

## ダム操作よもやま話 そのー2

### ～定水位操作について～

まえがき

今回は流入量の把握方法について、その特性について説明いたしました。今回はこれらの流入量把握に関する特性が実際のダム操作にどのような影響を及ぼし、その結果どのような不都合が生じるか、またどのような対策が考えられるかについて定水位操作をテーマに考えてみたいと思います。

#### 1. ダム操作の現場で何が課題とされているか

定水位操作といえば流入量＝放流量によって貯水位を一定に保つというダム操作の中で最も簡単な操作であるとの認識がダム技術者の中では定着しているようです。

しかしながら、「定水位操作に於いて流入量＝放流量の操作を行っているにもかかわらず貯水位が勝手に上昇して制限水位を超えてしまう。」という言葉が操作の現場からよく聞くことがあります。これらの現象が何故起きるかについては定性的にとらえられて議論されることはあります。しかしながら、これらの現象を定量的に捉え分析されることは殆どありません。したがって、「定水位操作に問題がある。」という漠然とした認識はあるものの、どのような対策を講ずればよいか、と言った議論まで展開されていないのが実情であると言わざるを得ません。

ここでは可能な限り現場で得られた情報をもとに現場で実施されている手法に基づいて定水位操作をパソコン上で再現し、その課題と対策について考察してみました。

図ー1ー1はマニュアルに示された流入量の計算方式にしたがって計算した流入量に従い、それと同じ量を放流した場合の放流量と貯水量の変化を $Q_{。1}$ 、 $V_1$ として破線で示しています。(流入量方式)

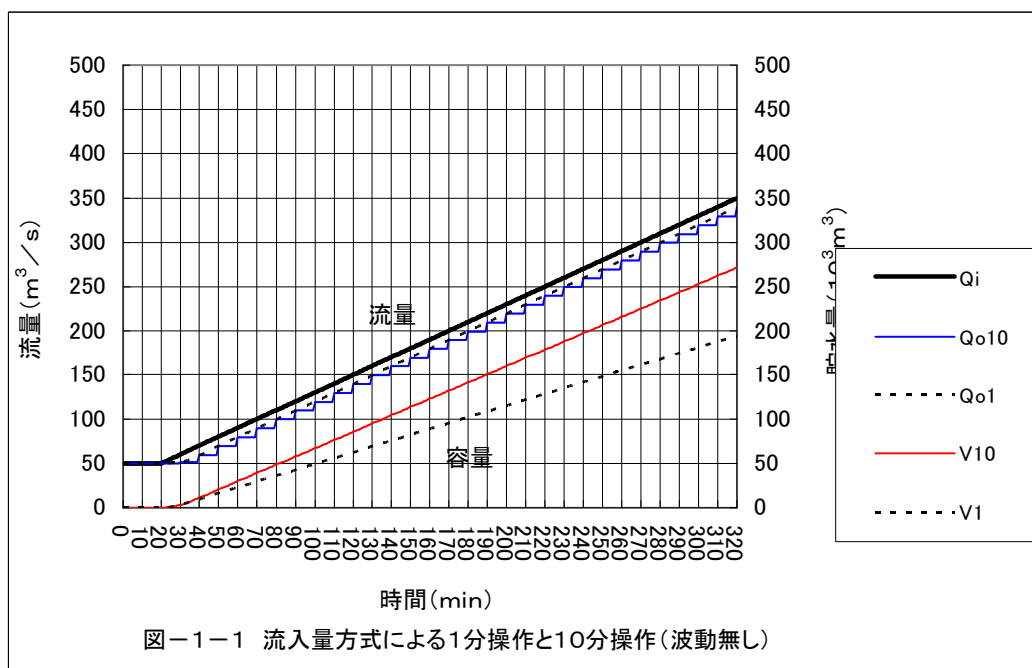
しかしながら、図ー1ー1を見る限り貯水量 $V_1$ は増加傾向にあり、定水位操作と言える状況ではありません。また、放流量 $Q_{。1}$ は流入量に対して一定の時間遅れになっていることが判ります。これは流入量そのものが流入量を計算する過程と、貯水位を平滑化する過程において発生する時間遅れにより生じたものであります。

このケースでは、流入量の計算時間間隔は10分、貯水位の平滑化時間も10分としてあります。この結果、流入量は約10分の時間遅れで計算され、計算流入量に等しい量を放流するとすれば当然放流量は実際の流入量より10分間遅れでなされることとなります。

その結果、流入量に対する放流量の時間遅れの分だけ貯水位が上昇することになります。

次に、図ー1ー1における $Q_{。1}$ は限りなく流入量の変化に追従するかたちで放流量を決定し、細かく(この場合は1分間間隔)ゲート进行操作した場合の結果を示しています。

しかしながら、ゲートは一定の間隔をもって操作されることが一般的です。従って、直線的に変化する流入量に対しても放流量は階段状に変化させながら対処せざるを得ません。



こうなれば、仮に流入量の計算過程での時間遅れがないとした場合には、操作直後には瞬時的には流入量=放流量となりますが、その後、次の操作までは一定の開度に固定されますから、放流量はほぼ一定に保たれます。そうすれば流入量が上昇する過程では放流量の変化は図-1-1の上では $Q_{o10}$ で示すように階段状の変化をたどり、放流量はますます流入量から乖離していくこととなります。貯水量の変化(増加)は $V_{10}$ として示すようにさらに大きくなっていきます。

つまり、定水位操作を行う場合、流入量の計算過程で生じる計算流入量の時間遅れ、さらには、ゲートの階段状操作による流入量と放流量の乖離の2つの要因によって、放流量の面からも貯水位管理の面からも、所定のと通りの定水位操作が実行し得ないということがご理解いただけたものと思います。

## 2. ダム管理用制御処理設備標準設計仕様書(案)同解説について

定水位操作についてはダム管理用制御処理設備標準設計仕様書(案)同解説(以下、「仕様書(案)」という。)があり、この中で「3-2-10 操作演算処理」において、定水位操作に関して以下のような記述があります。(仕様書(案)における記述は下線を施しています。)

操作演算処理は、各ダムの操作規則・細則に従い、ダムから放流を行うための放流方式にもとづいてダムから放流すべき水量の目標値(目標全放流量)を算出するものである。

本処理は放流操作装置で行うものとする。ダム運用の目的と必要となる放流方式を下表に示す。

とされており、定水位放流方式が必要となるダム運用の目的として以下のものがあげら

れています。

①常時満水位又は制限水位の維持 ②常時満水位から制限水位への移行及び洪水初期の流入量と放流量のすりつけ。

つまり、仕様書（案）では、ある貯水位と放流の状態から定水位状態（貯水位が目標とする水位にあり、しかも、流入量＝放流量の状態にある。）へのすりつけ操作とすりつけ後の貯水位の維持の2つの全く特性と目的の異なる操作をひっくるめて「定水位放流方式」と定義しています。（注：仕様書（案）では「定水位放流方式」としていますので、本稿で使う「定水位操作方式」と区別して使用することとしました。）

この中で定水位放流方式として

定水位放流方式は、水位偏差方式と不感帯方式がある。流入量変化が大きい場合は水位偏差方式を用い、流入量変化が少なく安定している場合は不感帯方式を用いるのが有効である。両方式の選択は操作員の判断による。

とされています。しかしながら、操作員がどのような状況の下でどのようなデータに基づいて判断するかの具体的な方法論は示されていません。

ここで、水位偏差方式についてかなりのページを割いて説明がなされていますが、基本的には「放流ステップ－放流量対応表」によるものと考えられます。しかしながら、貯水位の上昇・下降に従って放流量を変化させるということは取りも直さず放流量の変化にしたがって貯水位が変化するということであり、この水位偏差方式を「定水位放流方式」の一つとしてひとくくりにして取り扱っている仕様書（案）の表現には無理があるのではないかと考えられます。

また、「流入量の変化が大きい場合は水位偏差方式を用い、流入量の変化が少なく安定している場合は不感帯方式を用いるのが有効」とありますが、これは「常時満水位から制限水位への移行または洪水初期の流入量と放流量のすりつけを行う場合には水位偏差方式を用い、常時満水位又は制限水位の維持を行う場合には不感帯方式を用いるのが有効」とするのが示された放流量の決定式の特性から見て正しい表現ではないかと思えます。

洪水を迎える前の段階の操作として、基本的には次のような目的と特性の異なった2つの操作が必要になります。

- ①. 任意の放流量と貯水位の状態から、洪水期制限水位に向けて貯水位をコントロールしながら放流量を流入量に近づけていく操作。
- ②. ①の操作に引き続いて、貯水位を一定に維持する操作。

洪水の動向と貯水位の関係において必ずしも①～②というステップをとるとは限りませんが、一般的には①の操作を「すり付け操作」、②の操作を「定水位操作」と分けて考えるのが理解しやすいのではないかと考えられます。

すり付け操作にしても定水位操作にしてもそれぞれに明確な目的とそれぞれの操作上の特性と課題があるということを認識した上で対処する必要があると言えます。

本稿では、まず、②の貯水位を一定に保つ操作について考え、①の貯水位をコントロー

ルしながら放流量を流入量に近づけていく操作については稿を改めて考えてみたいと思います。

### 3. 定水位操作の放流関数について

水位を一定に保つ操作方式の一つとして仕様書（案）では「不感帯設定方式」として取り挙げられています。

定水位操作放流方式（不感帯設定方式）は、貯水位が設定された水位を中心に不感帯内に維持するように貯水位の変化に応じて放流量を増減させる不感帯設定方式である。

として、現在貯水位が上限水位より高い場合の放流量として次のような式が提案されています。

$$Q_{o,b} = Q_{i,t} + (\Delta V1 / \Delta T) \dots (1)$$

ここで、 $Q_{o,b}$ ：目標放流量

$Q_{i,t}$ ：現在流入量

$\Delta V1$ ：（現在貯水位－上限貯水位）に相当する貯水量

$\Delta T$ ：  $\Delta V1$  を放流するために要する時間

（以下省略）

ここで、注意すべきは、(1) 式をよく見ると計算流入量 ( $Q_{i,t}$ ) より大きい量 ( $Q_{o,b}$ ) を放流することとなっており、また、貯水位も  $\Delta V1$  に相当する水位だけ上限水位を超えている場合があることでもあります。つまり、定水位操作上の条件として「①水位は上限水位を超えてはならないこと。②流入量を超えて放流してはならないこと。」とされていますが、これらの条件の実現は定水位操作で (1) 式を適用する限りにおいては不可能であることを結果として示していることを認識する必要があります。

次に、仕様書（案）には (1) 式に対するコメントとして特別な記述はありません。しかしながら、(1) 式の右辺第 2 項において、特に計算時間間隔との関係において、 $\Delta T$  の値をどのように設定するかは (1) 式の操作特性を左右する重要なポイントとなって参ります。

このような観点から定水位操作に関する工学的かつ客観的な視点からの考察を展開しながら (1) 式の特性についても考察してみました。

いま、(1) 式について  $t_n$  時点の貯水量を  $V_n$ 、流入量を  $Q_{i,n}$ 、放流量を  $Q_{o,n}$  とし、ひとつ前のステップ  $t_{n-1}$  のそれを  $V_{n-1}$ 、 $Q_{i,n-1}$ 、 $Q_{o,n-1}$  とします。また、目標とする貯水量（貯水位）を  $v0$  とすると (1) 式は次のように書き換えることができます。

$$Q_{o,n} = Q_{i,n} + \frac{1}{\Delta T} (V_n - v0) \dots (2)$$

$Q_{i,n}$  は (3) 式で計算されます。

$$Q_{i,n} = Q_{o,n-1} + \frac{1}{\Delta t} (V_n - V_{n-1}) \dots (3)$$

これを (2) 式に代入すると (4) 式が得られます。（ただし、 $\Delta t$  = 計算時間間隔、(1)

式における  $\Delta T$  ( $\Delta V_1$  を放流するための時間) とは区別する。 )

$$Q_{o,n} = Q_{o,n-1} + \frac{1}{\Delta t}(V_n - V_{n-1}) + \frac{1}{\Delta T}(V_n - v_0) \dots (4)$$

(4) 式で計算時間間隔  $\Delta t$  は流入量計算のための係数として固定化されており硬直的ですが、これを同時に  $\Delta T$  の柔軟化も含めて一般化すると (5) 式が得られます。

$$Q_{o,n} = Q_{o,n-1} + K2(V_n - V_{n-1}) + K1(V_n - v_0) \dots (5)$$

(5) 式を定水位操作における放流関数とします。

定水位操作における放流量は基本的には流入量をもとに決定されますが、(5) 式は貯水量 (貯水位) と現在の放流量を基本情報として決定されることとなります。従って、「水位放流方式」による定水位放流関数と言うこととなります。以下、本稿においては (5) 式を「水位放流方式」と呼ぶことに致します。

また、(5) 式は微分方程式的に見ると減衰振動の方程式になります。(詳細な式の展開はここでは省略しますが、参考文献をご覧ください。)

(5) 式は、減衰振動の方程式ですから  $K1$  と  $K2$  を適切に設定すれば放流量は自動的に流入量に収束し、貯水量は目標とする貯水量に自動的に収束するという素晴らしい特性を持ち合せています。

逆に、 $K1$  と  $K2$  の設定を誤ると、計算される放流量と貯水量は数学的には発散の状態となる場合があります、操作上においてもとんでもない危険な結果を招く可能性もあります。

$K1$  は  $Q_o$  が  $Q_i$  に収束していく過程の周期を、 $K2$  は  $Q_o$  が  $Q_i$  に収束して行く過程の収束度合いを支配する定数です。

$K1$ 、 $K2$  を具体的にどの程度の値にすればよいかについては、例えばゲートの操作間隔を  $600 \text{ sec}$  とすれば、 $K1=K2=1/2000 \sim 1/1800$  程度が好ましいようです。

減衰振動ですから  $K1$ 、 $K2$  の値を  $1/600$  以上にすると貯水池の波動現象に対して敏感に反応し、計算する放流量が数学的に発散する危険性があります。

#### 4. 放流関数の特性について

以上、(5) 式により、考察した定水位操作の放流関数 (水位放流方式) について幾つかのシミュレーション計算を行い、従来の方式 (流入量方式) との比較を行ってみました。

シミュレーション計算は流入量方式と水位放流方式の違い、ゲート操作間隔の違い、貯水位の波動変動の影響度合いなどを明らかにするために、表-1 (NOの欄) に示すような10のケースについて行いました。

操作関数	K1, K2の値	ゲート操作	波動	放流量の表示	貯水量の表示	NO
流入量方式 (放流量=計算流入量)	K1=1/600, K2=0	1分間	無し	$Q_{o1}$	$V_1$	1
			有り	$Q_{ow1}$	$V_{w1}$	2
		10分間	無し	$Q_{o10}$	$V_{10}$	3
			有り	$Q_{ow10}$	$V_{w10}$	4
水位放流方式..(5)式	K1=K2=1/2000	1分間	無し	$Q_{ov1}$	$V_{v1}$	5
			有り	$Q_{ovw1}$	$V_{vw1}$	6
		10分間	無し	$Q_{ov10}$	$V_{v10}$	7
			有り	$Q_{ovw10}$	$V_{vw10}$	8
不感帯方式..(1)式	K1=K2=1/600	1分間	無し	$Q_{ov0}$	$V_{v0}$	9
			有り	$Q_{ovw0}$	$V_{vw0}$	10

(注-水位放流方式と流入量方式と不感帯方式の数学的関係は(5)式を基本にして表-1に示すような特別なK1、K2の値を採用した場合となります。)

その結果は、表-2に示すような各計算ケースを組み合わせながら、それぞれの計算条件の放流量や貯水量の変化に及ぼす影響を比較表示しています。

表-2 図面番号と計算ケースの組み合わせ

図面番号	計算ケース	図面の名称の説明
図-1-1	1 3	流入量方式の1分操作と10分操作(波動無し)
図-1-2	5 7	水位放流方式の1分操作と10分操作(波動無し)
図-2-1	1 5	流入量方式と水位放流方式の比較(1分操作、波動無し)
図-2-2	3 7	流入量方式と水位放流方式の比較(10分操作、波動無し)
図-3-1	2 6	流入量方式と水位放流方式の比較(1分操作、波動有り)
図-3-2	4 8	流入量方式と水位放流方式の比較(10分操作、波動有り)
図-4-1	1 9	流入量方式と(1)による操作の比較(1分操作、波動無し)
図-4-2	2 10	流入量方式と(1)による操作の比較(1分操作、波動有り)

a. 流入量方式と水位放流方式による放流量比較(ゲート操作間隔ごと)

まず、最初に提案した(5)式に基づき、 $K1=K2=1/2000$ として、ゲート操作間隔を1分間として、放流量と貯水量の変化を計算してみました。その結果を図-1-2に $Q_{ov1}$ 、 $V_{v1}$ として破線で示しました。

さらには、図-1-1の流入量方式と同じようにゲート操作間隔を10分間として、放流量と貯水量の変化を計算してみました。その結果を図-1-2に $Q_{ov10}$ 、 $V_{v10}$ として示しました。

図-1-1の流入量方式と比較して図-1-2の水位放流方式の場合は、ゲート操作間隔を10分間とした場合は若干の誤差の増加はあるものの、放流量の流入量からの遅れ具合、貯水位の安定度合いは大局的に見て格段に改善されていることが判ります。

同じ計算結果をゲート操作間隔ごとに流入量方式と水位放流方式との間で比較してみました。

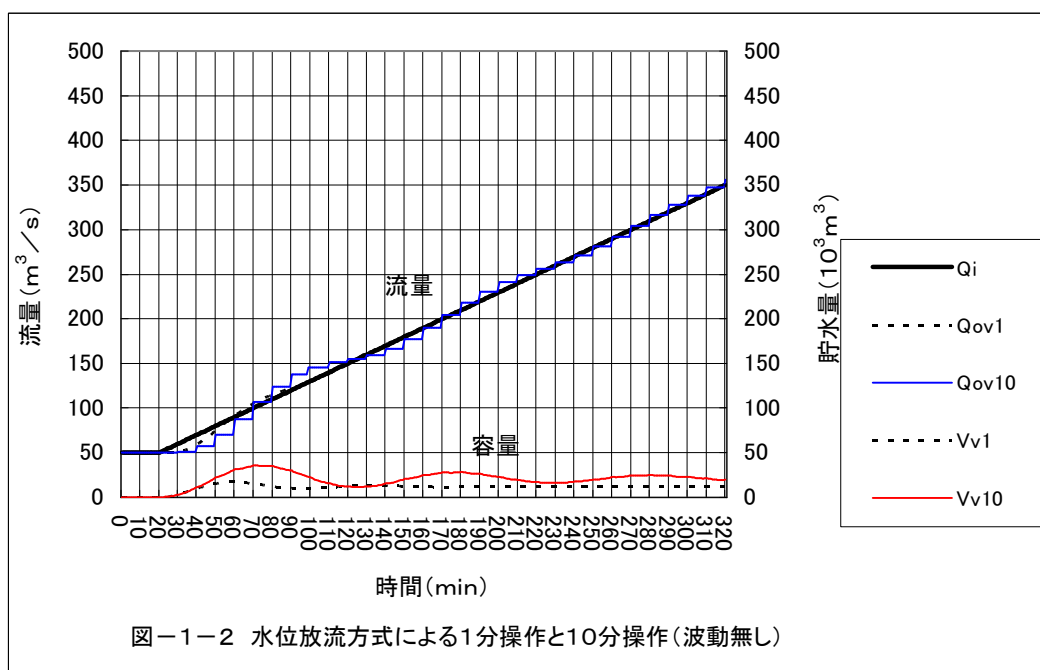
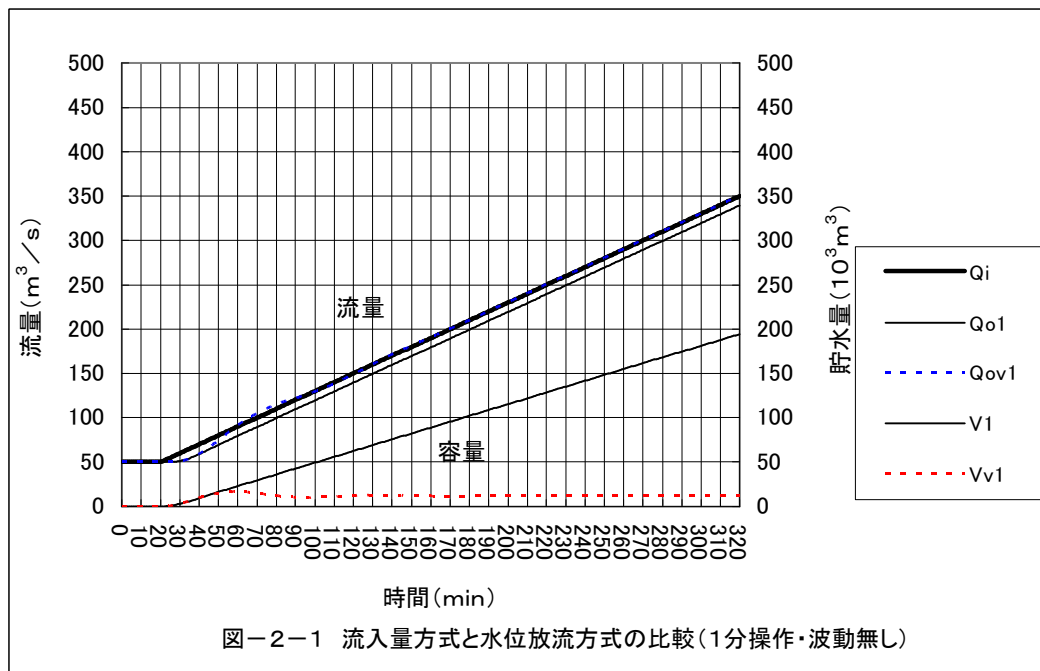


図-2-1は、1分間操作による流入量方式と水位放流方式の比較です。

図-2-2は、10分間操作による流入量方式と水位放流方式の比較です。

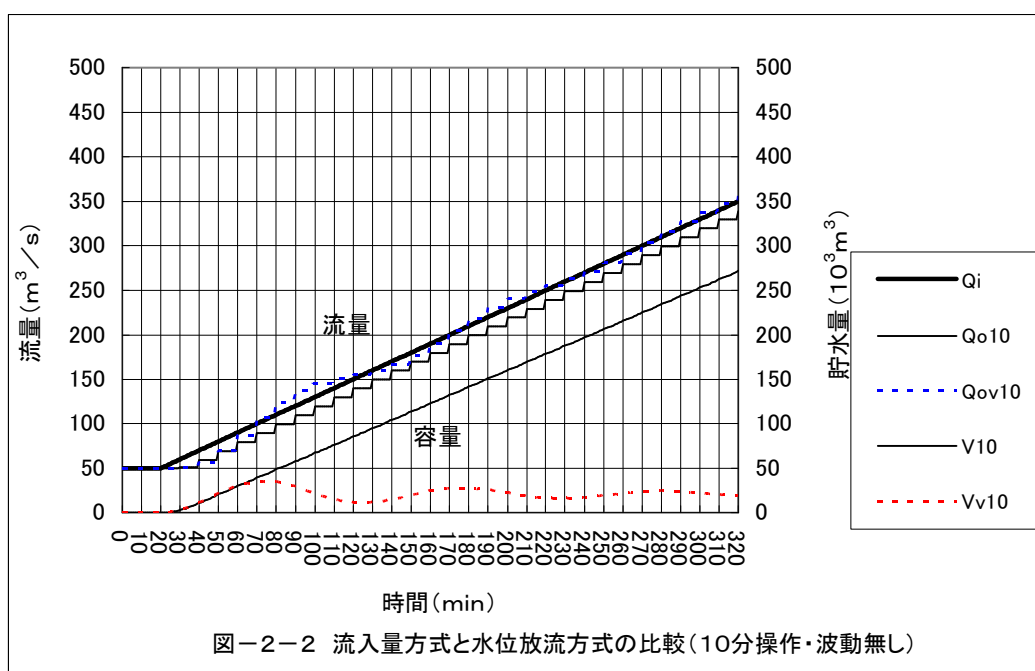
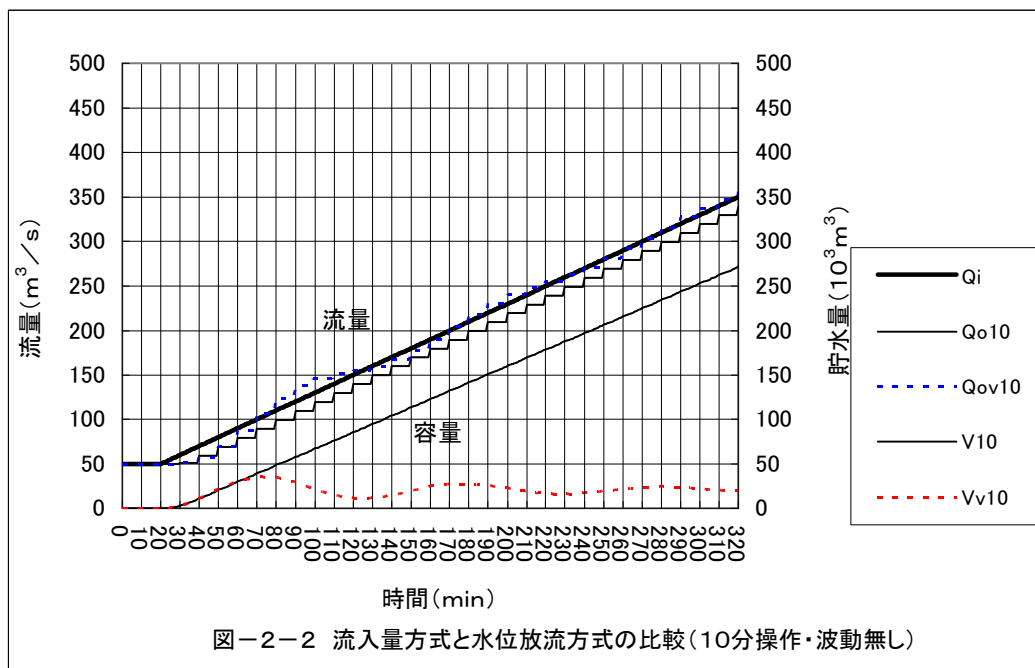
いずれの操作間隔に於いても水位放流方式の場合が放流量の流入量に対する整合度合、貯水位の安定性ともに優位であることが明らかです。

#### b. 貯水池の波動が放流量決定に及ぼす影響の比較 (流入量方式と水位放流方式)

次にそれぞれの放流関数で貯水池水位に波動を加えてみました。加えた波動は貯水池面積を  $1 \text{ km}^2$ 、振幅  $0.5 \text{ cm}$ 、周期  $1100 \text{ sec}$  としています。

その結果を図-3-1に1分間操作、流入量方式の場合、 $Q_{ow1}$ 、 $V_{w1}$ 、水位放流方式の場合、 $Q_{ovw1}$ 、 $V_{vw1}$ として示しています。

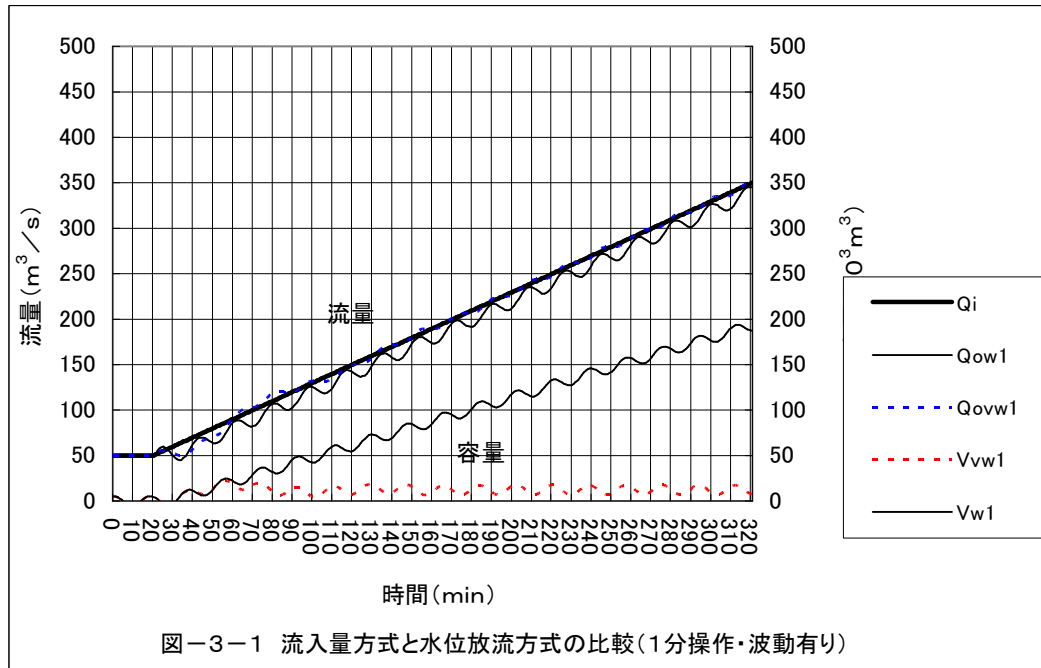
図-3-2に10分間操作の結果を流入量方式の場合、 $Q_{ow10}$ 、 $V_{w10}$ 、水位放流方式の場合、 $Q_{ovw10}$ 、 $V_{vw10}$ として示しています。



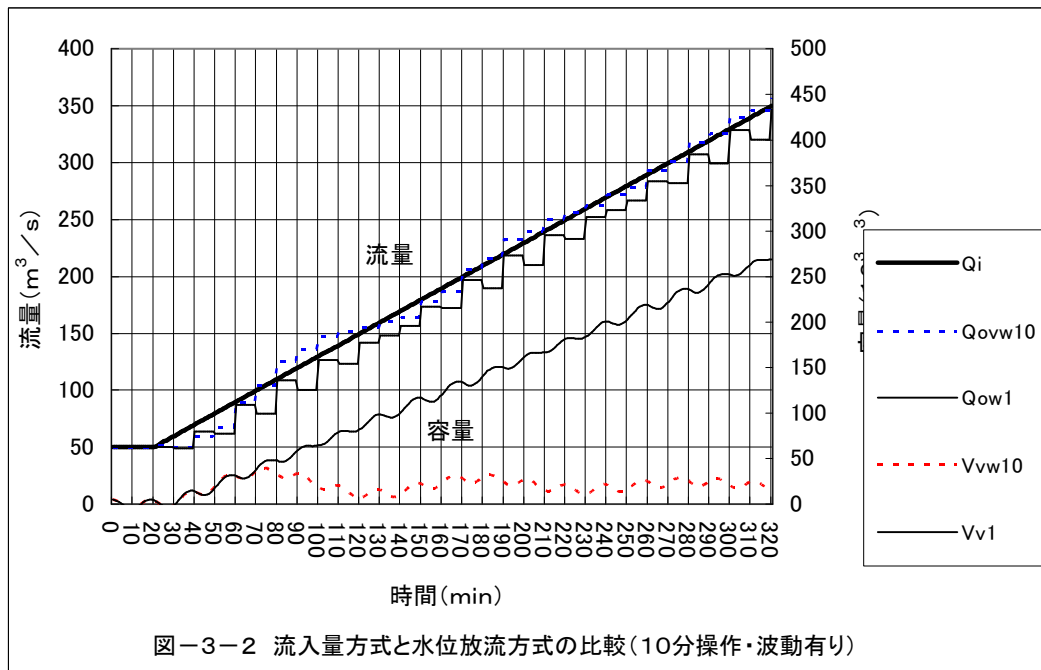
いずれの場合も、従来の流入量方式に比べて水位放流方式の場合が格段に放流量も貯水量も改善されたものとなっています。

c. 不感帯方式 ((1) 式) による計算結果 (流入量方式との比較ならびに波動の影響) いま、 $K1=K2=1/600$ 、 $v0=0$ として (5) 式にもとづいて、ゲート操作1分間の場合の放流量を計算してみました。これは、(1) 式において  $\Delta T=600 \text{ sec}$  とし





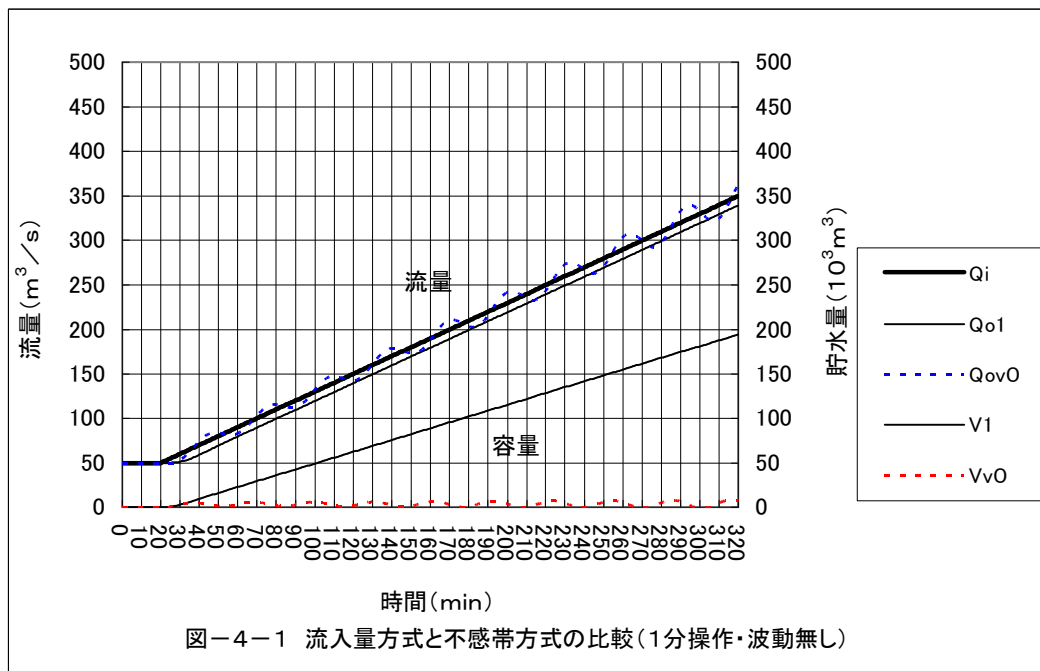
た場合と同じ計算になります。



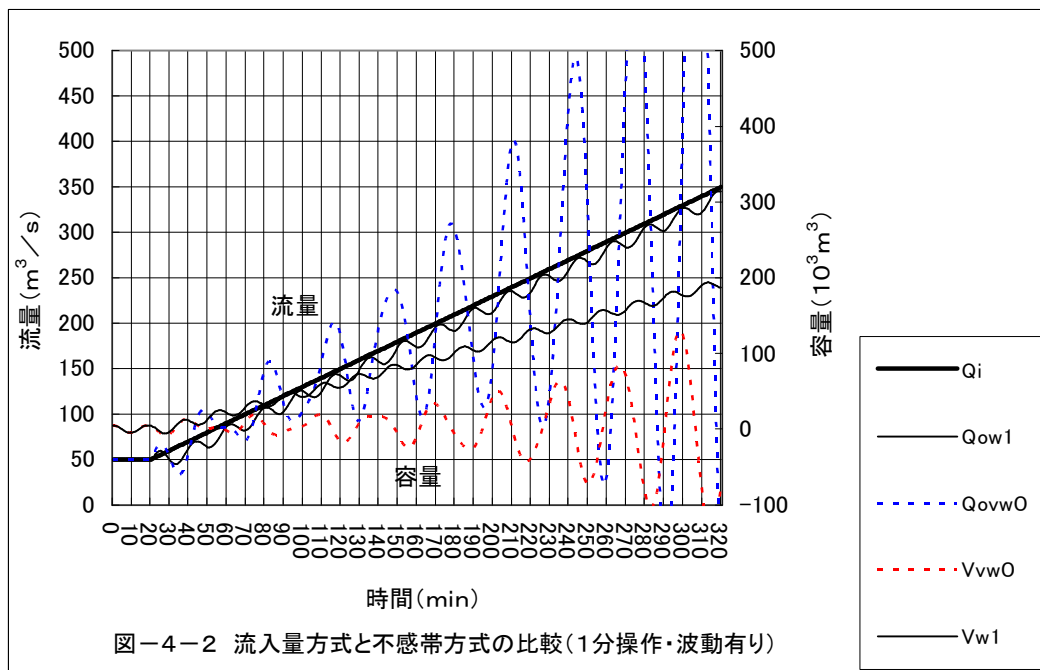
この結果、放流量を $Q_{ov0}$ 、貯水量を $V_{v0}$ として図-4-1に破線で示しています。貯水量 $V_{v0}$ は $V_1$ と比較すると、長期的に見て一定の値に収まる傾向にあります。放流量 $Q_{ov0}$ は波の影響が無いにもかかわらず若干ながら不安定な動向を示しています。いずれの値も誤差が増幅傾向にあります。

次に同じ放流関数で貯水池水位に波動を加えてみました。加えた波動はb. のケースと

同じにしました。



その結果を図-4-2に流入量方式の場合 ( $Q_{ow1}$ 、 $V_{w1}$ ) と比較して、 $Q_{ovw0}$ 、 $V_{vw0}$ として示しました。



$\Delta T$ の値にもよりますが、(1)式を放流関数とするいわゆる不感帯方式は(5)式から見ると、 $K_1$ 、 $K_2$ の値が水位放流方式の場合より不安定な領域にあると言えます。

以上、定水位操作における流入量方式と不感帯方式、水位放流方式の比較計算を行いな

がそれぞれの特徴を評価してみました。

K1、K2 の値を  $1/600$  にするという事は、仕様書（案）の（1）式において  $\Delta T = 1/600$  にすることと同じであり（5）式で  $K1=K2=1/2000$  とする場合と比較してみると不安定領域にあると言わざるを得ません。

一方、K1、K2 の値を  $1/2000$  より小さくすると反応が鈍くなり操作の遅れにつながる可能性があります。

したがって、実際のダム操作に適用する場合にはダムの規模、操作特性などをふまえて慎重な試行計算を行いながらK1、K2 を決定していく必要があります。

このような式の特徴に関する考察を抜きにして（1）式に示された式を安易に適用することは大変に危険なことであると言わざるを得ません。

（1）式に於いて  $\Delta T$  をどの様に設定するかは（1）式の操作特性を左右する重要な要素であることが判りました。また、単に流入量の計算式にこだわることなく、もう少し柔軟な立場からのアプローチも選択肢の一つとして存在することが判りました。

より柔軟な視点からの定水位操作の放流関数として（5）式を提案しましたが、（1）式は（5）式の中の限定された状況のなかにあり、しかも、その操作特性は操作上可成り不安定な領域にある可能性があることも判りました。

#### 4. まとめと発展的考察

以上の結果を踏まえつつ、（5）式をさらに安定した定水位操作の放流関数として採用する場合の留意事項をその特性をふまえて整理すると以下のようになります。

- ①定水位操作関数は（5）式のように一般化して設定することが出来る。
- ②（1）式は一般化した（5）式に於いて  $K2=1/600$  と特定した状況である。しかも、（1）式における  $\Delta T$  については仕様書（案）では何ら言及がなされていないがこの設定の仕方によっては操作の安定性が大きく左右される。 $\Delta T < 600 \text{ sec}$  とすると不安定な操作状態となる可能性がある。
- ③（5）式は、減衰振動方程式とみなせば、K1 は放流量が流入量に収束していく過程での周期を主に左右している。また、K2 は放流量が流入量に収束していく速度を主に左右していると言える。
- ④K1、K2 を小さくしていくと（ $1/2000$  以下にすると）放流量決定に於いて安定した状態であるが、流入量に対する放流量の収束スピードが遅くなり、操作の遅れにつながる可能性がある。
- ⑤K1、K2 を大きくしていくと（ $1/600$  以上にすると）放流量決定に於いて不安定な状態となるが、放流量に対する流入量の収束スピードは速くなる。
- ⑥いずれにしても操作の安定性、収束のスピードとは相反する特性であるが2律背反の関係にある。どの様な値を選択するかについては貯水池の状況、洪水調節計画などを

ふまえつつ慎重に決定していく必要がある。

⑦流入量方式による従来の方法に比べて水位放流方式による放流量は大局的に見て放流量と貯水量の管理において格段の改善効果が認められるものの細部にわたっての放流量や貯水位の管理においては操作規則を満足していない。しかしながら、水位放流方式による操作の優位性は明らかであり、このような観点からの操作規則のあり方を議論する必要がある。

つまり、定水位操作はその特性上目標とする流量並びに貯水位に対して上下方向から接近していくこととなる。従って、「制限水位以下」とか「流入量を超えてはならない」といった操作の条件は現実的ではない。このようなことから、操作規則における、水位管理、流量管理の条件をこれらの操作特性をふまえて設定する必要がある。

以上、定水位放操作関数の特性について整理しました。

ダム操作の現場に於いては、洪水発生前の流入量、放流量、貯水量の関係はそのダムの目的・規模等によって様々です。

いま、ダムの貯水池が定水位操作の目標水位にあり、流入量と放流量が殆ど同じであるという状態を定水位操作状態と定義しますと、洪水発生前の流入量、放流量、貯水量の関係は定水位状態とは全く乖離した状態を想定しなければなりません。

ダム操作の現場に於いては、どの様にして定水位状態に接近させていくかが現実的な課題となって参ります。この定水位状態へ近づけていく操作を「すりつけ操作」と定義していますが、2章で言及したように仕様書（案）では定水位放流方式の中の水位偏差方式として説明されています。この定義が仕様書（案）の説明を非常に難解なものとしているのではないかと考えています。

今回はすりつけ操作について考えてみることにします。

[ダム操作よもやま話の目次に戻る](#)

#### 参考文献

- (1) ダム管理の例規集 国土交通省河川局河川環境課監修 財団法人 ダム水源地環境整備センター編
- (2) ダム管理用制御処理設備標準設計仕様書（案）同解説 財団法人 ダム水源地環境整備センター編
- (3) HP : <http://www5b.biglobe.ne.jp/~mizu-ima/dam/index.htm>  
キーワード ダム操作 今村瑞穂
- (4) ダム操作の理論と実際（未定稿） ダム操作研究会