

2016年8月の異常洪水時におけるダム操作の考察

Research on a Dam Operation for Extraordinary Flood in August 2016

室蘭工業大学 ○学生員 寺田 詢 (Jun Terada)
 室蘭工業大学 正 員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
 室蘭工業大学 学生員 田中 雅人 (Masato Tanaka)

1. 研究背景

2016年8月17日から23日にかけて、7号、11号、9号の3つの台風が北海道に連続して上陸した。さらにその一週間後の8月30日には台風10号が接近し、それによりもたらされた降雨の影響で、石狩川水系では河川の氾濫や堤防の決壊が発生するなど甚大な被害となった。

金山ダム流域は先行する台風の影響で、流域内の土壌が湿潤して流出率が増大し、ダムへの流入量も増大した。この際、ダムでは異常洪水時防災操作開始水位であるEL343.70mを超え、さらに高水時最高水位を超えることが予測されたため、通常の洪水調節から異常洪水時防災操作に移行した。

上記の事例のように大型台風による河川への流量を予測し、被害を最小化できるようなダム操作のあり方を考察することを本研究の目的とする。

本研究では台風10号の期間における金山ダム地点での流入量計算を行い、その計算結果を用いて金山ダム操作規則に基づくダム放流量の計算を行った。本研究における計算手順を以下に示す。

- 1) 金山ダム操作規則に基づき、台風10号の期間における実測流入量を用いたダム放流量の計算を行う。
- 2) 白谷ら¹⁾による流域貯留量を考慮した流出計算法をもとに、分布型モデルによる台風10号の期間における金山ダム地点での流入量計算を行う。実際のダム操作に用いる流入量は、単位時間あたりの貯水位変化と放流量の関係から算出するが、流入量予測をダム操作に適用するという観点から本研究では、流出モデルによる計算値を用いる。
- 3) 上記の1)により求めた分布型モデルによる流入量計算を用いて、金山ダム地点での放流量の計算を行う。
- 4) 上記の計算より、台風10号による流入量の増加のように異常洪水時防災操作が必要となる場合において

も、それを回避できるようなダム操作について提案する。

2. 研究方法

2.1 災害事例

8月28日からの降雨により、空知川流域の串内観測所では8月31日0:00に最大時間雨量49mm、その後同日10:00までに累積雨量515mmを記録した。本研究では、計算対象期間を8月14日0時から9月5日0時までとした。この際の累積降雨量分布図を図-1に示す。

2.2 対象地域の概要

金山ダムは、石狩川水系空知川上流に位置する中空重力式ダムで、洪水調節、水道、発電を目的とする多目的ダムであり、流域図を図-2に示す。また、金山ダムにおける貯水池容量配分を図-3に示す。

金山ダムの洪水調節については、図-4に示すように、ダム地点計画高水流量1,000 m³/sに対して、計画最大放流量240 m³/sを放流し、最大洪水量760 m³/sの洪水調節を行なう機能を有している。

金山ダムの台風10号時の報告³⁾より、台風10号の影響による洪水調節時には、総雨量273.3mmと既往最大の降雨量が記憶されており、最大流入量も計画流入量1,000 m³/sを超える1,549 m³/sであった。この際、異常

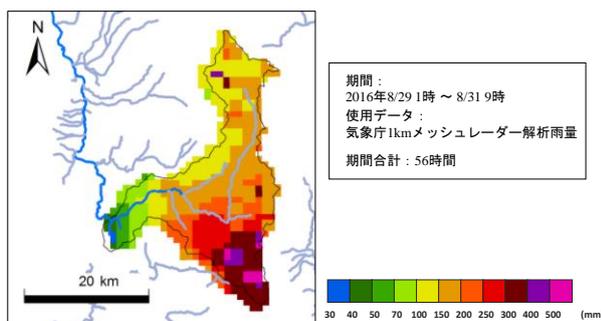


図-1 台風10号における金山ダム流域の累積降雨量分布図

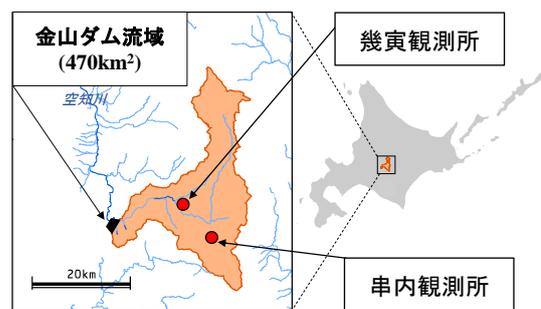


図-2 金山ダム流域位置図

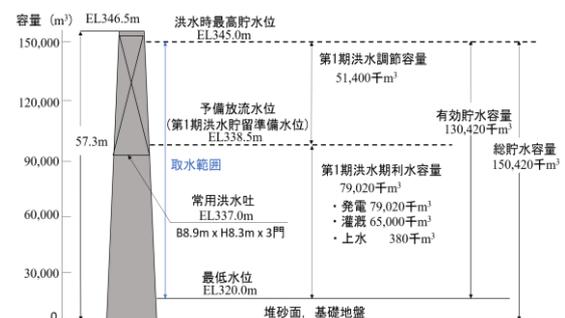


図-3 金山ダムの容量配分

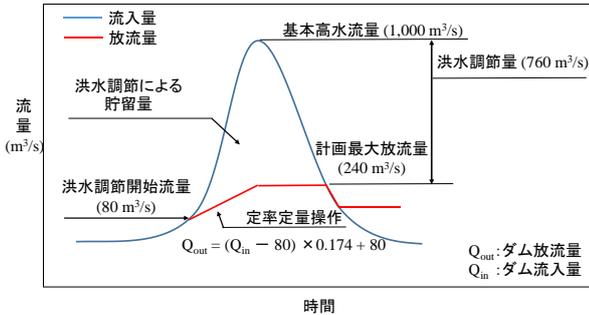


図-4 金山ダム地点洪水調節模式図

洪水時防災操作水位である EL343.70m を超えたため、異常洪水時防災操作を行うこととなった。

2.3 ダム放流量の計算条件

金山ダムにおいて、操作規則に基づいたプログラミングを行い、初期貯水位、初期放流量、初期貯留量を初期値として、流入量(10分データ)及び貯水位に基づく放流量の計算ができるようにした。以下に放流量を求めるまでの手順と放流量の計算条件を示す。

- a) 放流量を求めるまでの流れ
 - ① (初期流入量 - 初期放流量)により、正味の流入量を求める。
 - ② ①で求めた正味の流入量(m³/s)に単位時間を乗じることで、貯留量変化 ΔV を求める。
 - ③ ②で求めた ΔV + 初期貯留量)により、貯留量 V を求める。
 - ④ ③で求めた貯留量 V を金山ダムの H-V 式に当てはめ、ニュートン法により貯水位 H(m) を求める。
- なお、金山ダム H-V 式は金山ダム貯水位-貯留量対応表から以下のような近似式を求めた。

$$H = 2674.54435 V^3 - 2526166.44865 V^2 + 797639851.68255 V - 84205089071.893 \quad (1)$$

ここで、H は貯水位(m)、V は貯留量(m³)である。

以上より、流入量 Q_{in} (m³/s)および求めた貯水位 H (m)を用いて以下に示す手順で放流量を計算する。

b) 放流量の計算条件

放流量の算出は、図-4 に示すダムへの流入に対する放流の模式図及び操作規則で定められている放流制限を勘案する。以下に放流量の計算条件を示す。なお、洪水調節の開始が洪水貯留準備水位で出来るように、これより 50cm 低い 338mより流入量=放流量 (水位維持) 操作を行うものとする。

- ① 通常操作 (貯水位 < 洪水貯留準備水位)

洪水量が 80 m³/s 以下の場合、流入量 = 放流量 (水位維持) とする。
- ② 洪水調節操作時 (貯水位 ≥ 洪水貯留準備水位)

洪水量が 80 m³/s 以上となり、貯水位が 338.5m 以上となった場合、洪水調節を開始する。流入量が 80 m³/s 以上 1,000 m³/s 以下の場合、流入量が最大に達するまでを定率操作として、以下の式で放流量を設定する。

$$\text{放流量} = (\text{流入量} - 80) \times 0.174 + 80 \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

また、流入量が最大に達した場合は、流入量と放流量が等しくなるまでを定率操作として、以下の式で放流量を計算する。

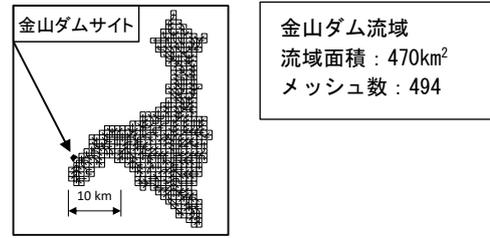
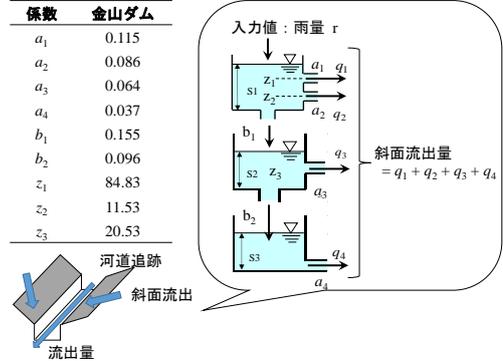


図-5 金山ダム流域の河道網図



$$\text{放流量} = (\text{最大流入量} - 80) \times 0.174 + 80 \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

なお、最大流入量が 1,000 m³/s を超える場合、計画

図-6 河道追跡と斜面流出を組み合わせた流域貯留量計算モデル

最大放流量=240m³/sを放流する。

その後に放流量が流入量と一致した後は、流入量 = 放流量 (水位維持) とする。

③ 異常洪水時防災操作 (貯水位 ≥ 343.7m)

貯水位が 343.7 m 以上となり、洪水時最高水位を超えることが予測される場合、異常洪水時防災操作を開始する。異常洪水時防災操作は、金山ダム操作規則にもとづく貯水位・放流量の対応表によるものとした。放流量を増量し、流入量と放流量が同量となった時点以降は、流入量 = 放流量 (水位維持) 操作とする。

2.4 分布型モデルによるダム流入量の推定

流入量予測をダム操作に適用する観点から流出モデルによる計算値を求めた。ダム流入量の推定手法として、白谷ら¹⁾の提案する「流域貯留量」を初期値とする斜面流出・河道追跡と組み合わせた分布型モデルを用いた。

① 流域貯留量の推定

入力データとして対象地域における1日ごとの約1kmメッシュレーダ解析雨量を用い、メッシュごとに直列3段タンクモデルを用いて流入量を計算した。対象流域河川の河道網を図-5に示す。また、kinematic wave式を用いて金山ダム地点までの河道追跡を行い、金山ダム地点での流入量を算出した。タンクモデルのパラメータは白谷ら¹⁾の報告を参考に河道追跡でダム地点の流量が再現できるものを用いた。

以上の計算によって得られる各タンクの貯留高を流域貯留量とみなした。河道追跡と斜面流出を組み合わせた流域貯留量計算モデル及び使用したパラメータを図-6に示す。河道追跡には kinematic wave 法の次式を用いた。

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} + \frac{5}{3} \frac{i_c^{0.3}}{n_c^{0.6}} \frac{q_c^{0.4}}{B^{0.4}} \frac{\partial q_c}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

② ここで、 q_c : 河道の流量 (m^3/s), n_c : 粗度係数 ($m^{-1/3}$), i_c : 河道勾配, B : 河道幅 (m). 河道の粗度係数は $n_c=0.03$ とし, 河道勾配や斜面勾配, 落水方向などの地形情報は石狩川流域ランドスケープ情報から与えた. データは 1km 四方のメッシュを基本単位として, 支川流域やダム流域毎に分類されている. 流出率の算定

次に流域貯留量を考慮した流出率の算定方法と流出モデルについて説明する. 山田ら⁴⁾は, 次式に示す流域の保水能を考慮した流出率の算定方法を提案している. この方法では, 初期水分量と累加雨量から流出率が算出される.

$$f_i = 1 - \frac{\exp(-aS_1)}{a \int_0^i rdt} \left\{ 1 - \exp\left(-a \int_0^i rdt\right) \right\} \quad (3)$$

ここで、 f_i は降雨開始、 i は時間後の流出率、 S_1 は降雨開始前日の流域貯留量 (1 段目タンクの貯留高) (mm), r は雨量強度 (mm/h) である. また、 a はパラメータ (1/mm) で、ハイドログラフの再現性から流域毎に与えられる. ここでの初期水分量は表層土壌を対象にしていることから、本研究では式(1)の初期貯留量 S_1 には表層土壌に対応するものとして 1 段目タンクの貯留高を与えた.

以上の流出率算定式で得られた流出率を観測雨量に乘じ、それを表面流出量に寄与する雨量 (有効雨量) とし、残りを中間流出及び地下水流出量に寄与する雨量とした.

③ 分布型モデルによる流入量算出手法

入力データとして、①で求めたメッシュごとの流域貯留量と 1km メッシュレダ解析雨量を用いた. 計算手法として、①と同様の斜面流出モデルと、①に示した河道追跡モデルとを組み合わせた流出モデルを使い、約 1km 四方のメッシュごとに計算を行った. 斜面流出モデルには、直接流出と地下水流出の 2 成分を考慮し、以下に示す基礎式を用いた.

$$\text{直接流出: } \begin{cases} \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = fr, & q_s = \beta h_s^p \\ \beta = \sqrt{i_s}/n_s, & p = 5/3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{地下水流出: } \begin{cases} s = k_1 q_b + k_2 dq_b/dt \\ ds/dt = (1-f)r - q_b \\ k_1 = c_1 k_2, & k_2 = (c_3 - 1)/c_0 \\ c_0 = (\delta/T_c)^2, & c_1 = \delta^2/T_c \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 h_s : 斜面の流積あるいは水深 (m), q_s : 単位幅流量 (m^2/s), f : 流出率, r : 雨量強度 (mm/s), i_s : 斜面勾配, n_s : 等価粗度 ($m^{-1/3}$), s : 貯留高 (mm), q_b : 地下水流出成分流出高 (mm/h), c_1, c_3 : モデル定数, δ : 減衰定数 (=2.1), T_c : 地下水流出成分の時定数, なお、等価粗度は、地被により設定し、山林 : 0.4, 畑地 : 0.2, 市街地・裸地など : 0.01 とした. また、地下水流出モデルの定数は、 $c_3=1.2, T_c=28.0$ とし、流出率を決める未知定数 a を 0.0046 とした.

以上により求めたメッシュごとの斜面流出量を、図-6 に示す金山ダムの流域メッシュと河道網に投入し、kinematic wave 法による河道追跡によってダム流入量を

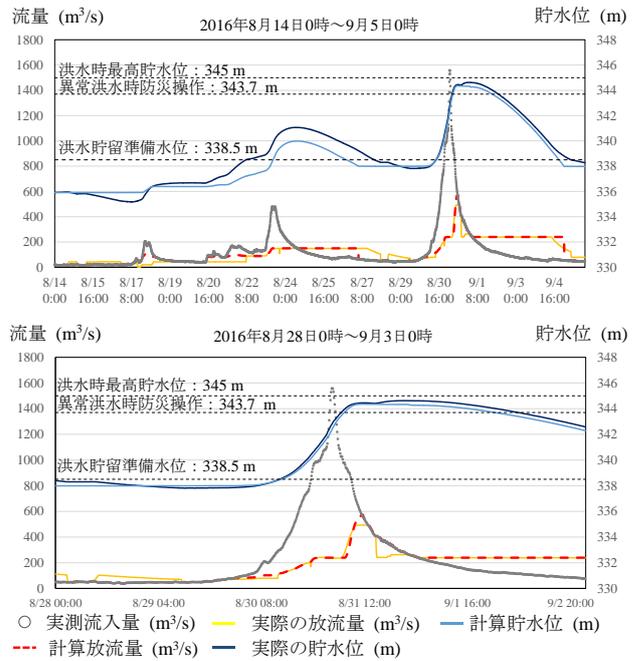


図-7 一連の台風における実測流入量を用いた放流量計算結果

求めた.

3. 結果と考察

3.1 2016年8月台風10号の事例における分析結果

2016年の一連の台風の期間を含む2016年8月14日から9月15日における、操作規則にもとづく放流量の計算結果を図-7に示す.

当時の実際の放流量・貯水位と貯水位・放流量の対応表による計算放流量・計算貯水位を比較すると、計算放流量は実際の放流よりピーク放流量が多い結果となったが、当時の放流状況を再現できていることが分かる. なお、実際の放流は流入の見通しや下流の状況を判断しながら行うため、その差が生じたものである. 当時の金山ダムは台風10号の接近前に事前放流によってダム放流量を増加させることで洪水貯留準備水位から約70cmダム貯水位を低下させていた. また、流入量がピークを越え、洪水時最高水位を超えない見通しが立った後に、増水時の異常洪水時防災操作の放流量増量操作を終了することで、下流側の被害軽減に配慮していたことがわかる.

3.2 流出計算結果に基づくダム操作のシミュレーション

2016年8月台風10号における、分布型モデルによる金山ダムへの流入量算定結果を図-8に示す. 分布型モデルではピーク流量を若干過小評価しているが、全体的な再現性からみて、図-1のような降雨分布が考慮できるモデルであることが示された.

分布型モデルによる金山ダムへの流入量算定結果を用い、操作規則に基づくダム放流量を計算した結果を図-9に示す. 実際よりは若干多い放流量が推定されているが、異常洪水時防災操作が必要となるような洪水時には、適切な予測雨量や流出モデルパラメータの設定が可能であれば、ダム操作予測が十分可能であることが示された.

以上より、分布型モデルに基づく流入量計算と放流量

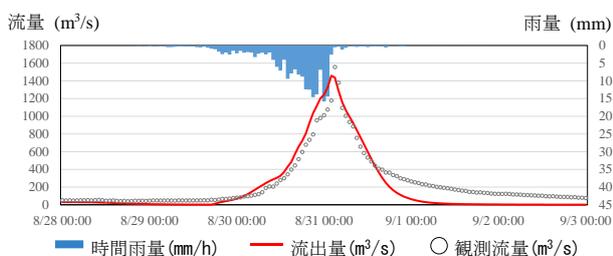


図-8 分布型モデルによるダム流入量再現結果

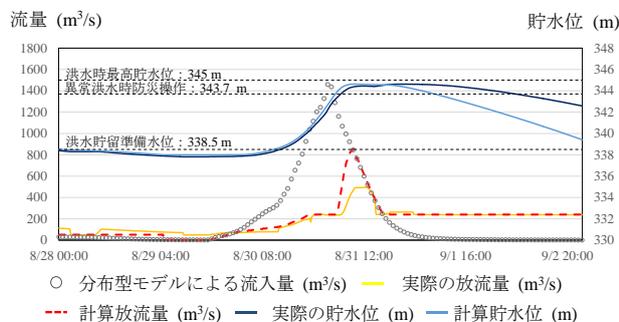


図-9 分布型モデルによるダム放流量計算

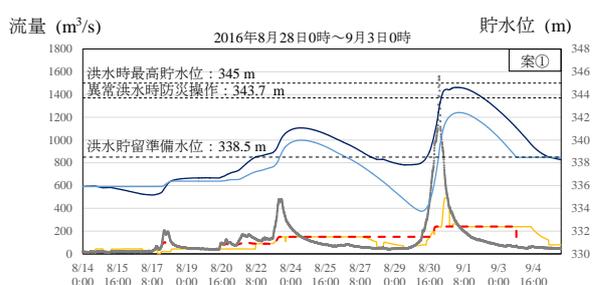


図-10 一連の台風におけるダム放流量提案操作結果

計算をもとに、被害を最小化できるようなダム操作の試算を行う。

3.3 被害を最小化するダム操作の検討

前記報告³⁾より、金山ダム管理支所は8月31日、ダム下流における道道の応急復旧工事着手にあたり、放流量を低下させていた。そこで、洪水時の放流操作の提案として、ダム流入量増加に備えて、台風9号後の出水段階で規定よりも多い放流量を以下の案で放流した結果を図-10に示す。なお、現在は洪水調節用ゲート数高より下の貯水位337m以下では利水放流量以上の放流は出来ない。本検討は、ゲートを改築して放流できることを仮想的に設定したものである。

案①：台風9号による8月24日～27日の出水対応の定流量操作に伴う放流を再度出水があるものと想定して継続する。

案②：台風10号の接近前の貯水位を一連の台風接近前の初期貯水位である336mまで下げ、無害放流量80m³/sの事前放流を行う。

以上のような事前放流で、ダム放流量を増加させたことで、台風10号のような異常洪水時であっても貯水位を抑え、案①、②の両方で異常洪水時防災操作を回避し、異常洪水時防災操作の開始水位である343.7m未満において、洪水調節出来る結果となった。

実測流入量に対する放流量計算結果(図-7)と、提案操作における放流量計算結果(図-10)の比較から、ピーク貯水位を最大2.3mの低下が可能となることが示された。また、実測流入量を用いた放流量計算時のピーク放流量564m³/sに対し、提案操作におけるピーク放流量は240m³/sであり、最大224m³/sの放流量を減少させ、下流側の流量増加を抑える結果となった。

以上の手法及び結果より、ダムの改築でゲート放流の増強ができ、流入量の増大が的確に予測できるようになれば、適切な事前放流によって、異常洪水時防災操作を回避できる可能性が示唆された。

4. 結論

本研究において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) ダム操作規則をプログラミングし、2016年8月の一連の台風における金山ダム流入量からダム放流量を推算し、当時の放流操作の再現性を確認した。
- 2) 金山ダム流域において、分布型モデルによる流出計算を行うことで、2016年8月の台風10号における流入量を再現した。
- 3) 分布型モデルにより計算した流入量をもとに、金山ダム放流量を試算した結果、放流能力を増強して適切な事前放流を行えば、2016年8月のような洪水事例においても、異常洪水時防災操作を回避できる可能性が示唆された。

謝辞：本研究をすすめるにあたり、(一財)日本気象協会の臼谷友秀氏ならびに国土交通省北海道開発局札幌開発建設部河川管理課及び金山ダム管理支所には、データ提供等で協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 臼谷友秀, 中津川誠: 流域貯留量を考慮した流出計算法の凡用性について, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.463-468, 2012.
- 2) 臼谷友秀, 中津川誠: ダムの洪水管理への流域貯留量の活用, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.4, pp.535-540, 2011.
- 3) 成田健, 青木二郎, 中村洋祐: 台風10号による金山ダムの異常洪水時防災操作について, 国土交通省北海道開発局第60回(平成28年度)北海道開発技術研究発表会
- 4) 山田正, 山崎幸二: 流域における保水能の分布が流出に与える影響について, 第27回水理講演会論文集, pp.385-392, 1983.
- 5) (財)北海道河川防災研究センター・研究所: 実践流出解析ゼミ 講義テキスト編, 第4回, 第8回, 第12回, 2006.