から噴出する際には研磨材粒子速度がより低下していることによるものと考えられる。

Fig. 7 Variations of cutting depth h/d with distance from sheath exit X'/d

図8には、図7をノズル出口からの無次元距離 X/d に書き換えた結果を示す。本実験における X/d と X'/d の間には、鞘付きノズルの場合には $X/d = X'/d + (L_{sheath}/d)$ 、通常ノズルの場合には $X/d = X'/d + 2.4$ の関係がある。 X/d が同一の条件で $Q_{air} = 44$ L/minの鞘付きノズルと気中における通常ノズルの切断深さ h/d を比較すると、通気鞘付きノズルを用いた水中切断では気中切断と同程度の切断深さを実現されていることが分かる。非通気鞘付きノズルを用いた場合、水中における通常ノズルが切断能力を失う $X/d > 60$ の領域においても、ある程度の切断能力

が保持されている．加工物からはね返り噴流によるノズル本体の損傷が危惧される場合，ノズル本体と加工物間の距離を離すことができるという点で，たとえ通気することが出来なくとも鞘付きノズルは有用である⁽⁵⁾．

図 9 に，吸引空気流量 $Q_{air} = 44 \text{ L/min}$ の鞘付きノズルを用いた水中切断と通常ノズルを用いた気中切断について，切断面の写真を示す．図 8 に示したように， $X/d > 70$ において $Q_{air} = 44 \text{ L/min}$ の鞘付きノズルによる切断深さと通常ノズルによる気中切断深さは同程度であるが，切断面には大きな差異が見られる．すなわち，通常ノズルによる気中切断の場合，切断幅は大きく，試験片表面の広い範囲が損傷を受けて切断面角部には大きな丸みが付いている．一方，通気鞘付きノズルによる水中切断の場合，切断幅は小さく，試験片表面の損傷はわずかである．これは，気相中で ASJ が半径方向へ大きく広がる場合において鞘部は ASJ の半径方向の広がりを拘束すること，また水中切断においては半径方向に広がって液相中に入射した研磨材粒子が急激に減速されて加工能力を失うことによる．

Fig. 8 Variations of cutting depth h/d with distance from nozzle exit X/d

(a) Submerged cutting (b) Cutting in air
($L_{sheath} = 52.4 \text{ mm}$, $Q_{air} = 44 \text{ L/min}$) (Ordinary nozzle)

Fig. 9 End views of cuts by sheathed nozzle and ordinary nozzle

鞘部長さ $L_{sheath}/d = 52.4$ の場合について，吸引空気流量 Q_{air} が無次元切断深さ h/d とノズル出口・試験片間の無次元距離 X/d の関係に及ぼす影響を図 10 に示す．いずれの通気量の場合も，鞘出口の近傍領域における h/d は一定であるが，それより下流の領域では h/d は X/d が増加すると直線的に減少する．ただし， Q_{air} が大きいほど h/d は大きな値をとり， X/d の増加に伴う h/d の減少率は小さくなる．ただし，図 8 で示したように $Q_{air} = 44 \text{ L/min}$

の条件下で鞘付きノズルを用いて行った水中切断深さは、通常ノズルによる気中切断深さと同程度であり、吸引空気流量をこれ以上増加させても、切断深さの増加は期待できない。

Fig. 10 Effect of air flow rate Q_{air} on cutting depth h/d by sheathed nozzle with ventilation

Fig. 11 Effect of sheath length L_{sheath} on cutting depth h/d

図 11 に鞘部長さ L_{sheath} が無次元切断深さ h/d と鞘出口・試験片間の無次元距離 X'/d の関係に及ぼす影響を示す。吸引空気流量は $Q_{air} = 44$ L/min である。比較のために、通常ノズルを用いた場合の気中における h/d も示してある。 $L_{sheath}/d = 52.4$ の場合、鞘出口の直下流域では h/d がほぼ一定であるが、さらに X'/d が増加すると h/d は直線的に減少する。 $L_{sheath}/d = 32.4$ の場合にも X'/d が増加すると h/d は直線的に減少するが、鞘出口の近傍領域で h/d がほぼ一定となる領域は認められない。同一 X'/d で $L_{sheath}/d = 32.4$ と $L_{sheath}/d = 52.4$ の場合を比較すると、 $L_{sheath}/d = 32.4$ による h/d の方が大きい。 $L_{sheath}/d = 32.4$ の場合には、形成された ASJ はその半径方向広がりが鞘内壁に到達しないままに鞘から流出する。一方、 $L_{sheath}/d = 52.4$ の場合には、ASJ は鞘出口に至る前に鞘内径いっぱいまで広がる。鞘は ASJ の半径方向の広がりを拘束するので、鞘なしの場合と比較してより集束した ASJ が鞘から噴出する。このため、鞘出口のごく近傍の領域においては、気相中により集束した ASJ が噴出することになる。集束

した ASJ では X'/d の増加に伴う切断能力の低下は小さい．以上の理由により， $L_{sheath}/d = 52.4$ の場合には鞘出口直下流域において h/d がほぼ一定になったものと考えられる．ところで，実際の切断作業においては，ノズルヘッド部と加工物との間の距離は可能な範囲で小さく設定（数 mm から 10 mm 程度）することが多いので，本実験の範囲では， X'/d が小さな領域でより大きな切断深さが得られる鞘部長さ $L_{sheath}/d = 32.4$ のノズルの方が優位である．最適な鞘部直径および長さは，気相中における ASJ の分裂挙動と ASJ の半径方向広がりが密接に関係すると考えられるので，さらに詳細な検討が必要である．

図 11 の結果をノズル出口からの無次元距離 X/d に書き換えたものを図 12 に示す． $L_{sheath}/d = 32.4$ の h/d および $L_{sheath}/d = 52.4$ の $X'/d > 20$ ($X/d > 72.4$) における h/d は，通常ノズルを用いて気中で行った場合の h/d （破線で示している）と同程度である．すなわち通気鞘付きノズルを用いることで，ノズル出口からの距離が同一の条件で比較すれば，鞘部長さに関わらず気中と同程度の水中切断深さが実現することが可能である．

Fig. 12 Comparison of submerged cutting depth by ventilated nozzle with cutting depth in air

5. 結論

水中アプレシブサスペンションジェット（ASJ）切断用の通気鞘付きノズルを提案し，通気鞘付きノズルから噴出する ASJ による水中切断結果を気中 ASJ 切断や水中 ASJ 切断と比較検討した．本実験の範囲で得られた主要な結論は以下の通りである．

- (1) 通気鞘付きノズルを用いて水中切断を行うことで，ノズル出口からの距離が同一であるという条件下で比較したとき，気中における切断と同程度の切断深さを得ることが可能である．
- (2) 通気することが出来ない場合でも，鞘付きノズルはノズル本体と加工物間の距離を確保することを可能にする．ただしこの場合は鞘出口からの距離の増加によって ASJ の切断能力が急激に低下する．
- (3) 通気鞘付きノズルを用いる場合，吸引空気流量が大きいほど切断深さは大きく，ノズル出口からの距離の増加に伴う切断深さの減少はより緩やかになる．
- (4) 2 種類の鞘部長さについて行った通気鞘付きノズルによる水中切断結果によれば，鞘出口近傍の領域においては，鞘部長さの短いノズルを用いることでより大きな切断深さが得られる．

本研究で使用した ASJ システムは，平成 18 年度から 20 年度の消防防災科学技術研究推進制度に係る研究「可燃性蒸気が存在する雰囲気下で使用可能な高速切断器具（大きさ，性能は従来程度）の開発」の助成を得て製作したものである．記して謝意を表す．

文 献

- (1) 日本ウォータージェット学会編, “ウォータージェット技術事典”, (1993), pp.167-191,丸善.
  - (2) Brandt, C., Louis, H., Meier, G., and Tebbing, G., “Abrasive suspension jets at working pressures up to 200 MPa”, *Jetting Technology*, (1994), pp.489-509. Mechanical Engineering Pub.
  - (3) 清水誠二, 西山貴教, 志村孝夫, 表龍之, “アブレシブサスペンションジェットの水中せん孔特性”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 68, No. 676 (2002), pp.3346-3351.
  - (4) Hung, T. N., Louis, H., Peter, D., and Senne, T., “Submerged application of abrasive water suspension jets (AWSJs)”, *Water Jetting*, (2004), pp.205-216, BHR Group.
  - (5) 清水誠二, 西山隆敏, 加藤寛章, “水中アブレシブサスペンションジェット用さや付きノズル”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 71, No. 701 (2005), pp.2458- 2464.
  - (6) 清水誠二, 田村知隆, “鞘付きノズルを用いて形成される水中水噴流(通気した場合の特性)”, 2006 年度日本ウォータージェット学会技術年次報告会, (2006), pp.19-24.
  - (7) 清水誠二, 相模駿典, 彭國義, 柿崎隆夫, “災害救助用アブレシブ・サスペンション・ジェットシステムの試作”, 噴流工学, Vol. 26, No. 2 (2009), pp.11-16.
  - (8) 清水誠二, “直接加圧方式アブレシブジェットの流動構造とせん孔特性に及ぼすノズル形状の影響”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 62, No. 603 (1996), pp.3838-3845.
  - (9) Ito, H., Aoyama, T., Peng, G., and Shimizu, S., “Observations of cavitating jets issuing from a sheathed nozzle”, *Water Jetting Technology for LOHAS* (2009), International Academic Printing, pp.97-100
-