

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06169

研究課題名(和文) 気泡流被覆水中サスペンション・ジェット脈動特性の解明および通気鞘の最適化

研究課題名(英文) Characteristics of flow pulsation of air ventilated submerged suspension jet and design optimization of ventilation nozzle head

研究代表者

彭 國義 (PENG, Guoyi)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：90295527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、水中構造物の切断工法を確立するため、通気水中アブレシブサスペンションジェット(以下ASJ)の流れ構造及び脈動特性を解明し、通気鞘流路の最適化によって気層被覆水中ASJを生成するノズルシステムを開発した。様々な条件で実験した結果、通気ジェット気層域パルセーションのストローハル数 St は、鞘内圧力で定義された擬似キャビテーション数 σ (sh)に依存することが示された。適切な通気流量で σ (sh)が約0.0005の場合、鞘出口に約20～30dの連続的気層域が形成される。スタンドオフ距離がこの範囲内では水中相対切断深さはほぼ1になり、気中と同程度の切断能力が得られることが検証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、流れの能動的制御の観点から、連続気層被覆水中ジェットを生成するノズルシステムを開発し、水中ジェットへの流体抵抗を大幅に低減する手法を提示した。その応用として、通気水中ASJを用いた水中切断工法を確立し、気中と同程度の切断能力を有することが検証された。福島第一原発など原子炉の解体作業に水中切断工法との重要な選択肢を示し、社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：High-speed abrasive suspension jet (hereafter ASJ) shows a peculiar processing property but it decreases quickly under submerged condition. Aimed to establish an effective method for submerged cutting, high-speed video observation on the flow structure of air ventilated jets was carried out and a ventilation nozzle system to generate air coated jet in submerged condition has been developed. Air coated jets pulsate periodically, and the dominant frequency of jet pulsation decreases with the increase of ventilation flowrate. Strouhal number st defined by the dominant frequency depends upon an altered cavitation number σ (sh) defined by the pressure in sheath. When σ (sh)=0.0005 at an appropriate ventilation flowrate, stable cavities of 20-30d in length covering the jet are formed. Cutting tests show that the relative kerf of submerged cutting reaches to nearly one within this range of standoff distance and an equal processing ability of the cutting in air is demonstrated.

研究分野：流体工学

キーワード：ウォータージェット 混相流 流れの可視化 流動制御 キャビテーション アブレシブサスペンションジェット 水中切断

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

ウォータージェット(以下 WJ)とは直径 0.1mm~数 mm 程度のノズルを用いて水を加圧・噴射することで得られる高速水噴流であり、洗浄や材料の表面改質、ゴムなど軟質材料の加工に用いられる。その上、金属などの硬質材料の加工を行うため、水噴流に研磨材を混入するアブレジブウォータージェットが開発され、その加工能力を飛躍的に向上させることができた。アブレジブウォータージェットは、その形成手法によって、「ノズルヘッド中で加速された水の噴流中に研磨材を混入する」アブレジブインジェクションジェット(以下 AIJ)と「予め水に研磨材を混入したスラリーを加圧して噴射する」アブレジブサスペンションジェット(以下 ASJ)の二種類に大別される。同じ噴射圧力の AIJ と比べ、ASJ はより優れた加工能力を有し、水中構造物の切断への適用が期待されている^①。しかし、水中切断の場合、水中に噴射される ASJ は早期に分裂し、スタンドオフ距離の増加にしたがってその加工能力が急激に低下するため、ASJ の水中加工有効スタンドオフ距離は非常に小さく、跳ね返り噴流によってノズル自身の損傷が課題である^②。水中切断用 ASJ の加工有効スタンドオフ距離を拡大するため、清水らはコリメーティング機能を持つ鞘パイプを取付ける鞘付ノズルが提案され、水中せん孔実験によりその有効性が検証された^③。さらに、ASJ の水中加工能力の向上を図るため、本研究者らにより通気孔を設けた鞘付ノズルシステムが研究・開発され、水中切断実験により、適切な通気流量で水中 ASJ の加工有効スタンドオフ距離を拡張するとともに加工能力を大幅に向上させる可能性が示され、水中 ASJ へ通気の有効性が確認された^④。しかしながら、鞘内に形成される気泡クラウドは周期的に伸縮し、通気水中 ASJ は強い脈動が示される。通気水中 ASJ 流れ構造の解明及び最適使用条件の確立は、水中 ASJ 実用化の重要課題である。

2. 研究の目的

水中切断に用いられる通気 ASJ は、(1) キャビテーション数が小さく (0.01 以下) 激しいキャビテーションが伴い、(2) 通気によってジェットのまわりに多数の気泡が含む気泡流領域が形成され、(3) 気泡クラウドが膨張・収縮に伴ってジェットを覆う気泡流は周期的に伸縮し、ジェット流れは強い脈動を示すなどの特徴がある。通気水中 ASJ の加工能力の向上を図るため、本研究では、実験および数値解析の両面から、通気水中 ASJ の構造とその脈動特性を解明し、通気手法の影響を考察して通気ノズルヘッドの構造改良を行い、通気 ASJ を用いた水中切断工法を確立し、その使用条件を提示する。

3. 研究の方法

(1) 模擬実験による通気水中 ASJ 脈動特性の可視化解析

Fig. 1 に本研究で用いた ASJ 生成装置の概略図を示し、(a) は ASJ システムの構成、(b) は流路図である。ASJ 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。使用する高圧ポンプ(マルヤマエクセル, MW7HP40L)の最高使用圧力は 35 MPa、吐出流量は 15 L/min であるが、ASJ を用いた試験片切断実験は噴射圧力が 20 MPa と 30 MPa で実施した。

Fig. 2(a) に通気水中 ASJ 用噴射ノズルヘッドの概略図を示し、のど部直径は d である。本研究では集中した ASJ を生成するため、フォーカス部長さが $10d$ の A10 ノズルを用いた。通気鞘の内径は $3d$ であり、ノズル出口(鞘入口)から鞘出口までの鞘部長さは L_{sh} と記す。Fig. 2(a) に示すように、ノズル出口と鞘出口からのスタンドオフ距離をそれぞれ X と X' で表し、 $X = X' + L_{sh}$ の関係をもつ。異なるノズルシステムで同じ X の場合の加工能力を比較して鞘の性能を評価することが可能である。また、通気鞘内キャビテーション流れの状態を表す無次元指標として、鞘内圧力 p_{sh} を基準とした擬似キャビテーション数 σ_{sh} を用いる。

水中 ASJ には研磨材粒子が含まれており噴流周囲水が短時間で濁ってしまうので、水中における ASJ の非定常脈動の観察は困難である。そのため、本研究では通気水中 ASJ の模擬実験を実施し、流体力学的相似条件の下で通気水中水噴流の高速ビデオ観察を行った。その結果により、力学的な相似性から通気水中 ASJ の脈動特性を推定した。ASJ と水噴流は、同一ノズルを用いて同じ噴射圧力で噴射しても気中における噴流の分裂挙動が異なるため、鞘付ノズルの空気吸引特性も異なる。これまでの気中噴流に関する実験結果に基づいて水噴流用ノズルヘッドの鞘部長さを $L_{sh}/d = 46$ に設定した場合、 $L_{sh}/d = 16$ の ASJ ノズル(A10)とほぼ同じ空気吸引性能を持つことが確かめた。そのため、本研究では $L_{sh}/d = 46$ の通気鞘付ノズルヘッドを用いて水を噴射して模擬実験を行い、通気水中 ASJ の非定常脈動特性を調べた。

(2) 通気水中 WJ 流れ構造の可視化観察及び数値解析

通気水中 WJ の内部流れ構造を観察するため、Fig. 2 (b) 示す可視化実験用通気ノズルヘッド

を製作し、Fig. 3 に示す縦型可視化計測実験装置に取り付けて実験を行った。実験では、通気鞘付ノズルを透明なアクリル製水槽の底面に垂直に設置し、水面を一定の高さに保つ。圧力タンクに貯めた加圧清水と圧縮空気をホースとバルブを経由してノズルヘッドへ接続する。バルブを開いてWJ ノズルより清水を鉛直方向上向け噴射し、空気バルブを開いて空気を供給して通気水中WJを形成させる。高速度ビデオカメラとLEDライトを水槽の両側に設置し、透過光を照射し

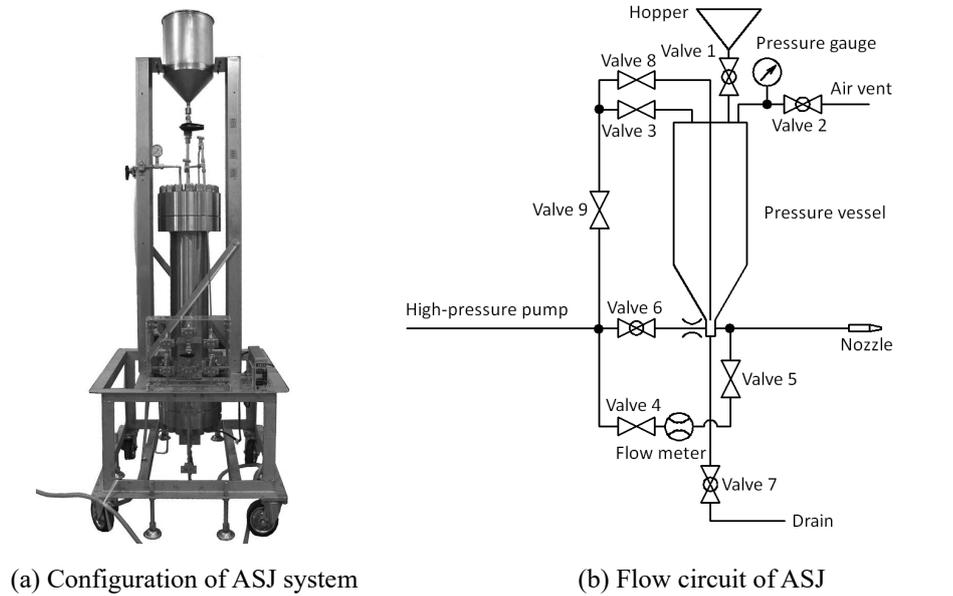


Fig. 1 High-pressure ASJ generation device

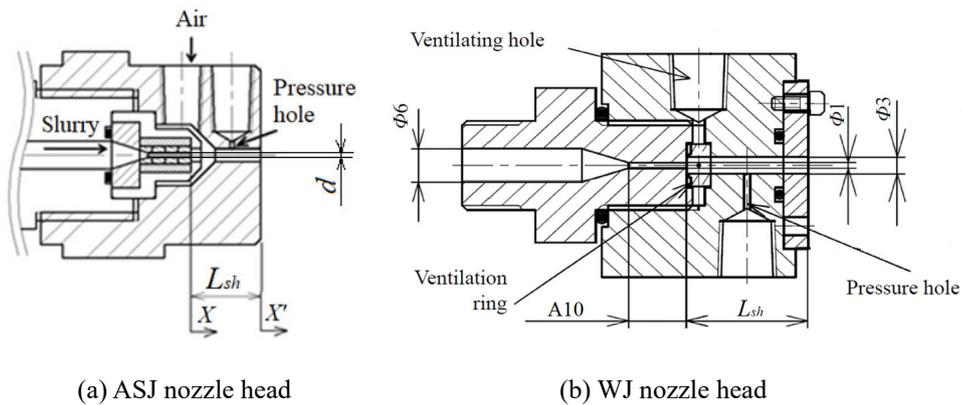


Fig. 2 Schematic of nozzle head with ventilation cap

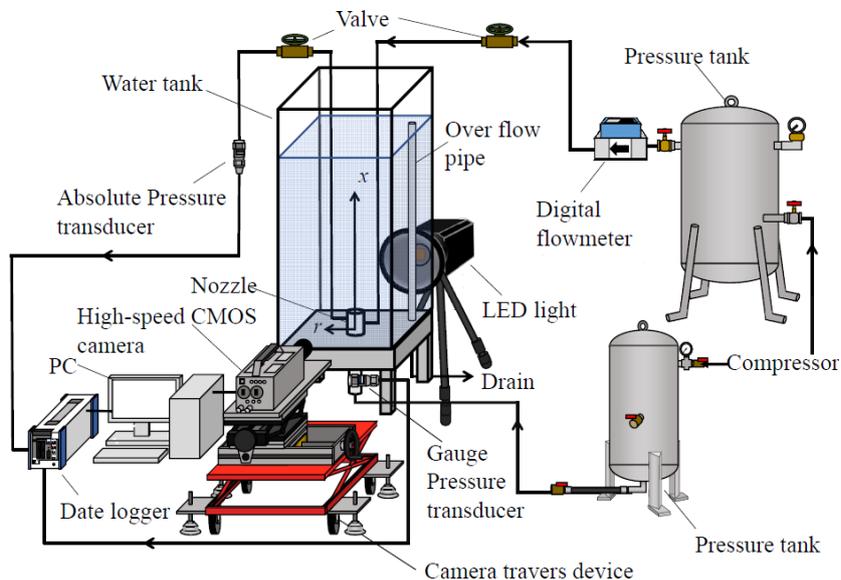


Fig. 3 Experiment setup for visualization measurement of air-ventilated jet

て通気水中 WJ の様相を撮影する。通気リングの交換によって通気流路構造を変更することが可能であり、本研究では、3 種類の代表的な通気手法を用いて可視化観察を行った。

また、ノズルヘッド内部流れ構造の可視化観察は困難であるため、本研究では、キャビテーション気泡の膨張・収縮を考慮する圧縮性混合流気泡キャビテーションモデルを用いて高速水中 WJ の圧縮性混合流解法を開発し、数値解析による通気流路の構造改良を試みた。

(3) 通気 ASJ による水中切断実験

開発された通気ノズルヘッドの性能を検証するため、金属材料の水中切断実験を行った。試験片はアルミニウム合金板 (JIS A5052P)、研磨材はガーネット #100 または #120 を用いる。容積が約 10L の研磨材充填容器に研磨材を充填し、Fig. 1(b) に示すバルブ V6, V9 と V5 を調整して約 110 秒間ほぼ一定の研磨材質量濃度 24.8wt% を有する ASJ の噴射ができる。したがって、水中切断実験はほぼ研磨材濃度を保って約 90 秒間実施する。その際、ノズルヘッドを垂直 6 軸多関節ロボット (Motoman HP20) に把持させ、所定のトラバース速度で水平方向に水中を移動させる。ノズルヘッドの水深は約 100mm で、ASJ は試験片に垂直して水平に噴射される。水中切断実験時は水面から空気を吸い込まないように消波板を使用する。

4. 研究成果

(1) 通気水中 WJ 内部流れ構造の可視化観察

本研究では、異なる通気流路を形成する通気リングを用いて通気水中ジェットの流れ構造を観察し、その影響を調べた。例として、Fig. 4 には $4 \times \phi 0.5$ の円孔による通気 A 方式、Fig. 5 には幅 2 ミリのスロートによる通気 B 方式を用いて形成された通気水中 WJ の高速度ビデオカメラの瞬時画像を示す。非通気の場合は、Fig. 4(a) と Fig. 5(a) に示すように通気 A 方式と通気 B 方式ともほぼ同じパターンのキャビテーション気泡雲の放出が示されている。通気の場合、Fig. 4(b) には気泡流被覆の拡散した WJ が形成されていることが読み取れる。一方、Fig. 5(b) には鞘出口に大きなキャビティが形成され、その中に水のジェットが噴射されていることが示唆されている。中心軸近くのジェット表面は光の反射で灰色に見え、そのジェットを囲む外側の黒い領域はキャビティの界面である。したがって、連続的気層域に覆われる WJ の形成が観察された。キャビティ内の領域は気中とほぼ同じ環境であり、ジェットへの抵抗が飛躍的に低減する。ジェットを覆うキャビティが周期的に放出することで一定の影響があるが、このような連続気層域の範囲内では水中でも気中と同程度の加工能力を得ることが可能と考えられる。

(2) 気層被覆水中 WJ の脈動特性

通気水中 WJ を覆う気層域の伸縮特性を解明するため、高速ビデオ画像に解析により噴流脈動の周波数を求めた。通気水中 ASJ の流動様相を推定するため、本研究では、水中切断実験に用いた水中 ASJ 用通気ノズルヘッドとほぼ同等な空気吸引特性を有する水中 WJ 用通気ノズルヘッドを用いて通気水中 WJ の高速ビデオ観察をし、時系列画像グレーレベルのフリエー解析を行った。

通気水中ジェット脈動特性の重要パラメータとして、噴流脈動卓越周波数 f 、噴流の理論速度 V_{th} と鞘の内径 d_{sh} を用いて定義された無次元ストローハル数 St を用いる。Fig. 6 にストローハル数

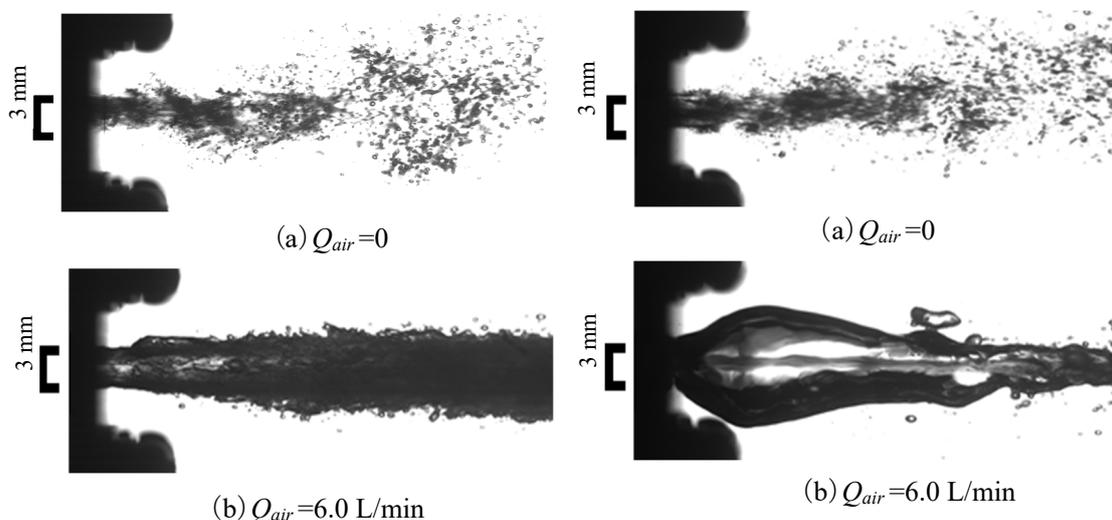


Fig. 4 Instantaneous photograph of submerged jet ventilated by A type sheath

Fig. 5 Instantaneous photograph of submerged jet ventilated by B type sheath

の逆数 $1/St_t$ と擬似キャビテーション数 σ_{th} の関係を示す。ジェットを覆う連続気層域脈動の卓越周波数に対応する $1/St_t$ は、噴射圧力や通気流量に関係なく破線で挟まれた領域内にあり、擬似キャビテーション数 σ_{th} だけに依存することがわかる。 σ_{th} の低下にしたがって、 $1/St_t$ は実線で示す傾向で上昇することが読み取れる。 $\sigma_{sh} = 0.0005$ 付近では $1/St_t \cong 100$ 程度となり、直径 $d_{sheath} = 3$ mm の鞘出口に形成される連続的気層域の長さは約 20~30 mm であると推定される。鞘部長さ $L_{sh} = 16d$ のノズルヘッドを用いた場合、ノズル出口からの距離 $X/d = (X' + L_{sh}) = 36 \sim 46$ の範囲内では相対的に高い切断能力が得られると示唆された。

(3) 通気水中 ASJ の切断能力の検証

開発された通気ノズルヘッドの性能を検証するため、アルミニウム合金試験片の水中切断を行った。 Fig. 7 に噴射圧力が 30 MPa、トラバース速度が 2 mm/s のときの水中切断深さ h_{sub} の実験結果を示す。ここで、横軸は通気流量 Q_{air} を表す。丸記号は $X/d = 26$ 、三角記号は $X/d = 56$ の場合の切断深さ、エラーバーはその値の変動範囲を表す。 $X/d = 56$ の場合、適切な通気流量 ($Q_{air} = 60$ L/min) で最大の水中切断能力が得られることが確認された。

また、ASJ の気中切断能力と比較して、同一の試験片を用いて同一の噴射パラメータの下で気中または水中での切断実験を行い、噴流の周囲条件の影響を評価するため、同一条件の下で ASJ の気中平均切断深さ h_{in-air} との比である相対切断深さ $h^* = h_{sub}/h_{in-air}$ を用いる。 Fig. 8 は、異なる噴射圧力 P_i 、水深 H とスタンドオフ距離 X/d での相対切断深さをまとめたものである。横軸は設定された通気流量で測定された鞘内圧力で求めた擬似キャビテーション数 σ_{sh} を表す。 $\sigma_{sh} = 0.0005$ の場合、 $X/d = 26$ における相対切断深さはほぼ 1 になり、気中と同じ程度の切断能力を有することが示された。また、スタンドオフ距離 $X/d = 56$ における相対切断深さは 0.8 程度まで収まり、可視化観察より推定された連続気層域の長さに一致するものと考えられる。

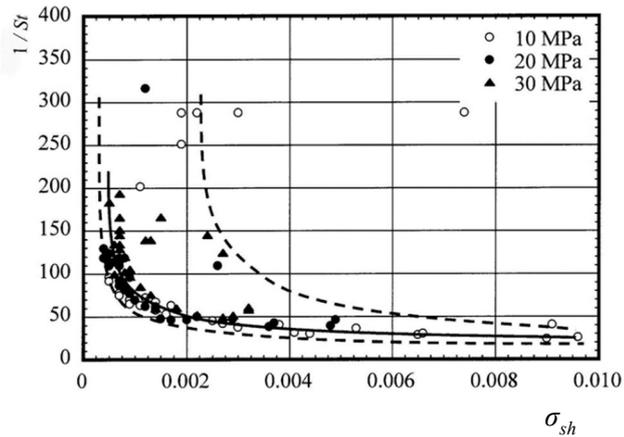


Fig. 6 Relation between St and σ_{sh}

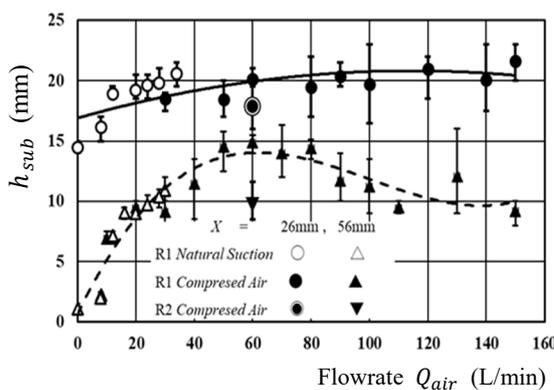


Fig. 7 Kerf of submerged cutting by ventilated ASJ ($P_i = 30$ MPa)

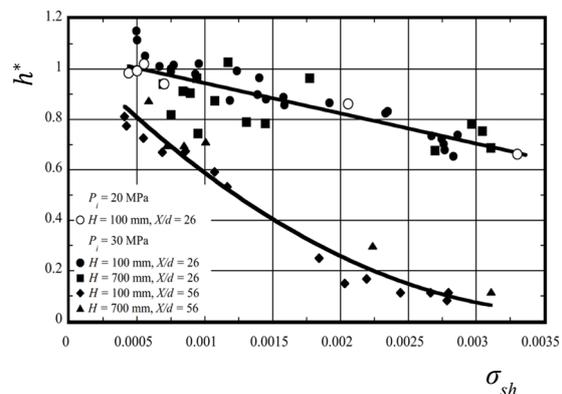


Fig. 8 Relative kerf of ASJs under submerged condition

<引用文献>

- ① R. Kovacevic, et al., 1997, State of the Art of Research and Development in Abrasive Waterjet Machining. J. Manuf. Sci. Eng., 119(4B), 776-785.
- ② Summers D. A., 2003, Waterjetting Technology, CRC Press, 642p.
- ③ 清水誠二, 西山貴教, 志村孝夫, 表龍之, 2002, アブレジ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, 68(676), 3346-3351.
- ④ 清水誠二, 西方博紀, 彭國義, 小熊靖之, 2015, アブレジブサスペンションジェットの水中切断特性, 日本機械学会論文集 B 編, 81(831), 15-00361.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Peng Guoyi, Tamura Yukiteru, Oguma Yasuyuki, Klich Jiri	4. 巻 1
2. 論文標題 Effect of Ventilation to Abrasive Suspension Jet Under Submerged Condition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in Water Jetting	6. 最初と最後の頁 28 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-53491-2_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 J. Klich, D. Klichova, G. Peng	4. 巻 1
2. 論文標題 Submerged abrasive water jet piercing/drilling: preliminary tests	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in Water Jetting	6. 最初と最後の頁 91-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-53491-2_10	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 G. Peng, M., Mori, T. Tazaki, Y. Oguma	4. 巻 240
2. 論文標題 Numerical simulation of unsteady cloud cavitation: a comparative study of compressible mixture models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	6. 最初と最後の頁 062043 ~ 062043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1755-1315/240/6/062043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shimizu Seiji, Peng Guoyi, Oguma Yasuyuki	4. 巻 1
2. 論文標題 AIR COATED ABRASIVE SUSPENSION JETS UNDER SUBMERGED CONDITION	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Modern Machinery Science Journal	6. 最初と最後の頁 2214 ~ 2217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17973/MMSJ.2018_03_201770	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Peng Guoyi, Wakui Ayaka, Oguma Yasuyuki, Shimizu Seiji, Ji Hong	4. 巻 6
2. 論文標題 Periodic Behavior of Cavitation Cloud Shedding in Submerged Water Jets Issuing from a Sheathed Pipe Nozzle	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Flow Control, Measurement and Visualization	6. 最初と最後の頁 15~26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4236/jfcmv.2018.61002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計16件(うち招待講演 4件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 向山友祐, 彭 國義, 小熊靖之
2. 発表標題 通気水中ウォータージェット流れ構造の高速度ビデオカメラ観察
3. 学会等名 第63回日本大学工学部学術研究報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 G. Peng, Y. Tamura, Y. Oguma, J. Klich & H. Quan
2. 発表標題 Effect of ventilation on the performance of abrasive suspension jet for submerged cutting
3. 学会等名 PRIC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 G. Peng, Y. Tamura, Y. Oguma, D. Klichova, J. Klich
2. 発表標題 Cutting of submerged objects by abrasive suspension jet
3. 学会等名 International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 G. Peng, Y. Tamura, A. Wakui, Y. Oguma & H. Quan
2 . 発表標題 Effect of ventilation on the behavior of submerged cavitating water Jet
3 . 学会等名 3rd International Symposium of Cavitation and Multiphase Flow (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 G. Peng, Y. Tamura, Y. Oguma & J. Klich
2 . 発表標題 Effect of ventilation to abrasive suspension jet under submerged condition
3 . 学会等名 Waterjet 2019 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 D. Klichova, J. Klich & G. Peng
2 . 発表標題 Evaluation of surface topography created by abrasive suspension jet under submerged condition
3 . 学会等名 Waterjet 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 J. Klich, D. Klichova & G. Peng
2 . 発表標題 Submerged abrasive water jet piercing/drilling: preliminary tests
3 . 学会等名 Waterjet 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 G. Peng, Y. Oguma, S. Shimizu
2. 発表標題 Flow characteristics of air-ventilated water jets under submerged condition
3. 学会等名 24th International Conference on Water Jetting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 G. Peng, Y. Oguma
2. 発表標題 Numerical simulation of unsteady cavitation in a submerged water jet by compressible bubbly mixture flow method
3. 学会等名 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 彭 國義
2. 発表標題 通気水中ウォータージェットの流動特性と水中切断
3. 学会等名 ウォータージェット学会総会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田村住暉, 清水清二, 彭國義, 小熊靖之
2. 発表標題 気層被覆水中水噴流の観察
3. 学会等名 ウォータージェット技術年次報告会 (論文集)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 G. Peng, Y. Oguma, S. Shimizu
2. 発表標題 Numerical simulation of unsteady cavitating jet by a compressible bubbly mixture flow method
3. 学会等名 AWG-IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 G. Peng, T. Itou, Y. Oguma, S. Shimizu
2. 発表標題 Effect of ventilation on the velocity decay of cavitating submerged water jet
3. 学会等名 4th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 G. Peng
2. 発表標題 Flow characteristics of ventilated water jets under submerged condition
3. 学会等名 International Workshop on Water-Jet Propulsion 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 清水誠二, 彭國義, 小熊靖之
2. 発表標題 通気鞘付きノズルを用いて形成される水中水噴流の特性
3. 学会等名 2016年度ウォータージェット技術年次報告会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤隆之, 彭 國義, 小熊靖之, 清水誠二
2. 発表標題 PIVを用いたキャピテーション・ウォーター・ジェットの速度場計測
3. 学会等名 2016年度ウォータージェット技術年次報告会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	向山 友祐 (MUKAIYAMA Yusuke)		
研究協力者	田村 往暉 (TAMURA Teruyuki)		
研究協力者	クリヒ ジリ (KLICH Jiri)		
研究協力者	クリチョバ ダーグマ (KLICHOVA Dargma)		
研究協力者	權 輝 (QUAN Hui)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	小熊 靖之 (OGUMA Yasuyuki) (00608127)	日本大学・工学部・専任講師 (32665)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関