

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

INFLOW AND OUTFLOW DISCHARGE HYDROGRAPHS AND PROPAGATION MECHANISM OF FLOOD FLOWS IN DAM RESERVOIRS

塚本洋祐¹・由井修二²・福岡捷二³

Yosuke TSUKAMOTO, Shuji YUI and Shoji FUKUOKA

¹正会員 中央大学大学院 理工学研究科 博士課程後期課程 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 国土交通省関東地方整備局 渡良瀬川河川事務所 (〒326-08220 栃木県足利市田中町661-3)

³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)

Inflow and outflow discharges in dam reservoirs give basic informations to the management of dams and downstream rivers. Inflow discharges to dam reservoirs have been evaluated from the H-V relation and the outflow discharge estimated by reservoir water elevations. These provide a simple estimation method for the inflow discharge to the reservoir, but effects on flood water storages by flood propagations in reservoirs, and inflows from tributaries and valleys have not been considered properly.

In this study, we installed many water gauges in the Kusaki dam and the Takatsudo dam areas, and obtained the water-level observation data in many points along the reservoirs and rivers. To evaluate inflow and outflow discharge hydrographs based on the observation of temporal changes in water surface profiles, unsteady two-dimensional analyses of floods were performed. We showed propagation mechanisms of flood flow and flood water storage in reservoirs based on these observed data and analyses and raised some issues for dam reservoir managements.

Key Words : *inflow and outflow discharges, flood propagation, storage volume, dam reservoir, flood flow analysis, water surface profiles*

1. 序論

ダム貯水池の流入量・放流量は、流域における洪水流出予測の検証材料として用いられ、また、下流河川の河道管理を行う上での重要な情報を与える。

一般にダム流入量ハイドログラフは、ダム貯水池の下流端付近で観測された1地点の貯水位データを用い、これが水平に上昇するものとして、貯水池のH-V関係に基づく貯留量と、ダムからの放流量の差により算定されている。この手法により、ダム貯水池への流入量を簡易に推定することが可能であるが、貯水位の水平上昇を仮定していることから、貯水池内を流下する洪水波形の変形による縦断的な水位変化に伴う貯留や、溪流・支川等からの流入による影響が考慮されていない。このため、実際に洪水時にダム貯水池へ流入する流量と比較して、ダム流入量を過小に評価していることが懸念される。

一方、ダム放流量ハイドログラフは貯水位とゲート開

度による算定式を用いている。しかし、貯水位は、ゲート操作、波浪、セイシュ等の影響により変化するため、これより算定される放流量について、実際の観測データに基づく検証が必要と考える。これらの検討は、下流河川の安全確保や、ダム貯水池の効率的運用のため、ダム貯水池を含む上流、下流河川における洪水流の体系的な把握を可能にし、ダムと河川の管理に有意な情報を提供すると考えられる。

ダム流入量、放流量の評価法には、石田¹⁾ら、中村²⁾らにより、貯水位に含まれるセイシュ等の水位振動成分を除去し、平滑化水位を用いた高精度化手法が提案されている。これらの手法は、既存のダム流入量、放流量の算定法を基本とし、使用する貯水位の高精度化を目的としており、貯水池内の洪水流下について十分言及していない。また鈴木³⁾らは、平滑化水位により算定した放流量が、小規模貯水池では放流に伴う流速増で接近流速が大きくなり、全水頭で求める放流量が過小評価されることを指摘している。一方、貯水池内の洪水流下伝播特性

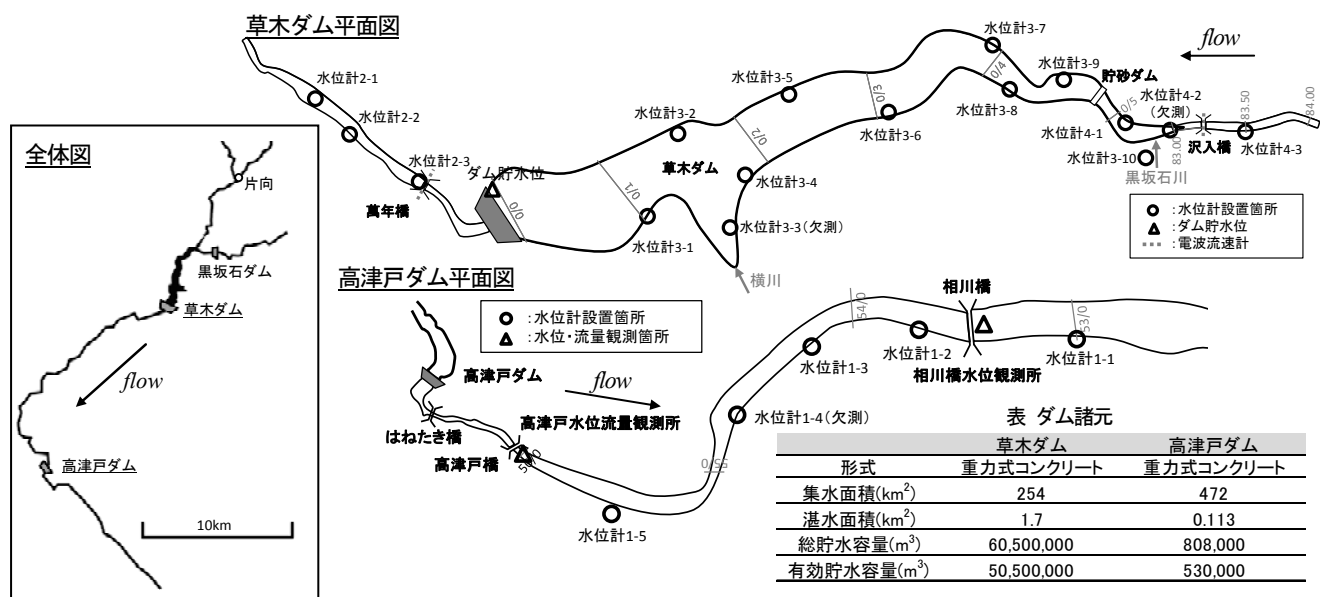


図-2 草木ダム、高津戸ダム平面図と洪水観測地点

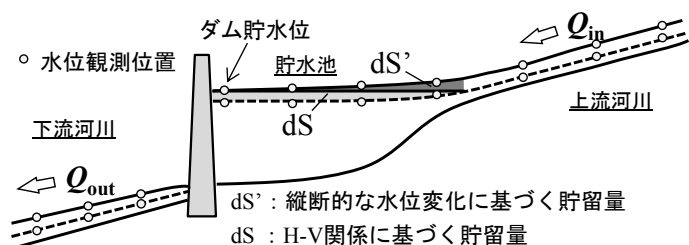


図-1 本研究で明らかにすべきこと

については、古くから水位、流量の伝播特性に関する研究が行われている(例えば4)、5)。しかし、これらの検討は、実験水路や数値解析を用いたものであり、実河川をベースとした検討は多くない。竹村⁶⁾らは小規模電力ダムが連続する実河川を対象に、実測データと一次元不定流解析法により、ゲート操作の違いが河道貯留効果や洪水波形の伝播に及ぼす影響を定量的に評価している。しかし、対象とする貯水池規模が小さいため、貯水容量の大きい貯水池を対象とした場合、貯水池内の洪水の流れ、波形の伝播特性が異なるものと考えられる。

福岡らは、洪水時に観測された河川の水面形時系列データを用いた非定常二次元洪水流解析を行い、多くの河川の洪水流の実態解明に有効性が確認されている^{7)、8)}。川幅に匹敵する水深の大きい区間のダム貯水池では、洪水流の流下特性は河道と異なる。しかし、ダム貯水池において観測された水面形の時系列データには洪水流の特徴的な流動が現れていると考えられる。これら水面形の時間変化を含む洪水時の変化特性を貯水池流動解析モデルを用いて分析することにより、洪水流動の実態を明らかにすることが可能と考えている。

本研究では、ダム貯水池を含む上下流河川で観測された水面形の時系列データを用い、上流河川の Q_{in} (ダムに流入する流量)と下流河川の Q_{out} (ダムから放流される流量)を算定し、貯水池のH-V関係から求まる貯留量 dS

だけでなく、縦断的な水位変化に基づく貯留量 dS' を評価し、ダム流入量、放流量の評価を行う(図-1参照)。このために、利根川水系渡良瀬川の草木ダム、高津戸ダムの貯水池および、それらのダムの上下流河川に水位計を多数設置した。平成25年9月洪水において水位観測等を実施し、これらの観測データを用いた洪水流解析から、ダム貯水池への流入量、放流量ハイドログラフを算定した。これらより、洪水の伝播、貯留量等を河川とダム貯水池について連続的、一体的に検討することを目的とする。

2. 平成25年9月洪水の再現計算

(1) 平成25年9月の洪水観測

図-2に草木ダム、高津戸ダムの平面図と洪水観測地点を示す。この区間では、平成25年9月に発生した台風18号に伴う出水を対象に、洪水時の時空間的な水位変化を詳細に測定し、縦断的な水面形の時系列データを得た。水位計は、草木ダム貯水池内に10地点、上流河川に3地点、下流河川に3地点、高津戸ダム下流では5地点に設置した。なお、支川(横川、黒坂石川)流入箇所では、流入による影響を把握するため本川との合流点に水位計(3-3,3-10)を設置している。上流河川からの流入量の把握を目的に、水深が浅くなるダム堤体から4.0km地点より上流区間で、約300m~500m間隔で水位計を設置し、貯水池内では約500~1,000m間隔で水位観測を実施している。なお、水位観測は5分間隔の瞬間値データを記録しているため、観測水位データに振動が見られる(図-8参照)。

(2) 解析方法

ダム上流河川、下流河川では、観測水面形時系列デー

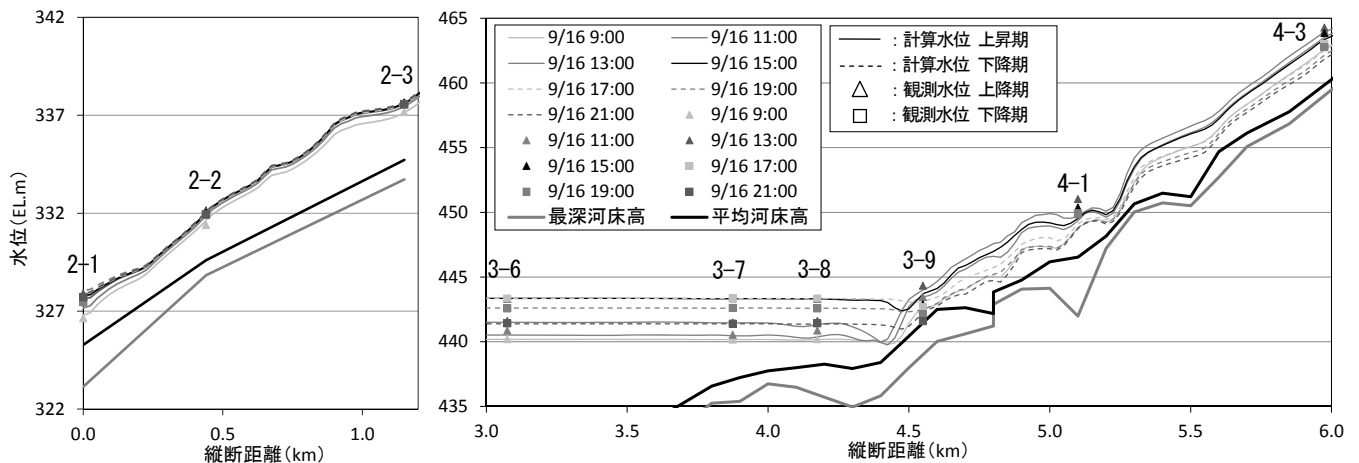


図-3(a) 解析水位と観測水位の比較 (左：草木ダム下流河川, 右：草木ダム上流河川)

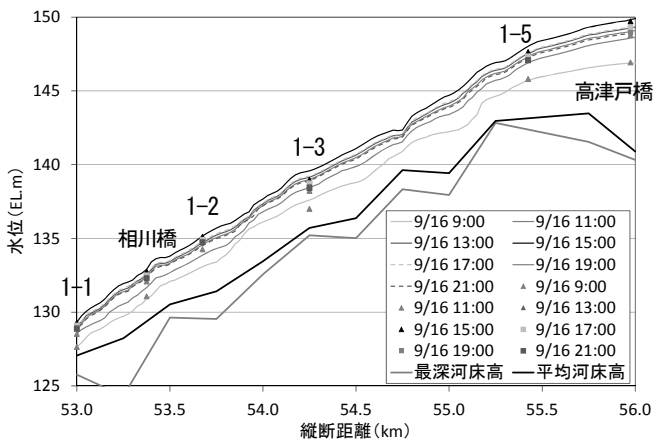


図-3(b) 解析水位と観測水位の比較 (高津戸ダム下流)

タに基づく平面二次元洪水解析を適用し、上・下流河川における洪水流量ハイドログラフを算出する。一方、草木ダム貯水池内では、水深が大きい（川幅：最大500m、水深：最大60m）ことから、鉛直方向の流動を考慮した解析の必要性が高いと考えられるが、本出水では貯水位の上昇・下降が概ね平らであったことから、観測水位の時間変化から貯水池貯留量の算定のみ行った。

(3) 検討条件

草木ダム上流河川では、上流端を水位計4-3地点、下流端を水位計3-6とし、解析水位と観測水位が一致するように境界条件を設定する。下流端を水位計3-6とした理由は、この地点より下流では、最深部の水深が10mを超えるため平面二次元解析の適用性に問題があるためである。草木ダム下流河川では、上流端を水位計2-3、下流端を水位計2-1とし、高津戸ダム下流では、上流端を高津戸橋、下流端を水位計1-1とした。粗度係数、樹木群等価係数は、観測水面形の時系列を再現する表-1に示す値を設定した。当該区間では、一般に山地河道で用いられている粗度係数0.040⁹⁾と比較して、全体的に大きな値となっている。これは、河床に存在する大粒径の河床材料が流れに及ぼす形状抵抗や、急勾配区間における3次元性の強い流れによる抵抗を粗度係数で表現している

表-1 設定した粗度係数、樹木群透過係数

区間	粗度係数 ($m^{-1/3} \cdot s$)		樹木群等価係数 (m/s)
	低水路	高水路	
草木ダム 上流河川	0.063	-	-
貯水池	0.025	-	-
下流河川	0.064	-	-
高津戸ダム 下流河川	0.048~0.060	0.065	40

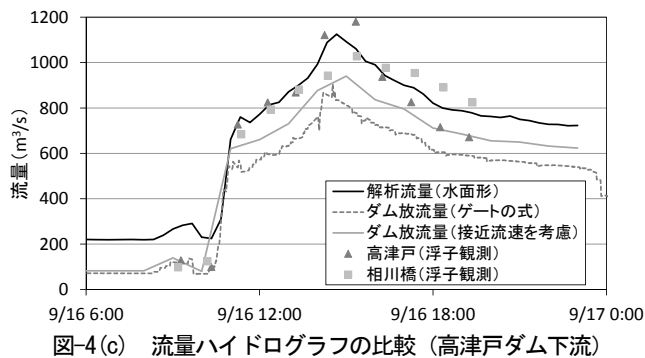
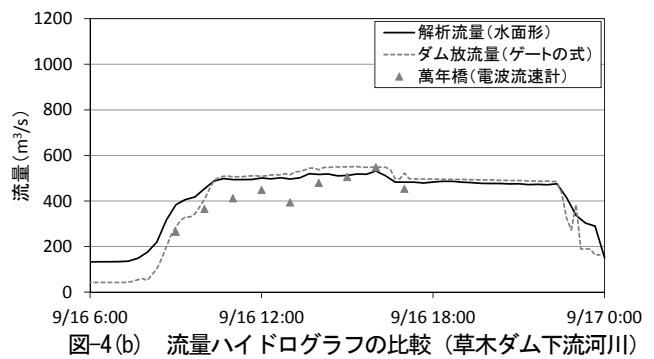
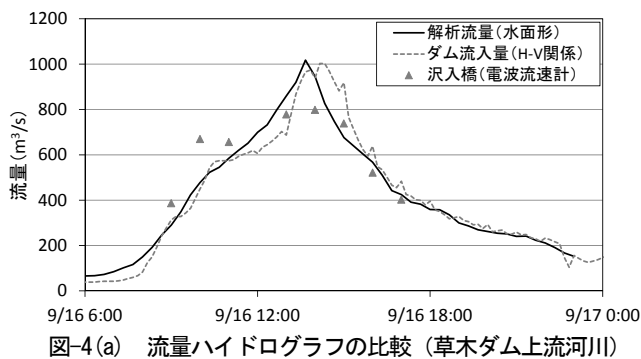
ためと考えられる。対象区間内には、主要な支川として黒坂石川（流域面積31.85km²）、横川（流域面積6.77km²）が流入する。横川は、流域面積が小さく横川地点近傍の水位計3-4に支川流入の影響がみられなかったことから、考慮しないこととした。黒坂石川は、上流に位置する黒坂石ダムの放流量を用いた。解析対象期間は、9/16 6:00~9/17 0:00までの18時間とした。

(4) 計算結果

図-3に草木ダム上下流河川、高津戸ダム下流河川の水面形時間変化の観測値と解析値の比較を示す。草木ダム上流河川では、水位計4-1地点において、解析水位が観測水位より若干低くなるものの、その他の区間では、解析値は観測値と概ね一致している。上流河川とダム貯水池の境界部（4.4km地点）では、解析水面形に顕著な水位変化が生じている。この区間は、水位波形が変形する遷移領域にあたり、水位上昇期は遷移区間が下流側に発生し、水位下降期は上流側に発生している。なお、この区間の水位波形の変化については、第4章で分析を行う。草木ダム下流河川では、全川的に解析値は観測値と概ね一致している。

高津戸ダム下流では、水位計1-3地点で解析水位が観測水位より高くなる傾向にあるものの、その他の区間では、解析水位は観測水位を概ね表現している。

なお、解析より得られた流量ハイドログラフや貯水池の貯留効果については、第3章において詳細に分析を行う。



3. ダム貯水池流入量、放流量と貯留率

観測水面形から算出された解析流量ハイドログラフと、従来から用いられている貯水池H-V関係に基づくダム流入量、ゲートの式に基づくダム放流量の比較検討を行う。また、解析より得られる貯留率 ($Q_{in} - Q_{out}$) とH-V関係、ゲートの式から算定される貯留率を比較する。

(1) 解析流量ハイドログラフから算定したダム流入量・放流量と従来の算定法の比較

図-4に草木ダム上下流、高津戸ダム下流における観測流量ハイドログラフと解析流量ハイドログラフの比較を示す。図中には、従来の貯水池のH-V関係とダム放流量から求めたダム流入量と、ゲートの式に基づくダム放流量も示している。図-4(a)、(b)に示す電波流速計推算流量は、草木ダム上流河川では沢入橋、草木ダム下流河川では萬年橋地点において、電波流速計による流速観測値に、流量補正係数0.85¹⁰⁾を用いて推算した流量を示す。

草木ダム上流河川(図-4(a))では、流量上昇期において、解析流量が沢入橋の電波流速計推算流量より若干小さい傾向にあるものの、沢入橋の観測流量ハイドログラフを概ね捉えている。流量上昇期に解析流量ハイドログラフが沢入橋の観測流量より小さい理由としては、電波流速計の観測点と水位観測点が異なっていたことや、豪雨時の強風による電波流速計の観測精度が主要因と考えられる¹⁰⁾。また、貯水池のH-V関係に基づくダム流入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約30分早いものの、全体的な波形は対応している。

草木ダム下流河川(図-4(b))では、解析流量ハイドログラフは、萬年橋の電波流速計による流量とほぼ対応している。また、解析流量ハイドログラフとゲートの式に基づくダム放流量ハイドログラフは、概ね対応している。以上より、平成25年9月洪水では、草木ダムのダム流入量、放流量と本解析による解析流量は、ピーク流量、流量波形ともにほぼ対応する値となることが分かる。

一方、高津戸ダム下流(図-4(c))では、解析流量ハイドログラフは高津戸地点、相川橋地点の浮子観測流量と概ね対応している。また、解析流量とゲートの式に基づく高津戸ダム放流量を比較すると本解析の方が260m³/s程度大きい結果となる。この主要な原因として以下のことが考えられる。高津戸ダムは湛水面積が0.113km²と小さく、洪水時はクレストゲートから洪水流が放流されることから、接近流速の増大に伴い速度水頭が増大し、ダム放流量を過小評価していると考えられる³⁾。図-4(c)に示す接近流速を考慮したダム放流量は、高津戸ダムの貯水位とゲート諸元から限界流速を推定し、速度水頭を考慮した比エネルギーを用いて推定した放流量である。接近流速を考慮することにより、ゲートの式に基づくダム放流量は、解析・観測流量ハイドログラフに近づく傾向を示す。なお、この高津戸ダムの放流量については、ダム貯水池内の水位縦断分布や接近流速の評価方法、貯水池内の堆砂状況等を分析し、更なる検討が必要である。

(2) 貯水池の貯留

図-5に観測水面形の時系列データにより算定される単位時間あたりの貯留量(上流河川の Q_{in} と下流河川の Q_{out} 差分)と、H-V関係・貯水位より算出した単位時間あたりの貯留量の比較を示す。貯水池における貯留量 S は、以下の式で表される⁷⁾。

$$dS / dt = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

ここに、 S : 貯留量、 Q_{in} : 上流河川からの流入量、 Q_{out} : 下流河川への放流量を示す。両算定法による貯留量を比較すると、洪水開始(9/16 6:00)から9/16 11:00までの流量規模が小さい時間帯では、H-V関係に基づく算定法の方が貯留量が多く、それ以降では観測水面形の時系列データより算定した貯留量の方が大きい。この差の

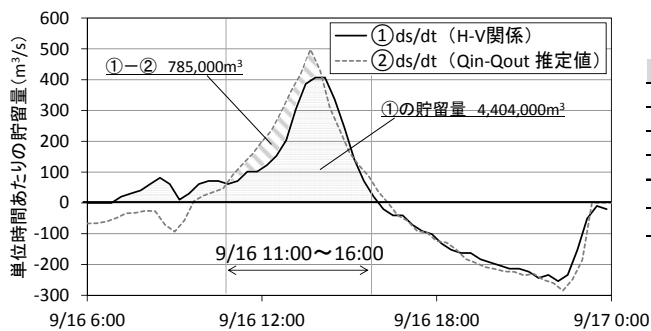


図-5 単位時間あたりの貯留量の比較

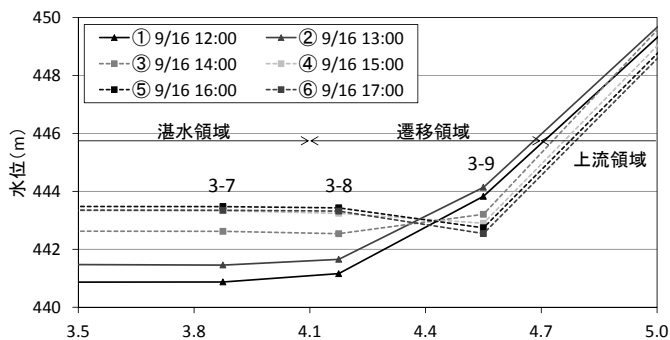


図-6 遷移領域における観測水面形の時間変化

要因について以下のことが考えられる。観測水面形の時系列データを用いた平面二次元洪水解析では、主に洪水ピーク付近の時間帯の観測水面形が再現されるように一定の粗度係数を設定している。このため、流量規模が小さく河道水位が低い時間帯（9/16 6:00～11:00）では、洪水流に及ぼす河床抵抗を過小評価され、河道域における流量算定精度が低く評価されている。このため、 Q_{in} - Q_{out} の値に誤差が入ったものと考えられる。

洪水ピーク付近（9/16 11:00～16:00）では、 Q_{in} - Q_{out} による貯留量ピークとH-V関係に基づく貯留量のピークに差が生じており、これは図-4(a)に示す流量ハイドログラフと同様の傾向を示す。また、 Q_{in} - Q_{out} の値の方がH-V関係に基づく貯留量より大きく算定されている。この差の主要因は、図-1に示す様に、H-V関係に基づく貯留量と Q_{in} - Q_{out} による貯留量との差分として評価される縦断的な水位変化に基づく貯留量 ds' に関係していると考えられる。H-V関係では、貯水池内の水位はほぼ水平とみなしているが、湛水領域の水位計3-1と3-6では最大で0.03mの水位差が生じている。なお、 Q_{in} - Q_{out} の算定値には、河川の観測水位に含まれる誤差や、遷移領域における水位波形の変形による影響も含まれており、河川の水位観測の精度向上、貯水池内の洪水流の流動を踏まえた洪水波形の変形機構を明らかにすることが課題として残されている。今後は、 ds' の定量的な評価を行うため種々の洪水に対してデータの蓄積を行うと共に、貯水池内の流動と ds' の関係について検討を行う必要がある。

表-2 矢野らの検討との本検討条件の比較

項目	①草木ダム	②矢野ら(run7)
延長(m)	4,600	150
水路幅(m)	150～500	0.6
水路勾配	1/90	1/150
最大水深(m)	60	0.225
容量(m³)	39,399,600	10
ピーク流入量(m³/s)	1,002	0.030

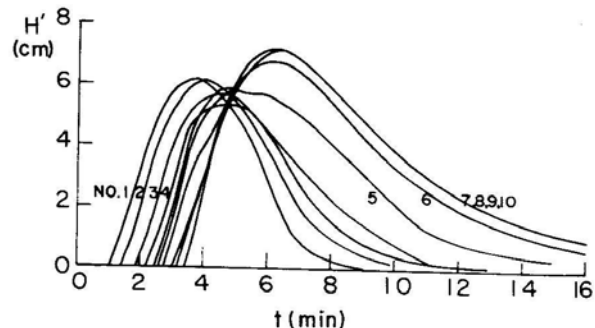


図-7 矢野らの検討結果 水位～時間曲線 (run7) ⁴⁾

4. 水位波形の変形（遷移領域）に関する考察

図-6は草木ダム貯水池における遷移領域の観測水面形の時間変化を示す。平成25年9月出水は、洪水規模が比較的小さかったことから、貯水池湛水域において縦断的な水位変化は小さく、ほとんど水平に近く水面が変化した。しかし、3-8、3-9地点（上流河川とダム貯水池の境界）では、貯水位がピークに達した後、上流河道とダム貯水池の境界部の水面形に逆勾配が生じている。このような貯水池の水位波形の伝播特性を理解するため、観測データを用いて遷移領域の洪水波形について分析する。

矢野⁴⁾らは、一様勾配、一様幅の実験水路に刃型堰を設置した実験水路（表-2参照、比較的規模の小さい砂防堰、用水取入れ堰を想定）の、湛水領域に洪水流が流入した場合の洪水波形の変形を検討している。この検討では、ダム貯水池に流入する洪水流は、湛水領域、遷移領域、上流領域の3領域に分類され、湛水領域では水位波形はほとんど変化せず、遷移領域において水位波形が急変することが指摘されている。この現象は、図-7に示す様に、上流から流入するNo.1～No.4の洪水波形がNo.5で大きく変化することで2つの水位ピークを有し、湛水域となるNo.7～No.10では水位が水平になる。本検討で対象とする草木ダムは、貯水池容量、洪水規模が矢野らの検討に比して十分大きい。また、貯水池水位の観測データに明確に湛水領域、遷移領域が見られることから、矢野らの結果と比較検討する。

図-8に観測された各地点の水位上昇量ハイドログラフを示す。なお、水位上昇量ハイドログラフは、洪水初期である9/16 6:00の水位を基準とし、この基準水位からの上昇量を示したものである。また、上流河川の観測水位に顕著な振動が見られる。これは、5分間隔で観測水位をプロットしているためであり、今後はデータの取得間

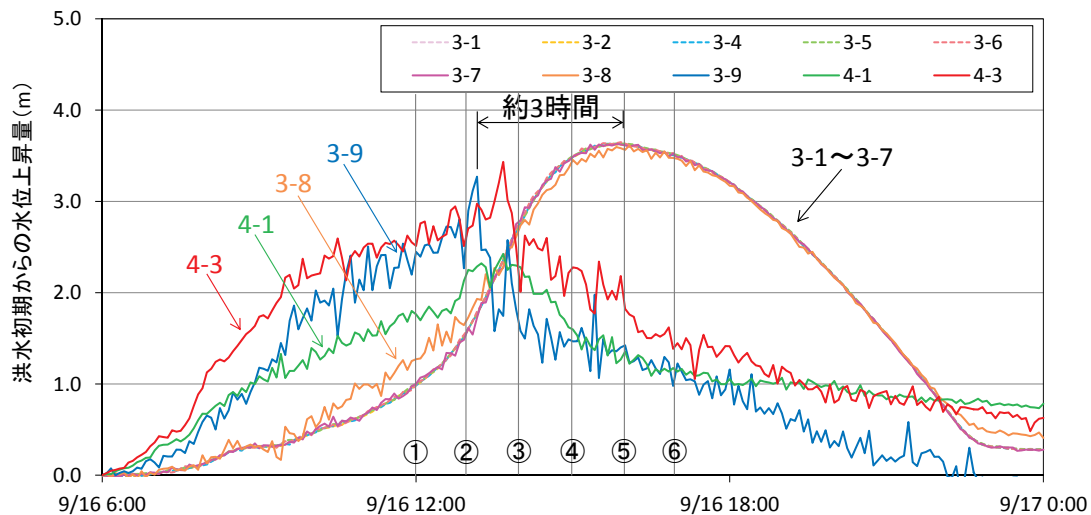


図-8 洪水初期からの水位上昇量のハイドログラフ

隔を短くすることで、水位観測の精度の向上を図る必要がある。草木ダム貯水池では、水位計3-7より下流区間において水位波形がほとんど一致しており、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、縦横断形状に違いにより多少の差はあるものの、同じ傾向の水位波形を有していることが分かる。ここでは、この2区間の境界に位置し、水位波形に特徴的な変形がみられる水位計3-8地点（図-8 橙線）に着目して考察を行う。上流領域における水位上昇期（図-8 ①～②）は、水位計3-8より上流側に位置する水位計3-9（図-8 青線）、4-1（図-8 緑線）と同じ傾向の波形で水位が上昇している。この時、湛水領域では、上流領域の水位上昇と比較して、草木ダムの貯水容量が大きいことから水位上昇が遅く、上流域の水位波形と湛水域の水位波形に約3時間の差が生じている。その後、上流領域の水位が下降し、湛水領域の水位が上昇する（図-8 ③～⑥）ことで、水位計3-8の水位波形は湛水領域の背水の影響を受け、湛水領域の波形特性により水位波形が変形する。なお、この水位波形の変形は、図-7に示す矢野らの実験のNo.5地点（遷移領域）における水位変化特性と同様である。実験水路と実河川とで貯水容量や縦断的な水深・川幅の変化に違いがあるものの、実河川においても実験水路と同様の現象が現れている。遷移領域における水位波形の変形は、潜り込み流の発生と、潜り込みに伴う貯水池内の流速変化と水位上昇変化が複雑に生じているものと考えられる。このため、貯水池内の洪水流の流動と遷移領域の形成機構について定量的に検討していく必要がある。

5. 結論

本研究では、観測水面形の時系列データを用いた平面二次元洪水流解析から、ダム上下流河川における、流量ハイドログラフを算出し、貯水池における水位波形の変形や貯留について分析を行った。本出水は比較的小規模

であったこともあり、貯水池内の縦断的な水位変化が小さく、概ね水平に上昇した。このことから、縦断的な水位変化による貯留量増加分は小さく、従来から用いられているH-V関係に基づく流入量、ゲートの式に基づく放流量の算定方法で説明できることが明らかとなった。

今後は、上流河川からの流入ハイドログラフと貯水池ハイドログラフの時間差の形成過程や、貯水池の洪水波形の形成・伝播と貯留率について貯水池内の流動解析を踏まえ明らかにしていくとともに、大きな洪水についても、本研究の結果が成立するか、高津戸ダムの様な小ダムの放流量評価の精度向上等を検討する予定である。

参考文献

- 1) 石田享平, 中村興一, 鈴木洋之, 藤田睦博: ダム貯水池流入量の推定精度向上に関する研究, 水文・水資源学会誌, 第13巻, 1号, pp.31-43, 2000.
- 2) 中村興一, 藤間聡, 中村篤史: ダム貯水池振動特性と貯水位平滑化について, 水工学論文集, 第48巻, pp.1387-1392, 2004.
- 3) 鈴木洋之, 落合厚, 須賀正志, 溝口敦子: 小規模発電ダム貯水池で洪水時に生じる流量推定精度の劣化, 土木学会論文集B, Vol.65, No.2, 81-86, 2009.
- 4) 矢野勝正, 芦田和男, 高橋保: 境界条件による洪水流の変形に関する研究(第1報), 京都大学防災研年報, 8, pp.257-270, 1965.
- 5) 尾崎幸雄, 秋元保: 貯水池内に流入する洪水の挙動について, 水理講演会講演集, 23, pp.27-33.
- 6) 竹村吉晴, 福岡捷二, 浅見和人: 小規模発電ダムが連続する河道における洪水流の伝播と貯留効果について, 水文・水資源学会誌, 第23巻, 2号, pp.129-143, 2010.
- 7) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, pp.60-83, 2005.
- 8) 福岡捷二: 河道設計のための基本は何かー水面形時系列観測値と洪水流ー土砂流の解析を組み合わせた河道水理システムとその見える化, 河川技術論文集, 第17巻, pp.83-88, 2011.
- 9) 土木学会: 水理公式集, 平成11年度版, 第2編河川編, pp.89.
- 10) 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: 流量観測の高度化マニュアル(高水流量観測編) Ver1.0

(2014. 4. 3受付)