

# ダム洪水吐のゲートレス化に係わる放流特性の水理模型実験と三次元数値流体解析の比較検討

## COMPARISON OF HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT AND 3-D NUMERICAL SIMULATION ON DISCHARGE CHARACTERISTICS RELATED TO GATELESS PROJECT OF DAM SPILLWAY

佐藤隆宏<sup>1</sup>・佐藤塁<sup>2</sup>・木岡浩一<sup>3</sup>・田中邦保<sup>4</sup>  
Takahiro SATO, Rui SATO, Kouichi KIOKA, Kuniyasu TANAKA

<sup>1</sup>正会員 工修 電力中央研究所 地球工学研究所 流体科学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

<sup>2</sup>正会員 株式会社 四電技術コンサルタント 土木事業部 (〒761-0121 高松市牟礼町牟礼1007番地3)

<sup>3</sup>正会員 四国電力株式会社 徳島支店 技術部 土木建築課 (〒770-8555 徳島市寺島本町東2丁目29)

<sup>4</sup>正会員 工修 四国電力株式会社 高知支店 技術部 土木建築課 (〒780-8545 高知市本町4丁目1番11号)

In the gateless reconstruction of Myodani dam, constructed in 1931 and had become filled up with sediment, it was planned to remove the existing gate pier, raise the dam spillway, and enlarge the sediment flushing gate. In this study, a 1/25 scale hydraulic model experiment and a 3-D numerical simulation were conducted, and the water level distribution and flow velocity distribution upstream and downstream of the dam were measured. A comparison between the numerical results and the experimental data indicated that the calculation result could reproduce the water level from the upstream of the dam to the overflow with sufficient accuracy. Also it was confirmed that the difference of the velocity distribution between the current riverbed and the planned riverbed could be properly calculated.

**Key Words :** *Overflow spillway, Gateless, Sedimentation, Dam reconstruction, Risk management*

### 1. はじめに

戦前に建設されたダム調整式水力発電所は既に築70年を超え、ダム貯水池堆砂の進行に伴う有効貯水容量の減少によって、運用実態が流れ込み式発電所とほぼ同様の状況になっている地点も多い。特に河川最上流部に建設されたダムは流域面積が狭い地点も多く、降雨発生から放流開始までの時間が短いため洪水吐ゲートを頻繁に操作する必要があるなど、ダム管理に多大な労力を要している。また、近年の異常豪雨の頻発化に対して、放流操作遅れによる災害発生リスクの増大も懸念されている。そしてこのような状況の中で、近年、洪水吐をゲート放流方式から越流方式へ変更するゲートレス化によって、設備のスリム化ならびに運用・保守の合理化・省力化、災害発生リスクの低減を進める地点が増えている。

ゲートレス化などのダム改良工事や一般的なダム新設工事に際しては、ダム洪水吐の放流特性を水理模型実験で確認することが多いが<sup>1)</sup>、三次元数値流体解析で事前

に洪水吐形状などの最適化を図り、実験ケース数を削減できるメリットは大きい。また、堆砂の進行した既設ダムの放流特性を、水理模型実験ではなく、ダム越流形状や地形を考慮した三次元数値流体解析で確認できると合理的である。しかしながら、上流地形影響のないダム洪水吐を対象に三次元数値流体解析によってダム越流係数の再現性を検討した既往研究<sup>2)</sup>はあるものの、堆砂が進行するなど上流地形影響が強いダム洪水吐の放流特性やダム越流係数を検討した事例はほとんどない。

本研究では、ゲートレス化に必要な既設ダム洪水吐ゲートピアの撤去、堤体越流部の嵩上げ、排砂門ゲートの大型化などを伴うダム改良形状に対して、水理模型実験によって放流特性を調べるとともに、貯水池堆砂が進行したゲートレスダムの放流特性やダム越流係数に対する三次元数値流体解析の適用性を検討する。

### 2. 既設ダム洪水吐のゲートレス化の概要<sup>3,4)</sup>

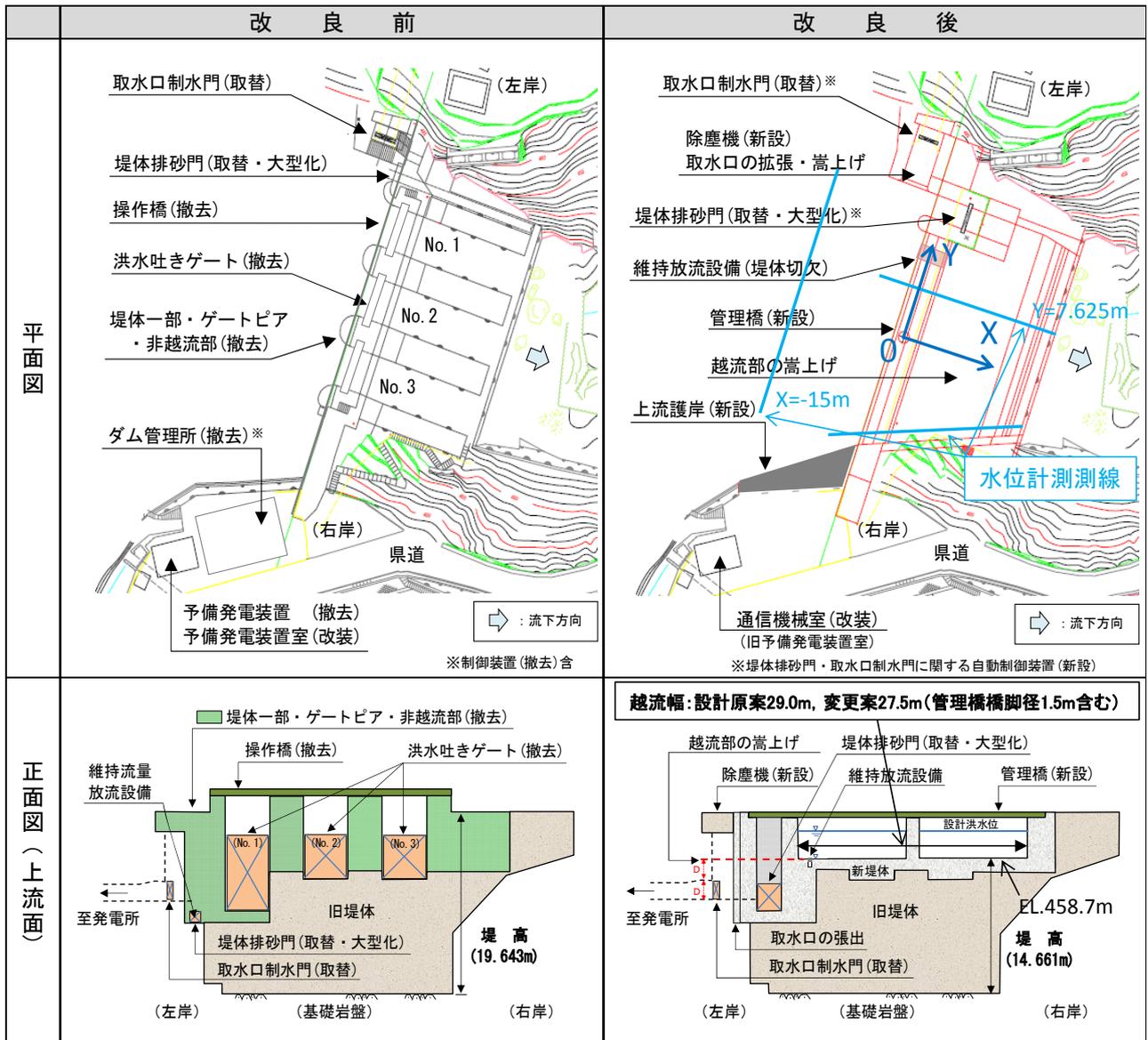


図-1 ダム改良前後の平面図ならびに正面図

本研究では、昭和6年に建設された四国電力切越発電所（徳島県，吉野川水系貞光川，最大出力4,500kW，最大取水量2.78m<sup>3</sup>/s，有効落差・改造前185.15m→改造後183.36m）の明谷ダムを対象とする。改造前は、堤高19.643m，洪水吐ゲート3門（ローラーゲート，5.40m×8.02m×1門，5.40m×4.60m×2門）の重力式コンクリートダムであった。有効貯水容量は建設時は38千m<sup>3</sup>であったが，その後の堆砂の進行により半減（2014年時点15千m<sup>3</sup>）し，運用実態が流れ込み式発電所とほぼ同様の状況であった。また，流域面積が13.93km<sup>2</sup>と小さいことから，

- ・降雨発生から放流開始までの時間が短く，出水予測や通知通報・下流警報の時間確保に苦慮していた
- ・減少した調整池容量に対して洪水吐ゲートが大きいことから，放流時に小開度でのゲート操作を頻繁に行う必要があり，放流操作の遅れによる災害リスクが懸念されていた

など，出水対応において細心の注意と多大な労力を要す

るとともに，改造前の設備形態ではダムでの常駐管理が不可欠であった。

このような状況の中，洪水吐ゲートなど主要設備が更新時期を迎えていたことも踏まえ，洪水吐をゲート放流方式から越流方式へ変更（ゲートレス化）するためのダム改良工事を実施し，設備のスリム化および運用・保守の合理化・省力化を図った。具体的には，既設洪水吐ゲートおよび操作橋の撤去，ならびに，堤体・ピアコンクリートの一部撤去・新設（越流部嵩上げ等）により，ゲートレスのローダム化（改造後の堤高14.661m）を図った。また，設備保守の省力化のため，取水口自動除塵機の新設や排砂門の大型化（改造前：0.91m×0.91m，改造後：3.0m×3.0m）などを行った。なお，設計洪水流量については，本工事がダム改造に該当して現行基準の適用を受けるため，河川管理施設等構造令に示される算定方法に準拠するとともに，流域面積が20km<sup>2</sup>以下と小さいこと，および，堤高が15m未満と低いことを考慮の

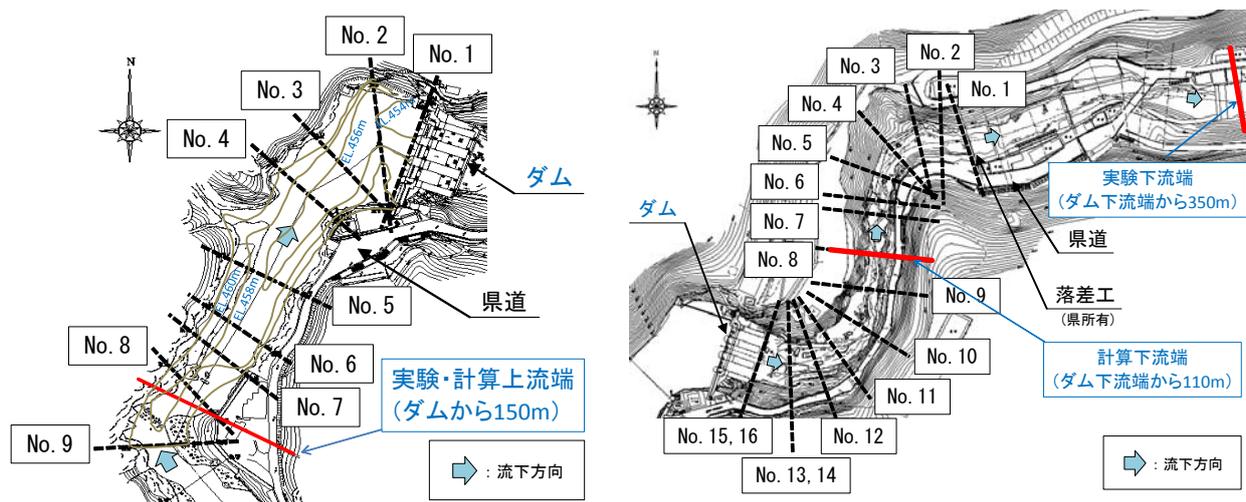


図-2 ダム上下流平面図 (左：ダム上流, 右：ダム下流)

うえ、200年確率流量と既往最大流量 ( $210\text{m}^3/\text{s}$ ) のうち大きい流量を採用して  $350\text{m}^3/\text{s}$  (改造前： $211\text{m}^3/\text{s}$ ) に見直した。

ダム改良前後の平面図・正面図を図-1に示す。なお、同図の改良後平面図には、後述の座標軸や水位計測測線を示している。

### 3. 放流特性の検討方法

#### (1) 水理模型実験

本ゲートレスダムは、図-2に示すように、蛇行部を有する急流河川 (勾配1/30程度) に設置され、かつ、現状の調整池はほぼ満砂状態で水深が浅い (ダム上流約150mの河床標高が越流頂標高EL. 458.7mと同程度)。この放流特性を調べるため、水理模型は蛇行部を含むダム上流約150m、ダム下流約350mの範囲を縮尺1/25で製作した。ダム模型は木製ペンキ仕上げであり、河川・調整池模型は深淺測量と現地河道調査に基づいてモルタル刷毛仕上げで地形を再現し、ダム下流には大きな転石や岩等も配置した。流れの相似律にはフルードの相似則を適用した。なお、設計洪水流量時の越流水深は8cm以上、レイノルズ数は  $1.25 \times 10^4$  以上を確保している。また、河川の粗度については過去の出水時 ( $126\text{m}^3/\text{s}$ ) の洪水痕跡を精度良く再現できることを確認している。

計測は、ポイントゲージで貯水池内と越流部の水位分布、サーボ式波高計で下流河川の水位変動、電磁流速計でダム上流の平面2次元流速分布を測定した。

#### (2) 三次元数値流体解析

ダム越流係数は越流形状やダム前面河床高などによって異なるが、それを含む上下流の放流特性を連続して解析するため、複雑な自由水面を精度良く安定的に計算できる当所開発の三次元数値流体解析コードSLOSH-NAGARE<sup>5)</sup>を用いた。これは、直交格子の有限差分法で連

続式と運動方程式を離散化し、VOF法で水面を追跡し、乱流モデルにはRNG型のk-εモデルを用いている。流速・圧力の時間発展には陰解法であるSIMPLER法を用い、さらに、流速、圧力の収束計算ではマトリクス要素を全て正の値になるよう工夫し、安定化を図っている。

計算格子は、ダム近傍流況の再現に十分な解像度と計算時間を鑑み、最小格子サイズを設定した。具体的には、管理橋橋脚直径が水平8格子、ダム越流面上流側円弧が鉛直3格子となるよう、水平・鉛直ともに最小格子サイズ0.1875m (実物スケール) で、ダム上流約150m、ダム下流約110mの範囲を不等間隔直交格子で分割した。総計算格子数は約300万 (水平  $150 \times 175$ , 鉛直67) である。なお、ダム越流部などの構築物を除く河川・調整池の数値地形は、1m間隔の等高線からNatural Neighbour内挿法で作成した1m格子の数値地図を基に、転石情報や深淺測量結果、現地写真を参考に微修正して用いた。また、上流端には安定的に給水されるようにプールを設け、小流量でも水深を確保し高流速にならないようにした。下流端は自由流出境界条件とし、下流水位が上流に影響を及ぼさないようにした。

### 4. 放流特性の比較検討結果

#### (1) ダム調整池の流況評価

図-3にダム直上流の水面付近の流速分布の比較を、図-4にダム軸上流15mのダム軸と平行な横断方向の水位分布の比較を示す。また、図-5にゲートレスダム上下流の流況の計算結果 (スクリーンショット) を示す。ここに、X、Yの原点は図-1に示したように管理橋橋脚の中心で、Xはダム軸直交方向 (下流が正)、Yはダム軸方向 (左岸方向が正) である。また、ダム天端標高はEL. 458.7mで、 $h$ はダム天端基準の越流水深である。流速と水位の計算結果は、定常状態確認後の300秒間の平均である。なお、本検討の越流幅は、実験、計算ともに、設計原案の

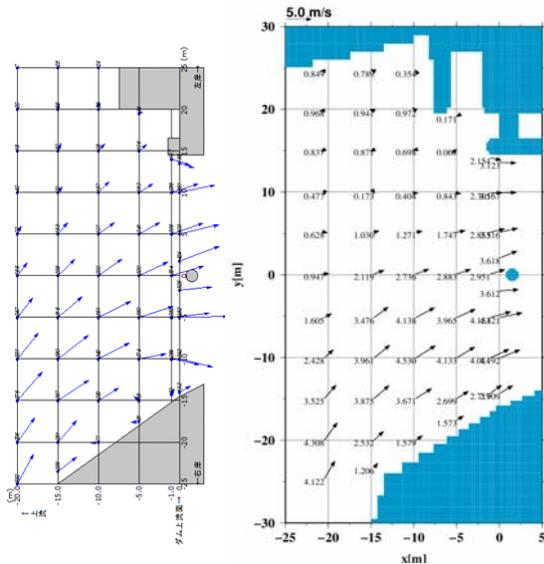


図-3 水面付近のダム上流流速分布(左：実験，右：計算)  
(現状河床，290m<sup>3</sup>/s，排砂門全閉)

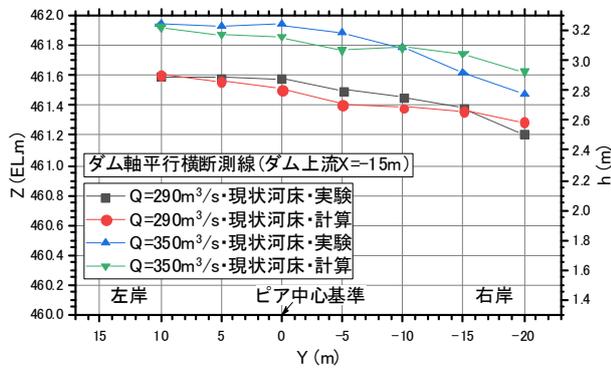


図-4 ダム上流水位の比較(現状河床)

表-1 ダム上流平均水深と越流係数の比較(現状河床)

	実験		計算	
	290m <sup>3</sup> /s	350m <sup>3</sup> /s	290m <sup>3</sup> /s	350m <sup>3</sup> /s
平均水深 h [m]	2.77	3.10	2.74	3.10
越流係数 C	2.29	2.34	2.32	2.34

29.0m (管理橋橋脚直径1.5mを含む) である。

表層流速の実験結果によると、湾曲内側となる右岸近傍と左岸側によどみ域が形成される。また、その間を流れる主流は右岸側の方が速く、流速ベクトルがダム軸直交方向に対して左を向いている。計算結果は、左岸側のよどみ域が実験よりも多少広いものの、実験における偏流の傾向を概ね再現できている。

ダム軸方向水位分布については、偏流の影響で右岸側の水位が低くなるが、流量によらず、計算結果は実験結果によく一致している。7カ所の計測点の平均水深 $h$ からダム越流係数 $C (=Q/B/h^{1.5})$ を算定すると、表-1に示すように、計算結果と実験結果は実験流量精度(全幅堰±1.7%)以内で一致しており、再現性は高いと言える。なお、290m<sup>3</sup>/sは100年確率流量である。

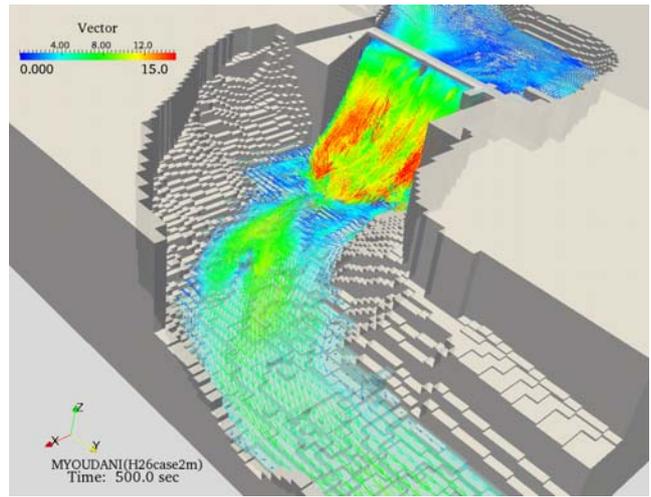


図-5 ゲートレスダム上下流流況の計算結果  
(現状河床，350m<sup>3</sup>/s，排砂門全閉)

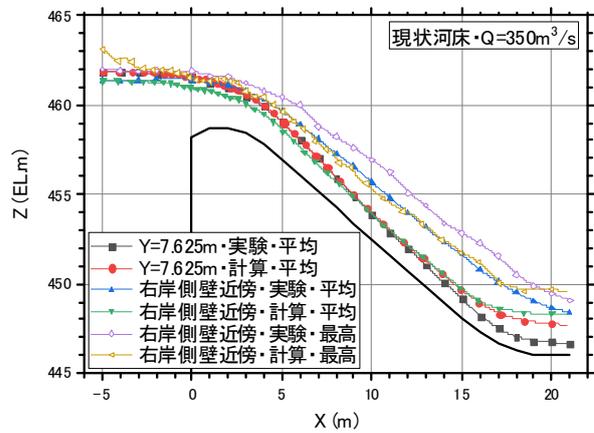


図-6 ダム越流部水位の比較(現状河床)

## (2) ダム越流部の流況評価

図-6にダム越流部水位について、管理橋左岸側洪水吐の中心(Y=7.625m)と右岸側壁近傍の実験結果と計算結果の比較を示す。

これらによると、管理橋や側壁の影響が少ない洪水吐中心の水面形は、ダム高さの半分程度であるEL.452m程度まではよく一致し再現性が高いが、ダム洪水吐末端付近の水位は計算の方が高い。本計算では、ダム越流天端付近の流況の再現性を優先して直交格子の格子サイズを小さくし、ダム洪水吐下流部の格子サイズは計算時間の制約で大きくせざるを得なかったため、ダム洪水吐末端付近のエネルギー損失が過大評価となったと考えられる。

右岸側壁近傍の水位については、計算の方が低く、計算の最高水位が実験の平均水位程度である。計算格子サイズの関係で、計算の水位評価点(壁からの距離)は実験よりも少し遠くなっており、計算格子の解像度とあわせて、漸縮形状の壁際水位の評価には課題がある。

## (3) ダム下流の流況評価

図-7に横断2測線のダム下流水位と横断地形の比較を

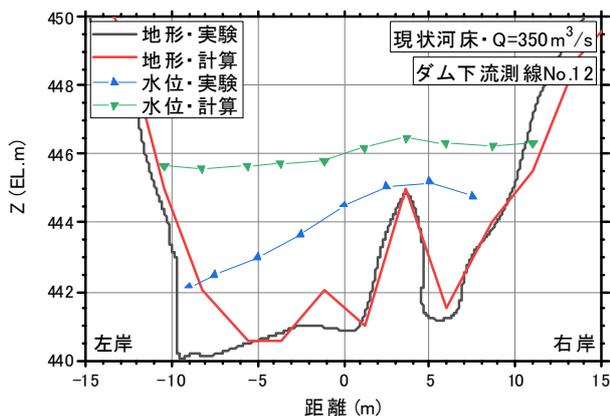


図-7 ダム下流水位の比較 (350m<sup>3</sup>/s, 排砂門全閉)

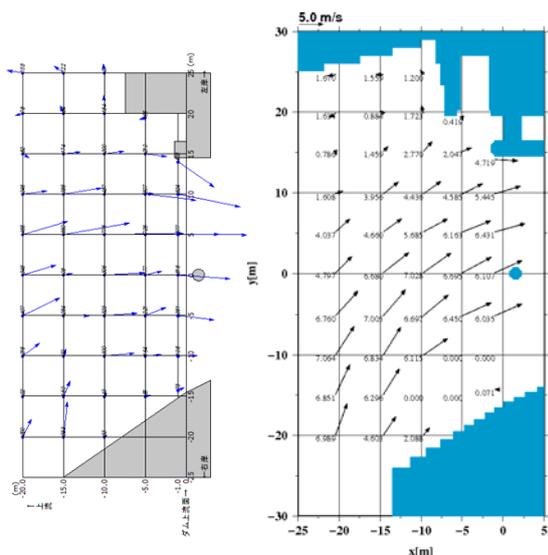
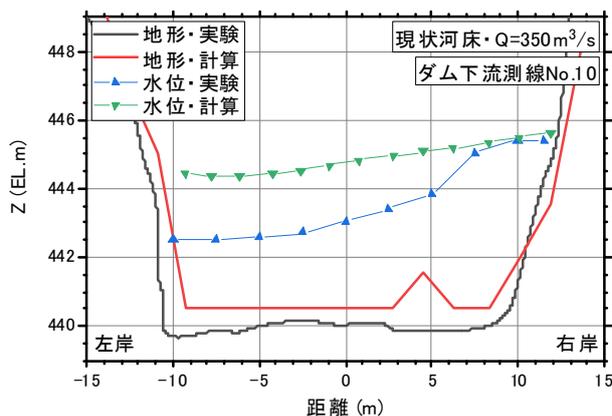


図-8 水面付近のダム上流流速分布(左: 実験, 右: 計算) (計画河床, 290m<sup>3</sup>/s, 排砂門全閉)

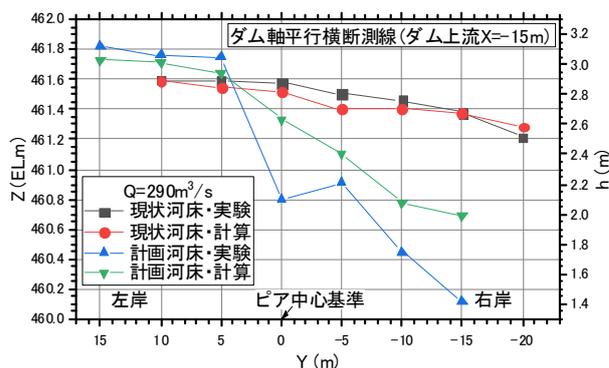


図-9 ダム上流水位の河床条件影響比較

示す。なお、計算地形は各計算格子の上面中心標高を繋いだものである。これらによると、計算と実験の地形は完全に一致しているとは言えないが、その違いの大きさ以上に計算水位は実験水位よりも高い。また、実験では湾曲外側の水位の方が内側よりもかなり高いが、計算の水位差はそれほど大きくない。前述のとおり、本計算の格子サイズはダム越流天端付近を優先しているため、下流河川の格子サイズは 水平約1m、鉛直0.5mと比較的大きい。このため、最大3~5m規模の転石や岩は直角格子でも表現できるものの、下流河川を主に占める砂礫河床や露岩河床については特に湾曲岸沿いの直角格子が実験に比べると凹凸が大きい。このために下流河川のエネルギー損失が過大で計算水位が実験水位よりも高くなったと考えられ、再現性を向上させるためには特に水平格子サイズを小さくする必要があると考えられる。

#### (4) ダム調整池の堆砂影響評価

本地点は堆砂の進行が早いいため、計画河床の検討も行った。計画河床は、ダム越流天端標高を基準に、現状河床勾配の1/2の河床勾配<sup>0</sup>で堆砂するものと想定し、そ

のような河床勾配の平滑な地形とした。図-8に計画河床におけるダム直上流の水面付近の流速分布の比較を、図-9にダム軸上流15mのダム軸と平行な横断方向の水位分布の比較を示す。

表層流速の実験結果について現状河床 (図-3) と比較すると、計画河床では湾曲内側の低流速域が広がり、左岸側を中心に流れて流速が速い。計画河床の計算結果も湾曲内側の低流速域が広がり、左岸側の表層流速は実験結果よりも少し遅いものの、主流が湾曲外側に偏る流況の変化は概ね再現できている。

水位については、右岸側の水位低下量が実験よりも少し小さいものの、左岸側の水位についてはほぼ一致している。実験の河床面はかなり平滑な地形である一方、階段状の直角格子で模した計算地形は相対粗度が少し大きく、水位が高くなったと考えられる。

#### (5) 排砂門の影響評価

本ゲートレスダムは大型の排砂門を設置したため、排砂門の開閉が放流特性に与える影響について数値実験を実施した。図-10に排砂門全開時のダム直上流の水面付近の流速分布の計算結果を、図-11にダム軸上流15mのダム軸と平行な横断方向の水位分布の計算結果を示す。

表層流速について排砂門全開時の計算結果 (図-3) と比較すると、排砂門全開時の流速ベクトルは全体的に排砂門の方に向いている。一般的に、水面よりも低標高に

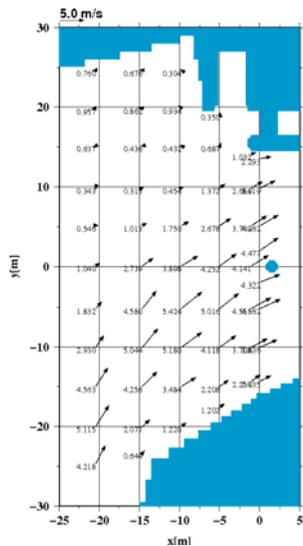


図-10 水面付近のダム上流流速分布  
(計算, 現状河床, 290m<sup>3</sup>/s, 排砂門全開)

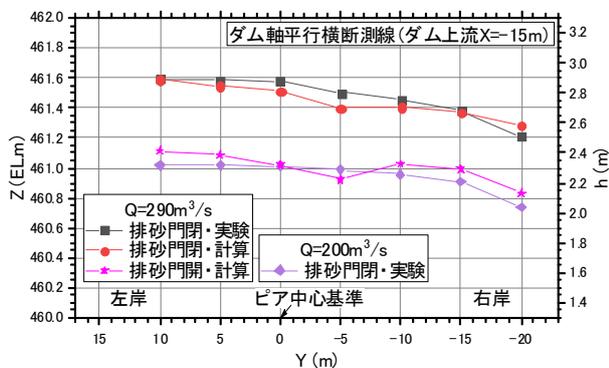


図-11 ダム上流水位の排砂門開閉影響比較

あるダム排砂門の開閉による流況影響は、排砂門の近傍にとどまり、調整池全体の流況に影響を及ぼすことは少ない。しかし、本ゲートレスダムは、排砂門が大きく、排砂門全開時の水位が全閉時に比べて0.4~0.5m程度低くなること、また、河床高が高いために排砂門全開によって流速が上がりやすいことから、湾曲部の偏流がより大きくなって、全体の流況に影響したと考えられる。

水位については、排砂門全開によって水位が下がるが、計算水位は排砂門全閉条件の流量200m<sup>3</sup>/sの実験水位とほぼ一致している。排砂門中心標高を基準とした計算平均水深は6.52mであり、入口損失係数を0.5、出口損失係数を1.0と仮定すると排砂門放流量は83m<sup>3</sup>/sと算出され、排砂門全開条件の計算水位は概ね妥当な値と考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、蛇行部を有する急流河川を対象に、貯水池堆砂が進行したゲートレスダムの放流特性について水理模型実験ならびに三次元数値流体解析を実施し、主に

流況と水位の再現性を確認した。その結果、ダム上流から越流部までは0.1m以内の差で水位が一致し、ダム越流係数も実験流量精度程度で再現できる目処を得た。しかし、下流河川については計算の方がエネルギー損失が過大で、計算格子サイズの設定方法について課題が残った。ダム貯水池の計画河床の流況再現性については、ダム直上流の湾曲内側のよどみ域で計算水位が少し高いものの、現状河床よりも標高が3m以上高い満砂状態において主流が湾曲外側となる流況を再現できることを確認した。排砂門全開条件については、排砂門全開流れとダム越流流れが混在する複雑な流れでも安定的に計算でき、計算水位が排砂門流出流量を差し引いた水位になることを確認した。また、大型の排砂門が設置され、かつ、堆砂が進行して河床位が高い調整池では、排砂門近傍だけではなく、調整池全体の流況が変化しうることを確認した。

本研究の評価対象区間には、湾曲部やダム越流部に加えて排砂門なども存在し、常流と射流が混在した複雑な流れとなるが、ダム越流部付近の計算格子サイズを適切に設定し、また、上流端にプールを設けることで設計洪水流量でも安定的に精度高く計算することができた。計算時間に課題はあるものの、非定常なハイドロでも確実に検討できる目処がたち、高経年化で堆砂が進行した既設ダムなどのリスク評価が進展すると考えられる。

謝辞：実験の実施にあたり、斎藤章彦氏（元・四国総合研究所）の協力を頂いた。また、数値解析の実施にあたり、田中伸和氏（電力中央研究所名誉研究アドバイザー）、中園有子氏（電力計算センター）の協力を頂いた。ここに記し、深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 例えば、藤田久之、山崎啓左、高澤英樹: 滝波川第一発電所小原ダム改修に伴う形状検討の水理実験, 電力土木, No.351, pp.28-32, 2011.
- 2) 例えば、熊谷洋、板井雅之: 水理模型実験代替を目的とした3次元流体解析によるダム越流係数算定技術の開発, 河川技術論文集, 第24巻, pp.661-666, 2018.
- 3) 川野裕知、木岡浩一、壬生和也: 切越発電所明谷ダム改良工事の計画・設計および施工, 電力土木, No.394, pp.27-32, 2018.
- 4) 壬生和也、木岡浩一: 既設ダム洪水吐きの放流方式変更によるダム管理業務の合理化・省力化について~切越発電所明谷ダム改良工事~, 第15回中小水力発電技術に関する実務研修会, pp.91-124, 新エネルギー財団水力地熱本部, 2019.
- 5) 木原直人、高島大輔、吉井匠、池野正明、太田一行、田中伸和: 陸上構造物に対する津波流体力評価(その1), 電力中央研究所研究報告, N12010, 2012.
- 6) 国土交通省砂防部: 土石流・流木対策設計技術指針及び同解説, 2007.

(2019. 4. 2受付)