

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420124

研究課題名(和文) 気泡流被覆水中アブレシブ・サスペンション・ジェット生成法の確立

研究課題名(英文) Establishment of the generation method of air-coated abrasive suspension jet under submerged condition

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：福島第一原発など廃炉に決まった原子炉の解体作業に水中構造物の切断工法が不可欠となるが、強力なアブレシブ・サスペンション・ジェット(以下、ASJ)を水中切断に用いた場合、スタンドオフ距離の増加に伴ってその加工能力が急激に衰えることが課題になっている。水中ASJの性能向上を図るため、本研究では、通気鞘付きノズルを用いて気泡流被覆水中ASJの生成手法を確立し、流れの構造解析および水中切断実験によって通気鞘の寸法と通気流量等の使用条件を検討した。

研究成果の概要(英文)：The cutting method of underwater structures is essential to dismantle a nuclear plant decided on decommissioning such as Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. However, when the Abrasive Suspension Jet (ASJ, hereafter) technology is applied the processing capability quickly declines with increase of standoff distance. In order to enhance the performance of ASJ, the method to generate air-coated ASJ by using sheathed nozzle with ventilation is established in this work, and the effects of sheath dimension and ventilation air flow rate are examined through flow analysis and material cutting tests.

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 キャピテーション 気泡流 可視化計測 数値解析

1. 研究開始当初の背景

ウォータージェットとは直径 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、加工物の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。さらに、金属やコンクリートなど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シブジェットが開発され、ウォータージェットの加工能力を飛躍的に向上させることができた。アブレシブジェットは、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シブインジェクションジェット (以下 AIJ と表記) 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シブサスペンションジェット (以下 ASJ と表記) の二種類に大別される。システムの複雑性およびノズルの摩耗など構造上の問題で ASJ の実用化が遅れているが、早期に実用化された AIJ と比べ、ASJ はより優れた加工能力を持っているため、水中構造物の切断への適用が期待されている。しかし、ASJ を水中切断に用いた場合、水中に形成される 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 ASJ の加工能力が急激に減少するため、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が損傷する危険性もある。

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、本研究担当者らより、スタンドオフ距離を大きく取ってもその加工能力が大きく低下しない鞘付きノズル (ノズルヘッドにコリメーティング機能を持つ鞘パイプを取付けるもの) が提案され、水中せん孔実験により、鞘に空気を自然吸引させることで ASJ の加工有効スタンドオフ距離が大いに増加することが確認された。しかしながら、鞘に形成される ASJ の流れ構造が複雑であり、ASJ に働く流体抵抗や通気により ASJ の加工性能への影響などは解明されていない。水中 ASJ の実用化を図るためには、鞘に形成される ASJ の構造解析によって鞘付きノズルへの通気手法を検討し、低摩擦抵抗の収束した ASJ を生成することができる高性能鞘付きノズルシステムの開発が必要である。福島第一原発の廃炉作業に必要な水中構造物の切断工法を確立する立場から、本研究課題に対する国内外の関心は高い。

2. 研究の目的

通気鞘内に形成されるジェット流れは、

- (1) 多数の気泡からなる気層に覆われる、
 - (2) 気泡クラウドの膨張・収縮に伴って周期的に伸縮する、
 - (3) 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う、
- などの特徴があり、ASJ の加工能力は

ジェットと鞘壁面とのせん断層に働く粘性抵抗に大きく影響されることが考えられる。また、鞘付きノズル形状の最適化によって集束したジェットを形成することができれば、ASJ の切断能力をより向上させることが可能である。このような背景の下で、本研究は、水中 ASJ の性能向上を図るために、通気鞘付きノズルによる気泡流被覆水中 ASJ の生成法を確立し、流れの構造解析および水中切断実験により鞘付きノズルシステムの寸法と最適使用条件を見出すことを目的としてなされたものである。

3. 研究の方法

(1) 気泡流被覆水中ウォータージェットの高速度ビデオカメラ観察と画像解析

図 1 に本研究で製作した横型水中ウォータージェット実験装置の概略を示す。幅 690 mm、高さ 690 mm、長さ 2092 mm の大気開放型水槽に通気鞘付ノズルヘッドを取り付け、水中で水噴流を水平に噴射する。ノズル出口における水深は約 210 mm である。吸込渦が発生して水面から空気吸引することを避けるため、ノズルヘッド上部の水面は空気吸込防止板で覆っている。鞘基部の吸引用ポートからはビニールチューブを介して大気圧の空気を自然吸引させる。噴流の高速度ビデオ観察は、主に透過光で行う。通気流量は気体用マスフローメータ (アズビル (株)、CMS0050 型) を用いて測定する。鞘内キャビテーション圧力 P_{Sheath} はノズルキャップの圧力測定孔にスプリングホースを介して絶対圧測定用圧力変換器

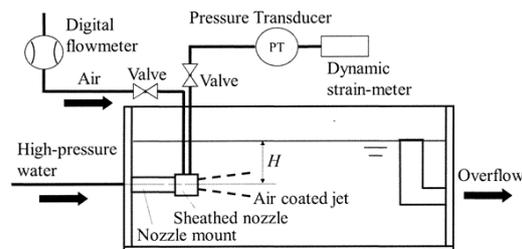


Fig. 1 Experiment setup for submerged water jets

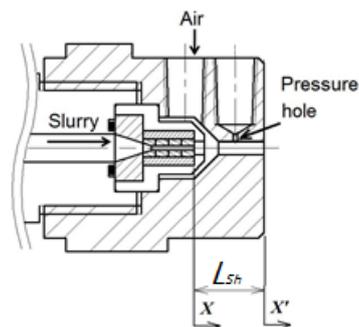


Fig. 2 Schematic diagram of nozzle head with ventilation hole

(共和電業, PAB-A-1MP)を接続することで測定する. 形成された気泡流被覆水中水噴流の様相は高速度ビデオカメラ (Photron, FASTCAM SA-X2) を用いて観察する. 通気鞘付ノズルによる気泡流被覆水中水噴流の状態を表す指標として, 鞘内キャビテーション圧力を基準としたキャビテーション数 σ_c を定義する.

$$\sigma_c = \frac{p_d - p_{sh}}{P_i - p_d} \quad (1)$$

ここで P_i, p_d, p_c はそれぞれ, ジェット噴射圧力, 噴流周囲圧力, 鞘内圧力である.

図2に水中切断実験に用いた通気鞘付ノズルヘッドの概略を示す. ノズル出口からの距離を X , 鞘部出口からの距離を X' と定義し, $X = X' + L_{Sheath}$ の関係をもつ. 異なるノズルシステムで X が同じ場合の加工能力の変化は鞘による効果である.

(2) PIVによる通気水中ウォータージェットの速度場計測

図3に水中ウォータージェットの PIV 実験装置の概略を示す. 気泡流被覆水中ウォータージェットを形成するため作製された通気鞘付きノズルを縦型大気開放水槽の底面中心に装着し, 高圧ポンプによって加圧された清水もしくは圧力タンク内の加圧された清水をノズルへ供給し, 鞘通気口から供給された空気と共に通気鞘付きノズルより鉛直方向に噴出させる. 通気流量は, 面積式流量

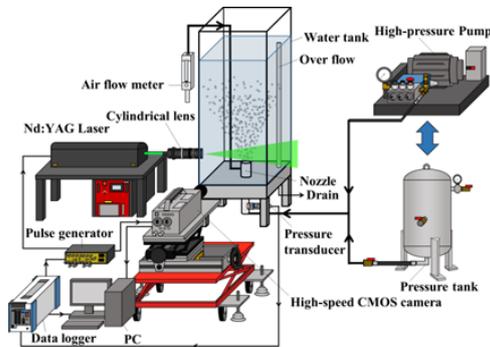


Fig. 3 Experiment setup for PIV of air-ventilated submerged water jets

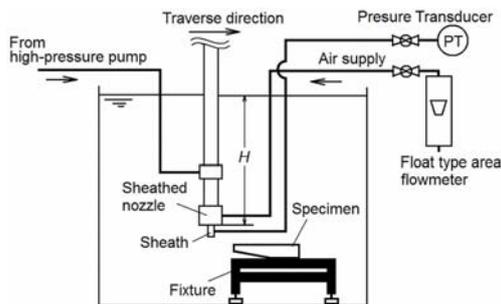


Fig. 4 Experiment setup for submerged cutting by air-ventilated ASJ

計を用いて測定する. ジェット噴射圧力は, ノズル上流に設置した圧力変換器によって測定する.

水中ウォータージェット速度場の計測は, Nd:YAG レーザー, 高速度 CMOS カメラ, パルスジェネレーターで構成された PIV システムを用いる. YAG レーザーとシリンドリカルレンズを用いてライトシートを形成し, ノズルの中心軸に合わせて側方からウォータージェットを照射する. キャビテーションジェット内の気泡から発せられる散乱光によって流れを可視化し, 高速度 CMOS カメラで撮影する. これらの PIV システム機器の動作は, パルスジェネレーターで同期させており, ノズル上流に設置した圧力変換器からの信号をもとに, 圧力と PIV 画像を同時記録する. カメラの解像度は $1,024 \times 1,024$ Pixels と設定され, 撮影速度は 5,000 fps である.

(3) 混合流モデルによる水中ウォータージェット流れの数値シミュレーション

前述の可視化実験では, 噴射圧力の増加に伴ってノズル出口近傍多数気泡が集まり, その内部を直接観察することが難しく, 激しいキャビテーションを伴う高速ウォータージェット内部流れ構造の解析と予測は難問の一つになっている. キャビテーション流れの数値解析に幾つかの手法が提案されたが, 激しいキャビテーションを伴う高速ウォータージェットへの適用は, また様々な課題がある. 本研究では, 高速水中ウォータージェットに伴う非定常キャビテーション流れの数値解析に注目し, キャビテーション気泡膨張・収縮の影響を考慮する圧縮性混合流気泡キャビテーションモデルに気泡半径の近似解法を導入して, 圧縮性混合流気泡キャビテーションモデルの簡略解法を開発する. 鞘付きノズルによる水中ウォータージェットの数値シミュレーションに適用し, キャビテーションウォータージェットの流れ構造およびコア速度の減衰を調べる.

(4) 気泡流被覆 ASJ による水中切断

通気鞘付きノズルを用いて生成された水中 ASJ の性能を調べるため, 水中切断を行った. Fig. 4 に水中切断実験に用いる水槽と実験装置の概略を示す. 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から構成されている. 研磨材充填容器の容積は約 10 L で, 最高使用圧力 35 MPa, 吐出流量 15 L/min の高圧ポンプ (マルヤマエクセル, MW7HP40L) を用いるが, 実験時の噴射圧力 P_i は 30 MPa 一定とする. 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 を用いる. 切断実験の際は, ノズルヘッドを垂直多関節ロボット (Motoman HP20) に把持させ, 所定のトラバース速度 V_T で水中を移

動させる。ノズルヘッドの水深は約 100 mm で ASJ は水面に対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。鞘への通気は内径 6 mm のビニールチューブを用いて空気を供給する。空気流量はチューブの途中に設けた弁で調整し、チューブ端に取り付けた面積式流量計を用いて測定する。鞘内の圧力は、ノズルキャップの圧力孔にスプリングホースを介して絶対圧測定用圧力変換器（共和電業、PAB-A-1MP）を接続して測定する。

4. 研究成果

(1) 水中ウォータージェットの流れ構造

Fig. 5 に例として発達した水中ウォータージェットの数値解析結果を示す。ここで、ジェット噴射圧力は $P_j=1.0\text{Mpa}$ 、キャビテーション数は $\sigma=0.1$ である。(a) は圧力分布、(b) は気相の体積率 GVF のコンター図を示したものであり、黒い矢印は速度ベクトルを表す。その結果、ノズル入り口で圧力が急激に低減し、鞘出口近くまで低圧領域が形成され、発

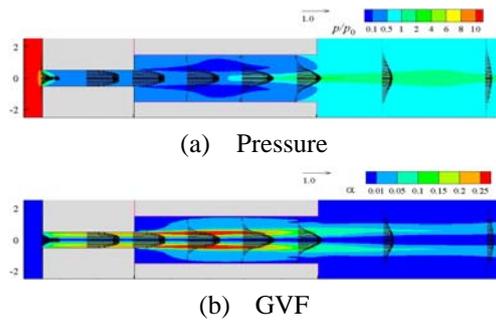


Fig.5 Temporal distribution of developed submerged water jet ($\sigma=0.1, Re = 4.5 \times 10^4$)

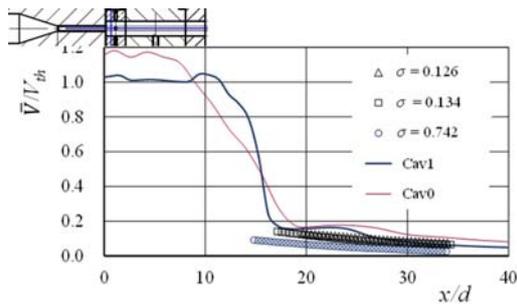


Fig. 6 Variation of velocity along central axis

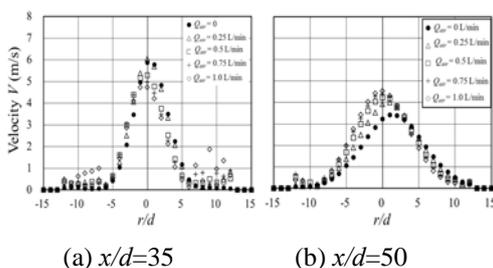


Fig. 7 Velocity profiles evaluated by PIV

達したキャビテーション気泡雲は、ジェットまわりの断層に集中して下流側へ周期的に放出することが示された。

Fig. 6 に中心軸に沿って噴流速度の変化を示す。ここで、実線は均質キャビテーションモデル (Cav0) と気泡流キャビテーションモデル (Cav1) による計算結果、 Δ , \square , \circ 記号は異なるキャビテーション数の場合の PIV 結果を表す。よって、通気しない場合、鞘出口から噴流速度が急激に減衰し、水中ウォータージェットの加工能力が急激に低下することが示唆された。

(2) 通気水中ウォータージェット中心軸噴流速度の減衰

水中ウォータージェットの加工能力を向上させるため、鞘付きノズルを用いて気泡流被覆水中ウォータージェットを形成し、PIV を用いてその速度分布を調べた。Fig. 7 に異なる通気流量における時間平均の速度プロファイルを示す。Fig. 7 (a) は $x/d = 35$ で鞘出口近くの断面、(b) は $x/d = 50$ で下流側断面における速度分布を示したものである。非通気の場合 ($Q_{air} = 0$) と比べると、通気によって鞘出口での流速が低下する傾向があるが、 $x/d = 50$ での下流側では通気した場合の中心軸流速が速くなる。高压噴射の場合通気によって噴流速度分布の変化をさらに検討することが必要であるが、通気によって水中ウォータージェット中心軸噴流速度の減衰が抑制されることが分かり、ASJ の水中加工能力の向上につながることを示唆された。

(3) 気泡流被覆水中ウォータージェットの脈動特性

気層被覆水中 ASJ の切断性能向上を図るためには、その流動の様相を解明することが必須である。しかし、水中 ASJ には研磨材粒子が含まれており、噴流周囲水が濁ってしまうため、水中における ASJ 噴流の直接観察は困難である。そのため、水中水噴流について高速ビデオ観察および画像解析を行いその流れ構造を調べる。一方、気層被覆水中水噴流の観察結果から気層被覆水中 ASJ の流動様相を推定しようとする場合、ASJ と水噴流とは気中における噴流の分裂挙動が異なるために、同等の空気吸引特性を持つ鞘付きノズルヘッドを用いる必要がある。本研究では、水中切断実験に用いた水中 ASJ 用通気鞘付きノズルヘッドとほぼ同等な空気吸引特性を有する水中水噴流用通気鞘付きノズルヘッドを製作し、気層被覆水中水噴流の高速ビデオ観察を行った。気泡流被覆水中水噴流の高速ビデオカメラ画像から、鞘出口下流側 $5.0d$ ($x/d = 5$) の位置において噴流軸の垂直方向に 1 ピクセル幅の画素を抽出する。Fig. 8 に時系列的に並べた画像の例を示す。ここで

噴射圧力 $P_j = 10$ MPa であり, Fig. 8 (a) ~ (d) の通気流量 Q_{air} は 0, 12.0, 24.0, 36.0 L/min に変化させている. 図の結果より, 気層域が脈動していることが確認され, Q_{air} の増加にともない脈動が規則的になり, その周波数が低下することがわかる.

前述の時系列画像から噴流軸の垂直方向に平均したグレーレベルの時間的変化を調べ, 周波数解析を行うことで気層域の脈動の卓越周波数 f を求め, 次式でストローハル数 St を定義する.

$$St = \frac{f \cdot d_{sh}}{V_{th}} \quad (2)$$

ここで, d_{sh} は鞘の直径, V_{th} は損失を無視した理論噴出速度である.

Fig. 9 にストローハル数の逆数 $1/St$ とキャビテーション数 σ_c の関係を示す. ジェットまわりの気層域脈動の卓越周波数に対応する $1/St$ は, 主要な脈動のプロットは噴射圧力や空気供給方法に無関係に実線で示した線上に乗ることがわかる. 即ち, 気層域脈動の周波数は鞘内圧のキャビテーション数に依存する.

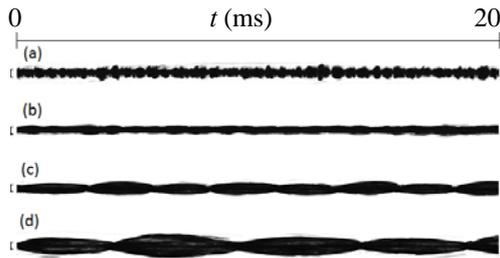


Fig.8 Temporal fluctuation of jet width near the exit of sheath-pipe ($P_j=10$ MPa, $x'/d=5$)

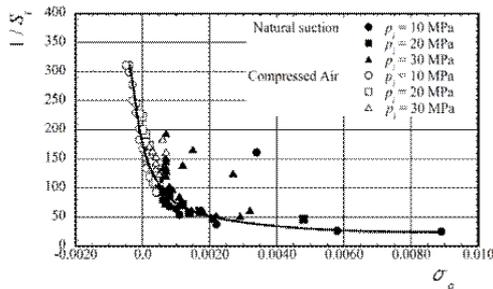


Fig. 9 Relation between $1/St$ and σ_c

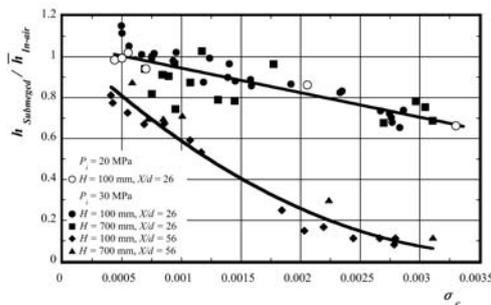


Fig. 10 Relative cutting depth of ASJ under submerged condition

(4) 気泡流被覆 ASJ による水中切断

通気鞘付きノズルを用いて形成される気層被覆水中 ASJ の加工能力は気中 ASJ と比較して低下するが, その原因は噴流の周囲条件によって研磨材粒子の速度が異なると考えられる. 噴流周囲条件の影響を評価するため, 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, 水中 ASJ の切断性能の指標として, 下記の相対切断深さ h^* を用いる.

$$h^* = \frac{h_{ASJ_submerged}}{h_{ASJ_in-air}} \quad (3)$$

ここで, h_{ASJ_in-air} は ASJ の平均気中切断深さ, $h_{ASJ_submerged}$ は気中切断実験と同一 X/d における水中切断深さを表す.

Fig.10 には, $L_{Sheath} / d = 16$ の通気鞘ノズルヘッドを用いて水中切断実験を行った結果を示す. ここで, 縦軸は気層被覆水中 ASJ の相対切断深さ, 横軸は鞘内圧力で定義されたキャビテーション数 σ_c を表す. ▲と■記号は $X/d = 56$, 他の記号は $X/d = 26$ での切断深さを表す. $\sigma_c = 0.0005$ の場合, $X'/d = 10$ ($X/d = 26$, 鞘部出口からの距離 $X' = 10$ mm) 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が得られることが示された.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① G. Peng, A. Wakui, Y. Oguma, S. Shimizu and H. Ji, Periodic behavior of cavitation cloud shedding in submerged water jets issuing from a sheathed pipe nozzle, Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 6(1), 2018, pp. 15-26. (査読有)
DOI: 10.4236/jfcmv.2018.61002
- ② G. Peng, K. Okada, C. Yang, Y. Oguma and S. Shimizu, Numerical simulation of unsteady cavitation in a high-speed water jet, International Journal of Fluid Machinery and Systems, 9, 2016, pp. 66-74. (査読有)
DOI: 10.5293/IJFMS.2016.9.1.066
- ③ G. Peng, C. Yang, Y. Oguma and S. Shimizu, Numerical analysis of cavitation cloud shedding in a submerged water, Journal of Hydrodynamics, 6, 2016, pp. 986-993. (査読有)

DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60700-X

- ④ G. Peng, G. Tryggvason and S. Shimizu, Two-dimensional direct numerical simulation of bubble cloud cavitation by front-tracking method, IOP Conf. Seri.: Materials Science and Engineering, 72, 2015, pp.1-7. (査読有)
DOI: 10.1088/1757-899X/72/1/012001
- ⑤ 清水誠二, 西方博紀, 彭國義, 小熊靖之, アプレシ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, 81,
2015, pp.1-11. (査読有)
DOI: 10.1299/transjsme.15-00361

[学会発表] (計 10 件)

- ① G. Peng, T. Itou, Y. Oguma and S. Shimizu, Effect of ventilation on the velocity decay of cavitating submerged water jet, 4th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control (FSSIC2017), Tokyo, Japan, 21-24, Aug., 2017, pp.162-163. (Paper No. A122 on USB).
- ② S. Shimizu, G. Peng and Y. Oguma, Evolution of abrasive suspension jets, Proceedings of 11th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology (PRIC-WJT 2016), Xuzhou, China, Oct. 16-18, 2016, 4-1, pp. 393-401.
- ③ G. Peng, Y. Oguma and S. Shimizu, Unsteady behavior of cavitating water jet issuing from a submerged orifice nozzle, Proceedings of 11th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology (PRIC-WJT 2016), Xuzhou, China, Oct. 16-18, 2016, 1-1, pp.1-5.
- ④ 清水誠二, 渡辺修二, 彭國義, 小熊靖之: アプレシブジェット研磨材供給チューブ内流れの観察, 2015 年度ウォータージェット技術年次報告会論文集, pp. 39-45, 2016. 2. 26 (東京).
- ⑤ 彭國義, 小熊靖之, 清水誠二: 鞘付きノズルにおける非定常キャビテーション気泡流の数値シミュレーション, 2015 年度ウォータージェット技術年次報告会論文集, pp. 47-51, 2016. 2. 26 (東京).
- ⑥ G. Peng, Y. Oguma and S. Shimizu, Numerical analysis of cavitation cloud shedding in a submerged water jet, Proceedings of Twelfth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Oct. 27-29, 2015, pp.666-667.
- ⑦ 清水誠二, 西方博紀, 彭國義, 小熊靖之: アプレシブサスペンションジェット水中切断, 日本機械学会 2015 年度年次大会 DVD 論文集「No.15-1」, S0510103, 2015. 9. 13-16 (札幌).
- ⑧ G. Peng, Y. Oguma and S. Shimizu, Visualization observation of cavitation cloud shedding in a submerged water jet, Proceedings of the 3rd Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control, Perth, Australia, July 5-9, 2015. (Paper No. A063)
- ⑨ 石崎賢至, 彭國義, 小熊靖之, 清水誠二: 鞘付きオリフィスノズルを用いたウォータージェット流れの可視化観察, 2014 年度ウォータージェット技術年次報告会論文集, pp. 27-32, 2015. 1. 23-24 (金沢).
- ⑩ 彭國義, 清水誠二: 相変換を伴うウォータージェット流れの数値解析手法とその応用, 2014 年度ウォータージェット技術年次報告会論文集, pp. 39-44, 2015. 1. 23-24 (金沢).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

彭 國義 (PENG, Guoyi)
日本大学・工学部・教授
研究者番号: 9 0 2 9 5 5 2 7

(2) 研究分担者

清水 誠二 (SHIMIZU, Seiji)
日本大学・工学部・教授
研究者番号: 8 0 1 5 4 2 9 3

(3) 研究協力者

TRYGGVASON, Greater
小熊 靖之 (OGUMA, Yasuyuki)
西方 博紀 (NISHIKATA, Hironori)
石崎 賢至 (ISHIZAKI, Kenji)
岡田 邦宏 (OKADA, Kunihiro)
伊藤 隆之 (ITO, Takayuki)
和久井 彩香 (WAKUI, Ayaka)