

UAVを用いたダム放流時の流況観察と 活用方法に関する研究

STUDY ON FLOW CONDITION OBSERVATION AND UTILIZATION METHOD OF DAM DISCHARGING BY USING UAV

喜多村 雄一¹・吉澤 和明²・高木 慎悟³
Yuichi KITAMURA, Kazuaki YOSHIKAWA and Shingo TAKAGI

¹フェロー会員 工博 電源開発㈱茅ヶ崎研究所 専任部長 (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

²電源開発㈱中部支店船明工事所 課長 (〒434-0012 静岡県浜松市浜北区中瀬7135-36)

³正会員 電源開発㈱中部支店船明工事所 所長 (〒434-0012 静岡県浜松市浜北区中瀬7135-36)

When evaluating the scouring phenomenon downstream of the dam due to the flood discharge, observation of the flow at the actual dam will be an important basic data for predicting the change of the river bed by discharge. In this paper, regarding the flow condition observation at the time of dam release, we examined the advantages and disadvantages by observation using Handycam video, ITV camera, and UAV. We examined and evaluated how to utilize for the flow situation observation in the downstream of the dam. In particular, moving image by using UAV is advantageous in that the entire photographing can be observed directly above, and can be observed closer to the sky. In addition, we evaluated the flow condition at the time of discharging through moving image analysis by PIV.

Key Words : downstream river bed decline, monitoring, river regime, swirling flow, ITV, UAV

1. はじめに

河川全幅にわたって洪水吐ゲートを有するダムにおいては、ゲート操作の順序や放流量の違いによって、ダム下流の流況が大きく変化する。特に、ダム左右岸側に発生する旋回流に伴い、ダム直下河床の砂礫が移動・洗掘され、ダムの安定性に大きな影響をあたえることが報告されている^{1),2),3)}。実際のダム放流時の流況観察は放流による河床の変化を予測するための重要な基礎資料となる。

これまでの流況観察は、アナログ写真撮影、デジタル写真撮影あるいはデジタルハンディカムを用いた動画撮影を使用して行なわれており、対策検討や対策工設計の基礎資料として活用してきた。現時点での最も簡易な観察・記録方法であるが、定点観測やそれを用いた流況解析を行う場合には工夫が必要である。ダムゲートピアに設置している監視用カメラ（以下、ITVという）による観察は、定点観察としては極めて有効であるが、ITV設置位置からの俯角（水平線とITVから対象物への線のなす角度）が小さい箇所のデータについては、解析を工夫する必要がある、作業時間と精度の低下が課題となっ

ている。

この短所を補うため、近年その進歩がめざましい無人航空機（以下、UAVという）に搭載したカメラを活用し、動画撮影とそのデータを用いた流況解析を行った。これにより、現地における流況をより正確に把握することが可能となり、粒子画像流速測定法（以下、PIVという）により表面流速を推定できることが確認された。

本報告は、船明ダム放流時の流況観測を事例に、現在実施している観測方法毎の活用状況と長所・短所を整理するとともに、UAVで撮影した動画を用いたPIV解析結果、水理模型実験における流況との対比によって現場における流況改善を行った事例について報告するものである。

2. ダム下流の旋回流と流況観察の重要性

(1) 船明ダム下流の洗掘対策と流況の現地観測

船明ダムの直下流は、1977年竣工以降、度重なる出水により、断続的に河床低下が進行している状況にあった。これまで、護床工の変状の都度応急的な対策を取ってきたが、ダムの安定性をより長期的に確保するため、構造

的安定性と水理的安定性の両面から検討^{1),2),3)}を行い、2015年10月より下流洗掘対策工事（長期的対策工）に着手した。またダム下流の維持管理では、洗掘現象の影響でダムや護岸等の構造物に影響が生じた時点で対応を行う事後保全的な考え方から、現地調査や水理模型実験による洗掘現象の究明および対策工の検討を通じて得られた知見に基づき、予防保全の考え方を導入し新たな維持管理システム^{4),5)}を構築した。具体的には、流況および河床のモニタリング、管理基準による評価、必要に応じた保全策・追加対策の実施、更に維持管理計画の見直しを適切に行っていくものである。

このなかで、ゲート放流時の流況観測は、下流洗掘の主要因の一つである平面旋回流の発生状況を観察する重要な基礎資料となる。洪水吐ゲート数が多いダムでは、ゲート操作の順序や放流量の違いによって、ダム下流の流況が大きく変化する。特に、ダム直下に発生する旋回流は、ダム直下流河床の砂礫が移動・洗掘し、ダムの安定性に大きな影響を与えることが確認^{2),3)}されている。

(2) 河床洗掘に影響を及ぼす旋回流

写真-1は、2013年10月26日、1,960m³/s放流時の動画映像を示す。船明ダムは9門の洪水吐ゲートを有するが、この時、洪水吐ゲートは4Gから8Gゲートの5門が開の状態である。赤の矢印で示すように、左岸側には大きな旋回流が発生している。

発生した旋回流は、左岸付近を上流に向かいエプロン下端に沿って流れ、ゲート放流水と合流する位置で、斜め下向きに潜り込む流れが形成され、河床洗掘にとって特に厳しい流況となる。

(3) 放流方法の変更による旋回流軽減策

船明ダムの洪水吐ゲート操作は、操作規程により6G→7G→5G→8G→4G→9G→3G→2G→1Gの順に行うこととなっている。一方、1門毎の開度は、何度か変更を加えており、1978年においては“ピラミッド型放流”，1983年からは“部分均等放流”と呼び、いずれも河川の中央付近のゲートを中心に放流を行っていた。これらの放流方法は、ゲートが全門開となるまで旋回流が発生する。そのため、2014年6月より1門当たりの開操作を1.0m→0.5mに変更し、早期に全門が開となる操作“全門均等放流”に変更した（図-1）。

写真-2は、2014年10月6日、2,083m³/s放流時の動画映像を示す。“全門均等放流”へ変更後の放流状況であり、既に9門全門が開の状態である。写真-1は、“部分均等放流”であるが、ほぼ同じ放流量にも関わらず流況に明瞭な違いが認められ、左岸側の旋回流も小さい。

図-2は、2014年5月に行ったダム下流河床位の測定結果であり、“部分均等放流”を行っていた時の河床位を示す。図-3は、2014年10月に測定したもので、2014年6月に“全門均等放流”に変更後、計8回の出水（最大

2,091m³/s）を経た河床位を示し、図-2と比較しダム下流河床位の様相が大きく変化しているのがわかる。

図-4の差分図を見ると、洗掘箇所と堆積箇所が明瞭に判別できる。エプロン直下（①）では堆積が進行し、右岸側（②）では洗掘が進行している。③の箇所では、2G～4Gゲート下流の堆積箇所が洗掘され不明瞭になり、5G～6Gゲート下流では堆積が進行している。これらの変化は、上流からの流下土砂がほとんどないことが確認されていることから、放流方法の変更に伴ない旋回流の発生状況が変化し、ダム下流の河床砂礫材が移動し再構成されたものである。



写真-1 1,960m³/s放流時の流況（デジタルカメラ）

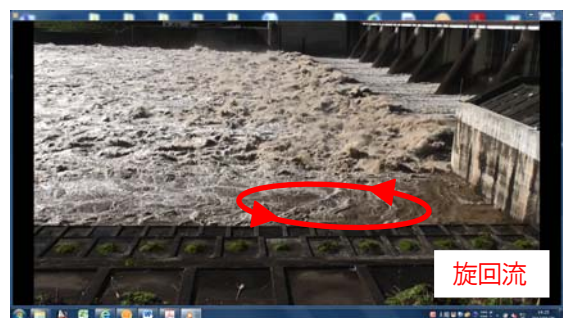


写真-2 2,083m³/s放流時の流況（デジタルカメラ）

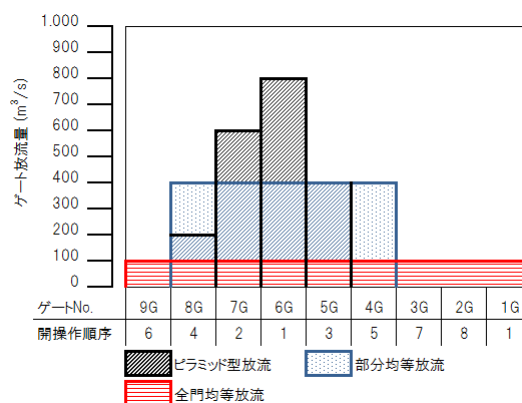


図-1 洪水吐ゲート操作のイメージ

ダム下流の洗掘状況を観測する場合、河床位測定による観察が直接的であるが、出水の都度測量を行うのは経済的に負担が大きく、作業工程的にも調整が難しい場合が多い。一方、河床の変動の要因となる流況の観察は容

易に実施することができ、河床変化の要因分析や出水後の河床変化の推定を行うための重要な基礎資料となる。

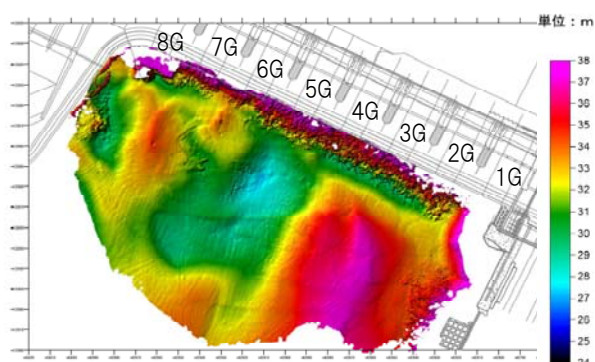


図-2 河床位測定結果（2014年5月）

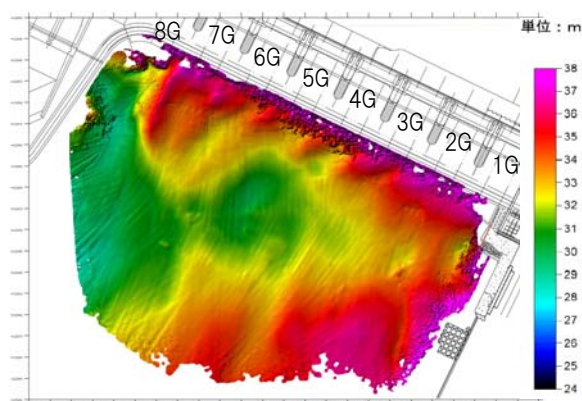


図-3 河床位測定結果（2014年10月）

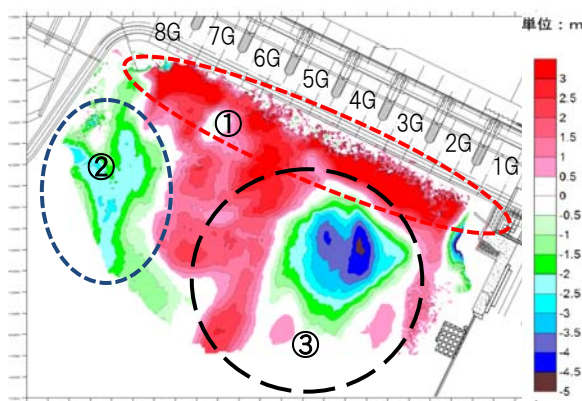


図-4 図-2と図-3の差分図

3. これまでの流況観測

(1) デジタルカメラによる観測

船明ダムは、竣工以降、大規模な出水を幾度も経験しており、その記録はその時々一般的な器材を用いて、アナログ写真撮影、デジタル写真撮影あるいはデジタルハンディカムによる動画撮影を行っており、対策工の基礎資料として活用してきた。写真-1および写真-2はその事例である。定点観測やそれを用いた流況解析を行う場合には工夫が必要であるが、デジタルカメラによる静止画・動画撮影は最も簡易な観測方法であることから、現在も大きな出水の都度、記録し保存を行っている。

(2) 監視用カメラ（ITV）による観察と解析

a) 観察方法

2015年4月より、船明ダムの6Gから7Gゲート間のゲートピアに設置している監視用カメラを用いて、5画面を基本画面として設定し、2,000m³/s以上の出水時に動画による定点観測を実施している。ITVの基本仕様を表-1に示す。

写真-3は、全放流量1,419m³/sに撮影した事例で、5画面の内3画面を示したものである。観察結果は、全体の流況の特徴、跳水発生位置と安定度、左岸側の旋回流の発生状況、右岸側から護岸までの流況等に注目して整理することとしており、これらの記録を蓄積することにより、河床変化が生じた場合の原因分析資料として活用を期待している。

b) 流況解析

ITV動画を用いた流況解析については、朝日ら^{6) 7)}により、粒子画像相関法の一つであるLSPIV⁸⁾を用いた跳水の位置や旋回流形状を把握する研究がなされている。課題として、精度の問題が指摘されている。これに対して、評定点を増やすことにより精度の向上が期待できるが、現在のITVの位置からは俯角（水平線とITVから対象物への線のなす角度）が小さく、1ピクセル当たりのエリアが大きく水面変動が捉えづらくなり、解析精度の低下を起こす原因となることが報告されている。



写真-3 1,419m³/s放流時の流況（ITV）

表-1 ITVの基本仕様

撮影画素数	38万画素
ズーム倍率	光学21倍
旋回角度	水平方向 360° 垂直方向 +70° ～ -90°

4. UAVを利用した流況観察と解析

(1) 観察方法

2015年9月4日（約1,100 m³/sの洪水ピーク後）に、dji社製UAVのINSPIRE 1（写真-4）を用いて空中写真・動画による流況観測を行った。本機体については、概ね風速10m/s以下であれば飛行、および空中停止が可能である。機体に搭載できるカメラは4Kカメラ（4096×2160p）が搭載できる。また、現地での流速が20m/s程度でも、通常のビデオ録画スピード（Δt=1/30sec）で、PIV解析ができる画像が録画可能である。ただし、夜間、降雨、および強風時には観測できない。

写真-5および写真-6は、ゲート放流474m³/s（4G～9Gゲートの6門が開）の小流量放流時に、上空約250mと約150mにおいて撮影したものである。当時は、UAV飛行に関する制限がなく高高度の撮影が可能で、広範囲の観測が可能であった。



写真-4 UAV（dji社製 Inspire 1）



写真-5 474m³/s放流時の流況（UAV, 高度250m）



写真-6 474m³/s放流時の流況（UAV, 高度150m）

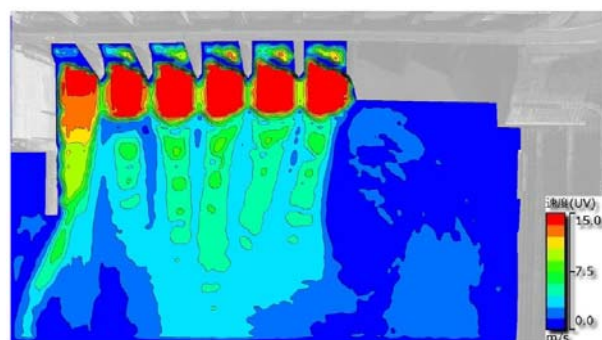


図-5 等速面・等速線図

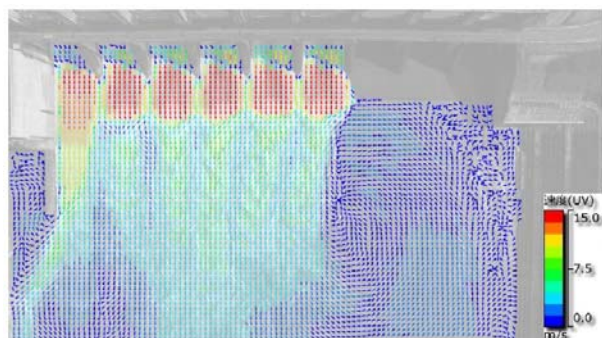


図-6 ベクトル図

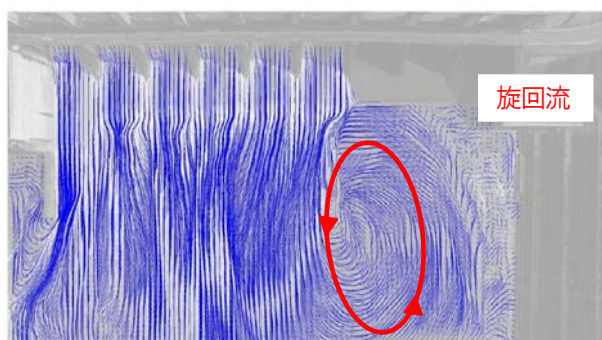


図-7 流線図

(2) 流況解析

図-5、図-6および図-7は、写真-6の動画より等速面・等速線図、ベクトル図および流線図を解析したものである。画像解析ソフトは、カトウ光研のFlow Expertを使用

しており、PIV解析により画像中のベクトルの推定を行った。解析格子は $5.0 \times 5.0\text{m}$ 、解析時間は20秒とした。解析は、撮影画像中の時間的に連続した2画像を得た上で、その1つ目の画像における微小な領域内の輝度値分布と2つ目の画像における領域内の輝度値分布との相互相関関数を求め、その最大値となる変位を検査領域内の粒子群の平均変位ベクトルとして推定している。

図-7から、左岸側に発生している旋回流の影響範囲や水面の流れの様相、また旋回流がゲート放流の流れに影響を及ぼしている様子が明瞭に確認できる。解析では、特別の工夫はしていないものの、よく流れの状況を表している。観測では、特別な粒子（トレーサー）を流すのではなく、水面における輝度の変化を流速として、2時刻法によるPIV解析を行った。このため、実験室で行うトレーサーを使ったPIVの解析方法に比べて誤差が入る可能性が高い。今後、撮影高度（画角）に対する解析格子、検査領域、および深査領域の大きさについて検討が必要である。

5. 流況観察結果を用いた流況改善

次に、流況観察結果を踏まえて、対策工に反映させた事例を紹介する。

2. (1) に記載したように、旋回流が河床洗掘に及ぼす影響を低減するために、できるだけ早期に全門が開となる全門均等放流に変更した。一方、全門開の状態となっても、ダムの構造上左岸導流壁下流部に死水域があり、狭い範囲で旋回流が発生しているのが確認できる（写真-2）。この小さな旋回流も少しでも低減するため、三次元水理模型実験（1/50模型）の結果を踏まえて、護床工ブロック（20t型テトラポッド）を用いて水制工を設置することとした（写真-6 b））。

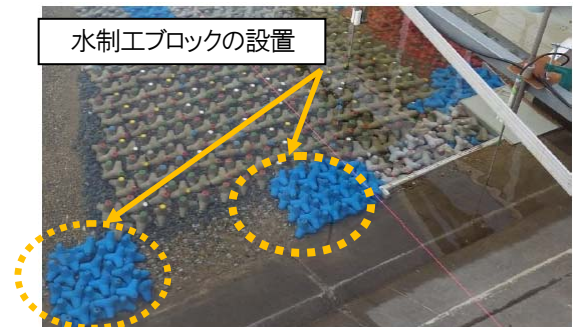
写真-7は、実際に水制工を設置した後の流況を示すもので、2016年9月21日全放流量 $1,474\text{m}^3/\text{s}$ 時のUAV画像である。水制工の効果が明確に確認され、大きな旋回流の勢いが低減されているのが良くわかる。

一方、水制工近傍に視点を移してみると、1Gゲートからの放流水が水制工上流側に直接あたり、周辺流況が乱れているのが確認できる（写真-8）。

この実現現象を観察後、再度三次元水理模型実験で再現してみた。UAVによる動画は真上から撮影したものであるため比較しやすく、実現現象を水理模型実験においても確認できた。その後、水理模型実験により、この流況改善策を検討したところ、写真-9に示すように水制工ブロックの上流側にブロックを積み増しすることにより、流況の改善が見られたため、2017年10月からの工事で追加施工した（写真-10）。



a) 原案



b) 修正案

写真-6 左岸側のブロック配置計画
（三次元水理模型実験）



写真-7 $1,474\text{m}^3/\text{s}$ 放流時の流況（UAV）

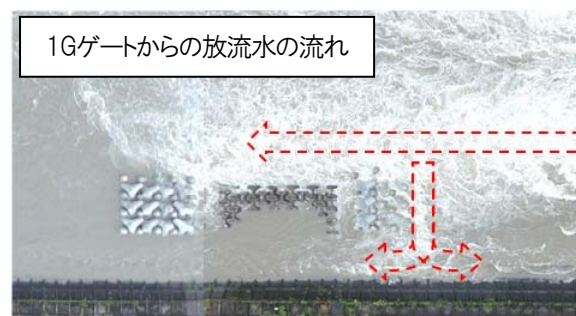


写真-8 写真-7の拡大図（UAV）

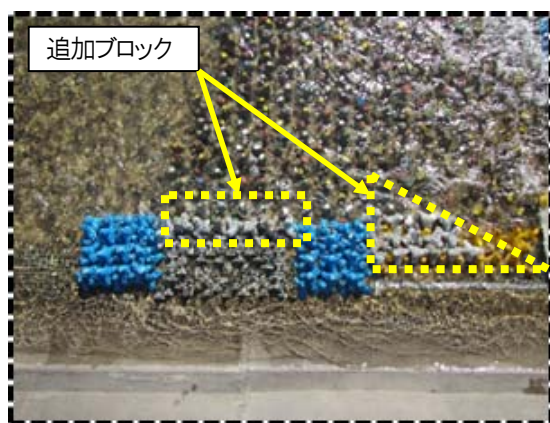


写真-9 水理模型実験での追加ブロック計画

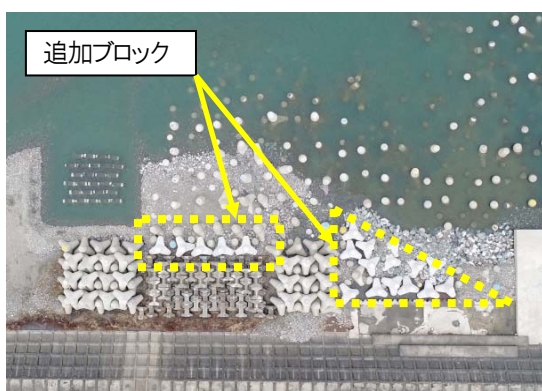


写真-10 実機での追加ブロック (UAV)

上記は、①UAVを用いた出水時観察、②水理模型実験による流況改善策の検討、③現場における対策実施、④UAVを用いた流況改善の再確認、という手順でより良い対策を検討し、実施したものである。

6. まとめ

流況観察の各観測方法の長所・短所は、表-2 に示すように整理される。今後、これらの長所・短所を踏まえたうえで、UAV の活用による観測が期待される。

今後の流況観察方法とその活用方法および課題について整理すると以下のとおりである。

- ・流況観察のための動画撮影を行うカメラ（デジタルカメラ・ITV・UAV）は、各々の長所・短所があるものの、確認したい事象に適したアングルが記録できれば各々の長所を生かすことができる。例えば、小規模出水時の段落ちの流れを観察する場合には、定点観察が容易な ITV カメラを使用し、真上から平面的な流れを観察する場合には UAV が適している。同じアングルでの観察記録を蓄積していくことが重要である。
- ・流況観測する場合、最も入手したいのは出水時のデータである。UAV による観察の弱点は、夜間、降雨、および強風等の条件下では撮影（飛行）できない点である。現在、全天候型の UAV の開発等が進められつ

つあるが、市場に機体が流通するまでは、現在の機器のみで全ての観測条件をカバーすることは難しい。

- ・流況解析を行う場合には、上空から流況を撮影可能である UAV の使用が極めて有効である。UAV による動画から PIV による表面流速の推定ができ、ベクトル図、流線図等を作成することにより、実現象の変化を相対的ではあるが定量的に捉えることが可能となった。
- ・流況解析方法は、トレーサーによらず、水面における輝度の変化を流速として、2 時刻法による PIV 解析を行っている。このため、トレーサーを使った PIV の解析方法に比べて誤差が入る可能性が高い。今後、撮影高度（画角）に対する解析格子、検査領域、および深査領域の大きさについて検討が必要である。

表-2 各観測の長所・短所

観察方法		UAV	ITV	デジタルカメラ
監視	長所	高度150m以下であれば、河川区域内での撮影は自由。 対象箇所を真上から撮影可能で、接写も可能。	精度良く、定点撮影可能。	最も簡易に撮影可能。 ズームアップにより対象箇所撮影可能。
	短所	雨天・強風時の撮影不可、よって、最大放流時には撮影できない可能性が大きい。	カメラが固定。 俯角が小さい箇所が生じる。	手振れが生じる。 精度良い定点撮影が困難。 俯角が小さい。
流況解析		評定点を多くすれば、大幅に精度向上可能。	俯角が小さい場所、精度向上が難しい。	手振れが生じるため、精度良い解析が困難。

参考文献

- 1) Y.Kitamura, S.Takagi: Hydraulic study on scouring downstream of Funagira Dam spillway apron (Japan), International conference scour and erosion, (ICSE2016), Sep. 2016.
- 2) Y.Kitamura, S.Takagi: Study on scouring phenomena at downstream of dam during flood control, ICOLD2017 Prague, Jul. 2017.
- 3) 喜多村雄一, 高木慎悟: 洪水放流に伴うダム下流洗掘現象に関する考察, 大ダム No.242, 2018 年 1 月
- 4) S.Takagi, M.Sato, Y.Kitamura: Development of new maintenance program for scouring measures at downstream of dam, ICOLD2017 Prague, Jul. 2017.
- 5) 高木慎悟, 佐藤麻衣, 喜多村雄一: ダム下流洗掘対策に関する維持管理システムの開発, 大ダム No.241, 2017 年 10 月
- 6) 朝日一堯: 画像解析・推知解析によるダム直下の流れの把握に関する研究, 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻, 修士論文, 2016 年 2 月
- 7) 戸田祐嗣, 朝日一堯: 船明ダム下流部の流速観測に関する報告書, 2016.
- 8) 椿涼太, 藤田一郎: Large-scale PIV software User's manual, pp.1-56, 2015.

(2018. 4. 3受付)