気層被覆アブレシブサスペンションジェットによる水中切断*

伊東 秀人^{*1}, 彭 國義^{*2}, 清水 誠二^{*2}

Submerged Cutting by Air Coated Abrasive Suspension Jets

Hideto ITO^{*1}, Guoyi PENG and Seiji SHIMIZU

^{*1} Graduate School of Engineering, Nihon University
Nakagawara 1, Tokusada, Tamuramachi, Koriyama, Fukushima, 963-8642 Japan

A ventilated sheathed nozzle for producing abrasive suspension jets (ASJs) has been developed as a means of extending the effective standoff distance and improving the cutting capabilities under submerged conditions. In the present investigation, submerged cutting tests were conducted with aluminum specimens at a jetting pressure of 30 MPa to clarify the effects of sheath length and air flow rate on the cutting capability of ASJs. The nozzle used in the tests was a conical convergent nozzle with a focusing section. For the range of experimental conditions used, improved cutting was achieved with a shorter nozzle sheath. High-speed observations and measurements of the flow rate distribution of water jets were also carried out at a jetting pressure of 10 MPa in order to investigate the flow structure of air coated ASJs under submerged conditions. The cutting capability was found to drastically improve for small standoff distances since air coated ASJs are formed downstream of the sheath exit.

Key Words : Submerged Cutting, Abrasive Suspension Jet, Sheathed Nozzle, Multi-Phase Flow, Air Coated Jet, Flow Visualization

1. 結 言

水と研磨材を混合・攪拌して形成されたスラリーを直接加圧することによりノズルから噴出させるアブレシブサスペンションジェット (ASJ) は、アブレシブノズルヘッド部において研磨材粒子を高速水噴流で加速し固気液三相噴流として噴出させるアブレシブインジェクションジェット (AIJ) と比較して高い加工能力をもつことが知られている^{(1),(2)}。また、ASJ は大深度水中環境下においても使用することが可能であるため、水中加工特性についての研究^{(3),(4)}も行われており、原子炉圧力容器や炉内構造物の切断方法として有力な手段であると考えられている⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。

ASJ を用いて水中切断や穿孔を行う場合、ノズルと被加工物間の距離 (スタンドオフ距離) やキャビテーション係数が増加すると ASJ の加工能力は急激に低下する^{(3),(4)}。この問題を解決するため、水中切断用通気鞘付き ASJ ノズルが提案されている⁽⁸⁾。通気鞘付きノズルを用いて形成される気層被覆水中 ASJ では、加工に有効なスタンドオフ距離範囲が飛躍的に拡大することや、切断深さが気中 ASJ のそれに匹敵する事が示されている^{(9),(10)}。しかし、鞘部長さ、通気流量といったパラメーターの最適化は十分に行われているとは言えない。また、通気鞘付きノズルを用いて形成される気層被覆水中 ASJ の流動構造やその特性に関しては全く解明されていない。

本報告では、通気鞘付きノズルを用いて形成される気層被覆水中 ASJ による切断実験を行い、スタンドオフ距離、通気流量および鞘部長さを変化させた場合の切断能力を実験的に調べることで、通気鞘付きノズルを使用する際の好適なパラメーターを探る。さらに、通気鞘付きノズルから噴出する水中水噴流について、高速ビデオカメラを用いた観察や流量分布測定を行い、気層被覆水中水噴流の流動構造を明らかにすることで、気層被覆水中 ASJ の切断特性の改善を図るものである。

* 原稿受付 2012 年 8 月 3 日

^{*1} 学生員, 日本大学大学院 工学研究科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

^{*2} 正員, 日本大学 工学部

E-mail: g2131@cc.ce.nihon-u.ac.jp

2. 実験装置および方法

実験に用いた ASJ システムを図 1 に示す。本システムは、高圧ポンプ、研磨材充填容器およびノズルヘッドで構成されている。研磨材充填容器の容積は約 10 L である。使用した高圧ポンプ（マルヤマエクスセル, MW7HP40L）の最高使用圧力は 35 MPa、吐出流量は 15 L/min であるが、ASJ 切断実験は噴射圧力 30 MPa で実施する。使用する ASJ システムの詳細は文献 9, 11 を参照されたい。

Fig. 1 Circuit of ASJ system

鞘付きノズルヘッド部を図 2 に示す。本実験では、気中で比較的集束した ASJ を形成できるノズル A10⁽¹²⁾ を用いる。ノズル直径 d は 1 mm で、フォーカス部長さとノズル直径の比は 9.6 である。ノズル入口の収縮部は頂角 36°の円錐状で、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。鞘部内径は 3 mm であり、ノズル出口下流に設けた内径 3 mm の部分の長さを鞘部長さ L_{sheath} と定義する。また、ノズル出口からの距離 X および鞘出口からの距離 X' を図 2 のように定義する。したがって、 X と X' には $X = X' + L_{sheath}$ の関係がある。図 2 は鞘部長さ 16 mm のノズルヘッド部を示しているが、鞘部長さ 30, 50 mm の場合には、ノズルキャップ出口に内径 3 mm, 外径 5 mm のステンレス製鞘を取り付けている⁽¹⁰⁾。ノズルキャップの基部には通気用ポートが設けてあり内径 6 mm, 長さ 4 m のビニールチューブを用いて大気を自然吸引させる。空気流量は、面積式空気流量計を用いて測定する。

Fig. 2 Ventilated sheathed ASJ nozzle ($L_{sheath}/d = 16$)

図 3 に ASJ 切断実験で使用した試験片の概略図を示す。試験片はアルミニウム合金製 (JIS A5052P) である。試験片端部の厚さはそれぞれ 15 及び 30 mm で、角度 10° のテーパ部を有する。切断深さ h は、テーパ部においては完全に切断された位置における試験片厚さおよび一定厚さ部分における切断溝の 10 点平均深さから求めている。研磨材はガーネット #100 を用いる。

Fig. 3 Schematic of test specimen

ノズルヘッドを垂直多関節ロボット (安川電機, Motoman HP20) のアームに把持させ、トラバース速度 2 mm/s で水中を移動させる。ノズルヘッドの水深は約 100 mm で ASJ を水面に対して水平に噴射させる。水中切断実験時は水面から空気を吸い込まないように金属製カバーで水面を覆っている。

また、高速ビデオカメラを用いて通気鞘付きノズルで形成される気層被覆水中水噴流の観察も行う。ところで、ASJ の加工能力は研磨材粒子の速度と空間的分布に関連すると考えられるが、研磨材流量の空間的分布を直接測定することは困難である。気層被覆水中 ASJ の切断特性を解明する手掛かりを得るために、ASJ と水噴流の分散の程度は異なるが、水噴流で流量分布を測定する。流量分布測定実験は水槽に通気鞘付きノズルを取り付け、精密ステージ上に固定した流量計測用プローブに向けて噴流を噴射することによって行う。流量計測用プローブとしては、内径 0.5 mm、外形 0.8 mm のステンレスチューブを用いて製作したものを用いる。精密ステージは、噴流半径方向に 0.01 mm の精度で、噴流軸方向には 0.5 mm の精度で位置を設定することができる。

3. 実験結果および考察

ASJ による気中せん孔実験によれば、その加工特性は噴流の流動構造と密接な関係を有する⁽¹²⁾。通気鞘付きノズルを用いた水中切断の場合、鞘内部および気層被覆領域における ASJ は、気中における流動の様相に近い状態であると考えられる。気中 ASJ の流動様相を明らかにするために高速ビデオ観察を行った。撮影速度 28169 frames/s、露光時間 $2 \mu\text{s}$ の場合の連続画像を図 4 に示す。画像間の時間間隔は $35 \mu\text{s}$ である。ノズル A10 を用い、噴射圧力は 30 MPa、研磨材濃度は約 25 wt% である。 X/d はノズル出口からの無次元距離を示す。撮影範囲内において噴流中心部の連続した構造は維持されているが、噴流はノズル出口直下から半径方向へ広がる。スタンドオフ距離が増加すると気液界面が大規模に変形し、比較的大きな液塊とその周囲の液滴を確認することができる。撮影した画像から気液界面の凹凸あるいは液塊の移動速度 V を計測した。無次元速度 V/V_{th} と X/d の関係を図 5 に示す。ここで、 V_{th} はベルヌーイの定理で計算される理論噴出速度である。 X/d が 0 ~ 100 の領域において、 V/V_{th} は 0.82 から 0.91 程度でほぼ一定である。この結果は、既発表の結果⁽¹²⁾ とほぼ一致している。

本研究で用いた通気鞘付きノズルでは、鞘基部に設けたポートから大気圧の空気を自然吸引させている。吸引空気流量は通気用ビニールチューブの途中に設けた弁で調節することが出来る。鞘付きノズルの無次元鞘部長さ L_{sheath}/d が最大吸引空気流量 $Q_{air\ max}$ に及ぼす影響を図 6 に示す。 $L_{sheath}/d < 30$ の領域では L_{sheath} が大であるほど $Q_{air\ max}$ は増加するが、 $L_{sheath}/d > 30$ においては $Q_{air\ max}$ がほぼ一定となっており、 L_{sheath}/d に依存しない。スタンドオフ距離が増加すると、ASJ は急激に半径方向へ広がる。研磨材濃度によって異なるが、 $X/d = 20$ における ASJ の無次元直

Fig. 4 Instantaneous photographs of ASJ issuing from nozzle A10 in air ($p_i = 30$ MPa)

Fig. 5 Non-dimensional velocity V/V_{th} versus non-dimensional distance from nozzle exit X/d

径 W/d は、2.8 ～ 3.4 程度であることが示されている⁽¹¹⁾。ASJ 噴射後の $L_{sheath}/d = 30, 50$ の鞘出口部を観察すると、 $L_{sheath}/d = 30$ の鞘内壁にはわずかな損傷痕が認められる程度であったが、 $L_{sheath}/d = 50$ の場合には研磨材粒子によって鞘内壁が摩耗し、鞘内径が拡大していた。このことは ASJ が鞘内径いっぱい広がるまで $Q_{air\max}$ は増加するが、それ以上鞘部長さを増加させても $Q_{air\max}$ は増加しなくなることに対応するものと考えられる。

図 7 に無次元鞘部長さ L_{sheath}/d が無次元切断深さ h/d と鞘出口からの無次元距離 X'/d の関係に及ぼす影響を示す。 L_{sheath}/d は 16, 30 および 50 の 3 種類であり、通気流量 Q_{air} は 34 L/min である。また、切断実験は噴射圧力 30 MPa、研磨材濃度約 25 wt% の同一運転動力下で行われている。いずれの鞘部長さの場合も、スタンドオフ距離が増加すると切断深さは一次関数的に減少する。鞘部長さ 50 の場合、鞘が ASJ の半径方向への広がりを制限することで

集束した ASJ が噴出するため、鞘出口の直下域に切断深さがほぼ一定になる領域が認められる⁽¹⁰⁾．同一の X'/d における h/d を比較すると、 $L_{sheath}/d = 16$ の鞘付きノズルを用いた場合の h/d が最も大きい．

Fig. 6 Maximum air flow rate $Q_{air max}$ versus non-dimensional sheath length L_{sheath}/d

Fig. 7 Change in depth of kerf h/d with distance from sheath exit X'/d for $L_{sheath}/d = 16, 30$ and 50

図 7 の横軸 X'/d 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 8 に示す． X/d が同一な場合の切断深さは、鞘部長さに関係なく概ね一本の直線上に乗る．但し、スタンドオフ距離が大きい領域では、鞘部長さが長いほど ASJ まわりの気相域が保証されるため、また L_{sheath}/d が 30 以上では鞘が ASJ を集束させる効果をもつことから、切断深さが若干大きくなる傾向を示す．

図 9 に鞘部長さ $L_{sheath}/d = 16$ の場合について、通気流量 Q_{air} が無次元切断深さ h/d に及ぼす影響を示す。 X'/d は 5 ～ 40 の範囲である。いずれの X'/d においても、 Q_{air} がある値より小さい領域では切断深さが直線的に増加するが、 Q_{air} がそれ以上の範囲になると h/d はほぼ一定の値となる。比較的小さな X'/d の場合、少量の通気を行うことで ASJ の水中切断能力が大きく向上する。 X'/d が大きい場合、水中切断能力を向上させるために多量の通気が必要である。しかし、過剰な通気を行っても水中切断能力は向上しないことが分かる。

Fig. 8 Change in depth of kerf h/d with distance from nozzle exit X/d for $L_{sheath}/d = 16, 30$ and 50

Fig. 9 Change in depth of kerf h/d with air flow rate Q_{air} when $X'/d = 5, 10, 20$ and 40

水噴流と ASJ で流動の様相は異なるが、鞘出口近傍における噴流の広がりと同程度であるならば、水噴流の様相を観察することで ASJ の鞘出口近傍の流れ場の様相を定性的に理解できると考え、透明アクリル樹脂製鞘を用

いて水噴流の高速ビデオ観察を行った．ASJ による切断実験の多くは噴射圧力 30 MPa，鞘部長さ 16 mm としたが，予備実験から水噴流の観察実験はそれぞれを 10 MPa，50 mm とした．これらの条件下で噴出された ASJ あるいは水噴流は，鞘出口部において鞘内径までは広がっていない．通気鞘付きノズルで形成される水中水噴流の鞘出口近傍における画像を図 10 に示す．(a)，(b)には通気流量 Q_{air} が 6 および 22 L/min の高速写真を示す．画像間の時間間隔は約 1 ms である． $Q_{air}=0$ L/min の場合，噴流は鞘出口近傍において鞘内径いっぱい広がるキャビテーション気泡雲を形成し，鞘から流出する⁽¹³⁾．通気流量が比較的小で $Q_{air}=6$ L/min の場合，鞘出口から鞘内壁面に沿う逆流が生じて，鞘内で水噴流と干渉する．このため噴流の集束性は失われ，噴流は減速されるものと考えられる．通気流量が十分に大で $Q_{air}=22$ L/min の場合，鞘内の逆流領域はほとんど見られない．鞘出口直後に注目すると，鞘から噴出した噴流は依然として空気層によって被覆され，集束した噴流としての構造を保つ⁽¹⁴⁾．気層によって被覆された状態の噴流構造によって急激な噴流速度の減衰が抑制され，水中 ASJ 切断において加工能力の低下を防ぐと考えられる．

Fig. 10 Instantaneous photographs of air coated jets

($p_i = 10$ MPa, $L_{sheath}/d = 50$)

気層による被覆の効果が鞘出口からどの程度の範囲まで持続出来るかを検討するため，通気鞘付きノズルから噴出する水中水噴流で流量分布測定を行った．噴射圧力 10 MPa，ノズル A10 の場合で，本実験範囲で最も良好な加工特性を持つ無次元鞘部長さ $L_{sheath}/d = 16$ の鞘付きノズルを用いた．測定範囲は無次元スタンドオフ距離 $X'/d = 0 \sim 80$ とし，通気流量 $Q_{air} = 0, 14$ L/min の場合についての結果をそれぞれ図 11 の(a)および(b)に示す．ここで r は噴流中心軸からの半径方向距離を示し，流量 q は $X'/d = 0$ における気中噴流の最大流量 $q_{c,max}$ で無次元化している． $q_{c,max}$ はプローブの流入孔面積とベルヌーイの定理から計算される理論流量 q_{th} と比較すると $q_{c,max}/q_{th} \approx 0.51$ であった．測定に用いた流量プローブがボルダの口金と類似の形状であることを考慮すると妥当な流量測定値が得られていると考えられる．(a)と(b)を比較すると， $X'/d = 0$ における $q/q_{c,max}$ はあまり差がないものの， $Q_{air} = 0$ L/min の場合にはすでに若干の流量減少が認められる． $Q_{air} = 14$ L/min の場合，噴流中心部では気中噴流の最大流量とほぼ同一流量となっていることが分かる．また，(a)に示す $Q_{air} = 0$ L/min の場合では X'/d が大きくなるにつれ $q/q_{c,max}$ は著しく減少するが，(b)に示す $Q_{air} = 14$ L/min の場合，その減少は比較的緩やかである．通気鞘付きノズルを用いることで気層被覆水中水噴流が形成され， X'/d の増加に伴う噴流中心軸付近の流量減少，すなわち速度減少は大きく抑制される．

無次元スタンドオフ距離 X'/d と無次元最大流量 $q/q_{c,max}$ の関係を図 12 に示す．いずれの場合も， $q/q_{c,max}$ は X'/d が増加すると減少する．しかし，通気を行うことにより特にスタンドオフ距離の小さな領域で，水中環境においても気中噴流に近い状態を実現できる事が分かる．気中噴流の場合，気液界面の凹凸や比較的大きな液塊の移動

速度はスタンドオフ距離 $0 \sim 100$ の範囲においてほぼ一定である。したがって、 X/d の増加に伴う $q_c/q_{c\max}$ の減少は水噴流の分裂に主な要因があると考えられる。通気を行わない水中水噴流の場合、噴流と周囲流体間の大きな速度勾配と粘性作用により、両者間で運動量の交換が行われる。これにより、噴流は周囲の水を巻き込みながら半径方向へと広がり、噴流速度は減衰する。通気を行った場合、気相中に噴出することで噴流速度の減衰は緩やかになる。しかし水噴流と気層被覆領域、および気層被覆領域と周囲水の界面の不安定が流れの様相に大きな影響を及ぼす。通気流量を増加させると気層被覆領域は大きく脈動する現象も観察される⁽¹⁴⁾。

Fig. 11 Flow distribution of the water jets

 Fig. 12 Relationship between X/d and non-dimensional maximum flow rate $q_c/q_{c\max}$

通気鞘付きノズルを用いた水中 ASJ の切断深さ h/d とスタンドオフ距離 X/d の関係を図 13 に示す。水中 ASJ 切断実験時の研磨材濃度は約 25 wt%，鞘部長さ L_{sheath}/d は 16，通気流量 Q_{air} は 0, 4 および 28 L/min である。同図

には通常ノズルを用いた気中 ASJ の切断深さも示している。ただし、気中 ASJ 切断実験時の研磨材濃度は約 33 wt% である。いずれの場合も X/d が増加するにつれて h/d は直線的に減少するが、 X/d が小さな領域における $Q_{air} = 28 \text{ L/min}$ の場合の h/d は、気中 ASJ のそれに匹敵する値をとる。また、図 9 でも述べたように、通気量もたらす効果は X/d が小である領域ほど顕著であり、僅かな通気量で h/d は大きく改善される。

以上を総合すると、気層被覆 ASJ の水中切断特性は以下のように考えられる。研磨材粒子の質量、形状、硬さ等を一定と仮定すれば、ASJ の切断能力は粒子衝突回数と粒子の衝突速度の関数であると考えられる。気中 ASJ の場合、通常のスタンドオフ距離範囲において研磨材粒子速度はほぼ一定で、研磨材粒子の衝突回数はその分散の程度すなわち ASJ の分裂の様相に対応するものと考えられる。従って集束した ASJ が形成されている場合、スタンドオフ距離増加に伴う切断能力の減少は僅かである。一方水中 ASJ においては、周囲水と ASJ 間の大きな速度勾配と粘性作用により研磨材粒子速度は大きく減衰され半径方向へも広がるので、ASJ の切断能力はスタンドオフ距離の増加とともに急激に低下する。但し、噴流周りに発生するキャビテーションは ASJ の加工能力低下を抑制する一定の効果をもつ⁽³⁾。通気鞘付きノズルを用いた場合、気層被覆 ASJ が実現される鞘出口近傍の切断能力は気中 ASJ のそれに近い。鞘出口から離れた位置においては、気相領域と周囲流体間の不安定性などによって、ASJ が気層で被覆された構造は気泡流中を ASJ が貫通する構造に変化する。このため、研磨材粒子速度は減速し、半径方向への分散も促進されるために ASJ の切断能力は気中の場合と比較して小さくなる。

Fig. 13 Change in depth of kerf h/d with distance from nozzle exit for various Q_{air}

4. 結 言

通気鞘付きノズルを用いた気層被覆水中 ASJ による切断実験を行い、スタンドオフ距離、通気流量および鞘部長さが切断能力に与える影響を実験的に明らかにした。さらに、通気鞘付きノズルから噴出する水中水噴流の高速ビデオ観察および流量分布測定を行い、気層被覆水中水噴流の流動構造と気層被覆水中 ASJ の切断特性の関連性について検討を行った。明らかとなった点は以下の通りである。

- (1) 通気鞘付きノズルを用いる場合、本実験の範囲内では、鞘部長さが短い方がより高い切断能力をもつ。
- (2) ASJ の加工能力は、 X/d が小である程少量の通気流量によって大きく改善されるが、過剰な通気を行っても水中切断能力はあまり向上しない。

- (3) 通気流量が比較的小さい場合、鞘内壁に沿って逆流が生じ、生じた逆流は鞘内部において噴流と干渉する。通気流量が十分大である場合には、鞘下流域においても気層被覆噴流が形成されるので、水中 ASJ の加工能力の低下を防ぐことが可能である。

本実験にあたっては日本大学工学部機械工学科流体システム工学研究室の卒業研究学生の助力を得た。記して謝意を示す。

文 献

- (1) R.M. Fairhurst, R.A. Heron, and D.H. Saunders, “DIAJET – A New Abrasive Water Jet Cutting Technique”, *Proc. 8th Int. Symp. Jet Cutting Tech.*, (1986), pp.395-402.
- (2) C. Brandt, H. Louis, G. Meier, and G. Tebbing, “Abrasive suspension jets at working pressures up to 200 MPa”, *Jetting Technology*, (1994), Mechanical Engineering Pub., pp.489-509.
- (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. 603 (2002), pp.3346-3351.
- (4) T. N. Hung, H. Louis, D. Peter and T. Senne, “Submerged application of abrasive water suspension jets (AWSJs)”, *Water Jetting*, (2004), BHR Group, pp.205-216.
- (5) C. Brandt, H. Louis, G. Tebbing, and Ch. Witzsche, “Abrasive water suspension jets for nuclear decommissioning – Final investigations of the first application”, *9th American Waterjet Conference*, (1997), Paper 50.
- (6) C. Brandt, S. Brandt, H. Louis, W. Milchers, Ch Von Rad, N. Eickelpasch, H. Kalwa, H. Alba, and H. Brehmer, “Application of abrasive water suspension jets for nuclear dismantling”, *Jetting Technology*, (1998), BHR Group, pp.467-476.
- (7) H. Alba, C. Brandt, H. Brehmer, N. Eickelpasch, H. Kalwa, H. Louis, and W. Reiter, “The application of abrasive water suspension jets (AWSJ) for the dismantling of Nuclear power plants”, *Proc. International Symposium on New Applications of Water Jet Technology*, Ishinomaki, (1999), pp.443-450.
- (8) 清水誠二, 西山貴教, 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.
- (9) Shimizu, S., Sakuma, M., Hitomi, K., and Peng, G., “Submerged cutting by abrasive suspension jet issuing from sheathed nozzle with ventilation”, *Water Jetting*, (2010), BHR Group, pp.435-441.
- (10) 清水誠二, 佐久間正仁, 人見孔太, 秋山健太, 彭國義, “アブレシブサスペンションジェットによる水中切断”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 77, No. 775 (2011), pp.437-445.
- (11) 伊東秀人, 彭國義, 清水誠二, “試作したサスペンションジェットの特性”, 噴流工学, Vol. 29, No. 1 (2012), pp.4-11.
- (12) S. Shimizu, “Effects of nozzle shape on structure and drilling capability of premixed abrasive water jets”, *Jetting Technology*, (1996), BHR Group, pp.13-26.
- (13) H. Ito, T. Aoyama, G. Peng, and S. Shimizu, “Observation of cavitating jets issuing from a sheathed nozzle”, *Proc. 9th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology*, (2009), pp.97-100.
- (14) H. Ito, G. Peng, and S. Shimizu, “Submerged abrasive suspension jets issuing from sheathed nozzle with ventilation”, *Proc. WJTA-IMCA Conference and Expo*, (2011).