

## 満水になったダム湖の洪水調節能力

八戸工業大学 佐々木 幹夫, 釧路高専 加藤 雅也

### 1. はじめに

近年、日本各地において過去に経験したことのないような大雨が降り、大水により河川は溢れ、氾濫水による被害が出ている。洪水は河川の堤防管理よりもダム管理による対策の方がはるかに安全度は高い。しかし、近年、ダムにおいても計画を上回る出水が発生しており、緊急放流を余儀なくされているダムもいくつかある。2018年9月21日、愛媛県肘川上流の野村ダムでは異常な出水により緊急放流を行ったがこの放流で逃げ遅れにより5名の犠牲者が出ている。異常な出水に見舞われている現状を考えれば計画を上回る豪雨時のダム放流計画を持つ必要があるように見える。ダム湖は満水になっても洪水調節能力は存在しており、放流の仕方によっては大幅に放流量を少なくできる。ここに、本研究ではダム天端に越流式の異常洪水吐きゲートを有するモデルダムを設定し、満水になったダム湖の洪水調節能力を検討してみる。

### 2. モデルダムの設定とダム湖の水面上昇高

青森県岩木川上流西目屋村に目屋ダムがあった。1960年4月からその機能を発揮し、55年と半年の月日を頑張ったダムである。その機能は2015年9月に津軽ダムに引き継がれ、目屋ダム本体は津軽ダムのダム湖の中に水没している。この目屋ダムは幾度なく計画高水流量を越えた洪水（超過高水流量）に見舞われてきたダムであり、本研究のモデルダムとして最適と考える。表1にその緒元を示した。表中の $C_q$ は常用洪水吐流量を大オリフェスとして求めた時の流量係数である。

表1 モデルダムの緒元（目屋ダム）

ダム基準面	非常用洪水吐底面高を0m	(EL176.0mを基準面とする)
ダム流域	171.58	$\text{km}^2$
ダム湖面積	2.05	$\text{km}^2$
ダム天端高	11.5m	(EL187.5m) (EL176.0mを基準面とする)
非常用洪水吐(ゲート)底面位置	0m	(EL176.0m)
非常用洪水吐(ゲート)の高さ	10m	(EL186.0 m)
非常用洪水吐(ゲート)の幅	7m	
常用洪水吐(ゲート)底面位置	-5.5m	(EL170.5m) (EL176.0mを基準面とする)
常用洪水吐(ゲート)の高さ	6m	
常用洪水吐(ゲート)の幅	5m	2門 (計 10m)
常用洪水吐流量	280~560	$\text{m}^3/\text{s}$ (EL176.5 ~186.0 m) ( $C_q=0.6$ )

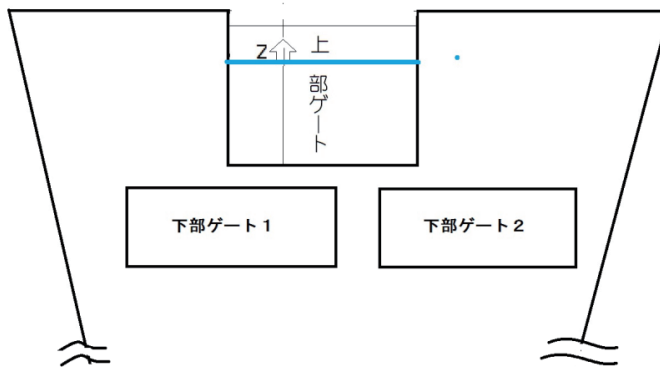


図1 モデルダム放流ゲート位置模式図

表1に示したようにここに設定したモデルダムは、ダム堤体天端より11.5m下に、非常用洪水吐（ゲート）があり、この幅は7m、高さは10m、この高さをダム湖水面が超えることのないようにダム湖水面の管理を行うものとする。すなわち、ダム堤体上端に設けられた非常用洪水吐（ゲート）上端よりもダム水面は下にくるようにダムの放流が操作されるものとする。放流は天端より17m下に常用洪水吐（ゲート）が2門も水位に応じて併用して行う。このゲートの幅はそれぞれ5m、高さは6mとなっており、このゲート2門の最大流量はダム湖面の位置により異なるが280～560m<sup>3</sup>/s程度となっている。放流は上端の非常用洪水吐からは自然越流式、これと併用して下の常用洪水吐2門からはゲート操作により行うものとする。図1に示した上部ゲートが非常用洪水吐、下部ゲートが常用洪水吐となっている。

### 3. 基礎方程式

満水時の水面をダム天端に設置された越流堰（非常用洪水吐）底面高にとった時、この湖面積は表1に示したように $A_s=2.05 \text{ km}^2$ となる。ダム湖面はこの堰の高さ10mより高くならないように上部ゲート1門と下部ゲート2門の洪水吐を用いて放流するものとする。越流堰（非常用洪水吐）からの自然越流式流量 $Q_u$ および、その下に位置している常用洪水吐からの流量 $Q_l$ は以下のようにそれぞれ式（1）および式（2）により与えられるものとする。

$$Q_u = C_q B h_c \sqrt{g h_c} = C_q B \left(\frac{2}{3} z\right) \sqrt{g \left(\frac{2}{3} z\right)} \quad (1)$$

ここに、 $z$ :水位、 $h_c$ :越流水深

$$Q_l = \xi^{pm} Q_{lm} \quad (2)$$

$$\xi = (z - z_s) / (H - z_s)$$

ここに、 $z_s$ :下部ゲート操作開始高  $Q_{lm}$ :下部ゲート最大流量

$$Q_{lm} = 300 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (3)$$

式（１）は上部ゲート（非常用洪水吐）の自然流下越流流量であり、流量係数  $C_q$  は 0.6 をとっている。式において、 $z$  はダム湖の水位であり、前述のように上部ゲートの底面を 0 としている。式（２）はダム湖水位に応じたゲート開閉操作による流量としている。式（３）に示したように本研究では下部ゲートの最大流量を  $300\text{m}^3/\text{s}$  としている。これは下部ゲートの操作に余裕を持たせているためである。ダム湖の水面高  $z$  は式（４）により与えられる。すなわち、ダム湖への流入量  $Q_{in}$  と放流量  $Q_{out}$  の差がダム湖の水面  $z$  を上昇させることになる。

$$A_s \frac{\partial z}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (4)$$

ここに、

$$Q_{out} = Q_u + Q_l \quad (5)$$

式（４）の水面高  $z$  は越流堰底面からの高さであり、 $z = 0$  はダムが満水になった時の水面高となる（本研究の定義）、 $t$  は時間である。ダム湖への流入量はこれまでの目屋ダムの実績値を用いることにする。ダム湖が満水になり、水面上昇が上部ゲート高  $H = 10\text{m}$  以内に収まるように計算を行うものとする。図 2 に式（４）に用いている記号を示した。

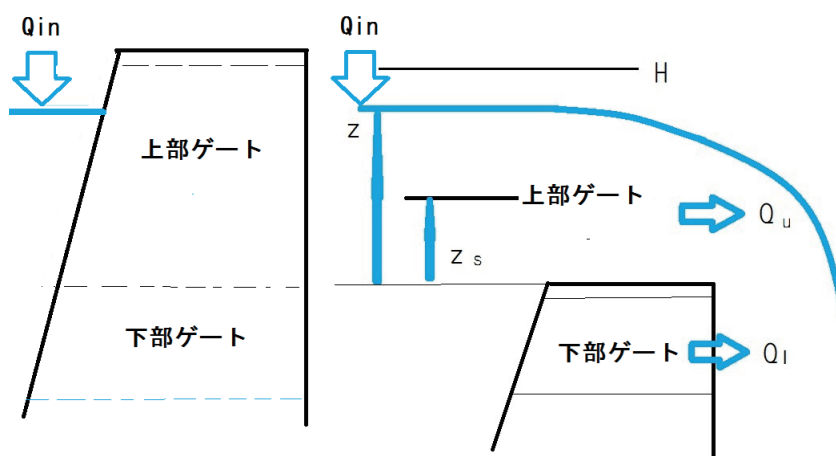


図 2 ダム湖の水位、流入量 および放流量

現在の現象が次のダム湖の水位を決めているので式（４）は次式（６）のように前進差分により表せ、次の水位  $z$  が求められる。

$$A_s \frac{z_{t+1} - z_t}{\Delta t} = Q_{in,t} - Q_{out,t} \quad \therefore z_{t+1} = z_t + \Delta t (Q_{in,t} - Q_{out,t}) / A_s \quad (6)$$

#### 4. 満水になったダム湖の洪水調節能力

目屋ダムの計画高水流量は  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  であるが 1997 年 5 月にはこの 2 倍に相当する  $1037.2$

m<sup>3</sup>/s の洪水流量がダムに流入している。図 3 にこの 1997 年 5 月洪水時の放流量 Q<sub>out</sub> を示した。この放流量は式 (6) により求まっている。差分近似は時間ステップを 1 秒から 3600 秒まで変化させて精度を調べてみた。結果、60 秒までは差が 1 %未満であり、600 秒まで広げると最大で 3 %未満の差となる。時間ステップを Δ t =600s としても有意な放流量が求まる。

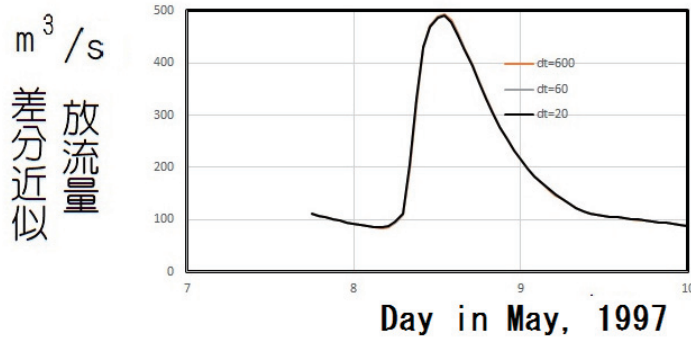


図 3 差分近似時間ステップと解の精度

図 3 は Δ t =20, 60, 600s の計算値を示しており、Δ t =600s でも Δ t =20, 60s の計算値に重なっており、計算値としては十分といえるようである。流量が大きく変化するところでは差異が認められるが最大値 332 m<sup>3</sup>/s に対して 324 m<sup>3</sup>/s と 3 %未満の差となっている。

図 4 に 1972 年 7 月洪水における放流量の計算結果を示した。図の縦軸は超過流量比で示している。ここに、超過流量比はダムへの計画高水流量 500 m<sup>3</sup>/s に対する割合であり、図より、このときダムには計画の約 2 倍の超過流量が流入している。記録によると 1044 m<sup>3</sup>/s に達している。ゲート操作により放流しているが放流量は 913 m<sup>3</sup>/s と流入量より約 100 m<sup>3</sup>/s 少ない放流量となっている。これに対して本研究で示した理論による放流は流入量より約 500 m<sup>3</sup>/s 少ない 520 m<sup>3</sup>/s となっている。満水になったダム湖の洪水調節能力は明らかである。

図 4 に示した放流量の計算において、下部ゲート（常用洪水吐）操作開始高 z<sub>s</sub> を z<sub>s</sub> = 0.5m としている。これは、下部ゲートの高さが 6m あり、このため下部ゲートの上端位置が 0.5m の高さにあることより設定している。また、式(2)に示した放流関数指数 pn は pn=0.25 としている。放流関数は流入量、下部ゲートの最大流量、下部ゲート操作開始高により放流量を最小にするタイプがあるように見える。本研究では式 (8) の 3 種類により検討している。

$$Q_l = \phi(\xi)Q_{lm} \quad \text{ここに} \quad \xi = (z - z_s) / (H - z_s) \quad (7)$$

z<sub>s</sub>: 下部ゲート操作開始高    Q<sub>lm</sub>: 下部ゲート最大流量

$$\begin{cases} \phi(\xi) = \xi \\ \phi(\xi) = \xi^{0.5} \\ \phi(\xi) = \xi^{0.25} \end{cases} \quad (8)$$

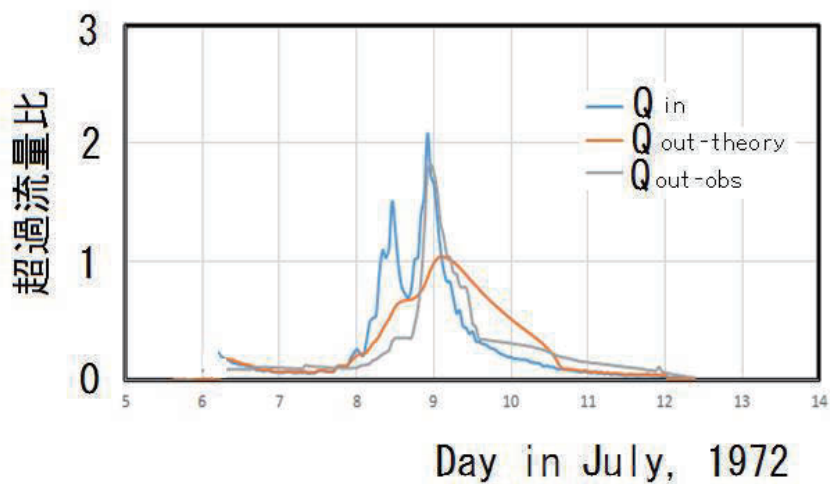


図4 満水になったダム湖の洪水調節能力（1972年7月洪水）。下部ゲート開始高  $z_s = 0.5$  m、放流関数指数  $pn=0.25$ 。超過流量比=流量/計画高水流量  $500\text{m}^3/\text{s}$ 。

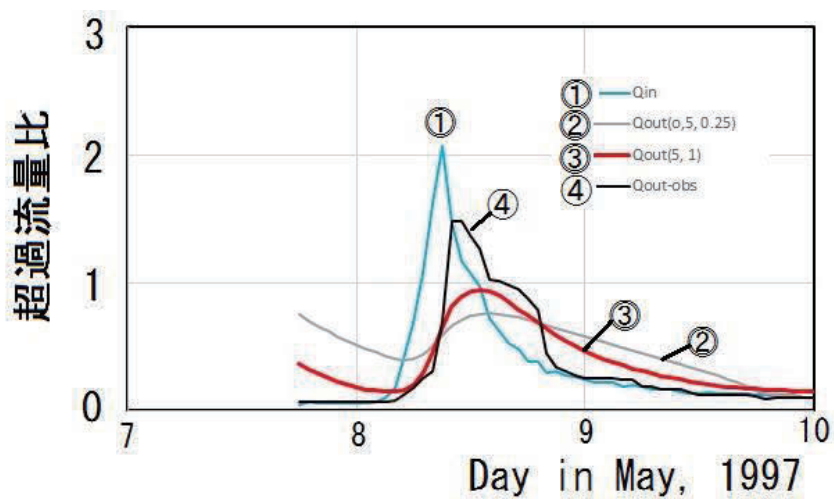


図5 満水になったダム湖の洪水調節能力（1972年5月）。①流入量、②放流量、 $z_s = 0.5\text{m}$ 、 $pn=0.25$ 、③放流量  $z_s=5\text{m}$ 、 $pn=1$ 、④放流量（実績）

図5に1997年5月洪水の放流量計算結果を示した。図4と同様に、図の縦軸は超過流量比となっている。図より、このときもダムには計画高水流量の約2倍の超過流量が流入している。記録によると計画高水量  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  を大幅に超え  $1037 \text{ m}^3/\text{s}$  に達している。ゲート操作により放流しているが最大放流量は  $685 \text{ m}^3/\text{s}$  と3時間遅れで流入量より約  $350 \text{ m}^3/\text{s}$  少ない放流量となっている。これに対して本研究で示した理論による放流は流入量より約  $660 \text{ m}^3/\text{s}$  少ない  $380 \text{ m}^3/\text{s}$  となっている。これは図の②で示した放流量であり、ゲート操作開始水位が  $z_s = 0.5\text{m}$ 、放流関数指数が  $pn=0.25$  の場合である。図中③の放流量はゲート操作開始水位が  $z_s = 5\text{m}$ 、放流関数指数が  $pn=1$  の場合であり、流入量が予測できればこのようなゲート操作も可能となる。ゲート操作開始水面位置を  $5\text{m}$  にしたのは放流実績では  $6\text{m}$  になってからゲート操作を開始していることより設定している。図は満水になったダム湖でも洪水調節能力があることを示している。

流入量がわかっている場合には式(8)に示した関数のどれが最適なのか調べることはできる。しかし、どのような流入波形になるのか不明な場合には試行錯誤は不可能である。どの流入パターンにも適用可能な放流関数は式(8)の第3式である。式(8)の第1式の放流関数はダム湖への流入が比較的穏やかな超過洪水に対して有効であり、第3式は流入が激しい場合に対応する放流関数であり、第2式はその中間の超過洪水に対応する放流関数となっている。最適な放流関数については今後の研究に期待したい。

## 5. むすび

ダムの洪水調節の評価は流入してくる水量を貯留し、如何に下流に対して流量の低減を図ったか、放流量低減により下流河川水位上昇を如何に防いだか、によって行われている。近年、計画高水流量を超えた洪水が頻繁に発生し、ダムの緊急放流や河川の氾濫が起きている。これにより逃げ遅れによる死亡事故が発生するようになっており、このような悲劇を解消するためには逃げ遅れをなくすソフト対策も重要であるが本研究では超過洪水に対して満水になったダム湖の洪水調節能力を明らかにすることも重要ではないかとの考えに立ち、満水になってからのダム湖の洪水調節能力について理論的な考察を行ってみた。流入してくる水量をダム湖に貯留し下流への放流量を可能な限り低減するのが本来のダムの役割であるが超過洪水があればダムは満杯になり、貯留による流量低減は期待できない。しかし、満杯になったダム湖は湖面が広く、流入量に対して水位上昇は鈍感になり、この機能を利用すると流量の低減を図ることが可能となる。本研究で示した理論はここに着目したものである。本研究により以下のことが明らかとなった。

- (1) ダム湖の連続の式は前進差分により近似できる。これは現在の流入量、放流量が次のダム湖の水位を決めている現象に対応している。
- (2) 差分近似は時間ステップが600秒(10分)でも誤差が3%未満で解を求めることができる。
- (3) モデルダムの設定により超過洪水比200%の洪水に対しても流入の5割以下の放流量で流量低減を図ることができ、これを明らかにした。満水になったダム湖でも洪水調節能力は存在する。