

～様々な切り口からダム操作を見る～

まえがき

ダム操作よもやま話として、これまでに、流入量把握に関する課題、定水位操作に関する課題、擦りつけ操作に関する課題、利水ダムの操作とただし書き操作に関する課題などの4つのテーマについて考察してまいりました。

ダム操作においては、操作指標と操作特性、貯水池状況と操作特性など、その見る角度とおかれた背景において、それぞれに特徴的な操作特性を提示することがあります。

ここでは、これらのダム操作を幾つかの異なった角度から見た場合、何が見えるかといった視点から考えてみたいと思います。

先ず、ダムからの放流量とその決定情報との関係を可能な限り定式化するとともに、解析的な立場から分析して、放流量決定の指標とその特性について考えてみます。

次に、洪水時操作全体をハイドログラフとは異なった放流量と貯水量の関係から分析するとともに操作相互間の移行のかたち等について考察します。

最後に、同じ操作規則と流入波形に対して、貯水池状況の違いによる放流量への影響を分析します。

これらの様々な角度からの分析を通じて、ダム操作への計画・設計段階からの取り組みの必要性に言及することといたします。

1. ダム放流量とその決定情報

ダム操作を解析的に考えると言うことは、流入量のハイドログラフに対して、或る目的と方針をもって放流量を決定しようとする時、貯水池容量がどの様に応答するか、また、逆に、貯水池水位を適切にコントロールするためにはどのような目的と方針に基づき放流量を決定すればよいかを考えることであると言えます。

若干、まわりくどい説明になるかもしれませんが、解析的観点からダムの操作を考察しようとするれば、先ず、考えられる操作のすべてを定式化して表現する必要があります。

ダム操作の基本式は以下の3つの式から構成されます。

$$Q_i = f_1(t) \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_o = f_2(Q_i, V, H) \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{dV}{dt} = Q_i - Q_o \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 Q_i : 流入量、 Q_o : 放流量、 V : 貯水量、 H : 貯水位、 t : 時間

(1) 式は流入量で、時間の関数です。一般的には不定型であり、定まった形で示されることはありません。

(2) 式は放流量で、ダム の 操作ルールを示しています。流入量 Q_i や貯水量 V の関数で示されることもあり、穴あきダムなどは貯水位の関数として示されることもあります。

(3) 式は連続式で、流入量、放流量、貯水量の関係を制約しています。

ダム操作の解析とは、(1) 式、(2) 式、(3) 式を連立させ、放流量、貯水量の変化を時間 t の関数として求めていくものであると言えます。

ここで、流入量である (1) 式が不定型であり、時間 t の関数として一義的に設定しにくい面もあり、一般的に (1) 式、(2) 式、(3) 式を連立させて解析解を得ることは不可能と考えられています。このことが、ダム操作の解析的考察を難しくしている原因の 1 つと言えるでしょう。

従って、通常は一定時間間隔毎に流入量、放流量から貯水量を数値計算して、それぞれの時間変化をハイドログラフとして図示して、洪水調節効果や調節特性の分析をすることが一般的な方法となっています。

しかしながら、流入量を簡略化して (4) 式のように単純化して設定すれば、流入量の増加・減少の度合いは一応表現できます。また、与えた放流ルールが放流量や貯水量にどのように影響するかといった解析的分析も一部ではありますが可能となります。

$$Q_i = a t + b \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 a : 流入量の増加率、 b : 定数

以上のような観点を踏まえつつ、(2) 式の放流関数のかたちとして、どのようなものがあるかを以下の①～④のように整理してみました。

① 一定量放流操作

$$Q_o = q_0 \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 q_0 : 計画放流量。ただし、 $Q_i > q_0$ のときに限る。

時間 t にも貯水量 V にも関係なく一定量 q_0 を放流する方式です。一定量放流方式か、一定率一定量放流方式の後半部分にも適用します。

② 一定率放流操作

$$Q_o = \frac{(q_u - q_s)}{(q_p - q_s)} (Q_i - q_s) + q_s \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 q_u : 計画最大放流量、 q_p : 計画洪水流量、 q_s : 洪水調節開始流量

従来から採用されている一定率放流方式です。(5) 式と併せて一定率一定量放流操作とすることもあります。

③ 貯水量の 1 / 2 次関数 (一定率放流関数)

$$Q_o = K_1 \sqrt{(V - v_s)} + q_s \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 v_s : 洪水期制限水位時貯水容量、 K_1 : 定数、 V : 貯水量。

K_1 を適切に選択すると (6) 式と同じ一定率放流を実現することができます。

④ 穴あきダムの放流量 (自然調節ダム)

$$Q_o = C A \sqrt{H - h_o} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、C：流量係数、A：放流管の断面積、H：貯水位、 h_o 放流管の中心標高
 (6)式や(7)式に近い特性を持っていますが、放流管の諸元によって支配されます。
 従って、一旦放流管の構造を決定してしまうと放流特性を修正することが出来ません。

⑤ 貯水量の1次関数(遅らせ操作関数)

$$Q_o = K_2 (V - v_s) + q_s \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 v_s ：放流開始時貯水容量、 q_s ：放流開始時放流量、 K_2 ：定数。
 後述のように時間遅れ $1/K_2$ の遅らせ操作を実現することができます。

⑥ 遅らせ操作関数並びに定水位放流関数(流入量=放流量)

$$Q_o = Q_i (t - T_1) \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 T_1 ：放流量の流入量に対する遅れ時間。

(10)式は、流入量に対して時間遅れが T_1 の場合の放流関数です。

(10)式において、 $T_1 = 0$ とすると、従来から採用されている定水位操作の放流量です。
 計算する流入量が貯水位の変動により安定しないことがあり、計算流入量の時間遅れも加
 わるため貯水位を一定に保つことが出来ない場合があります。

(9)式で $K_2 = 1/T_1$ とすると(9)式と(10)式は同じ放流量を実現することがで
 きます。

⑦ 改良型定水位放流関数

$$Q_{o,n} = Q_{o,n-1} + k_3 (V - v_o) + k_4 (V_n - V_{n-1}) \dots \dots (11-1)$$

ここで、 k_3 、 k_4 ：定数、 v_o ：目標貯水量、 n ：階差式における計算ステップ。

階差式で表現した定水位操作の改良型のもので、(10)式で $T_1 = 0$ の場合と比較する
 と貯水位の管理が大幅に改善され、決定される放流量の安定性も改善されています。

仮に、初期放流量が流入量と同じでない場合においても、時間とともに流入量に対して
 収束して行くという優れた特性を持っています。 k_3 は放流量の目標に対する収束のスピー
 ドを支配し、 k_4 は振動しながら収束する周期を支配する定数です。

$$\frac{d Q_o}{d t} = K_3 (V - v_o) + K_4 \frac{d V}{d t} \dots \dots \dots (11-2)$$

(11-1)式は階差式で示していますが、これを一般化して示すと(11-2)式のよ
 うになり、この形で解析的な分析を行います。(11-1)式も(11-2)式も(10)
 式で $T_1 = 0$ の場合と同じ目的の放流を実現することができます。

⑧ 擦り付け操作関数(定水位操作)

$$Q_o = \frac{(V - v_s)}{(v_u - v_s)} (Q_i - q_s) + q_s \dots \dots \dots (12)$$

ここで、 v_s ：初期貯水量、 v_u ：目標貯水量、 q_s ：初期放流量。

$V = v_s$ で $Q_o = q_s$ 、 $V = v_u$ で $Q_o = Q_i$ となります。任意の貯水量 v_s と任意の放流量 q_s

の状態から、定水位状態 ($V = v_u$ で $Q_o = Q_i$) に誘導して、定水位操作を継続するという便利な式です。

⑨ 自由越流関数

$$Q_o = C B(H - h_1)^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots (13)$$

ここで、C : 流量係数、B : 越流幅、H : 貯水位、 h_1 : 越流頂標高

自由越流の際の放流量で、流下形態がオリフィス状態になれば (8) 式の形態になります。(8) 式と (13) 式の間には遷移領域が存在し水理的に不連続となる場合がありますから注意が必要です。

⑩ 貯水量の2次関数 (追いつき操作)

$$Q_o = A(V - B)^2 + C \dots \dots \dots (14)$$

ここで、V : 貯水量、A, B, C : 定数で、初期放流量と貯水量 (q_m, v_m)、上限放流量と貯水量 (q_u, v_u) の2点を通るように設定します。

放流量は流入量に追いついていく操作になります。

⑪ ただし書き操作関数

$h_m < H < h_d$ の時

$$a = \frac{(a_d - a_m)}{(h_d - h_m)^2} (H - h_m)^2 + a_m \dots \dots (15-1)$$

$h_d < H < h_u$ の時

$$a = \frac{(a_u - a_d)}{(h_u - h_d)} (H - h_d) + a_d \dots \dots (15-2)$$

ここで、a : ゲート開度、 a_m : 8割水位時の開度、 a_d : サーチャージ水位時の開度、 a_u : 設計洪水水位時の開度、 h_d : 8割水位、 h_m : サーチャージ水位、 h_u : 設計洪水位、H : 貯水池水位

ただし書き操作ルールを定式化するとこのような形になります。

以上、11 ケースの放流量の決定方式について思いつくままに列挙してみました。これらの式の表現と説明としては不十分な点があるかも知れませんが、洪水時操作における放流量がどのような情報に基づき、どの様なかたちで決定されているかといった視点から見れば十分に目的を達成するものであろうかと思えます。

これらの式について若干の分析を試みてみたいと思います。

これまで操作規則において主に採用されてきたものは、①、②、④、⑥、⑨、⑪と言えます。新たに、③、⑤、⑦、⑧、⑩を加えて、ダム操作全体のあり方を考えてみることにしました。

これらの式について大まかに分類し、整理してみるとつぎのようなことが言えようかと思えます。

- ・何らの指標にも左右されずに決定される放流量。
 - ①の一定量放流量はほかの指標と関係なく決定される放流量です。
 - ・流入量をもとに放流量を決定するケース。
 - ②の一定率放流方式、⑥の定水位操作ならびに遅らせ操作は流入量をもとに放流量を決定します。
 - ・貯水位により放流量を決定するケース
 - ⑪はただし書き操作要領を定式化したものですが、貯水位によって放流量（直接的にはゲート開度）を決定するケースです。④は穴あきダム放流量を示す式です。⑨は④がオリフィス流であるのに対して自由越流による放流量ですが、いずれの場合も水位によって放流量が決定されます。
 - ・貯水量によって放流量を決定するケース
 - ③は貯水量の1/2次式により、⑤は貯水量の1次式により、⑧は貯水量の2次式により決定されますが、Vの次数によってそれぞれ決定される放流量は独自の特性を持っています。また、⑦については貯水量のみによって放流量を決定することの出来る定水位操作関数です。
 - なお、貯水位によって放流量が決定されるケースと貯水量によって放流量が決定されるケースでは特性的傾向はほぼ同じといえますが、貯水位と貯水量の間にH-V関係が介在し、この関係が必ずしも定式的に整理できない場合があります、ここでは区別して整理しています。
 - ・貯水量と流入量によって決定されるケース
 - ⑧は貯水量と流入量によって決定されるケースです。
 - 貯水量と流入量の間を同時にコントロールすることが出来ます。
- 以上、様々な形の放流関数があることを紹介しました。これらは操作のそれぞれの段階で要求される特性に合わせて適用されることとなります。
- 例えば、
- ・洪水前操作やただし書き操作においては放流量が流入量に追いついていく操作で最終的には「流入＝放流」になる操作ですから、⑧、⑨、⑩の関数が適用可能です。また、これに加えて⑪の関数もただし書き操作関数として適用されていますが、この場合は放流量というよりゲート開度を決定するルールですから放流量の特性との関連で直接的に議論することはできません。
 - ・洪水調節操作においては、一定量放流操作については①の関数、一定率放流操作については②の関数と③の関数が適用可能です。④の関数はどちらかというと③の関数に近い特性を有していますが、H-Vカーブを介在していますから解析的にその特性を論じることはできません。
 - ・定水位操作については、従来から⑥の(10)式で $T=0$ とした場合が適用されていますが、⑦と⑧の関数も効果的に活用することが出来ます。

・ 利水ダムにおける河川の従前の機能を維持していくための遅らせ操作としては、従来から実施されてきた⑥の(10)式のほか、⑤の関数も効果的に活用できる可能性があります。

以上のように、幾つかの組み合わせからなる洪水時ダム操作のそれぞれの目的を達成するためには複数の放流量の決定方法があることが判りました。

それぞれの放流関数はダム毎に適用条件が異なりますから、それぞれの関数の特性を的確に捉えながら、適切な組み合わせを取捨選択して考えていく必要があるでしょう。

例えば、ダムの貯水池内に発生する波浪は流入量の把握に影響を及ぼしますから、そのような場合には波浪の影響の少ない貯水容量から放流量を決定する関数を選択するなどの対応が効果的であると考えられます。

また、洪水時操作においては「設計洪水水位においてダム設計洪水流量を放流する。」とか「洪水期制限水位で洪水調節開始流量を放流する。」等、放流量が貯水量（又は貯水位、以下同じ）との関連において決定されるケースがあります。

このような場合、貯水量で放流量を決定する放流関数においては、あらかじめ貯水量との関係において所定の放流がなされるよう諸定数を定めておけば自動的に貯水量と放流量の同時管理がなされることとなります。

このような観点から、貯水量により放流量を決定する操作方法（③、④、⑤、⑦、⑧、⑨、⑩、⑪）をまとめて「水位放流方式」と定義して、その他の放流量の決定方法と区別することができます。

2. 方程式の解析解による分析

放流関数による放流量と貯水量の解析的分析の方法としては、前章で述べたように流入量、放流関数、連続式の3つの式を連立させて解く方法について触れました。しかしながら前章で挙げた11通りの放流関数のうち解析解が得られるものは、流入量を(4)式のようにtの1次関数とした場合においても、①、②、⑤、⑥、⑦程度に限定され、他の放流関数では解析解を得ることは困難です。

しかしながら、この様にして得られる解析解が放流関数の特性を評価するにあたっての効果的な手段の一つであることは言うまでもありません。

ここでは、比較的解析解が得られやすい⑤の貯水量Vの1次関数による放流関数である(9)式について考察してみたいと思います。

$$\frac{dV}{dt} = Q_i - Q_o \dots \dots \dots (3)$$

$$Q_i = a t + b \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_o = K_2(V - v_s) + q_s \dots \dots \dots (9)$$

以上、連続式(3)式、流入量式(4)式、貯水量Vの1次関数による放流関数(9)式を連立させて解くと(16)式のような解が得られます。

$$Q_o = \left\{ q_0 - \left(b - \frac{a}{K_2} \right) \right\} e^{-K_2 t} + a t + b - \frac{a}{K_2} \dots \dots \dots (16)$$

ここで、 q_0 は境界条件で、 $t = 0$ における Q_o の値です。

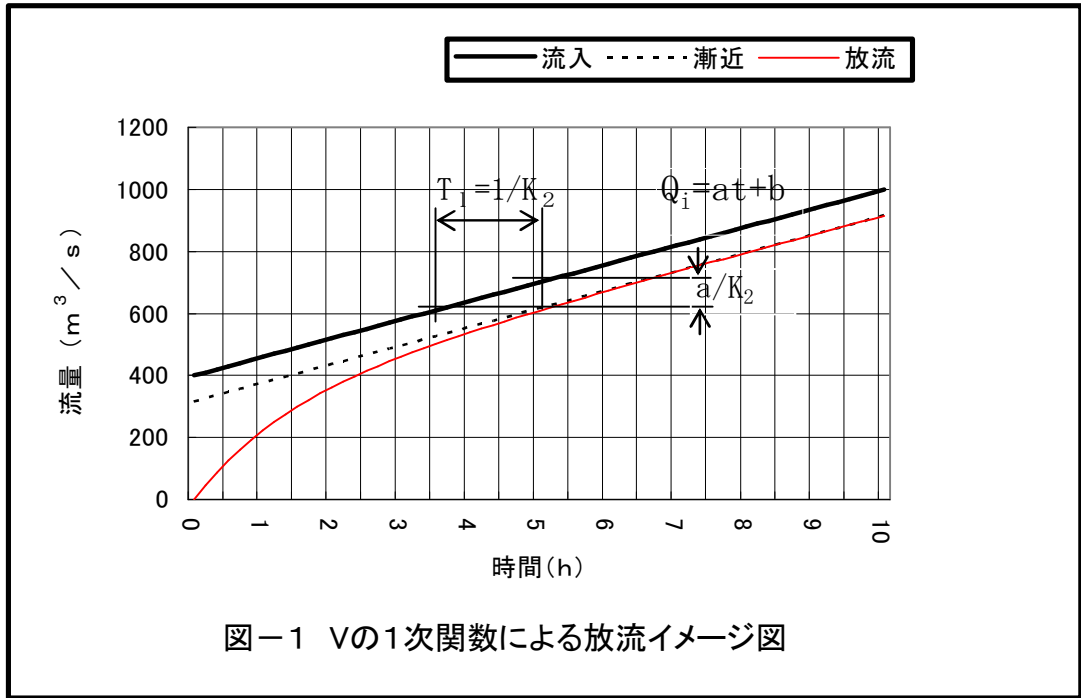


図-1 Vの1次関数による放流イメージ図

(16) 式を時間 t を横軸に流量を縦軸にして図示したものが図-1です。(16) 式の漸近線を同時に破線で示しています。

(16) 式と図-1から次のことが解ります。

1) (16) 式で示す Q_o の値は、 $t = 0$ で $Q_o = q_0$ 、 $t = \infty$ で $Q_o = a t + b - a / K_2$ となります。

言い換えれば、(16) 式は、図-1で示すように、任意の値 q_0 からスタートした放流量は最終的に流入量より a / K_2 だけ小さい値に漸近していくということが解ります。

2) 図-1で見るように、縦軸で a / K_2 の差は横軸の差に置き換えると $1 / K_2$ になります。このことは、(9) 式は流入量(4) 式に対して時間遅れが $1 / K_2$ の放流を実現できる遅らせ操作の放流関数であることを示しています。

つまり、(9) 式において、 $K_2 = 1 / 1800$ とすると、放流量は流入量に対して、 1800 sec (30 min) 遅れの操作を自動的に実行できることとなります。

3) 放流量である(16) 式による Q_o が時間経過とともに一定の値に収束していくと言うことは、仮に途中で誤操作等により異なった放流をしても時間経過とともに本来あ

るべき操作の姿に自動的に修正されていくと示しています。

これらのことは(9)式は遅らせ操作関数として好ましい複数の特性を持ち合わせているということにほかなりません。

以上は、(3)、(4)、(9)式を連立して得られた解である(16)式と図-1を分析することによって得られた結果ということが出来ます。

3. 一定率放流方式の特性を数値計算によって分析してみる

ダム操作のそれぞれの段階に対応した放流関数は複数存在し、貯水池毎により適切な方法を選択出来る可能性があることを説明しました。

アメリカにおいては、貯水池面積が広いため流入量の計算過程において誤差が発生し、そのため洪水調節操作においては貯水位(又は貯水量)をもとに放流量を決定する場合があります。この場合も「水位放流方式」と言うことが出来ます。

ここでは、一定率洪水調節操作を実施する場合において、②の流入量方式による放流量の決定と③の貯水量(貯水位)より決定した場合のそれぞれの放流量の特性の比較を数値計算によって行った場合の結果について比較評価してみます。

いま、図-2に示すような、基本となる洪水の波形を時間0hで $1000\text{ m}^3/\text{s}$ 、ピーク流量を $3000\text{ m}^3/\text{s}$ として、ピークまでの時間を15h、ピーク以後は増加過程を逆戻りするような洪水波形を考えてみます。

この基本となる洪水波形に対して(6)式に示すような一定率放流方式と(7)式に示すようなVの1/2次式による水位放流方式の適用性について考えてみました。

一定率放流方式は $1000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上の流量の50%を放流するとすれば放流量は次の式で決定されます。

$$Q_{o1} = (Q_i - 1000) \times 0.5 + 1000 \dots \dots \dots (17)$$

次に、同じ流入波形に対して、水位放流方式で(16)式と同じ放流を実現するためには次の(17)式により可能となります。

$$Q_{o2} = \alpha \sqrt{\frac{2a}{1-\alpha}} \sqrt{V} + 1000 \dots \dots \dots (18)$$

ただし、 α = 放流率、 a = 流入量の時間増加量。

いま $\alpha = 0.5$ 、 $a = 2000/15/3600$ (後述の基本洪水波形)とすれば、(18)式は(19)式のように示されます。

$$Q_{o2} = 0.192\sqrt{V} + 1000 \dots \dots \dots (19)$$

つまり、(17)式と(19)式は流入量が基準洪水波形の場合においては同じ放流量の履歴を実現することが出来ますが、(18)式は流入量の時間増加量に支配されますから、流入量が基準洪水波形からずれていけば、それぞれの式によって計算される放流量は少しずつずれてきます。

従って、基準洪水波形で同じ放流履歴が実現できた場合においても、流入量の波形が変わってきた場合、それぞれの式による放流量がどのように変化していくかを把握しておく必要があります。

ここで、図-2に示すような基本の洪水波形にたいして、検討の対象とする任意の洪水の波形を $(Q_p - T)$ で示します。

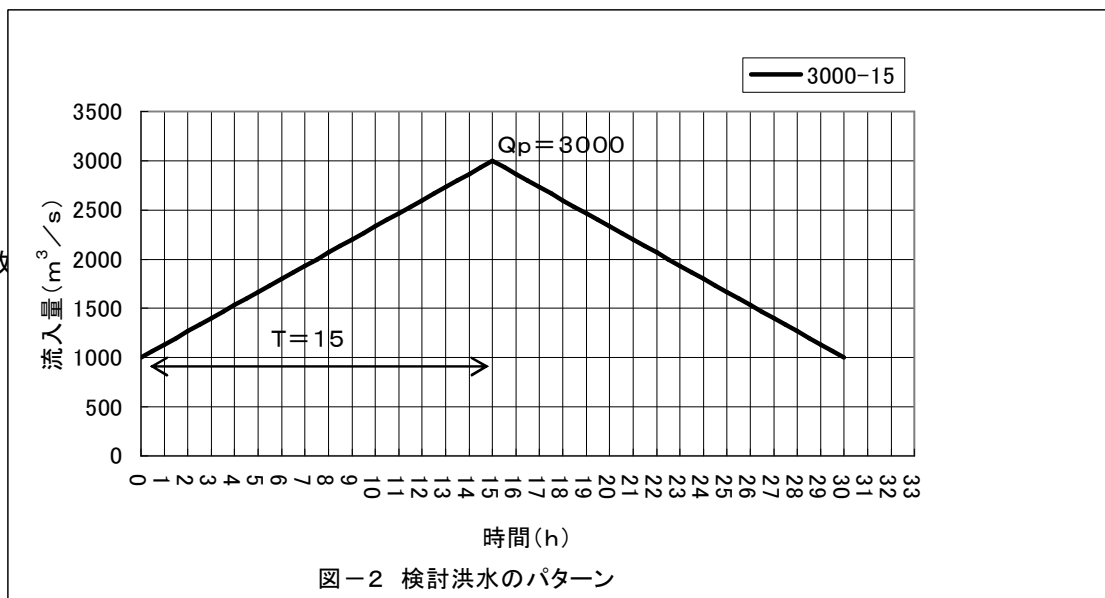


図-2 検討洪水のパターン

ここで、 Q_p = ピーク流量、 T = ピークまでの洪水継続時間とします。結果、基本波形の洪水は $(3000 - 15)$ と示すことができます。

さらに、基本波形 $(3000 - 15)$ をベースにして表-1に示すような9個の洪水群を考えてみます。

表-1 評価対象洪水の番号一覧

区分		最大流入量(Q_p)		
		2400	3000	3600
洪水継続時間(T)	9	1 (2400-9)	4 (3000-9)	7 (3600-9)
	15	2 (2400-15)	5 (3000-15)	8 (3600-15)
	21	3 (2400-21)	6 (3000-21)	9 (3600-21)

これらは、基本波形を中心にして、初期流量を時間0で $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ として、それぞれ洪水継続時間 T を $\pm 6 \text{ h}$ とピーク流量 Q_p を $\pm 20\%$ 変化させた場合の波形を考えています。なお、表-1のそれぞれの洪水の前面の数字は洪水の番号を示しています。

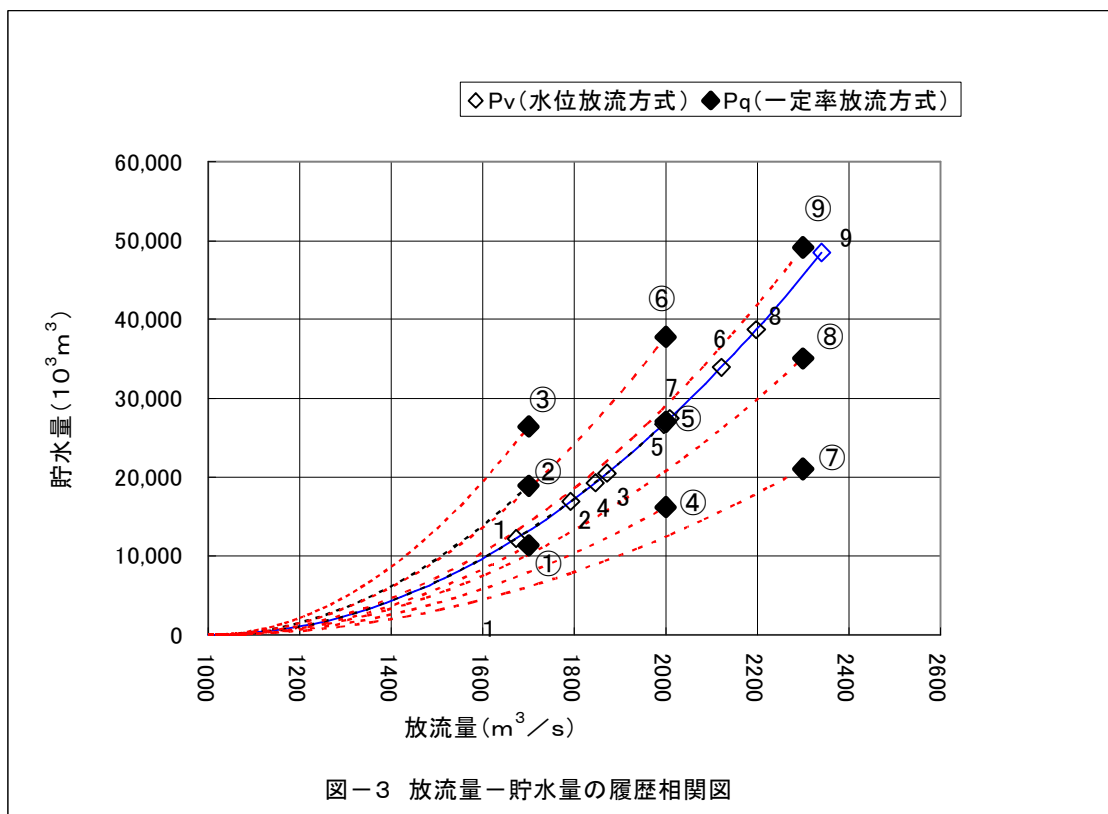
ここで、9個の波形に対して(17)式と(19)式をそれぞれ適用して放流量と貯水量を計算しました。

これらの計算結果を放流量と貯水量の関係で履歴的に示したものが図-3です。

ここでは、洪水調節全体ではなく、簡略化して流入量がピークになるまでの履歴を示しています。(考察が煩雑にならないようにとの観点からこのようにしました。)

ここで、それぞれの洪水で流入量がピークになったときの流入量と貯水量の相関を、流

入量を基準にして放流量を決定する（17）式の場合、図-3の①～⑨（凡例の p_q ）で示しました。また、貯水量で放流量を決定する（19）式の場合を1～9（凡例の p_v ）で示しました。これらの凡例に添付した番号は表-1で示した洪水番号（1から9まで）と一致するものです。



この場合、基本洪水波形では同じ履歴になるように（17）式と（19）式の係数を調整していますから、2つのルールによる Q_0 と V の関係を示す履歴（⑤と5）は一致しています。

しかしながら、この図-3からわかるように、放流量と貯水量の関係は、水位放流方式では（ p_v ）洪水波形が変化しても、一つの曲線上（（19）式上）にあります（1～9）が、一定率放流方式の場合は（ p_q ）洪水波形ごとにばらついています。（①～⑨）

この場合、それぞれ9個の洪水波形ごとの放流量や貯水量を平均したものについては殆ど同じ値になります。（（17）式による場合 Q_0 の平均値 $1982 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 V の平均値 $24.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、（19）式による場合 Q_0 の平均値 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 V の平均値 $24.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ となり、それぞれの差は計算誤差の範囲内にある。）したがって、どちらの方式が効率的であるかと言った観点からの優劣は論じることはできません。

しかしながら、（17）式では、先ず、流入量を計算し、その結果をもとに放流量を計算しますが、（19）式の場合は、貯水位から計算された貯水量から直接的に放流量を計算することが出来ます。したがって、流入量の計算の際に発生する貯水池変動などの誤差の発

生要因を回避できることとなります。(19)式においても貯水池変動などの誤差要因は影響しますが、流入量計算誤差に対するよりはるかに小さい誤差となることが確認されています。さらに、(17)式では流入波形が異なれば同じ貯水位に対して様々な放流を行う必要がありますが、(19)式では同じ貯水位においては1つの放流量しかありません。このことは洪水調節操作を著しく単純化していることに他なりません。

また、(17)式では操作の途中で計算誤差により貯水位に誤差が発生すると、貯水量はそのまま次の操作に影響が及びますが、水位放流方式である(19)式の場合は(16)式や図-1で示したように自動的に本来あるべき操作の方向に軌道修正がなされていくという優れた特性をもっています。

この2つの式による方法論の安定性比較については参考文献1にて考察していますから参考にしてください。

図-3は放流量と貯水量の関係で示していますが、これは、放流量と貯水位の関係に置き換えて示すことも可能です。

このような計画洪水波形のみならず考えられる洪水群に対処するための放流設備の設計という観点から考えると(17)式の場合(①~⑨の場合)、すべての洪水に対する放流履歴を包含しようとすれば、(19)式による場合(1~9の場合)より大きな放流能力の放流設備を設置する必要があります(①、④、⑦、⑧の場合)。

このような観点から考えると(19)式による場合の方が放流設備の設計という立場からは経済的に有利であることは明らかです。

以上、様々な考えられる放流量決定の方法論の中から、一定率放流方式についての2つの式についてその特性を比較し、その評価を試みてみました。

これらの考察の経過を踏まえると、ダム計画・設計段階から操作についての考察を展開しながら洪水処理設備の諸元決定等に反映させる必要があると言えるでしょう。

4. 洪水時操作の全体像を異なった座標軸から見る

図-4-1をご覧ください。この図には洪水の始まりから終わりまでの洪水時操作の全体像を示しています。

この図は縦軸に流量と貯水量の2つの情報を、横軸に時間をもって表示しています。

ここで、 Q_i は流入量で、 Q_{o_1} は洪水前放流操作、 Q_{o_2} は洪水調節操作、 Q_{o_3} の前半はただし書き操作、後半は定水位操作、さらに、 V は貯水量の変化です。

放流開始から洪水前操作を経過して洪水調節操作に移行し、洪水調節操作のある段階からただし書き操作に移行し、放流量が流入量に追いついた段階で定水位操作に移行しています。いわゆるハイドログラフで、我々にはなじみ深い形の情報であると言えます。

P0点は放流開始の段階です。放流開始の判断は貯水位が洪水期制限水位に達する前に放流量を流入量に近づけて、洪水調節体制を整えること。一方では、水資源確保の観点から無効放流を回避すること。この洪水前操作を円滑に行うことが、つぎに続く洪水調節操

作の実行を保証することになります。(詳しくは「その2」をご覧ください。)

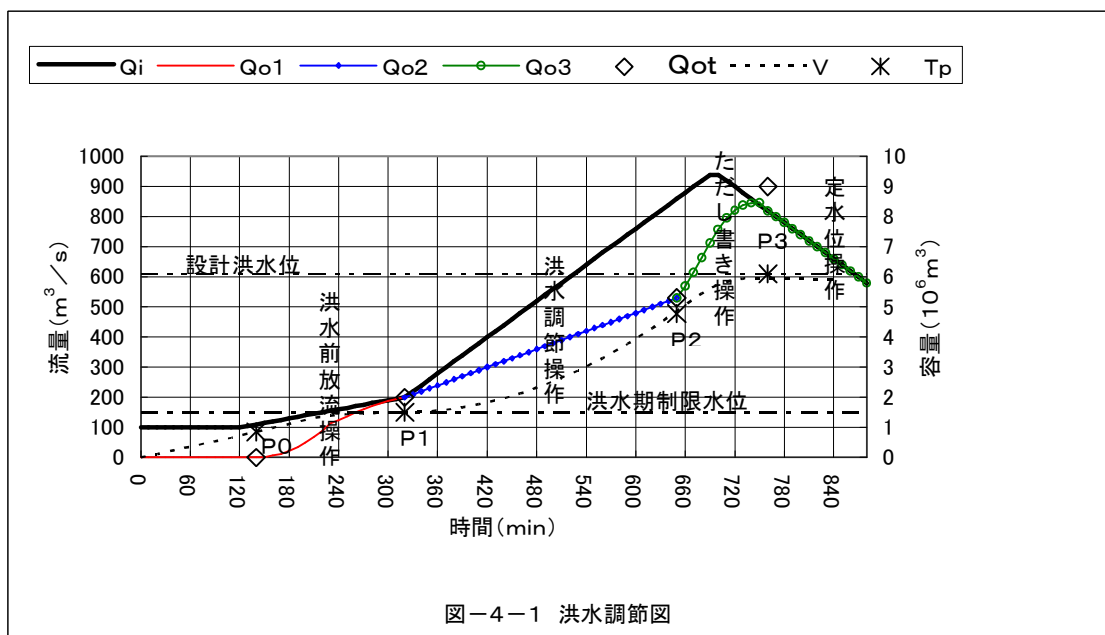


図-4-1 洪水調節図

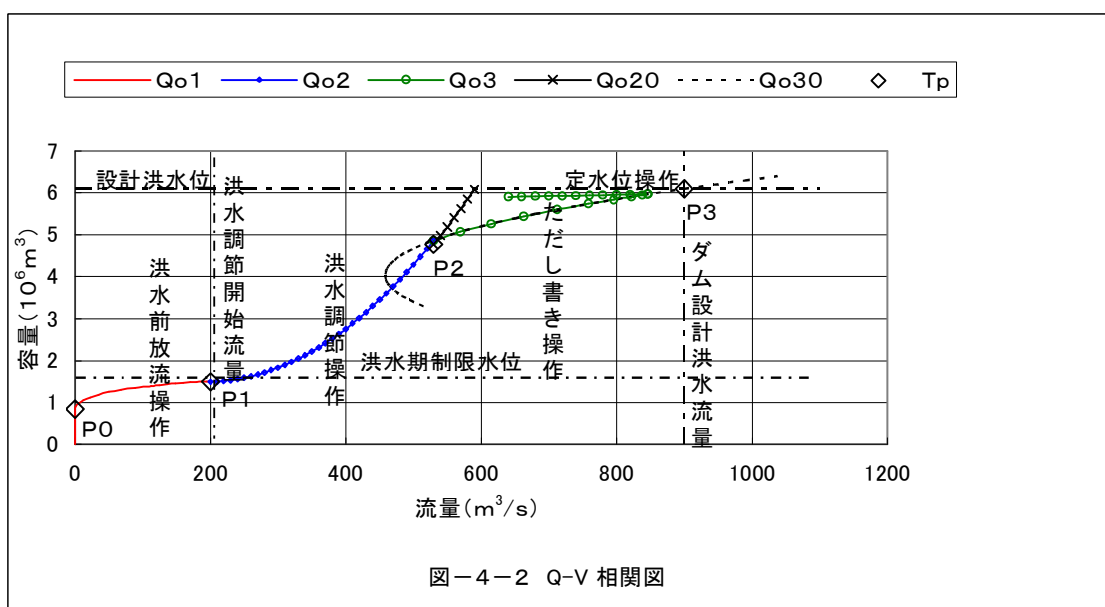


図-4-2 Q-V 相関図

P 1 点は洪水調節操作への移行点です。移行の条件は流入量が洪水調節開始流量を超えていること、貯水位が洪水期制限水位に達していることです。

P 2 点は洪水調節操作からただし書き操作への移行点です。ただし書き操作への移行が早すぎると洪水調節効果が減殺され、遅すぎると貯水位が異常に上昇し、これを回避するために急激な放流量の増加に繋がりがかねません。従って、可能な限りの情報を収集し、適切なタイミングと適切な方法で洪水調節効果を確保しながら貯水位のコントロールをしなければなりません。(詳しくは「その4」をご覧ください。)

一方、図-4-2は図-4-1の放流量 Q_o と貯水量 V の関係を縦軸に貯水量、横軸に放

流量の相関図として示したものです。

図-4-1で操作の変換点として示したP0～P3点は放流量 Q_0 と貯水量 V の2つの指標として示されていましたが、図-4-2ではそれぞれ操作の変換点を1つのポイントとして示していることが判ります。図-4-2において示したP3点はダム設計洪水流量と設計洪水位の容量として示されることとなりますから、操作結果に基づく放流量と貯水量の関係によって示されるグラフはP3点を上限として、計画上も操作上も、その上側にも右側にも及ぶことはありません。

従来は、図-4-2のようなかたちで洪水時操作を見ることは少なかったのですが、図-4-1のようなハイドログラフでは見えない洪水時操作の様々な側面が見えてくることに気が付くはずです。

取り敢えず、2つの図をよく見比べてみて、図-4-1の放流量と貯水量の動向が図-4-2で見るとどの様に表現されているかを読み取ってみてください。

図-4-1において、洪水前放流操作 Q_{01} は放流量が流入量に追いついていく操作、洪水調節操作 Q_{02} は、放流量が流入量からより小さい方向に遠ざかっていく操作、ただし書き操作、 Q_{03} は洪水前操作と同様に放流量が流入量に追いついていく操作になっています。

一方、図-4-2を見ると、洪水前放流操作 Q_{01} は V の2次関数、洪水調節関数 Q_{02} は V の1/2次関数、ただし書き操作関数 Q_{03} は V の2次関数になっていることが判ります。

つまり、 Q_i は流入量で、 Q_{01} は洪水前放流で(14)式によって、 Q_{02} は洪水調節で(7)式(Q_{020})によって、 Q_{03} の前半はただし書き操作(14)式(Q_{030})によって、後半は定水位操作で(11)式によってそれぞれ示すことが出来ます。

このことは逆に図-4-2に示した放流量 Q_0 と貯水量 V の関係から放流量を決定して行けば、図-4-1に示すような放流と貯水量のハイドログラフが得られるということになります。

いわゆる貯水位のみで放流量を決定する水位放流方式により洪水の始まりから終わりまでの操作の可能性を示しています。

さらに、ここで強調したいのは図-4-1とともに図-4-2を併用しながら洪水時操作を行えば放流量と貯水量の両面から操作状況を同時に検証できますから、より安全な操作を実現することが可能となります。

また、図-4-2では、それぞれの操作の変換点P0、P1、P2、P3等における判断が貯水位(貯水量)と放流量との関係において一義的かつ解析的に分析・考察することが出来ますから、的確な操作変更の判断を実行することが可能となります。

さらに、図-4-2では、流入量が、どの様なハイドログラフになっても放流量と貯水量の相関図は同じですから、一旦、P0、P1、P2、P3の位置を決定し、この相関図をセットしてしまえば、この相関図に沿って放流量を決定して行けばよいわけですから、操作中における判断は著しく単純化されます。また、それぞれの操作の段階における Q_0 と V の関係によって決定される操作点がこの相関図から外れるようでしたら、操作の誤りと

いう事になりますから、このような観点から、操作の検証も容易に行うことが出来ることになります。

従って、洪水時操作の段階では図-4-1と図-4-2を同時に大型方眼紙に座標軸とP0、P1、P2、P3等の操作上の主要なポイントをあらかじめ設定して置き、 Q_0 とVの関係をその都度リアルタイムでプロットしていけば、簡単に操作の検証を行うことが出来ることになります。実際に現場で試してみられては如何でしょうか？

また、それぞれのポイントで流入量、放流量、貯水量の相互関係を詳細に分析していけば、ある操作から次の操作（たとえば、放流開始の判断、あるいは、洪水調節操作からただし書き操作への移行判断など）への移行にあたっての合理的な判断方法（例えば、限界流入量法等）が解析的観点から見えてくるものと考えられます。

こうすることにより、誰がやっても同じ答え、何時やっても同じ答えが得られる操作が実現できることとなります。

このことは客観的かつ継続的な立場からダム操作への一般的な信頼性を確立するための不可欠の要件であると言えるでしょう。

さらに、図-4-2によれば、縦軸のVをHに置き換えれば、これはH-Qカーブになります。従って、図-3においてしたように、この図-4-2の中で放流設備のH-Qカーブを重ね合わせれば、利水放流設備、洪水調節門扉、洪水吐きなどの複数の放流設備諸元の全体的な組み合わせの在り方を比較的容易に考察することが可能となります。

5. 下流河道の水位上昇速度の変化を時系列にして眺める

2. 3. 4. においては、主に洪水調節を放流量と貯水量との関係において様々な角度から見た場合の考察を試みました。

ここでは、貯水池の初期の状況が放流量にどのような影響を及ぼすかについて、下流河道の水位上昇速度を時系列に見ながら考えてみたいと思います。

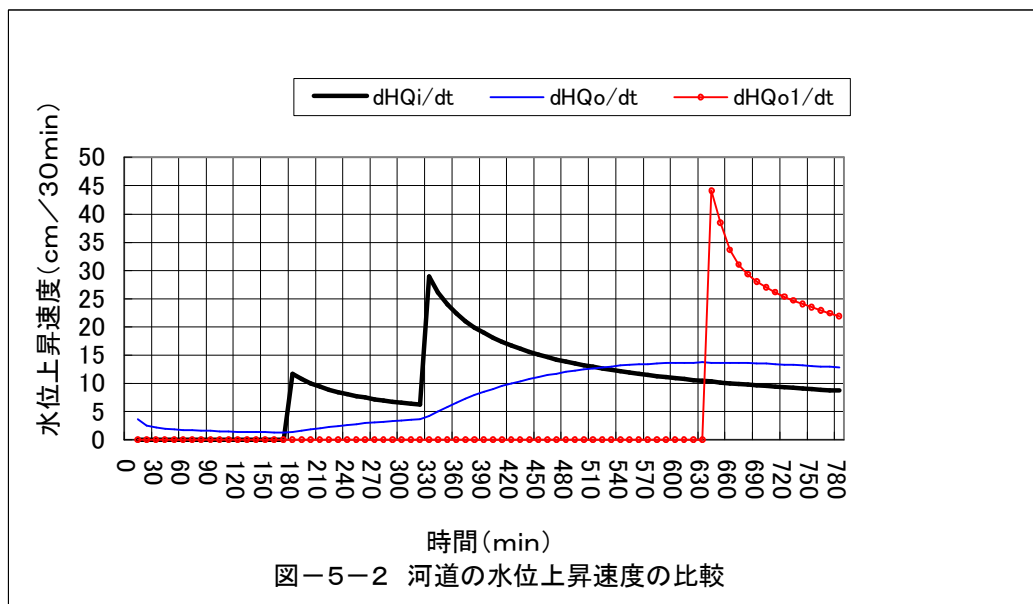
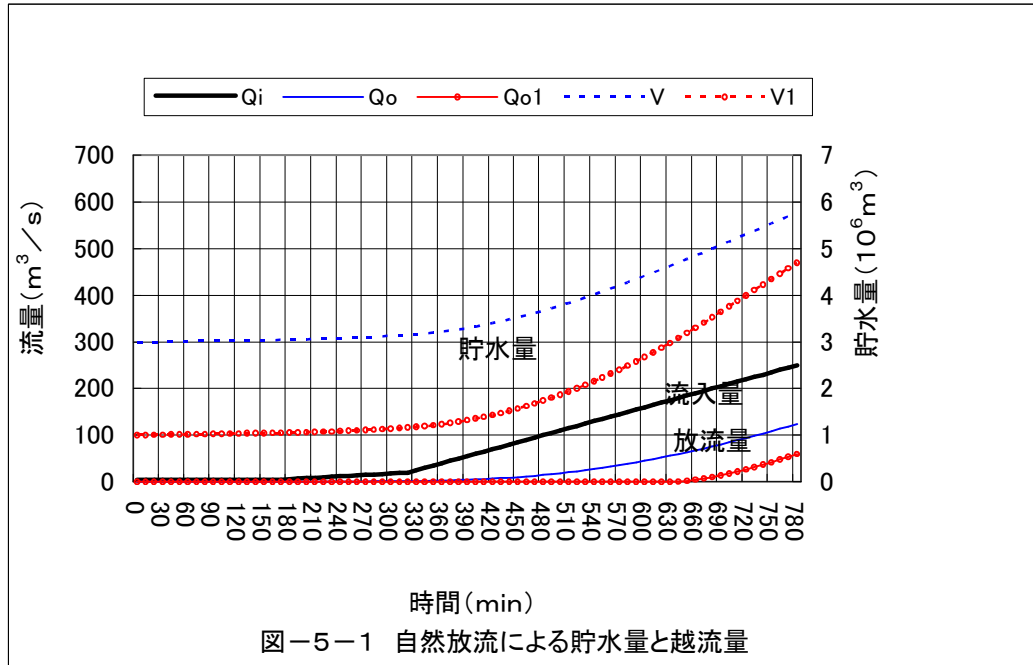
図-5-1は或る穴あきダムの放流状況を流量と貯水量の変化を示した一般的なハイログラフを示したものです。

1つは、初期の貯水位が洪水期制限水位にある場合。（放流量の変化を Q_0 で、貯水量の変化をVで示しています。）もう一つは、初期の貯水位が洪水期制限水位より100万 m^3 低い場合です。（放流量の変化を $Q_{0.1}$ で、貯水量の変化を V_1 で示しています。）

この図より明らかに、同じ流入波形でも初期貯水位が異なれば、当然のことですが放流量も貯水位もその履歴は異なって参ります。しかしながら放流量の履歴の変化のみでは両者の特性の明確な違いを読み取ることは不可能です。

これらの結果を受けて、下流河道の水位時上昇速度を計算してみました。その結果を図-5-2に示しましたが、初期貯水位が洪水期制限水位にある場合（ dHQ_0/dt ）にたいして初期貯水位が（100万 m^3 ）低い場合（ $dHQ_{0.1}/dt$ ）においては越流開始時の河道の水位上昇速度が大きくなっていることが判ります。

つまり、同じ洪水波形と放流設備においても、初期貯水位の変化によって放流量の時間変化特性は大きく異なってくると言うことが解ります。



これらのことから、次のようなことが言えるのではないでしょうか。

まず、初期貯水位が低い場合、越流開始時において下流河道の水位上昇速度の変化に留意する必要があるということ。

さらには、近年操作の安定化を目論んで自然調節方式が採用される場合があるが、初期貯水位の差により生じる放流量変化特性に対して適切な対処方針を考察する必要があるということ。

放流設備をゲートレス構造にする場合、洪水前の貯水位の状況が洪水期制限水位にあれば確かにゲートレス構造は操作を単純化するという観点からは効果的と言えますが、利水容量の大きいダムで洪水前に貯水位が制限水位を大きく下回っている場合には越流開始時点の下流河道の水位上昇速度が制限値を超えている可能性があるのではないかと考えられる場合があります、相応の対策を講ずる必要があります。

つまり、ゲートレス構造の放流設備は一見操作の単純化と安定化にとっては効果的であるかのように見えますが、下流河道の水位上昇の問題のみならず、洪水調節特性の総合的観点から眺めてその対応を考察するとき、硬直的な構造であることを認識すべきであると言えるでしょう。

6. まとめ

以上、洪水時操作をいくつかの異なる角度から眺めながらその特性を考察してみました。2. では考えられるすべての操作方式を定式化して、それぞれの特性を考えてみました。

その結果、放流量の決定方法としては、a. 何らの指標にも左右されない放流量の決定方法、b. 流入量の関数として決定する方法、c. 貯水量の関数として決定する方法、d. 貯水位の関数として決定する方法、e. 複数の関数によって決定する方法等に分類することが出来ました。

また、従来から考えられる方法に加えて水位放流方式などの新しい操作方法も提案した結果、様々なケースへの対応の間口が広がったのではないかと考えられます。

これらの方法はダムの計画・設計又は操作特性との適合性を考慮しながら選択されていく必要があります。

3. では、放流関数の一つを解析的立場から分析した結果、これまで見えなかった放流関数の特性の幾つかを明らかにしました。

これらの結果を踏まえながら、4. では洪水時操作の全体像を、貯水量（または貯水位）と放流量の相関履歴として見てみました。その結果、操作全体をシステムティックに見ることが出来るとともに、貯水位と放流量の同時管理に格段の改善の可能性が期待されることが明らかになりました。

また、これらの事により、放流設備全体の経済的設計に寄与することも判りました。

5. では自然調節方式における初期貯水位の変化が放流特性にどのようなかたちで影響するかについて考えてみました。その結果、自然調節方式は様々な操作を取り巻く諸条件を考えると、これらの諸条件の変化に対して柔軟に対処することが出来ない側面があることが明らかになりました。

我々は、洪水時操作の在り方はダム建設事業の最終段階になって検討すれば良いとの雰囲気の中で対処しているのではないかと感じられます。

しかしながら、本稿での検討結果を踏まえると、操作の在り方が洪水処理設備の基本的な諸元決定に確実に影響していることも判りました。

つまり、洪水調節操作の在り方はダム建設事業の終わりに考えればよいのではなく、そのはじまりに考えるものであるとの認識が必要ではないでしょうか。

[ダム操作よもやま話の目次に戻る](#)

参考文献

1. ホームページ 「ダム操作の理論と実際 今村瑞穂」

URL: <http://www5b.biglobe.ne.jp/~mizu-ima/dam/index.htm>

キーワード: ダム操作の理論と実際 今村瑞穂