

多地点水位観測を用いた 流入量算定精度向上の検討について

札幌開発建設部 千歳川河川事務所 漁川ダム管理支所 ○杉村 大輔
渋谷 直生
伏見 康則

ダム流入量は、ダム操作の判断等に用いられる極めて重要な基礎データである。また近年、集中豪雨の頻発等を背景に、特別防災操作の導入等のダム管理の高度化が注目されており、流入量算定精度の高精度化が求められている。ダム流入量の算定に用いられる貯水位変化方式は、貯水池内で水位が一律と仮定しており、貯水池における縦断的な水位変化の影響は考慮されない。本稿では、貯水池及び上流河道において多地点水位観測を実施し、縦断的な水位変化特性を整理するとともに、水位変化がダム流入量の算定に及ぼす影響を分析した。また、流入量算定精度向上に資する多地点水位計の概略の配置方法を提案した。

キーワード：貯水位変化方式、平均断面法、次元不定流解析、多地点水位観測、水面振動

1. はじめに

ダム流入量は、ダム管理において洪水調節の開始や放流量決定の判断等に用いられる重要なデータである。近年では、線状降水帯等による集中豪雨が頻発しており、事前放流操作や特別防災操作の導入、異常洪水時防災操作の見直し等、ダム管理の高度化が注目されている。このような中、ダム操作を適切に実施し、ダム下流域の安全性を確保する上で、ダム流入量のさらなる高精度化が求められている。

ダム流入量は一般に、ダム堤体近傍の貯水位計による観測水位が貯水池内で一律であると仮定して求めた貯水量変化 ΔV を变化に要した時間 T で除した $\Delta V/T$ にダム放流量を加えることで算定される¹⁾。この方法について、塚本ら²⁾は、貯水池内で一律の水位を仮定して求めた流入量が実際よりも大きく算定される恐れがあることを指摘している。

上記を背景として、本稿では、ダム貯水池に多数の水位計を配置し、観測水位(以降、多地点観測水位と呼ぶ)から貯水池内での縦断的な水位変化特性を整理した。また、流入量の真値が得られていないことから、従来の貯水位変化方式と、多地点観測水位による平均断面法及び次元不定流解析法の3手法による流入量を比較、分析することで各手法の特徴と課題を考察した(以降、3手法をそれぞれ、貯水位変化方式、平均断面法、次元不定流解析法と呼ぶ)。平均断面法は、縦断的な水位変化に伴う貯水量変化を直接的に算定できる方法であり、次元不定流解析法は、洪水の伝播に伴う時間遅れや波形のつぶれを捉え、平均断面法との違いを比較するために採

用した。各手法の流入量算定方法は2章で述べる。

対象ダムは、貯水池流路が単一であり、貯水池流入端付近の最深河床勾配が約1/300と急勾配である漁川ダムとした。矢野ら³⁾は、貯水池の洪水流挙動が湛水領域と河道領域及びこれらの接続部に現れる遷移領域に区分されることを明らかにしている。漁川ダムは、湛水領域と河道領域の両方の流水挙動を有する特性があることから対象とした。また、漁川ダムにおいて流入量算定精度が向上した平均断面法を、貯水池が二股の形状を有し、水面振動が課題となっている留萌ダムに適用し、流量の振動抑制効果を考察した。さらに、これらの結果を踏まえて、流入量算定精度向上に資する水位計の概略の配置方法を提案した。

2. 流入量算定方法

貯水位変化方式と平均断面法の概念図を図-2に示す。図中の式(1)~(3)は、ある水位に対する貯水量 V 、貯水位変化方式による流入量 Q_{bc} 、平均断面法による流入量 Q_{bm} の算定式である。ここに、 V_c ：ダム地点水位が貯水池内で一律とした場合の貯水量、 V_m ：多地点観測水位から算定した貯水量、 N ：堆砂測線数、 T ：時間、 Q_{out} ：ダム放流量、添え字 ij は時間ステップ、 j_l は堆砂測線を示す。

貯水位変化方式では、各測線に一律の水位を与え、平均断面法では、多地点観測水位から水位計間の堆砂測線位置(図-1)での水位を直線内挿した。これらの水位から河積 A を算出し、測線間の区間距離 Δx を乗じて求めた貯水量 V_c 、 V_m の変化量を時間 T で除し、放流量 Q_{out} に加えることで流入量を算定した。

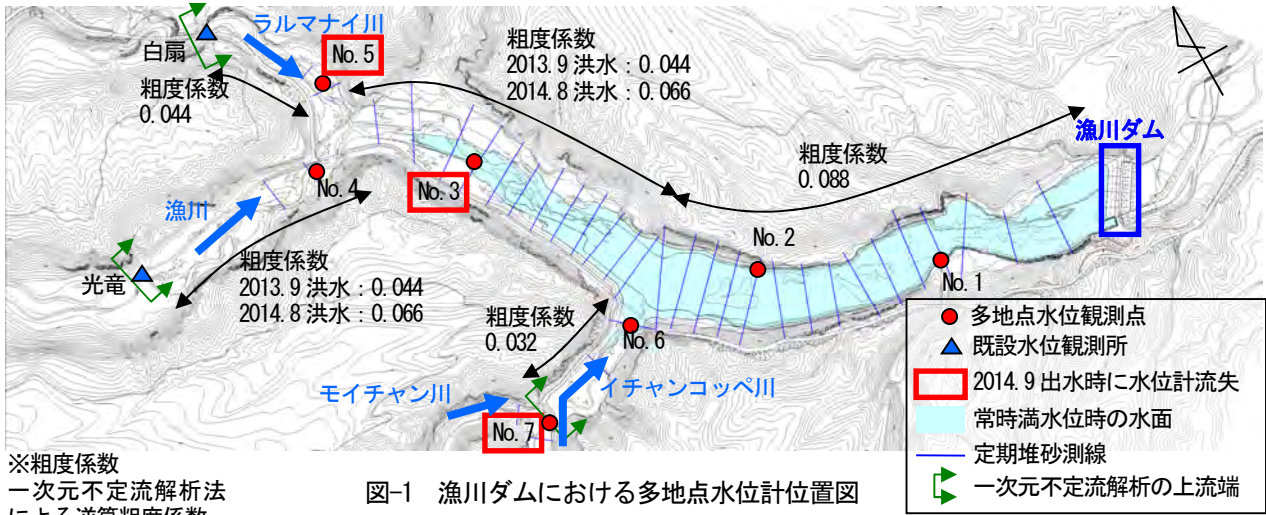


図-1 漁川ダムにおける多地点水位計位置図

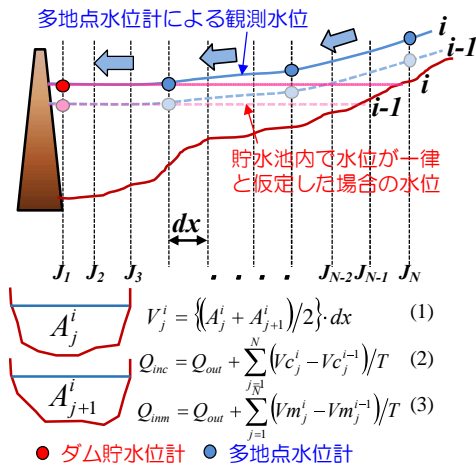


図-2 貯水位変化方式と平均断面法概念図

一次元不定流解析法は、多地点観測水位を上下流端の境界条件としてダム流入量を算定するもので、縦断的な水位変化から求まる水面勾配により流速が生じ、流量が算定される。本検討では、ダム流入量の算定を目的としていることから、水位データから流量を算定可能な手法を採用した。

3. 漁川ダムの概要

漁川ダムは、千歳川水域総合開発の一環として支川漁川の千歳川合流点より約25km上流の恵庭市漁平に、昭和55年に完成した多目的ダムである。ダム型式は中央コア型ロックフィルダムであり、総貯水容量は15,300千m³、堤高は45.5m、流域面積は113.3km²である。ダム貯水池は図-1に示すように南東-北西の方向に長軸を持ち、直線的な形状を有する。主な流入支川として、ダム堤体から約1,700mの地点でイチャンコッペ川が合流し、約3,000mの地点でラルマナイ川が合流している(図-3)。

漁川ダムでは、2014年9月11日に計画高水流量(600m³/s)を超過するピーク流量819m³/sの既往最大洪水が生じた。当該洪水時の土砂堆積に伴う河床上昇によって貯水容量が圧迫されており、より効率的なダム運用、流入量算定

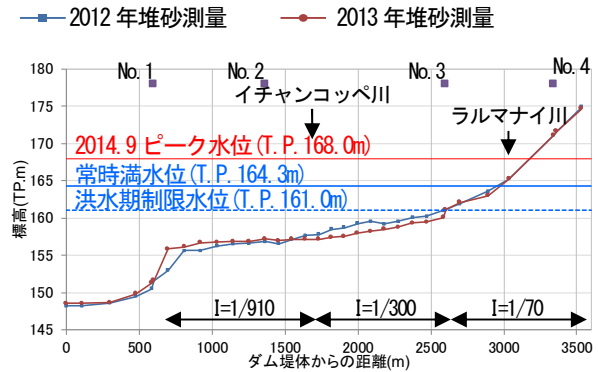


図-3 漁川ダムにおける最深河床高の縦断面図

の高精度化が求められている。

また、貯水池流入端付近の最深河床勾配が約1/300と比較的急勾配であり(図-3)、湛水領域と河道領域の両方の流水挙動を有する特性があることから対象ダムとした。

本検討では、漁川ダムの地形条件を踏まえて、貯水池の水位変化特性が流入量算定に与える影響について、2章で示した3手法で比較、分析を行った。

4. 漁川ダム貯水池における多地点水位観測

2013年8月から漁川ダムにおいて図-1に示す7箇所水位計測を開始した。No.1は堆砂棚の肩付近、No.2は支川合流付近、また、No.3は貯水池流入端の水位変化を確認することを目的とした。No.4、No.5、No.6は、支川合流前後の水位変化を確認するため、ダム貯水池に流入する直前の漁川、ラルマナイ川及びイチャンコッペ川河道内に設置した。No.7はイチャンコッペ川とモイチャン川の合流点付近であり、一次元不定流解析の上流端境界条件を得ることを目的とした。これらの水位計測は、圧力式水位計を用いて1分毎に観測した水位をロガーに収め、これを定期的に回収することで行った。なお、ダム堤体近傍では、既設の貯水位計での水位計測を継続している。漁川ダムでは、2014年9月11日の既往最大洪水において、No.3、No.5、No.7水位計が流失し、洪水時のデータ

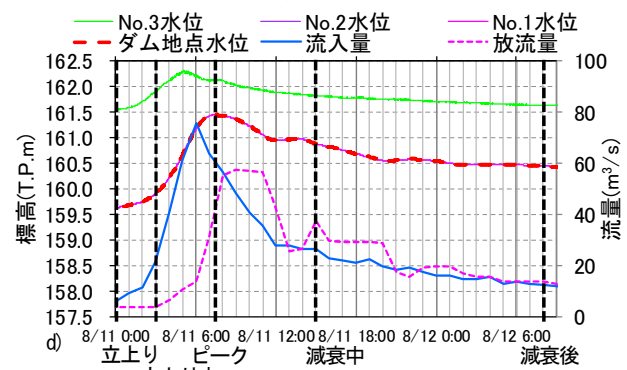
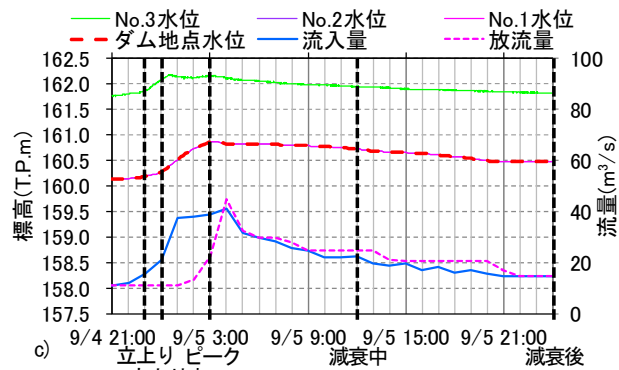
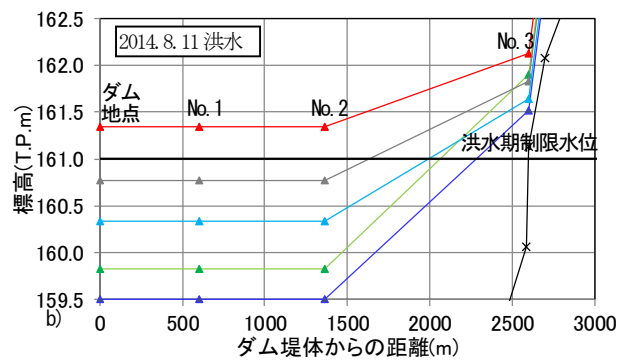
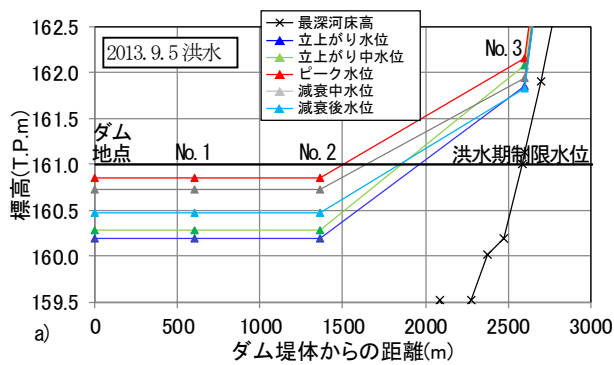


図-4 漁川ダム a) 2013. 9. 5 洪水時の水位縦断面図、b) 2014. 8. 11 洪水時の水位縦断面図、

c) 2013. 9. 5 洪水時の観測水位波形と流入・放流量波形、d) 2014. 8. 11 洪水時の観測水位波形と流入・放流量波形

が得られなかった。2015年にNo.5、No.7を流失前と同位置に再設置したが、No.3については前年の洪水による土砂堆積で河床が1m程度上昇し、同位置への設置が困難であったため、上流約300mの位置に再設置した。No.3は貯水池流入端に位置し、平均断面法において上流端の水位変化を捉える重要なデータである。このため、5章、6章では、同一箇所での水位データが得られた2014年9月11日以前の約1年間でピーク流入量が大きかった2013年9月5日洪水(流入量ピーク $44\text{m}^3/\text{s}$)と2014年8月11の洪水(流入量ピーク $76\text{m}^3/\text{s}$)を対象に、縦断的な水位変化特性を整理し、流入量算定精度の比較、分析を行った。

5. 漁川ダムにおける縦断的な水位変化特性

4章で選定した2洪水について、多地点観測水位から水位変化特性を整理した。図-4a)、b)に多地点観測水位による立上りから減衰後にかけての水面形の時系列変化を示す。No.3地点の水位上昇量は、立上り水位から立上り中水位にかけて大きくなっているが、ダム地点からNo.2地点では立上り中水位からピーク水位にかけて大きくなっており、貯水池上流部の流量が下流に伝播する際に時間差が生じている。これは、図-4c)、d)の水位波形で、No.3と比較してその下流地点の水位ピークが遅れていることから確認できる。

貯水池流入端とダム地点水位の水位上昇時刻の差は、必ずしもダム地点における貯水位変動と流入量が一致しない可能性があることを示唆している。

6. 漁川ダムにおける流入量算定精度の分析

貯水位変化方式、平均断面法、一次元不定流解析法の3手法で流入量を比較、分析した。また、多地点水位計の配置場所等が流入量算定精度に及ぼす影響を分析した。

(1) 計算条件

貯水位変化方式では、ダム堤体近傍の貯水位計で計測された水位を用いた。平均断面法では、No.1、No.2、No.3の1分間隔水位の10分平均値を用いた。貯水位変化方式について、漁川ダムの実管理では、貯水位変化量が $5\text{cm}/10\text{分}$ を超過した場合、最小二乗法に切り替えて流入量を算定しているが、ここでは、貯水池内一律の水位と多地点観測水位とで水位条件が異なることによる流入量算定精度への影響を比較するため、最小二乗法への切り替えは行わず、貯水位変化方式のみで流入量を算定した。

一次元不定流解析の対象区間は、光竜地点(漁川)、白扇地点(ラルマナイ川)、No.7地点(イチャンコッペ川)からダム堤体までとした。上流端境界条件は、光竜地点、白扇地点、No.7地点の水位とし、下流端境界条件はダム地点水位とした。粗度係数は、解析区間の中間点No.1～No.6の多地点観測水位の再現性から逆算した(図-1)。

各手法での地形条件は、定期堆砂測量の実施時期が毎年11月頃であることに鑑み、各洪水生起年の前年の測量成果を使用した。

(2) 流入量ハイドログラフの比較・分析

図-5に3手法で算定したダム流入量波形の比較図を示

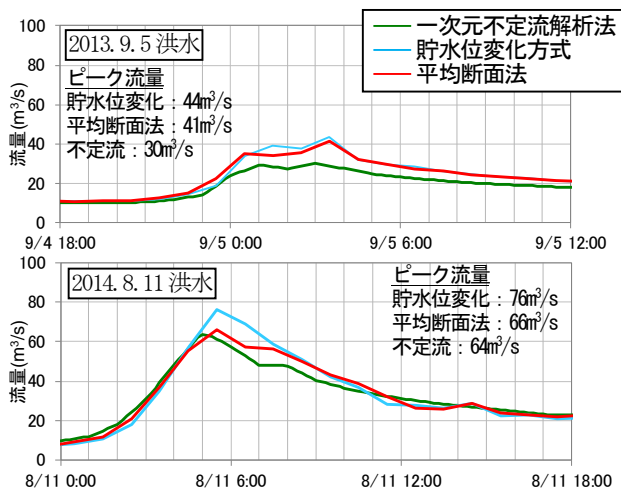


図-5 流入量算定結果の比較(漁川ダム)

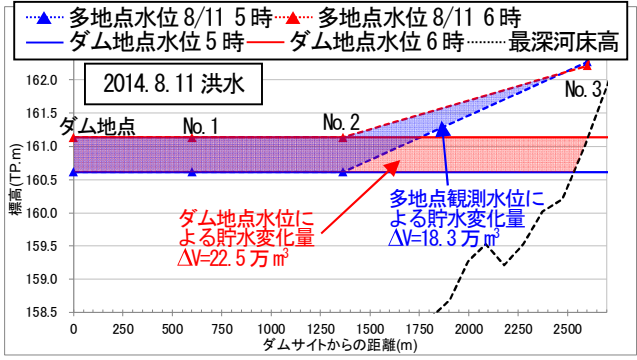


図-6 貯水位変化方式と平均断面法のピーク流量時の貯水量変化(漁川ダム、2014.8.11洪水)

す。貯水位変化方式と平均断面法のピーク流量を比較すると、平均断面法の方が小さく算定されている。ピーク流量時刻付近の貯水量変化を比較すると(図-6)、平均断面法の方が小さい。これは、ピーク流量時刻付近でNo.3地点の水位が低下し始めているためであり、平均断面法の流入量は、貯水池流入端の水位変化を反映している。

また、平均断面法の方が貯水位変化方式と比較して流入量波形の立上りが早い。図-4a), b) で示したように、No.3水位は、No.2からダム地点間の水位と比較して、水位の立上りが早いのである。平均断面法の流入量は、洪水初期の貯水池上流部での水位上昇を反映している。

ただし、図-6に示した多地点観測水位の水面形と河床形状は合致していない。これは、平均断面法ではNo.2からNo.3地点間の水位を直線内挿で算定しているためであり、実際にはNo.2、No.3地点間に水面勾配の変化点が生じている可能性がある。(3)では、多地点水位計の配置場所や数が流入量算定精度に及ぼす影響を分析した。

一次元不定流解析法による流入量波形は、2014年8月洪水ではピーク流量が平均断面法と同定度となるものの、2013年9月洪水ではピーク流量が小さく算定された(図-5)。これは、2013年9月洪水のNo.3地点におけるピーク流量時の流速が小さいためと考えられる(図-7a)。2014年8月洪水の流速は、約3m/sと2013年9月洪水の2倍程度である。

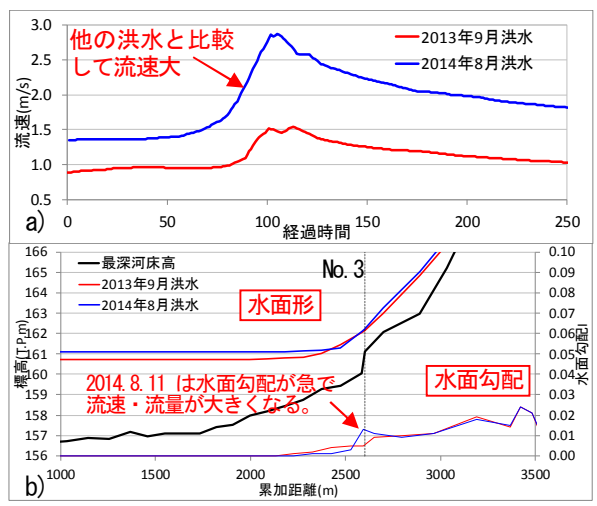


図-7 一次元不定流解析による a) 流速ハイドロと b) ピーク流量時の水位、水面勾配縦断面図(漁川ダム)

図-7b)に示すように、No.3地点付近の2014年8月洪水時の水面形は2013年9月洪水と比較して急勾配であり、流速及び流量が大きく算出されている。

一次元不定流解析法では水面勾配により流速が生じるため、貯水位が水平に上昇・下降する場合には計算上流れが生じず、流量の算定精度が低下する。貯水位が水平に上昇する場合、鉛直二次元解析等、鉛直方向の流動を考慮可能なモデルを適用する必要がある。

(3) 水位計配置の流入量算定精度への影響分析

平均断面法によるピーク流量を概ね再現することができた2014年8月洪水時の一次元不定流計算水位に平均断面法を適用して流入量を試算した。

図-8に、2014年8月洪水時の一次元不定流解析による水位縦断面図を示す。No.2、No.3地点間で水面勾配が変化しており、多地点水位計ではこの水面形の変化を捉えていない。No.2、No.3地点間に約90m間隔で存在する13の全堆砂測線に水位計を配置した場合(Case1)、水面勾配変化点1地点に水位計を追加した場合(Case2)、現行の多地点水位計のみの場合(Case3)の3通りの水位計配置を仮定して算定した流入量を比較した。

図-9にCase1~Case3の流入量波形の比較図を示す。Case3のピーク流量はCase1、Case2と比較し8m³/s程度小さい。これは、Case3ではNo.2、No.3地点間の水位を直線内挿で仮定することによって単位時間あたりの貯水量変化を過小評価しているためである。Case2はCase1とほぼ一致しており、今回の試算では、1地点に水位計を追加することで、全測線で水位観測を行った場合と同等の結果が得られた。

平均断面法では、水面勾配変化点で水位観測を行う必要があることを確認した。今後、複数規模の洪水で同様の検討を行い、水位計の追加配置を精査する必要がある。

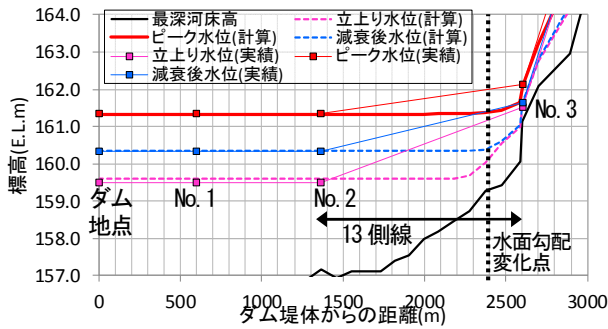


図-8 不定流解析水位縦断面図(漁川ダム、2014. 8. 11)

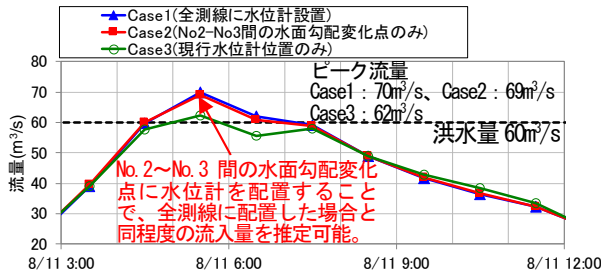


図-9 一次元不定流計算水位を用いた平均断面法の計算流量(漁川ダム、2014. 8. 11)

7. 留萌ダムにおける流量の振動の抑制効果

留萌ダムでは、図-10に示す10箇所(赤丸)で水位観測を行った。ここでは、流入量のピーク時刻付近で警戒体制移行判断基準である $20\text{m}^3/\text{s}$ 前後の振動が確認された2013年11月10日の洪水(流入量ピーク $24\text{m}^3/\text{s}$)を対象に平均断面法を適用し、流量の振動の抑制効果を確認した。

(1) 流入量の振動の抑制効果

平均断面法で使用する多地点観測水位は、ダム堤体近傍の本川1から湛水区間上流端の本川4地点、右川3地点の水位とし、地形条件には、2013年の堆砂測量成果を使用した。貯水位変化方式と平均断面法による流入量の算定結果を図-11に示す。ダム管理用制御処理設備で記録された流入量(ダムコン流入量)と貯水位変化方式は、ハイドロの立上り時及び低減後等で流量の振動が見られるが、平均断面法ではこれが抑制されている。平均断面法は、多地点観測水位を用いることで各区間の貯水量変化 ΔV を分割して算定することができるため、ダム堤体近傍の1地点の貯水位の振動が全体に波及せず、流入量の振動が抑制されている。

(2) 水位計配置の留意点

2014年8月10日12時~15時の本川1~3地点の水位時系列データ(図-12)について相互相関解析を行った(図-13)。約70分の長周期振動成分が確認され、本川1、3と本川2は逆位相となっている。これは、本川1、2、3地点の間に振動の節があることを示している。

長周期性の振動の存在は、石田ら⁴⁾、鈴木・中津川ら⁵⁾

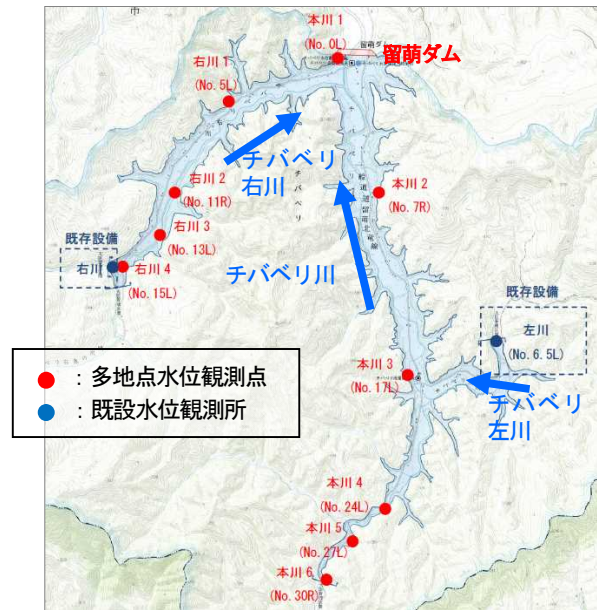


図-10 留萌ダムにおける水位計配置図

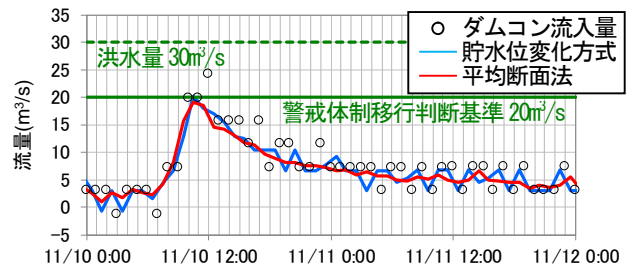


図-11 平均断面法と貯水位変化方式の比較(留萌ダム、2013. 11. 10洪水)

も定山溪ダム、金山ダムで明らかにしている。短周期の振動成分は、周期の数倍の時間で移動平均をとることによりある程度平滑化することが可能である。一方で、長周期の振動成分を移動平均により除去しようとする、時間遅れが大きくなるためダム管理上現実的ではない。このような長周期振動の影響を極力排除するためには、振動の節の位置を把握し、多地点水位観測による平均断面法を適用することが有効と考えられる。

ただし、2014年8月洪水においては長周期振動の振幅は 5mm 程度であり(図-12)、流入量算定精度に及ぼす影響は小さい。計画規模や設計洪水流量規模洪水での、水面振動の流入量算定精度への影響評価は今後の課題である。

8. 多地点水位計の配置方法の提案

多地点水位観測を行うことで、流入量の高精度化が期待できることから、漁川ダム、留萌ダムと同様の課題を持つダムでの多地点水位計の概略の配置方法を提案した。

貯水池形状と水位変化特性が異なる漁川ダム、留萌ダムをそれぞれ流量伝播型、水面振動型に分類し、2ダムの検討で得られた知見をもとに、精度良く把握すべき事象を整理した(表-1)。多地点水位計の配置に際しては、

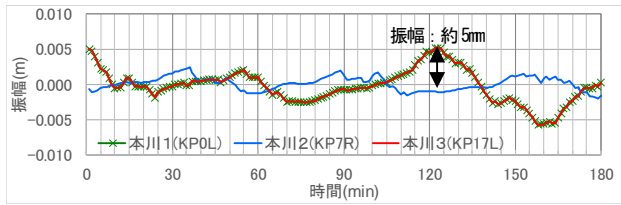


図-12 留萌ダムにおける水面変動の時系列
(2014.8.10 12:00~15:00)

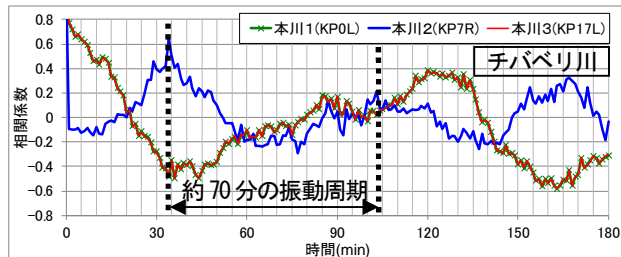


図-13 留萌ダムの多地点観測水位を用いた
相互相関解析結果(2014.8.10 12:00~15:00)

以下の地点に留意することが望ましい。ただし、上記の分類は、漁川ダム、留萌ダムの中小規模洪水を対象とした検討で設定したものであり、大規模洪水や他ダムでの観測をもとにダム分類を追加することも必要である。

- ①振動の節の付近
- ②河床縦断面形及び（又は）水面勾配の変化点付近
- ③支川合流点付近
- ④サーチャージ水位と河床の交点の直上流付近
- ⑤平面的な狭窄部
- ⑥5とその上下流の配置地点との中間地点
- ⑦支川の2及び4に相当する地点

上記①は水面振動型のダムを対象とし、②から⑦は水面勾配の変化に着目したもので、全てのダムに共通する。水面勾配の変化区間は、洪水規模や洪水初期の迎水位によっても変動する可能性があるため、不定流解析等で水面形を把握した上で水位計配置を精査していくことが重要である。

上記に留意した漁川ダムの水位計追加配置案を図-14に示す。本ダムでは、水位計測期間中に既往最大洪水が生起し、水位計が流失しデータが得られなかった。大規模洪水時は縦断的な水位変化特性が中小規模洪水時と異なる可能性があるため、今後、大規模洪水を含む複数規模の洪水で汎用性の高い流入量算定精度向上方策を検討する必要がある。

9. 結論

本検討で得られた結論を以下に示す。

- 1)多地点観測水位と平均断面法を用いることで貯水池上流部の水位変化を反映した流入量を算定できる。
- 2)多地点観測水位を用いることで流入量の振動をある程度抑制することができる。

表-1 ダムの分類

分類	貯水池形状	水位変化特性	精度良く把握すべき事象
流量伝播型 (漁川ダム)	単一流路型 (直線型)	流入端～堤体間の波形伝播・ピーク流量低減	出水時の縦断的な水面形の時系列的変化
水面振動型 (留萌ダム)	分岐型	固有振動が卓越	貯水位の空間分布・振動(貯留量の把握が重要)

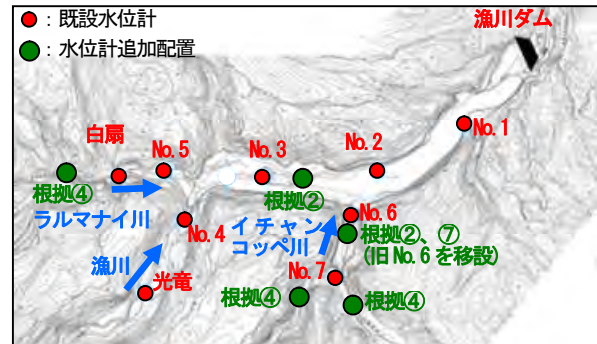


図-14 漁川ダム水位計追加配置案

3)今後の流入量算定精度向上に資する多地点水位計の概略的配置方法を提案した。

本検討では、流量観測値による流入量算定精度は検証できていない。また、流入量の算定には放流量を用いており、その精度によって流入量算定精度は変化する。ダム下流で流量観測を行い、放流量を検証することも課題である。今後、漁川ダムや水面振動の影響が顕著なダム貯水池において多地点水位観測を行い、以下の検討を実施することで、さらなる流入量の高精度化を図ることができると考えている。

- ・大規模洪水時の水位変化特性の分析
- ・流量観測値による流入量の検証
- ・鉛直二次元モデル等、鉛直方向の流動を考慮可能なモデルを用いた流入量の算定精度の検証
- ・水面振動特性の分析
- ・ダム下流での多地点水位観測と放流量の検証

謝辞：本検討では留萌ダム管理支所より資料提供等ご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)一般財団法人 水源地環境センター:ダム管理用制御処理設備標準設計仕様書(案)同解説,2005.6.
- 2)塚本洋祐,福岡捷二,大山修: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,60,2016.2.
- 3)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),京都大学防災研究年報,8,pp.257-270,1965.
- 4)石田亨平,鈴木洋之,長谷川和義:多地点同時計測法による定山溪ダム貯水池での水面変動の計測と解析,土木学会論文集, No.628/II-48,163-176,1999.8.
- 5)鈴木洋之,長谷川和義,中津川誠,岩崎政司:金山ダム貯水池の水面振動特性,土木学会年次学術講演会,54,1999.9.