

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

HYDRAULIC MODEL TEST AND DEVELOPMENT OF PREDICTION MODEL FOR FLOW MECHANISM IN DAM RESERVOIR

塚本洋祐¹・福岡捷二²・大山修³・白山昌義⁴
Yosuke TSUKAMOTO, Shoji FUKUOKA, Osamu OYAMA and Masayoshi SHIRAYAMA

¹正会員 工修 中央大学大学院 理工学研究科 都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

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)

⁴正会員 株式会社建設技術研究所 研究センターつくば (〒330-8551 茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)

The flood management in dam reservoirs has been performed by using a water level observed near the dam body. However, the characteristics of the flood propagation of water level and discharge hydrograph are different in each flood flow, especially inflow of large scale flood flows. For efficient and safe dam reservoir management, it is important to clarify the mechanism of flood propagation. In this study, the hydraulic model test was carried out in order to investigate the characteristics of reservoir storage and flow mechanism in dam reservoirs. Moreover, the flood flow analysis method was developed to understand characteristics of flood flow dynamics in dam reservoirs and applied to hydraulic model tests of dam reservoirs.

Key Words : *hydraulic model test, dam reservoir, flood propagation, flood flow analysis, water surface profiles, flood management*

1. 序論

ダム貯水池における洪水管理は、下流河道の治水安全度向上のため重要である。ダム貯水池の洪水管理は一般に、ダム堤体付近で観測された貯水位とゲートの式から放流量を、ダム放流量と貯水池のH-V関係からダム流入量を算定し行われている。この手法は、貯水池への流入量、放流量の関係を簡易に推定可能であるが、貯水池内の洪水流量の連続関係のみを用いて行われており、洪水の流動や流量の伝播機構についてはブラックボックスのまま、適切な貯水池管理を行うには、このブラックボックスを理解する必要がある。

貯水池内の洪水流下特性について、多くはないが実験水路や数値解析を用いた検討が行われている。矢野¹らは、一様勾配、一様幅の直線水路に刃型堰を設置したダム貯水池模型で、流動形態を湛水領域、遷移領域、上流領域に分類し、実験的検討を行っている。この研究は、洪水波形の伝播、変形についてのパイオニア的研究に位置づけられ、洪水流の流動機構について基礎的情報を与

えている。竹村²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により、ゲート操作の違いが河道貯留や洪水波形の伝播に及ぼす影響を評価している。対象とする貯水池規模は小さく、貯水容量の大きい貯水池では、洪水の伝播や流動特性が異なるものと考えられる。著者³らは、草木ダム貯水池とその上下流河川で洪水時に観測された縦断水面形の間時間変化データを用い、平面二次元非定常流解析から、ダム貯水池における流入量、放流量ハイドログラフの検討を行っている。これにより、川幅と水深の大きさが同じオーダーの貯水池において、平面二次元非定常流解析は、洪水の伝播機構の説明は出来ても、貯水池内の流動を理解するには不十分であることが明らかとなった。効率的、効果的なダム貯水池の管理のためには、現在用いられている流入量、洪水放流量ハイドログラフの算定精度の検証や、貯水池内での洪水位、流量ハイドログラフの変形を適切に評価可能な解析方法の確立が必要である。このための一つの方法は、ダム貯水池の大型水理模型実験で洪水流入による貯水池内の流動を詳細に観測し、基礎的データを得て、それを分析することである。

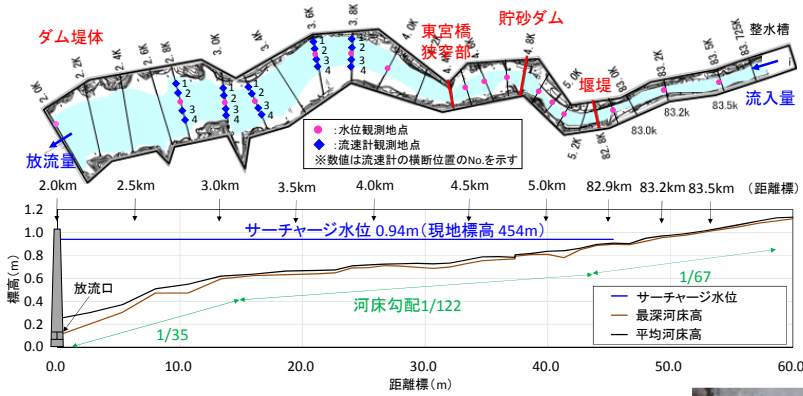


図-1 水理模型の平面図、縦断面図と水理実験の観測箇所

本研究では、このような背景からダム貯水池における洪水流の伝播、流動の理解を目的に大型模型実験を実施した。測定データから貯水池内の洪水流の流下特性を明らかにし、これを表現可能な数値解析モデルを構築する。次に、観測値と解析モデルを用い、貯水池を流下する水位、流量ハイドログラフの縦断変化の機構を明らかにし、現行のダム貯水池管理の課題を明らかにする。

2. 水理模型実験

本研究では、草木ダム貯水池を模した大型水理模型に洪水を流下させ、貯水池内の流動機構について詳細な調査を実施した。図-1に水理模型の平面図と縦断面図を示す。模型水路は、利根川水系渡良瀬川に位置する草木ダムを模した全長約60mの水路である。模型縮尺は1/75とし、模型縮尺を大きくするため、ダム堤体を2.0km地点に移設し、湛水領域を若干短縮して実験を行った。模型放流口は河床付近(図-1中の0.15m)となる。表-1に実験条件を示す。対象洪水波形は、H25.9洪水(現地流量 $1,000\text{m}^3/\text{s}$)であるが、模型湛水領域では流速が小さく、流速の観測値に誤差を持つことから、ピーク流量を現地流量 $1,300\text{m}^3/\text{s}$ (模型換算 26.7l/s)になるように引き伸ばしている。初期湛水位は、草木ダムの夏期制限水位相当とし 0.74m とする。また、放流量は、草木ダムの放流操作に準じて設定しており、洪水後は、夏期制限水位まで貯水位を下げるため、一定量放流を行う。観測項目は、水位、流入量、放流量、流速であり、観測位置は図-1中に示す通りである。水位はポイントゲージ、流入量、放流量は電磁流量計、流速は電磁流速計により観測する。流速は鉛直方向に4点、横断方向に4点計測した。

図-2に貯水池内の流況写真を示す。この流況は実験開始18分後のものであり、染料を投入することで流況を可視化している。上流河川から流入する洪水流は3.6km地点の湾曲右岸に衝突し、主流が分岐し、平面渦が発生している。水深が大きくなる3.2kmより下流の区間では、河積の増大により流速が低下し、流れが停滞する。この区間は、流下方向の水深、川幅の増大や、貯水池河岸の微地形により、複数の平面渦が相互に干渉しながら流下

表-1 実験条件一覧

項目	模型縮尺1/75	現地条件		模型条件	
		単位	値	単位	値
流量	2013洪水	m^3/s	1,000	l/s	20.5
	引き伸ばし	m^3/s	1,300	l/s	26.7
粗度係数	上流河川	$\text{m}^{-1/3}\text{s}$	0.050	$\text{m}^{-1/3}\text{s}$	0.024
	貯水池	$\text{m}^{-1/3}\text{s}$	0.025	$\text{m}^{-1/3}\text{s}$	0.012
模型規模	全長	m	4,500	m	60.00
	貯水池幅	m	300	m	4.00
	上流河川幅	m	50	m	0.67
時間		hr	11	hr	1.27

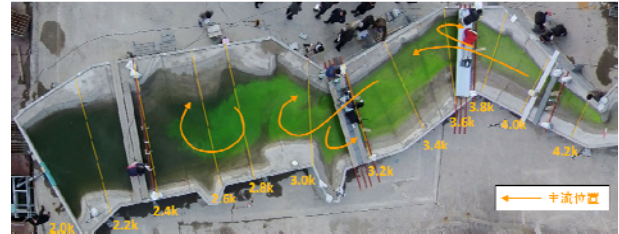


図-2 貯水池内の流況写真

する。このように、ダム貯水池の縦横断的に複雑な地形変化のため、洪水流は三次元流れとなって流動する。

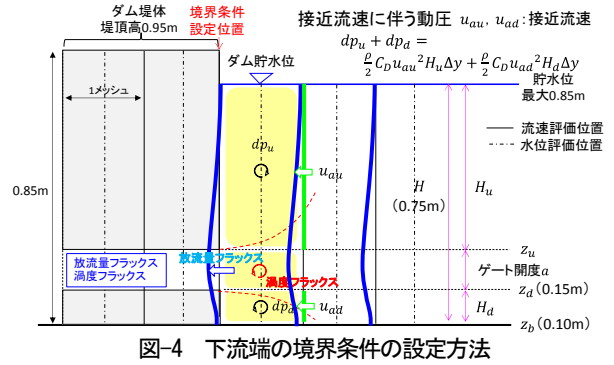
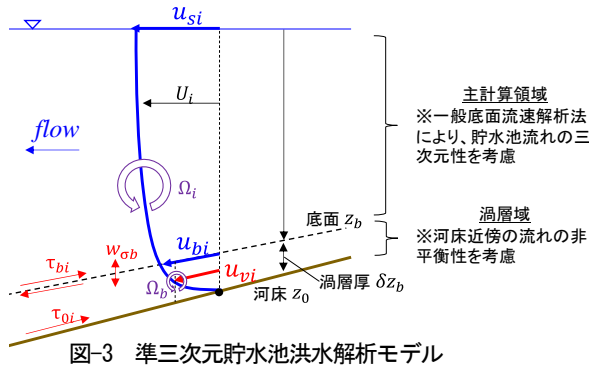
3. ダム貯水池における洪水流動解析

(1) 解析の概要

(a) ダム貯水池洪水流動解析の考え方

一般にダム貯水池は、通常の河川と異なり、流下方向に水深、川幅が増大し、河積が急激に大きくなる特徴を有している。このため、貯水池内の洪水流は、平面だけでなく鉛直方向にも変化する。また、湛水領域では水面形が概ね水平になること、縦断的な河床高変化により逆圧力勾配状態の流れが発生することから、底面や河岸での剥離流れを伴う複雑な三次元流況を示す。竹村ら⁴⁾は、河道貯留による流量ハイドログラフの変形は、断面内の横断流速分布と断面内の平均流速の差が大きい区間で生ずる洪水遊水量に起因することを明らかにしている。ダム貯水池の洪水変形を論ずるためには、三次元的な流速分布の議論が重要となる。よって、本研究では洪水時に貯水池に流入する洪水流の縦断面水面形の時間変化と、ダム貯水池の縦横断的な地形変化を考慮した貯水池の三次元的な流動解析モデルを構築し、貯水池内の洪水流の伝播、流動機構を明らかにする。

近年、内田ら⁵⁾は、局所三次元流れを評価可能な準三次元解析モデル(一般底面流速解析法)を開発した。福岡ら⁶⁾は、一般底面流速解析法に観測された水面形の時系列データを用い、多くの河川における洪水流と河床変動の特性を明らかにしてきた。本研究では、図-3に示すように、内田ら⁵⁾の解析法を貯水池流れに応用し、主計算領域と渦層域の2つの領域からなるダム貯水池の準三次元貯水池洪水解析モデルに拡張する。なお、本研究では洪水時の流動現象を対象とすることから、ダム貯水池



内の水温や水質変化による密度流の影響は考慮していない。主計算領域は、洪水流が大きな運動量をもって流下する領域であり、河床面よりわずかに上の面（渦層域の上面）の領域を示す。この領域では、貯水池内の流れの三次元性の影響を考慮するため、一般底面流速解析法を用いる。一般底面流速解析法は、鉛直方向流速の方程式（水深二重積分連続式）と水深積分鉛直方向運動方程式により、水深積分モデルの枠組みで流れの三次元性を考慮することができる。渦層域では、湛水領域の流れが逆圧力勾配になることにより、河床近傍で流速の低減や剥離が生じ、流速分布が非平衡状態になる。このため、河床の縦横断的な形状変化とそれに伴う流速場の変化を考慮するため、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こととした。また、渦層域で発生した質量、運動量、過度を主計算領域と交換することにより、本解析モデルは、貯水池内の流れを一体的に取り扱うことが可能なものとなっている。

(b) ダム貯水池洪水流動解析の基礎式

一般底面流速解析法の基礎式については、内田ら⁵⁾により詳述されていることから、ここでは、渦層域における解析法について述べる。渦層域の非平衡流れを考慮するため、連続式(1)と運動方程式(2)を解く。

$$w_{ob} = -\frac{\partial \delta z_b u_{vi}}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_{vi}}{\partial t} + u_{vk} \frac{\partial u_{vi}}{\partial x_k} = -\frac{\partial (dp_b + \rho g z_s)}{\rho \partial x_i} + \frac{\tau_{bi}}{\rho \delta z_b} - \frac{\tau_{oi}}{\rho \delta z_b} \quad (2)$$

ここに、 $k=1,2,3$ ($x_3=z_s$: 渦層に垂直な方向)、 w_{ob} : 底面の渦層と垂直な流速、 δz_b : 渦層の厚さ、 u_{vi} : 渦層における層平均 x_i 方向流速、 dp_b : 底面圧力の非静水圧成分、 z_s : 水面高、 τ_{bi} : 渦層面に作用するせん断応力、 τ_{oi} : 底面に作用するせん断応力である。

鉛直方向流速 w_{ob} は、鉛直方向の運動方程式を解かず、連続式(1)から計算する。式(2)に含まれるせん断応力は渦動粘性係数を用いて式(3)のように表す。

$$\frac{\tau_{bi}}{\rho} = \left(v_i \frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_b = v_{ib} \cdot A_b \frac{(u_{bi} - u_{vi})}{h}, \quad A_b = \frac{1}{\alpha(c_b - c_v)} \quad (3)$$

c_b, c_v は、対数分布則を用いて式(4)のように表す。

$$c_b = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z_b}{k_s} \right) + Ar, \quad c_v = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\delta z_b / 2 + \delta z_0}{k_s} \right) + Ar \quad (4)$$

ここに、 v_{ib} : 渦動粘性係数、 u_{bi} : 底面の x_i 方向流速、 h : 水深、 z_b : 河床高、 $\alpha = \kappa/6$ 、 $\kappa = 0.41$ 、 $Ar = 8.5$ である。

渦動粘性係数は、底面-渦層の間の流速差と水深の積で式(5)のように表す。

$$v_{ib} = \alpha_b \delta u_b h, \quad \delta u_b^2 = (u_{bi} - u_{vi})(u_{bi} - u_{vi}) \quad (5)$$

ここで、渦動粘性係数 v_{ib} は、以下のようにも定義できる。

$$v_{ib} = \frac{\alpha \kappa \omega_b h^2}{2 \ln(z_s / z_b)} \quad (6)$$

本研究では、内田ら⁵⁾の検討と同様に、それぞれ大きい方の値を用いて、渦動粘性係数を計算することにした。

非平衡状態の底面過度は、一般底面流速解析法の過度の生産項で用いられている平衡状態の底面過度を渦層内の過度とすることで考慮し、式(7)のように表す。

$$\omega_{bej} = 2 \varepsilon_{ij3} A_\omega \frac{u_{bi} - u_{vi}}{h}, \quad A_\omega = \frac{1}{\kappa(c_b - c_r)} \ln \left(\frac{z_s}{z_b} \right) \quad (7)$$

ここに、 ω_{bej} : 底面過度、 ε_{ij3} : エディトンのイプシロンを示す。

(2) 解析条件

解析対象区間は、ダム堤体のある2.0kmから上流河川83.725km区間とする。境界条件は、上流端に流量ハイドログラフを、下流端に貯水位ハイドログラフを設定する。図-4に下流端境界条件の設定方法を示す。放流量は、貯水位観測地点において、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。過度フラックスは、ダム堤体前面の解析メッシュにおける過度の内、ゲート開度分だけ下流に放出されるものとしてモデル化した。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、上流河川、遷移領域と、湛水領域とで分けて設定する。上流河川、遷移領域では、観測水面形の時系列データを再現するように粗度係数を時間変化させ $n=0.053 \sim 0.087$ （模型換算 $n=0.026 \sim 0.042$ ）を設定した。また、湛水領域では、 $n=0.025$ （模型換算 $n=0.012$ ）で一定値とした。

(3) 解析結果

図-5に縦断水面形時間変化の観測値と解析値の比較を示す。ダム貯水池は、貯水池下流端にダム堤体を有することから、上流から流入する洪水流が湛水領域で減速し

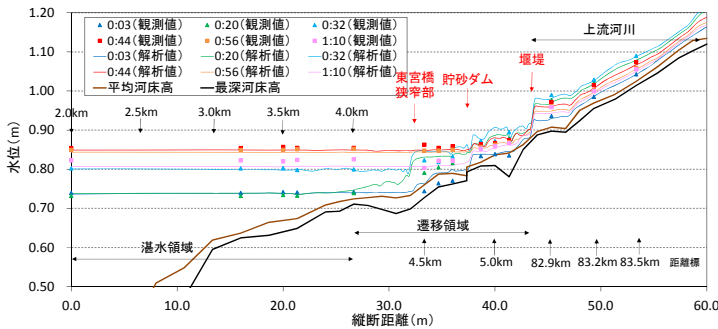


図-5 縦断水面形の解析値と観測値の比較

貯留される。本検討で対象とする流入流量が、貯水池の貯留容量に比して小さいため、貯水池内の水位はほぼ水平に上昇する。滞水領域では、水位上昇期、下降期ともに縦断水面形は概ね水平になる。遷移領域では、流量上昇期（実験開始20分～32分）において、4.0km～4.4kmの間で縦断的な水位変化が生じている。上流河川域では、河床勾配に応じて縦断水面形が形成される。縦断水面形の解析値と観測値を比較すると、水位上昇期の遷移領域において、解析水位の方が観測水位より若干高く計算されているものの、解析水位は観測水位と概ね対応している。

図-6に放流量、貯水位ハイドログラフの解析値と観測値の比較を示す。図中には、上流端の流量境界条件である流入量ハイドログラフを併記している。貯水池内の水位の縦断変化は実測値、解析値ともに概ね同一の値をとりながら水平に上昇していることから、ピーク流量発生時刻（実験開始32分）付近で、放流量の解析値は観測値よりもやや大きくなるものの、現行の貯水池下端の貯水位を用いたゲートの式より算定されるダム放流量と解析の放流量は概ね一致している。

図-7に貯水池内の単位時間あたりの貯留量（貯留率）を示す。貯留率 dS/dt は、流入量 Q_m 、流出量 Q_{out} の差、もしくは対象区間の水面高さの時間変化であり式(8)より評価される。

$$\frac{dS}{dt} = Q_m - Q_{out} = \int_L \frac{\partial A}{\partial t} dx \quad (8)$$

ここに、 S ：貯留量、 A ：流水断面積、 L ：対象区間の長さを示す。図-7中の実線で示す解析の貯留率は、各解析メッシュの水面高さから算出した値を、プロットは現行のダム操作と同様に1点の貯水位とH-V関係より算定した値を示す。解析値とH-V関係に基づく貯留率を比較すると、H-V関係に基づく貯留率はわずかに大きく算定されている。既往検討³⁾における縦断的な水位変化による貯留量 dS' は、本検討で対象とした洪水規模では、小さいようである。H-V関係に基づく貯留量が解析値に基づく貯留量よりやや大きくなる理由は4章で示す。

図-8（左図）に解析流速コンター図、ベクトル図と観測流速ベクトルの比較を示す。流量上昇期は、貯水池内の水深が小さく流速が大きい状態にある。4.0kmより上流は上流河川から慣性力の強い流れが流入する区間であ

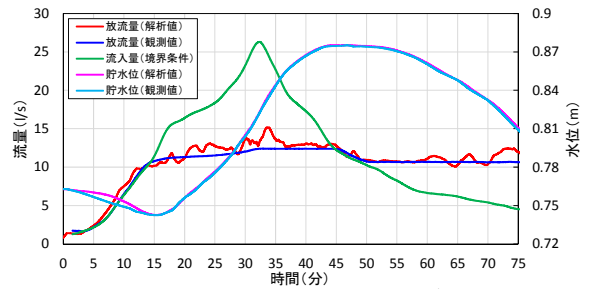


図-6 放流量、貯水位のハイドログラフの解析値と観測値の比較

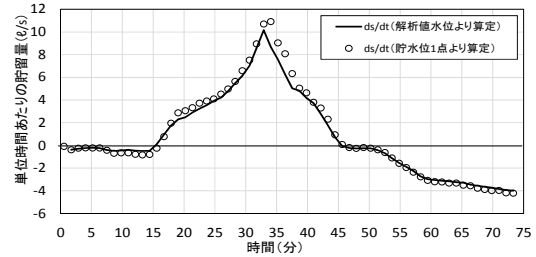


図-7 貯水池内の単位時間あたりの貯留量

り、図-5に示す縦断的な水位変化による貯留量 dS' の発生区間に対応している。この区間は、東宮橋狭窄部の深掘れにより河床が逆勾配になっており、水表面と底面の流速差による大きな鉛直混合により、縦断的な水位変化が発生する。遷移領域から滞水領域に流下する洪水は、3.6km地点付近の右岸を水衝部とし、下流へ流下する主流成分と逆流する成分に分けられる。この時、流下方向に複数の平面渦が発生し、流出入流量、湛水位に応じて平面渦の発生位置、構造が変化する。流入水は流速は小さいながらも湛水域内を流下し、水平に近い水面形で徐々に水位が上昇する。水位ピーク時には、流入量は小さくなり、5.0km付近まで縦断水面形が水平となる。その後、放流量が流入量より多くなり貯水位が低くなることで、再び貯水池内の流動が活発化する。流速の観測値と解析値を比較すると、解析値は、洪水流の順流、逆流の傾向と概ね対応している。なお、観測流速は10秒平均値である。解析値は、全体的な流動の傾向を把握することを目的に1分平均値を示している。

図-8（右図）は鉛直流速分布の解析値と観測値の比較を示す。上流の3.6km地点は、ダム貯水池の滞水領域と比較して川幅が狭く、水深が小さいことから、通常の河川に近く、解析の鉛直流速分布は、観測値を概ね再現している。3.2km地点では、河床底面付近を除き、解析の鉛直流速分布は、観測値と概ね対応する。2.8km地点と3.2km地点を比較すると、流量上昇期は、概ね同程度の流速となるが、貯水位が高くなるに従い、2.8kmの流速は小さくなる。底面付近の流速を見ると、河床勾配が大きく、逆圧力勾配となる2.8km地点では、河床近傍で流速が極端に低減する。これらの結果より、解析モデルはダム貯水池内の流動を概ね表現している。

4. ダム貯水池の洪水伝播機構

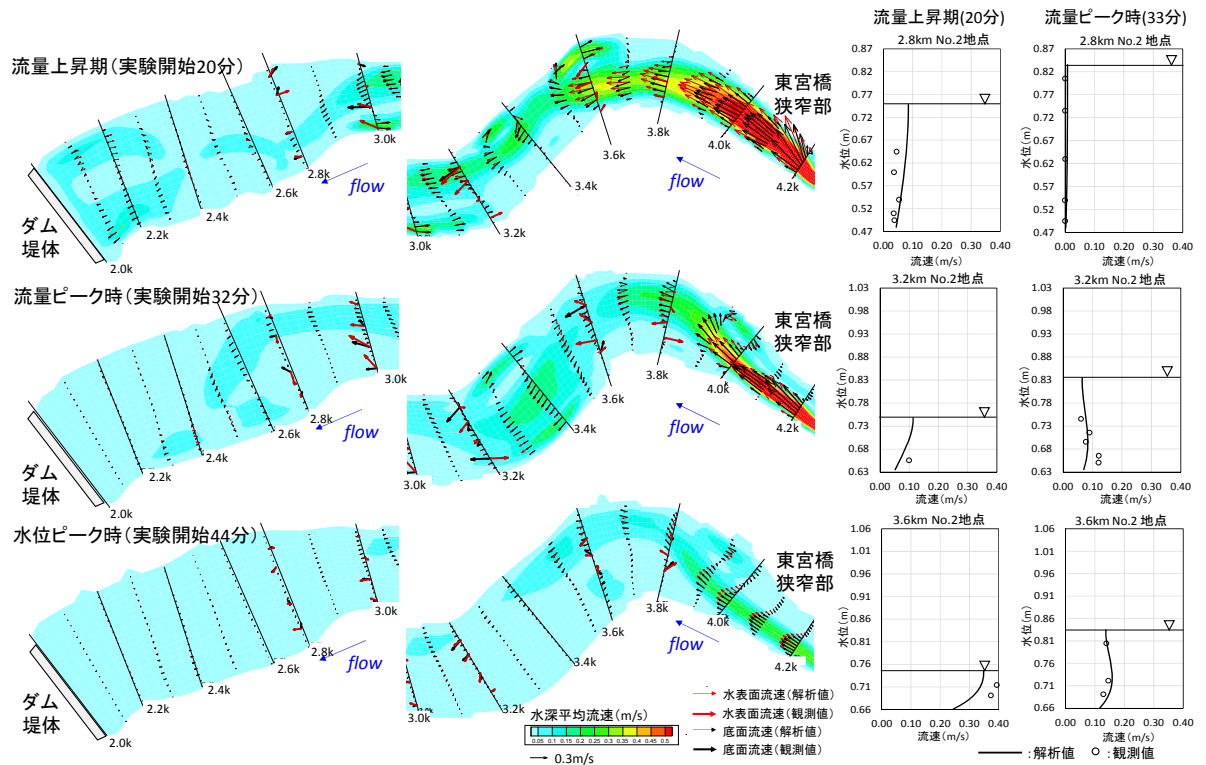


図-8 左図：解析流速コンター図、ベクトル図と観測流速ベクトルの比較、右図：鉛直流分布の解析値と観測値の比較

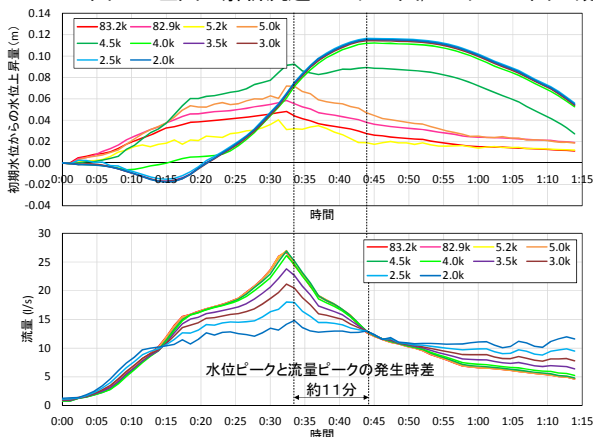


図-9 水位、流量ハイドログラフの縦断変化

(1) 中小規模洪水時の洪水伝播特性

図-9に貯水池内の各地点における水位、流量ハイドログラフの縦断変化を示す。この水位、流量ハイドログラフは解析値であり、水位ハイドログラフは洪水初期からの水位変化量を示す。なお、図-9の水位、流量は各断面における解析流量の1分間平均値を示している。水位と流量の伝播特性は大きく異なる。上流河川では、ほぼ同時刻に水位、流量ハイドログラフのピークが発生するのに対し、湛水領域では、水位ハイドログラフのピークは流量ハイドログラフのピークから11分遅れている。流量ハイドログラフは、貯水池の上流領域ではほぼ同一波形で流下し、湛水領域に流入すると、貯留によりピーク流量が減ずる。式(8)に示すように、貯留量は流入量 Q_{in} 、流出量 Q_{out} の差であり、流量ハイドログラフの縦断的な変化の時間積分から求まる。以下に、縦断的な流量変化と貯留量について分析する。図-10に解析流量の縦断分

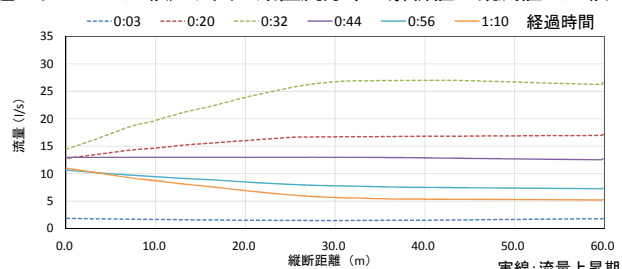


図-10 解析流量の縦断分布
実線：流量上昇期
破線：流量下降期

布を示す。流量上昇期(図中の破線)は、湛水領域、遷移領域となる4.0km地点より下流の区間で流量が顕著に減ずる。この隣り合う時間の縦断的な流量差がその時間内の貯留量であり、湛水領域、遷移領域の区間で洪水流が貯留され、流量ハイドログラフは縦断的に変形する。また、貯水低下期(図中の実線)は、貯水池への流入量に対し、放流量が大きくなるため、貯留分が徐々に排水される。水位ハイドログラフは、図-9に示すように、遷移領域で波形が大きく変形し、4.0km地点より下流(水位ハイドログラフの2.0km~4.0km地点)では、湛水領域の背水の影響により同一形状の波形になる。これは、本検討の流入量の規模が貯水池の規模に比して十分小さく、貯水位の上昇が概ね水平であったためである。このように、中小規模洪水では、貯水位がほぼ水平に上昇することから、貯留量 dS による流量波形への影響は小さく、現行のダム操作における貯水位水平を仮定し求めた貯水池への流入量は十分高い精度を有する。放流量についても、貯水容量が大きいダムでは、堤体付近の流速が小さくなることから、貯水位から求めるゲートの式による放流量は工学的に十分な精度を有すると考えられる。

(2) 大規模洪水時の洪水伝播特性

貯水池に大流量が流入したときには、中小規模洪水と比較して湛水領域の水位上昇が早く、貯留量の増大により、貯水池内に縦横断的な水位変化や遷移領域における洪水流の大きな流動が生じると想定される。以下に、大規模洪水時の流動、貯留について分析する。図-11に大洪水ピーク流量時における単位時間あたりの水位上昇量と水深平均流速分布を示す。この図は、大型水理模型実験のピーク流量を現地流量 $2,200\text{m}^3/\text{s}$ （流量確率 約1/200）に引き伸ばし、本解析モデルを適用した結果である。ピーク流量時は、貯水池内で大きな流動が発生し、平面渦の発生区間では貯留が生じ、局所的な水位上昇が発生する。図-12に同時刻の単位時間、単位距離あたりの貯留量を示す。各時間でも、図-12と同様な貯留量図を描くことが出来、全区間の貯留量の和の時間変化が、例えば図-7のように描くことが出来る。図-12中には①現行のダム操作と同様に貯水位1点から算出した貯留量と②各解析メッシュの水位上昇量より算出した貯留量を示している。②が①より高くなる区間（図中の横縞）は、図-11の平面渦発生区間（ $3.5\text{km}\sim 4.0\text{km}$ ）と対応している。これは、竹村⁹らの言う、貯留量の内で流量ハイドログラフの変形を引き起こす洪水遊水量である。ダム貯水池では、大流量が貯水池に流入し、大きな流動により生じる流速分布の断面平均流速からの偏差が大きくなる区間で生じている。また、①が②より十分高くなる区間は（図中の縦縞）、流速が大きく洪水時に実際に発生している貯留量に対し、現行のダム管理で行われている水平な水位上昇による貯留量の評価によって大きめに評価されている。これは、水位上昇期の湛水領域では流入量に対し放流量が十分小さいことから、貯水池下端の運動エネルギーは非常に小さく、水面高がエネルギー高となる。したがって、ここでの水面高が貯水池内で最も高くなり、その高さが貯水池内でどこでも成立すると仮定して求められたものである。このことは、現行のダム管理では、洪水時の貯水容量に余裕を持たせていると解釈できるが、これはまた、貯水池への流入流量を大きめに見積もっているとも考えることが出来る。よって、大洪水流入時に安全で効率的なダム管理を行うためには、流れの三次元性による流速分布に起因する ds' の発生機構の理解を踏まえた精度の高い洪水流入量とダム貯水池内の流動把握が必要であり、ダム貯水池と上流河川において、洪水時における縦断的な水位変化の把握を目的とした洪水観測体制を構築すべきである。その上で、本論文の解析法で示した観測水面形の時間変化に基づく上流河川及びダム貯水池洪水流動解析⁹から、異なる規模のダム貯水池で、大規模洪水流入時の流動把握が重要となる。

5. 結論

本研究では、ダム貯水池洪水流動解析モデルを構築し、

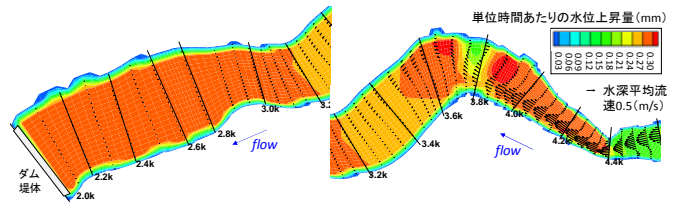


図-11 大洪水時の単位時間あたりの水位上昇量と水深平均流速分布（流量ピーク時）

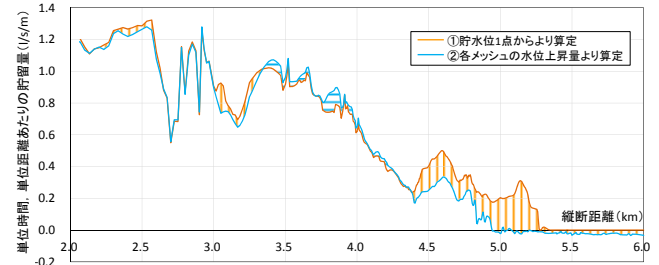


図-12 単位時間、単位距離あたりの貯留量（流量ピーク時）

大型水理模型実験に適用することで、解析モデルの妥当性を確認し、観測値と解析結果から、貯水池を流下する洪水流の貯留、流動機構について分析した。また、現行の貯水池管理の課題を提示した。今後は、貯水池特性の異なるダムを対象に、貯水池と上下流河川における縦断水位の時間変化データを蓄積するとともに、大流量流入時についても、ダム管理が適切に行えるように本検討方法の現地適用し、合理的なダム管理に生かすことが必要である。

謝辞：本研究、水理模型実験を実施するにあたり、中央大学工学部都市環境学科4年の大野純暉さんに協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 竹村吉晴, 福岡捷二: 非定常平面二次元流れにおける洪水遊水量の評価法と北上川山間狭隘河道における洪水流の流量と水位ハイドログラフの伝播機構, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol. 70, No.4, pp.L721-L726, 2014.
- 5) 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.
- 6) 福岡捷二: 実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性, 河川技術論文集, 第20巻, pp.253-258, 2014.

(2015. 9. 30受付)