

草木ダム貯水池の洪水流動を考慮した 洪水流入量, 放流量の評価方法に関する研究

STUDY ON THE EVALUATION METHOD OF INFLOW AND OUTFLOW
DISCHARGES CONSIDERING FLOOD FLOW DYNAMICS IN THE KUSAKI
DAM RESERVOIR

塚本洋祐¹・福岡捷二²・大山 修³

Yosuke TSUKAMOTO, Shoji FUKUOKA and Osamu OYAMA

¹正会員 博士(工学) 株式会社建設技術研究所 研究センターつくば(〒300-2651 茨城県つくば市
鬼ヶ窪1047-27)

²フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 国土交通省関東地方整備局 渡良瀬川河川事務所(〒326-0822 栃木県足利市田中町661-3)

The flood management in dam reservoirs has been performed by using the condition that a water level observed near the dam body holds uniformly everywhere in the reservoirs. However, floods in dam reservoirs flow down transforming a water-level and a discharge by flows in three-dimensional reservoirs. For efficient and safe dam reservoir management, it is necessary to establish the evaluation method of inflow and outflow discharges considering the mechanism of water storage, and three-dimensional flow structures in dam reservoirs. In this study, the quasi-three dimensional numerical model for explaining three-dimensional flow features was applied to the Kusaki dam reservoir. The evaluation method of inflow and outflow discharges based on the numerical model and observed temporal changes in flood water surface profiles was proved to be valid.

Key Words : dam reservoir, reservoir flood flow analysis, flood propagation, storage volume, water surface profiles, flood management

1. 序論

洪水時のダム貯水池は, 流動形態から図-1に示す湛水領域, 遷移領域, 上流河川域に分類されるが, 現行のダム管理では貯水池内の水面がほぼ水平に上昇するとみなしてダムへの洪水流入量, ダムからの放流量を算定してきた. すなわち, 現行のダム管理では, 貯水池下端のダム堤体付近で観測された貯水位とダム放流量算定式から放流量 Q_{out} を算定し, 放流量と貯水池の水位-水量(H-V)関係に基づく貯留率 dS/dt からダム流入量 Q_{in} を算定することにより管理が行われている. この手法は, 貯水池内の洪水流量の連続性の関係を用い, ダム流入量, 放流量を簡易に推定可能にしている. 複雑な形状を有するダム貯水池を流下する洪水流は, 貯水池内を流動しながら時空間的に流量・水位波形を変形しつつ流下する. しかし, 現行のダム管理では, 洪水流の時空間的な流動変化にともなう貯留(図-1中の dS')の影響は考慮されてい

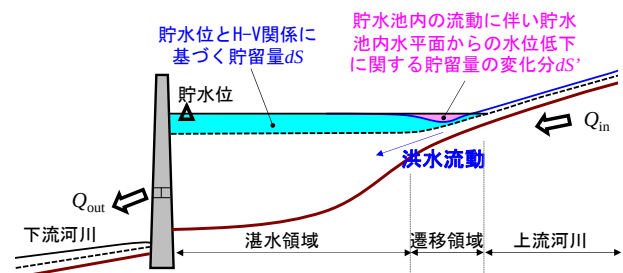


図-1 洪水波形の伝播特性

ない. 安全で, 効率的・効果的な貯水池管理のためには, 貯水池内洪水の流動, 貯留, 伝播メカニズムの検討に基づくダム流入量, 放流量を評価することによって, 現行のダム管理方法の検証が必要である.

著者ら¹⁾は, 利根川水系渡良瀬川に位置する草木ダム貯水池とその上下流河川で水面形の時系列データを詳細に観測し, これに基づく平面二次元非定常流解析から, 現行のダム管理で用いられているダム流入量, 放流量の検証を行なった. しかし, 貯水池内で起こっている洪水流動実態が測定されていないためと, 浅水流方程式を基

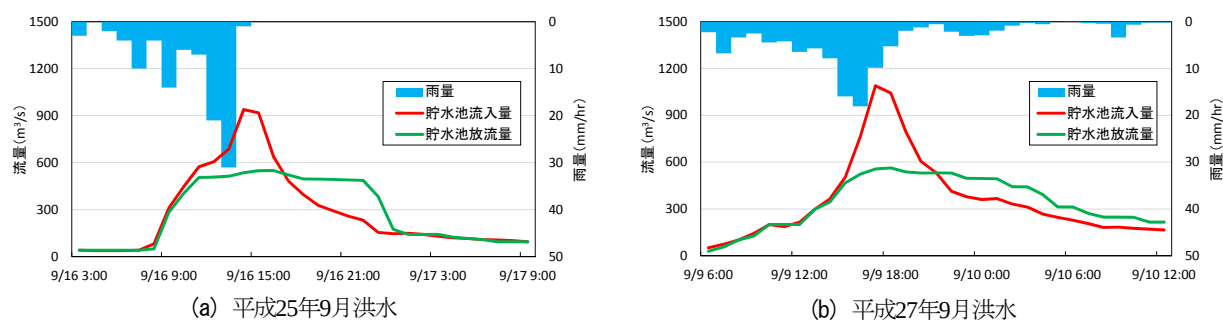


図-2 現行のダム管理におけるダム貯水池流入量、放流量ハイドログラフ



図-3 草木ダムと上下流河川における洪水観測体制

礎式とする平面二次元非定常流解析を用いているため、ダム貯水池内の地形の縦横断的な変化にともなう三次元的な洪水流動の解明は不十分なことが明らかとなった。そこで、貯水池内の洪水流動実態を定量的に明らかにするため、ダム貯水池水理模型を用いた、貯水池内の洪水流の水位、流速分布の詳細な計測を行い貯水池内の洪水流動の実態を明らかにし、さらに、貯水池内の洪水流動を表現可能な準三次元貯水池流動解析法を構築し、その妥当性を示した²⁾。しかし、水理模型実験は、ダム流入量と放流量を既知量として検討が行われているが、現地ダムでは、洪水時にダム流入量、放流量を計測することは容易ではない。したがって、洪水時に観測可能なダム貯水池水位時系列データと、さきに開発した準三次元貯水池流動解析法を用い貯水池内の流動を求めることによる、合理的なダム流入量、放流量の評価方法の確立が必要とされている。

本研究は、準三次元貯水池流動解析法を用い、観測された貯水池水面形時系列データにほぼ一致するように草木ダム貯水池の流動を解き、算定された洪水流動に基づくダムへの洪水流入量、ダムからの放流量を評価し、評価方法の有効性を示す。

2. 草木ダムにおける洪水観測

(1) 対象洪水

対象洪水は、草木ダム貯水池において観測された平成25年9月と平成27年9月の2洪水とした。図-2に観測雨量と草木ダムの現行管理により実施されたダム流入量、放流量ハイドログラフを示す。平成25年9月洪水は、9/16の未明より降雨が生じ、13:00に最大で31mm/hrの降雨が発生した。草木ダムでは、累加雨量が30mmを超えた段

階で放流が開始され、放流量が500m³/sとなった時点で一定量放流が実施される。ピーク雨量発生後に降雨が止み、9/16の22:00に一定量放流が終了している。平成27年9月洪水は、9/9の未明より降雨が始まり、16:00に最大で18mm/hrの降雨が発生した。平成25年9月洪水と比較して平成27年9月洪水の方がピーク降雨量は小さいものの、降雨の継続時間が長い。このため、平成25年9月洪水と比較してピーク流量が大きく、ピーク雨量発生後も断続的に降雨が発生することで、放流期間が長い特徴を有している。

(2) 洪水観測体制

図-3に草木ダムと上下流河川における洪水観測体制を示す。水位計は、草木ダム貯水池内に10地点、上流河川に3地点、ダム下流河川に3地点設置した。貯水池上流区間から上流河川区間（水位計3-7より上流の区間）では、ダムへの洪水流入量の把握を目的に約300m～500m間隔で水位観測を行い、貯水池内では約500～1,000m間隔で水位観測を実施している。

上流河川では沢入橋、ダム下流河川では萬年橋地点で電波式流速計により横断方向に8～10測線観測することにより、流速分布のデータを得た。なお、本検討ではこの観測流速分布と、沢入橋、萬年橋地点の観測水位を用い河道流量を推定している。

(3) 水位波形の分析

図-4に各観測地点の水位ハイドログラフを示す。なお、水位ハイドログラフは、洪水初期の水位を基準とし、この基準水位からの上昇量を用い示している。平成25年9月洪水の上流河川の観測水位に顕著な振動が見られる。これは、5分間隔で観測された水位の瞬間値をプロットしているためである。なお、平成27年9月洪水では、観

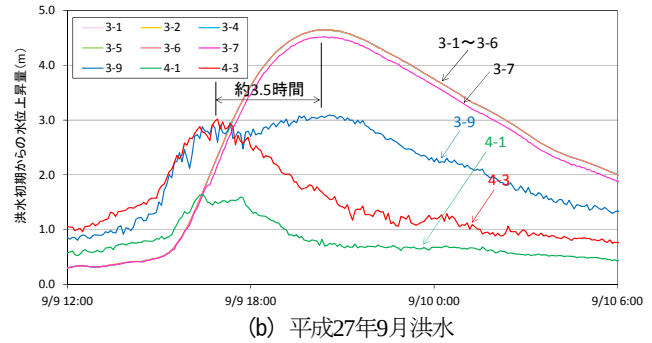
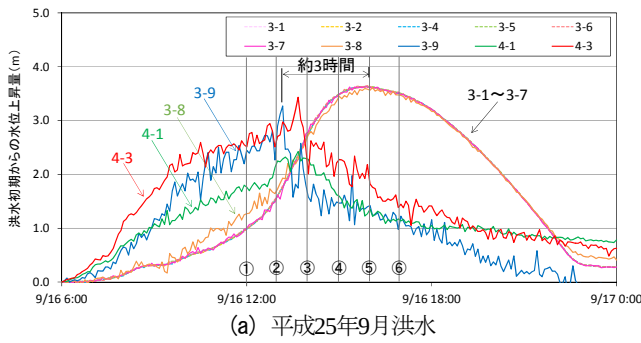


図-4 洪水初期からの観測水位上昇量ハイドログラフ

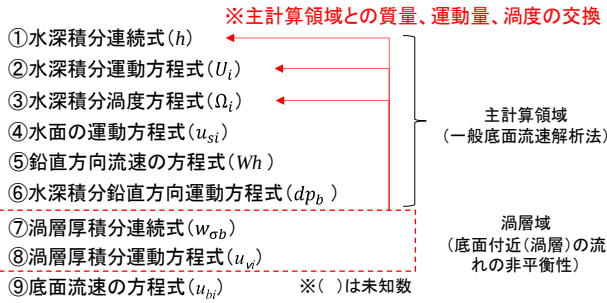


図-5 準三次元貯水池流動解析法の枠組み

測間隔を30秒に短縮し5分平均で平滑化しているため観測水位の振動が低減している。草木ダム貯水池では、水位計3-7より下流区間の水位波形は一致し、水面がほぼ水平となる湛水領域を形成している。一方、水位計3-9より上流区間では、水位観測地点の縦横断形状の違いにより多少の差はあるが、同じ傾向の水位波形を有している。平成25年9月洪水の上流河川における水位上昇期（図-4(a) ①～②）には、水位計3-8地点（図-4(a) 橙線）は、その上流側に位置する水位計3-9（図-4 青線）、4-1（図-4(a) 緑線）より上昇速度は遅いが同じ傾向で水位が上昇する。この時の流入流量に対し、貯水池の湛水領域は水位上昇が遅いため、上流河川の水位波形と湛水領域の水位波形に約3時間の時差が生じている。その後、上流河川の水位が下降し、一方湛水領域では水位が上昇する（図-4(a) ③～⑥）ことで、水位計3-8の水位波形は湛水領域の背水のために、湛水領域と同様の水位波形となる。平成27年9月洪水では、水位計3-8が欠測となったが、水位計3-9には湛水域の影響が現れている。なお、水位計4-1の観測水位は、上流河川の水位計4-3と比較して水位上昇量が小さい。これは、後述する解析結果（図-6）に示すように、水位計4-1は沢入発電所堰堤において堰上げられた洪水流が、大きな落差を有して流下し、射流区間に存在していることが要因として考えられる。上流河川の水位波形と湛水域の水位波形に約3.5時間の時差が生じている。なお、詳細な水面変化や洪水流動機構については、第3章と第4章で詳述する。

3. 平成25年9月、平成27年9月洪水の再現計算

(1) 準三次元貯水池流動解析法の概要

表-1 粗度係数一覧

	平成25年9月洪水	平成27年9月洪水
上流河川・遷移領域	0.053～0.087	0.055～0.069
湛水領域	0.025	0.025
ダム下流河川	0.061～0.087	0.061～0.087

著者らは、ダム貯水池内の洪水流動を評価するには、貯水池内の地形の縦横断的な変化に起因する流動、特に河床近傍における非平衡流れの流速分布等を考慮する必要があることを示し、これを表現可能な準三次元貯水池流動解析法を開発した²⁾。図-5に準三次元貯水池流動解析法の枠組みを示す。本解析モデルの特徴は、ダム貯水池内の地形の縦横断的な変化による洪水の流動、変形を考慮するため、貯水池内の洪水流動を規定する河床勾配が縦横断的に大きく変化する遷移区間における河床近傍の非平衡流れと、それに伴う流速の鉛直分布の変化を河床近傍の渦層を考慮することによって表現することにある。本解析モデルは、洪水が大きな運動量をもって流下する主計算領域と、河床近傍での渦層域の2層から構成されている。主計算領域では、内田ら³⁾が河川の流れに用いた水深積分モデルの枠組みで流れの三次元性を考慮できる一般底面流速解析法を用いる。渦層域では、河床近傍の非平衡状態の流れとそれに伴う流速分布の変化を考慮するため、河床近傍の渦層域における連続式、運動方程式より、渦層内の流れを直接的に評価する。また、上流河川は通常の河川であることから一般底面流速解析法を用いる。以上より、本解析モデルは、準三次元解析モデルの枠組みで、上流河川～遷移領域～湛水領域を流下する洪水流を一体的に取り扱うことが可能なモデルになっている。

(2) 検討条件

解析対象区間は、ダム堤体の0.0kmから上流河川84.0km区間とする。境界条件は、上流端に水位計4-3の観測水位ハイドログラフを、下流端ダム地点において観測貯水位ハイドログラフを設定する。放流量は、ダム地点の解析水位が貯水位に合うようにゲート開度を調整し、放流量フラックスを設定する。渦度フラックスは、ダム堤体前面の解析メッシュにおける渦度の内、ゲート開度分だけ下流に放出されるものとモデル化した。また、ダム堤体から受ける流体力をゲート上部、下部に働く静

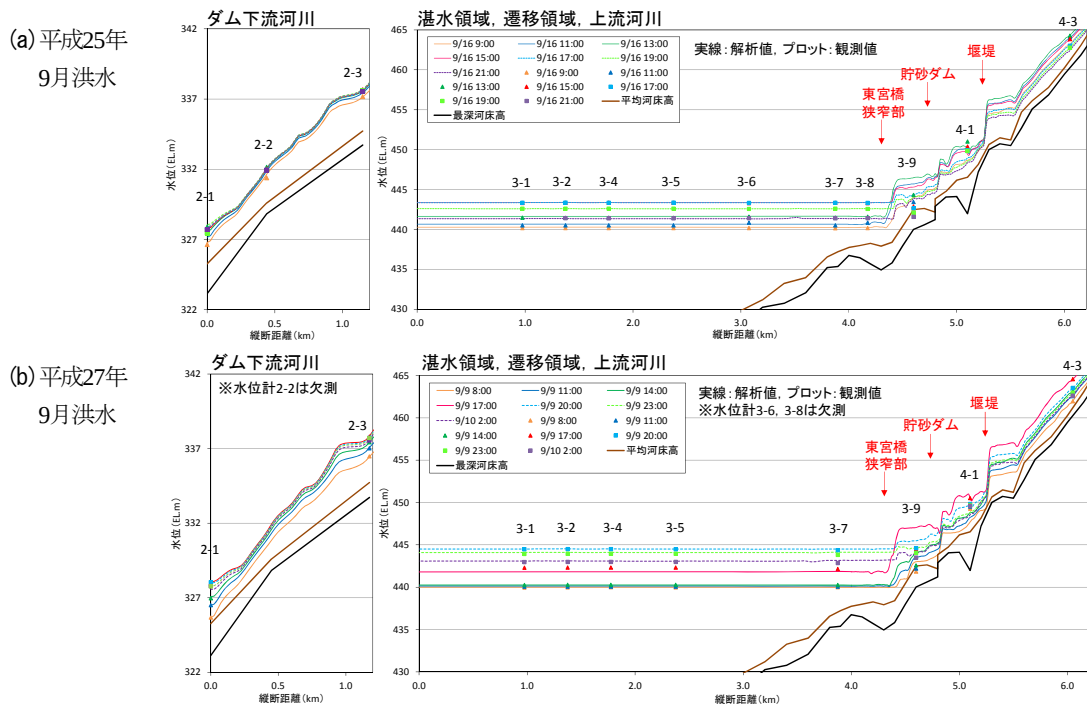


図-6 縦断水面形の解析値と観測値の比較

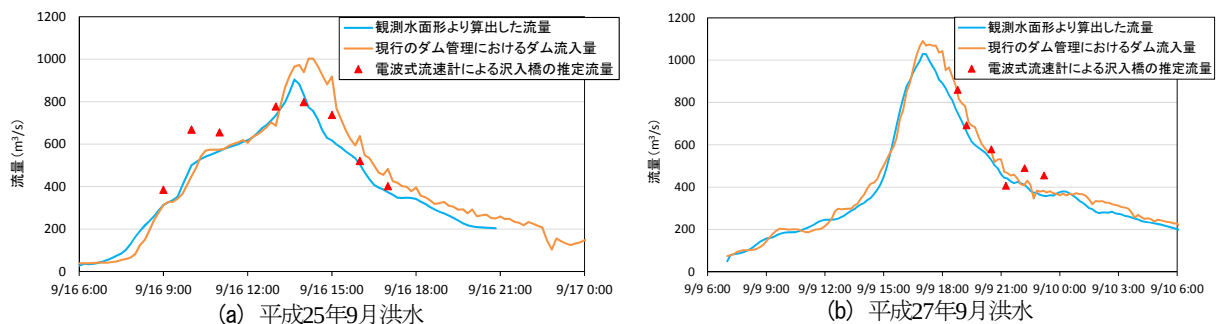


図-7 ダム貯水池流入量の解析値と観測値の比較

水圧に加え、接近流速により生じる動圧を考慮している。解析対象区間の粗度係数は、表-1に示す様に、上流河川・遷移領域、湛水領域、ダム下流河川で分けて設定し、上流河川・遷移領域、ダム下流河川では、観測水面形の時系列データを解析で再現するように粗度係数を変化させている。粗度係数を時間的に変化させている理由は、洪水位、流速の大きい時間帯には、洪水流の水位変化に及ぼす岩や巨石等の河床材料の形状抵抗を粗度係数で表現していることが主要な理由である。また、貯水池内の湛水領域では $n=0.025$ で一定値を設定した。

(3) 解析結果

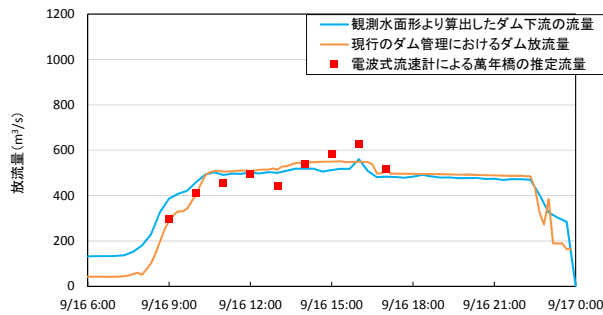
図-6に縦断水面形時間変化の解析値と観測値の比較を示す。平成25年9月洪水、平成27年9月洪水の解析水位を見ると、湛水領域では、上流から流入する洪水流が減速し貯留される。両洪水とも、湛水領域の容量に比して、流入流量が小さいことから、湛水領域では水位上昇期、下降期ともに縦断水面形は概ね水平になることが分かる。

平成25年9月洪水の遷移領域では、流量上昇期（9/16 11:00～13:00）において、水位計3-7、3-8付近で若干の水

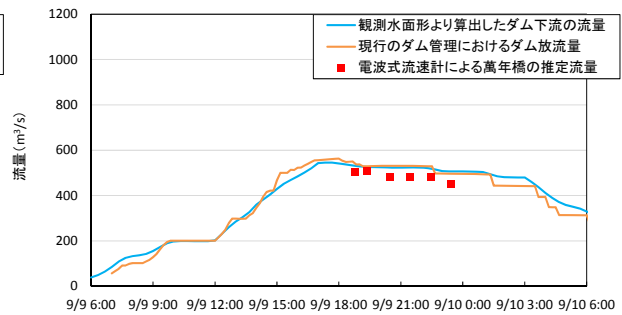
位変化が生じている。上流河川域では、河川に固有の河床勾配に応じて縦断水面形が形成される。平成27年9月洪水も同様の傾向にあり、水位計3-7～東宮橋狭窄部（4.4km地点）の区間で若干の水位変化が生じている。なお、両洪水とも、水位上昇期の遷移領域である水位計3-9において、解析水位の方が観測水位より高く計算されている。これは、図-3中に示す東宮橋の狭窄部の影響を大きくとりすぎている可能性があり、この区間の水位の解析精度度について、さらに検討が必要であると思われる。

ダム下流区間では、平成25年9月洪水では、各水位観測地点において解析水位は観測水位と対応している。なお、平成27年9月洪水では、水位計2-2が欠測しているものの、解析水位は上流端境界条件である水位計2-3、下流端境界条件である水位計2-1を表現している。

図-7に上流河川の水面形の時間変化から算出したダム流入量の解析値と観測値の比較を示す。図中には、現行のダム管理で用いられるダム流入量も示している。なお、観測値は沢入橋の電波式流速計による流速観測値に、流量補正係数 0.85^4 を用いて推算した流量を示す。

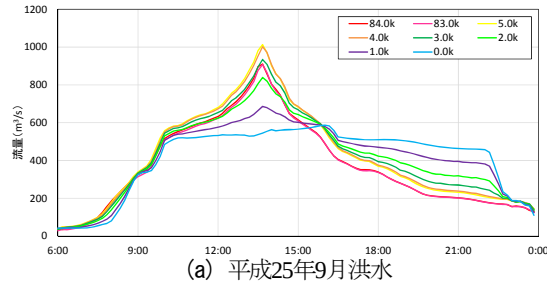


(a) 平成25年9月洪水

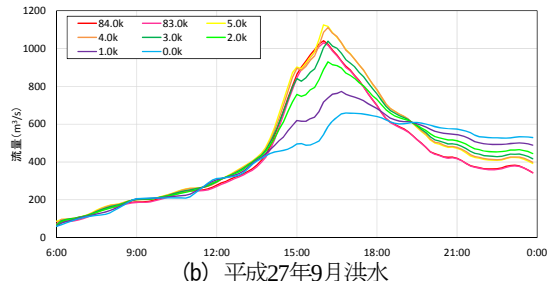


(b) 平成27年9月洪水

図-8 ダム貯水池からの放流量の解析値と観測値の比較



(a) 平成25年9月洪水



(b) 平成27年9月洪水

図-9 解析流量ハイドログラフの縦断変化

平成25年9月洪水の上流河川では、流量上昇期において、解析流量が沢入橋の電波式流速計推算流量より若干小さいものの、沢入橋の観測流量ハイドログラフの傾向を捉えている。また、現行のダム管理で用いられるダム流入の評価量と観測水面形の時系列データに基づく解析流量ハイドログラフを比較すると、解析流量のピーク発生時刻が若干早いものの、水位上昇期の波形は対応している。しかし、平成27年9月洪水は、平成25年9月洪水と同様に流量下降期において、解析流量と現行のダム管理で用いられるダム流入量に差が生じている。解析流量と電波式流速計による推定流量を比較すると、解析流量は沢入橋の観測流量ハイドログラフの傾向を捉えているが、前述のように河川上流域は複雑な河道形状を有する急流河川のため、水位観測、解析精度についてさらに検討が必要である。

図-8にダム放流量の解析値と観測値の比較を示す。なお、観測値は図-7に示す沢入橋と同様に、萬年橋の電波式流速計による流速観測値と流量補正係数を用いて推算している。平成25年9月洪水、平成27年9月洪水ともにダム下流河川では、水面形を用いた解析流量ハイドログラフは、萬年橋の電波流速計による推定流量、現行のダム管理で用いられるダム放流量と良く対応している。草木ダムの湛水領域は、流入量に比して貯水池容量が大きいことから、ほぼ静水状態となる。このため、現行のダム

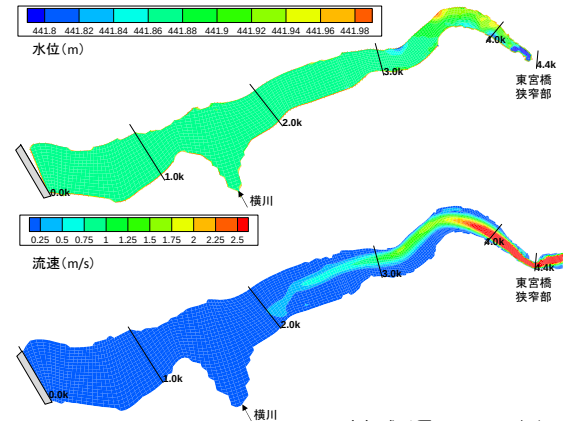


図-10 平成27年9月洪水ピーク流量流下時の
水位コンターと、水深平均流速コンター

管理で用いられている、ダム付近の水位を用いて導かれたダム放流量算定式は、十分な精度で評価出来ていると言える。

4. 貯水池内の流動と貯留量の分析

(1) 草木ダムの洪水流下特性

草木ダムの洪水流下特性として、洪水波形の伝播、変形機構について分析する。図-9に解析流量ハイドログラフの縦断変化を示す。図中の流量は各断面における解析流量の10分間平均値を示している。平成25年9月洪水、平成27年9月洪水ともに、2.0kmより下流の区間で流量ハイドログラフが大きく低減する。図-10に平成27年9月洪水のピーク流量時の水位コンター図、水深平均流速コンター図を示す。水位コンター図を見ると、湛水領域では縦横断的な水面変化は見られないが、遷移領域である東宮橋狭窄部から貯水池への流入部では、局所的に水位が湛水領域の水位より低くなる。この地点の流速を見ると、上流河川から慣性力の強い洪水流が流入し、約2.5m/s以上の流動が発生している。この洪水流動による運動エネルギーが、湛水領域に比して遷移領域の水位を低下させる要因となっている。貯水池内を流下する洪水流は、約2.0km地点まで0.5m/s程度の流速を有して流下する。2.0kmより下流の区間で、貯水池の河積が大きくなり、上流から流入する洪水流は、ほぼ静水状態となる。この

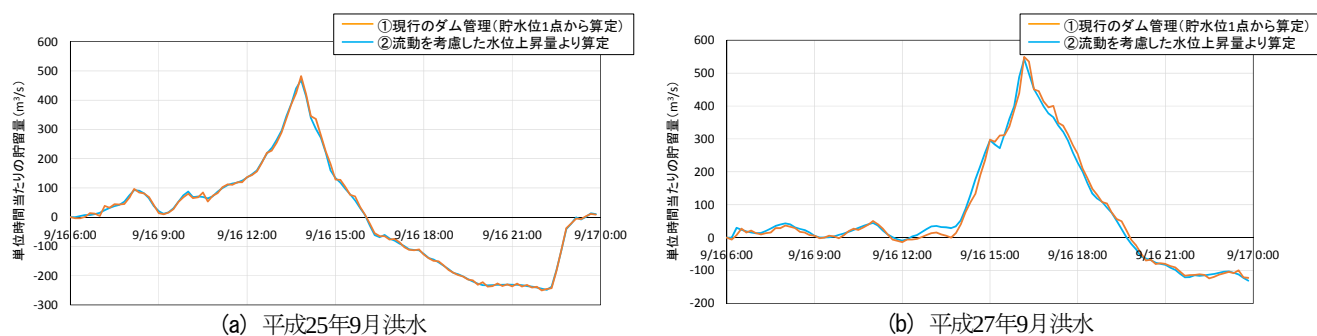


図-11 単位時間当たりの貯水池貯留量

ため、2.0kmより下流の区間で貯留量が大きくなり、縦断的に流量ハイドログラフが低減しつつ流下する。

(2) 貯水池内の洪水流動を考慮した貯留量と現行のダム管理への影響評価

図-11に単位時間あたりの貯留量を示す。図中の①は、ダム堤体付近の解析貯水位を用い、現行のダム管理と同様に、貯水位が水平に上昇する仮定のもとで算定した貯留率を、図中の②は、貯水池内の洪水流動を考慮した解析水位と流速分布を用い算定した貯留率を示す。また、図-1中に示す ds' の全貯留量に占める割合を表-2に示す。平成25年9月洪水の①の貯留量は、②の貯留量とほぼ同値となる。また、平成27年9月洪水では、①の貯留量は②の貯留量より1.9%大きく算定されている。草木ダム貯水池の湛水領域を縮小した水理模型実験と洪水流動解析の既往検討²⁾では、貯水池全体で水位が水平であるとした貯留量から流動変化を考慮した解析による貯留量の変化は、貯水池全体の貯留量の約10%程度となることを示した。これに対し、本検討で算出した草木ダムの ds' は、平成25年9月洪水で0.4%、平成27年9月洪水で1.9%となった。この主要因は、フルード相似則を適用し水理模型実験で用いた流量は、現地で対象とした洪水流量よりかなり大きく、貯水池容量を縮小したため、水理模型実験の湛水領域が現地に比して小さく全貯留量に占める ds' の割合が相対的に大きくなったためと考えられる。

以上の検討より、現地ダム、水理模型実験の洪水観測と洪水流動解析から、現行のダム管理は、貯留率、ダムへの洪水流入量をやや大きめに評価していることが明らかとなった。このことは、ダム洪水管理が安全側で行われていることを示している。非常時となる場合を除いては、ダム貯水池は、計画水位内で運用される。貯留率が大きめに評価されることは、ダム内の流動によって生じる遷移区間の水平からの水位低下分は、貯留のための洪水貯留余裕分と見ることができる。今後、異なる規模のダム貯水池及び異なる規模の洪水について同様の検討を行うことによって、洪水時のダム貯水池の水理現象の理解と、それに基づく安全で適切なダム管理を行っていくことが望まれる。

表-2 ds' の全貯留量に占める割合

	草木ダム		水理模型実験 (現地換算値)	
	平成25年9月 洪水	平成27年9月 洪水	中規模 洪水	大規模 洪水
ピーク流量 (m^3/s)	939	1,090	1,300	2,200
①貯留量 (m^3)	6,860	8,980	11,640	19,780
②貯留量 (m^3)	6,830	8,810	10,490	18,230
①-②:貯留量 ds' (m^3)	30	170	1,150	1,540
全貯留量に占める 割合(%)	0.4	1.9	10.9	8.4

5. 結論

- 1) 本研究で示された観測水面形の時系列データと、準三次元貯水池洪水流動解析法、一般底面流速解析法を用いた上流河川からのダム貯水池への流入量ハイドログラフ、ダム貯水池から下流河川への放流量ハイドログラフの算定法は、貯水池への流入量、貯水池からの放流量の算定に有効であることを示した。
- 2) 平成25年9月、平成27年9月の中規模洪水において、草木ダムにおける洪水流動による水位低下によって生じた貯留量変化分 ds' は0.4%~1.9%となることを示した。この結果、貯水池内の水面が水平に上昇、下降するとして現行のダム管理方法は、貯水池への流入流量をやや大きめに評価するものの、管理上安全側の値を与え、実用上有効であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 塚本洋祐, 由井修二, 福岡捷二: ダム貯水池の洪水流入量・放流量ハイドログラフと洪水伝播機構に関する研究, 河川技術論文集, 第20巻, pp.467-472, 2014.
- 2) 塚本洋祐, 福岡捷二, 大山修, 白山昌義: ダム貯水池水理模型実験と貯水池洪水流の流動予測モデルの開発, 水工学論文集, 第60巻, pp. I_673- I_678, 2016.
- 3) 内田龍彦, 福岡捷二: 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 71, No.2, pp.43-62, 2015.
- 4) 流量観測の高度化マニュアル (高水流量観測編) Ver1.1, 独立行政法人土木研究所, 水害・リスクマネジメント国際センター, 2015.

(2016. 4. 4受付)