

【特別寄稿】

限界放流量方式による洪水前放流操作

株式会社テクノ 今村 瑞穂*

キーワード 洪水前放流操作・神様運転・空振りリスク・限界放流量方式

まえがき

洪水前放流操作において、「どのような情報とどのような方法論に基づき、ダムへの流入量を水資源として貯留しつつ余分の流量をいかにして安全に下流に放流するか。」といった課題について、本誌 No.319（2013年4月 ダム操作よもやま話 その3～洪水前操作について～、参考文献1）において考察しました。

ここでは、限界流入量と流入量を比較することにより放流開始時期を判断し、この時の放流量と貯水量をもとに放流閾数を設定して、この放流閾数をもとに放流すれば下流河道の水位上昇速度をある程度コントロールしながら放流量が流入量に漸近し同時に貯水位も目標とする貯水位に到達できる手法を提案しました。

この操作方法は、洪水調節を目的に有する多目的ダムにおいて洪水を迎える前に避けて通れない重要な操作となっていますが、利水ダムにおける洪水前の対処方法、すなわち水資源を確保しながら洪水は安全に流す方法としても有効と考えます。

また、本誌 No.373（2017年10月 洪水調節効果を期待した異常洪水時防災操作～貯水池容量の有効活用について～ 参考文献2）においては、洪水調節ダムの異常洪水時防災操作の効率的な操作方法として、「限界放流量方式」を提案しています。

これまで、異常洪水時防災操作においても下流河道の水位上昇速度をコントロールしながら、貯水位を目標水位に近づけつつ、放流量を流入量に近づけていく操作方法として限界流入量方式を提案してきました。一方、限界放流量方式とは限界流入量方式をさらに進化させて下流河道の水位上昇速度をコントロールしながらさらに効

果的に貯水位を目標水位に漸近させ、同時に放流量も流入量に近づけていく操作方法です。

洪水前放流操作については異常洪水時防災操作と比較すると、操作自体の頻度が多く、目標貯水位（洪水前操作の場合は常時満水位または洪水期制限水位）に到達する確率が圧倒的に高くなります。

従って、放流量を流入量にどのように擦りつけ、擦りついた後に、どのような操作を行うかについてもさらに安全で確実な方法論を考察する必要があります。

このような観点から、本稿では①洪水前放流操作の条件や課題を再確認するとともに、②限界放流量方式の概要と洪水前放流操作への適用並びにその評価等についての考察を展開いたしました。

1. 洪水前放流操作の条件

多目的ダムの操作規則、あるいは利水ダムにおける操作規程の洪水前放流操作における条件を挙げると以下のとおりです。

- ①放流量が洪水流量以下において、貯水位は常時満水位（または洪水期制限水位）を超えないこと。
- ②放流に当たっては下流河道に急激な水位の上昇を及ぼしてはならないこと。
- ③放流に当たっては水資源確保の観点から無効放流とならないようにすること。

これらの条件を満足するために、操作の現場ではどの段階から放流を開始し、どのように放流量を決定して行くかについての判断と対応に悩まされることになります。

また、近年、水利用者、下流域の関係者のダム操作に対する治水・利水面からの要望は際限なく高まり、ダム管理者としても看過できない状況にあります。

ここでは、既報に加えて、新たに、無効放流を可能な限り少なくするよう、至近の情報により放流計画を修正

* 技術顧問

する方法（限界放流量方式）により水資源の更なる確保機能を強化し洪水を安全に放流する見通しができたので報告するものです。

2. 洪水前放流操作を行う上での課題

いま、貯水池の常時満水位時の容量を670万 m^3 、下流河道の流量係数 K を17 m/s 、水資源補給のための利水放流量を4 m^3/s とする利水を目的に含むダムを考えてみます。

この時、考える流入量は図-1に示すような最大100 m^3/s 、初期貯水量を600万 m^3 （空き容量70万 m^3 ）とします。

また、洪水量は仮に200 m^3/s とします。（洪水量を200 m^3/s として、試行操作をする対象洪水が100 m^3/s となっています。これは、洪水を予測して洪水が来なかった場合、空振りのリスクが大きくなることからこのような設定をしました。）

以上の条件のもとで前記3つの条件を満足させながら洪水を処理するにはどのように対処すれば良いかについて考えてみたいと思います。

ここでいう洪水を処理するとは、「刻々と変化する流入量を見ながら放流量をコントロールして可能な限り空き容量を埋めていく、一方、貯水量が常時満水位に達した段階では放流量が流入量に等しくなっていること。」であるということが出来ます。

対処の方法については様々な選択肢があると思いますが、ここでは、手始めに完全に予測された流入波形（いわゆる神様運転。）に対して、トライアル計算による方法で試行してみたいと思います。

下流河道の許容水位上昇速度を30 $\text{cm}/30\text{min}$ とすると、放流開始後の放流量 Q_o の時間変化は次の式で与えられます。

$$Q_o = K \left(H_c / 1800 / 100 \times (t - t_s) + \sqrt{\frac{q_w}{K}} \right)^2 \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 K = 河道の流量係数 (m/s)、 H_c = 許容水位上昇速度 ($\text{cm}/30\text{min}$)、 t = 任意の時刻 (s)、 t_s = 放流開始時の時刻 (s)、 q_w = 利水放流量 (m^3/s)

図-1において、まず、利水放流量4 m^3/s を継続放流した場合の放流量 (Q_o 利水補給) と貯水量 (V 利水補給) の変化を示しました。（「利水補給操作」という。）

次に、利水補給操作の過程で貯水量が常時満水位（670万 m^3 ）になった時（380 min ）から（1）式による放流を開始した場合の放流量 (Q_o 利水優先) と貯水量 (V 利水優先) の変化を示しました。（「利水優先操作方式」と言う。）

以上、2つのケースにおいて、まず、利水補給操作による貯水量の最大値は、約738万 m^3 、常時満水位以上に68万 m^3 の超過貯留となります。

また、利水優先操作方式の場合、貯水量が670万 m^3 になったとき Q_i は100 m^3/s で放流量の最大値は48.27 m^3/s となり、貯水量の最大値は約708万 m^3 、常時満水

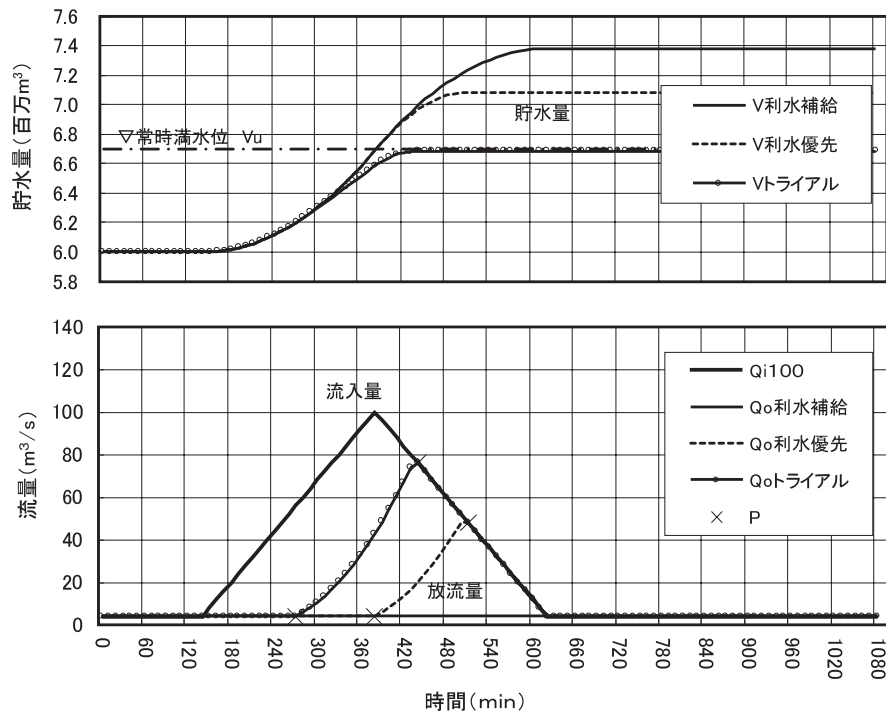


図-1 トライアル計算、利水補給操作ハイドログラフ

ダム技術 No.375 (2017.12)

位以上に38万 m^3 の超過貯留となります。(この時、仮の話として強制的に貯水位を常時満水位に維持しようとするれば、放流量を瞬時に4 m^3/s から流入量と同じ100 m^3/s まで増加させることになり、下流河道の水位は約2m上昇することになります。)

いずれの場合においても放流量が洪水量(200 m^3/s)未満で常時満水位を上回るようになりますから操作規則を満足しているとは言えません。

次に、操作規則のすべての条件を満足するための操作を考えてみます。

(1)式により下流河道の水位が30cm/30minの速度で上昇するように放流量を増加させながら放流量が流入量に追いついた時、丁度、貯水量が常時満水位になるような操作とするためには何時から放流を開始すればよいかという視点から考えてみました。

方法としては、まず放流開始時期を仮定して放流量と貯水量を計算し、放流量が流入量に追いつくときに貯水量が、丁度、常時満水位になるような放流開始時期をトライアルにより計算して放流開始時期を決定することといたしました。

図-1にこの時の放流量($Q_{\text{トライアル}}$)と貯水量($V_{\text{トライアル}}$)の変化を示しています。

その結果は放流開始が270min時点、その時の貯水量が約620万 m^3 であり、放流量が76 m^3/s になったとき流入量に追いつき、その結果貯水量は約670万 m^3 となります。(「トライアル操作方式」と言う。)

この結果は、利水優先操作方式より約110min早く、貯水量は常時満水位より約50万 m^3 低い段階で放流を開始することとなります。

図-1の3つのケースの計算結果から、それぞれの操作をめぐる背景とその結果とを結び合わせて、洪水前放流操作の特性と今後の展開を想像してみてください。

以上のうちトライアル操作方式のみが洪水前放流操作の条件を満足するための手順であるということができませんが、この手順については放流開始前に流入量がすべて正確に把握できることを前提とした、いわゆる神様運転ですから、この方法は現実的には実行することは不可能であると言わざるを得ません。

操作規則においては、「所長は、流入量を予測して放流量を決定しなければならない。」との趣旨の記述がありますが、どのようにすれば洪水前放流操作の3条件が満足されるかの方法論についての記述は見当たりません。

アメリカではこのような実情を踏まえて、まず貯水位が常時満水位になるまで貯留して水資源の確保を図り、その後下流河道の水位上昇に留意しながら放流を行うと

いった「利水優先操作方式」と同じ操作を行うこととしているケースがあります。(参考文献3)

これは、前記の洪水前放流操作の条件が現実的に如何に厳しいかということの証であり、結果「①放流量が洪水流量以下では貯水位は常時満水位(または洪水期制限水位)を超えないこと。」の条件を無視したこととなりますが、貯水容量が格段に大きいアメリカにおいて採用できるもので、我が国においてそのままこの方式を適用することは困難であると言わざるを得ません。

以上、まわりくどい説明をしましたが、洪水前放流操作が如何に難しいか、またその条件が如何に厳しいかの認識を共有するために、敢えて、この章を設けることといたしました。このような共通認識のもとで洪水前放流操作のあり方を考えて行くこととします。

3. 下流河道の水位上昇速度をコントロールしながら同時に貯水位のコントロールを図る操作

洪水前放流の複数の条件を満足するために、まず、「放流量が流入量に追いついた時に貯水量が目標とする常時満水位となる。」という条件を自動的に満たしながら、下流河道の水位上昇速度を如何にコントロールするかといった視点から考察を加えてみました。

3-1 単純限界流入量方式による洪水前放流操作

単純限界流入量方式については参考文献2において考え方を示していますが、議論の全体を把握し易くするために改めてその概要をここで記述することとします。

限界流入量を考える場合の追いつき操作の放流関数は、いくつか考えられますが、ここでは放流量が流入量に擦りついていく関数(擦りつけ関数)とする場合について考察しています。

現状の放流状態を利水補給操作として、利水補給操作の現状点(仮想放流開始点)を(q_m, v_m)とし、放流量が流入量に擦りついて行く点を(Q_i, v_u)と仮定して整理すると、この2つの点を通る放流関数の式は(2-1)式で示すような貯水量と流入量の関数として示すことができます。

$$Q_o = q_m + \frac{(Q_i - q_m)}{(v_u - v_m)}(V - v_m) \quad \dots\dots (2-1)$$

ここで、 Q_i は流入量、 V は貯水量、 q_m は追いつき操作開始時の放流量、 v_m は追いつき操作開始時の貯水量、 v_u は目標とする常時満水位時の貯水量です。

この放流関数(2-1)式の特性は以下の通りです。

- 1). 現在の放流量 q_m と貯水量 v_m の関係を満足する。 $(V = v_m$ で、 $Q_o = q_m$ となる。)
- 2). $V = v_u$ で $Q_o = Q_i$ となる。つまり、貯水位が常時

満水位になると自動的に $Q_o=Q_i$ となり、放流量が流入量に擦りついて行く形となる。このことが、(2-1)式の特徴を示しているものといえます。

3). (2-1)式をもとに、限界流入量 Q_{ic} を定義して放流開始のタイミングを指示する指標とすることとします。

限界流入量 Q_{ic} は次式によって計算することが出来ます。

$$Q_{ic}=q_m+\sqrt{2\sqrt{KQ_m}\times H_c\times(v_u-v_m)} \quad \dots\dots (2-2)$$

ここで、 H_c は操作規則上許容される下流河道の水位上昇速度の上限値、 K は河道の流量係数です。 Q_{ic} が Q_i より小さくなる直前の段階より (2-1) 式にもとづいて放流を開始すれば、その時の下流河道の水位上昇速度は許容値 H_c 以下となります。この方式を「単純限界流入量方式」と定義します。

3-2 さらに進化した放流量と貯水量の改善管理について。(限界放流量方式)

単純限界流入量方式によれば、放流開始時の下流河道の水位上昇速度をコントロールして貯水位が目標水位に達したとき放流量=流入量となるような操作を実施することができます。しかしながら、トライアル操作と比較した場合、特に、小規模洪水で無効放流が生じるリスクがあり、貯水量の有効利用の面でさらに改善の余地があるのではないかと判断される部分がありました。

そこで、限界流入量 Q_{ic} と流入量 Q_i ができるだけ乖離しないように至近の流入量と貯水量に基づき限界流入量を計算し、これにより適宜一定量放流操作を絡めつつ放流量をコントロールする方法（「複式限界流入量方式」という。）を考えてみました。

その結果、下流河道の水位上昇と貯水量をコントロールするという観点から相応の改善効果を確認することができました。(参考文献2)

しかしながら、この方式ですと何回も放流関数を変更する必要があり、計算が煩雑となります。また、放流特性的に見ても増加放流と一定量放流が交互に実行されることとなります。

従って複式限界流入量方式の究極的な方法として (2-2)式の左辺を流入量 Q_i とするような q_m を求めて、これを放流量とすることを考えてみました。

その理由は

- ① q_m は複式限界流入量方式の究極的な形であり、放流量が急激な放流となることなく流入量に追いつくことができる限界流入量方式で考えられる最小の放流量であること。
- ② (2-1)式において、 $v_m=v_u$ となった場合、つまり、貯水位が常時満水位となった段階で自動的に放流量 q_m は流入量に等しくなっていること。

によるもので、いわゆる追いつき放流操作関数としての条件をさらに高度な形で満足していることによるものです。

こうすることにより、追いつき操作における貯水位の上昇する速度を改善し、結果として無効放流量を減少させることができます。このようにして計算した放流量 q_m を「限界流入量」に対して「限界放流量」と定義し、この操作方式を「限界放流量方式」と定義しています。(参考文献2)

ここで、各操作方式の概要を表-1に整理してみました。

表-1 各操作方式の概要

操作方法	放流開始判断	放流量決定方法	操作上の特性・評価
利水優先操作方式	貯水量=常時満水位となった時点	放流の原則、(1)式	・放流開始判断の時期は明確であるが、常時満水位の超過は避けられず、実務的に採用は不可
トライアル操作方式	放流量が流入量に追いつくとき貯水位が常時満水位になるよう放流のタイミングを試行計算により求める	同上	・正確な流入量予測が必要となる(神様運転)が現状では実務的に困難
単純限界流入量方式	限界流入量 $Q_{ic}<$ 流入量 Q_i となった時点	擦り付け関数=(2-1)式(放流開始時の放流量・貯水量は定数、放流開始後は流入量・貯水量が変数)	・放流開始判断は明確で実用可能であるが、小規模洪水でトライアル操作と比較して無効放流のリスクが高くなる場合がある。
複式限界流入量方式	①限界流入量 $Q_{ic}<$ 流入量 Q_i となった時点 ② $Q_{ic}>Q_i+\alpha$ で、一旦、一定量放流操作に移行 ①、②の繰り返し		・上記無効放流リスクは改善されるが、放流開始後、一定量放流操作への移行・増加再開の判断が常に必要 ・その都度、放流関数の再設定も必要
限界放流量方式	限界流入量 $Q_{ic}<$ 流入量 Q_i となった時点	(2-2)式で $Q_{ic}=Q_i$ となる放流量 q_m をその都度、逆算	・上記無効放流のリスクはさらに改善される ・操作の都度、放流量の算出が必要となるも計算は容易※1

※1 例えばエクセルのゴールシーク機能やマクロの機能の利用が可能。

4. 操作方法の特性分析と評価

4-1 試算による操作方法の特性分析

以上の方法のなかで、利水補給操作、単純限界流入量方式と限界放流量方式により、第1章と同じ貯水池規模、洪水波形について試算を行い、その結果を図-1のトライアル操作方式による計算結果と並べて、図-2-1～図-2-3に示しました。

図-2-1において、トライアル操作方式、単純限界流入量方式、限界放流量方式の各方式の放流量、貯水量の変化を表-2に示す記号で表示しています。

以下、図-2-1～図-2-3について説明をします。表-2と見比べながら考察して下さい。

(図-2-1には限界流入量としては Q_{ic} 利水補給のみを表示しています。流入量が限界流入量に追いつくまでは Q_{ic} 単純限界も Q_{ic} 利水補給も Q_{ic} 利水補給と同じ値となるため、簡略化のためこのようにしました。図-3-1、図-3-2、図-3-3も同じ理由により Q_{ic} 利水補給のみの表示としています。)

①図-2-1において、放流開始時期は異なりますが、放流量の増加具合は単純限界流入量方式 (Q_o 単純限界)、限界放流量方式 (Q_o 限界放流)、トライアル操作方式 (Q_o トライアル) とともに流入量がピークに至るまでの間は同じような挙動を示しています。

②放流開始時刻はトライアル操作方式より単純限界流入量方式、限界放流量方式の方が若干早くなっています。その分だけ無効放流のリスクが加わったものと考えられます。(トライアル方式は無効放流のリスクが0)

③貯水位の上昇度合いは目標とするトライアル操作方式 (V トライアル) に対して限界放流量方式 (V 限界放流) の場合は若干の遅れを伴いながら常時満水位 (v_u) に達していますが、単純限界流入量方式 (V 単純限界) の場合は常時満水位に達することは出来ませんでした。図-2-2においても同様の傾向を確認することができます。この点が、単純限界流入量方式においては生じていた空振りを限界放流量方式においては回避することができた

結果であると言えます。

④図-2-3には各方式における放流量による下流河道の水位上昇速度の時間変化を記載していますが、限界放流量方式 (dH/dt 限界放流) の場合も単純限界流入量方式 (dH/dt 単純限界) の場合も目標とすべきトライアル操作方式 (dH/dt トライアル) に対して、若干の差があるものの、ほぼ同じ傾向を示しているということが言えます。この点から (2-1)式、(2-2)式は下流河道の水位上昇速度をコントロールする関数としては適当であるということが言えます。

以上、放流関数による放流量と貯水位のコントロールについて述べましたが、単純限界流入量方式、限界放流量方式によるそれぞれの特性と相互関係については参考文献2で詳細に説明していますから参考にしてください。

4-2 洪水規模の変化に対する各操作方式の対応と評価に関する分析

規模の大きい洪水においては、いわゆる空振り操作の可能性は小さくなっていきます。また、限界流入量以下の流入量に対しても利水補給操作以上の放流をすることはありませんから空振りの心配はありません。

ここでは、洪水の規模の変化に着目して、それぞれの操作方式を適用し、その結果を評価してみました。貯水池の計画条件は図-2-1の場合と同じです。

洪水の規模と波形は図-2-1の場合 ($Q_{imax} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$) を1つのケースとして、それより大きい場合と小さい場合の $Q_{imax} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, $60 \text{ m}^3/\text{s}$, $80 \text{ m}^3/\text{s}$, $120 \text{ m}^3/\text{s}$ のケース、さらに、利水補給操作のみで操作した時の最大貯水量が常時満水位容量にほぼ一致するケース ($Q_{imax} = 72 \text{ m}^3/\text{s}$) について、 $Q_{imax} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合と同様のケースの計算を行いました。

そのうちの $Q_{imax} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, $80 \text{ m}^3/\text{s}$, $120 \text{ m}^3/\text{s}$ の3ケースについて放流量と貯水量の計算結果を図-3-1～図-3-3に示しています。それぞれの図における凡例は表-2に示すとおりです。

図-3-1に $Q_{imax} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ のケースを図示していま

表-2 図-2-1～図-2-3及び図-3-1～図-3-3における凡例の説明

操作方式	放流量	貯水量	限界流入量	相関図	水位上昇速度
利水補給操作	Q_o 利水補給	V 利水補給	Q_{ic} 利水補給	V 利水補給	—
単純限界流入量方式	Q_o 単純限界	V 単純限界	Q_{ic} 単純限界	V 単純限界	dH/dt 単純限界
限界放流量方式	Q_o 限界放流	V 限界放流	Q_{ic} 限界放流	V 限界放流	dH/dt 限界放流
トライアル操作方式	Q_o トライアル	V トライアル	—	V トライアル	dH/dt トライアル
図面番号	図-2-1及び図-3-1、図-3-2、図-3-3			図-2-2	図-2-3

※限界流入量は単純限界流入量方式、限界放流量方式においても流入量が限界流入量に追いつくまでは Q_{ic} 利水補給と同じ。

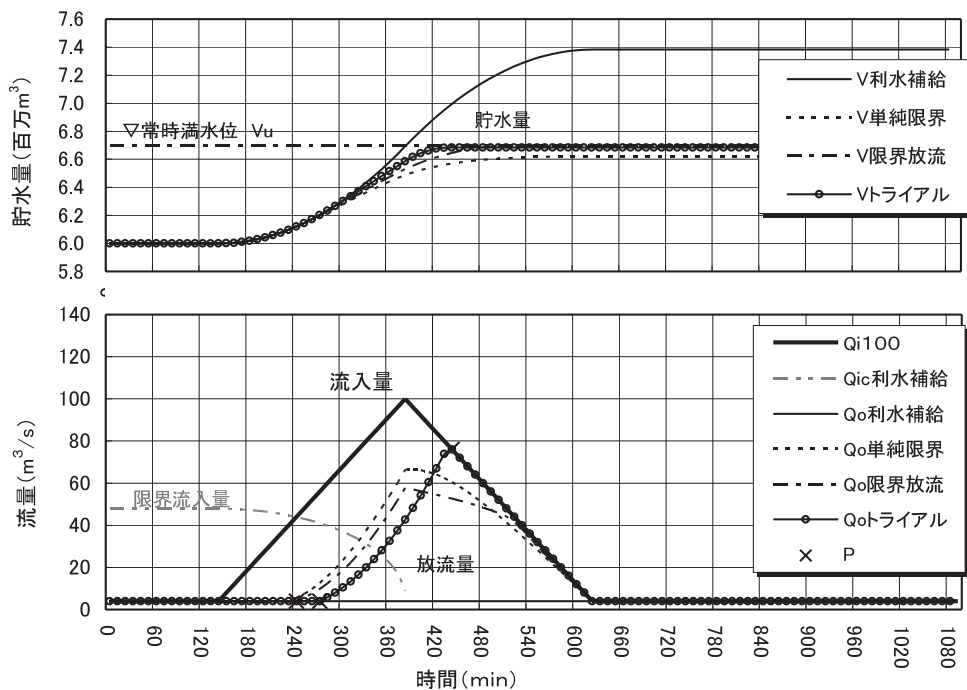


図-2-1 限界放流方式等ハイドログラフ

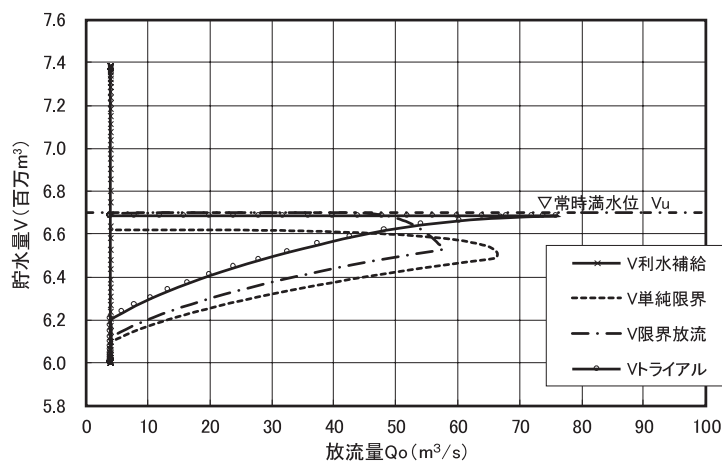


図-2-2 Q_o-V 相関図

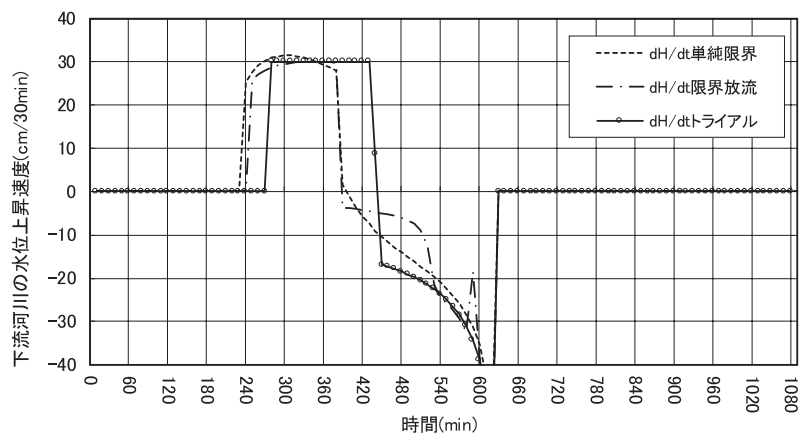


図-2-3 下流河川の水位上昇速度

ダム技術 No.375 (2017.12)

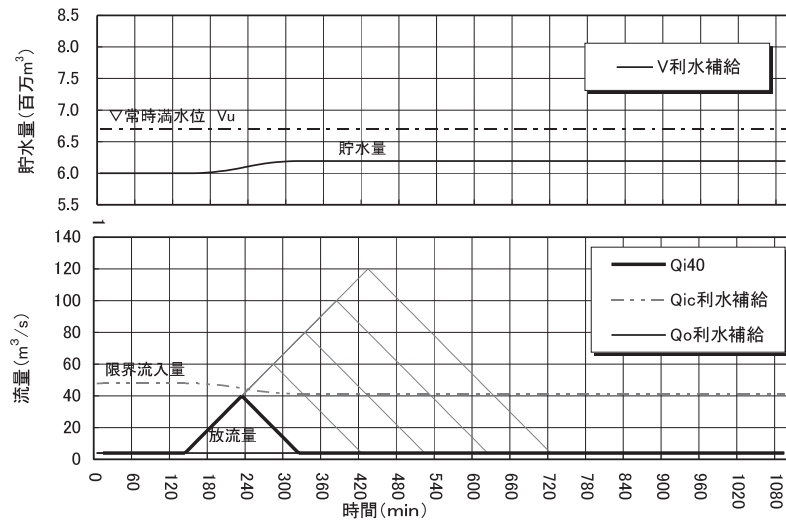


図-3-1 限界放流等ハイドログラフ ($Q_{\max} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$)

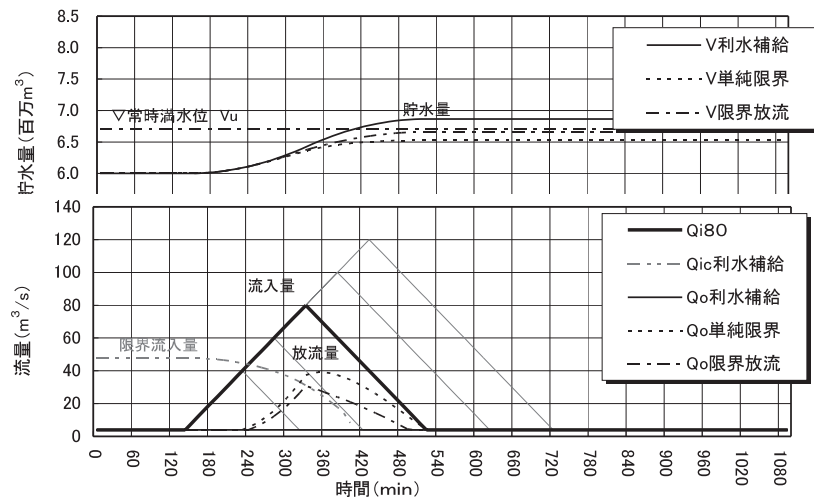


図-3-2 限界放流等ハイドログラフ ($Q_{\max} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$)

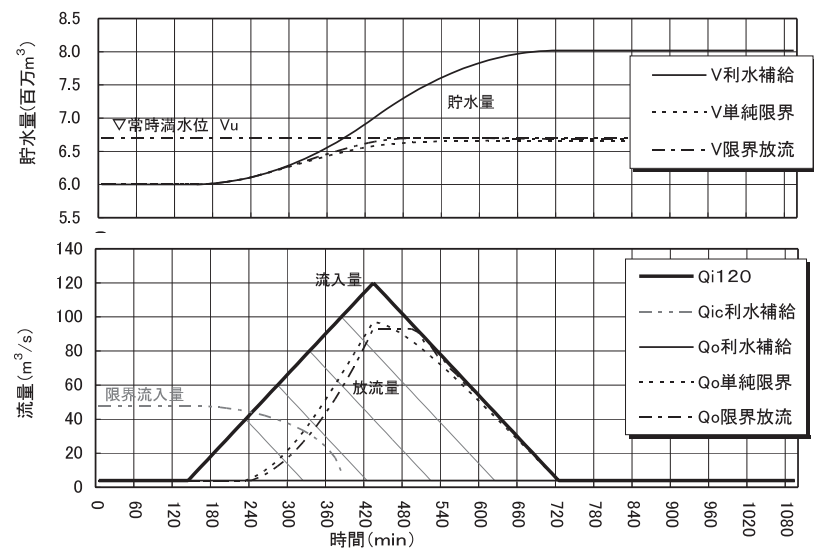


図-3-3 限界放流等ハイドログラフ ($Q_{\max} = 120 \text{ m}^3/\text{s}$)

ダム技術 No.375 (2017.12)

す。この場合は流入量が限界流入量に達していませんので利水補給操作を継続しています。(Q₀利水補給及びV利水補給)

従って、このケースでは(貯水位は常時満水位に達していないものの)無効放流の発生の可能性はありません。

図-3-2にQ_{imax}=80 m³/sのケースを図示しています。この場合は利水補給操作による最大貯水量(V利水補給)は常時満水位を超えているのに対して、単純限界流入量方式においても限界放流量方式においても貯水量(V単純限界及びV限界放流)は常時満水位に達しておらず、無効放流が発生しています。

図-3-3にQ_{imax}=120 m³/sのケースを図示しています。この場合は単純限界流入量方式(V単純限界)においては常時満水位に達していませんが、限界放流量方式(V限界放流)においては常時満水位に達しております。

各ケースの洪水規模に対して、それぞれの操作方式を適用した場合の最大貯水量を計算した結果を表-3-1に示しています。

表-3-1の計算結果について、横軸にQ_{imax}を、最大貯水量を縦軸にして、単純限界流入量方式(V単純限界-30)、限界放流量方式(V限界放流-30)による計算結果を、それぞれ相関図として(「相関線」という。)図-4に示しています。なお、V利水補給は利水補給操作によるものです。(ここで、これまでの計算においては、下流河道の水位上昇速度の上限値を30 cm/30 minと設定しており、図表中の添え字“-30”は、その水位上昇速度上限値の条件を示したものです。)

図-4において、A点はV利水補給線が常時満水位となる点で、それぞれの操作方式による相関線がA点の右側では常時満水位線に一致するかどうか、A点の左側ではV利水補給線に一致するかどうかで空振りであるか

否かを判断します。(これを「目標線」と定義します。)

相関線が目標線に一致すればその操作方式の空振りのリスクは0ということになります。

図-4において、各方式の相関線と目標線と間には、大小の差はありますがいずれの方式でもすきまが生じています。

相関線V限界放流-30が常時満水位と一致する点をB、V利水補給線と一致する点をCとします。ここで、擬似三角形ABCの面積の大きさが限界放流量方式の空振りのリスクの大きさを示すこととなります。

相関線V単純限界-30により形成される擬似三角形は相関線V限界放流-30のそれよりはるかに大きいものとなっています。このことは単純限界流入量方式の方が限界放流量方式より空振りのリスクが大きいことを示しています。

このような考察の結果、神様運転によるトライアル操作方式の場合(空振りリスクが0)を除いて洪水前操作には相応の空振りのリスクが存在するということが言えます。この中で、単純限界流入量方式(V単純限界-30)による場合より、限界放流量方式(V限界放流-30)の方が空振りのリスクが小さいことが判りました。

また、貯水位が利水補給操作により常時満水位となるような規模の洪水(A点付近)の時、提案したいずれの操作方式においても空振りのリスクが高いことがわかります。

4-3 下流河道の水位上昇速度の設定値の影響分析

次に、下流河道の水位上昇速度の上限値の無効放流に及ぼす影響を分析するために、その値を50 cm/30 minとした場合についても計算して表-3-2に示すとともに、図-4にそれぞれの相関線をV単純限界-50、V限界放流-50として示しています。

相関線V限界放流-50が常時満水位と一致する点をB'、V利水補給線と一致する点をC'とします。

表-3-1 洪水規模別、操作方式別最大貯水量(万m³)水位上昇速度30 cm/30 min

Q _{imax} (m ³ /s)	40	60	72	80	100	120	記号
利水補給操作	619.4	647.0	669.4	686.6	738.2	801.8	V利水補給
単純限界流入量方式	619.4	637.4	647.3	652.7	661.7	665.8	V単純限界-30
限界放流量方式	619.4	644.5	659.2	666.5	670.0	670.0	V限界放流-30

表-3-2 洪水規模別、操作方式別最大貯水量(万m³)水位上昇速度50 cm/30 min

Q _{imax} (m ³ /s)	40	60	72	80	100	120	記号
利水補給操作	619.4	647.0	669.4	686.6	738.2	801.8	V利水補給
単純限界流入量方式	619.4	639.9	650.1	655.4	663.7	666.7	V単純限界-50
限界放流量方式	619.4	646.5	663.7	670.0	670.0	670.0	V限界放流-50

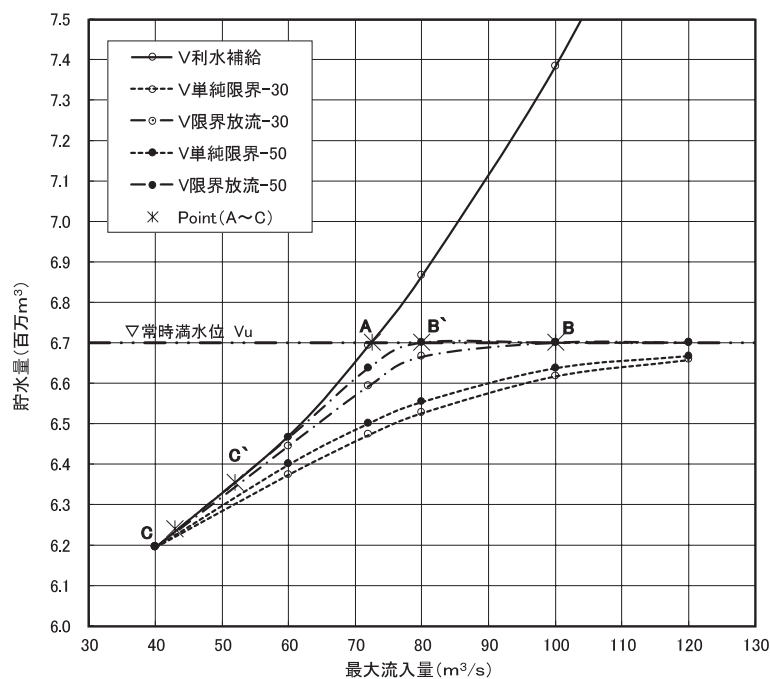


図-4 操作方式別貯水量の確保状況

擬似三角形 $AB'C'$ の面積は擬似三角形 ABC の面積より小さな値となっています。

これらのことから、 V 単純限界-50 は V 単純限界-30 より、 V 限界放流-50 は V 限界放流-30 よりそれぞれ目標線により近づいていることがわかります。つまり、水位上昇速度の上限値 H_c を大きく設定すれば、空振りのリスクが小さくなるということを示しています。

ここで、水位上昇速度の制限は、下流河道の河川利用者の安全確保のために設定されているものであり、一方、空振りのリスク回避は、水資源確保の観点です。両者はトレードオフの関係にあることがわかりました。したがって、水位上昇速度の制限は、より厳しければよいというものではなく、当該ダムにおける利水運用の重要性、流入量による水位上昇速度の実態等も考慮の上、適切に設定する必要があるのではないかと考えられます。

このような視点で図-4を見ると次のようなことが言えます。

- ① 神様運転によるトライアル操作方式以外の操作方式では幾らかの無効放流のリスクを考える必要がある。(ただし、図-4において、出水規模が C または C' を下廻る場合、または、 B または B' を上廻る場合においてはこの限りではない。)
- ② 操作方式としては、単純限界流入量方式より限界放流量方式の方が無効放流のリスクが小さい。
- ③ 下流河道の水位上昇速度の上限値を大きく設定すれば

ば無効放流のリスクを小さくすることができる。

- ④ 図-4 から判断すると、利水補給操作のみで最大貯水量が常時満水位容量にほぼ一致するような規模の出水に対して、無効放流のリスクが最も大きくなる可能性がある。

何れにしても、神様運転によらない限り洪水の規模によっては無効放流のリスクを避けることができないとの認識の上で洪水前操作には対応する必要があると言えます。

まとめ

以上、本稿の考察結果を要約すると以下の通りとなります。

① 洪水前放流操作の3条件を満足するためには、流入量を完全に予測することができてはじめて正確な放流開始時刻を設定することができることになります(神様運転)。このことは、実操作において、3条件の完全な実行は非常に困難であるということが出来ます。このような共通認識の上で洪水前放流操作の課題に取り組む必要があります。

② 3条件に対して現実的な取り組み方法の一つとして擦り付け関数と限界流入量方式を提案しました。

擦り付け関数による追いつき操作は貯水位が目標水位(例えば常時満水位)になったとき自動的に放流量が流入量になるような放流関数です。

限界流入量方式とは限界流入量が流入量を下回る瞬間に擦り付け関数により放流量を決定すれば、その時の下流河道の水位上昇速度は制限値以下となるような放流方法で、実務的に3条件を満足できる操作方法に近いといえることができます。

限界流入量方式においても新たな情報により操作方針を変更するような改良を加えた限界放流量方式によれば3条件の満足度はさらに向上することが判りました。

③神様運転によらない洪水前放流操作においては放流操作における空振り（無効放流の発生）のリスクがあります。空振りのリスクは洪水の規模に左右され、最も空振りリスクの大きい洪水規模は、利水補給操作のみで最大貯水量が常時満水位容量にほぼ一致するような規模の洪水であると言えます。それよりも大きな洪水、あるいは小さな洪水においては、リスクは小さくなるかまたは0となります。

④水位上昇速度の上限値 H_c を大きく設定すれば、空振りのリスクが小さくなるということがわかりました。水位上昇速度の制限は、下流河道の河川利用者の安全確保のために設定されているものであり、一方、空振りリスク回避は、水資源確保の観点です。両者はトレードオフの関係にあることがわかりました。したがって、水位上昇速度の制限は、より厳しければよいというものではなく、当該ダムにおける流入量による水位上昇速度の実態、利水運用の重要性等も総合的に考慮の上、適切に設定する必要があると思われまます。

⑤アメリカにおいては利水優先操作方式に似た操作により常時満水位以上の貯水を許容しています。ダムの規模、計画内容にもよりますが、洪水前放流操作の3条件はそれぞれ独立したものではなく相互に干渉するもので

す。下流河道の許容水位上昇速度は貯水位の確保や空振りのリスクに影響します。このような観点から3条件に対してはそれぞれの条件に個々に対処するのではなく、総合的観点から対処する必要があると考えられます。

あ と が き

以上、洪水前放流操作における限界放流量方式の適用性について考察を行いました。この方式に限らず貯水位が目標貯水位に近づき定水位状態に近づく放流量の算出にあたって計算結果が不安定となる場合があります。定水位操作が難しいとされる原因の一つもこの事によっています。

洪水前放流操作は放流量が洪水量になる前に目標貯水位に達すれば定水位操作を避けて通れません。また、洪水調節ダムで洪水量より大きい放流量で目標貯水位に達する場合は目標貯水位以下で洪水調節操作に移行する必要があります。今後は、洪水前放流操作から、利水ダムでは洪水処理操作、洪水調節ダムでは洪水調節操作への移行方法とその特性についても考察していきたいと考えています。

最後になりましたが、本稿を取りまとめるにあたり、(株)建設技術研究所のダム操作高度化研究会メンバーの協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) ダム操作よもやま話 その3～洪水前操作について～ 今村瑞穂 ダム技術 ダム技術センター 2013年4月
- 2) 洪水調節効果を期待した異常洪水時防災操作～貯水池容量の有効活用について～ 今村瑞穂 ダム技術 ダム技術センター 2017年10月
- 3) 洪水前操作のあり方とその方法について 今村瑞穂 ダム技術 ダム技術センター 2010年7月