

ダムにおける大規模洪水対応技術の現状と今後

猪股広典・佐藤弘行・高田翔也

1. はじめに

近年、毎年のように大規模な洪水が発生しており、異常洪水時防災操作（大きな出水によりダムの洪水調節容量を使い切る可能性が生じたため、放流量を徐々に増加させ、流入量と同じ流量を放流する操作¹⁾、いわゆる緊急放流）を実施したダムも存在する。気候変動に伴う洪水の大規模化が想定されるため、ダムにおける大規模洪水への備えが今後重要となる。本報文では既往文献を基に、2.において異常洪水時防災操作に対する既往の取組として、事前放流と異常洪水時防災操作に係る情報伝達の有効化について紹介する。その後、3.において効果的な事前放流や情報伝達に加え、ダムの放流能力の増強の観点から今後の技術的方向性を述べる。

2. 異常洪水時防災操作に対する既往の取組

2.1 事前放流の導入から現在まで

事前放流は、治水のために確保された容量を治水対策に一時的に活用するため、台風の接近などにより大雨となることを見込まれる場合に、降雨によりダムの水位が回復することを前提に、利水容量を洪水発生前に放流して貯水位を低下させる操作である。事前放流の目的は、治水の計画規模や河川（河道）・ダム等の施設能力を上回る洪水の発生時におけるダム下流河川の沿川における洪水被害の防止・軽減である²⁾。このことから、事前放流は単にダムの異常洪水時防災操作を回避することのみを目的とした操作ではないが、異常洪水時防災操作を回避することにより下流沿川の洪水被害防止・軽減に貢献することを目的に含む操作と考えることができる。一方で、事前放流を実施したものの、気象予測が空振りまたは極端な過大予測であった場合には利水容量が回復せずその後の利水補給に支障をきたすおそれがある。

事前放流は、平成17年にとりまとめられた、

主に多目的ダムを対象として具体的な検討手法を記した「事前放流ガイドライン（案）（以下「旧ガイドライン」という。）」において考え方が導入された³⁾。旧ガイドラインでは事前放流の実施範囲として「降雨解析などにより確実に容量回復が見込める容量の活用」をはじめとした4つが挙げられた。「降雨解析などにより確実に容量回復が見込める容量」は気象予測を用いて設定される一方で、「確実に容量回復が見込める」という記載から事前放流を実施しつつも放流した利水容量の回復が重視されていたことが伺える。

その後、令和元年台風第19号（以下、「令和元年東日本台風」）等を踏まえ、緊急時において既存ダムの有効貯水容量を洪水調節に最大限活用できるように、政府は、国土交通省に加えて、利水ダムを所管する省庁（厚生労働省、農林水産省、経済産業省、資源エネルギー庁）や気象庁等で構成される「既存ダムの洪水調節機能強化に向けた検討会議」を設置（令和元年11月26日）し、「既存ダムの洪水調節機能の強化に向けた基本方針」（令和元年12月12日）に基づき、事前放流を実施するにあたっての基本的事項をとりまとめた事前放流ガイドライン（以下「新ガイドライン」という。）が令和2年に策定された²⁾。新ガイドラインにおいては、事前放流の開始基準や事前放流による貯水位低下量の設定について気象予測を用いた具体的な方法が示されるとともに、情報の共有など事前放流の実施にあたっての留意事項等が示された。また、事前放流実施後に貯水位が回復しなかった場合の対応として損失補填の内容が明記されていること及び旧ガイドラインでは対象としなかった利水ダムも事前放流の実施対象として含まれていることが特徴として挙げられる。新ガイドラインに従って、利水ダムも含めて多くのダムにおいて事前放流が実施されるようになり、令和2年度出水期においては全国122ダム（うち、63ダムが利水ダム）、令和3年度出水期は全国94ダム

(うち、46ダムが利水ダム)において事前放流が実施された⁴⁾⁵⁾。

事前放流の導入から現在までの経緯は上述の通りであり、事前放流における技術的な核である気象予測については可能な限り最新の予測技術を用いる努力をしつつ、気象予測の限界を補うための損失補填制度の措置等も併せることにより実施範囲を順次拡充してきている。

2.2 異常洪水時防災操作実施に係る情報伝達の有効化に向けた取組

事前放流の実施により全ての大規模洪水に対して異常洪水時防災操作を回避できるわけではない。異常洪水時防災操作が実行された場合、ダム下流河川で急激な水位上昇や洪水氾濫が生じる恐れがあるため、関係機関や下流住民を含む一般に対して操作の実施について情報を効果的に伝達して確実な避難行動に結びつけることが求められる。

異常洪水時防災操作に関わる情報は、ダムの操作規則に基づくダム管理者から関係機関への通知、ダム管理者から市町村へのホットラインによる伝達等が行われている。しかし、情報のインパクトが足りないことや情報の持つ意味が十分に住民に共有されていないために確実な避難行動に結びついていないことが課題として挙げられている⁶⁾。平成30年7月豪雨時に異常洪水時防災操作を実施した肱川水系のダムでは、異常洪水時防災操作を実施する2時間程度前に関係する自治体へホットラインにより異常洪水時防災操作の実施が伝達されたが(その後、自治体が避難指示を発令)、深刻な浸水被害が発生した。その後とりまとめられた「異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能と情報の充実に向けて(提言)」(以下「提言」という。)においては、ダム管理所が発信する異常洪水時防災操作に関する情報提供が確実な避難に結びついていないことが指摘された。それと併せて同提言では、直ちに対応すべきこととして、住民等の主体的な避難の促進、市町村長による避難勧告等の適切な発令の促進等の項目が今後の改善事項として挙げられ⁶⁾、ダム下流河川における浸水想定図等の作成、ダムの洪水調節機能を踏まえた住民参加型の訓練、ダムの洪水調節機能を踏まえた避難勧告着目型タイムラインの整備等様々な取組が実施されている⁷⁾。

3. 今後の方向性

3.1 事前放流

事前放流の今後さらなる効果的な実施に向け、5つの観点について整理された骨子(案)がダム工学会ダム大規模洪水対応ワーキンググループから示された⁸⁾。ここでは、5つの観点の中から治水機能の向上に直接的に関係する「事前放流を効果的に実施する技術開発の必要性」の内容を踏まえ、事前放流による治水効果の向上に向けた今後の技術的検討事項について述べる。現在の気象予測技術は事前放流の導入検討開始時と比較して著しく進展しているものの、現在においても事前放流を規定する最大の要因は予測雨量の予測先行時間と精度であると考えられる。新ガイドラインにおいては、予測先行時間84時間のGSM及び39時間のMSMの平均降水量ガイダンスを用いることとされているものの、事前放流の準備や事前放流に用いる放流設備の放流能力の制限等により、予測先行時間内に十分な貯水位低下を行うことが困難なダムが存在することも考えられる。そのため、より予測先行時間の長い予測雨量が利用できることが望ましいが、一方で予測先行時間が長くなるほど予測精度が低下する恐れもある。予測雨量を用いる限り予測誤差は不可避であるとして、アンサンブル予測雨量から得られる誤差の程度(不確実性)を定量的に扱いながら事前放流の操作を決定する方法について研究が行われてきているため⁹⁾¹⁰⁾、これらの方法について事例検証を重ねることで、より効果的な事前放流が実施できる可能性がある。特に文献¹⁰⁾では、15日先までの長い予測先行時間のアンサンブル予測雨量を用いて洪水調節開始前の数日前から発電放流量以下の放流量により事前放流することで、事前放流の実施による発電量増大への貢献について述べている。

また大野ダム(近畿地方整備局管理:京都府所在)のように、堆砂の進行状況に余裕があると判断し、堆砂容量の一部を事前放流の実施範囲に充てることにより治水機能の向上を図ることも有効であると考えられる¹¹⁾。ただし、堆砂容量は徐々に埋まる一方で、気候変動に伴う洪水外力増大・ダムへの流入土砂量の増大により堆砂進行は加速化される可能性がある。ダム施設や貯水池周辺地山の安全性を確認しつつ、建設以降の堆砂実績と

将来的な堆砂進行の見通しに基づいて検討されることが望まれる。

3.2 異常洪水時防災操作に係る情報伝達

異常洪水時防災操作に係る情報伝達の有効化に向けては、2.2で述べた通り提言に基づき様々な取組が実施された。その後、令和元年東日本台風時に異常洪水時防災操作を実施したダムについて、関係する自治体へアンケートを実施することで情報発信に関する課題について整理された。その結果、異常洪水時防災操作がどのような操作であるのか市町村の防災担当者に必ずしも十分に理解されていない、提供される情報量が少なすぎる、避難につながる重要な情報が分かりづらい等の意見が挙げられ、情報の発信の仕方と情報の受け止め方にギャップが存在することが確認された⁷⁾。今後、真に「伝わる（情報を受け取って理解してもらい行動につなげる）」効果的な情報提供に向け、提言で挙げられた事項について更に継続して取り組むことが必要である。

上述の方向性は、予測精度の問題とは別として現時点の技術水準等で実施可能な取り組むべき課題である。予測精度の観点については、平成30年7月豪雨時に異常洪水時防災操作を実施した肱川水系のダムでは、異常洪水時防災操作の実施前に自治体へのホットラインにより情報が伝達されたものの、雨量やダム流入量の予測精度は低かったことが指摘されている⁸⁾。今後は、より早く確実な情報伝達や、大規模な洪水において氾濫被害の最小化を図る操作の実施等に向け、ダム流入量の予測精度向上に向けた技術開発が必要である⁹⁾。

3.3 ダムの放流能力の向上について

3.3.1 大規模洪水に対するダムの放流能力

今後想定される大規模洪水に対して、前節で述べた洪水調節機能に対する強化の点に併せ、ダムの放流能力についても議論する必要がある。

洪水調節における異常洪水時防災操作は、貯水位の異常上昇に伴い設計上ダムから放流することが想定されていない箇所からの放流になれば放流を制御できなくなることおよびそれに伴う下流における被害を防ぐために行われる。これは、治水計画の計画規模を超えて、洪水調節機能の限界に到達している状況であり、前節で挙げた事前放流等の容量確保による対策が求められる。

一方で、容量確保の議論とは別に工学上予想さ

れる最大規模の洪水量を超える洪水に対して、洪水吐きの放流能力が十分であるかという点がある。放流能力が不十分な場合、流入＝放流の操作ができず、貯水位が設計で考慮している最高水位（設計洪水位）よりも上昇する恐れがある。ダムを設計する際には、洪水調節計画とは別に、工学上予想される最大規模の洪水量等をもとに洪水吐き規模が設定されているが、気候変動に伴う外力増大を考慮すると、非常用洪水吐き放流能力の増強の必要性についても今後検討を行う必要がある。本節では、現行のダムにおける洪水吐きの設計条件の概略と、海外における洪水吐き放流能力増強事例、国内における今後の方向性について述べる。

3.3.2 大規模洪水に対する洪水吐きの放流能力に係る設計条件

現在のダムの安全面に係る洪水吐きの設計条件は、設計洪水位でダム設計洪水流量を常用・非常用洪水吐きを併せて放流できることである。ここで、ダム設計洪水流量は昭和51年の河川管理施設等構造令以降、1)200年確率流量、2)既往最大、3)地域別比流量図から定まる流量の中で最大の流量により決定される（フィルダムは当該流量の1.2倍）。そして、これらの流量が一定流入する仮定のもと（一部の貯留効果が見込めるダムを除く）、設計洪水位で放流可能な規模の洪水吐きが設けられている。土砂や流木、ゲート操作の遅れ等の他要因を除けば、ダム設計洪水流量そのものがダムの放流能力に関する水理条件であり、今後は気候変動を踏まえたダム設計洪水流量の設定方法の検討が重要となる。なお、実際の洪水において流量は時間的に変化し、一定流入することは考えにくいため、今後の検討においてはその点についても留意が必要である。

3.3.3 大規模洪水に対するダムの放流能力に係る設計条件

洪水流入規模が、ダムが有する洪水吐き放流能力を上回った場合、流入＝放流とならず、過剰貯留により貯水位は上昇し、設計洪水位以上の貯水位となる恐れがある。実際のダムにおいては、前項で述べた設計洪水位に、風や地震による波浪などの影響を加味した非越流部高さが設定されている。一方で、設計外力として設計洪水位以上は考慮していないこと（構造計算上安全率を見込んでいたためただちに構造上の危険が生じるものでは

ない)、水位上昇に伴うゲートクリアランス等の不足による放流能力低下が生じる可能性があることなど、設計洪水位以上の設計では考慮していない貯水位における現象については不確実要素が多い。そのため、貯水位が設計洪水位を超えた際にこういった現象が生じるか、またその際どのような被害が生じるかについて検討し、そのリスクを把握しておくことが対策を講じるにあたり重要となる。

3.3.4 海外の放流能力増強事例その1

海外では、外力設定の見直しにより、不足する洪水吐きの放流能力を増強する事例が増えている。米国では2014年に、FEMA（Federal Emergency Management Agency、連邦緊急事態管理庁）から“Technical Manual: Overtopping Protection for Dams”が公表された¹²⁾。このマニュアルでは、放流能力の増強を目的とした洪水吐き増設事例や堤体下流面や下流アバット岩盤を流水が安全に流下することを可能とした事例が紹介されている。本報文では、マニュアルで紹介されている事例のうち特徴的な事例を紹介する。なお、ここで紹介する事例が放流能力の増強そのものを目的としたものか、洪水調節機能の向上を目的としたものかについては区別していないが、ダム型式毎の改造方法について着目されたい。

Folsom dam（図-1）は1956年に完成した堤高100mの重力式コンクリートダムである。放流能力増強のために、左岸側にあるフィル部のウィングダムと地山の間に洪水吐を増設する再開発事業が2017年に完成している。また、洪水期には降雨量の予測に基づき洪水調節容量を確保するために事前に放流が行われており、降雨予測が外れて利水容量が不足した場合には近傍の流域から用水を買い取る協定を予め締結しており実際に1998年に実施されている。

Big Tujunga dam（図-2）では、放流能力の不足から天端に越流型の洪水吐が増設されるとともに、耐震性の不足から堤体下流面を増厚する再開発事業が行われている。

Coolidge dam（図-3）は、1930年に建設された堤高76mのマルチプルアーチダムで、左右岸に非常用洪水吐が設置されている。1980年に、洪水吐きの放流能力不足から洪水時に下流の岩盤が越流水により侵食されるリスクがあることが判明

したことから、洪水吐きの放流能力増強のための改造が行われている。改造にあたっては、非常用洪水吐のシュート部の補強とともに、流水にさらされる懸念があった堤体下流アバット部の岩盤をコンクリートで保護する対策が実施されている。

Leyden dam（図-4）とLeft hand valley dam（図-5）はともにアースフィルダムであり、堤体天端の一部を2m程度切り下げたうえで、天端と下流面をRCC（Roller Compacted Concrete）により階段状に保護することで流水の減勢効果を期待する対策が実施された。Left hand valley damでは、2013年の洪水時に約1週間最大約20cmの水深でRCC部を流下したものの大きな損傷は発生しなかったことが報告されている。

以上のとおり、設定外力の見直しに伴い、放流能力の増強を目的としたダム型式や現場条件に応じた多様なダム改造事例がある。その中には、ダム計画上の最高水位（設計洪水位相当）以下で放流能力を増強させる事例のほか、堤体下流面や下流の岩盤を流水が流下することも想定して保護するといった日本には無い事例が存在し、その際の計画・設計・施工過程は日本においても重要な知見となると考えられる。

3.3.5 海外の放流能力増強事例その2

近年、フランスを中心に洪水吐き放流能力増強の一手法として、Piano Key Weir（ピアノキー型越流堰、以下「PKW」という。）の採用事例が



図-1 Folsom dam：写真右側が増設された洪水吐き

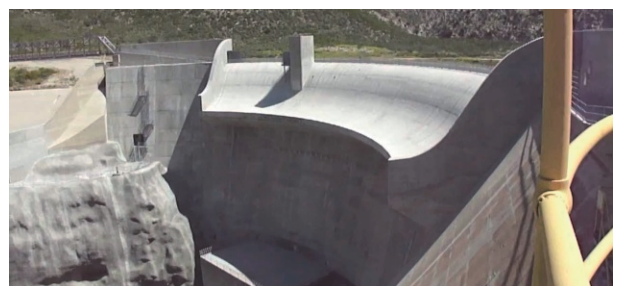


図-2 Big Tujunga dam¹³⁾

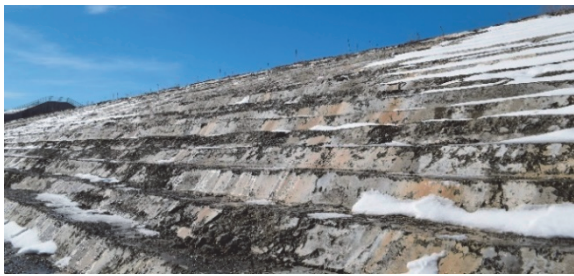
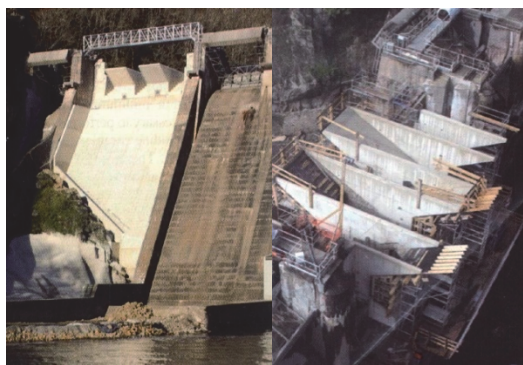
図-3 Coolidge dam¹³⁾

図-4 Leyden dam : 堤体下流面をRCCで階段状に保護

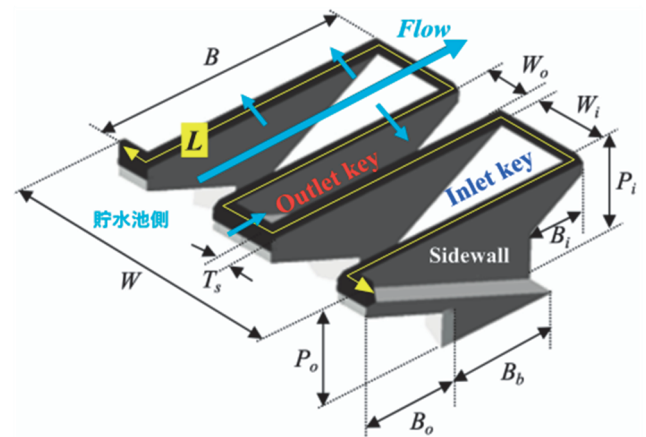
図-5 Left hand valley dam : RCCで階段状に保護した堤体下流面からの流下状況¹³⁾図-6 PKWが採用されたSaint-Marc dam
(左：完成後下流面、右：施工途中)¹⁴⁾

増加している。PKWとは、図-6、図-7に示すようにラビリンス堰の改良形状として、F. Lempérièreら¹⁵⁾により提案された。表-1は、近年のPKWを採用したダムの一覧である¹⁶⁾。

PKWは、Inlet（流入） & Outlet（流出）keyおよびsidewall（側壁）からなるユニットを

表-1 PKWが採用されたダム一覧¹⁶⁾

Name	Country	Commissioning	Name	Country	Commissioning
Bakkhada	Algeria	1938	Emmenau	Switzerland	2012
Beni Bahdel	Algeria	1940	Campauleil	France	2014
Goulours	France	2006	Charmines	France	2015
Saint-Marc	France	2008	Rambawa Tank	Sri Lanka	2015
Etroit	France	2009	Rassise	France	2015
Gloriettes	France	2010	Raviege	France	2015
Rattling Lake	Canada	2011	Van Phong	Vietnam	2015
Escouloubre	France	2011	Da Dang 3	Vietnam	2016
Gouillet	France	2011	Dak Mi 3	Vietnam	2016
Malarce	France	2012	Record	France	2016
Beaufort	France	2013	Xuan Minh	Vietnam	2016
Black Esk	United	2013	Gage	France	2017
Dak Mi 4B	Vietnam	2013	Hazelmere	South Africa	2018
Dak Mi 4C	Vietnam	2014	Oule	France	2018
Giritale	Sri Lanka	2013	Ouldjet	Algeria	2018
Loombah	Australia	2013	Lewis Creek	USA	2019
Sawra Kuddu	India	2013	reservoir		

図-7 PKWの基本形状（Pralongら¹⁷⁾に一部加筆）

基本構造としている。特徴としては、国内ダムに多く採用されている標準越流頂に比べ、越流長が長くなることから放流能力が増加する（図-7における $W \ll L$ ）¹⁷⁾。さらに、堤体上流に規模の大きな導流水路を必要とするなど新規ダムでない場合施工条件が厳しいラビリンス堰に比べ、導流水路等を不要もしくは最小限にすることができ、堤体上流面が鉛直でも設置が容易となる点が優れていると考えられる。一方で形状のパラメータ（図-7中 P_i 、 L/W 等）は30以上とされ¹⁷⁾、近年海外では実験、計算による知見が積み重ねられている。

我が国においても、非常用洪水吐きの放流能力増大の観点、またダム設計洪水流量に対する設計水深を小さくすることによる洪水時最高水位の引上げ（洪水調節容量の増加）の観点から、導入メリットの多い洪水吐き形式と考えられる。一方で、地震等に対する構造面での検討事例は少なく、今後さらなる検討が必要である。

3.3.6 大規模洪水に対する国内ダムの放流能力増強に関する今後の方向性

ダムの放流能力の観点で大規模洪水に対する基

礎的事項、海外の事例を整理した。今後の主な検討項目として、以下が挙げられる。

- 1) 放流能力増強に向けたダム形式毎の洪水吐き増設方法の整理・検討
- 2) 階段式の越流部やPKW等新たな洪水吐き形式の適用条件の検討および開発
- 3) 気候変動を踏まえたダム設計洪水流量の検討
 - 1)、2)における海外事例が参考となることから、現在、各ダムの改造における水理的・構造的な設計思想、制約条件、コスト等の分析を進めている。
 - 3)についても海外での事例も踏まえながら今後検討していきたい。

4. おわりに

ダムにおける大規模洪水への対応として、事前放流と異常洪水時防災操作に係る情報伝達の有効化に関するこれまでの取組について述べた後、事前放流、情報伝達及びダムの放流能力増強について今後検討すべき技術的項目について述べた。今後はここで述べた項目に加え、貯水池土砂管理や、事前放流をはじめとした高度な操作の導入によるダム管理所の負担増への配慮等も交えながら検討することが必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川砂防技術基準 維持管理編（ダム編）、2016
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：事前放流ガイドライン、2020
- 3) 国土交通省河川局長：国土交通省所管ダムにおける事前放流の実施について、平成17年3月30日 国河流第20号、2005
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：令和2年度出水期における事前放流の実施状況、2020
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：令和3年度出水期における事前放流の実施状況、2021
- 6) 異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会：異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能と情報の充実に向けて（提言）、2018
- 7) ダムの洪水調節に関する検討会：ダムの洪水調節に関する検討とりまとめ、2020
- 8) ダム工学会ダム大規模洪水対応ワーキンググループ：ダム事前放流の効果的実施に関する提言（案）（骨子）、ダム工学、Vol.31、No.2、pp.245～247、2021
- 9) 猪股広典、川崎将生、工藤俊：アンサンブル予測雨量を用いた洪水時ダム操作における操作決定方法に関する研究、水文・水資源学会誌、Vol.34、No.1、pp.24～53、2021
- 10) 角哲也、加納茂紀、道広有理：長時間アンサンブル降雨予測を用いたダム操作のパラダイムシフト、河川、No.894、pp.78～85、2021
- 11) 京都府：第2回 京都府大野ダムの洪水調節機能と情報の充実に向けた検討会、2019
- 12) Federal Emergency Management Agency (FEMA): Technical Manual: Overtopping Protection for Dams, 462p, 2014.
- 13) K. D. Hansen and T. J. Fitzgerald: Performance of RCC Used for Overtopping Protection and Spillways, 2nd International Seminar on Dam Protection against Overtopping, pp.7-20, 2016.
- 14) Laugier F, Lochu A, Gille C, Ribeiro ML and Boillat JL (2009) Design and construction of a labyrinth PKW spillway at Saint-Marc dam, France. The International Journal of Hydropower and Dams, 6(5): 100-107.
- 15) Lempérière, F., Ouamane, A. 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. Hydropower & Dams 9(5), 144-149.
- 16) World Register of Piano Key weirs prototypes: https://www.uee.uliege.be/cms/c_5026433/en/world-register-of-piano-key-weirs-prototypes (2021年12月取得).
- 17) Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Piroton, M., Boillat, J.L., Leite Ribeiro, M. and Schleiss, A.J. (2011). "A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters." Proc., International Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, 271-278.

猪股広典



土木研究所つくば中央研究所
水工研究グループ 上席研究
員（特命事項担当）、博士
（工学）

Dr. INOMATA Hironori

佐藤弘行



国土交通省国土技術政策総合
研究所河川研究部大規模河川
構造物研究室 主任研究官

SATO Hiroyuki

高田翔也



土木研究所つくば中央研究所
水工研究グループ水理チーム
研究員

TAKATA Shoya